NIFS-MEMO-67

平成 25 年度　核融合科学研究所技術研究会

核融合科学研究所　技術部

Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories by Department of Engineering and Technical Services

Department of Engineering and Technical Services, NIFS

Feb. 10, 2014

平成２５年度
核融合科学研究所技術研究会

日時　：　平成 26 年 3 月 13 日（木）～3 月 14 日（金）

開催場所　：　犬山国際観光センター「フロイデ」

核融合科学研究所　技術部

Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories
By
Department of Engineering and Technical Services

Abstract

The Symposium on Technology in Laboratories was held on March 13 and 14 at Inuyama International Sightseeing Center “FREUD” in Inuyama City, Aichi prefecture, Japan.
The symposium was hosted by National Institute for Fusion Science (NIFS). There were 268 participants from many Japanese universities, national laboratories, technical colleges and from some Japanese Industrial world. Ninety one papers were presented in the symposium. Technical experience and new technology were reported and discussed being divided into five sessions; technology of fabrication, device technology, diagnostic and control system, cryogenics, information processing.

Keywords: symposium, technology, fabrication, device, diagnostic, control system, cryogenics, computer, data processing, information processing

はじめに

自然科学研究機構　核融合科学研究所　技術部長
飯間　理史

総合技術研究会は 1975 年分子科学研究所で開催された技術研究会を起源とし、その後、高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）、名古屋大学プラズマ研究所（現核融合科学研究所）が参加し、技術職員が集える数少ない場となりました。当時は唯一と言っていいほどでした。独法化後は評価の対象にもなり、積極的な参加が大学、高専においても推奨されるようになり、名称も総合技術研究会となりました。分子科学研究所の技術課のご努力でホームページに詳しく載せられていますので、ぜひ一度ご覧になってください。

本技術研究会は 5 つの分科会、工作技術、装置技術、計測・制御技術、低温技術、情報処理技術で構成されています。時間が許す限り、他の分野を聴講してみてください。

技術者の人員が減少する中、教育・研究には多種多様で高度な技術を期待されるようになりました。単独技術での業務遂行は難しく、新たな挑戦が必要になってきます。他分野の技術者との交流の中から、何かしらのヒントを得ることがあればと思います。積極的に別領域・他大学の技術職員と交流を持ち、新たな技術の獲得ができるようにこころがけて頂きたいと思います。核融合研でも技術交流をプログラムとして行っており、ぜひ核融合科学研究所技術部のホームページを覗いてみてください。

また技術の継承は、技術職員の高齢化に伴い、早急に対応しなければならない問題となっています。若い方々には臆することなくベテランに、ベテランには分かりやすく若い人たちに接していただき、研究所、大学の垣根を超え技術の継承が行える場になれば幸いです。

今回は会場の都合から犬山での開催となりました。ご不便をおかけしたかもしれませんがご容赦いただければ幸いです。また開催に当たり、会場フロイデさん、支援をいただいた核融合研究会、講師を引き受けていただいた先生方、所長や管理部の方々をはじめ研究所の皆様に感謝します。

目次

第１分科会　（工作技術）

(1)　市販のガラス容器を利用した光化学反応器の製作 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
宇都宮大学 地域共生研究開発センター　○長谷川和寿

(2)　工作技術・溶接技術向上の取り組み ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
東北大学 電気通信研究所　研究基盤技術センター　工作部　○佐藤圭祐

(3)　極低温・超高真空 TEM 用超高真空チャンバーの製作 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
北海道大学 低温科学研究所　技術部装置開発室　○中坪俊一

(4)　学生実験「素粒子の相互作用と磁気モーメント」に関する装置製作・・・・・・・・・・・・・13
東北大学 ニュートリノ科学研究センター　○鈴木貴士

(5)　工作機械利用のための安全教育コンテンツ作成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19
電気通信大学　教育研究技術部　○藤本甫、金子克巳、田幡秀典

(6)　ILC 用超伝導加速空洞の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
高エネルギー加速器研究機構　○渡邉勇一、安島泰雄、井上均、佐伯学行

(7)　Super KEKB 用超伝導電磁石の実機部品製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27
高エネルギー加速器研究機構　共通基盤研究施設　機械工学センター　○東憲男
加速器研究施設　大内徳人、有本靖

(8)　三次元測定機によるレーザプローブの活用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・33
岩手大学　工学系　第三技術室　○加賀亨
第一技術室　箱崎義英

(9)　汎用油圧サーボ疲労試験機を活用した鋼管の疲労強度評価試験装置の試作・・・・・・・・・35
九州大学 大学院工学研究院　○村上幸治

(10)　「大学の技術とは何か」を考えつつ名古屋大学理学部物理金工室の４０年を振り返る・・・38
名古屋大学 全学技術センター　教育・研究技術室　装置開発技術系　○河合利秀

第 2 分科会　（装置技術）

(1)　激光 XII 号レーザーにおける光軸調整の自動化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・49
大阪大学　レーザーエネルギー学研究センター　○千葉晃弘、山田研二、中西佑介
漆原新治、鈴木和浩、奥浩行、鈴木健治、池脇元彦、山本洋一

(2)　真空度のネットワークモニタリングに対応したピラニ真空計の開発・・・・・・・・・・・・・52
大阪大学　レーザーエネルギー学研究センター　○中西佑介、山田研二、鈴木和浩
千葉晃弘、奥浩行、鈴木健治、池脇元彦、山本洋一、漆原新治

(3)　LFEX 真空チャンバーの真空制御監視システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・54
大阪大学　レーザーエネルギー学研究センター ＧＯＤグループ　○久保田善大
上野一輝、石田正人、辻公一、村上英利、川崎鉄次
中田芳樹、實野孝久、白神宏之、宮永憲明

(4)　JT-60 N-NBI 加速電源の長パルス化改造・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・58
日本原子力研究開発機構　ITER プロジェクトユニット　○佐々木駿一
花田磨砂也、秋野昇、遠藤安栄、清水達夫

(5)　負イオン中性粒子入射（N-NBI 加熱）装置のビーム軸改造・・・・・・・・・・・・・・・・・63
日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門　NB 加熱開発 Gr　○藻垣和彦
花田磨砂也、秋野昇、小又将夫、根本修司

(6)　マルチスクリーンを用いた高感度ビームプロファイルモニターの開発・・・・・・・・・・・69
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　○橋本義徳、手島昌巳
外山毅、三橋利行
三菱電気システムサービス　大津聡

(7)　高エネ研放射光科学研究施設　BL15 の建設・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　放射光科学研究施設　○小山篤
上條亜衣、丹羽尉博、仁谷浩明、清水伸隆、五十嵐教之

(8)　J-PARC MR エキサイターにおけるマルチパクタリング対策・・・・・・・・・・・・・・・・82
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　○岡田雅之、外山 毅
GSI　アレキサンダー・シュナーゼ

(9)　デマンドリアルタイム監視システムの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
核融合科学研究所　技術部　○長原一樹、安井孝治

(10)　ミラー駆動装置の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・93
核融合科学研究所　技術部　○岡田宏太、小川英樹、伊藤康彦
東京大学大学院新領域創成科学研究科　西浦正樹
核融合科学研究所　プラズマ物理研究系　久保伸

(11)　エックス線・電子線回折による結晶集合組織測定装置について・・・・・・・・・・・・・・・96
横浜国立大学　理工学系大学院等技術部　○岡安和人

第 3 分科会　（計測・制御技術）

(1)　Zynq-7020 を使用した画像処理プラットフォームの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
筑波大学　システム情報工学等技術室　○小野雅晃

(2)　ネットワーク（SiTCP）-高圧電源（HV）モジュールの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・108
高エネルギー加速器研究機構　中性子科学研究施設　○佐藤節夫

(3)　J-PARC/MLF における、トリガー信号及び時刻配信システムの開発・・・・・・・・・・・・・112
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　○瀬谷智洋
佐藤節夫、坂口将尊

(4)　動的風荷重に対応した圧力載荷装置の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・114
東北大学　工学部・工学研究科技術部　○丸山暁

(5)　植物葉の蛍光リモートセンシング計測システムの開発とストレス障害・・・・・・・・・・・122
静岡大学　技術部　プロジェクト・安全支援部門　○増田健二

(6)　ワイヤレス電力伝送を利用したがん温熱治療用磁界発生装置・・・・・・・・・・・・・・・126
金沢大学　環日本海域環境研究センター　○池畑芳雄

(7)　動物行動実験のための温度湿度制御装置の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・130
東北大学　電子光理学研究センター　○長澤育郎

(8)　USB を用いて、VB での入出力制御の AC タイマー製作と PCI 入出力ボードとの比較・・・・133
大阪市立大学　研究支援課　○松山利夫

(9)　Web2c と STARS との相互接続・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・136
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　○小菅隆
Deutsches Elektronen-Synchrotron　Philip Duval、Reinhard Bacher

(10)　教育用ロボットビジョンシステムの開発支援・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・141
群馬工業高等専門学校　教育研究支援センター　○森田真司
機械工学科　小川侑一

第 4 分科会　（低温技術）

(1)　ヘリウムはガスボンベ 1 本で何リットル液化できるのか　・・・・・・・・・・・・・・・・・145
琉球大学 極低温センター　○宗本久弥

(2)　ヘリウム液化業務関連の諸データ集・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・151
千葉大学 理学部　○吉本佐紀

(3)　数字で見る液化室運営・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・160
東京大学 物性研究所 低温液化室　○鷺山玲子、土屋光

(4)　液体ヘリウム容器加圧用バルーンの改良・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・165
京都大学 化学研究所　○楠田敏之

(5)　理学部サブセンター自動監視設備の設置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・168
東京大学 低温センター　○志村芽衣、戸田亮、寺岡総一郎
理学部技術部　機器実習・分析系　八幡和志

(6)　LHD 低温システムの運転実績・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・171
核融合科学研究所 技術部　○森内貞智、大場恒揮
鷹見重幸、野口博基、三戸利行

(7)　ヘリウム液化機・内部精製器の設定と精製ガス中の不純物濃度・・・・・・・・・・・・・175
東京大学 低温センター　○戸田亮、加茂由貴、阿部美玲

(8)　東京大学本郷キャンパスにおけるヘリウムガス回収率向上の試み・・・・・・・・・・・・180
東京大学 低温センター　○寺岡 総一郎、志村芽衣、戸田亮、加茂由貴、阿部美玲

(9)　ヘリウムガス回収設備におけるドライヤー吸着剤の性能低下について・・・・・・・・・・182
筑波大学 研究基盤総合センター 低温部門　○近藤裕、宮内幹雄、敦賀将太
物性・分子工学専攻　池田博

(10)　cERL 用超伝導加速空洞 2K 冷却システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・186
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　○小島裕二、仲井浩孝、中西功太
原和文、細山謙二、本間輝也

(11)　2K ヘリウム冷凍機の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・190
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設　○原和文、小島裕二
仲井浩孝、細山謙二、森田荘司、兼清孝之、伊佐公宏

第 5 分科会　（情報処理技術）

(1)　情報セキュリティ・ポリシー改定作業に参加して・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・197
分子科学研究所　技術課　○内藤茂樹

(2)　ゲスト用無線 LAN アカウント申請システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・201
鳥取大学　技術部　工学・情報部門　○川戸聡也
総合メディア基盤センター　情報基盤研究開発部門　大森幹之

(3)　新たな利用者層の開拓を目指すホスティングサービスの広報戦略・・・・・・・・・・・・・206
京都大学　情報部　○赤尾健介

(4)　モバイル端末と連携する資産実査管理システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・210
放射線医学総合研究所 研究基盤センター情報基盤部　○大竹淳、下村岳夫

(5)　新スーパーコンピュータの更新と運用管理について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・215
名古屋大学 全学技術センター　通信情報支援室　通信情報系　○田島嘉則

(6)　ヘルプデスク業務へのチケッティングシステムの導入・・・・・・・・・・・・・・・・・・・222
高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設　計算科学センター　○高瀬亘

ポスターセッション

工作技術

(1)　CAD/CAM を駆使した最近の機械加工について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・227
名古屋工業大学　技術部　○萩達也

(2)　工作機械利用のための安全教育コンテンツ作成　（第１分科会　(5)を参照）
電気通信大学　教育研究技術部　藤本甫、金子克巳、田幡秀典

(3)　コールドプローブ法を搭載したゼーベック係数測定装置の試作・・・・・・・・・・・・・・・229
北陸先端科学技術大学院大学 ナノマテリアルテクノロジーセンター　○仲林裕司
愛媛大学　教育学部　中本剛

(4)　発泡スチロールの 3 次元切削加工・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・231
岩手大学　高度試作加工センター　○武田洋一
工学系技術部　野中勝彦、菊池護

(5)　導波管型帯域分離フィルターの製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・233
名古屋大学 全学技術センター　○大西崇文、鈴木和司

(6)　ＫＡＧＲＡクライオスタットの設計　ー振動解析についてー・・・・・・・・・・・・・・・・238
高エネルギー加速器研究機構　機械工学センター　○小池重明、久米達哉
超伝導低温工学センター　木村誠宏、鈴木敏一

(7)　CMB(Polar BeaR Ⅱ)測定器の設計開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・243
高エネルギー加速器研究機構 機械工学センター　○鈴木純一

(8)　穀物摩擦係数測定装置の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・246
北海道大学 大学院農学研究院　○和田友則
北方生物圏フィールド科学センター　佐藤浩幸

装置技術

(9)　非蒸発ゲッター（NEG）ピルを使った NEG ポンプの製作と評価・・・・・・・・・・・・・・248
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　物質科学第一　○菊地貴司
間瀬一彦、飯塚敏江

(10)　LabVIEW(DAQ デバイス）を用いた JT-60SA データ収集システムの開発・・・・・・・・・・251
日本原子力研究開発機構　那珂核融合研究所　○末岡通治

(11)　小型熱ナノインプリント装置用マイクロヒータの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・259
東京工業大学　技術部　半導体 MEMS プロセス技術センター　○庄司大

(12)　２５０ＭＶＡ電動発電機の運転保守の歩み・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・263
核融合科学研究所　技術部　○加藤明己

(13)　JT-60SA 組立及び位置計測・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・266
日本原子力研究開発機構　那珂核融合研究所　○鈴木貞明、柳生純一、正木圭
西山友和、中村誠俊、佐伯寿、星亮、澤井弘明、長谷川浩一、新井貴、柴沼清

(14)　cERL 安全管理システム-その 2・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・272
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　○濁川和幸
加速器研究施設　長橋進也

(15)　L バンドライナックの電子ビーム高精度化に関して・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・275
大阪大学　産業科学研究所　技術室　○古川和弥

(16)　JT-60SA に向けた ECRF 装置伝送系の改良と開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・278
日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門　RF 加熱開発グループ　○平内慎一
横倉賢治、小林貴之、澤畠正之、寺門正之、日向淳
和田健次、佐藤福克、星野克道、森山伸一

(17)　広帯域 VUV-SX ビームライン新 BL-2 の建設・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・284
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　○豊島章雄、田中宏和
菊地貴司、堀場弘司、小菅隆、永谷康子、森丈晴
北島義典、組頭広志、雨宮健太

(18)　技術棟改修とその後の安全対策について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・288
東北大学金属材料研究所　テクニカルセンター　○佐藤寿和、本郷健一、本郷徹男
伊藤学、臼井和也、井本勇吉、佐藤史弥、安藤幸輝、鈴木大介、田中裕也
石川光、永野勇、入間川克朗、和田繁男、佐藤香織、三浦重幸

(19)　高磁場超伝導線材の引張歪印加機構プローブの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・292
分子科学研究所　装置開発室　○近藤聖彦、青山正樹、杉戸正治
核融合科学研究所　菱沼良光

(20)　スイッチング電源及びノイズフィルターからの漏洩電流調査結果と対策・・・・・・・・・・294
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　○荒川大

(21)　NC ワイヤカットにおけるリサイクルの取り組みと課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・305
横浜国立大学　技術部　応用加工技術班　○篠原維

(22)　建屋内における湿度分布の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・307
高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所　○田中伸晃

(23)　閉構造ダイバータ用クライオポンプへの熱負荷評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・318
核融合科学研究所　技術部　○村瀬尊則、土伏悌之
米津宏昭、ダイバータグループ

(24)　BL6C 改造・・・330
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　○内田佳伯、河田洋
三菱電機システムサービス　太田浩正
東京工業大学　佐々木聡、奥部真樹

(25)　JT-60U のプラズマ計測装置の解体、撤去・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・334
日本原子力研究開発機構　核融合研究部門　先進プラズマ実験グループ　○千葉真一
砂押秀則

(26)　高エネルギー加速器研究機構の CERL および STF における導波管の現状・・・・・・・・・・339
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　○竹中たてる
三浦孝子、加速器第五系 RF グループ

(27)　JT-60 トカマク解体の完遂・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・344
日本原子力研究開発機構　○岡野文範、池田佳隆
逆井章、花田磨砂也、JT-60 チーム

(28)　KEK 小型電子加速器のビームライン変更に伴うアライメント・・・・・・・・・・・・・・・353
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　○荒木栄、浦川順治
照沼信浩、福田将史

計測・制御技術

(29)　生体信号計測のための計装アンプの設計と試作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・358
宮崎大学　工学部　教育研究支援技術センター　○外山貴子

(30)　実験装置周辺機器の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・360
東京大学　物性研究所　○下ヶ橋秀典

(31)　KEK-PF 新 BL2 および新 BL15 の制御システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・364
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　○永谷康子、小管隆

(32)　ロードセルの持つ温度特性、および実験データに与える影響とその対策への基本的考察・・370
東京大学　生産技術研究所　基礎系　○片桐俊彦

(33)　レーザーを用いたプラズマ計測装置の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・376
核融合科学研究所　技術部　○渋谷真之
大型ヘリカル研究部　中野治久

(34)　LHD 真空容器内周回軌道の製作と設置確認作業・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・380
核融合科学研究所　技術部　○河合将照、林浩、小渕隆、三宅均
大型ヘリカル研究部　磯部光孝、西村清彦、小川国大

低温技術

(35)　ヘリウム液化機 L140 の真空断熱性能と昇温特性について・・・・・・・・・・・・・・・・・386
電気通信大学 研究設備センター　○小林利章

(36)　ヘリウムガス回収率向上への取り組み・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・391
大阪大学 理学研究科　技術部　○笹尾愛、古木良一、稲角直也、戸所泰人
基礎工学部　技術部　川井昭、本庄浩司
低温センター　伊藤義浩、竹内徹也
大学院理学研究科　野末泰夫　田島節子

(37)　web アプリケーションによる低温設備ユーザへの安全教育・・・・・・・・・・・・・・・・・394
高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センター　○岡田竜太郎、高橋直人、荻津透
木村誠宏、田中健一、中本建志、佐々木憲一、都丸隆、飯田真久、大畠洋克、寺島昭男

(38)　TREK 実験用超伝導トロイダル磁石システムの冷却系再構築・・・・・・・・・・・・・・・・397
高エネルギー加速器研究機構 J-PARC センター ○大畠洋克、岡村崇弘、荒岡修、槙田康博
素粒子原子核研究所　今里純

情報処理技術

(39)　有償頒布物受注管理システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・402
放射線医学総合研究所 情報基盤部　科学情報課　○下村岳夫、大竹淳

(40)　計算科学研究センターにおける夏季の電力ピークカット対策・・・・・・・・・・・・・・・404
分子科学研究所 技術課　○松尾純一、水谷文保、岩橋建輔

(41)　CMS を用いた Web サイトの検討と構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・411
電気通信大学 教育研究技師部　○水谷孝男

(42)　技術研究会報告集データベース構築完成後の取り組み・・・・・・・・・・・・・・・・・・413
分子科学研究所 技術課　○長屋貴量、澤昌孝、水谷文保

(43)　FEFS ファイルシステムのディスクアクセス速度の改善・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・417
分子科学研究所 技術課　○岩橋建輔、松尾純一、水谷文保

(44)　配信でよく利用される動画圧縮規格の現状と後続規格・・・・・・・・・・・・・・・・・・・420
分子科学研究所　技術課　○澤昌孝、水谷文保

参加機関及び参加人数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・427

あとがき・・428

Web 版技術研究会報告集の閲覧方法について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・429

第1分科会
（工作技術）

市販のガラス容器を利用した光化学反応器の製作

長谷川和寿
宇都宮大学 地域共生研究開発センター 先端計測分析部門

概要

光化学反応実験装置の水銀ランプ用の冷却ジャケットの修理を長年請け負ってきましたが、簡単に修理ができる形状への改良を提案し、その結果新たな装置が完成したので発表します。

手作業のガラス工作においては、市販の２Ｌのガラス容器への共通スリ合わせ（15/30）の枝付工作は大変苦労しました。また、容器のネジロをメスの共通スリ合わせ（60/50）に変更するという依頼もありましたが、加工は無理であると判断しました。そこで容器内に挿入する水銀ランプ用の冷却ジャケットとの接続にＯリングを使用し、冷却ジャケットもＯリングを使用しての製作を試みました。それぞれの材料のサイズ等を考慮し製作した結果、反応器の動作は良好であり、不都合はありませんでした。

１　これまでの経緯

＜光化学反応器について＞

光化学反応器とは、冷却ジャケットと呼ばれる水などで冷却できる様な二重構造になっているガラス製の容器の中に紫外線ランプを挿入し、さらにガラス製の反応容器に試薬等と共に投入して光化学反応実験ができる装置です。つまり反応容器の中から紫外線を照射して光化学反応をおこなう実験装置です。（図１）

図１　光化学反応器

この実験装置を使用している工学部応用化学科の有機高分子研究室より、紫外線ランプを挿入する冷却ジャケットの修理依頼がありました。冷却ジャケットはパイレックスガラス製ですが、紫外線ランプからの熱が原因と思われるヒビが内管に入ります。これを修理するためには二重管の内管のみを交換する必要があり、そのために二重管の口をカットして新たに製作した内管を挿入して溶接し直します。この修理依頼が頻繁にあり、この作業を何度も繰り返してきたが、なかなか面倒な作業です。そこで簡単に内管の交換ができる様な冷却ジャケットを製作できないものかと考えました。さらに反応容器の容量も増やしたいという依頼者からの要望も考慮して、冷却ジャケットのみではなく反応容器も製作することにしました。

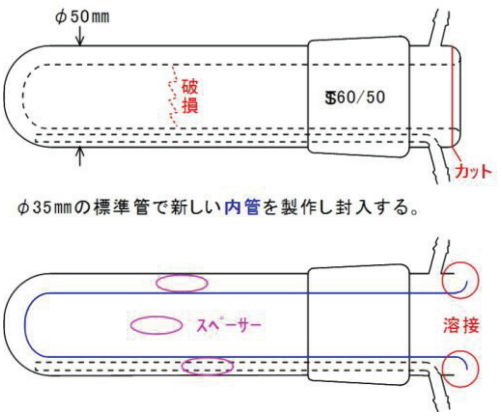


図２　冷却ジャケットの修理

２　製作依頼

＜破損修理状況＞

冷却ジャケットの修理は以前より何度も実施しており、その修理方法はすでに技術研究会等で発表しています。その修理方法を図２に、修理状況を表１示します。

＜要望と検討＞

依頼者によると冷却ジャケットはたいへん高価なので、市販品の予備を多数は用意できず、破損した場合何度でも修理するほかはないとのことです。しかし何度も修理しているとバーナーの熱によってガラス自体が劣化して修理する事ができなくなります。そこでスリ合わせを部品として購入して同等の冷却ジャケットを製作してほしいとの依頼もありましたが、スリ合わせ部分に溶接はできないのでいろいろな方法を検討しました。さらに反応容器についても現在使用している容器は容量が少ないので容量の大きい市販の容器の口部にスリ合わせを溶接してほしいとの要望もありましたが、それも断念していただきました。

表１　修理状況

破損部分	修理回数
内　管	２４回
冷却水導入管	９回
容　器	２回

＜代替案の検討＞

この冷却ジャケットの内管を多数作り置きしておいて、破損した時にすぐに交換できればたいへん便利です。そこで、簡単に交換できるタイプへの改造を計画しました。（図３）

まず冷却ジャケットの内管と外管の接続方法を検討しました。

ガラス管同士を接続する手段としては**スリ合わせジョイント**や**フランジジョイント**が一般的です。通常、スリ合わせが広く用いられていますが、破損する度に交換して使い捨てにするには高価で、ヒビがスリ合わせにも達する可能性があります。またフランジを用いた場合も、スリ合わせと同様なことが起こると考えられます。

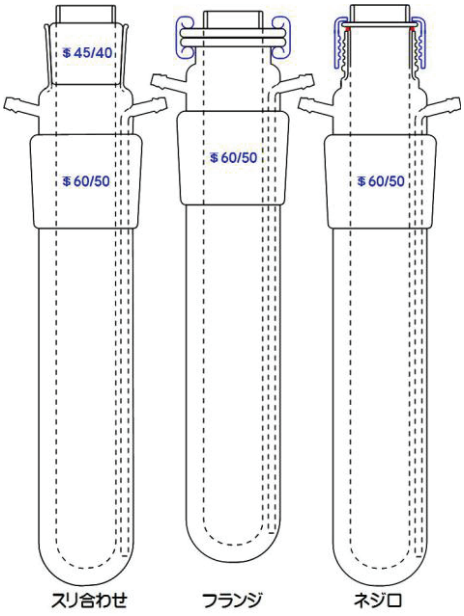


図３　外管と内管の接続案

その他の方法としては、近年手軽に入手できる様になったガラス製の**ネジロ**を使用する事も考えました。しかし様々なサイズのネジロが市販されているわけではないので、規格外のサイズは特注品となり高価になります。そこで高価な部品を使用せず、簡単に組立が可能な構造のものはないかと検討した結果、**Ｏリング**を使用して冷却ジャケットが製作できないかと考えました。Ｏリングのジョイントは、高真空が必要な分析装置やガラス製のグリスレスバルブなどに多く使用されているので機密性や耐久性には問題がありません。さらに製作する過程でも余計な部品を溶接する必要がないのでシンプルで安価に製作することができます。

さらにＯリングでガラス管を接続する方法を利用すると、反応容器との接続部分にも応用することができるので、容器の容量を増やすことも可能となります。そこで依頼者との相談の結果、２Ｌの市販のガラス容器で製作することになりました。

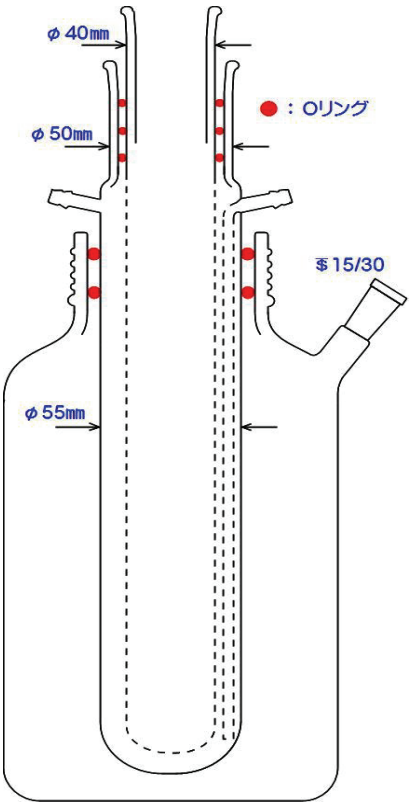


図４　設計図

３　設計

図４に設計図を示します。この様にまず市販の容器に入るガラス管で冷却ジャケットの外管を製作し、次いで外管に入れる内管を製

作します。またそれぞれのガラス管の外径と内径に合うサイズのＯリングを用意する必要があります。

つまり２Ｌの容器の口径に合うＯリングを選択し、そのＯリングの内径に合わせて冷却ジャケットの外管を決定し、外管の内径に合うＯリングを選択し、そのＯリングの内径に合わせて内管を決定します。ガラス管には様々なサイズがあり、またＯリングも様々な大きさや太さのものが安価で市販されています。これらの容器やガラス管に対して、きつすぎずかつ緩すぎないＯリングを選択する事が重要です。

いろいろ検討した結果、Ｏリングはシリコン製 P-50A、P-40 を、パイレックスガラスはφ55 ㎜、φ50 ㎜、φ40 ㎜の標準管を、容器は DURAN 製２ＬGLS-80 のネジロびんを使用することにしました。

４　製作

＜反応容器の製作＞

依頼者からこの容器の肩口にスリ合わせを溶接してほしいとの要望があり、共通スリ合わせ（15/30）を溶接する事になりました。しかしこの大きさの容器を加工した経験がないので成功するかどうか、またこの容器にパイレックスガラスを溶接する事が可能かどうかも不明でした。そこで事前に同じ製品の 500ml 容器に枝菅の溶接加工をおこなって、パイレックスガラスが溶接可能であることを確認しました。

この大きさの容器になると直接素手で持つことができないために、容器を保持するための治具に固定して溶接作業を実施します。またバーナーの炎に比べて容器がかなり大きいので、より慎重に時間をかけて容器全体を熱して、素早く枝菅のスリ合わせを溶接し、容器全体を熱して除歪し、熱し始めた時よりも時間をかけてさらに慎重に容器全体を徐冷する必要があります。加工に用いた自作の治具と完成した容器を写真１に示します。

写真１　容器と治具

＜冷却ジャケットの製作＞

まず内管はφ40 ㎜管を使用して、大きめな試験管の様に製作します。開口部は紫外線ランプが挿入しやすいように外開きに加工します。次にφ55 ㎜管で外管の胴体を製作します。この胴体の端部に内管を挿入する部分になるφ50 ㎜管を溶接します。さらに冷却水を導入するゴム管止め付き枝菅（φ10 ㎜標準管）を片側だけ溶接します。もう片側には冷却水の導入管（φ5 ㎜標準管）を内側に封じ込める必要があるので、吹き口から挿入して先に胴体に溶接します。そして同じ位置に残りの枝菅を内側の導入管がずれない様に注意しながら溶接します。溶接部分の周辺全体を再加熱して確実に除歪をしてから、慎重に徐冷をして導入管の溶接作業は終了です。最後に吹き口をカットして、開口部は内管を挿入しやすい様に外開きに加工して仕上げます。この時も加工部分は確実に除歪してから徐冷をして完成となります。組み立てる前の冷却ジャケットを写真２に示します。またそれぞれの部品と完成品を写真３に示します。ネジロびんのフタには冷却ジャケットの通る大きさの穴を開けて、ネジロ部分のカバーとして利用しています。

写真２　冷却ジャケット
（左：内管、右：外管）

写真３　完成品（左：各部品、右：組立後）

５　結果と考察

冷却ジャケットは外管と内管を溶接しなくてもよいＯリングによる固定方法で、問題なくしっかりと固定することができました。また内管が破損した場合でも、内管をＯリングだけで固定しているので簡単に交換することが可能になりました。さらに内管は試験管の形状をしているだけなので修理することも代替品を準備しておくことも簡単です。

反応容器を組み立てて漏れ試験を実施した結果、反応容器と冷却ジャケットとのＯリングからのガス漏れはありませんでした。また冷却ジャケットに水道水を流したところ、通常の流量の水圧ではＯリングからの水漏れはありませんでした。ただし、さらに必要以上の水圧をかけると徐々にですが冷却ジャケットの内管が浮き上がって出てくることを確認しました。そこで安全のために内管の開口部にフックなどをかけて外管と固定することを提案しました。

依頼者によると反応容器と冷却ジャケットの接続部分は、実際の光化学反応実験において、反応容器に溶接したスリ合わせに環流器を接続することもあり、容器の内圧はほとんど変化しないため、常にしっかりと固定されているそうです。

６　まとめ

光化学反応実験装置のための反応器の製作において、安価なＯリングを利用することで反応器も安価に製作することができた。特にジョイント部分は特別な構造も加工も必要がないため簡単に製作できるので、破損した内管の修理は簡単にできるようになりました。

またＯリングを利用したガラスのジョイントは、接触面が確実に密着している状態において、漏れもなく十分に実用に耐えうるジョイントである事がわかりました。

ただし冷却ジャケットの製作において、封じ込めた冷却水の導入管、内管の間隔、Ｏリングのサイズ、これらの兼ね合いで、外管の全てを同径のガラス管で製作できなかったことが残念でした。

工作技術・溶接技術向上の取り組み

佐藤圭祐
東北大学電気通信研究所　研究基盤技術センター　工作部

1. はじめに

本工作部では研究室からの依頼により、様々な実験装置・器具の製作を行っており、2012 年度においては 167 件の依頼があった。１つの依頼につき１人の職員が完成まで担当しているため、各職員は旋盤やフライス盤の操作や溶接作業など、製作工程の全てに精通している必要がある。そのため私は工作部に所属された 5 年前から、日頃の実務を通して工作技術や溶接技術の向上に努めている。それに加えて、極めて難しいとされているアルミニウム合金溶接技術を習得するため、アルミニウム合金製真空チャンバーを題材とした製作実習を行った。そこで本稿の前半では、研究室からの依頼で製作したテフロンチャンバーの製作内容を取り上げて工作部で行っている実務について紹介し、後半はアルミニウム合金製真空チャンバー製作実習の内容について紹介する。

2. テフロンチャンバー製作

先述のとおり工作部の実務は主に研究室で使用する実験装置・器具の製作であり、真空実験装置や光学機器など多岐にわたる機器を製作してきた。その過程の中で過去数年に渡って製作してきたものにテフロンチャンバーがある。テフロンチャンバーは医工学分野における生物の研究において、細胞膜の通電実験に使用されている。これまで方形及び円柱形のテフロンチャンバーを継続して製作してきた。その写真を図 1 に示す。特徴として、2 つのテフロン製ブロックの間にサンプルを挟んで両側から締め付ける構造になっている。そしてサンプルが当たる面に小さい孔が開いており孔の中に溶液を満たした状態で実験を行うようである。この孔は内部に向かって広くなる形のテーパー孔となっており非常に独特な形状をしている。図 2 の赤い丸で囲んだところがテーパー孔である。この形にすることで溶液中に気泡が溜まるのを防ぐことができる。テーパー孔の加工は、チャンバーを一体物で形成する必要がある上に内部から工具を入れることが不可能であることから工夫を要する。

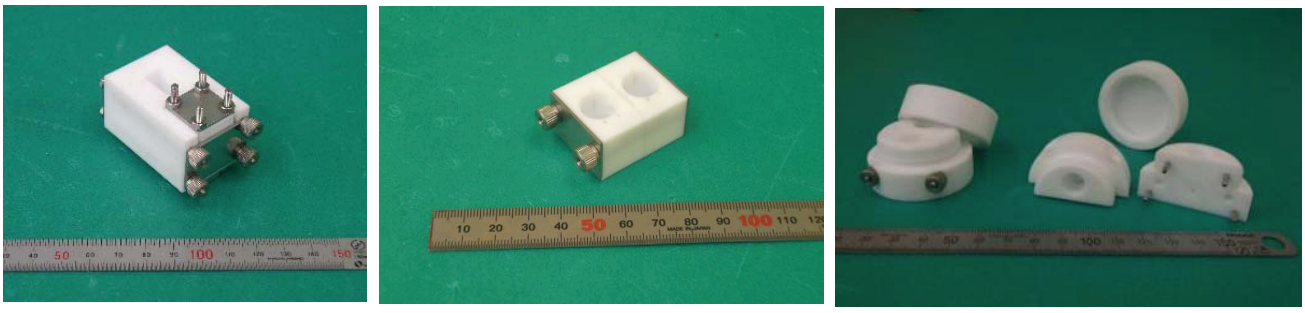


図 1　これまで製作してきたテフロンチャンバー

図 3 はフライス盤を使用して円柱形のテフロンチャンバーにテーパー孔を加工している様子である。割り出し盤にアルミの治具をチャッキングし、テフロン材料をその治具に固定した。そしてテーパー孔の中心が割り出し盤の回転の中心と合致するように固定した。そして赤い矢印の方向に回転させながらエンドミルによる切削を施した。

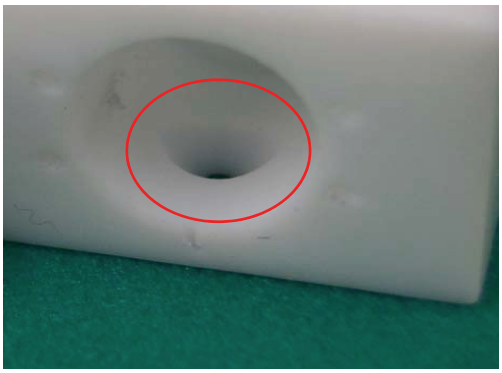


図 2　テーパー孔

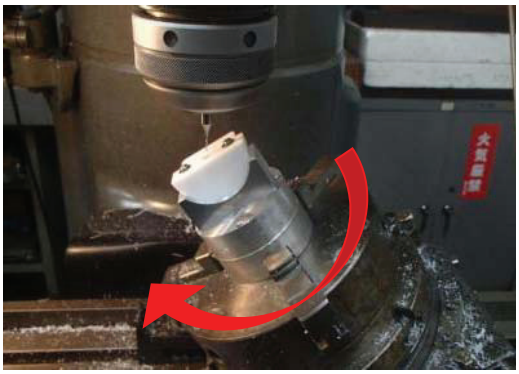


図 3　テーパー穴の加工の様子

3. アルミニウム合金製真空チャンバー製作実習

製作作業は基本的に切削加工→溶接→リークテストという工程で行っている。万一、リークが見つかった場合の修理は、リーク箇所近辺の溶接ビードを切削して取り除き、そこを再び溶接し、リークテストをするという手順で行った。リークが無いことが確認できれば完成となる。この章では製作内容の紹介を、切削加工、溶接、リークテストと修理、の工程毎に説明する。

3.1 切削加工

通常、アルミニウム合金表面は厚い多孔質な酸化膜が形成されガスが多量に吸着しやすい状態にあり、真空材料として用いる際には表面処理が必要となる。その処理の一つに、旋盤での切削加工の際にエタノールを切削液に用いて加工する方法がある。エタノールには、脱脂・脱水効果や、冷却作用により酸化膜形成を抑制する効果があるので、切削の際に清浄でち密な酸化膜が形成され、ガス吸着量を大きく低減させることができる。この節では、旋盤や、ラジアルボール盤、フライス盤によるエタノールを使用した切削加工について説明する。

3.1.1 旋盤

真空チャンバー胴体部分のパイプを、旋盤(HAMATSU　HAT-20-B-800G)で切削加工している様子を図 4 に示す。この図にあるように点滴器具を用いてエタノールを切削箇所に滴下した。パイプをチャックに固定する際は、締め付けによる変形を防ぐため、パイプの内側に丁度合うサイズの円板を入れた。また、内面を加工する際は振動を抑えるためパイプの周りにゴムバンドを巻いた。こうすることで、より表面積が少ない平坦な面が得られ、表面に吸着するガスの量が減少し、チャンバー内の真空度がより高くなる。内面と外面の切削加工の条件だが、荒削りはハイスの剣バイトを用いて回転速度 100rpm で直径 0.5mm ずつ行い、最後の仕上げの切削はダイヤモンドの剣バイトを使用して回転速度 70rpm で直径 0.02mm 削った。

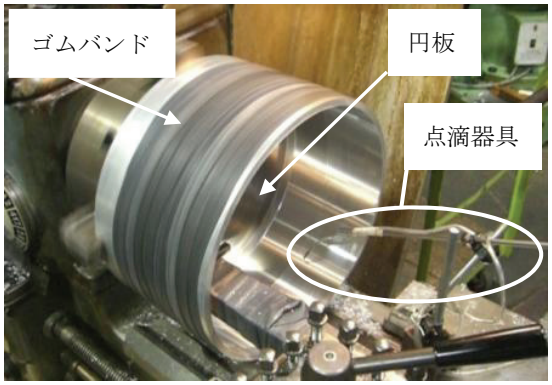


図 4　旋盤による胴体用パイプの切削の様子

3.1.2 ラジアルボール盤

ラジアルボール盤(MORI-SEIKI YR3-115)による胴体パイプのボーリング加工の様子を図 5 に示す。このパイプは 3.1.1 で説明した旋盤で加工したパイプ 2 つを溶接して製作したものである。図 5 にあるようにパイプを割り出し盤に固定し、ドリルで下穴をあけた後にボーリングヘッドを使って切削加工を行ってポートが入る大きさまで穴を拡大した。この時も切削箇所にエタノールを滴下した。

図 5　ラジアルボール盤による胴体パイプの加工の様子

3.1.3 フライス盤

図 6 にフライス盤(MAKINO KSAP)を使用してチャンバーの天板を切削加工している様子を示す。ここでは、ポートが入る穴の周りに溶接開先を加工している。まず、ポート穴の中心とサーキュラーテーブルの中心が一致するように板を固定した。そしてサーキュラーテーブルを回転させ、エンドミルで穴の周りを切削して開先溝を形成した。この時も切削箇所にエタノールを滴下して加工を行った

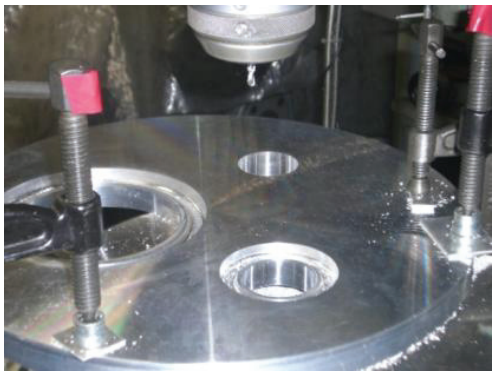


図 6　フライス盤による天板の開先加工の様子

3.2 溶接

溶接機はダイヘンの AE-300 を使用し、清浄度が高い TIG 溶接を採用して交流電流で行った。図 7 に回転台を使用して胴体パイプと天板を溶接した様子を示す。今回のように円周溶接する際は回転台を使用し材料が自動で動くようにした。この回転台は本工作部で製作したものであり、スクロールチャックがモーターによって回転する構造になっている。チャックはアースと繋がれていて、モーターには電流が流れないように絶縁を施してある。回転速度や溶接電流値は補助作業者に口頭で指定して、自分の代わりに調節してもらうことにした。この工程では胴体パイプが天板で塞がれてしまうので外側から溶接を行ったが、この場合は内側に酸化膜が形成するのを抑えるためのシールドガスが必要となる。そこで図 7 に示すように全てのポートをアルミホイルで封止し、チャンバーの中に Ar ガスを注入しながら溶接を行った。また、溶接する距離が長かったため長さ 1m の溶加棒 1 本では間に合わず、3 回に分けて溶接した。その際、溶接ビード同士の間に隙間が生じないように 50mm ほど重なるようにして溶接した。電極の径は 4.0mm、溶加棒の径は 4.0mm、電流値は 260A 前後で行った。

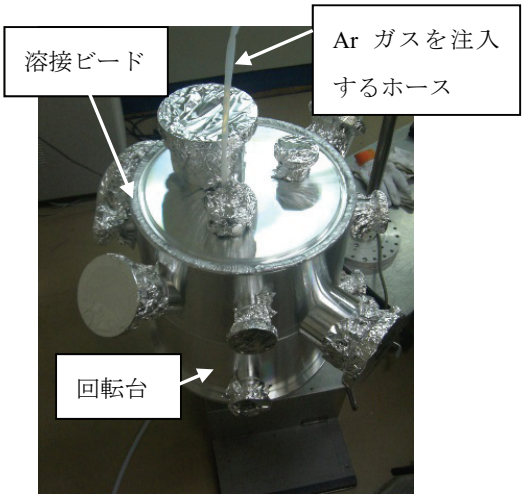


図 7　胴体パイプと天板の溶接ビードの様子

3.3 リークテストと修理

リークテストは真空法で行った。胴体パイプ側面にポートを溶接しリークテストしたところ、数箇所のリークが見つかった。そこでリーク箇所近辺の溶接ビードをビューカッターで削り、図 8 に示すように溶接して修理した。しかし、再度リークテストしたところ数箇所のリークが見つかったので、再び溶接修理した。すると今度はリークを止めることができた。全ての部品を溶接して、リークテストでリークが無いことを確認して真空チャンバーが完成した（図 9）。

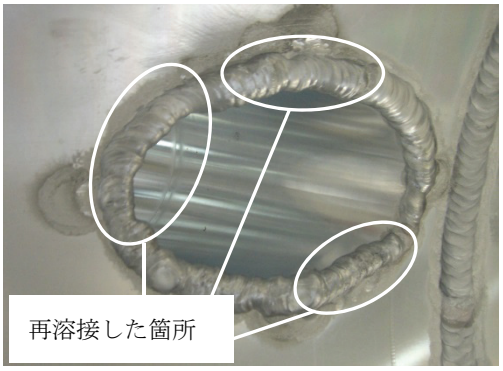


図 8　リーク箇所の修理の様子

図 9　完成したアルミニウム合金製真空チャンバー

4. まとめ

本工作部に所属してからの 5 年間で、実務を通して様々な工作技術を向上させることができた。さらに、アルミニウム合金製真空チャンバー製作実習を通して様々な技術を身に付けることができた。特に、難易度の高いアルミニウム合金の真空溶接技術を習得することができたのは非常に大きい収穫であった。それ以外にも、清浄度が要求されるエタノールを使用した加工といった様々な加工技術（材料の固定、刃物の選定、加工条件等々）や、リークを的確に見つける技術も習得することができた。これから工作部での業務を果たしていく中で新たな試みに携わる機会があると思うが、引き続き工作技術や溶接技術の向上に努めていくことで難易度の高い要望にも答え応じていきたいと思う。

謝辞

今回のアルミニウム合金製真空チャンバー製作実習に取り組むに当たり、本工作部の職員の皆様にはご理解とご協力をいただきました。特に、渡辺博志技術補佐員には製作工程全般に渡って熱心な技術指導をいただきました。

この場をお借りして心よりお礼申し上げます。

極低温・超高真空 TEM 用超高真空チャンバーの製作

中坪俊一

北海道大学低温科学研究所 技術部装置開発室

概要

極低温・超高真空 TEM で用いる超高真空チャンバーを製作した．チャンバーは超高真空に耐え，かつ除振することも考慮した結果，重量があり継ぎ目のない SUS304 の一体物での製作をおこなった．これまで培ってきた経験を生かし，既存の設備および，新たに導入した U 軸加工機能を持つ特殊仕様 NC フライス盤を用いて加工をおこなった．

1　TEM の極低温・超高真下での利用と問題

本研究所，香内晃教授の研究課題「氷生成過程のその場観察・構造解析のための極低温超高真空透過型電子顕微鏡の開発」が採択された．これは，アモルファス氷の生成過程を透過型電子顕微鏡（本研究所所有．以下，TEM）を用いて，極低温・超高真空下でミクロからマクロまで実験観察を可能にするという研究課題である．

1950-60 年代の TEM を用いた氷の実験観察は，その開発と共におこなわれてきた．当時は真空度が悪く，氷の生成を全く制御できず，温度も 77K 以下にはできなかった．1980 年代後半から，超高真空下で観察可能な TEM の開発が進められてきたが，試料が常温～高温であったため，冷却は不可能だった．一方で，極低温下で観察可能な TEM の開発も進められ，生物試料を閉じ込めたアモルファス氷薄膜を 4K まで冷却できた。しかし，冷却する目的が試料の電子線照射損傷を防ぐという目的だったため，加熱ができない，真空度が悪いなどの問題があった．

香内教授は，数年前より極低温・超高真空下においてのアモルファス氷試料が実験観察できるようにするため，この開発を進めてきた．しかし，導入した TEM の試料冷却ホルダーを液体 He で冷却するため，その冷却保持時間は 1 時間程度かつ温度調整範囲は 5-20K と限られていた．さらに真空漏れもひどく，アモルファス氷試料の実験観察という目的では全く使いものにならなかった．一方，He 冷凍機を導入することで，温度可変（10-300K）で長時間の冷却が可能だった，その振動のため，これまで冷凍機の使用は避けられてきた．

2　He 冷凍機を用いた極低温・超高真空 TEM の開発

香内教授は長年 He 冷凍機を使用し，多種類の除振法を走査型トンネル顕微鏡等へ適用してきた。その経験を生かし，極低温・超高真空下で実験観察可能な TEM の開発に向けたシステム設計をおこなってきた．我々装置開発室は，香内教授が設計した「He 冷凍機を用いた極低温超高真空 TEM へ改良」を実現すべく，除振システムの製作などをおこなっている． システムの詳細に関しては現在開発段階で，知的財産を含むため，除振システムおよび各種部品を接続する部分の超高真空チャンバーの製作についてのみを報告をする．

図 1　チャンバー上部

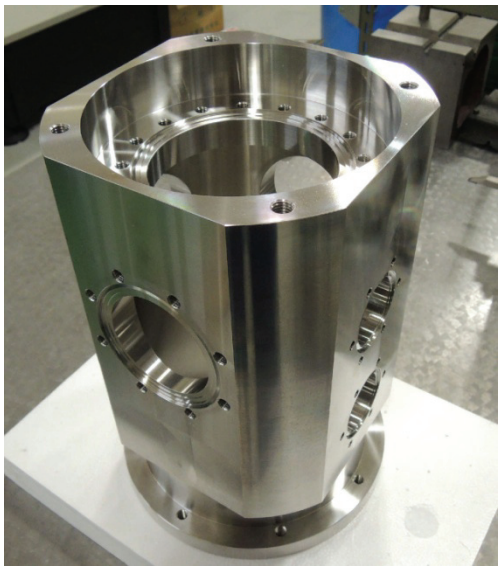


図 2　チャンバー底部

3　超高真空チャンバーの製作

今回製作した超高真空チャンバー（以下，チャンバー）を図 1，2 に示す．これは超高真空であることはもとより，除振も考慮するため，継ぎ目がなく重量がある SUS304 丸棒から一体物で製作した．そのため，これまで製作してきたチャンバーとは異なり，溶接で部品を組み合わせるようなことが全くないため，一つのミスですべて一から作り直さなくてはならなかった．

チャンバーは、上部が冷却系（パルスチューブ冷凍機）および除振システムに接続する．シール面は極力振動が伝わらないように，樹脂製シール（オムニシール）を用いた接続となる．底部は真空排気系（イオンポンプ）と接続する．真空排気系との接続には，一般的に超高真空で使用される無酸素銅製のメタルガスケットではなく，防振を考慮したインジウム合金製のガスケットを検討している．

横のポートは，3 面に ICF114 ポートが 1 か所ずつあり，残りの 1 面に ICF70 ポートが 2 か所ある．ICF114 ポートは, 荒引きの排気系（ターボ分子ポンプ）および TEM 試料ホルダーの冷却系伝達系との接続に使われ，ICF70 ポートは各種電源・センサーとの接続に使われる．

チャンバーは，SUS304 の丸棒を購入し，内径および端面の荒加工をおこなった後，装置開発室で仕上げ加工をおこなった．なお荒加工は，加工前の重量が 72 kg（荒加工後は 36 kg）もあり，取り扱いが難しく，作業の安全を考え外注した．

4　特殊仕様 NC フライス盤について

今回の製作は既存の NC 旋盤に加え，と昨年度導入した特殊仕様 NC フライス盤を用いた．この特殊仕様 NC フライス盤は，これまで培ってきた NC フライス盤の経験と技術を生かせる機種を検討した．その結果，本研究所内の教員および共同利用・共同研究拠点関係者の多種多様な需要に対応できる，U 軸[*1]加工機能をもった NC フライス盤を導入した．

今回導入した特殊仕様 NC フライス盤を図 3，4 に示す．NC フライス盤は静岡鐵工所社製 R-5VN をベースに，特殊仕様として，イタリア Dandrea 社（輸入代理店：日研工作所）の U 軸加工機を付加した．また，U 軸加工機と同時に，既存の NC 円テーブルも使用できるようにした．これには，NC フライス盤の制御器を標

*1 NC フライス盤における U 軸とは、回転主軸に取り付けられた工具が回転中心軸から移動しながら加工径を変えられる軸のことを言う。

準仕様である 4 軸対応（同時 3 軸）の FANUC 社 20i から，5 軸対応（同時 4 軸制御）の同社 0iMD へ載せ換え，アンプ増設および電源の増強をおこなった．また，NC 傾斜円テーブルを導入することで 5 軸加工機にもなり，この構成は将来を見据えた仕様にもなっている．なお、5 軸加工機への機械仕様変更および制御器のパラメーター設定は，現地調整（本研究所）で対応できる．

図 3　U 軸加工機能を付加した NC フライス盤

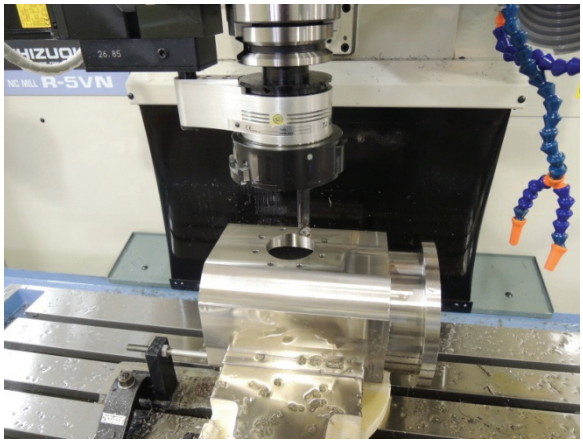


図 4　チャンバー加工中の U 軸加工機

図 5　NC フライス盤主軸

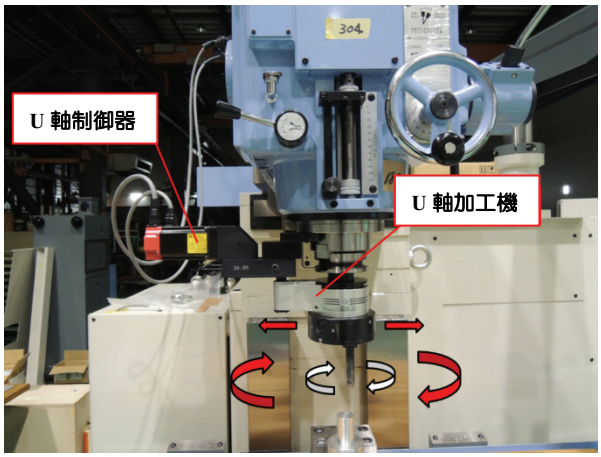


図 6　U 軸加工機を付加した主軸

5　U 軸加工機について

一般的な NC フライス盤の主軸が刃物の回転のみに対して，U 軸加工機能は主軸に U 軸加工機を取り付けることにより，切削工具の回転と移動（U 軸）が併用可能となる．これにより，切削加工径を自在に変えることができる（図 5,6）．

U 軸の移動量は±17mm と小さいが，切削工具の取り付け位置によって，回転半径 34mm，直径 64mm の加工が可能である．したがって，今回のような ICF フランジの加工範囲は充分にカバーできる．また，U 軸導入検討時に切削加工による工具のびれが問題になったが，今回の加工では全く問題なかった．なお，製作した一体型チャンバ

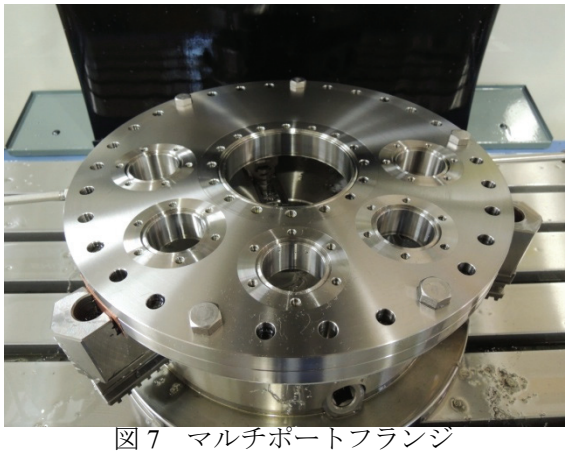


図 7　マルチポートフランジ

ーの真空性能について，現時点では検証できていない．ただし，NC フライス盤導入後，U 軸加工機を使ったケースとして，図 7 のマルチポートフランジの加工例を挙げるが，このチャンバーシステム全体で，5×10^{-8}Pa の真空度を達成しており，超高真空下での使用が実証されている．また，一体型チャンバーの使用条件が 10^{-7}Pa 程度ということから考慮しても，全く問題ないと思われる．

6　U 軸加工機使用時の問題点

今回導入した U 軸加工機は，本来，マシニングセンターへの取り付けを想定した仕様となっている．その例として，U 軸加工機の主軸テーパは BT 仕様となっている．国産の一般的な NC フライス盤は，主軸テーパが NT 仕様であるが，この U 軸加工機には NT 仕様の物が存在しない．NC フライス盤導入検討時に，この問題を解決すべく，主軸に切削工具（ミーリングチャック・U 軸加工機）を固定するドローイングボルトを標準の NT 仕様のほか，BT 仕様の物を用意し，個々に使い分けることとした．しかし，実際に使用すると，ドローイングボルトはもとより，重量がある U 軸加工機と NT 仕様の切削工具の交換の煩雑さゆえに問題が多かった．これまで使用してみて，特に改良が必要と感じたのは次の 2 点である．

1 点目は，主軸の位置決めである．通常，位置決めの対象物が穴や円柱状の物であれば，主軸にダイヤルゲージを取り付け，主軸を回転させながら中心位置を割り出す．また、対象物が角型の場合は、平面部にタッチセンサーなどを当て端面の位置を割り出す．しかし，U 軸加工機は，主軸が移動するため，対象物が穴や円柱状の物であれば対応が可能だが，角型の場合，対応が難しい．今後は U 軸加工機を取り付けたまま，各種形状に応じた位置決め機構を設けていく予定である．これにより，ドローイングボルトおよび U 軸加工機，NT 仕様切削工具の着脱を省略できる．

2 点目は，今回導入した U 軸加工機は切削工具（バイト）取り付け用のツールブロックが 2 種類しか存在せず，さらにその取り付け位置が限定されている点である．もともと U 軸の移動量が±17mm と限られているうえに，ツールブロックの取り付け位置も限られているため，実用的に使える U 軸移動範囲がより狭くなってしまう．我々がこれまで培ってきた NC 旋盤での技術を生かすため，また，U 軸加工機の能力を充分に引き出すためには，様々な切削工具や多様な形状をした被削物に応じた固定治具を開発しなければならない．

7　おわりに

今回製作したチャンバーは，企業であれば U 軸加工専用機や（NC）正面旋盤，（NC）立旋盤，機械式のボーリングヘッドを使ってのマシニングセンターによって加工できる．しかし，大学の工作施設において，こういった千万円もする工作機械をそうたやすくは導入できない．またスペースも限られているため，このような大型機械を導入できる施設も限られている．大学で働く技術職員は，限られた予算，限られた工作機械の中で多種多様の加工が求められる．そこで我々は日夜自らのアイデアを基に，治具などを工夫しながら加工をしている．この特殊仕様 NC フライス盤は，そういう意味で，他大学においても導入検討の参考になるかもしれない．

我々はこの特殊仕様 NC フライス盤を駆使し，さらなる技術の向上を目指したい．これにより，高付加価値かつ高度な技術を必要とする，特殊な超高真空機器の開発や特殊形状実験装置の開発が可能となるであろう．また，将来的には，NC 傾斜円テーブルと 5 軸対応の CAM を導入し，我々にとって未知の領域である 5 軸制御加工を可能にしたい．

学生実験「素粒子の相互作用と磁気モーメント」に関する装置製作

鈴木　貴士

東北大学ニュートリノ科学研究センター

1. 背景

今年度（平成 25 年度）から、東北大学ニュートリノ科学研究センターが担当する学生実験の課題が「泡箱写真解析」から「素粒子の相互作用と磁気モーメント」に変更された。この実験課題の変更に伴い、コイルの製作、コイル装置台の製作、磁気測定、データ取り出し用電子回路の準備、高電圧ケーブル・信号ケーブルへのコネクタの取り付け、天井裏配線、実験室の移動によるレイアウトなど、主に学生実験の環境整備全般を担当した。

2. 学生実験の内容

この実験は、宇宙線ミューオンの崩壊によって作られる電子・陽電子の放出方向の時間変動を用いて、素粒子の磁気モーメントを測定することを目的とする。素粒子の磁気モーメントは、一様な磁場がかけられた銅板の中でミューオンが崩壊することによって生まれた電子の放出方向を、プラスチックシンチレータと光電子増倍管を用いて測定することで求めることができる。（図.1 参照）

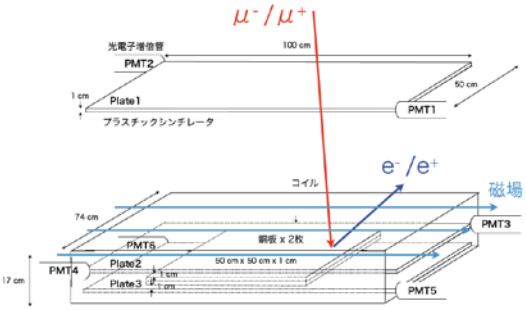


図.1 装置模式図

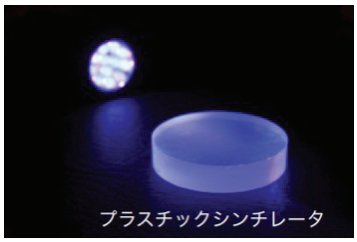


図.2 プラスチックシンチ

図.3 光電子増倍

シンチレータとは、放射線が当たったときに蛍光を発する物質のことで、この発光のことをシンチレーションという（図.2）。シンチレータには無機シンチレータ、プラスチックシンチレータ、液体シンチレータなどがある。今回の実験では固体のプラスチックシンチレータを使用した。

光電子増倍管（以下 PMT、図 3）とは、微弱な光を電気信号へ変換する真空管である。実験では、PMT はプラスチックシンチレータが素粒子からエネルギーを吸収し、そのシンチレーションを電気信号に変換してミューオン信号をデータとして取り出すために使用する。

今回の実験は、技術職員として「一様な磁場を作ること」が重要なポイントであるため、磁場を作り出すためのコイル製作と一様な磁場に微調整するための磁気測定を中心に紹介したい。

3. コイル製作（全 3 台）

3-1. コイルフレーム

コイル製作に当たって、まずはじめにコイルフレームの設計に取りかかった。設計の条件として、まずコイル磁場に影響を与えないように非磁性体の部材を用いることが求められたため、アルミニウム部材を使用した。また、コイルフレームの内側に 1000mm×500mm×10mm のプラスチックシンチ

レータ２枚と 500mm×500mm×10mm の銅板２枚を納める必要があるため、それ以上のコイル内部空間を持つフレームであること、またプラスチックシンチレータ 2 枚と銅板 2 枚で総重量約 50kg になるため、その重量に耐えうる構造であることが求められた。図.4 は完成したコイルフレームである。完成したコイルフレームの内部空間は約 1000mm×670mm×150mm で、プラスチックシンチレータと銅板を十分に収納できるサイズにした。

図.4 コイルフレーム

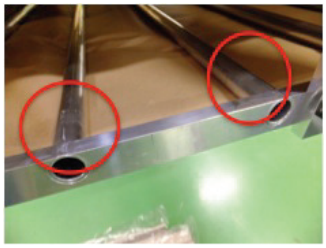


図.5 フレーム工夫点

フレームの設計時に最も工夫した点は、図.5 で示したフレームの口部分とアルミ丸棒の接続部分に段差がつかないようにしたことである。総重量 50kg 程度になるプラスチックシンチレータや銅板をコイル内部に挿入するだけでも非常に困難な作業であるが、フレームの口部分に段差があると、挿入時にそのエッジに荷重がかかった場合、プラスチックシンチレータに傷がついてしまう恐れがある。段差をなくしたことで、実際の作業ではこれらのリスクを除外しうまく挿入することができたと考えている。

3-2. 銅線巻き

コイル線材は、フジクラ社製のネオマール線 φ1.2mm を使用した。巻き方は、図.6 に示すように、回転しやすいようにコイルフレームの軸に丸パイプを通し、ネオマール線の方も同様にロールに丸パイプを通して回転しやすいようにセッティングした。銅線巻きの作業は二人一組で行った。一人はコイルフレームを回転させ、もう一人はネオマール線をガイドすることでネオマール線の重なりなどもなく正確に巻くことができた。コイルは全てで 3 台製作したが、1 台目の製作の時にネオマール線を巻いていくにつれてフレームが徐々にたわんでしまい、巻き始めの部分に若干の弛みが発生してしまった。この反省を活かし、2 台目以降は次の 2 つの補強を施してからネオマール線を巻いた。1 つは、図.7 の三角駒による補強である。もう一つは、巻く前にタイでフレームをきつく縛り（図.8）、たわむ余地を最小にしたことである。この二つの補強により、2 台目以降は更に正確にネオマール線を巻くことができた。

図.6 作業風景

図.7 三角駒で補強

図.8 タイで補強

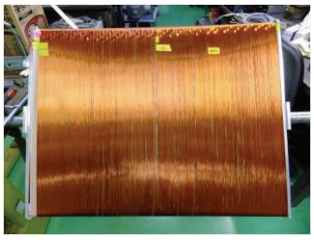


図.9 メインコイル

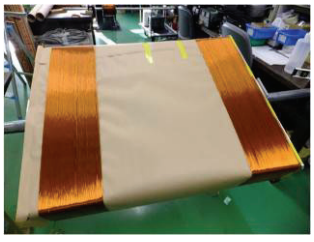


図.10 サブコイル

磁気強度に関する条件として、コイル中心の 500mm×500mm の範囲（コイル内に銅板を設置する場所である）で一様な 50 ガウスの磁気強度（±2 ガウス）であること、また当センターが所有する

DC 電源は最も大きいものでも最大電圧 30V であったため、これら 2 点を考慮して銅線の巻き数を決定した。銅線はコイルに 2 層巻いたが、コイル電圧を抑えるため、1 つの層を中心で二つに区切り、全体で 4 つのコイルを並列に接続させた構造をとった。その時の一つのコイル巻き数は 335 巻きであった。また、これら 2 層巻いた部分をメインコイル（図.9）とすると、それとは別に 3 層目のコイル両端に 150 巻きずつサブコイル（図.10）を巻いた。サブコイルは、メインコイルだけではコイル中心から開口部に向けて徐々に磁気強度が低下していくことが予想されるため、一様な磁場を作るときに補助的に利用することを目的に巻いた。コイルは 3 台製作したが、全ての台においてメインコイル部の抵抗値が 4 つのコイルすべてにおいて同じ値（9.7Ω）であった。

3-3. コイル台の製作

また、コイルを乗せるためのコイル台を製作した。骨組みには、コイルフレームと同様に、コイル磁場に影響を与えないように非磁性体であるアルミニウム建材を使用した。図.11 はコイル台にコイルフレームを乗せた画像である。コイルはアルミ製 L 字金具でコイル台に固定した。図.12 は完成した装置の全体像である。

図.11 コイル台

図.12 装置全体像

図.12 の、コイルの口を塞ぐように取り付けたものは通風用ファンである。コイルは電流を流すとネオマール線の持つ抵抗により発熱する。このファンは、コイルの発熱によって温められる空気がコイル内部に留まり、更なるコイル発熱を助長しないように通風するために用いている。なお、コイルの反対側の口には、逆に空気を吸い込む向きにファンを取り付けていて、2 つのファンを組み合わせて通風するようにしている。これによって、コイル表面は通電後 1 時間程度で約 40℃という安定した値を示すようになった。ネオマール線は、抵抗率が自身の温度に比例するという性質を持っているため[1]、ネオマール線の温度上昇をできるだけ抑え安定にすることは、一様な磁場を作製するために重要なことである。コイル製作や通風用ファンの設置については、近い内容の実験を行っている他大学の実験報告をヒントにした[2] [3]。

4. 磁気測定

4-1. 目的と測定準備

コイル内の磁場を微調整して、中心 500mm×500mm のエリアに一様な 50 ガウスの磁場（±2 ガウス）を作ることを目的に磁気測定を行う。
磁場の微調整は 3 つの DC 電源を使用することによってコイルに流れる電流を制御することで行う。1 台はメインコイルに、残りの 2 台は各サブコイルに割り当て、それぞれの電源を調整することで一様な磁場の作製を目指す。磁気測定は、LakeShore 社製の 410Gaussmeter を使用して行った。また、コイル内部の磁気測定を行うための冶具（図.13）を製作し、測定しにくさを解消した。

図.13 磁気測定用冶具

4-2. 磁気測定手順

まず始めに、図.15 に示すように通風用のファンを台と水平になるように倒し磁気測定用冶具をコイル内部に挿入しコイルに固定する。次に、水平に倒したファンを台にして磁気エリアパネルを設置 （図.16）し、測定者がコイル内部のどこを測定しているのかを簡単に分かるようにする。コイルに固定した冶具にガウスメータをセッティング（図.17）し、電源電圧の微調整と磁気測定を繰り返し行うこと（図.18）で一様な磁場を作製する。実際の学生実験では、磁気測定マニュアル（図.14）を作成し、それを元に学生に磁気測定方法を説明した。

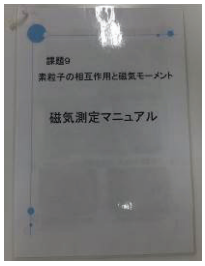


図.14 測定マニュアル

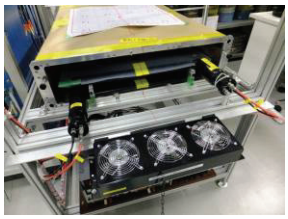


図.15 ファンを倒す

図.16 測定用冶具を挿入

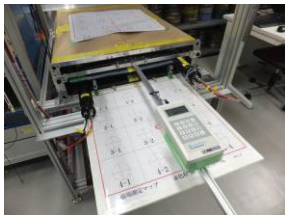


図.17 ガウスメータの設置

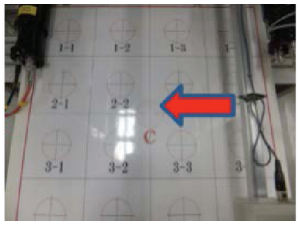


図.18 測定場所の調整

4-3. 結果

磁気測定の結果を図.19 に示す。磁気測定は 500mm×500mm の範囲を 17 箇所に分けて行い、それぞれのエリアを行-列で示してあり、同じ枠内に大きめの黒字で示したのは磁気強度である。1 行目は、測定者から見て奥側のコイル開口部であり、4 行目は手前側のコイル開口部である。中心 C はコイル中心部を示している。表.1 は磁気測定時の各電源装置の電流-電圧の値である。Main はメインコイル、Sub1 は手前側サブコイル、Sub2 は奥側のサブコイルにそれぞれ割り当てた DC 電源のパラメータを示している。

左図の結果から、500mm×500mm のエリアで最大でも 50.4 ガウス、最低でも 49.1 ガウスであり、コイル製作の条件である一様な磁場（50 ガウス±2 ガウス）を作製することに成功した。

単位；ガウス

1-1 50.2	1-2 49.4	1-3 49.1	1-4 49.5
2-1 50.3	2-2 49.6	2-3 49.7	2-4 50.1
3-1 50.4	3-2 50.2	C 49.7 3-3 50.0	3-4 50.1
4-1 49.5	4-2 49.4	4-3 49.3	4-4 49.7

図.19 磁気測定結果

	電流値(A)	電圧(V)
Main	11.72	28.5
Sub 1	0.48	2.0
Sub 2	0.70	3.0

表.1 磁気測定パラメータ

5. 来年度に向けての改良

5-1. 問題点

来年度の学生実験に備え、装置の改良を行ったので改良内容を報告する。今年度の学生実験で、コイル磁場を作製すると磁場作製前と比較してミューオン信号数が約 80%も減少してしまうという問題が起きた（表.2)。ここでミューオン信号数とは、本文 1 ページの 2.学生実験の内容で一度説明したように、宇宙から降り注ぐミューオンがプラスチックシンチレータを通過したときに発するシンチレーションを PMT が電気信号に変換することによってカウントされる数のことである。

ミューオン信号数が減少するということはそれだけ測定に要する時間が増加してしまうということなので、実験効率を上げるためにも改良は急務である。

表.2 にある Plate とは、プラスチックシンチレータと PMT のセットを示している。実験では、Plate はコイル 1 台に対し 3 枚必要であり。図.20 で示すように、Plate1 はコイル外側 1m 上方に設置し、Plate2 と Plate3 はコイル内に設置されている。コイルの外側に設置した Plate1 は磁場の有無に関わらず信号数が一定なのに対し、コイル内に設置した Plate2、Plate3 では磁場なしの状態のカウント数と比較して磁場有りの状況ではカウント数が約 80%減少していることが分かる。この結果から、今回のミューオン数の減少は、PMT がコイル磁場の影響を受けて信号数が減少したのではないかと考えられる。そこで改善案として、PMT を磁場の影響から守るために磁気シールドカバーを装着させて、その変化を調べることにした。

		磁場なし	磁場有(50Gauss)
コイル内	Plate1	~2500[/30sec]	~2500[/30sec]
	Plate2	~2500[/30sec]	~450[/30sec]
	Plate3	~2500[/30sec]	~600[/30sec]

表.2 信号数の減少

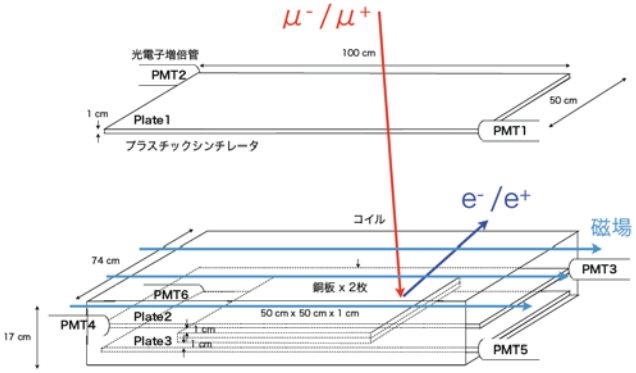


図.20 装置模式図

5-2. 磁気シールドカバーの製作

磁気シールドは、一般的にパーマロイなどの強磁性体の部材を使用して作られる。今回の改良では、試験的に鉄製のシールドカバーを製作した。使用したのは内径 φ7mm の鉄製パイプで、PMT に装着しやすいよう形状を加工し、その後錆び止めのため塗装した(図.21)。図.22 は装着後の装置の様子である。

図.21 鉄製パイプの加工

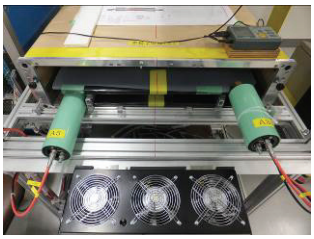


図.22 カバー装着

次に、磁気シールドカバーを装着した状態で磁気測定を行った。結果を図.23 に示す。これは、強磁性体である鉄製パイプをコイルに近い場所に設置したことによって、コイル内部磁場に何らかの影響を与えていないかを確認するためである。図.23 の黒字で示した数値は、カバー装着後の磁気強度であり、その下の括弧内の黒字はカバー装着前の磁気強度である。この結果から、鉄製磁気シールドカバーを Plate2、Plate3 の PMT に装着してもコイルの内部磁場には悪影響を与えないことが確認できた。

単位；ガウス

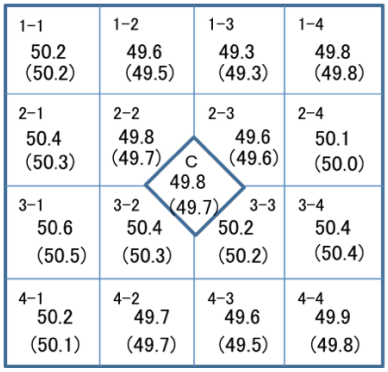


図.23 カバー装着後の磁気測定結果

	電流値(A)	電圧(V)
Main	11.70	30.0
Sub 1	0.58	2.5
Sub 2	0.97	4.3

表.3 磁気測定パラメータ

5-3. 結果

PMT に磁気シールドカバー装着後の、ミューオン信号数変化の結果を表.4 に示す。

	磁場なし	磁場有 (50Gauss)	磁場有カバー付 (50Gauss)
Plate1	~2500[/30sec]	~2500[/30sec]	~2500[/30sec]
Plate2	~2500[/30sec]	~450[/30sec]	~1800[/30sec]
Plate3	~2500[/30sec]	~600[/30sec]	~2000[/30sec]

表.4 カバー装着前後の信号数変化

表.4 の赤字で囲ってある部分が、カバー装着後のコイル磁場内でのミューオン信号数である。この結果をみると、シールド装着後のコイル磁場内でのミューオン信号数は、磁場がない状態と比較して約 25%の減少に抑えることができた。今後さらに改良する余地はある。

6. まとめ

今回の製作は、実験タイトル変更の話を受けてから今年度（平成 25 年度）の学生実験開始まで、1 年 3 ヶ月程度を費やして準備をしてきた。限られた期間と限られた予算の中で条件をクリアし、タイトル変更後初めての学生実験を大きな問題なく終えられたことは、私にとって非常に大きな自信になった。今後も改良点は出てくると思うが随時対応し、さらに良い実験環境の実現に努めたい。

7. 謝辞

今回の製作に当たり、理学部機器開発・研修室の皆さんにはアルミ材加工や材料選出について貴重なご助言をいただきました。また、今回の一連の製作機会を与えてくださった清水格先生、貴重なアドバイスをいただいた技術職員の方々、特に高山知明技術補佐員には右も左も分からない状態の私を導いていただきました。記して感謝申し上げます。

8. 参考文献

[1] 銅線の電気抵抗の温度変化 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要第 32 号(2011.9)
UCHITA Yumiko, YOSHIOKA Masashi, SHIGEMATSU Hirotaka

[2] ミューオンの寿命・g 因子の測定(2011.10) 内田健人、大野海、上野市訓、救仁郷拓人、仲村佳悟
http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/A1/reports/a1report11a.pdf

[3] 宇宙線ミューオンの測定(2006.3) 荒木慎也、宮本紀之、室井章
http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/papers/b-thesis/fy2005_b-thesis-1.pdf

工作機械利用のための安全教育コンテンツ作成

○藤本　甫，金子 克巳，田幡　秀典

国立大学法人 電気通信大学 教育研究技師部

1　目的

電気通信大学ものつくりセンターでは全学科、全専攻の学生、教職員が工作機械を利用することができる。利用する場合は毎年 5 月に開催するものつくりセンター安全講習会を受講することが条件となっている。安全講習会の受講人数は毎年 100 人以上である。大学発行の安全手帳に掲載されている工作機械の取り扱いについて、機種ごとに動画、スライドを使用し説明している。

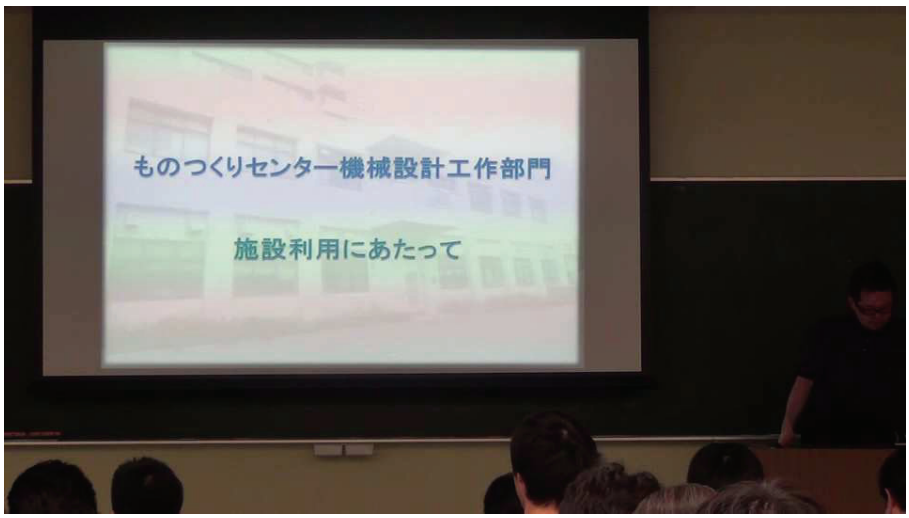


図.1 安全講習会

その後、工作機械を利用する際にはものつくりセンター職員または工作機械の取り扱いを熟知している教員による実技指導を個別に受け、安全作業に対する心得を十分に有すると認められた場合に利用を許可される。春先や研究が本格化する時期は学生から実技指導を個別に依頼される機会が多くなり、学生は順番待ちによって研究が滞ってしまうなどの弊害も見られる。ものつくりセンター職員にとって学生への安全教育は重要業務であり可能な限りすべての実技指導の依頼に対応するべきであるが、短時間での直接指導で学生に十分な理解をさせることは難しい。機械工作においては安全教育が十分でない場合、大きな事故、ケガにつながる可能性が高くなる。

そこで工作機械について基本的な注意事項などを示した映像コンテンツを補助教材として Web に置き、事前に工作機械の作業の基礎を学ばせ、直接指導する前に理解を深め、安全教育をより充実させることが可能であるかを考察した。

図.2 学生への直接指導

2　映像コンテンツを作成する工作機械の選定

図.3 に平成 25 年度 11 月までの工作機械使用状況を示す。学生が使用する工作機械は主に旋盤、フライス盤である。時間数は少ないが、ボール盤も使用している人数も多い。

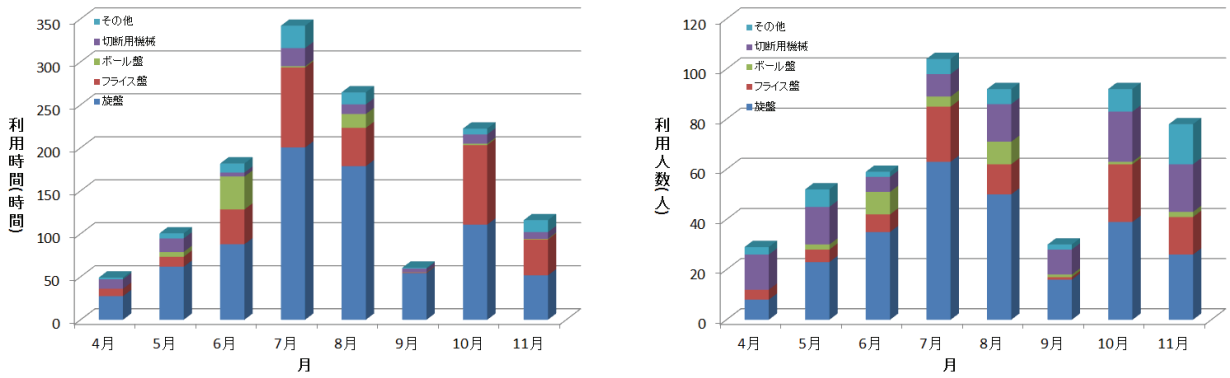


図.3 平成 25 年度工作機械使用状況

利用頻度の高い工作機械、比較的注意するべき項目が少ない工作機械について映像コンテンツを優先的に作成することとし、はじめに作成が容易であるとの判断から両頭グラインダについてのコンテンツを作成することにした。その後は使用頻度、注意点のバランス、各研究室での保有の可能性を考慮して、ボール盤、旋盤、フライス盤、鋸盤の順で作成することにした。

3　映像コンテンツの作成

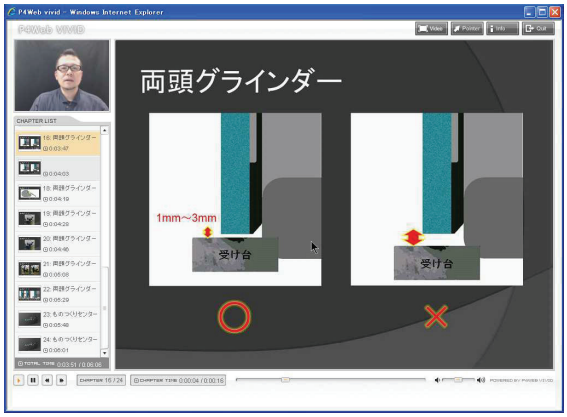


図.4 画面構成

図.4 に映像コンテンツの Web 画面の構成を示す。パワーポイントで作成した工作機械を説明する画像を Web 画面の右側に、説明者の動画を左上に配置した。さらに説明者の動画の下にスライドごとのキャプチャーを表示するようにして、閲覧途中で聞き逃した場合でも簡単に戻ることができる仕様にした。

パワーポイントの内容は、はじめて工作機械に触れる学生を対象に作成することとして詳細な説明をした。両頭グラインダを例にすると、工作機械の外観および用途を動画・写真を使って説明、材料ごとに研削砥石の選定が必要である説明、作業前の準備の説明、研削の際の材料の向きなどひとつひとつ説明を行う。

映像コンテンツの作成には PC と Web カメラを使用する。図.5 に概略図を示す。実際の録画には図.6 のようにパワーポイントの再生用の液晶モニタを置くことで目線が下がらないように配慮した。

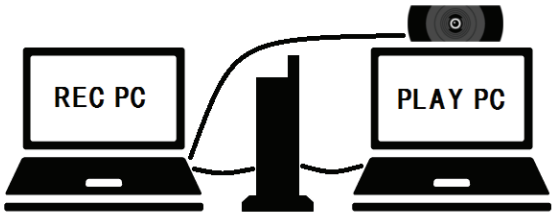


図.5 録画装置概略図

図.6 実際の録画装置

録画用 PC では Web カメラによる説明の動画と説明用 PC のパワーポイントのスライドを結合させエンコードする。録画・録音素材とスライドの合成には Earnet 社の Vivid Encoder を使用した。画面構成は図.4 のとおり、録画の際にはパワーポイント側のスライドごとにチャプターが追加される設定とした。

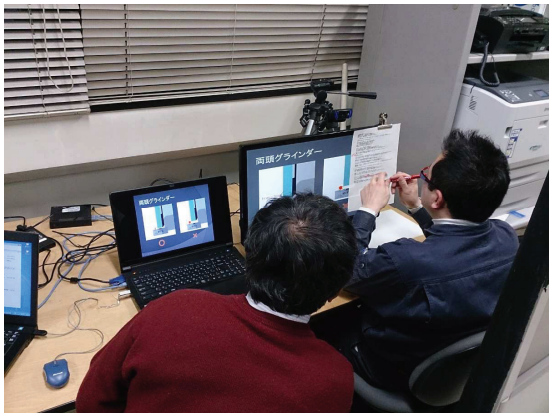


図.7 録画風景

4　両頭グラインダの映像コンテンツについて

両頭グラインダの映像コンテンツは当初 5 分程度となる予定であった。はじめて作業をする学生向けというコンセプトのため、内容は両頭グラインダの概要、作業の見本動画、研削砥石に関する詳細な説明、ものつくりセンター内の配置図、安全な作業のための諸注意、季節を問わず作業着は長袖を着用、安全靴着用の奨励、保護メガネ・マスクの着用などの服装に関する注意、両頭グラインダ作業における作業前安全確認、砥石と工作物の当て方というものであった。完成したものを再生したところ予定時間を超え 8 分程度になった。

内容を再度検討した結果、服装、安全靴など両頭グラインダ作業以外の一般的な機械工作作業についての注意点であることから、一般的な機械工作作業の注意点の説明は工作機械の説明中には入れず、「作業時の服装について」とコンテンツを独立させたほうがよいと判断した。

5　おわりに

技術系職員は積極的に安全教育にはかかわるべきであり、充実した安全教育は不可欠である。Web に公開し閲覧した学生や教職員から意見を聞き、よりよいものにしていきたい。

現在、完成しているものは「両頭グラインダ」、「卓上ボール盤」、「作業時の服装について」の 3 つである。ポスター発表では完成したものを見られるようにしているのでそちらも見ていただきたい。

ILC 用超伝導加速空洞の製作

○渡邉勇一、安島泰雄、井上 均、佐伯学行
（高エネルギー加速器研究機構）

高エネルギー加速器研究機構内、開発供用棟に設置した電子ビーム溶接機等を用いて、In house の ILC 用 9cell 超伝導加速空洞を製作中である。次の段階として、自動化技術の開発・コスト削減に向けた研究開発を行っている。現在、製作中の 1 号機を中心に報告する。

1　はじめに

国際リニアコライダー(ILC)のような、将来の大型プロジェクトでは超伝導空洞の量産技術が非常に重要である。工業生産として必要な自動化技術を開発し、さらなるコストダウンを進めていく必要がある。そのためにはより先進的な製造方法を発案していかなければならない。そのような目的で、超伝導空洞の量産研究を行う施設(CFF)に、2011 年 4 月 電子ビーム溶接機(EBW)が 導入された。この EBW（Fig.1）は加速電圧を 60kV から 150kV 間で連続可変が可能である。低電圧領域から高電圧領域までの Nb（ニオブ）の溶接特性、特に裏ビードの形成に関する溶接基礎試験を行ってきた。また、現在 KEK# 1 号機として、空洞の主要パーツをほぼ CFF で製作した。KEK#1 号機の製作を報告する。

Fig.1 電子ビーム溶接機(EBW)

2　空洞製造技術開発施設(CFF)

CFF は工作棟の西側、開発共用棟（旧 PS エネルギーセンター）内に設置したクリーンルーム仕様で、4 つの部屋で構成される。ハーフセルのトリム加工を行う縦旋盤を設置し、建屋への入室口を兼ねる前室。Nb 円盤からハーフセル形状にプレスするサーボプレスマシン（Fig.2）を設置したプレス室。空洞パーツ表面の異物を化学的に除去する CP(Chemical Polish)装置を設置した CP 室。成形されたハーフセルや、種々のパーツを接合して空洞を組み立てる電子ビーム溶接機を設置した EBW 室の 4 室である。

導入された EBW 機は、SST 社の高電圧型で最大 150kVx100mA（15kW）を発生できる。電子銃は縦横 2 か所に取付け部を設け、溶接の姿勢で移動が可能となっている。

Fig.2 プレスマシンとハーフセル

CFF におけるハーフセルの深絞りにはサーボプレスが導入された。サーボモーターによる制御によりプレスモーションを変化させることが可能となっている。このプレスマシンで成形されたハーフセルをトリム加工する際、KEK#01 号機ではアイリス部を突合せ形状、赤道部にはインロー形状を採用した。

ハーフセルのトリミングには Al 製の専用加工冶具を用い、旋盤で赤道部、アイリス部の順に加工していく。Nb の切削加工はバイト刃先の管理が重要で、作業者の経験、技量が形状、組立精度を決定することになり非常に重要である。

3　空洞の製作

スティフナ加工（Fig.3）には 0 号機用製作時の成形不良改善のために、事前に端部のみを成形する端部プレス冶具を追加した。端部プレスをおこなった後で、全体の成形を行い、ダンベルに組み合わせた時のスティフナ端部の成形不良を改善するのが目的である。さらに、0 号機では、あらかじめ長めに素材を用意し、スティフナ形状に成型したのちに不要な部分を放電加工で切り落としていたが、1 号機では素材を設計寸法することで不要部分をなくし、プレス後の切り落とし作業を省略することに成功した。端部の成形不良については、一定の効果は見られたが、最終プレス型の最適化を行うことで、より一層の改善が見込める。

1 号機では、空洞の多連化に有効と思われる、電子銃をチャンバの横に取り付け、ビームを空洞の側面から撃つ、横撃ち姿勢を導入した。これにより、空洞上部から空洞側面を撃つ縦撃ちで懸念されるたわみ形状の問題を回避できると考えられる。そこで今回、新たに横撃ちでの条件だしをおこなった。Nb 板でのビードオンによる条件出しを、電圧、電流、フォーカス電流値などを調整し、最適な条件が得られるまで行った。評価方法としては、目視や触診によるビードの形状観察。また、表面観察装置を使用したビード境界の評価のほか、形状測定装置によるビードの断面形状計測等もおこない、アイリス部、赤道部、終端部各々の最適条件を探索した。（Fig.4）

Fig.3　スティフナプレスジグ

スライドブッシュで、ダンベル EBW の収縮に追従する冶具を利用し、最適条件でダンベル化を実施した。
しかし、1 個目のアイリス部は条件出しに使用した。Nb パイプより熱容量が大きいと考えて、電流値を 1 から 2mA 増やした条件で溶接したところ溶接部に穴が開いてしまった。

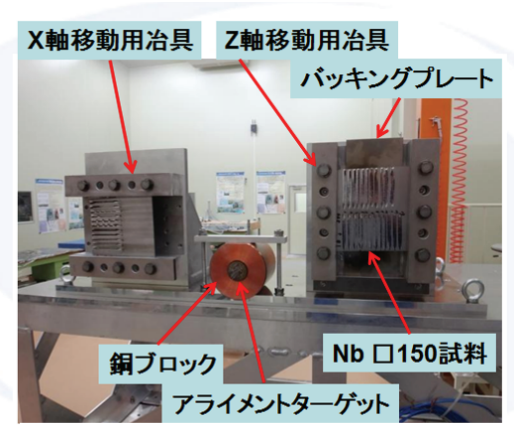


Fig.4　条件出しセットアップ

ダンベル形状（Fig.5）のため、パイプの時より熱がこもることが判明し、輻射熱が影響していると考えられた。ダンベルの残り半周を利用し、電流を 3mA 下げて実施したところ、今度は裏ビードが非常に細くなった。結果、この間に最適条件があることが想定された。

電流が弱く裏ビードが細くなったダンベルについては、ダンベルを傾けてセットし、内面から補修溶接を行うことで、滑らかなビードを形成することができた。（Fig.6）

次に、補強用のスティフナリングをダンベルの間に対向して、2 枚挿入し EBW した。

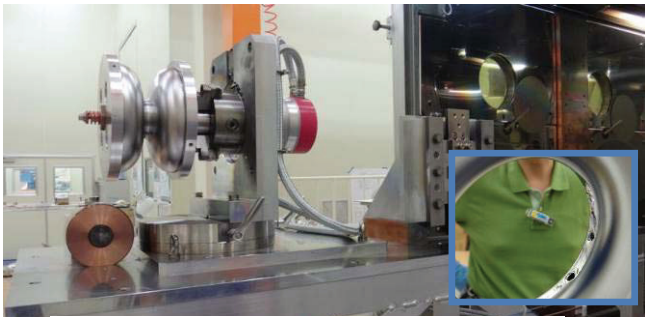


Fig.5　ダンベル溶接のセットアップ

このように、スティフナリング付のダンベルを 8 セット（Fig.7）作成し、ダンベルを 2 セット重ねて 2 ダンベル(Fig.8)を作成、その後 2 ダンベルを 2 セット重ねて 4 ダンベル(Fig.9)、4 ダンベルを 2 セット重ねて 8 ダンベル(Fig.10)とセンターセル部を製作し完成させた。

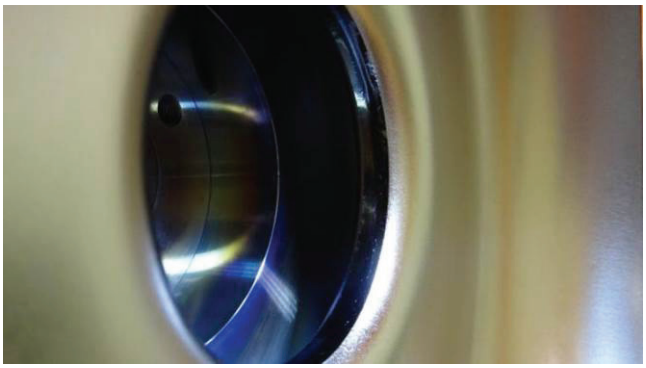


Fig.6 化粧溶接したアイリス部ビード

Fig.7 スティフナリング溶接

Fig.8 2 ダンベル化

Fig.9 4 ダンベル化

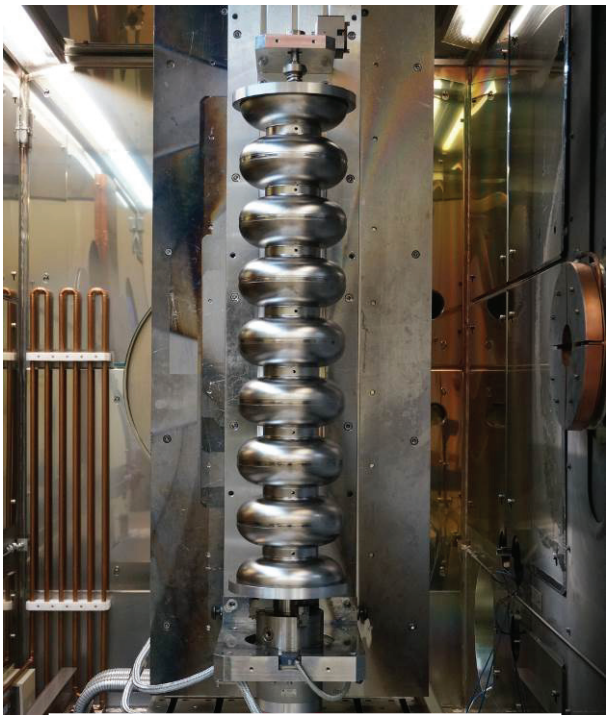


Fig.10 8 ダンベル化

完成したセンターセルの両端にはエンドグループ(Fig.11)と呼ばれる、高周波のインプット部とモニター部が取りつく。この箇所には、従来の空洞とは違い、ウォータージェットで加工したアンテナ(Fig.12)や、超深絞り先進プレス加工を用いたHOM外導体(Fig.13)など、先進的な加工法を取り入れ加工を簡略化することにより、コストダウンを目指している。

Fig.11 エンドグループ

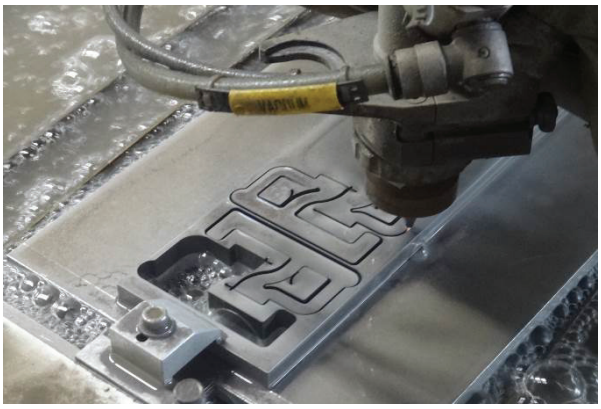


Fig.12 ウォータージェットでのアンテナ加工

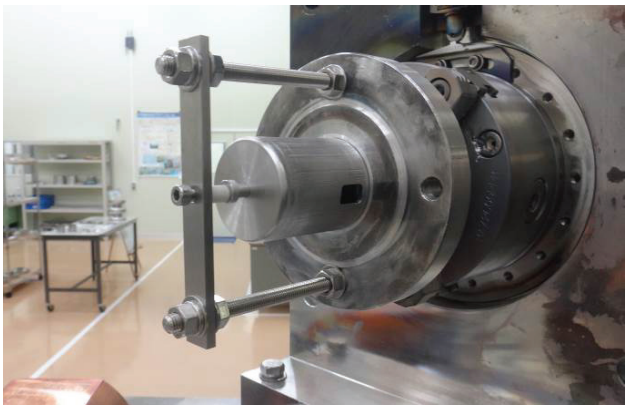


Fig.13 超深絞り先進プレス加工を用いた外導体

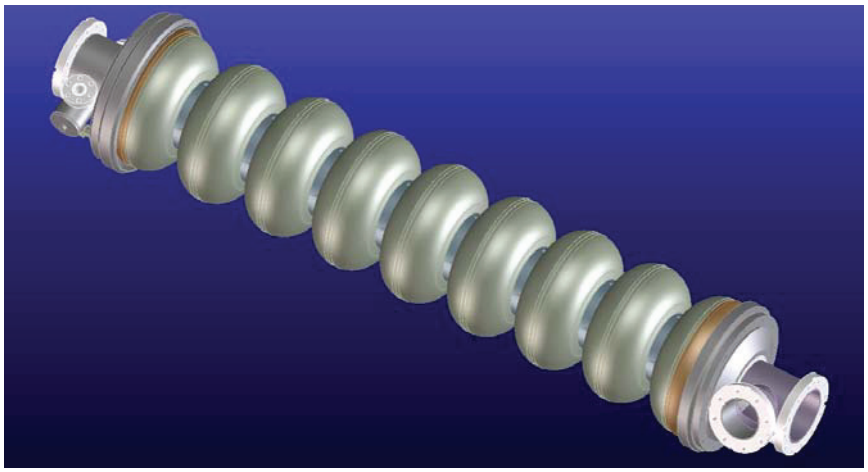


Fig.14 9cell 超伝導加速空洞 完成予定図

4 まとめ

現在、最終組立て工程に入りエンドグループを組立中である。エンドグループは、部品点数が多く、溶接形状も複雑で、それぞれの溶接の最適条件探索に多くの時間をかけ最適化を図り、各パーツの溶接をほぼ完了することができた。組立治具を整備し慎重に組立を進めている。その後センターセルと組み合わせ、今年度中にKEK#1号機(Fig.14)を完成させる予定である。

5 参考文献

1) 安島泰雄 他 「超伝導空洞製造技術開発のための電子ビーム基礎試験（Ⅱ） 平成23年6月2日、3日 第12回高エネ研メカ・ワークショップ、第2回先端加速器・機械工学・超伝導低温技術研究会 於 KEK

2) 上野健治 他「空洞製造技術開発施設（パイロットプラント）について（Ⅱ）」 平成23年6月2日、3日 第12回高エネ研メカ・ワークショップ、第2回先端加速器・機械工学・超伝導低温技術研究会 於 KEK

Super KEKB 用 超伝導電磁石の実機部品製作

○東憲男 A)，大内徳人 B)，有本靖 B)

A) 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設　機械工学センター

B) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

現在，KEK では KEKB 加速器のアップグレード計画 Super KEKB に向けて，ビーム衝突点直近で使用される超伝導電磁石の設計が完了し製作が進められている．この超伝導電磁石システムは，8 台の主 4 極電磁石で構成する．それらの超伝導電磁石実機の主要構造部品となる GFRP（以下，G10 と称す）材のエンドスペーサと呼ばれる絶縁スペーサ部品を同時 5 軸制御マシニングセンタで製作した．本報告は，実機用エンドスペーサの部品製作（R 側の 4 台分）について行う．

1　超伝導 4 極電磁石

超伝導 4 極電磁石は，Super KEKB 衝突点の左右に設置されたクライオスタットに各々4 台ずつが組込まれる．各磁石の捲き線に使用する超伝導線材（NbTi 線）は，キーストン角のある矩形のケーブル（裸線寸法：0.97mm x 2.5mm 図 1 中の右下）とした．超伝導コイルは 2 層構造で設計されており，ダブルパンケーキ捲き線を採用した．QC1RP のコイル捲き線図を図 1 に示す.

コイル捲き線で超伝導線材以外の主要構造部品となる G10 のエンドスペーサは，コイルエンド部での超伝導線材の位置決め及び固定を行うために, 磁場計算で求められる設計値に対して ±0.025mm の寸法公差内で各エンドスペーサ部品を加工する必要がある。直線部は, ウエッジと呼ばれる絶縁スペーサ部品で構成する.

コイル捲き線成型したコイルは，対地絶縁材（ポリミドフィルム）でコイル全面に亘って覆われる。各絶縁処理した 4 極のコイルを組合せて 1 台の磁石とし，各極のコイルが設計した形状に位置決めするように，カラー材（非磁性構造材）で固定される。4 極のコイル間の超伝導線材の端部処理（半田付け）で完成する.

2　エンドスペーサの製作手順

エンドスペーサの製作手順の概略を記す．2D-CAD で作成したコイル捲き線図（図 1）を元に 3D-CAD でモデリングを行う．3D モデルのデータを中間ファイルの STEP ファイルデータに変換し，3D-CAD/CAM ソフト CATIA V5（R21：以下，CATIA と称す）に読込む．3D モデル形状に沿って，エンドミルの工具軌跡（CL データ）を作成する．3D モデル形状から設計値に対する許容量（±0.025mm）を確認する．APT データ（図 2 に示す）をポストプロセッサ（IMS 製）に通して，NC データに変換する．同時 5 軸制御マシニングセンタ（以下，5

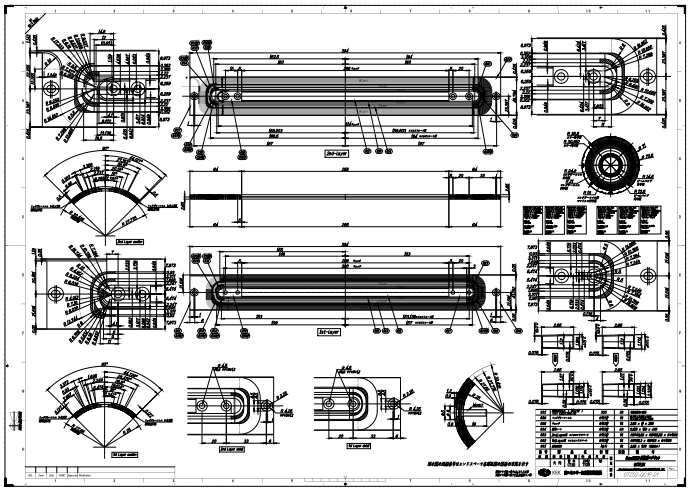


図 1.　QC1RP 超伝導 4 極電磁石 コイル捲き線図

軸 MC と称す）にセットしたアルミ製マンドレル固定治具（MST 製 HSK-A タイプのインターフェイスを採用した．以下，マンドレルと称す）に，予め内外径仕上げ加工したパイプ形状の G10 素材を取付けて，超硬スクエアエンドミル（以下，エンドミルと称す）の工具を用いて G10 パイプ素材（以下，素材と称す）から削り出す．高精度な 3D 計測タッチプローブ（RMP600：以下，プローブと称す）を用いて機上測定を行う．

1 台の磁石でコイルのリード部とリターン部及び 2 層からなる構造で，各エンドスペーサ形状が異なっている．各種のエンドスペーサ形状に対応する為に，10 種類のマンドレルを用意した．エンドスペーサの加工精度は±0.025mm を目標とした．5 軸 MC の加工例を図 3 に示す．

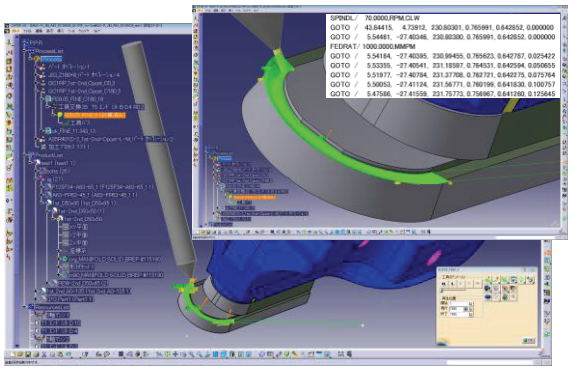


図 2.　スプライス部形状加工用 CL データの作成例（ 同時 5 軸の APT データ：右上 ）

3　CL データおよび NC データの作成

3D-CAD（OSD Modeling2007）でモデリングした QC1RP 用エンドスペーサ形状の一例を図 4 に示す．

CATIA に読み込んだ 3D モデルのエンドスペーサ形状の側面（超伝導線材が接する側面：図 4）に加工工具となるエンドミル側面が沿うように，ほとんどの形状はφ4mm のエンドミル側面で削り出す加工方法を採用した．

素材からエンドスペーサの形状を削り出した部品が加工基準となるマンドレルから離れないように，パイプ肉厚（以下，肉厚と称す）2.65mm の内，0.15mm を残した仕上げ加工の APT データを作成した。加工する曲面形状の加工方法としては，主に多軸曲線加工と多軸側面輪郭加工を用いた．同時 4 軸加工（1 軸固定：A-90°）の一例を図 5 に示す．図 6 に，APT データと NC データ（IMS ポスト変換後）の作成例を示す．

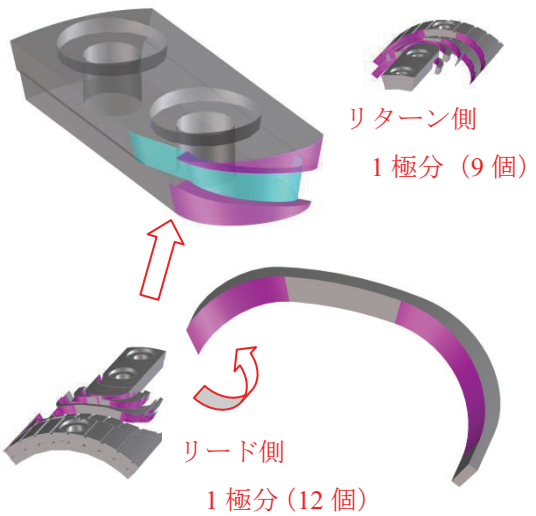


図 4.　3D-CAD でモデリングした
エンドスペーサの一例（QC1RP の 1 極分）

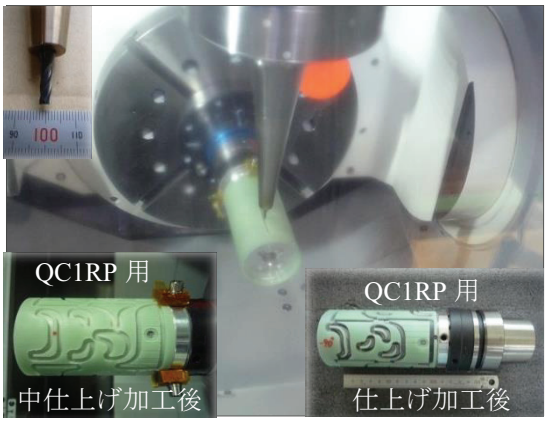


図 3.　5 軸 MC の加工例（同時 4 軸加工）

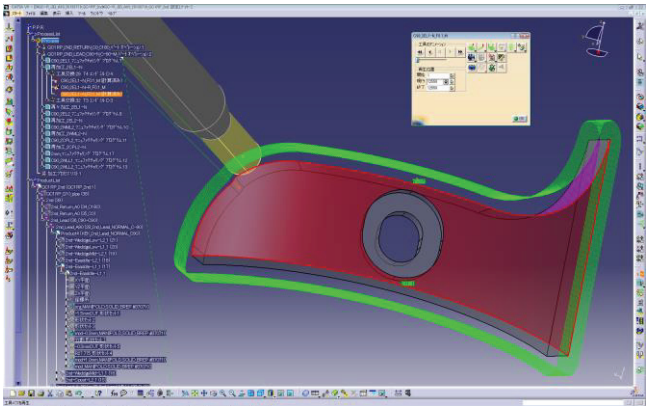


図 5.　同時 4 軸加工の一例（多軸曲線加工）

図 6.　IMS ポスト変換の一例

```
G90 G0 X-43.636 Y41.859 Z151.8 A-90. C44.058
G41.4 G1 X-22.774 Y20.3 D4 F300.
X-22.63 Y20.439 Z151.8
X-22.63 Y20.439 Z152.
X-22.63 Y20.439 Z174. F1000.
X-22.629 Y20.44 Z174.079
X-22.627 Y20.442 Z174.141
```

NC データ ← APT

```
GOTO / 22.73826, 20.33451, 216.51000, 0.695391, 0.718632, 0.000000
INSERT G41.4 D4
GOTO / 22.59453, 20.47359, 216.51000, 0.695391, 0.718632, 0.000000
GOTO / 22.59453, 20.47359, 216.71000, 0.695391, 0.718632, 0.000000
FEDRAT/ 1000.0000,MMPM
GOTO / 22.59453, 20.47359, 230.00000, 0.695391, 0.718632, 0.000000
GOTO / 22.59400, 20.47410, 231.03838, 0.695391, 0.718632, 0.000000
```

4　PC 上での NC シミュレーション

NC シミュレーションソフトは，NCSIMUL を用いた．本ソフトは，「CATIA V5 → NCSIMUL 統合データインターフェース」に因って，CATIA で設定した 3D モデル（製品及び素材・治具）や工具情報を NCSIMUL に各種の CAM データとして取り込む．NCSIMUL のシミュレーションの一例を図 7 に示す．

NC データのプログラムを選択する事で, 目的のシミュレーションを実行して製品や治具に工具干渉の有無および仕上げ面の解析（設計値との差）を確認できる．工具と治具の衝突した場合には，シミュレーション中に衝突対象となる 3D モデル形状が赤く表示される．また，情報ウインドウに警告としてコメントの一例「・・・以下の干渉 工具サブホルダーおよびクランプ・・・」を選択すると，警告箇所を赤丸枠でハイライト表示される．図 8 には，エンドミルとマンドレルの衝突した場合のシミュレーションの一例を示す．

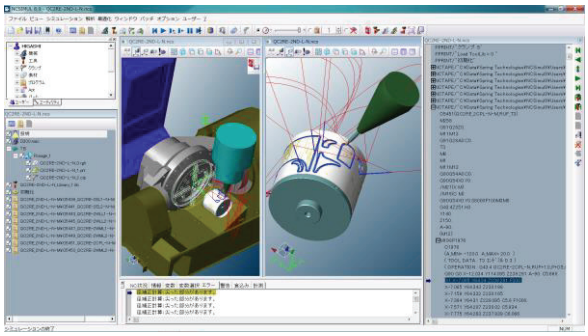


図 7.　NCSIMUL のシミュレーション例
（QC2RE の 2 層目コイル用エンドスペーサ）

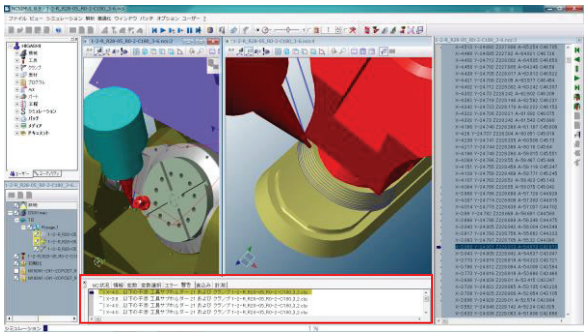


図 8.　NCSIMUL のシミュレーション中の衝突例
（QC1RP の 1-2 層ポスト R 用エンドスペーサ）

5　工作機械上でのドライラン

一般的には製作時間の短縮を図る為に NC シミュレーションを実施し，工作機械上でのドライランを省略する. しかしながら今回は新規の機械で使い慣れていない事も有り, 工作機械上でのドライランを実施した。

本機は，平成 25 年 3 月末に新規導入した 5 軸 MC（牧野フライス製 ：D300）を使い，平成 25 年 9 月下旬（当初の予定）までに製品を納める時間的な制約があった．

NC シミュレーション上での干渉箇所とプログラムの動作確認後に工作機械上で NC データの修正した場合には，本来は PC 上での NC シミュレーションに遡って動作確認を行う必要があった．しかし，単純なプログラム修正で有った為に，ドライランの操作を行った．結果，主軸と治具との衝突を起こした．原因は単純なプログラムミスで有るが, NC 操作盤のシングルブロック釦を押し忘れていた事と送り速度を小さく設定していなかった事が重なり，主軸の衝突に至った．主軸衝突後の工具ホルダとマンドレルを図 8 に示し，工具ホルダとマンドレルのヘリサート（M12）部分との融着部（赤丸枠）を示す。

主軸の衝突後に，主軸の傾きや高速回転時の振動等の確認を行った。幸いにも，納品時の主軸テーパ穴の振れ等の検査値と主軸衝突後の検査値では大きな違いは見られず，許容値の範囲内であった．また，テスト加工の寸法測定結果からも問題無いと判断し，このままの状態でエンドスペーサの加工を進めた。

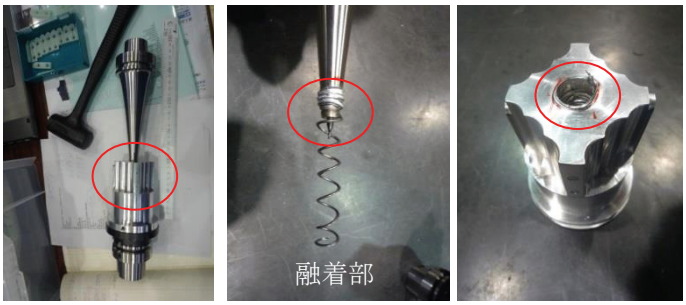


図 8.　主軸衝突後の工具ホルダとマンドレル

6　エンドスペーサの加工

エンドスペーサの主な加工は，荒加工・中仕上げ加工および仕上げ加工を 2 本のエンドミルで行った．荒加工・中仕上げ加工では，φ3mm のエンドミル（XAL-EM4S3）を用いて仕上げ加工では，φ4mm のエンドミル（XAL-PEM4R4-4）を用いた．荒加工後の削り代は 1mm とし，中仕上げ加工後の削り代は 0.25mm とした．荒加工・中仕上げ加工の軸方向切込み量は，2.15mm とし，肉厚の残り量を 0.5mm とした．

肉厚の残り量を 0.5mm とした場合と 0.15mm とした場合と比較しても，機上計測結果に顕著な差が見られなかった．この結果，肉厚の残り量が 0.15mm とした場合，製品としての寸法形状を保持している事が確認できた．また，製品の切り落とし加工やバリ取り加工の作業性を考慮して，肉厚の残り量を 0.15mm とした．

これらの検討を踏まえて，仕上げ加工では 1 回の切込み量を基材のガラスクロスの厚さ 0.2mm よりも小さい 0.125mm にした事で，製品の鋭角な形状部分の欠損を低減できたと思われる． 素材の肉厚 2.65mm に対して，1 回の軸方向切込み量 0.125mm を 20 回繰り返し（等高線）加工し，素材の肉厚の残り量が 0.15mm になるように加工を行った．エンドスペーサ加工の主な各切削条件を図 9 に示す．

荒加工・中仕上げ加工

主軸回転数	8000 rpm
軸方向(Ad)切り込み量	2.15 mm（1 回）
径方向(Rd)切り込み量	3 mm・0.75 mm
送り速度	200 mm/min・500 mm/min

仕上げ加工

主軸回転数	8000 rpm
軸方向(Ad)切り込み量	0.125 mm（20 回）
径方向(Rd)切り込み量	0.25 mm
送り速度	1,000 mm/min

G10 パイプの肉厚	2.65 mm
切削液	水溶性切削液（AP-EX-E3）
希釈倍率	～6 倍 ＋ 消泡剤添加
工具	超硬スクエアエンドミル

図 9.　エンドスペーサ加工の各切削条件

7　機上計測プログラムの作成と機上計測

機上計測プログラムの作成ソフトは，レニショーの Productivity+（以下，P+ と称す）を導入した．P+は，CATIA からインポートした 3D-CAD モデル上に直接計測箇所を選択し，各計測サイクルを作成する．予め測定する座標が判っている場合は，直接 G コードを入力が可能である．作成した各計測サイクルを P+上での動作シミュレーションで確認後に，NC プログラムとして出力して完成する．

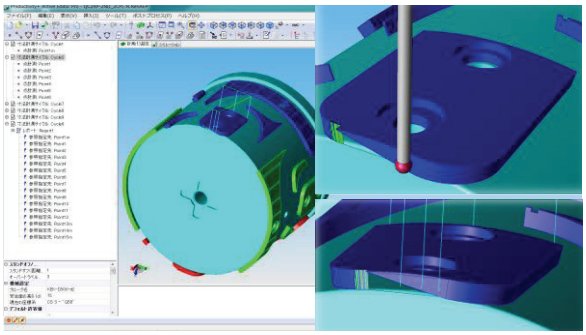


図 10.　機上計測シミュレーションの一例
（QC2RE 用エンドスペーサの測定箇所の選択）

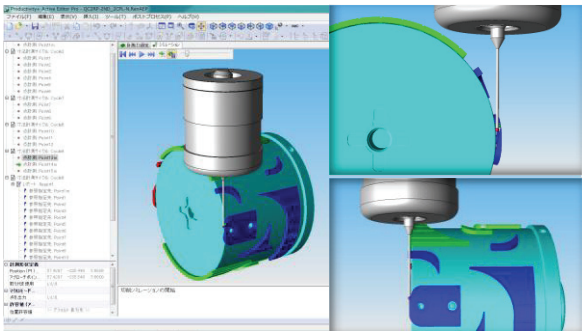


図 11.　機上計測シミュレーションの一例
（タッチプローブ本体と素材との干渉確認）

形状測定は，エンドスペーサの加工直後に機上計測プログラムを呼出し実行して行う．測定結果を外部記憶装置（CF メモリカード）に出力して確認する．機上計測シミュレーションの一例を図 10・図 11 に示す．機上計測シミュレーションのプログラム例を図 12 に示す．

工作機械メーカでは，高精度加工を行う場合には暖気運転を推奨している．今回は可能な限り空時間を空けないで，製品の加工直後に寸法形状の機上計測を行った．結果，加工直後の状態から機上計測が完了するまでの時間変化に伴う工作機械の姿勢変化による計測誤差を少なく出来たと思われる．また，5 軸 MC を設置した加工室内の空調設備の温度設定は 20℃±1℃（約半年の期間）として．加工室内の温度変化を極力少なくして加工および機上計測を行った。

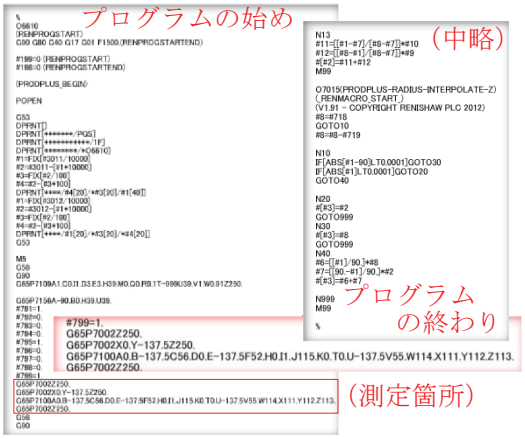


図 12.　機上計測のプログラムの一例

8　エンドスペーサの寸法追込み加工

機上計測の結果，製品の寸法公差 ±0.025mm を超えていた場合には，NC 操作盤の工具オフセット値を補正する．具体的には，G41.4 D4（3 次元工具径補正左，工具番号 4 のオフセット）に対応する T4 のオフセット値を 0mm から -0.005mm に変更すると，部品形状の寸法 0.005mm（実際の機上計測結果は，～0.005mm）だけ小さく加工される．材質がガラスクロスとエポキシ樹脂の複合材で構成される素材をエンドミル加工した仕上げ面は，Ra ～ 10 μ m 前後の表面粗さ（算術平均粗さ：Ra）となった．

エンドミルの工具交換時期は，T4 のオフセット値が 0.015mm 以上となった場合とした。図 13 には，寸法追込み加工後の機上計測の一例で，素材の破片にプローブが接触して計測が自動ストップした状態を示す．

図 13.　寸法追込み加工後の機上計測の一例

9　エンドスペーサの再機上計測と製品の切落し加工

エンドスペーサの寸法追込み加工直後に再機上計測を行い，測定値を確認後に製品の切落し加工を行った．切落し加工は，仕上げ加工でも使用した同じφ4mm のエンドミルを用いた．切落とし加工のプログラムは，製品の仕上げ加工した面を傷つけないようにエンドミルの中心を+0.05mm オフセットした位置として，逃がした位置で切落し加工を行った．

また，切落し部分の切込み深さは 0.15mm として，製品が素材から完全に切落ちないように一部分（例，2.216mm）だけは残るように加工した．切落し加工の例を図 14 に示す．一部の製品では，素材から完全に切離され，落下した事例が数回は起きた．幸いにも，落下した製品には，形状の破損は見られなかった．

再機上計測の一例（寸法追込み加工前後の測定値，例 T4 のオフセット量：0.005 mm）を図 15 に示す．

プローブを使った 5 軸 MC の機上計測では、全ての製品について ±0.025mm 以内の測定結果となった。

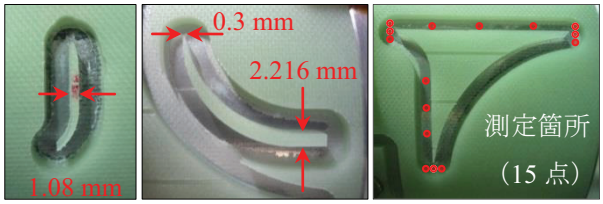


図 14.　切落し加工と測定箇所の例（QC2RP 用）

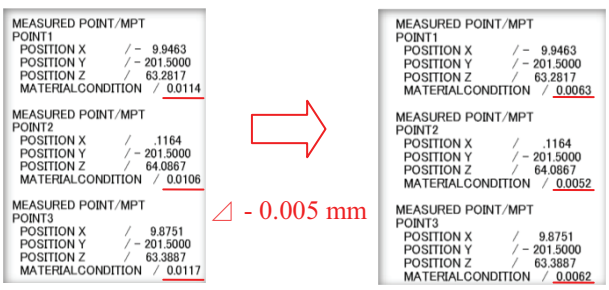


図 15.　再機上計測の測定値の一例（追込み前後）

10 まとめ

超伝導電磁石の主要な構造部品である実機用 QC1RP（84 個）・QC1RE（88 個）・QC2RP（72 個）・QC2RE（100 個）のエンドスペーサを製作した．機上計測の結果，全ての製品について寸法公差 ±0.025mm 以内である事を確認した．製作した実機用エンドスペーサ（R 側の 4 台分）を図 16 に示す．

今回使用した素材の内外径仕上げ加工は，素材とマンドレルとの取付け精度の隙間が約 30 μm になる為に、素材の外表面の振れ量が約 50 μm となった．素材の外表面の振れ量に対しても高精度な仕様に応えられるように，5 軸 MC 上で素材の内外径仕上げ加工を含めて検討している．

今後，G10 パイプ素材の複合材特性を考慮した製品の加工精度向上を目指したいと考えている．

図 16. 製作した実機用エンドスペーサ（R 側の 4 台分）

11 参考文献

1. 大内徳人，他「Super KEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの開発」- ビーム最終収束用超伝導 4 極電磁石 - 平成 25 年 5 月 15 日，2013 年度 春季低温工学・超電導学会，於 タワーホール船堀
2. 東憲男，他「Super KEKB 用 超伝導電磁石の部品製作 -(2)-」平成 25 年 4 月 6 日，第 14 回 高エネ研メカ・ワークショップ，於 高エネルギー加速器研究機構
3. 有本靖，他「Super KEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの開発」-QC1 プロトタイプの開発と低温試験結果- 平成 24 年 11 月 8 日， 2012 年度 春季低温工学・超電導学会，於 大阪大学
4. 東憲男，他「Super KEKB 用 超伝導電磁石の部品製作」平成 25 年 3 月 18 日，平成 24 年度 愛媛大学総合技術研究会，於 愛媛大学
5. 東憲男，他「Super KEKB 用 超伝導磁石のエンドスペーサの製作について」平成 24 年 4 月 6 日，第 13 回 高エネ研メカ・ワークショップ，於 高エネルギー加速器研究機構
6. 東憲男，他「Super KEKB 用 超伝導磁石の捲き線治具の製作」平成 23 年 3 月 18 日，平成 22 年度 熊本大学総合技術研究会，於 熊本大学
7. 東憲男，他「Super KEKB 用 R&D 超伝導磁石の開発」平成 18 年 3 月 2 日，第 12 回 分子科学研究所技術研究会，於 分子科学研究所

三次元測定機によるレーザプローブの活用

○加賀　亨 A)，箱崎　義英 B)

A) 岩手大学 工学系第三技術室

B) 岩手大学 工学系第一技術室

1　はじめに

近年，岩手大学高度試作加工センターではものづくり教育の環境設備を整えるため最新の工作機械が導入されている．これらの機械は熱変位制御など連続運転に対する様々な対策がなされており長時間運転を要求される曲面形状などが比較的容易に加工できるものとなっている．曲面加工の高精度化を図るには加工後の測定が重要であり，測定結果を加工側へ反映することが加工精度の向上となる．当加工センターでは，その測定機器として 3 次元測定機が導入された. 本稿では, この 3 次元測定機を用いた面測定について紹介する．

2　三次元測定機について

三次元測定機は，XYZ の互いに直交する可動軸とスケールによって構成され，測定物に測定子（タッチセンサー）が一定の接触圧で接することにより空間上の 3 次元座標値を求めることができる．今回使用する三次元測定機は Mitutoyo，CRYSTA-Apex S776 である．測定プローブは接触式タッチプローブと非接触式レーザプローブを備えており，チェンジャーを介して自動交換できるものとなっている．測定によって得られた点群データは評価プログラムによってマスタモデルとの比較照合や寸法測定が容易に行える．

3　測定モデル

測定に使用するモデルを図 1 に示す．測定モデルの上部球面は SR=4[mm]である．球面形状は，ラジアスエンドミルを用いてマシニングセンタにより切削加工を行った. 工具パスは図 2 に示すような切削方向とし，工具軸方向（Z 軸）に切り込んで加工を行った．切込みピッチは 0.03[mm]とした．

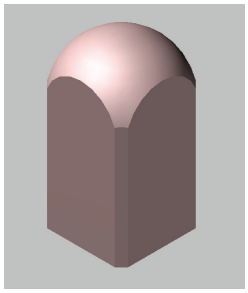


図 1　測定モデル

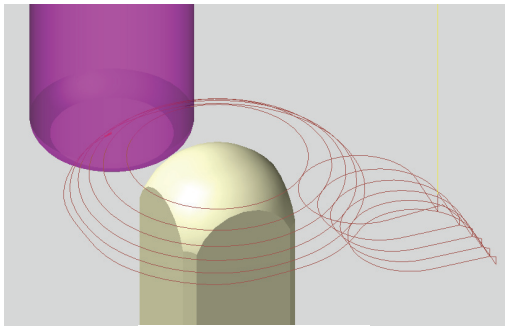


図 2　工具パス

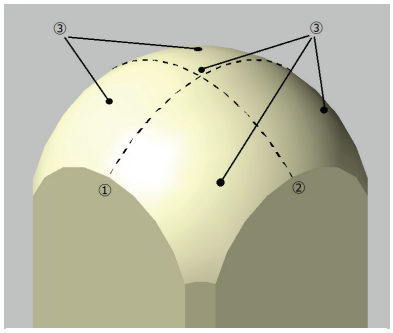


図 3　プローブによる測定点

4　形状測定

4.1 タッチプローブによる接触式測定

接触式は球状の接触子（プローブ）と測定対象物を接触させる方式であり，プローブ中心の 3 次元測定座標が測定される．したがって，プローブ半径の補正を行う必要がある．本システムには線，円，球などの測

定プログラムがあり，測定点より円の中心座標や直径などの要素が容易に求まる．また，径補正は自動で行われる．今回の測定は直径 4[mm]のタッチプローブを用いて行った．図 3 に測定点を示す．①および②は球面のセンターを連続的に測定し，円測定プログラムによって半径を求めた．それぞれの値は 3.96，3.93[mm]であった．また，図 3 - ③の 5 点をもとに球面測定プログラムにより球半径を求めた結果 SR=3.94 であった．

4.2 レーザスキャニング

非接触式はラインレーザプローブを用いて行う．任意形状をラインレーザでスキャニングし，高速度にデータの収集が行えるものである．高い分解能により測定物を高能率に測定できるシステムである．測定面に光沢がある場合，レーザ光の反射が強くなり測定抜けやノイズとなることがある．この場合はつや消し塗料などで表面処理を行う必要がある．当測定物も白色のパウダースプレーを塗布したのち測定を行った．レーザスキャニングによって得られた測定結果を設計値 CAD モデルと照合させ誤差量をカラー表示したものが図 4 である．スキャンピッチ（ストライプ）は 0.05[mm]で行った．誤差量は 0.01[mm]以上が赤色,-0.01[mm]以下が青で表示されている．

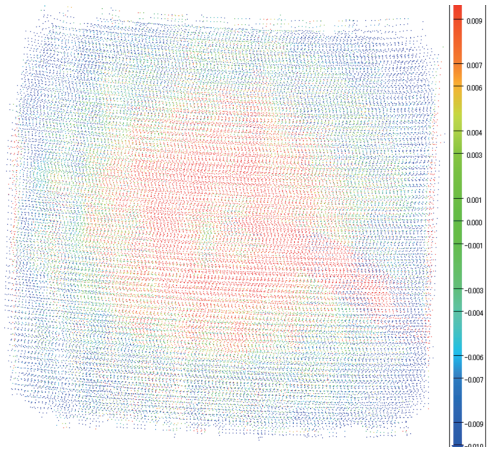


図 4　設計値との比較結果

5　考察

プローブによる接触式測定では，球の半径は設計値よりも小さい値として求まった．その原因として，図 5 に示すように理想面に対して接触点での誤差量が 0.01[mm] とした場合，それらの接触点を用いて球の半径を計算するため 3.93[mm]と求まる．また，数点で半径を求めるため測定するたびに結果にばらつきが見られる．

非接触式のレーザプローブを用いた測定では図 4 に示すように中心付近（頭頂部）は赤色が多く点在し設計値よりも頭頂部が高く，外側は青色であることから低くなっていることがわかる．この結果から接触式測定において頭頂部付近の測定点を用いて要素測定を行うと半径は小さい値として求まる．また，加工面において誤差のばらつきがあることから，測定の再現性が無いこともわかる．

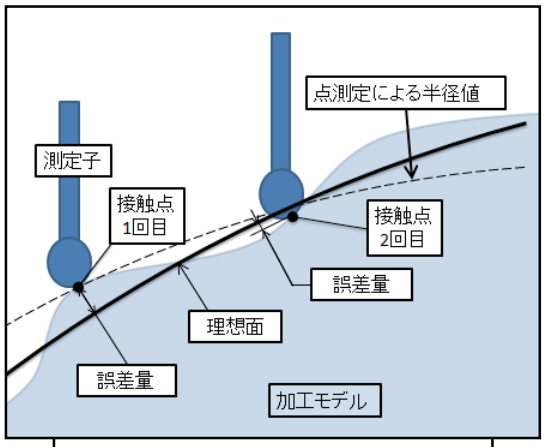


図 5　プローブによる要素測定

6　まとめ

今回，切削加工にて作製したモデルを 3 次元測定機による接触式と非接触式の方法で測定した．接触式測定では球面上の数点を用いて測定すると再現性の無い結果となった．非接触式測定では面全体を測定し設計値と比較した結果，面全体に誤差が生じていることが分かった．接触式測定での要素計算による評価では，数点の接触点で計算を行っているため面としての評価をしているわけではない。これに対して，レーザスキャニングによる測定では、面全体を細かいピッチで測定し設計モデルと比較することから面全体の評価を行っていることがいえる。このことにより，曲面状に加工したものを評価する場合にはラインレーザを用いて面全体の測定を行い，設計値と比較・評価することが有効である．

汎用油圧サーボ疲労試験機を活用した鋼管の疲労強度評価試験装置の試作

村上幸治

九州大学 大学院工学研究院

1　背景と目的

天然ガスや原油等を，生産地から消費地まで直接かつ恒久的に輸送できるパイプラインは，長距離輸送方式として設置が増大しているが，建設及び維持管理コストの削減や稼働率向上の観点から鋼管の厚肉化や高強度化が進んでいる [1]．一般的にパイプラインは受給量の変動に伴い内圧や流量が変動することに起因した円周方向成分の繰返し応力が作用する．鋼管製造時に生じるシーム溶接部に関しては，API(米国石油協会)[2] や ISO(世界標準化機構) [3]などに強度評価基準があるため，鋼管製造会社メーカーは専用の高価な内圧変動疲労試験装置 [4]を用いて独自の評価を実施することが必要となる．

本報告は，汎用的な油圧サーボを用いて安価かつ簡便な内圧力変動を載荷することで，管円周方向に意図する応力変動を付与できる疲労試験装置の試作を行った．

2　検討事項

疲労試験中の試験体破壊時の安全対策に不備が残る可能性を完全に排除できなかったこと，装置の試設計・試運転を繰り返す必要性があること，かつ，鋼管内部で生じている圧力変動付与の状態を目視しながら装置改良を行うことが望ましい，等の観点から，初期検討用供試体としてはアクリル樹脂製を用いたフランジ付き試験体を作成した．使用する油圧サーボ機器の最大負荷能力および最大パイプ長を考慮した範囲内で実施する必要があるが，管径および肉厚は評価対象のパイプラインで使用されている寸法とし，閉フランジで密閉した管内部を満たした流体に繰返しの圧力変動を与えることで，管円周方向に応力変動を付与する機構を採用した．

3　機構の試設計

Fig.1 に内圧負荷機構の概略を示す．管内部の流体に圧力変動を与える手法自体は既報の内圧変動疲労試験機構 [5] と同様である．流体には取り扱い及び漏洩時の処理が容易な水道水を採用した．

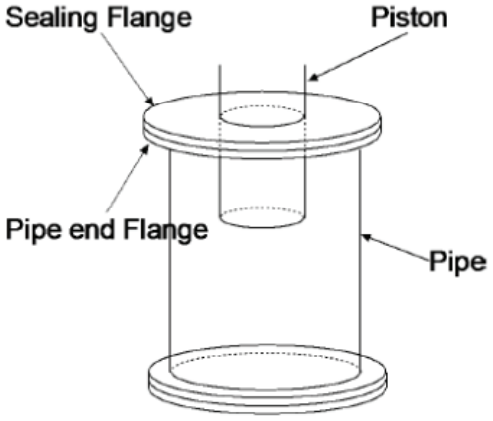


Fig.1 Schematic illustration of loading mechanism

今回用いた試験体はアクリル樹脂製ではあるが，周辺機器は鋼管を対象とした試験に転用可能にするため，

検討対象の管径と肉厚は Table 1 に示す寸法とし，管の長さは設置環境を考慮した結果，500[mm]とした．なお，長さの妥当性に関しては，FE 解析を実施しパイプ中心部に管円周方向応力が安定して作用することを事前に確認している．

Table 1 Test pipe Dimension

	Outer diameter[mm]	Thickness[mm]
Model_1	273	15.9
Model_2	323	17.5

本試験で安全性検討を行いたい応力変動条件として，稼働状況等の観点から管円周方向作用応力の最大値（σ_{max}）325[MPa]，最小値（σ_{min}）25[MPa]を設定し，これを実現できるために付与すべき内圧変動条件を Table 2 のように決定した．

Table 2 Applied pressure conditions

	Pmax[MPa]	Pmin[MPa]	Δ P[MPa]
Model_1	37.86	2.91	34.95
Model_2	35.22	2.71	32.51

Table 2 に示す内圧変動を負荷するためのピストン外径は，使用する油圧サーボの負荷能力やストローク限度の都合上，70[mm]とし，内圧変動に見合う体積変化はストローク長を 196.6[mm]とすることで実現可能である．

Fig.2 にアクリル樹脂により製作した評価試験管と冶具の組立図を示し，Fig.3 に設置写真を示す．

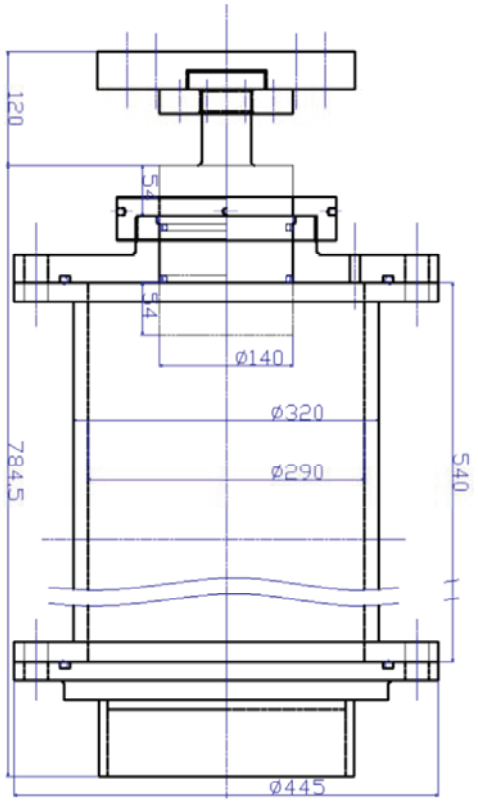


Fig.2 Assembly drawing at acrylic pipe

Fig.3 Testing image photograph

4　動作確認およびまとめ

鋼管の疲労強度評価試験装置の試作を行い，閉フランジ付アクリル樹脂製パイプに管円周方向の変動応力を作用させ，機構の動作確認を行った際，鋼管への適応に関する考察として，以下の知見を得た．

1. 評価試験管に水道水を充填したところ，静水圧状態での水漏れは確認できなかったが，注水時に流体内部に微小な気泡が発生したため，一昼夜保持した後，パイプ内のエア抜きを実施する必要性が生じた．
2. 使用した水道水やアクリル樹脂は無色透明で，目視による境界が不明瞭となるために，水道水に薄い朱色を添加することで視認を容易とする工夫を行った．
3. 評価試験管はパイプ下面で自立する設計のため，上下部フランジ面の水平精度が重要であるが，加工の難易度を考慮すれば，鋼管を使用する際は試験体の支持方法について再考する必要があると考えられる．
4. 機構の細部に渡る動作確認の際，パイプ内に流体の注入および加圧状態の中でエア抜きを都度，行う必要が生じたが，アクリルフランジ部の破損を招いたため，エア抜きを考慮した機構を考慮する必要があると考えられる．

参考文献

１）例えば，（社）溶接学会，溶接学会誌，Vol.80 No.3（2011）

２）Americam Petroleum Institute SPEC 5L，Specification for Line Pipe（2007）

３）International Organization for Standardization 3183，Steel pipe for pipeline transportation systems（2013）

４）例えば，http://www.an.shimadzu.co.jp/test/special/sp03.htm，(accessed on 13. Jan. 2014.)

５）例えば，山口善弘ら，材料，第 23 巻 第 252 号（1974）

「大学の技術とは何か」を考えつつ

名古屋大学理学部物理金工室の４０年を振り返る

○河合利秀

名古屋大学　全学技術センター　教育・研究技術支援室　装置開発技術系

概要

名古屋大学理学部物理金工室の技術職員となって 40 年，金属工作を中心に物理系の様々な実験装置を手がけながら「オープンショップ制」を推進してきました．

機械工作技術を中心にしながら装置開発の要素技術である真空・低温，溶接，メカトロニクス技術を取り入れると同時に，機械設計の基礎を勉強し，3D-CAD の導入・普及を図り，素粒子宇宙物理学の国際的な研究プロジェクトで大きな役割を果たすこともできました．

こうしたことを紹介しながら「大学の技術とは何か」を改めて考えたいと思います．

なお文中，これまで関わってきた方々の個人名を多数記載しています．本来ならば氏名を正確に記さなければならないのですが，本稿では親しみを込めて，____さんと記すことをお許しください．

1　どのような仕事をしてきたか

(1)　物理金工室のスタイル（仕事に対する考え方）を変える

採用されたころ，物理金工室のスタイルは「研究者が持ってきた図面通り作る」でした．当時ボスであった佐野正市さん（故人）は，理学部金工室が高橋重敏さんを中心とした「実験装置を考えながら作る」であったのに対し，どんな厳しい精度が記載されていても「図面通りに作る」ということを自慢にしていました．これは佐野さんが当時珍国立大学技術職員では珍しかった旋盤一級技能士であったことや，高橋さんに対するライバル心もあったと思います．

40 年前の物理金工室は，一般用の工作機械を限定（ワシノ旋盤，新潟フライス，新潟６尺旋盤）し，佐野さん専用の旋盤（池貝：D20）や高精度な工作機械，高級な測定工具は一般には使わせないという考え方でした．これは日本の大学工作室の一般的なスタイルです．このスタイルは技術職員のテリトリーを確保してそこから他者を排除することで存在感をアピールできる反面，若手研究者にとっては仕事を頼みづらくなるなど，敷居の高いものでした．

私はこうした弊害を感じ，敷居を下げるための努力・・・金工室を「閉鎖された空間」から「解放された空間」に作り変える努力を続け，同僚たちの協力を取り付けて，機械工作実習の受け入れ人数拡大とオープンショップ制（実習修了者は金工室の工作機械を全て自由に使える）を成功させ，同時に研究室からの依頼業務に対してはその研究プロジェクトに参加して，プロジェクトの一員として技術業務を分担し，遂行するという仕事のスタイルをとってきました．

私は，金工室の維持や運営にも積極的に関与し，金工室の従来の業務に加えて，プロジェクト参加型の技術業務も多数担当してきました．

仕事のスタイルを変えてきた内容の経緯や詳細は２章で述べます．

(2)　プロジェクト参加型の技術業務

私は主に素粒子宇宙物理学の研究プロジェクトに関わってきました．モットーは『難しい仕事ほどおもしろい』です．

最初は MWPC（X 線検出器）などの部品を「図面通り作る」スタイルでしたが，次第に実験目的と使用環境，取付方，組み立て方，性能試験の方法など，観測装置全体を「考えながら作る」方がおもしろく，教育・研究に役に立つ装置になると考えて，スタイルを変えてきました．

こうしたことを重ねるうちに，WA75/CREN のターゲットムーバーが大きな飛躍となって，その後多くの国際共同研究に技術スタッフとして関わるようになりました．私は英語が苦手で思うように会話ができないのですが，本当に重要なことはきちんと伝わるもので，海外での技術打ち合わせや現地での組み立て作業を体験してきました．図 1 は実際に関わった研究プロジェクトあるいは開発した装置名です．

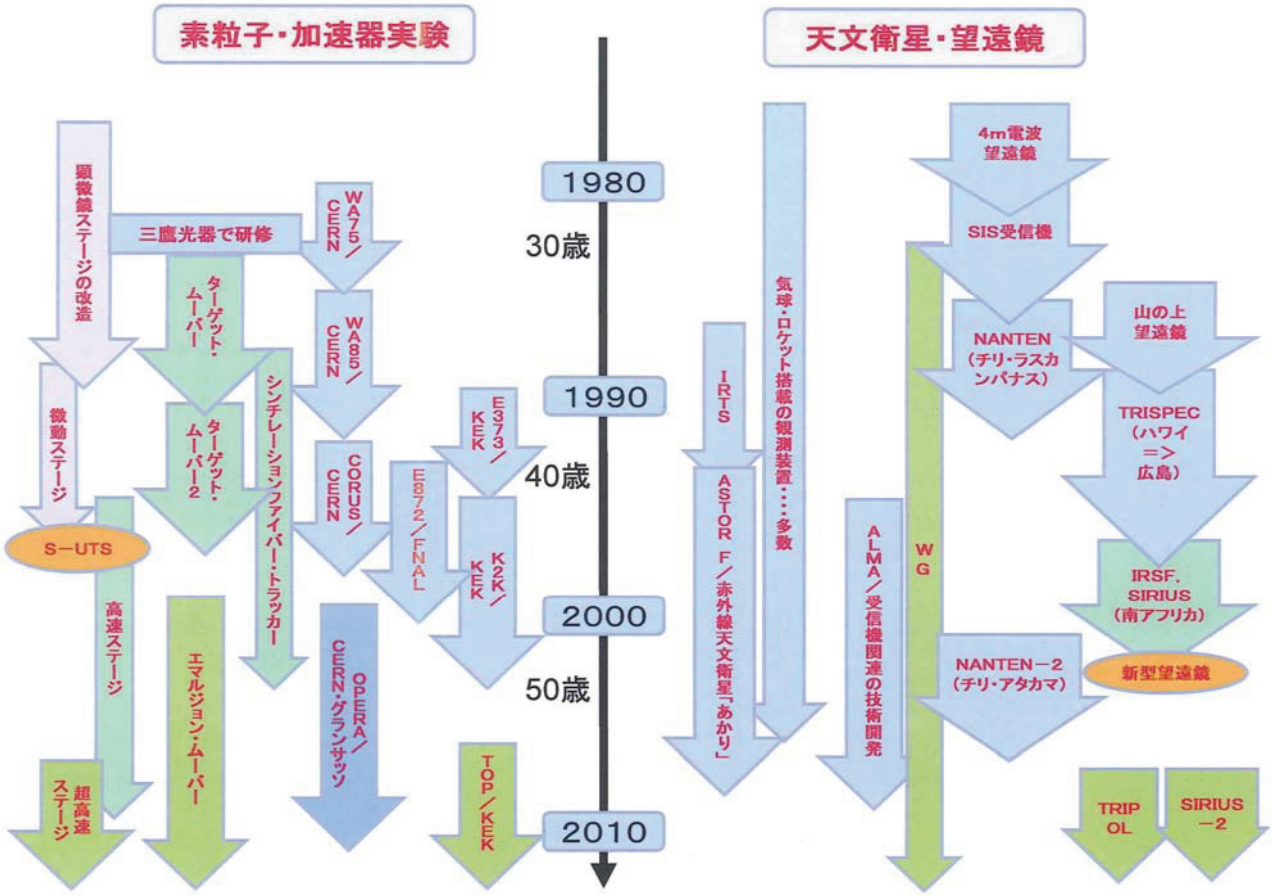


図 1，私が係わったプロジェクト参加型技術業務

2　物理金工室から 40 年・・・「仕事のスタイル」の変遷と新技術の獲得

(1)　佐野さん時代の物理金工室（1970 年代）

私は 1972 年 7 月に物理金工室に技術補佐員として採用され，翌年文部技官になりました．当時は佐野さんが責任者として物理金工室を牽引し，物理工作委員会（教員＋技術職員，世話人は若手教員）が運営を担っていました．B 館一階の東の突き当りの部屋で，6 尺旋盤 2 台，4 尺旋盤 2 台，縦フライス，万能フライス，縦型ボール盤，コンター，足踏み式シャー，高速切断機，治具研磨盤，両頭グラインダー各 1 台，仕上げ室に卓上ボール盤 2 台という装備で，機械室の中央にはまだ蓋を閉めたままの大型鉄製定盤（1000x1500）があり，一度も使われることなく物置になっていました．

測定器はマイクロメータ，ノギス，ダイヤルゲージ，そしてまだ誰も使ってないブロックゲージといっ

たところでしょうか．しかし，ブロックゲージや大型定盤は後の仕事に大いに役に立ちました．

佐野さんの方針は「研究者が書いてきた図面通りに作る」ことです．とにかく「設計図通りに作る」．これが旋盤技能士 1 級を持つ佐野さんの誇りでした．物理金工室より一足先に発足した理学部金工室は当時ダイリューションクライオスタットやロケットによる赤外線天文観測装置を手掛け，華々しく活躍していましたので，佐野さんは大いにライバル心を燃やし，むこうが「開発技術」というならこちらは「加工技術」と張り合っていました．

(2)　駆け出しのころの失敗談

マキノフライスのテーブル中央上にエンドミルの削り痕を残したのは私です．当時何も知らないままアクリル板の成型を頼まれて，覚えたてのフライス盤で削るまでは良かったのですが，エンドミルの固定力が不足して切削応力で徐々にエンドミルが下がり，フライスのテーブルを削ってしまったのです．プラスチックを削っているのに金属のような切りくずが出てきたのですぐに運転を止めると，見事にテーブルを削っていたわけです．そのまま進めていればエンドミルが破損する事故につながったので，早く気が付いてよかったのですが，もともとはツーリング・コレットの締め付力不足が原因であり，私の失敗です．

フライス盤による失敗をもう一つ．

宇宙線ドーム用のプラスチックシンチレータ（500mm 角厚さ 100mm）をフライス盤で整形したのですが，シンチレータをステップクランプでフライス盤のテーブルに固定したまま帰宅し，翌朝フライス盤を見ると，シンチレータが見事にばらばらに割れていました．プラスチックシンチレータはストレスに弱く，前日固定を解いておかなかったのが原因です．まさか固定しておいたものが木端微塵に壊れてしまうなど思いもよらなかったのですが，このことは工作物の固定応力について考えるきっかけを与えてくれました．

(3)　仕事のスタイルを考えさせられた失敗

あるとき，標準ラックの製作を依頼されました．今なら迷わず購入しますが，当時は高価であったことや，重い装置を搭載するためには足回りを補強して重心を下げる必要もあったことなどから，特別に作ってほしいとのことでした．鉄のアングルを切断してフライス加工し，タップ穴を加工してから溶接，塗装したものです．苦労して作ったラックですが，収めた翌朝，ゴミ捨て場に捨ててあることに気が付きました．さすがに大きなショックを受けました．折角苦労して作るのだから，せめて少しは役に立つものを作りたいと思い，なぜ捨てられたかを考えました．

その後，標準ラックを調べるとインチとメートルの 2 種類あり，双方寸法が微妙に違っていて，共通性がないことを知りました．結局のところ，発注者が規格を取り違えた図面を示して私に製作依頼したようなのですが，確信は持てませんでした．

当時，佐野さんの流儀としては依頼者の図面は完全無欠であり疑うことは許されないという立場です．しかし，複数の部品が組み合わさるもので穴の位置が食い違っているなど明らかな間違いに遭遇することもあり，研究者でも間違うことがあるということを佐野さん流としても認めざるを得ません．私も自信を持って図面の間違いを指摘したいので，材料力学を一から勉強し，応力による撓みや破壊強度を計算できるようになりたいと努力するようになりました．

ラック事件以来，依頼者の意図をしっかり把握して，自分に納得してから製作に取り掛かるように心がけました．時には研究室にお邪魔してどんなふうに使うものなのか，どのように使われているのかを確かめ，製作・納品後はそれを使う時に一緒に見るようにしました．こうしたことから，もっとこんな風にしたらいいとか，ここをこうしたらよいという考えが浮かぶようになり，教員・学生の皆さんと議論をして作るようになりました．

要するに，「依頼された通り作る」から「依頼された内容を考えて作る」というように，佐野さんの流儀

に反して変えてきたわけです.

(4)　NC フライス盤の導入

佐野さんはハイカラのセンスも併せ持っており, 常に新しい技術を取り込もうという姿勢は旺盛でした. 1980 年代には新しくフライス盤を購入することとなりましたが, なんとか NC フライス盤を導入したいと考えました. 当時 NC フライス盤はとても高価で物理金工室の一年分の予算では手が届かなかったのですが 2 年分をつぎ込めば何とかなります. そこで, 日立製作所の縦型フライス盤の各軸がサーボモータ駆動であることに目をつけて, これを先に購入し, 次年度に NC 制御装置（SONY マグネスケール製）を特別仕様で付け加えることで, 合わせて NC フライス盤になると考えました. これには佐野さんも大乗り気で, 物理の予算委員会を説得し, 写真 1 のような NC フライス盤導入に成功したわけです.

しかし, このように完成品を購入したのとは違うのでいろいろ問題もありました. 当初 PC98 からデータ転送できるといわれていましたが私の技術不足で十分に行えないことや, 後付けの NC 制御装置であるために細かい調整ができず, 円周加工における加工精度に一部分基準を超えた誤差がでることなどでした. しかし, この NC 制御装置は後に日立製作所が正式採用して NC フライス盤として売りさしたことを考えると, このようなことを考えたユーザーが大勢いたように思います.

この NC フライス盤の試験運転で理学部 G 館の看板を真鍮板から削りだすことになりました. G 館の西側入り口にかかっている真鍮製（黒染め）をよく見てもらうと, エンドミルの底刃の跡が残っているので削り出しであることがわかると思います. 写真 2 がその看板です. 文字は理学部の A～E 館にかかっている看板の文字との統一性を考慮したオリジナルデザインです. 複雑な図形ですが, 直線と円弧をつなぎ合わせて文字を浮き彫りにしたもので, 工具径補正を使った荒加工や仕上げ加工など, 大変良い勉強になりました. これは「理学部で一番立派な看板」として先生方に喜ばれました.

NC フライス盤の導入はクライオスタットの形を円筒形から立方体に変える大きな力となりました. O リング溝はもっぱら旋盤加工でしたが, コーナーR を配した角形など自由な溝形を NC フライス盤で加工し, 真空を実現できれば, クライオスタットの形状は自由自在です. 色々なパターンの O リング溝を NC フライス盤で加工し, 真空試験を行った結果, 断熱真空程度の性能は確保できることを証明できました. これによって, NANTEN（チリ・ラスカンパナス天文台に設置）の SIS 受信機クライオスタットはキューブ型として, 入射窓の光学的な角度や局部発振出力（LO）挿入, IF アンプなどの受信機としての基本機能をコンパクトにまとめる今の形になりました. 私たちが受信機のクライオスタットにこの形を取りこむ前は SUS 製の円筒とフランジを溶接した円筒型がクライオスタットの標準形でしたが, これ以後, アルミブロックから削りだした立方体のクライオスタットが一般的に使われるようになりました.

写真 1, NC フライス盤（日立 2MW）

写真 2, NC 加工の練習になった理学部 G 館の看板

(5)　3D-CAD 導入と展開

1992 年 EWS をベースとした 3D-CAD システムを導入し，大規模な機械設計に対応できる技術的な基礎を固めました. 2001 年には PC ベースの 3D-CAD に変更し, サイトライセンスも獲得して現在に至ります.

当時機械製図を目的とした 2D-CAD が全盛で，三次元イメージで直接設計を進めていく 3D-CAD はほとんど普及していない時期でした．しかし，米国では 3D-CAD による大規模設計が現実のものとなり，CERN や FNAL などの技術組織にも 3D-CAD が利用され始めていました．当時の 3D-CAD の技術レベルは黎明期ともいえるものでしたが，大学の実験装置が大規模化し，複雑化していく中で，装置開発を進めるには 3D-CAD の導入が不可欠だと考えていました．しかし，問題は導入コストです．当時名大総長だった早川先生と学部長の諏訪先生の協力もいただき，EWS ベースの最新式三次元ソリッドモデルとして注目を浴びていた Pro-ENGINIEER を導入することができました.

このシステムは EWS ベースのため，必然的に EWS による分散型ネットワークコンピュータシステムについての勉強も必要となり，物理学科の技術職員であった佐藤利和さんをメンバーに加えて EWS ベース 3D-CAD を技術職員の力で運用していきました．写真 3 は 2004～2007 年に手がけた赤外線天文観測装置 TRISPEC，この装置は私が手がけた装置の中で最も複雑なものの一つです．光学設計を元に，機械設計の詰めを Pro/ENGINEER で行いました．このような技術開発が可能になったのも 3D-CAD 導入の成果です.

EWS ベース 3D-CAD は維持経費が高く，更新費の確保が難しいため，2001 年に 3D-CAD を中心に事業展開している民間企業を調査し，私たちの身の丈にあった設計システムを探しました．その結果，PC ベースの SolidWorks に乗り換えることにしました．SolidWorks を選んだ最大の理由は秀逸な「チュートリアル」があり，基本的な操作方法を自習によって覚えられることです．図形や図学の知識がない学生でもすぐに使えるようになり，にも簡単な操作で三次元イメージの「部品」を記述することができ，製これらの部品を組み合わせて大きな装置を記述できます．三次元イメージから製図に変換することも容易で，複雑な装置を比較的短時間に記述し，設計を詰めていくことができます.

SolidWorks は中堅の三次元ソリッドモデルで，欧米では工業大学の副読本に使用期間限定版が添付されるなどアカデミックライセンスが広く普及していました．しかし日本ではアカデミックライセンスがなかったので，日本 SolidWorks 社と直接交渉し，日本版のアカデミックライセンスを設定してもらいました．現在 SolidWorks は 3D ソリッドモデル普及を牽引し，世界のトップシェアを争っています.

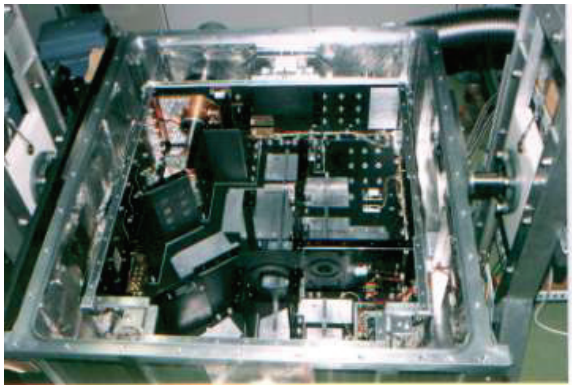


写真 3，Pro/ENGINEER で設計した観測装置

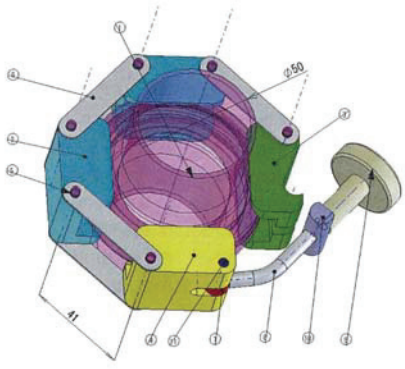


写真 4，3D-CAD を使ったプレゼンテーション

最新版は有限要素法による解析機能も充実し，機械設計ツールとしての機能を向上させています．理学部の教育研究現場では，研究室会議などで実験装置の説明を行うとき，3D-CAD による三次元画像を使ったプレゼンテーションは極めて協力で，参加者の共通理解を深めることに大きく貢献しています．これは使ってみて始めてわかった有効性です．写真 4 は 3D-CAD の三次元画像を使ったプレゼンテーションの例です．アニメーションもできるので，複雑な機構もわかりやすく説明することができます.

現在，ネットワークライセンス：1（クライアント 100 ライセンス），スタンドアロン・ライセンス：20 を所有し，機械工作実習では機械設計の基本ツールとして利用し，大学院教育の装置開発に利用を進めています．機械設計というよりは三次元の「ノート」のようなイメージで使っています．

(6)　Web による機械工作技術の普及と入門書の執筆

2004 年ころから，機械工作実習を補完する目的で「実験装置を作るための工作教室」というホームページを立ち上げ，基礎的な内容と共に，機械工作実習だけでは経験できない様々な工作方法について，その概要と写真による簡素な解説を掲載しました．このホームページはいまだにすべての項目を完成していないのですが，2006 年には「旋盤」「バイト」で検索すると一番上に URL が掲載され，ひと月に 3 万を超えるアクセス数（同一ユーザーからの複数アクセスはカウントしない）を得るようになりました．

特に人気が高いのは「旋盤加工の基礎」「旋盤による加工例」「バイトのいろいろ」「旋盤用バイトの研磨」「測定器の使い方」などで，時には 10 万／月を超えることもありました．

このような状態になって，日刊工業新聞社の編集部から「ものづくり」初心者向けの専門書のシリーズ「目で見てわかる・・・」を執筆しないかとの依頼があり，「測定工具の使い方」を皮切りに，「治具・取付具の使い方」「切削バイトの選び方・使い方」「穴あけ作業」の 4 冊（写真 5）を書き上げました．

幸いなことに，最初に書いた「測定工具の使い方」はシリーズの中でも最も売れ行きがよく，すでに 9 刷となって 1 万部を超える総発行部数となりました．

写真 5，河合利秀の著書 4 冊（Visual Books　シリーズ）

大学の技術職員がこのような初心者向けの基礎的内容の書籍を執筆することはこれまでに例がなかったのではないかと思います．同じシリーズを執筆されている諸先生方はみな工学部の学位を持った方々であり，工学部などで教鞭をとられていることを考えると，物理金工室の日常的な技術が「日本のものづくり」の基礎技術を代表していると評価されたように思います．

Web で公開している我々の技術は古い枯れたものではありますが，モノづくりの基礎として重要な内容を網羅的にもっていると自負してよいのではないかと思います．

(7)　新しい技術の導入

理学部の実験系を対象とした装置開発を進めていくと，機械技術だけでは対処できなことは明白です．真空装置を作るためには TIG 溶接器や真空漏れ試験機が必要となります．実験装置はデータをどのように取り出すかということを考えれば電子回路技術やコンピュータ技術との連動が不可欠です．これらを総合すると，機械加工＋真空技術＋メカトロニクス＋機械設計という 4 つの技術分野における総合的な技術力が必要です．これらの関係を図 2 に示します．

機械加工にしても，精度を要求される場合，幾何公差を使って設計に取り入れるだけでなく自分で作った部品や外注加工の部品が目標の精度通りに尽きられているかを検査する必要があります．これらの要求

には接触式三次元測定器や表面荒さ計，非接触三次元測定器など，高価な測定設備とクリーンな環境が必要です．私たちはこれらを全て揃えることはせず，超精密は第一装置開発室（旧称：理学部金工室）に任せて，汎用工作機械による加工精度を確認するための，接触式三次元測定器や工具顕微鏡を持つことにしました．これらの設備は気軽に使えるため，機械工作実習の時にも順次紹介しながら使い方を学生（主に修士 1 年）に教えていきます．

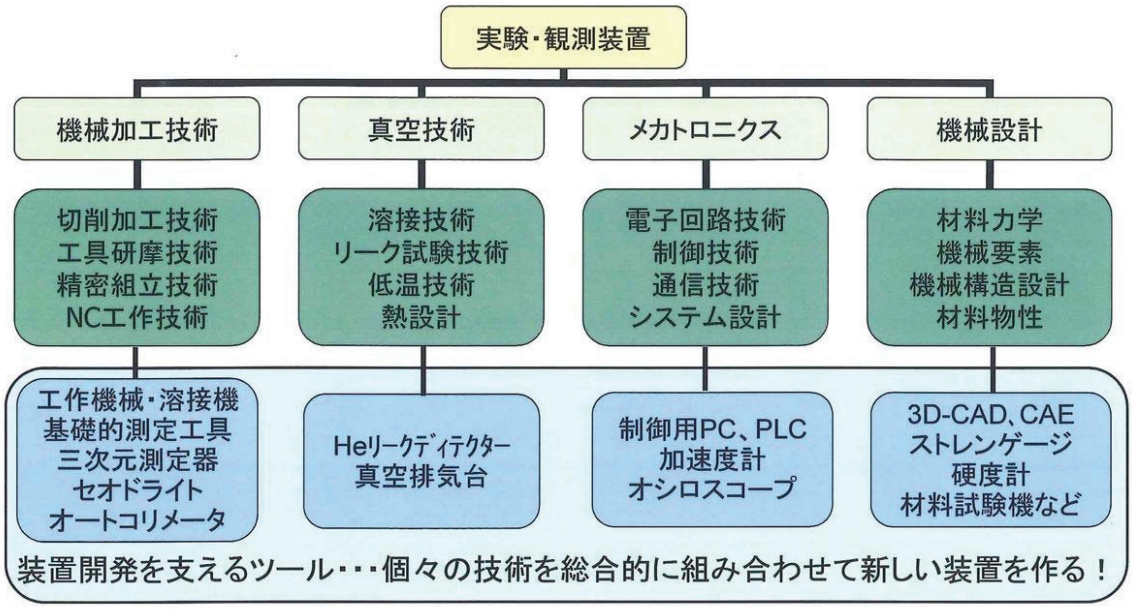


図 2，装置開発室の技術とツール

写真 6，工具顕微鏡

写真 7，He リークディテクター

写真 8，接触式三次元測定器

3　大学の技術とは何か

前置きが長くなってしまいましたが，本論は「大学の技術とは何か」です．

私が行ってきた物理金工室～装置開発室の変革の中で，最も大切だと思うことは「教員の言うとおり」ではなく，「一人前の技術者」「技術の専門家」として教員と対等に向き合うことです．そのとき，科学への興味，教員が進めている教育・研究の高い理想や思いを共有することで本当に責任を持った仕事になります．そして，教育・研究における自分の技術の貢献をよく理解し，これを周囲の教員にも知ってもらうことです．これらの教員と技術職員の良好な関係は相互に尊敬し信頼しあう人間的な関係構築が不可欠です．

それでは「一人前の技術者」「技術の専門家」というのはどういうものなのか．ここが問題です．

そこで，私たちの技術業務をよく見ることにしましょう．以下の項目はみな「大学の技術」であり，それを実施している技術職員は紛れもなく「技術の専門家」であるといえます．

(1)　誰もやったことのないことを実現する

私たち技術職員は，教育研究の最前線にいて，日夜教員と共に教育・研究を推し進めるために努力しています．研究が独創的で世界屈指の内容であればそれを支える実験装置や観測装置は「これまでに誰も作った事がない」物を作る．分析技術系では「これまでに誰も経験のないこと」を調べることになると思います．私たち大学技術職員の技術業務をよく見ると，このように「誰もやったことのない」技術内容が多く含まれているのが特徴です．これらの技術は企業では醸成できない性格のものなので，大学技術職員の存在は教員の独創的研究を推進する上で重要な役割を担っていると思います．

(2)　最先端技術の普及

講座付の教室系技術職員はこれまで一つの研究室の技術しか経験できなかったのですが，組織化によって複数の研究グループの技術業務を取り扱うようになりました．私たちの物理金工室も，物理学科の多彩な研究に関わる技術を経験することができます．これは大変大きなメリットです．

ある研究グループが開発した新しい技術を，別の研究グループに応用することで研究が大きく進むことがあります．私たちの技術の経験を生かせば，効率よくその研究グループに新しい技術を導入することができます．このように，大学の研究の中で培われた高度な技術を他の研究分野にも応用して適応することは，技術職員に技術の経験と蓄積がなくては不可能なことです．

(3)　教員のアイディアを形にする

金工室では外注加工業者も良く利用します．私たちの業務量を遙かに超える依頼があります．これに対応するには外注加工をうまく利用するしかありません．しかし，教員や学生の書いた図面のままでは加工業者に出せない場合がほとんどです．寸法精度や幾何公差，面粗さなどを書き加え，寸法の矛盾がないかを確認するなどの作業が必要になります．これをもう少し推し進めると，教員のポンチ絵から三次元の設計ツール（SoliWorks など）で詳細設計を行い，部品を外注加工し，金工室で装置として完成させることもできます．教員のアイディアを「翻訳」し，あらゆる装置を作ってしまう．私はこのスタイルで仕事をしています．研究内容をよく理解し，教員が実現したいことの本質を掴めば実現可能だと思います．

(4)　優れた工業製品や民間技術を研究に動員する

特定分野の技術に精通すると，関連する業界の製品や企業の先進的な技術についての知識や理解が深まり，技術情報の交流も進みます．大学の教育・研究の現場でこうした知識を最大限に生かし，研究室の技術背景をリフレッシュするとか，新しい研究に対して民間技術の到達点を見ながら技術的な提案を出来るようになることが重要です．これは，民間の技術開発や優れた工業製品を教育・研究の現場に適用して，これまで超えられなかった技術的な壁を乗り越えていくので，貢献度も大きいと思います．

4　国際共同研究における技術職員の役割

国際共同研究などの大きな組織の研究では，技術職員の出る幕がないように思われますが，実はここにも国際的な競争があり，イニシャティブの取り合いが繰り広げられています．国際共同研究では，大学技術職員は大きな役割を担っています．私が関わった仕事から代表的な例を二つ紹介します．

(1)　加速器実験（国際共同研究）における技術職員の役割

CERN や FNAL などの加速器実験では日本の技術職員の役割が大変重要です．ターゲットムーバーやシ

ンチレーションファイバートラッカーではCERNの技術者集団との開発競争を勝ち抜き，日本の研究者が研究プロジェクトの中で発言力を増すことができました．

ここではシンチレーションファイバートラッカーの実用化技術について紹介しましょう．

私は一年先輩の石川さんとよいコンビでシンチレーションファイバートラッカーの実用化技術を CERNの技術者集団とを争い，勝ち抜いてきました．加速器実験は巨大な実験装置であり，装置を持っているグループが本家なので，我々日本人の研究グループは軒先を借りるようなものです．従って，主導権は最初から相手側にあるのですが，日本のグループがその実験の命脈を握る技術に見通しを付けることができたら，これでやっと相手側と対等です．最終的にはその研究で最も貢献したグループが研究成果の多くを獲得できます．私は相手側の技術職員と競争関係にあることを常に意識しています．そして，相手側の技術者集は共同作業者でもあるので，まずはしっかりした信頼関係を構築することを心がけています．

(2)　日本の優秀な工業製品を研究の最前線に活用する

国際共同研究は日本の優れた技術や工業製品を世界に紹介する良いチャンスです．日本の工業製品の特長をよく理解し，積極的に採用していくことができるとよいと思います．こうしたところでも，海外の技術者はナショナリズムというか，愛国心があり，自国の製品を積極的に使いたいと主張してきます．こんなところにも国際競争があるのだと驚く反面，私たちももっと日本の製品を宣伝したいと思います．

図3は南アフリカのサザーランド天文台に設置した赤外線望遠鏡（IRSF）の設計図（完成予定図）です．IRSF は 1.4m の主鏡を持つカセグレン式天体望遠鏡で，私と京都の西村製作所と共同で開発・製作し，現地で組立・調整を行いました．IRSF は経緯台式架台の軸受けに THK の R ガイドを採用し，望遠鏡架台の構造を大幅に変革して，高性能低コスト化を実現しました．R ガイドを使った IRSF のような経緯台架台は名古屋方式と言われ，IRSF 以後，世界の小規模天体望遠鏡はほとんどが名古屋方式を採用しています．

THK は当初自社製品（R ガイド）が天体望遠鏡のような高精度な装置の軸受けに採用されたことに不安をもっていましたが，IRSF によってその性能が証明され，今では新入社員の技術研修で自社の誇る技術として最初に取り上げるなど，大きな誇りとなっています．写真 9～11 は南アフリカでの組立作業です．

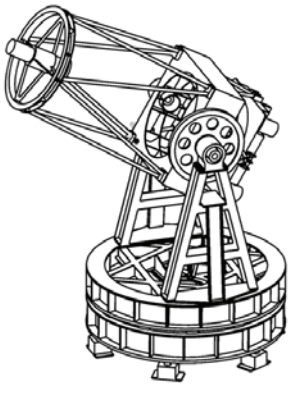


図 3，IRSF 基本設計

写真 9，現地組立

写真 10，R ガイド調整

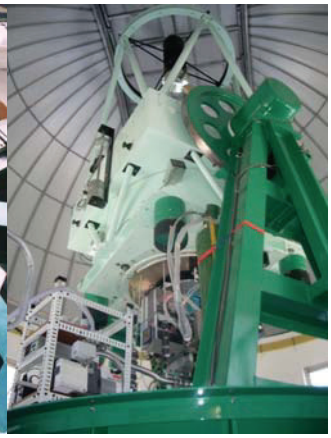


写真 11，完成した IRSF

天体望遠鏡は，観測の度に「星の位置」を正確に測定しています．大気による位置のズレとか，望遠鏡と地面の熱影響による歪みやズレなどを星の位置を頼りに補正して，何時でも正確に星を捉えられるようにしています．星（恒星）の位置は世界中の天文台で正確に測定されているので，世界で最も精度の良い「ものさし」であると言えます．天体望遠鏡は恒星を見て自分を校正するということをしているのです．これを生かすには，ガタやヒステリシスのない軸受けと回転機構であれば良いのです．R ガイドはそれを安価に実現した優れた日本の商品です．

5　技術の専門性を獲得するには・・・若手教育の視点から

名古屋大学理学部物理金工室に就職し，大学の技術職員として 41 年間様々な仕事をしてきた中から，「大学の技術とは何か」をテーマに，大学技術職員の役割について述べてきました．そして私たちが大学の技術職員として活躍するには「技術の専門家」になることが重要であると主張してきました．

しかし，大学の技術職員として技術の専門性を獲得する道筋は簡単ではありません．私の場合は良き先輩らに恵まれ，切磋琢磨する相手も CERN や一流企業の技術者など好敵手に恵まれてきました．向こう見ずな性格も幸いして，比較的若いときにターゲットムーバーという大変難しい仕事を任され，成し遂げることで技術者として飛躍することができました．

今は書く大学に技術組織が整備され，盛んに技術研修が行われているので，私が若い頃よりはずっと恵まれた環境にあるのではないかと思います．しかし，憲法に掲げられた「人権」も，これを渇望する階層や個人が声を上げて周囲の人々に働きかけなければ何の効力も益もありません．同じように，何よりも技術者として成長したいと思っている若い技術職員の皆さん自身が声を上げ，行動しなければならないと思います．

よく「何も教えてくれない」という言葉を聴きます．「仕事は盗め」というような古くさいことを言うつもりはありませんが，私は「～を教えてほしい！」と言ってほしい．聖書の一節にある「求めよ！さらば与えられん！」通りなのだと思います．若手の自覚的な「押し」を待ちたい所ですが，先輩技術職員として伝えたいことがあります．

(1)　失敗を恐れるのではなく失敗から学ぶ

私は多くの仕事に恵まれ，研究成果にも結び付いて技術者として望外なまでに評価されました．技術者として大変幸せな人生であったと思います．これまでに多くの字数を割いて私の仕事を紹介してきましたが，共通して言えることはどれもが順調に推移したわけではなく，幾多の失敗を重ねてそれを乗り越えた結果，それまでの技術の壁を打ち破り，不可能を可能にしたことで新しい成果に結びつけたものであったことです．成功したのは私の仕事の一部です．ほかの仕事には多くの失敗があります．中にはどんなに努力しても乗り越えられなかったものもあります．私の技術的な見通しの甘さ，勉強不足，発想そのものの欠陥など，技術的な壁を乗り越えられずに「失敗」のまま収束せざるを得ませんでした．これらの仕事はいまだに苦しい記憶として脳裏から離れません．こうしたことを考えてみると，大勢の方々に迷惑をおかけしながらも，私を最後まで信頼していただいた人に恵まれ，何とか今日まで綱渡りの技術者人生であったと思います．

私は若い皆さんに「失敗してもよい．本当の仕事は失敗してから始まると言ってもいい．失敗を恐れてはいけない.」と言い続けています．失敗をしないような仕事は技術目標そのものが低く，このような仕事ばかりでは技術者としての成長は望めません．もちろんこうした仕事をきちんとこなすことは大切ですが，時々は，精いっぱい背伸びしてそれでもうまく行くかわからないぐらいの難しい仕事にチャレンジしてほしいと思います．

(2)　日常的な仕事の中にも技術目標を持とう

いつも面白い仕事があるとは限りません．ルーチンワーク的な日常の仕事など，技術的に面白いところなどないと思われがちです．しかしどのような仕事の中にも，よく見れば腕を磨く「ねた」があります．

私は機械工作が本家なので，工作機械による部品加工を例にとって考えてみましょう．

普通の部品加工では，精度もほどほどで，普通に加工すれば終わってしまいます．しかし，このような中にも，腕を磨く「ねた」はたくさんあります．機械加工では，公差を設計値より厳しくするだけで良い腕試しになります．いわゆる「品質管理」ですが，公差を厳しくするとどれも同じように使えるようになります．相手側の加工精度にもよりますが，精密組立の部品加工には必要な技術です．例えばボールベア

リングのハウジングや軸加工ではμ単位の公差が要求されます．このような厳しい公差を要求されたときに始めてそれに取り組むのでは間に合いません．普段から練習しておかなければなりませんね．問題はこうした練習をいつ行うかです．要求があった時に練習を始めるのではなく，一桁上の加工精度を自己目標として，普段の機械加工で実現できるように努力を重ねていれば良いのです．普通の加工の時に刃物と加工物の関係を試しながら，工作機械の癖も掴んでおきます．こうしておけば精度の厳しい加工が来るのが楽しみになりますね．

(3)　無理難題ほど面白い

私自身は，教員や学生に「無理難題ほど面白い！」とはっぱをかけています．研究が世界水準を超えようとすれば必ずその研究を支える技術も難しいことになる．世界で誰も成功させたことのない技術目標が出てくることでしょう．私はそのような研究に技術者としてかかわれることに大きな誇りを感じるのです．技術者として難しい課題を突き付けられたら，大喜びしていいと思います．それだけ，期待が大きく，研究が進展した時に技術職員の貢献も大きく評価されることでしょう．

言い換えれば，教員や学生の皆さんの科学進歩に対する情熱を共有し，私たち技術職員も技術革新に挑戦する姿勢こそが，大学の技術職員に求められている「資質」ではないかと思います．

(4)　研究者のまねごとではなく「技術の専門家」を貫く

技術職員は大学という組織にあっては「わき役」です．主役は教員と学生です．教員は自らが発案し企画した教育・研究を推進する責任をもち，事務的要素は事務職員が，技術的要素は技術職員がそれぞれ担当することで大学という大きな組織が機能しているわけです．このことはしっかり理解してほしいと思います．技術職員はあくまでも「技術の専門家」として教員や学生と向かい合うことでやっと対等に渡り合えます．

これを勘違いして，教員の真似事をして自分が研究を主導しようとした途端に，教員の世界の成果の奪い合いとなり，ヒエラルキー下位の技術職員は競争に負けてしまうことになります．このようにして能力のある技術職員の多くが教育・研究に貢献することも能力を発揮することなく潰れていく姿をたくさん見てきました．

技術職員が勝負できるのは大学の教育研究を支える技術です．「技術職員に相談に乗ってもらった結果大変良い物ができて研究も大いに発展した」と言われるのを楽しみに，そして一緒に頑張った教員や学生が研究成果を挙げて素晴らしい研究者に成長していく姿を見るのが楽しみです．そうした研究者に「技術の専門家」として一目置かれるようになることを目標にしたいですね．

6　むすび

これまで41年間，数々の失敗を繰り返してきた私を暖かい眼差しで見守り，背中を押していただいた諸先生方に感謝したいと思います．

そして何よりも，自分自身で技術研鑽していくことが技術者の生きる道ということを教えてくれた先輩技術職員の皆さんに感謝します．勉強会の講師を快く引き受けていただいた同世代の先生方には本当にお世話になりました．私の失敗作を前に，一緒に悩み，解決方法を導き出すまで支えていただきました．今日あるのは，こうした皆さんの支えがあってこそだと思います．

改めて，お礼申し上げます．

第2分科会
(装置技術)

激光 XII 号レーザーにおける光軸調整の自動化

○千葉晃弘 A), B)，山田研二 A), B)，中西佑介 A) ,B) ，漆原新治 A) ，鈴木和浩 A) ，
奥浩行 A) ，鈴木健治 A) ，池脇元彦 A) ，山本洋一 A)

A) 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

B) 特定非営利活動法人レーザー技術推進センター

概要

本報告では、激光 XII 号レーザーの光軸調整を自動化するために取り組んできた経緯や手法、ハードウェアおよびソフトウェアの開発について報告する。本稿は、背景と自動化、ハードウェア開発、ソフトウェア開発、まとめについて述べる。

1　背景

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 XII 号レーザーは核融合研究を目的として建設され、1983 年に稼働を開始した大型のガラスレーザー装置である。波長 1.053 μm、光路長約 270m、ビーム数 12 本で、性能は出力エネルギー20kJ、ピーク出力 40TW を誇り、建設されてから 30 年を経過している現在でも核融合研究やその他の研究において幅広く利用されている。全体構成はレーザーを発振する発振器部とエネルギーを増幅する増幅部、集光してターゲットに照射する集光部などがある。増幅部は 1 本のビームでエネルギーを増幅する前置増幅器列と 12 本のビームに分けてエネルギーを増幅する主増幅器列からなり、それぞれに様々なコンポーネントが設置されている。

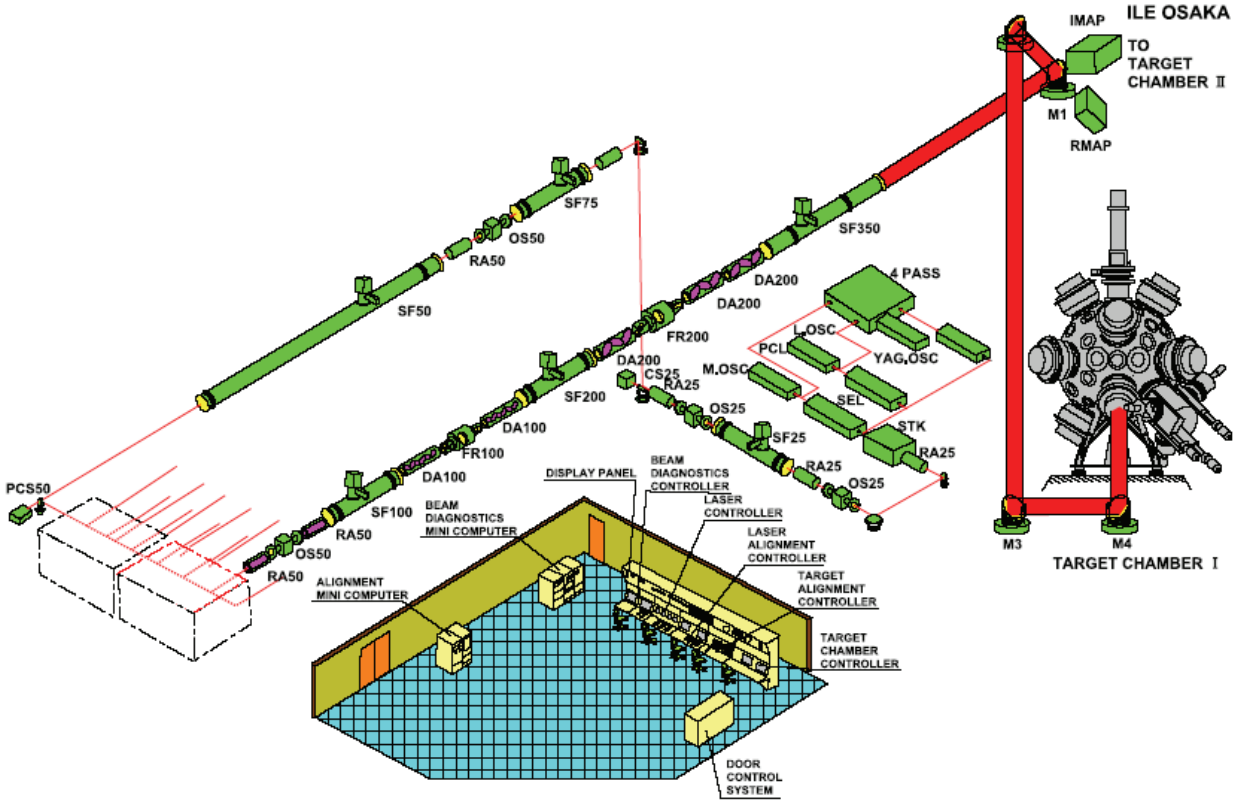


図 1　激光 XII 号レーザーのシステムレイアウト

レーザーが全てのコンポーネントの中心を通り、基準の角度になるように光軸を調整しなければならない。光軸調整は、ビームモニターに装備された CCD カメラで光軸の状態を確認して、ミラーに装備されたステッピングモーターを制御して行う。ステッピングモーターを制御するモータードライバーやビームモニター、発振器のシャッターを動作させる制御器があり、各制御器をまとめて遠隔制御できるコントローラーを用いて光軸を調整する。光軸調整には 3 人で 40 分程度の時間がかかるため、自動化して作業時間を短縮し、激光 XII 号レーザーの 1 日のショット回数を増加させることが目的である。

2　自動化

光軸調整を自動で行うために必要な光軸の状態監視や装置の制御は PC で行う。そのため、PC にビームモニターで取得したビームパターンを取り込んで解析し、各制御器と通信して遠隔制御することが必須となる。PC にビームパターンを取り込むためにインタフェース社の画像入力ボードを用いた。通信には PC や各機器が繋がっている制御ネットワークを用いた。

3　ハードウェア開発

光軸調整を行うために必要である各制御器の老朽化が進み、改修や修理等を行いながら使用している状態であった。また、遠隔制御に必要な LAN のインタフェースがないため、新たにネットワークに対応した制御器を開発した。独自で開発することで制御対象に合ったものが開発でき、コスト面も安価に抑えることができた。

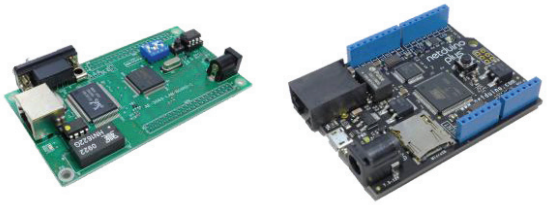


図 2　秋月電子製 H8-3069F と Netduino Plus

制御器はネットワーク対応のマイコンボードと制御回路を組み合わせて開発した。マイコンボードはネットワーク対応でデジタル入出力を備えた秋月電子製 H8-3069F や Netduino Plus を使用し、ソフトウェアとの通信や各種制御が可能となるようにプログラミングを行った。Netduino Plus は.NET Micro Farmework に対応し、VisualStudio を使った開発できるため、光軸調整用の制御器以外の機器にも採用している。制御対象が多く、マイコンボードの入出力の数が足りない場合には Xilinx 社の CPLD を用いて拡張した。制御回路は設計やテストを行った後、プリント基板 CAD の EAGLE を用いて回路図やパターン図を作成して外注でプリント基板を製作し、部品実装は自前で行った。ケースは汎用のものを購入して、小型の CNC を用いて穴あけ加工や文字を彫刻して製作した。

図 3　開発した制御器

ステッピングモーターを制御するモータードライバーやビームモニターのシャッターや他の機器を制御するための制御器など 5 種類 24 台を製作した。これによって、光軸調整に必要な制御器は全て更新および LAN 化を行うことができた。

4　ソフトウェア開発

ソフトウェアは、C#を用いて開発した。光軸調整用ソフトウェアの開発はビームパターン取得や解析、各装置の制御、自動光軸調整などの機能ごとにライブラリを作成して進めた。これによって、複数の開発者が並列して開発を行うことができ、単体テストを利用して効率良く開発を進めることができた。開発したライブラリを用いて、前置増幅器列用と 2 ビームの光軸調整を行うことができる主増幅器列用の 2 種類のソフトウェアを開発し、現在試験運用中である。実際に運用する際には前置増幅器列用 1 台と主増幅器列用 6 台で運用することになるため、それらを一括で制御するための統括ソフトウェアが必要である。それについては現在開発中である。

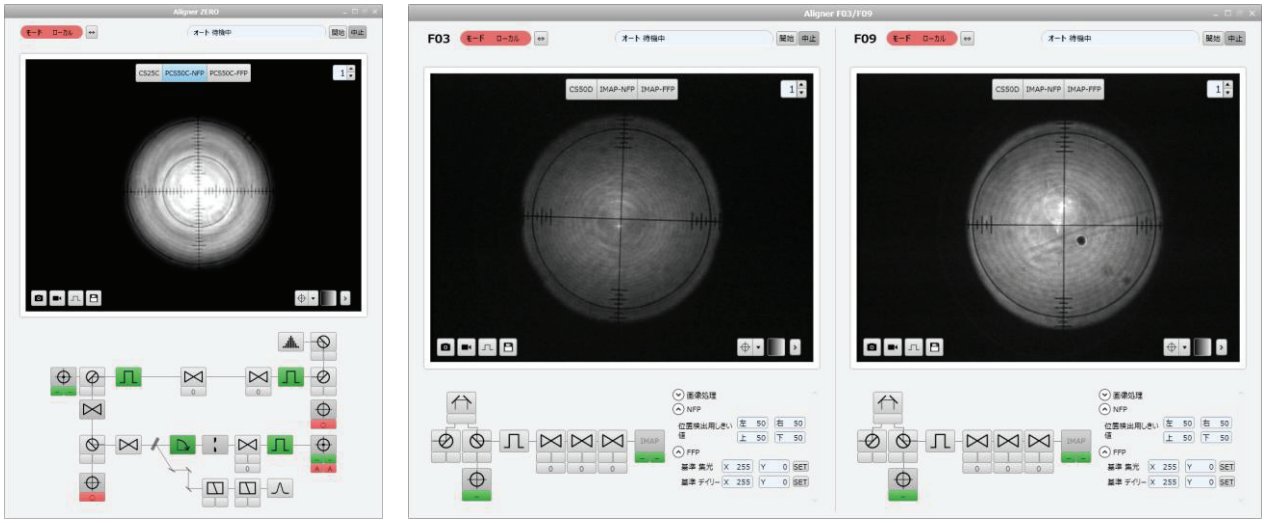


図 4　前置増幅器列と主増幅器列の光軸調整用ソフトウェアの外観

5　まとめ

光軸調整の自動化に向けて、制御器の更新および LAN 化、ソフトウェア開発を行ってきた。制御器の更新および LAN 化により、制御器のトラブルが大幅に減少してソフトウェアから直接制御することも可能となった。ソフトウェアが完成すれば 3 人で 40 分程度かかっていた光軸調整が、1 人で 20 分程度での作業が可能となり、激光 XII 号レーザーの 1 日のショット回数を増加させることが期待できる。

真空度のネットワークモニタリングに対応したピラニ真空計の開発

○中西佑介[A),B)]、山田研二[A),B)]、鈴木和浩[A)]、千葉晃弘[A),B)]、奥浩行[A)]、
鈴木健治[A)]、池脇元彦[A)]、山本洋一[A)]、漆原新治[A)]

[A)] 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

[B)] 特定非営利活動法人レーザー技術推進センター

概要

真空装置には圧力を測定するために真空計が備えられている。なかでも大気圧から使用でき、約 10^{-1} Pa まで測定可能なピラニ真空計は現在でも広く使用されている。一般的にピラニ真空計は白金線を使用した測定子と圧力を表示する表示器をもったコントローラーで構成されるが、今回はネットワーク経由で遠隔から圧力をモニタリングできるピラニ真空計を開発した。

1 背景

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 XII 号レーザーは、1983 年に建設され約 30 年経過した現在でも稼働し核融合をはじめ様々な研究に利用されている。波長は 1.053μm、ビーム数は 12、出力は 20kJ／40TW、年間ショット数は約 1,000 ショットである。激光 XII 号レーザーシステムの中にスペーシャルフィルター（Spatial Filter：SF と略す）と呼ばれるコンポーネントがある。SF は両端にレンズを備えたケプラー型のビームエキスパンダーであり、焦点付近にはピンホールを設置し、レーザービームの高周波成分を除去する空間周波数フィルターとしても機能している。この焦点付近で起こる気中放電を防止し、気体分子への衝突によるレーザー出力の損失を軽減するために内部は真空状態となっている。1 ビームにつき 3 つ、共通光路部分を含めるとその数は 40 を超え、24 時間（一部を除く）真空ポンプによる真空排気を行っている。これまで超高真空コンポーネントにおける圧力状態をネットワークからモニタリングできるシステムを構築してきた。熱陰極型電離真空計やスパッタイオンポンプコントローラーからのモニター出力をネットワークに対応した A/D コンバータに接続し、ソフトウェアからデータを収集するといった構成である。しかし、同じ構成で中真空コンポーネントの圧力状態をモニタリングするには少し問題がある。6 つある中真空コンポーネントではピラニ真空計が使用されているが、測定子の数に対してコントローラーの数が不足している。コントローラーの価格は 1 台約 15 万円であり、A／D コンバータ等の機器類を含めると 100 万円近くのコストがかかってしまう。こうした問題を解決し、全真空コンポーネントをモニタリングするために、マイコンボードを使用した低コストで省スペースのピラニ真空計の開発に着手した。

