

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

令和3年度 核融合科学研究所技術研究会

日時: 令和4年3月10日～3月11日

Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories

10-11 March 2022

核融合科学研究所 技術部
Department of Engineering and Technical Services,
National Institute for Fusion Science

(Received - May 10, 2022)

NIFS-MEMO-90

May 26, 2022

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. The views presented here are solely those of the authors. This document is intended for information only and may be published in a journal after some rearrangement of its contents in the future.

Inquiries about copyright should be addressed to the NIFS Library, National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-5292 JAPAN.

E-mail: tosho@nifs.ac.jp

<Notice about copyright>

NIFS authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights and reuse rights of copyrighted works. If you wish to obtain permissions of these rights, please refer to the homepage of JAC (<http://jaacc.org/eng/>) and confirm appropriate organizations to request permission.

令和 3 年度 核融合科学研究所技術研究会

日時 : 令和 4 年 3 月 10 日 (木) ~ 3 月 11 日 (金)

開催場所 : オンライン

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 successfully held at online from March 10th to 11th in 2022 hosted by National Institute for Fusion Science (NIFS). Participants of 253 attended the symposium from universities, research institutes and technical colleges. Papers of 35 were presented at the symposium. The participants discussed and exchanged views on the output of the new technology, techniques and technical experiences in five subcommittees of the technology of fabrication, the device technology, the diagnostic and control system, the cryogenics, and the information network technology.

The keynote speech by Professor Katsumi Ida and the online tour of the experimental facility were also successful.

Keywords: symposium, technology, fabrication, device, diagnostic, control system, cryogenics, information, network

Some figures and tables are in color only CD-ROM (PDF).

はじめに

自然科学研究機構 核融合科学研究所
技術部長 小林 策治

この度、核融合科学研究所におきまして技術研究会を開催することとなりました。技術研究会は日常業務で携わっている実験装置の開発、維持管理の話題から改善、改良の話題に及ぶ広範囲な技術的研究支援活動についての発表や技術職員同士の交流及び技術向上を図ることを目的とし全国の国立大学法人、大学共同利用機関法人、及び国立高等専門学校等の技術職員の参加・協力によって運営されています。

昨今、技術部職員の高齢化が進みそれに伴う技術継承が急務になっています。また組織化が叫ばれて久しく各大学でも改組を行い技術職員による組織運営が行われています。しかしながら一致団結した動きを掛け声とともに行うには取り組まなければならない課題がいくつもあり必ずしもうまく運営できていないのが現状です。本年度の技術研究会は3研究所（分子科学研究所、高エネルギー加速器研究機構、核融合科学研究所）の持ち回り開催年度ですが、隔年で総合技術研究会として全国の各大学等で開催されております。技術研究会開催には多くの技術職員が準備・運営に携わる必要があり日頃つながりが少なくなりがちな関係を改善する良い機会ともなりえます。実態の伴った組織づくりが叶えば世代交代や若手育成も計画的に実行できる素地となることを確信いたしております。また、技術研究会では様々な経験を持った先輩、同僚たちが自身の経験談を数多くの方に公開し日頃の職務に役立てていただきたいとの思いで発表をしていただいています。積極的に他大学の技術職員との交流を持ち技術の向上と幅を広げていただくよう心がけていただきたいと思います。

本年度は新型コロナウイルス感染症の影響を鑑みオンラインでの開催となりました。核融合科学研究所技術研究会としては初めての試みとなりました。開催にあたり講師や見学会の案内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いたします。

目次

第1分野 (工作技術)

- (1) 学生が自ら実験研究用装置を設計製作する意義・・・・・・・・・・・・・・ 1
九州大学 馬場 敦
- (2) 装置製作を通しての新人育成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
名古屋大学 渡邊 雄亮
- (3) 電子ビーム露光によるポジ型レジストの現像温度と最適露光量の関係・・・・ 6
東京工業大学 田村 茂雄
- (4) 電磁界解析を用いたマイクロ波ノッチフィルターの製作・・・・・・・・・・・・ 8
核融合科学研究所 清水 貴史
- (5) スキュー六極電磁石の形状測定および微調整再組上げ・・・・・・・・・・・・ 11
高エネルギー加速器研究機構 荒木 栄

第2分野 (装置技術)

- (1) ラングミュアプローブを用いたプラズマ計測および実験環境の整備・・・・・・・・ 15
核融合科学研究所 中川 翔
- (2) CMB 観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発・・・・・・・・ 19
高エネルギー加速器研究機構 金山 高大
- (3) ECH における高圧電源用切替機の設計について・・・・・・・・ 23
核融合科学研究所 竹内 俊貴
- (4) 光源加速器インターロックシステム更新計画・・・・・・・・ 27
高エネルギー加速器研究機構 濁川 和幸
- (5) 電子顕微鏡のオンライン化の実例紹介・・・・・・・・ 31
東北大学 阿部 真帆
- (6) KEK-PF におけるセラミックスチェンバー一体型パルスマグネットのための
ビーム試験路構築・・・・・・・・ 33
高エネルギー加速器研究機構 内山 隆司
- (7) J-PARC 崩壊ミュオンビーム輸送系における偏向電磁石 (DB2) の
コイル換装及び磁場測定・・・・・・・・ 36
高エネルギー加速器研究機構 湯浅 貴裕
- (8) ガフクロミックフィルムによるビームロス評価・・・・・・・・ 40
高エネルギー加速器研究機構 塩澤 真未
- (9) 軟 X 線ビームライン集光鏡の in situ 炭素汚染除去・・・・・・・・ 44
高エネルギー加速器研究機構 片岡 竜馬
- (10) ヒートシールドの電磁力解析・・・・・・・・ 47
量子科学技術研究開発機構 本間 寛人

第3分野 (計測・制御技術)

- (1) 汎用一斉警報通知システム WAN-WAN の展開 51
分子科学研究所 豊田 朋範
- (2) コンデンサバンク監視装置の概要 54
高エネルギー加速器研究機構 溝端 仁志
- (3) 植物群落の太陽光誘起蛍光による光合成測定 56
静岡大学 増田 健二
- (4) 電子式個人線量計の校正 61
大阪大学 福井 宥平
- (5) SuperKEKB における加速電圧位相とビーム負荷調整 63
高エネルギー加速器研究機構 小笠原 舜斗
- (6) Python 版 STARS server と導入例 67
高エネルギー加速器研究機構 小菅 隆
- (7) 放射光源加速器インターロックシステム更新に伴う
フィールドバスの検討 72
高エネルギー加速器研究機構 石井 晴乃
- (8) LHD 計測シャッターシステムの改修について 77
核融合科学研究所 西村 輝樹
- (9) 企業との共同研究、高周波誘導加熱装置用制御回路の研究開発 81
高エネルギー加速器研究機構 佐藤 節夫
- (10) インピーダンス整合速度改善のためのポンプの自動化 84
核融合科学研究所 神田 基成

第4分野 （極低温技術）

- (1) LHD 超伝導ポロイダルコイルシミュレーションモデル構築・・・・・・・・・・ 89
核融合科学研究所 鷹見 重幸
- (2) LHD ヘリウム圧縮機用主電動機の長期運用実績とメンテナンス履歴・・・・・・・・ 93
核融合科学研究所 野口 博基
- (3) 音響ビリアル係数から密度ビリアル係数を求める公式・・・・・・・・・・・・ 97
京都大学 多田 康平
- (4) ヘリウム液化装置保守 圧縮機オイル補充と長尺ボンベ開放検査・・・・・・・・ 101
千葉大学 吉本 佐紀
- (5) ヘリウム回収ガスバッグ鉄枠損壊の原因と今後の安全対策・・・・・・・・・・・・ 105
京都大学 西崎 修司
- (6) ヘリウム純度計監視システムの紹介・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 109
分子科学研究所 浅田 瑞枝
- (7) 極低温業務 便利グッズ4種の紹介・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 112
分子科学研究所 高山 敬史

第5分野 （情報・ネットワーク技術）

- (1) キャンパス情報ネットワーク（NIFS-LAN）のシステム更新・・・・・・・・・・ 115
核融合科学研究所 井上 知幸
- (2) ライブストリーミングの計画と実施・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 119
分子科学研究所 内藤 茂樹
- (3) 機械学習を用いた空洞内面検査ソフトの開発・・・・・・・・・・・・・・・・ 123
高エネルギー加速器研究機構 荒木 隼人

参加機関及び参加人数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 126

あとがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 127

Web 版技術研究会報告集の閲覧方法について・・・・・・・・・・・・ 128

第 1 分野 (工作技術)

学生が自ら実験研究用装置を設計製作する意義

馬場 敦

九州大学理学部附属工場

1. はじめに

九州大学理学部附属工場は、理学部附属工場の研究・教育における技術支援を行う施設として

- ・ 市販されていない特殊で精密な実験機器類の開発・修理
- ・ 装置設計相談
- ・ 技術指導
- ・ 技術講習会開催
- ・ 材料払い出し

等を行っている。

主業務である機械加工室では精密機械製作・修理、板金、真空機器溶接(SUS、アルミ)、装置設計相談、技術指導、工作講習会、金属・アクリル等材料の払い出し等の業務を行っている。

筆者は本学に在籍し 11 年になるが、業務時に

- ・ 学生の図面が読みづらい
- ・ 装置をよく壊す
- ・ 依頼時に学生が思うようにプレゼンを行えない

といった問題に度々遭遇した。これらの問題は複数の問題発生原因・機構が存在するため解決は容易ではない。

本稿ではそれらの問題のボトルネックを掘り下げて明確にしていき、課題の解決を実現した方策及び成果について報告する。

2. 諸問題の発生原因・機構

学生が研究を行う際に生じる問題は様々あるが、まずは、研究室所属の学生の諸問題を 3 点抽出し、発生原因を検討する。

i. 図面が読みづらい

当工場では学生からの工作の依頼を請け負う際に一番感じる問題はこれである。

具体的には、

- ・ 図面に記載されている縮尺と印刷された図面の縮尺が異なっている
- ・ 図面上にバランスよく設計対象物が配置されていない

- ・ 寸法の洩れおよび記載ミス
 - ・ 製品のどこを基準に寸法を取るか（中心、右側、左型など）の整合性が取れていない
- という事例がある。

これらが生じる理由は、

- A) 理学部なので設計製図の授業がない
- B) 教員を含め身近に製図に精通した検図者がいない
- C) 図面を元にどのように製作を行うかの知識不足

ということが考えられる

ii. 装置をよく壊す

この問題も定期的に発生する。

具体的には

- ・ ネジが取れなくなる（主に大きいサイズのネジ）
 - ・ ネジ切ってしまい取れなくなる（主に小さいサイズのネジ）
 - ・ 部品を落として破損させてしまう
- という事例がある。

主にネジに関しての事が多いがその限りではない。

これらが生じる理由は、

- A) 全体的に扱いが雑
- B) 工学部と比べて機械に触ってきた経験が少ない（仮定）
- C) トルク管理や正しいネジ締め等の知識がない

ということが考えられる

iii. 加工依頼時の学生のプレゼンで意図が読み取りにくい場合がある

この問題も業務を行う際にたびたび生じる。

これは、

- A) 加工に対する知識不足
 - B) コミュニケーション能力の不足
 - C) 製図不良
- という理由が考えられる。
- プレゼンテーションを行う際には、単に上手に話

せばよいという訳ではなく、バックグラウンドにある知識や、分かりやすい資料（今回は図面）が不可欠である。どれか欠けていても、意思の疎通は可能だが、誤解が生じる恐れもあるので、可能な限りまんべんなく準備を行ったうえでプレゼンテーションを行う必要がある。

以上、抽出した3点の諸問題に対して様々な発生原因が考えられるが、私は理学部の学生のものづくり全般に対する知識及び技能の不足が最大のボトルネックであると考えた。以下にものづくりに関連付けた諸問題の解決策を示す。

3. 課題の方向性

諸問題の発生原因・機構をもとに、複数の課題を提案し、課題解決策を実行した。

i. 設計製図力を鍛える

当学部学生は製図法に関する知識は少ないが、CAD を利用した設計に興味を持っている傾向があり、独学ではあるが、ある程度3DCAD を利用した設計を行える。そこで、依頼時に私が検図を行う際には3DCAD の利用に関する一般的なアドバイスやパラメーター機能及びCAE 解析等の雑学を交え学生に設計製図の興味を持たせ、必要寸法や簡単な製図法を教えることにした。

ii. 加工の知識を増やす、機器の使用法を理解する

依頼時に、簡単な加工であれば自作を進めるようにした。簡単なアドバイスや安全に注意したうえで、できる限り自作することで、加工に興味を持ってもらうよう促した。

iii. コミュニケーション能力を鍛える

加工時に手取り足取り段取りを教えることはせず、安全に考慮したうえで極力自ら考えさせ作業をさせた。その際に、どこがどのように分からないかを自ら考えさせ、具体的な質問を引き出した。また、依頼時に寸法の記載漏れや三角法を無視した図面により製作者の意図が読み取れない場合も、最初はこちらからピンポイントな質問はせずにできるだけ学生に説明をさせた。

4. 成果

以前のように検図による図面の修正のみを行っていた場合と比較して、3DCAD の手ほどきを交えたアドバイスを行ったほうが学生は興味を持って設計製図に関するアドバイスを吸収した。また、なぜそ

の寸法が必要なのかを加工時及び使用時を例にあげて説明したため、学生の頭に深く残り、次回以降の図面に反映された。

加工の体験により、製作が不可能な形状の依頼も減り、効果があった。設計製図能力及び加工知識の向上により、依頼時のプレゼンテーション能力の向上も見られた。

以前は年に1回、工場使用者に対して講習会を行っていたが、コロナ禍で2年連続中止になっており、工場使用に関する基礎能力が不十分な学生が多かったが、最低限の教育は確保できた。また、修士及び博士の学生が、新しく研究室に配属された後輩達を自発的に工場に連れてきて、使用法をレクチャーする姿も見られ、学生間の後進育成に一役買えたと感じた。

5. まとめ

工場を利用する学生の諸問題はほぼ解決されたが、工場を利用しない他の理学部の学生への設計やものづくり等の教育教材を作成しHP 上にアップする等幅広い活動も今後は検討したい。

また学生に対してデモ的に利用したCAE 解析だが、筆者自身の業務にも応用できるように自分自身、もっと深く研鑽したい。更に、自分が得た知識を暗黙知化してしまわないように、形式知化しナレッジベースを構築して、後進の育成も意識していきたい。

設計は単純に図面を作成することではなく、工程設計、信頼性設計、損傷許容設計及び熱設計等、研究、開発及び民間での業務などにも深く密接してくる。エンジニアリングチェーンの上流に位置することもあり、設計力を強化することはフロントローディングによるエンジニアリングチェーンの強化につながり、業務の効率化にもつながる。

生産年齢人口の減少による働き方改革や業務効率化といった日本全体での課題や、設計力強化や高度な専門人材の育成なども求められており、筆者の所属する工場自体の改善のみならず、学生たちが社会に出ていった際の活躍に当工場の活動が一役買えたら幸いである。

装置製作を通しての新人育成

○渡邊 雄亮、後藤 伸太郎、足立 勇太、坂井 優斗、中木村 雅史

名古屋大学全学技術センター装置開発技術系

1. はじめに

主に実験装置の製作や機械工作実習を行う本技術系では、業務を行うにあたり装置設計のスキルや機械部品加工の実能力が求められる。採用初年度の研修として、これらの基本技能を習得することを目的とした新人育成研修を実施した。本研修は、次の2部で構成した。

①装置の設計から製作に関わるモノづくり技術について一通りの実技講習

②実践的な装置製作

②の装置製作では、研究者と打ち合わせを実施し要望を聞き取り、構造案については新人が考え提案する流れで実施した。OJT 形式の製作を通して、①で習得したモノづくり技術の実践と、研究者の要望を具体的な形にしていく提案型の装置製作を経験できた。本稿では、①と②の具体的な内容について報告する。

2. 研修項目と日程

研修の前半で実技講習を実施し、後半にかけてOJT 形式で進める装置製作を実施した。

表1 研修項目と日程

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
3DCAD(SOLIDWORKS)									
切削加工(旋盤)									
切削加工(フライス盤)									
熱処理&研削加工									
TIG溶接									
ワイヤ放電加工									
装置課題OJT									

3. 装置製作に関わる実技の習得

各実技については、技術系内での加工講習受講と工具類の製作を通して習得した。

3-1 SOLIDWORKS での 3D モデリング

スケッチ→押し出し操作で部品の 3D 形状を作る基本的な操作をはじめ、回転形状スケッチ、ロフト、スイープ、多数の繰り返し形状、アセンブリ操作、3D モデルから分解図、2D 部品図面作成等、実用的なコマンドについて習得した。製作する工具類を題材としてモデリング練習を行なった。

3-2 旋盤加工

タップハンドル(図1)を題材として旋盤加工を実施した。部品製作を通し旋盤での外形、穴あけ、面取り、ローレット加工等、一通り基本的な加工操作を習得することができた。

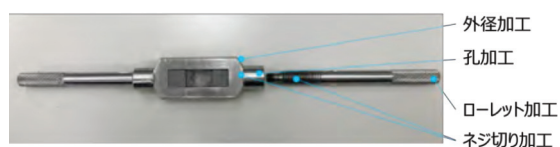


図1 製作したタップハンドル

3-3 フライス加工

平行プレートを題材としてフライス加工を実施した。コンタマシンの切断した S55C 板(図2,3)を4面切削し(図4)、熱処理前の直方体形状に仕上げた(図5)。

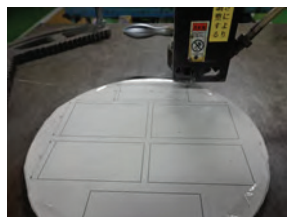


図2 材料カット



図3 カット後の材料



図4 フライス加工

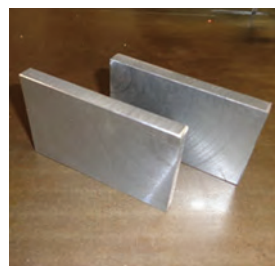


図5 フライス加工後

3-4 熱処理

平行プレートを題材として熱処理を実施した。熱処理条件について、テストピースでの試行の結果、水焼き入れだと割れが発生したが、油焼き入れであれば割れが発生しなかったため、850℃で油焼き入れを行った(図6,7)。焼き入れ後 200℃で空冷焼き戻しを施した。顕微鏡での組織観察および、硬さ試験は実施しなかったが、鋸刃が立たなくなったことから硬度の向上は確認できた。

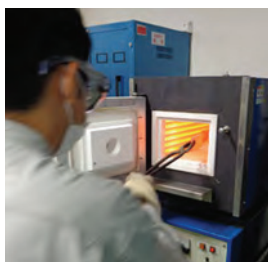


図 6 熱処理炉



図 7 熱処理前後比較

3-5 研削加工

平行プレートを題材として研削加工を実施した。熱処理後のワークは、表面が酸化し歪も生じていたが、平面研削盤での加工により狙いの寸法に仕上げた(図 8,9)。砥石のドレッシング操作から荒研削・仕上げ研削まで、製作を通して一通り習得することができた。浸透探傷法で割れがないことを確認後(図 10)、3D プリンタで製作した専用ケースに収め完成とした(図 11)。



図 8 厚さ方向の研削



図 9 高さ方向の研削

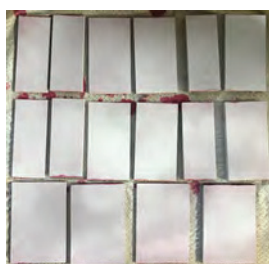


図 10 割れ検査

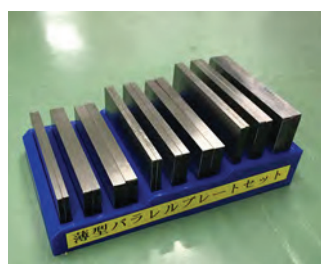


図 11 完成品

3-6 TIG 溶接

「アーク溶接等の業務に係る特別教育」を受講後、突き合わせ溶接(図 12)と肉盛り溶接練習(図 13)を行った。溶接練習後、デスク棚を題材とした TIG 溶接を実施した。デスク棚はステンレス角パイプ材の溶接で構成し、底部高さ調整用、サイドパネル取り付け用の埋め込みナットを溶接する構造とした(図 14)。製作を通して TIG 溶接の基本操作を習得した。



図 12 突き合わせ溶接練習



図 13 肉盛り溶接練習

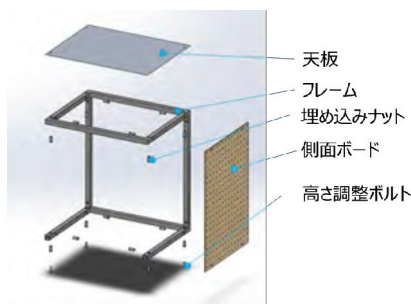


図 14 デスク棚 3D モデル



図 15 溶接部



図 16 棚完成品

3-7 ワイヤ放電加工

テストカットサンプルの作成を題材とした、先輩職員によるワイヤ放電加工の講習会を受講した。くりぬいた穴が製品側となるダイ加工(図 17)、くりぬいたものが製品となるパンチ加工(図 18)、テーパ孔加工、上下異形状加工、開形状加工について、それぞれ加工練習を実施し、基本的なワイヤ放電加工操作を習得した。

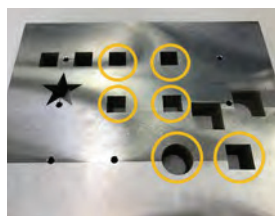


図 17 ダイ加工



図 18 パンチ加工と開形状

4. 装置の設計製作

装置設計では、最初に研究者との打ち合わせを実施し、装置概要と要望について聞き取りを行った。製作する装置は、回転物の回転速度ムラを吸収(図 19)するための振り子式動吸振器で、設計に対する要望は、理論式に近い特性を得るため、振り子回転軸の摩擦モーメントを低減し滑らかに回転することであった。

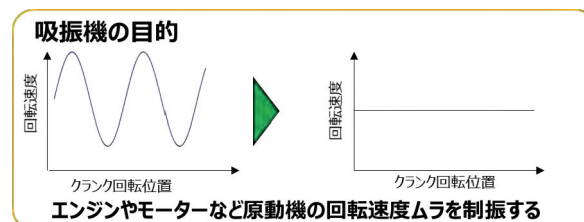


図 19 吸振機の目的

軸はボールベアリングを用い支持するシンプルな構造として設計した(図 20)。実際の装置製作の前に、使用するボールベアリング選定用に軸のみのテスト機を製作した(図 21,22)。

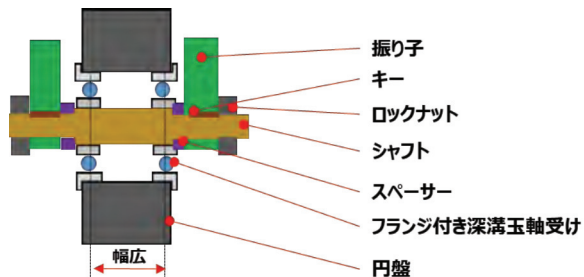


図 20 軸構造

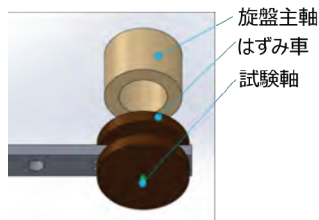


図 21 テスト用軸モデル



図 22 回転テスト

軸にはずみ車を取り付け、旋盤主軸を使い一定回転数からの停止時間を測ることで摩擦モーメントを比較した。特性確認の結果、シール無しのオープン形状の摩擦トルクが最も低かった(図 23)。

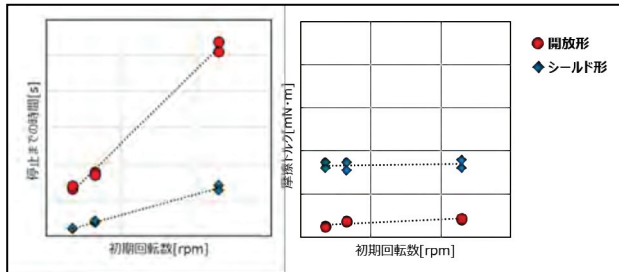


図 23 試作機での回転特性実験結果

シール内に封入されたグリス攪拌による摩擦損失が無いと考えられた。実験室内での使用に限られるため、低摩擦を優先しオープン形状のボールベアリングを採用した。使用する軸受けを組み込んだ装置全体の 3D モデルを作成し(図 24)、干渉等が無く成立していることを確認してから製作に移り完成させた(図 25)。

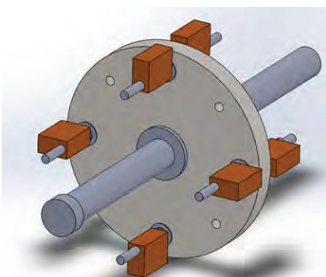


図 24 装置 3D モデル



図 25 完成後の装置

5. おわりに

新人育成研修を通して装置製作に関わる基本的な知識と加工技術を習得することができた。また OJT 形式の装置製作を経験することで、研究者の要望を聞き取る場所から始める一連の装置製作を経験することができた。今後の装置製作においても目的を理解した上で、作り手側からも選択肢を増やす提案ができるよう取り組みたい。

研修企画をはじめ、各種工作機械の使い方講習、OJT 形式の装置製作において設計の助言等、多くのサポートを頂きました。機械システム工学専攻井上研究室並びに本研修関係者の皆様に感謝いたします。

電子ビーム露光によるポジ型レジストの現像温度と最適露光量の関係

田村 茂雄

東京工業大学 オープンファシリティセンター マイクロプロセス部門

1. はじめに

電子ビーム直接露光による極微細加工技術は、微細性に優れ、パターンジェネレーション機能による任意のパターン設計が可能である。この技術は、ナノテクノロジーを駆使した少量多品種のパターンが必要なデバイス研究にとり、非常に有効なパターン作製法である。電子ビーム露光では、パターンの微細化の要求から高加速電圧化が進められている。しかし、加速電圧が高くなるとレジストへのウェハからの後方散乱の影響が低減されることにより実効的な露光感度が低下する。露光装置の加速電圧を 50 kV から 100 kV に上げるにより実質的に解像に必要な露光量が約 2 倍になる。

今回、加速電圧 100 kV の電子ビーム露光においてポジ型レジストのパターン形成に必要な露光量を低下させるため現像温度に着目し、現像温度を 35℃ に上げるにより露光量を 1/2 以下に低減できたので報告する。

2. 電子ビーム露光

電子ビーム露光装置は、JBX-6300SJ を使用した。電子銃は加速電圧 25/50/100 kV で切り替え可能なサーマルフィールドエミッション型を使用している。ビーム形状はポイントビームでビーム電流値は 30 pA～20 nA、最小ビーム ≤ 2.9 nm (100kV 高分解能描画モード) が得られる。今回の実験では加速電圧 100 kV 高分解能描画モードを使用した。電子ビーム走査ステップ 6 nm を使用し、ビーム電流 200 pA、フィールドサイズ 62.5×62.5 μm^2 、最小走査ステップ 0.125 nm である。

フィールド内は、ステージ移動せず、ビームスキヤンナーで電子ビームを偏向する。フィールドサイズ以上のパターンは、試料ステージを移動することにより露光する。例えば 500×500 μm^2 のパターンの露光では、高分解能描画モードでは、64 分轄されフィールド毎にステージが移動する。そのため、高分解能描画モードでは、ビーム電流を大きくしても露光時間は、ビーム電流でなく、ステージ移動時間に律速される。

3. レジスト

電子ビーム露光用レジストは、高解像度、高感度、環境に対する安定性等が要求されている。

従来は、高解像性をもつ PMMA が使用されてきた。PMMA の電子ビーム露光と処理のメカニズムはよく理解されており、多くのプロセス使用法が開発されている。現像プロセスとしては超音波攪拌や低温現像などの処理技術により PMMA を用いて 10 nm の分解能のパターニングが可能となっている。しかし、PMMA は比較的感度が低く、エッチング耐性も低いため、微細で高密度なナノ構造の大規模パターンを直接形成する必要がある PMMA に代わるポジ型レジストとして、今回使用したポジ型レジストである ZEP520A (a-chloromethacrylate と a-methylstyrene の 1:1 共重合体) がある。これは、高感度で安定した耐久性のあるレジストとして開発されたものである。ZEP520A では側鎖が PMMA と比較して、塩素原子とフェニル基で置換されている。ZEP520A(日本ゼオン製)は、高解像度と高感度を併せ持つレジストであり微細加工プロセスに多く用いられている。

4. 感度特性の現像温度依存性

露光試料は Si ウェハに ZEP520A を 670 nm スピンコーティングした後、恒温槽で 170 °C 20 分プリバークし作製した。電子ビーム露光はビーム電流 200 pA、ビーム走査ステップ 6 nm、露光量は 50～295 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ まで 5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ステップで変化させた。露光パターンは 5×100 μm^2 の矩形とした。現像温度は 23, 30, 35 °C と変化させ、キシレンで 60 秒、リンスはイソプロピルアルコールで 15 秒おこない、ドライ窒素で乾燥した。膜厚は、触針式プロファイラ TENCOR P-7 で測定した。現像温度による感度変化を図 1 に示す。現像温度 30, 35 °C では 50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以下でも露光されていることが予想できるが、これは電子ビーム露光装置の偏向速度が最大 12 MHz であり 50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以下では偏向速度が追従しないため露光できなかった。50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ では走査速度 11.11 MHz であり、露光装置の限界となる。装置のもつ走査速度に

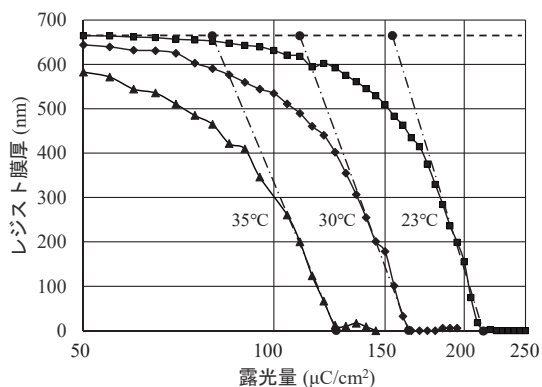


図 1 現像温度と露光感度の関係

追従させるためには、ビーム電流を下げるか走査ステップを大きくとるしかない。現像温度と露光感度、 γ 値の関係を表 1 に示す。現像温度が高温になるに従い解像に必要な露光量が低下し、高感度となった。感度曲線のコントラスト γ 値が高いほどレジストの解像度は高くなる。 γ 値は図 1 の感度特性の傾きから求めた。現像温度が高くなるに従い γ 値は低下した。

表 1 現像温度と感度, γ 値

現像温度(°C)	露光感度($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	γ 値
23	215	7.0
30	165	5.7
35	125	5.2

5. グレーティングパターンのライン幅と現像温度の関係

露光試料は Si ウェハに ZEP520A を約 200 nm スピンコーティングした後、恒温槽で 170°C20 分プリベークし作製した。電子ビーム露光はビーム電流 200 pA、露光量は 50~540 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ まで 10 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ステップで変化させた。グレーティングパターンは設計値を周期 100 nm 幅 30 nm とした。現像温度は 23, 30, 35 °C 変化させキシレンで 30 秒、リンスはイソプロピルアルコールで 15 秒おこない、ドライ室素で乾燥した。現像後の試料はチャージアップ防止のため Os を 5 nm コーティングし、電子顕微鏡 S-5200 で観察した。パターン幅が設計値とほぼ等しくなる露光量を適正值とした。電子顕微鏡写真を図 2~4 に、現像温度による露光量とライン幅の関係を図 5 に示す。現像温度 23 °C で 260 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であったが温度を上げるとともに露光量が低下し 35 °C では 110 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ で露光可能となった。

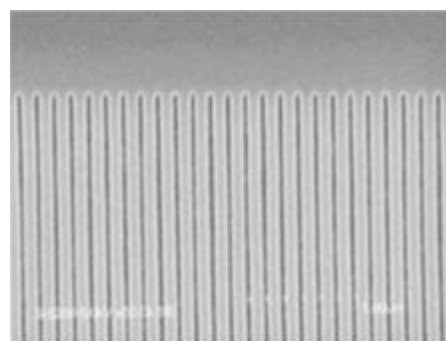


図 2 現像温度 23 °C 260 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

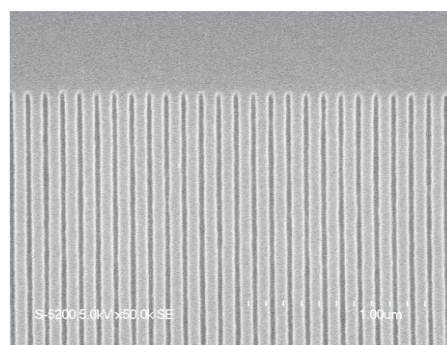


図 3 現像温度 30 °C 150 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

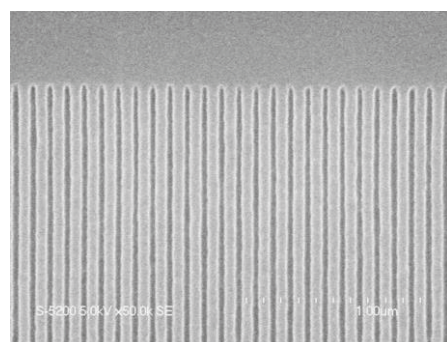


図 4 現像温度 35 °C 110 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

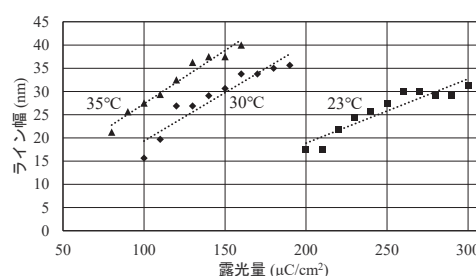


図 5 周期 100 nm グレーティングのライン幅と現像温度の関係

6. まとめ

ポジ型レジストにおいて現像温度と最適な露光量の関係を求めた。現像温度を 23 °C から 35 °C に上げることによりパターン解像に必要な露光量が低下することを確認した。周期 100 nm のグレーティングでは露光量が 260 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ から 110 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ に低下し高感度化が確認できた。この値は加速電圧 50 kV における露光量に近い。

電磁界解析を用いたマイクロ波ノッチフィルターの製作

清水 貴史^{A)}、岡田 光司^{A)}、小林 策治^{A)}、西浦 正樹^{B),C)}

^{A)} 核融合科学研究所 技術部、^{B)} 核融合科学研究所 ヘリカル研究部

^{C)} 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

1. はじめに

本研究所では、大型ヘリカル装置 (LHD) において核融合プラズマに関する基礎研究を行っている。LHD は、プラズマを閉じ込める実験装置で、プラズマの状態を計測する、多くの計測機器が LHD に取り付けられている。それらの計測機器の中には、プラズマを加熱するために用いられるマイクロ波の影響を受けるものがある。このマイクロ波は非常に強力で、計測機器に入ってしまうと機器を壊してしまう恐れがあるため、マイクロ波を減衰させる必要がある。そこで、図 1 に示すノッチフィルターと呼ばれるものを使用することでマイクロ波を減衰させ、計測機器を守ることができる。

本事例は、このノッチフィルターの製作依頼に対して、電磁界解析を用いて設計・製作を行ったので報告する。



図 1 ノッチフィルター

2. 性能要求

製作するにあたって要求される性能は、76.95 GHz のマイクロ波を 40 dB 減衰させ、尚且つ 50GHz~75 GHz は減衰させずに通過することである。76.95 GHz という周波数は、LHD に使用される加熱装置 (電子サイクロトロン共鳴加熱) のうちのひとつが 76.95 GHz という周波数のためである。また、50 GHz~75 GHz の帯域はプラズマを計測するために使用するので、減衰させずに通過する必要がある。製作する個数は、全部で 9 個である。

3. 電磁界解析

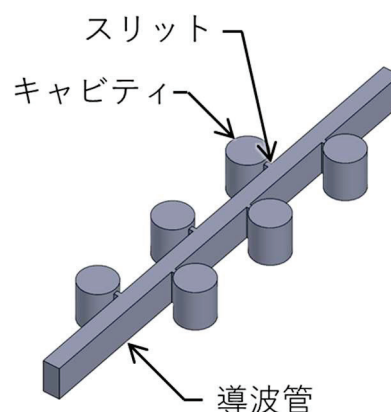


図 2 内部空間形状の 3D モデル

図 2 にノッチフィルターの内部空間形状を示す。導波管と呼ばれる矩形の断面を持つ通路と、円筒状のキャビティと、それらを繋ぐ細い通路のスリットから構成されている。キャビティや導波管の形状、キャビティのピッチは、理論式に基づいて設計をしている。しかし、それだけではスリット部や材料の影響を計算出来ていないため、実際に製作しても理論式通りの性能にはならない。そこで、電磁界解析を活用してスリット部などの影響を、より現実に近くシミュレーションすることで改善点を見つけることが出来る。スリット部やキャビティの大きさを変えてシミュレーションを行い、それぞれの形状がどのように性能に影響するか、その傾向を調べることで最適な形状を作っていく。解析を繰り返し、要求された性能を満足する内部空間形状を設計する。

電磁界解析は、ANSYS HFSS (以下 HFSS) を使用している。HFSS は、本事例のような高周波のマイクロ波解析において高い精度を持ち、自動でメッシュの最適化を行う点など、取り扱い易い解析ツールである。HFSS では、マイクロ波を伝送する空間を 3D ソリッドモデル化して解析を行う。ソリッドモデルの作成は HFSS 上でも可能であるが、機能やモデルの作成しやすさから、3D CAD ソフトは SOLID WORKS を使用した。解析条件として、マイクロ波の入射ポート、材料特性の設定を行い、計算を実行すると図 3 に示す周波数特性や図 4 に示す電界密度

分布といった解析結果が確認できる。これらの結果を参考にソリッドモデルを修正して解析を繰り返すことで周波数特性の改善を行った。その結果を図 3 (改善後) に示す。

これまで、ノッチフィルターなどのマイクロ波部品は、導電率の高さから材料に銅を使用していたが、アルミ (A5052) での解析結果においても性能に大きな影響はなかった。そのため、複数個を設置する本事例では、軽量なアルミを使用することにした

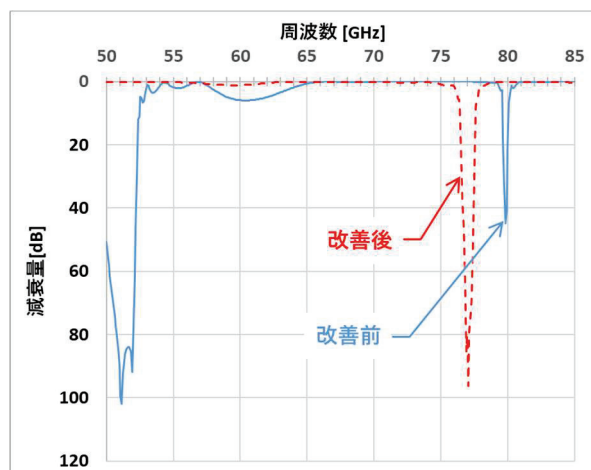


図 3 解析による周波数特性グラフ

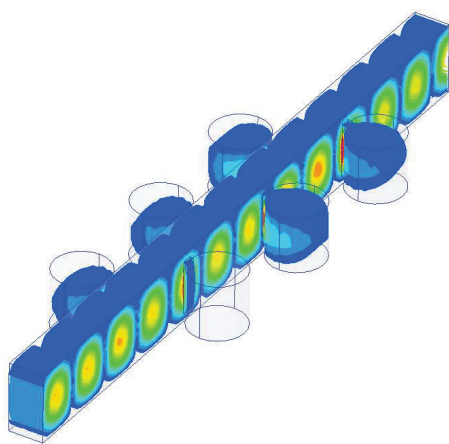


図 4 解析による電界密度分布

4. 設計

HFSS による解析で求めた内部空間の形状を金属加工で再現するため、2 分割構造として設計を行った。設計したソリッドモデルを図 5 に示す。上下のブロックを合わせることで内部形状を作っているが、2 つのブロックを組み立てる際に正確な位置決めが必要となる。そのため、2 本の位置決めピンを配置し、ずれが発生しないようにした。また、2 つのブ

ックの固定用ネジは分割面を確実に密着させるためネジの本数を多くしている。

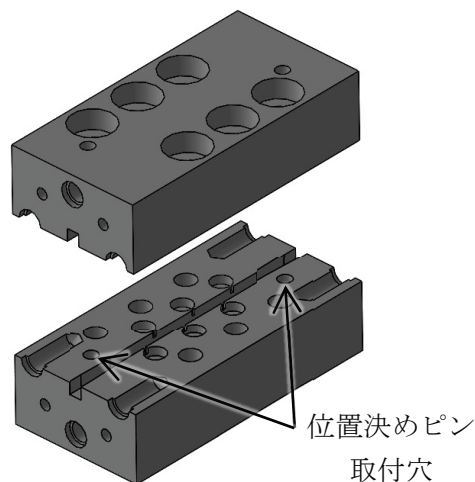


図 5 3D CAD による設計

5. 製作

図 1 に示したものが、製作したノッチフィルターである。加工は、マシニングセンターで行った。内部空間にあたる箇所の切削は、マイクロ波フィルターとしての性能に大きく影響するため、寸法精度が重要となる。解析にて内部形状を検討した際、10 μm の形状変更で性能に影響が見られたので、可能な限り設計値に近づけるよう加工を行った。まず、最終的な製品と同じ加工プログラムにて、内部空間にあたる箇所をテスト加工し、寸法測定を行う。次に、設計値との差分を加工プログラム上で補正することで寸法精度を高めた。寸法測定は、ノギスやマイクロメーターで行うことが困難な形状なため、画像寸法測定器を使用している。この測定器は非接触で、なおかつ数 μm の精度で測定することが出来るので、本事例のような加工品に有効である。

6. 性能試験の結果

製作したノッチフィルターは、本研究所にあるベクトルネットワークアナライザー (以下 VNA) によって性能試験を行う。VNA は、220 GHz までの周波数において減衰量の測定が可能であり、本事例の場合は、性能要求に合わせて 50 GHz~85 GHz における減衰特性を測定し、評価した。その結果を図 6 に示す。50 GHz~75 GHz の間は、約 3 dB の減衰に抑えられており、76.95 GHz では約 55 dB の減衰が確認できたので、要求された性能を満足していると評価した。しかしながら、要求された 9 個を製作した場合、加工精度のばらつきにより減衰特性の要求を

満足できない可能性がある。そこで、図 6 のグラフに示す、減衰している周波数（センター76.8 GHz）を 76.95 GHz へ移動させて、残りの個数を加工する。具体的には、キャビティの加工深さ（円筒の長さ）を変えることで減衰する周波数を移動させる。この方法は、電磁界解析の検討時に結果を確認しており、変更する加工寸法も解析によって決定している。こうした調整を行い、製作した 9 個の性能グラフを図 7 に示す。個々のばらつきは生じているが、76.95 GHz 付近に減衰を移動出来ており、すべての製品で要求された性能は満足していることがわかる。

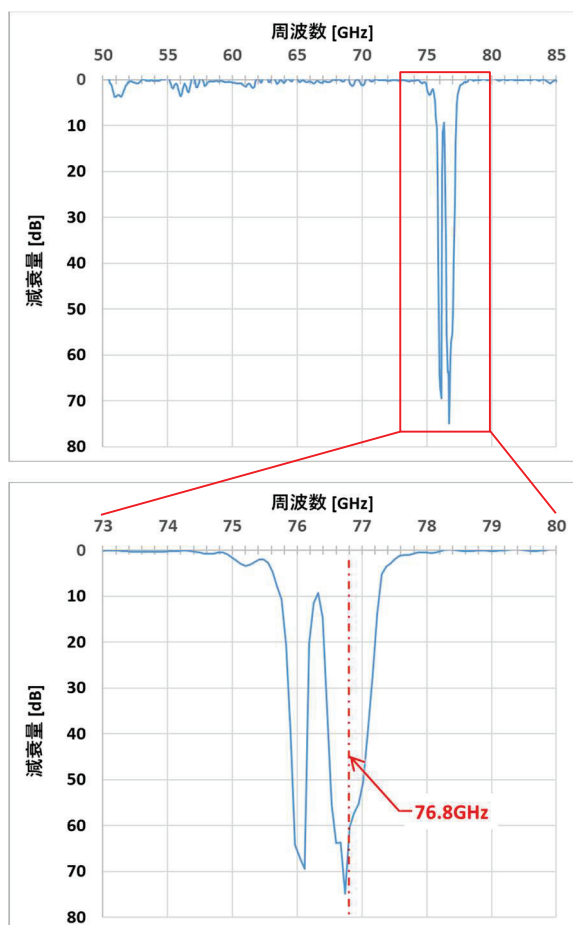


図 6 試作品一周波数特性グラフ

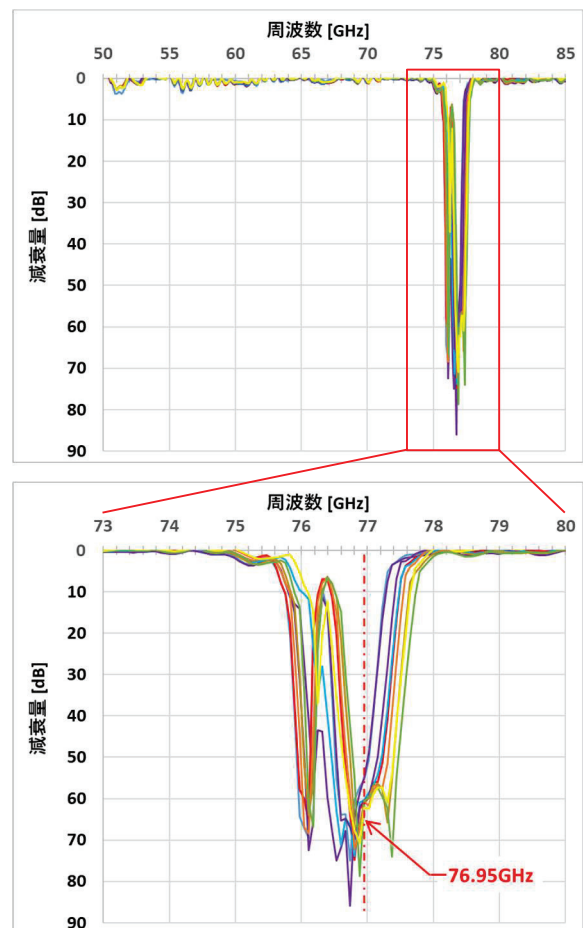


図 7 製品一周波数特性グラフ

実績からも、試作は 1 回程度で済むことが多く、今回のように試作品の性能が良く、そのまま製品となる場合もある。また、機械加工に加えて画像寸法測定器やベクトルネットワークアナライザなどの測定器により、製作品の評価を迅速に行うことが可能となり、加工精度や性能の改善に活用できた。

7. まとめ

本事例では、マイクロ波部品であるノッチフィルターの電磁界解析を用いた設計から加工・性能評価までを行い、要求された性能のものを製作することが出来た。ノッチフィルターの設計は、理論式だけで行うことも可能であるが、試作品の性能が良いことは稀で、トライ&エラーを繰り返す必要がある。しかし、解析を用いたことで試作品の数を大幅に減らすことできた。過去のノッチフィルター製作

スキュー六極電磁石の形状測定および微調整再組上げ

○荒木 栄^{A)}、 阿部 優樹^{B)}、 植田 猛^{A)}、 大澤 康伸^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設、 ^{B)}総合研究大学院大学

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の先端加速器試験施設(ATF、図1)では、1.3 GeVに加速した電子ビームをダンピングリングにて高品質な低エミッタンスビーム[1,2]にする。これを用いて、国際リニアコライダー(ILC)において必要とされるナノメートルビームの技術開発を最終収束システム試験ビームライン(ATF2)により進めている。ILCでの衝突ビームサイズ7 nm(垂直方向)に対応する極小ビーム(目標垂直ビームサイズ37 nm)の実現ならびにナノメートルレベルでのビーム位置制御の技術開発が目標である。現在は垂直方向41 nmを達成しており、高速位置補正技術でビーム位置安定化を進めている。[3, 4]。

加速器のビームラインはビーム光学系に基づき、加速空洞や電磁石などが配置されている。粒子の振動を抑えつつ、電子ビームを目標サイズに絞るためには、電磁石など装置を所定の位置に整列させる必要がある。その設置精度の許容値は標準偏差(1σ)およそ0.1mm以下で規定されている。さらに精密な軌道調整が要求されているATF2では、主要の電磁石にはベース架台に遠隔操作でミクロン単位的位置調整機構(精密ムーバ)が組み込まれている。開発したムーバ架台の多くはProgrammable Logic Controller(PLC)でパルスモータを駆動して位置制御をしている[5, 6]。精密ムーバによりビーム運転中のビーム応答を基にしたアライメント(Beam Based Alignment: BBA)が可能になっている。四極電磁石23台、六極電磁石4台、八極電磁石2台に続き、近年スキュー六極電磁石4台もBBAが可能になった[7]。スキュー六極電磁石は、二次の dispersion などの非線形ビーム光学系の補正を行い、極小ビームに絞り込むために重要な役目を果たす。再利用した電磁石には想定以上の精度が求められ、再組み上げて誤差を小さくする努力をした。追加工は行わず、三次元測定、磁場測定結果から一定の効果があつたので報告する。

2. スキュー六極電磁石

スキュー六極電磁石は、ビーム光学設計には当初

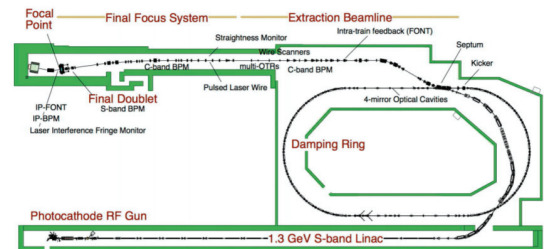


図1 ATF 加速器のレイアウト図

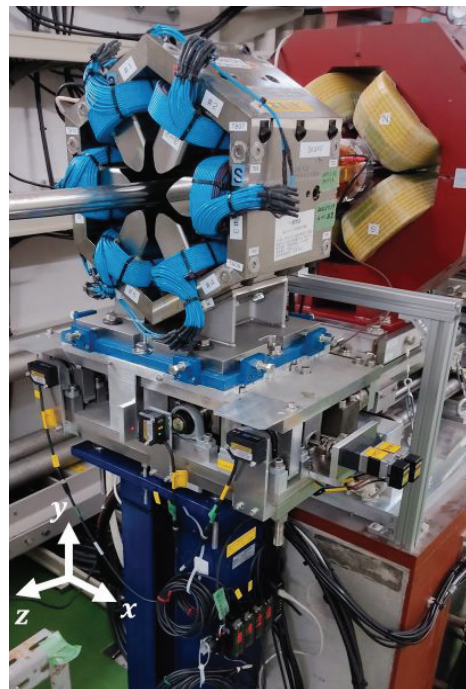


図2 ビームライン設置のスキュー六極電磁石

組み込まれていない、後から追加設置した空冷の電磁石である。非線形の色収差など調整するための補正用電磁石で、別の加速器からの流用で磁極およびコイルをATF2用に交換して再利用した。本来、電磁石性能は磁場測定などで性能を評価してからビームラインに組み込むが、補助的な補正用電磁石であり時間的余裕もなく性能評価せずに試験導入のまま使用していた。本体(図2)は鉄材の削り出しで、ヨーク部分と磁極からなるT型パーツの6回対称の構造体で、青色のコイルが磁極に巻かれている。近年の精密なビーム位置制御技術においては補正が重要である。必要な電磁石として性能の不鮮明さが浮き彫りになった。

3. 磁極形状測定

初期の組み立て時は、中央部の対向する磁極間距離が設計になるように組み上げたものである。ビームラインに組み込まれた状態では測定は困難であり、性能評価のため、2021年夏にビームラインから取り出して可搬型三次元測定器：Faro ARM (Fusion 10 fit)[8]で形状を測定した。測定点全体で3Dモデルとfittingすると誤差が全体に平均化されるため、一つのT型パーツを基準として、磁極間の位置ズレなどを割り出した。測定精度は3D位置精度で0.1 mm程度で、その一例を図3に示す。対向する磁極が並行にズレている部分（最大差で2 mm程のズレ）があり、磁極全体的には回転しているような状態、また外周の六辺の対角距離が0.2 mm程度ばらついていることも判明した

4. 問題点と対策案

形状測定の結果は多かれ少なかれ、組み上げ精度が悪いことが判明した。部品の作り直しや再加工は、部材手配など時間的余裕がなく、組み上げの精度を高めて対応する方針とした。具体的には二つの方法を取った。

- ・T型を高精度で組み上げる、外側リターンヨークの $\phi 13$ mm（以下、特に表記がなければ単位はミリメートルとする。）にM12ボルト2本で締結している部分。

- ・外周の六角形、組み付け面をM10ボルト3本ずつで斜めに締結している（正六角形が変形）部分。

対策としてまず、前者のT型の組み上げ精度を高めるためにM12ボルトの首下 $L=8$ を $\phi 13.0(-0.05/+0.15)$ で製作した。接合部の隙間をなくしたM12特殊ボルトにより、以前の0.5 mmの隙間から0.15 mm程度までT型の精度を高めることはできた。しかし、外周の正六角形が保てなければ、誤差がそのまま磁極位置に影響するため思った程効果が出なかった。

後者の組み付け面の穴は製作図では $\phi 10.5$ であるが、現物の精度はおおよそ $\phi 10.0$ で高精度の締結できる加工穴であった（図4,5）。しかし、設計通りの正六角形に組み付けることは困難であった。ビームラインに組み込む時には、必ず斜めに分割して戻す、半割作業が伴うのでズレが生じやすい。

5. スキュー六極電磁石の再組み付け

電磁石の磁場精度に影響する望ましくない誤差磁場があると、軌道誤差が生じてしまう。磁場誤差が補正磁石の能力以内であることが求められている。

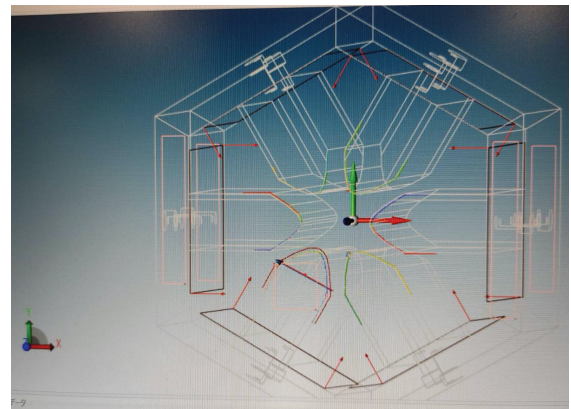


図3 電磁石(SK1)の三次元測定結果

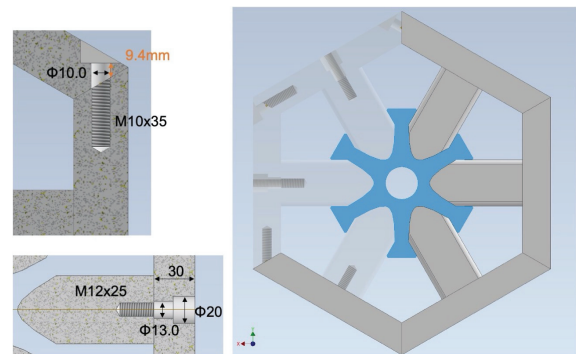


図4 磁極とヨーク形状



図5 M12 特殊ボルト

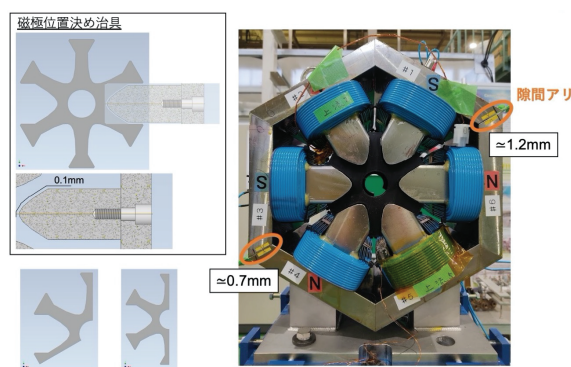


図6 磁極位置決め治具と組み立て

中央部の磁極位置を正確に導くために、熱溶解積層方式(FDM)3Dプリンターで作成した磁極位置決め治具（素材：PLA、 $t=20$ 、隙間は0.1~0.3）を表裏2枚、挟み混んで組み立てることにした（図6）。外周ヨーク接合が変形しているため、磁極を治具に合わせ込むと、T型を3個分組み上げた半断面の間に

1 mm 程隙間が生じてしまった。次の対策としてヨークの組み付けに使用している M10 の全ねじキャップボルトも首下のある物に変更した、ただし、手持ちの市販品の首下直径は、製造ロットにより $\phi D_s = 9.95$ 前後でばらつきがあり、高い精度のリーマボルトを入手して組み付けた。実測値（マイクロメータ）は、 $\phi D_{g6} = 9.98$ で組み付けの隙間は無く窮屈であった。それでも正六角形に外周ヨークを組み上げることは難しく、磁石の加工精度レベル以上なので、磁極位置決治具を治めるためには、一部 M12 特注ボルトをやめて通常のボルトに変えて微調整する必要があった。位置決め治具が、はまる状態で電磁石の半割再現性を確認して再組み立てを終了した。

6. 磁場測定

スキュー六極電磁石のセンターのボア系 $\phi 60$ 、磁極長：200 mm である。機構内電磁石グループのコイル長：600 mm (long)、200 mm (short)の磁場測定機を使用して磁場中心における磁場強度や多重極成分、二極成分の電流依存など磁場測定データを取得した（図 7）。磁場測定の結果、50 μm 程度の半割再現性は確認できた。また、電流依存性の不要な二極成分があることを確認した。これは磁極の位置ズレが大きく影響していると考えられる。三次元形状測定結果を基に磁極位置の誤差を反映させて、有限要素解析ソフトウェア：OPERA[9]を使用して電磁気システムのシミュレーションで検証してみた。図 8 に示すように磁極のズレが主要因である結果が得られた。

磁極の位置ズレが小さくなるように再組上げ後、二極成分が減少していることを再び磁場測定で確認した。なお、半割の作業復元時の締め付けトルクで変化するが、トルク管理により再現性があることも確認できた（図 9）。

7. スキュー六極電磁石の BBA 結果

再組上げで電磁石の誤差磁場が以前より減少したので、ビームラインに再設置して、ビーム運転で活用した。BBA 測定方法は、先ず電流を 0A にセットして、ムーバポジションを縦横位置の原点にセット、スキュー六極電磁石を縦または横に ± 2 mm ほど移動させて、電流をプラス、マイナスに電磁場を変化させた際の電子ビーム軌道データを取得する。一例として SK4 のデータを図 10 に示す。縦軸は、軌道変化量を基に各電磁石地点での軌道変化量（キック角）を算出、横軸はムーバ位置である。図 11 にビームラインの各磁石の位置、表 1 に BBA 測定結果を

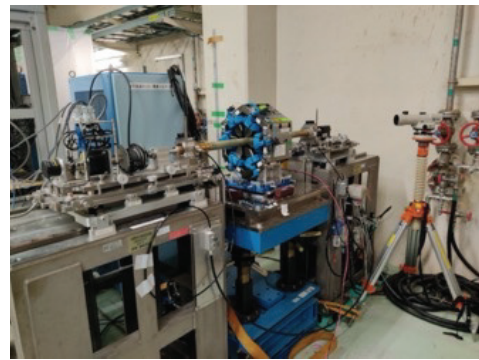


図 7 電磁石磁場測定の作業風景

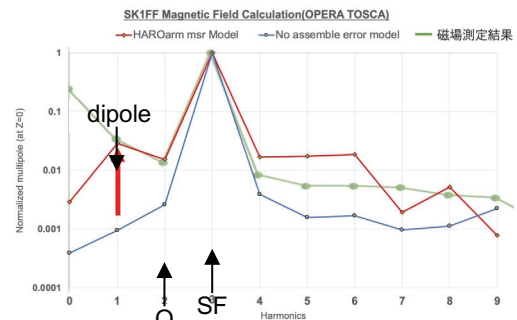
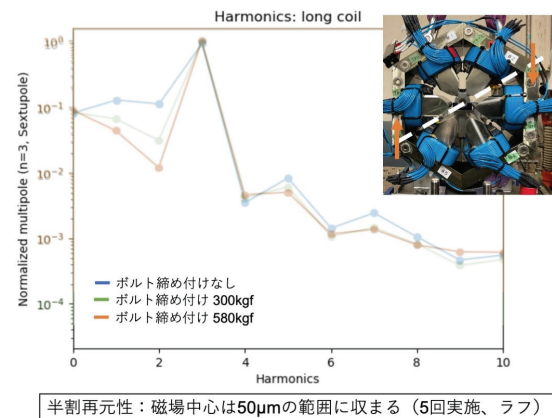


図 8 多重極成分の OPERA のシミュレーション結果。設計値（青）に対して位置ズレがある場合（赤）と磁場測定結果（緑）の比較。共に二極成分が増えることを確認（赤矢印）



半割再現性：磁場中心は50 μm の範囲に収まる（5回実施、ラフ）

図 9 各締め付けトルク時の多重極成分の変化

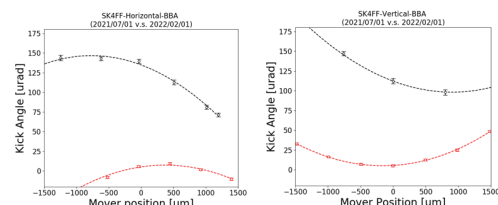


図 10 スキュー電磁石（SK4）の BBA 測定結果
改修前（黒）より改修後（赤）キック角が減少

示す。スキュー六極電磁石のダイポール成分から生じるキック角は 100 μrad 以下になり（SK2 は若干大

最終収束ビームライン(FF)

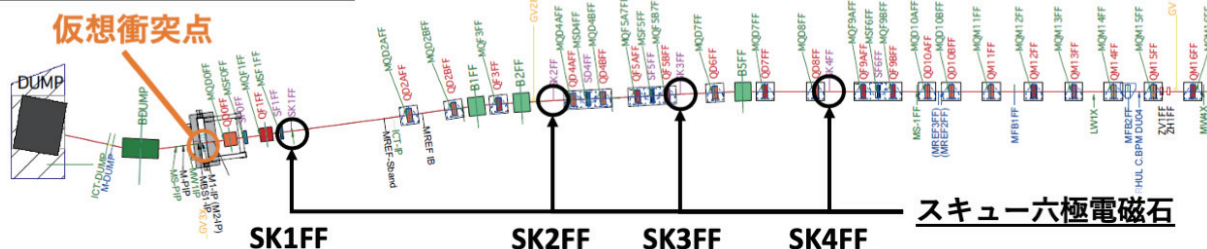


図 11 ビームライン設置のスキュー六極電磁石

表 1 スキュー六極電磁石 BBA 測定結果 (2022.2 月)

Magnet Name	BBA offset Hor.	BBA offset Ver.	Dipole kick Hor.	Dipole kick Ver.
SK1FF	443 μm	-363 μm	78 μrad	51 μrad
SK2FF	251 μm	-46 μm	184 μrad	71 μrad
SK3FF	679 μm	-53 μm	80 μrad	76 μrad
SK4FF	386 μm	-180 μm	8 μrad	5 μrad

きい)、改修前の 1/3~1/10 以下に減少した。BBA offset は、電子ビームセンターからのズレを表すが、ムーバ原点がゼロと等しくないことを示しており、可動域範囲内なので問題にはならない。

8. まとめ

ナノメートルビームの技術開発を進める上で電磁石の精密設置は重要である。前提として電磁石の機械的中心と磁場中心の誤差は考慮して並べる必要がある。多重極磁場によるビームサイズへの影響が考えられるため、非線形光学補正用スキュー六極電磁石の改修を行った。三次元測定により 2 mm 程度の磁極位置のズレが判明した。電磁場シミュレーションと磁場測定から組み上げ精度が悪いと比較的大きい不要な二極成分が発生することが判明した。組み立てに使用するボルトの締結誤差を極力小さくして、組み立て誤差を少なくする調整を進めた。その結果、二極成分によるキック角は、5 μrad ~ 184 μrad に改善した。一部の電磁石は満足する値ではないが、概ね良好な結果が得られたので、現在、ビーム運転で活用して実験を進めている。現状よりも多重極磁場を改善するには、電磁石の作り直しが考えられるが、高額な費用と時間が必要なため、補正磁場を微調整するために更なる追加コイルの検討を進めている。

参考文献

- [1] K. Kubo *et al.*, Phys.Rev.Lett.88,194801(2002).
- [2] Y. Honda *et al.*, Phys.Rev.Lett.92,054802(2004).
- [3] ATF collaborators ” ATF2 Proposal”, KEK Report 2005-2 (2005).
- [4] 照沼信浩他 KEK 先端加速器施設(ATF)におけるナノビーム技術開発 第 18 回日本加速器学会年会プロシーディングス(2021).
- [5] 荒木栄 電磁石精密位置調整ムーバ架台の電動化 総合技術研究会 2017 東京大学報告集 (2017).
- [6] 荒木栄 ATF 加速器電磁石架台(精密ムーバ架台)とモータ制御 総合技術研究会 2019 九州大学報告集 (2019).
- [7] 阿部優樹、荒木栄他 KEK-ATF スキュー六極電磁石への自動位置調整機構の導入とアライメント法の確認 第 18 回日本加速器学会年会プロシーディングス(2021).
- [8] FARO®; <https://www.faro.com/ja-jp/>
- [9] Opera シミュレーション・ソフトウェア; <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/opera/solutions/>

第 2 分野 (装置技術)

ラングミュアプローブを用いたプラズマ計測および実験環境の整備

○中川 翔^{A)}、田上裕之^{A)}、竹内俊貴^{A)}、千村大樹^{A)}、中田実希^{A)}、田窪英法^{A)}、
清水貴史^{A)}、小渕隆^{A)}、林浩己^{A)}、小林策治^{A)}、林祐貴^{B)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 高密度プラズマ物理研究系

1.はじめに

核融合科学研究所（NIFS）の技術部は、大型ヘリカル装置（LHD）におけるプラズマ実験が円滑・安全に遂行されるように、各種構成機器の運転・保守に携わっている。プラズマ実験には、真空装置、加熱装置、電源装置、計測装置などの様々な装置が必要であり、それらを扱うために機械・電気・材料・プラズマ物理などの広範囲の知識や技術が要求される。

今回、若手技術職員がプラズマ実験装置の構成を理解し、それぞれの構成機器の運転方法を身につけることを目的として、小型のプラズマ発生装置（以下、本装置）と周辺装置の整備およびプラズマ生成実験を行った。加えて、ラングミュアプローブによるプラズマ計測を行い、本装置が生成するプラズマの電子温度・密度を調査した。この測定のために、プローブの製作や電源・測定システムの整備、取得したデータの解析作業の必要があり、これらの整備も行った。以上、一連の作業で得られた知見について報告する。

2.装置概要

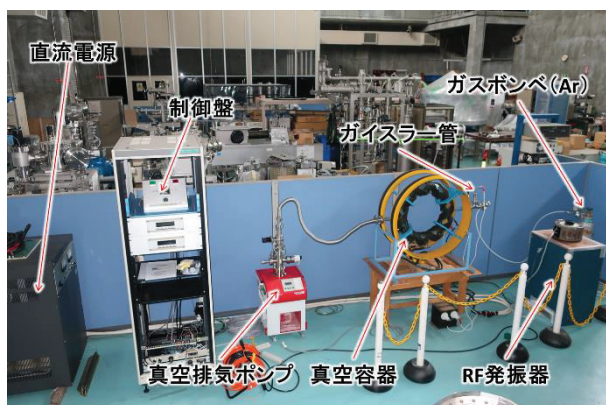


図1 プラズマ発生装置

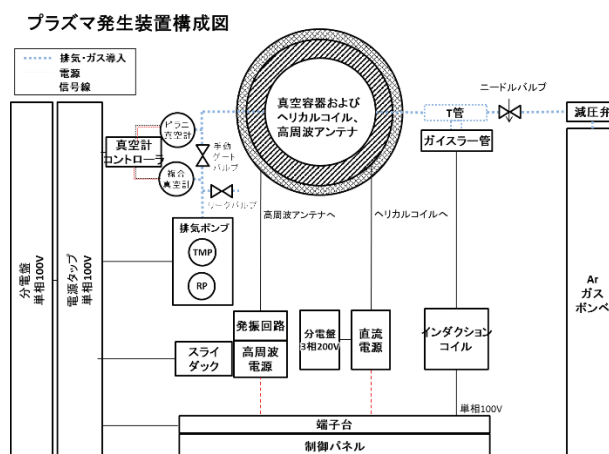


図2 構成概略図

本装置は、1984年 TOKYO ひかり博覧会の展示用の模型として京都大学で作成されたものを、2019年にNIFSに移管し、再構成を行ったものである。

本装置の様子を図1に示す。図1中心付近の黄色いリングの内側にあるものが、本装置の真空容器となる円管状のガラス容器である。その他に、図1の右から、プラズマ生成ガスのボンベ、減圧弁、高周波発信回路、プラズマ点火に必要なガイストラ管、真空容器内を真空引きする排気ポンプ、制御盤、磁場生成のための直流電源で構成される。

