

# NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

## 国内大学のトカマク実験装置の概観

Overview of tokamak devices in universities in Japan

「先進トカマク開発のための実験研究」研究会

Study Group on Experimental Research for Advanced Tokamaks

( Received - May 26, 2023 )

NIFS-MEMO-93

Sep. 1, 2023

# 国内大学のトカマク実験装置の概観

令和 5 年 5 月

「先進トカマク開発のための実験研究」研究会



# Overview of tokamak devices in universities in Japan

## Study Group on Experimental Research for Advanced Tokamaks

### Abstract

A study group on experimental research for advanced tokamaks (represented by T. Fujita) was organized and held meetings from FY 2020 to FY 2022 as one of general collaboration projects of National Institute for Fusion Science (NIFS). In meetings held in October 2021 and September 2022, topical sessions were organized on overview of individual experiment devices. Nine research groups made presentations in these topical sessions, with fruitful discussions. This report includes commentary articles on experimental devices written by seven research groups; HYBTOK-II, LATE, PHiX, QUEST, RELAX, TOKASTAR-2 and TST-2. It contains useful information on constitutions, know-how on operation, analysis tools, etc. It is expected that this report would be utilized for improvements in individual devices.

**Keywords:** tokamak device, device constitution, diagnostics, operation, analysis tools.

## はじめに

「先進トカマク開発のための実験研究」研究会

研究代表者

名古屋大学 藤田隆明

令和2年度から令和4年度にかけて実施された核融合科学研究所一般共同研究(研究会)「先進トカマク開発のための実験研究」では、令和3年10月と令和4年9月にオンラインで開催した研究会において、実験装置の概要に関するセッションを設け、9つの研究グループからそれぞれの実験装置の概要についての発表・議論が行われた。本資料は、その発表内容をベースに、7つの研究グループ(HYBTOK-II、LATE、PHiX、QUEST、RELAX、TOKASTAR-2、TST-2)が執筆した各実験装置の概要についての解説記事をまとめたものである。普段の学会や研究会では聞くことが少ない各装置の構成、運転のノウハウ、解析ツールなどについての有益な情報を含み、今後のそれぞれの装置の整備に役立てていただくことを期待している。

## 目次

|                          |                            |    |
|--------------------------|----------------------------|----|
| 小型トカマク装置HYBTOK-IIの実験装置概要 | 渡邊清政、岡本征晃、柴田欣秀、大野哲靖        | 1  |
| LATE装置の概要                | 打田正樹、田中仁、前川孝、LATEグループ      | 7  |
| 小型トカマク装置PHiX             | 筒井広明                       | 14 |
| QUEST装置の概要               | 長谷川真                       | 22 |
| RELAX装置の概要               | 井上孟流、稲垣泰一郎、三瓶明希夫、比村治彦、政宗貞男 | 28 |
| TOKASTAR-2装置の概要          | 藤田隆明、岡本敦                   | 40 |
| TST-2装置の概要               | 江尻晶、辻井直人、篠原孝司              | 48 |

# 小型トカマク装置HYBTOK-IIの実験装置概要

## Overview and Device specification of Small Tokamak, HYBTOK-II

渡邊清政、岡本征晃、柴田欣秀、大野哲靖  
K.Y.Watanabe, M. Okamoto, Y.Shibata, N. Ohno

核融合研、石川高専、岐阜高専、名大工  
NIFS, NIT/Ishikawa collage, NIT/Gifu collage, Nagoya Univ.

### 1) はじめに

HYBTOK-II装置は、名古屋大学・大学院工学研究科・電気系研究室である大野研究室が所有する小型トカマク実験装置で1988年ごろに完成し、当初、EML(Ergodic Magnetic Limiter)の研究に精力的に利用された[1]。ジュール加熱のみの運転で典型的な放電の中心電子温度が100eV以下、電子密度が $10^{19}\text{m}^{-3}$ 以下であることから、各種挿入プローブによる温度、密度、磁場等の直接計測が可能と言う特徴を備えている。2001年以降、ジュールコイル用電源、垂直磁場用コイル電源、トロイダル磁場用コイル電源にIGBT素子を用いたインバータ電源に換装を行い、再現性の高い比較的長時間(10ms以上)の放電が可能となっている。その後、モード純度を向上させた回転外部摂動磁場印加用コイルの設置、回転摂動磁場コイル用電源の追加、ディスラプション研究のためのジュールコイル電源システムの改造、各種挿入プローブ計測器(磁気プローブ、マッハプローブ、トリプルプローブ)の追加・改良を経て、外部RMP((Resonance Magnetic Perturbation/共鳴性摂動磁場)の浸透・遮蔽特性研究、外部RMPと不安定性の相互作用の研究、3次元コイルを用いた垂直位置不安定性抑制の予備実験、オーミックトカマクの流速特性研究、MHDスペクトロスコピイ等に関する研究や真空容器挿入型の2次元磁気プローブアレイやトリプルプローブアレイ、マッハプローブアレイ等の新規開発計測器の性能評価等に利用されている。本稿のHYBTOK-IIの装置仕様については、参考文献[2, 3, 4]を参照した。

### 2) 実験室の環境、インフラ

3面を部屋内を仕切るコンクリート壁、1面を建物の壁で囲われた一角にHYBTOK本体が設置されている。HYBTOK放電制御盤、制御計算機、計測データ収集計算機、タイミング生成器、波形

生成器、ADC等は本体設置場所と独立した観測室に設置しており、電源盤は本体設置場所と同じ部屋ではあるが、コンクリート壁の外に設置してある。原則、運転にあたって水冷を必要とする機器は無い。

### 3) 装置の構造、メンテナンス等について

HYBTOK-IIの主要装置パラメータを表1に示す。本装置の大半径は40 cm、小半径は12.8 cmの真空容器からなり、トロイダルセクションの#1と#10の2箇所にはリミタ(リミタ半径11 cm, #1、10共に材料としてモリブデンを使用)を有する(図1参照)。真空容器は、厚さ2 mm、SUS304製でトロイダル方向に2分割され、デルリンスペーサーにより絶縁されている。また、HYBTOK-IIは鉄心(図2の黄色の鉄骨部)を有している。

計測・作業用のポートは側面に大小合わせて12個(真空排気用を含む)、上下に38個あり、大きなものは直径が15cm程度あるので、新たな機器や計測器の取付等は基本的に、真空容器をトロイダル方向に分割することなしに、ポートを介して作業が可能である。

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| 真空容器大半径 $R_0$                  | 0.40 m  |
| 小半径(円形断面) $a$                  | 0.128 m |
| 厚さ(SUS304)                     | 2 mm    |
| リミタ(Mo)半径 $a$                  | 0.11 m  |
| プラズマ電流 $I_p$                   | < 15 kA |
| トロイダル磁場 $B_t$                  | < 0.5 T |
| トロイダルコイル                       | 16個     |
| $B_t, B_v$ , オーミック用IGBTインバータ電源 |         |
| 鉄心あり                           |         |
| 放電間隔                           | 3 min   |

表1 HYBTOK-IIの主要装置パラメータ

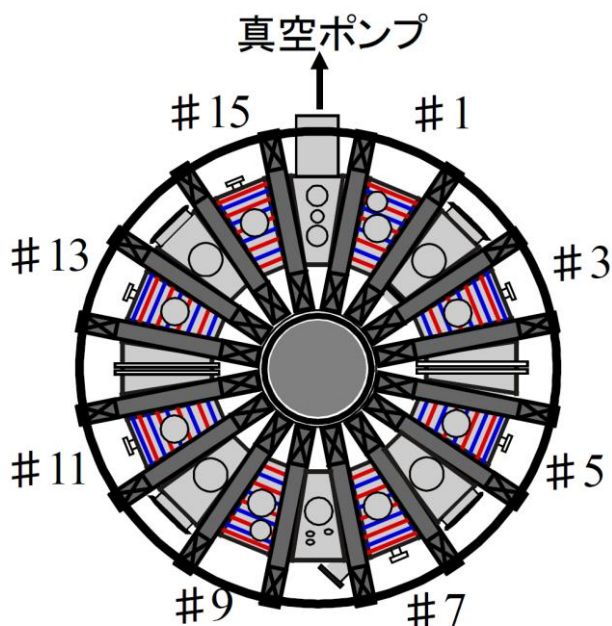


図1 HYBTOK-II 全体の上面図。円周状の灰色の帯部が真空容器。真空容器上部の○と側面のでっぱり形状はポート。#1~15はトロイダルセクション番号。⊗はトロイダル磁場コイル断面。青・赤実線は共鳴振動磁場生成用コイル。

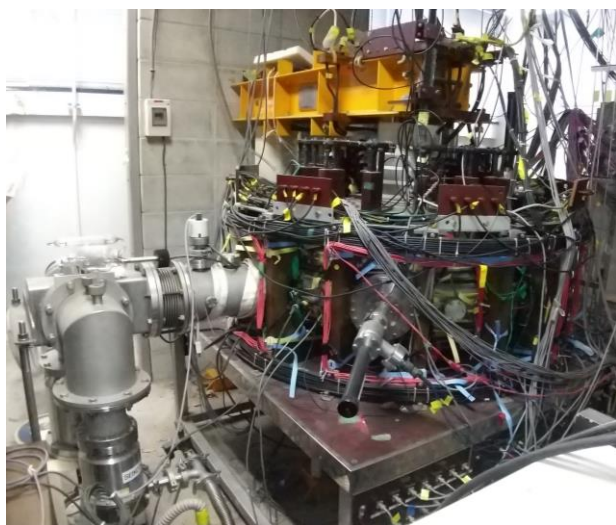


図2 HYBTOK-II の全体写真。上部の黄色部が鉄心。左部の配管は真空排気用の配管。

#### 4) 磁場コイル、およびその電源

##### 4)-1 磁場コイル

図3に設置された磁場コイルの種類と設置位置を示す。トロイダル磁場はトロイダル磁場コイル16個により作られ(図1参照)、最大磁場強度は約0.5 Tである。プラズマ電流は鉄心を介した変圧器の原理を用いて、1次側のジュールコイルに電流を流すことで、2次側であるプラズマに電流を流すことができ、最大プラズマ電流は±15 kAに

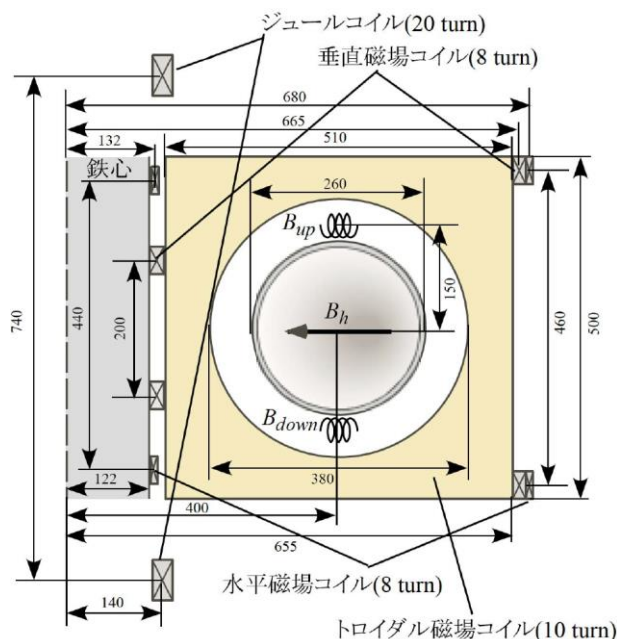


図3 HYBTOK-II 構成コイルの名称、大きさ、配置及びターン数。

達する。位置制御を行う垂直磁場コイル、水平磁場コイルは4つの円環コイルからなり、巻き数はともに8ターンである。

##### 4)-2 コイル電源

HYBTOK-II では、ジュールコイル電源、垂直磁場コイル電源、トロイダル磁場コイル電源に IGBT 素子を用いたインバータ電源(愛知電機製特注品)を用いている。垂直磁場コイル用電源の回路図を IGBT インバータ電源の例として図4に示す。また、各 IGBT インバータ電源の仕様を表2に示す。

ジュールコイル、垂直磁場コイル電源ともに耐電圧・許容電流が 1200 V, 300 A の IGBT 素子を用いており、インバータユニットをそれぞれ3並列、4並列で用いることで±750 A、±1000Aの電流出力が可能となっている。各インバータユニットの出力電流を DC Current Transformer (DCCT) によりフィードバックしている。比例・積分 (PI : Proportional Integral) 制御コントローラでは、出力電流指令値とフィードバック信号を比較し、電流偏差に比例した信号と、偏差の積分量に比例した信号の和を出力する。PI コントローラの出力は 40 kHz で PWM (Pulse Width Modulation) 変調されて電圧が出力される。このようにして、出力電流が指令値と同じになるように制御されており、高い制御性を有している。

トロイダル磁場電源は耐電圧・許容電流が 1700 V, 2400 A の IGBT 素子を用いており、インバータユニットを2並列で用いることで最大+6 kAの電流出力が可能となっている。トロイダル磁場の



|        | ジュール電源                                 | 垂直磁場電源                                 | トロイダル磁場電源                               |
|--------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 定格     | 26 ms 通電3分休止                           | 26 ms 通電3分休止                           | 25ms 通電2分休止                             |
| 定格出力電圧 | ±550 V                                 | ±300 V                                 | +400 V                                  |
| 定格出力電流 | ±750 A                                 | ±1000 A                                | +6000 A                                 |
| 定格負荷   | 0.22 Ω, 1 mH                           | 0.105 Ω, 680 μH                        | 0.066 Ω, 2.2 mH                         |
| 制御方式   | 出力電流瞬時値制御                              | 出力電流瞬時値制御                              | 出力電流瞬時値制御                               |
| 電力変換方式 | 自励式電圧型<br>フルブリッジ<br>PWMインバータ           | 自励式電圧型<br>フルブリッジ<br>PWMインバータ           | 自励式電圧型<br>ハーフブリッジ<br>PWMインバータ           |
| 使用素子   | IGBT (1200V, 300A)、<br>1 φ<br>インバータ3並列 | IGBT (1200V, 300A)、<br>1 φ<br>インバータ4並列 | IGBT (1700V, 2400A)、<br>3 φ<br>インバータ2並列 |
| 電源入力   | 単相AC200 V                              | 単相AC200 V                              | 三相AC200 V                               |

表 2 ジュールコイル用、垂直磁場コイル用、トロイダル磁場コイル用電源の主要使用パラメータ。

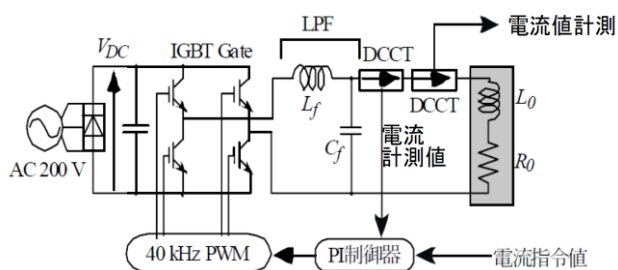


図 4 IGBT インバータコイル電源回路図。

運転は、フラットトップの時間間隔とコイル電流値をトロイダル磁場コイル用電源盤内にある設定器で設定することによりトロイダル磁場波形のフラットトップがこれらの設定値になるように IGBT 素子が動作する。トロイダル電源のコンデンサには待機時に 800 V まで充電され、運転指令のパルス信号が入力されると 300 V だけ放電される（設定電流値を 6 kA、通電時間を 20 ms に設定したとき）。この場合、次の通電までに必要な充電時間は 2 分である。パルス信号が入力されると IGBT 素子は 2.2 kHz のスイッチング周波数で設定した電流値と通電時間になるように動作する。

トロイダル磁場波形にリップルが存在することが確認されており、このリップルの周波数は IGBT 素子のスイッチング周波数である。リップルの大きさは定格電流に対して ±0.5 % である。トロイダルコイル電流値を上げるほど、フラットトップに達するまでの時間が長くなるため、トカマク放電する場合にはトロイダルコイル電流値によって運転指令のパルス信号の入力時刻を調整する必要がある。

ジュールコイル用電源、垂直磁場コイル用電源における IGBT インバータ電源への入力波形は、制御用コンピュータ上の LabVIEW(National Instruments Co. Ltd.) によって生成され、WE7000 に装備した任意波形発生器（型名：

WE7121/10MHz ファンクションジェネレータモジュール）を介して、ジュールコイル用電源、垂直磁場コイル用電源へ送られる。LabVIEW では、ジュールコイル、垂直磁場コイルに流す電流値を、毎回の放電終了時に観測者が水平位置を確認し、その位置によって電流値を調節し、次の放電に臨むという、プレプログラム方式である。プレプログラム方式による位置制御だけでは、放電毎のプラズマ水平位置のばらつきを生じ、再現性の高い放電を実現することができない。そこで、放電の再現性を高めるための水平位置制御は高速フィードバック制御については、9)-2 節に記載する。

HYBTOK-II で生成されるプラズマはリミタ配位の円形断面を持ち、垂直方向の時間的な位置変動は安定しているので、垂直位置制御のための水平磁場コイルには市販の直流安定化電源 PAK20-36A(菊水電子工業)を用いて一定直流（5～10 A）を流している。

#### 4)-3 回転摂動磁場生成用コイル、及び電源

HYBTOK-II は閉じ込め磁場生成用のコイル以外に回転する共鳴摂動磁場生成用のコイル(外部共鳴摂動磁場磁場用コイル)を有し、それは 2 組のヘリカルコイルにより構成される。この 2 組のコイルに位相差を持つ交流電流を流すことによって、回転する共鳴摂動磁場を生成する。主たる生成摂動磁場モード数は  $m/n=6/2, 6/1$  (ここで、 $m, n$  はそれぞれポロイダルモード数、トロイダルモード数)である。共鳴摂動磁場用コイルは導体による遮蔽を防ぐため真空容器内に設置することが望ましいが、HYBTOK-II では、内部への設置が容易ではないため真空容器の外部に設置されている。また、その設置の空間構造であるが、HYBTOK-II の真空容器は 16 個のセクションから構成されており、その内の一つ置ききの 8 セクションにポロイダル断面に対称性よく 2 組(A, B)のコイル(フジクラ電線社製、型名: WL-1D、耐圧 600 V、導体部断面積 8 mm<sup>2</sup>、ケーブル外径 6 mm)が巻かれている。その概略を図 5 に示す。トロイダル方向に局所的な配置をしていることから局所ヘリカルコイル(Local Helical Coil: LHC)と呼んでいる。LHC は図 5 に示すような構造をしており、電流の向きを各セクション間で定められたポロイダル角になるように設置することにより、より良いトロイダルモード数を得るようにしている。表 3 に、摂動磁場発生コイル用電源の仕様を示す。このインバータ電源では耐圧・耐電流が 1200 V-400 A の IGBT 素子(三菱電機、型式: CM400HA-24H)を用いている。

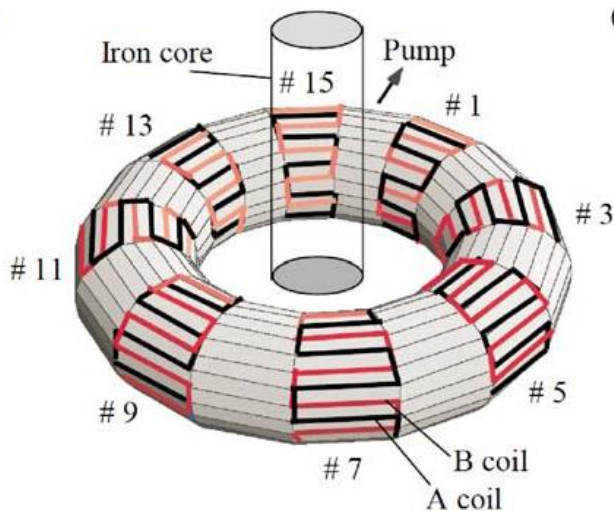


図 5 共振振動磁場用コイル配置図。赤と黒の実線がコイル配値で、独立で通電可能。

|          |                          |
|----------|--------------------------|
| 定格電圧     | 600 V                    |
| 定格電流     | 150 A                    |
| 定格出力周波数  | 10 kHz                   |
| 定格負荷     | 40 $\mu$ H, 0.5 $\Omega$ |
| 周波数設定範囲  | 1-30 kHz (分解能 1 kHz)     |
| 通電時間設定範囲 | 1-10 ms                  |

表 3 回転振動磁場コイル用電源の主要使用パラメータ。

本コイル電源は、 $m/n=6/2, 6/1$  の振動磁場発生コイルだけでなく、簡易的に取り付けた低次の振動磁場コイルや真空容器内に取り付けた MHD スペクトロスコーピ用アンテナにも給電可能である。

#### 4)-4 ディスラプション研究のためのジュールコイル電源システム

HYBTOK-II において、プラズマ電流を増加させる低  $q$  ディスラプション実験を行う場合、ジュールコイル用電源に IGBT インバータ電源を使用した場合、電流値の瞬時制御によりディスラプション発生時に電源が応答してしまい、プラズマ電流の単調減少が抑制されてしまう。この現象を回避して、低  $q$  ディスラプション実験を行うために、外部ストップ信号により、放電中の任意の時刻でインバータ電源によるジュールコイルへの電流供給を遮断し、サイリスタスイッチによりコンデンサバンク放電に転流させるように電源を改造してある。改造後のジュールコイル用 IGBT インバータ電源の電力供給システム模式図を図 6 に示す。破線で囲んだ箇所が改造をおこなった点である。インバータ電源に対し並列に

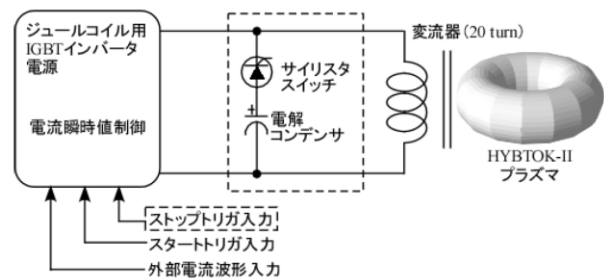


図 6 改造ジュールコイル用電源の模式図。IGBT インバータ電源から電解コンデンサ電源への給電源移行システムを追加。

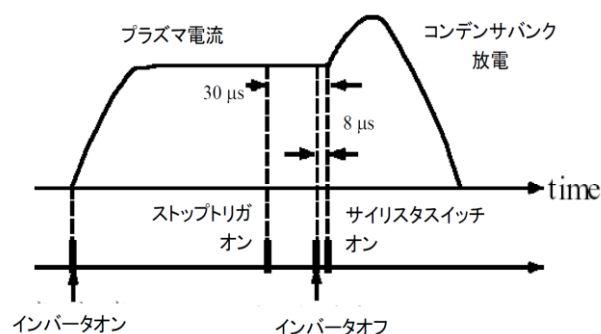


図 7 改造ジュールコイル用電源による IGBT インバータ電源から電解コンデンサ電源への給電源移行システムを使った電流値波形例。

挿入されたサイリスタスイッチは、三菱電機製 TM400PZ-2H である(規格は平均オン電流 400 A、ピーク繰り返し逆電圧は 1600 V、ピーク繰り返しオフ電圧は 1600 V)。ジュールコイルに流れる電流はプラズマ生成時、最大で 300 A であることから、平均オン電流と比較しても安全面の問題はないことを確認している。また同様に設置された電解コンデンサは耐電圧が 450 V、容量が 18 mF を使用し、電源ユニットに新たに装備されたスライダックにより電圧調整をおこなう。

コンデンサバンク放電への転流に伴い変化するプラズマ電流波形の模式図を、トリガタイミングのシーケンスに併せて図 7 に示す。コンデンサバンクからの給電に切り替え後は、充電電圧によってプラズマ電流波形が変わるので、垂直磁場コイル電流の指令波形を変えて、プラズマの水平位置調整をする必要がある。

#### 5) 真空排気装置、壁調整方法

排気系は 2 台のターボ分子ポンプ (セイコー精機製, 型名 STP-301C, 公称排気速度 300 liter/s、大阪真空社製, 型名 TH520, 公称排気速度 520 liter/s) を用いて真空容器内を排気しており、到達真空度は  $10^{-7}$  Torr 程度になる。真空容器にはベーキング用リボン線が巻かれており、大気開放

後は、これを用いつつ、トカマク放電を繰り返すことにより、真空容器内のコンディショニングを行っている。

#### 6) 使用する粒子種（ガス種）、粒子供給方法

燃料ガス供給システムは、同じ実験室で使われている大野研究室の他のプラズマ実験装置と共用で、 $H_2$ ,  $D_2$ , Ar, He,  $N_2$ , Ne が現在利用可能である。燃料ガスシステムから供給されたガスは一旦HYBTOK-II 専用のガス貯めに貯蔵し、そこから放電毎に真空容器にガスが供給される。現在、通常の放電は、 $H_2$  ガスで行っている。

#### 7) 加熱・電流駆動装置

現在利用できるプラズマ加熱源は、ジュール加熱のみである。

#### 8) 運転に必要な計測器（磁気計測など）

運転に必要な計測器は、以下の通りである。磁気プローブアレイ(ポロイダル磁場計測用/プラズマ水平・垂直位置測定用)、ロゴスキーコイル(プラズマ電流値計測用、トロイダル磁場コイル電流値計測用)、周回磁束ループ(周回電圧計測用)。他に運転に必要な計測値は、ジュールコイル電源電圧値、ジュールコイル電源電流値、垂直磁場電源電圧値、垂直磁場電源電流値であるが、以上はそれぞれの電源盤からの出力を制御計算機に転送している。

#### 9) トカマクプラズマの立ち上げ、制御

##### 9)-1 トカマクプラズマの立ち上げ

トラス2か所(#9、#16セクションの下側)にトリア入りタングステン製のフィラメントが設置されており、プラズマ放電時には2つのフィラメントに通電し、プラズマ着火を促進している。ただし、フィラメント1個運転では、壁の条件がかなり良くないと着火が難しい。

##### 9)-2放電制御について

放電時の各機器の運転タイミングにはオプトサイエンス社製の8chディレイタイムパルサー(model:9618)を使用している。ディレイタイムパルサーへの入力トリガタイミングを0 ms とすると、各タイミングのディレイ時間を図8に示す。ディレイタイムパルサーは、HYBTOK放電制御盤からの制御信号によりスタートする。

##### # プラズマ電流制御;

前もって設定した一次側ジュールコイルの電流値波形をファンクションジェネレータ(横川

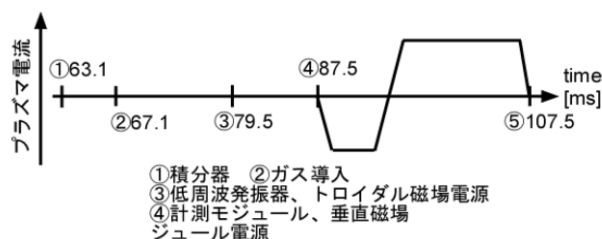


図 8 HYBTOK 各機器の運転タイミングチャート例。

電機製WE7121)を介して、ジュールコイル電源に指令値として入力する。電流値波形はLabViewで作成する。鉄心磁束変化のヒステリシス特性を考慮して鉄心の飽和(100Vms)をできるだけ回避し、放電時間を延ばすため、典型的には交流的なプラズマ電流波形を採用している。このため、極性反転後のプラズマ電流駆動時に10kAで10ms程度の放電時間が可能となっている。

##### # プラズマの水平位置制御;

典型的には、前もって設定した垂直磁場コイルの電流値波形をファンクションジェネレータ(横川電機製WE7121)を介して、ジュールコイル電源に指令値として入力する。電流値波形はLabViewで作成する。以前、DSPを使った位置制御システムがあったが、現在、故障中である。最近、東工大の協力でマイコン(Arduino Due)を使ったシステムを導入し、現在、試験的運用しているが、時間応答が十分でない場合もあり、改良が必要と考えている。

##### # 垂直位置制御;

固定電流値を行っている。制御電流値は磁気軸の垂直位置を確認し、手動で電流値を設定する。

##### # プラズマ形状制御;

ポロイダルコイル系の制約で形状制御は行えない(実際のポロイダルコイル位置を考慮したMHD平衡計算結果によるとプラズマ最外殻の断面形状はほぼ真円)。

##### # 密度制御;

ガスはピエゾバルブによって導入され、運転時に $10^{-4}$ Torr程度になる。ピエゾバルブの開閉度、開閉時間については自作のファンクションジェネレータに手動で設定する。

#### 10) 実験条件の設定、データ収集、データ管理、実験日誌など

##### 10)-1 実験条件の設定

トロイダル磁場コイル電流波形、シーケンス間隔、ジュールコイル・垂直磁場コイル電流波



形を入力する。放電前にピエゾバルブ開閉度を設定し、トリガー(計測、ガスパフ)設定を行う。

#### 8)-2 データ収集システム

ADCとして、運転制御用計測データ収集用に100kHz、4ch入力のWE7272モジュール(横河電機製)を8セット、各種プローブ計測データ収集用に、1MHz、2ch入力のWE7275モジュール(横河電機製)を8セット、1MHz、2chのADC入力モジュールを8ボード備えたDL750(横河電機製デジタルオシロ)、1MHz、4chのNR-HV04モジュール(キーエンス製データロガー)を6セット利用している。WE7272、WE7275とPCとのインターフェース用にWE7000(横河電機)を2台、NR-HV04とPCとのインターフェース用にNR500(キーエンス)を1台運用している。

#### 10)-3 データ管理

WE7272、WE7275で収集したデータは、ショット毎にWE7000からLAN経由で制御計算機やデータ収集計算機(共にOSは、WindowsXP)に転送し、“¥実験担当者¥年月日/モジュールリンク名¥その日のショット通番”で、時刻付き、アスキーデータのcsv形式で保存している。デジタルオシロDL750で計測した計測データは、ショット毎に手動で内蔵HDDにデータ保存し、実験の区切りが付き次第、LAN接続で個別PCにデータを保存している。その際の手書きは、時刻付き、アスキーデータのcsv形式となっている。NR-HV04で計測した計測データは、NR-500経由で、専用PCにショット毎に時刻付き、アスキーデータのcsv形式で保存している。

#### 10)-4 実験日誌など

基本紙ベースで備忘録程度(実験の概要、放電の状態、放電数等)の事項を実験記録簿に記載。実験担当者によっては、excel等で実験条件等を細かく管理している場合もある。

#### 11) 基本的な解析ツール(プラズマ位置形状解析など)

解析プログラムは、PV-WAVE、Matlab、Pythonを利用して作成している。プラズマ水平・垂直位置評価(プラズマ半径評価、挿入プローブの小半径位置評価)、プラズマ境界・プラズマ中心のq値評価(中心は電流分布推定時)、電子温度、電子密度をプローブ計測値から評価している。プラズマ流速評価、磁場揺動強度FFT、クロスコリレーション評価等に適用している。

#### 12) 安全対策、安全教育関係

# 核融合研、名大主催の放射線取り扱い講習会に参加し、ルクセルバッジで被ばく量を監視している。

# トロイダル電源は、コンデンサ電圧が200V以下になってからブレーカ断を行っている。

# トリプルプローブやマッハプローブの電源配線; 回路と電源の配線が終わってから、電源コンセントを繋ぐ。

# RMP電源の極性切り替えもブレーカは切らずに、電源を停止状態にしてから配線の切り替えを行っている。

# 大気開放後の作業は、大気圧を確認して実行する。

#### 参考文献

[1] S. Takamura, Phys. Fluids B2 (1990) 1947.

[2] 菊池祐介、名古屋大工学研究科、博士論文「トカマクプラズマ中への回転ヘリカル摂動磁場の浸透・伝播過程に関する基礎研究」(2004).

[3] 岡本征晃、名古屋大学工学研究科、博士論文「トカマクデスラプションにおけるプラズマ内部構造ダイナミックスの観測および電流減衰時間の評価委に関する研究」(2008)

[4] 金沢由樹、名古屋大学工学研究科、修士論文「トカマクデスラプションへの外部共鳴摂動磁場印加の影響」(2011).

