

2025 年度
技術職員報告書

2026 年 6 月
核融合科学研究所技術部

はじめに

技術部長 鈴木直之

2026年1月1日付で技術部長に就任した鈴木直之と申します。技術報告書は2023年度より毎年度出版され、今年度で第3号となります。技術報告書出版の目的は、核融合研技術部の活動記録を残し、公表することにあります。つまり、技術部が得た知識や技術を可視化し、組織として記憶にとどめるとともに、外部に対して「私たちはこういう活動をしている」という証拠を示す行為、と考えています。たとえ、日常的に行われている業務、失敗に終わった業務、担当者の主観として技術的に高度ではないと感じられる業務であっても、組織として記憶しておくことで、後輩たちにとって貴重な教材となり得ます。また、技術報告書を継続的に出版することは、外部に対して組織の存在意義を示し、信頼性を高めることに繋がると考えています。核融合研技術部の価値を高めるためにも継続して出版していく所存です。

さて、2025年はLHD（大型ヘリカル実験装置）による実験が遂行された最後の年となりました。1998年3月31日に開始された、世界初の大型かつ超伝導コイルを備えたLHDによる実験は2025年12月25日に完遂しました。27年余りにわたる運用の中で、20万回を超える超高温プラズマ放電を研究に供しました。技術部はLHDの運転に多大な貢献を果たしており、技術部なくしてLHD実験はなかった、と言っても過言ではありません。

今回の技術報告書では、新たに運用班の活動報告を掲載しています。特にLHD運用班は、実質的には2025年度が最後の活動となるので、年度にこだわらない報告を求めています。LHD実験で培われたノウハウを報告書として記録に残し、2026年度から始まる新たな学術基盤事業や各種プラットフォームの整備業務に活用できればと考えています。

次に2025年度の人事に関して申し上げます。

2025年4月に新規採用職員として松本大輝氏が設計開発技術課に配属されました。主な業務は電子顕微鏡取扱い業務と数値解析業務です。本報告書では、松本氏に複数の報告を執筆していただいております。ぜひご覧ください。

また、2名の技術職員が退職されました。退職された皆様の今後の活躍を心よりお祈り申し上げます。

最後に、2024年度の技術報告書では触れることができませんでしたが、2025年初頭に2名の技術職員がご逝去されました。横田光弘氏と関口温朗氏です。横田氏は、1995年にKEKから核融合研へ転勤されました。主に、PLCを使った制御システムの開発業務に従事され、2022年度からは技術部副部長として、部長を補佐する職務に就いておられました。また、関口氏は、1995年に核融合研に入所されました。超伝導コイルシステムの開発に関する業務をはじめ、NBIの運転保守業務、データ収集系の整備業務に従事されておりました。ここに謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

目次

はじめに	2
1. 各課の技術報告	7
1.1. 機械システム技術課	8
1.1.1. 純モリブデンを用いた固定板の製作方法	8
1.1.2. マイクロ波ステーション用ミラーの製作	10
1.2. 設計開発技術課	12
1.2.1. 誘導加熱法作業における台座の改良	12
1.2.2. 高温超伝導テープ線材を用いたコイル巻線機の開発状況	16
1.2.3. 大型ヘリカル装置用超伝導送電システムの運転保守実績	20
1.2.4. 次期核融合プラズマ実験装置 CHD-U 候補 VAST のモジュラーコイルプロトタイプ 製作	24
1.2.5. LHD ヘリカルコイルにおけるセルノックス温度計の放射線影響に関する考察	28
1.2.6. 未利用バイオマス由来活性炭の賦活最適化	31
1.2.7. JT-60SA におけるドップラー反射計アンテナの電磁力評価	34
1.2.8. 超高熱負荷試験装置 ACT2 の改造計画	38
1.2.9. 研究所外実験機器における実験支援	40
1.2.10. 共同研究実験機器のリーク試験と真空技術	43
1.2.11. フォトグラメトリー技術を用いたカーボン製タイルの設計	45
1.2.12. UVSOR 向け一様磁場形成のための永久磁石の配置検討	49
1.2.13. 設計開発技術課における共有物品管理システムの構築と運用	53
1.2.14. フュージョンエネルギー・ナノプラットフォームにおける電子顕微鏡専用ブースの建 設支援	56
1.2.15. 電子顕微鏡関連の業務について	61
1.2.16. タングステンと低放射化フェライト鋼の低温接合技術の開発	64
1.3. 電気電子技術課	68
1.3.1. 2025 年度 LHD-ECH の運用と保守、および CHD-ECH の整備について	68
1.3.2. 続・GaN-FET を用いたインバータ電源の製作	73

1.3.3. 電力デマンドサーバの更新、および、Web コンテンツの開発.....	77
1.4. 計測分析技術課.....	81
1.4.1 大型ヘリカル装置の重イオンビームプローブにおける 3MV タンデム加速器の運転状況 について.....	81
1.4.2. 核融合科学研究所における 1MV タンデム加速器の現状について.....	83
1.4.3. 大気中トリチウムの化学形態別観測に向けたパッシブサンプラー用触媒容器の試作検 討.....	85
1.4.4. 超伝導マグネット研究棟における試験設備の運用・保守および安全管理.....	87
1.5. 制御情報技術課.....	90
1.5.1. LHD 超伝導コイル励磁用電源運転・保守について.....	90
1.5.2. サーマルカメラを用いたカレントリードヒータの断線および過熱検知システムの開発	92
1.5.3. LHD 低温制御システムの長期運転実績と運転保守実績.....	94
1.5.4. 機械学習によるカメラ映像のリアルタイム異常検出.....	98
1.5.5. 情報システム・セキュリティセンター 情報ネットワークグループの活動.....	101
1.5.6. 無線アクセスポイント(eduroam)の整備について.....	103
1.5.7. 文献データベース API を活用した独自論文データベースの構築および管理システムの 開発.....	104
1.5.8. QR コードを用いた研究会受付システムの開発.....	106
1.5.9. Microsoft365 を活用したノーコード申請承認システムの構築.....	108
2. 運用班の活動報告.....	109
2.1. LHD 本体運用班活動報告.....	110
2.2. LHD 低温システム運用班活動報告.....	114
2.3. LHD 制御装置運用班活動報告.....	118
2.4. LHD 加熱装置運用班活動報告.....	120
2.5. LHD 計測装置運用班活動報告.....	124
2.6. 装置開発運用班活動報告.....	126
2.7. CHD 運用班活動報告.....	131

2.8. 情報システム運用班活動報告	136
3. 海外出張報告	139
3.1. ITER 機構への出張	140
3.2. NIFS 次期装置設計に向けた CFQS 1 T 化改修工事現地視察	142
3.3. マサチューセッツ工科大学 (MIT) 及びコモンウェルス・フュージョン・システムズ (CFS) への出張	145
3.4. 米国 General Atomics 社訪問およびダイバータ共同設計	147
4. 研修報告	151
4.1 令和 7 年度東海地区国立大学法人等「マネジメント研修」に参加して	152
4.2 プログラムマネージャー人材育成プログラム参加報告	153
4.3 令和 7 年度 東海・北陸地区国立大学法人等技術職員合同研修 「物理・化学」コース E コース：半導体試料の TEM 観察と EDS 分析 への参加	157
5. 技術研究会開催報告	159
令和 7 年度核融合科学研究所技術研究会開催報告	160
6. 採用 1 年を経過して	163
採用 1 年を経過して	164
7. 学会発表リスト	165
論文	166
口頭・ポスター発表	166
採択	166
受賞・表彰	167
資格	167

報告書の表題右上の（ ）は、技術部の業務の分類を示しています。

- ・(技)：技術部又は所属課の業務
- ・(安全衛生)：安全衛生推進センターの業務
- ・(LHD)：LHDに関する業務
- ・技術部における運用班の業務
 - (装置開発運用班)
 - (情報システム運用班)
- ・工学系施設部門における運用班の業務
 - (総合工学実験棟運用班)
 - (開発・計測実験棟運用班)
 - (超伝導マグネット研究棟運用班)
 - (CHD運用班)
 - (計算機部門運用班)

1. 各課の技術報告

1.1. 機械システム技術課

1.1.1. 純モリブデンを用いた固定板の製作方法

(技)

機械システム技術課 清水貴史

1. 概要

本報告は、直線型プラズマ装置「TPD-II」のプラズマ源近傍に使用する固定板（図1参照）の製作工程についてまとめたものである。当該部品は高温環境下で使用されることから、材料は製作依頼者により純モリブデンと指定された。モリブデンは硬く、脆い性質を持つ難削材であるが、本製作ではマシニングセンタによる外形切削および曲げ加工において工具選定や加工条件の最適化を図り、要求を満足する製作手法を確立した。

2. マシニング加工工程

1-1. 加工手法と工具選定

図2に示す形状を加工するにあたり、ワーク（モリブデン薄板）を治具へネジ固定し、エンドミルによる外形切削を行った。モリブデン特有の硬さ・脆さに起因する「欠け」や「むしれ」を防止するため、以下の通り工具を選定した。

- ・エンドミル：OSG AE-VMSS φ3（工具メーカー推奨、超硬ですくい角が大きい刃先形状）

加工条件：回転数 2653[rpm]，テーブル送り 106[mm/min]，切込み ap 0.5[mm]

- ・ドリル：NACHI ハイスドリル

1-2. 加工結果

上記工具および加工条件にて加工を行った結果、加工面は良好であり、懸念された欠けの発生も確認されなかった。工具摩耗についても、5個の製作範囲内では目視による変化は見られず、ハイスドリルによる穴あけも含め、安定した加工が可能であった。

3. 曲げ加工工程

3-1. 常温曲げにおける課題

モリブデンは常温での延性に乏しく、一般に加熱した状態での加工が推奨される。当初、常温およびヒートガンによる簡易的な加熱条件下で試験を実施したが、いずれも曲げ部に割れが発生した。これは加熱温度が再結晶温度に対して不十分であったことが原因と考えられる。

3-2. 割れ防止策の検討と実施

設備上の制約から高温加熱が困難であったため、曲げRを大きくすることで応力緩和を試みた。具体的には以下の対策を講じた（図3参照）。

- ・治具の変更：ワーク押さえ治具をR形状のものへ変更。
- ・配置の最適化：押さえ治具の位置を調整し、局所的な歪みを抑制。

3-3. 曲げ加工の結果

曲げRを大きく取ることで、常温においても割れを発生させずに成形することに成功した。なお、曲げ加工は仕上がりの寸法の子測が困難であるため、事前に端材でテストを繰り返し、要求された寸法を

満足する校正値を算出した上で本加工を行った。

4. まとめ

本製作を通じ、純モリブデン板の加工において以下の知見を得た。

- ・切削加工： すぐい角の大きい超硬工具を選定することで、欠けやむしれのない良好な加工面が得られる。
- ・曲げ加工： 加熱が困難な環境下であっても、曲げ R を適切に設定することで、常温での割れを回避した加工が可能である。



図 1. 純モリブデン製固定板

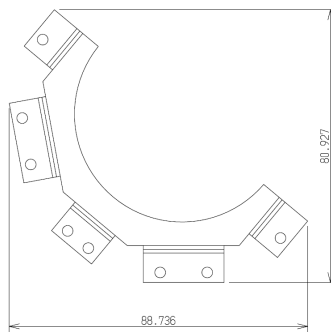


図 2. 展開図面

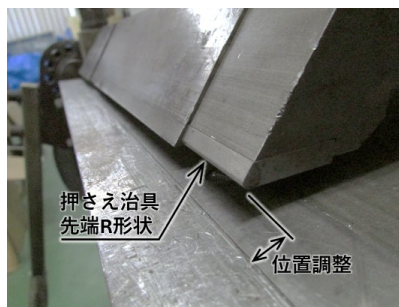


図 3. 曲げ加工機の押さえ治具

1.1.2. マイクロ波ステーション用ミラーの製作

(技)

機械システム技術課 岡田光司

1. 目的

この報告書はモノづくりに携わる技術職員に向けて、実験装置の製作方法・加工手順について技術継承を目的とした記録を残していくことを目的とする。

2. マイクロ波ステーション用ミラー

現在、核融合科学研究所 (NIFS) において実験準備が進められているコンパクトヘリカル装置 (CHD) のマイクロ波ステーションで使用される集光ミラーを 8 枚製作した。8 枚の内訳は平面ミラーと曲面ミラーそれぞれ 4 枚ずつであった。材料はアルミニウム合金 (A15052) である。

3. 反射面の加工

3-1. 平面ミラー

平面ミラーの反射面は、マシニングセンターにてフェイスミルを使用し反射面を切削加工で仕上げる。ミラーを設置する際、光軸合わせが容易にできるように表面を耐水ペーパーと研磨剤 (ミニター株式会社製ポリッシングコンパウンド (HD1003, 1002, 1006)) を使用してレーザー光が乱反射しない程度に磨き上げる。

3-2. 曲面ミラー

曲面ミラーの反射面はそれぞれ R354,R364,R422,R500 の球面形状である。3D CAD (SOLIDWORKS) でソリッドモデル (図 1) を作成し、CAM (Mastercam) によって加工プログラムを作成する。加工工程は荒加工と仕上げ加工で構成される。荒加工は Z 方向の高さ毎に輪郭線に沿って工具を動かす等高線加工 (図 2) で行い、Z 軸方向の切込み量は概ね 1 時間以内で加工が完了するように調整し決定する。荒加工時間の短縮は加工時間全体の短縮につながり経費削減が実現できる。

仕上げ加工は X 軸-から+の一定方向に平行に工具を動かす走査線加工 (図 3) で行う。Y 軸方向の切込み量 (切削ピッチ) は 0.1mm ずつで加工を行う。平面ミラーと同様、設置時の光軸合わせ作業を容易にするため表面を耐水ペーパーと研磨剤を使用してレーザー光が乱反射しない程度に磨き上げる。

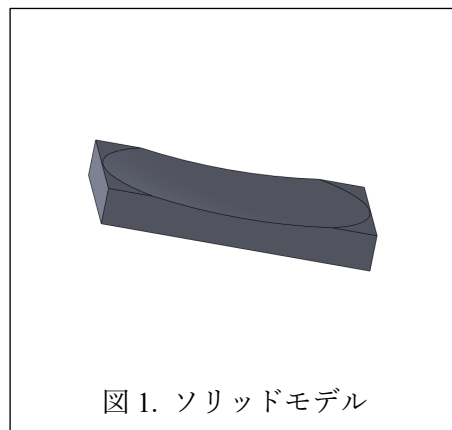


図 1. ソリッドモデル

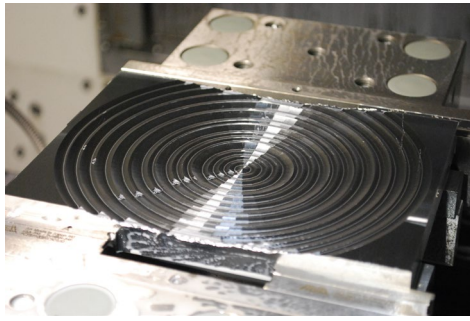


図 2. 等高線加工

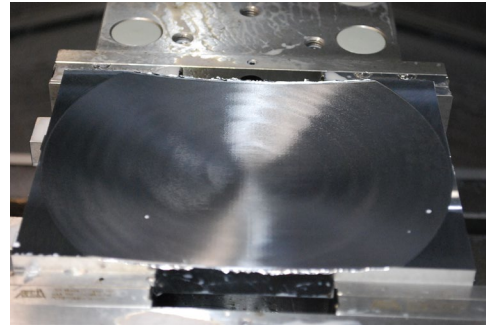


図 3. 走査線加工

これらのほか大型ミラー（350mm×400mm 以上）の場合は Y 軸方向の切込み量（切削ピッチ）を 0.1mm とした場合膨大な時間がかかってしまうため、切削ピッチを 0.2～0.3mm と調整して加工時間が最大 24 時間以内で完了するよう設定する。これは仕上げ加工に使用する増速スピンドルユニット（スピンドル）が高速で回転することによりギア等の摩擦によりスピンドルの温度が上昇することによって微小ではあるが伸びやずれが発生し製品の加工精度や表面仕上げに及ぼす影響を少なくするためである。

3-3. 外形の加工

8 枚の集光ミラーの外形は研究者からの要望で楕円形状に加工する必要があった。(図 4) 外形加工は今年度機械工作室に新規導入したワイヤー放電加工機 (WC) にて加工を行った。WC による加工はマシニングセンター (MC) による切削加工に比べて加工時間が 2 倍以上かかるが外形切削を行うための治具を製作する必要がない。今回、MC ではなく WC で外形加工を行ったのは WC 操作の習熟を深めることを目的としたためである。使用する工作機械については一長一短があるため納期や予算等を考慮して機械を選択する必要がある。

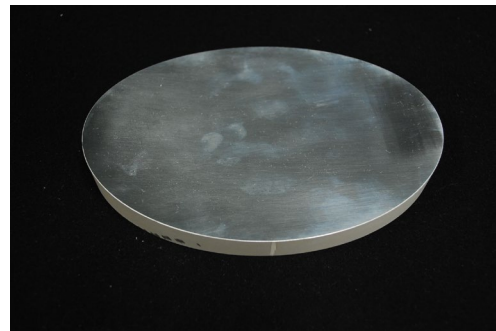


図 4. 楕円形状

1.2. 設計開発技術課

1.2.1. 誘導加熱法作業における台座の改良

(LHD : LHD 真空容器内炭素板分析)

設計開発技術課 加藤ひろみ

1. 目的・背景

大型ヘリカル装置(LHD)では、重水素ガスを用いたプラズマ実験(重水素実験)が6年間行われた。重水素実験では、D-D核融合反応によってトリチウムが生成され、トリチウムの一部は排気により排出されるが一部は真空容器内のプラズマ対向壁に滞留している。重水素実験終了に伴い真空容器内のプラズマ対向壁の炭素板を取り外して、トリチウム滞留量の分析を行っている。分析の手法として、イメージングプレートを用いてトリチウム表面分析や誘導加熱法に基づきトリチウム滞留量の評価などを行っている。本報告書では、誘導加熱を行う際に生じた事象と改善策などを報告する。

2. 台座改良の経緯

2-1. 台座と様々なサイズの炭素板

炭素板は高周波加熱昇温脱離装置で加熱しトリチウムを脱離するがこの時に炭素板を設置する台座は、高周波誘導加熱に対して電磁的に透過性を有する絶縁材料であり、高温に耐える素材であることが条件である。図1に台座の写真を示す。本装置で使用している台座の材料は、窒化アルミニウムを使用しており、3つの部材から構成される。3つの部材は、絶縁材である酸化アルミニウム製(アルミナ96)のナベネジを使用して固定される。台座に設置できる炭素板のサイズは、高周波誘導加熱のアンテナ形状で制約されており、最大で幅:230mm×高さ:130mm程度×厚さ:20mm程度である。台座の上に炭素板を設置後、酸化アルミニウム製(アルミナ96)ネジで試料を抑えて固定する。また、炭素板の加熱温度を制御するために台座の設置面から高さ56mm付近に設置したファイバ型放射温度計が設置されており、炭素板を放射温度計から見込める位置に設置しなければならない。しかし作業の過程で、一部の炭素板は本条件を満たさないことが判明し、加熱処理および設置が困難であることが明らかとなった。

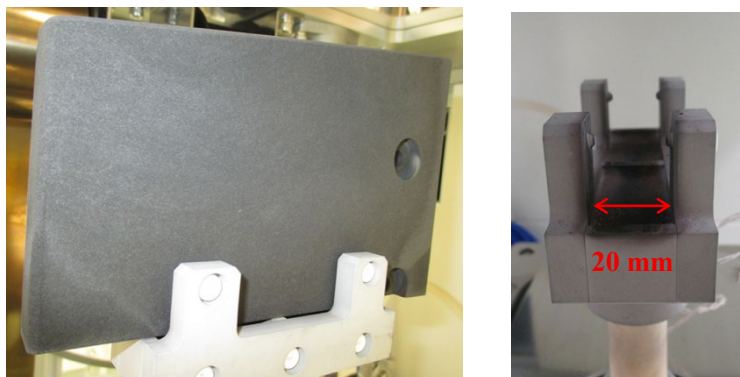


図 1 : 窒化アルミニウム製台座に炭素板を設置(左)と側面からみた台座(右)

2-2. 高さ：32 mm の炭素板の加熱

幅：220 mm×高さ：32 mm×厚さ：14 mm の炭素板の写真を図 2 に示す。この炭素板の問題は、高さが無いため放射温度計が試料を見込めず、温度コントロールができない。そのため放射温度計で測定できる高さまで炭素板の位置を上げる必要があった。その方法として酸化アルミニウム製(アルミナ 96)の板に試料を固定して高さを調節した。アルミナ板が倒れることの無いように酸化アルミニウム製スペーサー(アルミナ 96)で板を固定した。この状態で加熱処理を行ったところ、炭素板試料の熱膨張によりアルミナ板が割れて炭素板が脱落した。

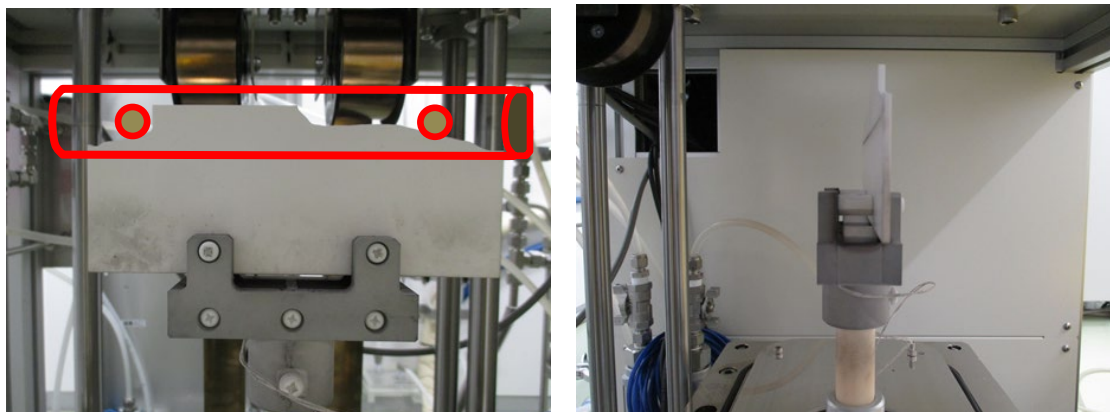


図 2：加熱処理途中で割れた酸化アルミニウム製板の正面(左)と側面(右)

2-3. 幅：100 mm×高さ：100 mm×厚さ：30 mm の炭素板の加熱

写真を図 3 に示す。この炭素板の問題は、厚さが 30 mm と厚いため既設の台座に設置できないことである。そのためコンターマシンを内蔵したグローブボックス内で炭素板を 20 mm 以下の厚さにスライス加工をする必要があった。3D プリンタで作成した固定治具に炭素板を取り付け、スライス作業を行う。40 数枚程度の炭素板を分析する予定にしていたので加熱処理する前に多大な時間と手間が掛かる。

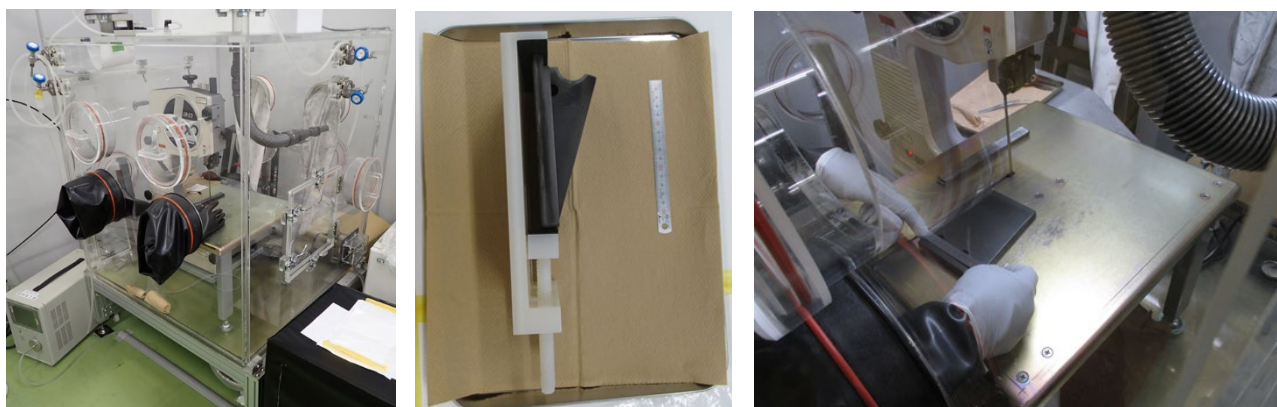


図 3：コンターマシン内蔵グローブボックス(左)と 3D プリンタで作成した固定治具(中央)と作業風景(右)

2-4. 問題点の解決に向けた新しい台座の設計

2-2・2-3 で上げた問題点を改善するため台座を設計した。出来上がった台座は 3 つの部材から成り、材料は耐熱温度やコストの観点から総合的に判断し、マシナブルセラミックス(シェイパル Hi Msoft)を採用した。3 つの部材は、既設の台座と同様に酸化アルミニウム製(アルミナ 96)で作られたナベネジを

使用して固定される。製作した台座は、炭素板試料を支えられるよう台座の両側にガイドを設けた。台座は炭素板サイズ、幅：105 mm×高さ：130 mm 程度×厚さ：32 mm が設置できるようにした。また、2-2 で使用した炭素板を設置できるように、両側の支持部を加工した。具体的には、台座の両側のガイドに切り欠きを入れ、はめ込む仕様にした。設置の状況の写真を図4に示す。高さ：65 mm に、切り欠き深さ：15 mm、切り欠き幅：15 mm を加工することで、放射温度計の測定位置に炭素板を設置することができ、加熱温度制御を可能にした。また、2-3 で使用した炭素板を設置した写真を図5に示す。2-3 で示した炭素板は、台座の両側のガイドをコの字型にすることにより脱落することなく、スライス加工しなくても設置できるようにした。このような形状の大きく異なる炭素板を1つの台座で対応できるように設計し製作した。

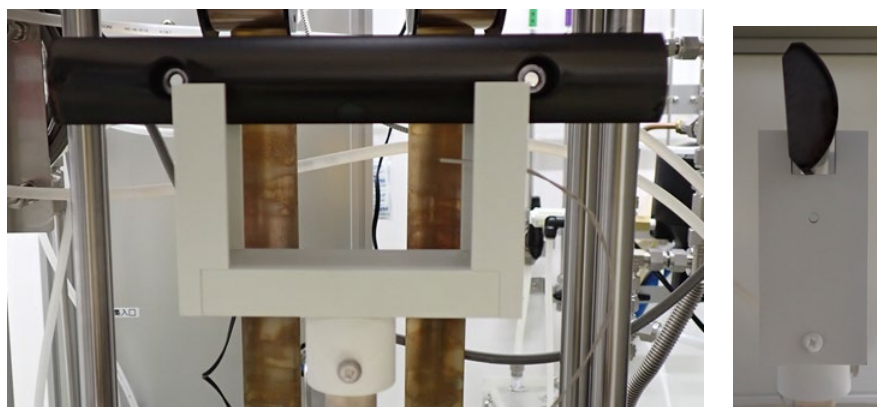


図4：新しく製作した台座に2-2の炭素板を設置した正面写真(左)と側面写真(右)



図5：新しく製作した台座に2-3の炭素板を設置した写真

3. まとめ

新しい台座では、多様な形状の炭素板を試料台座から脱落することなく加熱処理ができるようになった。また、炭素板加工の時間を大幅に短縮できた。材質をマシンブルセラミックスにしたことにより窒化アルミニウムと同等の熱特性を有しながら、製作コストも抑えられた。本装置で行ったトリチウム滞留量評価の一部は、2025年度の第42回プラズマ・核融合学会年会においてポスター発表を行った。今後もトリチウム滞留量の評価を行い、核融合炉におけるトリチウム収支、トリチウム挙動研究に貢献していきたい。

謝辞

新しい台座製作において株式会社北野製作所様、また、設計において田中将裕准教授より多大なご助言をいただいたことに感謝いたします。

1.2.2. 高温超伝導テープ線材を用いたコイル巻線機の開発状況

(超伝導マグネット研究棟運用班)

設計開発技術課 田上裕之、野口博基

1. 概要

核融合科学研究所の超伝導マグネット研究棟では、高温超伝導(HTS)線材を用いた磁場コイルの研究開発を行っている。本研究開発の効率化を目的として、棟内にて HTS テープ線材を用いたコイルの試作、性能試験を一元的に実施できる体制の構築を進めている。2024 年度より HTS コイル巻線機の開発に着手し、現在はコイル巻線制御の要素技術確立のため、試作機の製作に取り組んでいる。HTS テープ線材を用いて様々な形状にコイル巻線する技術は市場でも確立されていないため、技術部職員による技術協力として内製することを目指している。本報告では、モーター制御によりテープ線材を一定の張力でパンケーキ巻線可能な装置を低コストで製作した結果について、これまでの一連の設計活動、試運転結果に加え、技術的に苦労した点も含めて報告する。

2. 巻線時の張力制御方法

一般的に、コイル巻線時にテープ線材の張力を一定に維持するためには、ブレーキ、即ち巻き取る方向とは逆向きにトルクを与える必要がある。本制御を実現する手段として、(1)パウダクラッチ/ブレーキ、(2)モーターの2方式が考えられた。(1)は、特殊な磁性粉体を介して摩擦力をかけてトルクを伝達・制御する機器であるが、比較的高価なこと、粉体劣化による定期保守が必要なことに加え、所内での取り扱い経験も乏しいことから採用を見送った。一方、(2)モーター方式については、巻き取り、ブレーキの両動作に適したトルク特性を有するトルクモーターを選択した。

コイルをパンケーキ巻きする場合、コイル直径がターン数に応じて増加するため、一定のトルクを出力し続ける単純なモーター制御では、張力の一定維持は実現できない。そのため、質量計等に利用されているロードセルを用いてテープ線材の張力をモニタし、その値に基づいてモーターのトルクをフィードバック制御することとした。

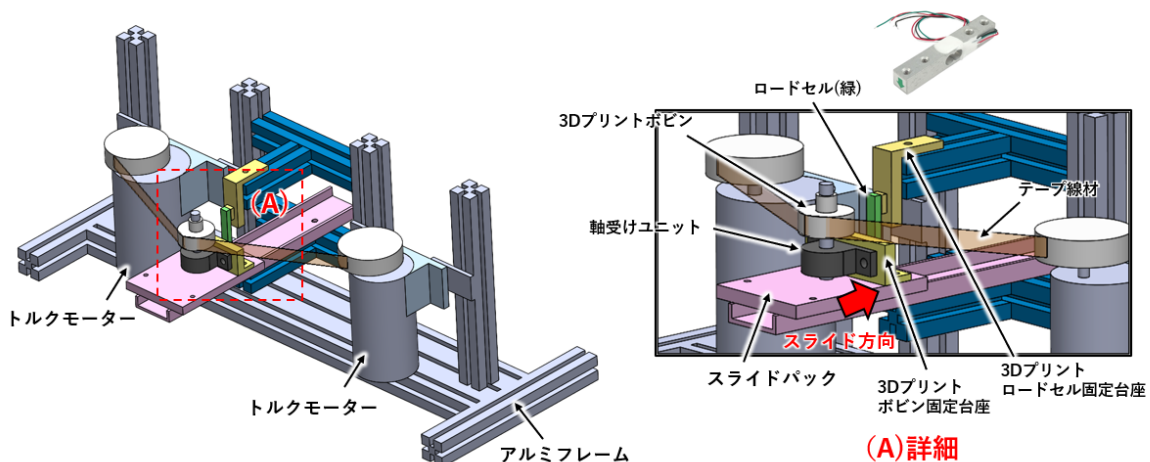


図 1. コイル巻線試作機本体の3次元モデル



図 2. コイル巻線試作機の製作結果

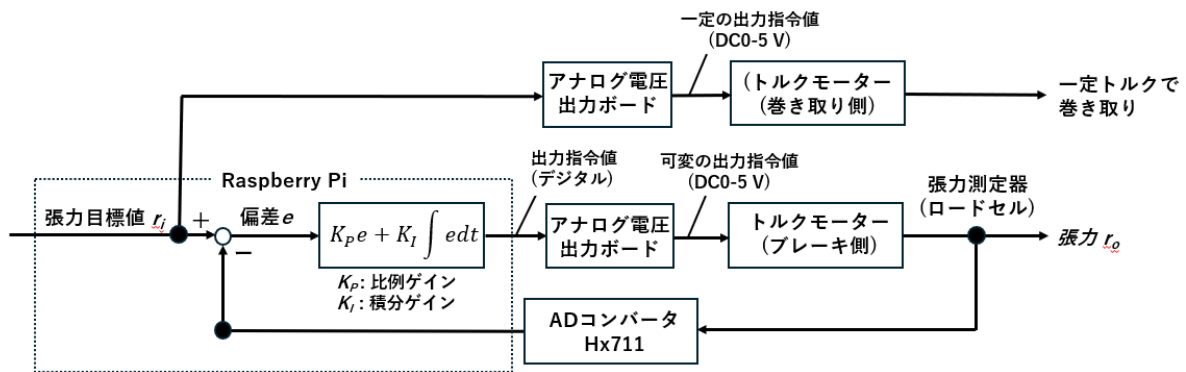


図 3. テープ線の張力フィードバック制御ブロック図

3. 巻線試作機的设计

図 1 に、コイル巻線試作機本体の 3 次元モデルを示す。2 台のトルクモーター（オリエンタルモーター、K シリーズ）にてテープ線材の巻き取り及びブレーキ、即ち逆トルク付与をそれぞれ行う。トルクモーターの仕様決定にあたり、巻き終わり時のコイル直径を 100 mm、質量 350 g、巻き送り速度 15 mm/s、巻線張力 3 N とした。各モーターは縦置きにしてコイルのポビンを水平にすることで、ポビン径の空間的な制限を低減しているが、それに伴い、ロードセルによるテープ線材の張力測定機構が複雑になる。当初、張力測定器は市販品を調達することを考えたが、最低でも 10 万円程度と高価であることに加え、今回のような水平方向のテープ巻線に適さない構造のものが大半であったため、自作するに至った。

図 1(A) に、張力測定器の設計モデルを示す。縦方向に設置した 2 台のモーターの間に張力検出用のロードセル(緑色)を片持ち状態で垂直に設置し、テープ線の張力を測定する。具体的には、水平方向に台座が移動するスライドパック(図 1(A)桃色)を採用し、その台座上にポビンを立ててテープ線材を支持し、台座ごとロードセル方向にスライドすることで張力を伝える方式とした。本機構については 4 節でも別

```

Shell x
>>> %Run ao_tension_rev.3 20251016_pi_contr.py

Welcome to the Pilot Coil Winding Control System. Now initializing...
AioInit Ret = 0 正常終了
AioResetDevice Ret = 0 正常終了
AioSetAoRangeAll Ret = 0 正常終了
AIO_output_Range = 51(0-5[V])
CH.No. 0:tension contr, 1:winding speed contr.
Winding speed voltage as CH1(V)? (0.1-2.0 V ): 0.8 ← 巻き取り側初期トルク指令電圧値(V)
Initial tension contrl voltage as CH0(V)? (0.1-2.0 V ): 0.8 ← ブレーキ側初期トルク指令電圧値(V)
Tension set value? (N) You can input between 0-5 N :3 ← 目標張力値(3N)
Coil winding time? (s) You can input between 0-100 s :10 ← 巻線時間(s)
/home/pi/contec/caio/config/hx711.py:17: RuntimeWarning: This channel is already in use, conti
ning anyway. Use GPIO.setwarnings(False) to disable warnings.
  GPIO.setup(self_PD_SCK, GPIO.OUT)
Hx711 initializing...Tare done! Add weight now...
If you want to quit control, please input (q)

tension=-0.178N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.91288

tension=-3.691N ← 巻線開始1秒後の張力検出値(N)
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7507724955677987

tension=-4.017N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7059615142440796

tension=-3.537N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.708381853106022

tension=-3.233N
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7132633723497391

tension=-3.233N ← 巻線開始5秒後の張力検出値(N)
Current tension cotrol voltage (CH00) = 0.7059847799548832

```

図 4. 試運転時の PI フィードバック制御画面

途説明する。

ロードセル自体も一般的な産業応用品の場合高額であるが、Raspberry Pi(ラズパイ)等のマイコン用として、500 円程度と極めて安価かつ良好な計測精度(誤差 0.5 %以下)を有するものを調達できた [1]。当該品は別売りの AD コンバータ(Hx711)と組み合わせることで使用するが、こちらも 500 円程度で購入可能である。ラズパイ用の Hx711 のサンプル制御プログラムは、GitHub にて無償公開されている。

4. 巻線試作機の製作

図 2 に、製作した試作機全体の写真、試作機本体の拡大図、並びに張力計測部の拡大図を示す。本機器は巻線機本体、モーター制御電源、モーター回転方向制御スイッチ、トルク制御用ラズパイで構成される。全体の製作費は予算である 10 万円以内に収まった。テープ線材は、試運転用として幅 10 mm の銅テープを用いた。巻線試作機本体の中央に設置された張力測定器の支持構造物やコイルのポビンは、3D プリンタにより造形した。これにより低コストに加え軽量化を実現し、モーターへの負担低減を図っている。3D プリントしたコイルのポビンとトルクモーターのシャフトは、ポビンにあらかじめ下穴を設けて造形し、その後イモネジでタップ加工を行い、シャフトまで貫通させることで固定した。

図 2 の張力計測部の拡大図に示す通り、ロードセルは 3D プリントした固定台座にて片持ち状態で支持されており、テープ線材の張力によりスライドしてきた 3D プリントポビンとその支持構造を受け止めることで、張力を計測する仕組みになっている。

図 3 にテープ線の張力フィードバック制御のブロック図を示す。ラズパイに張力目標値 r_t を入力すると、ラズパイ用アナログ電圧出力ボード(AO ボード),(CPI-AO-1602LC, 2CH)より DC0-5 V 信号が 2 台のトルクモーターの制御電源に出力され、トルク制御される。運転開始時には、AO ボードからブレーキ側のモーターと巻き取り側のモーターそれぞれに対して、所定の初期トルク指令値を入力する。その後、巻き取り側は一定トルク制御とし、ブレーキ側はフィードバックトルク制御を行う。フィードバック制

表 1 張力フィードバック巻線制御試運転により見出された課題と対応方針

課題 ID	内容	課題への対応方針
課題 A	フィードバックの応答性を高めすぎると、2 台のモーター同士の力(トルク)関係が崩れ、巻線が逆回転する	トルクモーター同士のトルク指令値の差分が一定数以下にならないよう制限を設ける
課題 B	巻線終了時にトルクモーターの回転速度が速いと、停止指令を与えても慣性力でしばらくモーターが回転し、テープの張力が緩む	巻き終わり時に巻き取り側のモーターのトルクを徐々に下げ、減速するプログラムを組み込む
課題 C	張力目標値に応じて初期トルク指令値、比例ゲイン、積分ゲインを変更する必要がある	様々な入力パラメータで体系的な調査を行う

御では、張力測定器から得られた計測データを AD コンバータを介してラズパイに取り込み、その値と張力目標値 r_i を用いて PI 制御演算を行う。その計算したトルク出力指令値は、ラズパイから AO ボードを介してモーターに発信される。

5. 試運転結果

図 4 に、ラズパイの PI フィードバック制御画面を示す。入力パラメータは、1)巻き取り側とブレーキ側のトルクモーターの初期トルク指令電圧値、2)目標張力値(N)、巻き線時間(s)である。試運転の結果、巻線動作自体は良好で、目標張力 3 N に対して 3.2 N 程度に制御することができたが、本制御のための適切な初期トルク指令電圧値や PI フィードバック制御の比例ゲイン K_P 、積分ゲイン K_I を見出すことに予想以上に苦労することが判明した。本パラメータスタディを進める上での留意点及び対応方針を表 1 に示す。

6. まとめと今後の開発計画

HTS テープ線材によるコイル巻線試作機の製作を通して、トルクモーター制御、張力計測、張力フィードバック制御等、巻線制御に必要な要素技術の開発を安価かつ着実に進めることができた。今後は、5 節で記述した留意点に対応しつつ、HTS テープ線を用いた試作機による実際のコイル巻線、通電試験を行う予定である。5 節で述べた試運転では、一度銅テープ線材を 3D プリントした送り出し用ボビンに手で巻き取った上で巻線を行ったが、HTS テープ線材では納品されたボビンを、そのまま別途 3D 造形する接続治具を介してトルクモーターと連結、巻線する計画であり、本 HTS コイル製作を経て得られた知見を実機の巻線機製作時に反映予定である。

参考文献

[1] Micro Type Load Cell SC616C データシート, <https://akizukidenshi.com/goodsaffix/SC616C-1kg%20load%20cell.pdf>

1.2.3. 大型ヘリカル装置用超伝導送電システムの運転保守実績

(LHD)

設計開発技術課 田上裕之、野口博基

制御情報技術課 大場恒揮

1. 概要

核融合科学研究所（NIFS）では、1998年3月に大型ヘリカル装置（LHD）によるプラズマ閉じ込め実験を開始し、2025年12月に完遂した。LHDは超伝導システムを有し、コイル電源からの送電線設備も超伝導送電システム(バスライン)を採用している。超伝導バスラインは、真空断熱及び複雑な配線経路、冷却方式に対応するため5重同軸コルゲート管構造となっており、その運転保守結果も工学上重要な知見となる。本報告では、約28年間、総定常冷却時間74,500時間に及ぶ超伝導バスラインの運転保守並びに主な不具合履歴について報告する。

2. 大型ヘリカル装置(LHD)の概要

世界最大級の環状型のプラズマ閉じ込め実験装置であり、将来の核融合炉の実現を見通した学術研究を担うNIFSの基幹装置である。図1にLHD本体の主な構成を示す。LHDは超伝導システムを有し、図1、2に示すように超伝導ヘリカルコイル(HC)、超伝導ポロイダルコイル(PC)、超伝導バスライン、コイル電源、並びにヘリウム液化冷凍装置から構成される。