構成概略図を図2に示す。点線は真空排気・ガス導入、実線は電源等、破線は制御や計測用の信号線の接続を示している。実験時は、真空容器左のポートから排気を行いながら右のポートに接続したガスボンベからの流量を調整することで、ガスの充填圧力（絶対圧力）を $1 \times 10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa 程度に保つ。ガラス管の周りに巻かれたヘリカルコイルは、直流電源からの電力供給で、閉じ込め磁場を生成する。ガイストラ管の放電によりプラズマを生成した後、プラズマを維持するために、ヘリカルコイルに沿うようにして巻かれたアンテナから高周波を照射し、プラズマを10秒程度維持する。プラズマの生成時間はコイルの加熱によって制限される。これらの機器は図2中央下に示す制御パネルの出力端子に接続され

ており、所定のシーケンスに従って動作する。

3. 各装置の整備とプラズマ点火試験

本装置のガラス製真空容器、制御パネル、加熱装置の一部は既存品を流用し、それ以外は新たに整備した。

真空排気装置は、Pfeiffer 社製の HiCube80Classic を使用した。フレキ管により真空容器と接続し、手動バルブを挟んで上流側と下流側にそれぞれ真空計を取り付けた。ヘリウムリーク試験および排気試験を行い、最高到達圧力は 10^{-4} Pa 程度であることを確認した。直流電源は高砂製作所製のものを使用した。配電盤から直流電源まで 5.5 sq の三相交流出力用ケーブルで接続し、直流電源からコイルまでは 200 sq の直流出力用ケーブルで接続した。なお、直流電源は DC500 A まで出力可能である。コイル単体での通電試験では、制御盤から正常に遠隔動作が可能かを確認した。

また、再利用するものにおいても、老朽化により動作が補償されないことや使用方法に関する情報も限られていることから、各装置で動作確認を行う必要があった。

制御盤では、背面にある各端子から接点の動作を、テスターなどを用いて一つずつ確認した。インダクションコイルは、各所の絶縁を確認し、電極部が欠損していた部分は新たに製作した。また、インダクションコイルからガイスラー管までの接続は高電圧となるため、高圧ケーブルを購入した。ガイスラー管は若井田理学株式会社製の新規品を購入した。

以上の取り組みにより、大きな問題なくプラズマが生成することを確認した。図 3 に本装置のプラズマ生成の様子を示す。

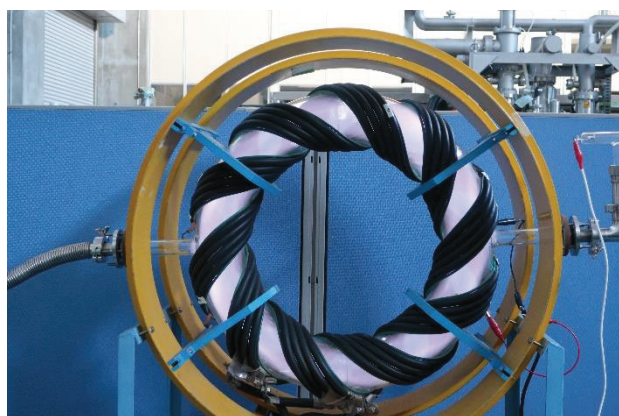


図 3 プラズマ生成の様子

4. ラングミュアプローブを用いたプラズマ測定

4.1 プローブの製作

ラングミュアプローブは、プラズマの電子温度や

電子密度を計測するための基本的なプラズマ計測手法のひとつである。ラングミュアプローブには、2 本の電極間に電圧を印加するダブルプローブと、1 本の電極と参照電極の間に電圧を印加するシングルプローブがある。参照電極はプラズマと十分な面積で接触する導体である必要があるが、本装置の真空容器はガラス製であるので、参照電極に使用可能な部分がない。そこで、今回はダブルプローブを作成した。

図 4 にプローブの構造を示す。

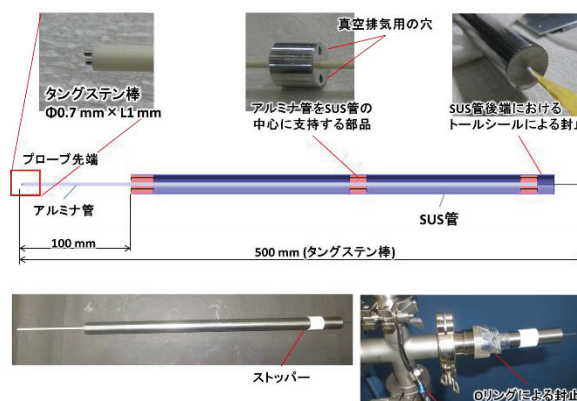


図 4 プローブの構造

電極には $\phi 0.7$ mm 長さ 500 mm のタングステン棒を 2 本使用した。それらを絶縁体のアルミナ管に挿入し、先端部のみ 1 mm 露出した状態で、アロンセラミックにより固定した。電極が露出した部分の表面積は、流入する電子の量を決定する重要な情報であることから、既定の長さとなるように慎重に作業を行った。

アルミナ管の先端から 100 mm より後方は、ステンレス管により覆われる。ステンレス管の内部には、図 4 中央上部に示すようなステンレス製の支持部品を取り付け、電極がプローブの中心に支持されるようにした。支持部品には $\phi 3$ mm の穴を 2 つ設けており、ステンレス管の中が真真空に引かれるようにしている。また、ステンレス管の後端はトルシールで封止している。

プローブを挿入するポートには、ゲージポートを用いた。そのため、真空封止を担う O リングと触れる面が滑らかな状態となるように、ステンレス管は BA (Bright Annealed) 処理されたものを選定している。加えて、さらに表面が滑らかとなるように鏡面仕上げを施した。

プローブは、ゲージポートから 400 mm 程度挿入する。そのため、ゲージポートでの支持とは別に、プラズマに近い側にも支持点を設ける必要があった。一方で、真空容器のポートの数が限られており、プ

ローブ挿入と排気を同じポートで行う必要があった。したがって、図5に示すようなプローブのガイドを作成し、プローブを中心に支持しながら、 $\phi 1.5$ mmの穴から排気が可能となるようにした。

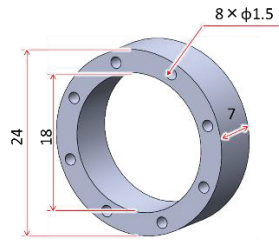


図5 プローブガイドの構造

4.2 測定

作成したプローブを用いて、プラズマ計測を行った。ダブルプローブとしては十分な信号を得ることができなかったが、ステンレス管のまわりにプラズマが生成されており、参照電極として機能すると考えられたため、プローブをシングルプローブとして使用した。

図6に測定システムの概要図および測定の様子を示す。電源には、正負両方の電圧を印加することができるバイポーラ電源を使用した。 -40 Vから $+40$ Vまで 0.5 Hzで電圧 V を掃引し、プローブに流入する電流 I_p を調査した。電流値は、回路の途中に挿入した抵抗にかかる電圧 V_r を測定し、抵抗値より算出した。データロガーにより、抵抗電圧 V_r とプローブ印加電圧 V_p の2chを 20 ms 間隔で取得した。

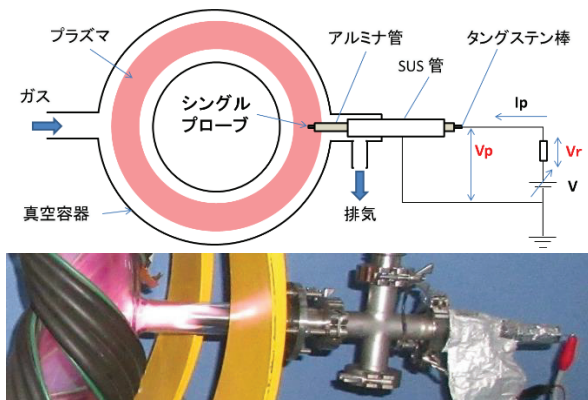


図6 プラズマ測定の様子

図7に測定点を示す。測定は、真空容器の大半径 R で $218, 248, 269$ mmの3点で行った。 $R=250$ は真空容器中央となる。

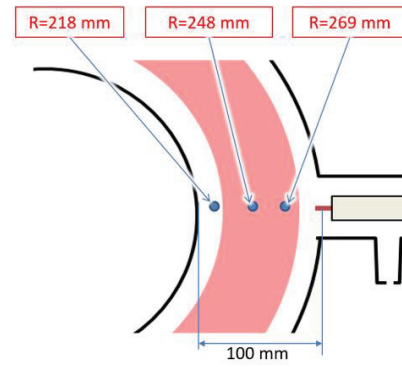


図7 測定点

4.3 電子温度・密度の解析

取得した電圧電流データから電子温度を得るために、下記のような手続きに基づきデータ処理を行った^[1]。

プローブ電圧 ϕ と電流 I_p の関係は図8(a)のように表される。プローブ電流からイオン飽和電流 I_{si} を差し引くことで、電子電流を得ることができる。図8(b)に示すように電子電流を片対数でプロットすると、その傾きから電子温度を求めることができる。

一方、電子飽和電流は以下の式で表される。

$$I_{se} = \frac{1}{4} en_e A \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{1/2}$$

ここで n_e は電子密度、 A はプローブの表面積、 k はボルツマン定数、 m_e は電子質量である。図8(b)に示す曲線の外挿点から I_{se} を決定し、先に求めた T_e から電子密度を求めることができる。

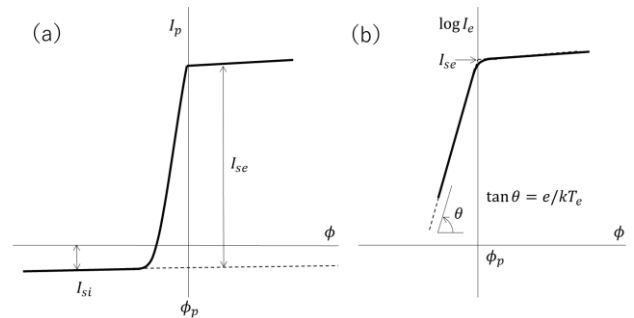


図8 (a) プローブの電圧・電流特性

(b) プローブの電圧・電流特性の片対数プロット

4.4 測定結果

4.3 の手続きに従い求めた電子温度と電子密度を図9に示す。本装置では真空容器中心で電子温度 4 eV程度、電子密度 10^{17} m^{-3} 程度のプラズマが生成されていることを確認した。温度に換算すると、 $1 \text{ eV} = kT$ の定義より、 $T = 4 \text{ eV}/k \approx 46,000 \text{ K}$ となる。 $R=218$ mmにおいて電子密度が減っている理由としては、プローブをプラズマ内部まで挿入す

ることになるため、プローブ自身がプラズマの電子密度に影響を与えるためと考えられる。

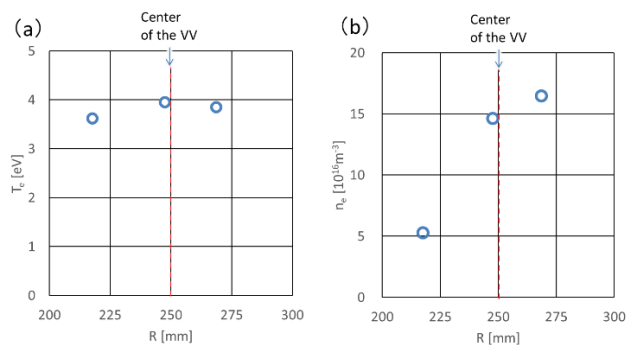


図9 各測定位置における(a)電子温度と(b)電子密度

5.まとめ

1984年にTOKYO ひかり博覧会の展示用の模型として京都大学で製作したプラズマ発生装置を NIFS に移設し、プラズマの点火・生成が可能な状態に再構成した。また、プラズマ電子温度および電子密度を測定するため、ラングミュアプローブを製作し、その他プローブ用の電源などの実験環境も整備した。測定の結果、本装置の生成するプラズマは、真空容器中心で電子温度4 eV程度（およそ46,000 K）、電子密度 10^{17} m^{-3} 程度であることが分かった。

本装置の立上げ、実験、測定作業を通じて、若手職員のプラズマ実験装置に対する理解が深まるだけでなく、与えられた仕事に対して疑問や興味を持つてとことん追求するなど主体性が醸成された。

参考文献

[1]高村秀一著 プラズマの理工学入門 森北出版 (1997)

CMB 観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発

○金山 高大^{A)}、鈴木 純一^{A)}、山岡 広^{A)}、長谷川 雅也^{B)}、金子 大輔^{B)}、五十嵐 悟^{C)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 メカニカルエンジニアリンググループ

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 CMB グループ

^{C)} 株式会社エイ・イー・エス 宇宙・航空機試験チーム

1. 研究背景

宇宙の起源は、ビッグバンと呼ばれる超高温・超高密度の火の玉が急膨張することによって誕生したとされている。しかし、ビッグバン以前に宇宙の急膨張があり、その際に放出された熱エネルギーがビッグバンの火の玉になったとするインフレーション宇宙仮説は初期宇宙を説明する有力な仮説である。

宇宙誕生から 38 万年後は、宇宙の温度が 3000 K まで下がることで電子や陽子と衝突を繰り返していた光が宇宙空間を長距離進めるようになった。この光は宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background : CMB)と呼ばれ、2.7 K の電磁波として宇宙のどの方向からとも一様に飛来し観測できる。光や電磁波には、偏光(Polarization)という振動をしながら進行する状態が存在し、CMB の偏光には偏光 B モードと呼ばれる特殊な渦状の偏光パターンが存在する。もしインフレーションが起きた場合、原始重力波と呼ばれる時空が振動することで生じる波により大きな渦の偏光 B モードができるとされ、観測すると宇宙誕生の様子を理解できると考えられている。また、CMB が地球に届くまでの間に重力レンズ効果と呼ばれる宇宙空間内に分布する物質の影響で曲がることで小さな渦の B モードができるとされ、宇宙大規模構造の鍵を握ると考えられている。

高エネルギー加速器研究機構(以下 KEK)の CMB グループでは、インフレーションのエネルギースケール決定を目的とした POLARBEAR という国際コラボレーション実験を行っている。また、KEK のメカニカルエンジニアリンググループはその設計に関わっている。図 1 に実験装置を示す。



図 1 POLARBEAR 望遠鏡

実験装置の望遠鏡は、大気の影響が地表の約半分であるチリのアタカマ高地で観測が行われており、主鏡、副鏡、レシーバーシステムから構成される反射型望遠鏡である。レシーバーシステム内部には、1 K 以下に冷却された超伝導検出器(Transition Edge Sensor : TES)と呼ばれる高感度で温度変化を測定できる技術を用いた TES ボロメータと呼ばれる検出器が組み込まれており、アンテナに入射した CMB のパワーを高精度に測定することを可能にしている。また、検出器を極低温に保つために複数の冷却システムが搭載されており、その 1 つにパルスチューブ冷凍機(CRYOMECH : PT415-RM)が採用されている。

POLARBEAR はこれまでに、重力レンズ効果による偏光 B モードを世界で初めて観測した。^[1] また、より高精度な測定が可能な POLARBEAR-II を設置して重力レンズ・原子重力波起源の偏光 B モードの精密測定を行う試みや、望遠鏡を 3 台同時に使用することで観測の感度を高める Simons Array 実験も進められている。しかし、精密測定を行う中で、低周波ノイズが観測範囲を制限してしまうため大きな問題となっている。^[2] その主要原因の 1 つとしてパルスチューブ冷凍機の冷媒であるヘリウムの循環に起因する低周波振動が考えられる。低周波振動はパッシブな除振を行うことが難しく、アクティブな除振を行う手法を採用し R&D を行っている。図 2 に実験装置の構造を示す。

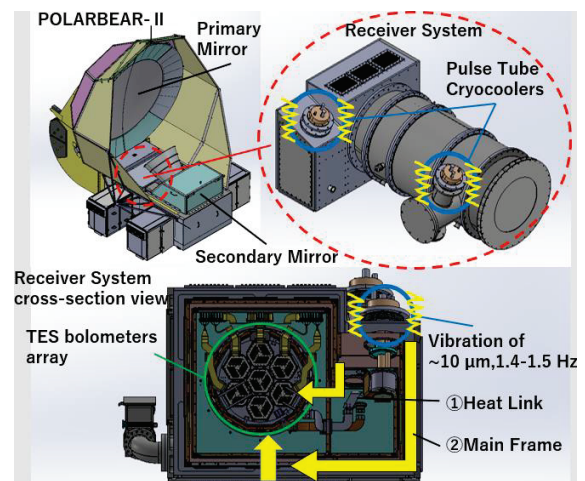


図 2 実験装置の構造

2. 設計開発

(1) 設計要求

KEK では、チリの実験装置を模擬した R&D 用のクライオスタットを用いて実験を行っている。問題となるパルスチューブ冷凍機も組み込まれており、KEK でアクティブ除振装置の設計開発及び実験を行った上でチリの望遠鏡に組み込む方針となった。

冷凍機の振動が TES ボロメータへ伝達する経路として①TES ボロメータを冷却するためのヒートリンクからの伝達、②筐体からの伝達、が考えられる。このことから、筐体に伝達する前にレシーバーシステム外部で振動を除去する必要がある。

振動状態を明らかにするために R&D 用クライオスタットの冷凍機上で、鉛直方向振動を分解能 $0.25\ \mu\text{m}$ のレーザー変位計(キーエンス：CL-P015)で計測すると、 $1 - 10\ \mu\text{m}$ 、 $1.4 - 1.5\ \text{Hz}$ 程度の振動だった。測定箇所によって振幅は異なり、水平方向も同様であった。図 3 に鉛直方向の振動を示す。

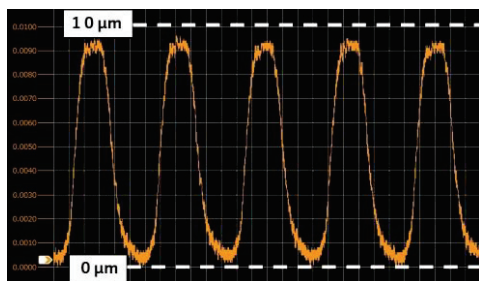


図 3 レーザー変位計による振動計測

また、レシーバーシステムは内部を真空にするため、装置には気圧による負荷がかかる。除振装置はその荷重を支える必要があり、断面積から概算すると約 $2000\ \text{N}$ だった。図 4 に内部の様子を示す。

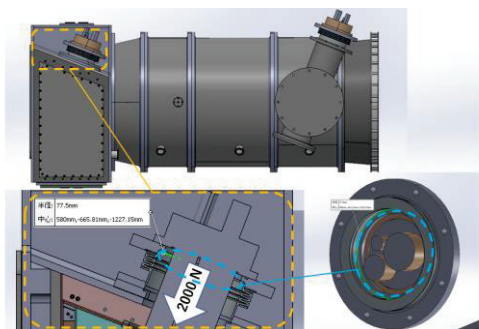


図 4 装置内部における真空引き荷重

更に、実験装置は既に運用されているため、組み込む場所や加工範囲は限られていた。これらの振動条件と荷重条件、組み込み可能範囲などの要求を満たすように設計を行った。

(2) 除振方法

防振ゴムなどのパッシブな除振方法は、 $1\ \text{Hz}$ の振動を防振するばね定数を算出すると耐荷重の要求を満たすことが困難であり、アクティブな除振を行うことに決まった。重力波実験の 1 つである TOBA 実験で用いられているアクティブ防振装置^[3]を参考に piezo アクチュエータを使用したアクティブ除振の方法を採用することになった。

(3) 部品の選定

piezo アクチュエータは振動と荷重の設計要求をカバーできる可動域 $90\ \mu\text{m}$ 、Push force capacity が $3000\ \text{N}$ のもの(PI : P-844.60)が採用された。また、piezo アクチュエータは構造上せん断や曲げ応力に非常に弱いため、取り付け面の角度誤差によって生じる力や取り付け面が移動する際に生じる偏心を吸収する許容角度 $\pm 0.5^\circ$ のフレキシブルカップリング(メステック : M-9914-FB88)を採用した。また、クライオスタットや実際の装置は角度をつけて運用する場合が多く、piezo アクチュエータのみで荷重を支持するのはリスクがあることから、荷重を分散する目的で防振ゴム(NBK : FGBAS-30-40-M8-EE-55)を採用した。

(4) アクティブ除振装置の設計開発

まずは試験機を製作して真空引きの確認や荷重をかけた状態での駆動などを確認した後、R&D 用のクライオスタットへ組み込んでアクティブ除振の試験を行った。図 5 に R&D 用クライオスタットと設計した除振装置を示す。

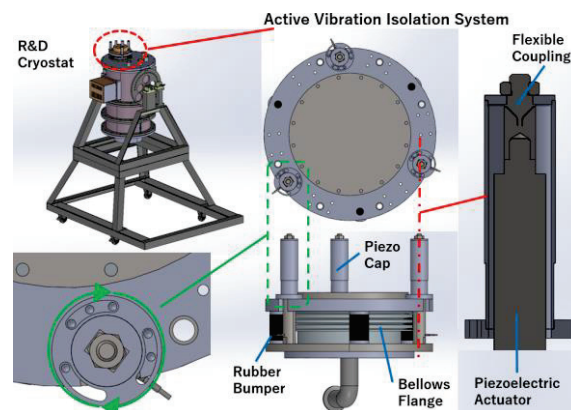


図 5 アクティブ除振装置試験機

振動の方向は鉛直と水平のどちらでも確認できたため、振動を打ち消すには piezo アクチュエータを斜めに取り付けることが考えられた。しかし、せん断や曲げに弱い特性があることや組み込み可能範囲からまずは piezo アクチュエータを鉛直方向に取り付けてアクティブ除振の原理実証を行い、水平方向の振動はその結果によって検討することになった。鉛直方向の除振を行うにあたって、piezo アクチュエータを鉛直に取り付ける必要があったが、パルスチューブ冷凍機を取り付けているベローズフランジには組み込むスペースが無かったため、このフランジは追加工を行うことにした。

また、限られたスペースの中での除振装置の取り付け方法が難しい点だったが、piezo アクチュエータにキャップのような機構を取り付けて 3 箇所の間接的にフランジを押し上げる構造を考えた。また、piezo アクチュエータのカップリングはタップ部分で回転させて締結するため位置が定まらないが、そのキャップがどの位置に来ても固定できる設計にすることで問題を解決した。

3. 実験・結果

(1)駆動試験

各部品を選定した際、3つのピエゾアクチュエータ単体での駆動や制御方法の確認のため駆動試験を行った。ピエゾ素子には圧電効果を応用した逆圧電効果と呼ばれる現象が利用されており、電圧をかけることで伸び縮みさせることができる。今回は電圧を上げた時の変位と、電圧を下げた時の変位も記録した。アクチュエータの変位はレーザー変位計で計測した。図6に電圧と変位の関係を示す。

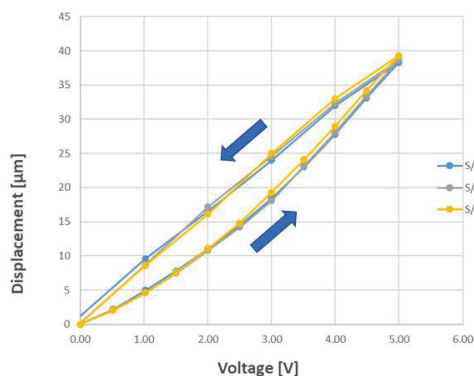


図6 電圧と変位の関係

電圧に応じて変位がある程度決まることや、ヒステリシスなどの特徴、個体差がほとんど無いことが確認できた。

(2)真空・耐荷重試験

試験機を製作してクライオスタットに組み込む前に、真空引きをした状態でアクチュエータを駆動させることでリークの確認や耐荷重を満たしているか確認する試験を行った。真空状態にして荷重がかかると3つのアクチュエータそれぞれの変位は小さくなったが、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 1.4 - 1.5 Hz 程度で押し上げる要求は十分に満たせることが確認できた。

(3)アクティブ除振試験①

これらを踏まえて R&D 用のクライオスタットにアクティブ除振装置と冷凍機を組み込み、アクティブ除振の試験を行った。図7に試験の様子を示す。

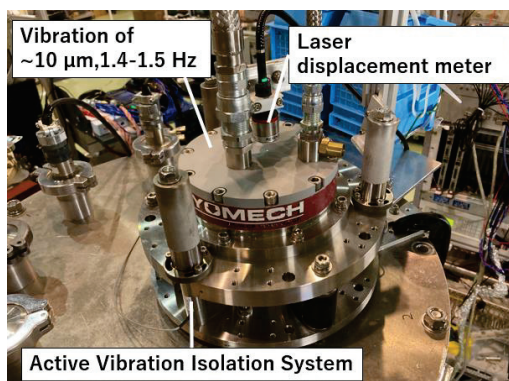
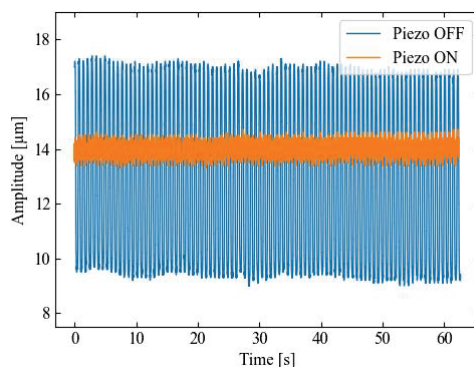
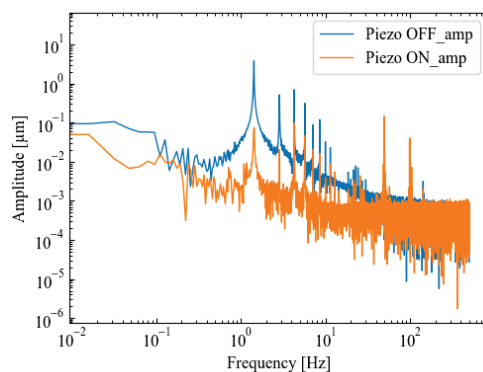


図7 アクティブ除振試験の様子

今回はオープンループ制御によって周波数や電圧を調整してピエゾアクチュエータを駆動させた。3つのピエゾアクチュエータは3又のBNCコネクタで駆動を同期させた。電圧や周波数などの制御にはマルチファンクションジェネレータ WF1974 を用いてオシロスコープでモニタした。レーザー変位計は冷凍機鉛直方向に取り付けた。初めは電圧などの調整が難しく、振動が増大することもあったが、調整すると振動を減少させることができた。また、位相などの細かいパラメータを上手く調整するとレーザー変位計で計測している冷凍機の 1.4 Hz ピークの鉛直方向の振動を約 $7\text{ }\mu\text{m}$ から $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度に除振させることができた。図8にアクティブ除振試験の結果(ピエゾ ON と OFF の比較)を示す。



(a) 除振前後の時間と振幅



(b) 除振前後の周波数と振幅

図8 アクティブ除振の結果

図8(a)は時間と振幅の関係、図8(b)はフーリエ変換して求めた周波数と振幅の関係である。図より、1.4 Hz ピークの振動を 60 秒間除振できていることが分かる。ただし、今回はオープンループでの制御だったため、長時間の安定した除振はできなかった。データは取れなかったが、鉛直方向と水平方向の振動を同時に $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度まで除振することも検証できた。

(4) アクティブ除振試験②

次にレーザー変位計での振動減少は確認できたが、レーザー変位計はある1点しか計測していないため、全体的に振動がどのように変化したのかわかりづらい。そのため、計測範囲 0.1 - 400 Hz, 1 V 3.16 cm/s² (Gal) の加速度計(特許機器:MG-102S)を加えて試験を行うことになった。アクティブ除振によって、レーザー変位計鉛直方向の振動を 1 μm 以下にした状態で加速度計の鉛直方向の振動がどのようになるか検証した。図 9 に振動計測の結果を示す。

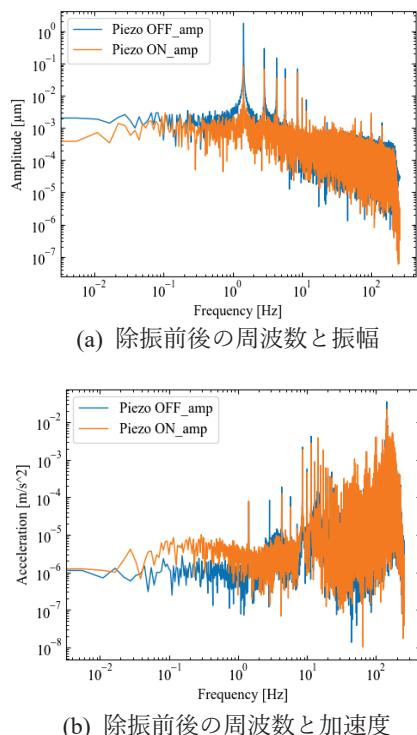


図 9 振動計測結果

図 9 (a)は周波数と振幅の関係、図 9 (b)は周波数と加速度の関係を表している。図 9 (a)で 1.4 Hz ピークの振動はレーザー変位計の値は減少しているが、図 9 (b)で加速度計の値は減少していない結果となった。図 9 (b)で高周波の値が大きいのは、加速度計が空調や周りの音による影響を受けてしまうためである。

また、図 9 (a)では、図 8 (b)と比べると、1.4 Hz 以外の振動が減らせていないことが分かる。以上より、変位計の値だけを用いてアクティブ除振を行うのは難しく、複数のセンサが必要になると考えられる。

(5) 振動解析

レーザー変位計はクライオスタットの上でスタンドにより固定しているため、振動が変位計に伝わってしまい共振する可能性があった。レーザー変位計の振動の様子を明らかにするために解析ソフト ANSYS を用いて構造解析やモーダル解析、ランダム振動解析を行った。図 10 に解析の様子を示す。

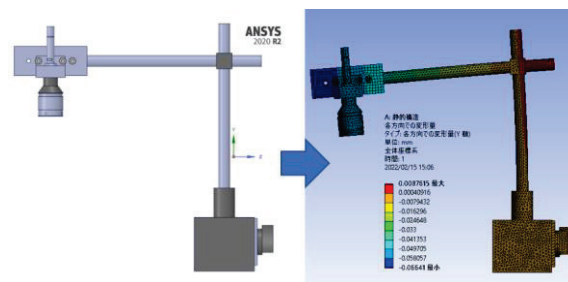


図 10 解析の様子

構造解析では、変位計の自重によるたわみは最大 60 μm 程度だった。モーダル解析では、1 次モードが 60 Hz 程度であることから 1.4 Hz の振動では共振しないと考えられた。ランダム振動解析では、クライオスタット上の振動データを入力したが応答振幅は計測に影響が無いことを確認した。

4. 結論・展望

アクティブ除振装置の設計開発を行い、KEK にある R&D 用のクライオスタットへ組み込み実験を行った。実験の結果より、アクティブ除振装置を搭載することによってパルスチューブ冷凍機の 1.4 Hz ピークの振動は、レーザー変位計による計測では 7 μm 程度から最大 1 μm 程度に除振できた。しかし、加速度計による計測では減少していなかったため、引き続き原因究明が必要である。振動の低減は CMB の観測精度向上につながると考えられるが、今後はこれを検証するために実験装置にヘムトアンプや実際の実験で用いられる TES を搭載し、アクティブ除振装置が ON の時と OFF の時の比較をする性能評価試験を行う予定である。また、ピエゾアクチュエータを 3 つから 6 つに増やすことで全方向の除振や安定性に関しても検証や改良を行い、オープンループ制御から、振動の値をフィードバックするクローズドループ制御のシステムを確立する予定である。これらが完成次第チリの検出器に導入する。

最後に、設計開発における機械加工は KEK の機械工学センターに依頼し大変お世話になりました。

参考文献

- [1] P. A. R. Ade et al. (POLARBEAR Collaboration) Phys. Rev. Lett. 113, 021301 – Published 9 July 2014
- [2] Satoru Takakura et al JCAP05(2017)008 Published 3 May 2017
- [3] 正田 亜八香(2014) Development of a High-Angular-Resolution Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻学位論文 (未公開)

ECH における高圧電源用切替機的设计について

○竹内 俊貴^{A)}、伊藤 哲^{A)}、水野 嘉織^{A)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部 加熱技術課

1. ECH システムとジャイロトロン概要

ECH とは LHD 実験プロジェクトにおける主要加熱法の一つであり、電子共鳴加熱のことである。磁場閉じ込め装置 (LHD) に閉じ込められた電子を閉じ込め磁場強度 ($\sim 2.75\text{T}$) に応じた共鳴周波数 ($f(\text{GHz})=28T$) の電磁波 (マイクロ波) によって加熱する方法を指す。

核融合科学研究所の ECH システムは主に直流電源、電磁波発振器 (ジャイロトロン)、伝送路 (導波管)、入射アンテナ (ミラー) で構成されている。

ジャイロトロンは、基本的にコレクタ電源・ボディ電源・アノード電源の 3 つの直流高圧電源により動作をして電磁波を発振する (図 1)。

直流電源に接続されたジャイロトロンにより出力された電磁波は、導波管内を伝搬して LHD の真空容器内に設置されている準光学的ミラーによってプラズマ中心を狙えるように入射される (図 2)。

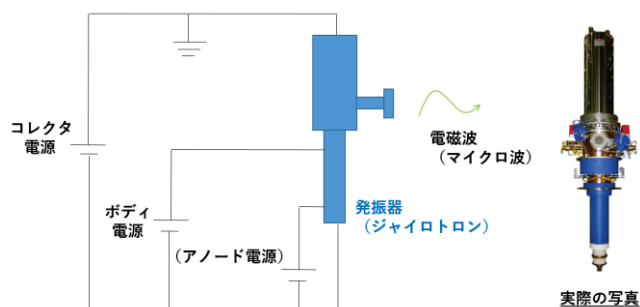


図 1 ジャイロトロンとその直流高圧電源

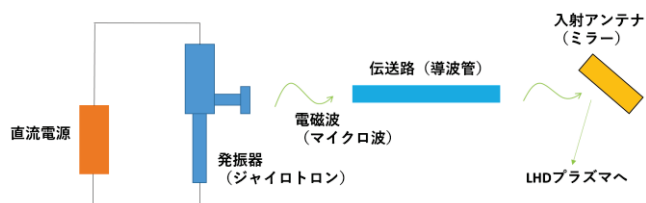


図 2 ECH システムの概略図

2. 設計の背景について

LHD の ECH では、#1・#2・#4・#5・#7・#8 の合計 6 台のジャイロトロンが稼働しており、実験テーマに応じて複数のジャイロトロンを使い分けている。ただし、#7 と #8 は仕様でコレクタ電源の印加電圧が異なるため同時運転ができない。

その為、実験テーマに応じて #7 と #8 を切り替える必要があり、高圧電源フェンス内にて感電の危険がないことを確認した上で、切り替え作業を行っていた。#7 と #8 の切り替え作業には 10~15 分程度時間を要する。この時間を削減する為、高圧電源フェンス外から 1 つのスイッチで切り替え可能な高圧電源用切替機的设计を行った。

なお、高圧電源用切替機は #7 と #8 用に各々 1 台ずつ設置し、制御系は 24V リレー等を用いて構築した。#7 用切替機は接点部を 3 箇所 (コレクタ電源・ボディ電源・アノード電源) とし、#8 用切替機は接点部を 2 箇所 (コレクタ電源・ボディ電源) とした。

3. 高圧電源用切替機について

3.1 設置場所について

高圧電源用切替機の設置場所は、核融合科学研究所大型ヘリカル実験棟の加熱装置室内にある #7 フェンス内に #7 用切替機を、#8 フェンス内に #8 用切替機を設置した (図 3) (図 4) (図 5) (図 6)。

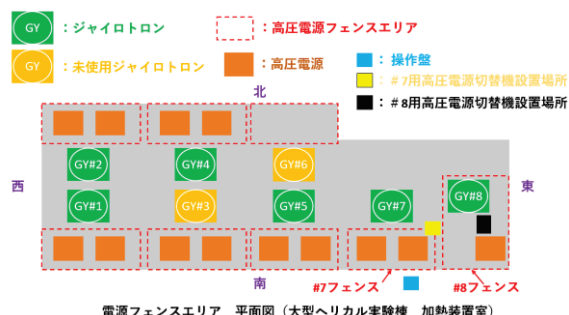


図 3 電源フェンスエリア (平面図)

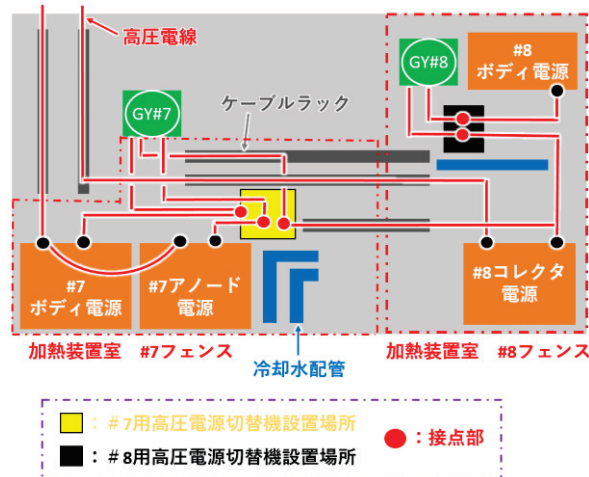


図 4 切替機設置位置 (平面図)

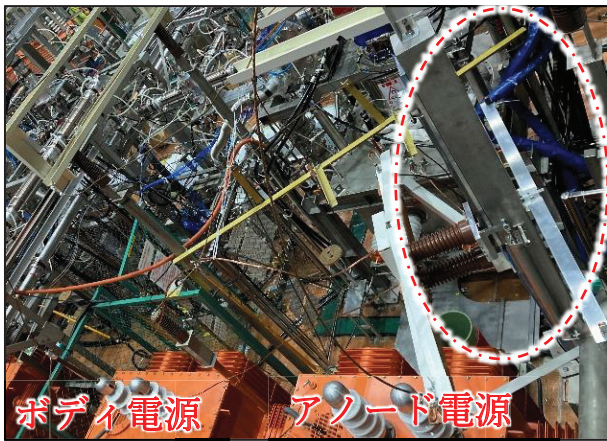


図 5 #7 用高圧電源切替機の設置現場
(加熱装置室 #7 フェンス内)

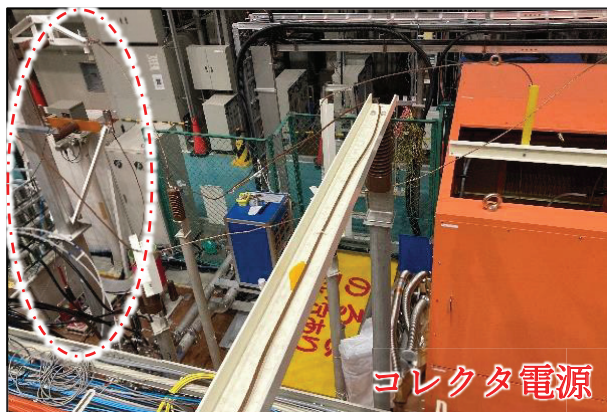


図 6 #8 用高圧電源切替機の設置現場
(加熱装置室 #8 フェンス内)

3.2 高圧電源用切替機の構成について

高圧電源用切替機は、支持架台、エアシリンダー、高圧用ガイシ、ガイドレール、リニアガイド、絶縁 FRP 製アングル、ベーク板、接点部、光電センサ、ターゲット等で構成されており、その高さは 3860mm (#7 と #8 共通)、横幅は 1310mm (#8 は 780mm) ある (図 7)。

前述したように #7 用高圧電源切替機には接点部を 3 箇所、#8 用高圧電源切替機には接点部を 2 箇所設けているが、各々の接点には高圧電線が共締めで取り付けられており、各接点は電位が異なる為ベーク板にて絶縁が施されている。

高圧電源用切替機の支持架台は、一体物ではなく上下 2 分割を採用した。これは運搬性や組み立てを考慮してのことである。

また支持架台にはガイドレールが取り付けられており、そのガイドレール上を駆動体が移動する仕組みとなっている。そのため、支持架台を垂直に設置

する必要がある、溶接ひずみを考慮し支持架台との取り付け箇所はボルト固定とした。

高圧電源用切替機には駆動体があり、駆動体に高圧用ガイシ、プレート、リニアガイドが固定されている。そして、その駆動体がガイドレール上を上下に移動することで各接点を同時に ON・OFF させている。なお、駆動体は上方向 (接点 OFF 方向) ではストッパーにより停止する。

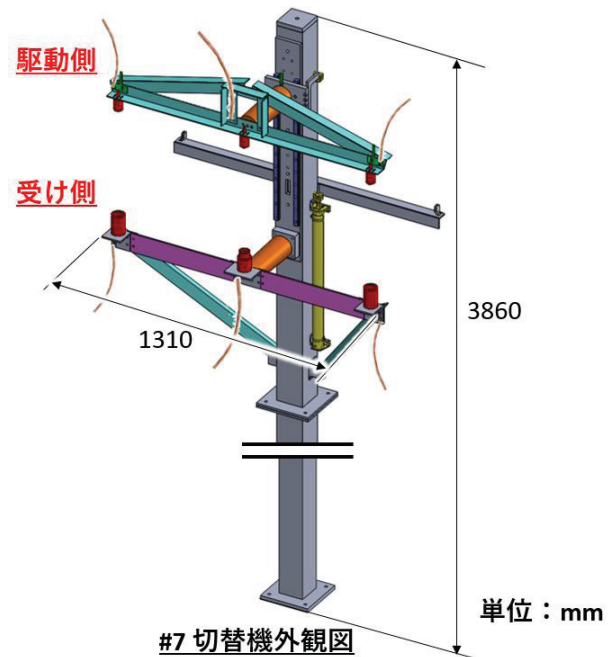


図 7 #7 用高圧電源切替機 外観図

3.3 高圧電源用切替機の駆動する仕組みについて

高圧電源用切替機の駆動は、まず操作者がスイッチを操作すると 24V リレーを介して電磁弁内の弁体を駆動する。

電磁弁には加熱装置室内に設置されているエアードライヤーを接続しており、駆動した弁内部により 2 方向に圧縮空気を供給できるようになっている。

電磁弁内を通過した圧縮空気はスピードコントローラーを介してエアシリンダーに供給される。エアシリンダーの上下 2 方向に圧縮空気を供給することで、エアシリンダーのシリンダーに接続された駆動体が上下に移動する。

接点部の構成は、駆動体にステンレス製の丸棒が取り付けられており、丸棒が受け側の穴の開いたステンレス製の受けに圧縮空気の圧力で挿入されることにより導通する。

このような構造にした理由は、振動等により接点間の接触状態が離れてしまうのを防ぐ為である。

なおエアシリンダーの選定は、駆動させる荷重の大きさと方向により定められている。

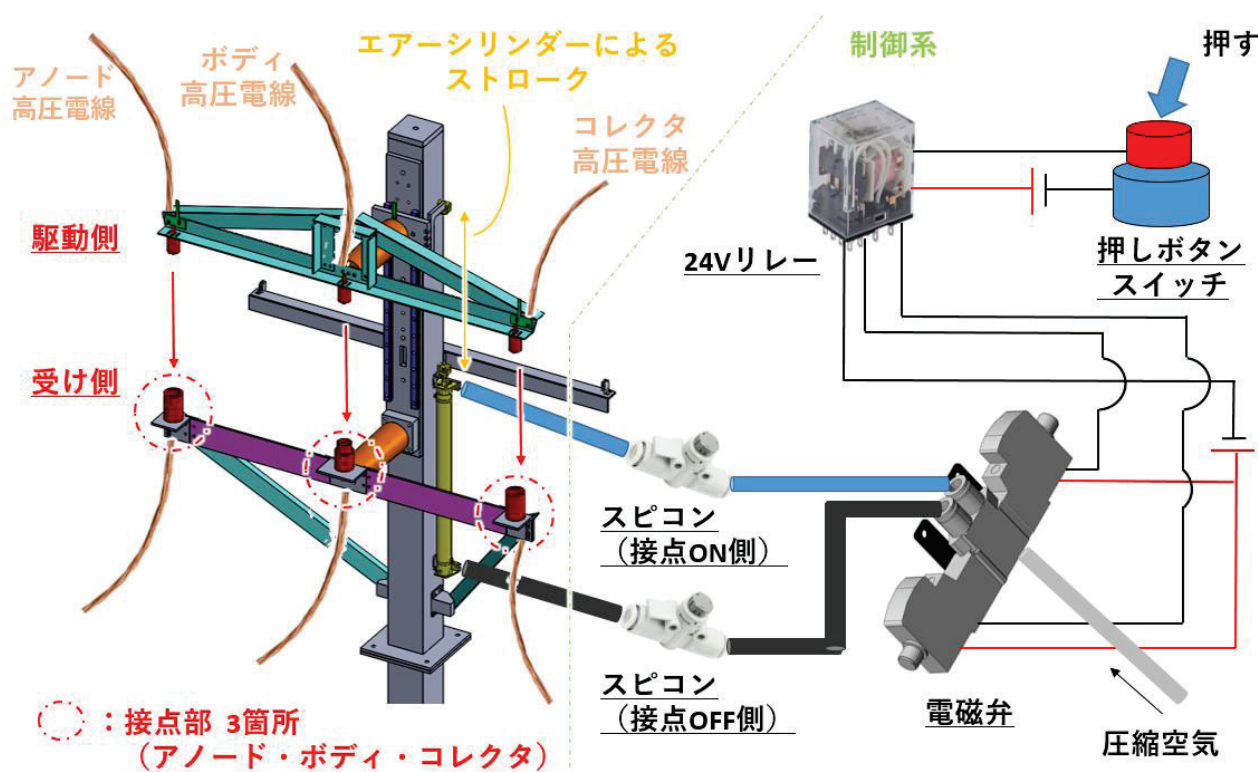


図8 #7用高圧電源切替機の構成図

3.4 接点 ON 状態の確認について

切替機の設置当初は接点が ON 状態となっていることをボタンの押戻と駆動体の状態を目視することで判断していた。しかし、これでは本当に接点が ON 状態であるのか分からず判断基準もあいまいである。その為、この対策として反射型光電センサを採用した(図9)。

駆動体の各接点部近傍にターゲットを取り付け、駆動体が最下点（接点 ON の位置）に到達したら光電センサから出されるレーザー光がターゲットで反射し、それを光電センサが感知することでセンサから信号が出力される。その信号により操作盤に取付けられているパイロットランプを点灯させ、その点灯

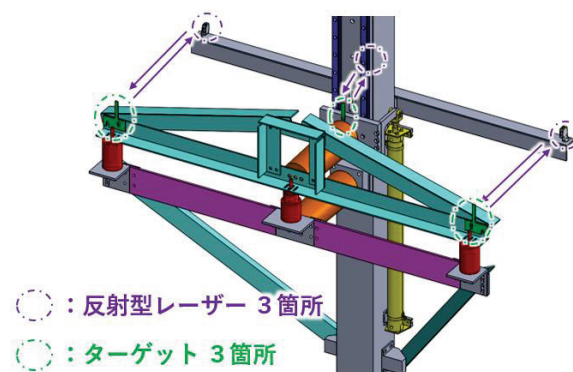


図10 光電センサとターゲットの位置関係

の有無により接点の ON 状態を確認することとした(図10)。

3.5 #7 と#8 の高圧電源用切替機の違いについて

#8 のジャイロトロンにはアノード電源がない。このことで、#7 用切替機では接点部が3箇所、#8 用切替機では接点部が2箇所という違いが生じる(図11)。



図9 光電センサ（オムロン製）

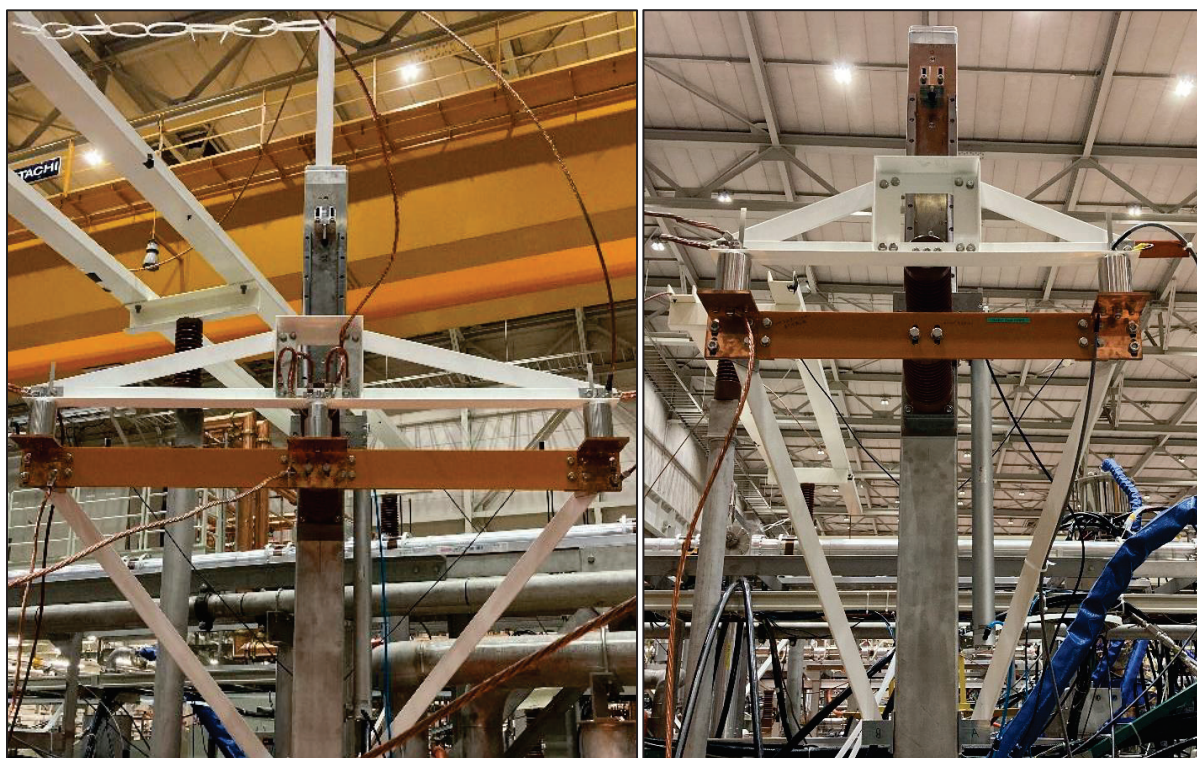


図 11 #7 用高圧電源切替機（左）と#8 用高圧電源切替機（右）

4. まとめ

#7 と#8 用高圧電源切替機を各 1 台ずつ設計・組み立て・据え付けを行った。本装置は第 23 サイクル LHD 実験から使用しており、現在問題なく稼働している。

これまでの#7 と#8 の切替作業は、高圧電源フェンス内にて感電の危険がないことを確認した上で、人力で高圧電線を結線・取り外し・切り替えていた。しかしこの切替作業は時間を要するだけでなく、感電という危険性も含んでいた。これを高圧電源フェンス外から 1 つのスイッチの操作で切替可能な高圧電源用切替機を設計・設置したことで作業効率化と安全性の確保を図ることができ、LHD 実験の ECH システムに貢献することができた。

光源加速器インターロックシステム更新計画

○濁川 和幸^{A)}、長橋 進也^{A)}、石井 晴乃^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設、^{B)}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

高エネルギー加速器研究機構（KEK）の光源加速器は蓄積リングの加速器で、入射器（LINAC）からの電子ビームを入射し、放射光と呼ばれる強力な X 線や真空紫外線を発生させ、新薬や新材料の開発に活用されている加速器である。本報告書では、この光源加速器を安全に運用するために必要なインターロックシステム更新計画について報告する。

光源加速器のインターロックシステムは設置から 40 年近い年月が経過し、途中更新されたインターロックシステムの心臓部である PLC（Programmable Logic Controller）も既に 12 年以上が経過しメーカーの推奨する耐用年数（10 年）も経過している。また、表示器についても、使用している蛍光灯の入手や処分が難しくなっており、今後の維持管理が非常に困難な状況になっていた。

そこで、数年前からインターロックシステムの更新を行うべく、現システムの問題点洗い出し、規制庁への申請書の確認などを行い、新システムへの更新に向けて、システム構成を検討し始め、同時に実現に向けた予算要求も行ってきた。

今年度（令和 3 年度）に、光源加速器の高度化計画や老朽化対策を行う一環としてインターロックシステム更新についても予算化され、更新作業を開始することとなった。今回の更新作業は、複数年計画でインターロックシステムの全面更新を行うこととし、詳細な全体システムの設計から始めたところである。

2. 基本方針

光源加速器インターロックシステム更新については、全面更新を行うことを基本として、安全に関係する各種配線についても出来る限り新しいものに置き換え、老朽化対策を行いつつ、加速器運転の更なる安全系強化も視野に入れたシステム構成とする方針である。また、今回の更新作業の経験を次期放射光建設時のインターロックシステム構築時に役立てられるよう、技術の積み立てや技術開発の推進も行う予定である。

第 1 章でも述べた通り、光源加速器は LINAC からの電子ビームを入射して運用している。そのため、

LINAC のインターロックシステムとも信号のやり取りを行い、相互に安全を確保する仕組みとなっている。さらに、放射光を使用した実験のためのビームラインと呼ばれる複数の実験ラインにも安全な実験を行うためのインターロックシステムがビームライン毎に設置されている。このインターロックシステムとも信号のやり取りを行い、安全を確保する仕組みになっている。そのため、今回の光源加速器インターロックシステム更新にあたっては、各インターロックシステム担当者とも情報交換を行い、それぞれのシステムとの接続方法や信号の種類についても再検討して構築を行うこととした。

3. 現システム

現インターロックシステムは、図 1 のイメージ図のような構成となっている。安全を担保するための各種機器（インターロックドア・非常停止スイッチ・各種表示器等）からの信号配線は、写真 1 にあるように光源加速器の制御室横や加速器本体が設置してある光源棟の地下の中継端子で一度信号線をまとめるなどしてはいるが、ハードワイヤーによる一極集中型の配線となっており、配線そのものも古く配線図が残っていないなどのため、実際の配線経路が不

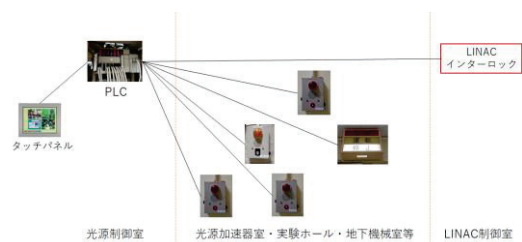


図 1 現インターロックシステム・イメージ図

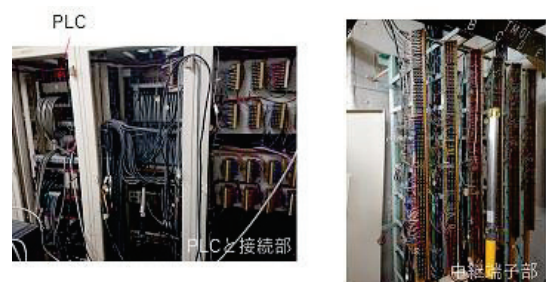


写真 1 現システムの配線

明になっている配線があるなどが現状である。

4. 新システム

更新後のインターロックシステムの構成は図2のイメージで構築することを考えている。

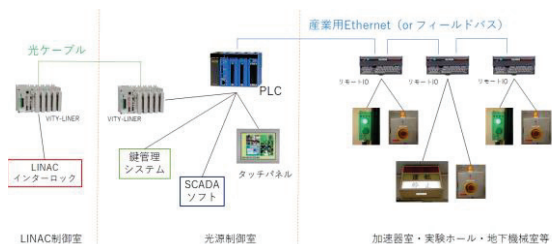


図2 新インターロックシステム・イメージ図

心臓部となる PLC は、KEK では光源加速器制御系や他の加速器施設でも多く使用されている Yokogawa の FA-M3 を使用することとした。これは、KEK 内での機器についての情報共有や、故障時などにモジュール類の調達が素早く行える可能性が高いことを考慮したものである。

全体構成としては、加速器の制御システムとも必要な情報を相互にやり取りすることが可能にするものの、インターロックシステムの情報表示などを含め、新システムだけで完結するように構築することを目指している。情報表示とログの収集については SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）の使用を考えており、現在幾つかの SCADA について情報収集などを進めている最中である。インターロックシステムへの指示出しについては、従来のシステムと同様にタッチパネルの使用を考えている。

システム構築に必要な各種機器については非常停止ボタンと表示器を新しいものに置き換えることとして新規に作成する。また、更なる安全確保に向け、退避確認スイッチも新たに設置する考えである。これらの構成機器については、次章で詳しく説明する。

配線についても、新規に作成した機器と PLC 間の接続に関しては勿論のこと、加速器本体がある加速器室入口に設置してあるリミットスイッチなど現システムのものを使用する場合でも、できる限り新規に配線し直すことを目指している。配線の詳細については第6章で説明する。

5. 各種構成機器

インターロックシステムには加速器運転の安全確保のために非常停止ボタンや加速器の運転状態表示を行う表示器などの各種機器が設置されている。

先にも述べたが、今回のインターロックシステム

更新に際して、非常停止ボタンと表示器は現状ものを置き換えることとして新規に作成した。表示器は現システムで問題となっている蛍光灯タイプではなく、LED タイプで作成した。

加速器の運転（光源加速器においては、電子ビームを入射して放射光実験が行える状態）前には、加速器室内に残っている者がいないことや、加速器の各機器に異常がないかを確認するために、必ず加速器室内のパトロールを行ってから運転を開始している。現状ではパトロールが終了したことを確認するためのスイッチなどは特に設置していないが、加速器室内を隈なく見て回った事の証明にするためにも、退避確認スイッチを加速器室内に複数設置し、パトロール中に退避確認スイッチを押し、すべての退避確認スイッチが押されていないと加速器の運転が出来ない仕様にする。

写真 2,3,4 がそれぞれ新たに作成した非常停止ボタン、退避確認スイッチ、表示器となっている。非常停止ボタンには小型の黄色回転灯を備え、加速器の運転を視覚的にも知らせる一種の表示器としての機能も備えている。

また、インターロックシステムとは直接接続されているわけではないが、安全系の一部として加速器室内の監視用カメラも更新を行う。監視用カメラは PoE（Power over Ethernet）で給電可能なネットワークカメラで構築し、PC 画面上でカメラ画像が確認可能なものを設置予定である。



写真2 非常停止
ボタン



写真3 退避確認
スイッチ



写真4 表示器（運転状態表示）

6. 新システムの配線関係

第5章で説明した構成機器や加速器室に複数ある入口の扉が確実に閉まっていることを確認するためのリミットスイッチ等と、PLC 間の配線については、図2にあるようにリモート IO を使用した省配線シ

システムを利用したものを考えている。

省配線システムについては、フィールドバスか産業用 Ethernet のどちらかを使用することを考えているが、次期光源計画も見据え幾つかの形式を実際にテストし、その使い勝手や通信速度などを考慮した上で採用する計画である。第2章でも述べた通り、実験用の各ビームライン・インターロックシステムとも信号のやり取りを行っており、その点数も多くなっている。このため配線方法は、ビームライン・インターロックシステムの担当者とも連携して考えるのが重要であり、今回の配線に関するテストも協力して行っている。テストに関しては、本研究会の石井晴乃氏の発表である「放射光源加速器インターロックシステム更新に伴うフィールドバスの検討」^[1]で詳細を述べているので、そちらを参照されたい。

リモート IO の設置についてはどの方式を採用するか決めていないこともあり、小型の 19 インチラックに設置することを考えていたが、実際の配線作業を行うことを考えていく上で、リモート IO を設置したい場所に、新たに 19 インチラックを設置するスペースのないなど上手くいかない可能性があることが判明した。そこで、リモート IO や 24 V 電源、各種リレーなど必要に応じて設置可能な壁設置タイプのリモート IO ボックスを作成し、ここにリモート IO を設置した中継点とすることとした。写真 5 が、実際に作成したリモート IO ボックスである。中には 24 V 電源と DIN レールを設置し、リモート IO やリレー、端子台などが DIN レールに設置できる構造にしてある。



写真 5 リモート IO ボックス

光源加速器に電子ビームの供給をしている LINAC とも信号をやり取りしているが、こちらとの配線は配線距離が長い（ケーブル長で 1 km 程度）こともあり、光ケーブルを使用して接点信号を送信できる装置を使用することとした。この方法でも幾つかの方式があるが、今回は LINAC の安全担当者と相談を行った結果、LINAC が光源加速器の他にビー

ムを供給している Super KEKB などとの間で信号をやり取りする際に使用していて、実績がある YDK テクノロジーズのデータ伝送システムである VITY-LINER を使用することとした。

7. 出入口扉用鍵管理ボックス

加速器室へに入るための入口は搬入口を含め全部で 7 か所ある。また、LINAC との間にあるフェンスが 2 か所ある。

すべての扉は電気錠などで管理されているが、扉を開けるためにはそれぞれの場所に応じた鍵を使用する方式となっている。

現状では、鍵は写真 6 のボックスで管理されており、インターロックシステムとも信号のやり取りを行い、鍵が全て返却されていないと加速器の運転が出来ないようにしている。

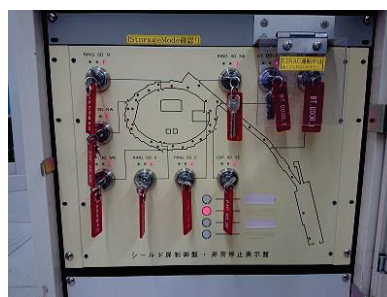


写真 6 現状の鍵管理ボックス

鍵管理ボックスは新しいものに置き換わっていたが、先の東日本大震災で故障し、現在は初期のものを再利用している状況にあり、このボックスについても老朽化対策をする必要があり、今回のシステム更新にあたって、この鍵管理ボックスも作り替えることとした。

新しい鍵管理ボックスが写真 7 である。加速器の運転状況をインターロックシステムからの信号で把握し、特殊なキーシリンダー（MIWA U9KE-01）を使用することで、鍵の抜き差しが制御可能なボックスとなっている。



写真 7 新規に作成した鍵管理ボックス

8. 進捗状況

第1章でも述べた通り、更新作業は複数年度で行うが、これは光源加速器の運転計画に影響を与えないようにするために、各種工事などを運転休止期間中のみで行うよう考えたためである。年度当初は2年計画で更新作業を終える計画であったが「新型コロナウイルス（COVID-19）」による部材調達の遅れなどがあり、計画終了までの期間は流動的である。

計画の初年度にあたる今年度は、年度当初に第5章でも述べたように、非常停止ボタンなどの各種構成機器の作成、鍵管理ボックスの設計と作成から始めるなど、新規に作成するものについては、現時点（令和4年2月末）ですでに完成している。

機器設置を含めた各種配線作業の検討や、PLCなどの購入手続きも初年度から始めている。非常停止ボタンなどの仮取り付けと配線作業は、夏季の運転休止期間に可能な範囲で行うことを考えていたが、先に述べた部材等の長納期化で納品までに時間がかかり、夏季の運転休止中の作業を諦め令和3年12月末から令和4年1月末までの冬季運転休止期間中で行った。写真8は配線作業後の非常停止ボタンと退避確認スイッチであり、一番左側は現状の非常停止ボタンである。ただし、新たに設置した非常停止ボタンと退避確認スイッチについては、新システム稼働時からの運用開始とするため、現在は使えない旨の表示でボタン等を覆っている状態である。

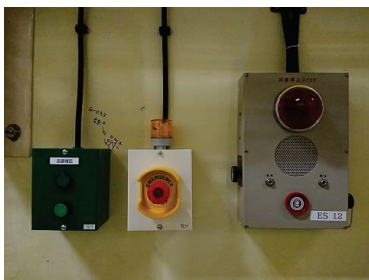


写真 8 設置後の非常停止ボタン等

LINAC との間で使用する光ケーブル配線とデータ伝送システム機器の設置も冬季に配線を完了している。写真9,10が設置したデータ伝送システムの写真である。写真9は光源加速器側の設置写真で既存の19インチラック内に必要な機器を設置してある。写真10はLINAC 制御室地下の設置状況である。こちらは、新規にボックスを作成して壁面に設置している。このボックスには、24V 電源とデータ伝送システム用モジュール、DIN レールが設置され、端子台や必要に応じてリレーなどが設置可能なものとなっている。



写真 9 光源加速器側データ伝送システム

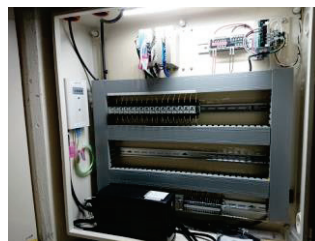


写真 10 LINAC 側データ伝送システム

表示器についても作成は終了しているが、現システムの表示器と混同しないようにするため、今回の配線作業では前倒して運用する表示器のみを設置した。写真11の赤矢印で示した部分が、今回の作業で設置した表示器である。LINAC との間にあるフェンスに設置してあり、運転状況によって、フェンスより先に立ち入らないよう注意喚起を行っている。



写真 11 先行運用中の表示器

9. 謝辞

今回の更新作業を進めるにあたり、物構研放射光のインターロックシステム担当者である小菅隆氏、仁谷浩明氏、LINAC のインターロックシステム担当者である白川明広氏、佐武いつか氏にシステム構築のための助言や更新作業の協力をいただいた。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

[1] 石井晴乃 他 放射光源加速器インターロックシステム更新に伴うフィールドバスの検討 令和3年度核融合科学研究所技術研究会 報告書 (2022).