図 1　ピラニ真空計測定子

図 2　ピラニ真空計外観

2 原理および仕様

ピラニ真空計の原理は、測定子の白金線を一定温度に保つために流れる電流値を測定することである。圧力が高い状態のときは、白金線

に多くの気体分子が衝突するため奪われる熱量が多く、白金線の抵抗値が大きく下がるので温度を一定に保つためには多くの電流を流さなければならない。一方で、圧力が低い状態のときは白金線に衝突する気体分子が少なく、抵抗値の低下は小さいため少ない電流で白金線の温度を一定に保つことができる。このように、気体分子の電流には相関があるため、測定子に流れる電流値を測れば結果として圧力を測定したことになる。今回製作するピラニ真空計にはコンポーネントの位置関係から 1 台で 2 本の測定子を同時にコントロールできることや、ネットワークに接続できることが求められた。このため、ネットワークに対応した Netduino Plus というマイコンボードを使用した。.NET Micro Framework に対応し、C#言語で開発ができるためデータの収集を行うソフトウェアと親和性が高い。従来の測定子ケーブルを接続できるコネクタをフロントパネルに、電源用 DC ジャック、mini-USB、LAN ポートをリヤパネルに設けている。コントロール回路は縦 53mm×横 71mm の Netduino Plus にスタッキングされた基板に 2 回路分が納まっている。現場で常時圧力を表示する必要がないため、表示器は備えていない。

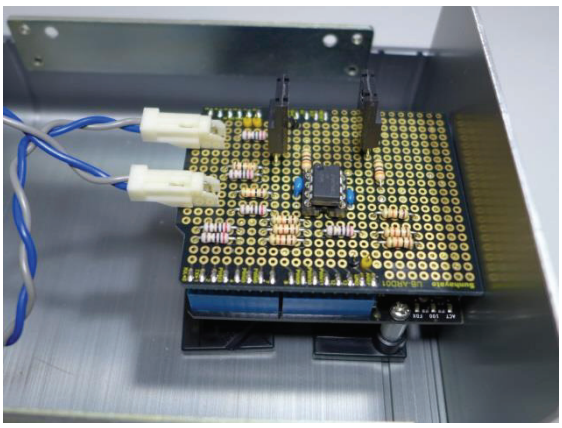


図 3　ピラニ真空計内部

（上側：コントロール回路基板　下側：Netduino Plus）

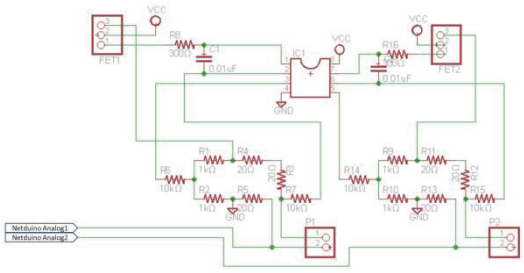


図 4 回路図

3 まとめ

マイコンボードを使用し、低コストで省スペースのピラニ真空計を製作することができた。旧ピラニ真空計と比較して、2 本の測定子を同時にコントロールできること、コストを約 1／20 に抑えられたこと、圧力レンジや測定子の切り替えスイッチ、表示器を廃止したことにより大きさを約 1／8 にまで縮小できたこと、ピラニ真空計＋A／D コンバータの機能を 1 台に凝縮できたことが特長である。現在では 3 台で 6 つのコンポーネントをモニタリングしている。測定精度は既製品に対して±8%と少し大きく、今後の課題となっている。取得した圧力データはデータベースへとアップロードされ、総数 40 を超える全真空コンポーネントのネットワークロギングができるようになった。また、発表では現在の圧力状態やアップロードされたデータを公開する Web ページも作成したので併せて紹介する。

図 5 ピラニ真空計外観

（左側：旧ピラニ真空計　右側：新ピラニ真空計）

LFEX 真空チャンバーの真空制御システムの構築

○久保田 善大[AB)]，上田 一輝[AB)]，石田 正人[AB)]，辻 公一[AC)]
村上 英利[AB)]，川崎 鉄次[A)]，中田芳樹[A)]，實野 孝久[A)]
白神 宏之[A)]，宮永 憲明[A)]

[A)] 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター GOD グループ
[B)] 特定非営利活動法人レーザー技術推進センター
[C)] 日本アドバンストテクノロジー(株)

概要

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは 10PW の性能を持つ超高強度の LFEX レーザーが稼働している。LFEX レーザーは発振器と増幅及びイメージ転送系を有するフロントエンド部と、回折格子をダイヤモンド型に組み合わせたパルス圧縮と実験用ターゲットにレーザーを集光する Off axis parabola mirror(OAP)を有するリアエンド部で構成されている。リアエンド部は高真空に保たれている真空チャンバー内に設置されている。真空チャンバーは建設時に導入された真空排気装置と増設したターボポンプユニット、クライオポンプユニットにより真空排気を行なっているが、各ポンプの設置位置が離れた場所に点在しているため運転や操作に支障をきたしていた。点在している各ポンプをネットワーク経由で一括管理するためのシステム構築を行なったので、これについて報告する。

1　LFEX レーザーリアエンド部の構成

LFEX レーザーは発振器から出力されたレーザーがパルス伸長器を通り、増幅部で増幅したレーザーをイメージ転送系でリアエンド部に伝達する。

リアエンド部に伝達されたレーザーは、4 枚のミラーにより高真空に保たれた真空チャンバーに入っていく。真空チャンバーに入射したレーザーは、回折格子とミラーをダイヤモンド型に組み合わせたダイヤモンド型パルス圧縮器で短パルス化し、その後 3 枚のミラーと OAP により実験ターゲットに照射される。

図 1 に全体のレイアウト図、図 2 にリアエンド部のレイアウト図を示す。

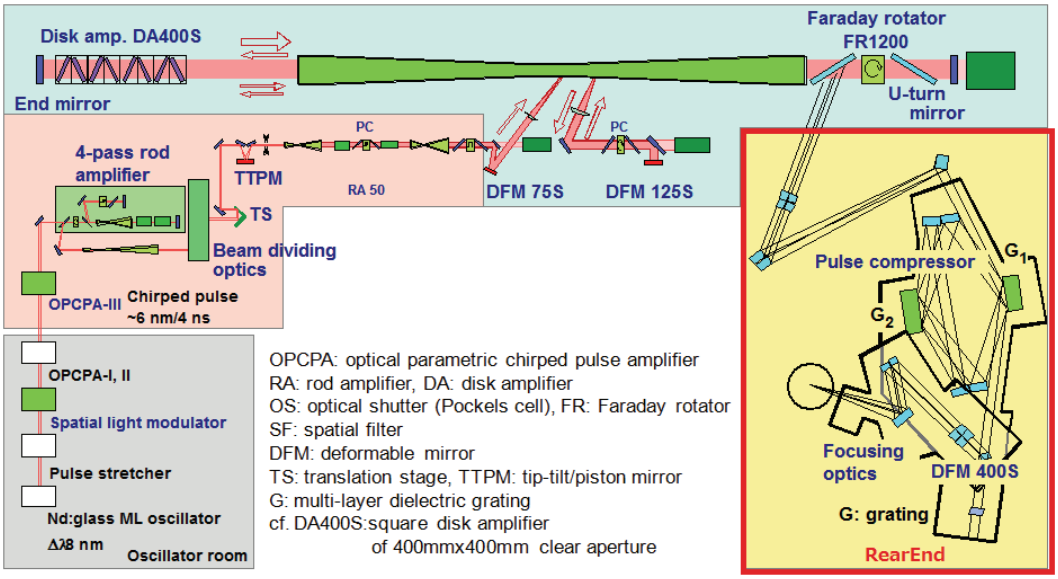


図 1．LFEX レーザー全体レイアウト図

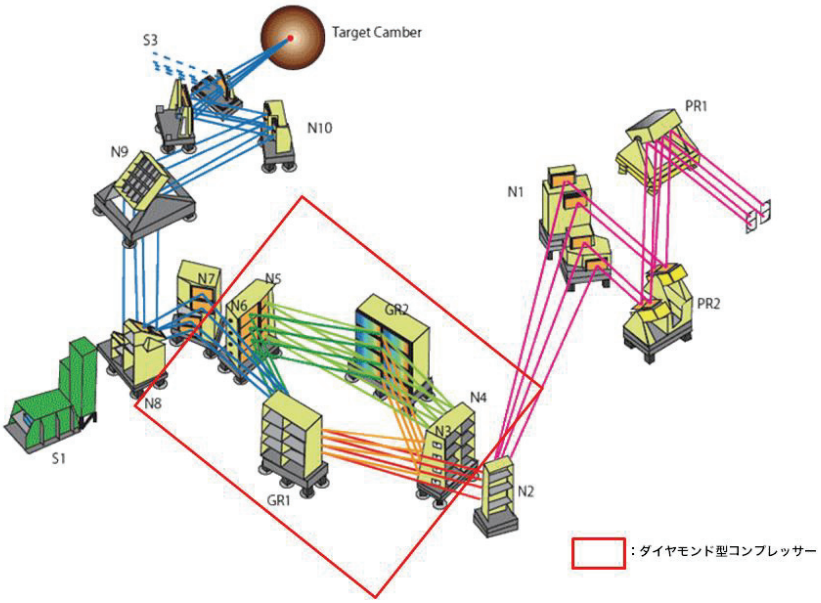


図 2．LFEX レーザーリアエンドレイアウト図

2　真空系の各機器

真空チャンバーは真空容器を 1F と 2F に配置し、その間を大型真空ダクトにより接続している。まず始めにドライポンプとターボポンプを組み合わせた真空排気装置により、2.67[Pa]まで真空引きを行う。次に水分子を吸着させるために 1F と 2F に設置してあるポリコールドを稼働する。さらに高真空にするために増設したターボポンプとクライオポンプを稼働する。真空状態は、1F と 2F のそれぞれに設置されたワイドレンジ真空計を用いて測定している。

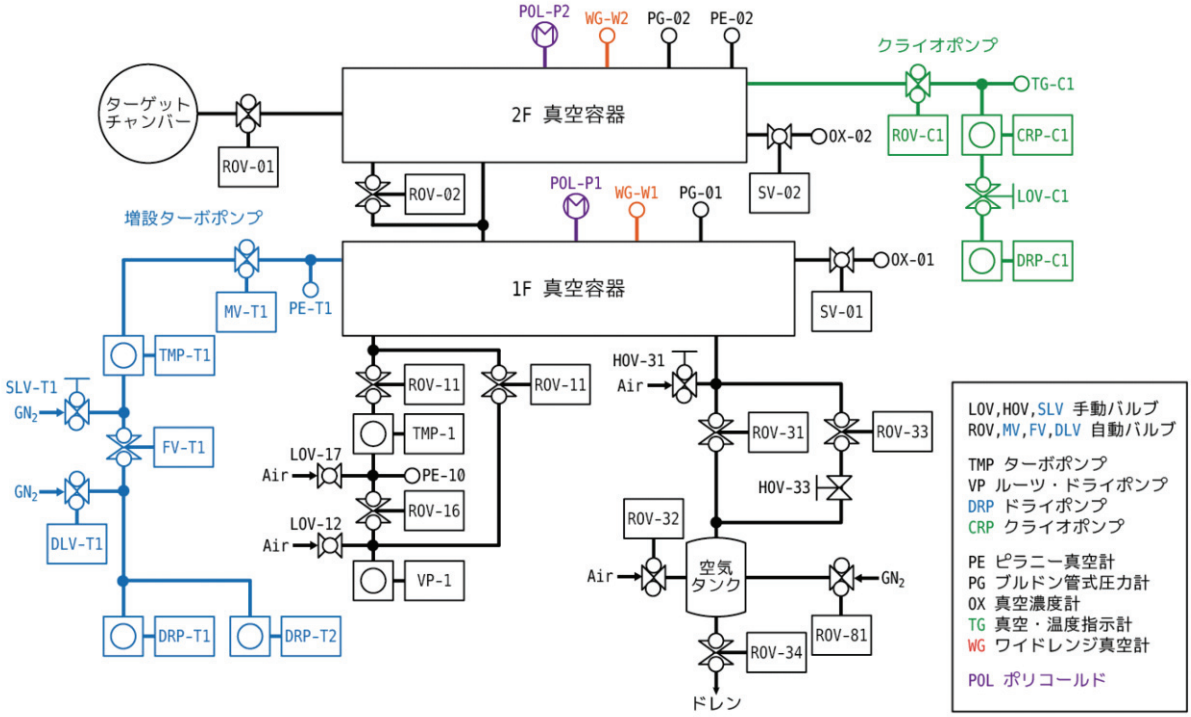


図 3．真空系統図

3　ネットワーク構築によるリモート化

排気装置及び真空計は点在しているため、手動による運転操作は時間と労力がかかる上に、トラブル時の対応も考慮する必要がある。これらの各排気装置をネットワーク経由で操作・状態取得を行えるように各機器のリモート化を行なった。リモート化した排気装置を以下に示す。

・真空制御盤ステータスモニター

真空排気装置の制御盤から出力されるステータスデータ(真空度やアラーム等)の取得を行なっている。

・ターボポンプユニット用冷却水循環装置リモート化

ターボポンプユニット用冷却水循環装置の操作及び温度やアラームなどの状態取得を行っている。

・クライオポンプユニットのリモート化

クライオポンプユニットの操作及び状態取得を行っている。

・ポリコールドシステムリモート化及び温度ロガー

2 台あるポリコールドの操作及び温度などの状態取得を行なっている。
またそれぞれを冷却するための冷却水循環装置の操作及び温度やアラームなどの状態取得も行なっている。

・ワイドレンジ真空計データロガー

ワイドレンジ真空計は 1F と 2F にそれぞれ設置されており、高真空状態の真空度データを取得している。

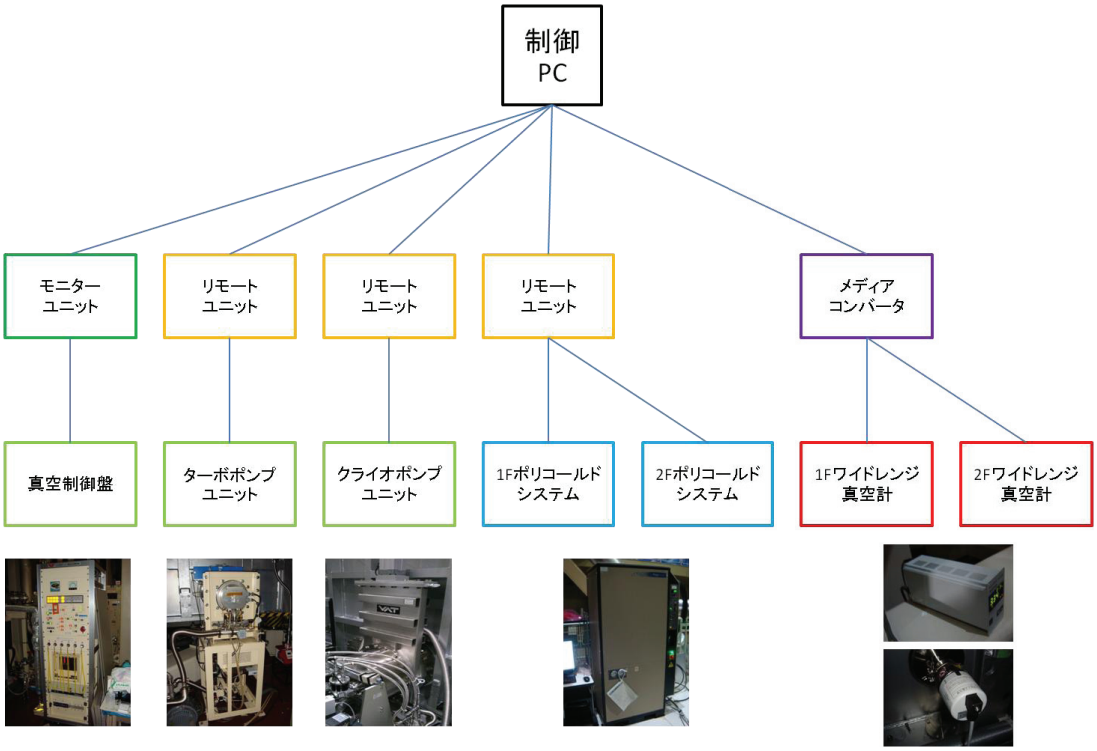


図 4.　真空系制御図

真空チャンバーの真空引き及び大気戻しの作業には長時間かかり、その作業の間にポリコールドシステムとクライオポンプユニットの立ち上げ、立ち下げを手動で操作していたため、真空状態を定期的に確認し、タイミングよく操作する必要があった。今回行なったリモート化により、現場に張り付いて真空状態を確認する必要がなくなり、スムーズに真空引き及び大気戻しの作業を進めることができるようになった。また自動化することで操作ミスによるトラブルも防ぐことができるようになった。

4　真空系監視統合化

・パソコンによる一括管理

各機器のリモート運転操作・状態取得をネットワーク経由で管理ができ、定期的に機器の状態を確認することができるようになった。

取得したログはデータベースサーバーにアップロードされるようになっている。

また、トラブル発生時の対応を迅速に実施できるようになった。

・取得データの閲覧

取得した真空度や温度などのデータをデータベースサーバーにアップロードすることにより、WEB 上で閲覧できるようにした。

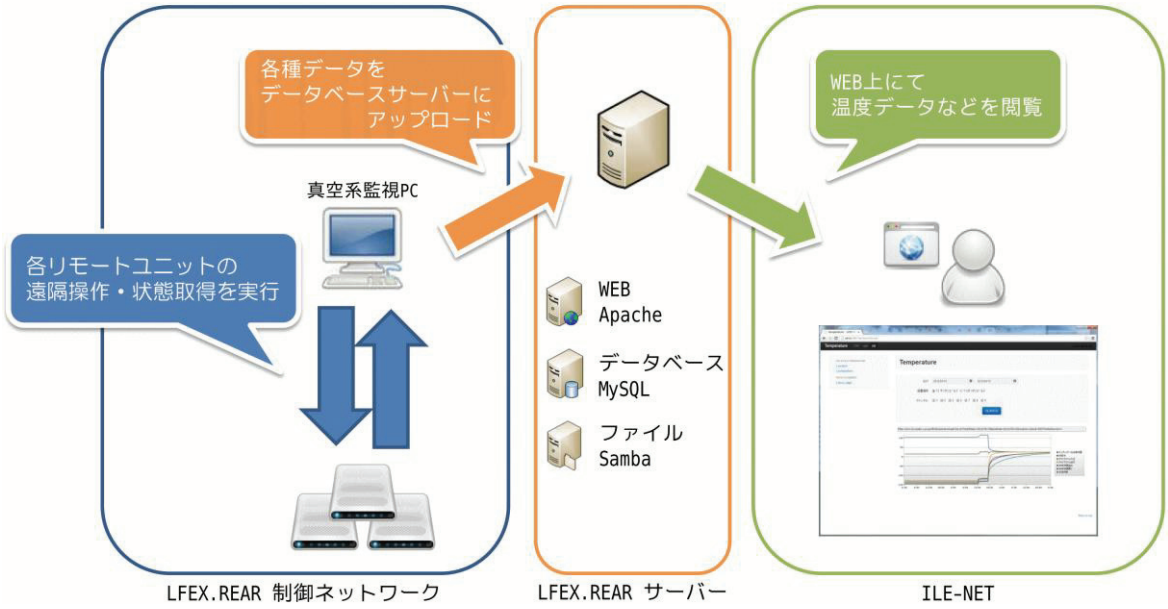


図 5.　真空系監視統合化

5　まとめ

LFEX レーザーの真空チャンバーにはさまざまな排気装置及び真空計が設置されている。これらの機器は離れたところに点在しているため、各装置の場所に移動して装置の立ち上げ、立ち下げを行わなければならなかった。各機器をリモート化及びネットワーク化することにより、一箇所で集中的に運転操作が可能とり、省力化することができた。ネットワーク経由で随時各機器の運転状態を確認することができ、真空度やポンプなどに異常が発生した場合、速やかに対応できるようになった。

JT-60N-NBI 加速電源の長パルス化改造

○佐々木　駿一、花田　磨砂也、秋野　昇、遠藤　安栄、清水　達夫

独立行政法人　日本原子力研究開発機構　ITER プロジェクトユニット

概要

日本原子力研究開発機構では、核融合実験装置 JT-60U を超伝導コイル化する JT-60SA を製作中（図 1）である。JT-60SA では、負イオン中性粒子入射装置（以下、N-NBI 装置という）のビームパルス幅を定格の 10 秒から 100 秒へ延ばすことが要求されている。本要求に対応するため、N-NBI 加速電源の構成機器であるインバータの改造を実施した。改造後、無負荷通電試験を行い、JT-60SA の定格である-500kV,100 秒通電を達成した。本稿では、N-NBI 加速電源の長パルス化改造及び無負荷通電試験の結果について報告する。

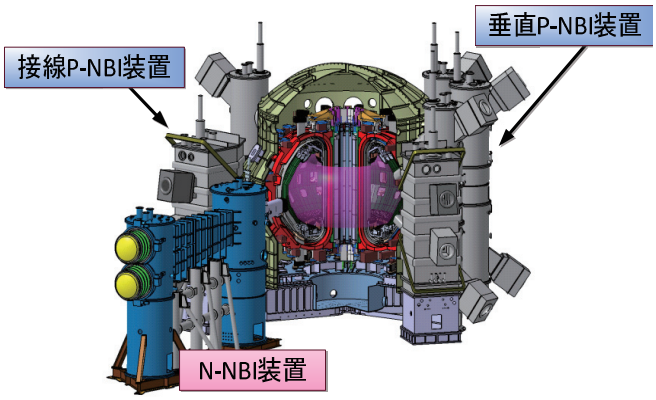


図 1.　JT-60SA　NBI 加熱装置

1　N-NBI 装置用電源

N-NBI 装置は、1 ユニットで 2 つのイオン源を有しており、1 イオン源あたりの中性粒子ビーム入射パワーは 5.0MW、ビームエネルギーは 500keV である。N-NBI 装置用電源は、負イオン生成部電源と定格-500kV の加速電源で構成されている。負イオン生成部電源は、アークチャンバー内でソースプラズマを生成するためのフィラメント電源とアーク電源、負イオン生成に適した磁場配位を作る PG フィルター電源、ソースプラズマから負イオンビームを引き出すための引出電源、ソースプラズマから引き出される電子の量を調整するためのバイアス電源で構成されている。

加速電源は、生成された負イオンを 3 段加速により最大 500keV まで加速するための電源であり、図 2 に示すとおり、降圧変圧器（TRA）、コンバータ、インバータ、直流発生装置、過電圧抑制用コンデンサ、サージ抑制用リアクトル等で構成されている。本電源は、3 段の段数を有する静電加速器に最大-500kV の高電圧を印加するため、インバータ及び直流発生装置は 3 組設置されており、3 段直列に接続された直流電源から各々-500kV,-326kV,-163kV の電圧が出力される。出力電圧の調整は、コンバータの位相角制御及びインバータのパルス幅制御で行い、

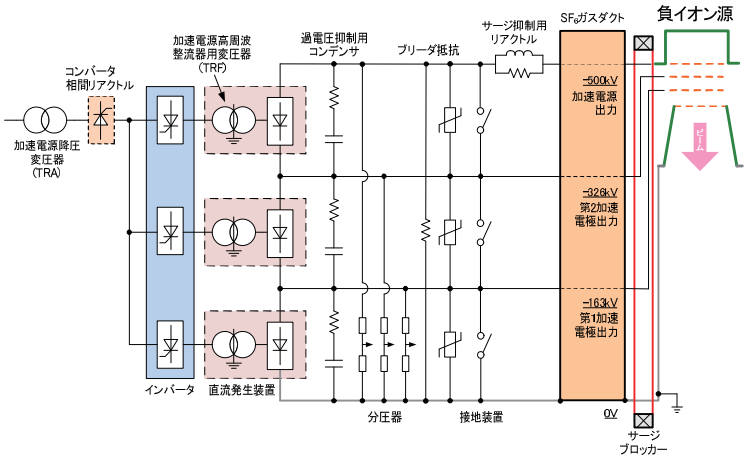


図 2.　N-NBI 加速電源回路図

コンバータで出力電圧を粗調整し、インバータで微調整する方式を採用している。

また、負イオン源の加速部では、高い頻度で短絡現象である絶縁破壊（以下、BD（ブレークダウン）という）が発生する。加速部で BD が発生すると、電源の対地浮遊容量に蓄積されたエネルギーがサージとして加速部に流入し、負イオン源に溶融や耐電圧低下を引き起こす可能性がある。さらに、BD により発生したサージは電源各部に伝播し、電源機器や制御系に誤動作や故障を引き起こす可能性がある。これらの障害から加速電源及び負イオン源を保護するため、本電源には BD 時にインバータを瞬時に停止し、加速電圧の出力を 200 μ s 以下の時間で遮断する高速スイッチング機能を有する。さらに、一定時間停止後に加速電圧出力を再立ち上げし、再びビームを出力する機能も備えている。

また、BD によるサージを抑制するための並列抵抗器付きリアクトル及びサージブロッカーが加速電源出力部に設置されている。

2　長パルス化改造検討

JT-60SA において、N-NBI 加速電源は、運転上限値を最大定格値（500kV,64A）と同一のまま、パルス幅を定格の 10 秒から 100 秒へ、繰返し率を 1/60 から 1/30 へ伸長することが要求されている（表 1）。本要求に対応するため、製作時の保護協調曲線、構成機器の改造設計検討結果及び温度上昇測定試験の結果を基に、加速電源の長パルス化改造検討[1)]を実施した。保護協調曲線図（図 3）による検討の結果、加速電源の構成機器であるインバータ GTO(Gate Turn-Off thyristor)の定格最大通電時間が 50 秒、コンバータ相間リアクトルが 19 秒となるため、長パルス化改造が必要であることが分かった。また、ブリーダ抵抗についても、通電時の温度上昇測定試験の結果、定格での最大通電時間が最大約 40 秒となり、改造が必要となる。

その他にも、コンバータのサイリスタスナバ抵抗器の冷却機能、主回路銅帯の改造が必要であることが分かった。

表 1.　N-NBI 加速電源　仕様

項目	性能	
	増力前	増力後
出力電圧	-500kV	同左
電圧立上げ時間	100msec 以下	同左
出力電流	64A	同左
通電時間	10sec	**100sec**
繰返し率	1/60	**1/30**
出力電圧制御	ｺﾝﾊﾞｰﾀ、ｲﾝﾊﾞｰﾀ	同左
高速遮断時間	200 μ sec 以下	同左

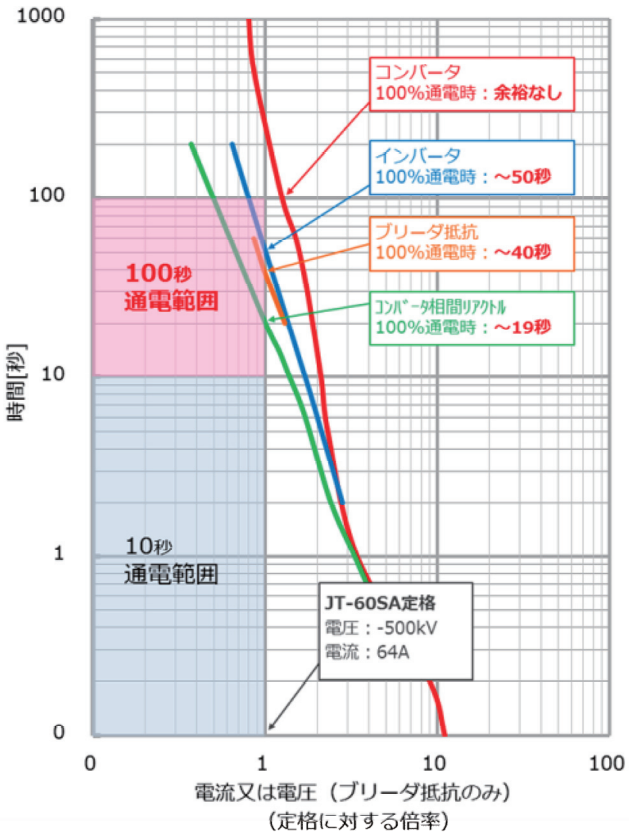


図 3.　保護協調曲線図

3　長パルス化改造

今回、加速電源の長パルス化改造の一環として、インバータ及びコンバータ相間リアクトル等の改造を実施した。

インバータにおいて、100 秒通電時に問題となるのは GTO 素子の接合部温度である。既設インバータは、負荷側変圧器 TRF(1920A-10 秒)に 3 並列で接続されるため、インバータ 1 面当たりの定格電流値は 640A となる。この定格電流値で通電した

場合、50 秒を超えると GTO 素子の接合部温度が許容値の 125℃を超えてしまう。そこで、各段のインバータ回路数を増やし、1 台当たりの電流値を下げる改造を実施した。改造後の回路構成（図 4）は、従来の 3 並列から 4 並列に変更した。4 並列にすることによって、インバータ 1 面当たりの出力電流値を 480A（=1920A/4 並列）に抑えることができ、100 秒通電時の GTO 接合部温度を許容値以下に抑えることができる。しかし、既設 GTO 素子は製造終了となっているため、加速電源 1 段分については、IEGT（Injection Enhanced Gate Transistor）素子を用いた IEGT インバータ盤計 9 面（3 並列×3 相）を新たに製作した。また、既設加速電源制御盤との制御信号の授受を行う増設インバータ PG(Pulse Generator)盤についても製作した。なお、IEGT インバータ盤及び増設インバータ PG 盤を収納する建屋（増設インバータ棟）は、既設インバータを収納しているインバータ棟の隣に建設した（図 5）。

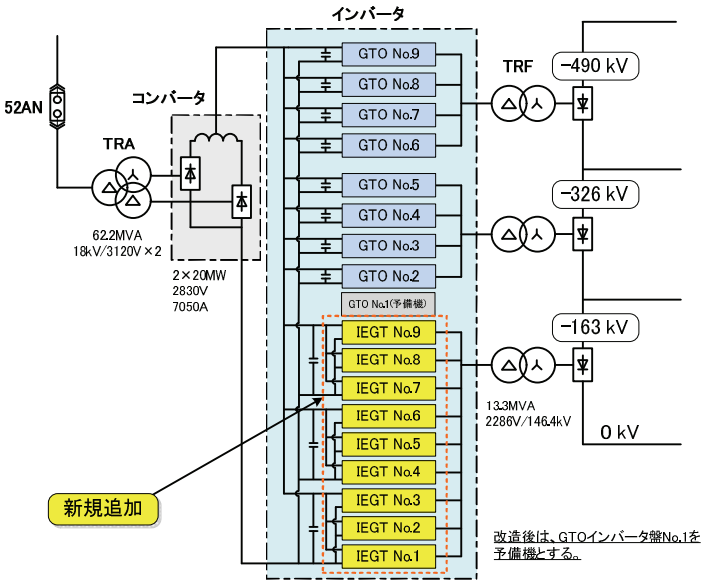


図 4.　インバータ回路構成（改造後）

図 5.　増設インバータ棟

コンバータ相間リアクトルは、定格電流値で 19 秒以上通電するとコイル導体の温度上昇が上限値に達し、巻線間の絶縁性能が低下する恐れがあるため、導体断面積を 1.4 倍に構造変更し、放熱を良くした新規リアクトルと交換した。

その他の改造として、100 秒通電時に許容温度を超えてしまうコンバータ盤内の主回路銅帯の改造、IEGT インバータ盤増設に伴う制御系の改造及び配線変更等を実施した。

4　制御システム開発

加速電源の長パルス化改造と並行して、長パルス改造後に行う無負荷通電試験のための制御システムを独自に開発した。本制御システムの開発によって得られた技術・知見は、JT-60SA 用制御システムの設計及び開発に反映する。

無負荷通電試験用制御システムは、図 6 に示すとおり、汎用性に優れた PLC(Programmable Logic Controller)、タッチパネル等で構成されている。新設した PLC と低圧制御ユニット CP1DN（加速電源制御

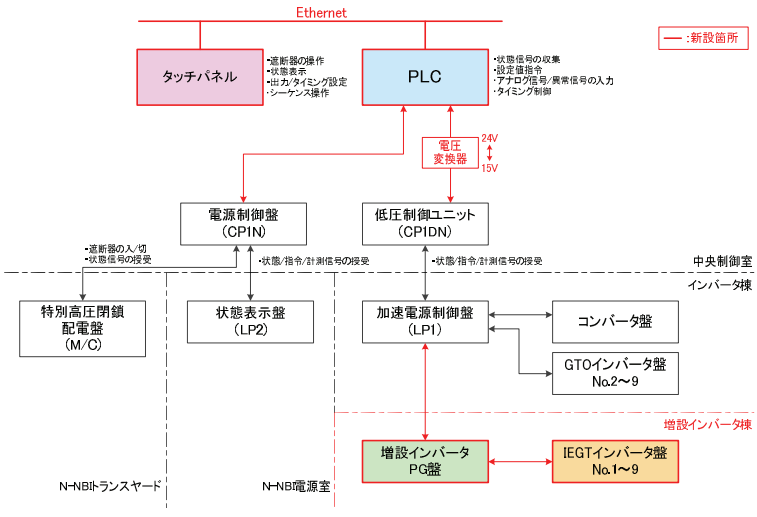


図 6.　試験用制御システム構成図

盤と各種設定値や警報等の送受信を行う）は、CP1DN 背面に新設した端子台を介して接続される。

PLC は、主回路遮断器の入/切操作、状態信号の収集、出力設定値指令、電圧/電流等のアナログ信号の入力、異常信号の入力、CP1DN 内の既設基板とデジタル入出力信号の授受等を行う。

タッチパネルは、Ethernet で PLC と接続され、遮断器の操作及び状態表示、加速電圧設定、シーケンスの START/STOP 操作、出力電圧/電流や警報の表示等を行う（図 7）。

図 7.　タッチパネル画面

5　無負荷通電試験

これら一連の改造後、IEGT インバータ盤、増設インバータ PG 盤及びコンバータ相間リアクトル単体で健全性確認試験を実施した後、既設盤と組み合わせて加速電源全体で総合動作試験を実施した。なお、本試験は直流電流計測装置二次側ケーブル及び長パルス化改造が必要であるブリーダ抵抗器（改造未実施）を切り離し、無負荷で通電試験を実施した。

無負荷通電試験は、最初に無出力の状態で保護連動試験を実施した。保護連動試験は、シーケンス中に既設盤及び増設盤の各々から故障信号を模擬的に発信し、保護連動が正常に動作することを確認した。その後、各段に個別に電圧を印加し、異常のないことを確認した。

最終試験として、パルス幅を 3 秒に固定した状態で第 1～3 段同時に繰返し通電を行い、出力電圧を -500kV まで上昇させた。出力電圧 -500kV 到達後、パルス幅を伸長し、JT-60SA での定格である出力電圧 -500kV において 100 秒通電（図 8）を達成し、今回改造した全ての機器が正常に動作していることを確認した。

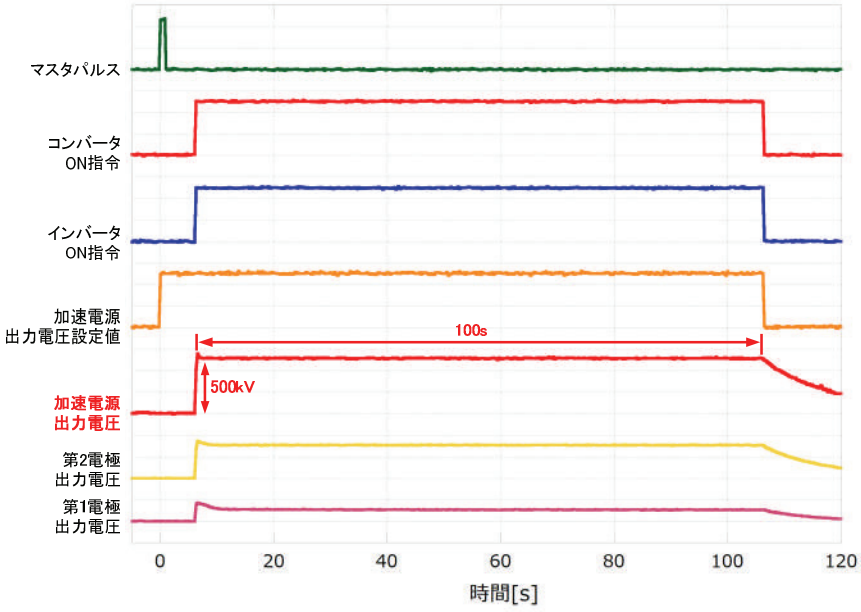


図 8.　-500kV-100s 通電波形

6　まとめ

N-NBI 加速電源について、JT-60SA での要求性能である出力電圧-500kV,100 秒通電に対応するため、加速電源の構成機器であるインバータ、コンバータ相間リアクトル、主回路銅帯等の長パルス化改造及び無負荷通電試験用制御システムの開発を行った。改造後に無負荷通電試験を実施し、JT-60SA での定格-500kV-100 秒通電を達成した。

7　今後の予定

今後は、今回改造を実施していないブリーダ抵抗器及びコンバータサイリスタスナバ抵抗器の冷却ファンの長パルス化改造を実施する。そして、改造対象機器の改造終了後、JT-60SA の運転開始前までに実負荷試験を実施し、加速電源全体の動作確認や BD 時のスイッチング機能の確認を行う予定である。

参考文献

1)　薄井　勝富他：“JT-60SA に向けた中性粒子入射装置の電源増力”
第 18 回分子科学研究所技術研究所　技術研究会報告書

負イオン中性粒子入射（N-NBI 加熱）装置のビーム軸改造

○藻垣　和彦　花田　磨砂也　秋野　昇　小又　将夫　根本　修司
日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門　NB 加熱開発 Gr

１．はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60U）を超伝導化する JT-60SA 計画は、負イオン中性粒子入射加熱装置（以下「N-NBI 加熱装置」という。）のパルス幅を現在の 30 秒から 100 秒に伸長すると共に、N-NBI 加熱装置のビーム入射軸の高さを従来（1 FL から 8000mm）より 550mm 下げることによって核融合炉の定常化のための電流駆動効率の向上を目指している。図 1 に JT-60SA を示す。本稿では、平成 24 年 12 月から平成 25 年 12 月までの 1 年間に実施した N-NBI 加熱装置のビーム入射軸に関する改造作業について報告する。

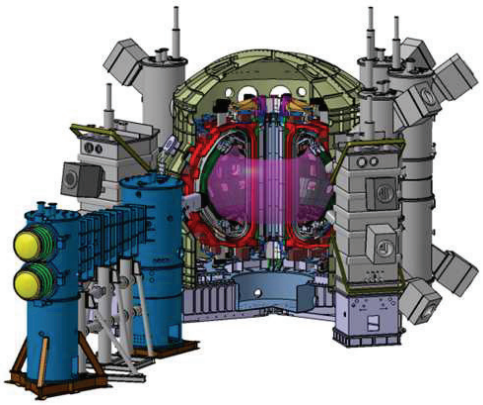


図 1　JT-60SA　外観図

２．JT-60N-NBI 加熱装置の概要

NBI 加熱装置はプラズマへ重水素の中性粒子ビームを入射し、プラズマを追加熱する装置である。NBI 加熱装置は 1 次粒子を生成するイオン源、ビームライン機器（1 次イオンを中性化するガスセル、中性化されなかったイオンを処理するイオンダンプ、クライオポンプ等）、ドリフトダクト等から構成されている。図 2 に N-NBI 加熱装置を示す。N-NBI 加熱装置は、高密度のプラズマに入射し、高効率電流駆動実験に用いられるため、高電圧でも中性化効率が高い負イオンビームを用いている。負イオンを中性化するため、中性化セル部が長く、イオン源からドリフトダクトまでの長さは 23m になる大型装置である。中性化された負イオンビームはターゲットである JT-60SA のプラズマに対して接線方向に入射される。N-NBI 加熱装置の構成は大きく分けて、イオン源タンク、中性化セル、イオンダンプタンクから構成されており、イオン源タンクは直径 3.0m、高さ 10.8m（5m はイオン源タンクスカートの高さ）、重量 75 t であり、2 段構造を有する。ビームラインの位置下げのために、最下段部の部品を新規購入部品と入れ替える。タンク内面の真空に晒される領域には、10 t の磁気シールド（パーマロイ）が隙間無く設置されている。中性化セル部は、上イオン源及び下イオン源からのイオンビームを中性化するセルが 2 本あり、その 2 本のセルが 1 本に集合する Y 字形状となっている。中性化セルは外装と内装の 2 重構造となっており、外装は、真空境界と磁気

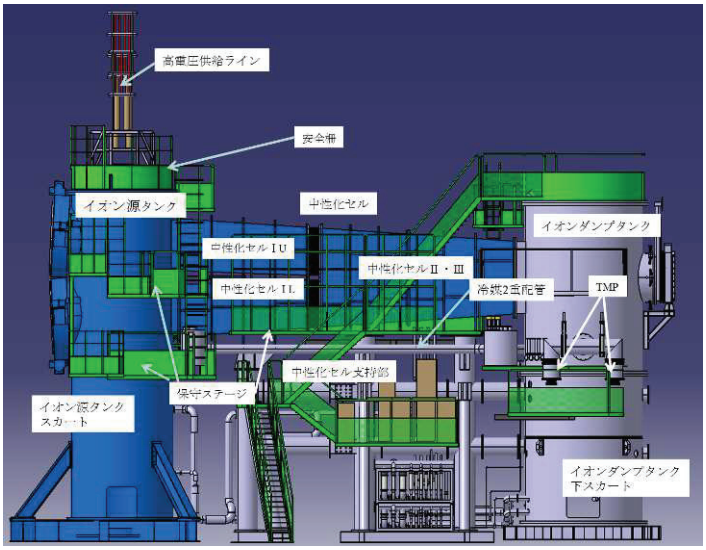


図 2　N-NBI 加熱装置　外観図

シールドの役目を担っている。中性化セルの全長は約 12m、重量は約 45t となる。中性化セル本体は 3 本の支持柱と 5 本の斜柱で構成されている中性化セル支持部が支える構造となっており各支柱の間には、ビームライン機器へ電源供給用の現場盤並びに受熱機器からの熱電対信号を受ける受熱部温度監視盤及びクライオポンプへの冷媒配管、各受熱機器への冷却水ヘッダ等が配置されている。中性化セルもイオン源タンク同様に 2 段構造であり、ビームラインの位置下げのために、最下段部の部品を新規購入部品と入れ替える。イオンダンプタンクは直径 3.5m、高さ 9.0m（4.5m はダンプタンクスカートの高さ）、重量 65t である。中性化されなかった負イオンビームと、引き出された正イオンビームを熱処理するためのビームダンプと、ビームコンディショニングのターゲットとなり、同時にビーム効率を測定できるカロリメーターが設置されている。イオンダンプタンクもイオン源タンクや中性化セル同様に 3 段構造になっており、ビームラインの位置下げのために、最下段部の部品を新規購入部品と入れ替える。

３．N-NBI 加熱装置ビーム軸改造作業

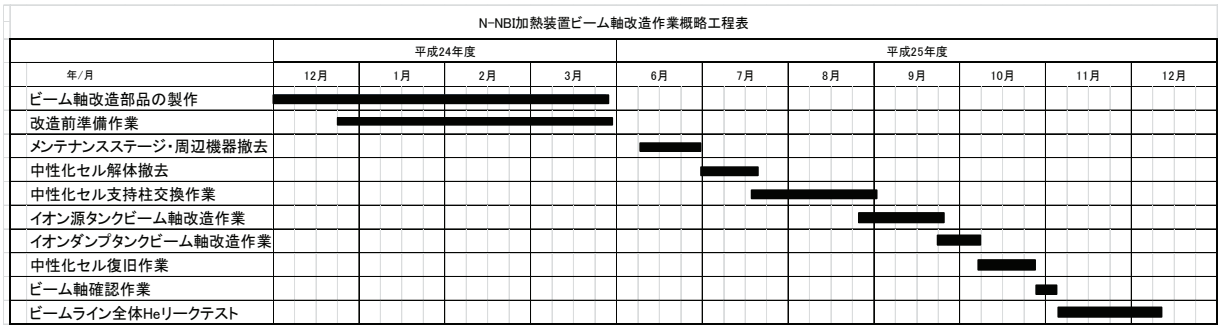


図 3　N-NBI 加熱装置ビーム軸改造作業工程表

JT-60SA 作業計画においては、NBI 以外の組み立て作業の工程上、ビーム入射軸改造作業は平成 24 年 12 月から平成 25 年 12 月までの 1 年間で実施することが求められていたが、設計当初想定していた作業期間（18 ヶ月）は大幅に超えるものであった。そこで、既存設備の解体を最低限に抑え、工期を短縮した。

具体的には、N-NBI ビームライン機器であるイオン源タンク及びイオンダンプタンクに関しては、最下段部品であるスカートを新規製作品と交換し、中性化セルに関しては、新規製作の支持柱と交換する。さらに、各作業手順を見直し、短縮化を図り、約 1 年間で、全ての作業終了の工程を作成した（図 3）。

４．改造前準備作業

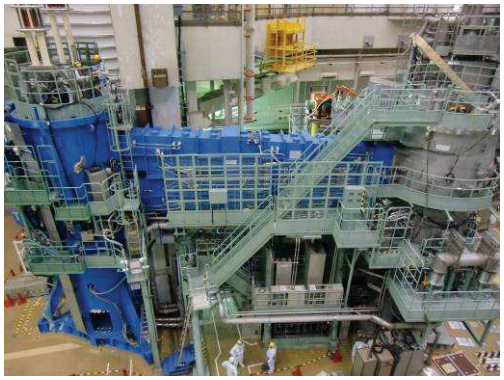


図 4　解体撤去準備作業前

図 5　解体撤去準備作業後

平成 24 年 12 月から平成 25 年 3 月末までに、改造前の準備作業として、一旦 N-NBI ビームラインを解体する作業を実施した。図 4 に解体撤去準備作業前、図 5 に解体撤去準備作業後を示す。各機器への制御ケーブル・動力ケーブルの引き戻し、受熱機器冷却配管及び圧空配管、ビームライン機器真空配管の切離し、ビームライン周辺機器の撤去、ビーム軸確認用架台の設置を実施した。引戻したケーブルは、取外し部の端末処置と行先表示の取付けを実施し、仮置き保管場所として N-NBI 加熱装置の中性化セルの脇へ足場パイプを利用した仮設ステージ（図 6）を設けてケーブルを仮置した。圧空配管及び冷却配管、真空配管等は、接続部の切り離しと各配管サポート部の撤去を行った後、解体時に干渉する部分のみを取り外し、その他の機器は仮設サポートで仮受けした（図 7)。これにより、作業工程の短縮が図れた。ビームライン周辺機器の撤去（図 8）についても、イオン源タンク及びイオンダンプタンク吊り出し時に、ワイヤーと干渉するものだけを撤去することで作業期間短縮を行った。

図 6　ケーブル保管仮設ステージ

図 7　冷却配管サポート

図 8　周辺機器撤去作業

５．中性化セル撤去作業及び中性化セル支持部改造

平成 25 年 6 月から、ビームラインの解体を開始した。各タンク及び中性化セル用のメンテナンスステージの取外しを行い、7 月上旬から重量機器である中性化セルの解体撤去を行った。中性化セルはイオン源タンクとイオンダンプタンク間に設置されているものであり、中性化セルＩU、中性化セルＩL、中性化セルⅡ、中性化セルⅢの 4 部品で構成されている。長さは 12m、総重量は約 45t である。中性化セルの撤去において、中性化セルＩU、L と中性化セルⅡ、Ⅲ間とを接続しているベローズの外装及び内装を切り離し、2 分割した後に、イオンダンプタンク側の中性化セルⅡ/Ⅲ（図 9）からクレーンにより吊り上げて撤去を開始した。撤去された中性化セルは、転倒防止対策を施し作業現場である組立室に仮置き保管した。残りのイオン源タンク側の中性化セルＩU/L（図 10）を撤去した後、1 ヶ月半かけて中性化セル支持構造部の支持柱と斜め支柱を、新規製作部品と交換した。中性化支持部には中性化セル支持柱間に設置されているビームライン現場盤と受熱部温度監視盤用のステージがある。このステージは、斜め柱が貫通しており、支持柱と斜め柱で支持されている。通常支持柱及び斜め支柱を交換するためには、このステージの完全撤去が必要となるが、ステージ上の各盤から配線されている各種ケーブルを引き戻す作業に工期がかかる上、ステージ撤去時には一部を切断する必要があることから作業量が増加する。そこで、今回ステージ撤去は行わず、支持柱交換時には、ステージを仮支持（図 11）し、支持柱及び斜め柱を交換（図 12）する方式を取った。本方式でも撤去できない支持柱に関しては、支持柱を半分に切断（図 13）し、新規に制作した柱を溶接で接続する方式（図 14）を採用した。

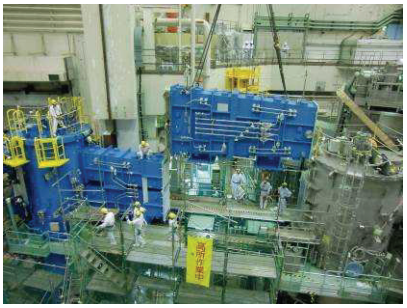


図 9　中性化セルⅡ/Ⅲ撤去

図 10　中性化セルⅠU/L 撤去

図 11　ステージ仮支え柱設置

図 12　支持柱撤去

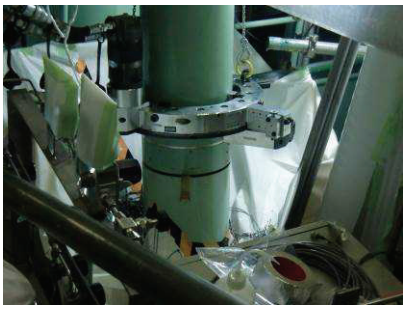


図 13　斜め支柱切断

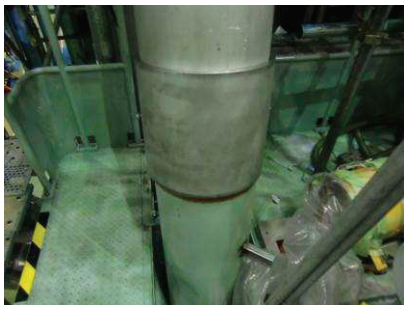


図 14　斜め支柱交換後の接続

６．イオン源タンク改造作業

イオン源タンクのビーム軸改造は、既存のイオン源タンク下側のスカート部分を新規製作したスカートと入れ替えることで対応した（図 15～19)。イオン源タンクスカート上面は、真空境界面である。また、イオン源から引き出された負イオンビームが JT-60 本体の漏えい磁場により軌道を曲げられぬよう磁気シールド板が設置されている。このため、イオン源タンクスカート上面はクラッド鋼と呼ばれる SUS と SS400 の積層構造であったが、クラッド鋼は希少材料であり、入手及び加工時間更にコスト面に問題があり、作業期間内に新規に製作することが困難であった。そこで、クラッド鋼の代替品として、ニッケルメッキした SS400 板を用い、従来のクラッド鋼と同等の磁気遮蔽性能及び脱ガス性能を担保した。製作の際、直径 3m、長さ 4m のイオン源タンクスカート全体にニッケルメッキを施すことは、メッキ加工が困難であるため、イオン源タンクスカートを 2 分割構造（図 17、18）に変更し、真空に晒される上部のみにニッケルメッキを施した。さらに、真空境界面である上面の真空リーク試験をビームライン改造の全体作業終了後に実施し、リークがあった場合は、後戻り作業となり 1 ヶ月半は復旧に掛かる。この理由からイオン源タンク改造作業の終了時点で、イオン源タンクの単体真空リーク試験を実施するため、新規製作イオン源タンクスカート上部は、フラ

図 15　イオン源タンク
吊り出し

図 16　イオン源タンク
スカート吊り出し

図 17　イオン源タンク
新規下スカート据付

図 18　イオン源タンク 新規上スカート据付	図 19　イオン源タンク据付	図 20　イオン源タンク スカート 2 重 O リング

ンジ面に O リング溝を 2 重に設けて（図 20)、イオン源タンクとスカートを組み合わせた後、2 重の O リング間を真空引きし、He リーク試験を実施出来る構造とした。

本改造作業に合わせて、これまでの JT-60 での運転で損傷を受けたビームリミタの熱電対の調査・修理も合わせて実施した。調査の結果、上下ビームリミタの計 8 本の熱電対中 4 本に不具合を起こしていた。

7．イオンダンプタンク改造作業

イオンダンプタンクの改造作業は、イオン源タンクの作業と同様に、新規製作したスカートを交換することによって、ビームラインの位置下げ改造を実施した。イオンダンプタンクスカートは、真空境界面を有していないため、単純に、スカートを新規製作品に交換した後、イオンダンプタンクの芯出し、位置調整を実施した（図 21，22，23)。

図 21　イオンダンプタンク 吊り出し	図 22　新規イオンダンプタンク スカート据付	図 23　イオンダンプタンク 据付

8．中性化セル復旧作業及びビーム軸確認作業

中性化セルの復旧（図 24）は、解体時の逆の手順で作業を実施した。復旧に際しては、ビーム軸との位置関係を常に確認しつつ、構成機器の設置位置の微調整を行った。N-NBI ビームラインのビーム軸は、下イオン源（イオン源 L）のビーム軸と、上イオン源（イオン源 U）のビーム軸で構成されている。ビーム軸の確認と構成機器の設置位置調整には、レーザーセオドライトを使用し、ビーム軸に対する機器の中心位置との設置誤差は±2mm 以内とした。このビーム軸の設定には、建家基準(ベンチマーク)からビーム軸調整用の基準を設けた。レーザーセオドライトは、改造前及び位置下げ改造作業後のそれぞれに対して、イオン源 L 側ビーム軸（図 25)、イオン源 U 側ビーム軸（図 26)、合成したビーム軸を測定するための、簡便に位置を変えられる構造を有する架台に設置した。レーザーセオドライトを用いた測定で、改造後の各機器の設置誤差がビーム軸に対して全て仕様内の±2mm 以内であることを確認した。

図 24　中性化セル据付	図 25 イオン源 L ビーム軸確認	図 26 イオン源 U ビーム軸確認

9．ビームライン真空リーク試験

真空リーク試験実施時の真空排気は、1）仮設の真空排気装置を準備し実施する案と、2）既存の設備（2 台のターボ分子ポンプ（TMP）と補助真空排気系（2 台のメカニカルブースターポンプ（MBP)、4 台のロータリーポンプ（RP)）を用いる 2 案があった。前案は、確実な動作が期待出来る代わりに N-NBI 加熱装置に使用した場合、必要な排気速度を確保するために大型真空排気装置が必要となる上に、トリチウム汚染の可能性があり、使用した真空排気装置は管理区域外への搬出が不可となるため、汚染物抑制の観点からも不採用とした。後案の問題点は、N-NBI 装置の前に撤去された正イオン NBI 装置と共通であり、すでに切断されている真空配管の閉止処置、各バルブの開閉信号や、真空計測信号のインターロックに対する処置が必要となり、作業工程が伸びる事が予想される。そこで、真空配管の閉止処置と並行して、バルブ開閉や真空計測信号等の計装関係の処置を実施した。また、N-NBI 加熱装置は、真空排気速度を向上するため、イオン源タンクスカート内に TMP を設置していたが、クライオポンプへ変更した経緯があり、スカート内に TMP 取合いフランジがあった。既存の TMP2 台を、従来の位置からイオン源タンクスカート内に設置するとともに、位置変更に伴う TMP の排気側の処置については、本改造で廃棄するバルブやベローズを流用し、放射化物低減と工期短縮を実現した。真空リーク試験準備作業はビームライン改造作業と平行して実施し、改造作業終了時速やかにビームライン機器の真空リーク試験を開始した。その結果、従来 1 週間以上有していた真空リーク試験を 4 日間で完了することができた。また、ビームライン全体の真空リーク試験を、3×10^{-10}Pa・m^3/s の感度で実施し、リークが無いことを確認した。

10．まとめ

従来 18 カ月要すると考えられていた負イオン中性粒子入射加熱装置のビームラインの改造作業を、交換部品の最小化を図るとともに、作業工程調整を実施し、僅か 12 ヶ月で完了することに成功した。本作業で培われた知識や技術を、今後に予定されている正イオン中性粒子入射装置の再設置に活用する予定である。

［参考文献］

1）小又　将夫他　；“JT-60SA に向けた NBI 加熱装置の解体”（2013）

マルチスクリーンを用いた高感度ビームプロファイルモニターの開発

○橋本義徳 A)，手島昌巳 A)，外山　毅 A)，三橋利行 A)，大津　聡 B)

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

B) 三菱電気システムサービス

概要

大強度陽子加速器(J-PARC)のメインリングへの入射トランスポートラインで，高感度２次元プロファイルモニターの開発を行っている．３種類のビームターゲットを用いて，ビームのコアからテールまでを６桁以上の感度で計測できることを実証した．測定にはチタン及びアルミうフォイルからの遷移放射光（OTR: Optical Transition Radiation）と，クロームをドープしたアルミナからの蛍光を用いた．

1　はじめに

ハロー領域までを含めたビームプロファイルモニターは，特に大強度加速器の運転においては，ビームコリメーションを診断し最適化を図ること，またロスを制御するなどの重要な診断の役割を受け持つ．そして２次元での測定ではさらに高度な情報を得ることができる．

我々は, J-PARC メインリングへの入射路である 3-50 BT のビーム診断装置として, まず OTR を用いたビームプロファイルモニターを開発した[1,2]．このモニターでは，ビームコア部の 2 次元プロファイルは，5×10^{11} p/bunch 以上で有意に診断できた．その理由として，3GeV 陽子ビームからの OTR の大きな角度広がり ±13.5° であること，またビームのσが 15mm 程度のサイズの大きなビームであること，のこれらの問題を克服するために，受光口径 300mm の大きな凹面鏡を持つ Offner リレー光学系を採用することにより, OTR の光収率を上げる工夫を行ったことによる．

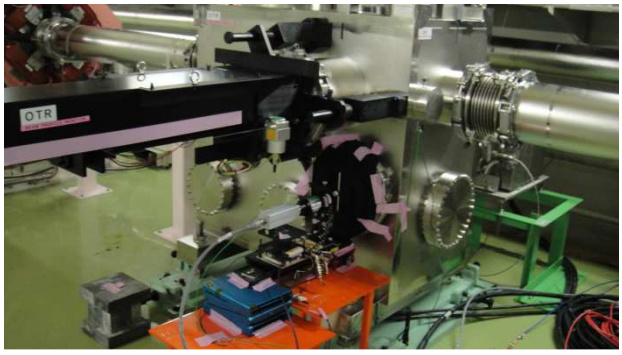


図 1:ビームラインに設置された計測装置 真空容器から左手に伸びる黒い箱は，マルチスクリーンターゲットの直線導入機．その下に CID カメラと I.I. が設置されている．

さらに，ビームコアの周辺部に広がるハロー領域を限定して計測するために， OTR を使わずに，より発光量の高いスクリーンを用いることにした．Al_2O_3 + Cr（アルミナ）のスクリーンは発光量も高く残光が長い時間に亘って続くためにその光量を積分することで収量を増やすことができる．また，コアのすぐ外側近傍を高感度で計測するために，中央部に丸穴をもつアルミスクリーン（100 μm^{t}）も用意し，コアよりもさらに感度を上げて計測できるようにした．

これらを組み合わせたマルチスクリーンターゲットを用いて．高感度計測の実証試験を行った[3].

2　計測装置

真空容器の製作では，Offner 光学系とターゲットのアラインメント方法及びメンテナンスの容易さ，そして構造的な安定性に留意した．図 1 に装置の外観写真と図 2 にその構成を示す．真空容器の外形サイズは，$(1100^{L}\text{-}1259^{H}\text{-}620^{D})mm^3$ である．容器内部は，(1) ターゲットルーム，(2) OFFNER　リレー光学系ルーム，(3)

２次光学系ルームの３室から構成されている．

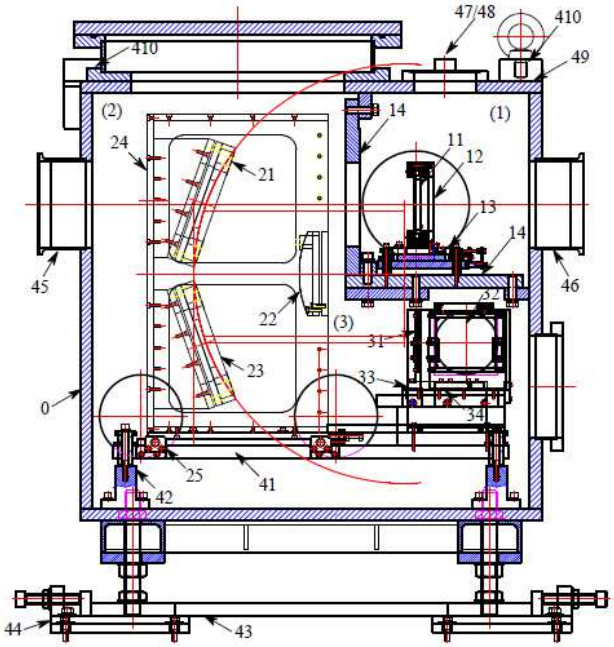


図 2: 真空容器の構成． (1) ターゲットルーム：11 ターゲット，12 フレームガイド，13 ターゲットベース，14 仕切り板，(2) OFFNER リレー光学系ルーム：21 上部凹面鏡，22 凸面鏡，23 下部凹面鏡，24 ミラーホルダー，25 ポジショナー，(3) 2 次光学系ルーム：31 スクリーン，32 平面鏡，33,34 ポジショナー，(4) その他：41 光学ステージ，42 ポジショナー，43 容器ベース，44 固定ベース板，45 上流側ビームパイプ，46 下流側ビームパイプ，47-49 レーザートラッカー計測用ピンネスト台座，410 吊り具，0 容器．

マルチスクリーンターゲットと，ターゲットフレームのスライド装置を各々図 3，4 に示す．マルチスクリーンは，図 3 のように円形の 3 連で構成されており，リング内径は 120 mm，スクリーンのピッチは 150 mm である．これらは一つのフレームに収められており，水平方向にステッピングモータにより直線導入され，ビームコアからテールのハロー領域までを切り替えて使用する．また図(b), (c) のスクリーンのエッジをビームに対して任意の位置にセットすることができる．(a)の 10 μm^t チタンフォイルのソリッドスクリーンの非平坦性は，22(±7.5) μm である[4].

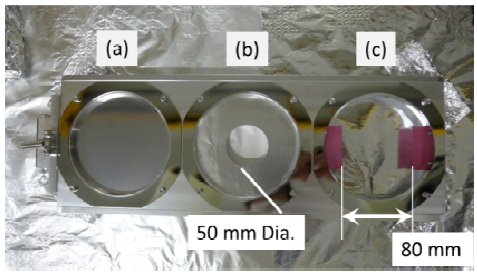


図 3: マルチスクリーンターゲット．(a)10 μm^t チタンフォイル．(b)100 μm^t アルミフォイルは直径 50 mm のビーム穴を持つ． (c) 0.5 mm^t の Cr をドープした Al_2O_3 スクリーン．

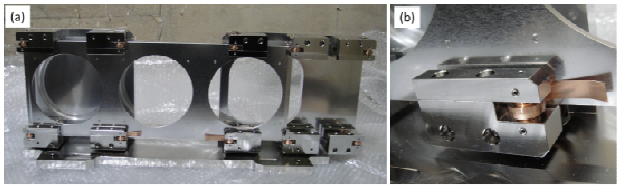


図 4: (a) マルチスクリーン用フレームのスライド装置，(b) スライド装置のギャップの摺動部には，リン青銅製のカムフォロワーを採用し摩擦を低減している．ターゲット位置の平坦性は， 150 μm 以下となるように，厚みの明確な金属テープを用いてフォロワーのローター位置を調整した．

真空内に収められている Offner リレー光学系の概念図を図 5 に，製作した光学系を図 6 に示す．Offner リレー光学系は 3 つの球面ミラーで構成されており，図 6 に示すように同心の R500 と R250 の位置にそれぞれ凹面鏡と凸面鏡を配置してある．30 mm 厚みの Pyrex ガラスを球面研磨し球面以外の全ての外表面全体をアルミ蒸着した．各ミラーは直接アルミ製の調整ベースに取り付けることにより帯電しない構造である．アルミのハウジングに全ての光学要素が収められており，その重量は約 70 kg である．

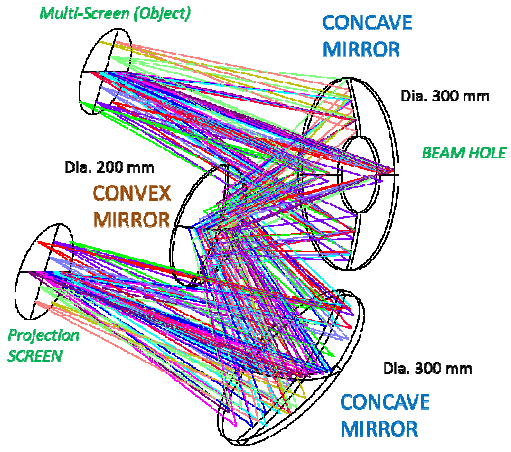


図 5: Offner リレー光学系概念図

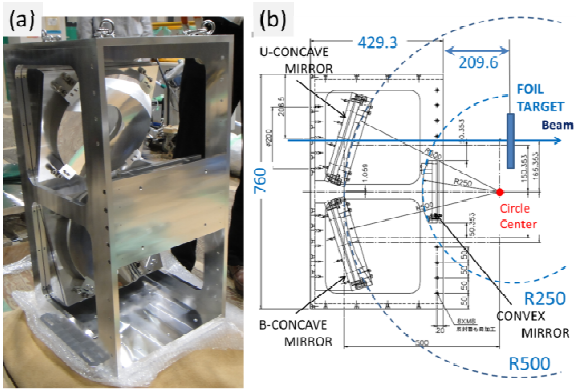


図 6: Offner リレー光学系実機．(a) 3 つの鏡はアルミ製のハウジングに収められた．上部凹面鏡には，ビームを通過させる直径 120 mm の穴をあけている． (b) ターゲットと光学系の位置関係．

OFFNER 光学系の特性をテストベンチで測定した（図 7)．焦点深度は，±10 mm 程度であった．垂直と水平方向での焦点位置が 3mm 程度異なるアスティグマティズムが見られた．10 mm ピッチのグリッドスクリーンを用い，水平方向±100 mm，垂直方向 +30/-60 mm の範囲で良い結像を見た．中心部では，0.2 mm 程度の空間分解能を持つ．垂直上方方向（反転）の領域が狭くなるのは，中央の凸面鏡で視野を削っていることの影響である．

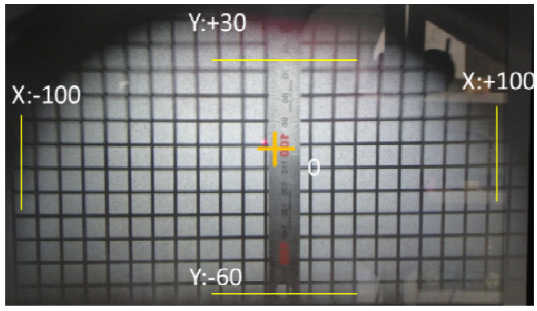


図 7: Offner 光学系のグリッドパターンテスト．

3 計測器

測定装置は，集光レンズ，Image Intensifier (I.I.) をリレーレンズ で CID (Charge Injection Device) カメラに接続する構成である．CID カメラは，300kGy 程度の耐放射線性をもつ. 図 8 に装置全体のセットアップを示す．CID カメラのビデオ出力信号は，約 400m 遠隔の電源棟まで, 5D サイズの同軸ケーブルで転送し，10 bit Video ADC でデジタル化している．ターゲットで発生した光は，Projection Screen に結像され，560 mm に置かれたレンズで集光する．測定装置の主要なスペックは図 1 にまとめる．I.I. は，シングルステージの MCP を内蔵しており，1〜10 μs の高圧パルスを印加させることでビームに同期させてゲートを掛けて OTR 光と蛍光を測定する．I.I. の光ゲインの高圧依存性を図 9 に示す.

表 1: 計測器の主要なスペック

Device	*Item*	*Specification*
Focus Lens	Focal Length	17 mm
[YakumoYMV2595N]	F number	0.95
	Image Format	1” (16 mm dia.) 12.8×9.6
	Front Aperture	26.8 mm
Image Intensifier	MCP	Single Stage aperture 18 mm
[HPK V2697U]	Luminous Gain	12000[lm/m^2/lx] at MCP 900V
	Resolution	30 [lp/mm]
	Phosphor Screen	Persistence: ~1ms
Relay Lens	Magnification	0.5
CID Camera	Radiation Tolerance	300kGy
[ThermoFisher8725D]	Image Format	1”
	Sensitivity	0.1 lx

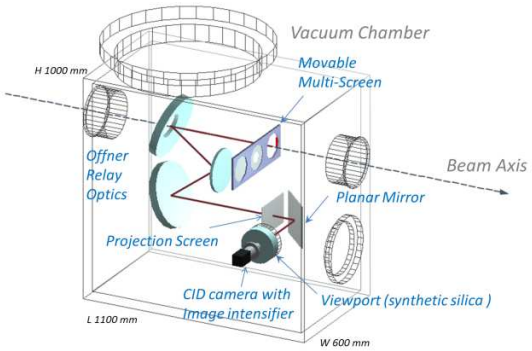


図 8:マルチスクリーンモニターセットアップ

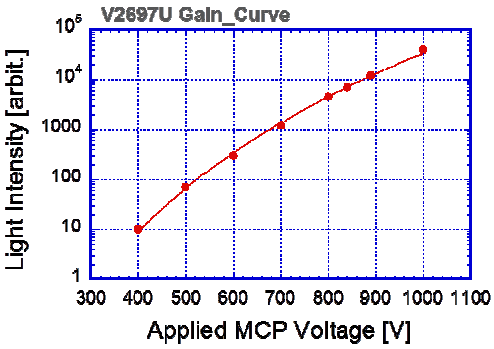


図 9: I.I. のゲインカーブ.

4　測定結果

マルチスクリーンを用いての測定結果をスーパーインポーズして図 10 に示す. ビームコアからハロー領域のビームテイルまでを，やや低めのビーム強度である遅い取出しの営業運転モードの 9.6 × 10^{12}/2bunch において計測した．測定には，図 3 の 3 種類のスクリーンを用いた．それぞれの測定では，I.I.のゲインを光量に応じて最適化している. また I.I. ゲート時間を 10 μs にセットし，2 bunch/shot で，平均化するために連続する 5 ショットを取得した．またデータからビーム不在時のバックグラウンドを差引いている．中央のビームコアはチタンのソリッドスクリーンにより，そのすぐの外側の三日月型のテイル部は 50 mmΦの穴あきのアルミスクリーンを用いて共に OTR 光を測定したものである. さらに外側の左右それぞれ 3 つのプロファイルは，アルミナスクリーンからの蛍光により得られたプロファイルである．図の下の水平方向に射影したプロファイルはピーク値でノーマライズしたものである．尚，以下の解析は，全て水平(H)方向に射影したプロファイルを用いて行った.

これらのプロファイルデータをつないでひとつながりの空間分布を作成するためには，次が必要である.

i) OTR 光と FL 光の収量比

ii) I.I. のゲインカーブ

ii)は，図 9 で求まっているので，i)を測定するために，±25mm にセットしたアルミナスクリーンから

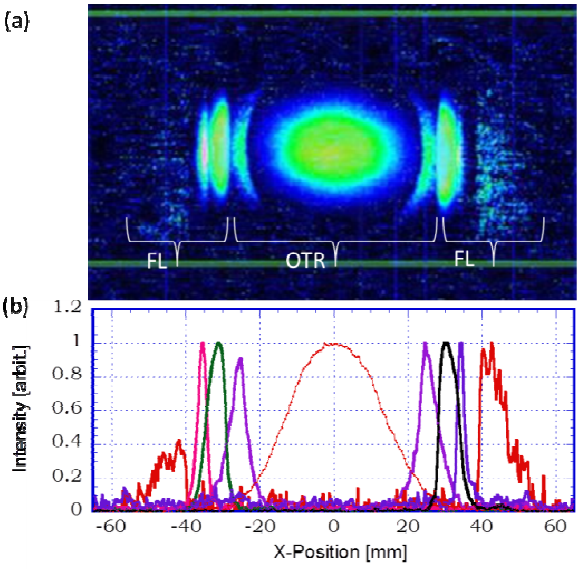


図 10:マルチスクリーンを用いて計測されたビームプロファイルをスーパーインポーズした． (a) 2 次元ビームプロファイル, (b) その水平方向への射影.

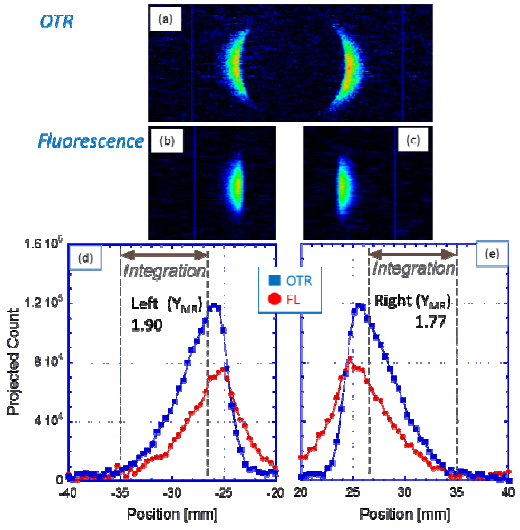


図 11: OTR と蛍光の比較． (a)は．OTR， (b), (c) は蛍光からの 2 次元ビームプロファイル．(d) と (e) はそららの射影.

の蛍光を用いたプロファイルと 50mm φの穴あきスクリーンからの OTR のプロファイルの比較を行った(図 11). この測定時の I.I.の MCP 電圧は，OTR 計測のとき 1000 V，蛍光測定のとき 500V であった.

図の(c), (d) に赤と青のマークでそれぞれ OTR，蛍光の射影を示す. 蛍光/OTR の収量比を求めるには，まず測定データの面積（カウント）比を求め，次に MCP ゲインの補正を行う 2 段階の手順を行った.

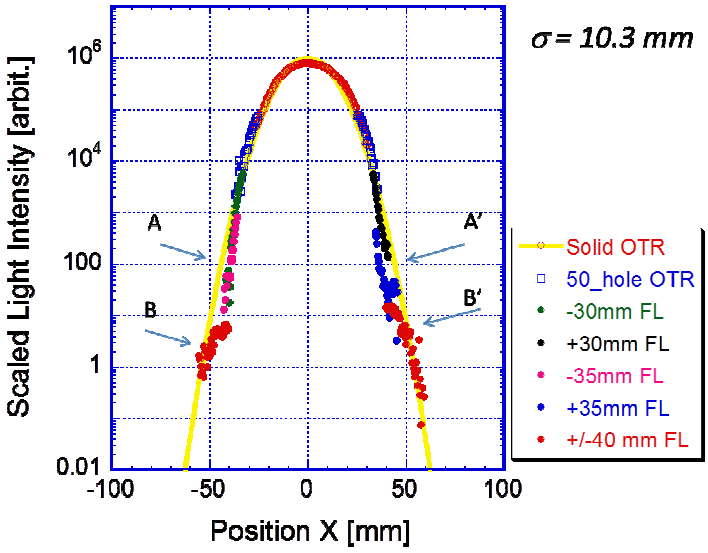


図 12: マルチスクリーンによるビームプロファイル

まず，図中の両矢印の領域である[-35, -26.5] mm 及び[26.5, 35] mm の範囲で，カーブを積分して，蛍光と OTR の面積比を求めた．ビーム左側の(c) のプロファイルでの比の値は 1.908 であり，右側の(d)のプロファイルでの比の値は，1.773 であった．これらの左右の比の平均は，面積比蛍光/OTR=1.84 (±3.7%)となった.

次に，OTR データ取得時の MCP 電圧 1000V と FL の 500V での収量比を補正するために，図 9 のカーブから，ゲイン比 MCP1000V/MCP500V を求めると 5.0e4/7.0e1=714.3 である，したがって，面積比蛍光/OTR にこのゲイン比を乗じて，収量比 FL/OTR=1.84×714.3=1314.6 となった.

さて，上記のようにして実測の光量値で補正することにより蛍光相当の OTR 光のプロファイルを求めることができた．同じ方法により，残りのデータであるチタンソリッドスクリーンからの OTR と蛍光の測定データを全て蛍光相当で，かつ同じ I.I. ゲイン相当の値に補正した．それら全ての補正データをプロットしたものを図 12 に示す．全体のデータがほぼ素直な形で接続され，ピークに対して 10^{-6} 以下までのデータを得た．黄色実線は，ビームコア部の OTR データだけのガウスフィットカーブであり，その σ は 10.3 mm であった．またビーム領域は 100mm 以上にまで及んでいることがわかった.

5　ビームコアとハローの同時計測

ビームハローをビーム中心部に対して 10^{-6} のオーダーまで計測できることがわかったので， 図 13 のように，OTR 計測用のチタンソリッドフォイルのビームから見た直前に，4 方向からの可動式アルミナスクリーンを配置する計画である．このようにすることで，図(a) の下部に示すようなビームコアとハローの同時計測の射影データが得られることが期待される．図(b)に，現在製作中の

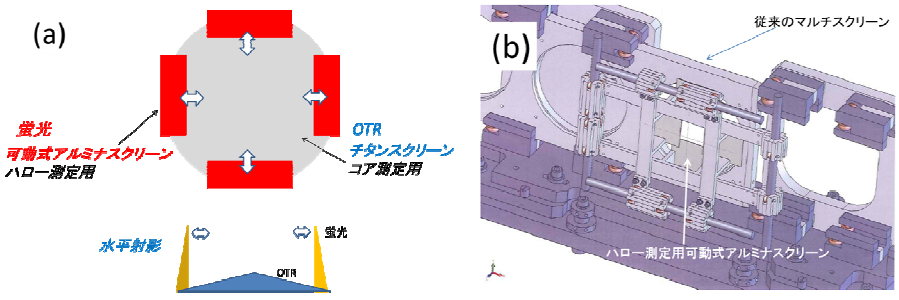


図 11: OTR と蛍光の同時測定装置． (a)はビームから見たターゲットの構成，下部にあるように OTR と蛍光を同時に計測できる． (b)は，現在製作中の 4 方向可動式のアルミナスクリーン用ターゲット駆動装置のヘッド部.

アルミナスクリーンの可動装置のヘッド部を図示してある.

6　まとめ

OTR と蛍光でのプロファイル測定を組み合わせることで，ビームの横方向の空間分布を 6 桁程度の光強度比で測定した. クロームをドープしたアルミナスクリーンを用いるメリットは, 残光時間が長いことであり, 時間積分により大きな光量を得ることができることである. 今回の測定に用いた I.I. ゲート時間の 10 μs よりもさらに時間を伸ばすことで，現在よりも下の桁までの測定が可能になると考えている．ビームから見てアルミナスクリーン を OTR のソリッドスクリーンの直前のハロー領域にセットすることで，OTR 光と蛍光を同時に計測できるターゲットシステムの設計を行っている．これにより，ビームコアからハローまでをワンショットの計測で行うことができると考えている.

今回は，限られたスタディー時間での最初のハロー計測のデータとその解析を報告した．今後はシステムの特性を含めてさらに高精度な測定装置として完成度を高めてゆきたい.

参考文献

[1] M. Tejima, et al., “Development of Offner Relay Optical System for OTR Monitor at 3-50 Beam Transport Line of J-PARC, Proc. Proc.International Beam Instrumentation Conference (IBIC), Tsukuba, 2012.

[2] M. Tejima, et al., “Fabrication Summary on the Equipment of an OTR Beam Profile Monitor for the J-PARC 3-50BT “, Proc. 10 th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013 (in Japanese).M. Tejima, et al.,

[3] Y. Hashimoto, et al., “A DEVELOPMENT OF HIGH SENSITIVE BEAM PROFILE MONITOR USING MULTI-SCREEN”, Proc.International Beam Instrumentation Conference (IBIC), Oxford, 2013.

高エネ研放射光科学研究施設　BL15 の建設

○小山篤，上條亜衣，丹羽尉博，仁谷浩明，清水伸隆，五十嵐教之

高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所　放射光科学研究施設

概要

放射光科学研究施設は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構にある研究施設で、周長 187m・2.5GeV の PF リングと、周長 377m・6.5GeV の PF-AR リングから放射される放射光を利用した実験が行われています。国内外の大学・研究所・民間企業などから、年間約 3500 名の研究者が利用しています。

BL15 は PF リングに新しく設置された挿入光源（ショートギャップアンジュレーター）からの放射光を用い、XAFS、小角散乱などの実験を行うためのビームラインです。昨年春～夏に設置作業を行い、今年春からのユーザー実験開始に向けて、現在立ち上げ調整中です。今回はビームラインの設計・設置、性能評価実験の結果を報告します。

1　BL15 の特徴

BL15 では主に XAFS(エックス線吸収微細構造)、小角散乱(SAXS)の実験を行うためのビームラインです。それぞれの実験で必要な放射光の性能は表 1 の通りです。

要求ビーム性能と光学系の比較

SAXS	ビーム性能項目	XAFS/XRF
2～3, 6～7, 10～12	エネルギー (keV)	2.1～15（連続）
100(H)x10-100(V)	サイズ (μm)	10-20
<0.3 mrad	発散	特に規定しない
>10^{10} phs/s	フラックス	エネルギー分解能の方が重要
2x10^{-3}で十分	エネルギー分解能	<2x10^{-4}
大きな実験ハッチ	その他	エネルギーの高速掃引
低発散型光学系 高散乱能の分光 なるべく少ない光学素子	光学系	縮小光学系 高分解能の分光 高次光抑制鏡（ダブルミラー）

⇒ 高精度かつ迅速に切替可能なタンデムビームライン

表 1

このような実験側からの要求を満たすため、今回建設を行った BL15 には以下の特徴があります。

・挿入光源（ショートギャップアンジュレーター）からの強力な放射光を使用　→　熱対策が必要
・実験によって異なるビームへの要求を、5 台のミラーにより実現
・実験に使用する放射光のエネルギー範囲が広い　→　分光器の駆動範囲が広い
・XAFS 実験では連続的に放射光のエネルギーを変える　→　挿入光源と分光器の同期制御が必要
・低エネルギーの放射光も使用する　→　放射光リングとビームラインを仕切る窓材を設置しない
・ビームサイズが 10 μ m 程度と小さい　→　振動対策が必要

主要な光学素子の配置は以下のようになります。それぞれの実験では別な実験装置を使うため、実験ハッチは 2 つに分かれています。2 つの実験は同時には行えませんが、片方の実験ハッチを利用している時に他方の実験ハッチには入室ができるようになっています。ビームラインの全体図を図 1 に示します。

距離	名称	仕様		
0m	アンジュレーター	周期長 17.6mm、周期数 27、最大 K 値 1.61		
15m	水平方向平行化ミラー(M1)	Aspherical Flat Bent	Ph コート　入射角 4.0mrad	間接水冷
21m	分光器(Mono)	分光結晶 Si(111)	入射角 7～72°	液体窒素冷却
25m	鉛直方向集光ミラー(M2)	Flat Bent	Rh コート　入射角 4.0mrad	
26.5m	水平方向前段集光ミラー(M3)	Flat Bent Bimorph	Rh コート　入射角 4.0mrad	
30m	高調波除去ミラー(M4)	Double Flat	Ni コート　入射角 0～12mrad	
31m	四象限スリット	仮想光源点		
32.5m	水平方向後段集光ミラー(M5)	Double-Surface Bimorph	Rh コート　入射角 4.0mrad	

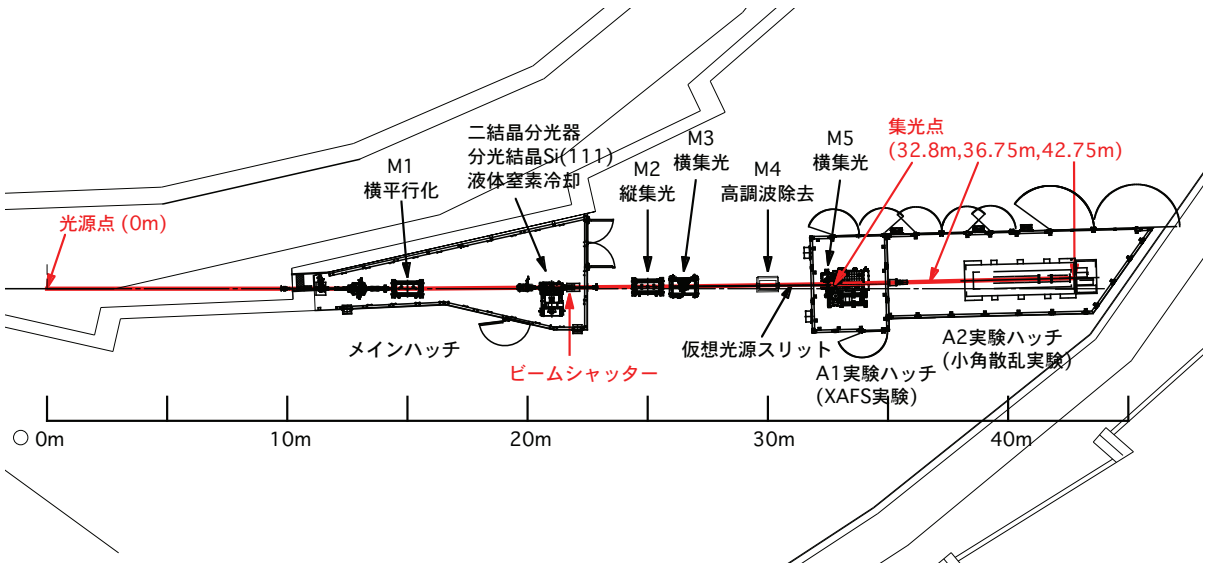


図 1　BL15 の全体図

2　光源

BL15 の放射光源は新たに設置されたショートギャップアンジュレーターです。アンジュレーターとは高速で周回する電子を磁場により蛇行させることにより放射光を発生させる装置です。磁場で曲げられる毎に発生する放射光が互いに干渉し、波長分布は不連続ですが指向性が高く、かつ輝度の高い放射光を得ることができます。BL15 に設置されたアンジュレーターは、27 対の永久磁石により磁場を作っています。図 2 に BL15 のアンジュレーターからの放射光強度の計算値を図 2 に示します。赤で書かれた曲線は永久磁石の間隔を 4mm にした時に得られる放射光の強度の計算値で、磁石の間隔を広げていくと、強度のピークは高エネルギー側にシフトします。

写真 1　放射光リングに設置された挿入光源

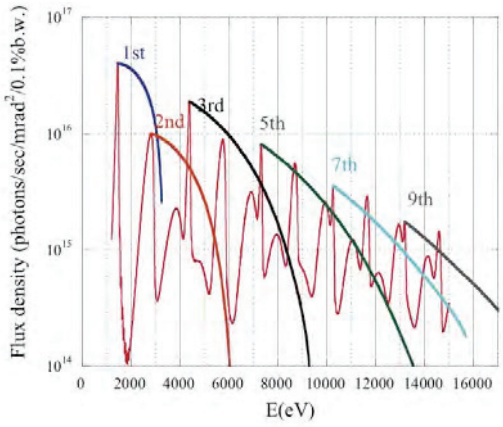


図 2　挿入光源からの放射光の強度（計算値）

3　集光光学系

広がりをもって放射される放射光を実験試料の位置で集光させるためにミラーによる集光が行われています。

水平方向は M1 ミラーにより放射光を平行化し、さらに M3 ミラーにより 31m 地点に設置したスリットの位置に集光させて、そこを仮想光源点とします。M5 は曲率を変えることができる両面ミラーで、A1 ハッチ使用時には強く曲げて M5 ミラーから 30cm の位置に集光させて、集光点に試料を置いて XAFS 実験を行います。A2 ハッチ使用時にはミラーの裏面を使い、A2 ハッチ内に集光させます（図 3）。垂直方向は M2 ミラーにより、それぞれの集光点に集光させます。M4 は高調波（実験に使うエネルギーの 3 倍、4 倍などのエネルギーを持ったＸ線）を除去するためのミラーです。

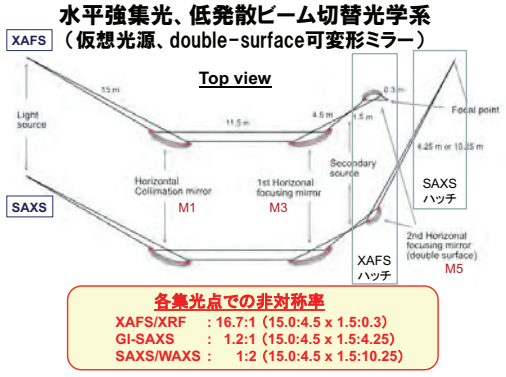


図 3　集光光学系（水平方向）

4　分光器

放射光の中から実験に必要なエネルギーの放射光を取り出すための装置が分光器です。BL15 の分光器には平行に配置された 2 枚のシリコン結晶が使われています。結晶への入射角を変えることにより実験に必要なエネルギーの放射光を取り出しますが、BL15 は実験に使用するエネルギーが 2.1～15keV と非常に広いため、分光器の入射角は 70.3°～7.6°と広範囲になります。

挿入光源からの強力な放射光によりる分光結晶の歪みを小さくするために、分光結晶は液体窒素により冷却されています。

また、XAFS 実験では放射光の分光結晶への入射角を連続的に変化させ、放射光のエネルギーを変化させながらデータをとりますが、それぞれのエネルギーで強い強度の放射光を得るために挿入光源のギャップを同期させて動かします（分光器と挿入光源の同期制御については、本研究会ポスター発表 : 永谷康子「KEK-PF 新 BL2 および新 BL15 の制御システム」を参照して下さい）。

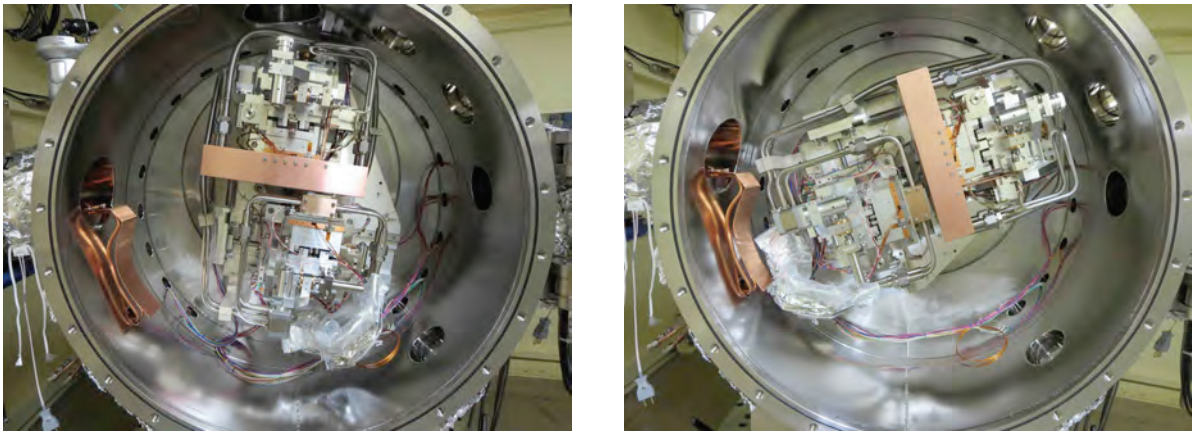


写真２　左が入射角約１０°、右が入射角約７５°
第２結晶は銅製のカバーの陰になり見えていない

5　真空系とインターロック

放射光の電子蓄積リングは 10^{-9}Pa 台の超高真空となっているため、一般的なX線用のビームラインでは蓄積リングとビームラインの間は 0.2mm 程度のベリリウム板 2 枚により真空的に切り離しています。しかし、BL15 では低エネルギーの放射光も使用するため（2.1keV の放射光は 0.4mm のベリリウム板により 99%以上が吸収される）、ベリリウム板による仕切りをなくし、電子蓄積リングとビームラインが真空的に切り離されていない構造になっています。ビームラインの真空が、蓄積リングの超高真空に影響を与えないために、ビームラインにマスク(5mm(H) X 2.5mm(V)と 10mm(H) X 7mm(V))や細くて長い角管を設置し、その前後に真空ポンプを配置することで差動排気をおこなっています（図４）。

実験は実験ハッチ内で大気中で行います。ビームラインの真空と大気は通常 0.2mm 程度のベリリウム窓により隔てていますが、窓材による放射光の吸収を少なくするため、BL15 では 25μm のカプトン膜を窓材として使用しています。

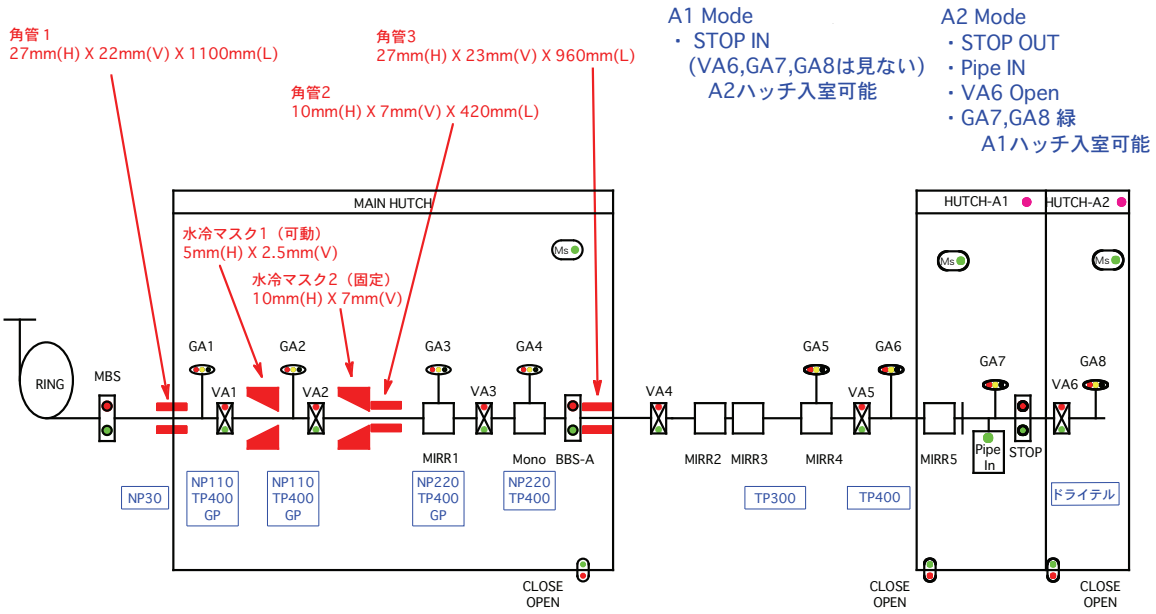


図４　インターロックと真空システム

6　振動対策

BL15 の放射光ビームは、ミラーで集光されることにより、集光点では 10μm オーダーの大きさになります。ミラーなど光学素子のわずかの振動でも放射光ビームが動いて実験に影響を与えるために、振動対策が必要になります。

放射光実験ホールは地下深くまで埋められた杭の上に、高さ 1～1.5m、幅 0.4～0.5m の梁を渡し、梁の上に厚さ 20cm のコンクリートの床を載せた構造になっています。梁の間隔は 3～7m 程度あり、コンクリートも薄いために、梁から離れた場所では人が近づくと体重により床が沈みビームが動く事が観測されるビームラインもあります。小さなビームを使う BL15 ではそのような動きを抑えるために、主要な光学素子は梁の上に載るように設計しました。しかし、M3 ミラーと M5 ミラー、XAFS 実験装置は梁から離れた位置に設置することになってしまったため、その部分の床を補強する工事を行いました。厚さ 20cm の既設コンクリート床を撤去し、梁に鉄筋を打ち込み、新たに厚さ 50cm のコンクリート床を敷設しました。

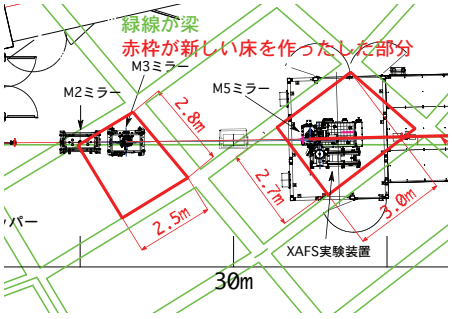


図５　床工事の範囲

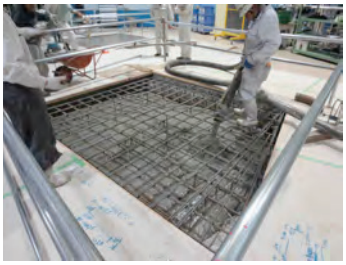


写真３　既設床を撤去し、梁から鉄筋を組みコンクリートを流し込む

光学素子の架台は通常鉄材で製作しますが、ミラー、分光器など主要な光学素子の架台は固有振動数を持たず、重量も重たい石定盤で作成して振動を抑えています。また、真空ポンプの振動がビームラインに伝わるのを抑えるために、ポンプを除振台に乗せる、砂を入れて重たくした架台の上にポンプを固定する、ポンプとビームラインの間に長めのベローズを入れるなどの対策をしています。さらに、ミラーなどでは光学素子本体やその駆動機構を載せている架台と、真空チェンバーを別の架台に載せることにより、真空ポンプなどの振動がミラー本体に伝わるのを抑えています。

写真４　M2 ミラーとスリット
駆動機構の架台として石定盤を使用。
真空チェンバーと駆動機構が別の架台になっている

写真５　真空ステーション
ポンプは除振台、砂入りの架台の上に設置
長めのベローズで真空チェンバーと切り離す

7　得られた光

１２月末までにM１ミラー、分光器の調整を行い、BL15A1 ハッチに光を導入しました。挿入光源のギャップ値を 4mm とした時に観測された放射光の強度を図６に示します。これは計算で求めたスペクトル（図２）と良く一致しており、予定通りの光を得ることができました。

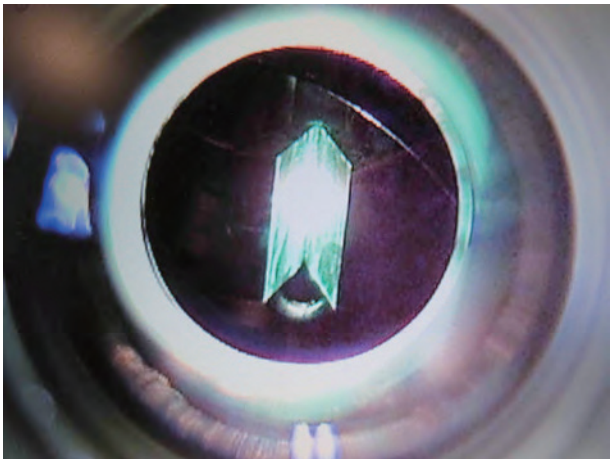


写真６　放射光で光るビームストッパー

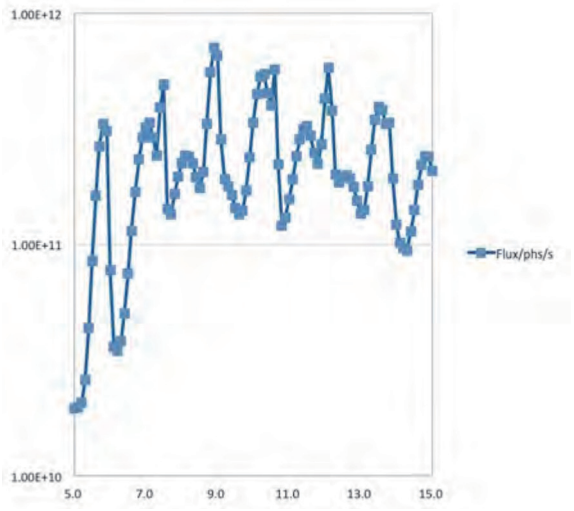


図６　観測された放射光スペクトル

8　今後の予定

今年１～２月のビームタイムではM２～５ミラーを光軸に入れ、春からの共同利用実験に向けて調整を進めていく予定です。

写真７　BL15 全景

写真８　BL15A1 ハッチと XAFS 実験装置

写真９　BL15A2 ハッチ内の SAXS 実験装置

J-PARC MR エキサイターにおけるマルチパクタリング対策

○岡田 雅之 A), 外山 毅 A), アレキサンダー・シュナーゼ B)

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

B) GSI

概要

J-PARC　主リング加速器ではビーム制御の為にエキサイターを設置している。エキサイターはその構造上マルチパクタリングが発生しやすいが、これは真空の悪化を引き起こしビームに悪影響を与える為、抑制する必要がある。現在ビーム軸方向に微弱な磁場を作る事でそれを行っているが、これを電極のコーティングによる方法に変更したいと考えている。そこで、窒化チタン(TiN)・ダイヤモンドライクカーボン(DLC)の２種類の試料について二次電子放出の測定と RF テストを行った。

1　J-PARC MR エキサイター

J-PARC は 400MeV 線形加速器, 3GeV シンクロトロン(RCS), 50GeV シンクロトロン(MR)からなる陽子加速器で、そのうち MR は直径約 500m のもっとも大きいシンクロトロンで、RCS から 3GeV で入射した陽子ビームを 30GeV に加速して約 2.5 秒～6 秒周期でニュートリノ実験施設やハドロン実験施設に供給している。

MR にはビーム軌道を制御する為のエキサイターと呼ばれる装置が 2 組設置されていて、Bunch by Bunch Feedback や　Tune 測定、遅い取出しにおけるスピルリップル低減 及び Intra-bunch Feedback のスタディに利用されている。エキサイターはストリップライン型キッカーと呼ばれるタイプの向かい合った平行電極に逆位相の電圧を印加する事でビームを制御している。

エキサイターの様に高圧の高周波を印加する機器では電極間でマルチパクタリングと呼ばれる現象が発生する。マルチパクタリング発生すると真空が悪化して放電などの悪影響が生じる為、これを抑制するためになんらかの処置をする必要がある。今回、MR エキサイターで行ったマルチパクタリング対策について報告する。

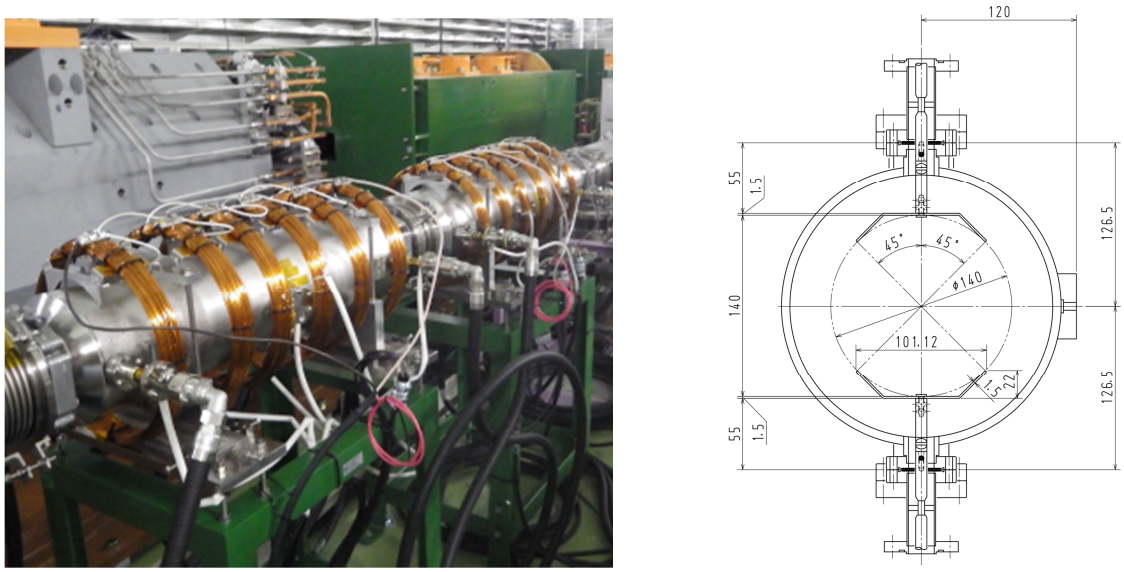


図 1 J-PARC MR エキサイター (左:設置写真　右:構造図)

2　マルチパクタリングとその対策

2.1　マルチパクタリング

エキサイターの様な向かい合った電極に RF 電圧が印加されている状況において、ビームや放射線の衝突等の要因で電極表面に 1 次電子が放出されたとする。放出された電子は RF 電場により加速され反対側の電極に衝突し、2 次電子を放出する。この時 RF が最初の放出の時と逆位相であれば、2 次電子は再び反対側の電極に向かって加速される。この様に電子が RF に同期して電極間を行き交う現象をマルチパクタリングという。

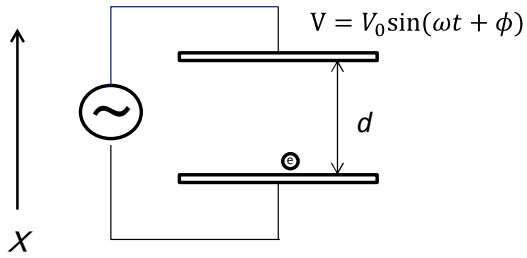


図 2　マルチパクタリングモデル

図 2 の様な電極間隔が d の平行平板の間に $V=V_0 sin(\omega t+\phi)$ の電圧が印加されたモデルの場合、電極間の電子の運動方程式は

$$\frac{d^2x}{dt^2}=\frac{eV_0}{md}\sin(\omega t+\phi) \tag{1}$$

で表される。ここで、m は電子の質量、ω は RF 周波数、φ は初期位相(0≦φ≦π/2)である。t=0 の時 x=0、dx/dt=0 の条件でこの式を解くと時刻 t での電子の位置は

$$x=-\frac{eV_0}{\omega^2 md}\left[\sin(\omega t+\phi)-\sin(\phi)\right]+\frac{eV\cos(\phi)}{\omega md}t \tag{2}$$

となる。マルチパクタリングの起こる為には、電場が逆位相となる t=(2n+1)π/ω の時に x=d にならなくてはならないので(2)式は

$$d=\frac{eV_0}{\omega^2 md}\left[2\sin(\phi)+(2n+1)\pi\cos(\phi)\right] \tag{3}$$

と表される。ここで n=0 とした場合、マルチパクタリングの起きる RF 条件は

$$0.267\le\frac{eV_0}{\omega^2 md^2}\le 0.5 \tag{4}$$

となる。[1]

ところで、この計算では 1 つの電子が電極に衝突した際に放出される 2 次電子の数を 1 つとしているが、実際にいくつの電子が放出されるかは電極の状態や衝突の際の電子のエネルギーで異なる。加速された電子が電極表面に衝突した際に 1 つの入射電子に対していくつの 2 次電子が放出されるかの比を二次電子放出係数(SEY: Secondary Electron Yield)と言う。この値が 1 以上の場合マルチパクタリングは持続・拡大するのに対し、1 より小さい場合は収束に向かう。したがって、マルチパクタリングの対策としては①マルチパクタリングの RF 条件を避ける。②二次電子放出率を 1 より小さくする。と言う 2 つの方向が考えられる。

2.2　ソレノイド磁場によるマルチパクタリング対策

現在 MR エキサイターでは、図 1 からも分かる様にチェンバーの外側にソレノイドコイルを巻いて電流を流してビームと平行な磁場を発生させることにより RF の条件を変化させてマルチパクタリングを抑制している。写真のエキサイターの場合、100 ターンのコイルを 6 つ設置しており、コイルに 4A の電流を流し 30Gauss 程度の磁場を発生させる事でマルチパクタリングは抑えられる。

しかし、コイルに電流を流すためには当然の事ながら電流電源が必要で加速器運転中はその維持管理をし

なくてはならず、トラブルの原因ともなりうる。

2.3　電極コーティングによる対策

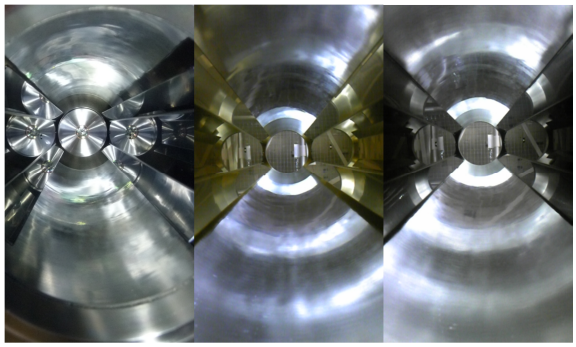
そこで、電源を用いない対策として今回②の方法に沿って電極表面をコーティングする事で二次電子の放出を減らす方法を検討することにした。電極としてステンレスの基材に電解研磨しただけの物(SUS)・窒化チタン(TiN)でコーティングした物・ダイヤモンドライクカーボン(DLC)でコーティングした物を用意し、それぞれの SEY や RF 印加時の真空の変化を測定して比較する事にした。

3　二次電子放出率の測定

SEY の測定は試料に電子ビームを照射し、その反射電流を測定する方法で行った。SEY は反射電流 (I_r)/入射電流 (I_b) で定義されるが、実際の測定では I_b の測定は困難なので下式の様に反射電流とサンプルホルダーからのコレクタ電流 (I_i) を測定して計算で求める。

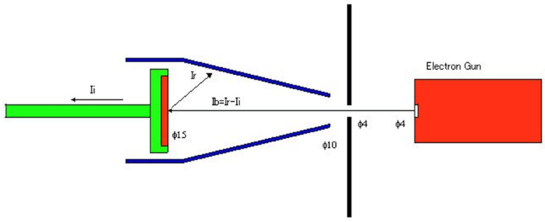
$$SEY = \frac{I_r}{I_r - I_i} \qquad (5)$$

最初に試料をホルダーに取り付けた後、まず 10-7 Pa 台まで真空に引いた状態で照射ビームのエネルギーを変えながら SEY を測定し、その後チェンバーごと 150℃で 20 時間ベーキングしてから再度測定を行った。これを 3 種類の試料それぞれで測定した結果を図 5 に

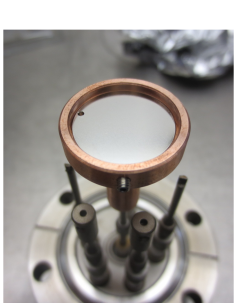


a) SUS　　b) TiN　　c) DLC

図 3　今回テストした電極



a) システムレイアウト



b) DLC サンプル

c) カバー電極

図 4　SEY 測定システム

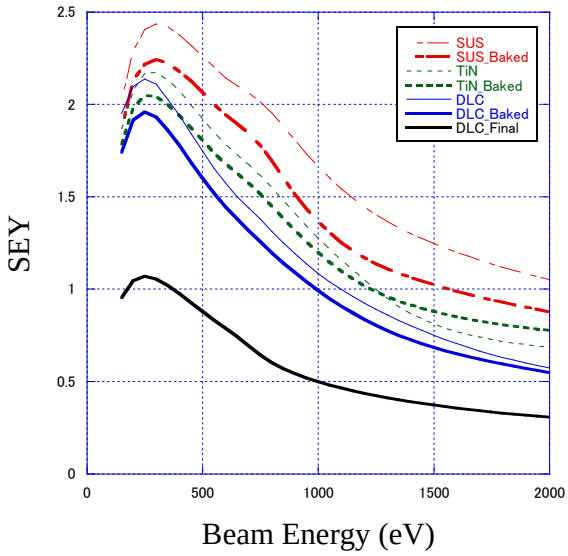


図 5　SEY 測定

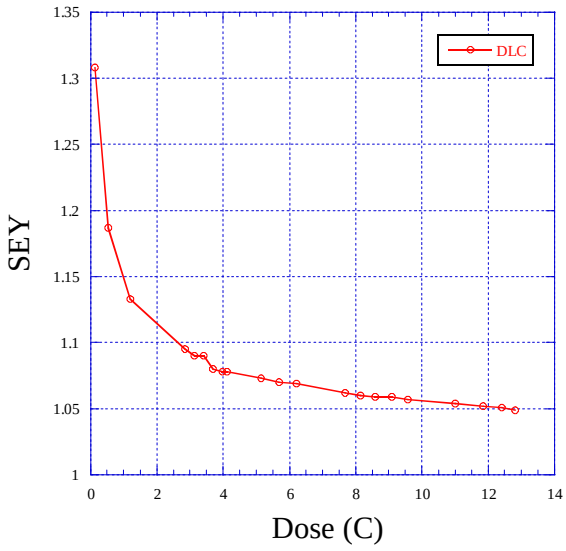


図 6　Scrubbing による SEY の改善

示す。SEY の値は SUS>TiN>DLC の順で低くなり、ベーキングにより概ね 1 割程度低くなる事が分かる。しかし SEY の値は実機で用いる領域を中心に広い範囲で 1 より大きく上回っている。そこで、SEY の最大値が最も低かった DLC の試料に対して長時間電子ビームを照射して scrubbing を行い、SEY が減少する様子を測定した。Scrubbing は SEY がピークとなる 250eV の電子ビームの照射を続ける事で行った。その結果を図 6 に示す。横軸は scrubbing で照射した電子の総量で縦軸は SEY の最大値である。SEY の値は大きく減少したものの、完全に 1 を割るには至らなかった。(図 5)

4　真空テスト

4.1　テストベンチ

SEY の測定と平行して、実際のチェンバーに電極取り付けてマルチパクタリングの状況を測定した。直接マルチパクタリングを測定する事は難しいので、マルチパクタリングによるチェンバー内真空の変化を測定し強さの指標とすることにした。測定に使ったセットアップを図 7 に示す。チェンバーは SUS 製で内側は電解研磨を行ってある。それにスクロールポンプとターボ分子ポンプからなる真空排気装置を取り付けて、反対側にイオンゲージを取り付けて真空度を測定する様になっている。電極は実際の運用と同様に SG からの出力電力を 2 分割し片方の位相を反転させて 2 台の 3kw のアンプに入力。増幅された RF は電極を通過してアッテネータで吸収される。

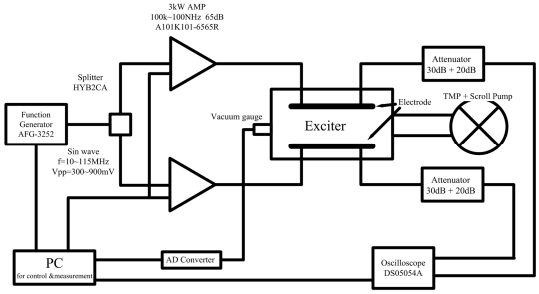


図 7　エキサイターテストベンチ

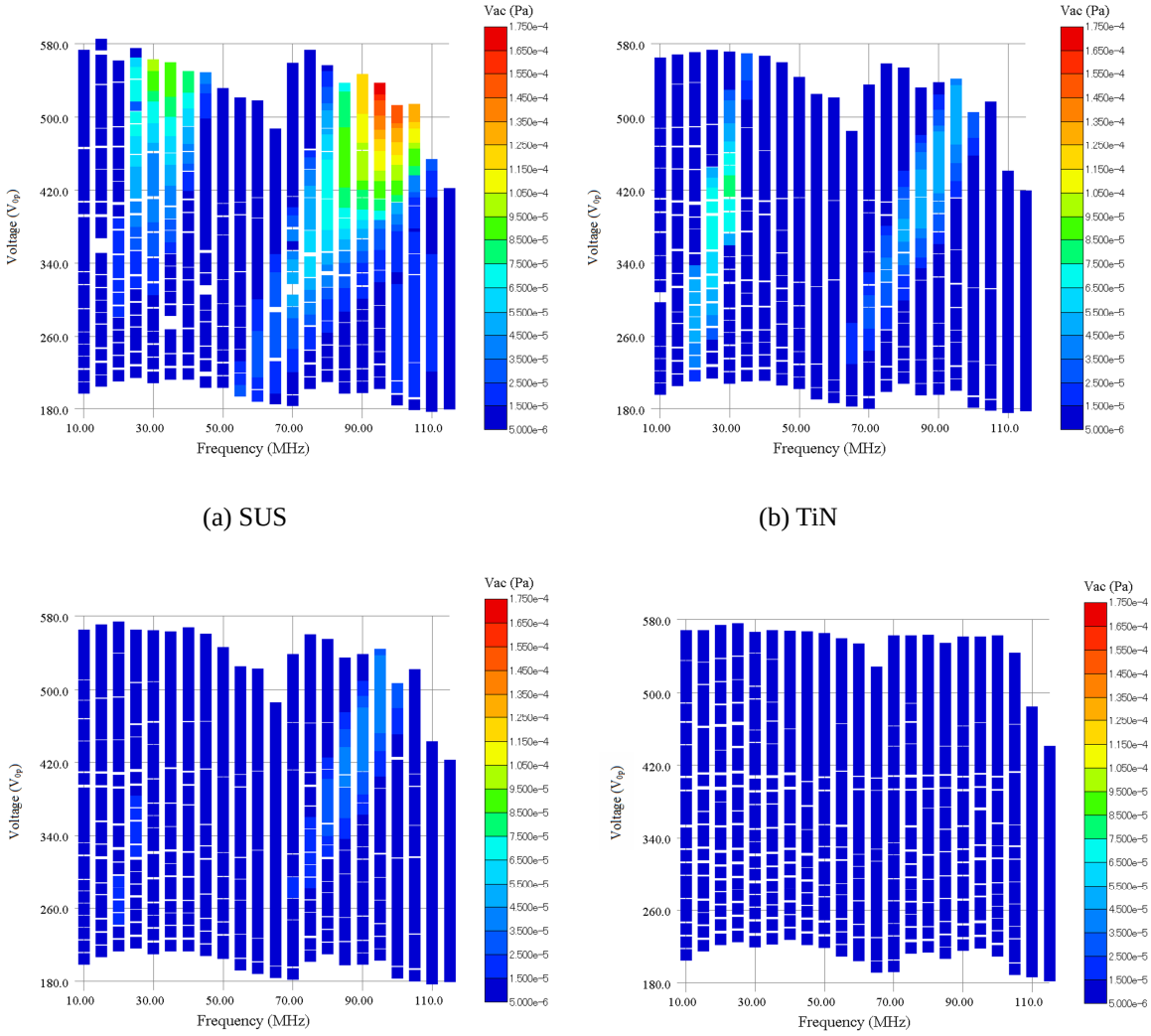
4.2　測定結果

測定は 3 種類の電極について行った。その結果を図 8(a)～(c)に示す。チェンバー内の圧力は 10^{-5}Pa 以下の平常値に対して、SUS では最大 $1.7*10^{-4}$ まで上昇したのに対して、TiN は $7.5*10^{-5}$、DLC は $4.5*10^{-5}$ と 1/2,1/3 程度で収まっている。この結果は SEY と同じ傾向で SUS, TiN, DLC の順にマルチパクタリングが弱くなっていることを示している。この事から実際に使用する電極は DLC コーティングした物とした。

ところで、真空の悪化が見られる領域は全ての電極で大きく 2 か所に分かれており、電極の種類によらずほぼ同じ所にある。これらの領域は(4)式に電極間距離(140mm)、電極チェンバー間距離(26mm)を入れた場合の領域と一致する。したがってパルチパクタリングは電極間だけでなく電極とチェンバー内壁間でも起こっていると考えられる。そこでチェンバーの内面を DLC コーティングする事でさらなるマルチパクタリングの抑制が可能ではないかと考え、内面を DLC コーティングしたチェンバーを製作した。このチェンバーに DLC コートの電極を取り付けて同様の試験をした結果を図 8(d)に示す。測定した全域にわたって $1*10^{-5}$Pa 以下であった。この値は当初の目的であるソレノイドコイルをつけずに運用するのに十分な値であると判断した。

5　まとめ

J-PARC MR に設置された多目的なエキサイターは向かい合った 1 対の電極を用いたストリップライン型エキサイターである。このタイプの電極に RF を印加した場合、RF の条件によってはマルチパクタリングと言う現象が発生し真空が悪化して運転に支障をきたす事がある。これを防ぐために現在、ビームと平行にソレノイドコイルによる微弱な磁場を印加している。しかし、この方式では電源の維持管理が必要なため、コ



(a) SUS　　(b) TiN

(c)DLC　　(d)DLC＋内面コート

図 8: 真空度測定

ーティングにより二次電子を抑制する方式への移行を検討する事にした。

電界研磨した SUS, TiN, DLC コートした電極について SEY や真空度の測定を行った結果、最も成績の良好だった DLC を採用する事とし、最終的に電極だけでなくチェンバー内面も DLC でコーティングする事でマルチパクタリングを十分に抑制する事が出来た。

参考文献

[1] Y. Kijima, "超伝導空洞用大電力入力カプラに関する研究", Dr. Thesis, School of Mathematical and Physical Science, The Graduate University for Advanced Studies, 2002, http://id.nii.ac.jp/1013/00000611/

謝辞

本研究を進めるに当たり、SEY 測定装置の借用並びに測定方法についてご指導・コメントを頂きました久松広美氏には厚く御礼申し上げます。

デマンドリアルタイム監視システムの開発

○長原　一樹，安井　孝治

核融合科学研究所 技術部 装置技術課

概要

大型ヘリカル装置（LHD）実験では大きな電力を使用する装置が数多く使われている。実験中はデマンドが契約電力を超えないよう、技術職員がデマンドの監視を行っている。デマンドの監視にはデマンド監視用 web ページ[1]（以下、デマンド監視ページ）を使用する。しかしデマンド監視ページはデマンドの表示に遅れが生じるため、デマンドが契約電力に迫る場合、使用電力の微調整が困難であった。この対策としてデマンドをリアルタイム監視できるシステムを開発した。本報告では電力監視業務について簡単に説明した後、新たに開発したシステムについて報告する。

1　核融合科学研究所の電力系統

1.1　LHD 実験用の受電設備

LHD 実験用の受電設備の概略を図 1 に示す。電力会社からの電力は所内の特高変電所で受電する。受電電圧は 77,000V である。受電電力は用途ごとに 5 つの配電用変圧器で分岐し、各実験棟の機器に供給される。LHD 実験において重要な機器が接続されている系統には、商用電力系統に停電が発生したときにもそれらを運転し続けるために自家発電機が接続されている。

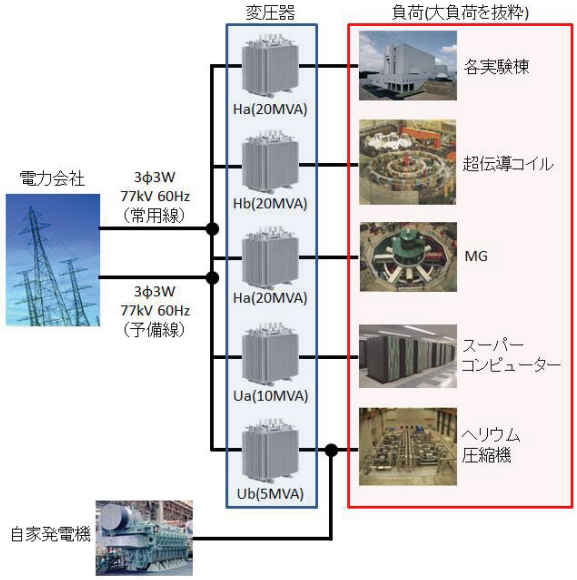


図 1 .LHD 実験用の受電設備（概略図）

1.2　デマンドとは

図 2 は現在デマンドの推移の一例である。現在デマンドとはデマンド計測開始から現在までの電力の 30 分平均である。図 2 では、デマンド計測開始から 12 分後の電力は A+C、その 30 分平均は B+C に相当する。従ってデマンド計測開始から 12 分後の現在デマンドは 2300kW である。デマンドとは 30 分間の電力の平均であり、これはデマンド計測開始から 30 分後の現在デマンドと同義である。図 2 ではデマンドは 6300kW である。

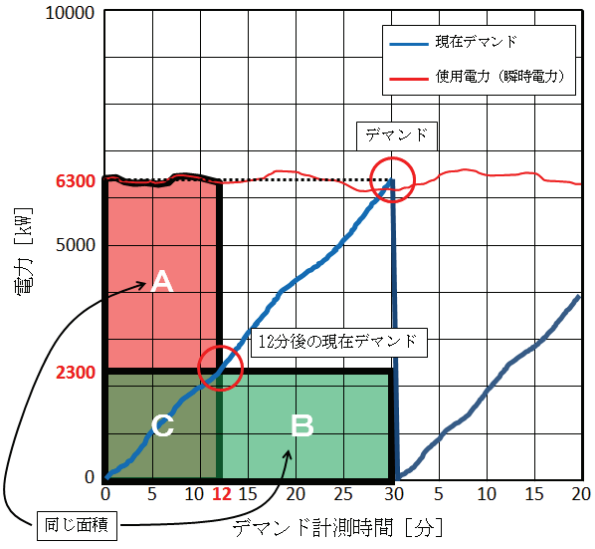


図 2 .現在デマンドグラフ

1.3　契約電力について

LHD 実験に使用される電力に対して支払う電気料金は、契約電力で決まる基本料金と電力の使用量に応じて決まる料金に大別される。契約電力とは使用できる電力の上限であり、電力会社との協議で決められる。契約電力が大きくなるほど基本料金も高くなる。契約電力は年間の最大デマンドで決まる。万が一デマンドが契約

電力を超過した場合は違約金を支払わなければならない。また次年度の契約電力は超過分を踏まえてより大きくする必要があり、基本料金はより高くなる。平成 25 年度の LHD 実験中の契約電力は 9.1MW である。電力の使用量は、電力会社によって設置された最大需要電力量計が組み込まれた取引メーター（以下、取引メーター）で計測される。表 1 に LHD 実験で大きな電力を消費する機器の一例を示す。

表 1. 大きな電力を消費する機器の一例

機器名	使用電力	主な用途
MG（Motor Generator）	2~2.5MW	プラズマ加熱装置への電力供給
ヘリウム液化冷凍装置	4MW	超伝導コイル用の液体ヘリウム製造・精製
NBI	2.6MW	プラズマの加熱
スーパーコンピューター	1~1.2MW	核融合プラズマの挙動解析
冷却水装置	1MW	LHD 実験に使用する機器の冷却

2　使用電力管理・監視業務について

2.1　使用電力管理・監視業務の必要性

契約電力以内で実験を遂行するためには、デマンドが契約電力を超えないようにする必要がある。しかし LHD 実験の遂行が使用電力抑制のために制限されては本末転倒である。LHD 実験の遂行を最優先しつつ使用電力抑制を図るためには、電力需要を把握して使用電力を調整する使用電力管理と使用電力監視を行う必要がある。

2.2　使用電力管理業務

使用電力管理は電力使用予定ページで行う。100kW 以上の電力を使用するユーザーには、電力使用予定ページに使用予定を登録することを依頼している。電力使用予定ページでは各ユーザーの使用機器名、使用電力（kW）、担当者名（担当者不在の場合のための副担当者名も）、使用予定日時を一覧することができる。図 3 は電力使用予定ページの画面である。このページに登録された情報から今後の電力需要を予測する。LHD 実験の内容によりデマンドが契約電力を超過することが予想される場合は、機器の担当者に使用予定日の変更を事前に依頼してデマンドが契約電力を超えないように調整する。

図 3 .電力使用予定ページ

2.3　使用電力監視業務

使用電力監視はデマンド監視ページで行う。デマンド監視ページでは LHD 実験用電力の現在デマンド（デマンド計測開始から現在までの平均電力）と図 1 で示した 5 つの系統に接続されている機器の使用電力を監視することができる。LHD 実験中はデマンド監視ページで現在デマンドの推移を監視する。予測デマンドが契約電力に迫る場合は LHD 実験に関係しない機器を可能な限り停止して使用電力を調整する。図 4 はデマンド監視ページの画面である。

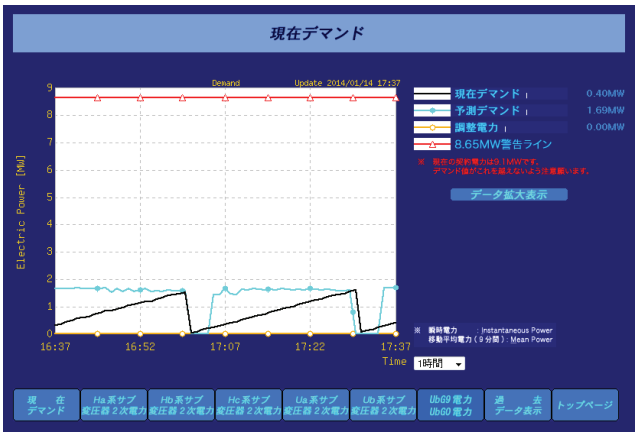


図 4 .デマンド監視ページ

2.4　従来の電力監視業務の問題点

デマンド監視ページがあるデマンド監視サーバーは特高変電所のデータ処理装置の各種データを 1 分周期で収集し、所内に web 配信している。web 表示の更新周期は約 15 秒であり、データ処理装置の日々の時間遅れを含めると、2～3 分の遅れが生じる場合もある。この場合、予測デマンドの増減は 2,3 分待たなければ分からない。その結果デマンド監視ページのデマンドは、取引メーターのデマンドと数百 kW の誤差となる。つまりデマンド監視ページのデマンドが契約電力以下でも、取引メーターのデマンドは契約電力を超えていた、ということも起こり得る。

3　デマンドリアルタイム監視システムの開発に至った経緯

2.4 の問題を解消するために以下を検討した。

①取引メーターを監視カメラで直接監視する

②取引メーターの仕様変更依頼

③市販のデマンド監視装置の導入

④デマンドリアルタイム監視システムの開発

①は実施後に、取引メーターが現在デマンドを約 3 分ごとに 20 秒ずつしか表示しないことが判明した。また表示される現在デマンドは換算前の値であり、正しい値を得るためには換算する必要がある。これらの理由から①は実用的ではなかった。

②は取引メーターを常に現在デマンドを表示するように仕様変更し、監視カメラで監視するというものである。しかし電力会社に仕様変更を依頼したところ、他の需要家との整合が取れなくなるため承認を得られなかった。

①、②以外の方法で高精度のデマンド計測を行うためには、取引メーターと同じ原理で計測する仕組みを新たに準備する必要がある。取引メーターは一定の電力量ごとに信号（パルス）を出力して、その数を計測している。電力会社に相談したところ、取引メーターが出力するパルスは、使用申請をすることで需要家側でも使用できることが判明した。そこで③を検討したがコストや納期の面で採用に至らなかった。

結局①～③の検討はいずれも失敗に終わった。しかしその検討過程で、取引メーターが出力するパルスを正確に計測し、かつ取引メーターの計測時刻に合わせることができれば高精度のデマンド計測が可能であることがわかった。そこでこれらを満足できる④のデマンドリアルタイム監視システム（以下、リアルタイムシステム）を開発することとした。

4　リアルタイムシステムの開発について

4.1　要素検討

まず取引メーターから出力されるパルスを受信するための装置を検討した。安価な市販品の調査や、自作することも検討したが、実は特高変電所には取引メーターのパルスを検出し、増幅・整形して出力するパルス検出器と呼ばれる装置が既に設置されていた。次にパルス検出器からどのようなパルスが出力されるかを調査した。図 5 にパルス検出回路を示す。検出回路の出力はその構成のため、

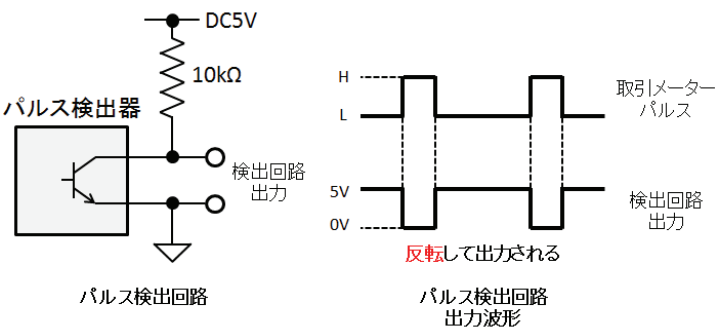


図 5 .取引メーターのパルス検出回路

取引メーターのパルスが反転したものとなる。図 6 は図 5 のパルス検出回路で計測したパルス検出器の出力波形である。①、②、③（H→L→H と変化している矩形）が出力パルスである。①・③は同じパルス幅（0.36s）だが、②は①・③よりはるかに長いパルス幅（7.72s）となっている。また①→②→③→①→・・・と①～③が周期的に出力されることがわかった。更に、デマンドが大きくなると①・③のパルス幅は変わらず、②のパルス幅と③－①の間隔が短くなることも分かった。図 7 に図 6 のパルス波形の詳細を示す。図 6 のパルス波形を測定した時間帯のデマンドは、デマンド監視ページによる計測で 5.4MW であった。仮にデマンドの値が 5.4MW の数倍になったとしても、取引メーターのパルス波形の周期は 17 秒の数分の一である。リアルタイムシステムはこの数秒の周期のパルス波形を計測することができればよい。リアルタイムシステムのパルス計測には、パソコン用のカウンタボードを使用することとした。採用したカウンタボードは 10MHz までのパルス信号をカウントすることが可能であり、LHD 実験中にデマンドがもし契約電力を超えて大きくなったとしても、パルス検出器のパルスを取りこぼすことはない。

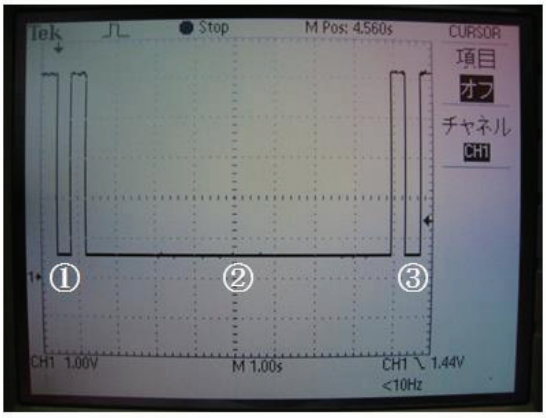


図 6 .取引メーターのパルス波形

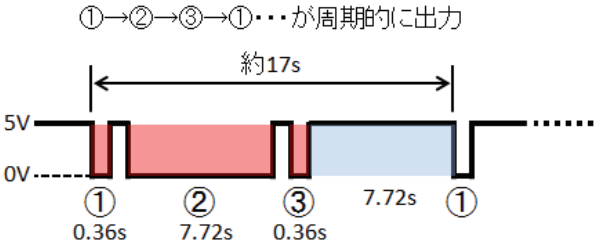


図 7 .取引メーターのパルス波形詳細図

4.2　リアルタイムシステムの原理（ハードウェア）

図 8 にリアルタイムシステムのシステム図を示す。既設の取引メーター・パルス検出器から出力されるパルスは、自作パルス受信ユニットに入力される。図 9 は自作パルス受信ユニットのブロック図である。パルス検出器の出力を電力量パルス変換部で電圧パルスに変換・ノイズを除去してカウンタボード内臓のパソコンに出力する。カウンタボードはパルス数をカウントしてパソコンに出力する。

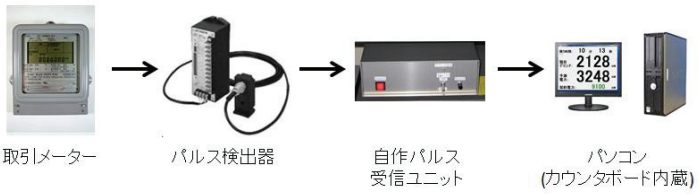


図 8 .リアルタイムシステムのシステム図

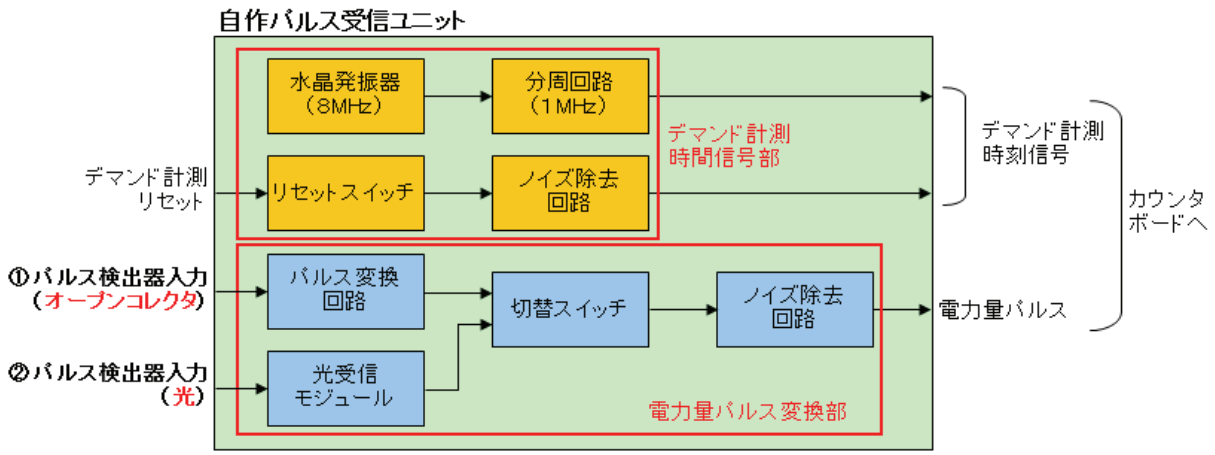


図 9 .自作パルス受信ユニットのブロック図

自作パルス受信ユニットの電力量パルス変換部には、①オープンコレクタ入力部と、②光入力部がある。自作パルス受信ユニットとパソコンは、当初特高変電所に設置していた。このときはパルス検出器のパルスは、自作パルス受信ユニットの①オープンコレクタ入力部に接続していた。また LHD 実験中は特高変電所から数百 m 離れた制御室でデマンド監視を行う。制御室から遠方にあるリアルタイムシステムを使用するために、LHD 実験中は制御室のパソコンから特高変電所のパソコンにリモートアクセスしていた。

しかし実験中にリアルタイムシステムに不具合が発生した場合、システムの復旧のためには制御室から特高変電所へ行かなければならない。不具合に速やかに対応するために、現在は自作パルス受信ユニットとパソコンは制御室に設置している。パルス検出器（特高変電所）と自作パルス受信ユニット（制御室）間のパルスの伝送は、特高変電所に新たに光送信モジュールを設置して電圧信号を光に変換し、制御室にある自作パルス受信ユニットの②光入力部まで送信することで行っている。特高変電所－制御室間には既設の光ケーブルのルートがあり、新たに光ケーブルを敷設する必要はなかった。

自作パルス受信ユニットには、デマンド計測時間信号部でデマンド計測時間（30 分）を正確に測定するための回路もある。デマンド計測時間信号部は、水晶発信器（8MHz）、分周回路で 1MHz のクロック信号を生成してカウンタボードに出力する。

4.3　リアルタイムシステムの原理（ソフトウェア）

図 10 にリアルタイム監視ソフトウェア（以下､監視ソフト）を示す。監視ソフトは Visual Basic で製作した。監視ソフトはデマンド計測の残り時間・現在デマンド・予測デマンドの表示機能を持ち、それぞれの値は 1 秒ごとに更新される。現在デマンドはカウンタボードに入力される電力量（kWh）パルスを下式にて現在デマンド（kW）に換算して得る。

図１０.監視ソフト画面

現在デマンド＝パルス数×（28000÷3000）×（60÷デマンド時限（30））

28000 は取引メーターの VCT 変成比、3000 はパルス検出器のパルス定数（3000 パルスを受信する度に 1kWh パルスを出力）である。現在デマンドの文字色は、現在デマンドが契約電力の 95%以上の値になると赤色になり、監視者に注意を促す。予測デマンドは下式にて算出する。

予測デマンド＝現在デマンド＋（直前の現在デマンド変化率[kW／分]×残り時間[分]）

デマンド計測時間は自作パルス受信ユニットのデマンド計測時間信号（1MHz のクロック信号）を基準としている。現状では、所内のタイムサーバーと比較して 5 日で 1 秒程度のズレが生じるため、毎朝 8 時に所内のタイムサーバーと同期を取ることで誤差を修正している。

監視ソフトの画面は制御室前方のモニタに映し出し、誰でも見られるようにしている。

4.4　リアルタイムシステムの運用について

平成 25 年度の LHD 実験でリアルタイムシステムを運用したところ、10 月 23 日 14：00 の取引メーターのデマンドが 9.016MW のとき、リアルタイムシステムのデマンドは 9.012MW であり、その誤差は 4kW であった。また同じ時刻のデマンド監視ページのデマンドは 8.97MW であり、取引メーターとの誤差は 46kW であった。図 11 にデマンド監視ページ・リアルタイムシステムそれぞれのデマンドをまとめた。

10 月 23 日 14：00 前後のこの日の実験はデマンドが契約電力に迫るほど大きかったが、リアルタイムシステムによってデマンドを契約電力間際に抑えることができた。

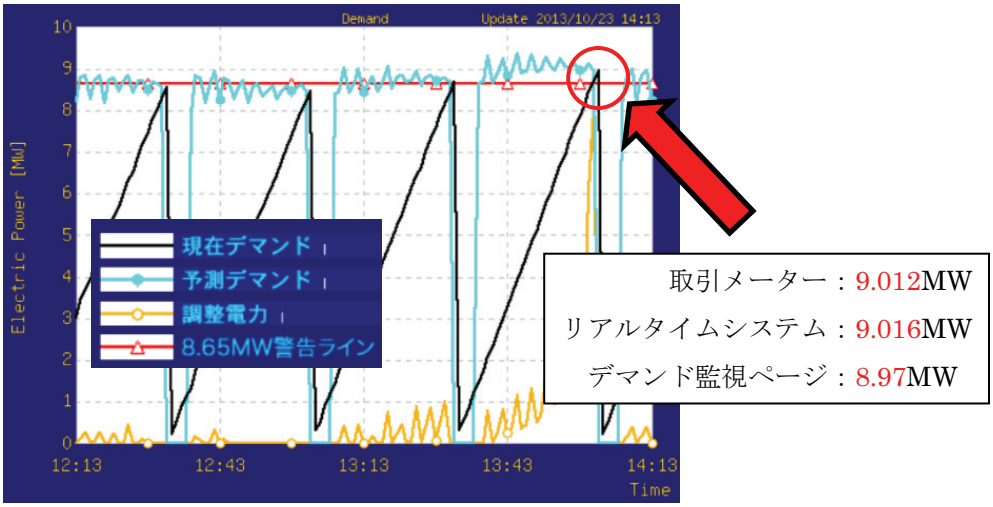


図１１.デマンド監視ページ・リアルタイムシステムの各デマンド

取引メーターの現在デマンドは約 3 分毎にしか表示されないため、取引メーターのデマンドを読むのは困難であったが、可能な限り調べた範囲ではリアルタイムシステムと取引メーターのデマンドの誤差は最大で約 37kW であった。誤差を完全になくすことはできていないが、デマンド監視ページより誤差を小さくできたためデマンド計測の精度は向上した。またリアルタイムシステムでは 1 秒ごとに現在デマンドが更新されるため使用電力の急変をより迅速に察知することができるようになった。

4.5　リアルタイムシステムの課題

取引メーターの時刻は取引メーターの電源周波数（商用周波数）に同期している。所内のタイムサーバーを基準とすると、取引メーターの時刻のズレは 1 ヶ月程度の比較的長い期間で見れば小さい。しかしデマンド計測時限である 30 分ごとに約半日ほど見た場合は大きくなる。その大きさは実測で最大 13 秒程度であった。現在リアルタイムシステムの時刻合わせは毎朝 8 時に所内のタイムサーバーと同期を取ることで行っており、取引メーターの時刻との同期は取れていない。従って使用電力の変動が大きい場合は、リアルタイムシステムと取引メーターの時刻には誤差が生じる。リアルタイムシステムの取引メーターとの時刻合わせは今後の課題である。

5　まとめ

より高度な電力監視方法を試行錯誤してリアルタイムシステムを開発した。デマンド監視ページは現在デマンドの更新周期が 1 分・取引メーターに対するデマンドの誤差が数百 kW であったのに対し、リアルタイムシステムは更新周期が 1 秒・取引メーターに対するデマンドの誤差は 37kW 程度とデマンド監視の性能が向上した。リアルタイムシステムにはまだ改善の余地があるが、より質の高い使用電力監視に貢献できたと考える。

6　参考文献

[1]安井孝治、他,“デマンドデータ配信サーバの構築”,平成 15 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会,February 26-27,2004

ミラー駆動装置の開発

○岡田宏太 A)，小川英樹 A)，伊藤康彦 A)，西浦正樹 B)，久保伸 C)

A) 核融合科学研究所 技術部

B) 東京大学大学院新領域創成科学研究科

基盤科学研究系先端エネルギー工学専攻

C) 核融合科学研究所 プラズマ加熱物理研究系

概要

プラズマ実験で使われるミラーの駆動には従来、超音波モーターが使われていたが、ミラーの高速動作の要求に答えるため、サーボモーターによる駆動装置を開発した。本報告では、この駆動装置の内容と、開発段階で発生した不具合について報告する。

1　背景

核融合科学研究所で行われているプラズマ実験では、プラズマの生成・加熱を行うために、真空容器内にマイクロ波を入射している。マイクロ波は真空容器内に設置された複数枚のミラーを反射しながら進み、最もプラズマに近い駆動ミラーの角度によってプラズマに対する入射位置・角度が決定される。またこのようなミラーはプラズマの計測にも使われており、プラズマからの電磁波や入射マイクロ波の散乱信号をミラーで受け、真空容器の外側に伝搬させ、容器外に設置した受信機で計測を行っている。

プラズマの生成や計測を行うためには、ミラーの角度が最適になるよう駆動ミラーを制御する必要がある。既存の装置ではミラーの駆動に超音波モーターを使用していたが、超音波モーターは回転速度が遅く、プラズマ生成中（数秒間）に所望の範囲（30°程度）でミラーを掃引することが出来なかった。また制御装置も導入以来更新されておらず、将来のプラズマ応答に対するフィードバック制御などの高速動作には処理能力が不十分であった。

そこで、ミラーの高速動作と細かな位置制御を目的として、超音波モーターからサーボモーターへの交換を行い、さらに、高速動作に対応した制御システムを制作することとなった。

2　装置概要

2.1　駆動系

図 1 にミラーが設置されている大型フランジを示す。ミラーは直径 2m 程度のフランジの真空側に固定されており、真空ベローズを介して、フランジの大気側に固定されているミラー駆動部と接続されている。ミラー駆動は水平方向（X 軸）と垂直方向（Y 軸）の 2 軸の回転動作が可能な構造になっており、動作可能範囲は X 軸で±30°、Y 軸で±15°程度である。それぞれの駆動軸にはエンコーダが接続されており、エンコーダ値からミラーの角度を求めることができる。

既存の装置では、駆動器には超音波モーターが使われていたが、今回の改造でサーボモーターに交換した。エンコーダは相対位置検出型が使われていたが、プラズマ実験中に発生するノイズにより誤カウントが頻発

していたため、絶対位置検出型のエンコーダに交換した。

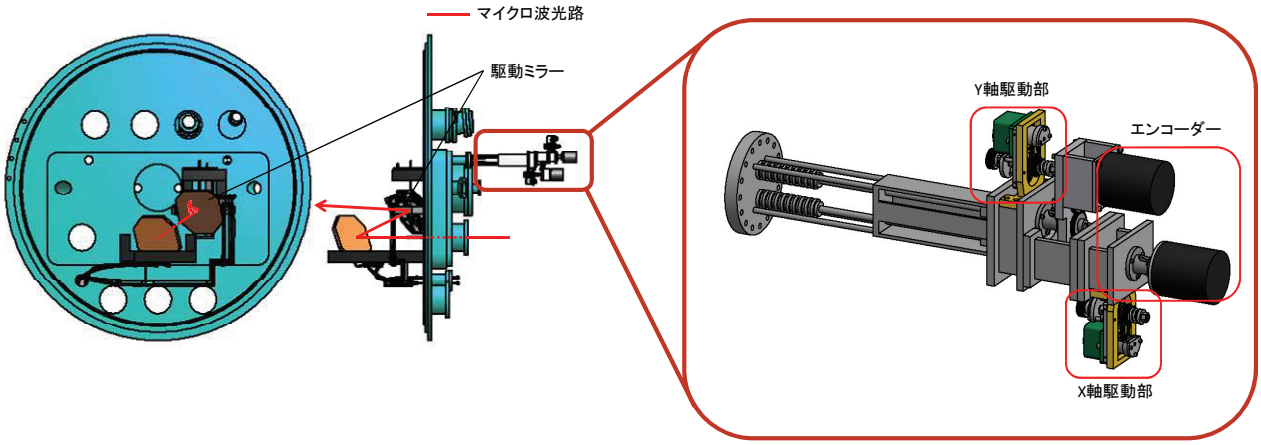


図 1　真空容器ポート大型フランジ及びミラー駆動部

2.2　制御系

図 2 に制御装置の外観写真を示す。制御装置には PLC（プログラマブル・ロジック・コントローラ）を使用することにした。タッチパネルを搭載し、グラフィカルな操作が可能となっているが、プラズマ実験中は制御室からの遠隔操作が基本となるため、Ethernet を介して制御装置と通信を行う PC ソフトの開発を技術部制御技術課に依頼した。図 3 に PC ソフトの画面例を示す。このソフトは核融合科学研究所の小川英樹が開発した SHMIT(Standard HMI Template)によって制作されている。SHMIT を使用することで短期間に高機能かつグラフィカルなアプリケーションの作成が実現した。通常のプラズマ実験では、この PC ソフトから指令を送り、ミラーの駆動制御を行うが、現場でのメンテナンスの際は制御盤のタッチパネルからミラーの操作を行う。

既存の装置では PLC のスキャンタイムが約 200ms と大きく、僅か数秒間のプラズマ生成中に角度を監視しながらミラーを駆動させるためには、処理能力が不十分であったが、新しい制御装置はスキャンタイムが 4ms 程度と短いため、ミラーの角度を監視しながらプラズマ生成中に十分な距離を動作させることが可能となった。そこで制御プラグラムも実験シーケンスと同期運転が可能な仕様とした。具体的には、実験前に予め移動点を設定しておき、プラズマ生成と同時に予め設定した順序でミラーを連続動作させるという機能である。

図 2　制御装置外観

図 3　PC 側の制御設定ソフト

3　不具合

動作試験を行った結果、2 件の大きな不具合が発生したため報告する。

3.1　オーバーラン

上記の改造後、動作試験を行った結果、ミラーの位置決め時にオーバーランをする不具合が頻発した。原因を調査したところ、PLC のスキャンタイムよりもエンコーダの値が変化するスピードが早く、エンコーダ値を正確に読み取れていないことが判明した。PLC のスキャンタイムが 4ms なのに対して、エンコーダの最下位 bit は 1.3ms 毎に値が変化する。モーターは速度制御で動いており、PLC がエンコーダの値を監視し、目標値に到達した時にモーターを停止する制御をしていたが、エンコーダの最下位 bit 及びその次の bit を常に Low と判断していたためにオーバーランをしていた。

対策として、速度制御から位置制御への変更をおこなった。位置制御は PLC からサーボモーターに対して、移動量に応じたパルス出力を行い、移動距離を直接的に指示するので、エンコーダの値を監視しながら停止動作をする必要がない。この変更は PLC に位置制御ユニットを追加し、ラダープログラムを書き換えるだけでよく、モーターの変更等は必要ない。急な改造でも、簡単に変更を行う事が可能なのは PLC の特徴である。

3.2　エンコーダの誤読

新しい制御装置では、予め設定した順序でミラーを動作させる連続動作機能を設けたが、この動作中、設定した角度に到達する前に、動作が停止する不具合がまれに発生していた。PLC のラダープログラムをトレースしたところ、エンコーダの値が一瞬だけ大きく変化していることが判明した。これはエンコーダの出力形式がバイナリコードであったために、複数の bit が同時に変化する場合があり、その最中にエンコーダ信号を取得した場合に発生していた。

この不具合の対策は、ラダープログラムでソフト的に行った。具体的には、1 スキャン前のエンコーダの値をレジスタに保存しておき、その値と現在値との差がある一定値以上であったら、誤った値であると判断する機能を付加した。

なお、現在ではエンコーダをグレイコード出力のタイプを交換している。グレイコードは値の切り替わり時に変化する bit が常に 1 つなので、上記のような問題は発生しない。

4　まとめ

プラズマ実験で使用される真空容器内ミラーの駆動機の開発を行った。プラズマ生成中に実験と同期したミラーの連続動作を行うために、モーターを超音波モーターからサーボモーターに交換し、エンコーダは相対位置検出型から絶対位置検出型に変更した。その結果、ミラーの動作速度は改造前が 0.7(deg/s)だったのに対し、改造後は 9.9(deg/s)と 10 倍を超える速度での移動が可能になり、プラズマ生成中に実験シーケンスと同期したミラーの連続動作が可能になった。また、エンコーダを絶対位置検出型にしたことで、実験中の過酷なノイズ環境下でも正確なミラー角度が得られている。

エックス線・電子線回折による結晶集合組織測定装置について

岡安 和人 [A)]

[A)] 横浜国立大学 理工学系大学院等技術部

1 はじめに

結晶集合組織（以降単に集合組織と記す）とは，ある範囲の結晶方位の結晶粒が高い割合で存在する状態のことをいう[1]. 多くの金属材料は結晶方位によって強度[2]，磁気特性[3]，電気伝導度[4]といった材料特性が変化する．このため，材料が持つ特性を最大限引き出す手法として加工と熱処理を利用し，材料を特定の結晶方位に制御する，いわゆる集合組織制御が重要になる．集合組織の測定は試料の厚さ方向も含めた全体を計測する場合には中性子回折（Neutron Diffraction; ND）法，試料表面全体の場合には X 線回折（X-Ray Diffraction; XRD）法，試料表面の一部（1-2mm 程度の領域）の場合には電子後方散乱回折（Electron BackScatter Diffraction; EBSD）法ににより計測することができる．ここでいう試料とは 10mm-20mm 程度のサイズを想定している．ND については JAEA，J-PARC 等に設備があるが，設備が大規模になるため，利用は限られているのが現状である．中性子回折については昨年度出版された解説[5]をご一読されたい．集合組織測定の多くは XRD 法，EBSD 法で行われており，本稿では XRD および EBSD 法の測定原理についてごく簡単に述べることにする．

2 XRD 法による集合組織測定

XRD 法ではバルク体試料については Schulz の反射法が，薄膜試料では Decker の透過法が用いられるのが一般的である[6-9]. 集合組織測定には X 線発生装置と，集合組織測定専用の 3 軸ゴニオメータが必要となる．通常よく行われる粉末回折図形を取る場合に使用する標準タイプのゴニオメータはスリットを通すことで絞った X 線を試料に当て，試料との角度 θ に対し，回折後の角度 2θ の位置に検出器を配置することで Bragg の回折条件（$2d\sin\theta=\lambda$）を満たした場合に回折により X 線強度が得られることになる．ここで d は結晶面間隔，λ は照射線源（X 線等）の波長である．集合組織測定は 2θ を Bragg の回折条件を満たす位置で固定し，試料に図 1 に示すような α 回転，β 回転を与えることで特定の回折線の角度分布を見ることができる．入射 X 線は Schulz スリットを通した発散 X 線束を照射する．得られた回折線をバックグラウンドから差し引き，Defocus 補正を行うことで図 2 に示す極点図を描くことができる．測定する試料の表面は電解研磨等により無ひずみ状態にするのが最も間違いない極点図が得られるが，表面の状態は悪くても測定は可能である．

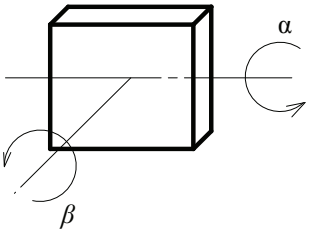


図 1 集合組織測定時の試料の回転.

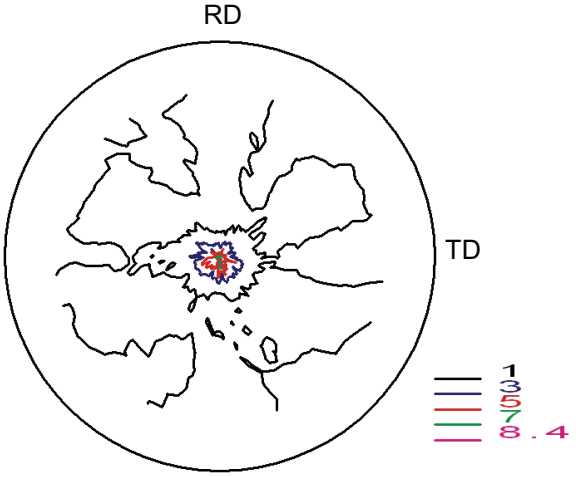


図 2 200 回折線により描いた{001}極点図の例. 試料は T4 処理した 6061 アルミニウム合金.

3　EBSD 法による集合組織測定

EBSD 法は比較的新しい測定手法で 2000 年以前から装置としては存在していたが，2000 年以降 PC，デジタルカメラの飛躍的な発達に伴って測定性能が向上し，走査型電子顕微鏡（SEM）という既存の装置に加えることで測定が可能になることもあり，急速に広まった．SEM との組み合わせで用いられるため，SEM-EBSD 法とも呼ばれる．最近では単に試料の結晶方位分布を測るだけではなく温度や変形を加えながらの in-situ 測定，残留応力測定，EDX を組み合わせた組成情報も取り込めるようになってきている．原理としては電子線を測定試料に照射したときに反射電子によって得られる菊池パターンを画像解析によって絶対方位解析を行い，1 点ごとに決定していくことで可能となる．詳しくは書籍[8, 9]や解説[7, 10, 11]を読まれたい．1 点 1 点の方位解析情報を元にして図 3 に示す結晶粒マップピングや図 4 に示す極点図など描くことができる．尚，EBSD については試料表面を電解研磨等で無ひずみ状態にすることが必要とされる．近年では電界放出型（FE-）SEM と組み合わせることでマルテンサイトなどの組織を得ることもできる．透過型電子顕微鏡（TEM）試料をそのまま透過法でマッピングを行う手法[12]もある．

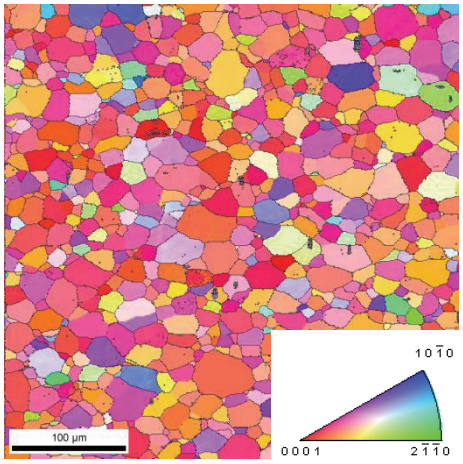


図 3　結晶粒マッピングの例（Ti 連続焼鈍材）．図の色が右下に示す方位と対応している．

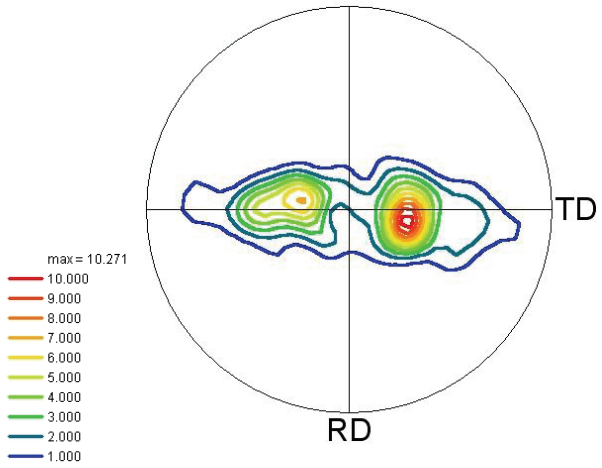


図 4　図 3 より得られた結晶方位情報から描いた 0001 極点図の例．

4　参考文献

[1] 福富洋志，岡安和人：集合組織の基礎－表現法と形成過程－，塑性と加工, 54 (2013), 91-95.

[2] 本間智之，鎌土重晴：集合組織制御による高機能材料の創製(4)マグネシウム合金，塑性と加工, 54 (2013), 127-131.

[3] 富田敏郎：集合組織制御による高機能材料の創製(1)鉄鋼材料，塑性と加工, 54 (2013), 111-115.

[4] 左海哲夫：集合組織制御による高機能材料の創製(3)銅合金，塑性と加工, 54 (2013), 122-126.

[5] 鈴木徹也，徐平光：集合組織の測定・評価法(3)中性子回折法，塑性と加工, 54 (2013), 106-110.

[6] 山田義行，長尾圭吾：集合組織の測定・評価法(1)X 線回折法，塑性と加工, 54 (2013), 96-100.

[7] 井上博史：EBSD および X 線回折による集合組織解析，軽金属, 60, (2010), 666-675.

[8] U. F. Kocks, C. Tomé, and H.-R. Wenk: Texture and Anisotropy (1998), Cambridge University Press.

[9] O. Engler and V. Randle: Introduction to Texture Analysis, 2nd Edition (2010), CRC Press.

[10] 森田博文：集合組織の測定・評価法(2)SEM-EBSD 法の概要とデータ収集の流れ，塑性と加工, 54 (2013), 101-105.

[11] 鈴木清一：初めて使う人のために(4)EBSD 法の原理と活用事例，日本鉄鋼協会会報 18 (2013), 403-408.

[12] 鈴木清一：透過 EBSD 法の評価と材料ミクロ組織観察への応用，日本金属学会誌 77 (2013), 268-275.

第3分科会
（計測・制御技術）

Zynq-7020 を使用した画像処理プラットフォームの開発

小野雅晃

筑波大学・システム情報工学等技術室

概要

Xilinx 社の Zynq-7020 を使用して、カメラの画像をディスプレイに表示できる画像処理用のプラットフォームを開発した。Zynq-7020 は、デュアルコアの ARM プロセッサと FPGA を内蔵した IC(Integrated Circuit)である。Zynq-7020 の FPGA(Field Programmable Gate Array)部分に AXI4 バスを使用したカスタム IP(Intellectual Property)コアを自作して、ARM プロセッサの DDR(Double Data Rate)3 SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory)コントローラと AXI4 バス上で接続し、カメラ画像データを転送した。そのカメラ画像データを AXI4 バス経由で読みだしてディスプレイに出力し、フレームレート変換を行った。カメラ画像をディスプレイに表示できるので、カメラ画像を画像処理する際のプラットフォームとして使用することができる。画像処理例としてラプラシアン・フィルタを最初にソフトウェアで実装し、次にハードウェアにオフロードした。

1　Zynq-7000 ファミリの概要

Zynq-7000 ファミリは、Xilinx 社の FPGA と 2 つの ARM プロセッサ・コアを統合した IC である。Xilinx 社は FPGA の設計会社であるが、今回の Zynq-7000 ファミリはデュアルコアの ARM Cortex-A9 を搭載している。これは、一番下のグレードでも 667MHz の周波数で動作する強力なプロセッサである。AXI バスで接続された FPGA も搭載されているので、ARM プロセッサで時間のかかる処理は FPGA にオフロードすることができる。

図 1 に示す様に、Zynq-7000 は、次に示す主要なファンクション・ブロックで構成されている。

- PS(Processing System)
  - アプリケーション・プロセッサ・ユニット (Application Processor Unit, APU)
  - メモリ・インターフェース (Memory Interface)
  - I/O ペリフェラル (I/O Peripherals, IOP)
  - インターコネクト (Central Interconnect, etc.)
- PL(Programmable Logic)
  - FPGA

APU には、ARMv7 に対応したデュアル ARM Cortex-A9 MPCore CPU(Central Processing Unit)が内蔵され、667MHz～1GHz の動作周波数で動作する。APU の CPU(Central Processing Unit)は、NEON と呼ばれる SIMD(Single Instruction Multiple Data)エンジンと FPU(Floating Point Unit)、更に 32KB の命令 L1 キャッシュ、32KB のデータ L1 キャッシュ、512KB の共有 L2 キャッシュが搭載されている。

メモリ・インターフェースは、DDR3、DDR3L、DDR2、LPDDR-2 をサポートする DDR SDRAM コントローラと、NAND 型フラッシュ ROM(Read Only Memory)、NOR 型フラッシュ ROM 及び SRAM(Static Random Access Memory)をコントロールするスタティック・メモリ・コントローラ(SMC) が搭載されている。

Zynq-7000 は豊富な I/O ペリフェラルを持っている。I/O ペリフェラルを以下に示す。

- GPIO(General Purpose I/O)
- ギガビット・イーサーネット・コントローラ(x2)
- USB コントローラ：ホスト/デバイス/OTG(x2)
- SD/SDIO コントローラ(x2)
- CAN コントローラ(x2)

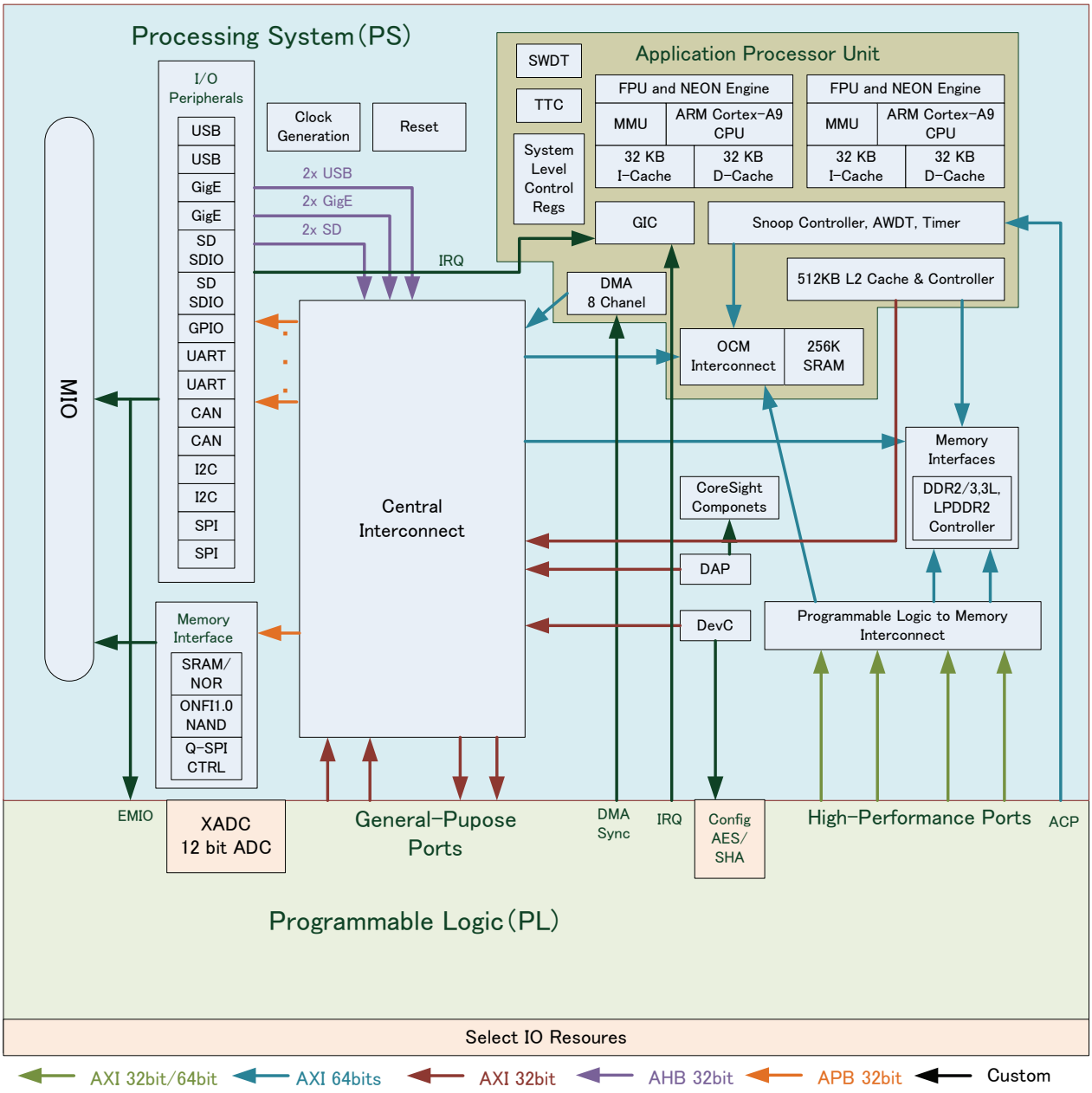


図 1　Zynq-7000 のブロック図[1]

- UART コントローラ(x2)
- I2C コントローラ(x2)

PS と PL 間は、GP マスタ 2 ポート、GP スレーブ 2 ポート、HP スレーブ 4 ポート及び ACP スレーブ 1 ポートで接続されている。GP スレーブ・ポートは 32 ビット幅のポートで、あまりスピードの必要ない AXI Lite Slave ポートなどに使用される。HP スレーブ・ポートは 32 ビットまたは 64 ビットの AXI バスで、PS の DDR SDRAM コントローラを高速に使用したい場合などに使用される。

ACP スレーブ・ポート（以下、ACP ポート）は、64 ビットのキャッシュ・コヒーレンシを維持できるポートである。ACP ポートからの Read は、データが L1 キャシュに保存されていれば、L1 キャッシュから行われる。また、ACP ポートへの Write は、L2 キャッシュに対して行われる。CPU のライトバック・データ・キャッシュが ON になっている場合の HP スレーブ・ポートからのアクセスでは、CPU から DDR3 SDRAM などに書いたデータを FPGA 側で Read するには、キャッシュのフラッシュが必要である。FPGA から DMA(Direct Memory Access)で DDR3 SDRAM などに書かれたデータを CPU が読むためには、キャッシュのインバリデートが必要である。どちらもソフトウェアで明示的に特殊命令を実行する必要がある。しかし、ACP ポートからアクセスでは、命令による明示的なキャッシュの操作は必要ない。すべてハードウェアでキャッシュのコヒーレンシが維持できる。ACP ポートをうまく使用することができれば、実行速度が早くなることが予想できる。

2　ZedBoard を利用したカメラ表示回路[2]

ZedBoard[3]は Digilent 社の Zynq-7020 を使用した汎用ボードである。ZedBoard には、HDMI(High-Definition Multimedia Interface)、オーディオ入力、LAN コネクタ、Pmod™ [1]コネクタ、FMC(FPGA Mezzanine Card)コネクタなどの I/O が搭載されている。Pmod コネクタに CMOS カメラを接続し、HDMI と VGA(Video Graphics Array)ポートからカメラ画像を出力する回路を作成した。システムの構築には Xilinx 社の PlanAhead という FPGA 用ツールを使用している。PlanAhead プロジェクトを図 2 に示す。PlanAhead では、Zynq-7020 の FPGA 部分に搭載するハードウェアを作製することができる。

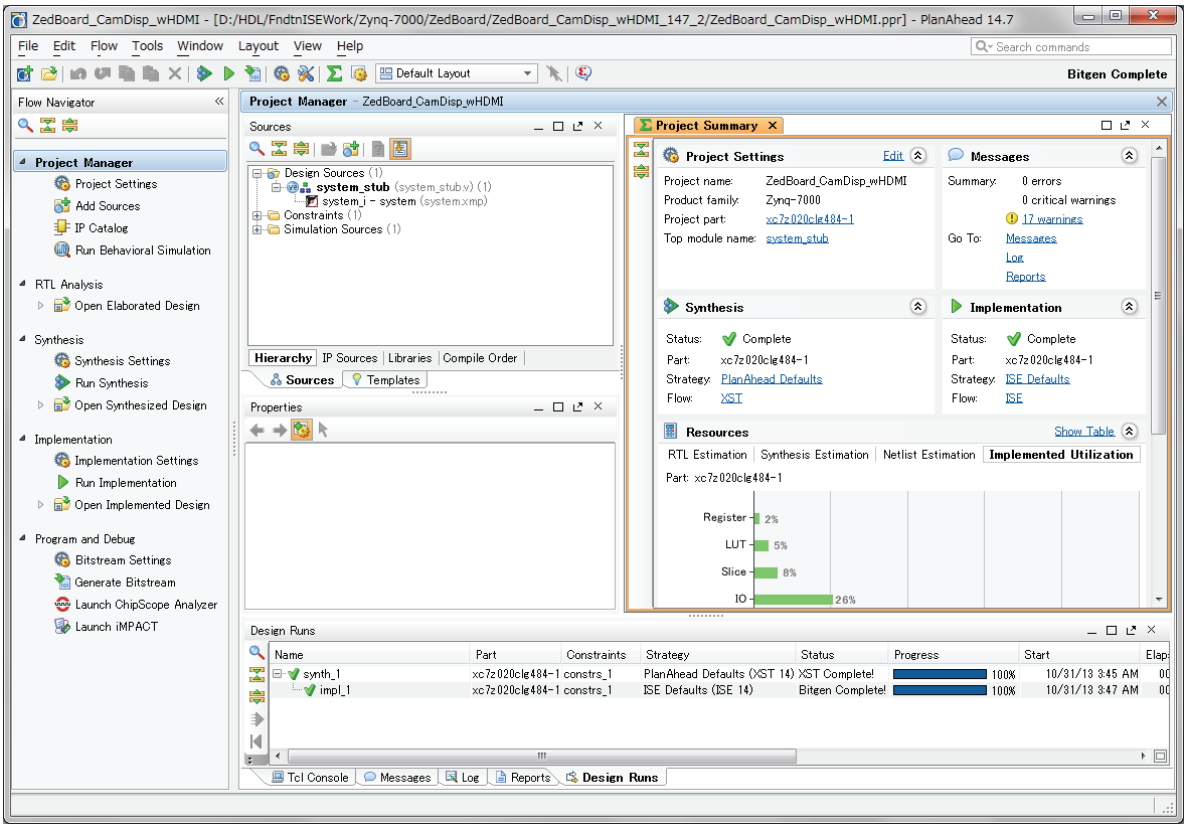


図 2　ZedBoard を利用したカメラ表示回路の PlanAhead プロジェクト

ZedBoard に接続する CMOS カメラにはマイクロン社製の CMOS カメラ MT9D111 を使用した。MT9D111

[1] "Pmod™" is the trademark of Digilent Inc.

は最大解像度が 1,600 ピクセル×1,200 行の CMOS カメラで、最大解像度でフレームレートは 15fps (frame per second)である。今回は、この MT9D111 を SVGA (800 ピクセル×600 行)で使用している。

PlanAhead 中で XPS (Xilinx Platform Studio)と呼ばれる IP コアの設計ツールを使用している。XPS は IP コアをグラフィカルに接続する事により回路を設計するツールである。図 2 において、Project Manager の Sources ウインドウの system_stub の下の system_i が XPS のプロジェクトである。

XPS では、よく使われる回路が汎用 IP コアとして用意されていて、それらを接続することによって回路を構成する。汎用 IP コアとして用意されない IP コアは、カスタム IP コアとして自作することができる。カメラ表示回路では、カメラからの画像データを PS の DDR3 SDRAM にバッファリングする IP コア(カメラ・インターフェース IP コア、mt9d111_inf_axi_master)をカスタム IP コアとして作製した。更に、バッファリングされたカメラからの画像データを HDMI 出力用 IC(ADV7511)に出力する IP コア(ビットマップ・ディスプレイ・コントローラ IP コア、bitmap_disp_cntrler_axi_master)もカスタム IP コアとして作製した。各 IP コアの接続には AXI4 バスを使用している。AXI4 バスは、ARM 社の ARM プロセッサ用のバスであり、汎用チップ内部バスとして、よく使用されるようになった。mt9d111_inf_axi_master と bitmap_disp_cntrler_axi_master は、図 1 に示す PS の High Performances Ports を通って、PS の DDR3 Controller に配線された DDR3 SDRAM に接続されている。図 3 に XPS のプロジェクトを示す。XPS プロジェクトには、mt9d111_inf_axi_master_0 と bitmap_disp_cntrler_axi_master_0 の他、axi_interconnect_1、axi_interconnect_2、processing_system7_0、axi_gpio_0、axi_iic_adv7511、axi_iic_mt9d111、axi_timer_0、char_rom_axi_lite_0 を追加してある。

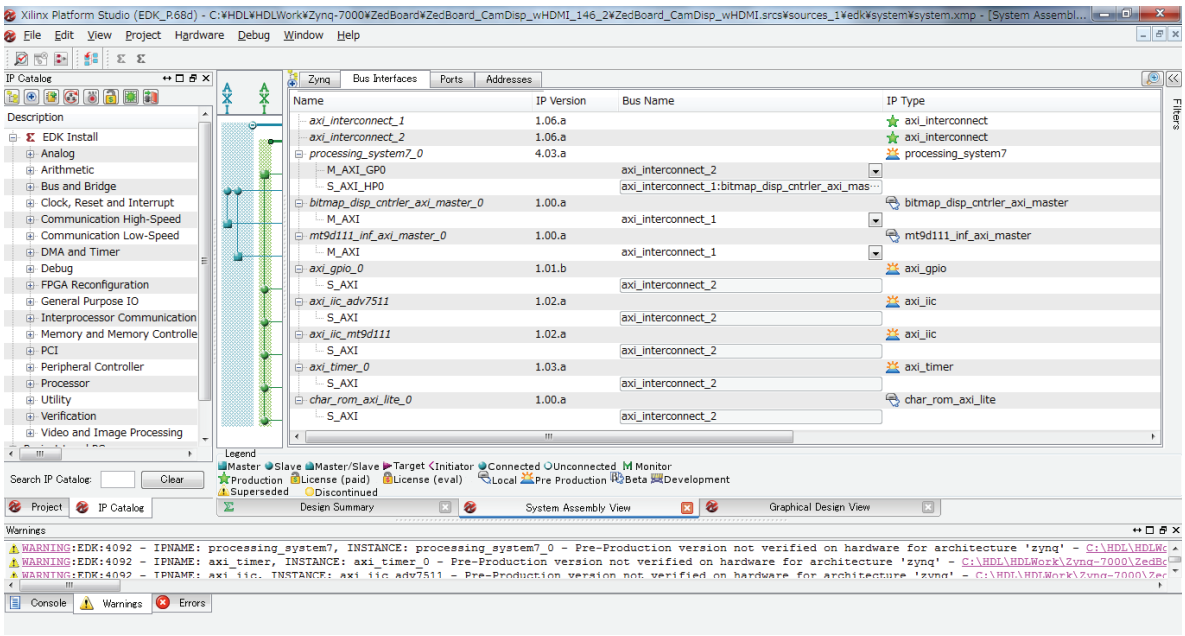


図 3　ZedBoard を利用したカメラ表示回路の XPS プロジェクト

図 3 は、XPS の Bus Interfaces タブの表示を示している。Bus Interfaces タブでは、マウスをクリックすることでバスを接続することができる。図 3 では 2 つの AXI4 バスを使用している。緑色の AXI4 バスは、AXI4 Lite バスで、主に ARM プロセッサから各 IP コアへの設定レジスタの設定用途に使用されている。水色の AXI4 バスは、通常の AXI4 バスで、カメラ・インターフェース IP コアとビットマップ・ディスプレイ・コントローラ IP コアを ARM プロセッサの S_AXI_HP0 ポートに接続している。S_AXI_HP0 ポートは DDR3 SDRAM コントローラにつながっているので（図 1 参照）、2 つの IP コアが DDR3 SDRAM にアクセスすることができる。

カメラで撮影した画像をディスプレイに表示している様子を図 4 に示す。この表示のサイズは、SVGA (800 ピクセル×600 行)となっている。

図 4　カメラで撮影した画像をディスプレイに表示

ZedBoard と Pmod コネクタに接続された CMOS カメラの様子を図 5 に示す。

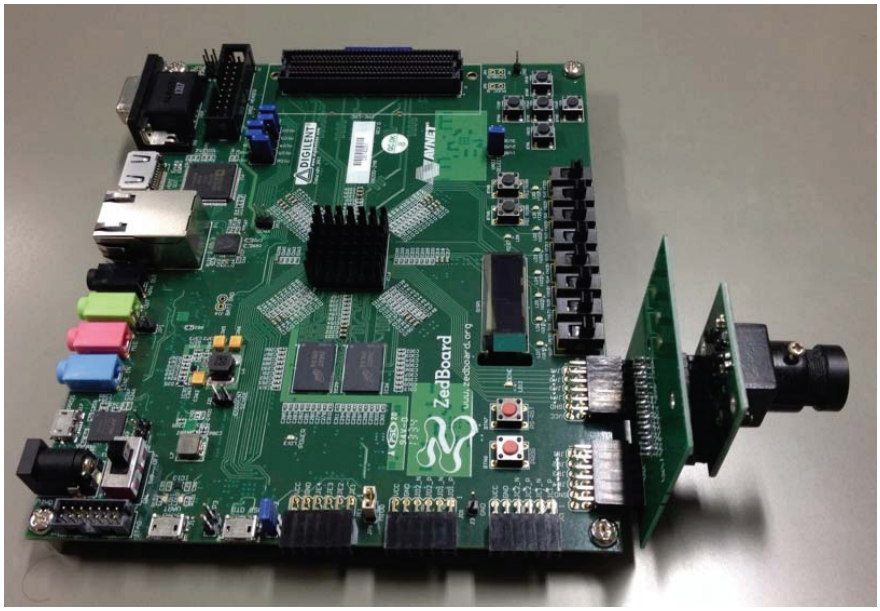


図 5　ZedBoard と Pmod コネクタに接続された CMOS カメラ

3　ラプラシアン・フィルタの実装[2]

Digilent 社から ZedBoard 用の Linux を動作させることができる PL 部の回路と u-boot ブートローダーや Linux のブートイメージ、RAM ディスク・イメージが配布されている[3]。これを使用して ZedBoard で Linux を起動した。更に、2.で述べたカメラ・インターフェース IP コアとビットマップ・ディスプレイ・コントローラ IP

コアを PL 部の回路に追加し、Linux のブートイメージを書き換えてカメラ画像を VGA ポートに出力した。その XPS プロジェクトを図 6 に示す。図 6 の mt9d111_inf_axi_master_0 がカメラ・インターフェース IP コアで、bitmap_disp_cntrler_axi_master_0 がビットマップ・ディスプレイ・コントローラ IP コアである。

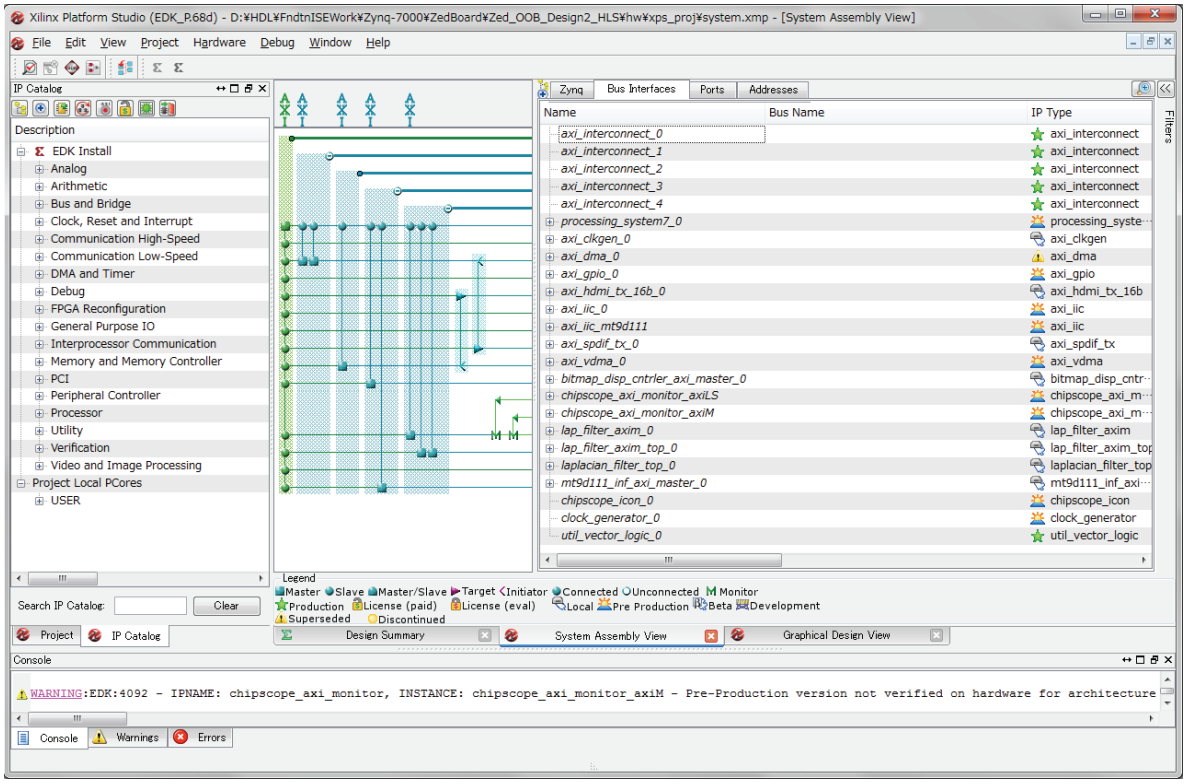


図 6　Digilent Linux での最終的な XPS プロジェクトの様子

Digilent Linux では、Linux のペンギンを HDMI ポートから HD 解像度で出力している。そのフレーム・バッファを一部借用して、カメラの画像をバッファしている。よって、HDMI の画像はペンギンとカメラの画像が表示されるが、カメラの画像は解像度が SVGA のため、正常には表示されない。その様子を図 7 に示す。2 匹のペンギンの下が、SVGA 解像度のカメラ画像なのだが、HD 解像度のディスプレイに表示しているため正常に表示されない。

図 7　Digilent Linux 上の HDMI 画面表示

VGA ポートの画像出力は、Digilent Linux の VGA 画面出力用 IP コアから、自作のビットマップ・ディスプレイ・コントローラ IP コアに変更した。よって、VGA ポートからの画像はカメラで撮影した画像が正常に表示される。その様子を図 8 に示す。但し、色の階調が 4096 階調なので、擬似輪郭が見える。

図 8　Digilent Linux の VGA 表示画面

カメラから入力した画像を元にラプラシアン・フィルタを実装して、エッジの抽出を試みた。最初は ARM プロセッサのソフトウェアでラプラシアン・フィルタを実現した。ソフトウェアの最適化後の実行時間は約 390ms[3]だった。次に、ラプラシアン・フィルタを PL 部のハードウェアにオフロードした。AXI4 バスのマスタ・アクセスを使用したラプラシアン・フィルタの実行時間は約 24ms[4]だった。ソフトウェアからハードウェアにオフロードしたことで速度は約 16 倍になった。ハードウェアにオフロードされたラプラシアン・フィ

ルタの IP コアは図 6 に示す lap_filter_axim_0 である。lap_filter_axim_0 にソフトウェアでコマンドを与えることにより、ハードウェアを起動して、ラプラシアン・フィルタを画像に適用することができる。

ラプラシアン・フィルタのハードウェアによる処理を説明する。

1. カメラから入力されたピクセル･データの格納されている DDR3 SDRAM の領域を DMA で Read して、画像のラインごとにライン・バッファにバッファリングしておく。
2. 画像の 3 ライン分が集まったら、ラプラシアン・フィルタをかける。
3. ラプラシアン・フィルタ処理後のデータを DDR3 SDRAM の別の領域に DMA で Write する。
4. 次のラインのピクセル・データを DDR3 SDRAM から読んでくれば、前の 2 ラインは予め読んであるので、ラプラシアン・フィルタをかけることができる。

ラプラシアン・フィルタの出力画像を図 9 に示す。

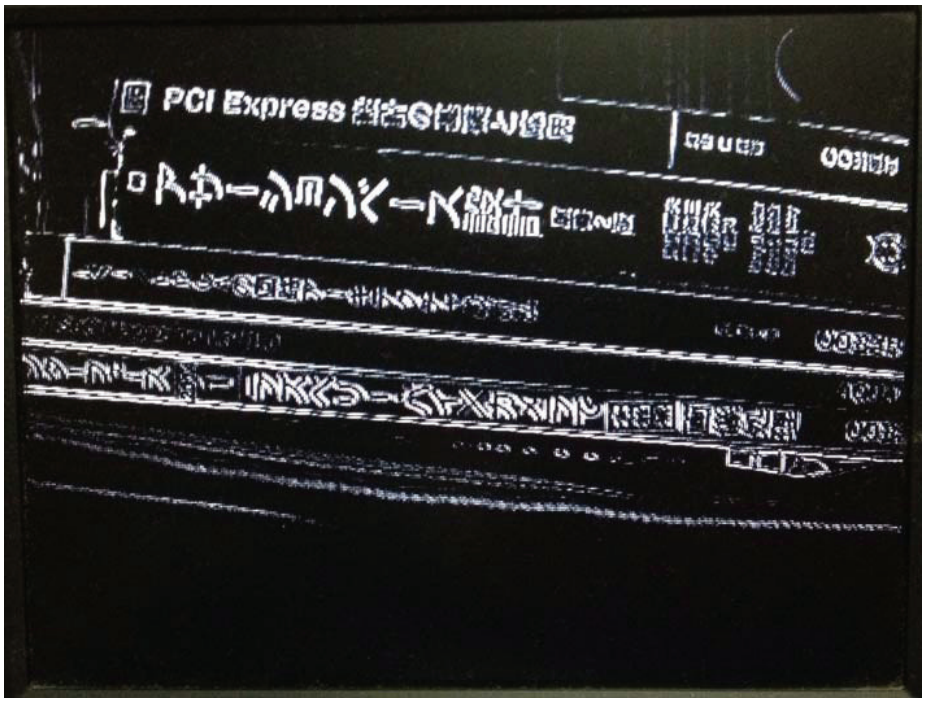


図 9　ラプラシアン・フィルタ処理後の画像

4　まとめ

Xilinx 社の ARM プロセッサ Zynq-7000 を用いた ZedBoard を使用して、CMOS カメラの画像をディスプレイに表示することができた。次に、Digilent 社の Linux を動作させて、Linux 上で CMOS カメラの画像をディスプレイに表示させることができた。更に、Linux 上のソフトウェアでラプラシアン・フィルタを実装して、最適化し動作時間を測定した。ラプラシアン・フィルタをハードウェアにオフロードしたところ、ソフトウェアの約 16 倍速く実行することができた。

5　参考文献

[1]　Zynq-7000 All Programmable SoC テクニカル リファレンス マニュアル UG585 (v1.6.1) 2013 年 9 月 10 日, p27 図 1-1 : Zynq-7000 AP SoC の概要,
http://japan.xilinx.com/support/documentation/user_guides/j_ug585-Zynq-7000-TRM.pdf

[2]　ZedBoard, FPGA の部屋, http://marsee101.web.fc2.com/zedboard.html

[3]　ZedBoard　Zynq™-7000 Development Board , Digilent 社,

http://digilentinc.com/Products/Detail.cfm?NavPath=2,400,1028&Prod=ZEDBOARD

[4] “ソフトウエアのプロファイリング４（ハードウェアと同じ方式)”, FPGA の部屋, http://marsee101.blog19.fc2.com/blog-entry-2599.html

[5] “AXI4 Master アクセスのラプラシアン・フィルタ IP９（できた。完成）”, FPGA の部屋, http://marsee101.blog19.fc2.com/blog-entry-2661.html

ネットワーク（SiTCP）-高圧電源（HV）モジュールの開発

佐藤節夫

高エネルギー加速器研究機構 中性子科学研究施設

概要

高エネルギー加速器研究機構（KEK）の中性子科学研究施設（KENS）では、パルス中性子を使用した散乱実験を行い、物質の構造解析等を行ってきている．中性子検出器に ^{3}He を使用したガス検出器や中性子を光に変換して光電子増倍管を使用した検出器が使用されている．どちらの検出器にしても-1500V～+2000V の範囲での高圧電源を使用する．通常の中性子散乱実験は、中性子検出器用処理回路を実験中立ち入れない実験室内に置かれ、データ読み出しや制御が LAN ケーブル 1 本を通して安全な場所から行われる．しかし、高圧電源はネットワークされたものが少なく、また高価であるため、高圧ケーブルを伸ばすか何度も実験を止めて電圧を変える必要があった．そこで昨年度開発を行い、この研究会でも紹介させていただいている、SiTCP-VME 変換モジュールの空き空間を利用して高圧電源部分を作製し、ネットワークから制御できるようにしたので、紹介したい．

1　SiTCP-HV モジュール

SiTCP-HV モジュールは、SiTCP-VME 変換モジュールに高電圧電源回路を増設し、制御できるようにしたモジュールである．写真 1 に作製した SiTCP-HV モジュールの外観を、図 1 に内部構成を示す． FPGA は、Xilinx 社の Spartan6 の LX9 を使用していて、ピンが出ている TQG144 パッケージが選べるタイプである．ピン間隔が 0.5mm であり外側に出ているので、手半田が可能である．

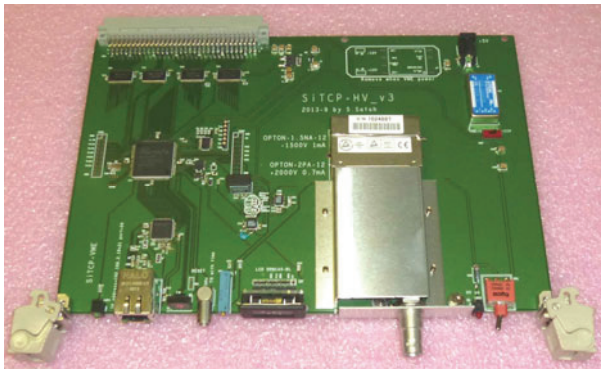


写真 1. SiTCP-HV の外観

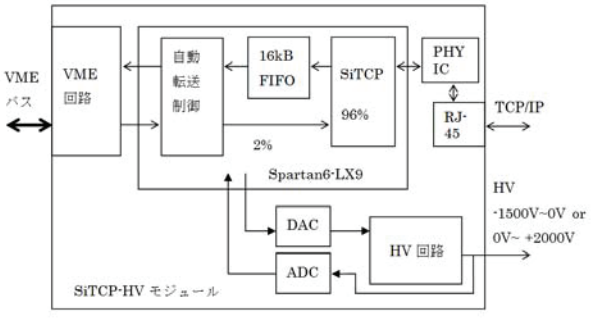


図 1. SiTCP-HV の内部構成

写真 1 のように、左側 3 分の 1 程度が SiTCP-VME 機能で、下からネットワーク用 RJ-45 コネクタ、ネットワーク IC（PHY-IC）、FPGA、TTL-IC、VME コネクタに続いている．残りの右側 3 分の 2 に高電圧電源を増設した．高電圧発生モジュールは松定プレシジョン社の小型基板取り付け型を使用した．取り付けるモジュールの型を変えることにより、負電圧か正電圧を選ぶことができる．VME 電源を使用することもできるが、右上のコネクタで+5V の電源アダプターからの電源供給からでも 1A 程度で使用できるようにした．図 1 に示すように、SiTCP 部分が FPGA プログラムの 96%を占め、残りの内の 2%で VME 転送ブロックをプログラムした．残りの 2%以内に DAC と ADC 制御を行える機能を付け、高電圧を調整し、監視できるようにした．ほとんどゲートを使用しないので、全体で 98%の使用量で収まっている．

2　高電圧電源部分

写真 1 の右側が高電圧電源部分で、安全のためにアルミ板でカバーしている．写真 2 は、カバーを外して横から見た様子である．高圧部分は危険であるので、なるべく単純化して事故が起こりにくくした．実際には高電圧部分をなるべく小さな空間に閉じ込め、完全にグランド面で覆う構造に心掛けた．両面基板を使用し、高圧部分がある半田面は全面グランドとし、部品面は銅箔パッドだけとした．剥がれやすくなるので、なるべく面積を広くし、力が加わらないように構成部品を半田付けした．写真 2 の見えている部分だけが高電圧があるところで、全体をアルミ板のカバーで覆うが、ネジで確実にグランドとなるようにした．

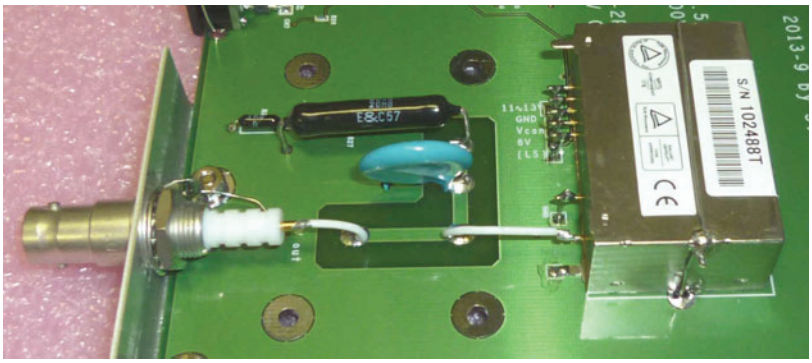


写真 2. カバーを外して横から見たところ

図 2 に高電圧部分の回路図を示す．プリント基板を作るための回路図なので、高電圧発生モジュールからの高電圧出力は空中配線になるので記載されていない．電圧の制御はデジタル - アナログ変換器（DAC）を使用してネットワークを通してできるようにした．しかし、手動でも調整したい場合もあるので、電源投入時は手動で調整できるようにした．図中左の「DAC out」が DAC 出力に繋がっているが、オープン状態にすることで手動設定の VR1 が有効になる．DAC を出力状態にした場合、手動設定の抵抗を無視できる駆動能力を持つ．0~4.095V 出力電圧であり、オペアンプの IC12 により高電圧モジュールの 0~6V の制御電圧に変換している．ネットワークからは別の値を設定したり、手動制御に戻したりできるようにした．どちらで設定した場合でも、最終的な高圧電源の値をアナログ - デジタル変換器（ADC）で読み出せる．また、パネルについた液晶表示器（LCD）は常時表示している．

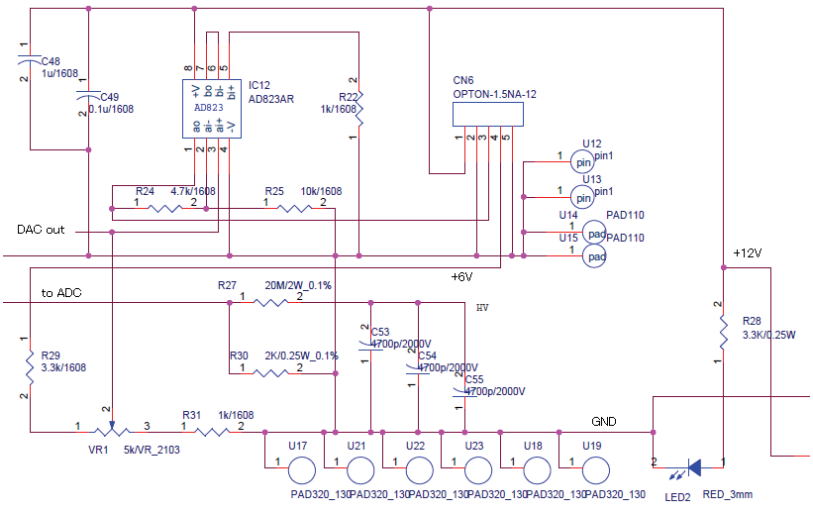


図 2. 高電圧部分の回路図

制御できる電圧の極性は、少し不便であるが高電圧発生モジュールを変えることで対処した．入出力が絶縁されたモジュールを使用して、高電圧出力を切り替えて正電圧と負電圧を替える方法もあるが、モジュールサイズが大きり、さらに高電圧に耐えられるスイッチが必要になる．素人が安全に扱うためにも単純化し、特殊な部品の使用を避けた．

高電圧発生モジュールは松定プレシジョン社の OPTON-A シリーズを採用した．基板に直接取り付けると高電圧部分を閉じ込められなくなるので、縦型モジュールを横倒しで使用した．モジュールケースへのグランド接地を完ぺきにするため、取り付け用アース線でプリント基板グランド面に半田付けしている．^{3}He ガス検出器用には 0～2000V の制御ができる OPTON-2PA-12 を、光電子増倍管を使用した検出器用には 0～-1500 の制御ができる OPTON-1.5NA-12 を使用した．電源電圧は扱いやすい+12V とした．

3　高電圧の読み取り

高電圧が正電圧の場合と負電圧の場合があるので、単電圧の ADC の読み出し部分を同じに扱うことはできない．取り付ける部品を変えることで対処し、それが明示的にわかるような基板を心掛けた．図 3 に ADC 部分の回路図を示す．図 2 左の「to ADC」が図 3 右下の「to LCD」と同じラインである．高電圧を 20MΩと 1kΩで分圧した 2 万分の 1 の電圧（±2000V＞±100mV）を LCD と IC11 のピン 3 で受ける．LCD は±100mV を直接表示できるので、そのまま±2000V の表示となる．IC11 は FET 入力オペアンプで、データシートによると 10^{13}Ω であるので、影響はない．±100mV を増幅できるように、U11 の DCDC コンバータで IC11 にマイナス電源を与えている．ピン 5,6,7 のオペアンプで、高電圧の負電圧の時は反転アンプに、正電圧の時は正転アンプになるように部品の付け替えて変えられるようにした．付け間違えが減るように、全て 1kΩとなるように値を調整した．

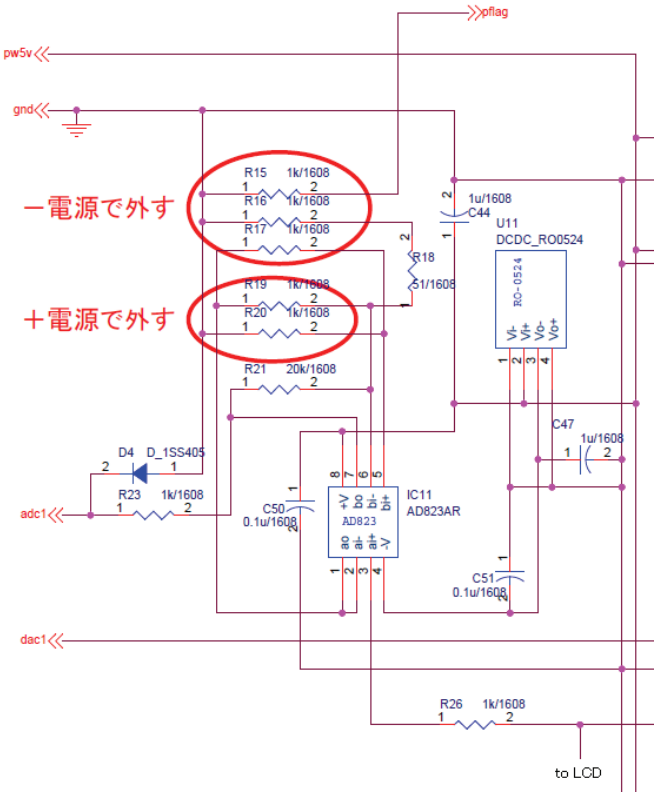


図 3. ADC 部分の回路図

4　ネットワーク（SiTCP）からのアクセス

SiTCP は TCP/IP と UDP/IP が独立に使用できる．高速で信頼性が求められる VME 通信側を TCP/IP とし、速度が必要ない今回の HV 機能を UDP/IP とした．SiTCP の UDP/IP の使用法は、32 ビットのアドレスと 8 ビットのデータ長（バイト）を指定して、データの転送ができる．1 回の転送で送れるデータ量は 1～255 バイトで小さいが、各種設定や読み出しには十分であり、32 ビットのアドレス空間で制御レジスタを簡単に配置できる．

表 1 に SiTCP の UDP/IP 設定レジスタの配置を示す．HV 電圧設定では、高電圧設定用の DAC への値の設定と、読み出しができる．HV 電圧読み出しでは、ADC の値が得られる．それぞれ 12 ビット精度を使用しているので、16 ビットずつのアドレスを割り振った．その他に、中性子実験で使われている時刻情報を与えられるように、アドレス 0x190 から 7 バイトに配置した．書き込みでは時刻を与えられ、読み出しでは内部クロックで 1 秒ごとにカウントアップした値が読み出される．

図 4 に LabVIEW での使用例を示す．set HV に高電圧を設定して set HV ボタンを押すことにより設定される．0 を設定すると、

表 1 . SiTCP の UDP/IP 設定レジスタ

アドレス	
0x180	HV 電圧（DAC）設定（2 byte）
0x182	HV 電圧（ADC）読み出し(2 byte)
0x184	
0x190	装置時刻相対カウンター（7 byte）

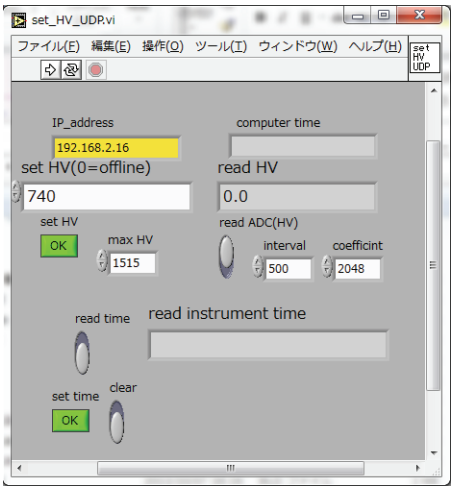


図 4. LabVIEW での使用例

パネル上の半固定抵抗で設定した値が有効になる．read ADC スイッチを上に上げることで ADC の読み値が read HV 欄に表示される．中性子実験用に付けた機能の時刻情報の設定を set time ボタンを押すことにより、PC の現時刻が設定できる．read time ボタンを押すことにより、read instrument time 欄に読み出した値が表示される．電源投入時は 0 で、2008 年 1 月 1 日を示している．2010 年以降の時刻を設定することにより、この時刻情報を付加したタイミング信号を出す.