3. 超伝導バスラインの概要及び運転・保守内容

超伝導バスラインは、HC、PCに給電するための直流超伝導送電線設備であり、HC用に6本、PC用に3本実装されている。表1にバスラインの諸元を、図3に超伝導バスラインの構造を示す。配線の取り回しを容易にしつつ断熱を確保するため、5重のコルゲート構造を採用している。定常冷却時は、冷凍機より供給される液体Heをバスラインの最内層である第一層目に気液二相状態で流し、冷却する。供給されたHeは第二層目を通り、Subcooler Tankを介して冷凍機まで戻る仕組みになっている。第三層目は真空断熱、四層目は80Kの断熱用シールドガス、五層目が真空断熱となる。

バスラインは冷却から加温に至るまでの1回の運転サイクルをこなすために、半年間程度の健全性維持が求められる。年間の運転・保守計画の策定、点検業者の監督業務に加え、真空排気作業、真空ポンプの分解点検、計器・凍結防止ヒータの点検、ペニング真空計の補修、制御機器の改造業務を自ら実施

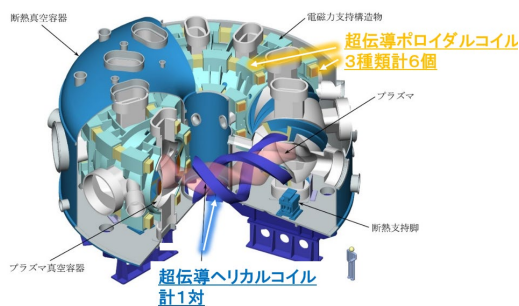


図1. 大型ヘリカル装置(LHD)本体の構成

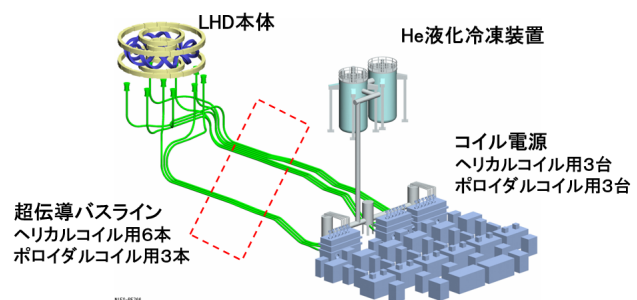


図2. コイル電源—超伝導コイルまでの構成

表1 超伝導バスラインの諸元

総全長(9本合計)	497 m
平均全長	55 m
最小曲げ半径	1.5 m
超電導線	NbTi/Cu ($T_c=9.5$ K)
定格電流	32 kA@ 1T, 4.4 K
定格耐電圧	DC5 kV@77 KGHe

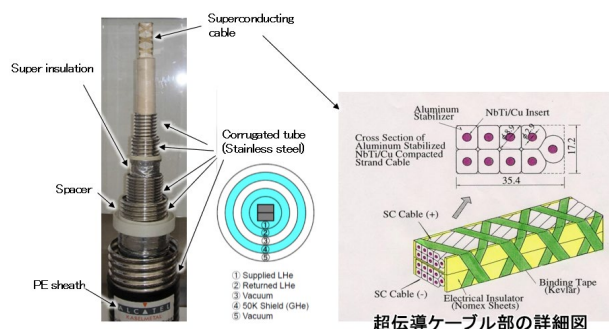


図3. 超伝導バスラインの構造

することで、バスラインの健全性を保ちながら職員の保守能力の維持・向上を図ってきた。バスラインは2026年1月16日の運転完遂までに計26回の運転サイクルを経験し、総定常冷却時間は74,500時間、通電時間は14,000時間に達した。

4. 経験した主な不具合と対応

超伝導バスラインが運転完遂までに経験した主な不具合を表2にまとめる。このうち、No.3,4について詳細を4-1、4-2節にて述べる。

4-1. 不具合 No.3 バスライン H2-I 冷却不良

2018年度の実験運転サイクルにて、HC 給電用のバスラインを冷却したところ、6系統中1系統のみ、液体 He を送液したにも関わらず温度が液体 He 温度(4.4 K)まで下がりきらず 10 K 程度にとどまり、結果的に冷却完了が当初の予定より 1 週間遅延した。調査の結果、図4に示すバスライン真空排気用シールオフバルブとオペレータの接続に不良が生じ、真空排気時の開操作が不十分となっていたことが原因と判明した。

不具合原因である常設のオペレータ本体の交換、到達目標真空度の見直し、真空排気系の改善(図5参照)、真空度および IR カメラによるバスライン表面温度遠隔監視システムの導入(図6参照)を行うことで2026年1月の運転完遂まで再発防止を果たした。真空排気系の改善は、1)排気配管をベローズから直管へ変更、2)シールオフバルブオペレータ部に遠隔監視用真空ゲージを導入の2点である。

4-2. 不具合 No.4 バスライン予冷用断熱二重配管の異常着霜

不具合 No.3 の事象(4-1 節参照) の水平展開として、バスラインの初期冷却時に使用する予冷用断熱二重配管のシールオフバルブ並びにオペレータそれぞれ9点の交換を業者にて実施した(図7参照)。交換作業後、真空排気を行った後に当該配管の真空層を封じ切った状態で冷却運転を行ったところ、図8に示すように9本中3本の配管表面に大きな霜が生じた。その後、霜が解けることでLHD 本体室地下の広範囲にわたって大量の結露が滴下する結果となった。

調査の結果、真空排気後の封じ切りに失敗し、真空が劣化した状態で配管を冷却していたことが判明した。当該配管は全長約 30 m のベローズ配管であり、ベーキングも困難であったことから真空断熱の

表2 超伝導バスラインの主な不具合履歴

No.	発生年	機器分類	不具合件名	不具合内容	対処
1	1998	電流リード	電流リードの異常着霜	真空度の悪化による異常な量の着霜	真空排気基準の見直し 除霜用ヒータの導入
2	1999-2009	クエンチ検出器	クエンチ検出器重故障誤発報	クエンチ検出器から重故障信号が誤発信された。長期にわたり事象が再発	ノイズによる誤発信を考慮した インタロックロジックの見直し
3	2018	バスライン本体	バスラインH2-I冷却不良	4.1節参照	4.1節参照
4	2019	予冷用断熱 二重配管	予冷用断熱二重配管の異常着霜	4.2節参照	4.2節参照
5	2024	温度計	電流リード常温端温度計測定不良	バスラインの冷却運転開始後、18系統中5系統の電流リード温度計の計測が不可となった	既設温度系は生産中止かつ詳細不明のため、代替品を選定し、 直営作業にて実装

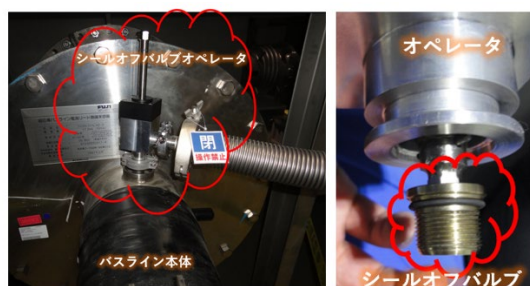


図4. バスラインシールオフバルブとオペレータ



図5. バスライン真空排気系の改善結果

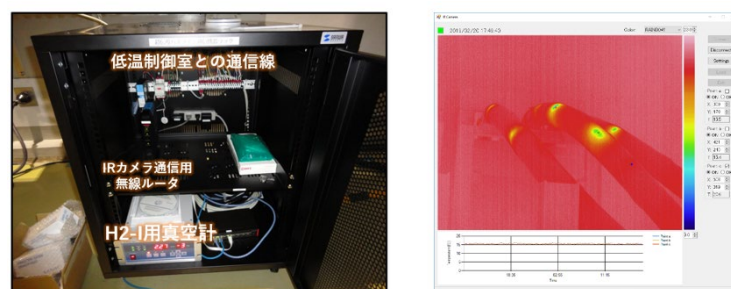


図6. バスライン真空度、表面温度遠隔監視システムの導入

左図：真空度、温度遠隔監視盤の新設、右図：IRカメラによる遠隔温度監視画面

完全な復旧に2年を要し、ベローズ配管の真空破壊のリスクを痛感した。シールオフバルブは、排気後も現場に残すことで再発防止とした。また、すべての予冷用断熱二重配管表面に熱電対を設置し、遠隔温度監視する体制を整えた。

5. バスラインの運転保守結果の総括

バスラインの運用開始から20年経過した2018年には、建設当初の保守担当者が退職したこともあり、1000点以上におよぶ各構成部品の保守状況が不透明化し、健全性維持に懸念が生じた。そこで、2019年よりバスラインの主要な機器・部品のリスト化を進め、各機器の個数、型番、製造元、設置年、点検、更新、不具合履歴、予備品の確保状況等を一元管理できる機器分類別保守管理表(EXCEL)を作成した。管理表を作成後、過去20年分の保守点検、更新、改造記録などを反映することで、バスラインの各機器の現在の点検、更新状況が明確化され、2020年度以降のきめ細やかな保守計画の策定を可能にした。



図7. バスライン予冷用断熱二重配管シールオフバルブの交換
左図：作業の様子、中央及び右図：シールオフバルブの詳細

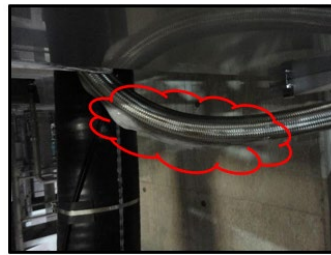


図8. 予冷用配管表面に生じた霜

機器分類別保守管理表に紐づける形で、「バスラインの冷却運転中に」生じた不具合発生履歴の整理も行った。整理結果として、1998年3月の運転開始から2025年2月までに、生じた不具合を原因別、かつLHD実験サイクル毎にまとめたグラフを図9に示す。不具合は実験開始初期である第1～第3実験サイクル時に多く発生しているが、その後は概ね毎年1-2件程度に抑えられている。第22実験サイクル前保守点検(2020年度)より機器分類別管理表を導入し、第26実験サイクルまでの不具合の抑制に成功した。また、図9の円グラフに示した通り、計器の故障が要因である不具合が19件と最も多く、LHD実験の開始や継続に影響を与えた件数も5件と最多であったことが判明し、国内外の他の超伝導核融合実験装置の保守や将来の原型炉設計の参考になるデータを取得することができた。

このように機器分類別保守管理表は、合理的な点検計画の策定や不具合履歴の管理・分析等に大変有用であることが示唆されたため、今後、様々な中・大型実験機器への適用を検討したい。

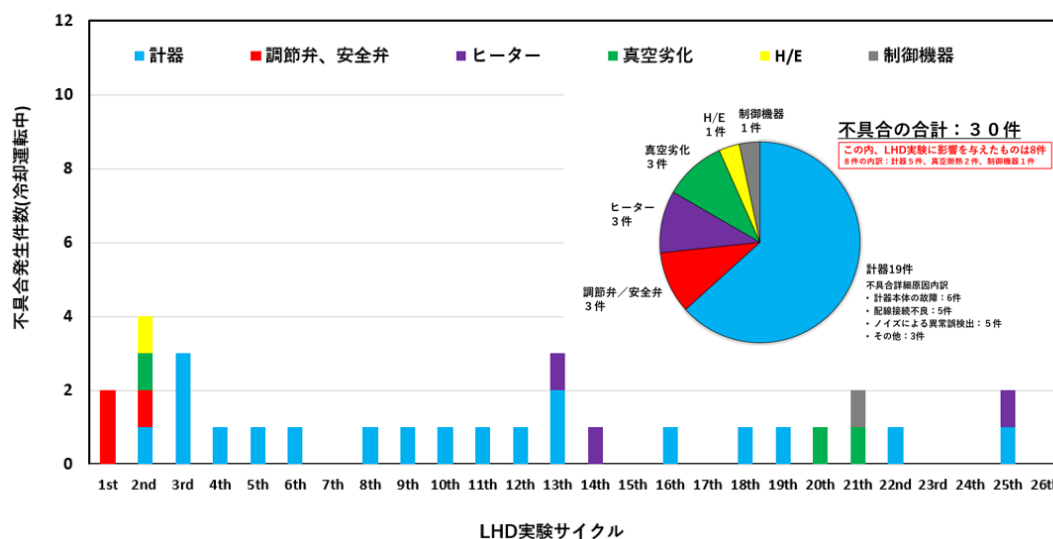


図9. 超伝導バスラインの冷却中に生じたLHD実験サイクル別の不具合発生件数のまとめ

1.2.4. 次期核融合プラズマ実験装置 CHD-U 候補 VAST のモジュラーコイルプロトタイプ製作 (技)

設計開発技術課 田上裕之、柳原悠人、中川翔、村瀬尊則
計測分析技術課 長原一樹

1. 概要

核融合科学研究所(NIFS)では、学術研究基盤事業『超高温プラズマの「マイクロ集団現象」を中核とした核融合科学の学術研究基盤計画』の基幹研究プラットフォームとしての役割を担う、CHD-U の物理・工学設計を進めている。現在、様々な装置の候補を並行して検討しているが、その中でも真空容器内に形成するプラズマ閉じ込め用の実験磁場配位を柔軟に制御できる「可変対称性トーラス：Variable Symmetry Torus(VAST)」案を重点的に進めている。2025 年度には、VAST の研究開発の一環として基幹部品であるモジュラーコイル(MC)プロトタイプを 1 点製作し、製作性確認及び製作技術の確立を果たした。本報告では、NIFS の研究教育職員や製作者と連携しながら技術職員が主体となって進めた MC プロトタイプの設計及び確立した製作技術を紹介する。

2. 可変対称性トーラス(VAST)の概要

CHD-U の候補である VAST は、大半径 1.5 m、小半径 0.4 m、アスペクト比 4、磁場強度 1.5 T のステラレータ型の常伝導核融合プラズマ実験装置である。図 1 の左図に、VAST の磁場コイル構成を示す。主なコイルとして、プラズマを真空容器内にトーラス状に閉じ込めるために、4 種類 16 個の MC を備える。また、MC によって生じた磁場を様々な実験磁場条件に制御するために、それぞれ 1 種類 4 個のインナーモジュラーコイルとサドルループコイル、並びに 1 対のポロイダルコイルも有する。

3. モジュラーコイルの設計

図 1 の右図に、試作対象の MC を示す。MC は MC_A から MC_D の 4 種類が存在し、それぞれ形状が異なる。当初は面曲率が大きく、製作が困難と予想される MC_C や MC_D の試作を計画したが、材

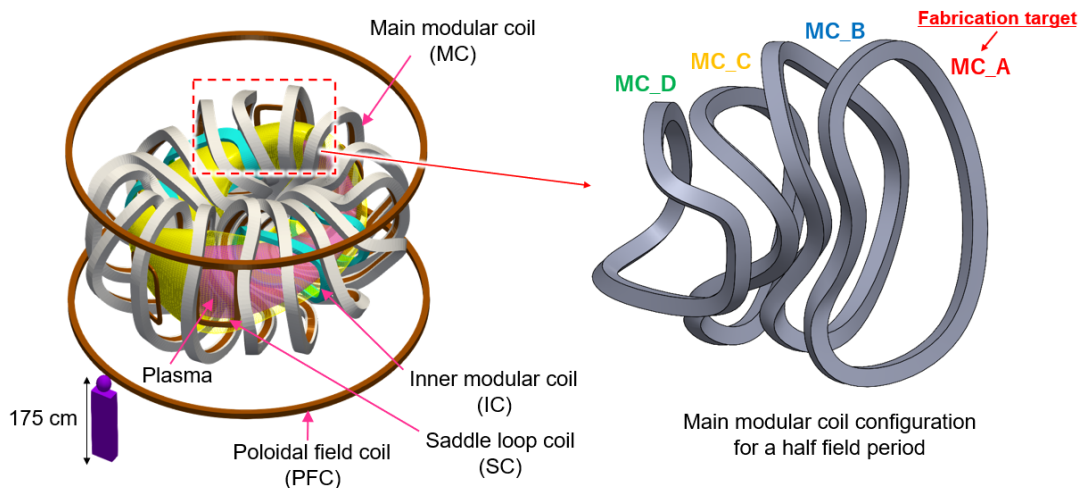


図 1. 可変対称性トーラス： VAST の磁場コイル構成

表 1. モジュラーコイルプロトタイプ設計パラメータケーススタディ(一部抜粋)

分類	名称	単位	ケース1	ケース2	ケース5	ケース6.5c	ケース6.5f	ケース6.5h	ケース6.5k	ケース6.5L	ケース7.5	備考
導体	幅	mm	8.5	10	10	11	11	11	11	11	12	
	高さ	mm	8.5	10	10	11	11	11	11	11	12	
	冷却水穴径	mm	4	4	5	5	5.5	5.5	6	6	5	
	R(導体4方)	mm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	導体絶縁厚さ	mm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	対地絶縁厚さ	mm	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	電流密度	A/mm ²	73.82	73.82	73.82	58	73.82	53	69	55	57	
	トータル電流	kAT	689.11	689.11	689.11	689.11	689.11	689.11	689.11	689.11	689.11	値変更不可
	1導体あたりの電流	kA	4.34	6.39	5.87	5.83	7.12	5.11	6.34	5.05	7.04	
	ターン数(トータル電流(kAT)より計算)		158.7	107.8	117.4	118.2	96.9	134.9	108.7	136.4	97.9	トータル電流/1導体あたりの電流
ターン数(幅×高さ方向ターン数)		160	120	120	120	100	140	112	140	100		
ターン数(幅方向)		16	12	15	12	10	14	14	14	10	幅方向の定義は4-2節参照	
ターン数(高さ方向)		10	10	8	10	10	10	8	10	10	高さ方向の定義は4-2節参照	
コイル寸法	コイル断面幅(対地絶縁込み)	mm	174	150	186	162	136	188	188	188	146	対地絶縁厚さ3mm 導体絶縁厚さ1mm
	コイル断面高さ(対地絶縁込み)	mm	111	126	102	136	136	136	110	136	146	
	コイル断面積	mm ²	19314	18900	18972	22032	18496	25568	20680	25568	21316	
	DP並列巻き数		1	1	2	1	1	1	2	1	1	DP = Double Pancake
	DP数		5	5	2	5	5	5	2	5	5	数が少ないほど製作時間短縮?
	口出し導体数(入口+出口の合計)		10	10	8	10	10	10	8	10	10	
コイル性能	冷却水圧力損失(1.4 L/min)	Mpa	2.58	1.93	0.82	0.65	0.34	0.48	0.31	0.31	0.54	Hazen-William formula
	コイル全体流量	L/min	7.00	7.00	5.60	7.00	7.00	7.00	5.60	7.00	7.00	
	定格電圧	V	6446.1	4834.6	4834.6	3798.5	4028.8	4049.5	4217.6	4202.4	3110.8	1グループ(4個)
	フラットトップ電力1グループ(4個)	MW	28.0	30.9	28.4	22.1	28.7	20.7	26.7	21.2	21.9	1グループ(4個)
総合評価					有力候補			有力候補		有力候補	有力候補	
評価要素	巻き線性		容易	良	良	懸念有	懸念有	懸念有	懸念有	懸念有	懸念有	導体寸法
	他の機器との干渉回避		懸念有	良好	懸念有	無	無	懸念有	懸念有	懸念有	懸念やや有	コイル幅、コイル高さ
	製作時間		長時間	長時間	短時間	長時間	長時間	長時間	長時間	短時間	長時間	DP数、並列巻き数
	冷却水圧損		過大	過大	やや大	やや大	小	普通	小	小	普通	冷却水圧力損失
	冷却性能		低	低	やや低	やや低	高	やや高	高	高	高	コイル全体流量
コイル電源製作費		やや高	やや高	高	安	高	安	高	安	安	出力電力、電流、電圧	

料である導体の納期や巻き型の製作期間の都合等から、製作者であるテクノ電気工業(神奈川県秦野市)の技術者と協議の結果、MC_Aを選択した。

MC プロトタイプ設計として、最初に導体の種類を決定した。VAST の MC は高い電流密度、すなわちコイル導体の温度上昇が大きいことが見込まれたことから、水冷の正方形ホローコンダクタを採用した。続いて適切な導体寸法、コイル断面寸法、電流密度等を調査するために、表1のようなケーススタディを行った。表1の内、黄色ハイライトで示したパラメータを変化させることで、コイルの断面寸法に加え、所定の冷却水流量の場合の圧損、フラットトップ時の印過電圧、電力等を算出し、評価とした。なお、本ケーススタディを行う際には以下の制限事項を守る必要があった。

- A) MC のトータル電流が 689.11 kAT を超えること
- B) 導体の電流密度が 73.82 A/mm² を超えないこと
- C) 所定の冷却水流量の場合に、圧損が 1 MPa を超えないこと
- D) MC 同士や MC とプラズマ間の距離を、ある程度確保すること
- E) 定格電圧や電流の一方が極端に高くなりすぎないこと

A)は所定の磁場強度を確保するため、B)は通電時の温度上昇を抑えるため、C)は冷却水設備のコスト削減、D)は装置本体の組み立て性、E)はコイル電源のコスト削減のための制限である。また、MC の巻線性、即ちコイル導体径についても最大 12 mm としている。以上の制限から、例えばコイル導体の寸法を小さくすると巻線性は良いが、電流密度が上昇し、冷却水の穴径が小さくなることで圧損が上昇することになる。また、定格電圧も大きくなることからコイル電源のコストも増大する。そのため必然的にコイル導体や断面は大きくなっていくが、その場合巻線性に加え制限事項 D)に抵触してくる。そのような点を加味しながら少しずつ候補を絞っていった結果、表1に示す4つの CASE: CASE5, 6.5h, 6.5L, 7.5 が有力候補として挙がり、これらの内比較的電流密度が低く、かつ圧損が最も低い CASE6.5L を選択した。

表 2. モジュラーコイルプロトタイプ(CASE6.5L)の諸元

分類	名称	単位	値	備考
導体	幅、高さ	mm	11	正方形ホロー導体
	冷却水穴径	mm	6	水冷導体
	電流密度	A/mm ²	55	
	トータル電流	kAT	689.11	
	1導体あたりの電流	kA	5.05	
コイル寸法	ターン数(幅×高さ方向ターン数)		140	
	ターン数(幅方向)		14	
	ターン数(高さ方向)		10	
	コイル断面幅(対地絶縁込み)	mm	188	対地絶縁厚さ3 mm
	コイル断面高さ(対地絶縁込み)	mm	136	導体絶縁厚さ1 mm
	DP数		5	
	口出し導体数(入口+出口の合計)		10	
コイル性能	1導体あたりの流量	L/min	1.40	
	冷却水圧力損失(1.4 L/min)	Mpa	0.31	Hazen-William formula
	コイル全体流量	L/min	7.00	
	コイル抵抗(75°C)、1個	mΩ	207.9	電気抵抗率=1.895*10 ⁻⁸
	コイルインダクタンス(自己)	mΩ	77.9	
	コイルインダクタンス 1グループ(4個)	mH	546.3	ANSYS Maxwell
	定格電圧(コイル励磁(1秒))	V	5500.0	1グループ(4個)
	フラットトップ電力 1グループ(4個)	MW	21.2	1グループ(4個)

CASE6.5L の諸元をまとめたものを表 2 に示す。なお、今回のケーススタディの制限事項は、中国西南交通大学との共同プロジェクトである準軸対称ステラレータ CFQS の建設プロジェクトの知見に基づくものであり、NIFS の技術職員も本プロジェクトの設計・評価・建設時の品質管理に強く関わってきた。

4. モジュラーコイルプロトタイプの製作

4-1. 巻き型の製作

図 2 に、MC_A プロトタイプの製作フローを示す。巻き型は図 2 手順 No.1 に示すように、ベース部と MC が乗る巻線部に大別され、巻線部については MC の周方向に 24 分割し、それぞれを機械加工して組み立てる仕様とした。巻線部の底部同士の部品、並びに底部とベース部同士は溶接であり、巻線部の底部以外の部品はボルト接続である。レーザートラッカーによる 3 次元寸法計測の結果、巻き型の最大寸法誤差は 1.7 mm と良好な寸法精度を示した。

4-2. コイル巻線作業

ホローコンダクタ表面の絶縁テーピング処理後、図 2 手順 No.4 のように巻線が進められた。今回はトラスの外側方向(大半径方向)に電流リードを引き出すため、ダブルパンケーキ巻きを採用した。MC を手順 No.4 のように横に倒した状態でコイル断面を見たときに、水平方向を幅方向、垂直方向を高さ方向とすると、シングルパンケーキ単位で幅方向に 14 ターン、高さ方向には 10 ターン巻く仕様になるため、5 つのダブルパンケーキ(1 条巻き)が高さ方向に重なる形になる。MC は 3 次元状に振じれており、巻線時にスプリングバックが生じることから、MC の周方向に数十か所、シャコ万力とジュラコンにてホローコンダクタを押さえつける必要があった。このような事情から、巻線作業には約 1 か月を要した。

なお、巻線作業の前に、図 2 手順 No.3 のように絶縁テーピング及び樹脂含浸状態のサンプル導体間の耐電圧試験を実施している。その結果、対地電圧 DC 5.5 kV に対して AC25 kV まで絶縁を担保できることが分かった。

4-3. 対地絶縁テーピング、真空含侵

巻線完了後、MC を巻き型から少々浮かしながらノーマックステープによる対地絶縁処理を行った。その後、再度 MC を巻き型に戻し、図 2 手順 No.5 のように密閉後、真空含侵を行った。真空含侵は、MC を所定の温度まで昇温した後に真空引きしながら樹脂を巻き型内に流し込み、大気開放して樹脂を加圧することで MC の断面内の隙間を埋めて絶縁する手法である。真空含侵後、所定の品質検査を行った上で 2026 年 3 月 31 日に大型ヘリカル実験棟ヘリウム液化冷凍機室に納品された。

5. モジュラーコイルプロトタイプ製作で得られた技術的な知見

本事業で得られた主な技術的な知見を以下に示す。本内容に基づき、実機のモジュラーコイルの設計を進めていく予定である。

- ・ 今回使用した幅、厚さのガラステープとカプトンテープ、ノーマックステープ並びに含侵剤を使用することで、ある程度の寸法精度を保ちつつ十分な導体間および対地絶縁性能を確保可能
- ・ 巻線時の燃れを考慮した、設計値(1 mm)に対する適切な導体間絶縁厚さの情報が得られたため、実機製作時は更に精度よく MC を製作することが可能。なお、今回の MC プロトタイプ製作誤差は約 10 mm
- ・ 幅 11 mm、 $\phi 6$ のホローコンダクタの場合、より曲率の大きい MC でも精度よく巻線可能



図 2. モジュラーコイルプロトタイプの製作フロー

1.2.5. LHD ヘリカルコイルにおけるセルノックス温度計の放射線影響に関する考察

(LHD)

設計開発技術課 野口博基

1. 概要

LHD ヘリカルコイル（以下ヘリカルコイル）は世界最大級の超伝導コイルとして、1998年の第1サイクルプラズマ実験から2026年第26サイクルプラズマ実験まで、28年間にわたってプラズマ実験用の磁場を提供してきた。

また、第19サイクルから第24サイクルまでの6年間は重水素実験を実施することによって、ヘリカルコイルは放射線に曝露された。第26サイクルプラズマ実験をもって、ヘリカルコイルはその役割を終えたが、長期運用によってこれまでに貴重な知見が数多く得られた。その中でも今回は、ヘリカルコイルで使用したセルノックス温度計の放射線影響について考察したので報告する。

2. ヘリカルコイルにおけるセルノックス

ヘリカルコイルは図1のように、H1コイルとH2コイルの2重らせん構造になっており、プラズマ真空容器の周りをH1コイルとH2コイルで合計10ピッチ巻いてある。超伝導導体はコイル容器の中でH-O、H-M、H-Iの3ブロックに分かれて巻かれており、それぞれ異なった電源に接続されている。

導体はコイル容器の中を液体ヘリウムで満たすこと（浸漬冷却）で冷却され、超伝導状態になる。コイル容器には液体ヘリウムが上部へ抜ける配管が各ピッチ毎に合計10本設置されており、その配管表面にそれぞれセルノックス温度計が取り付けられている。これは冷却時に各ピッチから流れ出る液体ヘリウムの温度を測定するためのものであり、導体の常伝導化などの異常が無い場合は飽和蒸気圧での液体ヘリウム温度を示すはずである。ヘリカルコイルではコイル容器内の圧力が大気圧より若干高いので、この温度は4.4K程度を示すことが妥当だと考えられる。

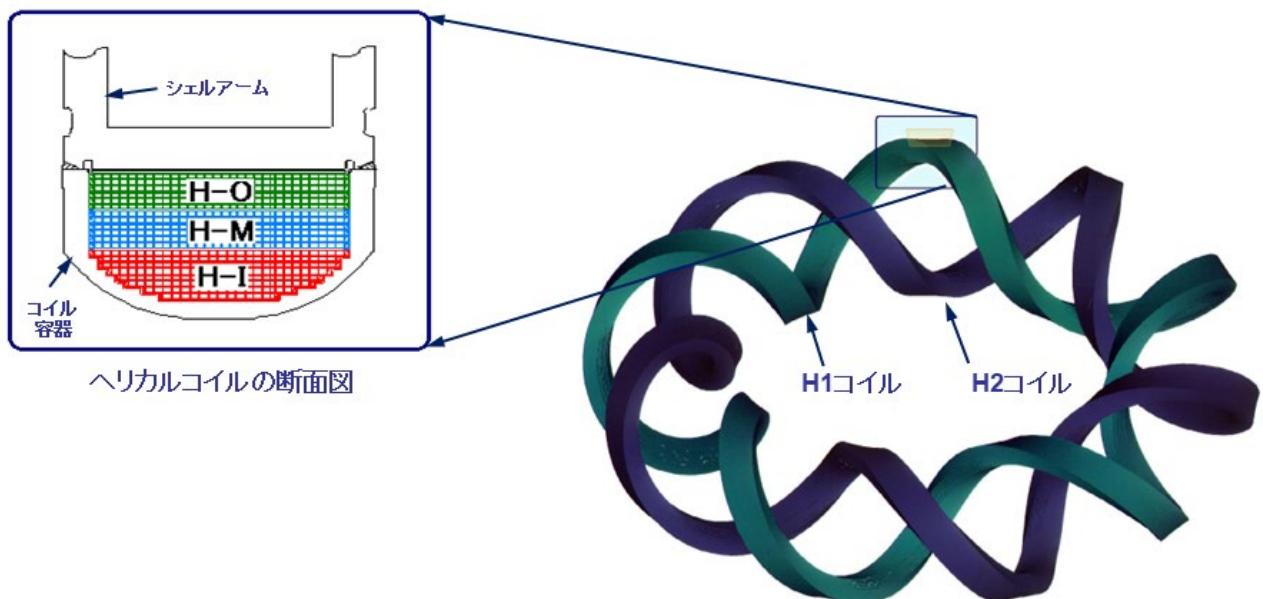


図1. ヘリカルコイルの概略図

3. 各サイクルのセルノックス温度計の温度推移

セルノックス温度計測定データのうち、コイル予冷が完了してから通電する前までの、飽和蒸気圧で安定した冷却状態を定点の測定値として、サイクル毎にまとめたものを表1に示す。今回は重水素実験の前後での放射線影響を考察するので、第9サイクル以前のデータは省略した。前述の通り、第19サイクルから第24サイクルまでが重水素実験である。また、グラフ化したものを図2に示す。

表1. 各サイクルの定点データ

	HTI1105	HTI1205	HTI1305	HTI1405	HTI1505	HTI1605	HTI1705	HTI1805	HTI1905	HTI1005
10th	4.30	4.40	4.40	4.40	4.40	4.30	4.40	4.40	4.40	4.40
11th	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.30	4.40	4.30	4.40	4.40
12th	4.36	4.32	4.38	4.30	4.40	4.30	4.39	4.29	4.36	4.32
13th	4.36	4.37	4.39	4.35	4.41	4.34	4.39	4.34	4.36	4.36
14th	4.36	4.35	4.41	4.32	4.41	4.32	4.40	4.30	4.39	4.34
15th	4.38	4.38	4.44	4.36	4.41	4.35	4.39	4.34	4.41	4.38
16th	4.39	4.33	4.49	4.30	4.41	4.30	4.41	4.30	4.41	4.33
17th	4.39	4.42	4.40	4.36	4.41	4.35	4.41	4.36	4.41	4.38
18th	4.42	4.42	4.57	4.36	4.41	4.35	4.41	4.36	4.41	4.37
19th(DD)	4.41	4.43	4.40	4.37	4.40	4.35	4.41	4.36	4.42	4.37
20th(DD)	4.44	4.43	4.32	4.36	4.40	4.35	4.41	4.37	4.43	4.37
21th(DD)	4.47	4.44	4.35	4.36	4.41	4.34	4.42	4.38	4.45	4.37
22th(DD)	4.49	4.46	4.34	4.37	4.42	4.35	4.42	4.40	4.46	4.38
23th(DD)	4.53	4.47	4.35	4.37	4.42	4.35	4.43	4.41	4.48	4.38
24th(DD)	4.55	4.48	4.38	4.37	4.44	4.35	4.44	4.43	4.50	4.39
25th	4.55	4.47	4.36	4.37	4.43	4.35	4.43	4.43	4.49	4.39
26th	4.57	4.49	4.40	4.37	4.43	4.35	4.44	4.45	4.52	4.39

セルノックス温度計の温度推移

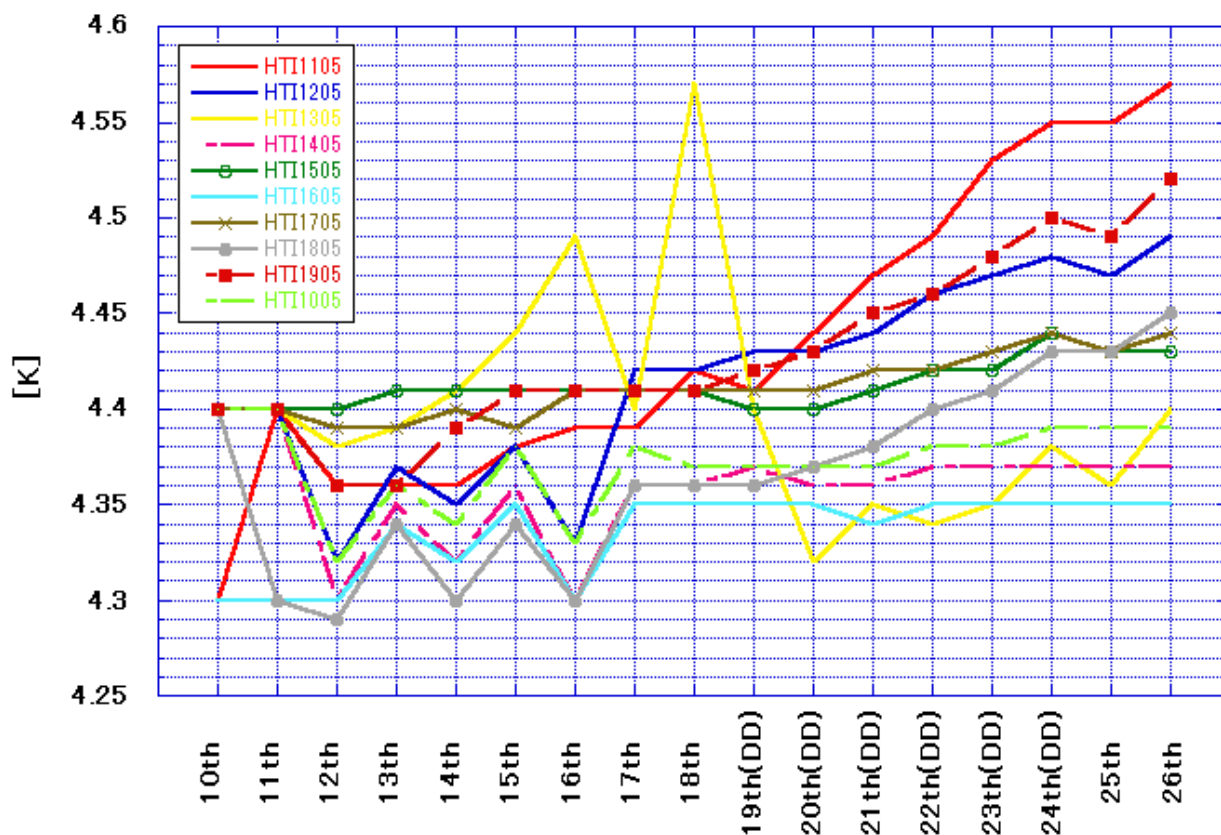


図2. 温度推移グラフ

4. 考察・まとめ

温度推移グラフのうち、黄色で示した HTI1305 は第15サイクルから異常な値となり、放射線影響と

は別の原因による故障と思われるので無視して頂きたい。(第 19 サイクル前に交換して正常化した)

グラフを見ると、本来、4.4K 程度で一定に推移するところ、重水素実験を開始した第 19 サイクルを境に、年々上方へシフトしていっているように見える。ほぼ全てのセルノックスが同じ傾向であるため、データ収集系の変換器やアンプの誤差が原因とは考えにくく、やはり放射線の影響によってセルノックスの測定値が上方へシフトしていると考えられる。また重水素実験が終了した後の、第 25、第 26 サイクルは放射線の出ない軽水素実験に戻ったのだが、引き続き値が上方へシフトする傾向が見られる。これは、LHD 全体が放射化したことにより、軽水素実験時にも引き続き周囲の装置から放射線が出続けており、その影響によるものと考察した。

セルノックス温度計は放射線によって値にズレが生じるといった現象は、極低温関係者からしばしば聞いてはいたものの、ネット検索などではあまりヒットしない話題だった(逆にセルノックスは放射線の影響を受けにくいという検索結果も出る)。しかし、今回ヘリカルコイルにおいて、セルノックス温度計の測定値が上方へシフトする現象が確認でき、その原因が放射線による影響だと推定できた。

セルノックス温度計は極低温領域で精度が良く、極低温分野では比較的良好に使用される。しかしながら、放射線の影響を受ける可能性があることから、加速器や核融合など、放射線が発生する装置に超伝導を応用する場合は極低温の温度測定センサの選定に注意が必要だと考えられる。

1.2.6. 未利用バイオマス由来活性炭の賦活最適化

(技)

設計開発技術課 村瀬尊則 田上裕之 中川翔 柳原悠人 (執筆)

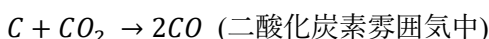
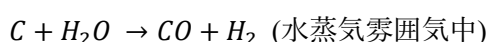
計測分析技術課 長原一樹

1. 概要

大型ヘリカル装置(LHD)の真空排気に用いられるクライオポンプでは、排気パネルの吸着剤として活性炭が使用されている[1]。核融合科学研究所 技術部では、LHD 向けクライオポンプの研究開発で蓄積した知見を活用し、SDGs を意識した取り組みとして、核融合プラズマ実験装置のクライオポンプに利用する、未利用バイオマス由来の高機能活性炭の創製と社会実装に向けた研究開発を行っている。これまでに、高温真空加熱によるシリカ除去法、および放電プラズマ焼結 (SPS) 法を用いたバインダーフリーの焼結手法に係る研究開発を行い、それぞれ特許を取得するとともに[2, 3]、学術論文として出版した[4]。2025 年度は、炭素材料に細孔を形成する賦活と呼ばれる工程において、使用するガスの流量や賦活時間、ガス種の組み合わせによって生じる活性炭の性能差を系統的に調査し、これまでに得られた中で最大の比表面積を示す賦活条件の組み合わせを見出した。

2. 内容

これまでのクライオポンプの研究開発において、ガスの吸着速度を高めるためには、吸着材である活性炭の細孔のうち、直径 2~50 nm のメソ孔の豊富さが重要であることが分かった。そこで本研究では、メソ孔が豊富な活性炭の作製を目標としている。豊富なメソ孔を得るためには、細孔形成を行う賦活において、種々の条件によって比表面積及び細孔径分布がどのように変化するかを理解することが重要である。賦活には主にガス賦活と薬品賦活があるが、本研究では、比較的实验が容易なガス賦活を用いた。ガス賦活では、炭素材料を水蒸気または二酸化炭素雰囲気中で 750~900°C に加熱することで実施する。その際に起きる炭素のガス化反応を以下に示す。



本賦活においては、ロータリーキルン(RK-0330、株式会社モトヤマ)を使用した。これは、炉心が回転することで、炭素材料と賦活ガスの接触面積を増やし、効率的に賦活が行えるという特長を持つ。装置の外観を図 1 に、賦活の構成を図 2 に示す。本賦活における固定条件と変動条件を表 1 に示す。作製した活性炭の評価には、高精度ガス・蒸気吸着量測定装置(BELSORP MAX X、株式会社マイクロトラック・ベル)を用いた窒素ガス吸着測定法を行い、評価指標である比表面積 [m²/g] と、細孔径分布を算出した。

表 1. 賦活の条件

固定条件	
賦活温度	900°C
試料炭素質量	1.0 g
炉心回転数	5 min ⁻¹
変動条件	
賦活ガス	CO ₂ , H ₂ O, CO ₂ +H ₂ O
賦活時間	5 ~ 90 min
二酸化炭素の体積流量	0.2 ~ 0.8 L/min
水蒸気の質量流量	2 ~ 10 g/h

二酸化炭素または水蒸気を単体で用いたときの賦活時間に対する比表面積の変化を図 3 に示す。それぞれ、二酸化炭素の体積流量は 0.8 L/min、水蒸気の質量流量は 2 g/h である。二酸化炭素賦活では賦活