電子顕微鏡のオンライン化の実例紹介

○阿部 真帆、太田 憲治

東北大学 電気通信研究所 研究基盤技術センター

1. はじめに

コロナ禍により、感染リスクを避けながら研究活動を継続するために共用実験設備のオンライン化・リモート化への対応が求められている。東北大学電気通信研究所 研究基盤技術センターでは、装置のオンライン・リモートシステムを情報系の職員が構築し、分析装置担当職員が来年度より正式に運用を開始する。ここでは走査型電子顕微鏡（SEM）のオンライン、リモートシステムの概要と実用例について報告する。

2. 走査型電子顕微鏡（SEM）について

東北大学電気通信研究所 研究基盤技術センター評価部は 14 台の共通機器を提供し、その運用と維持管理を行っている。そのうち利用頻度の高い走査型電子顕微鏡（以下、SEM）と X 線回折装置（XRD）にオンライン、リモートシステムを導入している。

SEM は真空中で細く絞った電子ビームを試料に走査し、試料表面から発生する信号（二次電子、反射電子）を検出して試料表面の拡大像を表示する装置である（図 1）。

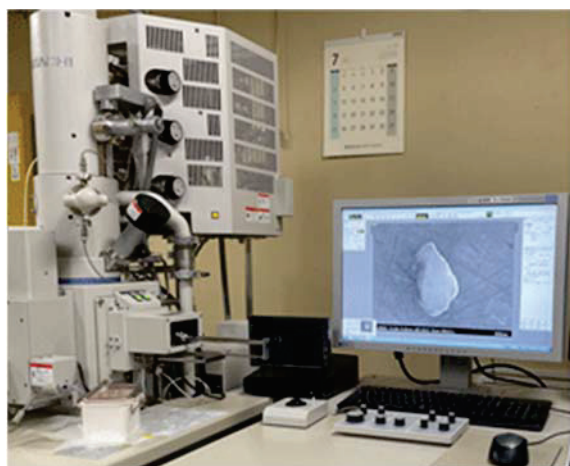


図 1 SEM 本体と拡大像

私が管理している SEM は日立製 SU-8000 と SU-6600 の二台で、どちらも SEM と分析装置の制御 PC 二台が接続されている。

3. リモートシステムを導入した経緯

二台の SEM は運用を開始してから 13 年が経過し

ており、ヘビーユーザーの異動や利用者が他の新しい装置を使用するなど、2017 年ころから利用が減少していた。2020 年より新型コロナウイルス感染症拡大防止のため、出勤停止やリモートワークの推進がありさらに利用が減少しており、利用を回復するには何かアピールできるものはないか検討していた。

2020 年 12 月に文部科学省の「先端研究設備整備補助事業（研究施設・設備・機器のリモート化・スマート化）」の公募があり、リモート化のオプションがあれば学内外にアピールできる可能性があると考え、本研究所の情報系職員の太田に装置のリモート化について相談した。

5 の項目で述べる装置の機能や装置に直接ネットワークに接続することができないことなどの条件があるが、太田から少しの機材を経由すれば可能であるという回答があった。また、業者に依頼するより費用も抑えることができるとの回答もあり、リモートシステムの導入を依頼した。

4. リモート化の種類について

リモート化にはいくつかの種類があり、①装置制御 PC を利用者が遠隔で操作する、②装置管理者が装置を遠隔で操作する、③装置管理者が装置を操作し測定依頼者との情報共有をリモートで行う、④装置管理者が遠隔から装置を監視する 4 つのパターンが考えられる。

5. リモート化導入にあたっての問題点

SEM のリモート化にあたり、問題として制御 PC がネットワークに接続できない点があげられる。これは、制御 PC にインストールされている SEM 管理ソフトがウイルス対策ソフトや OS のアップデートに影響を受けるため、メーカーからネットワークへの接続を禁止されていることが理由である。

もう一つの問題が、SEM を操作するにあたり制御 PC 以外の操作が必要となっている点である。これは、観察面の移動、倍率、ピント調整などは制御 PC とは別のコントローラーで行うこと、サンプルのセットは手で行うことにより、制御 PC だけで操作が完

結しないため装置の前に操作者が必要である。

上記の理由により前項①の装置制御 PC を利用者がオンライン上で操作するリモートシステムを構築することは難しい。

そこで前項③装置管理者が装置を操作し、依頼者との情報共有をリモートで行うためのシステムを構築した。

6. 構築したリモートシステムについて

構築したシステムは PC の操作画面を画像として取り出し、ネットワークに接続した別の PC でビデオ会議システムの画面共有機能で操作画面を表示させるものである。

実際に構築したシステムは図 2 の通りである。SEM 制御 PC と分析装置制御 PC にそれぞれモニターケーブルを介して画面切替器に接続する。切替器、PC 画面を画像として取り出すビデオキャプチャ、ネットワークが使用できる PC の順で接続し、制御 PC の画面をビデオ会議システムを通して遠隔にいる依頼者と共有する。

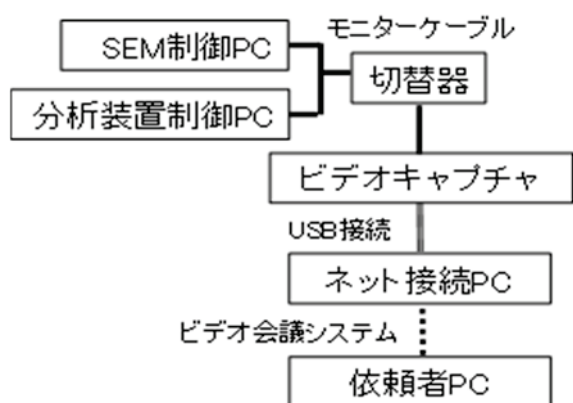


図 2 リモートシステム概要

システム構築に使用した物品（切替器、ビデオキャプチャ、ケーブル類）はすべて大手通販サイトで販売されており、容易に入手可能なものである。また、専門的な情報系の知識を持たない装置管理者でも理解できるシンプルな構成となった。設置した写真は図 3 の四角の枠で囲んだ箇所である。

使用法は①SEM と制御 PC、分析装置制御 PC を起動、②ネットワーク接続用 PC を起動、③ビデオキャプチャの USB ケーブルをネットワーク接続用 PC に接続、④ビデオ会議システムを起動、の 4 つの容易なステップで完了する。そのため SEM の操作に支障をきたすことなく測定依頼者との画面共有が可能となった。

今回構築したシステムは測定希望者が直接測定できない場合に装置管理者が代理で測定するだけでな



図 3 リモートシステム設置状況

く、測定依頼者との情報共有に有効であると考えられる。SEM の依頼測定では測定依頼者が想定した表面状態ではない場合があり、どのような画像・データが求められているか判断が難しく、多くの時間をかけて必要以上のデータをとることがある。そこで測定画面の共有により依頼者はリアルタイムで表面状態の把握ができ、装置管理者は指定された箇所の分析を行うことで測定時間が短縮できるメリットがある。

つくば市の産総研の研究員の方にご協力いただき、リモートで提供いただいたサンプルの測定画面を見ていただいたところ、ノート PC で仮面共有をすると、分析中の元素のラベルなどの文字が見えづらいとの指摘があった。ただし、デスクトップの大きいモニタに変更すると大体の文字が見えるようになったため、測定依頼者には大きいモニタを使用することを通知すればこの問題点は解決できることが分かった。測定依頼者からサンプルの詳細な情報やサンプルに応じた検出器の選定などを教えていただき、メールのやり取りだけでは得られない有用な知見を得ることができ、情報共有による測定時間の短縮だけでなく、リアルタイムで情報を共有することで技術向上につながるメリットがあった。

参考文献

- [1]日立ハイテクフィードバック 画面共有システム
https://www.hitachi-hightech.com/hfd/product_detail/?pn=extope_em

KEK-PF におけるセラミックスチェンバー一体型パルスマグネット のためのビーム試験路構築

○内山 隆司^{A)}、満田 史織^{A)}、野上 隆史^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 加速器第六研究系

1. はじめに

多目的に利用が可能なキッカーとして、セラミックスチェンバー一体型パルスマグネット (Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet: CCI_{PM}) の開発が行われている[1]。セラミックと電磁石コイルが一体化することで、外装は簡潔でありながら、耐真空応力、耐磁場応力、耐熱応力のある強固な構造強度、高い耐電圧、絶縁強度を可能にしている。加速器実装に向けたビーム性能評価が出来るよう PF-BT ダンプラインにビーム試験路を設計し、構築したので報告する。CCI_{PM} 外観写真を図 1 に示す。

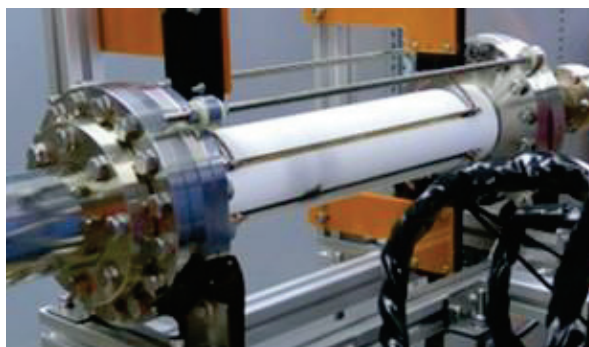


図 1 CCI_{PM} 外観

2. ビーム試験路の配置

2006 年頃トップアップ運転に対応するためビームトランスポートラインの改造が行われ、2007 年に入射ビーム整形用スリット及びビームダンプが設置された。さらに、入射ビームを利用した実験ができるようにビーム試験路としての利用も進められ、これまでにビームポジションモニター (Beam position

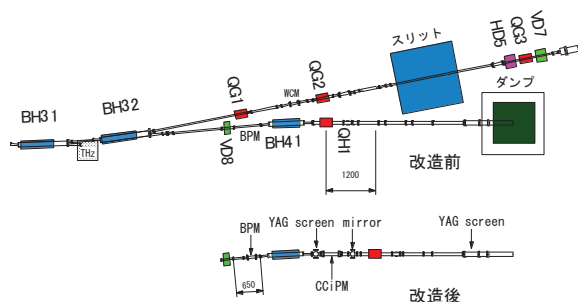


図 2 ビームトランスポートライン及び
ダンプライン全体図

monitor:BPM) やテラヘルツ関連の試験が行われてきた。2018 年までのビームトランスポートライン全体図改造前と 2019 年の改造後を図 2 に示す。

CCI_{PM} のビーム性能を実証するためには、入射ビームを自由にコントロールする必要がある。幸いにも、入射路には偏向電磁石が 3 台あり、そのうち BH32 と BH41 でビームの水平方向をコントロールできる。BH32 においては、電磁石 ON で PF-Ring に入射され、OFF でビームダンプラインに導かれる。BH41 上流には垂直ステアリングもあり、ビーム位置調整が可能な配置になっている。このような配置から BH41 下流からダンプ点までの間に試験用キッカーを配置すれば、キッカー点のビーム位置を自由に調整したキッカー試験が可能である。垂直ステアリング下流には、試験用の小口径 BPM が設置されている。この BPM を大口径に変更し位置モニターとして生かすことで、水平方向及び垂直方向に大きく振ることができ、ダンプラインに導入されるビーム位置を非破壊かつリアルタイムにモニターすることが出来る。CCI_{PM} の直上流およびダンプ点にスクリーンモニターを設置することでビーム位置の変化を監視でき、キッカーによる蹴り角を求めることができる。また、CCI_{PM} の下流には内面コーティングの状態を確認できるように内視鏡ミラーを設置した。

CCI_{PM} のビーム試験に向け、電磁石と真空ポンプの配置変更、スクリーンモニターの交換及び新設、CCI_{PM} を大気開放無しで CCI_{PM} の内面コーティング及び埋め込みコイルの破損の有無を監視するため内視鏡を新たにダンプラインに新設した。ダンプラ

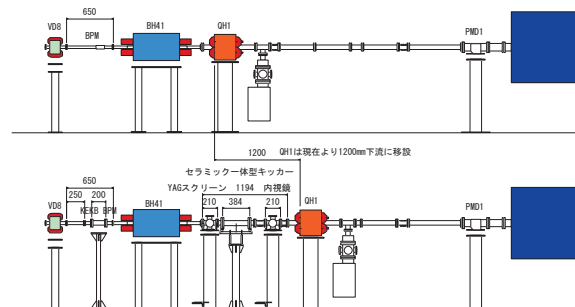


図 3 ダンプライン全体図

イン全体図を図3に示す。

3. ビーム試験路の構築

3.1 ビームポジションモニター

試験路内で使用していた BPM(R&D)は全長 650 mm 内径 20 mm と狭く、電子ビームの振れ幅・電気信号の信頼性（位置計算に必要な感度係数）を考慮し、KEK B 入射路で使用実績のある全長 200mm 内径約 50mm の予備品を借りて設置した。BPM の両端は HELICOFLEX 仕様のため ICF フランジへの変換フランジを製作した。BH41 用真空ダクトは ICF70 形状（現状維持）で製作してある。性能試験に支障があれば形状を拡幅することで解消できる。

3.2 スクリーンモニター

ダンプに近い最下流のスクリーンモニター PMD1 はキッカーの蹴り角を精密に評価する上で分解能が重要となることから、デマルケストから YAG に交換出来るように YAG スクリーンホルダーを新規に製作した。導入器はそのまま再利用した。YAG スクリーンホルダーは導入器先端に取り付けられるようになっている。図4に YAG スクリーンホルダーを示す。

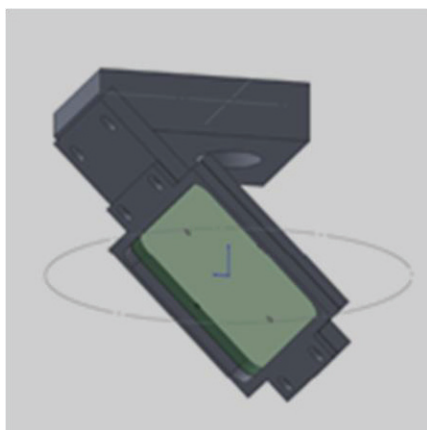


図4 YAG スクリーンホルダー

CCiPM 上流のスクリーンモニターで使用する導入器は、以前 PF リングで使用していたものを再利用した。圧空シリンダーは、放射線によるダメージで圧空漏れなどの故障が起こりやすいため、PF リングで使用しているものと同型のものにすることで予

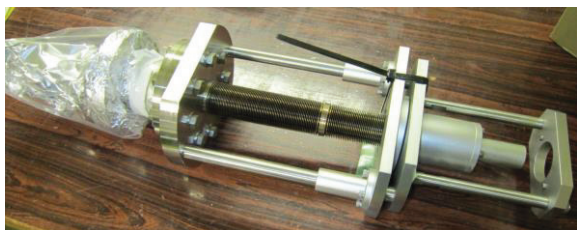


図5 YAG スクリーン導入器

備品の共通化ができ、故障したときに素早く交換できるメリットがある。導入器本体の写真を図5に示す。

スクリーンの大まかな位置調整はニップル管の全長で調整を行う。微調整はシリンダー部の取付けボルトで行い、 ± 5 mm の微調整ができる。スクリーン用チェンバーに ICF114 面管 210 mm 六方管を使用した。今回の改造では入射路とダンプ路が接近しているため導入器を上を設置したが、これから試験を行っていくなかで、機器挿入の追加や変更が生じても対応できるように設計されている。YAG スクリーンの設置風景とスクリーンを横と下から見た写真を図6に示す。



図6 YAG スクリーン 左：横から 右：下から

3.3 内視鏡駆動機構

CCiPM 内部には、パルス磁場に対する渦電流の生成を抑制する楕型パターンコーティングが施されている。ビームが通過するとき内面で放電が起こることがある。このときダメージを与えコーティングが剥離する恐れがある。放電現象に関しては、電源側でモニターすれば観測できるが、コーティング面の剥離を確認するには大気暴露する必要がある。確認するだけでも手間がかかるので、大気暴露無しでコーティングの状態を確認できるシステムの構築が望まれた。システムの構築に、cERL[2]の電子銃開発でビーム調整用に使用していたミラーを再利用することにした。このミラーは極高真空領域での使用実績があり、ユーザー運転のリングにも導入が可能である。内視鏡ミラーと YAG スクリーンの写真を図7に示す。

内視鏡ミラーの上部に M3 のタップ穴があいている。ミラー表面がチェンバー中心になるようにホル

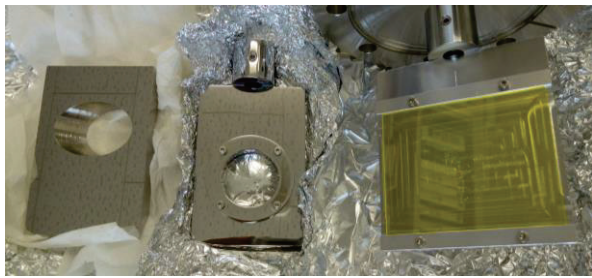


図7 左：内視鏡ミラー
中：YAG スクリーンホルダー
右：YAG スクリーン

ダーが製作され、圧空導入器の先端に固定されている。内視鏡ミラーは2段駆動の導入器用で、斜め45°に内径26mmの穴があけてありビームを通しながら内面の状態を監視することもできる。ストローク長110mm、1段ミラー:80mm、2段:穴あきミラー30mmに設計されている。電子ビームによるチャージアップ対策も必要なことから、使用する導入器はストローク長100mmのシングルタイプを使用することにした。図8に導入器全体写真を示す。



図8 導入器全体

ミラー用チェンバーもスクリーン同様に、ICF114面管210mmの六方管を使用した。ミラーの重量などを考慮すると、上から挿入して下に跳ねた方が導入器の負荷が少なく良いが、ミラーと設置するカメラの関係で挿入方向に制約があり、横のポートから下に跳ねて監視する構造となった(図8)。ミラーは六方管のどのポートに接続しても監視できるように対応している。図9にCCiPM直上流及び下流ダンプ点までの写真を示す。

4. ビーム試験路構築のまとめ

CCiPMの実用化に向け、ビームによる性能試験が急がれていた。2018年度に設計検討が開始され、2019年1月にビーム試験路が完成した。R&Dの時間がほとんど無く、実績のある良い部分だけを取り入れ、装置の組立及び動作試験を行い、試験路を構築した。また、CCiPMの開発が同時に行われ、口径違い(D60,D40,D30)のものも交換しやすいようになっている。

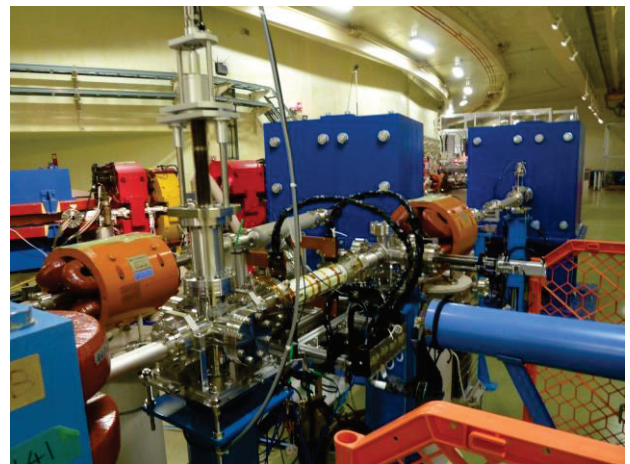


図9 CCIpM 直上流からダンプ点までの様子
(手前側左下隅がBH41となり上流側である)

この試験路構築後CCiPMのビームを使った試験が行われた[3]。入れ替えたBPM、YAGスクリーン、内視鏡の動作も確認されている。口径違いのCCiPMの試験検証[4]も実施され継続した利用がなされている。この試験路の構築で、今後のCCiPM実用化に向けたR&Dが可能になると同時に、キッカー試験以外のモニター系ビーム試験など多角的な利用が期待されている。

参考文献

- [1] C. Mitsuda et al., Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, p660.
- [2] S. Sakanaka et al., Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, p897.
- [3] C. Mitsuda et al., Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, p376.
- [4] Y. Lu et al., Proc. 12th International Particle Accelerator Conf. (IPAC'21), Campinas, Brazil, May 2021, paper TUPAB359.,

J-PARC 崩壊ミュオンビーム輸送系における 偏向電磁石 (DB2) のコイル換装及び磁場測定

○湯浅 貴裕^{A)}、藤森 寛^{A)}、池戸 豊^{A)}、河村 成肇^{A)}、Patrick Strasser^{A)}、
坂田 茂雄^{B)}、目黒 学^{B)}、川端 公貴^{B)}、砂川 光^{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)}株式会社 NAT

1. はじめに

J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) における崩壊ミュオンビーム輸送系 (D-Line) に設置されている偏向電磁石(DB2)は製作から 40 年以上が経過しており、コイルの経年劣化が懸念されるため、コイル線材の選定、予備コイルの製作および、既存の磁極への組み込みを 3 年計画で実施した。また、コイル製作時に冷却水路を増設することによって冷却機能を強化し、高運動量ミュオンの輸送に対応できるように電磁石の高度化も行った。そして、コイル換装後に磁場測定を行い、コイル換装前後での磁場測定結果と磁場計算との比較することで整合性を確認した。

2. 偏向電磁石(DB2)

図 1 に示すように DB2 はミュオン標的から D-Line に導かれたミュオンビームを 40 度偏向させて実験エリアに導く偏向電磁石である。

実際に D-Line から取り出した DB2 を図 2、計算に用いた三次元磁場解析プログラム(OPERA-3d)モデルを図 3 に示す。

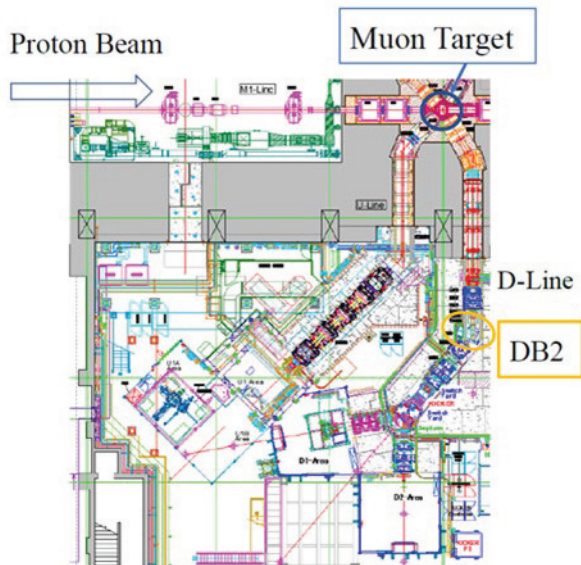


図 1 崩壊ミュオンビームライン(D-Line)



図 2 DB2(実物)

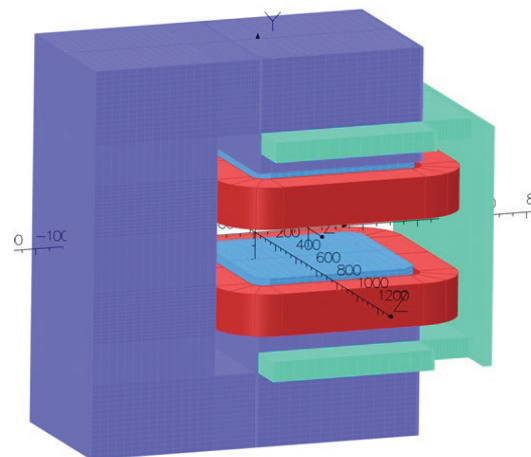


図 3 DB2 の磁場解析モデル

3. コイル線材の選定(1 年目)とコイル製作(2 年目)

コイル更新にあたり、既存の Yoke と Pole, End-guard を使用して、コイルのみを交換することから、使用するコイル線材 hollow-conductor(ホロコン)は同一外寸を有し、公称断面積が同等である必要があった。しかし、交換前のホロコンと同じ断面形状のホロコンが入手困難だったため、図 4 のような $\square 12\text{mm} \times 12\text{mm}$ の同一外寸を有し、公称断面積が同等のホロコンを選定した[1]。

選定したホロコンを用いてコイルを製作した(図 5)。



図 4 ホロコン断面(左：旧コイル、右：新コイル)

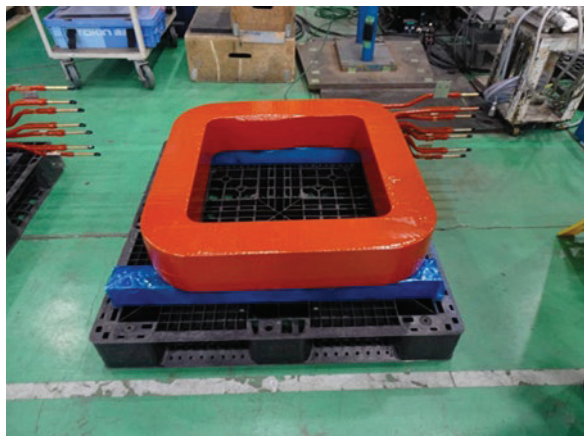


図 5 製作したコイル

4. コイル換装作業(3 年目)

コイル換装作業は End-guard を外した後、クレーンを使い DB2 を上下分割して行った。図 6 にコイル換装作業中の風景、図 7 にコイル換装後の DB2 を示す。

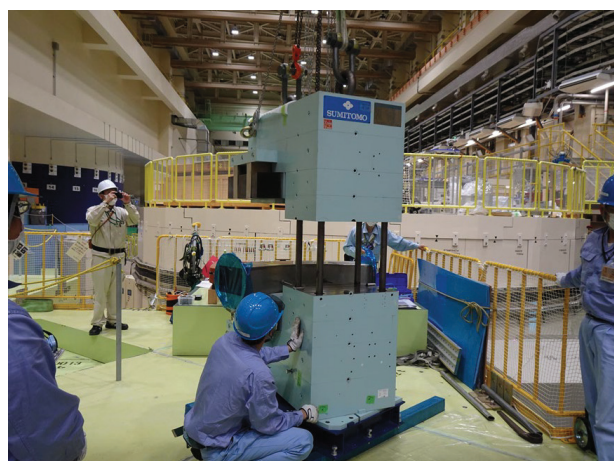


図 6 コイル換装作業中の風景

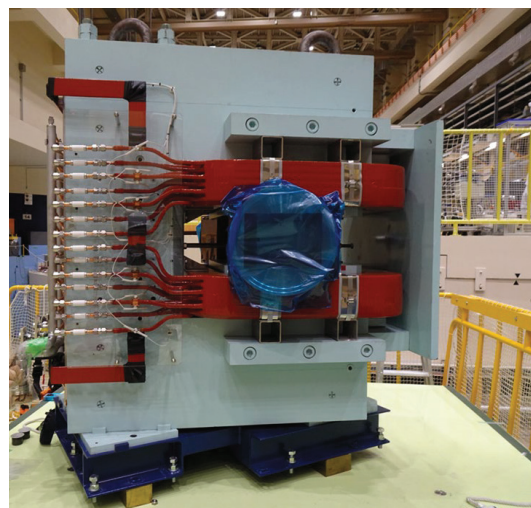


図 7 コイル換装後の DB2

コイル換装作業終了後に性能検査と磁場測定を行った。表 1 に既存電源の定格(400A)での性能検査の結果を示す。実測値と計算値で概ね一致していることが確認された。

表 1 新コイルを実装した DB2 の性能検査結果

	計算値	実測値
ホロコン形状	□12×12-φ6.5	□12×12-φ6.5
電流[A]	400	400
電圧[V]	43	44.9
インダクタンス [H](電磁石全体)	0.204	0.299(120Hz)
上下コイルの合計抵抗(20℃)[Ω]	0.1146	0.1051
中心磁場[T]	0.599	0.598
冷却水路数	12	12
電磁石での差圧 [MPa]	0.1	0.1
流量[L/min]	21	21
流速[m/s]	0.87	0.87
温度上昇[℃]	12.5	10

5. 磁場測定

磁場測定は図 8 で示す磁極中心で励磁特性の測定、400A を流した状態で Pole edge を基準点にしてビーム軸方向(z 軸方向)に±250mm の磁場を測定、直交する水平(x)方向にはピッチ dx=25mm で±75mm まで測定を行った。

図 9 に励磁特性の測定結果とアンペールの法則に沿った磁場、OPERA-3d モデルから求めた計算値を

示す。実測値は計算値と良く一致していることが確認された。

図 10 に z 軸方向に沿った磁場についてコイル換装前後での比較を示す。旧コイルでの測定結果は OPERA-3d の結果と良く一致するが、新コイルでは Fringe 部分で相違が見られた。その際の測定経路に沿った磁場の積分(BI積)を表 2 に示す。旧コイルでの BI積と比べて約 2%低い結果となった。

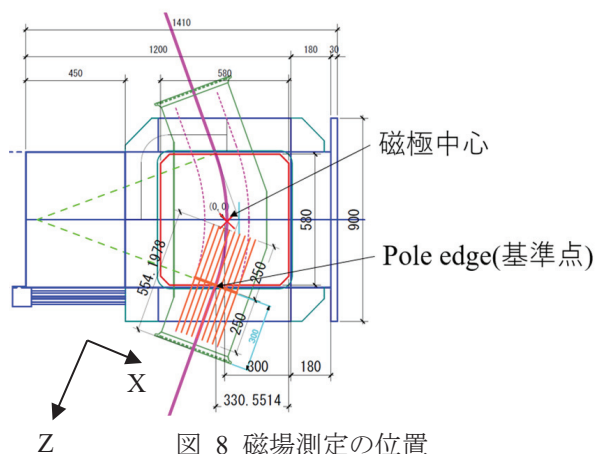


図 8 磁場測定の位置

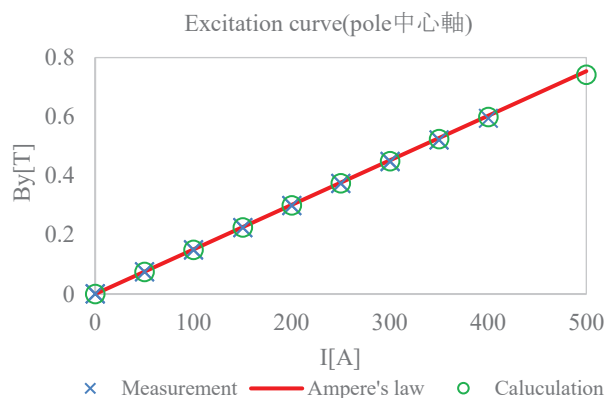


図 9 励磁特性の測定結果

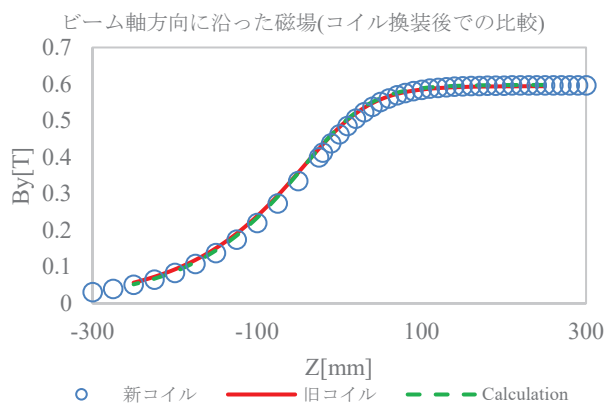


図 10 中心軸に沿った引き抜き

表 2 BI積

	旧コイル	新コイル
BI積[T・m]	0.202	0.197

今回交換したコイルは旧コイルと同じ外寸で巻き数も同じだったことから、磁場測定結果は一致すると予想していた。一致しなかった原因を考えていく中で、基準点となる Pole edge を CAD 図のダクトフランジの中心位置から設定したが、電磁石とダクトのミスアライメントを考慮していなかった。電磁石とダクトがビーム方向に 10mm ずれていたと仮定した場合、旧コイルでの測定結果と良く一致していることが確認された。

図 11 に実測値の測定位置を -10mm した場合の磁場と旧コイルでの測定結果を示す。

また、中心軌道および水平方向に $\pm 75\text{mm}$ の軌道において、新コイルと旧コイルで BI積の一致も確認された。表 3 に $x=-75\text{mm}, 0\text{mm}, 75\text{mm}$ での BI積を示す。

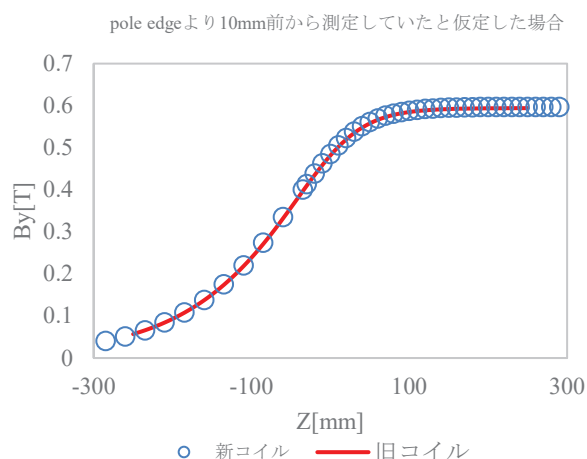


図 11 Pole edge が 10mm ずれていたと仮定した場合の磁場測定結果

表 3 BI積の比較($x=-75\text{mm}, 0\text{mm}, 75\text{mm}$)

	BI積(旧コイル) [T・m]	BI積(新コイル) [T・m]
X=-75mm	0.215	0.215
X=0mm	0.202	0.203
X=75mm	0.188	0.188

以上のことから、今回の磁場測定では電磁石とダクトのミスアライメントにより測定値が旧コイルと一致しなかったと推測される。また、旧コイルでの

測定結果が OPERA-3d の計算結果と良く一致していたのは、電磁石単体(ダクト無し)での測定であったため、Pole edge の位置を合わせやすかったからである。

6. 高運動量(250MeV/c)のミュオンを輸送する場合の評価

新コイルでは 250MeV/c という高運動量のミュオンを輸送できるように冷却水路数を 3 水路/コイルから 6 水路/コイルに増設した。250MeV/c のミュオンを輸送するために必要な電流値である 510A を流した際の冷却水の温度上昇を計算した結果を表 4 に示す。J-PARC においては冷却水の流速は 2 m/s 以下、冷却水の温度上昇が 25 °C 以下と運用条件が定められている。旧コイルでは冷却水の温度上昇が条件をオーバーするのに対して、新コイルでは条件を満たしており、J-PARC で使用可能であることが分かる。

表 4 250MeV/c のミュオンを輸送する際の計算

	旧コイル	新コイル	条件
ホロコン形状	□12×12- □6×6	□12×12- φ6.5	-
公称断面積 [mm ²]	108	110.8	-
コイル全体の 抵抗(20°C)[Ω]	0.1176	0.1146	-
冷却水路数	6	12	-
電磁石での差 圧[MPa]	0.1	0.1	-
流量[L/min]	15	21	-
流速[m/s]	1.26	0.88	< 2
電流[A]	510	510	-
発熱量[cal/s]	7.31×10 ³	7.12×10 ³	-
温度上昇[°C]	29	20	< 25

また、510A を流した際の磁場分布を図 12 と図 13 に示す。純鉄の飽和は 2T 付近から顕著になると言われているが、Median plane と Pole 表面のどちらでも磁場は 2T に達しておらず、磁極の飽和は見られないので、250MeV/c のミュオンを問題無く輸送可能であることが磁場計算からも示された。

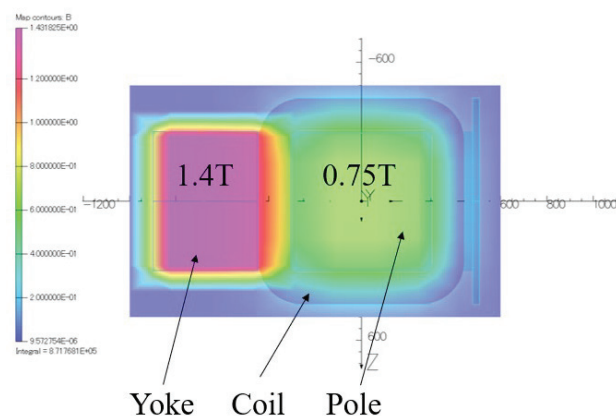


図 12 median plane(Y=0)での磁場分布

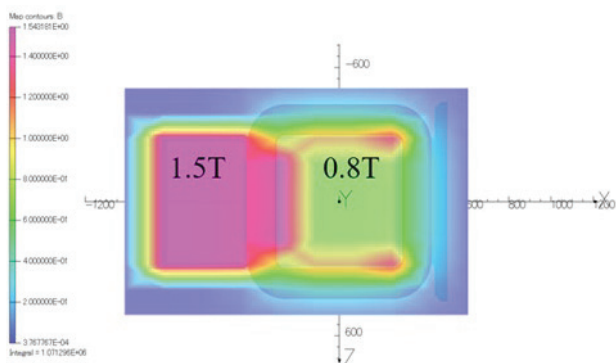


図 13 Pole 表面(Y=100)での磁場分布

7. まとめ

ホロコン選定からコイル換装作業までを 3 年で行う計画を立て、今年度は最終年度としてコイル換装作業と磁場測定を実施した。

コイル換装後の性能検査において、各パラメータが計算値と概ね一致していることが確認された。

磁場測定から得られた結果は、旧コイルと fringe 部分で一致しなかったが、電磁石とダクトのミスアライメントを仮定すると、旧コイルと良く一致したため、当該ミスアライメントが原因ではないかと考えられる。

さらに、冷却水路数の増設により、高運動量のミュオン(250MeV/c)を輸送できるように電磁石の高度化も併せて実施した。

新コイルを実装した DB2 はビームラインに再設置され、再チューニングすることなく、現在順調に稼働中である。

参考文献

- [1] T. Yuasa and H. Fujimori *et al.*, Optimization of spare coils and magnetic field for dipole magnet (DB2) at decay muon beamline in J-PARC, KEK Proceedings 2019-13 (March 3-5 2020, Chiba University, Japan), P57-60 (in Japanese).

ガフクロミックフィルムによるビームロス評価

○塩澤 真未 帯名 崇

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構(KEK)は多くの加速器を所有している。加速器は電子や陽電子、陽子などの荷電粒子を光速近くまで加速して高エネルギーのビームを作り、それから得られる放射光や二次粒子ビームを用いて物質や生命の根源や宇宙の起源を解明するための実験装置である。ビームが失われると放射線が出るため、加速器は遮蔽体で覆われている。ビームロスが比較的多い箇所では加速器停止後も残留放射線が見られることもある。モニターや電磁石などの加速器を構成するコンポーネントは放射線によりダメージを受け、トラブルを引き起こすことがある。実際に KEK でもビームモニターの CCD 素子が放射線ダメージを受け、図1のようにノイズとしてスターダストが見られたり、冷却水のゴムホースが放射線ダメージ等により硬化して冷却水が漏れる事故等も起こっている。

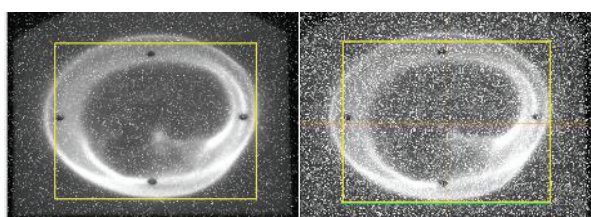


図1 放射線による CCD ダメージ
(左図 : 2018 年、右図 : 2022 年)

機器の故障前に交換したり、事前に遮蔽鉛等で保護しておくという観点からも、加速器内のどこでビームがロスしているのか、どこで放射線が強いのかを知ることは非常に重要である。しかし、放射線エリアモニターは高性能な反面、比較的高価であり配線など設置の手間もかかる上に設置場所も限られてしまう。そこで今回、設置場所の制限がほぼなくダクトや電磁石などに直接貼り付けて放射線を簡便に計測できるツールとしてガフクロミックフィルムに着目した。KEK 内の加速器 compact Energy Recovery Linac (cERL)、Photon Factory (PF)それぞれで、ビームロスにより生じた放射線を照射し、その変色度合からビームロスの絶対量や加速器リング内でのビームロス分布を評価した。今回はその経過報告を行う。

2. ガフクロミックフィルムについて

ガフクロミックフィルム(Gafchromic® film Ashland 製)は放射線への暴露により変色するラジオクロミックフィルム的一种である^[1]。もともとは医療分野で X 線や γ 線の線量分布測定用に開発、販売されてきたが、近年加速器分野でも応用されつつある^[2,3,4]。よく似たものに 2 次元の放射線測定法として知られるラジオグラフィックフィルムがある。これはハロゲン化銀が還元されて黒化する作用を利用しており、暗室での現像が必要である。一方で、今回用いたガフクロミックフィルムは放射線感受性モノマーの破断・重合作用によりポリマー化されて染色される作用を利用しており、暗室や現像が不要であるため、より簡便に測定できる。また、主な組成が炭素、水素、酸素で構成されるため、人体組成に近く安全で金属を含んでいないため使用後は容易に廃棄できる^[5]。

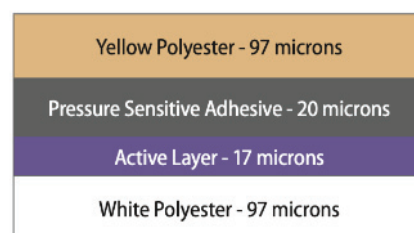


図2 RT-QA2 のレイヤー構造^[6]

ガフクロミックフィルムは感度や用途により数種類あるが今回は感度が 0.02 Gy~8 Gy の RT-QA2 を用いた。RT-QA2 は図2に示すように^[6]、17 μ m の感受層が黄色と白色のポリエステル層により保護されるようなレイヤー構造になっており、比較的丈夫で扱いやすい。

新品のフィルムは鮮やかなオレンジ色をしているが、放射線を照射されたフィルムは図3のように積分 Dose 量に応じて、きつね色→茶色→こげ茶色へ



図3 RT-QA2 の色の变化

と変化する。この色の変化を一般的な反射式のフラットベッドスキャナーで読み取り、cERL では、エリアモニターを用いて絶対値の校正を行った。PF では、ロスが多い場所ではビームロスにより生じた放射線の影響でフィルムが黒くなると考え、一定の期間 PF リング 1 周にフィルムを 50 枚程度設置して色の変化によりビームロス分布を測定した。

3. 保管と照射準備

3.1 購入と保管

ガフクロミックフィルムを購入すると、温度履歴シートが同梱されているので、まずこのシートが青・黒色であることを確認する。もしフィルムが輸送過程で高温状態に晒されてしまうと温度履歴シートはオレンジ色になり、そのフィルムでの放射線量を正しく評価することができなくなってしまう。

ガフクロミックフィルムは遮光した上で 15～35℃の室温中で保管する。極度の乾燥した環境ではフィルムが変質する恐れがあるためデシケータや冷蔵庫での保管は避ける。

3.2 照射準備

今回使用した RT-QA2-1010J は購入段階では 10 インチ四方の正方形であったため、目的に応じてカッターで裁断した(図 4)。ハサミやローラー式の裁断機では剥離が生じやすかったため、カッターを採用した。フィルムにはスキャン時の方向依存性があることが知られているので^[5]、図 4 に示すように裁断前にフィルムの隅に管理番号や印を書いておき、スキャン時にもとの方向を統一できるようにした。



図 4 照射準備

今回は 50 mm×60 mm のサイズにカッターを用いて裁断し、運搬や設置の際にフィルムが傷いたり、剥離しないようにポリエチレン製の袋に入れた。裁断の際は、定規等で傷がつかないようにスキャン時にスキャナーの読み込み面となるオレンジ色の面を下向きにしたり、カッターマット上の微細なゴミによりフィルムが傷つくこと

を避けるためにブロワーでゴミを除去しつつ作業を行った。また、フィルムに触る際は手袋を着用してフィルムに油脂がつかないように気を付けた。

4. 照射とスキャン

図 4 の状態のフィルムを KEK 内の加速器 cERL と PF の加速器室内に養生テープを用いて運転前に貼り付け、運転後に回収した。

cERL は開発中の加速器であり、単位時間あたりに周回している電荷量が圧倒的に多くビームロスを減らす目的で加速器室内に合計 12 個の放射線エリアモニターの ALOKA モニター(日立アロカメディカル製)が設置されている。ここに加速器運転期間中にフィルムを設置し(図 5)、その期間に ALOKA モニターで計測した積分 Dose 量とフィルムの色の変化をキャリブレーションカーブとして求めた。

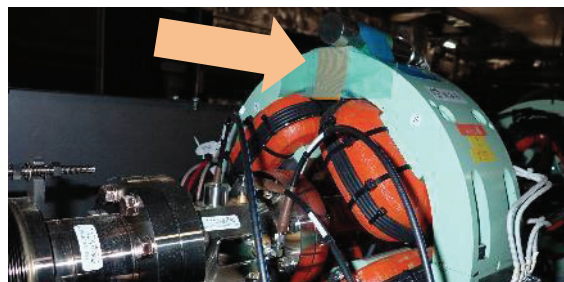


図 5 cERL の四極電磁石に設置したフィルム

一方 PF は営業マシンとして安定的な運転を行っており、ロスが多いと思われる入射点付近に ALOKA モニターが 1 つあるだけである。運転期間中に加速器室内に入れる回数も cERL に比べて限られているため、キャリブレーションカーブの作成が難航している。しかし、ビームロス測定の目的で加速器室内壁に設置したフィルムでリング 1 周分の分布を測定できたのでその結果を報告する。照射後のフィルムは、照射量により図 6 のように色の変化がみられる。潜像の影響^[1]を避けるために半日ほど遮光、室温の条件で保管したのちスキャン時の反射を避けるため袋から取り出して図 6 のようにコピー用紙に糊で張り付けた。

この際に方眼紙などを用いるとスキャン時に透けてしまうので避ける。また、フィルムを張る際にテープ等を用いると、凹凸ができスキャン時にモアレ縞ができる原因になりやすいので気を付ける。

この状態で反射方式のフラットベッドスキャナーでデジタル化した。ラテラル依存性^[5]を考慮し、スキャン方向と垂直方向の CCD 配列方向から離れない

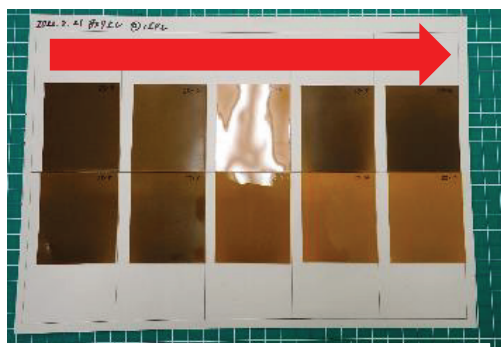


図 6 スキャン準備

ようになるべく中心付近にフィルムを配置した。図 6 のようにフィルムを配置したら、矢印方向にスキャンするとよい。また、スキャナーの読み込み面のゴミを除くのにスキャン毎にブロワーで塵を飛ばすとよい。今回使用したのは、PF 制御室内の複合機 ApeosPort2360 で、読み取り解像度は最大設定値の 600dpi で、ユーザーが設定できる条件はすべて手動設定にした。スキャンしてデジタル化したフィルムは Python で解析を行った。

5. cERL での実験

2021 年 10 月の cERL 運転期間中にフィルムへの照射を行った。cERL の運転は連続して行っており、1 日ごとに点検のために加速器室内に入ることができる。また上述したように ALOKA モニターも多数あるため、図 7 の○△プロットに示すように合計 11 枚のフィルムで積分 Dose 量と色の変化の対応をとることができた。

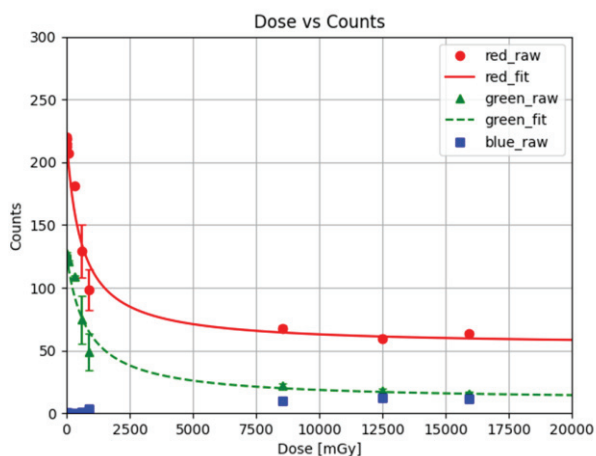


図 7 キャリブレーションカーブ

まず、デジタル化したフィルムは管理番号の部分を除くため 850×950 pixel に切り取り、それぞれのピクセルの 8bit の Red、Green、Blue それぞれの成分を抽出した。細かい傷やスキャン面のゴミが白とびとして見えてしまったのでカーネルサイズ 10 で

median filter をかけた。これをフィルム毎に平均したカウント値が縦軸プロットである。一方で横軸はフィルムを設置していた期間に ALOKA モニターでカウントした線量の総和である積分 Dose 量である。ALOKA モニターは等価線量(Sv)としてモニターしているが、今回は放射線荷重係数を 1 として 1 Sv = 1 Gy の吸収線量として考えた。Blue 成分は照射量に対する応答が悪く、ほぼバックグラウンドレベルで推移していたため解析には用いていない。

実線および破線はそれらのプロットを有理関数^[7]

$$X(D) = a + b/(D - c) \quad (D \text{ は Dose 量、} a, b, c \text{ は定数})$$

でフィッティングしたものである。フィルムのダイナミックレンジから外れる照射量のフィルムもあったが、系統的な変化が見られたため、今回は 11 点すべてを用いてフィッティングを行った。表 1 にその結果を示す。

表 1 フィッティングパラメータ

	a	b	c
Red	5.45×10^1	9.42×10^4	-5.69×10^2
Green	9.25×10^0	9.31×10^4	-7.90×10^2

このようにキャリブレーションカーブを求められたことにより、未知線量の照射済みフィルムの積分 Dose 量を見積もることができるようになった。

6. PF での実験

2021 年秋の PF 運転期間中の 12 月 9 日～12 月 23 日の 2 週間の期間、PF 加速器室の内壁にフィルムを設置した。厳密な測定をするわけではないので、内壁からビームまでの距離はほぼ一定であるものとして、多角形の内壁の各々の頂点からビームの上流・下流にそれぞれ 1000 mm の位置、ビーム高さと同じ床から 1200 mm の高さに合計 47 枚設置した(図 8)。

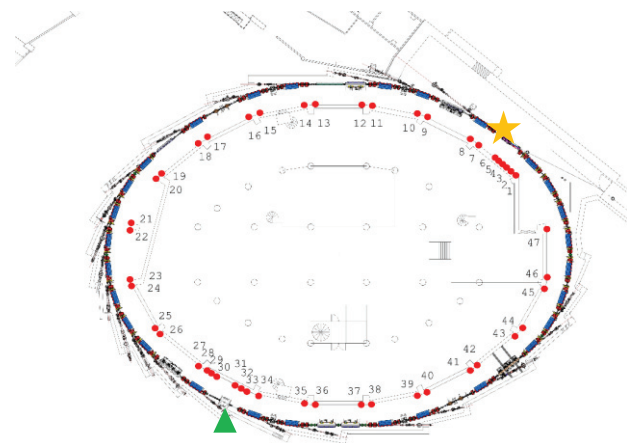


図 8 フィルムの設置場所

超伝導ウィグラー付近は既設のロスモニター等からビームロスが多いことがわかっているため、多めに設置した。

先ほどと同様に RGB 成分をフィルム毎に抽出し、フィルムナンバーに対するカウント値の変化のプロットを図 9 に示す。

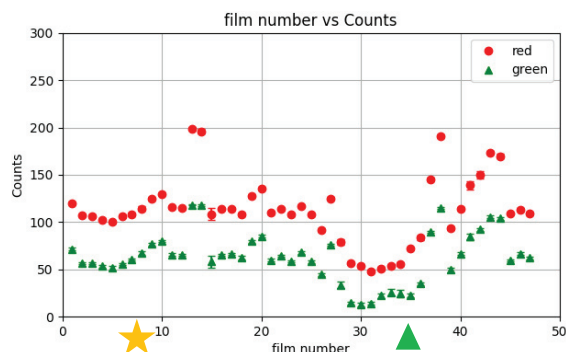


図 9 PF リングのロス分布

図 9 中に示した☆と△マークは図 8 に対応しており、それぞれ入射点と超伝導ウィグラーの場所を示す。今回の測定により、予想される箇所以外での大きなビームロスは見られないことが分かった。また、入射点付近より超伝導ウィグラー付近での吸光度が高いことから、入射点より超伝導ウィグラー付近のほうがよりビームロスが多いということが今回の調査により明らかになった。

一方で、パルス六極電磁石電源の影となっていた箇所に設置していた 13 と 14 のフィルムはほぼ黒化しておらず、Red、Green 共にカウント値が高かった。このことより、物体の影となっている場所には放射線はあまり当たらず、遮蔽がいかに大切かということを改めて確認することができた。

今回、詳細は紹介しないが cERL でのキャリブレーションカーブが PF でのキャリブレーションデータと整合しなかったため PF の ALOKA モニターの隣に設置したフィルムを用いて新たに PF 用のキャリブレーションカーブを作成しようと試みた。しかし、積分 Dose 量が低線量の領域で狭すぎたことと、系統的な変化をしなかったことでキャリブレーションカーブの作成に至っていない。これは蛍光灯下の環境で照射を 2 ヶ月ほど続けたことと、ALOKA モニターの位置がビームダクトから遠かったことが考えられる。

放射線を照射していれば、蛍光灯の影響は誤差程度で気にならないだろうと考えていたが、長期でかつ低線量の照射では、加速器による放射線に加え蛍光灯の光の影響でフィルムが変色してしまったために、思うような結果が得られなかったと考えられる。



図 10 蛍光灯によるフィルムの影響

図 10 は室温の蛍光灯下でおよそ 2 ヶ月間放置したフィルムと新品のフィルムの比較である。放射線環境でなくても、人間の確認できるレベルで色の変化が認められる。

7. まとめと今後の課題

ガフクロミックフィルムは、比較的短時間で強い照射量がある環境とエリアモニターが 1 つあればキャリブレーションカーブを求め、フィルムの色の変化から絶対値を見積もることができる。一方で相対的な評価であれば、比較的簡単に行える。また、現像が不要で色の変化を現場ですぐに目で見えて確かめることができるため、厳密な解析を行わないラフな測定に用いるのが便利である。

今後は PF におけるキャリブレーションカーブを作成すべく、茶封筒などを用いて、蛍光灯の影響をできるだけ排除できるような工夫をしたい。cERL におけるキャリブレーションカーブもより高精度なものとなるよう Dose 量との対応をもっと増やしていきたいと考えている。

参考文献

- [1] ガフクロミックフィルム研究会編 ガフクロミックフィルムの取り扱いに関して 第 10 回ガフクロミックフィルム研究会(2018).
- [2] Y.Yuri *et al.*, “Application of a Gafchromic film to the intensity distribution measurement of low-energy ion beams”, in the Proceedings of the 13th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, 2016, p.1277.
- [3] T.Ishizaka *et al.*, “Calibration of gafchromic dosimetry films for large-area ion-beams distribution measurement”, in the Proceedings of the 9th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, 2012, p.594.
- [4] T.Ishizaka *et al.*, “Measurement Method of Ion-beam Relative Intensity Distribution Using γ -Ray Irradiation Response Function of Gafchromic Film HD-V2”, Radioisotopes 66, 252 (2017).
- [5] 吉田 毅 GAFCHROMIC 事始め 第 9 回 GAFCHROMIC Film 研究会(2017).
- [6] Gafchromic RTQA2 film, http://www.gafchromic.com/documents/RTQA2_Literature.pdf
- [7] Lewis D, Micke A, Yu X ラジオクロミックフィルムによる正確な線量測定を簡単にする解析方法 VERITAS SCIENCE LETTER (2014).

軟 X 線ビームライン集光鏡の in situ 炭素汚染除去

豊島章雄 ^{A)}、菊地貴司 ^{A)}、田中宏和 ^{A)}、松岡亜衣 ^{A)}、○片岡竜馬 ^{A)}、
若林大祐 ^{A,B)}、間瀬一彦 ^{A,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)}総合研究大学院大学

1. はじめに

放射光光源から放出されるシンクロトロン放射は、ビームラインで適切に集光・単色化され、ユーザーの測定装置に供給される。真空紫外光 (VUV)、軟 X 線 (SX) を供給するために、集光鏡、回折格子などの光学素子が用いられる。VUV や SX は、気体中で容易に吸収されるため、供給するためのビームラインは低い圧力を保つ必要がある。

VUV ビームラインにおいて、測定試料の炭素 K 吸収端領域の吸収スペクトルを正確に測定するためには、チェンバー内残留炭化水素に起因する光学素子の炭素汚染を防ぐ必要がある。我々は、表面化学研究用 VSX ビームライン BL-13A (図 1) を建設するにあたり、残留ガスによる光学素子の炭素汚染を防止するために、ビームライン全体にわたり 1×10^{-8} Pa 以下の到達圧力を実現した^[1]。さらに in situ で光学素子の炭素汚染を除去することを目的として、M3A チェンバーに 1×10^{-2} Torr- 1×10^{-3} Torr の酸素、M2/G チェンバーに 1×10^{-6} Torr- 9×10^{-5} Torr の酸素を導入しながら、0 次光を照射して表面酸素原子を生成し、M1、M2、Gr、M3A の表面炭素汚染を除去した^[2]。また、2013 年に建設した BL-13B についても同様に炭素汚染除去を行った。

我々は、BL-13B 後置鏡 M3B を交換したことに伴い、2021 年度第 I 期運転期間に M3B およびブランチ振り分けミラー Mp の炭素汚染除去を行った。また、第 II 期運転期間に上流の M1 ミラーの炭素汚染除去を行った。本報告書では、これらの実験結果について報告する。また、第 II 期には、Mp について、Ni コートミラーおよび Au コートミラーの反射光強度の比較を行ったので、本報告書で併せて報告する。

2. 実験方法

本実験では、超高真空槽に酸素気体を導入して行

う。ビームラインでの真空トラブルを起こさないために、チェンバー内の適切な圧力監視が望まれる。そこで、ゲートバルブ開閉、酸素気体導入時、ポンプ立ち上げ時など、何か操作を行うたびにチェンバー内圧力を記録した。

実験の前に、M3B チェンバー上流の水平スリット、M3B チェンバー上流の上下スリット、および M1 焦点位置での水平スリットを予め全開にした。炭素汚染除去前に炭素の K 吸収端 (280–330 eV) における最下流での光強度を測定し、炭素汚染に由来して光強度が低下していることを確認した。光源基幹部チェンバー GAB の圧力が 1×10^{-10} Torr 程度であることを確認しつつ、炭素汚染除去を行う光学素子のチェンバー内に酸素気体を 1×10^{-3} Torr 導入しながら 0 次光を照射した。このとき、図 2 のように、0 次光によって発生した酸素原子の発光が確認できる。0 次光を 1 時間程度照射した後、酸素気体導入を止め、炭素 K 吸収端付近における最下流の光強度を測定し、炭素汚染が除去されているか確認した。

3. 結果

3.1. M3B, Mp ミラー炭素汚染除去 (2021 年度第 I 期運転)

図 3 に、炭素除去前、M3B 炭素除去後、Mp 炭素除去後、Mp 照射位置変更後のミラー電流、金メッシュ電流を示す。

表 1 より、第一後置鏡 (M3B) チェンバーにのみ O₂ を導入したところ、実験前後の M3B 電流測定において炭素の吸収端における電流値の回復は 5%程度にとどまった。これは M3B より上流にある光学素子も炭素汚染されていることを示唆する。可能性として第一集光鏡 (M1) と振り分け鏡 (Mp) が挙げられたが、M1 はビームライン使用時に常時微量の O₂ が導入された状態で白色光が照射されているため、

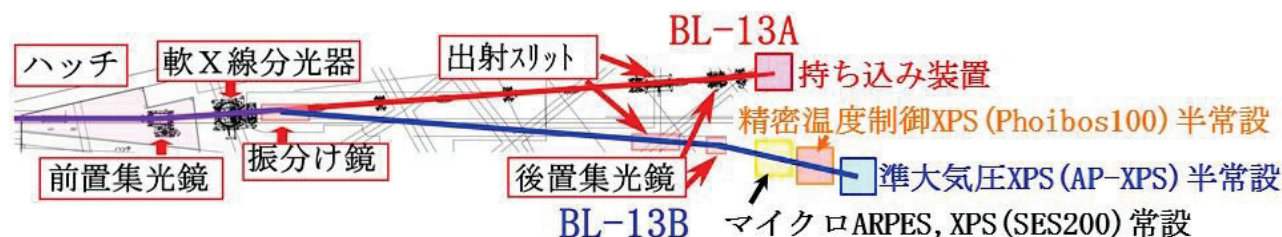


図 1 放射光実験施設軟 X 線ビームライン BL-13^[1]。

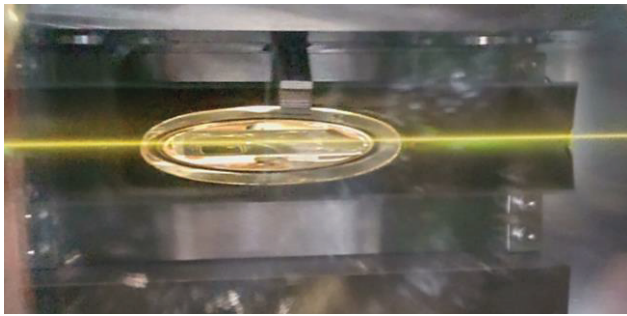


図2 酸素雰囲気で0次光を照射したときのミラーの様子。炭素汚染は考えにくい。よって、この光量低下はMpの炭素汚染が原因と考え、Mpについても追加で炭素汚染除去を行うこととなった。M3B電流について、M3B炭素汚染除去後の測定電流は、測定領域において炭素汚染除去前の電流より平均約60%増加したが、Mp炭素汚染除去後の測定電流はM3B炭素汚染除去後の測定電流と比較して平均約13%減少した。原因として、マイクロメーターを含むスリット可動部のバックラッシュ、光学素子の熱負荷などによって、各実験に関して再現性が得られなかったことが考えられる。特に熱負荷については、吸収端位置の変動とも関連していると考えられる。これらの改善のために、(i) マイクロメーター調節時に余分に回してから元の目盛に戻すことでバックラッシュの影響を低減させる、(ii) 30分程度ビームを導入した後に測定

を開始する、といった作業が必要となると考えられる。

なお、本実験終了後、最下流に設置してある光電子分光装置 SES200 チャンバーの圧力を測定したところ、実験終了から2日後で 8.0×10^{-10} Torr、4日後では 6×10^{-10} Torr であり、炭素汚染除去時の酸素気体導入の圧力への影響は2日でかなり低減されることがわかった。

3.2. M1 炭素汚染除去 (2021 年度第 II 期運転)

図4に、実験開始前後におけるM3A電流およびIRD電流を示す。炭素汚染除去実験前後のM3A、IRD電流はいずれも最大約17%強度が増加していることから、M1炭素汚染除去に成功したと考えられる。M3Aについて、炭素汚染除去前後いずれも284.6 eVに吸収端があることがわかる。これは、本実験および前回の実験で除去を行っていないM3Aの炭素汚染に起因する吸収であると考えられる。M3A下流のIRDの電流値が284 eVで減少していることから、M3Aで吸収が起こっていることを裏付けている。

図5に、Au(赤実線)、Cr(緑破線)、Ni(黒鎖線)コートMpミラーを使用したときの後置鏡M3Bにおける光強度を示す。Crコートでは約540 - 580 eVで、Niコートでは約850 - 880 eV近傍で電流減少が見

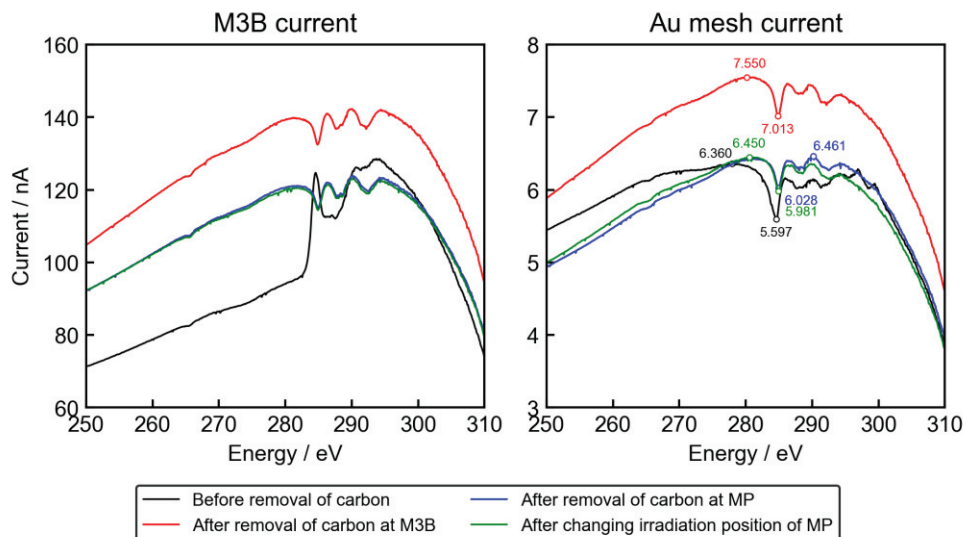


図3 炭素汚染除去後のミラー電流強度(左)、金メッシュ電流(右)。各グラフはそれぞれ炭素汚染除去前(黒線)、M3B炭素汚染除去後(赤線)、Mp炭素汚染除去(青)、Mpのビーム照射位置変更後(緑線)。

表1 各状態における金メッシュ電流の最大値と吸収端の強度比。

	Peak-maximum intensity ratio at Au Mesh / %
Before removal of carbon	87.995
After removal of carbon at M3B	92.885
After removal of carbon at Mp	93.303
After changing irradiation position of Mp	92.733

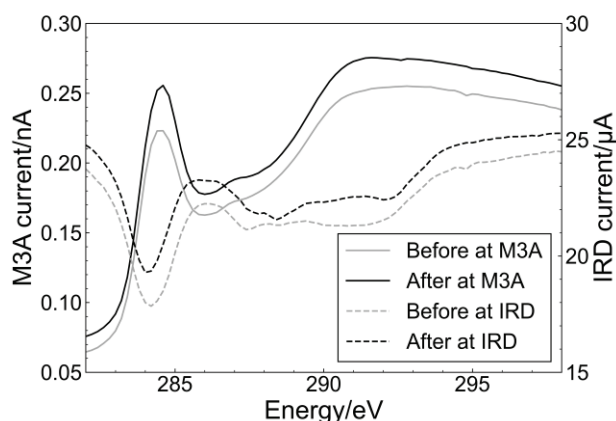


図4 M1 炭素汚染除去前（灰色）および除去後（黒色）の M3A（実線）および IRD（破線）における光強度。

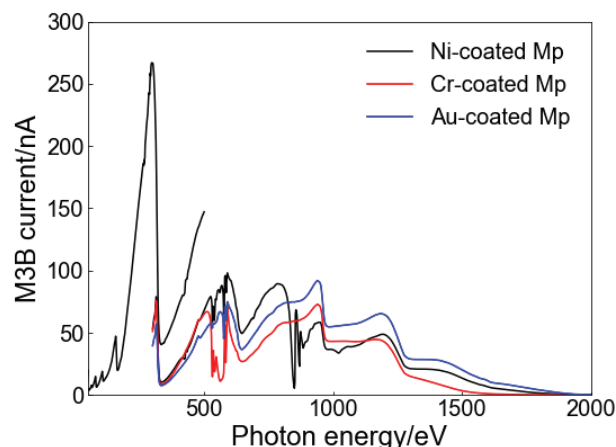


図5 Ni コート(黒線), Cr コート (赤線), Au コート (青線) Mp ミラーを使用したときの後置鏡 M3B における光強度。

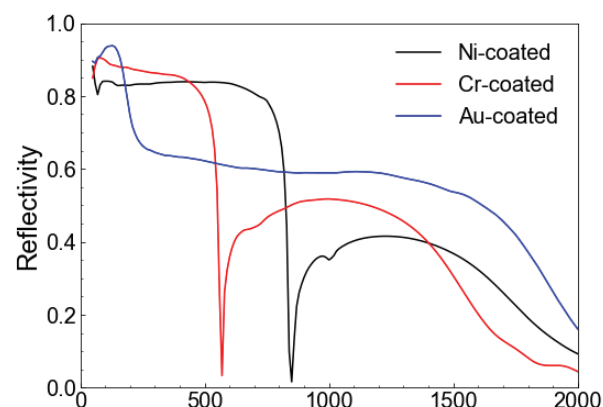


図6 Au (左上), Cr (右上), Ni (左下) を SiO_2 基板上に 50 nm 積層させたときの反射率^[3]。

られることがわかる。低いエネルギー領域（300 eV～）では Cr, Ni と比較して Au の電流の方が小さいが、Cr, Ni とともに前述の吸収端位置より高エネルギー側で Au より電流が小さくなる傾向にあることがわかる。

一方、各コーティングを SiO_2 基板上に 50 nm 積層させたときの、30 - 2000 eV の光における反射率を図 6 に示す^[3]。Au コートは、反射率が約 150 eV 以上で 60%程度まで減少し、約 1300 eV まで緩やかに

減少する。一方、Cr コートでは反射率は約 580 eV の吸収端までは 80%以上、1000 eV 付近では 50%程度である。また、Ni は、約 850 eV 付近の吸収端までは 80%以上、1200 eV 付近では 40%程度である。したがって、図 5 の結果と図 6 で示した Cr, Ni の吸収端位置および反射強度は傾向が一致していることから、本実験によって妥当な反射率の比較結果が得られたといえる。

4. まとめ・今後の展望

本報告書では、2021 年度運転中に行った BL-13 の光学素子 M3B, Mp, および M1 の炭素汚染除去の結果を報告した。これらの光学素子について酸素雰囲気下で 0 次放射光を照射することで炭素汚染除去を行うことで、光量の改善が確認された。本実験では第二後置鏡 M3B' については炭素汚染除去を行わなかったため、次年度運転以降には実施したい。また、M1 炭素汚染除去を行った際、炭素の吸収スペクトルが観測されたため、BL-13A 後置鏡 M3A の炭素汚染除去も併せて行う必要があると考えられる。

参考文献

- [1] A. Toyoshima, H. Tanaka, T. Kikuchi, K. Amemiya and K. Mase, *J. Vac. Soc. Jpn.*, **54**, 580-584 (2011).
- [2] A. Toyoshima, T. Kikuchi, H. Tanaka, J. Adachi, K. Mase and K. Amemiya, *J. Synchrotron Rad.*, **19**, 722-727 (2012).
- [3] B. L. Henke, E. M. Guilletson and J. C. Davis, *At. Data Nucl. Data Tables*, **54**, 181-342 (1993).