5　まとめ

昨年開発した SiTCP-VME インターフェースモジュールでネットワークから VME 機器が制御できるようになった．今年度はこのモジュールに高電圧発生機能を追加することができ、ネットワーク制御できるようになった．中性子実験においては必ず高電圧電源を使用するので、非常に便利になった.

6　参考文献

[1]　佐藤節夫, “高速ネットワーク（SiTCP）-VME 変換モジュールの開発”, 平成 24 年度技術研究会

[2]　http://e-sys.kek.jp/tech/sitcp/

[3]　http://avnet.co.jp/design/kits/xilinx/AES-S6MB-LX9-G.aspx

J-PARC/MLF における
トリガー信号及び時刻配信システムの開発

○瀬谷智洋 A)，佐藤節夫 A)，坂口将尊 A)

A) 高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所

1. はじめに

J-PARC/MLF では、加速器によって生成されるパルス中性子を使用し、物質の構造解析を行っている。TOF 法により解析をおこなっているので、中性子の発生源から検出器までの中性子飛行時間の測定が重要である。つまり、実験では 1000ch を超す中性子検出器からの信号と、１パルスごとの中性子飛行時間を測定している。

現在、装置ごとにタイミングボードを設置し、任意の時刻とパルス ID を付与して、１パルスごとの測定データを区別している。

本開発では新たなタイミングボードを開発し、今まで装置ごとに管理していた、時刻とパルス ID を施設共通のものとし、統一したタイミング信号を使用して、測定を行うことを目的としている。

2. 概要

図 1.に概念図を示す。まず、加速器制御室より 1 パルスごとに付与されるパルス ID を取得する。MLF と加速器制御室は別の建物でおよそ 500m 離れている。この間はリフレクティブメモリと呼ばれる高速なインターフェイスで接続されている。リフレクティブメモリと開発を行ったタイミングボード間は VME で接続され、ここで MLF 統一時刻を付与し、その後、各装置へ分配する。

3. 新ボードへの要求

- VME を通じてリフレクティブメモリへアクセスし、パルス ID を取得する。
- パルス ID、MLF 統一時刻を付与し、各装置へ転送する。

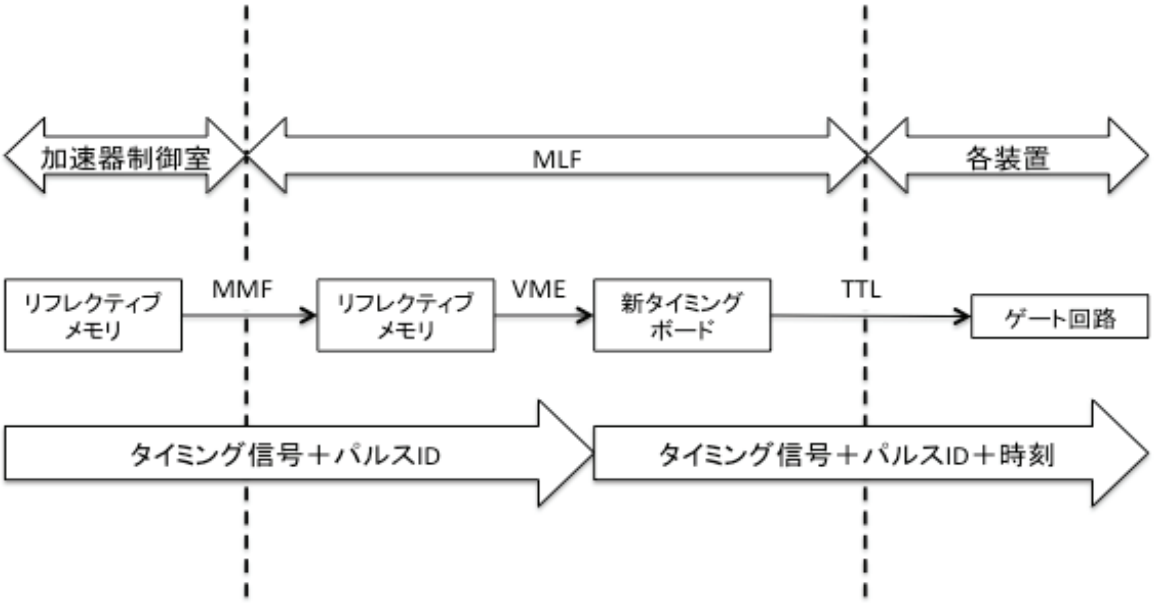


図 1.　概念図

4. ハードウエア

図 2.に開発に使用した VME ボードを示す。Bee Beans Technologies 社の Scarlet RUNNER を使用した。このボードは、Xilinx 社の Virtex-4 を使用した FPGA ボードで、Ethernet を用いた TCP・UDP 通信機能を持っており、また VME の J1,J2 の通信インターフェイスも有している。唯一、各装置に設置されたゲート回路との通信機能を持たないが、この点については、未実装領域に手を加えることで対処することとした。

元々このボードは、Ethernet を経由した VME マスタモジュールとして設計されていたが、本件のハードウエアの用件を満たしており、かつ FPGA が搭載されているので内部ロジックの変更が可能なことから、このボードを使用することとした。

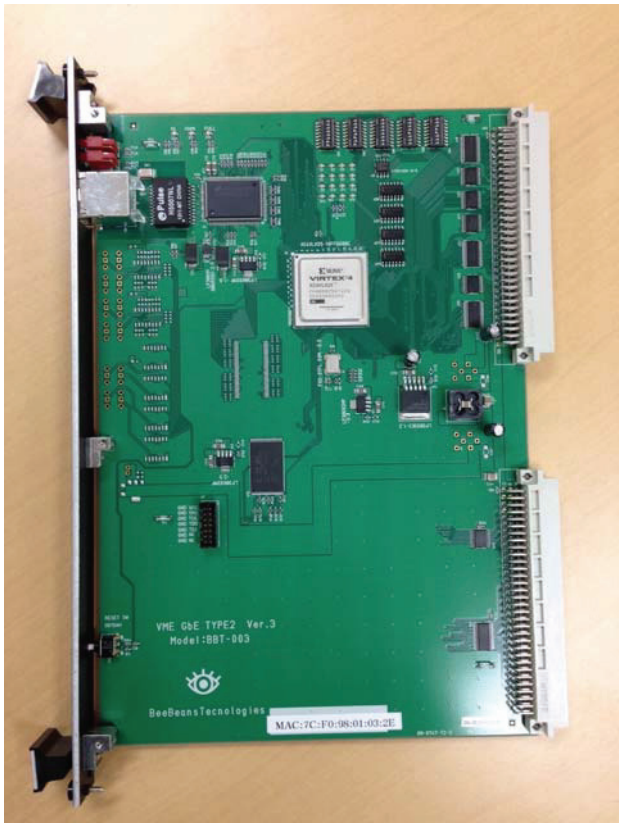


図 2.試験用 VME ボード

5. 動作試験環境

PC から制御可能なリフレクティブメモリを用意し、加速器制御室に設置されているリフレクティブメモリを模擬した。これを用いて VME で新タイミングボードと接続されているリフレクティブメモリに、パルス ID を擬似的に書き込み、これを用いて動作試験を行った。

6. 動作試験結果

試験結果については、口頭発表にて報告を行う。

参考文献

1). S.Satoh, S.Muto, N.Kaneko, T.Uchida, M.Tanaka Y.Yasu, K.Nakayoshi, E.Inoue, H.Sendai, T.Nakatani, T.Otomo, Development of a readout system employing high-speed network for J-PARC, During a contribute to International Symposium on Pulse Neutron and Muon Science (IPS 08), NIM A 600(2009)103-106

2). Xilinx Virtex-4 FPGA Family Data Sheet http://www.xilinx.com

3). Ultrahigh-Speed Fiber-Optic Reflective Memory with Interrupts
GE Fanuc Embedded Systems

動的風荷重に対応した圧力載荷装置の製作

丸山暁

東北大学 工学部・工学研究科技術部

1　はじめに

台風や竜巻などの強風により建築外装材が破壊されるとそれ自身が飛来物となり被害を連鎖的にもたらす．また，窓ガラス等の開口部が損傷すると漏水が発生し，また強風が吹き込むと建物内圧が上昇し，負の外圧との相互作用により，より大きな外向きの風力が屋根に加わるため，屋根の脱落にもつながる．そのため建材の耐風圧性能評価は重要である．しかしながら従来の圧力載荷装置では一定，漸増荷重もしくは数秒周期の脈動風圧を再現できても，実際の風荷重のような時々刻々と変化する動的風荷重は再現できなかった．本製作では動的風荷重に対応した圧力載荷装置を製作し，その装置を用いて適切な耐風圧性能評価を実現することを目的とする．

2　製作の経緯

今回製作する圧力載荷装置はカナダのウェスタンオンタリオ大学の G.A. Kopp らによって開発されたものである．大きな特長は動的風荷重に対応していることである。再現できる風圧の周波数は試験体を取り付ける圧力箱と呼ばれる箱の体積や風圧，荷重する風圧波形により異なるが，この装置は 0.6[m]×0.6[m]の大きさの試験体に 6[Hz]の動的風荷重を再現できる．日本国内には圧力載荷装置として(一財)日本建築総合試験所と東京工芸大学が所有しているものがあるが日本建築総合試験所の装置は動的風荷重に対応しておらず，東京工芸大学の装置の応答性は 0.05[Hz]~0.06[Hz]と動的風荷重に対応しているとは言いがたい．

当初はウェスタンオンタリオ大学から同装置を購入し輸送する計画であったが，輸送費等で数十万円かかる上に実験室の電気工事に 170 万円，先方へ支払う装置代として数百万円が必要であることが分かった．また，この装置は日本国内では一般的ではない三相 600[V]で動作するため，一度電源工事をしてしまうと移動の度に 100 万円以上の電気工事費が発生する．

これだけの費用をかけて輸送して使用するよりも，三相 200[V]で動作し日本国内で入手しやすい部品で装置を製作した方が安価で保守も容易であるため日本仕様のものを製作することとした．

3　圧力載荷装置の構造・性能

圧力載荷装置の構造を図 1 に示す．事前に入力時刻暦データを用意し，制御 PC に入力しておく．その波形データを元に制御 PC はモーションコントローラやインバータを介してブロワの出力制御を行なう．また同じくモーションコントローラやサーボアンプを介してサーボモータを駆動させることで弁開閉量制御を行なう．この弁開閉量を高速制御することで動的風荷重に対応することが可能となる．試験体に取り付けられている圧力センサの計測値やサーボモータ内蔵のエンコーダの値はモーションコントローラを介して制御 PC へフィードバックすることで微調整を行なうことができる．製作した装置は最初に製作した 1 号機とその後に製作した 2 号機があるが本文中では特記がある場合を除き 2 号機について記述する．

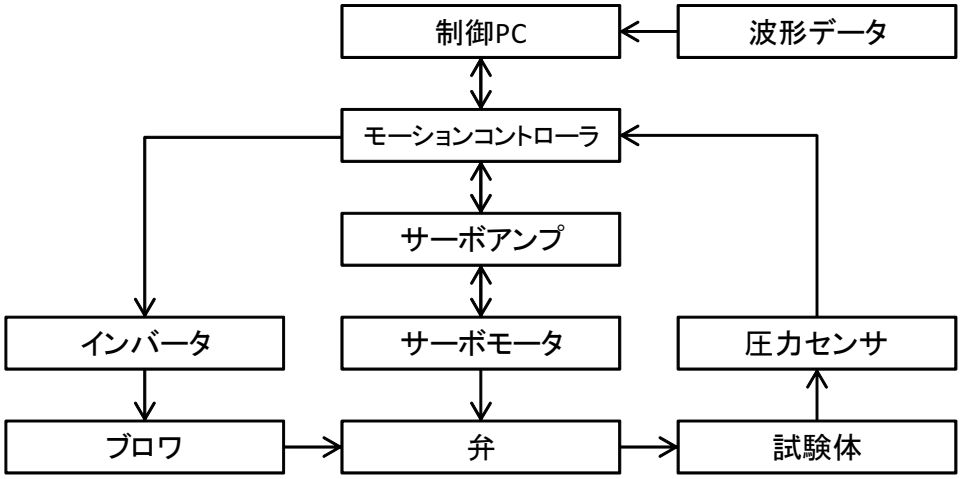


図 1：圧力載荷装置の構造

図 2：装置本体(1 ユニット)

図 3：装置本体(3 ユニット連結)

製作した装置を図 2 から図 3 に示す．図 2 のようにブロワや弁，サーボモータを 1 つのパレットに載せて 1 ユニットとし，そのユニットを図 3 のように 3 台連結することで大きな試験体(1.82[m]×2.0[m])に対応できる．1 ユニットの大きさは W850[mm]×D850[mm]×H1550[mm]である．

装置出力は 2 号機ではまだ実測されていないが，1 ユニットのみで構成されている 1 号機では，風洞実験より得られた風圧時刻暦データより作成した動的風荷重時刻暦を載荷した際，圧力箱(W1114[mm]×D1310[mm]×H141[mm])にて実測された最大風圧は 13.79[kPa]であった。また，この実験の際に載荷した風圧を，幅 9.1[m]，長さ 10.4[m]，屋根平均高さ 8.8[m]の建物の窓(0.83[m]×0.9[m])に加わる風圧係数を仮定して，最大風速(10 分平均)へ換算すると 91[m/s]相当の風圧であることが分かった．これは 1965 年に日本に上陸し，高知県室戸市室戸岬で観測史上最大の風速である 69.8[m/s]を記録した台風 23 号よりも大幅に強いものである。2 号機は 3 ユニットあるため，同じ大きさの圧力箱に対してはさらに大きな風圧が出力できると予想される。また，実測された最大追従可能周波数は 7[Hz]である．

4　各構成要素

A)　ブロワとインバータ

ブロワはウェスタンオンタリオ大学で開発した装置(以下モデル装置)に採用された米 Gast 社の R6PP の出力特性よりも高性能なものを選定した．それはモデル装置設計時の選定根拠となった書類が入手できなかったためである．今回の装置は，試験体に負圧力(吸引方向)を加えるため吸引時の最大静圧が重要になる．そのため吸引時の最大静圧とその際の風量を比較した．R6PP の場合 20[kPa]で 4.9[㎥/min]であるのに対し，日立産機システム社製 VB-110-E2 では 29.7[kPa]で 5.9[㎥/min]であった．価格や納期も条件を満たすものだったためこちらを採用した．性能一覧を表 1 に示す．

表 1：ブロワ比較

項目	R6PP	VB-110-E2
電源電圧[V]	230	200
最大静圧(吸引)[kPa]	19.9	29.4
最大静圧(吸引)時の風量[㎥/min]	4.9	5.9
電動機出力[kW]	8.2	12.5
重量[kg]	140	147

動的風荷重を実現するためにはブロワの駆動装置もそれに対応してブロワを急加速できる必要がある．モデル装置は独シーメンス社製 MICROMASTER 440 シリーズであったが，代理店の取扱機種は 400[V]動作機しかないため同型機は使用できない．そのため代替品として三菱電機製 FR-A720-15K を採用した．

B)　弁とサーボアンプ・サーボモータ

弁の概観を図 4 に，横断面を図 5 に，弁体を図 6 に示す．動的風荷重に対応するためには高速で流量調整を行なわなければならない．モデル装置も弁は既製品ではなく自主開発したものを使用している．弁も図面を元に国内で製作することも検討されたが，価格や納期で大変不利なのでウェスタンオンタリオ大学から購入して使用することにした．弁の内部には図 5 のように 3 つの仕切りがありそれらの開閉制御をすることで流量調整を行なう．弁体は図 6 のように蝶のような形をしておりサーボモータで回転させることで開閉制御を行なう．

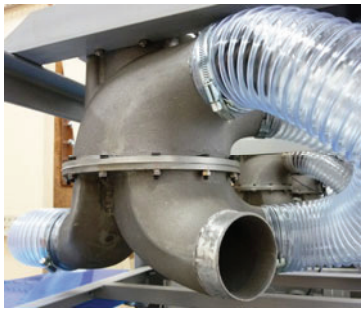


図 4：弁外観

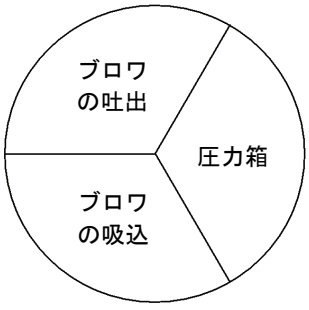


図 5：弁の横断面

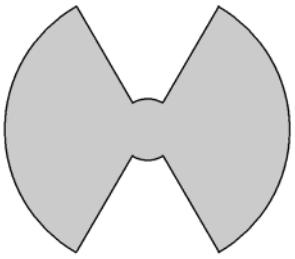


図 6：弁体の形状

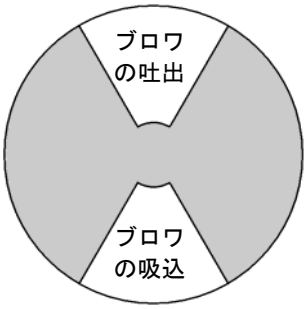


図 7：無負荷時の弁体

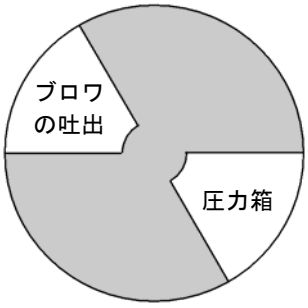


図 8：正風圧時の弁体

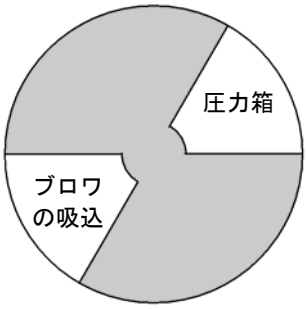


図 9：負風圧時の弁体

図 7 は無負荷状態の弁体の位置である．圧力箱へつながる口を弁体が塞いでいるので試験体に圧力がかからない．図 8 は正風圧載荷時の弁体の位置である．圧力箱とブロワの吐出が接続されるため正風圧が加えられる．図 9 は負風圧を載荷時の弁体位置である．圧力箱とブロワの吸込が接続されるため負風圧が加えられる．

動的風荷重に対応するためには弁の開閉量制御の応答性が必須となる．モデル装置は伊 Lafert Servo Motors 社の B7112P-03288U を用いていたが, こちらは日本国内に代理店がないため入手困難であった．こちらもモデル装置設計時の選定根拠の書類が一部しか入手できなかったため，B7112P-03288U の最大トルクや制御可能な慣性モーメント比を十分に満たし，制御信号の種類が後述のモーションコントローラに対応しているものを選定することとなった. その結果, 三菱電機製 HF-JP シリーズである HF-JP503K を採用した．サーボモータの制御に用いるサーボアンプは三菱電機から指定されているものの中から MR-J3 シリーズである MR-J3-700A を採用した．

C) 圧力箱

圧力箱を図 10 から図 11 に示す．一般に外装材に加わる圧力は負圧(建物の外側から内側にかかる力)の方が大きいため，また試験体に正風圧を加えると破壊時に試験体破片が周囲に散乱し後片付けが大変であるだけでなく大変危険であるので，負風圧を加えることで試験体破片が圧力箱内部に残り，飛散が最小限になるように工夫されている．

図 10：圧力箱(正面－試験体取付面)

図 11：圧力箱(裏面)

D) モーションコントローラ

動的風荷重に対応するには，圧力センサの値を元にサーボモータへのフィードバックを高速処理できる高性能なモーションコントローラが欠かせない．後述の制御用ソフトウェアはモデル装置で使用していたものを改良することが決定していたのでそれと互換性のあるモーションコントローラを選択する必

要があった．今回は，米ナショナルインスツルメンツ社製のモーションコントローラである PCI-7344 と端子台である UMI-7764 を採用した．このモーションコントローラは 4 台までのサーボモータを同時に制御することができ，62.5[μs]ごとに運転指令を送信できる．またアナログ入力ポートも備えているため，フィードバックに必要な圧力センサは直接モーションコントローラへ接続することもできる．そのためフィードバックの応答性が向上している．制御 PC との接続インタフェースは PCI である．

モーションコントローラからサーボモータへの位置決め制御信号は 0[V]~5[V]のパルス列で出力することにした．しかしながらサーボアンプへは差動パルス列で入力する必要があったのでモーションコントローラとサーボアンプの間に自作の信号変換回路を挿入することで解決した．サーボモータはモーションコントローラからの 1 パルスで 0.1[°]回転するように設定した．

E) その他センサ

試験体のひずみ量を測定するためにはひずみゲージやレーザー変位計を，圧力箱内の圧力分布の測定のためには圧力センサを使用する．これらのセンサの値は直接制御に関わるわけではないものの，利便性向上のためモーションコントローラと同じように制御用ソフトウェアと互換性があるものから選定し，I/O モジュールとして NI-CompactDAQ を使用することにした．こちらはモーションコントローラとは異なり USB で簡単に接続できるため自由度が高い．こちらの CompactDAQ 本体にアナログ電圧入力カードである NI 9205 を 3 枚挿入することで，合計 40 個以上のアナログ差動入力信号を 16 ビットの分解能で処理することができる．

F) 制御 PC

フィードバックの応答性の確保には制御 PC も高性能である必要がある．後述のソフトウェア開発者と調整した結果，今回のような少ないユニット数であればワークステーションのようなコンピュータでなくても高性能な PC であれば十分であるとの結論が出たので表 2 の構成で用意することとした．今回モーションコントローラボードは 1 枚のみであるが今後機能拡張する際に対応できるようなものを自作することにした．

実験中に PC でハードウェアに起因するトラブルが発生し実験に失敗すると，試験体を作り直す必要があるが，それには多くの手間や時間や費用がかかる．そのため自作する際はトラブルの起こりやすい初期ロットのマザーボードや特殊な機能が搭載されているものを選択しない，信頼性で定評のあるメーカーのマザーボード・メモリ・電源を選択する，内部の排熱対策を十分に行なうといった点に注意して信頼性を高めた．OS は後述の制御用ソフトウェアとの関係もあり，動作保証されている OS の中で安定稼働が見込める Windows7 の 32 ビットとし，エディションはソフトウェア開発者が日本語を読めないことを考慮し多言語対応であり簡単に表示言語を切り替えることができる Ultimate とした．制御用ソフトウェアは動作中にグラフの表示を行なうが，これにより CPU やビデオコントローラに負担がかかりフィードバックの応答性に悪影響を与えることが 1 号機運転中に判明している．そのため，2 号機では CPU 内蔵ビデオコントローラである HD4000 は使用せず AMD Radeon HD6670 を搭載している．

表 2：制御 PC 性能一覧

OS	Windows7 Ultimate 32bit SP1
CPU	Intel Core i5-3570K 3.4GHz
チップセット	Intel B75
RAM	4GB PC3-12800
ビデオコントローラ	AMD Radeon HD6670
ビデオメモリ	1GB GDDR5
HDD	500GB
光ディスクドライブ	スーパーマルチドライブ
電源	Cooler Master GX450W

G)　制御盤

制御盤ボックスを購入する際に見積もりを取った結果，機器すべてを 1 つにまとめると高額になることが分かった．そのため過電流遮断器や電磁接触器，リレーやタイマーといった開閉器や制御機器を収める制御機器盤と，インバータやサーボアンプ，リアクトルといった駆動機器を収める駆動機器盤に分割することにした. 2 つの盤の間はダクトで接続する. 制御盤は 2 つを連結した状態で W2.3[m]×D0.4[m]×H1.2[m]である．図 12 に制御盤外観を，図 13 に制御機器盤内部を，図 14 に駆動機器盤内部を示す．駆動機器盤には許容温度や発熱量等から必要な風量を計算し，排気ファンを設置している．また，各電線は保守管理をしやすくするため図面と同じ電線番号の付いたチューブを取り付けている．

後述の制御用ソフトウェアの開発者は日本語を読めないため，制御盤の各スイッチや表示灯の表記は図 15 のように日本語と英語の両方で記載している．

モーションコントローラ端子台やモーションコントローラ電源，NI-CompactDAQ やその電源は別の DAQ 盤として別の制御盤にまとめた. それは制御機器盤や駆動機器盤の中はノイズ源となる機器が多く，センサからのアナログ電圧信号に悪影響を与えることが予想されたからである. DAQ 盤を図 16 に示す.

図 12：制御盤外観

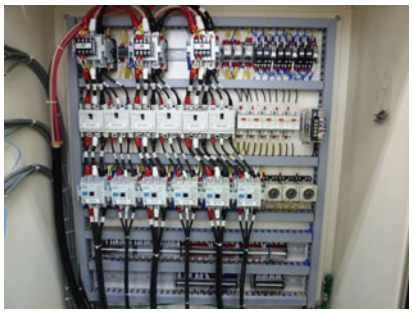


図 13：制御機器盤内部

図 14：駆動機器盤内部

図 15：2 言語表記されたラベル

図 16：DAQ 盤外観

H)　制御ソフトウェア

前述のようにソフトウェアはウェスタンオンタリオ大学で使用されていたものを改良して使用するにした．ソフトウェアは米ナショナルインスツルメンツ社製の LabVIEW を使用して製作されていた．LabVIEW とは G 言語と呼ばれる，図形や記号を用いたグラフィカル言語でソフトウェア開発できるソフトウェアである．これにより比較的短時間で高度なソフトウェアを製作することができる．

今回はウェスタンオンタリオ大学でもモデル装置の開発に携われた米 Insurance Institute for Business & Home safety の Murray James Morrison 氏に来日していただき 1 号機用のソフトウェア製作に 2 週間，2 号機用ソフトウェア製作に 2 週間の合計 4 週間でソフトウェアを製作していただくこととなった．

装置のフィードバック制御に直接関わるセンサやインバータやサーボアンプといった駆動機器との信号線をどの端子に接続すれば短時間で改良できるのかを事前に何度も打ち合わせをし，最大限ソフトウェア側に配慮することで 2 週間という短期間で改良を行なうことが可能となった．

I)　電気設備

本装置の電源は三相 200[V]であり，最大出力時の消費電力は 45[kW]である．装置の設置場所である実験棟の変電設備容量は 100[kVA]であることや他の装置の稼働状況等を調査した結果，現在の設備で十分賄えることが分かった．そのため，実験室内にある分電盤の改修工事のみを施設部の許可の元で行なった．具体的には，主幹ブレーカーの交換(100[A]から 175[A])，電力量計の交換(120[A]から 250[A])，分岐回路の増設(175[A])，分電盤から制御盤までの約 30[m]の天井裏ケーブル敷設である．今までも他の業務で電気工事をしたことはあったものの，これほど大規模なものは初めてであった．特に使用したケーブルが太く曲げにくい上に重量も 30[m]で 60[kg]以上だったため，天井裏へ引き上げるだけでも一苦労で作業は困難を極めた．しかしながら今までの業務経験を最大限活用することで事故や怪我なく終えることができた．

5　運用状況

2012 年 2 月に 1 号機が完成し，2013 年 5 月に 2 号機が完成した．1 号機は昨年度の卒業研究に使用され，2 号機は今年度の卒業研究に使用されている．来年度から 1 号機・2 号機共に今まで以上の高頻度での稼働が見込まれている．実験の様子を図 17 に示す．

図 17：実験の様子

6　おわりに

目的である動的風荷重に対応した圧力載荷装置の製作に設計から完成に至るまで携わることができたことに大変満足しているだけでなく，インバータやサーボアンプといった駆動機器の選定方法から制御盤の設計方法，実際に制御盤製作する上でのコツ等を学ぶことができて大変有意義であった．通常業務である電気工事・電子回路設計製作・電気設備設計製作・PC の製作といったすべてが関係しており，自分自身の持つ技術の大幅な底上げになったように感じている．

謝辞

本製作にあたり本学の工学研究科都市・建築学専攻構造安全システム学研究室の植松康教授やガヴァンスキ江梨助教，今野大輔氏や髙橋麻衣氏に様々なご協力をいただきました．ここに謝意を表します．

参考文献

G.A. Kopp， F.M. Bartlett， J. Galsworthy， D. Henderson， H.P. Hong， D.R. Inculet， E. Savory， L.M. St. Pierre， D. Surry(2006)：The “Three Little Pigs” Full-Scale Testing Facility

今野大輔(2013)：窓ガラスの耐風性能評価法に関する研究

岡田玲，吉田昭仁，松井正宏，田村幸雄，中田信治(2011)：外装材耐風圧性能試験装置の基本特性，日本風工学会誌，第 36 巻第 2 号，pp155-156

中川尚大，高森浩治，前田豊，西村宏昭(2009)：低層建築物屋根上の遮光ネットの設計用風荷重と耐風性能試験，GBRC Vol.34 No.4

植物葉の蛍光リモートセンシング計測システムの開発とストレス障害

○増田健二

静岡大学技術部プロジェクト・安全支援部門

概要

CCD 分光器を用いて，酸性液（pH 4.0 : 緩衝液）や有害紫外線(UV-B,C）などの植物のストレス要因を与え，植物葉のクロロフィル濃度やその他化合物の構成要素に関する情報をレーザー励起蛍光法 (Laser-Induced Fluorescence, LIF 法) によりスペクトル解析する．CCD カメラを用いて，クロロフィル量の有無による蛍光の葉内分布の違いを明らかにするとともに，ここで得られた知見をもとに，ストレスによる LIF スペクトルへの影響について調べた．また遠隔計測システムの開発として， CCD カメラによる二次元的なクロロフィル蛍光画像解析法を確立する．太陽光スペクトル中の暗線による FLD (Fraunhofer Line-Discrimination) 法を用いた植物蛍光分布画像システムの開発する．生育場所において直達太陽光励起による植物葉蛍光を計測する．

1　はじめに

植物における活性酸素生成（ストレス）要因としては，水分・土壌など様々なものがあるが，本研究では地球環境の悪化の一原因となっている大気汚染物質（NO_x, SO_2, etc.）による酸性雨とオゾン層破壊に起因する有害紫外線（ultraviolet B : UV-B）に着目した．これらの大気汚染物質に暴露した植物葉から放射されるクロロフィル蛍光スペクトルをレーザー励起蛍光 (Laser-Induced Fluorescence : LIF) 法[1],[2],[3]を用いて測定し，光合成能力とストレス指標を評価した．クロロフィルから放出される蛍光を解析することにより，葉の組織を壊さずに非接触で葉緑体中の光合成能力，すなわちストレスシグナルを計測する．高ストレス状態では，活性酸素濃度が増加して光合成が抑制される．植物葉からの LIF は，照射するレーザー光の波長によってそのスペクトルが異なる．可視レーザー光で励起した場合には，主にクロロフィルの２つの化学反応系 I，II に関係した赤色 (690 nm) から近赤外(740 nm)で極めて強い蛍光が見られ，このスペクトルの変化を解析することにより，植物葉のクロロフィル濃度や光合成色素の構成要素に関する情報が得られる．また紫外レーザー光励起の場合には，クロロフィル以外にもフラボノイドによる緑色（490nm）蛍光が見られる．本研究では，クロロフィル量の有無による蛍光の葉内分布の違い等を観察するとともに，ここで得られた知見をもとに，ストレスによる LIF スペクトルへの影響について調べた．

2　レーザー励起蛍光法

試料植物葉として，緑色の葉に白色の斑入りのポトス（Pothos、*Epipremnum aureum*）葉を用いたときの蛍光顕微鏡（Leica TCS SP8）写真を示す. 倍率 63 倍で表面から 100μm 程度の深さまで測定が可能である (図.1). LIF 測定では CCD 分光器 (Ocean Optics USB2000)を用いて蛍光スペクトルを測定する．532nm レーザー光による励起 (図.2-a)では，クロロフィルによる 650－770nm の赤色の蛍光があり，690nm（F690）と 740nm（F740）に蛍光のピークが見られる．F740 は，光合成活性状態のチラコイド膜上に存在する光化学系 I のクロロフィルから発せられており[4]，これらのクロロフィル蛍光強度比（ F740/F690 ）は，植物生体内でのクロロフィル濃度の指標[5]となることが知られている(図.2).

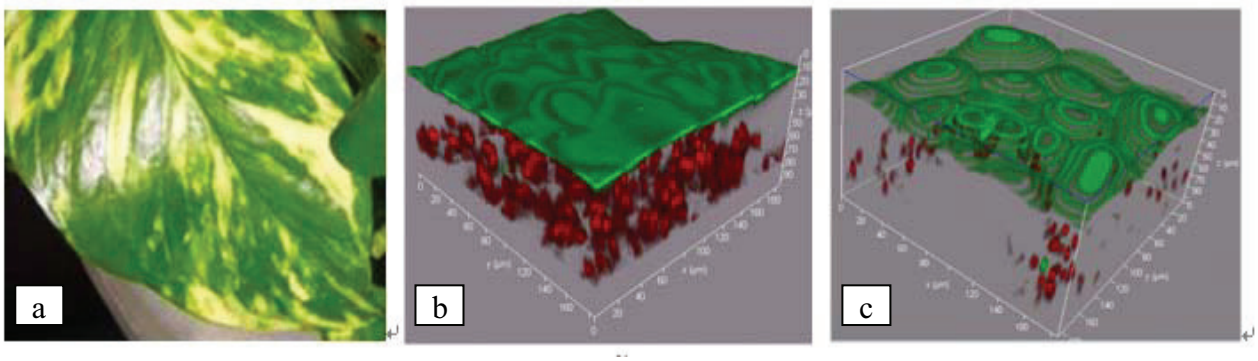


図. 1　ポトス葉の蛍光顕微鏡写真：a,ポトス葉の写真，b,緑葉部分，c,白葉部分．緑葉では深さ 30μm 程度からの棚状組織にクロロフィルから発せられる赤色ー近赤外域の蛍光が見られ，表皮（クチクラ）では 5μm の厚さでフラボノイドによる緑色蛍光が観察される．白葉では，赤色蛍光は米粒状に点在しており，緑色蛍光もより薄くなり楕円縞模様となっている．

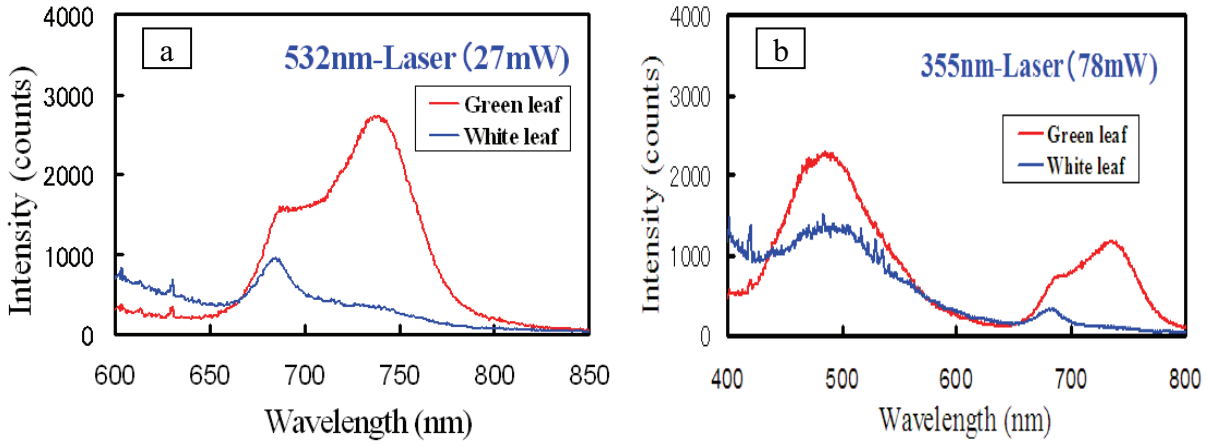


図. 2 ポトス葉を用いて LIF 法による蛍光強度測定：a，紫外（355nm,78mW），b,可視（532nm,27mW）．クロロフィルをほとんど含まない白葉では，740nm（F740）の蛍光ピークがなくなり，690nm（F690）の蛍光ピークも半分程度の強度となった．紫外励起による 490nm（F490）の蛍光ピークの比較において，フラボノイド量に依存した蛍光強度が観測された．

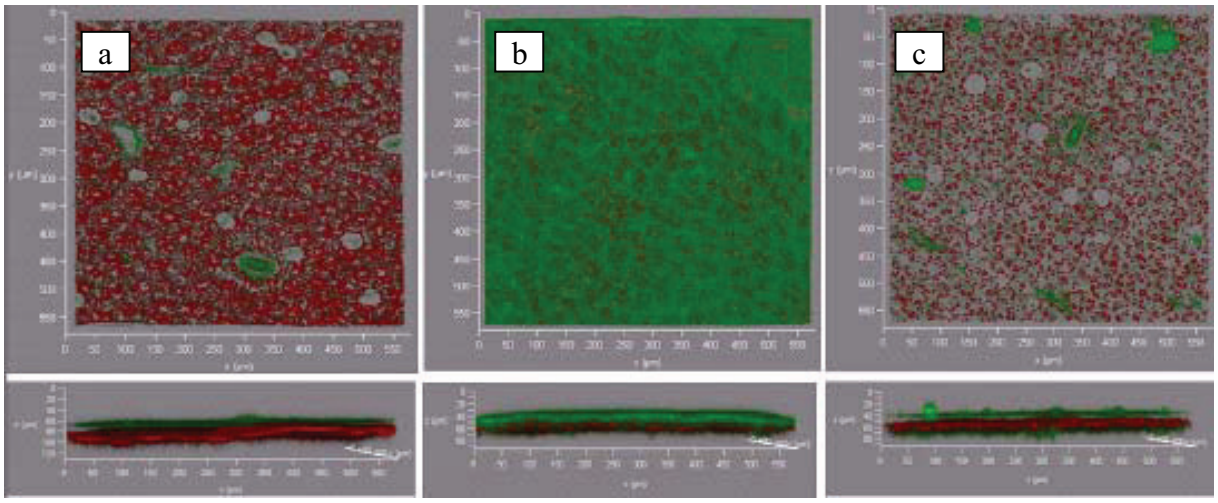


図. 3 ストレス障害による蛍光顕微鏡写真：a, Natural, b, UV-C Exposure, c,PH-4.0 Exposure，厚さ 5μm のフラボノイド蛍光（a）が UV-C の 6 時間暴露(b)によって 15μm 程度に増殖し，クロロフィルが減少している．酸性水(pH 4)に葉の表面を 6 時間浸水させた後，1 週間放置した場合，葉は黄色く変色し，クロロフィル・フラボノイドともに減少している．

3　ストレス障害と蛍光の関係

試料植物葉としてモンステラ（*Monstera*）を用いた．酸性水（pH 4）や有害紫外線（UV-C）などの植物のストレス要因を与え，植物葉のクロロフィルやフラモノイド濃度に関する情報を蛍光強度比（F740/F690）やF490 の強度比較によって取得する．

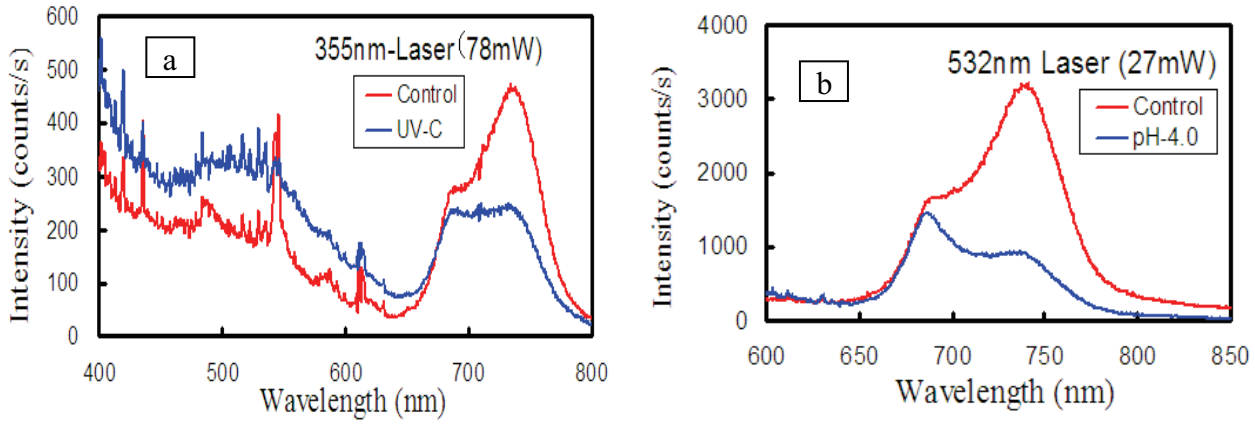


図. 4 モンステラ葉のストレス障害による蛍光スペクトル．LIF 法では，UV-C(a)と酸性水 pH-4(b)ストレスにより，光化学系Ⅱのクロロフィル蛍光（F740）は半分程度の強度となったが、光化学系Ⅰの F690 蛍光には変化は見られず，740nm ピーク蛍光とクロロフィル濃度の関連性が確かめられた．また，フラボノイド蛍光（F490）強度の上昇が見られた．

4　LIF 法による葉面の蛍光分布測定

可視域（532nm）レーザー光を拡幅し，白板に貼り付けた葉面全体に照射する．CCD カメラ（BITRAN BU51LN）に広角レンズと干渉フィルタ（CWL:750nm, FWHM:40nm）を取り付け、F740 の二次元的な蛍光画像を取得する (図.5).

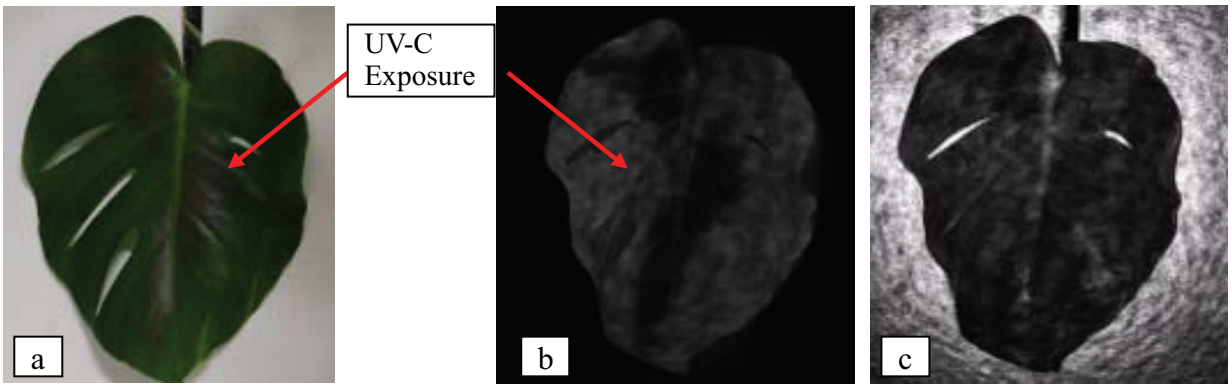


図. 5 LIF 法による葉面の蛍光分布：a, モンステラ葉の中央（茶色）部分を UV-C で 6 時間暴露したデジタルカメラ写真．c, 532nm レーザーの反射光．b, 蛍光画像．UV-C ストレスによってクロロフィルが減少し，蛍光強度の減少が画像として取得できた．

5　植物葉蛍光リモートセンシング計測

数 10m の距離の植物葉の蛍光をリモートセンシング計測するシステムとして，実験室において 532nm レーザー光を植物葉の全面に照射し，微弱な蛍光を天体望遠鏡（口径 130mm）で集光させ，CCD カメラとレデューサ，干渉フィルタ（CWL:750nm, FWHM:40nm）を組み合わせた画像測定系(図.6)を用いて，植物葉の二次元的なクロロフィル蛍光（F740）強度分布画像を取得した(図.7).

6　まとめ

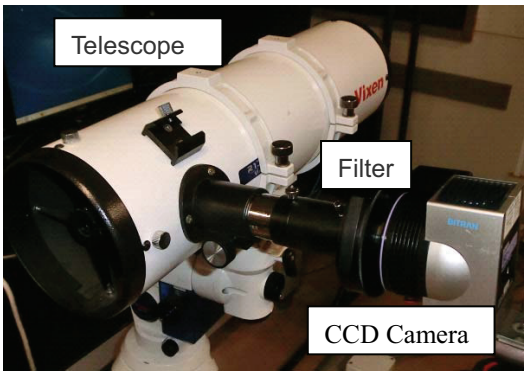


Fig. 6 リモートセンシング計測システム

532nm レーザー励起した場合には，クロロフィルの 赤色(670nm) から近赤外（740nm）で極めて強い蛍光が見られ，このスペクトルの変化を解析することにより，植物葉のクロロフィル 濃度に関する情報が得られる．紫外域の 355nm レーザー励起した場合には，クロロフィル以外にもフラボノイドからの緑色(490nm)の蛍光スペクトルが見られる．これら化合物の種類および濃度から蛍光強度や共焦点蛍光顕微鏡による観察から葉内分布の違い等を明らかにするとともに，赤色蛍光（F670）と近赤外蛍光（F740）の蛍光強度比（F670/F740）とクロロフィル濃度の関係を解析することによりストレスによる影響について調べた. 緑葉と白い斑入りのポトス葉を用いて CCD カメラを用いて葉面全体の蛍光分布画像を取得した．この特徴を応用した LIF 法による葉面の蛍光分布画像計測は，植物の生育状態をリモートセンシング的に測定できる有効な方法である．今後は，屋外での FLD 法 [6],[7]を用いてクロロフィルなどの蛍光解析に応用する．クロロフィル蛍光は太陽光に比べて非常に微弱なため，太陽スペクトルの暗線（O2 線-A バンド：760.68 nm）域を利用する．この方法では，太陽光エネルギーによる生育場所において光合成能力に伴う，環境悪化に伴うストレス評価への活用などに期待される．

図. 7　植物葉蛍光リモートセンシング計測 : a, 532nm レーザー光をポトス葉に照射する．b, 10m の距離から CCD カメラを用いて撮影（積分時間 20ms）すると白葉部分が反射光は強いため白く写る．c, 干渉フィルタ（CWL:750nm, FWHM:40nm）を用いて蛍光（積分時間 50s）を撮影する．緑葉部分が白く写り，蛍光分布が撮影できた．

参考文献

[1] H. K. Lichtenthaler *et. al.*: Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. J. Plant Physiol., 148, 599-612 (1996).
[2] 増田健二，名和靖矩，齊藤隼人，馬渕佑作，眞子直弘，川田善正，久世宏明，レーザー励起蛍光法を用いた植物の酸性雨と紫外線ストレス計測、第 60 回応用物理学会春季学術講演会 (2013.3.27-30)
[3] Kenji. Masuda, Y. Nawa, H. Saitou, Y. Mabuthi, N. Manago, Y. Kawata, H. Kuze.: Proceeding of 2013 Japan-Taiwan Bilateral Symposium in Nano/Bio-Photonics 61-64, Shizuoka University (Nov.24-27,2013)
[4] Z. G. Cerovic *et al.*, Ultraviolet-induced fluorescence for plant monitoring: present state and prospects, Agronomie, 19, 543-578 (1999)
[5] 峰内健一, 高橋邦夫, 立本英機 : 大気汚染ガスが植物の LIF スペクトルと蛍光の葉内分布に及ぼす影響, 大気環境学会誌，34，445-4556 (1999)
[6] L. Guanter *et.al.* :Developments for vegetation fluorescence retrieval from spaceborne high‐resolution spectrometry in the O2‐A and O2‐B absorption bands. J. Geophys. Res., vol. 115, D19303 (2010)
[7] 増田健二，齊藤隼人，馬渕佑作，眞子直弘，久世宏明，直達太陽光励起による植物葉の蛍光スペクトル計測システムの開発、第 55 回日本リモートセンシング学会秋季学術講演会論文集 33-34, (2013.11.21-22)

ワイヤレス電力伝送を利用したがん温熱治療用磁界発生装置

○池畑芳雄

金沢大学　環日本海域環境研究センター　技術職員

概要

誘導加温がん温熱治療とは、がんに磁性流体を注入し、磁界により４３℃以上に発熱させることでがんを死滅させる治療である。この磁性流体を３W 程度発熱させるには、体の深部(150mm)で 3mT の磁界強度が求められる。同時に体内の渦電流による発熱や電界による発熱が治療に影響しないことが求められている。周波数は 100 k Hz 程度で、共振電流 400A、共振電力は 1 MVA を超えることを想定している。実現方法としてまず磁界強度を上げるため上下のコイルではさみ込む構造とする。一般的には上下のコイルは直列に接続されるが、電界の影響を避けるためや、治療の利便性を考慮し、今回はワイヤレス電力伝送を利用した方法を報告する。また上下のコイルには共振回路を設け、共振周波数に微小な差を設けることで、磁界分布を多様に制御することができる。このことにより体内の渦電流を減らすことが可能になる。大電流を扱う部品や冷却についても紹介したい。

1　誘導加温がん温熱治療とは

体外に置かれた励磁コイルにより体内に高周波(100 kHz 程度)の高レベルの磁界(3 mT- 10 mT)を体内(体表面から最大 15 cm 程度)に発生させることが必要である

体深部での磁界を大きくするとともに患者の体型に合わせることができる磁界発生コイルとして，体を挟むような２個の平面コイルで構成した励磁コイル装置は大きな磁界を発生させることが可能である(図 1)。しかしコイルは直列接続して同じ電流を流すと電界（4 k VAC)の影響が非常に強くなる。さらにコイル接続間ケーブルにも冷却系が必要である。これを解決する方法として，磁気結合によるワイヤレス給電システムにて電流を誘導することを提案する。すなわち，一方のコイルは励磁側であり，他方のコイルは誘導作用で電流を印加する方法である。

ワイヤレス給電により誘導電流を効率的に流すためには，励磁側および誘導側コイルは直列共振回路を構成する。

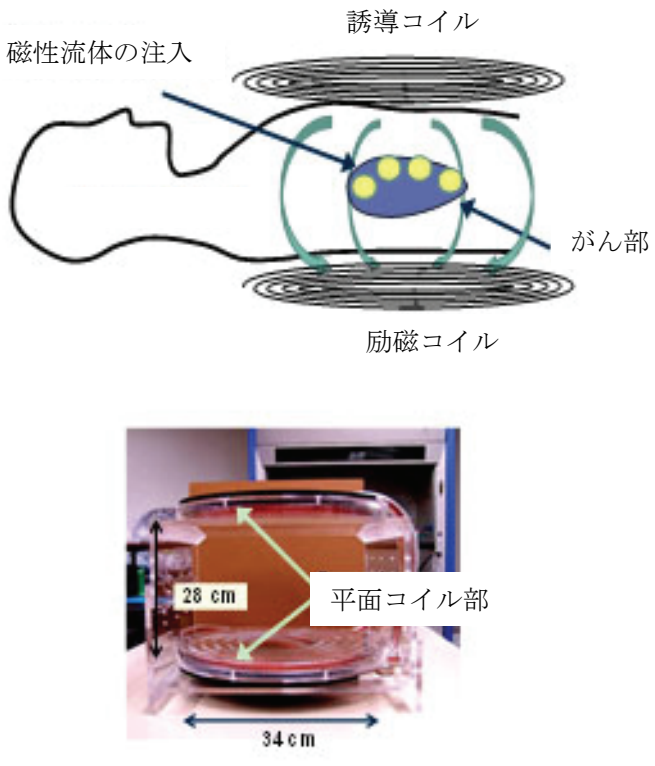


図 1　ダブル平面コイル

2　磁界共鳴でのワイヤレス電力伝送

励磁コイルの構成と利点　　ダブル平面形コイルの励磁電流は，電磁誘導方式のワイヤレス伝送を適用して，他方の誘導側コイルは誘導作用により電流を流し，コイル間の回路接続を省略した。大きな誘導電流を流すためには，L-C 直列の共振特性を利用する。ダブル平面形コイルのワイヤレス伝送システムは，原則的に励磁側，誘導側の共振周波数を同一とした共振回路(L, C)を構成している。励磁側は，高周波電源装置から励磁される。他方の誘導コイル側は無結線であり，移動の自由度が生まれる。ただし，実用規模では励磁側コイルにも冷却系が接続する必要がある。

等価回路と共振特性　　ワイヤレス伝送方式による基本動作を考慮した等価回路を示す(図２)。この回路では，励磁周波数が約 100 kHz 程度であり，コイル間の磁気結合のみを考慮する。さらに磁気結合を等価回路で表すとＴ形の等価回路として，(図２(b))となる。このシステムは，基本的には無損失で励磁電流のみが励磁側・誘導側コイルに流れるが，実際にはコイルの抵抗損失，コンデンサの等価損失などが無視できなく，励磁，誘導側における損失を等価抵抗 r1, r2 として直列に挿入した。　励磁側・誘導側コイル電流の定常時の電流İ1, İ2　の振幅，位相等が必要な項目である。よって，電流İ1, İ2　は

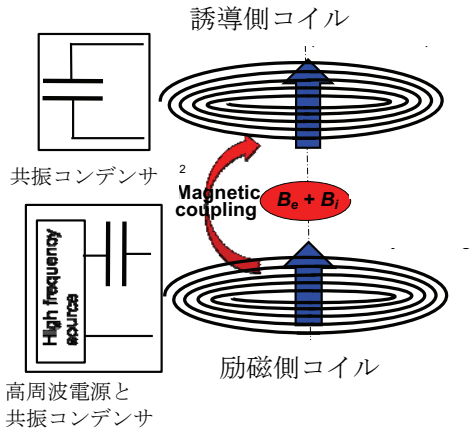
$$\dot{I}_1 = \dot{V}_1 / \dot{Z}_1 \qquad (1)$$

$$\dot{Z}_1 = \{r_1 + \frac{\omega^2 M^2 r_2}{r_2^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2}\} + j\{(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) - \frac{\omega^2 M^2 (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}{r_2^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2}\} \qquad (2)$$

$$\dot{I}_2 / \dot{I}_1 = \frac{j\omega M\{r_2 - j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})\}}{r_2^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2} \qquad (3)$$

基本回路では，励磁側(添字 1)，誘導側での L-C 共振回路は同じ共振周波数 f0 となる。

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_1 C_1} = 1/2\pi\sqrt{L_2 C_2} \,. \qquad (4)$$



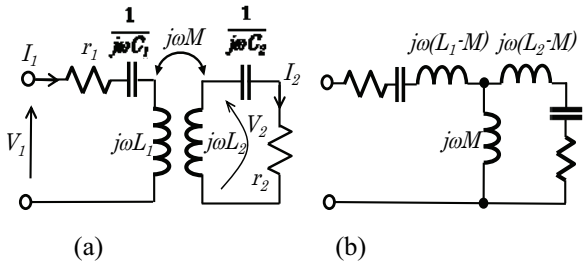


図２　ダブル平面コイルの等価回路

3　SPICE による等価回路の検討

LTSpice によりシミュレーションを行うことで(図 4)、2 つの共振状態(周波数 f1，f2)が存在することがわかる(図 3 (a))。またこれらの電流位相特性は実機でも測定し同様であることを確認している。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1(L_1+M)}},\quad f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_2(L_2-M)}} \quad . \qquad (5)$$

一般には同一の周波数(f 0=f01= f02)となるように回路素子を選ぶ。また，相互インダクタンス M は,

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad . \qquad (6)$$

と表され，k はコイル間の結合係数である。誘導加温用励磁コイルの形状では結合係数は,

$$0.01 < k < 0.1 \qquad (7)$$

程度の値をとる。

誘導側のコイルにも、励磁側とほぼ同じ電流が流れるのは、コイルの Q が非常に大きい（Q=450 程度）からである。(図 4)

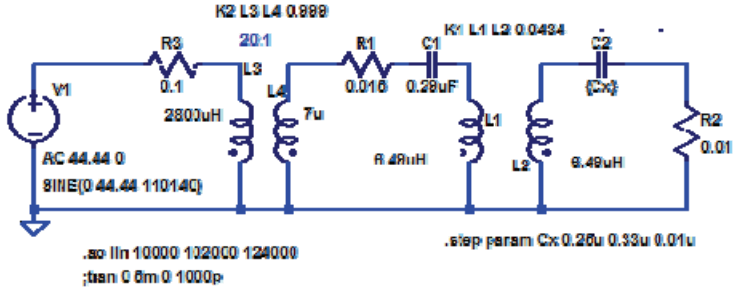
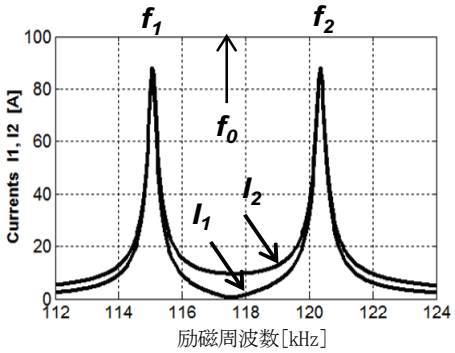
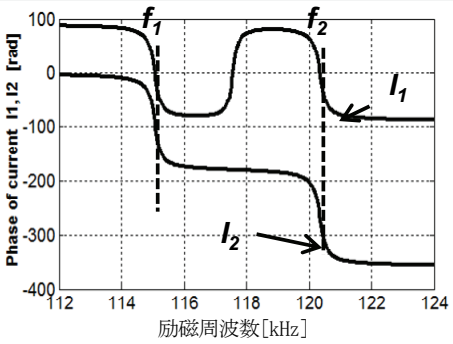


図 4　LTSpice による等価回路



(a)励磁電流 I1 と誘導電流 I2 の周波数特性



(b)　励磁電流 I1 と誘導電流 I2 の位相特性

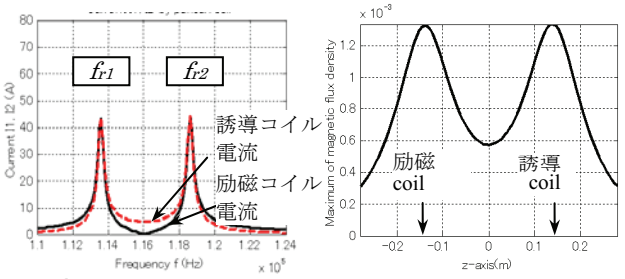
図 3　電流位相の周波数特性

4　共振周波数の差による磁界分布の制御

回路より 1, 2 次の励磁電流の比は,下記で与えられる。

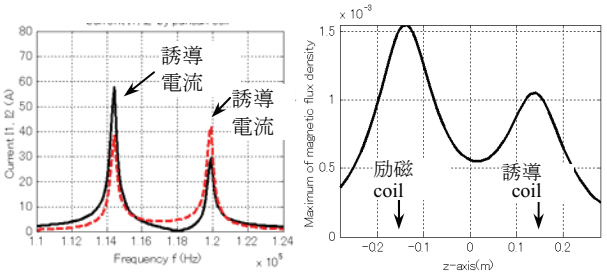
$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{j\omega M\{r_2 - j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})\}}{r_2^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2} \qquad (8)$$

ダブル平面コイルの 1, 2 次の励磁電流，ならびにコイル軸上の磁束密度分布を図 5 に示す。図 5 に示すように，2 次側の誘導コイルの電流が励磁側コイルの電流とほぼ同じ値であり，理想的に 2 側コイルに電流が誘導されている。



(b) コイル電流　　(b) 磁束密度

図 5　励磁電流特性とコイル間の磁束密度分布
(*f01*= *f02*=116.0 kHz)



(a) コイル電流　　(b) 磁束密度

図 6 励磁電流特性とコイル間の磁束密度分布
(共振周波数がアンバランス時)
(*f01*=116.0, *f02*=118.1 kHz)

しかし励磁側と誘導側の共振周波数を±５％ほど変化させることにより、励磁側と誘導側の共振電流が変化する(図 7)。誘導側のコイル電流は大きく変化しないのに対して、励磁側の電流は大きく変化することになる(図 7)。この特性を利用すれば、磁界強度の傾斜をコントロールできる。さらに 2 つの共振周波数(fr1, fr2)のうち，1, 2 次励磁電流が逆位相となる共振周波数 fr2 では、コイル間の中央付近で磁束密度がキャンセルされることになる。共振周波数の変化で、この特性も変化させることができる(図 8)。

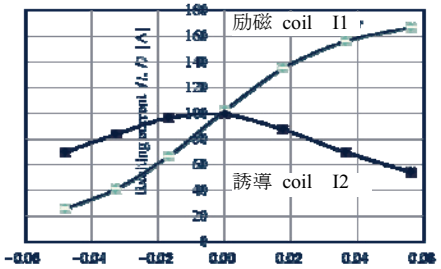


図７ 共振周波数の変化による励磁電流特性

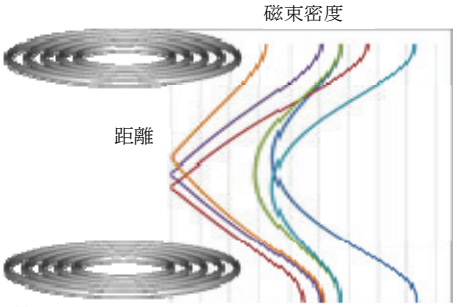


図８ 共振周波数の変化による多様な変化

5 大電流を扱う部品や冷却方法についての紹介

1. 大電流リッツ線：編組(へんそ)

(1-UEW 24/245/0.06) 素線 0.06mm を 24 x 245＝5880 本

シール線のシールドと同じような構造としたリッツ線であり、中空であることから近接効果による損失が少なく、太い割に高い周波数にも対応でき、パイプに通すことで液冷も可能になる。液冷の実績として 400A(110 k Hz)がある。

2. 端子付けの方法

1.束ねてはんだ付けするとはんだを吸い膨らむため、他の UEW 線で先端部分を固定する。(図 10 1.)

2.素線が UEW であるため、430℃ではんだ付けできる。はんだポットを利用する。(図 10 2.)

3.圧着端子にて端子を取り付ける。(図 10 3.)

4.ボルトは銅製にメッキとした。(図 10 4.)

3. 大電流共振コンデンサ：

RC73P501S224K (0.22μF 500VAC 300Arms (水冷時)) (図 11)

誘電正接は 0.001 以下と非常に損失が少ないため、発熱が少ない。また全体が電極となるため接触抵抗も減らせる構造となっている。液冷却の場合は冷却水に沈めることになる。

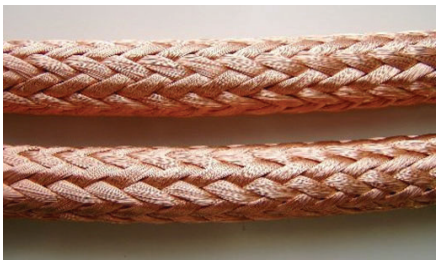


図 9 編組(へんそ)リッツ線

図 10 1.

図 10 2.

図 10 3.

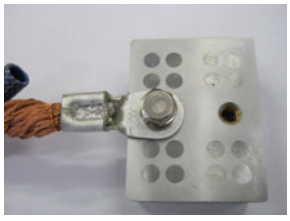


図 10 4.

図 11 3. 大電流共振コンデンサ

動物行動実験のための温度湿度制御装置の開発

長澤　育郎

東北大学　電子光理学研究センター

概要

ショウジョウバエなど動物の行動実験では、何の作用によって行動パターンが変化するのか判別するために、温度や湿度など行動パターンに影響を与える物理量を制御する必要がある。今回、この動物行動実験のために温度・湿度を一定に保持する装置に利用するコントローラの製作依頼があり、これを開発した。

コントローラ以外の装置の写真を図１に示す。装置は断熱材で覆われたアクリル製の大小２つのチェンバー内にそれぞれヒーターと霧発生器を設置したものをダクトで連結したもので、霧発生器で作られた湿度の高い空気を送風することで、湿度を制御する構造になっている。また、温度に関しては底面部にヒーターを組み込んだ台が存在しこれを過熱し、ファンによって空気を撹拌することで温度を制御する構造になっている。

今回製作したコントローラによる制御により、チェンバーの設置環境の温度・湿度が 20℃・30%という条件下で設定可能温度・湿度範囲は 20℃～35℃・30%～95%、設定分解能はそれぞれ 0.1℃・1%、制御量安定後のふらつきはそれぞれ±0.5℃、±5%程度という性能が実現した。

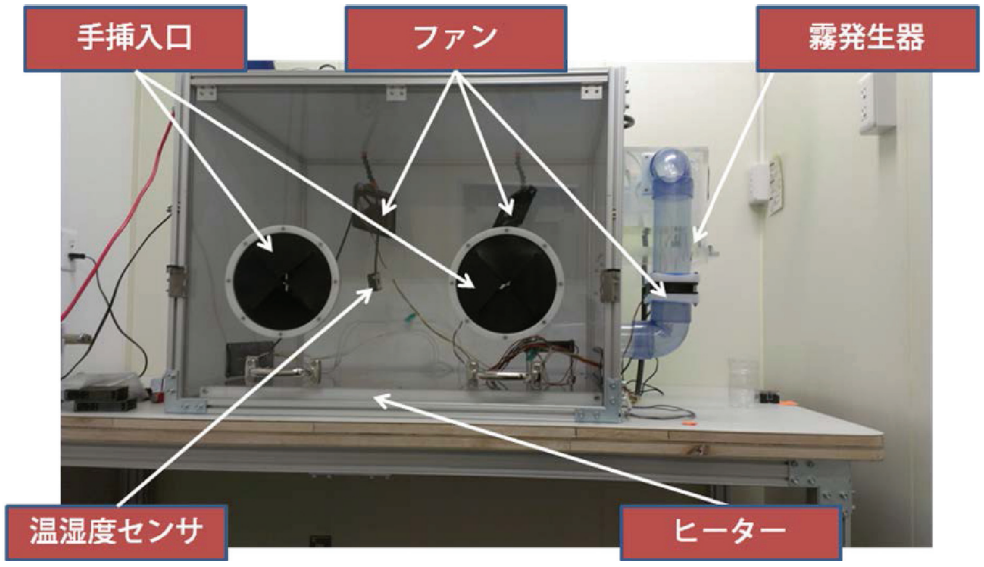


図１　温度湿度制御装置の構成（ヒーターで温度を、霧発生器で湿度を制御する。
ファンはチェンバー内の温湿度分布を均質に保つために利用されている。）

1　開発の背景

東北大学生命科学研究科神経科学分野の谷本研究室から、ショウジョウバエの行動実験を行う上で温度変化と湿度変化による行動パターンの変化を排除するために、既存の動物行動実験用の温度湿度制御装置のコ

ントローラのデッドコピーの製作依頼があった。

しかし既存の装置はドイツ製であり、部品が日本での入手が難しいなどの問題があり、そのままデッドコピーを製作するのは難しい上、コストを同程度に抑えつつ改善が可能な点があったため再設計を行った。

2　要求仕様

再設計にあたって以下の表 1 に挙げた仕様を満たす必要があった。

表 1　温度湿度制御装置の要求仕様

番号	項目	値
1	設定可能な温度範囲	20℃～35℃（チェンバー外部の気温 20℃時）
2	制御安定後の温度のふらつき	±0.5℃
3	設定から温度が安定するまでの所要時間	1 時間（20℃から 35℃まで）
4	温度の測定精度	±0.5℃
5	設定可能な湿度範囲	25%～85%（チェンバー外部の湿度 25%時）
6	制御安定後の湿度のふらつき	±5%
7	設定から湿度が安定するまでの所要時間	10 分（25%から 85%まで）
8	湿度の測定精度	±5%
9	コントローラ･ヒーター起源の磁場の大きさ	0.3 Gauss

各項目の値は基本的には既存の装置の性能に準拠したものである。ショウジョウバエは 5Gauss 程度の磁場により行動に影響が生じるという情報があり、チェンバー内加熱用に使用するヒーターの電流起源の磁場によりショウジョウバエの行動に影響を与えないように磁場の制限を追加した。

3　製作したコントローラの構成

再設計後の装置のコントローラの構成要素とその主な仕様を記したブロック図を図 2 に示す。全体としてはセンサの測定量を PID 制御が可能な調節器に取り込み、PID 制御出力値を ON/OFF の時間の比に変換してソリッドステートリレーを駆動する時間比例 PID 制御を行ってヒーターや霧発生器を動作させ温度と湿度を一定に保つシンプルな構成になっている。

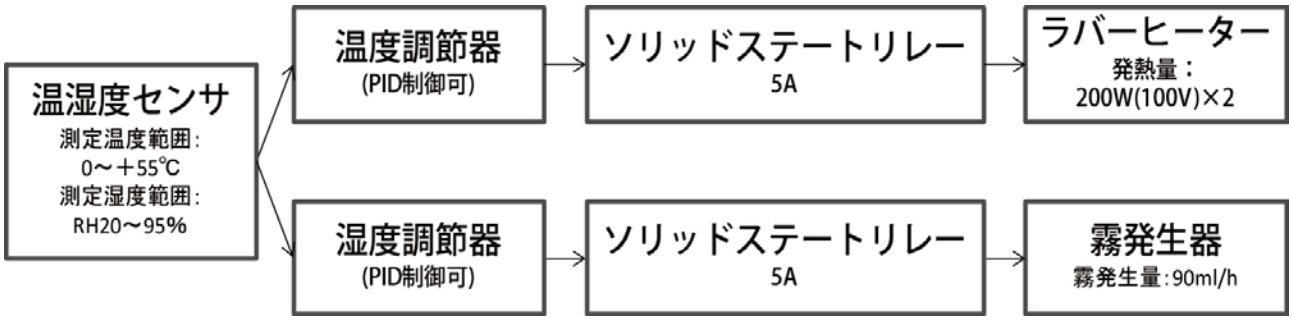


図 2　温度湿度制御装置のコントローラ部分の構成要素とその主要な仕様

センサは、温度センサに Pt100 、3 線式、許容差クラス B の白金測温抵抗体を利用し、湿度センサに高分子抵抗式のものを利用した一体型温湿度センサであるオムロンの ES2-THB を使用した。許容差クラス B の白金測温抵抗体は、35℃の環境下で温度の誤差の最大限度が±0.46℃程度で、高分子抵抗式の湿度センサも実験

環境下における湿度検出精度が±5%のものなので要求仕様を満たしている。

温度調節器と湿度調節器はセンサである ES2-THB に対応したオムロンの E5DC を利用した。これにヒーター等の制御対象を駆動できる十分な電流容量を持つソリッドステートリレーを組み合わせることで、時間比例 PID 制御が可能となり、既存の装置の ON/OFF 制御による温度湿度調整に対しコストが同程度でより高精度の制御が可能になった。

ヒーターと霧発生器に関しては、既存の装置に利用されていた部品以上の仕様のものを選定した。ヒーターは厚さ 1 ㎜程度の薄いシート状の形状で面全体を均等に加熱できるようになっているラバーヒーターというもので、安全のために 85℃で強制的に停止するようにサーモスタットが取り付けられている。霧発生器も市販のものを利用しており、AC100V を入力することで超音波振動子を水中で駆動することで霧を発生させる構造になっている。

4　装置の動作試験結果と性能

実際に製作したコントローラ外観の写真を図 2 に、動作試験結果を図 3 に示す。

図 2　製作した温度湿度制御装置のコントローラ外観（左：フロントパネル　右：リアパネル）

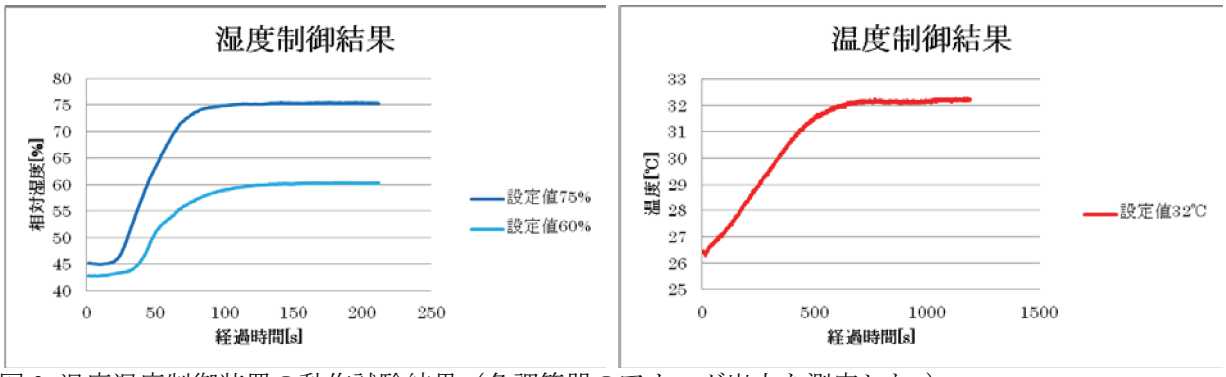


図 3 温度湿度制御装置の動作試験結果（各調節器のアナログ出力を測定した。）

動作試験時に装置に組み込んだ調節器のアナログ出力の値を測定した結果、湿度に関しては設定開始から数分で目標値に達し、温度に関しては 15 分程度で目標値に達した。目標値に達してからのそれぞれのバラつき（標準偏差）は湿度は±0.04%、温度は±0.05℃程度に収まり、オフセットが湿度が+0.3%、温度が+0.15℃存在することがわかった。それぞれのセンサの精度を組み合わせると目標値からのずれは最大で 0.3±5%、0.15±0.5℃程度であるという見積もりになる。湿度や温度が実際にどの程度目標値からずれているかは、他のより高精度な測定器を使って評価する必要があり、今後測定する必要があるが概ね仕様を満たしていることがわかった。

また、動作時のチェンバー内部の磁場をガウスメータで測定した結果、バックグラウンドから±0.1Gauss であったので、これも仕様を満たしている。

USB を用いて、VB での入出力制御の AC タイマー製作と PCI 入出力ボードとの比較

松山利夫

公立大学法人　大阪市立大学　研究支援課

1　概要

実験装置等を自動的に使うには、パソコンの外部入出力で。構成は、Windows マシンと VB（Visual　Basic)、PCI（I/O）ボードを用いていました。しかし、安価と使い勝手を考慮して今回、初めて USB を用いて使ってみました。AC 電源のタイマー（ON－OFF 制御）を製作して、容易に使えたので、その製作内容と PCI ボードとの使い勝手などを比較し紹介します。

2　製作の動機

従来から実験装置等を自動的に扱うのに、パソコンからの拡張ボードとしてインター・フェイス（以下 I/F）使って外部入出力（以下 I/O）を行ってきました。I/F は、PCI を用いていた為、少なくとも 2～3 万円程度からなのと、ボードの取り外しが、意外と厄介がられていました。また、ユーザーからの要望もあり安価と使い易さを考慮して今回は、初めて USB を使って I/O の制御をしてみました

図 1．AC タイマー、コンセントの外観

3　AC タイマーの仕様と製作

製作したのは、AC コンセントからの 100V、1A をパソコンにて設定した時間でオンーオフさせるタイマーを製作しました。（図 1.図 2.）仕様は、6 個口で、各々独立して設定出来ることと、大抵のタイマーは、24 時間周期で設計されているので、それに関わらず設定出来る事でした。そして AC アダプターをのせやすくし、タイマーの繰り返し回数が、多いので、リレーでは、10 万回程度が、保証範囲なのでソリッド・ステート・リレー（以下 SSR）（図 3）を用いて製作しました。SSR は、シャープの S108T02 で、AC125V、8A の規格、トライアックとフォト・トライアックをモジュール化した機構になっています。

USB・I/O は、ネットで販売されている低価格なものを選びました。ワンチップマイコンで USB 接続し無償の VB 2010Express を使いプログラム出来ることから、ユーザー側でのエディティングもソフトを新たに購入せずに使えるため便利になっています。本体（USB-IO2.0(AKI)）は、図 2.の右下にある基板です。電源は、UBS からの 5V、500mA を使い、製作した基板上のトランジスタにより、SSR 駆動とモニタ LED の点灯電流を流しています。保護用のヒューズは、電源側が、10A そして、各々ポリヒューズを 1A を付けています。

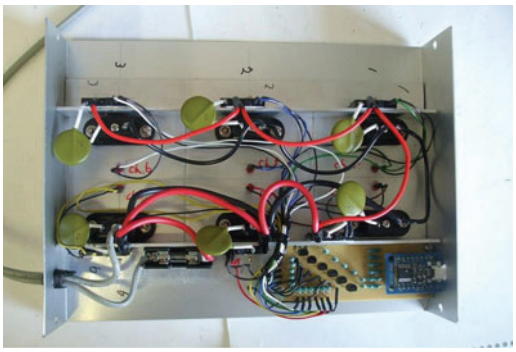


図 2.　AC タイマー、コンセントの内部

4　プログラムと動作

使用した OS は、Windows Vista と Visual Basic2010 で、プログラム作成にブッレド・ボードを用いて確認しながら行いました。(図 4) タイマーは、1 時間単位で使用するのですが、1 秒で確認し、1 時間に替えてもう一度確認しました。Timer コントロールを使いオン設定とオフ設定を行ない、DateTime 構造体で、予定時刻の表示などが、できました。これらのコードを複数に作成した状態で各々独立したタイマーを実現できました。(図 5)

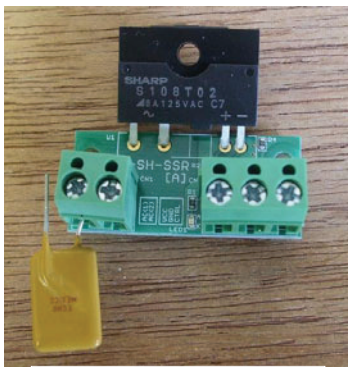
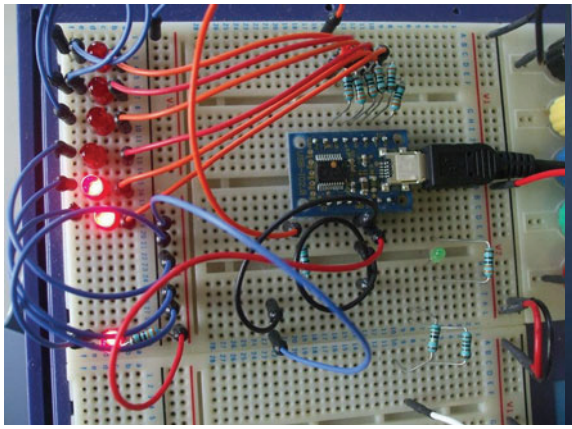
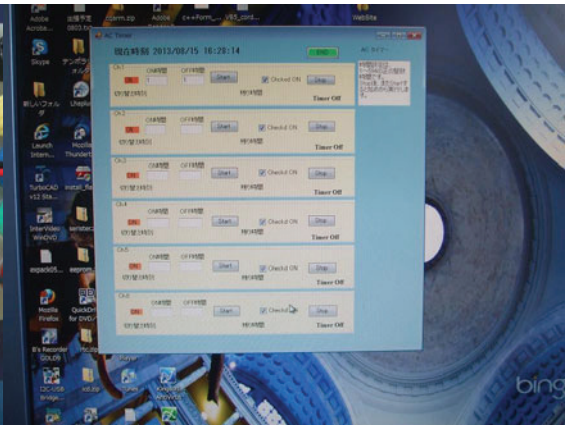


図 3.　SSR



(図 4.　ブレッド・ボード上の確認)



(図 5.　ディスプレイの表示)

5　製作してみて

コントロールボードと USB モジュールでの製作は、作り易く、電源を USB から取れるため外部からの電源が、不要でした。テスト段階では、ブレッド・ボード上の時も USB から使えたのでデスク上で使えました。規模が小さな I/O としては十分に使えました。

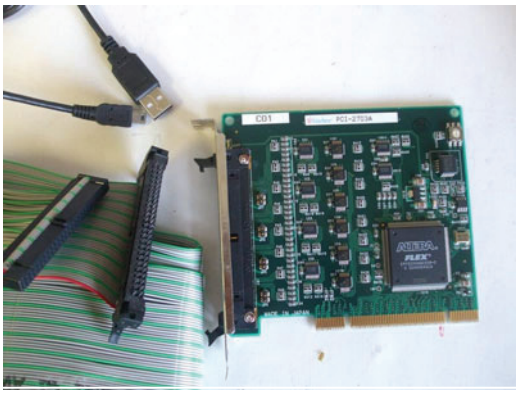


図 6.　PCI ボード

6　今回の USB と PCI の比較

正確な比較とは、なりませんが、まず PCI での使い方は、I/O のボード (図 6) は、(表 1) の様に形状が 120 x107mm で、PC の拡張スロットに内蔵し、50 ピンの MIL 規格（他にアンフェノール・ハーフピッチ）コネクタから取り出して使用した場合。使い勝手は、ソフト的には、ほとんど同じで、Windows　OS 上に VB でのプログラムをしています。この I/O コントロールをするのには、PCI と USB は、大差なく使えました。しかし、PCI は、従来からのバリエーションが、多くあり、それに対応したソフトとハードウエアが、揃っています。今回の USB モジュールは、31x21mm とかなり小規模で I/O は、12 点、コマンド数が、数種類（構造体数種、

表 1. 仕様

	PCI	**USB**
型番	PCI-2703A	USB-IO2.0
サイズ	120 x107mm	31x21mm
入出力数	4port,32 点	2port,12 点
動作電圧	5V	5V
ドライブソフト	Win32API 関数 (DLL)	DLL ファイル

メソッド数種）です。I/O の用途では、簡単・手軽に使えました。また、最近この USB に対応したモジュールが、シリーズ化して出されており、従来の PCI と同様に扱える様になっています。

参考文献等

・「かんたん！　USB で動かす電子工作」　小松博史、　オーム社
・「Km2Net　USB-IO2.0(AKI)　説明書」　ケイエムトゥネット　他
・「GPC-2000 デジタル入出力インタフェースモジュール用 Windows ドライバ」
（Help for Windows）ヘルプ画面より　株.インタフェース
・「デジタル入出力インタフェースモジュール用 Windows ドライバ
ユーザーズマニュアル(日本語)　」[製品型番：PCI-2703A]」 MPB-J2703A　株.インタフェース

Web2c と STARS との相互接続

○小菅 隆 A), Philip Duval B), Reinhard Bacher B)

A) 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

B) Deutsches Elektronen-Synchrotron

概要

STARS は、TCP/IP Socket とテキストメッセージ送受信を使ったシンプルかつ強力な小規模向制御用ソフトウエアで、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory のビームライン等への導入、また、他の研究機関・大学等での応用が進んでいる。一方、Web2c は、DESY (Deutsches Electronen-Synchrotron、ドイツ)で開発されたソフトウエアで、Web を利用して GUI を提供する事ができる。今回新たに Web2c の STARS 用インターフェースの開発が行われ、我々は Web2c と STARS の接続を確認した。ここでは、STARS と Web2c の概要及び相互接続の実際について報告する。

1 STARS

STARS[1][2] (Simple Transmission and Retrieval System)は小規模制御システムに向いたソフトウエアで、TCP/IP Socket とテキストベースのメッセージ送受を用いた非常にシンプルな構造となっている。STARS では 1 つの STARS server に対して複数の STARS client が TCP/IP Socket を用いて接続する。それぞれの STARS client は STARS 上でユニークな Node name を持つこととなっており、各 STARS client が送信先の Node name を示したテキストベースのメッセージを STARS server に送信すると、そのメッセージは目的の STARS client に送信される。図 1 はコマンド送信と結果受信の例で Term1 が Dev1 を送信先としてメッセージを送信し、結果を受け取る例である。この時、Term1 は STARS Server とのやり取りのみに注意を払えばよく、単純に言い換えれば、STARS Server にコマンドを送信し、返答を待つだけである。また、Dev1 についても同様に、Dev1 は STARS Server からのメッセージにのみ注意を払えばよく、STARS Server からのコマンドに対し単純に反応を返すだけである。実際に STARS を使用したシステムでは更に多くの STARS Client が接続することとなるが、各 STARS Client がこの単純なプロセスをこなす事で複雑なシステムを構成する事が可能である。なお、このコマンド送信と結果受信の例は、シンクロナスなデータ受信の例と言う事もできる。

STARS は更にイベント配信機能を有している。図 2 に示すとおり、たとえば Term1 があらかじめ STARS

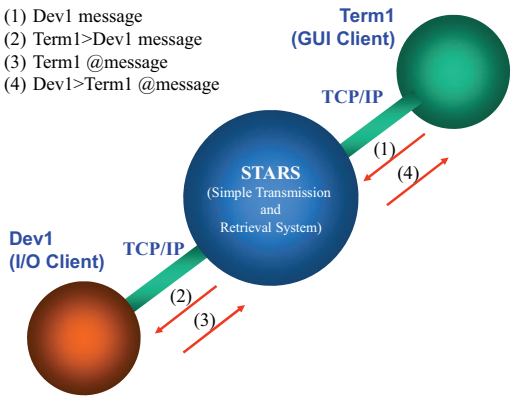


図 1. コマンドの送受

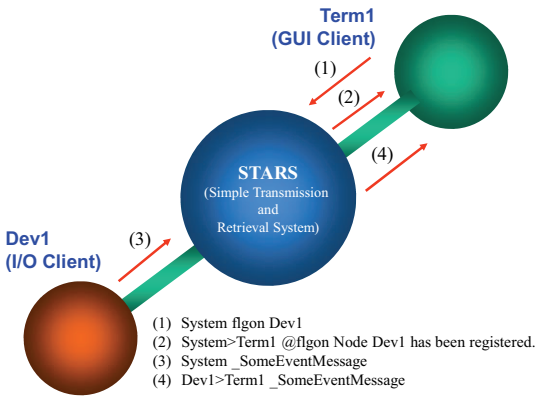


図 2. イベント配信機能

Server に Dev1 からのイベント配信リクエスト(flgon コマンド)を送信しておくと、Dev1 がイベントメッセージを STARS Server に送信した際、このイベントメッセージは自動的に Term1 に送られてくる。STARS Server はこのイベント配信リクエストを複数の STARS Client から受け付ける事が可能で、該当する Client からのイベントメッセージがあった場合にはイベントメッセージをリクエストを行っている複数のクライアントに届ける。このイベント配信の機能の例はアシンクロナスなデータ受信の例と言う事もできる。

以上のように STARS では TCP/IP Socket とテキストベースのメッセージ送受を行うシンプルなシステムであるが、更に Perl や C、.Net、Java などの言語用にインターフェースライブラリが用意されており、これらを利用すると、更に TCP/IP Socket の接続プロセスに関して気にすることなく、STARS を利用できるようになる。なお、ここで述べた、シンクロナス及びアシンクロナスなデータ受信については後述の Web2C との接続の際に大きなポイントなる。

2 Web2c

Web2c Toolkit[3]（以下単に Web2c と記述）はコントロールシステム用 Web アプリケーションを開発する際に大変有用で、ユーザーフレンドリーなルック・アンド・フィールを提供するとともに、これらの利用には特別なプログラミングのスキルは必要とされない。また、Web2c はプラットフォームに依存しないように設計されている。これらのサービスは HTTP を通してネットワーク上の様々な機器からアクセス可能（制限を加えることも可能）であり、かつ暗号化されたパスワード送信によるセキュアなシングルサインオン手続きも提供している。

Web2c は HTML (Hyper Text Markup Language)、CCS (Cascading Style Sheets)、AJAX (Asynchronous Java Script And XML)などを含む Web 2.0 パラダイムが使用されており、クライアントである Web ブラウザ上ではインタラクティブな GUI (Graphical User Interface) ページが動作する。これらのインターフェースはスマートフォンやタブレットといったモバイル端末を含む主な Web ブラウザ上で利用可能である。

なお、Web2c Toolkit は加速器制御やビームライン制御に於いて利用される、TINE、DOOCS、EPICS、TANGO などのプロトコルに対応しており、今回 STARS がテスト的に追加された。

3 STARS の導入状況と Web2c 利用のメリット

高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory に於いて STARS はビームライン制御用のシステムとして利用[4][5]されているだけでなく、実験ホール入退室管理システムや、ビームラインインターロック集中管理システム、キー管理システム、フロントエンド機器モニターシステムシステム等に広く応用されている。

図 3 はビームラインに STARS を導入した場合の一般的なソフトウエア配置の例で、ある程度基本となるユーザインターフェースやビームラインユーザーに対し共通のインターフェース（TCP/IP Socket とテキストベースのコマンドの送受）を提供するようにして

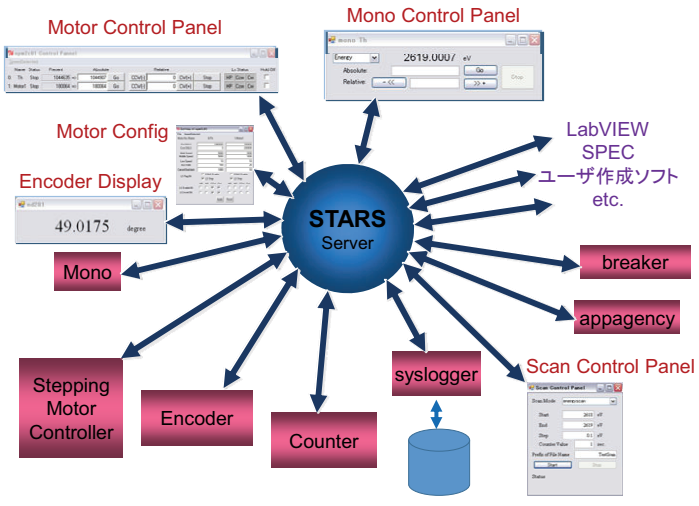


図 3. STARS によるビームライン制御のための STARS Client 配置の例

いる。ビームラインユーザーはこの共通のインターフェースを利用することで LabVIEW や SPEC といったプロダクトの接続や、自作のソフトウエアを接続する事が可能である。ビームライン制御に於いて、STARS は様々な構成をとる事が可能で、この例の他に必要に応じて複数のパーソナルコンピュータを利用するなどの構成にする事もできる。これらに加え Web2c を利用することにより、GUI 構成の柔軟性が大幅に向上する事が予想できる。

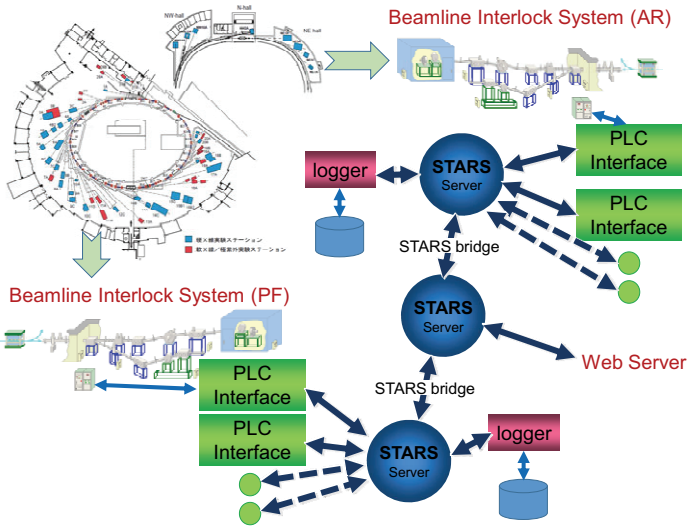


図 4. STARS によるビームラインインターロック集中管理

図 4 はビームラインインターロック[6]集中管理システムに利用した例である。Photon Factory に於いてビームラインインターロックシステムは、「放射線安全」、「ビームライン真空の保持」、「ビームラインコンポーネントの保護」を目的にビームライン毎に設置されている。これらビームラインインターロックシステムの運転状況を示すステータス信号は STARS を使って常に監視、変化情報が記録されている。これらの信号の監視は、安全かつ円滑な放射光利用実験を利用する上で非常に重要かつ有用であり、これらステータス信号の状況 Web を通じて確認可能となっている。しかし、この情報はあくまでもテキストベースであり、GUI の開発が望まれている。Web2c はこの GUI 開発において大変有用である。

4　Web2c と STARS の接続

今回 Web2c の STARS 用のインターフェースが新たに開発された。初めの時点では Web2c の開発者よりサンプル的なコード(Java)が供給されていたので、ここではこのサンプルコードを実際の STARS の通信に合わせて変更してゆくことから始めた。なお、STARS との接続には STARS Java interface library を使用した。これらのコードの中には、シンクロナス的なデータハンドリングを行う部分や、アシンクロナス的なデータハンドリングを行う部分があり、それぞれ STARS のコマンド送受及びメッセージ配信機能に当てはめた。図 5 は eclipse を使い実際にインターフェースを構築しているところを示しており、STARS Java interface ライブラリのメソッドを呼び出すためのコードが記述されている。

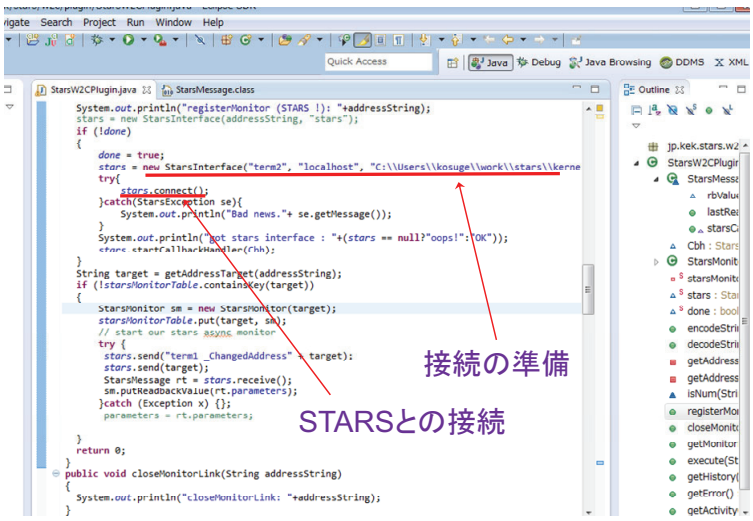
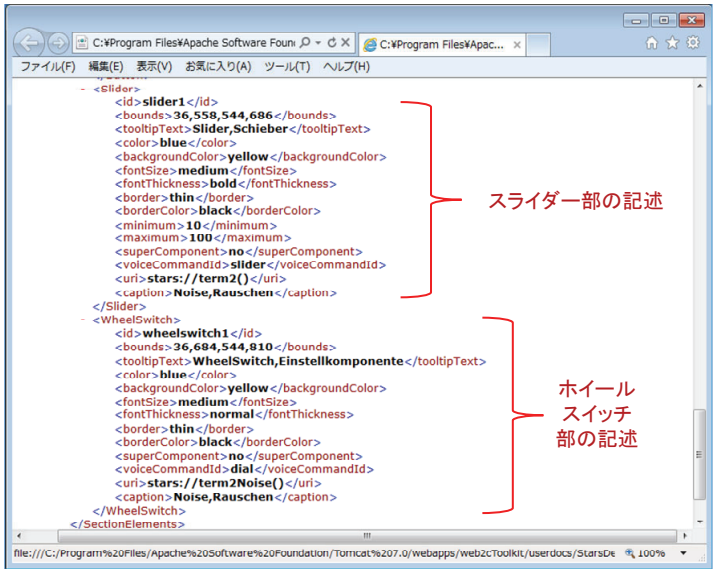


図 5. Web2c 用 Java コードの編集

Web2c のチャートや、スライダーといったコンポーネントをどのように配置するかのデザインは Web2c 用のディレクトリに配置された XML ファイルを編集することにより行われる。また、この XML の各項目を設

定する事で Web2c のコンポーネントを前述 Java のソースのメソッドに関連付けできる。図 6 は設定用の XML ファイルの例である。



5　接続テストの結果

図 7 は今回テスト的に作成した Web2c を使用した GUI の例である。今回は Web サーバを特に使用せず、Apache Tomcat を単体で動作させその上で Web2c を起動している（Windows7 professional を使用）。また、STARS server およびテスト用の STARS client も同様の PC 上で動作させた。図 8 は

図 7. Web ブラウザでの表示

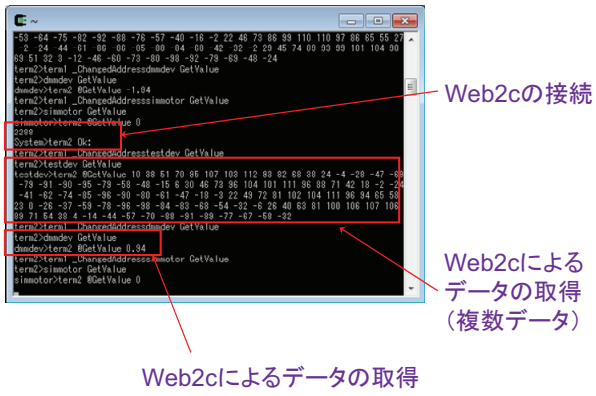


図 8. STARS Debugger での観察

STARS の Debugger 機能を利用して通信の様子をモニタした様子である。この結果から今回 Web2c と STARS の接続が成功したことを確認した。なお、図 9 はスマートフォン(Android)で VPN を通し、同様の Web2c のページを表示した例であり、PC 以外でも同様の表示および操作が行えることを確認した。

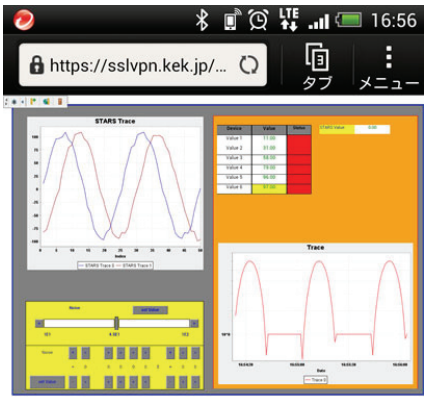


図 9. Android 端末での表示

6　まとめと今後の予定

以上のように、今回我々は Web2c と STARS の接続に成功した。そして、スマートフォンなどの PC 以外の端末においても同様に STARS と接続された Web2c が動作することを確認した。

なお、今回はテスト的な環境で動作テストを行ったが、今後汎用性や拡張性を確保するためには、詳細なインターフェースの定義や、ソフトウエアの作り込みが必要となる。

Web2c と STARS の接続は大変有意義であり、今後のビームライン制御の STARS GUI 構築においても非常

に有効なソリューションとなる事が予想される。また、現在の実践投入目標は、これまでテキストベースであった、ビームラインインターロックシステムの運転ステータス配信を GUI 化することである。

7　参考文献等

[1] T. Kosuge et al, “Recent Progress of STARS”, PCaPAC 2005 (2005, Hayama, Japan)

[2] http://stars.kek.jp

[3] http://adweb.desy.de/mcs/web2cToolkit/web2c_home.htm

[4] 小菅隆､他､“PF におけるビームライン制御標準化に関する取り組み”, 平成 17 年度技術研究会 (2006, 分子科学研究所)

[5] 小菅隆、他、“STARS の PF ビームラインへの広がりと開発状況”, 平成 21 年度技術研究会 (2010, 高エネルギー加速器研究機構)

[6] 斉藤裕樹、他、“最新のビームライン・インターロックシステム”, 平成 19 年度技術研究会 (2008, 核融合科学研究所)

教育用ロボットビジョンシステムの開発支援

○森田真司 A)，小川侑一 B)

A) 群馬工業高等専門学校 教育研究支援センター

B) 群馬工業高等専門学校 機械工学科

1　システム概要

本システムは図 1 のような構成である．工場のひとつのライン上で多種の製品を製造することを想定している．製品により部品の種類や数が異なり，部品がばらまかれた場所(供給側)から別の場所(組立側)に部品を運び組立図に従って組み立てる．これを実現するため，ばらまかれた部品と組立図はカメラで撮影し，得られた画像から部品の種類や位置を認識させている．

次にシステムの動作について述べる．

供給側の部品(ワーク，ハンドで把持できるように上部に突起が付いている)および組立側の組立図(ワークの絵や画像あるいは実物を配置したもの)は，パソコン(PC2)に接続された 2 台の USB カメラで撮影した画像を解析してすべてのワークの位置座標を得る．

図 1. ロボットビジョンシステムの外観

ワークの座標は LAN 経由でハンド付の両マニピュレータに送信し，マニピュレータ 1 が供給側のワークを掴み，単軸ロボットの台座に置く．すると単軸ロボットが光電センサ 1 によるワークの検知を受けて組立側に搬送する．更に I/O ユニット経由でマニピュレータ 2 に搬送完了信号を送信すると，マニピュレータ 2 がワークを組立側の配置座標に置き PC2 に完了信号を送信する．平行して光電センサ 2 がワークがなくなったのを検知すると単軸ロボットが台座を供給側に戻す．これを組み立てが完成するまで繰り返し，次の組立図とワークに備える．

図 1 の外にパソコンが 2 台あり，PC1 で I/O ユニットを制御するプログラム，PC2 で画像処理および通信のシステム制御プログラム(実習プログラム)を動作させる．

本システムのハードウェアは，支援依頼を受けた時(平成 24 年 2 月)には設置済みであり，卒研生がプログラム開発をしている段階であった．システムのハードウェアを表 1 に，利用ソフトウェアを表 2 に示す．

表 1 ハードウェア一覧

機器名	型式・性能	製造会社
USB カメラ	LifeCam HD-5000 (2 台) 400 万画素相当	Microsoft
マニピュレータ	6 自由度垂直多関節形 RV-2SD　(2 台) 位置繰返し精度±20μm	三菱電機
ロボットコントローラ	CR1 700　(2 台)	三菱電機
ハンド	RH-915　空圧式 (2 台)	シュンク・ジャパン
単軸ロボット	T5-12-250 (1 台)	YAMAHA

光電センサ	E3Z-T61A-D (2 台)	OMRON
I/O ユニット	USBX-I16 (1 台)	テクノウェーブ

表 2 ソフトウェア一覧

機能	ソフトウェア名称	製造会社
システム制御開発 (実習プログラム開発)	Visual BASIC 6.0	Microsoft
カメラ制御，画像処理	HALCON 9.0 Developer's Kit(HDK，専用言語)	リンクス
マニピュレータ制御	RT-Tool Box2 MELFA BASIC V(専用言語 BASIC like)	三菱電機
単軸ロボット制御	POPCOM (専用言語)	YAMAHA
I/O ユニット制御	Visual BASIC 6.0 ライブラリ	テクノウェーブ

本システムにおいては表 2 のソフトウェアを利用し以下のプログラムを開発している．

① カメラ撮影，画像処理，マニピュレータとの通信およびユーザインターフェイス(実習プログラム)

② マニピュレータ制御・通信プログラム(供給側と組立側の 2 個)

③ 単軸ロボット制御プログラム

④ I/O ユニット制御プログラム

全部で 5 個であるが，カメラ制御と画像処理については HDK を利用して機能や処理別の小プログラムを複数作成している．HDK で開発したプログラムは Visual BASIC のコードとしてエクスポート可能で，これらをカスタマイズして①のプログラムに組み入れた．最終的には依頼時の状態から①と②は全面的に書き直し，③は小変更のみ，④はそこそこ手を加えている．

2 依頼内容と対応内容

当初の依頼内容は，プログラム開発における以下の問題の解決であった．

・動作が不安定で稀にしか動作しない

・動作が遅い

・複数のカメラを認識できない

・複数個のワークに対応できない

・複数種のワークに対応できない

これらの問題により，依頼を受けた時は供給側のカメラ 1 のみを使用して供給側に置かれた一種類のワークひとつの座標を画像解析で得て両マニピュレータに送信し，ワークを組立側に搬送して供給側と同じ座標に置き終了，という動作が稀に成功するのみであった．

この状態から，開発中の全プログラムを解析し，マニュアルや参考書 [1)] を読み，サンプルプログラムを参照し，バグを取り，改良を加え，あるいは書き直してすべて解決した．更に必要と判断した機能も追加した．

以下に対応した内容の例を挙げる．

・カメラの判別

複数カメラの認識を可能とした後，どのカメラが供給側か組立側かを判別できるようにした．具体的には紙に A の白抜き文字を書いて切り抜いたものを供給側に置き，それを画像認識することで判別した．これによりカメラをどの USB ポートに接続しても動作可能となった．

・複数ワークの認識および複数種ワークの対応

ワークが複数画像認識されると，座標の変数が自動的に配列になるのを発見し，単数時と複数時とで処理を分けた．対応したワークは，長方形，正方形，三角形，L 形の 4 種類で，これらのワークをモデル(テンプレート)化してファイルに保存し，撮影画像からモデルの種類ごとにテンプレートマッチングを実施し，マッチ

ングした重心の XY 座標と角度を得る．三角形と L 形は重心と把持用の突起の位置にズレがあったため補正を加えている．また，組立図にワークが未検出のときは供給側と同じ位置に置くか，組立図ファイル(組立側にワークを配置して撮影したもの)を読み込むかを選択できるようにした．

・動作改善

初期設定時に可能な処理を行うようにした．まずカメラ認識・判別を実施し，予め作成したカメラパラメータ(焦点距離やγ値など)と後述のキャリブレーションプレート原点画像のファイルを用いたカメラキャリブレーションを実行しておく．

・設計図再読込ボタン(この設計図は組立図と同意)の設置

当初は企業での使用を想定し，できるだけ人の操作を介在させずに自動的に何個も組み立てるようにした．組立図を一度読み込ませれば同じものを作り続けるが，組立図を途中で変更できるように設計図再読込ボタンを設けた．

3　学生実験への対応

当初の問題を解決後，本システムの 4 年機械工学科実験での利用を想定した改良の依頼があり，他にも実習で必要と予想した機能も加え，実習プログラムとして改良した．以下に機能をいくつか紹介する．

図 2 は実習プログラムを実行した直後の画面である．カメラ認識時の静止画が左(供給側)右(組立側)に表示されている．撮影，カメラ調整，キャリブレーションのボタンは供給側と組立側の 2 個ずつ用意してある．

図 2. 実習プログラムの起動画面

・撮影画像保存

図 2 の画像ウィンドウをクリックするとその画像を jpeg 形式のファイルに保存する．

・撮影ボタン

クリックするとカメラ撮影して画像を画像ウィンドウに表示する．実習中にワークや組立図が範囲内にあるか確認できる．

・カメラ調整ボタン

動画のようにリアルタイムの撮影画像を画面に表示し続ける．台の中央には座標軸が描いてあり，その交点とプログラムが画像に重ねて表示している XY 軸の原点が重なるようにカメラ本体の向きなどを調節する．この調整により，画像認識で得られた座標とマニピュレータに保存されている座標とのズレを減少させる．

・カメラキャリブレーション

キャリブレーションは実物と画像の対応関係を調整するために行うもので，図 3 はカメラ 2 のキャリブレーションを実行している様子である．図 3 のように一部に切り欠きがある黒枠の中に大きさと間隔が決まった黒丸が並べられたキャリブレーションプレートを 11 回次々に撮影する．撮影画像はファイルに保存され，それらを用いてキャリブレーションを実行し、カメラパラメータを保存する．図 3 の下画像のプレートの中心が原点となる．

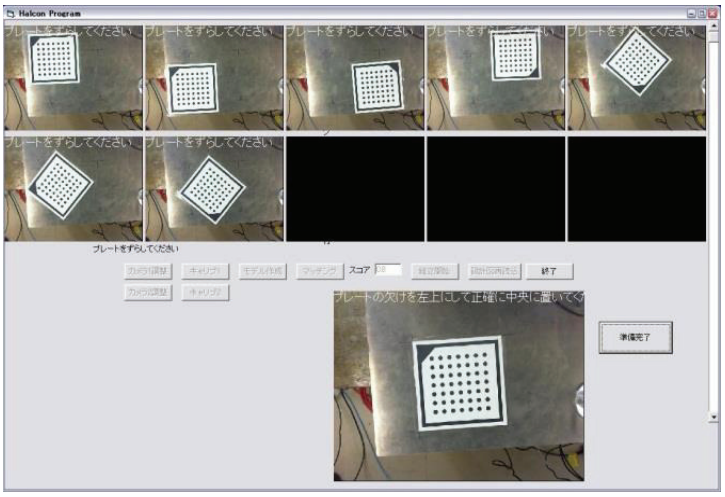


図 3. カメラ 2 キャリブレーション実行中

カメラはオートフォーカスだが，ピンボケ画像はプレートが検出できずエラーとなるため，リアルタイムに撮影画像を表示することでピントを確認できるようにしてある．

・マッチングボタンとスコア値

スコア値は撮影画像からモデルの特徴値(面積や縦横比など)に一致する部分を検索するときの閾値で，閾値を超えるとモデルにマッチしたと判定される．ボタンをクリックすると，供給側の画像からスコア値以上の値が検出された部分にその値を表示する．実習でスコア値を適当に設定し，ワークだけが正確に検出されるような値を見つけることを想定している．

・組立開始ボタン

実際に組み立てを開始する．実習を想定しているため，製品の組み立てが完了すると一旦停止するようにしている．設計図再読込機能は不要となるためボタンを無効化した．

4　今年度の依頼

平成 25 年度の卒研で 2 台のパソコンを 1 台にし，パソコンの OS を変え，HDK を最新バージョンに上げ，Visual BASIC6.0 から Visual Studio .NET 2012 へ変更したとのことで，実習プログラムを .NET へと移行する依頼を受けている．

5　まとめ

依頼内容を実現した上で更に独自に機能を追加するなど要求以上のものが開発できた．Visual BASIC の経験は無いに等しかったため調べながらの開発となったものの，他の様々なプログラミング言語の経験を生かし，不明な点や問題発生時にも対応できた．他の初めて使った専用言語についても同様である．HDK を利用すると画像処理がそこそこ手軽に実現でき，人的な開発コストを低減できた点は大きかった．

ただし改良の余地はいくらでもある．例えばキャリブレーションで撮影したプレートがピンボケとなると HDK の仕様上エラーで終了してしまうが，その前に撮影をやり直せるようにすることも可能である．

本システムは実際に 4 年機械工学科実験やオープンスクールなどで活用されるなど，プログラム開発者としての喜びを少なからず感じており，このような機会を与えてくださった小川教員，機械工学科長，教育研究支援センター長に感謝申し上げます．

参考文献

1) 株式会社リンクス画像システム事業部: HALCON 活用法,株式会社リンクス出版事業部, 2004.

第4分科会
(低温技術)

ヘリウムはガスボンベ１本で何リットル液化できるのか

宗本久弥

琉球大学 極低温センター

概要

7 m^3 のガスボンベ 1 本で何リットルの液体ヘリウムができるか、実測結果と計算で得た値を報告する。

1　背景

2012 年はヘリウムの調達に困難が生じた。ヘリウムの流通には地域性があり、このとき沖縄では液だと数か月待ちのところガスには余裕があった。但しカードルではなく 7 m^3 のバラ瓶である。当センターは普段ヘリウムを液で補充しているが、止むを得ない。幸い保守用に中圧タンク[註]へつながる 5 本分のボンベスタンドがあるので、何度ものボンベ交換は大変だが、純ガスを購入して液化することにした。純ガスは液化用圧縮機の吸入ラインへ直接ではなく、中圧ラインを経由しての供給となる。また純ガスを一旦ガスバッグへ流して精製運転する方法は、回収用圧縮機の動力など無駄が増えるので避けたい。

2　意外な液化結果

これまでは液とガスの体積比をよくいわれる 700 倍と単純に考え、ボンベのガス 7 m^3 = 7,000 L で液 10 L と思っていた。しかし 7 m^3 のボンベから実際に液化してみると、思ったほど液が貯まらなかった。汲み出しや回収ガスの液化も同時に行ったので正確なところは判らないが、10 L/本よりはずっと少ないようだった。

そこで純ガスの液化運転だけをしてみたところ、24 本のボンベで 176 L しかできなかった(7.3 L/本)。配管接続時のパージガスや、中圧タンクに入らない 1 MPa 以下の残ガスは回収ラインへ流しているので、ボンベ内のヘリウムを全て液化したわけではないのだが、それでも少な過ぎると思われた。

どこか漏れていてヘリウムを損失しているのではないかと心配になったが、問題は発見できなかった。そして次に「ボンベ 1 本で 10 L」というのは正しいのか、しっかり計算してみることにした。

3　ボンベ内のヘリウム

正確な内容積

7 m^3 と呼んでいるボンベの内容積は約 47 L である。規格上は 46.7 L で[1] [2]、+5% –0% (46.7～49.0 L)の精度で製造されている。新たに 20 本のガスを購入したのでボンベの刻印を見てみると、V (容器則[3]第 8 条第 1 項第 6 号)の値は 47.1～48.0 に散らばっており、合計で 948.1 L、平均 47.4 L だった。但し V は開放時の値で、ボンベは内圧がかかると若干膨れる。過去所有していたボンベの耐圧検査記録を見ると、充填時は 0.1～0.2 L 程度膨張するようである。

7 m^3 というのは大気圧換算した貯蔵能力のことで、現在は一般則[4]第 2 条第 1 項第 9 号イの式

$$Q = (10\,P + 1)\,V \qquad (1)$$

で計算される。(ここでは V の添え字を省略する。一般則では他と区別するために V_I となっている)

35℃での最高充填圧力 P = 14.7 MPa(ゲージ圧)、内容積 V = 0.0467 m^3 より　Q = 6.9116 m^3　(2)

以前、圧力の単位に kgf/cm^2 を用いてたころの一般則(高圧ガス取締法 1951～1997 年)では、

$$Q = (P + 1)\ V,\ \mathrm{P} = 150\ \mathrm{kgf/cm^2}\ (= 14.7\ \mathrm{MPa})\ \text{より}\ Q = 7.0517\ \mathrm{m^3} \quad (3)$$

と現在より若干大きめの値になっていた。想像だが、元々は 150 気圧(150 atm)で 7m^3 になるように内容積を

$$V = 7{,}000\ \mathrm{L} / 150 = 46.\dot{6}\ \mathrm{L} \quad (4)$$

としたと思われる。圧縮瓦斯及液化瓦斯取締法施行令(1923～1951 年)では圧縮瓦斯の定義が「10 気圧以上」というように、初期は圧力の単位が「気圧」だった。[5] [6]

正確な圧力

式(1)は法令上の値を決める近似式なので、現実の値にはならない。

正確に計算してみると、大気圧を 1 atm = 0.101325 MPa(絶対圧) として

$$14.7\ \mathrm{MPa(ゲージ圧)} = 14.7 / 0.101325 + 1 = 146\ \mathrm{atm} \quad (5)$$

がボンベ内圧である。

式(1)では内容積 V の係数が $10P + 1 = 148$ になってしまうが、式(5)で得た値による大気圧換算では

$$Q = 146\ V = 6.82\ \mathrm{m^3} \quad (6)$$

となる。しかし、この体積になるのは理想気体の場合である。(ボイルの法則)

実在気体

ヘリウムの実在気体としてのデータを調べてみる。ここでは NIST Chemistry WebBook[7] を参照した。

絶対温度 T、圧力 P、体積 V、理想気体の物質量 n_{ideal}、実在気体の物質量 n_{real}、気体定数 R とすれば

$$n_{ideal} = PV / RT \quad (7)$$

であり、一定容積内の物質量は温度と圧力に応じて次のようになる。(t ℃ $= T$ K – 273.15)

表 1. V = 1 L のときのヘリウムの物質量

t ℃	P MPa(絶対圧)	n_{ideal} mol	n_{real} mol	n_{real} / n_{ideal}
0	0.101325	0.044615*	0.044593	0.99951
35	0.101325	0.039547	0.039531	0.99959
35	14.801	5.7770	5.4185	0.93794

＊ 1 L / 0.044615 mol = 22.4 L/mol (標準状態)

これよりヘリウムは常温大気圧で理想気体と見なして差し支えないが(誤差 0.05%)、高圧ボンベには理想気体の 93.8%しか充填できないことがわかる。

また 35℃にて、大気圧と 14.7 MPa(ゲージ圧)との物質量の比は

$$5.4185\ \mathrm{mol} / 0.039531\ \mathrm{mol} = 137 \quad (8)$$

となり、内容積 $V = 0.0467\ \mathrm{m^3}$ のボンベには 14.7 MPa で

$$5.4185\ \mathrm{mol/L} \times 46.7\ \mathrm{L} = 253\ \mathrm{mol} \quad (9)$$

のヘリウム原子が入っていて、大気圧での体積は

$$Q = 137\ V = 6.40\ \mathrm{m^3} \quad (10)$$

となる。これは公称値 7m^3 の 91.4%である。

ボンベ内の残ガス

ボンベからは通常、この式(9) (10)の 253 mol、6.40 m^3 を全て取り出せるわけではない。ボンベ内には少なくとも大気圧のヘリウムが残る。またガスを放出したボンベは冷たいので、残ガスの密度は 35℃のときよりも高い。これは理想気体として扱えて式(7)より(但し圧力単位は atm) ボンベ内の温度が 12℃ (285 K)のとき

$$n = 1 \times 46.7 / (0.082 \times 285) = 2.0 \text{ mol} \quad (11)$$

と丁度 2 mol で、充填量 253 mol の 0.8 %の残ガスが生じる。(35℃でも 1.85 mol)

ガス納入業者のボンベは口金に逆止弁が内蔵されているため、これよりさらに残圧が高くなる(一例として 0.3 MPa)[8]。容器弁の製造元として(株)ネリキに問い合わせたところ、内蔵している逆止弁の作動圧は個体差が大きく、0.11～0.39 MPa にばらついているという。仮にこれを 0.3 Mpa (残圧 4 atm)とすると

$$n = 4 \times 46.7 / (0.082 \times 285) = 8.0 \text{ mol} \quad (12)$$

の残ガスがあり、充填量の 3.2 %になる。

質量測定 (物質量)

ボンベから取り出せるヘリウムの質量も実測してみた。ボンベには質量 W も刻印されているが(容器則第 8 条第 7 号)、これは容器弁等の附属品を含まない値なので、ガスが空になったときの質量として扱うことはできない。精密な測定は難しいが、液体窒素供給用の台秤 (最小表示 0.1 kg) を用い、ボンベを 5 本一組で計量することにした。刻印 V を見た前記ボンベ 20 本の総質量をガス消費の前後で比較したところ、差は 20.5 kg であった。

ここでヘリウムの原子量を 4.00 とすると、取り出したヘリウムの物質量は

$$20.5 \text{ kg} / 4.00 \text{ g} = 5125 \text{ mol} \quad (13)$$

となる。20 本の全容積は前述の 948.1 L で、充填時の各ボンベの膨張を 0.2 L と仮定すると、規格値 46.7 L のボンベ(この仮想ボンベは膨張しないとする)の 1 本あたりの物質量に換算すれば

$$5125 \text{ mol} \times 46.7 \text{ L} / (948.1 \text{ L} + 0.2 \text{ L} \times 20) = 251 \text{ mol} \quad (14)$$

これに残ガスの式(11)の 2 mol を加えると、実在気体として計算した式(9)の 253 mol とよく一致する。しかし、これでは逆止弁を考慮した式(12)には少しだが合わない。

そこで物質量についての実測値と計算値の誤差要因を、思いつくことからいくつか挙げてみる。

1. 逆止弁の作動圧力がそれほど大きくなかったのかもしれない。
2. ボンベによっては刻印 V からもっと大きく膨脹しているのかもしれない。
3. 台秤は購入後 20 年近く一度も較正していないため、指示値が狂っているかもしれない。
4. 大気圧が低め。当地は標高 120m 程度で、当日の気圧はおよそ 1001 hPa (0.988 atm)であった。[9] [10]
5. ボンベが多めに充填されていたのかもしれない。ガス会社では温度と圧力、あるいは質量で充填量を管理している。未使用のボンベを 1 本だけ確認したが、ボンベ表面温度 23℃のとき 14.2MPa だった。ヘリウム(実在気体)の温度と圧力の関係によると、35℃で 14.7MPa のヘリウムは、23℃で 14.13MPa、24.5℃で 14.20MPa なので、充填量は概ね規定どおりである。若干多めだったかもしれないが、当方の温度や圧力の測定にも誤差があるため、判然としない。
6. 実在気体の計算に用いている、NIST Chemistry WebBook から得たデータの確度

なお、残念ながらこの 20 本は純ガスだけの液化データを取ることができなかった。

4　液化貯槽内のヘリウム

次いで低温のヘリウムについて検討する。なお、貯槽は米 Cryofab 社の CMSH-500 型である。

液相

NIST Chemistry WebBook によると、液体ヘリウムは大気圧(1 atm)において沸点 4.230 K、密度 124.73 g/L、比体積 0.032089 L/mol である(低温工学ハンドブック[11]では 4.22 K、124.8 g/L)。一般に貯槽内圧は大気圧より高く、例えば 30 kPa (0.03 MPa、ゲージ圧)では沸点 4.52 K、液密度 118.34 g/L となり、体積は

$$124.73 / 118.34 = 1.0540 \text{ 倍} \qquad (15)$$

に膨張する。(5.4%増)

しかしここでは簡単のため、大気圧下(1 atm)で検討を進めることとし、ボンベ 1 本から得られる物質量も有効数値を 2 桁に下げて 250 mol (2.5×10^2 mol)として扱う。250 mol/本すべてが液になれば、その体積は

$$0.032 \text{ L/mol} \times 250 \text{ mol/本} = 8.0 \text{ L/本} \qquad (16)$$

である。

気相

ところで貯槽内の液相が 1 L 増えたとき、気相は 1 L 減っている。液化サイクルにおいてこの減った 1 L 分のガスは、三重管で液化機へ戻り、やがて液化される。つまり増えた液の全てがボンベから供給されたヘリウムというわけではなく、しかも沸点の低いヘリウムではこの点が無視できない。

ここで気相の状態を知る必要があるが、これが非常に難しかった。実測を試みるも上手くデータが得られず、これだけで一つのテーマとなってしまいそうなので今回は見送った。また、あるデュワーでのデータ(温度や密度の分布) が型の違う他のデュワーに当てはまるかどうかもわからず、さらに加圧下ともなればお手上げである。参考に比体積の文献値を示す。(NIST Chemistry WebBook より)

表 2. 大気圧下(1 atm)でのヘリウムの膨張

相	温度 K	比体積 L/mol	備考
液	4.23	0.0321	沸点
気	4.23	0.239	沸点　液の 7.4 倍
	4.88	0.321	液の 10 倍
	6.43	0.478	沸点(気)の 2 倍
	273	22.4	液の 699 倍
	308	25.3	液の 788 倍

ヘリウムのガス密度は、沸点 4.23 K で 16.8 g/L とかなり大きく、液密度の 13.4 %もある。しかし、わずかな温度上昇で急激に膨張し、6.5K では沸点ガス密度の半分の 8.3 g/L、室温では 1/100 の 0.16 g/L 程度となる。また冒頭で述べた液とガスとの体積比が 700 倍になるのは、ほぼ 0℃であった。

(参考に窒素の場合、沸点 77 K でガス密度は液密度の 0.6%しかなく、体積が 700 倍となるのは 23℃だが、液の比体積は 0.0348 L/mol でヘリウムとあまり変わらない)

仮に貯槽内のガス密度が液密度の 1/10 で均一とすると、液が 1 L 増えたときに 0.1 L 分の原料は元々貯槽内にあった 1 L のガスで、0.9L 分がボンベからのガスである。つまりボンベで供給したヘリウムの 10/9 倍の液ができる。したがってボンベ 1 本分のヘリウムを液化すると、貯槽には

$$8.0 \text{ L/本} \times 10/9 = 8.9 \text{ L/本} \qquad (17)$$

の液が貯まることになる。

実際の液化

しかし実際の純ガス運転ではボンベ接続時のパージガスや中圧ラインへ入らない残ガス(第 3 章で検討したボンベ内から取り出せない残ガスとは異なる、念のため)があり、その分は液化できない。パージと残ガスを合わせて 10 気圧分と仮定すると、その物質量は式(11)を利用して

$$n = 10 \times 46.7 / (0.082 \times 285) = 20 \text{ mol} \quad (18)$$

したがって純ガス運転でできる液は、式(16) (17)に手を加えて

$$0.032\text{L/mol} \times (250 - 20) \text{ mol/本} \times 10/9 = 8.2 \text{ L/本} \quad (19)$$

また、液化機の運転前後で中圧タンクの圧力を比べてみると 22 kPa ほど増えていた。気温は大きく違わず 15℃程度(288 K)、タンク内容積は 5 m^3 なので、理想気体として式(7)より(但し圧力単位は Pa)

$$n = 22{,}000 \times 5 / (8.31 \times 288) = 46 \text{ mol} \quad (20)$$

のヘリウムがボンベから中圧タンクへ補充されていた。これが液化されていればさらに

$$0.032\text{L/mol} \times 46 \text{ mol} \times 10/9 = 2 \text{ L} \quad (21)$$

の液が貯まっていたはずである。したがって、これを当初の 176 L に加えれば

$$(176 \text{ L} + 2 \text{ L}) / 24 \text{ 本} = 7.4 \text{ L/本} \quad (22)$$

が実測値となるべきであった。

液化量は式(22)の実測値 7.4 L/本と式(19)の計算値 8.2 L/本で 1 割違う。ここで再び誤差要因を考えてみる。

1. 何か見落としてる要素や誤りがあるのかもしれない。
2. やはりどこかガス漏れがあり、しかし見つけられずにヘリウムを損失しているのかもしれない。
3. 貯槽内の気相密度は仮定した 1/10 よりもっと小さいのかもしれない。
4. ボンベ 1 本から 250mol のヘリウムが得られなかったのか? 液化量を実測したときはボンベの刻印 V を見なかったが、46.7L よりは大きかったはずである(液は増えるはず)。充填量、逆止弁の作動圧、それに気温、気圧などは、質量を実測したボンベと異なるかもしれない。
5. 貯槽から回収しているガス量の影響(蒸発率 5 L/日)
6. 貯槽内圧の影響(大気圧下での計算値より液は増えるはずだが?)
7. 液面計の指示値は正しいか? 超伝導式を用いており、気柱振動式で較正してあるが、液面の換算表は正しいのか。デュワーに貼られた表と説明書の表で違ったり、inch と cm で食い違う表も見たことある。またデュワー各個体も寸法に製造上のばらつきがある。

5 まとめ

7 m^3 ボンベの中身は大気圧 35℃で 7 m^3 のはずが、実在気体ではそれよりずっと少なく 6.4 m^3 しかなかった。また液体ヘリウムとガスの体積比 700 倍というのは、0℃での値だった。これらを組み合せてボンベ 1 本で液 10L と思っていたのは大間違いで、実際は 8L 程度にしかならない。

ヘリウムは液密度が低い上に冷ガスの密度が高く(臨界点が大気圧に近い 2.2 atm)、質量から液量を求めづらい物質である(そのため差圧式液面計は不正確なようだ)。ボンベから得られるヘリウムの物質量は実測値と計算値が近かったが、液化量は実測値と計算値で 1 割も違ってしまった。台秤や液面計および文献値の確度、デュワー内の気相状態、未知の漏れの有無、見落とし事項など、不確定な要素がある。実測したボンベも質量と液化量とで別だった。もっと精密にたくさん実測してデータを集めたいが、なかなか機会がなく難しい。

註

中圧とは、液化用圧縮機の吸入圧力と吐出圧力の中間という意味である。中圧タンクは、供給されるヘリウムガス(不純物を含み、液化機内部で精製される)の精製量と、液化されて減るガスの量とのアンバランスを吸収するバッファである。精製されたガスが過剰のときは圧縮機吐出から中圧タンクへ充填され、不足のときは中圧タンクから圧縮機吸入へ補給される。こうして通常は実験室等から回収したガスを精製しながら液化しており(精製運転)、当液化機では中圧タンクを 0.4～0.6 MPa で運用している。中圧タンクの役目は他にもあるが、ともかくこの圧力範囲を大きく外れるとトリップする。なお、液化機は Linde L70 型である。

一方、純ガス運転は業者から購入した精製不要のガスを液化する。現設備ではボンベを中圧ラインにしか接続できないため、ボンベ内圧が中圧に近づくとそれ以上供給できず、残ガスが生じてしまう。またボンベは圧力に余裕を持って交換しないと、中圧タンクのガスが消費されて中圧低下でトリップしてしまう。

参考文献

[1] 日鉄住金機工株式会社 製品紹介
http://www.nsskikoh.nssmc.com/cyl/cyl03.html

[2] 高圧昭和ボンベ株式会社 製品ガイド
http://www.koatsu-showa.co.jp/sub/sprod111.htm

[3] 容器保安規則
http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S41/S41F03801000050.html

[4] 一般高圧ガス保安規則
http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S41/S41F03801000053.html

[5] 「高圧ガス」の定義・・・そもそもは？
LP ガス保安技術者向け Web サイト：知って得する豆知識
http://www.lpgpro.go.jp/guest/knowledge/2006.html

[6] なぜ 1MPa 以上の圧縮ガスが高圧ガスか？
http://e-learning.jimga.or.jp/jimga_g/01/01.htm
(一般社団法人日本産業・医療ガス協会 e–ラーニング 高圧ガスの安全知識
http://www.jimga.or.jp/front/bin/cglist.phtml?Category=7228)

[7] Thermophysical Properties of Fluid Systems, NIST Chemistry WebBook
米 The National Institute of Standards and Technology
http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/

[8] どうやってガスを容器に詰めるの？逆止解除アダプター
函館酸素株式会社
http://hakosan.com/column/h190601.htm

[9] 気象庁 過去の気象データ検索
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php

[10] keisan サービス 標高から気圧を計算
http://keisan.casio.jp/exec/system/1203469826

[11] 低温工学ハンドブック
訳・編 低温工学・関西支部　発行 内田老鶴圃新社 1982 年

ヘリウム液化業務関連の諸データ集

吉本佐紀

千葉大学理学部

概要

千葉大学では稼働しているヘリウム液化機および周辺機器の運用状況を把握するため様々なデータを収集しています．この内，運用状況を如実に反映している特徴的なデータやトラブル解決に役立つデータなど有用なデータはこれまでの研究会やウェブサイトで報告してきました．しかし発表するにはヴォリューム不足な小データもたくさんあります．個別には何の関連性もなく，また発展性のない「だからどうした」という程度のデータですが日の目を見ずに埋没させるのはもったいないので，これらを寄せ集めて諸データ集として報告いたします．

1　ヘリウム液化用圧縮機の消費電力量と気温

ヘリウム液化運転で費やした液化用圧縮機の消費電力量を稼働時間で割って一時間あたりの平均消費電力量を毎回運転毎に計算しています．これらのデータを時系列にグラフにしたのが図 1 です．これを見ますと３つの大きな山があるように見え周期性が見られます．夏場に小さくなり冬に大きくなる増減を繰り返しています．どうも気温に依存していそうです．また３つの山がだんだん大きくなっているようにも見えます．

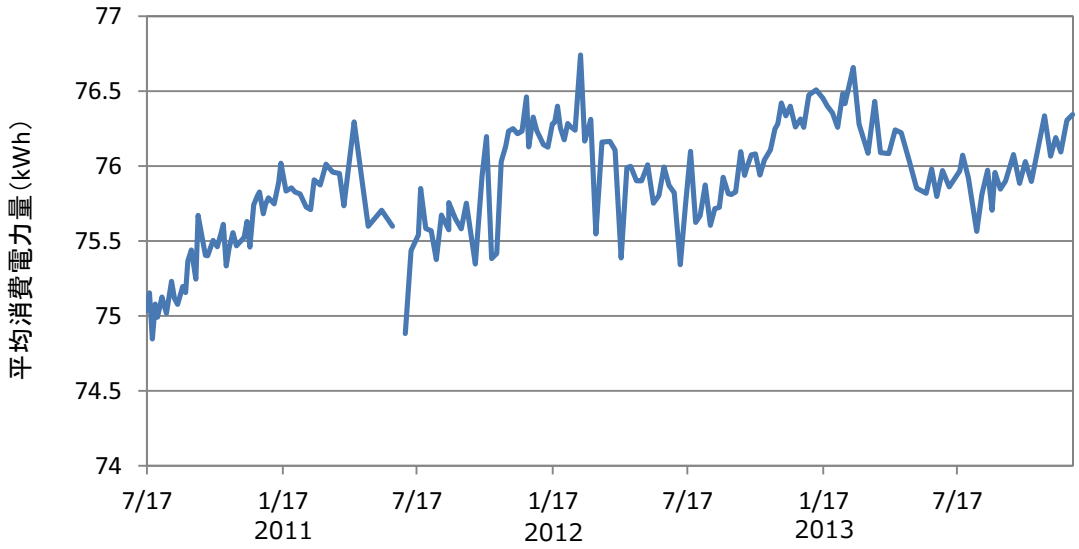


図 1. 平均消費電力量の推移

そこで今度は図 2 に示すように気温と平均消費電力量の関係をグラフにしてみました．これによるとやはり気温との依存性が見られます．稼働日の平均気温が高い方が消費電力量が小さくなる傾向が読み取れます．ただし比例関係の帯にやや厚みが見られるのが気になります．

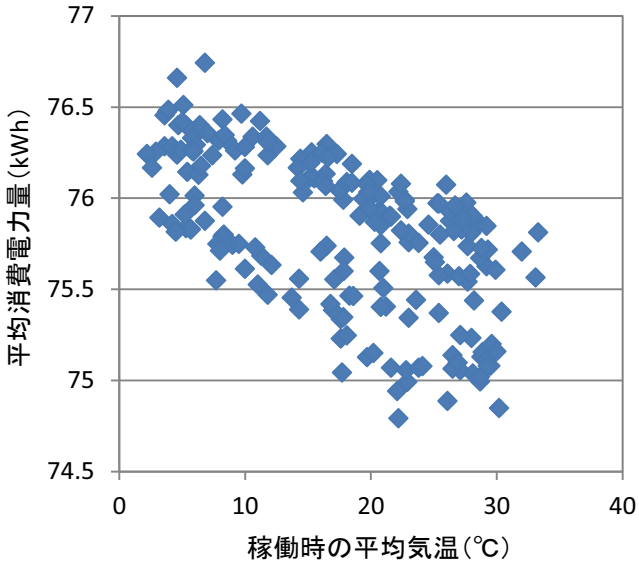


図 2. 平均消費電力量と気温

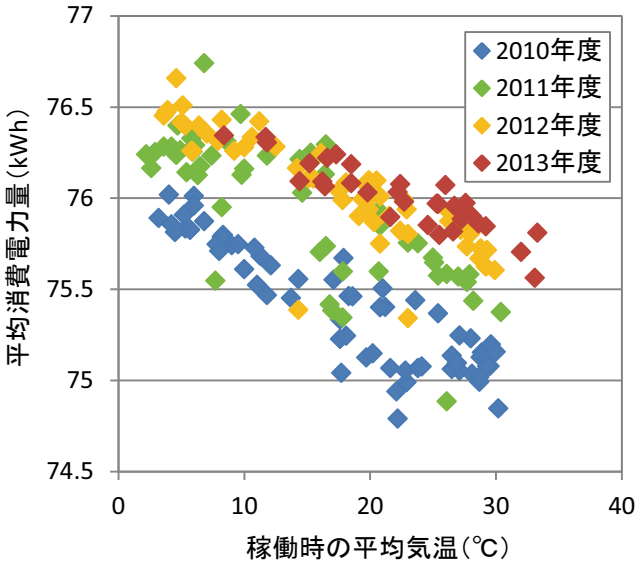


図 3. 平均消費電力量と気温（年度毎の色分け）

そこでさらに図 2 を稼働日の年度毎で色分けしてみました．これによると導入初年度の 2010 年から時間を経るごとに比例関係の帯が上方へスライド移動している様子が見られます．これは図 1 における 3 つの山が徐々に大きくなっていく傾向とも整合が見られ，年々消費電力を食うようになっていることを示していると思われます．つまり経年劣化なのかもしれません．ちなみに気温が高いと電力量が小さくなるのはどうしてなのかはわかっていません．

2　ヘリウム液化運転時の液化機からのヘリウムガス回収量

ヘリウム液化運転ではヘリウムガスは液化機と液化用圧縮機の間を往復し，ループ状に流れています．このループへ吸い込まれたヘリウムガスは一部が液化され，一部は冷媒としてループし，また一部は回収系統へまわります．さて，この回収系統へまわるヘリウムガスの量ですが，どれほどあるのか以前よりずっと気になっていました．液化運転時に回収ガスカードルの減圧速度は液化速度を計る一つの指標になりますが，液化機がカードルからガスを吸う割に実は回収へ戻してばかりだと液化速度はあまりよくないという事になります．そういえば液化運転中は回収用圧縮機が液化運転していない時に比べて頻繁に起動しています．そこで液化機から回収ガスバッグへ向かう配管に積算ガスメーターを設置して流量を測ってみました．

表 1. 一サイクルでの回収ガス量と所要時間の平均値

	平均流量（m^3）		平均所要時間		単位時間流量（m^3/分）	
	冷却過程	再生過程	冷却過程	再生過程	冷却過程	再生過程
2010 年	0.630	1.209	0:05:07	0:10:28	0.123	0.115
2013 年	0.620	1.050	0:05:38	0:10:28	0.110	0.100

液化運転では冷却・精製・再生の各過程の内，冷却過程と再生過程でヘリウムガスが回収へまわります．導入当初（2010 年）のデータと最近（2013 年）のデータを比較したところ冷却過程・再生過程ともに流量が若干減少したようです（表 1）．ただしデータ採取の条件を揃えているわけではないので断定はできません．

次に液化運転全体での回収ガスの量について調べてみました．まず回収ガス量と液化時間の関係ですが，

図 4 を見ての通りきれいな比例関係が見られました．現在の運用状態では液換算で 50～70 L 程度のヘリウムガスが回収されています．液化運転日の朝不純ガスカードルのガス量から液化時間を概算しますが，この回収量を加味すると，液化速度が 45～50 L/h ですので 1～1.5 h の液化時間増加という事になります．ただ実際には実験室からの回収もあり液化運転終了時刻の予想は残念ながら毎回全く当たりません．

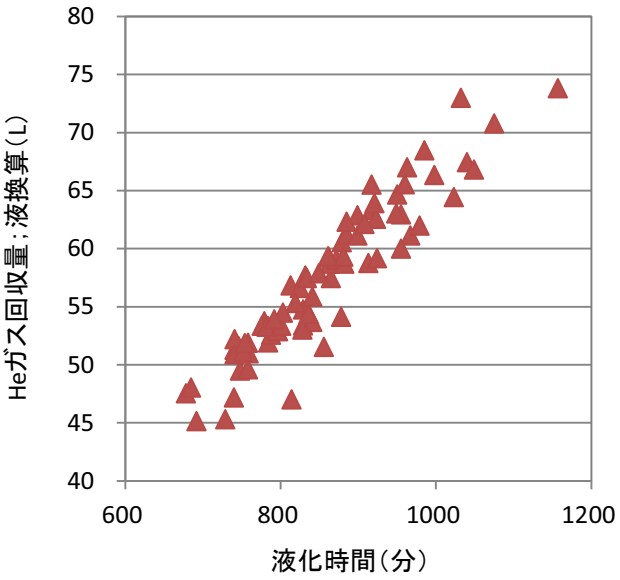


図 4. 回収ガス量と液化時間

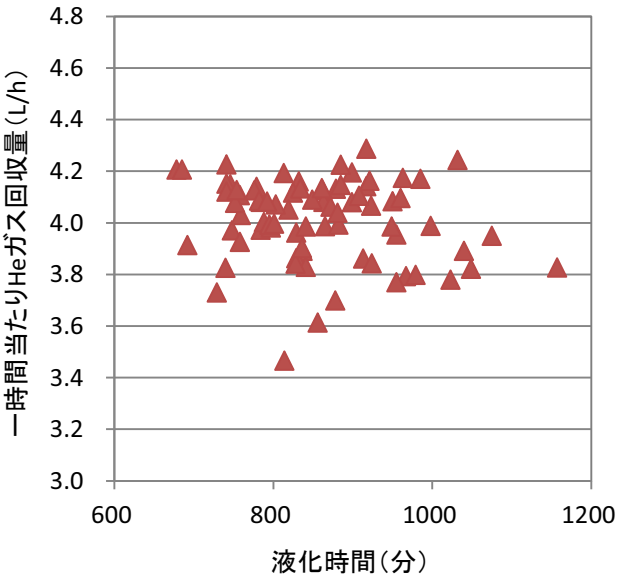


図 5．単位時間回収量と液化時間

図 4 で示した回収量を液化したヘリウムの製造量で割れば回収率が計算できます．図 6 を見ますと液体ヘリウムを 1 L 製造するのにヘリウムガスを液体換算で約 0.09 L 回収しています．つまり製造量に対して概ね一割を回収へ戻しているという事がわかりました．図 5 および図 6 を見ると，単位時間当たりの回収量およびヘリウム 1 L 液化当たりの回収量は液化時間が長くなれば少なくなるといったような依存性は読み取れませんでした．

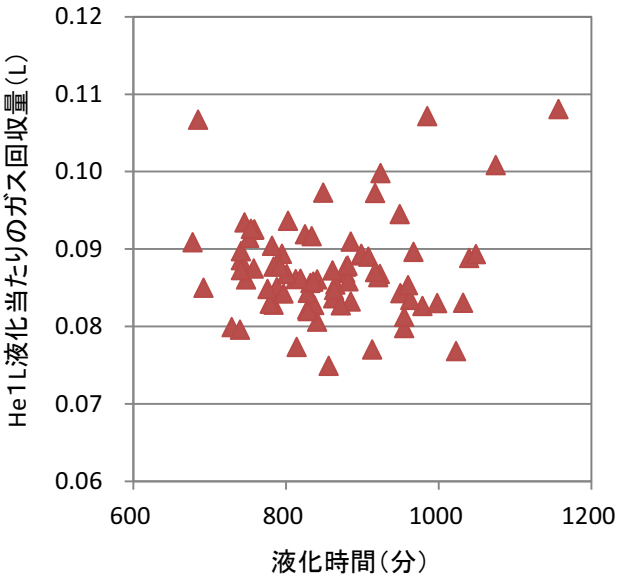


図 6. 回収率と液化時間

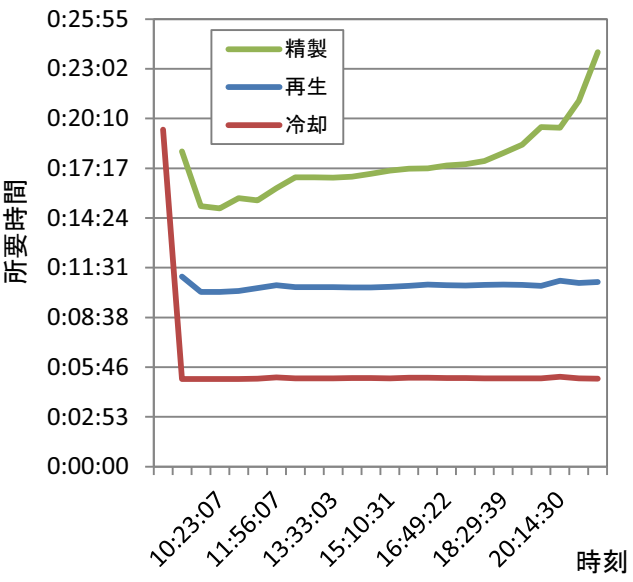


図 7. 各過程の所要時間の変遷

さらに冷却過程および再生過程の所要時間は液化運転の経過時間とともに長くなったりまたは短くなったり変化するのか調べてみました（ついでにヘリウムガスを回収へ回さない精製過程の所要時間も加筆）．図 7 によると冷却過程・再生過程ともに時間経過とは関係なく一定のようです．以上より回収へ放出する流量も液化時間に関係なく一定であると推測できます．

ちなみに精製過程は時間経過とともに長くなる傾向が見られます．これは不純ガスの供給元である回収ガスカードルの圧力が液化時間経過とともに減圧することで不純ガスの液化機への取り込む流量が減るため，精製ガスを規定量作るのに時間がかかっているためなのでしょうか．なかなか興味深いです．

3　ヘリウム液化運転での液体窒素使用量

ヘリウム液化運転での補助冷却材である液体窒素の使用量を調べてみました．測定はヘリウム液化機から放出される窒素ガス配管中に積算ガスメーターを設置して流量を測っています．しかし窒素ガス放出管には窒素ガス以外にも内部精製器に溜まった不純物も排気されてくるため，厳密には窒素ガス量を正確には測れていません．しかし千葉大学の場合回収ガスの純度が極めて高く不純物の放出が非常に少ないため，放出ガスの測定値をそのまま近似的に窒素ガス量として扱っています．

まず液化運転トータルでの使用量は図 8 に示すように液体換算で 500～600 L 前後で，一時間あたりでは 30 L/h 程度の使用量となっています．

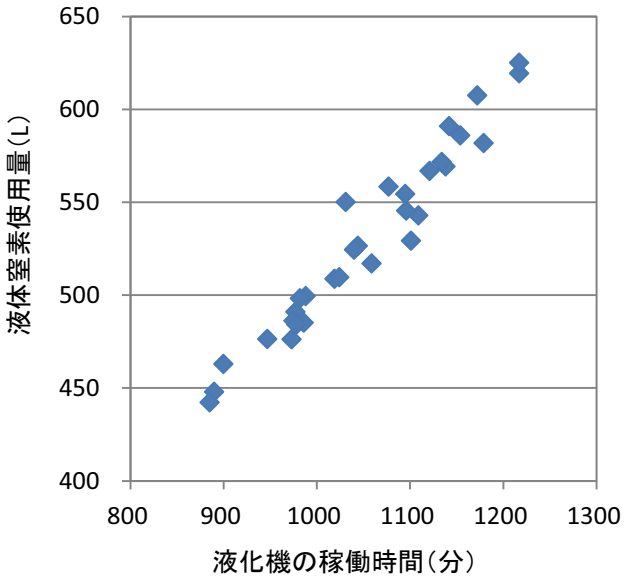


図 8. 窒素使用量と稼働時間

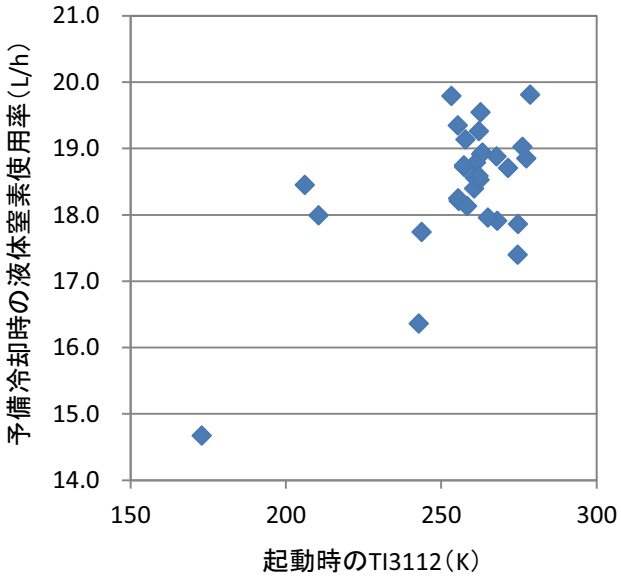


図 9. 予備冷却時の窒素使用量と起動時の温度

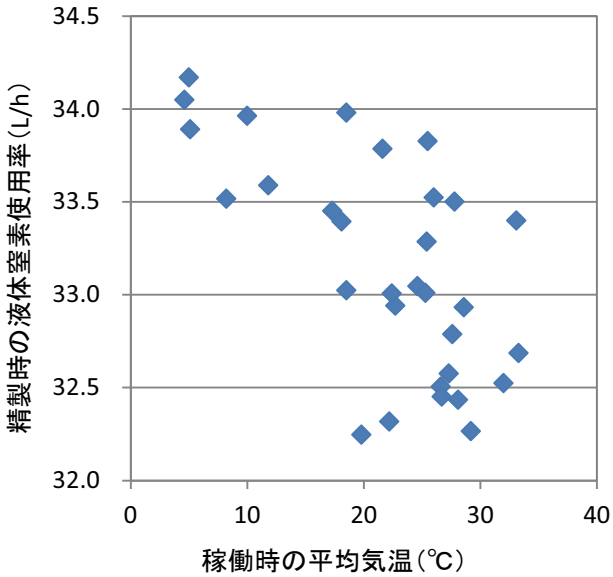


図 10．精製時の窒素使用量と平均気温

次に予備冷却時と精製時の使用量を調べてみました．図 9 および図 10 によると，予備冷却時の液体窒素使用量が 19 L/h 前後なのに対して精製時は 33 L/h 前後となっており精製時の方が多く使用していることがわかりました．先代のレシプロ式の液化機では逆で予備冷却時の方が液体窒素を多く使っていたので意外な結果となりました．イメージ的には液化機の熱容量が大きく，一度液化機本体が冷えてしまえば，その後の精製過程では本体を冷やす時よりも少量の液体窒素で温度を維持できてしまうという感覚を持っていましたが，新しい液化機では異なるようです．精製量が先代の液化機よりも 3 倍近くあるので液体窒素をどんどん使用しないと温度を維持できないという事なのかもしれません．

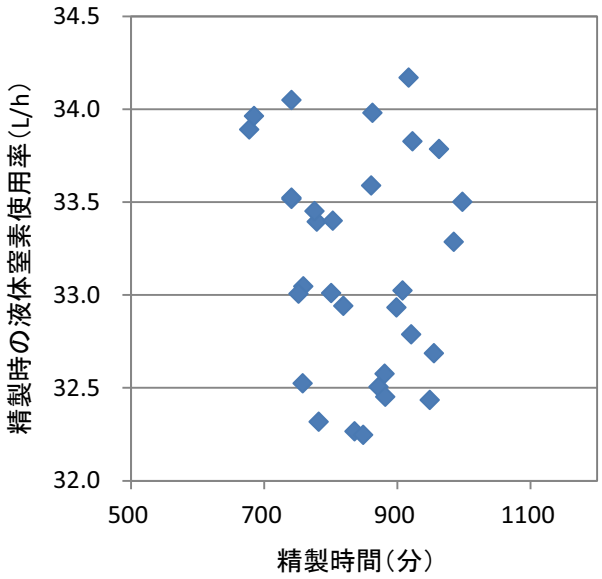


図 11. 精製時使用率と精製時間

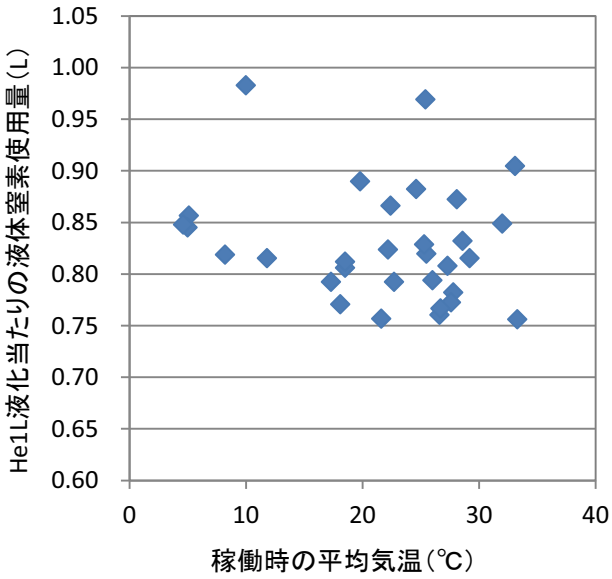


図 12. He 液化に対する使用率と平均気温

図 11 は精製時の一時間あたりの使用量と精製時間との関係です．既に図 8 で比例関係が示しているように長時間運転したからといって使用率が減っていくという事はないようです．最後に液体窒素使用量をヘリウム液化量で割ってヘリウム 1 L 液化するのに液体窒素をどれだけ使用しているのかを計算してみました．図 12 によると概ね 0.8 L～0.9 L となっています．また稼働日の平均気温との関係は特には読み取れません．

4　小型容器の性能

小型液体ヘリウム容器（100 L・60 L 型）の蒸発損失率を調べ比較してみました．集計データは容器附属の使用記録ノートから極低温室に安置している状態で自然蒸発した検量記録のみを抜き出し，さらに測定誤差の影響をなるべく小さくするため安置されていた時間が連続 5 日以上のデータのみを抽出しています．また容器返却直後や汲み入れ直後の検量データは，あくまでも安静状態にこだわって使いませんでした．これら厳選したデータを蒸発量・測定期間ともそれぞれ合算して蒸発率を算出しています．

図 13. 液体ヘリウム容器の蒸発損失率

表 2. 液体ヘリウム容器の蒸発損失率

容器	サイズ（L）	蒸発量（L）	測定期間（日）	蒸発率（%）
A	100	766	692.72	1.11
B	100	623	557.44	1.12
C	100	1877	903.90	2.08
D	60	2868	1870.27	2.56
E	100	853	687.15	1.24
F	100	893	618.26	1.44
G	100	641	282.48	2.27
H	100	927	472.63	1.96
I	100	1187	602.26	1.97
J	100	280	240.67	1.16
K	100	319	255.70	1.25
L	60	2156	1889.55	1.90
M	100	1229	863.93	1.42

図 13 に容器毎の蒸発損失率の相対関係，表 2 に具体的データを示します．これによると容量の小さな 60 L 容器の方が容量の大きな 100 L 容器よりも蒸発損失が大きくなってしまう事がわかります．しかし同じ 100 L 容器同士で比べてみても意外と性能差が大きく最大で約 2 倍もの差が開いています．ちなみにグラフではわからなくなっていますがメーカーごとに比較してみるとやはりその優劣が如実に表れました．

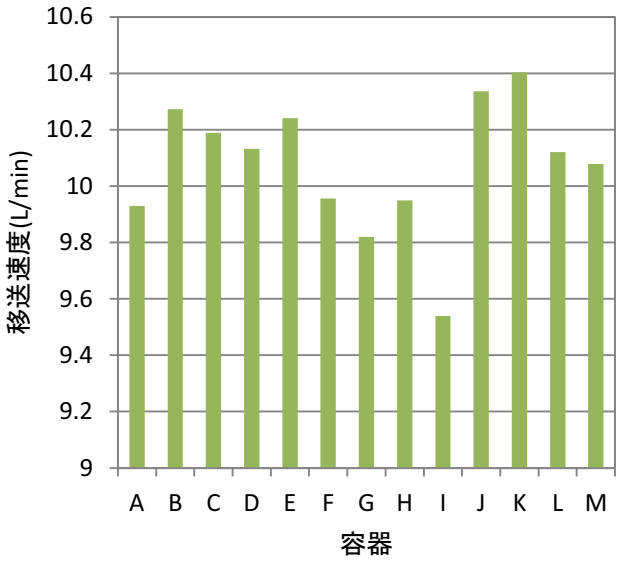


図 14. 貯槽からの移送での平均移送速度

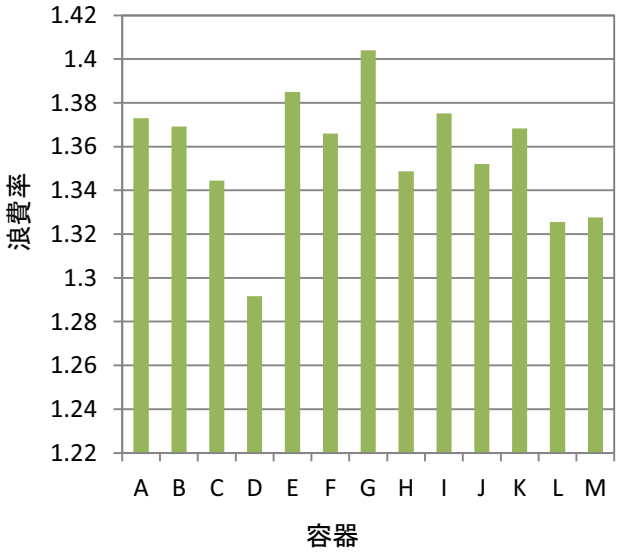


図 15. 貯槽からの移送での平均浪費率

蒸発損失率の性能差が個体毎にこれほどまでに出ているので，貯槽からの移送効率にも影響しているのか確認したくなり移送データを調べてみました．図 14 および図 15 に示すデータは，貯槽から小型容器へ液体ヘリウムを汲んだ記録の内なるべく条件を揃えるため，①トランスファーチューブが室温まで温まっている状態で開始した移送データは除く，②移送量が 40 L 未満の少量移送データは除く，③貯槽の平均圧力が 0.03MPa 台のデータのみ抽出（データ数が最も多い加圧帯だったので）というように限定して選別しました．データ数は各容器 10～20 個ほどです．※浪費率＝使用量÷充填量としています．

これによると，例えば図 13 で蒸発損失の大きい C,G（D は 60L 容器なので今は除く）を見てみると，G に関しては平均移送速度が相対的に遅く浪費率が大きいため蒸発損失率の悪さが影響しているのかと思わせるデータです．ところが C については逆な傾向が出ています．その他容器全体としても傾向がはっきりしませ

ん．まだまだ諸条件の違いがありこれらが揃っていないためと思われます．残念ながら蒸発損失率の性能差と移送効率の関連を示すデータとはなりませんでした．

5　貯槽からの移送状況

今度は容器の種別関係なく全容器データで貯槽からの移送状況を確認してみます．ただし，こちらのデータもトランスファーチューブが室温まで温まっている状態で開始した移送データは除いてあります．室温状態からの移送では明らかに移送速度および蒸発損失が異なるため，連続で移送する際の２本目以降の移送データだけを選んでいます．

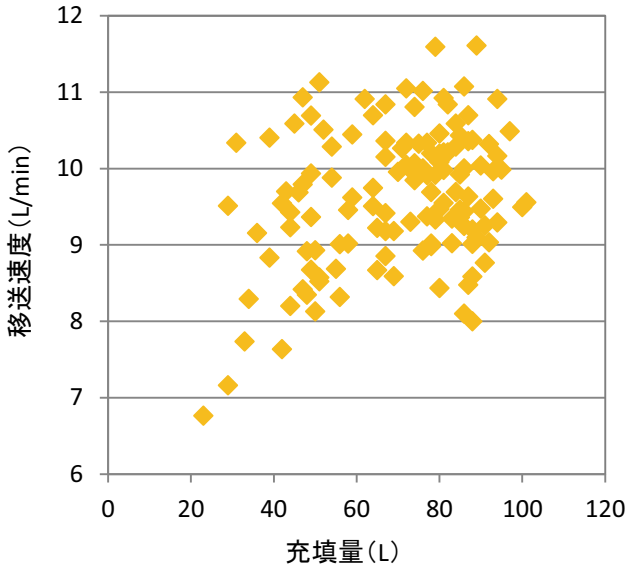


図 16. 充填量と移送速度

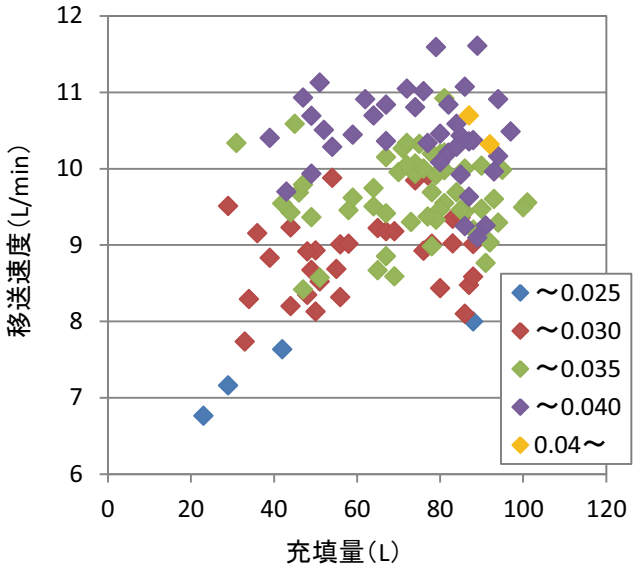


図 17. 充填量と移送速度（圧力分け）

移送速度と充填量について図 16 を見ますと関係性は特には見られません．このグラフを貯槽の加圧量の区分毎に分けて色付けしてみます．すると，図 17 にあるように加圧量に応じて移送速度が速くなっていく様子がおぼろげにわかります．おもしろいですね．※図 17 中の色分け圧力区分の単位は MPa です．

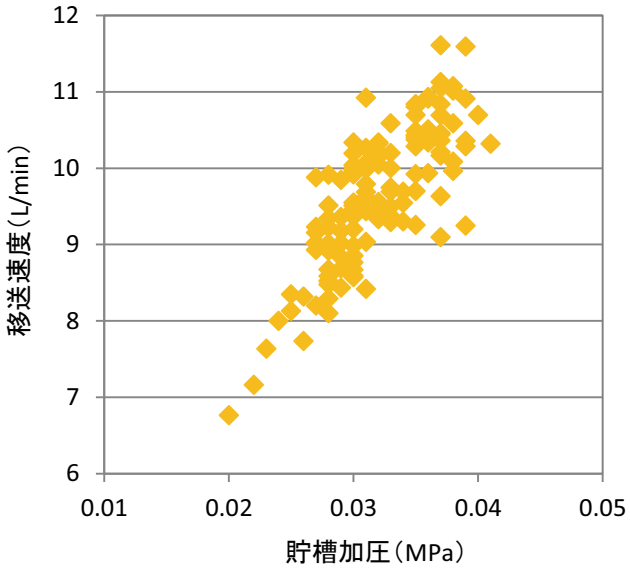


図 18. 貯槽の加圧量と移送速度

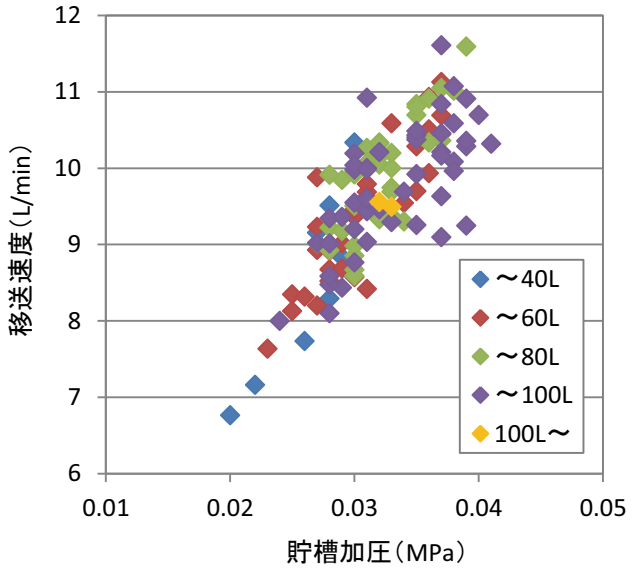


図 19. 貯槽の加圧量と移送速度（充填量分け）

移送速度と貯槽の加圧量の関係を見てみますと，図 17 でも比例関係がわかりましたが，より鮮明に比例関係が図 18 に表れています．加圧量を増やすと移送速度も速くなっていきます．同様に図 18 のグラフを今度は充填量毎に色分けしてみます．既に図 16 で関係性が見られなかったようにこちらでも分布が混じり合って依存関係は見られません．

次に浪費率についても移送速度を調べたのと同様に充填量と貯槽の加圧具合との関係性を確認してみます．

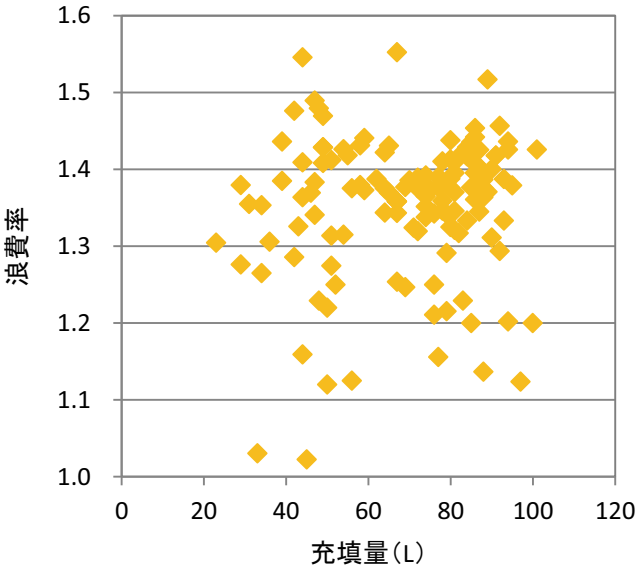


図 20. 充填量と浪費率

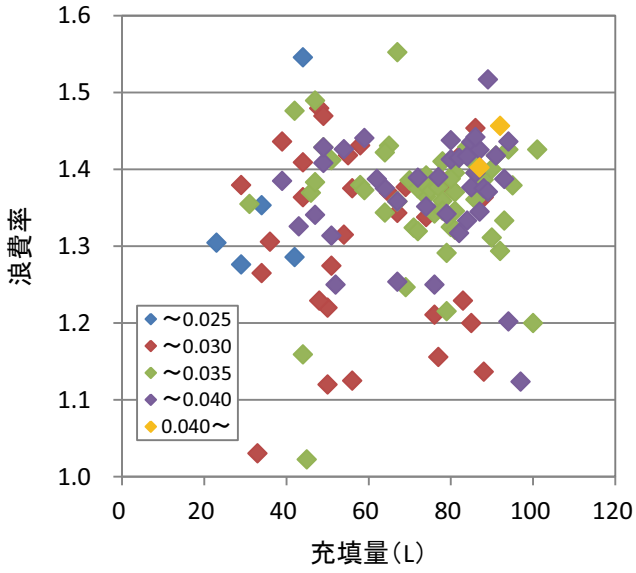


図 21. 充填量と浪費率（圧力分け）

まず浪費率と充填量については図 20 を見ての通り全く傾向が出ていません．充填量が多くなるほど効率的になり浪費率が小さくなるのではと予想しましたが残念ながらその様子は読み取れませんでした．こちらも貯槽にかけた圧力毎に色分けしました．図 21 を見ると色が混じり合っており加圧量との依存関係は無いようです．例えば 0.03～0.035 MPa 帯を最小に他圧力帯が上に覆い被さるような分布を期待しましたがそんな事はありませんでした．しいて言えば 0.025～0.03 MPa 帯（赤マーク）が低浪費率域に比較的多いです．

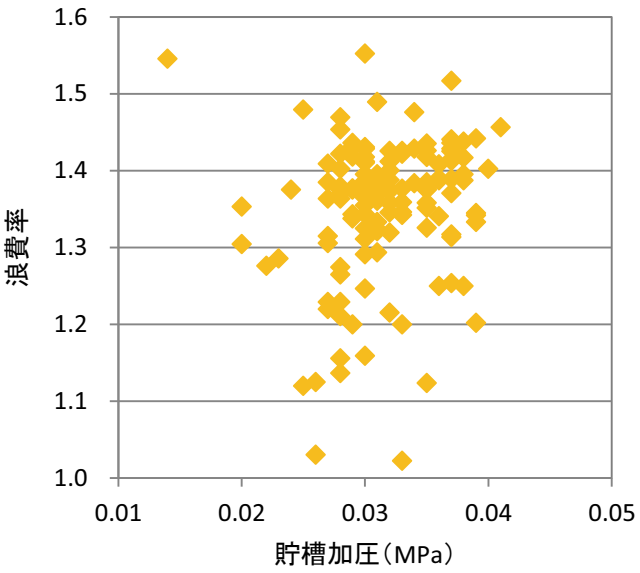


図 22. 貯槽の加圧量と浪費率

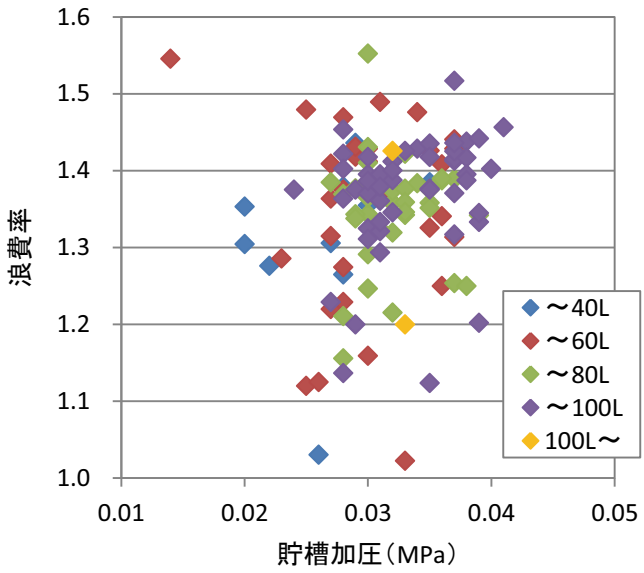


図 23. 貯槽の加圧量と浪費率（充填量分け）

浪費率と貯槽の加圧量の関係を見てみますとこちらもすでに図 21 で関係性がなかったように図 22 では混じり合った分布になっており傾向は出ていません．そして同様に図 22 も充填量毎に色分けしてみましたがやはり何の傾向も読み取れません．浪費率に関しては充填量や貯槽への加圧加減で如実に影響が表れる事はないようです．

6　液化量と供給量

液体ヘリウムの需要と供給のバランスについて考えてみました．需要に対して供給が十分に余裕がある場合，利用待ちの容器が待機状態にあり，知っての通り保存しているだけでも自然蒸発が絶えず続いているので供給していないのに蒸発ガスが溜まることになります．一方，供給が需要に追いついていない場合は液化したらすぐに利用者が持っていく状況になります．液化量と供給量は近接しており液化量に占める供給量の割合を利用率とすると高利用率となり一見供給効率が良好に見えます．しかし常に利用者が供給の順番待ちの状況であり欲しい時にすぐに使えない事が考えられます．高利用率でも供給効率が良いとは言えません．

さて，千葉大学では設備更新および将来を見越して着々と小型容器を増やしてきたことにより供給が需要に対して十分に余裕のある状況になりました．このため前述のように待機状態の液体ヘリウムの量が増え，利用されずに蒸発した気体の液化量の割合が増えました．つまり供給はしていないのに液化量はそれなりに増えています．約半分のヘリウムは極低温室の中だけで循環している状況です．

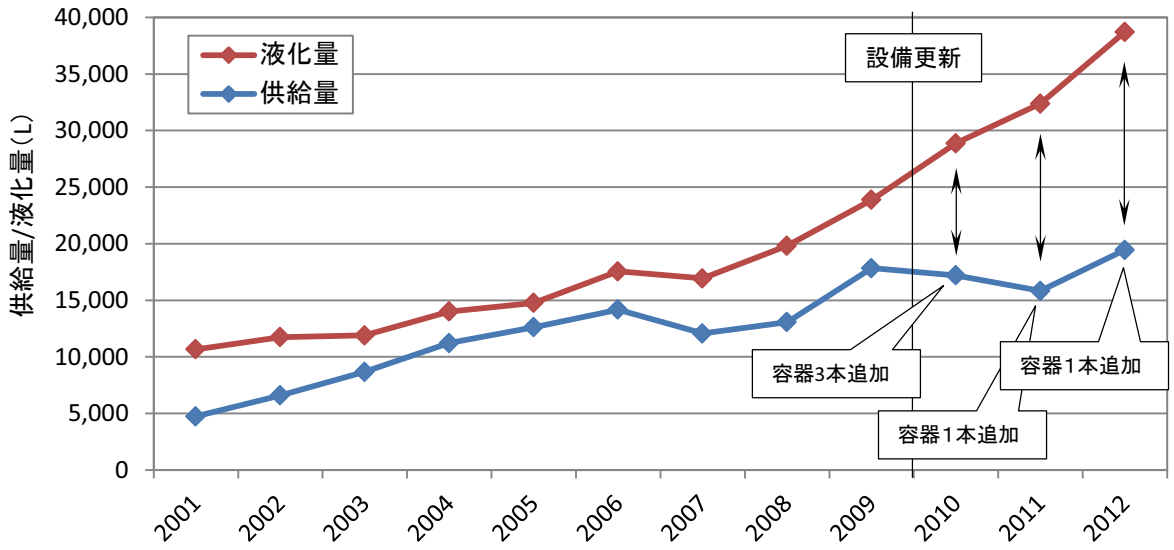


図 24. 供給量と液化量の推移

利用者が液化室へ行けばいつでも供給を受けられるとても便利な状況を仮定すると，それは待機状態のヘリウム容器がたくさん控えていれば成し得ます．しかし，この状況は利用率が低い事になります．我々はいつも利用者の利便性を高めようと努力しつつ供給業務の効率的な運用も追及していますが，この２つの要素は相反するものとも捉えられます．双方のバランスが保てるよう努めなければならないのでしょうか．

参考文献

吉本佐紀“設備更新後の新ヘリウム液化装置の運用状況”2010 年度熊本大学総合技術研究会低温技術報告集

数字で見る液化室運営

○鷲山 玲子，土屋 光

国立大学法人 東京大学 物性研究所 低温液化室

概要

東京大学物性研究所（以下物性研）低温液化室（以下液化室）では，運営母体である低温委員会等で報告を行う為，液化室運営上必要になる各種データの蓄積と解析を行っている．これらのデータは，通常の液化室運営に役立てている他，改善すべき事案があり大きな予算請求などを行う際などにも役立っている．ひとたび液化機が故障すると莫大な費用がかかる液化室運営では，データの蓄積と解析は液化機を故障させずに貴重な予算を有効に使う為にも欠かせない作業であると考えられる．また，昨今の大学をとりまく予算状況はどこも厳しいが同様な液化機を持つ機関ではやりくりに苦心されている機関も多いと思われる．そこで，多少なりとも他機関での参考になればと思い，今回は液化室運営でよく利用する各種データについて報告を行う．また，ここ最近，業務上改善した点についても併せて報告を行う．

1　ヘリウムに関する各種データ

図 1 に 2000 年 1 月からのヘリウムガスの回収率（以下回収率）と液体ヘリウムの供給量（以下供給量）の推移を示す. 回収率はヘリウムを回収して再液化を行う施設では非常に気になる数字だと思われる. そこで，回収率とその次に気になる数字である供給量に何かしらの相関関係が見いだせるかを期待し，図を描いてみたがこれらには特に相関関係は認められなかった.