時間 10 分で比表面積が最大となり、それ以降は時間の増加と共に急激に減少するのに対し、水蒸気賦活では 30～60 分をピークに緩やかに減少した。また、賦活時間を 10 分に固定し、ガス流量を変化させた場合には、流量に関わらず比表面積に大きな変化は見られなかった。これらの結果をもとに、賦活時間 10 分で二酸化炭素と水蒸気を同時に使用し、二酸化炭素の体積流量を 0.5 L/min、水蒸気の質量流量を 10 g/h としたとき、比表面積は本実験における最大値の 1001.1 m²/g に達した。このときの細孔径分布を、同じ賦活時間および流量の単体ガス賦活の結果と併せて図 4 に示す。細孔径 0.6 nm 付近のピーク強度は水蒸気単体賦活で最大となるが、1~2 nm 付近のピーク強度および 10 nm 付近のメソ孔のピーク強度は、二酸化炭素と水蒸気を同時に使用したものが最大となる。これは、単体ガスの形成する細孔の分布双方の特徴を兼ね備えた分布であり、賦活ガスの同時使用によって、単体使用の場合と比べてメソ孔が豊富な活性炭が得られることが示された。本報告内容について、第 42 回プラズマ・核融合学会 年會において柳原がポスター発表を行った。

3. まとめ

核融合プラズマ実験装置のクライオポンプ用吸着材として用いる、より高性能な活性炭の開発のため、メソ孔を多く形成できる賦活条件を実験的に検討した。賦活ガスとして二酸化炭素と水蒸気を同時に使用することで、それぞれを単独で使用した場合よりも比表面積が増大するとともに、各単体ガスで形成される細孔径分布の特徴を両方兼ね備えた活性炭が得られた。さらに、ガスの吸着速度において重要なメソ孔が最も多く形成されることが分かった。今後、賦活ガスを逐次的に使用する手法などにより、比表面積およびメソ孔量をさらに増大させる賦活条件の最適化を進める。

参考文献

- [1] T. Murase *et al.*, Plasma Fusion Res. 11, 1205030 (2016).
- [2] 大学共同利用機関法人自然科学研究機構及び穴織カーボン株式会社、多孔質炭素材料の製造方法、特許第 7301300 号、2023 年 6 月 23 日
- [3] 大学共同利用機関法人自然科学研究機構及び穴織カーボン株式会社、粉末活性炭成形体の製造方法、特許第 7501845 号、2024 年 6 月 10 日
- [4] Y. Yanagihara *et al.*, Plasma Fusion Res. 19, 1205012 (2024)



図 1. ロータリーキルン外観

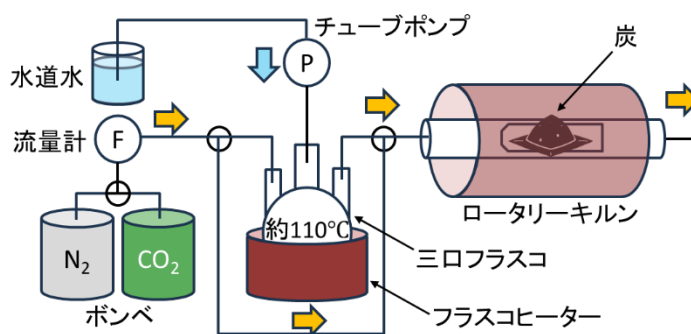


図 2. 賦活の構成

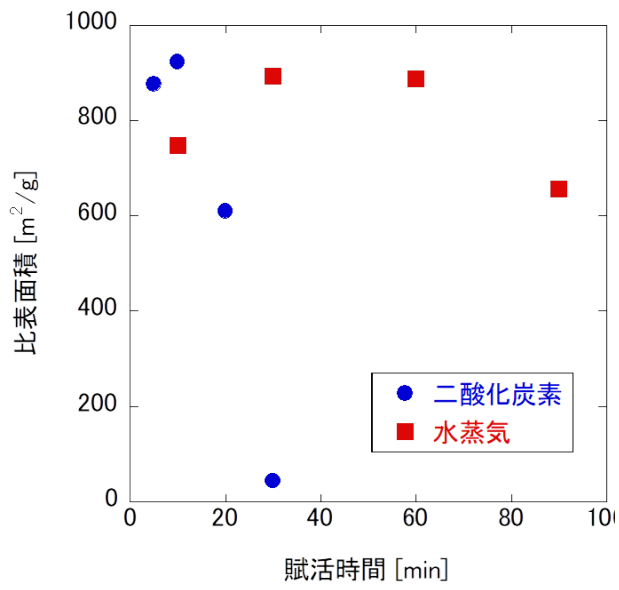


図 3. 賦活ガス種ごとの賦活時間と比表面積の関係

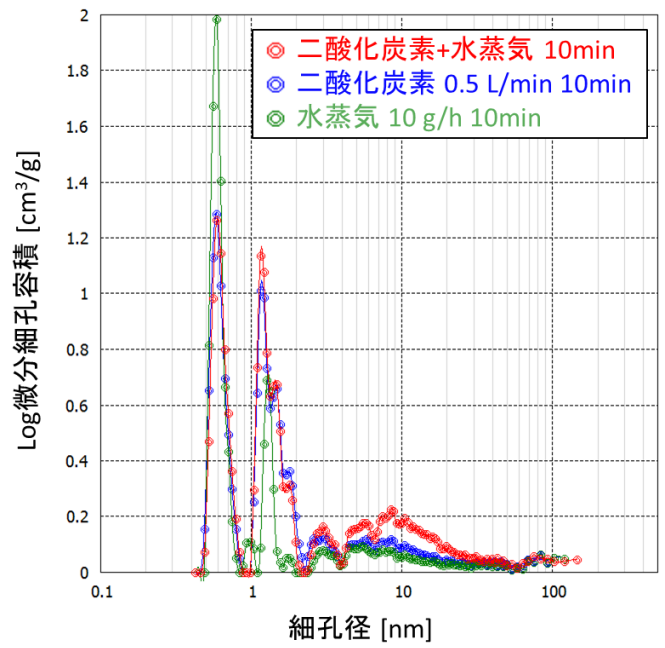


図 4. 賦活ガス種ごとの細孔径分布

1.2.7. JT-60SA におけるドップラー反射計アンテナの電磁力評価

(技)

設計開発技術課 村瀬尊則 中川翔 林浩己 柳原悠人 (執筆)

量子科学技術研究開発機構 本間寛人

1. 概要

JT-60SA は、日欧共同で進められている超伝導トカマク装置であり、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST)の那珂フュージョン科学技術研究所に設置されている。現在、2027 年度メンテナンス期間における設置に向けて、ドップラー反射計の適用について検討が進められている。トカマク装置では、実験中にプラズマ電流が急激に消失するディスラプション現象が発生すると、プラズマ周辺の構造体に誘導電流が流れ、極めて大きな電磁力が作用するため、機器の設計において事前の検証が必要不可欠である。本取り組みでは、設計したドップラー反射計アンテナが当該電磁力に対して耐えうるかを評価するため、有限要素解析ソフトウェア Ansys を用いて電磁場解析および構造解析を実施した。

2. Ansys を用いた電磁力評価

ドップラー反射計は、プラズマに電磁波を入射し、反射波のドップラーシフトを観測することで、乱流強度およびポロイダル速度を計測する装置である。これらの物理量は、プラズマの周辺領域とコア領域の間の輸送物理を理解するうえで重要である。JT-60SA に設置予定のドップラー反射計の 3D モデルを図 1 に示す。本装置は、ポートプラグと呼ばれる円筒構造の内側に、2 本のコルゲート導波管が通っており、その先端には 2 枚のミラーが設置されている。また、根元部は計測ポートと接続されており、フランジ部で固定された片持ち梁構造となっている。本解析では、まず Ansys Maxwell を用いた過渡磁場解析によりディスラプション時に発生する電磁力を算出した。次に、その計算された電磁力を Ansys Mechanical にインポートし、アンテナに生じる応力を評価した。このとき、アンテナに発生する相当応力を構成部材の許容応力値と比較した。なお、許容応力値は米国機械学会 (ASME) が策定する圧力容器規格 (ASME Section VIII Div.2) を参照している。

電磁力解析では、Maxwell の周期解析機能を活用して計算コストを削減するため、図 2 に示すように JT-60SA 装置全体を周方向 1/9 に切り取ったモデルを使用した。解析では各種コイルに定常電流を与え、プラズマ電流が約 5 ms の間に 5500 kA から 0 A まで急激に変化するディスラプション条件を設定した。解析時間範囲は 0~20 ms、時間ステップは 1 ms とした。このとき、ディスラプションに伴う磁場の急激な変化によって、アンテナに図 3 に示すような誘導電流が生じ、これが各種コイルの形成する磁場と相互作用することで、図 4 に示すようなトルクが発生する。

応力解析では、アンテナに対して電磁力解析によって導出した電磁力に加え、重力加速度を荷重として付与し、相当応力と変形量を算出した。その結果、図 5 に示すように、ミラー保持部には電磁力に起因する応力が、アンテナの根元には自重による応力がそれぞれ生じていることが確認できる。

応力解析の結果、アンテナを構成する SUS316L の許容応力 115 MPa に対して、アンテナに作用する最大応力が 14.3 MPa と十分な余裕があることが分かった。この結果を踏まえ、計測効率向上の観点から、アンテナをプラズマに近づけるため、図 6 に示すように、プラズマ側へポートプラグを延長する設計を検討した。延長条件として、真空容器まで延長した場合と、安定化板まで延長した場合の 2 ケース

について、同様の解析を実施した。ミラー位置ごとの最大相当応力と最大変形量の時間変化を図7および図8に示す。また、図9および図10に最大時の相当応力分布と変形のベクトル分布を示す。結果として、プラズマに近く電磁力が最も大きい安定化板までポートプラグを伸ばした条件においても、最大相当応力はアンテナ先端部で52.4 MPaとなり、許容応力を十分下回った。また、変形量は、自重によるたわみと電磁力によるトルクが重畳することで、斜め下方向に最大約2.0 mmとなるが、計測精度への影響および他機器との干渉はいずれも問題ないことを確認した。以上の結果より、今後の詳細設計および実機製作には、安定化板までポートプラグを延長した設計を採用することとした。一方で、設計変更によりポートプラグ先端部がプラズマに接近するため、プラズマからの放射熱の影響が無視できなくなる懸念がある。この懸念については、今後、熱解析を実施して検証する予定である。本内容について、令和7年度技術研究会における技術交流会にて柳原が口頭発表を行った。本解析は、QSTで行われた同様の電磁力解析を参照して実施しており、QST 那珂フュージョン科学技術研究所 先進プラズマ研究開発部 先進プラズマ第2実験グループの本間氏より多大なご助言をいただいた。

3. まとめ

JT-60SA へのドップラー反射計設置に向けて、ディスラプション時の電磁力に対するアンテナの構造健全性をAnsysによる有限要素解析で評価した。初期設計では、最大相当応力が14.3 MPaであり、許容応力115 MPaに対して十分な余裕を有することが確認された。この結果を踏まえ、計測効率向上のためポートプラグを延長した設計についても同様の解析を実施した。その結果、最も電磁力が大きくなる条件においても最大相当応力は52.4 MPaにとどまり、許容応力を十分に下回ることが確認された。以上より、延長設計の構造的妥当性が示され、安定化板までポートプラグを延長した設計を、詳細設計および実機製作に採用することとなった。今後は、プラズマへの接近に伴う放射熱の影響を調査するため、熱解析を実施する予定である。

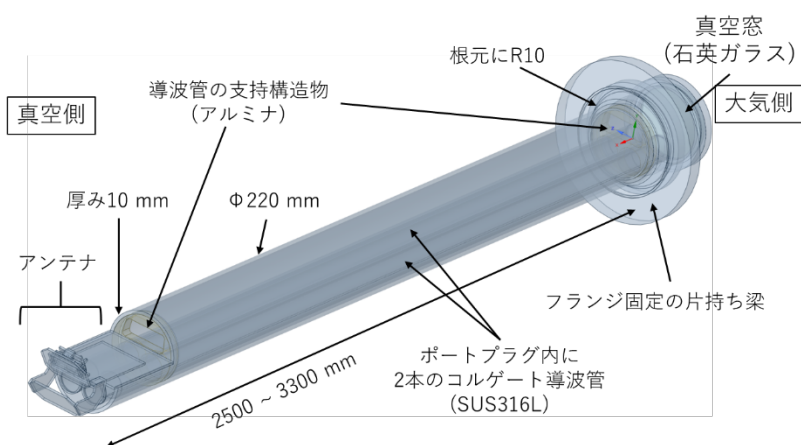


図 1. ドップラー反射計アンテナモデル

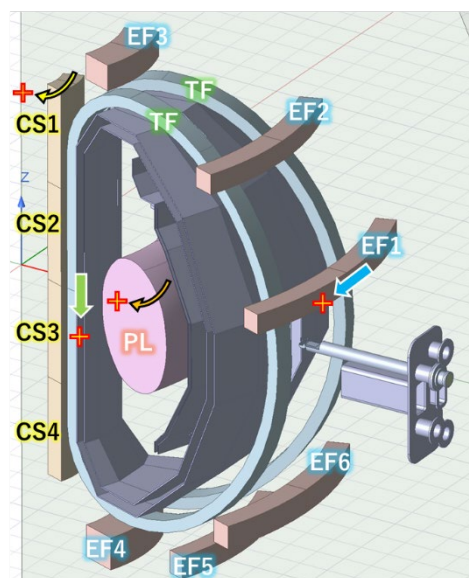


図 2. 電磁力解析用 1/9 分割モデル

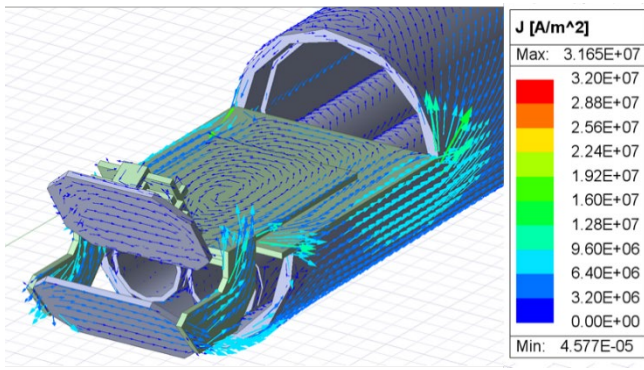


図 3. ディスラプション時の誘導電流密度分布

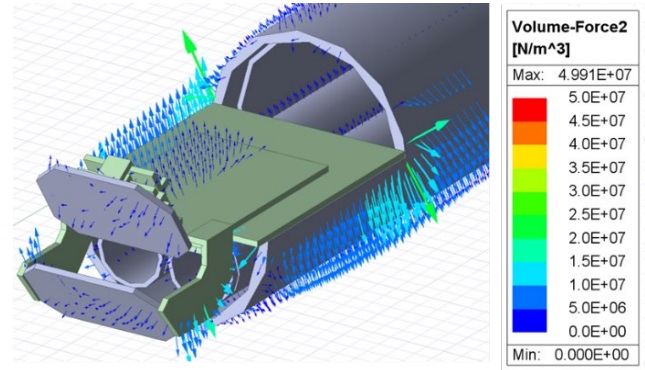


図 4. ディスラプション時の電磁力による物体力密度分布

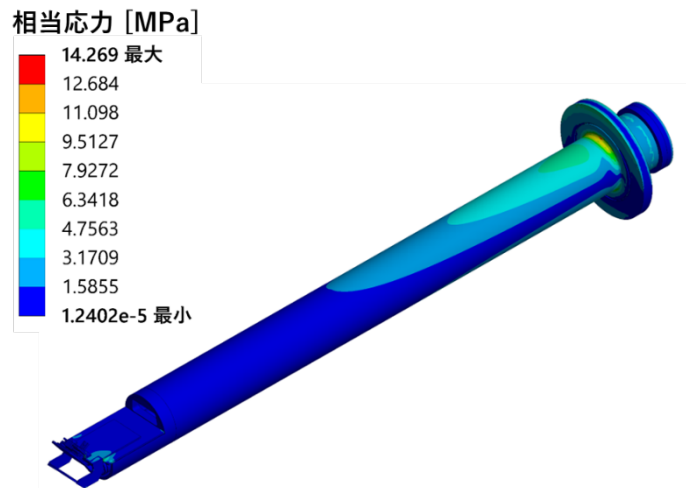


図 5. 初期設計における最大時の相当応力分布

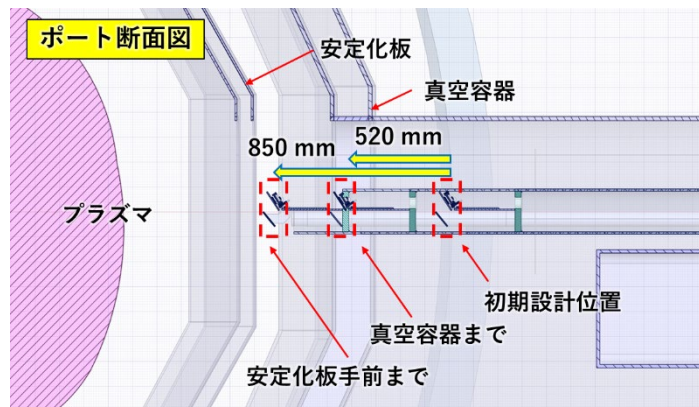


図 6. ポートプラグ長さの設計案

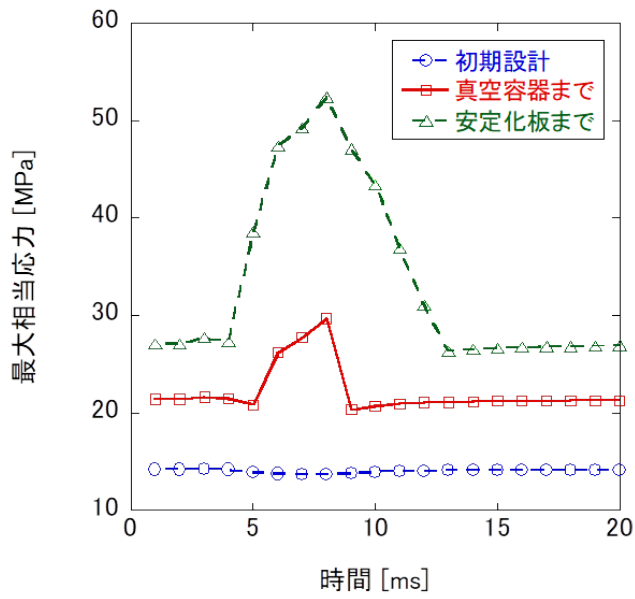


図 7. 最大相当応力の時間変化

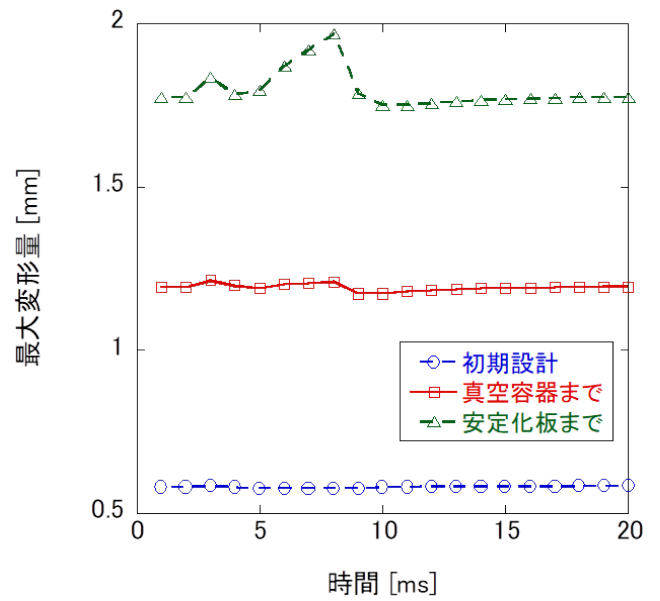


図 8. 最大変形量の時間変化

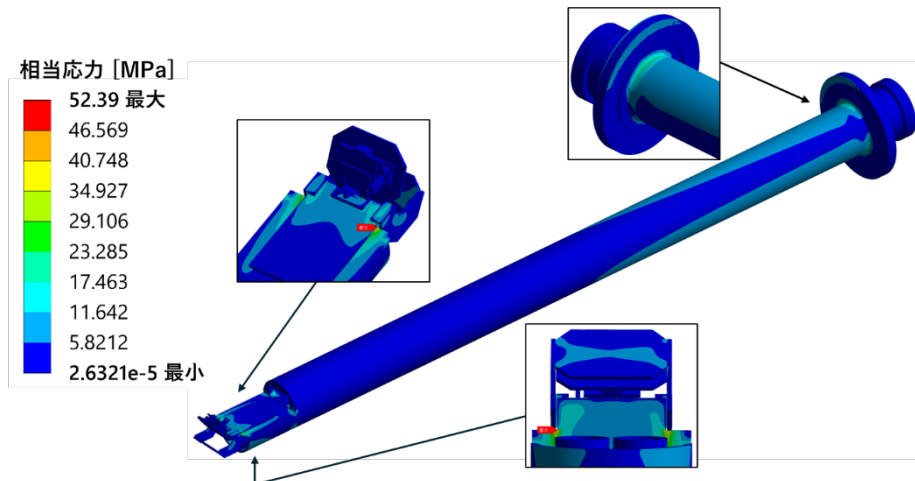


図 9. 安定化板まで延長した設計における最大時の相当応力分布

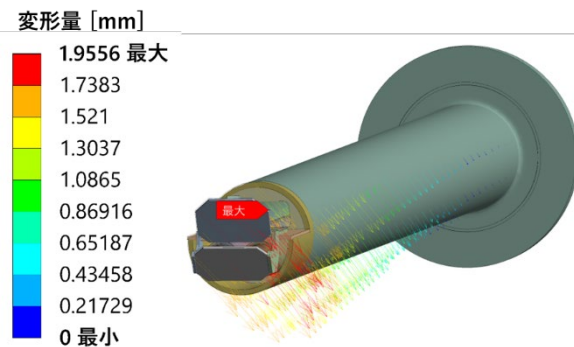


図 10. 安定化板まで延長した設計における最大時の変形量ベクトル分布

1.2.8. 超高熱負荷試験装置 ACT2 の改造計画

(技)

設計開発技術課 村瀬尊則 中川翔 柳原悠人 (執筆)

1. 目的

超高熱負荷試験装置 Active Cooling Teststand 2 (ACT2) は、最大 300 kW の高出力電子ビーム照射により試験体を加熱し、熱負荷試験を行う装置である。NIFS では、プラズマ実験装置のダイバータ受熱機器開発等に用いられ、共同研究による他機関の研究者の利用にも広く供されている。熱負荷試験においては実験ごとに試験体の組付けが必要であるが、現状の構造では真空チャンバーの開口部が小さく、作業者が上半身をチャンバー内に入れた状態での一人作業を余儀なくされており、作業効率および安全性の面で課題がある。本報告では、この課題を解決するためのチャンバー改造計画について述べる。

2. 内容

ACT2 の外観および試験体組付け作業の様子をそれぞれ図 1、図 2 に示す。真空チャンバーは直径 800 mm、長さ 800 mm の円筒形状であり、開口部の直径は 450 mm である。この開口部の制約から、組付け作業は一人しか行えず、奥まった箇所の作業では作業者が頭部をチャンバー内に挿入した姿勢での作業となる。チャンバー内の構成を図 3 に示す。チャンバー内には試験体、電子ビームの照射範囲を絞るリミター、退避用ビームダンプ、冷却水配管、および熱電対などが配置されている。特に冷却水配管は、実験ごとに継ぎ手の組み換えおよび締め付けが必要であり、狭隘な環境での作業は身体的・精神的負担が大きい。以上の課題を踏まえ、作業性改善を目的とした以下の 3 つの改造案を考案した。

① チャンバー扉および試験体設置部をレール引き出し式とする案

構成案のモデルを図 4 に示す。ACT2 の支柱にスライドレールを水平に取付け、チャンバー扉と試験体搭載枠を一体化した構造をレール上で引き出す方式である。チャンバー外で試験体の組付けが可能となるため、作業スペースが確保され、2 人以上による同時作業が実現できる。また、冷却水配管の出入口を扉側に設けることで、配管の接続・締め付け作業もチャンバー外で行うことができ、作業効率の大幅な向上が期待できる。

② 試験体設置部のみをレール引き出し式とする案

構成案を図 5 に示す。試験体を搭載するレール駆動式の土台を新たに製作し、組付け作業時に土台ごとチャンバー外へ引き出す構造である。案①と同様にチャンバー外での作業が可能となる一方、冷却水配管の出入口はチャンバー内から変更しないため、配管接続は試験体組付け後にチャンバー内で行う必要がある。スライドレールの設置やチャンバー扉の改造が不要なため、案①と比較して改造作業が容易である。

③ チャンバー開口部を拡張する案

構成案を図 6 に示す。チャンバーの開口部を拡大するとともに、それに対応した新規扉を取り付ける。試験体搭載土台を着脱可能な構造に改造し、土台ごと取り出してチャンバー外で組付け作業を

行う方式である。案②と同様に、冷却水配管の最終接続はチャンバー内で行う必要があるが、改造箇所は案①より少ない。

関係者と協議の結果、作業性改善効果が最も高い案①を第一候補とした。今後、本計画に係る予算が計上され次第、実施する予定である。

3. まとめ

ACT2 における作業性改善のため、真空チャンバーの改造計画を立案した。現状では開口部の制約により、試験体の組付けや冷却水配管作業を、チャンバー内の狭隘な環境で行わざるを得ず、作業効率および安全性の面で課題がある。提案した3案はいずれも、試験体およびその周辺機器の組付けをチャンバー外で行うことを基本方針としており、中でも案①はその効果が最も高い。2025年度は予算の都合で本改造の実施には至らなかったが、引き続き設計の具体化を進め、早期実現を目指す。

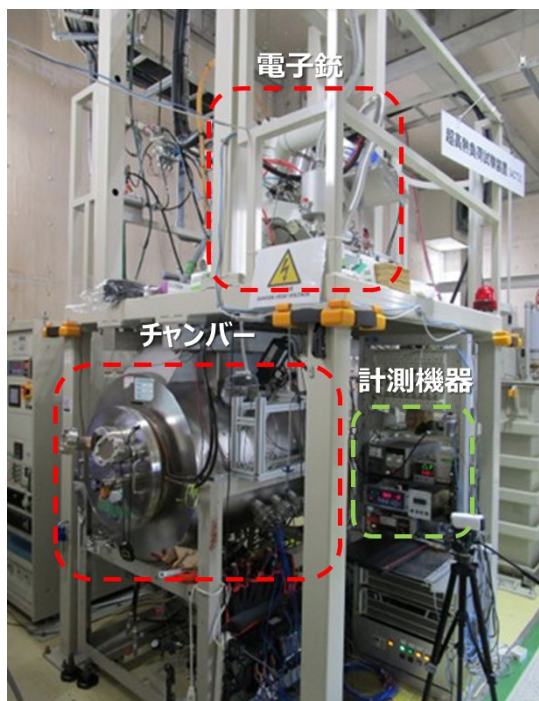


図 1. ACT2 外観

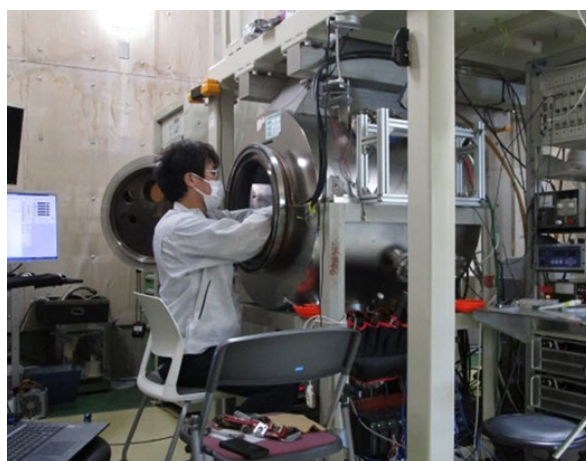


図 2. 試験体組付け作業の様子

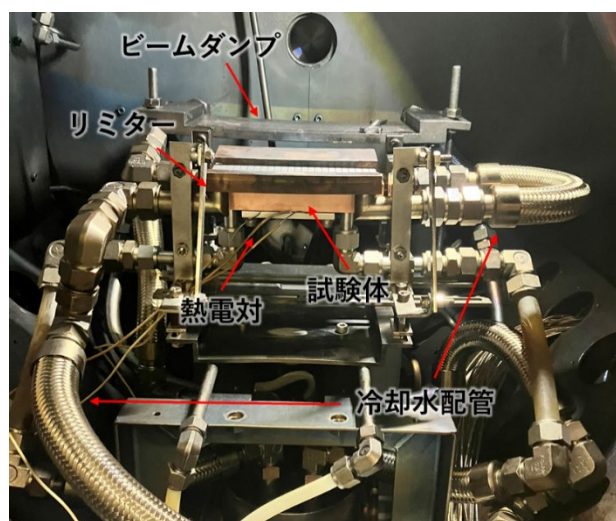


図 3. 真空チャンバー内の構成

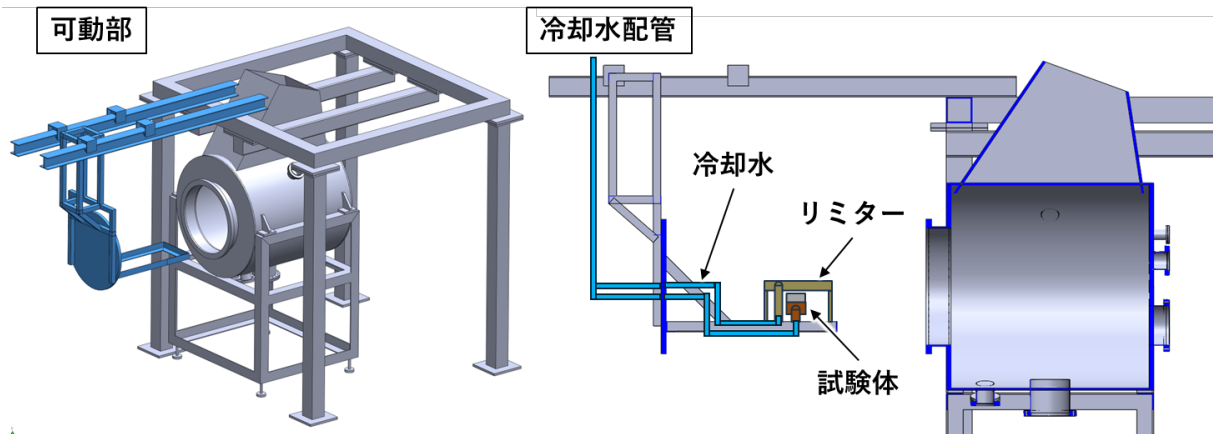


図 4. 改造案①：チャンバー扉および試験体設置部をレール引き出し式とする

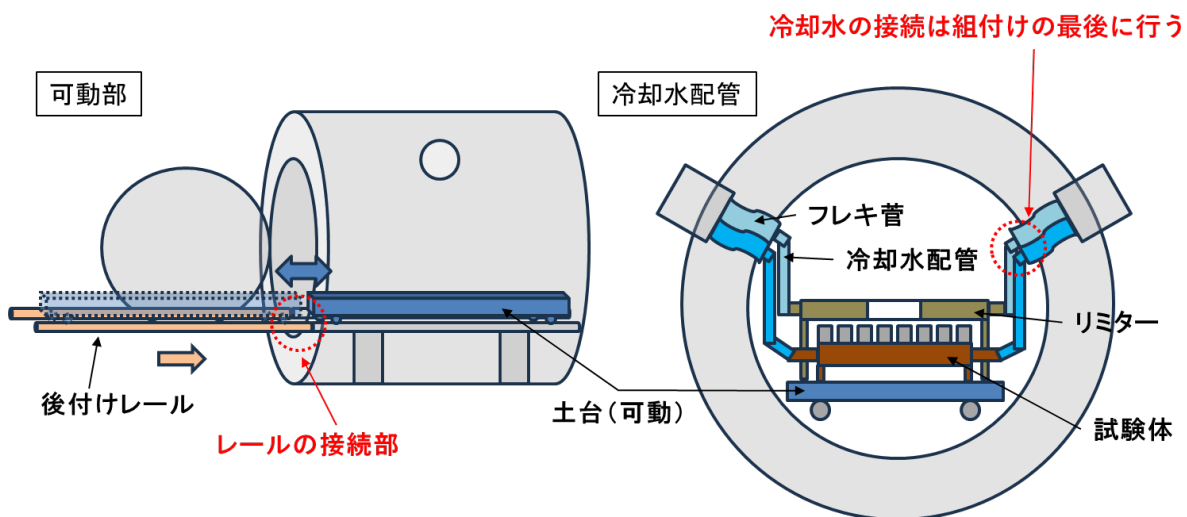
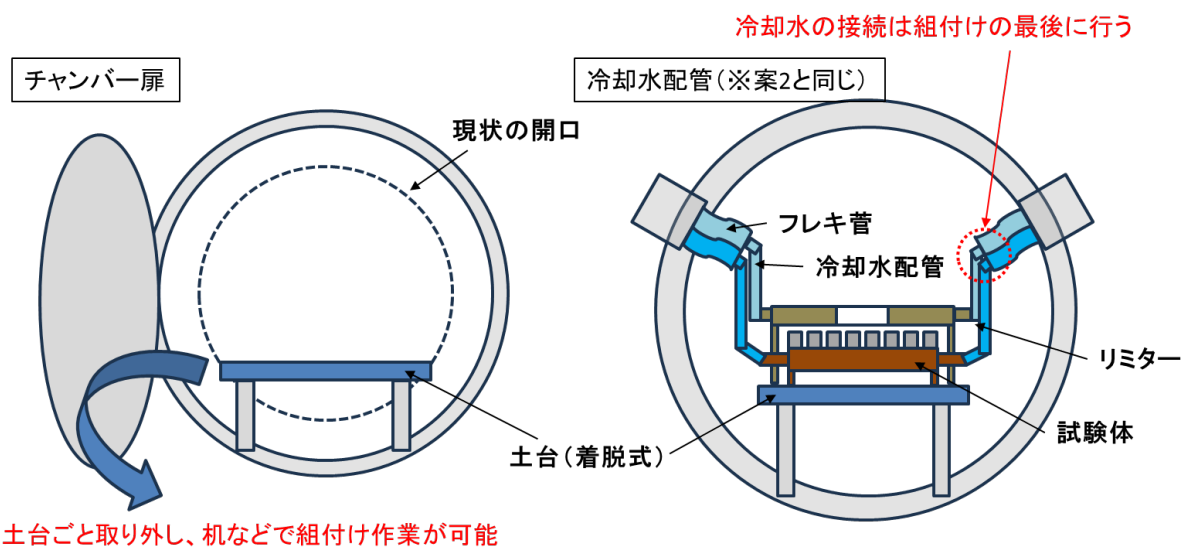


図 5. 改造案②：試験体設置部のみをレール引き出し式とする



土台ごと取り外し、机などで組付け作業が可能

図 6. 改造案③：チャンバー拡張部を拡大する

1.2.9. 研究所外実験機器における実験支援

(技)

設計開発技術課 千村大樹

1. 目的

核融合科学研究所プラズマ・複相間輸送ユニット小林政弘教授の依頼で分子科学研究所 UVSOR の BL1U で実験装置の設置、運転、計測等を行い、円滑に実験を行えるよう支援する。

2. 概要

2-1. 内容

UVSOR のビームライン BL1U でアミノ酸に円偏光照射する実験と光電離プラズマ実験を行った。真空紫外光を用いた実験であり、UVSOR のビーム射出口から試料までの経路は真空でなければならない。UVSOR に接続できる圧力に到達できる真空機器を構築し、設置や計測などの技術支援を行った。

2-2. 作業

UVSOR での小林教授の実験は約半年に一度の頻度で一週間実施される。限られた一週間の実験期間で装置を設置から撤収作業までを行い、確実に実験を遂行することが求められる。今年度はミラーと設置するチャンバーの変更やプラズマの磁場閉じ込めのための磁石の追加、プラズマの生成したガス分析のための QMASS の追加を行った。実験期間内でも条件の変更で分析機器や真空排気の変更等のフランジ作業を随時行った。また、実験期間前に機器構築や一部機器のテスト運転 (図 1) を行った。

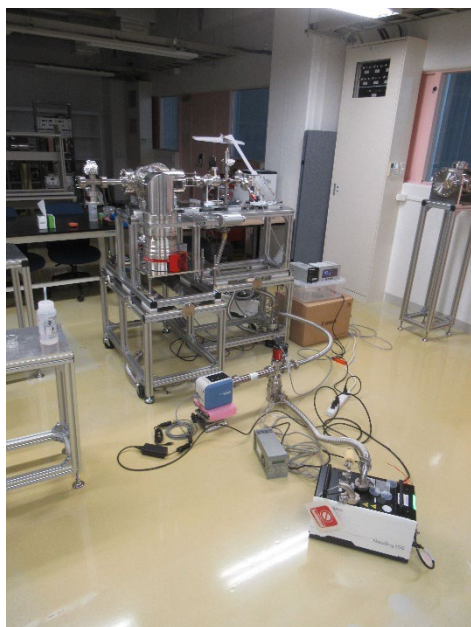


図 1. 実験前真空機器構築テスト運転



図 2. 光電離プラズマ実験の様子

プラズマ生成部は 10Pa 程度であり、QMASS 測定圧力上限の 1×10^{-2} Pa と圧力差が大きく構築と調整が難しかった。図 2 で示す実験機器への磁場形成もでき、多くの計測データを取得できた。

3. 結果

利用時間の限られている実験において機器設置撤収は正確かつ素早く行うことで実験時間が長くなるためとても重要な事項である。また実験機器は同一のものや構成がないため、ミスなく作業を行うには内容を把握し機器や真空部品の扱いを熟知している必要がある。

実験での真空に関する機器の構成や取り扱いを実験支援の形で活かし、測定結果やデータ取得として研究者の発表に役立てた。

1.2.10. 共同研究実験機器のリーク試験と真空技術

(技)

設計開発技術課 千村大樹

1. 目的

共同研究で利用する大阪大学の実験装置（オクタビアン）が正常に動作せず、原因としてリークの可能性があげられた。研究所の計測機器等共同利用を用いてリークを特定し、実験の早期開始に寄与する。

2. 概要

2-1. 内容

オクタビアンのある大阪大学では真空リーク試験を行う技術やノウハウがなく、使用できるリークディテクターもなかった。計測機器等共同利用でリークディテクターの貸し出しを行い、真空技術講習で真空とリーク試験に関する技術を紹介し、実験装置のリーク特定を行った。

2-2. 作業

オクタビアンは40年以上前に作られた加速器である。図1で示すイオン源での圧力が正常に動作していた時に比べて高く、リークの疑いがあった。貸し出したリークディテクター(Pfeiffer ASM310)と持ち込んだリーク試験道具を用いて真空フード法を使用し、リーク試験を行った。試験体のフランジ1つずつを個別に袋で小分けし、リークを特定した。

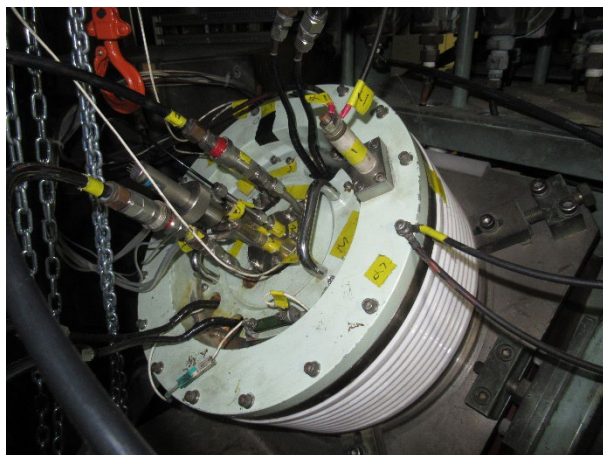


図1. 実験装置イオン源部分

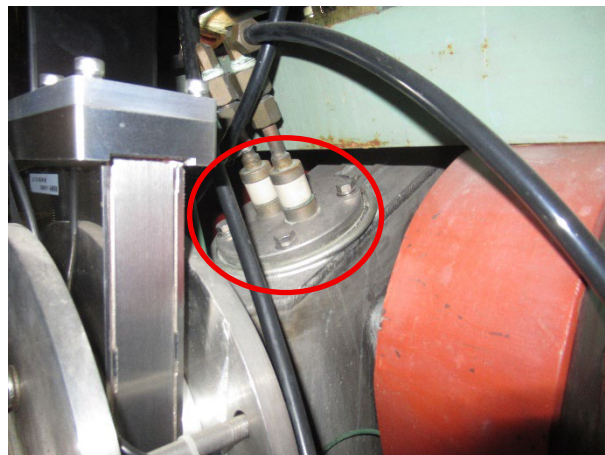


図2. リーク特定箇所

3. 結果

図2のフランジからのリークを特定し、構造や使用年数から特定したフランジのパッキンの劣化によるリークの可能性が大きいことを伝え、改善に貢献した。

真空技術の中でもリーク試験に関するノウハウは一般的ではなく、実験機器においては特に個々の機器ごとに対応が異なるため、基礎的な知識から対応力まで求められる範囲が広い。入り組んだ形状である機器でのリーク特定は困難であったが、問題箇所の特定により実験の早期再開に貢献した。

また、真空技術のプレゼン（図3）とリーク試験の作業を通じて、ノウハウや技術、使用する道具の選定などを伝えて技術的な知識の共有により、大学研究者や職員でリークの確認などの作業を進められ

る環境を整えた。



図3. 真空技術プレゼン

1.2.11. フォトグラメトリー技術を用いたカーボン製タイルの設計

(技)

設計開発技術課 中川翔

1. 概要

大型ヘリカル装置（LHD）の真空容器内では、1億度を超える高温プラズマが生成される。プラズマは磁場により形成される磁気面内に閉じ込められるが、実験条件によっては、プラズマからの熱負荷が真空容器壁に作用するほか、ECH や NBI 等の加熱装置から供給されたエネルギーの一部がプラズマに吸収されず、真空容器壁へ入射し、損傷を与える可能性がある。そのため、真空容器内壁にはステンレスと銅の張り合わせ材で作られた保護板が真空容器内全面に設置されている。また、ダイバータ領域では、意図的にプラズマを真空容器に衝突させるため、耐熱性に優れたカーボン製のダイバータ受熱板が配置されている。これらのダイバータ受熱板の枚数は約 1,700 枚に及び、らせん状に配列されたヘリカルダイバータ構造は、LHD 真空容器の特徴的な構造の一つとなっている（図 1）。