# LATE装置の概要

## Overview of Low Aspect ratio Torus Experiment (LATE) Device

打田正樹、田中仁、前川孝、LATEグループ

京都大学大学院エネルギー科学研究科

### 1. はじめに

京都大学のLATE (Low Aspect ratio Torus Experiment) 装置は、電子サイクロトロン (EC) 周波数帯のマイクロ波電力のみで球状トカマクプラズマの形成・維持を行うことを目的として、1999年に実験を開始した小型装置である[1, 2]。

この目的のため、中心ソレノイドコイルは持たず、主要な加熱機器として 2.45GHz および 5GHz のマイクロ波を使用する。この際、入射電磁波より変換された電子バーンスタイン (EB) 波を用いることで、プラズマ遮断密度を超えた球状トカマクプラズマの生成・維持を行う。

2021 年、LATE を設置している本体建物の改修工事のため一旦分解され倉庫保存となった後、2022 年春より再組立を行っている。本稿では、LATE 装置の主要構成機器や実験手順、主な計測・解析について述べる。

### 2. 実験室の環境、インフラ

LATE 装置は京都大学北部構内の先端エネルギー科学実験棟内にあり、1 階に本体および主要機器、地下 2 階に純水冷却装置および一部のマイクロ波用電源が設置されている。運転は 2 階の制御室より行う。1 階の本体室には道路に面した大扉があり、大型機器の搬入に使用する。また、天井クレーン (2.8t) が設置されており、LATE 装置本体の組立、電源等の大型機器設置等に使用するほか、通常の大気開放の際にも重量のあるフランジの取付け・取外し等に使用する。

### 3. 装置の構造

図 1 に LATE 装置の概要を示す。真空容器は内径 1 m、高さ 1 m、厚さ 8 mm のステンレス製円筒型容器であり、円筒中央に外径 114 mm、厚さ 7 mm の中心柱が通っている。中心ソレノイドコイルは無く、中心柱の中にはトロイダル磁場コイルのみが収まっている。上面および下面フランジは 28 mm 厚の円形フランジである。真空容器で決まるプラズマ生成領域は約  $0.8 \text{ m}^3$  で

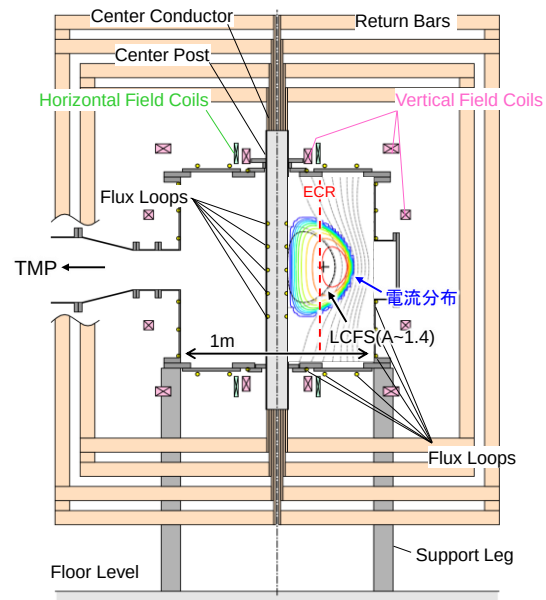


図 1. LATE 装置の概要図 (側面図)

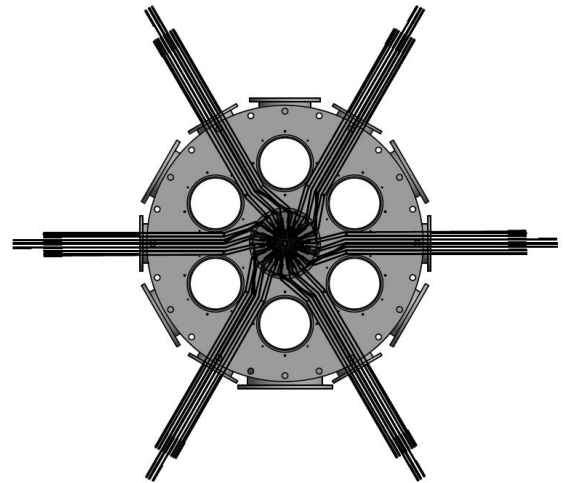


図 2. LATE 装置上面図

ある。

真空容器は 2001 年、2022 年に観測ポートの増設を行い、現在では上面フランジ及び下面フランジに各 15 個 (内径 215 mm×6、内径 64 mm×6 個、内径 39 mm×3)、側面に 60 個 (内径 310 mm×1、内径 210 mm×5、内径 159 mm×6、

内径 64 mm×40、内径 39 mm×8) の観測ポートが設けられている。最大のポート径は 310mm であり、大気開放時に人が容器内に入ることは基本的には出来ない。

真空容器内の上部・下部・赤道面外側には Mo 板を設置し、EC 加熱で生成された高速電子の真空容器壁への流入による局所的な温度上昇を緩和している。上部および外側は観測ポートより可動式 Mo 板 (上部は厚さ 10 mm、外側は 20 mm) を挿入し、下部には厚さ 10 mm の Mo 板を下フランジの上に置いている。それぞれの Mo 板はステンレス薄膜 (0.5 mm 厚) を介した水冷により真空外より冷却する。

トロイダルコイルは中心柱内に設置した 60 本の直線導体とそれらを直列に繋ぐためのリターンバーよりなる。直線導体は外径 10 mm、厚さ 2 mm の中空導体であり、中空部を水冷して用いる。この直線導体 60 本を中心柱内に配置し、エポキシ含浸により固定している。リターンバーは幅 75 mm、厚さ 3 mm の銅製であり、自然空冷で用いる。リターンバーは高さ方向に 4 段に分けて直線導体との接続スペースを確保し、トロイダル方向には 6 方向にまとめてリターンすることでポートへのアクセス性を確保している (図 2 参照)。6 方向にまとめることによりトロイダル磁場リップルが発生するが、リターン部を真空容器から離すことでリップルは  $R = 0.5 \text{ m}$  (真空容器壁) においても最大 1.5% 程度である。6 方向に分けたリターンバーは絶縁板を挟んだ上で全体をボルト固定し一体化し、6 方向に設置した支柱に固定している。

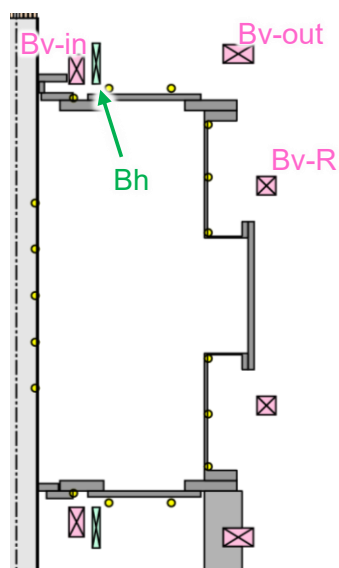


図 3. ポロイダルコイル配置図

トロイダルコイルへの室温 ( $\sim 25$  度) での通電試験では、中心導体に 1 L/min の純水を流した上で 1kA の電流を 380 秒間流した際、最大温度上昇は中心導体部で 13 度であった。

ポロイダルコイルは垂直磁場コイル 3 対および水平磁場コイル 1 対が設置されている。垂直磁場コイルは内側より順に Bv-in、Bv-out、Bv-r の 3 種類 (図 3 参照) が設置されており、すべて 20 ターンの自然空冷式コイルである。コイルが作る磁場のディケイ指数は容器中心の  $R = 0.25 \text{ m}$  においてそれぞれ 0.83、0.24、0.007 である。100 A 通電時の磁場は  $R = 0.25 \text{ m}$  においてそれぞれ 0.17 mT、1.13 mT、2.89 mT である。EC によるプラズマ立ち上げに際しては垂直磁場のディケイ指数の設定が重要であり、これらのコイルを組み合わせることで最適な磁場配位を形成する。これらの垂直磁場コイルに加えて、プラズマの垂直位置制御のために水平磁場コイル (Bh) を設置している。22 sq の KIV 線を手巻きで 21 ターンしたもので、自然空冷で使用している。

#### 4. 磁場コイル電源

トロイダル磁場コイル電源として、1kA、120V の定常電源と、3kA、330V、0.1 秒のパルス電源の 2 種類を保有している。定常電源は 500A、120V の電源 2 台より構成されており、直列運転の場合は 500A、240V、並列運転では 1kA、120V の出力が可能である。パルス電源は全容量 10F の電解コンデンサ (350V、33mF) バンクとトランジスタスタックを用いた電源であり、LCR 放電波形の途中よりトランジスタにより定電流制御を行うものである。定電流となるフラットトップ時間は出力電流に依存し、3.0 kA 出力の場合は約 0.1 秒、1.5 kA 出力では約 0.4 秒のフラットトップ時間となる。3 kA 通電時 (180 kA turn) には、5 GHz マイクロ波に対する基本共鳴層が  $R = 20.2 \text{ cm}$ 、1.5 kA 通電時 (90 kA turn) には、2.45 GHz マイクロ波に対する基本共鳴層が  $R = 20.6 \text{ cm}$  となり、どちらの場合も容器中央に基本共鳴層を設定可能である。

ポロイダル磁場コイル電源は、Bv-in 用に 35 V、400 A (35 V、200 A を 2 台並列) の定常電源、Bv-out 用に 16 V、300 A (16 V、100 A を 3 台並列) の定常電源、Bv-r 用に 60 V、800 A、2 s のパルス電源を用いている。Bh 用には、20 V、60 A の定常バイポーラ電源を用いる。垂直磁場コイ

ルの通電電流波形は電源の外部電圧制御により行い、任意波形発生器を用いてプリプログラムにより設定する。水平磁場コイルについては、赤道面上下のフラックスループ計測で得た信号を用いてフィードバック制御により通電し、プラズマの上下位置安定化を行っている。

トロイダル磁場、ポロイダル磁場コイル電源はすべてリニアレギュレータ方式のものを用いており、ノイズ発生が懸念されるスイッチング式電源は使用していない。

## 5. 真空排気装置と壁調整方法

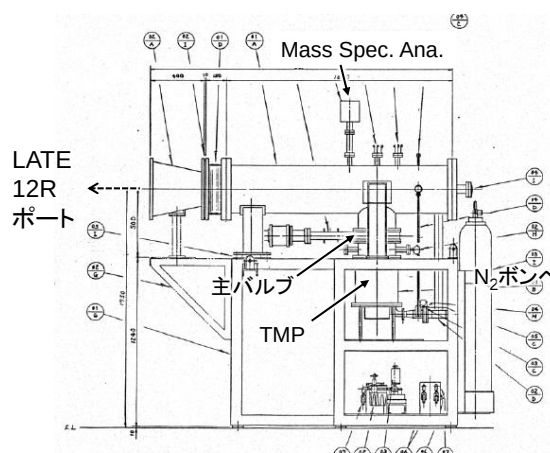


図 4. 真空排気装置

真空排気部の概要を図4に示す。真空排気は主ポンプにターボ分子ポンプ (1800 L/s) を使い、後段に補助ポンプとしてメカニカルブースターポンプ (1833 L/min)、およびロータリーポンプ (367 L/min) を用いている。これらの排気装置系を LATE の赤道面ポート (内径 210 mm) に接続して使用している。到達真空度は約  $1 \times 10^{-5}$  Pa である。

本体のベーキングは真空容器に取り付けられたヒータにより常時 50 度前後に保っている。O リングを用いた装置であり、高温ベーキングは行っていない。

壁調整法は、通常放電と同じ  $H_2$  ガスを用いたプラズマ放電を行うことにより壁洗浄を行う。放電洗浄の際には定常のトロイダル磁場コイル電源 (< 1 kA) を用いた 2~5 秒程度の放電を行い、ショットを重ねながら徐々にプラズマ電流を上げていくように放電を行う。EC によるプラズマ立ち上げにおいては、プラズマ電流の上昇とともに高速電子のエネルギー帯が上がり、これらが損失する場所も変化する。定常

垂直磁場での電流ジャンプによる磁気面形成 [3] 後、垂直磁場およびマイクロ波電力を上昇させながらプラズマ電流をランプアップ [4] させるが、プラズマ電流値が新たな値に上昇する度に、放電中の電離真空計信号に真空容器壁からのガス放出と思われる真空度の上昇がみられる。放電洗浄においては、このようなガス放出が観測されなくなるまで放電を行う。

## 6. 粒子供給装置、加熱・電流駆動装置

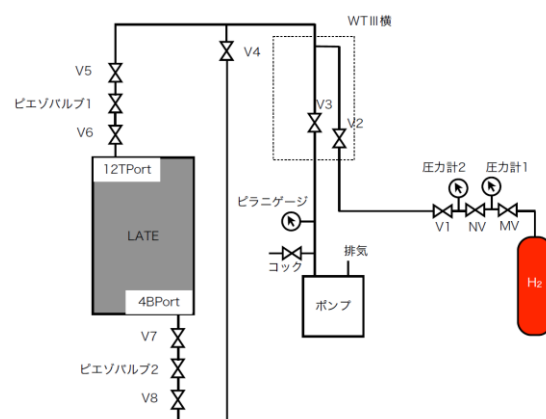


図 5. 水素ガス導入装置

放電は主に  $H_2$  ガスを用いており、ガスボンベから減圧弁、ステンレス配管を通してピエゾバルブを用いたガスパフにより真空装置内へ供給している (図5参照)。ピエゾバルブの制御は任意波形発生器の出力を増幅してピエゾバルブに印可しており、主に矩形パルスの幅と周期で供給量を調節している。複数台の任意波形発生器を用いて放電中のガスパフ量を制御している。

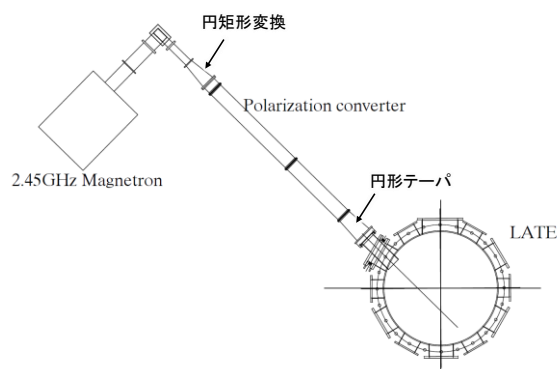


図 6. 2.45 GHz マイクロ波入射系

加熱・電流駆動装置には、すでに述べたように 2.45 GHz および 5 GHz のマイクロ波装置の



みを用いており、これらの電力でプラズマの発生、プラズマ電流生成、トカマクプラズマ形成・維持までをすべて行う。

図 6 に 2.45 GHz マイクロ波入射系の概要図を示す。発振管に 20 kW、CW マグネトロンを用いたマイクロ波装置であり、最大 2 s の出力が可能な装置である。マグネトロンからの電力は  $TE_{10}$  モード矩形導波管で伝送した後、LATE 本体の直前で円形矩形変換器を通して円形  $TE_{11}$  モードに変換し、任意偏波発生器により偏波を設定して[5]、円形テーパ管で入射ランチャー径 134.2 mm に適合させて赤道面外側からセラミック窓を通して入射される。入射ランチャーとしては、終端されていない円形導波管そのまゝを用いている。セラミック窓を含めた入射ランチャーはベローズを用いて角度調節が可能であり、入射偏波および入射角を調整することにより電子バーンスタイン波への結合率を最適化する[6]。同様のシステムが合計 4 台あり、4 つのポートよりそれぞれ入射することで合計 80 kW、2 s の 2.45 GHz マイクロ波電力の入射が可能である。マイクロ波電力は外部制御により出力の連続変化が可能であり（立上り  $\sim 2 \mu s$ 、立下り  $\sim 20 \mu s$ ）、任意波形発生器により制御する。

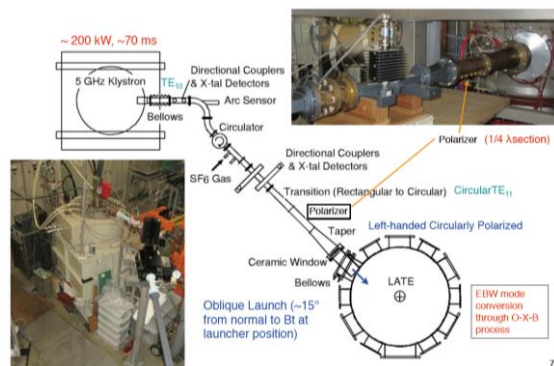


図 7. 5 GHz マイクロ波入射系

図 7 に 5 GHz マイクロ波入射系の概要図を示す。こちらは発振管にクライストロンを用いた装置であり、最大 200 kW、0.1 s の入射が可能である。クライストロンには、日本原子力研究所（現量子科学技術研究開発機構）より借用したパルスクライストロンを用い、当初設計よりもビーム電圧およびビーム電流を下げ、パルス幅を長くして使用している。発振器からの電力は  $TE_{10}$  モード矩形導波管で伝送した後、円形矩形変換器により円形  $TE_{11}$  モードに変換し、偏波器により左回り円偏波に変換した後、入射ラ

ンチャーより入射される。ランチャーは 2.45 GHz の場合と同様に、終端されていない円形導波管そのまゝを用いている。

どちらの立体回路も、ネットワークアナライザにより測定した特性をもとに必要なに応じて導波管回路内にオリフィス板を挿入して反射率を数%以下に調整している。

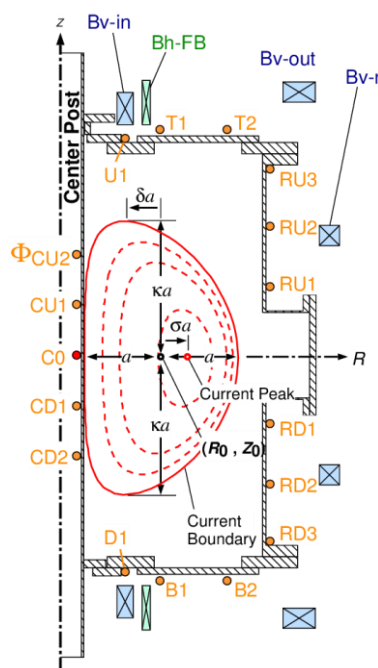


図 8. フラックスループ位置と電流分布モデル

## 7. 計測器

磁気計測として、LATE 装置では 17 本のフラックスループを図 8 のように設置している。中心柱内に 5 本（図中の CU2, CU1, C0, CD1, CD2）、容器外側壁に 6 本（RU1~3, RD1~3）、容器上面及び下面に 6 本（U1, T1, T2, D1, B1, B2）設置されている。フラックスループからの信号はアナログ積分器を用いて、放電開始直前に積分開始した積分信号を記録する。この他に、39 箇所磁気プローブを設置しており、磁気揺動の計測を行っている。

LATE 装置では、フラックスループにより計測した磁束分布より電流分布推定を行っている。LATE での EC 立ち上げにおいては、高速電子（ $\sim 100 \text{ keV}$ ）がほとんどの電流を担い、それらの軌道は磁気面から外側に大きくシフトした軌道となる。したがって、プラズマ電流が磁気面上を流れることを前提とした平衡解析や電流分布推定等を用いることができない。そ

ここでプラズマ電流を7つのパラメータ（図8の $R_0, Z_0, a, \kappa, \delta, \sigma$  および電流のピーク指数 $\alpha$ 、ピーク電流密度 $j_0$ ）を持つモデル分布関数を用いて磁束データを満たすように最小二乗フィッティングによりパラメータを決定して求めている[4]。さらに、求めた電流分布をもとに、非等方圧力分布モデルによる平衡解析を行っている（10. 解析ツールを参照）。

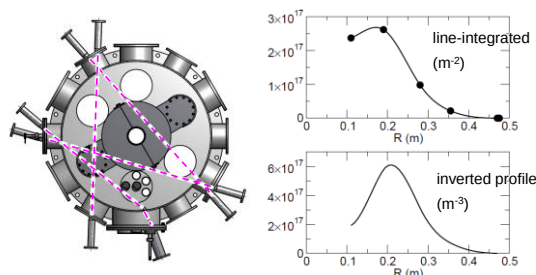


図9. 70 GHz ミリ波干渉計コードと赤道面密度分布の解析例

プラズマ密度の計測は70 GHz ミリ波を用いた干渉計により行っている。図9に示すように赤道面に4コード配置し、線積分密度信号を計測している。70 GHz ガン発振器を用いたホモダイン干渉計であるが、標準導波管部品を用いて $\sin$  及び  $\cosine$  成分を同時測定し位相検出を行っている[7]。4コードの視線積分信号および外側リミタにおいて密度ゼロの5つのデータをスプライン補完した後、アーベル変換をすることで赤道面上の電子密度分布を得ている。

X線計測として、垂直4コードのCdTe硬X線波高分析、AXUV検出器アレイを用いた4方向軟X線CT像再生（合計80ch）、赤道面上2アレイでの軟X線計測を行っている。赤道面AXUVでは極薄膜（Al 50 nm や Al 25nm とポリイミド 25nm の複合膜等）を用いた吸収法により電子温度の推定を行う。また、可視光高速CCDカメラによりプラズマ像の時間発展の計測や、可視分光器による不純物スペクトル計測を常時行っている。

## 8. プラズマの生成・制御

LATEでは、2.45 GHz および5 GHz マイクロ波電力のみでプラズマの生成およびプラズマ電流駆動を行い、球状トカマクプラズマを形成している。プラズマ立ち上げにおいて行う主な制御は、マイクロ波電力および偏波、平衡垂直磁場強度および形状、水素ガスパフ調整である。電子密度は主にマイクロ波電力やガスパフ、プ

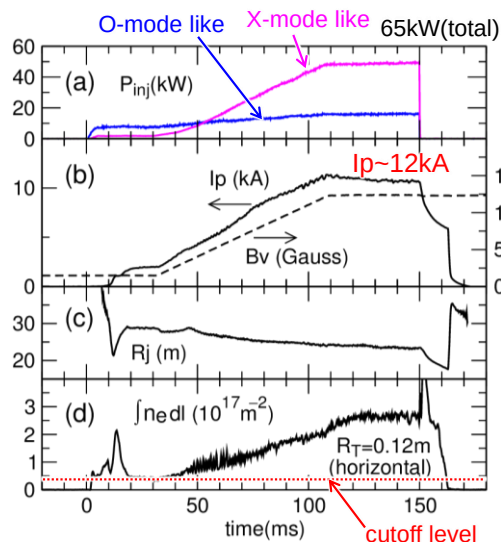


図10. 2.45 GHz マイクロ波による放電例

ラズマ電流は主にマイクロ波電力および平衡垂直磁場の制御により行うが、電子密度分布やマイクロ波入射偏波は電子バーンスタイン波へのモード変換に影響し、お互いに影響を及ぼしあうため、制御は容易ではない。

LATEでのトカマク形成は定常垂直磁場印可の下でのEC加熱による放電開始[8]、プラズマ電流生成と電流ジャンプによる磁気面形成[3]、プラズマ電流ランプアップ[4]の各段階を経て行われる。それぞれの段階において適切なマイクロ波電力および偏波、垂直磁場強度および形状、ガスパフの設定が必要であり、磁気計測、電子密度分布計測、可視光像、不純物スペクトル、X線計測の結果を参照しながらそれらの調整を行って、プラズマを立ち上げる。

図10は2.45 GHz マイクロ波を用いて12 kAのプラズマ電流を立ち上げた放電の例である。 $B_v \sim 20$  Gの定常垂直磁場の下でマイクロ波電力を入射すると放電が開始し、プラズマ電流が発生して電流ジャンプを経て $\sim 2$  kAのプラズマ電流となり磁気面が形成される。その後、平衡垂直磁場のランプアップとともにマイクロ波電力を増大させてプラズマ電流をランプアップし、最終的に12 kAのプラズマ電流を持つ球状トカマクが形成される。電子密度はプラズマ電流ランプの開始前後からオーバードレンスとなっており、最終段階ではプラズマ遮断密度の6~7倍に達しており、電子バーンスタイン波によるトカマク維持が行われている。電子密度の上昇によりマイクロ波遮断層付近の密度勾配



も上昇するため、電子バーンスタイン波へのモード変換のための最適な入射偏波も時間的に変化していくので、この放電では X モードに近い入射偏波での電力の割合を時間的に増大して放電を行っている。最終的に 65 kW の 2.45 GHz マイクロ波によりプラズマ電流 12 kA、中心の電子密度  $6 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$  (プラズマ遮断密度の 8 倍) のトカマクが形成されている。

## 9. 実験の遂行

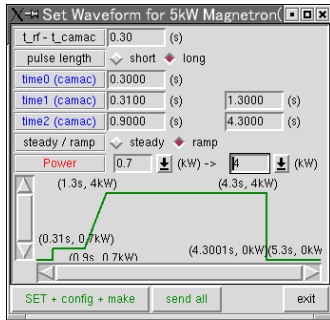


図 11. マイクロ波電力設定用 GUI

実験条件の設定 (マイクロ波電力、磁場強度・形状、ガスパフ波形) は主に PC より図 11 に示すような自作 GUI ソフトを用いて制御している。GUI ソフトにより制御波形の時間発展を決め、これにより任意波形発生器を制御して各種制御機器を外部制御する。各装置のトリガー設定はデジタルディレイパルサー (30ch) 等を用いて設定している。

データ収集は、複数のシステムを計測器に応じて使用している。CAMAC 規格でデータ転送にイーサネットを用いる CC/NET クレートコントローラと自作 AD コンバータ (12 bit, 1 MHz, 32 kwords, 計 400 ch、Elsys TraNET EPC (14 bit, 10 MHz, 32 Mwords, 32 ch)、National Instruments PXIe (16 bit, 1.25MSa/s, 128 ch) 等を用いている。放電ショット毎に自動でデータ収集を行うように自作プログラムや Labview による制御を行っている。その他に 24 時間データを収集する容器壁温度、真空度の記録には NI cDAQ を用いている。

データの保存は日付+ショット番号により階層化したサーバ上のフォルダに行き、1 日毎、1 月毎に簡単なスクリプトにより自動バックアップを行う。

実験日誌は主に手書きで行ったものを実験後に PDF 化して保存しているが、主な制御機器

の設定パラメータは、9. で述べた条件設定用 GUI ソフトによりショット毎に設定値を保存しており、記入漏れ等への対策を行っている。

## 10. 解析ツール

データの解析は、高級言語 (C、Fortran 等) とインタープリタ (Python, Perl 等) を組み合わせた自作プログラムを目的に合わせて作成して使用しており、特定の解析ソフト等は使用していない。

プラズマ電流位置・形状は 7. 計測器で述べたようにフラックスループによる磁束計測により求めている。磁束計測におけるノイズ対策を厳重に行い、この方法での推定磁束と計測磁束の平均二乗残差は 1% 未満である。これにより求めた電流分布をもとに  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \nabla \cdot \vec{\mathbf{P}}$  (ただし、 $\mathbf{j}$  は電流密度、 $\mathbf{B}$  は磁場、 $\vec{\mathbf{P}} = p_{\perp} \hat{\mathbf{I}} + (p_{\parallel} - p_{\perp}) \hat{\mathbf{b}} \hat{\mathbf{b}}$ 、 $\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{B}/|\mathbf{B}|$ ) を解くことで、平衡圧力分を求める。

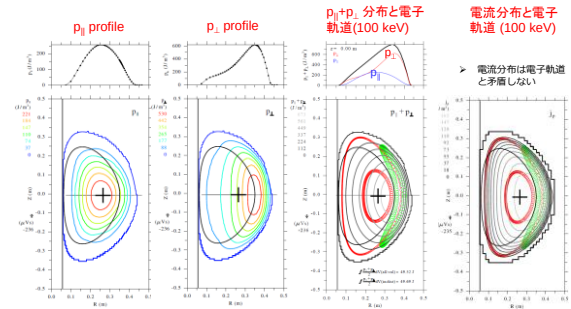


図 12. 平衡圧力分布解析例

図 12 に平衡圧力分布の解析例を示す。求められた圧力分布、電流分布と高速電子軌道を比較すると、3 者が互いに矛盾しない結果が得られており、総合的に解析結果の妥当性を確認している。

## 11. 安全対策

安全対策として、学生が機器を運転することも考慮して、高電力装置や危険な装置においてはインターロックや安全装置を必ずつけるようにしている。マイクロ波入射装置は、プラズマを見るフォトリランジスタの信号を用いてプラズマが消えた際には電力変調信号をゼロにし、入射電力をオフにしている。

また実験室内に人が居る状態で放電をしないように、監視カメラ 8 台で全ての箇所を確認できるようにしている他、実験室の入口扉の開閉モニタ、実験室へ入室する際は放電トリガーの遮断スイッチを入れる等、複数の安全対策を

組み合わせている。また、安全衛生管理基準に準拠するように室内を整備するよう心がけている。

新入生への安全教育は年 1 回の研究科による安全教育、学内講習会等があり、装置固有の安全講習として修士 1 年の際に運転に関する安全教育を研究室で行っている。

#### 参考文献

- [1] H. Taoka, H. Ammi, M. Asakawa, Y. Terumichi, M. Uchida, H. Tanaka, T. Maekawa, J. Plasma Fusion Res. **76**, 561 (2000).
- [2] H. Taoka, T. Yoshinaga, M. Uchida, T. Maekawa, J. Plasma Fusion Res. **82**, 526 (2006).
- [3] T. Yoshinaga, M. Uchida, H. Tanaka, T. Maekawa, Phys. Rev. Lett., **96**, 125005 (2006).
- [4] M. Uchida, T. Yoshinaga, H. Tanaka, T. Maekawa, Phys. Rev. Lett., **104**, 065001 (2010).
- [5] Y. Noguchi, M. Hibino, M. Uchida, H. Tanaka, T. Maekawa, Plasma Phys. Control Fusion, **55**, 125005 (2013).
- [6] H. Igami, T. H. Tanaka, T. Maekawa, Plasma Phys. Control Fusion, **48**, 573 (2006).
- [7] Y. Nozawa, M. Uchida, R. Kajita, H. Tanaka, T. Maekawa, Rev. Sci. Instrum. **92**, 083501 (2021)
- [8] K. Kuroda, M. Wada, M. Uchida, H. Tanaka, T. Maekawa, Plasma Phys. Control Fusion, **58**, 025013 (2016)

# 小型トカマク装置 PHiX

## Plasma with Helical fields Initiative eXperiments (PHiX)

筒井広明

Hiroaki TSUTSUI

東京工業大学 科学技術創成研究院  
Tokyo Institute of Technology

### 1 概要

装置外観写真を図 1, 装置諸元を表 1, 装置を上から見た模式図を図 2 に示す。PHiX は "Plasma with Helical Fields Initiative eXperiments" の略であり、分割型ヘリカルコイルによるヘリカル磁場を印加したトカマク実験を行うための装置である。PHiX は大半径 33 cm, 小半径 9 cm の小型装置ながら  $\kappa = 1.8$  という高い楕円度のトカマク放電ができるよう設計された装置である。トロイダル磁場コイルは 16 本のコイル, ジュール加熱用の鉄芯付き OH コイル, 位置形状制御のためのポロイダル磁場コイルは 6 本, また真空容器内に 2 本の高速制御用コイルがある。これらのコイルの電源は, トロイダル磁場コイルはフライホイール発電機, その他のコイルはコンデンサバンクと IGBT を用いたインバータ電源で駆動している。計測系は, 真空容器内に 14 本のフラックスループとセクション #12 に 12 ch の磁気プローブアレイ, セクション #2, #4, #6, #7, #10, #14, #16 にトロイダル方向の磁気プローブが一つずつ配置されている。そして, オペアンプを用いた時間積分を行い磁束値に変換し, 測定用のロガーや制御用の FPGA (Field Programmable Gate Array) に接続される。制御は, National Instruments 製の FPGA : CompactRIO を用いてプラズマ位置形状の実時間制御を可能としている。

### 2 磁場閉じ込めに必要なコイル系

#### ● トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは 13 turn 巻いてあるコイルがトラス周回上に 16 個配置されており, フライホイール発電機により電源供給し, 現在真空容器中心で 0.0875 T のトロイダル磁場を生成している。