ヒートシールドの電磁力解析

○本間 寛人 ^{A)}

^{A)}量子科学技術研究開発機構（量研） 那珂研究所 先進プラズマ実験グループ

1.はじめに

図 1 に示す JT-60SA^[1]は世界最大の超伝導トカマク型装置であり，高いプラズマ電流で高温・高密度のプラズマを長時間維持する運転を行うことを目的とする．プラズマを制御するため，クライオスタットのポートからプラズマに向かって，計測器を内蔵するポートプラグと呼ばれる長尺な構造材を挿入し，図 2 に示すようにポートプラグ先端の観測窓を通してプラズマの計測を行う．観測窓前面にはグロー放電による壁コンディショニング中などの非計測時に，観測窓への不純物の付着を防止するためのシャッター機構が取り付けられている．シャッター駆動部はプラズマからの熱放射によって高温となり機能を失う恐れがあるが，この箇所には水冷機構を設けることが構造的に難しい．そこで，駆動部を保護するために図 2 のようにヒートシールドを設置することも一案であるが，ヒートシールドは熱以外の外力にも耐える構造とする必要がある．トカマク型装置ではしばしばプラズマ電流が急激（ $\sim \text{ms}$ ）に消滅する現象（ディスラプションと呼ぶ）が発生し，消滅のタイムスケールから非常に大きな電磁力が構造物にかかる．一般に電磁力対策の設計では板の肉厚を増したり^[3]，スリットを設けたりする^[4]ことで電磁力・応力を低減する手法が採られるが，そのスリット自体の為に力学的構造が弱くなる．したがって，ヒートシールドの設計ではスリットを設けて電磁力を低下させるとともに，リブを工夫して設けることで力学的構造を強化し，電磁力に耐えられる構造となるだろうと考えられる．

2.電磁力・構造解析のモデル

ディスラプションによるプラズマ消滅時のシミュレーションは DINA コード^[5]によってなされ，5.5 MA のプラズマ電流が 4 ms で減衰することを想定している．この条件を構造計算モデルに入力した．図 3 に構造計算の解析モデルを示す．図 1 で示した JT-60SA の内部構造を模擬し，プラズマ電流の他，CS，EF と TF コイル，さらに安定化板，真空容器および図 2 に示したポートプラグとヒートシールドが解析

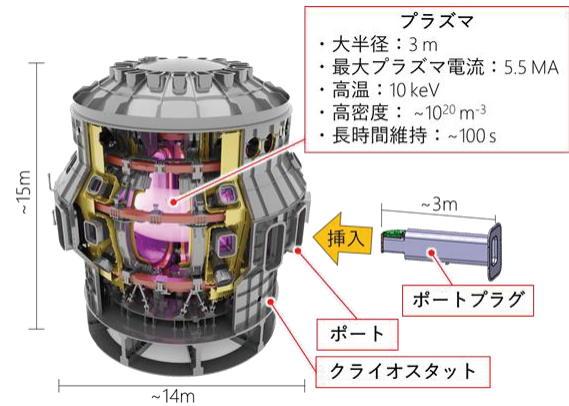


図 1 JT-60SA のデザイン^[2]

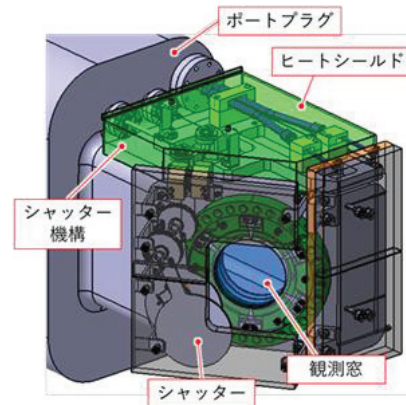


図 2 ポートプラグ先端部に設けられたシャッター機構部を保護するヒートシールド

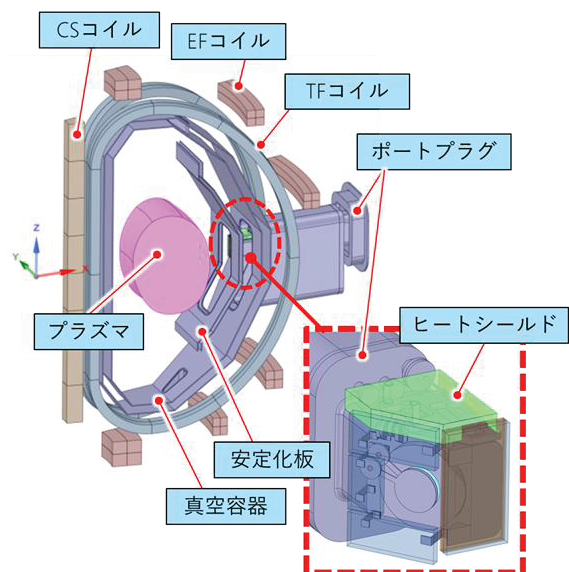


図 3 解析モデル

モデルに含まれる．ヒートシールドは厚み 3 mm，幅 372 mm，長さ 144 mm，高さ 76 mm で，板を折り曲げて溶接する構造としている．

プラズマ電流は図 3 に示す円形断面内に一様に分布すると仮定し，前述のとおり 5.5 MA から 4 ms で減衰させる．この急激なプラズマ電流の消滅により，安定化板，真空容器，ポートプラグやヒートシールドに渦電流 j が誘起され TF コイルおよび EF コイルによる磁場 B と結合して電磁力 $F = j \times B$ が生じる．ここではこの電磁力を汎用有限要素法解析プログラム ANSYS APDL によって解析を行った．

計算された電磁力による応力をヒートシールドの材料である SUS304 材の設計応力と比較する．すなわち，ANSYS APDL によるトレスカ応力を，ここではヒートシールドの温度を 200 度と仮定して SUS304 材の降伏応力 144 MPa の 1/1.5 の値である 96 MPa を設計応力（Sm 値）と比較する．設計応力を超える場合には膜応力成分 Pb と曲げ応力成分 Pm に分解し， $Pb \leq Sm$ ， $Pb + Pm \leq 1.5Sm$ にて評価を行う．

3. ヒートシールドに対する電磁力解析結果 1：スリットがない場合

図 4(a) にヒートシールドに発生する渦電流の解析結果を示す．同図に示すように XYZ 軸を設定したとき，プラズマ電流は +Z 軸方向から見たときに時計回りに流れている．したがってディスラプションによるプラズマ電流の急激な減衰によってヒートシールド中には +Z 方向の磁場が過渡的に生じ，反時計回りに渦電流 j が発生する．図 4(a) に示すように渦電流は，ヒートシールドを貫く磁束が最も多い電流ループとなるヒートシールドの周辺部で流れる電流が大きくなる．図 4(b) に電磁力の解析結果を示す．TF コイルと EF コイルがつくる磁場 B は -Y 向きに存在するので，電磁力の方向は $\pm Z$ 向きに分布する．ヒートシールドは図 5 に青矢印で示す端部と黒矢印で示す中央部で固定されているが，赤の領域は片持ち構造となっている．よって，ここでの強度設計では領域 A，領域 B，および領域 C にかかる +Z 向きに分布する電磁力の低減が重要である．各領域断面（図 4(a) 中の赤破線部）に流れる渦電流，および各領域に働く電磁力を表 1 に示す．渦電流は領域 A で 3.13 kA，領域 B で 752 N であり，各領域に働く力をヒートシールドに加えると，図 6 で示すように広い範囲で設計応力を超えるので，このままではディスラプション時に損壊する恐れがある．

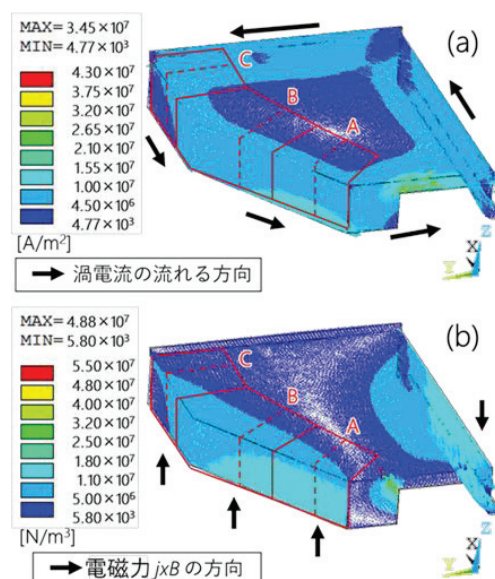


図 4 (a)渦電流の分布と(b)電磁力の分布

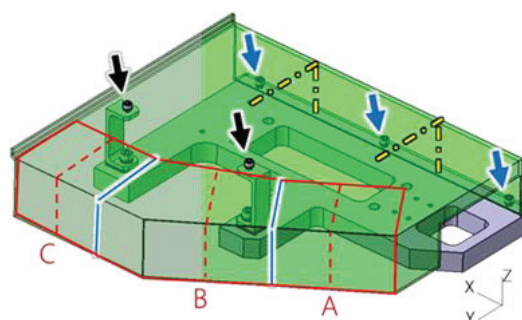


図 5 ヒートシールドの固定
青矢印：端部 3 カ所，黒矢印：中央部 2 カ所

表 1 ヒートシールド（スリットがない場合）
の各領域での渦電流と電磁力

領域	渦電流 [kA]	電磁力 [N]
A	3.13	509
B	2.84	752
C	1.45	199

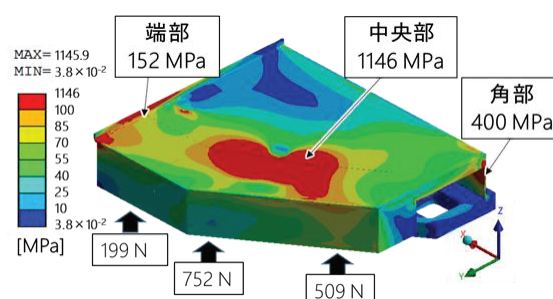


図 6 各領域に働く電磁力を与えた時の
ヒートシールドに働くトレスカ応力
(設計応力を超える領域を赤で示す)

4. ヒートシールドに対する電磁力解析結果 2: スリットがある場合

ヒートシールド中を周回する電流成分を低減させるため、図 5 の青実線部で示す位置にスリットを設ける。また、黄一点鎖線部にもスリットを設ける。A 領域と B 領域に分けるスリットは側面を流れる渦電流のピーク付近とし、B 領域と C 領域に分けるスリットは 2 つの黒矢印固定部中央とした。また、黄一点鎖線部のスリットはヒートシールド固定ボルトの中央部に設け、各ボルトが支える領域が均等になるように分割している。4 本のスリットは、プラズマの熱放射によるヒートシールド内部への入熱が小さくなるようになるべく細い幅とするのがよい。機械加工の都合から幅 3 mm とし、図 4(a)で示すように、渦電流が 1/1000 となる領域まで切断するため、各 100 mm としている。図 7 にスリットを切ったヒートシールドを示す。

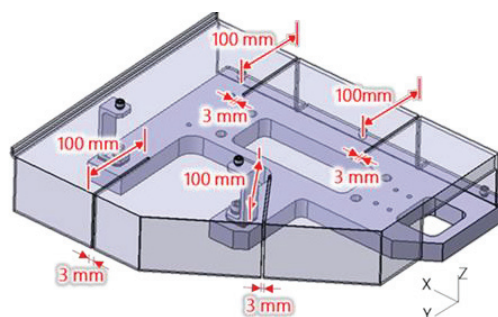


図 7 スリットを切ったヒートシールド

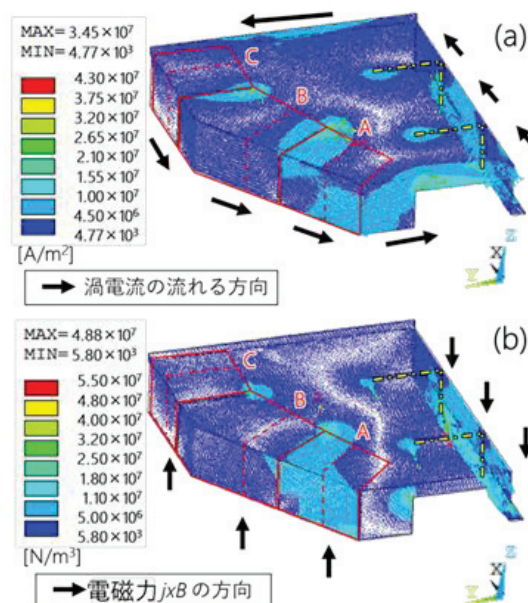


図 8 (a)渦電流の分布と(b)電磁力の分布

図 8(a)にヒートシールドに発生する渦電流の解析結果を示す。スリットによって渦電流の流れが遮られ、スリットに沿って回り込むような流れがみられる。図 8(b)に電磁力の分布を、表 2 に各領域の断面(図 8(a)中の赤破線部)に流れる渦電流、および各領域に働く電磁力を示す。スリットなしの場合に最大となっていた領域 A の渦電流は 1.45 kA、領域 B での電磁力は最大 142 N となっており、それぞれスリットありの場合と比べて減少した。同様に他の領域でも減少している。スリットを設けることで渦電流を減少させ、電磁力を低減できる見通しが得られた。しかし、応力評価を行うと図 9 中の赤色で示すように、まだ中央部と角部で設計応力を超える。

表 2 ヒートシールド (スリットがある場合) の各領域での渦電流と電磁力

領域	渦電流 [kA]	電磁力 [N]
A	1.45	335
B	1.03	142
C	0.55	65.6

5. ヒートシールドに対する電磁力解析結果 3: スリットが有りがつりブ有りの場合

図 6 に示す解析結果から主に領域 A および領域 B の応力を低減させる必要がある。ヒートシールドに加わる力は +Z 方向に作用するため、格子上のリブを設けて曲げ方向に対する断面係数を大きくする方法が有効である。一方、リブの追加によってさらなる渦電流の増加は最小限に抑える必要がある。これらの条件から、Y 方向のみリブを設けることとする。また、図 9 の応力分布から応力の大きな領域 A にはリブを 4 か所、領域 B にはリブを 3 か所設ける。領域 C では電磁力は十分に小さいのでリブを設ける必要はない。図 10 にリブを設けたヒートシールドを示す。図 9 に示したようにリブがない場合、応力の最大値は 680 MPa であるので、断面係数を約 7 倍以上増加させることによって設計応力である 96 MPa 以

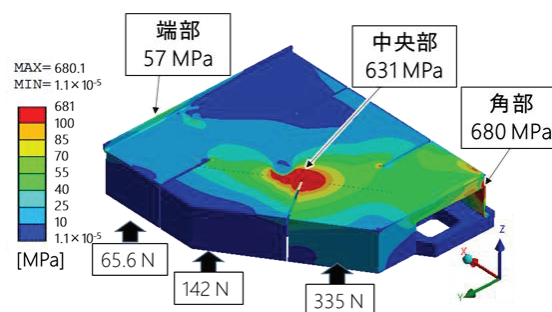


図 9 各領域に働く電磁力を与えた時のヒートシールドに働くトレスカ応力 (設計応力を超える領域を赤で示す)

下が達成可能となる．また，溶接性やその他構造物との干渉の都合から，リブ厚，高さ，間隔をそれぞれ 5 mm，30mm，および最小 25 mm とした．図 11 に示すように，リブを設けたモデルでは応力はヒートシールドの角部で最大となる．設計応力を超えるため，膜曲げ成分に分解して再度評価を行うと，表 3 に示すように膜応力成分 P_b と曲げ応力成分 P_m は， $P_b \leq S_m$ ， $P_b + P_m \leq 1.5S_m$ を満たすため，設計条件を満足することが確認された．

6.まとめ

プラズマの熱放射からシャッター機構部を保護するため，ヒートシールドの構造設計を行った．ヒートシールドにはディスラプション時に発生する渦電流のため電磁力がかかり，これによって損壊する．これを防ぐためにヒートシールドにスリットを設けると渦電流が最大で 64 %減少し，電磁力が最大で 81 %減少したが，生じる応力は設計応力を超えることが判明した．そこで，渦電流の流れ方，電磁力のかかり方を考慮してリブを磁場と平行な方向に設けることによって生じる応力を設計応力以下に抑えることに成功した．

今回の設計では，電流が流れる経路をスリットによって妨害することで，電磁力が低減されることが示された．一方で，スリットの位置や角度についてパラメータスキャンを行っていないため，最適なスリットの形状・配置は得られたとは言えない．電磁力低減は他の機器設計でも共通の課題であるため，最適な形状・配置を得る手法の確立が重要である．

参考文献

- [1] P.Barabaschi, Y.Kamata, H.Shirai, et al., Progress of the JT-60SA project, Nucl. Fusion 59 (2019).
- [2] Fusion for energy, “JT-60SA Design, 2020, <https://fusionforenergy.europa.eu/news/europe-and-japan-complete-jt-60sa-the-most-powerful-tokamak-in-the-world/>, (参照 2020-6-25)
- [3] S.Yamamoto, et al., Design of stabilizing plate of JT-60S, Fusion Eng. Des., 168(2021)
- [4] K.Weishan, et al., Electromagnetic analyses and optimization for slit configuration of ITER blanket shield block, Fusion Eng. Des., 109-111(2016)
- [5] M. Takechi, S. Sakurai, K. Masaki, et al., Disruption simulation for JT-60SA design and construction Fusion Eng. Des., 146 (2019)

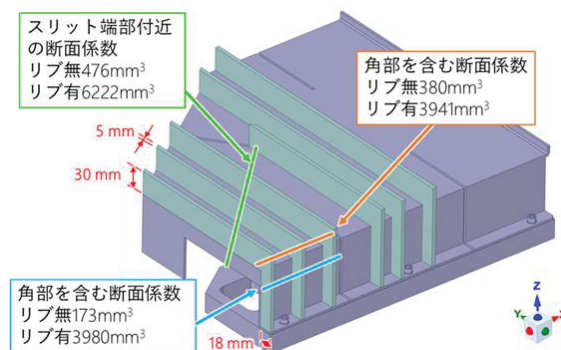


図 10 構造強化したヒートシールド

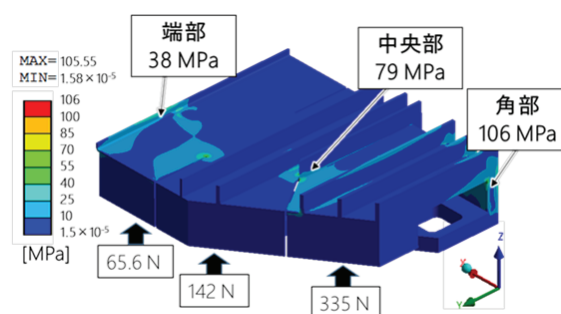


図 11 各領域に働く電磁力を与えた時のヒートシールドに働くトレスカ応力 (設計応力を超える領域を赤で示す)

表 3 角部での応力評価

膜 (P_m)	膜+曲げ (P_m+P_b)
$S_m (=96\text{MPa})$	$1.5S_m (=144\text{MPa})$
17MPa	46MPa

第 3 分野

(計測・制御技術)

汎用一斉警報通知システム WAN-WAN の展開

○豊田 朋範^{A)}、千葉 寿^{B)}、古舘 守通^{B)}、藤崎 聡美^{B)}、木村 和典^{A)}

^{A)}分子科学研究所 技術推進部、^{B)}岩手大学 理工学系技術部

1. はじめに

我々が共同開発した汎用警報システム(通称 WAN-WAN : Wireless Alarm Network for Wide Area Notification) システム^{[1][2][3]}は、分子科学研究所の共同研究棟 C 棟クリーンルーム(以下クリーンルーム)で 2021 年 4 月から運用を開始し、順次拡張を続けながら順調に運用を続けている。クリーンルームにおける WAN-WAN システム導入の必要性と監視対象イベント発生時の動作、並びに今後の拡張計画について報告する。

2. クリーンルームの構造と広範囲通知の必要性

クリーンルームは Fig.1 のように、16 台の FFU(Fan Filter Unit)からフィルターを通した清浄な空気を循環させる、水平層流方式で清浄度を構築・維持している。一方で、リソグラフィの各種工程や設備で窒素やアルゴンを使用し、アセトンなどの各種有機溶剤、更にはフッ化水素酸など毒劇物も多数存在する。

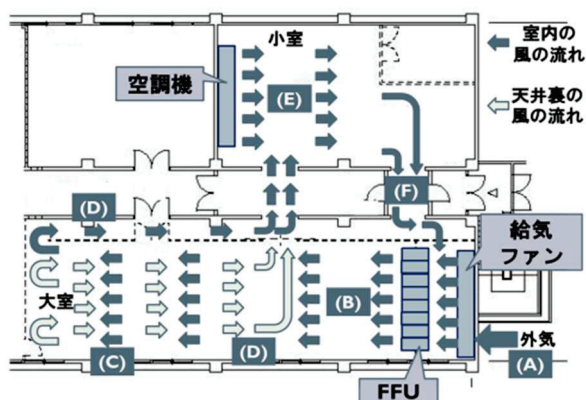


Fig.1: Air flow in clean room

空間の閉鎖性と重大事故の危険性が同時に存在するクリーンルームの運用において、ガスボンベの圧力低下や緊急事態発生を通知することは、作業中にクリーンルームを行き来する手間や定期的な巡回の削減、被害の拡大と二次災害の防止に有用である。しかしながら、クリーンルームの性質上、粉塵の発生を伴う工事は極力避けたい、現在の装置や設備はそのまま使用したい、導入費用が高額で定額の維持費が発生するなど課題が多い。

我々は、共同開発した WAN-WAN システムを適用

することで、課題の解決を図った。

3. WAN-WAN システムと基本モジュール

WAN-WAN システムとは、我々が共同開発した基本モジュールを主軸として、市販のスマートスピーカーやスマートライトなどを駆動し、携帯端末に通知するシステムの総称である。

基本モジュールは、100x50x30(mm)の樹脂ケースに、接点入力対応の BNC コネクタ、テスト用ボタン、動作インジケータ LED、電源供給用 Micro B タイプコネクタと DC ジャックを各 1 個搭載している (Fig.2)。

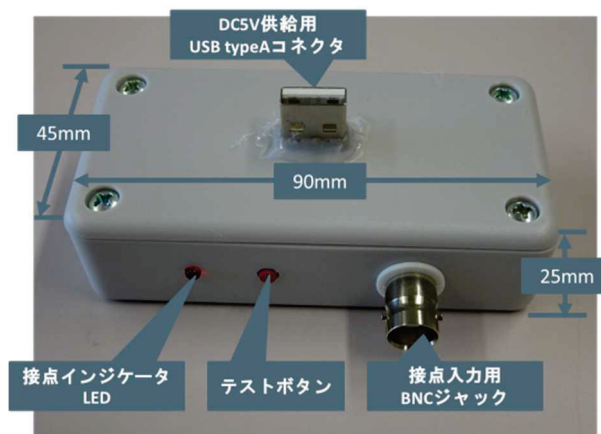


Fig.2: Basic module of WAN-WAN system

起動条件とした基本モジュールの接点入力が入 ON になると、Wi-Fi を介して別途設置したスマートスピーカーやスマートライトを起動する。これにより、たとえば、ボタン A を押した時、スマートスピーカーが「ボタン A が押されました」とアナウンスし、スマートライトが赤色で 1 分間点滅する。

4. WAN-WAN システムのクリーンルーム警報システムへの適用

WAN-WAN システムを適用したクリーンルーム警報システム(第 2 期)の構成を Fig.3 に、例として窒素ポンベの圧力低下時の通知動作を Fig.4 に示す。

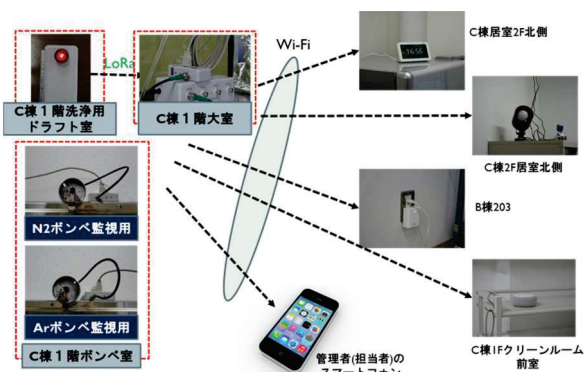


Fig.3: System configuration of clean room alert system (2nd stage) using WAN-WAN



Fig.4: Notification when the pressure of the nitrogen cylinder drops

ガスポンベの圧力計は接点出力を備え(Fig.5)、これを基本モジュールに接続することで、圧力低下時に管理者のスマートフォンに通知が入り、各所に設置したスマートスピーカがアナウンスし、スマートライトが黄色で点滅する。



Fig.5: Connection with a pressure gauge

洗浄用ドラフト室には、作業者がフッ化水素酸や硫酸に侵されて手が使用不能である、あるいは転倒した場合を想定し、床面からの低い位置に独自開発の警報ボタンユニットを設置することで、非常事態を外部に通知できるようにした(Fig.6)。警報ボタン

ユニットは LoRa(Long Range)無線 を搭載している。

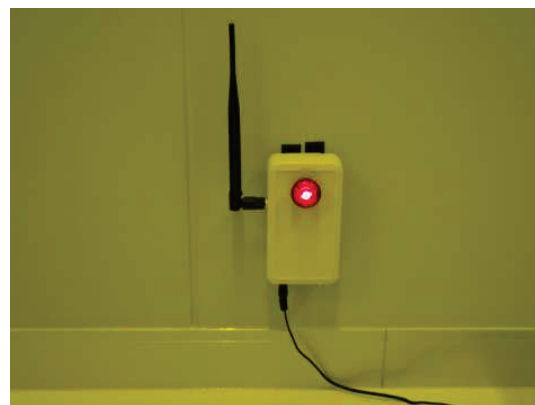


Fig.6: Alert button unit with built-in LoRa

LoRa (Long Range) 無線とは、920MHz 帯の長距離伝搬・障害物に強いことを特徴とする無線通信規格である^[4]。分子科学研究所のクリーンルームは、周囲をカラー鋼板で囲まれている入り組んだ空間で、洗浄用ドラフト室のように Wi-Fi や 4G 回線が圏外になるポイントもある。そのようなポイントでも、LoRa 無線 を使用することで、あたかも延長ケーブルのように通信距離を延長することが出来る。

警報ボタンが押されると、LoRa 無線によって、Wi-Fi が届く場所に配置したマスターユニットに通知が届く。マスターユニットには WAN-WAN 基本モジュールを接続しており、基本モジュールの接点入力を ON にして、システムを起動する。

アナウンスの内容、言語、アナウンスするスマートスピーカの選択や追加などは、クリーンルーム担当者からの要望を受けて何度か調整している。

5. 関連ユニットの開発と今後の拡張計画

WAN-WAN システムを用いたクリーンルーム警報システムは、運用開始以降、窒素ポンベの圧力低下を 4 回、アルゴンガスの圧力低下を 2 回通知している(2021 年 12 月現在)。圧力低下はいつ発生するか分からないため、圧力低下の通知は、毎日の巡回や使用したい時に使用できないストレスから解放されると、担当者からも好評である。

クリーンルーム警報システムは、第 3 期でスマートスピーカを 2 箇所増設した他、-270℃~1800℃の温度計測が可能な熱電対ユニット(Fig.7)、床の水漏れを検出する水漏れセンサユニット(Fig.8)を開発した。いずれも基本モジュールと USB コネクタで直結でき、基本モジュールに電源供給が可能である。

策定中の第 4 期(Fig.9)では、搬入口上部に設置されたパトライトと、酸素濃度計を加える計画であり、クリーンルームの安全・安心な稼働と担当者のリソ

ースを本来の業務に向けるための環境づくりに貢献する所存である。

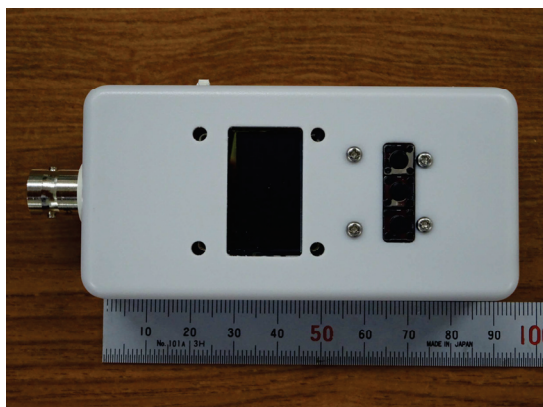


Fig.7: Thermocouple unit



Fig.8: Water leak sensor unit



Fig.9: Concept of clean room alert system (4th stage)

参考・引用文献・特許情報

- [1] 特願 2019-214632 「通知システム、通知システムにおける制御装置、及び通知システムにおける制御方法」 千葉寿、豊田朋範、古舘守通、藤崎聡美
- [2] 特願 018-156982 「緊急防災ドッキングステーション」 千葉寿、豊田朋範、古舘守通、藤崎聡美
- [3] 特許 6954530 号「警報連動型防災システム」 千葉寿、豊田朋範、古舘守通、藤崎聡美
- [4] 「クリーンルーム統合制御システムの開発－FFU 制御ユニットとトラブル対策－」 豊田朋範、装置開発室 AnnualReport2020 p24～25

6. 謝辞

本開発は、2019 年度自然科学研究機構産学連携支援事業(課題名「一斉警報通知防災システム」構想の実現に向けた社会実験)並びに 2019 年度～2021 年度川合所長奨励研究費の助成を受けて行われた。

基本モジュールと LoRa 無線は、分子科学研究所と岩手大学との共同開発の成果であり、システムの配置・試験には近藤聖彦氏、高田紀子氏、木村幸代氏、石川晶子氏(以上、分子研)に協力いただいた。各位に深い感謝の意を表する。

コンデンサバンク監視装置の概要

○溝端 仁志 ^{A)}

^{A)}高エネ研 加速器

1. はじめに

J-PARC リニアックでは半導体アンプ 4 台とクライストロン 45 台を用いて加速器の運転が行われている^[1]。クライストロンの駆動には 12 台の高圧電源を用いている。高圧電源の構成機器にコンデンサバンクがある。

設計寿命を超えるコンデンサがあり、コンデンサバンクの交換作業を進めている。しかし、交換が間に合わず、設計寿命を超えるコンデンサを使用している箇所もある。コンデンサの故障により、長期間の加速器運転停止を引き起こす可能性もあり、運転停止を最小限にするためにコンデンサ故障の予兆を早期に感知する必要がある。

2. コンデンサバンクの概要

コンデンサバンクの外観を図 1、諸元を表 1 に示す。6 号機以外のコンデンサバンクは 8 並列 2 直列で構成されていて、上下 2 段の構造となっている。これは 1 台のコンデンサの定格電圧は高圧電源の出力電圧より低いためである。リニアック建設当時から使用されているものもあり、コンデンサの老朽化が進んでいる。

2019 年にコンデンサバンク 3 号機のコンデンサ 1 台から絶縁油の漏出が判明した。油の漏出部分を塞ぐ処置をしたが、コンデンサから漏出した油の総量はわからなかった。油が漏出したコンデンサの健全性も分からないため、当該コンデンサの使用を中止しコンデンサバンクから切り離す処置をした。その結果、コンデンサバンクの構成は 8 並列 2 直列から、7 並列 2 直列になった。2020 年にコンデンサバンク 3 号機のコンデンサを全て新品に交換し、2021 年にコンデンサバンク 1、2 号機を交換した。

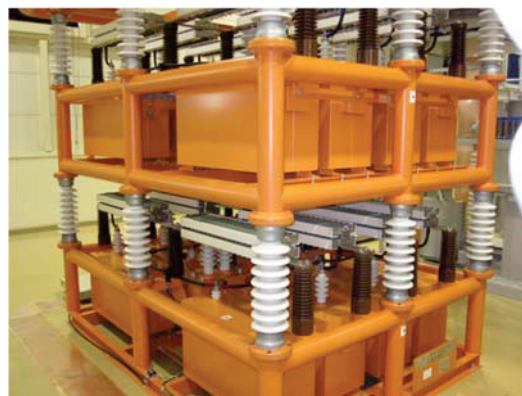


図 1 コンデンサバンクの外観

3. コンデンサ監視システム

3.1 コンデンサケースの膨張監視

コンデンサ内で絶縁破壊が発生すると、コンデンサに過電流が流れるようになる。過電流により、コンデンサの素子が焼損および発熱することによりコンデンサ内の絶縁油が分解・ガス化してコンデンサケース内の圧力が上昇する。コンデンサケース内の圧力上昇により、コンデンサケースが膨張する。監視するコンデンサは高電位のため非接触でケースの膨張の有無を測定する必要がある。コンデンサケース膨張の有無をレーザ変位センサを用いて監視する。レーザ変位センサは基準距離からの変位量を非接触で測定することが出来、測定値に応じた電圧を出力することができる。

3.2 コンデンサケースの温度監視

平常時でも周囲温度やコンデンサの内部温度によりコンデンサケースは膨張している。平常時と異常時のコンデンサ状態を区別するためにコンデンサの温度も同時に測定する必要がある。前記の通りコンデンサケースは高電位のため、温度を測定するとき

表 1 コンデンサバンクの諸元

#	1	2	3	4～5	6	7～11	12
容量	36.0 μ F		28.8 μ F	25.5 μ F	12.9 μ F	28.8 μ F	26.5 μ F
定格電圧	-110kV				-80kV	-110kV	
構成	8 並列 2 直列				6 並列	8 並列 2 直列	
製造年	2021 年		2020 年	2000 年	2003 年	2010 年	2001 年

も非接触で測定する必要がある。コンデンサの温度を放射温度センサを用いて測定する。放射温度センサも測定値に応じた電圧を出力することができる。

3.3 データ収集系

データ収集系の図を図2に示す。レーザ変位計、放射温度センサの電圧出力をPLC(Programmable Logic Controller)のアナログ入力モジュールを介してEPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)にデータを送る。それぞれのデータはアーカイバに保存され、いつでも参照が可能である。アーカイバに保存されたある日の24時間のデータ例を図3に示す。コンデンサ温度の変化量は 4.0°C 、コンデンサケースの変位量は 4.5 mm であった。

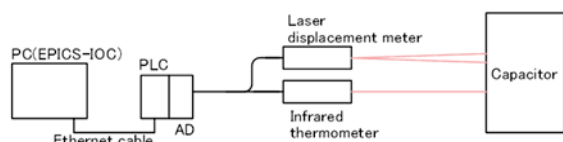


図2 データ収集系の概略

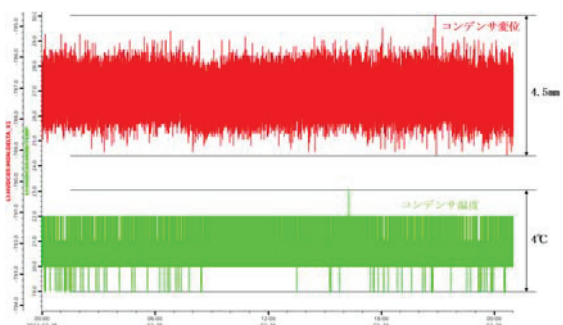


図3 24時間のデータ例

3.4 コンデンサケースの温度監視の問題点

コンデンサケース温度の測定に使用している放射温度センサは1点のみの温度を測定している。そのため、測定点以外で異常な温度上昇があった場合、異常が検知されるまで時間がかかってしまう。この問題点を解決するために温度分布を表示できるサーモカメラを併用する。

本サーモカメラを使用したプログラムではPC上で指定した範囲内の最大温度を表示できるようになる。図4にプログラムの実行画面を示す。現在は未使用ながら測定された温度が設定値以上になると接点信号を出力できる機能もある。

4. 今後の展望

老朽化が進んでいるコンデンサバンクの更新を今

後も進めていく。

また、今回紹介したシステムで測定したデータを基にコンデンサの変位、温度が設定値を超えた時に注意喚起ができるようにシステムを更新していく。さらに、機器の追加をしていき監視体制の強化を図っていく。

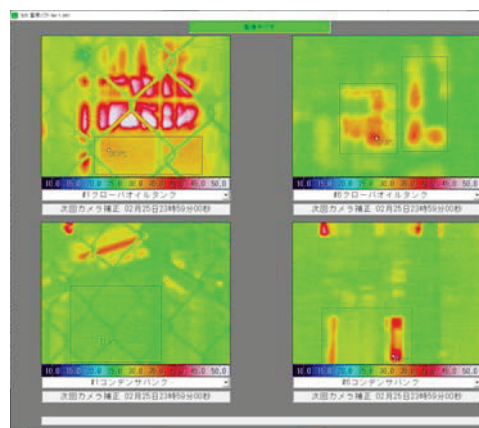


図4 サーモカメラ画面

参考文献

[1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, "ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR HIGH-INTENSITY PROTON ACCELERATOR FACILITY PROJECT, J-PARC", JAERI-Tech 2003-044, KEKReport2002-13.

植物群落の太陽光誘起蛍光による光合成測定

○増田 健二 ^{A)}

^{A)}静岡大学 技術部 教育研究支援系

1. はじめに

これまで、太陽光誘起蛍光 (Solar-Induced Fluorescence, SIF) による光合成測定システムの開発を進めてきた。日中、太陽光強度が適切な範囲にある場合には、光合成反応に伴ってクロロフィル *a* (Chl*a*) 蛍光が放出され、SIF として観測される。一方、日中の強光条件下では、クロロフィルに吸収された誘起エネルギーは、その多くが余剰エネルギーとして熱または蛍光として放出される。太陽光を利用して生育場所において、CCD 分光器による天体望遠鏡を用いた樹冠レベルの高解像度スペクトル計測と CCD カメラに広角レンズを取り付け、群落レベルの広域の SIF 画像計測をする近接リモートセンシング計測システムを開発^{[1]-[4]}した。本研究では、開発した SIF 計測システムを使い、Chl*a* 蛍光の 750nm のピーク値から光合成活性の評価を行う。太陽光が強光のもとで放出される SIF 強度値からは、熱放散経路の活性化が判断できると考えられる。熱放散が活発な植物ほど葉の表面温度は低くなるため、温暖化緩和能力の評価に利用できる可能性がある。

2. クロロフィル *a* 蛍光強度値と含有量の比較

Fig.1(a)のように、LED 光をシアンフィルター (600nm~740nm カット) とホットミラー (675nm~カット) を透過させて、620nm より長波長側をカットした光で誘起するとクロロフィルの吸収の影響を受けない 685nm と 740nm にピークのある純粋な Chl*a* 蛍光が検出できる。①濃い緑 (SPAD 値: 76.1) > ②緑 (60.2) > ③黄緑 (45.2) > ④黄 (11.8) > ⑤赤 (1.7) の順で SPAD 値が大きくなる。SPAD 値が同じくらいの値に偏らないように 40 枚の葉を選んで測定する (Fig.1(b))。緑葉(①,②,③)は F685 (684.5-685.4nm) と F740 (739.5-740.4nm) にピークがあり、黄色(④)と赤色(⑤)の葉は F740 のピークが小さくなる。2つのピーク波長の強度比 (F_{740}/F_{685}) から、Chl*a* の含有量を推定する (Fig.1(c))。Fig.1(d)のように、Chl*a* 含有量 (F_{740}/F_{685}) と SPAD 値(▲)がよい相関を示した。Chl*a* 含有量 (F_{740}/F_{685}) と F740 のピーク値(●)も相関関係がみられる。このことから、F740 のピーク値から光合成活性の判断が可能であると考えられる。

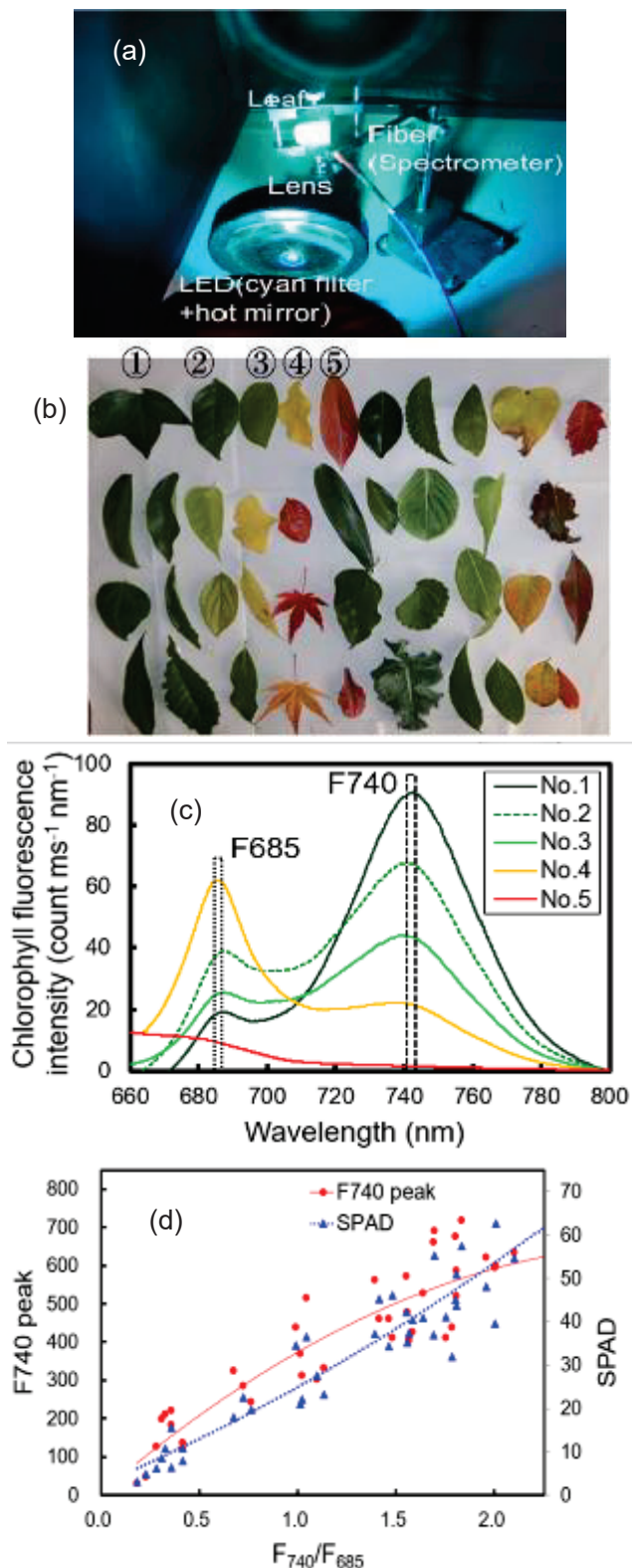


Fig.1 Comparison of Chl*a* fluorescence peak intensity value and content.

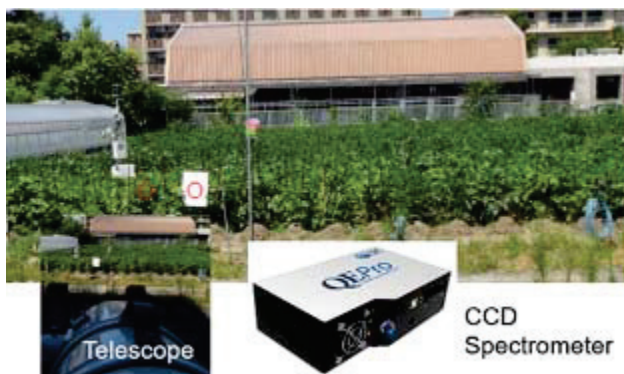


Fig.2 Measurement of SIF intensity by soybean variety.

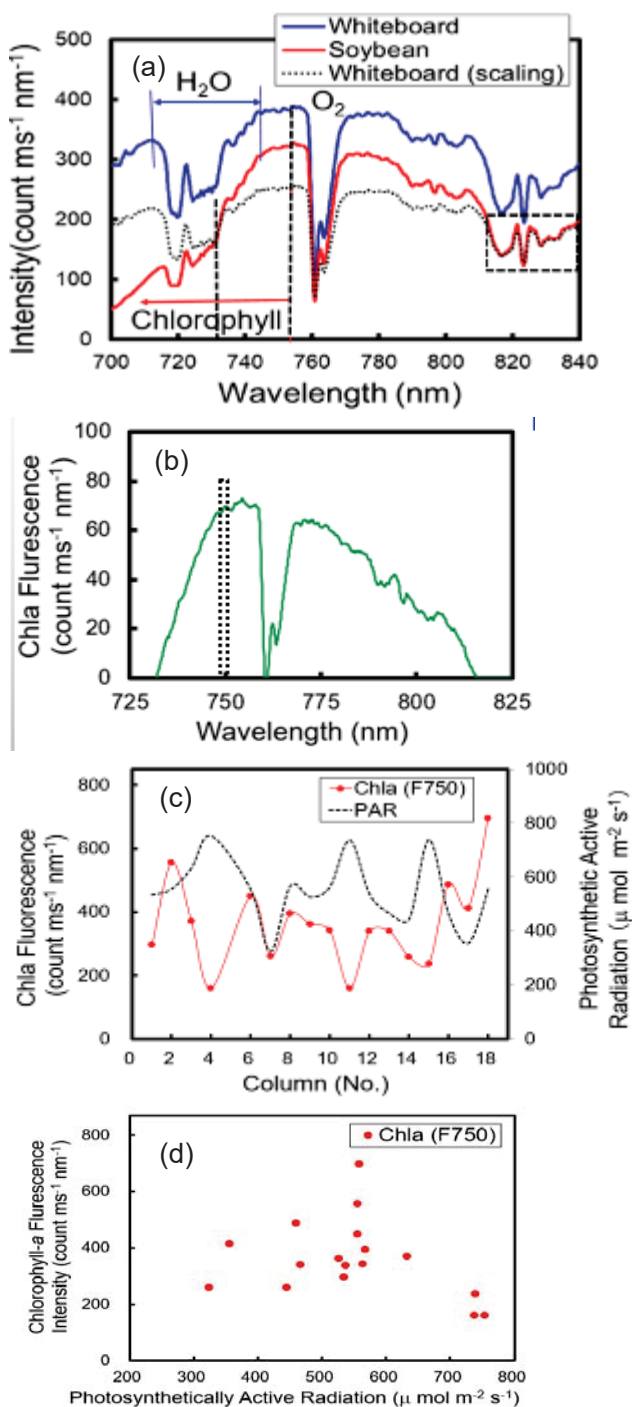


Fig.3 SIF intensity in the spectral analysis obtained for column 1-22 of soybean.

3. ダイズの品種別の SIF 強度の測定^[2]

2016 年 9 月 2 日に京都大学農学研究科の圃場において、ダイズの品種別の SIF 強度の分光スペクトル計測を行った(Fig.2)。列ごとに異なった品種のダイズが植えられている。5 列目に白板を設置する。天体望遠鏡を水平移動させて、白板とダイズの樹冠を列順に赤○枠を分光スペクトル計測する。Fig.3 (a) に示すように、青線の白板の近赤外反射スペクトルにダイズの反射率を掛けて蛍光強度のない破線枠の 815nm より長波長側をフィッティングして、スケールリングしたのが点線である。赤線はダイズの近赤外反射光+蛍光の重畳スペクトルであり、赤線から点線を差し引くことによって、SIF スペクトルが検出できる (Fig.3(b))。列 (No.)ごとのダイズの Chla 蛍光の F750Peak (●)と PAR (破線)を比較した (Fig.3(c))。Fig.3(d)のように、PAR が 550 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 辺りまでは、PAR の上昇に伴って F750Peak の SIF 強度値も大きくなっていく。PAR が 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を超えると SIF 強度値は小さくなり、光合成反応が低下していく。列 (No.)ごとに異なった品種のダイズが植えられており、PAR が 550 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 辺りの SIF 強度値の違いは、光合成活性に伴うものと考えられる。

4. Chla 蛍光の強度値と PAM (ETR) の比較

2019 年 9 月 10 日静岡キャンパスにおいて SIF 強度とパルス変調法(Pulse amplitude modulation, PAM)による電子伝達速度(Electron transfer rate, ETR) の測定を行った (Fig.4)。ターゲットの樹木は、18m の距離にあるサカキである。緑葉と赤みがかった葉を SIF と PAM で交互に測定し、その都度 PAR を測る。

Fig.5 (a)のグラフは、11 時から 15 時の間に観測された緑葉と赤葉の SIF 強度の時間変化である。PAR の変化に伴い、SIF が変化する様子が見られる。

緑または赤の個葉に、PAM 装置でレベルの異なった LED パルス光を照射することにより、最大の蛍光量(F_m)と任意の強さの光の下で放出される蛍光量(F)を測定して、式 (1)を用いて電子伝達の量子収率(Φ_{II})を求めた。Fig.5 (b)のように、PAR が上昇すると光合成に使われるエネルギーの割合である電子伝達の量子収率(Φ_{II})は低下する。

$$\Phi_{II} = (F_m - F) / F_m \quad (1)$$

式 (2)のように、 Φ_{II} の値に PAR をかけ、さらに葉の吸収係数 0.84 と、二つの光化学系への分配率 0.5 をかけると、光合成の電子伝達速度(ETR)が求まる。こうして得られた各 PAR での ETR を結ぶことで、緑葉の ETR(▲)の光飽和曲線が得られる (Fig.5(c))。この飽和値から光合成活性を評価している。

$$ETR = \Phi II \times PAR \times 0.84 \times 0.5 \quad (2)$$

SIF 強度を PAR で割った SIF 収率は、PAR が $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度までは低下していくが、以降は一定となる (Fig.5(b))。SIF も ETR と同様に PAR の値が $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度で飽和する。この飽和値から光合成活性を判断することができる。PAR が $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を超えると PAR の上昇に伴って、SIF 強度値が増加して行く。これは、余剰エネルギーとしての蛍光(SIF)を検出している (Fig.5(c))。

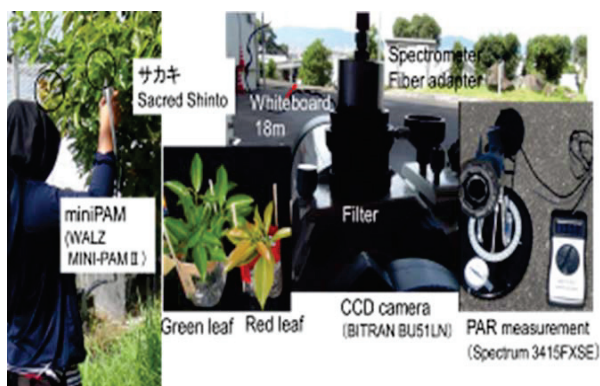


Fig.4 Measurement of SIF intensity and PAM (ETR) .

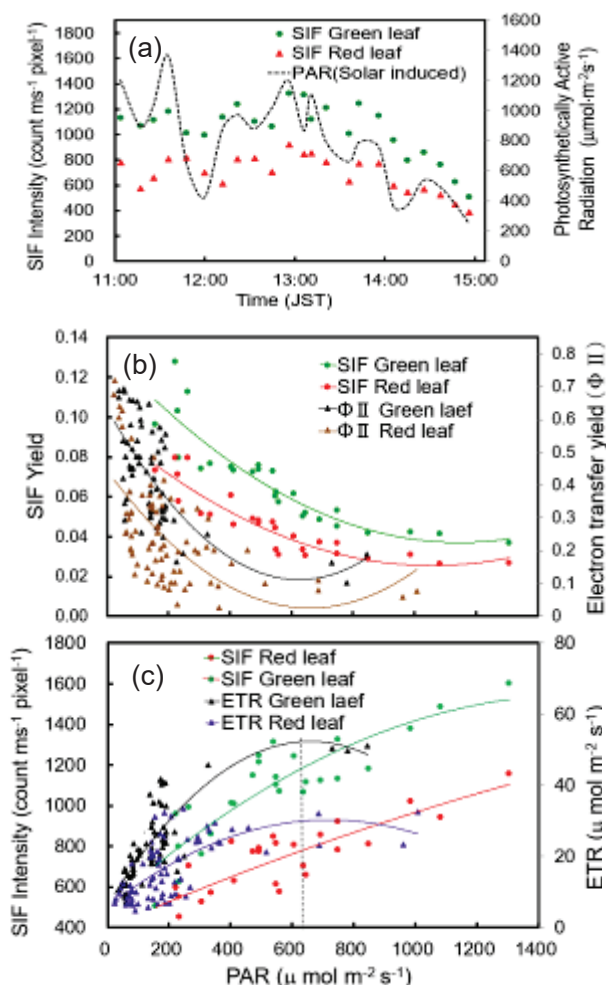


Fig.5 Comparison of SIF and PAM . (a) Temporal change of the SIF and PAR intensity. (b) Relation of fluorescence yield and PAR. (c) PAR dependence of SIF intensity and ETR.

5. 森林でのコナラの蛍光強度と光合成の日変化^[3]

2015 年 9 月 12 日に森林総合研究所京都市山城観測地において、コナラの SIF 強度と光合成の日変化の測定を行った。高さ 10m の檜の上で、光合成蒸散測定器(LI-COR 社, LI-6400)を設置し、個葉レベルの光合成測定を行う。30m の CO₂ タワーの上から天体望遠鏡(Vixen、Φ95mm)を用いて、樹木の樹冠レベルの測定を CCD 分光器 (Ocean Optics, QE65 Pro)によるスペクトル計測と CCD カメラ(BITRAN, BU-51LN) による画像計測を行った (Fig.6)。

Fig.7 (a)のように、大気温と PAR の上昇により葉内温度(●)が上昇する。13:00 頃にピークとなり 35°C を越える高温となり、葉内の乾燥を防ぐため気孔を閉じて Fig.7(b)のように、気孔コンダクタンス(Cond, ▲)が 13:00 頃に最も低下している。それに伴い CO₂ を葉内に吸収する速度である光合成速度(Photo, ●)も低下している。つまり、光合成反応が低下しており、日中の強光条件下においては、光合成のキャパシティーをはるかに超える太陽光誘起エネルギーをクロロフィルが吸収すると光合成速度は飽和状態となり、ほとんどは熱として放散され、またごく一部は蛍光として放出して安定な基底状態に戻る。Fig.7(c)は、葉内温度が上昇すると細胞間で飽和した水蒸気圧が上昇するので葉内飽和水蒸気圧差(VPD, ▲)が増大し、蒸散(熱放散)速度が大きくなっていくことを示している。Fig.8 に示すように PAR の上昇に伴い、余剰エネルギーとしての蛍光強度(●)と VPD(▲)はほぼ直線的に上昇している。

6. 広域(群落レベル)の SIF 強度分布画像^[4]

Fig.10 の緑線(実線)は、日中の強光条件下の余剰エネルギーとして放出される蛍光強度スペクトルである。蛍光強度のある波長領域内の F780 フィルタ(点線)で撮影した蛍光と近赤外反射光の重畳画像から、画像スケール法において蛍光強度が生じない波長領域の F740 フィルタ(青線・破線)で撮影した近赤外域反射光画像を差し引くことにより (F780-F740)、蛍光強度分布画像を取得する。

2018 年 9 月 30 日(日) 夜間に最大瞬間風速 42m s⁻¹ という猛烈な台風 24 号が浜松市を通過し、静岡大学浜松キャンパスの樹木も大きなダメージを受けた。9 月 28 日の台風通過前 (Fig. 11 (a)) と 10 月 2 日の通過後 (Fig.11 (b)) を比べると、距離 37 m の白板の後方 48 m 右にあるケヤキは黄緑であった葉が一夜にして茶色に変色した。Fig.11 (c)と(d)は台風前後での蛍光画像の比較であり、位置 3 のケヤキは灰色からほとんどが黒色に変化しており、蛍光強度値の低下

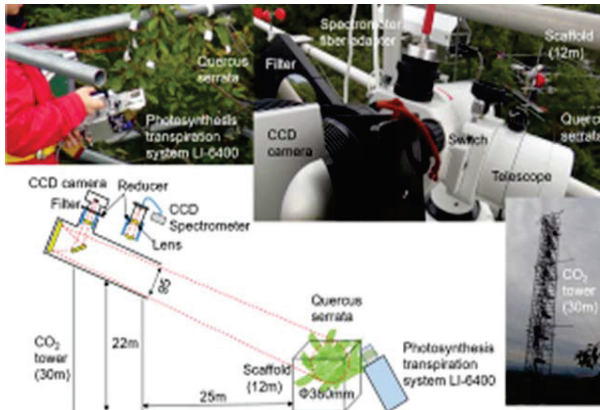


Fig.6 Stand-off measurement of a forest canopy (8-12 September, 2015).

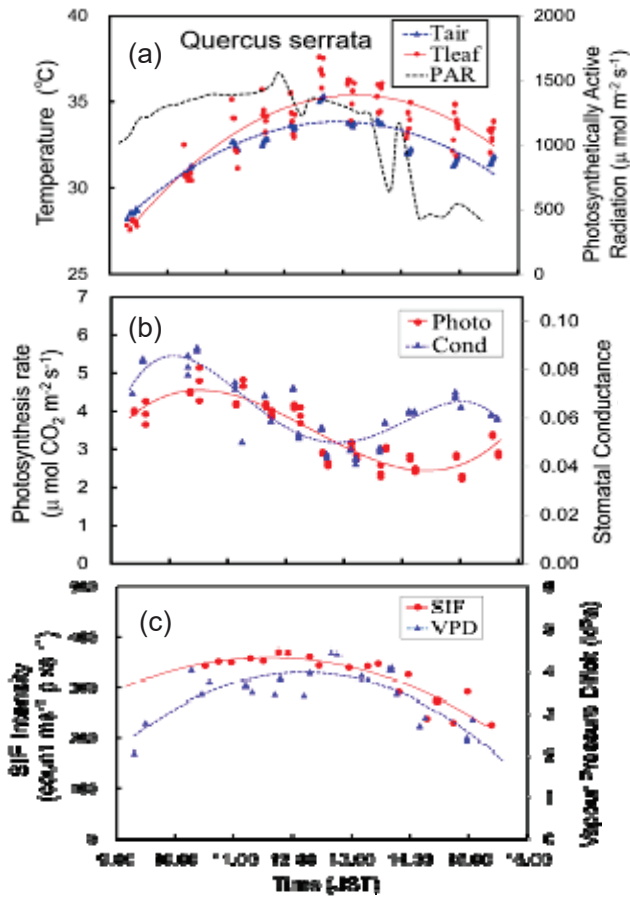


Fig.7 Temporal change of Photo, Cond, VPD and SIF intensity *Quercus serrata* .

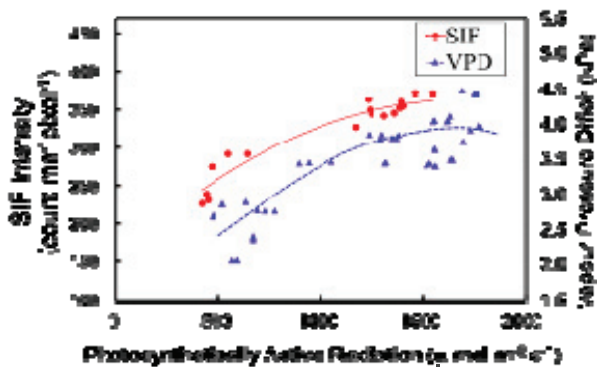


Fig.8 PAR dependence of SIF intensity and VPD.

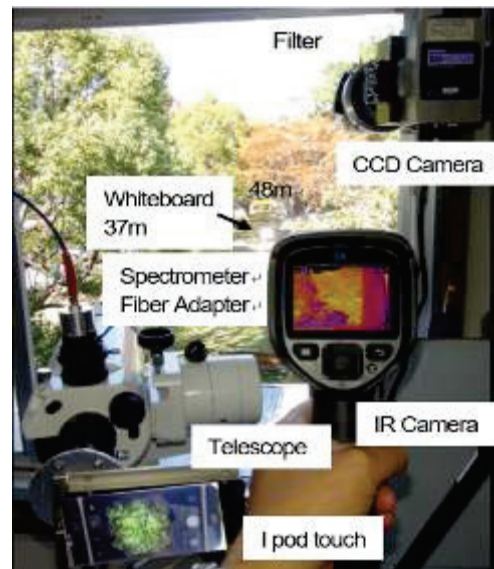


Fig.9 Stand-off measurement of a camphor and zelkova. (28 September, 2 October, 2018).

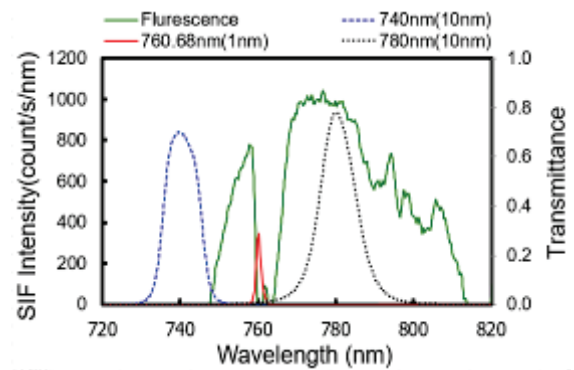


Fig. 10 Fluorescence and vegetation index measurement by the filter. (a) Band-pass filter, (b) F740, and F780 filters used for the Fluorescence measurement.

(a) 28 Sept. 11:54-11:57 (b) 2 Oct. 11:55-11:58

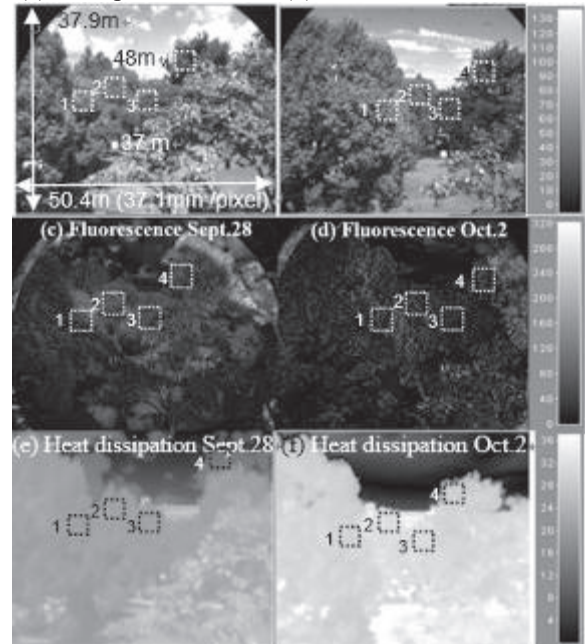


Fig.11 Observations before and after the passage of a strong typhoon that hit Hamamatsu on September 30, 2018.

が見られる。強風によって、茎が折れ葉に養分や水分が供給できなくなり、クロロフィルの含有量の低下に由来すると考えられる。クスノキは葉が振り落とされ、枝間隔が広げられたことによる葉密度の低下も起きている。Fig.11 (e)と(f)は、赤外線カメラを用いて樹木（群落）葉の表面温度を測定した。熱放散が活発であれば、群落の表面温度は低くなり、より濃い灰色となる。台風通過後（図 11 (f)）は、ほとんど濃い灰色はなくなり、熱放散が低下していることが分かる。

7. 強光条件下におけるイネの SIF の画像計測と赤外線カメラによる熱放散の推定

静岡キャンパス内の農学部の富田研究室の田圃において、イネの個体（複葉）レベルの SIF 強度分布画像と熱放散画像の計測を行った。具体的には、焦点距離 300mm の望遠レンズを CCD カメラに取り付け、F760 の狭帯域の干渉フィルタにより SIF 微細画像（図 12(a)）を取得した。また、熱放散が活発な植物ほど、葉の表面温度は低くなるため、スマホ（iphone）接続型の赤外線カメラ（FLIR ONE Pro, 1080×1440pixel）を用いて熱画像を取得した（図 12(b)）。圃場のイネなどの作物の生産への気候変動に伴う環境動態解析においては、個葉レベルではなく群落レベルでの植生機能の環境応答の解明が必要となる。

8. まとめ

室内において、LED 光(cyan filter+hot mirror 透過光)を用いたクロロフィル a (Chla) 蛍光の測定を行なった。太陽誘起蛍光(SIF)には、適切光のもとでの Chla 蛍光と日中の強光条件下での余剰エネルギーとして放出される蛍光がある。

Chla 蛍光の 2 つのピーク波長の強度比 F_{740}/F_{685} から Chla 含有量を推定する。Chla 含有量(F_{740}/F_{685})と F740 のピーク値には相関関係が見られることから光合成活性の判断が可能となった。

PAM による光合成の電子伝達速度 (ETR) と同様に SIF 強度からも PAR の上昇に伴う飽和曲線が得られ、光合成活性を判断する手法となった。

日中の強光条件下では光合成に使われるエネルギー割合(光合成収率)が低下し、余剰エネルギーとして放出される蛍光がほぼ直線的に上昇している。

広角レンズを冷却式 CCD カメラに直接取り付け、同じ視野内において光学フィルタにより波長帯域を限定して複数の画像間の演算によって広域の蛍光強度分布画像を取得する新たな手法を開発した。

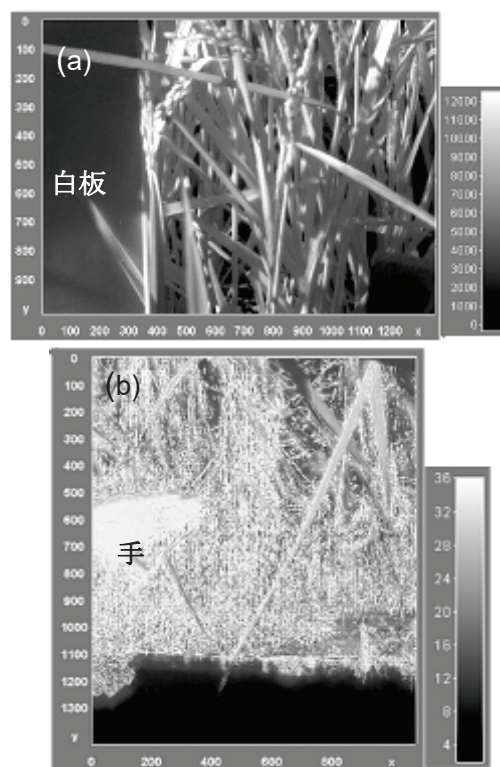


Fig.12 Image measurement of rice. (a) SIF intensity image, (b) Thermal image using the infrared camera.

参考文献

- [1] K. Masuda, H. Saito, Y. Mabuchi, N. Manago, Hiroaki Kuze : Stand-off measurement of solar-radiation Induced vegetation fluorescence using oxygen A-band, IGARSS IEEE International, ,2993-2996, DOI:10.1109/IGARSS.2014.6947106
- [2] K. Kuriyama (Masuda), N. Manago, H. Kuze, K. Homma, K. Muramatsu, K. Yoshimura, Y. Kominami, Spectral image measurement of chlorophyll fluorescence using the oxygen A-band: application to rice field and forest. ISRS 2016, Jeju Island, Korea. 22-24 April 2016
- [3] K. Kuriyama (Masuda), N. Manago, H. Saito, H. Kuze, Optical remote sensing of vegetation fluorescence on the canopy level under insolation, International Symposium Remote Sensing (ISRS 2015), A8-34, National Cheng Kung University, Taiwan.
- [4] K. Masuda, N. Manago, H. Kuze : Remote Sensing of vegetation canopy fluorescence with wide-area image acquisition. IGARSS IEEE International, THP1 pp.9, Yokohama, July 28-August 2, 2019.