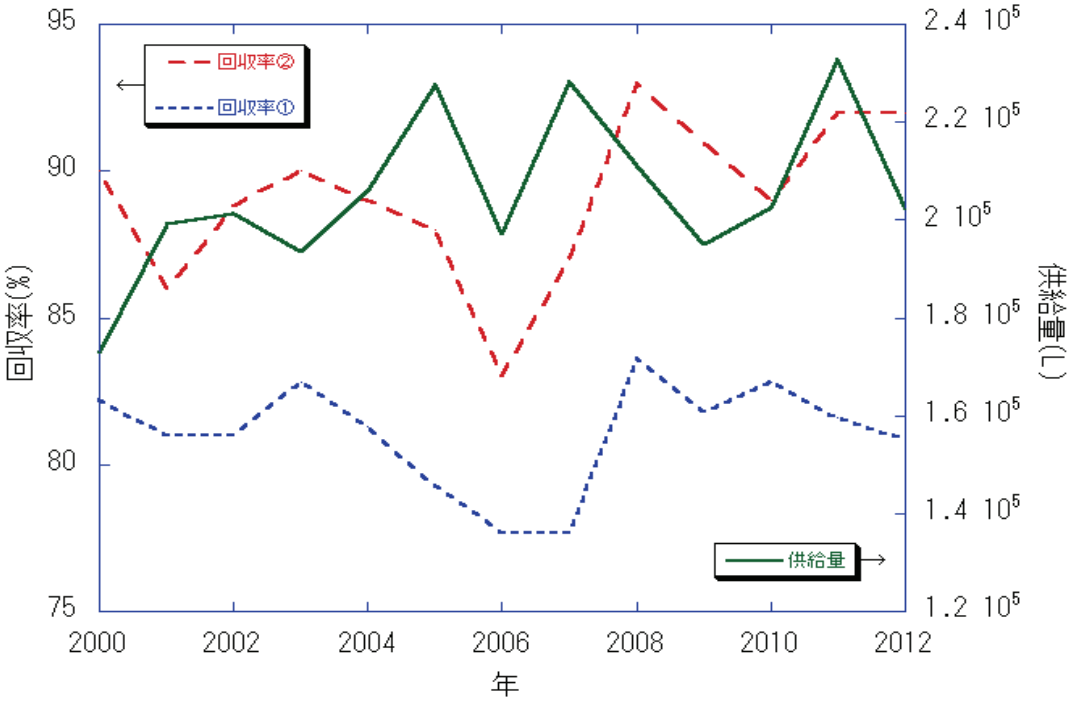


図1. 回収率と供給量の推移

回収率については，算出方法が異なる回収率①と②の数値をプロットしてみたが，算出方法に寄らず比較的良く連動しており，指標として回収率を使用する場合には，算出方法にはあまり寄らないと言える．2006年に起きた液化機故障を挟んで若干上昇しており，ここ数年は回収率②で 90%前後にあり全体として良い傾向にある．なお，現在，物性研では回収率を以下に簡単に述べる 3 つの方法で算出している．詳細については，液化室 web サイト[1] と土屋技術専門職員が過去に纏めた資料[2]をご覧頂きたい．

回収率①は，ユーザー側の使った液体が実際に回収配管を通してガスとしてどれだけ戻ってくるかという算出方式である．他の算出方法より回収率が低く表示されてしまう問題点が指摘されているが，ユーザーに回収率向上への意識を持ってもらう事と放出などの異変を検知する観点から，一定の指標を続けて使う事が好ましく，1999 年以降使用している．今回はこの月毎のデータを年単位で平均してプロットしたものを図 1 に示している．

回収率②は，年間の購入量を基準として供給量で割った数値である．在庫などのファクターがないので，外部機関などと単純比較によく利用している．回収率③として，回収率①に液体の返却量も加味した算出方法を用いるとより 100%に近い数値が出るが，2013 年 5 月分より算出を開始した為，十分なデータが無いので今回は使用しなかった．この方法のほうが回数率としてはユーザー側の感覚に近いかもしれない．

物性研は全国共同利用研究所という性質上ユーザーの出入りが激しく，ユーザーからの密な報告を期待できないことから，1999 年に柏キャンパスに移転以降，棟別の回収率を算出して液化室側からも回収率の数値により研究室内の回収異常を発見できるようにしている．また，そのデータは毎月欠かさず web 上[1]に掲載しているが，それらの数字はいつでも閲覧できるので出入りが激しいユーザー側でも常に異常検知することが可能であり，更にはユーザー同士でお互いの回収率を意識しあえることもあり，回収率の良さに繋がっているとも考えられる．

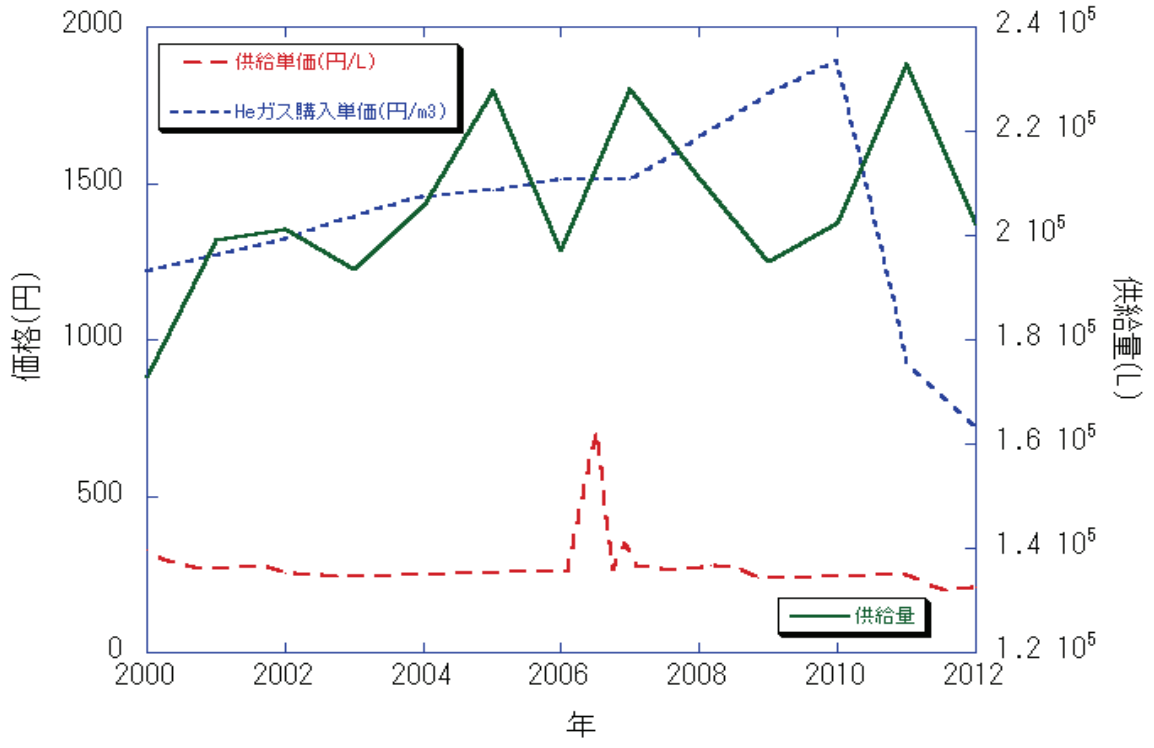


図2. 供給価格とヘリウム購入単価と供給量の関係

図 2 は液体ヘリウムの供給価格（以下供給価格）とヘリウム購入単価と供給量の関係を示す．供給価格は，ここ数年は 200 円/L 台で推移しており，2012 年 5 月から所内価格 200 円/L，所外価格 220 円/L と非常に低価格である．これは年間 20 万 L 以上の供給が安定してあることと，回収率が良いのでガス購入費用が抑えられている事が主な要因である．因みに，供給価格は，所内外で差はあるが，研究室・月毎の回収率に寄らない均一価格で，年単位の経費からコストを割り出し年度当初に設定している．幸いにして全体的に回収率が良い為この方式で理解を得られており，事務作業の軽減にも繋がっている．

また，供給価格は年々下がっている傾向にあるが，これは回収率が若干向上した事と 2010 年度入札に新規のガス業者が参入し He ガスの購入単価が劇的に下がったおかげである．しかし，2010 年度以降に大幅な値下げに至らなかったのは，次年度繰越が可能になったからである．以前は，緊急の整備費用は物性研が持つ予備費などから臨時経費という形で液化室に配分して貰い補うことが多かったが，最近は予算削減の煽りを受け受益者負担が原則になってきており，緊急に必要な整備費なども全てヘリウムの供給価格で補える様な予算を組む事が求められている．そこで財務的に可能になった次年度繰越制度を利用して，緊急時の復旧作業や金額が大きな整備の為に自ら備えている．しかし，来年度よりヘリウムガスが値上がるという話もあるのでいつまでこの価格を維持できるかは，回収率の維持・向上に大きくかかっている．

図 3 は収入の推移を示したグラフであるが，これらのデータからは液体ヘリウムが収入の多くを占めている事がわかる．また，臨時経費の多くはトラブルが原因で支出が増えた為，所や本部に要求して獲得した経費であるが，液化機が故障した年は額が飛び抜けており，液化機に一旦トラブルが起こると支出も跳ね上がることが一目瞭然である．なお，原則単年度決算なので収入総額=支出総額である．

この様に液化室の運営を数字で見てみると，回収率が高くなると供給価格が下がり，利用しやすい事で更に供給量が増える事がわかる．また，供給量が増えると 1 L あたりの経費負担割合が小さくなり，更に供給価格は下がるが，ユーザーの最大数はある程度制約されているので供給量は増えるが，設備限界もあり最大維持状態に入り収入が安定する為，大きな整備も行いやすくなり，更に安定した運営が可能なる．現時点ではこのように上手くバランスの取れた運営が行われているので，この状態を維持できる様，引き続き努力したい．

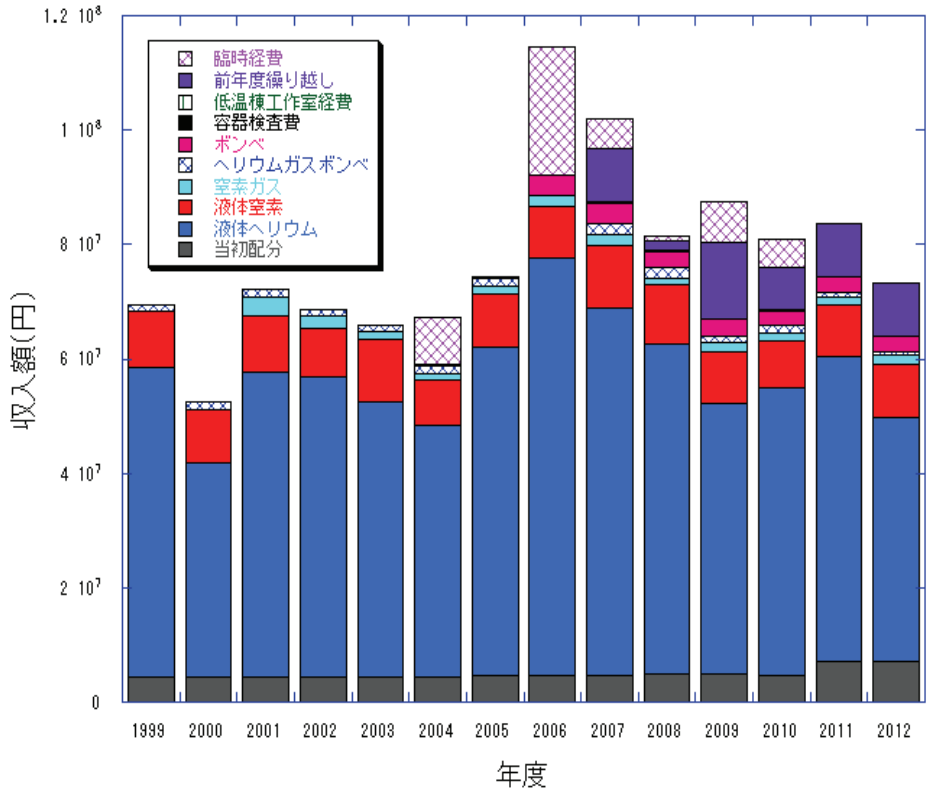


図3. 収入の推移

2　日常運転において改善した点

（ア）トランスファーチューブの詰まり解消

2011 年の液化機更新直後より，トランスファーチューブがしばしば充填時に詰まる現象が起こっていたが，時間経過で解消することもあり原因不明として放置していた．トランスファーチューブの各所に設置してある温度計の変化などから，主に詰まっていた場所は回収バルブ部と推察されるが，2012 年 10 月に汲み出しをメインに行って貰っている担当者が交替した際，初心者だとこの問題に上手に対応できなかった事もあり根本的に解決すべく，トランスファーチューブのリークチェックを行った．結果，図 4 の赤丸で囲んである接続部数箇所からリークが確認できたので増し締めを行った所，空気の吸い込みが無くなり問題が解消した．我々もかなりウッカリしていたのだが，納入業者も納期の問題もあり現地組み立てが行われている箇所のリークチェックを行っていなかった様である．また，このように現地組み立てが行われている構造をもつトランスファーチューブでは，納品後に必ずリークチェックを行うことが重要だと改めて感じた．場合によっては仕様書に明記することも必要かもしれない．

図4. 汲出用トランスファーチューブ

（イ）液化機 2 号機(L280)のコールドボックスの真空低下解消

TCF50 運転の経験上，コールドボックスの真空度は低下する物だと思い込んで放置していたのだが，更新から 2 年ほど経過したある日，ふとしたことでロータリーポンプを確認したら油量確認用レベルゲージの窓が錆らしき物でべっとりと覆われ酷い事になっていた．慌ててポンプを OH に出したところ内部に酷い錆が発生していた（図 5 : 左）. TCF50 時代にはこのような事が起こらなかったので，ポンプが原因では？と思い，ポンプを OH に出した後，再設置して経過観察し錆の原因を探っていったところ，OH に出した業者より「ポンプではなくやはり液化機に原因があるのでは?」との指摘を受け本格的にチェックを行ったところ，リークが見つかりコールドボックスの真空低下解消に繋がった．なお，リークチェックは土屋技術専門職員と小池酸素の木下氏でリークディテクタを使って行い，図 5 の温度計（TI3130,TI3155）の接続ポートからリークを確認した．ポートが立っているフランジ一式を交換し，このリーク問題は解消された．

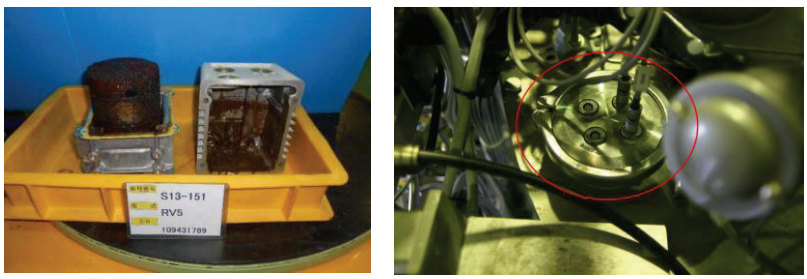


図5. OH に出したポンプ（左）とリークしたフランジ（右）

（ウ）回収用圧縮機のトラブル

こちらも更新して暫く立った頃，2012 年 4 月頃より回収用圧縮機#1 の起動盤のブレーカーが起動直後（スターデルタ切り替え時）に落ちるという現象が頻発した．この回収用圧縮機は六本木より移設した物（1994 年の液化機更新時に同時に更新）でトラブル発生時は設置より 18 年が経過していた．詳細については次回の報告に譲るが，なかなか原因を見つけることができず，最終的に残ったモーターの交換を行ったところトラブルが解消した．あまり聞いたことはないが，長期間使用していると今回の様なトラブルも起きると思われる．

図6. 回収用圧縮機のモーター
手前：旧，奥：新

（エ）変更許可申請した点

液化機更新後，法令上申請の必要な部分では，カードル回収充填口追加と容器置き場の拡大を行った．液化設備と構内道路を挟んだ場所にヘリウムガス容器置き場（以下容器置場 B）が設置されている．今までは容器置 B にカードルが置かれた場合，埋設溝にフレキシブルホースを入れて使用していたが，KHK の講習会で啓発を受け，ステンレス配管のしっかりした物に置き換えた．また，同時にバルブスタンドも追加し，カードルをより安全に受け入れできることが可能になった．また，上記のように容器置場 B を整備したところ，ヘリウム不足が深刻になり外部機関支援等でローダーによってヘリウムガスを受け入れる必要が出てきたことから，貯蔵量をローダーも受入可能なように増量した．物理的変更は伴わない為，軽微変更ですむかと思っていたが，想定外にローダーが長く，既存の容器置き場よりはみ出てしまい，最終的に変更許可申請になり完成検査も行った．これで更に万全な体制が整ったので外部機関支援もスムーズに行えるものと期待される．

3　まとめ

数字で俯瞰すると良い点も悪い点も明確になることから運営への反映が行いやすく，ユーザーの理解も得やすい．反面，怠慢や手抜きはすぐばれてしまうので時に厳しい作業でもあるが，少人数での効率的な運営には欠かせないことなので継続して行っていきたい．

日常業務上では，液化システムの重大なトラブルは電装系に起因する事が多い気がする．特に電装系の経年劣化によるトラブルは，機械系のトラブルと違って破損や音や臭いがしないので原因探求が難しい．しかし，1999 年の柏移転から今年で 15 年経過していることもあり，今後の装置の老朽化に備えて早めに設備の電装系の更新を行っていきたいと考えている．

引き続きヘリウム不足が懸念されている日本国内では，ヘリウムを液化できる施設は益々非常に重要な責務を負う事になると考えられる．そのような観点からも液化室を効率的に運営することは重要になってくると思われる．我々の液化室の各種データが他機関での効率的な運営の参考になれば幸いである．

4　参考文献等

[1] 東京大学 物性研究所 低温液化室 web サイト　http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/cryogenic/
[2] ヘリウム回収率の計算方法　土屋 光 / 2002 年度 東京大学 技術発表会

液体ヘリウム容器加圧用バルーンの改良

○楠田　敏之

京都大学　化学研究所

概要

液体ヘリウムを実験装置にトランスファーを行なう際に使用するゴム製のバルーンを改良し，小さな力でヘリウムボンベを使った場合に近い圧力まで加圧出来るよう改良を行った．

1　はじめに

液体ヘリウムを実験装置にトランスファーを行なう際に 100 リットルなどの小口容器を加圧する必要がある．この加圧には大きく分けてヘリウムボンベを使う方法とゴム製のバルーンを使う方法がある．

ヘリウムボンベを使う方法は作業が楽な反面慣れないと小口容器が空になっても気が付かずに加圧を続けてしまい，実験装置内の液体ヘリウムを蒸発させてしまう恐れがある．最悪の場合には超伝導マグネットのクエンチを引き起こす事態になる可能性がある．

バルーンを使う方法は直径 30cm 程度のバルーンを使い，膨らましたあと萎むまで待つ操作を繰り返す方法と，直径 20cm 程度の小さめのバルーンを使い圧力を保ちながら加圧操作を続ける方法がある．前者は加圧圧力が低いためトランスファーに時間がかかり，後者はボンベでの加圧に近い圧力まで加圧出来るため比較的短い時間でトランスファーを行うことができる．

筆者は後者の方法を勧めているが，欠点として小口容器の内圧の上昇にともない写真 1 に示すようにバルーンが大きく膨らみ，これを押しつぶして加圧するのにかなりの力，腕力を必要とする．また，バルーンが大きく膨らむことによりゴムが伸びて劣化する．

写真1

今回，加圧に要する力が小さくなりさらにバルーンの劣化も少なくなることで液体ヘリウムユーザーの利便性の向上に寄与する改良が出来たので報告する．

2　バルーンの加工

バルーンが大きく膨らみこれを押しつぶすために大きな力が必要になるので，バルーンが大きく膨らまないようにする対策を考えた．最初に 10cm×20cm 程度の大きさの布製の袋に入れたが，これは強度不足のため写真 2 のようにすぐに圧力で縫い目から裂けた．次に革製の袋などの丈夫な袋を探したが良い材料が見つからなかった．その後改良を続ける中で，バルーンを二つ折りにして使用することにより小さな力で 0.03 MPa まで簡単に加圧出来ることがわかった．以後この二つ折りを基本と

写真2

写真 3

写真3

写真 5

写真 6

写真 7

写真 8

して改良を行った．　この二つ折りの形状を保ち圧力でバルーンが膨らまないようにする方法として手近にある材料で丈夫な袋状のものを探していたところ，軍手の手の甲が入る部分が丁度良い大きさであることに気がつき，軍手を使ったところ良い結果が得られた．バルーンを二つ折りにして軍手に納めるだけではバルーンが膨らんだ時にはみ出してしまう．そこで，圧力がかかっても形状を保つようにするために縫製を写真 3 から写真 7 のように行なった．縫製には圧力に耐える強度を確保するために強度の高い糸を使用する必要からレザークラフト用の糸とステッチャーを使用した．

写真 4 バルーンを二つ折りにして軍手の中に入れる

写真 5 軍手を折り返して中指と薬指に当たる部分を結ぶ

写真 6 人差し指と小指に当たる部分を重ね手首側と縫い合わせる

写真 7 中指と薬指の先端をそれぞれ人差し指と小指に当たる部分に縫い合わせて止める

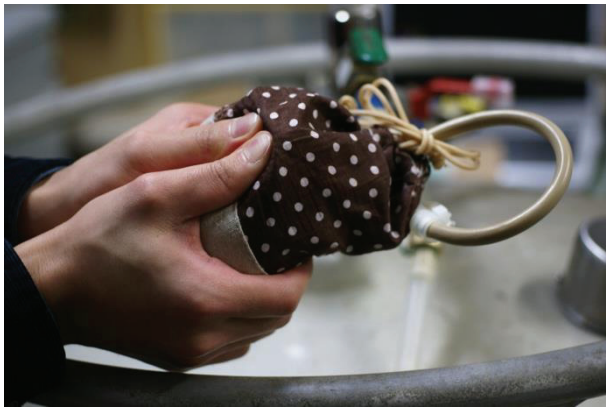
従来は大きく膨らんだバルーンを両腕や脇にはさんで押しつぶすなど大きな力を必要としたが，この軍手

を使った改良により握力だけで液体ヘリウム 100 リットル容器を容易に 0.03 MPa まで加圧出来るようになり，液体ヘリウムのトランスファーの作業に必要だった力は写真 8 に示すように腕力から握力へと小さな力で可能となった．

写真 9

写真 10

3　加工の簡易化



次に，軍手をステッチャーで縫製する方法では製作に手間がかかり一般的ではないことから，広く使ってもらえるように簡易に製作出来る方法とした．

二つ折りの状態で軍手に入れたバルーンを市販の布製の 500ml ペットボトルのカバーに収めた．この方法は作り易く良い結果が得られたが，軍手を縫い合わせていないためにバルーンが徐々に二つ折りが解けてくる．この対策として軍手を縫う必要があるがレザークラフト用のステッチャーでは一般的ではなく裁縫用の糸では強度が低いと考え比較的強度のある凧糸を使った．ペットボトルカバーが補強材になるため前述の軍手単独で使用するまでの強度は必要ないことから凧糸が使える太い縫い針で写真 9 のように必要最小限縫い合わせた．これをペットボトルのカバーに収めた状態を写真 10 に示す．

4　結果

この結果，液体ヘリウムトランスファー時の加圧に使用するバルーンを握力のみの小さな力で 0.03 MPa まで加圧出来ように改良することが出来た．また，バルーンが大きく膨らまない状態で使用できるため劣化も少なくすることが出来た．従来はバルーンを使用するとヘリウムボンベを使うよりも低い圧力までしか加圧出来ないことからトランスファーに時間がかかっていたが，この改良でヘリウムボンベを使用して加圧した場合と同等の 0.03 MPa まで安定して加圧出来るようになり，ボンベからの加圧と同等の時間でトランスファーが可能となり，労力の軽減と時間短縮が出来た．

加工の簡易化の項で作り易くするためにペットボトルカバーを使用したが，軍手を縫い合わせたものの方が使いやすかった．これは軍手の生地が適度に伸びるためであると思われる．柔軟性のあるカバーがあれば写真 7 の軍手を縫い合わせた場合に近い使い勝手になると思われる．

理学部サブセンター自動監視設備の設置

○志村　芽衣[A)]，戸田　亮[A)]，寺岡　総一郎[A)]，八幡　和志[B)]

[A)] 東京大学　低温センター

[B)] 東京大学　理学部技術部 機器実習・分析系 物理学専攻配置

概要

低温センターでは，別棟に設置されている理学部サブセンターヘリウム回収設備の保守点検を行っている．従来は，技術職員が 1 日 3 回ウェブカメラで日常点検を行い，異常の有無をチェックしてきたが，この方法では，異常を迅速に発見したり，運転履歴を残したりすることができない．このため，異常への対処が遅れることや，異常の発生原因を特定できないことがあった．遠隔自動監視システムの導入により，異常時すぐにエラーを発報することができれば，早急な対処が可能となる．また，日々の運転データを蓄積することができれば，異常発生の原因を解明することや，異常を未然に防止することも可能となる．本発表では，理学部サブセンター既設設備への自動監視装置の設置について報告する．

1　理学部サブセンター　点検の現状

現在，理学部サブセンターは低温センターで保守点検する設備となっている．サブセンターには理学系研究室で使用されたヘリウムガス（1 日あたりおよそ 100 m^3）を回収するため，流量計，ガスバッグ，圧縮機，純度計等が設置されている．低温センター技術職員は，毎日朝・昼・夕の 1 日 3 回，ウェブカメラを用いて，ヘリウムガスの純度や設備の運転状態，異常の有無をチェックしている．異常がある場合には，徒歩 5 分ほど離れたサブセンターに出向いて原因を突き止め復旧させるが，異常発生のタイミングによっては発見が遅れてしまい，被害が大きくなってしまうことがある．また，運転の詳しい履歴を記録するシステムがないため，原因の解明が困難になることもある．そこで，理学部サブセンターに遠隔自動監視装置を設置し，運転状態の記録とエラー発生時の即時連絡が可能なシステムを構築することにした．

2　理学部サブセンター　自動監視システムの構築

理学部サブセンターの自動監視システムでチェックする項目を表 1 に示す．システム全体の概要図と理学部サブセンターフロー図を図 1(a)，(b) に示す．No.1-12 までのチェック項目は，既存の計器で測定／判定可能である．No.13-18 のチェック項目については，新たに湿度センサ（HIOKI），CMOS レーザーアプリセンサ（KEYENCE），テフロン被覆型熱電対[T]（山里産業），漏水検知帯および漏水検出器（OMRON）を設置することで対応した．各データを記録し，また必要に応じてエラーの発報を行うため，これらの計器の出力を，時系列での電圧・温度湿度のデータを測定し記録できる計測器（メモリハイロガーLR8400（HIOKI））に接続した．

新設の各機器は，既存の制御盤の下の空間に，新たに（600×500×250 mm）のサイズの制御盤を設置し，その中に収納した（図 2）．新設のセンサは，測定対象に応じて適切な位置に設置した．設置状況を以下に示す．湿度センサは，酸素濃度計近くの壁に貼付した（図 3）．ガスバッグレベルセンサ（CMOS レーザーアプリセンサ）については，外枠の隅に固定して，ガスバッグの上限・下限に合わせてレーザーセンサのリミットを設定し，高さを監視できるようにした（図 4）．温度測定用の熱電対は，圧縮機本体ヘッド・シリンダ部

の接合面付近および圧縮機のモーター付近に貼付した（図 5）．漏水検知帯は，①圧縮機本体ヘッド・シリンダ部の接合面付近，②圧縮機の冷却水配管継手（入口側），③圧縮機の冷却水配管継手（出口側）の 3 カ所に，漏水センサは，④流量計バルブの下，⑤冷却水配管の下の 2 カ所に設置した．一番漏水の可能性が高い①に巻きつけたセンサについては単独で，比較的漏水の可能性が低い②～⑤の 4 つのセンサについては並列で漏水が検出されるように結線した（①，②については図 5 を参照）．

表 1 に挙げたチェック項目について，メモリハイロガー画面の表示例を図 6.に示す．各項目について，測定機器のアナログ出力読込みが確認できた．温度，湿度以外のデータは，出力された電圧をスケーリングして各々の測定単位に変換した．ヘリウム純度やガス流量，サージタンク圧力や湿度，ガスバッグの高さや圧縮機温度，酸素濃度については，時系列での連続的なデータ収集が可能となった．また，圧縮機の起動状態や漏水については，電圧の変化により，起動/停止，漏水あり/なしがそれぞれ確認できた．さらに，純度低下やサージタンク圧力の異常上昇，ガスバッグの高さについては，設定値の範囲を超えた場合に，また，パネルエラーや漏水についてはエラーランプ点灯や漏水感知がされた場合に警報が発報されるように設定した．

表 1. チェック項目

No.	測定項目		目的	単位
1	回収ガス純度		回収純度評価	[V]→[%]
2	回収ガス流量(瞬時)		回収流量評価	[V]→[m^3/h]
3	サージタンク圧力		保安および 回収装置許容量評価	[V]→[MPa]
4	圧縮機起動		圧縮機運転状態の評価	[V]→ON/OFF
5	警報 (既設制御盤)	過電流	運転異常検知	
6		断水		
7		吸入圧低下		
8		ホルダー満杯		
9		純度低下		
10		吐出温度上昇		
11		吐出圧上昇		
12	酸素濃度(部屋)		保安	[V]→[%]
13	湿度(部屋)		保安	[%]
14	ガスバック　　レベルセンサー		保安および 回収装置許容量評価	[V]→[%]
15	温度	圧縮機本体ヘッド・シリンダ部の接合面	保安	[℃]
16		圧縮機 モーター部		
17	漏水	圧縮機本体ヘッド・シリンダ部の接合面	保安	[V]→漏水あり/なし
18		圧縮機 冷却水ホース、流量計下、冷却水配管下		

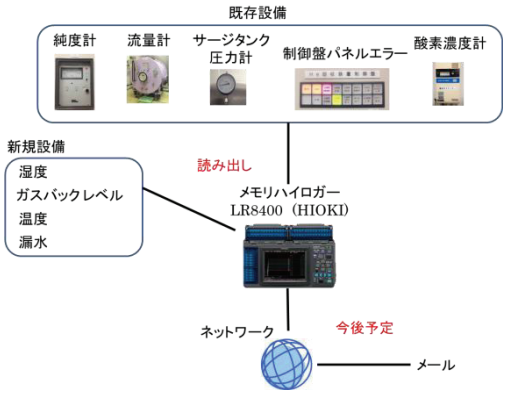


図 1(a). システム概要図

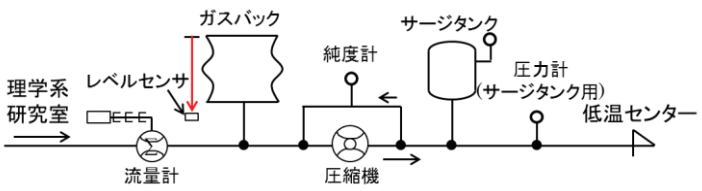


図 1(b). 理学部サブセンター フロー図

図 2. 新規制御盤（円内）と既存の制御盤

図 3. 湿度センサ（円内）

図 4. ガスバッグレベルセンサ（円内 A）と反射板（円内 B）

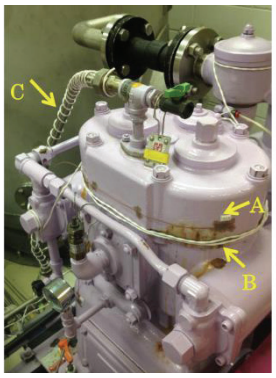


図 5. 熱電対(A)と漏水検知帯(B,C)

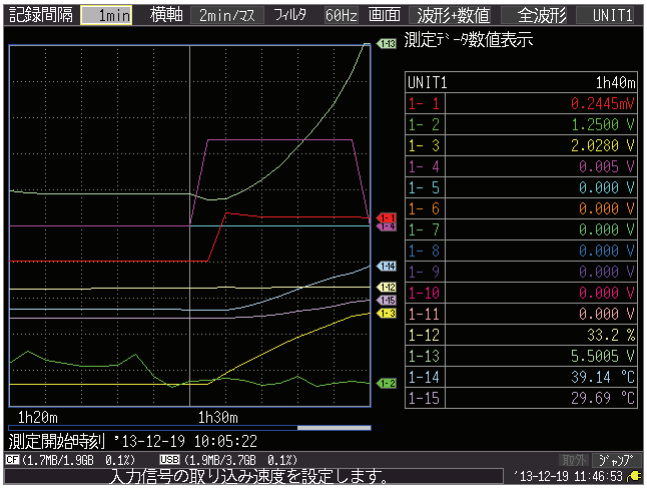


図 6. メモリハイロガー画面の表示例

3　まとめと今後の展開

今回，理学部サブセンターに新たに自動監視装置を設置した．ヘリウムガス回収設備の運転状態を常時記録し，運転状況を分析することが可能となった．さらに，測定値を設定基準値と比較し，エラー発報できることを確認した．今後，これらの警報が発報された際に，メール送信によって緊急連絡できるシステムを構築する予定である．また，回収率向上の観点からも本システムは有用である．たとえば，ガスバッグ，圧縮機，サージタンク圧力の各データは，クエンチのような不測の事態や複数の研究室でのトランスファが重複した場合など，一時的に大量の蒸発ガスが発生した場合に大気放出することなく回収可能な量について，定量的な指針を与えてくれる．分析結果に基づき，設備の強化や運用ルールの策定を行うことで，ヘリウムガスの漏洩を未然に防ぐことが可能になる．

現在，低温センターが保守点検しているセンター外のヘリウムガス回収設備は，理学部サブセンターの他に，工学部サブセンター，薬学部サブセンターがある．今後，これらの施設にも同様のシステムを導入することにより，保安度とヘリウムガス回収率の一層の向上に努めたいと考えている．

LHD 低温システムの運転実績

○森内貞智，大場恒揮，鷹見重幸，野口博基，三戸利行

自然科学研究機構　核融合科学研究所

概要

大型ヘリカル装置（LHD）は，超伝導ヘリカルコイル，超伝導ポロイダルコイル，超伝導バスライン等で構成される大型超伝導システムを冷凍能力 9kW@4.5K のヘリウム液化冷凍機で冷却する世界最大級の核融合プラズマ実験装置である．この大型超伝導冷却システムである LHD 低温システムは，過去 15 年間で 16 回の長期連続運転を達成し，LHD のプラズマ実験に支障をきたすような大きなトラブルも無く，安定な運転を継続してきた．LHD 低温システムの運転実績やこれまでに発生したトラブル事例等について報告する．

1　LHD 低温システムの構成

LHD 低温システムの概略フローを図 1 に示す．LHD 低温システムは，寒冷を発生・回収するヘリウム液化冷凍装置，被冷却体である超伝導ヘリカルコイル，超伝導ポロイダルコイル，電磁力支持構造物，80K 輻射シールド，超伝導バスラインおよび電流リード，各熱負荷体への寒冷配分を制御するバルブボックス等で構成される．ヘリカルコイルは液体ヘリウムの浸漬冷却，ポロイダルコイルは超臨界圧ヘリウムの強制冷却，電磁力支持構造物と超伝導バスラインは液体ヘリウムの 2 相流強制冷却によって冷却される．これらの寒冷に加え，80K 輻射シールドへの冷却ヘリウムガスも同時に 1 台のヘリウム液化冷凍装置から供給および回収される．このように，LHD 低温システムはヘリウム液化冷凍装置と被冷却体が密接に結びついた一筆書きのフローとなっており，各装置間の連携をとった統合した操作が必要な複雑なシステムとなっている．

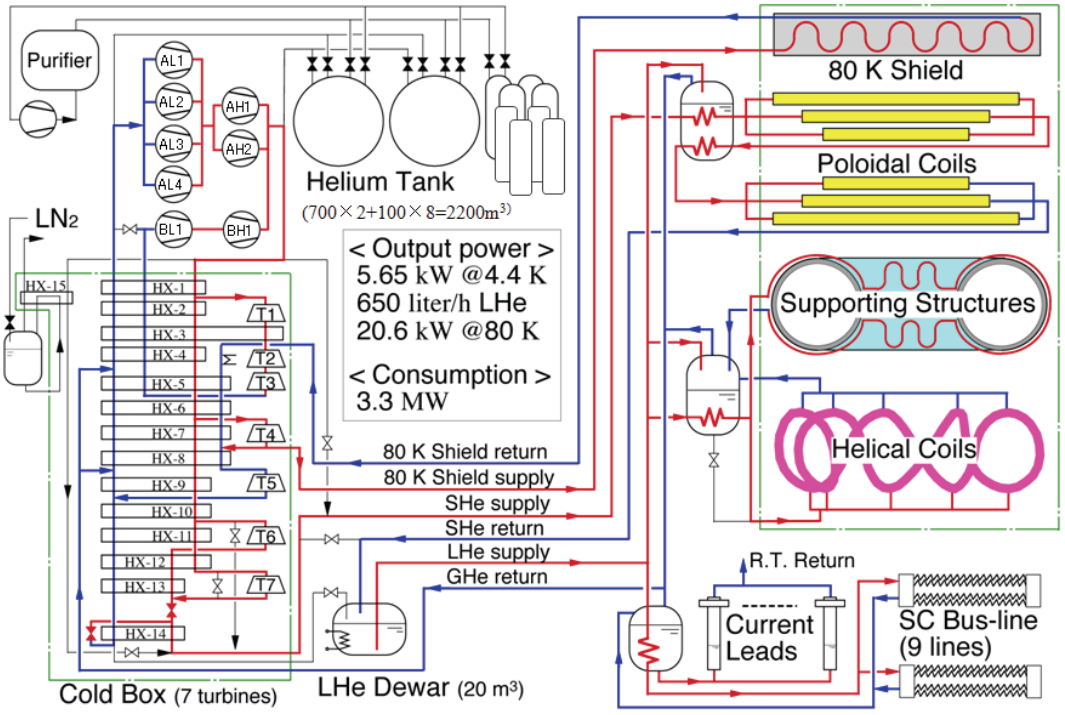


図 1. LHD 低温システム概略フロー

2　LHD 低温システムの運転実績

2.1　運転経過

ヘリウム液化冷凍機単体試運転を経て，1998 年 2 月に LHD 低温システムとして第 1 サイクルの本格運転を開始し，2012 年 12 月末に第 16 サイクルの運転を完了した．図 2,3 に LHD 低温システムの第 15 サイクル予冷・加温運転の温度推移を，図 4 に 15 年間の運転時間履歴とその 1 例として第 15 サイクルでの運転経過を示す．LHD 低温システムは年に 1 回の運転が行われる．まず予冷運転前に外部精製器を使用してシステム系内のヘリウムガス中の不純物濃度が分析計の検出感度である 1 ppm 程度となるまで精製運転を行ったのち，超伝導コイル等の熱ひずみを低減させるため各部の温度差を 50 度未満に制御する予冷プログラムにより寒冷流量配分を行いつつ約 1 ヶ月かけて冷却および加温運転を行う．これまでほぼ要求された LHD 実験スケジュール通りに運転してきた．精製・予冷・定常・加温の各運転工程を含め各運転サイクルで 5,000 時間以上の長期連続運転を達成し，超伝導コイル等を超伝導状態に保った定常運転では 4,000 時間におよぶ安定なプラズマ実験環境を提供してきた．第 1 サイクル運転開始から第 16 サイクル運転完了までの LHD 低温システムの積算運転時間は 71,020 時間に達し，年間のおよそ 2/3 となる高い稼働率を実現している．

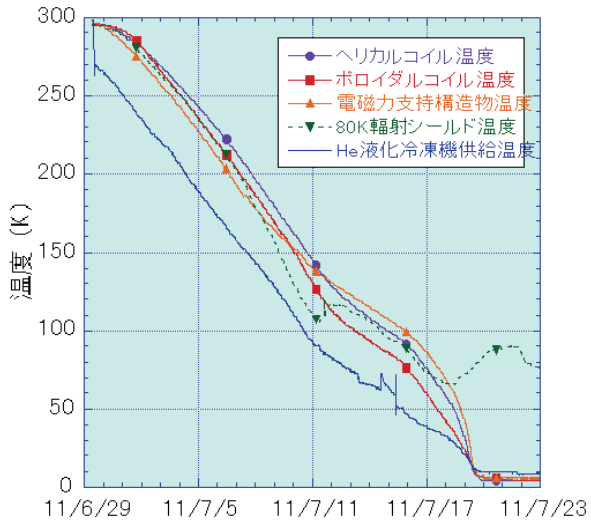


図 2. 予冷曲線

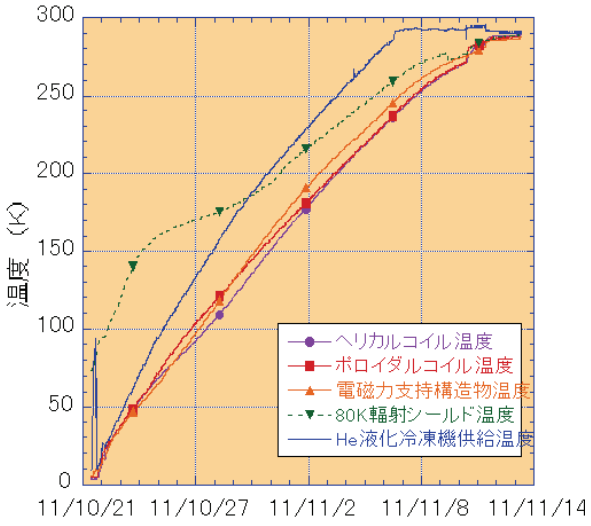
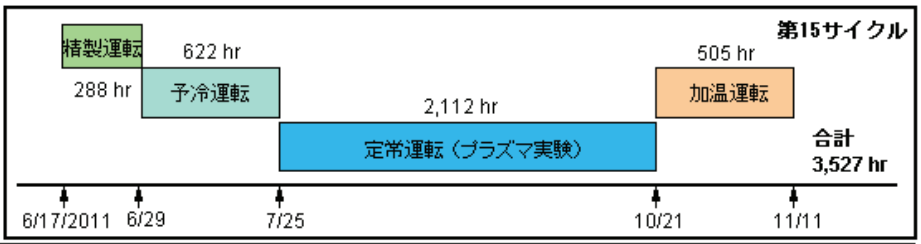


図 3. 加温曲線



運転サイクル（年度）	1st (1997-8)	2nd (1998)	3rd (1999)	4th (2000)	5th (2001)	6th (2002)	7th (2003)	8th (2004)	9th (2005)	10th (2006)
積算運転時間	2,895	3,522	5,361	5,016	5,294	4,920	5,001	4,814	5,035	5,037
定常運転時間	1,350	2,359	3,965	3,538	3,791	3,366	3,446	3,216	3,470	3,436

11th (2007)	12th (2008)	13th (2009)	14th (2010)	**15th (2011)**	16th (2012)	合計
5,184	3,856	3,688	4,128	**3,527**	3,742	71,020
3,607	2,272	2,152	2,591	2,112	1,272	46,013

図 4. LHD 低温システム運転経過と実績

2.2　稼働率

表 1 に各運転サイクルで機器故障および停電等の外部要因によってシステムが停止するに至ったトラブルの件数とその停止時間，（運転時間－停止時間）／（運転時間）で定義される稼働率を示す．トラブルの原因や状況またはその時の運転状態により停止時間や復旧時間への影響は大きく異なるが，第 10 サイクルと第 15 サイクルでは稼働率 100%となり，全体でも 99.0 %と高い稼働率を達成した．

表 2 に LHD 低温システムが停止に至ったトラブルの件数と停止時間と 1 件当たりの平均停止時間を要因別に示す．15 年間の運転でシステム停止に至るトラブルが合計 27 件発生し，そのうち計測／制御系の不具合が 11 件，圧縮機に関する故障によるものが 5 件，低温システムとしては外的要因である落雷等による電力損失が 5 件と冷却水に関する不具合が 4 件，操作ミスが 1 件となっている．いずれも非常処理用自動制御プログラムによる保護動作や故障箇所の迅速な修理処置等により，機器破損や不純物混入等の 2 次的被害もなく短時間での運転再開が可能となった．一方，第 16 サイクルで発生した超伝導コイルの絶縁部劣化によるヘリウムガスリークの補修作業のための停止時間を除き，システム停止に至った不具合の停止時間の約 7 割が計測／制御系および圧縮機によるものであり，停止の主要因となっていることが分かる．さらに，圧縮機に関する故障によるものが 1 件当たりの停止時間としては最も長くなる結果となっており，ヘリウム循環圧縮機の故障内容によっては修理および復旧に時間を要し，LHD 低温システムの稼働率を大きく低下させることとなる．

表 1. LHD 低温システム稼働率

サイクル	件数	停止時間	稼働率
1st	4 (2)	138 hr	95.4 %
2nd	2 (0)	4.8 hr	99.8 %
3rd	3 (1)	12.4 hr	99.7 %
4th	4 (0)	37.2 hr	99.3 %
5th	1 (1)	0.5 hr	99.9 %
6th	1 (0)	0.1 hr	99.9 %
7th	2 (1)	64.5 hr	98.7 %
8th	1 (0)	54.1 hr	98.8 %
9th	1 (1)	2.3 hr	99.9 %
10th	0 (0)	0 hr	100 %
11th	2 (1)	23.4 hr	99.5 %
12th	1 (0)	0.2 hr	99.9 %
13th	2 (2)	7 hr	99.8 %
14th	2 (1)	228.7 hr	94.7 %
15th	0 (0)	0 hr	100 %
16th	1 (0)	169 hr	95.7 %
合計	27 (10)	742.2 hr	99.0 %

（ ）は定常冷却中における件数

表 2. システム停止に至った件数と停止時間

要因	件数（件）	停止時間（hr）	平均時間（hr）
計測/制御系	11	287.4	26.1
圧縮機	5	268.2	53.6
停電/瞬停	5	10.0	2.0
冷却水	4	7.5	1.9
誤操作	1	0.1	0.1
超伝導ｺｲﾙ	1	169.0	169.0
合計	27	742.2	27.5

2.3　故障事例

システム停止に至ったトラブルの内，最も長い修理時間を要した圧縮機の故障として，第 14 サイクル精製運転中にヘリウム循環圧縮機 A 系高段 1 号機のスラストベアリングの損傷が発生した．LHD 低温システムの精製運転を中断し，ヘリウム循環圧縮機を全台停止して該当機のベアリング交換やローター補修等を行うことで 228 時間のシステム停止となったが，運転中定期的に行っている圧縮機の振動測定により，異常な振動値や振動解析等から運転状態の不具合を早期に発見し，迅速な修理処置を行うことによって機器の重大な損傷を未然に防ぎ，最短での運転復旧を実現することができた．図 6 に第 12 サイクルから第 14 サイクルまでのヘリウム循環圧縮機 A 系高段 1 号機の圧縮機各部の振動測定値の 1 例を示す．第 12，13 サイクルでは，圧縮機各部の振動値は管理値 40 μ m 以下のところ 20 μ m 未満であったが，第 14 サイクル精製運転時の振動値は垂直方向で最大 200 μ m を超える高い数値となり，さらに加速度についてはレンジオーバーとなった．この振動測定値および振動特性の解析結果や運転状態から，ベアリングを中心とした圧縮機内部での異常が発生したと判断し，早期の修理作業への決断に至った．

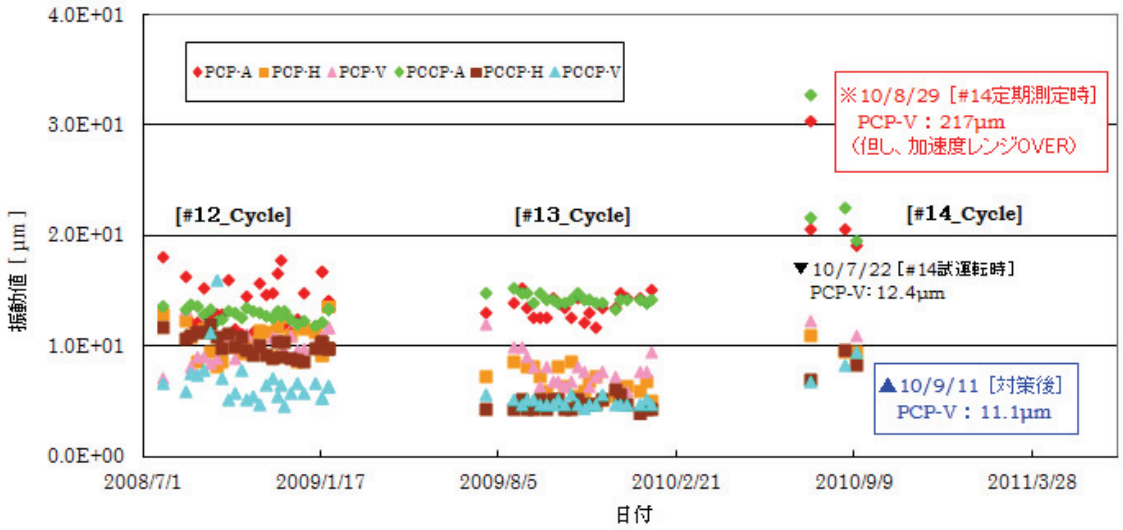


図 6. ヘリウム循環圧縮機 A 系高段 1 号機の振動測定値

2.4　圧縮機の信頼性向上

LHD 低温システムの更なる信頼性の向上を目的として，8 台構成のヘリウム循環圧縮機ユニットに低段用および高段用冗長化圧縮機を 1 台ずつ追加することにより，8 台の内のどの 1 台が故障してもバックアップ可能な冗長化機能を追加した．図 7 に LHD 低温システムのヘリウム循環圧縮機ユニットの概略の圧縮機構成図を示す．接点信号およびバルブの切替操作により，任意の圧縮機と切り替えて運転することが可能となる．第 16 サイクル加温運転時に圧縮機の故障を想定した冗長化圧縮機の運転を行い，吸入／吐出圧力等に変化のないバックアップ運転が可能であることを確認した．

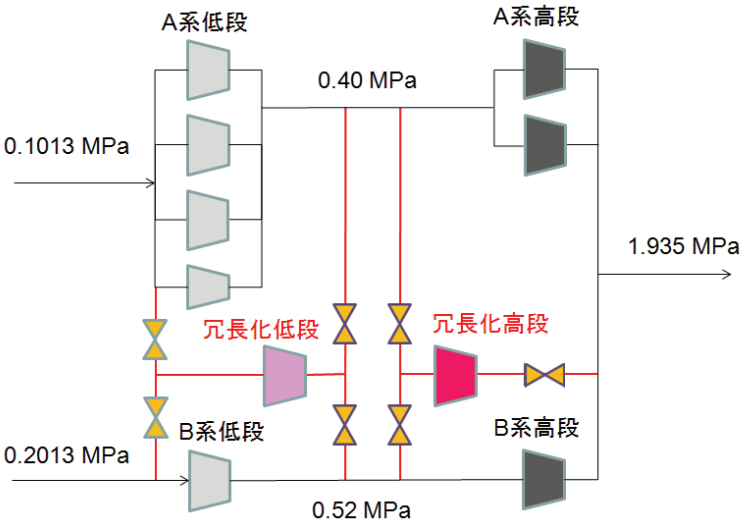


図 7. ヘリウム循環圧縮機ユニット概略構成図

また，圧縮機の定期的な手動による振動測定以外に，ヘリウム循環圧縮機の異常振動をさらに早期に発見するために常時振動値の傾向を制御室で監視できるシステムも整備している．

3　まとめ

LHD 低温システムは 15 年間で 16 回の長期連続運転を行い，過去の故障経験の蓄積に基づく適切な点検・管理および改良・改善を行ってきた結果，総運転時間が 71,000 時間を超えると共に稼働率 99.0%の高い信頼性を達成した．また，新たな装置の追加改造にも対応しつつ，その要求された運転工程に応じた安定なプラズマ実験環境を提供してきた．LHD 低温システムとして 15 年を経過している現在，経年劣化と考えられる様々な不具合等に対し，長期連続運転に対するシステムの信頼性を向上させるための対策を進めている．

ヘリウム液化機・内部精製器の設定と精製ガス中の不純物濃度

○戸田 亮，加茂 由貴，阿部 美玲

東京大学　低温センター

概要

回収ヘリウムガスには，様々な原因により混入した不純物が含まれている．不純物は液化効率低下や液化機故障の原因となるため，低温センターのヘリウム液化装置には，不純物を取り除くための内部精製器が備えられている．精製効率や精製ガス中の不純物濃度は，回収ガスの純度や内部精製器制御の条件設定に依存する．このため，効率よく運用するためには，最適な精製運転が行われるよう設定を調整する必要がある．ここでは，平成 23 年度に発生した液化効率低下を解決するために行った内部精製器の設定調整と精製ガスの不純物濃度分析，また平成 24 年度に行った回収ガスの純度変化に伴う設定の再調整について報告する．

1　背景

低温センターでは，使用後のヘリウムガスを回収し，再液化してユーザーに提供している．回収したヘリウムガスには，回収の過程で混入した不純物（主に空気）が含まれている．液化機本体に不純物が侵入すると，液化効率の低下や液化機の故障を引き起こす．このため，低温センターの液化装置（Linde 社，L280）には内部精製器が備えられており，これを用いてヘリウムガス中の不純物を除去（精製）し，純粋なヘリウムガスを液化機本体に供給する仕組みとなっている．

2　内部精製器

図 1 に内部精製器のフロー図を示す．内部精製器の運転過程には，精製器を精製に必要な温度まで冷却する冷却過程，実際に精製を行う精製過程，精製器内に固着した不純物を昇温して取り除く再生過程がある．精製ガスは精製過程でのみ作られるため，液化機本体へ供給される精製ガスの量は，内部精製器がどの運転過程にあるかで大きく異なる．この影響を吸収して連続的に液化運転を行うために，液化機本体側には必要な容量をもつバッファタンクが備えられている．

冷却過程では，図 1 中に青色で示した内部精製器冷却用配管に，液化機本体で生成されている低温のヘリウムガスを流し熱交換器を冷却する．熱交換器だけでなく精製器全体を冷やす必要があるため，同時に内部精製用ライン（図 1 中赤色）を通して液化機本体側からガスホルダーへと少量のヘリウムガスを流し，熱交換させる．冷却力は精製器冷却バルブ（CV3430）の開度に依存する．精製器が十分冷却されると精製過程に移行する．精製過程では，回収ガス中の不純物が液体空気貯槽に分離され，PV3415 を通じて大気放出される．液体として分離できなかった微量の不純物は，精製器の冷端部分（図 1 中熱交換器 HE(4) ）までの配管壁に順次固着する．精製中は，精製器の冷端部分の温度（TI3475 でモニターされる）が設定値に保たれるよう，冷却バルブがコントロールされる．精製器が適切な温度に維持されていれば，冷端部を通り過ぎた気体は純ヘリウムガスになっている．精製器内の配管に不純物が蓄積して入口と内部の差圧（圧力は PI3401 と PI3445 でモニター）が設定値以上になるか，精製ガスが十分バッファタンクに貯蔵されこの圧力が設定値以上になると，再生過程に移行する．再生過程では，冷却バルブを閉じ，液化機本体側から室温の純ヘリウムガスを精製器内に流して昇温を行う．このガスの大半はバイパスバルブ（PV3435）を通して液化機本体に戻り，一

部がガスホルダーへと流れる．精製器の温度があらかじめ設定されている温度（不純物が十分気化する温度）まで上昇すると再生過程は終了し，冷却過程へと移行する．液化運転中，内部精製器ではこのサイクルを繰り返し，液化の原料となる回収ガスの精製を行っている．

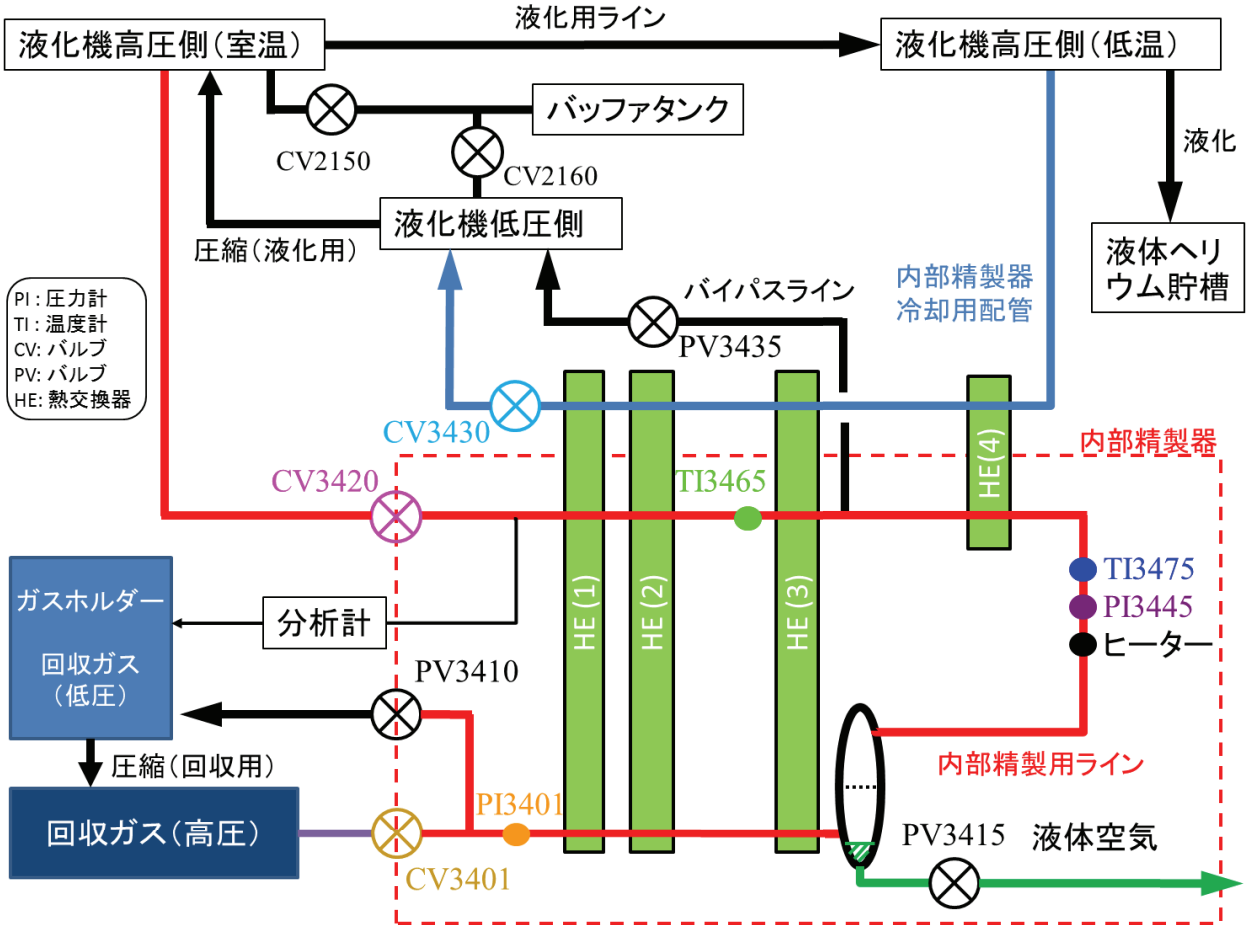


図 1. 内部精製器のフロー図

3　内部精製器の設定調整と精製ガスの不純物濃度分析

平成 23 年度のはじめ，液化装置の時間あたりの液化量（液化効率）が日々大きく変動するというトラブルが発生した．液化系統中の不純物を取り除く真空引きを実施しても，1 週間程度という非常に短い期間で同じ状態に陥ってしまうことから，回収ガス（純度 96-99%）中に含まれる不純物が内部精製器で十分取り切れず，液化機本体内に継続的に混入しているものと推測された．そこで，精製ガスの不純物濃度を分析するため，精製ガス出口バルブ（CV3420）付近の分岐に一時的に分析計（Linde 社，Multi-Component Detector WE34DM-3）を接続し，正常に不純物が取り除かれているかを確かめるとともに，最適な運転が行えるよう内部精製器の設定を変更することにした．

従来の運転条件（TI3475 の制御目標値が 30 K）における運転状態と，検出された不純物濃度を図 2 に示す．CV3401 が開き，PI3401 および PI3445 が 2.5 MPa 程度以上の圧力となっているところが精製過程，CV3401 および CV3430 が閉じているところが再生過程，CV3430 が再度開いているところが冷却過程である．液化機本体側から純粋なヘリウムガスが供給されている冷却過程（図中 E）が最も不純物濃度が少ない状態である．これに比べ，精製中（図中 B）の不純物濃度は継続的にやや高く，十分不純物が除去できていないことがわかる．また，精製開始後（図中 A），再生開始時（図中 C），再生中（図中 D）に過渡的，あるいは突発的な不純物濃度の増大が検出されている．

精製開始後の冷却バルブ開度，温度，不純物濃度の挙動から，精製器の制御目標温度が高すぎるものと考え，目標値を 12 K に変更して運転を行った結果が図 3 である．この設定変更の結果，これまで見られていた A のピークはなくなり，C のピークも大きく抑制された．精製中の不純物濃度 (B) も冷却中の不純物濃度 (E) とほぼ変わらない水準まで低下しており，不純物を十分除去できていることがわかる．しかし，再生中に見られたピーク（D）は，従来の設定の場合よりも低いものの長く続いている．精製器内に蓄積された不純物は再生中に順次気化し，液化機本体側からの純ヘリウムガスによってガスホルダー側へと押し流される機構になっているが，不純物の蒸発量が多い場合，これを押し流すための風量が足りず，不純物が PV3435 側に逆流して液化機本体に流入してしまう．ここではそれを捉えているものと考えられる．これを改善するため，再生時の精製器の内部圧力の目標値を可能なだけ引き上げ，押し出し用の風量を上げる試みを行ったが，あまり変化は見られなかった．気化した不純物をすべて回収ガスホルダー側に流すためには，ガスホルダーへ向かう出口のインピーダンスを下げ，風量を増す必要があるものと考えられる．

精製器冷端部の温度設定 12 K は，メーカーの標準仕様である 30 K と比較すると非常に低い温度である．精製器の熱負荷が小さい冷却時には，冷端温度は 5.6 K といった非常に低い温度を示しており，これは他の施設に納入されている同型の液化装置と比べて非常に低い．この事実から，これは温度設定についてのメーカーの仕様が間違っているのではなく，本センターに納入された液化装置に付いている温度計の較正が，何らかの原因でずれてしまったものと推測している．本調整については文献[1]にも詳細な記事があるため，興味があればあわせて参照していただきたい．

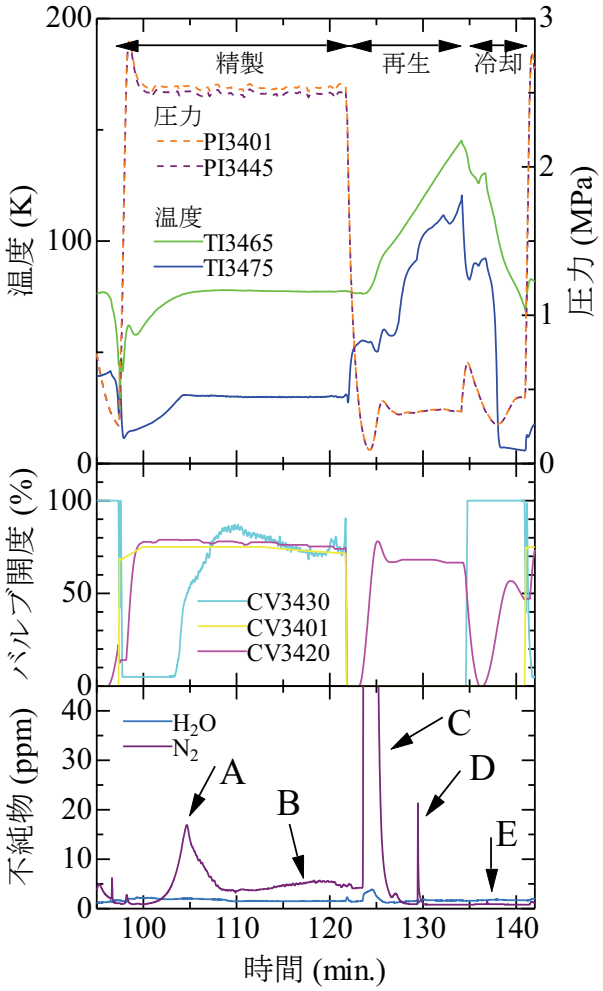


図 2. 従来設定での運転

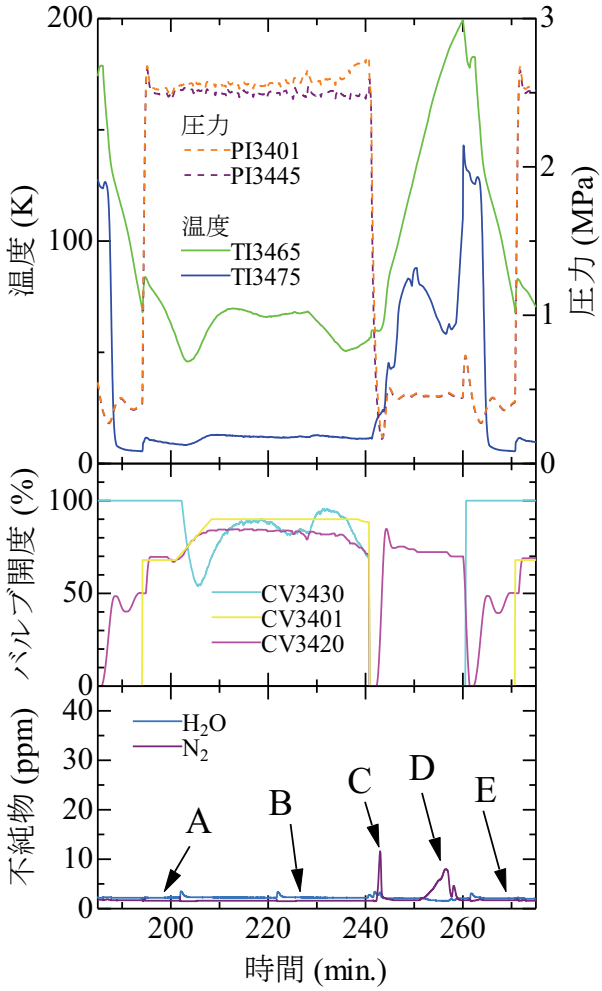


図 3. 設定調整後の運転

4　回収ガスの純度変化に伴う設定の再調整

本センターでの回収ガスの純度が 96%程度と低くなっていた原因が，回収ガスホルダーダイアフラムの経年劣化により発生したピンホールから空気が流入しているためであることがわかったため，平成 24 年度にその修理を行った．その結果，回収ガスの純度は 99%以上に回復した．

回収ガスの純度が変わった後も，同じ設定で内部精製器を使用したが，これまでとは精製，再生，冷却のサイクルが変わってしまった（図 4）．これまでは，精製，再生，冷却の 1 サイクルがほぼ同じパターンで周期的に繰り返されていたが，純度回復後は 1 回目の再生時間が短くなり，結果として 2 回目の精製開始時のバッファタンクの空き容量が少なくなるため，2 回目の精製時間が短くなった．また，2 回目の再生は従来よりも長くなり，再冷却終了時点でのバッファタンク内のガスレベルはより低くなってしまった．また，この運転では，内部精製器配管の閉塞（不純物の蓄積）のために 3 回目の精製時間が極端に短くなってしまい，連続的なリサイクル運転ができなくなってしまっている．このとき，バッファタンクのレベルが維持されているのは別途用意してある純ガスを使用して運転を継続したためである．これは，2 回目の長い再生時間を使ってもなお，精製器内の不純物を除去しきれていないことを示している．

図 4 を見ると，精製過程における液体空気貯槽付近の温度 TI3465 が，従来の 70 K 程度から 50 K 前後にまで低くなっていることがわかる．この原因は，回収ガス中の不純物濃度が下がったことで，この温度域で凝縮する不純物が減り，液体空気貯槽付近の熱負荷が減ったためであると推測される．この 50 K という温度は，液体空気を分離する温度としては低すぎるため，液体になるべき不純物がそのまま液体空気貯槽前の配管に

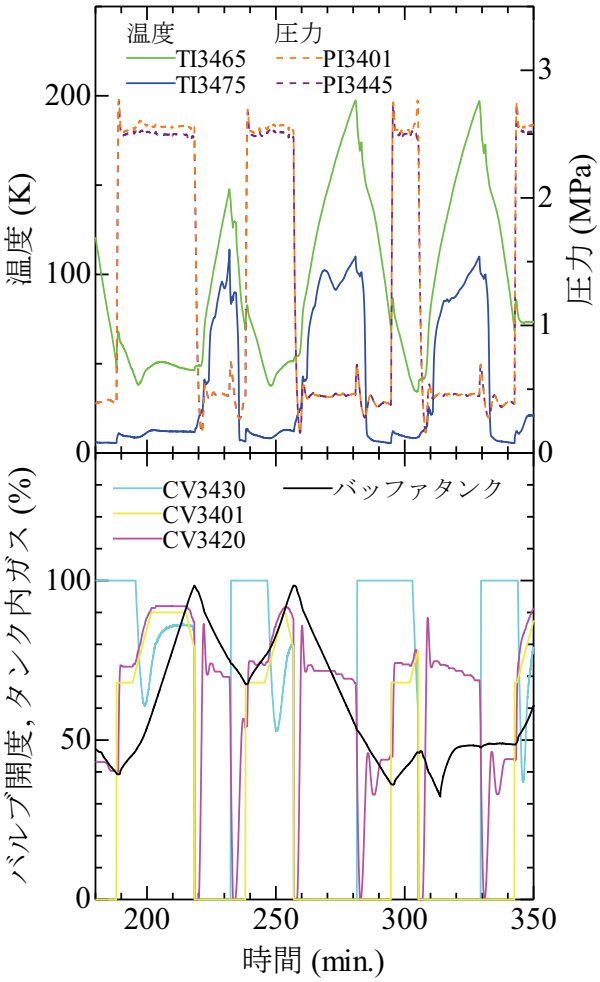


図 4. 純度回復後の運転

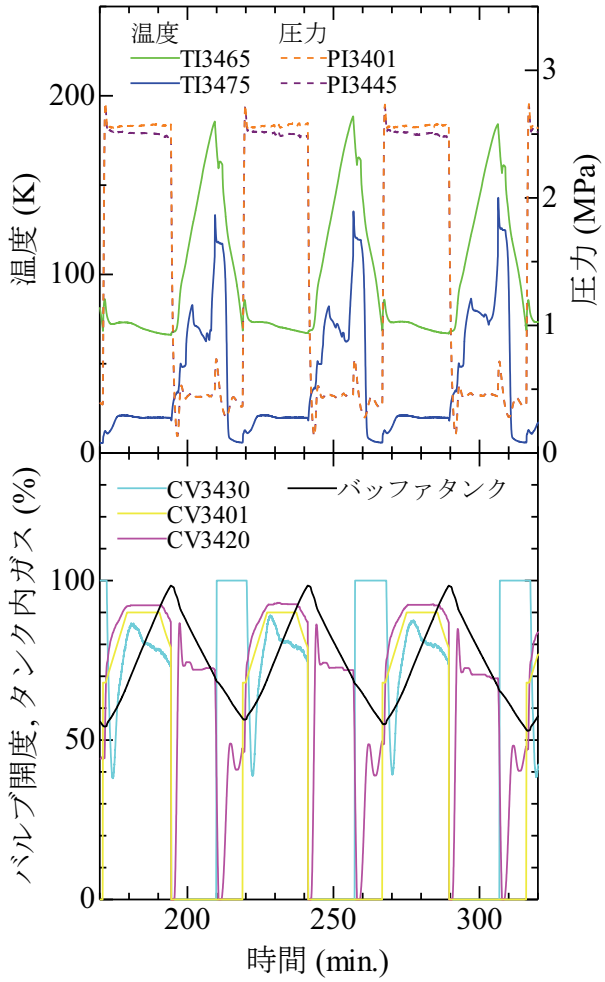


図 5. 再調整後の運転

固着してしまい，結果として再生不良を引き起こしたものと考えられる．そこで，TI3465 が従来通りの 70 K 程度になるよう，冷却制御の目標である TI3475 の設定値を 20 K に変更した．その結果，従来と同様の精製，再生，冷却パターンで安定して運転が行えるようになった（図 5）．

本調整は，借用していた分析計を返却した後に行ったため，設定変更に伴って精製ガス中の不純物濃度がどのように変わったか，残念ながら定量的なデータが存在しない．とはいえ，系内真空引きから液化機のパフォーマンスが低下してくるまでの期間に変化は見られていないため，精製ガスの純度は実用上問題ないレベルを維持していると考えている．今後，機会があれば分析計を使用して濃度の確認を行い，必要があればさらに調整したい．

5　まとめ

液化効率の低下に対処するため，内部精製器によって作られる精製ガスの不純物濃度を，分析計を用いて測定した．従来の運転条件では精製時の温度設定が高すぎ，精製ガス中に常に数 ppm 以上の窒素ガスが含まれてしまうこと，内部精製器の運転過程の切り替え時に非常に多量の不純物が液化機本体側へ流入してしまうことがわかった．精製時の温度設定を 12 K とより低い温度に設定することで，精製ガス中の不純物濃度が下がり，良好な運転状態を保持できることがわかった．このような低い設定温度にする必要が生じたのは，温度計の較正がずれてしまったため，元となる回収ガスの純度が低いためであると考えている．ガスホルダーの修理によって回収ガスの純度が回復した後は，同じ温度設定では内部精製器が冷えすぎてしまい，不純物の固着場所が変わって再生不良を引き起こすことがわかった．現在は，制御温度の設定を 20 K に変更し，良好な運転状態を維持できている．内部精製器は液化機本体と密接に関連しているので，精製器の性能だけでなく液化装置全体の運転状態に留意する必要があるが，より不純物流入の少ない運転状態にするために，内部精製器の運転過程切り替え時のシークエンスの変更や系のインピーダンスの変更を行うとよいと考えている．

謝辞

今回，ガス分析のために分析装置を貸してくださった物性研究所・低温液化室のみなさま，とくに使用方法についてサポートしてくださった物性研究所・低温液化室の土屋光氏に感謝いたします．また日々液化機の起動，運転，停止を行い，議論にお付き合いくださった低温センター・液化供給部門の志村芽衣氏，佐藤幸一氏，早坂洋氏に感謝いたします．

参考文献

[1] 戸田 亮, 加茂 由貴, 阿部 美玲,「内部精製器の設定条件と精製ガス中の不純物濃度」,『平成 23 年度低温センター年報』 pp. 85-89（2013）.

東京大学本郷キャンパスにおけるヘリウムガス回収率向上の試み

○寺岡総一郎，志村芽衣，戸田亮，加茂由貴，阿部美玲

東京大学 低温センター

概要

希少資源であるヘリウムガスの回収率を向上させることは近年その重要性が著しく増大している．回収率低下の要因は研究室に於ける損失，建屋内配管とサブセンターと呼ばれる回収設備に於ける損失，各建屋から低温センターに到る回収途中で生じる損失および低温センターに回収されてきた蒸発ヘリウムガスを液化して小分け容器に汲出し供給するまでの間に生じる損失に分類できる．それぞれついて複数の要因が考えられいずれも重要な課題であるが，本発表ではそれらのうち汲出し業務に使用する移送管のパージベローについて説明する．

1　汲出し用三重移送管

各研究室より回収された蒸発ヘリウムガスは液化機にて再液化されたのち一旦液体ヘリウム貯槽に蓄えられ，そこから小分け容器と呼ばれる容量 100 L または 60 L の容器に移送されて各研究室に配送される．その間にも様々な損失の要因があるが，本年度（H25）は汲出しに際して生じる損失を最優先課題として，損失量のできるだけ精密な評価と対策を並行して進めることとなった．以下まず三重管の概要を説明する．

本キャンパスでは小分け容器への汲出しは三重壁の移送管（以下，三重管）と貯槽側のポンプを用いて行われる．図 1-a に対象となる小分け容器側への液供給と蒸発ヘリウムガスの回収の流れを模式的に示す．容器は上部フランジユニットを外して三重管に接続する．その際，容器ネック部，三重管接続部は短時間とはいえ大気開放となるのでパージベロー下部の枝管よりパージ用のヘリウムガス（貯槽の蒸発ガスを利用）を流す．パージガスはパージベロー内部を通り，その上部の枝管より流量計，逆止弁を経てガスホルダに回収される．汲出しポンプ運転中に容器側で生じる寒冷蒸発ヘリウムガスは大部分が三重管の内管と中管の間の空間を通って貯槽に戻されるが，一部はパージベローを通してガスホルダに回収される．

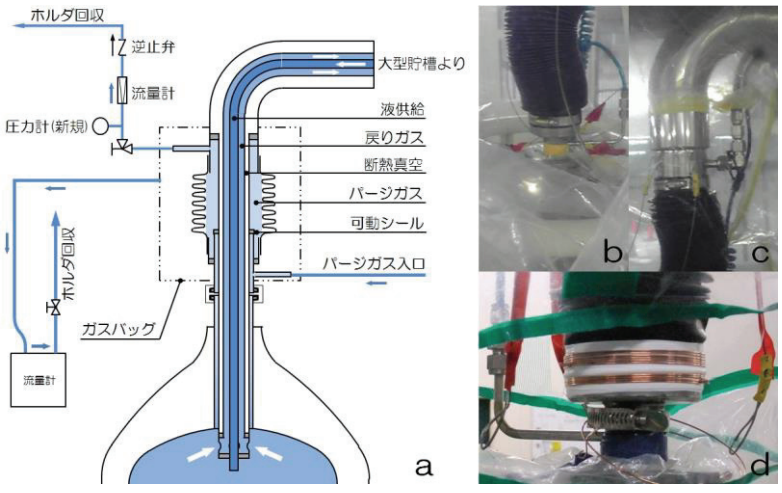


図 1. a 汲出し移送管と小分け容器取合い部，b ガスバッグシール部下部，c 同上部，d パージベローシール部

本年度初頭あたりから雨季にかけてパージベローの経年変化等により，主に縫製部と上下のシール部からの漏れが顕著になったと汲出し業務を通じて認識されるようになった．対策はベローを交換することだが，まず損失量の評価と応急策として図 1-a の２点鎖線で示されるように，パージベロー周囲をガスバッグで覆い，捕集ガスを積算流量計を通してホルダに回収した．ベローの交換前後を比較すると，交換後は積算計では検知できない程度まで漏れが減少したが，今度はパージベローの内圧が抜けないためにベローの座屈による早期損耗が懸念されるとともに液量ロードセル計量の重量設定が大きくオフセットするという現象が生じた．原因の一つはパージベロー出口側の流量計フロートが下位でスタックして流量が確保されていなかったことで，これは分解洗浄により解消した．

2　可動シール部流量の再調整

過剰内圧の本質的な原因は図 1-a の可動シール部の損耗に伴う流量過大なので，シール材を交換のうえ，可動シール部を再調整した．図 2-a にシール部の簡略なスケッチを示す．適切な流量を確保するためには半締め状態にしなくてはならず，運用により調整がずれることが懸念されたのでナットをスライスして締付けねじにカウンターを当てた. またベロー内圧をモニターできるよう測定範囲 0～20[kPaG]の圧力計を追加した. 再調整後は図 2-b に示すように汲出しポンプ稼働中のベロー内圧は適切な値（～2[kPaG]）に保たれ，漏洩も止まり，重量設定のオフセットも+1[kgf]で安定している．

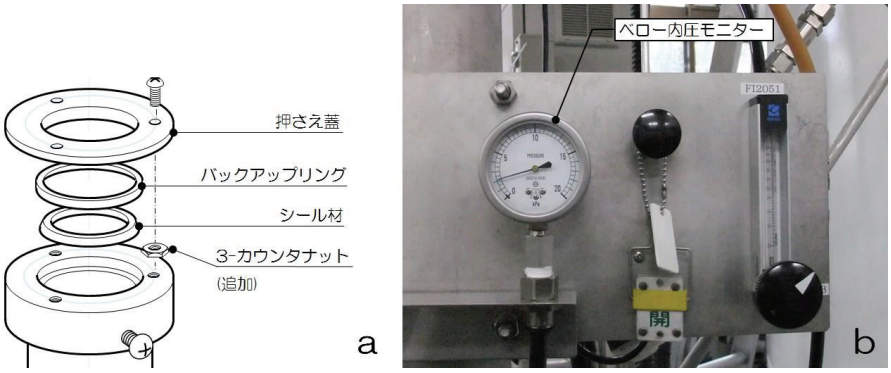


図 2. a 軸シール部のスケッチ，b パージベロー内圧モニター用圧力計

3　まとめと今後の展開

本発表では汲出し業務に絞って説明したが，その他の課題として低圧部回収配管気密試験の精密化や研究室で装置に液体ヘリウムを汲足す際の移送管予冷ガスの回収，研究室流量計の寒冷による損耗対策，一時的な大量の蒸発に対処するための運用ルール制定や回収設備増強の指針となる基礎データの蓄積はようやくその端緒についたところである．これらについては結果が得られ次第，別の機会に紹介したい．

4　謝辞

当センター技術補佐員の板垣信則氏には汲出し業務を通じて調整後の装置の状態について有用な意見をいただきました．ここにお礼申し上げます．

ヘリウムガス回収設備におけるドライヤー吸着剤の性能低下について

○近藤裕 A)，宮内幹雄 A)，敦賀将太 A)，池田博 B)

A) 筑波大学 研究基盤総合センター 低温部門

B) 筑波大学 物性・分子工学専攻

はじめに

実験等に使用した液体ヘリウムはヘリウムガスとして再液化のために回収される．しかし回収ヘリウムガス中には水分が含まれているため，ヘリウム回収設備にはドライヤーを設置して水分の除去を行っている．筑波大学のヘリウム回収設備には二基の高圧ドライヤーがあり，設置から約 20 年が経過していた．最近では加温再生や真空置換の作業についてこれまでとは違う状況が発生したため，吸着剤の劣化が疑われた．そこで吸着剤の交換を行い，取り出した吸着剤を熱分析装置を用いて成分分析を行った．今回，熱分析測定の結果と，それを基に取り組んだ改善策について報告する．

1　ヘリウム回収設備について

筑波大学では，図 1 のヘリウム系統概略図に示すように回収したヘリウムガスはヘリウム回収圧縮機二基で圧縮され，油水分離器を通り，さらに高圧ドライヤーで水分を除去した後，長尺カードルへ充填される．

高圧ドライヤーは二基あり，一基目が平成 3 年に設置され，さらに平成 6 年に一基を増設し，それと同時に一基目の高圧ドライヤーの吸着剤を交換して現在に至る．高圧ドライヤーの切り替えや加温再生，真空置換の作業は手動操作で行い，一方を使用していない間に加温再生と真空置換を行い，一週間ごとに交互に使用している．再生の方法として，窒素ガスを流しながら一日 7 時間 200 ℃での加温を二回行い，冷却後に真空置換を行っている．

ところが最近，再生作業についてこれまでとは違う状況が発生した．露点や真空引きに要する時間を計測していないため不確定要素があるが，これまでと同じ加温時間では乾燥が不十分に感じたり，真空置換に要する時間が短くなったりする状況が発生した．このことから吸着剤の劣化が疑われたため，平成 24 年に吸着剤の交換を行った．そして，吸着剤の状態を判断するために，熱分析装置を用いて吸着剤の成分分析を行うこととした．

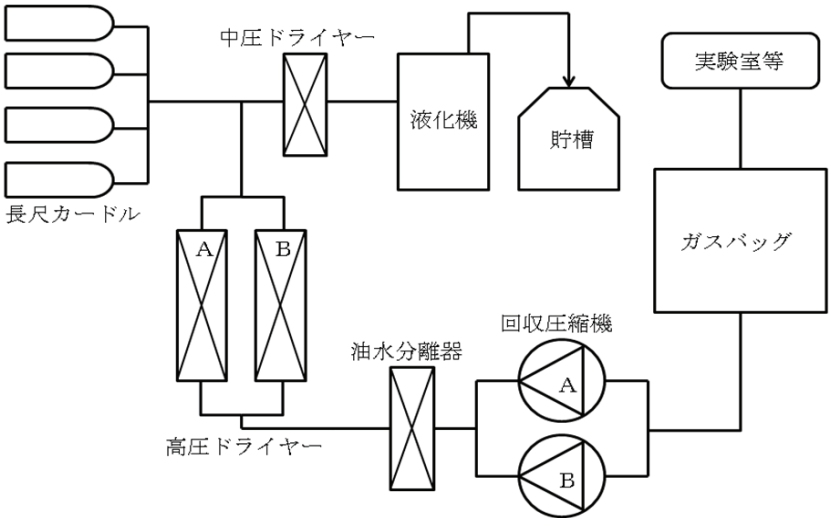


図 1. ヘリウム系統概略図

2　熱分析装置について

今回，吸着剤の分析に用いた装置は，筑波大学 研究基盤総合センター 分析部門にあるエスアイアイ・ナノテクノロジー（株）社製の示差熱熱重量同時測定装置（TG/DTA7300）である．

示差熱熱重量同時測定装置とは熱重量測定（TG）と示差熱分析（DTA）とを組み合わせて，単一の装置で同時に測定する方法である．以下に TG と DTA の定義と構成について記述する．

熱重量分析 TG（Thermo Gravimetry）とは物質の温度を一定のプログラムによって変化させながら，その物質のある物理的性質を温度の関数として測定する一連の手法である．

示差熱分析 DTA（Differential Thermal Analysis）とは，試料及び基準物質の温度を一定のプログラムによって変化させながら，その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する手法である．

DTA の装置構成を図 2 に示す．試料と基準物質を加熱炉内の対称位置に配置し，ヒーターによって加熱炉の温度をプログラムに従って変化させ，試料側と基準物質側に設置した熱電対でそれぞれの温度を計測している．

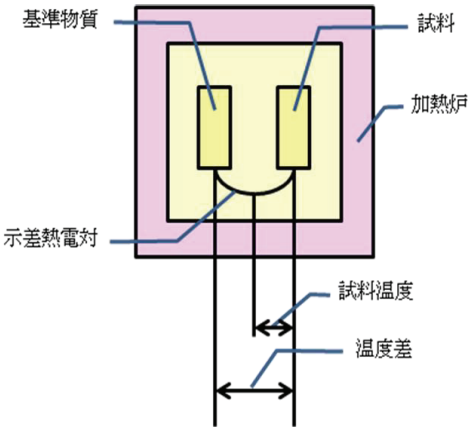


図 2. DTA の装置構成図

示差熱分析で検出するのは試料の温度（正確には基準物質との温度差）であり，転移，融解，反応等の吸発熱を伴う現象が測定対象となる．温度変化に伴い，試料が転移や反応を起こした場合，基準物質との温度差が変化するため，これを検出する．DTA 信号からは試料の転移温度，反応温度，及び転移や反応が吸熱現象か発熱現象かの情報が得られる．これらから融解，ガラス転移，結晶化，気化，昇華，結晶転移等の相転移，脱水，分解，酸化，硬化等の反応現象を捉えることができる[1].

3　測定内容と成分分析結果

成分分析は新品の粒状モレキュラーシーブ，高圧ドライヤーの A と B から取り出した吸着剤の粒状活性アルミナの 3 種類を行った．測定条件として昇温温度を 40 ℃から 500 ℃に設定し，計測時間を 50 分間に設定した．

グラフ上の緑色のラインが測定試料重量の変化(TG)，青色のラインが温度(Temp)，赤色のラインが示差熱分析値(DTA)を示している．

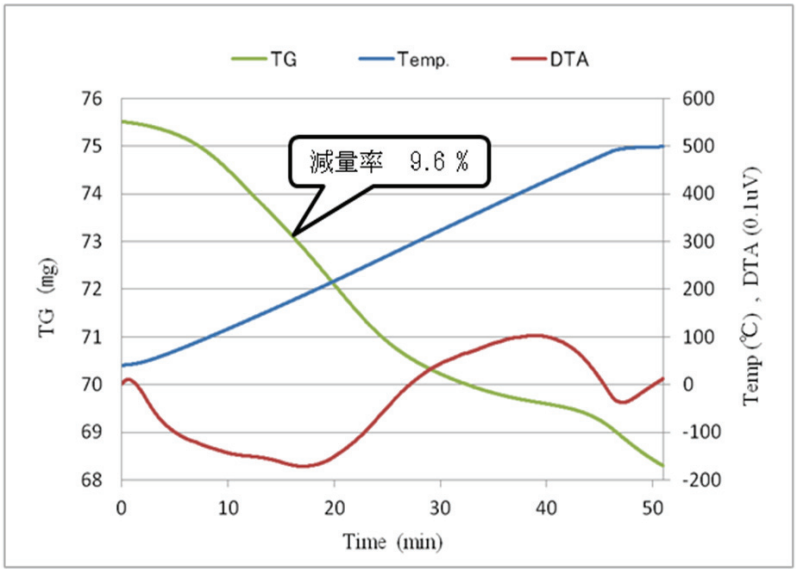


図 3.　新品モレキュラーシーブの TG/DTA 曲線

最初に新品のモレキュラーシーブを成分分析した結果を図 3 に示す．測定開始直後の 40 ℃近傍から減量を伴う吸熱が始まり 200 ℃近傍でピークが見られ，脱水の反応が起きたと考えられる．また 400 ℃近傍では酸化分解と思われる発熱のピークが見られた．

そして，測定開始時の重量と測定終了時の重量変化を減量率として表すと 9.6 %という結果になった．

次に高圧ドライヤーA から取り出した活性アルミナを成分分析した結果を図 4 に示す．測定開始直後の 40 ℃近傍から減量を伴う吸熱が始まり，70 ℃近傍でピークが見られ脱水の反応が起きたと考えられる．その後 220 ℃から 270 ℃近傍にかけて減量が見られた．さらに 370 ℃近傍から急激に減量が進行し吸熱ピークが 490 ℃近傍で見られた．

そして，測定開始時の重量と測定終了時の重量変化を減量率として表すと 16.1 %の減量という結果になった．新品モレキュラーシーブの結果と比較すると 100 ℃近傍の脱水による減量は僅かで，200 ℃以上での減量が顕著であり，全体での減量率も大きくなっているのが分かる．

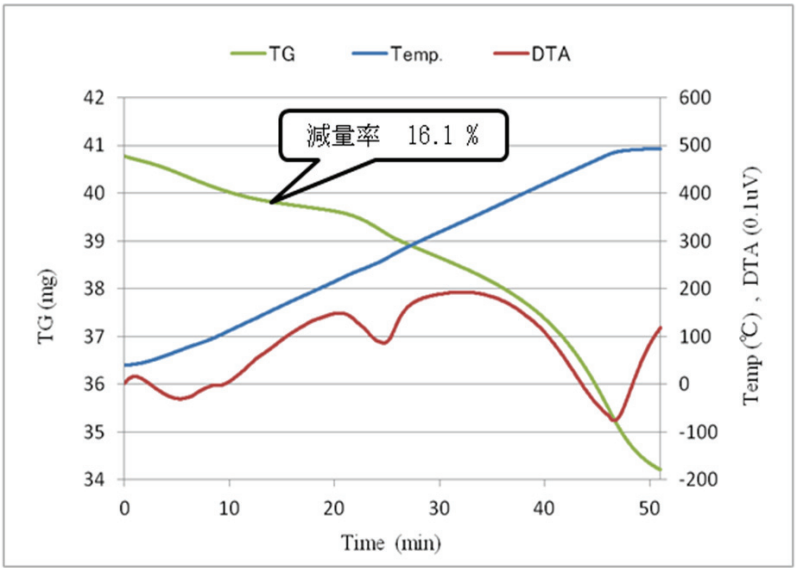


図 4.　高圧ドライヤーA 吸着剤の TG/DTA 曲線

さらに高圧ドライヤーB から取り出した活性アルミナを成分分析した結果を図 5 に示す．40 ℃近傍から減量を伴う吸熱が始まり，100 ℃近傍でピークが見られ脱水の反応が起きたと考えられる．その後，360 ℃近傍で酸化分解と思われる発熱ピークが見られたが，200 ℃以上の温度域では減量の割合が小さくなっている．

そして，測定開始時の重量と測定終了時の重量変化を減量率として表すと 12.7 %の減量という結果になり，脱水による減量が主であるのが分かる．

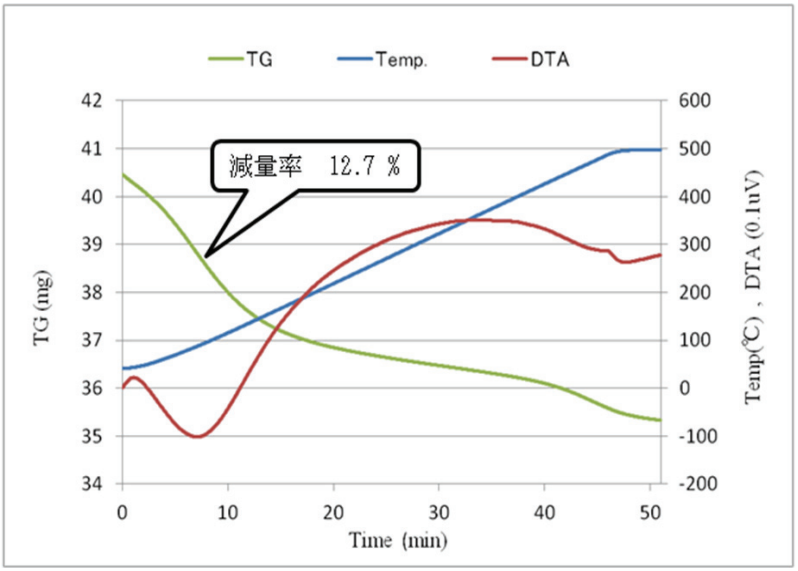


図 5.　高圧ドライヤーB 吸着剤の TG/DTA 曲線

今回の成分分析結果から，特異な変化が見られたのは高圧ドライヤーA の吸着剤であった．高圧ドライヤーA の吸着剤には 200 ℃～300 ℃近傍の間で DTA に変化があり，減量も確認できる．さらに 340 ℃以上から急激な減量が見られたことから，水分以外の物質が吸着されていたと考えられる．これにより，200 ℃の加温再生では吸着剤の再生が出来ずに目詰まりした状態であったため，水分の吸着能力が著しく低下したと考えられる．

水分以外に混入する可能性がある物質を考えると，回収圧縮機に使用しているオイルが挙げられる．そのオイルは Mobil Rarus427 で引火点が 264 ℃[2]であった．そして，ドライヤーA の成分分析結果に現れた反応温度域と引火点がほぼ合致しており，引火点付近でオイル成分が蒸発して減量が起きたと考えられる．そして 300 ℃以上の温度域では酸化分解，さらに 490 ℃近傍では熱分解が起きたことで大きく減量したと考えられる．

一方，高圧ドライヤーB の吸着剤は脱水の反応以外に特異な変化が見られなかったことから，オイル成分等の不純物混入はなく，吸着能力は問題なかったと考えられる．

4　改善策について

高圧ドライヤーの前段には油水分離器も設置していたが，何らか要因によってオイル成分が高圧ドライヤーに混入して吸着剤を汚染したと考える．この状況を改善するため，油水分離器カートリッジフィルターについて，それまで 1 年毎に行っていた交換サイクルを半年毎に短縮することとした．さらに油水分離器への負担軽減を目的に，その前段にコアレッサーフィルターの設置を行った．

そして，高圧ドライヤーの再生についても見直しを行い，加温については窒素ガスを流しながら 48 時間連続で行い，真空置換は 10^{-1} Pa 程度まで行うこととした．さらに真空引きに要する時間や到達真空度を記録し，吸着剤の状態変化に早く気付くことが出来るように改善を図った．

5　まとめ

今回，吸着剤の成分分析を行ったことにより，高圧ドライヤーA については水分以外にオイル成分が吸着されていたこと，高圧ドライヤーB については水分以外は吸着されていないことが判明した．

そして，高圧ドライヤーA についてはオイル成分の影響で 200 ℃の加温再生では吸着剤が再生しないため，水分の吸着能力が低下したと考えられる．

高圧ドライヤーA にオイル成分が混入した原因は不明であるが，何らかの要因でオイル成分が混入したと考え，改善策として油水分離器の前段にコアレッサーフィルターを設置して運用することとした．

また，高圧ドライヤーの再生作業について記録を残すことにより，吸着剤の状態変化を把握できるので早期対応が可能になると期待して，今後もヘリウム回収設備の機能維持管理に取り組んでいく．

謝辞

本報告にあたり，熱分析装置の測定についてご協力をいただいた筑波大学 研究基盤総合センター 分析部門の権田賢一 職員，並びに中園広行 技術専門職員に深く感謝いたします．

参考文献

[1]　一般社団法人　日本分析機器工業会HP　http://www.jaima.or.jp/jp/basic/cta/

[2]　Mobil Rarus™ 400 Series
http://www.mobil.com/USA-English/Lubes/PDS/GLXXENINDMOMobil_Rarus_400.aspx

cERL 用超伝導加速空洞 2K 冷却システム

○小島裕二，仲井浩孝，中西功太，原 和文，細山謙二，本間輝也

高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設

概要

現在，高エネルギー加速器研究機構では 1.3GHz の超伝導加速空洞を使用して ILC 用と ERL 用（エネルギー回収型ライナックという次世代光源）の研究開発（冷却試験）が行われている．今回報告する cERL（コンパクト ERL）は ERL の小型版として設計されたもので，冷却システムの基本的な構成は ILC 用とほぼ同様である．主要構成機器はヘリウム液化冷凍システム（600 W），2 K コールドボックス，2 K 真空排気装置，高性能トランスファーライン，そして被冷却体である複数台の超伝導加速空洞モジュールで成り立っている．

ただし，超伝導加速空洞は ILC 用の実験ではパルス運転であったが cERL では連続加速モードとなり加速運転時の熱負荷が大きくなると予想される．従って，cERL は真空排気能力を 2 倍以上（2 K での冷却能力≒80 W）とし対応している．すでに両施設で 2 K の冷却試験は成功しているが，2 モジュールの並列冷却及び長期（1 ヶ月）連続運転を行っていなかった．今回，2013 年 11～12 月に約 40 日のコンパクト cERL のビーム試験が行われたのでその報告を行う．（2014 年 1～3 月にも約 60 日の連続冷却試験を予定している．）

1　冷却システム概要

本システムの概要図を図 1 に示す．本ヘリウム冷凍設備は KEK の ERL 開発棟に 2010 年に移設されたもので 1986 年製の TCF200（ヘリウム液化機）を使用している．

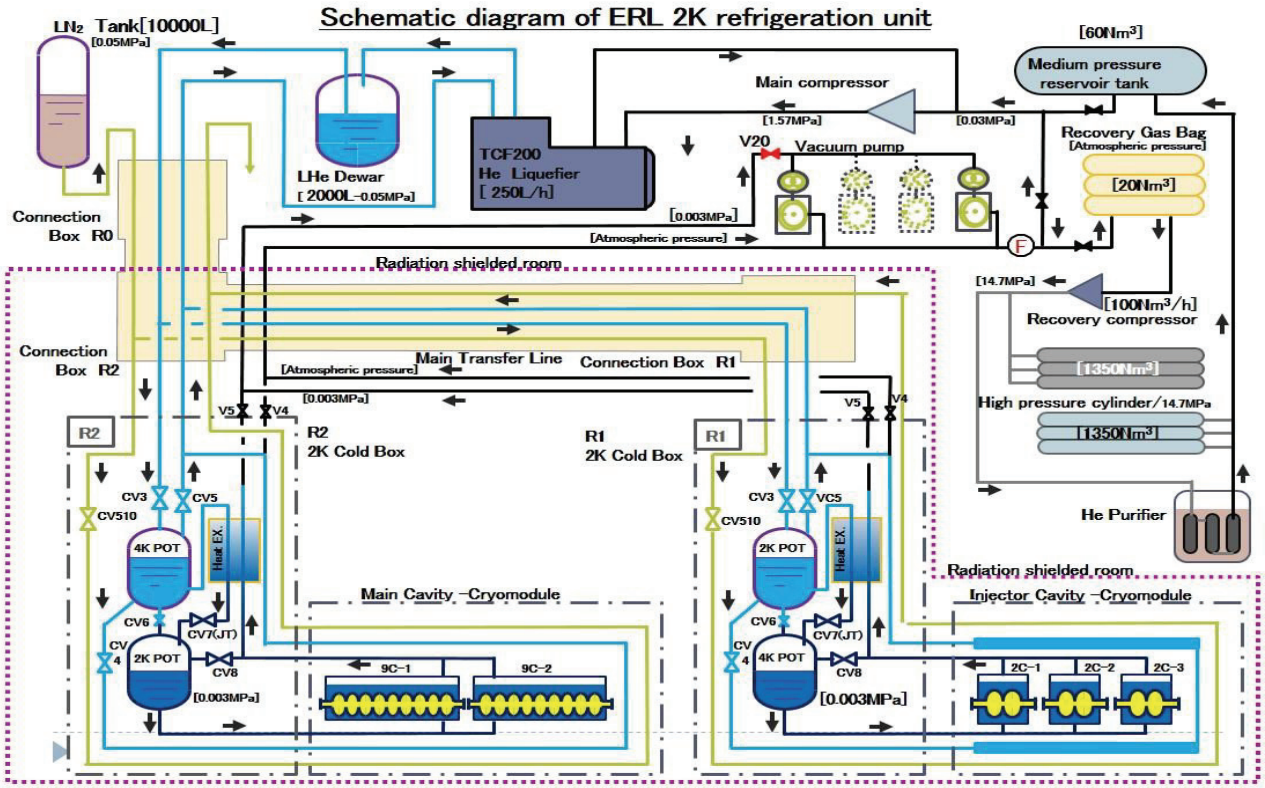


図 1. 2 K 超流動冷却システム概要図

上記ヘリウム液化機で液化されたヘリウムは一度 3000ℓ の液化ヘリウム貯槽に貯められ，マルチトランスファーチューブ（全長約 35 m）にて放射線シールド内に設置された R1,R2-2 K コールドボックスの 4 K ポット（70 ℓ ）に供給される．このポット内で気液分離され気相は CV5 から再びトランスファーチューブを通り液化機に戻される．液相は 5 K シールドと 2 K ポット（70 ℓ ）に分岐され，前者は CV4 から入射空洞及び主空洞の 5 K シールドを冷却した後，気液混相で液化機に戻される．（入射空洞の 5 K シールドは 60 ℓ の貯槽があるので気相のみ戻される．）一方，2 K ポットに向かった 4.5 K の液化ヘリウムは 2 K 領域（空洞貯槽等）で気化したヘリウムガスと熱交換した後に JT 弁（CV7）を通り 3 kPa に減圧され 2 K ポットに供給される．2 台の 2 K コールドボックスにはそれぞれ，入射空洞モジュールには 3 台(2 連空洞×3 台)，主空洞モジュールには 2 台（9 連空洞×3 台）の空洞が接続されていて，その貯槽で気化した 2 K のヘリウムガスは 2K コールドボックスの熱交換器を通って放射線シールド室の外側にある真空ポンプで排気される．貯槽内圧は 3 kPa（2 K）に維持されている．ここで排気されるヘリウムガスの流量を測定して 2 K 領域に侵入する熱量を算出している．また，80 K シールドの冷却は液化窒素を貯槽から直接各機器の 80 K シールドへ供給され，戻り窒素ガス（100 K）は屋外に大気放出させている．

2　長期連続冷却運転の問題と対応

前回の冷却試験では主加速空洞と入射空洞は個別に冷却試験を行っていた．しかし，今回は本冷却システムで初めて並列に同時冷却し両空洞を同期させてビーム試験を長期間行うこととなった．そこで，下記の問題が生じた．

1 ） クールダウン

冷却する主空洞のホムダンパー（HOM）は急激な温度変化をあたえると熱収縮により亀裂が発生し磁気ダンパーの性能が低下する可能性がある．従って並列 2 モジュール（入射空洞，主加速空洞）を同時に室温から 100 K まで冷却する場合，主空洞の各温度を監視しながら冷却速度制限を 3 K/h，最大温度差 50 K 以下で冷却しなければならない．　※入射空洞の冷却制限は特に設定されていない．

＜対応と結果＞

クールダウン（室温→4.2 K）は主空洞の冷却速度制限を優先し入射空洞もその速度に合わせることとした．そこで，主空洞を 3 系統（1 系：空洞貯槽系, 2 系:5 K シールド系, 3 系：窒素シールド系）に分け主要各温度を系別に監視するプログラムを作成し，各系の流量調節弁を最大冷却速度（3 K/h）及び温度差 50 K 以内に制御することとした．

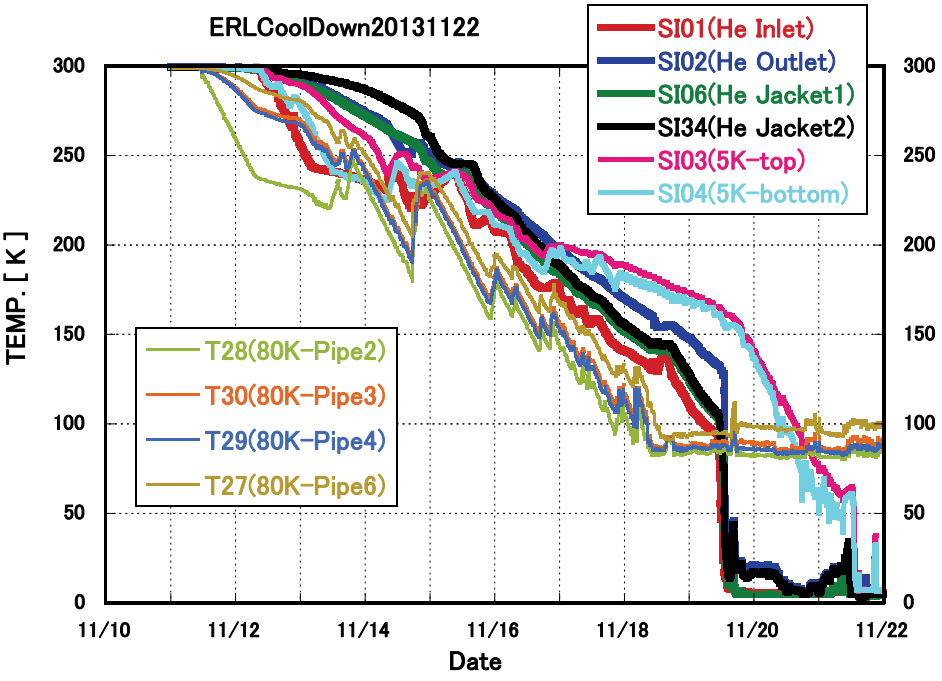


図 2. 主空胴のクールダウン曲線

今回の主空洞モジュール側のクールダウン結果を図 2 に示す．

冷却は 3 系が 11/11 11:00，1 系及び 2 系は 11/12 9:00 に開始した．冷却開始直後は各系の上流部（入口付近）の温度は約 3 K/h で直線的に冷却 されている．しかし，徐々に下流部（出口部）まで温度勾配が出来てしまい出口温度との温度差が広がっていき 50 K になると供給弁が閉じてしまう．その結果，各系とも冷却速度が急に低下したり上流側の温度は昇温したりしているのが解る．なるべくスムーズに冷却するには供給ガス温度を 3 K/h で下げていく方法が理想だが，1 系（太線），2 系（中線）の冷却ヘリウムガスは液化機の窒素熱交換器を通した約 110 K（一定）のヘリウムガスを供給していたため被冷却体との温度差が大きすぎたため上記現象が発生したと推測される．図中 11/15 からは供給温度を上げて段階的に供給ガス温度を調整することで対応した．また，3 系（細線）の窒素シールド系は直接液化窒素を供給しているため出入口の温度差が簡単に 50 K を超えてしまい図 2 で示すようにのこぎりの歯状に冷却されていることが解る．ただし，全系とも温度制御プログラムに特に問題は無く自動制御で冷却速度は平均 1.2 K/h（室温から 100 K まで 7 日間）で冷却することが出来た．（150 K 以下では液化機のタービンを起動し予冷ガスの温度を調整した．）

各温度が 100 K 以下となったら熱収縮の影響が無くなるので冷却速度制限も無くなる．3 系は出口温度を 100 K に設定してあるので実験終了まで（約 40 日間）このまま自動制御を続けていた．2 系，3 系及び入射空洞は液化ヘリウム貯槽から直接液化ヘリウムを供給するモードに変更し 2 日後に空洞モジュールのクールダウンは完了した．（図 2－11/21 14:00）その後　上記（1 章）2 K 定常運転に移行した．

2 ） 安定した 2 K 維持運転

2 K 冷却時（減圧運転時）に最大 80 W の負荷が加わった場合，2 モジュール間に圧力差が発生したり，温度や液面が不安定にならないか？また，負荷を 80 W で一定にするコンペンセートヒータを使用すべきか？

＜対応と結果＞

減圧運転に使用する真空ポンプは 2013 年に 4 ユニット増設して，現状のメカニカルブースターポンプとロータリーポンプユニットは 8 ユニット設置されている．全て稼働した場合 3 kPa を維持できる排気量は 80Nm^3/h を記録した．従って，2 K の気化潜熱を 23.3 J/g とすると約 92 W の冷却能力があることが解る．ただし，安定した圧力や液面を維持するためには液化ヘリウムの供給ロスや熱交換器ロスを 10%と見積もると，許容熱負荷は 80 W 程度が限界である．

今回 2 K 領域（2 K コールドボックスの 2 K ポット 2 基＋主空洞，輻射空洞貯槽系）の無負荷時の熱負荷（スタティックロス）を測定したところ 26.5 W であった．従って，2 K 領域のスタティックロスは加速運転中も変化しないと仮定し，許容される RF ロスの最大値は 53.5 W となった．

スタティックロス＝ 26.5 W（2013 12/4 の測定値）

RF ロス最大値　＝ 53.5 W 以下（空洞モジュール 2 基の加速運転時 RF ロス）

合　計　　≒ 80 W　（許容熱負荷）

また，加速試運転運転中（RF ロス≒50 W）でも負荷の変動による圧力や温度のふらつきは上記真空ポンプの上流に設置した圧力自動制御弁（図 1　V20）で 2 K ポット内の圧力を 3.0±0.1 kPa に保つことが出来た．従って，真空ポンプの負荷を考えると「負荷が一定であるが排気流量は多い」A 案と「負荷は変動するが排気流量は少ない」B 案を比較すると冷凍機の負荷も減る B 案を採用することとなった．

3 ） ヘリウム精製装置

真空ポンプの排気ヘリウムガスはオイルの蒸気も含む不純ヘリウムガスとし一度ガスバッグに回収し，高圧精製装置にて処理し精製長尺カードルに充填される．しかし，長期連続運転を行うためには毎日 2 K 減圧運転（最大排気流量＝80 Nm^3/h）を 12 時間行うとするとガスの回収量は約 1000 Nm^3 となって精製運転を毎

日 10 時間行わなければならない．精製装置再生（再生時間：8 時間）のタイミングを考えると週末土日に行わなければならない．

＜対応と結果＞

当初，4 台の真空ポンプユニットをさらに 4 台追加して最大 80 Nm^3/h のヘリウムガスを全てガスバッグに戻していたが直接液化機の主圧縮機吸入側に戻すこととした．その結果，回収精製運転をする必要が無くなり問題は解決される．さらに，クエンチ等で一時的に回収圧縮機の能力（100 Nm^3/h）以上のガスを回収するときに対応出来るようになった．ただし，真空ポンプの排気ヘリウムガスにはオイル蒸気が含まれているので主圧縮機のオイルと混ざってしまう危険性があった．そこで，主圧縮機（MYCOM）と真空ポンプのオイルが同じ前川 MH-41 オイルを使用することとした．当然同型の真空ポンプに MH オイルを使用して，その排気性能（到達圧力，及び排気速度）を確認した．1 週間の連続運転（真空度 3 kPa）で大きな性能変化は無かったので 8 台のロータリーポンプ全てを MH-41 オイルに交換した．

4 ） リーク（2K 領域への空気混入）

長期連続運転の弊害として，2K 領域（負圧部）での少量のリーク（空気の混入）でも蓄積され熱交換器，バルブ，配管の閉塞，冷却性能の悪化等の危険性がある．

＜対応と対策＞

前回の入射空洞（単体）2 K 冷却試験も約 2 ヶ月の運転が行われその間に 1 度リークが発生している．

リーク箇所は 2 K 領域にある JT 弁（CV7）のスピンドルシール部で，閉塞し液化ヘリウムの供給が出来なくなってしまった．部分加温後，開放チェックしたところ長軸スピンドルの常温部 O リング摺動面に上下摺動キズがあった．原因はアクチュエータと長軸スピンドルの芯だし不良のためと思われる．修復後，他の同条件のバルブも開放して O リングを交換したが特に異常はなかった．その後，リークチェックを行なって異常の有無を確認した後に運転を再開した．その後今回の冷却試験でも閉塞等問題は無かった．

その他の故障としては真空ポンプの冷却水循環チラーの電磁弁に故障があったが実験に特に支障は無かった．

3　まとめ

◎　2 モジュールの同時クールダウンは 4.2 K まで実質 9 日間で行われた．冷却速度は 100 K まで平均 1.2 K/h で冷却することが出来た．

◎　今回の冷却試験は温度制御プログラム等の自動化の効果もあり夜間の人員の省力化も達成できた．また，今後の制御パラメータの資料とすることも出来たので，次回のクールダウンに反映できることに期待している．

◎　真空ポンプのオイルを主圧縮機と同一にした効果で回収精製運転時間は冷却運転中の 40 日間に 10 時間程度であった．（液化ヘリウム貯槽のシールドガスがガスバッグに回収されている．）

◎　本 2 K 冷却システムの許容熱負荷は現状 80 W で最大 56.5 W の RF ロスを吸収出来る．

※真空ポンプを増強すれば許容熱負荷を上げることが可能．

◎　2 K 定常運転時には圧力（3.0±0.1 kPa），温度及び液面の安定した制御を行うことが出来た．従って，あえてコンペンセートヒータ制御を行わないこととなった．

＊ILC 関係の冷却システムは平成 21 年度技術研究会「ILC 用超伝導加速空洞冷却試験」参照

2K ヘリウム冷凍機の製作

○原 和文，小島裕二，仲井浩孝，細山謙二 A)，森田荘司 B)，兼清孝之，伊佐公宏 C)

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

B) ㈱日立プラントメカニクス

C) ㈱日立テクノロジアンドサービス

はじめに

高エネルギー加速器研究機構のトリスタン実験や KEKB 実験で使用された共振周波数 500MHz ニオブ製超伝導加速器は，約 4K の液体ヘリウムで浸漬冷却され電子ビームの加速運転を行った．現在，我々研究所の ERL 開発棟と STF 棟において将来計画に使用される次世代の超伝導加速器冷却試験が行われている．超伝導加速器は，高いエネルギーでビーム加速をするので強い放射線が発生し，コンクリート・シールドで囲われた建屋や地下トンネルに設置される．超伝導加速器が収められたクライオ・モジュールは，狭い場所に設置されるので出来るだけ小さくする必要がある．そこで超伝導加速空洞の共振周波数を 1.3GHz にして超伝導加速空洞本体を小さくすることでクライオ・モジュールが小型になり，その占有面積を出来るだけ少なくしている．しかし共振周波数を 1.3GHz にすると超伝導加速空洞の表面抵抗が大きくなるが，飽和蒸気圧力 3kPa の液体ヘリウムで冷却すれば，大きくなった分の表面抵抗を無視することができ，かつ超流動ヘリウムの高い熱伝導性により局部的に発生した熱を素早く取り除く事が出来るので，超伝導加速空洞の最大加速電場を大きくすることが出来る．

我々加速器冷凍機グループは，平成 21 年から高エネルギー加速器研究機構の先端加速器棟で，プロトタイプの 2K ヘリウム冷凍機を設計製作し，地下トンネルで将来 ILC 計画に使われる共振周波数 1.3GHz 超伝導加速器の冷却試験を行った．このプロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機は，超伝導加速空洞を内蔵したクライオ・モジュール近傍に設置され，超伝導加速空洞を冷却する 2K 液体ヘリウムと 5K 輻射シールドに 4K 液体ヘリウムを供給し，そして 80K 輻射シールドに液体窒素を供給する．地下トンネルの冷却試験は，約 100 日間行われ，超伝導加速空洞を 2K の温度で安定して冷却する事が出来た．ここで得られたプロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機の設計製作技術を転用して製作した cERL 計画の実機 2K ヘリウム冷凍機を紹介する．

1　2K ヘリウム冷凍機フロー図

Figure-1 に cERL 用 2K ヘリウム冷凍機本体のフロー図を示す．2K ヘリウム冷凍機と超伝導加速空洞が収められたクライオ・モジュールは，ERL 開発棟のコンクリート・シールド内に設置される．コンクリート・シールドの外に設置されている SULZER 社 TCF200 冷凍機の 3000L 液体ヘリウム・デュアーからの液体ヘリウムと屋外の CE タンクからの液体窒素は，高性能マルチトランスファーラインでコンクリート・シールド内に送られ，そのバルブボックスから，門型高性能トランスファーラインで 2K ヘリウム冷凍機に供給される．

バルブボックスにある流量調節弁により液体ヘリウムは，2K ヘリウム冷凍機の 4K 液体ヘリウムタンクに取付けた超伝導液面計の設定レベルになるように貯められる．また液体窒素は，2K ヘリウム冷凍機 80K シールドの戻りラインに取付けた温度計により設定温度になるようにコントロールされ，そして冷却に使用された窒素ガスは，コンクリート・シールドから屋外まで敷設された放出管で大気に排出される．

超伝導加速空洞の冷却は，4K 液体ヘリウムタンクと 2K 液体ヘリウムタンクの途中に設けた流量調節弁で，一定の冷却スピードになるようにクライオ・モジュールの各温度をモニターしながら液体ヘリウム量をコントロールして行う．ヘリウム・ジャケットの液面高さは，2K ヘリウム冷凍機の 2K 液体ヘリウムタンクと液相，気相が繋がっているので，2K 液体ヘリウムタンクの超伝導液面計でコントロールされる．

5K シールドの冷却は，超伝導加速空洞の冷却と同時に始められ，2K ヘリウム冷凍機 5K シールド戻りラインの温度計で，4K 液体ヘリウムタンクの先に設けた流量調節弁をコントロールして液体ヘリウムで冷却する．

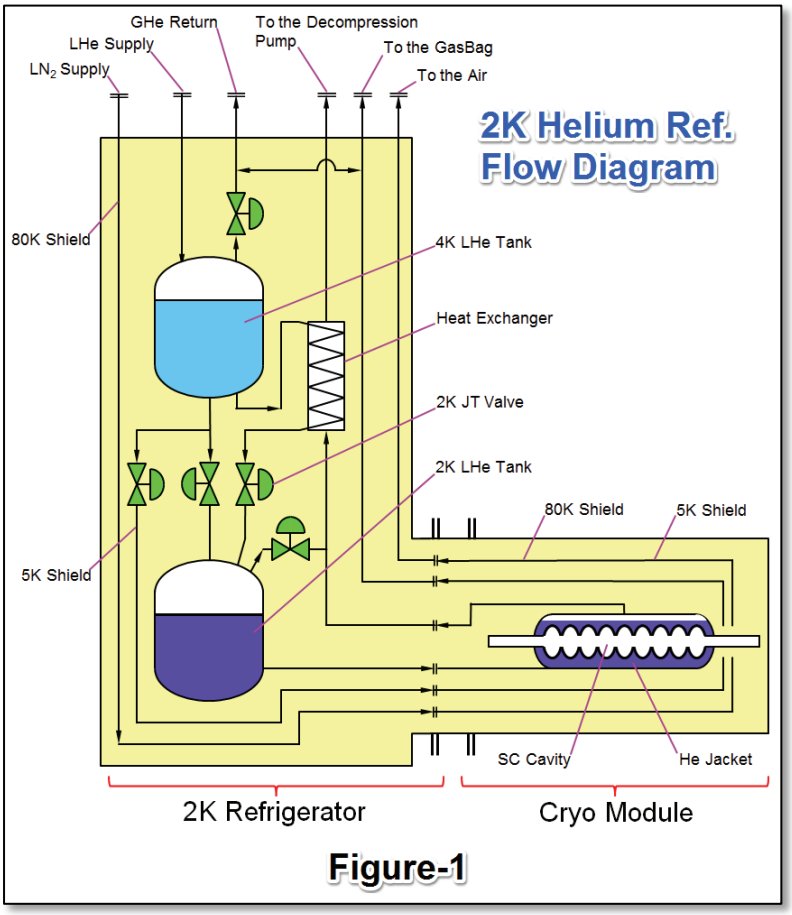


Figure-1

超伝導加速空洞が完全に液体ヘリウムに浸かったならば，2K 液体ヘリウムタンクとヘリウム・ジャケットをメカニカル・ブースターポンプとロータリーポンプで構成した減圧ポンプシステムで 3kPa まで減圧し，超伝導加速空洞を 2K に冷却する．2K 液体ヘリウムタンクは，減圧より蒸発した分の液体ヘリウムを 4K 液体ヘリウムタンクから補給しなければならないが，2K 液体ヘリウムタンクに 4K の液体ヘリウムを供給するのでは効率が悪い．そこで熱交換器と JT 弁を設け，減圧により戻ってくる冷たいヘリウムガスの顕熱を熱交換器で回収して 4K 液体ヘリウムを予冷して 2K 液体ヘリウムタンクに補給する．これにより熱交換器を使わない場合に比べて 2K ヘリウム冷却能力が最大 3 割程度，大きくする事が出来た．

2　2K ヘリウム冷凍機 装置概要図

Table-1 に 2K ヘリウム冷凍機の諸元と Figure-2 に概要図を示す．この 2K ヘリウム冷凍機の特徴は，容積が約 70L の 4K と 2K のタンクを縦に並べて持っていることである．それは，プロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機と同じように，コンクリート・シールドの狭い空間にクライオ・モジュール近傍に設置するので，出来るだけ占有面積を狭くする必要があり，高さ方向の余裕があったのでプロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機と似た設計になった．

設計は，クライオ・モジュールのヘリウム・ジャケット液面を，2K ヘリウム冷凍機の 2K 液体ヘリウムタンク液面でコントロールするので 2K 液体ヘリウムタ

2K Ref. Specifications

NAME OF PARTS	MEASUREMENTS	MATERIAL	REMARKS
Vacuum Vassel	H 2200×φ962×6t	SUS304	
4K LHe Tank	H 660×φ400×3t	SUS316L	V≒ 70L
2K LHe Tank	H 660×φ400×3t	SUS316L	V≒ 70L
80K Shield	H 1850×φ887×2t	A5052	
5K Shield	H 1680×φ787×2t	A5052	
Pipes	φ6.35×1t	SUS316L	
	φ14×0.5t	SUS316L	
	φ17.3×0.8t	SUS316L	
	φ76.3×0.8t	SUS316L	
Angle Valve	Φ 14	SUS316L	
	32A	SUS316L	
	50A	SUS316L	
Heat Exchanger	Pipe φ6×1t	C1220	L≒ 7000mm
	Fin 0.5t	C1020	A≒ 2400cm^2

Table-1

ンクの位置を基準にして設計を始めた．4K 液体ヘリウムタンクは，2K 液体ヘリウムタンクの直上にトップフランジから SUS316L φ25×0.5t の薄肉配管 1 本で吊り下げ，その周りに流量調節弁を合計 5 セット，液体窒素と液体ヘリウムのバイオネット・ジョイントを 4 ポート，減圧ポンプライン，5K シールドガス戻りラインと各ラインの安全弁ポートや計装ポートを配置した．トップフランジは混雑したが，ポート数に比べて外径を小さくすることが出来た．さらに 2K ヘリウム冷凍機のコールドマスを極力小さくするために主な内部の配管は，材質 SUS316LTP の薄肉パイプを使用している．

80K と 5K の輻射シールドは，プロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機やクライオスタットで使用され実績のある，押出成型アルミニウム部品を使用した．各シールドは，その部品に各々液体窒素と液体ヘリウムが流れる SUS316LTP φ14×0.5t をはめ込んで，そこに 2 ㎜厚のアルミニウム板を溶接して製作した．はめ込んだパイプからの伝熱でシールドを冷却する方法は，シールド材に使用されるアルミニウムとステンレスパイプの異材継ぎ手を使用しないため，コストを低く抑える事と高圧ガス取締法を受験するときに有利であった．

流量調節弁は，コールドマスを小さくすることと熱侵入量を小さくすることが目的で，部品に薄肉配管を用いたアングルバルブを使用した．また口径が大きいものは，バルブボディ本体部品にバーリング加工を行うことで，機械加工で作るバルブボディ本体に比べて軽量化することが出来た．

今回製作した 2K ヘリウム冷凍機の冷凍能力は，プロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機よりも大きくするように要求があった．そこで新しく熱交換器を開発し 2 台連結して使用した．しかしプロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機で製作した熱交換器は，真空銀ロウを所外に依頼したので熱交換器の製作費用が高く，設計変更や開発に時間がかかった．そこで専用の真空炉を製作し，熱交換器の開発や製作を短期間で行えるようにした．

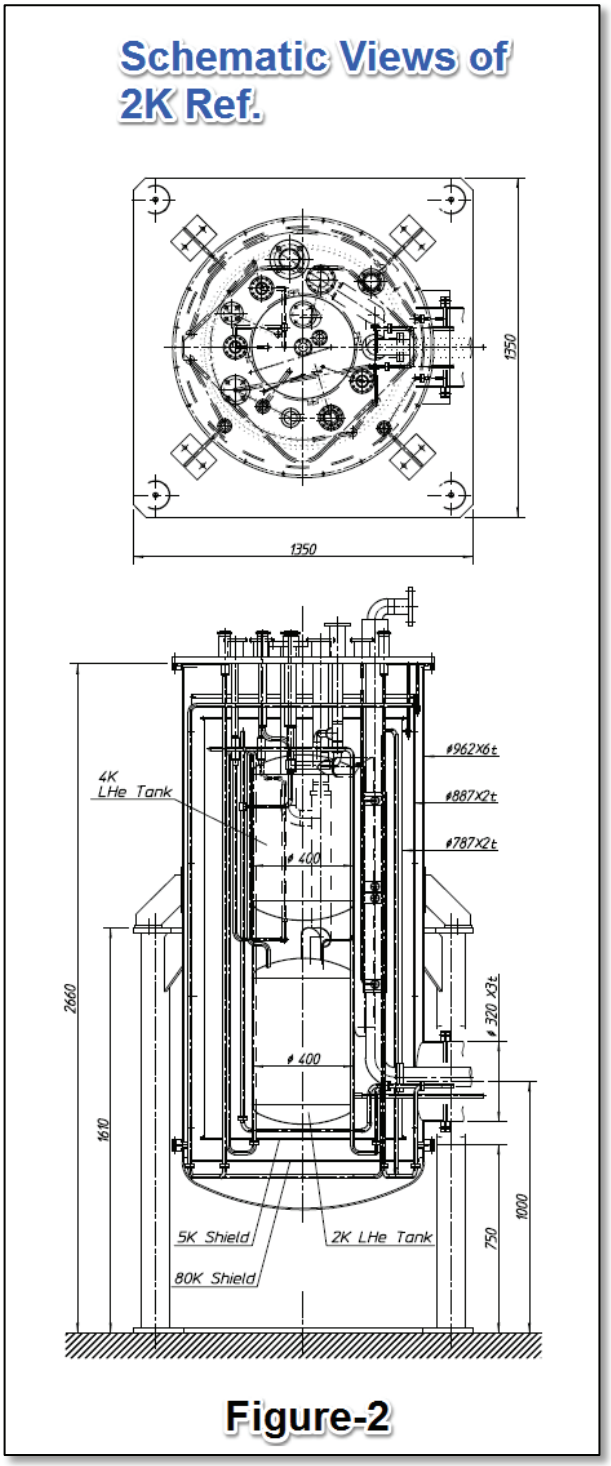


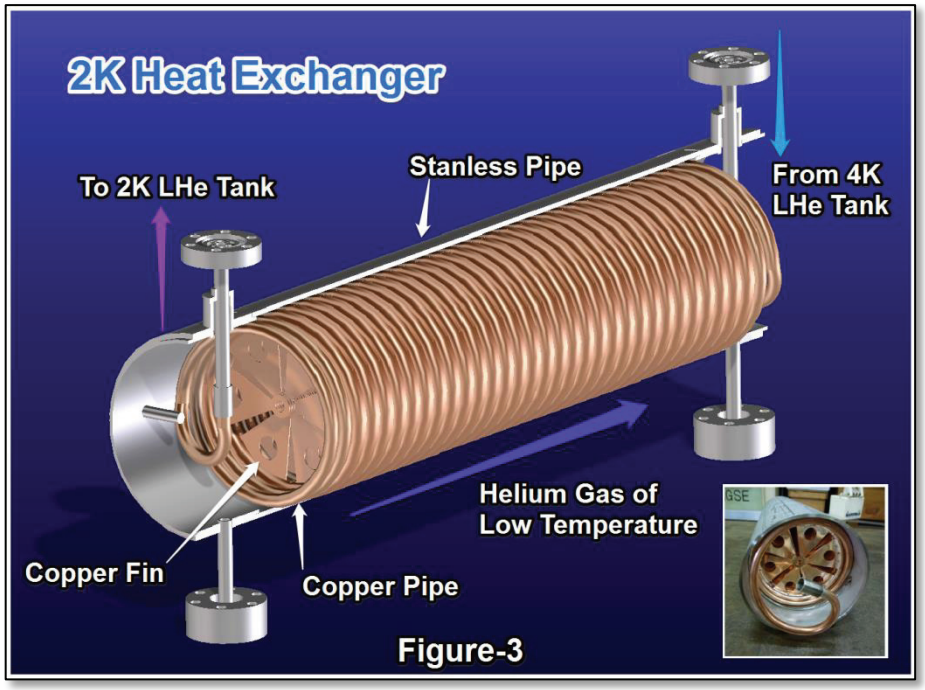
Figure-2

2K ヘリウム冷凍機の組立とクライオ・モジュールの接続は，2K ヘリウム冷凍機内部の各配管のフランジ・ジョイント部を底へ集中することで底部の鏡板を外すだけの簡単な作業でアクセスできる設計にした．

3　熱交換器

熱交換器は，銅パイプと銅製フィンから成り，真空炉で銀ロウ付けされ，パイプに挿入し製作される．この 2K ヘリウム冷凍機に開発した熱交換器を Figure-3 に示す．この熱交換器は，プロトタイプ 2K ヘリウム冷

凍機で使われたものと比べて銅パイプの直径とフィンの面積をそれぞれ 2 倍になるように設計した．製作は，リン脱酸銅パイプを 31 ピッチのコイル状に成型し，そのパイプにプレス成型した銅製のフィンと銅－SUS の継ぎ手を固定し，真空炉で JIS Bag-8 銀ロウ材を使用し真空ロウ付けを行う．銅パイプの長さは，約 7m でパイプ 1 ピッチ当たり 6 枚のフィンがロウ付される．またフィンの固定方法は，軸方向から見て前の段に固定されたフィンと少しずらして固定されるので，ヘリウムガスの流路を遮り効果的にフィンからヘリウムガスへ熱を受け渡されるように工夫した．



熱交換器の性能は，銅パイプとフィンの隙間にしっかりと銀ロウが入っているのが重要であり，その良し悪しで性能が変わってしまう．そこで銀ロウの浸み込みやその条件だし，加温冷却の管理を研究する目的で専用の真空炉を製作した．その結果，ショートサンプルをロウ付け後，切断してロウ材の浸み込み確認や真空炉の温度モニター個所を変えて加温冷却温度の研究を行い，さらに真空炉内の熱交換器の設置位置によって銀ロウの溶け方の確認を気軽に行えたので，短期間で銀ロウ付け条件を決定でき，歩留まり良い熱交換器を製作する事が出来た．

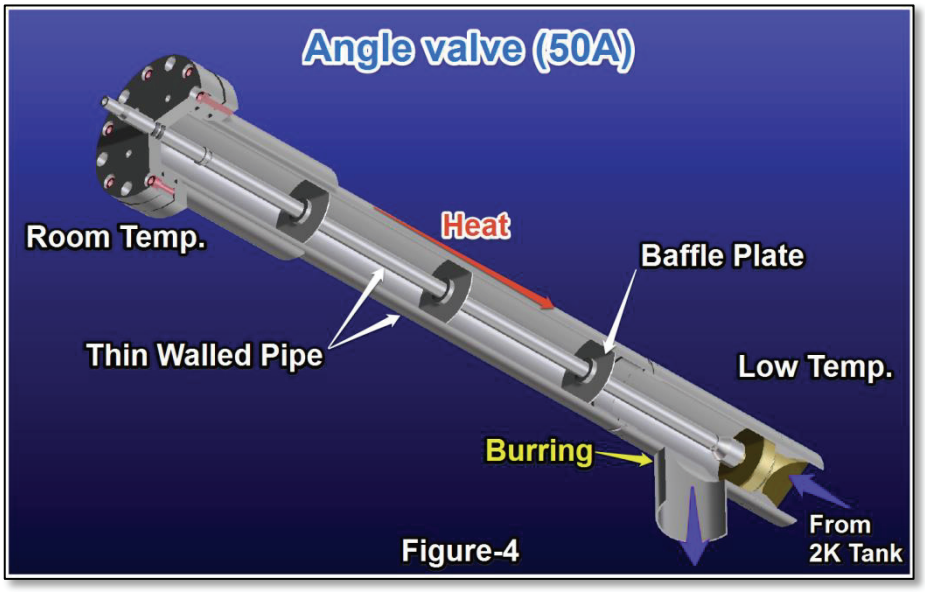
銀ロウ付け後，熱交換器本体は，材質 SUS316LTP の 80Asch5s，長さ約 400 ㎜の外筒パイプに挿入され，取合いフランジとパイプを溶接し，その後，圧力測定パイプと温度計挿入部品を外筒パイプに溶接して固定される．液体ヘリウムパイプと圧力測定ポートに用いるフランジは，2K ヘリウム温度で実績のある SUS316L の ICF34 フランジを使用した．パイプに挿入された熱交換器本体は，焼きなましされているので非常に柔らかく，縦方向に取付けて使用する場合に，振動等によりフィン間隔が詰まって性能が低下しないようにフィンの間隔を保つスペーサーを設けた．この 2K ヘリウム冷凍機に使用した熱交換器は，直列に 2 台を繋げて使用している．

熱交換器は，この大きさをスタンダードとし，必要とされる冷凍能力に合わせて複数台を組合せて対応する．これにより将来大きい冷凍能力が必要になっても組合せて対応することで新たに設計する必要が無く，また真空炉も現在の真空炉で製作できるので製作コストを低く抑える事が出来る．

4　流量調節弁

2K ヘリウム冷凍機で使用されたアングルバルブを Figure-3 に示す．流量調節弁は，トップフランジに溶接されるので室温部からの熱伝導により低温部へ熱が伝わる．そこで 2K ヘリウム冷凍機に使用する流量調節弁は，熱侵入を小さくするようにしたアングルバルブを使用した．このアングルバルブの口径は 50A で，2K 液体ヘリウムタンクからの減圧ポンプへ戻すヘリウムガス量をコントロールする．このバルブの設計は，コ

ールドマスが小さい事，熱侵入量が小さい事，製作しやすい事を目標にして行った．そこでコールドマスを出来るだけ小さくするためにバルブボディにバーリング加工を行って製作した．一般的にバルブボディは，丸棒やブロックを旋盤やフライス盤から削り出しで製作するので重くなってしまう．そこでSUS316LTP-S の 50Asch5s パイプからバーリング加工で鍔出しを行い，その端部を平らに研削して吐出パイプを溶接し製作した．バーリング加工は，鍔出しした所へパイプを突合せ溶接できるので，バルブボディの素材になるパイプへ穴を開けてパイプ溶接する方法と比べて，溶接歪の少ない部品を作る事が出来る加工法である．



室温部から低温部までの長さは，熱侵入量を小さくするために外筒パイプ SUS316LTP φ60.5×0.8t と芯棒 SUS316LTP φ10×0.5t を使用し長さ約 550 ㎜とした．このバルブの侵入熱の量は，室温部を 300K，低温部を 4K として計算すると約 0.6W となる．バルブの熱負荷は，他に輻射によるものがある．しかし伝導による熱侵入量と比べて非常に低い値である．

常温部が閉塞されていて一端が低温になる低温バルブやパイプでは，しばしばその中で激しい自励振動によって起きるサーマル・オシュレーションによる熱負荷の増大を起こすことがある．一旦サーマル・オシュレーションが起きると常温部から低温部へ短時間で熱が運ばれるので，いくら熱侵入量を小さくする工夫をしても全く無駄になってしまうくらいの大きい熱負荷となる．このサーマル・オシュレーションを起こさないために，弁軸にテフロン製のバッフル板を設けてバルブ本体パイプ内の空間を仕切ってサーマル・オシュレーションの発生を防止した．バッフル板は，弁軸上で位置を調整したり後から枚数を追加したり減らしたりする事が出来る．現状，この設計でサーマル・オシュレーションは起きていない．

流量調節バルブに使用される部品は，薄肉配管と溶接されるので適当な差込み穴の要求精度や溶接するための逃げ部加工が重要であり，また各シールドで使われる押し出し成形されたアルミニウム部品は，我々グループで試作を行い開発されたものである．

5　まとめ

ILC 計画で使用され実績のあるプロトタイプ 2K ヘリウム冷凍機の設計を手本として民間企業に製作を依頼した．今報告書で紹介したアングルバルブの部品は，薄肉配管と溶接を行うので穴の公差や溶接方法，溶接逃げの工夫，バーリング条件等，たくさんのノウハウを持っている．同じく熱交換器は，小型で 2K ヘリウム用として実績のあるものが世の中に無い．2K ヘリウム冷凍機の製作は民間企業に依頼したが，産業財産権や知的財産権を守るために重要な部品や装置を支給品とした．2K ヘリウム冷凍機本体は，真空槽内の配置を工夫してコンパクトにする設計を行い，薄肉配管やアルミニウムを使用して出来るだけ軽く製作したこと，バーリング加工を用いて熱侵入の少ない軽いアングルバルブを製作したこと，専用の真空炉を製作して新しい熱交換器を開発したことにより，2K ヘリウム冷凍機単独で行った 2K 液体ヘリウムタンクへのスタティッ

ク・ロスは，約 1.2W と良い結果が得られた．また 2K ヘリウムの最大熱負荷は，クライオ・モジュールを接続して 2K 液体ヘリウムタンクの圧力が 3kPa を維持できるまで超伝導加速空洞を運転した状態で測定した結果，約 40W の冷却能力を得る事が出来た．

KEK では，ILC や ERL の大型計画の予備実験が行われている．それら計画に使用される加速空洞は，2K 液体ヘリウムで冷却される予定になっているので 2K ヘリウム冷凍機が必要なのは，必須であるだろう．特に ERL 計画は，CW 運転が想定され大きい 2K ヘリウム冷凍能力を発生する 2K ヘリウム冷凍機が求められる．海外の大きい実験施設では，大型のヘリウム冷凍機で加圧超流動ヘリウムを作り，離れた超伝導機器へ供給して運転を行っている．我々の 2K ヘリウム冷凍システムは，液化ヘリウム冷凍機で 4K 液体ヘリウムを超伝導装置のそばに置かれた 2K ヘリウム冷凍機に供給して，そこで超流動ヘリウムを作り供給する．どちらの方式も一長一短があるが，我々のシステムは，超伝導装置の近くで超流動ヘリウムを生成するので効率が良く，スーパーリークが起こる確率も低い．しかし超伝導装置と一緒に狭い空間に設置されるので，どうしても占有面積が必要になる．将来の大型計画でこのタイプの 2K ヘリウム冷凍機が採用されるならば，製作コストの圧縮と小型化，そして 2K ヘリウム冷却能力を大きくすることが必要となる．

今後の課題は，今回製作した熱交換器の熱特性を測定し，この 2K ヘリウム冷凍機に相性の良いコールド・コンプレッサーを開発したいと考えている．現在 2K ヘリウムを生成するために，室温部にメカニカル・ブースターポンプとロータリーポンプを合わせた複数台の減圧ポンプシステムを設置している．将来，ERL ビームエネルギー増強で超伝導加速空洞と 2K ヘリウム冷凍機が増設された場合，現在のポンプシステムは，設置場所や電力の面で限界が近いと考える．そこで我々の 2K ヘリウム冷凍機用に，コールド・コンプレッサーの開発が必要になる．この開発は，2K ヘリウムを生成するために重要な開発要素で 2K ヘリウム冷凍システム全体を小さくする事が出来る可能性を持っている．将来は，この 2K ヘリウム冷凍機にビルトイン出来るようなコールド・コンプレッサーを開発したいと思っている．

第5分科会
(情報処理技術)

情報セキュリティ・ポリシー改定作業に参加して

○内藤茂樹 A)

A) 自然科学研究機構分子科学研究所 技術課

概要

自然科学研究機構岡崎 3 機関では、本年度情報セキュリティ・ポリシーの改定作業を行い、私はネットワーク担当の技術職員として改定作業に参加した。今回の改定では情報セキュリティ・ポリシーを基本方針と運用基準に分割した。そのうち運用基準では管理者の権限等を記述したのだが、その権限の内容を上部委員の了承を貰うのに時間を費やした。本発表では、技術職員の視点からの情報セキュリティ・ポリシー改定作業について報告する。

1. 情報セキュリティに関する文書

情報セキュリティに関する文書は、セキュリティ・ポリシーとセキュリティ実施手順書があり、このうちセキュリティ・ポリシーは基本方針と運用基準に分割した。原則どの文書も情報に関する最高責任者がネットワークをどのように統治するかを示すものであるため、署名は情報に関する最高責任者となる。

基本方針は、情報に関する最高責任者がネットワークを統治する思想を示した文書であり、運用基準はそれをどのように実現するかの要点を記述したものである。この 2 つの文章からなるセキュリティ・ポリシーの決定には、改定は困難となるが情報を取り扱う最上位の委員会等で議決し、ネットワークの利用者へは組織の責任者が決定した文書であるとして示した方が良い。もう一つの実施手順書は、セキュリティ・ポリシーを実現するためのネットワークの運用方法を記述した文書であり、ある程度改定に柔軟性を持たせる必要がある。そのため比較的会議が頻繁に開催される委員会での議決のみで改定可能としておく方が良い。岡崎 3 機関では、署名は “岡崎情報ネットワーク担当責任所長”とし、セキュリティ・ポリシーの改定は“岡崎情報ネットワーク管理運営委員会(以下、運営委員会)”の議決によるとした。一方の実施手順書の改定は、運営委員会の下位の委員会である“岡崎情報ネットワーク管理運営専門委員会(以下、専門委員会)”での議決によることにした。

文書の策定方針が決まったら、上位の文書から策定を行う。

2. 基本方針の策定作業

まず始めに文書の適応範囲を決定する。必要な部分を含めるのは勿論、不要な部分が含まれないように注意しなければならない。岡崎 3 機関で以前策定した文書では、その範囲を岡崎 3 機関内の組織名を使っていた。これでは生活協同組合等の、同じネットワークを利用しながら岡崎 3 機関に含まれない組織への適用ができない。そのため適用範囲を岡崎 3 機関のネットワーク(以下 ORION)をとすることにした。

基本方針は岡崎 3 機関の情報セキュリティ 3 文書の最上位に位置する。また岡崎 3 機関は自然科学研究機構(以下 NINS)に所属するため、NINS の情報セキュリティ文書の下位に位置する。したがって基本方針は NINS の情報セキュリティ文書に準拠し、基本方針以外の岡崎 3 機関のセキュリティ文書は、基本方針に準拠しなければならない。基本方針に準拠することによって、岡崎 3 機関の全ての情報セキュリティ文書は、間接的

に NINS の情報セキュリティ文書に準拠することになる。各文書間の関係を図 1 に示す。

基本方針には基本理念、情報セキュリティを担当する組織、評価と改定について記述した。

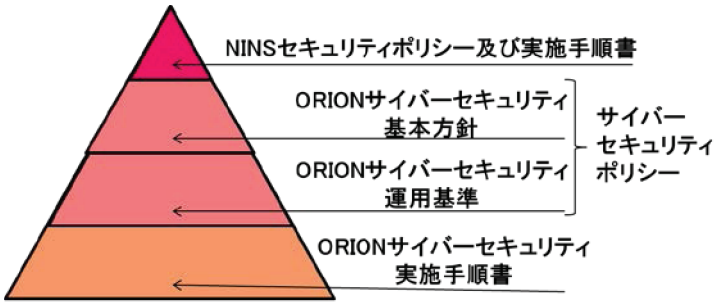


図1 セキュリティポリシー及び手順書の位置関係

基本理念として、岡崎 3 機関は大学共同利用機関法人であることを念頭に、公開性と利便性とが調和した情報セキュリティを実現することを目指すことにした。大学共同利用機関法人は大学の研究者にとって研究拠点となる公開の場であり、公開性と利便性とが十分に確保されている必要がある。それには安全性を重視し過ぎるあまり閉鎖的になってはならないという立場を採る必要がある。しかし一方では、適切なレベルの情報セキュリティを確保しなければならないのは明確である。したがって基本方針では、情報及び情報環境の扱いに関する方針を明文化することによって、公開性や利便性を損なわずに安全性を確保する為の指針を提供することを目的と定めた。また事前に予測することが不可能なセキュリティ上の問題が起きる可能性を考慮し、柔軟に対応出来るように記述した。そして ORION の利用者に情報の取り扱いに関する危険の認識と責任の自覚を促すための啓発活動と研修の推進をすることを定めた。

情報セキュリティを担当する組織として、“情報化責任者(機関 CIO)”と“サイバーセキュリティ組織”を定めた。機関 CIO とは、ORION 内の全てのサイバーセキュリティに関する総括的な権限と責任を有する者であると定め、岡崎 3 機関の岡崎情報ネットワーク担当責任所長を機関 CIO の助言機関であるとした。サイバーセキュリティ組織は、ORION 全体を担当する“全体組織”と、ORION の部分を担当する“個別組織”を定めた。個別組織は全体組織の下位になる。また外部への情報発信を目的としたサーバの管理者間で情報共有を目的とした ORION サーバ管理者組織についても定めた。全体組織は ORION サーバ管理者組織に情報セキュリティに関する情報を提供する。

評価と改定については、情報システムの変更、情報セキュリティの技術的進歩、新たな脅威等を考慮して、Plan-Do-Check-Act(計画-実行-点検-処置)モデルにより運用するように努め、期間を定めて定期的に評価と必要な改定を行うこととした。また評価する際には闇雲に高レベルのセキュリティを求めず、各情報の機密性、完全性、可用性の 3 つの特性ごとに脅威と脆弱のレベルを考慮したリスク値を設定して行うことが望ましいことも記述した。

3. 運用基準の策定作業

運用基準は基本方針の下位に位置し準拠する。したがって適応範囲も基本方針同様 ORION である。運用基準では、情報セキュリティ技術、電子化情報のセキュリティ、人的セキュリティ及び評価と改定を記述した。

情報セキュリティ技術には、ORION への接続の仕方、ネットワーク管理者の権限及び問題発生時の行動指針、ORION に接続する機器に求められる事柄及び情報セキュリティ機器について記述した。現在 ORION では目的別セグメントの運用をしている。したがって接続の仕方としては、目的別セグメントの大まかな分類と概略、各セグメントを利用できる条件を記述した。ネットワーク管理者の権限及び問題発生時の行動指針としては、問題発生時には全体組織に報告し指事を仰ぐこと、緊急時には事後報告で良いが必ず評価を受けて以後の対応に生かすように努めること、Firewall 等の情報セキュリティ機器を運用すること、及び守秘義務に関しての記述をした。また、ネットワーク管理者は下位のネットワークを構築し、下位ネットワーク管理

者を指名して権限を委譲することも可能とした。基本方針で定めたサイバーセキュリティ組織も含めた組織の関係を図 2 に示す。

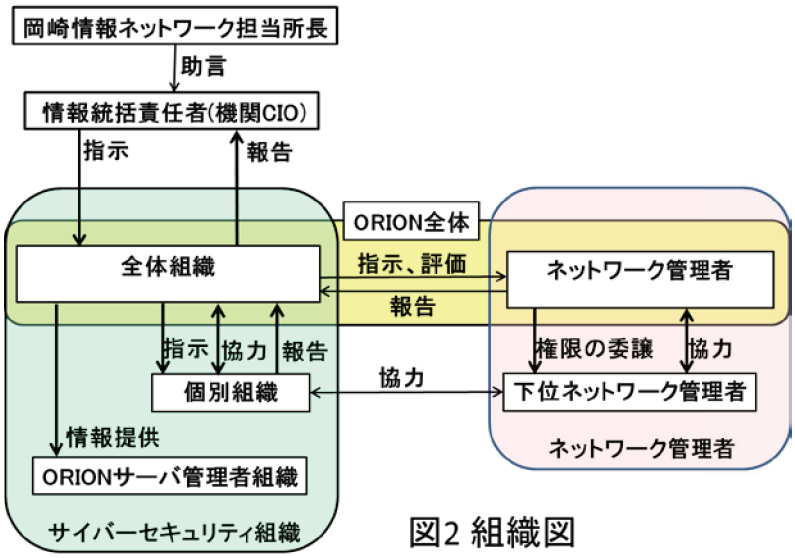


図2 組織図

ORION に接続する機器に求められる事柄としては、接続前及び接続後ともに情報セキュリティに十分配慮しなければならないとし、特に Windows と MacOS に関してはアンチウィルスソフトの導入を義務づけた。また NAT やトンネリング装置を設置し ORION に接続するには、運営委員会での許可を義務づけた。情報セキュリティ機器に関しては、機器の最新性と発見した問題への迅速な対応について記述した。

電子化情報のセキュリティでは、基本的な考え方として、通常の印刷物とは別の慎重な取扱いが求められるため、それに応じた体制と規則・ガイドライン等の整備を求め、また各情報は機密性、完全性、可用性を考慮して取り扱わなければならないとした。そして情報を ORION で扱われる全ての電子データと定義した。情報のセキュリティとしてはアクセスコントロールなどの機器側での設定のみばかりで無く、アカウント管理や情報の取扱など利用者個人が行うべき事柄も記述した。

人的セキュリティとしては、利用者に対して法令等やセキュリティ・ポリシー等を遵守することを求める一方、情報セキュリティ対策について教育研究上の利便性を著しく損なう点、遵守することが現実的に困難な点については改善を求めることができるとした。また啓発活動と研修を推進することも記述した。

評価と改定に関しては、上位文書の基本方針と同一とした。

4. 実施手順書の策定作業

実施手順書は運用基準の下位に位置し準拠する。したがって適応範囲も ORION である。運用基準では実際に ORION を利用する上で守らなくてはいけないことや、各組織が行うこと等を具体的に記述した。

セキュリティ・ポリシーの 2 文書との大きな違いは、改定を行うのが運営委員会ではなく、その下位組織にあたり、比較的頻繁に会議が開催される専門委員会である点である。これは実施手順書が具体的な内容を記述していることから、状況の変化に速やかに追随して改定可能とするためである。また項目が多いため、第二章に文書内で使う言葉の定義を行った。始めに言葉の定義を行っておけば、以降ではその言葉を説明せずに使って文章を簡潔に記述するためである。

実際に ORION を利用する上で守らなくてはいけないこととして記述した内容としては､アカウントを登録する時の申請や、機器を接続する際の申請方法等である。機器に関しては単純な端末であったり、外部に対してサービスを提供するサーバであったりと種別が複数あるため、それぞれについて区分して記述した。当然のことながら、各機器に施すセキュリティ対策は運用基準で定めたことに準拠している。

電子化情報のセキュリティとして、各情報を格付けすることを求めた。格付方法は NINS が定める方式に従い取り扱う。取り扱いの例としては、外部に出してはならないとする情報を、外部の民間企業等が提供するストレージサービス等に転送することを禁止する等である。なお、この外部の民間企業等が提供するサー

ビスに関して、特に外国のサーバ上に情報を置く場合についての注意事項を記述した。理由は、保存先が日本国外の場合、保存したデータを日本国の法律によって守ることができないからである。それは保存されたデータをどのように扱うかは、そのデータを保存している機器が設置されている国の法律に依るので、保存されたデータに対して開示請求があった場合、日本国の法律であれば却下された事案が許可されてしまう可能性があるためである。

各個人による情報管理の項目を設け、その中にソーシャルメディアを利用する上での諸注意を記述した。これは総務省人事・恩給局が公開している「国家公務員のソーシャルメディアの私的利用に当たっての留意点」という文書を元に作成した。

各組織の運営に関しては、基本方針、運用基準に準拠した。作業内容まで詳細に書くと想定外の事象への対応が難しくなる可能性を考慮し、指針と明確な義務を記述するに留めた。

啓発活動に関しては、一般利用者やサーバ管理者等の役割に応じた研修を行うこととした。これは必要となる情報に違いがあるためである。そして研修に使った資料は後日 WWW 等で降下するように努めることとし、ORION の利用者が情報セキュリティに関する知識を独学できるような情報を提供するように努めることも盛り込んだ。またこの実施手順書は、利用者に熟読することを要請するには長すぎる。したがって研修同様に役割に応じたガイドを作成することになった。ガイドには最低限守れば良い項目を列挙し、できる限り短くする予定である。

評価と改定に関しては、上位文書の運用基準とほぼおなじである。ただし、改定を議決するのが、専門委員会である点が違う。

5. 改定作業に関する考察

今回は各文書を改正すると言うことで、現行の文書をできるだけ残すようにしたのだが、これが良くなかったと感じている。理由は現行の文書の制定時期が古いため現在の ORION 運用状況に合うように修正すると、元からの文章と加筆した文章との擦り合わせが簡単では無かったからである。おそらく初めから新規に作成した方が早くて整合性をとりやすかっただろう。また使う言葉や表現方法等が技術職員からすれば問題ないと思われることも、研究者の方から問題があると指摘を受けることもあった。特に運用基準案のネットワーク管理者の権限の項目では厳しい御意見を頂いた。言葉が持つ意味や重さ、文章がどのように受け取られかねないかについての考察が不足していたと実感している。これは案を作成する会議は技術職員を主体として行いつつも、定期的に作成途中の案を専門委員会で確認して貰えば良かったと思う。次回の改訂時には、これらの反省点を生かして作業を行いたい。

6. 今後の道筋

来年度より改訂版の基本方針、運用基準、実施手順書が施行される予定である。今後は PDCA サイクルが開始され、規定した内容に沿った運用を行っていかなければならない。特に利用者に対する啓発活動や研修に注力する必要があるだろう。そして定期的に点検し、必要なら改定を重ねていかなければならない。規定は策定することだけで無く、運用していくことも重要である。ネットワークに携わる技術職員として、今後も情報セキュリティの向上に努めていきたいと思う。

ゲスト用無線 LAN アカウント申請システムの構築

○川戸聡也 [A)]，大森幹之 [B)]

[A)] 鳥取大学 技術部 工学・情報系部門（総合メディア基盤センター）

[B)] 鳥取大学 総合メディア基盤センター 情報基盤研究開発部門

概要

鳥取大学では学外者にゲスト用無線 LAN アカウントを発行している．これには，従来，紙面による申請と管理者による手動発行を要していた．そのため，即時発行できず申請者と管理者双方に負担を掛け，不便であった．そこで，両者の負担を軽減し利便性を向上するため，申請者による Web 上での即時発行を実現する「ゲスト用無線 LAN アカウント申請システム」を構築した. 本報告では当システムの概要について紹介する．

1　はじめに

鳥取大学（以下,「本学」という.）では，学外者でも必要に応じて学内でネットワークを利用できるよう，ゲスト用無線 LAN を提供している．この無線 LAN の利用にはゲスト用無線 LAN アカウントが必要であり，その発行管理は総合メディア基盤センター（以下，センターという.）にて行っている．従来，申請者がセンターに紙面で発行申請を行い，紙面を受け取ったセンターの担当者がシステムに手動登録することでアカウントを発行していた．この方法では，申請者と管理者双方に負担が掛かり，申請と発行にタイムラグが生じるなど不便であった．そこで，両者の負担を軽減し利便性を向上するため，申請者による Web 上での即時発行を実現する「ゲスト用無線 LAN アカウント申請システム」(以下, 申請システムという.) の構築を考えた．次項より，本学のゲスト用無線 LAN や構築した申請システムの概要について紹介する．

2　ゲスト用無線 LAN

本学には教育系，研究系，事務系，ゲスト系と呼ぶ 4 つのネットワークが存在する．このうち，ゲスト系は SINET 直下にファイアウォールを設置したネットワークであり，本学内部のネットワークには接続されていない．また，セキュリティ上，学内ネットワークに比べて厳しく通信を制限している．このゲスト系ネットワークの VLAN に配置しているのがゲスト用無線 LAN であり，本学統一認証 ID を持たない学外者を主な対象として提供されている. 接続方式として WPA2-PSK, 暗号化方式に AES を採用し, Cisco Wireless Services Module（WiSM）を用いた Web 認証にて利用者を制限している（図 1）.

従来は申請者による紙面での申請及び WiSM に対する管理者による手動のアカウント登録が必要であり，以下のような問題点があった.

・紙面申請のため処理の負担が大きく，アカウントの申請と発行にタイムラグが発生

・アカウントの登録及び削除が管理者による手動作業

・アカウントの有効期間が最長 1 ヶ月（WiSM にアカウントを登録する場合の制約）

今回は WiSM 内でアカウントを管理するのではなく，新たに構築する申請システムにてアカウント管理を行うようにし，WiSM が申請システムを都度参照して認証を行うこととした．それにより，問題点を解決し負担の軽減と利便性の向上を図った.

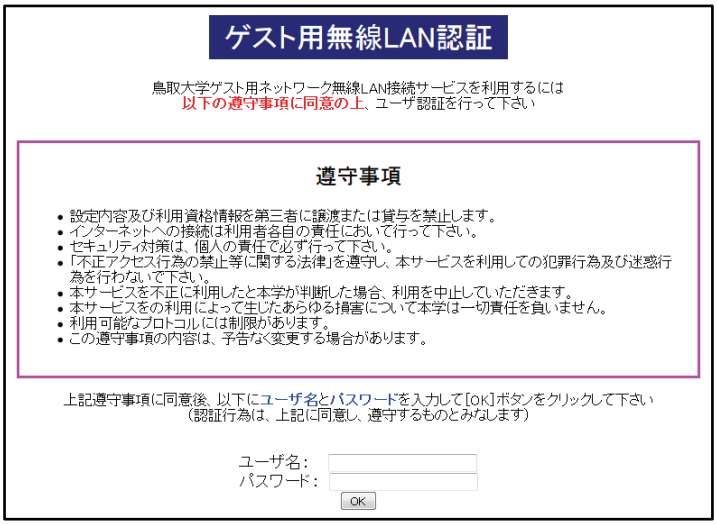


図 1　Web 認証画面

3　ゲスト用無線 LAN アカウント申請システム

以下をコンセプトとして申請システムを構築した．

・Web 上でのアカウント申請及び申請済アカウントの確認が可能

・アカウントの即時発行を可能とし，発行責任の承認を兼ねる

・統一認証 ID を利用したシステムの利用（教職員によるアカウント作成が可能）

・有効期限（最長で申請年度末までを想定）付きのアカウントとし，期限切れ時に自動で削除される

申請システムの構成図を図 2 に示す．申請システムサーバを仮想マシン上の CentOS 6 に構築した．WiSM サーバは既存である．次項より各機能と申請の流れについて述べる．

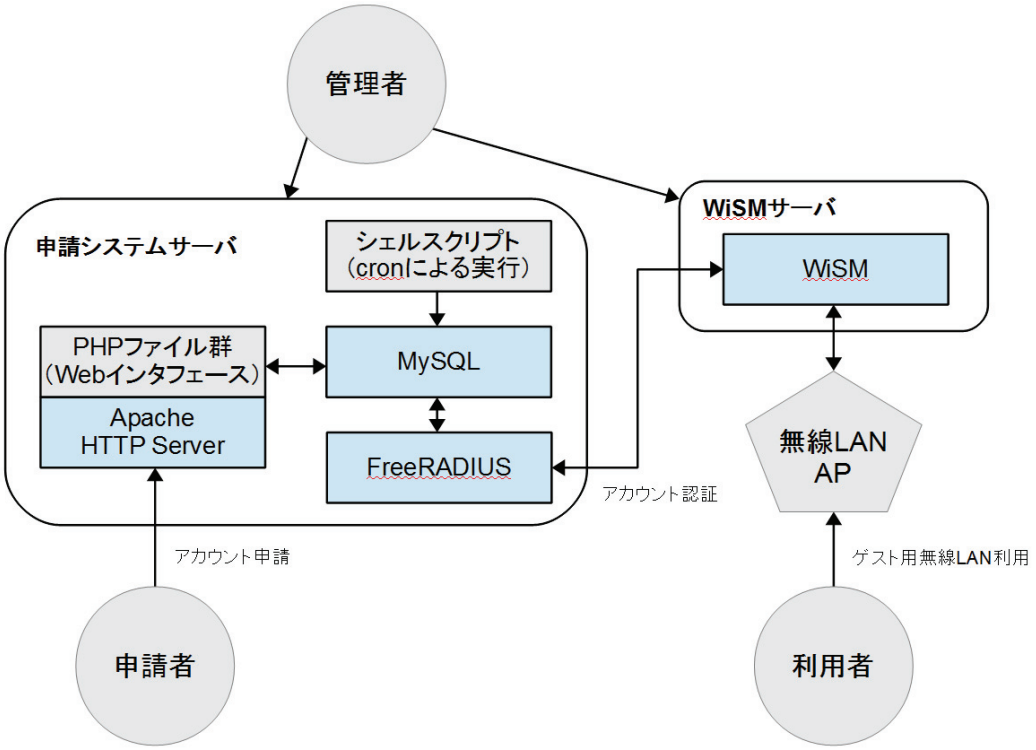


図 2　申請システムの構成図

3.1　アカウント認証

アカウント認証は，認証処理を担う FreeRADIUS とアカウントを格納するデータベースを担う MySQL とを連携して作成した[1][2]．RADIUS には認証（Authentication）と課金管理（Accounting）の機能があるが，今回は認証機能のみを利用した．

両ソフトウェアをインストール後，MySQL にて FreeRADIUS 用のデータベースを作成する．そこに，予め FreeRADIUS に用意されている MySQL 連携用各テーブルが記述済みの schema.sql のうち，認証に必要な「radcheck」，「radreply」，「radusergroup」の各テーブルをインポートする．各テーブルの利用目的は以下の通りである．

・radcheck：認証に利用されるアカウントの格納

・radreply：各ユーザに対する応答属性の定義

・radgroupreply：各グループメンバーに対する応答属性の定義

今回は属性定義が必要なく，radreply と radgroupreply は未定義としたが，これらが無いとクライアントからの接続に失敗するためテーブル内情報が未定義でも必須となる．「radcheck」の列項目（アカウントに付随する情報）は表 1 に示す通りである．「id」から「value」は予め設定されており，「applicant」から「notes」までを付け足した．

表 1　radcheck の列項目

列名	説明
id	行を一意に識別するための値
username	アカウントのユーザ名(ユニークキーに手動で設定)
attribute	固定文字列「Password」
op	固定文字列「=」
value	アカウントのパスワード
applicant	申請者の統一認証 ID
record_date	申請年月日
start_date	利用開始年月日
end_date	利用終了年月日
notes	付記事項

後はクライアント側である WiSM の IP アドレス情報と共有鍵(Shared Secret)を client.conf に記述し，WiSM でアカウント認証を行う際に申請システムを参照するように設定することで認証の仕組みを構築した．併せて，WiSM ではなく外部のデータベースにアカウント情報を保存することにより，アカウントの有効期限を自由に設定可能とした．

3.2　Web インタフェース

Web 上でのアカウント申請を可能とするため，ブラウザ経由で利用可能な Web インタフェースを，PHP，HTML，CSS を組み合わせて作成した．Web サーバソフトウェアには Apache HTTP Server を用いた．

図 3 に作成したファイル群を示す．申請者に実際に見えるファイルはログインページ（login.php），ログアウトページ(logout.php)，アカウント申請ページ(registration.php)，アカウント管理ページ(management.php)である．その他のファイルではログイン処理（ldap.php），パスワードや CSV ファイルの生成（password.php，csv.php），データベース処理（db.php），セッション管理（session.php），スタイルの指定（css.css）を行い，申請者に見えない内部で処理される．矢印は各ファイルの対応関係を表している．

アカウント申請ページ（図 4）にてアカウント申請時に設定可能な項目は以下の通りである．以下の設定に加えて，チェックボックスを用いた順守事項への同意確認も行う（同意しなければ申請不可）．

・一括してのアカウント申請（999 個まで）

・アカウントのユーザ名（半角英数字 8 文字までの指定した文字列に連番の数字を接尾に加えたもの）

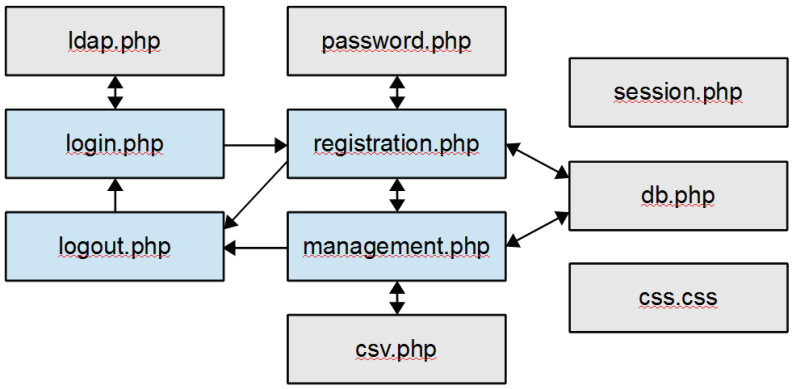
・利用期間（最長で申請年度の年度末まで）　・付記事項（利用者や利用目的の入力）

また，アカウント管理ページ（図 5）の機能は以下の通りである．

・申請アカウント一覧の表示（ユーザ名，パスワード，申請日，利用開始日，利用終了日，付記事項）

・申請アカウント一覧の CSV 形式でのダウンロード（ユーザ名とパスワードのみ）

・申請アカウントの選択削除



・login.php　：　ログイン処理を行うページ（ログインページ）
・logout.php　：　ログアウト処理を行うページ（ログアウトページ）
・registration.php　：　アカウント申請を行うページ（アカウント申請ページ）
・management.php　：　申請アカウントの管理を行うページ（アカウント管理ページ）
・ldap.php　：　ログイン時にLDAPへの問い合わせを行う
・password.php　：　パスワードを自動生成する
・db.php　：　データベースに対する処理を行う
・csv.php　：　申請アカウントをCSVで出力する
・session.php　：　セッションの処理を行う
・css.css　：　CSSのスタイルシート

図 3　作成したファイル群

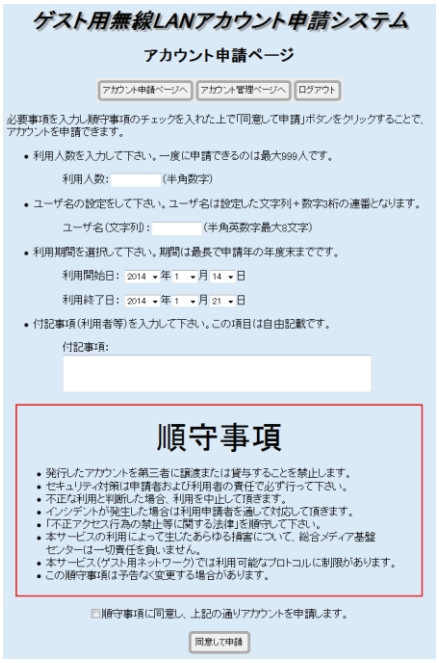


図 4　アカウント申請ページ

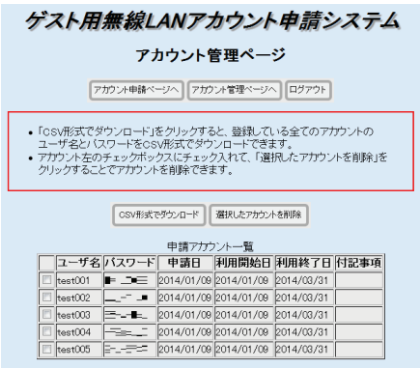


図 5　アカウント管理ページ

3.3　アカウントの自動削除

有効期限切れアカウントはスクリプトと cron の連携により自動で定期的に削除されるようにした．実行時年月日が利用終了年月日を超えているアカウントを削除するシェルスクリプトを作成し，毎日 0 時 5 分に実行されるように設定した．これにより，有効期限切れアカウントは自動で定期的に削除され、申請者によるアカウント登録と併せ，アカウント管理に係る管理者の負担を大幅に軽減することができた．

3.4　申請システム利用の流れ

申請者による申請システムの利用の流れは以下の通りである．

①ブラウザ経由で「ゲスト用無線 LAN アカウント申請システム」ページ（学内限定）にアクセスし，本学統一認証 ID を用いてログインする．

②「アカウント申請ページ」にて必要事項を入力し，順守事項に同意した上でアカウントを申請する．

③「アカウント管理ページ」にて申請アカウントの一覧を確認する．必要に応じて，アカウントの削除や CSV による出力を行う．

④ログアウトしてアカウントの申請を終了する．

紙面に記入する必要がないため，申請者の負担が軽減された．また，申請したアカウントは即時発行（利用可能）であるため，申請と発行のタイムラグを解消することができた．

4　おわりに

ゲスト用無線 LAN アカウント申請システムの構築により，申請者と管理者双方の負担を軽減し利便性を向上する仕組みを準備できた．本報告書執筆時点ではまだ実際に運用されておらず，アカウント発行に係る規則を整備している段階であるが，この作業が完了の後，早い段階で運用を開始する予定である．また，この申請システムの構築は筆者の技術向上を兼ねて行ったものであり，機能やインタフェース，排他制御など未熟な部分が多い．随時改良していく予定である．

参考文献

[1] Installing FreeRadius and MySQL on CentOS 5.8, http://blog.garciagea.com/?p=192, 2014/1/14.

[2] guide/SQL HOWTO, http://wiki.freeradius.org/guide/SQL-HOWTO, 2014/1/14.

新たな利用者層の開拓を目指すホスティングサービスの広報戦略

○赤尾健介 A)

A) 京都大学 情報部

概要

京都大学（以下,「本学」と略記）の情報環境機構では，学内に向けホスティングサービスを提供しており，利用は年々増加している．しかし，サービスに関する学内に向けた情報発信は，既にサービスを認知し利用している，または利用を検討している教職員に向けた，利用方法とシステムの仕様に関する説明が主体であり，新たな利用を開拓する広報のアプローチが不足していた．本稿では現状の問題点に関する考察と検討した今後のコンセプトについて述べる．

1　京都大学で提供するホスティングサービス

本学の情報環境機構では，汎用コンピュータシステム（以下,「汎用コン」と略記）内に占有または共有のバーチャルマシン（以下,「VM」と略記）を稼働させ，本学で活動する教職員が学術研究や教育等に関する情報発信・広報を行う場面で，Web を活用するためのホスティングサービスを展開している．このサービスは「ホスティング・ホームページサービス（以下,「本サービス」と略記)」と称して，現在は用途・目的にあわせて選べる３種類のラインナップを用意している．具体的には，共用の Web サーバによる Web 公開環境を提供する「ホームページサービス」と root 権限を付与した占有の VM サーバ環境を提供する「VM ホスティングサービス」，そしてマルチメディアコンテンツの配信を行う「ストリーミングサービス」の３つで構成されている．

本学ではインタネットが日本で普及し始めた 1995 年以降も，長らく全学向けのホスティング環境が整備されなかったため，学内の本部組織や部局組織から各研究室に至るまで，様々な場所で独自にサーバを導入し，Web サイトや電子メールなどが運用されてきた背景がある．しかし，これは，物理的な計算機の購入と設置場所の確保，電力や周辺設備，メンテナンスのための人員が必要になり，費用面・労力面ともに組織にとって大きな負担となる．さらに全学的な視点で言えば，これらの負担は学内で重複しており非効率である．世の中では年々向上する計算機の処理能力と仮想化技術の浸透により，最近は Web を活用する現場ごとに個別の計算機を持つ必要性がなくなり，これらはホスティングへのシフトが進んでいる．そして本学が所有する汎用コンも，１つの大型の計算機システムに Web 活用環境を集約するためのホスティングを十分担うことが可能である．そこで，汎用コンを用いて本サービスを提供することで，学内に点在しているサーバ機器の役割を汎用コンピュータの中に格納し，各組織の Web 活用環境の維持に必要な負担を軽減して，さらに全学の視点では効率化されることを期待している．

2　サービス利用件数の推移と傾向

本サービスの利用件数の推移を図 1 のグラフに示す．このように，利用件数はサービスの提供開始以降，年々増加してきた．また 2009 年に root 権限付きの VM ホスティングサービスを加えたことで，これまで独自にサーバを作り込み，ホームページサービスの共用サーバの動作要件では代用できないケースも受け入れることが可能になった．また，2013 年にサービスの提供内容と利用負担金を改定した結果，本サービス導入

の敷居が下がり，利用件数はさらに伸びている．

しかし，これらの申請のうち，大半が新規にサイトを構築するケースであり，独自に運用されていた Web サーバでの公開から本サービスに移行するケースは少ない．図 2 のグラフは 2010 年 5 月に調査を行った際に把握できた，京都大学で公開される Web サイトとサーバ数（値はホスト名ベース）を示したものである．なお，サーバの設置が登録制や許可制ではない本学では正確な個体数の把握は困難で，実際には学内外に本学に関係するサイトやサーバはさらに存在しており，この値は「少なくともこれだけのサーバが学内で稼働している」というものである．前章で述べた通り，これらを汎用コンの環境へ集約し負担を軽減・効率化することが，本サービスの 1 つの重要なミッションと言えるが，2010 年の調査以降も既存の独自サーバからの移行は，VM ホスティングサービスで 7 件，HP サービスで 34 件に留まっている．従って，本サービス提供の成果として，学内でこれ以上の独自サーバの増加に歯止めをかけることに貢献はしたが，既存の独自サーバを格納し集約することはあまり進んでいないと考えられる．

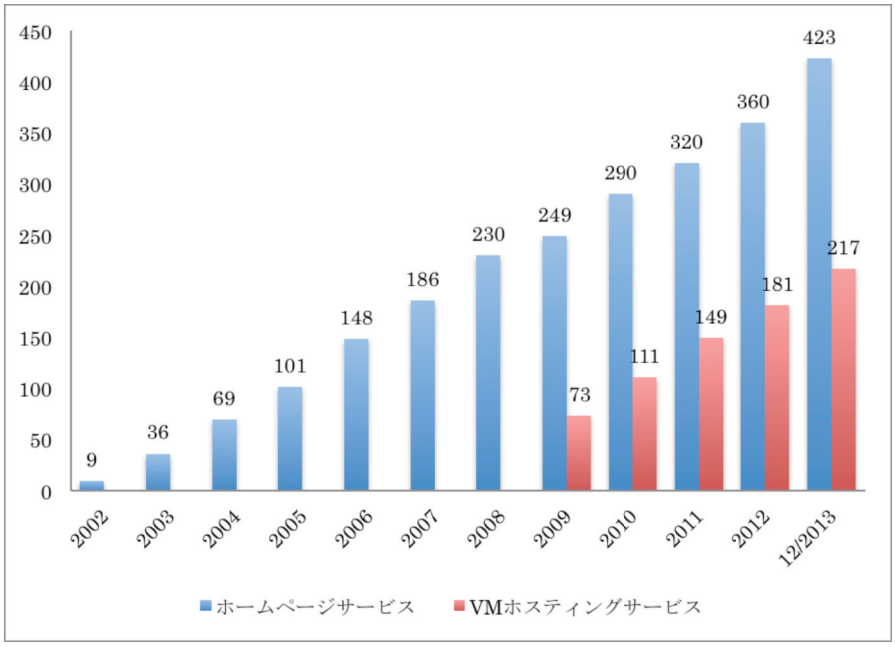


図 1. 利用件数の推移(2013 年 12 月現在)

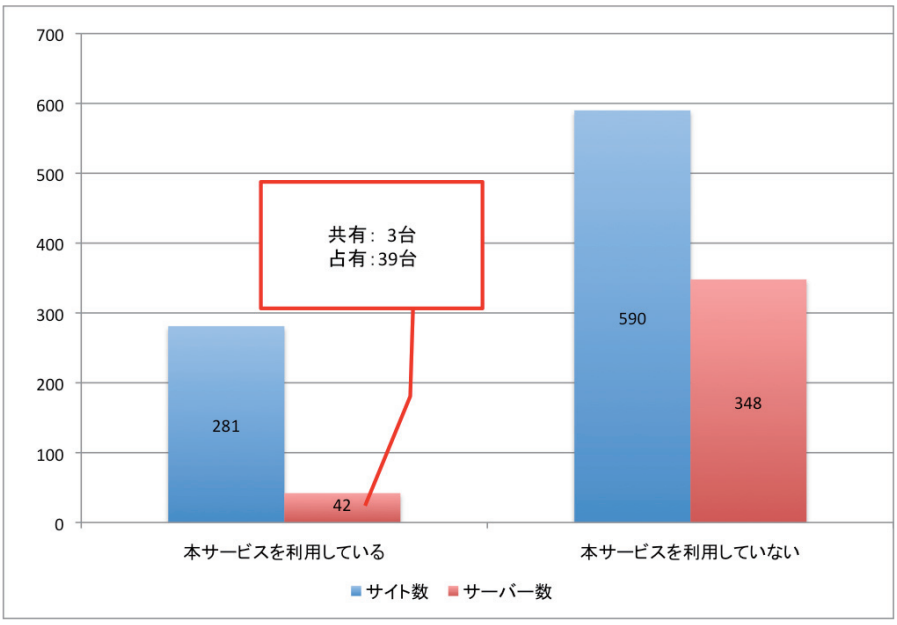


図 2. 実態調査(2010 年 5 月現在)

3　サービス広報の現状と問題点

このサービス申請状況を鑑みると，新たな組織の立ち上げといった，サイト新設が必要になるケースなどでは，本サービスを知り利用を検討してもらえているのに対し，独自に導入したサーバが既に稼働し現状のまま運用し続けても支障がないケースでは，情報の周知が十分でないと考えられる．

本サービスに関する広報は現在，Web サイトとパンフレットで行っている．両者ともサービス内容と使用方法について説明しているが，ページ数や画像等の差し込みに制約が無い Web では詳しく説明しているのに対し，スペースに限りのあるパンフレットはサービスラインナップと申請方法のみを説明している．

これまでの Web サイトやパンフレットは，既にサービスの利用を検討または利用している構成員に対し，より詳しい情報や規定などを説明する内容が主であった．特にパンフレットは，講習会や窓口等で頒布はしているものの，サービスの利用を検討している構成員との面会による利用相談の際の説明資料として活用するケースが多く，内容もそれを前提とした構成で作成していた．従って，パンフレット自身に，Web 関係に携わる教職員に対して，本サービスを広めるための利用開拓効果が期待できるものではなかった．また，Web に掲載する情報に関しても，情報環境機構の提供サービスが年々増え続ける中，サイトで発信される膨大な情報の中に本サービスの情報が埋もれてしまい，アクセス者が目的のサービスまでたどり着きにくい状態になっている．特に，それぞれが持っている情報関係の課題や悩みに対し，どのサービスを利用することで何ができるのか理解しにくい現状がある．

そのような状況で，新たに Web 活用の必要に迫られるケースでは，担当者がその手段を探すために学内で情報収集を精力的に行うため，同じ様な業務に携わる教職員などに尋ねたり，情報環境機構や大学本部に問い合わせたりする過程で，本サービスの情報へたどり着く．しかし，既に独自に Web 環境の構築が済んでいるケースでは，そもそもそのようなプロセスに至ることがほとんどない．だが，例えば情報環境機構の担当者が機構の活動に関するキャラバンを行い，ヒアリングなどでコミュニケーションを取る中で，現在運用中のサーバが本サービスで代用でき，負担が軽減される旨を一度理解されると，機器の更新や故障のタイミングで本サービスへの移行につながっているケースは多々ある．従って，本サービスへの移行のニーズはあるが，サービスの存在を知らせる広報のアプローチが不足していると考えられ，学内の Web 関連の担当者にいかに広めていくかが問題であった．

4　Web とパンフレットを使い分ける広報戦略の検討

Web サイトがユーザからのアクセスを待たなければならない受動的な情報発信手段なのに対し，パンフレットはターゲットに向けて配布できる能動的な性質を持つ．これらのことから，これまで行ってきた両媒体で同様の内容を記載することをやめ，それぞれの手段の特性を活かす情報を記載し，広報の役割を棲み分けるべきであるという結論に至った．すなわち，導入ガイド的な位置づけであったパンフレットを新たな利用層を開拓するためのチラシに位置づけ，サービスの存在を周知する役割を担わせる．そして，サービスに興味を持ち詳細を知りたい構成員にはそこから Web へ誘導し，サービスの内容や導入方法・利用サポートの詳細情報を提示する．

同時にパンフレットに記載する内容を本サービスに限定せず，関連や競合する他の情報環境機構のサービスについても記載することで，それぞれのケースに合ったサービスへたどり着けるようにする．また，これまでサービス提供目線でサービス別の情報掲載だったが，これを利用者目線の目的別に変え整理する．これにより各サービスで扱える範囲と，サービスの活用で何が変わるか（メリット・デメリット）を明確にするとともに，業務に関係しない部分を読み飛ばせるようにすることで，情報の見つけにくさを解消する．さらに，利用ケースを視覚的にわかりやすくするなど，パンフレットの中の情報を読み手が消化しやすいよう，

デザインにも配慮する．

今回の検討過程では，まず始めに情報環境機構で展開中のサービスと手続きについてまず把握を行い，そこから本サービスへの関連や競合を調べた．これは，機構のサービスを役割別に整理することで，利用者目線の目的別で本サービスやその他の関係するサービスを提示可能にするためである．具体的には，まず始めに発想技法的に機構のサービスとその役割，手続きやバックグラウンドとなるシステムなど，思いつく全ての情報を吐き出し，それを本サービスの各ラインナップの要件でフィルタリングすることで分類した．そして，今回作成するパンフレットは，Web 管理担当の教職員に向けた機構サービス活用に関するガイドという位置づけにし，目的に応じて提供サービスを適切に使い分けるため，または複数サービスを組み合わせるために有益な情報を選定・掲載することにした．

5　今後の課題とまとめ

現在は今回検討したコンセプトのもと，サービスを運用する技術職員・利用者対応を行う窓口担当の事務職員・パンフレットのデザイン担当の３つの立場のスタッフが集まってミーティングを行い，パンフレットの実装に向けて議論を進めている．来年度の頒布に向け製作を継続し，今年度中に完成することを目指している．

本稿では，本サービスの広報のアプローチについて，現状の問題点に関する考察と，検討した今後のコンセプトについて述べた．本サービスは現行のサービスに改定してからまもなく 1 年が経過し，本サービスにもともと関心があった組織からの利用を十分に獲得し終えた今，学内の情報環境整備をさらに進めるためには，新たな利用者層を開拓する働きかけが重要になる．また我々の情報の発信だけでなく，学内の声の受信も常に心がけ，今後もより良いサービスを追求していかなければならない．今後も引き続き努力を重ね，本学の学術研究や教育を情報の側面から支援していきたいと考える．

謝辞

本稿を執筆するに当たり，日頃よりご指導を賜っております，汎用コンピュータシステムならびに学術情報基盤サービスの運営関係者の皆様と，情報部情報基盤課の皆様に感謝します．

参考文献

[1] 赤尾健介，「利用実態調査から見えるホスティングサービス運用の現状」，第 33 回 全国共同利用情報基盤センター 研究開発連合発表会 研究開発論文集, 2011 年

[2] 赤尾健介 他，「ホスティング・ホームページサービスの改定について」，京都大学学術情報メディアセンター全国共同利用版［広報］Vol.12-No.1, 2013 年

[3] 赤尾健介，「京都大学で提供するホスティングサービスの改定」，2013 年度 AXIES 大学 ICT 推進協議会 年次大会論文集, 2013 年

モバイル端末と連携する資産実査管理システムの構築

○大竹　淳[A)]，下村　岳夫 1[A)]

[A)] 独立行政法人放射線医学総合研究所 研究基盤センター情報基盤部

概要

放医研が保有する資産情報は DB 管理されている。この電子情報と現物とを突合せ確認する作業は「実査」と呼ばれ定期的に全所で実施されるが、資産に貼られた ID を目視確認して帳票に記入していく方法は各現場に大きな作業負担を強いていた。そこで我々は①QR コードによる省力化、②記録管理の半自動化、を実現する FileMaker ベースの新システムを開発した。大幅な業務効率化が期待される本システムについて発表する。

1　背景

放射線医学総合研究所（以下、放医研）が保有している数多くの資産・備品は経理課の運用する会計システム上でデータベース管理されており、その数は延べ 24000 件以上に上る。

これら資産・備品の電子データと実際の資産現品とを突き合わせる確認作業を「実査」と呼び定期的に全所で実施されているが、現品に貼られた資産シールの ID を読み、紙に印刷した資産チェックリストと照合するこの作業は各現場担当者に大きな負担を強いており、特に

（1）どこに設置されているか探す手間

（2）現品のシール上に小さな字で書かれた ID を読みとる手間

（3）シールの ID が紙のチェックリストのどこにあるか探す手間

（4）紙のチェックリストで不足している情報を確認する手間

などが問題点として挙げられており、早急な改善が望まれていた。

資産統括部門である経理課ではかねてより電子化を検討しており、平成２４年度以降に発行した資産シールには資産 ID を表す 2 次元バーコード（ＱＲコード）を印字して配布して準備を進めていたが具体的なシステム化には至らず、2013 年に情報基盤部へシステム化支援を依頼した。本システムは支援依頼に応える形で情報基盤部が新規に開発したものである。

2　目的

放医研では資産・備品情報は電子データで管理しておきながら実査作業ではその全てを紙と目視と手作業で行なっている。上で述べた担当者の負担を軽減するにはシステム化による自動化・省力化とより積極的な電子データ活用が有効と考えた。

すなわち、実査作業を管理・サポートする「資産実査管理システム」を導入し

「大量の資産データを持ち運びながら」

「現品とデータをスムーズに照合する」

ことで、大幅な業務効率化を図ることを目的とした。

3　方法

3.1　基本設計

本システムは大きく２つに分けて考える。

１つは、実査担当者が持ち運びながら実査を行い、資産現品との照合や検索あるいは進捗表示ができる機能。モバイル端末上で稼働する。資産の現品を目視した都度、手元のモバイル端末を操作し資産リストから当該資産を探し出し、"確認"のチェックと、必要に応じて備考などを記入できる。端末上には実査すべき資産データが格納されているため、担当者は画面上で"未確認"の資産リストを見ることで都度自分の進捗を確認することができる。本システムではこのモバイル端末上の機能を「資産実査支援ツール」（以下、支援ツール）と名付けた。

もう１つは資産統括部門（＝経理課）が資産データと実査記録を１元的に管理する機能。本システムの中核として放医研の全資産データと過去の実査記録を収集・管理する。

資産や実査記録の一覧表示や詳細表示の機能を有し、任意の条件で抽出されたデータを支援ツールへ転送することが可能となっている。また、実査作業後に支援ツールから届く実査記録を履歴的に保存することで、実査の全所的な進捗管理が可能となっている。会計システムのサブシステムとして位置づけられ、会計システムからは資産データや職員データ等の提供を受ける。一方で、支援ツールに対してはサーバとしての役割を担い、支援ツールをクライアントシステムのように扱う。ノート PC 上で稼働するこの機能を「資産実査管理ツール」（以下、管理ツール）と名付けた。

この支援ツールと管理ツールが会計システムと連動することで資産実査業務の効率化を実現する。

3.2　運用設計

運用の手順は図１の通り。

① 本システムで活用する資産データは会計システムがマスタとなる。そのため、会計システム上で資産データの追加・変更があった場合には適宜資産データ一覧を出力しそれを管理ツールに取り込む。

② 実査担当者から支援ツールの貸出し申請が届いた場合、申請に基づき支援ツールのセッティングを行う。実査対象となる資産データと実査担当者リストを管理ツールで抽出し、支援ツールへ転送する。

③ セットアップした支援ツールを実査担当者へ貸し出す。

④ 実査担当者は支援ツールを使い、現場を回って資産実査を行う。資産現品を確認したら、支援ツール内の当該資産データに対して"確認済"のチェックを入れる。必要に応じて、設置場所の変更や備考メモなども記入する。

⑤ 全ての資産実査が完了したら、実査担当者は資産統括部門へ支援ツールを返却する。

⑥ 返却された支援ツール内に保存されている実査記録を管理ツールへ転送する。

⑦ 管理ツール上で実査記録の収集を確認する。現場からの備考メモ等を参考に必要に応じて会計システムの資産データを修正する。

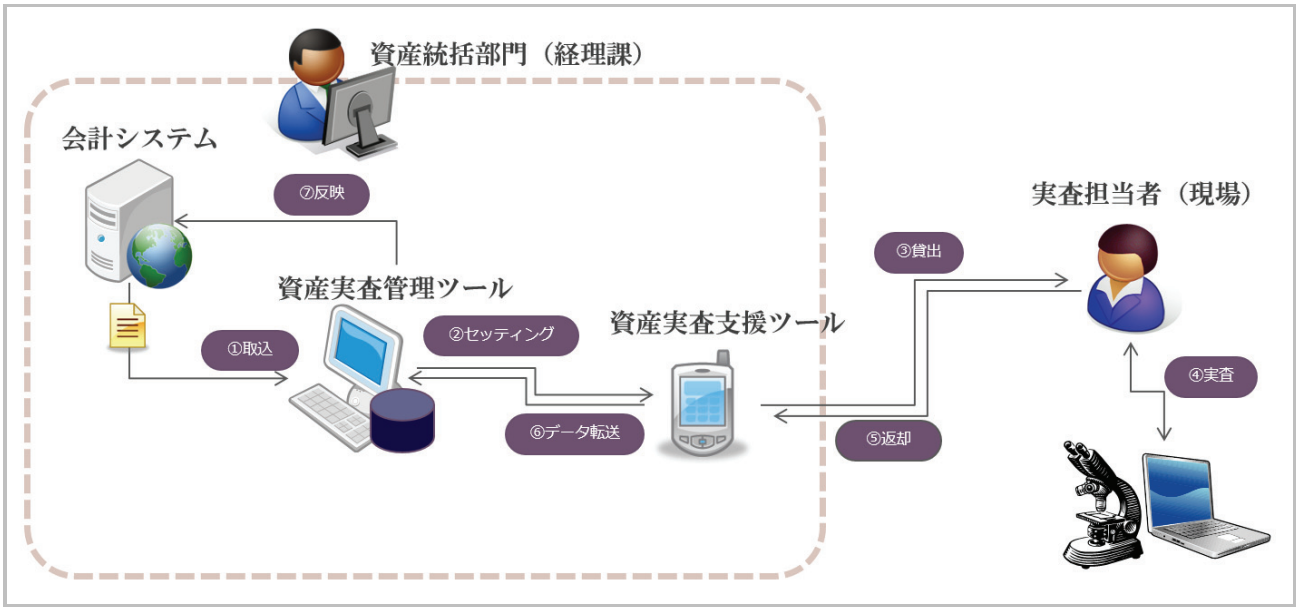


図１．システムの概要と運用手順

3.3　構築

放医研の資産・備品に貼付されている資産シールは、平成 24 年度以後発行したものは全て資産 ID を表す 2 次元バーコード（ＱＲコード）が印字されている。支援ツールの開発にあたっては、このＱＲコードを読み取ることで現品確認とし資産データとの照合をスムーズに行うことが期待された。

当初はＱＲコードを読み取る業務用ＱＲコードリーダ端末の導入が想定されたが費用が高額になることと作業中にモニタ表示される情報量が不十分であることから汎用的なスマートデバイスを用いて内製で開発することとした。

- 持ち運びに便利
- ＱＲコード読み取り可能
- ネットワーク接続可能
- ３Ｇ/ＬＴＥ回線不要
- データ操作性
- 開発環境と開発効率

といった要素を考慮し、端末は iPod Touch を採用した。支援ツールは FileMaker で開発し、iPod Touch の FileMakerGo 上で稼動させた。管理ツールは、支援ツールとの連携を考慮して FileMaker で開発した。

会計システムと管理ツールとの連携は CSV 形式のファイルで行い、管理ツールと支援ツールとの連携は FMP プロトコルでデータの転送を行うこととした。

3.4　管理ツールの機能一覧

- 会計システムから出力した資産データと職員マスタデータを取り込み、管理ツール内のマスタデータを一括更新
- 資産データの一覧表示と条件指定抽出
- 資産データの詳細表示
- 実査記録の一覧表示と条件指定抽出

・実査記録の詳細表示
・抽出した資産データと職員データを支援ツールへ転送

3.5　支援ツールの機能一覧

・管理ツールから資産データと職員データを受信
・実査担当職員の変更
・ＱＲコードリーダを読み、資産 ID／読取日時／実査担当者名などを実査記録として記録
・資産データ一覧と並び替え
・実査記録一覧と並び替え
・実査記録ごとに手動で設置場所変更や備考を追記

図２．支援ツールの画面

4　結果

2013 年 11 月より、運用テストとして所内の限定された部門で本システムを用いた資産実査を実施した。実査担当者に対して支援ツールの操作説明を 1 時間実施した後に一台貸与した。

2 週間の実施期間中に 16 件の実査記録が登録され、返却後に管理ツールにデータを転送し、特段の問題なく全て正常に稼動した。利用者からは「スムーズに作業ができる。資産の詳細情報が手元の端末で見られるのは（紙に比べて）大変便利。」という感想が届いた。課題や要望として

・ＱＲコードの読取には若干コツがいる。慣れるまでは少し時間がかかる。
・資産シールの貼る位置によっては読取が大変。
・端末画面が小さいため文字が見づらい。
・他部門のＱＲコードを読んでしまった場合の対応がわからなかった。

といった意見もあり、これらの対応後に全所的な導入を行うこととした。特に文字の小さい点については要望も多いため、今後は iPad 等のタブレット型のデバイスでの実装を検討する。

また、ＱＲコード付きの資産コードはまだ十分に配布し切れておらずこうした点の対応は今後の課題とし

て経理課が取り組んでいくこととした。

5　考察

モバイル端末には可搬性、リッチなインターフェース、カメラやＧＰＳ等の内臓デバイスの豊富さといった特長があり、放医研の資産実査業務の課題とうまくマッチし、業務の効率化を実現できた。特に FileMaker を採用することで、簡単な操作で画面デザインやコーディングが完了し、最小限のコストと期間で開発が可能となったことが大きい。Windows と MacOS の両方への対応だけでなく iOS での稼働環境（FileMakerGo）も用意されており複雑になりがちなデバイス間連携／OS 間連携も支障なく運用できている。

資産の実査は、それ自体が現場からは忌避感のあるイベントであり「管理上しかたない、規則だからやらないといけない」という空気が所内に蔓延している。そういった中で今回資産統括部門である経理課と技術部門である情報基盤部が手を組んで制度と技術との両面から積極的に改善を図ったことが現場からは好意的に受け止められている。この事例が単なる「新たなシステムの開発」という以上に大きな意味を持っていることも付け加えておきたい。

新スーパーコンピュータの更新と運用管理について

○田島　嘉則 A)

A) 名古屋大学 全学技術センター 通信情報系支援室 通信情報系

概要

平成２５年１０月より、名古屋大学情報基盤センターの新スーパーコンピュータが稼働し計算サービスを開始した。また前のシステムには無い新たなサービスも開始しており、新スーパーコンピュータのセキュリティ対策を含めた運用管理および今後のシステムについて述べる。

1　はじめに

名古屋大学情報基盤センターは、全国共同利用機関として学内はもとより他大学の研究者にスーパーコンピュータの計算資源を提供してきた。また平成２２年度より北海道大学、東北大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、九州大学のスーパーコンピュータを所有する各基盤センター等で８拠点のネットワーク型学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点として計算資源の提供を開始し、更に平成２４年１０月より理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を中核として全国の主要なスーパーコンピュータを高速ネットワークでつないだ革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）へも計算資源を提供し運用している。また加えて、先端研究施設共用イノベーション創出事業を経て、昨年度から民間企業に対しても計算サービスを提供している。

このように情報基盤センターでは、各プロジェクトを含めて学内外の研究者に対しスーパーコンピュータ利用技術や大規模データを使った数値シミュレーションと可視化技術、並びに広域仮想化情報サービスの環境などを提供している。

2　新スーパーコンピュータについて

今回導入したスーパーコンピュータは、Fujitsu PRIMEHPC FX10,Fujitsu PRIMERGY CX400,仮想演算サーバ(Cisco UCS B200M3)の３つのシステムで構成されており、利用者ファイルは仮想計算サーバ以外富士通の高性能ファイルシステムである FEFS（Fujitsu Exabyte File System）を導入し、共有できるようになっている。仮想演算サーバを除くシステムの性能を表１－１、１－２に示す。

(1)　Fujitsu PRIMEHPC FX10

大規模分散並列型演算サーバで、前システムの Fujitsu FX1 の後継機である Fujitsu PRIMEHPC FX10 は、理化学研究所の「京」との連携を念頭に置いたシステムであり、使用されている CPU は SPARC64IXfx、OS は Linux ベースの独自 OS（XTCOS）となっている。演算性能は前システムの約３倍となっている。なお CPU は水冷式となっており、チラー等の設備を新たに設置している。

(2)　Fujitsu PRIMERGY CX400

Fujitsu PRIMERGY CX400 は研究室と同じ Linux 環境での利用が可能で、数々のアプリケーションソフトが使用できるシステムとなっている。CPU は Intel の IvyBridge を搭載し、OS は RedHat Enterprise Linux6.4 である。また CX400 は CX400/250 と CX400/270 の２機種が導入されており CX400/270 はアクセラレータ（Xeon Phi3100）を搭載し、演算性能を高くしている。また CX400/270 では 184 ノード中 88 ノードが仮想的に大規

模な共有メモリを使用することができる vSMP(Versatile Symmetric Multi-Processing)サーバとして設定されている。また演算性能は、前システムの Fujitsu HX600 の後継機に当たる CX400/250 が約 7.4 倍、また SMP を運用していた Fujitsu M9000 の後継機に当たる CX400/270 は約 73 倍となっている。

(3) 仮想演算サーバ

仮想演算サーバは Cisco UCS B200M3 のブレードサーバに VMWare を導入し、仮想サーバを立ち上げている。この仮想演算サーバは、情報教育システム内に設置されており、x86-64 に基づく汎用性を持ち、資源を情報教育システムとの共通化によって導入・運用の効率化を図っている。仮想演算サーバシステムには、OpenGL,OpenMPI,Hadoop 等のソフトウェアが用意されており、資源的には大規模計算向きではないが、主に教育用としての利用が期待される。

(4) ストレージ装置

ストレージ装置は、ファイル制御装置として Fujitsu PRIMERGY RX300S7、磁気ディスクアレイ装置として DDN 社の SFA12K-40 を導入しており物理容量は前システムの約３倍となる 3.96PB となっている。

(5) その他

可視化関係として、偏向方式立体視用のプロジェクションシステム２台(1920×1200)、150 インチスクリーン、AVS/Express 等のソフトウェア、それらに画像を投影させるためのサーバ類を導入している。

表１－１　新スーパーコンピュータの性能（フェーズⅠ）

機種名	Fujitsu PRIMEHPC FX10	Fujitsu PRIMRGY CX400	
		CX400/250	CX400/270
OS	Linux ベース独自 OS（XTCOS）	Red Hat Enterprise Linux6.4	Red Hat Enterprise Linux6.4
プロセッサ	SPARC64IXfx (1.848GHz) 16 コア	Intel IvyBridge (2.7GHz) 12 コア	Intel IvyBridge (2.7GHz) 12 コア
総ノード数 (総コア数)	384 (6,144 コア)	368 (8,832 コア)	184 (4,416 コア)
総演算性能	90.8 TFLOPS	190.7 TFLOPS	279.9 TFLOPS
総メモリ容量	12 TiB	23.5 TiB	23.5 TiB
演算性能/ノード	235.5 GFLOPS (16 コア)	518 GFLOPS	518 GFLOPS
メモリ容量/ノード	32 GiB	64 GiB	128GiB
アクセラレータ	無	無	Xeon Phi3100 family(MIC)

表１－２　ストレージ装置（ディスクアレイ装置）

機種名	DataDirect SFA12K
物理容量	3.96 PB
RAID	RAID 6

3　運用・管理

運用・管理では、利用者に計算資源を提供するために、スーパーコンピュータを正常に稼動させることはもとより、利用者管理、利用統計および計算資源の使用量に応じて課金をする課金管理も重要な項目となっ

ている。

まず利用者管理については、前システムと同様とし大きな改修は行わないようにした。業務の流れを図 1 に示す。利用者登録のユーザーインターフェイスは Microsoft Access のフォーム機能を利用し登録画面を作成している。この画面から入力されたデータは ODBC 接続された Oracle データベースに登録される。データベースに登録されたデータは作成または更新日付からデータを抽出し LDAP サーバへ送り、そこで登録・変更用の ldif ファイルを生成し、LDAP の登録・変更を行っている。ログインノードは公開鍵暗号方式を採用しているので LDAP での認証を行ってはいないがログイン時に ID が登録されているか確認を行っている。また HPC ポータル、HPCI 用 shibboleth 認証や電子メールサービスでは LDAP にて認証を行っている。また HPCI への対応については HPCI 専用の利用申請システムが HPCI 事務局にあり、それに対応するために利用者登録画面、利用承認通知書の改修を行っている。

次に利用統計および課金管理についてであるが、今回のスーパーコンピュータの更新にあたり、機種が変更されたのは基より、利用統計・課金データを出力する運用管理ソフトウェアが Parallelnavi から、多数の計算ノードの階層管理による効率的なシステム監視や大規模システムの効率的な監視・操作ができ、また FX10 固有のシステムである Tofu インターコネクトで最適化した資源を割当てるなどの機能を有するペタスケールシステムに対応したミドルウェアである TCS(Technical Computing Suite)に変更された。これにより利用統計・課金の各データの出力ファイルが変更されたが、新規に作成することなく前システムのフォーマット変換プログラムを修正し、従来の課金・利用統計システムが利用可能となるようにした。

課金体系についても改版され、前システムに比べ演算負担経費が 1/30、ファイル使用負担経費が 1/40 とし利用者への負担を軽減し、使用ノード数に応じた演算負担経費に係る並列係数の廃止や負担金額に応じた使用可能額の倍率の簡素化を図り、より多くの研究者に利用されるように配慮した。また新たなサービスである vSMP ノードや仮想計算サーバの利用については、申請制となっており、ノード占有する事になるので、一定額を徴収している。

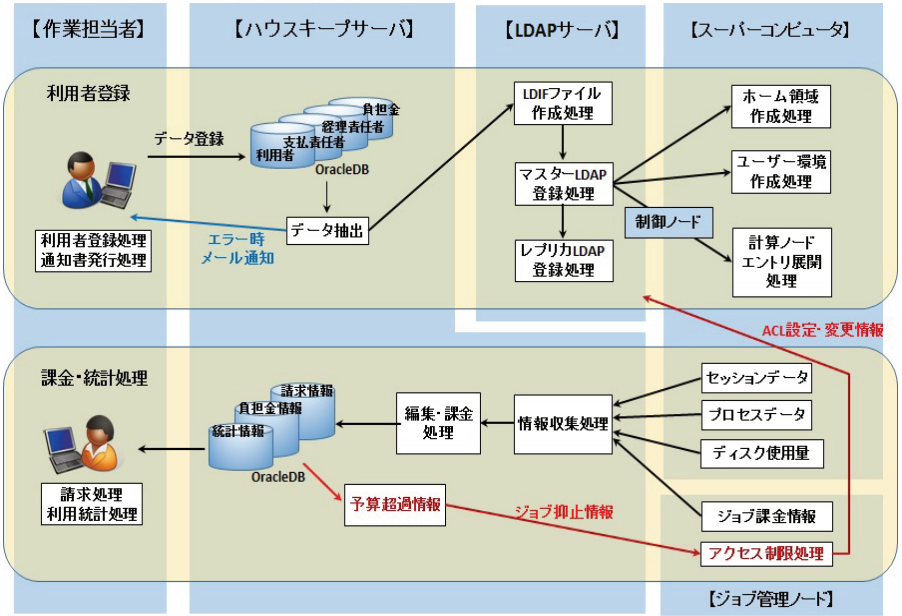


図 1　データの流れ

次にリソースグループ（前システムではジョブクラスにあたるもの）を表 2 の様に設定し、利用者の計算規模により選択できるように細かく分けている。また表２のリソースグループ以外にも、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究用や民間利用用のリソースグループも作成し運用している。

表 2 リソースグループ一覧

機種	リソースグループ（キュー名）	最大使用可能ノード数	最大使用可能CPUコア数	最大経過時間		最大使用可能メモリ容量	備　考
				標準値	制限値		
FX10	fx-interactive	1	16	1 時間	1 時間	28GiB	デバック用
	fx-debug	4	64	1 時間	1 時間	28GiB×4	
	fx-small	12	192	24 時間	72 時間	28GiB×12	
	fx-middle	48	768	24 時間	72 時間	28GiB×48	
	fx-large	96	1,536	24 時間	72 時間	28GiB×96	
	fx-special	384	6,144	unlimited		28GiB×384	予約制
CX400/250	cx-debug	4	96	1 時間	1 時間	56GiB×4	デバック用
	cx-single	1	24	24 時間	336 時間	56GiB×1	
	cx-small	8	192	24 時間	168 時間	56GiB×8	
	cx-middle	32	768	24 時間	168 時間	56GiB×32	
	cx-large	128	3,072	24 時間	72 時間	56GiB×128	
	cx-special	368	8,832	unlimited		56GiB×368	予約制
CX400/270	cx2-debug	4	96	1 時間	1 時間	112GiB×4	デバック用
	cx2-small	8	192	24 時間	72 時間	112 GiB×8	
	cx2-middle	32	768	24 時間	72 時間	112 GiB×32	
	cx2-large	64	1,536	12 時間	12 時間	112 GiB×64	
	cx2-special	184	4,416	Unlimited		112GiB×184	予約制

その他に、スーパーコンピュータの電力測定や、設置場所の温度・湿度管理を Panasonic の Eneview を導入し、毎月の消費電力量、電気料金の算出等を行い運用・管理を行っている。

4　セキュリティについて

インターネットの発展と普及によってコンピュータへのセキュリティは非常に重要な課題であり、今回の機種更新にあたり、利用者のデータの改竄や破壊、不正侵入などを防ぐために、様々なセキュリティチェックを行っている。図２は今回更新したシステムの構成図である、図２から分かるように、計算ノードは全てプライベートアドレスにて構成されており、グローバルアドレスを付与し運用しているのは、ログインノード、HPC ポータル、HPCI 用 IdP サーバなどの一部のサーバのみとなっており、ログインノード以外は iptables などで情報基盤センター内の指定された端末からのみ ssh でのログインを許可している。

また１～２か月に１回行われる保守作業時にメーカー提供のセキュリティパッチをログインノードや計算ノードはじめ対象ノード全てに当てている。ログインノードについてはスーパーコンピュータを利用するために学内外は基より海外からも接続を可能としているので、更にセキュリティを高めるために、次のような仕組みを導入し運用している。

(1) 公開鍵認証方式の導入

公開鍵認証方式では、ログインするためには ID と秘密鍵、秘密鍵と対となる公開鍵そして鍵のパスフレーズが必要となり通常の ID とパスワードではログインができない。利用者はスーパーコンピュータ側に公開鍵を配置し、ID、秘密鍵そして鍵のパスフレーズを利用しログインができる、これによりセキュリティを高めている。なお、公開鍵の配置は HPC ポータルにて利用者が行えるようになっている。

(2) Denyhosts の導入

ブルートフォース攻撃に対抗するために、短時間に 5 回以上ログインに失敗すると、そのログイン元の IP アドレスが/etc/deny.hosts に自動設定され、接続を拒否するようにしている。

(3) Tripwire の導入

Tripwire については、一日一回チェックを行い、結果レポートがシステム管理者へメールで通知され、各ログインノードのシステムファイル等が改竄されていないか確認をしている。

(4) ログインの監視（ログイン成功者チェックリスト）

これは Denyhosts のホワイトリストを利用し、4 時間毎にそのリストに載っていない IP アドレスからのログインが成功した場合、利用者番号、日時、IP アドレス、ログインしたホスト名の一覧が、管理者へメールで通知される。これを基に誰がどの IP アドレスからログインしたかが分かり、通常ない地域の IP アドレスが通知にあった場合には、利用者へ確認している。また確実に利用者が分かっている IP アドレスについては、ホワイトリストへ登録し、通知メールには表示されないようにしている。

(5) ログサーバの設置

各ログインノード等のログを同時にログサーバにも出力されるようにしている。これによりログインノード側のログが改竄された場合でも、ログサーバ側に改竄される前のログが残っているので、インシデントが発生した場合に調査や確認の重要なデータとなる。

(6) su コマンドでの root 権限への昇格操作時に管理者へメール送信

ログインノードなどで、su コマンドにより root 権限への昇格操作が行われた場合、リアルタイムで、どの ID がどのサーバで root 権限へ昇格したかが管理者へメールで通知される。これにより root 権限での作業申請が無い時にセンター職員以外の ID で権限昇格が行われた場合、直ちに調査する事が可能となる。

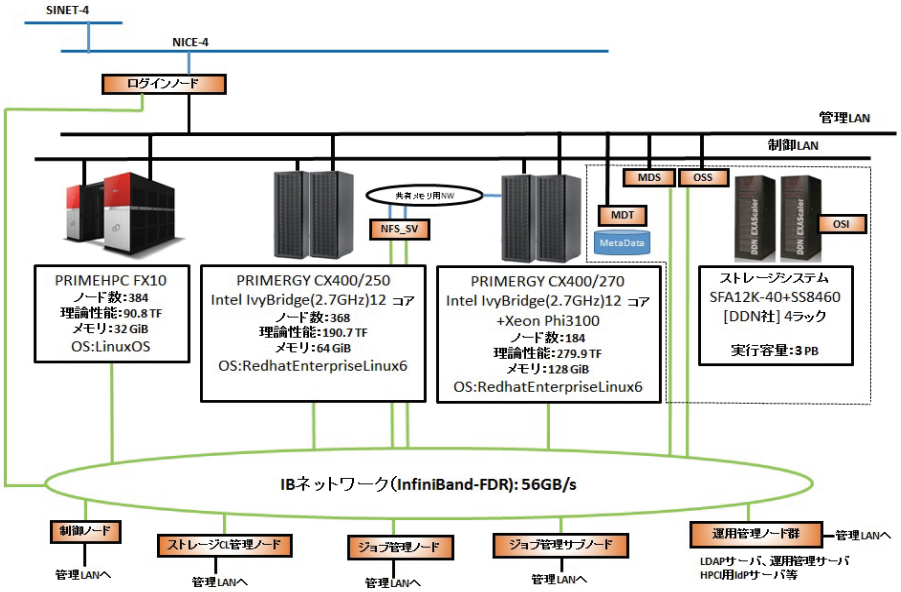


図 2　システム構成図

これらの仕組みでは(1)、(2)、については不正なログインができないようにするための設定であるが、秘密鍵とそのパスフレーズが不正に取得され場合、ログインされてもログインノード側では、正常なログインと判断し抑止はできない。そこで(3) 以降の項目で、ログインに関してのチェックやシステムファイルの改竄等の不正な操作が行われていないかチェックすることになる。このようにスーパーコンピュータでのセキュリ

ティを高めインシデントが発生しても調査を容易にできるようにしている。

5 新しいサービス

今回のシステム更新に伴って、vSMP システムと仮想演算サーバシステムの２つのサービスが新たに開始された。まず、vSMP システムであるが、前システムの M9000 システムにて SMP システムのサービスを行ってきたが、ノードが共用となっていたため競合が発生し待ちが発生すことがあった。しかし今回の vSMP システムでは、利用期間を設けたノード占有方式としたので利用者は他の利用者を意識することなく大規模メモリを使用するジョブを流すことができる。vSMP システムのメモリサイズの種類は、表３の通り、512GB,1TB,2TB,4TB の４種類で利用者が選択し申請をする。

表３ vSMP ノードクラス

vSMP ノード クラス	メモリ サイズ	最大使用 ノード	最大使用 Phi 数	最大使用 CPU コア数
512GB コース	512GB	6	6	144
1TB コース	1024GB	12	12	288
2TB コース	2048GB	24	24	576
4TB コース	4096GB	46	45	1080

次に、今回新たにサービスを開始した仮想演算サーバについてであるが、種類としては演算速度、メモリ、ディスク容量の違いから５種類のコースがあり利用者が使用する目的に応じて選択することができる。今のところ大規模演算利用よりリテラシー等の教育用として利用されると考えられる。

6 今後について

これまでは、平成２５年１０月から稼動を開始した、スーパーコンピュータについて述べてきたが、ここからは今年度末から来年度末に行われる、スーパーコンピュータシステムや可視化システムの増強予定について述べる。図３は今後の増強予定を図にしたものである。

図３　今後の予定

図３から分かるように、平成２６年３月には、高度可視化システムが導入される。このシステムは平成２５年度の補正予算により導入されるシステムであり内容は以下の通りである。

高性能可視化システムとして、SGI の UV2000（24TFLOPS/24TB MEM)、高精細ディスプレイシステム、ディスクアレイシステム（約 3PB）を導入予定であり、その他にバーチャルリアリティシステムとして据置型 HMD（ヘッドマウントディスプレイ)、携帯型 HMD、ドーム型ディスプレイシステム等を導入する。

これらはスーパーコンピュータでの計算結果を基に可視化し結果の確認やシミュレーションなど可視化し、他大学と連携して共同研究等が行われる事が期待される。

次にスーパーコンピュータのバージョンアップについてであるが、平成２７年３月にバージョンアップを予定している。これは今回のシステム更新時は CPU ロードマップの端境期となり、新しい製品の導入ができなかった。そこで調達時に平成２５年１０月から平成２７年２月までを Phase Ⅰ、平成２７年３月からを Phase Ⅱと位置付け、バージョンアップを盛り込んだ調達を行った。

Phase Ⅱからのシステムは図３に示す通りであり、FX10 の後継機は現在開発中ではあるが、Phase Ⅱからの計算能力は CX400 の更新および補正により導入される高度可視化システムも含めると、現在の６倍以上、ストレージについても同様に物理容量で 11PB 以上となり、今後更に増加する可能性のある大規模計算および高度な可視化にも対応できるようにする予定である。

6 まとめ

今回更新されたスーパーコンピュータシステムは今のところ順調に稼動し運用されている。しかしスーパーコンピュータシステムの更新は Phase Ⅰ が終了した段階であり、Phase Ⅱまで導入作業が続くことになる。

また Phase Ⅱシステムでは、現在のシステムの運用現状や電気料金等を踏まえて、課金の改訂などを行う可能性があり、利用者登録、課金処理、利用統計処理などの業務システムも改修する必要が出てくるので、今後もシステムの運用を含め対応していきたいと考えている。

参考文献

[1]名古屋大学教育研究用高度コンピュータシステム利用マニュアル　2013 年 10 月 24 日版
[2]スーパーコンピュータ高度利用研究会説明資料　2013 年 5 月 10 日版
[3]スーパーコンピュータ高度利用研究会説明資料　2013 年 11 月 21 日版
[4]Tecnical Computing Suite v1.0 ジョブ運用ソフトウェア入門ガイド
[5] http://www2.itc.nagoya-u.ac.jp/center/ja/system.pdf (システム構成)

ヘルプデスク業務へのチケッティングシステムの導入

高瀬　亘 A)

A) 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設　計算科学センター

概要

高エネルギー加速器研究機構　計算科学センターは，各種計算機システム，ネットワークシステム，及び関連設備を運用・管理し，機構職員，及び共同利用者に対してこれらのサービスを提供している．今年度，当センターはこれらサービスのヘルプデスク業務にチケッティングシステムを導入し，作業内容，進捗状況の共有による円滑な対応を可能にした．本報告では，チケッティングシステム導入までの道のり，導入したチケッティングシステムの概要，今後の展開について述べる．

1　はじめに

当センターでは，各種計算機システム，ネットワークシステム，及び監視設備，電源，空調当の関連設備を運用・管理し，機構職員，及び共同利用者に対してこれらのサービスを提供している．当センターの提供するサービスのヘルプデスク業務の流れを図 1 に示す．ヘルプデスクでは，①メール，電話，直接の来訪により，サービス利用者（以下，利用者）からの問い合わせを受け付けている．②問い合わせがヘルプデスク内だけで対応可能な場合は，ヘルプデスクが利用者へ返答する．③ヘルプデスク内だけでの対応が困難な場合は，各サービス担当者宛のメーリングリストへメールを送信してエスカレーションする．その後は，④サービス担当者が対応をメールまたは口頭にて指示しヘルプデスクに利用者への返答を依頼する場合と，⑤サービス担当者が直接利用者へ返答する場合がある．

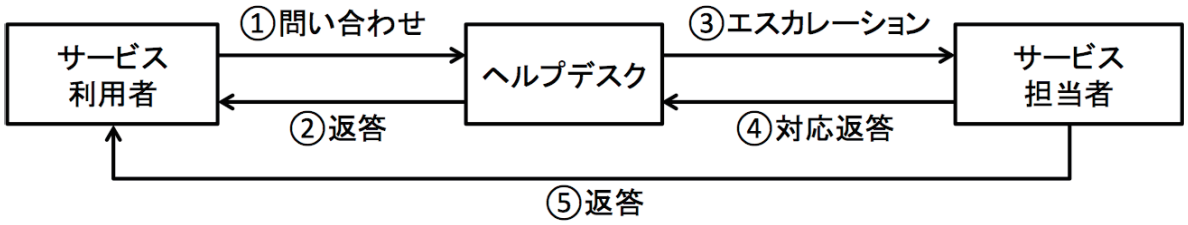


図 1. ヘルプデスク業務の流れ

従来ヘルプデスクでは，利用者からの問い合わせ内容，対応の進捗をヘルプデスク内で独自に管理しており，各サービス担当者がこれらを閲覧することはできなかった．このため，ヘルプデスク側とサービス担当者間の問い合わせ対応についての情報共有がうまくいかず，対応に遅延が発生する問題があった．そこで，チケッティングシステム導入により，ヘルプデスクとサービス担当者間での円滑な連絡を図り，さらには過去の対応作業の記録を蓄積し当センター内での知識共有を図ることにした．

2012 年 4 月から導入準備を開始し，2013 年 5 月にサービスインとなった．以下，チケッティングシステム導入までの道のり，導入したチケッティングシステムの概要，今後の展開について述べる．

2　チケッティングシステム導入までの道のり

チケッティングシステム導入までの道のりを表 1 に示す.