2024～2025 年度には、真空容器内、特にカーボンに蓄積されたトリチウムの低減を目的として、真空容器内にある全てのカーボン製タイルについて交換が実施された。交換対象となったカーボン製タイルは上述のダイバータ受熱板のほか、NBI の入射から真空容器を守るアーマータイル等を合わせて合計約 3,000 枚にも及ぶ。大部分のタイルは設計時の図面に基づき製作され、順次設置が進められたが、約 20 枚の一部タイルについては、製作リストに含まれていないもの、または既存の形状と一致しないものが存在することが判明した。これは、当該タイルを後から追加、または改造されたにもかかわらず、現場合わせによる加工や別目的のタイルの流用が行われ、その内容が図面に反映されていなかったためである。設置作業の進行に伴い、当該タイルの存在が明らかになり、新たに設計及び製作を行う必要が生じた。

これら新規製作の対象となったタイル（対象タイル）に対し、効率的に形状設計を行う手法としてフォトグラメトリー技術を適用した。本報告では、具体的な手法とその有効性について報告する。

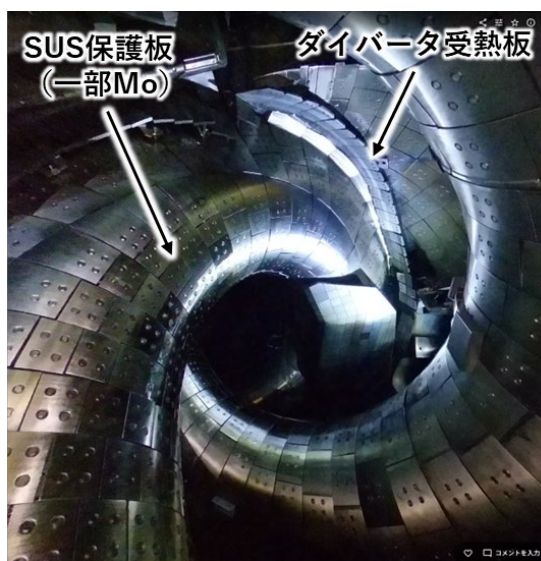


図 1. LHD プラズマ真空容器内

2. 対象タイルの設計における技術課題

対象タイルの設計にあたり、いくつかの課題が存在した。以下に技術的な課題をまとめる。

まず、対象タイルには図面などの設計情報が残されていなかった。加えて、対象タイルの多くは改造や現場合わせを経て製作された特殊形状であり、かつ当該事象が判明した時点において対象タイルは交換のため既に取り外されていた。そのため、対象タイルを再設計するにあたり、対象タイルの周辺機器や真空容器壁との距離を測定するほか、計測ポートの視野を確保するなどの配慮が必要であった。従来の設計方法では、まず真空容器内で上記寸法を測定し、その結果をもとに3D-CADでタイル形状を設計する。次いで、型紙や3Dプリンタ等によりモックアップを作成し、再度真空容器内で適合確認を行う必要があった。さらに、適合確認において周辺機器との干渉が確認された場合には、3D-CADで寸法を修正し、モックアップを再製作する工程を繰り返す必要がある。このため、1枚のタイル設計に多大な時間と労力を要していた。

加えて、現場測定の手法にも課題があった。平面タイルであれば、型紙を現場に持ち込み、周囲形状に合わせて加工することで概略形状を把握でき、寸法測定についても基準面に沿った方向の測定で十分対応可能である。しかしながら、対象タイルには三次元形状のタイルも含まれており、すべての寸法をノギスやスケールなどの基本的な道具で測定するのは非常に手間のかかる作業であった。なお、一般的には三次元測定器や3Dスキャナの使用も有効な手法として考えられる。しかし、これらの機器は高価であるうえに、本設計は約2週間という限られた期間内に実施する必要があり、新たに調達する時間的・予算的余裕はなかった。

さらに、LHD真空容器内という特殊な作業環境も大きな制約の一つであった。作業時には防塵服や防塵マスクおよびゴム手袋の着用が必要であり、真空容器内への出入り時間を要する。そのため、必要な工具の不足に応じて都度容器外に戻ることや、容器内で実施できない作業のために頻繁に真空容器の外へ退出することは、作業中断の時間が多くなり、作業効率の観点で現実的ではない。加えて、安全確保の観点から、真空容器内で作業を行う2名に加え、外部で状況を監視する監視員を1名配置する必要がある。このため、1つの作業に対して常に3名分の作業時間を要することとなり、人的コストの増加も課題であった。したがって、真空容器内での測定作業は、事前に十分な作業計画を立てたうえで実施する必要がある。また作業は容器内に常設されたノギス等の簡易工具および初回に持ち込んだ工具のみで完結できるように構成し、容器への出入りに伴う作業中断を最小限に抑えることが求められる。

これらに加え、実験スケジュールおよび真空容器作業全体の工程上の制約により、設計・製作・据付には限られた期間内で実施する必要があった。特に、製作発注の期限が厳しく、納品後の後加工も工程上困難であることから、発注期限までに現場へ完全に適合する形状を確定する必要があった。

3. フォトグラメトリー技術の適用

このような課題に対し、3Dスキャンの代替手法としてフォトグラメトリー[1]を採用し、設計に活用した。図2にフォトグラメトリーの一例を示す。

フォトグラメトリーとは、複数の写真から対象物の三次元形状を復元する技術である。異なる視点から画像の中で同じ特徴点を対応付けし、その視差をもとに三次元位置を推定することで三次元形状を再構成する。この技術は古くから存在し、近年はフリーソフトウェアで容易に利用可能となっている。大きな利点は特別な機材を必要とせず、一般的なデジタルカメラのみで実施可能なことである。そのため、

新たな撮影機材の導入は行わず、真空容器作業で従来から記録用として使用しているコンパクトデジタルカメラのみを用いて測定することができた。また、真空容器内作業では記録用のデジタルカメラを常時携帯しているため、特別な事前準備を必要としない点も利点であった。このため、新たに設計が必要な箇所が現場で突発的に確認された場合でも、即座に撮影を開始し、三次元形状の取得に必要な画像情報が入手できた。

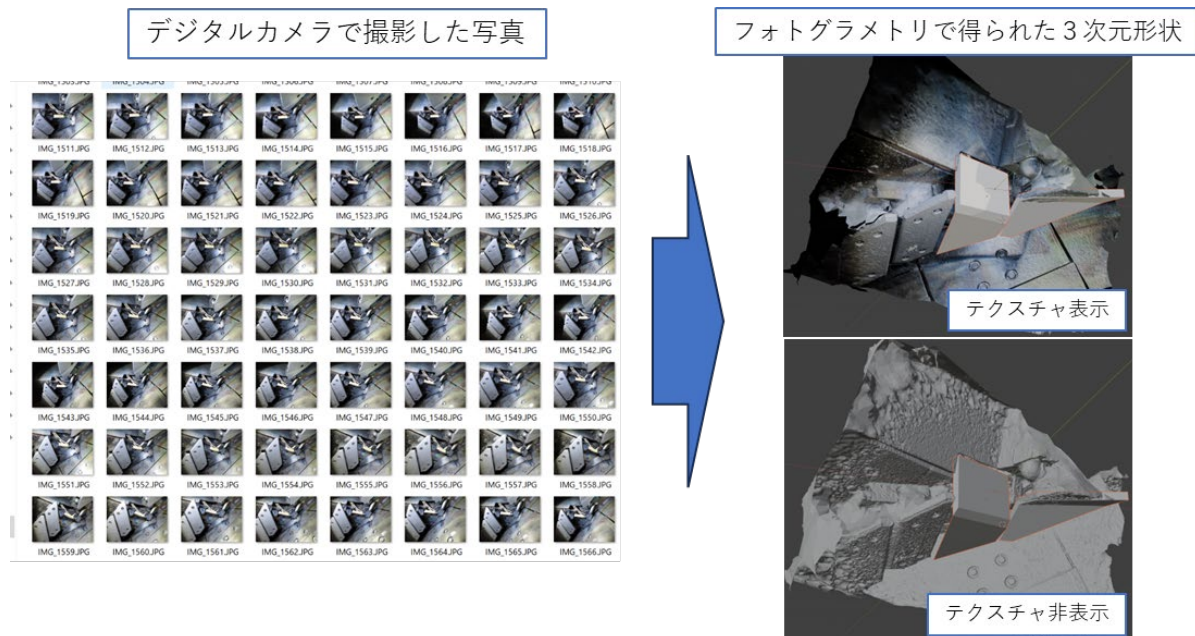


図2. フォトグラメトリ技術の例

本手法を用いた設計手順について、以下に示す。

まず、対象を様々な角度から撮影し、多数の画像を取得する。一般に撮影枚数が多いほど高精度なデータが得られるため、十分な枚数を確保することが望ましい。図2の例では、約 50 cm × 50 cm のエリアに対して約 100 枚の写真撮影した。1 エリアあたりの撮影時間は約 5 分であった。

次に、取得した画像をフォトグラメトリソフトウェアである Meshroom [2]により処理し、テクスチャ（表面の色情報）を有する OBJ 形式のメッシュデータを生成した。生成データは、角度・位置・スケールの調整や不要部分のトリミング等の加工が必要であるため、メッシュ編集ソフトである Blender [3]を用いて処理した。その後、必要な形状を抽出し、STL 形式へ変換した上で、CAD ソフトウェアである SolidWorks [4]に取り込み、設計モデルを作成した。さらに、設計に基づき実寸大の型紙および 3D プリントによるモックアップモデルを作成し、現場合合わせにより最終的な寸法確認を行った（図3）。

今回得られた三次元形状の精度は、撮影条件の良好な箇所では約 2~3 mm、条件の不利な箇所では数 cm 程度であった。しかしながら、これらの精度は本設計の要求を十分満たすものであった。その結果、2~3 mm 程度の微調整を除き、実際の現場確認において大きな修正作業は発生しなかった。

また、撮影した画像を専用のソフトウェアで処理するには数時間を要し、撮影時間も含めると、三次元データ取得後に設計モデル作成の開始までに一定の時間を要する。一方で、本手法により得られる情報は非常に多く、測定時に意識していなかった寸法についても後から取得することが可能である。本検討では 20 枚余りのカーボンタイルを設計したが、近接するタイルは一度にスキャン可能である。本検討では 20 枚余りのカーボン製タイルを設計したが、全体としては 9 回のスキャンで対応できた。従来のノギス等による測定では、測定漏れがあった場合に真空容器内での再作業が発生する可能性がある

が、本手法は効率および確実性の観点から極めて有用であることが分かった。

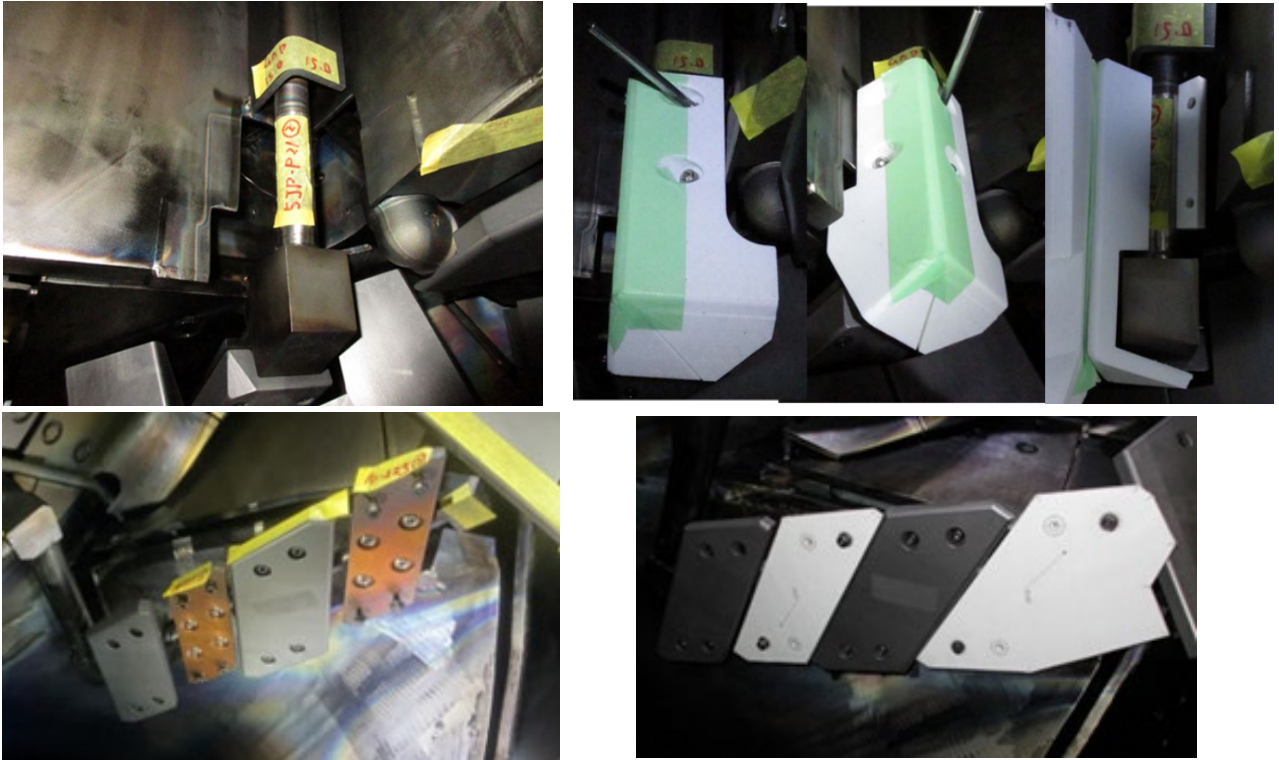


図3. 製作対象のタイルの設置位置の一例 4.5U（上段左）、10T（下段左）と
試作品を現場につけた様子の一例 4.5U（上段右）、10T（下段右）

4. まとめ

今回の取り組みでは、対象タイルの形状設計に対してフォトグラメトリ技術を適用し、3D スキャナの代替手法として有効に機能することを示した。限られた装備およびタイトなスケジュール下においても、本手法により効率的に三次元形状を取得し、設計・製作・据付までの一連の工程を円滑に実施することができた。さらに、本手法の具体的な手順を確立したことから、今後、類似の業務などへ展開していきたい。

参考情報

- [1] Wikipedia「写真測量法」, <https://ja.wikipedia.org/wiki/写真測量法>
- [2] Meshroom. <https://alicevision.org/view/meshroom.html>
- [3] Blender. <https://www.blender.org>
- [4] Solidworks. <https://www.solidworks.com/ja>

1.2.12. UVSOR 向け一様磁場形成のための永久磁石の配置検討

(技)

設計開発技術課 中川翔

1. 概要

本報告は、プラズマ・複相間輸送ユニットの小林政弘教授が主導する、分子科学研究所における UVSOR 実験装置を対象として実施した設計検討の結果をまとめたものである。当該実験装置では、シンクロトン放射光を用いた気体の光電離現象を利用し、ガスセル内にプラズマを生成し、その特性を計測する実験が行われている。将来的な実験の拡張のため、図1に示す位置に一様磁場を形成する装置の開発が求められ、本検討を実施した。

設計にあたっては、装置の複雑化を避けるために、冷却機構や電源設備を必要とする電磁コイルは採用せずに、永久磁石を用いることが前提とした。中心軸上で0.1 Tの磁場強度が求められた。

以下では、永久磁石の配置を工夫することにより、所定の強度かつ一様な磁場を実現するために実施した検討内容について述べる。

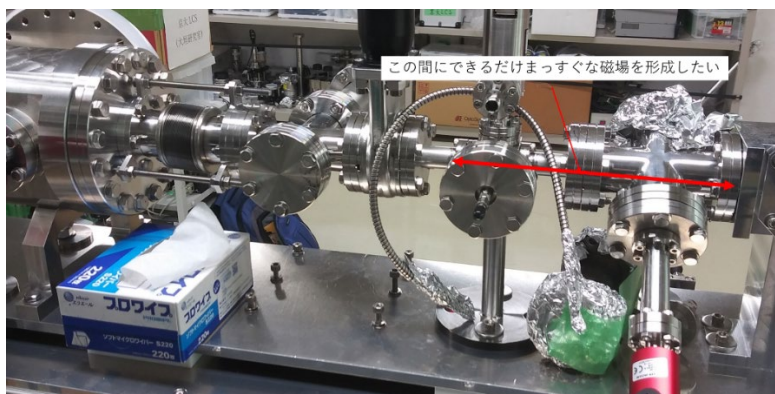


図1. UVSOR における放射光を用いた光電離実験装置

2. 永久磁石を用いた一様磁場生成方法の検討

まず初めに検討したのは、ヘルムホルツコイルによる一様磁場生成の原理に着想を得て、円形の永久磁石を配置する案である。この配置における磁場を評価するため、有限要素解析ソフト ANSYS/Maxwell を用いて磁場解析を実施した。

図2に磁石の配置、図3の上段に軸断面の磁場ベクトルの分布および磁力線を示す。解析の結果、本配置では一様磁場が形成されることが明らかとなった。具体的には、各磁石内部では軸方向にN極からS極へ向かう磁場が形成される一方、隣接する磁石間では磁場の向きが逆転する。このため軸方向に連続した一様磁場を得ることができない。

比較のため、図3の下段に電磁コイルが生成する磁場分布を示す。電磁コイルの場合は、設計通り一様磁場を生成していることが確認できる。したがって、電磁石と永久磁石では磁場形成の特性が本質的に等価ではないことが示され、本目的を達成するには別の配置案を検討する必要があると判断した。

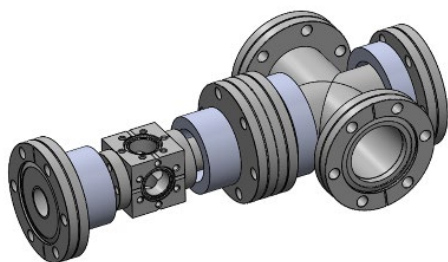


図2. 初期の配置案

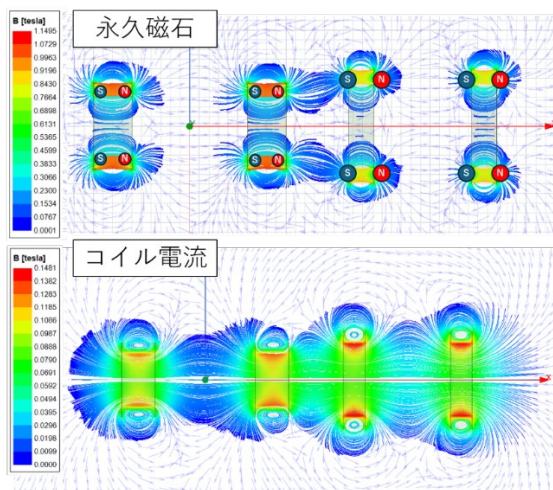
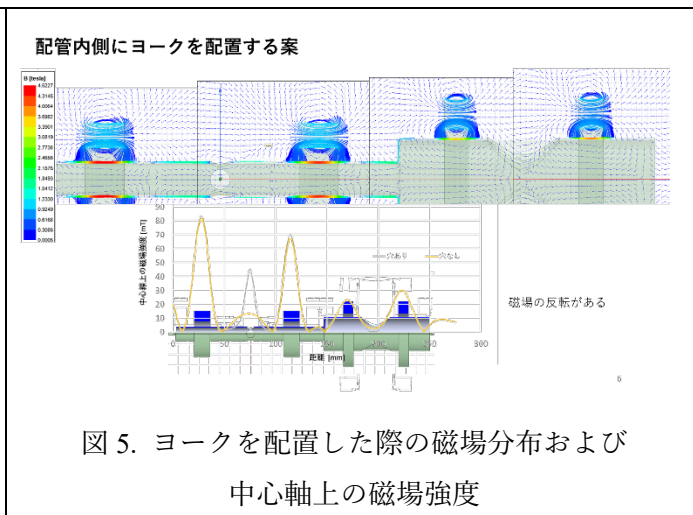
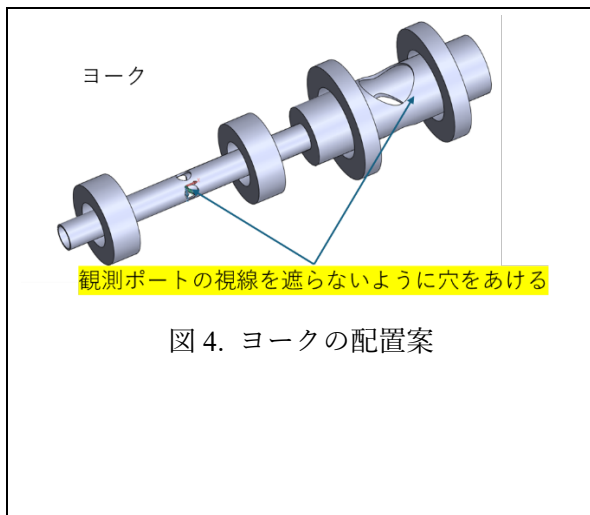


図3. 円筒形状の永久磁石と電磁石が作る磁場の違い

次にヨーク（継鉄）を用いた磁場形成方法について検討した。ヨークとは鉄製の部材のことで、磁力線を集中させることで磁場の制御や磁束密度の向上に用いられる。本検討では、永久磁石間に円筒形のヨークを配置することで、系全体を一つの円筒状磁石として機能させ、軸方向に一樣磁場が形成されることを想定した。確認のため、理想的な配置条件で磁場解析を実施したところ、軸方向にほぼ一樣な磁場が得られることを確認した。しかし、図4に示すように実際は装置との干渉により十分なヨークを配置することができない。その結果、ヨークが欠損する領域では磁力線の集中が不十分となり、軸方向の磁場分布に乱れが生じる。具体的には、当該領域近傍において磁場の反転が生じ、一樣磁場の形成が阻害されることが明らかとなった。



次に、磁石の極性を周方向に回転させながら配置する方法を検討した。本配置は、後にハルバツハ配列と呼ばれる手法に相当することが分かった。(図6) ハルバツハ配列は、特定方向の磁場を強める目的で用いられる磁石配置である。磁性の向きを回転数を「極数」と呼び、本検討では極数を2とすることで、軸方向に直線的な磁場を形成できると考えた。この仮説を検証するため、同じ磁石配置で一方を極性を回転させた解析を行ったところ、中心軸上で磁場の反転が生じず、一樣な磁場領域が形成されることを確認した。

磁石片側に磁界が集中

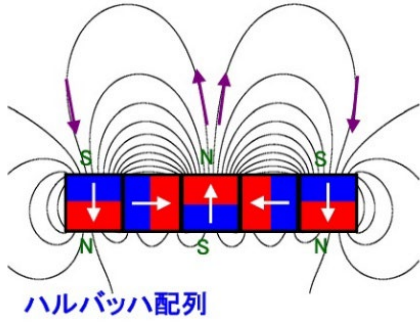


図 6. ハルバツハ配列の例

(ネオマグ株式会社, 「ハルバツハ配列」,
NeoMag 磁石ナビ,
https://www.neomag.jp/mag_navi/glossary/glossary_main.php?title_name=ハルバツハ配列)

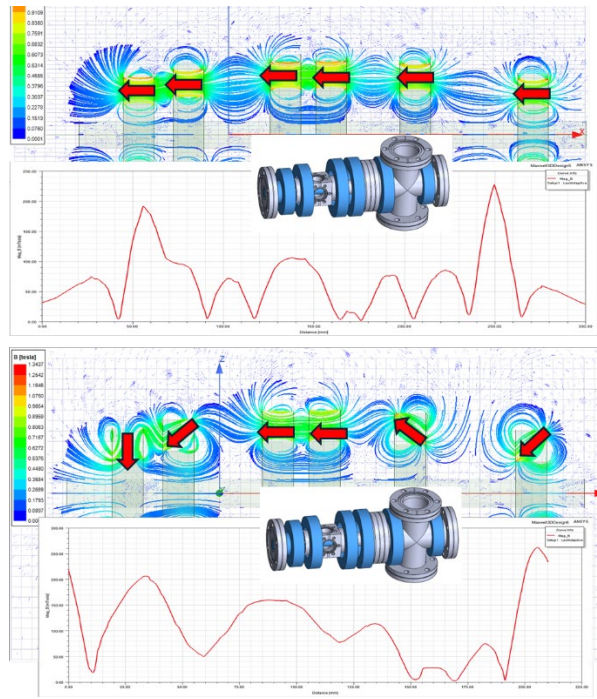


図 7. 極性の向きを変えることにより磁場分布および軸上の磁場強度の違い

磁石配置の検討にあたっては、ネオマグ株式会社の製品仕様を参照し、実際に製作可能な着磁方向を有する磁石を前提として設計を行った。

設計では、装置との干渉条件を考慮しつつ、使用可能な磁石形状および着磁方向の範囲内で配置を工夫し、所望の磁場分布が得られるよう設計を行った。具体的には、磁石の位置および向きを調整することで、中心軸上において約 0.1 T の磁場強度を有し、かつ一様な磁場分布が得られる配置に到達した。図 8 に最終的な磁石配置案、当該配置によって作られる磁場分布および中心軸上の磁場強度のグラフを示す。

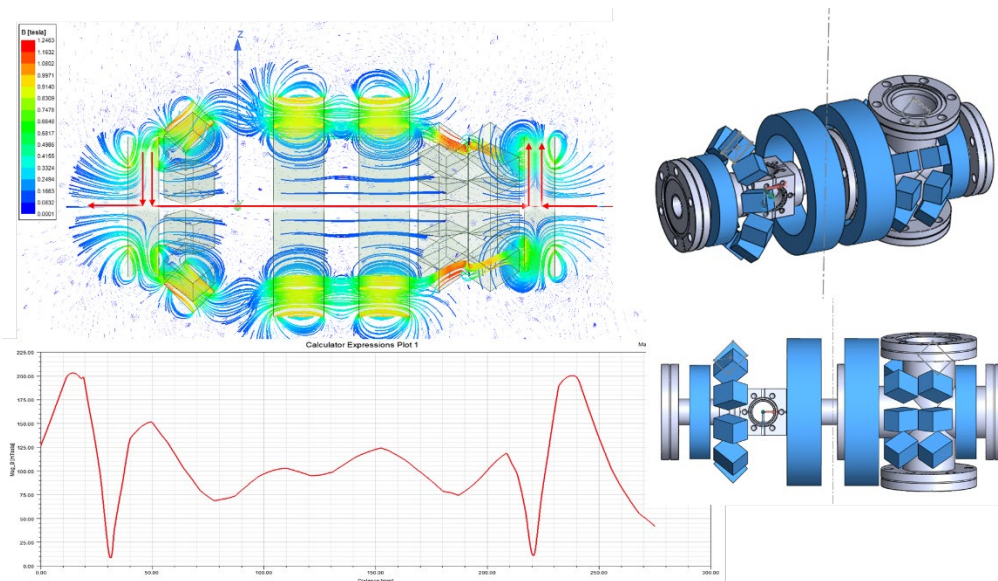


図 8. 最終案の磁石配置で作られる磁場分布および中心軸上の磁場強度

3. 実機の製作

本設計に基づき、実機の製作を行った。実験装置に取り付ける際、磁力が強く組立が困難であったため、磁石数の削減等の設計修正を実施した。その後、装置への取り付けを完了した。今後、設計通りの性能が得られているかを検証するため、磁場測定を実施する予定である。

4. まとめ

本報告では、UVSOR 光電離実験装置において、永久磁石のみを用いて中心軸上に約 0.1 T の一様磁場を生成するための設計検討を実施した。複数の配置案を比較した結果、電磁石と同様な配置やヨークを併用する配置では実機条件下で十分な性能が得られないことが明らかとなった。

これに対し、ハルバッハ配列をもとに磁石配置を工夫することで、装置の干渉といった制約を満たしつつ、中心軸上で所望の磁場強度をもつ一様な磁場分布を実現した。

以上より、永久磁石の配置工夫により、電源や冷却を必要としない簡便な一様磁場生成手法が実現可能であることを示した。さらに、本検討を通じて、既存の手法や知見を適切に組み合わせることにより、制約の厳しい条件下においても有効な解決策を導出できることが確認された。

1.2.13. 設計開発技術課における共有物品管理システムの構築と運用

(技)

設計開発技術課 中川翔

1. 概要

あらゆる業務において、道具や消耗品、装備品の適切な管理は不可欠である。これら物品不足や管理不備は作業の中断や遅延を招き、業務の効率性および安定性を損なう要因となる。このような問題を未然に防ぐためには、物品の使用量や在庫数、使用状況を正確に把握することが重要である。

一方で、すべての情報を網羅的に管理することは現実的ではなく、物品管理のニーズは現場ごとに多様な形で存在している。したがって、これらのニーズに対し、目的に応じた技術的手法を適切に適用することが求められる。

こうした取り組みは必ずしも表立って評価されるものではないが、業務の効率化や属人化の低減、作業品質の安定化に直接寄与するものであり、技術職員が主体的に取り組むべき重要な業務の一つである。

設計開発技術課では、LAN ケーブルや映像ケーブルなどの予備品を集約し、共有物品として管理している。本取り組みでは、これらの物品を効率的に管理するためのシステムを考案し、運用を開始した。

2. 共有物品の管理における課題

従来、物品管理は主に Excel を用いて行っていたが、いくつかの課題があった。まず、物品を使用する場面は緊急であることが多く、その都度記録を行う余裕がない点が挙げられる。さらに、現場作業においては PC を使用できない場合も多く、リアルタイムでの入力が困難であった。そのため、作業後に記録を行おうとしても入力漏れが発生しやすく、結果として帳簿上の在庫と実際の在庫の間に乖離が生じていた。

加えて、管理者以外が物品を使用する場合の伝達手段にも課題があった。電話や口頭などの同期的な連絡手段は使用者にとって手軽である一方、管理者は対応のため作業を中断させる必要があり、時間的な負担が大きい。一方、メール等の非同期的な連絡手段では、管理者は任意のタイミングで確認ができる利点があるものの、使用者にとっては使用物品の項目や数量を整理して連絡する手間が大きい。

3. 共有物品管理システムの構築

これらの課題を解決するため、「QRコードを用いた専用カード」と「スマートフォン対応アプリ」を組み合わせた管理手法を考案した。

3-1. 使用状況を可視化する仕組み

まず、各物品に対して一対一で専用カードを用意し、物品と同じ袋に保管する。使用時には、袋から物品とカードを取り出し、カードのみを回収ボックスに投入する方式とした。この仕組みにより、回収されたカード情報から使用品目および使用数を即座に把握することができ、これにより使用者は特別な記録作業を行うことなく、使用情報を管理者へ伝達することができる。また、管理者は回収されたカードを確認することで、保管用のコンテナ内を直接確認することなく在庫状況を把握することが可能となる。さらに、本方式は非同期的な情報伝達手段であるため、使用者と管理者の双方にとって作業中断が

少なく、時間的負担を低減できる。(図1)



図1. 使用状況の可視化のための手法

3-2. 在庫リストの更新作業の効率化

さらに、在庫リストの更新作業を効率化するため、Microsoft 365 の PowerApps[1]を用いて管理アプリを作成した。物品情報は Microsoft Lists [2]上で一元管理し、本アプリから在庫リストを更新できる構成とした。本アプリはスマートフォンからの利用を前提としており、作業の間や使用直後に即時更新が可能であるため、記入漏れの防止につながる。また、各物品には管理番号を付与した QR コードを対応付けている。アプリで在庫リストを更新する際は、カードの QR コードを読み取ることで該当データを呼び出し、数量の増減を簡便に入力できる仕組みとした。これにより、入力作業の手間を大幅に削減している。(図2)



図2. 在庫記録更新の簡便化のためのアプリ開発

3-3. 改善点

一方で、本手法にはいくつか課題も存在する。まず、従来の Excel による管理と比較すると、仕様変更や機能追加に対する柔軟性が低い。すなわち、機能拡張にはアプリ側の設計変更が必要となり、開発環境に不慣れな場合には、追加や修正に一定の検討時間を要する。

また、カード作成にかかる準備作業の負担も無視できない。具体的には、サムネイル画像の準備、データベースへの登録、QR コードの生成、ラベル印刷およびラミネート加工といった工程が必要である。新規物品が追加時にはこれらの作業を都度実施する必要があるが、加えて開発ツールの操作を確認しながら

ら作業を進める場合には、想定以上の工数を要することがある。ただし、これらの課題は、運用を継続する中で開発ツールの習熟に伴い、ある程度軽減するものと思われる。

さらに、今後の改善として、アプリを共有し、利用者自身が在庫リストを直接更新できる仕組みの導入を検討している。また、現状では在庫情報のみを管理対象としているが、使用履歴などの情報も記録可能とすることで、より高度な物品管理の実現を目指す。

4. まとめ

本取り組みでは、カード方式とスマートフォン対応アプリを組み合わせた物品管理システムを構築し、物品の在庫情報を効率的に管理できる環境を整備した。これにより、記録漏れや連絡漏れによる在庫数の乖離低減が期待できる。

一方で、本システムは運用開始直後の段階にあり、実際の運用を通じた課題の抽出や改善の余地が残されている。今後は、利用者からのフィードバックなどを踏まえて機能拡張や修正を行い、さらなる運用改善を図る予定である。

参考情報

[5] Microsoft. 「Power Apps」. <https://powerapps.microsoft.com>

[6] Microsoft. 「Microsoft Lists」. <https://www.microsoft.com/microsoft-365/microsoft-lists>

1.2.14.フュージョンエネルギー・ナノプラットフォームにおける電子顕微鏡専用ブースの建設支援 (技)

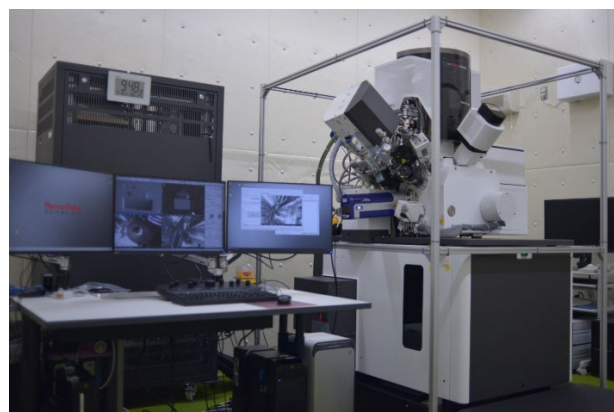
設計開発技術課 松本大輝

1. 概要

本報告は、令和7年度に実施したフュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム整備事業の一環として実施された、電子顕微鏡の導入および関連施設整備についてまとめたものである。本事業では、主要な装置として、『レーザー／プラズマ集束イオンビーム加工観察装置 (Laser PFIB) (Helios 5 Laser Hydra)』 (以下、Helios) および『透過型電子顕微鏡 (S/TEM) (Talos F200X G2)』 (以下、Talos)、原子間力顕微鏡 (AFM) (Dimension Nexus) の導入が決定した。電子顕微鏡専用ブースの設計仕様は、主要な装置となる Helios, Talos の設置要件を基に決定された。本報告書では、Helios, Talos の搬入・設置を基に説明する。これらの装置は、2,400mm を超える天井高さが要求されることに加え、厳密な温度管理および低振動環境が求められるため、装置を設置するブースには、規格品のプレハブ構造が適用できなかった。そのため本事業では、室内天井高を 3,500mm とした電子顕微鏡専用ブース (以下、ブース) を新設することを決定し、その壁や天井には断熱材や防音材を配置することで空調による室温 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ の恒温制御ならびに外部騒音の影響を低減する構造を採用した。図1は既に導入された機器の写真である。



透過型電子顕微鏡
(S/TEM)
(Talos F200X G2)



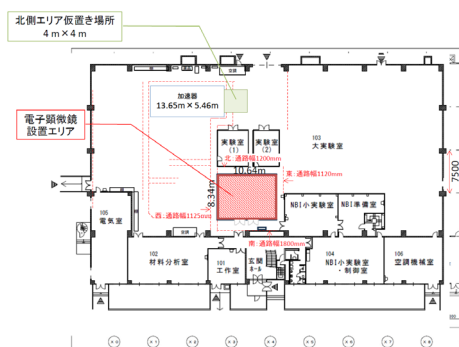
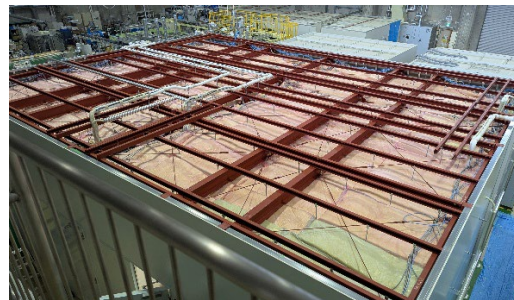
レーザー／プラズマ集束イオンビーム
加工観察装置 (Laser PFIB)
(Helios 5 Laser Hydra)

図1. 導入された電子顕微鏡 (Talos (左)、 Helios (右))

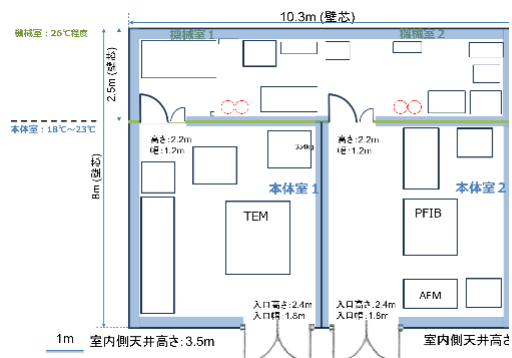
2. 設計

本ブースは、総合工学実験棟大実験室内に建設することとした。工事に際しては北側に機器仮置きエリアを設け、搬入および施工動線を確保した。ブースは本体室1、本体室2、機械室1、機械室2の計4室で構成されている。機械室1と2に関しては、両室境界に設置される壁を構造用のバーを残し撤去したことにより、運用上は実質的に3室構成となっている。本ブースの内壁は防音壁、断熱材で覆われている。これは先述の厳密な温度管理および低振動環境のためである。本ブースはエアコンを各本体室に2台ずつ、各機械室1台ずつ (計6台) を用いて内部の温度を調整している。加えて除湿機を本体室に

1台ずつ、機械室1と2合せて1台の計3台、熱交換器を本体室に1台ずつ、機械室1と2合せて1台の計3台設置している。Talos, Helios には磁場キャンセラーを設置し、外部磁場の影響を抑制している。Helios は除振台の上に設置し建物の揺れの影響を抑制している。Talos は機器本体内部に除振構造を内蔵している。図2は建設した総合工学実験棟の外観と設置エリア、そして建設したブースの外観と模式図である



総合工学実験棟と俯瞰図



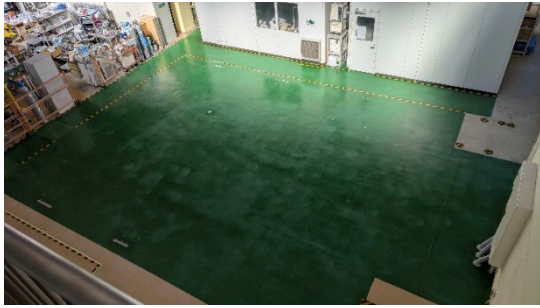
ブースと内部の機器配置の模式図

図2. 電子顕微鏡専用ブースの総合工学実験棟大実験室内での設置エリア(左図)およびブース内での機器配置の模式図(右図)

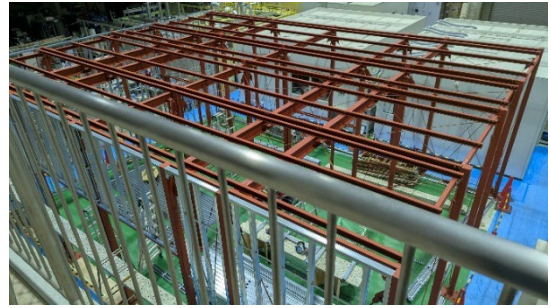
3. 経過

ブース建設および装置導入の工程を以下に示す。工程の様子は図3に示す。

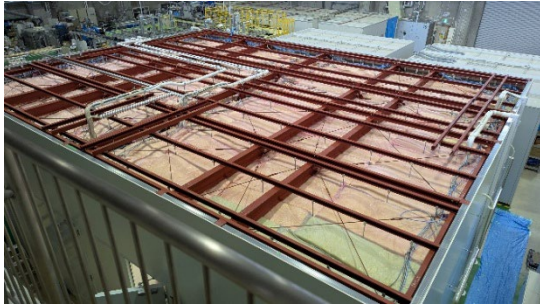
- 電顕ブース工事：令和7年10月着工、令和8年3月完成
- 装置搬入および初期整備：令和8年1月～3月
- 検収
 - Helios：令和8年2月24日
 - Talos：令和8年3月13日



(a)ブース建設前（令和7年10月）



(b)建設途中（令和7年11月）



(c)完成(右上)



(d)完成（西側面）



(e)機器搬入時の様子



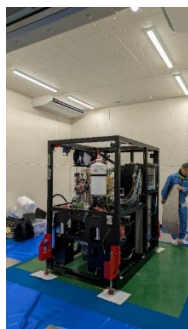
(f) 機器搬入時の様子



(g) Talos 搬入時の様子



(h) Helios 搬入時の様子



(i) Talos 搬入時の様子



(j)Helios 搬入時の様子

図3. 電頭ブースの建設の経過、装置搬入の様子

4. 機器の動作状況

現在実務に向け操作方法の確認、条件の検討を行っている。Helios に関しては TEM 薄膜の作成、広範囲の断面加工、分析を予定している。Talos に関しては従来の装置で加工した薄膜の観察に加え、Helios で加工した薄膜の観察、分析を予定している。