謝辞

本研究は、2012 年～2021 年度、千葉大学環境リモートセンシング研究センターの共同利用研究の助成を受けた。また、平成 26～28 年度科学研究費補助金・基盤研究 C (課題番号 26340003) の助成を受けた。

電子式個人線量計の校正

○福井 有平^{A)}、古川 和弥^{A)}、菅田 義英^{B)}

^{A)}大阪大学 産業科学研究所 技術室、^{B)}大阪大学 産業科学研究所 量子ビーム科学研究施設

1.はじめに

令和2年9月11日に放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則（以下、「規則」という。）の一部を改正する規則が公布され、昨年10月には放射線障害予防規程に定めるべき事項に関するガイド（測定の信頼性確保関係）の改正に関するパブリックコメントの募集が行われた^[1]。これによれば令和5年10月1日から、測定の信頼性確保として放射線施設に立ち入る者に係る外部被ばく線量の測定の信頼性確保、放射線施設に立ち入る者に係る内部被ばく線量及び施設等の放射線測定に用いる放射線測定器の点検及び校正が求められることになる。前者ではISO/IEC 17025に規定される能力を満たす人又は機関による測定及びそれと同等の品質マネジメントシステムの確立等に係る要求事項を満たす測定が求められるが、弊所で外部被ばく線量を測定するために使用しているガラスバッジ（千代田テクノル）がこれを満たしているため、これまで通り線量測定を委託すれば問題ない。一方、後者は各事業所で「点検及び校正を1年ごとに適切に組み合わせて行うこと」とされ、今後はJISに基づいて校正された機器との感度比較を自施設内で行うことになると予想される。

弊所ではこれまで電子式個人線量計（以下、ポケット線量計。）の個体ごとの感度のばらつきを調べ、より信頼性の高い線量値を得るためのプロトコルの開発を行ってきた。線量の再現性の良い測定方法を確立しておくことは、ポケット線量計だけでなく、サーベイメータの校正においても重要である。

2.校正の種類

今回のガイドの改訂で示された放射線検出器の校正は、計量法に基づく校正事業者登録制度（JCSS）及び日本産業規格（JIS）に基づいて校正施設で実施する物や、自施設で行う較正された放射線測定器として用いる比較校正のほか、以前に実施した較正が現在も有効であることを確認するためのものとしてJIS等示される機能確認や、測定の目的や対象に照らし、放射線測定器について必要な精度を確保することが説明できるものが該当する、としている。このことから、事業所にある全ての放射線測定器につ

いてJCSSやJISの規格に基づく校正を実施することまでは求められないと言えるが、その代わり測定の信頼性確保のために比較校正・機能確認を行う必要がある。

3.測定方法

基本的な測定方法は、ポケット線量計と放射線源の距離を変えながら一定の照射時間照射し、照射終了時の測定値を記録する流れである。図1のようにブレッドボードにポケット線量計（ZP-144, Panasonic製）の寸法に合わせたL字金具をネジで固定し、ポケット線量計の位置の再現性を高めた固定方法をとる。放射線源も金属板で挟み四隅をネジ止めで固定し、これを0.1 mmの精度で距離を調整できるX軸ステージを使用してポケット線量計と放射線源間の距離を変えた。

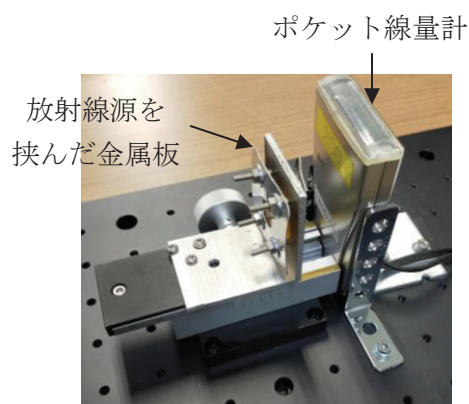


図1 測定方法

まずポケット線量計自体の測定値誤差を評価するための測定を行った。ポケット線量計と放射線源との距離を1.0 cmにして、100分間連続照射をし、その間20分ごとに測定値を記録する。この照射を計4回繰り返し、20分毎の測定値のばらつきを評価した。

次にこの測定体系による誤差を評価するための測定を行った。ポケット線量計と放射線源の距離を0.5 cmとし、100 μ Sv カウントする時間を記録する。1回の測定が終わるたびにポケット線量計を取り外し、再びセットし直す。この測定を計5回繰り返し、100 μ Sv カウントする時間のばらつきを評価した。

次は、ポケット線量計と放射線源の距離 0.5 cm のときに 100 μ Sv カウントする時間を測り、その時間で他の 4 点 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 cm) の距離でも照射した。

4.測定結果

ポケット線量計自体の測定値誤差を評価する測定では、各 20 分間の測定値の平均値が $53.15 \pm 0.99 \mu$ Sv となり、ポケット線量計の指示値が 1 μ Sv 単位のため、標準偏差が約 $\pm 1 \mu$ Sv であることは許容できる誤差の範囲であると言える。また 100 μ Sv カウントする時間の平均値は 1210 ± 17.65 秒であり、標準偏差を平均値で割った変動係数は 0.0146 である。このことから測定体系による誤差も小さく許容できる範囲であると言える。

次に 5 点の測定点での計測値を次式の形でエクセルのソルバーによるフィッティングを掛け処理をした。その関数形を下記に示す。

$$f(x) = \frac{I_0}{(x - X_0)^2} + Y_0$$

ここで I_0 は照射時間を含んだ感度係数、 X_0 はセッティング誤差と本体内部の検出部の位置の誤差による係数、 Y_0 はバックグラウンドを示し、本測定では照射時間が短いことから $Y_0 = 0$ とみなせる。フィッティングを掛け求めた $f(x)$ と測定値 y の値を同じグラフにしたものを図 2 に示す。図 2 に示した結果は 33 台のうちの 1 台である 204 番を使用した。測定した 33 台全てにおいて、測定値 y に対してフィッティング関数 $f(x)$ の値がほぼ一致しており、また測定値 y も距離の逆二乗則に従った結果を示している。

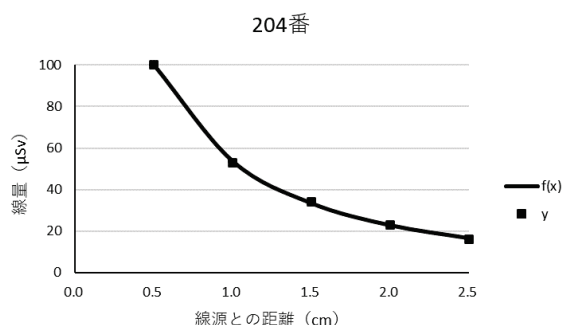


図 2 測定結果の一例

またセッティング誤差と検出器本体内部の検出部の位置の誤差による係数 X_0 に関して、33 台の平均値は -0.87 ± 0.028 cm であり、変動係数は 0.033 となったため、 X_0 のばらつきが小さく測定できていると

言える。ここで X_0 が負の値になっているのは、ポケット線量計本体の表面を 0 cm として、放射線源方向が正の値、その反対方向が負の値としているためである。実際の検出部の位置はポケット線量計本体内部に存在しているため、この係数が負の値となる。

照射時間を含んだ感度係数 I_0 を照射時間 t で割れば純粋な感度係数となるため、この計算を行い 33 台分の感度係数 I_0/t の平均値を求めると、 9.04 ± 0.414 となった。同様に変動係数は 0.046 であり、こちらもまた X_0 と同水準のばらつきの小ささが示された。

5.考察、まとめ

これまでの測定結果より、この測定体系は再現性が高くばらつきの小さい信頼性の高い測定方法であるということが示された。また、測定値が距離の逆二乗則に従っていることから、少なくともポケット線量計の感度に多少の違いはあっても、故障が疑われるほど動作が異常である物は無いと思われる。今後、この測定体系の精度で比較校正や機能確認に使用できるかを検討していく必要がある。

参考文献

- [1]原子力規制委員会「第3回放射性同位元素等規制法に係る審査ガイド等の整備に関する意見聴取 資料1」
<https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/RIguide/260000035.html>
 (参照日 2022 年 2 月 28 日)

SuperKEKB における加速電圧位相とビーム負荷調整

○小笠原 舜斗、小林 鉄也、西脇 みちる

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

SuperKEKB^[1]は、標準理論を超える物理探索を目的とした、素粒子物理実験用の電子陽電子衝突型円形加速器である。加速器は周長 3 km の 7 GeV 電子リング(HER)と 4 GeV 陽電子リング(LER)で構成され、衝突点には Belle II 検出器^[2]が設置されている。

衝突型加速器を用いた素粒子物理実験では、より多くのデータを集め、統計精度を高めることが重要である。SuperKEKB は、大量のデータを取得するため、前身である KEKB 加速器の 40 倍($8 \times 10^{35} / \text{cm}^2/\text{s}$)という前人未踏の目標ルミノシティ(衝突頻度)を設定している。これを達成するため、蓄積ビーム電流の設計値も最大 3.6 A (LER)という世界最大級の大電流に設定されている。

2021 年後半の運転では、蓄積ビーム電流が最大 1.02 A で、世界記録となるピークルミノシティ($3.81 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$)を達成^[3]した。今後も目標ルミノシティ達成に向け、蓄積電流の増強を伴う調整が続けられる。

SuperKEKB の大電流ビームの加速には、2 リング合わせて 2 種 38 台におよぶ高周波(RF)加速空洞^[4]が用いられる。これらの空洞には、地上から供給される大電力 RF によってビーム加速に適した電磁場(定在波)が励起され、ビームは空洞通過時刻の電圧位相に対応したエネルギーで加速される。SuperKEKB では蓄積電流が非常に大きいため、ビームの不安定性(発散力)が増し、ビーム加速のために必要な電力(ビーム負荷)も前例のないほど大きくなる。ビームを安定かつ効率的に加速するには、ビームに対する加速位相が空洞間で揃っていることが望ましい^[5]。これは、ビームが各空洞から受け取る電力が空洞間で均一であることに相当する。

これまでの運転では、最低限の大まかな位相調整のみが行われており、それでも運転に大きな支障はなかった。しかしながら、今後さらに増強される大電流ビームに対応していくには、より詳細な加速位相(ビーム負荷)の評価・調整が必要と考えられる。

本稿では、多数の空洞を用いて大電流ビームを加速する SuperKEKB の加速位相(ビーム負荷)調整方法や、新たに製作したビーム負荷評価・調整ツールについて紹介する。

表 1 RF に関する主な運転パラメータ^[4-6]

パラメータ	LER	HER
ビームエネルギー [GeV]	4.0	7.0
ビーム電流 [A]	3.6*	2.6*
ロスエネルギー [MeV/turn]	1.76	2.43
空洞タイプ	ARES	SCC/ARES
RF 周波数 [MHz]	508.9	
空洞数 (ステーション数)	22 (16)	8(8)/8(6)
RF ピーク電圧 [MV/cavity]	0.5*	1.5*/0.5*
ビームパワー [kW/cavity]	400~*	400*/600*
クライストロン電力 [kW/station]	~800*	~450*/800*

*: 設計値

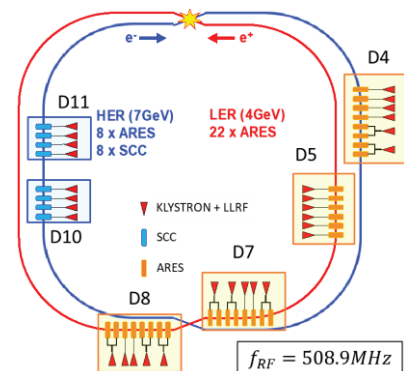


図 1 SuperKEKB の RF ステーション配置^[5]



図 2 ARES 空洞が多数並ぶ D7 直線部

2. SuperKEKB の RF システム

表 1 に、SuperKEKB の RF に関する主な運転パラメータを、図 1 に、SuperKEKB の加速空洞(RF ステーション)の配置を示す。2 リングそれぞれに 3 か所の RF セクションがあり、加速空洞が分散配置されている。RF 周波数は全て約 508.9 MHz である。

加速空洞には、常伝導空洞と超伝導空洞^[7]の 2 種類がある。常伝導空洞は、電磁氣的に結合した 3 つ

の空洞を用いた独自の空洞システムで、ARES 空洞^[8]と呼ばれる。HER には ARES 空洞と超伝導空洞が各 8 台、LER には ARES 空洞が 22 台設置されている。図 2 に、ARES 空洞の外観を示す。

各空洞には、クライストロン(大電力 RF 増幅器)を用いて最大 1 MW の連続波 RF を供給する^[9]。クライストロン 1 本に対応する加速システム一式を RF ステーションと呼ぶ。通常はクライストロン 1 本で空洞 1 台を駆動するが、一部の ARES 空洞ステーションではクライストロン 1 本で空洞 2 台に電力を供給している(=1:2 ステーション)。

各 RF ステーションには低電力 RF(LLRF)制御システム^[10]一式が組み込まれ、加速電圧やチューニング制御等を担っている。RF 信号は、一台のマスタオシレータから分配される基準信号^[11]に全ステーションが同期している。

基準信号から空洞までの経路上には、幾つかの位相調整機構(移相器)が配置されている。図 3 に、例として D07 セクションにおける主な移相器を示す。主要な移相器には、セクション全体の位相を調整する「Section Phase」、ステーション毎の位相を調整する「Station Phase」、1:2 ステーションにおいて空洞間の位相を調整する導波管移相器がある^[5,11]。

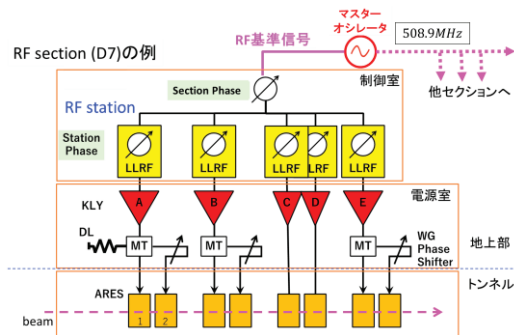


図3 RFセクションにおける位相器配置^[5]

これらの移相器のうち、導波管移相器を除く2種は電子的な移相器で、位相補正量を遠隔制御できる。

最初のビーム蓄積の前には空洞位相をある程度揃える^[5]必要があり、これには RF 信号の直接測定が必要である。しかし、直径 1 km のリングに分散した多数の空洞の RF 信号を正確に比較することは非常に困難である。正確な位相を知るには、蓄積されたビームから情報を得るしかない。これについて、次章以降で説明する。

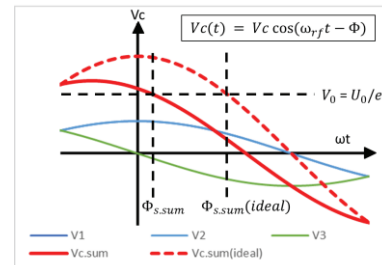
3. 加速位相と位相安定性の原理

本章では、加速位相調整の前置きとして、位相安定性の原理^[5,6]について説明する。SuperKEKB のよ

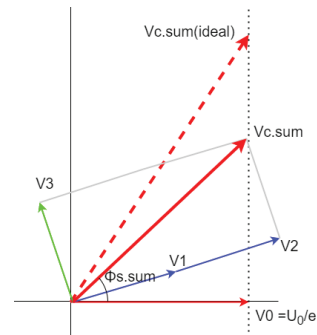
うにビームのエネルギーが十分に高い加速器では、粒子の速さは殆ど光速で変わらない。本稿ではこれを前提とする。

加速空洞が複数あるリングでは、各空洞の空洞電圧(ピーク電圧 V_c 、位相 Φ_s)のベクトル合成($V_{c.sum}$ 、 $\Phi_{s.sum}$)を考え、これを加速電圧に持つ仮想的な空洞がリングに1台あるとして、加速空洞に対するビームのふるまいを考える。

例として、加速空洞を3台持つリングがあり、空洞2台の位相が揃っているが、1台の位相が他に対して 90° ずれている場合を考える。各空洞の電圧を $\vec{V}_1 \sim \vec{V}_3$ 、合成電圧を $\vec{V}_{c.sum}$ として、時間(位相)軸での電圧波形とそのベクトル図を図4に示す。また、全ての空洞で位相が揃っていた場合の合成電圧 $\vec{V}_{c.sum}(ideal)$ を赤破線で示している。



(a) 電圧波形



(b) ベクトル図

図4 位相差がある空洞の合成加速電圧

リングを周回する粒子は、電磁石で軌道を曲げられるときに放射光を出してエネルギーを失う。SuperKEKB のようにエネルギーを上げない蓄積リングでは、粒子はリングを1周する間に失うエネルギー U_0 と加速エネルギーが釣り合うような位相(同期位相)で加速される。周回粒子の電荷を e としてこれらの関係を表すと、式(1)になる。

$$U_0 = eV_0 = eV_{c.sum} \cos(\pm\Phi_{s.sum}) \quad (1)$$

U_0 は加速器の設計で決まるので、 $V_{c.sum}$ に応じて $\Phi_{s.sum}$ は自然に決まる。ただし実際にリングを安定

に周回できる位相は、SuperKEKB(粒子の速さが光速度で一定)の場合は図 4 において $+\phi_{s.sum}$ のみである。理由を以下に説明する。

空洞到着位相が $+\phi_s$ から少しずれた粒子のふるまいについて考える。位相 $+\phi_s$ の周りでは、空洞へ早く到着した粒子ほど強く加速される。SuperKEKBのように粒子の速が変わらない場合は、一般にエネルギーの高い粒子ほど軌道が大回りするので、この粒子の次の周回では空洞到着位相が遅れ、今度は弱く加速される。これを繰り返すと、位相のずれた粒子も $+\phi_s$ の周りで振動(シンクロトロン振動)しながらリングを周回し続けることができる。言い換えると、加速電圧が時間変化している(高周波である)ことが、均衡位相からのズレに応じた復元力として働き、安定なビーム加速を実現する。これを位相安定性の原理という。一方で、 $-\phi_s$ の周りでは位相のずれによる加速の強弱が反転する(復元力とは逆になる)ので、安定に周回することができない。

図 4 のように複数の空洞間で位相差があると、 $V_{c.sum}$ が小さくなり、 $\phi_{s.sum}$ が 0° (電圧ピーク)の方向へシフトする。シンクロトロン振動の復元力は加速電圧の時間変化によるので、このときの復元力は位相が揃っている時よりも弱まり、ビームの安定性が損なわれる。また、電力にも無駄が生じる。逆に、図 3 のような移相器を調整して空洞間の位相を揃えられれば、シンクロトロン振動の復元力が強くなり、ビームの安定性を高めることができる。

空洞間の位相を揃える方法の一つとして、周回ビームを直接観察し、シンクロトロン振動数が最も高くなる位相設定を探す方法^[12]が考えられる。この方法は、移相器を少し動かしては信号スペクトルを測定する、という操作を RF ステーション毎に何度も繰り返す必要があり、30 ものステーションを抱える SuperKEKB で行うには手間と時間が大きすぎる。またスペクトル測定では十分な精度を得ることが難しい。そこで SuperKEKB では、より手軽で高精度なビーム負荷を用いた調整方法を使う。

4. ビーム負荷と加速位相調整

ある 1 台の加速空洞で入力・消費される RF 電力の関係^[5,6]を式(2)に示す。またこのイメージを図 5 に、ビーム電流との関係を図 6 に示す。

$$P_{kly} - P_{ref} = P_{beam} + P_{wall} \quad (2)$$

P_{kly} はクライストロンから空洞へ送られる電力で、 P_{ref} は空洞入力結合器からの反射電力である。 P_{ref}

は入力結合器の設計で決まり、設計ビーム電流で反射電力が最小になるように調整される。

空洞に入る RF 電力の一部(P_{beam})が、ビームに供給される。 P_{beam} はビーム電流 I_{beam} と加速電圧 V_0 の積であり、式(3)で表される。

$$P_{beam} = V_0 I_{beam} = V_c \cos \phi_s \cdot I_{beam} \quad (3)$$

P_{beam} は空洞の視点で見ると電力負荷となるので、これを指してビーム負荷という。

P_{wall} は空洞壁面損失で、 V_c の維持に必要なとする電力である。 V_c と P_{wall} には一定の関係($|V_c|^2 \propto P_{wall}$)がある。LLRF 制御システムは、 P_{beam} を補償して V_c (つまり P_{wall})が常に一定になるよう P_{kly} を制御する。

式(2)の 4 つの電力のうち、図 6 において実線で示した P_{kly} と P_{ref} は、直接測定が可能である。 P_{wall} の値は設定 V_c と空洞の特性パラメータから計算可能だが、ビームを加速しないとき($I_{beam} = 0$)の電力からも容易に求まる。したがって、これらの測定値の加減算から P_{beam} を求めることができる。

式(3)において、 V_c が一定なら ϕ_s も自然に決まる。ある I_{beam} における各空洞の P_{beam} を空洞間で比較することは、 $\cos \phi_s$ を比較することに相当する。また、その比例係数から空洞の ϕ_s を求めることができる。

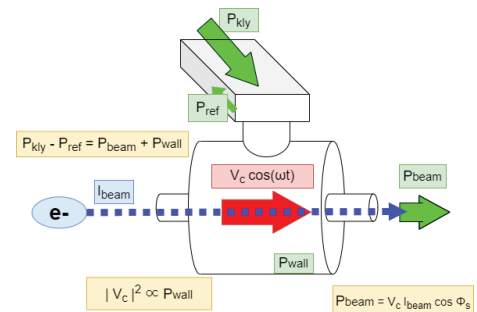


図 5 空洞に入出力される RF 電力

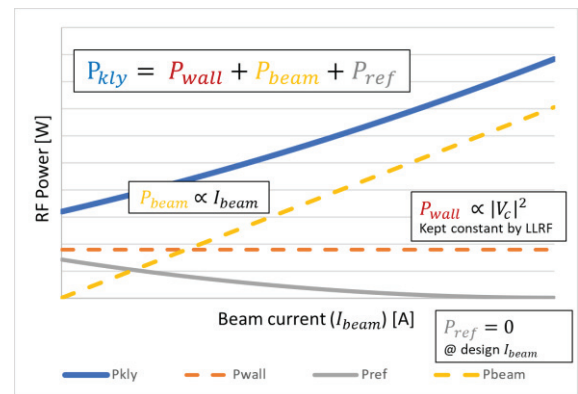


図 6 RF 電力とビーム電流の関係

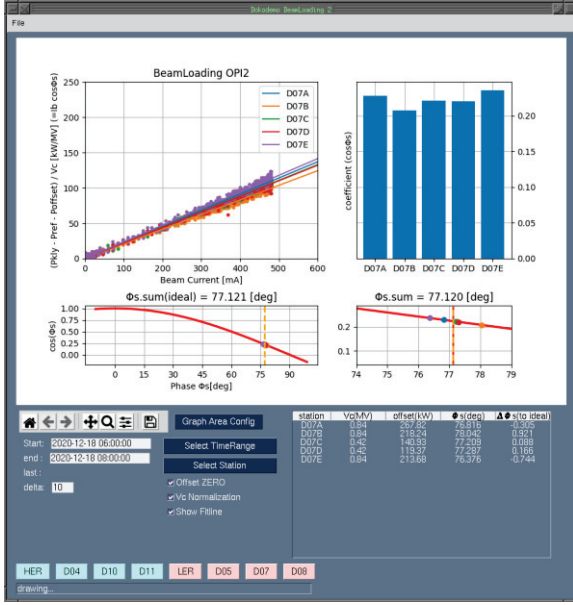


図 7 ビーム負荷調整ツール

5. ビーム負荷調整ツールの開発

これまでに紹介した方法で位相調整を行うため、各空洞のビーム負荷を評価するソフトウェア(調整ツール)を製作した。図 7 に調整ツールの画面例を示す。図 7 では、D7 セクションのビーム負荷を表示している。調整ツールは Python3 で開発し、GUI は PySimpleGUI^[13]を利用した。

式(2)からは、 P_{wall} さえ分かっているれば、あるビーム電流 1 点の電力測定から P_{beam} が求まる。しかし、実際には大電力 RF の電力測定は誤差が大きいので、測定値 1 点だけを使った見積もりでは信頼性が低い。そこで調整ツールでは、指定した時間帯における電力測定値を取得し、図 6 のようにビーム電流を横軸、式(2)の左辺($P_{kly} - P_{ref}$)を縦軸としたプロットを作成し、線形フィットして見積もり精度を高めるようにした。得られた一次式の切片(オフセット)が P_{wall} となり、傾きが加速位相(ビーム負荷)に対応する。

しかしそれだけでは、 V_c や P_{wall} の異なるステーション間の比較が見た目には難しい。そこで、オフセットの除去や V_c 正規化の機能も設けた。図 7 はこれらの機能を有効化したものである。この場合、フィットの傾きがそのまま $\cos \phi_s$ になる。簡易的な調整であれば、この状態でプロットの傾きが揃うように移相器を操作すればよい。

ところで、各空洞の V_c と ϕ_s があれば、ベクトル合成から $V_{c.sum}$ と $\phi_{s.sum}$ 、さらに V_0 も得られる。また、 $V_{c.sum}(ideal)$ は全ての V_c の合計である。これらを使うと、式(4)から理想的な位相 $\phi_s(ideal)$ が得られる。

$$V_0 = \left(\sum V_c \right) \cos \phi_{s(ideal)} = V_{c.sum} \cos \phi_{s.sum} \quad (4)$$

理想的な位相関係の時、全ての空洞の位相が $\phi_s(ideal)$ になるはずである。逆に言うと、導出した $\phi_s(ideal)$ を目標値として各ステーションの移相器を動かせば、全ての空洞位相が揃う。つまり、これにより位相調整の自動化も可能と考えられる。

この方法は、RF 電力のプロット一枚から全ステーションの移相補正量を一気に決めることができる。移相器を動かしながらビームの挙動を観察する必要もなくなるので、シンクロトロン振動測定など他の方法よりもはるかに簡潔に位相調整を行える。

調整ツールにおいては、下段のサブグラフに各空洞の ϕ_s の分布を表示し、さらに $\phi_{s.sum}$ と $\phi_s(ideal)$ を点線で表示するようにした。ステーション毎の位相補正量はパラメータテーブルに個別に表示できるので、別途用意された移相器操作パネルにこの値をそのまま入力するだけで位相調整が完了する。

6. まとめ

SuperKEKB の加速位相(ビーム負荷)調整、およびそのために開発した調整ツールについて紹介した。

今回開発したツールで RF の正確な運転パラメータを容易に得られることは、位相調整以外のビームスタディなどにも有用である。今回開発したツールが、加速器全体の性能(ルミノシティ)向上および安定運転に貢献できると期待したい。

最終的な目標は、ビーム負荷調整そのものの自動化である。今後は調整ツールを使った位相調整の有効性や副作用の検証などを続けていく予定である。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2013, no. 3, pp.03A011, 2013
- [2] <https://www.belle2.org/>
- [3] "SuperKEKB 世界最高ルミノシティを今期も更新!", <https://www2.kek.jp/accl/topics/topics211224.html>
- [4] K. Akai *et al.*, "RF System for SuperKEKB", Proc. of PASJ2010, pp.177-181.
- [5] 西脇みちる, "RF システム(1)", OHO'19 テキスト (2019)
- [6] 小林鉄也, "RF システム(2)", OHO'19 テキスト (2019)
- [7] M. Nishiwaki *et al.*, "Status of Superconducting Accelerating Cavity and Development of SiC Damper for SuperKEKB", Proc. of PASJ2017, pp. 914-918.
- [8] T. Kageyama, *et al.*, "Development of High-Power ARES Cavities", Proc. of PAC97, 1997, pp. 2902-2904.
- [9] K. Watanabe *et al.*, "Current Status of the High-Power RF Systems during Phase2 Operation In SuperKEKB", Proc. of PASJ 2018, pp.464-467.
- [10] T. Kobayashi *et al.*, "Operation Status of LLRF Control System in SuperKEKB", Proc. of PASJ2021, TUP044
- [11] T. Kobayashi *et al.*, "RF Reference Distribution System for SuperKEKB", Proc. of PASJ2013, pp.1159-1163.
- [12] T. Kobayashi *et al.*, "Phase adjustment between cavities with beam loadings disparity in high power RF distribution system at SuperKEKB", Proc. of PASJ2020, WEPP38
- [13] <https://pysimplegui.readthedocs.io/en/latest/>

Python 版 STARS server と導入例

○小菅 隆^{A)}、Jan Szczesny^{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 (DESY)

1. はじめに

Simple Transmission and Retrieval System (STARS)^[1]は比較的小規模なシステム向けの制御用ソフトウェアで、シンプルながら様々なシステムに柔軟に対応できる特徴を持っている。

STARS 開発以来、根幹をなす STARS server 部には Perl が使用され、複数の OS 上で動作するマルチプラットフォームが実現されているが、新たに Python3 を使用した Python 版 STARS server (以下 PySTARS) が新たに開発された。PySTARS ではマルチプラットフォームの実現はもとより、マルチプロセッシングの機能を持たせることで、データ転送の効率向上も目指した設計となっている。また昨今、ソフトウェア開発の場面において Python の利用が盛んとなっており、PySTARS の開発は、今後の STARS システム構築を進めるうえで有利となる事が予想される。PySTARS はベンチマークテストなどが行われ、現在様々なシステムへの導入が進んでいる。

2. STARS の概要

STARS は高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設のビームライン制御やビームラインインターロックシステム^[2]をはじめ、様々なシステムに導入されている。

STARS では一つの STARS server に対して複数の STARS client が TCP/IP socket で接続し、それぞれが STARS server との間でテキストベースのメッセージを送受する(図 1)。単体で動作する一般的な制御アプリケーションが、様々な機能を実現するために Function library などを利用するのにに対し、STARS ではこれらの STARS client 毎に機能を持たせる。なお、前述のように接続は TCP/IP socket を使用したプロセス間通信であるので、各 STARS client 及び STARS server を同一 PC 上で動作させる事も、ネットワークで接続された複数の PC 上に分散させることも可能であり、柔軟なシステム構成を行う事が出来る。また、STARS client の接続、切断に関してはシステム全体を停止する必要がないので、システムの運転を続けたまま機能の追加、削除を行う事が出来る。

全ての STARS client は、一つの STARS システム

上でユニークな Node name と呼ばれる ID を持つ事になっており、メッセージの宛先や送り主と使用される。例えば “Term1” という Node name を持った STARS client が “Dev1 xxx” のようなメッセージを STARS server に送ると、STARS server は “Dev1” を宛先として認識し、Node name “Dev1” の STARS client に “Term1>Dev1 xxx” のように送り主の情報を含めたメッセージを送信する。メッセージを受け取った “Dev1” はこのメッセージを解析することで送り主等の情報を取得することができる。

STARS を使用したシステムでは、基本的に以上のようなテキストメッセージの送受を行う事で、様々な機能を実現していく事となる。

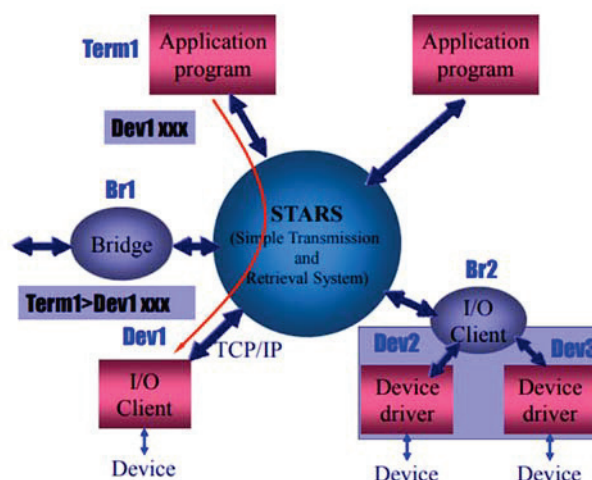


図 1 STARS の概要

(STARS tutorial http://stars.kek.jp/STARS_Tutorial.pdf より)

なお、STARS にはこのほかにも STARS client が接続する際にホスト名のチェック、キーワードによるチェックなどの機能がある。また、STARS Bridge と呼ばれる STARS client を利用する事で、他の STARS システムと接続する事も可能である。

STARS 関連のソフトウェアは STARS のウェブサイト^[3]を通じ、ダウンロードし無料で利用する事が出来る。

3. PySTARS

STARS を使用したシステムに於いて STARS server は根幹をなすもので、各 STARS client とメッセージの送受を行う。Perl 版の STARS server はシングルスレッドであり、更に STARS client からのメッセー

ジは select 関数によりシーケンシャルに扱っている。そのため STARS server が、ある STARS client にデータを送受している間、他の STARS client からのデータはバッファリングされるのみで、目的の STARS client へのデータ送受は STARS server が処理を終えるまで待たされる事となる。短いコマンドなどのメッセージ送受の場合、これは特に問題とならないが、大量データの送受に対してはこの部分がボトルネックとなる可能性大きい。

PySTARS ではシングルスレッドでの動作自体の高速化も図られているが、マルチプロセッシングにより大量データ転送の場合でも他の STARS client が待たされる事を防ぐ機能が実装された。

3.1 Python のマルチスレッディング

Python ではマルチスレッディングの機能が容易に利用可能で、プログラミングの際には大きなアドバンテージとなる。当初、PySTARS 開発においてもマルチスレッディング機能利用の検討を行った。しかし Python に備わっているグローバルインタープリタロック (GIL) に関連する制約から単純にマルチスレッド化するだけでは STARS server の高速化は難しい事が分かった。このためマルチプロセッシングを基盤とする開発へと進むこととなった。

3.2 設定ファイルと実際の実行

PySTARS は設定ファイルの編集を行う事でシングルスレッドモード、マルチプロセッシングモードの切り替え等が可能である。以下に PySTARS の設定ファイルである PyStars.cfg の内容を示す。

```
[param]
starsport      = 6057
starslib       = takaserv-lib
# if empty use starslib directory
starskey       =
# if true use Multiprocessing verion
starsmulti     = no
```

以上のうち starsport、starslib、starskey については、デフォルトの状態で STARS server の一般的な値となっているので特に変更する必要はない。PySTARS はデフォルト設定ではシングルスレッドモードで動作するようになっているが starsmulti の項目を “yes” とする事でマルチプロセッシングモードでの動作となる。

PySTARS を実行するためにはあらかじめ Python3 がインストールされている必要がある。Windows ではコマンド プロンプトあるいは PowerShell、Linux ではコマンドラインなどから、

Python PyStars.py (Windows anaconda3 等)
あるいは

Python3 PyStars.py (Linux 等)
と入力する。

図 2 はシングルスレッドモードで PySTARS が起動した際の (WSL Ubuntu 20.04.4 LTS) のスクリーンショットである。

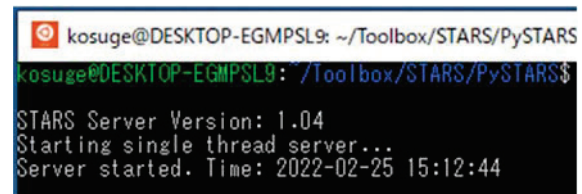


図 2 PySTARS をシングルスレッドモードで起動

また、以下は telnet client を使用、複数の STARS client として PySTARS に接続した際の各プロセスの様子 (ps コマンド出力) である。

```
458 tty1      S      0:00 python3 PyStars.py
462 tty2      S      0:00 telnet localhost 6057
463 tty4      S      0:00 telnet localhost 6057
464 tty5      S      0:00 telnet localhost 6057
```

シングルスレッドモードの場合は、複数の telnet client に対して PySTARS プロセスが 1 つだけ実行されていることが分かる。

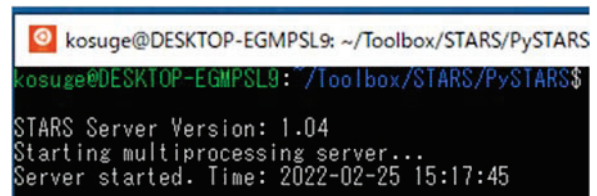


図 3 PySTRS をマルチプロセッシングモードで起動

一方マルチプロセッシングモードで実行した場合 (図 3) は、以下の通り 3 つの telnet client 毎に PySTARS のサブプロセスが実行される事が確認できている。

```
468 tty1 Sl 0:00 python3 PyStars.py
469 tty1 S 0:00 /usr/bin/python3 -c from multiproces
sing.resource_tracker import main;main(5)
474 tty2 S 0:00 telnet localhost 6057
475 tty1 Sl 0:00 /usr/bin/python3 -c from multiproce
ssing.spawn import spawn_main; spawn_main(tracke
r_fd=6, pipe_handle=12) --multiprocessing-fork
478 tty4 S 0:00 telnet localhost 6057
479 tty1 Sl 0:00 /usr/bin/python3 -c from multiproce
ssing.spawn import spawn_main; spawn_main(tracke
r_fd=6, pipe_handle=16) --multiprocessing-fork
482 tty5 S 0:00 telnet localhost 6057
483 tty1 Sl 0:00 /usr/bin/python3 -c from multiproce
ssing.spawn import spawn_main; spawn_main(tracke
r_fd=6, pipe_handle=20) --multiprocessing-fork
```


4. ベンチマークテスト

PySTARS についてこれまでの Perl 版 STARS server との比較のために、いくつかの条件について負荷テストを実施した。

4.1 テストの概要

今回の動作テストのために、Load tester という STARS client を作成した。この Load tester はあらかじめ送り先(他の Load tester)と data の長さを他の STARS client からのコマンドによりセットし、_Trigger イベントを送信する事で

From>To Test Data.....

のようにセットされた長さの文字列を含むテスト用の Test コマンドメッセージを送出する。また、Load tester はこのコマンドメッセージを受け取ると、

From>To @Test DataLength

のように、受け取ったデータ長を返信するようになっているので、複数の Load tester を立ち上げると、それぞれの間でのデータ送受が任意に行える。更に Load tester は、_Trigger イベントの受信した時間を 0 として、Test コマンドを送信開始までの時間、コマンド送信完了までの時間、@Test リプライメッセージの内容及び受けとるまでの時間をそれぞれ System にイベントとして送る。観測を行う Client ではあらかじめ Test コマンドを送信する Client に flgon しておくことで、これらの時間の記録を行う事が出来る(図 4)。Load tester としては Python 版のものと及びまったく同じ動作をする Perl 版のものを作成した。

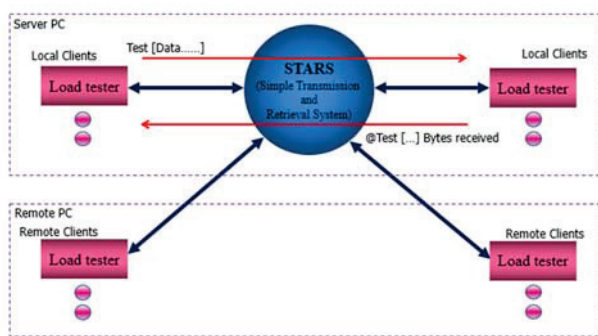


図 4 ベンチマークテストの概要

今回はこれまでの Perl 版 STARS server (Perl Server)、PySTARS シングルスレッドモード(グラフ中では Python Single Server と記述) 及び PySTARS マルチプロセッシングモード(グラフ中では Python Multi Server と記述)について、STARS server 及び Load tester を同一の PC で動作させた場合(Local) と、Load tester を別の PC で動作させネットワーク

を通して(100Mbps)通信を行った場合(Remote)について、次のような条件でテストを行った。

- Load tester (Python) 1 対 1 での送信テスト
- Load tester (Python) 4 対 2 での送信テスト
- Load tester (Python) 5 対 5 での送信テスト
- Load tester (Perl) 1 対 1 での送信テスト
- Load tester (Perl) 4 対 2 での送信テスト
- Load tester (Perl) 5 対 5 での送信テスト

なお stars.py については長いメッセージを扱う事が出来ないというバグの修正と速度を改善するための改造が行われている。今回テストに使用した PC のスペックは次の通りである。

STARS server 及び Local Load tester が動作する PC

CPU: Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @ 3.60GHz
OS: Ubuntu 18.04.4 LTS
Python version: 3.6.9
Perl version: 5.26.1

Remote Load tester 用 PC

CPU: Intel(R) Core(TM) i5-7500T CPU @ 2.70GHz
OS: Windows 10 Pro + WSL + Ubuntu 18.04.4 LTS
Python version: 3.6.9
Perl version: 5.26.1

4.2 STARS client 1 to 1 の負荷テスト

まずはじめに 1 対の Load tester による負荷テストを行った(図 5)。このテストでは Server と Client の組み合わせを変えるとともに一度に送信するメッセージ(データ)の大きさを変えて、それぞれの転送速度を計測している。



図 5 STARS client 1 to 1 負荷テストの概要

図 6 は結果をプロットしたグラフである。横軸は一度に送るデータ長、縦軸は転送にかかった時間及び送信データの長さより計算した転送速度である(以下示すグラフも同様)。データ長が 100kB を超えると、PySTARS 及び、Python 版の Load tester を組み合わせた場合の測度が大きく向上している。なお、Perl 版では時間がかかりすぎるため、10MB までのテストとしている。シングルスレッドモードの PySTARS が最速ではあるが、マルチプロセッシングモードの PySTARS が転送速度を維持しているのに対し、シングルスレッドモードの STARS server には速度の低下がみられる。

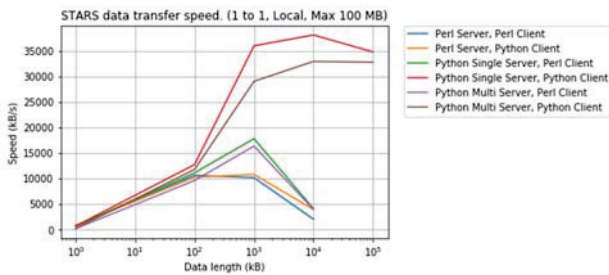


図 6 STARS client 1 to 1 負荷テストの結果

4.3 STARS client 4 to 2 の負荷テスト

次に 4 つの Load tester から 2 つの Load tester に送信した場合のテスト (4 to 2: 2 つの Load tester から 1 つの Load tester に同時送信、それを 2 組) を行った (図 7)。

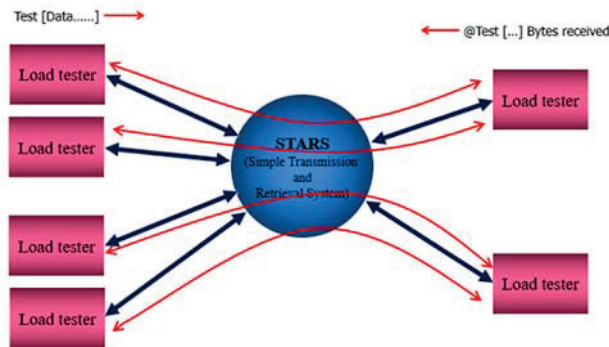


図 7 STARS client 4 to 2 負荷テストの概要

図 8 は 4 to 2 でのテスト結果である。PySTARS マルチプロセッシングモードが他のものに比べると圧倒的に高速である事が分かる。100MB に於いて若干の測度低下が認められるが、やはり PySTARS マルチプロセッシングモードが最速となっている。

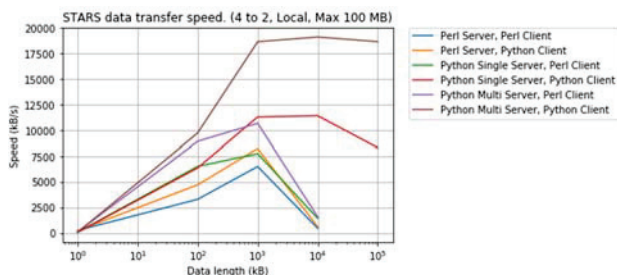


図 8 STARS client 4 to 2 負荷テストの結果

4.4 STARS client 5 to 5 の負荷テスト

更に高負荷を想定して、図 9 に示すように 5 つの Load tester からそれに対応する 5 つの Load tester へ送信試験を行った。

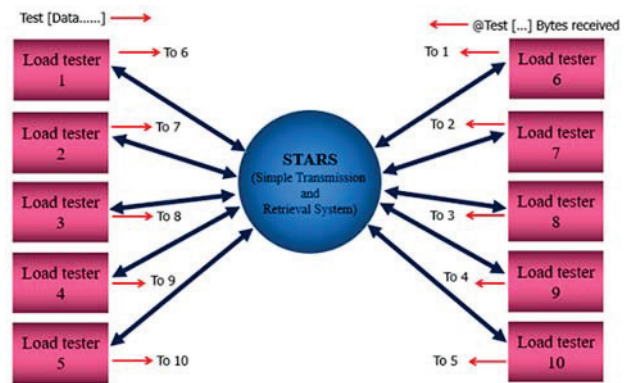


図 9 STARS client 5 to 5 負荷テストの概要

図 10 は本テストに於いてすべての STARS client を 1 台の PC 上で動作させた場合の結果である。転送データ長が長くなった場合、若干の速度低下が認められるが、PySTARS のマルチプロセッシングモードが最速となっている。

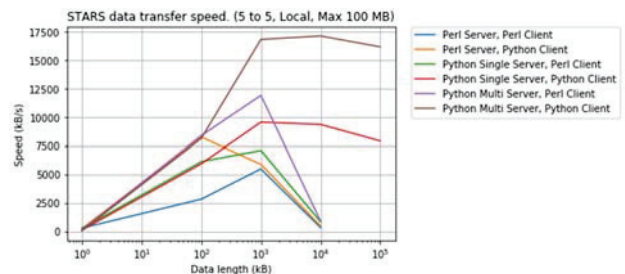


図 10 STARS client 5 to 5 負荷テスト (Local)

図 11 は STARS server が動作する PC と別の PC 上で Load tester を動作させ、5 to 5 のテストをネットワーク (100Mbps) を通して行った結果である。1MB から 10MB までは PySTARS シングルスレッドモードが若干早くないが、100MB では PySTARS マルチプロセッシングモードが最速となった。

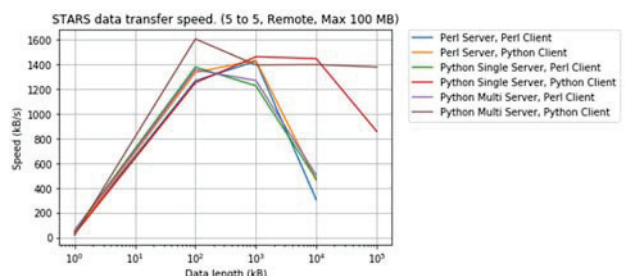


図 11 STARS client 5 to 5 負荷テスト (Remote)

5. システムへの導入と安定性の確認

今回 PySTARS を Alarm 通報システム構築に際して採用、安定性等の確認を行った。Alarm 通報システムは PF のビームラインインターロックシステムに STARS Bridge を使用して接続され、ビームラインインターロックシステムの状況をモニターする。もしビームラインに何らかの異常が発生した場合は、Arduino UNO を通じてマルチ通報機 (株式会社タカコ

ム製 ADS-100)により担当者への電話連絡がされるとともに、関係者にメールによる通知が行われる(図12)。

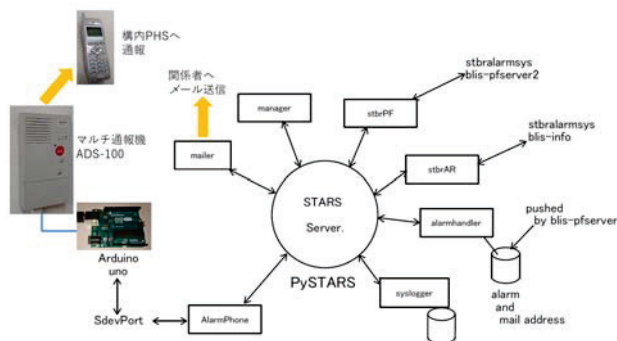


図 12 Alarm 通報システム

これまで、Alarm 通報システムの運用を通して PySTARS の有効性と安定運転が確認されている。

6. まとめ

以上の通り、新たに開発された Python 版 STARS server PySTARS の速度確認を行った結果は非常に良好であり、状況によってはこれまでの Perl 版 STARS server に比べて 10 倍以上の速度向上を確認できた。

PySTARS については実際のシステムへの導入を更に進行させる予定である。

参考文献

- [1] T. Kosuge and Y. Nagatani, “STARS: Current Development Status,” in Proc. PCaPAC’14, Karlsruhe, Germany, Oct. 2014, paper WPO019, p. 75.
- [2] 小菅隆、仁谷浩明 新しいビームラインインターロックシステムと導入の効率化 高エネルギー加速器研究機構 技術研究会 2016 報告集 (2016)
- [3] <http://stars.kek.jp/>

放射光源加速器インターロックシステム更新に伴うフィールドバスの検討

○石井 晴乃^{A)}、小菅 隆^{A)}、濁川 和幸^{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

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)放射光実験施設 Photon Factory (PF) では、放射光源加速器で発生させた放射光から X 線や軟 X 線、真空紫外線などの波長の光を取り出し利用することで様々な物質・生命科学の研究を行っている。

今回、光源加速器インターロックシステムの老朽化対策として、インターロジックのロジック部を担う Programmable Logic Controller(PLC)、非常停止ボタンや状態表示器などの各種機器、これらに付随する配線等の更新^[1]を行うことになった。本更新は単なる老朽化対策にとどまるものではなく加速器運転の安全強化や次期放射光光源計画も視野入れたものである(詳細については光源インターロックの更新について経緯や基本方針などは本研究会の濁川和幸氏の発表である「光源加速器インターロックシステム更新計画」を参照)。

新インターロックシステムでは、各種構成機器と PLC 間等にリモート IO を使用した省配線システムの採用を考えており、フィールドバスとして DeviceNet 及び Modbus、産業用 Ethernet として Ethernet/IP について通信テストを行い採用についての検討を行った。

2. 新光源加速器インターロックシステムの構成と省配線システム

光源インターロックシステムは PLC とリモート IO、ドアスイッチや非常停止スイッチ、状態表示器などの入出力機器で構成されている。本システムは図 1 のように加速器制御室の PLC が加速器施設内の各所に設置されたリモート IO を介し、ドアスイッチや非常停止スイッチなどの入出力機器の制御を行っている。リモート IO は今回の更新で新しく施設内の数か所に設置した IO Box の中に取り付けられ、付近の入出力機器の信号線などが接続される。PLC とリモート IO 間の配線方法については今回の検討をもとに選定を行う。

また、光源加速器は入射器(LINAC)から入射された電子を使って、放射光を発生させビームラインと呼ばれる実験装置に光を供給している。そのため光源加速器のインターロックシステムは LINAC 及び

ビームラインと信号をやり取りする必要があり、加速器制御系や LINAC、ビームラインなどとも必要な情報のやり取りをする必要がある。これらの他システムとの情報のやり取りについても一部リモート IO を利用した省配線システムの導入を考えている。

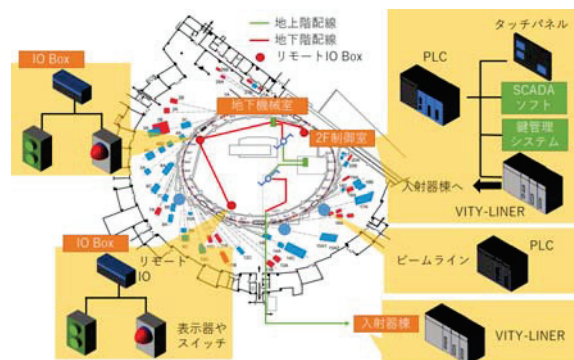


図 1 光源インターロック構成

3. 省配線システムの要求仕様

今回の光源加速器インターロックシステム更新ではインターロックシステムの中核となる PLC は情報共有や故障時などの物品調達や交換対応等を考慮し、KEK の光源加速器制御系や他の加速器施設でも広く利用されている横河電機株式会社(以下 Yokogawa)製の FA-M3 とした。また、スイッチや表示器等の機器は DC 24V で動作するためこれらに対応する入出力リモート IO 等を選定した。配線の最大距離はあらかじめ定めた IO Box や PLC の配置より計算しており最長 120m となっている。要求される応答速度は、本システムで制御する対象の動作速度なども鑑み、十分に安全を担保できる速度の 30ms 以下とした。これらのパラメータを各種機器と PLC 間の省配線システムを構築するにあたり想定されるフィールドバスや産業用ネットワークの選定条件として表 1 にまとめる。

表 1 選定条件

内容	仕様
PLC	Yokogawa FA-M3 F3SP71-4S
入出力電圧	DC24V
最大配線距離	120m
応答速度	30ms 以下

4. インターフェイスモジュールとリモート IO

PLC とリモート IO 間でフィールドバスや産業用 Ethernet でのデータ通信を行うためには、図 2 で示すような、使用する PLC に対応するインターフェイスモジュールが必要である。

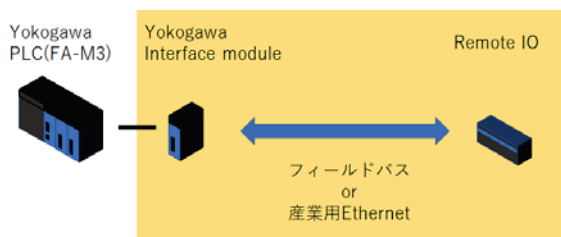


図 2 インターフェイスモジュール

Yokogawa が提供しているフィールドバスと産業用 Ethernet のインターフェイスモジュールとしては表 2 のようなものがあり、今回は DeviceNet と Modbus、Ethernet/IP の 3 つについて検討をすることとした。

表 2 Yokogawa で提供している
インターフェイスモジュール

フィールドバス	DeviceNet, Modbus, CAN2.0B
産業用 Ethernet	Ethernet/IP, FL-net

入出力のリモート IO は各インターフェイスに対応し、前述の要求を満たすものを選択している。型番などの詳細については、後述の通信テストの各フィールドバス、産業用 Ethernet 毎に述べる。

5. 通信テスト

省配線システムの選定のために、4 で取り上げたインターフェイスモジュールとそれに対応するリモート IO を PLC に接続し、それぞれの反応速度等の確認を行った。

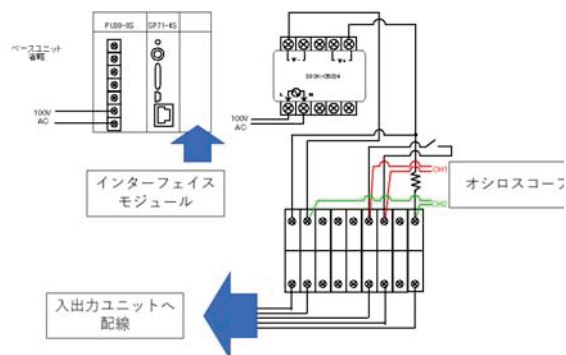


図 3 入出力テスト用回路

図 3 は入出力応答を測定するために用意した回路である。右側回路のスイッチはリモート IO の入力端子に接続され、ON/OFF 信号は省配線システムを

通して PLC に読み込まれる。一方 PLC の出力信号は省配線システムを通じてリモート IO の出力端子に出力される。負荷回路としては一般的な抵抗を使用した。今回、これらの入力部及び出力部の電圧をモニターする事で入出力の応答を観察した。

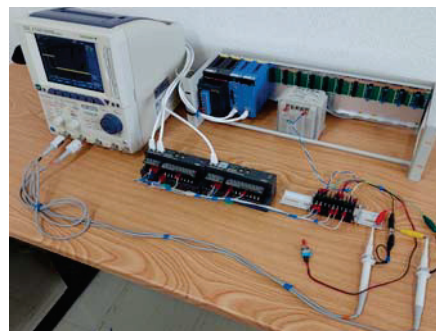


図 4 通信テストの様子

PLC のプログラムは FA-M3 用のプログラム開発ソフトウェア WideField3 で作成した。本ソフトウェアでラダープログラムを作成することで、PLC へのプログラムのインストールなどが簡単にできる。また、PLC やモジュールのアドレスデータのモニターも可能である。

今回テストのために次のような機能を持つプログラムを作成した。

- ・インターフェイスモジュールなどの初期設定
- ・入力の読み込み
- ・入力の状態を出力に反映

このプログラムはインターフェイスモジュール等の初期設定を運転開始時 1 回のみ行うため、入出力の応答時間には影響を与えない。なお、設定するパラメータなどはインターフェイスモジュールによって異なる。入出力の読み書きについても、モジュール毎に手順や処理が違うためプログラムの大きさや読み書きのタイミングが異なっている。そのため各通信規格について、今回のインターロックシステム更新で要求される応答速度や配線距離などを満たしているかどうかだけでなく、設定やプログラム作成の手間など使いやすさについても確認を行った。

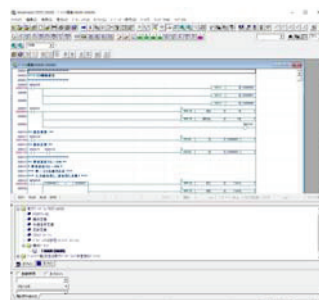


図 5 ラダープログラム(WideField3)

5.1. DeviceNet

DeviceNet は PF のビームライン測定器側のインターロックシステムにも利用されているフィールドバスのため、ビームラインインターロックとの連携なども考慮しテストを行うことにした。DeviceNet の代表的な仕様について表 3 に示す。

表 3 DeviceNet の仕様

制御方式	マスタ・スレーブ方式
最大ケーブル長	500m (太ケーブル/伝送速度 125kbps)
ケーブル	DeviceNet 専用ケーブル
配線方法	デジチェーン、枝状分岐のバス接続、スター型接続など
最大接続数	マスタ 1 台に対し 63 台
伝送速度	125kbps~500kbps
通信方式	I/O 通信(Poll, Bit-Strobe, COS, Cyclic)、メッセージ通信

通信・入出力応答のテストは 5 の回路に DeviceNet インターフェイスモジュール(F3LD01-0N)、M-SYSTEM のリモート IO(出力ユニット R7D-DC16A と増設入力ユニット R7D-EA8)を接続し行った。テストのために行った準備は以下のとおりで、実際の設定値(表 4)はリモート IO の EDS(Electronic Data Sheet)のパラメータから決定した。

- ・インターフェイスモジュールとリモート IO のノード番号、伝送速度、終端抵抗を本体のスイッチなどで設定
- ・モジュールの取り付けと配線
- ・ラダープログラムでのスキャンリスト作成
- ・入出力プログラムの作成

表 4 DeviceNet 機器の設定値

ノード番号	F3LD01-0N : 64, R7D-DC16A+R7D-EA8 : 1
通信速度	200kbs
送信間隔時間	10ms
ベンダ ID	184
デバイスタイプ	0
プロダクトコード	33
出力データサイズ	2
出力データオフセット	0
入力データサイズ	2
入力データオフセット	0
通信方式	I/O 通信(Poll)

スキャンリスト作成ではノードの数だけ表 4 のような設定をプログラムから行う必要がある。そのためノードが増えるほど設定が複雑かつ、ラダープログラムが膨大になる。一方で、IO からの入出力データはスキャンリストの情報をもとに自動的に既定のデータアドレスに格納されるため入出力プログラムはシンプルなものになった。

入出力の応答時間の最大時間は、下記の式で計算することができ、テスト環境では約 25ms になる。
最大入出力応答時間=送信間隔時間×2+1 スキャン時間+スレーブ内入力遅れ時間+スレーブ内出力遅れ時間

実測値は表 5 の通りで、スキャンのタイミング次第で送信間隔時間分の入出力応答時間の変動がみられる。送信間隔時間はノード数によって設定目安があり、ノード数が増えるほど長めに設定する必要がある。大体 10 ノード毎に 10ms 送信間隔時間が増えるため、ノード数が増える場合は応答時間に注意が必要である。

表 5 DeviceNet 入出力応答時間

最大	最小
27ms	16ms

5.2. Modbus

Modbus は通信プロトコルのみが規定された汎用ネットワークで、PF では実験ホールの温度湿度や装置用冷却水の水流量などの環境測定に Modbus/TCP 利用されている。

Modbus では通信ケーブルなどについては規定されていないため、機器の設定については今回利用した Modbus インターフェイスモジュール(F3LC31-2F)と M-SYSTEM のリモート IO(R7M-DAC16C)の仕様をもとに行った。

表 6 Modbus の仕様(F3LC31-2F+ R7M-DAC16C)

制御方式	マスタ・スレーブ方式
最大ケーブル長	1.2km
結線方式	RS-485
最大接続数	マスタ 1 台に対し 8 台
伝送速度	1.2k ,4.8k ,9.6k, 14.4k, 19.2k, 28.8k, 38.4k, 57.6k, 115.2kbps
通信方式	Modbus RTU/ Modbus ASC II

テスト環境は下記のような手順で構築した。その際の機器設定値は表 7 のとおりである。

- ・インターフェイスモジュールとリモート IO の伝送速度、リモート IO のノード番号を本体のスイッチなどで設定
- ・モジュールの取り付けと配線
- ・R7M 用のコンフィギュレーションソフトウェア R7CON で伝送モード、パリティなどを設定
- ・入出力プログラムの作成

表 7 Modbus 機器の設定値

局番	F3LD01-0N : 0, R7M-DAC16C:1
通信速度	115.2kbs
伝送モード	ASC II
ストップビット	2bit
パリティ	None
データ長	7bit

Modbus の入出力プログラムは初期設定とメッセージ通信によるデータアドレスへの読み書きで構成されたラダープログラムとなっており、入出力応答について測定した結果は表 8 のようになった。

表 8 Modbus 入出力応答時間

最大	最小
85ms	30ms

5.3. Ethernet/IP

Ethernet/IP はイーサネットを利用したオープンネットワークのためケーブルの調達や配線がしやすいというメリットがある。Yokogawa では産業用 Ethernet を利用したインターフェイスとして FL-net も用意されているが、開発状況なども鑑み Ethernet/IP でテストを行うことにした。Ethernet/IP インターフェイスモジュール (F3LN01-0N) と M-SYSTEM のリモート IO (入力 : R7G4HEIP-6-DA16, 出力 : R7G4HEIP-6-DC16A) の仕様を表 9 に示す。

表 9 Ethernet/IP 仕様(F3LN01-0N+ R7G4HEIP-6-DA16+ R7G4HEIP-6-DC16A)

制御方式	TCP/IP, CIP
セグメント最大長	100m
ケーブル	10BASE-T / 100BASE-TX (ツイストペア UTP/STP, Cat5 以上)
最大接続数	256
通信周期	1~10000ms
伝送速度	10/100Mbps
通信方式	I/O 通信、メッセージ通信

Ethernet/IP のテスト環境の構築は次のような手順で行った。

- ・インターフェイスモジュールとリモート IO の IP アドレスの設定
- ・リモート IO R7G4HEIP-6-DA16 の入力取り込み時間をコンフィギュレーションソフトウェア R7CFG で設定
- ・モジュールの取り付けと配線
- ・インターフェイスモジュールのスキャンリストやタグなどの設定を設定ツールから行う
- ・CPU モジュールのリンクレジスタ設定
- ・入出力プログラムの作成

Ethernet/IP の IO 通信では通信を要求する側がスキャナ、要求される側がアダプタとよばれ、スキャナアダプタ間の通信のためにはタグの設定が必要になる。タグ設定では通信周期などもアダプタの入出力ごとに決めることができる。テストでは表 10 のように設定を行った。なお、送受するデータのサイズ等はリモート IO の EDS を使用しているため省略する。

表 10 Ethernet/IP 機器の設定値

入力取り込み時間	1ms
アダプタ R7G4HEIP-6-DA16 の通信周期	アダプタ->スキャナ : 1ms スキャナ->アダプタ : 1ms
アダプタ R7G4HEIP-6-DC16A の通信周期	アダプタ->スキャナ : 1ms スキャナ->アダプタ : 1ms

Ethernet/IP の IO 通信では設定ツールを用いた初期設定で、アダプタとの入出力データを格納するアドレスを CPU のリンクレジスタに設定、ラダープログラム内ではこのリンクレジスタの読み書きを行うだけでリモート IO の入出力を行うことができる。また、入出力応答時間も表 11 のように安定している。

表 11 Ethernet/IP 入出力応答時間

最大	最小
9ms	7ms

6. まとめ

今回 KEK の放射光源加速器インターロックの更新を行う上で、最適な省配線システムを検討するために DeviceNet、Modbus、Ethernet/IP の 3 種類のフィールドバス及び産業用イーサネットについて機器選定と設定、入出力応答のテストを行った。その結果を表 12 にまとめる。

表 12 DeviceNet、Modbus、Ethernet/IP の比較

比較内容	DeviceNet	Modbus	Ethernet/IP
通信速度	要求はクリア	少し遅い	十分早い
配線距離	規格次第	十分長い	注意が必要
配線	自由度が高い	自由度が低い	自由で簡単
ケーブル作成	手間がかかる	手間がかかる	簡単
設定	複雑	簡単	非常に簡単
接続数	十分多い	少ない	非常に多い
ラダープログラム	簡単	複雑	簡単

3 種類の配線法を比較すると応答速度や配線の容

易さなど鑑み総体として Ethernet/IP が今回の光源インターロック更新の配線法として最適と言える。ただし、Ethernet/IP を利用する場合はセグメント間のケーブル距離が 100m 以内になるように注意して配線する必要がある。今後は、これら 3 種類のインターフェイスモジュールユニットの運転動作の安定性や他社 PLC との通信の相性などについても検証していく予定である。

参考文献

- [1] 濁川和幸 他 光源加速器インターロックシステム更新計画 令和 3 年度核融合科学研究所技術研究会 報告書 (2022)
- [2] 小菅隆 他 新しいビームラインインターロックシステムと導入の効率化 平成 28 年度高エネルギー加速器研究機構 報告書 (2016)

LHD 計測シャッターシステムの改修について

○西村輝樹 ^{A)}、横田光弘 ^{A)}、小川英樹 ^{A)}、渋谷真之 ^{A)}、林 浩 ^{A)}

^{A)} 核融合科学研究所技術部

1. はじめに

大型ヘリカル装置(以下、LHD という)には、プラズマ計測のために観測窓が多数ある。LHD では、実験準備としてグロー放電洗浄により真空容器内壁の洗浄を行うが、その時に観測窓を汚損させ計測不良を招くおそれがある。それを防ぐため各観測窓にはシャッターが設置されており、必要に応じて遠隔で開閉できる計測シャッターシステムが構築されている。

計測シャッターは、LHD が設置されている大型ヘリカル実験棟とは別の制御棟制御室にある PC によって、シリアル通信を用いて通信機器室に設置された PLC へ指示を送り、PLC によって LHD の設置されている本体室にある圧縮空気の電磁弁を動作させて開閉する仕組みとなっており、すでに 20 年以上稼働している。今回、老朽化した PC を更新するにあたり、シリアルポートを有した機種の入手が難しくなったこともあり、新しい規格であり、より高速である Ethernet を用いたシステムへと改修を行った。

2. システムの調査・整理

改修作業について、旧システムは 20 年以上前に構築されたもので機器構成の再調査から始めた。

観測ポートは、LHD の外周側に設置されているものは”O”、内周側は”I”、上部は”U”、下部は”L”の記号+、LHD を上部から見た時の 12 時の位置から時計回りに 1 番からの番号を組み合わせたものがつけられている。観測窓のシャッターは当初より現在の数があったわけではなく、LHD 実験の進捗により追加・変更・削除が繰り返されてきた。操作画面上では、その順番にボタンが配置されていたが、本体室に設置された電磁弁の順番は必ずしもその順番でないところがあった。そのため、各電磁弁に接続された圧縮空気のチューブの行き先を調査・タグ付け等、操作画面と一致するように整理を行った。

3. 旧計測シャッターシステム

LHD は、装置本体の外径 13.5 m、高さ 9.1 m という大きさで、装置各所に設置されたシャッターを本体室内の一か所から制御することが難しい。この

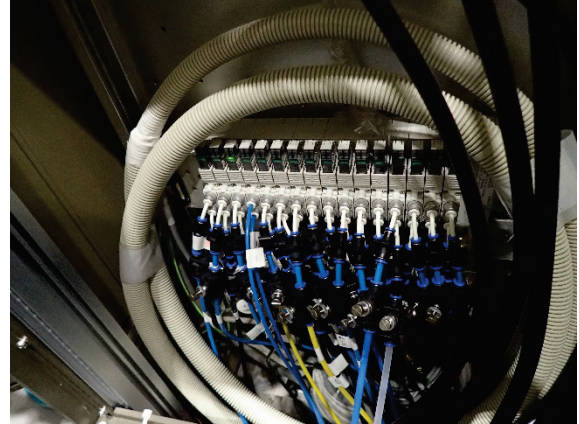


図 1. 本体室設置の電磁弁

ため、電磁弁と制御 PLC を収める計測シャッター用の制御ラックを図 2 に示す様に、計測ステージ毎に 4 ヲ所設置し、そこから最寄りの各観測窓のシャッターを制御するようにしている。

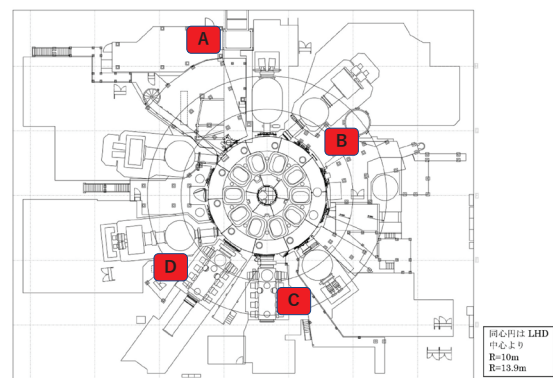


図 2. 計測シャッター制御ラック配置図

このラックに設置された電磁弁の制御用 PLC は、平成 29 年の LHD 実験の重水素化に伴い、重水素実験時に発生する中性子によって故障したり誤作動を起こしたりするおそれがあるため、大型ヘリカル実験棟内の別の部屋である通信機器室に移設されている。(図 3)

通信機器室と制御室は、メディアコンバータにより光に変換され、光ファイバーによってシリアル通信している。

制御室では、PC に四つのシリアルポートを増設・利用していたが、過去の更新において USB-シリアル変換アダプタを用いたものに置き換えられている。



図 3. 通信機器室の計測シャッター制御ラック

PC の OS も、順次更新され、今回の更新前は Windows7 であった。更新前のシステム構成図を図 4 に示す。

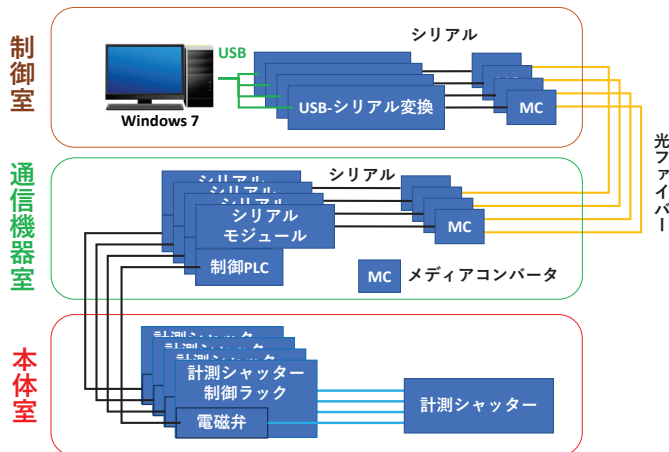


図 4. 旧計測シャッターシステム構成図

4. 使用機器等

改修作業時に旧計測シャッターシステムで使用していた機器は、以下の表 1 の通りであった。

表 1 旧計測シャッターシステム機器一覧

	メーカー	規格
PC	HP	Z200 Windows7
シリアル変換器	IO データ機器	USB-RSAQ5
メディアコンバータ	ネットワークサプライ	GPNET opt-23A
シリアルモジュール	オムロン	PLC CPU ユニット 内蔵
制御 PLC	オムロン	CS1W-ID212, OC221 等

注: 制御 PLC は、追加した時期により規格が違いため、

主な入出力ユニットのみの規格を示す。

このうちの、PC を更新し、シリアル通信に関わるところを Ethernet 通信規格のものへ変更を行った。今回の改修で更新、追加した機器を以下の表 2 に示す。

表 2 新計測シャッターシステム新規機器一覧

	メーカー	規格
PC	EPSON	Endeavor MR8200 Windows 10
メディアコンバータ	BUFFALO	LTR2-TX-MFC2R
スイッチングハブ	BUFFALO	LSW5-GT-8EP/WHM
Ethernet モジュール	オムロン	CS1W-ETN21

制御 PLC と電磁弁は、旧システムの機器をそのまま使用した。

5. 新計測シャッターシステム

シリアル通信から Ethernet を用いた通信に変更するために、上記のように通信機器室のラック内の PLC に Ethernet モジュールを追加した。(図 5)

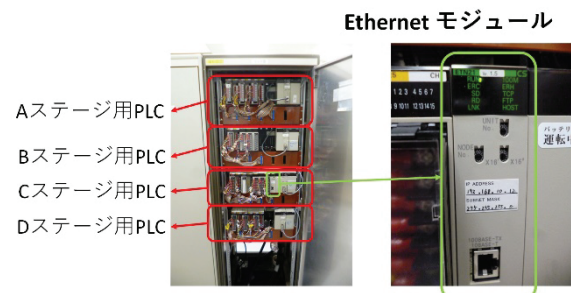


図 5. 通信機器室の PLC と Ethernet モジュール

また、PC 本体の更新 (OS : Windows 10) と計測シャッター制御専用で使う LAN カードを追加し、図 6 に示すような構成へと変更した。

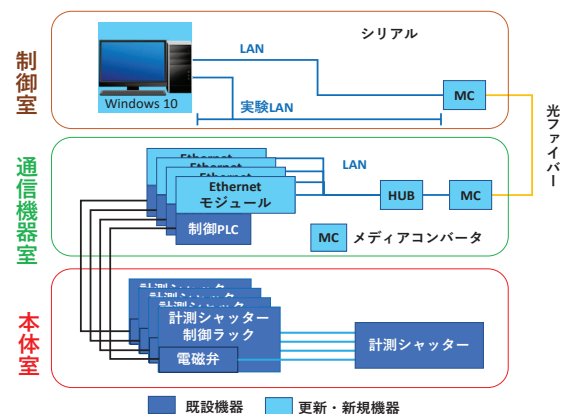


図 6. 新計測シャッターシステム構成図

これまで、制御 PC を設置している机の下は、USB ケーブル 4 本と、USB-シリアル変換アダプタ 4 個、4 台のメディアコンバータとその AC アダプタと、乱雑な状態であったのが、LAN ケーブル 1 本とメディアコンバータ 1 台とすっきりとさせることができた。