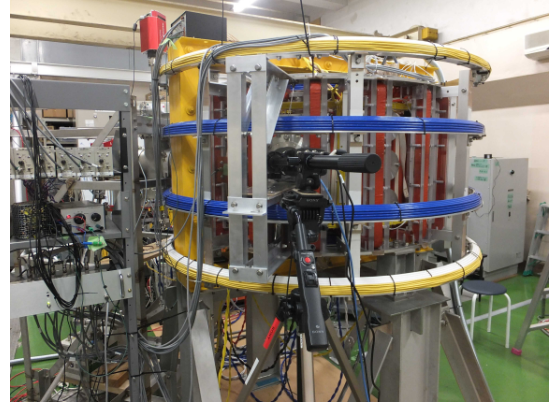


図 1: PHiX 装置の外観

表 1: PHiX の装置パラメータ

|               |         |
|---------------|---------|
| 大半径 $R_0$     | 33 cm   |
| 小半径 $a$       | 9 cm    |
| 楕円度 $\kappa$  | 1.8     |
| プラズマ電流 $I_p$  | < 5 kA  |
| トロイダル磁場 $B_t$ | < 0.3 T |
| 放電時間 $t$      | < 5 ms  |

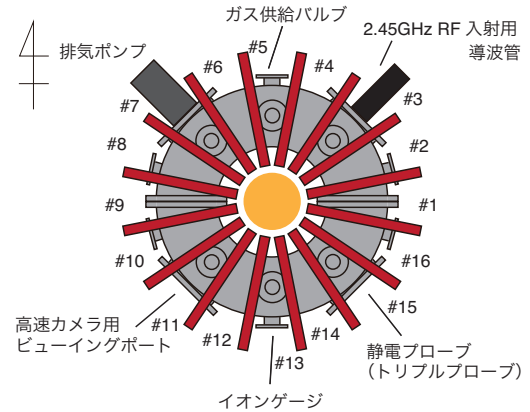


図 2: 装置上面からの概略図

- OH コイル

トカマクでは、プラズマの閉じ込めと加熱にトロイダル方向にプラズマ電流が必要になる。変圧器の原理で1次側コイルの磁束を変化させ、2次側のプラズマに誘導電流を駆動する方法である。鉄芯（図3）の飽和特性を、図4に示す。飽和磁束は0.025 Vs程度であり、両振りしても0.05 Vs程度と若干少なめである。これはプラズマ電流の駆動に5 Vの周回電圧が必要であるとする、10 ms程度の放電しか維持できないことを意味している。放電時間の長時間化には、真空ポンプの増強とベーキングにより不純物を減らしてやるか、高周波加熱などによる加熱でプラズマの電気抵抗を十分小さくしてやる必要がある。

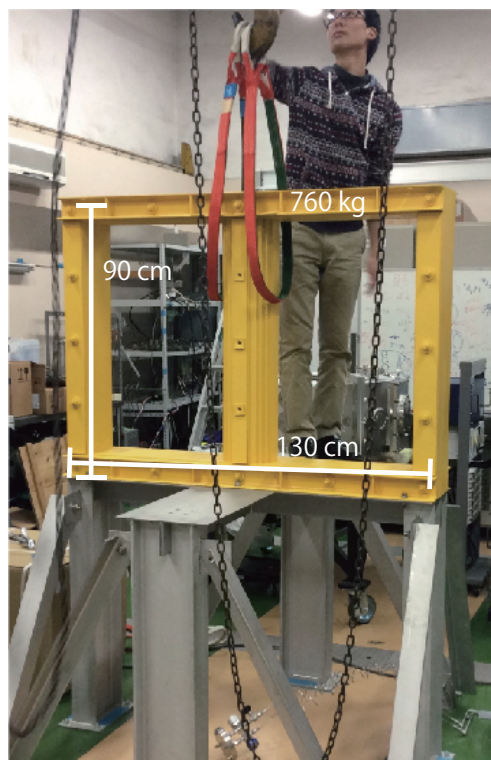


図 3: 鉄芯の外観と寸法

- ポロイダル磁場コイル

図5にPFコイルの配置と巻き数を示す。PFコイルはプラズマの位置形状制御に用いられ、PHiXは真空容器外に6本、真空容器内に2本のPFコイルが配置されている。また、PF3, 4は鉄芯内側に配置されているため、OHコイルに電圧を印可すると、巻き数比分の電圧

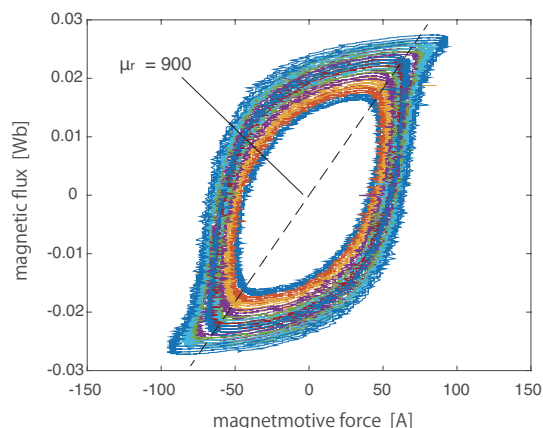


図 4: 鉄芯の磁気特性曲線

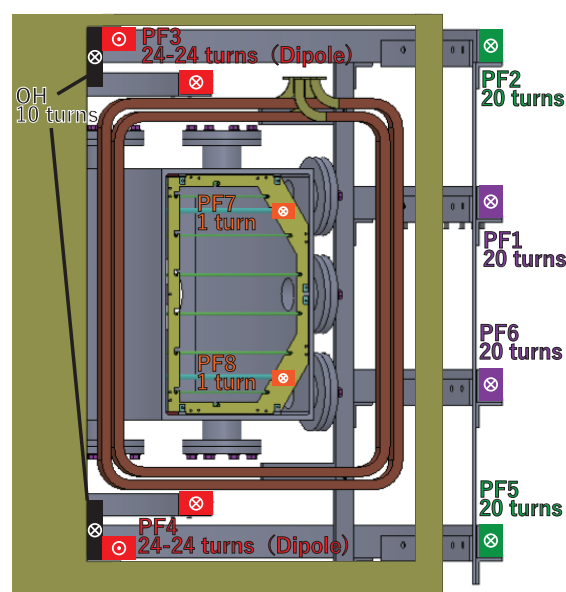


図 5: OH,PF コイル位置と巻き数

が出力される。そこで鉄芯内側にPF3, 4の巻き戻し線を設けて、電圧が出力されないようにしている（図6）。

### 3 真空系

PHiX装置は、 $10^{-6}$ Pa台の高真空度を誇る装置であるが、不純物の多い低真空度によるトカマク放電は、プラズマ着火のしづらさにより周回電圧が高くなる問題がある。放電時間を延ばすためには、低い周回電圧による運転が求められる。そこで、PHiX装置は排気系（図7, 8）に力を入れ、高真空度を実現しており、高純度の軽水素プラズマを



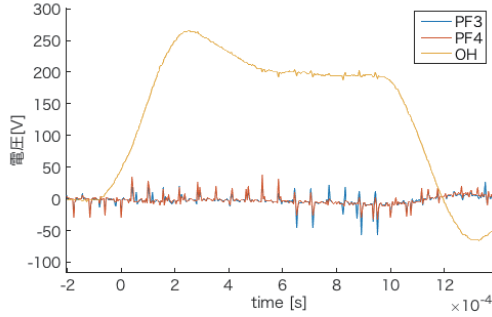


図 6: PF3,4 (ダイバーターコイル) の巻き戻し線効果

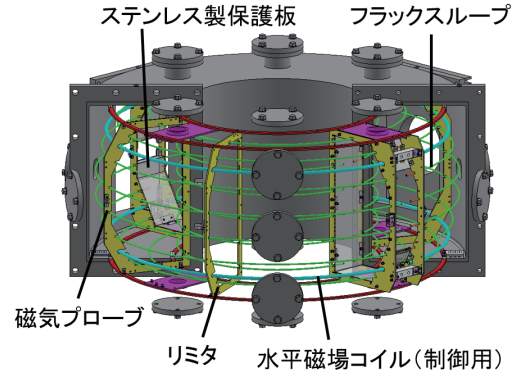


図 9: 真空容器内構造

生成することができる。軽水素供給にピエゾバルブを用いており、放電時の背景圧力はフィードバック制御により調整している。

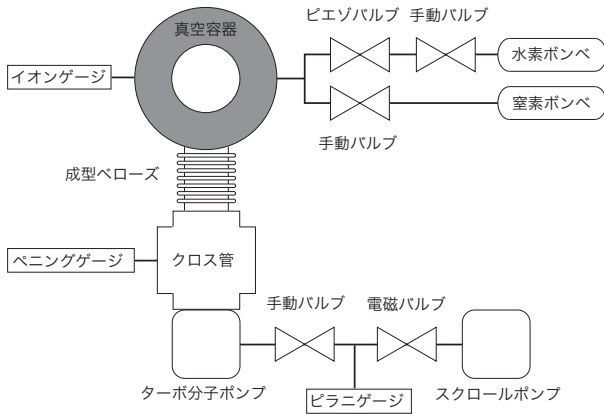


図 7: 排気ポンプとガス供給系の模式図

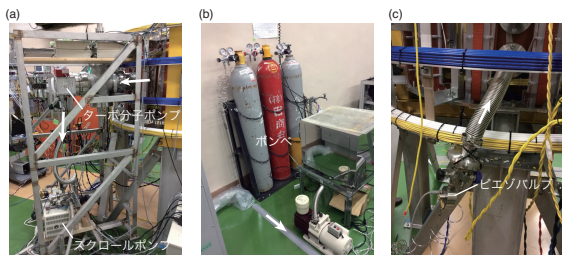


図 8: 真空排気とガス供給系の外観. (a) 真空排気系 (b) 燃料供給系 (c) バルブ

#### 4 制御に必要なプラズマの位置を検出する磁気計測

- フラックスループ

フラックスループは、真空容器内のポロイダル断面に 14 本設置されており (図 9), 周回電圧とプラズマの位置形状を求めるために用いられる。トロイダル方向に 1 周したループにより鎖交するポロイダル磁束を測定する。鎖交する磁束を  $\Psi$  として

$$v_{FL} = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1)$$

で得られる。周回電圧の計測は、演算処理せず測定する。

- ピックアップコイル

プラズマを計測する際、局所的磁場を計測することも重要になる。ピックアップコイルは、ポロイダル方向に感度を持った小さなコイルである。ピックアップコイル設置箇所の磁束密度  $B_\theta$  を計測ができる。

ピックアップコイルの巻き数を  $N$ , 鎖交面積を  $S$  として,

$$v_{Pick} = NS \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

で得られる。

- ロゴスキーコイル

ロゴスキーコイルは、真空容器の外でポロイダル方向に一周している環状ソレノイドコイル (図 10) であり、真空容器には周回電流が流れないようにトロイダルカットが入っているので、プラズマ電流を測定することができるコイルである。ロゴスキーコイルが作るループを貫く総電流を  $I$  とすると、アンペールの法則



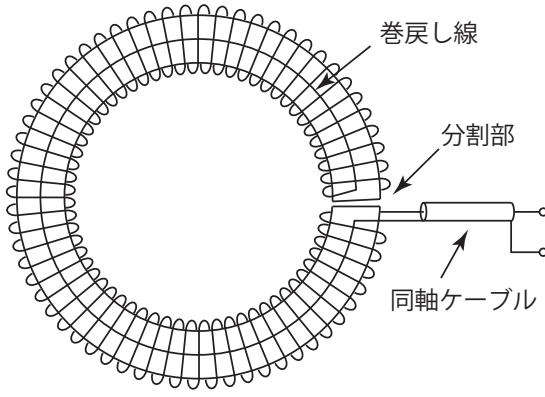


図 10: ログスキーコイルの構造

より

$$\oint_C \mathbf{B}_p \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (3)$$

のような関係があり、またログスキーコイルに鎖交する磁束は

$$\phi = \oint_C nS \mathbf{B}_p \cdot d\mathbf{l} = nS \mu_0 I \quad (4)$$

と表せる。ここで  $n$  は単位長さあたりの巻き数である。誘導起電力の時間積分が磁束となるので、ループを貫く電流は

$$I = \frac{1}{\mu_0 n S} \int V_{\text{Rogowski}} dt \quad (5)$$

となる。

## 5 電源系

### ● フライホイール発電機

フライホイール発電機は、モーターの軸に取り付けられた回転体の機械エネルギーをトルク制御を介して電気エネルギーへと変換する蓄電装置である（図 11）。AC モーターの制御手法である「ベクトル制御」を適用すれば、トルクの瞬時制御が可能になり、発電出力の動的応答に優れたパルスパワー電源が実現される。これまで 100 ms 程度の放電が限界であった小型プラズマ実験において、1.5 秒以上の ECR 放電を実現できている（図 12）。

### ● IGBT インバータ制御による放電

PHiX のコイル電源は、自励式 IGBT を用いたインバータを PWM 制御により任意電圧波形

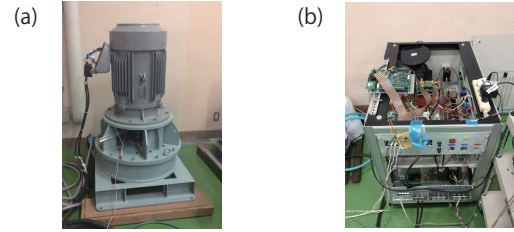


図 11: (a) フライホイール発電機 (b) 制御用インバータ

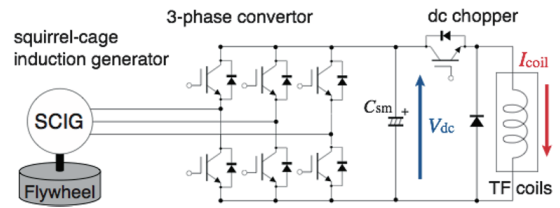
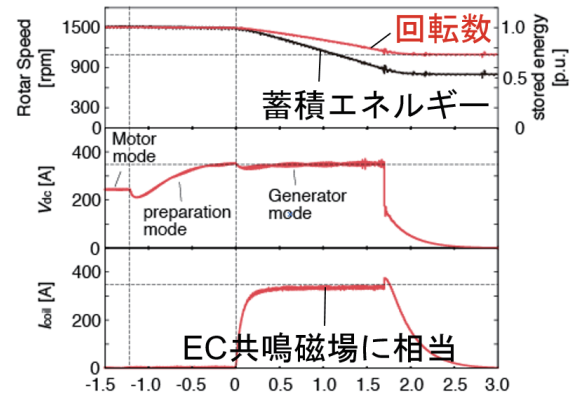


図 12: 回路図とトロイダル磁場コイル励磁試験結果

を生成し、各コイル独立制御でプラズマ位置制御を行う。表 2 に、PF コイルに使用している電源スペック一覧を示す。また、図 13 のように系統から電力を供給することにより、コンデンサバンクのエネルギー不足の問題を解決し、ポロイダル磁場コイルを 1 秒以上通電することが可能となった。

## 6 計測制御システムの概要

LabVIEW は Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench の略で、計測制御分野において、ナショナルインスツルメント社が提供するプログラミング開発環境である。図 14 のように、Fortran や C のようなテキストベースのプログラミング言語とは違い G 言語と呼ばれるグラフィ

表 2: PF 用電源装置の主要パラメータ

|       | プロト機           | 1 号機              | 2 号機              | 3 号機              | 4 号機                    |
|-------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| 主回路構成 | H ブリッジ×<br>2   | H ブリッジ×<br>2      | H ブリッジ×<br>2      | H ブリッジ×<br>2      | H ブリッジ×<br>2            |
| 定格電圧  | 300 V          | 300 V             | 300 V             | 300 V             | 300 V                   |
| 定格電流  | 400 A          | 150 A             | 200 A             | 150 A             | 600 A                   |
| 定格容量  | 240 kVA        | 90 kVA            | 120 kVA           | 90 kVA            | 360 kVA                 |
| 用途    | OH, サドルコ<br>イル | PF コイル<br>PF1,PF6 | PF コイル<br>PF2,PF5 | 容器内コイル<br>PF7,PF8 | ダイバー<br>タコイル<br>PF3,PF4 |

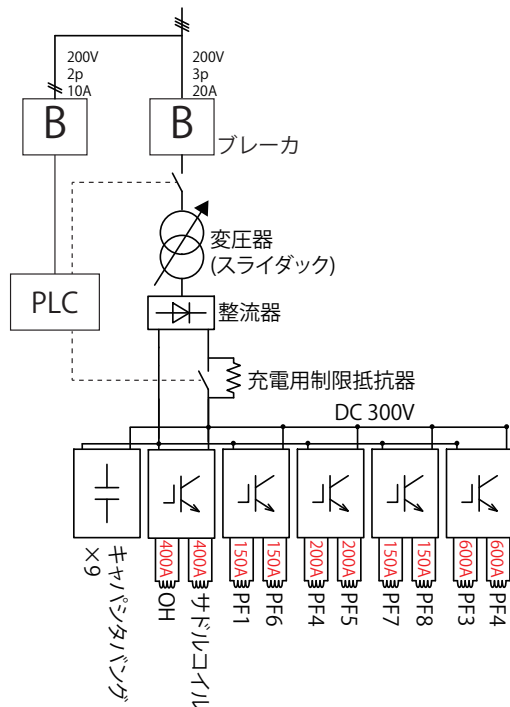


図 13: システム接続の回路図

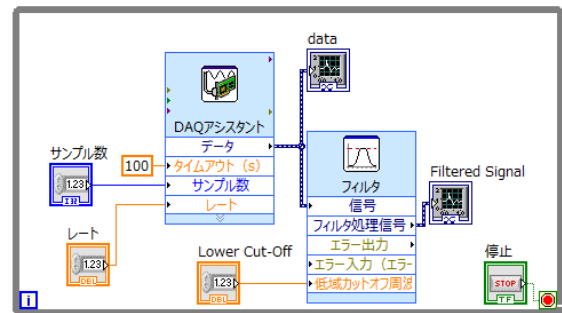


図 14: LabVIEW プログラム例

表 3: PHiX に使用しているデータロガー

|       |           |
|-------|-----------|
| シャーシ  | PXIE-1073 |
| モジュール | PXIE-6358 |
| 中継機   | BNC-2090A |

カルプログラミング言語を用いて図形や記号でプログラム開発ができ、言語を理解していなくても直感的にプログラミングができるという特徴がある。本装置は、LabVIEW 開発環境下において、48CH 同時収録できるロガーシステム（表 3）とプラズマの実時間制御を可能とする FPGA システム（表 4）において放電実験を行う。

## 6.1 48 CH 同時収録を可能とする計測環境（図 15）

トカマクプラズマのデータ収録において、様々な測定器から得られる大量のデータを収録・演算処理をしなくてはならない。ここでは、LabVIEW システムでのデータ保存の流れを説明する。図 16 に計測プログラムの内容を示す。

1. ファイルダイアログ：保存形式、保存名、ヘッダー情報などの保存ファイル設定
2. DAQ アシスタント：計測プログラムのメイ

表 4: PHiX に使用している FPGA 装置内容

|       |        |                                                                      |
|-------|--------|----------------------------------------------------------------------|
| シャーシ  | NI9154 |                                                                      |
| モジュール | NI9215 | アナログ入力, $\pm 10 \text{ V}$ , $100 \text{ kS/秒}$ , 16 ビット, 4 Ch モジュール |
| モジュール | NI9401 | 双方向デジタル I/O, $5 \text{ V/TTL}$ , 8 Ch モジュール                          |

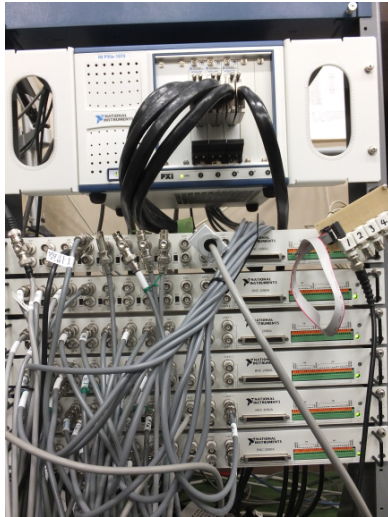


図 15: 48 CH 同時収録を可能とするロガー

ンファンクション, 測定環境設定

3. 波形表示用の演算処理: ディスプレイに表示する波形の演算処理 (各測定器のゲイン計算, フィルター処理)

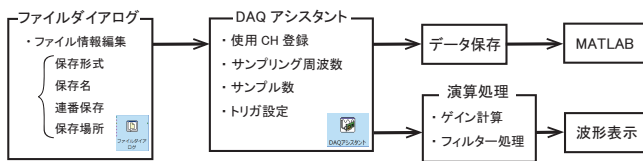


図 16: 計測プログラム

放電波形データ保存後, MATLAB で演算処理し, 詳細な波形情報 (プラズマ重心位置など) を表示する流れとなっている。

## 6.2 Labview FPGA

Field Programmable Gate Array (FPGA) はユーザーがプログラム可能な論理ゲートの配列, つまりハードウェアである。FPGA でプログラムできるのは, AND ゲートや XOR ゲートのような論

理回路はもちろんのこと, 整数や固定小数点も取り扱うことができる。FPGA で使用されている一般的なプログラミング言語としては, HDL(Hardware Description Language) に代表される専用のハードウェア記述言語がある。FPGA は集積回路なので, FPGA でプログラミングを行うことができれば, 自分専用の集積回路を作ることができる。LabVIEW FPGA は, NI 社が提供する FPGA が搭載されている計測用ハードウェア, ソフトウェア, ドライバの総称である。LabVIEW FPGA の特徴は, FPGA のプログラミングに HDL のようなハードウェア記述言語の知識を必要とせず, ユーザーは LabVIEW の知識だけで, FPGA 開発ができる。

## 6.3 プラズマ位置の実時間制御を可能とする FPGA 環境

プラズマの実時間制御において, 波形データを収録し, 信号を処理し, プラズマの位置制御をするには高速なシステムが必要である。CompactRIO と LabVIEW FPGA モジュールを本装置に実装することにより, 実時間制御が可能になる。図 17, 18

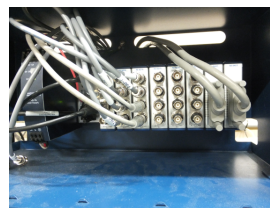


図 17: プラズマ位置制御用 FPGA システム

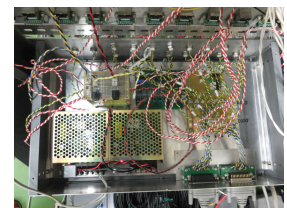


図 18: FPGA I/O 中継機

に FPGA 装置の外観を示す。FPGA アナログ入力 は主に各コイル電流, 積分後のフラックスループ, 周回電圧が入力され, デジタル出力は各コイル指令値, ピエゾバルブ制御指令値に該当し, NI9401 のデジタル入出力は D-sub25pin ケーブルを通して中継機に接続され, BNC 端子に変換されている。ま

た、中継機には電流増幅回路、ロングパルス防止回路などが内蔵されている。

## 7 トカマク放電運転の流れ（図 19, 20）

1. 高純度の軽水素で満たすために、真空ポンプにより高真空まで  $10^{-5}$  Pa 程度まで排気する。
2. 水素ガス圧をピエゾバルブで制御し、真空容器内圧力を  $10^{-2}$  Pa 程度にする。
3. フライホイール発電機を用いて「トロイダル磁場コイル」を励磁し、トーラス周回方向の磁場を作る。
4. 導波管よりマイクロ波を入射して、電子サイクロトロン共鳴を利用した ECR 放電により予備電離を行う。
5. プラズマは「リミタ」により拡散を制限され、プラズマから外部への熱の伝達を抑制する。
6. 「OH コイル」の磁束を変化させ、真空容器内に誘導起電力を印加して電子を加速する。プラズマは電子が運ぶ電流によって加熱され、プラズマの温度・密度を高め、プラズマ電流が作り出す磁場によってトーラス容器内に閉じ込められる。
7. プラズマ電流が作るポロイダル磁場はトーラス内側で強く、外側で弱くなるため、圧力によってプラズマが外に拡がろうとする。それを抑えるため、ポロイダル磁場コイルにより垂直磁場をつくり制御する。ポロイダル磁場コイルは、プラズマの断面形状・位置制御に用いられる。
8. 磁気センサを用いてプラズマ位置形状を検出し、実時間制御を行う。

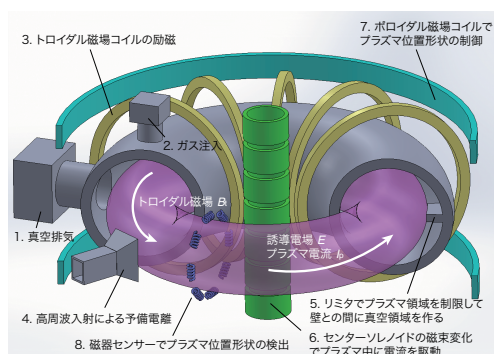


図 19: PHiX の運転手順

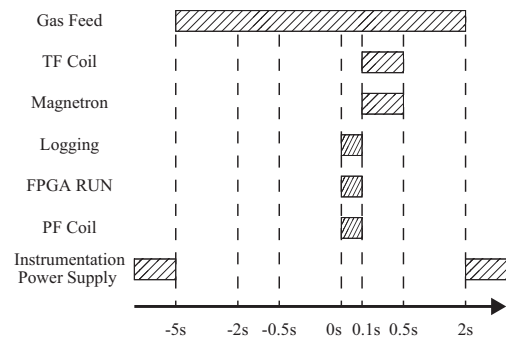


図 20: PHiX の運転シーケンス

## 8 サドルコイルを用いた安定化 [1]

最後に、サドルコイルを用いた垂直位置安定化実験を示す。PHiX には図 21 に示すようなサドルコイルが設置されており、このコイルが作る磁場とトロイダル磁場との合成磁場が平均的ポロイダル磁場（図 22）を作ることが計算で示されている。図

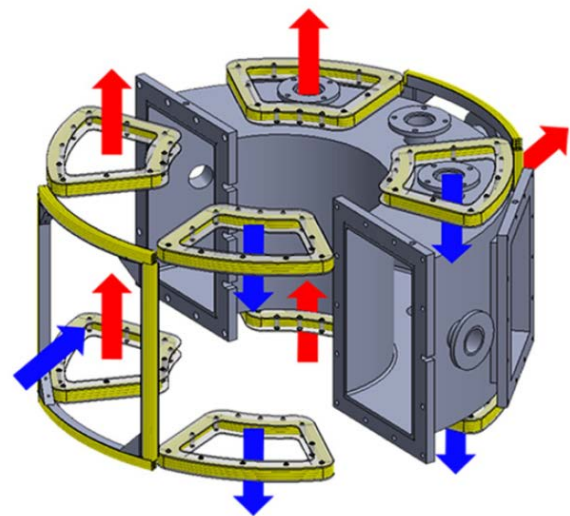


図 21: プラズマ位置安定化用サドルコイルと印加磁場の向き

23 にサドルコイル電流  $I_{SC} = 0, 2.6 \text{ kA}, -2.4 \text{ kA}$  の放電結果を示す。サドルコイル磁場印加によりプラズマ放電時間が延びていることが分かる。また、逆方向に印加した場合は短くなっている。サドルコイル磁場をトロイダル方向に周期的に印加した場合は、サドルコイル電流の向きを反転させても、作られる平均磁場は向きを含めて同じになるが、本実験でのサドルコイル通電は周期的ではないので電流の向きで実効磁場が異なり、その結果が実験に



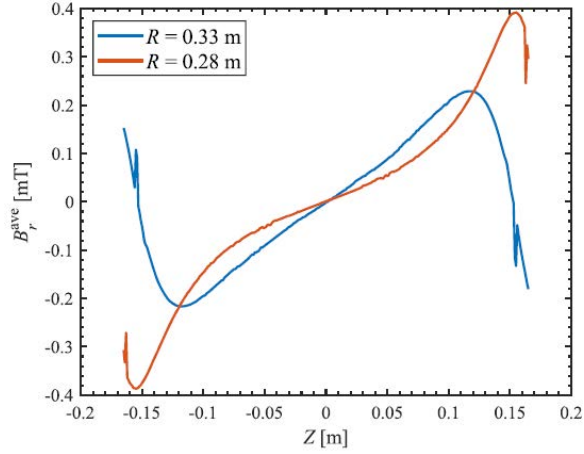


図 22: サドルコイル磁場とトロイダル磁場の合成で作られた実効的  $B_r$

現れている。図 24 はこれらの実験での高速カメラ映像である。この映像からも、サドルコイル磁場によりプラズマ垂直位置が安定化されていることが分かる。

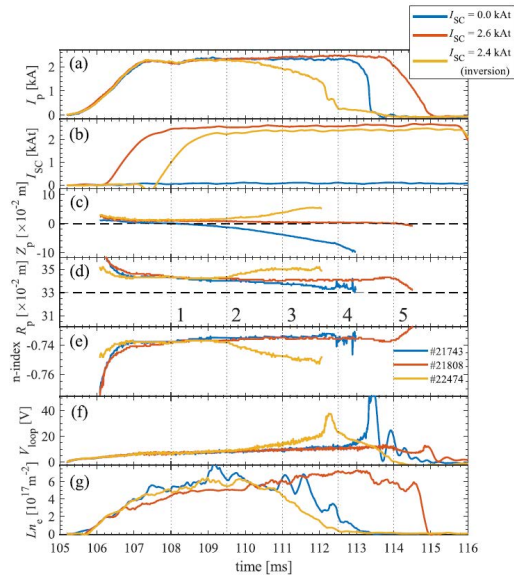


図 23: サドルコイル磁場印加時の放電波形例

## References

- [1] S. Naito et al Nucl. Fusion **61** 116035 (2021)

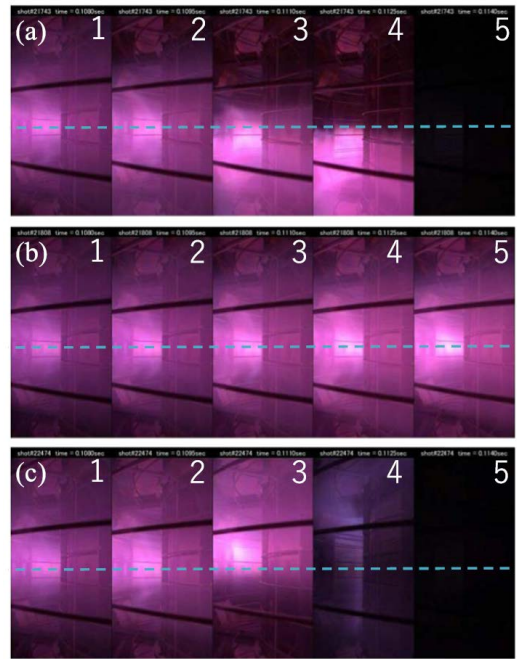


図 24: 高速カメラ映像。数字は図 23(d) に対応している。(a) w/o  $I_{SC}$  (b)  $I_{SC} = 2.6$  kAturn (c)  $I_{SC} = -2.4$  kAturn.