Talos において鏡筒内の排気速度が十分でないとの指摘があり、原因を調査中である。

5. 技術部としての支援内容

本事業では、3D CAD を用いた三次元モデルの作成および 3D プリンタによるスロープ模型の造形を実施した。(図4) 3DCAD モデルは機器配置の検討に利用することが期待できる。スロープ模型は金属板で製作予定のスロープの下部に配線するケーブルとの干渉の確認、形状の検討に用いた。

また、今後の運用に備え Talos の保守のため継続的な補充が必要な液体窒素について、取り扱いマニュアルを作成し、設置した。(図5)



図4. 3DCAD、3Dプリンタを用いた支援
(左) ブースの3Dモデル、(右) 3Dプリンタによるスロープ模型



図5. 液体窒素取り扱いマニュアルの作成、設置

6. まとめ

以上より Helios および Talos の導入が完了した。Helios ではレーザーおよびプラズマ FIB を活用した高速加工や、試料ダメージを抑えた加工が可能である。Talos では電子エネルギー損失分光 (EELS) による軽元素検出や高いエネルギー分解能での元素分析において活躍が期待される。令和 8 年度から本装置の本格運用を開始する予定である。

1.2.15. 電子顕微鏡関連の業務について

(技)

設計開発技術課 松本大輝

1. 本報告書の目的

令和7年度より本研究所技術部は電子顕微鏡関連の業務を新たに請け負うこととなった。本業務は技術部として初めての取り組みであるため、業務内容の整理とこれまでの実績について報告する。また本年度を通じて得られた知見を基に、今後どのような点で技術力や創意工夫を活かせるかを検討することを目的とする。

2. 本研究所で運用されている電子顕微鏡

本研究所では用途に応じて以下の電子顕微鏡を運用している。実際の画像を図1に示す。

- 集束イオンビーム/電子ビーム加工観察装置 (FIB-SEM) (NB5000) (以下「FIB-SEM」)
- 透過型電子顕微鏡 (TEM/STEM) (JEM-2800) (以下「TEM」)
- 超高分解能電界放出型走査電子顕微鏡 (JSM-7100F) (以下「FE-SEM」)



TEM

日本電子株式会社

JEM-2800®



FIB-SEM

株式会社 日立ハイテク

NB5000®



FE-SEM

日本電子株式会社

JSM-7100F®

図1. 本研究所で利用している電子顕微鏡

3. 観察対象となる試料

本研究所の電子顕微鏡での観察対象は大きく2種類に分類される。

3-1. プラズマ照射試料

プラズマ照射試料は、表面に高温プラズマが照射された試料であり、表層部分に損傷が生じている。核融合炉内壁（ヘリカル型を含む）では特に表面損傷の評価が重要であり、その評価にはTEM（透過電子顕微鏡）による原子レベルでの観察が必要となる。観察対象材料であるタングステン（以下「W」）は非常に硬く、通常の加工方法ではTEM観察が可能な薄膜試料を作製できない。そのため、専用のFIB加工レシピを用いた試料作製が必要であった。

3-2. 接合試料

接合試料は、異なる 2 種類の材料を接合したものである。試料全体の接合状態を確認するため、広範囲かつ深さのある断面観察が求められる。本技術はもともと核融合炉向けに用いられてきたが、現在では産学連携など幅広い分野へ展開している。接合材料の研究では TEM 観察や SEM による断面観察を用いて界面の状態を観察する。

これらの試料を前述の電子顕微鏡で観察、元素分析、結晶方位分析することが業務である。

4. 業務内容

4-1. 電子顕微鏡の運用

これまで電子顕微鏡は研究部が管理していたため、担当の時谷先生および森下様の指導のもと装置管理および運用方法を習得し、日常的な測定対応および装置管理業務を担当することで、運用体制の維持・安定化に貢献した。

4-2. W 超薄膜加工技術の習得

プラズマ照射 W 試料について TEM 観察に適した試料作製方法を習得した。特に、W は前述の通り専用の FIB 加工レシピは必要であった。そこで森下様より具体的な加工手法の指導を受け実作業に適用できるレベルに到達した。FIB 加工による W の薄膜試料作製例を図 2 に示す。

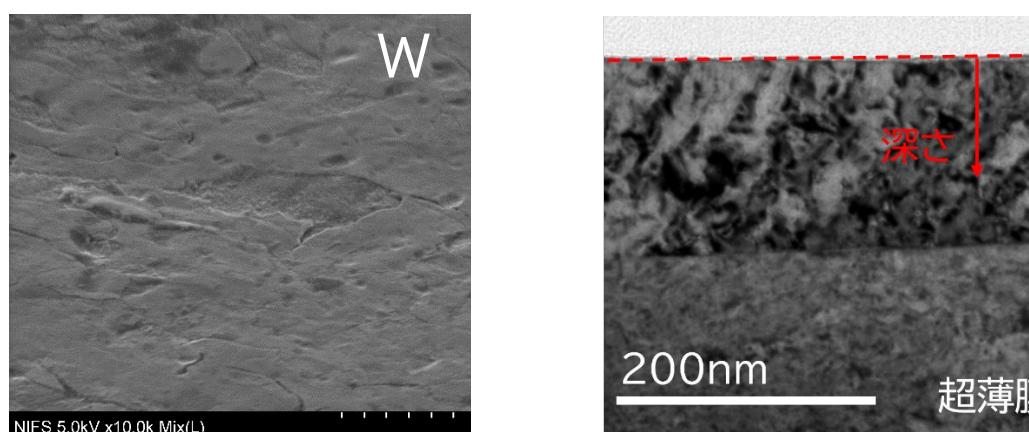


図 2. W の薄膜試料作製

(左) 加工前の W 表面 (右) 薄膜化後の TEM 像

4-3. 3D プリンタの活用

技術部の所有する 3DCAD と 3D プリンタを活用した支援を行った。例えば治具の製作による作業環境の改善 (図 3) や卓上格子モデルを製作 (図 4) した。治具は日常業務において作業の効率化に利用し、卓上格子モデルは電子顕微鏡観察時の議論や作業員の学習に利用された。

・かさ上げ台

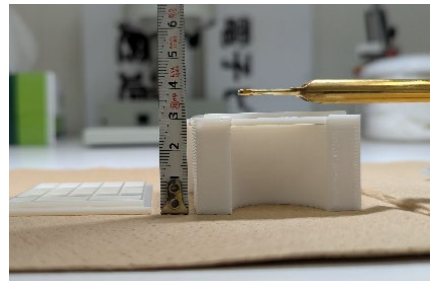
FIB-SEM で加工した薄膜を TEM に移動する際はピンセットを用いた手作業で薄膜をホルダーに移動する。これは危険な作業であり、わずか手先のブレで長時間かけて作製した薄膜を破損するリスクがあった。そのためホルダー間との距離を縮めるためのかさ上げ台を制作した。その結果、ホルダーとケース間が近くなるため欠落のリスクが減少した。

・卓上格子模型

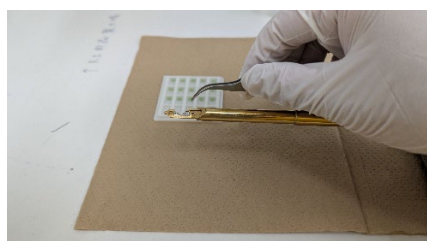
面心立方格子、体心立方格子の卓上模型を造形した。TEM 観察や EBSD（電子後方散乱回折）による観察は結晶方位を検討する必要がある。これは観察時に依頼者とその場で検討する必要がある場合があるが、立体幾何の理解が必要であり会話のみによる認識のすり合わせが難しかった。そのため、装置の部屋に前述の卓上格子模型を設置した。その結果、観察する結晶面の確認や作業員の観察時の確認に利用された。



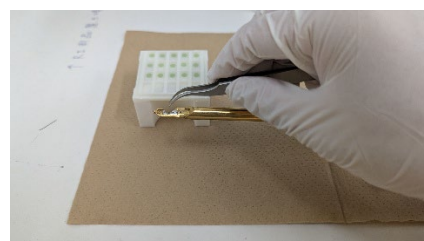
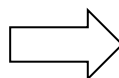
造形したモデル



ホルダーとの高さ比較

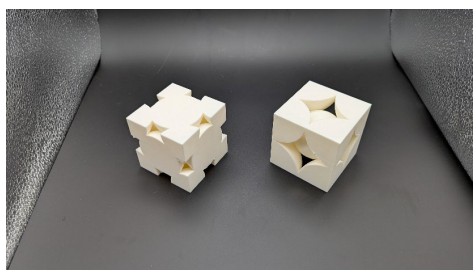


使用前



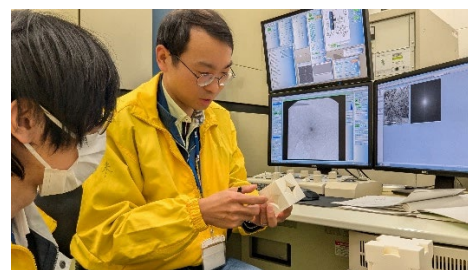
使用时

図3. 製作例1 ホルダーのかさ上げ台



造形したモデル

(左) 面心立方格子、(右) 体心立方格子



使用の様子

図4. 製作例2 卓上格子モデルの製作

5. まとめ

本年度は、技術部として初めて電子顕微鏡業務に携わる一年となった。装置管理、試料加工、観察まで一連の作業を経験することで技術部としての対応範囲を拡大することができた。これまでに得た知見を基に今後は研究部との連携を深めつつ新規の加工技術の開発に加え、再現性の高い加工手順の整備や作業支援治具の製作など技術部ならではの工夫をさらに進めていきたい。

1.2.16. タングステンと低放射化フェライト鋼の低温接合技術の開発

(技)

設計開発技術課 村瀬尊則

1. 概要

核融合炉のプラズマ対向機器には、極めて高い熱負荷に耐える耐熱材料と、効率的に熱を除去する冷却構造材が必要とされる。特に第一壁やダイバータ板では、高温プラズマが直接照射される表面に高融点かつ低放射化特性を有するタングステンが使用され、その背面にはヒートシンク材として低放射化フェライト鋼 (F82H) の適用が考えられる。しかし、両材料は熱膨張係数や材料特性が大きく異なるため、接合時に残留応力が発生しやすく、高い接合強度を得ることが困難であった。

さらに、低放射化フェライト鋼は高温履歴による脆化の懸念がある。特に 800 °C 近傍以上では結晶粒粗大化による靱性低下が知られている。そのため、一般的な高温接合プロセスの適用が難しいという課題があった。また、従来法では複数回の接合工程を必要とする場合があり、工程数や製造コストの増加も問題となっていた。

本開発では、700~800 °C という比較的低温域において、一回の接合操作で高い接合健全性を有するタングステン/低放射化フェライト鋼接合体を実現することを目的とし、リン銅箔、チタン箔、およびタングステン粉末/銅粉末混合層からなる中間材を用いた接合技術を開発した。接合プロセスには放電プラズマ焼結法 (SPS 法) を適用し、接合条件や中間層構成を最適化することで、高強度接合体の形成に成功した。

2. 開発の背景と課題

核融合炉では、超高温プラズマに曝されるプラズマ対向機器に対して、優れた耐熱性と熱除去性能が要求される。タングstenは高融点であり、スパッタ耐性や低放射化特性にも優れることから、ダイバータ板などのプラズマ対向材として有望視されている。一方で、タングsten単体では熱を十分に除去できないため、背面に冷却機能を有するヒートシンク材を接合する必要がある。

ヒートシンク材としては、中性子照射後の放射化が少ない低放射化フェライト鋼が一つの有力候補となっている。しかし、低放射化フェライト鋼は 800°C を超える温度履歴により組織変化や脆化を生じる可能性があるため、接合温度を低く抑える必要がある。

一方、タングstenは高融点材料であり、一般的なろう付けや拡散接合では高温処理が必要となる。また、タングstenと低放射化フェライト鋼では熱膨張係数差が大きく、接合後の冷却過程で残留応力が発生しやすい。その結果、界面剥離やクラック発生など接合健全性の低下が課題となっていた。

従来技術では、タングstenと中間材を高温で接合した後、別工程で低放射化フェライト鋼を接合する二段階接合法が提案されている。しかし、この方法では工程数が増加するだけでなく、ニッケル系材料を使用する場合には放射化の懸念も残されていた。

このため、本開発では低温・短時間・一工程で接合可能な新たな接合構造および接合プロセスの構築を目指した。

3. 接合構造および接合プロセスの検討

本開発では、タングステンと低放射化フェライト鋼との間に複数の中間材を積層した構造を採用した。中間材として、リン銅箔、チタン箔、およびタングステン粉末と銅粉末の混合体を用いた(図1(a)参照)。

リン銅箔は700℃付近で液相を形成するため、低温条件下でも接合界面の反応を促進できる。一方、銅単独では熱膨張係数が大きく、冷却時に残留応力が発生しやすい。そのため、中間層中にタングステン粉末を分散させることで、中間層全体の熱膨張係数を低減し、界面応力の緩和を図った。

さらに、チタン箔を追加することで、リンとの反応による界面反応層形成を促進し、接合強度向上を図った。実際にチタン箔の有無による比較試験を実施した結果、チタンを添加した場合に高いせん断強度が得られた。

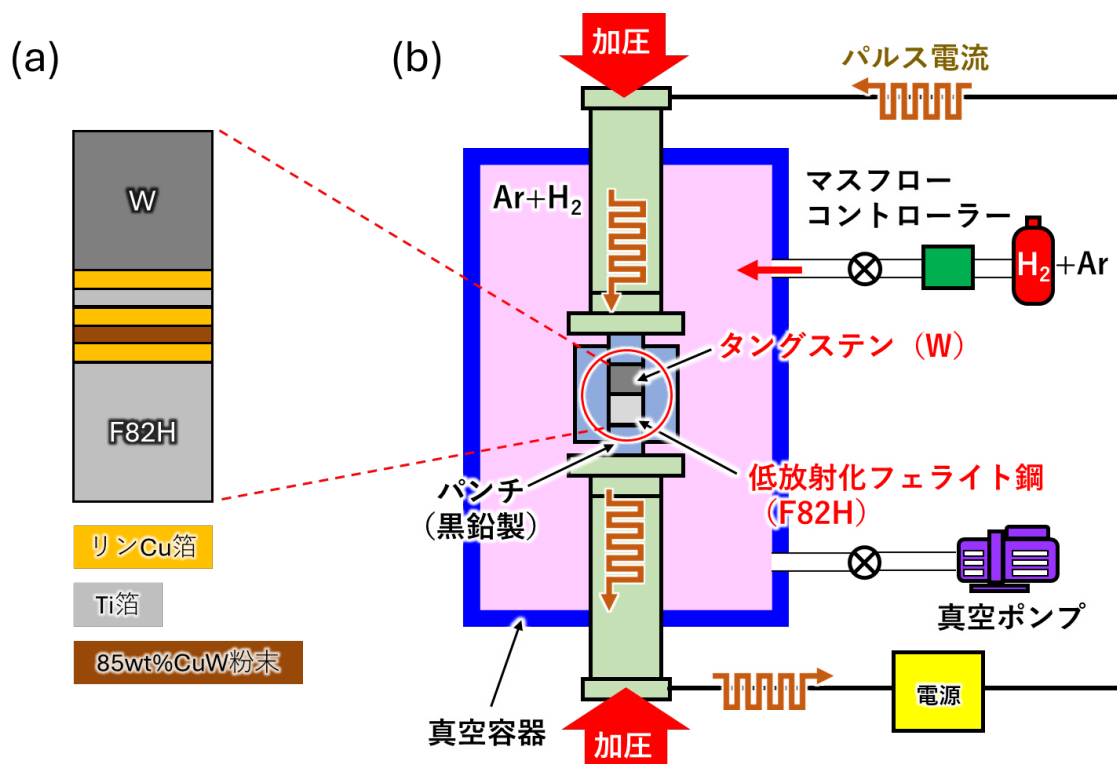


図1. (a) タングステンと低放射化フェライト鋼の接合構造, (b)放電プラズマ焼結装置の模式図

接合には放電プラズマ焼結法 (SPS 法) を用いた (図1(b)参照)。SPS 法は、試料へ直接パルス電流を流すことで内部発熱させるため、急速昇温および局所加熱が可能であり、材料への熱影響を抑制できる特徴を有する。低放射化フェライト鋼の健全性を考慮し、接合温度は600~800℃の範囲で実験した。

また、タングステン表面の酸化を抑制するため、真空引き後に水素を含むアルゴンガスを導入した還元性雰囲気下で接合を実施した。加圧条件についても検討を行い、5 MPa から40 MPa の範囲で実験した結果、高加圧条件の方が高い接合強度を示した。

保持時間についても10分から30分の範囲で条件を探索したが、保持時間延長による顕著な強度向上は確認されず、短時間接合でも十分な接合性を得られることを確認した。

4. 接合試験および評価結果

接合試験では、φ9.4 mm 円柱状のタングステンおよび低放射化フェライト鋼を用い、中間材を介して

接合体を作製した。種々の条件にて接合後、せん断試験による接合強度評価を実施した。

温度依存性評価では、800 °C条件で最も高い接合強度を示し、720 °Cまで温度を下げた場合でも十分なせん断強度を維持した。一方、650 °C以下では著しく接合強度が低下した。これは、リン銅箔の溶融や界面反応が不十分となり、中間層形成が不完全であったためと考えられる。

また、タングステン粉末を含まない条件では接合強度が著しく低下したことから、タングステン粉末による熱膨張差緩和が重要であることを確認した。中間層厚みについても検討を行い、粉末量を減少させた条件では接合強度がやや低下した。これは中間層が薄くなることで残留応力緩和効果が低下したためと推察される。

チタン箔の有無による比較では、チタン箔を使用した場合に高い接合強度を示した。界面観察結果から、チタンとリンの反応による界面強化が接合性向上に寄与したと考えられる。

接合界面および破断面の観察には SEM および EDX 分析を用いた。分析の結果、中間層内に鉄、クロム、リンが分布していることを確認し、低放射化フェライト鋼側元素の拡散が接合形成に寄与していることが示唆された。また、タングステン粉末が中間層中に均一に存在することで、界面応力緩和に寄与していることが確認された。

以上の結果より、中間材構成および接合条件を適切に制御することで、700~800°Cという比較的低温域においても高健全性接合が可能であることを明らかにした。

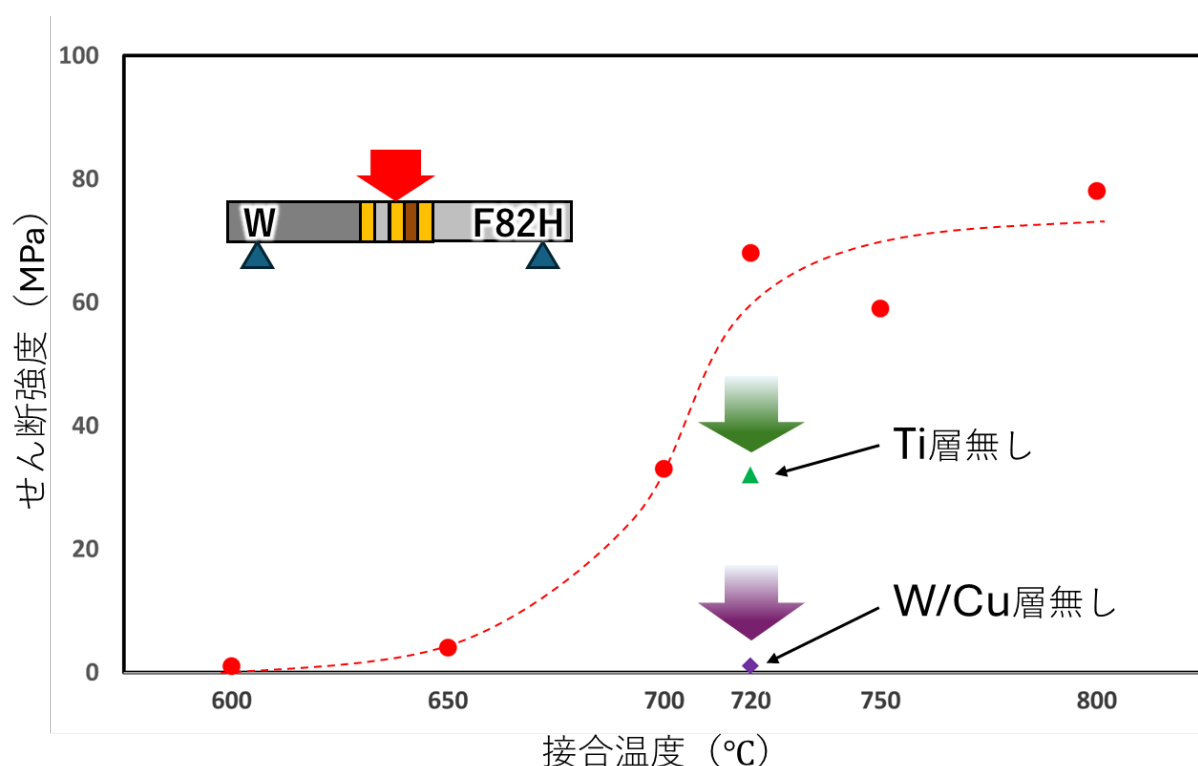


図 2. 接合試験体のせん断強度における温度依存性および中間層の構成依存性

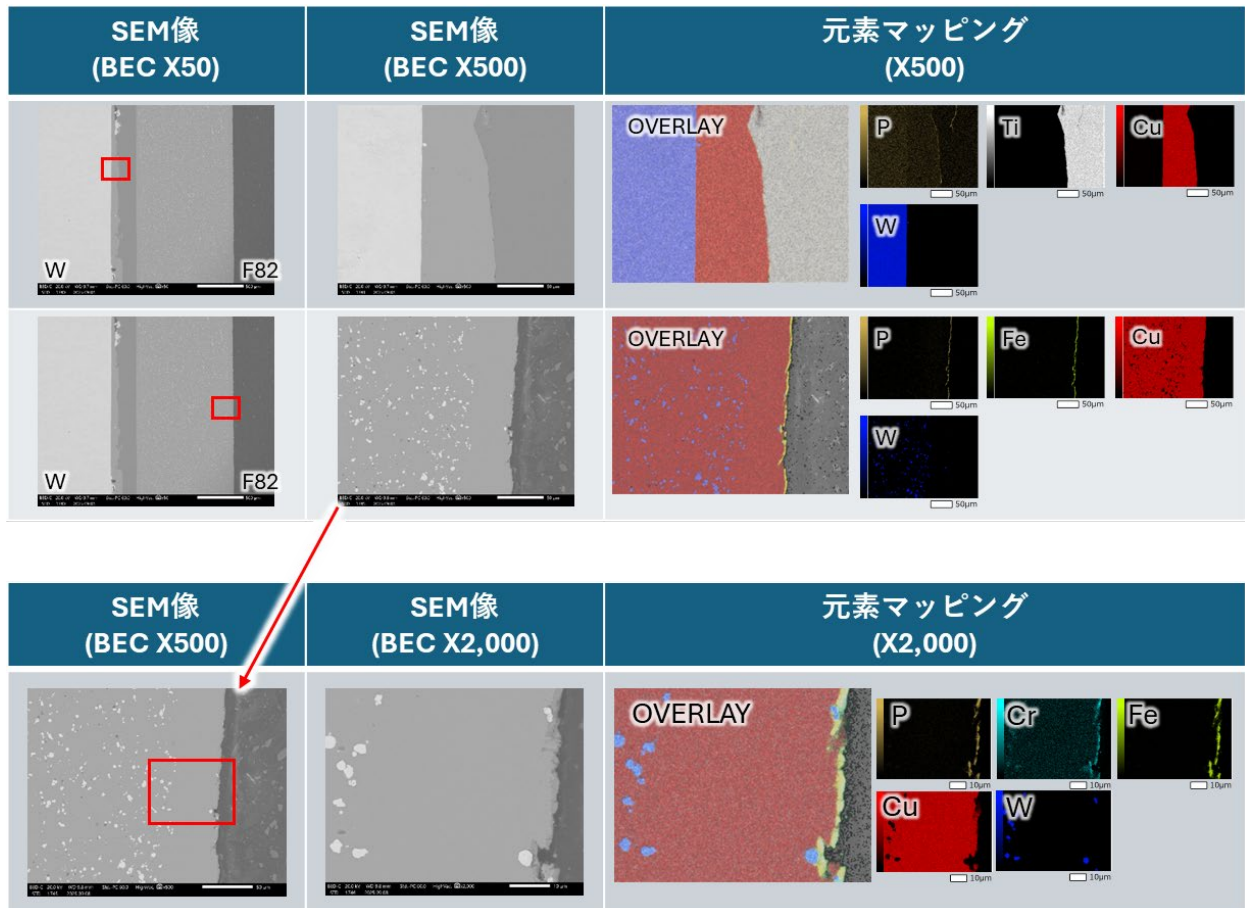


図3. W と F82H の接合界面における SEM 像および EDX 元素マッピング像

5. まとめ

本開発では、タングステンと低放射化フェライト鋼の低温接合技術について検討を行い、リン銅箔、チタン箔、およびタングステン粉末／銅粉末混合層からなる複合中間材と SPS 法を組み合わせることで、700～800 °Cの低温域において高強度接合を実現した。

特に、中間層へのタングステン粉末導入による熱膨張差緩和、およびチタン添加による界面反応促進が接合健全性向上に有効であることを確認した。また、短時間・一工程で接合可能であることから、製造工程簡略化やコスト低減への効果も期待できる。

さらに、各種接合条件および中間層構成を体系的に評価することで、低温接合における接合メカニズムや強度発現要因について知見を得ることができた。本成果は、核融合炉用ダイバータ板などのプラズマ対向機器への適用に加え、高温環境下で使用される各種耐熱接合構造への展開も期待される。

なお、本開発成果については、接合構造および製造方法に関する特許出願を行い、技術成果の知的財産化を進めている。今後は大型試験体による評価や熱疲労試験などを進め、実機適用に向けた信頼性向上を図る予定である。

1.3. 電気電子技術課

1.3.1. 2025 年度 LHD-ECH の運用と保守、および CHD-ECH の整備について

(LHD、CHD 運用班)

電気電子技術課 水野嘉識

1. 目的

第 26 サイクル LHD 実験を円滑に遂行するため、ECH 機器の事前整備および運用を適切に実施する。また、LHD 実験後の共同研究利用や CHD への機器移設についても、必要な手続きを踏まえ、適切に対応する。

2. 概要

5 月に LHD 真空容器内での入射位置確認試験を実施した。この試験に向け、4 月からジャイロトロンの運転準備を開始したが、154GHz ジャイロトン用超伝導マグネット（以下 SCM という）1 台が所定温度まで冷却できず、故障と判断して修理対応となった。SCM は 9 月の中旬に修理から戻り、LHD 実験に間に合わせるためのセットアップを実施した。

また、77GHz ジャイロトン 1 台が 7 月末に納入され、LHD 実験に供するための準備作業を進めた。さらに、以前から課題であった対向壁監視については、画像解析 AI を用いたオペレーター向け注意喚起システムを導入した。

9 月から 12 月に実施された第 26 サイクル LHD 実験では、77GHz ジャイロトン 2 台、154GHz ジャイロトン 2 台を運用したが、1 2 月終盤に 77GHz ジャイロトン 1 台でリークが発生した。

加えて、5 月中旬から CHD 向けの ECH 機器移設工事が開始され、工程整理や各種書類対応などの業務を行った。

3. LHD 関連業務について

3-1. LHD 真空容器内での入射位置確認試験

真空容器内に塩化ビニル板をターゲットとして設置し、治具を用いて座表面が分かるように固定した状態でミリ波を入射した。温度変化を IR カメラで撮影することで、設定位置と実際の入射位置のずれを観測した。図 1. に撮影した画像の 1 つを示す。

観測されたずれについては、研究者がアンテナ設定プログラムを修正し、第 26 サイクル実験に対応した。



図 1. IR カメラで撮影したターゲット画像

3-2. SCM 故障対応

入射位置確認試験に向けて各ジャイロトン用 SCM の冷却を実施したが、154GHz 用 SCM の 1 台が 8 K 以下に冷却できず、励磁試験ではクエンチが発生したため、冷却不良が確実となった。

メーカーとの協議の結果、工場で熱スイッチを取り外す方針となり、ジャイロトロンを引き抜いたうえで SCM を搬出した。修理および試験を経て、9 月中旬に冷却状態で納入された。

通常セットアップには約 1 か月を要するが、LHD 実験まで 2 週間足らずであったため短縮工程で対応した。その結果、前サイクルより出力が約 1 割低下した。

主なセットアップ手順は以下のとおりである。

- ・ SCM 設置、励磁試験、磁場測定、位置調整
- ・ ジャイロトンインストールおよび発振確認
- ・ 光軸確認（ミリ波伝送試験）
- ・ パワーモード確認

3-3. 77/50GHz ジャイロトンセットアップ

第 25 サイクルで 77GHz ジャイロトン 1 台がリークしたため、CHD での使用も見据えて 77/50GHz ジャイロトロンを 1 台導入した。従来機との主な相違点は出力窓の厚みである。新ジャイロトロンは 6 月末に納入された。

SCM のセットアップは事前に完了していたため、納入と同時にインストール作業を開始した（図 2. にインストール作業風景を示す）。新品であるため真空度を監視しつつ、1 日かけて電子銃のヒーター通電を実施した。

その後、

- ・ 77GHz での発振確認
- ・ 出力窓でのビームパターン確認
- ・ 1MW 超までの短パルス出力確認

を行った。50GHz についても同様の試験を行ったが、出力は 700kW 程度にとどまった。

LHD では 77GHz のみ使用するため、77GHz 出力で光軸調整および長パルス運転に向けたコンディショニングを実施した。

第 26 サイクル初期はコンディショニング不足により出力制限が必要であったが、実験終了後もコンディショニングを継続した結果、10 月終盤には安定して出力が得られるようになった。

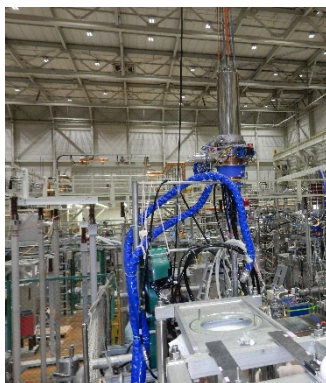


図 2. ジャイロトロンインストール作業風景

3-4. 対向壁監視

当初は私が開発を進める予定であり、端末やキャプチャーボードの準備を進めていた。しかし、2本のジャイロトロン準備や CHD 設備移設が重なり、第 26 サイクルまでの開発完了が困難と判断し、別部署へ制御システム開発を依頼した。

私は、第 25 サイクルの実験動画を全て確認し、教育データを提供するとともに、研究者からの要望を取りまとめる形で協力した（図 3. に教育データの 1 例を示す）。

第 26 サイクル前にシステムが完成し運用を開始したが、オペレーターが使用する主モニターに表示できなかったため、小型モニターを追加購入し、確認しやすい環境を整えた。

第 26 サイクル後の真空容器内確認では、第 25 サイクル時より溶損が軽減されていたとの報告をうけた。



図 3. NG 画像の 1 例

3-5. 第 26 サイクル LHD 実験

実験は 10:00 開始、17:15 分終了で進められ、第 25 サイクルよりも前後 30 分ずつ延長された。対応は 8:30-17:15 と 9:00-17:45 の 2 シフト体制で行った。

CHD への電源移設により、154GHz ジャイロトロン 1 本分の入射パワーが第 25 サイクルより減少した。また、ショット番号 199459 では 77GHz ジャイロトロンでリークが発生し使用不能となった。この

装置は CHD での使用を予定していたため、修理可否を検討している。2009 年から運用しており、期待寿命としては十分である。

その他大きなトラブルはなく、全体として比較的順調に実験を進めることができた。

図 4. に第 27 サイクルでの入射パワー推移を示す。

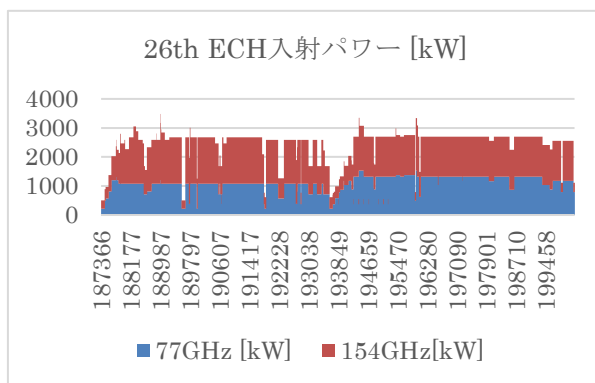


図 4. 第 27 サイクルでの ECH 入射パワー推移

4. CHD への機器移設業務について

「超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学」計画を進めるにあたり、LHD で稼働していた 3 系統の ECH 電源のうち 1 系統を、CHD へ移設、整備することとなった。

ECH 電源は、

- ・#1：77GHz ジャイロトロン 2 台用
- ・#2：154GHz ジャイロトロン 2 台用
- ・#3：154GHz ジャイロトロン 1 台+56GHz ジャイロトロン 1 台用

の 3 系統であり、LHD 実験への影響を最小限にするために#3 を移設対象とした。

CHD の機器設置予定エリアには CHS-ECH 機器が残っていたが、CHD 実験で想定している磁場条件や入射パワーと適合しないため撤去から着手した。引き取り希望のある機器は所内手続きを経て譲渡し、PCB 汚染の可能性のある機器については確認作業を行った。また、機器担当者が既に所内にいなかったため、資料探索にも時間を要した。

移設作業は業者委託であったが、ジャイロトロンの入れ替えや運転の合間を縫う必要があり、日程調整や現場対応に多くの時間を割いた。さらに、当初用意されていた低圧電源は、数、容量とも不足していたため、施設安全管理課と協力して増設を行った。

令和 7 年度末までにジャイロトロン 1 台分の移設は完了したが、CHD では 2 台運用を予定しているため、令和 8 年度も工事を継続する予定である。

図 5. に移設作業前後の様子を示す



図 5. 左:作業前の様子 右:作業後の様子

5. 今後の課題

LHD は令和 7 年度で終了となったが、LHD-ECH はプラットフォームとして共同研究での利用が予定されており、引き続き設備維持が必要である。また、現在使用していない機器が多く残っているため、新規実験装置の設置スペース確保の観点からも、機器の譲渡や廃棄を進める必要がある。

CHD については、電源移設工事、水回り設備の整備、伝送路準備、ジャイロトンセットアップを進める必要がある。令和 8 年度にファーストプラズマを予定しており、スケジュールはタイトではあるが、計画に沿って作業を進めていく必要がある。

1.3.2. 続・ GaN-FET を用いたインバータ電源の製作

(技：令和7年度核融合科学研究所技術研究会)

○伊藤 康彦^{AB)}、中野 治久^{AC)}、富里 哲夫^{D)}

A) 核融合科学研究所 B) 技術部電気電子技術課、C) プラズマ装置学ユニット、D) ユニオン電機(株)

1. はじめに

国際熱核融合炉 (ITER) にて実装が計画されている中性粒子ビーム入射加熱装置 (NBI) があり、これに保守性に優れた高周波負イオン源を適用するための研究開発が行われている。NBI 装置の模式図を図1に示す。

NBI の動作を簡単に述べると、イオン源で高周波放電により水素プラズマを発生させ、そこから水素負イオンを取り出し、それを加速した後に電氣的に中性化し、残留したイオンを除去して核融合プラズマに入射し加熱する装置である。

現在イオン源にて水素プラズマ放電を励起するためのアンテナコイルに、高周波電力を供給するインバータ電源 (周波数 500k~5MHz、~60kW 目標) を製作中である。前回の報告ではインバータ電源のスイッチング素子に GaN-FET を用いた回路基板の設計法について言及した。今回は基板の試作と簡易動作テストを行ったこと及び、本基板を8組のフルブリッジ並列接続として 15kW 出力とするための設計法について報告する。

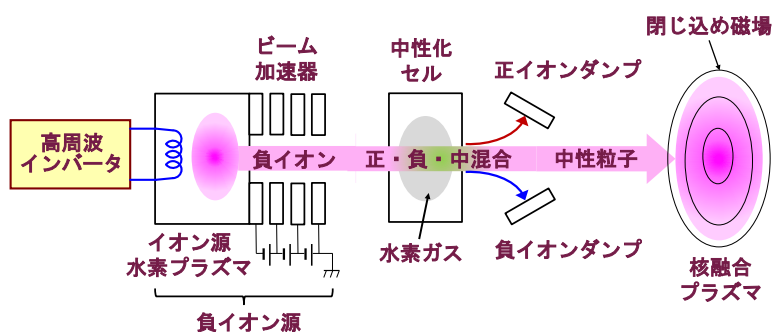


図1. 中性粒子ビーム入射装置

2. インバータ電源回路

本回路及び周辺回路の構成を図2に示し、主要部の動作を説明する。

ハーフブリッジ構成のインバータ回路基板 (図3) 2枚をフルブリッジ構成として8並列接続し、直流電源 (最大 600V, 25A) 出力を 500k~5MHz で高速スイッチングを行うことにより、アンテナコイルに高周波電流を供給する。スイッチング素子には GaN-FET (Infineon, IGOT60R070D1) を用いる。本素子はドレイン・ソース間電圧 $V_{DS}=600V$ 、ドレイン電流 $I_{DS}=60A$ 、 $S_{rew-rate}=200V/ns$ 、ON 抵抗 $70m\Omega$ である。

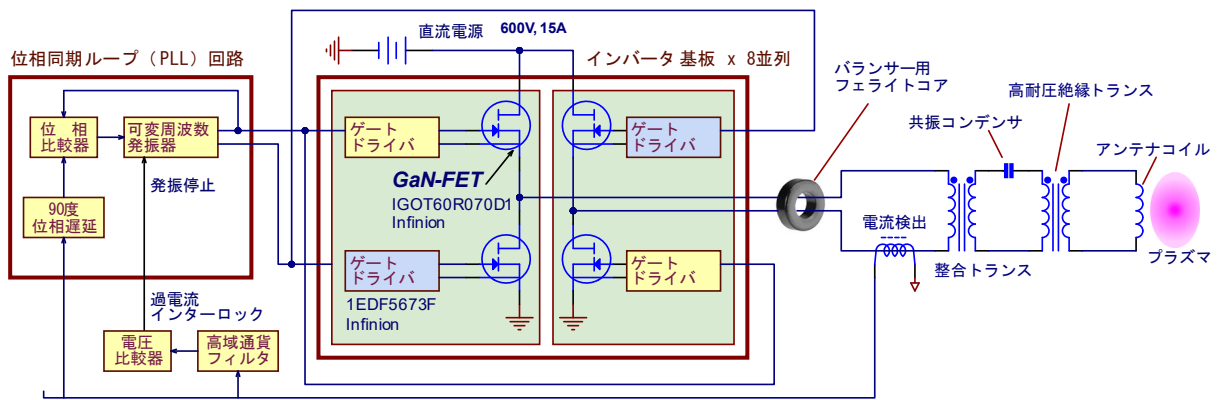


図 2. インバータ電源回路の構成

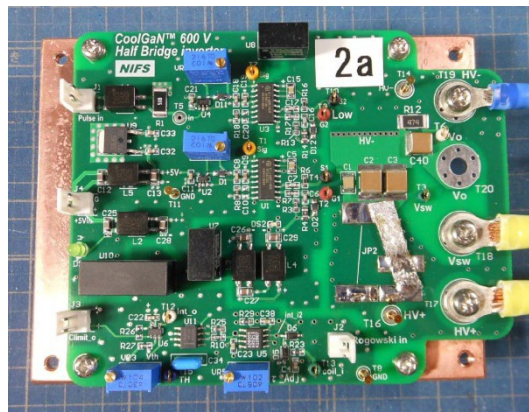


図 3. ハーフブリッジ・インバータ基板

本基板は Infineon 社の評価基板 EVAL_1EDF_G1B_HB_GAN を参考に改造したもので改造箇所は前回報告した^[1]。今回の改造箇所は主に GaN-FET の保護回路で、ログスキーコイル (図 4 右) の実装方法を変更した。本コイル (2mmΦチューブに 0.2mmΦポリウレタン線を 40 回巻き) にて GaN-FET のハイサイド側ドレイン電流を検出し、しきい値以上でインバータの動作を停止させる。

最初には本コイルを挿入する線路において、ドレイン電流とバイパスコンデンサに流れる電流が加算された線路に実装してしまったため (図 4-a)、検出波形が鈍ってしまい 500kHz 以上のスイッチング周波数での利用ができなかった。

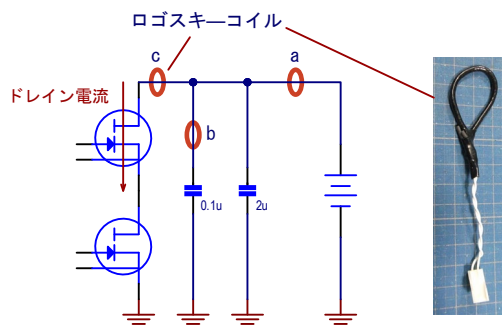


図 4. ドレイン電流検出用ログスキーコイル実装位置

そこでバイパスコンデンサのみの線路に本コイルを実装してみたが (図 4-b)、検出レベルが低下した

のみで効果がなかった。次にドレインのみの線路に本コイルを実装してみたが（図 4-c）、応答速度が改善しなかった。また本コイルの直径を 25mm, 70mm の物でも試したが応答速度は変わらず本コイルの利用を諦めた。

この代替として富里提案による高域通過フィルタ（HP12CH3-0B、R&K 社）を利用することにした。インバータ負荷端子直近の電流波形は共振周波数で正弦波に近いが、共振周波数より低い場合（負荷が容量性）はハードスイッチング状態となり高調波が増加する。一方、共振周波数より高い場合は誘導性負荷となり、ソフトスイッチング状態が保たれる。この性質を利用して本フィルタで高調波成分のみを抽出し、一定振幅値以上になった場合に全インバータ動作を停止させる。