また、万が一制御 PC が故障した場合に備えて、同じ LAN 上に接続されたバックアップ用 PC からでも制御できるようにした。

6. プログラム更新

通信方式をシリアルから Ethernet に変更したことに伴い、これまでの C モードコマンドによるやり取りを、Fins/TCP コマンドを利用した方法に変更した。プログラムは LabVIEW を用いて開発しているが、今回 FINS/TCP による通信部分は、サブ VI として分離した形で作成し、再利用できるようにした。

ユーザーインターフェースについては、前述したように制御するシャッターは、何度も追加・変更がされてきた。そのため、操作画面もその都度、追加・変更されて、デザイン等の統一がなく、少し分かりづらいものとなっていた。また、複数の操作プログラムで制御を行っていたため、何枚ものウインドウを開く必要があり、他のウインドウの下に隠れることもあった(図 7)。

この複数の操作プログラムを、図 8 に示すように 1 つのプログラムに変更した。実験時のみ開けるシャッター、常時開けたままにしておくシャッター、研究者の指示に従って開閉するシャッター等、色分

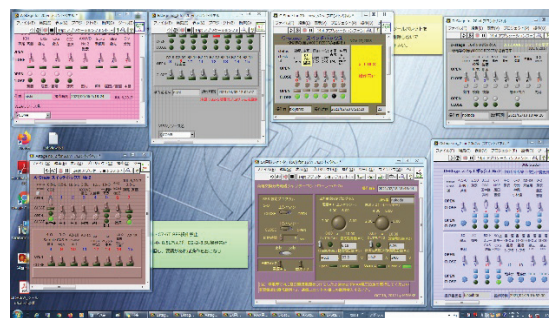


図 7. 旧操作画面

けをし、操作者がなるべくミスをしないデザインとした。

また、実験時のみ開けるシャッターは、一括で開閉できる機能を追加した。この機能により、これまで数十個のスイッチ操作を確認しながら行っていたものが 1 クリックで完了するため、操作時間の短縮やシャッターの開け忘れや閉め忘れを防ぐことができた様になった。

7. 苦労したところ

この改修作業は 3 年以上前から計画されており、改修に必要な部品が予算の余裕のある時に既に入荷されて用意されていた。最初は、それらの部品を使用して通信テストを行ったが、光ファイバーの通信不能の症状が発生し上手くいかず苦労した。その時点で、部品の規格を調べればよかったのだが、用意された部品で通信できるはずという思い込みがあり、作業が大幅に遅れてしまった。

通信機器室に来ている光ファイバーの端子は FC コネクタであったが、新たに導入したメディアコン

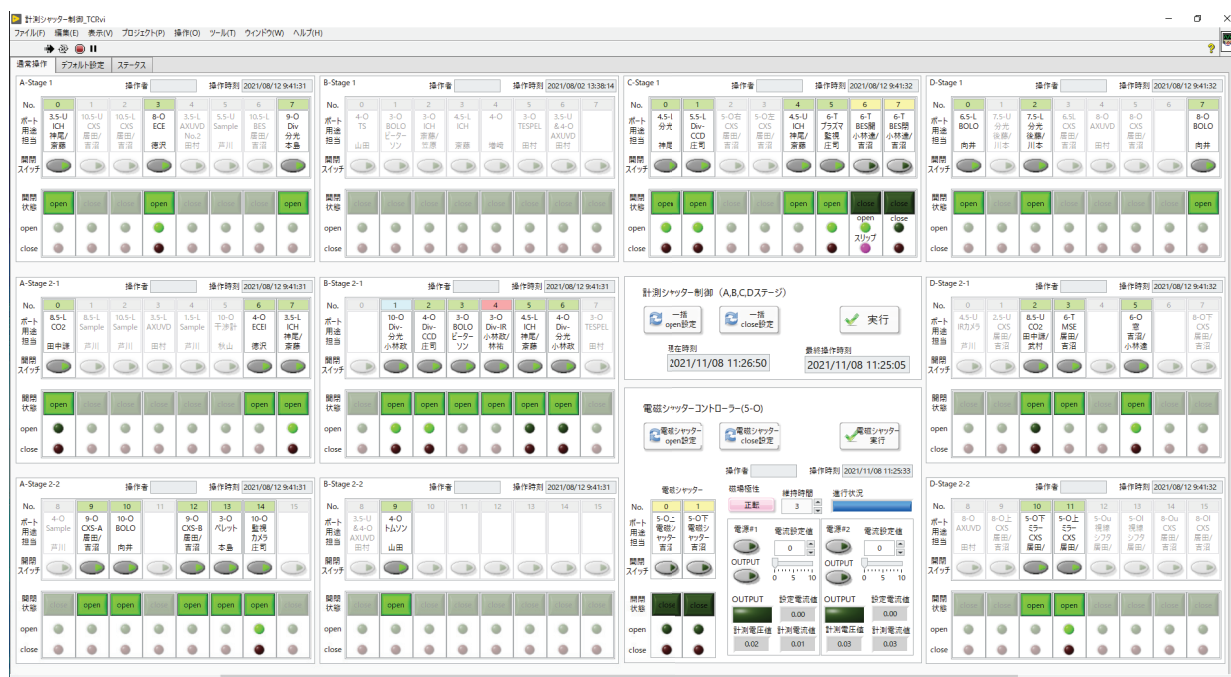


図 8. 新操作画面

バータのコネクタは SC コネクタであった。そのための変換アダプタが必要であるが、用意されていた
1. 部品に下記の変換アダプタがあった。



図 9 SC/FC 変換アダプタ

ネットワーク機器に詳しい方ならすぐにお気づきかと思うが、ネットワーク機器にあまり詳しくない私は、こちらのアダプタを疑うことなく他の不具合の可能性を調べるのに時間を費やしてしまった。後日、どうもこの部品が怪しいということに気づき、詳しい者に相談して、ようやく規格が違う事に気づいた。後で見れば、型番に”SM”と明示されていたが、これがシングルモードを表していることには当初、気づかなかった。

上記のような FC オスと SC オスのマルチモード用のアダプタを探したが、見つからなかったため、図のような FC オスと SC メスのアダプタと SC コネクタの短い光ファイバーを用いることとした。そのように部品を取り替えることにより通信が復旧することとなった。



図 10 SC/FC 変換アダプタ

1. 機器が新しい規格になったことにより、故障時の機器の入替が容易になった。
2. Ethernet 規格にしたことにより、通信速度が向上した。
3. 光ファイバーやケーブル等を減らすことにより、メンテナンスしやすくなった。
4. 操作プログラムの更新により、操作性が向上した。

7. まとめ

今回の改修による以下のメリットが得られた。

企業との共同研究、高周波誘導加熱装置用制御回路の研究開発

○佐藤 節夫^{A)}、 安達 智宏^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 物構研・中性子、^{B)} (株) 第一機電 新事業推進部

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の中性子科学研究系では 30 年以上に渡り、独自に開発した様々な回路技術で中性子実験を行ってきている。これらの技術は、茨城県の東海村に稼働している大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質生命研究所 (MLF) の主要な検出器読み出し回路に採用されている^[1]。これらの技術を活用するために、高周波誘導加熱装置を製作販売している第一機電と共同研究を始めた。第一機電の制御回路をデジタル化し、物理実験にも対応できるシステムを目指す。

2. 高周波誘導加熱装置

高周波誘導加熱装置は、高周波電源による電磁誘導現象を利用し、高周波加熱を行う。被加熱物は導電体である必要があるが、絶縁体などの実験試料に対しても、導電性容器を使用して間接加熱ができる。高周波誘導加熱装置を 1kHz~400kHz の周波数で制御できるデジタル制御回路を研究開発した。

図 1 (a)に電気溶解炉回路例を、(b)に試料加熱例を示す。(a)のように、4 個のトランジスタをコイル両端に配置し、①と②のゲート信号で 2 個ずつ交互に導通させることを繰り返し、高周波駆動する。(b)は本開発のデジタル制御回路で加熱した例で、Vcc 電圧 25V、共振周波数 9kHz で約 1.3kW を発生させ、外径 42mm のステンレス円筒の温度を 650°C まで上げた。

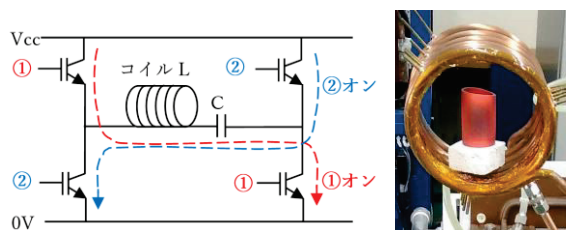


図 1 (a) 電気溶解炉回路例 (b) 試料加熱例

3. デジタル制御回路

図 2 に、ゲート信号①と②のタイミングを示す。コイル信号 (コイル電流のフィードバック) の 2 値化 (デジタル) 信号から一定時間のずれ (位相: フェーズ) を持つて、①と②を発生する。お互いの間

に不感帯 (デッドタイム) を持つ。①と②は同じ周期と幅で、周期ごとに少しずつ修正して目標に近づける。フェーズを変えることで共振周波数を少し調整できる。デッドタイムは、トランジスタに貫通電流が流れないようにする安全対策である。少なくとも 1kHz~250kHz で周波数を変えられる必要がある。

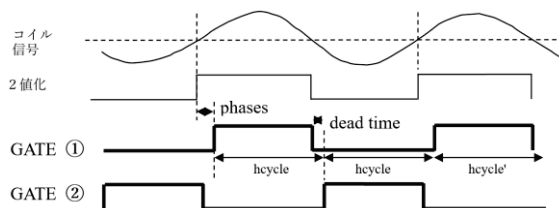


図 2 ゲート信号①と②のタイミング

図 3(a)に開発した DIG200k 基板の外観を、(b)にブロック図を示す。第一機電の準備した親基板に、KEK の開発した DIG200k 基板をコネクタで接続した。10MHz-12bit サンプリングのアナログ・デジタル変換器 (ADC) を 3 個使用し、フィールド・プログラマブル・ゲートアレイ (FPGA) でゲート信号を発生する。FPGA 内に CPU を作り、制御 PC からネットワークを通して制御およびデータ取り出しができる。液晶画面で状態確認できるようにした。

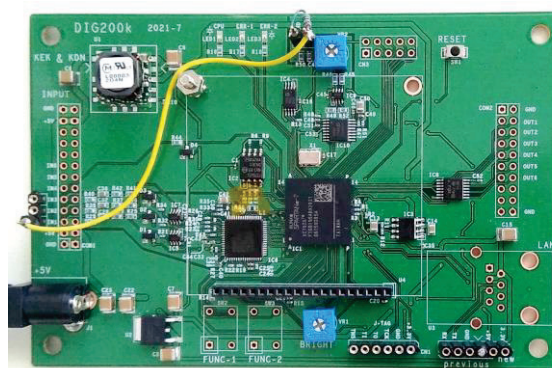
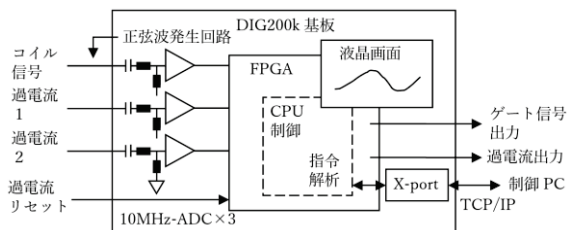


図 3 (a) 開発した DIG200k 基板の外観



(b) DIG200k 基板のブロック図

図 4 に DIG200k 基板の処理の流れを示す。図 2 のゲート信号を作り出す。コイルのフィードバック信号を ADC でデジタル化し、指定した周波数の近辺の周波数で 2 値化する。指定したフェーズとデッドタイムに沿ったゲート信号①と②を作成する。FPGA 内に 32 ビット CPU を作成し、シリアル信号をネットワークに変換する XPort モジュールを使用し、制御 PC から制御できるようにした。

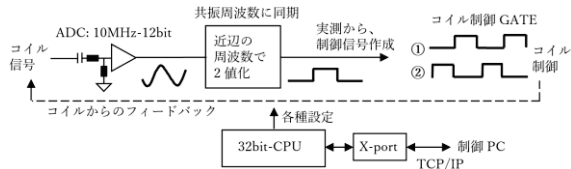


図 4 DIG200k 基板の処理の流れ

図 5 に ADC 出力の 2 値化の求め方を示す。目標とする共振周波数は、使用するコイルとコンデンサにより求まる。FPGA プログラムは常に ADC 出力の最大値と最小値を検出し、それらから中間値を決め、立ち上がりと立下りを求める。それぞれで検出したら、設定周波数の 1/4 周期を不感とし、ジッタ等のノイズによる誤動作を防ぐ。さらに、それぞれの変化が共振周波数から求めた制限時間内に合致した場合のみ、同期信号を出す。

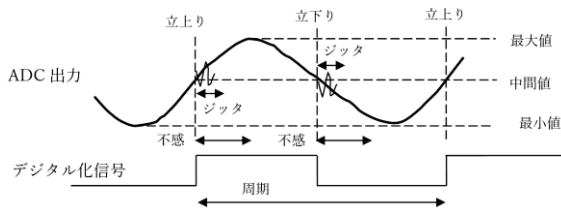


図 5 ADC 出力の 2 値化

図 6 にゲート信号発生求め方を示す。cycle は 16, 32, 64, または 128 信号の平均周期、phase は位相、diff は入力デジタル化信号の予想値と GATE 出力信号の差分である。hcycle は GATE 出力信号用の半周期で、周期の前後で同じ長さにする。次の半周期は

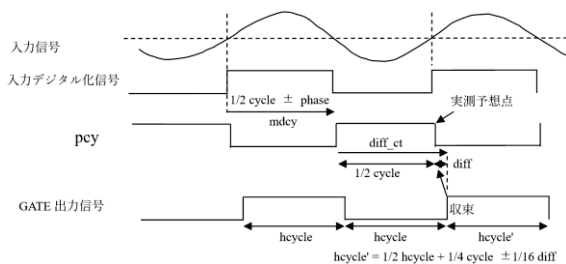


図 6 ゲート信号発生

$hcycle' = 1/2 hcycle + 1/4 cycle \pm 1/16 diff$ で、急な変化をしないように、半分は前の周期を引き継ぎ、残り半分は平均周期とし、差分 diff の 16 分の 1 の差し引

きで入力信号の 2 値化信号である、入力デジタル信号に位相差で収束させる。

4. 制御プログラム

制御 PC からは、LabVIEW プログラムで制御する。シリアル通信で、キャラクターベースで設定と波形データの読み出しを行う。図 7 に、FPGA 内に作成した CPU のシリアル通信コードを示す。

DIG200k 基板のシリアル通信コード

Xport のデフォルト IP アドレス、ポート番号: 192.168.1.40, 14000

RS232C: 115200 ボー、8 ビット、ストップビット 1、パリティ・フローなし

LLn ROM の設定、n=0 読み出し: 1 書き込み

LNn:xxxx 各制限値等の設定

n=1>dcycle : 周期、20000÷動作周波数 (kHz)、+0x8000 で手動
n=2>dead_time : 不感時間、(μs) × 80
n=3>phase_time : 位相時間、(μs) × 80、負 = +0x8000
n=4>alarm_volt : 警報電圧、(mV) × 調整係数、12 ビット長
n=5>avmode : 移動平均、0/1/2/3/4 = no/16/32/64/128
n=6>tch : 波形データの入力番号、0/1/2
n=7>tdiv : 波形データの X 軸のクロック単位、0-3/4/5/6/7 = 1/2/4/8/16
n=8>fmode : フィルター、0/1/2/3 = no/5clk/13clk/16clk

LTn:xxxx テスト用正弦波の周波数設定

LS 現測定値の読み出し

LP 波形データの読み出し

#LP 読み出しデータの先頭

PHA data データ送信開始

nnnnn 1024 ワード続く、リミット付きデータ

* n は 10 進数表示、x は 16 進数表示である。

図 7 シリアル通信コード

図 8 にプログラム例を示す。グラフの白が ADC の出力で、コイルからのフィードバック信号を表す。赤がゲート信号①で、緑が②である。(a)に 400kHz に同期させた様子を、(b)に 1kHz に同期させた様子を

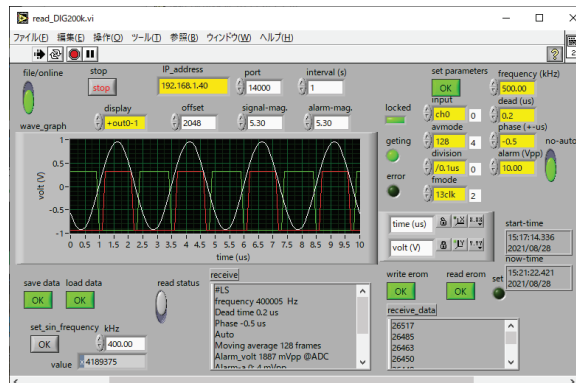


図 8 (a) 400kHz に同期させた様子



(b) 1kHz に同期させた様子

示す。(a)から、 $10\mu\text{s}$ の間に 4 サイクルあり、 400kHz であることが確認できる。(b)から、1 サイクルの間隔が $1000\mu\text{s}$ であり、 1kHz であることが確認できる。

位相を自動で変えて、コイル出力特性を測定できる機能を付けた。画面右下の scan phase ボタンを押すと、別画面が出てきて、自動測定できる。check_phse.vi 画面が開く。左下の phase start と phase inc. と loop をセットし、scanning ボタンを押すと phase を phase inc. で変えながら、コイル出力の振幅電圧を phase-Vpp グラフに記録していく。このデータのテキストファイルは、右下の text ボタンを押すと得られる。return ボタンを押して元の画面に戻る。最適な共振周波数を探索できる。



図 9 check_phse.vi 画面

図 10 に 250kHz の高周波誘導加熱装置の試料加熱例を示す。本開発のデジタル制御回路で加熱した例で、 V_{cc} 電圧 100V 、共振周波数 250kHz で、ステンレス板の温度を 766°C まで上げた。

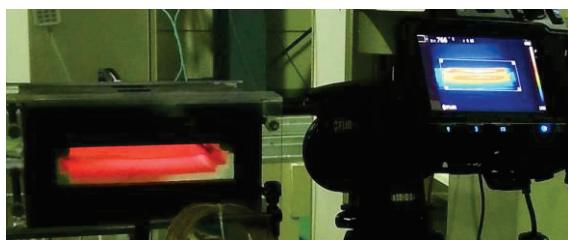


図 10 250kHz の高周波誘導加熱装置の試料加熱例

5. まとめ

KEK で培ってきた技術が、第一機電の高周波誘導加熱装置の制御回路の研究開発に役立てた。高周波誘導加熱装置を 1kHz ～ 400kHz の範囲でデジタル制御できる、DIG200 k 基板を研究開発できた。制御 PC からネットワークを通して、各種設定と、波形データの読み出しができる。今までに、周波数が 9kHz と

250kHz の高周波誘導加熱装置で動作試験ができている。最終的には、製品化を目指している。

参考文献

[1] S. SATO, T. Seya, H. Oshita, H. Kato, N. Hikida, K. Ishizawa, A. Yamaguchi and M. Matsuura, ucans8, <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023105004>.

インピーダンス整合速度改善のためのポンプの自動化

○神田 基成^{A)}、野村 吾郎^{A)}、齋藤 健二^{B)}、

笠原 寛史^{B)}、關 良輔^{B)}、関 哲夫^{B)}

^{A)}自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部

^{B)}自然科学研究機構 核融合科学研究所 研究部

1. ICRF 加熱

核融合科学研究所では大型ヘリカル装置（以下「LHD」Large Helical Device）を用いて定常高温高密度プラズマの閉じ込め研究を行い、将来のヘリカル型核融合炉を見通した様々な視点から学術研究を推進している。LHD で使用されているプラズマ加熱方法の一つに、数十 MHz の電磁波を用いたイオンサイクロトロン周波数帯（以下「ICRF」Ion cyclotron range of frequencies）加熱がある。

ICRF 加熱装置は大きく分けて高周波発振器、同軸伝送路そしてアンテナで構成されている。図 1 に本研究所の ICRF 加熱装置の概略図を示す。

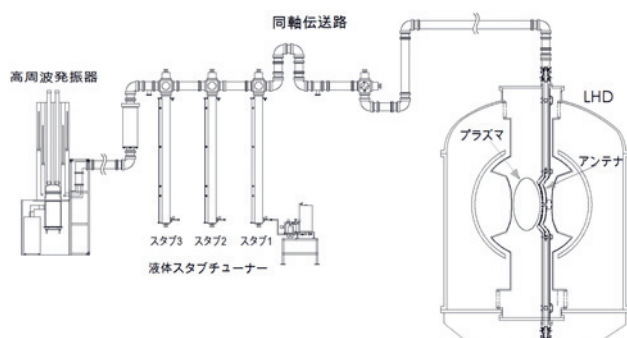


図 1 ICRF 加熱装置の概略図

2. 液体スタブチューナーについて

プラズマ実験では、実験シーケンスの放電開始から、あらかじめ設定された放電時間の間、加熱パワーを入射してプラズマを生成し、インターバル（以下、放電間）を経た後、再び放電するという最短約 3 分のシーケンスを繰り返す。その放電中にプラズマ負荷抵抗やアンテナインピーダンスの時間変動により反射電力が生じる。この反射電力は ICRF 入射パワーの悪化だけでなく、高周波発振器の損傷に繋がることもある。

反射電力を軽減するための装置として、同軸伝送路の一部に 2 本または 3 本の液体スタブチューナー（以下、スタブ）を設置している。スタブは、その同軸伝送管の外導体と内導体の間にシリコンオイルを入れ、その液面高さを変化させることによって反射

電力を減らす（以下、整合を取る）装置で、液面高さ測定のため差圧計が取り付けられている。また、入射電力と反射電力は、高周波発振器とスタブの間の同軸伝送路に設置してある 2 つの方向性結合器でそれぞれ測定している。本研究所では、1 台のスタブの液面高さを変動させるのに、1 台のポンプ及び複数の電磁バルブを使用する方法とパルスモーターにより駆動するシリンダを使用する方法の 2 通りを採っている。図 2 に液体スタブチューナーの構成を示す。

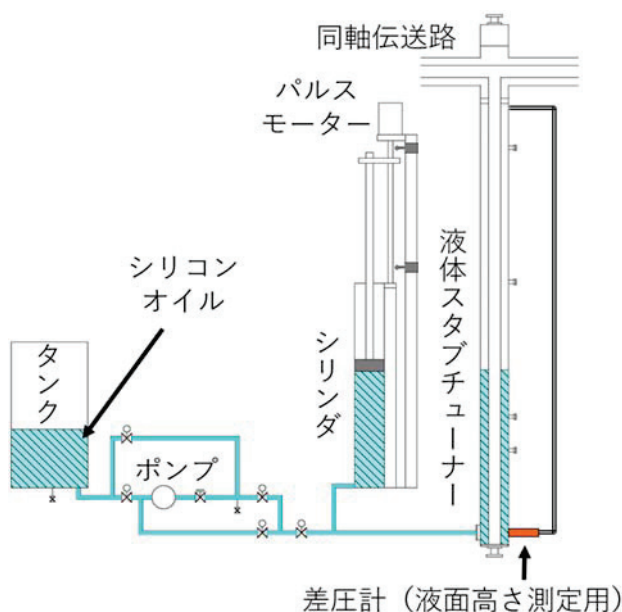


図 2 液体スタブチューナーの構成

これまで、整合最適化のフィードバック制御には、ポンプの起動やバルブの開閉による制御時間遅れがあることから、ポンプ駆動は使用せずに、シリンダ駆動を使用してきた^[1]。しかし、近年のアンテナ改造に伴い、アンテナインピーダンスの変動速度が上がり、また、整合が取れる液面高さ（以下、整合位置）の変化量が増加し、シリンダのストローク量の限界近くになった。そのため、フィードバック制御における液面高さの変化量及びその速度の増加が必要になり、シリンダに加えてポンプも使用することとした。

2019 年度までは、次の放電の初期整合位置への調整は、放電間にシリンダ制御システムが自動で行っていたが、フィードバック制御にポンプを使用することでシリンダのみでは初期整合位置に調整することができなくなることがあった。その場合、手動制御によるポンプ操作で初期整合位置に調整していた。そのため、ポンプ制御を自動化することとし、そのプログラムを LabVIEW で作成した。この自動制御方法をポンプ補助方法と呼ぶこととした。

3. 模擬試験

3.1 ポンプの制御プログラム

図 3 にポンプ補助方法における放電中のポンプ制御のフローチャートを示す。可変容量コンデンサをプラズマ負荷と見立てた模擬試験では、ポンプ補助方法におけるポンプの駆動条件を、整合位置と現在の液面高さの差が 0.05m 以上になると整合位置に近づけるようポンプを駆動させるとした。

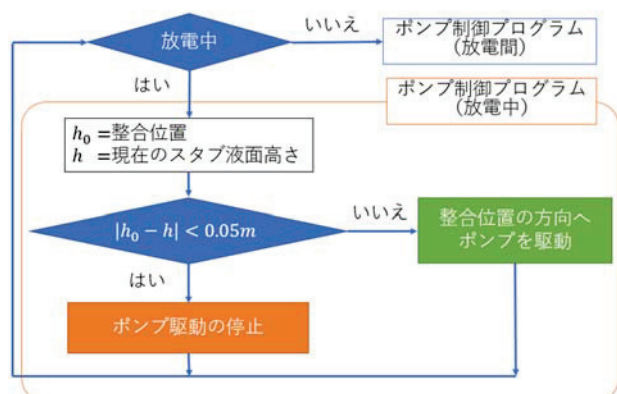


図 3 放電中のポンプ制御のフローチャート

放電間では、予想される次の放電の初期整合位置に調整しなくてはならない。シリンダ駆動に関しては過去の実験条件から次の放電の駆動方向を予想することができる。シリンダのストローク量には限界があるが、その方向を考慮して放電開始時のシリンダの位置を決めることで、駆動方向のストロークを大きく取ることができる。このように放電間にはシリンダの初期位置を設定し、さらにその位置に移動させる必要がある。また、シリンダの制御にはスタブの液面高さを初期整合位置に調整するプログラムが働いているため、ポンプでシリンダの初期位置を間接的に変えることができる。そこで、図 4 のようにシリンダの位置を調整するプログラムを組み込んだ。

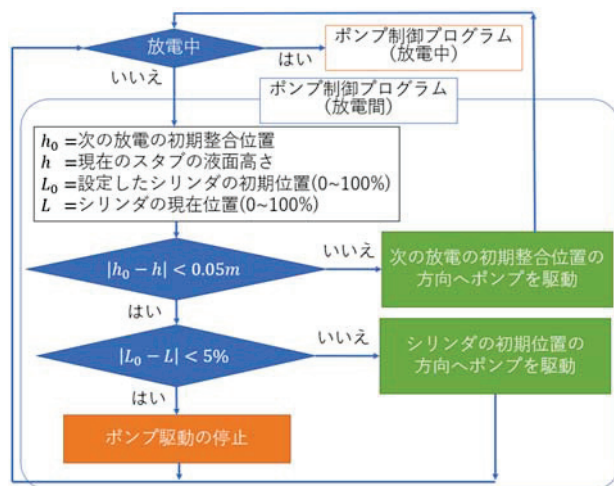


図 4 放電間のポンプ制御のフローチャート

3.2 模擬試験の実験結果

図 5 に ICRF パワーの反射率を示す。この図より、パワーの反射率が 23 秒以降、大きく改善していることが分かる。

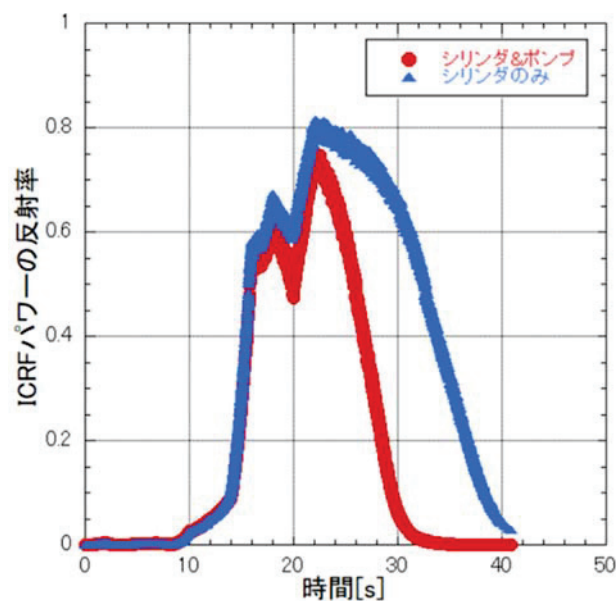


図 5 模擬実験における ICRF パワー反射率

2 つの制御方法における 3 本のスタブのそれぞれの液面高さ速度をスムージングしたものを図 6 と図 7 に示す。反射率が大きく変化した 23 秒時の液面高さ速度を比較すると、ポンプ補助方法がシリンダ駆動のみのフィードバック制御に比べ、約 1.6 倍となっていることが分かる。

また、放電間にシリンダのストローク量以上に液面高さの調整が必要な場合のポンプ制御も正常に機能していた。

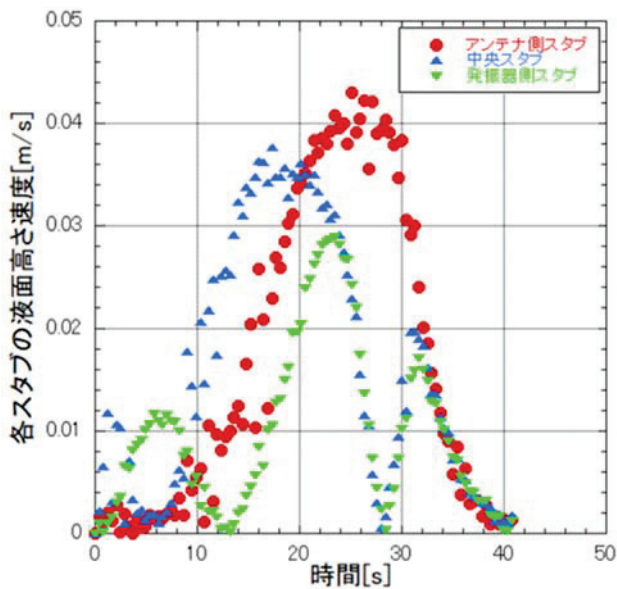


図6 ポンプ補助方法におけるスムージングした各スタブの液面高さ速度[m/s]

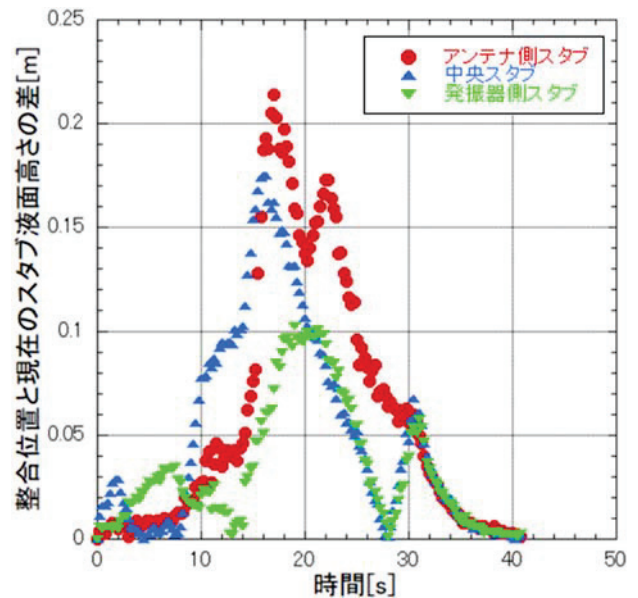


図8 模擬試験におけるポンプ補助方法での整合位置と液面高さの差[m]

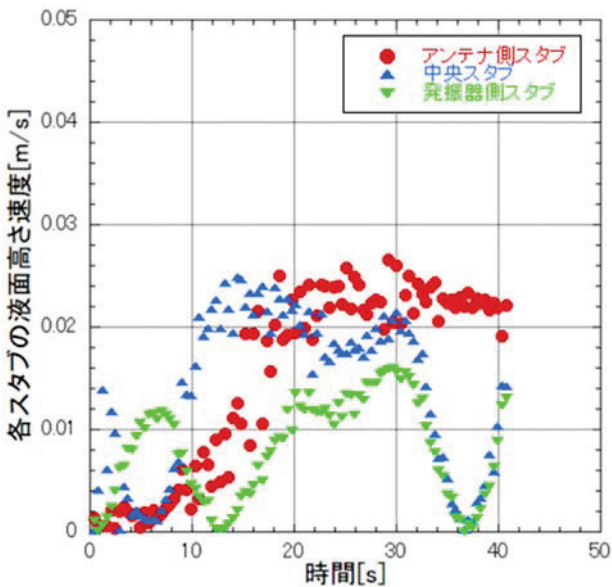


図7 シリンダ駆動のみのフィードバック制御におけるスムージングした各スタブの液面高さ速度[m/s]

また、その影響でスタブの液面高さを測定する差圧計の信号に入るノイズを拾い、ポンプの駆動がチャタリングしやすくなった。そのため、図9のようにポンプ制御のフローチャートを改善した。この制御では、放電中のポンプの駆動条件を整合位置と現在の液面高さの差が 0.035m 以上になると、 0.015m 未満になるまでポンプを駆動する、という駆動条件を設定した。

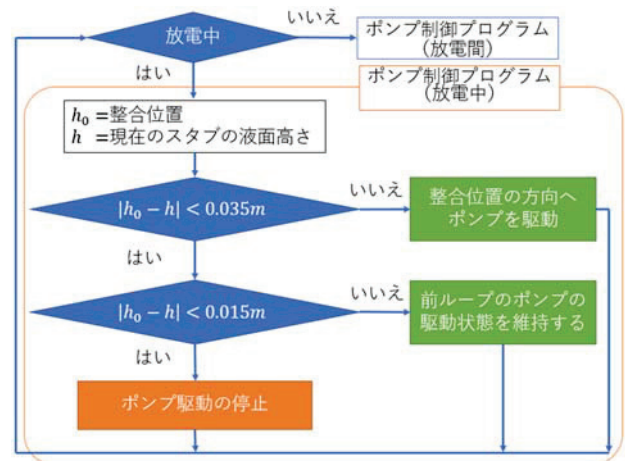


図9 実験中のポンプ制御のフローチャート

4. プラズマ実験

4.1 制御プログラムの変更

図8に模擬試験におけるポンプ補助方法での整合位置とスタブの液面高さの差を示す。この図のように最大 0.2m 以上あることから、これを減少させるため、ポンプの駆動条件を緩和することとした。

4.2 実験結果

プラズマ実験でのICRFパワーの反射率を図10に示す。この図より8秒以降でポンプ補助方法がシリンダ駆動のみのフィードバック制御に比べ、ICRFパワー反射率が大きく減少していることが分かる。

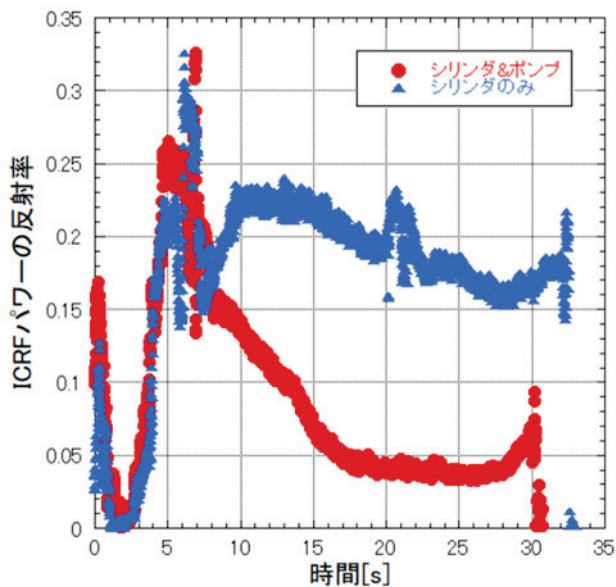


図 10 プラズマ実験における ICRF パワー反射率

また、ポンプ補助方法における整合位置と液面高さの差を図 11 に示す。この図より、制御プログラムの変更後は整合位置と液面高さの差が 0.2m 以内に収まったことが分かる。

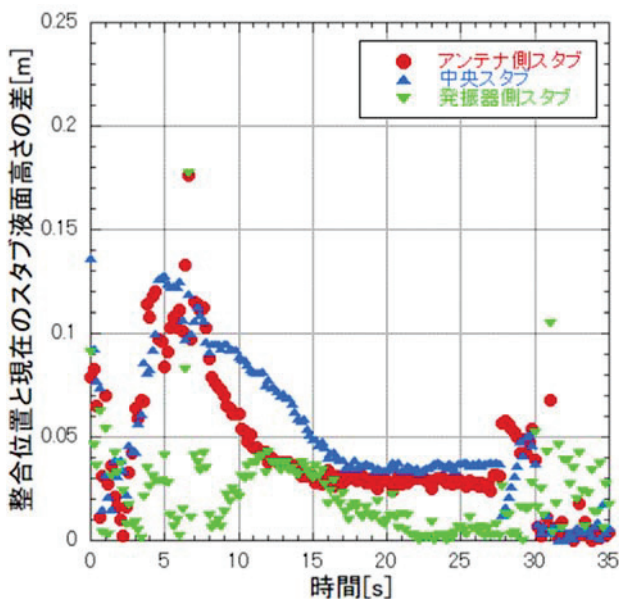


図 11 ポンプ補助方法における整合位置と液面高さの差[m]

5. まとめ

スタブチューナーの制御に従来のシリンダ駆動にポンプを加えたことで、液面高さ速度が約 1.6 倍になり、ICRF パワー反射率を大幅に減少させられた。

また、これまで手動での操作の必要であった放電間の初期整合位置への調整を自動化することで、装置の運転効率が向上し、LHD 実験の ICRF システムに貢献することができた。

参考文献

- [1] K. Saito et al., “Real-time impedance matching system for ICRF heating in LHD”, Fusion Eng. Des. 83, 245-248 (2008).

第 4 分野 (極低温技術)

LHD 超伝導ポロイダルコイルシミュレーションモデル構築

鷹見 重幸

核融合科学研究所 技術部

1. はじめに

NIFS ではメーカーと共同で冷凍プロセスの最適化や制御アルゴリズム開発などを目的とした低温プロセス実時間シミュレータ^[1](Cryogenic Process REal-time SimulaTor(C-PREST))を開発してきた。これまでに LHD のヘリウム液化冷凍機をモデル化し、極低温までのシミュレーションができることを確認してきた。しかし超伝導コイルを含む被冷却体側については簡易的なモデルとなっており、詳細なモデルが構築されていなかった。

そこで予冷運転の検討や予冷運転シーケンスプログラムの動作検証に使用できるシミュレータを目指して被冷却体のモデル化を進めている。本報告書では被冷却体 3 系統のうちの 1 つである LHD 超伝導ポロイダルコイル系統のシミュレーションモデルの構築とシミュレーション結果について報告する。

2. C-PREST について

C-PREST が開発された目的は以下の通りである。

- ・ 冷凍プロセスの最適化
- ・ 制御アルゴリズムの設計・検証
- ・ 非常時シーケンスプログラム開発・検証
- ・ 運転訓練

C-PREST は図 1 に示すように、3 台の PC と 1 台のコントローラをネットワークで接続した構成となっている。設定 PC は各制御プログラム等の編集・設定を行い、運転操作 PC は系統図表示や運転操作を行い、コントローラはシーケンス・フィードバックなどの制御プログラムを実行する。これらは実機と同じハードウェアとソフトウェア構成となっており、実機で使用するプログラムをそのまま使用することができる。

低温プロセスモデル PC にはモジュラー型シミュレーションソフトであるオメガシミュレーション社製 Visual Modeler (VM) がインストールされ、ヘリウム低温熱物性計算モジュール HEPAK が組み込まれている。VM にはバルブや熱交換器などの一般的なユニットモデルが用意されている他に、C 言語等を用いてユーザーがユニットモデルを作成する機能があり、超伝導ポロイダルコイルのシミュレーションモデル

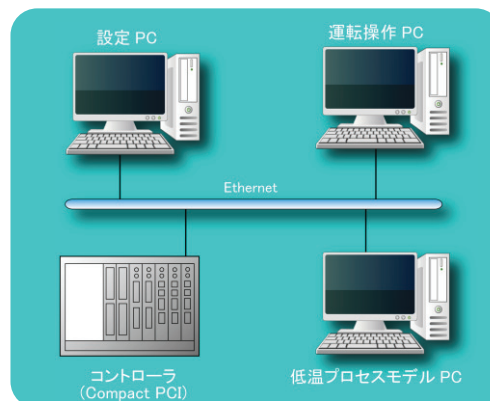


図 1 C-PREST 機器構成

構築では、この機能を利用した。

3. 超伝導ポロイダルコイルについて

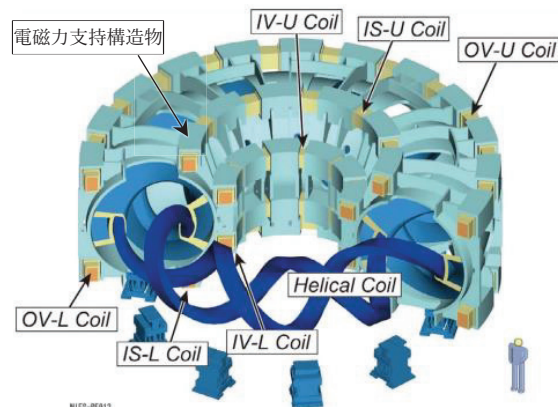


図 2 超伝導ポロイダルコイル

図 2 に示す通り超伝導ポロイダルコイルは外側から OV コイル、IS コイル、IV コイルが上下に配置された 3 対のコイルで構成されている(上側を”-U”，下側を”-L”と記載)。コイルは超伝導導体をパンケーキ巻き(1 層をターン方向に巻いた巻き方)にしたものを 16 層積み上げた構造となっており、冷却流路としては 16 本の並列パスが存在する。

また各コイルは電磁力支持構造物に固定されている。電磁力支持構造物とコイルとの間には、図 3 に示すステンレス製のスリーブが取り付けられている。スリーブの内側には冷却配管が取り付けられ、電磁力支持構造物からの熱的擾乱の影響がコイルに及ばないようにしている。

超伝導ポロイダルコイル系統にはこの他に流路を切り替えるバルブや熱交換器などで構成されており、冷媒であるヘリウムガスが流れる流

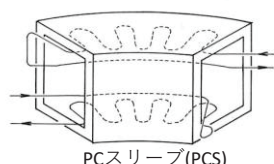


図 3 スリーブ^[2]

路を示したプロセスフロー図は図4の通りとなる。またポロイダルコイルの主なパラメータは表1の通りとなり、総重量は約160t(絶縁材重量を除く)となる。

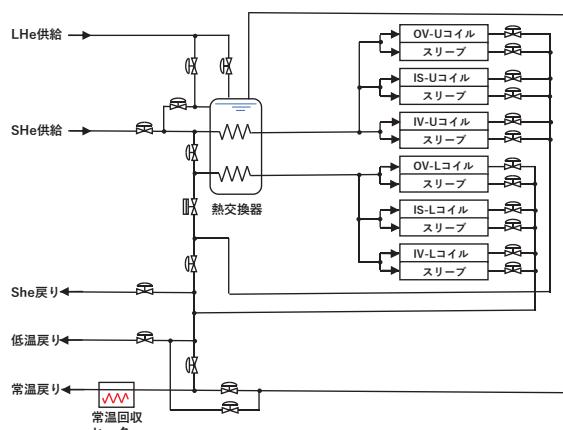


図 4 超伝導ポロイダルコイル系統のプロセスフロー図

表 1 超伝導ポロイダルコイルの主なパラメータ

	OV-U/L	IS-U/L	IV-U/L
コイル直径[m]	11.2	5.8	3.7
導体長[m]	314	230	170
ターン数	9	13	15
レイヤー数	16	16	16
コイル重量[t]	26	14	10
スリーブ重量[t]	15	7.5	4.7

4. 超伝導ポロイダルコイルのモデル化

図4のバルブ、熱交換器、常温回収ヒータ部については、VMが用意するユニットモデルを使用し、そのパラメータには設計値に基づく値を設定した。超伝導導体とスリーブについては、ユーザーユニッ

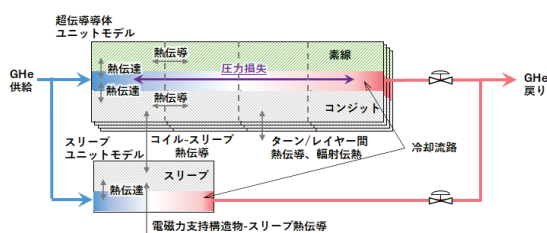


図 5 コイルとスリーブモデルの概略図

トモデルの機能を利用して新たに作成しモデル化を行った。その概略図を図5に示す。超伝導導体は冷却流路と2つの伝熱壁(素線部、コンジット部)を持つ。冷却流路を流れる流体と伝熱壁間の熱伝達、伝熱壁長手方向の熱伝導、冷却流路の圧力損失を計算する。またコンジット部やスリーブ伝熱壁については絶縁材を介して接触部との熱伝導を計算する。さらに熱シールドの役割を果たしている80Kシールドと呼ばれる部分とコイルの間では輻射伝熱を計算する。計算したこれらの伝熱量と伝熱壁の比熱と重量から伝熱壁温度を計算する。予冷のシミュレーションでは常温(300K)から極低温(4K)までの計算が必要なため、各材料の熱伝導率や比熱などの物性値は温度の関数として与える。

以下に超伝導導体ユニットモデル作成において重要な管摩擦係数と流体の流れの計算について記載する。

4.1 管摩擦係数の計算について

超伝導ポロイダルコイルの導体は図6に示すようにケーブルインコンジット導体(CICC)が用いられている。CICCは超伝導線材であるNbTiと銅からなる複合多芯線の素線486本を撚り合わせたケーブルをステンレス製のコンジットに押し込んだ構造となり、冷媒は素線と素線の間の僅かな隙間を流れ、コンジットが冷却配管の役割を果たす。このため室温では管摩擦係数は非常に大きく、一方極低温になると冷媒であるヘリウムガス(超臨界圧ヘリウム)の粘性が低くなるため管摩擦係数は小さくなる。管摩擦係数は導体を流れる流量を左右し、導体の冷却スピードに影響するため、モデル化において重要な値となる。

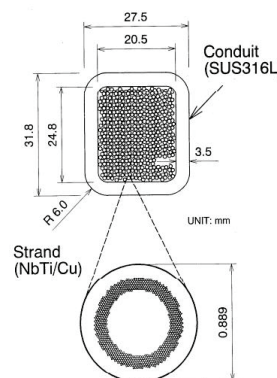


図 6 CICC^[3]

CICCの管摩擦係数 λ はKathederの経験式^[4]として知られている以下の式で表される。

$$\lambda = \frac{1}{Void^{0.72}} \left(\frac{19.5}{Re^{0.88}} + 0.051 \right) \cdot \cdot \cdot (1)$$

Void: 空間率(断面積に対する隙間の割合でポロイダルコイルでは38%)、Re: レイノルズ数(流体の慣性

力と粘性力の比)を表す。

実際の OV-U コイルの予冷運転データを用いた実測値と(1)式の管摩擦係数をそれぞれプロットすると図 7 のように誤差があるため、回帰分析によるパ

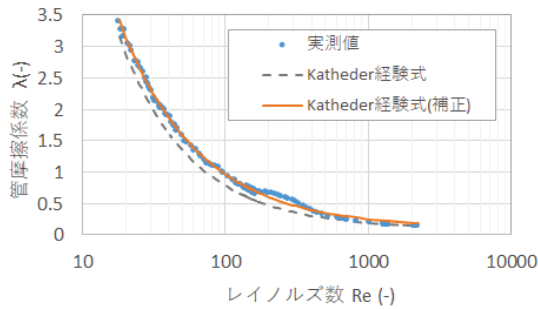


図 7 OV-U コイル管摩擦係数

ラメータフィッティングを行った。フィッティングによる補正後の管摩擦係数 λ' の計算式は(2)式となり、図 7 の実線の通り実測値とほぼ一致する計算式が得られた。

$$\lambda' = \frac{1.05}{Void^{0.72}} \left(\frac{15.4}{Re^{0.791}} + 0.051 \right) \cdot \cdot \cdot (2)$$

CICC の圧力損失は(2)式で求めた管摩擦係数を用いて Darcy の式(式(3))より算出する。

$$dP = \lambda' \frac{\dot{m}^2 L}{2\rho A^2 de} \cdot \cdot \cdot (3)$$

dP : 圧力損失 [Pa]、 $\dot{m}$: 質量流量 [kg/s]、 ρ : 密度 [kg/m³]、 L : 導体長 [m]、 de : 水力直径 [m]、 A : 流路断面積 [m²]を表す。

4.2 冷媒の流れのモデル化について

超伝導ポロイダルコイルの導体長は表 1 に示すように非常に長いので、流体は流速に応じた滞留時間と混合・拡散をしながら流れる。このような流体の振舞いを計算するため図 8 に示す完全混合槽列モデルを利用した。完全混合槽列モデルは n 個の等しい容積の槽に分割し、各槽を直列に接続し槽内は完全に混合するものとして計算するモデルである。各槽内の物質収支と熱収支はそれぞれ式(4)(5)となる。

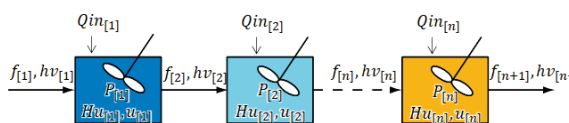


図 8 完全混合槽列モデル

$$\frac{du_{[i]}}{dt} = f_{[i]} - f_{[i+1]} \cdot \cdot \cdot (4)$$

$$\frac{dHu_{[i]}}{dt} = f_{[i]}hv_{[i]} - f_{[i+1]}hv_{[i]} + \frac{dP_{[i]}V}{dt} + Q_{in} \cdot \cdot \cdot (5)$$

u : 成分ホールドアップ [g]、 f : 質量流量 [g/s]、 Hu : 熱ホールドアップ [J]、エンタルピー [J/g]、 P : 圧力 [Pa]、 V : 容積 [m³]、 Q_{in} : 入熱 [W]、 $i=1 \sim n$ を示す。

5. 予冷シミュレーション結果

5.1 コイルとスリーブモデル

系統全体をシミュレーションする前に図 5 に示すコイルとスリーブモデルのシミュレーションを行い予冷運転データとの比較を実施した。OV-U コイルの予冷シミュレーション結果を図 9 に示す。境界条件として入口/出口圧力、入口温度、バルブ開度、80K シールド温度、電磁力支持構造物温度には予冷運転データを使用し、この時の流量と出口温度を比較した(凡例の sim はシミュレーション結果、ope は運転データを表す)。コイル及びスリーブの流量及び出口温度は良く一致する結果が得られた。その他 5 つのコイルについてもシミュレーション結果は運転データと一致する結果が得られた。

5.2 ポロイダルコイル系統全体

ポロイダルコイル系統全体のシミュレーションの境界条件としては、ヘリウム液化冷凍機からの供給/戻り圧力・供給温度、各バルブ開度、及び 80K シールド・電磁力支持構造物の温度に予冷運転データを使用した。この時の出口温度と流量と常温回収ヒータ出力についてシミュレーション結果を図 10 に示す。

常温戻り流量には乖離が見られるが、供給流量と低温戻り流量はほぼ一致する結果となっており、また常温戻り温度と常温回収ヒータの波形は運転データとほぼ一致していることから、常温戻り流量計の計測誤差と考えられる。

常温戻り温度の 330h あたりでシミュレーション結果と運転データが一致していないのは、このタイミングで常温戻りバルブが全閉され流量が 0g/s となり、運転データは熱侵入により緩やかに温度上昇がみられるのに対し、シミュレーションでは、この部分の熱侵入を考慮しておらず、流れが無い状態では VM は常温を示してしまうためである。

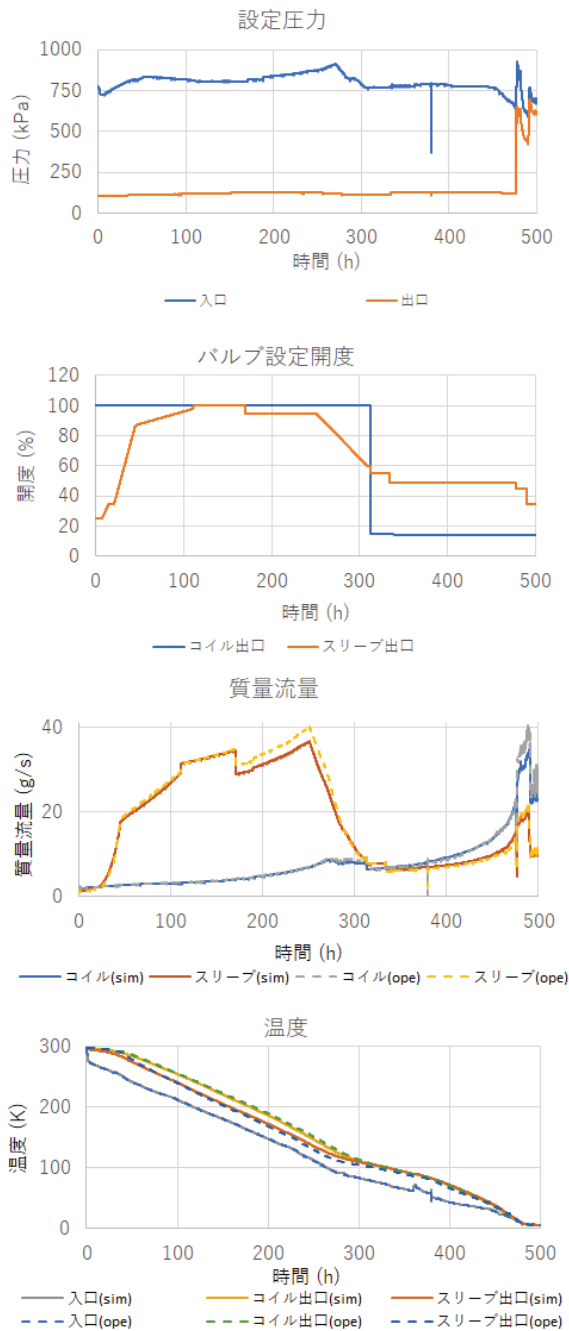


図 9 OV-U コイル予冷シミュレーション結果

6. まとめ

モデル化に必要な超伝導導体やスリーブのユニットモデルを作成し、超伝導ポロイダルコイル系統のシミュレーションモデルを構築した。構築したモデルのシミュレーション結果は予冷運転時のデータとほぼ一致する結果が得られた。今後、他の系統についても詳細なシミュレーションモデルを構築して、シミュレータとして活用できるようにする。

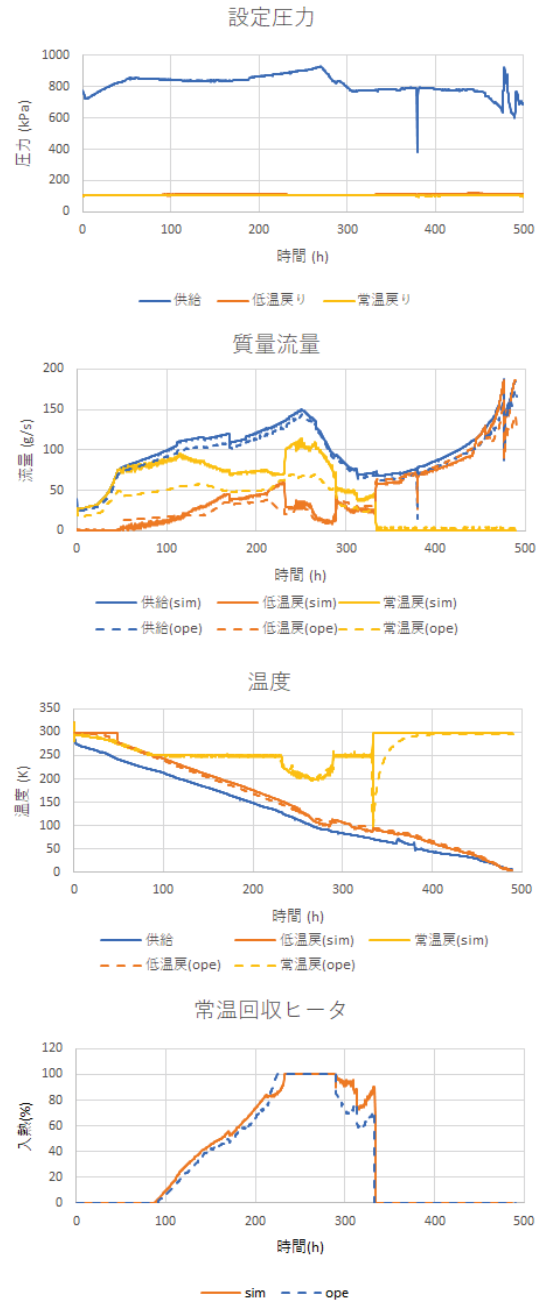


図 10 ポロイダルコイル系統
予冷シミュレーション結果

参考文献

- [1] R.Maekawa et al., "Advances in Cryogenic Engineering, 53 (2008), 483-492
- [2] K.Takahata et al., "Cooldown Performance of an Inner Vertical Field Coil for the Large Helical Device" IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL. 32, NO. 4, JULY 1996.
- [3] K.Takahata et al., "Fabrication of Poloidal Coils" Journal of plasma and fusion research 72(12), 1996-12-25
- [4] H.Katheder, Cryogenics 34, 595 (1994)
- [5] K.Takahata et al., "Long-Term Monitoring of Hydraulic Characteristics of LHD Poloidal Coils" Plasma and Fusion Research: Regular Articles Volume

LHD ヘリウム圧縮機用主電動機の長期運用実績とメンテナンス履歴

○野口 博基、 田上 裕之、森内 貞智、濱口 真司、LHD 運転グループ
核融合科学研究所

1. はじめに

大型ヘリカル実験装置 (LHD) は 1998 年 3 月からプラズマ実験を開始し、2022 年 3 月現在までの 24 年間で 179,273 ショットの実験を行った。

この実績の中で、LHD 低温システムはプラズマ実験に必要な磁場を提供するために、安定した長期連続運転を行い、高い稼働率を達成してきた。

今回は LHD 低温システムの心臓部とも言える、ヘリウム循環圧縮機ユニットの動力源である主電動機に着目し、これまでの運用実績やメンテナンス履歴をまとめたので報告する。

2. LHD 低温システムの概要

LHD は全てのプラズマ閉じ込め磁場コイルを超伝導化した世界で初めての大型実験装置である。

超伝導コイルは、図 1 のように直径 13.5m の断熱真空容器 (ベルジャー) 内に、それぞれ、1 対 2 本のヘリカルコイルと 3 対 6 本のポロイダルコイルが配置されている。

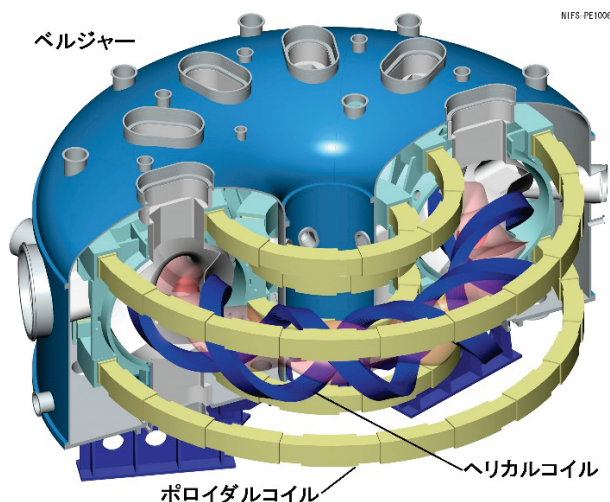


図 1 ベルジャーと超伝導コイル

ヘリカルコイルの主半径は 3.9m であり、最も外側にあるポロイダルコイル (OV コイル) の半径は 5.55m である。これら超伝導コイルが作る中心磁場は最大約 3T であり、その強力な磁場でプラズマを閉じ込めて実験を行う。

また超伝導コイルは励磁した際にそれぞれお互いの電磁力が影響しあう。コイルに働く電磁力が 1m

あたり 1000t を超える部分もあるため、超伝導コイルは電磁力支持構造物と呼ばれるステンレス製の構造物で強固に固定されている。

これら超伝導コイルと電磁力支持構造物と一緒に冷却され、配管なども含めるとおよそ 820t の極低温構造物となっている。この巨大な被冷却体は、LHD の持つ日本最大級のヘリウム液化冷凍機によって冷却される。LHD ヘリウム液化冷凍機のフローを図 2 に示す。

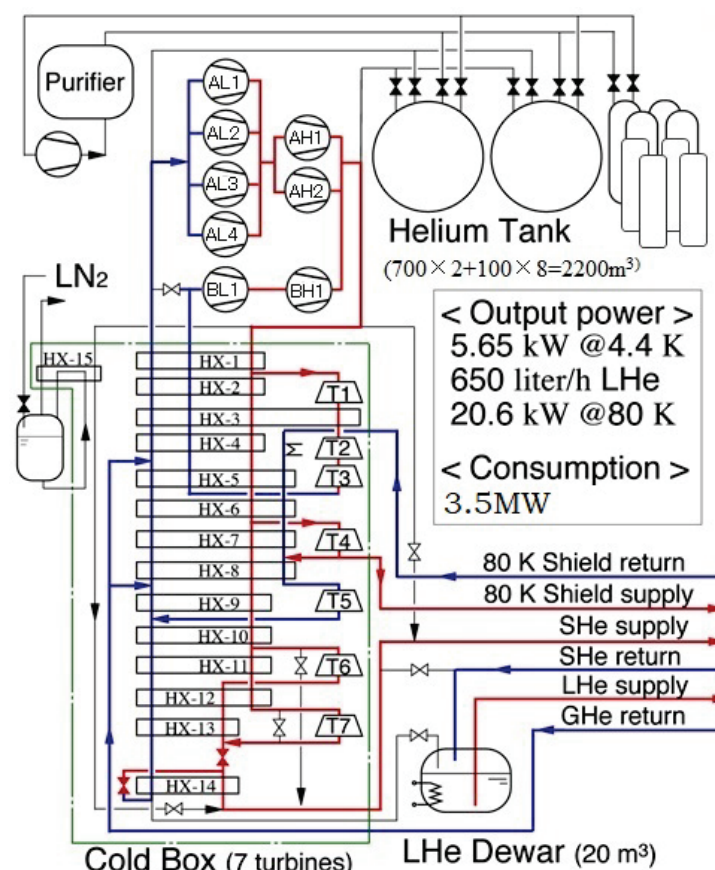


図 2 LHD ヘリウム液化冷凍機フロー図

8 台の単段圧縮機で構成されるヘリウム圧縮機ユニットにより 1.8MPa まで圧縮されたヘリウムガスはコールドボックスへ送られ、7 台の膨張タービンと 15 台の熱交換器によって、液体ヘリウム、超臨界圧ヘリウム、80K シールドガスヘリウムの各種冷媒を同時に製造可能なシステムとなっており、冷凍能力として 5.65kW@4.4K、20.6kW@80K と液化能力として 650L/h を同時に発生する。

冷媒として超伝導コイル等を冷却し、温度が上昇したヘリウムガスは屋外ヘリウムタンクに回収され、再びヘリウム圧縮機ユニットにより圧縮され、コールドボックスから冷媒として送り出されて循環する。

この循環の起点となる、心臓部とも言えるヘリウム圧縮機は、大流量でヘリウム液化冷凍機用として実績がある油噴射式スクリー圧縮機を採用している。そして、その動力源となる主電動機にはかご型三相誘導電動機を用いている。

3. LHD 低温システムの運転実績

LHD 低温システムの運転スケジュールは年度によって違う場合もあるが、概ね 8 月に精製運転を開始し、超伝導コイルの予冷運転を経て定常運転に入りプラズマ実験を行う。そして翌年 2 月にプラズマ実験を終了し、超伝導コイルの加温運転を行って実験サイクルを終える。図 3 に昨年度第 22 サイクルの運転実績を示す。

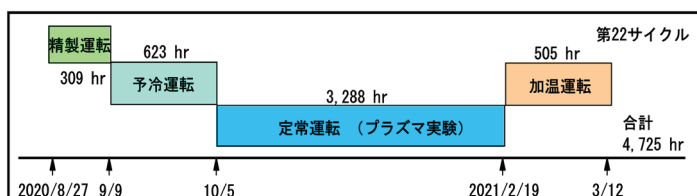


図 3 22 サイクル LHD 低温システム運転実績

精製運転開始から加温運転終了までのおよそ 7 ヶ月間、ヘリウム圧縮機は 24 時間連続運転となる。この長期連続運転は機器にとって過酷であり、特に回転機器には大きな負荷となるが、LHD 低温システムは 1997 年度にスタートした第 1 サイクルから現在 2021 年度の第 23 サイクルまでの運転で高い稼働率を誇っている。今回は圧縮機が停止に至った事象を故障としてカウントし、現在までの 23 サイクル分の稼働率をまとめたので表 1 に示す。

稼働率の定義は MTBF (平均故障間隔) と MTTR (平均修理時間) から稼働率 = $MTBF / (MTBF + MTTR)$ とした。また MTBF は積算運転時間を故障回数で除した値、MTTR は故障時間を故障回数で除した値とした。

これまでの合計で 99.3% と高稼働率になっており、特に 2013 年度以降は 99.9% から 100% と非常に高い稼働率となっている。これは 2012 年度から圧縮機に冗長機をラインナップし、8 台ある圧縮機ユニットのうち、どの号機にトラブルが発生した場合でも、停止してからおよそ 1 時間程度で冗長機に切替えて再起動可能となり、故障時間を短縮できるようになったことが理由の一端だと考えられる。

表 1 稼働率実績

サイクル/年度	運転時間 (hr)		故障回数 (定常)	故障時間 (hr)	稼働率 (%)
	積算運転	定常運転			
1 /1997-8	2,895	1,350	4 (2)	138	95.4
2 /1998	3,522	2,359	2 (0)	5.3	99.8
3 /1999	5,361	3,965	5 (3)	12.4	99.7
4 /2000	5,016	3,538	1 (0)	37.2	99.3
5 /2001	5,294	3,791	1 (1)	0.5	99.9
6 /2002	4,920	3,366	1 (0)	0.1	99.9
7 /2003	5,001	3,446	2 (1)	64.5	98.7
8 /2004	4,814	3,216	1 (0)	54.1	98.8
9 /2005	5,035	3,470	1 (1)	2.3	99.9
10 /2006	5,037	3,436	0	0	100
11 /2007	5,184	3,607	2 (1)	23.4	99.5
12 /2008	3,856	2,272	1 (0)	0.2	99.9
13 /2009	3,688	2,152	2 (2)	7	99.8
14 /2010	4,128	2,591	2 (1)	228.7	94.7
15 /2011	3,527	2,112	0	0	100
16 /2012	3,742	1,272	1 (0)	169	95.7
17 /2013	3,575	2,088	0	0	100
18 /2014	3,717	2,256	0	0	100
19 /2016-7	5,761	4,296	1 (0)	0.6	99.9
20 /2018	4,749	3,095	0	0	100
21 /2019	4,720	3,263	1 (0)	0.7	99.9
22 /2020	4,725	3,288	0	0	100
23 /2021	4,749	3,288	0	0	100
合計	103,015	67,587	28 (12)	744.0	99.3

圧縮機が停止に至る故障の発生源は圧縮機ユニット自身の他、制御計算機、超伝導コイル、冷却水、電源、など多岐に渡るが、今回着目する圧縮機ユニット主電動機の故障が原因で停止に至った事象は、これまでの 23 サイクルのうち 1 度しかない。

運転中の主電動機故障は表 1 の赤枠で囲った第 19 サイクルで発生した。第 19 サイクルは通常と違い、2016 年 12 月末から精製運転を開始して、2017 年 8 月 3 日までの予定で定常運転 (プラズマ実験) を行っていた。圧縮機連続運転中は週に一度圧縮機と主電動機の振動値 (振幅) を測定して、健全性を確認しているが、加温運転に入った日の翌日 8 月 5 日の測定で、A 系高段 1 号機 (AH1) の主電動機反カップリング軸方向で管理値を超える異常に高い振動値が測定され (管理値は 38μm)、同時に甲高い異音 (金属音) 発生も確認された。図 4 に振動値推移グラフを示す。その後毎日測定して様子を見たが、振動値の上昇は収まらず、垂直方向にも異常振動が見られ始めたので、8 月 8 日にバックアップの冗長機に切替えた。この時、圧縮機が停止していた時間は約 35 分間だった。冗長機に切替えてすぐに再起動し、停止からおよそ 1.5 時間後には圧縮機ユニットは定格に達し、加温運転を再開している。19 サイクルの稼働率は、このトラブルがあったにもかかわらず、停止時間が短いために 99.9% と高稼働率であった。