# QUEST装置の概要 Overview of QUEST Device

長谷川 真

九州大学応用力学研究所

## 1. はじめに

高温プラズマ理工学研究センターでは、将来の基幹エネルギー源として必要になる核融合炉の実現を目指し、先進的磁気閉じ込め配位である球状トカマク装置 QUEST (Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak) を用いて基礎研究を行うQUEST計画を2007年に開始している。核融合炉での重水素と三重水素の燃焼反応を行い、プラズマの長時間定常運転を行うためには、燃料となる水素など粒子リサイクリングを制御して、真空容器内の粒子を適切な量に維持することが重要になる。真空容器壁の表面での粒子の再結合が壁温に強く依存する性質を利用して、QUESTでは高温壁による粒子制御が提案され、室温から400℃までの温度条件で長時間トカマク運転が実施されている[1-4]。高温壁の温度は最高500℃まで昇温可能で、核融合炉の壁温を模擬した環境でトカマク実験を行うことが可能である。

一方で、高温・高密度のプラズマを閉じ込めるために、トカマクでは高いプラズマ電流を駆動する必要もある。球状トカマクはオーム加熱用ソレノイドコイルを設置するスペースが限られているため、誘導電流駆動が困難であることから、非誘導プラズマ電流スタートアップが進展してきた。QUEST計画では高周波を用いた電子サイクロトロン加熱 (Electron Cyclotron Heating, ECH) による非誘導電流スタートアップの開発・研究も積極的に行っており[5, 6]、筑波大・核融合科学研究所との共同で開発された28GHzジャイロトロンを使ったECCD (Electron Cyclotron Current Drive)では、70 kA以上の完全非誘導電流駆動を達成するなど、世界トップクラスの実績も有している。今後は250kW定常クライストロン (周波数8.56GHz) を使った高電力定常ECH/ECCD[7]、さらに電子バーンスタイン波による加熱電流駆動なども計画されている。

他の非誘導電流スタートアップ法として、真空容器内の2つの電極間に高電圧を印可して放電させ、磁気再結合を通じてトカマク配位を

形成するCoaxial Helicity Injection (CHI)についても検討がなされ、2014年、九州大学、プリンス トンプラズマ物理研究所 (米)、ワシントン大学 (米) の日米国際共同研究としてQUESTにてCHI実験プロジェクトが始動している[8, 9]。

## 2. 実験室の環境、インフラ

QUEST 装置を稼働させる電力系統は3つに分かれており、それぞれ基本的に 2000kVA、3000kVA、4000kVA の容量を有している。2000kVA は主として、冷却水を循環させるポンプであったり、真空排気を行う真空ポンプであったりなど、電力が定常的に必要となる機器や計測器などに用いている。3000kVA は 50kA もの通電が可能なトロイダルフィールド (TF) コイルに用いられ、4000kVA は他のポロイダルフィールド (PF) コイルやプラズマの RF 加熱機器などに用いられる。また、屋外には 3 m<sup>3</sup>/min 以上の流量で 3 MW 以上の冷却能力のある冷却水設備を有しており、加熱機器やコイル電源、また PF コイルや TF コイルなどコイル自体の冷却を行っている。

## 3. 装置の構造

プラズマの閉じ込めを行う PF コイルは図 1 のように配置されており、基本的に上下対称の位置にあるコイル、例えば PF1 コイルと PF7 コイルを同方向に直列接続して使用している。オーミック加熱用として PF4 コイル、ダイバータ配位用として PF3、PF5 コイルなどを用いている。また、HCU コイル、HCL コイルを逆方向に直列接続して水平磁場を作り出し、垂直位置制御用として用いている。TF コイルは、8 か所のリターンがあり、それぞれ 2 turn を有しているので、計 16 turn となっている。真空容器の半径が約 1.4m であるのに対して、リターンの半径位置が 2.5m と大きな値となっており、低トロイダルリップルでのプラズマ閉じ込めが可能である。

真空容器内の粒子制御を行うために、プラズマ対向壁の温度を能動的に制御できることは、

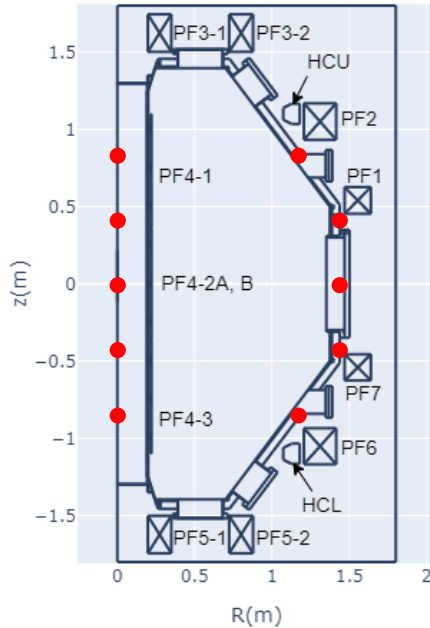


図1 真空容器のポロイダル断面とポロイダルコイルの設置位置。図中の●はホール素子センサーの設置位置

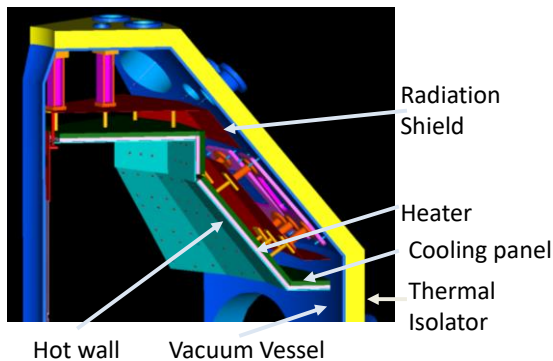


図2 高温壁の構造

QUEST装置の大きな特徴の一つである。このために、真空容器内には高温壁（図2）が設置されている。高温壁のパネル内にはシースヒーターが埋め込まれ、設計上500℃までの加熱が可能である。また高温壁の背面には冷却水配管が設置され、高温壁と適切な熱抵抗で接触させることで冷却することも可能になっている[10]。真空容器壁は、計測器の保護や構造物の熱伸びなどの観点から基本的に100℃で維持されるので、高温壁と真空容器壁の熱的接触を抑えるために、その中間には輻射遮蔽パネルが設置されている。

粒子制御で重要となる各構造物の温度分布を詳細に計測するために熱電対が各箇所に設置されており、真空容器壁で85か所、輻射遮蔽パネルで52か所、高温壁で199か所と、計330以上に及ぶ熱電対が設置され温度分布の詳細

な計測がなされている。

#### 4. 磁場コイル電源

QUEST装置では定常運転に関する研究を行うために、磁場コイル電源も定常運転ができるようになっている。多くの電源は一方向に電流を流すことのできる片極性の電源であるが、TFコイルの電源を除いて多くの電源は電源側で極性を切り替えることが可能なので、電流の向きを変えるためにコイルの結線替えをする必要はない。また、プラズマ垂直位置制御など正負両方向の通電が必要になる制御のために、一部、両極性の電源も有している。

プラズマ制御システム（Plasma Control System, PCS）は中央制御システム（Central Control System, CCS）と連動してシーケンス時刻やプラズマの状態に応じた制御信号を各コイル電源に送出する。電流の指令値を受け取る電源もあるが、一方で電圧の指令値を受け取るコイル電源も存在する。これらの電源に対しては、電流に対するPID制御をPCS側に組み込み、PCSが電圧指令を各コイル電源に送出するようにしている。

#### 5. 真空排気装置と壁調整方法

QUESTの真空排気は排気速度が10 m<sup>3</sup>/sのクライオポンプ4台と、2 m<sup>3</sup>/sのターボ分子ポンプ1台でなされる。数値はいずれもカタログ値で、全体の排気速度は42 m<sup>3</sup>/sになるが、ガス校正による実効排気速度の評価によれば、大体30 m<sup>3</sup>/s程度と予想される。大気開放後の真空排気では、リークテストの終了後に、だいたい200℃で高温壁によるベーキングを数日間行い、同時に8.2GHzのRFパワーを入射して真空容器内の放電洗浄を実施している。この時の磁場配位は基本的に単純トロイダル磁場配位であるが、真空容器内が全体的に等しく洗浄されるように、周期的にトロイダル磁場強度を変動させて、電子サイクロトロン共鳴位置を真空容器内の内側から外側までスweepするなどしている。

#### 6. 粒子供給装置、加熱・電流駆動装置

QUESTでは主に水素を用いてプラズマの生成を行っている。真空容器内への粒子の供給は、圧電素子を用いて数ミリ秒と瞬間的に粒子の供給が行えるピエゾバルブを用いる場合と、流量センサーを有し連続的に流量の制御ができ

るマスフローコントローラ（Mass Flow Controller, MFC）を用いる場合があり、それぞれ用途に応じて使い分けられている。短パルス放電でプラズマ密度などを制御する場合にはピエゾバルブが使われ、長時間放電で粒子の供給量を制御する場合には MFC が使われることが多い。

プラズマの電流駆動として、PF4 コイルによる誘導電場による電流駆動[11]があり、8kA の通電電流を 100ms 程度の間に変動させることで、センターソレノイド近傍で瞬間的に 1 V/m 弱程度の誘導電場を生成させるなどしている。その他の加熱・電流駆動装置として RF によるものがあり、8.2 GHz クライストロンによるもの、第 2 次高調波共鳴による 28 GHz ジャイロトロンによるものなどが挙げられる。特に 28 GHz ジャイロトロンでは斜め入射による高速電子およびバルク電子の制御に関する研究が行われており[12, 13]、垂直入射と斜め入射を同時に行うための 2 系統化や基本高調波共鳴のためのトロイダル磁場の増強などが検討されている。他には、8.56GHz クライストロン(250kW 定常)による加熱・電流駆動なども計画されている。

## 7. 計測器

QUEST 装置では、ログスキーコイルやフラックスループ、ピックアップコイルなど基本的な磁気計測の他に、干渉計や硬 X 線計測、静電プローブ、分光計測やトムソン散乱計などの基本計測機器と共に用途に応じた計測機器を備えている[14, 15]。ここでは特に長時間放電に対応した磁気計測としてホール素子計測を紹介する。ログスキーコイルやフラックスループなどの磁気計測のセンサーの出力は時間微分の値なので、所望する値を求めるために時間積分をする必要がある。この時間積分が長時間にわたるとゼロ点の僅かな変動が顕著になり、長時間放電で計測誤差を多く含むようになる。一方、ホール素子による磁気計測はセンサーの出力がそのまま磁場の値に対応するので、時間積分をする必要がなく、長時間にわたり高い精度で計測を行うことが可能である。使用したホール素子は、磁場検出範囲と磁場感度がそれぞれ  $\pm 220 \text{ G}$  と  $9 \text{ mV/Gauss}$  であり、プロトタイプでは Surface Mount Device（SMD）のホール素子をユニバーサル基盤上に配置して簡素な電子回路を構成した（図 3）。QUEST 装置では、中心軸上の z 方向の磁場を計測するホール素子が 5 個設置してあり、真空容器の外側でも 5 か所で



図 3 プロトタイプのホールセンサー

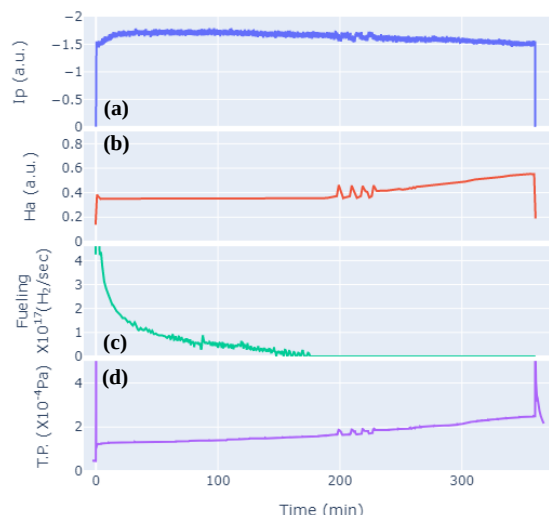


図 4 粒子供給制御を行った時の長時間放電波形。(a)プラズマ電流、(b)水素発光強度、(c)粒子供給量、(d)真空容器内真空度

3 軸の計測が行えるホール素子センサーが設置されている（図 1）。いずれも、真空容器の大気側に設置されているので、真空容器壁による渦電流効果によってプラズマによる磁場の信号は数ミリ秒の時間遅延を受けて計測される。一方、真空容器内とくらべれば比較的良好な低ノイズ環境なので精度よく計測が行え、かつ真空容器を大気開放することなくセンサーの交換が行えるなどメンテナンス性が高いともいえる。ホール素子の各箇所における信号の強度比からプラズマ位置を算出しており、その絶対強度からはプラズマ電流を算出している[16]。

## 8. プラズマの生成・制御

トカマクプラズマの立ち上げに際して、TF コイル、PF コイルの電流波形は事前にプレプログラミングされる。誘導電場によるプラズマ電流立ち上げでは、8.2GHz などの RF を入射して予備電離を行い、PF4 コイルを用いて誘導電場を生成してプラズマを立ち上げる。非誘導電流

立ち上げでは、事前に弱い閉じ込め磁場配位を生成しておき、その中に RF を入射している。プレプログラミングされた波形に従って垂直磁場が強くなっていき、その垂直磁場に応じてプラズマ電流が立ち上がっていった。

次に長時間放電時における燃料供給制御について述べる。粒子供給量が増えると分光計測による水素の発光強度も増えることから、QUEST 装置では PCS において、この発光強度に対する PID 制御を組み込んでいる。PCS は、発光強度が目標とする値になるように MFC に粒子供給の指令を送出する。発光強度はプラズマ対向壁への粒子フラックスに相当する量でもあるので、長時間放電で重要となる壁への粒子フラックスを制御した状態で、燃料供給制御を行っているという事もできる。図 4 に長時間放電において粒子の供給制御を行った場合の例を示す。プラズマ放電の前半では、水素の発光強度が一定になるように、徐々に粒子の供給量を減らしていったが、遂にはゼロになり粒子供給の制御が行えず、放電の後半では水素の発光強度が増大していったことが分かる。この現象に見られるようなプラズマ対向壁での粒子の動的リテンションの評価も QUEST 装置において継続して行われている[17]。

## 9. 実験の遂行

コイル電流の波形や、プラズマの加熱入力パワー、燃料供給などの、実験条件の設定は Web ブラウザを通じて波形を確認しながら行っている。ユーザーが波形データを編集して、グラフ表示をさせて確認した後、保存ボタンをクリックする(図 5)と、その波形データが記述されたファイルが PCS にアップロードされる。PCS はプラズマ放電の開始前に、それらの設定ファイルを読み込み、シーケンス時刻に応じて他機器に信号を送出する。

データ収集では、信号ケーブルを遠方まで引き回す必要のないように、計測が行える場所でデータ収集を行う分散型のデータ収集を想定している。各々の機器には計測の開始を知らせるトリガー信号が送られ、また、Ethernet のネットワークケーブルを介してプラズマ放電番号やシーケンス時刻を伝えたり、収集したデータをサーバーへ転送するなどを行ったりしている。

収集されたデータは、データサーバーに保存されるが、基本的にファイルベースの保存であって、そのディレクトリ階層は、上位から順に

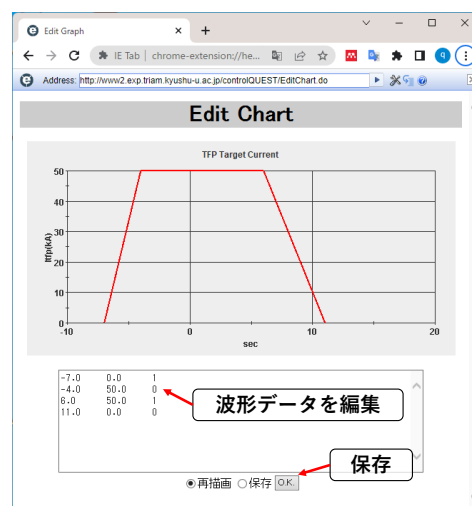


図 5 波形データの編集画面

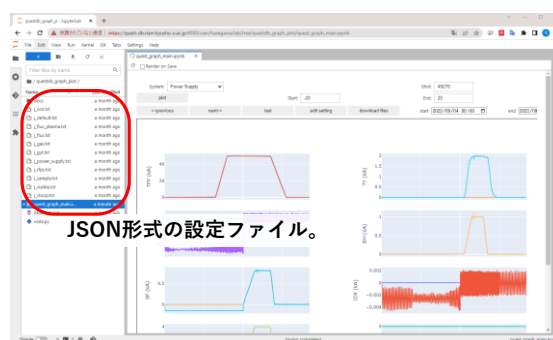


図 6 JupyterHub 上でのグラフ描画

プラズマ放電番号、計測名称または機器名称、その計測機器で計測されたデータファイルという構造である。グラフ表示によるデータの閲覧は Web で提供しており、表示させたいプラズマ放電番号と、その時刻、データ種類などを入力して、描画ボタンをクリックすると Web 上にグラフが表示される。この方法はユーザー側での環境構築が必要なく便利である一方、Web に表示させるデータの種類やレイアウトを変更する際には、Web サーバーの管理者が対応する必要がある、柔軟な変更が難しいという事がある。そこで新たな解析環境として JupyterHub[18]を DMZ のサーバー上に構築することを試みている。これは、マルチユーザーに対応しており、Web ブラウザ経由でログインすることですぐに解析環境を使用できる。この解析環境で実行可能なグラフ描画のスクリプトを提供しており、グラフに表示するデータ種類やグラフィックレイアウトなどの設定ファイルも、人



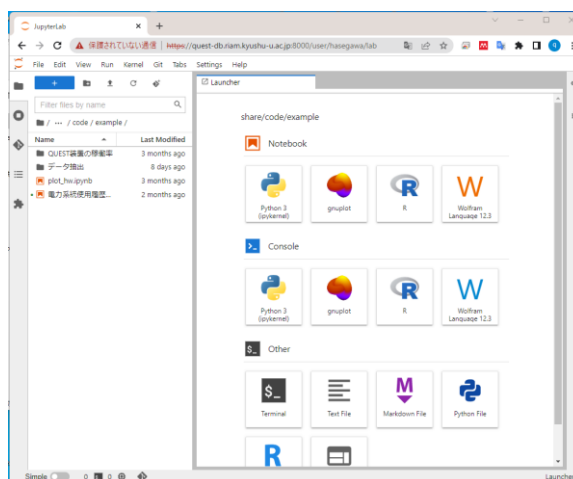


図 7 JupyterHub のログイン後のトップ画面。Python や R 言語などのアイコンが表示されている。

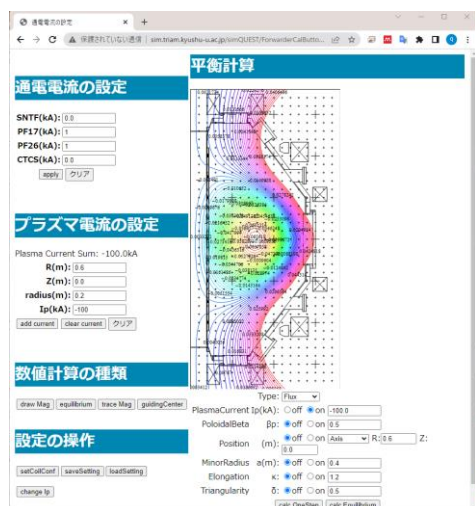


図 8 Web で提供される基本解析ツール

が理解しやすく階層構造を持たせることもできる JSON 形式で提供してあるので、ユーザーはそれらを参考にして、独自のグラフ描画ページを作成することができるようになっている (図 6)。日々の実験内容を記録する実験日誌は Web 上で管理している。具体的にはコンテンツ管理システムと呼ばれるものを用いて、それらの幾つかのモジュールを組み合わせることで、Web 上での実験日誌の編集や閲覧などの機能を構築している。

## 10. 解析ツール

先に述べた JupyterHub では各カーネルを事前にサーバーにインストールしておくことで、Jupyter notebook で Python 言語を実行したり、R 言語や gnuplot などを実行できたりすることが

できる (図 7)。また JupyterHub でターミナルを起動することで、Linux ベースのコマンドでファイル操作なども行うことができ、共有ディレクトリを介してユーザー間でデータやコードの共有が簡便に行えるようになっている。このような情報共有を通じて共同研究において効率的なデータ解析が行えるようになることが期待される。

また実験中に、プラズマの基本的な位置や形状などが簡便に取得できるように、ごく基本的な解析ツールを Web で公開[19]して実行できるようにしている (図 8)。これは、各コイルの電流や、プラズマ電流など基本的なパラメータを Web 上で入力することで、真空容器内の磁場の分布を表示させたり、プラズマの平衡計算を行ったりすることを可能にする。また粒子の軌道計算や磁力線の追跡なども行える。これらのサービスは Graphical User Interface (GUI) であるので直感的に操作をすることができ、プラズマの状況などを迅速に評価するなど、実験の効率的な推進に役立っている。一方、手動でパラメータの入力を行う Web のユーザーインターフェースだと、パラメータサーベイをする場合などには不向きである。そこで、コードの管理や共有が可能となる GitLab[20]などのサービスを利用してこれら基本的な解析ツールのコード自体の提供を行い、各人で新たにスクリプトを追加することで、パラメータサーベイなどができるようにする試みも新たに始めている [21]。提供に際して、各種ドキュメントはフローチャート図、数式や表など、多彩な表現が可能であるため、ユーザーにコードの使用方法など分かりやすい説明を提供することが可能になっている。

## 11. 安全対策

学生や職員は QUEST を用いた実験に参加する前に、この装置を使用する上での安全教育を受講する必要がある。QUEST 装置の実験では X 線が発生することもあるため、X線障害予防規程等講習会などを通じて、装置の安全な取り扱い方法や、電離放射線の生体に与える影響などを学ぶ。トムソン散乱計でレーザーも使用するので、レーザーについても同様に、安全な取り扱い方法などを学んでいる。特にプラズマ生成時に、X 線の管理区域である本体室にいないように、本体室に立ち入る際のルールを周知しているが、その安全対策の一環として、本体室の入り口に入退室管理盤を設



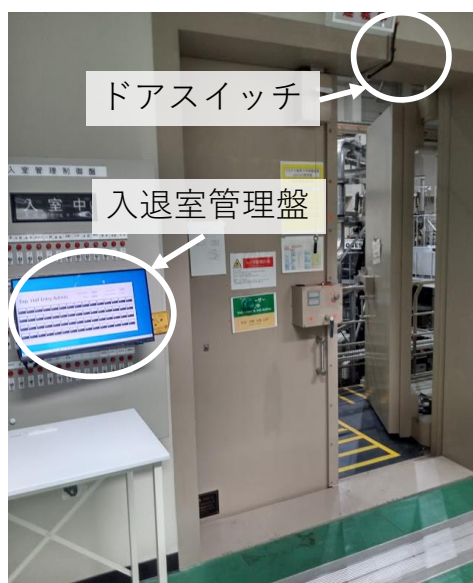


図 9 本体室入り口の入退室管理盤とドアスイッチ

置して、実験への参加者は入退室時に自分の名前のボタンを押すようにしている。また、ドアインターロックも設置しており、プラズマ放電の開始前に入室者が存在していたり、ドアが開放されていたりする場合には CCS が放電シーケンスを安全に停止させるようになっている（図 9）。また放電シーケンスを周知するために、各箇所ショットナンバーやシーケンス時刻等を表示するディスプレイを設置したり、シーケンス時刻に応じて注意を喚起する音楽やアラーム音などを制御室や本体室で鳴らしたりしている。

### 参考文献

- [1] K. Hanada et al., *Nucl. Mater. Energy*, **27**, 101013 (2021).
- [2] M. Hasegawa et al., *Plasma Fusion Res.*, **16**, 2402034 (2021).
- [3] K. Hanada et al., *Nucl. Fusion*, **59**, 076007 (2019).
- [4] K. Hanada et al., *Nucl. Mater. Energy*, **19**, 544–549 (2019).
- [5] H. Idei et al., *Nucl. Fusion*, **60**, 016030 (2020).
- [6] S. Kojima et al., *Plasma Phys. Control. Fusion*, **63**, 105002 (2021).
- [7] T. Onchi et al., *Fusion Eng. Des.*, **146**, 2567–2570 (2019).
- [8] R. Raman et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **50**, 4171–4176 (2022).
- [9] K. Kuroda et al., *Plasma Fusion Res.*, **16**, 2402048 (2021).
- [10] M. Hasegawa et al., *Fusion Eng. Des.*, **129**, 202–206 (2018).
- [11] Y. Zhang et al., *Fusion Eng. Des.*, **168**, 112362 (2021).
- [12] T. Onchi et al., *Phys. Plasmas*, **28**, 022505 (2021).

- [13] H. Idei et al., *Fusion Eng. Des.*, **146**, 1149–1152 (2019).
- [14] C. Huang et al., *Plasma Fusion Res.*, **14**, 1402128-1-1402128-8 (2019).
- [15] M. Fukuyama et al., *Plasma Fusion Res.*, **14**, 3402111 (2019).
- [16] M. Hasegawa et al., *Fusion Eng. Des.*, **112**, 699–702 (2016).
- [17] Q. Yue et al., **15**, 2402013 (2020).
- [18] <https://jupyter.org/>, accessed Dec. 2, 2022.
- [19] <http://sim.triam.kyushu-u.ac.jp/simQUEST/>, accessed Dec. 2, 2022.
- [20] <https://about.gitlab.com/>, accessed Dec. 2, 2022.
- [21] [https://gitlab.com/hasemac/tokamak\\_equilibrium](https://gitlab.com/hasemac/tokamak_equilibrium), accessed Dec. 2, 2022.

# RELAX 装置の概要

## Overview of RELAX machine

<sup>1</sup> 井上孟流、<sup>1</sup> 稲垣泰一郎、<sup>1</sup> 三瓶明希夫、<sup>1</sup> 比村治彦、<sup>2</sup> 政宗貞男

<sup>1</sup>T. Inoue, <sup>1</sup>S. Inagaki, <sup>1</sup>A. Sanpei, <sup>1</sup>H. Himura, <sup>2</sup>S. Masamune

<sup>1</sup> 京都工芸繊維大学 電子システム工学専攻

<sup>2</sup> 中部大学 工学部

<sup>1</sup>Department of Electronics, Kyoto Institute of Technology

<sup>2</sup>College of Engineering, Chubu University

## 1 はじめに

RELAX(REversed-field-pinch of Low-Aspect ratio eXperiment) 装置は、京都工芸繊維大学プラズマ基礎工学研究室 (KIT) が所有するトーラス型プラズマ閉じ込め装置である [1, 2]。RELAX は 2007 年にアスペクト比  $A$  が 2 と小さい reversed-field-pinch (RFP) プラズマ [3] の研究を行うために建造された。装置建造当初の主要研究課題は、電子速度分布関数の非等方性に起因するブートストラップ電流による RFP の定常化の可能性の探求 [4–9] と、低アスペクト比 RFP プラズマコア付近のモード有理面間隔が広がることを利用した quasi-single helicity (QSH) 状態への遷移過程 [10–13] に代表される MHD 研究の 2 つであった。それらに加えて、抵抗性壁モード (resistive wall mode: RWM) を抑制するためのアクティブフィードバック制御機構の研究開発が行われてきた [14, 15]。これらの研究が進められていた 2014 年度、実験室が新棟へと移転されることが決定した。その移転に伴い、RELAX はすべてのプロジェクトを中断し、装置の解体と新実験室への移設が行われた。その後、2019 年に、RELAX で 2 流体自己組織化トーラスプラズマの実験的検証計画が立案された。この時、RELAX で RFP だけではなく、トカマクも形成する計画が立てられた [16]。2020 年度から 2022 年度にかけて、トロイダル磁場コイルのアップグレードが完了された。現在、RELAX では、トカマクプラズマ形成の初期実験が進められている [17]。

KIT では、RELAX プロジェクトの他、3 つの主要プロジェクトが進められている [18–24]。その内の 1 つに、非中性プラズマを用いた 2 流体プラズマプロジェクトがある [25–33]。そのプロジェクトは BX-U 装置 [34] で実施されている。BX-U は一様磁場中での実験である一方、RELAX で RFP とトカマクを作り出すというハイブリッド性は、トロイダルプラズマが必ず持つ磁気シア  $s(r)$  分布をトカマクと RFP で系統的に変えながら、動的トロイダルプラズマが緩和状態へと自己組織化する過程

の中で、イオン流体と電子流体の異なる流体運動、つまり、2 流体プラズマ状態から自己組織化する過程の比較を内部プローブを用いて実施することを可能にする。また、それら動的な高温 2 流体トロイダルプラズマダイナミクスを受動的に観測するための新しい光学的測定器 [35, 36] の開発研究も同時に実施できる。これは、燃焼プラズマがトロイダルプラズマで計画されている当該分野の未来を見越した上で遂行している。

動的トロイダルプラズマに関するテーマは最先端プラズマ物理学に位置づけられている。本国の物理学学会ではメタステートと呼ばれるプラズマ状態に注目が注がれており、RELAX の動的トロイダルプラズマはそのメタステート状態の開拓も意図している。現在の RELAX の代表的テーマに 2 流体プラズマ緩和過程と正準フラックスチューブがあるが、これらの研究テーマは米国プラズマフロンティアサイエンスでも採択されている。それら研究提案書に基づいた国際共同研究が、KIT とウィスコンシン大学 WPPPL との間で進められている [37]。その他の海外連携として、イタリア RFX コンソーシアムで RFX-Mod2 装置の改造が進められている。RFX-Mod2 装置は 2024 年春から新しい実験研究をスタートさせる予定をしており、KIT はその実験への参加についても打診を受けている。このように、RELAX は動的トロイダルプラズマの未開拓事項の基礎研究を中心に据えて、国際的に連携している。

## 2 ホール実験室と給電設備

図 1 は RELAX の全体写真を示している。RELAX が設置されている実験室は京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス内で高電圧・大電流実験を実施することができる唯一のホールである。ホールの広さは 16 m × 7.4 m、天井の高さは 5.2 m である。分電盤は単相 100 V と三相 200 V の 2 面を使用している。ホールの中には、広さ 8.3 m × 3.4 m、高さ 3.1 m のシールドルームが設置されている。このホールでは、RELAX プロジェクトと BX-U プ

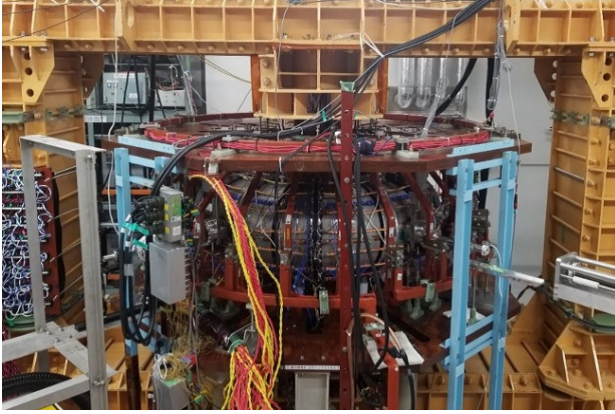


図1 RELAX 装置の写真。

プロジェクトが進められている。それぞれの装置に建物から電氣的に切り離された単独アースが与えられている。また、シールドルームのアースも建物から切り離された独立アース仕様になっている。

RELAX は高さ 2 m, 長さ 3.3 m, 幅 0.32 m, 総重量約 30 t のケイ素鋼鉄で作られた鉄芯を備えている。鉄芯の飽和磁束はおおよそ 0.2 Wb である。ホールは、その重量物を吊り上げるクレーンが将来設置される仕様で作られており、RELAX の組立・解体時に供される。

### 3 RELAX 装置の構造

#### 3.1 SUS304 製トーラス型中空真空容器

表 1 は円形断面の真空容器の仕様をまとめている。真空容器壁には様々な観測用ポートが取り付けられている (図 4 参照)。それら観測用ポートは、ポロイダル角  $\theta = \pi/2$  のトーラス上部、 $\theta = \pi$  の赤道面外側、 $\theta = 3\pi/2$  のトーラス下部に分散設置されている。ポートサイズは、ICF152、ICF114、ICF70、ICF34 である。一般に、RFP 配位での高温プラズマ閉じ込めでは、真空容器壁上の観測ポート孔を回避して流れる渦電流に起因する不整磁場が問題になる。これは、トカマクに比して RFP のトロイダル磁場が弱いために、不整磁場の影響が相対的に大きくなることによっている。そのため、観測用ポートのサイズを小さくすることが不整磁場の低減に効果的である。これらの要請に応えるように、RELAX の観測用ポートはトロイダル方向 ( $\phi$  方向) に  $\pi/8$  間隔で配置されている。ただし、 $\phi = 0, \pi$  の断面上は除かれる。その他、RELAX 建造前の STE-2 RFP 装置における実験で、RFP の抵抗性モードのモード (位相) ロック現象、および、不整磁場に起因する壁面へのロッキング現象が観測されていた [38]。したがって、小さなポートはこの現象をできる限り回避する目的に対しても効果的に働く。