GaN-FET の放熱について当初は水冷を予定していたが 13.56MHz インバータの空冷方式^[2]を参考とし、銅ヒートスプレッドとの絶縁に低熱抵抗値 0.05°C/W である 0.5mm 厚の窒化ガリウム板（アズワン、67-4574-92）に低熱抵抗値 0.036°C/W の放熱グリス（アイネックス社、JP-DX1）を塗布した。

3. 位相同期ループ（PLL）回路

プラズマ放電状態の変動により共振周波数が変化すると、負荷に供給する電圧と電流の位相がずれる。この場合 GaN-FET の Low-side 及び High-side が同時に ON 状態となり、ドレイン供給電源が GND へ短絡し過大電流が流れ、素子が破損する原因となるハードスイッチング状態となる。これを避けるため PLL 回路（図 5）により負荷供給電圧と電流の位相差に応じてスイッチング周波数を制御し、適切な共振周波数に合わせる。本回路は富里設計による PLL 回路を参照し製作を行った。

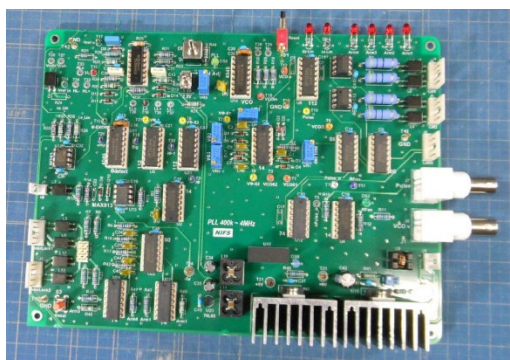


図 5. PLL 回路基板

4. インバータの並列接続

数 kW 以上の高出力を得るためには、インバータ回路の並列運用が必要となる。本基板は 2 枚 1 組のフルブリッジ又は 1 枚でのハーフブリッジ構成で利用でき、最大出力は数 kW 程度までである。全体で 16 枚の基板を 1 つの筐体の実装し最大出力 15kW までとし、更にこれを 4 台並列接続し 60kW での運用を計画している。多チャンネル並列構成では、各基板特性のバラつきにより一部の GaN-FET が過負荷状態になる事を防止するための balancer 回路^[1]として、各チャンネルの出力部にフェライトコアを挿入する。

5. 動作試験

フルブリッジ 1 組で水冷疑似負荷による動作試験を行っている段階である（図 6）。PLL による共振周

波数の自動調整については 500k~5MHz に渡って安定した動作が得られている。

GaN-FET のハードスイッチング動作を避けるため、ゲートドライバ IC の入力波形のデューティ比を、CR 積分回路を構成するトリマ抵抗の調節により行う。しかし PLL 出力パルスを各インバータ基板に分配するための回路でパルスのデューティ比が低下する問題があり、ゲート波形のタイミングが適切でないため、本問題を解消するまでの高電力疑似負荷試験においては、ファンクションジェネレータを信号源としている。

MHz を超える大電力動作になると大きなコモンモードノイズによる妨害を受けることが確実であり、出力線路や小信号系にコモンモードノイズ抑制用のフェライトコアを挿入する等のノイズ対策が必須となる。

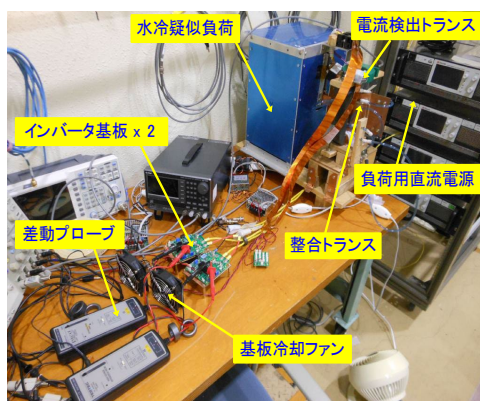


図 6. インバータ動作試験

6. まとめ

ITER で実装が計画されている NBI の高周波負イオン源の開発研究で利用するインバータ電源回路を製作中である。1 組のフルブリッジ回路を製作し、疑似負荷にて 4.9MHz、2kW で動作することを確認した。現在フルブリッジ 8 並列構成を組み込んだインバータシステムを組立中である。最終的にはこれを 4 セット並列運用して 60kW、5MHz を目標とする。

参考文献

- [1]GaN-FET を用いたインバータ電源の製作、伊藤康彦、令和 6 年度筑波大学技術研究会
- [2]MHz 周波数帯のワイヤレス電力伝送における高出力化・高効率化・伝送距離向上のための要素技術研究、大矢根 蒼、名古屋大学大学院工学研究科博士論文、2023 年 3 月

謝辞

インバータ電源設計製作において、ユニオン電機株式会社、富里哲夫氏から多くの貴重な技術的アドバイスを頂いたことに大いに感謝する。

1.3.3. 電力デマンドサーバの更新、および、Web コンテンツの開発

(技)

電気電子技術課 安井孝治

1. 目的

Windows OS の更新に伴い、電力デマンドサーバを更新することになったが Web コンテンツの一部機能が使用できなくなった。そのため、ハードウェアの更新と共に Web コンテンツも一部更新することとした。

2. 概要

2002 年に運用を開始した電力デマンドサーバであるが、これまで LHD 実験など大電力を使用する実験において、電力会社との契約電力を超えないよう監視することを主な目的として運用している重要なサーバである。契約電力を超えると電力会社に支払う違約金が発生し、それに合わせ契約電力を更新することになる。契約電力が高くなれば電力基本料金も高くなりその分研究費を減らさざるを得なくなる。従って、効率よく実験するためには契約電力を超えないようにすることが重要である。

電力デマンドサーバは、デマンドデータ、および、各実験棟の消費電力データを 1 分毎に収集すると共に、電力系統別に 1 分毎にグラフ表示を自動更新するものである。また、過去データを検索しグラフ表示する機能があり、過去の消費電力の比較や解析ができる。

今回、Windows OS の更新により過去データのグラフ表示機能が使用できなくなったため、Web サーバの更新と共に別の方法で過去データをグラフ表示できるようプログラムを更新した。

3. 内容

3.1. アプリの構成

使用したアプリは下記の通りである。

- ・ HTTP サーバ：Apache 2.4
- ・ CGI プログラム：Strawberry Perl 5.40
- ・ グラフ表示プログラム：JavaScript (Chart ライブラリ)

3.2. 過去データのグラフ表示機能について

CGI プログラムと JavaScript プログラムを組み合わせることにより各種機能を持たせた。

そして、2002 年の運用開始以来 20 年以上のデータが蓄積されているが、この間に電力系統の配線換えや建屋名称の変更、電力量計の乗率変更などもあり、収集データが錯綜することとなった。これらの変更時期にムラはあるものの、ある程度は対応できるように一覧表を作成し (表 1)、これに併せデータの切換えや補正などを表示プログラム側で対応した。

図 1 は電力デマンドの電力表示画面であるが、電力系統毎に切り換えて表示、および、時間範囲を設定することができる。そして、Chart モジュールの機能によりプロットデータを選択することで表示／非表示ができ、マウスポインタをデータポイントに合わせるとその時間と数値を表示させることができる (図 2)。

表1. 電力系統配線換えや建屋名称変更などの履歴

デマンドデータの系統別名	T/U系統名	H/U系統名	種名称 1993.12	種名称 1996.7	種名称 (2000.7.127 ケーブル接続替え)	デマンドデータ種名称 (2000.7.127 ケーブル接続替え)	種名称 (2000.8.27 管理データ取組確認)	デマンドデータ種名称 (2000.8.27 管理データ取組確認)	種名称 (2004.8.17 ケーブル接続替え)	種名称 (2006.9.25 ケーブル接続替え)	種名称 (2006.9.26 管理データ取組確認)	デマンドデータ種名称 (2006.9.26 管理データ取組確認)	種名称 (2006.9.26 管理データ取組確認)	種名称 (2007.12.1 ケーブル接続替え)	種名称 (2008.3.25 管理データ取組確認)	種名称 (2009.3.25 ケーブル接続替え)	種名称 (2023.8.7 ケーブル接続替え)	種名称 (2023.8.7 ケーブル接続替え)
6	Hb1	H11	低圧変換機	低圧変換機	--	7	--	7	--	7	--	7	--	7	--	7	--	7
7	Hb2	H12	加熱変換機	加熱変換機	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10	9 10
8	Hb3	H13	冷却水装置機1	冷却水装置機1	21 24	予備	21 24	予備	21 24	予備	21 24	予備	21 24	予備	21 24	予備	21 24	予備
9	Hb4	H14	大型ヘリカル変換機	大型ヘリカル変換機	--	21	--	21	--	21	--	21	--	21	--	21	--	21
10	Hb5	H15	大型ヘリカル変換機	大型ヘリカル変換機	--	22	--	22	--	22	--	22	--	22	--	22	--	22
11	Hb6	H16	Hc圧縮機機	Hc圧縮機機	--	31	--	31	--	31	--	31	--	31	--	31	--	31
12	Hb7	H17	計量変換機	計量変換機	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39	38 39
13	Hb8	H18	Hc圧縮機機	Hc圧縮機機	--	30	--	30	--	30	予備	64	予備	64	予備	64	予備	64
14	Hb9	H19	大型ヘリカル変換機	大型ヘリカル変換機	--	20	--	20	--	20	--	20	--	20	--	20	--	20
15	Hb10	H20	冷却水装置機2	冷却水装置機2	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28	27 28
16	Hb11	H21	閉塞変換機	閉塞変換機	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53	52 53
T/U系統 (H/U系統)																		
17	Hb1	H21	加熱変換機 NBI	加熱変換機 NBI	予備	59	--	59	--	59	--	59	--	59	--	59	--	59
18	Hb2	H22	加熱変換機 ECH	加熱変換機 ECH	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
19	Hb3	H23	加熱変換機 KRF	加熱変換機 KRF	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
20	Hb4	H24	専定変換機 FWG	専定変換機 FWG	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
21	Hb5	H25	大型ヘリカル変換機 Tモード DC	大型ヘリカル変換機 Tモード DC	--	41	--	41	--	41	--	41	--	41	--	41	--	41
22	Hb6	H26	大型ヘリカル変換機 Tモード DC	大型ヘリカル変換機 Tモード DC	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
T/U系統 (H/U系統)																		
23	Hc1	H31	専定変換機 FWG	専定変換機 FWG	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
24	Hc2	H32	加熱変換機 KRF	加熱変換機 KRF	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
25	Hc3	H33	加熱変換機 ECH	加熱変換機 ECH	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
26	Hc4	H34	加熱変換機 KRF	加熱変換機 KRF	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
27	Hc5	H35	加熱変換機 ECH	加熱変換機 ECH	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
28	Hc6	H36	加熱変換機 NBI	加熱変換機 NBI	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
29	Hc7	H37	予備	加熱変換機 NBI	予備	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
30	Hc8	H38	予備	加熱変換機 Tモード	予備	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
T/U系統 (H/U系統)																		
31	Ub1	U11	低圧変換機	低圧変換機	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
32	Ub2	U12	専定変換機	専定変換機	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51	50 51
33	Ub3	U13	加熱変換機	加熱変換機	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
34	Ub4	U14	専定変換機	専定変換機	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
35	Ub5	U15	計量変換機	計量変換機	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
36	Ub6	U16	大型ヘリカル変換機	大型ヘリカル変換機	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17	18 17
37	Ub7	U17	Hc圧縮機機	Hc圧縮機機	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
38	Ub8	U18	大型ヘリカル変換機	大型ヘリカル変換機	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
39	Ub9	U19	予備	予備	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
40	Ub10	U20	加熱変換機	加熱変換機	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
41	Ub11	U21	予備	予備	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
42	Ub12	U22	予備	予備	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
43	Ub13	U23	予備	予備	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
T/U系統 (H/U系統)																		
44	Ub1	U21	計量変換機	計量変換機	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
45	Ub2	U22	制御機	制御機	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
46	Ub3	U23	予備	予備	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
47	Ub4	U24	予備	予備	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
47	UbG1	U2G1	受水施設	受水施設	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
48	UbG2	U2G2	冷却水装置機1	冷却水装置機1	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26	23 24 25 26
49	UbG3	U2G3	Hc圧縮機機	Hc圧縮機機	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
50	UbG4	U2G4	大型ヘリカル変換機	大型ヘリカル変換機	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
51	UbG5	U2G5	制御機	制御機	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
52	UbG6	U2G6	特高変換機	特高変換機	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
53	UbG7	U2G7	予備	予備	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
54	UbG8	U2G8	予備	予備	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
55	UbG8	U2G8	予備	予備	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
56	UbG9	U2G9	自家発電機 (ガスタービン)	自家発電機 (ガスタービン)	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43

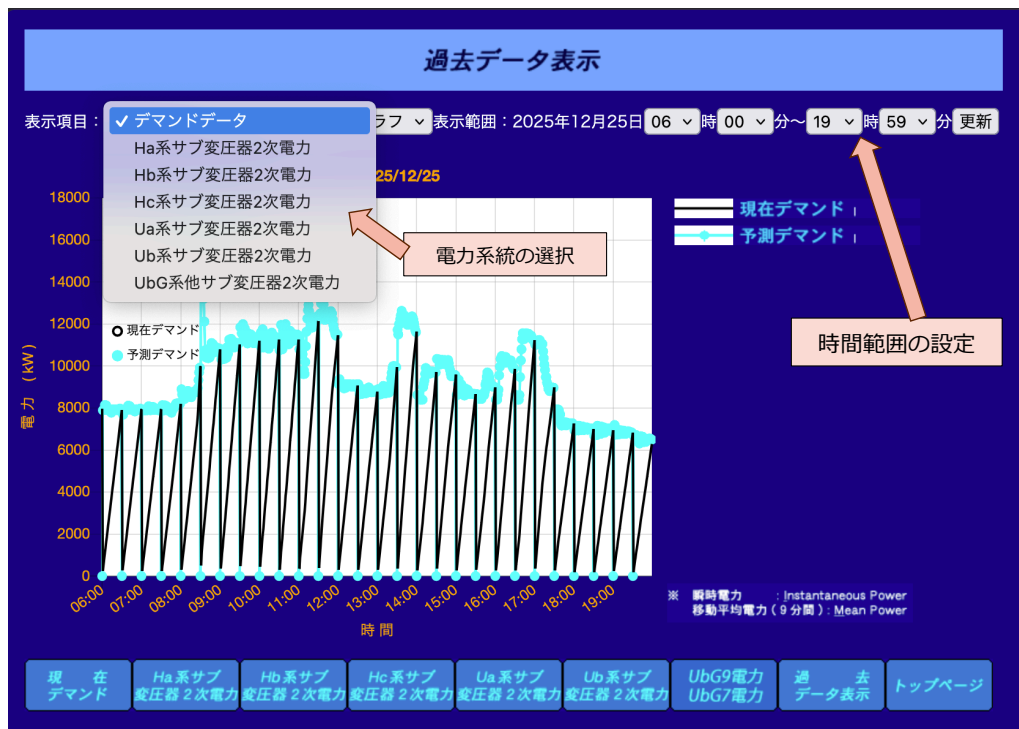


図1. 電力デマンドの表示 (電力系統の選択と時間範囲の設定機能)

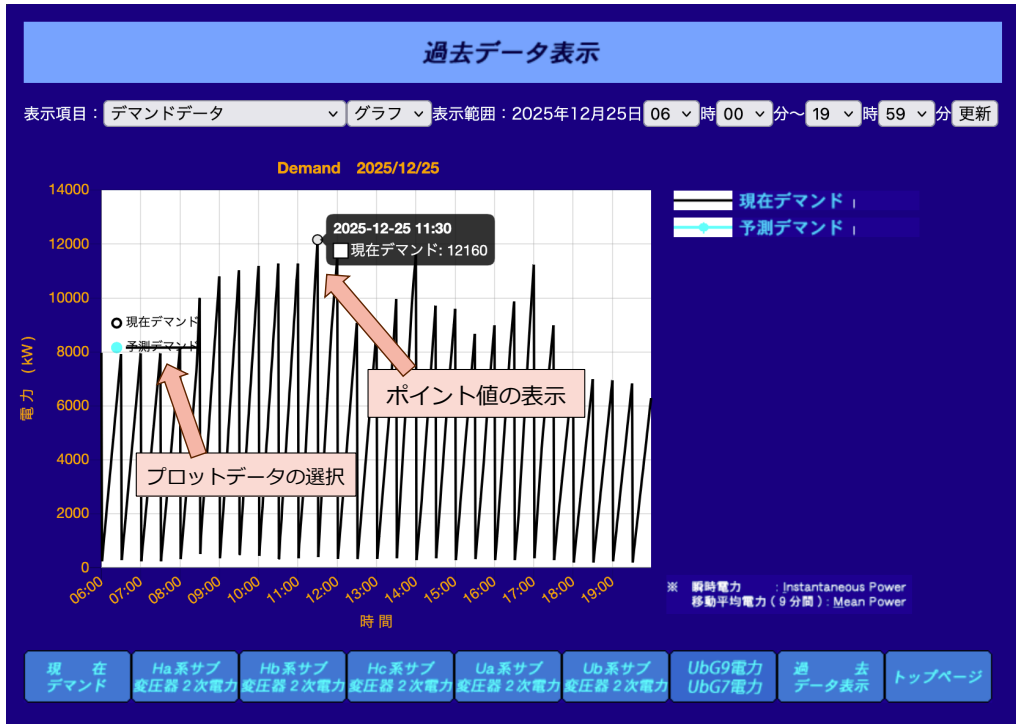


図2. 電力デマンドの表示（プロットデータの選択とポイント値の表示機能）



図3. Hc 系統電力の表示

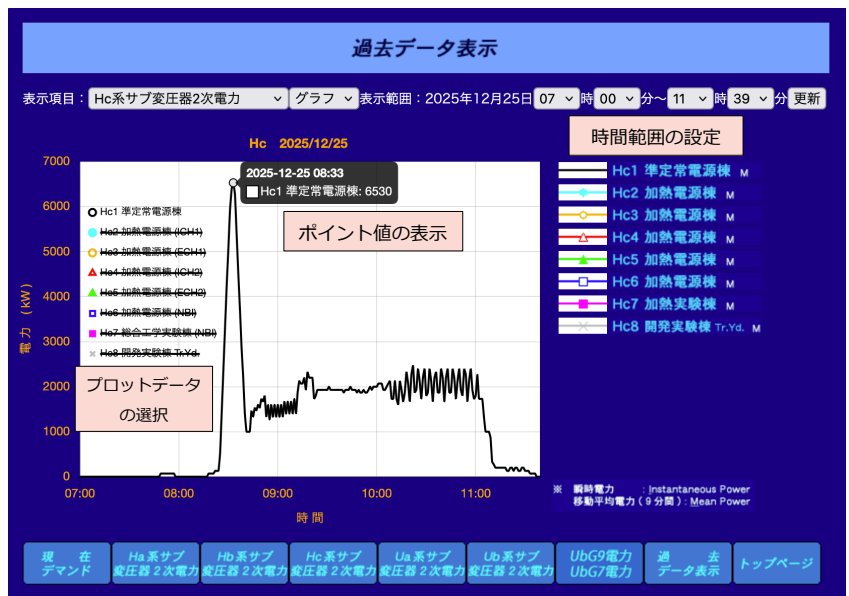


図4. Hc1 準定常電源棟のみ選択し拡大表示

図3はHc系統電力の表示例であるが、Hc1準定常電源棟のMG消費電力を調べる場合、時間範囲の設定とプロットデータの選択により図4のように詳細表示することができる。また、図5のUbG系統電力の表示例では、UbG7太陽光発電設備の発電電力を調べる場合、同様に図6のように詳細表示することができる。

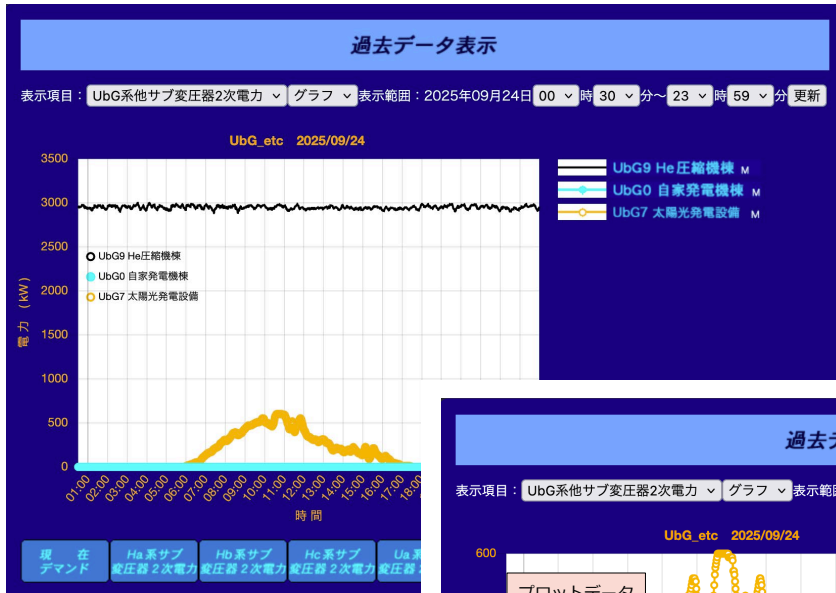


図5. UbG系統電力の表示

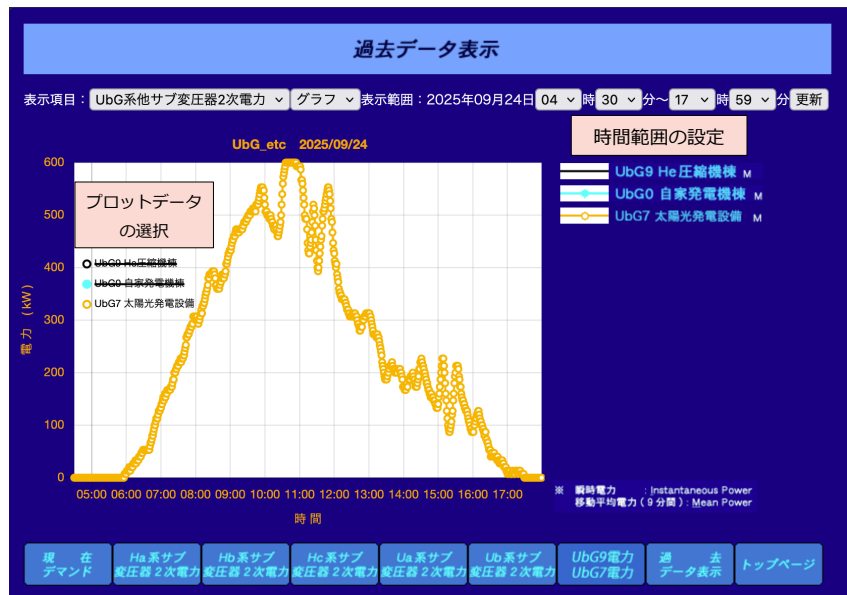


図6. UbG7太陽光発電設備のみ選択し拡大表示

4. まとめ

高機能なJavaScript用ChartライブラリやCGIプログラムを使用することにより、過去の収集データ(csvファイル)を検索し読み込み、電力データをWebブラウザ上でグラフ表示するプログラムを開発した。表示は電力系統別に切り換えることができ、時間範囲の調整も可能とした。また、過去の電力系統の配線換えなどの変更履歴に併せ、元データを修正することなくプログラム側でデータの切り換えや補正表示をするようにした。

最後に、2002年の開発当初より1分毎のデータ収集と画像生成プログラムの作成・更新にご協力頂いた技術部の鷹見氏、データ収集元である特高変電所の電力計、電力量計の取合いの整備や乗率変更、情報収集などにご協力頂いた施設・安全管理課と特高変電所のご担当の皆様へ感謝する。

1.4. 計測分析技術課

1.4.1 大型ヘリカル装置の重イオンビームプローブにおける 3MV タンデム加速器の運転状況について

(LHD)

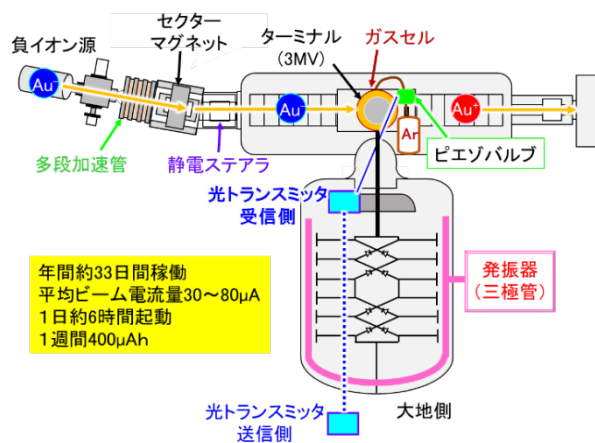
計測分析技術課 田窪英法、神田基成

1. HIBP の紹介

核融合科学研究所では、将来の核融合発電を目標として、世界最大級の超伝導プラズマ閉じ込め実験装置である大型ヘリカル装置(Large Helical Device, LHD)を用いて、プラズマ閉じ込めの基礎研究を実施している。重イオンビームプローブ(Heavy Ion Beam Probe, HIBP)は、プラズマの閉じ込め性能を研究する上で重要なパラメータとなるプラズマ電位を計測する装置である。本稿ではHIBP で用いているタンデム加速器の運転状況について報告する。

2. 3 MV タンデム加速器の構成

本加速器の構成図を図 1 に示す。負イオン源で1価の Au⁻イオンビームを生成し、-64keV で多段加速管によってビームを引き出して加速させる。生成された Au⁻の中には不純物(O₂, Cu, H₂O など)が含まれている為、セクターマグネット(以下、SM とする)により質量分析を行い、Au⁻のみを取り出し、静電ステアラによりビーム軸を調整して加速器へ入射している。加速器は LHD 実験スケジュールに合わせて年間約 33 日運用している。



3. 加速器用発電機 (MG) のベアリング破損修理

LHD 実験に伴い、加速器を 2.237MV まで昇圧した際に「加速電圧異常」「加速器温度高」により緊急停止する事象が発生した。加速器を制御する制御盤にて、警報操作解除を実行したところ、正常にリセット出来たため、コンディショニング不足で瞬間的なスパーク発生による影響だと判断し再起動を行った。

加速器を再起動して徐々に昇圧したが、「加速電圧異常」が再度発報して緊急停止した。加速器の制御システムを調査した結果、加速器に給電している高電圧電源に不具合が発生していることが判明した。電源単体で調査して正常であることから、加速器内部で異常が発生していると判断し、内部調査を実施することにした。(図 2) その結果、加速器内部で給電するための発電機のベアリングが破損していることが判明したため、NIFS 内部で修理を実施した。



図 2. 加速器内部での作業の様子

4. まとめ

加速器を製造したメーカーは事業撤退しているため、部品の設計・製作から修理を行う必要がある。通常約1年以上かかるところを突貫して1カ月程度で修理を完了させた。その後試運転を行い、加速器が正常に運転できるようになったことから、LHD実験に参加することが出来た。

1.4.2. 核融合科学研究所における 1MV タンデム加速器の現状について

(総合工学実験棟運用班)

計測分析技術課 田窪英法、設計開発技術課 千村大樹

1. IB 解析装置の紹介

核融合科学研究所 (NIFS) では、将来の核融合炉材料に対する水素同位体のガス吸蔵挙動および照射特性を評価するため、2014 年より 1 MV ペレトロン・タンデム加速器 (NEC 社製) を運用している。本加速器は、RBS (ラザフォード後方散乱分析)・ERDA (弾性反跳粒子検出法)・PIXE (粒子線励起 X 線分析)・NRA (核反応分析) の非破壊分析手法に対応しており、照射材料の元素分析や深さ分布解析が可能な装置である。本稿では IB 解析装置で用いているタンデム加速器の状況について報告する。

(図 1)

2. 加速器の構成

図 1 はイオンビーム解析装置の各機器の概要を表す。負イオン源は ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 H_2 の 3 種類のガスを 100MHz の RF 型荷電変換イオン源 (アルファトロス) で電離させ、Rb により荷電変換させて負イオンを生成する。E (電圧) × B (磁場) によりビーム軌道を調整した後、1 MV ペレトロン・タンデム加速器 (バンデグラフ型) に入射する。加速器中央で N_2 ガスを用いて荷電交換を行い、陽イオンにすることで二段階の加速が行われる。加速されたビームから使用する価数のイオンを偏向マグネットで選定し、チャンバーに入射する。RBS・ERDA・PIXE・NRA を使用し、試料を非破壊で元素分析及び深さ分布を測定している。イオンビーム電流は最大 100 nA であり、加速器は年間約 480 時間運転している。

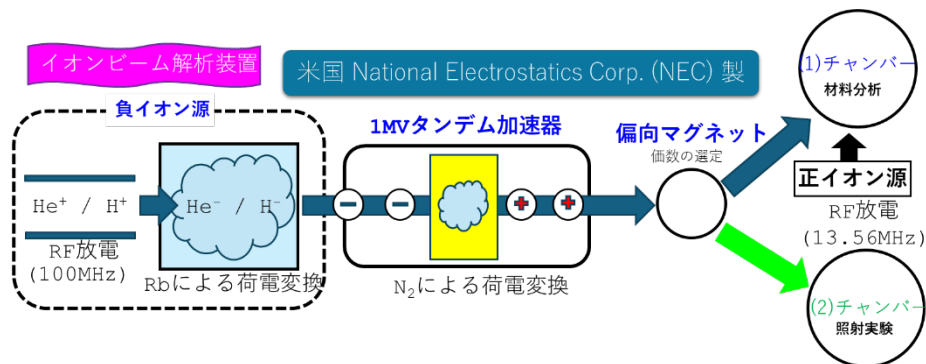


図 1. イオンビーム解析装置の外観図

3. 加速器不具合について

加速器運転中の加速電圧を測定できる GVM で正しく測定できない不具合が発生した。加速器内部を点検し、GVM のベアリング部が破損していたため修繕を実施し、電圧の測定が確認でき、運転安定性の回復を行った。

また、イオン源のガス導入チューブを修繕するために設置しているシールドボックスの一部を取り外し、代わりにアルミホイルを用いてシールドを行った際、荷電交換用 Rb 周辺の温度監視に不具合が発生した。シールドボックスを再度設置すると温度表示が正常に行われたことから、アルミホイルでのシールド対策は不十分であることが分かった。

4. まとめ

加速器運転中に GVM の電圧監視不具合により制御ができない事象が発生した。加速器を大気開放し、部品を交換することで正常に電圧信号をモニター出来るようになった。イオン源 RF からのノイズをシールドするためにアルミホイルを使用した。温度監視に不具合が発生した。シールドには 29 μ m以上の厚さの金属が必要であることが判明した。

1.4.3. 大気中トリチウムの化学形態別観測に向けたパッシブサンプラー用触媒容器の試作検討

(技)

計測分析技術課 中田実希、岩田智恵

1. 目的

核融合科学研究所（NIFS）では、施設周辺環境における大気中トリチウム濃度の監視を継続的に実施している。大気中トリチウムの捕集方法としては、ポンプ等を用いて空気を強制的に通気するアクティブ法と、自由拡散を利用するパッシブ法が存在する（表1）。

表1. 大気中トリチウム捕集におけるアクティブ法とパッシブ法の比較

	アクティブ法	パッシブ法
メリット	・ 化学形態別捕集可能 ・ 回収水分量を容易に制御可能	・ 電源不要 ・ 置くだけで捕集可能
デメリット	・ 電源が必要	・ HTO のみ捕集可能

パッシブ法は電源を必要とせず、設置の自由度が高いなどの利点を有する一方で、分子状トリチウム（HT）と水蒸気状トリチウム（HTO）を区別して観測することが困難であるという課題がある。

近年、常温環境下において HT を HTO へ酸化可能な疎水性白金触媒が報告されており[1]、この技術を用いることでパッシブ法における化学形態別観測の実現が期待される。

本報告では、既存のパッシブサンプラーに疎水性白金触媒を適用するための触媒容器構造を検討し、実運用の観点からその有効性評価を目的とする。

2. 方法

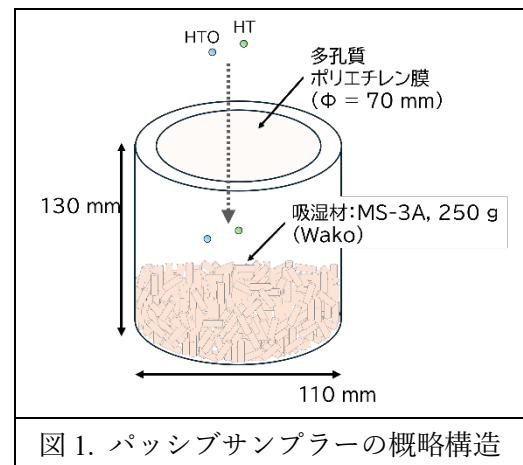
2-1. サンプラーの構成

本検討で対象としたパッシブサンプラーは、自由拡散により大気中の水蒸気を吸湿材に捕集する方式であり、外容器、吸湿材、および多孔質ポリエチレン膜から構成される(図1)。吸湿材に捕集された水分は加熱により回収され、吸湿材は再利用可能であるが、触媒は高温で疎水性が失われるため、両者を個別に取り出せる構造とする必要がある。このため、触媒の導入にあたり以下の設計要件を設定した。

- ・ 吸湿材と触媒がそれぞれ個別に取り出せること
- ・ 触媒で酸化された HTO が効率的に吸湿材へ移行する構造であること
- ・ 既存観測とのデータ連続性確保のため、外容器の形状を変更しないこと
- ・ 屋外環境下で長期間使用しても劣化や変形の恐れが少ない素材を使用すること

2-2. 触媒容器の試作

前節で示した設計要件を満たす触媒配置方法として、構造の異なる2種類の触媒容器を試作し、構造



安定性および吸湿材との干渉の観点から比較を行った。

まず、簡易な構造として、不織布製の小袋に触媒を入れて、入口を折り返しホチキスで固定したもの（以下、簡易型、図 2(a)）を作製した。本構造は作製が容易である一方、設置状態によって触媒の偏在が生じやすく、また折り目部に吸湿材が入り込むことで触媒と吸湿材の分離性が損なわれる可能性がある。

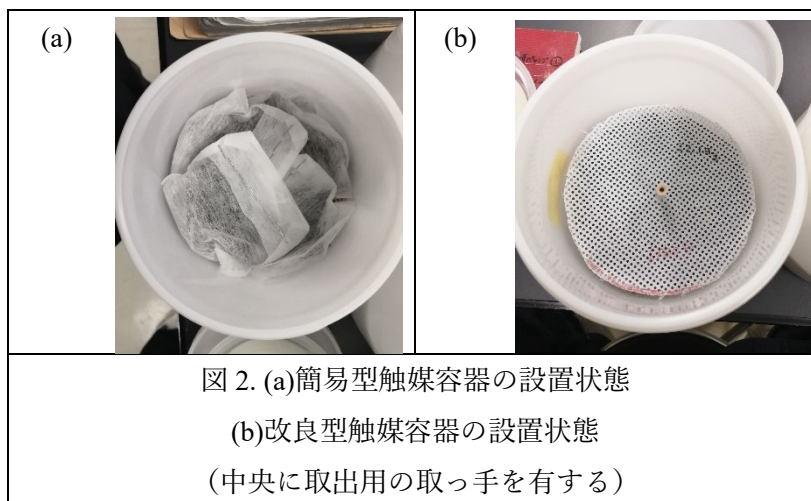


図 2. (a)簡易型触媒容器の設置状態
(b)改良型触媒容器の設置状態
(中央に取出用の取っ手を有する)

次に、触媒の均一配置および吸湿材との分離性の向上を目的として、PTFE パンチングシートを用いた円柱構造（以下、改良型、図 2(b)）を作製した。本構造では、テグスにより容器内径に合わせた支持構造とし、触媒層の位置を安定的に保持できるよう設計した。また、取り出し性を考慮して蓋を設けるとともに、有効吸湿面積の低下を防ぐことを目的として、吸湿剤との間に隙間ができるよう短い脚部を付与した。

比較にあたっては、吸湿材との分離性、触媒の配置安定性、および取り扱い性を主な評価項目とした。

3. 結果・検討

試作した 2 種類の触媒容器について、触媒容器の導入が吸湿性能に与える影響を評価するため、捕集水量および HT 濃度の比較を行った。その結果、捕集水量は簡易型および改良型で大きな差は認められず、いずれも同程度であった。また、HT 濃度についても両構造で顕著な差は見られず、同程度の転換挙動を示した。

一方で、作業性および触媒配置の安定性の観点では、改良型構造が優れていた。具体的には、吸湿材との干渉が少なく、設置方法による触媒の偏在が抑制されることで、吸湿材と触媒の位置関係が構造的に固定されることが確認された。

以上より、触媒容器構造は転換性能に大きな影響を与えない一方で、作業性および触媒配置の安定性の観点から構造設計が重要であることが示された。本結果に基づき、改良型構造を採用し、実環境観測に適用している。

[1] Y. Iwai, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2011

1.4.4. 超伝導マグネット研究棟における試験設備の運用・保守および安全管理

(超伝導マグネット研究棟運用班)

計測分析技術課 馬場智澄

1. はじめに

超伝導マグネット研究棟では、高温超伝導導体開発をはじめとする最先端の大学及び民間企業との共同研究を支援するため、多様な極低温・強磁場試験装置を運用している。特に大口径高磁場導体試験装置等は、1 サイクルに数ヶ月を要する大規模試験となるため、運用の均一化、効率化、および経年劣化に伴う安全性の担保が喫緊の課題となっている。本報告では、現在の設備概要と、安全・保守に向けた取り組み、および最新の不具合対応について詳述する。

2. 主要設備の技術仕様

当施設が保有する主要試験装置の仕様を以下の表 1 に示す。超伝導マグネット研究棟主実験室内の設備を図 1 に示す

表 1. 試験設備一覧および性能仕様

設備名称	主要仕様・能力	特徴
温度可変低温設備	冷凍能力: 600W (4.5K) 供給能力: 1.0kW (20-30K) / 1.5kW (40-50K) 液化能力: 250L/h SHe 供給能力: 350W、50g/s	広範な温度領域での試験に対応
大口径高磁場導体試験装置	ボア径: 700mm / *最大磁場: 13T (4.2K)	温度可変機能を備えた大型設備 コイル形状の評価可能
大型超伝導導体試験装置	**最大磁場: 9T (4.2K)	温度可変、長尺導体評価が可能
中型導体試験装置	**最大磁場: 8T (4.2K)	液体ヘリウム温度での汎用試験
小型導体試験装置	*最大磁場: 9T (4.2K)	液体ヘリウム温度での迅速評価

*ソレノイドコイルを使用、**スプリットコイルを使用

3. 安全管理と標準作業手順の再整備

特に大口径高磁場導体試験装置と大型導体試験装置は、1 回の試験サイクル（サンプル取付・冷却・試験・昇温・サンプル回収）に 2~3 ヶ月を要し、多額の費用が発生する。運用の均一化と老朽化対策として、以下のマニュアル再整備を実施している。

3-1. 作業要件と教育

- 安全講習: 全利用者に所定の安全講習受講を義務付け。
- 有資格作業: サンプル交換、電流リードエクステンション・天板取付取外しにはクレーン操作、玉掛作業は、法令に基づく免許保有者および講習修了者のみに制限する。

3-2. 作業手順の重要留意事項（例：大口径装置）

- 重量物の取扱い: サンプル電力供給用ブスバー（約 8kg/枚）の着脱。最大 8 枚（+極一極同数）
 - トランスファーチューブ（全長約 6m）2 本の着脱には専用ジグを使用し、クレーンを用いて指定位置に固定する。図 2
- 干渉防止: 天板吊り上げ: サンプルをセットした天板の脱着時には、スリングの配置と周辺機器との干渉を厳密に確認する。図 3
- 圧力隔壁の保護: 真空排気シーケンス: マグネット層、外層等の真空引きの順番を誤ると層と層の間に圧力差を生じ機器を破損する恐れがある。このため排気の順番を厳密に規定する。フローチャートに基づく相互確認を必須とする。
- 超高真空・極低温環境の信頼性担保: (リークチェックとヘリウム真空置換): 各系統のリークチェックは規定圧力に到達した後に実施し、漏洩箇所の有無を確認する。作業完了後は真空度等の測定結果を確認し、記録を残す。ヘリウム真空置換を適切に実施し、極低温環境における不純物等の混入を抑制し、機器性の能低下やトラブルを防止する。

4. 計画的維持管理（予防保全）実績

今年度は、装置担当者が確保した予算に基づき以下の予防保全を実施した。

4-1. 共通インフラの整備

- ヘリウム循環圧縮機: スライディングシールの交換を実施。
- 純水冷却装置: 屋外設置装置のイオン交換樹脂を交換。予算の都合により、交換周期が 3 年 8 ヶ月（標準 3 年）に延伸した。
劣化診断: 樹脂の状態確認（褐色～暗褐色への変色）により能力を限界まで活用したことを確認。
図 4

水質制御: 直接補水による負荷を考慮し、前処理運転を実施した。電気伝導率は運用基準 ($1 \mu\text{S/cm}$ 以下) を達成したことから、定常運転へ移行した。

5. 不具合事象と応急処置

大型導体試験装置において発生した真空リークに対し、以下の技術的処置を講じた。図 5

- **事象:** 10kA 電流リード部の真空リーク。過電流による絶縁部の熱損傷の懸念。
- **対応:** ヘリウムリーク試験により漏洩箇所（2 箇所）を特定。
- **処置:** 常温硬化型エポキシ系接着剤（ニトフィックス SK-230）による封孔処理を実施。
- **結果:** 再試験においてリーク率が許容値以下であることを確認し、復旧を完了。

6. 結論

本研究棟の設備は、高い冷凍能力と強磁場を両立する極めて重要な研究基盤である。老朽化に伴う仕様の変化（機器の「癖」）に対し、数値を伴う手順書の再整備と、計画的な部品交換と、今回のような迅速な不具合修復を組み合わせることで、安全かつ確実な共同研究環境を維持していく。