問題となった AH1 は圧縮機側の振動には異常が見られなかったため、主電動機の不具合と判断して、加温運転終了後の停止期間中メンテナンスで新品に交換した。

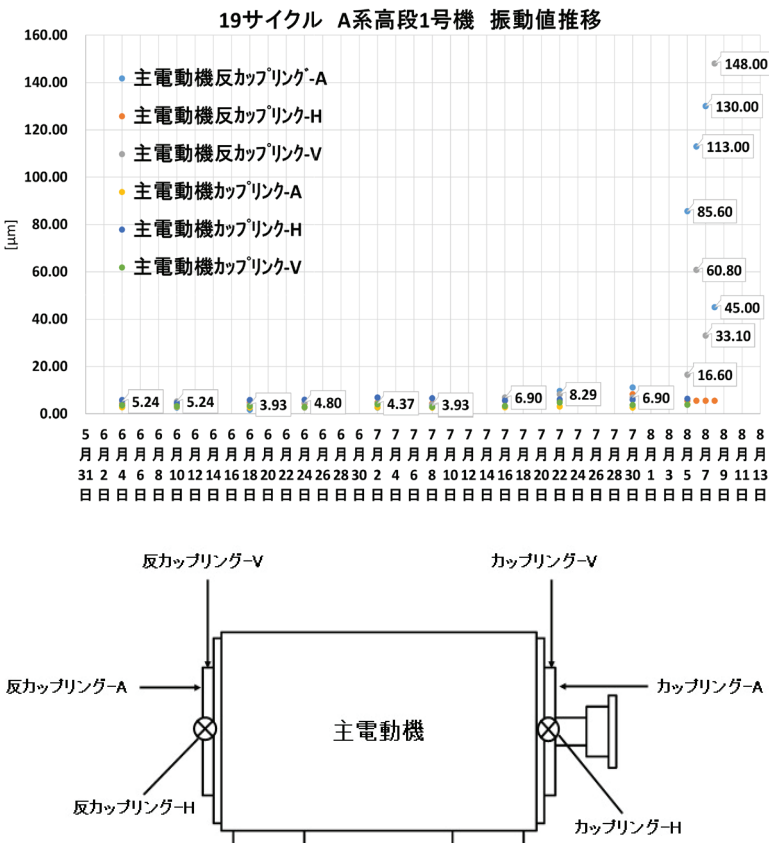


図 4 AH1 振動値推移グラフ

これまでの運転実績の中で、主電動機に関するトラブル発生事象はこの一件しかない。長期連続運転を行う回転機器としては、故障発生回数が少ないと思われるが、これは適切なメンテナンスを行っているからだと考えている。最後に次章でどのようなメンテナンスを行っているかを紹介したい。

4. ヘリウム圧縮機用主電動機のメンテナンス履歴

主電動機の仕様は 8 台ある圧縮機の大きさによって各種あり、表 2 の様になっている。

表 2 主電動機の仕様一覧

A系低段1号 (AL1)	400kW	6600V	39. 9A	2P	F種絶縁
A系低段2号 (AL2)	400kW	6600V	39. 9A	2P	F種絶縁
A系低段3号 (AL3)	400kW	6600V	39. 9A	2P	F種絶縁
A系低段4号 (AL4)	210kW	6600V	22. 1A	2P	F種絶縁
A系高段1号 (AH1)	740kW	6600V	72. 1A	2P	F種絶縁
A系高段2号 (AH2)	740kW	6600V	72. 1A	2P	F種絶縁
B系低段1号 (BL1)	270kW	6600V	27. 9A	2P	F種絶縁
B系高段1号 (BH1)	330kW	6600V	33. 1A	2P	F種絶縁

電源電圧は高圧 6600V、60Hz で、停電対策として所内常用発電機設備の系統から受電している。運転中の消費電力は 8 台の合計でおよそ 3500kW である。

実際に設置してある AL3 の写真を図 5 に示す。

次にメンテナンスだが、一般的に回転機器の保守において重要なのは、運転状態を把握することと、運転時間管理によるオーバーホールや消耗部品の交換だと考えられる。目視点検や異音確認の他、運転中に継続的に振動値（振幅）と表面温度や電流値を計測することによって運転状態を把握している。これによって前述した 19 サイクル運転中に発生した事象の様に、故障して停止してしまう前に初期の段階で不具合発生事象を発見でき、計画的な停止から冗長機へ切替えて再起動、といったスムーズな運転再開につながられ、連続運転に対する影響を最小限に留める事が可能となる。また、運転状態から部品の消耗や劣化の傾向が判断できれば、部品交換などの点検時期を決定するための判断材料にできる。

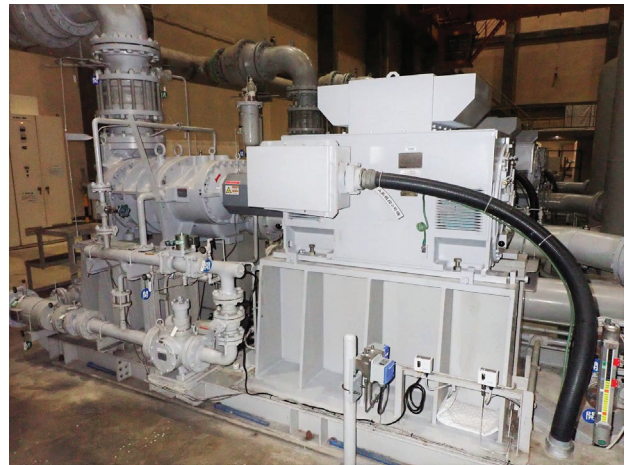


図 5 AL3 主電動機

運転時間管理によるオーバーホールや消耗品の交換に関しては、実施時期をいつにするかが悩ましい。メーカーの推奨メンテナンス周期では、ベアリング交換が 24,000h 毎、分解洗浄 / ワニス含浸処理による絶縁強化が 48,000h 毎となっている。しかしながら、限られた予算内でメンテナンスを行うため、他機器でのトラブル対応があった場合など、毎年全台数を推奨通りに実施することはできない。さらに前述の運転状態把握によって、消耗や劣化の度合いが進んでいる可能性があると考えた場合は、その号機に関しては優先的に点検する必要がある。このように総合的に判断して、これまで点検を実施する号機と時期を決定してきた。その実績を下記の図 6 に示す。

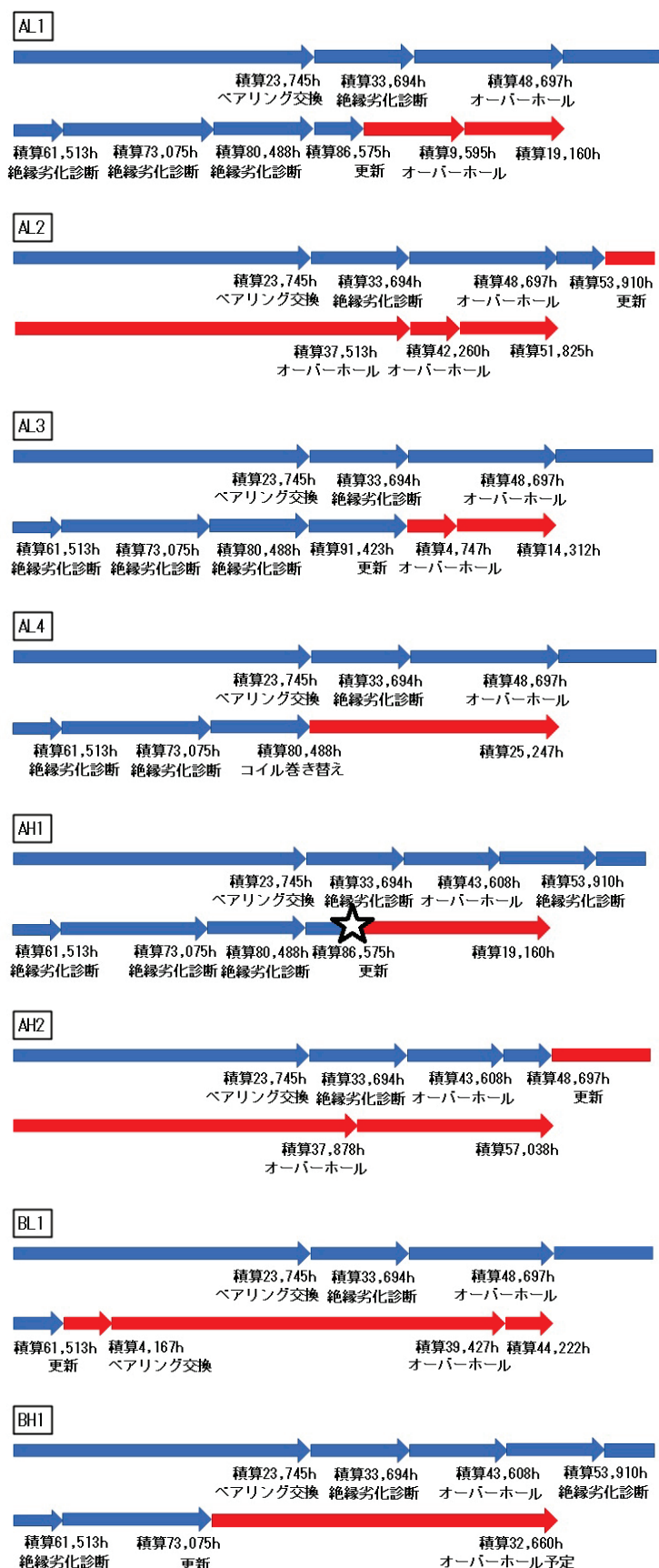


図 6 主電動機のメンテナンス履歴

新品更新後は赤矢印で表している。コイル巻き替えはほぼ新品と同じ状態になるとのことで、新品更

新と同じく赤矢印で表している。オーバーホールはベアリング交換とワニス含侵処理を両方行っている。

まとめてみて分かったことは、運転時間が 48,000h を超えたものは順次新品へ更新しており、現在は全号機が 2 台目に替わっている。（コイル巻き替えを含む）

ベアリングの交換は 40,000h を超えない様に実施しているが、AL3 と AH1 は同じベアリングで 40,000h を超えて運転していた期間がある。AH1 は同じベアリングで 42,967h 運転していた期間があり、全台の履歴のうち一番長い。またこの時は最終的に振動値が異常上昇し、前述の 19 サイクルの圧縮機停止事象の発生につながっている。（図 6 の AH1 星印で発生した）AL2、AH2 は 2 台目に入ってから積算運転時間が 48,000h 時間を超えているので、そろそろ 3 台目に更新する時期に来ていると考えられる。BH1 は今サイクル終了後にオーバーホールの予定だが、2 台目更新後の積算運転時間が 32,660h なので、年間の運転時間をおよそ 5000h とすると、もう一年先延ばしが可能そうだ。

続いて絶縁劣化診断だが、こちらはメーカー推奨で 2～3 年毎に行った方がよいとされている。試験項目を表 3 に示す。

表 3 絶縁劣化診断試験項目

絶縁抵抗試験	メガーチェック 対地絶縁
直流試験	絶縁体の汚染や吸湿度合いを判定 内部の局部的欠陥の発見
交流電流試験	内部ボイドの発見
誘電正接試験	絶縁体の劣化、吸湿度合い 内部ボイドの発見
部分放電試験	絶縁体内部のボイドや欠陥による部分放電の 発見

絶縁劣化診断は地絡や漏電につながる対地絶縁抵抗低下の他にも、コイル巻き線の線間短絡（レアショート）を引き起こす絶縁体内部のボイド（気泡）や欠陥を発見することができるため、ワニス含侵処理やコイル巻き替え、新品への更新などの時期を決定する判断材料となる。ベアリング交換が優先されるが、予算に余裕がある場合は実施が推奨される。

5. まとめ

LHD 低温システムは 1997 年度の第 1 サイクルから、現在の第 23 サイクルまでの運転で、高い稼働率を維持し続けている。またヘリウム圧縮機用主電動機のメンテナンスはこれまで適正に行われており、安定した長期連続運転を可能にしている。

音響ビリアル係数から密度ビリアル係数を求める公式^[1]

○多田 康平^{A) B)}

^{A)}京都大学 大学院工学研究科、^{B)}京都大学 環境安全保健機構 低温物質管理部門

1. 序論

液化ガスの製造など高圧ガスを取り扱う場合には、用いる気体に対して、(理想気体としてではなく、) 実在気体としての性質がしばしば利用される。例えば、ヘリウム液化の最終段階で利用されるジュール・トムソン効果は、定義により理想気体では現れず、実在気体でこそ現れる効果である^[2]。このような背景から、用いる気体の実在気体としてのふるまいをよく理解しておくことは重要であると考えられる。

希薄な実在気体の記述には、物理量のビリアル展開がしばしば用いられる。主なものに、圧縮因子 Z を気体のモル密度 ρ のべきで展開したもの：

$$Z = \frac{P}{\rho RT} = 1 + B\rho + C\rho^2 + \dots \quad (1)$$

音速 u の二乗を圧力 P のべきで展開したもの：

$$u^2 = \frac{\gamma_0 RT}{M} \left(1 + \frac{\beta_a}{RT} P + \frac{\gamma_a}{RT} P^2 + \dots \right) \quad (2)$$

がある。ここに、 R は気体定数、 T は熱力学温度、 M はモル質量、 γ_0 は理想気体における定圧熱容量と定積熱容量の比(比熱比)を表す。 $B, C, \dots$ は密度ビリアル係数、 $\beta_a, \gamma_a, \dots$ は音響ビリアル係数と呼ばれ、これらはいずれも温度の関数である。比熱比 γ_0 は、単原子分子では温度によらず一定の値 $5/3$ をとるが、それ以外の分子では、主に分子内振動や他の分子内自由度のために、温度の関数である。分子回転のみが励起され、他の自由度を無視してよいとすると、 γ_0 は、二原子分子および直線多原子分子では $7/5$ 、非直線多原子分子では $4/3$ の定数値をとる。

密度と音響のビリアル係数を結ぶ関係式は広く知られており^[3,4]、第二ビリアル係数については、以下の式で与えられる。

$$\beta_a = 2B + 2(\gamma_0 - 1)T \frac{dB}{dT} + \frac{(\gamma_0 - 1)^2}{\gamma_0} T^2 \frac{d^2B}{dT^2} \quad (3)$$

B の温度依存性が分かれば β_a の温度依存性は計算できる一方で、 β_a の温度依存性が分かっているにもかかわらず式だけでは B の温度依存性は自明でない。単原子分子については式(3)の微分方程式が解かれ、 β_a の温度依存性から B の温度依存性を計算する数式が示され

ているが^[5-7]、その数式は、一見使いやすいものとはいえない。加えて、その他の分子については、そのような方法論自体、報告されていない。

そこで本研究では、 γ_0 が温度によらず定数であると仮定した条件の下で、式(3)を数学的に解き、 β_a について適当な関数形を仮定し、さらに物理学的に適当な初期条件を課すことで、単原子分子のみならずその他の分子にも適用できる、 β_a の温度依存性から B の温度依存性を計算する公式を導く。最近の筆者の論文^[1]では非直線多原子分子の例としてメタン(CH_4)についても議論しているが、本稿では、極低温寒剤として広く利用されている単原子分子のヘリウム 4 (^4He) と二原子分子の窒素 (N_2) に限定して、得られた公式により β_a の温度依存性から B の温度依存性をよく計算できることを確認する。

2. 公式の導出

γ_0 が定数であるとすれば、式(3)はオイラー型の微分方程式である。変数 T を $t = \ln T$ で置換すると、

$$\frac{d^2B}{dt^2} + \frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0 - 1} \frac{dB}{dt} + \frac{2\gamma_0}{(\gamma_0 - 1)^2} B = \frac{\gamma_0}{(\gamma_0 - 1)^2} \beta_a \quad (4)$$

が得られ、この微分方程式の一般解として

$$B = e^{pt} [C_1 \sin(qt) + C_2 \cos(qt)] + \frac{\gamma_0 e^{pt} \sin(qt)}{q(\gamma_0 - 1)^2} \int \frac{\beta_a \cos(qt)}{e^{pt}} dt - \frac{\gamma_0 e^{pt} \cos(qt)}{q(\gamma_0 - 1)^2} \int \frac{\beta_a \sin(qt)}{e^{pt}} dt \quad (5)$$

が得られる。式(4)は2階の微分方程式なので、積分定数が2個(C_1 および C_2)存在する。これらはあとで初期条件を課して決定する。 p と q はそれぞれ

$$p = -\frac{\gamma_0 + 1}{2(\gamma_0 - 1)}, \quad q = \frac{\sqrt{-\gamma_0^2 + 6\gamma_0 - 1}}{2(\gamma_0 - 1)} \quad (6)$$

で与えられ、 γ_0 が定数のとき p と q も定数である。

式(4)の一般解である式(5)は、 β_a の具体的な関数形が与えられておらず、そのままでは利用することが難しい。そこで β_a に適当な関数形を仮定することにする。ビリアル係数の温度依存性は、例えば論文^[8,9]のように、しばしば熱力学温度のべき級数で表され

る。これを踏まえ、 β_a の温度依存性が

$$\beta_a = \sum_j \beta_j T^j = \sum_j \beta_j e^{jt} \quad (7)$$

で表される場合を考える。 β_j は、温度に依存しない、 T^j の係数とする。この場合、式(5)は簡単になり、

$$B = e^{pt} [C_1 \sin(qt) + C_2 \cos(qt)] + \sum_j \frac{\gamma_0 \beta_j e^{jt}}{(\gamma_0 - 1)^2 j^2 + (\gamma_0^2 - 1)j + 2\gamma_0} \quad (8)$$

を得る。変数を T に戻せば、 β_a の温度依存性から B の温度依存性を計算する公式として次式を得る。

$$B = T^p [C_1 \sin(q \ln T) + C_2 \cos(q \ln T)] + \sum_j \frac{\gamma_0 \beta_j T^j}{(\gamma_0 - 1)^2 j^2 + (\gamma_0^2 - 1)j + 2\gamma_0} \quad (9)$$

式(9)の第1項および第2項は減衰振動のようにふるまい、その振幅は C_1 と C_2 で特徴づけられる。これらの項を以下では「減衰振動項」と呼ぶことにする。これらは低温領域では B の温度依存性に影響するが、温度上昇につれて急激に減衰する。 $\gamma_0 = 5/3$ の場合 $p = -2$ 、 $\gamma_0 = 7/5$ の場合 $p = -3$ 、 $\gamma_0 = 4/3$ の場合 $p = -7/2$ だからである。高温では、 B の温度依存性は式(9)の最後の項のみで与えられる。この最後の項を、以下「シグマ項」と呼ぶことにする。

C_1 と C_2 を与える初期条件を検討するため、典型的な B の関数形を思い起こすことにする。低温では主に分子間引力のために B は負の値をとる。温度上昇につれて、分子の運動エネルギーが増加し分子間力と競合し始める。また、実際の分子は排除体積をもち、高い温度ではその効果が大きくなる。そのため B は温度上昇とともに増加し、ボイル温度 T_B でゼロになり、さらに正の値をとるようになる。実際の分子は完全な剛体ではなく、さらなる高温では実効的な排除体積は減少し始める。温度が無限大に近づくにつれ、排除体積はゼロに漸近し、それゆえ実在気体のふるまいは理想気体のそれに近づいていくと考えられる。したがって、 B はある温度で極大をとった後、緩やかにゼロに漸近すると考えられる。

このような B の温度依存性を考慮すると、「 $T = T_B$ で $B = 0$ 」および「極大をとる温度 $T_{\max}$ で $dB/dT = 0$ 」が適当な2つの初期条件と思われるかもしれない。しかしながら、後者の条件は、数学的には適当でも物理学的には適当でない。なぜならば、ほとんどの分子において $T_{\max}$ が高温すぎるために、その温度に到達する前に分子が熱解離してしまうか、仮に分子が安定だとしても、実験的にその温度を達成するこ

とが極めて難しいからである。

いくつかの検討の結果、物理学的にも適当な初期条件として、「 $T = T_B$ で $B = 0$ 」および「 T_B とは別の温度 $T = T_B/m$ で $B = B_m$ 」を選ぶことにした。 m は1とは明確に異なる任意の正の数とする。これらの初期条件から、 C_1 と C_2 は以下のように与えられる。

$$C_1 = -\left\{ \left[B_m \left(\frac{m}{T_B} \right)^p - \Omega \left(\frac{T_B}{m} \right) \right] \cos(q \ln T_B) + \Omega(T_B) \cos \left(q \ln \frac{T_B}{m} \right) \right\} / \sin(q \ln m),$$

$$C_2 = \left\{ \left[B_m \left(\frac{m}{T_B} \right)^p - \Omega \left(\frac{T_B}{m} \right) \right] \sin(q \ln T_B) + \Omega(T_B) \sin \left(q \ln \frac{T_B}{m} \right) \right\} / \sin(q \ln m) \quad (10)$$

ここに、

$$\Omega(T_B) = \sum_j \frac{\gamma_0 \beta_j T_B^{j-p}}{(\gamma_0 - 1)^2 j^2 + (\gamma_0^2 - 1)j + 2\gamma_0},$$

$$\Omega \left(\frac{T_B}{m} \right) = \sum_j \frac{\gamma_0 \beta_j \left(\frac{T_B}{m} \right)^{j-p}}{(\gamma_0 - 1)^2 j^2 + (\gamma_0^2 - 1)j + 2\gamma_0} \quad (11)$$

である。

3. ヘリウム4 (^4He)

ヘリウム原子は2個しか電子をもたないため、近年、高精度な第一原理計算が可能となってきた。ビリアル係数においても理論計算の方が実験よりも高精度である。本稿では、最近発表された理論計算の論文^[10]のビリアル係数のデータを利用した。文献^[10]に報告されている0.5 K から1000 K までの118個の β_a のデータを、熱力学温度のべき級数で、標準偏差0.29 cm³ mol⁻¹ で、次のようにフィッティングした。

$$\frac{\beta_a}{\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}} = -4.1420198 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^3 + 8.2295908 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^2 - 5.9056759 \times 10^{-2} \left(\frac{T}{\text{K}} \right) + 34.541662 - 465.67255 \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^{-1} - 91.990366 \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^{-2} - 4.7918563 \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^{-3} - 10.250695 \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^{-4} + 2.3086230 \left(\frac{T}{\text{K}} \right)^{-5} \quad (12)$$

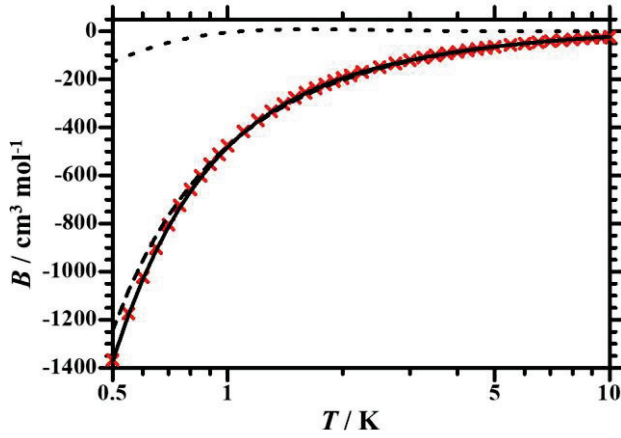


図 1 0.5 – 10 K での ${}^4\text{He}$ の B の温度依存性。シンボルは文献値^[10]を表す。点線、破線、実線は、式(13)における「減衰振動項」、「シグマ項」、それらの和、をそれぞれ表す。

${}^4\text{He}$ の場合には、 γ_0 は $5/3$ の定数である。 B の文献値^[10]から、ボイル温度は $T_B = 23.3 \text{ K}$ と見積もることができ、また、 $m=2$ を選ぶと、 $T = T_B/2 = 11.65 \text{ K}$ において $B_{m=2} = -17.2 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ と見積もることができた。これらのパラメータを用いて、前章で求めた公式により、 B の温度依存性は、

$$\begin{aligned} \frac{B}{\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}} = & \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-2} \left[31.63767 \sin\left(\sqrt{\frac{7}{2}} \ln\left(\frac{T}{\text{K}}\right)\right) \right. \\ & \left. - 4.345371 \cos\left(\sqrt{\frac{7}{2}} \ln\left(\frac{T}{\text{K}}\right)\right) \right] \\ & + \frac{5}{38} \times \left[-4.1420198 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^3 \right] \\ & + \frac{5}{26} \times 8.2295908 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^2 \\ & + \frac{3}{10} \times \left[-5.9056759 \times 10^{-2} \left(\frac{T}{\text{K}}\right) \right] \\ & + \frac{1}{2} \times 34.541662 \\ & + \frac{5}{6} \times \left[-465.67255 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-1} \right] \\ & + \frac{15}{14} \times \left[-91.990366 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-2} \right] \\ & + \frac{5}{6} \times \left[-4.7918563 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-3} \right] \\ & + \frac{1}{2} \times \left[-10.250695 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-4} \right] \\ & + \frac{3}{10} \times 2.3086230 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-5} \end{aligned} \quad (13)$$

と計算できた。 B の計算値^[10]と式(13)との比較を図 1

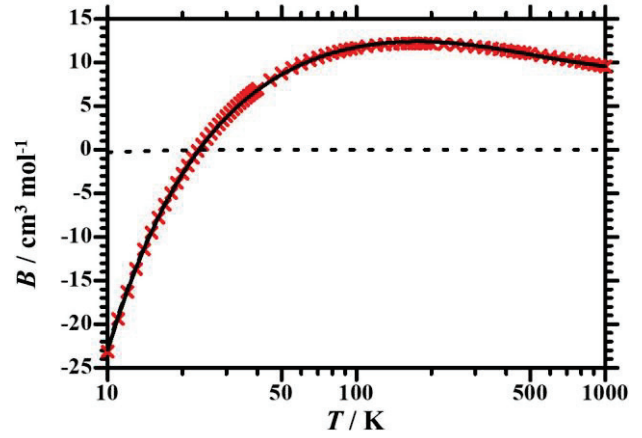


図 2 10 – 1000 K での ${}^4\text{He}$ の B の温度依存性。シンボルは文献値^[10]を表す。点線、破線、実線は、式(13)における「減衰振動項」、「シグマ項」、それらの和、をそれぞれ表す。破線と実線は、ほぼ重なっている。

($T = 0.5 - 10 \text{ K}$ の範囲) および図 2 ($T = 10 - 1000 \text{ K}$ の範囲) に示す。全体的に見て、式(13)は文献値^[10]をよく再現している。「減衰振動項」を考慮しなければ、本公式による温度依存性すなわち「シグマ項」は、 1 K 以下の領域では、温度が下がるにつれて次第に文献値^[10]から離れていき、 0.5 K で両者の差は $122 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ まで広がる。「減衰振動項」と「シグマ項」との和が、数学的にも物理学的にも適当な、式(3)の微分方程式の解であるため、「減衰振動項」はこの差を補償し、この温度での両者の差を $5 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ まで抑えている。「減衰振動項」の寄与は、 10 K 以上では、絶対値で $0.3 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ より小さくなる。図 2 の全温度領域では、「シグマ項」のみで $0.13 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ の標準偏差で、 B の温度依存性が再現されている。

4. 窒素 (N_2)

N_2 については、 80 K から 400 K の範囲で、 β_a の実験値が 16 点報告されている^[11, 12]。これらの β_a の値を、熱力学温度のべき級数で、 $0.19 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ の標準偏差で、次のようにフィッティングした。

$$\begin{aligned} \frac{\beta_a}{\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}} = & 85.00 - 1.6265 \times 10^4 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-1} \\ & - 8.078 \times 10^5 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-2} \\ & - 1.707091 \times 10^7 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-3} \end{aligned} \quad (14)$$

アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) の開発した REFPROP ソフトウェア^[13, 14]を用いると、 N_2 の γ_0 は、 400 K 以下では 1.400 ± 0.003 の範囲にあると求めら

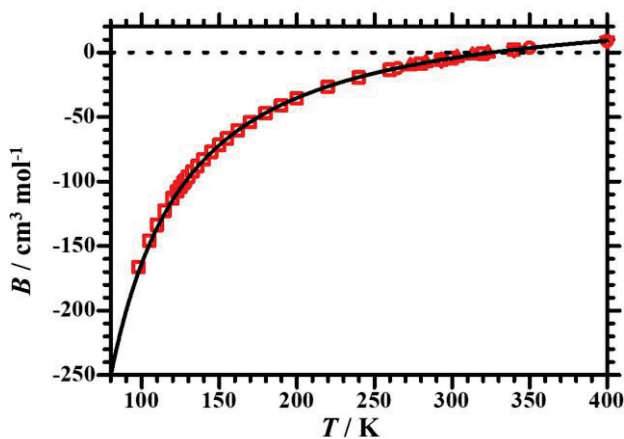


図 3 80–400 K での N_2 の B の温度依存性。シンボルは実験値^[15–18]を表す。点線、破線、実線は、式(15)における「減衰振動項」、「シグマ項」、それらの和、をそれぞれ表す。破線と実線は、ほぼ重なっている。

れた。したがって論文^[11, 12]の温度範囲では近似的に γ_0 は温度によらず $7/5$ で一定とみなせる。 B の実験値^[15–18]から、ボイル温度は $T_B = 327$ K と見積もられ、また、 $m = 2$ を選ぶと、 $T = T_B/2 = 163.5$ K において $B_{m=2} = -59$ cm³ mol⁻¹ と見積もられた。これらのパラメータにより、 B の温度依存性は、

$$\begin{aligned} \frac{B}{\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}} = & \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-3} \left[1.724942 \times 10^4 \sin\left(\sqrt{\frac{17}{2}} \ln\left(\frac{T}{\text{K}}\right)\right) \right. \\ & + 2.000459 \times 10^4 \cos\left(\sqrt{\frac{17}{2}} \ln\left(\frac{T}{\text{K}}\right)\right) \\ & + \frac{1}{2} \times 85.00 \\ & + \frac{7}{10} \times \left[-1.6265 \times 10^4 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-1} \right] \\ & + \frac{35}{38} \times \left[-8.078 \times 10^5 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-2} \right] \\ & \left. + \frac{35}{34} \times \left[-1.707091 \times 10^7 \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-3} \right] \right] \end{aligned} \quad (15)$$

と計算できた。文献値^[15–18]と式(15)との比較を図3に示す。図3のスケールでは両者はよく一致している。式(15)は、文献値^[15–18]を 0.82 cm³ mol⁻¹ の標準偏差で再現した。この標準偏差は、式(15)のフィッティングの標準偏差および文献^[11, 12, 15–18]の不確かさの和と同程度である。したがって、式(9)が単原子分子のみならず二原子分子にも有効であることを示した。この N_2 の場合では、「減衰振動項」の寄与は 80 K 以上で 0.05 cm³ mol⁻¹ 以下であり、図3の全温度領域で、「シグマ項」のみで B の温度依存性が再現されている。

5. 結論

γ_0 が温度によらない仮定の下で、 β_a と B を結ぶ微分方程式を解くことで、 β_a の温度依存性から B の温度依存性を計算する公式を導いた。極低温寒剤として広く利用されている単原子分子の ^4He と二原子分子の N_2 について、本公式により B の温度依存性をよく計算できることを確認した。このことから、本公式は、 γ_0 が近似的に温度によらない場合に、単原子分子のみならずその他の分子においても有効であることを示した。本公式で低温領域を計算する場合には「減衰振動項」の寄与を無視できないため、初期条件として2温度点での B の値が必要である。一方、「減衰振動項」を無視できる程度の高温度領域では、そのような初期条件は必要なくなり、 β_a の温度依存性のみから B の温度依存性を容易に計算できる。

参考文献

- [1] K. Tada, Int. J. Thermophys. 43, 64 (2022).
- [2] K. Tada, Int. J. Refrig. 127, 157 (2021).
- [3] K. A. Gillis and M. R. Moldover, Int. J. Thermophys. 17, 1305 (1996).
- [4] 宝積勉、佐藤春樹、渡部康一 熱物性 11, 10 (1997).
- [5] L. W. Bruch, Phys. Rev. 178, 303 (1969).
- [6] L. W. Bruch, Phys. Rev. A 2, 2167 (1970).
- [7] M. E. Boyd and R. D. Mountain, Phys. Rev. A 2, 2164 (1970).
- [8] F. C. Matocotta, G. T. McConville, P. P. M. Steur and M. Durieux, Metrologia 24, 61 (1987).
- [9] G. T. McConville and J. J. Hurly, Metrologia 28, 375 (1991).
- [10] P. Czachorowski, M. Przybytek, M. Lesiuk, M. Puchalski and B. Jeziorski, Phys. Rev. A 102, 042810 (2020).
- [11] M. B. Ewing and J. P. M. Trusler, Physica A 184, 415 (1992).
- [12] J. F. Estela-Urbe and J. P. M. Trusler, Int. J. Thermophys. 21, 1033 (2000).
- [13] E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber and M. O. McLinden, NIST Standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard reference data program, Gaithersburg, 2018.
- [14] R. Span, E. W. Lemmon, R. T. Jacobsen, W. Wagner and A. Yokozeki, J. Phys. Chem. Ref. Data 29, 1361 (2000).
- [15] W. Duschek, R. Kleinrahm, W. Wagner and M. Jaeschke, J. Chem. Thermodyn. 20, 1069 (1988).
- [16] P. Nowak, R. Kleinrahm and W. Wagner, J. Chem. Thermodyn. 29, 1137 (1997).
- [17] M. O. McLinden and C. L sch-Will, J. Chem. Thermodyn. 39, 507 (2007).
- [18] I. D. Mantilla, D. E. Cristancho, S. Ejaz, K. R. Hall, M. Atilhan and G. A. Iglesias-Silva, J. Chem. Eng. Data 55, 4227 (2010).

ヘリウム液化装置保守 圧縮機オイル補充と長尺ボンベ開放検査

吉本 佐紀
千葉大学 理学部

1. はじめに

千葉大学理学部極低温室では学内に液体ヘリウムおよび液体窒素を供給している。液体ヘリウムに関しては、回収・再液化によるリサイクル利用をしており、液化装置をはじめとした関連機器の保守は、設備を維持していく上で非常に大切な業務となっている。今回はこれらの機器の大型保守を2つ行ったので、その様子について報告する。

2-1. 圧縮機オイル補充の背景

当施設で稼働している液化用圧縮機：ケーザー CSD122 はスクリー回転軸のメカニカルシールからオイル漏れを起こしている。メカニカルシールは漏れを完全に止めるものではないため、微量の漏れは許容されているが漏れ量には個体差があるようだ。当施設のものは導入当初漏れが酷く、メカニカルシールを交換した経緯がある。交換後、漏洩量は減ったものの許容範囲内で漏れは続いている。排油時に漏洩量を記録しているので図1に示す。

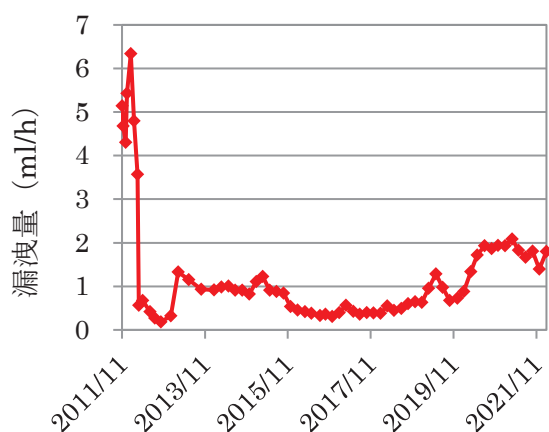


図1 圧縮機のオイル漏れ量

2018年に行った整備ではオイル交換を実施している。この時は、導入当初からずっとオイル漏れが続いているのにもかかわらず、オイルセパレータータンクに設置されている油面計の指し示す油面レベルが多め位置のまま変化せずにいたことから、油面計の故障が疑われ、油面レベルが不明なため整備に踏み切った背景があった。結論から言うと油面計は壊れておらず、導入当初に封入されたオイル量が多過

ぎだったことが判明している。このオイル交換の際にオイル量は適正量の上限に調整した。その後、正常範囲内ながらオイル漏れが続いている事によって徐々に油面レベルが低下してきたため、今回のオイル補充に至った。

2-2. オイル補充

補充作業の決行は万が一のトラブルに備えて、利用量が落ち着いた時期かつ液化運転後の回収ガス量が減っていて次の液化運転まで日程に余裕のあるタイミングで行った（液化運転は概ね週1回）。

手順としては、縁切り・圧抜き・開放/補充（図2）・気密検査・ガス置換・ライン復帰・試運転である。後述の長尺ボンベ整備とも共通するが、特定のガス雰囲気下で利用する機器類を大気開放の伴う整備を行う場合、手順に手間が掛る。



図2 オイル補充口の開放

2-3. 油面レベルの調整

油面レベルは稼働中におけるレベルを確認する必要があり、補充時には確定できない。また、一度運転ラインに復帰させると内部に圧力がかかるため、抜く事は出来ても追加補充する事は出来ない。以上より、補充時に多めに入れておき、試運転時に油面レベルを確認しながら抜き出す事となる。

ところが、今回は保有していたオイル残量が3Lしかなかった。しかし、前回オイル交換してからの漏洩量がちょうど3Lであったため、保有している3Lを全て補充すればピッタリではないかと予想した。補充後の試運転で確認すると想定通り、前回オイル

適正量の上限に調整したのと同じレベルに回復していた。このため今回はオイル抜き作業はしていない。

ちなみに、オイルを抜くバルブはオイルセパレータータンクの底にあり、低い位置な上に狭くて暗く見えづらく非常に作業がしづらい(図3)。さらに付帯している継手は脱着の手応えに乏しく、前回整備時ははめるのに一苦労した。このため、実はオイル抜き取り作業には消極的であった。補充作業で多少多めに入ってしまったとしても継続的に漏れているので、いずれ油面レベルが下がっていく事や、導入当初からの油面レベルが高過ぎても支障なく約10年間運転してきた事を踏まえると尚更であった。

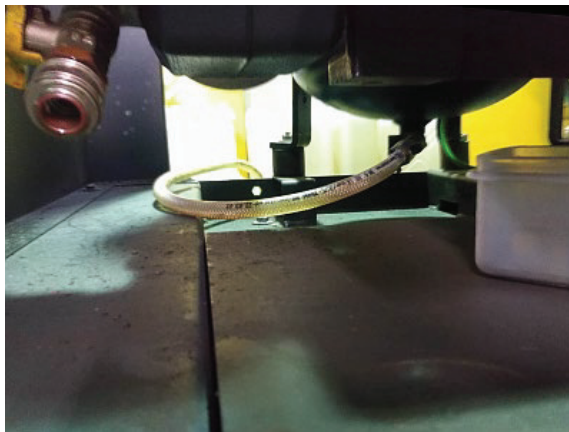


図3 オイル抜出口は狭く作業しづらい

オイル補充前後の油面レベルを図4に示す。作業順に①～④と並んでいる。ゲージは赤色がオイル不足、緑色が適量、黄色が多過ぎである。補充前の圧縮機稼働中の油面レベルは適正量(緑色)のちょうど真ん中であつた。まだ余裕はあつたが今回は早めの補充を行った。

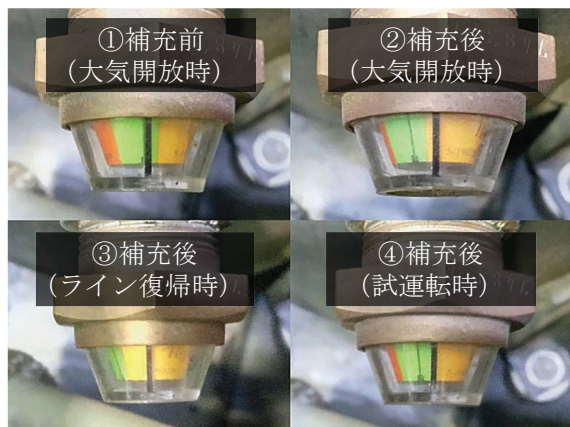


図4 オイル補充前後の油面計の表示

なお、③④の写真からも分かるように、油面レベルは停止時よりも稼働時の方が低いレベルで表示される。メーカーに確認したところ、圧縮機を起動すると各部へオイルが流れて油面が落ち、停止すると

オイルがタンクへ戻ってくるとの事だった。油面ゲージの色配置が逆の機種もあったので、稼働・停止時にどのように表示が動くのか確認した方が良い。

2-4. 注意すべき作業

作業を終えた上で気が付いた失敗はライン復帰時の圧力導入である。液化用圧縮機は流量が大きいので配管サイズも65Aと太い。故に配管中に設置されているバルブも巨大である。前回2018年の整備時もバルブをゆっくり慎重に開けたが、急激な圧力の導入になってしまい圧縮機の筐体が揺れ動いて非常に怖い思いをした。バルブを微開にしたつもりでも断面積が大きいので、流入量が多くなってしまったようだ。今回も恐る恐る行ったがこれほど神経を使うくらいならガスボンベで均圧しておけば良かったと後になってから気が付いた(図5)。圧力差は約0.13MPaだったがそれでも配管容量によってはそれなりの衝撃を伴うという事がわかった。今後似た様な場面もあると思うので注意する。



図5 この角度でガスが流れ始めたので待機した

3-1. 長尺ボンベの開放検査の背景

高压ガスを製造する当施設は、第一種製造事業所として一年に一回千葉市消防局の保安検査を受けている。この検査は高压ガス保安法に基づいて事故防止を目的として、事業所が安全に運営されているのかを検査している。

検査項目の内、ヘリウムガスを貯蔵している長尺ボンベについて、これまで肉厚測定をすることで減肉が起きていない事を報告してきたが、2015年より開放して内部の目視検査もするよう求められた(図6)。開放対象となった長尺ボンベは複数本で長尺カードルを構成しており、ボンベそれぞれは使用環境が同一である。そこで検査では全てのボンベを開放するのではなく代表1本を開放検査する事となった。また、検査頻度は3年に1度と決められた。

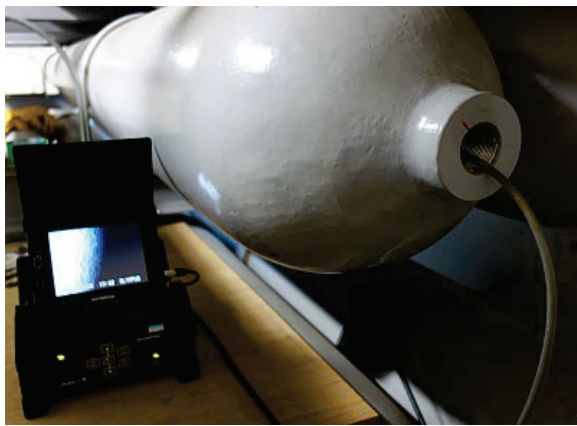


図 6 内視鏡で内部を目視検査する（2015）

3-2. 長尺カードルの構成と検査対象

長尺カードルは合計 12 本の長尺ボンベから構成されており、3 系統に分かれている。2010 年に設備更新があり大幅に入れ替えたが、その前から利用している長尺ボンベの継続利用や新たに増設も行っており、やや複雑な構成となっている。長尺ボンベの開放順については指定されておらず、任意の 1 本を選べるので、今のところ系統毎に行っている。

表 1 系統構成と検査時期

系統	設置年	構成本数	検査年
No.1	2010,2015	6	2015
No.2	1996	2	2018
No.3	2010	4	2021

3-3. 開放検査の下準備

前項で報告した圧縮機のオイル補充の時と同様に、ヘリウムガスで満たされた機器を大気開放するためには、中に入っているガスを抜き取らなくてはならない。ただし、長尺ボンベの場合はガスを貯蔵するための機器なので、内在しているヘリウムガスの容量が圧縮機よりもはるかに多い。このため、ガスの抜き取りには時間がかかる。

また、抜き取ったヘリウムガスを別の長尺ボンベへ詰め替える場合、ガス量によっては貯蔵容量を超えてしまう。これらを踏まえると、なるべくヘリウムガスが少ない内に行うのが好都合である。つまり、液化運転後のガスが最も減った状況（液化し尽くした状況）で下準備に取り掛かるのがタイミングとして良い。さらに詰め替え作業も液化運転中に行ってしまうと、ガス量をより減らすことができ、次の液化運転までの時間が少しでも多く稼げる。トラブル等の不測の事態に備えて時間的余裕がある事は精神衛生上にも良く、事故を防ぐことにもつながる。

検査対象ボンベからヘリウムガスを大気圧まで抜いた後は、窒素ガスで置換した。大気圧まで減圧されていればヘリウムガスが入った状態で開放して検査することも出来るが、やはりヘリウムガスの損失は少しでも抑えたい。また、開放中は空気の侵入が考えられる。ボンベの中がヘリウムガスだと空気との比重の違いで、窒素ガスに置換した時に比べて空気が多く侵入してしまう（ヘリウムガスが多く抜けてしまう）と考えられる。作業を簡素化したい場合は窒素ガス置換の手間とヘリウムガスの損失を天秤にかけることになる。ちなみに空気の侵入防止に拘るのなら、窒素ガスのチューブをボンベ開放と同時に挿入して、窒素ガスを流しながら検査をすればよい。今回はそこまでは徹底していない。

3-4. 開放検査

検査では内視鏡により内部の目視検査を行った。従前までの 2 回の検査では高価な工業用内視鏡をレンタル会社より借りてきて検査に用いたが、今回の検査では安価なものを購入して試してみた。



図 7 似た構図で比較 上:高価品と下:安価品

結果は思いのほか綺麗で、高価な内視鏡の画像と遜色無いものが得られた（図 7）。安価にしてこの性能、光学機器の進化には驚かされる。また、今回購入したものは wifi でスマートフォン端末（以下スマホ）やノートパソコンへ映像を送るタイプで、ディスプレイとは一体型ではなかったため後述の使い方をを行うには軽量で使い勝手が非常に良かった。

新たな試みとして、内視鏡ケーブルの先端にあるカメラを狙った箇所へ送り込めるよう、伸縮タイプの釣り竿を活用してみた。今までは内視鏡ケーブルを単に押し込むだけであったため、ボンベの底を這っている状態であった。挿入長も初めは進むが次第に力が伝わらなくなって先へ進まなくなっていた。

そこで今回考案したのは、ケーブル先端のカメラを釣り竿の先端に固定して挿入する方式である（図

8). 竿に固定されているので、ポンベの底だけでなく側面や天井にもカメラを寄せることができる。

長尺ポンベが格納されているポンベ庫は狭く、ポンベの開口部と壁面までの距離はわずかしかない。このため一本物の長い棒を挿入しようとするとストロークが全く足りない。この点においても伸縮タイプの釣り竿なら、ポンベの入口で伸ばしながら挿入する事ができるので狭くても問題とならない。まさしく今回の目的にピッタリな補助具となった。



図 8 釣り竿を補助具にして内視鏡を操る

3-5. 目視検査の結果

開放検査は今回で3度目になり、表1で示したように3世代の長尺ポンベを系統毎に目視検査してきた。2015年に初めて、5年経過のポンベを内部目視検査した際、錆は確認できないものの斑状のシミのようなものが至る所に確認できた。これが腐食によるものなのか、当初判断できなかった。ところが、非常にタイミングが良い事に、増設工事直前の未使用の新品長尺ポンベが控えていた。今後も検査していく上で未使用状態ではどのような様子なのか、基準として大きな価値があるので、未使用ポンベも目視検査を行った。その結果、未使用品でも同様の斑状のシミが確認できた。つまりシミは元からあるもので、後からできた腐食ではない事がわかった。



図 9 各ポンベ内部の様子

図9の写真は未使用ポンベと系統毎のポンベ内部の様子である。目につくのはやはり③だろうか。これについては2002年に導入された油水分離機が入る前から運用していたため水が入ったのではないかと推定している。油水分離機設置以降に導入されたポンベが今後同じように腐食してしまうのか注意深く見ていきたい。なお、錆の見つかった1996年導入ポンベは検査後に使用を停止している。

3-6. 気になった点

今後の検査で気を付けるべき点を表2に示す。A: 開放口のボルトは脱圧・ガス置換した状態で初めて開けることができる。事前に触って確認することができない。当日ぶっつけ本番となるため、万が一“硬すぎて開かない”という事態になったら下準備が全て台無しになってしまう。控えのポンベを整えておくリスク回避となる。B: 検査前後は対象ポンベが運用から離脱するため、貯蔵容量が減少する。このタイミングでガスや液の外部購入による補充は容量オーバーを招く危険があるので避ける。C: 内部撮影した写真を整理すると似た様な写真ばかりで、どこを撮っているのかわからなくなる。位置を変える毎に内視鏡をポンベから抜いて「底」「側面」「天井」などと紙にでも書いて撮影した方が良い。D: 実は今回内視鏡を2台購入している。1台目は自分のスマホでは使えなかった。他者のスマホでは使えたので相性が悪かったのだろうか。そこで新たに購入した2台目だったが誰のスマホでも使えなかった。安かろう悪かろうのハズレを引いたのだろうか。いろいろ試して行く内に、捨てずに残しておいた先代のスマホで1台目の内視鏡が使える事がわかった。当日になって不具合が発覚して右往左往する事のないよう事前に確認しておくのが安心である。

表 2 開放検査の留意点

A	検査対象の準備は2本行う
B	検査前は保有量の充当は避ける
C	撮影位置ごとに目印を写す
D	内視鏡の操作性は事前に確認しておく

4. まとめ

今回行った整備は他機関では行っていないところが多いかもしれない。それでも未使用ポンベの内部の様子など利用価値のありそうなものを紹介した。もし今後整備を行う場面が来たら、これらの資料が役立てば幸いである。

ヘリウム回収ガスバッグ鉄枠損壊の原因と今後の安全対策

○西崎 修司、 多田 康平

京都大学 大学院工学研究科 技術部

1. はじめに

2021 年 8 月 27 日に、京都大学大学院工学研究科附属桂インテックセンター（桂キャンパス B クラスター）のヘリウム回収ガスバッグが膨らみ過ぎたため、その鉄枠が損壊し、使用不能となる事故が発生した。web カメラモニター、異常警報発生時連絡システム、安全弁・安全器といった事故防止のための複数の安全装置を設置していたが、それぞれの装置につき様々な理由で正常に機能せず、事故を防ぐことができなかった。本発表では、事故の概要、事故の原因および今後の安全対策などを報告する。

2. ヘリウム回収システムの概要

京都大学桂キャンパスでは、各研究室で使用されたヘリウムを、建物ごとに設置されたサブステーション内のガスバッグ（3–6 m³）に一旦回収している。ヘリウム純度に問題が無ければ、ガスバッグに溜められたヘリウムガスを自動的にポンプで送り出し、共同溝中の配管を通して、B クラスタ極低温施設のガスバッグ（30 m³）に集約して回収している。

ガスバッグは、通常の状態では、人が操作することなく、自動的に運転している。桂キャンパスではサブステーションはキャンパス内の 8 ヶ所に点在しており、寒剤担当者は常にすべてのガスバッグの運転状況を監視しているわけではない。一方で、処理能力を超えた量のヘリウムガスがガスバッグへ送り込まれると、ガスバッグは膨らみ過ぎて、最悪の場合ガスバッグの破裂などの重大な事故に至るおそれがある。桂キャンパスでは、ガスバッグの安全な運用に資するため 3 種類の安全装置を併用しているが、最近ではそれらの運用に問題があった。次章で、安全装置の概要とそれらの問題点について述べる。

3. ヘリウム回収システムの安全装置と問題点

3-1. web カメラモニター

web カメラモニターは、ガスバッグに web カメラを設置し、ネットワークを介して寒剤利用者がガスバッグの運転状況を即時に確認することで、ヘリウム充填時の速度調整などに利用してもらうことを意図するものである。

しかしながら最近では、web カメラモニターは、現有のヘリウム液化システム(OS が Windows XP で、すでにサポートが終了している。)と同じネットワークに接続していたため、セキュリティの問題から、web カメラモニターを外部（極低温施設以外の学内を含む。）から接続できないように設定していた。そのため、学内の寒剤利用者が web カメラに接続できず、ガスバッグの運転状況を確認することができない状態であった。

3-2. 異常警報発生時連絡システム

異常警報発生時連絡システムとは、ガスバッグの膨らみ過ぎなど異常事態が生じた場合、ガスバッグ関連機器がキャンパス内担当部局へ自動的に警報を発報、この担当部局が自動警報を確認したのち直ちに寒剤担当者へ電話連絡して、寒剤担当者がその異常に対応する、という連絡システムのことである。

異常警報発生時連絡システム導入当時は、寒剤の取り扱いに不慣れな利用者も多く、たびたび担当部局から連絡が入り、そのつど寒剤担当者が対応していた。最近では、利用者が寒剤の取り扱いに慣れてきたことと、寒剤担当者側でポンプの始動タイミングを早めに設定したこともあり、ガスバッグの膨らみ過ぎがあまり発生しなくなっていた。たまた膨らみ過ぎとなっても、これはたまたまガスバッグが比較的膨らんでいたタイミングで充填を始めたために生じたもので、すぐにポンプが始動してガスバッグが萎み始めるため、あまり問題にもならなかった。そのため、異常警報の頻度も低くなり、また、これまで重大な事故は起きなかったため、気の緩みもあり、以前に比べ自動警報を重要視していなかった。

3-3. 安全弁

安全弁は、ガスバッグ内圧が設定圧力を超えると、弁が自動的に開いてヘリウムガスを大気放出することで、ガスバッグ本体や関連設備の損傷を防ぐためのものである。当初は設定圧力 9000 Pa の機械式安全弁が設置されていた。

ガスバッグ本体は大気圧下で使用し、設計圧力が約 300 Pa のため、安全弁の設定圧力が高すぎるのではないかと懸念が生じた。そこで、安全弁の代わりに、注入する油の量により設定圧力を変更できる



図1 油封入式安全器



図2 外側に大きく湾曲した鉄棒

油封入式安全器（図1）に取り替えた。当初、安全器の設定圧力を 200 Pa に設定していたが、ヘリウム充填の度にヘリウムガスを大気放出していた。設定圧力を上げてみても大気放出は解決されなかった。調査の結果、安全器の分岐が悪いことが原因だった。本来安全器はガスバッグ入口付近で分岐すべきだが、回収配管の途中で分岐していたため、大気圧のガスバッグの内圧ではなく、少し高めの回収配管の内圧により、安全器が反応していた。安全器では大気放出を止めることができなかったため、異常警報発生時連絡システムが機能している限りにおいて安全と判断し、仕方なく、安全器の入口弁を閉じていた。

4. ガスバッグ鉄棒損壊事故の概要

異常警報発生時連絡システムにより、2021 年 8 月 27 日 13 時半頃に B クラスターのガスバッグで上限異常（膨らみ過ぎ）警報が発生したとの電話連絡が、担当部局から同日 16 時ごろに寒剤担当者へ来たため、寒剤担当者側においてこのガスバッグに何らかの異常が発生していることを検知した。直ちに web カメラモニターでこのガスバッグを確認したが、カメラ越しでは異常を確認できなかった。

その後、異常警報のリセットのためにサブステーションに入り状況を確認したところ、側面の鉄棒が外に向かって大きく湾曲し、鉄棒を固定していたボ



図3 鉄棒湾曲のため、棒ごと固定ネジが破断

ルト数本が破断しているとともに、下棒も外に向かって湾曲していた（図2-4）。鉄棒が変形したことでガスバッグ天板の車輪が鉄棒のガイドレールから外れていた（図5）。ガスバッグは、封じ切りの状態で



図4 下面の鉄棒も湾曲

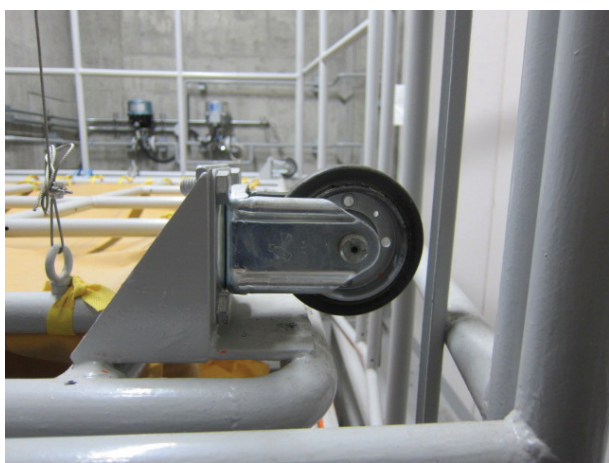


図5 鉄棒の湾曲でガイドレールから外れた車輪

徐々に萎んでいくことが確認されたため、それ自身も損傷を受けているものと判断された。

ガスバッグが正常に機能しない状態のため、使用停止とした。復旧完了までの当面の間、研究室からのヘリウムガスは、ガスバッグを介さずバイパスライン（別系統の配管）を通して、直接極低温施設で回収することとした。

5. ガスバッグ鉄棒損壊事故の原因

事故当日、破損したガスバッグを利用していたのはひとつの研究室のみであり、その研究室は当日、13時から13時半ごろにかけてNMR装置に液体ヘリウムを充填していた。事後調査でその研究室に充填の状況を確認したところ、普段の充填圧力（およそ0.1–0.2 MPa）より高めの圧力（およそ0.3 MPa）で充填していたことが分かった。また、その研究室ではNMRの管理者が最近交代し、寒剤の利用に充分慣れていなかったことも分かった。

これらのことから、その研究室がNMR装置への充填の際に、充填速度が速すぎて、ガスバッグの処理量を超えたことでガスバッグが膨らみ過ぎたため、



図6 webカメラモニター 管理者画面



図7 webカメラモニター 利用者画面

鉄棒を損傷したことが直接の原因と考えられる。これは上限異常警報が13時半過ぎに発生していることや、鉄棒の損傷の状況と矛盾しない。さらに、ガスバッグの膨らみ過ぎという異常事態が発生しても、利用者がwebカメラでガスバッグの運転状況を確認できないために利用者の側で異常を検知できなかったこと、異常警報発生時連絡システムによる寒剤担当者への連絡が遅れたことで寒剤担当者の側でも迅速に対応できなかったこと、安全器の入口弁を閉止していたため自動でガスバッグを保護する機能も働かなかったこともまた、今回の事故を防げなかった要因と考えられる。

6. 事故後の安全対策

6-1. webカメラモニター

事故の後、webカメラのネットワークをヘリウム液化システムから独立させることでネットワークの問題を解消し、Raspberry Piを用いて集中管理することにした（図6）。また、希望する利用者にwebカ

表 1 危機判断：現実と認識の関係

		認 識	
		危機と判断	危機でないと判断
現 実	危機	迅速な対応、クライシスマネジメント (危機が発生したあとの対処)	ぼんやりエラー（見逃しの三振） (対応の遅れやパニック発生で被害拡大)
	危機でない	うっかりのエラー（空振りの三振） (繰り返されると「狼少年」とみなされる)	組織の安定・信頼、リスクマネジメント (危機発生前に損失等の回避や低減を計画)

メラへのアクセス情報を公開し、充填中に利用者が研究室から web カメラにアクセスしてガスバグの運転状況を確認できるようにした（図 7）。

6-2. 異常警報発生時連絡システム

異常警報発生時連絡システムを以前より重要視することがなくなったため、今回の事故を含め、担当部局からの電話連絡が遅れる場合があることが問題のひとつであった。そのため、この異常警報発生時連絡システムでお世話になるこの担当部局には、今後、異常警報発報時には直ちに寒剤担当者まで電話連絡を頂けるように申し合わせた。

6-3. 安全弁

今後、油封入式安全器を機械式安全弁に戻し、この安全弁が正しく機能するよう、設定圧力や設置場所を改善することを検討している。

6-4. その他

研究室によっては教職員の異動や学生の卒業などにより、液体ヘリウムを使用する NMR などの装置の管理者が交代することも考慮せねばならない。web カメラモニターへのアクセス方法や、安全なヘリウム充填の方法などを盛り込むことで、これまでより充実した寒剤利用者への教育を実施していく必要がある。

7. 危機管理論

今回の事故に至った要因について、危機管理論の観点から再度考えてみたい。表 1 に現実での危機の有無と危機判断の関係を示す。危機管理において、危機であるものを危機である、危機でないものを危機でない、と正しく判断することは重要である。ごく些細な変化をもとに、確かに危機であるものに対して素早く対応することが求められたり、また逆に、ある兆候が全て重大な危機となるとは限らず、本当に危機であるのか否かを見極めることも求められたりする。

現実と認識が合致する場合、危機であるならば、危機に迅速に対応し、損失回避や被害の低減を目指すクライシスマネジメントを行う。他方、危機でないならば、時間的余裕があるため、事故発生前に損

失等の回避や低減を図るリスクマネジメントを行う。

現実と認識にズレがある場合、現実には危機であるのに、認識は危機でないと判断したならば、危機があるのに気付いていないぼんやりエラー状態であり、知らぬ間に被害が拡大する状態である。他方、現実には危機でないにもかかわらず、認識は危機であると判断することも適切でない。これが繰り返されるならば、イソップ物語の「狼少年」のように、肝心な時に適切な対応ができなくなる。

今回の事故のそれぞれの安全装置がどのような状態だったか表 1 と照らし合わせてみる。web カメラモニターについては、寒剤利用者は、そもそも web カメラに接続できず情報不足のため、現実には危機があったとしても危機でないと判断することしかできないぼんやりエラー状態だった。異常警報発生時連絡システムについては、現実には危機があっても、今まで危機でなかったから危機でないと判断したため、連絡が遅れて被害が拡大したぼんやりエラー状態だったといえる。安全弁・安全器について、当初は不適切な設定や設計だったので、実際は危機でないものを危機であるとの過剰反応を繰り返し、「狼少年」とみなされるうっかりエラー状態に陥った。この「狼少年」状態を避けるため、安全器の入口弁を閉めた結果、危機の有無の判断ができなくなるぼんやりエラー状態となり、危機を認識し対処することができなかった。

上述した事故後の安全対策によって、利用者および寒剤担当者は必要な情報を適時に得ることができ、適切な対応ができると考えられる。また、これらの人的要因が仮に働かなくても、安全弁によって機器側での適切な対応が可能となることで、事故を回避できるようになると考えられる。

8. まとめ

ヘリウム回収ガスバグの鉄棒破損事故の概要と、複数の安全装置が機能せず事故を防げなかった原因、および今後の対策について報告した。また、今回の事故に至った要因を危機管理論の観点からも考察した。

ヘリウム純度計監視システムの紹介

○浅田 瑞枝^{A)}、高山 敬史^{A)}、豊田 朋範^{A)}、木村 和典^{A)}、
千葉 寿^{B)}、古舘 守通^{B)}、藤崎 聡美^{B)}

^{A)}分子科学研究所 技術推進部、^{B)}岩手大学 理工学系技術部

1. はじめに

ヘリウムは極低温実験になくなくてはならない寒剤として使われるが、希少で高価な資源であり、リサイクル率の向上が急務である。また、回収配管への大量の空気混入によって液化機タービンの破損や液化ガス流路の詰まりが起こる恐れがある。重大な故障が起こると高額な修理費が必要になり、ヘリウム液化・供給を長期間停止せざるを得なくなってしまう。

2. 純度監視の現状

分子科学研究所では、液体ヘリウムを利用する全ての実験室に蒸発ヘリウムガスの回収配管と純度計の設置を義務付けており、現在表 1 に示す 4 種類の純度計が利用されている。配管の純度低下を調べることでヘリウムガスの漏れにいち早く気づき、ヘリウムロスや回収系への空気混入の被害を減らすことができるが、実験室に人がいない状況では純度低下に長時間気付かず、大量の空気成分が混入してしまっている事故が時々発生する。分子研では主にガスホルダーでヘリウムガスを回収しており、ガスバグ利用時よりも回収配管の負圧が強くなる傾向がある。純度低下によりガス回収系の開放に気づきやすい反面、開けっ放しになると空気を吸い込みやすい。

以前は PICNIC (マイコン) を使ってネットワーク経由で純度計を遠隔監視していたが、管理用 PC (OS: Windows 98) の故障に伴い休止していた。ヘリウム回収状況の遠隔監視システムについては、既に様々な大学が構築している^[1-6]。今回、これらの報告を参考に既存の純度計と Raspberry Pi 4 (Model B) を組み合わせて遠隔監視・アラートシステムを改良構築した。また、WAN-WAN システム^[7,8]との連携を試みた。

3. ヘリウム純度モニター

4 種類の純度計のうち、富士電機製の純度計は回収配管が合流する機械室に、ツジ電子製純度計は大量使用の実験室などに設置されている。まず、これらの純度を一括監視するモニターを作成した (図 1)。

ツジ電子製の純度計は有線 LAN 通信機能が備えられており、IP アドレスを割り振ればネットワーク経由で PC から純度などの情報取得や純度低下時のメール送信先など設定することができる。無償配布されているプログラムと純度計を 1 対 1 に対応させて純度を取得することもできるが、今回は Python の Telnet ライブラリを利用して通信し、複数の純度計

メーカー	富士電機	ツジ電子	三協電精	自作
センサー	熱伝導式	ピラニー	ピラニー	ピラニー
警報	なし	メール	ブザー音	なし
出力	DC 4~20 mA	純度値など (Telnet) 0~1 V (LEMO端子)	0~1 V	端子なし
使用箇所	機械室 (配管の合流部)	実験室	実験室	実験室

表 1 分子研で使用中の純度計

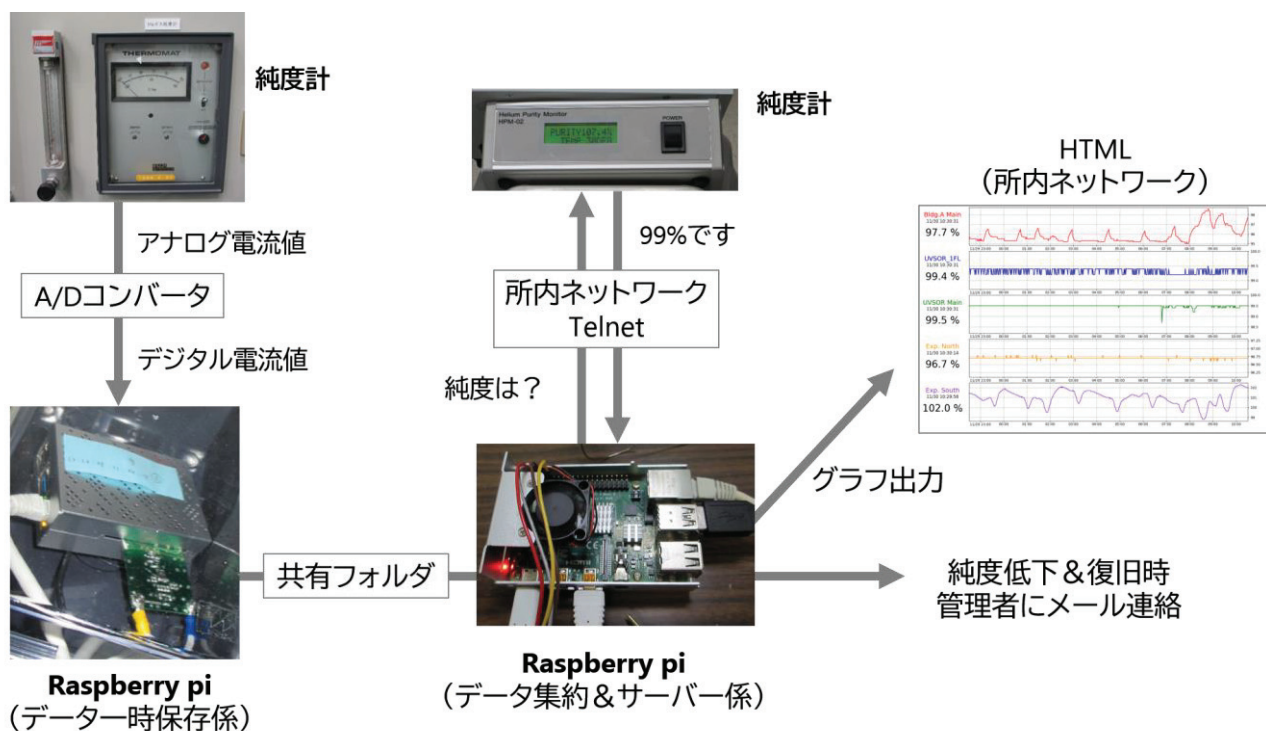


図1 2種類の純度計を集約する遠隔監視システム

からまとめて情報を取得した。純度を尋ねるコマンドを送信すると、温度補償された純度値がそのまま返ってくるため、便利である。ただし極端な純度低下時 (<20%) とセンサー端子異常時の動作が本体ファームウェアのバージョンによって異なるため、遠隔モニター側で異常検出時のアラートを分岐する際には注意が必要である。

富士電機製の熱伝導式純度計にはアナログ電流出力端子がある。以前は PICNIC で遠隔監視していたが、今回は PICNIC を A/D コンバータ+Raspberry pi に置き換えて復活させた。Raspberry Pi の GPIO に接続できる A/D コンバータを作成し、Python で電圧値を読み取り純度値に変換した。得られたデータは共有フォルダに保存し、サーバー役の Raspberry Pi がデータを収集する。ネットワークが不安定でも電源が供給されている限り純度をローカルに記録し続け、ネットワーク復旧時にサーバー役がログをまとめて取得する。

データ集約・グラフ出力プログラムは Raspberry Pi に標準搭載の Python で稼働させた。また、Raspberry Pi に Apache で web サーバーを構築して、HTML から純度グラフ画像を所内限定で閲覧できるようにした。純度低下時には設定したアドレスに直近のグラフを添付したメールを自動的に送信する。また 95% 以上に純度が回復した際にもメール送信するようにした。これによって、休暇中など所内ネットワーク

に即座に接続できない場合でも、純度低下が一時的か、現場対応が必要か判断できる。

使用した主な Python ライブラリ : telnetlib (ネットワーク通信)、smbus (I2C 通信)、smtplib (メール送信)、matplotlib (グラフ描画)、PySimpleGUI (GUI 描画)

4. WAN-WAN による純度低下の通知

三協電精製純度計はケース内部に空間があり、加工した基盤を内蔵する余地があるため、改造して WAN-WAN システムとの連携を試みた(図2)。WAN-WAN はスマートスピーカを介してスマートフォンに直接通知を送るシステムである^[7,8]。所内 LAN にアクセスできない場所でも、純度計本体に LoRa (Long Range) 無線アンテナ^[7]を取り付けることで、安定してデータを取得できることが利点の一つである。純度計が出力する電圧値をデジタル変換後、マイコンを搭載したマスターユニットが無線で取得し純度値に変換する。純度があらかじめ設定しておいた一定値を下回ると、WAN-WAN モジュールにトリガーが送信される。モジュールは居室等に設置したスマートスピーカを起動して、音声で純度低下を知らせる。また、管理者の携帯端末にヘリウムガスの純度低下を通知する。

5. 今後の展望

今後、ガス流量計と連携して実際に回収されるヘリウムガス量をモニターして、液体ヘリウム供給価格をガス回収/損失量に応じて変動価格とすることを検討中である。WAN-WAN システムについては、酸素濃度計などの緊急連絡が必要なモニターと組み合わせるなど、広範な応用が期待できる。

参考文献

- [1] 松尾政晃 他 九州大学伊都キャンパスにおける回収ヘリウムガスの遠隔監視システムについて 九州大学低温センターだより No.9 (2015).
- [2] 八幡和志 他 ヘリウム回収ガスのオンライン純度管理 山口大学技術研究会 2016 報告集 (2016).
- [3] 今村和孝 他 Raspberry Pi を用いたヘリウム純度、回収流量監視端末の開発 東京大学技術研究会 2017 報告集 (2017).
- [4] 上田雄也 他 回収ヘリウムガスの遠隔監視システムについて～運用開始から 2 年間の報告～ 東京大学技術研究会 2017 報告集 (2017).
- [5] 八幡和志 他 ラズベリーパイによるヘリウム回収ガス純度のオンライン管理 九州大学技術研究会 2019 報告集 (2019).
- [6] 中本将嗣 他 低温センター吹田分室ヘリウム監視システム 大阪大学低温センターだより 171, 20-23 (2021).
- [7] 豊田朋範 他 LoRa 無線とスマートスピーカを用いたクリーンルーム警報システムの開発と展開 山口大学機器・分析技術研究会 2021 報告集 (2021).
- [8] 千葉寿 他 周囲に人がいない時代の危機を乗り越えるための新しい機器管理 山口大学機器・分析技術研究会 2021 報告集 (2021).