真空容器は図 4 に示すように、 $\phi = 0, \pi$  の 2 つのポロイダル断面で分割されている。これら分割部

はポロイダルギャップと呼ばれている。これら断面には絶縁体の真空シールが用いられているので、 $\phi$  方向に周回する誘導トロイダル電流は真空容器壁上を流れることができない。したがって、中空型真空容器内部へのポロイダル磁束の侵入は真空容器によって妨げられない。このため、時間変化するポロイダル磁束がそのまま中空型真空容器の内部に侵入するので、誘導電場が生じる。この誘導電場により、プラズマ電流  $I_p$  が  $\phi$  方向に駆動される。

一方で、RELAX の真空容器はトロイダル方向のギャップを有していない。このために、トロイダル磁場の真空容器内部への浸透は、真空容器壁上を流れる誘導ポロイダル電流によって阻害される。したがって、RELAX では、順方向 ( $+\phi$ ) のトロイダルバイアス磁場が中空型真空容器の内部に十分侵入した後に、プラズマ生成オペレーションへと移行する。

表 1 真空容器の主な仕様。

|               |        |
|---------------|--------|
| 大半径 $R_0$     | 0.51 m |
| 小半径 $a$       | 0.25 m |
| アスペクト比 $A$    | 2.0    |
| 材料            | SS304  |
| 厚さ $\delta$   | 4 mm   |
| 磁束浸透時間 $\tau$ | 2 ms   |

#### 3.2 磁場発生用各種コイルについて

図 2 は RELAX と磁場発生用コイルの鳥観図である。RELAX のコイル系は、トロイダル磁場コイル (TFC)、オーミック加熱コイル (OHC)、垂直磁場コイル (VFC)、水平磁場コイル (HFC) により構成されている。既述した通り、RELAX でのトロイダル電流立ち上げには、鉄芯によるオーミック加熱法が用いられている。

##### 3.2.1 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場  $B_\phi$  を生成するための TFC は  $\theta$  方向にまかれた 24 個の D 型コイルで構成されている (図 2 の茶色)。それら 24 個のコイルは直列接続されている。このトロイダル回路が後述するオーミック加熱コイル回路と結合しないように、 $\phi$  方向に 1 ターンの巻き戻しコイルが設置されている。D 型コイルは無垢の銅製バスバー (25 mm  $\times$  30 mm) で作られている。D 型コイルの断面は矩形である。各 D 型コイルは図 2(b) に示すように、上側、下側、内側の 3 つの銅製バスバーで組み立てられる。それらは互いにボルトで接続されている。上側と下側の銅製バスバーは外側に挿入された FRP 製のブロックによって  $\theta$  方向に分割されている。その



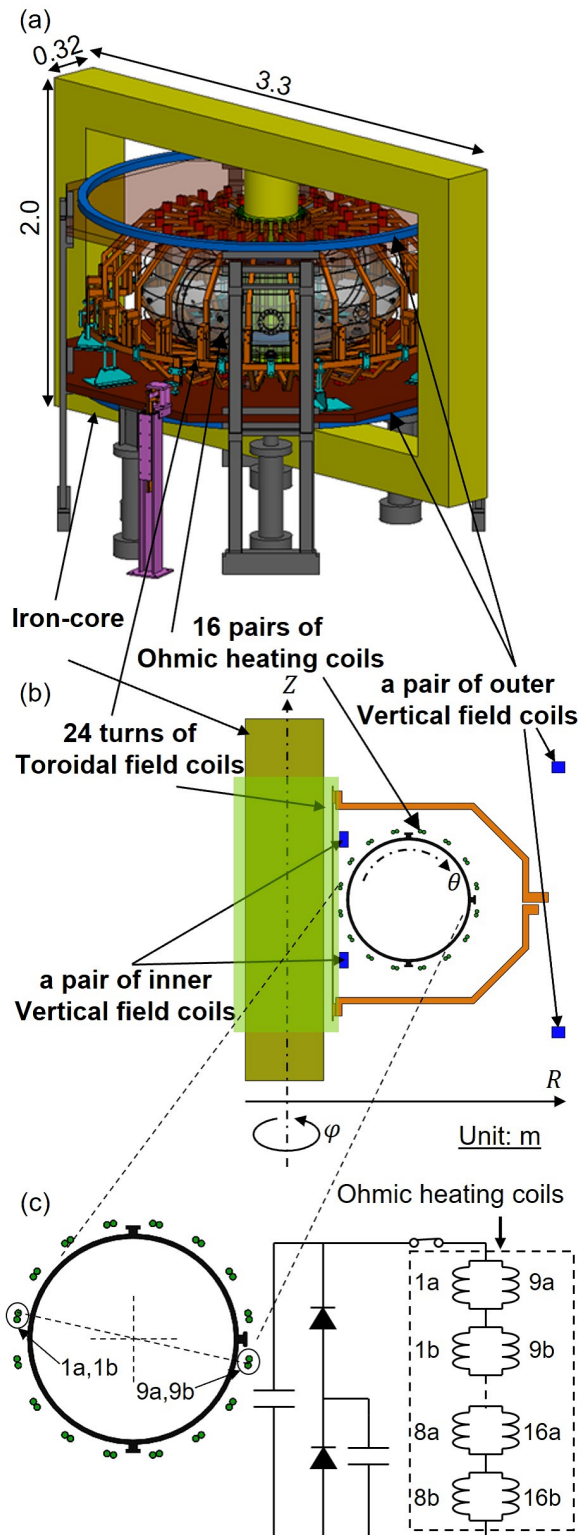


図2 (a)RELAXの鳥観図、(b)ポロイダル断面におけるコイルの配置、(c)オーミック加熱コイルの接続図。

分割部で、それぞれの銅製バスバーを流れる電流は接続用コイルへと流れ込む。内側に位置する銅製バスバーはFRP製の中空円筒(センタースタック)に埋め込まれている。この埋め込みにより、その銅製バスバーは固定されている。

24個のD型コイルは回路的には直列接続されている。コンデンサバンクからの電流は給電部を介して、1番目のD型コイルの $\theta$ 方向に流れ込む。その後、電流は接続用のコイルを介して、各D型コイルを流れて、24番目のD型コイルから出てくる。この電流は巻き戻し用コイル内を $+\phi$ 方向に1周流れることで、接続用コイル内を流れる時に作り出される不整磁場を相殺する役割も果たしている。

### 3.2.2 オーミック加熱コイル

OHCは鉄芯からの漏洩磁場の影響を低減化するために、真空容器と同軸状、つまり、 $\phi$ 方向に巻かれている。このOHCには断面積 $8\text{ mm}^2$ の銅撚り線が使用されている。OHCの各撚り線は $\theta$ 方向に角度が $\pi$ 異なる対向する位置のコイル同士が並列に接続されている。この並列接続が全部で16組直列ある。したがって、OHC全体としては2並列、16直列接続されている(図2の緑色)。すべての撚り線に同じ向き( $-\phi$ 方向)の電流を流すことで、鉄芯内の鉛直下向きの磁束が増加される。この磁束増加を打ち消す向きの電流が真空容器内にトロイダル電流として( $+\phi$ 方向)誘導される。

図2に示すように、OHCは対向するコイルとともに閉ループを形成している。したがって、プラズマの位置が巨視的にシフトすることで真空容器の外側に垂直方向の磁場が発生する時、この閉ループを貫く磁束が時間変化するために閉ループに起電力が発生する。この起電力が対向するOHCに流れる電流に変化を生じさせるため、その結果として、真空容器外側に発生した垂直方向磁場を相殺するようにプラズマを元の位置に戻す電磁力が生み出される。ここで、対向するコイル面に垂直方向へとプラズマがシフトする際、いつでも閉ループを貫く磁束変化を妨げる向きに誘導電流が流れることがポイントである。つまり、このOHCはプラズマ中心のシフトを全方向に対して抑制する受動的効果を有している[39]。

### 3.2.3 垂直磁場コイル

VFCはプラズマ電流中心の平衡位置制御のために用いられる。VFCは図2(青色)に示す位置に $\phi$ 方向に巻かれた4ターンのコイルで構成されている。コイルは銅バスバーを4つ接続することで作られている。図2に示されているように、1対のVFCはTFCの外側に設置されている。これとは別の1対のVFCは、TFCの内側、センタースタック付近に設置されている。それら内側と外側のVFCに互いに逆向きとなる電流が流れることで、真空容器内に垂直方向( $-Z$ 方向)の磁場が発生される。既



述の通り、垂直磁場はプラズマの平衡位置の制御に用いられるので、VFC に流れる電流波形は  $I_p$  の波形に比例していることが望ましい。

### 3.2.4 水平磁場コイル

VFC とは使用目的が異なり、HFC はトロイダルコイル系の不整磁場を相殺するために用いられる。HFC は図 2(黄緑色) に示す位置に  $\phi$  方向に巻かれた各 2 ターンからなるコイルである。HFC は TFC 外側の 2 つの VFC に沿っている。各ターンは断面積  $8 \text{ mm}^2$  の 4 本の銅撚り線で作られている。VFC と同様に、上下のターンに互いに逆向きの電流が流されることで、真空容器内に水平方向 ( $\pm R$  方向) の磁場が発生される。一般に、水平磁場はトロイダルコイル系と真空容器の設置誤差に起因することが多い。このために、水平磁場コイル電流の波形はトロイダルコイル電流波形と相似形であることが望ましいとされている。

## 4 磁場発生用コイルに用いられる電源

表 2 各コイルのコンデンサバンクのエネルギー。ここで、TFB(toroidal field bias) は順 ( $+\phi$ ) 方向、TFR(toroidal field reversed) は逆 ( $-\phi$ ) 方向の  $B_\phi$  を印加するバンクを表している。また、TFB(T) はトカマク用、TFB(R) は RFP 用のバンクを表している。

| バンク    | $W_c$ (kJ) | $C_H$ (mF) | $C_L$ (mF)        |
|--------|------------|------------|-------------------|
| TFB(T) | 86         | 0.8        | $1.8 \times 10^3$ |
| TFB(R) | 6          | 3          | -                 |
| TFR    | 2.2        | 0.2        | 31.2              |
| OHC    | 22.2       | 0.75       | 10                |
| VFC    | 0.1        | 0.4        | 7.2               |
| HFC    | 0.023      | 0.5        | 11                |

表 2 は各磁場コイルに流れる電流発生用コンデンサバンクのエネルギーをまとめている。磁場コイル電源回路はパワークローバ回路で作られている。パワークローバ回路は高電圧・小容量のコンデンサ (高圧側) と低電圧・大容量のコンデンサ (低圧側) およびクローバダイオードを組み合わせることでコイルに準定常状態の電流を供給する。一例として、図 3 はトカマク用のトロイダル磁場印加用のパワークローバ回路を示している。高圧側のコンデンサ  $C_H$  にはオイルコンデンサが用いられており、低圧側  $C_L$  のコンデンサにはアルミ電解コンデンサが用いられている。これらのコンデンサへの充電は高圧直流電源による直接充電方式や交流電圧の全波整流方式によって行われている。現在、こ

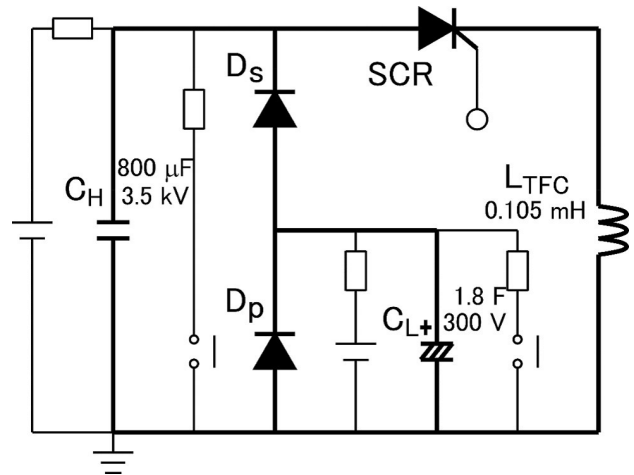


図 3 トカマクでのトロイダル磁場印加用電源の回路図。

れら充電器をすべて外部制御可能な直流電源に置き換えて、遠隔からリモート制御できるシステムに換装中である。スイッチについては、RELAX ではサイリスタやイグナイトロンを用いている。

## 5 真空排気装置と壁コンディショニング

真空容器本体の排気は  $520 \text{ L/s}$  のターボポンプで行われている。しかしながら、真空排気用のポートの口径は  $152 \text{ mm}$  と小さいために、ターボポンプの実効的排気速度は約  $90 \text{ L/s}$  と見積もられる。ターボポンプの背圧は  $240 \text{ L/min}$  のロータリーポンプで下げられている。プローブや MCP をインストールするポートにはそれぞれゲートバルブが取り付けられている。ゲートバルブが取り付けられているポートの差動排気には本体排気用とは別の排気ポンプセットが使われている。

RELAX では、真空容器壁上に OHC やプラズマ位置をフィードバック制御するためのセンサコイル等が取り付けられているため、ベーキング用のリボンヒーター等が巻かれていない。このために、真空容器壁のコンディショニングには放電洗浄 (plasma discharge cleaning: PDC) が用いられている。PDC では、 $15 \text{ kA}$ 、 $2 \text{ ms}$  の水素ガス放電が約 1 分間隔で行われている。PDC によって、真空容器本体の圧力は  $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  に下がる。

## 6 ガス供給方法とガス種

RELAX でのガス供給方法には 2 種類ある。第一が、ピエゾバルブを用いたガスの CW 供給である。この方法では、ピエゾバルブに印加する直流電圧を調節することでガスを CW 供給させつつ、排気用ポンプによる排気とバランスさせることで、真空容器内のガス圧を一定値に調節する。このピエゾバルブは PDC に用いられている。第二が、電磁バルブを用いたガスのパルス供給である。この方

法では、電磁バルブの背圧と電磁弁の開閉時間を調節することで、ガスの供給量が決定されている。

RELAX では、 $H_2$  と  $D_2$  のどちらかのガスが使われている。それらが混合されたガスを供給するシステムは準備中である。

## 7 計測器

表 3 RELAX で用いられている計測器の一覧。

| 計測器         | 測定量                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| ロゴスキーコイル    | プラズマ電流 $I_p$<br>各コイル電流                                   |
| フラックスループコイル | ループ電圧 $V_{loop}$<br>トロイダル磁束                              |
| 磁気プローブ      | エッジの磁場 $\vec{B}(\vec{r})$<br>イオン速度場 $\vec{u}_i(\vec{r})$ |
| 複合プローブ      | 電場 $\vec{E}(\vec{r})$<br>磁場 $\vec{B}(\vec{r})$           |
| 干渉計         | 線平均電子密度 $\bar{n}_e$                                      |
| トムソン散乱      | 中心電子温度 $T_{e0}$                                          |
| 軟 X 線計測     | $\bar{T}_e$<br>3 次元プラズマ形状                                |
| 分光器         | $H_\alpha$<br>イオン速度場 $\vec{u}_i(\vec{r})$                |

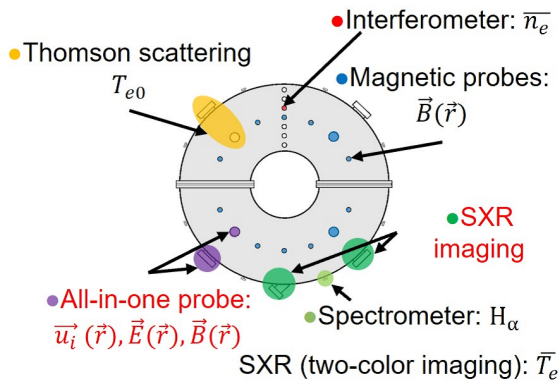


図 4 RELAX で用いる計測器の配置。

表 3 と図 4 は RELAX で用いている計測器の一覧と配置を示している。RELAX プラズマは比較的温度が低いので、受動的計測法の他に能動的計測法も用いられている。以下に示されている測定例

は RELAX で RFP プラズマを形成した場合に取得されたデータである。

### 7.1 プローブ計測

#### 7.1.1 磁気プローブ

RELAX では、プラズマエッジで 3 軸  $(r, \phi, \theta)$  方向の磁場成分を測定可能な磁気プローブが用いられている。磁気プローブはコイルを貫く磁束が起電力の積分した値に比例することを利用して磁場成分を測定する。測定された磁場  $B$  は平衡成分  $B_0$  と揺動成分  $b$  に分けて考えることができるので、複数の測定位置の  $b$  からトロイダルモード数  $n$  が得られる。図 5 は RFP プラズマでのモード解析例を示している。ここで、 $b_\phi^{m=1,n}$  はトロイダルモード数  $n$  の  $m = 1$  モードの振幅を表している。 $N_s = \left( \left[ \sum_{n=4}^8 \left( \frac{(b^{1,n})^2}{\sum_{n=4}^8 (b^{1,n})^2} \right) \right]^{-1} \right)$  は  $m = 1$  モードのトロイダルモードスペクトルの広がり の程度を表している。 $N_s < 2$  の場合、RFP プラズマのコア領域が準ヘリカル軸対称 (QSH) 状態であると考えられている。つまり、このエッジの磁場測定結果は RELAX でも RFP プラズマのコア領域が QSH 状態に変形していることを示唆している [10]。

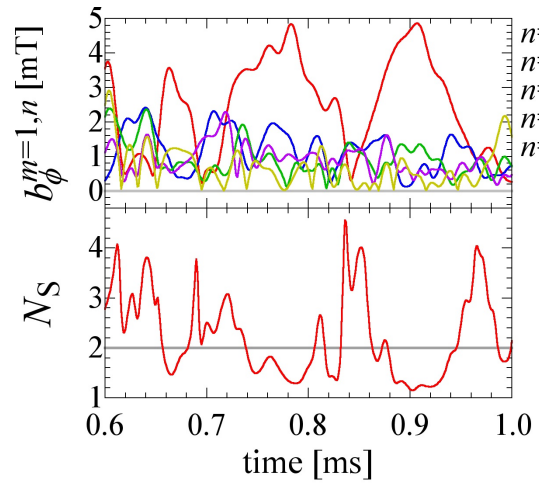


図 5 プラズマ電流のフラットトップにおける単一の支配的な  $m = 1/n = 4$  モードの準周期的振動とそれに伴うスペクトル指数  $N_s$  の変化。Ref. [10] Fig. 3 より引用。

#### 7.1.2 複合プローブ

RELAX プロジェクトでは、正準ヘリシティーおよび 2 流体プラズマ状態の実験的探索のために、複合プローブとそれに用いる独自の絶縁アンプも開発している [40]。図 6 は複合プローブの模式図を示している。この複合プローブは、マッハプローブ、キャパシティブプローブ、磁気プローブで構成されている。この複合プローブのマッハプローブ

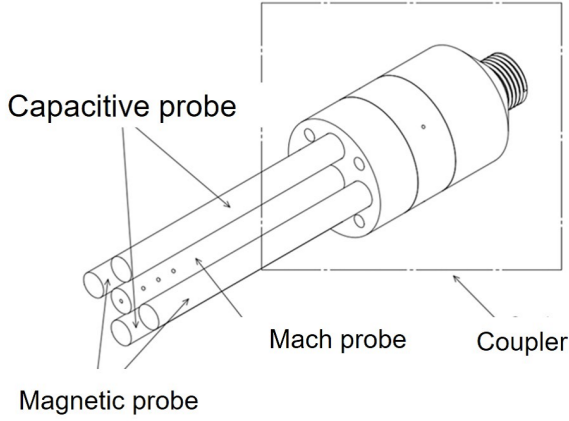


図6 複合型プローブのプロトタイプの様式図。

を用いて、イオン飽和電流を異なる4か所、あるいは、6か所の測定点で測定することで、原理的にそれら多点を頂点とする多面体の重心位置における渦度ベクトルも得られる。

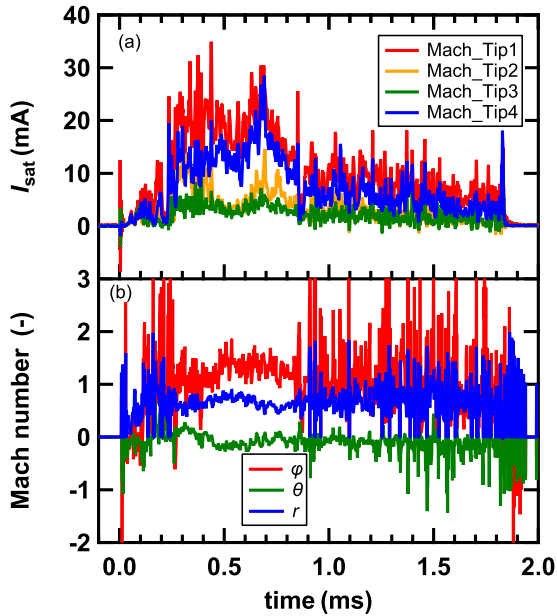


図7 複合プローブの初期実験で計測されたイオン飽和電流  $I_{\text{sat}}$  とマッハ数の時間発展。

現在、複合プローブの動作テストが行われている。図7は複合プローブから得られたイオン飽和電流  $I_{\text{sat}}$  とマッハ数の時間発展を示している。ここで、マッハ数はマッハプローブに取り付けてある4つの電極の  $I_{\text{sat}}$  から求められている。マッハ数の値は多面体の幾何学的性質を用いて計算されている。図7(b)より、RELAX-RFPプラズマの  $\phi$  方向のマッハ数は1.5、 $\theta$  方向は0.1、 $r$  方向は1.0となっている。これらの初期結果はRELAXプラズマ中にフローがあることを示しているが、そのフ

ローの方向性については更なる検討が必要である。

## 7.2 電子密度計測

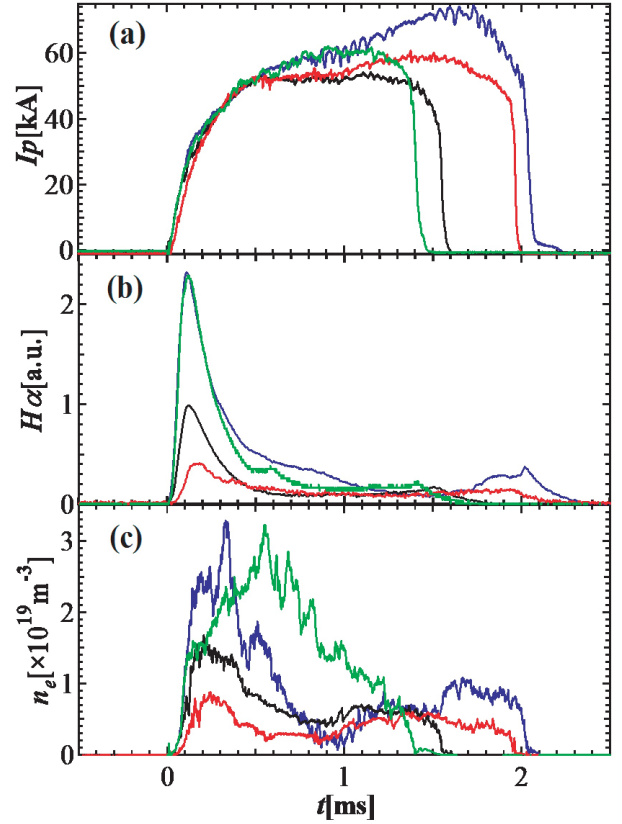


図8 (a) プラズマ電流、(b)  $H_{\alpha}$  線強度、(c) 線平均電子密度の典型的な波形。線の色は充填ガス圧の違いを表しており、それぞれ赤 (0.1 mTorr)、黒 (0.2 mTorr)、青 (0.4 mTorr)、緑 (0.4 mTorr) である。Ref. [41] Fig. 2 より引用。

電子密度計測には、140 GHz の干渉計が用いられている。干渉計はプラズマを透過したミリ波にプラズマ密度に比例した位相変化が生じることを利用して、線平均電子密度  $\bar{n}_e$  を測定することを原理としている。図8はRELAX-RFPプラズマでの測定例を示している。4種類の電流波形はそれぞれ0.1、0.2、0.4 mTorrの3つの異なる充填ガス圧に対応している。そのうちの2つは同じ充填ガス圧0.4 mTorrの場合で、密度の挙動が異なるものである。図8(c)の青線は緑線とは異なり、最初の密度のピーク後に急激に減少している。この急激な密度減衰は密度ポンプアウトと呼ばれている。 $B_{\phi}$  の反転には0.3-0.4 msの時間が必要とされるので、この密度ポンプアウトはRFP磁気面の形成が不十分のために生じている可能性が高い。密度ポンプアウトはRFPプラズマで広く観測されている挙動である[41]。RFP配位形成後にプラズマ密度が上昇しない理由については、リサイクリング率が低いこと



に起因していると考えられている。実際、RELAXでは理想キンクモードに対する安定性を確保するためにリミターも使われていない。結果として、リサイクリング率が低くなると考えられている。

### 7.3 電子温度計測

#### 7.3.1 トムソン散乱計測

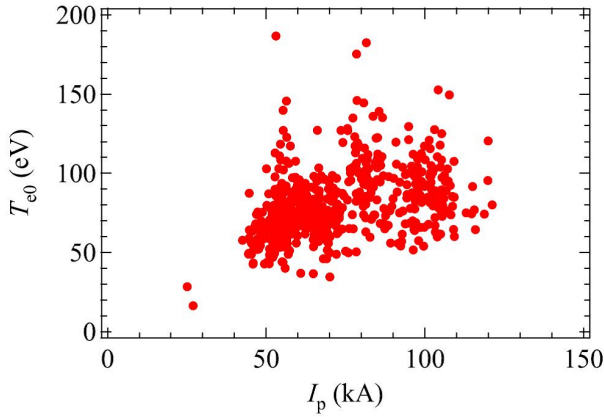


図9 トムソン散乱より測定される中心電子温度のプラズマ電流依存性。Ref. [42] Fig. 5 より引用。

トムソン散乱計測はプラズマに短波長のレーザーを入射する。レーザー源には、第一放射波長 1064 nm、最大出力 240 MW の Nd:YAG レーザー (Quantel 社製 YG982) が用いられている。そのレーザー光の 90 度散乱光のドップラー広がり測定することで、電子温度を局所的に求める計測器である。図 9 は中心電子温度  $T_{e0}$  の  $I_p$  依存性を示している。図 9 より、 $T_{e0}$  は約 100 eV であり、 $I_p$  と相関している [42]。

#### 7.3.2 ダブルフィルターを用いた軟 X 線計測

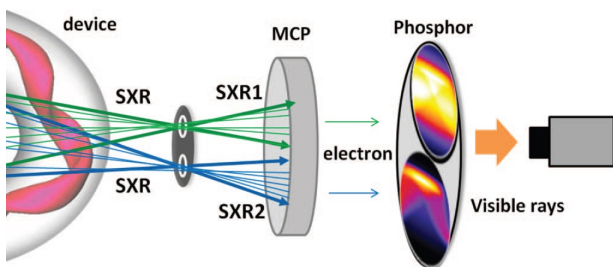


図 10 ダブルフィルターを用いた軟 X 線計測手法の模式図。Ref. [43] Fig. 1 より引用。

図 10 はダブルフィルターを用いた軟 X 線 (SXR) 計測法の概念図を示している。この計測法は、第一に、電子の偏向に起因する SXR を 2 種類の異なるフィルター (Al, Zr) を透過させる。第二に、それらの透過光を MCP で 2 次電子に変換する。その 2

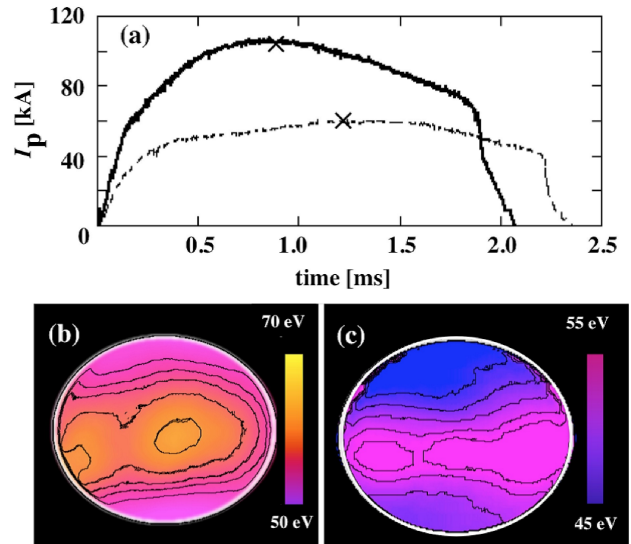


図 11 (a) 2 つの放電における  $I_p$  の時間変化とそれぞれの放電におけるダブルフィルターを用いた軟 X 線計測の撮影結果 (b)  $I_p = 100$  kA (c)  $I_p = 60$  kA。Ref. [12] Fig. 2 より引用。

次電子が蛍光盤の方向へと加速されて、蛍光盤に当たる際、蛍光が生じる。この蛍光画像が高速カメラで撮影される [43]。この際、蛍光の強度比が  $T_e$  に依存するので ( $\frac{P_{Zr}}{P_{Al}} \propto f(T_e)$ )、最終的に線平均電子温度  $\bar{T}_e$  の時間発展が測定される。図 11 は RFP プラズマでの典型的な測定例を示している。 $\bar{T}_e$  は  $I_p$  と相関しており、他の測定器で得られたプラズマコア及びエッジの  $T_e$  とも符合している [12]。

#### 7.4 画像データからのプラズマ形状の再構成

図 4 に示すように、RELAX では接線方向だけでなく垂直方向からの SXR 画像計測も行われる。

##### 7.4.1 接線方向からの軟 X 線画像計測

接線方向からの SXR 画像計測では、RFP プラズマの内部磁気面の 3 次元立体構造が推定される。図 12 は接線方向からの撮影画像の実験値と計算値を示している。ここで、図 12(a) は  $I_p = 60$  kA、平均トロイダル磁場  $\langle B_\phi \rangle = 30$  mT の時の実験結果を示している。この結果より、プラズマが QSH 状態にあるような場合、 $m = 1/n = 4$  モードが磁気揺動の支配モードであることがわかる。また、図 12 より分かるように、プラズマコア部のヘリカル変形領域で実験値と計算値がよく一致している。

##### 7.4.2 マルチピンホールを用いた軟 X 線画像計測

図 13 は一つのビューイングポートに取り付けられた薄い円盤上に開けられた複数のピンホールを通して複数の SXR フィラメントを測定し、プラズマ形状を推定する手法を説明している [45]。この取得された SXR 画像を基底画像データセットの級数和に分解することでプラズマの 3 次元形状が再



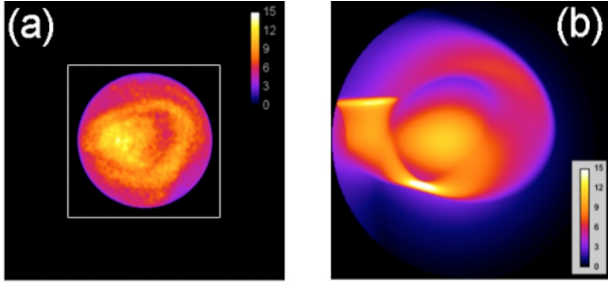


図 12 接線方向からの (a) 実験と (b) 計算の軟 X 線画像の比較。Ref. [44] Fig. 5 より引用。

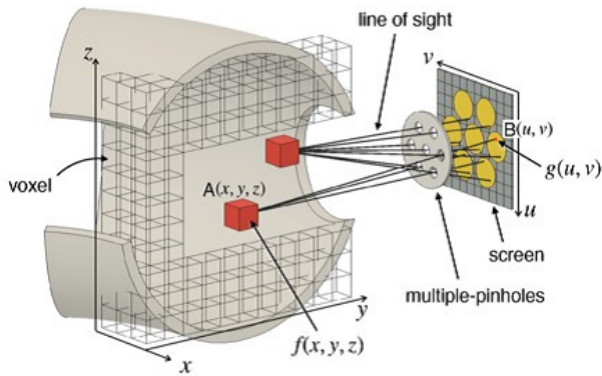


図 13 1つのビューイングポートからマルチピンホールを用いた軟 X 線画像計測手法の概念図。Ref. [45] Fig. 1 より引用。

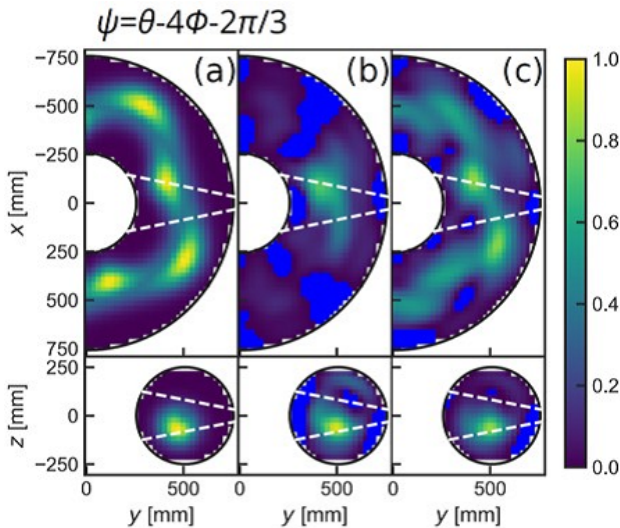


図 14 (a) テストデータと (b) Ridge 回帰 (c) Lasso 回帰を用いて得られた 3 次元再構成の数値データの断面図。白い破線は、マルチピンホールカメラの視野の境界を示す。Ref. [45] Fig. 6 より引用。