今後の課題: 液体窒素の所内利用状況の最適化。また、予算確保のタイミングに合わせた柔軟なメンテナンス計画の策定を行う。

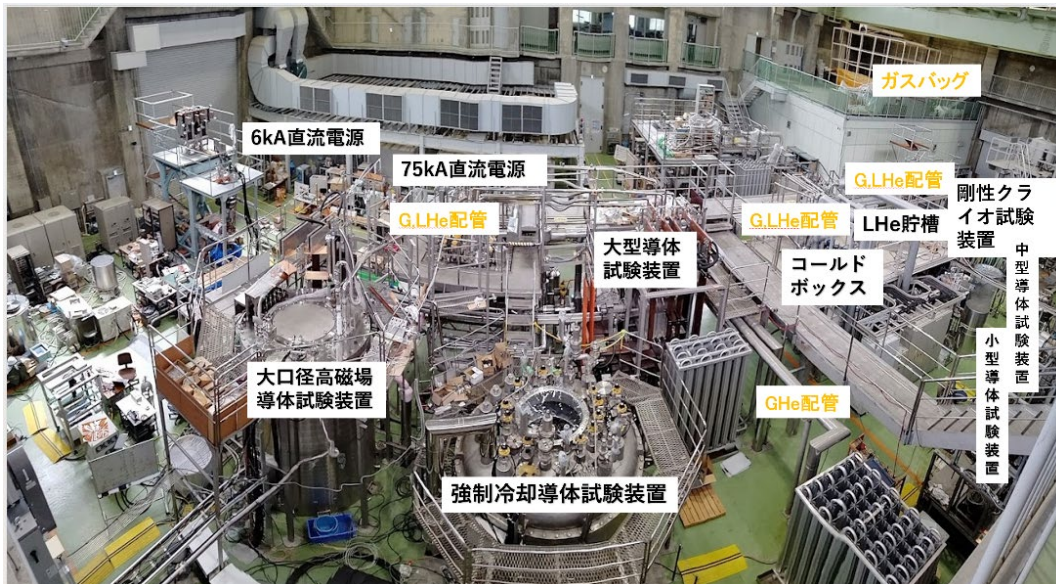


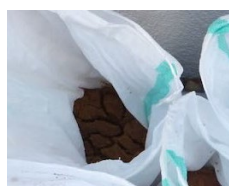
図 1. 超伝導マグネット研究棟主実験室内の設備



図 2. トランスファーチューブの移動



図 3. 天板サンプルの脱着



使用済みイオン交換樹脂 新イオン交換樹脂

図 4. イオン交換樹脂の状態

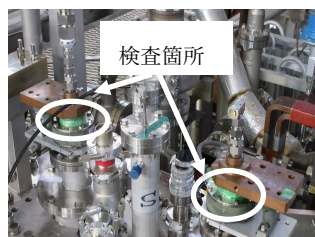


図 5. 真空リーク補修

1.5. 制御情報技術課

1.5.1. LHD 超伝導コイル励磁用電源運転・保守について

(LHD)

制御情報技術課 鷹見重幸

1. はじめに

技術部では、LHD 超伝導コイル励磁用電源（以下、コイル電源という）の装置立ち上げ当初から関わり、保守管理、データ収集システムの開発、ならびに通電電流値設定支援プログラムの開発・改良等の業務に従事してきた。また、2023 年度以降は、運転および日常点検を担っていた運転員の削減に伴い、これらの業務についても引き継ぐこととなった。本技術報告では、LHD 最後の実験期間となった 2025 年度におけるコイル電源の運転・保守について、これまでの実績を踏まえて報告する。

2. コイル電源の概要

LHD 超伝導コイルを励磁するためのコイル電源は、12 相サイリスタ方式による低電圧・大電流電源であり、クエンチ保護回路を有することを特徴としている。本コイル電源は、各 LHD 超伝導コイルに独立した電流を供給可能とするための 6 台の電源装置と、これらを同期させて協調制御する制御計算機システムから構成されている。LHD 実験の進展に伴い、2008 年には一部電源の出力電圧を増強するためのパルス電源が追加された。さらに、当初は手作業による極性切替板の付け替えにより実施していた極性切替については、2010 年に遠隔操作式極性切替器を導入し、自動化が図られた。このように、コイル電源は継続的に更新および改良が進められてきた。また、電源設置から約 15 年が経過した頃からは、機器の老朽化対策として、高圧受電盤、シーケンサ、UPS、制御機器、制御計算機システム等の更新を随時実施してきた。

3. 運転支援

先述のとおり、2023 年度以降のコイル電源の運転業務は、技術部職員が全面的に担うこととなった。しかし、コイル電源担当者 2 名のみでは運転シフトの編成が困難であったため、他装置の担当者の支援を得て運転を実施する体制とした。コイル電源の運転には、超伝導コイルのクエンチ（超伝導状態の破壊）を防ぐため、厳密な手順と細かなルールの遵守が求められる。ひとたびクエンチが発生して保護回路が作動すると、LHD 実験への影響は甚大であり、特に超伝導コイルを冷却する液体ヘリウムが蒸発した場合には、復旧に数日から 1 週間程度を要する。このため、毎週月曜日のメンテナンス日にコイル電源運転に関する打合せを実施し、その週の通電手順の確認を行うとともに、担当者間での情報共有を徹底した。また、通電電流値の設定時にはダブルチェック体制を導入し、ヒューマンエラーの防止を図った。これらの取り組みにより、2023 年から 2025 年までの延べ約 850 時間に及ぶコイル通電において、オペレーションミスなく安定したコイル電源運転を達成した。なお第 1～26 実験サイクルまでの 28 年間の総通電時間は 14145 時間であった。

4. 不具合

コイル電源においてこれまでに発生した不具合の分類を図 1 に示す。運転初期には、制御計算機シス

テムに起因する不具合が大部分を占めていた。中でも実験への影響が大きかったのは、複数の制御計算機間でデータを瞬時に共有するための通信機器であるリフレクティブメモリの不具合である。本不具合が発生すると、制御が正常に行えなくなるとともに外部からの操作も受け付けなくなり、急速減磁を実施した後、制御計算機システムをリセットする必要があった。当該不具合の原因は通信機器内部のソフトウェアバグであったが、不定期に発生する事象であったため原因特定に時間を要し、第3～第7実験サイクルまで継続した。コイル電源設置から約15年以上が経過した第17実験サイクル以降は、老朽化対策として機器更新を進めた。第19実験サイクル開始前には、制御計算機システムを従来のVMEからCompactPCIへ更新している。この更新に伴い、初期不良およびソフトウェアバグの増加が一時的に見られた。LHD実験最終年度である2025年度の第26実験サイクルにおいては、不具合は4件発生した。そのうち1件は制御機器内部のDAコンバータ用ICチップの故障によるものであり、基板上のICチップ交換により復旧したものの、実験への影響は約3.5日間に及んだ。

全体の不具合発生件数は約100件であり、そのうち約50件が実験中に発生した。年次点検等により不具合の約半数を未然に低減するとともに、段階的に実施してきた機器更新の効果により、不具合発生件数は全体として抑制されてきたと考えられる。

5. まとめ

LHD超伝導コイル励磁用電源の運転・保守について、装置立ち上げ当初からの経緯を踏まえ、その運用体制の変遷、不具合の発生傾向について整理した。

運転業務については、2023年度以降、技術部職員が主体となる体制へ移行し、他装置担当者の支援も得ながら運用を継続してきた。厳格な運転手順の遵守に加え、定期的な打合せによる情報共有やダブルチェック体制により、ヒューマンエラーの防止を図り安定した運転を達成した。

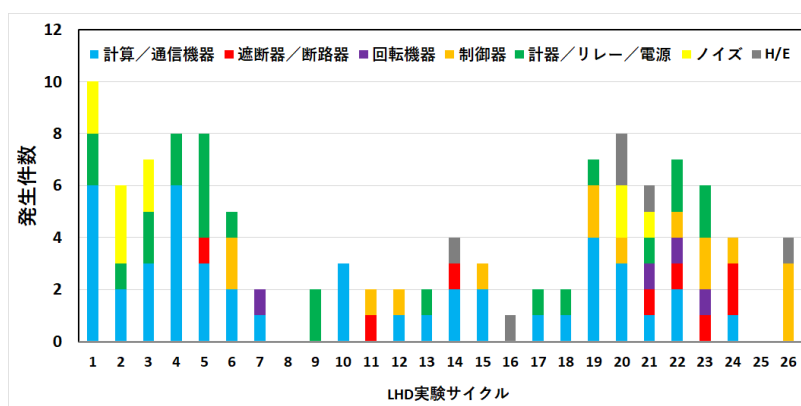


図1. 不具合履歴

1.5.2. サーマルカメラを用いたカレントリードヒータの断線および過熱検知システムの開発

(超伝導マグネット研究棟運用班)

制御情報技術課 大場恒揮

1. 概要

極低温システムの長期間安定稼働には、予期せぬ故障や微細な異常の早期発見が不可欠である。本開発では、広範囲な設備への適用と継続的な運用を目指し、低コストかつ省電力な IoT 用ボードコンピュータを活用した故障検知システムの開発を行っている。本システムは、対象機器である超伝導バスラインのカレントリードにおけるヒータの断線や異常過熱を監視対象とする。赤外線サーマルカメラを用いた非接触かつ空間的な温度分布監視に基づき、検知アルゴリズムの実装及び運用ノウハウの蓄積を目的としている。

2. システム構成

本システムは、測定対象の熱画像データをリアルタイムで取得・処理し、遠隔地の監視用 PC へデータを転送・表示する多段構成を採用した。

- ・撮像・計測部 (ESP32) : 32x24 ピクセルの赤外線サーマルカメラより温度データを取得し、初期処理を行う。

- ・データ転送部 (Raspberry Pi) : 計測場所と監視場所が離れているため、ネットワーク中継器としてデータを集約・転送を行う。

- ・解析・表示部 (Windows PC) : Python プログラムによりカラーマップの生成、画像解析、及び異常判定を行う。

3. 異常検知ロジック

本システムの特徴は、単一の温度変化ではなく、カラーマップ化された特定の「色領域」の滞留時間を監視する点にある。

3-1. ROI (Region of Interest) の設定

計算リソースの最適化及び背景ノイズの除去を目的として、監視画面内に ROI (関心領域) を設定した。これにより検知が必要なカレントリード部のみを抽出して解析し、処理パフォーマンスの向上を図っている。

3-2. 判定基準の設定

カラーマップのスケールに対し、以下の 2 つの閾値を定義した。

1. 上限色領域 (過熱判定) : 50°C 以上の温度に相当する色領域。
2. 下限色領域 (断線判定) : 20°C 以下の温度に相当する色領域。

3-3. 時間軸によるフィルタリングと異常処理

瞬時的なノイズや環境変化による誤検知を排除するため、時間的な許容誤差処理を実装した。上下限の色領域が 400 秒間継続して検出された場合、システムは「異常」と判断する。図 1, 2 にそれぞれ上下限の継続検知時の表示画面例を示す。異常検知時には、監視画面上の該当場所に赤色のマーカー (赤丸) を表示し、累積継続回数を重畳表示することでオペレータへの視覚的な警告を行う。

4. まとめ（成果）

本システムの導入により、カレントリードにおけるヒータの断線や異常過熱を非接触かつ視覚的に早期発見できる手法を確立した。また、ESP32、Raspberry Pi、Pythonといった異なるプラットフォームを組み合わせた IoT システムの構築及び実運用に耐えうる検知アルゴリズムの最適化に関する有用な知見とノウハウを蓄積することが出来た。

5. 謝辞

本システム開発にご協力を頂いた尾花哲浩准教授に感謝申し上げます。

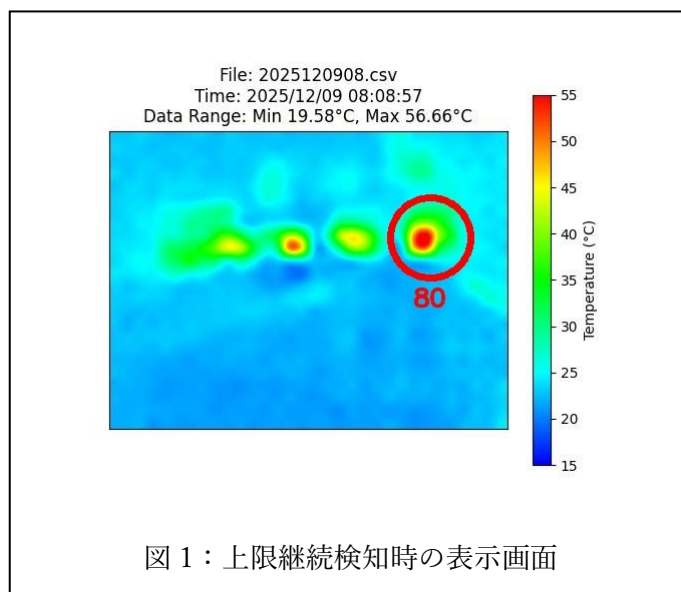


図 1：上限継続検知時の表示画面

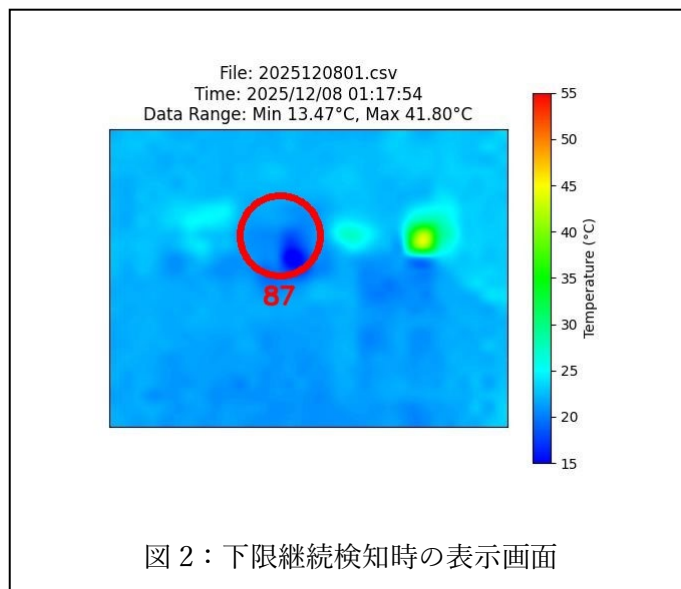


図 2：下限継続検知時の表示画面

1.5.3. LHD 低温制御システムの長期運転実績と運転保守実績

(LHD)

制御情報技術課 大場恒揮

1. はじめに

核融合科学研究所（NIFS）の大型ヘリカル装置（LHD）は、プラズマ閉じ込め磁場を発生させる超伝導システムであり、超伝導コイルを含む被冷却体の冷却重量は約 820 トンに及ぶ。これらを極低温に冷却・維持する LHD 低温制御システムは、1998 年の運用開始以来、実験の安全性と継続性を支える最重要インフラとして稼働してきた。

本報告では、28 年間にわたる長期運転実績に基づき、制御システムの技術的変遷、保守管理、および高い信頼性を維持するための技術的対策について報告する。

2. LHD 低温システムの概要と運用・保守実績

2.1 LHD 低温システムと LHD 低温制御システム規模

LHD 低温システムは、ヘリカルコイル（浸漬冷却）、ポロイダルコイル（超臨界圧ヘリウム強制冷却）、超伝導バスライン（二相流強制冷却）という、冷却方式の異なる 3 系統の負荷に 1 台の大型ヘリウム液化冷凍機からヘリウムを供給して冷却・加温を行う複雑なプロセスを有する。

LHD 低温システムのセンサーやバルブ個数は以下の通りである。

- ・ヘリウム液化冷凍機：温度計（61 個）圧力計（63 個）液面計（5 個）コントロールバルブ・ヒータ（70 個）ON/OFF バルブ（66 個）等
- ・ヘリカルコイル系統：温度計（200 個）圧力計（47 個）液面計（12 個）コントロールバルブ・ヒータ（34 個）ON/OFF バルブ（43 個）等
- ・ポロイダルコイル系統：温度計（125 個）圧力計（35 個）液面計（1 個）コントロールバルブ・ヒータ（32 個）ON/OFF バルブ（6 個）等
- ・超伝導バスライン系統：温度計（182 個）圧力計（60 個）液面計（38 個）コントロールバルブ・ヒータ（58 個）ON/OFF バルブ（19 個）等

それらを制御する LHD 低温制御システムは、アナログ入出力約 1,300 点、デジタル入出力約 1,000 点に及び、毎秒更新されるリアルタイム制御の下で、バルブやヒータ制御・温度や流量計算を含むフィードバックプログラムが約 560 個、状態移行や非常時動作を含むシーケンスプログラムが約 490 個動作している。

2.2 運転サイクルの詳細

1 サイクル（約半年～8 ヶ月）は、以下の 4 フェーズで構成される。

精製運転（2 週間）：系統内の不純物除去。

冷却運転（4 週間）：常温から 4K 近傍までの精密な冷却温度差制御。

定常運転（3～6 カ月）：プラズマ実験期間中の極低温状態維持。

加温運転（3 週間）：メンテナンスに向けた精密な昇温温度差制御。

2.3 制御システムの稼働統計と信頼性

1998 年から 28 年間（計 26 サイクル）におよぶ運転サイクル期間中の運用実績は以下の通りである。

累積運転時間: 114,216 時間 (VME 制御システム:70,608 時間、CPCI 制御システム:43,608 時間)

システム起因の累積停止時間: 95.6 時間 (VME 制御システム:95.6 時間、CPCI 制御システム:0 時間)

停止時間率約: 0.08%

この数値は、本システムが長期にわたり極めて高い信頼性をもって運用されてきたことを示している。

3. 制御システムの技術的変遷

長期運用におけるハードウェアの老朽化と技術革新に対応するため、システムの最適化を継続的に実施してきた。

3.1 VME 制御システム (第一世代: 1 サイクル (1997 年度) ~16 サイクル (2012 年度))

初期システムは、当時広く採用されていた VME バスベースのコントローラを負荷系統ごとに冗長化した 11 台のコントローラによる分散制御を採用し、高速通信ボード (リフレクティブメモリ) を介して全コントローラ間でリアルタイムデータを共有する構成を構築した。

保守の課題: 共有メモリ (リフレクティブメモリ) を介した同期構造が複雑であり、海外製専用ボードの生産終了に伴う保守部品の確保と迅速な技術サポートがないことが長期運用の障壁となった。

3.2 CPCI 制御システム (第二世代: 16 サイクル (2012 年度) ~26 サイクル (2025 年度))

システムの「保守性と迅速な技術サポート」による信頼性向上を目指し、16 サイクル (2012 年度) 加温運転中に国産のコンパクト PCI (CPCI) バスベースのコントローラへ刷新した。(図 1)

- ・制御の集約化: CPU 演算性能の飛躍的向上により、分散していた 11 台の制御機能を 1 つのメインコントローラに集約。これにより、トラブルの主因となりやすかった共有メモリを廃止した。

- ・フィールドネットワークの刷新: EtherNet/IP を採用したりリモート I/O 方式へ移行。配線の簡素化とともにノイズ耐性を強化した。

システム移行は冗長化システムの特徴を利用して運転側 VME 待機側 CPCI の構成として、精製・冷却・定常運転時にプログラムや操作端末等の動作比較確認後、加温運転時に 8 時間でシステム切替その後バルブ等最終動作確認を行い VME システム停止から約 24 時間後には CPCI システムによる加温運転を継続した。

4. 長期安定稼働を実現する保守管理

LHD 低温制御システムは 28 年間 (計 26 サイクル) で累積 311 件のトラブル事象が発生し、VME 時代は 11 件の制御停止に至る重大トラブルも発生したが、システムの最適化を継続的に実施して最終的な CPCI システムに移行後重大トラブルは発生していない。(図 2)

4-1. 信頼性向上への具体的アプローチ

完全冗長化: CPU、電源、通信、リモート I/O の全レイヤーを 2 重化し、単一障害を徹底的に排除。

ハードウェアの国産化: 迅速な技術サポートと部品調達を優先し、基幹部品を国産品へ移行。

運転の自動化: 2009 年に開発・導入した「自動運転プログラム」により、人的ミスを排除しつつ最適な温度制御を実現。

遠隔監視体制: 1999 年から Web 監視および自動通報システムの導入により、24 時間体制での遠隔状況判断を可能とした。

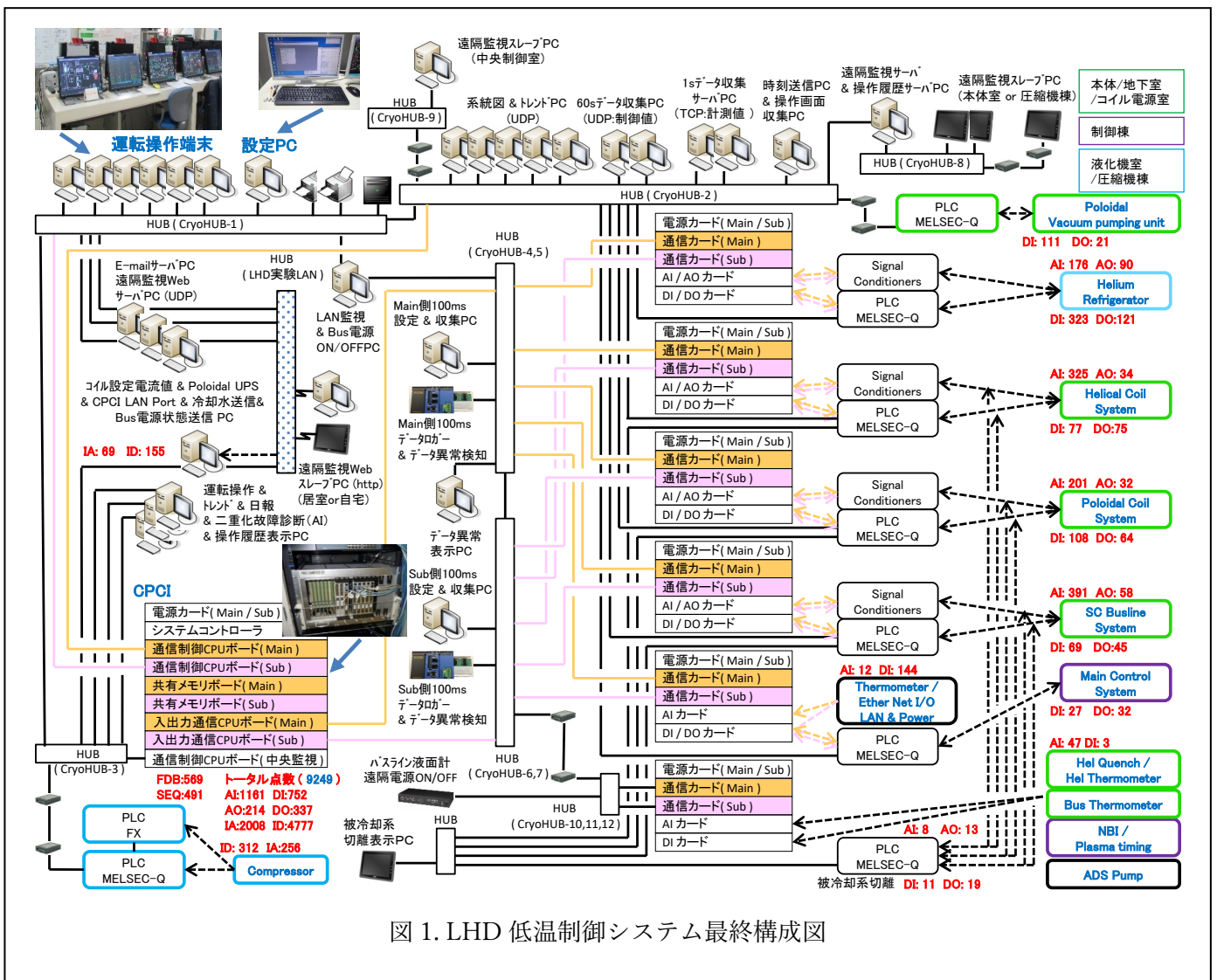
5. まとめ

LHD 低温制御システムは、28年という長期にわたり、核融合実験の基盤を支えてきた。この安定稼働の背景には、VMEやCPCIに象徴される「単一障害の徹底排除」、国産化による「保守性の向上」、遠隔監視による「遠隔状況判断」、そして「運転の自動化」という継続的な技術改善がある。

停止時間率 0.08%という実績は、極低温プラントの制御設計における一つの指標であり、今後の重要な技術的知見となるものである。

6. 謝辞

本システムの構築にあたり、初期設計から長年にわたる運用・保守に至るまで、多大なるご尽力をいただいた三戸利行教授・前川龍司教授および関係各社の諸氏に深く感謝の意を表す。また、24時間体制で現場の安定稼働を支え続けてきた方々の献身的な努力に対し、ここに厚く御礼申し上げる。



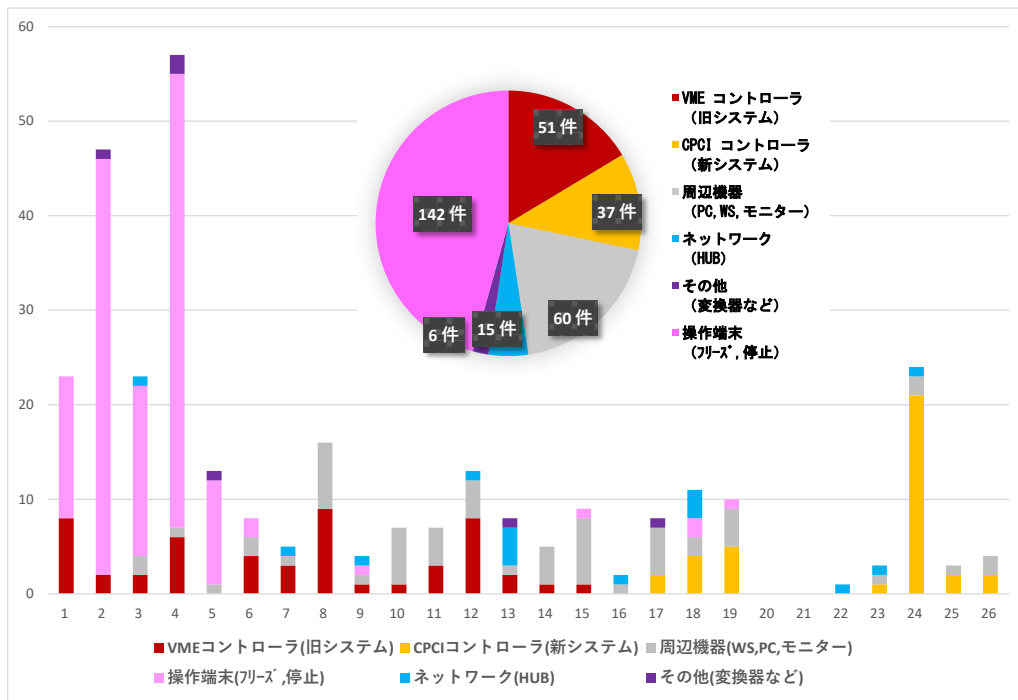


図 2. LHD 低温制御システム累積トラブル件数

1.5.4. 機械学習によるカメラ映像のリアルタイム異常検出

(技)

制御情報技術課 前野博也

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) では、装置本体の周りに 16 個のカメラを設置してプラズマ実験中に監視を行う。そのうちの 1 台は、加熱装置の 1 つである電子サイクロロン共鳴加熱装置 (ECH) の動作を監視するものである。この装置の動作によっては LHD 内部の壁面に損傷を与える可能性があるが、その際にはカメラの映像中に特徴的な発光が現れる。実験中は ECH の担当者が映像を監視するが、全ての映像を常時監視するのは現実的ではない。そこで、その補助として画像認識 AI を用いて異常検出を行い、担当者に警告を行う仕組みを構築した。

2. 使用機材および環境

映像信号は解像度 640x480、30fps の HDMI 信号である。キャプチャデバイスは一般的な HDMI-USB2.0 変換であるサンワサプライの USB-CVH DUVC2 を用いる。プログラムを動かす PC は Windows 11 で、GPU として GeForce RTX 4070 Super を備える。機械学習に標準的に使用される Python 環境として、Anaconda を利用することとした。

3. 学習モデルの作成

異常検出に機械学習を利用するため、リアルタイム性に優れた物体検出アルゴリズムである YOLO (Ultralytics 社提供) を利用することにした。

同社からは、人や車といった一般的な物体を検出できる学習済みモデルが配布されている。ただし、今回の検出対象である発光は検出できない。また、発光にも様々なパターンがある。このため転移学習と呼ばれる手法によって、本目的のために特化した専用モデルを作成する必要がある。以下にその手順を述べる。

初めに、学習させるデータを準備する。今回は、過去実験での同一カメラの映像から、異常と判定される画像を学習データとした。プロトタイプであるため、データ数は約 100 枚とした。これらの画像のうちの 1 枚を図 1 に示す。



図 1. 検出対象となる画像 (四角は検出部分)

次に、それらの画像に対しアノテーション（位置指定）を行う。画像内の検出対象を矩形で囲み、その座標情報を YOLO フォーマットのテキストファイルとして保存した。

こうして準備したデータセットを、学習用と検証用に 7:3 の割合で分割した。Ultralytics 社が配布している事前学習モデル (yolov8n.pt) を使用し、yolo detect train コマンドによって転移学習を行った。

4. 処理の流れ

モデルの準備後、プログラムを作成した。実験は 3 分または 3 分 30 秒のシーケンスが繰り返されるが、そのうち最初の 2 分 30 秒は準備時間であり、2 分 30 秒後の放電開始タイミングを T=0 と呼ぶ。T=0 からの 10 秒または 40 秒が放電時間であり、それに合わせて検出を行う。検出開始・終了のトリガーは TCP/IP で取得する。

トリガーを受信すると、映像に対してリアルタイム推論を行う。ここで、30fps において 1~2 フレームで消える発光は検出対象に当てはまらないことがわかっているため、同様の検知が 5 回連続した場合のみを検出とした。このために連続するフレーム間で IoU (Intersection over Union) という指標を計算し、指定した閾値を超え続けることを条件とした。

検出と判断したらその画像を保存し、1 秒待機して推論に戻る。それを繰り返し、終了のトリガーを受け取るかタイムアウトしたら、検出した画像を全て表示して待機状態に戻り、次の開始トリガーを待つ。

5. ユーザーインターフェース

検出に対しては、信頼度と呼ばれる AI の判定の確信度を表す指標が付与される。これは 0 から 1 までの値を取り、大きいほど AI が判定に自信を持っていることを示す。プログラム中ではこれに対して閾値（信頼度閾値）を設定し、それを超えていれば検出とするが、その値は可変とするのが一般的である。今回の検出においても、この閾値がどの程度であれば実際に検出したい発光が過不足なく判定されるか不明瞭であったため、プログラム実行時に UI を表示し、閾値を簡易に変更して値を即座に反映できるようにした。この UI のスクリーンショットを図 2 に示す。

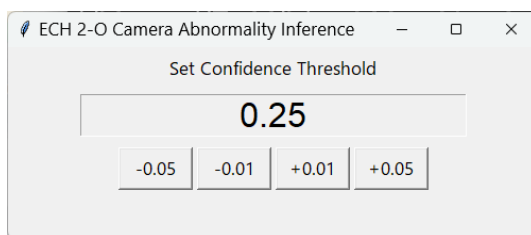


図 2. ユーザーインターフェース

6. 運用結果

LHD の第 26 サイクル実験において、実際に運用を行った。保存された画像を確認すると、想定通りの検出がされていることが確認できた。ただし、誤検出も多くあった。

ECH 担当者からは「光った場所とタイミングが表示されるのは良かった」という声があった一方、「プラズマの可視光で反応している場合が多かった」という意見もあった。

検出結果の一例を図3に示す。上の画像は複数箇所を正しく検出している例、下の画像は誤検出の例である。検出位置を示す四角形（バウンディングボックス）に添えられた数字は信頼度、右下の数字は実験のシーケンス番号を示す。下の画像の誤検出がプラズマの可視光に反応しているものである。今回は対処出来なかったが、画像全体の輝度が高いものを除外するようにすれば、このような画像を検出しないようにすることは可能だと考えられる。

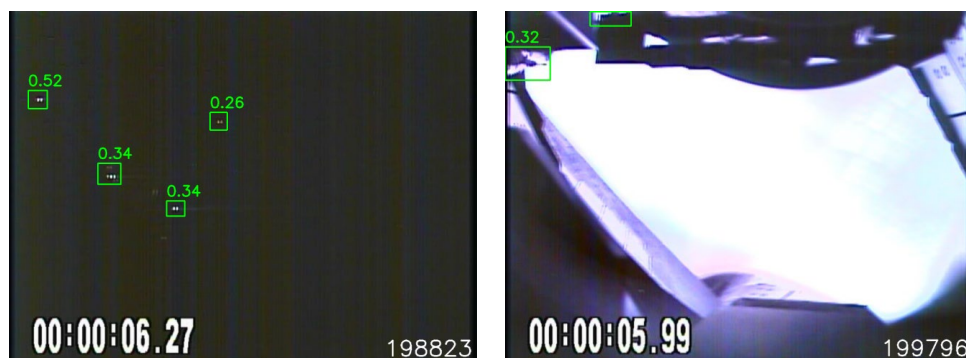


図3. 検出結果

7. まとめ

画像認識 AI を用いて監視カメラ映像の異常な発光を検出するプログラムを開発した。検出精度などに改善の余地はあるものの、概ね想定通りの検出結果が得られ、監視補助としての役割を果たすことができた。今後、同様の事例があれば今回の成果を応用することが十分可能であると考えられる。

1.5.5. 情報システム・セキュリティセンター 情報ネットワークグループの活動

(情報システム運用班)

制御情報技術課 井上知幸

1. 概要

情報ネットワークグループでは、研究活動の基盤となる研究所全体の情報ネットワーク環境を整備し運用している。技術部からは、常勤職員4名（来年度は1名減）、短時間契約職員2名が、技術部の情報システム運用班の一員として、情報ネットワークグループの業務を遂行している。2025年度の活動トピックスは以下の通りである。

2. システム更新

2-1. 検疫認証システムサーバ OS 更新

CentOS 7 を利用していた検疫認証システムのサーバ OS 更新を 2024 年度に検討したが、2024 年 6 月の OS サポート期限までにベンダーによる更新作業完了の見込みが立たなかったことと、必要な予算を確保できなかったことから、2025 年 6 月末までの 1 年間の OS 延長サポートを利用して延命していたが、予算の目途がついたことから、2025 年早々に作業に着手し、2025 年 6 月に AlmaLinux 9 に更新した。

2-2. ゲストネットワーク回線切り替え

これまで岐阜情報スーパーハイウェイ経由で利用していたゲストネットワークの回線品質が、トラフィック増加などの要因により長時間輻輳する状況が発生していることが判明し、近い将来改善が見込めないため、2025 年 7 月の契約終了に合わせてプロバイダ、回線の両方を切り替えることとなった。

検討の結果、回線はフレッツ光ネクスト（2025 年 7 月時点で土岐市下石町は光クロス（10G）非対応）、プロバイダはアルテリアネットワークス（クロスパス）を選択した。

2-3. キャンパス無線 LAN 導入

2024 年度に引き続き、無線 LAN アクセスポイントが整備されていない建屋に導入を進めることとなった。複数年度予算により、2026 年 3 月に研究 2 期棟、シミュレーション科学研究棟、開発実験棟の整備を完了し、2026 年度中に研究員宿泊施設（ヘリコンクラブ）、制御棟、総合工学実験棟、計測実験棟、超伝導マグネット研究棟の整備を完了する予定である。

2-4. 仮想サーバシステム更新

DNS サーバや DHCP サーバ等、ネットワーク運用に欠かせないサーバ群が稼働している仮想サーバシステムが保守期限を迎えたため、2026 年 3 月に更新作業を実施した。旧システムは VMware vSphere を導入していたが、Broadcom による VMware 社買収によりライセンス体系が大幅に変更された影響で価格が高騰したため、Nutanix AVH に乗り換えることを決断した。

3. 脆弱性対応内容

3-1. Ivanti Connect Secure：リモートアクセス、LHD アクセスゲートウェイ

2025年4月：CVE-2025-22457（認証なしにリモートから任意のコードを実行可能な脆弱性）
2025年2月に実施したファームウェアアップデートにより対応済み

3-2. PaloAlto（PanOS）

2025年4月：CVE-2025-0128（深刻な DoS 脆弱性）
対策バージョンへのバージョンアップ作業を実施。10.1.14-h6 → 10.1.14-h11

3-3. Fortigate（FortiOS）：ゲストネットワーク、六ヶ所研究センター

2025年12月：CVE-2025-59718, CVE-2025-59719（認証回避の深刻な脆弱性）
設定により回避した上で、対策バージョンへのバージョンアップ作業を実施 7.4.4 → 7.4.11

4. ユーザー問い合わせ対応

2025年度の問い合わせ対応は、前年度と比較して若干減少（366件→346件）した。11月と12月に標的型攻撃メールの訓練が実施されたため、問い合わせ件数が若干増加した。また、リモートアクセスのWindowsパッチ不具合（updateすると接続不可となる）が複数回発生したため、年度を通して問い合わせ件数が増加した。登録作業については、前年度とほぼ同数（609件→610件）であった。

※問い合わせ対応：メール、検疫認証システム、ウィルス関連、無線LAN、LHD-LAN、その他

※各種登録作業：DNS、SSL-VPN、メール、メーリングリスト、FW、UPKI証明書発行

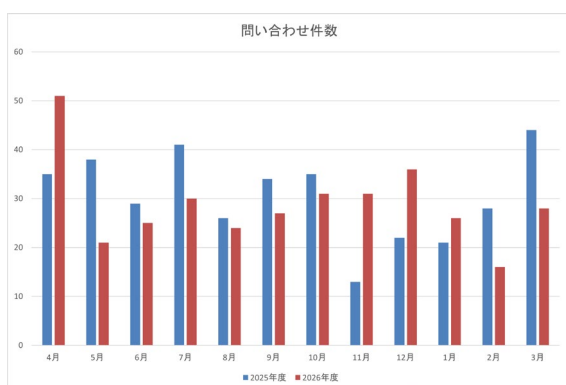


図1. 問い合わせ件数

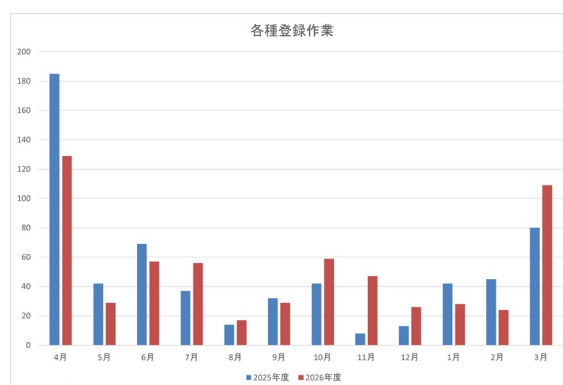


図2. 各種登録作業

1.5.6. 無線アクセスポイント(eduroam)の整備について

(情報システム運用班)
制御情報技術課 中村修

1. 目的

無線アクセスポイントは会議等を行う会議室を基本として、情報システム・セキュリティセンター長が認めた場所へ申請ベースで設置してきた。最近のノート PC には有線 LAN のポートが未実装で無線のポートしか実装されていないものも多く、ユーザからは居室でも eduroam を使えるようにしてもらえないかとの相談が多数寄せられていた。そのため、保守期限を迎えた機器を更新して新システムを導入する際、建物の大部分での無線接続が可能となるように無線アクセスポイントの設置場所を決め、ユーザの利便性を高めることを目的とした。

2. 概要

令和6年度に導入した、研究棟 I、管理・福利棟、図書館棟の3棟に続き、令和7年度は研究棟 II、開発実験棟、シミュレーション科学研究棟への導入を行った。5月に仕様策定委員会を立ち上げ6月には仕様を確定して公示したが、期間を要する政府調達であったため、技術審査を経て契約が完了し発注したのは10月であり、機器が揃って作業等を行うのは年明けの2月からとなった。

3. 作業内容

3-1. 入札対応

入札のため機種選定を行う事は出来なかったが、令和6年度に導入したクラウドサーバ HPE Aruba Networking Central からファームウェアアップデート等の管理が出来ることを仕様とすることで、同じ機種が導入されることを期待した。結果は期待通り前年度と同じ機種である Aruba の AP-615 を導入することができた。また、既存機器の設定変更は受注者において実施するか、現ネットワークシステムの構築業者に設定変更を依頼すること。との仕様も記載した。

3-2. 旧システムから新システムへの切替え

サービスが不安定となる時間をなるべく少なくなるように切り替えを行うこととした。各建屋の切替日までに UPS、PoE スイッチ、無線アクセスポイントの設置工事、及び LAN ケーブル配線工事を完了させ、切替日の当日は LAN ケーブルの接続替えと旧システムのシャットダウンのみを建屋毎に行っていた。この様に行う事で、無線の接続が不安定となる時間を最小限に抑えることができた。

4. 結果

昨年同様、旧システムから新システムへの切り替えは非常にスムーズに進めることができた。新システムへの切替え後、旧システムでは入らなかった無線の電波が居室でも入るようになり、非常に利便性があがったと喜びの声が多数寄せられている。また無線コントローラからの一元管理により、各無線アクセスポイントのトラフィックを一目で把握でき、PoE スイッチや無線アクセスポイントのファームウェアバージョンアップ作業も非常にやり易くなった事を実感できている。

1.5.7. 文献データベース API を活用した独自論文データベースの構築および管理システムの開発 (情報システム運用班)