表 1. チケッティングシステム導入までの道のり

年月	作業内容
2012 年 4〜9 月	必要な機能の洗い出し
2012 年 4〜11 月	チケッティングシステム実現のための様々なソフトウェアの評価
2013 年 1〜3 月	チケッティングシステム環境整備
2013 年 4 月	操作説明会開催，試用期間
2013 年 5 月	サービスイン

2012 年 4 月に導入検討を開始し，ヘルプデスク，及びサービス担当者へのヒアリングを通して，必要な機能を洗い出した．結果を下記に示す.

- 閲覧制限：将来的に利用者にも公開することを考え，可能であればチケットごとにアクセス制限をかけたい
- 使い易いユーザインタフェース（UI）：操作のし易い Web インタフェースをもつ
- メール対応：メールによるチケット更新，チケット更新時のメール通知ができる
- 多言語対応：表示言語として日本語，英語の言語切り替えができる
- カスタマイズの容易さ：機能拡張が容易に行える

上記と並行して，チケッティングシステム実現のための各種ソフトウェアを試験環境にインストールし，実際に使用しながら，洗い出した機能ごとに主観的な評価をおこなった．評価対象としたソフトウェアは，Redmine[1]，RT[2]，Trac[3]，JIRA[4]，OTRS[5]，メールワイズ[6]である．まず，チケットの閲覧制限であるが，いずれのソフトウェアも非ログインユーザに対してチケットを非表示にできるものの，チケット単位で細かな閲覧制限をかけることはできなかった．UI の使い易さは，Trac の場合ユーザ管理（追加・削除・パスワード変更等）を Web 上から行えるようにするにはプラグインが必要となる．他ソフトウェアは標準の状態のままで問題なく操作できたが，メニューや管理画面において Redmine，JIRA,メールワイズが使い易いと感じた．メール対応については，Redmine，RT，JIRA，OTRS，メールワイズは標準の機能で要件を満たしており，Trac はプラグインによって要件を満たすようになる．多言語対応については，メールワイズは日本語のみの対応であるが，その他については英語，日本語の表示切り替えが可能であった．カスタマイズについて，メールワイズ以外はプラグインの追加またはソースコードの修正によりカスタマイズが可能であった．また，Redmine はモンキーパッチと呼ばれる手法を使用し，オリジナルのソースコードを変更することなく既存機能に修正を加えて機能拡張が可能であった．以上より，UI の使い易さとカスタマイズの容易さの点で優れた Redmine を使用してチケッティングシステムを構築することとした.

2013 年 1 月より環境整備を始め，図 2 に示す構成のチケッティングシステムを構築した．チケッティングシステムは主サーバとバックアップ兼開発サーバの 2 台からなり，それぞれ RAID5 を構成している．2 台のサーバは，通常主サーバがヘルプデスクのチケッティングシステムサービスを提供し，もう 1 台は機能拡張のための開発用に用いられる．主サーバがダウンしたときは開発用サーバが代わりにサービスを提供する.

[1] http://www.redmine.org/
[2] http://www.bestpractical.com/rt/
[3] http://trac.edgewall.org/
[4] https://www.atlassian.com/software/jira/
[5] http://otrs.org/

バックアップは半日に 1 回行われ，2 台のサーバはそれぞれ 2 台分のバックアップデータを保持する．2 台のサーバへは当機構内の特定ネットワークからのみアクセスが可能である．また，ヘルプデスク，サービス担当者を Redmine のユーザとして登録し，Redmine ユーザのみチケッティングシステムを利用できるようにした．さらに，チケッティングシステム上からエスカレーションするために，E メール情報としてエスカレーション用メーリングリストを持つアカウントを作成した．

2013 年 4 月に，ヘルプデスク向け及び，サービス担当者向けの説明会を行い，導入したチケッティングシステムの概要及び操作方法について説明した．その後，試用期間を経て翌月正式にサービスの利用開始とした．

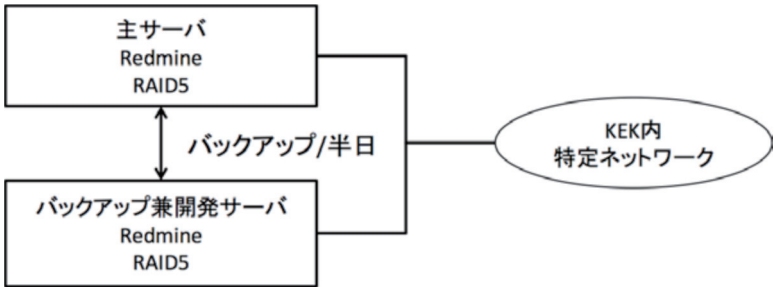


図 2. チケッティングシステム構成

3　導入したチケッティングシステム

チケッティングシステム利用の流れを図 3 に示す．利用者からヘルプデスクへ問い合わせがあると，ヘルプデスクはチケットを作成する．サービス担当者へのエスカレーションが必要な場合は，エスカレーション先メーリングリストをEメール情報として持つユーザを該当チケットのウォッチャー[7]に追加してチケットを更新する．チケット更新通知メールがエスカレーション先メーリングリストへ送られ，利用者からの問い合わせがサービス担当者へエスカレーションされる．サービス担当者は，チケッティングシステムからのメール通知をメーリングリスト経由で受け，該当チケットを確認し，対応をチケットへ追記する．ヘルプデスクはチケット更新時の通知メールを受け取ることで対応方法を知る．場合によっては，サービス担当者が直接利用者と連絡をとりあって問題を解決するが，この場合，サービス担当者は後ほど解決手法をチケットに追記する．このようにすることで，利用者からの問い合わせとその対応内容を記録として残すことができ，センター内での知識の共有につながる．

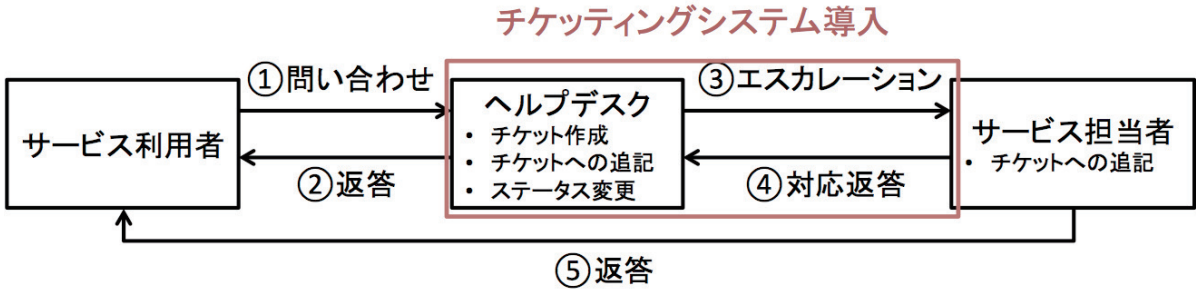


図 3. チケッティングシステム利用の流れ

利用者からの問い合わせ内容を分類するため，Redmine のプロジェクトを利用した．例えば，ネットワー

[6] http://products.cybozu.co.jp/mailwise/
[7] チケットの更新をメールで通知するための機能

ク関連の問い合わせは"Network"プロジェクト内にチケットを作成，Web 関連の問い合わせは"Web"プロジェクト内にチケットを作成する．また，本チケッティングシステム上では，表 2 に示すステータスを用いて現在のチケットの状態を表すことにした．ヘルプデスク主導でチケッティングシステムを使用するため，ステータスの状態はヘルプデスク側でしか変更できないようにした．ヘルプデスクとサービス担当者は，Web 上より現在のチケットの進捗を容易に確認・共有でき，対応の遅れを少なくすることにつなげられるようになった（図 4）．

表 2. チケットのステータス一覧

ステータス	内容
New	新規にチケットが作成された
In Progress	ヘルプデスクにて対応中
Escalating	サービス担当者へエスカレーション中
Answering	サービス利用者へ返答中
Closed	チケットがクローズされた
Canceled	チケットがキャンセルされた
On Hold	保留中

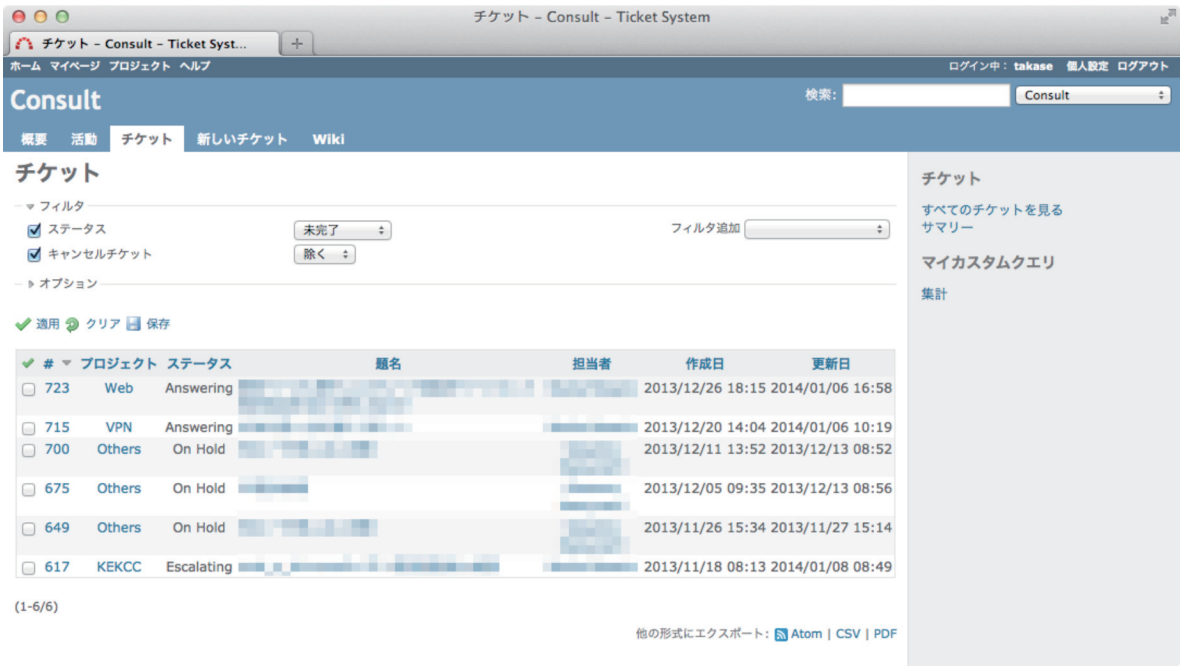


図 4. チケット一覧

4　まとめ・今後の展開

ヘルプデスク業務へチケッティングシステムを導入し，ヘルプデスクと各サービス担当者間で，問い合わせ内容や進捗状況を共有し，対応を円滑に進めることを可能とした．さらに，対応内容はチケッティングシステムに蓄積されていくので，センター内での知識共有にもつながる．

今後は，利用者へも公開し，問い合わせから返答までを全てチケッティングシステム上で行うことを計画している．他チケットの閲覧や機密情報の保護など，利用者のアクセス制限をどのように行うかを考える必要がある．

ポスターセッション

CAD/CAM を駆使した最近の機械加工について

萩達也

名古屋工業大学　技術部

概要

近年本学ものづくりテクノセンターでは独自作業するセンター利用者は多く，依頼加工など機械工作の需要が増えている，昔ながらの汎用機械で対応できるものから CAD データ支給による複雑高度なものまで幅広い．利用者の便宜を図り，手際よく加工業務を行うため CAD/CAM システムを導入している．これは CAD 設計図からマシニングセンター，ワイヤー放電加工機，旋盤などの NC（数値制御）工作機械を動かす加工プログラムを作成するツールである．2 次元加工（2D）と 3 次元加工(3D)の 2 種類があり，2D は穴あけや輪郭加工など平面的加工用，3D は立体曲面加工用プログラムを出力する．加工事例を提示して，CAD/CAM の仕組みと特徴，導入メリット，課題等を解説する．

1.　CAD/CAM の特徴

CAD/CAM システムとはパソコン上で製品の設計・製図から始まり工作機械を自動運転させるのに必要なＮＣプログラムを出力するツールである．近年，業務効率化を図るため，幅広い分野でパソコン機能の向上や扱い安さから急速に普及し活用されている．CAD/CAM に組み込まれた CAD の機能は加工対象物をモデル化，図形化することが中心である．本格的な設計・製図をする場合は，機能の充実している CAD 専門ソフトウェアを用いる．本学には NC 工作機械として，ワイヤー放電加工機，マシニングセンター，NC 旋盤の３機種が設置してある．それぞれの機械毎に異なった NC プログラムを用意する必要がある．

2.　加工事例

CAD/CAM を駆使した加工例を紹介する．ワイヤー放電加工用および 2D 加工用ソフトウェアは MYC 社の CAMBASE を，マシニングセンター3D 加工用ソフトウェアは C&G システムズ社の CAM-TOOL を用いた．3D 加工は，等高線荒加工，等高線仕上げ加工，走査線加工の順で進める．フォーミュラ部品の各加工条件を示す．

等高線荒加工：丸駒チップのφ32R5 スローアウェイを使用した．素材の最上部から下部へ，Z 高さ毎に，輪切りにした工具軌跡を描き，Z 切込み量 1mm のダウン加工を行った．回転数 1500rpm，送り速度 500mm/min，仕上げ代は 0.3mm とした．（エアーブロー加工）

等高線仕上げ加工：超鋼ボールエンドミルφ12R6 を使い，等高線荒加工同様に上部から下部へダウンカット加工で，Z 切込み量は 0.3～0.5ｍｍで荒加工時より細かくした．回転数 3000rpm，送り速度 1000mm/min，仕上げ代は 0.3mm とした．（切削液は水溶性加工液）

走査線加工：比較的傾斜の少ない平面を 0.2mm ピッチで一定方向に往復させる加工である．超鋼ボールエンドミルφ10R5 を使用、回転数 4000rpm，送り速度 1200mm/min とした．（エアーブロー加工）

2.1　フォーミュラプロジェクト

フォーミュラプロジェクトの車両部品を図 1，2 に示す．車両は毎年製作され，主な機械加工部品は８種類ほどある．どれも曲線・曲面形状が多く，汎用機械での加工は困難である．図 1 は NC 旋盤を使わず，マシニングセンター単独の加工例である．機械テーブルにワークセット後，連続加工した．中心軸外径はφ25.0（＋

35～＋22μm）の軸交差が得られた．図 2 はマシニングセンターとワイヤー放電加工機の複合加工である．

図 1.車両部品 A

図 2.車両部品 B（R/L）

2.2　ソーラーカーチーム

図 3 は実物大の十分の一スケールの縮小模型で， 支給された CAD データ（ソリッドワーク設計）を使い 3DCAD/CAM で NC データを作成した．ワーク材質はケミカルウッドで，加工時間は約 6 時間であった．フォーミュラの車両部品と加工は同様であるが，回転数 2000rpm 以上，送り速度は 2m/mm 以上の高速切削を試みた．

図 3．ソーラーカー模型（台座付き）

2.3　研究用機器

図 4 に電気工学科からの CAD 図面支給の依頼加工完成品を示す．それまで外注加工していた真空蒸着ホルダーを再加工した．材質はステンレスで寸法精度が厳しい．マシニングセンター2D 加工後，ワイヤー放電加工した．加工工程が多く，超鋼エンドミル（φ1.0～2.0mm）は回転数 10000rpm，送り速度 300 mm/min とした．

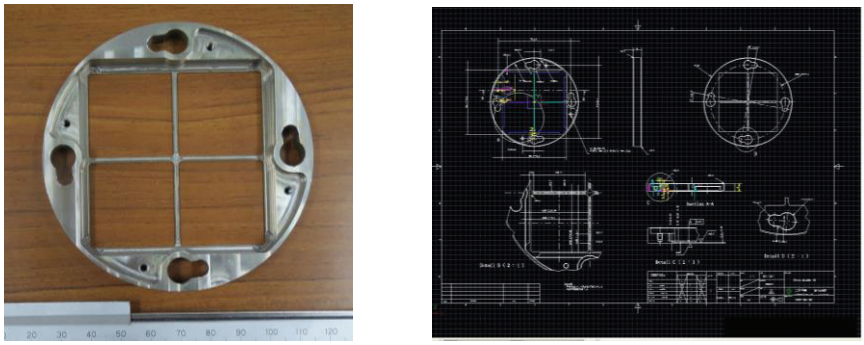


図 4.真空蒸着ホルダと CAD 図面

3.　まとめ

CAD/CAM を駆使すれば，熟練工でなくても，複雑な加工を早く，高精度で実現できる．CAD/CAM 導入によりそれまで諦めていた困難な加工が可能となった．依頼された加工業務が捗り，製作期間を短縮することができた．ＣＡＤデータ支給で加工を依頼される昨今，自動プログラミングに代わり，CAD/CAM は必須の機器である．講習会開き，オペレーターを養成していきたい．五感を頼りに汎用工作機械で加工する事も必要であるので，CAD/CAM 操作に固執することを戒めたい．

コールドプローブ法を搭載したゼーベック係数測定装置の試作

○仲林 裕司[A)]，中本 剛[B)]

[A)] 北陸先端科学技術大学院大学 ナノマテリアルテクノロジーセンター

[B)] 愛媛大学 教育学部

Keywaords ゼーベック係数　コールドプローブ法　ホットプローブ法　ペルチェモジュール

1　緒言

微小プローブを用いた熱電物性の測定は，近年の微細構造を有する熱電材料評価の強力な手段として注目されている 1, 2, 3). 我々は，これまでに微小プローブにヒーターを搭載したホットプローブ法を用いたゼーベック係数測定装置（SMP-MS）を開発してきた 4). この装置は，試料の熱平衡状態を自然緩和にて実現するため，1 点当たりの測定時間が長く，更なる測定の高速化が課題であった.

本件では，熱浴にペルチェモジュールを採用し温度制御を行うことで，試料に温度差を与え測定後の熱緩和を積極的に行うコールドプローブ法を考案し，測定の高速化を試みた.

2　装置開発

Fig. 1 にコールドプローブ法を用いた SMP-MS を示す. 熱浴下面にペルチェモジュールを設置し積極的な温度制御を可能とした. 試料は銀ペーストを用いて熱浴に固定することで熱浴との良好な熱接触を実現した. 試料環境を恒温にするため，試料室を断熱カバーで覆った．3 軸ステージに搭載したコールドプローブにより試料の二次元平面内の走査を行う．ペルチェモジュールを冷却することで試料の上下面間に温度差 $\boldsymbol{\Delta T}$ を与え，このとき発生する熱起電力をプローブ先端と熱浴にそれぞれ設置した熱電対線により測定し，独自に開発した自動測定プログラムを用いてゼーベック係数 $\boldsymbol{S}$ を求める．各点の測定終了毎にペルチェモジュールを用いて試料を熱平衡状態に制御する．測定は，Ni といくつかの熱電材料を用いた.

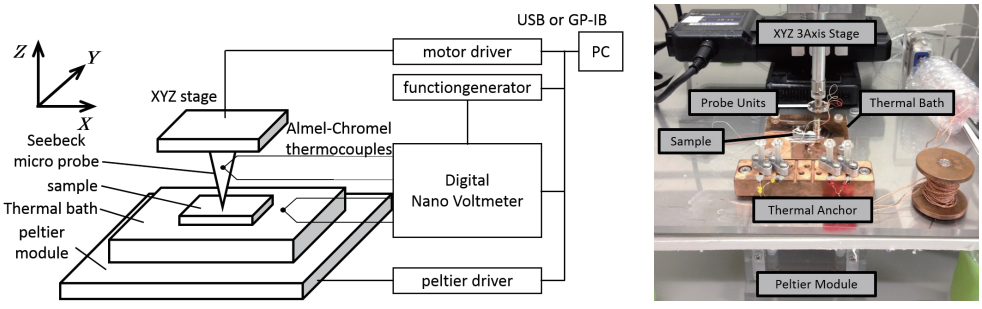


Fig. 1: The schematic picture of the SMP-MS by a cold probe method.

3　ホットプローブ法とコールドプローブ法の相違点

Fig. 2 にホットプローブ法とコールドプローブ法の熱回路を示す．前者は，試料に温度差を与える為の熱源として小型ヒーターを搭載し, 測定は, 微小プローブ先端から加わる熱により試料上下面に $\boldsymbol{\Delta T}$ が発生し，

その時の試料の熱起電力 ΔV を測定し S を得る．後者は，熱浴に設置したペルチェモジュールを用いて試料下面の温度を室温より下げることで試料上下面の温度差を得る．コールドプローブ法の微小プローブは，ホットプローブ法と比べて熱源を搭載する必要がなく，簡易な構造である．

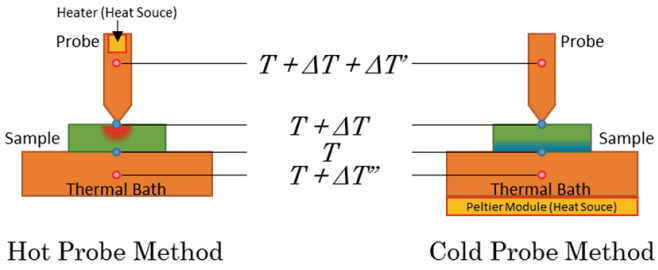


Fig. 2: The thermal circuit picture of a Hot-Probe method and a Cold-Probe method.

4　試作の評価

Fig.3 に熱浴温度の制御の有無による試料の熱緩和時間を試料別に示す．ペルチェモジュールを用いた試料温度の積極的な制御は，熱緩和の達成に要する基準を ΔT の 1 %とした場合，熱緩和に要する時間を約 1/3 まで短縮することができた．

ポスターセッションでは，Ni といくつかの熱電材料の測定結果についても紹介する．

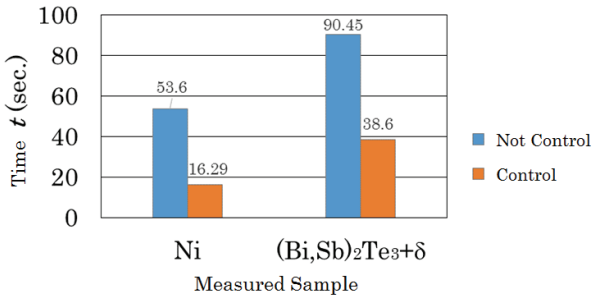


Fig. 3: The thermal control time of a thermal bath (Not) controlled by peltier module

5　参考文献

1)　G. Nakamoto, M. Kurisu: J. Electonic Mater. **38** 916 (2009).

2)　E. Müller et al.: Mater. Sci. Eng. **A 362** 17 (2003).

3)　仲林 裕司，中本 剛: TSJ2012 , **57** (2012).

4)　G. Nakamoto, Y. Nakabayashi: Intermetallics **32** 233 (2013).

6　謝 辞

本研究は，科学研究費補助金（23560363）の援助を受けて実施した．

発泡スチロールの 3 次元切削加工

○武田　洋一 A)，　野中　勝彦 B)，　菊池　護 B)

A) 岩手大学　高度試作加工センター

B) 岩手大学　工学系技術部

1　概要

発泡スチロール等の柔い材質の加工において，通常の切削加工方法では，ムシレなどの面荒れや発泡粒のこぼれなどが発生するために仕上げの加工が難しい材料である．この研究では，発泡スチロールの 3 次元切削の仕上げ加工方法を見出す為に，様々な切削条件で加工を行い比較評価した．

2　研究の背景

岩手大学高度試作加工センターでは，機械部品や研究部品のみならずデザインモデルの製作など，大小問わず発泡スチロールやゴム等の柔軟材料の 3 次元の成型加工に取り組んできた．エンドミルによる切削では表面のムシレがひどく，研磨や熱による表面処理など後加工が必要であった．また，発泡粒が欠けたり，所定の寸法が出せなかったりと苦労した．このような柔軟かつ弾性のある材料には，刃物が食い込みやすくするために，すくい角の大きい刃物が有効であるが，３次元切削に用いられるボールエンドミルにはそのような市販工具が少ないのが現状である．その中で今年度，多数個の発泡スチロール加工を請け負った．より良い仕上がりを目差し，精度の良い発泡スチロールの切削加工を行うために最適な切削条件の傾向を見出すべく，切削試験を行った．

3　装置および方法

本加工で用いた装置（図１）は NC フライス盤に最大回転数 60,000 min^{-1} の高速スピンドルを装着したものを用いた．切削工具は R3mm 汎用超硬ボールエンドミル（TSC-BEM2S3　すくい角 30°）を用いた．発泡スチロール発泡率 50 倍の主に容器などに用いられる材質のブロック材を用い，平板に両面テープによる固定した．

図１　NC フライス盤

加工実験に用いた形状，工具軌跡を図２に示す．ボールエンドミルによる平面，斜面，曲面，垂直面を評価しやすい形状とした．加工は３DCAD データを３DCAM により NC プログラムを作成し，加工を行った．切り込み量およびピックフィードは，平面部 0.1mm，斜面，曲面部 0.3mm，垂直部 1 mm とした．加工条件は，NC フライス盤の本体主軸の最高回転数である 4000 min^{-1} から 20,000 min^{-1}, 40,000 min^{-1} の 3 条件とした．切削送り量は，NC フライス盤の仕様を考慮し，最小一刃送り量 f =0.03mm，0.015mm，0.007mm として設定した．以上の全９条件の切削条件をアップカット，ダウンカットの方向で切削を行い，比較を行った．

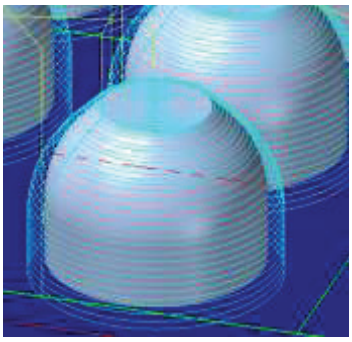


図２　切削形状・工具軌跡

4　結果および考察

切削表面の写真を図３に示す．また仕上がり表面を目視により 5 段階で評価したものを表１に示す．

ダウンカットの切削表面は，工具回転数が低回転になるほどムシレがひどく，カケなどが目立つ．一方高回転では，ムシレやカケが非常に少なくなり，ボールエンドミルの切削跡が非常に鮮明に確認出来る．ダウンカットは食い込み時の切り込み量が大きいため，材料がひずみやすく，さらに刃先の食い付きが悪く為にせん断しにくい為にムシレたと思われる．しかし，高回転時には，良好な面が得られた．工具の高速回転により，材料のひずみ速度を超え刃先の食い込みが良くなる為と考えられる．

アップカットの切削表面では，ダウンカットに比べ良好な表面を得られたが，低回転低送りにおいても非常に良好な面が得られる事が分かった. アップカットでは, 切り込み時の切削厚さがゼロから大きくなる為, 被削材の食い込み時のひずみも小さくなりせん断されやすい為と考えられる．また，高回転では高送りにしても切削表面が良好であり，低回転低送りに比べ 40 倍効率的に安定した仕上げ表面の切削加工が出来る．その為, 今回の様に金型を用いずに多数個加工出来るため, 非常にコスト効果がある.

平面部の切削表面は, 発泡粒のカケ以外に大きな差は見られなかった. 斜面部に比べ, ピックフィードを小さくしている影響と考えられる.

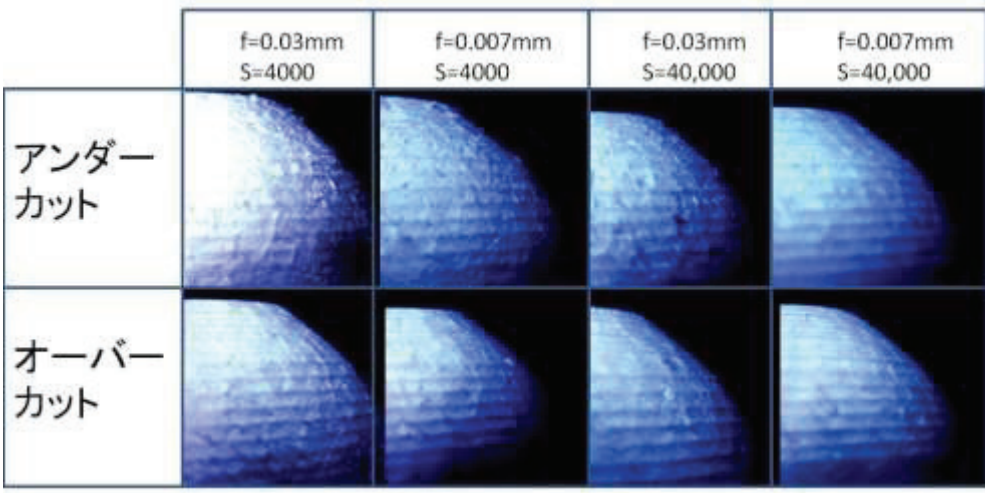


図３　発泡スチロール切削加工表面比較

表１　発泡スチロール切削加工面評価

カット方向	工具回転数 (min^{-1})	一刃当切削送り量		
		f=0.03mm	f=0.015mm	f=0.007mm
ダウン	4,000	E（ムシレ・カケ）	D（ムシレ大）	D（ムシレ大）
	20,000	E（ムシレ・カケ）	D（ムシレ大）	C(ムシレ･シワ)
	40,000	C（ムシレ・カケ）	C（ムシレ・カケ）	B（ムシレ）
アップ	4,000	C（ムシレ）	B（シワ）	A
	20,000	B（カケ）	A	A
	40,000	A	A	A

5　まとめ

以上により以下の知見を得た.

① 発泡スチロールの切削には，刃先食い込み時のひずみが仕上げ面に大きく影響する.

② 高速な切削速度の加工は, 柔軟で弾力性のある材料の刃先食い込み時の被削材ひずみを抑えるために, 良い仕上げ表面を得ることが出来ると共に、送り速度を上げて高効率な加工が可能となる.

導波管型帯域分離フィルターの製作

○大西崇文 A)，鈴木和司 A)

A) 名古屋大学 全学技術センター（理学）

1. はじめに

星の生誕を探求する電波天文学や地球大気環境観測ではミリ波、サブミリ波と呼ばれる周波数の高い領域の電波信号が用いられるが、ミリ波、サブミリ波を直接増幅する増幅器は存在しない。信号の増幅には、受信したい信号と周波数が少し異なる信号を混ぜ、周波数の低い信号を作り、それを増幅させるのが一般的である。しかし、この手法では装置が複雑化し、不安定性が増加するという問題点がある。今回製作した導波管型帯域分離フィルターは、導波管回路を利用して、必要な帯域の電波信号のみを出力するように設計されたフィルターであり、これを用いることにより、装置を簡略化することができる。ここではマシニングセンタを使用した 100 GHz 帯の導波管型帯域分離フィルターの製作について報告する。

2. 導波管型帯域分離フィルター

図 1 に製作した導波管型帯域分離フィルターの外観写真を示す。フィルターは図 2 に示すように左右対称の導波管回路をもつ二つの部品で構成されており、それらが向かい合わせにねじ固定されている。全体の大きさは縦 24.8 mm、横 52.4 mm、高さ 20 mm であり、中を通る導波管の大きさは、高さ 2.54 mm、幅 1.27 mm である。フィルターは冷却して使用するため、熱容量を減らす目的で、導波管回路の反対側の面は深さ 6 mm くり抜かれた形状となっている。材料にはアルミニウム合金 A6061 を用いた。

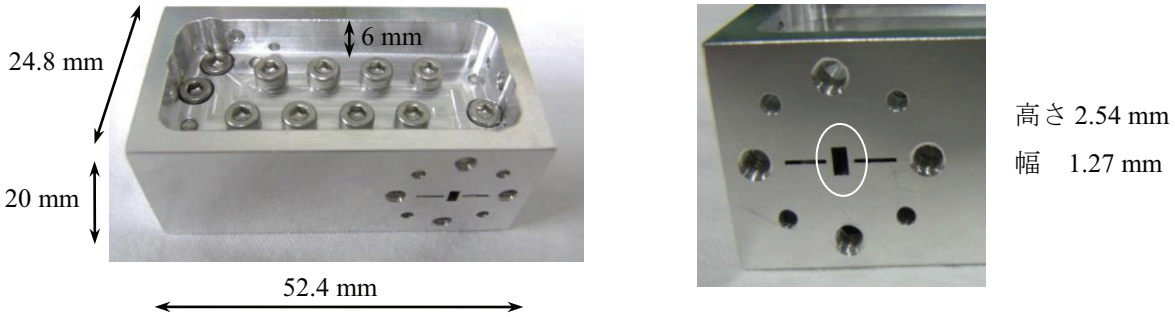
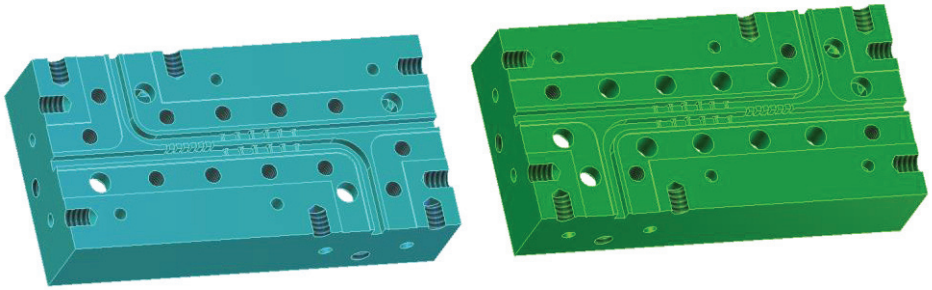


図 1 導波管型帯域分離フィルター外観



部品 1　　部品 2

図 2 部品の形状

図 3 に今回製作した導波管回路を示す。図 3 の色のついた部分が導波管回路である。導波管回路以外には、位置決め用のピン穴と、固定用のねじ穴がある。固定用のねじ穴のある面は、組立てる際に接触面の圧力を増やして導波管部分の隙間を少なくするため、周囲よりも 0.2 mm 低くなっている。導波管回路には、ハイブリッドカプラとバンドパスフィルターが組み合わされており、図 4 および 5 にそれぞれの寸法を示す。

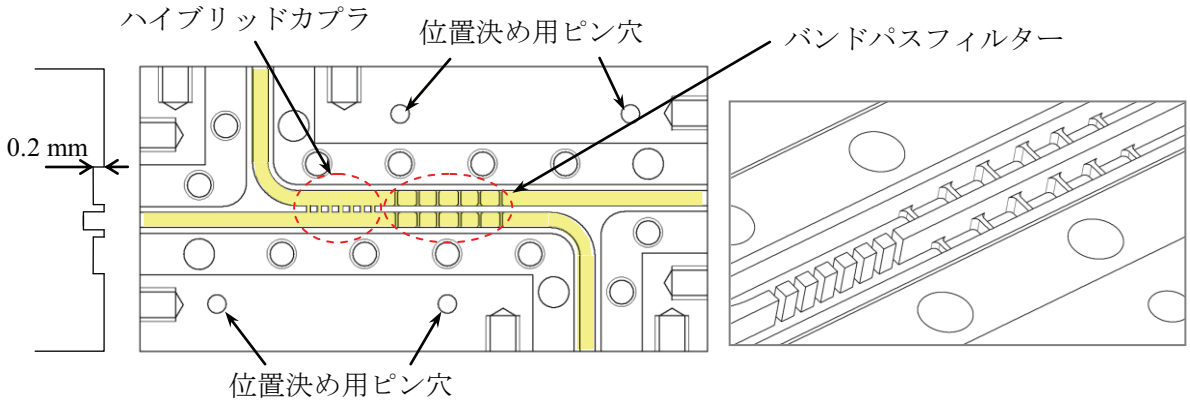


図 3 導波管回路

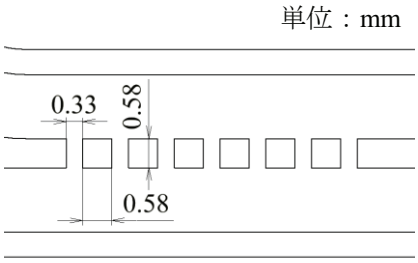


図 4 ハイブリッドカプラの寸法

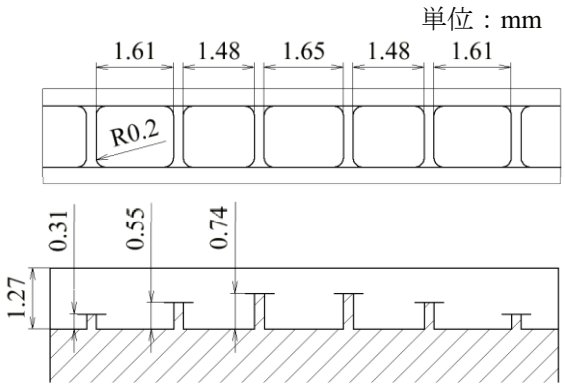


図 5 バンドパスフィルターの寸法

3. 加工手順

加工手順（図 6）を以下に示す。

(1) 裏側のポケット加工
(2) 固定用ねじ穴加工
(3) ねじ部の深さ 0.2 mm の溝の加工
(4) 導波管回路の加工
(5) 向かい合わせに固定し、側面を 4 面加工
(6) 側面のピン穴とねじ穴加工

加工には図 7 に示すマシニングセンタ（東芝機械社製 JRV 40E）を使用した。裏側のポケット加工には、3D-CAD のデータを CAM ソフト（OneCNC 社製 XR5）で読み込ん

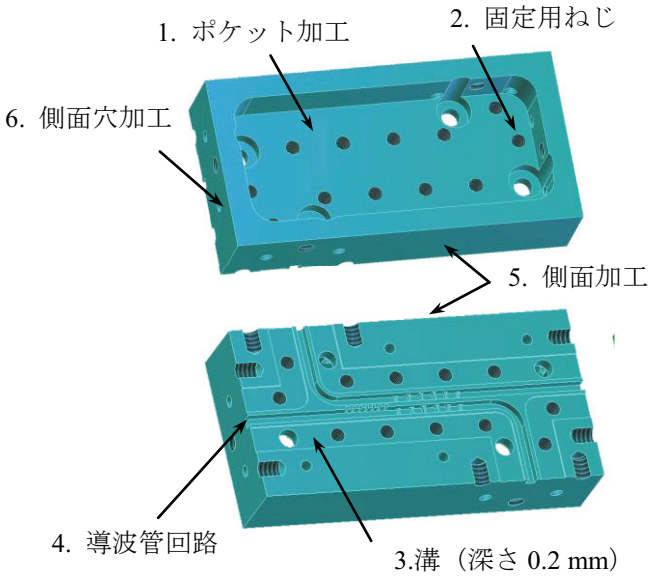


図 6 加工手順

で作成した加工プログラムを使用し、導波管回路および穴の加工には、自作の加工プログラムを使用した。導波管回路の加工に自作のプログラムを使用した主な理由は、当室の CAM ソフトでは、工具の径を補正するにはプログラムを作り直す必要があったことと、2 種類の工具を使用した場合に、それぞれの工具を意図したように動かすプログラムを作成するのが煩雑であったためである。

図 7 マシニングセンタ東芝機械社製 JRV 40E）

4. 導波管回路の加工

導波管回路の加工には、直径 1 mm および 0.3 mm のエンドミルを使用した。ハイブリッドカプラのスリットおよびバンドパスフィルターの角 R の部分は直径 0.3 mm、その他の部分は直径 1 mm のエンドミルにより加工した。使用した機械は主軸の最高回転数が 6,000 rpm であり、今回のような小径のエンドミルによる加工には回転数が不十分であるため、図 8 に示すように主軸に高速スピンドル（ナカニシ社製 HES500-BT40）を取り付けて加工を行った。切削油は、フックス社製エコカット 210 を使用した。

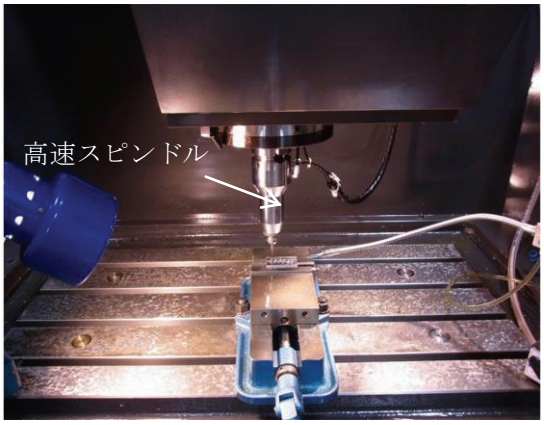


図 8 加工時の様子

最初に試作を行い、加工した導波管の幅（1.27 mm）およびスリットの幅（0.33 mm）の測定値と設計値との差を求め、その差分を補正して本加工を行った。加工を行った際の切削条件を表 1 に示す。

表 1 切削条件

	直径 1 mm エンドミル	直径 0.3 mm エンドミル
回転数 [rpm]	20,000	40,000
切り込み [mm]	0.1	0.01
送り速度 [mm / min]	100	100

5. 試作の結果

図 9 に試作後の全体写真および顕微鏡写真を示す。寸法を測定した結果、導波管およびスリットの幅それぞれ 1.27 mm に対して 1.259 mm、0.33 mm に対して 0.330 mm であった。この結果から、本加工では直径 1 mm のエンドミルの工具径補正値（直径）を 10 μm 小さくし、直径 0.3 mm のエンドミルは工具径補正値を変更せず加工を行うことにした。また、図 9 の顕微鏡写真からわかるように、直径 0.3 mm のエンドミルの切削痕が底に残っており、その段差は 15 μm であった。各エンドミルの高さ方向は、顕微鏡で見ながらエンドミルを加工面に近づけ、切りくずが出た位置を基準とした。本加工では

より確実にするため、場所を変えて複数回高さ合わせを行うこととした。なお、直径 1 mm および 0.3 mm のエンドミルでの加工時間はそれぞれ約 40 分、15 分であった。

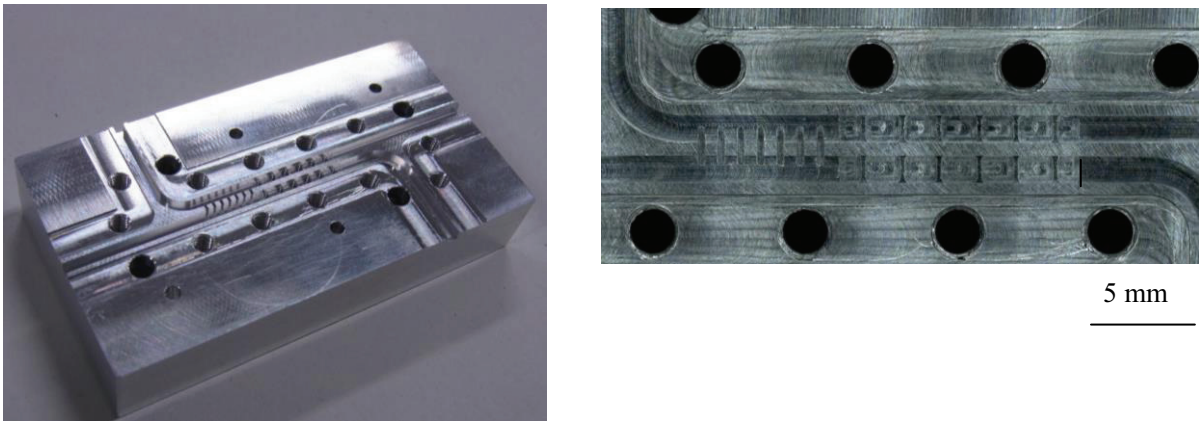


図 9 試作後の部品

6. 本加工の結果と考察

本加工後の顕微鏡写真および測定結果を図 10 および表 2 にそれぞれ示す。バンドパスフィルター部の寸法は平均値であるが、ばらつきはいずれも数μm 程度であった。本加工では試作の結果を考慮して導波管の幅（表 2 A）が 10 μm 大きくなるように、工具径の補正値（直径）を 10 μm 小さくしたが、両部品とも試作から 20 μm 以上大きくなった。試作では、A のみを測定して、工具径を補正したが、それ以外の箇所の寸法を測定したところ、ハイブリッドカプラの溝の長さ（C）は、設計値よりも 10 μm 小さく、これをもとに工具径を補正するならば、逆に工具径の補正値を 10 μm 大きくする必要があったことになる。他の箇所では試作と本加工とで A のような大きな変化は見られなかった。また、直径 0.3 mm のエンドミルに交換した後の高さ合わせは、両部品で同じように行ったが、実際に加工された高さは異なっており、部品 2 では導波管の底に直径 0.3 mm のエンドミルの切削痕があり、部品 1 では切削痕が見られない。今回使用した機械の仕様書によると、位置決め精度は±5 μm であり、高速スピンドルのコレットの芯振れ精度は 3 μm であった。またそれらの機械精度に加え、加工時の切りくずの

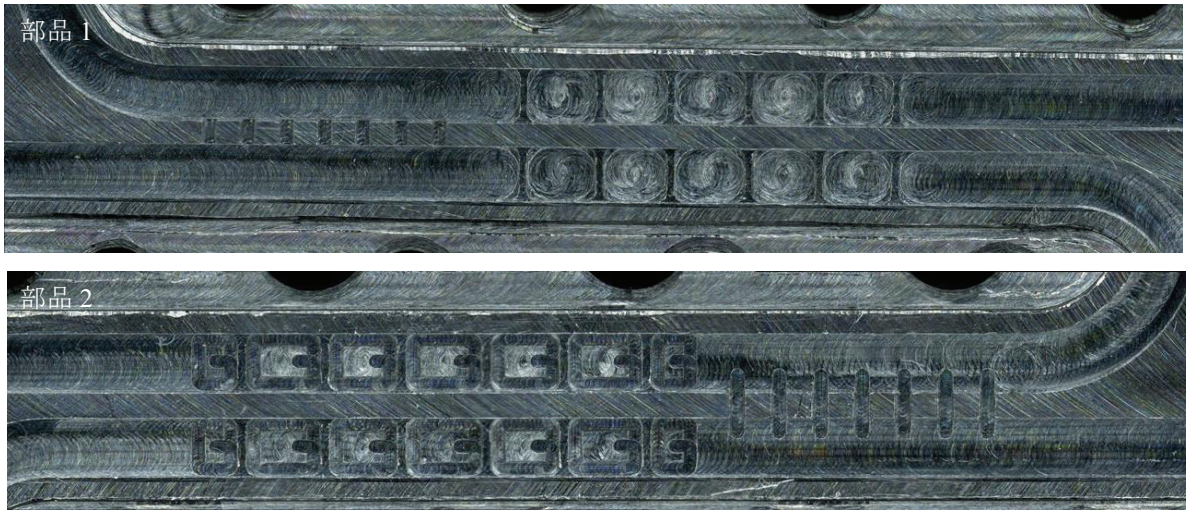


図 10 本番加工後の顕微鏡写真

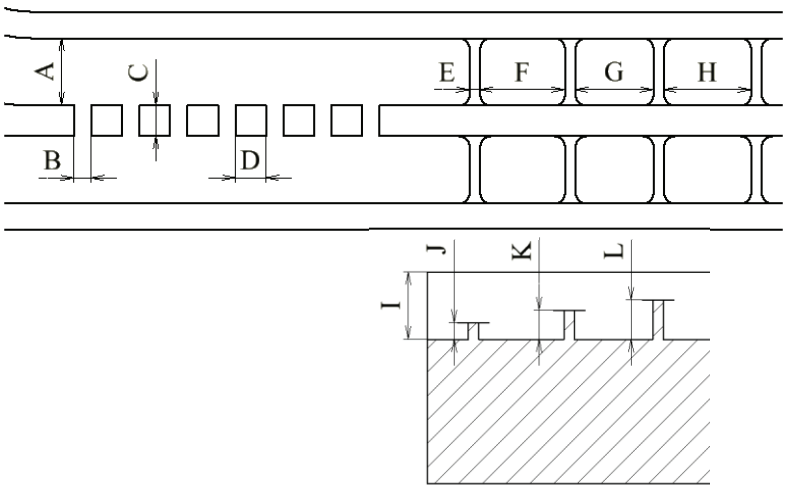
排出具合によってエンドミルがたわみ、誤差が生じる可能性もあり、このようなことから、寸法にばらつきが生じたと考えられる。

表 2 測定結果　　単位:mm

	A	B (n = 7)	C	D (n = 6)
設計値	1.27	0.33	0.58	0.58
テスト	1.259	0.330 ± 0.003	0.570	0.581 ± 0.002
部品 1	1.285	0.334 ± 0.003	0.564	0.575 ± 0.003
部品 2	1.288	0.329 ± 0.003	0.562	0.580 ± 0.002

	E	F	G	H	I	I'	J	K	L
設計値	0.2	1.61	1.48	1.65	1.27	1.27	0.31	0.55	0.74
テスト	0.206	1.606	1.472	1.641	1.268	1.283	0.306	0.551	0.738
部品 1	0.192	1.618	1.487	1.658	1.282	1.268	0.309	0.559	0.742
部品 2	0.195	1.615	1.487	1.652	1.270	1.274	0.309	0.551	0.738

I’ は直径 0.3 mm エンドミルの切削痕の位置痕



7. まとめ

マシニングセンタに高速スピンドルを取り付け、導波管回路をもつフィルターの加工を行った。製作したフィルターの精度は±10 - 20 μm であった。研究者からは、今回製作したフィルターを使用した実験の結果、ほぼ設計した通りの機能が得られたとの報告を受けている。しかし、今後さらに精度の良い加工を目指すには、本加工を行う前に、工具径補正値の変更後や工具取り付け後に試験的な加工を行い、使用する機械の精度の再現性等を把握しておくことが重要であると感じた。今回は私にとってマシニングセンタを使用する初めて機会であり、マシニングセンタの操作やプログラムの作成等、貴重な経験となった。

ＫＡＧＲＡクライオスタットの設計

―振動解析について―

○小池重明 A)，久米達哉 A)，木村誠宏 B) ，鈴木敏一 B)

A) 高エネルギー加速器研究機構　機械工学センター

B) 高エネルギー加速器研究機構　超伝導低温工学センター

概要

KAGRA は岐阜県神岡に建設中の重力波天文台で、マイケルソン型の片腕長 3km のレーザー干渉計であり、重力波の直接検出を目指している。 KAGRA では干渉計を構成する鏡を真空クライオスタットの中に設置し 20K の極低温にする。今回そのクライオスタットを設計製作した。そして、それに関連して有限要素法を用いて強度解析、モード解析などを行った。ここではそのうち主に振動解析について報告する。

1　はじめに

KAGRA とは岐阜県神岡に建設中の大型低温重力波望遠鏡で、片腕 3km のマイケルソン型のレーザー干渉計である。KAGRA では干渉計の要である鏡を 20K まで冷やすことにより熱雑音を低減させ、今まで行われてきた防振機構を合わせて使用し感度をあげ重力波の直接検出を目指している。鏡は 10^-7Pa の高真空に保たれたクライオスタットの中に 2 重の輻射シールドを設け、その中に輻射シールドの外から防振機構を介して支持されている。そして冷却は冷凍機からのヒートリンクと輻射によって行われる。鏡自体はクライオスタットとは独立に防振機構によって外から支持されるのでクライオスタットの振動の影響を受けにくい構造になっているが、クライオスタット及び輻射シールドの地面振動と主に冷凍機による外部振動に対する応答を知るために有限要素法の解析ソフト ANSYS を用いてモード解析から振動解析を始めた。

2　クライオスタットの構成

クライオスタットの概要を 図 1 に示す。高さ 4.3m、直径 2.6m、総重量約 11000kg で、2 重の輻射シールドの中に鏡を懸架する構造となっている。内側のインナーシールドは主に干渉計からの散乱光で生じる熱を吸収するほか、輻射による鏡の初期冷却促進にも寄与する。外側の輻射シールドは内側の輻射シールドとして機能する。シールドは A6063 および A1070 で構成され、重量は内側シールドが約 590kg、外側シールドが約 460kg で、デュポン社ベスペル®製の柱によってクライオスタット内壁に固定されている。内側シールド内壁は散乱光吸収のためダイアモンド・ライク・カーボン（DLC）加工が施されている。クライオスタットには 4 台の低振動冷凍機ユニット [1] が接続され、2 段式冷凍機の第 2 段コールドヘッドに接続された計 4 系統の伝導冷却路のうち 2 系統でインナーシールドを、熱的に独立した別の 2 系統で鏡を冷やす。また第 1 段コールドヘッドに接続された計 4 系統の伝導冷却路を使ってアウターシールドを冷やす。冷却能力の設計値は、運転温度がインナーシールドは 10K 以下、アウターシールドは 90K 以下、また鏡へのヒートリンク接続部に熱負荷各 2W を与えた時その接続部において 8K 以下、である。この運転温度におけるクライオスタット内の目標真空度は 10 -7 Pa 以下である。

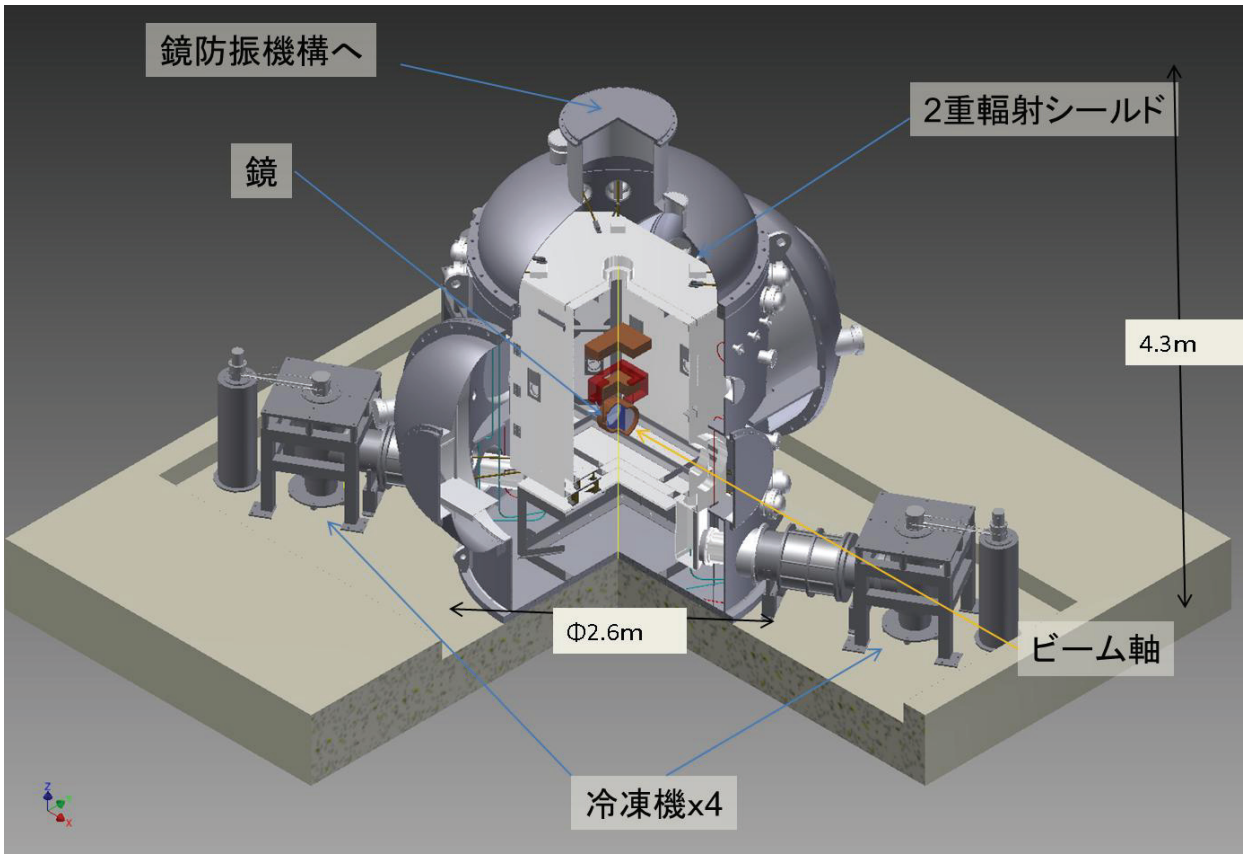


図 1

3　解析の方法

解析に使用したモデルは3DCADで作成したモデルをメッシュを切りやすいように簡略化しANSYSに読み込んで解析を行ったが、すべて読み込むと解析どころか編集もできなかったので、クライオスタットのチェンバー部と 2 重輻射シールドに分けて読み込んでモード解析を行うことにした。そしてチェンバー部については、出来上がったクライオスタットの冷却試験時(図 2) [2]にハンマリング試験を行い得られた共振振動数と計算結果を比較し計算結果を妥当なものとするためにモデルの固定点を固定なし(自由振動)、全周固定、2 箇所固定、3 箇所固定、4 箇所固定と境界条件を変えて解析し一番合う条件で解析した(図 3)。

図 2

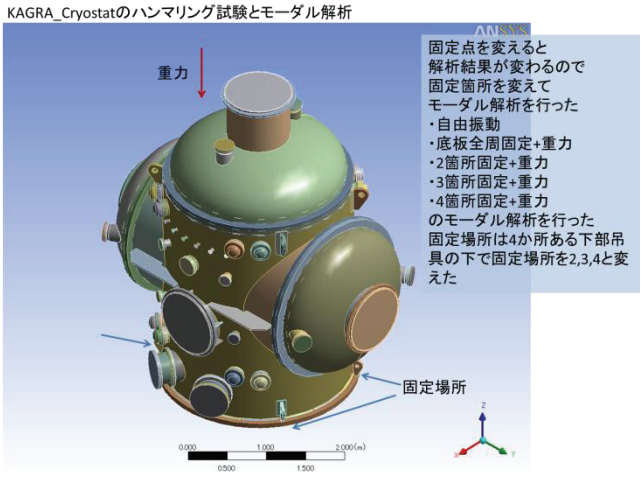


図 3

2 重輻射シールドについては形状が複雑なのでメッシュの大きさを細かくしながら解析を行い結果が収束するまで細かくした。そののち計算時間を節約するため結果に影響が少ない部分のメッシュを荒くするなどの最適化を行ってモード解析をした。2 重輻射シールドのモデル形状とメッシュの最適化の様子を図 4、図 5 に示す。そして、その結果に対して実際に測定した地盤振動を用いてスペクトル応答解析を行い、最大変形形状をもとめた。

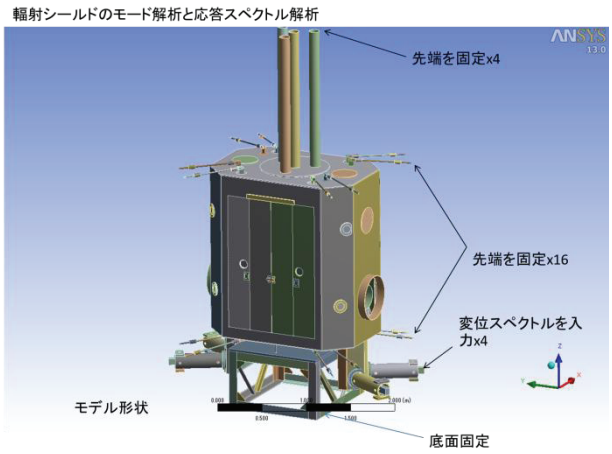


図 4

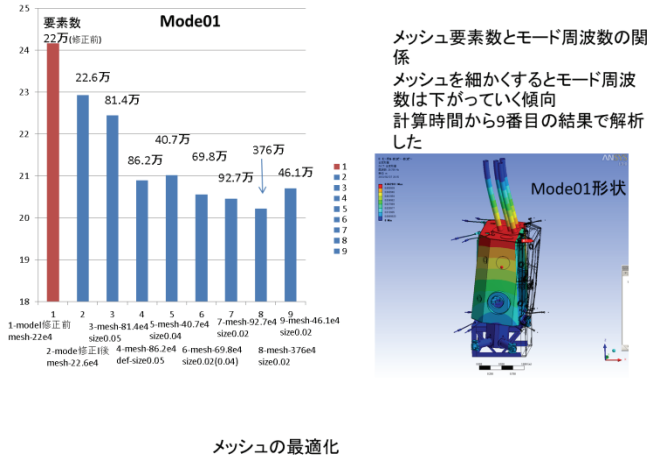
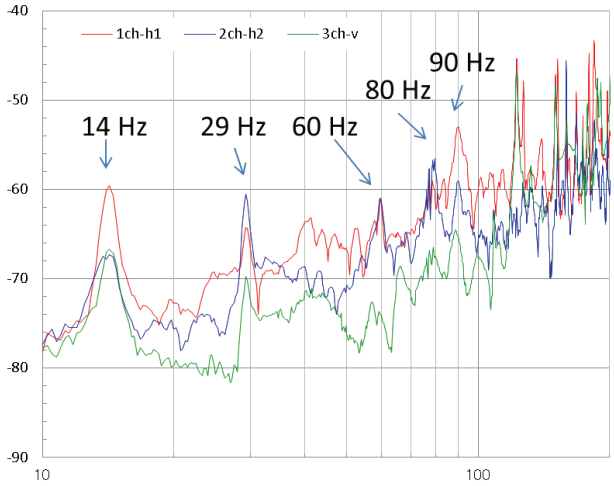


図 5

4　解析結果

クライオスタットの固定点を変えたときのモード解析結果を表 1 に示す。またハンマリング試験で求めた周波数応答関数のグラフを図 6 に示す。これによるとハンマリングの周波数応答関数には 14Hz,29Hz,60Hz,80H,90Hz に顕著なピークが見られこれがモード周波数とみられ、解析結果の 4 箇所固定がよく合っている。クライオスタットはコンクリート面にスペーサーを介して～8 か所で置いただけで特に固定はしていないのだが 4 箇所固定と同等という結果になった。また、別のクライオスタットの測定結果では 3 点固定の場合の共振周波数が見られており面ないしは多点で支持されているように見える物体も共振周波数を見る限り 3～4 点固定と同等いうことが分かった。



KAGRA クライオスタット真空容器の周波数応答関数(FRF)、インパルスハンマー入力、速度計の ACC(加速度検出)モード(ゲイン 120 dB, カットオフ 400Hz)にて検出、全 10 点のハンマ入力時の応答特性の平均値
1ch-h1 は水平ビーム軸方向、2ch-h2 は水平 1ch-h1 と直交方向、3ch-v は上下方向
14, 29, 60, 80, 90 Hz 付近にピークが見られる

図 6

表 1

モード周波数	自由振動	2 箇所固定	3 箇所固定	4 箇所固定	底板全周固定
F1	37.41 Hz	3.58 Hz	11.07 Hz	14.557 Hz	21.52 Hz
F2	40.95 Hz	20.76 Hz	22.22 Hz	31.281 Hz	35.28 Hz
F3	42.92 Hz	24.97 Hz	34.72 Hz	35.963 Hz	43.23 Hz
F4	43.15 Hz	35.87 Hz	38.03 Hz	42.53 Hz	48.79 Hz
F5	43.66 Hz	42.17 Hz	43.02 Hz	52.414 Hz	49.10 Hz
F6	56.56 Hz	43.75 Hz	44.81 Hz	53.655 Hz	56.02 Hz
F7	77.60 Hz	55.79 Hz	55.97 Hz	64.279 Hz	56.35 Hz
F8	79.33 Hz	55.96 Hz	56.14 Hz	76.052 Hz	66.96 Hz

表 2

モード	周波数(Hz)
F1	20.709
F2	23.947
F3	24.712
F4	24.878
F5	30.839
F6	38.156
F7	42.182
F8	45.09
F9	46.005
F10	51.373
F11	51.702
F12	61.149
F13	63.354
F14	65.502
F15	66.276
F16	66.615
F17	73.191
F18	76.181
F19	83.774
F20	85.771
F21	93.707
F22	94.328
F23	95.122
F24	97.214
F25	101.04

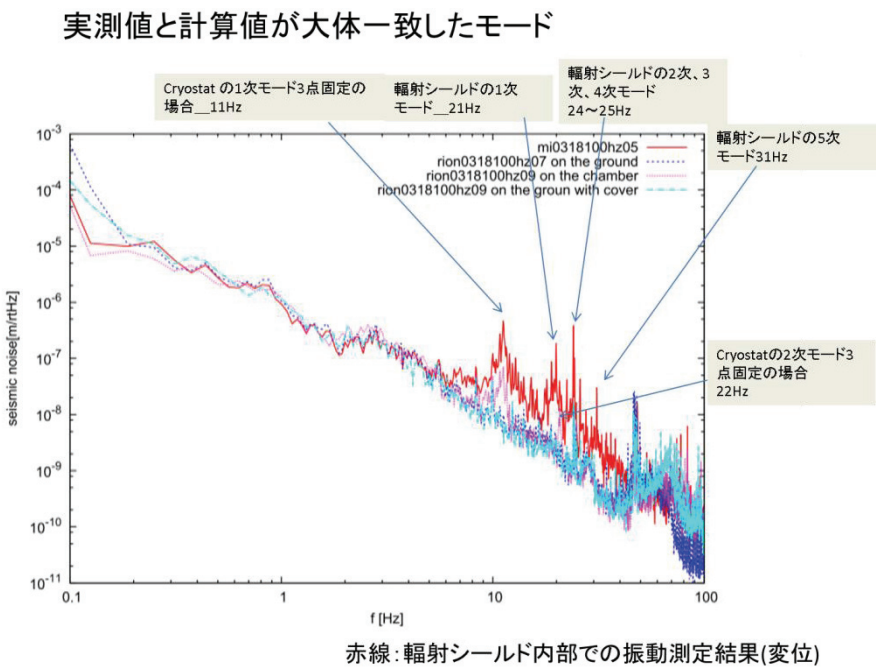


図 7

2 重輻射シールドのモード解析結果を表 2 に、振動計を輻射シールド内部底面に置いた時の周波数応答関数を図 7 に示す。この周波数応答関数には 11Hz,22Hz 付近にクライオスタット由来とみられるピークのほか、輻射シールド由来とみられるピークが解析結果でいう 5 次モードまでのピークが 21Hz,24～25Hz,31Hz に確認できた。

これらのモード解析結果を使って冷凍機の振動を入力したときのスペクトル応答解析を行った。入力データのスペクトルは図 8 のようなものでこれに対する応答スペクトル結果を図 9 に示す。これによると X,Y,Z 方向の変位の最大値は 0.45 μ m,0.5 μ m,0.67 μ m となっている。これらの数値はモデルの端の部分で出ているので、実際には測定器が置かれる部分で測定された値と比較検証する必要があるが、これは今後の課題として残っている。

また、地盤振動(図 10)の X,Y 方向のスペクトルデータを地震動として固定点に入力したときの応答スペクトル解析も行い X,Y,Z 方向の変位の最大値 0.011 μ m,0.052 μ m,0.0036 μ m(図 11)という結果が得られたが。これも、冷凍機による応答スペクトル結果同様に実際の測定値と比較検証する必要がある。

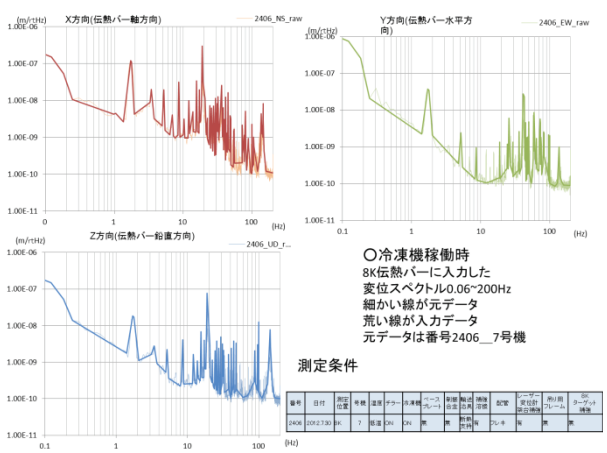


図 8

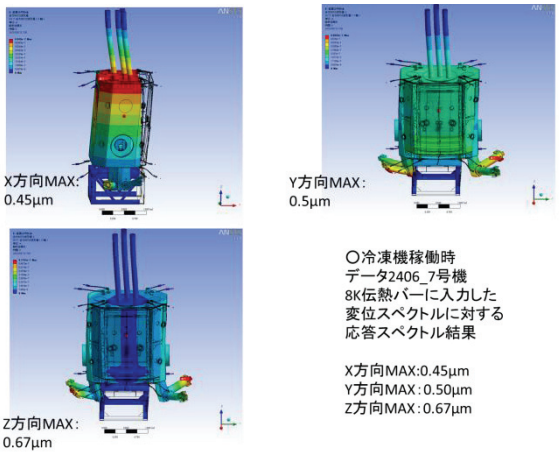


図 9

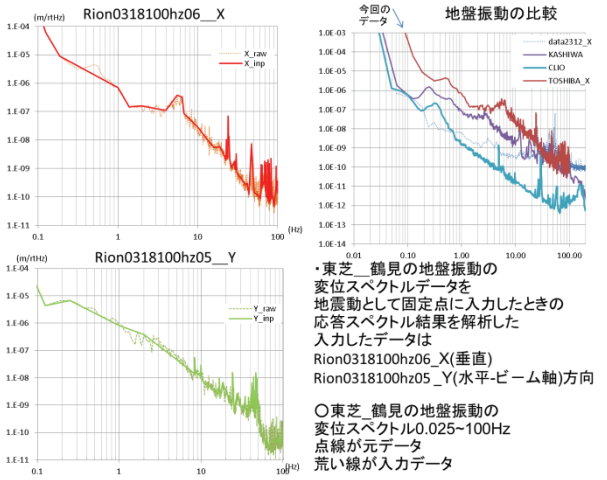


図 10

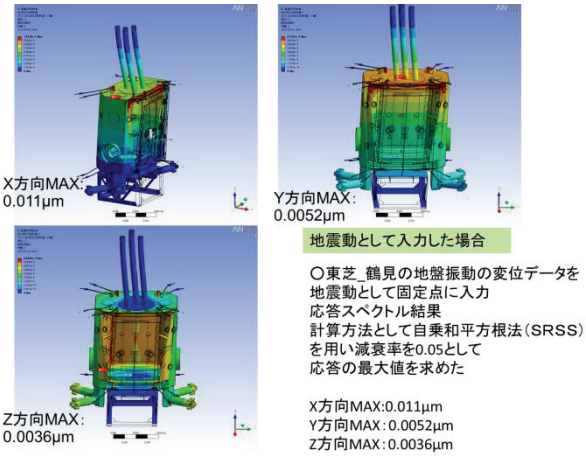


図 11

5　まとめ

- ミラーを設置するクライオスタット 4 台と冷却用低振動冷凍機 16 台が完成し、その振動特性を確認した
- クライオスタットのハンマリング試験とモード解析を比較し固定方法を変えた解析で 1 次,2 次,4 次～6 次モードまで大体固有周波数が合った
- 輻射シールド内部に振動計を置いて測定した結果では輻射シールドの 1～5 次モードとクライオスタットの 1,2 次モードのピークを確認できた
- 輻射シールドについて冷凍機振動と地盤振動の応答スペクトル解析をした。結果については実際に振動計にて測定した結果と比較検証する必要がある

6　参考文献

1. C. Tokoku, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.232
2. 大型低温重力波望遠鏡用低温設備の開発 (6) - KAGRA 用クライオスタット冷却性能試験- 東谷 千比呂, et al.: 2013 年秋季低温工学・超電導学会-

CMB(Polar BeaR Ⅱ)測定器の設計開発

鈴木純一

高エネルギー加速器研究機構　機械工学センター

概要

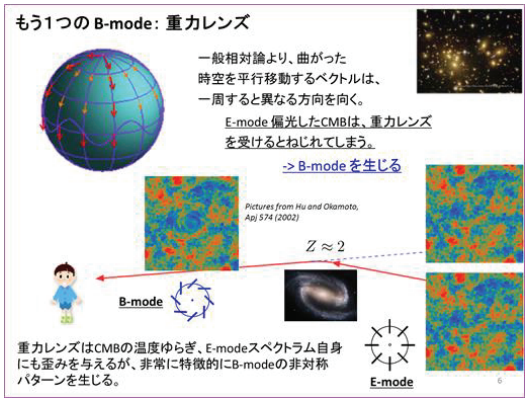
ＣＭＢ（宇宙マイクロ波背景輻射）の偏光を観測する事によって初期宇宙の物理を理解することができる。その為の観測装置としてクライオスタット内にレンズ群および半導体検出器を配置する構成となっている。機械工学センターとして本体の設計は勿論、前段階として各要素のＲ＆Ｄ(開発)用実験装置の設計組立、物性を知るための新素材のテストも含めて行っている。 今回、まだ測定器としては完成していないが途中経過を発表する。

1　はじめに

現在ＣＭＢグループとしては３つのプロジェクトが進行している。
１つはＱｕｉｅｔ実験、２つめはＰｏｌａｒＢｅａＲ実験、また３つ目として２００８年９月小型科学衛星ＷＧとして正式に承認された衛星としてのＬｉｔｅＢＩＲＤ計画である。（ＪＡＸＡ等との共同研究として）
さらに上記２つめのＰｏｌａｒＢｅａＲ実験（ＰＢ）はⅠとⅡが計画されており、ＰＢ－ⅠはU.C.Ｂｅｒｋｅｌｅｙ主導で既に観測が始まっている。
ＰＢ－Ⅱは高エネルギー加速器研究機構（ＫＥＫ）主導で数年後の観測を目指し機械工学センター、低温工学センター、素粒子原子核研究所共同で観測装置の設計製作が行われている。
ＰＢ－Ⅱ実験は宇宙マイクロ波背景輻射のＢモード偏光検出を目的としたプロジェクトであり、目指すサイエンスは大きく分けて二つ。

① 原始重力波による B-mode の検出
　期待される成果：　インフレーション期の物理
② 重力レンズによる B-mode の検出
　期待される成果：ニュートリノ質量和
　　重力レンズポテンシャル

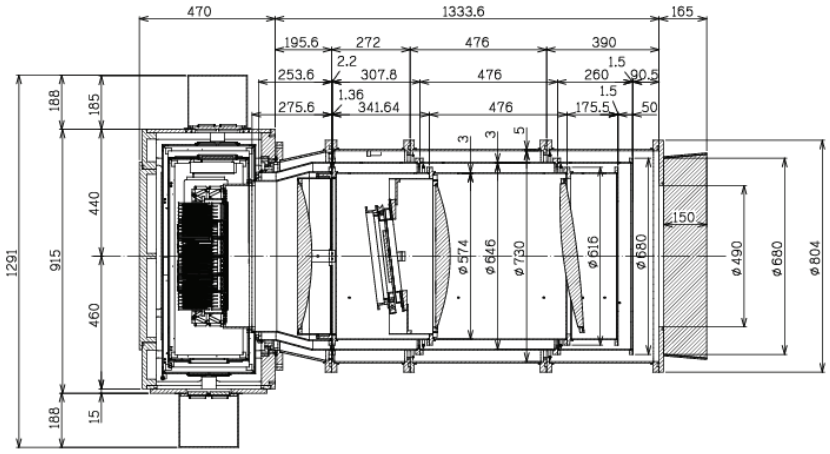
となっている。

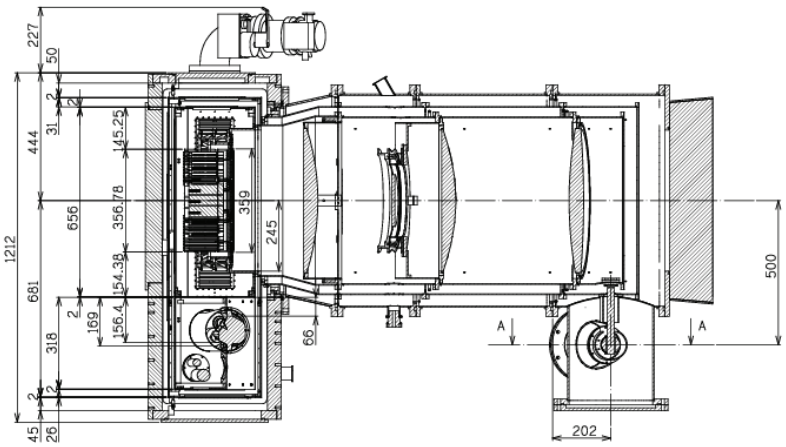


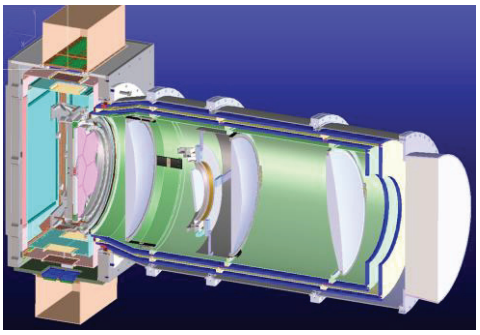
2　構造体設計

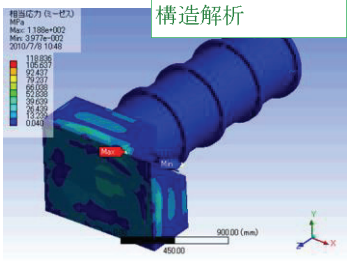
観測装置は約１．３ｍ×１．４ｍ×２．５ｍで見た目は望遠レンズを付けた一眼レフカメラのように見える。さらに観測装置は装置内のセンサー部が電波望遠鏡の焦点に合致するように望遠鏡に取り付けられる。（電波望遠鏡は約５ｍ×６ｍ×８．５ｍで既設の物であり、ユーザーは観測装置を製作すれば良い）装置自身はクライオスタットで、内部にはアルミナレンズ・偏光板・センサー等が収納されている。またクライオスタットは３層構造であり、再外層は真空層（３００Ｋ）。内層は５０Ｋ及び４Ｋシールドとなっている。内部は本体及びＴｕｂｅ部を二つのパルス管冷凍機により４Ｋまで冷やし、さらにこの観測装置の特徴の一つ

であるがセンサー部はソープション冷凍機及びＡＤＲ冷凍機により０．１Ｋまで冷やされる仕様となっている。

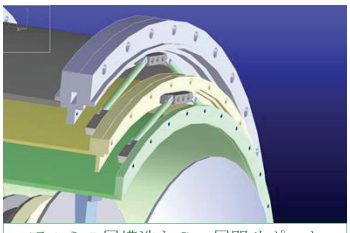


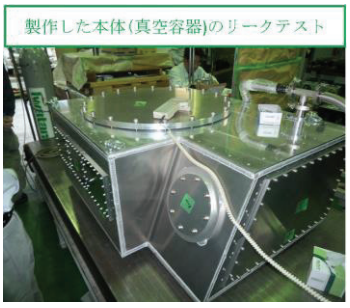






クライオスタットは図のようにＴｕｂｅ部が真空に対して構造的に強固である円筒状である一方、本体部は様々な制約から直方体の形状をしている。また観測装置が電波望遠鏡に組み込まれて駆動されることから軽量化を図る必要があり、基本の層構造はアルミとし層同士の保持にはＧ１０（ガラス繊維積層板）を使用している。このように異種材料、形状の複雑さから最初の叩き台となる概念案から構造解析を使用しフィードバックをかけ、また同時に進んでいる冷凍機、回路、光学系を設計しているグループからの要望を取り入れ何回かの構造解析を経て現在の形状となった。


アルミの層構造とG10層間サポート

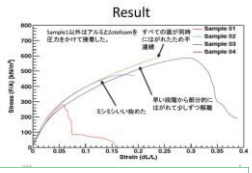


3　Ｒ＆Ｄ

機械工学センターでは各要素の試験に対しても設計製作のみならず、例えば新素材の使用に関して未知の物性があった場合には自分で実際にテストを行い物性値を調べることも行っている。特に今回は電波をロス無く真空部に引き込むためにＴｕｂｅ部先端をＺｏｔｅＦｏａｍ（発泡スチロール様の材料）と言う素材で真空窓を製作する必要があった。柔らかな素材なので最適な形状を設計するためにヤング率とポアソン比を調べる必要があり、機械工学センターの引張試験機で物性を調べることも行った。さらに冷凍機グルー

プからの要請でＡＤＲ冷凍機のテスト用クライオスタットの設計製作及び組立。その後回路グループから信号読み出し系の極低温域での動作検証を行うために上記のＡＤＲ用クライオスタットの改造を行ったりと様々なニーズに答える必要もあった。

マシニングセンタを利用した精密組立



引張り試験機による新素材ZoteFoamの物性テスト
(機械工学センターにおいて)

4　最後に

昨年度本体部分(３層構造)が完成、順調に第一回冷却試験に臨むことができた。また今年度はＴｕｂｅ部の設計が完了し製作もほとんど終了した。既に一部組立を行っている。並行してＺｏｔｅＦｏａｍによる真空窓もテスト品が完成したので実際に試験し設計値と相違ないか確認を行う段階にきている。その他回路等各要素も順調に進捗している。

以上述べてきたようにＫＥＫ機械工学センターでは個人が設計、製作、加工、組立、構造解析、測定と様々な知識を必要とされる。数年後には小型科学衛星へと発展することが決定していることから、今後ますます工学のエンジニアとして機械工学センターはプロジェクトへ積極的に参加していくことになる。

PolarBeaR-Ⅰが組み込まれた望遠鏡
チリ　アタカマ高原（標高5,000m）

今回このプロジェクトには日本外国を問わず多数の参加者があり、そのため各グループで使用する３Ｄ－ＣＡＤも異なり最初はデータのやり取りに混乱もあった。

いくつかの３Ｄフォーマットで試した結果、ＳＴＥＰフォーマットに統一してから技術者同士の連携もスムーズにいくようになった。またＣＡＤを持っていない研究者とは３Ｄ－ＰＤＦでデータを渡したりＳＫＹＰＥの画面共有機能を使用することで自分のＰＣ上の画面を相手に映して実際に寸法を拾いながら説明できることから誤解を招くことも劇的に少なくなったことを追記しておく。

穀物摩擦係数測定装置の開発

○和田友則 A)，佐藤浩幸 B),

A) 北海道大学大学院農学研究院

B) 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

概要

米、小麦、大豆等穀類の品種の違いにより、摩擦係数が変化するためある一定の方法で測定をする必要がある。それで、傾斜角を手動で変化させる装置が必要とされる。また、傾斜板の材質により、摩擦係数が変化するため、傾斜板の適正な材質を知る必要もある。この摩擦係数を知ることにより、例えば機械での搬送時に実用することができるので、穀物摩擦係数測定装置の開発依頼があった。

1　装置設計、製作

依頼された先生からの指示は、下記の点です。

１・アメリカから取り寄せたデジタル角度計を取り付けること。

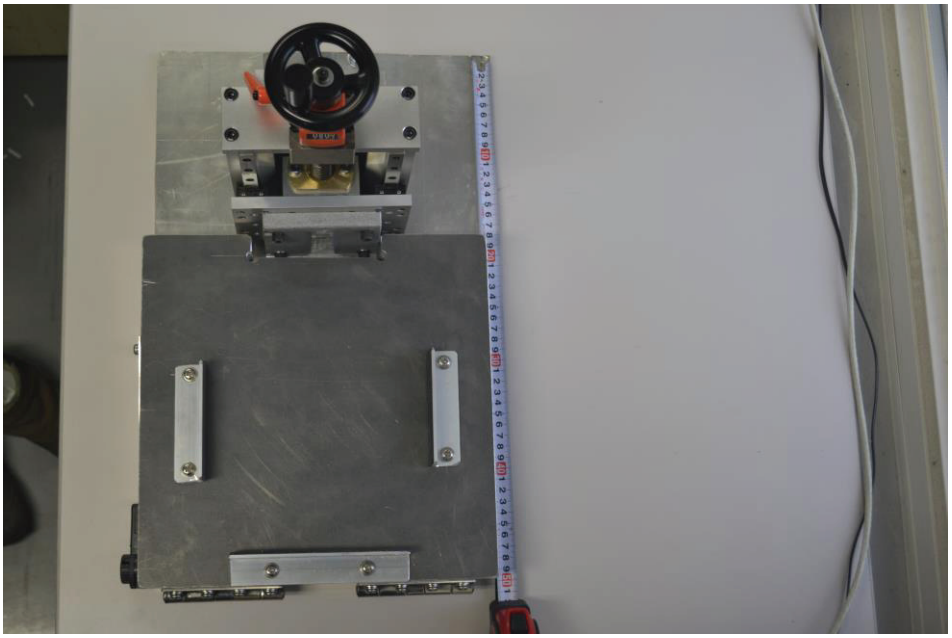
２・手で持ち運べること。（２０ｋｇまで）

３・傾斜角を変化させても装置自体は動かないこと。

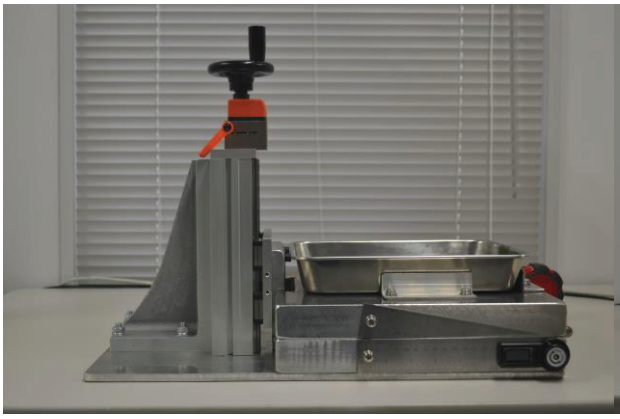
４・穀物が散乱しないようにステンレス製バットを使用する。

５・傾斜板の上に乗せる材質を簡単に変更できること。

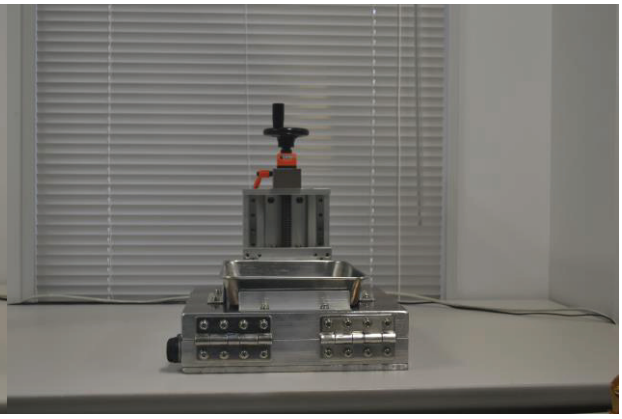
この指示を踏まえて装置を製作すると、デジタル角度計が幅３５ｍｍありましたので、硬質アルミ板をｔ35×300×300 を底板と傾斜板に使用することにした。底板と傾斜板はステンレス蝶番２つで接続した。傾斜板を持ち上げる構造は、垂直に移動する装置である KULDP20-A-220 をミスミ（株）から購入し、装置と底板をアルミ板ｔ5×300×500 で皿ボルトを用いて固定した。



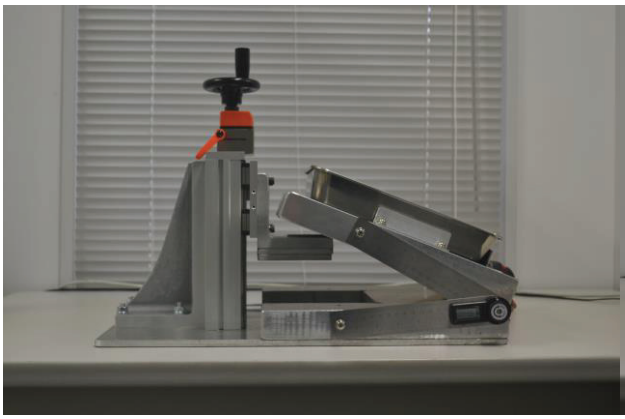
上面写真



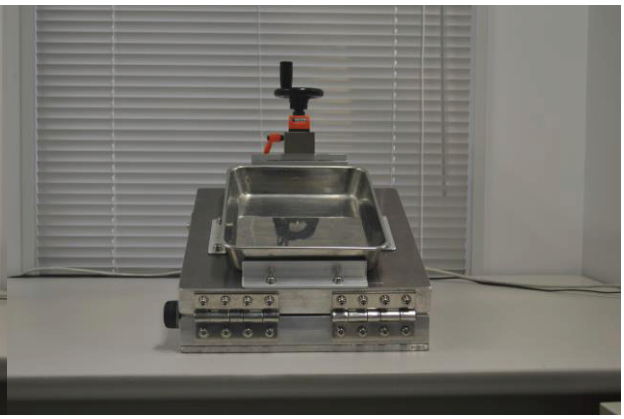
傾斜角０度の側面写真



正面写真



傾斜角２３度（最大）側面写真



正面写真

2　実験

供試材料、１米・品種ゆめぴりか（籾）２０１３年度北海道産

２小麦・品種はるきらり（消毒済み）２０１３年度北海道産

３大豆・品種ワセミドリ（乾燥済み）２０１３年度北海道産

実験回数は５回の平均値を求める。

3　結果と考察

米	角度
1	13.2
2	13.3
3	13.5
4	13.5
5	14.3
平均値	**13.6**

小麦	角度
1	19.0
2	17.6
3	17.1
4	15.9
5	16.8
平均値	**17.3**

大豆	角度
1	12.8
2	13.8
3	13.5
4	13.7
5	12.3
平均値	**13.2**

傾斜板の平均角度が米１３．６度、小麦１７．３度、大豆１３．２度となり、０．１度単位ごとに計測できることがわかった。今回の実験では、基礎データとして調査した。今後は傾斜板に載せるトレーの素材を変えて実験していきたい。装置の改善点としては、傾斜板を上下するハンドル装置が既製品のため直径 80ｍｍと小さく回転させにくかったので、今後は直径 100mm 以上のハンドルに改良したいと考えている。

非蒸発ゲッター（NEG）ピルを使ったNEGポンプの製作と評価

○菊地貴司[A)]，間瀬一彦[A)]，飯塚敏江[A)]

[A)] 高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所 物質科学第一

概要

非蒸発型ゲッターポンプ（non-evaporable getter, NEG）は、油をまったく使用しない、エネルギー消費が少ない、10^{-10} Pa 台まで排気できる、振動・騒音を生じない、小型軽量である、ゲッター材の蒸発・スパッターを伴わないなどの利点から、極高真空～高真空領域のポンプとして広く使われている[1, 2]。しかしながら、市販の NEG ポンプは比較的高価であること、大気圧開放を繰り返すとゲッター材の寿命が尽きて NEG 材を交換する必要があることが欠点である。我々は市販の NEG ピル（Alvatec Alkali Vacuum Technologies GmbH、Zr（70.0%）-V（24.6%）-Fe（5.4%）合金、φ10mm×3mm）とアルミナ管（φ1.2mm×φ0.8mm×100mm）、タンタル線（φ0.2mm×230mm）、電流導入付き CF70 フランジを用いて簡単な NEG ポンプを製作したので報告する。

引用文献：

[1] T. Kikuchi, K. Mase and F. Watanabe, J. Vac. Soc. Jpn. **55,** 21 (2012).

[2] T. Kikuchi, H. Tanaka, A. Toyoshima, and K. Mase, J. Vac. Soc. Jpn. **53,** 533 (2010).

1　簡易非蒸発ゲッター（NEG）

我々はこれまでストリップ状の NEG を使用して簡易型 NEG ポンプを製作してきた[1, 2]。市販のゲッター材料 St707 ストリップ（St707/CTAM/30D）を用いて作製した ICF114、ICF70、ICF203 マウント直接通電加熱型 NEG ポンプと ICF152 マウント間接加熱型 NEG ポンプを下図に示す。1m×30mm の St707/CTAM/30D は 400℃で 1 時間活性化すると水素に対して 1000 L s^{-1} 、窒素に対して 450 L s^{-1} の排気速度を持つ[3]。直接通電型 NEG のみで排気した放射光強度測定用超高真空槽は 2.4 × 10^{-8} Pa を維持し、間接通電型 NEG のみで排気した超高真空槽は 1.0× 10^{-8} Pa 以下まで到達した。

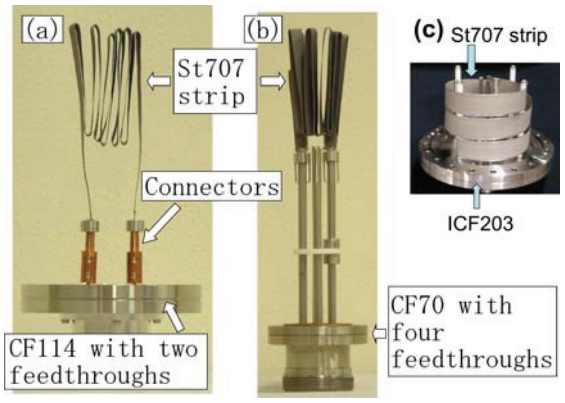


図 1. 直接通電加熱型 NEG

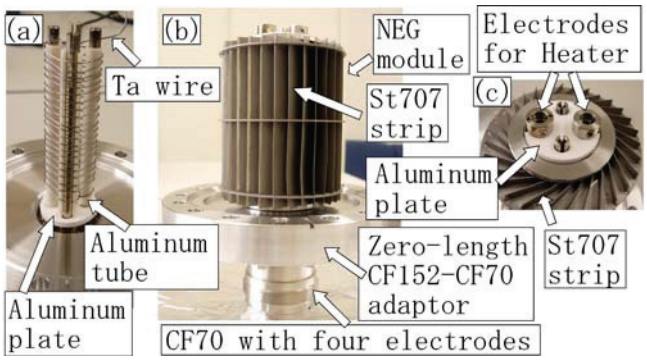


図 2. ICF152 マウント間接加熱型 NEG ポンプ[1, 2]

引用文献：　[3] C. Benvenuti and P. Chiggiato: J. Vac. Sci. Technol. A, 14 (1996) 3278.

2　NEG ピルを使った NEG ポンプの製作

我々が今回製作した NEG ポンプを図 3、図 4 に示す。29 段 3 列の NEG ピルを 2 枚のチタン製板ではさみ、両側の板を 6 本のチタン製支柱とナットで固定している。2 本のアルミナ管にタンタル線を通したものをヒーターとして 3 列の NEG ピルの中心に設置した。ヒーターと電流導入端子はスポット溶接で繋いでいる。

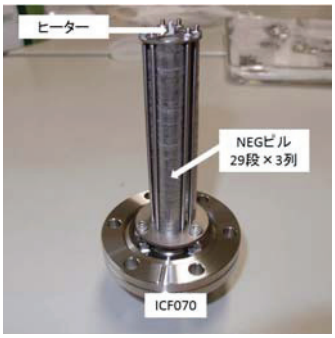


図 3. ICF70 マウント NEG ポンプの写真

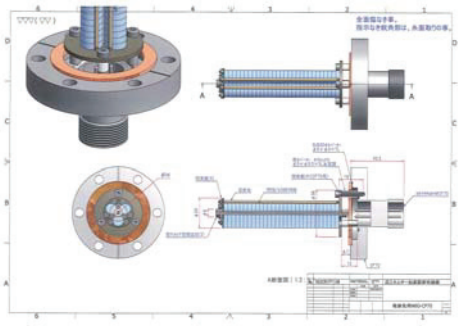


図 4. ICF70 マウント NEG ポンプの設計図

NEG を活性化するのは 450℃に 10 分加熱する必要がある。タンタル線に 3A 通電した時の NEG ピルの温度上昇を放射温度計を用いてチャンバー外から測定した結果を図 5 に示す。この結果から、NEG を活性化するには3A で30分程度通電すればよいことがわかった。このとき、ICF70 の温度は約 80℃まで上昇した。

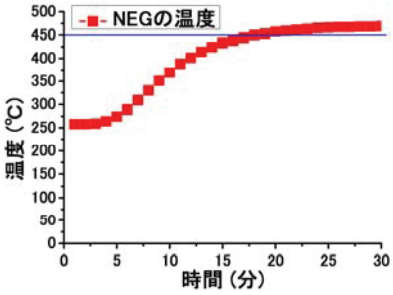


図 5.ヒーターに３A 通電した時の NEG の温度の通電時間依存性。

3　真空紫外軟 X 線ビームラインへの応用

今回製作した NEG ポンプは真空紫外軟 X 線ビームライン BL-13A[4-6]にて使用する予定である。ビームラインは光学素子の炭素汚染を防止するため、1×10^{-8} Pa 程度の真空に保つ必要がある。また、1 度建設すると装置が故障しない限り大気圧に戻さないので、NEG ポンプに適している。ビームライン排気用のスパッターイオンポンプをすべて NEG ポンプで代用すれば、ビームライン建設コストを大幅に削減できる。

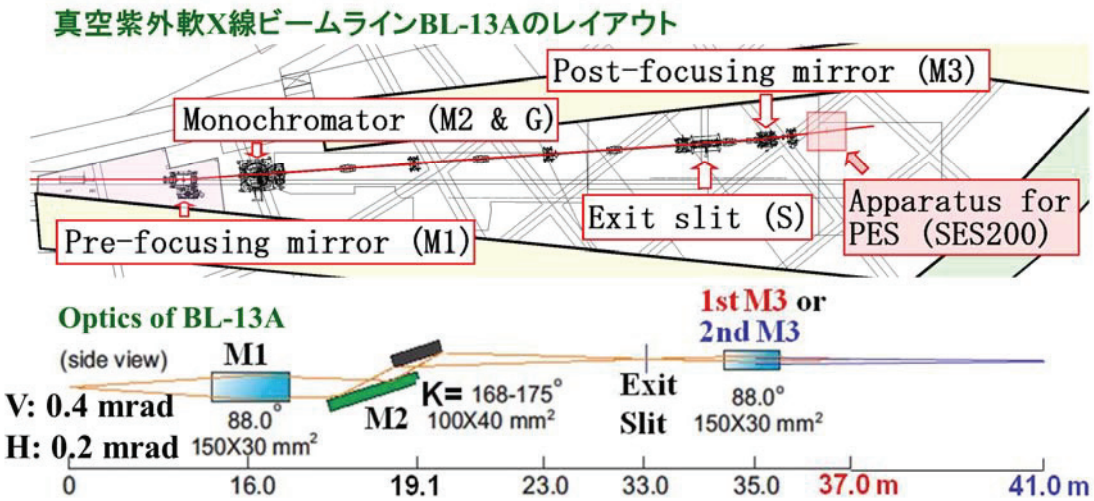


図 6.BL-13 レイアウト

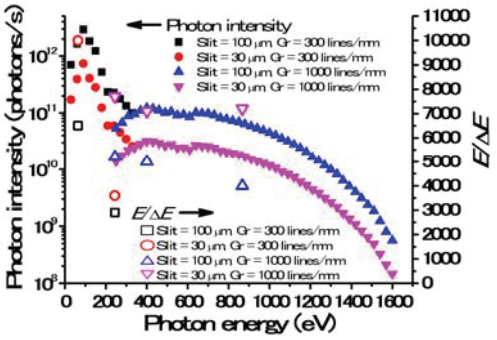


図 7. BL-13A の光強度とエネルギー分解能

参考文献

[4] K. Mase, A. Toyoshima, T. Kikuchi, H. Tanaka, K. Amemiya & K. Ito, AIP Conf. Proc. 1234 (2010) 709.

[5] A. Toyoshima, H. Tanaka, T. Kikuchi, K. Amemiya & K. Mase, J. Vac. Soc. Jpn. 54, 580 (2011).

[6] A. Toyoshima, T. Kikuchi, H. Tanaka, K. Mase, K. Amemiya, and K. Ozawa, J. Phys.: Conf. Ser., in press.

4　まとめ

市販の NEG ピルを用いて簡単かつ経済的に製作できる NEG ポンプを開発し、タンタル線ヒーターに 3A、30 分通電することで活性化できることを確認した。今後は NEG の各気体に対する排気速度を測定すること、真空紫外軟 X 線ビームラインの排気系として採用することを予定している。

5　謝辞

本研究を行なうにあたり、ご支援、ご助言をいただいた渡辺文夫氏（(有) 真空実験室)、西口宏氏（(有) バロックインターナショナル)、浅岡聖二氏、本田 融氏、宮内洋司氏、谷本育律氏、久松弘美氏（KEK 加速器施設)、豊島章雄氏、田中宏和氏、小山篤氏、雨宮健太氏、伊藤健二氏（KEK 物構研）に感謝します。

LabVIEW(DAQ デバイス) を用いた JT-60SA データ収集システムの開発

○末岡　通治

独）日本原子力研究開発機構　那珂核融合研究所

概要

国際熱核融合実験炉「ITER]のサテライトトカマク装置として日欧が共同で実施する「JT-60SA」計画を実現するためには、プラズマ放電の為の実験放電シーケンス全体を司る「JT-60SA 統括制御システム」とプラズマの平衡状態を制御し長時間維持する「実時間プラズマ平衡制御システム」の開発が必要不可欠である。中でも垂直方向に不安定性を持つプラズマを高速で制御する実時間プラズマ平衡制御システムでは、プラズマやその周辺機器から得られる計測データを高速且つ高精度で取得することが求められており、JT-60SA では JT-60U 期からの既設データ収集システムに代わる新たなシステムの開発が急務となっている。

そこで、JT-60SA のプラズマ実験放電での利用を想定した実時間データ収集システムの１つとして開発した「LabVIEW を用いた JT-60SA データ収集システム」について以下に報告する。

1　システム仕様の検討

JT-60SA の実験放電は、JT-60SA 統括制御システムの管理下で実施される放電シーケンスに従って、JT-60SA を取り巻く各サブシステム（コイル電源、加熱系・粒子供給系アクチュエータ、実時間プラズマ平衡制御システム、データ計測装置群等）が互いに同期を図りながら進行することで成立する（図 1-1 参照）。また同様に、実時間データ収集システムも JT-60SA 統括制御システムからの指令（ハードワイヤード信号）に従って機能することが求められる。

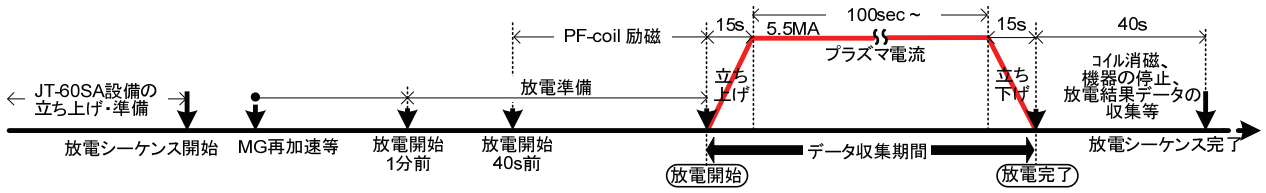


図 1-1　JT-60SA 放電シーケンスの流れ

1.1　入出力信号

本システムは、JT-60SA 統括制御システムから出力される以下の信号（デジタル信号：TTL レベル）に同期して動作する（図 1-1 中「データ収集期間」参照）。

１）データ収集開始→開始トリガ（例：放電開始）

２）データ収集停止→停止トリガ（例：放電完了）

３）データ収集周期→基準クロック信号（例：1kHz，4kHz）

そして、収集したデータ（アナログ信号：最大 32 点）は、プラズマ放電後にユーザーが容易に PC 等で解析・編集することができる仕組みを検討し、停止トリガ受信後直ちに CSV（Comma Separated Values）形式でファイルをディスク上に出力・保存する手法を採り入れた。

1.2　システム構成

本システムは上述の通り、①JT-60SA 統括制御システムから受信する指令及びクロック信号に同期して機能し、②収集したデータを CSV 形式のファイルとして出力・保存する、という 2 つの機能を備えたものでなくてはならない。

そこで、本システムの開発にあたり、どのような開発環境を基本にするべきか？開発コストや将来性などの観点から検討した結果、本システムは、ナショナルインスツルメンツ（NI）社製のシステム開発ソフトウェア「LabVIEW（Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)」とその機器(PXI モジュール)群を使用することとした。

その理由は、NI 社のデータ集録（DAQ）システムに分類されるモジュール群の DAQ システムの仕様に基づいた様々な機能や提供される充実したサービス、中でも RealTime(RT)-OS を搭載しない Windows-OS 環境下であっても外部トリガを使用した高速且つ高精度のデータ集録を実現するという機能が、本システムにおいて高い適用性があると判断したからである。

以下（図 1-2 および表 1-1）に本システムのハードウェア構成および仕様について示す。

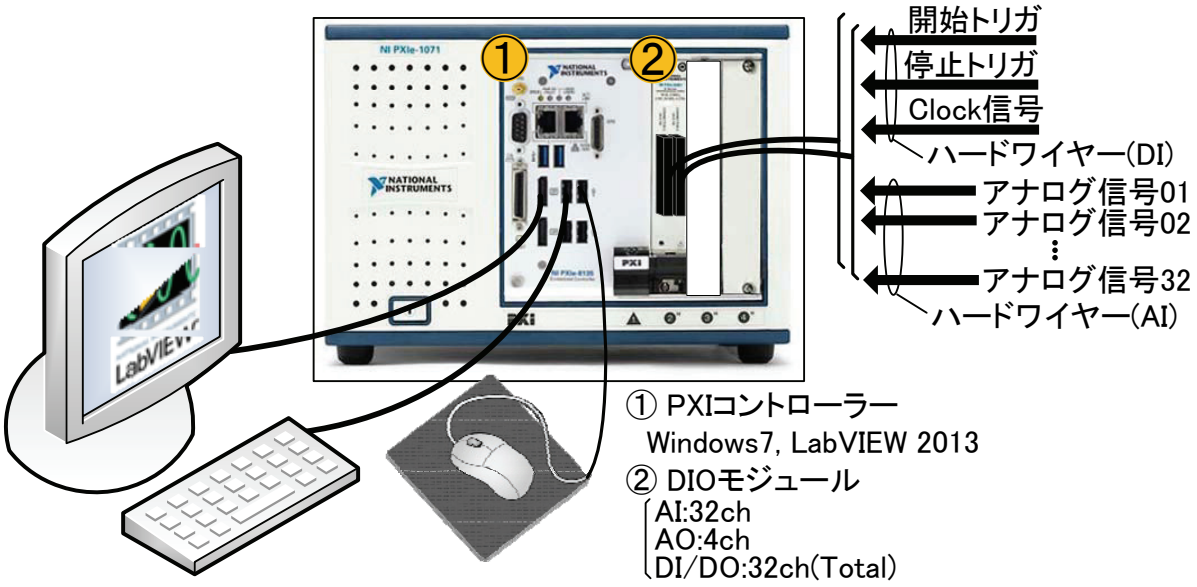


図 1-2　JT-60SA データ収集システム システム構成

表 1-1　システム仕様

品　名	製品仕様
PXI コントローラー	NI PXIe-8135（Core i7-3610QE 2.3 GHz） OS:Windows7 32-Bit For NI PXI Embedded Controllers
DIO モジュール	NI PXIe-6363（X シリーズ DAQ、AIx32、DIOx48、AOx4、2MS*/秒）　*MS:10^6Sample
開発ソフトウェア	NI LabVIEW 2013（日本語版）

2　データ収集機能の仕組み

本システムは、以下に示す 4 つのモードで構成される。そして、データ収集機能自体は、そのうちの 3 つモードが外部トリガ信号に従って遷移することで機能する（図 2-1 参照）。

モード①：外部（JT-60SA 統括制御システム）からの開始トリガを待機する（図 2-1①）。

モード②：開始トリガを受信すると、直ちに停止トリガを受信するまでの間継続してクロック信号に同期したアナログ信号のデータを収集を開始する。と同時に、並行して停止トリガの待機状態とする。データ収集中に停止トリガを受信した場合、即座にデータ収集を停止し、モード③に移行する（図 2-1②）。

モード③：収集したデータを CSV 形式でファイルに書き出し、再びモード①へ戻る（図 2-1③）。

モード④：データ収集周期や外部トリガ信号の入力 CH 割付けなど、初期情報を設定する（図 2-1④）。

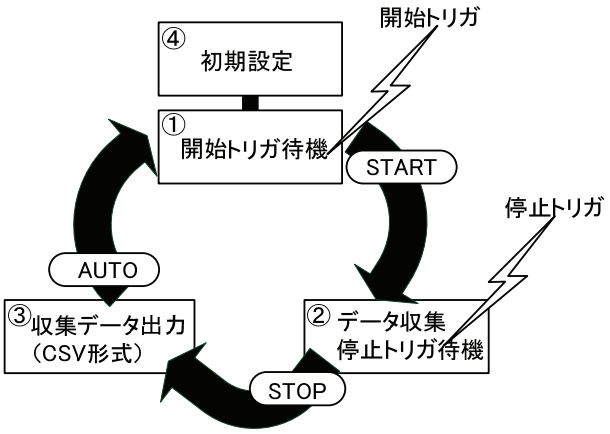


図 2-1　モード遷移図

本システムの開発当初は、JT-60U 期の実時間制御システムで利用してきた外部信号を受信するための「ポーリング(polling)方式」や、並行して動作している複数のプロセスを同期させたり割り込み信号の制御を行う「セマフォ(semaphore)方式」など、RealTime (RT) -OS 環境で用いてきた制御手法を LabVIEW 環境下でも同様に使用できるものと考えていたが、実際は WindowsOS 環境下の LabVIEW にこれらの機能は組み込まれていなかった。

そこで、LabVIEW 独自のデータ集録機能（DAQ デバイス）の設計を工夫して（ステートマシン方式（図 2-3 参照）を採用）、RT-OS 同等のデータ収集システムの開発を実現した。本報告では、以下にその詳細について報告する。

2.1　LabVIEW (DAQ デバイス)を用いたデータ収集の基本

本システムは 1 章で記した通り、WindowsOS を実装した NI 社の PXI コントローラーとデータ集録を行う DAQ デバイスモジュール、そして WindowsOS 環境下で稼働する汎用ソフトウェア「LabVIEW」で構成される。

LabVIEW では、データ集録デバイスを DAQ (Data AcQuisition)デバイスと称し、これらを制御する専用ドライバーを標準で搭載する。以下に DAQ デバイスのアナログデータ集録動作の流れ（図 2-2 参照）と今回作成した LabVIEW ブロックダイアグラム図の例（図 2-3 参照）を示す。

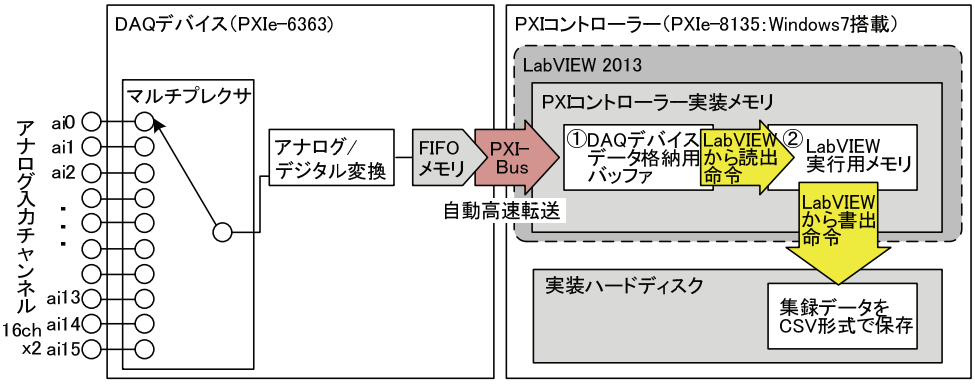


図 2-2　入力データの集録後の流れ

1）DAQ デバイスは、集録を開始すると停止トリガを受信するまで入力データのアナログ/デジタル(A/D)変換を継続し、その入力データは FIFO (First In First Out)メモリを介して予め確保された DAQ デバイスデータ格納用バッファ（以降「バッファ」と略す。図 2-2①）へ自動転送される。このバッファ容量は、予めユーザー側で任意に設定できる。

2）LabVIEW がグラフ表示や数値処理などで使用する際は、図 2-2①から LabVIEW 実行用メモリ（図 2-2②）上にデータを移行して使用し、読込後は図 2-2①の該当使用エリアの解放を実施する。

3）図 2-2②に移行したデータは、上記２）の処理以外にもユーザー側の要求に応じてハードディスク上へ格納する事も出来る。

4）万一、図 2-2①に格納されたデータがバッファ容量を超過した場合は、エラーが発生（LabVIEW 側に通知）し、データ収集機能はその時点で中断される。従って、図 2-2①のバッファ容量は、格納されるデータが超過しないよう予め余裕をもった大きさを設定しておく必要がある。

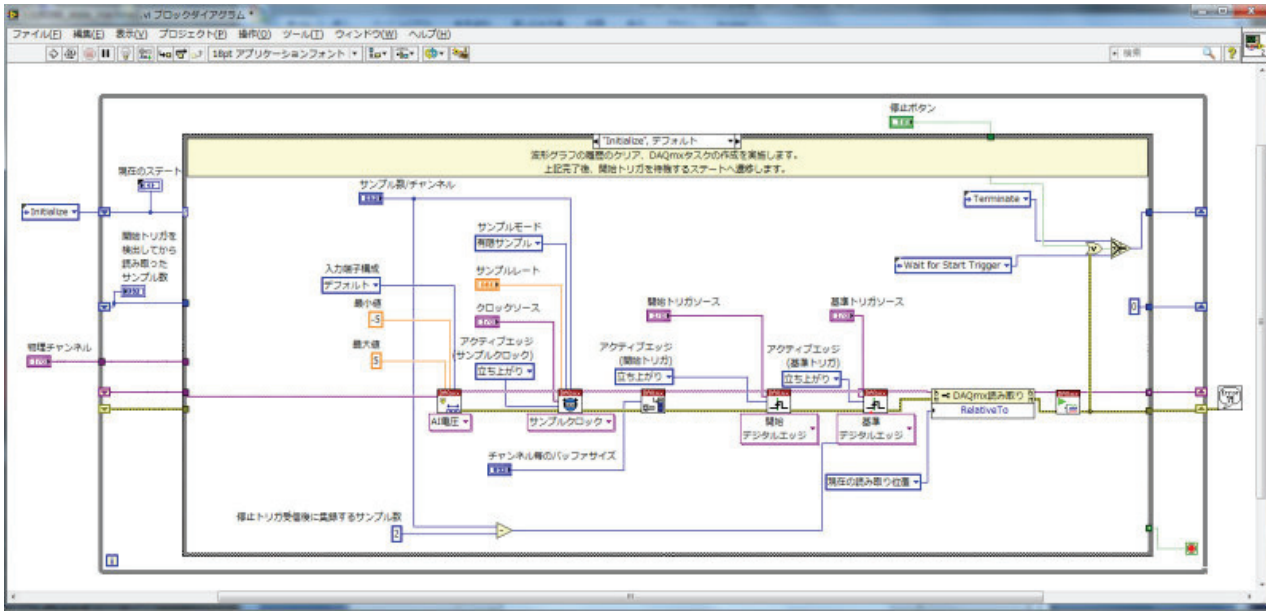


図 2-3　LabVIEW ブロックダイアグラム(ステートマシン）図の例

2.2　DAQ デバイスを用いたデータ収集システムの留意点

DAQ デバイスを用いたステートマシン方式によるデータ収集システムの開発にあたり、今回留意した 3 つの点について以下に示す。

①使用済みバッファ領域の解放

DAQ デバイスを用いたデータ収録では、2.1 項の通り FIFO メモリを介して予め確保したデータ格納用バッファに自動転送されるため、その時の PC の負荷状況に左右されず安定したデータ転送が出来るという特徴を持っている。LabVIEW がこのバッファに格納されたデータを使用する為には、LabVIEW 側から本バッファの該当データを実行用メモリ内に読出す必要がある。本バッファ容量は予めユーザが設定したサイズで規定されるが、データ集録中に本バッファが満杯になると、2.1 項 4）で記したようにエラーが発生する事態となる。一方、予め全データ分を格納できるような膨大なバッファ容量を確保しておくのは実用的ではない。

そこで、DAQ デバイスを用いたデータ集録では、本バッファの飽和が起こらないように定周期で格納されたデータを読出した後、使用（占有）バッファ領域の解放を実施することが必要不可欠であり、その上でデ

ータ集録点数、集録周期、集録期間に応じたバッファ容量の確保が求められる。

②データ収集完了時のバッファ残存データの読出し

DAQデバイスのデータ集録周期(DAQデバイスのFIFOメモリを介した格納バッファへの自動転送)とLabVIEWが格納バッファからデータを読出す周期は、基本的に非同期で行われる。また、LabVIEW が格納バッファから定期的にデータを読出す周期もその時のPCの負荷に左右されるため一定の周期とは言えない(図2-4参照)。しかしながら、DAQ デバイスには上記のような仕様であっても入力データを正確に集録できる仕組みが搭載されている。

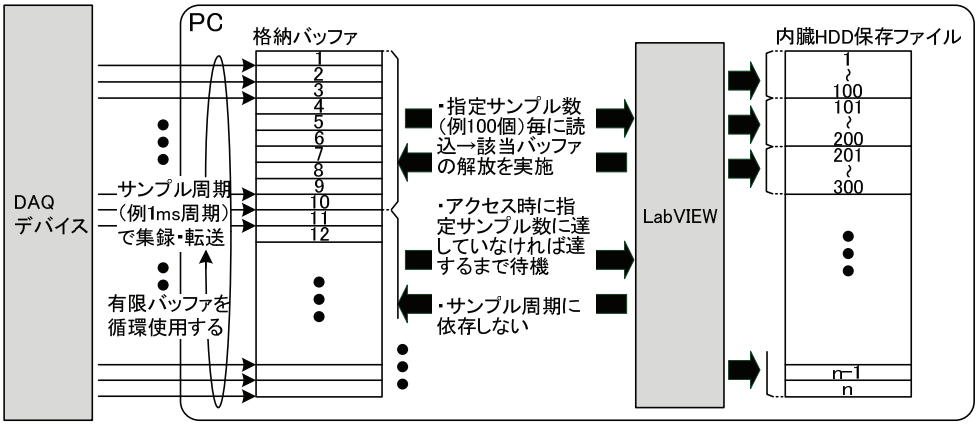


図 2-4　LabVIEW における集録データの取扱い例

LabVIEW は、DAQ デバイス用の関数を用いて定期的に格納バッファへアクセスし、該当するデータを読込んだ後、画面上の波形表示やデータ処理を行う。本読込み周期は、DAQ デバイスのデータ集録周期に無関係であり、Windows の処理能力に大きく依存する。

本読込み関数がバッファからデータを読込む条件は、「バッファ内に指定サンプル数分のデータが格納されていたら読込みを実行する。」である。従って、LabVIEW がバッファにアクセスした際、バッファ内の格納済みデータが指定数に達していなければ、本読込み関数は「指定数に達するまでの間、読込み処理を実行せずに待機する。」という動きをする。つまり、データ集録周波数を 1kHz、指定サンプル数を 100 サンプルとした場合、この時の LabVIEW のデータ読込み周期は「1ms 周期 x 100 サンプル」、すなわち 100ms 周期と計算できる（図 2-5 参照)。

一方、PC（Windows）の負荷が増大すると LabVIEW のデータ読込処理が遅延し、この読込周期が 100msec を超過する場合（100+αms)が想定される。この場合のデータ読込処理は、バッファにアクセス後即座に実行されるが、バッファからは指定数（100msec）分のデータのみの読込処理となるため、バッファ内には 100msec を超過して格納されたαms 分のデータは取り残される結果となる。すなわち、仮にこのような状況がデータ集録中に頻発するとバッファ内には取り残されたデータが累積していく結果となる。

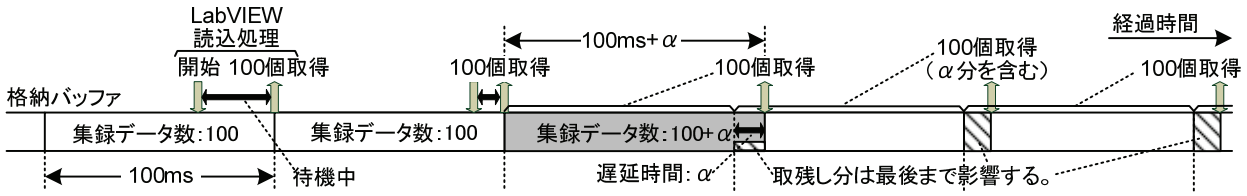


図 2-5　LabVIEW における集録データの取扱い例

③指定サンプル数待機中における停止トリガ受信時の取扱い

LabVIEW 搭載の DAQ デバイス読込機能のデータフローを図 2-6 に示す。LabVIEW のデータ読取りは、上記②項でも述べたように、指定サンプル数の設定値とその時の PC(CPU)の負荷状態によって「待機中」という時間帯が生じる場合がある（図 2-5 参照)。この「待機中」の期間に外部から停止トリガを受信すると、DAQ デバイスは直ちにデータ集録処理を停止してしまう為、以降バッファにはデータが格納されなくなる。結果、LabVIEW 側では以降「指定サンプル数が格納バッファ内に集録済みか？」というループ（条件）文を抜けられなくなり、異常停止を引き起こしてしまう。

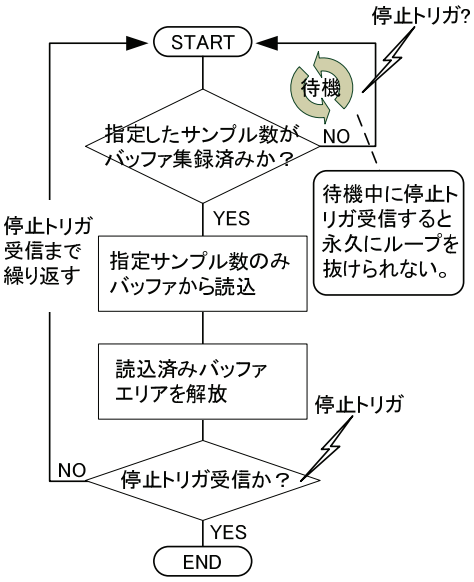


図 2-6　DAQ デバイス読込機能フロー

2.3　DAQ デバイスを用いたデータ収集の工夫点

本データ収集機能の開発にあたり、2.2 項に挙げた留意点、中でも②、③に関する対策は必須である。

そこで先ず 2.2 項②に関しては、DAQ 読込み関数に予め備わっている「バッファ内に残存する累積サンプル数を検出する機能」を用いて、データ収集完了（停止トリガ受信）後にバッファ内に累積サンプル数が存在した場合は、残存している格納データを一括して読み出して既集録データに結合するという仕組みを講じた。

そして 2.2 項③に関しては、専用のタイマー機能を追加した（図 2-7 参照)。これは、予定データ格納所要時間を越えても指定サンプル数のデータ格納が完了できない場合は、格納完了の待機処理を中断し次の処理へ移行させることで、データ集録中の異常停止の発生を回避させることに成功した。以下に本処理の具体例を紹介する。例としてデータ集録周期を 1kHz、指定データサンプル数を 100 とした場合を考える。もし、PC に起因する LabVIEW のデータ読込遅延が無く、且つデータ格納待機中に停止トリガの受信も無ければ、予定データ格納所要時間（データ読込処理周期）は 100msec と算定できる。すなわち、格納所要時間が「100msec + X（裕度)」を超えてもデータ格納が完了しない場合、「DAQ デバイスは LabVIEW のデータ格納完了待機中に停止トリガを受信してデータ収録を中断した。」と見なす事が出来る。従って、LabVIEW はタイムアップ検出を以て「本タイマーのタイムアップ＝停止トリガ受信済み」と判断し、即座に停止トリガ受信以降の処理へ移行する。

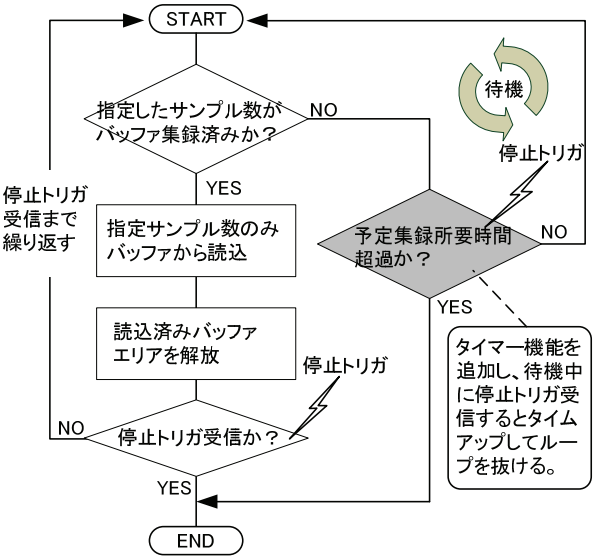


図 2-7　DAQ デバイス読込機能（改良型）フロー

3　JT-60SA データ収集システム

実時間データ収集システムのプロトタイプとして今回開発した本システムの仕様を以下に示す。

①入力部

・アナログ電圧信号入力：4ch

・集録周期：外部クロック（1kHz）

・開始トリガ、停止トリガ：外部トリガ（TTL レベル）

②出力部

・集録データ出力【CSV 形式】（図 3-1）、相対時刻、入力 CH　x4

・実時間入力波形（最新 1 秒間表示：図 3-2 中①）x4

・実時間入力波形（全集録時間表示：図 3-2 中②）x1

・集録サンプルデータ数/CH（図 3-2 中③）

	A	B	C	D	E
1	時刻	CH1	CH2	CH3	CH4
2	0.000	0.008	-0.015	-0.018	0.005
3	0.001	0.041	-0.009	-0.017	0.003
4	0.002	0.070	0.001	-0.014	0.000
5	0.003	0.093	0.012	-0.011	-0.001
6	0.004	0.112	0.024	-0.007	-0.001
7	0.005	0.127	0.037	-0.001	-0.001
8	0.006	0.140	0.049	0.005	0.000
9	0.007	0.149	0.061	0.013	0.002
10	0.008	0.156	0.073	0.020	0.005
11	0.009	0.161	0.084	0.029	0.008
12	0.010	0.164	0.093	0.037	0.012
13	0.011	0.167	0.102	0.045	0.016
14	0.012	0.168	0.110	0.054	0.021
15	0.013	0.168	0.117	0.062	0.027

図 3-1　CSV ファイルの出力例

尚、今回作成した LabVIEW 画面のサンプルやシステムの写真を図 3-2、及び図 3-3 に示す。

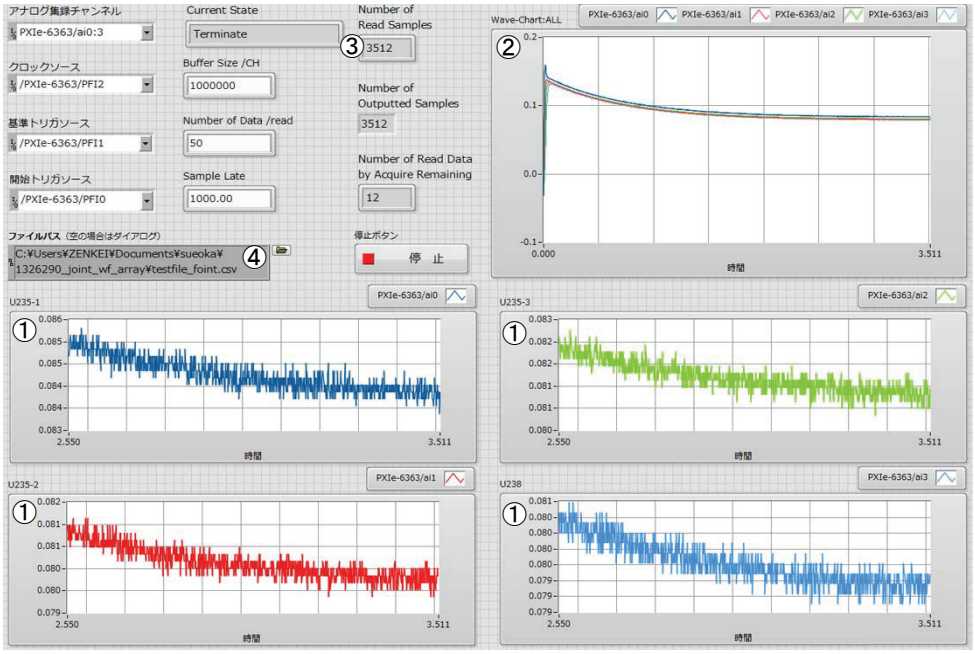


図 3-2 JT-60SA データ収集システムの PC（LabVIEW）画面

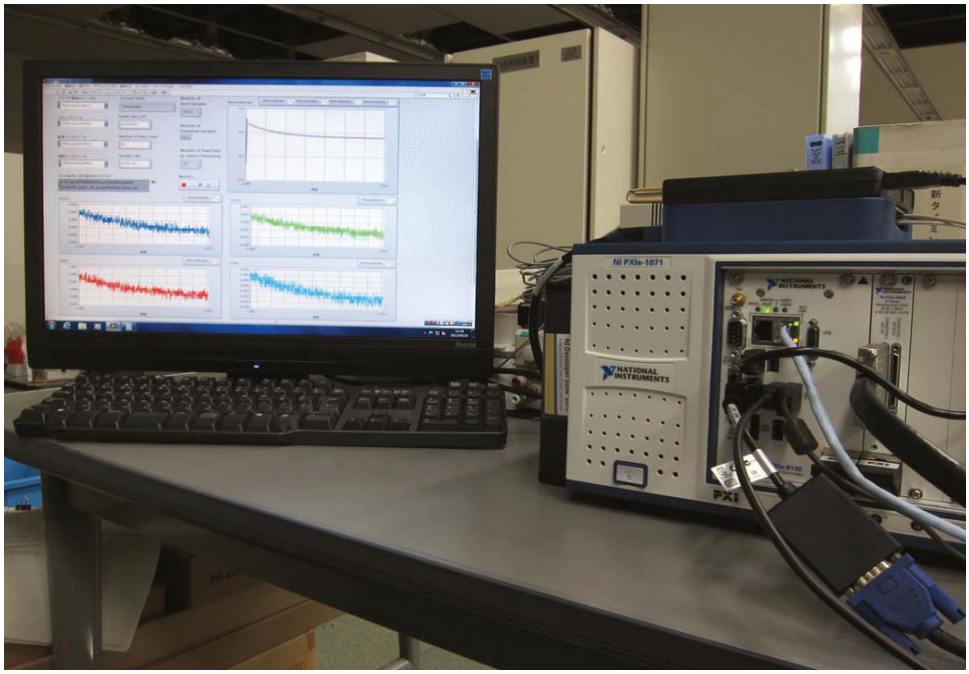


図 3-3　JT-60SA データ収集システムの実写真

4　まとめ

JT-60SA のプラズマ実験放電の利用を想定した新たな実時間データ収集システムの 1 つとして、NI 社製の PXI コントローラー、DAQ モジュール、そして汎用システム開発ソフトウェア「LabVIEW」を用いたシステムの開発を行った。本報告では、JT-60SA の放電シーケンスに従った外部トリガ、外部クロックに同期した実時間データ集録機能の製作や自動で集録したデータを CSV 形式でファイル出力するログ機能の搭載など、本システムの開発における検討結果やその実現に至るまでの工夫点などについて報告した。

今後は、入力信号の拡張やデータ収集周期の高速化、そして実時間制御で使用を予定しているリフレクティブメモリ（GE 社製 cPCI-5565PIORC)を用いた集録機能の開発など、より実用化に向けた開発を進めていく予定である。

小型熱ナノインプリント装置用マイクロヒータの開発

庄司　大

東京工業大学 技術部 半導体 MEMS プロセス技術センター

概要

現在、小型の熱ナノインプリント装置を試作してその実証実験を進めている。試作装置での加熱方法はホットプレートで装置外部から熱を加え、装置全体を加熱することで中の試料を加熱していた。しかし、実験で使用する試料は小さいためこの方法では熱のロスが非常に多い。そこで小型のヒータを製作して装置内に設置すれば試料とヒータが接触するため直接熱が伝わり、熱のロスを低減できる。今回は MEMS プロセス技術を用いて小型ナノインプリント装置用マイクロヒータを開発したので報告する。

1　はじめに

昨今では MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)デバイスの製作において微細化、高生産性、低コスト化が求められている。しかし、既存のリソグラフィ技術ではその限界が見えてきており、そのブレイクスルーとしてナノインプリント技術が注目されている。ナノインプリントとは基板に塗布した樹脂にモールドと呼ばれる型を押し付け、モールドのパターン形状を樹脂に転写する技術である（図 1)。特に、モールドの加圧と同時に熱を加えて樹脂を硬化する方式を熱ナノインプリントと呼ぶ。ナノインプリントは比較的新しい技術にも関わらず原理はシンプルであるため、小型のナノインプリント装置（図 2）を試作して研究開発を進めている。試作装置を用いた従来の熱ナノインプリントの加熱方法はホットプレートやオーブンを用いて装置の外部から熱を加え、装置全体を加熱することで中の基板に熱を加えていた。しかし、実験で使用する基板は 10mm 角で 0.4mm 厚と小さく多くの熱量を必要としないため、この加熱方法では加熱時間とナノインプリント後の冷却時間及び供給電力においてロスが多い。そこで小型のヒータを製作して装置内に設置すればヒータと基板が接触するため基板に直接熱が伝わり、装置全体を加熱する必要がないので時間及び電力ロスを低減できる。そこで今回は装置内に設置できる小型で薄型のマイクロヒータを開発したので報告する。

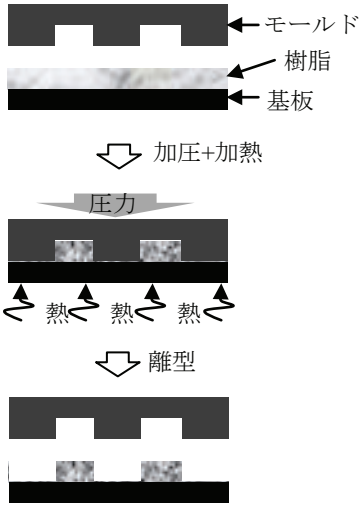


図 1　ナノインプリント技術

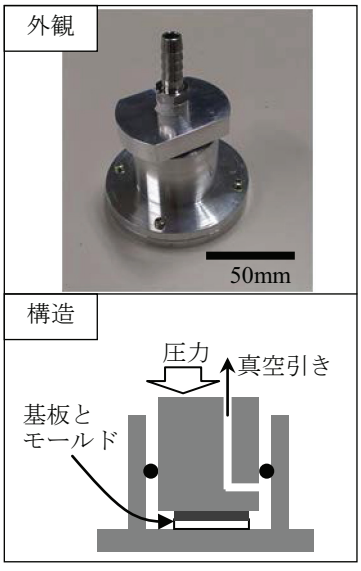


図 2　ナノインプリント装置の外観と構造

2　マイクロヒータの概要と仕様の策定

マイクロヒータはヒータ基板上にヒータ線をつづら折りのパターンで配線したものである（図 3)。ナノインプリントをするうえでヒータ面は平坦であり、また隣り合うヒータ線のギャップ間隔も極力小さくする必要がある。凹凸があると密着が悪いために熱伝導が悪くなり、また加圧の際に凸部に集中応力が掛かって基板が割れるからである。なお、マイクロヒータのヒータ

面は絶縁と物理的保護のためにコーティングを施す。

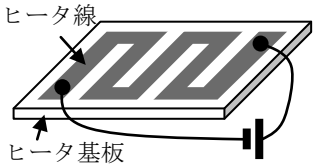


図 3　マイクロヒータ概要

2-1) 大きさ

ナノインプリント装置の試料ステージの大きさはφ30mm であるためマイクロヒータそれに収まるサイズでなければならない。また、ナノインプリント基板は 10×10mm であるためそれ以上のサイズが必要である。そこで、マイクロヒータは 20×20mm のサイズとした。マイクロヒータの厚みは厚すぎると配線の取り回しが困難であり、薄いと物理的強度が弱いためそのバランスを考えて 1mm 厚とした。

2-2) 温度

ナノインプリント用樹脂のガラス転移温度は一般的に 120～150℃であるため、ナノインプリントを行う際はそれ以上の温度で加熱しなければならない。したがって、マイクロヒータもそれ以上に加熱できるものが必要である。そこで製作するマイクロヒータは 200℃まで昇温可能な仕様とする。

2-3) 材料

ヒータ材料は導電性のものでなければならないため金属を用いる。200℃に昇温するために必要な電力を 30W 以上と見積もり、電圧を 30V 印加したとするとヒータ抵抗は 30Ω以下でなければならない。ヒータ線の厚みを 1μm、ヒータ線幅を 1.5mm、ヒータ線総面積を 15×15mm と仮定し、抵抗値 30Ω以下となるにはヒータ線材料の体積抵抗率は 2.7×10^{-7}Ω以下でなければならない。この条件を満たし、さらに製作の容易さやコスト等を勘案してヒータ材料には銅を選択した。

ヒータ基板の材料は絶縁性のものでなければならない。そこで、絶縁であり平坦でかつ硬度の高いガラスをヒータ基板に用いた。

3　マイクロヒータの製作

マイクロヒータの製作には MEMS プロセス技術を利用する。本技術を用いれば極めて平坦なヒータを製作できる。また、数μm の精度でパターンを描くことができるため、ヒータ線の間隔も非常に小さくできる。製作プロセスは以下の通りである。

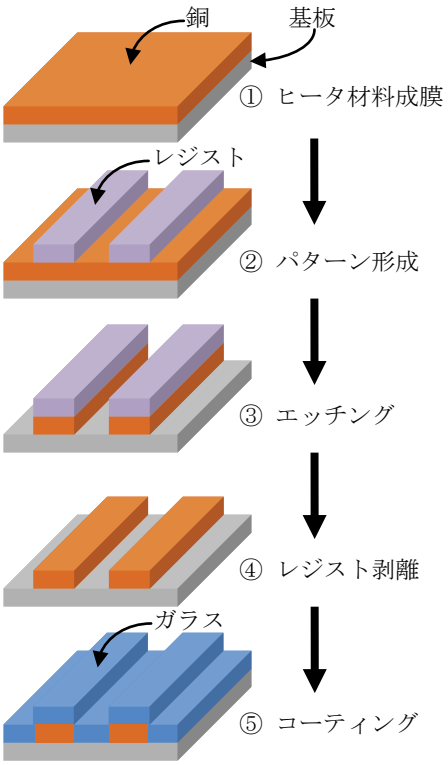


図 4　MEMS プロセス技術による
マイクロヒータの製作

3-1) ヒータ材料の成膜　（図 4 ①）

ヒータ材料である銅の成膜にはスパッタ法を用いる。スパッタ条件は、スパッタガス:Ar, 流量:10sccm, プロセス圧力:1Pa, RF 出力:100W, 成膜時間:7min である。これによって成膜される銅の厚みは 0.5μm である。

3-2) ヒータパターンの形成（図 4 ②）

ヒータパターンはリソグラフィ技術により形成した。レジストは AZ5214E（AZ エレクトロニックマテリアルズ）を用い、露光にはレーザ描画装置 DDB-201-NHT（ネオアーク）を用いた。

3-3) ヒータ材料のエッチング（図 4 ③）

ヒータ材料のエッチングはウェットエッチングで行った。エッチング液は塩化第二鉄を用い、室温で 40 秒間エッチングした。

3-4) レジスト剥離（図 4 ④）

レジストはアセトンで剥離した。

3-5) コーティング（図 4 ⑤）

コーティング材はガラスとし、TEOS を原料としたプラズマ CVD 装置でコートした。条件は、TEOS 流量:7sccm, O_2 流量:200sccm, プロセス圧力:53Pa, RF 出力:180W, 成膜時間:12min である。コートしたガラスの厚みは 2μm である。

3-6) 電極配線

マイクロヒータをスライドガラスに接着剤で貼り付け、スライドガラスに銅箔テープを貼った。マイクロヒータの電極部と銅箔テープをはんだ付けし、銅箔テープの両端に電極を結線した。

製作したマイクロヒータは図 5 の通りである。ヒータ部のサイズは 15×15mm であり、ヒータ線幅は 950μm でギャップは 50μm である。また、ヒータ抵抗を測定したところ 14.4Ωであった。

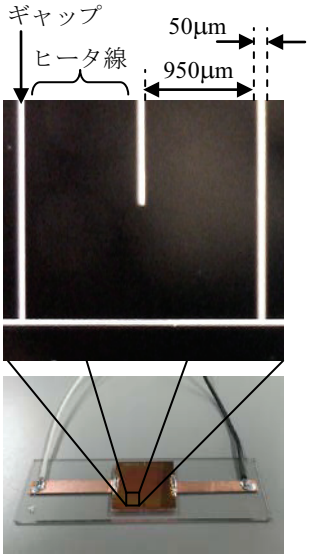


図 5　製作したマイクロヒータ

4　ナノインプリント時におけるマイクロヒータの温度

マイクロヒータに電圧を印加し、電圧と加熱の様子を放射温度計により測定した結果を図 6 に示す。印加電圧に応じて温度も上がっていることが分かる。但し、マイクロヒータは装置の中に組み込まれるためナノインプリントを行っている最中は外部から温度をモニタリングすることができない。そこで、マイクロヒータを装置に設置した状態で温度と電圧の関係を調べた。なお、温度は熱電対温度計で測定した。その結果を図 7 に示す。このデータを用いて電圧で温度調整することとした。

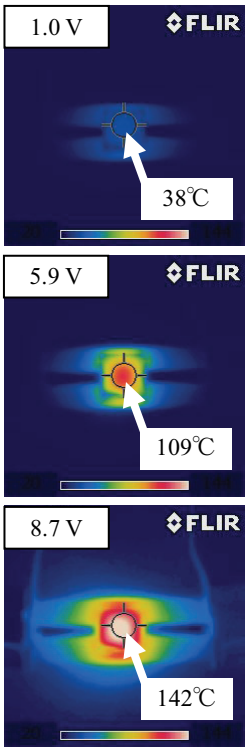


図 6　電圧印加による加熱

5　加熱時におけるマイクロヒータとホットプレートの諸条件の比較

従来、ナノインプリントにおける加熱はホットプレートで行っていた。ホットプレートに代えてマイクロヒータを用いた場合、加熱時間、冷却時間及び消費電力にどのような違いがあるかを検証した。

5-1) 加熱時間の比較

ナノインプリントを行う状態で基板温度を測定し、ホットプレート及びマイクロヒータで 100℃に加熱した。それぞれの時間と温度の関係を図 8 に示す。ホットプレートに比べてマイクロヒータは温度の立ち上がりが早い。これは基板に熱源が接しているからである。ただし、70℃あたりになるとマイクロヒータの温度上昇が緩やかになっている。マイクロヒータは電力供給能力が弱いためナノインプリント装置のよ

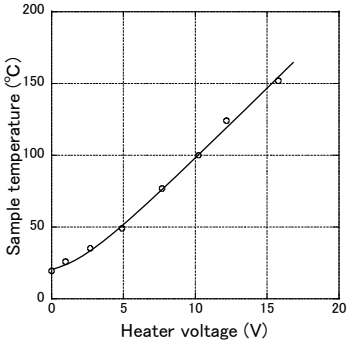


図 7　ヒータ電圧と温度の関係

うな熱容量の大きいものが接していると温度の安定に時間がかかるからである。100℃に達する時間はマイクロヒータでは 25 分、ホットプレートでは 18 分であり、ホットプレートより時間がかかる結果となった。

5-2) 冷却時間の比較

基板を 100℃に加熱した状態から熱源を切り、自然冷却させて基板温度が 50℃以下になるのに要する時間を測定した。結果はマイクロヒータで 6 分、ホットプレートで 20 分と、マイクロヒータのほうが短時間で冷却できた。これは、マイクロヒータによる加熱のほうが装置の温度を低く抑えられるからである。装置は熱容量が大きいため一旦温度が高くなると冷却に時間がかかってしまう。基板温度が 100℃の時の装置温度をホットプレートとマイクロヒータで比較した結果が図 9 である。マイクロヒータで加熱した方が装置温度が低くなっていることが分かる。マイクロヒータは基板に接しているため効率よく基板を加熱でき、その一方で装置への熱の伝わりを最小限に抑えられるからである。

5-3) 消費電力の比較

基板を室温から 100℃まで加熱するのに要した電力は、マイクロヒータでは 3.4Wh、ホットプレートでは 57.3Wh であった。マイクロヒータの消費電力はホットプレートの 1/17 と非常に少ないことが分かった。

6　マイクロヒータを用いたナノインプリント

製作したマイクロヒータで実際にナノインプリントを行った。モールドの材料はテンパックスガラスで、パターンは円錐台の窪みである（図 10）。ナノインプリント樹脂はフォトレジスト（OFPR800LB, 東京応化工業）で代用した。ナノインプリント温度は 150℃で 10 分間加熱した。ナノインプリント後の樹脂の写真を図 11 に示す。モールドパターンが適正に転写できていることが分かる。

7　まとめ

ナノインプリントにおける実験時間の短縮及び消費電力の低減を目的にマイクロヒータの開発を行った。マイクロヒータの製作には MEMS プロセス技術を利用した。製作したマイクロヒータとホットプレートでナノインプリントを行った場合の加熱及び冷却時間と消費電力の比較を行った。加熱時間はホットプレートより長くなったが、冷却時間は短縮し、消費電力は大幅に低減できた。また、マイクロヒータを用いてナノインプリントを行い、適正にモールドパターンを転写できることを確認した。

なお、本研究は平成 25 年度科学研究費補助金（奨励研究、課題番号 25917015）の助成を受けて行った。

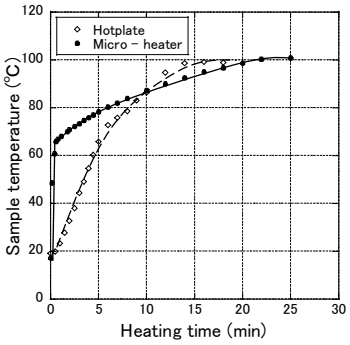
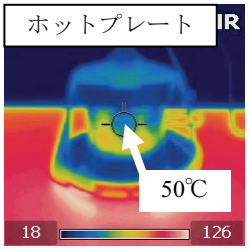


図 8　加熱時間と温度の関係



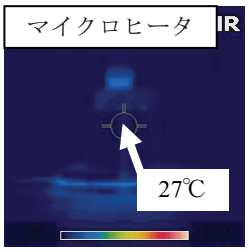


図 9　装置温度の比較

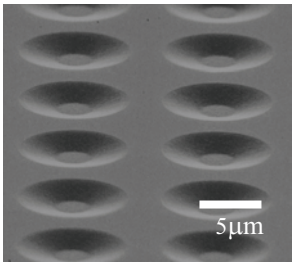


図 10　モールドの SEM 像

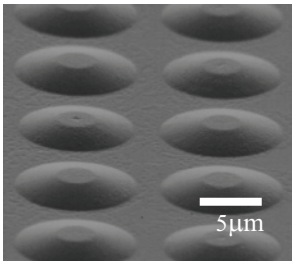


図 11　ナノインプリント後の樹脂の SEM 像

２５０ＭＶＡ電動発電機の運転保守の歩み

加藤明己

核融合科学研究所技術部

１．　はじめに

核融合科学研究所は、平成元年５月２９日に発足し、大型ヘリカル装置（以下ＬＨＤと略す）の設計、建設、ＬＨＤ実験、その他関係する研究を行ってきている。２５０ＭＶＡ電動発電機（以下MGと略す）は、平成５年に設置され、ＬＨＤの支援実験装置およびＬＨＤの加熱装置に大電力を供給してきている。

耐用年数を超えてなお研究のため運転しているMGの運転状況、点検履歴、故障履歴など、現在までの歩みを紹介する。

２．　MG総合機能性能

設計機能性能を以下に述べる。

出力容量：　最大２５ＭＶＡ

放出エネルギー：　１．４ＧＪ以上

出力電圧：　１８ｋＶ

出力パルス幅：　最大２０秒

運転周期：　５分（標準）

運転回数：　最大定格運転回数　　８０，０００回

　　定格未満運転回数　２００，０００回

耐用年数：　１５年

MGの概略を図１に示す。

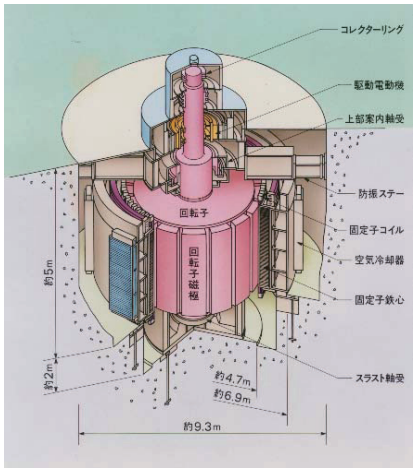


図１．　MG本体概略図

しかし、運転周期については、ＬＨＤ実験に対応時は３分周期がほぼ標準であり、実働年数は既に２０年を超え、運転回数に至っては５４万回を超え、現状は設計とは異なることも有る。

３．　運転履歴

MGの運転時間と、発電回数を年度ごとに示したグラフを図２に示す。

MGは平成４年度に建設され、MG自身のバグ出し運転、研究開発時に中性粒子入射加熱法開発試験装置やイオンサイクロトロン波加熱装置（以下ＩＣＲＦと略す）への送電を経て、平成８年度にＩＣＲＦへの送電は終了、平成１０年度にはＮＢＩ開発装置への送電終了、　平成１１年度からはＬＨＤ用の中性粒子入射加熱装置（以下ＮＢＩと略す）とコンパ

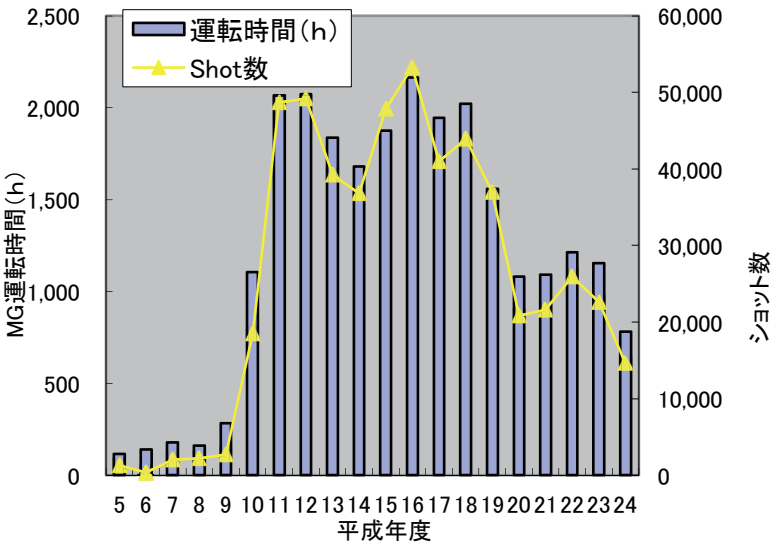


図２．　各年度におけるMG運転時間と発電回数

クト・ヘリカル・システム（以下ＣＨＳと略す）への送電を始め、平成１７年度から陽イオン源のＮＢＩへの送電、平成１８年度にはＣＨＳへの送電の休止、平成２２年度からはＬＨＤ用電子サイクロトロン共鳴加熱装置（以下ＥＣＨと略す）への送電を開始した。このように負荷側装置の種類、数等の変化に対応しつつＭＧは現在も運転を続けている。

４．本体点検履歴

ＭＧはＣＨＳの磁場コイル、加熱装置等に電力を供給するための電源で負荷はパルス負荷となるため一般の電力用電源設備と異なり比較的厳しい運転条件である。この様な運転条件にあるため長期的に十分な機能と信頼性を維持するためには常に点検、保守を行う必要がある。推奨は簡易点検を１年に１度、軸受、ポール吊り出しての詳細点検を５年毎である。実際に詳細点検を行ったのは平成１３年度[1)]と平成２０年度[2)]とほぼ７年間隔であった。平成２０年度点検時には、電動機の固定子部分放電試験において、絶縁層表面より部分放電が発生している事が確認された。予防保全の観点から平成２３年度に絶縁試験を行ったところ絶縁劣化の進行が確認され、平成２４年度に点検修理を行った。発電機、電動機の絶縁診断の結果の一覧を表１、２にそれぞれ示す。

表1　　250MVA発電機　固定子巻線絶縁診断試験結果一覧および判定基準

区分	試験項目		相	H4.11.17	H10.1.22	H14.3.16	H21.2.1	判定基準
電気的診断	直流吸収特性試験	絶縁抵抗1分値［MΩ］	U	4180	6400	5700	6200	---
			V	4240	5390	5300	6000	
			W	4100	5700	5100	5700	
			一括	2015	3610	2800	2600	
		成極指数	U	5.72	6.92	7.37	6.61	1.5以上
			V	5.61	7.34	7.74	6.50	
			W	5.66	7.42	7.84	6.67	
			一括	5.51	4.36	6.07	6.42	
	交流電流試験	第1電流急増点	U	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	10.4kV以上
			V	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	
			W	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	
		電流増加率[%] at 18kV	U	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.0%以下
			V	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
			W	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
	誘電体損失角測定	誘電正接初期値	U	0.80%	0.75%	0.63%	0.70%	---
			V	0.79%	0.75%	0.60%	0.62%	
			W	0.80%	0.77%	0.63%	0.68%	
		誘電正接増加分 at 13kV	U	---	0.48%	0.55%	0.62%	2.5%以下
			V	---	0.50%	0.54%	0.66%	
			W	---	0.55%	0.58%	0.67%	
		誘電正接増加分 at 最高試験電圧	U	0.82%	0.77%	0.83%	0.96%	6.5%以下
			V	0.80%	0.76%	0.82%	0.97%	
			W	0.84%	0.78%	0.88%	1.00%	
	部分放電試験	最大放電電荷量（広帯域）	U	350pC	340pC	1500pC	1370pC	10000pC以下
			V	420pC	310pC	2200pC	1720pC	
			W	390pC	390pC	1800pC	1400pC	
		最大放電電荷量（低周波）	U	690pC	500pC	3500pC	2830pC	20000pC以下
			V	800pC	470pC	5100pC	3820pC	
			W	750pC	560pC	4000pC	3380pC	
	最高試験電圧			23.5kV	18kV	18kV	18kV	

表2　　8．5MW誘導電動機　固定子巻線絶縁診断試験結果一覧および判定基準

区分	試験項目		相	H14.3.16	H21.2.1	H24.2.8	H24.5	H24.6	判定基準
電気的診断	直流吸収特性試験	絶縁抵抗1分値［MΩ］	U	5500	6600	6500	7880	7660	---
			V	6000	6500	6400	7890	7730	
			W	6400	6700	6200	7910	7760	
			一括	2700	2600	2400	–	–	
		成極指数	U	12.73	10.30	10.62	8.68	8.36	1.5以上
			V	11.83	10.15	10.16	8.24	8.28	
			W	10.94	10.15	10.65	8.38	8.34	
			一括	10.00	10.00	10.42	–	–	
	交流電流試験	第1電流急増点	U	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	10.4kV以上
			V	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	
			W	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	
		電流増加率[%] at 18kV	U	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.0%以下
			V	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
			W	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
	誘電体損失角測定	誘電正接初期値	U	0.54%	0.55%	0.92%	0.70%	0.73%	---
			V	0.54%	0.53%	0.91%	0.70%	0.72%	
			W	0.54%	0.51%	0.91%	0.69%	0.70%	
		誘電正接増加分 at 4.8kV	U	0.45%	0.45%	0.38%	–	–	2.5%以下
			V	0.44%	0.43%	0.41%	–	–	
			W	0.44%	0.39%	0.38%	–	–	
		誘電正接増加分 at 6.6kV	U	0.72%	0.71%	0.67%	0.86%	0.84%	6.5%以下
			V	0.73%	0.69%	0.67%	0.83%	0.80%	
			W	0.68%	0.69%	0.60%	0.79%	0.79%	
	部分放電試験	最大放電電荷量（広帯域）	U	1100pC	760pC	270pC	834pC	865pC	10000pC以下
			V	1300pC	2120pC	3800pC	3798pC	3745pC	
			W	1500pC	880pC	345pC	564pC	610pC	
		最大放電電荷量（低周波）	U	2500pC	1700pC	1180pC	8056pC	6797pC	20000pC以下
			V	2700pC	4250pC	23500pC	49537pC	18923pC	
			W	3000pC	1800pC	2480pC	13652pC	12321pC	

電動機固定子は、製造会社に持ち帰り、スチーム洗浄乾燥、コイル楔を各相５スロット取外しコロナ防止層の一部に消失を確認。楔取外しコイルにコロナ防止塗料を塗布し（図３）、部分放電試験により効果確認後、新製楔の挿入。ワニス処理がされた（図４）。

図３．コロナ防止塗料塗布中

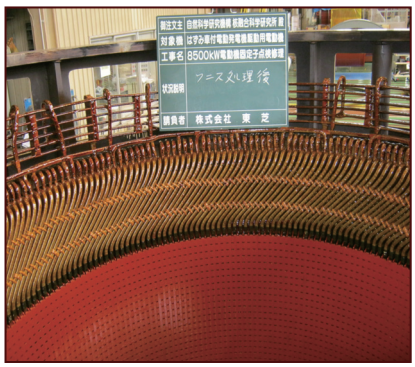


図４．ワニス処理後

５．故障履歴

平成５年３月設置後、制御関係については、装置故障ではないが、不具合が多々有り、制御計算機を平成21年に更新した後、現在も時々不具合が発生している。平成10年9月22日MG運転中に落雷による瞬停多発によりMGセルビウス装置のサイリスタ素子破損。平成16年9月27日速度制御盤内24V直流電源キット故障、平成20年10月27日より18ｋV用VCBの１台の投入失敗が続く。12月12日油集塵機No.1の高電圧部故障。平成22年6月11日油集塵機No.2の高電圧部故障。6月22日直流電源装置整流器接地故障（地絡検知）。平成24年2月13日上部油槽冷却水配管配管より漏水（図５、６）。7月9日補機制御盤内266個のリレーの内１個が動作不良。平成25年12月6日電動機ブラシ部火花によるコレクタリング荒損（図７）。

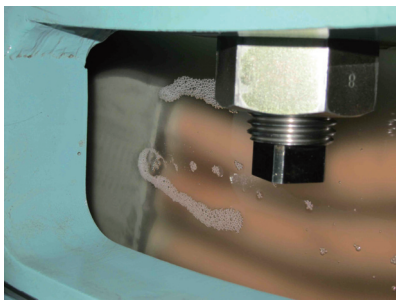


図５．装置内で圧空による穿孔調査

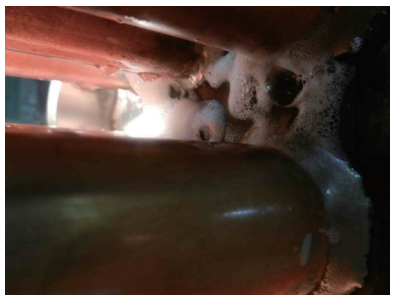


図６．装置外で石けん水による調査

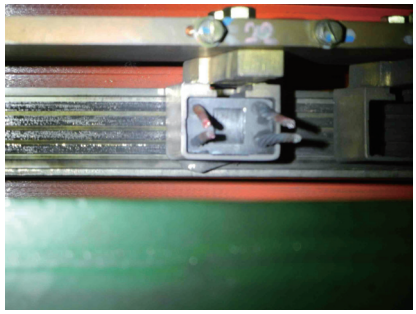


図７．コレクタリング荒損

６．おわりに

MGは、単独装置としては意味をなさない。6.6ｋＶ受電をし、18ｋＶで負荷側に送電することでその存在意義が生まれる。負荷側の要請に応えて運転できていることが重要である。しかしながら、運転すれば、ブラシは摩耗して短くなり新品との交換が必要となる。構成装置のひとつである電動仕切弁は約８年で弁体が摩耗して交換をした。冷却水ポンプの羽根車は約10年で交換。冷却水ポンプのグランドパッキンは定期的交換が必要な消耗品である。各冷却ファンは軸摩耗により軸の交換もしくは新規取替が必要となる。等々。

MGを運転可能な状態に維持しておく事。MGの管理には、MG構成機器に気を配らねばならない。製造後20年を過ぎ、各構成物も製造中止になった部品、機器なども多く、置き換えには再度設計から始めねばならない構成機器があり、一旦故障すれば製造には１年以上かかってしまう。製造継続の部品であっても、ひとつの製造に８ヶ月かかるものもある。必要性を見極め適宜、置き換えを進めて行く事が肝要である。

参考文献

［1］　加藤明己、他、“250MVA電動発電機の初回オーバーホール”、平成14年度東京大学総合技術研究会報告集、平成15年3月、P2、61-63

［2］　加藤明己、他、“核融合科学研究所250MVAはずみ車付電動発電機2回目オーバーホール”、平成２１年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告集、平成２２年３月、P－4－6

JT-60SA 組立及び位置計測

○鈴木貞明 A)，柳生純一 A)，正木 圭 A)，西山友和 A)，中村誠俊 A)，佐伯 寿 A)
星 亮 A)，澤井弘明 A)，長谷川浩一 A)，新井 貴 A)，柴沼 清 A)

A) 日本原子力研究開発機構　那珂核融合研究所

概要

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という）は、核融合エネルギーの早期実現に向けた幅広いアプローチ活動（Broader Approach：BA）の一環として、日欧共同で実施されるサテライト・トカマク計画において超伝導トカマク装置（以下「JT-60SA」という）の建設を行う。JT-60SA は、限られた空間に多くの主要機器を高精度で組み立てるため、3 次元 CAD を用いた模擬計測を行うことにより、組立に必要となる機器の代表点を確認し、組立の成立性を検証するとともに 3 次元計測器（レーザートラッカー）を用いた位置計測方法を検討した。本報告では、JT-60SA 組立の中で困難とされる TFC の位置計測方法を含めた組立方法について述べる。

1　JT-60SA 装置全体概要

JT-60SA の主要機器は、図 1 に示す通りであり、高温プラズマを閉じ込めるための高真空を作る真空容器（Vacuum Vessel：VV）、そのプラズマの閉じ込め磁場を発生する超伝導コイル（Toroidal Field Coil：TFC、Equilibrium Field Coil：EFC、Central Solenoid：CS）、コイル冷却のための断熱真空容器としてのクライオスタット（Cryostat）、常温機器と極低温機器との間に設置されるサーマルシールド（Thermal Shield：TS）及び高温プラズマを加熱するための外部加熱装置（NBI 等）から構成されている。

JT-60SA は、臨界プラズマ試験装置（JT-60）で使用していた設備などを最大限利用することを考慮している。

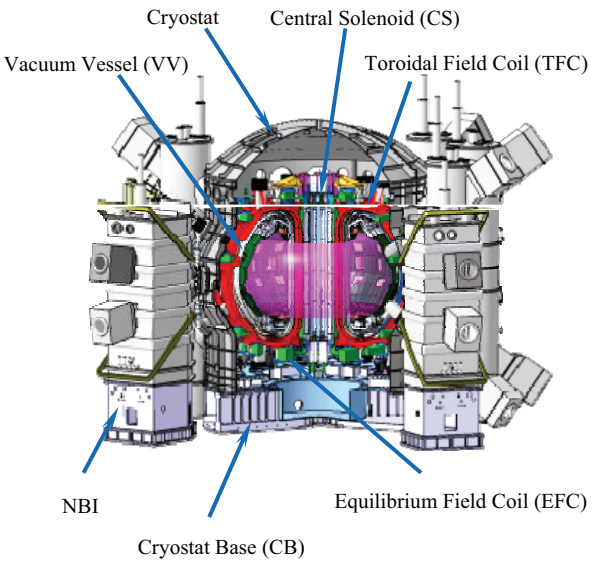


図 1.　JT-60SA 鳥瞰図

2　JT-60SA 本体の組立手順

JT-60SA の組立順序を図 2 に示す。組立の最初として、2013 年 1 月より JT-60SA の基礎となるクライオスタットベース（CB）が本体室ソールプレート上に設置され（図 2 ①参照）、これにより主要機器の組立が開始される状況となった。次の段階として、2014 年 1 月より CB の上に、EFC4～6 を仮置き（図 2 ②参照）して、VV を組み立てる（図 2 ③参照）。VV の組立は、まず、40° セクタを 7 台と 30° セクタを 2 台組み合わ

せて 340° まで組み合わせた後にサーマルシールド（VVTS）を 340° まで取り付ける。次に、20° の開口部から 17 台の TFC を挿入し、組立（図 2 ④参照）を行う。最後に、20° 分の VV と VVTS、TFC を一体化し、開口部に挿入することで最終セクタを組み立てる。この後、VV 内機器や EFC、CS の超伝導コイルの組立（図 2 ⑤参照）、ならびにクライオスタットサーマルシールド（CTS）と超伝導配管、クライオスタットボディ（CVB）の組立（図 2 ⑥参照）を行う。

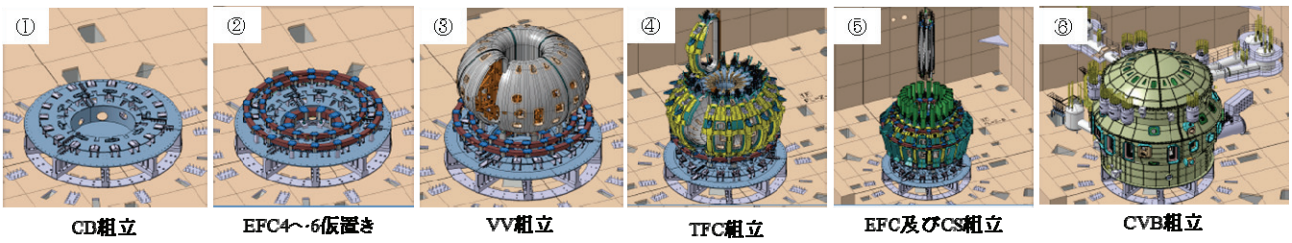


図 2.　JT-60SA 本体の組立手順

3　位置計測の方法

位置計測を行うにあたり、JT-60 の基準点（JT-60 Bench-Mark；B.M）を基に JT-60SA の絶対座標系を設定し、測定対象物の 3 次元位置を高い精度で計測できるレーザートラッカーを使用して組立位置の管理を行う。

組立計測に使用するレーザートラッカーは、ライカ社製の AT401 及び AT901 を使用する。AT401 は、垂直方向に測定範囲が広いため、大きい機器の計測に使用する。一方、AT901 は、AT401 比べて垂直方向の測定範囲は狭いものの、ターゲットであるリフレクタを使わず T プローブと組み合わせて陰に隠れた部分や深部の計測に使用する。

絶対座標系の原点は、既存設備との整合性を考慮して、JT-60SA の装置中心（ソールプレートの中心から高さ 8,000mm の位置）とするが、この原点は架空の原点であるため実際に見ることはできない。このため、組立時及び組立後に利用しやすい建屋の壁や設備、機器等に絶対座標系の参照点（reference point；ref.）を複数設置して、レーザートラッカーで常に原点が認識できるようにした。

JT-60SA の組立が始まり、CB の設置位置が絶対座標系に対して、X=-0.693mm、Y=1.113mm、θ =-0.015° だけズレが生じている。ここで、CVB の位置は CB 上のボルト穴で決まってしまうため、CVB の開口部のズレや NBI のビームラインの軸ズレが懸念された。これを調査した結果、軸ズレは僅かであり CB を基準に機器の組立をしても問題ないことがわかった。よって、CB 上に組み立てられる機器（VV、VVTS、TFC 等）は CB を基準とした座標系で組み立てることとし、位置計測は CB 座標系を使用する。なお、クライオスタットより外側の機器（共通ステージ、CTB、NBI 等）に関しては、現状のまま絶対座標系基準で組み立てを行い、クライオスタット内外の機器間の取合いはポート及び配管で調整をする。

4　TFC の組立と位置計測

TFC は、コイルケーシング、IIS（Inner Intercoil Structure）と OIS（Outer Intercoil Structure）及び GS（Gravity Support）から構成されている。コイルケーシングは、超伝導導体を納め、IIS と OIS は、18 個の TFC をトーラス構造に連結するとともに、電磁力による転倒モーメントに耐える機能を有している。GS は、CB 上で TFC の荷重を支持する。

TFC の組立では、最初に重力支持脚である GS の位置合わせと組立を行った後に、TFC の位置合わせ及び

組立を行い、最後に IIS 部と OIS 部の組立を行う。図 3 に TFC 組立のための代表点を示す。

TFC 単体の位置合わせの基本的な考え方は以下とする。TFC の位置と姿勢は、代表的な A、B、C 点の 3 点で決定することができる。すなわち、高さ方向は C 点で定義することにより、A 点及び B 点で位置と姿勢を決めることができる。具体的には、まず、トカマク中心を TFC 高さ方向の中心点（G 点）8018.3mm に合わせる必要がある。次に、C 点と G 点、球面ベアリング中心点（O 点）の関係は、幾何学的に定義されるため、重力支持脚の O 点によって TFC の高さ C 点を定義できる。これにより、まず O 点を決めることにより、結果として C 点の位置を決定し、次に A、B 点を測定することにより TFC 全体の位置と姿勢を定義することができる。

この基本的な考え方を基に、重力支持脚の O 点を定義するために重力支持脚の組立を行う。まず、GS の組立は、自立治具上で TFC の代表点を計測したデータを基に CB のダブルリング上に GS を仮置きし、GS ピンの位置を計測した値にシム等を使って高さ調整する。調整の方法は、レーザートラッカーを組立架台 1 段目歩廊に設置し、GS ピン部に専用の計測治具（Position DT Tool）を取り付け、GS のベアリング中心点（O 点）の直交 3 軸の位置を決定することにより、TFC の高さを決定する。図 4 に GS 計測方法の模式図を示す。GS は、TFC の電流中心線にある代表点の H 点と同一線上にピン中心位置があることを確認する。そして、GS の位置調整が確定したら、TFC を廻し込みために外側に傾けておく。TFC の位置調整後、TFC－GS の接続を行うが、正規のピンを挿入するためには、非常に高い位置決め精度が求められ、取り付けが困難となる場合がある。このため、最初は容易に挿入可能な仮ピンを用いて接続し、全体の位置調整と仮支持脚

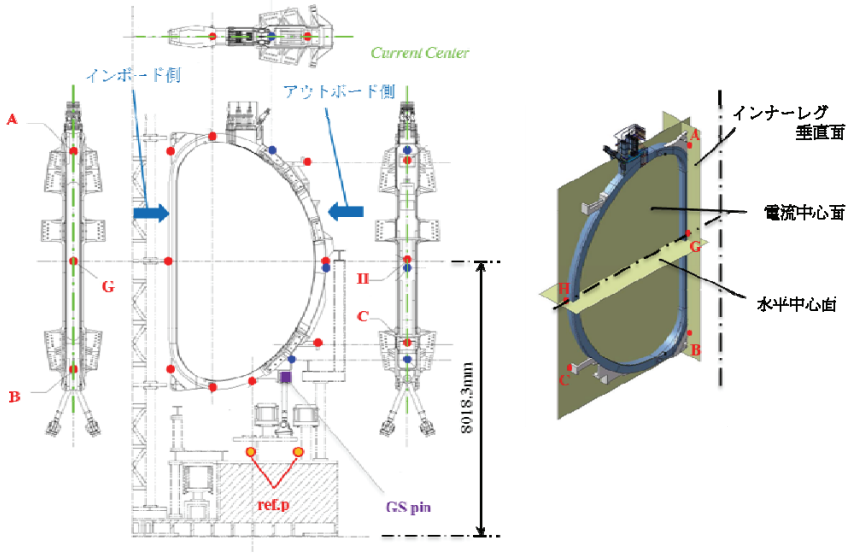


図 3.　TFC の代表点

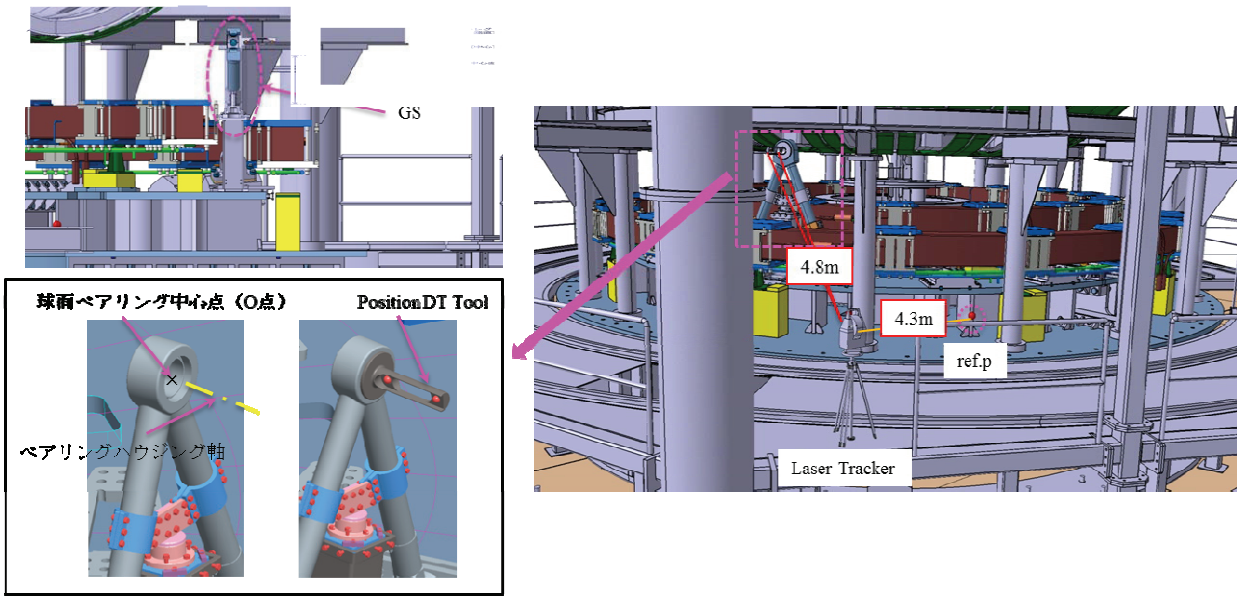


図 4.　GS 計測方法の模式図

や各部の仮固定を実施した後、仮ピンを正規ピンに交換を行う。

次に、TFC 本体の組立位置計測においては、全ての代表点をコイルの電流中心面上に設け、個々の TFC の組立は装置中心側（インボード側）基準で行い、電流中心線である A、B 点を参照して鉛直にするとともに、コイル高さを G 点で確認する。また、TFC の電流中心面である A、B、C 点でコイル方位とする。

TFC の垂直方向の測定は比較的広範囲となるため、組立計測には広角度の計測が可能なレーザートラッカーAT401 を使用して、インボード側はセンターポールの 1 段目から A、G、B 点を計測し、レーザートラッカーの位置出しにはダブルリング内側の ref.を使用する。一方、装置外周側（アウトボード側）については、組立架台 1 段目歩廊から H、C 点を計測し、レーザートラッカーの位置出しにはダブルリング外側の ref.を使用する。

このため、まず第 1 に 3 次元 CAD を使った ref.位置の写しとそれに伴う内在誤差の確認を行った。JT-60SA のインボード側の組立を行う場合、壁の ref.は直視できなくなる。また、アウトボード側であっても場所によっては既存設備で壁に設置された ref.が隠れて直視できない。そのため、CB の内側と外側に ref.を新たに設置することを考えた。作業にあたっては、CB の中にステージを組み、その中心から壁の ref.を 3 点以上計測して JT-60SA の原点位置を認識し、その上で新たに CB 内外に設置した ref.の座標を確認する。この方法によって生じる CB 内側 ref.の内在誤差は、レーザートラッカーの精度から、（0.015+0.006×18m[壁までの距離]）+（0.015+0.006×4.4m[CB 内側 ref.までの距離]）=0.16mm で、壁の ref.の内在誤差 0.14mm を加えると 0.3mm となる。同様に CB 外側 ref.の内在誤差も 0.1mm で、壁の ref.の内在誤差 0.14mm を加えると 0.24mm と極めて低いため、組立位置計測には主に CB 内外の ref.を使用することにした。[1)]

この方法でレーザートラッカーから最も離れている A 点の計測精度は、（0.015+0.006×3.6m[CB 内側 ref.までの距離]）+（0.015+0.006×6.3m[A 点までの距離]）=0.09mm であり、前記したダブルリング内側 ref.の内在誤差 0.3mm と合わせても 0.39mm である。TFC の組立許容値は±2.5mm なので十分に計測精度は満たしている。

さらに、計測作業の効率化を図るため、2 台のレーザートラッカーAT401 を 1 台のパソコンで制御することを考えた。図 5 に示すように TFC のインボード側とアウトボード側にそれぞれ AT401 を配置することにより、レーザートラッカーを移動することなく、インボード側とアウトボード側を同時に計測することができるため、レーザートラッカーの計測結果をリアルタイムで計測しながら位置合わせが可能となり、効率的な組立を行うことができる。

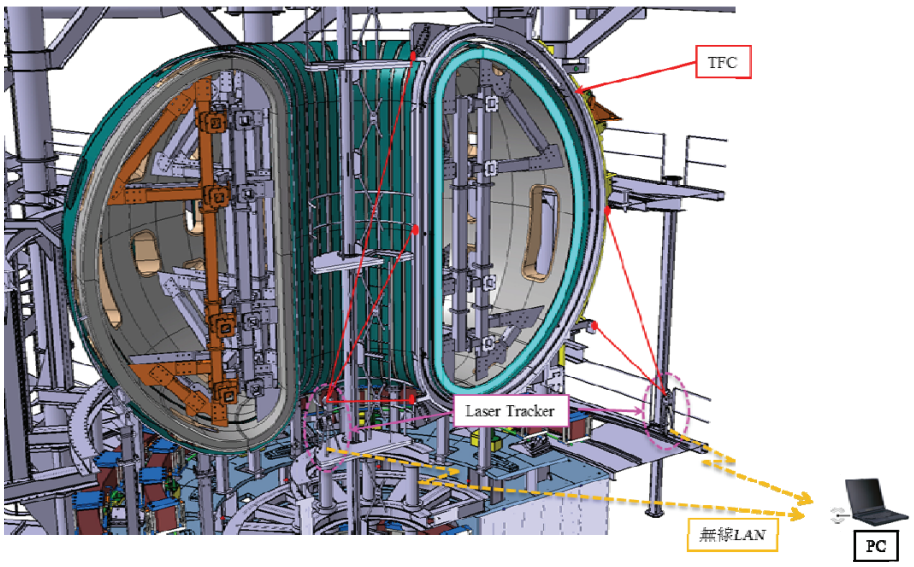


図 5.　TFC 計測方法の模式図

このように 1 台の GS 及び TFC が組み立てられ、隣り合う TFC も組み立て位置が確定した後に、IIS 部及び OIS 部の組立に入る。図 6 に IIS 部及び OIS 部の組立概念図を示す。まず、IIS 部は、上下の IIS とストレートレグから構成されており、隣り合う TFC 間には絶縁材（SLI ; G10/G11）とシム（SUS）が挟み込まれる。SLI は、1 枚当たり 619mm×

251mm、厚さ 3mm の分割構造となっているが、隙間が無いように取り付けられる。また、TFC 間は 5mm（設計値）で、SLI は 3mm のため、シムの厚さを調整して組立することになる。組立に際して、SLI の付いた TFC 面とシムの付いたもう一方の面を一体化させた時、IIS の面には隙間が無いものの、ストレートレグにおいては 0.5mm 以下の隙間となるようシム厚を調整する。接続面の測定には、レーザートラッカーを用いて IIS 部の計測を行い、TFC 2 台の IIS 部を相対比較することで、その差異からシム厚を算出する。こうして、既に取り付けられている TFC ともう一方の TFC の調整が完了後、IIS のボルト締め付けを行う。その後、IIS のキー穴寸法の測定を行い、その結果に基づいてキーのテーパーブッシングのカスタマイズ、キーの取り付けを行う。次に、OIS 部の組立は、隣り合う Shear Panel の面を計測し、平面度を確認する。Shear Panel の面は 5 枚あり、組立架台の 2 段目歩廊、ガイドレールステージを利用し、それぞれのパネル面のボルト穴を計測する。この際、レーザートラッカーの位置出しには、近距離の壁や設備に取り付けられた ref.を使用する。この結果から、隣り合う面が非理想的な関係にあった場合は、Shear Panel の形状に合わせてスプライスプレートをカスタマイズする。スプライスプレートを装着の際は、仮固定をした後、マーキングポイントを計測して変位の無いことを確認してから本締めを行う。その本締めでは、TFC の電磁力に対応するために適切な軸力でボルトを締めこむ必要があり、ボルトテンショナーを使用することを検討している。