構成される。図 14 に示すように、プラズマの形状をなにも仮定することなく、 $T_e$  と  $n_e$  の 3 次元分布を再構成する原理が確立されており [45]、現在この実験的検証を進めている [46]。

## 8 プラズマの生成と平衡・安定性の制御

表 4 は RELAX の典型的なプラズマのパラメータを示している。

表 4 RELAX 装置での典型的なプラズマパラメータ。

| パラメータ                                          | RFP     | トカマク  |
|------------------------------------------------|---------|-------|
| プラズマ電流 $I_p$ (kA)                              | ~ 125   | ~ 20  |
| 放電時間 $t_p$ (ms)                                | < 4.0   | ~ 5   |
| 電子温度 $T_e$ (eV)                                | ~ 100   | 計測中   |
| 電子密度 $n_e$ ( $\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ) | 0.2 ~ 3 | 計測中   |
| トロイダル磁場 $B_\phi$ (T)                           | < 0.05  | < 0.2 |
| プラズマ断面                                         | 円形      | 円形    |

### 8.1 プラズマ生成

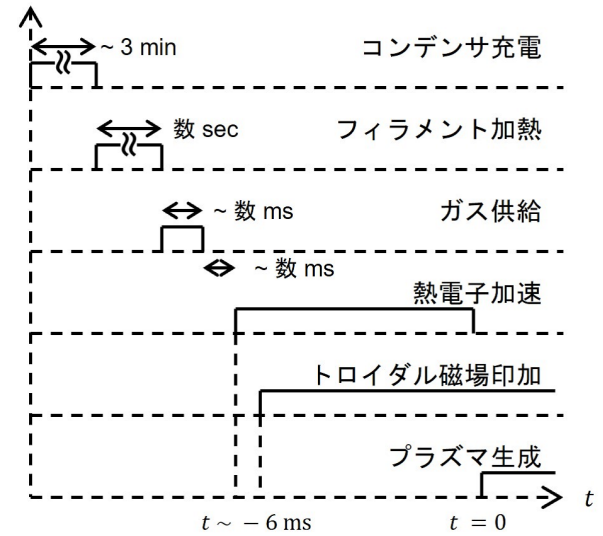


図 15 放電のシーケンス図。

RELAX では、鉄芯を利用した誘導電場によるプラズマ電流の立ち上げと維持、および、電子加熱が用いられている。この際、予備電離には、フィラメントからの熱電子放出が利用されている。図 15 は典型的な放電シーケンスの概要を示している。第一に、各コンデンサが設定電圧まで充電される。充電完了後、予備電離のためにフィラメントが一定の時間加熱される。その後、電磁弁からガスが供給される。プラズマ生成の数 ms 前からフィラメントに

加速電圧 (約 100 V) が印加され続けており、この時間中、熱電子が真空容器内に放出され続ける。放出された熱電子は、あらかじめ印加されている  $B_\phi$  による  $\nabla B$  ドリフトにより、真空容器の下部から  $Z$  軸方向、つまり、真空容器の中央部へと侵入している。最後に、オーミック加熱により、プラズマを生成する。

RFP プラズマの生成方法については以下のとおりである。磁束浸透時間  $\tau$  より十分短い時間で  $I_p$  を立ち上げることで、真空容器の磁束を保持する作用により、真空容器内に自己反転 (self reversal) RFP 配位が形成される。 $I_p$  の立ち上げと同時に、つまり、OHC を駆動する際に、TFC に逆方向の電流を流すことで、反転トロイダル磁場がプラズマに印加される。このとき、真空容器外側の反転トロイダル磁場が  $\tau$  程度の時間で内部に浸透して、内部の自己反転 RFP 配位の端の反転磁場とマッチする。マッチすると、真空容器壁を流れるポロイダル磁場は 0 となる。その状態を維持するように各コイルに電流を流す。このような RFP 生成法を aided self-reversal 法と呼ぶ。

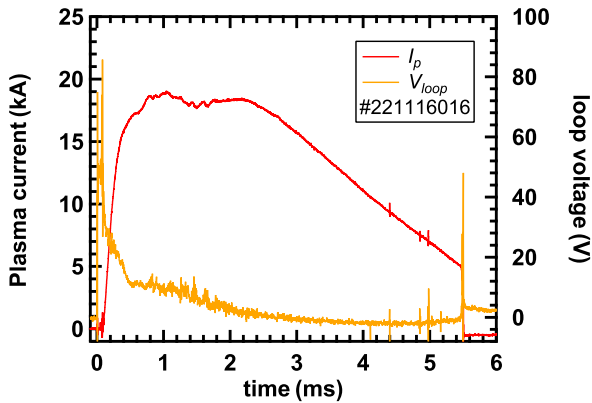


図 16 トカマクプラズマの初期実験でのプラズマ電流とループ電圧の時間発展。

図 16 は RELAX でのトカマクプラズマの初期実験の結果を示している。図 16 からわかるように、 $I_p$  は  $t \sim 2$  ms まで比較的フラットである一方で、 $t \sim 2$  ms 以降は緩やかに減衰する。このように放電時間が短い理由としては、初期実験では垂直磁場やフィードバック制御システムによるプラズマ位置制御が行われていない。加えて、RELAX にはリミッターがないために、プラズマの最外殻磁気面が真空容器壁に接触しているかもしれない。これらについては、現在、実験での改善を進めている。

## 8.2 プラズマの平衡制御

原理的に、トーラスプラズマの  $B_\phi$  は  $R$  に反比例するため、プラズマは  $+R$  方向にシフトする。このシフトを抑えるために、垂直磁場が印加される。水平磁場は、主に真空容器の軸と TFC の軸の

ずれによって生じる不整磁場を補償するために用いられている。既述の通り、RELAX にもこれら VFC/HFC が備えられている。

既述の通り、RELAX はポロイダルギャップを有している。そのため、プラズマの平衡維持のために真空容器壁を流れるトロイダル電流が  $\phi$  方向に閉じず、ギャップを挟んだサドル電流が形成される。このサドル電流が  $m = 1$  の不整磁場を発生させる。この局所的な  $m = 1$  不整磁場を補償するために、ポロイダルギャップ部に対して、サドルコイルを用いたフィードバック (FB) 制御システムが導入されている。不整磁場を検知するためのサドルセンサコイルはそれぞれのギャップに対して、ポロイダル方向に 8 個ずつ取り付けられている。外部から局所的な  $m = 1$  磁場を印加するためのサドルアクチュエーターコイルは、ポロイダル方向に 4 個ずつ敷設されている。これらを用いた FB システムの動作原理は、第 8.3 節で後述している。

## 8.3 プラズマの MHD 制御

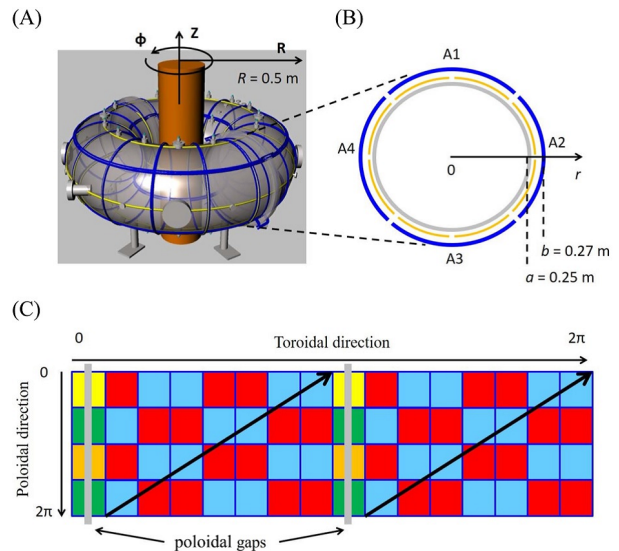


図 17 (A) 真空容器に取り付けられたサドルコイルアレイの鳥観図、(B) ポロイダル断面でのコイルの配置図、(C) SAC のトロイダル・ポロイダル方向の配置図。(B) の黄線が SSC、青線が SAC を示している。(C) の同じ色で表されるコイルが直列に接続されている。Ref. [15] Fig. 3 より引用。

RELAX では受動的なアナログ制御による FB 制御システムを取り入れている。FB 制御システムに用いるコイルアレイの配置が図 17 に示されている。漏洩磁場を検知するためのサドルセンサコイル (SSC) は 128 個 (16 トロイダル  $\times$  8 ポロイダル) 取り付けられている。外部から補正磁場を印加するためのサドルアクチュエーターコイル (SAC) は 64 個 (16 トロイダル  $\times$  4 ポロイダル) 敷設されて

いる。これらとは別に、2つのポロイダルギャップ近傍部には、それぞれ独立のSSCがポロイダル方向に8つ、SACが4つ敷設されている。これらFB用電源については、ギャップ近傍部に6台(3×2)、RWMの制御に2台の合計8台が使用されている。RELAX-RFPでは、 $m = 1/n = 2$ の外部キンクモードが主として生じる。このために、SSC/SACを $m = 1/n = 2$ に対応するように接続して、プラズマ制御がおこなわれている。

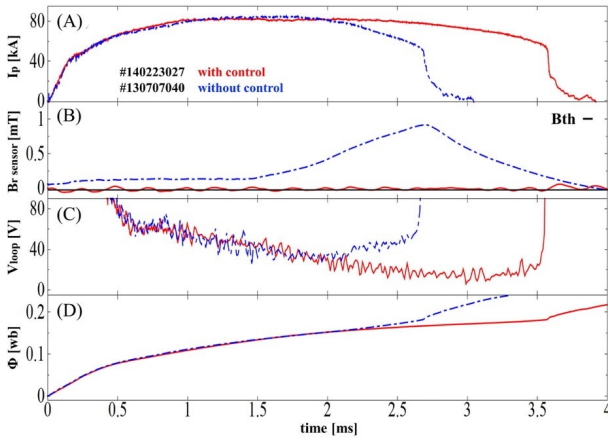


図 18 RWM 制御の放電波形への効果:(A) プラズマ電流、(B) $m = 1/n = 2$ モード振幅  $B_r$  センサー、(C) トロイダルループ電圧、(D) 鉄芯の消費磁束。赤線が RWM 制御あり、青破線が RWM 制御なしの場合を示している。Ref. [15] Fig. 7 より引用。

FB 制御システムの動作原理は以下のとおりである。第一に、SSC より磁場が測定される。次に、検出されたその磁場がコンパレータで設定した閾値を超えると、FB 制御電流がコイルに流れる。ここで、FB 制御電源には IGBT を用いた H ブリッジ回路が使用されており、漏洩磁場の極性反転に応じてコイル電流の向きも反転する。最後に、コイル電流が SAC に流れることで、補正磁場を生成し、漏洩磁場を相殺する。これらの動作を連続的に行うことで、漏洩磁場を設定した閾値以下に抑える。

一般に、RFP 配位では、理想キンクモードが RWM として不安定になる可能性がある。線形安定性解析によると、RELAX の典型的な磁場分布に対して  $m = 1/n = 2$  外部非共鳴キンクモードが成長率最大の RWM となることが示されており [47]、実験結果と一致している。その不安定モードに対するために、図 18 は、FB 制御システムによる RWM の制御例を示している。図 18(B) の青線は、FB 制御をおこなっていない場合、 $t = 1.5$  ms 以降で  $m = 1/n = 2$  モードが成長する様子を示している。一方で、図 18(B) の赤線は、FB 制御をおこなう場合、SSC からの信号が閾値以下に抑えられている

ことを示している。結果として、プラズマの放電時間は、FB なしの場合 ( $\sim 3$  ms) に比べて、ギャップ近傍部の独立 FB 制御とともに 1 ms 程度伸長している。つまり、FB 制御システムが RWM を抑制していることを示している [15]。

## 9 実験遂行の方法とその他

実験条件の設定はコンデンサの充電電圧値が主である。トカマク配位と RFP 配位の切り替え等に応じて、その都度、コイルの接続とコンデンサの構成(並列数/直列数)が変更される。

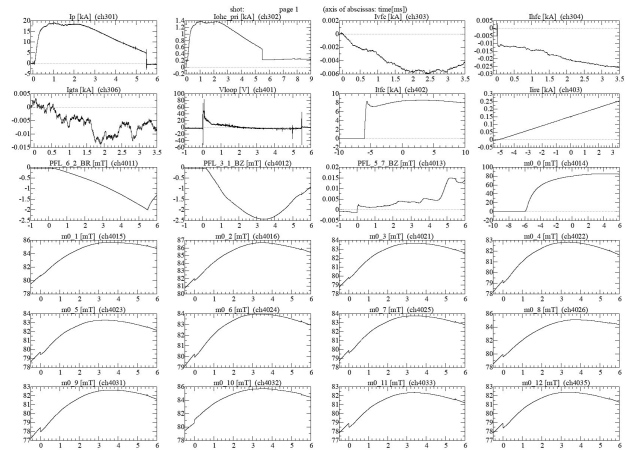


図 19 所得される 1 次データの一例。

データ収集については、CAMAC デジタイザーと DL オシロスコープを用いて、PC に 1 次データを取り込んでいる。取り込まれた 1 次データは C 言語で書かれた独自のデータ処理プログラムで、物理量へと変換される。図 19 は取得されたデータを物理量へと変換した後の波形の一例である。

データ管理については、すべてのデータは外付け HDD とグループ共有の NAS に保存される。実験ノートは excel 上に記載されている。ノートに記載されている事項は以下である。1 ページ目には、実験内容、実験者、実験時間等の基本情報が書かれている。2 ページ目には、CAMAC/DL のチャンネル設定値が示されている。3 ページ目には、プラズマ放電条件や充電電圧等の実験パラメータ値、および、その他の特記事項が記録されている。

現在、NIFS との SNET 共同研究の枠組みで、RELAX 実験データを NIFS サーバで収集・管理・表示のためのデータ処理システムの構築を進めている。現時点では、RELAX の放電データの大半が、NIFS の解析サーバに登録されている。これらのデータは、VPN を介して外部から表示・閲覧することが可能になっている。

## 10 データ解析用ツール

既述の通り、基本的な物理量の解析はショット直後に計算される。主な物理量は、ループ電圧より求



まる鉄芯の磁束、プラズマ抵抗、また磁気プローブ信号から計算されるモード等である。

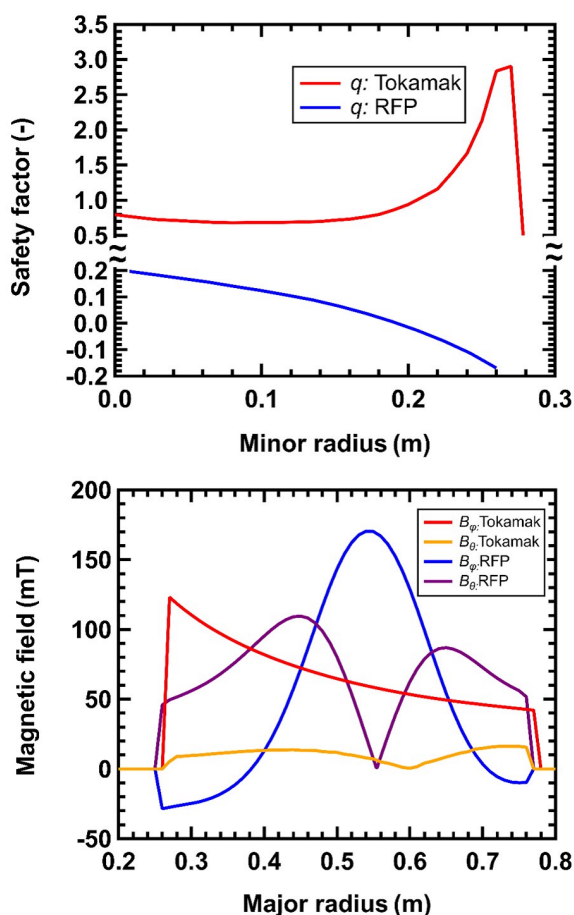


図 20 RELAX での RFP とトカマクプラズマの平衡計算の一例。

その他の解析としては、米国ウィスコンシン大学 MST グループ及びイタリア・コンソーシウム RFX との共同研究により、Grad-Shafranov 平衡解析コード [48]、磁力線追跡コード、SX トモグラフィコードの適用が完了されている。これらのコードは現在においても軽微な改良を重ねながら、データ解析に用いられている。図 20 は平衡計算より求めた RFP/トカマクプラズマの結果を示している。RFP/トカマクともに、 $a < 0.25$  m での  $q$  分布は期待される分布と一致している。ここで、トカマクに関しては、プラズマ内部の磁場計測が未実施のために、内部分布の計算にはいくつかの仮定が含まれている。また、容器壁の外側では磁場を 0 としているため、 $a > 0.26$  m で見られる  $q$  値の減少結果については無視されたい。同様に、 $R > 0.75$  m における磁場分布についても無視されたい。

現在では、RELAX におけるヘリカル平衡の解析を目的として、イタリア・コンソーシウム RFX と SH helicity relaxation 理論によるモデル化 [5]、VMEC コードによる解析 [49] も進められている。

また、シミュレーションについては、NIFS との共同研究により、MIPS コード [4] の適用の他に、NIMROD コードと FORTEC-3D コードの適用が進められている。これらのシミュレーションコードを用いることで、RFP 配位からヘリカル配位への遷移現象の時間発展や新古典輸送などについて、実験結果と理論の比較が進められている。

## 11 安全対策

安全教育については、学生は大学で開講される安全教育講習の受講を必須としている。研究室としては、実験手順や機器の操作方法をマニュアル化して構成メンバーに周知している。実験は 2 人以上で行うことをルールとしており、実験者はプラズマ放電時にシールドルーム内で待機するよう徹底している。RELAX での RFP プラズマ閉じ込め実験では、電子が高エネルギーまで加速されず、硬 X 線は問題にならなかった。しかしながら、トカマクプラズマ閉じ込めの場合、低密度領域でのプラズマ生成が良いならば、硬 X 線が発生する可能性がある。そのため、硬 X 線のモニタリングと対策の準備が進められている。

## 12 まとめと今後の展開

RELAX は RFP だけでなく円形断面トカマク配位も形成できる  $A = 2$  のトロイダルプラズマ装置である。鉄芯を用いてプラズマを立ち上げる方法をとっており、これまでは RFP のヘリカル変形の物理過程、そのための計測法の開発、トロイダルプラズマに共通する FB 制御機構の開発が主として行われてきた。近年、先端プラズマ物理学のテーマを実験的に研究することに注力しており、正準フラックスチューブや 2 流体自己組織化トロイダルプラズマの物理テーマが追及されている。これらのテーマを進めるに伴い、新しい能動および受動的計測器の開発とテストも実施している。

## 謝辞

これまで RELAX 装置に携わってこられた関係各位に深く感謝いたします。本稿の執筆に当たっては、高岡亮太氏、小嶋夏葵氏、佐々木貴弘氏、芦田有司氏、藤原瞳氏から協力を頂きました。また、現在の RELAX プロジェクトの遂行にあたっては、プラズマ基礎工学研究室の BX-U プロジェクトに従事している岡田敏和氏、中島雄太郎氏から学術面で多大なサポートを頂いています。

## 参考文献

- [1] S. Masamune et al. *Fusion Sci. Technol.*, **51**(2T):197, (2007).
- [2] S. Masamune et al. *J. Phys. Soc. Japan*, **76**(12):123501, (2007).
- [3] L. Marrelli et al. *Nucl. Fusion*, **61**(2):023001, (2021).
- [4] N. Mizuguchi et al. *Plasma Fusion Res.*, **7**:2403117, (2012).



- [5] R. Paccagnella et al. *Phys. Plasmas*, **25**(7):072507, (2018).
- [6] R. Ikezoe et al. *Plasma Phys. Contr. F.*, **53**(2):025003, (2010).
- [7] R. Ikezoe et al. *J. Phys. Soc. Japan*, **81**(11):115001, (2012).
- [8] A. Sanpei et al. *J. Phys. Soc. Japan*, **78**(1):013501, (2009).
- [9] S. Masamune et al. *J. Fusion Energy*, **28**(2):187, (2009).
- [10] K. Oki et al. *Plasma Fusion Res.*, **7**:1402028, (2012).
- [11] K. Oki et al. *Fusion Sci. Technol.*, **63**(1T):386, (2013).
- [12] A. Sanpei et al. *J. Phys. Soc. Japan*, **86**(6):063501, (2017).
- [13] K. Oki et al. *J. Phys. Soc. Japan*, **77**(7):075005, (2008).
- [14] H. Tanaka et al. *Plasma Fusion Res.*, **9**:1302057, (2014).
- [15] T. Nagano et al. *Electr. Eng. Jpn.*, **215**(2):e23377, (2022).
- [16] T. Inoue et al. *Fusion Eng. Des.*, **184**:113285, (2022).
- [17] T. Inoue et al. *64th Bulletin of the American Physical Society*, **TP11**:00006, (2022).
- [18] N. Kodama et al. *Plasma Fus. Res.*, **14**:1206088, (2019).
- [19] T. Ninomiya et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**:S11009, (2022).
- [20] S. Nishio et al. *submitted to Jpn. J. Appl. Phys.*, (2023).
- [21] Y. Kawade et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60**:046002, (2021).
- [22] A. Sanpei et al. *Opt. Express*, **28**(25):37743, (2020).
- [23] A. Sanpei et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **47**(7):3074, (2019).
- [24] A. Sanpei et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **46**(4):718, (2017).
- [25] T. Okada et al. *Phys. Lett. A*, **460**:128617, (2023).
- [26] Y. Nakajima et al. *AIP Advances*, **12**(4):045015, (2022).
- [27] Y. Nakajima et al. *J. Plasma Phys.*, **87**(4):905870415, (2021).
- [28] K. Akaike and H. Himura. *Plasma Fus. Res.*, **14**:4401149, (2019).
- [29] T. Kato et al. *Plasma Fus. Res.*, **14**:1201039, (2019).
- [30] K. Akaike and H. Himura. *Phys. Plasmas*, **25**(12):122108, (2018).
- [31] H. Himura et al. *Phys. Plasmas*, **24**(10):102129, (2017).
- [32] H. Himura et al. *Plasma Fus. Res.*, **12**:1201037, (2017).
- [33] S. Kawai et al. *Phys. Plasmas*, **23**(2):022113, (2016).
- [34] H. Himura. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, **811**:100, (2016).
- [35] H. Himura et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**(6):063306, (2016).
- [36] S. Yamada and H. Himura. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**(3):036109, (2016).
- [37] J. Sears et al. *64th Bulletin of the American Physical Society*, **UP11**:00135, (2022).
- [38] S. Masamune and M. Iida. *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, **5**:509, (2002).
- [39] S. Masamune et al. *Plasma Phys. Contr. F.*, **35**(2):209, (1993).
- [40] 高岡亮太、比村治彦. *プラズマ・核融合学会誌*, **99**(1), (2023).
- [41] M. Sugihara et al. *Plasma Fusion Res.*, **5**:S2061, (2010).
- [42] R. Ueba et al. *Plasma Fusion Res.*, **9**:1302009, (2014).
- [43] K. Nishimura et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **85**(3):033502, (2014).
- [44] T. Onchi et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **81**(7):073502, (2010).
- [45] S. Inagaki et al. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, **1036**:166857, (2022).
- [46] S. Inagaki et al. *Plasma Fusion Res.*, **18**:1202010, (2023).
- [47] S. Masamune et al. *J. Phys. Soc. Japan*, **68**(7):2161, (1999).
- [48] A. Sanpei et al. *IEEE Access*, **9**:74739, (2021).
- [49] R. Paccagnella et al. *in the proceedings of the 46th EPS Conference on Plasma Physics*, **P5**:1103, (2019).

# TOKASTAR-2装置の概要

## Overview of TOKASTAR-2 Device

藤田隆明、岡本敦

名古屋大学工学研究科

### 1. はじめに

TOKASTAR-2は、トカマクプラズマへのヘリカル磁場印加の効果の研究を主な目的として製作された小型トーラス装置である[1-3]。ヘリカル配位での電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 加熱によるプラズマ閉じ込め研究も行っている。ヘリカル磁場コイルは連続巻きではなく、トーラス外側、上部、下部に分割された局所コイルとなっている（トーラス内側には存在しない）。トカマク運転時のプラズマ電流は2 kA程度、持続時間は0.5 ms程度、プラズマ大半径は0.11-0.12 m程度、プラズマ小半径は0.04 m程度である。

TOKASTAR-2は2009年に運転を開始した。当初はトロイダル磁場コイル (TFコイル)、オーム加熱コイル (OHコイル)、定常垂直磁場コイル (VFコイル)、外側ヘリカルコイル (HFコイル) の4種類のコイルを有した。2012年に、パルス垂直磁場コイル (PVFコイル) と上下のヘリカルコイル (AHFコイル) が追加された。HFコイルに加えてAHFコイルを使用することで真空閉磁気面を形成できるようになった[4]。PVFコイルの使用により、従来100 A程度であったプラズマ電流[4]が1 kAを超えるようになった[5]。真空容器に流れる渦電流の効果で、垂直磁場の decay indexが大半径方向外側で1.5を超え、水平位置不安定発生しやすい状況であった。ヘリカル磁場印加によりその安定化を実証した[6]。2016年に、decay index 改善のためのPVFコイルの垂直位置の変更[7]、縦長断面プラズマ形成のための形状制御コイル (SCコイル) の設置、およびプラズマ境界を規定するポロイダルリミタの設置が行われた。2017年のポロイダル磁気プローブアレイ (PMP) の設置により、プラズマ位置形状を推定できるようになった[8]。2020年には、上下の三角形のヘリカルコイル (ULTコイル) [9]が設置され、現在に至っている。最近では、トカマクプラズマへの局所ヘリカル磁場印加の垂直位置安定化効果の研究[10]を主な目的としている。本稿では、TOKASTAR-2装置の概要について記述する。

### 2. 実験室の環境、インフラ

TOKASTAR-2 の実験室は4階で、研究室の教員や学生の居室と同じフロアにあり、往き来は便利である。床下に補強レール1本が敷設しており、その線上に本体やコンデンサバンクを設置している。機器の搬入は、幅 1.2 m 高さ 2.1 m のドアを通して行うため、設置できる機器の大きさはそれで制限されている。実験室の広さは、11 m × 7.8 m (86 m<sup>2</sup>)、天井高さは 3.4 m (空調の室内機までの高さは 2.7 m) である。補強レールと同じ線上に天井レール1本が設置され、チェンブロック 2 台が利用可能となっている。電力設備として三相 200 V の分電盤 3 面がある。冷却水は使用していない。実験室内に制御卓もあり、本体装置を目の前に見ながら実験することになる。制御卓付近からの実験室の眺めを図 1 に示す。

### 3. 装置の構造

図 2 に TOKASTAR-2 の本体部分の鳥瞰図と断面図を示す。

真空容器はステンレス製で、直径 60 cm、高さ 60 cm の円筒形である。側面部の厚さは 5 mm、

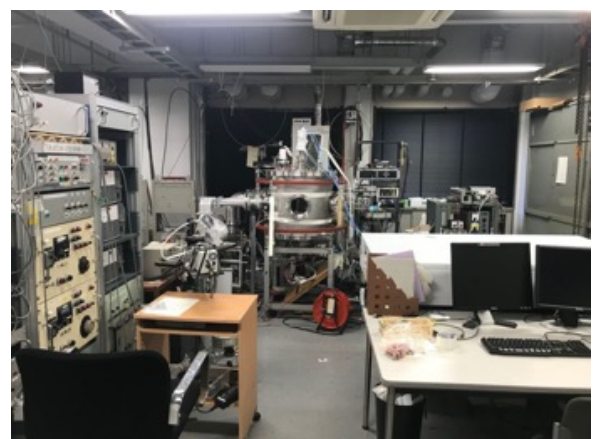


図 1 TOKASTAR-2 実験室の写真。中央が TOKASTAR-2 本体。左側は充放電制御盤など。右側が制御卓。写っている範囲は実験室の半分程度で、コンデンサバンクや充電器は制御盤のさらに左側のスペースにある。

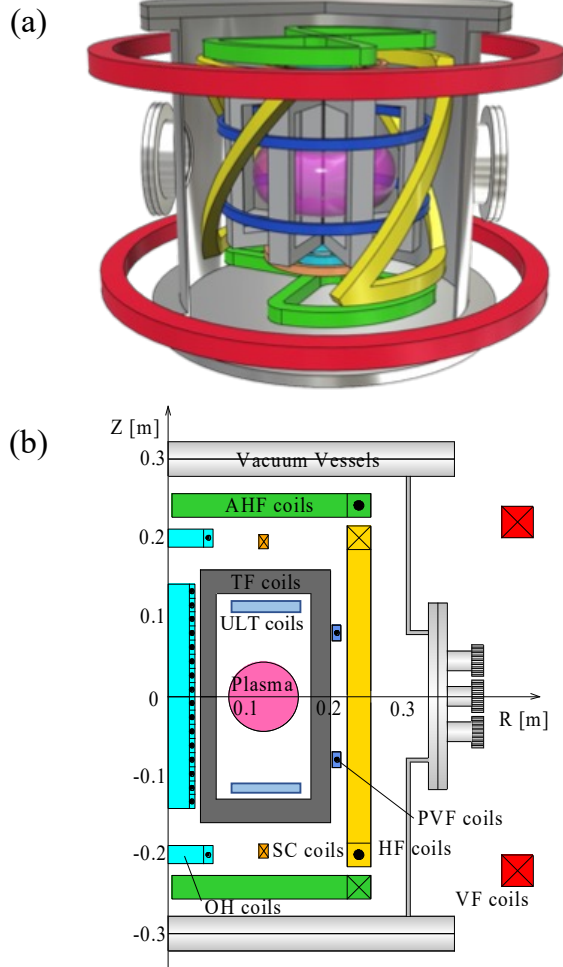


図 2 (a) TOKASTAR-2 本体部分の(a)鳥瞰図、(b)断面図。

上下フランジの厚さは 22 mm である。トロイダル方向に絶縁がないため、トカマク運転時にはプラズマ電流の数倍に達する大きな渦電流が流れ、プラズマ位置形状計算や平衡解析へのその影響の評価が重要な課題となっている[11]。側面にはトロイダル方向 90 度おきに大径 (JIS V150) ポートがあり、上部フランジには、中心部のコイル用電流導入用フランジの他に、同じく 90 度おきに V70 ポートが 4 つある。

磁場コイルは全部で 8 種類あり、1 種類 (VF コイル) を除くすべてのコイル (TF コイル、OH コイル、PVF コイル、SC コイル、HF コイル、AHF コイル、ULT コイル) が真空容器内に設置されている。コイル用電流導入端子は 32 個 (16 回路分) ある。底面フランジが架台に固定され、全ての真空容器内コイルおよび容器内機器は底面フランジから支持されている。真空容器内の磁場コイルの結線の変更や、磁気プローブの設置などの真空容器内作業は、真空排気マニホ