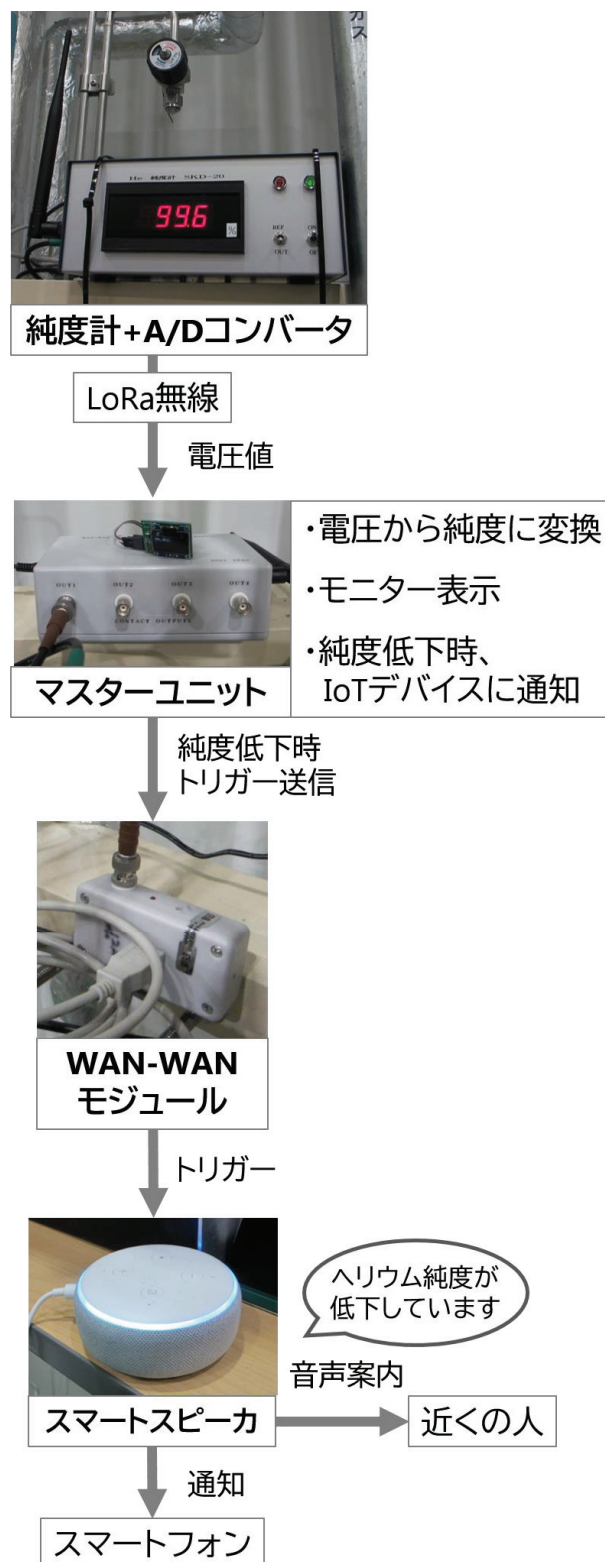


図2 WAN-WAN と連携したヘリウム純度低下通知システム

極低温業務 便利グッズ 4 種の紹介

○高山 敬史、 浅田 瑞枝
分子科学研究所 機器センター

0. はじめに

極低温の業務を遂行する上で、便利なグッズを製作したので報告する。何れもネット通販などで容易に手に入るパーツを生かして作っているのが特徴となっている。本報告では、下記 4 種類のグッズの紹介をする。

1. 液体 He 容器ベーキング装置
2. 蒸発 He ガス加温器
3. 初期予冷時 He ガス回収装置
4. ガスホルダー（ガスバッグ）レベル監視装置

1. 液体 He 容器ベーキング装置

この装置は 2021 年 3 月東北大学総合技術研究会において、東大物性研の清水氏らが発表した内容を参考に製作した。^[1]

熱伝導のよい銅パイプの内部にカートリッジヒーターと温度測定用の熱電対を内蔵し、上部にはスウェジロックユニオンティーを接続して、分岐した配管はリード線の導入口とパージ用ガスとしての乾燥空気送風口を兼ねている。使用した継ぎ手から取り出すヒーター用電線と熱電対用リード線導入部は、樹脂接着剤で固めて密閉されている。熱電対を使用した温度制御には、(株)チノールのデジタル指示調節計を選択して、銅パイプを希望の温度に変更できる。銅パイプ内部に内蔵した昇温用カートリッジヒーターは AC 電源で加熱され、交流の電源部にスライダックを用いることで加熱パワーを自在に変化できるのが特徴だ。図 1 にベーキング装置システム構成図と表 1 に機器パーツリストを載せる。

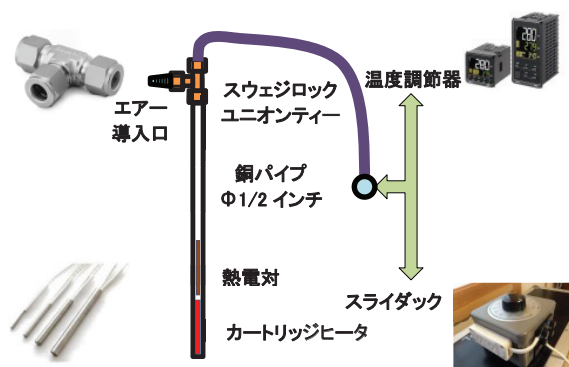


図 1 ヘリウム容器ベーキング装置

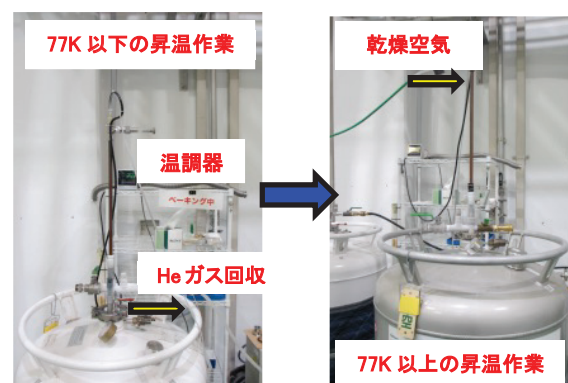


写真 1 ベーキング手順

この装置の操作手順として、液体ヘリウム容器に液が残っている状態で、希望温度に設定した銅パイプをトランスファーチューブ差込口よりゆっくりと挿入して、その際に蒸発したヘリウムガスは容器ヘッドにあるガス回収口より回収配管に送られる。次に、デジタル指示調節計の温度表示が 80K 付近になったところで、上部ユニオンティーの乾燥空気送風口よりエアーを送り込み、送られた空気は銅パイプを通してヒーターで加熱され、さらに液体ヘリウム容器を昇温しながら容器ヘッドのガス回収口より、今度は、大気側へ放出し設定した希望温度になるまで放置することで完璧なベーキングが終了する。写真 1 は実際の作業の様子である。

通常は、液体ヘリウム容器を昇温するには、容器内部に残った液体ヘリウムを逆トランスファーで容器が空になるまで回収配管へ全量回収して、次に、自然に昇温するまである程度放置して、最終段階として室温状態の乾燥空気です容器内部をパージする方法が主流となる。しかし、この旧来のやり方では容器の昇温再生が終了するまで最低でも 3～4 日の工程を要してしまう。ところが、今回製作した装置を使用することで最短で 1～1.5 日という驚異的なスピードで容器の昇温再生ができてしまう。この装置は、

表 1 機器パーツ構成表

カートリッジヒーター	AC100V 500W 10 φ L : 150mm
熱電対	K タイプ
温調器	(株)チノール DB670

業務の効率化に大いに貢献するものであり、今では手放せないグッズとなっている。

今回、このベアキング装置を運用してから気が付いた思わぬ副産物について紹介する。稀ではあるが年に数回あるかどうかという頻度で、液体ヘリウム容器を固体空気でブロックさせるミスが起きる。ブロックを開放するには従来、温めた銅パイプを容器注入口より挿入して閉塞物を溶かす方法が一般的だがこの方法では、固形物が溶け出した瞬間液体ヘリウム容器の内圧上昇分が一気に開放され、大量のヘリウムガスが大気に昇天してしまう。この放出ガスは非常に冷たいため、皮膚に晒されると凍傷を負ってしまう危険がある。しかし、当該装置を使うことで、閉塞物除去から容器再生という一連の作業において、容器を回収配管に接続しガスを回収した状態で行うことができ再生完了までは一切、外部にヘリウムガスを漏洩させずにすむ。凍傷といったリスク回避もできるのは嬉しい誤算だ。

2. 蒸発 He ガス加温器

ネットを検索すると様々な商品を目の当たりにする。熱交換器用の部材も例外ではない。従来、液体ヘリウムトランスファー時に蒸発したガスの加温用として、水を貯めたバケツの中をコイル状の銅パイプを通してガスを温める手法が主流であった。この方法だと、いつの間にかバケツの水が蒸発していたり銅パイプの太さに制限があったりして、とてもスマートな方法とはいえない難い面があった。今でも現役で使用しているユーザーの方には頭が下がる。

今回使用した熱交換器はネット検索で見つけた商品で、外径 1in のステンレス管に同じくステンレス製のフィンがらせん状に巻き付けられた部材となる。加工オプションとしてステンレス管の端部は真空機器で標準の NW25 フランジを採用した。このフランジを採用した理由は単に簡単に接続できるからである。フィンチューブ同士の接続には、U 型のス

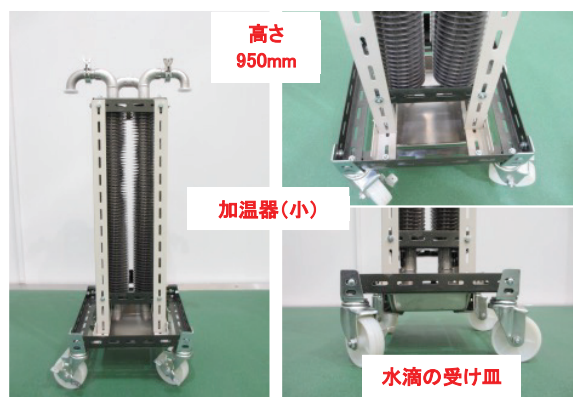


写真 2 ヘリウムガス回収加温器

テンレス管を使用して、蒸発ガス回収量の大小によりフィンチューブの使用本数と長さが決まる。同様の熱交換器で市販されているものに窒素ガス蒸発器があるが、これまたスマートとはいえず値段も高い。部品構成として、今回、フィンチューブ全体をアングルで囲って架台とした。架台の下部には、移動用のキャスターもある。更に液体ヘリウム充填時に付着した霜が解けた時用に、落下した水滴を受けるステンレスバットも備わっている。この装置の最大の利点は、簡単にパーツの最小単位までばらすことができ実験室の仕様に応じて変幻自在に作り変えることができる点だ。写真 2 は製作した小型の加温器となる。これは、実際にある研究室に設置された超電導マグネットへの液体ヘリウム充填用に使用されている。

3. 初期予冷時 He ガス回収装置

NMR など超電導マグネットを使用する実験装置はヘリウム冷凍機がついていない限り、数か月に 1 度は定期的に液体ヘリウムを補充しなければならない。充填の際に使用するトランスファーチューブは、液体ヘリウムの移送初期、室温状態にあるためそのままでは温かいヘリウムガスが実験装置内に送られてしまうため、最悪マグネットがクエンチすることもある。そこで、チューブを完全に冷却するまで液体ヘリウムを流し続けなければならないが、以前は、その予冷に使用して蒸発したヘリウムガスを大気に放出しており、抜本的な改善が必要であった。そこで、今回、冷却に使用したヘリウムガスを昇天させずに回収する装置を製作した。

図 2 は回収装置のイメージ図となり、部品構成は以下となる。トランスファーチューブ先端より排出されるガスの状態を目視できるよう装置本体には透明なアクリルパイプを用いた。パイプ上部には各種トランスファーチューブの外径に合わせるためダイ

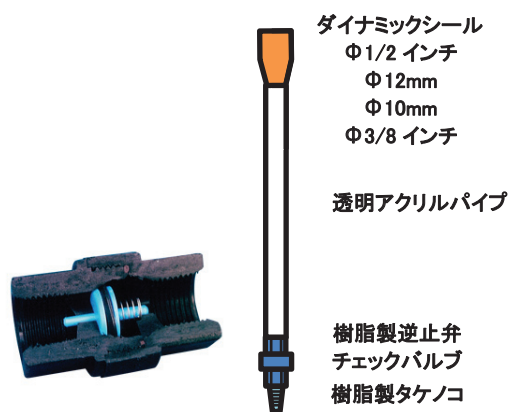


図 2 初期予冷時回収装置

ナミックシール^[2]を設置して、本体との接続にはシリコンチューブを用いた。トランスファーチューブのサイズによってダイナミックシールを簡単に交換できるのが特徴だ。アクリルパイプ下部には樹脂製の逆止弁が接続され、パイプ内部の圧力が発生した時のみヘリウムガスが回収配管へ流れる。逆止弁を使用することで、トランスファーチューブの抜き差しが簡素化され、煩わしいバルブ操作をすることなく予冷時の蒸発ガスを自動的に回収配管へ送ることができる。逆止弁の先は樹脂製のタケノコを使用して簡単に回収チューブとつなぐことができる。今回、樹脂製の逆止弁とタケノコを用いた理由として、この装置は NMR 近傍で使うため超電導マグネットの強磁場に影響されないよう配慮した結果である。唯一、逆止弁内部のスプリングだけは金属製となるがスプリングによる磁場への影響は皆無とっていいだろう。

実際この装置を製作して何回かテスト運転を行っているが、今まで大気へ放出していたヘリウムガスはほぼ 100%で回収ができるようになった。また、旧来の移送管予冷方法では冷却の最終段階でトランスファーチューブの先端に霜が付着して相手側装置の液注入口にチューブが差し込めないという事態に陥ったが、この回収装置を使うことによりチューブ先端部への霜の付着は一切起きていない。透明なアクリルパイプ越しに冷却状態も確認でき、何回か使用するうちに予冷完了のタイミングも分かりやすくなり、当初懸念された、アクリルパイプの凍結による破損も起きていない。

4. ガスホルダー（ガスバッグ）レベル監視装置

最近ラズパイを利用して回収ヘリウムガスの純度監視を行う大学が増えてきた。本技術研究会においても、分子研浅田がラズパイを使ったヘリウムガス純度監視について発表する。そこで、ラズパイを使って何かできないかを考えた末に、こうなれば便利だと思いついたのが、今回製作したガスホルダーのレベル監視装置である。以前は、秋月電子より販売されている PICNIC と呼ばれるワンボードマイコンを使用して、LabVIEW によるヘリウム回収純度の監視を行ったスキルがあったため、上記発案に至るまでの時間はそう長くはなかった。

元々ガスホルダーのレベルは、ヘリウム液化システムの制御監視装置にリアルタイムで表示されている。当研究所で使われているレーザー距離計を代用したレベルセンサーの出力は DC4-20mA で、シリアルに配線を追加してラズパイへ入力した。そのまま

の電気信号ではラズパイは認識しないため電流を電圧へ変換して、さらに AD コンバーターを介して I2C インターフェイスにて必要な信号をインプットする。入力信号の処理は、ラズパイにプリインストールされている Python と呼ばれるプログラミング言語を用いてモニターへの出力を行った。表示されるモニター画面はガスホルダーの容量が直感的に分かるよう、グラフィカルな表示形式を採用した。通常の業務をこなしながら、全くの Python 初心者でも約半年ほどで完成に至った。

今回製作した装置は、液体ヘリウムを充填する作業場に設置した。通常ガス回収、ヘリウム液化運転、ヘリウム充填作業等が全て重なると回収圧縮機のガス処理能力がガス回収量に追いつかず、ガスホルダーのレベルが満量に近づくという事態に見舞われたことが何度かあった。その際、今までは屋外に設置されたガスホルダーのレベルを目視しながら作業を行っていたが、この装置を使用することで、レベルの確認作業が現場でできるようになり業務の効率が劇的に改善された。写真 3 は実際にレベル監視を行っている液体ヘリウム充填場所の風景である。50m³ のガスホルダーに対して、現在何 m³ のガスがあるのか視認しやすくなっている。



写真 3 ガスホルダーのレベル監視

5. まとめ

本報告では、極低温業務に携わる中で仕事の効率化を目指して種々な便利グッズを開発した。今回、製作で使用した各々のパーツはネット通販で比較的手に入りやすく、しかも安価に製作できるのが特徴である。

最後に、この技術研究会は技術の共有の場として大いに役立って欲しい。

参考文献

- [1] 清水（野村） 未来 他 液体ヘリウム容器用自動昇温装置の製作 東北大学技術研究会 2021 報告集 (2021).
- [2] 加藤清則 他 ダイナミックシール 高エネルギー物理学研究所 1986 報告集 (1986).

第 5 分野

(情報・ネットワーク技術)

キャンパス情報ネットワーク（NIFS-LAN）のシステム更新

○井上 知幸 ^{A)B)}, 中村 修 ^{A)B)}, 高山 有道 ^{A)C)}, 山本 孝志 ^{A)C)},

情報ネットワークタスクグループ ^{A)}

自然科学研究機構 核融合科学研究所 ^{A)}情報通信システム部, ^{B)}技術部, ^{C)}ヘリカル研究部

1 はじめに

核融合科学研究所（NIFS）における、研究活動を支えるキャンパス情報ネットワークは、情報の種類、目的、用途の違いから、キャンパス情報ネットワーク（研究基盤ネットワーク、NIFS-LAN）、LHD 実験ネットワーク（LHD-LAN）、プラズマシミュレータネットワーク（PS-LAN）の3つのクラスタで構成されている。そのうち、研究者居室や一般業務等で利用される NIFS-LAN においては、平成 24（2012）年度から 25（2013）年度にかけて導入した各種ネットワーク機器やセキュリティシステムは導入から約 10 年となり、順次更新の時期を迎えている。昨年度には、平成 26（2014）年度に導入したメールシステムの更新を実施した。本研究会では、ここ数年に実施した NIFS-LAN の各種システム更新について報告する。

2 NIFS のネットワーク環境

NIFS は、約 46 万 m²の研究所敷地内に約 20 の建屋が点在している（図 1）。コアスイッチ、SINET5 との外部接続スイッチ、各種サーバ群等、主要なネットワーク機器は、シミュレーション科学研究棟のネットワーク機器室に集約して設置されており、各建物とはシミュレーション科学研究棟を起点とする光ファイバ網で結ばれている。

図 2 に NIFS-LAN の構成図を示す。SINET5 とは、外部接続スイッチを介して接続され、NIFS-LAN の接続点には、冗長化されたファイアウォールが設置されている。

主要なサーバ群は、仮想化サーバ、仮想化ストレージ、バックアップシステム、無停電電源システムからなる支援サーバシステム上で仮想マシンとして



図 1. 研究所俯瞰図

稼働している。

コアスイッチと各建物に設置されているエッジスイッチは 10GbE×2 で接続されており、建物内のネットワークは、各建物・フロアのネットワーク機器設置場所から各部屋まで、UTP ケーブルを配線している。利用者及びネットワーク管理者の利便性を考慮し、利用者数・部屋数が多い建物では、情報コンセント（RJ-45 コネクタ）を設置し、各部屋の情報コンセントと端末を接続するだけでネットワークを利用できるようにしている。来訪者用には NIFS-LAN と独立した商用プロバイダ回線によるゲストネットワーク、及び、eduroam による無線環境を用意している。

セキュリティ対策として、ウィルス対策ソフトの導入、標的型攻撃検知システム（FireEye）の運用、特に、ネットワーク接続端末の管理には検疫認証システム¹⁾を導入しており、NIFS-LAN に接続するためには、あらかじめ端末の MAC アドレスを登録した上で、ワクチンソフトの定義ファイル更新や OS アップデートが実施されているかどうかの確認をする「検疫」に合格する必要がある。

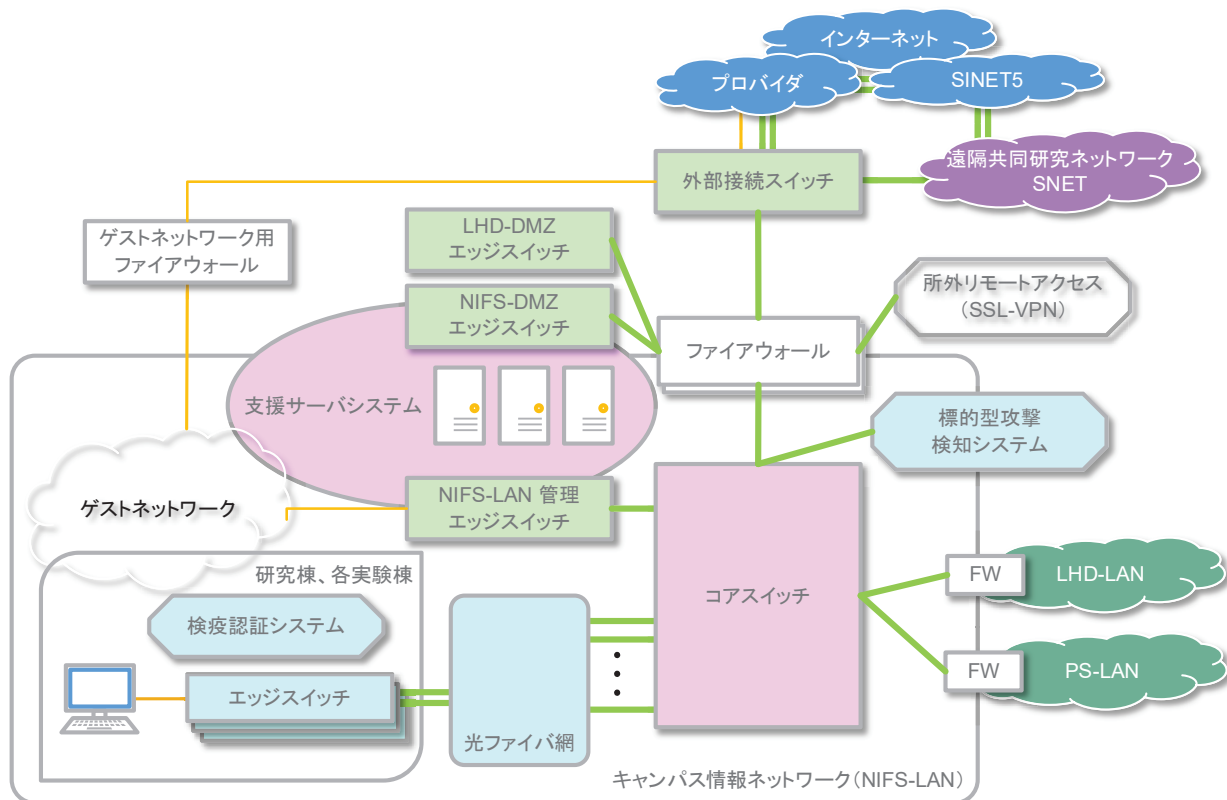


図 2. NIFS-LAN 構成図

3 システム更新

平成 30 (2018) 年度以降の各種システム更新について表 1 にまとめた。ファイアウォールなど一部を除き、平成 24 (2012) 年度から平成 26 (2014) 年度

に集中して導入されており^[2]、7～10 年程度で保守期限を迎えて機器、システム更新を行っている。いくつかの項目について、以下に詳細を述べる。

表 1. システム更新まとめ

更新年度	システム名	更新理由	内容
平成 29 (2017)	仮想ストレージ	保守期限	後継機種への更新 (HP P2000 → HPE MSA2050)
平成 30 (2018)	ファイアウォール	保守期限	後継機種への更新 (PaloAlto PA-4020 → PA-5220) 1Gbps→10Gbps に増強
	標的型攻撃検知システム	保守期限	後継機種への更新 (FireEye Web MPS 7300 → NX4500) 1Gbps→10Gbps に増強
	バックアップサーバ	保守期限	後継機種への更新 (HP X1400 → HPE StoreEasy 1660) Veeam Backup & Restore 導入
令和元 (2019)	ワクチンソフト	乗り換え	ESET Endpoint Protection への乗り換え ※詳細後述
	コアスイッチ	保守期限	モジュール、スーパーバイザのみの更新
令和 2 (2020)	メールシステム	保守期限	オンプレミスからクラウドサービスへの移行 ※詳細後述
	仮想サーバシステム	保守期限	サーバ更新、及び、検疫認証システム改修など ※詳細後述
令和 3 (2021)	所外リモートアクセス (SSL-VPN)	保守期限	システム更新 (F5 BIG-IP APM2000 → PulseSecure PSA5000) ワンタイムパスワード→クライアント証明書に変更
	ゲストネットワーク用ファイアウォール	保守期限	後継機種への更新 (FortiGate 100D → 60F)
	外部接続スイッチ	保守期限	100GbE 対応可能な機種に更新 (Catalyst 4900M → Catalyst 9500)
	エッジスイッチ	保守期限	約 4 分の 3 の調達。物品のみ。 ※詳細後述
令和 4 (2022)	エッジスイッチ	保守期限	残り機器の調達、及び、配線、設置作業を実施予定。

3.1 ワクチンソフトの更新

NIFS では、平成 11（1999）年から、所員の利用する端末用として、Symantec 社のワクチンソフト（Symantec Endpoint Protection）を使用していたが、2017 年のアカデミックプログラム終了を契機に、提供ソフトの変更の検討を開始し、2019 年後半、会社買収の影響からライセンス更新見積の提示もされない状態となったため、2019 年 12 月に、2020 年度からのワクチンソフト変更を決定した。

NIFS-LAN で導入されている検疫認証システムの仕様上、TrendMicro、McAfee、F-Secure、ESET からの選択となったが、他機関の利用状況、価格面などから ESET を導入することとした。乗り換えにあたっては、乗り換え特典の Symantec ライセンス期限の 2020 年 6 月までの ESET ライセンス試用期間を利用して、2020 年 1 月から、管理サーバの構築、端末動作試験、インストールマニュアルの整備等を実施した上で、所内配布を開始した。

乗り換えは予想よりも滞りなく進み、乗り換えが完了して定常運用となった後も、現在まで大きな問題は発生していないが、ESET 利用上の懸念点を挙げるとすると、日本販売代理店では英語版のサポートが無いこと、また、英語版と比べて、新バージョンの提供開始が遅いことが挙げられる。

3.2 メールシステムの更新

NIFS のメールサービスは、これまでオンプレミスのサーバ群で運用を行ってきた。平成 26 年度には、仮想化サーバ上で稼働する DEEPSOFT 社（現 QUALITIA 社）MailSuite を導入した。MailSuite の特徴として、柔軟なカスタマイズが可能であることが挙げられ、導入にあたっては、アカウント搾取等によるスパム発信源とならない対策として、ワンタイムパスワード（OTP）による二要素認証が可能となるようカスタマイズを実施し、セキュリティ面で高レベルなメールサービスを提供していた。^[3]

MailSuite の保守期限を令和 2（2020）年度末に迎えるにあたり、2019 年 10 月からクラウドサービスを含めた次期メールサービスの検討を開始した。^[4]

クラウドサービスの候補として、Google G Suite for Education（G Suite）の Gmail と Microsoft 365 for Education（M365）A3 の Exchange Online を検討した。MailSuite の更新案に対して、導入、及び、保守費用を比較すると、クラウドサービスの優位性は明らかであった。両者を総合的に検討した結果、Gmail の採用を決定した。

例年 10 月前後に始まる LHD 実験への影響を考慮し、2020 年 8 月上旬運用開始として準備作業に着手した。運用開始前の約 1 か月を掛けて、MailSuite のメールスプールを Gmail に移した上で、利用者の都合のいいタイミングで移行できるように、8 月上旬から 1 か月程度の移行期間を設け、期間中は新着メールを新旧両方のシステムへ配送することにより業務に支障が発生しないようにした。

MailSuite で利用していた ML 機能は、Google グループの配送機能を利用することとし、Google App Script などを利用し、メンバーや詳細設定の移行を実施した。

MailSuite 同様、Gmail でも 2 段階認証を必須とした。スマートフォンへのメッセージ通知や認証アプリ、電話での音声案内に加え、スマートフォンを持たない利用者や別の認証手段用として、セキュリティキー（Yubico YubiKey5 NFC）を利用者全員に事前配布した。

移行期間中には、新旧両システム間のメール転送不達などいくつかの問題が発生したが、予定通り 8 月末で移行期間を終了し、正式運用に移行した。

NIFS では名誉教授に対して終身利用可能なアドレスも発行しており、こちらも一般アカウント同様の手順で、2021 年 1 月までに Gmail 移行を完了した。

MailSuite のアカウント情報は、検疫認証システムの認証サーバのユーザー認証で利用していたため、次節で述べる検疫認証システムの改修作業終了を待って、2021 年 3 月中旬に運用を終了した。

3.3 仮想サーバシステムの更新

令和 2（2020）年度に保守期限を迎えた仮想サーバシステムは、物理サーバ（HP ProLiant DL380p Gen8）

4 台、仮想ストレージ 2 台 (HPE MSA2040, MSA2050) で構成していた。前述のオンプレミスのメールサービス (MailSuite) 運用終了に伴い、必要リソースが減少したことと、必要な稼働仮想マシンの見直しなどを実施し、物理サーバは 3 台 (HP ProLiant DL380 Gen10) で更新することとし、仮想ストレージは、保守期限を迎える既設 MSA2040 を廃止し、MSA2050 1 台とした。これにより CPU コア数は 128 → 120、搭載メモリは 224GB → 384GB、ストレージ容量は 19.6TB → 4.9TB となった。仮想化ソフトウェア VMWare vSphere の更新 (ESXi, vCenter Server) も同時に実施した。

仮想サーバシステムの更新と並行して、検疫認証システムの改修作業を実施した。認証サーバ、DNS サーバ、DHCP サーバの OS 更新 (CentOS 6 → 7) と、ネットワーク接続端末の登録、管理をする認証サーバの認証に MailSuite のアカウント情報を利用していたため、Google アカウントを利用した OAuth 認証に変更する作業を実施した。

DNS サーバの OS 更新のタイミングに合わせて、NIFS-LAN に設置されている DNS サーバの見直しを実施し、セキュリティ的に問題がある権威サーバとキャッシュサーバの兼用を取りやめた。また、所内停電時の影響を低減するため、NII の分散セカンダリ DNS サービスの利用を開始した。

3.4 エッジスイッチの更新

NIFS-LAN 全体で約 60 台設置されているエッジスイッチ (Aprosia13200-48X-PSR 等) は、令和 4 (2022) 年度中に保守期限を迎える。本来であれば、全台まとめた更新が望ましいが、予算的な制約に加えて、導入を想定していた機器が半導体不足やコロナ禍の影響から、年度内納品が間に合わない可能性があることが判明したため、令和 3 (2021) 年度は約 4 分の 3 の調達を実施し、残りは次年度の導入を予定している。

更新機器は、導入済みの検疫認証システムが動作することを仕様条件として機種選定を行ったが、静音ファン搭載電源が廃番となっていた影響で、静音化が必要な設置場所については、アップリンクが

1GbE のファンレス機器を選択せざるを得なかったため、10bEG×2 から 1GbE×2 に縮退させることにより対応することとした。

配線、設置作業については、来年度調達予定の機器と合わせて実施することを計画している。

4 今後の予定

前章でも触れた通り、来年度はエッジスイッチの残りの更新と、配線設置作業を予定しているが、作業の概算見積が想定以上の金額となったため、所内作業部分を増やすなど、作業内容の見直しにより費用を抑える予定である。

今後、仮想サーバストレージ、バックアップサーバ、標的型攻撃検知システムなどの更新が予定されているが、LHD 実験終了に伴い、予算確保が厳しくなることが予想されるため、場合によっては、代替システムへの変更も視野に入れて更新を検討する。

参考文献

- [1] 山本 孝志, et al. “情報セキュリティ対策としての検疫認証システムの構築と評価”, 学術情報処理 25(1) 9-20 (2021)
- [2] 井上 知幸, et al. “キャンパス情報ネットワークの更新について”, 北海道大学総合技術研究会報告集 (2014)
- [3] 井上 知幸, et al. “ワンタイムパスワード認証を利用したメールシステムの導入と運用”, 九州大学総合技術研究会報告集 (2019)
- [4] 山本 孝志, et al. “核融合科学研究所の電子メールサービスの Gmail と Google グループへの移行”, AXIES 年次大会 (2020)

ライブストリーミングの計画と実施

○内藤 茂樹^{A)} 長屋 貴量^{A)} 岩橋 建輔^{A)}

^{A)}分子科学研究所 技術推進部 計算情報ユニット

1. はじめに

2021 年度の分子研一般公開はオンライン開催となった。その中で 3D プリンターの出力映像をライブストリーミングすることとなり、私が担当した。本番までに事前打ち合わせ、テスト環境でのテスト、本番環境でのテストと段階を踏んで準備した。今回の発表では配信に使用した OBS を中心に、ハドルミーティング的に行った事前打ち合わせや接続テストでの試行錯誤、本番の状況等について報告する。

2. 事前打ち合わせ(ライブストリーミングの計画)

まず計算科学研究センターの会議室にてハドルミーティング形式で関係者による打ち合わせをした。ホワイトボードを使いながら岩橋が使用する機材とおおよその接続方法の案を示し、それに対して内藤と長屋が質問したり意見を述べたりするのを繰り返して、最終的な機材の接続案を作成した。

COVID-19 を考慮すれば、直接会わずにメーリングリストやチャット、Web 会議等のリモートで行うべきかとも思われるが、参加者が同じフロアの 3 名であり、換気に気をつけて短時間で行えば問題ないと判断した。またリモートだと色々時間がかかるが、今回ユニット長の岩橋よりライブストリーミングを行うとの話があった数分後には会議を始め、実質数十分で終了した。このような必要なときに短時間で行う会議をハドルミーティングと言う。ハドル (Huddle) とはアメフトの試合中に円陣組んで行われる作戦会議である。今回ホワイトボードを使ったハドルミーティングを行って良かった点を以下に記述する。

- 出た意見を即可視化、出席者全員で情報共有
 - フリーハンドで自在に線を引いて、各項目の関連性を即可視化
- 書いている状態が判るので、打ち合わせがだれない→リズム感
- オンラインだと発言が被りやすいが、オフラインだと誰かが話し出そうとするのが判るので被りづらい
- 一体感がある
- 身振り手振りで説明できる

- 機材の実物を見て確認できる

総じてリモート会議との最も違うのは臨場感による盛り上がりだと感じた。

ハドルミーティングは非常に有用であり、予約無しで使える会議室を準備しておくことをおすすめしたい。会議室に必要な物はホワイトボードぐらいであり椅子や机は無くても良い。ハドルミーティングはホワイトボードの前に集まって立ったまま行いう方が良いと思われるのと、そもそも椅子に座りたくなるほど長時間行いうものではない。また参加者は手ぶらで集まることを推奨する。会議の記録は最後にホワイトボードを撮影すれば事足りる(図 1)。

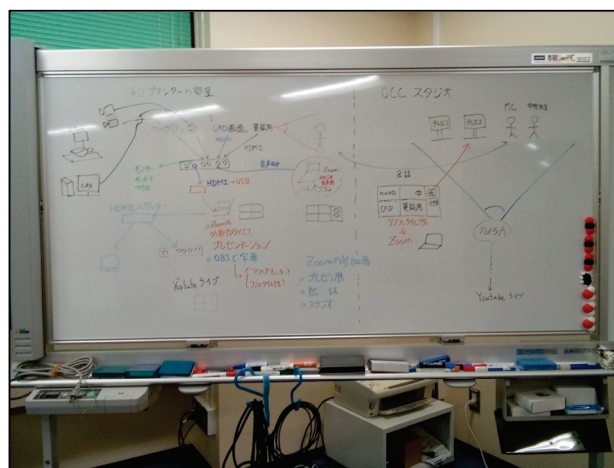


図 1 事前打ち合わせのホワイトボード

事前打ち合わせで決めたことは以下のとおりである。まずライブストリーミング中に一般公開の本部とのやり取りがあるが、それにはリアルタイム性も必要なので、Zoom を使うことにした。使用機材などについては、3 台のビデオカメラと 3D CAD 用 PC からの出力を HDMI スイッチャー (I-O DATA LIVE ARISER) へ入力し、HDMI スイッチャーの HDML 出力を HDMI→USB 変換にて配信用 PC に入力する。ビデオカメラを 3 台利用するのは、1 台を 3D プリンター全体の撮影用、1 台を 3D プリンターのヘッドの撮影用、もう 1 台を 3D プリンターの説明者用と分けるためである。3D プリンター全体だけでは動きが判らないので、ヘッドを撮影するビデオカメラも設置することにした。それら 3 台のビデオカメラの映像と 3D CAD 用 PC の映像を HDMI スイッチャー

で切り替えながらライブストリーミングを行う計画を立てた。さらに配信用 PC の HDMI 出力を、HDMI スプリッターを使って YouTube への打ち上げ機材 (CEREVO LiveShell X) とモニターに分配することにした。また配信用 PC で Zoom を動かし一般公開の本部との交信用にも使うことにした。ただし本部とのやり取りの音声は、配信用 PC からうまく YouTube に乗せることが出来るが不安があったため、別途 Zoom 用の PC を用意してそこから HDMI スイッチャーの Line IN に入力する方法も接続テストで試すことにした。また YouTube 上に字幕を付けたいと言うことで、配信用 PC 上に OBS (Open Broadcaster Software) をインストールし、OBS で字幕を付けてから出力することにした。

まず、この接続案でテストを行い、改善を進めることにした。

3. 機材の接続テスト

事前打ち合わせで決定した機材の接続案を基に、計算科学研究センター内の部屋を使って接続テストを行った。

一通り機材を接続して実際にテストを開始すると色々和不具合が出た。まず配信用 PC でキャプチャ入力した音声が出ない。これはハウリング防止のため Windows10 ではデフォルトで音声入力をスピーカー出力しないことが原因であった。Windows10 のサウンドの設定で“このデバイスを聞く”にチェックを入れて対処した。また Zoom の映像が左右反転して配信される問題は、“ミラー効果を有効にする”のチェックを外すことにより対処した。

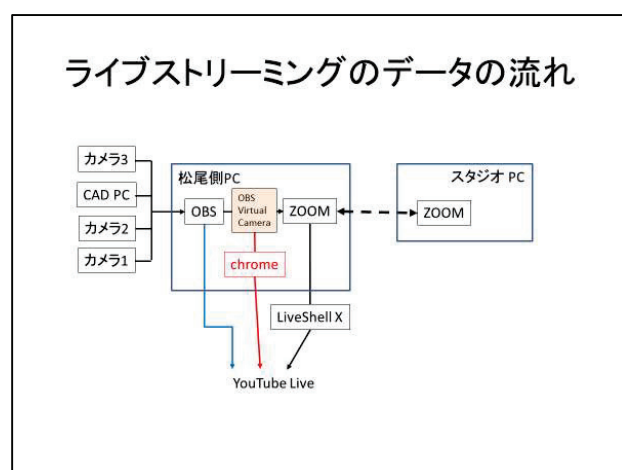


図 2 YouTube への打ち上げ経路

事前打ち合わせ時には LiveShell X で YouTube に打ち上げる計画であったが、テスト中に OBS から直接 YouTube へ打ち上げる方法と Chrome を経由する方法も試してみた(図 2)。その結果 OBS から直接打

ち上げる方法が最も良かったことと、現場へ持ち込む機材はできるだけ減らしたいこともあって、YouTube へは OBS から打ち上げることにした。ただ最初テストしたときは画像が悪く、OBS の設定でエンコーダを H.264、出力サイズを 1920x1080 に変更したところ、問題ない画質となった。しかしこの方法だと OBS に入力されるデータには Zoom の音声が入っていない。そこで図 4 で示すとおり別途用意した Zoom 用 PC から音声を HDMI スイッチャーに入力する方法を採用することとなった。

最終的な機材の接続方法を図 3 に、データの流れを図 4 に示す。Zoom 用 PC からの音声は、HDMI スイッチャーの 3D CAD 用 PC の Line IN に接続した。これはビデオカメラからの音声は必要であるが、3D CAD 用 PC からの音声は使わないからである。

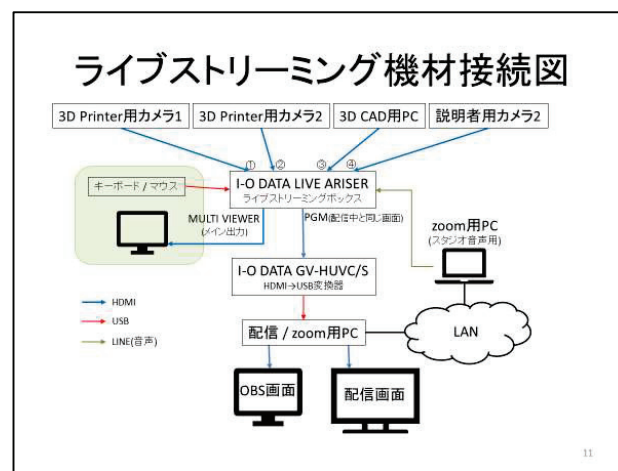


図 3 機材の接続

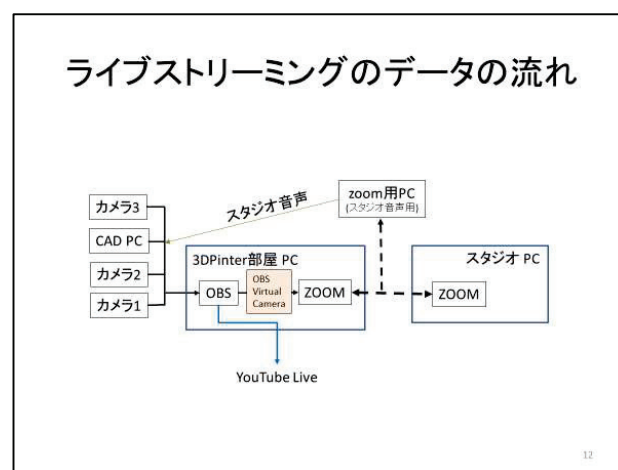


図 4 データの流れ

4. 現地でのテストとリハーサル

機材の接続テストで接続案の修正を行ったので、実際に現地で機材を設置して、さらなる問題点の洗い出しを行った。現地の室内が暗く、3D プリンターのヘッドの動きとかを明瞭に映像化できなかったの

コンセントの位置関係から、ケーブルを長いものに変更したり、PCの設置場所を確保したりする作業が必要だった。3D CAD 用 PC の出力が HDMI では無く DisplayPort だったため変換ケーブルを用意した。説明者用カメラも、はじめは本部とのやり取りや OBS で字幕を作成することを考慮して、配信用 PC の前に説明者がいることを想定した位置に設置をしていた(図 5)。

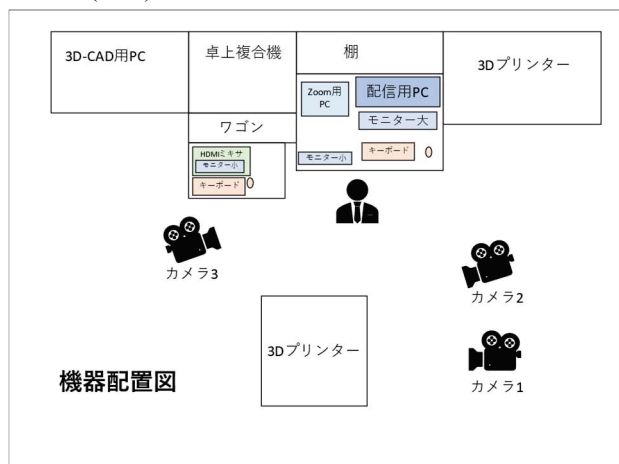


図 5 当初の機材配置図

しかし 3D CAD 用 PC の前に説明者がいた方が YouTube の視聴者には良いだろうと言うことになり、そちらに移動させた。また OBS で付ける字幕は、事前に説明者に作成しておいて貰い、本番ではそれを on / off することにすれば、説明者が配信用 PC の前にいる必要性が低くなったこともある。最終的な機材の配置を図 6 に示す。

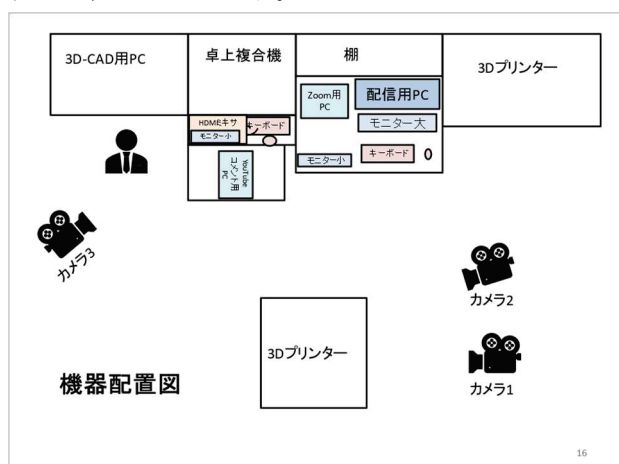


図 6 最終的な機材配置図

機材の接続後、実際に Zoom と YouTube にて確認したところ、YouTube の映像と音声は Zoom に対して 10 秒程度遅れることが判った。色々設定を変更してみたが改善しなかったが、実際の視聴者は YouTube しか見ないので、このタイムラグは問題にはならないだろうと判断した。

一般公開の本番前に全体リハーサルが 2 回行われ

た。その際にも確認を行ったのだが、ビデオカメラのマイクでは説明者の声がうまくとれなかった。そこでワイヤレスピンマイクを使うことにしたところ、説明者はビデオカメラに正対する必要がなくなり、動きながら説明することが可能となった。ワイヤレスピンマイクからの音声は説明者用ビデオカメラにレシーバーを取り付けてマイク端子と接続した(図 7)。レシーバーは汎用のものであり、ワイヤレスピンマイクとチャンネルを合わせて音声を受信している。



図 7 ワイヤレスマイクレシーバーの装着

また説明者用ビデオカメラの後ろに Zoom 用のモニターを配置した(図 7)。これで Zoom 時に配信する映像が本部と正対した状態となった。

3D CAD 用 PC からの入力がちらつくなど良くなかったため、PC と HDMI スイッチャーを近づけて使うケーブルを短くしたりケーブルを変更したりした。リハーサル時の HDMI スイッチャーの画面を図 8 に示す。リハーサル時は画面の確認のため等分割しているが、本番ではメインとなる 1 画面の右側に小さな 3 画面とすることにした。HDMI スイッチャーの正面のボタンで簡単に切り替えることができる。



図 8 HDMI スイッチャーの画面

なお今回使用したである I-O DATA LIVE ARISER にはモニターだけでなくキーボード及びマウスを取り付けて設定を行う。設定してしまえばキーボードとマウスは不要だが、不測の事態に備えて本番も付けたままとした。

5. 本番

全体をとおしてほぼ問題なく進行した。YouTube への打ち上げも途切れることは無く、本部とのやり取りも Zoom でスムーズに行えた。ただし HDMI スイッチャーのモニターのスピーカーでは音声聞き取りづらかったため別のスピーカーに変えたところ、その音声がビデオカメラのマイクに拾われてしまっていて、YouTube の視聴者には雑音混じりに感じられたとのことだった。また午後から当初撮影する予定が無かった 3D プリンターで出力を開始したため、急遽ビデオカメラ 1 台をそちらに移動した。本番の現場の状況を図 9 に示す。左側にビデオライト、右側に 3D プリンター撮影用のビデオカメラが 2 台設置してある。

本番当日は、私はビデオカメラに映らない位置で YouTube の管理画面を操作しつつ、説明者のサポートなどをしていた。本番途中にライブストリーミングの一つとして、3D プリンターを使って一般公開中に造形を一つ完成させることを始めた。これがビデオカメラ 1 台を異動させた理由である。ただ中々終わらず、YouTube の配信終了をギリギリまで送らせて、何とか完成形を視聴者の方にお見せすることができた。



図 9 本番の現場の状況

6. まとめ

分子研一般公開時の 3D プリンターのライブストリーミングは無事終了した。多少の見直しはあったものの、最初の事前打ち合わせで決めた接続案を大

きく変更する必要は無かった。これは事前打ち合わせの最中に、関係者間で接続案に関する情報共有と内容の理解が正しく行われ、中身のある議論ができていたからだろう。短時間でこれが出来たのはハドルミーティング形式で行ったことが大きいと思われる。必要な人員が必要なときに短時間集中して議論するという形式は非常に有用であることを改めて実感した。しかし、ハドルミーティングはその場にいる人しか参加できないと言う欠点があるのは事実である。一方 Zoom 等を利用すれば、遠隔地の方々の意見交換が可能となる。どちらか一方と言うことでは無く、オンラインとオフラインを使い分けることが重要であることに間違いは無いと思われる。

今回の一般公開は YouTube を使ったライブストリーミングで行われた。例年なら現地に来ていただいた方にしか情報提供できなかったが、ライブストリーミングなら遠隔地の方にも情報提供できる。これは有益な事には違いない。しかし現物を見て触って貰った方が良いのは事実だろう。いずれは技術発展により仮想現実空間内で可能になるかも知れないが、現状はやはり現地での一般公開が望ましいと感じた。

ライブストリーミングの実施という点では、現地では機材配置の制限があり、結果として HDMI 等のケーブルを長くせざるを得なかった。その影響が映像のちらつきとして出てしまったりした。ビデオカメラからの映像はさほど劣化しなかったが 3D CAD 用 PC からの映像の劣化が激しかった。PC からの映像出力を伝達するケーブルを短くなるような配置を心がける必要がある。また今回配信用 PC として CPU とメモリに余裕がありネットワーク接続が安定している有線 LAN に対応したデスクトップ PC を持ち込んだが、大きさもあって設置場所の確保が難しかった。有線 LAN に接続可能なハイスペックの Note PC を準備した方が設置場所の自由度は上がると思われる。

また本番の項目でも記述したが、当日急遽ビデオカメラを移動させたりした。これは何を配信するかという番組内容の考察が足りてなかったことによる。今回は初めてのライブストリーミングということで、技術的な部分のテストや改善で手一杯だった。考察する順番としては、配信する内容を考えて、それを達成するために必要な機材と配置を考えるべきだろう。

次にライブストリーミングを行う機会があれば、今回の反省を踏まえて、より良い配信を行いたい。

機械学習を用いた空洞内面検査ソフトの開発

○荒木 隼人

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

超伝導加速器の心臓部である超伝導空洞は、さまざまな原因によってその性能を制限される。その 1 つが溶接部内面に発生する欠陥であり、これを発見・除去するために内面検査装置が広く使われている。これは内面から写真を撮影することで欠陥を発見するものであるが、撮影された写真の中に欠陥が含まれているかどうかは人間が判断している。

今回、機械学習を用いた物体検出アルゴリズムによって欠陥の有無を自動で判断できるソフトウェアを開発したので報告する。

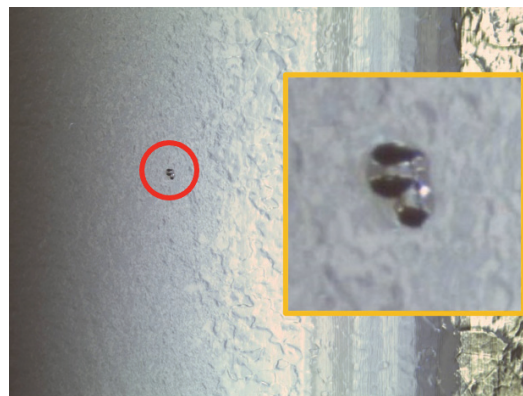


図 1 内面検査装置で発見された欠陥

2. 超伝導空洞の内面欠陥

ニオブ製の超伝導空洞は、プレス加工した板材を真空中で電子ビーム溶接することで製造される。この際、溶接パラメータや不純物の混入などの原因によって表面に凹凸が形成されることがある。例えば内表面に常伝導の不純物が存在すると、RF の表面電流によって非常に大きなジュール熱を生み、周辺部を温めることで熱的超伝導破壊を引き起こすことになる。このように、空洞性能に影響を与える内面の異常を欠陥と呼んでいる。

欠陥による性能制限を克服するために開発されたのが空洞内面検査装置(京都カメラ)である^[1]。この装置を使うことで、空洞内面をカメラで撮影して欠陥を発見し、局所研磨装置で欠陥を研磨し除去することができる。これによって性能の限界を大きく引き上げることができるだけでなく、空洞内面の詳細な観察結果を溶接や電解研磨の工程にもフィードバックできるようになった。内面検査装置で実際に発見された欠陥の画像を図 1 に示す。

しかしながら、この装置で撮影された画像は全て人間の目によって欠陥の有無を判断してきた。9 セル空洞 1 台の検査で撮影される画像は約 4000 枚であり、その中に欠陥が 1 箇所でも見つければそこで性能が制限されてしまう恐れがある。また、除去すべき欠陥であるかどうかの判定は難しく、検査の精度は熟練作業者の能力に依存しているのが現状である。

3. ソフトウェアの作成

ソフトウェアの制作は、GUI のないプロトタイプと、本番アプリケーションの 2 段階で開発した。この節では開発の流れを簡潔に記し、使用したツール等については次節で述べる。

3.1 プロトタイプ開発

試作段階では、参考記事^[2]で公開されているコードを Google Colaboratory^[3]上で動作するよう微修正し、また記事と同じ方法で欠陥を含む画像 76 枚から学習用データセットを作成した。このプロトタイプでの結果は定量的に評価していないが、この時点で概ね欠陥の検出には成功していた。また、プロトタイプに着手してから 1 日足らずでテストすることができた。

3.2 本番アプリケーション開発

プロトタイプで作成した学習・推論部分はそのまま、他に前提となるソフトウェアが必要ないような必要な機能を GUI で実装した。このアプリケーションは全て python で作成し、GUI 操作や学習を含む全ての機能が同じコードで Windows, MacOS, Linux の 3 つの OS で動作する。主な機能は次の通りである。

- 学習
画像と欠陥の位置情報のペアからなるデータセットから、検出モデルを学習する。
- 推論
学習したモデルを検査画像に適用し、検出結果を出力する。

● 結果の確認・編集

検出された欠陥の位置を表示し、その結果を学習用のデータセットとして出力する。また、手動で欠陥位置の追加・編集・削除を行う。この画面のスクリーンショットを図2に示す。



図2 確認・編集画面

3.3 性能評価

作成したソフトウェアの性能評価として、人間による検査結果との比較を行った。

実験にはA, B, Cの3名に協力を依頼した。Aは内面検査の熟練者で、現在全ての内面検査を担当している。今回は欠陥の客観的な定義が困難であるため、Aの判断を欠陥の定義とした。Bは初心者で、内面検査画像を見るのは今回が初めてであるため事前に簡単な説明を与えた。Cも内面検査の熟練者であるが、最近数年間は内面検査を担当していない。

評価に用いた画像は、過去の内面検査レポートに含まれている約4,000枚の画像であり、この中には欠陥が写っていない画像も含まれている。これらの中から100枚をランダムで抽出し、テストデータとした。さらにテストデータを除いた画像のうち、欠陥を含む画像1,566枚を学習用データとして用いた。

評価方法は次の通りである。同じテストデータをA, B, Cの3名と検査ソフトにそれぞれ欠陥検出してもらい、Aを定義としてB, Cおよび検出ソフトの正答検出率と正答含有率を比較する。それぞれの定義は、

正答検出率 = 正答検出数 / 正答数

正答含有率 = (正答検出数 + 正答重複数) / 正答数である。正答検出率が高いほど欠陥の見逃しが少なく、正答含有率が高いほど誤検出が少ないということになる。

以上の条件で検出性能の比較を行った結果を表1に示す。初心者Bは両方の指標で50%を下回っているが、これは内面検査の難しさを考えれば筆者の体感と矛盾しないものである。熟練者Cは正答検出率が高くないものの、正答含有率が非常に高いという

結果になっている。これは、熟練者Aと比べて欠陥と判定する基準が厳しいということを表しているものと考えられる。

検出ソフトの結果は正答検出率が3者の中で最も高い一方で、正答含有率はそれほど高くないという結果になった。これは、見逃しを少なくするために誤検知を許容するという方針で閾値を低く設定していることによる。この結果によって、最終的な人間の判断を前提とするのであれば十分な性能を有しているといえる。

表1 性能評価結果

	B	C	検出ソフト
正答検出率	44.0% (33/75)	46.7% (35/75)	81.3% (61/75)
正答含有率	89.5% (34/38)	56.3% (45/80)	52.7% (89/169)

4. 使用したツール等

今回、このソフトウェアを開発するにあたって使用した技術やツールを列挙する。

● Faster R-CNN^[4]

メインとなる物体検出アルゴリズム。ニューラルネットワークをend-to-endで用いた物体検出アルゴリズムとして最初に発表された。

● PyTorch^[5]

Pythonで機械学習を実装するためのライブラリ。機械学習に必要な道具が揃っていて、今回はこれに既に定義されているfaster R-CNNの学習済みモデルを使用した。

● CUDA^[6]

GPUを汎用計算に使うためのプラットフォーム。NVIDIA社が自社製GPU用に開発している。

● PySimpleGUI^[7]

PythonでGUIを実装するためのライブラリ。非常に少ないコード量で記述することができ、またWindows, MacOS, Linuxのマルチプラットフォームに対応する。

● Google Colaboratory

Jupyter notebookと同様にブラウザ上でpythonが実行できる環境だが、Googleのサーバ上で動作させられるサービス。ローカルへの環境構築が不要で、サーバの強力なハードウェアを使用することができる。

5. まとめと展望

機械学習を用いて超伝導加速空洞の内面欠陥を自動で検査するソフトウェアを開発し、その性能評価によって従来の人間による検査と同程度の精度があ

ることを確認した。まだ改良の余地はあるが、実用可能なレベルに達していると考えられる。

今後、物体検出の基本的なテクニックである学習データ水増しやハイパーパラメータの調整などの方法でさらなる精度向上を目指している。また、実際にこのソフトを実用化するにあたっての利便性向上として、検査結果のレポートを自動生成する機能などの追加を予定している。さらに、過去の膨大な画像データを再検査し、情報のデータベース化や再解析を行って新たな知見が得られるのではないかと考えている。

参考文献

- [1] Y. Iwashita et al., “Development of high resolution camera for observations of superconducting cavities,” *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* 11, 093501 (2008).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.11.093501>
- [2] 【人類最難関の挑戦】サイゼリヤの間違い探しを現代技術を駆使し片面だけで解く（深層学習）
<https://qiita.com/grouse324/items/9f49dafc97b78869476f>
- [3] <https://colab.research.google.com/notebooks/welcome.ipynb?hl=ja>
- [4] Ren Shaoqing *et al.* "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks" *Advances in neural information processing systems*, 28 (2015). <https://arxiv.org/abs/1506.01497>
- [5] <https://pytorch.org/>
- [6] <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>
- [7] <https://pysimplegui.readthedocs.io/en/latest/>

参加機関及び参加人数

【大学】

機関名	口演数	聴講者数	参加者数
東北大学	1	30	31
名古屋大学	1	11	12
東京大学		10	10
大阪大学	1	8	9
東京工業大学	1	5	6
九州大学	1	4	5
千葉大学	1	4	5
京都大学	2	2	4
熊本大学		4	4
北海道大学		4	4
筑波大学		3	3
徳島大学		3	3
広島大学		3	3
秋田大学		2	2
大阪市立大学		2	2
香川大学		2	2
九州工業大学		2	2
神戸大学		2	2
静岡大学	1	1	2
電気通信大学		2	2
鳥取大学		2	2
名古屋工業大学		2	2
山口大学		2	2
長岡技術科学大学		2	2
愛媛大学		1	1
大分大学		1	1
大阪府立大学		1	1
金沢大学		1	1
埼玉大学		1	1
佐賀大学		1	1
信州大学		1	1
富山大学		1	1
長崎大学		1	1
琉球大学		1	1
沖縄科学技術大学院大学		1	1
豊橋技術科学大学		1	1
機関数 36	9	124	133

【研究所】

機関名	口演数	聴講者数	参加者数
核融合科学研究所	8	54	62
高エネルギー加速器研究機構	13	25	38
分子科学研究所	4	5	9
生理学研究所		4	4
国立天文台		2	2
量子科学技術研究開発機構	1	1	2
機関数 6	26	91	117

【高等専門学校】

機関名	口演数	聴講者数	参加者数
大分工業高等専門学校	0	3	3
機関数 1	0	3	3

【総計】

機関数	口演数	聴講者数	参加者数
43	35	218	253

【分野別口演数】

分野名	口演数
工作技術	5
装置技術	10
計測・制御技術	10
極低温技術	7
情報・ネットワーク技術	3
計	35

あとがき

技術研究会実行委員長 林 浩己

令和3年度核融合科学研究所技術研究会を、令和4年3月10日、11日に開催しました。1年前は、多治見市産業文化センターにて現地開催として、対面での技術討論や人的交流ができることを希望していましたが、新型コロナウイルス感染症の変異株などの影響もありオンラインでの開催となりました。また、懇親会などで親交を温めつつ、更には新たなネットワーク作りを行う場としても本研究会を活用していただくつもりでいましたので、非常に残念でなりません。しかし、オンライン開催は「場所」や「時間」の制約が緩和され、多くの方が参加できると前向きに考え良しとしました。

技術研究会は、吉田善章所長の挨拶で始まり、大型ヘリカル装置計画研究総主幹の居田克巳教授による「光でプラズマ内部を探る」の基調講演の後、技術分野毎に口頭発表が行われました。発表技術分野は、5分野（工作技術、装置技術、極低温技術、計測・制御技術、情報・ネットワーク技術）で、全国の技術職員253名（43機関）の参加者があり、35件の口頭発表が行われました。口頭発表では、5分間の質疑応答に加えて発表毎にブレイクアウトルームによる交流セッション（20分間）を設けました。試みた交流セッションでは質疑応答の時間内でできなかった技術的な質問や技術討論、更にオンラインならではの幅広い技術者同士の情報交換ができた大変好評でした。また、極低温分科会においては、普段の見学では絶対見ることのできない極低温設備のオンライン中継や、最近のヘリウムガス入手等に係る極低温情報交換を企画し情報共有を図ることができました。閉会式後には、大型ヘリカル装置(LHD)のオンライン施設見学を行いました。案内役の大石鉄太郎助教は大型ヘリカル実験棟本体室から、川本靖子助教は制御室から、先生自らの研究内容も交えて装置や設備を説明頂いたことで、多岐にわたる技術を見聞することができました。

次の核融合科学研究所主催での開催は、4年後の2025年度です。最後になりますが、技術職員が全国規模で発表できる場としての技術研究会の開催にご協力いただいた核融合科学研究所の研究部、管理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

実行委員長

林 浩己

副実行委員長

小淵 隆

実行委員

横田光弘

鈴木直之

安井孝治

野村吾郎

小川英樹

大場恒揮

佐藤 守

中村 修

加藤ひろみ

Web 版技術研究会報告集の閲覧方法について

概要

1975 年度より開催されている技術研究会、並びに機器・分析技術研究会や実験・実習技術研究会の過去全ての報告集は電子化作業が完了し、Web 公開拒否の意思表示頂いているものを除いた全ての報告書を Web で参照可能です。各報告書は、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。以下の案内を参照頂き、ぜひご活用ください。

1 公開環境について

誰もが閲覧できる Web 環境では、基本的に題名等の公開にとどめています。利用者限定版では全報告書の閲覧ができます。このシステムでは SNS を利用しており、利用者の対象は技術研究会参加範囲に限定しています。

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（報告書参照不可） <https://techsv.ims.ac.jp/GEN>

利用者限定版（報告書参照可） <https://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。

3 利用者限定版の登録方法

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。

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。

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、下記までお願いいたします。

運用責任組織 自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部 担当者 岩橋建輔

Recent Issues of NIFS-MEMO Series

NIFS-MEMO-80	原型炉の運転制御に関する研究会 Program Committee of Technical Study on the Operation and Control of the Fusion DEMO Reactors 核融合原型炉の運転制御 Report on the Operation and Control of the Fusion DEMO Reactors (in Japanese)
NIFS-MEMO-81	自然科学研究機構 核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室 Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science 放射線安全管理年報 (2016年4月1日～2017年3月31日) Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2016 to March 2017 Jan. 22, 2018 (in Japanese)
NIFS-MEMO-82	主催：核融合科学研究所 技術部 Department of Engineering and Technical Services 平成29年度 核融合科学研究所技術研究会 日時：平成30年3月1日～3月2日 Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories May. 14, 2018 (in Japanese)
NIFS-MEMO-83	Kazuyoshi Yoshimura Nonlinear Wave Propagations in Binary-Gas Mixture May. 14, 2018
NIFS-MEMO-84	山本孝志、情報ネットワークタスクグループ 核融合科学研究所 情報通信システム部 T. Yamamoto and members of information Network Task Group The Division of Information and Communication Systems, National Institute for Fusion Science セキュリティを考慮した核融合科学研究所キャンパス情報ネットワークの構築 Construction of the campus information network with information security measures on NIFS Oct. 05, 2018 (in Japanese)
NIFS-MEMO-85	自然科学研究機構 核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室 Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science 放射線安全管理年報 (2017年4月1日～2018年3月31日) Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2017 to March 2018 Jan. 28, 2019 (in Japanese)
NIFS-MEMO-86	自然科学研究機構 核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室 Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science 放射線安全管理年報 (2018年4月1日～2019年3月31日) Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2018 to March 2019 Jan. 14, 2020 (in Japanese)
NIFS-MEMO-87	準軸対称ヘリカル型トーラス閉じ込め装置 CHS-qa 実験提案書 Proposal of the CHS-qa experiment CHS-qa design team July 22, 2020 (in Japanese)
NIFS-MEMO-88	自然科学研究機構 核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室 Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science 放射線安全管理年報 (2019年4月1日～2020年3月31日) Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2019 to March 2020 March 5, 2021 (in Japanese)
NIFS-MEMO-89	核融合科学研究所 安全衛生推進部 放射線管理室 Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science 放射線安全管理年報 (2020年4月1日～2021年3月31日) Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2020 to March 2021 March 8, 2022 (in Japanese)
NIFS-MEMO-90	核融合科学研究所 技術部 Department of Engineering and Technical Services 令和3年度 核融合科学研究所技術研究会 日時：令和4年3月10日～3月11日 Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories May 26, 2022 (in Japanese)