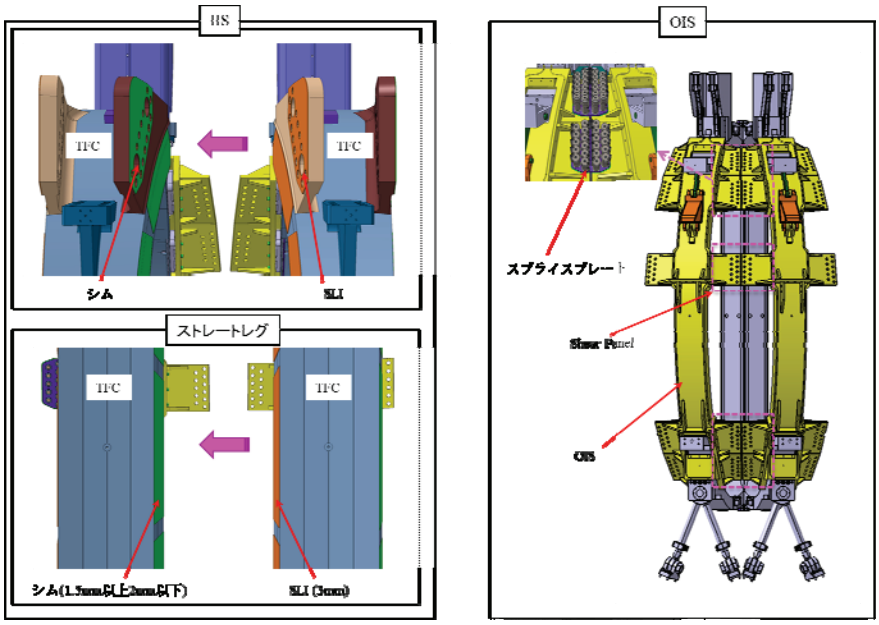


図 6.　TFC の IIS 部及び OIS 部の概念図

これら GS、TFC、IIS、OIS と一連の組立及び位置計測を繰り返し行うことによって、TFC をトーラス状に設置することになる。

5　まとめ

JT-60SA は、組立の最初として 2013 年 1 月から CB の組立を開始し、2014 年 1 月より CB 上に EF4～6 の仮置き、その後 VV の組立と JT-60SA の組立が本格的に始まる。JT-60SA 組立の中で最も重要で複雑な TFC の位置計測を行うにあたっては、3 次元計測器であるレーザートラッカーを採用して、組立誤差を極力小さくするとともに、絶対座標系を設定して、JT-60SA の構成機器全体の組立位置を管理する。そこで、本文でも述べた通り、JT-60SA の主要機器の一つである TFC の位置計測と組立の精度を確保する必要があるため、3 次元 CAD を用いて模擬計測を行い、機器の代表点を確認できる位置を確定して計測の精度を明らかにするとともに、組立に必要となる位置計測方法等を検討した。まず、TFC 単体の位置合わせの基本的な考え方として、TFC の位置と姿勢は、代表的な A、B、C 点の 3 点で決定することができる。すなわち、高さ方向は C 点で定義することにより、A 点及び B 点で位置と姿勢を決めることができる。次に、2 台のレーザートラッカーを 1 台のパソコンで制御することで、計測結果をリアルタイムで計測しながら位置合わせが可能となり、

効率的な組立を行うことができる。さらに、TFC 間の位置合わせにおいても、接続面を計測し、隣り合う面の形状を相対的な比較、確認することで調整できる。これらを検討評価することによって、10m 級の大型機器を数 mm の精度で組立できる基本的な計測方法を含めた組立方法を確立した。

参考文献

1) 柳生純一　他,“JT-60SA 組立計測の検討”,平成 24 年度愛媛大学総合技術研究会報告集(CD-ROM), P01-0097, 2013

cERL 安全管理システム - その 2

○濁川 和幸 A)，長橋 進也 B)

A) 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

B) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

高エネルギー加速器研究機構では、次期放射光光源として ERL（Energy Recovery Linac）を計画している。この ERL 計画を実現するためには様々な技術開発を行う必要があるため、実証機として cERL（コンパクト ERL）の建設を行い、平成 25 年 3 月から入射部の運転を行った。平成 25 年夏からは入射部に続き円周部の建設を進め、放射線主任者検査を経て平成 25 年 12 月より調整運転を開始した。

これに伴い、安全管理システムも機器の追加や変更等の更新作業を行った。本報告書では安全管理システムの中でも PPS（Personnel Protect System）の更新について報告を行う。

なお、本報告書は平成 24 年度愛媛大学総合技術研究会で行った報告[1]の続きである。この報告書も合わせてお読みいただきたい。

1　安全管理システムの基本構成

安全管理システムの基本構成は入射部のみの時と変更なく、図 1 の模式図のように、EPICS を使用したソフトウェアレベルで行うインターロック（ログも含む）、人間を守る PPS、各機器の運転モードを司り各機器を安全に動作させる MMS（Machine Mode System）からなっている。

PPS では加速器室への出入り管理を含めて放射線等から人を守る部分を担っており、PLC（Programmable Logic Controller）と非常停止ボタン・退避確認スイッチ等を使用して構築している。

今回のシステム更新では、PLC の変更はしていないが、その他の機器については使い勝手を考えた入れ替えや増設を行っている。

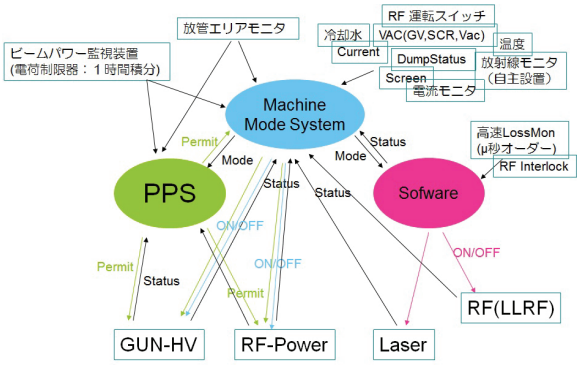


図 1. 安全管理システム模式図

2　システム更新

2.1　パーソナルキーシステム

cERL の加速器室内への入退出を管理するパーソナルキーシステムは鍵の貸し出しを行うキーボックスとこの貸し出し状況を制御室で監視するためのソフトウェアで構築されている。今回の改造ではキーボックスに関しては何も変更していないが、ソ

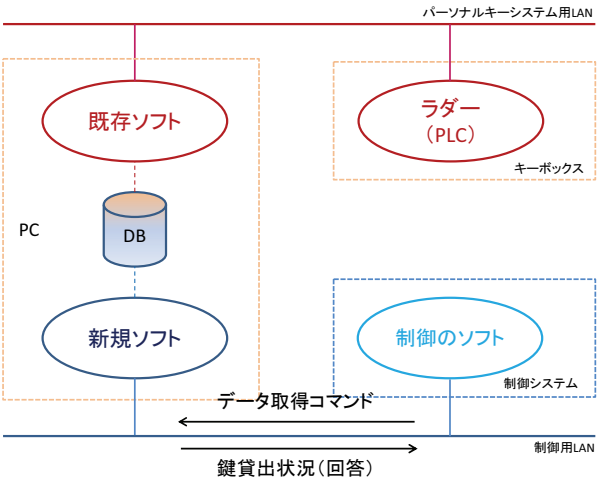


図 2. 新パーソナルキーシステム模式図

フトウェア側については更新作業を行った。

今までのパーソナルキーシステムは、安全性を考えてシステム専用の LAN でキーボックスと専用ソフトウェアを動作させる PC を接続して運用を行っていたため、PC のある制御室でしかキーボックスの状態を表示することが出来なかった。しかし、入射部の運転を進めて行く中で、加速器の制御システムからも運用状況を監視したいとの声が挙がり、制御システムも制御システム専用の LAN で構築され安全性にも問題がないと考えられる事から、今回のソフトウェアの更新作業を行った。

パーソナルキーシステムのソフトウェアは裏でデータベースを動作させており、キーボックスからの情報を一度データベースに格納してこの情報を基に現在の鍵の貸し出し状況や鍵管理のログ情報を表示する仕組みとなっている。今回の更新作業では、図 2 の模式図のように、TCP/IP で外部からのテキストベースのコマンドを受け付けるソフトウェアを今までのソフトウェアとは別に設けて、受け付けたコマンドに対してデータベースから情報を得て、鍵の貸し出し状況（貸し出し中の鍵の番号、貸し出し者の氏名、貸し出した時間）をテキストで返す仕組みとなっている。

現在、制御システムではこのコマンドを使用して写真 1 のようにキーボックスの上のモニターで現在入室している人の氏名が確認出来るようにしている。

写真 1. キーボックスと状態表示用画面

写真 2. 新型非常停止ボタン

2.2 非常停止ボタン

非常停止ボタンについては、加速器室への入口 2 か所にも設置するなどして総数を増やした。今回の非常停止ボタンは、写真 2 の通り設置場所を考慮して、加速器運転中を示す回転灯の廃止、異常時を加速器室外でも聴覚的に確認できるようにするブザーの設置、さらにはボタン自体も照光タイプとして押した事が視覚的にも確認できるようにするなどの構造変更を行った。

2.3 表示器

入射部までの運転では PPS の状態を確認するためにタッチパネル式の表示器を使用していた。このタッチパネルは例えば退避確認を開始するためのスイッチを配置するなど、PPS 用操作も兼ねているためページを分けて PPS の状態を示させており、トップ画面で常に細かい状態が確認出来る状況ではなかった。

今回は cERL として加速器を全体的に運転することもあり、タッチパネル式の表示器以外に SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）を使用して、新たに制御室に設置した 46 インチモ

写真 3. 制御室内の各種壁面モニター

ニター（写真 3 左下のモニター）に図 3 の通りの PPS 状態を常時表示することとした。これにより、表示器は操作すること主としてログを含む各種表示は 46 インチモニターで確認できるように変更した。また表示に関しては基本的に安全に加速器を運転できる状態の時を緑（青）もしくは黄色で表示することとし、何かしら赤表示が出ている時には異常状態である事を表すこととして一目で安全系に異常状態が起きたかどうかを判断できるようにしてある。

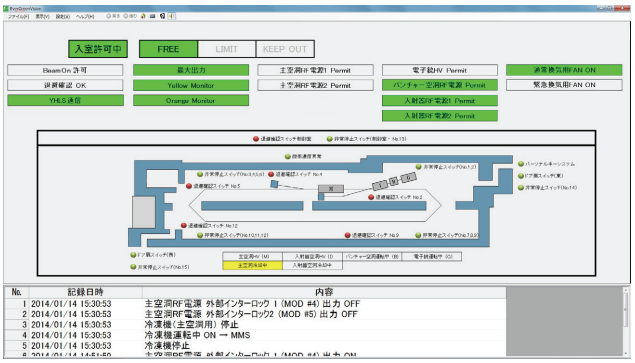


図 3. PPS 状態表示画面

2.4　監視カメラ

周回部の建設が進んだこともあり、今までの監視カメラでは死角となる部分が出来てしまった。そこで加速器室内の監視カメラの数を 3 台増設し全 13 台として、写真 3 の右下にあるモニターにマルチ画面で表示している。

2.5　安全ロジック

安全ロジックは図 4 の通りとなっていて、ロジック的には入射部だけの時と変更した部分はない。ただし、周回部の建設に伴い「主空洞」の高周波 ON/OFF に関する部分の追加や、非常停止ボタン等の増加数に伴う、プログラム（ラダー）の変更を行っている。

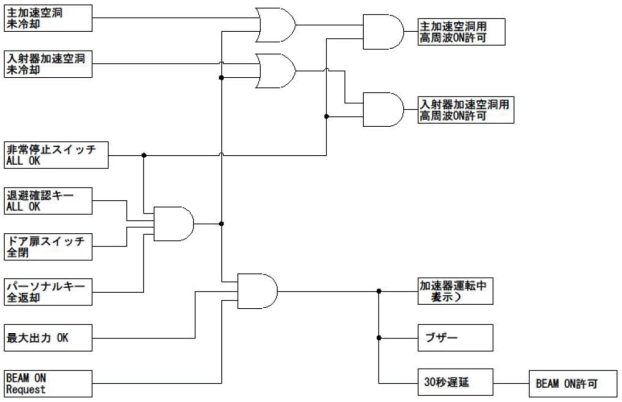


図 4. PPS のロジック図

2.6　その他

その他として、写真 4 のように制御室に設置した退避確認スイッチを非常停止ボタンとは別ものとして壁面取付にするなどの使い勝手を考慮した小変更も行った。

写真 4. 制御室の退避確認スイッチと
非常停止ボタン

3　現状と今後

平成 26 年 1 月下旬からは cERL の調整運転を再開し、3 月上旬に予定されている施設検査に備える。その後、夏まで加速器のコミッショニングを行っていく予定である。

また、秋には放射光を使用する「LCS ガンマ線ビームライン」の建設が行われる予定である。今後はこれにあわせて PPS も小改造を行う予定であり、ビームラインでの実験を安全に行えるようにするビームラインの安全系の構築も進めて行く予定である。

参考文献

[1]　濁川和幸 他,「cERL 安全管理システム」,平成 24 年度愛媛大学総合技術研究会, 2013/03/17-18

L バンドライナックの電子ビーム高精度化に関して

古川和弥

大阪大学　産業科学研究所　技術室

概要

阪大産研量子ビーム科学研究施設にある L バンドライナックはナノ秒からサブピコ秒領域でのパルスラジオリシス法による化学反応の研究や自由電子レーザー(FEL)によるテラヘルツ波の発生等に用いられている。

特に FEL の安定した発振のためには非常に高精度な電子ビームの発生が求められる。そこで電子ビーム安定化のためモジュレータに補充電ユニットを設置し、充電電流のコントロールを行うことで充電電圧の変動を 0.01%に抑えることができたためその報告を行う。またモジュレータに使われるスイッチング素子のサイラトロンに換わる半導体スイッチの開発を行っているため併せて報告を行う。

1　補充電回路の導入

FEL の実験に用いられるマルチバンチモードでは電子銃で発生させた 8μs の時間幅を持つ電子ビームを、バンチャー、加速管システムを用いて、間隔 9.2ns、時間幅約 20ps のミクロパルス列にバンチングし 15MeV 程度のエネルギーにして FEL システムに入射している。

メインの加速管に導入される高周波はクライストロンと呼ばれる高周波の増幅装置から発生されるが、そのクライストロンのカソードに電圧を印加する電源がモジュレータである。モジュレータ中にある Pulse Forming Network(PFN)へ充電された約 20kV の電圧はサイラトロンで放電され、パルストランスで昇圧後にクライストロンカソードに印加される。今回はその PFN の充電値にばらつきがあることが判明したため、充電器を改良し充電電圧の変動の改善を目指した。

もともと充電器には直列共振インバータが採用されていたが、充電電流が 298Ap となっていたため電流値が大きすぎて正確な充電が難しかった。そこで図 1 のように新規共振回路を追加し、C の値を小さく、L の値を大きくすることで共振周波数は変えずに 35Ap と出力電流を小さくすることにした。

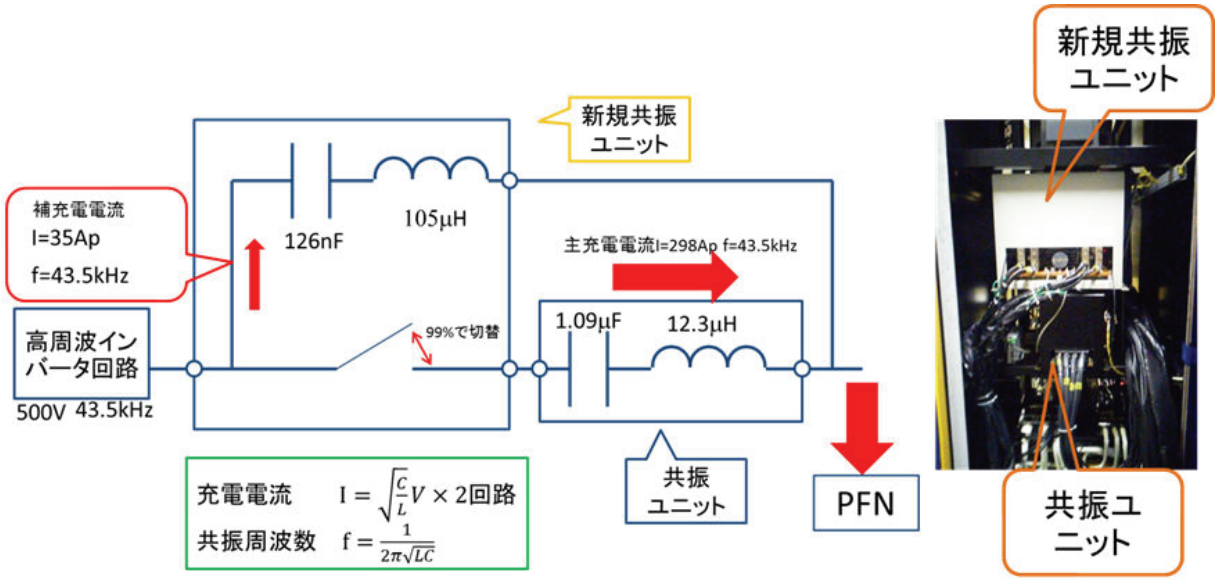


図 1. 充電回路

これにより、目標充電値の 99%までを旧共振回路と新規共振回路を通して充電し、最後の 1%を新規共振回路のみから充電することで充電変動率 0.01%の高精度な充電が可能となった。改善された波形を図 2、図 3 に示す。

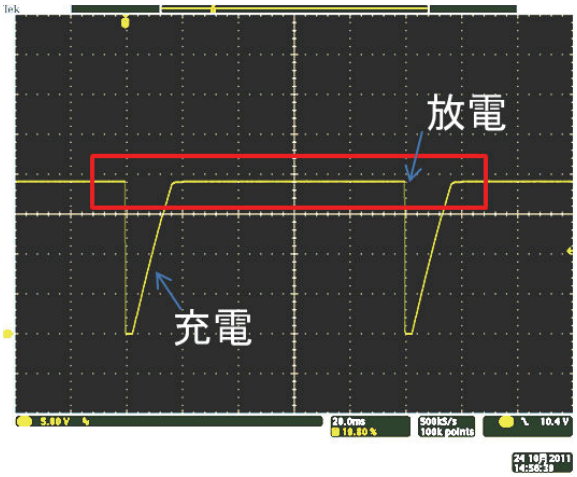


図 2. 充電電圧波形全体図

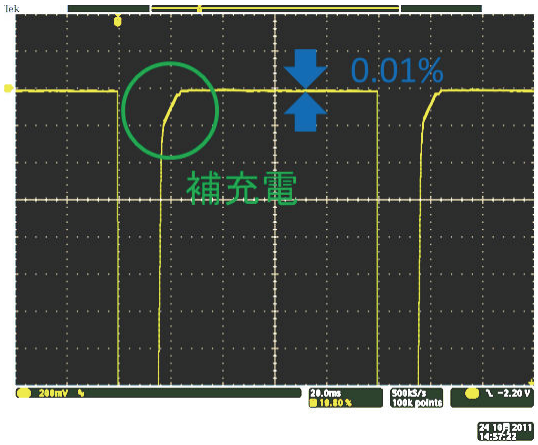


図 3. 充電電圧波形拡大図

2　ノイズ対策

新規共振回路を設置することで充電電圧の改善を達成したが、さらに波形を拡大すると図 4 のように充電電圧が 2 値に分かれていることが確認でき、その 2 値の差は充電電圧の 0.02%に相当することが判明した。また図 5 のように商用充電のリップル周波数に同期した 360Hz の変動が生じており、更に 60Hz の繰り返しの変動パターンが確認できた。

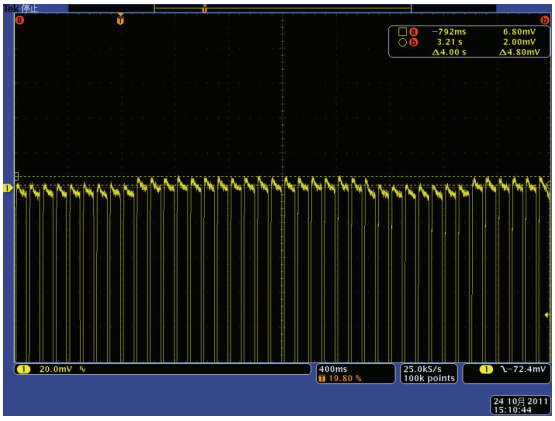


図 4. 2 値の変化が確認できる充電電圧波形

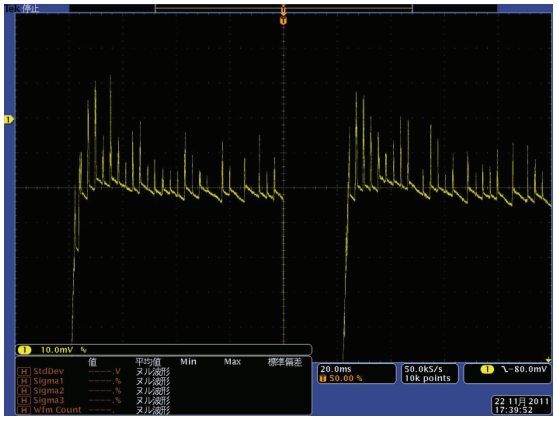


図 5. 360Hz 周期で変動する充電電圧波形

よってこれらの対策として 2 つの対策を行った。①PLC から送られてくる設定電圧がノイズの影響で 2 値に分かれていたことからインバータユニット内にシールド筐体に収めた DA 変換基板を設置し、基板内で DA 変換を行い、更にモニター信号との誤差増幅を行った。②インバータユニット内のコンバータ部分をインバータユニットから切り離し別のシールド筐体に分け、商用充電によるノイズの発生源を切り離し、さらに新しくノイズフィルターを追加した。これらの対策を図 6 に示した。

結果として図 7 に示すように充電電圧が 2 値に分かれる問題は解消し、360Hz の変動、60Hz の変動ともにほぼ解消した。

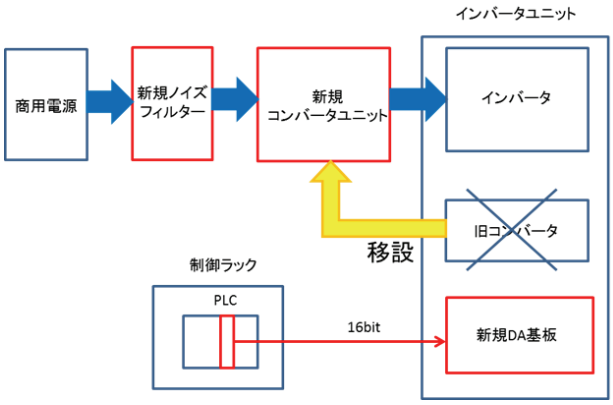


図 6. ノイズ対策

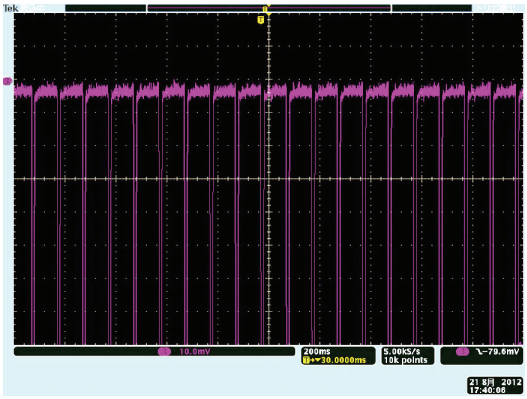


図 7. 改善された充電電圧波形

3　半導体スイッチの製作

充電電圧の変動改善により、PFN の充電電圧の変動はクライストロンの安定度の目標値である 0.04%よりも十分に安定させることができた。しかし高周波の振幅の安定度は目標値よりも悪いことが判明した。現状のモジュレータでは PFN の充電電圧をガス封入管であるサイラトロンで放電させている。そのサイラトロンの動作状態が変動すると高周波の振幅が変動することが確認できており、またサイラトロンは高価でかつ有寿命であることから図 8 のような半導体を利用したスイッチの作成を行った。

この半導体スイッチは SI サイリスタ 60 個を 10 直列・6 並列で動作させることで阻止電圧 25kV、通電時電流 5kA の性能をみたすことができた。この半導体スイッチの制御システムを図 9 に示す

この半導体スイッチを導入することで高周波の振幅がサイラトロン使用時の 0.11%から、ノイズレベルと同等程度の 0.05%まで改善することができた。

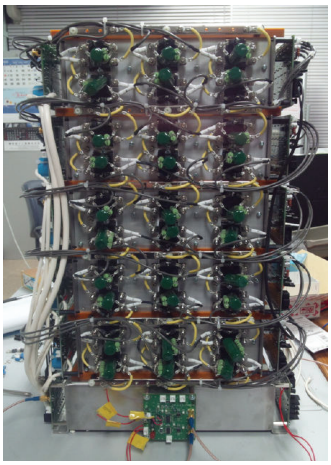


図 8. 半導体スイッチ外観

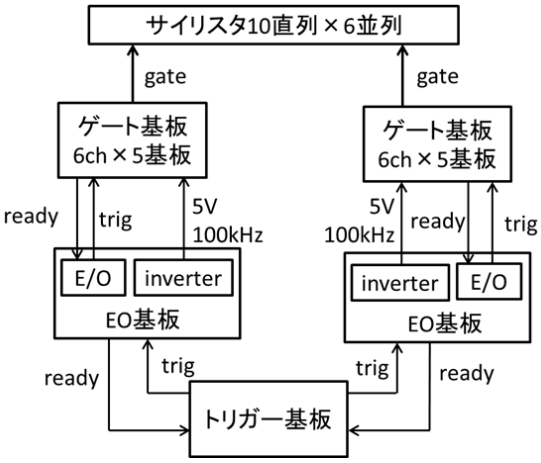


図 9. 制御システム

4　まとめ

今回報告を行ったクライストロンモジュレータの高精度化により、FEL の発振の安定性が格段に向上した。しかし半導体スイッチに関しては使用しているサイリスタの電気特性にばらつきがあり、また温度上昇等の問題もあるためこれらを改善した 2 号機の作成を行っているところである。他にも SHPB 半導体アンプの導入や電子銃電源の置き換え等を進めているところであり、より安定した電子ビームの発生を目指していきたい。

JT-60SA に向けた ECRF 装置伝送系の改良と開発

○平内慎一，横倉賢治，小林貴之，澤畠正之，寺門正之，
日向淳，和田健次，佐藤福克，星野克道，森山伸一
（独）日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門　RF 加熱開発グループ

概要

現在建設中のトカマク型核融合実験装置（JT-60SA）用の電子サイクロトロン加熱（ECRF）装置では、ジャイロトロン 1 基あたり 1MW-100 秒間の高出力、長パルス運転が要求されている。本装置では、要求仕様を満たすための開発運転とコンディショニング運転を行い、これまでに周波数 110GHz のジャイロトロンを用いて過去最高の 1MW-70 秒の出力を達成している。今回、新しく設計製作した 2 周波数（110, 138GHz）ジャイロトロンの長パルス試験において、伝送系の改良開発を行ない、0.5MW 出力では要求仕様と同等のエネルギーである 100MJ（パルス幅約 200 秒）を達成した。

本装置で高出力、長パルス運転を実現するためには、伝送系機器での高周波放電を抑制して、高周波効率良く伝送し、機器の発熱を抑制することが重要な課題である。また発熱した機器は効率よく冷却しなければならない。JT-60SA 用 ECRF 装置の伝送系には、JT-60U で使用した 1MW-5 秒仕様である伝送系機器も使用する予定であり、これらを改良することが必要である。

今回の開発運転において、改良に必要な機器の発熱や真空度の変化に関するデータを取得し、以下の改良開発を行った。①高周波放電時のアーク光、圧力上昇により高周波を遮断するインターロックシステムを改良し、インターロック設定信号レベルをショット中に可変できる制御システムを構築した。これによりエージング効率が大幅に上昇した。②温度上昇の大きかった整合器や導波管の冷却を強化し、ショット間での冷却に成功した。③ギャップ式真空排気導波管において、ギャップからの漏れ高周波による真空排気設備機器の温度上昇が問題となり、これを解決するために漏れ高周波吸収管を製作した。④伝送効率改善のために導波管を伝送する高周波の電力密度空間分布を測定する装置を開発し、高出力試験において導波管伝送モードの変化を確認することに成功した。

1　JT-60SA ECRF 装置の概要

JT-60SA ECRF 装置は、周波数 110GHz 及び 138GHz の高周波によるプラズマ局所加熱／電流駆動を行い、また閉じ込め性能を向上させるものである。プラズマ入射電力 7MW（ジャイロトロン出力 9MW）-100 秒間を要求されており、ジャイロトロン 9 基、伝送導波管系統 9 系統（伝送効率 75～80%）、アンテナ 4 基が装備される計画である。現在は、それに向けて設計検討、開発運転を進めている。図 1 に JT-60SA

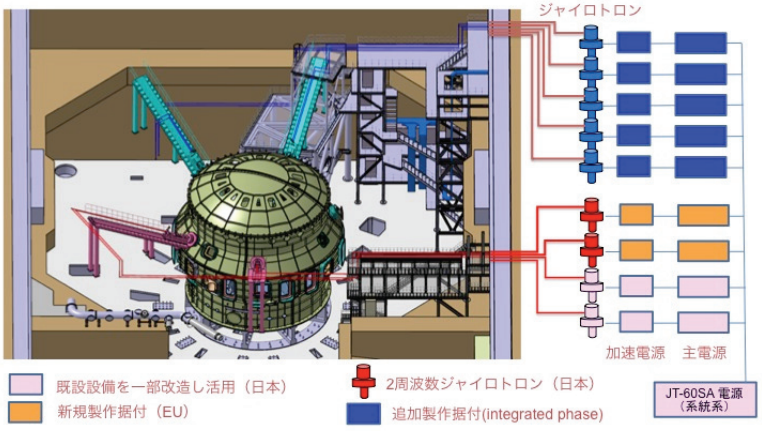


図 1　JT-60SA ECRF 装置システム構成図

ECRF 装置のシステム構成図を示す。

設計検討では、JT-60SA 本体室内とジャイロトロン及び周辺機器が設置されるジャイロトロンルーム内の CAD モデルを作成し、伝送導波管敷設ルートの配置検討を行っている。本体室内では、JT-60SA 本体に複雑に組み込まれる多くの機器モデルと ECRF 装置の機器モデルとの干渉チェックを行い、他装置との調整、干渉回避を行っている。これまでにジャイロトロンから JT-60SA 本体に接続されるアンテナまでの導波管ルートがほぼ決定した。今後モデルの詳細検討、その他周辺機器の配置検討を順次進めていく予定である。

2　ECRF 装置の長パルス試験に向けた改良

ECRF 装置で安定した入射を行うためには、真空管であるジャイロトロンの管内放電や、導波管、真空窓等の伝送系機器での高周波放電を抑制することを目的としたエージングが必要になる。エージングで最も注意しなければならない点は、機器に損傷を与える可能性がある「放電」や「機器の過熱」をなるべく発生させないこと、あるいは持続させないことである。そのため、圧力上昇（真空度劣化）と機器の急激な温度上昇、アーク光を注視しながら慎重にエージングを進める。

今回、エージング過程で行った改良により、2 周波数ジャイロトロンにおいて模擬負荷ダミーロードを使用した伝送系系統で 0.5MW-200 秒間伝送に成功した。

2.1　放電防止インターロックシステムの構築

ジャイロトロンや伝送系機器での高周波放電による機器の保護には、真空度信号やアーク信号をモニタし、これら信号が設定値を超えた場合、10 マイクロ秒内に高周波を遮断するインターロックシステムを装備している。このシステムでは設定値が時間的に一定であるため、高周波立上がり時に生じるノイズや、立上がりの短い時間帯に規則的に発生する発光現象にもインターロックが動作し、エージングが進まないことが問題となっていた。具体的には、図２に示すように、アーク検出信号には時間的に変動するいくつかのピークが見られる。しかし、以下の条件を満たすピークは、機器に重大な損傷を与える放電現象ではなく、ジャイロトロン発振初期のパラメータ変動時における別モードでの発振などに起因する発光現象と考えられるため、放電防止の観点で保護動作を必要とする信号ではない。

①アーク信号が比較的遅い時定数（0.01 秒程度）で、短時間増加し、その後減少する。【継続性】

②アーク信号増加時に真空度の劣化が観測されない。【真空への影響】

③アーク信号増加時に、伝送路内の進行波及び反射波に大きな変動がない。【高周波への影響】

④再現性がよく、繰返し発振時にほぼ同一のタイミング、同一の強度で信号が検出される。【予測可能性】

既存システムでは、上記現象での過剰な保護動作を避けるためには設定値を高く（緩

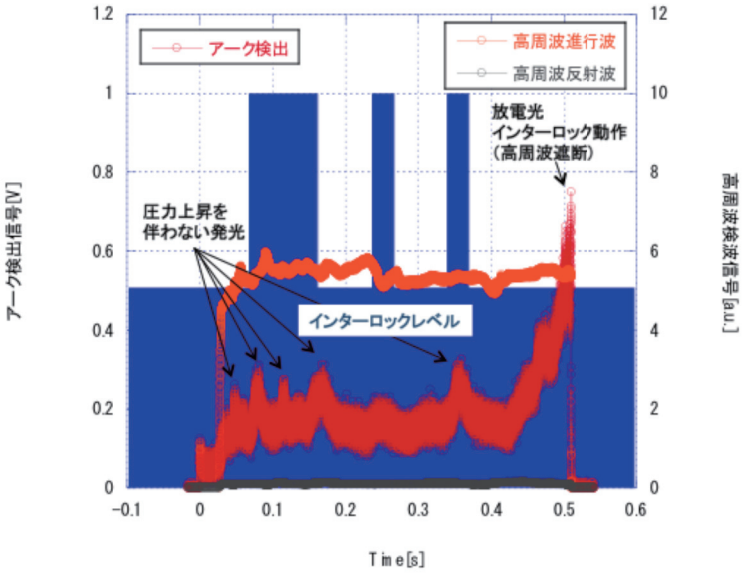


図２　アーク検出インターロック動作

く）する必要があるが、放電現象に対する本来の保護機能を損なわないためには、新たなインターロックシステムが必要であった。

この問題を解決するために、今回現場でのプログラミングが容易でそれぞれの装置の特性や状況に適合した制御を可能とする FPGA を使用し、1 ショット間のインターロック設定信号レベルを時間的に変えることのできるシステムを構築した。これにより、ショット中の圧力上昇を伴わない発光、ノイズには、インターロック設定信号レベルを可変させることで不要な保護動作を回避し、放電と考えられる発光については適切に保護することが可能となりエージング効率が大幅に上昇した。

2.2　伝送系機器の冷却効果

ECRF 装置の伝送系機器には、導波管にアルミニウム合金を、高周波を 90 度曲げるマイターベンドのミラー部にアルミナ分散強化銅等を使用している。これまでの 1MW-5 秒-デューティ 1/60 サイクル運転では、これらの機器の急激な温度上昇は観測されず冷却は不要であった。長パルス運転を行うに当たり高周波損失の比較的大きい整合器（～7%）マイターベンド（～1%）等の温度上昇が懸念されたため、水冷却が可能な構造である整合器内ミラー部、整合器筐体入出力ポート部、マイターベンド等のミラー部の冷却を行い、各機器の温度上昇を確認し、流量調整を行った。また、冷却構造を持たない機器についても温度上昇が確認されたため、冷却機能を付加する改良を行った。導波管には、熱伝導の良い銅製冷却ジャケットや導波管接続治具（カップリング）を利用した冷却ジャケットを取付け水冷却した。また、熱交換シリコンチューブを使用し、導波管に巻き付けて冷却する方法も試みた。これらにはチラーを使用し、ベース温度を低く（～20℃）することによって到達温度を低く抑えるようにした。整合器のポート溶接部や出入口ベローズフランジにおいては、内部高周波吸収で実績のある TiO_2（酸化チタン）コーティングを施し、水冷却機構を設けた冷却ジャケットを取付けた。

これらの冷却強化により、各機器から急激なガス放出をさせない温度（100℃以下）に抑え、ジャイロトロンの真空度（イオンポンプ電流）あるいは電源機器のジュール熱制限に伴う休止時間（デューティ 1/60）内に十分な温度降下を確認することが出来た。図 3 に 0.5MW 高周波伝送時の導波管温度上昇とショット間の冷却効果を示す。

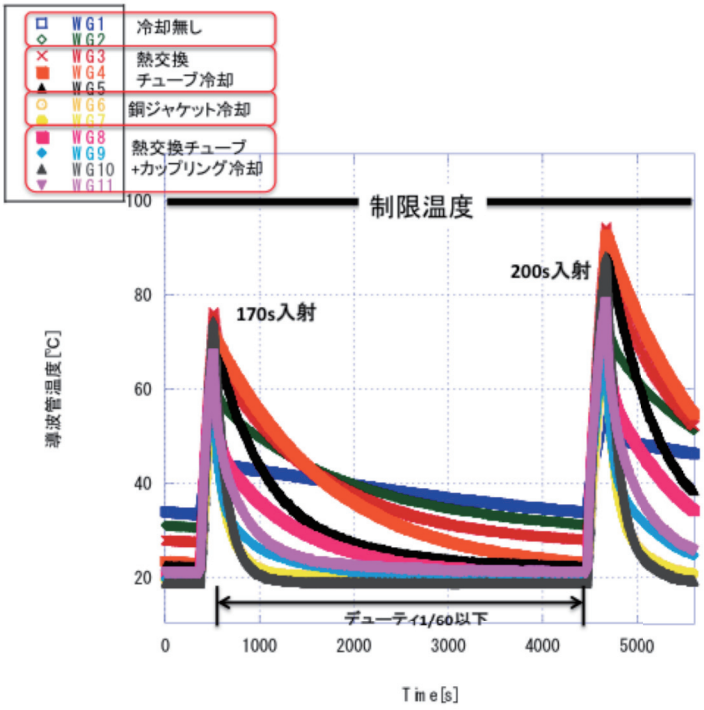


図 3　高周波伝送時の導波管温度上昇と冷却効果

3　長パルス試験で生じた問題点と今後の改良

ECRF 装置の長パルス試験において、2 章に示した改良によって解決された課題が多い一方で、今後の 1MW-100 秒運転に向けた問題点が明らかになった。これらを解決するためのさらなる改良案を検討した。

3.1　伝送系真空排気における問題点と対策

伝送系での高周波放電を防止するためには、伝送系内を高真空に保つ必要がある。ECRF 装置の伝送系では、導波管のコンダクタンスが小さいため、出来るだけ多くの箇所から排気することが望ましいが、排気ポートからの高周波損失による放電の可能性がある。本装置では、体積が大きく放出ガスの多い整合器とダミーロード、これに加え伝送路の途中にギャップ式の真空排気導波管を接続して真空排気している。ギャップ式真空排気導波管は、導波管間に 1～2mm のギャップを設けて真空排気を可能とする。ギャップの排気コンダクタンスは約 0.01m^3/s 程度であり、理想的な高周波伝送における損失は 0.01%以下と非常に小さい。また、ギャップからの微小な漏れ高周波を吸収するために排気ポートに高周波吸収体である SiC（炭化ケイ素）リングを取付けている。

今回、エージング過程において SiC リングが局所的に加熱され破損した。ダミーロードからの僅かな反射や伝送路で生じた不要モードによりギャップからの損失が理想よりも大きくなり、また、SiC と排気ポートの間の熱接触が良好でなかった可能性がある。SiC が脱落した後、吸収されない漏れ高周波により排気ポートに接続される真空排気機器 Al_2O_3（アルミナ絶縁フランジ等）の温度上昇した結果、放出ガスの増加が確認されたと考えられる。図４に排気ポート SiC リング取付け部の温度上昇を示す。

また、漏れ高周波の影響によりインターロックに用いる真空計（ピラニ/コールドカソードコンビネーションゲージ）の計測が不能となった。応急措置として、局所的な入熱に弱いアルミナ絶縁フランジを取外し、真空ポンプ（ターボ分子ポンプ）と真空計までの配管を 20cm 直管から 50cmL 字管に延長し距離を設け、エージングを進めた。図５にギャップ式真空排気導波管の真空排気機器構成を示す。

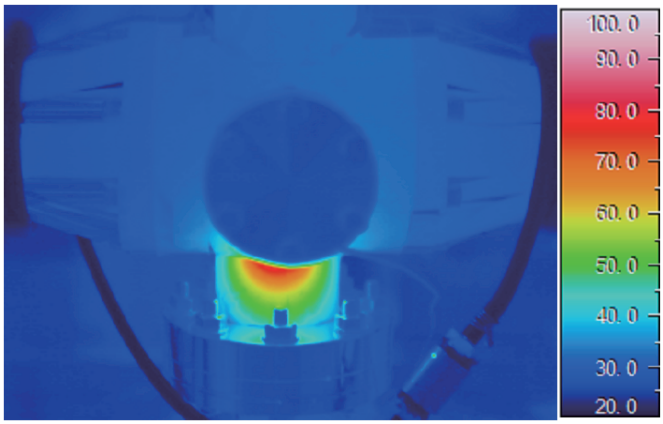


図４　排気ポート SiC リング取付け部温度上昇

対策として、真空配管に TiO_2 をコーティングし、外側を冷却し除熱する高周波吸収管を製作した。図６に高周波吸収管の構造図を示す。今後もギャップ真空排気導波管の漏れ高周波による温度上昇、圧力上昇に注視しながら運転を進める必要がある。

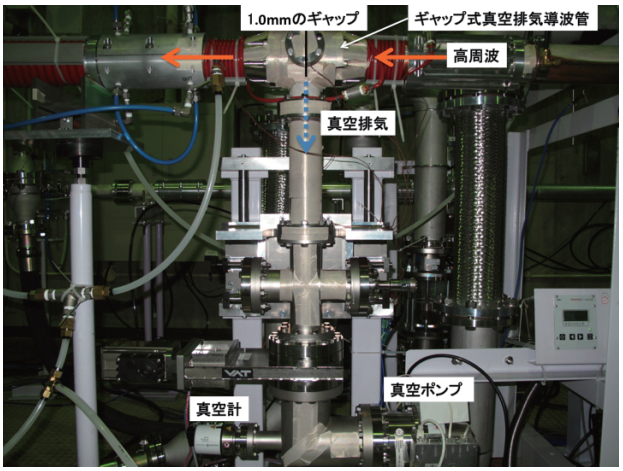


図５　ギャップ式真空排気導波管真空排気機器構成

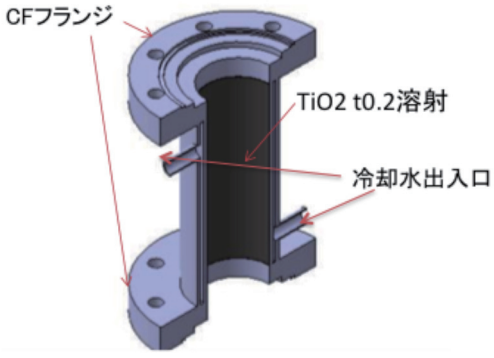


図６　高周波吸収管構造図

3.2　伝送電力密度分布測定装置の開発

高出力、長パルス運転を実現するためには、伝送系導波管での低損失伝送が重要な課題である。伝送系機器の異常により高周波伝送モード（HE_{11}）とは異なる不要モードの発生により高周波損失が増大し、熱となって機器の性能の劣化や、損傷を引き起こす可能性が発生する。今回、長距離伝送系で発生する高周波の異常や変化を運転中に迅速に検出できる伝送電力密度分布測定装置の開発を行った。図７に伝送電力密度分布測定装置の構造図を示す。

本装置は、伝送系内に設けた空間ギャップに一時的に挿入した誘電体ディスク（窒化硅素ディスク）に短パルス（約 0.1 秒）の高周波を透過させた後、瞬時（0.2 秒以内）に引き抜いてディスクで損失したエネルギーによる温度上昇を赤外線カメラで測定することで、高周波の電力密度の空間分布を測定するものである。これにより、導波管内おける不要モードの発生を検出することが可能となる。

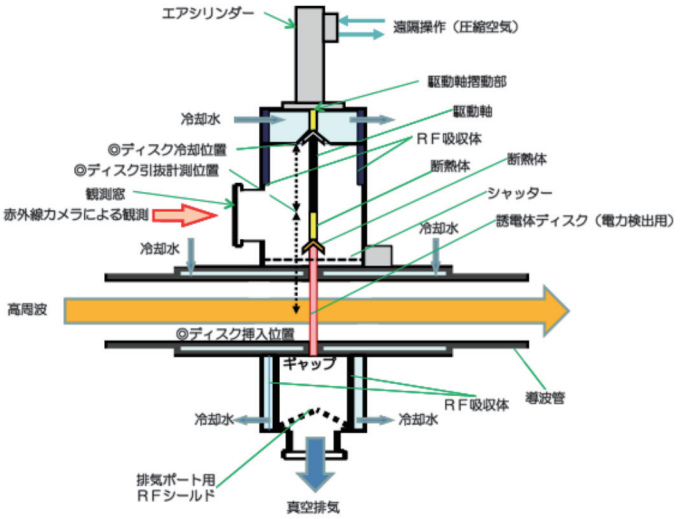


図７　伝送電力密度分布測定装置構造図

本装置の特徴は次の通りである。①誘電体ディスク材料として熱伝導率が高すぎず且つ適度な高周波の損失を発生する窒化硅素を選んだ。②取合い部を導波管にすることで、直接伝送系に接続出来る。③ディスクを断熱体に挟んで支持する構造であるため、支持部の熱伝導は無視できるほど小さい。④測定しない場合は導波管内の放出ガスを排気する真空排気導波管として利用できる。⑤ディスクの駆動は電磁弁を利用したエアシリンダーにより、パルス終了後瞬時に行う。

導波管を伝送する高周波は、理想的な場合、導波管の中心に電力密度が集中する HE_{11} モードとして伝送され、ディスクで測定される温度分布も同心円状になる。実際の運転において、伝送系で発生する不要モードが混在すると温度分布は非同心円状になり、異常を検出できる。試験では、0.2 秒の短パルス高周波を透過して、約 0.2 秒後に観測されたディスクの温度分布を測定した。結果は、不要モードが混在した非同心円状の温度分布が得られた。

ECRF 装置では、ジャイロトロンから出力されたガウスモードの高周波を整合器の 2 枚のミラーにより HE_{11} モードに変換するとともに導波管入射角度や位置等を調整している。この調整は、伝送系やアンテナにおける高周波損失に影響するため、高精度に調整する必要がある。現在の調整方法では、伝送系を大気開放し、ごく短パルス（〜2 ミリ秒）の高周波を導波管に取付けた感熱紙に入射し、焼跡から高周波の導波管入射位置を確認している。しかし、今回開発した伝送電力密度分布測定装置を用いれば伝送系内を大気解放することなく、導波管内の電力密度分布を計測しながら整合器ミラーの角度を遠隔駆動で調整、最適化することができるようになる可能性がある。図８にこの方法を試験した際の、整合器ミラー角度調整前と最適化後の導波管内伝送電力密度分布を示す。

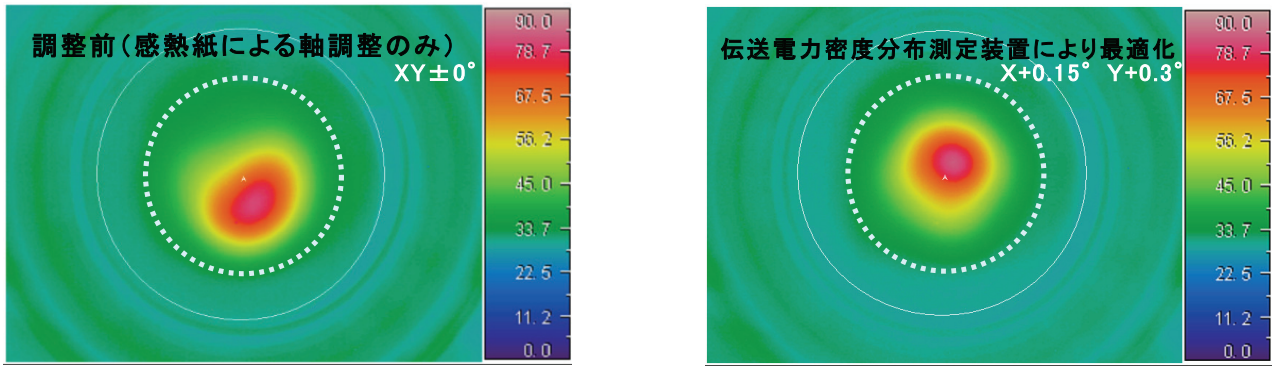


図８　伝送電力密度分布測定装置による導波管内伝送電力密度分布の最適化

4　まとめ

JT-60SA に向けた ECRF 装置の伝送系では、1MW-100 秒間の高出力、長パルス伝送を実現するために高周波放電を抑制し、高周波伝送効率を良くし、機器の過熱を抑制することが重要な課題である。今回の開発運転において、下記の改良開発を行い、1MW-100 秒と同等のエネルギーである 0.5MW-200 秒を達成した。

（１）　放電防止インターロックシステムを改良し、FPGA を使用してショット中にインターロック設定信号レベルを任意に可変できる制御システムを構築し、エージング効率を大幅に上昇させた。

（２）　温度上昇の大きかった整合器や導波管に冷却ジャケット、熱交換チューブを取付け、チラーを使用してベース温度を管理し、到達温度を低く抑えるとともに現在のデューティサイクル 1/60 のショット間冷却に成功した。

（３）　ギャップ式真空排気導波管の漏れ高周波による機器の温度上昇に対して、真空配管に TiO_2 をコーティングし、外側を冷却し除熱する高周波吸収管を製作した。

（４）　伝送系の不要モードの発生による高周波損失の増大、機器の発熱、損傷の可能性を防止することなどを目的として、伝送電力密度分布測定装置の開発を行い、導波管内の伝送電力密度分布の測定に成功した。

JT-60SA で要求される 1MW-100 秒-デューティサイクル 1/18 の範囲においては、導波管の到達温度をその溶融温度（600℃）よりも余裕を持って低く抑えることができる見通しである。しかし、導波管材料のアルミニウムの特性でもある高温（100～150℃）による強度の劣化や放出ガスの増加、また想定外の局所的な温度上昇による放出ガスを防ぐことが放電を防止する上でも重要である。今後も継続して温度、真空度の監視を行い、2 周波数において 1MW-100 秒間を目指し、併せて長距離伝送試験も実施していく計画である。

広帯域 VUV-SX ビームライン新 BL-2 の建設

○豊島章雄 A)，田中宏和 A)，菊地貴司 A) ，堀場弘司 A) ，小菅隆 A)，
永谷康子 A)，森丈晴 A)，北島義典 A)，組頭広志 A) ，雨宮健太 A)

A) 高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所

概要

高エネルギー加速器研究機構　放射光科学研究施設では、2.5GeV の電子・陽電子蓄積リングから放射される放射光を用いて様々な実験が行われている。今回報告する BL2 は、電子・陽電子蓄積リングの直線部分に設置された挿入光源（アンジュレーター）からの放射光を利用して実験を行うビームラインであり、従来から放射光利用が行われてきた。しかしながら、最新式の分光器に比べて分光エネルギー領域が狭い、光学素子の冷却が十分に行えないなどの問題があった。さらに、2011 年 3 月の東日本大震災によって大きなダメージを受け、所定の性能が達成できなくなったため、放射光科学実験施設では、この老朽化した既設ラインを撤去し、新たに広帯域高輝度の VUV/SX 領域ビームライン（30～4000 eV）として再構築を行った。
今回は、この新ビームラインの建設・立ち上げ調整を行った経過について報告する。

1　ビームラインの概要

新ビームラインに設置される分光器は、低コスト高性能を実現できる入射スリットレス可変偏角 Monk-Gillieson 型分光器であり、トロイダル鏡(M1)、前置平面鏡（M2）、不等間隔回平面折格子（VLSPG）、ブランチを切り替えるための平面鏡（M3）、出射スリット、後置集光鏡（M4）からなり、４枚のミラーと回折格子で構成される構造である。M2 および VLSPG を回転制御することにより、30-2000eV の領域で高輝度の単色光を得ることが出来る構成となっている。さらに B ブランチには 2 結晶分光器を設置し、軟 X 線アンジュレーターとの組み合わせにより 4000eV までの単色光を供給することが可能である。平面鏡（M3）と、後置集光鏡（M4）を切り替えることにより、3 つの実験ステーションへ単色光を導くことが出来る。

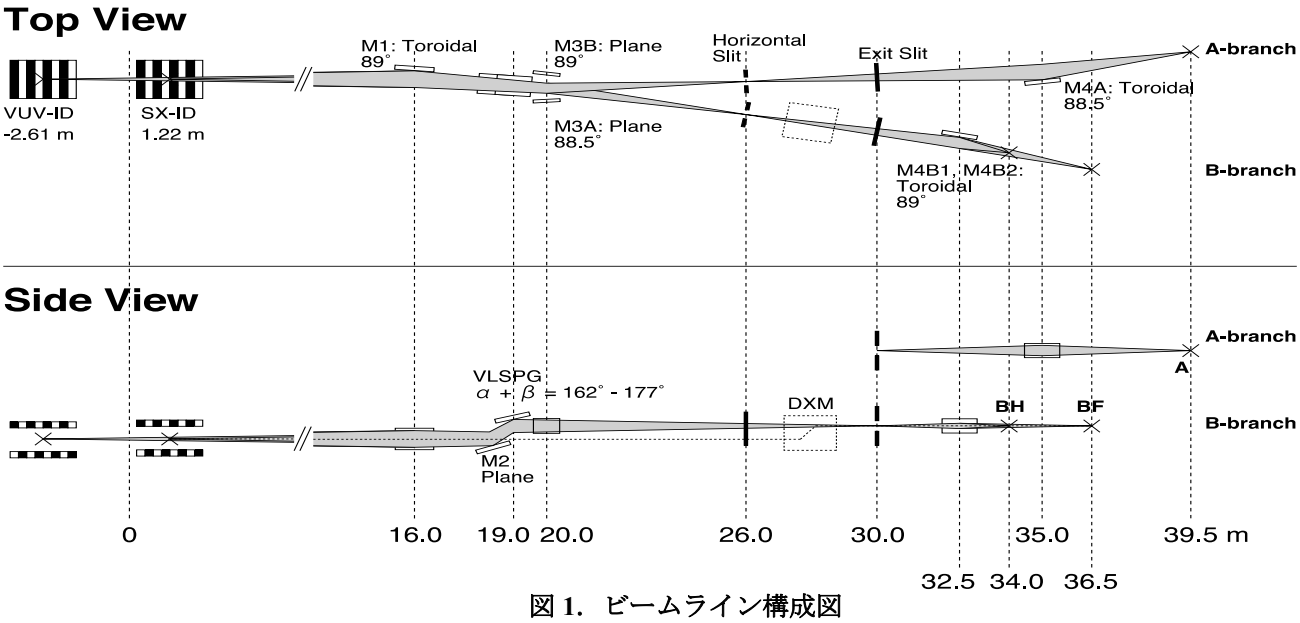


図 1. ビームライン構成図

2　建設スケジュール

放射光実験施設では、約 4000 時間／年のビームタイムを設けて共同利用実験を行っている。ビームタイム中は実験中のビームラインに影響を与えるために、騒音や振動の発生する建設作業をすることが制限されている。このため建設作業は、限られた休止期間を利用しての建設作業となる。今回の建設作業は以下の日程で行った。

2012 年度　　光学設計、概要設計・測量、技術開発（冷却・洗浄・調整機構)、
インターロック仕様決定、放射線遮蔽設計、図面作成・発注、光学素子発注、
ユーティリティ（水・圧空・電気）設計発注、各種真空コンポーネント発注、
動作確認（納品時検査)、コンポーネントプリベーク

2013 年度　春　　既設建築物の撤去、放射線遮蔽（ハッチ）工事、振動対策（コンクリート敷設）工事

2013 年度　夏～秋　設置測量、水・圧空・電力工事、ビームライン設置工事、
光学素子取付・アライメント、真空排気系設置、ベーキング、インターロック設置、
放射線遮蔽設置、完成検査

2013 年度　秋～冬　立ち上げ調整・性能評価

2014 年　　春　　挿入光源 VUV 用アンジュレーター設置　(予定)

3　建設報告

3.1 既設ビームラインの撤去および新ライン設置準備

2013 年春、短い実験停止期間の合間を利用して、既設ビームラインの撤去を行った。旧 BL2 は、ビームライン遮蔽ハッチ、軟 X 線実験ステーション A、実験ハッチ、分光器ハッチ、VUV 実験ステーション B が設置される重装備であり、建築場所の制限から一部にクレーンが使用できない場所もあった。このため作業に人手を要すものとなった。既設建築物の撤去後、床補修、およびユーティリティ（電気・冷却水・圧空配管）の整備が、実験の合間を縫って進められた。

図２．撤去開始時

図３．撤去後

3.2 測量と振動対策

今回の再構築作業おいて、ビームラインの基準線は、リングのバージョンアップによりマグネットの位置が変わっており、建屋の経年変化も無視できないことから、新しく引き直す事が必要とされた。測量により、

挿入光源の上下流に配置される 4 極電磁石から、水平、垂直の基準線を引き出した。また、光学素子の振動対策として、トロイダル鏡(M1)および、前置平面鏡（M2）／不等間隔回平面折格子（VLSPG）チャンバー架台にはコンクリートを敷設し一体化させた。分岐ミラーや 2 結晶分光器付近には、床ピットが存在したためコンクリートで補強し床の強度を高めた。

図４．振動対策

図５．測量

3.3 設置作業

2013 年の夏期停止期間を利用して、新ビームラインの設置作業を行い、各コンポーネントを測量位置に設置した。設置誤差は、真空槽およびダクトで±0.5 mm 以下、光学素子で±0.1 mm 以下になるよう設置した。各光学素子を取り付け後、下流光路上にレーザーを設置して、レーザー光がミラー中心を通り、上流までレーザーが届くように光学素子調整用のモーターで微調した。回折格子は、ホルダーに面内回転の微調機構がないため、レーザー光の反射（回折）を利用して、ホルダーと刻線が直交するように大気中で調整した。M2 ホルダーおよび G ホルダーのマウントは、精密水準器を使って水平を出した。さらに M2 については、オートコリメータを使用して、水平を取ったマウント面とミラー面が平行になるよう調整した。

約 2 ヶ月の設置作業が無事終わり、各真空排気系の立ち上げ、充分な時間を取ったベーキングが行われた結果、到達真空<1×10^{-8} Pa 以下を得ることが出来た。その後、放射線遮蔽設置、インターロック設置、完成検査と順調に進み、予定通りの工程で完成させることが出来た。

図.６　設置

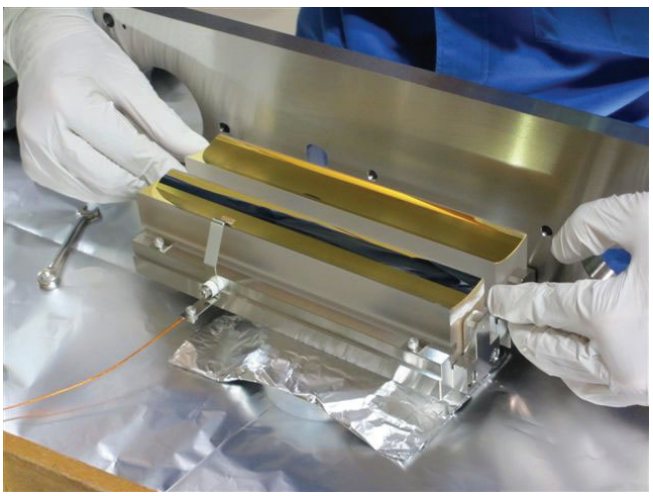


図.７　光学素子取付

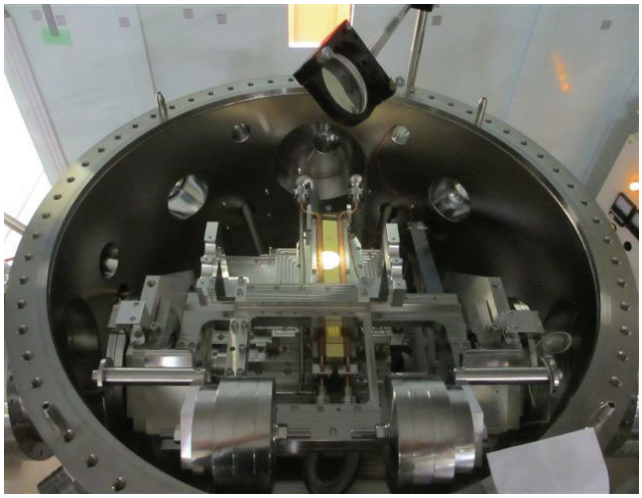


図.８　オートコリメータによるアライメント

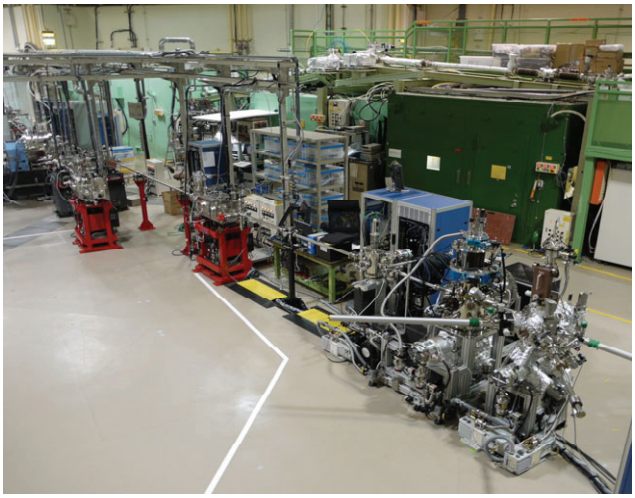


図.９　完成したビームライン

3.4 調整および分解能評価

分解能測定については、ガスのイオン収量スペクトルを測定することにより、求められたスペクトルと既知の自然幅を比較することで求めることが出来る。試料ガスの既知スペクトルの変化を利用して分光器の調整を行う。この報告書を執筆している時点では、まだ調整途中の状況であるが、図 10 は N_2（1s）401 eV 付近における収量スペクトル測定で得られた測定結果である。これによって分解能(E/ΔE) 10000 以上を達成していると見積もることが出来ている。

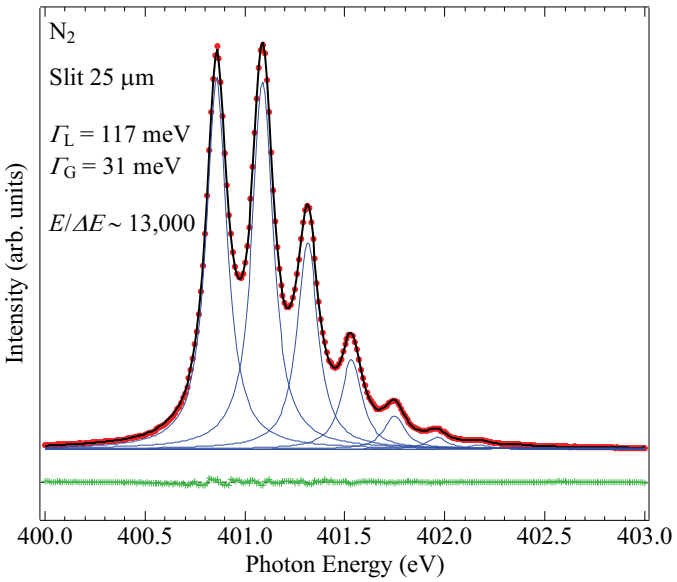


図.10 実測された N_2(1s)収量スペクトル

4　まとめ

広帯域 VUV/SX ビームライン BL2 の建設、立ち上げと関連する技術開発など一連の作業を行った。ビームタイムの休止期間を利用しての日程的に厳しい工事であったが、予定通り建設することが出来た。まだ調整途中の状況ではあるが、評価実験を行った結果、予想していた性能を得ることが出来た。2014 年春には VUV 用アンジュレーターが設置される予定であり、 また今後 2 結晶分光器の調整も順次進めていく予定である。

技術棟改修とその後の安全対策について

○佐藤寿和[A)]，本郷健一[A)]，本郷徹男[A)]，伊藤学[A)]，臼井和也[A)]，井本勇吉[A)]，佐藤史弥[A)]，安藤光輝[A)]，鈴木大介[A)]，田中裕也[A)]，石川光[A)]，永野勇[A)]，入間川克朗[A)]，和田繁男[A)]，佐藤香織[B)]，三浦重幸[C)]

[A)] 東北大学金属材料研究所 テクニカルセンター 機器開発技術グループ

[B)] 東北大学金属材料研究所 テクニカルセンター 企画調整室

[C)] 東北大学金属材料研究所 テクニカルセンター

概要

２０１２年から２０１３年にかけて東北大学金属材料研究所において技術棟Ｉの大規模な改修工事が行われました。最初の建設からおよそ５０年を経て老朽化した建物は耐震性も向上し、内外装共に新築の建物のように生まれ変わりました。改修工事に至った経緯、コンセプトの立案、改修計画から改修・移転までのプロセス、改修・移転により変わった点そしてその後の安全対策等について報告します。

1　経緯

東北大学金属材料研究所 技術棟Ｉは、１９６４年に南側、そして１９７０年に北側と、二期に渡って建設されました。最初に建設されてから５０年弱が経過し、東日本大震災以前から大規模な改修案が持ち上がったこともありますが実現には至らず、震災を経験することとなりました。震災で建物は壁のひび割れや、窓ガラスの破損等の被害を受けました。

図 1 ひび割れた壁

図 2 割れた窓ガラス

震災後には震災復興特別会計による予算がついたこともあり、２０１２年より大規模な改修工事が始まりました。

2　タイムスケジュール

２０１２年当時、技術棟Ｉはテクニカルセンターの機器開発技術グループ、企画調整室そして２つの研究プロジェクトが使用していました。機器開発技術グループは各研究室からの実験装置、部品や試料の作製を請け負っており、改修工事に伴う業務休止期間をできるだけ短くする必要がありました。そのため、改修工事は一期工事（北側建屋）と二期工事（南側建屋）に分け、一期工事が完了した時点で南側建屋にあった機

械加工室を北側建屋に移し、その後二期工事を行うという計画で行われました。

当初の計画では１１月の初めには一期工事が完了し、１１月の終わりまでに完成した北側への引っ越しを完了する予定でしたが、工事期間が延びたため、結局引っ越しが完了したのは１２月の終わりでした。また二期工事も期間が延びたため、結局すべての引っ越しが完了したのは当初の計画よりも二ヵ月近くおくれ２０１３年の５月の終わりでした。

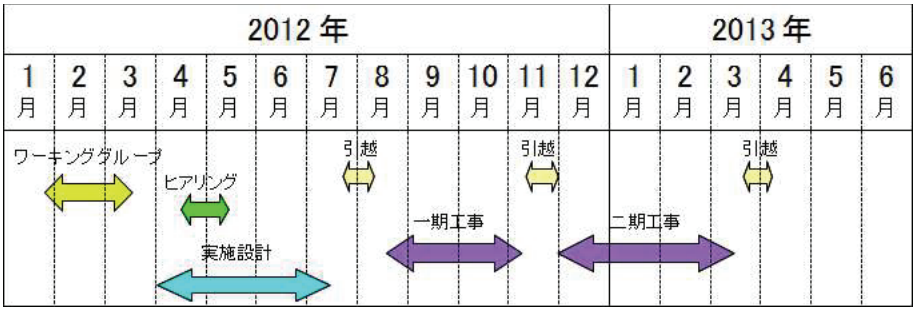


図 3 当初計画されたタイムテーブル

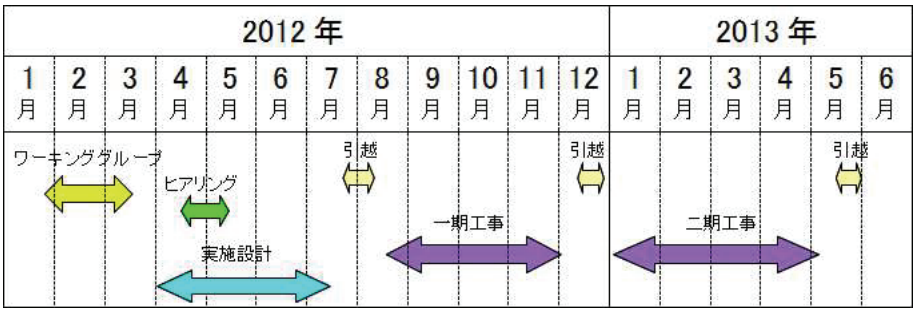


図 4 実際のタイムテーブル

3　改修前後変更点

テクニカルセンターの機器開発技術グループでは研究者からの依頼に応じて機器類の製作・修理や試料の製作等を行っています。改修前、依頼受付を行う場所は２階の設計室、加工は１階の機械加工室や溶接室で行っていたため、依頼内容によって機械加工担当者や溶接担当者と打ち合わせが必要な場合、１階と２階を行き来しなければならず、非常に不便でした。また、機器開発技術グループでは研究者が自ら工作機械を操作して工作を行うための工作指導室と呼ばれる部屋が２階にありましたが、材料の払い出しや切り出しをする場合には１階にある材料倉庫に下りていかなくてはならずやはり不便な状況でした。改修後、機器設計室と工作指導室はともに１階に移動し、業務の効率を改善することができました。当初は機器開発技術グループ居室も２階から１階に移動したいという要望がありましたが、結局スペースが確保できず、実現には至りませんでした。

また、改修前には NC 工作機械や切屑を吹き飛ばすためのコンプレッサを複数台使用していましたが、改修後には専用のコンプレッサ室を設け、そこに大型のコンプレッサを設置し、機械加工室の天井に張り巡らしたエアー配管を通じて必要な場所に圧縮空気を供給できるようにしました。これにより、コンプレッサの騒音もなくなり、さらエアーの供給口を多数設けたため機械加工室内の多くの場所で圧縮空気が使えるようになり利便性が向上しました。

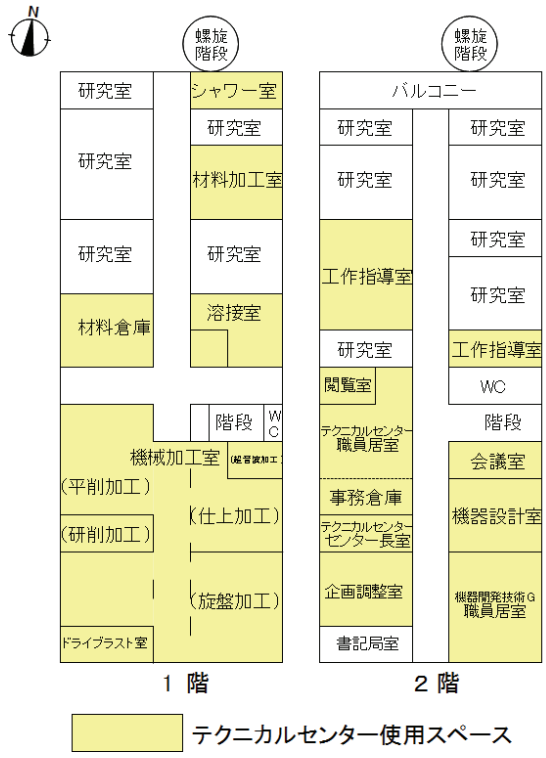


図 5 改修前の技術棟 I の配置図

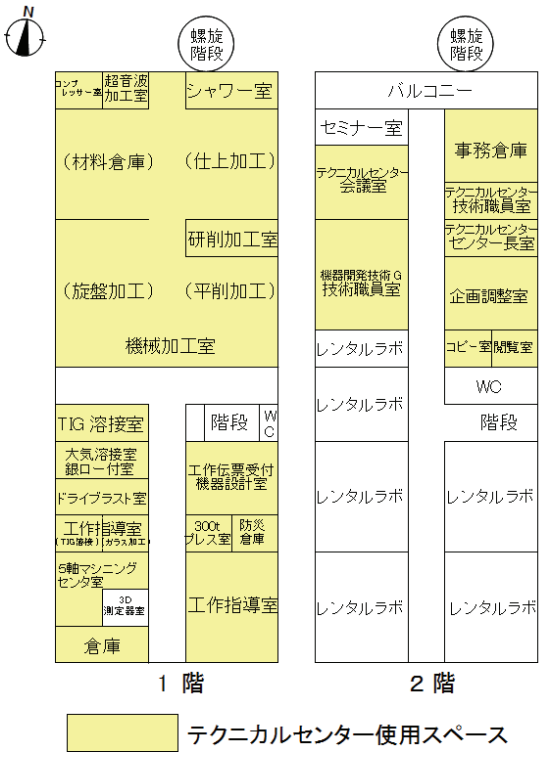


図 6 改修後の技術棟 I の配置図

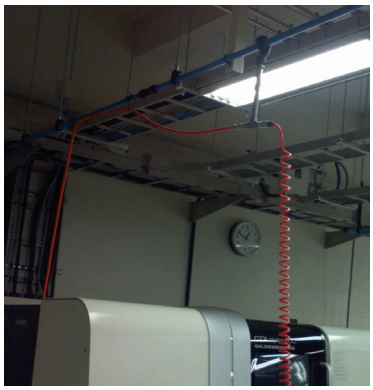


図 7 エアー配管と供給口

図 8 耐震補強用ブレス

4 改修後の安全対策

改修工事により建物自体の耐震性は向上しました。しかし大きな地震の際は建物自体が無事でも棚やキャビネット等の家具が転倒し、人的・物的被害を生じる場合があります。不幸中の幸いにして東日本大震災の際、我々の工場においては器物の落下・転倒による大きな被害はありませんでしたが、同じ東北大学の別の機械工場では高価なフライス盤が転倒し完全に壊れてしまったという報告がありました。このような被害を出さないための安全対策として改修後にキャビネット等の耐震固定、工作機械等の転倒防止措置を行いました。

図 9 キャビネットの耐震固定

図 10フライス盤の転倒防止バー

5　反省点

今回のような建物の大規模な改修と、それにともなう機器類や什器類の移転作業は私にとっては初めての経験で、分からないことばかりでした。部屋、照明、電機設備、水道配管、エアー配管、材料倉庫の材料棚、機械、什器等のレイアウト作業、移設物品・廃棄物品のリストアップ、機械物品の仮置き場の確保、新規購入物品の選定作業などやることがたくさんあり、しかも期限がかなりタイトだったため皆かなり大変な思いをしました。慣れない作業が多いため、ミスや取りこぼしがあり、施設部の方々や事務部の方々には大分ご迷惑をかけたかと思います。また、部屋のレイアウトなども、後になってみると「機械加工室内にパーティションで区切られた休憩室を作ればよかった」、「この場所にヒータがあるのはすごく邪魔だ」、「もっとこの辺にもコンセントがあったらな」、「グラインダーの集塵機の屋外廃棄設備を付けてもらうんだった」「SketchUp などの 3D モデリングソフトを使って、ビジュアルにプランニングして細部のレイアウトを検討するべきだった」などといった細かな反省点が浮かびあがってきました。おそらく私が定年退職するまでこのような大規模な改築や移転は無いと思いますが、もし別の機会があった場合はこれらの教訓を生かしたいと思います。

高磁場超伝導線材の引張歪印加機構プローブの開発

○近藤聖彦[A)]，青山正樹[A)]，杉戸正治[A)]，菱沼良光[B)]

[A)] 自然科学研究機構　分子科学研究所　装置開発室

[B)] 自然科学研究機構　核融合科学研究所

1　はじめに

民生・医療・エネルギーなどの分野において、高磁場超伝導線材の適用を考慮した機器の研究活動が活発になっている。高磁場下の超伝導線材は僅かなひずみの印加によって、臨界電流（超伝導状態で通電できる最大の電流量）特性の劣化が知られているために、線材のねじれなどによって発生する機械的歪は高磁場超伝導マグネットの性能に影響を与える。そのため、次世代の高磁場超伝導マグネットを使用した機器の実現に向けて、臨界電流特性に対する超伝導線材の機械的歪の感受性の鈍化に向けた新材料開発が最重要課題となっている。

例えば、高分解能の分子構造解析に用いられる NMR の実現は、25 テスラの高磁場環境を安定に作り出す必要がある。一方、核融合炉開発では、図 1 に示すようなねじれた形状の超伝導コイルでプラズマを閉じ込める方法が検討されている。これらには、高性能な高磁場超伝導線材を用いた高強度なコイルが適している。

このような背景から、高磁場下で超伝導線材に印加された歪に対する臨界電流の変化を測定する装置が必要となり、欧米では種々の手法が検討されている。現在、提案されている歪印加機構は、非常に複雑で大型装置となり、試験機関や試験方法等の制限を受ける。そこで、分子科学研究所装置開発室では超伝導線材開発に実績のある核融合科学研究所と共同で大型設備が不要かつ簡易的な引張歪印加機構を備えた臨界電流測定プローブを設計した。

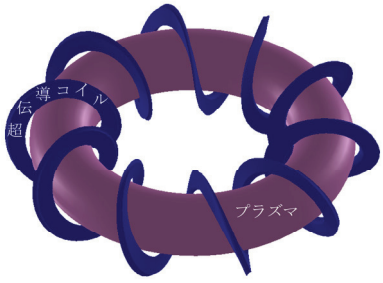


図 1　ねじれた超伝導コイルの模式図

2　引張歪印加機構プローブの設計

高磁場超伝導マグネットに使用される超伝導線材には、強大な電磁力（F=Jc×B×R；Jc:臨界電流、B:磁場、R：コイル半径）が作用する。そのため、超伝導線材には大きな電磁力や極低温から室温までの温度変化により発生する熱応力に耐える十分な機械的強度が要求される。素線段階における通常の臨界電流特性評価は、汎用のソレノイド型超伝導マグネットで高磁場を発生しその環境下で臨界電流を測定する。そこで、高磁場下で超伝導線材に印加された歪に対する臨界電流の変化を評価するにあたり、共同利用で開放されている物質・材料研究機構のソレノイド型 18 テスラ超伝導マグネットシステム（以後、高磁場装置と

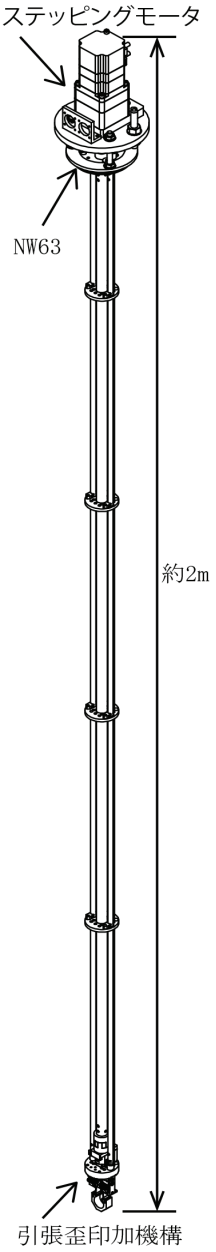


図 2　引張歪印加機構プローブの全体図

呼ぶ）を用いるので、高磁場装置に整合した測定プローブが必要となった。高磁場装置のボア径は 52mm と小さいため、この径内に収まる引張歪印加機構を備えるプローブを思案して設計を行った。図 2 に設計した引張歪印加機構プローブの全体図を示す。高磁場装置の磁場中心はプローブの挿入口となる NW63 フランジ面から約 1950mm 下方にあるため、この位置が線材取付け部になるように、引張歪印加機構と NW63 フランジをステンレスパイプで接続するので本プローブの全長は2,000mm より長くなった。

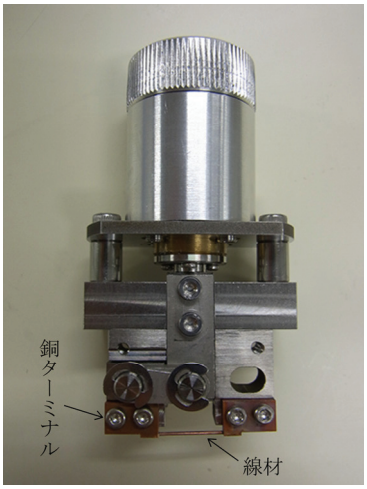
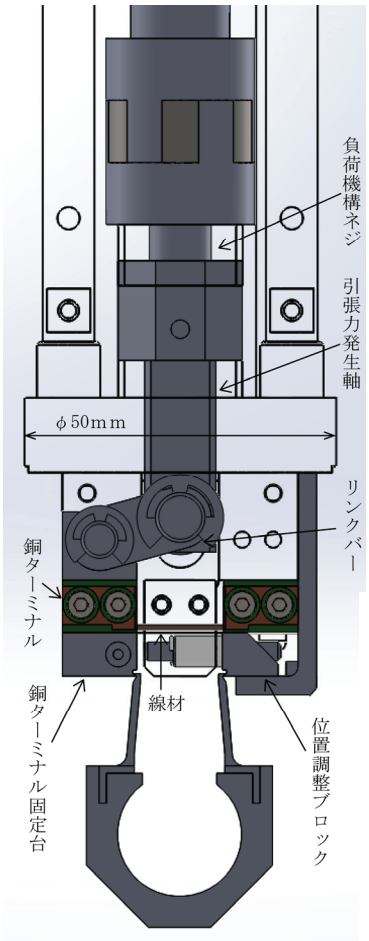


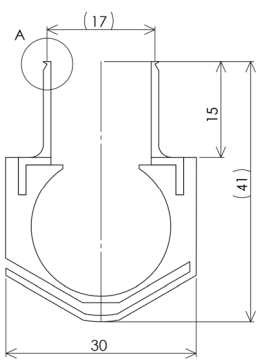
図 3　引張歪印加機構の試作機

3　引張歪印加機構

改良を重ねて図 3 に示すような引張歪印加機構の試作機を製作し、銅ターミナル（電極に相当）にハンダ接合した超伝導線材が、一様に引っ張られることを確認した。この試作機をさらに改良し設計した最大径が 50mm の引張歪印加機構の概略図（線材に通電する電流リードなどは省略している）を図 4(a)に示す。この機構は、負荷機構ネジを回転することにより、引張力発生軸が押し下げられ、この発生軸とリンクバーで連結されている銅ターミナル固定台がガイドに沿って水平方向に移動するので、線材に引張荷重が負荷される構造となっている。この機構で、線材径にもよるが、最大 2.5%（線材径：1.00mm）相当までの引張変形変位量が可能となる。



(a) 引張歪印加機構



(b) クリップゲージ

図 4　設計した引張歪印加機構とクリップゲージの概略図

負荷機構ネジの回転は、NW63 フランジの上部に設置したステッピングモータ（最大トルク：20Nm）を用いて行う。このモータと負荷機構ネジは専用のカップリングを用いてステンレスパイプで接続している。銅ターミナルと固定台の間には、絶縁するためにスペーサとして FRP を挟んで固定を行う。

高磁場かつ極低温下の線材の変位測定には、ひずみゲージを用いるのが一般的であるが、使用する線材径は 1.00mm 程度と小さくゲージを直接貼付することが難しいので図 4(b)に示す共和電業製のクリップゲージを用いる。これは円弧状の板バネに歪ゲージが貼付してあり、変位量が歪量として測定できる。また、クリップゲージの先端（A 部）は線接触となるようにナイフエッジ形状となっている。このエッジの一端を位置調整ブロックに取り付けることで、プローブ上部の NW63 フランジに取り付けている校正用ロッドを上下方向に移動させるだけで、歪ゲージ出力の変化を校正できる。

4　まとめ

高磁場かつ極低温環境下において超伝導線材の歪量と臨界電流量を測定できる引張歪印加機構プローブを設計した。現在、簡易な試作機を用いて窒素温度下の動作確認を行っており、この終了後、製作に取り掛かる予定である。また、代表的な Nb_3Sn 超伝導線材(線材径：1.00mm)を用いて、引張変形変位量と引張荷重等の関係について計測する予定である。

スイッチング電源及びノイズフィルターからの漏洩電流調査結果と対策

○荒川　大 A)

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

既成品の電源回路は大半がスイッチング電源であり、スイッチングノイズを抑制するために市販のノイズフィルターが今日では多用されている。既製品のノイズフィルターや電源からの漏洩電流は一般的に 1mA 程度と低く、通常ではあまり問題にならないが一度に数多く併用すると漏洩電流が無視できなくなる。

高エネルギー加速器研究機構のコンパクト ERL のメインリニアックで使用を予定し、新規設置した高周波増幅器からの地絡電流を詳細に調査した結果、上記のような漏洩電流が積算されて約 50mA にも達していたことが判明した。漏洩電流の詳細調査過程と対策方法について報告する。

1　漏洩電流調査の動機

新規に購入して設置した高周波増幅器（R&K 社製：型番 CA1300BW10-6372R 型）を試験していた段階で施設部電気係より地絡（漏洩）電流が大きいとの指摘を受けた。通常新品の電気製品が地絡することは非常に稀であることから、詳細な調査の必要性を感じたため実施することにした。

図 1－1．高周波増幅器の外観写真

高周波増幅器の主要諸元		
増幅中心周波数		1300MHz
周波数帯域幅		±5MHz
受電ﾌﾞﾚｰｶｰ		3相200V
		200A
最大出力		16kW
冷却方法		水冷
外観	高さ	2200mm
	幅	800mm
	奥行き	1100mm
構成		
高周波増幅ﾕﾆｯﾄの数		12台
ﾄﾞﾗｲﾊﾞｰｱﾝﾌﾟﾕﾆｯﾄ		1台
制御ﾕﾆｯﾄ		1台

表１－２．高周波増幅器の諸元表

2　調査に使用した CT

市販のデジタルクランプメーターでは地絡電流の周波数や位相など詳しい情報が得られないことも多い。また、専用の測定器等も販売されているとは思うが、納期等の問題があることから身近にある部品を使用し地絡電流測定用 Current Transformer（CT）を自作した[1−7]。完成した CT は特筆すべきほどの性能ではないが、内径 50mm のコアを使用することで電力線を通すことが可能な口径を確保し、50Hz 付近で平坦な特性が得られ、地絡電流の位相評価には十分な性能であるため、増幅度の校正作業後に使用した。

地絡電流測定用CTの諸元		
ｺｱ材	TDK　PE22 材	
内径	約50	mm
外径	約80	mm
厚さ	約20	mm
検出ｺｲﾙ巻き数	250	回
信号処理回路 入力ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ	2	Ω
出力保護抵抗	50	Ω
出力は高ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽにて観測のこと		
低域ｶｯﾄｵﾌ周波数	3～4	Hz
高域ｶｯﾄｵﾌ周波数	800	Hz
感度	0.1	A/V

図２－１．　CT の諸元表

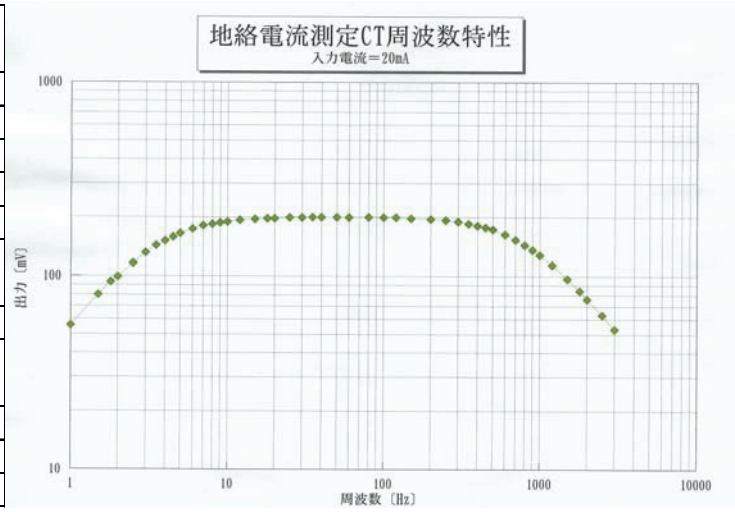


図２－２．　CT の周波数特性

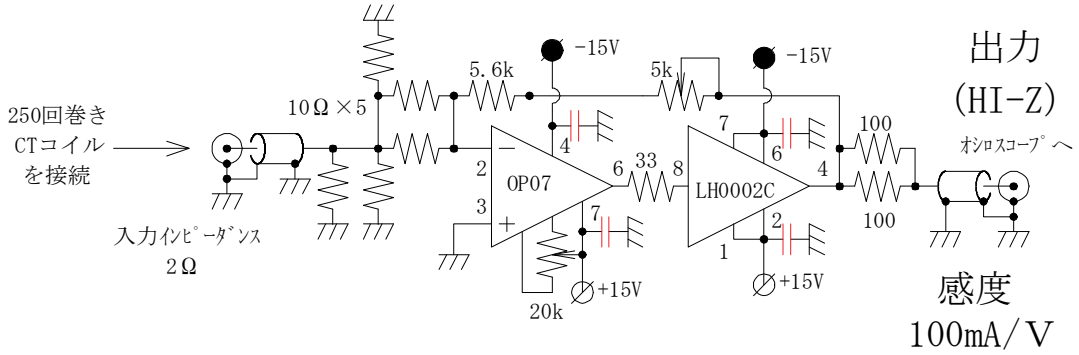


図２－２．地絡電流測定用 CT 信号処理回路図面

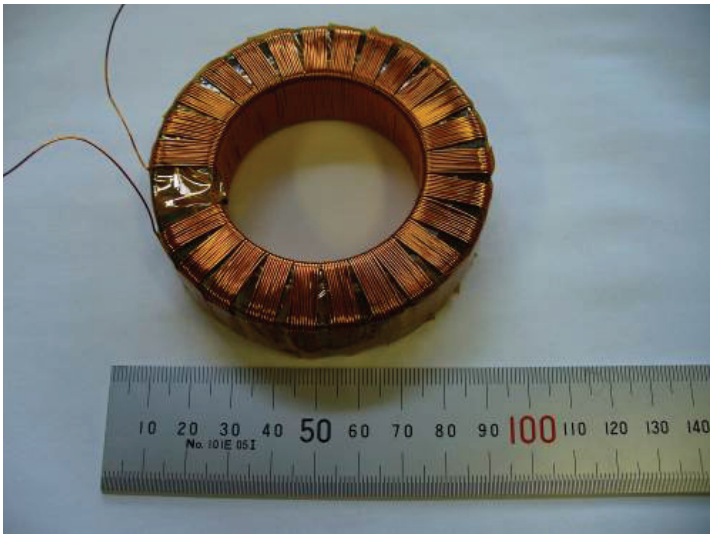


図２－３．巻き線を終えた CT の外観（テーピング前）

3　分電盤の電圧と漏洩電流

漏洩電流調査のはじめに漏洩電流と分電盤の 3 相 200V との電圧関係を比較するため分圧器を使って各相の電圧を調べたところ、次のようなことがわかった。調査前には図３－１に示すＹ結線の変圧器から中性点接地の３相交流を想像していた。しかし、高周波増幅器で受電していた交流は図３－２に示すΔ結線の変圧器からであり、Δ結線の変圧器を用いる場合など中性点による接地が取れない場合には高圧側からの混触防止のため、低圧側３相のうち１相をＢ種接地に接続することが法規によって規定されている [8] 。

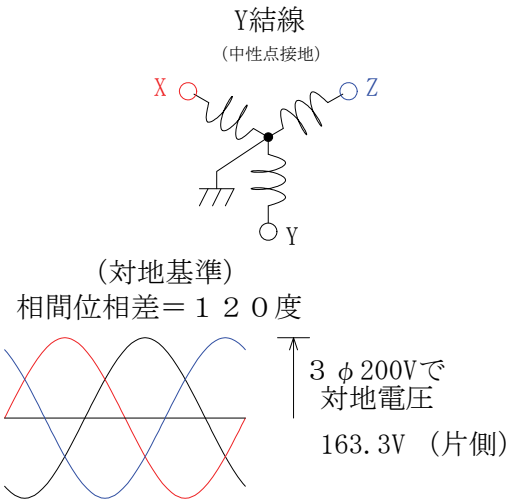


図３－１．Ｙ結線の変圧器（中性点接地）

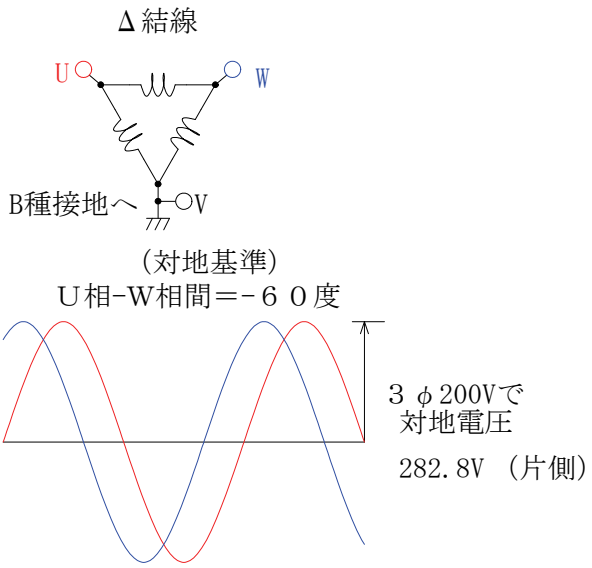
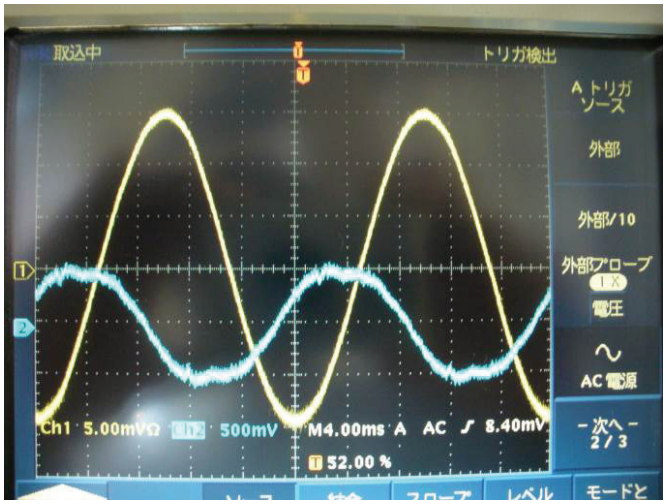


図３－２．Δ結線の変圧器（１相を接地）

受電端子の電圧確認後、高周波増幅器の制御側のみに通電された運転状態（スタンバイモード）での漏洩電流と分電盤の U 相を比較したものが図３－３である。U 相を基準にして考えると-120 度の位相で約 100mA〔peak to peak〕、実効値換算では 37mA の漏洩電流を確認した。更に高周波増幅器全体に通電される運転条件（高周波増幅モード：高周波出力＝０）に切り替えただけで漏洩電流が増え、実効値で約 50ｍA を観測する結果となった。



CH1　3 相 200V（U 相）の電圧波形
（分圧器を通しているため換算値で 100V/div）

CH2　地絡電流測定用 CT 信号処理回路出力波形
換算値（50mA/div）

漏洩（地絡）電流の位相
U相から見て漏洩電流が 6.6msec 前後遅れていることから、約-120 度前後の位相遅れの電流が接地線に流れていることが確認できた。

図３－３．高周波増幅器の漏洩電流調査結果（スタンバイモード）

4　ノイズフィルターの漏洩電流調査

高周波増幅器には 12 台の高周波増幅ユニットが実装され、内部電源配線は図４－１に示す通りであった。

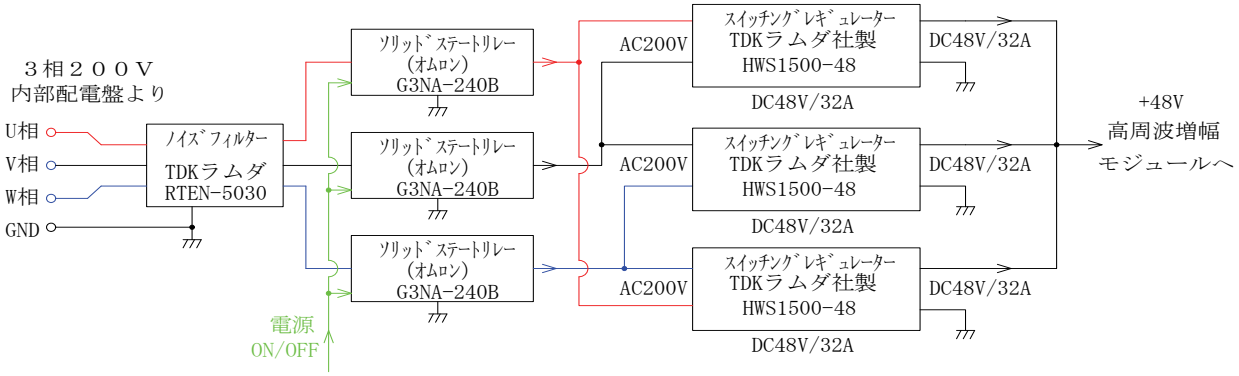


図４－１．高周波増幅ユニット内部の電源配線系統図

スタンバイモードではソリッドステートリレー（SSR）は OFF になっているため、ノイズフィルターからの漏洩電流を疑い、ノイズフィルターから調査を着手した [11] 。尚、表１－２に示したように筐体の構成は高周波増幅ユニットの他にも制御ユニット、ドライバーアンプユニットが存在し、これらにも同様のノイズフィルターは装着されており、ノイズフィルターの数は合計 14 台に及ぶ。ノイズフィルターのパネル面には図４－２に示す様回路図が描かれていたため、測定前の段階において漏洩電流の予想ができた。

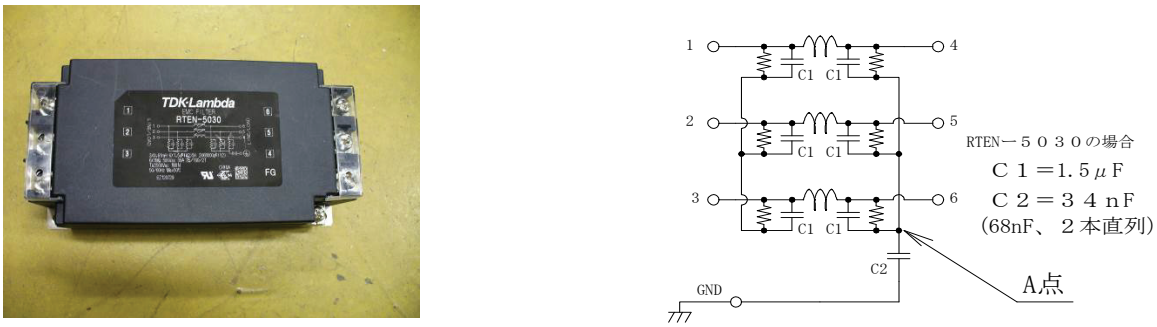


図４－２．ノイズフィルターの写真と回路図

図３－２に示したΔ結線トランスからの電圧が図４－２の回路に接続された場合、C２が C１より十分小さい条件下では図４－３に示すベクトル図のように、A 点には 3 相交流電圧の中性点と同じ 115Ｖ程度の電圧がかかり、C2 を介して接地（GND）に漏洩電流が流れる [9−10] 。尚、３相交流のベクトル図は基準位相をどこにして描くか異論があると思うが、U相から見て漏洩電流が-120 度であったことからここではU相を 120 度、W相を 60 度として表記することにした。

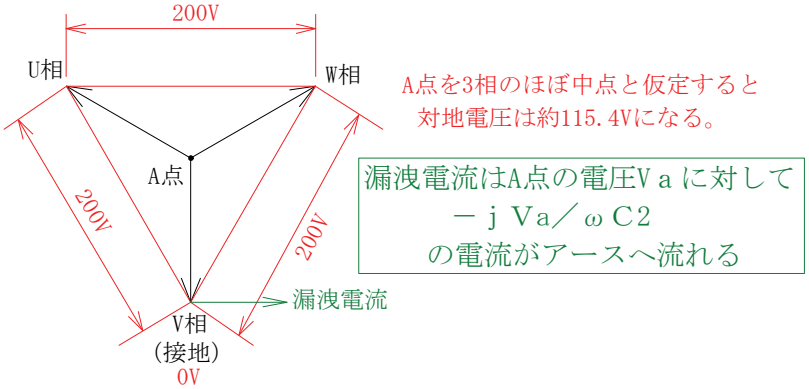


図４－３．ノイズフィルターからの漏洩電流ベクトル図

ノイズフィルター１台あたりの漏洩電流は計算値で約 1.2mA、フィルター単体の漏洩電流測定結果も計算値と同程度であった。装着されている 14 台を単純計算すると 17mA 程度の筈であるが、図３－３で観測された漏洩電流は 37mA であり上記と大きく異なる。スタンバイモードでもノイズフィルター以外の部分から 20mA 程度の漏洩電流があると判断し、ノイズフィルターの負荷についても詳細に調査を実施した。

5　ソリッドステートリレー（SSR）とスイッチング電源からの漏電

図４－１ではノイズフィルターの負荷側には SSR[12]が装着されている。当初は SSR の対地容量が大きいのではないかと疑って SSR の対地容量を測定したが 50pF 前後と十分小さな値であった。しかし SSR が OFF の状態でも接点間容量が 50nF と大きな値であることが部品単体で測定した結果わかった。そこでさらに SSR の負荷にも疑いの目を向け、スイッチング電源[13]の入力端子の対地容量を測定したところ、L 端子と N 端子はそれぞれ約 12.4nF の対地容量であった。図４－１に示した電源回路の接続状態を整理するため、SSR をスイッチとコンデンサーに置き換えて考え、漏洩電流の等価回路として書くと図５－１左側の図になる。

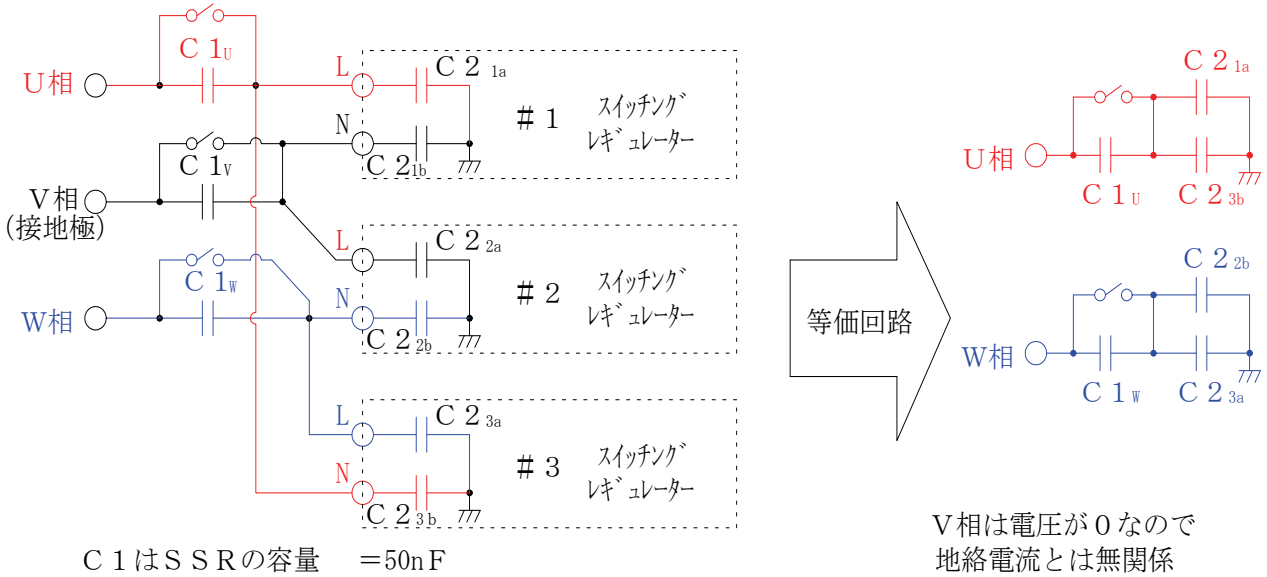
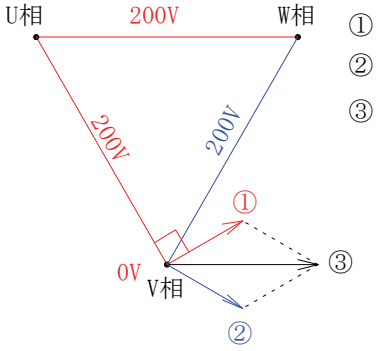


図５－１. SSR とスイッチング電源の接続等価回路

3 相 200V のうち V 相は接地に接続されているために対地電圧は０であるため、漏洩電流の観点から考えるとＶ相に接続された容量には漏洩電流は発生しない。従って図５－１の左側の図は同右側の図に単純化して考えることができる。



①＝U相－対地間容量の電流
②＝W相－対地間容量の電流
③＝①＋②の合成電流

U相－対地とＶ相対地の容量が等しければ
ノイズフィルターを付けた場合と同じ
位相角度の電流が漏洩電流となる。

図５－２. SSR とスイッチング電源の漏洩電流ベクトル図

図５－１の回路に生じる漏洩電流をベクトル図で表現したものが図５－２で、U相、W相から接地に対して生じる漏洩電流は、それぞれの容量から流れる漏洩電流①②の合成として③が接地線に流れ、漏洩電流の大きさは高周波増幅ユニット１台あたりスタンバイモード（SSR＝OFF）で③は約 1.7mA、高周波増幅モード（SSR＝ON）で③は約 2.7mA となる。　従って高周波増器の筐体（全 12 ユニット）の合計は、スタンバイモードで約 20mA、高周波増幅モードで 32mA に達することがわかった。位相角は図４－３と図５－２では同位相の漏洩電流であるため単純に加算される。即ち漏洩電流の総合計は図３－３で観測された測定結果とほぼ一致することから高周波増幅器の筐体全体で発生する漏洩電流の大半は負荷の対地容量による漏洩電流であることがわかった。

6　漏洩電流対策（小規模実験）

漏洩電流を小さくするための解決策を模索する中で、図６－１に示す漏洩電流補正回路を考案し、ノイズフィルター１個のみを使い約 0.9mA（R＝27ｋΩ）の補正を試す小規模実験を行なった。

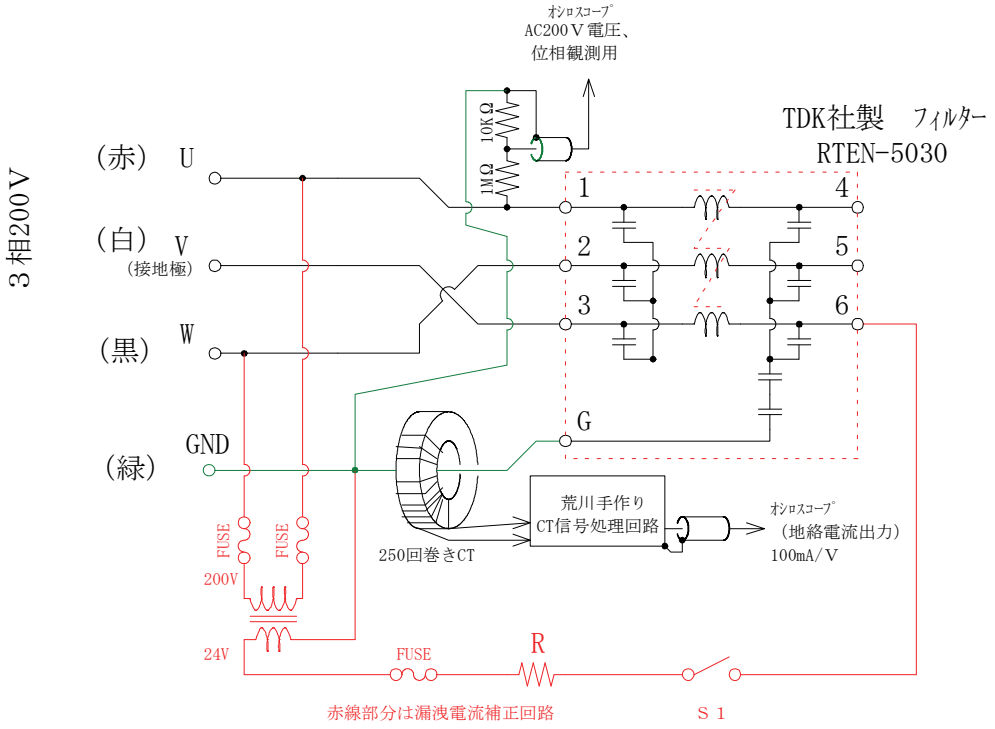


図６－１．漏洩電流補正回路（小規模実験用）

漏洩電流補正回路の動作原理は図４－３、及び図５－２のいずれの場合も対地容量による漏洩電流であり、漏洩電流の位相角がU相とW相の相間電圧に対して平行である。従ってＵ相とW相からトランスで絶縁を取り、接地線とＶ相の間に生じる漏洩電流と逆相の電流を流すことによって漏洩電流を打ち消すものである。

漏洩電流補正回路を付加する上で３相の配電盤接続ミスやトランス極性の誤配線など、万一の事故が起きても小電流で切れる FUSE を補正回路に入れておけば安全性は確保できる。

漏洩電流補正回路で用いるトランスの 2 次側の電圧は原理的には何Ｖでも良いが、あまり電圧が高いと補正回路の抵抗 R の発熱が大きくなるので無駄な発熱を生じる。逆にトランスの 2 次側電圧を極端に低くし過ぎると 3 相 200V のＶ相は接地されているとは言え、並列に接続する分電盤等から電力を供給している場合には２～３Ｖ程度の電位持つことがあるため、補正電流が不安定になることが懸念される。

これらの理由から 2 次側の電圧は電源電圧の 200V に対して 1 割前後が良好な値と判断し、24V にした。

補正前と補正後の漏洩電流の様子を図６－２及び図６－３に示す。補正電流を少し控えめに約 0.9mA としたため、補正後にも多少漏洩電流が見受けられるが、大きく漏洩電流を打ち消すことができることをこの実験で確認することができたので実機による実証実験を行なうことにした。

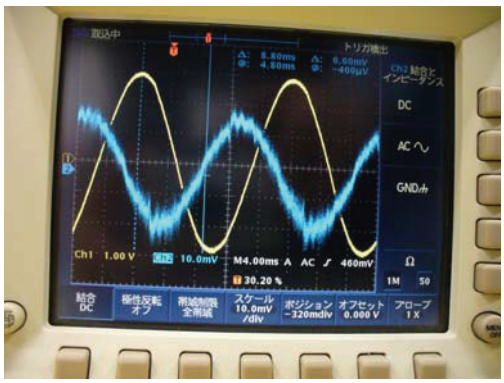


図６－２．漏洩電流補正前（S1＝OFF）
CH1（黄）３相 200V（U 相）電圧　100V/div

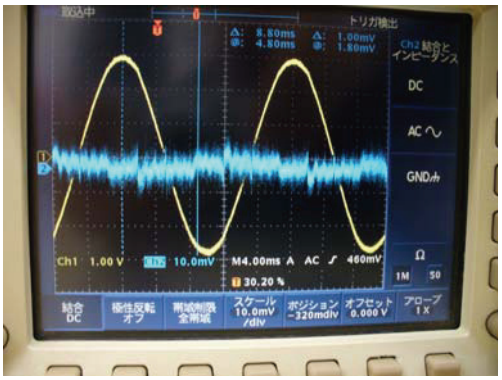


図６－３．漏洩電流補正後（S1=ON）
CH2（青）地絡電流測定用 CT 波形　1mA/div

7　漏洩電流対策（実機による実証実験）

高周波増幅器に漏洩電流補正回路を取り付け、有効性を確認する実証実験を高周波増幅器製造元の立ち合いの下で行なった。初期の調査を行なった段階（図３－３の写真を撮影した時）から建設が進行し、実証実験を行なった時点では高周波出力を負荷に接続する導波管が設置されていたため、図７－１に示す様に自作の CT を１台増設し、受電電流３相の和も確認することができるセットアップにした。

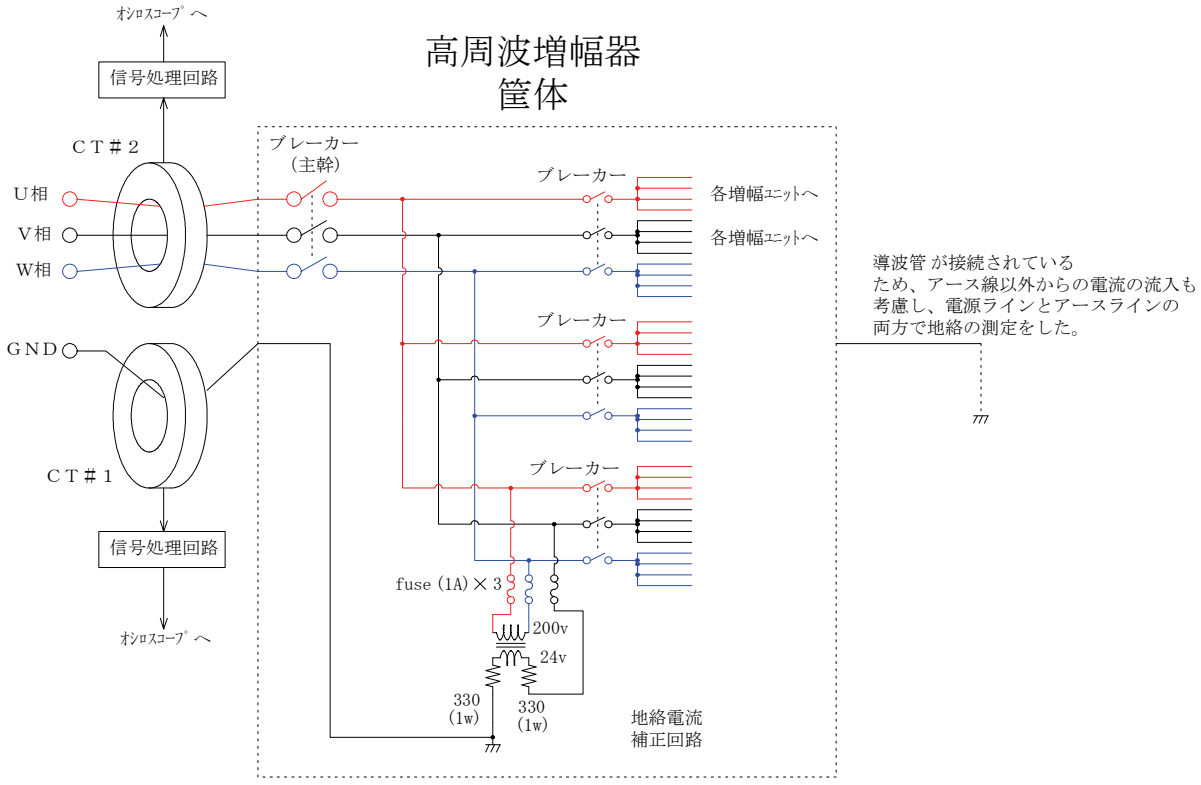


図７－１．漏洩電流補正の実証試験セットアップ

実証実験では漏洩電流に対して約 36mA の補正を行なう前後で測定を行なった。
尚、いずれの写真も CH1 は位相比較のための 3 相 200V（U 相）の電圧で、レンジは 100V/div である。
又、読み取りを正確にするために漏洩電流補正後の写真はオシロスコープのレンジを拡大表示している。

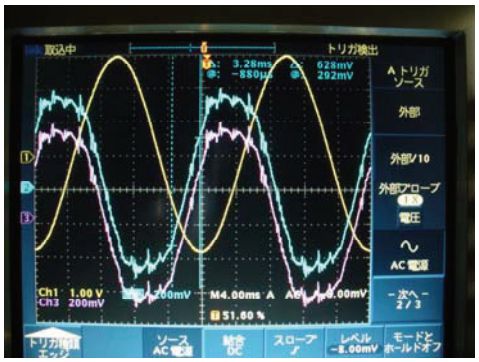


図７－２．スタンバイモード（漏洩電流補正前）
CH2　CT#1　漏洩電流　（20mA/div）
CH3　CT#2　漏洩電流　（20mA/div）

図７－３．スタンバイモード（漏洩電流補正後）
CH2　CT#1　漏洩電流　（10mA/div）
CH3　CT#2　漏洩電流　（10mA/div）

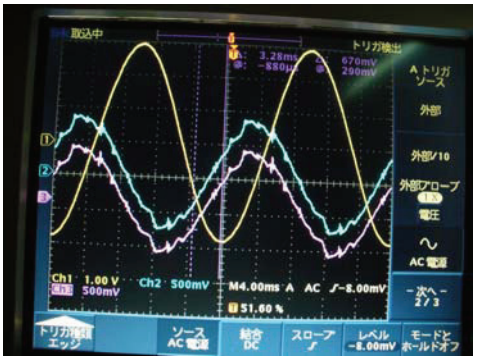


図７－４．高周波増幅モード（漏洩電流補正前）
高周波出力＝０
CH2　CT#1　漏洩電流　（50mA/div）
CH3　CT#2　漏洩電流　（50mA/div）

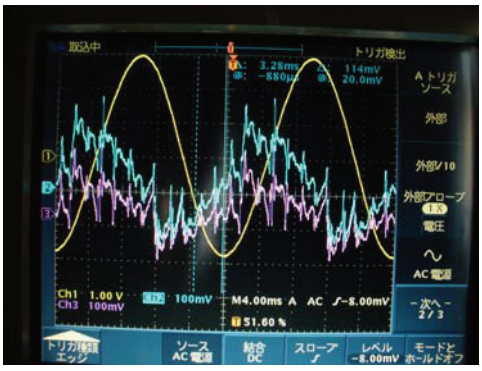


図７－５．高周波増幅モード（漏洩電流補正後）
高周波出力＝０
CH2　CT#1　漏洩電流　（10mA/div）
CH3　CT#2　漏洩電流　（10mA/div）

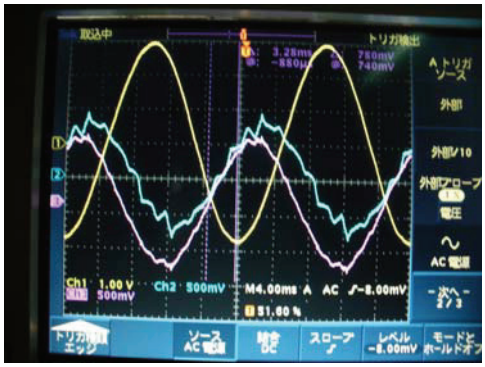


図７－６．高周波増幅モード（漏洩電流補正前）
高周波出力＝１５ｋW
CH2　CT#1　漏洩電流　（50mA/div）
CH3　CT#2　漏洩電流　（50mA/div）

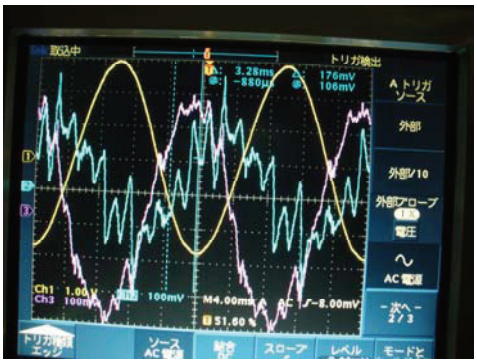


図７－７．高周波増幅モード（漏洩電流補正後）
高周波出力＝１５ｋW
CH2　CT#1　漏洩電流　（10mA/div）
CH3　CT#2　漏洩電流　（10mA/div）

同じ高周波増幅モードでも図７－４～図７－７に示す様、高周波出力（出力負荷）が増加するにつれ、漏洩電流が増加することが確認された。高周波出力の増加に伴う漏洩電流増加分については現在のところ原因特定には至っていないが、増加分は 10mA 強程度であるため、現時点では実用上はあまり問題にならないと思われる。図７－８のグラフにまとめたようにいずれの条件でも漏洩電流補正回路が動作している時の方が漏洩電流は十分に低く抑制できていることが確認され、漏洩電流補正回路の有効性を証明することができた。

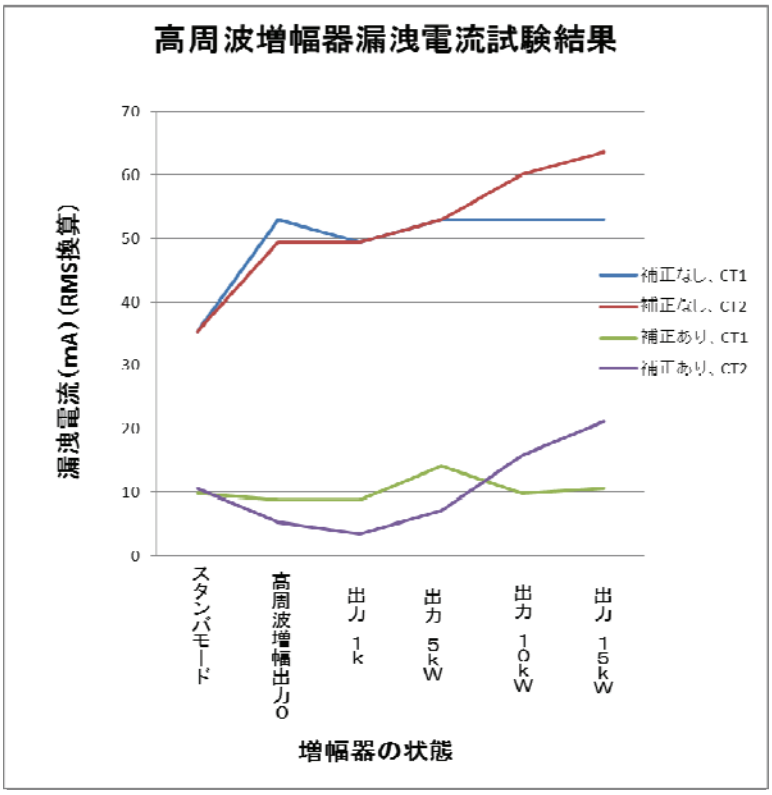


図７－８．高周波増幅器漏洩電流試験結果

8　まとめ

負荷の対地容量性による漏洩電流は、接地が施されていれば電気安全の観点から特段危険なものではない。しかし漏電監視の観点から考えると、常に大きな漏洩電流の存在によって電線の劣化などの本来監視すべき危険な地絡電流が混入しても見落としてしまう危険性が増す。従って漏洩電流は極力抑制する必要がある。

Ｙ結線の変圧器からの受電であればノイズフィルター等の対地容量が大きな負荷が存在しても、対地容量による漏洩電流は各相がお互いに打消し合うために問題が生じないのだが、施設の変圧器を交換する改修費用は膨大であるため受電変圧器の変更は困難である。Δ結線の変圧器から受電し、対地容量を持つ負荷の接続により漏洩電流が問題となった今回のケースにおいても負荷の筐体内部に漏洩電流補正回路を付加することで解決することが可能であることを今回の実証実験で証明することができた。

現在高周波増幅器の受電部には実効値 100mA で保護する漏電遮断機が取り付けられており、定常的に発生している 50～60mA の漏洩電流に加え、瞬時にノイズ電流等による漏洩電流が加わると 3 相 200V/200A のパワーが大きなブレーカーが遮断される危険性があるため、今回の実験結果を受け現在メーカーと漏洩電流対策について現在協議中である。尚、ここまで３相 200V の漏洩電流について述べてきたが、単相の電源についても漏洩電流により漏電遮断機が動作するなどの問題が発生することがあり、３相の場合と同様に漏洩電流補正回路によって問題解決ができるため、付録にて詳細について記述しておいた。

今後は漏洩電流の低減に努め、より安全な運転に貢献したいと考えている。

謝辞

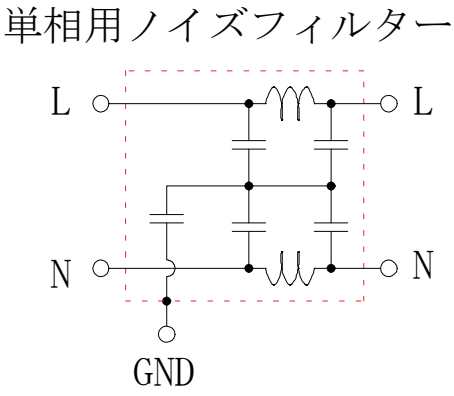
実機による実証実験には（株）R&K の牧野純人氏、長谷川貴俊氏にご協力いただきました。
漏洩電流の調査には竹中たてる氏、施設の電気担当者などにお世話になりました。
ＣＴ製作にあたり、中村英滋氏にはフェライトコアの提供をしていただきました。
この場をお借りしてご協力してくださった方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

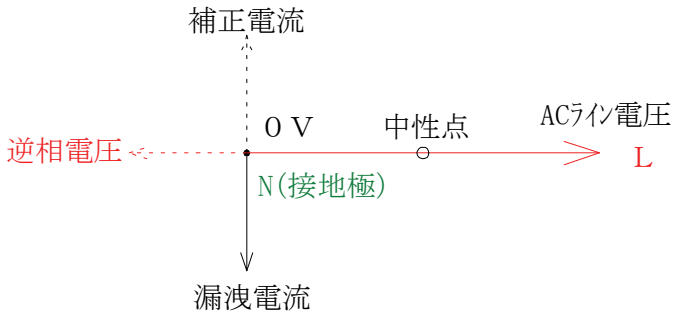
[1] 霜田光一　桜井捷海　共著、　エレクトロニクスの基礎（新版）、　裳華房、　新版第 28 版
[2] 岡村廸夫　著、　オペアンプ回路の設計、　CQ 出版社、　昭和 51 年 12 月 10 日第 8 版
[3] 山村英穂　著、　トロイダルコア活用百科、　CQ 出版社、　1993 年 7 月 20 日、第 14 版
[4] NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION、　1982 LINEAR DATABOOK
[5] アナログデバイセズ社、　OP07 data sheet　www.analog.com
[6] 平松成範　他共著、　Beam Intensity Monitor for KEK Proton Synchrotron、　KEK-77-21
[7] 荒川　大、　500Mev Beam Transport Line のビーム強度モニター、　KEK Internal 93-9
[8] オーム社編、　よくわかる電検三種④法規、　オーム社、　平成 9 年 10 月 30 日改訂初版
[9] 田中幸吉　前川禎男　共著、　朝倉電気工学講座　電気回路Ｉ、　昭和 50 年 3 月 30 日第 10 版
[10] 小川鉱一　著、　基礎電子工学、（放送大学教材　54533-1-9111）放送大学教育振興会、1991 年 3 月
[11] TDK ラムダ社、　http://www.tdk-lambda.co.jp/products/sps/catalog/jp/jtl_rsen.pdf
[12] オムロン株式会社、　http://www.fa.omron.co.jp/product/item/g3na2029h/index.html
[13] TDK ラムダ社、　http://www.tdk-lambda.co.jp/products/sps/catalog/jp/hws_j.pdf

付録（漏洩電流補正回路の単相への応用例）

本論文では 3 相 200V の対地容量による漏洩電流について述べたが、単相用として販売されている同様のノイズフィルター類（付録図１）やスイッチング電源類も対地容量は結構大きく、0.2～１mA 程度の漏洩電流は発生する可能性がある。従って単相の回路においても対地容量の漏洩電流によって同様な問題が生じ、大量のノイズフィルターやスイッチング電源を１台の筐体の内部で使用すると、漏電遮断機によって電源が遮断されるなどの問題が生じることがある。



付録図１．　単相用フィルターの一例

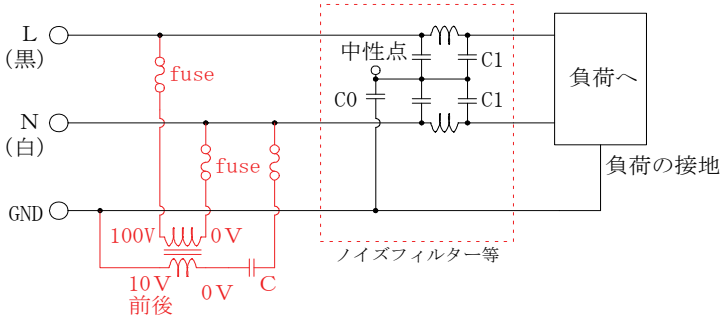


付録図２．　単相ベクトル図

単相からの対地容量による漏洩電流は付録図２に示す様、送電される AC ライン電圧に対して-90 度の位相角で流れる。AC ラインの電圧に対して逆相の電圧を得るのは小型のトランスを用いれば簡単にできる。

従って単相用の漏洩電流補正回路は付録図３に一例を示す様、フィルター等から GND に流出する漏洩電流と同じ電流が GND→N端子へと流れる様にすれば、漏洩電流補正が可能である。

単相用漏洩電流補正回路
（ＡＣ１００Ｖの一例）



赤線部分：漏洩電流補正回路

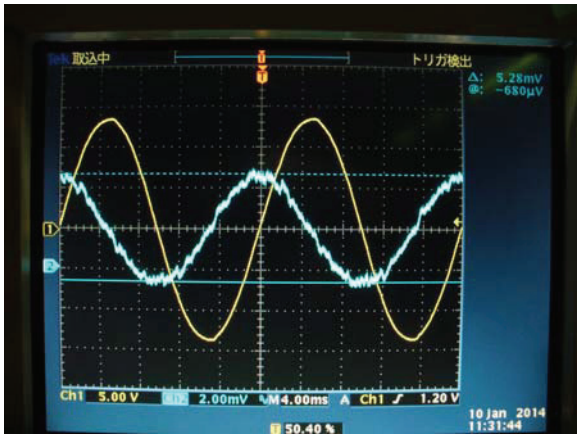
付録図３.（付録）単相用フィルターの漏洩電流補正回路例

漏洩電流は負荷に接続された機器が有する対地容量の和によって決まるが、問題となるほど大きな漏洩電流が生じている場合は多数の機器が１台の筐体に組み込まれた場合が多く、個々の容量把握は困難な場合が少なくないと思われる。そこで漏洩電流の位相がＬ端子の電圧に対して容量性（-90 度の電流）であることを確認の上、漏洩電流から計算して漏洩電流補正回路Ｃやトランスの電圧比を決める手法が実用的であろう。

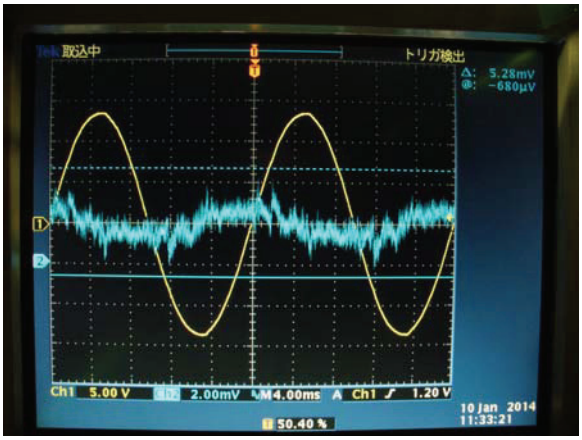
尚、接続ミスや計算ミスがある場合には漏洩電流が増えてしまう可能性があることに加えて、トランスのレアショートなどのトラブルの可能性は否定できないので、AC ラインに接続する部分には FUSE 等を挿入して保護することを推奨する。付録図４は手持ちの単相のノイズフィルター（TDK 社製の ZAC-2205-00U 型）１台の漏洩電流測定した結果であり、漏洩電流を実効値換算すると 0.187[A]であった。これに上記補正回路を付加する小規模実験の結果が付録図５である。

100V：10Ｖのトランスを用いたので計算値ではＣは 0.06μF 前後にすれば漏洩電流は最小になるはずであるが、ここで行なった実験では手持ちのフィルムコンデンサー0.047μF を用いたので若干補正電流量が不足するため漏洩電流成分が残るものの、かなり小さく漏洩電流を抑制できた。

付録図４．　単相 100Ｖ漏洩電流
CH1=AC100V ラインの電圧（50V/div）
CH2=地絡電流測定用 CT 出力　（0.2mA/div）



付録図５．　単相 100V 漏洩電流補正後
CH1=AC100V ラインの電圧（50V/div）
CH2=地絡電流測定用 CT 出力（0.2mA/div）



NC ワイヤカットにおけるリサイクルの取り組みと課題

篠原　維

横浜国立大学　技術部　応用加工技術班

概要

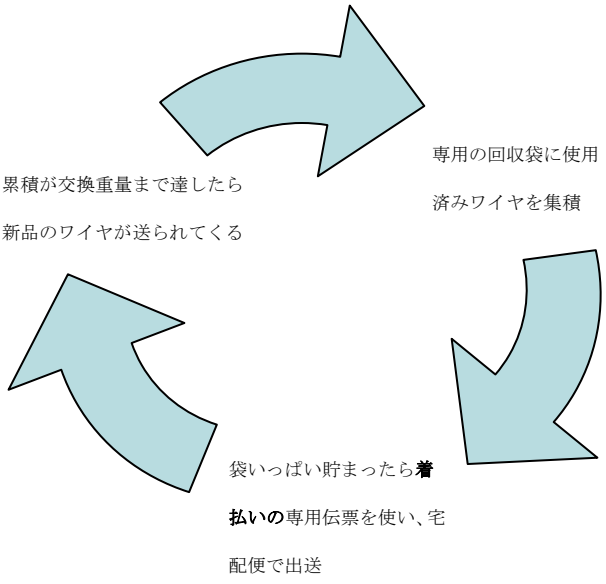
自分が担当する機械工場は、実習工場であるとともに横浜国立大学に所属する学生および職員ならばだれでも利用可能な、加工全般を行うための施設である。このうち事務仕事に関する部分、たとえば紙のリサイクル等についてはすでに取り組んでいたが、加工などで出る産業廃棄物については全くの手付かずであった。今回は NC ワイヤカット放電加工機（以下 NC ワイヤカット）についてリサイクルへの取り組みを行ったので、結果を発表させてもらうとともに、皆さんのご意見を聞かせていただければと思います。

1　目標の設定

リサイクルに取り組み産業廃棄物を減少させること自体はこれからの社会全般で重要なのだが、それによって余分な費用がかさむのは望ましくない。また、一般の工場で出る廃棄量に比べると、当機械工場から出る廃棄量はごく少量なので業者が嫌がるケースもある。当方も回収側も手間や費用がなるべくかからないやり方で実現する事を目標とする。

2　電極線ワイヤのリサイクル

電極線ワイヤのリサイクルは図 1 の流れで行う。特徴は一定重量のワイヤを送ったら新品の電極線ワイヤと交換という形をとるのでお金のやり取りが発生しない事と、使用済みワイヤとの交換率の中に運送料なども含まれるため、仕組みがシンプルなことである。



<参考値>
2014 年 1 月現在の交換率
5kg×4 巻＝20Kg ⇔ 使用済みワイヤ 64Kg

図 1　電極線ワイヤのリサイクル

3　ワイヤボビンの回収

ボビンの回収は、ワイヤ納品時の段ボールに使用済みワイヤボビンを保管していき、6 箱または 8 箱分が貯まったらそれを一つに束ねて業者に送付する。この時も専用の着払い伝票にて宅配便発送するので費用は発生しない。ワイヤボビンの回収については、運送費はワイヤの交換率には含まれておらず、NC ワイヤカット運用時のコストカットには貢献しないが、産業廃棄物の減少という観点からは意義があると考えている。

4　加工液フィルタのリサイクル

加工液フィルタのリサイクルは図 2 の流れで行う。特徴は使用済みフィルタ回収にかかる費用を業者が負担するのでお金のやり取りが発生しない事、回収したフィルタのケースを再利用することで業者はコストを抑えることができる事、その結果としてフィルタ自体の値段が安くなることである。

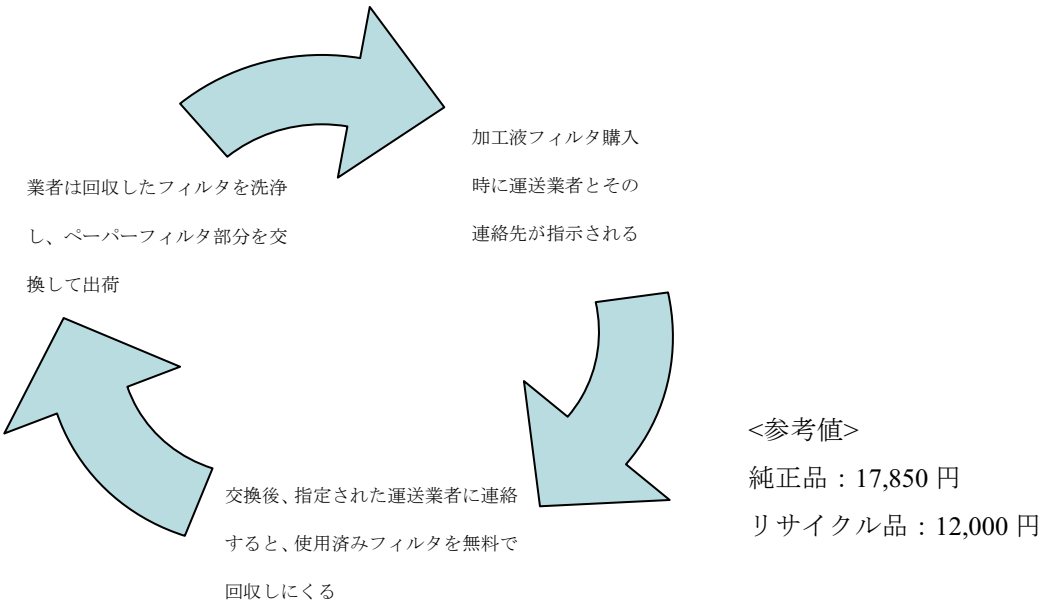


図 2　加工液フィルタのリサイクル

5　リサイクルが実現できなかった消耗品について

イオン交換樹脂については現在納品してもらっている樹脂メーカーに依頼してみたが、NC ワイヤカットのように加工液を循環・再利用させながら使用している場合は、さまざまな金属イオンがどうしても樹脂につくのでリサイクルするのは難しいと断られてしまった。今のところ、方策が立っていない。

加工時にワイヤに荷電するための給電板は、年間で損耗・交換する量がそもそも少ないのでリサイクル化が難しい。他のバイトやエンドミル等の超硬工具なども含めたリサイクルで可能かどうか模索中である。

6　まとめ

今回の取り組みをまとめると以下の通りになります。

・あまり手間のかからないリサイクルを実現し、結果としてコストカットにもつながった。
・イオン交換樹脂と給電板については、今のところリサイクルを実現できていない。

建屋内における湿度分布の研究

○田中　伸晃

A) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

概要

2007 年以来、KEK 施設の温湿度測定を行っている。得られたデータは、環境改善を提案するデータとしても活用している。これまで 7 年間の蓄積から、興味深い特性が見えてきた。

ハドロンホールでの研究をもとに実験室など、「内部に水蒸気発生源を持たず、外気流入は自然換気のみの建屋」においては、空間の湿度は水蒸気の量で示す「絶対湿度 g/m³」で見ると、ほぼ均一に分布するとの仮説を立てた。

今回は、その仮設の検証について報告する。

1　湿度の概念

一般的に湿度は、相対湿度を指す。相対湿度に対するもう一つの概念は、絶対湿度である。

相対湿度は飽和水蒸気量に対して、実際に含まれる水蒸気量の比をいい、単位は“%”である。絶対湿度は、単位容積あたりに含まれる水蒸気量をいい、単位は g/m³である。本研究では特に、絶対湿度の分布に着目して進めていく。

2　2012 年夏季　ハドロンホールの温湿度

茨城県東海村にあるハドロンホールにおける、2012 年夏季（7～9 月）の温湿度について述べる。夏季に絞った理由は、空調の除湿効果により、外気との比較が容易であるためである。

2-1　測定機器（常設）の配置

T&D 社製　おんどとり TR-72

温度湿度測定と、データ収集機能を持つロガー

測定間隔　1 時間ごと

設置場所

ホール北側　：北 8 スパンの地上と地下

ホール南側　：南 4 スパンの地上と地下

合計 4 台

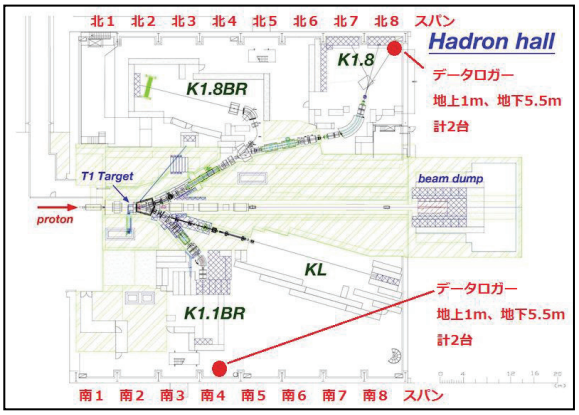


図 1　ハドロンホール平面図

2-2　ハドロンホールの空調機等

1　除湿機　：ホール北に 2 台、ホール南に 1 台。200L/day（メーカー公表）の除湿量

2　空調機　：KL エリアに計 32kw の空調機。K1.8BR エリアに計 8kw の空調機。K1.8 エリアに計 16kw の空調機。その他、実験用ハウスの空調がある。

除湿機は、ホール全体の除湿。空調機は各エリアを空調している。数値は特定できないが、各エリアの

空調も、ハドロンホール全体の除湿に寄与していると考えられる。

2-3　外気の流入状況

基本的に自然換気のみ。ハドロンホールの、建材の継目や建具の隙間からの自然流入と、ドアやシャッターの開閉に伴う流入から成る。

2-4　2012 年 7 月～9 月におけるハドロンホールの温湿度

2012 年 7 月～9 月における外気（東海村）と HD ホール 4 ヵ所の気温、湿度のグラフを示す。

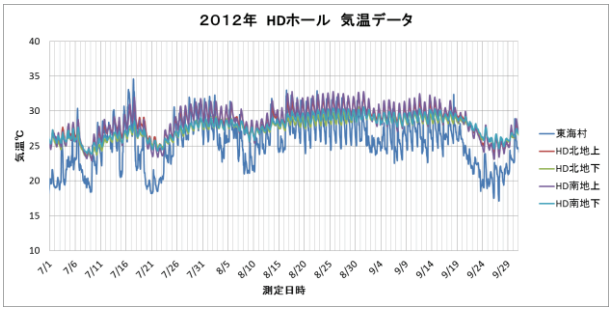


図 2　2012 年 7～9 月東海村と HD ホールの気温

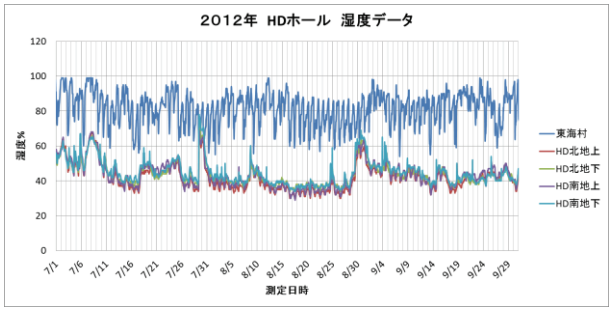


図 3　2012 年 7～9 月　東海村と HD ホールの湿度

東海村 平均気温℃	HD 北地上 平均気温℃	HD 北地下 平均気温℃
25.40	28.42	27.46
HD 南地上 平均気温℃	HD 南地下 平均気温℃	
28.40	27.74	

東海村 平均湿度%	HD 北地上 平均湿度%	HD 北地下 平均湿度%
81.62	41.80	43.84
HD 南地上 平均湿度%	HD 南地下 平均湿度%	
43.63	44.91	

表　2012 年 7～9 月　東海村と HD ホール　平均気温と平均湿度

気温に関して、ハドロンホールは外気と比べ高温傾向である。1 時間ごとのデータでは、4 ヵ所の最大と最小の差が 4℃程度になることもあるが、平均では最大と最小の差は、1.32℃である。

次に、湿度に関して。外気の湿度は変化が著しい。一日のなかでも大きく、変化する。ハドロンホールは外気と比べ極めて低湿で半分程度の数値である。これは、ホール内の除湿機等が機能しているためである。1 時間ごとのデータでは、4 ヵ所の最大と最小の差が 20%程度になることもあるが、平均では最大と最小の差は、4.1%である。

ハドロンホール内においては、気温は地上が地下より高く、湿度は地下が地上より高くなっている。南北別では、気温の差はほとんどなく、湿度は若干、南側が高い結果となった。グラフの傾きは気温湿度とも、4 ヵ所とも同様の傾きである。数値の差も小さく、気温湿度ともほぼ、均一と考えていい。

建物が大型であることと、地上高さ 18.5m の建屋において、測定地点が地下と地上 1m であり、日射の影響を直接、受けにくい場所であることが、これらの結果になったと思われる。

2012 年 7 月～9 月における外気（東海村）と HD ホール 4 ヵ所の絶対湿度のグラフを示す。

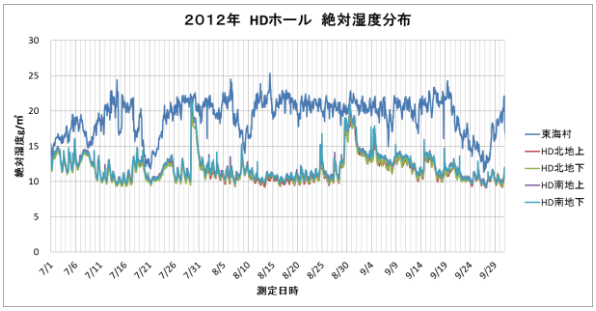


図 4　2012 年 7～9 月
東海村と HD ホール　絶対湿度

東海村　平均絶対湿度 g/m³	HD北地上平均絶対湿度 g/m³	HD北地下平均絶対湿度 g/m³
19.26	11.61	11.59
HD 南地上平均絶対湿度 g/m³	HD南地下平均絶対湿度 g/m³	
12.11	12.05	

表　2012 年 7～9 月
東海村と HD ホール　平均絶対湿度

３番目に、絶対湿度に関して。

外気のデータを見ると、湿度（相対湿度）は短時間で激しく変化するのに比べ、絶対湿度の変化は緩やかに見える。数値的には、ハドロンホールは外気比 60%程度の値である。絶対湿度においても、ホール内が外気とくらべ、低湿であるとの結果が出ている。1 時間ごとのデータでは、4 ヵ所の最大と最小の差が 5g/㎥程度になることもあるが、平均では最大と最小の差は、0.72g/㎥である。

以上から、ハドロンホール内の絶対湿度は、「ほぼ均一に分布する」と考えた。

3　絶対湿度分布調査実施の背景

2007 年以来のデータを見ると、ハドロンホールの絶対湿度は、上記の 2012 年夏季と同様、「ほぼ均一分布」との結果であった。この「ほぼ均一分布」との結論に対し、異議が唱えられた。

理由として、以下の点が指摘された。

1　除湿機等の配列がホール内で不均一であり、乾燥した空気が均等に行き渡らないのではないか
2　除湿機等の乾燥空気が届く範囲は、限定的である
3　測定地点が、ホール南北の地下と地上 1m の計 4 ヵ所で少なく、証拠とするデータ量として少ない
4　ホール高位置のデータが無い
5　ホール高位置は、湿った空気の層があるとも考えられる

これらの疑問に応えるために 2013 年夏、ハドロンホール 48 ヵ所における測定を行った。

4　2013 年夏季　ハドロンホール絶対湿度分布調査

4-1　測定機器の配置

2013 年 8 月～9 月にかけて、全スパン 3 ヵ所の高さにおいて、温湿度の測定を行った。
測定高さは、①地下の床上 1m、②地上高さ 1m の 2 ヵ所に加え、③地上高さ 9.5mの計 3 カ所とした。
各スパンを北 1S、南 1S と表記し、高さは枝番で、地下が 1、地上 1m が 2、地上 9.5m を 3 として示す。
北第 1 スパンの地下は、「北 1S-1」。同地上 1m を「北 1S-2」。同地上 9.5m を「北 1S-3」とする。
測定箇所は、合計 48 ヵ所となる。
ホール北側の北 8S-1、北 8S-2。南側の南 4S-1、南 4S-2。以上 4 ヵ所が、常設部である。
データロガー　：佐藤商事　MHT-381SD
　　使用場所　南 5S-1、南 5S-2。南 8S-1、南 8S-2、南 8S-3
　　：T&D 社製　おんどとり TR-72
　　使用場所　MHT-381SD の場所以外

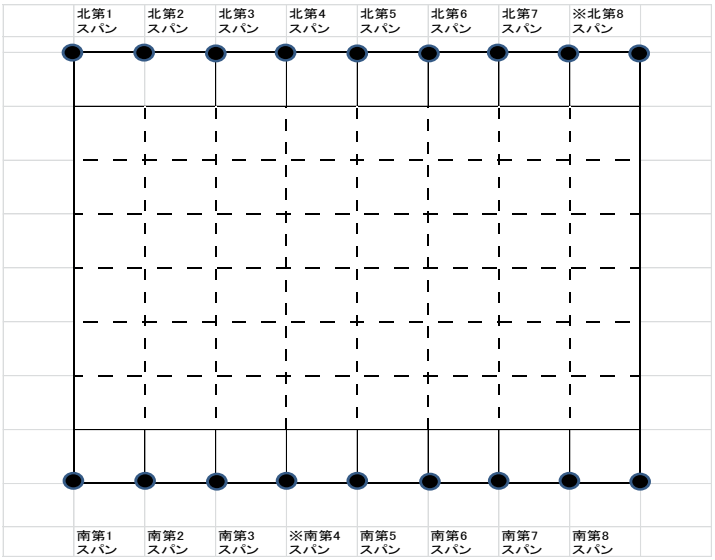


図 5　ハドロンホール測定地点（南北スパン表記）

4-2　ハドロンホールの空調機等

測定時、2 項で紹介した空調機、除湿機等が存在するが、運転状態は以下の通りである。
停止　　：除湿機（200L/day）3 台　　2013/07/05～
低負荷運転　：KL エリア 88kw 空調。K1.8BR エリア 8kw 空調機。K1.8 エリア 16kw 空調。
　　ビームライン空調
　　運転状態変更時期は不明であるが、低負荷運転の範囲は拡大していく

4-3　外気の流入状況

2012 年と同様、基本的に自然換気のみ。ハドロンホールの、建材の継目や建具の隙間からの自然流入と、ドアやシャッターの開閉に伴う流入から成るが、2013 年においては、より気密性を高めたため、2012 年より外気流入量は減少していると思われる。

4-4　2013/08/01～08/8 の測定

以下に、測定結果を示す。

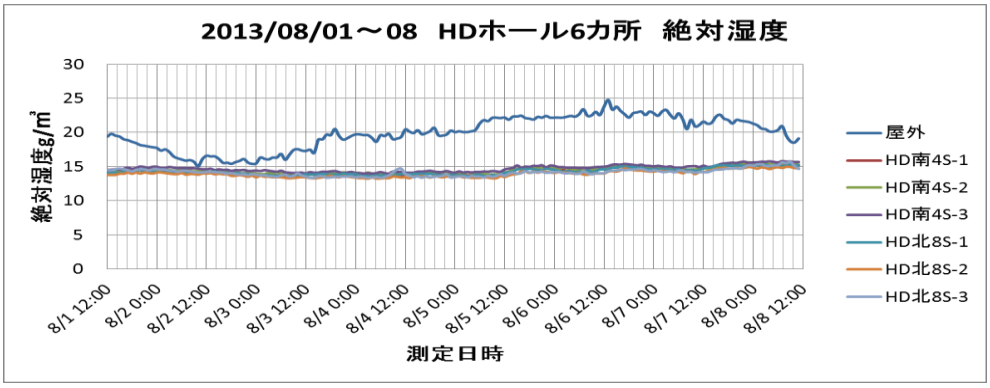


図 6　2013/08/01～08/08　ハドロンホール 6 カ所における絶対湿度

測定地点	屋外	HD 南 4S−1	HD 南 4S−2	HD 南 4S−3	HD 北 8S−1	HD 北 8S−2	HD 北 8S−3
平均値(g/㎥)	19.92	14.35	14.50	14.74	14.28	13.94	14.14

表　2013/08/01～08/08　ハドロンホール 6 カ所における絶対湿度平均値

課題である建屋の高位置、地上高 9.5m の測定を実施した。次に、絶対湿度分布を見る。

測定点 6 カ所における、最大値 - 最小値の平均は、0.82g/㎥ 。最大で 1.30g/㎥であった。高位置における数値の突出性はない。以上から、ほぼ均一分布であるといえる。

ホール内の除湿機、空調を停止もしくは制限したため、前年比で高湿度となっている。

4-5　2013/08/29～09/03 の測定

以下に、測定結果を示す。

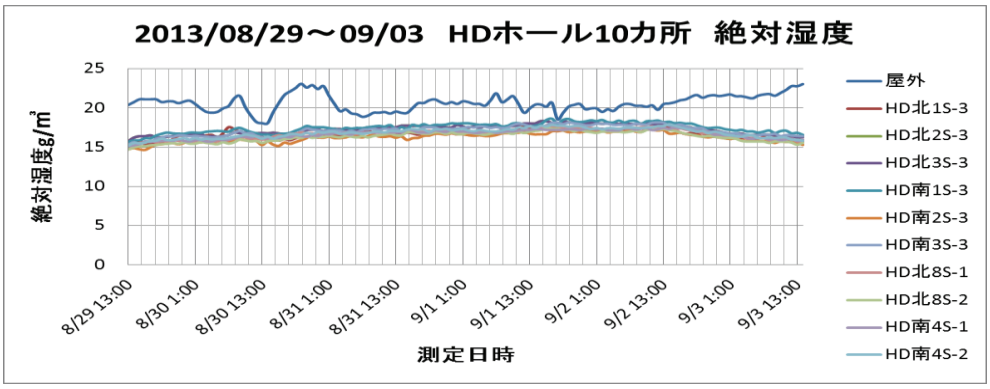


図 6　2013/08/29～09/03　ハドロンホール 10 カ所における絶対湿度

測定地点	屋外	HD 北 1S−3	HD 北 2S−3	HD 北 3S−3	HD 南 1S−3	HD 南 2S−3
平均値(g/㎥)	20.64	16.65	17.26	17.26	17.49	16.23
測定地点	HD 南 3S−3	HD 北 8S−1	HD 北 8S−2	HD 南 4S−1	HD 南 4S−2	
平均値(g/㎥)	17.11	16.68	16.34	16.65	16.84	

表　2013/08/29～09/03　ハドロンホール 10 カ所における絶対湿度平均値

絶対湿度の分布傾向を見る。

測定点 10 カ所における、最大値 - 最小値の平均は、1.34g/㎥ 。最大で 2.09g/㎥であった。この期間におけるホール内の絶対湿度は、「8/1～8」より高い。低位置より高位置の数値が若干高くなっているが、差は 1g/㎥台前半であり、ほぼ均一分布であるといえる。高位置の南 2S-3 が、10 地点中、最小値を示している。

屋外の絶対湿度は、「8/1～8」の数値とほぼ同じだが、ホール内は 3g/㎥程度上がっている。グラフからも、屋外との差が少なくなっているのが見える。

4-6　2013/09/03～09/06 の測定

以下に、測定結果を示す。

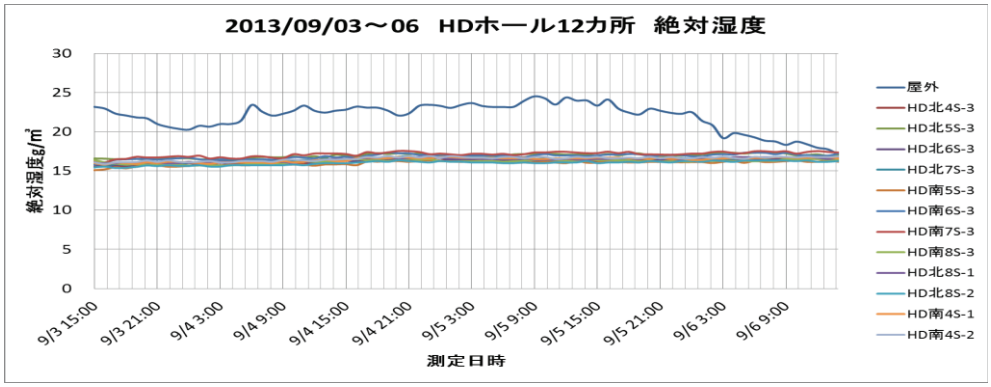


図 7　2013/09/03～09/06　ハドロンホール 12 カ所における絶対湿度

測定地点	屋外	HD 北 4S-3	HD 北 5S-3	HD 北 6S-3	HD 北 7S-3	HD 南 5S-3	HD 南 6S-3
平均値(g/㎥)	21.94	16.17	16.93	16.27	16.51	15.98	16.86
測定地点	HD 南 7S-3	HD 南 8S-3	HD 北 8S-1	HD 北 8S-2	HD 南 4S-1	HD 南 4S-2	
平均値(g/㎥)	17.11	16.19	16.45	16.00	16.45	16.55	

表　　2013/09/03～09/06　ハドロンホール 12 カ所における絶対湿度平均値

絶対湿度の分布傾向を見る。

測定点 12 カ所における、最大値 - 最小値の平均は、1.19g/㎥。最大で 1.55g/㎥であった。

高位置における数値の突出性もなく、ほぼ均一分布であるといえる。

測定終了時刻付近では、屋外とホール内の数値が一致する傾向が見える。

4-7　2013/09/06～09/09 の測定

以下に、測定結果を示す。

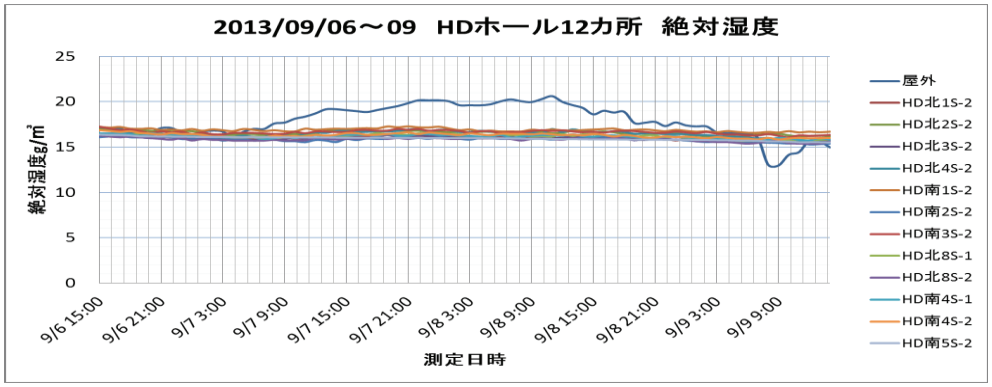


図 8　2013/09/03～09/06　ハドロンホール 12 カ所における絶対湿度

測定地点	屋外	HD 北 1S-2	HD 北 2S-2	HD 北 3S-2	HD 北 4S-2	HD 南 1S-2	HD 南 2S-2
平均値(g/㎥)	17.85	15.95	16.55	15.96	16.43	16.88	15.81
測定地点	HD 南 3S-2	HD 南 5S-2	HD 北 8S-1	HD 北 8S-2	HD 南 4S-1	HD 南 4S-2	
平均値(g/㎥)	16.63	15.91	16.18	15.82	16.15	16.28	

表　　2013/09/06～09/09　ハドロンホール 12 カ所における絶対湿度平均値

絶対湿度の分布傾向を見る。

測定点 12 カ所における、最大値 - 最小値の平均は、1.12g/㎥ 。最大で 1.49g/㎥であった。

以上から、ほぼ均一分布であるといえる。

測定開始時刻付近では、屋外とホール内の数値が一致する傾向が見える。

また、屋外とホール内の差がこれまでより、近接する傾向が見える。

4-8　2013/09/09～09/11 の測定

以下に、測定結果を示す。

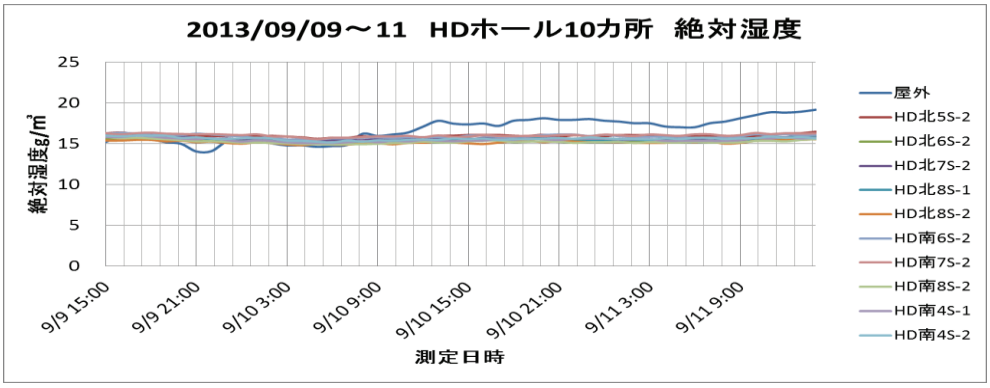


図 9　2013/09/09～09/11　ハドロンホール 10 カ所における絶対湿度

測定地点	屋外	HD 北 5S-2	HD 北 6S-2	HD 北 7S-2	HD 北 8S-1	HD 北 8S-2
平均値(g/㎥)	16.70	15.98	15.40	15.64	15.48	15.18
測定地点	HD 南 6S-2	HD 南 7S-2	HD 南 8S-2	HD 南 4S-1	HD 南 4S-2	
平均値(g/㎥)	15.91	16.03	15.23	15.47	15.62	

表　2013/09/09～09/11　ハドロンホール 10 カ所における絶対湿度平均値

絶対湿度の分布傾向を見る。

測定点 10 カ所における、最大値 - 最小値の平均は、0.92g/㎥ 。最大で 1.11g/㎥であった。

以上から、ほぼ均一分布であるといえる。

屋外とホール内の差は、より近接する傾向を示している。

4-9　2013/09/11～09/13 の測定

以下に、測定結果を示す。

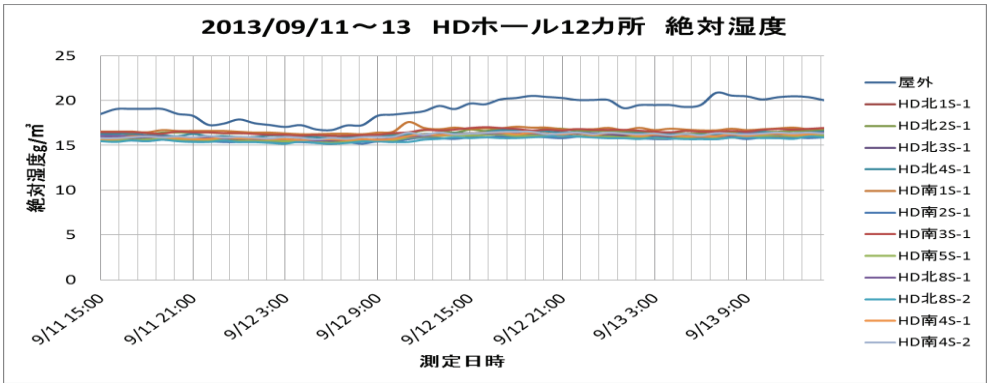


図 10　2013/09/11～09/13　ハドロンホール 12 カ所における絶対湿度

測定地点	屋外	HD 北 1S-1	HD 北 2S-1	HD 北 3S-1	HD 北 4S-1	HD 南 1S-1	HD 南 2S-1
平均値(g/㎥)	19.06	15.87	16.45	15.98	16.26	16.71	15.67
測定地点	HD 南 3S-1	HD 南 5S-1	HD 北 8S-1	HD 北 8S-2	HD 南 4S-1	HD 南 4S-2	
平均値(g/㎥)	16.55	15.81	16.05	15.64	16.03	16.15	

表　2013/09/11～09/13　ハドロンホール 12 カ所における絶対湿度平均値

絶対湿度の分布傾向を見る。

測定点 12 カ所における、最大値 - 最小値の平均は、1.11g/㎥ 。最大で 2.23g/㎥であった。

以上から、ほぼ均一分布であるといえる。

4-10　2013/09/13～09/17 の測定

以下に、測定結果を示す。

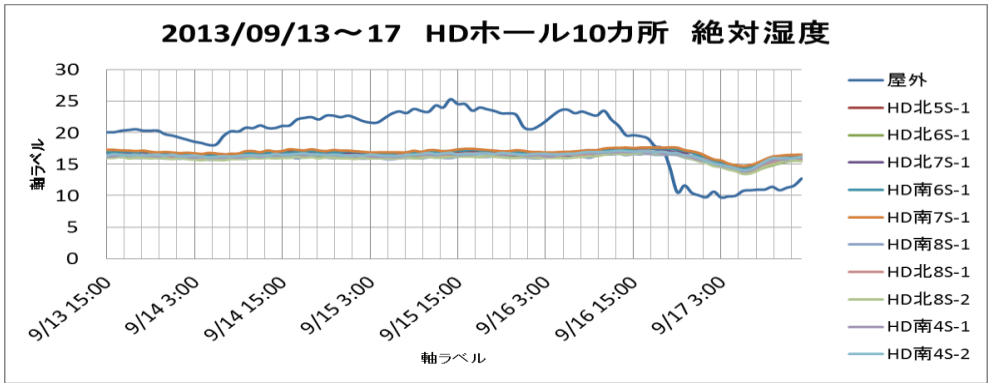


図 11　2013/09/13～09/17　ハドロンホール 10 カ所における絶対湿度

測定地点	屋外	HD 北 5S-1	HD 北 6S-1	HD 北 7S-1	HD 南 6S-1	HD 南 7S-1
平均値(g/㎥)	19.45	16.66	16.10	16.37	16.70	16.89
測定地点	HD 南 8S-1	HD 北 8S-1	HD 北 8S-2	HD 南 4S-1	HD 南 4S-2	
平均値(g/㎥)	15.87	16.22	15.84	16.22	16.35	

表　2013/09/13～09/17　ハドロンホール 10 カ所における絶対湿度平均値

絶対湿度の分布傾向を見る。

測定点 10 カ所における、最大値 - 最小値の平均は、1.10g/㎥ 。最大で 1.38g/㎥であった。

以上から、ほぼ均一分布の傾向が見える。

4-11　2013 年夏季　ハドロンホール絶対湿度データの特徴

前述したように、ハドロンホール内の空調機等は低負荷運転であったため、除湿量は大幅に減った。

それはホール内の絶対湿度が、2012 年比で 4～5g/㎥程度増加したとの結果からわかる。

低負荷運転の範囲は、測定開始当初より次第に、広げられたと思われる。それは、8/1 の測定開始時より後になるほど、ホール内外の数値が近接しているからである。

4-12　ハドロンホール絶対湿度分布についての結論

ホール内計 48 ヵ所において、場所を移しながら短いもので 3 日。長いもので 8 日間の測定を行った。

ホール内 14～17g/㎥の環境下で、絶対湿度の最大値と最小値の差は、概ね 1g/㎥台前半。割合にして 7%以下である。また、指摘された「高湿度の空気層」の存在は、測定結果からは確認されなかった。

以上から、内部に水蒸気発生源を持たず、外気流入は自然換気量のみの環境下における、ハドロンホール内の絶対湿度分布は、ほぼ均一であることがわかった。

5　絶対湿度均一分布の事例

建屋における絶対湿度分布が均一化する傾向は、今回行った詳細な測定をもって、より正確な検証がなされたと思う。さらに、2012 年のハドロンホールのデータから、興味深いものを紹介する。下のグラフを参照。

2012/08/24 23:00、南地下の数値が大きく上がり、それに遅れる形で、他の 3 カ所の数値が上昇している。時間を経て、4 ヵ所のデータが近接していく様子がわかる。

以上から、「高湿度の空気層」が生じても長くは存在せず、やがて均一化していくことがわかる。

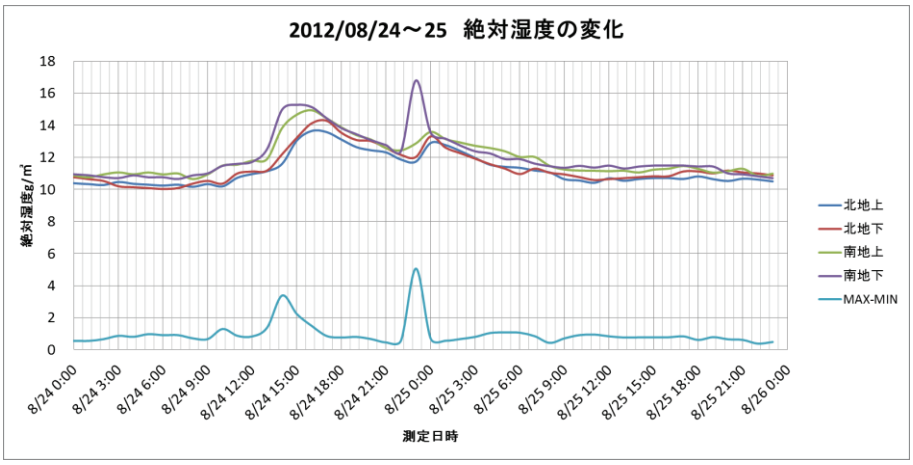
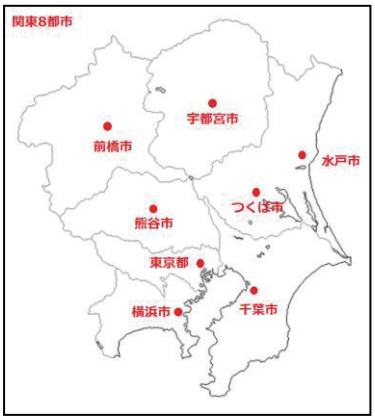


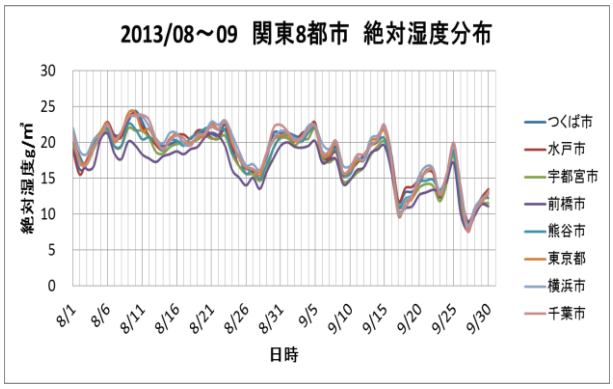
図 12　2012/08/24～08/25　ハドロンホール絶対湿度の変化

さらに、関東地方 8 都市について調べた。

これらを選定した理由は、関東平野という類似した環境下であるため、比較の対象にふさわしいと考えたからである。

期間は、2013 年 8 月～9 月。データは気象庁 HP より、各地気象台発表の、一日の平均気温と湿度を用いた。





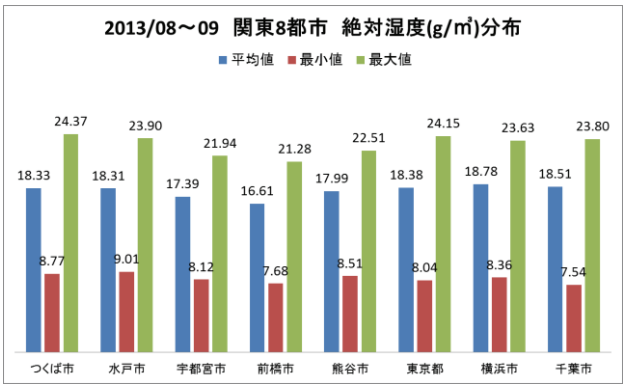


図 13　2012/08/～09　関東 8 都市における絶対湿度分布

平均値の最大が横浜市、最小が前橋市となった。その差は、2.17g/㎥である。前橋市を除く、7 都市間の差はおよそ、1g/㎥程度に収まっている。

熊谷市やつくば市は内陸であるが、高湿度である。つくば市と水戸市との距離は約 50km だが、両者間においてほとんど、値に差がなかった。

グラフの傾きも、8 都市ともほぼ同じ傾きを示していることから、海からもたらされる湿度が、内陸へと行き渡っているように見える。

以上から、絶対湿度の均一分布傾向は屋内だけでなく、屋外の事例として関東平野内でも、同様の傾向であることがわかった。

6　結果を受けて

絶対湿度が均一化していく様子は中学で学んだ、水に溶かしたミルクの粒子が広がり、均一化する過程を観察する「ブラウン運動」を想起する。液体中粒子の均一分布の例として、コロイド溶液がある。

空気の重さは、1 ㎥あたり 1.2kg（0℃・1 気圧）である。測定時の絶対湿度は、14～17g/㎥程度であり、空気全体からすれば、わずかな量である。空気中を、水蒸気という軽い粒子が均一に分布すると考えるのは、ごく自然な発想であった。絶対湿度均一分布の事例は、ハドロンホール以外の施設でも確かめられている。

気象資料より、「気団」について調べてみた。日本を覆う主な気団として、シベリア気団は寒冷・乾燥。オホーツク海気団は、寒冷・湿潤。小笠原気団は、高温多湿。揚子江気団は温暖・乾燥など、それぞれ性質が異なっている。これらの気団が日本に四季をもたらす、大きな要因になっている。

高温多湿の気団と寒冷・乾燥の気団の組み合わせなど、性質が異なる気団同士がぶつかると、互いは交じり合いにくい性質とのこと。気団のぶつかり合いは、数千キロの範囲で考える気象現象である。先に示した関東 8 都市の例では、約 100km 圏内で、ほぼ均一分布である。大きな範囲では不均一分布も考えられるが、それに比し微小な範囲内においては、ほぼ均一分布としても実用上問題ないと考えるが、いかがだろうか。

なぜ、絶対湿度は均一分布するかについて、現段階では説明できない。前述のブラウン運動や、熱移動の不可逆性も活かせるかも知れない。先人の文献を参考にしながら、研究していきたい。

絶対湿度が均一分布することがわかったことで、梅雨から夏の冷房期における、より有効な空調の可能性が期待できることがわかった。興味深くかつ、現実に求められているテーマである。効果的と考えられる方法を、試していきたい。

閉構造ダイバータ用クライオポンプへの熱負荷評価

○村瀬尊則，土伏悌之，米津宏昭 ，ダイバータグループ

自然科学研究機構　核融合科学研究所

概要

大型ヘリカル装置（以下、LHD）真空容器内の閉構造ダイバータ用クライオポンプは、高温プラズマや周辺の受熱板から高い輻射熱を受ける環境に置かれる。またポンプ内部のソープションパネル（以下、排気パネル）は周囲の輻射熱や排気するガスの吸着熱、固定治具からの伝導熱など、多様な熱負荷を受ける。水冷シールドや液体窒素冷却シールド（以下、LN2 冷却シールド）は輻射熱から排気パネルを守る役割を担っているが、万が一その冷却能力以上に加熱されると、機器に損傷が及ぶばかりでなく排気パネル温度が上昇し、さらには活性炭から吸着ガスが放出し始め、とたんに排気ポンプとしての機能が失われる。従って、排気パネルへの熱負荷とこれによる活性炭の温度上昇の評価は、性能に直接影響を与えるため特に重要である。

本件では有限要素法を用いて各種シールドへの熱負荷を評価し、排気パネルの輻射熱に対する熱的健全性を確認した。さらに、排気パネルにかかる熱負荷を、伝熱理論等を用いて試算した結果、排気パネルの活性炭表面温度は、水素ガスの最大排気時においても、排気ポンプとして機能する 20 K 以下を維持可能であると評価した。

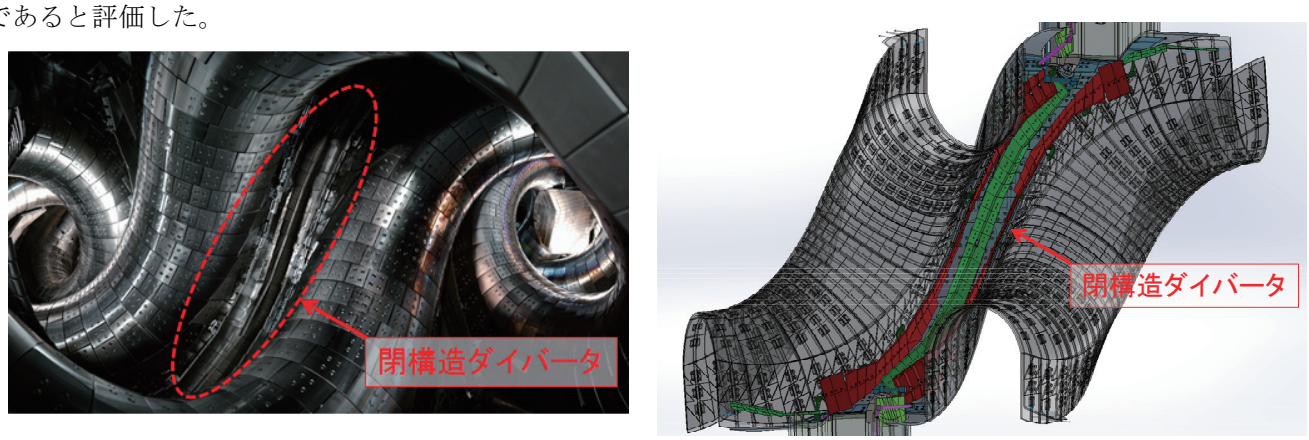


図１．LHD プラズマ真空容器内部写真と閉構造ダイバータ

1　閉構造ダイバータ用クライオポンプ

LHD は世界最大のらせん（ヘリカル）状の超伝導磁石によって安定的に高温のプラズマを閉じ込める装置である。プラズマを「閉じ込める」とは、プラズマが装置壁に触れないよう磁力線を使ってプラズマ全体を宙に“浮かせる”ことである。これはプラズマの「磁力線に沿って動きやすい」という性質を利用している。しかし、プラズマは完全に宙に浮くわけではなく、必ずそれを支える“支柱”のような磁力線が装置壁から伸び、プラズマ全体を固定する必要がある。この支柱のことを「ダイバータレグ」と呼び、これを受け止めるカーボン製の板を「ダイバータ受熱板」と呼ぶ（図２）。ダイバータレグはエネルギーの高い粒子束であるため、これを受け止めるダイバータ受熱板は耐熱性の高いカーボン（等方性黒鉛や炭素繊維強化材）が用いられている。

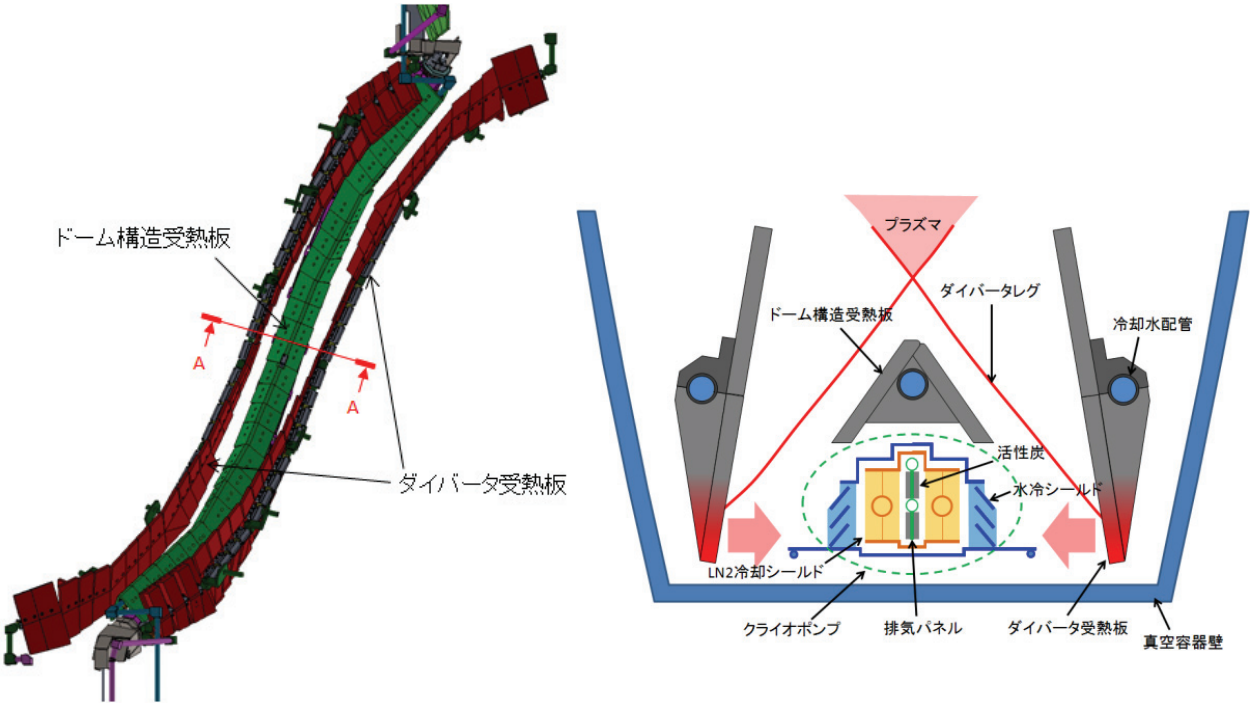


図２．閉構造ダイバータシステムの断面構成

図２に閉構造ダイバータシステムの断面構成を示す。閉構造ダイバータは、ダイバータレグを受ける起立型ダイバータ受熱板とプラズマからの輻射熱を防ぐドーム構造受熱板により構成されており、ドーム構造受熱板の下にはクライオポンプユニットが設置されている。このクライオポンプユニットは、排気パネル、周辺の輻射熱から排気パネルを保護する LN2 冷却シールド、およびダイバータ受熱板の輻射熱から LN2 冷却シールドを保護するための水冷シールドで構成される。本排気パネルは、水素ガスを排気することを目的とした、吸着材（活性炭）によるクライオソープションポンプ方式を採用した。また水素ガスに対して十分なソープション効果を得るためには 20 K 以下に排気パネルを冷却する必要がある。この冷媒には元素の中で最も沸点が低いヘリウムガスが用いられている。

2　クライオポンプ熱シールドへの熱負荷

閉構造ダイバータドーム構造受熱板の裏側に設置されるクライオポンプは、ダイバータレグにより加熱されたダイバータ受熱板の輻射熱を受ける。まず排気パネルを輻射熱から守る水冷シールドおよび LN2 冷却シールドへの輻射による熱負荷を評価するため、有限要素法を用いた解析ソフト（ANSYS）を用いて熱解析を実施し、水冷シールドおよび LN2 冷却シールドの熱的健全性を確認した。図３に計算モデルの概要を示す。ダイバータ受熱板はカーボンシートを介して冷却配管に接続され、タイル表面温度 1000℃を想定した熱負荷を加える。水冷シールドは３枚のルーバーブラインドを有し、両端のサポート端部より冷

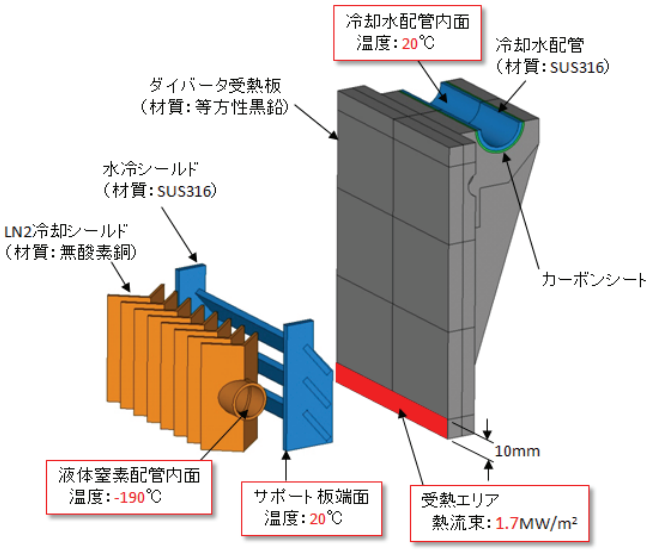


図３．計算モデルの概要

却される。LN2 冷却シールドではシェブロン構造の中央を貫く液体窒素配管内壁を-190 ℃に設定し、そしてダイバータ受熱板では冷却水配管内壁を 20 ℃に設定した。また水冷シールドでは両端のサポート板端部を冷却水温度 20 ℃に設定した。ダイバータレグを受熱する位置はダイバータ受熱板下端とし、水冷のルーバーを通過して LN2 冷却シールドを直接見込むエリアが最も多い条件、つまり、LN2 冷却シールドにとって最も熱負荷の厳しい条件で計算を行った（図４）。また受熱エリアの幅は、標準的な LHD 実験の観測結果から 10mm とした。

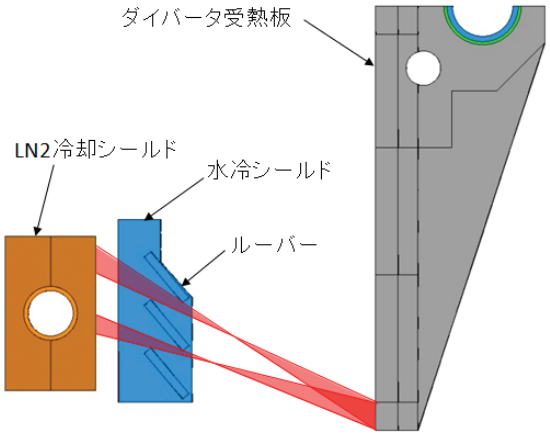


図４．受熱エリアの設定

本解析におけるダイバータ受熱板、水冷シールド、および LN2 冷却シールドでは輻射熱の相互熱交換を考慮している。ダイバータ受熱板ではタイル全面で輻射熱を放出するよう設定し、水冷シールド、および LN2 冷却シールドそれぞれルーバーブラインド部およびシェブロン部で輻射熱の相互交換をするように設定した。

上記の境界条件を適用して解析を実施した。図５に、ダイバータ受熱板、水冷シールドおよび LN2 冷却シールドの温度分布を示す。ダイバータ受熱板の先端温度が約 1000 ℃になるとき、対向する水冷シールドのルーバー上で最大約 300 ℃にまで温度上昇するにもかかわらず、LN2 冷却シールドにおけるシェブロン端部と液体窒素配管の温度差は 1K 以下であった。

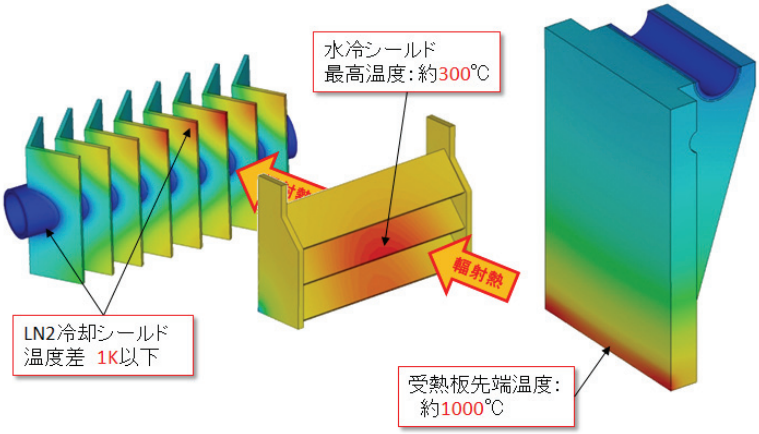


図５．ダイバータ受熱板および各種シールドの温度分布

このことから、本クライオ排気システムにおける水冷シールドや LN2 冷却シールドは、輻射熱に対し高い熱遮蔽機能を有していると評価でき、よってダイバータ受熱板の輻射熱により、クライオポンプ中央に位置する排気パネルの温度上昇に対して、ほとんど影響を与えないと評価できる。

実際の LHD 実験では、ダイバータレグの入射幅が 30mm 程度となる磁場配位も存在し、さらに今後プラズマ加熱パワーが増強されると、ダイバータ受熱板上の高温部も増加することが予想される。そこで、ダイバータ受熱板の受熱エリアを 10～60 mm までパラメータとして変化させ、受熱板表面で 1000℃を想定した熱負荷を加え解析を行った。図６に、受熱エリアと水冷シールドおよび LN2 冷却シールドの除熱量の関係を示す。受熱エリアの増加とともに、水冷シールド、LN2 冷却シールドのどちらにおいても、各除熱量は受熱面積の増加に対して緩やかに増加しているが、受熱エリアを 60mm 幅としても、除熱量は最大除熱量（LN2 冷却シールド：1.74kW、水冷シールド：20.6 kW）以下であった。従って、本クライオポンプのシールド除熱性能には十分な余裕があり、将来のプラズマ加熱パワーの増強にも耐えうる構造であることが分かる。

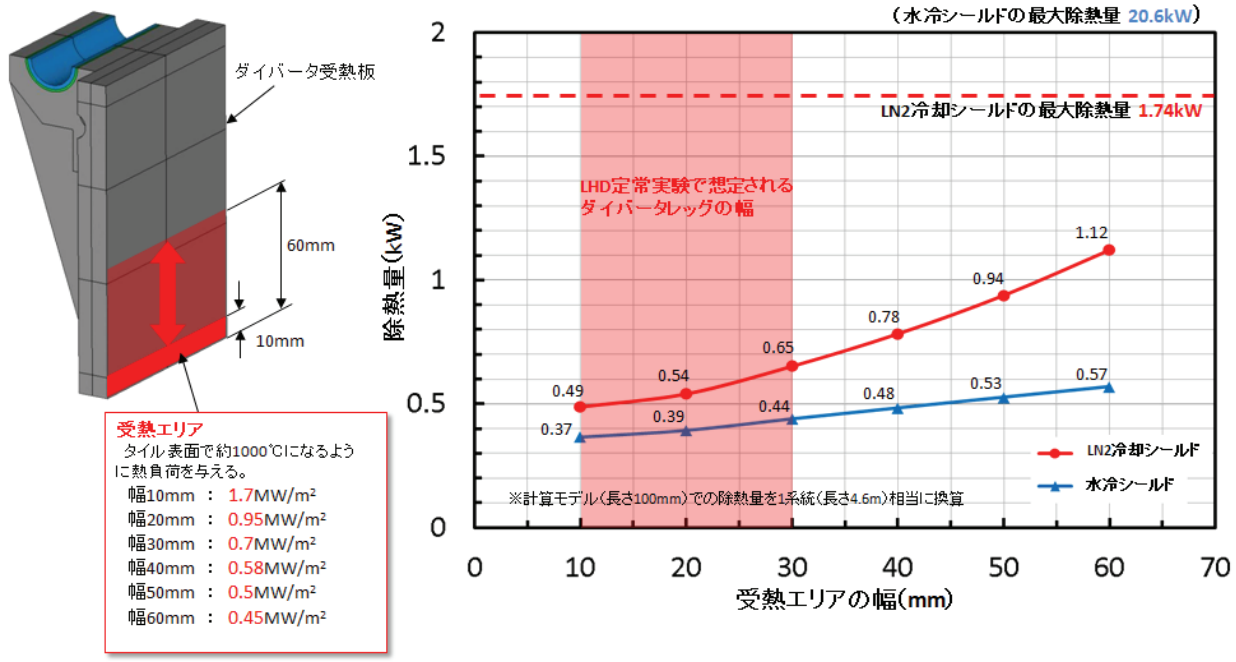


図６　受熱エリアとシールド除熱量の関係

３　排気パネルへの熱負荷の試算

前項では、ダイバータ受熱板からの熱輻射による排気パネルへの熱負荷について検証し、各シールドが十分な除熱性能を有しているため、クライオポンプ外からの輻射熱は排気パネルの温度上昇に寄与しないと結論付けた。本項ではクライオポンプ内部で発生する排気パネルへの熱負荷について検証する。その手法として、伝熱理論を用いて吸着材やパネルへ侵入する熱負荷を計算する方法と、実際の温度データを用いて冷媒（GHe）への熱負荷からパネルの熱負荷を計算する方法とで検証を行う。さらに活性炭に入る熱負荷の試算から有限要素法を用いて活性炭表面と排気パネルの温度差を求め、吸着材表面の温度が排気に必要な 20K 以下に冷却可能かを評価する。

３．１　伝熱理論を用いて概算する排気パネルへの熱負荷

排気パネルへの熱負荷には、パネルを取り囲んでいる LN2 冷却シールドからの輻射熱、パネルをサポートする冶具（ジルコニア製）からの熱伝導による熱負荷、および活性炭が水素ガスを吸着する際に発生する吸着熱による熱負荷が考えられる。ここでは、簡易的にモデルを仮定し、熱伝導の式からそれらを評価する。

３．１．１　輻射熱による熱負荷

まず排気パネルへの輻射熱を図７に示した輻射率を仮定して計算する。排気パネルには吸着材である活性炭が隙間なく敷き詰められていると仮定し、排気パネルの輻射率を $\varepsilon_p=1$ とした。また LN2 冷却シールドは外部の光を排気パネルへ導かないよう黒化処理が施されているため $\varepsilon_c=0.9$ とした。

このときの LN2 冷却シールドから活性炭への輻射熱 $q_c(W)$ は、ステファンボルツマン定数 σ（$5.67\times10^{-8}W/m^2/K^4$）、輻射率 ε、および排気パネルの受熱面積 A（$0.173m^2$）を用いて以下のように試算できる。

$$q_c = \sigma \times \varepsilon \times \left(T_{LN2}^4 - T_p^4\right) \times A$$

$$= 5.67 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1 \times 0.9}{0.9 + (1 - 0.9) \times 1}\right) \times (100^4 - 10^4) \times 0.173$$

$$= 0.80\ (W)$$

T_{LN2}、T_pはそれぞれ LN2 冷却シールドと排気パネルの温度であり、ここでは$T_{LN2} = 100K$、$T_p = 10K$とした。また輻射率 ε は並行平面の輻射率の式

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_p \varepsilon_c}{\varepsilon_c + (1 - \varepsilon_c)\varepsilon_p}$$

で求めた。なお、排気パネルは周囲を LN2 冷却シールドに覆われているため、形態係数はほぼ 1 と考えられるため、本試算では考慮していない。

本クライオポンプは 1 系統 6 ユニットで構成され、各ユニット間つなぎ部では、GHe 配管は LN2 冷却シールドから輻射熱を受けるため試算しておく必要がある。これは GHe 配管の直径が 12mm、1 系統あたりの長さが 2.4m（往路、復路各 1.2m）であることより、下記の式で計算できる。

$$q_c = \sigma \times \varepsilon \times (T_{LN2}^4 - T_{GHe}^4) \times A$$

$$= 5.67 \times 10^{-8} \times \left(\frac{0.4 \times 0.9}{0.9 + \frac{0.09}{0.173} \times (1 - 0.9) \times 0.4}\right) \times (130^4 - 10^4) \times (\pi \times 12 \times 10^{-3} \times 2.4)$$

$$= 0.57(W)$$

ここで LN2 冷却シールドの温度T_{LN2}は実測値を用いて 130K とした。ただし LN2 冷却シールド全体が一様に 130K となるわけではないため多少、過大評価となる。また、輻射率 ε は同軸円筒の輻射率の式

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_p \varepsilon_c}{\varepsilon_c + \frac{A_p}{A_c}(1 - \varepsilon_c)\varepsilon_p}$$