表 1 TOKASTAR-2 のコイル

| コイル名称   | 個数 | 導線径<br>(mm) | ターン数 |
|---------|----|-------------|------|
| TF      | 8  | 3.2         | 50   |
| OH (中心) | 1  | 3.2×2       | 42   |
| (上下)    | 2  | 3.2         | 22   |
| PVF     | 2  | 3.0         | 20   |
| SC      | 2  | 2.6         | 9+5  |
| VF      | 2  | 3.2         | 100  |
| HF      | 2  | 3.2         | 98   |
| AHF     | 4  | 2.6         | 126  |
| ULT     | 4  | 2.0         | 60   |

ールドやマイクロ波入射用導波管、VF コイルなどを取り外した後、チェーンブロックを使用して真空容器の上部フランジと胴部を吊り上げて取り外して行う。

プラズマ境界を規定するリミタはステンレス製で、トロイダル磁場コイルおよび ULT コイルの内側に設置されている (トロイダル方向 1 箇所)。このリミタで規定される軸対称な領域をプラズマ生成領域とみなすと、その中心の大半径は 123 mm で、断面は、R 方向 96 mm、Z 方向 200 mm の長方形である。

磁場コイルは、すべてエナメル銅線を巻いてエポキシ樹脂で固定したもの (モールドコイル) で冷却はない。各種コイルの個数、導線径、ターン数を表 1 に示す。

TF コイルは 8 個で、ULT コイルを除くと最もプラズマに近く、他のコイルを支える構造体ともなっている。

OH コイルは中心ソレノイドと上下 1 個ずつの円形コイルからなり、空芯である。大電流を流すため、中心ソレノイドでは銅線を 2 本並列としている。コイル電流値は最大 2 kA の範囲で使用している。

PVF コイル (上下 2 個) はトカマク放電の際の垂直磁場生成に用いる。プラズマ電流に近い時定数の電流波形とするため、上下並列接続として用いている

大気側の VF コイル (上下 2 個) は、インダクタンスが大きいので定常電源に接続してヘリカル配位の実験の際の垂直磁場生成に用いる。また、結線を変更して水平磁場コイルとして、トカマク実験の際にプラズマの上下位置を調整するための定常水平磁場の生成を行う。

SC コイルは、TF コイルの上下にあり、非円形断面トカマクを生成するための四重極磁場の生成に用いる。垂直位置の帰還制御のための

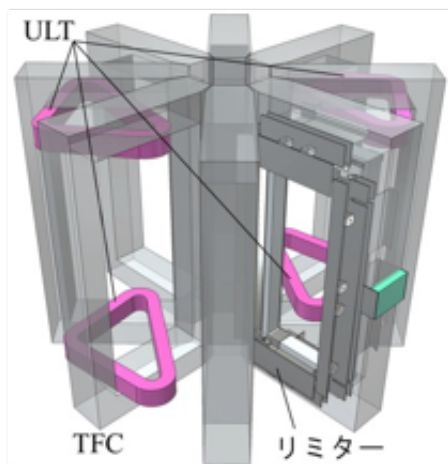


図3 ULT コイル

高速水平磁場コイルとしても使えるように、9ターン+5ターンに分かれているが、通常、それらを直列に接続し14ターンのコイルとして使用している。PVFコイルよりインダクタンスが小さいので上下直列接続でプラズマ電流に近い時定数の電流波形が得られる。

HFコイルは、TFコイル側面に2個設置された平行四辺形コイルのコイルである。このコイルが生成する実効磁場は主に垂直成分のみでそれだけでは真空閉磁気面はできないが、VFコイルおよびAHFコイルあるいはULTコイルと組み合わせることで真空閉磁気面の形成が可能である[4, 5, 12]。

AHFコイルはTFコイルの上下に各2個設置された扇形のコイルである。HFコイル、AHFコイルは定常電源に接続して使用する。

ULTコイルはTFコイルの内側（プラズマ生成領域の上下）に上下各2個設置された三角形コイルである（図3）。AHFコイルが生成する実効水平磁場が小さく、トカマクプラズマの垂直位置安定化が得られなかったため設置された[9]。AHFコイルの辺がトロイダル磁場に平行あるいは垂直なのに対して、ULTコイルの3辺のうち2辺はトロイダル磁場に対して斜めの角度となっていることとAHFコイルに比べてプラズマからの距離が約半分になっていることが実効水平磁場の増大に寄与している。定常電源あるいはパルス電源に接続して使用する。

#### 4. 磁場コイル電源

コンデンサバンクとして、10kV（使用電圧は2kV以下）、0.2mFのものが6個あり、TFコイル、OHコイル、PVFコイルに使用する。また、近年購入した比較的低圧（1kV）のものと

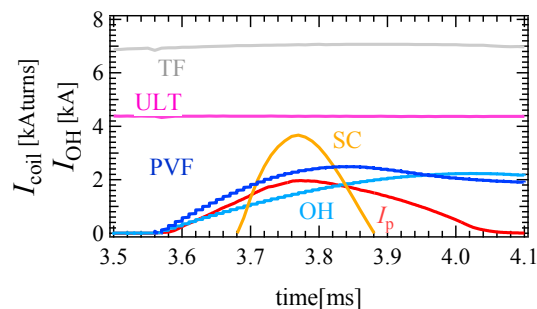


図4 典型的なトカマク放電における各種磁場コイル電流とプラズマ電流の波形

して、1mFが4個、0.5mFが2個、0.1mFが7個あり、主にSCコイルおよびULTコイルに使用する。

スイッチとして、イグナイトロンが2台あり、OHコイル電源のメインとクローバーに使用する。TFコイル、PVFコイル、SCコイル、ULTコイルにはサイリスタとダイオードが使用される。充電器としては核融合研から移設した3系統と東京大学（Proto RT）から移設した2系統を用いている。

定常電源として60V、60A 2台、80V、30A 2台などがある。

非円形断面トカマクへの局所ヘリカル磁場印加実験のときの通電波形の例を図4に示す（ULTコイルにコンデンサ電源を使用した場合）。TFコイル、ULTコイルはインダクタンスが大きく通電開始から電流ピークまで数msかかる。図のショットでは、ULTコイルが時刻 $t = 0.5$  ms、TFコイルが $t = 1.45$  msに通電を開始しており、図に示す時間帯はそれらのピーク付近で、プラズマ電流持続時間（約0.5ms）の間ではそれらはほぼ定常である。OHコイル、PVFコイルの通電をほぼ同時に開始してプラズマ電流を駆動してトカマク配位を形成し、プラズマ電流のピーク付近でSCコイルを通電して縦長断面形状としている。

#### 5. 真空排気装置と壁調整方法

真空排気は350 L/sのターボ分子ポンプで行う。粗引き用のバイパスを設けている。ロータリーポンプの排気口から屋外への排気ルートを設けている。

壁調整法としては、最高温度60度程度のベーキングとECR放電洗浄（30-60秒間隔で5ms程度の放電）を行う。真空容器内の（非金属）構造材が多いため、到達真空度は $1 \times 10^{-6}$  torr程度である。数時間の開放であれば1日で $10^{-5}$



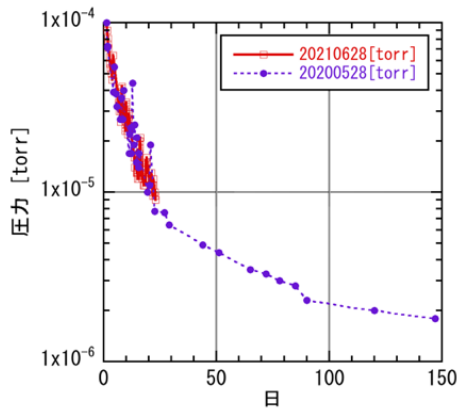


図5 長期間の大気開放後の排気曲線

torr 以下となるが、真空容器の上部フランジと胴部を取り外して行うような長期間の大気開放作業後では圧力の下がり方が遅く  $10^{-5}$  torr に達するのに 20 日、 $3 \times 10^{-6}$  torr に達するのに 75 日程度かかっている（図 5）。ベーキングヒーターが真空容器胴部にしかないので真空容器内構造物の温度がほとんど上がっていないと思われる。真空容器内構造物が載っている真空容器底面フランジにヒーターを取り付けることを検討している。

## 6. 粒子供給装置、加熱装置

ガス導入方法には定常とパフがある。定常では、ガス圧力が  $2 \times 10^{-4}$  torr 程度となるように、ニードルバルブで導入量を調整する。ガス消費量を抑えるため、導入中には真空排気のゲートバルブを絞っている。パフの場合は、ピエゾバルブを用いてプラズマ生成の数秒前（タイマーで設定）からガスを導入する。

プラズマ生成に使用するガス種は、窒素またはヘリウムである。他に水素の供給系を準備中である。

加熱装置として、2.45 GHz, 2 kW のマグネトロンを使用する。トロイダル磁場 0.0875 T での基本波共鳴加熱を行う（ECR プラズマ）。ヘリカル配位の実験だけでなく、トカマク放電の際にも予備電離として使用する。コーナー部の導波管の接続の仕方で O モード入射と X モード入射の切り替えが可能である。トカマク放電の場合、ガス圧が低い方ほど高いプラズマ電流が得られる傾向にある。O モード入射と X モード入射を比較した結果、X モードの方がより低いガス圧での着火が可能であったので、通常 X モード入射としている。

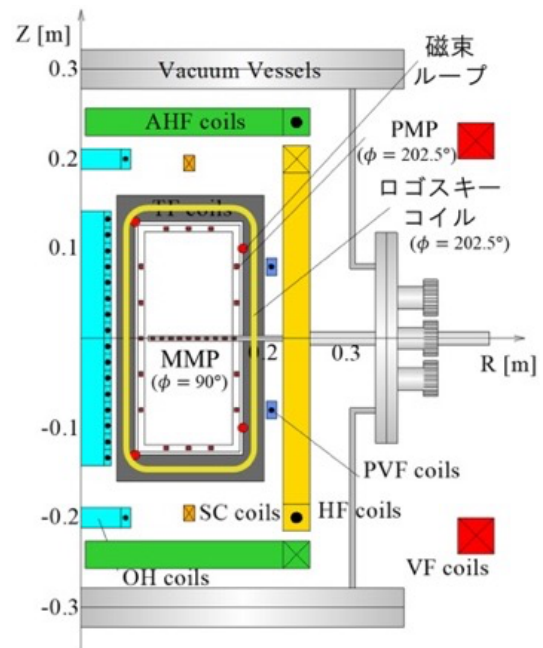


図6 主な磁気計測器

## 7. 主な計測器

ECR プラズマ、トカマクプラズマの生成時刻、持続時間の確認はそれぞれ、アバランシェフォトダイオード (APD) によるプラズマからの発光計測、ログスキーコイルによるプラズマ電流計測により行う。

### 7.1 プラズマの位置形状の計測

主目的であるトカマクプラズマの位置制御実験においては磁気計測が中心となる（図 6）。高速度可視カメラ（核融合研からの借用品）による撮影もプラズマの位置推定に重要である。TF コイルのため径方向の視野が限られる問題があったが、真空容器内にミラーを設置することで弱磁場側リミターまでの撮影が可能となった[13]。

磁気計測器は、ログスキーコイル、磁束ループ、磁気プローブアレイ（PMP、TMP）、可動磁気プローブ（MMP）からなる。以下にそれぞれについて記述する。

フラックスループは TF コイルの内側に、R 方向内外 2 本ずつ（計 4 本）ある。

ポロイダル磁気プローブアレイ（PMP）は、プラズマ生成領域をポロイダル方向に一周するように配置された全 16 チャンネルのプローブアレイである[8]。リミターのすぐそばに、その陰となるように配置されている。12 チャンネルは Z 方向の磁場、4 チャンネルは R 方向の磁場を計測する。プローブは、模型用モーターを

用いた手製巻き線機でセラミックス（マコール）製ボビンに 0.1 mm 銅線を巻いて作成した（直径 4.2 mm、長さ 4.5 mm、180 ターン）。セラミックス製のケース内にプローブを格納する。ケースは真空封止しておらず、多チャンネル電流導入端子を用いて信号を取り出す。

可動磁気プローブ（MMP）は、プラズマ内部を含む赤道面での Z 方向磁場を計測する[6]。外径 6 mm、内径 4 mm のガラスジャケット内（大気）に設置。9 チャンネル（ほぼ 10 mm おき）。ボビンは断面が 2.2 mm×6 mm の長方形、長さ 1.8 mm、導線径 0.06 mm、60 ターン。ストロー内でエポキシ含浸して製作した。ガラスジャケットは 15 mm 径の SUS 管に接続されている。ゲージポートから挿入され、ショット間に手動で抜き差しを行う。TF コイル通電試験により、トロイダル磁場による出力信号が最小となる角度に設定する。プラズマ中の磁場分布計測からプラズマ電流分布やプラズマの径方向位置の推定を行う [6, 7, 11]。ただし、プラズマへ挿入するとプラズマ電流が低減してしまう問題がある。

トロイダル磁気プローブ（TMP）は、TF コイルの外側脚部の側面に設置され、赤道面での Z 方向磁場をトロイダル方向 8 箇所計測する。ヘリカル磁場を印加したときのトカマクプラズマの三次元変形を検出し、三次元平衡を同定することを主目的とする。磁場揺動のトロイダルモードの同定にも用いられる。

なお、プラズマの位置形状計算には用いていないが、真空容器に流れる渦電流の評価のため、2022 年に大気側に外側磁気プローブ（OMP）が設置された。ある大半径位置での Z 方向 5 点での Z 方向磁場をトロイダル方向に連続的に計測できる。

## 7.2 プラズマの密度・温度等の計測

通常の静電プローブ（シングルプローブ、ダブルプローブ、トリプルプローブ、マッハプローブ）があり、実験内容に応じてゲージポートに設置される。MMP と同様、ショット間に手動で抜き差しを行う。主に ECR プラズマ（ヘリカル磁場ありあるいはなし）で用いられる [12, 14]。

分光計測として、可視分光器（シングルチャンネル、マルチチャンネル）があり、プラズマ中の不純物量のモニターや、線強度比法によるヘリウムプラズマの電子密度・電子温度の推定 [15] に用いられる。高分解能の可視分光器によ

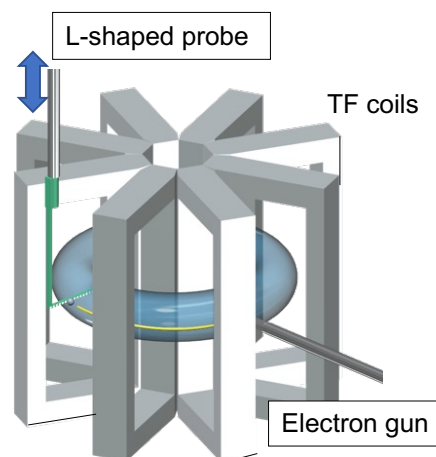


図7 電子銃とL字型プローブ

るヘリウムイオン線スペクトルのドップラー広がり計測によるイオン温度測定も行われた[16, 17]。

## 7.3 電子軌道マッピング計測

真空磁場計算によれば、TOKASTAR-2 では局所ヘリカルコイル（HF コイル、AHF コイル、ULT コイル）により生成されるヘリカル磁場で真空閉磁気面が形成できそれによるプラズマの閉じ込めが可能ではあるが、誤差磁場の影響などにより実際の磁気面が計算とは異なることも考えられる。実際の磁気面を計測することを目的として電子軌道マッピング計測が開始された [18]。閉磁気面が形成されない条件での誤差磁場（実際の磁場）の計測も行われている。赤道面のゲージポートから挿入される電子銃から射出された電子を、上部のゲージポートから挿入されたL字型の電子収集プローブで検出する（図7）[14]。電子収集プローブには R 方向に 15 チャンネルの金属板があり、ショット毎にプローブの Z 方向位置を移動させることで、あるトロイダル位置での電子軌道交点の二次元分布を得る。

## 8. プラズマの生成・制御

トカマクプラズマの生成は以下の順序で行う。コイル電流波形については図4も参照されたい。

(0) ガス導入（連続あるいは数秒間のパフ）

(1) 水平磁場コイル（VF コイル）、ヘリカル磁場コイル（ULT コイル、HF コイル、AHF コイル）に定常電源あるいはコンデンサ電源で通電を開始

(2) TF コイル通電開始、ほぼ同時に RF 入射開

始

- (3) ECR 層が内側リミターを越えた後、ECR プラズマが生成される
- (4) OH コイルおよび垂直磁場コイル (PVF コイル) 通電開始でトカマクプラズマ生成
- (5) 形状制御コイル (SC コイル) に通電して非円形度増大

コイル電流値 (波形) はコンデンサバンクの容量や充電電圧でほぼ決定され、帰還制御は行っていない。

コイルの通電開始および RF の入射開始の時刻は 10  $\mu$ s 分解能のディレイパルサーで設定する。ディレイパルサーで設定できる時刻は最大 99.99 ms である。ガスパフを用いる場合や定常電源で ULT コイルに通電する場合は、それより長い時間での設定が必要となるためタイマーを用いて、ガスパフの開始時刻、ULT コイルの通電開始時刻、ディレイパルサーの起動時刻 ( $t=0$  ms) を設定する。DC 電源で ULT コイル以外のコイルに通電する場合は、発熱による温度上昇があまり問題とならないため、コンデンサ充電完了と同時に通電を開始し、コンデンサ放電終了時に通電を終了する。

## 9. 実験の遂行

### 9.1. 実験条件の設定

実験条件の設定は、以下について全て手動で行う。

- ・コイル電源 (パルス) : コンデンサの容量、コンデンサ充電電圧、ON 時刻。
- ・コイル電源 (DC) : 電流値。
- ・ガス封入量 : 連続注入の場合は、ニードルバルブの開度 (連続注入) を調整してガス圧力を設定。パフの場合は、ピエゾバルブの印加電圧を設定。
- ・マイクロ波 : パワー、入射時間
- ・可動プローブ (MMP) : 径方向位置 (使用する場合)

プラズマ位置の帰還制御をしていないので、他のパラメータを固定して、垂直磁場コイル (PVF コイル) 電源のコンデンサ充電電圧をスキャンして最適な (プラズマ電流が最大となる) 条件を探索することが通常行われる。

プラズマ電流、プラズマ位置 (磁気プローブ、磁束ループ計測値) はショット間に見ることはできない (実験後に解析)。実験中はログスキーコイルの積分信号から大まかなプラズマ電

流波形を把握する。

### 9.2 データ収集とデータ管理

データ収集装置として、WE7000 (4+8+2 CH)、DL750 (16 CH)、SL1000 (16 CH) の 3 台を使用 (いずれも横河電機製)。高速カメラ、マルチチャンネル分光器は専用 (内蔵) の装置を使用する。

データ収集装置のサンプリング周期は 1  $\mu$ s あるいは 10  $\mu$ s、収集時間は 10 ms。

WE7000、SL1000 は専用ソフト (PC)、DL750 はその画面で、実験中に波形を確認する。

磁気計測信号は基本的に積分せずそのまま取り込み、数値的に積分している。

それぞれのショット毎のデータファイルに手動で名前 (ショット番号) をつけて保存する。研究室のサーバーへ転送し、実験日毎のフォルダ内に格納する (電圧の生データのみ)。

### 9.3 実験日誌

エクセルで標準的な様式のシートを作成し、それに記入する。データと同じフォルダに保存する。安全に関わる点検項目は紙の点検票に記録し、サインする。

## 10. 解析ツール

### 10.1 IGOR

実験データからのバックグラウンドの差し引き、補正、数値積分など簡単な処理は IGOR で行う。ログスキーコイル信号からのプラズマ電流算出を含め、磁気計測データはすべて数値積分。IGOR はデータの可視化 (グラフの描画) にも用いる。

### 10.2 プラズマ位置形状の推定

プラズマ電流を円環フィラメント電流の集合と近似して、実験のトカマクプラズマの電流中心位置、プラズマ断面形状 (LCFS) を算出するフィラメント法コード[8]を開発して使用している。

プラズマ外部に設置された磁気プローブアレイ (PMP) や磁束ループで計測した磁場・磁束、ログスキーコイルで計測したプラズマ電流、コイル電流の実験データを用いる。

電流中心位置の算出においては、プラズマ電流を 1 本の円環フィラメント電流と近似し、フィラメントによる磁場・磁束の計算値と PMP 及び磁束ループによるプラズマ電流磁場の計測値の差が最も小さくなるようなフィラメント

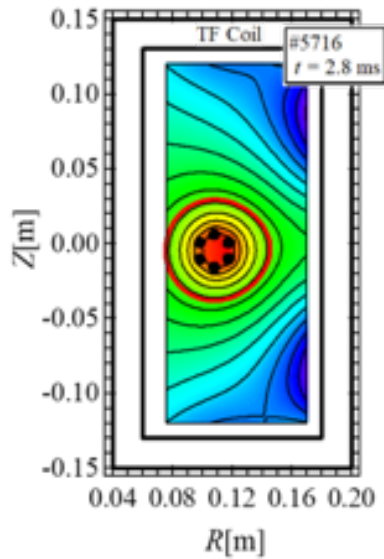


図8 フィラメント法コードの解析例。6つの黒点はフィラメントの位置、細い黒実線はトロイダル磁束の等高線、太い赤線は最外殻閉磁気面を示す。

の位置を最小二乗法で求める。プラズマ電流磁場の計測値を求めるには、実験における計測値から、コイル電流による磁場と渦電流による磁場を差し引く必要がある。渦電流磁場はコイル電流の時間変化とプラズマを模擬するフィラメントの位置および電流値を入力して、後述の回路方程式コードと同様の手法で計算する。同じコンデンサバンクの充電電圧で行うプラズマなしの通電試験（BG ショット）の計測値をプラズマ実験の真空磁場とみなし、それを差し引くことでプラズマ磁場を算出することもできる。

プラズマ断面形状の算出においては、上記の方法で求めた1本フィラメントの推定位置の周りに六角形に6本のフィラメントを置く。渦電流磁場は1本フィラメントの場合と同じと仮定して、フィラメントによる磁場・磁束の計算値とPMP及び磁束ループによるプラズマ電流磁場の計測値の差が最も小さくなるような、6本フィラメントの電流値を最小二乗法で求める。6本フィラメント電流、コイル電流、渦電流が生成するトロイダル磁束を足し合わせて、プラズマ生成領域における全トロイダル磁束を求め、最外殻磁気面を求める。解析結果の例を図8に示す。

### 10.3 渦電流計算

TOKASTAR-2では渦電流磁場が大きく、その

計算精度が重要な課題である。

渦電流の計算は通常、回路方程式コードと呼ばれる軸対称コードで行なっている[11]。このコードはTOSCAコードの渦電流計算ルーチンを基に作成したもので、真空容器を矩形断面円環状導体の集合体（67本）とモデル化し、それぞれの円環を回路とみなして、回路の自己インダクタンス、および回路間や円環コイルと回路の間の相互インダクタスを求める。円環コイルの電流の時間変化を入力として、それぞれの回路の電流の時間変化を計算する。フィラメント法コードにも含まれている。

実際のTOKASTAR-2の真空容器は、赤道面に大径のポートが4箇所が存在する（図2(a))など、軸対称ではない。その効果を調べるため、核融合研との共同研究によりANSYS MAXWELLによる三次元渦電流計算も実施した。

### 10.4 軸対称 MHD 平衡解析

軸対称 MHD 平衡解析はTOSCAコードを用いて行なっている。プラズマ電流、フィラメント法で求めたプラズマ位置形状、OHコイル電流値を入力として、仮定したトロイダルベータ値 $\beta_p$ および内部インダクタンスパラメータ $l_i$ （時間一定）での渦電流、残りの磁場コイル（PVFコイル）電流および平衡解を求める。

$\beta_p$ 、 $l_i$ をスキャンし、PVFコイル電流値および磁気プローブ（PMP）計測値あるいは可動磁気プローブ（MMP）計測値が実験値に最も近くなる条件を求める[11]。

### 10.5 三次元 MHD 平衡解析

トカマクプラズマにヘリカル磁場を印加すると、三次元平衡となる。TMPによりプラズマ電流磁場がトロイダルモード数 $n=1$ の構造を有することを観測している。本来、実験データの解析には、この三次元性を考慮する必要がある。三次元 MHD 平衡解析はVMEC [19]により行なっている。渦電流は回路方程式コードで計算し、外部軸対称コイルとして与えている。PMP、TMPの測定値と合致する平衡の探索はまだ行なっていない。

### 10.6 磁力線・電子軌道追跡

HSD(Helical System Design)コード[20]をベースとする、三次元および軸対称コイルが生成する磁場における磁力線及び電子の旋回中心軌道を計算するコードを整備している。TFコイル



やポロイダルリミターを模擬したリミターがコード内で設定されており、磁力線あるいは電子軌道がそのリミターに接触した場合、その追跡計算を終了する。出発点を内部でスキャンして最外殻閉磁気面を探索する機能を備えている。

磁力線追跡計算に基づき、局所ヘリカルコイル磁場による実効水平磁場 $B_R^{\text{eff}}$ 、実効垂直磁場 $B_Z^{\text{eff}}$ をそれぞれ以下のようにして算出する( $\phi$ はトロイダル角、 $s$ は磁力線に沿う長さ)。

$$B_R^{\text{eff}} = \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} B_R ds / \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} ds$$

$$B_Z^{\text{eff}} = \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} B_Z ds / \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} ds$$

実効水平磁場、実効垂直磁場をプラズマ断面内で平均することで、プラズマへ作用する実効的な水平磁場、垂直磁場を評価する[10]。

## 11. 安全対策

名古屋大学の安全教育ガイドラインに基づき、研究室の新人に対して年度初めに教員による安全教育を行なっている(3時間程度)。実験をテーマとする学生には毎年の受講を指示している。項目は、一般安全教育と実験に関する安全教育(実験一般、緊急時対応、電気、高圧ガス、レーザー、機械工作)である。

名古屋大学の環境安全衛生管理室により用意された安全に関する教材(eラーニング)もある。学科の工作室の利用のためには、管理者による講習を受ける必要がある。実際の作業・実験のやり方については教員等が個別に(実験グループ毎に)指導する。

実験は学生のみで行うことも多いが、学内に教員がいることが条件(教員の居室は実験室と同じフロア)としている。実験は原則として複数で行う。

## 謝辞

TOKASTAR-2の建設・整備・実験に関わられた山崎耕造博士、大石鉄太郎博士、有本英樹氏、安田幸平博士、および歴代の学生諸氏に感謝いたします。また、TOKASTAR-2の建設・整備・研究は、核融合科学研究所のLHD計画共同研究および一般共同研究の支援を受けて実施されました。

## 参考文献

[1] K. Yamazaki, et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES **8**, 1044 (2009).

[2] T. Oishi, et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES **9**, 69 (2010).  
 [3] T. Oishi, et al., J. Phys.: Conf. Series **511**, 012042 (2014).  
 [4] M. Hasegawa, et al., Plasma Fusion Res. **7**, 2402116 (2012).  
 [5] T. Sakito, et al., Plasma Fusion Res. **10**, 3402033 (2015).  
 [6] T. Ueda, et al., Plasma Fusion Res. **10**, 3402065 (2015).  
 [7] K. Muraoka, et al., Plasma Fusion Res. **13**, 1402111 (2018).  
 [8] K. Yasuda, et al., Plasma Fusion Res. **13**, 3402072 (2018).  
 [9] K. Yasuda, et al., Plasma Fusion Res. **15**, 1402083 (2020).  
 [10] K. Yasuda, et al., Phys. Plasmas **28**, 082108 (2021).  
 [11] R. Ikeda, et al., Plasma Fusion Res. **15**, 2402047 (2020).  
 [12] H. Itou, et al., Plasma Fusion Res. **13**, 1402039 (2018).  
 [13] T. Sakito, et al., Plasma Fusion Res. **11**, 2402074 (2016).  
 [14] K. Kado, et al., Plasma Fusion Res. **17**, 2402071 (2022).  
 [15] R. Yokoyama, et al., Plasma Fusion Res. **13**, 3402047 (2018).  
 [16] S. Kimata, et al., AIP Advances **12**, 045204 (2022).  
 [17] A. Okamoto, et al., accepted for publication in Proc. of the 15th Asia Pacific Physics Conference.  
 [18] Y. Shimooka, et al., Plasma Fusion Res. **11**, 2402110 (2016).  
 [19] S.P. Hirshman, et al., Comput. Phys. Comm. **43**, 143 1986.  
 [20] K. Yamazaki et al., Fusion Technology **21**, 147 (1992).

# TST-2装置の概要

## Overview of the TST-2 Device

江尻晶、辻井直人、篠原孝司

東京大学大学院新領域創成科学研究科

### 1. はじめに

TST-2球状トマカク装置は、TST、TST-M装置 [1] の後継となる小型球状トマカク装置であり、球状トマカクの基本的な物理を明らかにすること、効率的な電流駆動法を確立することを目的に建設された。装置・プラズマの主要な諸元は表 1 のとおりである。実験シナリオは、OHコイル（中心ソレノイド）の誘導電場でプラズマ電流を立ち上げるものと、高周波で立ち上げを行うものに分類できる。それぞれで得られるプラズマのパラメータが大きく異なる。

| 項目      | 値                                                                     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------|
|         | 誘導放電時/高周波立ち上げ放電時                                                      |
| 大半径/小半径 | 0.36 m / 0.25 m                                                       |
| アスペクト比  | ~1.5                                                                  |
| トロイダル磁場 | 0.3 T                                                                 |
| プラズマ電流  | 120 kA / 27 kA                                                        |
| 放電時間    | 30 ms / 120 ms                                                        |
| 中心電子温度  | 400 eV / 20 eV                                                        |
| 中心イオン温度 | 100 eV / 10 eV                                                        |
| 中心密度    | $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ / $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ |

表 1：TST-2 の主要諸元

最初のプラズマは1999年9月に得られ [2]、その後、球状トマカク特有のMHD不安定性である内部磁気リコネクションの研究 [3]、高周波電流駆動の研究を行った。後者では、21 MHz（高次高調速波）、200 MHz（低域混成波）、2.45 GHz（電子サイクロトロン波）、8.2 GHz（電子サイクロトロン波）の高周波それぞれで、非誘導プラズマ電流立ち上げと球状トマカク配位形成・維持が可能であることを示した [4-8]。また、200 MHz（低域混成波）については、3種のアンテナを用いた実験を行った。現在は、静電結合型コムラインアンテナを用いた実験を行っている。

### 2. 実験室の環境、インフラ

TST-2 装置は、東京大学柏キャンパスの基盤科学実験棟の球状トマカク本体室に設置されている（図 1、図 2）。この本体室は東西 15 m、

南北 22 m であり、本体、電源系、高周波系等の主要機器が設置されている。図 2 上の写真の中央に本体、左上に中二階が見える。中二階には高周波（200 MHz）の増幅系が配置されている。本体室は充電放電時には無人となる。放電の設

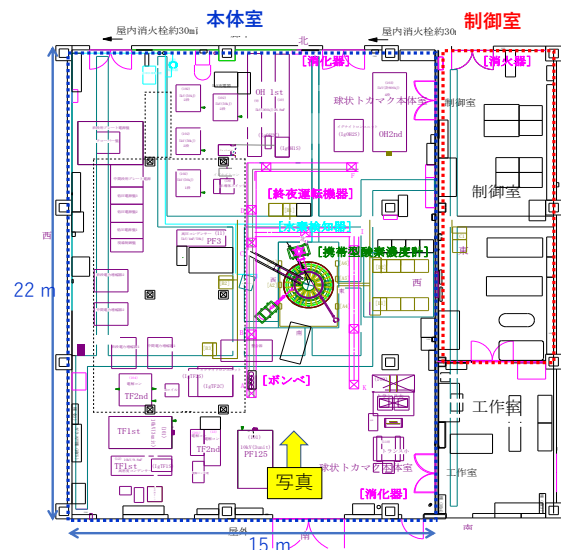


図 1：球状トマカク本体室平面図



図 2：球状トマカク本体室、本体写真

定、モニター、解析は隣の制御室で行う。本体室の電源系統は3相3線200Vと単相3線200Vで供給され、建物冷水の利用も可能である。建物冷水は、循環冷却水機器を介して、本体OHコイル、高周波機器等の冷却に用いられる。また、本体排気系バルブの駆動のために圧縮空気用コンプレッサーがある。

### 3. 装置の構造

真空容器は、カプセル状の外側部(SUS304)と円筒状の内側部(INCONEL625)で構成されている(図3)。外側部の内径は700mmで、渦電流を抑制するために肉厚は7mmである。内側部は高抵抗ニッケル合金製で内径125mm、肉厚1.6mmである。両方ともSUS304製のリブで大気圧に対する座屈強度、圧縮強度を補強している。プラズマのサイズはモリブデン製の内側リミター( $R=130\text{mm}$ )、外側リミター( $R=585\text{mm}$ )で規定されている。内側リミターは、円筒状の内側部のリブに取り付けられており、外側リミターは、高周波アンテナの両サイドに取り付けられている。

カプセル状の外側部の上部と側面部の間にはOリングフランジがあり、上下に分解できる構造になっているが、これまで分解したことはない。このフランジ部は断面積が大きく、大きな渦電流が流れるため、赤道面を挟んだ対称的な位置に同程度の抵抗となるような金属環を配置し、渦電流の上下非対称性を抑制している(10節参照)。内側円筒部は上下にOリングフランジがあり、外側部につながる。内側円筒部

にはベローズ部があり、突っ張ることで上下方向に長さの調整し、Oリング接触部のシールを確実なものとする。

真空容器、真空容器内構造物の多くはステンレス製であり、リミターとなる部分は全てモリブデン製である。その他、高周波アンテナの表面には銅がコーティングされている。炭素構造物は、レーザーアブレーション用ターゲットを除いて存在しない。また、磁気計測用にはテフロン被覆線、高周波磁気計測用にはセミリジッドケーブルを用いている。

### 4. 磁場コイル電源

図3(b)、(c)にコイルの構成が示されている。OHコイルとTFコイル中央部は、FRP樹脂でモールドされた一体構造であり、外側に二層のOHコイル(合計239ターン)、その内側にトロイダルコイル(24本)が配置されている。OHコイル導体はホローコンダクター型で内部に冷却水を通していている。TFコイルには冷却水用パイプが溶接されているが、現在は、通水していない。これらOHコイルとTFコイル中央部は、真空容器内側円筒部の中の大気側に配置されている。TFコイル中央部は、ジョイント部を経て外側TFコイル(24本)につながる。24本のTFコイルはトロイダル方向に巻き戻すように結線し、不正垂直磁場の発生を抑制している。OHコイルは2層を巻き戻すように結線し、不正トロイダル磁場の発生を抑制している。また、OHコイルには真空容器外側上下のPF4コイルを直列に結線し、プラズマ領域での垂直磁場を

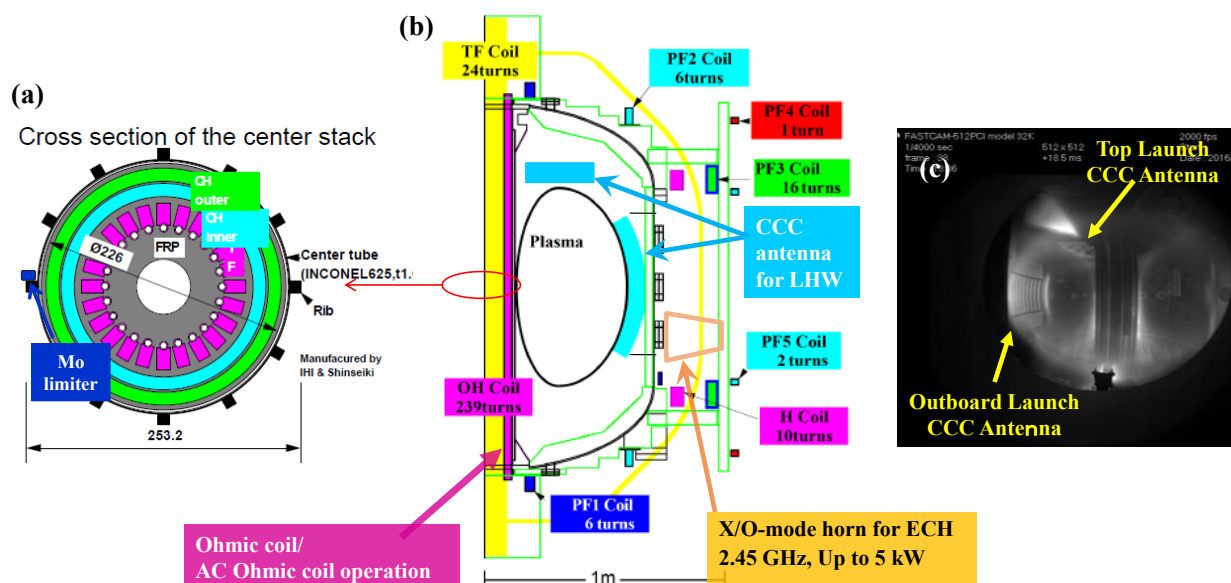


図3：TST-2装置中央部断面(a)、装置ポロイダル断面(b)、プラズマのカメラ画像(c)

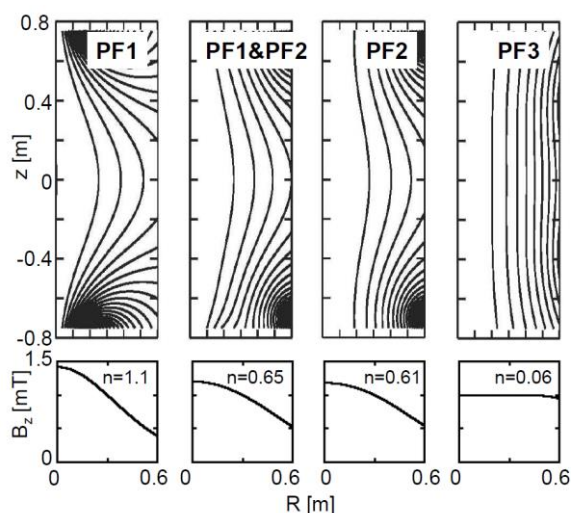


図4：垂直磁場コイルの生成磁気面の様子

抑制している。トカマクの主要垂直磁場の発生にはPF3コイルを用いる。PF3コイルの生成する垂直磁場の曲率はほぼゼロである。上下方向の安定性を強化するために、PF2コイルを用いることがある。PF1コイルは、OHコイルの上下近傍に配置されており、PF1単独または、PF2と直列接続で用いることで正曲率の垂直磁場の発生に用いられる。図4にPFコイルの組み合わせと垂直磁場の様子を示す。真空容器側面外側に、上下一対の水平磁場コイル（Hコイル）が配置され、Hブリッジを用いた両極性電源を用いてプラズマの上下位置制御を行う。

コイル電源としてコンデンサーバンクを用

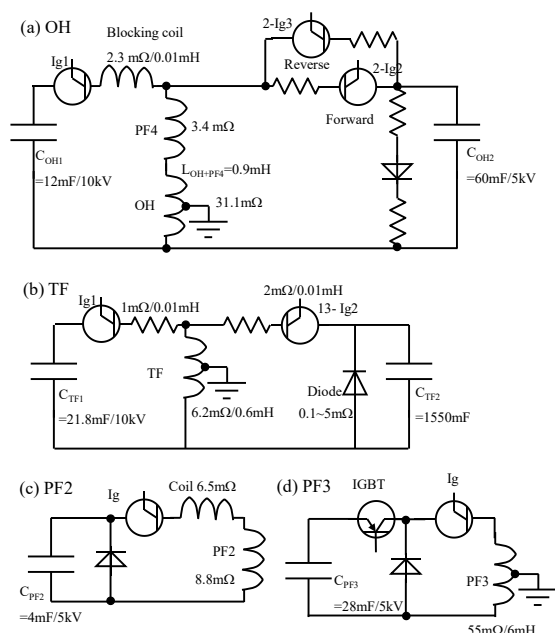


図5：OH回路(a)、TF回路(b)、PF2回路(c)、PF3回路(d)

いている。図5にOH、TF、PF2、PF3コイル系の回路図、図6にコイル電流波形、プラズマ電流波形、周回電圧波形を示す。OH回路では、立ち上げ用に充電したコンデンサー $C_{OH1}$ を用い、立下げには容量の大きい充電していないコンデンサー $C_{OH2}$ を用い、立下り時間を長くして放電時間を確保している。周回電圧は最大5V程度である。OH回路や他の回路では、スイッチとしてイグナイトロンを多く用いている。TF回路では、パワークローバー回路を採用し、TFコイル電流がなるべく一定となるようにしている。PF2には単純なLC回路とダイオードを用いた受動的なクローバー回路を採用している。PF3では、IGBTでのON/OFF制御とダイオードによる減衰回路（一種の受動的なクローバー回路）を組み合わせ、波形制御を行う。通常、PF3による平衡制御や水平磁場による垂直位置制御は、プレプログラムで波形を決めている。すべてのコンデンサーは、クローバー回路等によって、動作中ほぼ単極性となるように運用している。

図7にHコイルのHブリッジの4種の動作モードを示す。IGBTと逆方向ダイオードの組み合わせ4セットでHブリッジが構成され、コンデンサーの極性を変えずに、両極性の電流を増加させるモードと、ダイオードを用いた減衰回路モードが可能である。

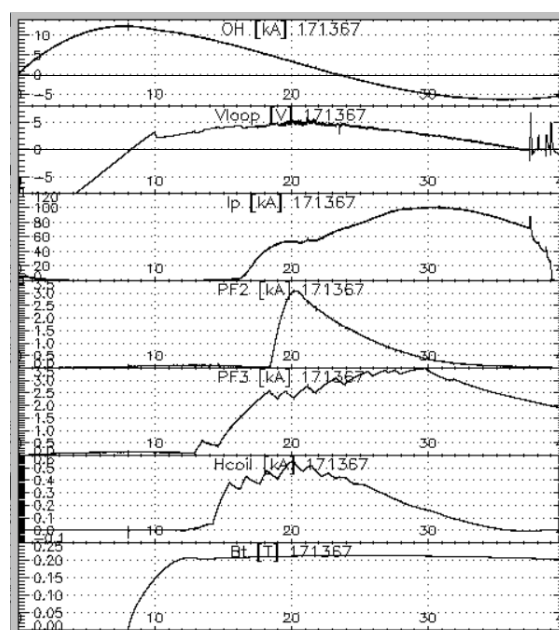


図6：上からOHコイル電流、周回電圧、プラズマ電流、PF2コイル電流、PF3コイル電流、Hコイル電流、トロイダル磁場



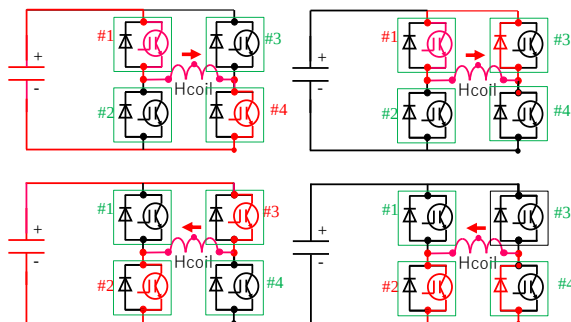


図7：Hコイル用Hブリッジの4種の動作モード。赤が各モードでの電流経路を表す。

TF2 と H コイルには電解コンデンサーを用い、その他ではオイルコンデンサーを用いている。

## 5. 真空排気装置と壁調整方法

本体排気系は、ターボ分子ポンプ、メカニカルブースターポンプ、ロータリーポンプで構成され、通常の本体真空度は、 $5 \times 10^{-7}$  Torr前後である(図8)。ただし、現在、メカニカルブースターポンプは故障中であり、使用していない。他に粗引き用のロータリーポンプがある。

大気開放と放電への影響(プラズマ電流、その時間積分、周回電圧、 $H\alpha$  信号強度)を図9に示

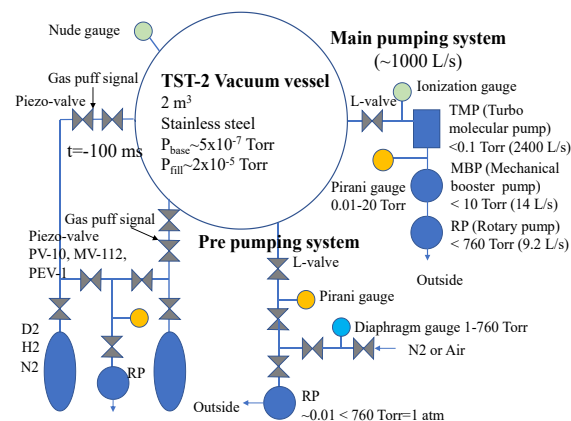


図8：真空排気、ガス供給系

す。また上段に日付、大気開放時間、真空容器内設置アンテナ等を記した。大気開放後の壁調整には誘導放電(OH 放電)を用いる。大気開放の期間が数時間であれば、100 ショット程度以下、数日であれば、1000 ショット程度以下のOH 放電で、OH 放電でのプラズマ電流や放電波形は通常時のものに復帰する。復帰に必要なショット数は、大気開放時間だけでなく、新たに真空容器内に設置する機器がある場合にはその機器にも依存する。また、これとは別に高周波アンテナの洗浄(エージング)が必要であり、

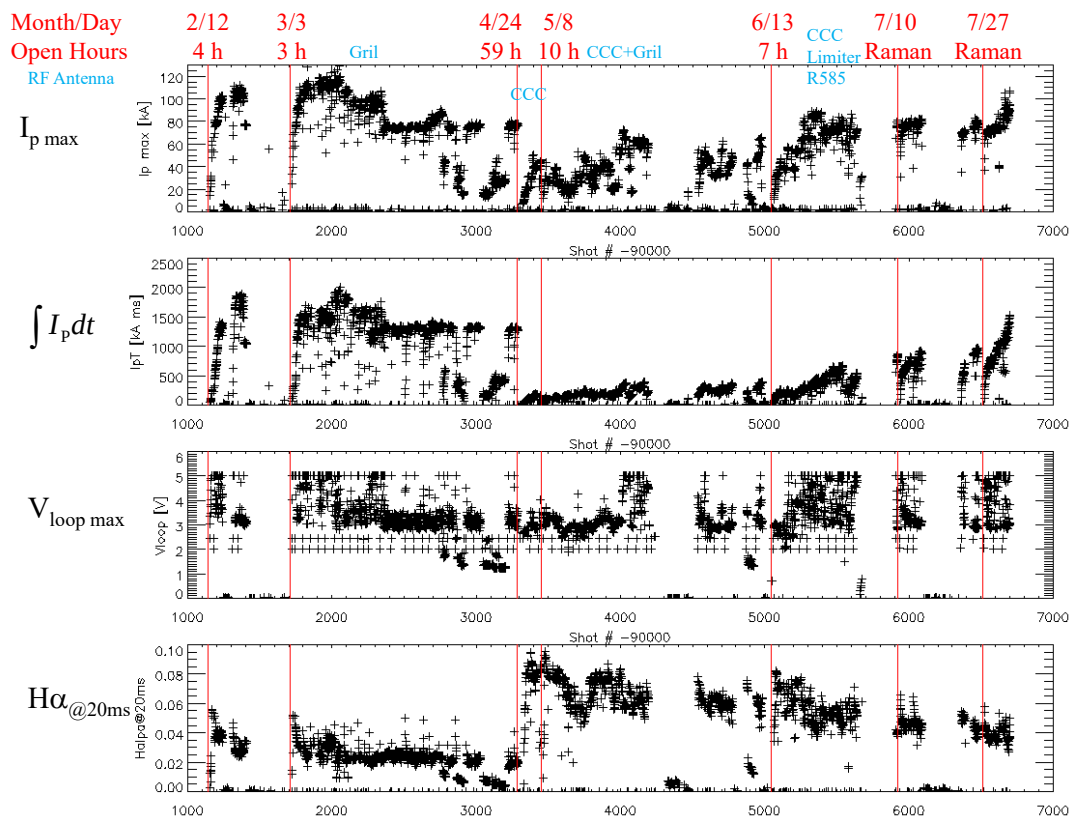


図9：ショット番号とプラズマ電流、その時間積分、周回電圧、 $H\alpha$  信号強度

真空入射によるガス出し、プラズマ放電による洗浄が必要である。どちらの場合もプラズマ電流の大きさと放電時間が洗浄の目安となる。また放電直後の真空度の良さも目安となる。大気開放直後は、壁から大量のガスが供給されることが  $H\alpha$  発光、放電直後の真空度からわかる。また、 $H\beta$ 、 $D\beta$  発光強度比から、重水素ガスのみを供給しても、放電後半では軽水素が壁から放出されていることがわかっている。分光測定から、主な不純物は炭素、酸素であることが示されており、中性モリブデンのラインがモリブデン製リミターの近傍、中性銅のラインがアンテナ近傍で見られる。ただし、これら金属のパワーバランスへの影響は小さいと見積もられている。

## 6. 粒子供給装置、加熱・電流駆動装置

通常、プラズマ生成のための供給ガスは重水素であるが、他に軽水素、窒素、ヘリウム、アルゴンを用いたことがある（図 8）。放電開始の 100 ms 前にピエゾバルブのガスを真空容器内圧力の読み値で  $2 \times 10^{-5}$  Torr（重水素の感度、ヌードゲージの応答を考慮した真値  $5 \times 10^{-5}$  Torr）前後になるまで供給した後に、プラズマを生成する。また放電途中で追加ガスパフを行って密度を上昇させることが可能である。ガス供給位置は弱磁場側または下側である。

高周波を用いたプラズマ電流立ち上げ・維持は TST-2 の主要な研究テーマの一つであり、現在は、低域混成波（200 MHz/200 kW）を励起する静電結合コムラインアンテナが 3 セット設置されており、2 つのアンテナの同時使用が可能である。

図 10 に典型的な高周波立ち上げ放電の波形を示す。この放電では、放電初期に弱磁場側赤道面に設置されたアンテナを用い、その後（ $t > 30$  ms）上側に設置されたアンテナを用いてプラズマ電流を増加させて維持している。この時の入射パワーは約 60 kW である。

## 7. 計測器

平衡再構成のため磁気計測として、ログスキーコイル、フラックスループ、ピックアップコイルが合計で約 80 チャンネル設置されている。大部分は真空容器内に設置されているが、8 本のフラックスループが真空容器外に設置されており、渦電流推定精度の向上に貢献している。反磁性ループはあるが、有意な信号は見られない。真空容器内に設置した磁気計測は、アナロ

グ積分器で積分した後に絶縁アンプを用いてデジタイザーに入力する。磁気計測は薄いステンレス板で保護されており、その時定数は 10 kHz 程度である。

マイクロ波干渉計（104 GHz, 50 GHz）でいくつかの視線で線積分密度の測定を行っている [9]。赤道面での主半径方向の線積分密度は、トムソン散乱システムで測定した密度分布の絶対値を決めるのに使われている。

トムソン散乱システムでは、YAG レーザー（1064 nm）を赤道面接線方向に入射し、空間 5 点の同時計測が可能である。またファイバーを入れ変えることで合計 10 点の分布測定が可能である [10, 11]。

高波長分解能分光器を用いて、不純物ライン（CV/227.1 nm, OV/278.1 nm, CIII/464.7 nm 等）のドップラー広がり測定することでイオン温度や流速を計測している。ショットごとに視線を変えることで分布測定が可能である [12]。

軟 X 線測定には、SBD (Surface Barrier Diode) を用いている。SBD 表面はアルミ電極となっており、70 eV にアルミの吸収端があるため、70 eV 以下での軟 X 線の寄与が大きい。TST-2 では、ベリリウム薄膜を前面に配置した SBD を

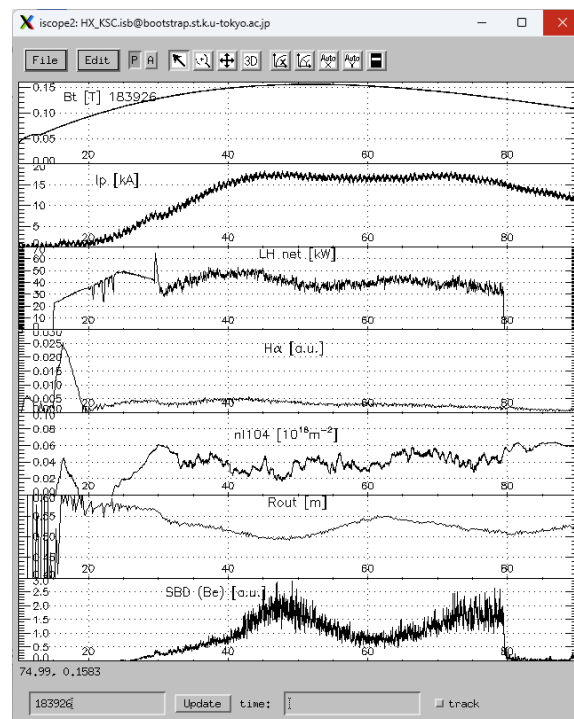


図 10 : jScope で表示した放電波形：上からトロイダル磁場、プラズマ電流、高周波入射パワー、 $H\alpha$  信号、線積分密度、弱磁場側最外殻磁気面位置、Be 薄膜付軟 X 線信号

別途用いている。こちらでは、1-10 keV の軟 X 線の寄与が大きいと考えられている。

硬 X 線をモニターするために、LYSO シンチレータと光電子増倍管を組み合わせたシステムを用意している。パルス分解は行わず、総エネルギーフラックスを測定している。ただし、真空容器外に設置されており、約 100 keV 以上のエネルギーの硬 X 線を反映していると考えられる。

高周波波動の作る磁場揺動を測定するためのピックアップコイルが真空容器内に配置されており、アンテナでの進行波励起のモニター、プラズマ中での波動現象の研究に用いられている [13]。SOL に静電プローブが設置されており、高周波波動で生成されたと考えられるテール成分が I-V 特性に見られる [14]。

放電の様子をモニターするために、高速カメラ (2000FPS) を用いている。これによりプラズマの動きを知ることができ、これを次の放電の条件を決めるのに役立っている。

## 8. プラズマの制御

予備電離にはマグネトロン (2.45 GHz/5 kW) による電子サイクロトロン加熱 (ECH) を用いる。また、実験によっては OH コイルに 1 kHz 程度の AC 電流を印加する AC OH 運転 [15, 16] を予備電離に用いる。

OH コイル (センターソレノイド) を用いた誘導放電では、ヌル磁場配位でプラズマ生成、プラズマ電流の立ち上げを行うが、ECH による予備電離を行うことで、プラズマ電流立ち上げを確実に行うことができる。また、弱い垂直磁場を印可した捕捉粒子配位での立ち上げの研究も行われている [17]。

OH コイル電流波形は OH コイル回路定数で決まり、プラズマ電流の時間発展の制御はできない (図 5)。プラズマは、通常、内側リミターで制限されるリミター配位であり、外側最外殻磁気面の位置制御を PF3 コイル電流で行う。PF3 コイル電流波形は PF3 回路内の IGBT スイッチで行うが、通常はプレプログラム波形制御である。垂直位置は、H コイル電流で行う。H コイル電流は IGBT を用いた H ブリッジ回路で行うが (図 7)、通常はプレプログラム波形制御である。PF3、H コイル電流は波形制御により鋸歯状となるが、真空容器の渦電流 (10 節参照) により、真空容器内では滑らかな波形となる。PF2 を用いることでプラズマの上下方向の広がりを制御できるが、通常は、PF3 に PF2 や PF1

を直列接続することで、(放電ごとに) プラズマの上下方向の広がりを変える。あるプラズマ電流のプラズマに対して、水平位置、垂直位置のフィードバック制御が可能であることを確認したが、より広い電流範囲でのフィードバック制御は未着手である。

## 9. 実験の遂行

TST-2 のコイル電源は全て、コンデンサーバンクであり、各コンデンサーの充電電圧、放電や各スイッチのタイミングで、実験条件の大部分が決まる。これら充放電制御、各種タイミング設定、ガスパフの設定は、LabView を介して行う。LabView での設定は、一部は、LabView 内で実行され、一部は、現場の Peripheral Interface Controller (PIC) を介して行われる。高周波パワーの設定制御は専用の制御器で行われる。LabView での設定情報は自動的にデータ管理用の Linux WS に保存される。またガス供給量 (圧力) や X 線サーベイメータの積算値や放電メモなどは、手動で入力する必要がある。これらの情報は、SQL でデータベース化され、Web インターフェースで閲覧編集を行うことが可能である。

Linux WS でデータ収集の設定、管理、データの保存を行う。データは MDSplus 形式で保存され、表示 (図 8) と簡単な解析も可能である [18]。カメラ画像、オシロスコープ記録データ等、MDSplus 形式ではないデータもある。

## 10. 解析ツール

図 10 に示した弱磁場側最外殻磁気面位置 (Rout) は、内側リミターで最外殻磁気面が決まるとし、Rout を赤道面のフラックスループとピックアップコイルの測定値から推測したもの

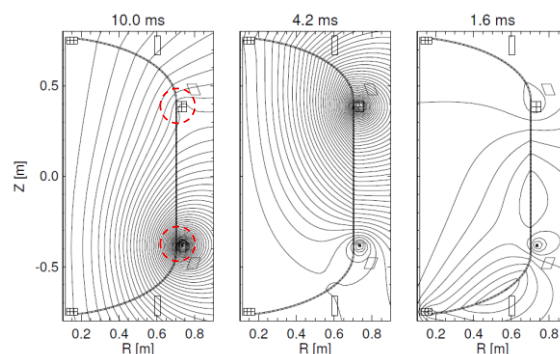


図 11 : EFIT による平衡解析で用いている渦電流の固有モードの例。左図の赤色円でフランジ、補正用金属環を示した。

である。これは、プラズマ位置のロバストな推定値であるが、より詳細な解析では、平衡配位を再構成する必要がある。TST-2 では磁気計測を用いた標準的な再構成コードである EFIT を MDSplus 上で用いている。再構成に必要な真空容器渦電流分布は、真空容器の固有モードのうち時定数が長いモードで表し、その係数をフィッティングで求めている。図 1 1 に用いた固有モードのうち、時定数の長い 3 つのモードを示す。真空容器外側上にフランジ、外側下部に上下非対称性補正用金属環があり、これらに流れる渦電流が大きいことがわかる。

EFIT は簡易的なツールであり、高周波維持プラズマの解析では、高速電子の効果を考慮した平衡解析が必要である。これまで打ち切り平衡 [19]、3 流体平衡 [20]、ハイブリッド平衡 [21] の開発とそれを用いた研究を行ってきた。

## 11. 安全対策

学生、職員への教育として以下を実施している。

### (1) 一般安全講習、放射線講習

### (2) TST-2 回路レポート、トマカクレポート

### (3) 実験技術講習

(1) は毎年研究室メンバーを対象に行っている。一般安全講習では、TST-2 実験で注意すべき危険や機器破損、核融合分野での事例の紹介をしている [22]。放射線講習では一般的な知識を説明している。(2)のレポートでは、図 5 に示したコイル回路に関する問題、トマカクに関する基礎的問題を提示し、回答を提出してもらっている。これらの問題が下記に示すメインオペレータの資格試験となっている。(3) は、テスター、オシロスコープ、ドリル等のよく使うツールや、TST-2 の主要機器、ソフト、ネットワーク環境に関するもので、新人が対象である。

実験体制とし下記を定めて安全を確保している。

(1) メインオペレータとサブオペレータを各実験日ごとに指名し、この 2 名 +  $\alpha$  で実験を行う。メインオペレータは、LabView等を用いて放電条件を決めて放電を行う。サブオペレータはメインオペレータを補助する。上述した二種のレポートの提出がメインオペレータの資格の一条件である。また、サブオペレータとして経験を積むことも条件である。

(2) 本体室の入退室をオペレータが把握し、充電中、放電中、高周波入射中は本体室立ち入り禁止とする。

(3) 実験開始前、終了後に所定の点検を行う。

## 参考文献

- [1] H. Toyama, et al., Fusion Energy 1998 (Proc. 17th Int. Conf. Yokohama, 1998), IAEA, Vienna (2000), EXP2/15a.
- [2] Y. Takase et al., Nucl. Fusion 41 1543 (2001).
- [3] A. Ejiri, et al, Nucl. Fusion 43 547 (2003).
- [4] A. Ejiri, et al., Nucl. Fusion 46, 709-713 (2006)
- [5] A. Ejiri, et al., Nucl. Fusion, 49, 065010 (2009)
- [6] Y. Takase, et al., Nucl. Fusion, 51, 063017 (2011).
- [7] T. Wakatsuki, et al., Nucl. Fusion 54 093014 (2014)
- [8] T. Shinya, et al., Nucl. Fusion 55 073003 (2015)
- [9] H. Kurashina, et al., Plasma Fusion Res. 5, 024 (2010)
- [10] J. Hiratsuka, et al., Plasma Fusion Res. 7, 2402092 (2012)
- [11] H. Togashi, et al., JINST, 10, C12020 (2015)
- [12] S. Tsuda, et al., Plasma Fusion Res. 10, 1202064 (2015)
- [13] Y. Ko, et al., Plasma Fusion Res. 14, 3402107 (2019)
- [14] J.H.P. Rice et al., Plasma Fusion Res. 15, 2402009 (2020)
- [15] A. Ejiri, et al., Plasma Fusion Res. 11 1202004 (2016)
- [16] A. Ejiri, et al., Nucl. Fusion 58 016012 (2018)
- [17] Y. Ko, et al., Plasma Fusion Res. 16 1402056 (2021).
- [18] N. Tsujii, J. Plasma Fusion Res. 95, 236 (2019).
- [19] A. Ejiri, et al., Nucl. Fusion 49 065010 (2009)
- [20] A. Ishida, et al., Plasma Fusion Res. 10 1403084 (2015)
- [21] N. Tsujii, et al., Nucl. Fusion 61, 116047 (2021)
- [22] A. Ejiri, et al., J. Plasma Fusion Res. 90 732 (2014).



## Recent Issues of NIFS-MEMO Series

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NIFS-MEMO-83 | Kazuyoshi Yoshimura<br>Nonlinear Wave Propagations in Binary-Gas Mixture<br>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<br>T. Yamamoto and members of information Network Task Group<br>The Division of Information and Communication Systems, National Institute for Fusion Science<br>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<br>Construction of the campus information network with information security measures on NIFS<br>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<br>Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science<br>放射線安全管理年報 (2017年4月1日～2018年3月31日)<br>Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2017 to March 2018<br>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<br>Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science<br>放射線安全管理年報 (2018年4月1日～2019年3月31日)<br>Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2018 to March 2019<br>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<br>Proposal of the CHS-qa experiment<br>CHS-qa design team<br>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<br>Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science<br>放射線安全管理年報 (2019年4月1日～2020年3月31日)<br>Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2019 to March 2020<br>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<br>Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science<br>放射線安全管理年報 (2020年4月1日～2021年3月31日)<br>Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2020 to March 2021<br>March 8, 2022 (in Japanese)                                                                              |
| NIFS-MEMO-90 | 核融合科学研究所 技術部<br>Department of Engineering and Technical Services<br>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<br>Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories<br>May 26, 2022 (in Japanese)                                                                                                                                                                      |
| NIFS-MEMO-91 | 松田慎三郎、木村一枝<br>Shinzaburo Matsuda and Kazue Kimura<br>森茂・一久 エネルギー開発に生涯をかけた兄弟<br>Shigeru Mori and Kazuhisa Mori, brothers devoted their lives to the new energy developments<br>February 16, 2023 (in Japanese)                                                                                                                                                           |
| NIFS-MEMO-92 | 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<br>Radiation Control Office / Division of Health and Safety Promotion National Institute for Fusion Science<br>放射線安全管理年報 (2021年4月1日～2022年3月31日)<br>Report on Administrative Work for Radiation Safety from April 2021 to March 2022<br>February 28, 2023 (in Japanese)                                                                 |
| NIFS-MEMO-93 | 「先進トカマク開発のための実験研究」研究会<br>Study Group on Experimental Research for Advanced Tokamaks<br>国内大学のトカマク実験装置の概観<br>Overview of tokamak devices in universities in Japan<br>September 1, 2023 (in Japanese)                                                                                                                                                                      |