を用いて算出した。

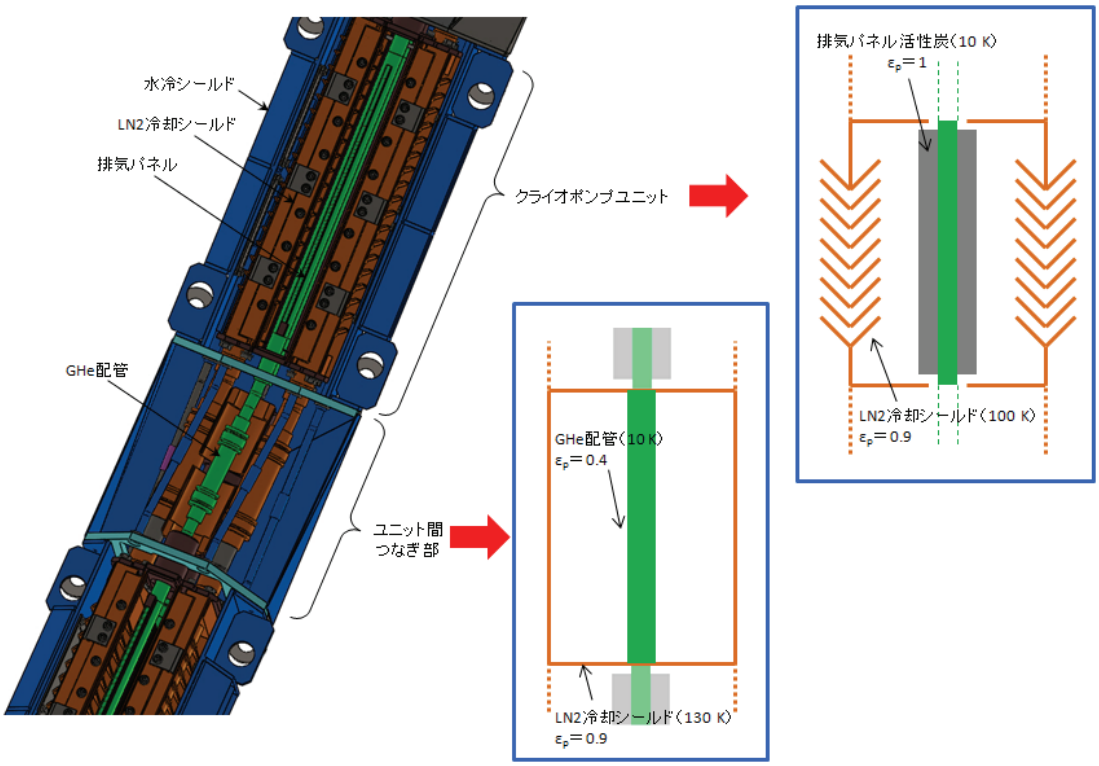


図 7．排気パネルへの輻射熱の評価に用いた輻射率

３．１．２　サポート冶具からの熱伝導による熱負荷

排気パネルは、絶縁材（ジルコニア）を用いたサポート冶具を介して LN2 冷却シールドに固定されている。サポート冶具は各パネル 4 個あるため 1 系統（6 ユニット）あたり 24 個のサポートを有する。本サポート形状を図８、また各サポート冶具の諸元を表１のように設定する。ただし実際には各サポート冶具は、ボルト固定ないし単純な接触状態であるため、面接触の状態により完全接触に比べて熱が伝わりにくくなる。すなわちここで試算される熱負荷は多少過大評価されることになる。

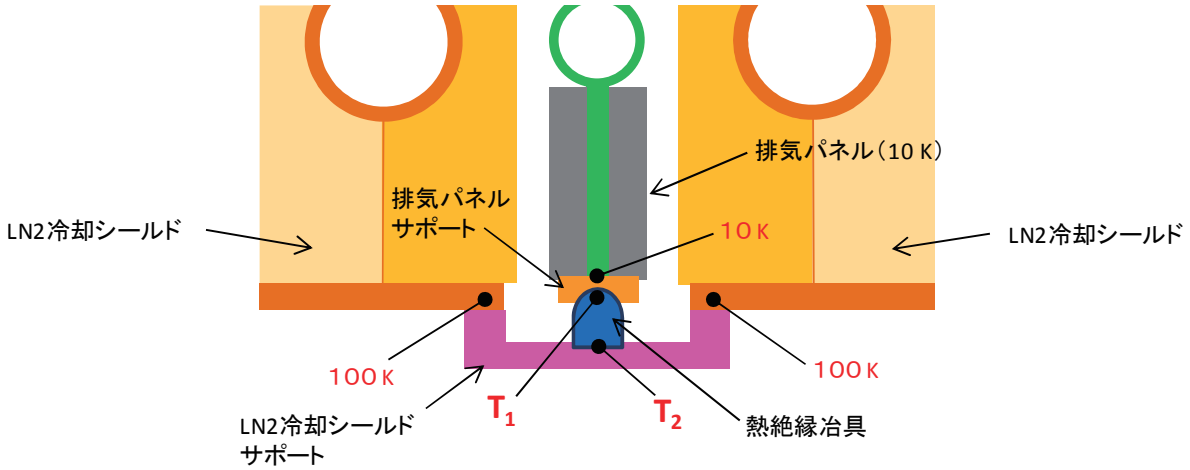


図８　排気パネルサポート冶具からの熱負荷評価に用いた計算条件

表１　排気パネルサポート冶具の諸元

サポート冶具	材質	熱伝導率 (W/m･K)	断面積 (mm^2)	長さ (mm)	形状
排気パネル サポート	無酸素銅 (Cu)	λ_{Cu}：420	A_1：64 (8 × 8)	L_1：2.4	ブロック
絶縁冶具	ジルコニア (ZrO_2)	λ_{ZrO2}：1	A_2：17.3 (π × 2.5 × 2.5)	L_2：5	円筒形
LN2 冷却シールド サポート	無酸素銅 (Cu)	λ_{Cu}：420	A_3：16 (8 × 2)	L_3：30	アーム形状

ここでサポート 1 個あたりの伝導熱を q_s(W)とすると、

$$q_s = \lambda_{cu}(T_1 - T_p)\frac{A_1}{L_1} = \lambda_{ZrO2}(T_2 - T_1)\frac{A_2}{L_2} = \lambda_{cu}(T_{LN2} - T_2)\frac{A_3}{L_3}$$

これらを連立して解くことにより、$q_s = 0.36\ (W)$　を得る。よって 1 系統あたり 24 個のサポートがあるので、全てのサポート冶具から入る熱負荷は、

$$q_s = 0.36\ (W) \times 24(個) = 8.6(W)$$

となる。

３．１．３　水素ガスの吸着による熱負荷

活性炭が水素を吸着する際に発生する吸着熱q_{g1}(W)は、比熱C_p(W/(Pa･L/s)/K)、吸着熱$\lambda\left(W / (Pa･L/s)\right)$、クライオポンプの排気速度 S(L/s)、および圧力 P(Pa)を用いて、

$$q_{g1} = C_p\left(T_g - T_p\right)SP + \lambda SP$$

と表される。ここで、T_gはパネル周辺の水素ガスの温度（100 K）、T_pはパネル温度（10 K）である。なお、水素ガスは 10 K～20 K の温度では凝縮しないため潜熱の影響は考えない。

また、排気速度 S と圧力の積 P、つまりクライオポンプが排気する水素の流量 SP（Pa･L/s）は排気パネルの冷却が完了した定常状態と、LHD プラズマ実験で水素を排気している時とで大きく異なるため、ここでは場合分けして考える。

（１）排気パネル冷却完了時

クライオポンプの冷却が完了すると、排気パネルへ出入りする熱の収支がつり合い、排気パネル温度が定常となる。この時、排気パネルは真空容器内に残るごく僅かな水素ガスを吸着するのみで流量 SP は無視できるほど小さい。よって$q_{g1} = 0$と考えることができる。

（２）水素ガス排気時

閉構造ダイバータ用クライオポンプを設計する上で想定した水素ガスの最大流量は、LHD 真空容器内に入射される固体水素ペレット（ϕ3L3）を 10 Hz で入射するときの水素ガス流量であり、この流量の水素を排気できることが本クライオポンプの設計目標である。固体水素ペレット 1 個あたりの水素は 2 Pa･m^3 であるので、10 Hz（1 秒間に 10 個）で入射された水素ペレットの水素ガス流量 SP は

$$SP = 2 \times 10^3(\mathrm{Pa \cdot L}) \times 10\left(個/s\right) = 2 \times 10^4(\mathrm{Pa \cdot L/s})$$

と考えられる。よってその場合の排気パネルへの吸着熱は

$$\begin{aligned} q_{g1} &= C_p\left(T_g - T_p\right)SP + \lambda SP \\ &= 14.2 \times 10^{-6} \times (100 - 10) \times 2 \times 10^4 + 4.4 \times 10^{-3} \times (2 \times 10^4) \\ &= 70(\mathrm{W}) \end{aligned}$$

となる。これを 4 台（2013 年 9 月時点）のクライオポンプで排気するため、1 台当たりの熱負荷は$70 \div 4 = 17.5(\mathrm{W})$となる。

３．１．４　水素ガスの熱伝導による熱負荷

LN2 冷却シールドと排気パネルの間にある水素ガスを介して、LN2 冷却シールドから排気パネルへの気体の伝導熱が存在する。この場合の熱負荷の計算は圧力が低い時の真空壁間の残留ガスによる熱伝導の式が適用できる。この熱伝導量をq_{g2}(W)とすると、

$$q_{g2} = 0.243 \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot a_0 \cdot \left(T_g - T_p\right) \cdot \frac{P}{\sqrt{MT}} \cdot A$$

と表すことができる。ここでγは気体の比熱比、M は分子量、P は水素ガスの圧力（Pa）そして A は受熱面積（m^2）である。また熱適応係数a_0は以下の式で与えられる。

$$a_0 = \frac{a_1 a_2}{a_2 + \frac{A_2}{A_1}(1 - a_2)a_1}$$

なおa_1、a_2はそれぞれ排気パネル、LN2 冷却シールドの熱適応係数であり、$a_1 = 1 \quad a_2 = 0.5 \quad \frac{A_2}{A_1} \approx 3$とす

ると、$a_0 = 0.25$を得る。T は平均温度であり、以下の式で与えられる。

$$\sqrt{T} = \frac{\sqrt{T_g} + \sqrt{T_p}}{2}$$

$T_g = 100(K)$　$T_p = 10(K)$のとき、$T = 43(K)$を得る。

ここで、この熱負荷は水素ガスの圧力によって値が異なるため、３．１．３項と同様に排気パネルの冷却完了時と LHD プラズマ実験で水素を排気している時とで場合分けを行う。

（１）排気パネル冷却完了時：$P = 1 \times 10^{-3}(Pa)$と仮定

$$q_{g2} = 0.243 \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot a_0 \cdot (T_g - T_c) \cdot \frac{P}{\sqrt{MT}} \cdot A$$

$$= 0.243 \cdot \frac{\frac{5}{3} + 1}{\frac{5}{3} - 1} \cdot 0.25 \cdot (100 - 10) \cdot \frac{1 \times 10^{-3}}{\sqrt{2 \times 43}} \cdot 0.173 = 4.1 \times 10^{-4}(W)$$

よって定常状態における残留水素ガスによる熱伝導は無視できるほど小さい。

（２）水素ガス排気時：$P = 1(Pa)$と仮定

$$q_{g2} = 0.243 \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot a_0 \cdot (T_g - T_c) \cdot \frac{P}{\sqrt{MT}} \cdot A$$

$$= 0.243 \cdot \frac{\frac{5}{3} + 1}{\frac{5}{3} - 1} \cdot 0.25 \cdot (100 - 10) \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \times 43}} \cdot 0.173 = 0.41(W)$$

水素ガスの熱伝導による熱負荷は、最大で0.41 W 程度であり、同じ条件における水素ガスの吸着熱による熱負荷と比べると非常に小さいことが分かる。

３．１．５　伝熱理論による排気パネルへの熱負荷のまとめ

３．１．１項～３．１．４項で試算した熱負荷のまとめを表２に示す。本クライオシステムにおける排気パネルへの熱負荷は、冷却完了時ではサポート冶具からの伝導熱が支配的となり、水素ガス排気時においては、水素ガスの吸着熱が支配的となる。

表２．排気パネルへの熱負荷の評価

項目	冷却完了時	水素排気時
LN2 冷却シールドからの輻射熱 $q_c(W)$	1.4（※1）	1.4（※1）
サポート冶具からの熱伝導$q_s(W)$	8.6	8.6
水素ガスの吸着熱$q_{g1}(W)$	0	17.5（※2）
残留水素ガスの熱伝導$q_{g2}(W)$	0.00041	0.41
活性炭への熱負荷(W)	0.8	19.31
排気パネル全体の熱負荷合計(W)	10	27.9

※１　このうち活性炭への熱負荷は 0.8 W。残りはユニット間の GHe 配管への入熱。

※２　固体水素ペレット（10 Hz）に相当する水素ガスを 4 台のクライオポンプで排気した場合の熱負荷。

３．２　温度データを用いた熱負荷の試算

ここでは、排気パネルへの熱負荷の試算方法として実際のパネルの温度データを用いた方法を用いて排気パネルに入る熱負荷を試算する。図９に冷却完了時におけるクライオポンプシステム各点の温度分布を示す。

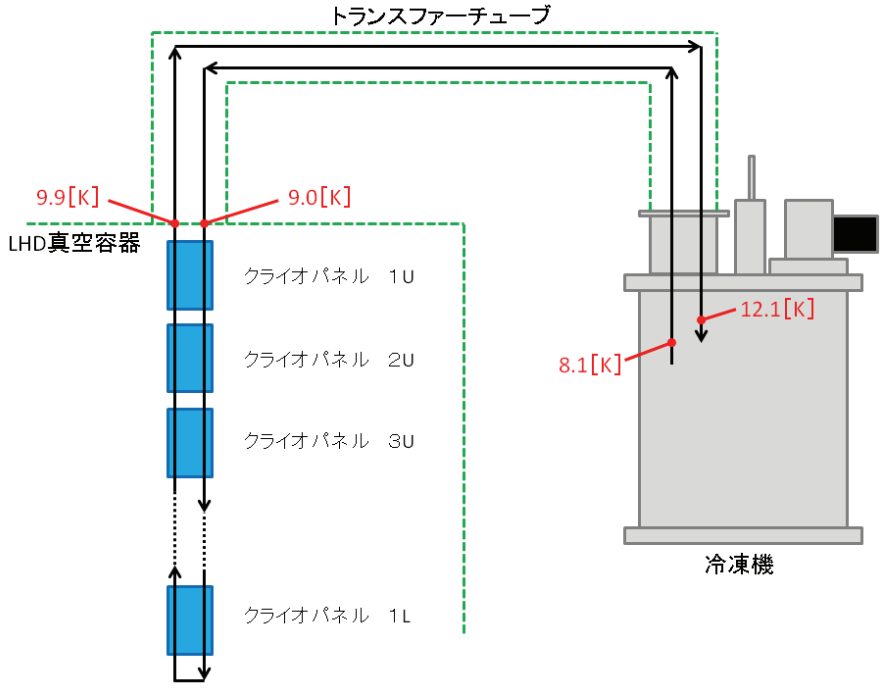


図９　冷却完了時におけるクライオポンプシステム各点の温度

３．２．１　排気パネルへの熱負荷

はじめに、排気パネルに入る熱負荷Qは、質量流量$\dot{m}$と比熱C_pを用いて以下のように表せる。

$$Q = \dot{m}\int_{T_1}^{T_2} C_p\, dT$$

ここで質量流量$\dot{m}$は、システムの循環流量 G が300[NL/min]であることから、

$$\dot{m} = \frac{G[NL/min] \times M[kg/mol]}{22.4[NL/mol] \times 60[s/min]} = \frac{300 \times 0.004}{22.4 \times 60} = 8.93 \times 10^{-4}[kg/s]$$

となり、クライオポンプの入り口温度と出口温度はそれぞれ、9.0[K]および9.9[K]であるので

$$\begin{aligned} Q &= \dot{m}\int_{T_1}^{T_2} C_p\, dT \\ &= 8.93 \times 10^{-4}[kg/s] \times 7.6 \times 10^{3}[J/kg] \times (9.9 - 9.0) \\ &= 6.2[W] \end{aligned}$$

となる。ここで伝熱理論から求めた排気パネルへの熱負荷は10 W（表２）と試算したが、試算値の半分程度の熱負荷ということが分かる。

３．２．２　トランスファーチューブへの熱負荷

トランスファーチューブ内の GHe 配管に入る熱負荷は、「冷凍機の出口～排気パネル入口」および「排気パネルの出口～冷凍機への戻り」の熱負荷を計算することにより求まり、

$$Q = \dot{m}\int_{T_1}^{T_2} C_p\, dT$$
$$= 8.93 \times 10^{-4}[\mathrm{kg/s}] \times 7.6 \times 10^{3}[\mathrm{J/kg}] \times \{(9.0 - 8.1) + (12.1 - 9.9)\}$$
$$= 20.4[\mathrm{W}]$$

となり、排気パネルからの熱負荷（6.2 W）に比べて大きな熱負荷を受けていることが分かる。

３．２．３　冷凍機特性表

閉構造ダイバータ用クライオポンプシステムで採用している冷凍機 RDK-415D における 1st および 2nd ステージコールドヘッドでの熱負荷特性図を図１０に示す。

ここでクライオポンプ冷却完了時における、1st および 2nd ステージのコールドヘッドの温度はそれぞれ約 50～60 K および 8 K である。図１０より 2nd ステージコールドヘッドが受ける熱負荷は冷凍機 1 台あたり約 9～10 W となる。さらに本システムでは、クライオポンプ 1 系統あたり冷凍機が 3 台あるので、全体で 27～30W の熱負荷があると試算できる。

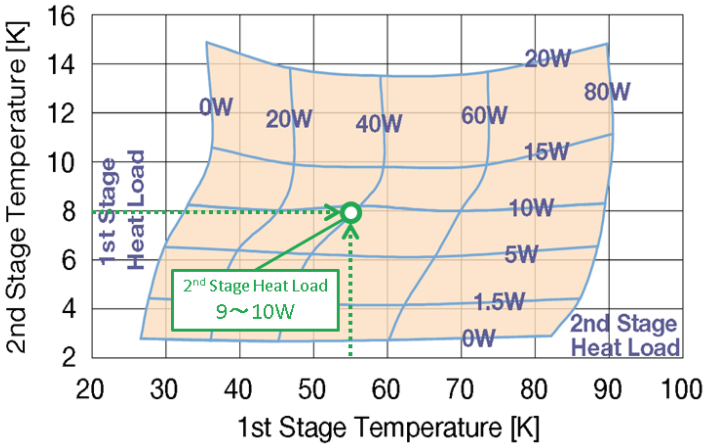


図１０　RDK-415D におけるコールドヘッドの熱負荷特性

３．２．１項および３．２．２項の結果より排気パネルとトランスファーチューブに入る熱負荷は

$$6.2(\mathrm{W}) + 20.4(\mathrm{W}) = 26.6(\mathrm{W})$$

と試算できるが、これは上記の熱負荷特性のグラフから求められる値（27～30 W）とほぼ一致する。

次に、冷凍機 2nd ステージコールドヘッドへの熱負荷が最も高くなる水素ガス排気時を考える。その場合の熱負荷は、表 1 および２．２．２項の結果から、$27.9(\mathrm{W}) + 20.4(\mathrm{W}) = 48.3(\mathrm{W})$となる。

この熱負荷を 3 台の冷凍機で受けるため、冷凍機 1 台あたりの熱負荷は、約16.1 W（$37.8(\mathrm{W}) \div 3$）となる。この値を冷凍機の熱負荷特性図で照らし合わせると、図１１の赤丸の位置になる。

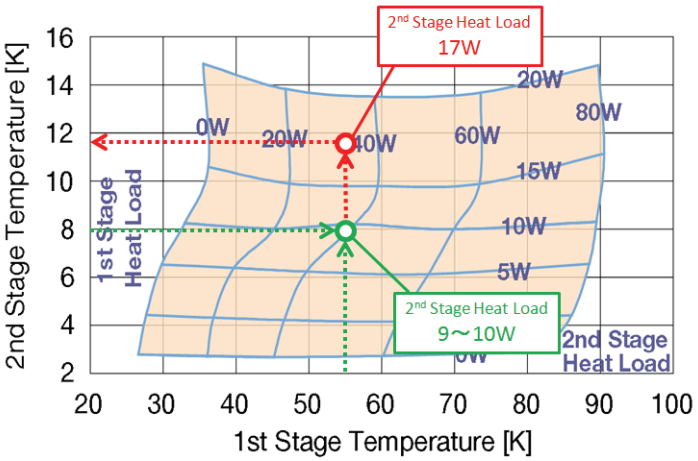


図１１　RDK-415D におけるコールドヘッドの熱負荷特性

この時の 2nd ステージコールドヘッドの温度はグラフから約 12 K と読み取れる。図９より、冷凍機と排気パネルの温度差は最大約 2～3 K であるので、排気パネル温度は実測値からの推定により 14～15 K 程度になるであろうと予測できる。この温度が排気ポンプとして機能するかどうかは活性炭の表面温度と関係しており、「活性炭表面温度 20 K 以下」が目安となる。つまり排気パネルと活性炭の温度差⊿T が 5 K 以内であるかを検証する必要がある。次項では、有限要素法を用いて排気パネルをモデル化し、温度差⊿T を評価する。

３．３　活性炭表面温度の評価

排気パネル表面と活性炭表面の温度差⊿T を評価するため、前項で試算した「排気パネルの表面温度 15 K」および「活性炭に入る最大熱負荷 17 W（16.1 W）」の条件を用いて有限要素法（ANSYS）による活性炭表面温度の検証を行った。

活性炭の表面温度は、活性炭への熱負荷と排気パネル基板への熱伝導のバランスによって決定する。閉構造ダイバータ用クライオポンプの排気パネルでは、活性炭は極低温ガス He で冷却された銅板上に無機接着材（インジウム）を介して貼り付けられている。また活性炭の貼付密度を上げるため、活性炭の貼付にはウロコ状貼付を採用している。図１２に活性炭貼付状況（試験パネル）の写真を示す。

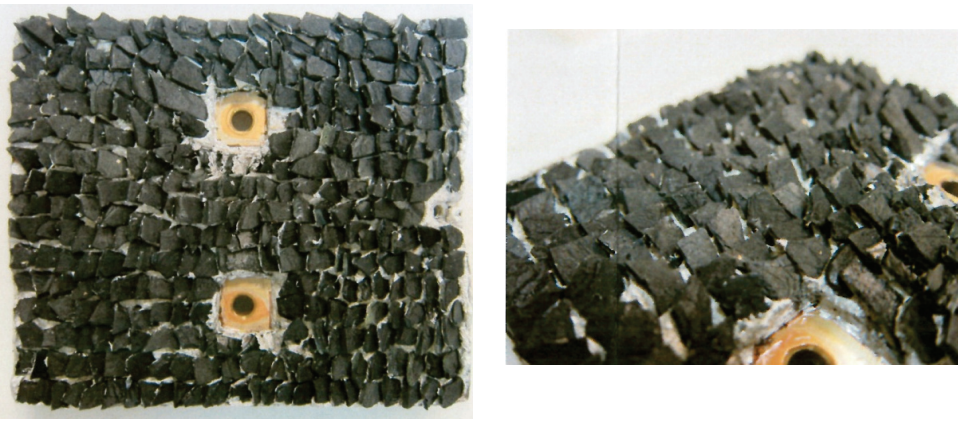


図１２　活性炭貼付状況（試験パネル）の写真

前項より、活性炭への熱負荷$q[W/m^2]$はユニット全体で「最大熱負荷 17W」を受けるので、これをユニット全体の活性炭の個数$N[個]$と活性炭１個当たりの露出面積$A_c[m^2]$で割ると求まる。ここで、活性炭の個数$N[個]$および活性炭１個あたりの露出面積$A_c[m^2]$はそれぞれ以下のようになるので、

$$N[個] = \frac{0.173[m^2]}{7\times10^{-3}[m]\times5\times10^{-3}[m]} = 4940$$

$$A_c[m^2] = 8.3\times10^{-5}[m^2]$$

※活性炭の個数は平置きした条件で算出

活性炭１個当たりの熱負荷$q[W/m^2]$は

$$q[W/m^2] = \frac{17[W]}{N[個]\times A_c[m^2]}$$

$$= \frac{17[W]}{4940[個]\times(8.3\times10^{-5}[m^2])}$$

$$= 41.5[W/m^2]$$

となる（図１３）。

また活性炭とインジウムの接触熱抵抗については、別途実施した要素試験から活性炭-インジウム間の熱伝達係数$95[W/m^2\cdot K]$を導き、この値を本計算に用いた。図１４に定常熱解析の結果を示す。

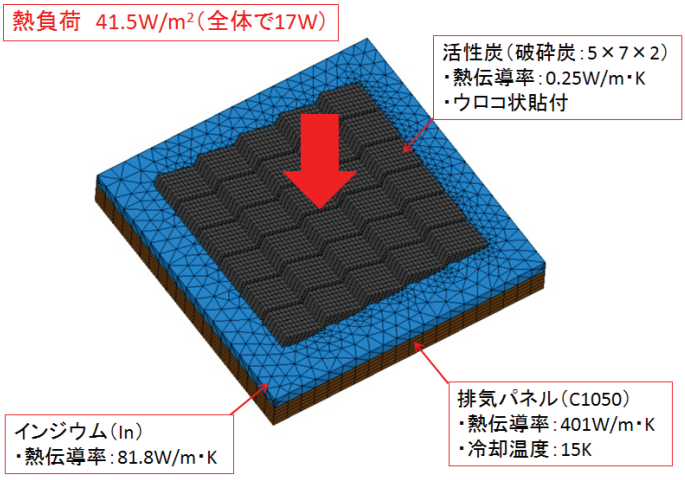


図１３　排気パネルの計算モデル

本クライオポンプにおける活性炭はウロコ状貼付を採用しているため、排気パネル基板との熱的な距離が活性炭の位置で異なり、その結果、活性炭表面温度に勾配が生じる。しかし、最も表面温度が高い箇所でも、インジウムと接触していない活性炭端部で、約 17.0 K（排気パネルの基板との温度差⊿T＝2.0 K）であった。
従って、本クライオポンプにおける活性炭表面温度は、最も熱負荷の高い水素ガスの最大排気時においても、活性炭が排気ポンプとして機能する条件「表面温度 20 K 以下」を満たしていると評価できる。

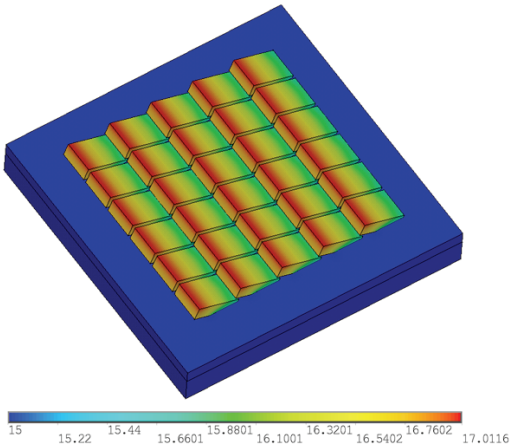


図１４　活性炭表面の温度分布

４　まとめ

LHD 真空容器内に設置される閉構造ダイバータ用クライオポンプの各種シールドおよび排気パネルへの熱負荷を検証した。まず水冷シールドおよび LN2 冷却シールドの熱負荷について有限要素法による熱解析を行い、ダイバータ受熱板の高温部からの輻射熱に対して高い熱遮蔽機能を有していると評価した。この結果は、排気パネルの温度上昇を評価する際、ダイバータ受熱板の輻射熱による影響は無視できるほど小さいということを示唆しており、そこで次に排気パネルへの熱負荷を、クライオポンプ内部で発生する熱負荷、つまり排気パネルを取り囲んでいる LN2 冷却シールドからの輻射熱、排気パネルをサポートする冶具からの熱伝導による熱負荷、および活性炭が水素ガスを吸着する際に発生する吸着熱による熱負荷について簡易モデルを設定し試算した。さらに、これら熱負荷試算値と冷凍機の特性表を用いて、水素ガスの最大排気時における排気パネルの境界条件、「排気パネルの表面温度 15 K」および「活性炭に入る最大熱負荷 17 W」を導いた。そして、これらの境界条件を設定して再び有限要素法による排気パネルの熱解析を行った結果、排気パネルの活性炭表面温度は、水素ガスの最大排気時においても、排気ポンプとして機能する 20 K 以下を維持可能であると結論付けた。

BL6C 改造

○内田　佳伯[A)]，太田　浩正[B)]，佐々木　聡[C)]，奥部　真樹[C)]，河田　洋[A)]

[A)] 高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所

[B)] 三菱電機システムサービス

[C)] 東京工業大学

概要

BL-6C ではミラーのカットオフの影響で利用可能なエネルギー範囲が 11keV 近辺までと制限されており,20KeV 近辺の光を使用した実験を行うことができなかった。そこで、ミラーを上流に移設することで20KeV 近辺の光を出すこととしたが、今改造ではミラー上流のモノクロまでの光学系を移設し、ミラー等の光学系は来年春に移設することとした。ポスターでは光学系の移設、移設後の光学系の調整結果等について発表する。

1　建設内容

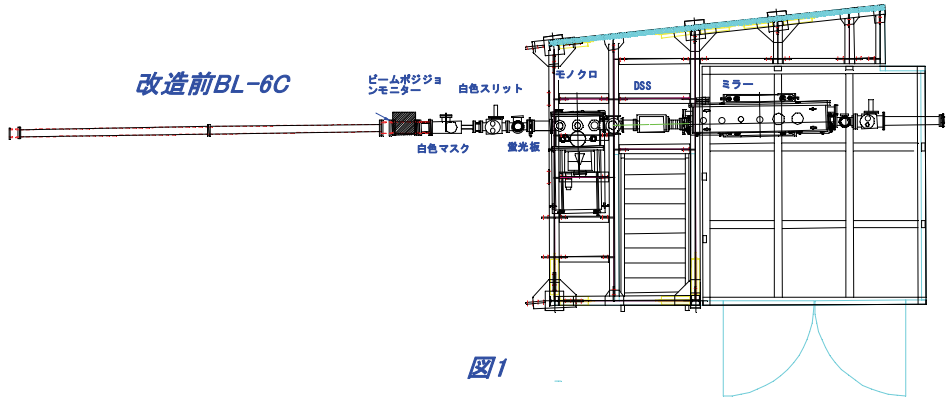


図1

BL6C の光学系配置はベンディングマグネットからの放射光を各ブランチへの出射・遮断するために用いられる MBS(メインビームシャッター)、リングとビームラインを真空的に切り分ける Be 窓、分岐された放射光を独立に出射・遮断するために用いられる BBS(ブランチビームシャッター)を経て図 1 に示すようにビーム位置を測定するビームポシションモニター、白色光を一定の大きさに切り出す白色光用マスク、白色光を任意の大きさに切り出す白色スリット、白色光を単色化するモノクロメーター、単色光を出射・遮断するために用いられる DSS(ダウンストリームシャッター)、単色光を集光するミラー、肉眼で放射光の位置が確認できる蛍光板等から成り立っている。ところが現状ではミラーのカットオフの影響で利用可能なエネルギー範囲が 11keV 近辺までと制限されており、20KeV 近辺の光を使用した実験を行いたいというユーザーの希望に沿うことができなかった。

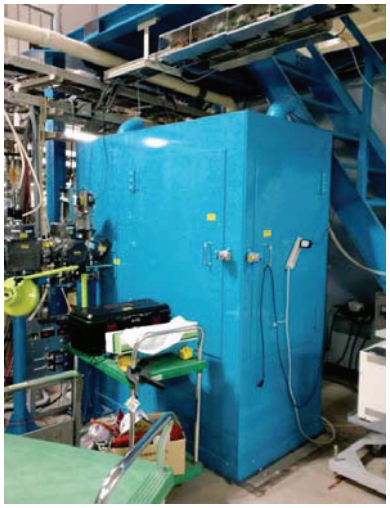


写真 1　　改造前モノクロ周辺

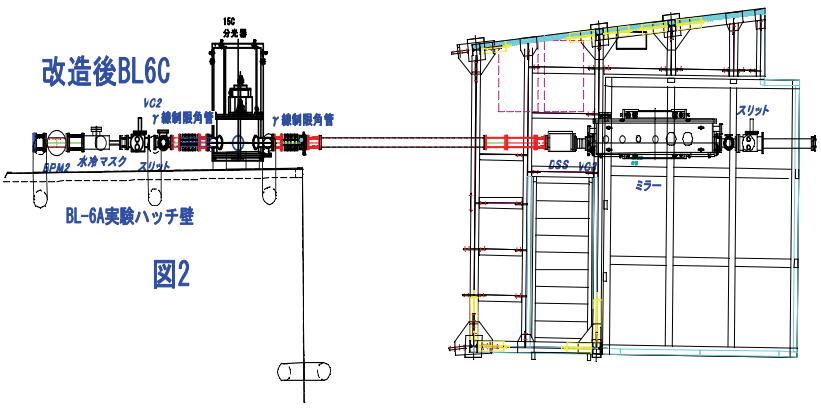


図2

そこでミラーを上流に移設することで 20KeV 近辺の光を出すこととした。ミラーを上流に移設する際にはモノクロ等他の光学系も移設する必要があるが、使用中のモノクロでは開閉口が隣のビームラインハッチ壁と干渉してしまうため、他のビームラインで使用していた開閉口が逆なモノクロに交換後移設する必要が生じた。一度にモノクロ、ミラーを移設するとそれぞれの光学系の評価が必要となるため、まずモノクロの移設・スタディを終えてからミラーの移設・スタディを行うこととした。そのため今改造ではミラー上流のモノクロまでの光学系を移設し、ミラー等の光学系は来年春に移設することとした。具体的には光学系では、白色用水冷マスク、白色水冷スリット、蛍光板、バルブ、加速器研究系で管理しているビームモニター移設、BL6C で使用していたモノクロを 20B に移設、BL15C で使用していたモノクロを BL6C に移設、分光器上下流に角管(γストッパー)新規設置を行った(図 2、写真 2)。また、BL6C 上流部は BL6A と共通であり、BL6A には白色 X 線ミラーが設置されているが、BL6C の真空到達度があまりよくないため新規 Be 窓追加による BL6A との真空区分けにより BL6A 白色 X 線ミラー汚染低減を行った。その他、春のミラー移設先にピットがあるが、ミラー周辺を人が歩く等すると振動がミラーに伝わり実験に悪影響を与えるためピットにコンクリートを流す込む補強工事、インターロック制御ラック移設、新規 Be 窓用冷却水等配管等を行った。また、モノクロ内配管は長年の放射線の影響からか触っただけで砕けてしまう状態であったためモノクロ内配管も交換した。

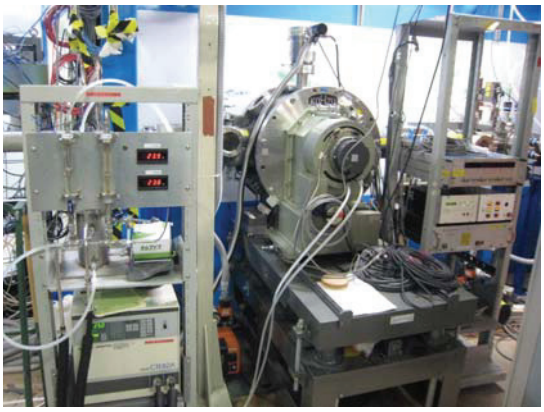


写真 2　改造後モノクロ周辺

2　建設時に起こった問題点

(1)けがき線と実際の光とのずれ

ビームライン光学系は当初ベンディングマグネットから想定される光に合わせて移設を開始していた。ところが，ビームラインで使用していた水冷マスクに時間とともに白色ビームが当たった跡が現れた(写真 3)。写真から分かるように水冷マスクの中心とビーム中心がずれており、また水冷マスク上流の BBS の白色ビームが当たった跡も中心よりずれていた。これらの跡から当初想定したビーム軸と実際のビーム軸は約 0.4mrad、BL7 側にずれていることが判明した。そのため一旦設置したモノクロ等を 0.4mrad ずらした位置に再移設を

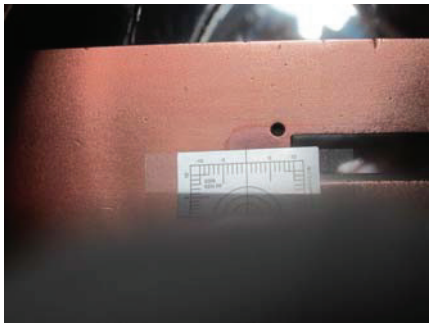


写真 3　白色マスクの焼け焦げた跡

おこなった。だだし、ミラーやミラー後方光学系に関しては、①最下流であり移動量が大きすぎる、②ずれていた位置でも使用できていた、③春にはまた移動する必要があることを考慮し、今改造では移設していない。

(2)モノクロステージ不具合

BL6C に移設したモノクロは BL15C で使用していた物であるが、モノクロの各ステージについて動かされていない物もあったため動作確認を行うこととした。パルスモーターの配線を新規にしたこともあり、最初は各ステージが動くかどうか、リミットスイッチを押せば止まるかどうかをチェックした後、リミットスイッチまで各ステージを動かす計画であった。ところが各ステーシの少量の動作確認後、翌日リミットスイッチまでモノクロ第 1 結晶の上下ステージを動かそうとした所動かなかった。調べてみると上下ステージのカムが、第 1 結晶を上下流に動かすためのマイクロメーターのつまみに干渉している状態であった(写真 4)。仮にステージにダメージがあったとすると、エネルギーを変化させた時に定位置にモノクロ光が出射されないため、急遽業者にモノクロを引き取ってもらいステージの修理・改善をしてもらうこととした。原因はカム中心軸上部の固定が緩んでおり、回転と共にカムがマイクロメーターのつまみ方向に押しやられたためと思われる。そのため上部の固定を行いかつ、マイクロメーターのつまみを反対につけることで干渉は起こらないようにした。

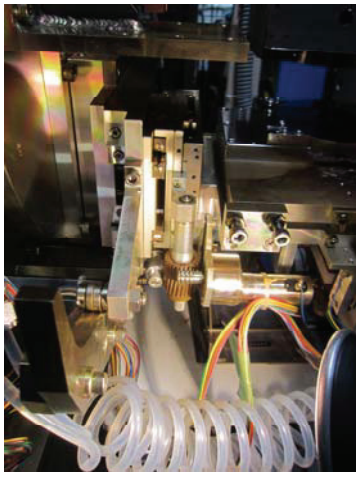


写真 4　不具合のステージ

3　光学系調整時に起こった問題点

実験ハッチ内装置の同じ位置に光を当てる必要があるため、エネルギーを変えた時にモノクロの出射位置が一定となる事が重要である。高さ方向はカム(カム式モノクロ)により一定であるが横方向はそうでないため、モノクロの 2 個の結晶(第 1 結晶、第 2 結晶)のあおり角に同じにする必要がある。モノクロの真空を引く前に第 1 結晶と第 2 結晶表面をオートレベルで見て水平となるように調整を行ったが、結晶表面と格子面が平行であればこの調整でよいのだが現実には一致している場合は少なく放射光を用いて調整する必要がある。実際モノクロの角度を変えた時に出射光が横にずれたためあおり角を調整することとなった。ところが光学調整前の動作確認では問題なかったが、あおり角のステージが CW 方向には動くが CCW 方向には動かず調整ができなくなった。あおり角のステージは 2 枚の板の間に丸棒が挟んであると共にバネが取り付けられており、DC モーターに取り付けられた軸の押し引きとバネの力であおり角が変化する構造となっている(図 3)。不調の原因はバネの引っ張る力が大きく DC モーターで押しきれないことが考えられる。すでに光学系調整に入っていたため修理することは困難であったが、幸い CCW 方向には手で動かせることができたため水平より CCW 方向にあおり角をもっていき、CW 方向のみで調整することとした。

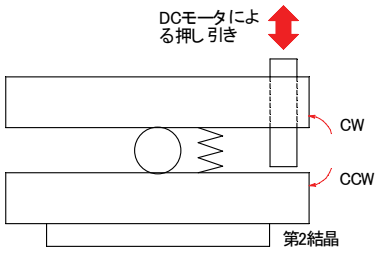


図3

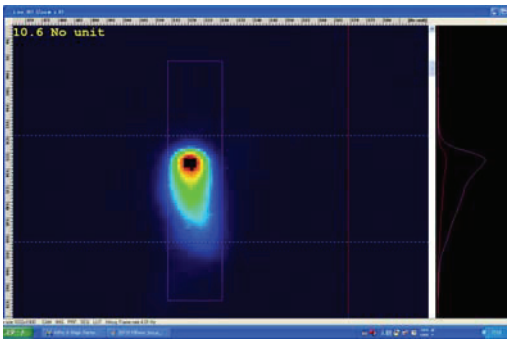


写真 5　2 次元検出器で見たミラー集光

4　光学系調整

モノクロの定位置出射やミラーの集光サイズを調べるために従来は実験ハッチ内にスリットや X 線 CCD カメラをセットしてスキャンするものであったが時間と手間がかかっていた。今回の調整では 2 次元検出器を使用したがリアルタイムで光の形状、位置、大きさが見られるため大幅に時間を短縮することができた。集光サイズは縦約 2.0mm　横約 1.1mm となった(写真 5)

5　まとめと今後の展開

新規にビームラインを建設するのではなく、既存のビームライン光学系を上流に移設であるためあまり問題ないと考えていたが色々問題が生じた。特にモノクロは長期駆動していない軸や放射線による劣化配管対策、さらに BL15C ではロータリーポンプ下での使用であり一方 BL6C ではターボポンプ下での真空であるためオフラインでのモノクロのリークチェック・最大真空度到達度がどれくらいか確認する必要があった。しかし、どれも大きな問題となることなく建設・調整は修了しユーザー実験に入ることができた。春の改造に向けての部品等の手配は終了しており、春のシャットダウンにミラー等の光学系を上流にもっていくことのより計画通り高エネルギーの光での実験を可能とする予定である 。

6　謝辞

三菱電機システムサービス(株)の太田浩正氏にはビームライン建設時の測量・設置・評価等全般に渡り協力をいただき、高エネルギー加速器研究所　河田洋教授、東京工業大学　佐々木聡教授、奥部　真樹助教には建設、評価全般に渡り助言、協力をいただいたことで BL の改造が行えたことに感謝します。

7　参考文献

平成 19 年度　技術研究会　「ビームライン BL6C の建設」　内田佳伯

JT-60U のプラズマ計測装置の解体、撤去

千葉 真一、砂押 秀則
日本原子力研究開発機構 核融合研究部門 先進プラズマ実験グループ

1. はじめに

JT-60U には、JT-60U プラズマの性能評価、実時間制御のために約 70 システムの計測装置が設備されていた。日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と記す）では、JT-60U トカマク装置を解体・改修し、超伝導コイルを用いたサテライトトカマク装置（以下、JT-60SA と記す）を建設する計画を進めている。JT-60SA では、再使用可能な JT-60U の計測装置をできるだけ使用しつつ、必要な計測装置を新たに整備する。JT-60U 本体装置の解体撤去に先駆け、JT-60U 本体周辺に設置された各種計測装置群の解体撤去を行った。再使用とする制御盤の撤去や光学ファイバーの引戻しを始め、写真 1 に示す JT-60 本体室の JT-60U 本体装置最上部に設置された 200ton を越える計測架台の移動、トリチウム汚染機器や遮蔽材を纏った装置の解体、高マンガン非磁性鋼製で構築された高さ 10m を超える計測ヤグラの切断解体など多種多様な解体撤去作業を 2009 年より順次進めた。本稿では、プラズマ計測装置の解体撤去作業の概要及びその作業で得た知見に関して報告する。

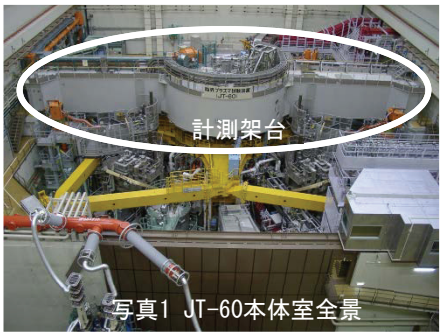


写真1 JT-60本体室全景

2. 解体撤去作業の概要

解体撤去の対象となるプラズマ計測装置の機器は、第一種放射線管理区域である JT-60 本体室に設置されていた。計測装置は、JT-60U の重水素実験によって発生した中性子の照射によって、必ずしも高いレベルではないが基本的には放射化している。加えて、多くの計測項目を可能な限り計測・診断することが実験遂行上必要とされ、各計測装置では真空配管、観測窓、真空中に設置された検出器など、最終実験運転時には約 90 箇所、JT-60U 本体の真空容器に接続する部分を有しており、その部分は JT-60U の重水素実験で生成されたトリチウムにより必ずしも高いレベルではないが基本的には汚染されている。そのため、溶接／切断／作業等の際には、放射性物質の汚染拡大防止や作業員の被ばく低減のための高度な放射線管理が要求される。

また、解体撤去される機器の大部分は、他設備の機器類とも複雑にかみあっているとともに、狭隘で極めて制限された空間に設置された機器も多い。そのため、装置重量が 2ton を超える機器の解体撤去に於いても、天井クレーンがアクセス出来ないことから、複数のチェーンブロックを駆使し、空中ブランコのように振り子運動をさせながら吊り出し、移動を行うなど、精緻な熟練技術を駆使した重量物の解体撤去を行った計測装置もある。

解体撤去された機器は、トリチウム汚染の有無に応じて保管／密閉容器に移動収納されるが、その際、切粉やワッシャー、ナットなどの細かな放射化物の飛散、落下が発生しないよう、解体現場において清掃、目視点検等の作業管理を徹底した。さらに、鉄材など錆びやすい材質の切断面には防錆処置をほどこし、収納保管後に錆が容器内に飛散、落下しないよう汚染拡大防止を考慮した切断要領としている。解体撤去した機器は、放射化物の保管管理を行うため、すべてにバーコードを貼り付け、機器情報（物品名、設置場所、放射化レベルなど）を記した保管管理台帳を作成登録し、サーバーで一元管理している。保管／密閉容器を車両で移動保管する際には、原子力機構が放射化物確認測定(空間、表面)を行い、安全管理を図った。一方、容器に入らない大型構造物の運搬に関しては、運搬中に塗装膜などが万が一剥がれることによる汚染の飛散を防止するため、車両荷台より運搬物全体をシートで養生するなどして、極力密封状態での運搬を実施した。

プラズマ計測装置での主な解体作業としては、①JT-60 本体装置の最上部に位置する重さ 215ton、全長 37mの計測架台の移動、②各計測装置の制御盤／信号ケーブル／検出器／サポート架台／真空観測窓／真空機器及び、遮蔽材（鉛・ポリエチレン）などの解体撤去、③難切削材である高マンガン非磁性鋼製で構築された重さ 45ton、高さ 12m の計測ヤグラのプラズマ溶断機による細断など解体にあたって空気汚染を伴う加工作業も行なった。

3. 主な解体作業

① 計測架台の移動

計測架台の移動に向け写真 2 に示す通り上面、内部、下面に設置された計測装置郡（約 103ton）の解体、減量を図り、図 1 の計測架台を同建屋の保管場所まで 250ton 天井クレーンで移動した。

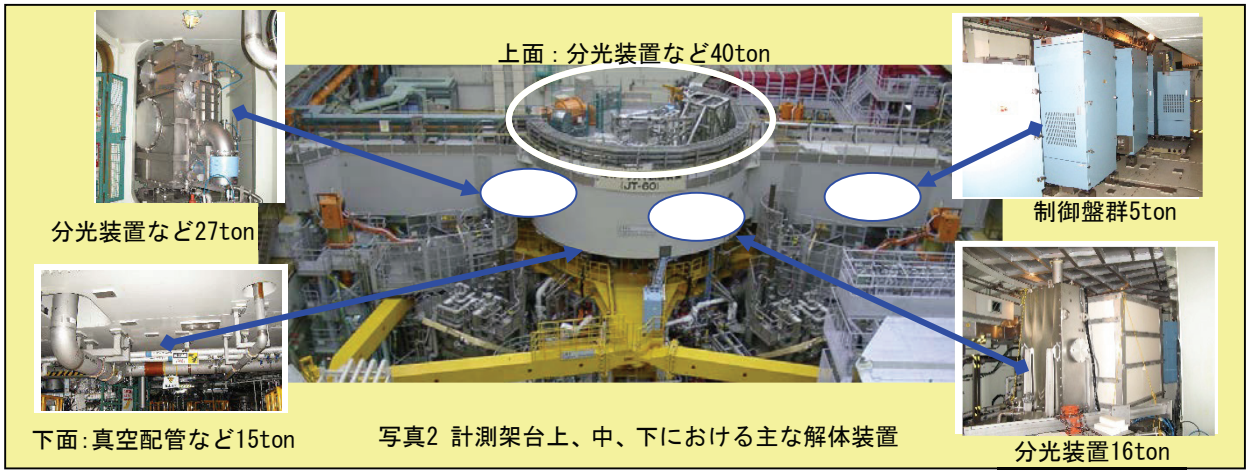


写真2 計測架台上、中、下における主な解体装置

計測架台総重量 210ｔ（減量後）を移動する際に使用した吊りワイヤーロープの選定結果を以下に示す。

・使用条件：吊角度 40° 4 点吊り　切断荷重 350tf とした場合

・安全荷重＝切断荷重*本数／安全率／吊り角張力増加係数

＝350tf ＊ 4 本 / 6 / 1.07

＝218ton

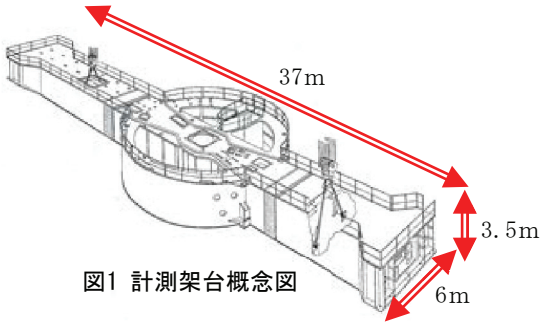


図1 計測架台概念図

上記より切断荷重 350tf および天井クレーンと計測架台との揚程を勘案した結果、エンドレスワイヤーロープφ72mm、内径 6300mm 吊りワイヤーロープを選定した。

一方、計測架台移動作業の際、想定外作業による解体部品落下など、ヒヤリ・ハットが 2 件発生した。2 件ともヒューマンエラーが起因とするヒヤリ･ハットであり､気づかなかった､深く考えなかったなど、油断および安易な行動が原因であった。刻々と変化する現場作業に対し、想定外時には、全作業を一時中断し作業要領や安全対策を客観的に再考するなど、常に問題意識・安全意識を高めることが、ヒヤリ・ハット（盲点）への気づきの第一歩と考える。

② 遮蔽材の解体

中性子線や X 線を遮蔽するため、約 70 システムの計測装置のうち、10 装置が鉛及びポリエチレンを用いた遮蔽材で覆われている。これら遮蔽材の総重量は鉛 65ton、ポリエチレン 22ton となり、計測装置の解体に伴いこれら遮蔽材の解体を行った。鉛は 1 個当たり 50kg 程度のブロック状であり、ポリエチレンは 1 枚当たり 20kg 程度の板状となっているが、移動、保管の際、容易に管理可能な金属製容器及び安価な大型土のう袋を収納容器として選定した。遮蔽材を有した計測装置の代表的な解体を写真 3 に示す。

鉛に関しては比重が大きいので金属製容器を製作したが、ポリエチレンに関しては比重が小さいので市販品の土のう袋（1ton バック）を採用することで大幅にコスト削減が出来た。しかし、吊上げ移動の際、ポリエチレン角による袋破損が一部見られたことから、土のう袋内側にプラベニヤとゴム板（側角・底角には厚手ゴム板で更に補強）を用いた内箱型の養生を施すことで、安全性及び実効性を向上した。

③ 計測ヤグラの切断解体

切断作業は、基本的に作業員の防護対策、作業区域の汚染拡大防止対策が比較的容易で空気汚染を伴わない、パイプソーやセーバーソーを用いた鋸切断工法を優先で行なった。写真 4 に代表的な鋸切断作業を示す。汚染拡大防止対策としては、シートにて作業区域養生、専用掃除機で作業場及び作業員の服、靴に付着した切粉の吸引にて汚染拡大を防止した。

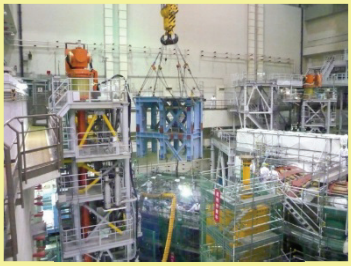
2012 年春、JT-60SA 改修作業に向けた最後の解体作業として、写真 5 に示す計測ヤグラの解体撤去を行った。このヤグラは高さ 12m の大型構造体（重量 45ton、高マンガン非磁性鋼製、厚さ 30mm）であり、各構造体が溶接にて全て一体化されている。解体撤去に向け、切断作業を行う切断工法として、養生の利点からギロチンソーによる鋸切断工法（付録参照）も検討したが、ヤグラの構造材である高マンガン非磁性鋼が極めて機械加工の困難な難切削材に該当すること、加えて、切断箇所が多く切断作業が全体工程の大半を占めることから、計測ヤグラの解体では確実に切断可能で切断速度が早いエアープラズマ溶断機による切断工法を採用した。

エアープラズマ溶断機による切断は、空気汚染を伴うため、ブロック単位に大きく切分けされたヤグラを局所排気装置 4 台有したグリーンハウスに運搬し、保管容器に収納可能な大きさになるよう 100 箇所を超える切断を行うなど、長期にわたるグリーンハウス内での溶断作業を実施した。

溶断作業時に発生する輻射熱やノロ（溶融物）、スパッタ(火粉)による火災防止対策として、グリーンハウス内の床一面と腰壁に不燃シートおよびブリキ板の二枚重ねによる火気養生を確実に行なっている。また、エアープラズマ溶断機の特性として、スパッタが広範囲に飛び散ると共に金属フューム（金属蒸気；細かな微粉末）が気中に多く発生することから、視認性確保およびフューム暴露を極力抑えるため、防火を兼ねたオールメタル製の金属高集塵率フィルタ式局所排気装置を設置し、そこより金属製ダクトを延伸して金属フュームをスポット吸引している。

2012 年 7 月 31 日エアープラズマ溶断機による切断が予定通り終了、最後の大型構造物である計測ヤグラの解体撤去作業が無事完了した。

計測ヤグラ（水色部）全景



ブロック毎に切分け

グリーンハウス内へ
搬入される１ブロック

エアープラズマ溶断作業

写真5　計測ヤグラの切断作業

4. 解体作業結果とまとめ

プラズマ計測装置の解体作業は、2009 年 10 月～2012 年 7 月の長期間にわたる且つ大勢の作業員による大規模な解体作業であったが、作業パート毎に現場での安全指導、作業要領指導の積み重ねによるコミュニケーション深化を図ることで各作業員の安全感度向上、育成に繋がり、無事故／無災害で完工することができた。解体撤去されたプラズマ計測装置は、放射化物として、すべてバーコードを用いて管理した。その管理点数は 2,637 点、総重量 428ton、概略総容積 1,204 ㎥となり、保管容器（20ft 海上コンテナ：30 ㎥換算）40 台分に相当する物量の解体作業であった。

多種多様な JT-60 プラズマ計測装置の解体撤去作業で得られた技術やノウハウは、今後の JT-60SA の建設における安全性の向上に役立てていく。

付録　　計測ヤグラ切断試験【ギロチンソー】

エアープラズマ溶断機による切断工法とは異なり、空気汚染を伴わない鋸切断工法として油圧駆動式鋸切断機（通称；ギロチンソー）を使用した切断試験を実施した。この切断機は、油圧チューブで接続された油圧装置と切断駆動部から構成され、作動／停止／スピードコントロールを手元のリモコンで遠隔制御することが可能となっている。

＜特徴＞

- ストロークが低速なため切断時間が長い
- 摩擦熱による表面硬化の影響が少ない
- 楕円軌道の駆動ストロークで、切口より刃を引上げながら戻るため、鋸刃の摩耗が少なく長寿命
- 水平、垂直など、どの姿勢でも取り付けが可能
- 付属チェーンによる機械固定式
- 切断駆動部の重量が150kgとなるため、狭隘部などでは取付けに時間を要す

＜切断試験＞

実際に解体撤去する高マンガン非磁性鋼製の計測ヤグラで写真 6 に示す切断試験を行った。切断する部材は 350H 形鋼 1 箇所となり、床面より 2m に位置する。

計測ヤグラ内へ
ギロチンソー吊り込み

350H形鋼切断開始。上部ハンドルで刃を手動送りする

刃の厚みが3mmで切断幅が広く、フランジ部では刃の当たりが長いため、切断に時間がかかる

写真6　鋸切断機による計測ヤグラ切断試験

＜試験結果＞

高マンガン非磁性鋼の切断に対して有効であることが確認できた。但し、350H形鋼1箇所の切断に7.5時間、その他に切断機脱着や養生・清掃など、準備と後片付けにそれぞれ3時間（5名）を要している。刃の熱曲がり防止の為、10分間連続切断後に交換（5枚ローテーション）したことにより、刃の欠損、摩耗は無く、切れ具合は良好であったため、刃は5枚で2箇所切断可能と予想される。

また、作業中に生じた不具合事象として、切断時間短縮を図るため刃の送りスピードを早くした際、刃がわずかながら斜めの状態で切断が進行し、次第に切断機本体との乖離が駆動部の負担となって異常音が観測された。これは、刃を手動送りする際に、被切断材に刃が過度に押し当てられたことにより垂直を維持できす、傾いたものと考える。

この試験から、ギロチンソーは、切断速度が遅い反面、切断作業で発生する廃棄物の量も少なく、処理も容易であるため、少切断解体作業等に於いては、プラズマ溶断工法よりも優位であると考える。なお、切断時間に関しては、経験則の蓄積による学習効果 によって作業効率の向上、時間短縮が期待できると考える。

高エネルギー加速器研究機構の CERL および STF における導波管の現状

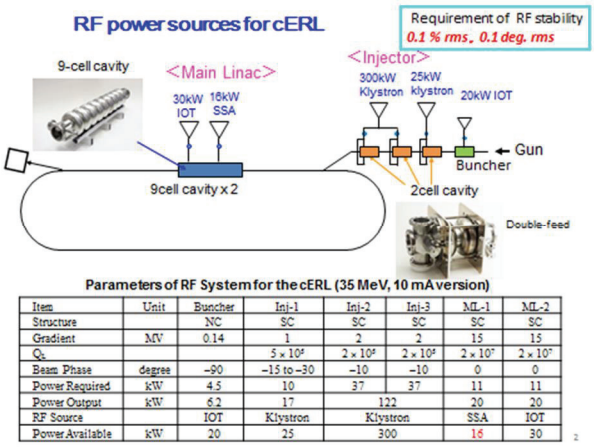
○竹中たてる、三浦孝子、加速器第五系 RF グループ

高エネルギー加速器研究機構

概要

高エネルギー加速器研究機構（KEK）のコンパクト ERL（図 1,2）、超伝導リニアック試験施設（STF）（図 9）では高周波源として L バンドを用いた計画が進んでいる。

cERL の加速空洞はバンチャー空洞および 2 セルの超伝導入射空洞 3 台と 9 セルのエネルギー回収を行う主空洞 2 台からなる。5 つの高周波源でバンチャー空洞、超伝導入射空洞、超伝導主空洞に大電力を供給している。この高周波源は IOT2 台、25kW クライストロン、300kW クライストロン、16kW 半導体アンプ各 1 台からなる。



Item	Unit	Buncher	Inj-1	Inj-2	Inj-3	ML-1	ML-2
Structure		NC	SC	SC	SC	SC	SC
Gradient	MV	0.14	1	2	2	15	15
Q_0			5×10^9	2×10^9	2×10^9	2×10^7	2×10^7
Beam Phase	degree	−90	−15 to −30	−10	−10	0	0
Power Required	kW	4.5	10	37	37	11	11
Power Output	kW	6.2	17	122		20	20
RF Source		IOT	Klystron	Klystron		SSA	IOT
Power Available	kW	20	25	300		16	30

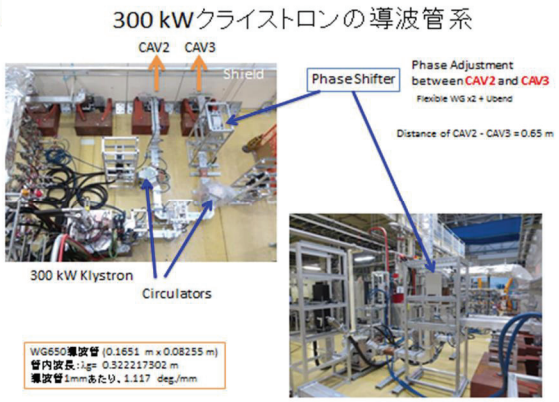


図 1:cERL とパラメータ　　図 2:cERL 導波管系

ILC プロジェクトを進めている STF 計画は初期の計画 STF I 、S1-グローバル、量子ビーム計画が終了し次期計画 STF II の準備を行っている。ここではカップラーテストスタンドや導波管ハイパワーテストスタンド、RF ガンなどに用いる導波管コンポーネントの電力試験を実施した。

本発表では cERL と STF の導波管系について報告する。

1　cERL の導波管系（電力分配系）

cERL の高周波電力に使用される導波管（272 個）はサーキュレータ 6 台、ダミーロード 6 台、直管全 120m、E/H コーナ 87 個、方向性結合器 13 台、スペーサー、マジック T4 台、フレキシブル導波管 25 個で構成され 272 ケ所のフランジで結合されている。そして国際規格の WR650 のフランジを 20N・m で締め付けているが 1 年以上放電は確認されていない。

超伝導入射空洞（Inj-1,2,3）は各空洞に入力カップラーが 2 つずつ上下対称に配置されており CW の大電力を供給する。このため同位相、同電力が要求されるので移相器とマジック T を用い、3 空洞、計 6 系統の導波管系が用いられる。電力は 25kW クライストロンをマジック T で 2 分割し、また 300kW クライストロンは 2 空洞を励振するためマジック T で 2 電力に分け、さらにマジック T で 2 分割して 4 系統になる。この入射空洞はそれぞれの空洞で結合器間の位相が 30°調整可能なので導波管組立は 30mm 以内で導波管長を合わせてある。

バンチャー空洞系は 20kW の IOT を用いてサーキュレータを透過してバンチャー空洞に給電される。超電導主空洞（ML-1,2）は 16kW 半導体アンプと 30kW-IOT で構成され夫々に 11kW の出力が要求されている。

1-1　30kW（CW）サーキュレータの電力試験（図 3）（写真 1）

30kW(CW)サーキュレータは透過電力を上げていくと VSWR が大きくなり、増幅器に付加する条件 VSWR1.25 を満足することができないことが分かった。温度依存を疑いサーキュレータの冷却水温度を数十度変化させ VSWR を測定したが 1.1 程度で大きな変化は認められない。そこでサーキュレータ内部の温度分布をビューポート付のコーナから赤外線カメラで測定（図 4）した。20kW で内部のフェライト温度は 139℃に達し VSWR は 1.368 と反射は 483W であった。その後の調査でも周辺部品に起因するフェライトの温度上昇は認められず、サーキュレータそのものが持つ電力依存性が現時点では疑わしい。そこで冷却板の改造や周波数帯域の広帯域化等が必要であると考えている。

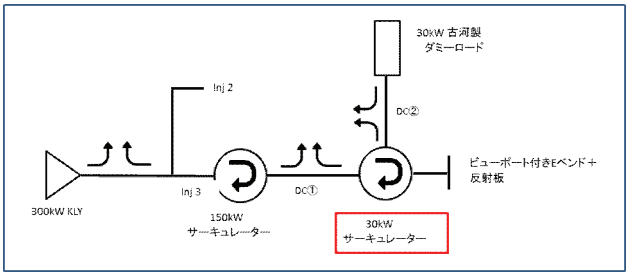


図 3:サーキュレータテスト概略

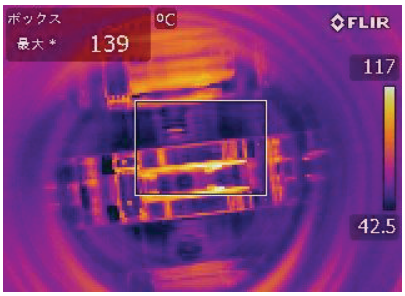


図 4:20kW 時のサーキュレータ内部温度

Cir 前 DC①		VSWR	ダミー前 DC②		Cir 温度(℃)	Cir 水温（℃）		ダミー水温（℃）	
Pf(kW)	Pb (W)		Pf (kW)	Pb (W)		IN	OUT	IN	OUT
4.96	27.8	1.162	4.8	2.9	45	30	30	30	35
10.1	14.3	1.078	9.86	13.7	58	30	30	30	38
15	92.4	1.170	14.8	29	71	30	30	30	40
20	483	1.368	19.2	48.1	98	30	31	30	42

表 1:電力と VSWR

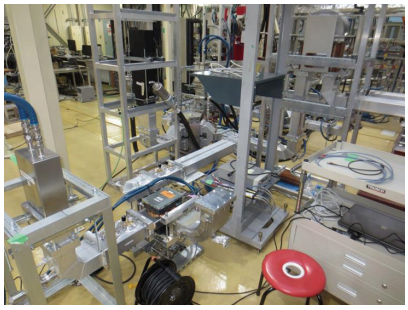


写真:1

1-2　移相器（図 2）

移相器は U ベンド導波管に 2 個のフレキシブル導波管（300mm）を付けフランジを稼働することで伸縮する構造になっている。これは入射空洞導波管系のサーキュレータ以降に据え付け、位相を最大 15mm 稼働でき 30.85deg まで調整が出来る。この移相器によって実質的に入射空洞対称カップラーの導波管長を調整する。

フレキシブル導波管は 0.3mm の肉厚の銅の蛇腹管を用いるので耐電力は STF、cERL で実証済みである。今後これにモーターを付け遠隔操作を行う予定である。

1-3　16kW（CW）サーキュレータの電力試験

このサーキュレータは全反射 15kW(CW)の試験で VSWR1.13 得ており、IOT の条件を満たすことが出来た。下記に試験結果を示す。

1)　Cir (島田）＋DC(300mm)＋SP(5mm)

Pf (kW)	Pb (W)	Pb/Pf
1	4.50	0.0045
5	0.70	0.00014
8	10.5	0.00130922
10	19.0	0.0019
15	55.0	0.00367647

表 2:入射電力と反射の比

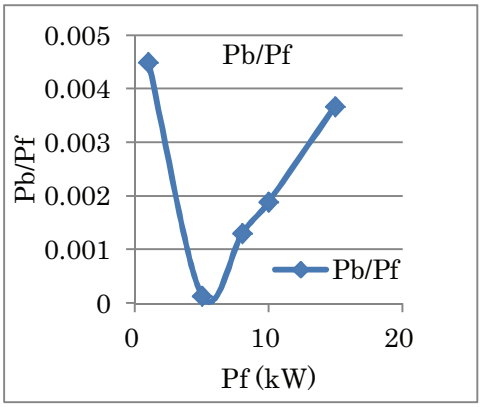


図 5:入射電力と反射の比

1-4　水負荷 30kW(CW)の電力試験

このダミーロードは電力負荷に冷却水を 30l/m ほど流して試験を行った。2 台の試験で VSWR1.06、1.09 を得た。冷却水温度を 20℃～40℃の使用範囲で変えても大きな変化はなく使用上問題がないこと確認した。試験結果は以下に示す通りである。

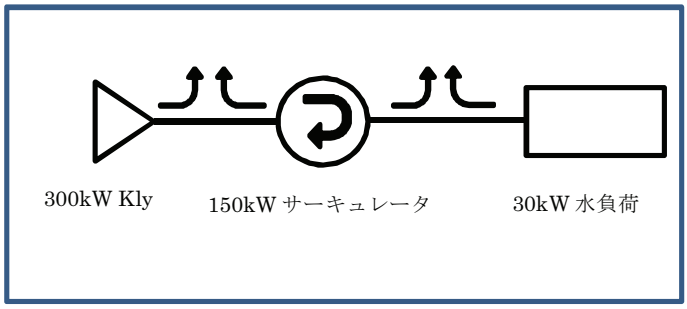


図 6:水負荷試験概略

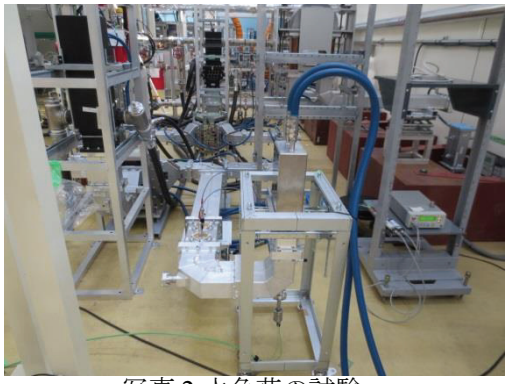


写真 2:水負荷の試験

(1)ダミーロード 1　[No.13036]					
透過出力		VSWR	水温（℃）		流　量
Pf (kW)	Pb (W)		IN	OUT	ℓ/min
5.21	10.0	1.092	29	35	32
10.5	18.7	1.088	29	38	32
14.8	22.6	1.081	29	40	32
20.2	21.6	1.068	29	43	32
25.2	17.3	1.054	29	45	32
30.1	12.2	1.041	29	48	32

2　STF の現状

STF Ⅱのコンポーネントの電力試験は東芝 MBK10MW クライストロンを使用してハイパワー テストスタンドで行われた。また導波管系はカップラー テストスタンド、RF ガンへの給電なども同時に構築した。今後 STF Ⅱで要求される導波管コンポーネントの開発も行っており、ダミーロードは開発が欠かせないコンポーネントである。昨夏 500kW 水負荷ロードと 500kW 個体ロード（SIC）の電力試験を行った。

2-1　STF の導波管系

導波管の試験として導波管の締め付けトルク、導波管のガス圧力封入、耐電力テストなどを行いった。

締め付けトルクは数年前にメーカーの方と富士フィルムのモノシートを用いて 15N・m 程度で締め付ければ十分であることを確認した。最近、モノシートを用いて再度テストを行ったが 20N・m で締め付けるとフランジの全周に亘って圧接痕がしっかりと残ることが確認できた。まだ、耐電力テストは行っていないので今後の課題である。STF Ⅱ 計画において導波管内を窒素ガス 2kg/cm2 で機密にして 5MW の耐電力を得る必要がある。フランジ面は溝とフラットを交合に組み合わせ溝に O リングを挿入しガス漏れを防ぐ構造になっている。O リングを 3 種類製造して O リングで機密が保持できるのかどうか漏れ試験を行っている、しかし数週間で 1 割ほど圧力が下がるのでガス導入フランジのアルミパイプを溶接にして最終試験の準備をしている。次にコンポーネントの耐電力試験結果を述べる。

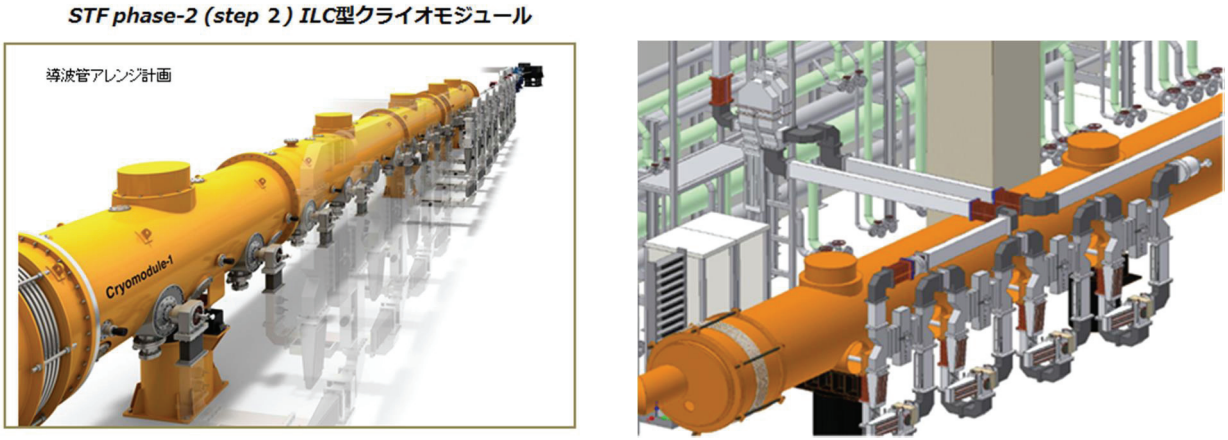


図 9:STF Ⅱ 導波管系

2-2　500kW 水負荷の電力試験

この水負荷は周波数 1300MHz、パルス幅 1.5mS、繰り返し 5Hz で使用を予定している。通常水負荷は冷却水の入出接栓が一方向に決められているので取り付け方法に制約がある。今回は取り付け方法を上下横向きで可能な製造をした。水負荷の冷却水の流れは問題にならなかったが製造時に冷却水の温度設定を低くしたことで VSWR が大きくズレ込んだ。本来の 500kW で使用すれば水負荷の温度も上昇し VSWR は良い方向にずれるので使用できる予定である。その時の試験結果を図 10 に示す。

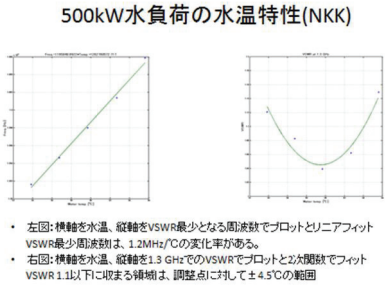


図 10:水負荷の水温特性

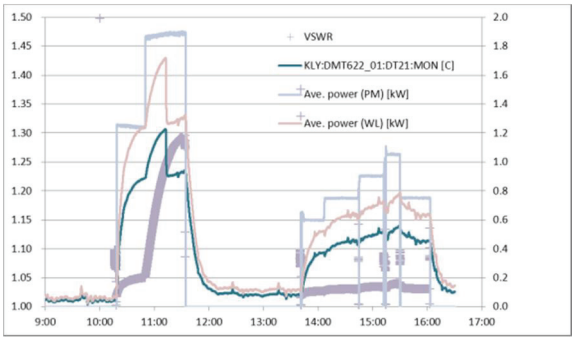


図 11: VSWR と電力

2-3　500kW 固体負荷の電力試験

固体負荷は 500kW が目標で今回のテストでは出力 500kW、パルス幅 750μS、繰り返し 5Hz と通常の出力 1/2 まで上げたが表面温度が 150 度に達し、VSWR1.47 と悪化した。これ以上出力を上げると内部が破損するので試験は中止したが今後は冷却効率を上げ流量を増やすなどして対応する予定である。試験結果を図 11 に示す。

3　まとめ

cERL と STF では L バンドのアルミ製導波管が使われ導波管コンポーネントの試験や導波管の諸要素について幾つか試験を行っている。導波管の締め付けトルクは 20N・m が良い、締め付け順は H 面の両側から対面で行っていくとよい。WR650 のフランジは溝とフラットを必ず合わせて接続する。今後、耐電力試験を行う予定である。これから 3 種類の O リングを使用した機密性の評価を溝、フラットの組み合わせたフランジで行う予定である。

今回試験したコンポーネントは冷却水を用いるものが多く個体ロードやサーキュレータなど冷却効率が悪い。RF 特性の VSWR の低下やフェライトの熱依存性が大きく出て開発のネックになっている。今後、どの様にして冷却効果を上げるかが課題である。

4　謝辞

今回の報告集原稿作成において試験データの提供と試験に多大な貢献をして頂いた NAT 吉田哲郎氏、石本和也氏、花香宣彦氏、植武優悟氏に感謝致します。

JT-60 トカマク解体の完遂

○岡野文範，池田佳隆，逆井　章 ，花田磨砂也，JT-60 チーム

日本原子力研究開発機構

1　はじめに

臨界プラズマ試験装置(JT-60)のトカマク本体及び周辺設備の解体(総重量として約 5,400 トン)は、H21 年度から着手し H24 年度(H24 年 10 月)に完遂した。JT-60 は、日欧共同で進めるサテライト・トカマク計画として、長パルス化と高圧力プラズマを目指した超伝導核融合実験装置 JT-60SA に改修するため、JT-60 トカマクを解体・撤去する必要があった。JT-60 は、放射線障害防止法に基づく国内唯一のプラズマ発生装置であり、平成 3 年から平成 20 年の 18 年間の重水素実験で発生した中性子により本体室の機器は放射化している。そのため、解体作業は放射線障害防止法に基づいて実施し、解体品の切粉や切断片等の放射化物の飛散防止を図るとともに作業毎に作業員や解体品の放射線測定を実施した。さらに、解体した機器等は将来のクリアランス処理を考慮して放射線測定データだけでなく材料、重量等のデータも管理記録し、管理区域内に保管した。一方、JT-60 本体は強力な電磁力に耐えるように主要構造物(例えばトロイダル磁場コイル構造体)は超硬材である高マンガン鋼からなり、更にそれらの構造体は本体中心部の狭隘部で溶接補強を行っていることから、超硬材の狭隘部での切断が課題であった。このため、解体にあたっては、単に組立手順の逆を行うのではなく、作業時の被ばく管理や解体品の保管場所までの流れを考慮しつつ解体手順を構築するとともに、その解体手順を実現するための適切な切断方法を見出す必要があった。加えて本体室においては多くの解体作業を同時に行う必要があることから、これらの安全作業体制を構築し、作業の安全実施に注力した。

2　JT-60 解体の作業内容

2.1　JT-60 の概要

JT-60 は、本体装置などの主要部で直径約 15m、高さ 13m、重量約 5,000 トンを超える国内最大のトカマク型核融合実験装置である(図 1) 。本体装置は、核融合反応を起こすために必要な高温プラズマ条件を実現するため、内部に高純度の水素或いは重水素を充填する真空容器、強磁場によりプラズマの閉じ込めや位置制御を行う TF コイルや PF コイルの大型コイル、コイルによる電磁力や地震で発生する応力に対して真空容器やコイル自身を支持する架台等から構成される(図 2) 。本体装置の主な材質は、TF コイルケースは高マンガン鋼、PF コイルは無酸素銅、真空容器はインコネル材、星形トラスビームや支持柱等の支持構造物は高マンガン鋼である。また、本体装置は、電磁力等に対して耐えうるように装置の各部位は、溶接により補強対策が施されている。そのため、前章で触れたように本体装置の解体では、通常の解体作業に先立ち、これらの補強対策箇所の加工を行う必要がある。また、本体装置の周辺には、真空容器内を超高真空に排気する真空排気設備などの本体付帯設備、プラズマの温度を上げるための加熱装置として中性粒子入射加熱装置(NBI)と高周波加熱装置(RF)、プラズマの温度等の性能や挙動を計測する計測装置など、種々の周辺設備が本体装置を取り囲むように配置されている。このため本体装置の解体に当っては、先ずこれら周辺設備から解体・撤去する必要がある。なお解体においては、これらの機器が放射化されているとともに、真空排気ライン配管など内表面には、重水素同士の核融合反応により発生したトリチウムが付着している可能性を踏まえて放射線管理を行いながら作業を行う必要があった。

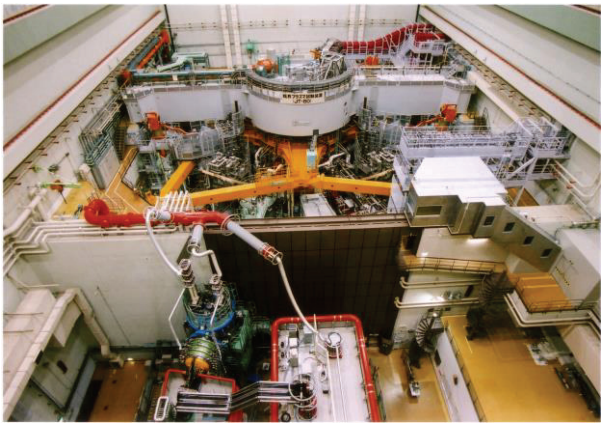


図 1 JT-60 装置の全景

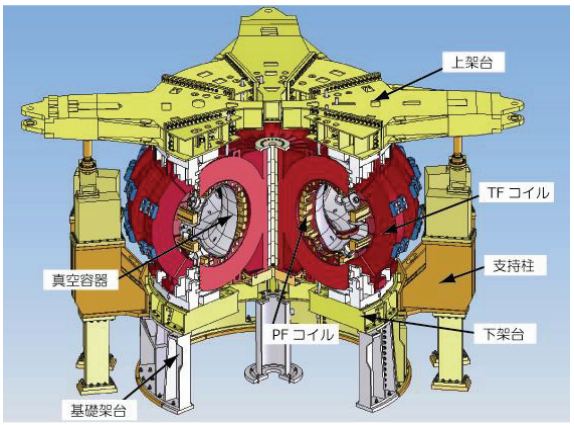


図 2　JT-60 本体装置

2.2　解体のための切断作業

JT-60 本体解体においては、電磁力等に対して機械的な強度を補強するために溶接されていた補強部の切断が大きな課題であった。すなわち殆どの溶接箇所は、高マンガン鋼の支持構造物同士をはめ合いで固定する所であり、結果的にその切断は狭隘部で実施する必要があった。TF コイルの解体にあたっては、この狭隘部で補強溶接された２個１組の TF コイルを１体のままで廻し込みながら吊り出すことは技術的に困難であると判断されたため、TF コイルを１個づつ切り離してから吊り出すことを解体の前提とした。このため、すべての溶接部を予め切断する必要があった。次に、1 個ずつ分離した TF コイルをドーナッツ状の真空容器から抜き取るためには、真空容器(＋PF コイル)の 20 度セクター分を切り取り、TF コイルを抜き出すためのスペースを作っておく必要がある。真空容器は外側に TF コイルがあるため、切り取り部は真空容器内側から分割して切断し(真空容器自身はより裕度を取って 40 度セクター分を切断)、真空容器内部に引き込む必要があった。この真空容器の外側表面には保温材があり、保温材が飛散しないような切断手法が必要であった。その次に PF コイルの切断に移行した。PF コイルは 5 種類、計 45 断面ブロックからなり、真空容器の外側を取り巻くように取り付けられている。TF コイルを吊り出すためには、20 度分の PF コイルを切断・搬出する必要があるが、ブロック数が多いことから、その切断作業の短縮化が求められていた。加えて真空容器のポートについては、TF コイルを回し込む際に干渉するため、事前に真空容器から切断しておく必要があった。

一方、TF コイル撤去後には、切り取った 20 度セクター部以外の残った真空容器(約 40 トン)＋PF コイル(約 280 トン)の吊り出しが必要となる。建屋クレーンの性能から吊り上げる総重量が 250 トン以下になるように 2 分割する必要があった。さらに 45 ブロックの PF コイルは、高マンガン鋼の支持構造体を介して真空容器の外側に取り付けられており、この真空容器と PF コイルの一体構造物を 2 分割するには、インコネル、銅＋絶縁材、高マンガン鋼の複合材の切断手法を見出す必要があった。

(1)TF コイル補強溶接部の切断

TF コイル(約 70 トン/個、全部で 18 個)は、2 個 1 組で上下 2 箇所のトカマク中心側狭隘部を幅 60mmX 深さ 50mmX 長さ 1000mm に亘って補強溶接していることから、TF コイルの解体にはこの補強溶接部を先に切断する必要があった。特に、TF コイルの構造体は、強力な電磁力に耐えうるため超硬度材(難削材)である高マンガン鋼であり、狭隘部でこの高マンガン鋼を切断することが求められた(図 3) 。火気を用いた切断方法は、狭隘部では溶融金属を吹き飛ばすことができないことから、機械的なフライス切断を行うこととした。ただし狭隘部であるため汎用のフライス加工機をそのまま取り付けることはできず、分解して持込んだ後狭隘部で再組立てが可能な専用の小型フライス加工機を開発する必要があった(図 4)。フライス切断においては、加工時の振動を抑える充分な剛性を持たせるとともに、作業員が直接、切断箇所を見ることができない狭隘部

での切断に対して、TV モニタを付帯させる等の工夫を行った。更にフライスの刃については、切れ味と損耗を実際の TF コイル切断で確認しながら、入手可能な種類のなかで最適化を図った。具体的には超硬エンドミルが最も高マンガン鋼の切断には有効であった。この結果、1 箇所の切断時間は約 9 日間(上側平均:7 日間、下側平均：11 日間)で実施できた。

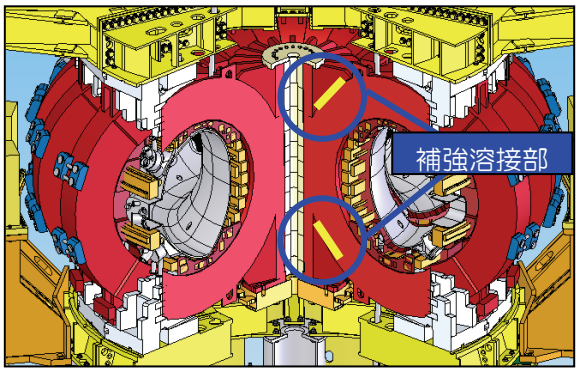


図 3　TF コイルの補強溶接部

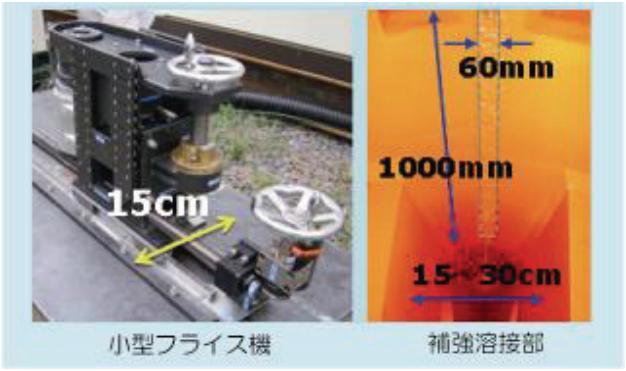


図 4　小型フライスマシン

(2)真空容器 40 度セクター分の切り取り

真空容器は、難削材であるインコネル(625)6mm 厚の板材を 2 枚用いた二重構造であり、外側には TF コイルがあるため切断は内側から行い、切断片は真空容器の内部に引き込む必要があった。火気手法は、真空容器外側のコイルの絶縁材(エポキシ＋ガラス繊維)等に引火する危険性があり採用できないため機械的な切断手法を用いた。この際、真空容器外側表面にはセラミック系の保温材が装着しており、保温材まで切断するとセラミック粉末が飛散し、TF コイルに囲まれた狭隘部では洗浄が困難となることから、保温材を切断しないで真空容器のみを切断することが求められた。このため、位置検出センサーを有し曲面形状に沿って切断深さを精密に管理できる専用のフライス機を導入することでこの課題を解決し、真空容器 40 度セクターを 4 分割して、真空容器内部に引き込むことを実現した(図 5)。

(3)真空容器ポート切断

TF コイルを真空容器から吊り出すためには､真空容器に溶接されているポートを先に切断する必要がある。この切断においてもポートの外側にはセラミック系の保温材が装着していることから、真空容器内側からポート筒のみを切断することとし、真空容器切断と同様に切断厚みを制御しながら切断してセラミック粉末の飛散防止を図った。

(4)ポロイダル磁場コイルの切断

真空容器 40 度セクター分を切り取った後は、次に PF コイル 20 度分を真空容器外側から切断し取除いた。PF コイルは銅バーに絶縁材を巻いた多層構造で、総数 45 ブロックが真空容器を取り囲むように配置されている。最も太い PF コイルの断面は約 35cm×約 45 cmであり、通常のセーバーソーでは切断長さが足りず、切断長さが 50 cmのギロチンソーという特殊な鋸機構を用いて切断を試みた。しかしながら 1 つのコイルの切断に 1 週間程度もかかり、作業期間の短縮が大きな課題となった。これに対して、冷却水を全く使用しない乾式ダイヤモンドワイヤーソーを導入し、PF コイルの一括切断を試みたところ、極めて短期間(約 5 日間:切断のみの正味時間)で PF コイルブロックの切断(2 線切)に成功した。ダイヤモンドワイヤーソーは、切断物の大きさや形状に依存することなく使用が可能で、ワイヤソーと各種プーリー、駆動モーターから構成され、プーリーのセッティングにより任意の部位からの切断ができる。乾式ダイヤモンドワイヤーソーのコイル切断(銅バー＋絶縁材)の実績が無かったので、先に試験体を用いて切断能力の確認をし、最終的に実機切断を回転速度 20m/s で実施して実現した。切断が進むにつれ張力が変化するが、常時モーターの電流値にてフィードバッ

ク制御を行い、調整用プーリーがワイヤソーを張る方向に移動し、常に一定張力を維持しながら切断を行う(図 6)。冷却水を使用しないので、切断の切粉については放射化物を含む排水処理の必要がなくビニール養生と掃除機で切断後の清掃が可能であり、作業時間の短縮、合理化ができる。更には作業員が切断箇所に居る必要もないことから怪我、被ばくの可能性も低く、極めて有効な切断手法であることが明らかとなった。

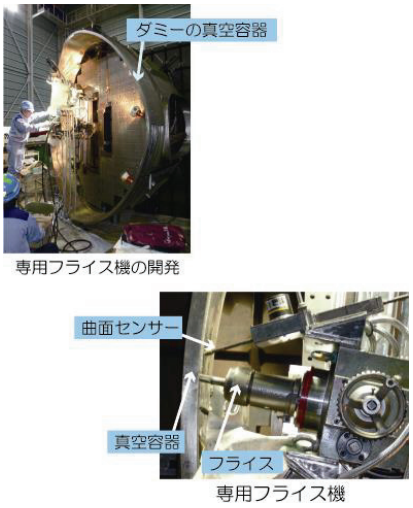


図 5　真空容器専用のフライスマシン

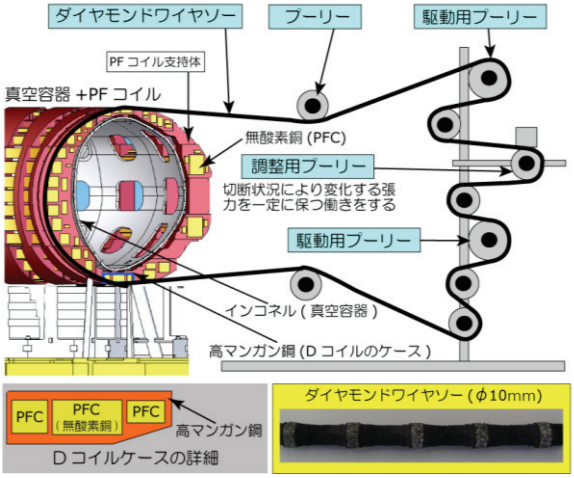


図 6　ダイヤモンドワイヤーソー

(5)「真空容器＋PF コイル」の 2 分割

TF コイル解体後の真空容器＋PF コイルの解体に当たっては、JT-60 製作時と逆手順の方法で真空容器と PF コイルを分離する案も考えたが、この場合、TF コイルを抜き取るための 20 度セクター部の切り取りと同様に、真空容器の切断と 45 ブロックの PF コイルの切断に加えて、36 箇所の PF コイルの支持構造体や真空容器のポート等の追加切断が必要となり作業期間の長期化が懸念された。このため、銅製 PF コイルの効果的な切断を実証した乾式ダイヤモンドワイヤーソーで、さらにインコネル（真空容器）、高マンガン鋼（PF コイル支持構造体）等の材料も切断可能であれば、「真空容器＋PF コイル」の一括切断が可能と考えた(Fig. 6)。このため、試験体で切断性能を確かめたところ、高マンガン鋼の切断時間は銅に比べ 2 倍程度遅くなるものの、技術的に適用できることを確認し、実機で「真空容器＋PF コイル」の一括切断(1 線切)を試みた。この結果、ダイヤモンドワイヤーソーの損耗は、PF コイル単体の切断に比べ 3 倍程度となり、途中 3 回交換する必要があったものの、約 7 日間(切断のみの正味時間)で一括切断を実現した。この値は、真空容器の 40 度セクターを内側からフライスで切断した時に要した時間の約 1/4 であり、極めて効率の良い有効な切断手法であることを示した。

2.3　放射線管理

JT-60 は、18 年間の重水素実験で発生した中性子(積算 1.5×10^{20} 個)により放射化している。本解体は、核融合実験装置が放射線障害防止法の下で行う最初のケースである。解体作業は、放射線障害防止法及び予防規定に基づいて実施し、大きなポイントは、切断作業に伴う切粉等の飛散を防止し作業者の内部被ばくを防ぐとともに、解体品を適切に保管管理することであった。さらに、作業に当たり、本体室内の領域区分(JT-60 トカマク中心からⅠ～Ⅳの 4 領域)を行い、放射化レベルが最も高い真空容器近傍の領域Ⅰでは、作業員の滞在時間を極力短くするとともに、領域Ⅰの SUS 材(^{60}Co が支配的)に関しては保管容器に入れた上で保管専用の建屋に保管、それ以外の領域(Ⅱ～Ⅳ)から出た解体品は保管容器に入れ保管専用の用地に保管するなど、領域に対応して保管管理を行った。

(1)作業時の管理

機器の切断が必須となる解体作業においては、切断時に発生する放射化した切粉や切断片等の飛散防止に努めるとともに作業者等に対する内部被ばく等の防止が重要である。そのため、作業者には作業内容に応じた適切な防護具を装着させるとともに、作業の種類毎に作業エリアを明確に区分した。加工が伴う作業(切断、溶断等)と加工が伴わない作業(スパナ等)は、養生方法や防護具が異なるために混在させない。また、加工が伴う作業は空気汚染が伴うもの(熱による加工の溶断、プラズマ切断)、伴わないもの(鋸等による機械切断)があり、養生方法が大きく異なる。鋸等による機械切断は、切粉の管理が全てであり、養生した作業エリア外に飛散させない管理を行う。熱による加工は、グリーンハウスまたはそれに準ずる養生にて、局所排気装置を設け負圧管理の下作業を行う。実際の作業において、作業場所が狭隘で確実な養生ができない場合は、可能な限りシート等で養生を行い、さらにその周辺部まで養生を拡大し、そこで完全に切粉を押さえ込むことにした。さらに、作業者が切断の作業エリア外に出る場合は、原子力機構の放射線管理担当員等が作業者の身体サーベィを行い汚染がないことを確認する等の方法を取った。

(2)解体品の収納保管

JT-60 トカマクの解体品は、管理区域からの解体となるため全ての解体品は、放射線測定を行った上で、那珂核融合研究所内にある管理区域内に原則、放射化物として保管する。この解体品は、JT-60SA で再据付するもの(約 600 トン、約 1,000 点)と、再据付する可能性が低いもの(約 4,800 トン、約 12,000 点)がある。再据付する可能性が低い解体品は、大きいものから小さいものまで多種多様であり、効率良く収納するため、専用の保管容器と密閉容器を用いた。保管容器は市販の海上コンテナ(20 フィート、40 フィート)を用い、密閉容器はトリチウム汚染の可能性がある真空配管等を収納するためのもので、保管容器(20 フィート)を密閉構造に改造したものである。保管用地は、放射化した解体品を入れた保管容器専用の保管場所で約 950 トンが保管されている。JT-60 機器収納棟は、本体装置等の大型機器を中心に約 3,850 トンが保管されている。一方、JT-60SA で再据付けする解体品は、JT-60 発電機棟 MG 室他にて主に NBI 加熱装置等約 600 トン(約 1,000 点)が保管されている(図 7,図 8) 。

図 7　保管用地 2

図 8　NBI 加熱装置の保管

(3)解体品の保管管理方法

解体品の保管は、放射化物としての厳重な管理は言うまでもなく、将来のクリアランスも考慮した情報管理も重要である。特に、JT-60SA で再据付けする可能性が低い多くの解体品は、使用履歴の異なる機器を大量に保管容器または密閉容器に収納し一定期間保管することになる。そのため、

将来においても放射化物の情報が容易に照合できるシステム(保管管理システム)を構築し、その情報を確実に保管する必要がある。JT-60 解体では、1 つの機器でも切断分解された機器毎に一つの単位として管理した。また、同じ種類の再使用品同士を固縛したり、ドラム缶等の容器に格納した場合は、その纏まりごとにタグ番号を発行し管理した。そのため、そのタグ番号により保管管理システムのデータベースから個々の情報が確認できる[1)]。

(4)保管管理システム

再据付けする可能性が低い解体品に関しては、全ての情報を計算機で管理するために保管管理システムを開発した。保管管理システムは、保管管理システムサーバー内に解体品情報をデータベース化し、そのデータベースの閲覧や保管管理台帳を作成したり、解体品のタグ番号又はバーコードスキャナーを用いて、そのものの情報を抽出する機能を有する。解体品情報の登録や閲覧、出力は、ローカルエリアネットワーク(LAN)に接続されたクライアント PC から Web ブラウザ(Internet Explorer 等)にてアクセスできるようにした[1)]。

3　JT-60 解体作業の進捗

新たに組立が始まる超伝導核融合実験装置 JT-60SA の基礎部となるクライオスタットベースが 2012 年(H24 年度)の下旬に欧州(スペイン)から輸送され、本体室に搬入される予定であったため、同年の中旬までに本体室中心部を更地化した。解体作業は、単年度契約であり作業の継続を考慮しながら実施する必要があった。本格的な解体作業に入る前の解体準備の中には、原子力機構の職員による作業も含まれる。特に真空容器内の第 1 壁タイルの取り外しは、約 12,000 枚のタイルを約 70 日間(約 700 人日)かけて行った。[2)] 図 9 に JT-60 解体工程を示す。本体装置の解体の流れ(図 10)に示すように、1 つ目の大きなマイルストーンは、TF コイルの吊出し・撤去(H23 年度内)であり、TF コイルを撤去するために、各設備の解体を逐次進めて干渉機器がなくなった状態で TF コイルを撤去した。2 つ目のマイルストーンは、真空容器を軽量化(2 分割)した後の吊り出し・撤去(H24 年 7 月)であった。[3)4)]

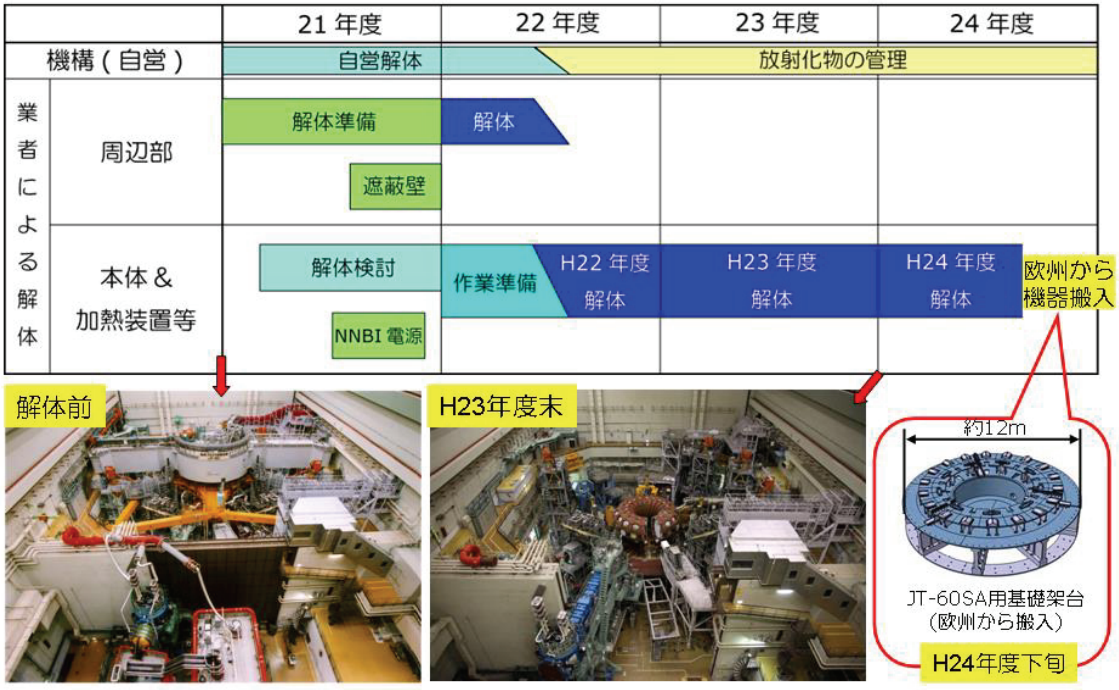


図 9　JT-60 解体のスケジュール

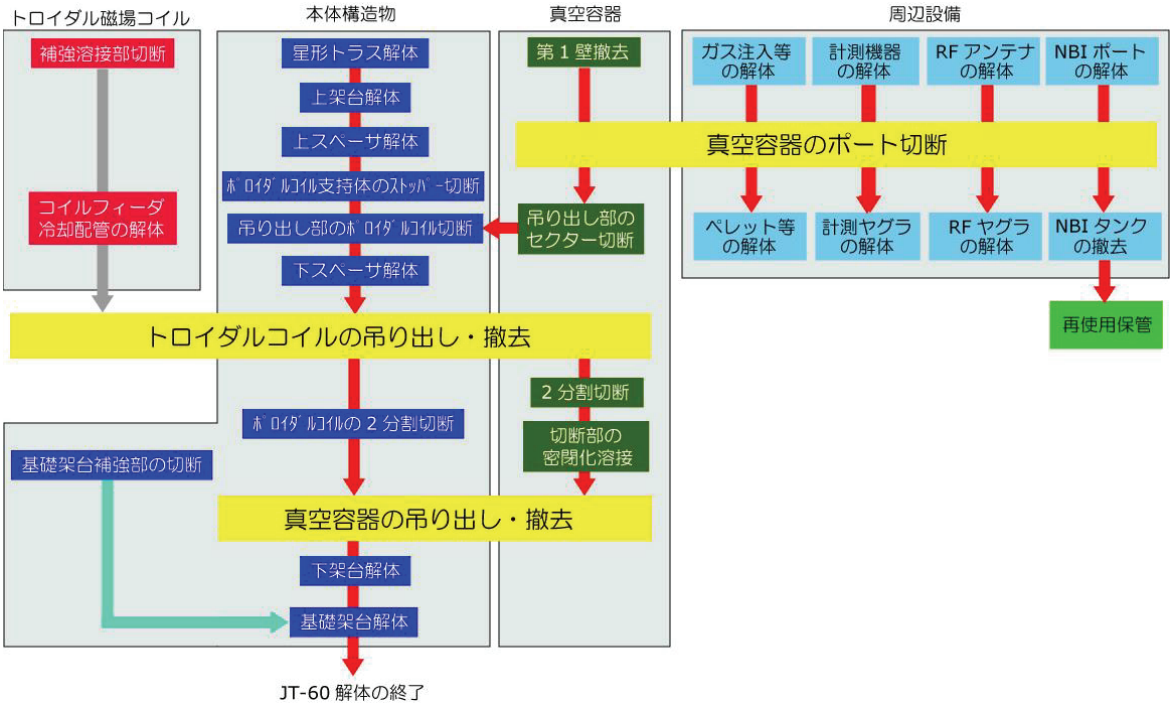


図 10　JT-60 本体装置の解体フロー

4　解体作業における作業分析

JT-60 解体は、日欧共同の国際協力である JT-60SA 計画に基づく工程が予め確定しており、限られた期間と予算内で進める必要があった。特に本体装置の解体に不可欠な切断作業は、放射線障害防止法の下に切粉の飛散と作業者の内部被ばく防止を図りながら安全でかつ効率良く作業を進めることが重要となった。更に、JT-60 解体は、メーカーに発注する契約形態が単年度契約(一般競争契約)であったため、長期に亘る作業を分割して発注する必要がある。このため作業開始前には、JT-60 の過去の作業経験や今回の各 R&D の結果を充分検討し、本体装置は無論、周辺の機器に至るまで詳細な解体工程表を検討して、年度毎の契約を行った。このような作業により、受注メーカーに対して効率的な解体作業を指示し、限られた期間で解体を完遂することができた。

実際の解体作業においては実績工程からも分かるとおり切断作業が工程を決めた(図 11)。更に本体装置の解体作業量としても切断作業は、全体の約 4 割を占め、この作業を効率良く実施することが、JT-60 解体の鍵であった（図 12)。すなわち狭隘空間で重量物を切断する場合、目視確認の困難さ、切断直後の応力開放による切断物の急な移動等、危険が伴うため、そのリスクを下げる手法が求められる。さらに真空容器近傍では、作業員の被ばくを軽減するためには、作業員の真空容器近傍での滞在時間を短くすることが求められる。このため今回の解体では、対象機器に応じて、分解・組立が容易で狭隘部に取付け可能な小型フライス加工機や切断深さを管理できる専用フライス加工機等を投入した。これにより、切断時の切粉の飛散を抑えながら高マンガン鋼やインコネル等の難削材の切断を実現した。TF コイルを撤去した解体後半では、切断箇所に養生ハウスを設置し、乾式ダイヤモンドワイヤーソーにより真空容器と PF コイルの一括切断を実現した。特にこのダイヤモンドワイヤーソーは、10㎜ のワイヤーが通る空間を確保すれば、機器の大きさ・形状に依存せず難削材の一括切断が可能であり、工程短縮（専用フライスと比べ約 1/4）と安全確保（作業員は切断箇所に近づかなくても可能であり、巻き込まれ、被ばく等の危険が無い）に大変有効であることを実証した。今後、こうした解体の経験や実績は、核融合分野以外の複雑な機器・設備の切断作業においても適用が期待できる。

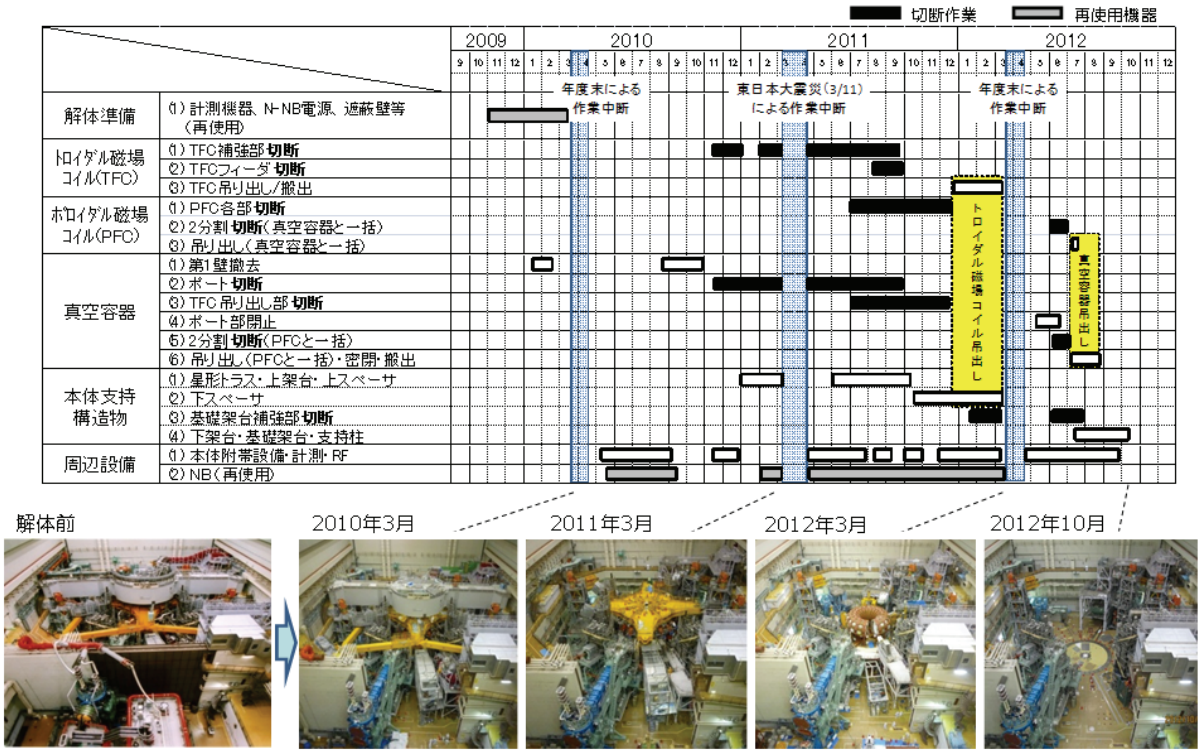


図 11　JT-60 解体の実績工程

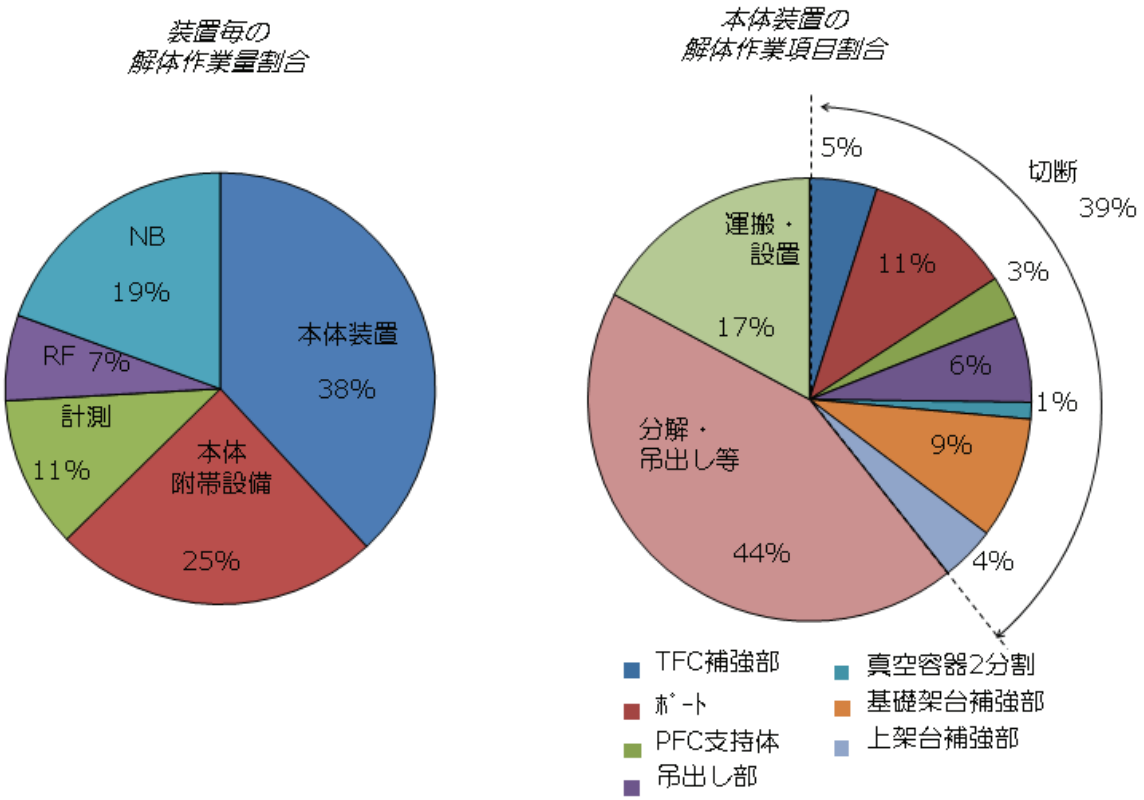


図 12　JT-60 本体装置の作業割合

5　まとめ

JT-60SA 建設に向けた JT-60 本体の解体作業は、2009 年(H21 年度)の自営による真空容器内の約 12,000 枚の第一壁タイルの撤去等の解体準備に始まり、2010 年(H22 年度)前半の周辺機器解体、2010 年(H22 年度)後半の本体装置・NBI 加熱装置解体、2011 年(H23 年度)の本体装置の主要機器である上架台（約 250 トン)、トロイダル磁場コイル（TF コイル：約 80 トン/個、全 18 個）の解体作業を終了し、各々を JT-60 機器収納棟に保管した。最終年の 2012 年(H24 年度)には、真空容器(約 40 トン）＋ポロイダル磁場コイル（ PF コイル:約 280 トン、支持体込み）を一括で 2 分割に切断、吊り出し後、JT-60 機器収納棟に保管するとともに、下架台（約 200 トン)、基礎架台（約 170 トン）の解体、保管を行い、3 年に亘って行ってきた解体総重量約 5,400 トンに達する JT-60 トカマク本体及び周辺設備の解体作業を完了した。JT-60 の解体作業は、放射線障害防止法の下での最初の核融合実験装置の解体であったが、適切な切断手法や放射線管理手法を導入することで、長期に亘る解体作業を無事故･無災害で終えることができた。

参考文献

1)西山友和　他,“JT-60 解体に伴う放射化物解体品の保管管理”,平成 22 年度熊本大学総合技術研究会報告集(CD-ROM),11P-240,2011.

2)柳生純一　他 ,“JT-60 解体に伴う内部タイルの取外し報告”,平成 22 年度熊本大学総合技術研究会報告集(CD-ROM),11P-241,2011.

3)岡野文範　他,“JT-60 トカマク解体の完遂” JAEA-Technology 2013-031

4)岡野文範　他,“JT-60 トカマク解体の完遂”デコミッショニング技報(Journal of the RANDEC),P10-P23,No48 2013.

KEK 小型電子加速器のビームライン変更に伴うアライメント

○荒木 栄 A)，浦川 順治 A)，照沼 信浩 A)，福田 将史 A)

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

概要

KEK 小型電子加速器において、マルチバンチ電子ビームとレーザー光蓄積装置（光共振器）を用いたレーザーパルスとの逆コンプトン散乱による小型 X 線源の開発を行っている。電子ビームはフォトカソード高周波電子銃（RF 電子銃）で生成し、加速管で最大 30 MeV まで加速する。その後、光共振器に蓄積したレーザーパルスと衝突させ、15～30 keV の X 線を生成する。この小型電子加速器（LUCX）では、短時間で鮮明な X 線イメージ画像を得ることを目標としている。昨年度、このためのアップグレードとして、3.6 cell RF 電子銃および 12 cell 定在波加速管の導入、4 枚ミラー平面光共振器の導入などを行った。本原稿ではこの加速器の改良に伴う設置とアライメントについて報告する。

1　小型電子加速器（LUCX）

2001 年度に開始された「先進小型加速器事業」の関連加速器技術開発として、レーザーを蓄積する光共振器開発を 5 年間行った。この開発事業では小型硬 X 線放射光源（約 10m 長）を医療診断に使うための必須の基盤技術として光共振器の開発を進めた。2005 年度事業終了までに X 線生成実験を行えなかったが、この事業によって大強度電子源製作と高性能光共振器製作技術を確立した。その後、文部科学省　平成 20 年度「光・量子科学研究拠点に向けた基盤技術開発」プログラムの「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」に引き継がれて、2008 年～2012 年度終了まで X 線生成実験を継続した。LUCX では、電子ビームとレーザーの衝突技術や、そのためのモニター開発、X 線検出器の開発などを行った。その時の（アップグレード前）小型電子加速器ビームラインの構成は図 1 上の様になっている。1.6 cell RF 電子銃生で成したマルチバンチ電子ビームを下流の S-band 3 m 進行波加速管で 30 ~ 40 MeV まで加速する。その後の 4 極電磁石により、電子ビームを衝突点で集束する。その衝突点には 2 枚ミラー光共振器が設置してあり、その内部に蓄積しているレーザーバルスと電子ビームを衝突させて逆コンプトン散乱により X 線を生成する。このときの電子ビームとレーザーバルスの衝 突角度は 20°である。衝突後、電子ビームと X 線は下流の偏向電磁石で分離し、電子ビームはビームダンプへ捨てられ、X 線は Be 窓を通じて大気に取り出して、検出器で X 線を観測する。

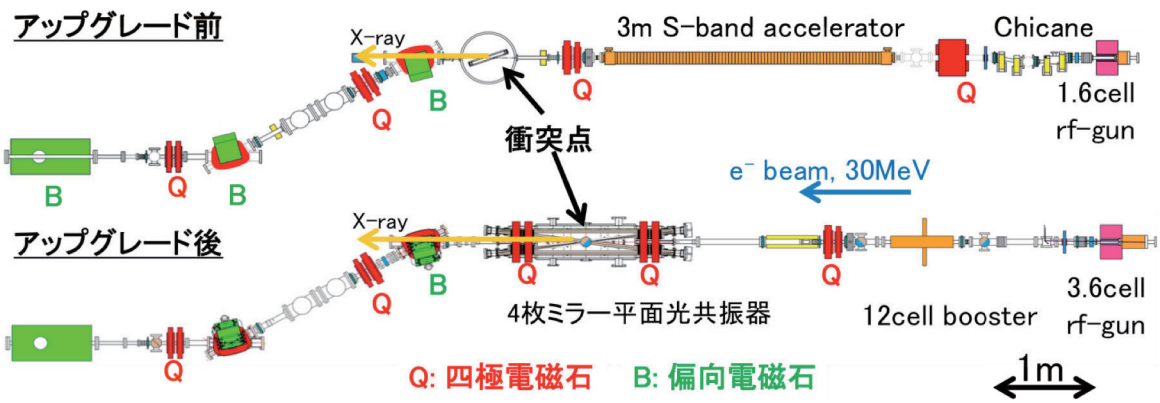


図 1. KEK 小型電子加速器（LUCX）のビームライン

2011 年の技術研究会では、その加速器のアライメント報告をおこなった。実験運転を進めている時に、東日本大震災に見舞われ、3 ヶ月の停止を余儀なくされた。建屋内の送電ラインが被災して、コンクリートシールドも数センチゆがんだ、加速器本体は大きなダメージは無かった。電力の復旧後、装置の点検・調整して衝突実験を再開し成果を上げる事ができた。（図 2 左、復旧後の写真）

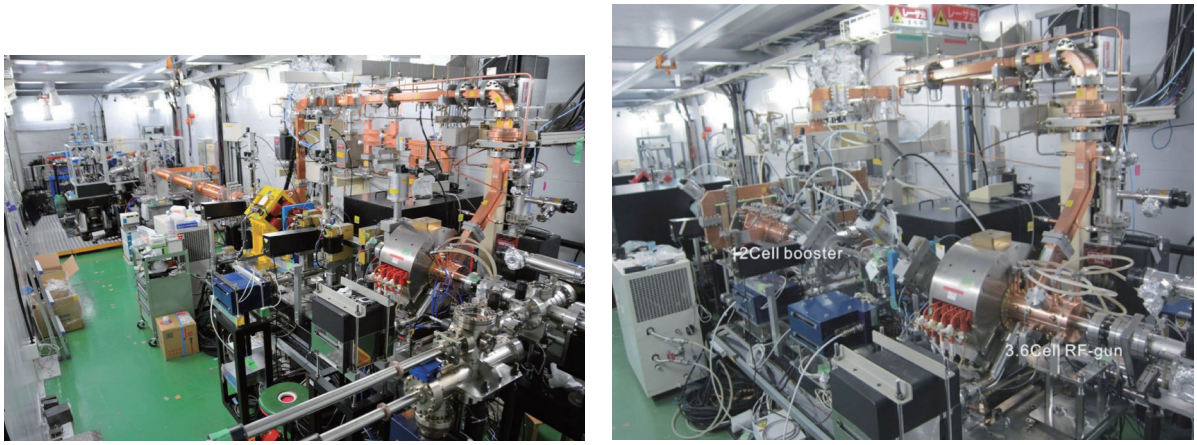


図 2. KEK 小型電子加速器（LUCX）の写真。変更前（左）、変更後（右）。

2　LUCX ビームラインの変更

2011 年秋の X 線イメージング試験（図 3）では、1 回のマルチバンチ電子ビームとレーザーの衝突での生成 X 線の光子数が 10^4 個と低いため、撮影に長い時間が必要であった。今回の変更は、生成 X 線の光子数を増やし、時間を短縮して LCS X 線でイメージを撮影できる様にするのがアップグレードの目標である。2012 年初冬より基本設計を始め、夏に組み替え作業を行った。

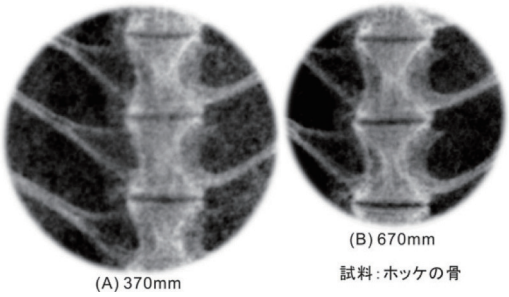


図 3. イメージングの一例

新ビームラインの構成は基本的には以前と同じだが、図 1 下および図 4 に示す様に、電子銃、加速管をそれぞれ 3.6 cell 型 RF 電子銃および 12 cell ブースターへ交換する。さらに RF 電子銃へのレーザー入射方式を変更してシケインを取り外し、加速器部分のサイズを現在の 5.7 m から 2.9 m へ約半分に小型化する。そして、X 線生成増強のために大型化した 4 枚ミラー平面光共振器を設置する。RF 電子銃で 10 MeV のマルチバンチ電子ビームを生成し、その後の 12 cell ブースターでさらに 30 MeV まで加速する構成である。表 1 にアップグレード後の電子ビームのパラメータを示す。ビームライン前半部と高周波立体回路の組み替えを終えて、秋には高周波を入力して電子銃とブースターのエージングを進めた。新規制作の高周波機器は、性能を引き出すためには、長いエージング期間が必要である。

表 1. 電子ビームのパラメータ

Energy	30 MeV
Bunch charge	0.4 nC
Number of bunches	1000
Beam size at the collision point（1σ）	33 μm ×33 μm
Bunch length（FWHM）	10 ps
Bunch spacing	2.8 ns

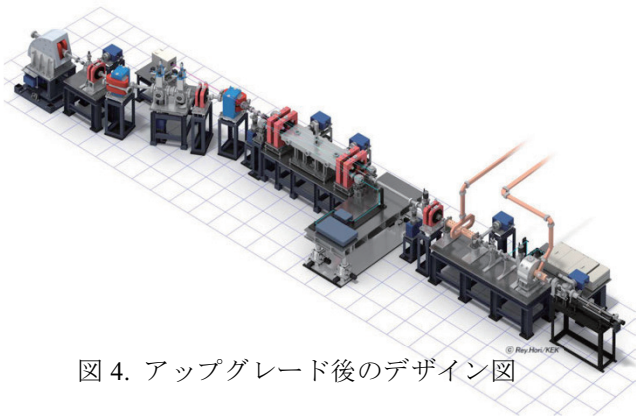


図 4. アップグレード後のデザイン図

3　3.6 cell フォトカソード RF 電子銃

生成する X 線の目標エネルギー（ = 15 keV）の X 線を生成するには 30 MeV の電子ビームが必要となる。1.6 cell からセル数を増やした 3.6 cell 型 RF 電子銃を導入することにより、ビームエネルギーを 5 MeV から 10 MeV まで引き上げることができる。図 5 と表 2 に 3.6 cell 型 RF 電子銃の構造とそのパラメータを示す。空洞形状は今までの 1.6 cell のものと同じで、滑らかなカーブで構成され、端板にはロードロック方式により着脱可能なカソードプラグを装着している、これに紫外レーザーパルス光（波長 266 nm）を照射することで光電効果により電子ビームを生成する。

表 2. 3.6 cell RF 電子銃のパラメータ

Frequency（π-mode）	2856 MHz
Q-value	15000
Coupling（β）	0.99
R/Q	395 Ω
Mode separation（π-2 π/3）	2.8 MHz

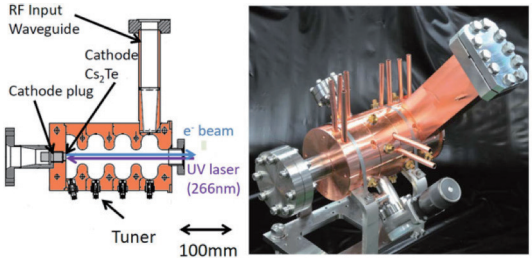


図 5.　3.6 cell RF 電子銃

4　12 cell ブースター

3 m の S-band 進行波型加速管から 82 cm の定在波型 12 cell ブースターへ交換することで、加速器部分を小型化する。ここで電子ビームのエネルギー利得は 20 MeV であり、入射ビームエネルギーが 10 MeV であるので、加速後に 30 MeV のビームを得られる。12 cell ブースター空洞の構造は今までの技術の蓄積を基にしており、3.6 cell RF 電子銃と基本的には同じものになっている（図 6 およびパラメータを表 3 に示す）。RF 入力セルは加速管中央部に位置し、ここから高周波を入力する。内部の電界分布の対称性を良くするため、RF 入力ポートはダブルフィードになっている。測量の基準となる物が無く、本体のけがきを利用して一次アライメントを行った。

表 3. 12 cell ブースターのパラメータ

Frequency（π-mode）	2856 MHz
Q-value	17800
Coupling β	1.1
Mode separation（π-10 π/11）	1 MHz

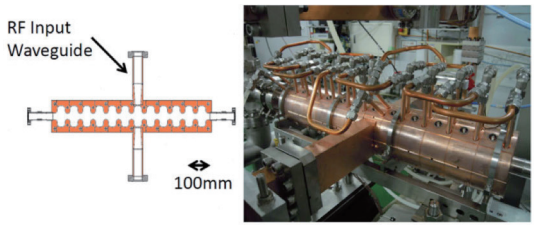


図 6.　12 cell ブースター

5　4 枚ミラー平面光共振器

以前の 2 枚ミラー光共振器ではミラーの誘電多層膜のダメージ閾値により蓄積するパワーが制限されていた。レーザーが反射するミラー表面を度々破壊していた。そのため共振器長を伸ばし、ミラー上のレーザーサイズを広げる構成としている。また、4 枚ミラー光共振器は 2 枚ミラーのものと比べてミラーの位置に対する許容誤差が広く、アライメントに対して有利になる。この光共振器は同一平面上に、各々2 枚の凹面ミラーと平面ミラーで構成されている（図 7）。

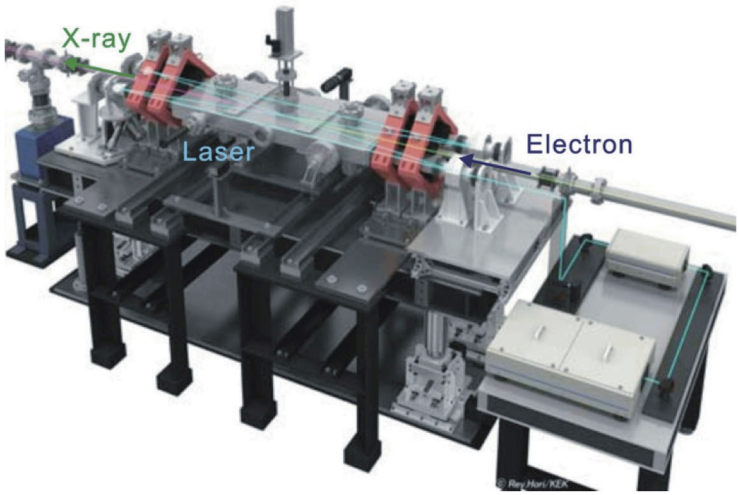


図 7. 4 枚ミラー平面光共振器

共振器を大型化し、凹面ミラー間の距離が 420 mm から 1893 mm と長くなったことで、ミラー上のレーザーサイズを大きくする事ができる。ミラー表面を破壊せずに蓄積できるパワーも増える。蓄積されるレーザーパルスの設計エネルギーは前回 X 線実験時の 15 倍の 6 mJ/pulse となる予定である。衝突点で電子ビームを絞るため共振器の内側に 4 極電磁石を前後 2 台ずつ配置した。ウェストサイズ（1 σ）は 55 μm × 25 μm（H × V）となっており、若干偏平になっている。電子ビームとの衝突角度は 20° から 7.5° となり、より正面衝突に近づけて利得を増やした。設置に関しては、共振器ミラーは精密調整台に取り付けるため、0.5 mm 程度の精度で十分である。分割した架台に、当初、配置して共振器が安定にならないため。前後のミラーが同一架台に載る様にテーブルを延長して対策した。配置の工夫と振動を抑えた架台の制作も重要である。

6　アライメント

ビームラインが電子銃から衝突点まで大きく変更されるため、電磁石や加速管など撤去してベース架台の設置の変更を行った（参考、図 2 右）。電磁石や加速管は各々調整用架台（中間架台）を挟んでベース架台に設置されている。LUCX の目標設置精度は 0.2mm 程度であり、各々の機器に視準できる基準があれば、たかが 15m程度の範囲であれば難しい精度ではない、しかし、基準が不明瞭、もしくは基準とする物の精度が悪い状態では、それらの設置精度の保証が難しい。今回明確に基準座が準備されているものは、ソレノイド電磁石、偏向電磁石（B1，B2）と増設した光共振器前後の 4 極電磁石のだけである。基準座を証として、基準ラインを作成して、それ以外の 4 極電磁石、ブースターおよびビームパイプのアライメントを行った。生成 X 線は、電子ビームの直線方向上に放出されるため、検出器の位置もアライメント対象になる。

精密アライメントはレーザートラッカー（3 次元測量器）を用いて作業するが、他の加速器測量で使用しているため、2013 年春におけるアライメントは簡易レーザーとオートレベルで進めた。この方法は、前回アライメント時において、レーザートラッカーと併せて使用して、一次アライメント手法を確立していた。夏には組み替え改造作業を終了し、試験運転を開始した。また、ビームラインの要所に設置されている。ビーム位置モニターやスクリーン・モニターで電子ビーム軌道（位置）を割り出し、実験中のビーム微調整を行うので、それらの設置位置も重要である。現在、RF 運転およびビーム運転の合間に精密アライメント作業を行っている。最近のレーザートラッカーによる測量結果を次に示す。RF 電子銃が取り付けられている。ソレノ

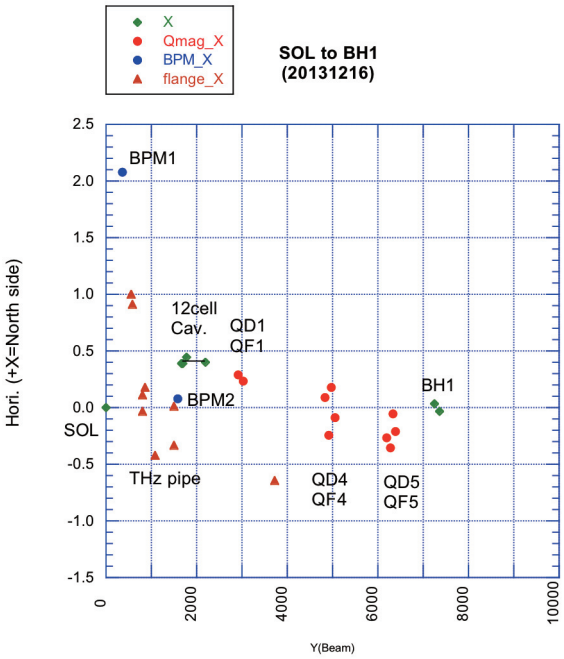


図 8. ビームラインの横方向のズレ

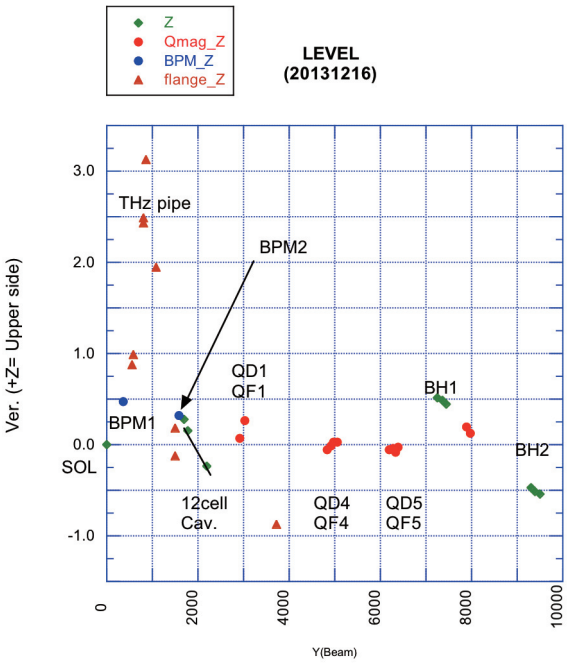


図 9. ビームライン高さ方向のズレ

イド電磁石（SOL）を基準とし、偏向電磁石（BH1）の方向を基準ラインとした。横軸はビーム方向を示し、縦軸は設計からのズレを表す（単位は mm）。図 8 に横方向のズレを示す。シケイン部を取り除いたスペースにスクリーン・モニターを含むテラヘルツ波実験装置（THz pipe）やブースターを配置したが、ソレノイド電磁石の直後、ビーム位置モニター（BPM1）が大きくズレ、ブースター（12 cell Cav.）が 0.4 mm ほどシフトしている。また、それらをつなぐビームパイプ（赤△）がねじれている事も明確になった。ブースター以降は、衝突点を通過する様に斜めのラインを構成している事が判明した。

高さ方向は、基準ジオイド面からのズレを図 9 に示す。上流部は同様にビームパイプのミスアライメントが判明した。主要な電磁石の設置は良好で±0.3mm に調整されている。偏向電磁石（BH1, BH2）は縦方向のトレランスには余裕があるので問題にならない。

7　まとめと今後の展望

LUCX グループでは、レーザー蓄積光共振器を用いた X 線源の開発を行っている。これまでに加速器の小型化のために 3.6 Cell RF 電子銃と 12 Cell 定在波菅の導入を行い、十分な性能のマルチバンチ電子ビームが得られることを確認した（図 10）。今後の RF エージングの継続によってさらにロングパルスの運転が可能となることが見込まれる。衝突用のレーザー蓄積光共振器として今回初めて 4 枚ミラー構成の平面光共振器を用いた。周長を非常に長くとることによってミラー上におけるダメージを避け、より高強度なレーザーパルスの蓄積が可能になった。但し、架台の剛性を見直す必要がある。最近の X 線生成試験では、総量として 6.38 $\times 10^6$ Photons/sec の X 線を確認している。これまでの 20 倍以上の X 線強度を達成しているとともに前述の電子ビーム・レーザー光のより一層の改良によってさらなる増強が期待できる。

アライメントは概ね良好である。ビーム軌道の調整を容易にするためと、電子ビームのエネルギーの測定精度などを高めるために、精密調整を引き続き行っている。残念ながらアライメント結果を本稿に掲載出来ないが、研究会ポスターにおいて報告する予定である。

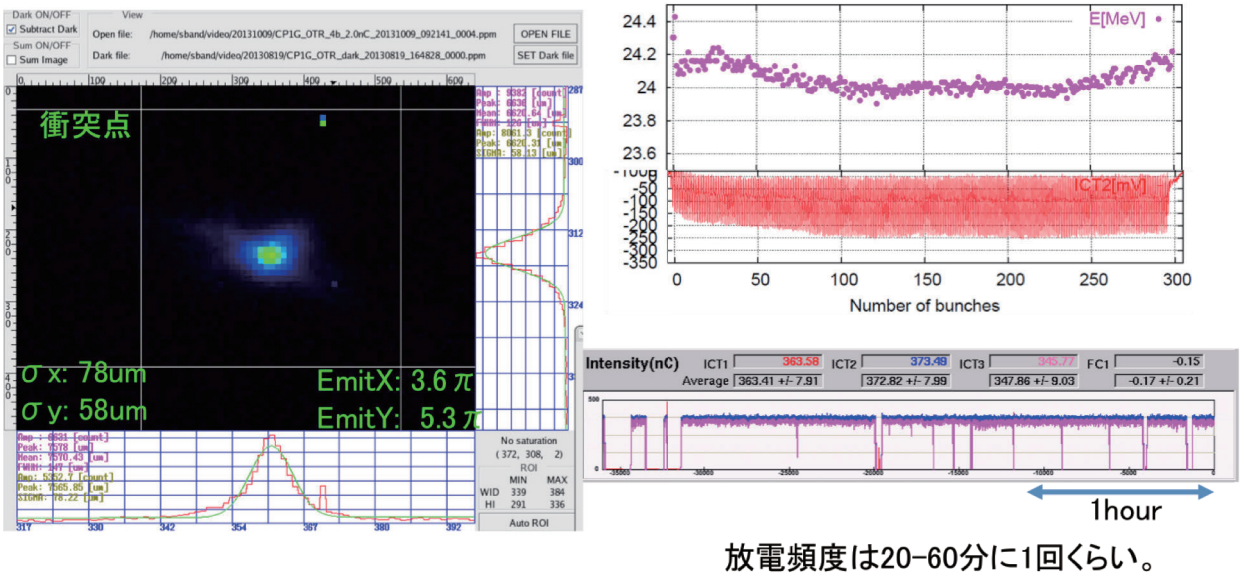


図 10. マルチバンチビームの調整

X 線実験は 24MeV, 380nC（1.25nC/bunch）, 300bunches で行っている。

生体信号計測のための計装アンプの設計と試作

外山貴子

宮崎大学工学部教育研究支援技術センター

概要

生体信号を用いた研究は、医学の分野のみならず、工学分野でも盛んに行われている。生体信号を計測するには、センサで取り込んだ信号を増幅器で増幅を行い、フィルタで不要な周波数成分を除去することなどが必要である。計測に必要な器具の小型化を図る 1 つの方法として、これらの回路ブロックを 1 つの IC に作り込むことがあげられる。そこで、今回、最初の取り組みとして、回路ブロックの 1 つである生体信号を増幅するための計装アンプの設計と試作を行ったのでここに報告する。

1　計装アンプの設計

本取り組みでは、生体信号の 1 つである、表面筋電位信号の計測を目的として計装アンプの設計を行った。表面筋電位信号のようなセンサからの微小な信号の増幅には、計装アンプが多く用いられている。また、計装アンプは、抵抗 1 本で動作ゲインを設定することできる。表面筋電位信号とは、人が体を動かした際に筋が発する電位を体表面から計測する電気信号であり、この信号は、数 μV～数 mV と非常に微弱で、かつ、数 Hz～数百 Hz 程度の低周波信号である。そのため、一般的な増幅器で表面筋電位信号を増幅すると、IC 内部で発生する雑音（ノイズ）に埋もれてしまう。一般に、IC 内部では、高周波よりも低周波で発生するノイズ（1/f ノイズ）の方がはるかに大きく、その値は周波数が低くなるにつれ、次第に大きくなることが知られている。

そこで、1/f ノイズの影響を低減させるような計装アンプの設計を行った。計装アンプの一般的な構成の 1 つとして、オペアンプ 3 個で構成されるものがある。そこで、まずオペアンプ単体（図 1）の設計を行い、そのオペアンプを用いて計装アンプ（図 2）の設計を行った。さらに、1/f ノイズの低減を行うため、チョッパースタビライゼーションを用いた計装アンプ（図 3）を設計した。図 3 の回路において、chopper1 でのスイッチングにより、入力信号は高周波側に周波数変換されるため、Amp1 と Amp2 により入力信号が増幅されても 1/f ノイズの影響を受けにくくなる。そして、chopper2 で信号は元の周波数に戻され、低周波側で増幅された 1/f ノイズは高周波側に変調される。

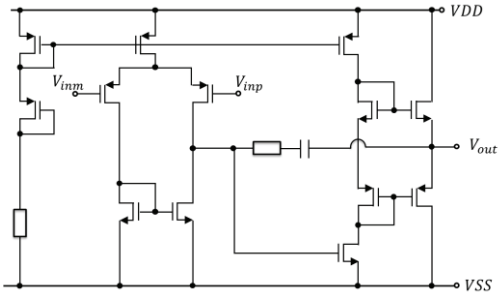


図 1　オペアンプの回路図

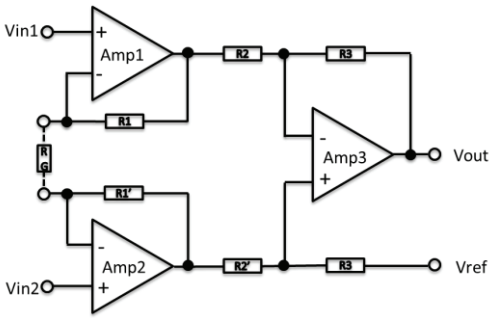


図 2　計装アンプの構成例

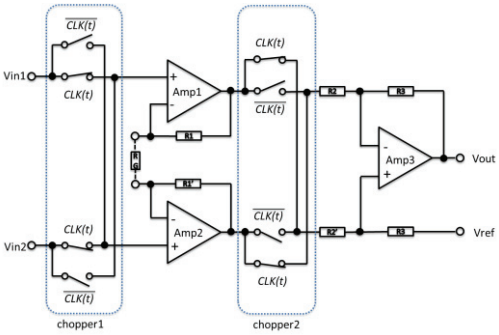


図 3　設計した計装アンプ

2　シミュレーション結果

1/f ノイズの低減の有効性を確認するために、計装アンプの Amp1 と Amp2 の非反転入力端子に、疑似 1/f ノイズを意図的に加えてシミュレーションを行った。シミュレーション条件は、電源電圧は±2.5V、入力信号は振幅 100μVp-p で周波数 100Hz の正弦波、チョッパーを付加した計装アンプのチョッピング周波数を 2kHz とした。図 4 に、チョッパーを付加した計装アンプ（図 3）とチョッパーなしの計装アンプ（図 2）の出力の FFT 解析結果を示す。表面筋電位信号の周波数である～500Hz の周波数に着目すると、1/f ノイズが低減できていることが確認できる。

また、計装アンプの利得については、理論値が 60[dB]となるように利得調整用の抵抗値を設定したとき、59.9[dB]であった。

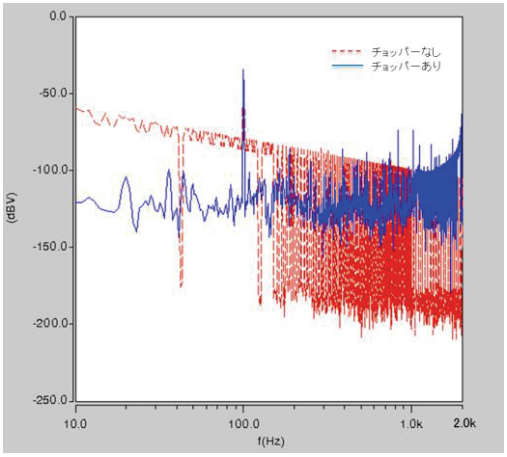


図 4　シミュレーション結果

3　IC の試作

IC 試作を依頼するため、CMOS 0.6μm プロセス（1.8mm 角）を用いて、マスクレイアウトを行った。図 5 に IC 全体のマスクレイアウトを示す。チョッパーを付加した計装アンプ（図 3）のほかに、シミュレーションで比較のために用いたチョッパーなしの計装アンプ（図 2）、計装アンプを構成したオペアンプ（図 1）単体 3 つ、チョッパーに用いた CMOS スイッチとインバータを個別に作り込み、試作した回路が所望の動作をしなかった際の原因追及ができるようにした。

計装アンプのマスクレイアウトについては、入力段の Amp1 と Amp2 の特性ができるだけそろうよう、バイアス部分は共用させ、MOSFET レベルでマージ可能なものはマージし、マージできないものはできるだけ近接配置を行った。これらのマスクレイアウト面積は、チョッパー有りの場合が、738.3μm × 388.3μm、チョッパーなしの場合は、702.0μm × 286.7μm となった。

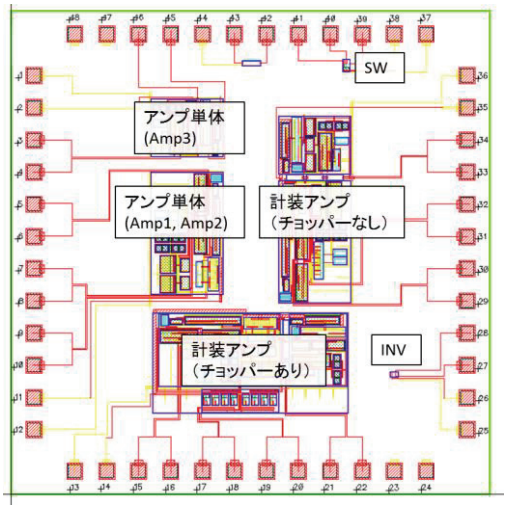


図 5　IC のマスクレイアウト

4　まとめ

今回、IC 内部で発生するノイズの影響を低減させた、生体信号計測のための計装アンプの設計と試作を行った。回路シミュレーションでは、表面筋電位信号の周波数において、ノイズを低減できていることが確認できた。現在、IC の試作依頼中であるため、納品後に試作した IC の評価を行う予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費（奨励研究）25918013 の助成をうけて実施した。ここに謝意を表します。

実験装置周辺機器の開発

○下ヶ橋 秀典

東京大学 物性研究所

概要

当研究所は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構，放射光研究施設内にビームラインを 2 本所有している（平成 25 年度末まで）．これまで日常業務として実験装置の維持管理および周辺機器の開発を行ってきた．今回，マニピュレータ Z 軸コントローラの置換基板開発，モータ軸制御用ハンディコントローラの開発，そしてスピン偏極実験に使用する磁化コイル電源用の遠隔操作・自動化プログラムの開発を行ったので報告をする．

1　マニピュレータ Z 軸コントローラの置換基板開発

目的・開発経緯

BL19A のメインチェンバーに装備しているマニピュレータ Z 軸コントローラが故障した．故障したコントローラ（ステッピングモータ制御用発振器）はすでに製造中止となっており，入手不可であった．また安価な代替品も存在しない．そこで，ワンチップマイコンを使用して，発振器の置換基板の開発を行った．

ステッピングモータ制御用発振器仕様と置換基板の回路構成

故障したコントローラは, 市販のステッピングモータコントロール用のパルス発振器を使用している. 仕様としてパルス速度範囲 50pps～10kpps，加減速制御機能，2 パルス方式の正逆転制御, リミット SW による停止動作の機能を有し, 速度調整は発振器本体のボリューム調整によって行う. 既存装置の速度調整は発振器の速度調整用ボリュームを外付けの可変抵抗器から行えるように改造して実現していた. 開発は初めに開発用基板を製作し，開発用基板上でパルス発振器と同様な動作の再現を確認しながらプログラミング等を行った. 使用したマイコンはアトメル社の ATMEGA328P を使用し，外部クロックに 20MHz を使用した．特徴として ADC 機能を有している．開発基板回路図を図 1 に開発用基板を図 2 に示す.

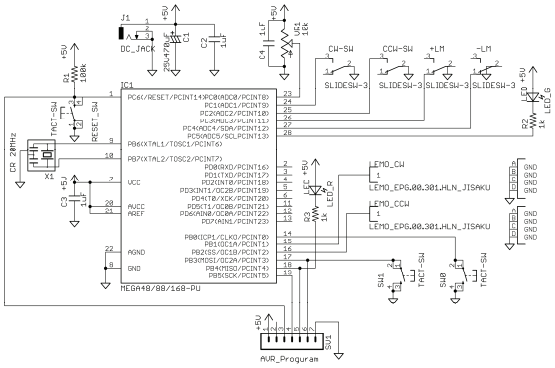


図 1．開発基板回路図

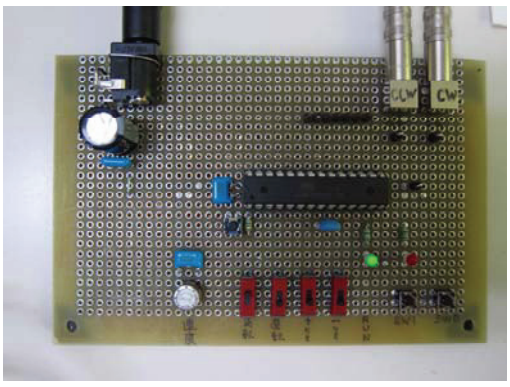


図 2．開発基板

ワンチップマイコンのプログラム

開発環境は ATMEL 社から発売している書込み器と同社から無償で提供されている統合環境を使用した. 開発言語は C 言語を用いた. 基準パルスをタイマ割込みにより生成し, 基準パルスをカウントすることにより可変タイミングの周波数（出力パルス）を生成している．クロックパルス

100 回ごとに割り込みを発生させて 200 k Hz の基準パルスを作り，例えば基準パルス 100 回ごとに出力を反転させることによって，1KHz の出力パルスを生成している．外付け抵抗器からの速度調整はマイコンに内蔵している ADC 機能を用いて 0V～5V の電圧値に変換して入力させることで実現した．

実　装

図３に既存のコントローラのケースに今回開発した実装用基板を取り付けた写真を示す．改造箇所として，24VDC 電源を取り外し 5VDC 電源に変更，故障した発振器を取り外し実装用基板に変更した．

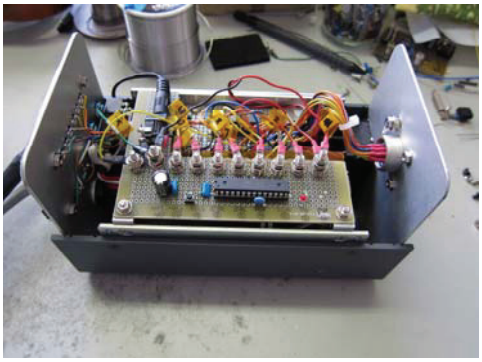


図３．実装

モータによる回転動作試験

手持ちのステッピングモータ，ドライバに接続して実際にモータを回転させる動作試験を行った．加減速制御がリニアではないので多少もたつき感があるが，問題なく動作した．さらに，装置本体に取付けての動作も確認した．

2　軸制御用ハンディコントローラの開発

目的・開発経緯

BL19A のマニピュレータ Z 軸コントローラの故障が発生した．応急的に代替のコントローラを開発し対応した（1 置換基板の開発により）が，今後の使用も考慮したコントローラの開発が求められたため．

仕様の決定

仕様としては手元でラフに操作でき，モータ軸数，機能の追加変更可能なものとし，汎用（標準）的な機器で構成するものとした．機器を選定するに当たり，PLC 制御で行うか Modbus 制御にて行うか検討を行った．PLC 制御の特長として，機器の汎用性が高く，LAN 接続可能なため PC での遠隔操作を容易に実現可能であること，PLC のユニットを追加することにより機能の拡張が可能であることがあげられるが，一方でモータドライバが独立に必要であり，機器構成が複雑になるという点が憂慮される．それに対し Modbus 制御の特長として，各機器が Modbus に対応している場合，ハードウェアの構成がシンプルになること，さらに，デイジーチェーン接続により機器の増設が容易に可能ということがあげられる．ただし，通信物理層が EIA-485（RS-485）のため PC と接続するには変換が必要であり，他の通信機器への拡張性は低い．今回はハードウェアの構成がシンプルであり，軸の増設が容易に可能であるということから，Modbus 制御にて開発を行うこととした．手元操作器は自由にデザイン可能なハンディ型タッチパネルを採用した．

システム概要とハードウェアついて

図４にシステム概要図を示す．タッチパネルとモータコントローラが Modbus に対応しており，さらにコントローラとドライバが一体化されているため非常にシンプルなシステム構成となった．軸の増設についてはドライバとタッチパネルの通信線に増設用コントローラドライバをデイジーチェーンで繋げるだけで良い．電源およびコントロール部は DIN レール上に配置しそのまま 19 インチラックに設置可能とした．モータおよびタッチパネルは延長ケーブルにより引き延し可能である．図５にハードウェアの写真を示す．写真手前

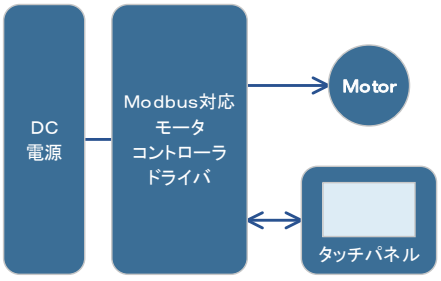


図４．システム概要

はタッチパネルである．写真奥のＤＩＮレール上の機器は左から電源ＳＷ，ノイズフィルター,ＤＣ電源（２４Ｖ），モータコントローラドライバ，端子台である．タッチパネル右上の非常停止ボタンは安全を考慮して Modbus 制御経由では無くハードワイヤで直接モータコントローラドライバを停止するようにしている．

タッチパネルついて

図６に今回作成したタッチパネルの運転操作画面を示す．操作はなるべく直感的に行えるようにし，励磁ボタン(EXCITE)を押してモータが起動したら，上下の▲▼ボタンを押すだけでモータを操作可能とした．▲▼のマークの大きさで運転速度の違いを表現した．なお，アラームに対する対応の仕方，通常運転の方法は HELP ボタンをおすと説明画面が表示される様にした．他に何枚か異なる運転操作画面，アラーム画面，モータ設定画面やステータスモニタ画面等を作成した．画面作成はメーカーのサンプルが用意されており容易に作成できた．モータコントローラとの通信もタッチパネルにプロトコルが用意されているため，タッチパネル上のスイッチやランプのプロパティを設定する程度で，モータコントローラのレジスタやメモリを自由に操作することが可能であった．

図５．ハードウェア

図６．タッチパネル画面

3　BL19A 磁化コイル電源の自動化プログラム開発

目的・開発経緯

BL19A のスピン偏極実験に使用する Fe ターゲット磁化コイル電源装置の遠隔操作化および自動化を行い，作業量の低減と作業時間の短縮を図るため．

磁化コイル電源の概要

図７に磁化コイル電源の原理図を示す．コイルに瞬間的に 50A 程度の電流を流し，Fe ターゲットを磁化させる装置である．装置による磁化のプロセスは以下の通りである．

① AC 電源を直流化しコンデンサに電荷を充電する（S1 閉）
② 規定の充電電圧に達するまで待つ（充電電圧は電源電圧と CR 時定数と充電時間で決定される）
③ 直流化電源とコンデンサを切り離す（S1 開）
④ 磁化用コイルにコンデンサを接続し，放電させる（S2 閉，放電接続にはサイリスタが使用される）
⑤ 磁化用コイルには大電流（50A 程度）が流れ，ターゲットを磁化する
⑥ 一定時間後，磁化用コイルとコンデンサの接続を切り離す（S2 開）

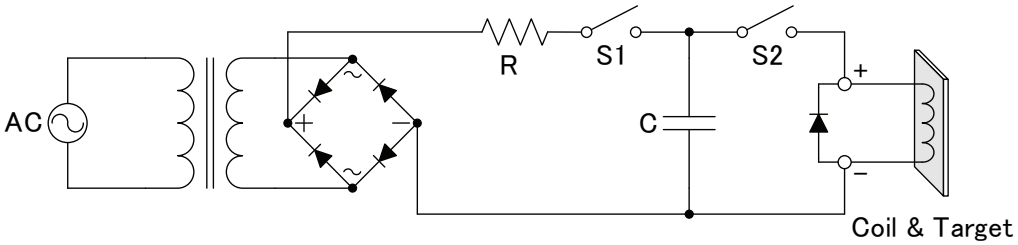


図７．磁化コイル電源の原理図

磁化コイル電源装置について

磁化コイル電源装置の写真を図８に示す．本装置は大電流の電磁リレーを内蔵することにより，４箇所の磁化コイルとその極性を選択可能である．直流化電源部はスイッチング電源になっている．磁化後のサイリスタスイッチ（S2）の OFF はタイマ設定可能となっているが，磁化プロセスの制御，管理の機能は装備されていない．LAN ポートを備えており，スイッチの ON-OFF，電磁リレーの切替え等の基本的な遠隔操作に対応している．ただし，クライアント側の遠隔操作用プログラムは用意されていない．そこで今回，LabVIEW による遠隔操作用プログラムおよび磁化プロセス制御プログラムの開発を行った．

図８．磁化コイル電源装置

LabVIEW プログラム

電源装置の LAN は TCP で通信可能である．LabVIEW で磁化コイル電源の通信用 SubVI を作成し，通信の OPEN・CLOSE，機器への問合せ，機器への命令実行といった処理を集約させた．メインルーチンではステータス取得と PC からの操作をポーリングで処理を繰り返し続けているが，磁化プロセスの自動シーケンスでは While Loop のシフトレジスタで処理を渡しているので，自動シーケンス実行中でもステータスの取得，実行可能なスイッチ等の処理を行うことが出来る．図９に作成した操作パネルの画面を示す．操作パネルは電源装置本体のボタン配置に合わせてデザインをすることで，本体での操作と PC 画面での操作の差違を可能な限り無くし，使用者の負担を低減するようにした．

図９．操作パネル画面

4　まとめ

実験装置の維持管理業務を行いながら，実験装置周辺機器装置の開発を 3 件行った．1 件については既設装置の故障対応として応急処置的な開発ではあったが，その他 2 件に関しては，つくば分室の機能が柏キャンパスに移動した後でも使用可能なものとして開発を行った．私は研究所間の技術職員人事交流として，物性研究所に出向してきました．勤務地であるつくば分室のメンバーをはじめ，極限コヒーレント光科学研究センターの方々，事務・技術部の方々の温かいご指導，ご配慮のおかげで何とか業務を行うことが出来ました．大変お世話になりました．そして，ありがとうございました．また，今後ともよろしくお願い致します．

KEK-PF 新 BL2 および新 BL15 の制御システム

○永谷康子，小管隆

高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所

概要

2013 年度、高エネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設（KEK-PF）にて、広帯域 VUV-SX ビームライン新 BL-2、そして高輝度 XAFS 実験および小角散乱実験が可能な硬 X 線ビームライン新 BL-15 が建設された。これに伴い、現在 KEK-PF で進められている「ビームライン制御の標準化」[1]に沿った形で制御ソフトウェア STARS（Simple Transmission and Retrieval System）[2][3]を使用して光学制御系システムを構築している。

本研究会では、両ビームラインの制御システムの現状および実際に行った導入作業について報告する。

1　制御対象となるハードウェア

1.1　新 BL-15 の制御対象となるハードウェア

新 BL-15 は、アンジュレータから放射される放射光を利用する硬 X 線ビームラインで、XAFS ステーションと小角散乱ステーションがタンデムで配置され、図 1 に示すような光学系の配置となっている。このうち白色モニター、可動マスク、ワイヤーモニター、2 結晶分光器、3 台のスリット（S1、S2、S3）と 5 台のミラー（M1、M2、M3、M4、M5）といったビームラインコンポーネントが、パルスモータにより駆動される。また、M3 の 2 軸と白色モニターの 2 軸、2 結晶分光器の θ 軸と Y1 軸と Z1 軸にエンコーダが取り付けられている。さらに、ビームライン側からはアンジュレータのギャップ値とギャップ速度パラメータの変更が可能となっている。

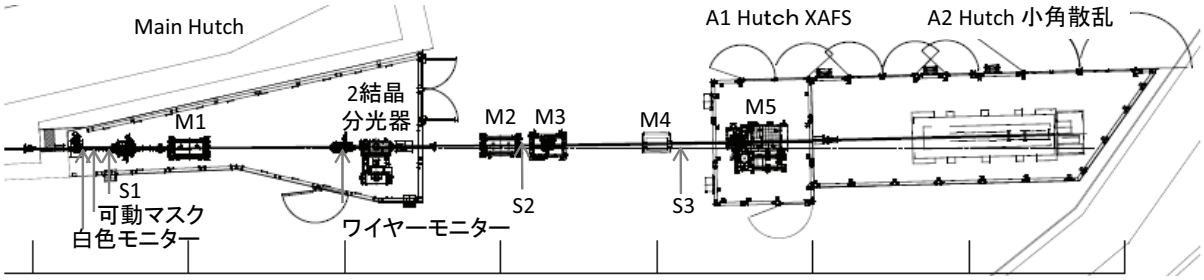


図 1　新 BL-15 光学系の配置

1.1.1　2 結晶分光器のパルスモータとエンコーダ

2 結晶分光器には、θ 軸、Z1 軸、Y1 軸、$\Delta\theta$ 1 軸、ϕ 1 軸、バランサ軸の計 6 つの駆動軸があり、θ 軸に対してはインクリメンタルロータリーエンコーダが、Z1、Y1 軸にはアブソリュートリニアエンコーダが取り付けられている。駆動軸のパルスモータは規格に合わせたそれぞれのパルスモータドライバに接続され、θ 軸、Z1 軸、Y1 軸のエンコーダとともに、モーションコントローラ（Delta Tau 社 BrickController）により制御される。モーションコントローラは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

モーションコントローラの機能を用いることで、θ 軸に関してはエンコーダの値ベースで駆動させることが可能であり、また NC 方式による計算結合で θ 軸と他の 5 軸の値の整合性を保ちながら駆動させることが

可能となっている。

1.1.2　M3 ミラーと白色モニターのパルスモータ

M3 ミラーには駆動軸として Y 軸と ϕZ 軸が、白色モニターには X 軸と Z 軸があり、M3 ミラーの ϕZ 軸にはロータリーエンコーダが、M3 ミラーの Y 軸と白色モニターの X 軸と Z 軸にはリニアエンコーダが取り付けられている。各パルスモータは規格に合わせたそれぞれのパルスモータドライバに接続され、各エンコーダとともに、M3 ミラー、白色モニターそれぞれに対応する 2 台のパルスモータコントローラ(神津精機製 SC-210)により制御される。

更にこれらのパルスモータコントローラは RS232C ポートを有しており、シリアルデバイスサーバ(MOXA NPort 5410)を介して Ethernet に接続され、Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.1.3　その他のビームラインコンポーネントのパルスモータ

可動マスク、ワイヤーモニター、スリット（S1、S2、S3)、ミラー（M1、M2、M4、M5）の駆動軸数（＝パルスモータの数）は、各スリット 4 軸の計 3 台で計 12 軸、可動マスクが 2 軸、ワイヤーモニターが 2 軸、M1 ミラーが 6 軸、M2 ミラーが 5 軸、M4 ミラーが 3 軸、M5 ミラーが 3 軸で、合計 33 軸である。各パルスモータは規格に合わせたそれぞれのパルスモータドライバに接続され、合計 3 台のパルスモータコントローラ(ツジ電子製 PM16C-04XDL)により制御される。更にこれら 3 台のパルスモータコントローラは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.1.4　ピコアンメータ

放射光ビームのプロファイルを測定するためのワイヤーモニターの出力 Z 軸、Y 軸に対し、それぞれ 1 台ずつのピコアンメータ(Keithley 6485)が接続される。このピコアンメータは RS232C ポートを有しており、シリアルデバイスサーバ(MOXA NPort 5410)を介して Ethernet に接続され、Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.1.5　デジタルマルチメータ

放射光ビームのプロファイルを測定するための出力をデジタルマルチメータ(Keithley 2701)に接続できるようにしている。デジタルマルチメータは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.1.6　アンジェレータのパラメータ制御

放射光光源系の管理下にあるアンジュレータ毎に設けられたアンジュレータパラメータ変更用インターフェイスサーバに対し Ethernet 接続して制御コマンドを送ることでギャップ等のパラメータの変更が行えるようになっている。インターフェイスサーバは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。新 BL-15 ではビームライン側からギャップ値と速度パラメータの変更が可能となっている。

1.2　新 BL-2 の制御対象となるハードウェア

新 BL-2 は、真空紫外から軟 X 線、硬 X 領域にかかるまでの広範囲なエネルギーをカバーするビームラインで、図 2 に示すような光学系の配置となっている。長直線部に真空紫外用アンジュレータと軟 X 線用アンジュレータ（2014 年春に設置予定）をタンデム配置し、可動マスク、トロイダルミラー(M1)、回折格子分光器(M2、G)、振り分けミラー（M3)、出射スリット 2 台(SA と SB)、アブソーバー、2 結晶分光器、後置鏡 2 台（M4A、M4B）といったビームラインコンポーネントが、パルスモータにより駆動される。また、可動マスクの Z 軸、X 軸、回折格子分光器の M2 軸と G 軸、そして 2 結晶分光器の θ 軸 Y2 軸と Z2 軸にはエンコーダが取り付けられている。さらに、ビームライン側からはアンジュレータのギャップ変更が可能となってい

る。

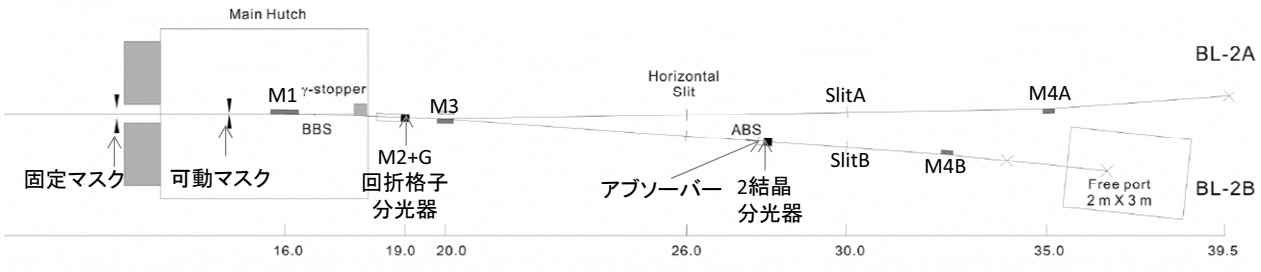


図 2. 新 BL-2 光学系の配置

1.2.1 2 結晶分光器のパルスモータとエンコーダ

2 結晶分光器には、θ軸、Z2 軸、Y2 軸、⊿θ2 軸、φ2 軸の計 5 つの駆動軸があり、θ軸に対してはインクリメンタルロータリーエンコーダが、Z2、Y2 軸にはアブソリュートリニアエンコーダが取り付けられている。駆動軸のパルスモータは規格に合わせたそれぞれのパルスモータドライバに接続され、θ軸、Z2 軸、Y2 軸のエンコーダとともに、モーションコントローラ（Delta Tau 社 BrickController）により制御される。モーションコントローラは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

新 BL-15 と同様に、モーションコントローラの機能を用いることで、θ軸に関してはエンコーダの値ベースで駆動させることが可能であり、また NC 方式による計算結合でθ軸と他の 5 軸の値の整合性を保ちながら駆動させることが可能となっている。

1.2.2 その他のビームラインコンポーネントのパルスモータ

可動マスク、回折格子分光器（M2、G）、ミラー（M1、M3、M4A、M4B）、スリット（SA、SB）、アブソーバーの駆動軸数（＝パルスモータの数）は、可動マスクが 2 軸、M1 が 5 軸、M2、G が各 1 軸で計 2 軸、M3 が 3 軸、SA と SB が各 1 軸で計 2 軸、M4A、M４B が各 5 軸で計 10 軸、アブソーバー1 軸、回折分光器の M2 と G の退避用が各 1 軸で計 2 軸、2 結晶分光器開閉用が 1 軸で、合計 28 軸である。各パルスモータは規格に合わせたそれぞれのパルスモータドライバに接続され、2 台のパルスモータコントローラ（ツジ電子製 PM16C-04XDL）により制御される。更にこれら 2 台のパルスモータコントローラは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.2.3 エンコーダ

可動マスクの X 軸と Z 軸にはリニアエンコーダが取り付けられており、RS-232C ポートを持った表示ユニット（Magnescale LY72)に接続されている。この表示ユニットはシリアルデバイスサーバ(MOXA NPort 5410)を介して Ethernet に接続され、Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

また、回折格子分光器の M2 と G の回転軸には角度を計測するためのロータリーエンコーダ（RENISHAW 社 TONIC T2000 RESM）が取り付けられており、エンコーダのカウンタ値を読み取るためのインターフェイス（平均化ユニット AVE-001RE）が分光器といっしょに分光器メーカーから提供された。その平均化ユニットのインターフェイスに合うエンコーダカウンタ値の読み取り機器としてツジ電子製 ER2C-03A を選定した。エンコーダカウンタの読み取り機器は、Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.2.4 カウンタ

放射光ビームのプロファイルを測定するための出力を 8 チャンネルカウンタ(ツジ電子 NCT08-02)に接続できるようにしている。このカウンタは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.2.5　ピコアンメータ

放射光ビームのプロファイルを測定するための出力を計3台のピコアンメータ(Keithley 6485)に接続できるようにしている。このピコアンメータはRS232C ポートを有しており、シリアルデバイスサーバ(MOXA NPort 5410)を介して Ethernet に接続され、Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。

1.2.6　アンジェレータのパラメータ制御

放射光光源系の管理下にあるアンジュレータ毎に設けられたアンジュレータパラメータ変更用インターフェイスサーバに対し Ethernet 接続して制御コマンドを送ることでギャップ等のパラメータの変更が行えるようになっている。インターフェイスサーバは Ethernet を介して STARS を用いた制御システムに接続される。現時点では真空紫外用アンジュレータのギャップ制御が可能となっており、2014 年春に設置予定の軟 X 線用アンジュレータについては今後の対応を予定している。

2　システム構成

STARS では複数のクライアントプログラム(User client、I/O client 等)が TCP/IP ソケットを介して STARS サーバに接続しメッセージの送受を行う事で一つの制御システムを構築していく。今回は同一コンピュータ上に STARS サーバ及びクライアントプログラムを配置して構築する事とした。

2.1　新 BL-15 の制御 PC とネットワーク

制御 PC(OS: Ubuntu Server 12.4.3 LTS 64 bit)を設置し、ピコアンメータ(Keithley 6485)およびパルスモータコントローラ(神津精機 SC-210）が接続されたシリアルデバイスサーバ、デジタルマルチメータ(Keithley 2701)、パルスモータコントローラ（ツジ電子 PM16C-04XDL）、モーションコントローラ BrickController とともに、新 BL-15 基幹部制御専用の LAN に接続する事とした。

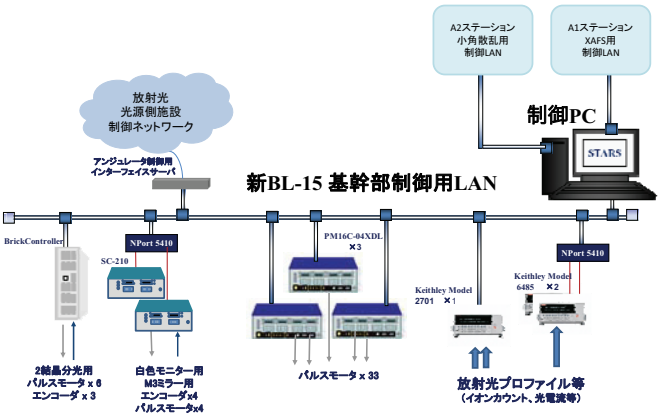


図 3 新 BL-15 基幹部のシステム構成図

制御 PC では、新 BL-15 の光学系制御用 STARS クライアントおよび STARS サーバが動作する。また、制御 PC には、4 つのネットワークインターフェイスを用意し、新 BL-15 基幹部制御用 LAN とは別に、XAFS ステーション専用の制御 LAN と小角散乱ステーション専用の制御 LAN それぞれに接続させる。残り 1 つは予備として使用する。

2.2　新 BL-2 の制御 PC とネットワーク

制御 PC（OS:Windows 7 64bit）を設置し、可動マスクのエンコーダ表示ユニット（Magnescale LY72）ならびにピコアンメータ(Keithley 6485)が接続されたシリアルデバイスサーバ、カウンタ（ツジ電子 NCT08-02)、パルスモータコントローラ（ツジ電子 PM16C-04XDL)、エンコーダカウンタ値読み取り機器（ツジ電子 ER2C-3A)、モー

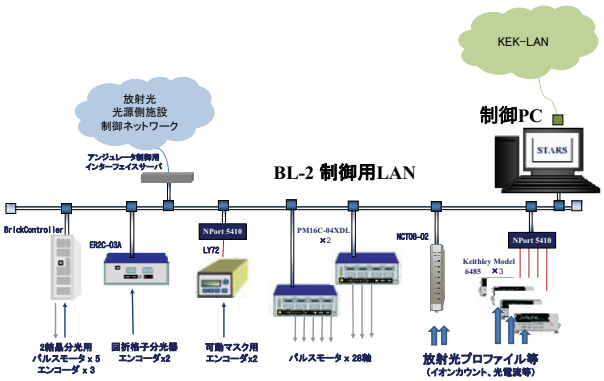


図 4. 新 BL-2 システム構成図

ションコントローラ BrickController とともに、新 BL-2 制御専用の LAN に接続する事とした。

制御 PC では、全ての STARS クライアントおよび STARS サーバが動作する。また制御 PC にはネットワークインターフェースを 2 つ用意し、1 つは制御用 LAN に、片方は KEK-LAN に接続させている。

3 制御システムの導入と開発

KEK-PF では STARS をベースとした制御システムの導入が進んでおり、パルスモータコントローラ（ツジ電子 PM16C-04XDL）、エンコーダカウンタ値読み取り機器（ツジ電子 ER2C-3A）、カウンタ（ツジ電子 NCT08-02）、ピコアンメータ(Keithley 6485)、デジタルマルチメータ(Keithley 2701)の制御用 I/O Client は既にあるものを使用した。パルスモータコントローラ(神津精機 SC-210)については、神津精機 SC-200 に対応した制御用 I/O Client があったのでそれを基にして SC-210 に対応した。

ここでは、今回新たに開発したプログラムや機能拡張、導入作業について紹介する。

3.1 ツジ電子製エンコーダ読み取り機器（ER2C-03A）および制御用 I/O Client の機能拡張【新 BL-2】

KEK-PF の分光器に取り付けられているエンコーダの値の読み取り機器としては、これまで HEIDENHAIN 社のエンコーダ表示ユニットが多く使用されてきたが、今回納品された分光器では、分光器のエンコーダシステムが RENISHAW 社のものに替わり、これに合わせたエンコーダカウンタ値の読み取り機器の選定が必要となった。様々な確認と精査を経て、ツジ電子製のエンコーダカウンタ値の読み取り機器 ER2C-03A を選定し、実際にエンコーダのカウンタの値が読めるようになったが、その後、ER2C-03A にエンコーダカウンタの値のリセット機能がないことが判明した。ツジ電子社のご協力を得て ER2C-03A 機器本体にカウンタ値の再設定機能を追加していただき、これに合わせて ER2C-03A 制御用 I/O Client にカウンタ値の再設定機能を追加した。この後さらに、ツジ電子製のエンコーダカウンタの値が最大 7 桁であるのに対し、回折格子分光器の M2 軸、G 軸のエンコーダカウンタの値がフルスケールで 8 桁必要であることが判明した。結局、回折格子分光器のエネルギー分解能を損なわないことを確認した上でエンコーダの表示器の逓倍を 1/4 にすることで暫定対応し、並行してツジ電子社に ER2C-03A のカウンタ値の 32bit 化対応を依頼した。ツジ電子社から対応が完了した ER2C-03A 機器本体は受け取っており、新 BL-2 に再設置するタイミングを待っているところである。

3.2 2 結晶分光器制御プログラムの開発【新 BL-2、新 BL-15】

今回、新 BL-15、新 BL-2 の 2 結晶分光器を制御するモーションコントローラ BrickController 用 I/O Client を新たに開発し、新 BL-15 と新 BL-2 に対しインストールを行った。この I/O Client を使用することで各軸をパルス値ベースでの駆動制御できるようになった。

次に、新 BL-15、新 BL-2 それぞれに対応した 2 結晶分光器の仮想的な制御を行う Virtual component client の開発を行った。Virtual component client クライアントでは、各駆動軸の換算値ベースでの駆動制御、そして分光器メーカーから提供され BrickController 内に登録された、θ 軸と他の軸を値の整合性を保ちながら駆動させるプログラムの起動・停止・実行中の判定機能を実装した。

3.3 Mictosoft.NET ベース GUI プログラムの Linux 制御 PC 上での動作チェック【新 BL-15】

スリット、ミラー等を制御する GUI クライアントプログラムについては、小角散乱のビームラインで制作したパラメータ設定を変えれば動作するつくりとなっている Mictosoft.NET 3.5 ベースのプログラムが既にあったので、Linux OS がインストールされた新 BL-15 の制御 PC に、Windows ベースのプログラムを動かすことができる Wine 環境をインストールして、これらのプログラムが動作するかどうか検証を行った。正常に動作することが確認できたため、新 BL-15 で使用することが可能となった。

3.4　新 BL-2 スクリプトプログラムの開発【新 BL-2】

新 BL-2 について一通り必要なプログラムのセットアップを行った後、ビームライン制御の使い勝手をよくするためのユーティリティプログラムとして、A ライン、B ライン切り替えのためのスクリプトプログラムや原点設定プログラム等の製作ならびにインストールを行った。

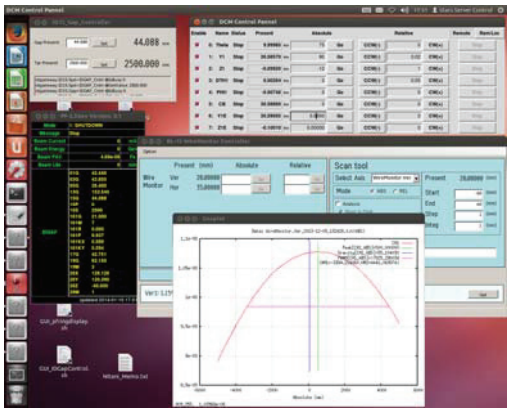


図 5 新 BL-15 制御 PC　制御画面イメージ

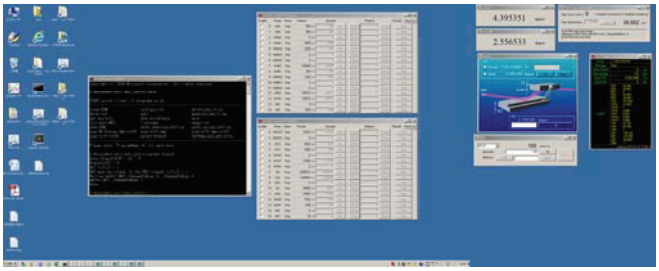


図 6 新 BL-2 制御 PC　制御画面イメージ

4　まとめと今後

今回、新 BL-2 と新 BL-15 でほぼ同時に建設が進行する中、ビームラインコンポーネントの納入が全体的に遅れ気味で、ビームライン調整を開始する秋の運転開始直前直後に作業が集中した。また、ビームライン調整が始まってから出現した 2 結晶分光器本体に関係するトラブルを解決するための調査協力や動作確認に時間をかけることも多かった。このような中でも、STARS の多くの資産を活用することで、新 BL-15、新 BL-2 に対して一通りの光学系の制御機能を提供することが出来ている。

新 BL-15 および新 BL-2 では、2014 年 1 月現在もビームライン調整を継続して行っており、新 BL-2 では、2014 年春に軟 X 線用アンジュレータ光源の追加が、また新 BL-15 ではアンジュレータのギャップ値と 2 結晶分光器の θ 軸および他軸の協調駆動の動作検証が予定されている。両ビームラインの進捗に見ながら引き続き制御系の整備を進める予定である。

参考文献

[1]　小菅 隆, et al, “P F におけるビームライン制御標準化に関する取り組み”, 平成 17 年度分子科学研究所　技術研究会

[2]　小菅 隆, et al, “放射光ビームライン BL-16A への STARS 導入“, 平成 19 年度核融合科学研究所　技術研究会

[3]　http://stars.kek.jp

ロードセルの持つ温度特性、および実験データに与える影響と その対策への基本的考察

○片桐俊彦

東京大学生産技術研究所 基礎系

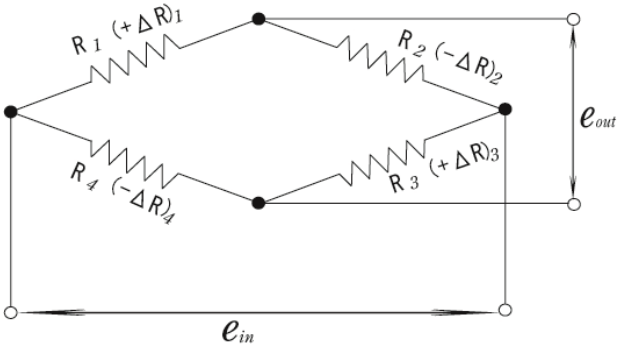
概要

３軸試験装置(斜面の安定計算等に使う内部摩擦角 Φ と粘着力 C を求める為の試験機)を用いて、地盤の液状化強度特性を求めるために不攪乱資料などを用いた非排水等繰り返し三軸試験（液状化試験）を行うために円柱状の土質試料を作成し、PC を用いた自動制御による試験を現在行っている．軸力計測の為、ロバーバルタイプと呼ばれるロードセルを使用しているが供試体の大きさより扱う容量も異なり、許容できるデータ誤差も同様に異なる．実際の実験において、ロードセル（最大容量 2kN）において実験を行ってみたところ温度特性における信号のふらつきが顕著に見られた．室内試験においては液状化実験などを行うため排水処理など１度の実験において完了までの日数が 2～3 日ほど必要であるため温度による信号への影響については極力抑える必要性がある．このため、計測機器などノイズの発生しやすいと考えられる要所において一つずつ確認を行ったところ、最終的にはロードセルにおいてその問題点を見出すことができた．その中でも殊に影響が大きいと考えられた温度特性による問題に着目し、実際の現象を基にロードセルに生じた温度特性、また材質の違う同じタイプのロードセル（最大容量 300N）との 2 つの比較を行うことで対象となる問題の周辺事項について検証し、将来的な設計に活かす意味合いで纏めたのでここに報告する．

1　比較検証に用いたロードセルについての基本的な計測原理と物性

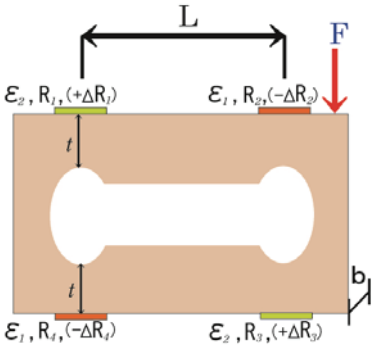
○ロードセルの基本的な設計概念

先ずは試験に用いたロバーバルタイプと呼ばれるロードセルの基本的設計概念について述べる．ロードセルについては、図 2．に示す様に直方体形状の真ん中が刳り貫いた形状となっている．主に高精度のロードセルに用いられるタイプであり、一般的には 1kg～1t の範囲で用いられる．今回、比較したロードセルについては刳り貫き形状は若干異なるものの同タイプのものである（写真）．実際の設計をする際には以下の様な関係式を用いて、目的の荷重容量を満たすロードセルが製作される．図の様に歪ゲージ（4 ゲージ法）が貼られているとし、上方から力 F を加えた場合、各歪値は以下の様に求まる．



ホイーストンブリッジ

図 1. ホイートストンブリッジ



ロバーバル型ロードセル

図 2.　ロバーバル型ロードセル

$\varepsilon_1 = \sigma / E$　および　$\sigma = M / Z$　、$M = F \times L / 4$　また　$Z = b \times t^2 / 6$　の関係より

$\varepsilon_1 = 3 \times F \times L / 2 \times b \times t^2 \times E$　また　$\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$　と求まる.

ここで、ε_1 および ε_2：求めたい歪量（με）、

E：材料の縦弾性係数[ヤング率]（GPa）

σ：応力（GPa）、

M：歪ゲージ貼付部のモーメント（N・mm）、

Z：歪ゲージ貼付部の単面係数（mm^3）

b：起歪体の奥行方向の厚さ（mm）、

L：ε_1～ε_2 のセンター間の距離（mm）、

t：起歪体の歪ゲージ設置部から刳り貫き部までの厚さ（mm）

また、ロバーバル構造の 4 ゲージ法による微小変化時の出力電圧（Δ*e*）については 4 枚のゲージの抵抗値をそれぞれ R_1、R_2、R_3、R_4 とした場合、オームの法則およびキルヒホッフの電流連続則より、

$e = ((R_1 R_3 - R_2 R_4) / (R_1 + R_2)(R_3 + R_4))\ ein$　　(*ein*：入力電圧)

図 1. または図 2. の様に微小変形して歪が発生した場合、

$\Delta e = ((R_1 R_2 / (R_1 + R_2)^2 (\Delta R_1 / R_1 + \Delta R_2 / R_2))\ ein + ((R_3 R_4 / (R_3 + R_4)^2 (\Delta R_3 / R_3 + \Delta R_4 / \Delta R_4))\ ein$

出力電圧それらの関係は $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ であり、力を受けた際の歪の微小変化 ΔR_1、ΔR_2、ΔR_3、ΔR_4 について、$|\Delta R_1| = |\Delta R_2| = |\Delta R_3| = |\Delta R_4| = \Delta R$ となる.

よって、出力電圧 (Δ*e*) については $\Delta e = (\Delta R / R)\ ein$　また、$\Delta R / R = K \cdot \varepsilon$ より、

$$\Delta e = K \cdot \varepsilon \cdot ein$$

と表され、出力電圧 (Δ*e*) と歪 (ε) とは比例関係にある事が分かる.

2　ロードセルにおける温度補償に対する考え方

自己温度補償の原理（温度誤差に影響する一要因としての考え方）について述べる.

歪ゲージが被測定体に接着されているものとすると、歪ゲージそのものの金属抵抗体の線膨張係数（λg とする）と被測定体線膨張係数（λa とする）との差により、温度による見かけ歪が生じる. これを歪ゲージを形成する金属抵抗の温度抵抗係数（αg とする）で相殺する様にしたものが自己温度補償の原理の考え方であり、ゲージ率（K）と共に式的には以下の様に表される（単ゲージとして考えた場合）. αg については一般的な温度係数についてはメーカーで製作される歪ゲージ材料などの特性の状況から一般的に公開されるケースは少ない.

$$\varepsilon_a = \alpha g / K + (\lambda a - \lambda g)$$

みかけ歪の低減には一般的に 4 ゲージ法（フルブリッジ）を用い、電圧信号の出力も大きくする方法が取られる。今回、温度変化におけるノイズの比較検討時に用いられたロードセルにおいても 4 ゲージ法で製作されたものが用いられている. 単ゲージで影響を受ける上述の式に関しても 4 ゲージにすることでその影響

を打ち消し合うことが可能なため、見かけ歪量を小さくできる．歪の誤差の影響度合いから考えると上述の式の中で金属（被測定体）と歪ゲージの線膨張係数の差が影響を及ぼしてくる要因となる．リン青銅では 0.7μ、アルミニウム合金では 0.4μ の歪量の見かけ歪を含んでいることになる．また今回使用した歪ゲージの特性では見かけ歪値のブレに関してはそれぞれ共通して最大±1.8μ 内の誤差以下で調整されているものを使用した．

次に実際に使用した 2 種類のロードセルの材料および歪ゲージの線膨張係数に関しては表 1. の様である．

表 1. ロードセル製作に使用された金属（被測定体）
および歪ゲージの金属における線膨張係数

金属 （ロードセルおよびゲージ）	線膨張係数 $\times 10^{-6}/℃$
リン青銅（被測定体）	16.7 (λa)
リン青銅（歪ゲージ）	16　(λg)
アルミニウム合金（被測定体）	23.4　(λa)
アルミニウム合金（歪ゲージ）	23　(λg)

この他に今回製作されたロードセルについては考慮されていないが、厳密には 4 ゲージにおいて温度の影響を平等に受けて理想的な出力構成は期待できないため、温度による零点の変化の調整、ゼロバランスまた出力感度調整などを行うために補償用抵抗が回路的には投入される．逆にこれらによる温度補償の精度を高めることにより、より精度の高い歪値を得ることが可能であり、これがよりノイズを低減する布石となる．補償抵抗を使用する際には使用条件・環境状況などにより一定の条件を加味する必要がある．

3　実際に行ったロードセルの温度特性の比較および検証

これまで述べてきた 2 つの材質の異なるロードセルにおける問題点となった実際の現象を示しながら、温度変化による歪値の相違についてここに検証を試みたい．同じロバーバルタイプのロードセルではあるが若干構造的には形状が違うことも述べておく．先ず、はじめにこれらのロードセルをどの様に使用しているかについての実験装置全体像について写真 1. に示す．これは 3 軸試験装置と呼ばれるもので先に詳述した様である．また、実際に液状化試験を行った際の繰り返し履歴曲線の結果図面を図 3. に示す．

写真 1. 実験装置全体
（左：装置全体、
右：ロードセル＋供試体設置状況）

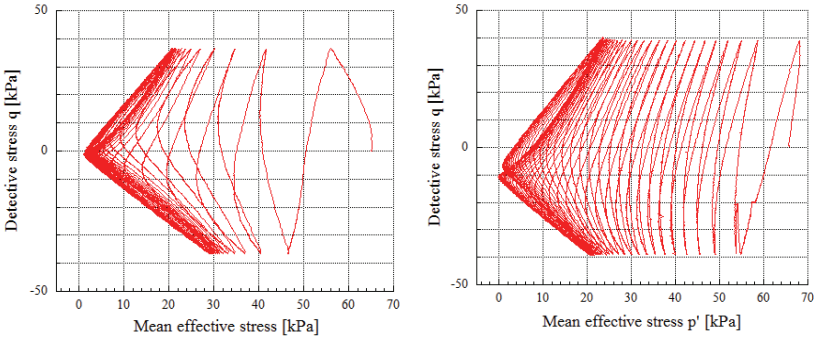


図 3. 平均有効応力に対するせん断応力図
（左：300N、右：2kN）

図 3．において左側の 300N のロードセルを使用した実験においては-3N ほど起点のずれはあるが 0 点に近い所から開始しており、かつ繰り返し実験におけるグラフ形状もほぼ安定した曲線を描いているが右側の 2kN のロードセルを使用した実験においては実験の開始時点より 0 点から-7N 程移動した位置からの開始となっており、時間的スパンのかかる液状化繰り返し実験においては温度変化などの歪ゲージの変化に対する影響が生じている様に見られた．ロードセルの測定容量的に許容できる範囲の問題も考えられる推定の元で実際の状況を確認すべく、歪ゲージに与える温度による影響がどの位なのかについて次の手順で検証を行った．

（計測手順）

1. 同じ温度環境で 2 つのロードセル（300N および 2kN）を隣り合わせに配置する．
2. 無負荷状態として 80000 秒（22 時間強）の間、同時計測する（計測上、フィルターは Off とした）．
3. 温度計測に関しては高精度 IC 温度センサー（LM35DZ）を用いることで温度の検出精度を高める．
4. 温度変化を確認するために途中、クーラーを入れて急激な温度変化を与えデータの推移を観察する．
   （0～60000 秒：自然状態の室内温度変化、60000～80000 秒：クーラー（暖房 28℃設定）を入れる）
5. データは 30 秒周期でデータ取得、データレーコーダーに記録していく．

試験に用いたロードセルは 300N（写真 2．右）、2kN（写真 2．左）の 2 種類のものと高精度 IC 温度センサー（LM35DZ）（写真 2．中央）を用いた（写真 2.）。特に歪ゲージまた被測定体においては風があたっても温度変化の影響が関与するため、風の流れが直接当たらない様に工夫した．また、ロードセルにおいては最大荷重量（歪レベルでは 2000μ）を±10V で設定する様な形で夫々にキャルブレーションを設定した．

以上の手順に従って計測を行った結果を図 4．に示す．各々の計測データについてはオリジナルの計測波形に移動平均フィルターをかけて、傾向がより見やすい曲線としている．

写真 2．計測状況
（手前の温度計は開始時点の表示であり、室温 28℃、湿度 14%を示している）

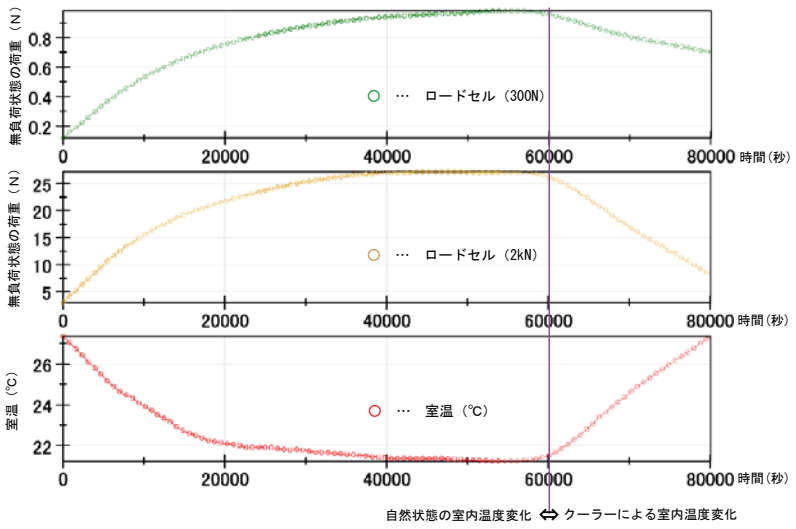


図 4．無負荷状態のロードセル（300N および 2kN）の室温変化に伴う出力（N）状況
（紫のライン（60000 秒）から暖房を入れ気温を上昇させた）

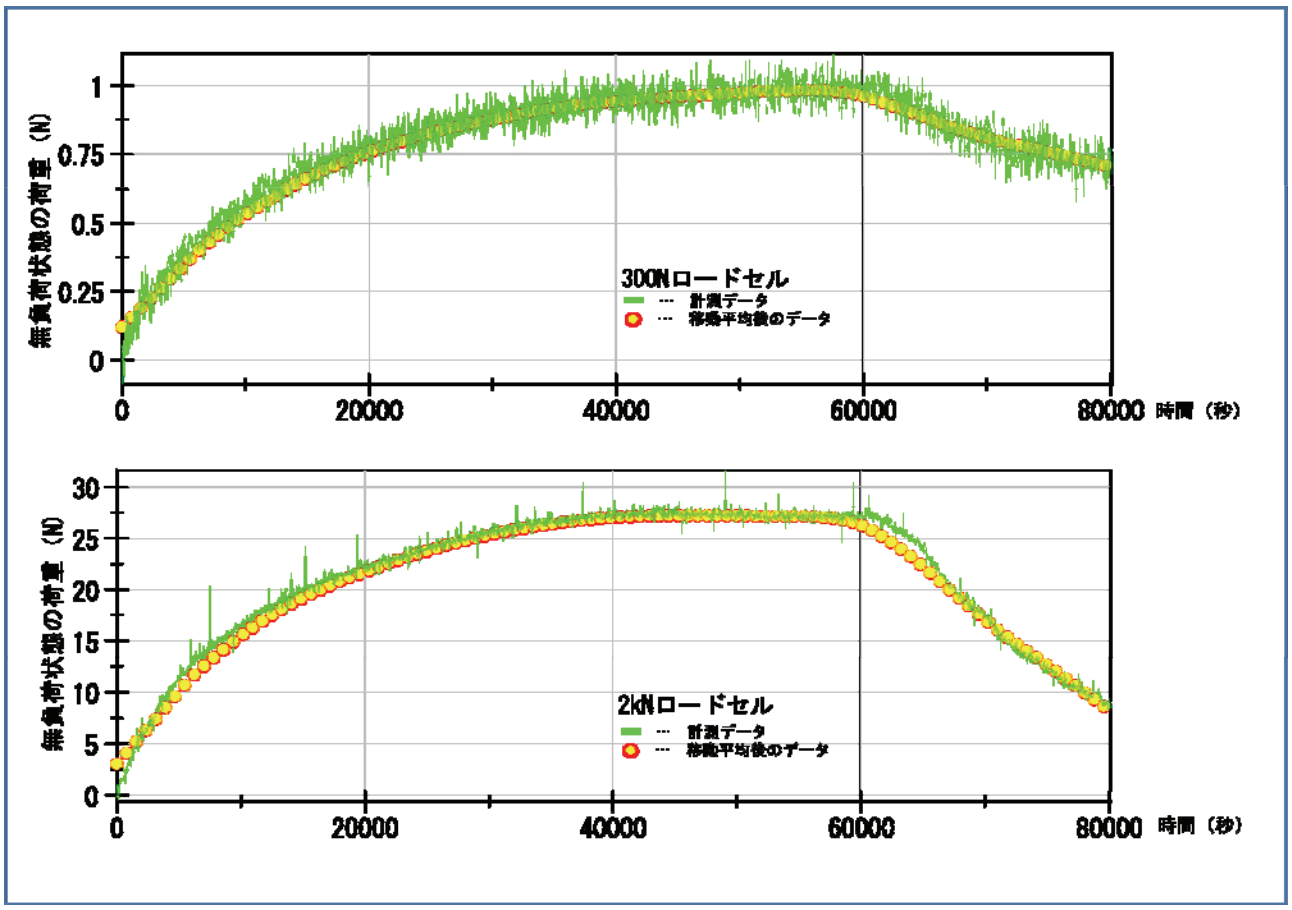


図 5.　無負荷状態のロードセル（300N および 2kN）の室温変化に伴う出力（N）状況
（緑線：計測されたデータ、○印：計測データを移動平均処理した後のデータ）

図 4. の計測結果をみると温度変化に追従して 2 つのロードセルも同様な傾向で変化していることが分かった．荷重換算においては 300N のロードセルにおいては最大で 1N、2kN のロードセルにおいては 30N となり、前者は 0.3%また後者は 1.5%の無負荷状態における室温の変動が計測された．また 60000 秒から 80000 秒までの間に暖房を入れて急激に温度を変化させてみたところ（変化範囲：8℃）、300N のロードセルにおいては 20000 秒で 0.3N、2kN のロードセルにおいては 20000 秒で 22N であった．また温度あたりの荷重 N の変化率は前者が 0.0375N／℃、後者が 2.75N／℃という結果となった．

これらの結果より、グラフから見る温度変化に対する荷重曲線の幾何学的形状については傾向の流れから大まかに一致していることが分かった．夫々のロードセルの特徴の比較で言えば凡そ容量に比して見かけ上の歪ゲージの値も大きくなっている．また、温度変化の追従性という面からみると 60000 秒時点以降 80000 秒時点において 300N よりも 2kN の変化が傾きから 300N よりも 10 倍ほどの割合で荷重が下がっていることが分かった．図 5. においては計測データおよび移動平均処理後のデータを重ねたものを図示してある．

4　考察

この報告はロバーバルタイプの 2 つのロードセルに関して、歪ゲージまた被測定体との間で実験環境下における温度変化による値のずれが明瞭であったため、その特性について比較検討することで基本的な特性を知るための実験・検証を行った．その結果を基に考察を加えると以下の様になった．

1. 無負荷状態のロードセルにおける温度変化による荷重の曲線においては幾何学的に形状また傾向は同様なものである．この意味は歪ゲージのもつ静的特性上、同様であることを示すものと言える．
2. 荷重値の変化を見た場合、300N のロードセル、2kN のロードセルの温度変化についてはどちらもほぼ同様の傾向を示す．ただし、急激な温度変化に関してはその変化率はグラフ上、2kN の方が明確に大きいことが分かった．
3. 実験で得たい許容誤差は扱うロードセルの設計時に期待する最大荷重量に対する比率で考え、設計使用することが大切である．
4. 歪ゲージと被測定体との夫々の線膨張係数については出来れば、同じ値が望ましいが見かけ誤差を小さくするためには 4 ゲージでブリッジを組み、見かけノイズをできるだけキャンセルすることを考えるほか、ダミーゲージなどで線膨張を調整するなどの工夫も場合によっては必要となる（但し、これについてはロードセルの機械特性と温度特性の観点から一定の条件下において成立するものである）．
5. 歪ゲージを被測定体に張り付けるための手法や知識など、随所にロードセルの精度に影響を及ぼす製作上のポイントがあり、それは経験的に培われていくものであるので常に経験が必要とされ、それが実験精度を決定していくものでもあることもこの計測と共に学んだ知識の中から新たな知見が得られた．

5　謝辞

今回のこの問題に関しては温度による特性を掴むため、静的な実験を行うなど実際の荷重値におけるロードセルと歪ゲージの特性の評価・検証を行った．その中で本報告を纏めるにあたっては歪ゲージメーカーの方々や特にロードセル製作また、ロードセル・歪ゲージに関する基本的な事項から幅広く、多くの知識をご提供・ご教示頂きました㈱ホクヨー遠藤氏にはここに心より謝意を申し上げる次第です．

6　おわりに

ロードセルはこれまでメーカーで販売されている荷重計の様な既成のものを利用する単なるユーザー的な観点でしか接して来なかった点、詳細な知識の点で未知の部分もあり、今回の様にロードセルや歪ゲージの深い知識が求められる問題点が発生したため、ロードセルや歪ゲージといったそれぞれ個別の知識に触れることもでき、またそれらの奥深さにも触れることが出来たのは幸いであった．今後の課題としては無負荷状態または一定荷重状況下における一定温度の歪値の変化を計測する事でロードセルの詳細な特性が一層明確になると思われるのでその点も計測する必要性が残されている．今後は本報告によって得られた知識や知見を基に今後の実験を行う際の礎とし、十分活用の上、より精度の高い実験環境へと活かしていきたい考えである．

レーザーを用いたプラズマ計測装置の製作

○渋谷真之 A)，中野治久 B)

A) 核融合科学研究所 技術部

B) 核融合科学研究所大型ヘリカル研究部

概要

負イオン源で生成されるプラズマ内の水素負イオン密度を計測するため、レーザーを用いたＣＲＤ分光法計測システムを製作した。実験のシーケンスに同期してパルスレーザーをプラズマに入射し、光検出器で得た信号から水素負イオン密度を求めることができた。また、高電圧上に置かれたミラー駆動用の自動ステージを遠隔制御できるシステムを紹介する。

1　はじめに

光吸収によって物質の濃度を測定する手法としてキャビティリングダウン(CRD)法がある。CRD 法とは高反射率ミラー2 つを物質を挟んで向い合せに置き、そこにパルスレーザーを入射して多重反射させて、物質に吸収されて減衰したレーザー光を計測することにより、物質の濃度を測定する手法である。

この CRD 法を用いて、負イオン源で生成されるプラズマ内の水素負イオン密度を計測するため、パルスレーザーの制御から波形計測・密度の解析までをシーケンス的に自動で行うシステムを構築することとなった。また、負イオンの密度分布も測定するためにレーザー光軸を移動させる必要があったが、ミラーは高電圧上で実験中はアクセスできない位置にあるため、遠隔からミラーを制御するシステムも求められた。

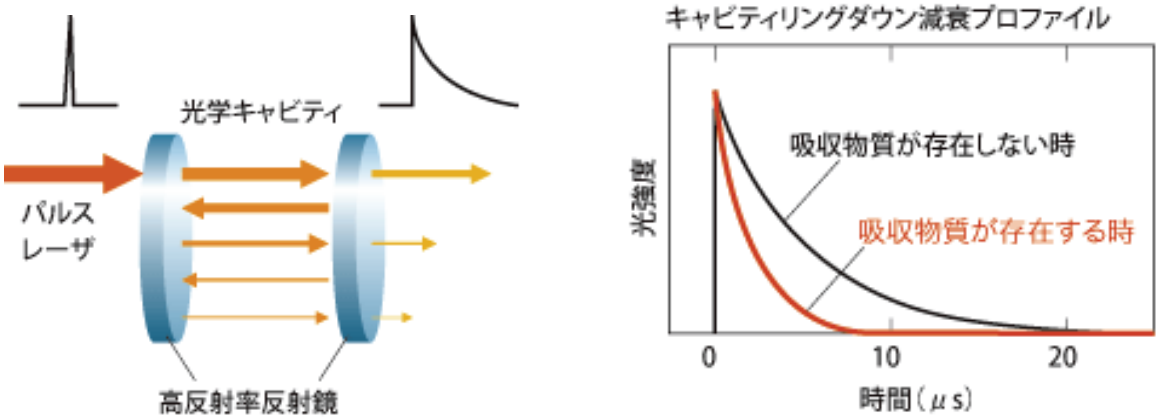


図１．キャビティリングダウン法

2　実験装置

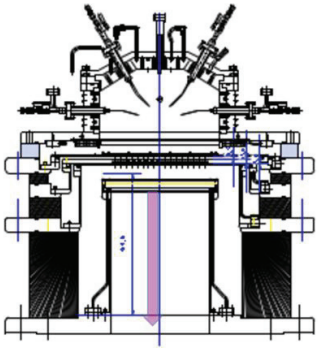


図２．負イオン源

負イオン源とは、大きな真空容器にガスをつめて放電を起こすとアークプラズマが生成され、この中に含まれている負イオンを高電圧で引き出す装置である。アークプラズマ生成および負イオンビームの引出は約 20 秒間でシーケンス的に行われ、それが通常２分周期で繰り返し行われる。

負イオン源に反射率 99.99%以上のミラーを取り付け、そこにパルスレーザーを入射することにより、内部の負イオン密度を測定する。レーザーには繰り返し発振周波数 20 Hz の Nd-YAG レーザー（基本波：1064 nm、パルス幅：5 ns）を、検出器には InGaAs ダイオードを用いた。

レーザー光は光軸調整用ミラーで 8 回反射させたのち、負イオン源に取り付けた高反射率ミラーに導かれる。高反射率ミラーを透過した 1 万分の 1 の光が負イオン源内部で多重反射して、反対側の高反射率ミラーを透過する 1 億分の 1 の光をファイバーで検出器まで導き AD コンバータでコンピュータに取り込み解析する。

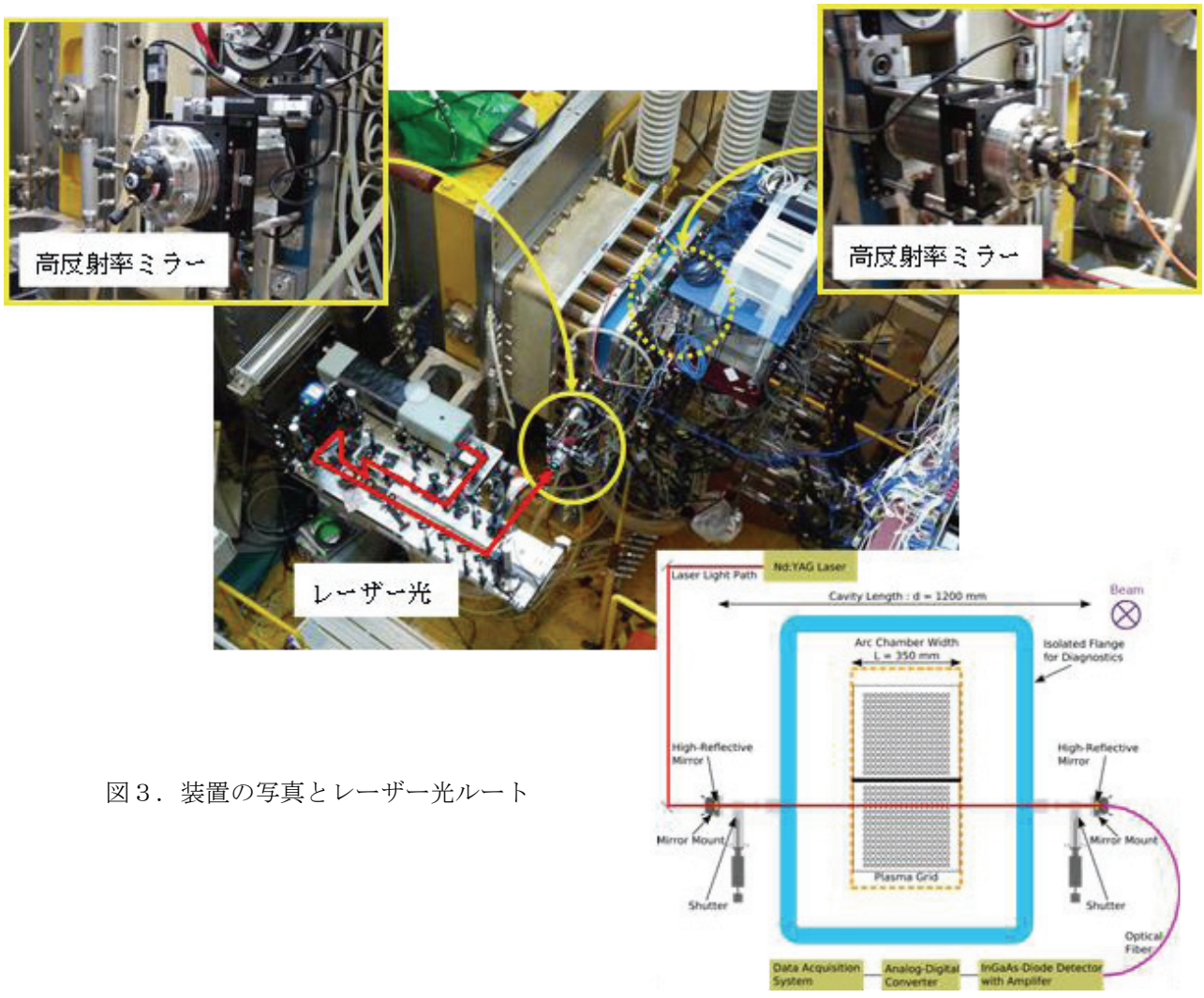


図３．装置の写真とレーザー光ルート

3　レーザーの制御と解析

実験シーケンスに同期させてパルスレーザーを入射させるため、Nd-YAG レーザーをリモート制御モードで発振させた。制御信号として TTL 信号 2ch をフラッシュランプ用と Q スイッチ用に 200μs 程度のディレイで与えることにより、発振させることができる。ディレイ時間によりレーザーの強度もコントロールすることができる。1 回の実験シーケンスは 120 秒周期で繰り返し行われ、1 シーケンス 20 秒間での負イオン密度の変化を測定するため、20 秒間 20Hz で 5ns のパルスレーザーを発振させる。パルスレーザー1 ショット毎に減衰波形を 100μs 間計測し、減衰の時定数から負イオン密度を求める。

TTL 信号の制御と減衰波形の計測には YOKOGAWA の WE7000 を使用し、WE7000 の制御と波形の解析に LabVIEW でプログラムを作成した。

LabVIEW でプログラムを作成したことにより、シーケンスに同期させて自動で TTL 信号を制御できるようになり、負イオン密度の変化もリアルタイムで表示できるようになった。

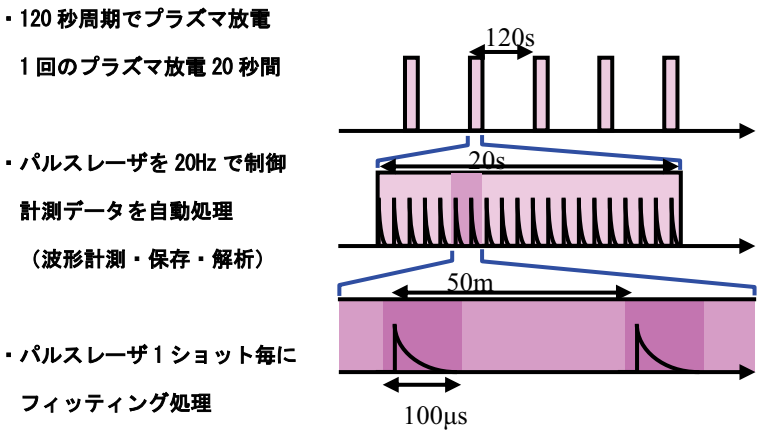


図４. レーザーの制御シーケンス

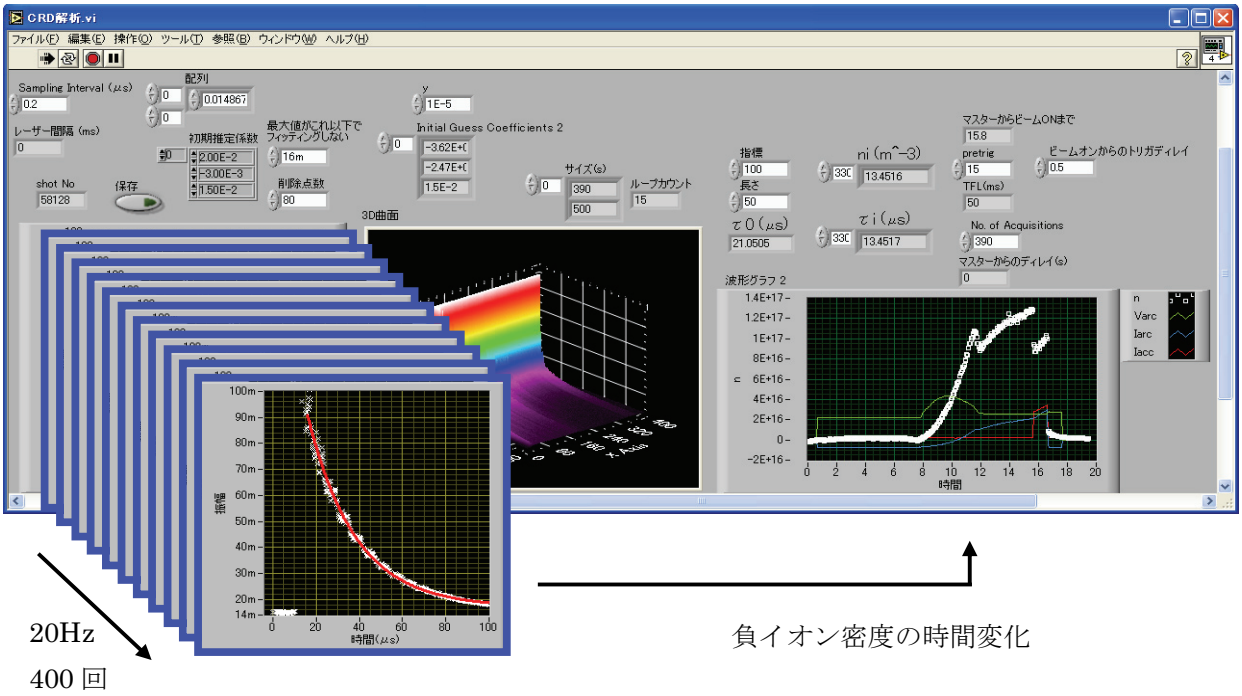


図５．計測画面

4　ミラーの位置制御

負イオンの密度分布を計測するためには、レーザー光軸を移動させる必要がある。当初は手動ステージで位置を移動させていたが、ミラーは高電圧上にあり実験中は立ち入れない場所にあるため、そのつど実験シーケンスを停止させて実験装置のある地下ピットまで行って手動でミラー5 箇所全 8 軸を動かして位置を変える必要があり、非常に手間がかかっていた。

そこで遠隔から制御できる自動ステージを導入した。自動ステージのコントローラはネットワークに接続され、パソコンからコントロールできる。しかし、レーザー光軸を XY 方向に移動させるためにコントロールすべきステージが 8 軸もあるため、LabVIEW で 8 軸すべてをコントロールできるプログラムを作成した。

目標の座標を指定するだけで光軸を簡単に移動させることができるようになり、実験効率を大幅に改善することができた。

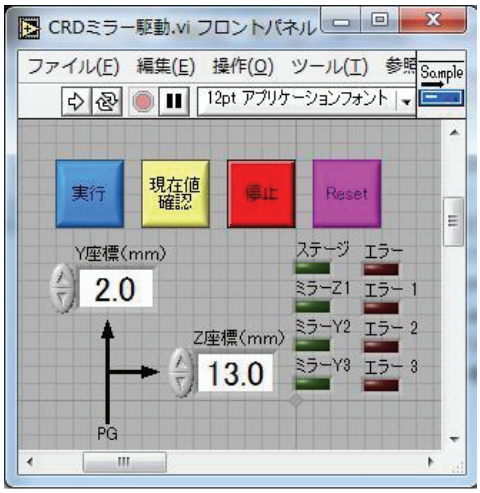


図６．自動ステージコントロール画面

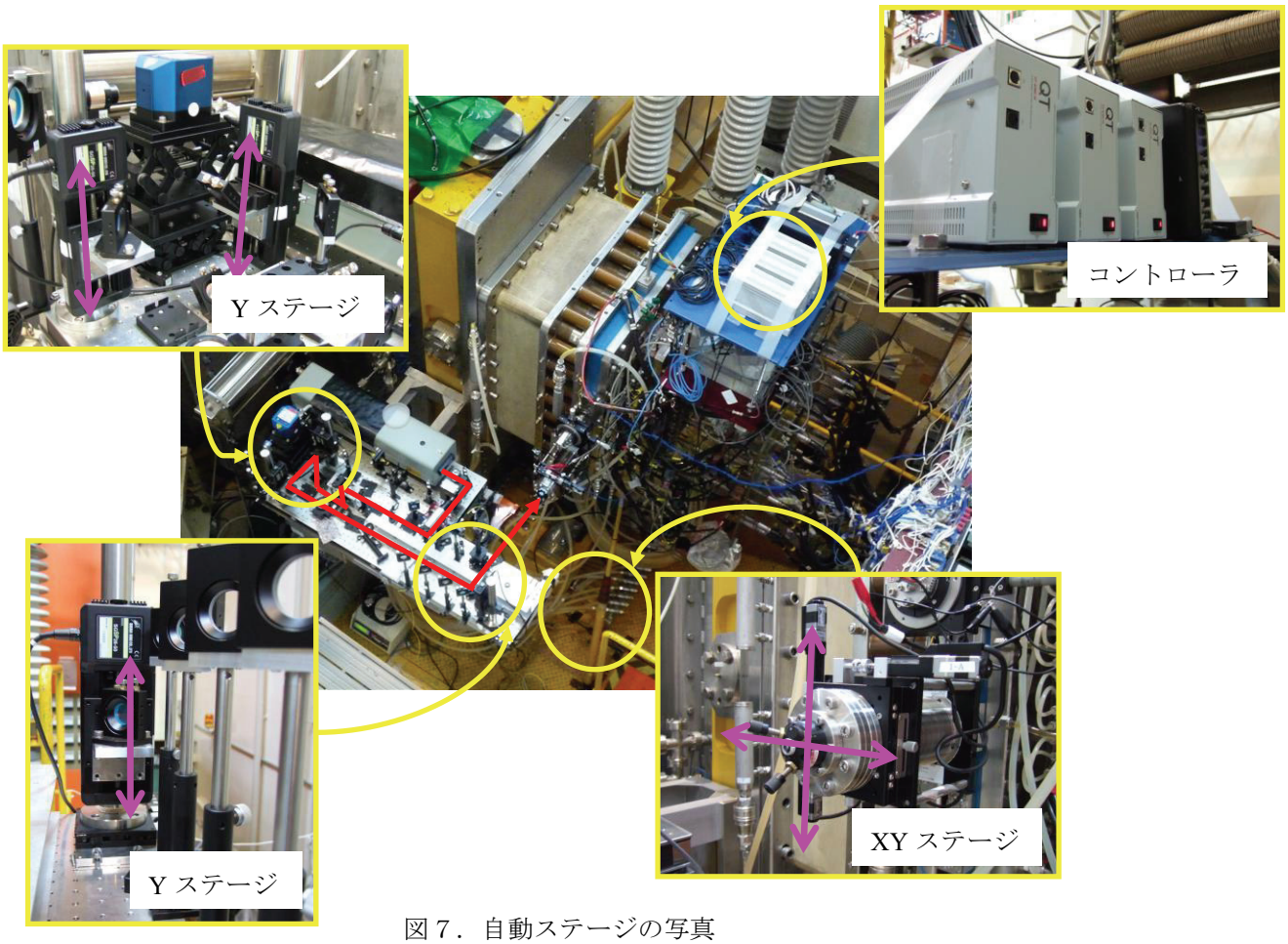


図７．自動ステージの写真

LHD 真空容器内周回軌道の製作と設置確認作業

○河合将照 A)，小渕隆 A)，林浩 A)，三宅均 A)，磯部光孝 B)，西村清彦 B)，小川国大 B)

A) 核融合科学研究所　技術部　計測技術課

B) 核融合科学研究所　ヘリカル研究部

概要

核融合研究所では大型ヘリカル装置の次期計画で用いる新規計測器の開発を進めている。この計測器の精度を上げるために較正用線源を用いた較正が必要である。本報では計測器較正のためにＬＨＤ真空容器内に設置する周回軌道の製作と設置確認作業について報告する。

1　はじめに

核融合科学研究所では核融合発電炉の実現を目指し大型ヘリカル装置（LHD）を利用した高性能プラズマ生成の研究が行なわれている。現在、さらなる高性能プラズマ生成を目指して加熱機器の増強、真空排気系など基幹設備の更新及び計測機器の整備等が進められている。放射線計測はプラズマの性能を評価する方法であり、本報告はこの計測の準備実験にあたるものである。

一般的なプラズマ計測系は観測視野にあるプラズマから放出される光や電磁波、粒子を観測することでプラズマの性能評価や振舞特性が調べられている。構造物による反射などの影響が少ないため計測されたデータから視線系をトーラス方向全体の推測することが可能である。

一方、準備を進めている放射線計測系は、視野範囲からだけでなく物質を透過したり、構造物により反射された放射線の影響が小さくない。そのため計測データから性能評価を行うためには計測器が設置された位置における計測系の検出感度が必要である。

この検出感度の較正は、較正用線源をトーラス方向数点に配置し測定したデータを基にトーラス方向全体の測定感度を推測する手法がこれまで行われてきた。ところがプラズマ閉じ込め装置の大型化と共に装置の構造が複雑化してきており、較正の精度を上げるためには測定点の増加が必要になってきている。その中で較正用線源を連続的にトーラス方向に移動させることでプラズマを模擬し、より精度を高めた感度較正方法が日本・那珂核融合研究所の JT-60 や米国・プリンストンプラズマ物理研究所の NSTX 装置で実施された（図 1）[1]。

この較正方法は較正用線源を搭載した鉄道模型をプラズマ閉じ込め容器のトーラス赤道面上に敷設したレールの上でトーラス方向に連続的に周回させるものである。この方法では、これまでの方法と比べ精度の高いデータが得られたため、LHD における放射線計測系の感度較正に同様の方法を採用することにした。本報では較正実験に向けて進めている線源搭載用周回移動体やトーラス周回用軌道の設計、製作および較正実験を模擬したプラズマ閉じ込め容器内設置作業について報告する。

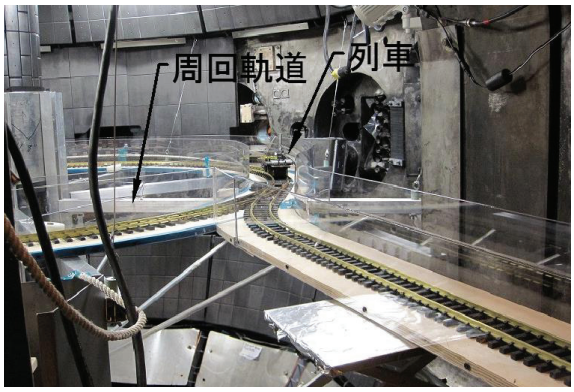


図 1　米国・プリンストンプラズマ物理研究所 NSTX 装置で実施された較正実験の様子

2　周回移動体及び周回軌道の設計・製作

LHD は、真空容器サイズが大半径 R = 3.9 m、小半径 r = 1.6 m で、超伝導コイルにより生成された磁場によりプラズマを閉じ込める磁場閉じ込め方式の装置である。そのため装置内をはじめ、装置周辺においても磁性体の設置は規制されている。メンテナンス期間における工具類の持込みにおいても数量、所在の管理が厳しく行われている。

また高温高密度の高性能プラズマの生成には不純物粒子の輻射によるエネルギー損失が大きな問題となることから、不純物粒子の発生源となる真空容器内壁の状態が重要となる。プラズマ生成実験前には真空容器のベーキングやプラズマ自身による放電洗浄を実施しているが、メンテナンス期間中における水分・油分・毛髪などの混入を抑制すべく防塵服、パウダーフリー手袋にマスク着用の対策が講じられている。

一方、較正用線源を周回させる較正実験に於いて、有意義なデータを得るためには 72 時間以上の連続周回が必要であることが、LHD の構造を考慮したモンテカルロシミュレーションにより算出されている [2]。

このような条件下で、較正用線源を周回させる較正実験を可能とする、周回移動体および周回軌道の設計・製作を行った。

2.1　周回軌道

周回移動体の軌道は真空容器内を周回する周回部 R = 3.744 m と周回移動体を周回部に導入する直線部 L = 12.3 m から構成されている。直線部軌道は図 2 に示したように ICF305 の計測ポートを利用して真空容器内に導入される。

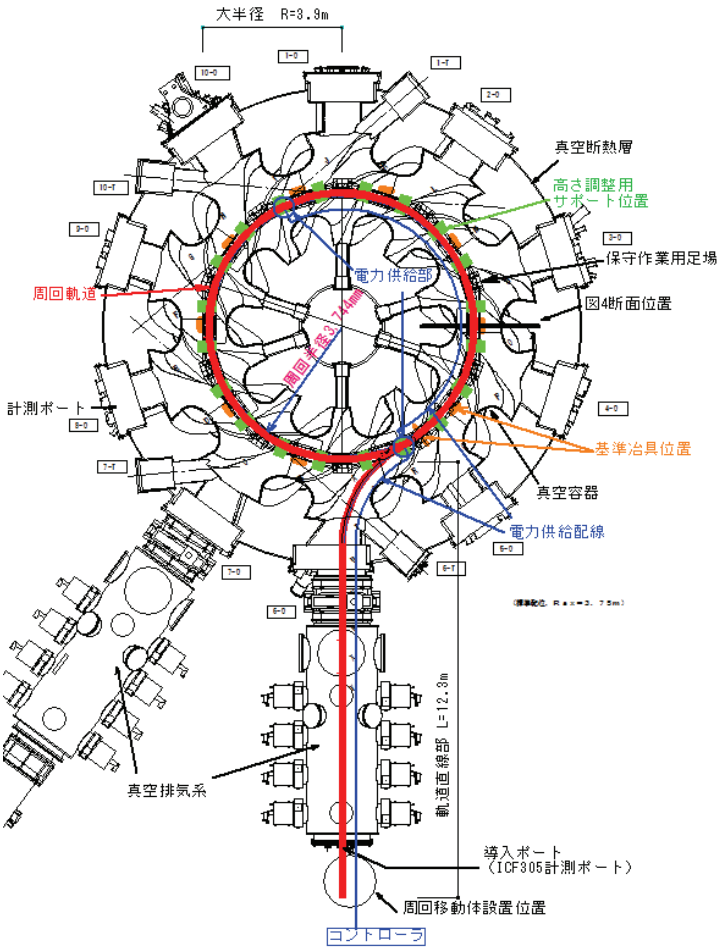


図 2　真空容器内に設置する較正用周回軌道

図 3　周回軌道の組立試験（保守エリア）

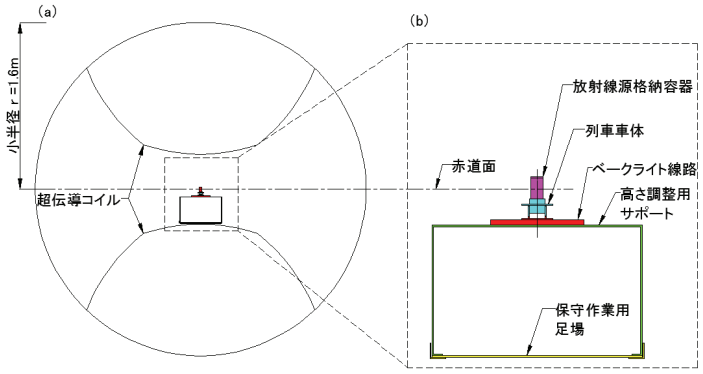


図 4　(a)真空容器ポロイダル断面と周回軌道位置
(b)周回軌道の真空容器内組み立て図

軌道の設置は計画当初、専用の治具を準備することを計画したが、保守点検用足場との入れ替え作業の時間やコストの問題から、真空容器内保守点検用の足場を流用して行うことにした。図 3 には真空容器内保守点検用足場を真空容器外の保守エリアに設置し、周回部軌道の組立試験を行った様子を示した。保守点検用足場の使用には既存機器保守点検のために水平および径方向に対し正確に調整されている利点がある。ただし、図 4 に示したように赤道面に対し 250 ㎜低い位置に保守点検足場は設置されているため、線源が赤道面を周回するためには高さの調整が必要であることが、図 4 と図 5 に示した高さ調整用のサポートを用意した周回部軌道と直線部軌道を接続するためには、周回部軌道に対し高い設置精度が求められることから、図 5 に示した基準治具を用意した。これらにより、6 ㎜以内の周回部の組み立てと高さ調整が可能となっている。

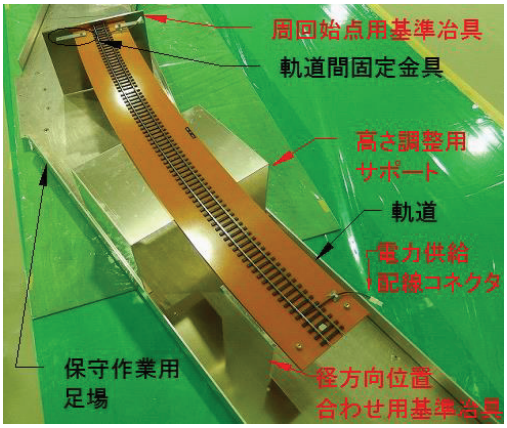


図 5　周回始点用の基準治具と径方向位置合わせ用基準治具を利用した周回軌道の設置位置調整の様子

周回移動体に電力を供給するレールは長さ 0.9 m～1.3 m、厚さ 10 ㎜のベークライト板の上に固定され、ベークライト板をつき合わせ、ジョイントをレール間に差し込むことでレールが接続され、レール全周に電力が供給されるようになっている。接続後は軌道間固定金具を用いてベークライト板間の固定を行っている。レール間の接触不良による電力供給停止を想定し、レールに接続された配線同士をコネクター（図 5）接続することで全周に電力が供給されるように工夫した。また、周回部は全周 23.5m と長いことから、周回方向の電圧降下による周回速度の変動が懸念されるため、供給電圧が全周で一定になるように電力供給元を 2 カ所設ける工夫を行った（図 2）。

その他、周回移動体が軌道から脱線した場合、線源や部品の紛失、真空容器内機器の破損が想定される為、軌道側面に塩化ビニール板で製作した落下防止用ガイドを準備している。

2.2　周回移動体

周回移動体には、プラズマを模擬した較正用線源を真空容器内で周回させるため、鉄道模型を採用した。直径 25 ㎜×高さ 50 ㎜、重量約 100 g の円筒形較正用線源格納容器を搭載し安定に周回させるため、模型としては国内で最大規格の O ゲージを選択し製作を行った。図 6 は設計・製作した周回移動体（3 号機）である。全長 300 ㎜、全幅 60 ㎜の筐体中央に線源搭載用ホルダーを設置し、較正用線源がトーラス赤道面を周回するように設計されている。

周回移動体の駆動部は、2 基のモータと車輪の他に、3 枚のギヤを有するギヤユニットで構成されており、安定した連続運転を可能にするためにバッテリーを使用せず、車輪を介しレールから電力を供給させている。また較正実験中は真空容器内に立ち入ることが出来ないため、図 2 に示した真空容器外のコントローラにより供給電圧および極性を切り替えることで、周回速度および進行方向の調整を可能としている。

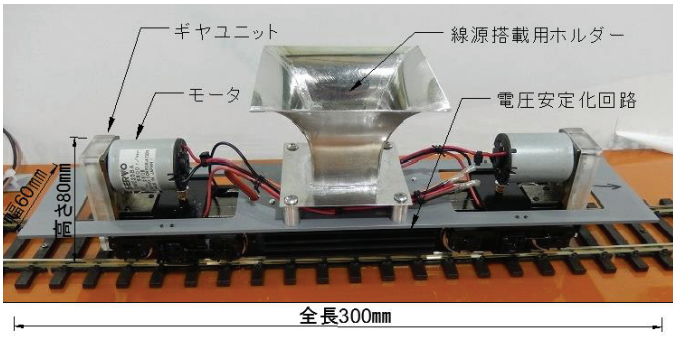


図 6　鉄道模型（O ゲージ）を基に製作した周回移動体

3　周回移動体走行試験

較正実験では 72 時間以上安定した周回移動体の連続走行が要求されているため、耐久性のある駆動部が必要である。設計した駆動部の耐久性を確認するため、約 100 時間の連続走行を目指した走行試験を行った。図 7 に連続走行試験の結果を示す。

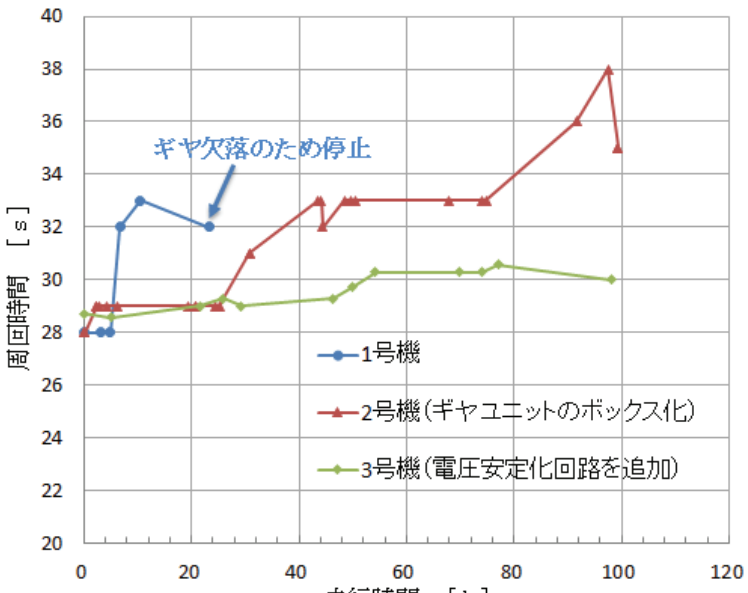


図7　連続走行試験結果

・1 号機

一般的なギヤユニットには、摩擦によるギヤシャフトの劣化などを抑制するためにグリースを用いることが多いが、真空容器内への持込規制を考慮し、1 号機はギヤユニットにグリースを使用しないものとして製作を行った。

1 号機は走行試験開始後の 5~6 時間は一定のラップを刻み安定走行していたが、急激にペースが落ち始め、最後は停止に至った。要因は想定された摩擦によるギヤシャフトの劣化と考えられ、図 8 に示したように、ギヤ 3 枚の内、中央の 1 枚のシャフトが折れ、ギヤが欠落していることが確認された。また駆動部周辺にも金属粉が確認され、ギヤユニットの摩耗が明らかなことから、グリースによる摩擦対策は省けないことが明らかになった。

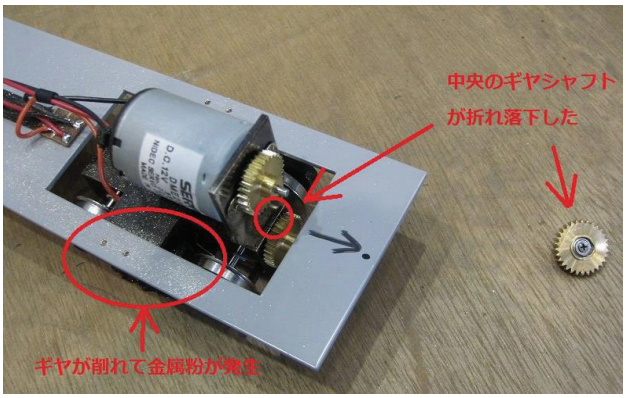


図 8　1 号機駆動部ギヤシャフト破損の様子

・2 号機

シャフトの劣化対策としてグリースを用いるには、走行中におけるグリースの飛散防止を施す必要がある。その対策として、ギヤユニットのボックス化による飛散防止策を検討し、改良を行った（図 9）。

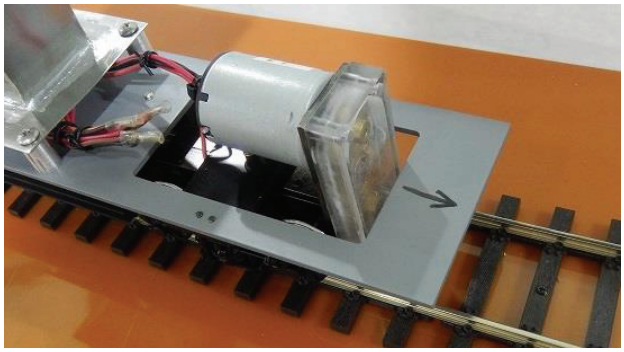


図 9　ギヤユニットのボックス化

走行試験では、懸念されたグリースの飛散は確認されなかったことから、ギヤユニットのボックス化対策に効果があったものと考えられる。また金属粉も確認されなかったことから、ギヤユニットの摩耗も抑制されていると判断された。

ギヤユニットの摩擦抑制が功を奏し走行時間は当初の目標である 100 時間が可能になった。駆動部の耐久

性は強化されたが、周回時間に於いては、徐々にペースが落ちる傾向が確認され、最終的には試験開始直後に比べ約 36%のペースダウンに至った。要因は、車輪・レールに摩耗と汚れの付着が見られたことから、鉄道模型に電力供給しているレールと車輪の間の抵抗が、長時間の走行による車輪との摩擦による摩耗と汚れの付着により変化したためと考えられる。

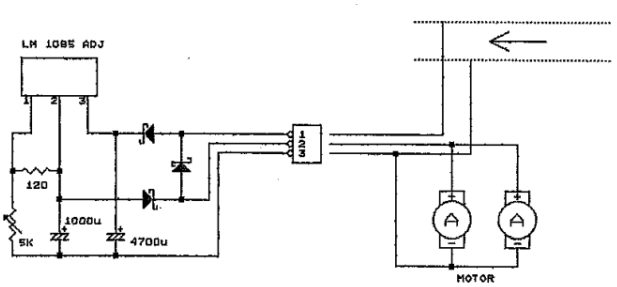


図 10　電圧安定化回路

・3 号機

対策として、入力電圧 12～15V に対し出力電圧が 10V 一定となる電圧安定化回路（図 10）を周回移動体に搭載し（図 6)、駆動部への電力供給一定化対策を施し、走行速度の安定化を図ることとした。また長時間走行中には入力電圧低下は発生するものと想定し、コントローラでの供給電圧の設定は、電圧安定化回路の入力電圧最大である 15V にすることにした。

加えて走行試験前にレールと車輪表面の拭き取り清掃を行い、抵抗体の払拭を行った。

その結果、100 時間後に 2 秒程度（約 7%）のペースダウンは確認されたものの 2 号機に比べ大幅な改善が確認され、安定な連続走行が実施できる周回移動体を得ることが出来た。さらに、2 回目の走行試験と合わせ合計 200 時間を走行した後も異常が確認されなかったことから、駆動部の耐久性もあることが確認された。

4　周回軌道のＬＨＤ真空容器内設置試験

較正実験本番に向けて問題点の洗い出しを目的に、製作した周回軌道の設置試験を LHD 真空容器内で実施した。図 11 には試験の様子を示した。ここでは、設置試験の準備内容と設置時に明らかになった問題点をまとめる。

設置試験では、主に技術職員に応援を依頼し、真空容器内での組み立て要員 11 名、器材を真空容器内に搬入する真空容器外要員 3 名の合計 14 名で実施した。設置試験の前日までに、実施内容について資料の配布と合わせ、説明会を実施した。

4.1 準備作業

真空容器内に水分・油分を持ち込まないように全ての部品、工具は事前にアルコールで拭き取り洗浄を行った。部品、工具を真空容器内に持ち込むために本体室内に集積する必要がある。本体室内はクリーンルームではないため集積中に水分・油分・埃などが付着する可能性がある。今回は集積するエリアをビニールシートで養生し部品・工具を保護したが、この方法では空気中の埃が付着する可能性が残る為、次回は搬入直前まで保管できる容器等で対応することを検討している。

真空容器内作業時に不足物品が無いように物品名と数量のリストを作成し、チェックを行った。このリストは作業終了時の搬出物品のチェックにも利用した。

図 11　周回軌道の真空容器内設置試験の様子

4.2　搬入、組み立て作業

まず真空容器内の各ポート間に 1 名入り基準治具、高さ調整サポート、軌道の順に手渡しで搬入した。

次に高さ調整サポート、基準治具、軌道の順に設置し軌道間の固定、配線接続を行った。高さ調整サポート設置の際、径方向位置合わせ用基準治具が干渉したため、次回は径方向位置合わせ用基準治具の搬入は最後に手順変更を行う。また高さ調整サポートの設置中、サポートが転落しそうになることがあった。保守作業用足場の直線部分には転落を防ぐ高さ 150 ㎜程度のガイドがあるのだが、サポート設置場所の一部にはガイドが付いていないためである。対策として不足場所に別途ガイドを取り付けることで足場からの転落を防止することとした。

設置された軌道の誤差を測った結果。基準治具と軌道の間に 6 ㎜の誤差があった為、現在基準治具やその設置方法の改善を進めている。測定後軌道を解体しサポート、冶具と共に搬出した。

5　まとめと今後の課題

計測器較正用の周回移動体と軌道を製作した。鉄道模型を利用することで製作期間、予算を縮減することができた。

較正実験は周回移動体の周回動作のみでなく、較正用線源の実験室への搬入、周回移動体への搭載と降ろし、実験室からの搬出・保管までが一連の内容である。今回は、周回移動体と軌道の設計、製作と改良について報告を行った。周回移動体に於いては駆動部の耐久性強化、連続運転の安定化を図り、十分な成果が得られたと考えている。200 時間の走行時間に対する耐久性は確認できているが、較正実験本番における万が一の破損に備え、同じ仕様の予備機を準備している。軌道については、前回の真空容器内設置試験から落下防止ガイドの設置が手順に加わるため、試験全体の設置手順の変更が発生した。

次回の設置試験では直線部軌道の設置および模擬較正用線源の周回移動体への搭載と周回試験を計画している。

直線部軌道終端が 250 ㎜φの導入ポートを通過できるかどうかは周回部と直線部の接続に於いてそれぞれの設置精度が大きく影響する。真空容器内での組立試験は今後 2 回計画されているが、その中で直線部からの組み立て手順の検討する必要があるかもしれない。加えて設置手順の精査と作業者への周知が重要である。

走行中の移動体の監視方法や周回回数のカウント方法についても準備が必要である。走行中の監視方法についてはネットワークカメラの設置を計画しているが、周回距離が長いためにカメラの個数が増えてしまう。視野を確認しつつ設置場所の十分な検討が必要である。周回回数のカウントには監視用カメラの画像に加え、光センサの利用を計画している。その他、較正用線源の周回移動体への搭載方法や降ろし方法の準備も必要であり、他の技術職員の協力を仰ぎながら進めていきたい。

参考文献

[1] A.L. Roquemore et al.,"Absolute calibration of the NSTX neutron monitor system”2011 IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2011), 26-30,June 2011, Chicago, Illinois, USA.SP1-39

[2] Naoto NISHIO et al.," Study on the Calibration of LHD Neutron Monitoring System” Plasma and Fusion Research: Regular Articles,Volume 6, 2405115 (2011)

ヘリウム液化機 L140 の真空断熱性能と昇温特性について

小林　利章

電気通信大学　研究設備センター

概要

電気通信大学では 2010 年のヘリウム液化設備更新によりリンデ社 L140 が導入され，現在まで稼働を続けている．L140 は本学の液化ヘリウム需要を十分にカバーする液化能力を持つが，供給需要量と貯蔵量などのバランスの事情により液化運転は比較的長い間隔をあけて行われることが多く，また運転時間も日常の業務時間内に配分するのが難しい状態が続いている．運転停止中の昇温を抑制することができれば，次回運転時の予冷時間が短縮され，運転計画の自由度が増し業務計画の改善をはかることができると思われる．本報告ではまず本学の液化システムとその運用体制の現状について説明し，改善が求められる運用体制について説明する．液化機のコールドボックス（CB）の真空断熱能力に着目し，予冷中から停止直後，停止中のそれぞれの段階について断熱真空の振る舞いと排気方法との関係について調査を行い，昇温の抑制には運転停止直後の大きな脱ガスを有効に排気することが重要であることが明らかになったので，詳細を報告する．

1　電気通信大学のヘリウム液化システムの運用と課題について

電気通信大学の液体ヘリウム供給は，週に 1 回の供給日（液体ヘリウムの払出作業を行う日）を定め，その日のみに供給を行うこととしている．液体ヘリウムの年間供給量はおよそ 25,000 L で，週あたりに換算すると平均して約 500L である．自然蒸発量と供給時のロスを考慮すると週あたりに必要な液化量は 600L 強程度であり，液化速度（不純ガス運転で 80 L/h）から計算するとおよそ週あたり 8 時間の液化運転を行う必要がある．液体貯槽の容量だけを見れば 2 週間に 1 回程度の運転でも対応可能であり，起動停止回数を最小限とするために運転回数を減らすべきであるが，2012 年末から継続しているヘリウム調達困難のため在庫量が最小限度で推移していることから運転回数の削減ができず，毎週 1 回の運転が恒常化している．

液化機は通常の運転時には液体窒素を用いて液化速度を最速にして運転しており，窒素無し運転は基本的に停止時間を調整するために行う液化速度の抑制，運転停止前や精製器不調時などにバッファータンクの内圧を高めるためのみに行う．これは液化機の運転時間を最小化させ機器の損耗を抑制すること，窒素無し運転時に液化機にかかる運転負荷を避け機器寿命を延ばすことを意図している．

液化業務に関しては，運転時間と業務時間との調整が難しく，改善が求められている．図 1 に液化業務におけるタイムテーブルの一例を示した．実際の運転においては 8 時間という液化時間に加えて予冷時間が追加されるため，液化運転時間が非常に中途半端な長さになる．本学の L140 は予冷時間が実績として室温から液が出るまで約 5 時間 30 分で， 室温からの運転では 1 回あたり 15 時間程度，液化運転に必要である．装置を起動し，予冷運転を行い，液が出て原料ガスのガス欠（あるいは貯槽の満タン）により停止するまで 15 時間とすると，最低限立ち会い操作が必要な起動時と停止時を同一日の業務時間に納めることが出来ない．そこで通常運用では，終夜運転による液化を基本としている．午後に起動し夜に精製運転サイクルが安定したことを確認するまで超過勤務を行い，終夜運転後の翌日の午前中に停止するパターンで行うことが多い．このように超過勤務が恒常化しているだけでなく，終夜運転中には運転終了時刻が翌日の午前に入るよう液化速度を抑制する調整操作を行うため，帰宅後の自宅からリモートによる液化機の監視と操作を行わなければ

ならない．また保安の観点からも無人運転は避けるべき状態である．1 日目を予冷のみの運転とし，二日間以上に分けて昼間運転でも可能だが，起動停止操作の回数を増やすこととなり，また時間が余分にかかるため他業務との調整が難しくなる．そのため分割しての運転は避けたい．

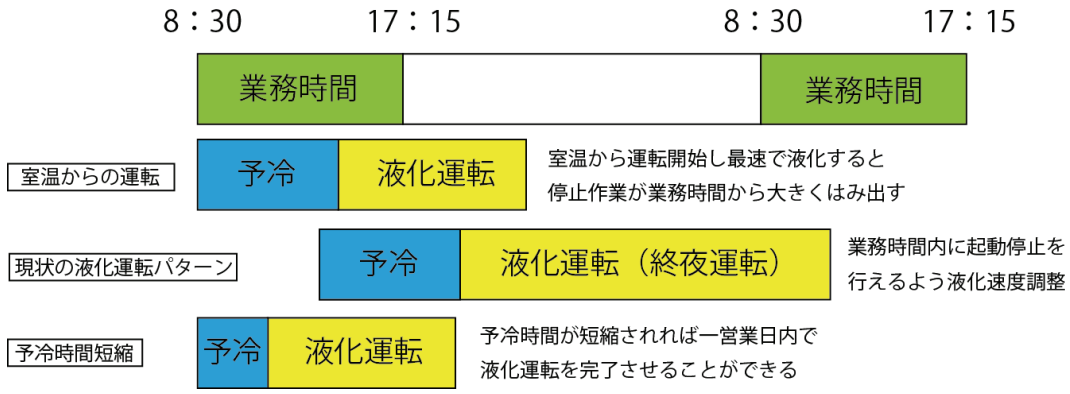


図 1. 液化業務のタイムテーブル

この課題の一つの解決方法として，運転停止中の液化機の昇温抑制があげられる．次回運転時まで十分に冷えた状態を維持できれば，起動後の予冷時間が短縮され，終夜運転を行わずに（多少の超過勤務は仕方がないとして）図 1 に示したように当日中に液化運転を完了させることができるだろう．また予冷に要する電力の削減により近年求められる省エネルギーに貢献することも同時に可能となる．

そこで，次回液化運転時の予冷時間短縮の可能性を探るために，①運転中，運転停止後の CB の断熱真空状態と昇温の調査，②真空排気方法の変更による昇温抑制の試行，を行った．本報告ではこれらの経過を報告する．

2　ヘリウム液化システムの機器構成と真空排気装置

電気通信大学のヘリウム液化システムについて，現在稼働している主要機器諸元を表 1 に示した．システムは，2000 年に現在の建屋に新設（東京大学物性研究所からの移設）された後，2010 年に機器の大規模な更新を行いリンデの L140 を導入し，現在に至る．液化能力は不純ガスを用いた運転で 80 L/h，液体窒素予冷を行わない運転モードでは 30 L/h である．

L140 の CB の真空断熱は，外部のロータリーポンプ (Edwards RV5，排気量 85 L/min) による真空排気システムと，CB 内の配管に設置されたクライオソープションポンプ（吸着器）より維持される．真空計（Edwards APG ピラニーゲージ，APGX-L）は CB 本体に溶接された枝管に接続されており，ロータリーポンプの排気ラインから独立している．指示値は監視 PC により常時記録されている．

ロータリーポンプの運転は真空計の値を基準に自動制御されており，CB 内が 0.3 Pa 以下の真空度になるまで運転し自動停止，その後圧力が 1 Pa まで上昇すると自動起動するよう設定されている．液化運転中はソープションポンプにより系内の真空が維持され，運転中の CB 内真空度は 1.5×10^{-2} Pa 以下の圧力（付属真空計の測定レンジ（大気圧から 0.02 Pa まで）の範囲外）となる．

クライオソープションポンプの吸着器はヘリウム容器からの戻りガスが流れ温度が低くなる箇所，温度計 TI3280 近傍に設置されており，予冷中もバイパスからのガスが流れる箇所にある．

表 1. 電気通信大学ヘリウム液化システム諸元（2013 年現在）

	製造者	形式	仕様能力
ヘリウム液化機 （2010 年更新）	Linde	L140	108 L/h（純ガス） 80 L/h（不純ガス） 30 L/h（LN_2 無し）
液体ヘリウム貯槽 （2000 年移設）	CRYOFAB	CMSH2000	2,000 L
液化圧縮機 （2000 年新設）	KAESER	DS241	840 Nm^3/h
中圧乾燥機 （2000 年移設）	小池酸素工業		2 塔式
中圧バッファータンク （2010 年更新)			16 m^3
回収圧縮機 A （2000 年移設）	Burckhardt	C5U 2.12	90 Nm^3/h
回収圧縮機 B （2010 年新設）	Burckhardt	C5U 214.4GEX	100 Nm^3/h
回収ガスバッグ			10 m^3×3 台
長尺回収ガス貯蔵容器			75 Nm^3×36 本 計 2,700 Nm^3
液体窒素 CE	岩谷産業	CEA-10K	9,700 L

3　液化機予冷運転中の真空断熱状態の変化

以下に今回調査した，平均的な通常運転中の CB 内圧力と温度などの関係について報告する．図 2 に液化機予冷運転の開始時から液化が開始されるまでの間の，TI3280(JT)の温度，TI3610（LN2 熱交換器出口），CB の断熱真空の圧力（IsoVac）の時間変化を示した．圧力の縦軸は対数である．

運転開始前，CB 内が常温（20℃前後）の状態ではロータリーポンプによる到達圧力は約 3 Pa である．通常この段階ではロータリーポンプは停止する真空度に到達しないので運転を続けている．液化機起動後の真空状態は，液化機の予冷の段階によって大きく変化する．

第 1 熱交換器（液体窒素予冷）予冷の段階（図中温度領域 1）では CB 内圧力は持続的に下降を続ける．配管予冷が終了し液体窒素が熱交換機内に流れ込み配管ガス温度が急に下降すると，液体窒素の流量を絞る制御がなされる．この時，CV3615（液体窒素バルブ）が絞られた瞬間，関係する系の温度が瞬間的に上昇するためか CB 内圧力が一瞬上昇する振る舞いが見られることがある. その後 CB 内圧力は継続して下降し, 0.3 Pa あたりで液化機の予冷進行に関係なく一定の値になる．この近傍で真空ロータリーポンプが自動モードであれば排気が停止され CB は締め切られる．ここで第 1 熱交換器の温度と CB の圧力変動は連動しておらず，熱交換器温度が下降中にもかかわらず一時的に飽和状態になる振る舞いが見られる．また第 1 熱交換器の予冷完了前後でも CB 内圧力は変化しない.

液化機の予冷が進行し（温度領域 2），80K あたりで液体ヘリウム容器からの戻り弁（CV3290）が全開になる．そこで内部精製器のクールダウンが開始されると同時に，CB 圧力は再度下降を始める．CV3290 が全開になり冷ガスが流れると CB 圧力は一瞬下降しまた戻るが，これはヘリウム容器からの戻りガスで瞬間的に冷えて周りより温度が低い部分が出来るためと思われる．TI3280 の下降に伴い吸着器が働き始め，20K あたりで飽和するまで CB 内圧力が下降する振る舞いを見せる．この振る舞いから，80K より高い温度では吸着器は十分に働かないと考えられる.

ヘリウム液化開始までの予冷時間は通常，5 時間 30 分程度である．TI3280 は液化運転中（温度領域 3），4.7K 程度を示し，CB 内の圧力は 0.015 Pa 以下で推移する．この数字は付属の真空ゲージの測定レンジ（0.02 Pa）より低い圧力で，実際には真空度はさらによいと思われる.

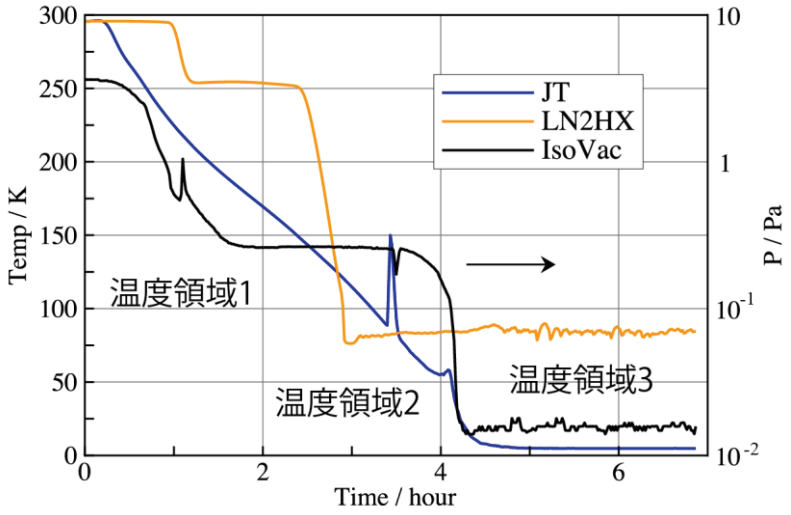


図 2. 液化機予冷中の温度変化と CB 真空度

4　運転停止後の真空断熱状態と，排気方法の変更による昇温抑制の試行

液化機が運転を終了した後，機器の昇温を抑制し次回の予冷運転を短縮するためには断熱真空の状態をより高真空に維持すれば良いはずである．そこで断熱真空の排気システムを，通常のロータリーポンプ（RP）による排気と，ターボ分子ポンプ（TMP）による排気，何も排気をしない状態とで，温度上昇がどのように変わるか比較することにした．運転条件は次の通りである．

ロータリーポンプによる排気では，排気システムの自動制御を解除し手動にてポンプの運転とバルブ操作を行い，液化運転停止直後から排気を開始した．

ターボ分子ポンプ（PFEIFFER VACUUM HiCube 300 classic，排気量 260 L/s）による排気では，付属ロータリーポンプの代わりに TMP を接続し，液化運転中から排気を開始した．

排気をしない状態は，液化運転停止直後に手動にて排気システムをシャットダウンしそのまま放置した．

図 3 に，これら異なる排気条件による，液化運転停止後の液化機内の温度の時間変化の比較を示した．

左は液化機停止直後の 10 時間を拡大して示している．真空排気を行わない場合，ポンプにより排気する場合と比べ早くに CB 圧力が上昇し，TI3280 もこのとき同時に上昇を始めた．TMP や RP で排気をしている条件では昇温開始が遅く 1 時間 30 分後から上昇が見られ，CB 圧力の急上昇は 2 時間後から見られた．しかし 2 時間後以降を比較すると，昇温速度の差がほとんど見られなかった．この領域では吸着器からの脱ガス量が非常に多く，真空ポンプの働きが脱ガス速度に追いついておらず，TMP でも RP でも CB 圧力がほぼ同じであった．そのため昇温速度は非常に大きく，排気方法による差が見られないのだと思われる．

室温に至るまでの昇温速度について右のグラフで比較する．運転停止後，排気を継続して行っている状態では，CB 圧力は停止後 5 時間頃にピークを迎え，その後脱ガス量の低下に伴い下降し，TMP では 0.3 Pa，RP では 0.6 Pa で平衡した．48 時間後の TI3280 温度は，TMP で 160 K，RP で 180 K で，TMP では RP に比較し約 20K 温度上昇が抑制されていた．しかしこの温度差は停止後 10 時間から変化しておらず，昇温中の昇温速度は TMP と RP ではほとんど差が見られなかった．停止後 6 日，温度が 250 K を超えたあたりから CB 圧力にも上昇が見られた．機器からの脱ガスと思われる．

真空排気システムを停止しておいた場合，約 10 時間で TI3280 は 150 K を超え，48 時間で 250K を超えた．CB 圧力は 8 Pa を超えたあたりから温度上昇に従って単調に上昇を続けていた．

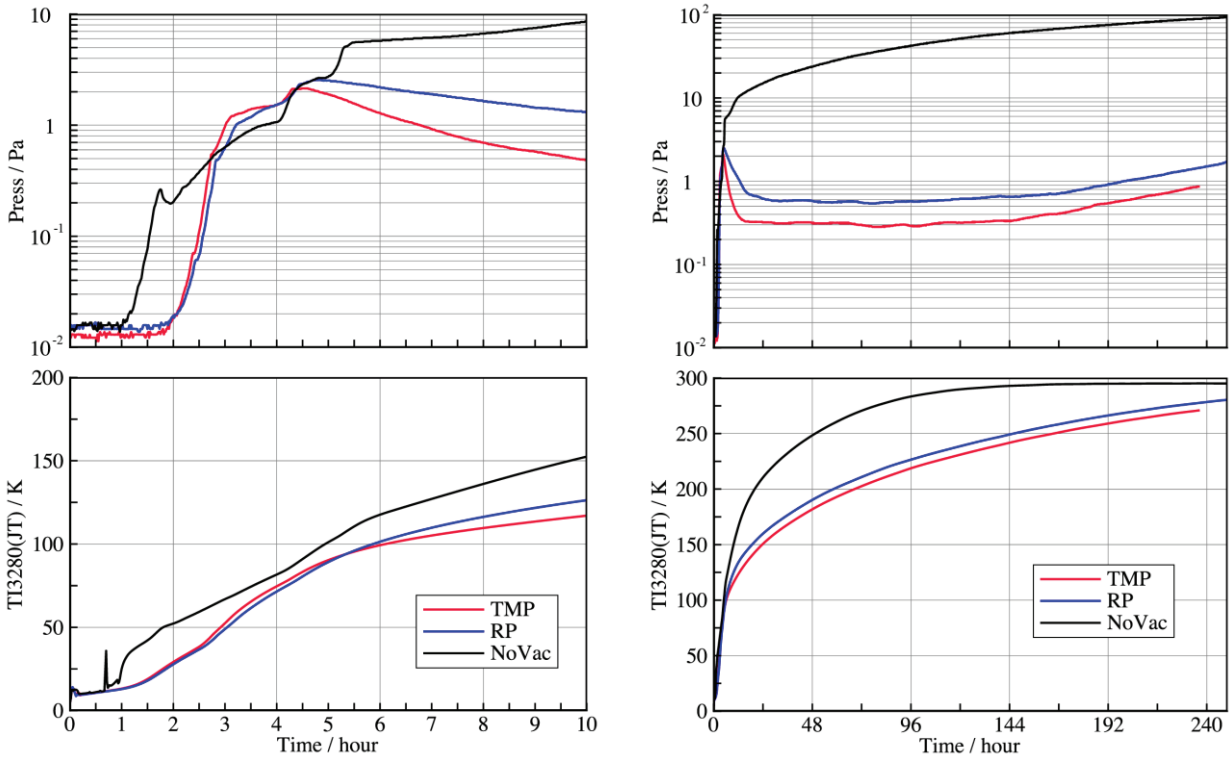


図3. 運転停止後の真空排気方法の違いによるCB真空度と昇温の比較．左は液化停止直後 10 時間を示している．

5　結果の検討と今後の課題

液化機停止後の昇温特性と CB 圧力の振る舞いから, 停止直後数時間の吸着器からの脱ガスによる CB 圧力の上昇，それに伴い不良化した断熱による温度上昇が昇温過程全体に対して非常に大きく寄与することが明らかになった. 昇温を抑制するためには停止後数時間の脱ガスを排気することが重要であるが, 現状ではTMPを用いても昇温速度を抑制することは出来ず，RP による排気で昇温を押さえた場合と比較し，昇温時間，次回運転時の予冷時間にほとんど差はなかった.

現在 CB の排気ポートは，電磁弁を介して非常にインピーダンスが大きな経路を通っており，TMP で排気を行うと TMP 付属の真空計と CB の真空計との間で 30 倍以上の真空度の差が見られる．ここがボトルネックとなり十分な排気量を確保できていない可能性が高い．停止直後の脱ガスを十分に排気するためには CB とポンプとの取り合い部分を大口径のフランジと交換する，あるいは TMP を CB に直接接続することが必要であると思われ，これは今後の課題である.

ヘリウムガス回収率向上への取り組み

○笹尾　愛[A)]，川井　昭[B)]，本庄　浩司[B)]，伊藤　義浩[C)]，古木　良一[A)]，稲角　直也[A)]，
戸所　泰人[A)]，竹内　徹也[C)]，野末　泰夫[D)]，田島　節子[D)]

[A)] 大阪大学理学研究科技術部
[B)] 大阪大学基礎工学部技術部
[C)] 大阪大学低温センター
[D)] 大阪大学大学院理学研究科

概要

近年ヘリウムの深刻な供給不足が大きな問題になっている．それを少しでも改善するために全ユーザーに対して，ヘリウム回収率の向上を依頼している．その中で，ユーザーが増加している核磁気共鳴装置（NMR）利用者に，液体ヘリウム充填時に放出されていたヘリウムガスの回収率の改善対策を行った．結果，ヘリウムガス回収率は飛躍的に上昇した．

1　はじめに

ヘリウムは不活性で熱伝導率が高く，あらゆるガスの中で-269℃と最も沸点が低い．ヘリウムは工業的に生産出来ず，約 8 割はアメリカ，その他は世界 5 カ国のある限られた天然ガス田からしか産出されない「希少資源」である．ガスでは半導体や光ファイバーなどのハイテク産業，液体では低温工学や医療分野の MRI に欠かせない．昨今ヘリウムは，製造業の成長が目覚ましい中国を始めとするアジア地域で需要増大の一途をたどっている．このため，世界のヘリウム需給構造のタイト化が恒常的となり，その状況に加えアメリカでのヘリウムの備蓄による供給制限により，価格の高騰と深刻な供給不足が大きな問題になっている．

大阪大学の低温センターでは，それを少しでも改善するために全ユーザーに対して，ヘリウム回収率の向上を依頼している．その中で，ユーザーが増加している核磁気共鳴装置（NMR）利用者に注目した．NMR では，感度を上げるため，非常に強力な磁場を発生させることが可能な超伝導磁石が使用されている．超伝導磁石を冷却する液体ヘリウムを充填する際のクエンチリスクを低減するために，これまではヘリウムガスを大気中に放出してマグネットの内圧を下げることが行われていた．今回，その内圧を下げつつ，ヘリウムガスをより多く回収するための改善対策を行った．

2　ヘリウム回収ラインの改良

NMR のマグネット内に液体ヘリウムを充填する時に，これまで大気中に放出されていたヘリウムガスを回収するために，ヘリウム回収ラインの改良を試みた．その際，充填時におけるマグネット内の内圧がなるべく上昇しないように注意した．そのために，ヘリウム回収管接続部の改良，ヘリウムガス回収メーターの大流量化，移動式気化器の導入を検討した．図 1 は，液体ヘリウム充填時におけるマグネット内部の内圧上昇を軽減するように，改良したイメージ図を示す．

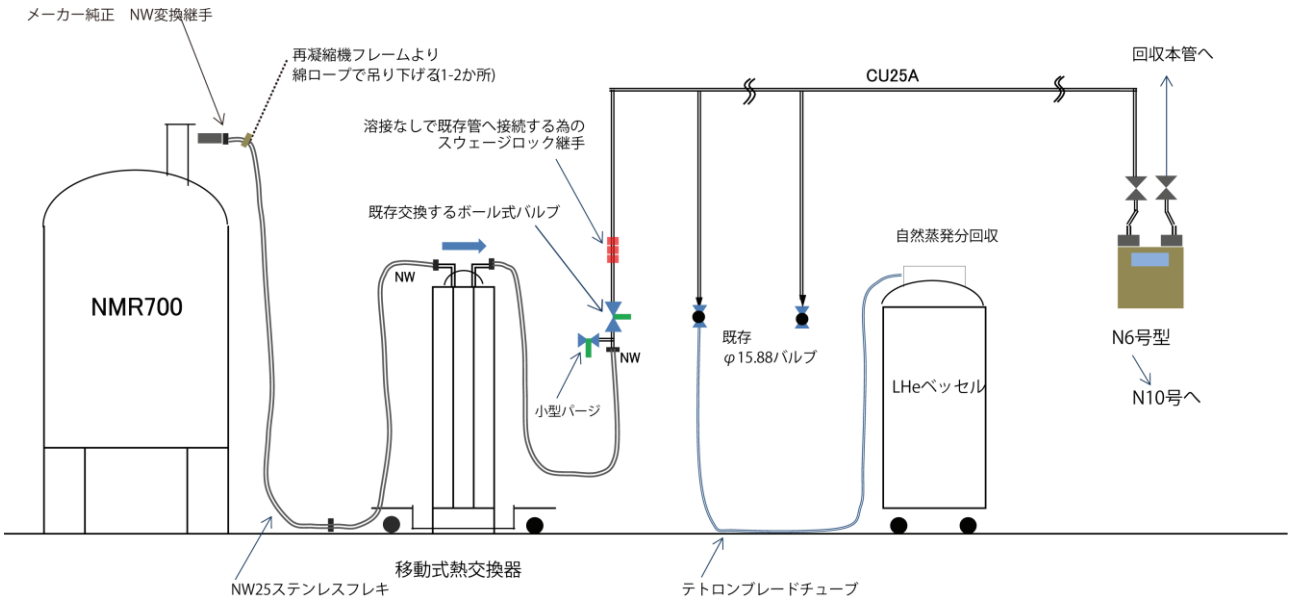


図 1. ヘリウム回収ライン改良イメージ図

（1）ヘリウム回収管接続部

図 2（a），（b）は，ヘリウム回収管接続部の改良前と改良後を示す．従来のヘリウム回収ライン接続部は，ゴムホースを接続できるように管経を小さくし，ニードルバルブを使用していた（図 2（a）参照）．これは自然回収を行っているときは十分であるが，今回のような短時間に大量のガスを回収することはできない．そこで接続部を NW 継ぎ手とし，25 φ ステンレスフレキでマグネットと接続した．バルブは，ボールバルブに変更した（図 2（b）参照）．

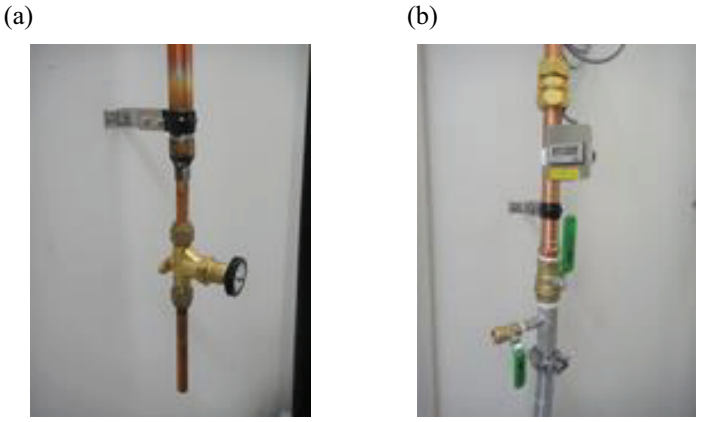


図 2. ヘリウム回収管接続部（a）改良前，（b）改良後

（2）ヘリウムガス回収メーター

図 3（a），（b）は，ヘリウムガス回収メーターの改良前と改良後を示す．ガスメーターは， N6（使用最大流量 : 6 m^3/h，最大指示量 : 999.999 m^3，最小指示量 : 0.2 L）から大流量の N10（使用最大流量 : 10 m^3/h，最大指示量 : 9999.99 m^3，最小指示量 : 2 L）に変更した．その際，接続部を工夫することで，従来の回収ラインをそのまま使用した．

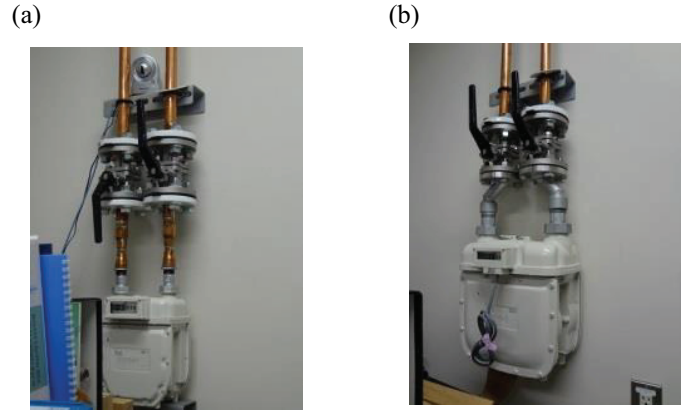


図 3. ヘリウムガス回収メーター（a）改良前（N6），（b）改良後（N10）

（3）移動式気化器の導入

図 4 は，移動式気化器を示す．液体ヘリウム充填時のヘリウムガスを回収ラインを用いて回収する場合，問題点がある．それは回収時のヘリウムガス温度が常温より低いことである．回収ヘリウムガス温度が常温より低いと，ガスメーターの回収量が正確にカウントされなかったり，メーターが冷えて破損する恐れがある．そのため，回収ヘリウムガス温度を常温にする気化器を間に設置する必要がある．今回，常設の気化器を設置するスペースがなかったので，液体ヘリウム充填時のみ使う移動式気化器を導入した．

図 4. 移動式気化器

3　結果

ヘリウム回収ラインの改良として，ヘリウム回収管接続部の改良および，ヘリウムガス回収メーターの大流量化，移動式気化器の導入を行うことで，下記の改善がみられた．

(a) ヘリウム回収管接続部の改良に伴い，流量が大幅に改善され，液体ヘリウム充填時におけるマグネット内の内圧上昇を抑えることができた．

(b) ヘリウムガス回収メーターの流量を大きくすることで，回収時の一時的な回収量増加が生じても，メーターの回収量が正確にカウントされ，破損もしなかった．

(c) 気化器を用いることで，ヘリウム回収ガス温度を常温にすることができた．そして，メーターの回収量が正確にカウントされ，破損も生じなかった．

これらの結果よりヘリウム回収率は，対策前の平成 24 年 1 月～12 月において各々72%であったものが，対策を行った期間を含む平成 25 年 1 月～12 月においては，89%，81%，85%と飛躍的に向上した．

4　まとめ

ヘリウムの深刻な供給不足は，現在も続いているため，ヘリウムガスの購入が滞りがちで，従来のような補充はできない．しかし，今回，ヘリウムガス回収率を向上させることで，ガスの消費量を減らすことができたことから，緊急度は多少改善された．今後も，ユーザーの協力を得て，ヘリウムガス回収率の向上に取り組んでいきたい．

謝辞

最期に，このヘリウム回収率の向上には，理学研究科分析測定室にご協力を頂きました．また回収ラインの改良における配管工事，移動式気化器作成は S.,PLANT.co（エスプラントカンパニー）にお願いしました．紙面を借りて，厚く御礼申し上げます．

web アプリケーションによる低温設備ユーザへの安全教育

○岡田竜太郎，高橋直人，荻津透，木村誠宏，田中健一，中本建志，佐々木憲一，都丸隆，
飯田真久，大畠洋克，寺島昭男
高エネルギー加速器研究機構　超伝導低温工学センター

概要

高エネルギー加速器研究機構超伝導低温工学センター（以下本センター）において次年度からの実施を予定している寒剤利用者向け e-Learning システムの方針から実装までの諸事項について発表を行なう．このシステムは利用者の利便性を高めるため，受講からテスト，修了証の発行までが web ブラウザの同一ウィンドゥで完結する．そのため保守性や改良のしやすさを考慮し，ソフトウェア製作からサーバでの公開までを全て自作で行い自由度を非常に高くしている．本発表では特に試験運用までで得られた知見を元に寒剤供給に求められる教育システムの実装条件についても触れる．

1　目的

本センターでは主たる業務の一つとして寒剤（液体窒素および液体ヘリウム）の供給を行っている．液体寒剤は使用に際し適切な手段が講じられない場合重大な事故に繋がる可能性があり，ユーザへの安全教育の質が事故率に直結すると考えられる．さらに，供給側の教育内容が良質なものであっても，ユーザ側の受講態度が悪ければ意味を無くしてしまう．そこで，安全教育の講習がされた場合は一般的に理解度テストが実施される．ただ，テストの実施については採点や問題作成の手間が掛かり，人数が多くなるほど教育担当者の負担は大きくなる．そこで，e-Learning により web 上で講習を受講し，テストや修了証の発行までを一元化して行なうことができれば教育側は講習実施の会場予約や講師の確保，テスト作成や採点等々の手間を省くことができる．さらに，受講者側からすれば自分の都合の良い時に受講ができ，また特定の部分を繰り返して学習できるなど利便性に優れる．

以上の理由から寒剤の供給を受ける際の安全教育に e-Learning を導入することは多くのメリットがあると言え，そのためのシステムを構築することは非常に有意義であると言える．

2　システムの仕様と方針

今回目的とするシステムでは e-Learning としての基本機能である『web 上での学習』についてと『理解度テスト』そして寒剤供給に係る修了証の発行などの『履修管理』について表 1 に挙げた仕様を実装する．

e-Learning システムとして一般的な講習の中断/再開については講習を一貫して受講してもらうため，また寒剤の取扱のみでそれほど長くしないため実装しないこととした．同様に修了証の再発行についても本センターで修了者を管理しているため，あえてユーザ側での再発行はできないようにした．

また，ユーザ環境が多種多様であることが予想されるのでなるべく一般的な状態で利用可能であるように特殊なアプリケーション等を使わず，HTML5 および CSS3.0，javascript と cookie が動作すれば利用可能なシステムを組むこととした．ただしサーバサイドではテストなどで perl で作成された cgi が動作している．

表 1. 本 e-Learning システムの仕様

web 上での学習	前提とするソフトウェア	HTML5 および CSS3.0 に対応した javascript 実行可能なブラウザ
	講習の方法	画面資料と音声ガイダンス
	単元の管理	音声再生の終了で単元の終了
	学習内容の構成	3 章（1 章あたり複数単元）
	講習の中断/再開	実装しない
	講習の個別受講	単元単位で可能
理解度テスト	形式	多肢選択式（1 章 3 問）
	テスト回数	各章ごと 1 回合計 3 回
	テスト内容	章に係る内容からテストページ読込時にランダムで作成
	失敗時の動作	章の始めに戻る
履修管理	修了時の動作	修了証の自動発行と教育者側への自動通知
	修了証の形式	web ページ上の画像
	修了証の再発行	実装しない

また，講習の開始から終了までのフローチャートは図 1 のようになる．

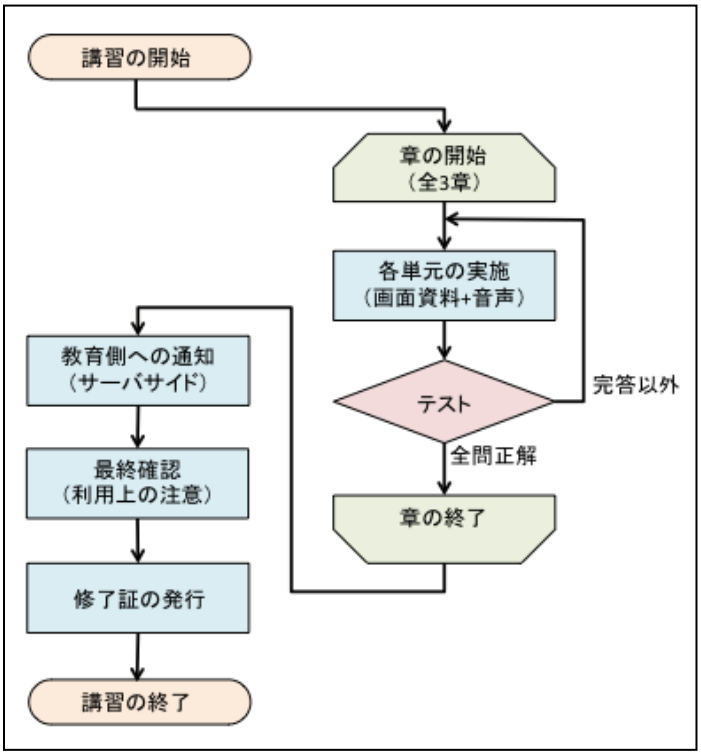


図 1. 講習のフローチャート

ランダム生成されるテストの完答以外は章の始めからやり直すという仕様は少々厳しいがユーザの理解を深めるために必要と考え実装した．

また，教育側への通知（サーバサイド）については，講習開始時に入力した氏名・所属・メールアドレスが教育担当者へ自動でメールされる．

3　資料内容

寒剤取扱に関する安全教育である本システムでは講習を『低温寒剤の物性』『低温寒剤の危険性と事故例』『低温機器の取扱』の三つの章に分けて各章ごと複数の単元に分割している．詳細は表 2 参照のこと．

表 2. 資料内容

章	単元
低温寒剤の物性	低温寒剤の物性
低温寒剤の危険性と事故例	極低温の危険性
	事故例（破裂）
	事故例（吸込・閉塞）
	事故例（凍傷）
	事故例（窒息）
	安全対策（破裂）
	安全対策（吸込・閉塞）
	安全対策（破裂と吸込・閉塞）
	安全対策（凍傷）
	安全対策（窒息）
	極低温の危険性（まとめ）
低温機器の取扱	低温容器等の取扱い
	低温容器（LN2 用開放容器）
	LN2 用開放容器の危険性（吸込・閉塞→破裂）
	低温容器（気密容器）
	低温容器（LN2 用自圧式容器）
	低温容器（LHe 用デュワー）
	バルブ操作に関する注意点
	LHe 用デュワー使用時の注意点
	高圧ボンベの取扱い
	低温機器の取り扱い（作業を始める前に）
	低温機器の取り扱い（作業を始める前に）

4　実装と試用

本システムは本センターweb サーバ上に設置され，職員による試用を行なっている．主として資料内容の校正および UI の修正，ユーザビリティに関する意見を募っている．

5　今後の展望

今後は職員による試用を通した改善を行い，平成 26 年度初頭からの運用を目的とする．運用当初は問題が発生することも考えられるため，移行期間として通常の講習なども併せて実施する．安定した運用と周知を終えた後は e-Learning に統一する．

また，寒剤を取り巻く情勢や法改正などに伴い資料やテスト内容のアップデートを適宜行っていく．加えて，履修者の DB 管理などについて要求に従い改善を施していく．

TREK 実験用超伝導トロイダル磁石システムの冷却系再構築

○大畠洋克 A)，岡村崇弘 A)，荒岡修 A)，槙田康博 A)，今里純 B)

A) 高エネルギー加速器研究機構　JPARC センター　低温セクション

B) 高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所

概要

現在, 高エネルギー加速器研究機構(KEK) を中心に TREK 実験と呼ばれる素粒子実験計画が進行中である. TREK 実験は，高強度中間子ビームを利用し，K ＋の電子とミューオンへの二体崩壊の精密測定により，レプトン普遍性の破れを探索することを目的としている．本プロジェクトでは 12 個の超伝導コイルから構成されたトロイダル超伝導磁石を用いるが，これは気液二相のヘリウムの強制循環により 4.5K に間接冷却される. この TREK 実験で使用する圧縮機, ヘリウム冷凍機ならびに超伝導トロイダル磁石は 1990 年代に KEK で実施された E246 実験で使用したものを再利用する予定である．これらは 10 年以上使用されておらず，再利用するにあたっては各機器の状況を十分に調査し問題点を改善する必要がある．これまで我々は 2012 年度から冷凍機等の冷却機器の調査を行ってきた．その中でいくつかの問題を明らかにした上で現在修復作業を行っている．本報では TREK 実験における超伝導トロイダル磁石並びにヘリウム冷凍機を含めた冷却システムの概要，調査の結果明らかになった冷却システムの問題点及び再構築のシナリオを述べるとともに今後のスケジュールについて報告する．

1　冷却システムの概要

図 1 は圧縮機・中圧タンク類まわりを除くヘリウム冷凍機ならびに超伝導トロイダル磁石部の概略フロー図を示す．また図 2 は本冷却システムの T-S 線図を示す．図 1 もしくは図 2 に示すとおり，圧縮機からの吐

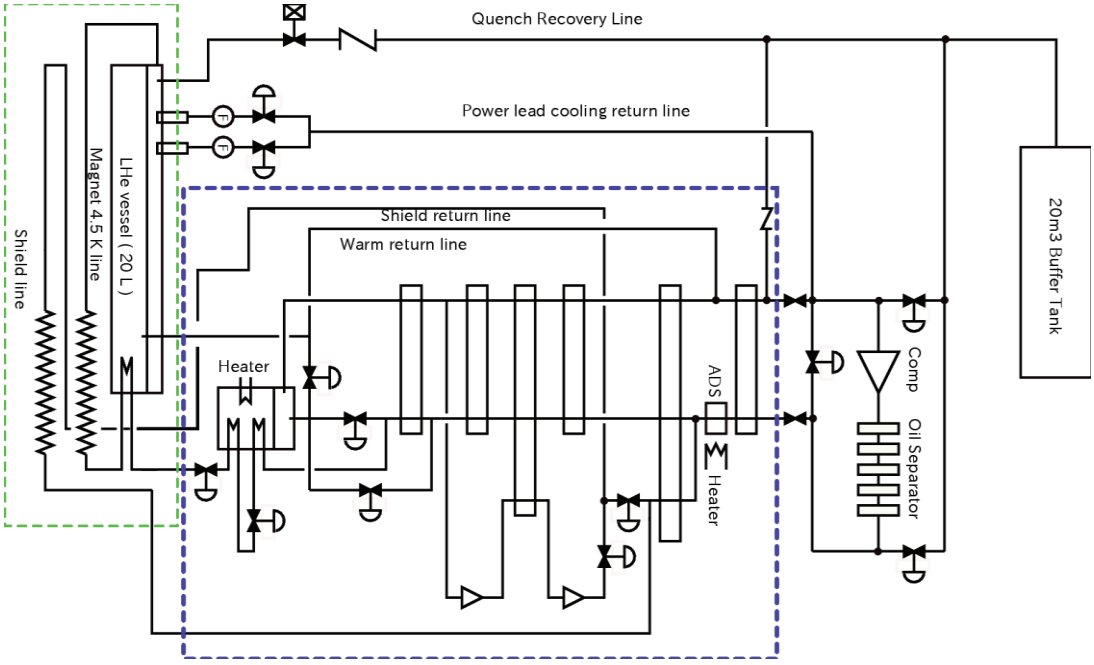


図 1. TREK 冷却システムの概略フロー図

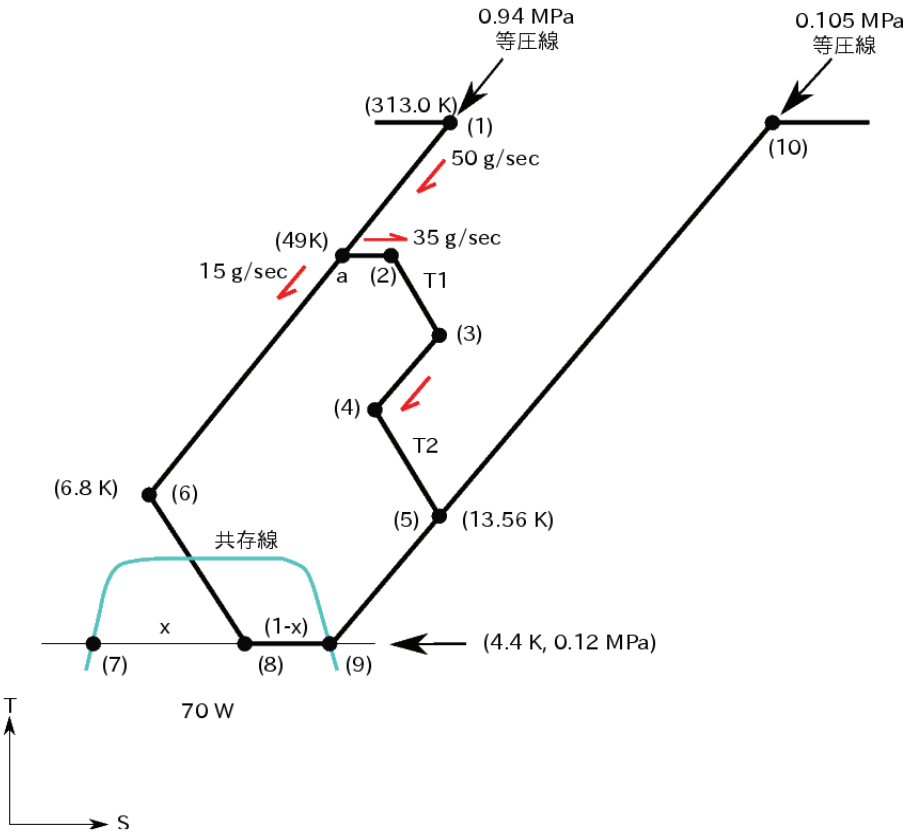


図 2. トロイダル実験で使用する冷凍機の T-S 線図

出流量は約 50 g/sec であり，そのうち 35 g/sec がマグネットシールド系に分流し，70 K のヘリウムガスで輻射シールドを冷却した後，第一・第二断熱膨張タービン T1, T2 により高圧ヘリウムガスは断熱的に膨張し，低圧ラインから圧縮機サクションへ戻る．また残り 15 g/sec は高圧のままの状態で最終熱交換器 E5 を通過して，約 8 g/sec が JT 膨張弁により等エンタルピー膨張しサブクーラー内へ液体ヘリウムとして貯蔵される．残り 7 g/sec はサブクーラー内に設けられた熱交換器を通過し，CV171 で 1.4 atm 近傍に減圧されることでクオリティゼロの液体ヘリウムが生成され超伝導トロイダル磁石冷却系に供給される．超伝導トロイダル磁石そのものは気液二相流ヘリウムの強制循環により間接冷却される．表 1 に超伝導トロイダル磁石における冷却システムの主要パラメータを示している．表 1 に記されているようにマグネットシステムの 4 K への熱負荷は 15 W であり，冷却チャネル長が 60 m であることから，本システムにおける単位長さ辺りの熱負荷は 0.25 W/m である．この熱負荷は過去実施された E246 実験で明らかにされた実測値である [1]．また強制循環流量が 7 g/sec であることを考えると冷却チャネル出口部分の二相流ヘリウムのクオリティ（乾き度）は約 0.12 となることが予測される．また TREK 実験で使用するヘリウムコンプレッサの主要パラメータを表 2 に示している．

2　冷却システムの問題点とその原因

TREK 実験で使用予定の冷凍機は 2005 年に廃止届けを出して以降 KEK つくばキャンパス北カウンターホールにて空調管理された室内に保管されていた．そのためこの冷凍機を再利用するにあたり問題点が無いか 2012 年度から調査を行ってきた．実施した主な調査内容は以下 3 項目である．

表 1. 冷却システム主要パラメータ

熱侵入量@4.5 K	15 W
熱侵入量@80K	250 W
電流リード冷却流量	0.3 g/sec
コールドマス@4.5 K	2.7 ton
コールドマス@80 K	0.65 ton
冷却方式	強制循環冷却（二相流）
冷媒の熱力学的状態	気液二相流 温度：4.5 K 流量：7 g/sec 入口クオリティ：0 出口平均クオリティ：0.12
超伝導トロイダル磁石冷却配管情報@4.5 K	ID=12 mm, Length=60 m 材質：無酸素銅
シールド冷却方式	熱力学的状態：T=60 K , P=0.7~0.9 MPa 流量：35 g/sec　（圧縮機吐出風量=50 g/sec）

表 2. ヘリウム圧縮機の主要仕様

メーカー / 型式	前川製作所 / HE250SG-M
コンプレッサタイプ	一段スクリューコンプレッサ
吐出圧力	0.9 MPa-G
軸動力	210 kW, 6600V
吐出風量	50 g/sec
容量制御方法	アンローダー方式
オイルセパレーター	1 次：デミスタ 2 次：コアレッサ 3 次：コアレッサ 4 次：活性炭 5 次：モレキュラーシーブス

１．気密試験

２．タービン目視調査

３．ファイバースコープを用いたヘリウム配管内の調査

冷凍機調査に関して時系列的に記すと次のとおりである．まず最初に冷凍機高圧配管低圧配管の気密試験を行った．その結果リークが見つかったため，冷凍機フロー図で示される自動弁を用いてセクションごとに領域を仕切った上で配管のどの部分がもれているかを調査した結果，タービン T1, T2 近傍にリークがあることが明らかになった．そこでタービンを目視したところ T2 に致命的な問題があることが明らかになった．図 3 は第一・第二断熱膨張タービン（T1, T2）を開放し目視したときの状況を示している．参考までに本冷凍機に搭載されている断熱膨張タービンの断面模型を同図左に示す. 図 3 に示すように第二膨張タービン T2 においてきわめて深刻な腐食が見受けられた．これはヘリウム系統側（断熱膨張側）並びに断熱膨張の際の工業仕事を取り出す側（ブレーキ側）の両方で腐食が生じており，特にブレーキ側のほうのインペラの腐食が著しい．これはタービンブレーキクーラーの冷却水ラインの水抜きを行わず冷凍機を長期にわたり保管していたため, 冷却水配管が腐食したことにより Helium ガスラインに冷却水が染み出したことに起因していることが調査の結果明らかになった. 第一膨張タービン T1 のブレーキクーラー用冷却水も水抜きをしていなかったが，こうした事象は起きていなかった．但し，T1 に関してもブレーキクーラーそのものの配管腐食による減肉が考えられるため，ブレーキクーラーに関しては T1, T2 共に交換した．タービンインペラに関しては T1 は LINDE 社にてオーバーホールならびにタービン回転試験を行って再利用することにしたが，T2 は修復不

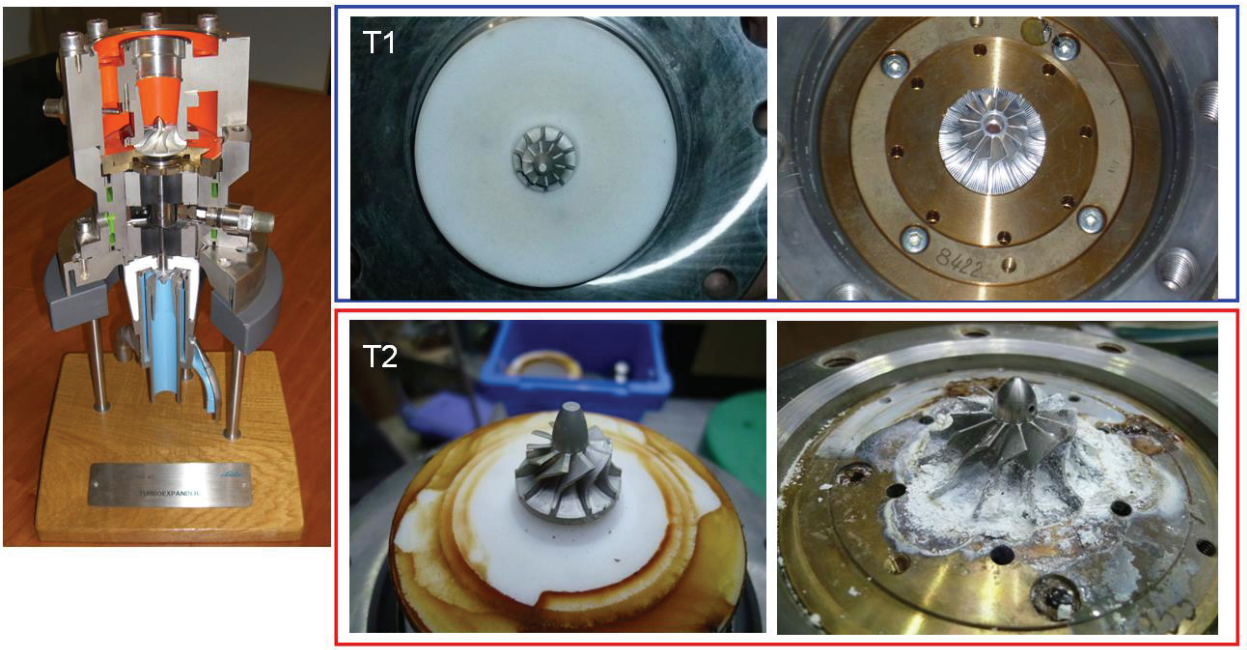


図 3.（左）断熱膨張タービンの断面　（右）第一・第二断熱膨張タービン（T1, T2）の状況（2012 年）

図 4. ファイバースコープによる断熱膨張タービン膨張側（ヘリウムライン系統側）の配管の様子

可能であったため新品と交換した．また図 3 の T2 の写真を見れば明らかなようにタービンの系統側（ヘリウム断熱膨張側）のテフロンパッキンも変色しているため，ヘリウムライン系統側の配管に冷却水が混入していることが懸念されたこともあり，T2 側の配管内部の様子をファイバースコープで目視する調査を行った．図 4 に目視した第二膨張タービンの膨張側の配管を示す．図示するように膨張タービン近傍の配管で若干の変色があるものの，全体的に腐食は確認されず，熱交換器部も目立った腐食が無いことを確認した．

3　冷却システム再構築

TREK 実験で再利用するヘリウム冷凍機の調査を上記のとおり行い問題点を明らかにした上で，冷却システムの再構築を以下のとおり行う．

（ヘリウム冷凍機関連）

- 断熱膨張タービン T1 のオーバーホール・回転試験，及び断熱膨張タービン T2 の交換
- 断熱膨張タービンブレーキクーラーの交換

- 制御システムの更新（制御システムの SATTCON から DeMPICS への移植，並びに制御盤新規製作）
- 自動弁ポジショナー交換
- 圧力発振器・温度センサなど計器類の校正・調査，必要に応じて交換作業
- 前川製作所圧縮機オーバーホール
- 中圧タンクオーバーホール
- 計装空気発生装置など冷却系に不可欠なインフラの調達

（超伝導トロイダル磁石関連）

- クライオスタットの電気試験・真空試験等調査
- マグネット制御盤の再構築

今年度は上記作業に加えて圧縮機建屋の建設をおこなっており，次年度以降冷凍機，圧縮機，トロイダルコイルの移設ならびに配管施工などを行い, 準備が出来次第生成運転, 冷却励磁試験を行っていく予定である．

4　まとめ

2012 年度以降, 高エネルギー加速器研究機構(KEK) JPARC センター低温セクションでは TREK 実験のための冷却システムの構築を行ってきている．本冷却システムは 1990 年代に使用していた冷凍機・超伝導トロイダル磁石を再利用する予定であり，これらが使用可能の調査を行い膨張タービンに腐食が生じていることが明らかになった．これはタービンブレーキクーラーの冷却水の水抜きを怠っていたことが主な原因であった．現在はこうした問題点を修復し TREK 実験のための冷却システムの構築を引き続き継続していく予定である．

参考文献

1. Imazato J., et. al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, MT17, p366-371.

有償頒布物受注管理システムの構築

○下村岳夫[A)]，大竹淳[A)]

[A)] 独立行政法人放射線医学総合研究所 情報基盤部 科学情報課

1　背景・概要

2012 年 2 月、放射線医学総合研究所（以下放医研）は不定期刊行物「原子放射線の影響に関する国連科学委員会（以下 UNSCEAR）報告書日本語版」の有償頒布を開始した。放医研は過去所外向けに物品を販売した経験は無く、これが初の試みであった。受注窓口を担当する我々科学情報課は、当時商取引のノウハウが全く無い状態から、手探りで申込受付や受注処理の為のシステムを急ぎ立上げる事となった。当初様々な問題点が浮き彫りとなったが、改良を重ねる事で一つ一つ解消し、現在は安定稼働している。本稿では、独法という営利追求を目的としない特殊な組織において商取引を行う、一見矛盾したミッションを遂行する為に構築した本システム及びその開発経緯について紹介する。

2　目的

放医研発行の不定期刊行物『放射線の影響- UNSCEAR2006 年報告書第 1 巻・第 2 巻、同 2008 年報告書第 1 巻』（全て放医研による日本語翻訳版）を有償頒布する為の、紹介＆申込み Web ページ、及び受注・入金確認・発送までの一連の作業を効率化するための管理システムを 2 週間で構築し、運用を開始する。

3　方法

1）業務分析によるシステム化すべき部分及び問題点の洗い出し

・基本的な構成や流れは、世の中に数多くある通販サイトを参考に

・なるべく入力が楽で分かり易い（見通しの良い）サイトにしたい

・科学情報課（受注管理担当）、経理課出納係（入金確認担当）、規制科学研究プロジェクト（書籍発送担当）の 3 部門をスムーズに連携させる

・見積書や請求書など会計書類の発行、申込者に対する各作業フェーズ毎のメール送信、後払い希望など特別な要望への対応が必要だが、受注処理に従事できる人数はせいぜい 1.5 名程度（＝定常処理の自動化による省力化が必須）

・『営利追求しない組織』ならではの諸事情を考慮する必要あり
（儲けても損しても批判の対象となる、製作にかかった費用以外の対価は仮に一時的であっても受け取ってはならない、etc...）

・国連との契約も考慮する必要あり、サイバー攻撃に対する防御も重要

・開発期間がほとんど考慮されずに頒布開始日が決まる（与えられた期間は僅か 2 週間）

2）開発ツール選定と設計と同時進行の実装

短い開発期間と様々な事情を考慮して、極力シンプルかつ柔軟対応可能に

・紹介＆申込み Web ページ：オーソドックスに HTML+PHP+CSS+JavaScript で作成
郵便番号入力による住所自動検索機能、受注メール＆Excel 貼付け用メール自動送信機能等を組込み

・受注データ管理：データベースを使用せず、メールの受信履歴と Excel シートで行う

・会計書類の生成＆印刷、メール生成、集計グラフ自動作成：Excel 関数/マクロを利用

3）運用開始後に発覚した問題点と対処

・注意書きは目立つ物以外読んでもらえない

→代引き/クレジット対応不可・送料着払いのみといった条件を知らずに申込みクレームとなった

：頒布条件は、とにかく目立たせる工夫が必要

・後払い適用ルールが曖昧だった為、場合によって対応がまちまち

→原則は前払い（入金確認後に書籍発送）だが、公的機関向けには後払いも例外的に認めていた

「公的機関とは何か」を定義しても、判断が難しいケースもある：条件緩和で対応

・基本的な書籍販売の常識が把握できていなかった

→書店への卸し販売の申入れが多数寄せられたが、当初適切な対応が取れていなかった

：一貫して「直販のみ対応」の方針を担当者間で共有

・会計書類等の記載内容に存在していた小さな間違いや一貫性の無さが表面化

→見積書・注文請書・請求書・領収書・納品書及び受領書・送付状のテンプレート見直しを実施

・受注処理を複数人で回していたが、連携が上手く取れなかった事が原因でミスが多発

→作業フェーズが長期に渡る事、特殊な要望に注意する事もよくある為、誰がいつどこまで何を作業したのか、を共有管理シートへしっかり書込む事を徹底

・申込者が誤って多く入金してしまった場合等に対処できなかった

→関連部門と相談の上、返金などイレギュラーな手続きの流れを新たに作成

・年度越えの処理は避けなければならない

→売掛金が発生しないよう、3/末の注文に対しては意図的に処理を遅らせる工夫で対処

4　結果

初期トラブルに対処するため改修を重ね、約 2 ヶ月程で安定稼働に至った。運用開始から 1 年を経た後、UNSCEAR 報告書 2008 年版第 2 巻、同 2010 年版が新たに追加された。これに伴うシステムのリニューアルと共に、管理シートや会計書類テンプレートの見直しも実施した。切替時に申込みが集中する事、新たなトラブルが発生し易い事は分かっていたので、事前に入念なチェックを実施して臨んだ結果、非常にスムーズな移行ができた。現時点での有効受注件数は約 370 件、頒布冊数は約 900 冊に達している。省力化も進み、現在では受注処理を 1 人で（かつ片手間に）回す事も可能となっている。

原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）報告書-日本語版- 有償頒布のご案内

https://www.nirs.go.jp/unscear/index.html

5　考察

書籍に限らず商取引の経験が一切無く、かつ開発期間 2 週間という状況で、不特定多数の一般消費者向けに有償頒布を開始するというのは、（当時の我々に他の選択肢は無かったが）今考えればかなり無謀な行為であった。しかし経験を重ねるに連れ、販売行為の中に発生する多種多様の問題に素早く対処するコツが少しずつ理解できてきた様に思われる。また広く一般の方に利用されるサイトの構築を通して、きめ細かなインターフェース設計の重要性や、先回りしてトラブルを防止する俯瞰的な視点によるチェックの重要性など、改めて気付かされた点は多い。販売行為を扱う機会は今後もさほど多くは無いと思われるが、この仕組み作りを通して自身の仕事の幅を広げられた事は確かであり、今後の開発業務に大きく役立つ物と確信する。

計算科学研究センターにおける夏季の電力ピークカット対策

○松尾　純一，水谷　文保，岩橋 建輔

分子科学研究所 技術課

概要

大型計算機は 5 年ごとに演算性能が 10 倍に増加し続けている。しかし最近では CPU の技術革新(コア数や SIMD 命令レジスタ長の増加)だけではそれに足りず、CPU 数を増やすことでそれが担保されており、消費電力の増加が無視できない。電気料金の抑制には、消費電力量削減以外に、夏季のピークを抑えることによっても年間を通じて効果が期待できる。夏季における日中のピークを、稼働台数調整以外に、サーモカメラ、エアカーテン、空調室外機への散水等を駆使し 20%程度抑える事を行った。

1.　はじめに

所属している計算科学研究センターでは、これまでにも省電力に対する試みを行ってきた[1,2]。

今回、ピークカットに着目した理由は、全体の消費電力量を下げることを考えると莫大な費用をかけて機構の構成変更が必要になるだろうが、日中のピーク電力だけ抑えることなら現状の設備のまま多少の手間をかけることで実現可能であろうという考えからである。

対策として、夏季の日中のみ実行した短期的なもの、夏季の期間のみ行った中期的なもの、現在も有効な長期的なものを行った、その一つ一つについて結果を報告する。

2.　機器構成

計算科学研究センターの機器構成と消費電力は表 1、またその割合は図 1 のようになっている。

表 1　計算科学研究センターの主な機器の消費電力

名称	メーカー名	型式	台数	消費電力[kW]
クラスター型計算器	Fujitsu	PRIMERGY RX300 S7	342	642
クラスター型計算器	Fujitsu	PRIMERGY CX250 S1	368	692
共有メモリ型計算機	Fujitsu	PRIMEHPC FX10	1	33
共有メモリ型計算機	SGI	UV20	1	46
IBスイッチ	GRID	Director 4036	53	6
IBスイッチ	Mellanox	SX6036	43	5
ネットワークスイッチ	Fujitsu	SR-S348TC1	27	3
ネットワークスイッチ	Fujitsu	SR-S324TC1	26	2
ネットワークスイッチ	Fujitsu	SR-X340TR1	20	2
ネットワークスイッチ	DELL	Force10 S4810	2	1
ネットワークスイッチ	DELL	Force10 Z9000	11	9
UPS	富士電機	UPS8000D-3/200	1	5
UPS	富士電機	UPS7100MX-T3/50	1	2
UPS	APC	Smart-UPS RT 5000	20	6
空調機	三菱電機	PFD-P450CM-E-6	3	45
空調機	三菱電機	PFE-P560CM-E-6	2	37
空調機	日立電気	RP-P560ACM1	9	261
		内蔵電熱加湿器	9	54
ディスク装置	Fujitsu	1.8PB FEFSディスク	1	24
ディスク装置	Panasas	ActiveStor11	1	10

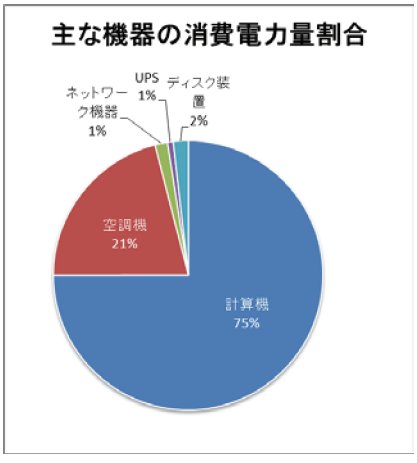


図 1　主な機器の消費電力割合

3. ピークカット対策

3.1. 空調機の稼働台数調整

日中のみ空調機の稼働台数を必要最低限、もしくはそれより少し足りない程度に抑える事で通常であれば14 時頃に現れる空調機の消費電力のピークを抑えようという短期的な対策。

計算機は 24 時間連続稼働させるため、空調機も 24 時間の稼働が求められる。そのため空調機が故障等で1、2 台停止しても計算機の稼働に支障が発生しないように余裕を持たせた数台の空調機を稼働させておくのが常套手段であるが、その余裕部分を削って人が常時監視することで担保した。

図 2 は空調機の稼働調整（10 台中 3 台を 8:30～18:15 の間停止）の有り無しにおける計算科学研究センター全体の消費電力量を示したグラフであるが、1 割程度日中の消費電力を抑えられることが確認出来た。また、稼働台数調整中に上昇した室温は夜間に稼働台数を戻すことで回復した（図 3）。

室外機に熱が貯まりすぎて冷却効率が急激に悪くなる状態が発生したが、その場合は 3.5 の対策を行った。

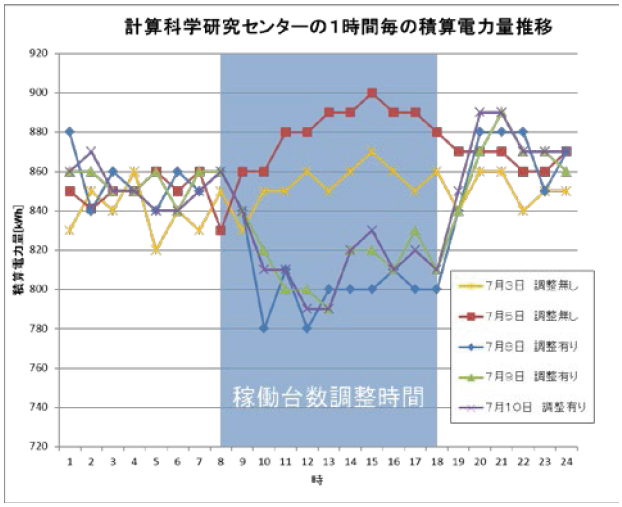


図 2　1 時間毎の積算電力量

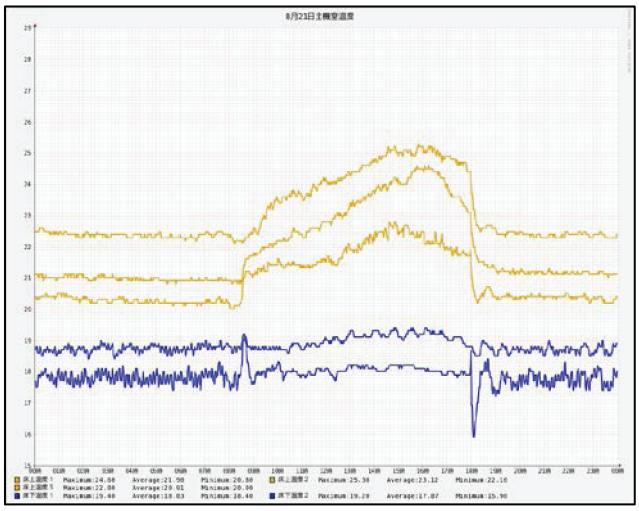


図 3　稼働台数調整時の室温

3.2. 計算機の稼働台数調整

夏季の期間のみ計算機の稼働台数を減らすという中期的な対策。

図 4 は計算機の稼働台数を 20%削減した前後の 1 日毎の積算電力量の推移である。結果 20%の計算機を停止させたにも関わらず、消費電力は 5%程度しか下げられなかった。

これは、年度初めであるということや、一部のシステムが共用開始直後であったことなどから計算機利用が通常よりも少なく、CPU 利用率として 80%弱であったため、実際に利用されている CPU 数としては縮退後もそれほど変わらなかったことが原因と考えられる。

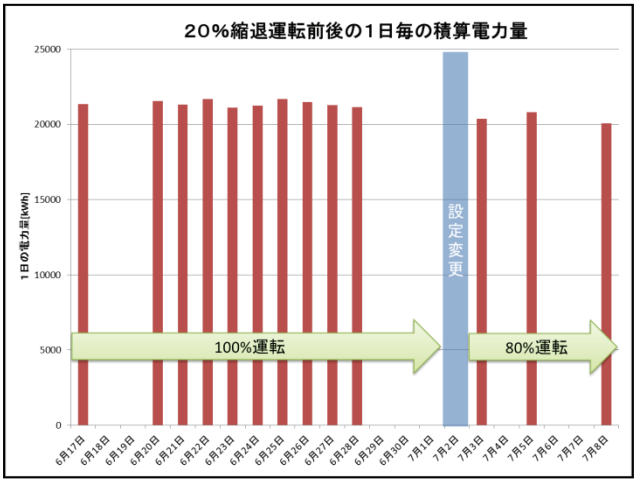


図 4　計算機を 20%停止させた時の積算電力量の変化

3.3. エアカーテン設置による冷却効率の改善

計算機の吸気側の空間をコールドアイル、排気側の空間をホットアイルとしてエアカーテンにて隔離することで、空調機と計算機の空気の循環路を正しく確保して冷却効率を上げようという長期的な対策。

エアカーテン設置前はサーモカメラの画像（図 5）より中央の 2 台の空調機に熱気が集中しており、左の 1 台はほとんど動作していない事が判明した。また、エアカーテン設置後は設置前に青かった左右の空調機が赤く写り均等に熱が回っている事が確認できた。（図 6）

エアカーテンは 2 つある主機室のどちらにも設置されたが、その 1 つにおいてはエアカーテン設置後、1 割程度空調機の消費電力量が減ったことが確認できた。（図 7）

図 8 は図 7 の場所のエアカーテン設置前後の室温のグラフで、床上は橙色、床下は青色で示されている。エアカーテン設置前は場所によって温度の差が大きく、同じ場所に置いても温度変化が大きかったが、エアカーテンが設置され温度差が少なくなり、同一場所における温度変化も少なくなったことが見て取れる。エアカーテンの設置平面図と設置後の写真を図 9、図 10 に示す。

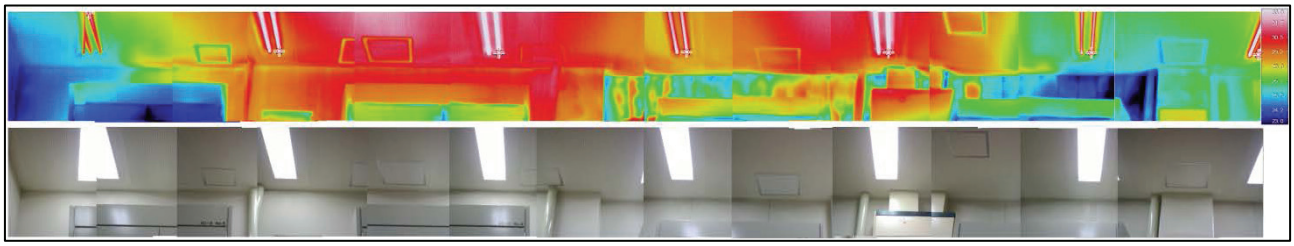


図 5　エアカーテン設置前の空調機の上部天井温度写真　サーモカメラ写真（上）　実写真（下）

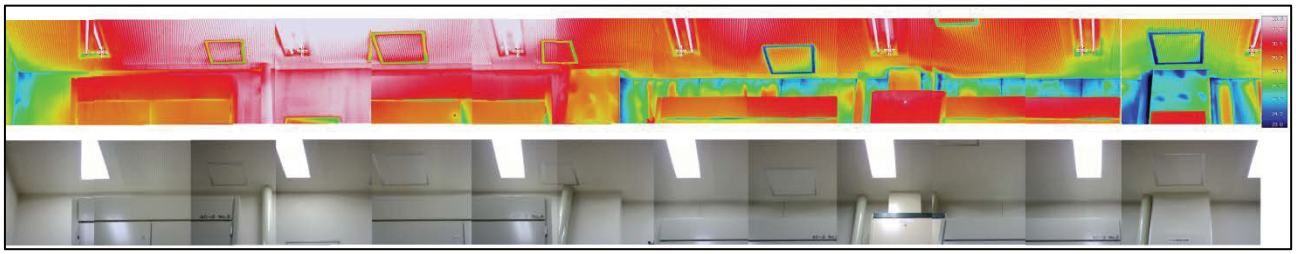


図 6　エアカーテン設置後の空調機の上部天井温度写真　サーモカメラ写真（上）　実写真（下）

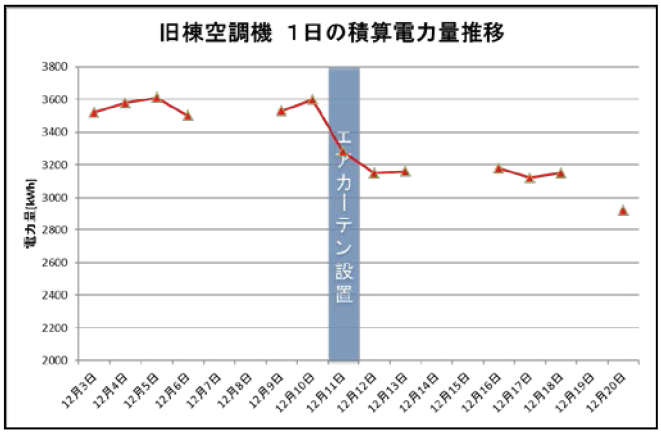


図 7　エアカーテン設置前後の空調機 1 日毎の積算電力量

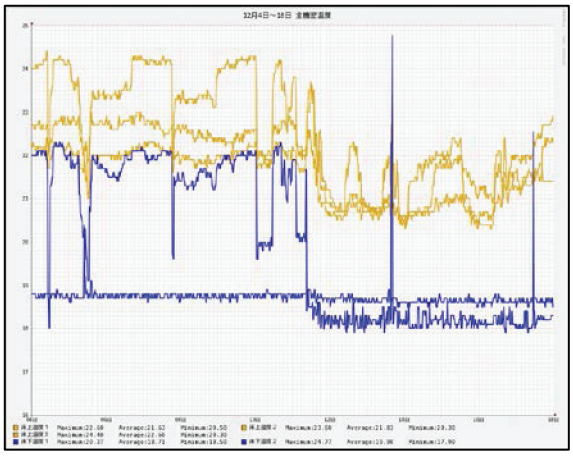


図 8　エアカーテン設置前後の室温

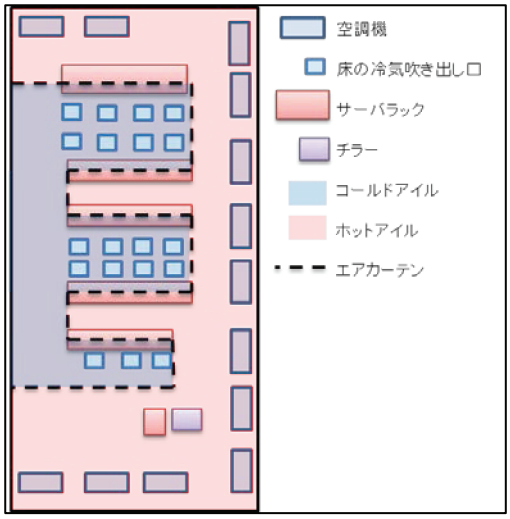


図 9　エアカーテン設置平面イメージ図

図 10　エアカーテン設置後の写真

3.4.　室外機に水散布

室外機に熱が貯まりすぎると空調機室外機の液化が十分に出来なくなるためか、一時的に冷却効率が悪くなる現象が発生することがある。空調機の台数に余裕がある場合であれば問題無いのだが、余裕のない状態に置いては、それが連鎖的に発生し空調環境が爆発するように破綻する。(図 12) このような事が発生した際には室外機に水を散布し、貯まった熱を発散させる一時的な対策を行った。

図 11 は平常時のグラフである。橙色の線が床上の温度、青色が床下の温度を示している。床下から吹き上げる冷気で計算機を冷やす構成を取っているので、青色の床下温度が保たれていれば正常と見なして良い。図 12 の場合においては 14:30 頃より床下温度の上昇が見られるが、15:30～16:00 の間散水することで収束した。

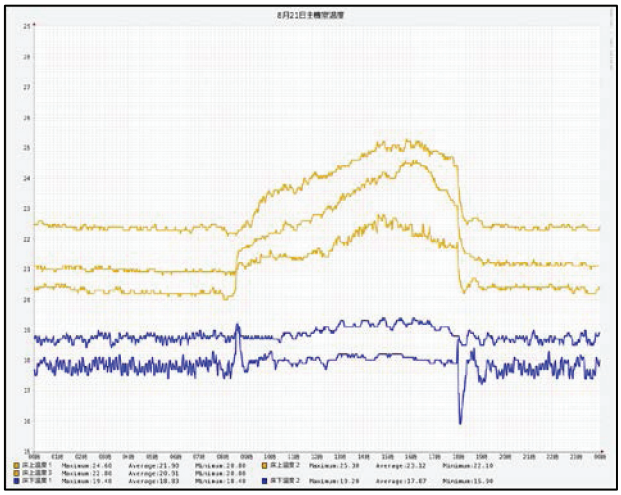


図 11　通常の日の室温推移図

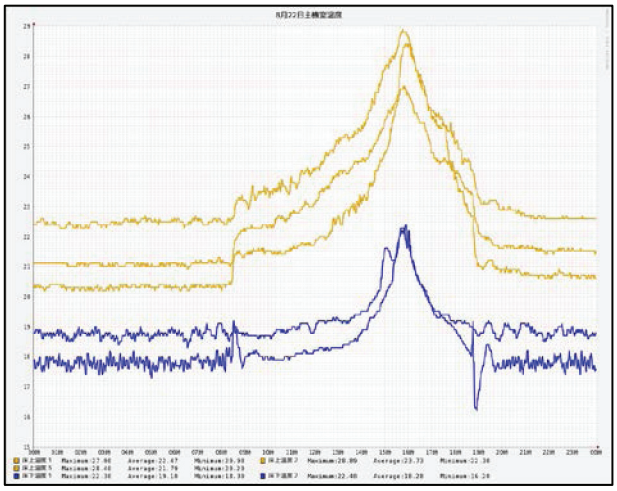


図 12　空調環境が破綻した日の室温推移図

今年度中に 3 回同様の症状が発生したが、これと同様に室外機への散水のみで回復させることができている。

常時散水すれば良いという考えもあるが、水道水をそのまま常時散水すると室外機のフィンへのカルキ付着やフィンの腐食が考えられるということ、このような用途に用いる浄水装置は高額であることなどから見送っている。

3.5. 外気導入による冷房

今回の夏季のピークカットとは関係ないが、冬期の外気導入による冷房効果を試してみた。外気導入はガス消火設備の換気扇(5400m^3/h)を動作させることで行った。

図 13 の青く塗られているところが外気を導入していた時間帯である。赤線がホットアイル温度、橙色がコールドアイル温度、緑がホットアイル湿度、青色が床下温度を表している。

外気導入を行っていた時間帯はホットアイル側もコールドアイル側も温度が 2～3℃低くなっているので効果があると言える。だがこの時、加湿等を行わずに行っていたため、湿度が大きく下がり最低で 10%に到達したため、中断した。

後に、この時の外気湿度（図 14）も下がっていたことがわかった。空気は水蒸気量が変わらない場合において温度が上昇すれば湿度は低下する。このときの外気温が 8℃、ホットアイルの温度が 37℃であったので湿度は 1/4 となる計算だ。この時の外気湿度は 40%程度であるので、ホットアイルでは湿度 10%で合致する。

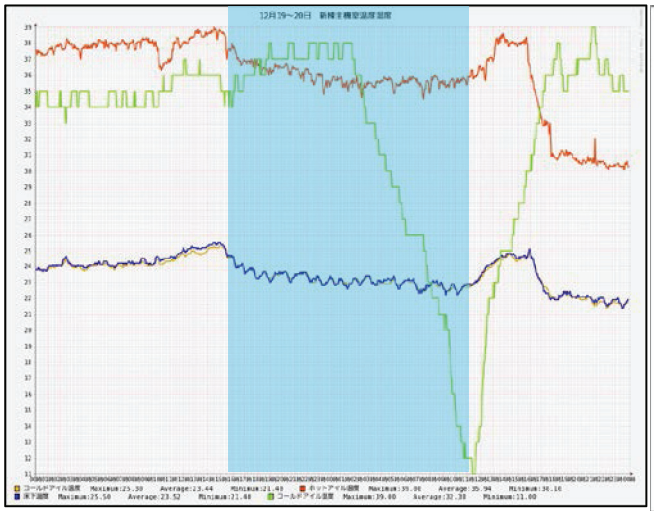


図 13　外気導入時の室温と湿度

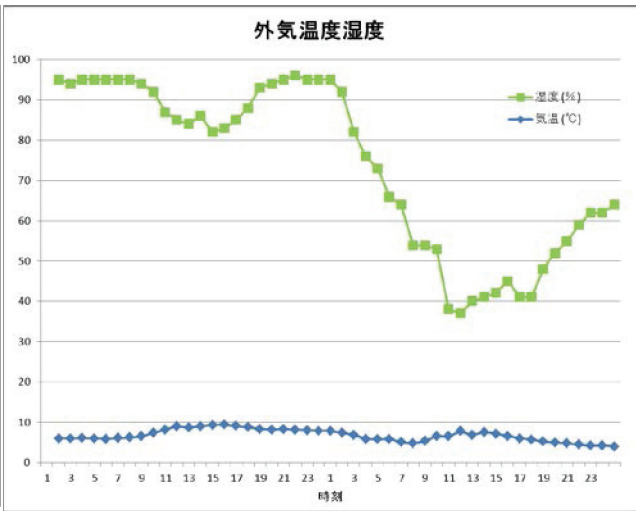


図 14　外気導入時の外気温度と湿度

3.6. 環境の可視化

また、異常事態の検知や対策の効果の程が分かるように環境データが観測出来ていることが必要なため、下記のような機器設置しリアルタイムな情報を見られるようにする長期対策も行っている。3.4 でも述べたが、空調環境が破綻してしまった図 12 のような状況はこの観測データを見て異常に気づき散水を行っている。

3.6.1. 電力量データ測定

フタバ企画　IEEE1888 エネルギー診断メータ（図 15）

3.6.2. 温度、湿度データ測定

T&D　おんどとり TR-71W（図 16）

3.6.3. データ収集サーバ

cacti と RRDtool を使ってサーバを構成し WEB よりグラフが見られるようにしている。（図 17）

図 15　IEEE1888 エネルギー診断メータ

図 16　おんどとり

図 17　cacti グラフ一覧

4.　結果

3.1 の空調機の稼働台数調整は一時的に凄く効果が高かった。しかし、4 時間を過ぎ部屋の温度が上昇してくると効果が薄くなるようだ。今回は 8:30～18:15 の間で縮退運転を行ったが、日中のピークを抑えたい場合には気温が最大となる 2 時を中心に 11 頃から行った方が良さそうだ。

3.2 の計算機の稼働台数調整は計算していないノードを止めた場合に置いては効果が薄いことがわかった。それは即ち、稼働台数を調整するという大がかりな構成変更を行わなくても JOB の投入数を制御することで消費電力量を操作出来ると言えるかもしれない。

3.3 のエアカーテンは効果が有った。ただ、当初はあまりにも厳密に区画を区切ったため、ホットアイル側の温度が上がりすぎてしまった（40℃以上）。空調機は吸い込み温度が高すぎたりると効率が下がったり、ホットアイルとコールドアイルの温度差が 20℃を超えると空調機の吹き出し温度が設定温度まで下がらなかったりする。この兆候も見られたので対策として、ホットアイル側にも多少の冷気を入れるようにした。

3.4 の外気導入は冬期に有効だが、湿度の管理が必要な事が分かった。加湿するに当たっては電熱の加湿器ではまた熱を生み出してしまうので、電力消費量が少なく、また気化熱による冷却効果も期待できる気化式の加湿器の導入を検討している。

5.　まとめ

今回は計算機を 7-8 月度において計算機を 20%縮退させると共に上記の対策を行い消費電力のピークカットを行った。計算科学研究センターにおける日中のピーク電力（図 18）より日中の最大消費電力は 6 月が 900[kWh]程度だったのが 7-8 月度には 800[kWh]程度と 11%程度抑えられている。また、図 21 より例年であると 7-8 月度は 6～7%ほど消費電力が上がる事が分かっているのでピーク値も同程度上がっていたはずと考えられる。また、図 19 の通り計算量は 6 月よりも数%多くなっているので、合計すると 20%程度のピークカットが実現できたと言える。

また、図 21 より積算電力自体は前年より 2 割程度増えているので、ピークカットができていると言えよう。また、長期的な対策も進んだ事から 8 月の時点で 7 月よりも消費電力が下がり、縮退運転等をやめた 9 月以降においても最大消費電力量が抑えられると共に積算電力量も減らすことができている。

地区全体としてのピーク消費電力見た場合(図 20)、前年に比べ 4-6 月度は大幅に増加していたが 7-9 月度は同等であり、今回のピークカット対応の効果があったと考えている。

今回はほとんど予算無しでのピークカットに取り組んだが、今後は室外機への散水、気化式の加湿器の設置等、少々の設備追加でピークカットや省電力化が見込めそうなことが多数判明したのでそれらの導入も進めていきたいと思う。

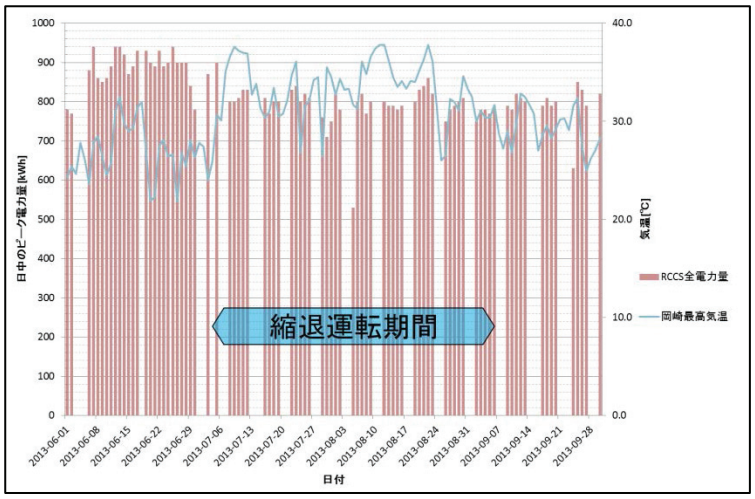


図 18　日中の最大消費電力量

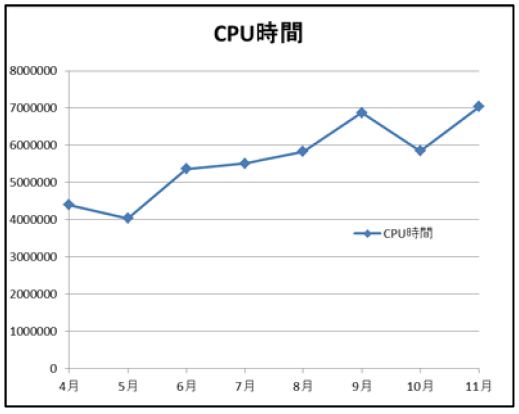


図 19　月別計算量

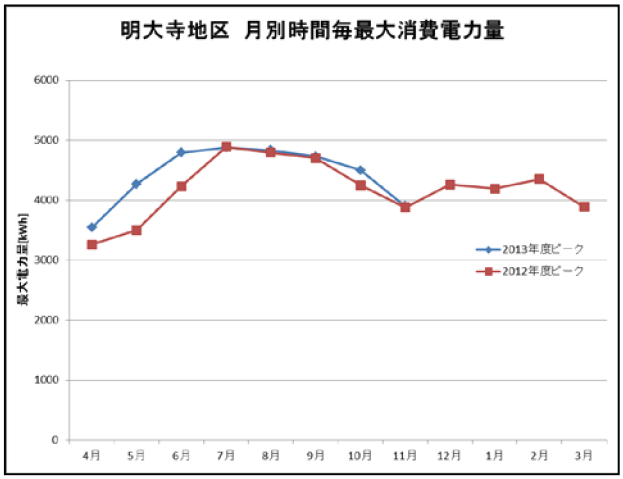


図 20　最大消費電力量（ピーク）の月別推移

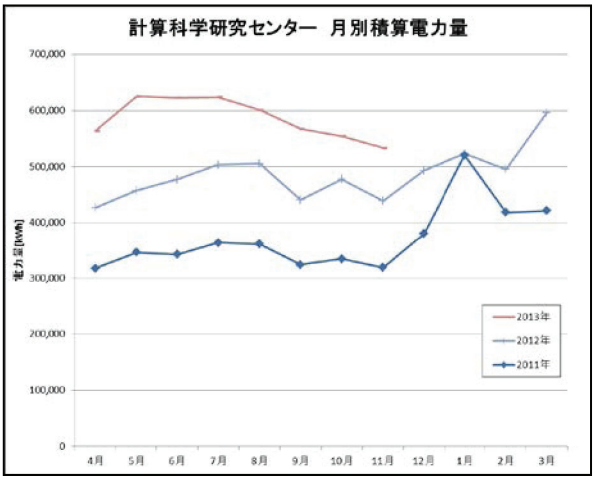


図 21　積算電力量の月別推移

参考文献

[1]　伊奈論, “電算機センターの省電力化について”, 昭和 59 年度名古屋大学プラズマ研究所技術研究会報告集, December 15-16, 1984

[2]　水谷文保, “大規模計算機システムにおける省エネルギー運用の検討”, 平成 19 年度核融合科学研究所技術研究会報告集, March 10-11, 2008

CMS を用いた Web サイトの検討と構築

水谷孝男

電気通信大学 教育研究技師部

概要

CMS(Contents Management System)を用いることにより、動的な Web サイトの構築が可能となる。また、CMS の仕組みを使うことにより、簡易なグループウェアとして利用が可能である。本報告では、幾つかの CMS Web アプリケーションを比較し、その中でもグループウェア機能を持つ NetCommons を用いた Web サイトとグループウェアとしての利用について検討し、実践的コミュニケーション教育推進室での運用について報告する。

1　CMS とは

Web コンテンツの仕組みは、萌芽期の静的な Web ページの作成から、動的な Web ページの生成方法に移行しつつある。静的 Web ページは、HTML 作成ツール等を用いて 1 ページずつ手作業で作成されるが、動的 Web ページは、主にサーバサイドでのプログラミングによって自動生成される。そのため、多技にわたる閲覧者のリクエストに柔軟対応でき、より利用者の期待に応える Web サイトを構築することが可能である。また、コンテンツの管理にデータベースを用いることにより、SNS,ブログなど、時間とともに投稿される大量の記事やファイルを、時系列や内容別に掲示するなどの機能をもたせることが可能である。

2　CMS を用いた Web 開発環境

このような環境を提供するサーバサイドのプログラミング言語としては、Perl, Java, PHP, Ruby などがある。Perl はデータの整形など詳細な作業をするのに適した言語で、CGI 環境ではよく使われる。Java は中間コードにコンパイルする必要があるなど、移植性、再利用、可視化の点でテキストベースに劣ると考えられるが、半面プログラムの遮蔽が求められる用途では有利とも考えられる。PHP はテキストベースなので、そのままでの再利用ができ、メンテナンスや修正が簡易などの理由で多用されている。

さらにデータベースを含め、パッケージ化したサーバサイド開発環境(XAMPP 等)がオープンソフトとして用意されており、開発環境の構築が簡易に行えるようになってきた。

3　CMS を用いた Web アプリケーションの比較検討

このような開発環境のもとで動作する、オープンソフトの Web アプリケーションで知られるものとして WordPress, Drupal, NetCommons などがある。今回、これらについて比較検討した。

WordPress は、既に解説書などが沢山発行されおり、また表示のテンプレートも 2 段組、3 段組などのものが多数用意されている。それ以外にも様々な形式のテンプレートがネット上から入手可能である。ページ構成としては、静的ページや動的ページが混在したサイトを作ることが可能である。しかし、メーリングリスト機能やグループウェアウェア機能は標準ではない。

Drupal は、CMS のアワードを取得するなど、豊富な機能やモジュールが利用できる。NASA、WhiteHouse、FireFox など著名なサイトが採用しており、信頼性のある Web アプリケーションである。しかし、メーリングリスト機能やグループウェアウェア機能は標準ではない。

NetCommons は、国立情報学研究所 新井紀子教授が中心となって開発が進められたもので、国内の教育機関、公共団体を中心に導入されており、毎年ユーザカンファレンスが開催されている。機能としては、他の CMS とは異なり、グループウェアや LMS の機能を持っている。単にコンテンツの管理だけでなく、ユーザアカウントによって管理されたグループスペースを共有することが可能であり、パブリックスペース、プライベートスペースとしても利用可能である。また、グループでのファイルの共有やメーリングリスト機能も有している。このような機能を持っていることから、国内で 2,000 以上の団体が利用している。

一方、サーバ環境として PHP の動作モードが safe_mode での運用の場合はエラーが出るなど、稼働するサーバ環境として制約がある。共有サーバ環境として運用している多くのレンタルサーバ会社では、サーバの有効利用の観点からマルチ Web サイトでの運用をすることが多いが、そのような運用の場合、セキュリティ保持の観点から PHP の動作モードを safe_mode で運用することが多く、NetCommons の稼働可能なサーバ環境には制限がある。そのため NetCommons を運用する場合は、専用サーバでの運用が望ましいと思われる。

4　運用 Web サイトに求められるもの

運用を検討している部署は、全学的な語学学習の推進役を担っている実践的コミュニケーション教育推進室である。この推進室で求められる Web サイトの機能としては、

・利用者同士の情報共有
・教材の共有化
・運用スケジュール
・イベントの掲示
・運用実績の紹介、蓄積

などが考えられる。

この観点から、Web サイト構築にあたって適切なアプリケーションを検討する必要があるが、利用者相互の情報交換・共有、外部との情報共有、教材の共有化等を実現するためには、利用者管理機能を持つグループウェア機能は必須である。このようなことを考えた場合、今回調査した Web アプリケーションとしては NetCommons が最適と思われ、現在 Web アプリケーションの開発を行っている。

参考文献

Wordpress について：http://wpthemejp.com

高橋のり著, 基礎からの WordPress, ソフトバンククリエイティブ株式会社.

Drupal について：http://drupal.jp

NetCommons について：http://www.netcommons.org

新井紀子編著, NetCommons で本格ウェブサイト, 近代科学社.

新井紀子他著, NetCommons 実践でわかるサイト構築, 近代科学社.

新井紀子監修, NetCommons 実践デザインカスタマイズ, 近代科学社.

技術研究会報告集データベース構築完成後の取り組み

○長屋　貴量，澤　昌孝，水谷　文保

自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課

概要

2002 年度より収集を開始した技術研究会報告集データベースは、今年度で 11 年目を迎え、8 つの研究会の 129 回分、8069 件の論文を集録するに至った。技術情報ネットワーク(SNS)の参加者は現在 433 人に至っている。運用面では、サーバーを仮想化し、バックアップ体制を強化した。

1　技術研究会報告集データベースの目的と歴史

技術研究会報告集データベースは、技術研究会と同様に、技術者同士の交流をより強固なものへ推進する事を寄与することを目的としている。具体的には、データベースに集録した内容を、検索機能を用いることで活用し、コミュニティを通じて交流が発展することを期待している。

この目的を遂行すべく、2001 年度 核融合科学研技術研究会より検討を開始し[1]、その後技術研究会の報告書の収録活動に着手している[2]が、前回の報告[3]で、当初集録予定だった全技術研究会の報告書の集録を開始した。また、参加者を技術職員に絞った、技術情報 SNS も 2006 年度に構築し[4]、コミュニティの交流に寄与するのと同時に、技術研究会の報告書の閲覧はこの技術情報 SNS の参加者のみ自由に行え、未参加者はタイトル等を検索できるようにしている[5]。歴史としては 11 年目に突入している。

2　報告書の集録数

技術研究会報告集データベースに集録する研究会としては、2012 年度では変化はなかったが、2013 年度においては、新たに「大学情報センター担当者等技術研究会」の収録を許諾していただいたため、集録対象の研究会が増え、現在まで研究会の数としては 8 つ、研究会の回数としては 129 回に増加した。

集録論文数について、2012 年度末では、既に集録を開始していた研究会の当年度の報告集を収めた為、前年度から 530 件増加し、7964 件に達した。

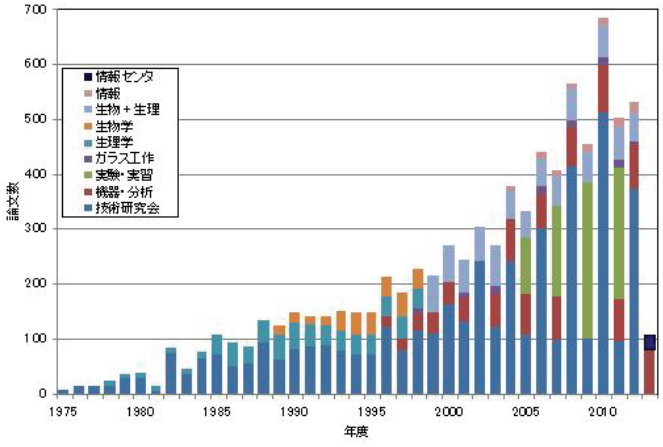


図 1. 集録論文の年度別種別

2013 年度においては、「大学情報センター担当者等技術研究会」の報告書の収録を開始したため、現在 8069 通の報告書を集録するに至っている。なお、今年度開催される研究会の報告書の収録がこれから行われることを考慮すると、報告書数はさらに増加するものと期待される。

3　目次情報の所属機関名の表記改修

前回報告時では、集録した報告書の目次に記載されている所属機関名に略称表記が存在したり、表記が統一されていないという問題が露見していたが、2010 年 9 月頃、全て正式表記に改修した。また、報告書に記載されている共著者を全て取り出し、検索できるようにした。なお、所属機関名に関しては表記を統一したが、人名に関しては、まだ漢字を統一することは行えていないため、対応を検討しているところである。

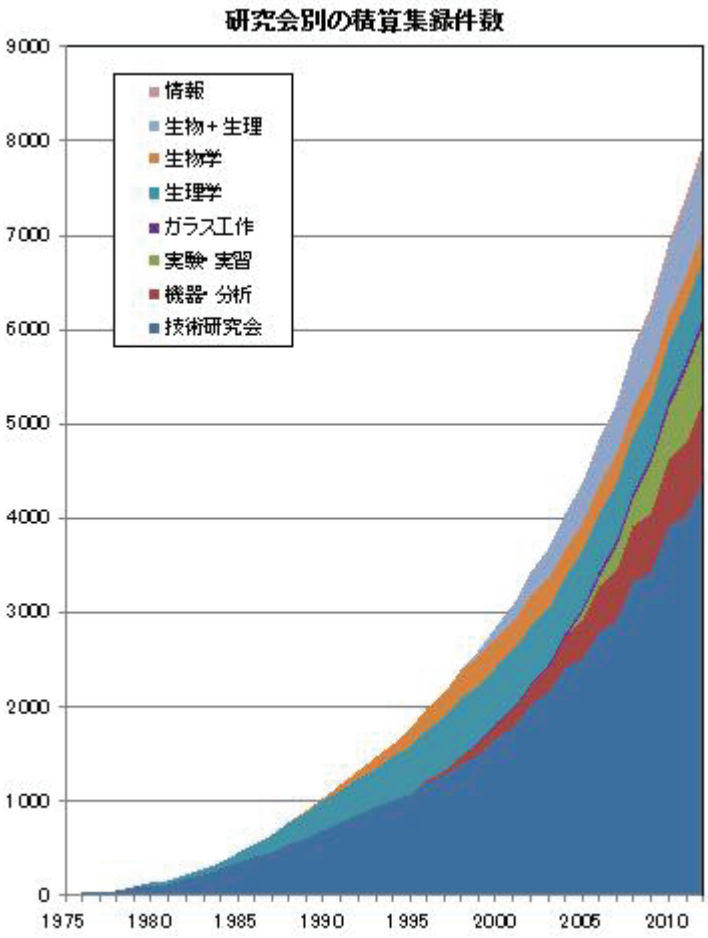


図 2.　研究会別集録報告書数

4　技術情報ネットワーク(SNS)の参加者数

技術情報ネットワーク(SNS)の参加者も増加しており、前回報告時には 214 名[4]だったものが、2010 年度末で 302 名、2011 年度末では 341 名まで増加した。

2013 年度では、ネットワーク技術に精通し、SNS の参加に慣れていると思われる、大学情報センター担当者技術研究会も加わったため、参加者数は 9 月中だけで 38 名の方に新たに参加していただけるという出来事もあり、現在(2014 年 1 月)までに 433 名までに増加した。これは近年稀にみる大幅な増加である。

なお、SNS の参加者を都道府県別に分類した所(図 5.)、近隣の県なのに参加者が一人もいないという県もあることが判明した。本 SNS の広報活動のさらなる充実を検討する必要がある。

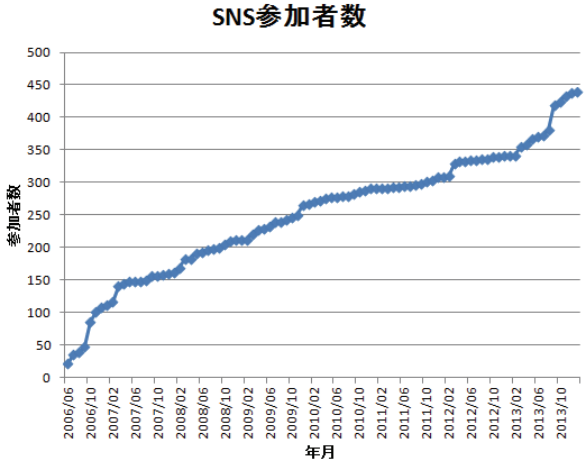


図 3.　SNS 参加者総計

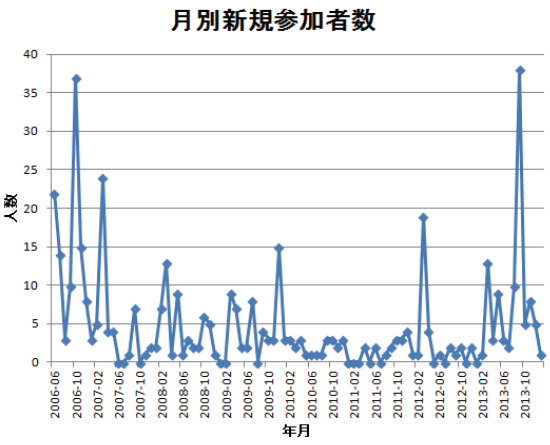


図 4.　SNS 月別参加者数

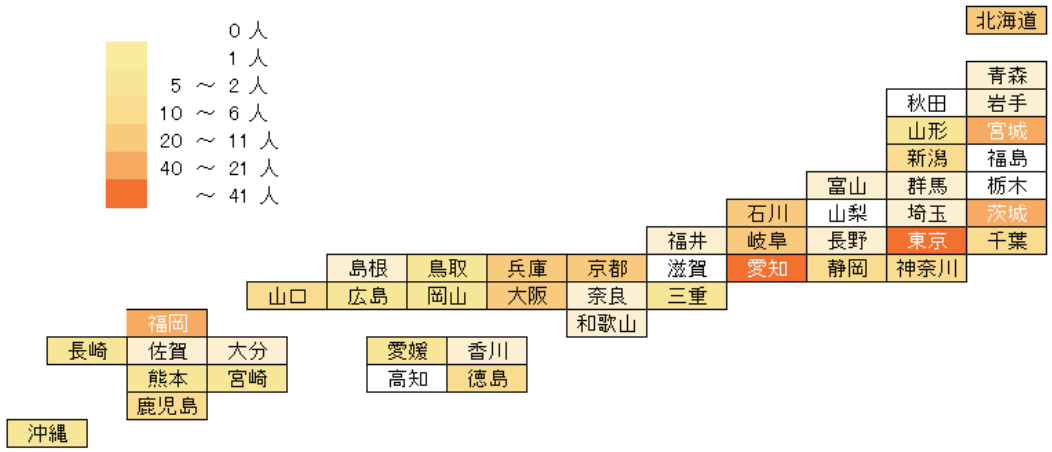


図 5. 都道府県別 SNS 参加者

5　システム運用での報告

前回報告時からの差分として、技術情報サーバーマシンを仮想環境(VMWare)上に構築し、運用形態を変更している。物理マシンをそのまま仮想化する P2V ではなく、各ファイルやデータベースなど必要データを新マシン上にコピーして新規構築している。

仮想化したことにより、今までの PDF ファイルやデータベースのダンプを同一マシン内にバックアップするのみならず、マシン環境全体をバックアップできるようになり、問題発生時のリカバリーや HDD の追加などの負担を軽減できるようになった。

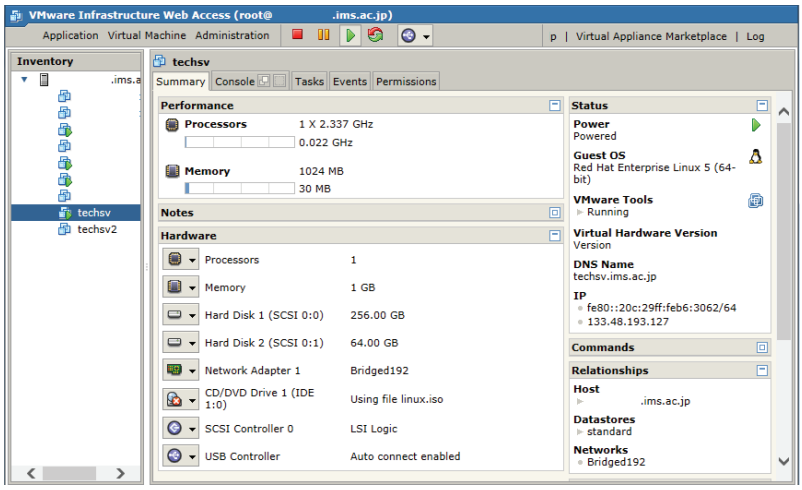


図 6. 仮想化した技術情報サーバーの管理画面

将来的には、当計算科学研究センターにて運用しているクラスタシステムへマシンを移転し、ハードウェアの対応から解放されることを予期している。

また、技術情報 SNS システム(OpenPNE)も、アップデートを行っている。アップデートの結果、ログイン後の画面右端部分にて、本技術情報 SNS の参加者が多い機関順にバナーを表示できるようになった。

なお、その後、OpenPNE のメジャーバージョンアップ版がリリースされており、そちらへのアップグレードを試行したが、「お勧めの本の紹介」といった一部機能が新バージョンではサポートされていなかったり、アップグレード後に日記の固有 ID が保持されずリンク切れが続出した、という事があり、まだアップグレートのテストに成功していない。しかし、折を見てシステムのアップグレードを行う気概である。

また、検索システムでも、報告書の掲載ページの情報を集録することで、雑誌とページ番号から報告書を参照できるようにすることを検討している。

6　参考文献

[1] 水谷文保,“技術研究会報告データベース化の検討”, 平成 13 年度核融合科学研究所技術研究会, March 14-15, 2002

[2] 水谷文保,“技術研究会報告データベース化の試み”, 平成 14 年度東京大学総合技術研究会, March 6-7, 2003

[3] 澤昌孝、水谷文保, “技術研究会報告集データベースの完成報告”, 平成 21 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会, March 18-19, 2010

[4] 水谷文保、澤昌孝, “技術情報ネットワーク SNS 環境構築”, 平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会, March 1-2, 2007

[5] 澤昌孝、水谷文保, “技術研究会報告集データベースの現状報告と新たな収録方法の模索”, 平成 20 年度京都大学総合技術研究会, March 9-10, 2009

FEFS ファイルシステムのアクセス速度の改善

○岩橋建輔，松尾純一，水谷文保

自然科学研究機構 分子科学研究所 技術課

概要

2013 年 3 月に高性能分子シミュレータシステムを更新した。共有ディスクには大容量かつ高速アクセスを満たすものとして、オープンソースの Lustre ファイルシステムを拡張した富士通製 FEFS（Fujitsu Exabyte File System）が導入された。運用開始後、十分な帯域幅にも関わらずアクセス速度が遅いことが判明した。本発表では、FEFS のボトルネックの特定と対策、および残された問題点について説明する。

1　FEFS 導入の経緯

計算科学研究センターに導入されている２つのコンピューターシステムのうち高性能分子シミュレータシステムを 2013 年 3 月に更新した。今回の更新では共有ファイルサーバーも対象であり、更新しないコンピューターシステムからも高速にファイルアクセスできる（700MB / 秒以上のスループット）ように設計する必要があった。高速な共有ファイルサーバーには様々な種類の製品があるが、通信の種類は InfiniBand などのインターコネクトタイプのものと 10GbE 接続などのイーサーネットタイプのものがある。これまで別々の地区に設置されていたコンピューターシステムを同一地区に設置したことにより、接続方法をイーサーネットに限定せずに構築することが可能となった。共有ファイルシステムへの帯域幅を担保するため、導入時の仕様では、新システムで 10GbE 接続ができるようにするか、既存システムへの InfiniBand の増設と既存ファイルサーバーの容量分を余分に用意するかを応札各社が選択できるようにした。その結果、高速な共有ファイルシステムとして、富士通製 FEFS が導入された。

2　FEFS について

FEFS はオープンソースソフトウェアの Lustre をベースに富士通が機能を拡張させたファイルシステムである。そのため、Lustre 自身の問題に起因する障害が発生することもある。FEFS で拡張されている主な点は、各種制限値の拡張、ラウンドロビン分散機能、I/O の帯域制御、ディレクトリー単位のクォーター制御、高可用性である。計算科学研究センターの実運用では I/O の帯域制御以外の拡張部分を利用している。例えば、Lustre では 1 ボリュームの最大の大きさは 16TB であるが、1200TB と 600TB の２つのファイルシステムを作成して運用している。また、同一ファイルシステム内に意味合いの異なる複数のディレクトリーが存在し、それぞれのディレクトリーでユーザーのファイルサイズを把握するためにディレクトリー単位のクォーターを利用している。これにより以前であれば初期化時に決定しなければならなかったファイルシステムの容量の決定行わずに、実際の使用量に応じて弾力的に運用できるようになった。

Lustre と FEFS の構成を比較することでどの部分が高可用性になったかを理解することができる。Lustre と FEFS の構成概念図をそれぞれ図 1 と図 2 に示す。FEFS では、ファイルのメタデータを扱う MDS とファイルの実データを扱う OSS の部分が冗長化され、障害が発生した際には正常に動作している残りのサーバーに処理が切り替わることができる。

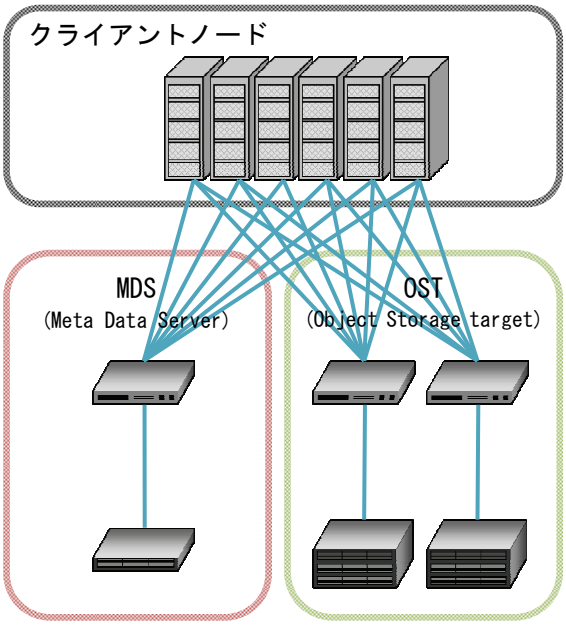


図 1　Lustre 構成概念図

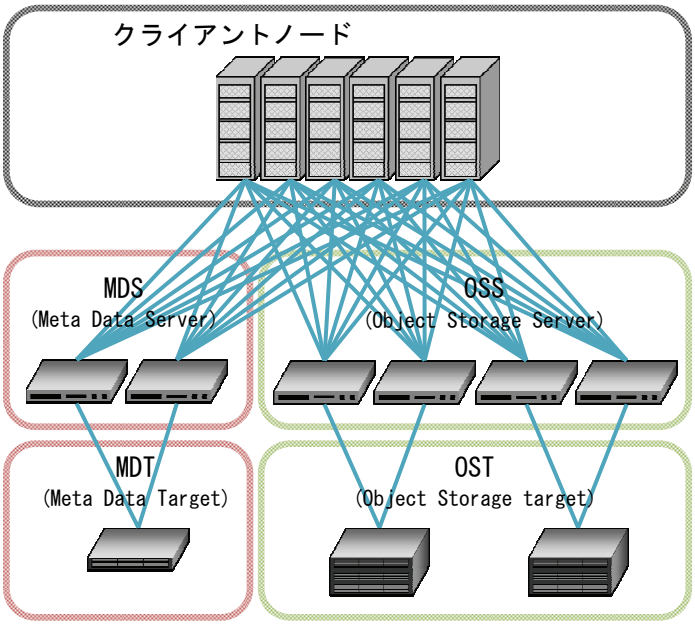


図 2　FEFS 構成概念図

3　FEFS 導入時の構成

計算科学研究センターでは共有ディスクの可用性を確保するため、２つの独立した FEFS に分割した。ハードウェア構成上の制約から容量を 1200TB と 600TB（以下便宜上それぞれ fefs1 と fefs2）とし、スループットを向上させるためストライプ数を 8 で設定した。データ保存領域とスクラッチ領域は fefs1 上に、バックアップ領域は fefs2 上に取るようにした。OSS と OST 部の詳細は図 3 に示した。

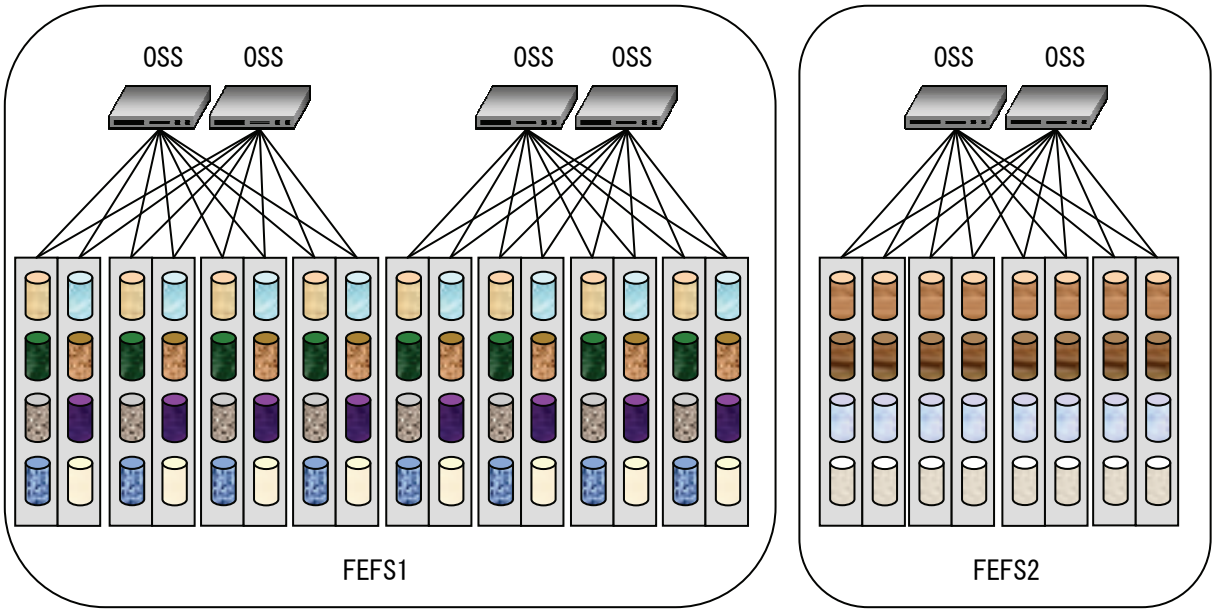


図 3　OSS と OST 部の詳細。円筒は OST である。同色の OST を 8 つでストライプしている。個々の OST は 7D+2P の RAID6 である。8 個の OST を灰色でまとめている部分は 1 つの筐体に収められている。OSS の搭載メモリー量は 32GB である。

4　FEFS 導入後に判明した問題点

共同利用のユーザーが本格的に利用を開始した頃からファイルアクセス、特にファイルのリスト表示が非

常に遅くなる現象が発覚した。ls コマンドを実行して 1 ファイルをリストするのに 0.2 秒前後、状況が悪い時には 0.5 秒前後要した。2 回目以降は一時的には高速にアクセスできたが、1 日程度で元の遅い状態になった。この応答性の悪さは FEFS を導入している他のサイトではほとんど発生していないものであった。

5　原因の特定と対策

ファイルアクセスが遅い問題については、開発元の調査の調査によると MDS の過負荷であり、当初 2 つのことが原因として挙げられた。1 つ目は CentOS などのデフォルトの ls が ls-F のエイリアスであり、ls-F を行うと MDS サーバーが保持していないファイルの属性の問い合わせが発生し、OSS サーバーへの問い合わせで負荷が高くなっていることが疑われた。2 つ目は LD_LIBRARY_PATH に FEFS 上のディレクトリーが先にあることで不要なファイルの open の問い合わせが発生することが原因の 1 つとして挙げられた。

2 つ目の原因に対する対応として、対象となるディレクトリーをローカルなファイルシステムに移動させることで MDS の負荷は軽減させることができたが、対応後、問題の本質は MDS ではないことが判明した。

再度の解析の結果、OSS からストライプ数個の OST 上のデータにアクセスしていること、および、その結果が本来 OSS にキャッシュされるべきだがキャッシュから溢れていることが原因であると判明した。OSS 1 台のメモリー量は 32GB であったのに対し、1 ファイルあたりキャッシュに要する全サイズは 16kB であり、データ領域にある 3500 万ファイルでは 140GB / OSS となり実メモリーが不足していた。また、OSS のキャッシュの大部分がファイルの実データのキャッシュとして使われており、inode/dentry のキャッシュとしてはあまり使われていないことも判明した。

この原因への対策として 3 つのことを行った。1 つ目は OSS のメモリー量を 32GB から 128GB に増設し、Linux のカーネルが使えるキャッシュのメモリーを増やした。2 つ目はなるべくキャッシュが解放されないようにカーネルパラメーターを変更（vfs_cache_pressure=0）した。この設定ではキャッシュが常時解放されないため、キャッシュ使用量に応じて、このパラメータを手動で変更している。3 つ目はバックアップの時にしか使われていなかった fefs2 も常時使うようにし、実質上 OSS の数を増やした。fefs2 は OSS の数が半分のため高速性は fefs1 に比べて劣るが、データ領域のうちホームディレクトリーの部分を fefs2 で運用し、バックアップ領域は逆に fefs1 で運用するようにした。ホームディレクトリーのデータ領域には 1400 万ファイルが存在していたが、すべてのファイルにアクセスしキャッシュに載せるのに 2 日程度を要した。

これらの対策により、1000 個のファイルがあるディレクトリーで ls にかかる時間が設定前までは 1-3 分要していたのに対し、設定後は 1 秒以下となった。

6　今後の課題

今回の対策は Linux カーネルのキャッシュ溢れを起こしにくくするものであるため、停電などでサーバーが停止した場合、キャッシュが全てクリアされる。そのため、復電後の最初のファイルアクセスが遅くなるが、これに対する解決策はない。また、停止前に inode/dentry キャッシュを書き出して再利用する機構については開発元で検討中である。

配信でよく利用される動画圧縮規格の現状と後続規格

○澤　昌孝，水谷文保

自然科学研究機構　分子科学研究所 技術課

概要

講演会や研究会などのライブ配信を PC 以外にタブレットやスマートフォンでもブラウザ上で FlashPlayer(Real Time Message Protocol(RTMP))や HTML5(HTTP Live Streaming(HLS))を利用して見られる様になったが、遅延において不満が残る状況である。

そこでこれまで使用してきた動画コーデック H.264 ではなく、ブラウザで再生可能な WebM で採用されている VP8 の性能を調べるため、WebM ストリーミングサーバ stream.m を使用して、画質や遅延等を比較した。

1　RTMP や HLS によるライブ配信

いままで分子研のライブ配信は、WindowsMediaServer（配信サーバソフト）と ExpressonEncoder4（エンコーダ）を使って MicrosoftMediaServer プロトコル（以下 MMS）で実施していたが、カメラで撮影したものがライブ配信受信した PC 側で再生されるまで 15～20 秒ほど遅延するという問題があった（図 1）。会場外にいるライブ配信の視聴者からも Twitter などを用いてリアルタイムに質問を受け付けて、より積極的にできるようにしたいと目論んだ際に、この 15～20 秒ほどの遅延は決して些細な数字ではなくなる。

図 1.　MMS よる配信時間の遅延時間

（手前モニタが撮影対象、奥モニタが配信を再生した画面）

昨年の総合技術研究会にてストリーミング方式を Adobe 社が開発した RTMP を AdobeMediaServer（配信サーバソフト。以下 AMS）と FlashMediaLiveEncoder（エンコーダ、以下 FMLE）にてライブ配信したところ、2～3 秒ほどの遅延で収まることを報告した（図 2）[1]。

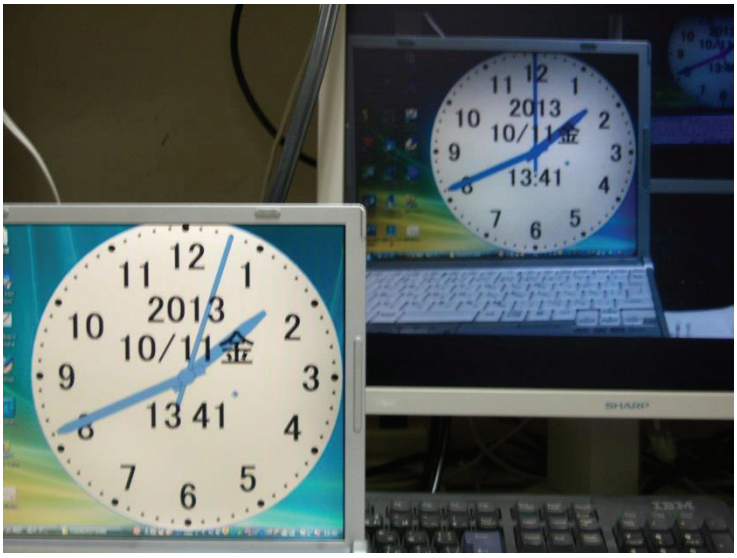


図 2.　RTMP による配信の遅延時間

しかし、RTMP の再生には Adobe 社の FlashPlayer が必須であるが、Apple 製スマートフォン・タブレットなどで利用されている iOS の最新版には FlashPlayer が提供されていないため再生することができない。iOS 端末でのストリーミングには Apple 社が開発した HTTP ベースのストーリミングプロトコル HLS で配信したものを HTML5 対応したブラウザ（iOS 版 Safari など）で視聴することが可能であるが、この場合の遅延時間は 30～40 秒ほどになる（図 3）[1]。

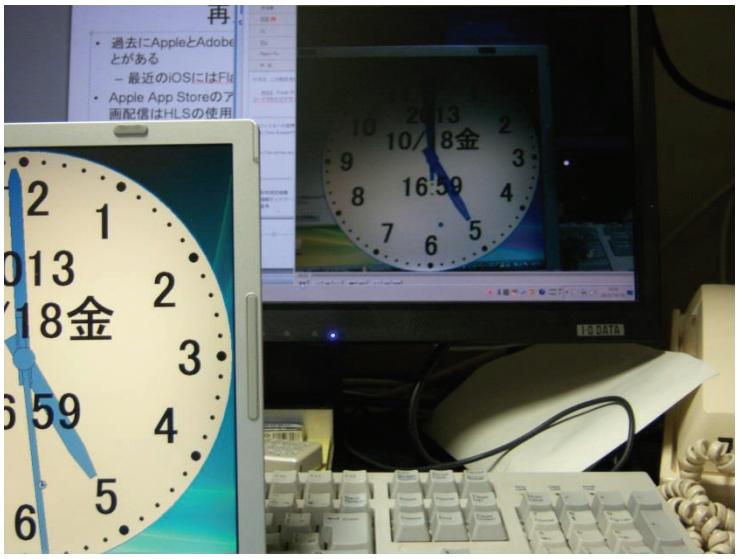


図 3.　HLS による配信の遅延時間

この HLS の遅延時間ではあまり芳しくないので、同じく HTML5 対応のブラウザで再生できる WebM でのライブ配信を調べることにした。

2　WebM でのライブエンコードおよび配信

WebM の配信サーバには stream.m[2]という Java で書かれたオープンソースサーバソフトを用いて、エンコードにはフリーソフトの FFmpeg[3]を用いた。ストリーミング配信システムの構成は以下の図 4 のとおり。

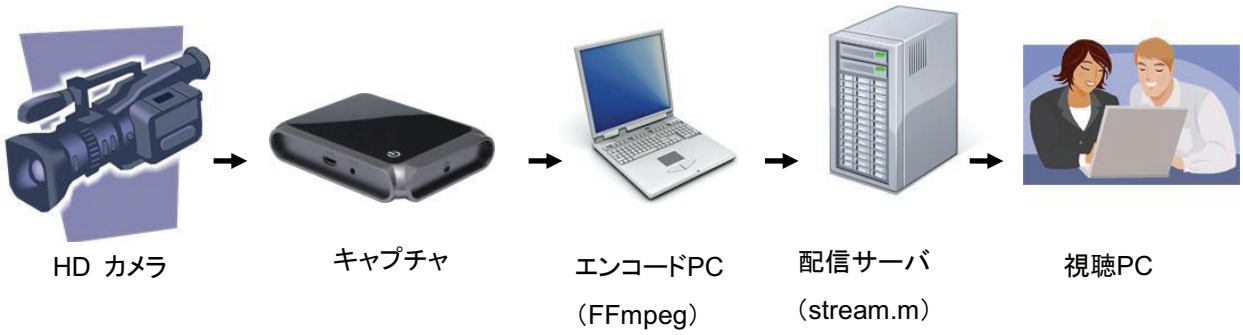


図 4. ストリーミング配信システム

なお、エンコード PC のスペックは以下のとおり。

-CPU：Intel i7-3667U(2.0GHz(ブースト時 3.2GH z)、2 コア、4 スレッド、Intel HD Graphcics4000)

-メモリ：8GB

-ディスク：APPLE SSD SM512E(Samsun SSD 512GB)

視聴は HTML5 対応のブラウザ（Firefox、Chrome）などでプラグインやアドオンなしで視聴可能である。

昨年の総合技術研究会の報告[1]と同じように、解像度 720p・ビットレート 1Mbps・フレームレート 15fps に設定して WebM のビデオコーデック VP8 でリアルタイムエンコードを試みたが、5 秒もたたないうちにドロップフレームが多発してまったくエンコードが進まない状態になった。

```
C:¥Webcam-Streaming>ffmpeg.exe -f dshow -i video="MonsterX-Live video" -threads
4 -r 15 -s 1280x720 -b:v 1024k -bufsize 2048k -vcodec libvpx -preset veryfast -f
  webm http://example.ims.ac.jp:8080/publish/first?password=secret
(中略)
Press [q] to stop, [?] for help
frame=    12 fps=0.0 q=0.0 size=       0kB time=00:00:00.00 bitrate=     0.0kbits/s
frame=    20 fps= 19 q=0.0 size=       0kB time=00:00:00.00 bitrate=     0.0kbits/s
frame=    26 fps= 17 q=0.0 size=     112kB time=00:00:00.13 bitrate=6877.8kbits/s
frame=    35 fps= 17 q=0.0 size=     112kB time=00:00:00.73 bitrate=1247.9kbits/s
frame=    42 fps= 16 q=0.0 size=     153kB time=00:00:01.20 bitrate=1045.3kbits/s
frame=    50 fps= 16 q=0.0 size=     187kB time=00:00:01.73 bitrate= 886.0kbits/s
frame=    58 fps= 16 q=0.0 size=     300kB time=00:00:02.26 bitrate=1084.3kbits/s
frame=    66 fps= 16 q=0.0 size=     339kB time=00:00:02.80 bitrate= 993.1kbits/s
frame=    74 fps= 16 q=0.0 size=     446kB time=00:00:03.33 bitrate=1097.4kbits/s
frame=    81 fps= 16 q=0.0 size=     479kB time=00:00:03.80 bitrate=1031.9kbits/s
frame=    89 fps= 16 q=0.0 size=     556kB time=00:00:04.33 bitrate=1051.0kbits/s
real-time buffer 62% full! frame dropped!
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 70% full! frame dropped!
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 77% full! frame dropped!
      Last message repeated 1 times
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 82% full! frame dropped!
      Last message repeated 1 times
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 87% full! frame dropped!
      Last message repeated 2 times
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 89% full! frame dropped!
      Last message repeated 2 times
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 91% full! frame dropped!
      Last message repeated 2 times
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 93% full! frame dropped!
      Last message repeated 2 times
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 96% full! frame dropped!
      Last message repeated 2 times
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 98% full! frame dropped!
      Last message repeated 2 times
```

```
[dshow @ 003ec240] real-time buffer 101% full! frame dropped!
      Last message repeated         Last mess214 times
```

このとき、エンコード PC の負荷を確認したが、CPU・メモリ・ディスクいずれも余裕があることを確認している。なお、「real-time buffer XX% full! frame dropped!」のエラーについては「-rtbufsize」という real-time buffer size を指定するオプションである程度抑えることができるが、上記のビットレート 1Mbps のリアルタイムエンコードでオプションを追加した場合でもエンコードが進まない現象の解消には至らなかった。

また、RTMP で利用するビデオコーデック H.264 を用いて、ほぼ同じオプションでビットレート 1Mbps のリアルタイムエンコードを行ったが、こちらは特に問題なかった。

```
C:¥Webcam-Streaming>ffmpeg.exe -f dshow -i video="MonsterX-Live video" -threads
4 -r 15 -s 1280x720 -b:v 1024k -bufsize 2048k -vcodec libx264 -preset veryfast -
f flv "rtmp://example.ims.ac.jp/dvrcast_origin/mp4:dvrstream.f4v"
（中略）
Press [q] to stop, [?] for help
frame=    15 fps=0.0 q=0.0 size=          0kB time=00:00:00.00 bitrate=     0.0kbits/s
frame=    23 fps= 22 q=32.0 size=         31kB time=00:00:00.19 bitrate=1290.6kbits/
frame=    31 fps= 19 q=28.0 size=         92kB time=00:00:00.73 bitrate=1023.3kbits/
frame=    38 fps= 18 q=28.0 size=        151kB time=00:00:01.19 bitrate=1030.0kbits/
frame=    46 fps= 17 q=28.0 size=        226kB time=00:00:01.73 bitrate=1068.0kbits/
frame=    54 fps= 17 q=27.0 size=        291kB time=00:00:02.26 bitrate=1050.6kbits/
frame=    62 fps= 17 q=28.0 size=        361kB time=00:00:02.79 bitrate=1055.5kbits/
frame=    69 fps= 16 q=27.0 size=        423kB time=00:00:03.26 bitrate=1060.1kbits/
frame=    79 fps= 16 q=28.0 size=        509kB time=00:00:03.93 bitrate=1059.8kbits/
frame=    87 fps= 16 q=29.0 size=        582kB time=00:00:04.46 bitrate=1068.1kbits/
frame=    94 fps= 16 q=28.0 size=        631kB time=00:00:04.93 bitrate=1048.0kbits/
（中略）
frame=   602 fps= 15 q=28.0 size=       4882kB time=00:00:38.79 bitrate=1030.7kbits/
frame=   610 fps= 15 q=28.0 size=       4948kB time=00:00:39.33 bitrate=1030.6kbits/
frame=   618 fps= 15 q=27.0 size=       5014kB time=00:00:39.86 bitrate=1030.2kbits/
frame=   625 fps= 15 q=27.0 size=       5064kB time=00:00:40.33 bitrate=1028.5kbits/
（以下略）
```

ビットレートを下げながら VP8 のリアルタイムエンコードで問題ない数値を探ったところ、400kbps を下回った辺りからドロップフレームしなくなり、安定することが分かった。

この結果を受けて、VP8 でのエンコードは解像度 720p、ビットレート 350kbps、フレームワーク 15fps で配信したものでテストすることにした。

2.1　遅延時間の測定

測定は図 1～3 と同様、手前のモニタに時計を表示したものを撮影し、奥のモニタにて配信を再生したものを表示させた（図 5）。

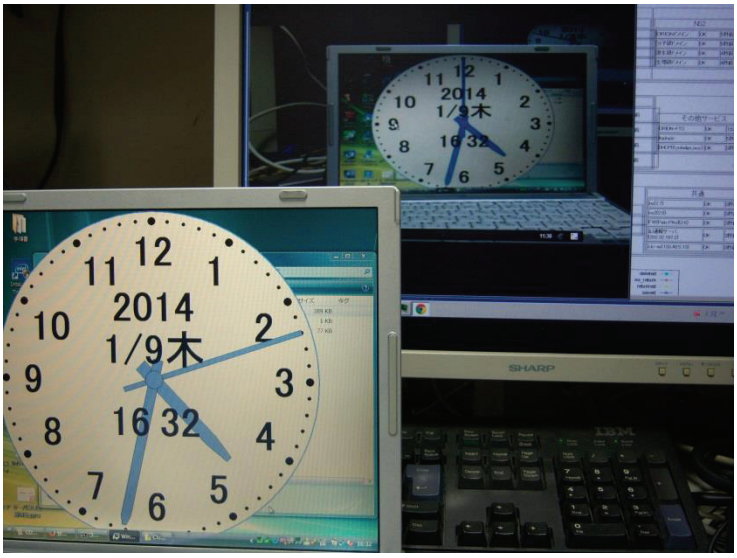


図 5.　WebM による配信の遅延時間

結果は 12 秒ほどの遅延となり MMS より若干良い結果となった。RTMP で FFmpeg を用いてほぼ同じオプションでビットレート 350kbps のエンコード・配信した際の遅延時間は 4 秒であった。

2.2　H.264 との画質比較

実際に研究会で録画したものを解像度 720p、ビットレート 350kbps、フレームレート 15fps でリアルタイムエンコード・配信を WebM(VP8)と RTMP（H.264）の両方で行い、ほぼ同じ再生個所のスクリーン画面のキャプチャを図 6・7 に示す。

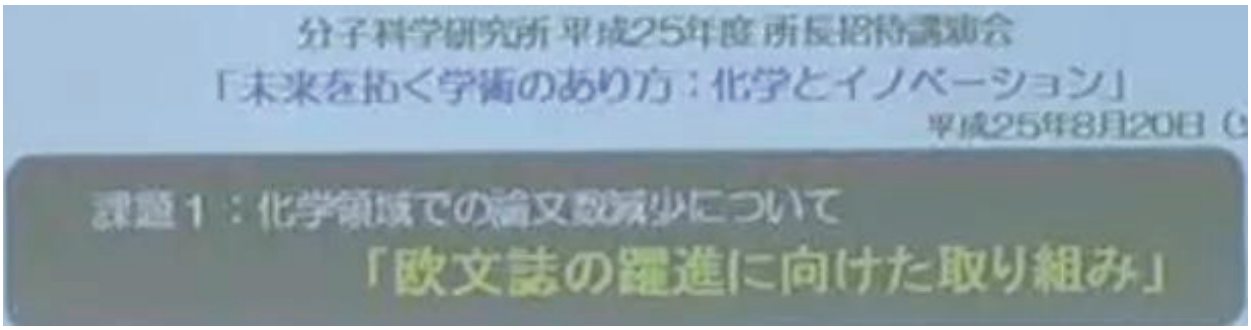


図 6.　WebM でのライブ配信したスクリーン画面のキャプチャ

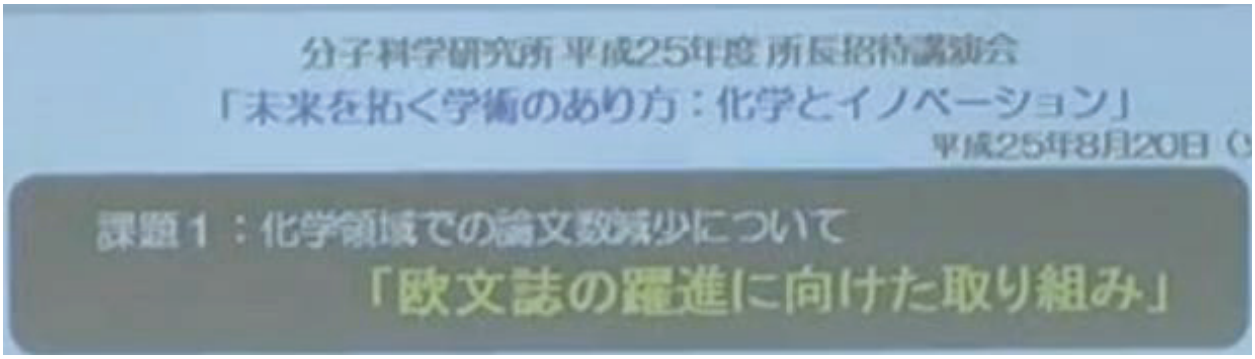


図 7.　RTMP でのライブ配信したスクリーン画面のキャプチャ

スクリーンの文字については RTMP の方がややくっきりしているが、全体的な画質としてはそれほど差は出なかった。また、両方ともに大きなブロックノイズが発生することもなかったが、WebM 再生中にバッファリングが発生することがあり、発生で画面が止まった分遅延する現象が発生した。

2.3　配信データの保存

配信サーバの sream.m にはサーバ上に残す機能はないが、以下のように FFmepg などで配信 URL を入力先としてキャプチャすることでローカルに保存することは可能である。

```
C:¥Webcam-Streaming>ffmpeg.exe –i webm http://example.ims.ac.jp:8080/publish/first -f webm record.webm
```

但し、stream.m の配信 URL はログインが必要であるため、上記のキャプチャを実行する前に、ブラウザで配信 URL にてログインしてストリーミングを再生しておく必要である。

3　主な配信方法のまとめ

昨年の技術研究会での報告[1]と今回の報告の挙げた配信方法の結果について以下の表 1 にまとめた。

表 1.　配信方法による遅延・動画保存・画質などについてのまとめ

配信プロトコル	MMS	RTMP	HLS	WebM
開発元	Microsoft	Adobe	Apple	Google
動画コーデック	VC-1	H.264	H.264	VP8
遅延の少なさ	△（15～20 秒）	○（2～3 秒）	×（30～40 秒）	△（12 秒）
サーバ上での動画保存	○	△（次に録画配信すると、上書きされる）	○	×
1Mbps 以上の高画質（ビットレート）でのライブ配信	○	○	○	×（350kbps 辺りが限界）
再生プラットフォーム	△（MMS 対応メディアプレイヤー必須）	○（PC）、×（iOS 系スマートフォン・タブレット）	○（Apple 製 OS）、△（HLS 対応メディアプレイヤー）	○（Firefox,chrome）、△（IE、Safari などは要プラグイン）

ライブ配信で WebM を選択するメリットは、再生プラットフォームが広いこと以外ほとんどない。特に高ビットレートでライブ配信ができない点では、ストリーミングがより高画質になっている現状には追い付いていない。

実際、WebM 開発元の Google の子会社がサービスしているライブ配信サービス YouTube Live[4]では WebM ではなく RTMP でエンコードするように指定されている[5]。

4　次世代解像度 4K 及び 8K 対応の動画圧縮コーデックの後続規格

現在、主流の解像度である FullHD（1920×1280）の圧縮に使用するコーデックでは H.264 が利用されているが、最近は次世代の解像 4K（3840×2160）は主に高価格帯な製品で発売されてきており、さらに次の世代の解像度 8K（7680×4320）の製品も展示会などで披露されつつある。4K は FullHD の 4 倍の解像度となるため、現行と同じ圧縮率（H.264）で動画データを作成した場合は 4 倍のサイズ増となる。HDD・SSD などの大容量化及び光通信の普及などで、データ保有可能量及び通信できる量は増加しているものの、データサイズが 4 倍（4K）～16 倍（8K）と爆発的な増加には対応できない。そのため、より圧縮能力の良い動画規格が望まれていた。

H.264 の後続規格として H.265 という規格があり、昨年初頭に ITU-T で承認された[6]。圧縮能力としては H.264 の約 2 倍であると発表されている。対応製品は主にエンタープライズ製品にリリースされつつある。エンコードソフトとしても DivX10 などデコード・エンコードができる製品が出始めている。

VP8 も同様に次世代解像度に向けての後続規格 VP9 が開発されている。圧縮能力としては VP8 の約 2 倍を目標としている。対応製品・ソフトは FFmpeg が最近デコード対応されたがまだまだ少ない。

対応製品では現状 H.265 の方がリードしているが、H.264 と同じく製品企業側に特許使用料が必要となっ

ており、VP9 は VP8 と同じく使用料は不要となってため、今後シェアがどのようになるかは予断を許さない。

5　最後に

残念ながら WebM（VP8）によるライブ配信は良い結果とならなかったので、当面の分子研のライブ配信は H.264 ベースの RTMP と HLS で行う予定である。しかし、近い将来 H.265 ベースのライブ配信方式が普及すると予想されるので、H.265 デコード・エンコードをローカルで動画ファイルを作成することから始めて、次世代解像度のライブ配信に備えたいと考えている。

参考文献

[1]　平成 24 年度愛媛大学総合技術研究会　澤昌孝、水谷文保　「低遅延ライブ配信とマルチプラットフォーム対応配信環境の構築」

[2]　stream.m
http://code.google.com/p/stream-m/

[3]　FFmpeg
http://www.ffmpeg.org/

[4]　YouTube Live
http://www.youtube.com/live/all

[5]　YouTube > ヘルプ　ライブエンコーダの設定、ビットレート、解像度
https://support.google.com/youtube/answer/2853702?hl=ja

[6]　New video codec to ease pressure on global networks
http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2013/01.aspx#.Us99JrR204I

参加機関名（50音順）及び参加人数

総参加者数	268
口頭発表者数	48
ポスター件数	44

参加機関	参加者数
岩手大学	2
宇都宮大学	1
愛媛大学	2
大分大学	1
大阪市立大学	3
大阪大学	15
沖縄工業高等専門学校	1
核融合科学研究所	53
学習院大学	3
金沢大学	2
基礎生物学研究所	1
九州大学	4
九州工業大学	1
京都大学	7
熊本大学	1
群馬工業高等専門学校	1
高エネルギー加速器研究機構	33
国立天文台	4
佐賀大学	1
静岡大学	3
千葉大学	2
筑波大学	5
東京工業大学	1
東京大学	11
東北大学	10
徳島大学	1
鳥取大学	2
富山大学	1
豊橋技術科学大学	2
電気通信大学	5
長岡技術科学大学	2
名古屋工業大学	8
名古屋大学	31
日本原子力研究開発機構	8
広島大学	2
分子科学研究所	19
放射線医学総合研究所	2
北陸先端科学技術大学院大学	1
北海道大学	9
宮崎大学	1
横浜国立大学	2
立命館大学	1
琉球大学	1
株式会社ダイゾー	1
JIA-QA	1

あとがき

技術研究会実行委員長　馬場智澄

核融合科学研究所が担当して企画開催する技術研究会は、交通の利便性及び複数の講演会場の確保等の必要性により、所内での開催は困難であるため、所外の会場を利用することとなりました。会場探しに当たっては、（１）技術研究会運営協議会からの要請により最低５分科会の講演を平行して開催可能な会場の確保、（２）研究所設置の世界最大級のヘリカル型プラズマ閉じ込め実験装置の見学が可能な場所、（３）前年度より利用予約を受け付けていただける、（４）宿泊設備が整っている、等の選定条件が有りました。これらの条件にあう会場として、犬山国際観光センター“フロイデ”をお借りし、開催する運びとなりました。

講演募集にあたり、昨年末に重ねての参加依頼もお願いいたしましたが、おかげさまで多数のご協力をいただき、充実した内容で企画開催できたことを心よりお礼申し上げます。

この技術研究会は職域を超えて真剣に議論頂ける技術職員の情報交換の場であります。仕事上の専門分野が異なっても各自が持つ要素技術や英知を有効活用することで新たな優位技術の誕生のきっかけとなり、各自の問題解決のヒントが得られるのではないかと思います。

技術研究会への参加を契機に、さらに継続的な技術交流へと発展させるというアクションを参加者一人一人意識的に行い、技術の研鑽を図られることを期待します。

最後に、今回の技術研究会の企画開催にご協力とご支援を頂きました、核融合科学研究所の管理部、研究部をはじめとする関係者の皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。

技術研究会実行委員会　実行委員長　馬場智澄
実行委員　小林策治、加藤明己
林　浩己　関口温朗
近藤友紀　伊藤康彦
駒田誠司　中村　修
野口博基　長原一樹

Web 版技術研究会報告集の閲覧方法について

概要

技術研究会では、報告集原稿の提出案内において、Web でも公開する種子の案内を出してきました。現在では、全期間分 4389 報告論文のデータベース収集が完了し、Web で閲覧できる環境を整備しております。各論文は、研究会毎の発表リストから選択するだけでなく、全文検索を含む様々な検索を利用して探し出すことが可能です。個々の論文の閲覧は、利用者限定環境でのみ可能です。一般利用環境では、タイトル等参照までが可能です。以下をご一読頂き、ぜひお試し下さい。

1　公開環境について

誰もが閲覧できる Web 環境で、技術研究会報告集の論文を公開することは多くの問題点があり、これまで何度も議論を繰り返してきました。そこで誰もが参照可能な Web 環境では、　タイトル等の演題情報のみを公開し、かつ検索可能期間を限定しました。これとは別に、閲覧者が限定できる環境を整備して、その環境下では論文閲覧ができるように整備しました。利用者限定環境には、SNS（Social Network Service）を利用しており、この SNS へ登録頂くことで、全期間の論文の閲覧が可能になります。

2　アクセス方法

利用形態に応じて、以下の URL までアクセスしてください。

一般公開版（論文参照不可）　http://techsv.ims.ac.jp/GEN

利用者限定版（論文参照可）　http://techsv.ims.ac.jp/SNS

一般公開版ページは、利用者限定版ページへリンクしています。もし一般向けに公開しているホームページ等へリンクしたい場合には、一般公開版ページをリンクするようにして下さい。SNS へ登録するには、既に SNS に登録済みの方から招待メールを送付頂く必要があります。もし身近に登録済みの方がいない場合は、下記問い合わせ先までご一報下さい。担当者より招待メールを差し上げます。

3　利用者限定版の登録方法と使い方

招待メールを受信したら、メール上の URL へアクセスして登録手続きを行って下さい。登録時には、利用規約を一読願います。登録方法など、SNS の使い方は、「利用の手引き http://techsv.ims.ac.jp/WIKI」を参照してください。利用者限定版ページ下部には、常に「利用の手続き」へのリンクが掲載されています。

登録すると１日１回ニュースメールが届きますが、これを止めたい場合は、「設定変更」メニューから設定可能です。技術研究会報告集データベースを利用したい場合は、SNS 画面左上にある黄色の「データベース検索」ボタンをクリックして下さい。登録が済んだら、利用規約の範囲で身近な方にご紹介下さい。

4　問い合わせ先

今後の開催分についても、下記の運用責任組織でデータ登録を行い、データベースを維持していく所存です。本件以外にも、本データベースや SNS の運用についてなど問い合わせは、下記までお願いいします。

運用責任組織	自然科学研究機構　分子科学研究所　技術課
担当者	水谷　文保
メールアドレス	mizutani@ims.ac.jp