制御情報技術課 野々村美貴

1. 目的

情報システム運用班では、複数の文献データベース（NAIS、Scopus、Web of Science、ORCID）の API を活用し、収集した論文情報を統合した独自の論文データベース「NIFS Research Activity Database (NRAD)」を構築した[1]。しかし、運用開始後は個別の修正依頼が急増し、システム担当者が直接データベースを更新するなど、手作業による負荷の増大が課題となっていた。そこで、運用担当者が直接、属性情報（査読の有無、著者区分、採択日、承認日、公開設定など）を更新できる Web システムを構築し、業務の効率化と迅速なデータ修正体制を整備した。

2. 管理システム構築

2-1. Web システム開発

本システムの構築には、PHP フレームワーク Laravel[2]を採用した。同フレームワークは、OAuth 認証を容易に実現できるパッケージ Socialite[3]や、安全かつ簡潔にデータベース操作を記述できるクエリビルダ[4]、柔軟なルーティング機能など、開発効率を向上させる機能が豊富に備わっており、本システムの構築に最適であると判断した。

2-2. ログイン認証

本システムでは、認証された利用者だけに編集権限を付与するセキュアな構成を実現するため、ログイン機能の実装が必須であった。当研究所では代表メールアドレスとして Gmail を利用していることから、利便性と安全性の両立を図るために、Socialite を用いた Google 認証によるシングルサインオン (SSO) を実装した。

2-3. 管理画面の構築

図 1 に示す論文一覧編集画面は、JavaScript ライブラリである jQuery のプラグイン tablesorter[5]を用いて構築し、ソートやフィルターによる絞り込み機能を実装した。さらに、一覧表上で直接データを編集可能とすることで、直感的かつ効率的な操作環境を実現した。

Refereed papers

1 - 10 / 317 (317) 10 1 Reset filters CSV file download

No.	Publication List	IID	AIN	Date	Declare Date	Source	Source ID	Article Type	Refereed	Title
	表示/非表示					Select Source		Select Type	Select Referee	
1	表示設定 Othersに移す 非表示	19757	42751	2025-12		Scopus		Paper	Refereed	
2	表示設定 Othersに移す 非表示	150	31534	2025-02		Scopus		Paper	Refereed	
3	表示設定 Othersに移す 非表示	105	31724	2025-05	2025-03-24	Scopus		Paper	Refereed	

図 1. 論文一覧編集画面

2-4. 個人 ID による論文情報収集の自動化

毎日実行している論文データベース API による自動収集は、当研究所の所属情報を抽出条件としていたため、研究者の過去の所属における業績を網羅できておらず、システム担当者が個別に論文データベースの個人 ID を指定し、文献データベースが提供する API を手作業で実行して不足分を取得していた。そこで、Web 上から個人 ID を更新予約リストに登録できる機能を構築し、毎日の収集時に個別 ID 毎の過去の業績を自動取得することを可能とした。図 2 に研究者別論文情報更新画面を示す。

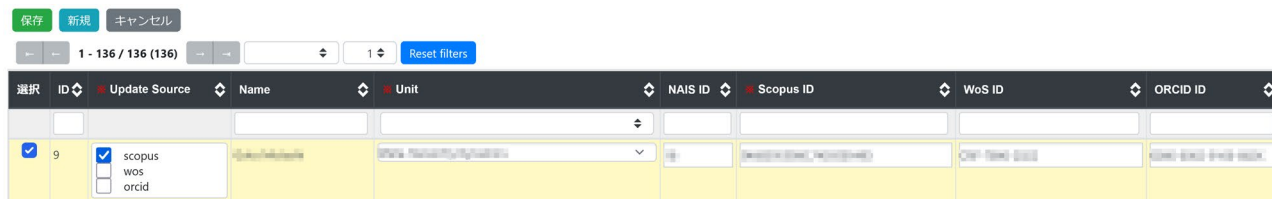


図 2. 研究者別論文情報更新画面

2-5. 外部連携用 API の開発

管理システムの導入によりデータが整理され、正確性が向上した。これを受け、研究者や研究所の業績紹介に活用することを目的として、外部連携用 API の開発に着手した。本 API は、特定の URL へのリクエストに対し、研究者個人または研究ユニットの論文情報を JSON 形式で出力する仕様である。また、管理画面には論文情報の公開可否を研究者単位で設定できる機能を実装し、第一著者および共著論文も含めるなど、柔軟なデータ提供を可能とした。

3. 結果

本システムの導入により、運用担当者が Web 上で容易に論文の属性情報を更新できる環境が整い、運用負荷の軽減と管理業務の大幅な効率化を実現した。さらに今後、外部連携用 API を通じて NRAD 以外のシステムとも連携し、研究所内外に対してより広く情報発信を展開していく予定である。

参考文献

- [1] 野々村美貴、2024 年度 技術職員報告書 p.48、“文献データベースの API を活用した独自の論文データベースの構築と研究成果の可視化”、https://etwww.nifs.ac.jp/report/2024_technical_staff_report_202507.pdf
- [2] <https://laravel.com/>
- [3] <https://laravel.com/docs/master/socialite>
- [4] <https://laravel-jp.toolboxforweb.xyz/docs/queries>
- [5] <https://mottie.github.io/tablesorter/docs/>

1.5.8. QRコードを用いた研究会受付システムの開発

(技)

制御情報技術課 野々村美貴

1. 目的

技術部では、2026年3月5日から6日にかけて「令和7年度 核融合科学研究所技術研究会」を開催した。本研究会では、受付の迅速化およびスタッフの負担軽減を目的として、QRコードを用いた受付システムを採用した。当研究所では研究会開催支援システムである Indico を運用しており、同システムを利用した QR コード受付を実施する予定であった。しかし、Indico による受付にはインターネット接続が必須である一方、会場の受付エリアはネットワーク圏外であった。このため、オフライン環境下でも動作する Excel VBA を用いて、独自の受付システムを構築した。

2. 受付システムの構築

2-1. 受付システムの検討

オフライン環境で稼働する受付システムを検討するにあたり、2025年に開催された「総合技術研究会 2025 筑波大学」の先行事例を参考とした。同研究会で導入されていた Excel を用いた QR コード受付システムは、保守性および確実性が高いと判断し、本研究会においても同手法を採用することとした。

2-2. QRコード付き参加証作成と発行

研究会の参加登録には Indico を使用しており、その登録情報を基に参加証を作成する必要があったため、Indico の標準機能を用いて QR コード付き参加証を作成した。図1に QR コード付き参加証を示す。参加者には Indico 上の個人専用ページにて事前に参加証を交付し、これを印刷して持参してもらうことで本人確認を行うとともに、受付における参加証発行を不要とした。

2-3. QRコードの読み取り

Indico で作成される参加証の QR コードは独自フォーマットで生成され、さらに暗号化されている。暗号化データについては、Indico におけるユーザー照合の処理[1]を利用して、Excel VBA によりデコード処理を実装した。これにより、個人を特定する情報の抽出が可能となった。

2-4. 受付システムの開発

Indico から抽出した参加者マスターデータと、QR コードリーダーで読み取ったデータを Excel VBA で照合する仕組みを構築した。照合の結果、一致した場合は受付用シートに氏名を自動登録し、不一致やデコードエラーが発生した場合には、原因に応じた警告を表示する機能を実装した。さらに、研究会内の情報交換会や施設見学会など、異なる受付業務にも柔軟に転用できるよう、汎用性を確保した。QR コードリーダーと受付システムを図2に示す。

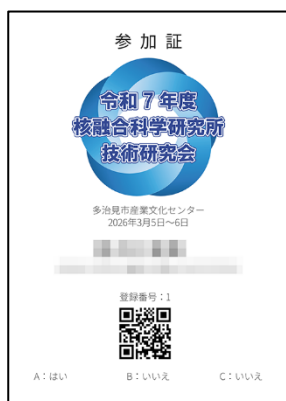


図 1. QR コード付き参加証



図 2. QR コードリーダーと受付システム

3. 結果

本受付システムの導入により、当日は混雑することなく、迅速かつ正確な受付を実現できた。受付スタッフの業務についても、名簿照合や参加証の受け渡しといった手間が解消され、QR コードリーダーによる照合のみで対応可能となり、業務負担が軽減された。さらに、研究会参加者アンケートにおいても「受付がスムーズであった」との回答が得られた。

参考文献

[1] <https://github.com/indico/indico-checkin-pwa/blob/master/src/pages/Auth/utills.ts#L149>

謝辞

本システムの構築にあたり、Excel を用いた QR コード受付システムをご教示くださった筑波大学の佐藤守様はじめ、総合技術研究会 2025 筑波大学受付スタッフの皆様に感謝申し上げます。

1.5.9. Microsoft365 を活用したノーコード申請承認システムの構築

(情報システム運用班)
制御情報技術課 野々村美貴

1. 目的

情報システム運用班では、所内 Web システムの構築を担っている。DX 推進により増加する軽微な開発依頼に対し、所内で利用可能な Microsoft365 を活用し、専門知識を必要としないノーコード開発ツール Power Automate を導入した。将来的にユーザー自身が保守・改修を行える仕組みを整えることで、持続可能な運用体制の確立を図った。

2. システムの構築

Power Automate を用いて申請・承認フローを構築した。図 1 に Power Automate フロー図を示す。Microsoft Forms からの申請送信をトリガーとしてデータを受信し、Teams 上で承認者が可否を判定する。一連のデータは Microsoft Lists に保存し、申請および承認履歴を参照できるようにした。また、受付や承認など進捗状況に応じて関係者へ通知メールを自動送信する仕組みも実装した。

2-1. 申請・承認フローの構築

2-2. メール送信における課題と対応

当研究所では代表メールアドレスとして Gmail を利用している。当初、Power Automate から Gmail への直接送信を検討したが、認証上の制約により実装が困難であった。そこで、Outlook を経由し、Microsoft 365 の自動転送機能を用いて Gmail へ配信する構成に変更した。

これにより、代表メールアドレスである Gmail への通知送信を実現した。

2-3. フローの自動無効化への対応

Power Automate の仕様により、90 日間実行実績のないフローは自動的に無効化される。本システムは利用頻度が低いため、この制限による稼働停止が課題となっていた。そこで、対象フローを毎日有効化する「無効化防止フロー」を実装し、利用頻度に依存しない継続的な稼働を実現した。

3. 結果

Microsoft 365 の活用することで、専門知識を必要としないノーコードでのシステム構築を実現した。これにより、将来的にユーザー自身が保守・改修を行える運用体制へ発展させることが可能となった。

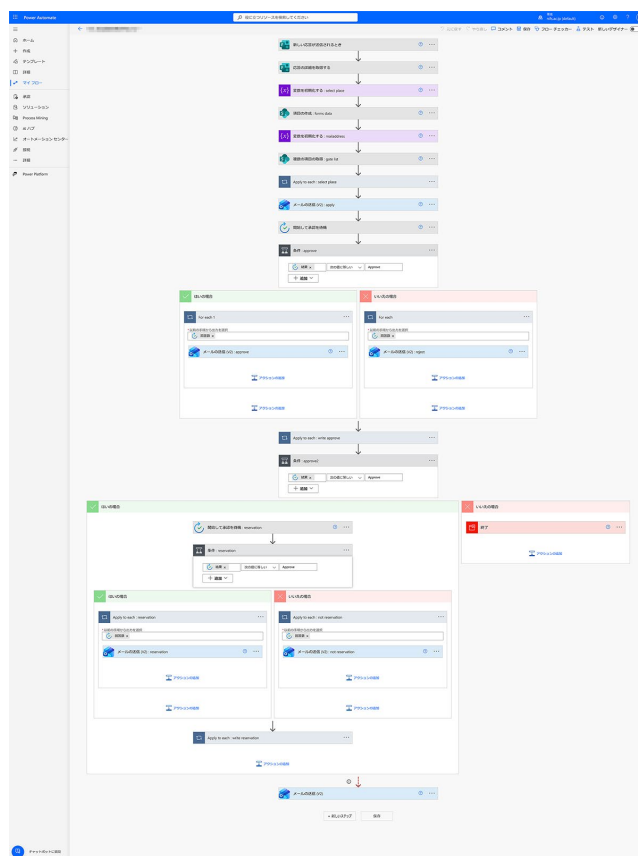


図 1. Power Automate フロー図

2. 運用班の活動報告

2.1. LHD 本体運用班活動報告

(LHD)

技術部長 鈴木直之

1. はじめに

LHD 本体装置とは、プラズマが生成される真空容器（以下「真空容器」と記す。）、真空排気装置、燃料ガスを注入するガスパフ装置、圧縮空気や冷却水を供給する装置に代表されるユーティリティ設備など、LHD の基盤を構成する装置群のことを指す。2018 年 3 月から開始された重水素実験に対応するため、各装置は大規模な改修を実施し、新たに排気ガス処理システムの運用を開始し担当装置とした。2022 年度までは主に技術部装置技術課が開発、保守を担当してきたが、2023 年度の技術部改組によって、課が担当するのではなく、新たに発足した LHD 本体運用班（以下「本体運用班」と記す。）が LHD 本体装置の開発、保守を担当することとなった。

本稿では、本体運用班の技術職員が、各装置に対してどのような取り組みをしてきたかについて報告する。

2. 担当装置への取り組み

2-1. 真空容器

真空容器に関して、本体運用班が行ってきた代表的な業務を以下に示す。

- ① 管理出入口の整備
- ② 真空容器内照明、ステップ等の整備
- ③ 第一壁及びダイバータ板の開発、保守
- ④ 研究者の作業助勢
- ⑤ 真空管理、リークテスト

管理出入口とは、真空容器に入室する際に、防塵服および防塵マスクの脱着や汚染検査を行うための部屋である。図 2 に、管理出入口内部の様子を示す。本体運用班は、当該部屋内に設置された機材・消耗品の管理、部屋内の汚染検査、ならびに廃棄物管理などを担当してきた。また、真空容器内作業を安全に遂行するため、作業者の入退を管理する入退管理システムや、作業環境（温湿度、換気風量、放射能濃度など）を常時モニタする環境監視システムの整備を行ってきた[1]。

プラズマ実験期間が終わり、メンテナンス期間が始まると、管理出入口の運用準備を始める。真空容器内へ入室ができるようになると、真空容器内に照明やステップを設置する。逆に言うと、この作業は照明やステップが無い状態で行われるため、熟練した技術職員によって行われる。

第一壁及びダイバータ板の開発、保守は、本体運用班にとって重要な作業の一つである。2024 年度には、全てのダイバータタイルを交換する作業を実施した。現場での交換作業自体はメーカーが担当したが、新たに設置するダイバータ板の調達は本体運用班で行った。その過程において、いくつかのダイバータ板については、新規に図面を作成し直す対応を行った。



図 1. LHD（2026 年 4 月 17 日撮影）

研究者が真空容器内で行う作業の一つとして、計測装置の較正が挙げられる。計測装置には、プラズマから放射される光を計測するものや、プラズマ中にレーザー光や電磁波を入射して計測を行うものがある。これらの計測では、測定位置の正確性を確保するための位置較正と、信号強度の定量性を担保する強度較正の両方が必要となる。図3に、積分球を用いた計測装置の較正作業の様子を示す。本体運用班はこれらの作業において作業助勢を行うだけでなく、真空容器内作業のスケジュール調整や、作業者の割り振りなども担当している。



図2. 管理出入口内部の様子

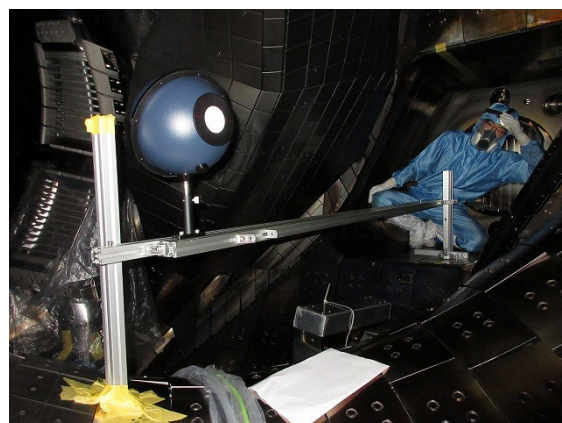


図3. 計測装置の較正作業助勢

2-2. 真空排気装置

真空排気装置は、排気する対象によって複数のシステムが構築されている。本体運用班では、これら真空排気装置の運転、点検、ならびに保守を担当している。メンテナンス期間中の主要な作業の一つとして、スクロールポンプのメンテナンス作業が挙げられる。スクロールポンプには、アネスト岩田社製のISP-1000を計32台採用しており、メンテナンス期間中にこれらのうち一部を対象としてメンテナンス作業を実施している。メンテナンス対象とするポンプの選定は、メンテナンスインターバルおよび運転時の負荷電流によって判断している。2021年度には、制御室から常時負荷電流をモニタ可能なシステムを整備し、スクロールポンプの運転管理を行ってきた[2]。スクロールポンプのメンテナンス作業は、保守作業室に設置されたグリーンハウス内で実施している。図4に、メンテナンス作業の様子を示す。



図4. スクロールポンプメンテナンス作業

2-3. ガスパフ装置

ガスパフ装置は、真空容器内にワーキングガス（水素やヘリウムなど）を供給し、プラズマの密度を制御するための装置である。ガスの供給はピエゾバルブを使って行っている。技術部は1998年のLHD実験開始から、一貫してガスパフ装置の運転と保守、開発を行ってきた。ガスパフ装置は、3分に1回実施されるプラズマショットに間に合わせるように操作をする必要がある。研究者は前のショット結果

を確認した上で、次のショットにおける密度条件を決め、ガスパフ装置の運転担当者に伝える。そのため、ガスパフ装置の運転担当者には長時間にわたる高い集中力が求められる。これらの理由から、ガスパフ装置の運転はシフト制を組んで対応してきた。2025年度の実験では、1チームあたり2~3名からなる3チームを編成し、1日を前半と後半に分けて対応した。また、プラズマ密度制御の自動化、高精度化、高再現性を目指して、FPGAを導入した様々な改良を行ってきており、運転担当者の負担を減らすと同時に、プラズマ実験の効率化に大きく貢献してきた[3][4]。

2-4. 排気ガス処理システム

排気ガス処理システムは、LHDから排気されるガス中に含まれるトリチウムを回収するためのシステムである。本システムでは、トリチウムを含む水素同位体を酸素と反応させ、水分子として回収する。回収方法としては、吸湿材を用いて水分を捕集する方法と、水を圧縮・凝縮してドレン水として回収する方法を採用している[5]。本システムはプラズマ実験の実施の有無にかかわらず、24時間連続で運転している。運転は基本的に全自動で行われるため無人運転が可能であるが、大量の水素ガスが排気される場合には運転モードを変更し、本体運用班の技術職員が常時運転監視を行いながら運転していた。2023年度に、これまでの運転実績に基づいて運用方針の変更とシステム改造を実施し、大量の水素ガスが排気される場合でも運転モードを変更することなく運転を可能とした。これにより、常時運転監視は不要となり、本体運用班の負担は大幅に軽減された。回収した水分は年に1回、専用のドラム缶に入れてアイソトープ協会に引き渡すこととしている。そのため、回収水をドラム缶に分取する作業も本体運用班が行っている。

また、排気ガス処理システムのトリチウム回収性能を確認するために、トリチウム捕集装置を設計、製作し運用してきた[6]。排気ガス処理システムの吸排気口にトリチウム捕集装置を設置して排気ガスをサンプリングし、トリチウムを水分子として捕集する。捕集したトリチウム水のトリチウム量は、液体シン



波形出力GUI



波形エディタ



CompactRIO

図5. ガスパフ装置の制御用FPGA



図6. 排気ガス処理システム



図7. トリチウム捕集装置

チレーション計数装置で測定する。この作業は2017年12月から2025年12月まで、ほぼ毎週実施された。収集されたデータは排気ガス処理システムの性能評価だけでなく、核融合実験施設におけるトリチウム収支を示す貴重なデータとして、各種学会や研究会に利用されている。

3. おわりに

今後の本体運用班の活動予定について記す。

LHDの運転は、2026年2月25日に終了したが、放射線管理の観点から、真空排気装置および排気ガス処理システムについては、引き続き定期的な運転が必要であり、本体運用班はその対応を担う。圧空設備や冷却水供給設備も必要となるが、LHD運転時と同等の出力は不要であるため、要求性能に見合った小規模な設備へ更新する。

核融合科学研究所は、2026年度から新たな学術研究基盤事業『超高温プラズマの「マイクロ集団現象」を中核とした核融合科学の学術研究基盤計画』を中心とした研究体制に移行する。本体運用班は、今後の研究活動においてLHD資産を有効に活用するために、LHD資産の撤去や改造作業に関わっていく。

参考文献

- [7] 長原一樹, 本島巖, 林浩己, 村瀬尊則. 大型ヘリカル装置における真空容器内入退管理・環境監視システムの構築. 技術研究会 2020 千葉大学報告集. 2020. 発表番号 O-3-10
- [8] 千村大樹, 鈴木直之, 加藤ひろみ, 林浩己. LHD におけるスクロールポンプの状態監視システムの構築. 総合技術研究会 2021 東北大学報告集. 2021. 発表番号 P6-6
- [9] 長原一樹. FPGA によるピエゾバルブの PI 制御. 2022 年度分子科学研究所技術研究会報告集. 2023. 発表番号 2-5
- [10] Kazuki Nagahara *et al.*, *Fusion Engineering and Design* 222, 115519 (2025)
- [11] 加藤ひろみ, 鈴木直之, 田中将裕. 排気ガス処理システムの設置と運転監視. 平成 29 年度核融合科学研究所技術研究会. 2018. 発表番号 P2-3
- [12] M. Tanaka, *et al.*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 318, (2018), 877

2.2. LHD 低温システム運用班活動報告

(LHD)

制御情報技術課 森内貞智

1. はじめに

LHD 低温システムは、ヘリカルコイル、ポロイダルコイル、超伝導送電システム（以下、バスラインという）等で構成される超伝導システムを1台のヘリウム液化冷凍装置で超伝導状態まで冷却・維持する循環型の冷凍システムであり、24時間連続で約3～4ヶ月間の安定な超伝導維持によりLHD実験を実行することが可能となる重要な基幹設備である。また、LHD超伝導コイル励磁用電源（以下、コイル電源という）は、LHDプラズマ実験のため精度の高い磁場を発生させる必要があるため、安定した装置の維持と正確な操作が求められる。これまで約28年間におよぶ長期運転を高い稼働率で達成し、要求されたLHDプラズマ実験環境を提供してきたLHD低温システム及びコイル電源の運転操作並びに保守運用について、2023年に発足したLHD低温システム運用班では引き続き担当し、さらに技術部で主体的に実行してきた。本報告では、LHD最後の実験期間となった2025年度の第26サイクルまでのLHD低温システム及びコイル電源の運転実績及び保守状況について、これまでの実績を踏まえて報告する。

2. LHD 低温システムの運転実績

2-1. 装置運用

LHD低温システムは、高圧ガス保安法に基づく法定点検及び装置の健全性を維持するための保守点検を毎年実施してきた。これまで実施してきた保守点検記録や部品の交換周期及びこれまでに発生した機器の故障事例を元にデータ化し、効率的な保守点検を実施した。特に、真空ポンプやヘリウム圧縮機をはじめとする回転機器や計測機器など多種多様な多くの機器を全て健全な状態に維持する必要がある。液体ヘリウムを減圧しヘリカルコイルの冷却温度を3.5Kまで低下させることで超伝導コイルの安定性をもたらすコールドコンプレッサは、特殊な精密機器でありその点検方法に特別な技術を要するため、技術部担当者がその技術を習得し、機材を整備することで、点検・部品交換並びに試運転での運転状態の計測まで精密に行ってきた。予算軽減を考慮した技術部担当者による計測機器等の校正試験やバルブの開度調整の実施を継続することで、さらに信頼性の高い運転を実現することが可能となった。図1に信号変換器の点検・校正試験の状況を示す。また、24時間連続運転を求められる低温システムでは不純物混入によるポロイダルコイルやタービン等の閉塞がLHD実験の安定な実施継続にとって最も懸念される不具合となる。メンテナンスでヘリウムガス系内に混入した可能性のある不純物を慎重に除去するため、細心の注意を払いヘリウムガス系内の真空ヘリウムガス置換作業を実施した。



図1. 信号変換器の点検・校正

2-2. 運転経過

ヘリウム液化冷凍機単体試運転を経て、LHD 低温システムとして 1998 年 2 月に第 1 サイクルの本格運転を開始し、2026 年 1 月中旬に第 26 サイクルの運転を完了した。図 2 にこれまでの運転実績を示す。

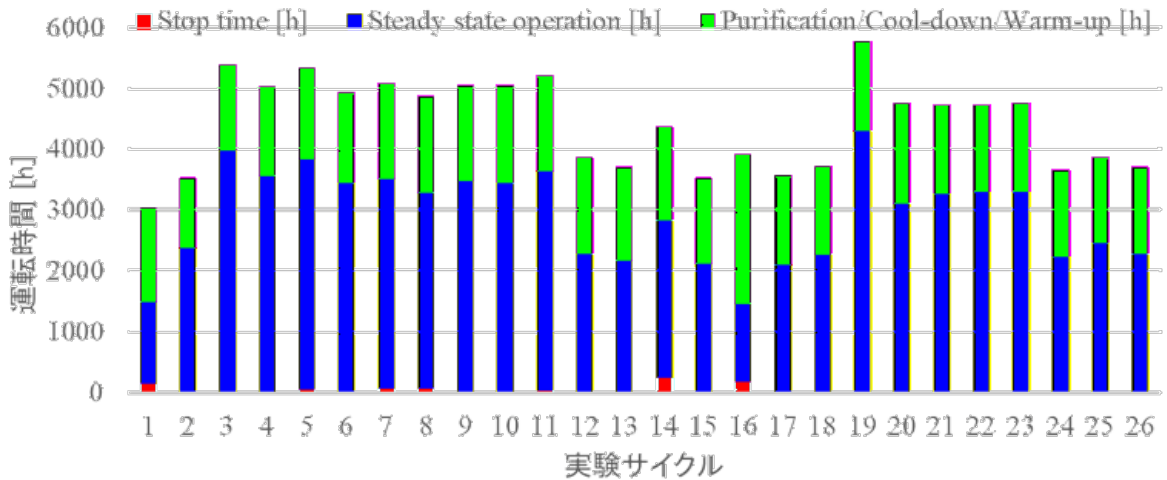


図 2. LHD 低温システムの運転実績

図 3 に第 26 サイクル予冷・加温運転の温度推移と第 26 サイクルでの運転経過を示す。LHD 低温システムは年に 1 回の運転を行う。まず予冷運転前に外部精製器を使用してシステム系内のヘリウムガス中の不純物濃度が分析計の検出感度である 1ppm 程度となるまで精製運転を行った後、超伝導コイル等の熱ひずみを低減させるため各部の温度差を 50 度未満に制御する予冷プログラムにより寒冷流量配分を行い、約 1 ヶ月かけて冷却および加温運転を行う。これまでほぼ要求された LHD 実験スケジュール通り

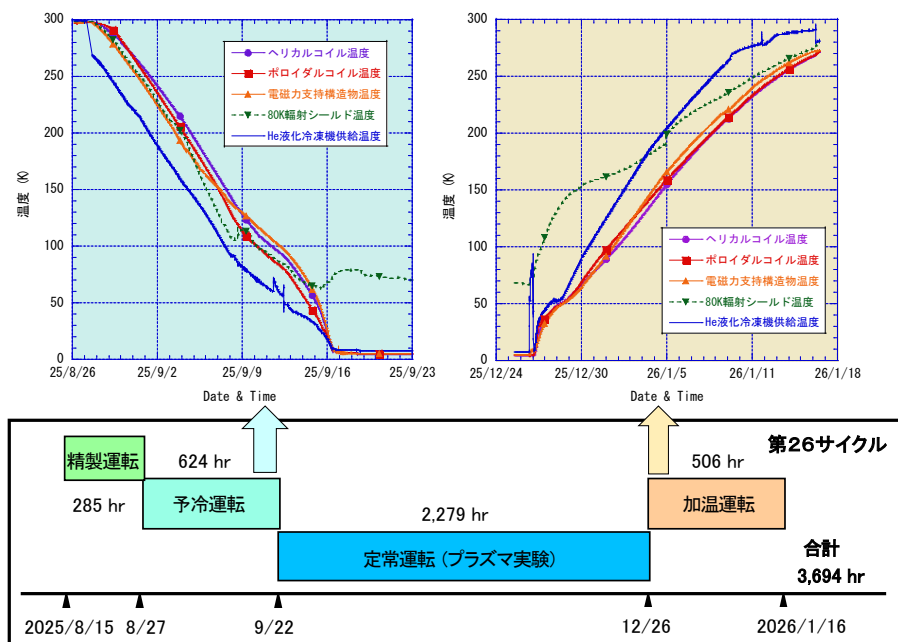


図 3. LHD 低温システムの第 26 サイクル運転経過

に運転してきた。精製・予冷・定常・加温の各運転工程を含め、各運転サイクルで3,000～5,000時間の長期連続運転を達成し、超伝導コイル等を超伝導状態に保った定常運転では2,000～4,000時間におよぶ安定なプラズマ実験環境を提供してきた。第26サイクルではヘリウム循環圧縮機高段機の不具合が実験期間中の深夜に発生し、LHD低温システムとしては定常冷却運転を維持することが極めて困難な状況に陥ったが、技術部の運転担当者の迅速な対応と適切な判断で、不具合の発生した圧縮機について冗長化圧縮機を代替運転する作業を速やかに行うことにより早急な超伝導状態への復旧を実現し、実験日数の損失を最小限にすることができた。第1サイクル運転開始から第26サイクル運転完了までのLHD低温システムの積算運転時間は114,215時間、LHD実験期間である定常運転時間は74,574時間に達し、高い稼働率を実現した。

2-3. 稼働率

図4に各運転サイクルで機器故障および停電等の外部要因によってシステムが停止するに至ったトラブルの件数とその停止時間、 $(\text{運転時間} - \text{停止時間}) / (\text{運転時間})$ で定義される稼働率を示す。トラブルの原因や状況またはその時の運転状態により停止時間や復旧時間への影響は大きく異なるが、全体でも99.3%と高い稼働率を達成した。

26年間の運転でシステム停止に至るトラブルが合計28件発生し、そのうち計測/制御系の不具合が11件、圧縮機に関する故障によるものが6件、低温システムとしては外的要因である落雷等による電力損失が5件と冷却水に関する不具合が4件、操作ミスが1件であった。いずれも非常処理用自動制御プログラムによる保護動作や故障箇所の迅速な修理処置等により、機器破損や不純物混入等の2次的被害もなく短時間での運転再開が可能となった。

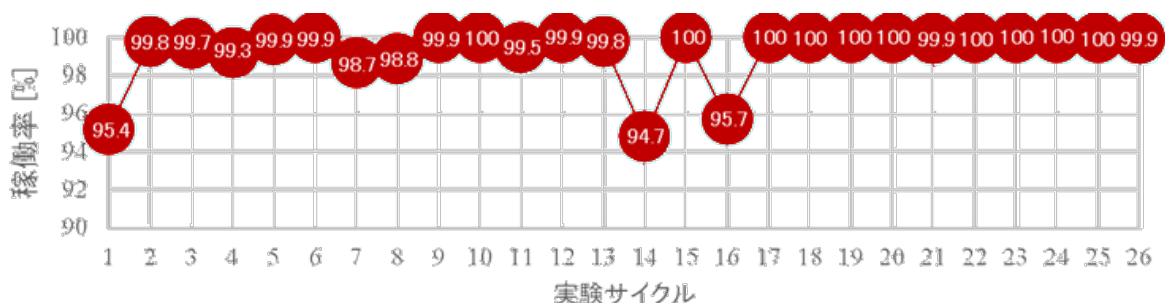


図4. LHD低温システムの稼働率

2-4. まとめ

LHD低温システムは28年間で26回の長期連続運転を行い、過去の故障経験の蓄積に基づく適切な点検・管理および様々な改造を行ってきた結果、総運転時間が114,000時間を超えるとともに稼働率99.3%の高い信頼性を達成した。また、高機能・高信頼化のための新たな装置の追加改造にも対応しつつ、LHD実験計画の要求された運転工程に応じた安定なプラズマ実験環境を提供してきた。LHD低温システムとして28年が経過し、経年劣化と考えられる様々な不具合等に対して長期連続運転に対するシステムの信頼性を向上させるための対策が有効であったと証明された。

3. コイル電源の運転・保守

技術部では、LHD 超伝導コイル励磁用電源（以下、コイル電源という）の装置立ち上げ当初から保守管理、データ収集システムの開発、並びに運転操作のための通電電流値設定支援プログラムの開発・改良等を担当してきた。重水素実験終了の 2023 年度以降は、運転操作及び日常点検を専任で担っていた運転員の削減に伴い、これらの業務についても技術部で主体的に実施した。

3-1. 運転操作と実験の対応

装置の健全性を維持するため、これまでの運転状況や故障履歴及び経年年数を考慮した適切な保守点検を検討し、実施してきた。また、LHD プラズマ実験開始前には装置の健全性と制御系の安定性を確認するため、コイル電源装置としての通電確認運転を実施し、安定な LHD プラズマ実験に貢献してきた。

2023 年度以降のコイル電源の運転業務は、技術部職員が全面的に担うこととなった。コイル電源担当者を構成しシフトを組んで LHD 実験の運転操作を担当した。これまで行ってきた運転員が行う体制から、経験の少ない技術部担当者が行うことで発生するヒューマンエラーを防ぐため、マニュアルの整備、実験前の担当者間の運転操作打合せによる操作方法の確認、実際の電流値設定時のダブルチェック体制の構築を実施した。この試みにより大きなミスオペレーションも発生せず、安全な運転操作を完遂した。

3-2. まとめ

老朽化が進む装置の適切な保守点検を確実に実施した。また、技術部職員が主体となる体制へ移行し、他装置担当者の支援も得ながら運用を継続してきた。厳格な運転手順の遵守に加え、定期的な打合せによる情報共有やダブルチェック体制により、ヒューマンエラーの防止を図り安定した運転を実現した。

2.3. LHD 制御装置運用班活動報告

(LHD)

制御情報技術課 森内貞智

1. はじめに

LHD 実験の最終年度である 2025 年度の第 25 サイクルは、LHD 中央制御装置では第 24 サイクルから専任の運転員が不在となり、多くの運転操作・監視業務を技術職員のみで行う 2 年目となったが、前サイクルより習熟した運転操作を行い、老朽化による不具合に対しても迅速且つ適切な対応により安定した LHD 実験を完遂させることができた。また、LHD 実験 LAN では監視体制の継続により特別な不具合もなく安定した運用を実現した。

2. LHD 中央制御装置

LHD 中央制御装置は、1997 年度の LHD 実験開始以来、LHD 本体の状態監視、運転モード管理、保護インターロック、実験シーケンス管理など、LHD 構成機器の統合的な運転管理機能を担ってきた。また 2023 年度から発足した技術部主体の制御装置運用班では、安定したプラズマ実験環境を提供するため、日常点検や消耗品等の更新対応、シフト体制による運転対応、トラブル発生時の対応など、LHD 中央制御装置の運用を多方面から支援してきた。

2-1. 機器点検・更新対応

図 1、図 2 に技術部担当者による LHD 実験前の中央制御装置現場盤の年次点検状況を示す。毎年実施している総点検においては、装置状態の確認や電源系統を含む機能確認などを実施しており、これまで重大な不具合は確認されていない。しかし 2025 年の日常点検において、機器の老朽化に伴う機器故障が確認されているため、2025 年度から 2026 年度にかけて実施した保守点検では、故障が発生した場合に LHD 実験に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器について慎重に検討を重ね、特に重要度が高いと考えられる UPS 装置、デジタル入力用直流電源、サーバ用 HDD 等の消耗品の交換に絞って機器更新を行った。この更新作業は LHD 実験を計画通りに完遂させることができた大きな要因の 1 つと考える。

2-2. 運転対応

プラズマ実験においては、毎朝の模擬シーケンス、磁場立ち上げ、準定常電源同期など、実験シーケンス開始までの一連の操作から、放電周



図 1. 現場盤の年次点検

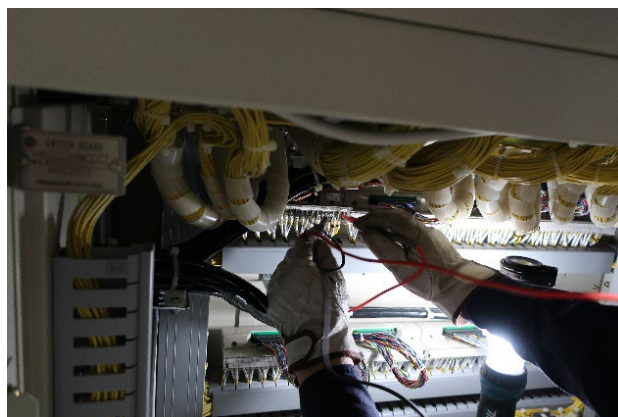


図 2. 現場盤の年次点検

期や磁場条件の変更時の対応、実験終了後の立ち下げ操作まで、一連のオペレーションを3名体制でシフトを組んで対応した。特に最終年度となった LHD プラズマ実験では、実験グループごとのマシンタイムや実験パラメータ等が細かく定められるなか、マニュアルに従い且つ各実験装置や計測装置との連携を図り、実験責任者のもと、ミスなく迅速に対応する必要があるため、常に高い緊張感を持って業務にあたることが求められた。

3. LHD 実験 LAN

LHD プラズマ実験を遂行するためには、安定した LHD 実験 LAN の運用が重要である。LHD 実験 LAN に不具合が起き、LHD の運転情報や主要な実験・計測データを通信できなければ、実験を中止しなければならなくなるほど LHD 実験 LAN の重要性は高い。予定されたスケジュール通りに LHD プラズマ実験が遂行されるよう恒にネットワークの状況を監視し、LHD 実験 LAN の安定した運用を行い、安全なネットワークサービスの提供を目的とした運用を行った。

3-1. 機器運用と実験前セキュリティチェック

ファイアウォールや LHD コアスイッチの最新機器への更新作業により、安全かつ高速なネットワーク環境を恒に維持してきた。ユーザーの新規接続等にも立会確認を実施することで確実なネットワーク運用に配慮してきた。

また、ネットワークの中でも特にセキュリティレベルの高い LHD 実験 LAN について、LHD プラズマ実験が開始される前には、LHD 実験 LAN に接続されている全ての Windows 機器が対象として、必ず LHD 実験前セキュリティチェックを行っている。Windows Update の実施と最新のデータベースによるセキュリティソフトでのスキャンの完了がチェック項目となっており、対応されなかった機器は実験開始前日に実験 LAN より切り離すこととしている。2025 年度の実験では4台の Windows 機器を切り離すこととなった。

3-2. 結果

LHD 実験 LAN の安定な稼働の継続を実現させ、また実験スケジュールに影響を与えるような重大な障害やインシデントについても発生しなかった。LHD 実験 LAN への新規接続申請の対応や、ドメインアカウントの発行・パスワード忘れ対応等にも迅速に対応して、LHD プラズマ実験に貢献できた。

2.4. LHD 加熱装置運用班活動報告

(LHD)

電気電子技術課 近藤友紀

1. はじめに

LHD 加熱装置運用班は、電子サイクロトロン共鳴加熱装置 (ECH)、イオンサイクロトロン共鳴加熱装置 (ICRF)、中性粒子入射加熱装置 (NBI)、および共通設備としての準定常電源と純水冷却装置を所掌し、これら装置に対応した4グループにて各装置の運転保守や試験開発などに関する技術業務を担当しています。また、運転保守業務に関しては職員のみですべての対応が困難なため一部を業務委託し、その業務管理も担当しています。

1998年からのLHDプラズマ実験開始以降は、日常の技術業務を通じて加熱装置の運用実績の蓄積を図るとともに加熱装置の高度化にも意欲的に取り組み、LHD 実験計画への支援責務を誠実に果たしてきました。加熱装置の性能向上はLHDにおけるプラズマ実験の成果に直結するものであって、2005年にはプラズマ計測を目的としたNBI4号機の増設、2010年にはプラズマ制御を目的としたプラズマ生成制御装置の増設、2015年にはNBI4号機加速電源の昇圧化改造、2016年からはLHD重水素実験に向けたNBI電源等の放射線遮蔽や管理区域内における保守整備環境の構築にも取り組んできました。ECHにおいては77GHzおよび154GHzジャイロトロン増設、導波管およびマイクロ波入射ミラーの改良、ICRFにおいては定常運転対応発振器の増設、アンテナや同軸管の改良などに継続的に取り組み、それぞれ世界最高水準の性能実績をあげました。準定常電源においては10年周期の大規模オーバーホール整備に主体的に取り組まれました。これら長年にわたる加熱装置運用班の業務成果は、2017年度末から開始されたLHD重水素プラズマ実験でのプラズマイオン温度1億2千万度(LHD計画における目標パラメータの一つ)の達成に結実したといえます。その後、2025年のLHD実験計画終了に至るまで各加熱装置の性能は維持し続けました。

本報告では、加熱運用班員がこれまで取り組んできた運転保守・技術支援・技術開発活動例についてくつか紹介します。

2. 電子サイクロトロン共鳴加熱装置 (ECH)

2-1. 共同研究支援環境の構築と改善

ECHグループではLHD実験の他、ジャイロトロンを用いた各機関との共同研究を推進しています。共同研究内容によっては、ジャイロトロンと高圧電源との組み合わせだけでなく導波管の組み換えやマイクロ波電力の照射目標物の設置や周辺防護などの作業を伴います。これら作業安全性確保の一環として遠隔操作による電源やマイクロ波伝送路の切り替え装置を設計・開発しました。

ジャイロトロンには3種類の高電圧電源(アノード、ボディ、コレクター)が用いられますが、これらを一括で圧空シリンダーを駆動源としたスライド機構により接続または切断できるようにしました。従来、現場での手作業で高電圧配線の接続替えをしてきましたが、これにより格段の作業安全性が確保されることになりました。また、マイクロ波の伝送経路の切り替えも圧空シリンダーを駆動源としたミラー回転機構により実現しました。図1は3D-CADによるこれら切り替え器の設計例を示します。

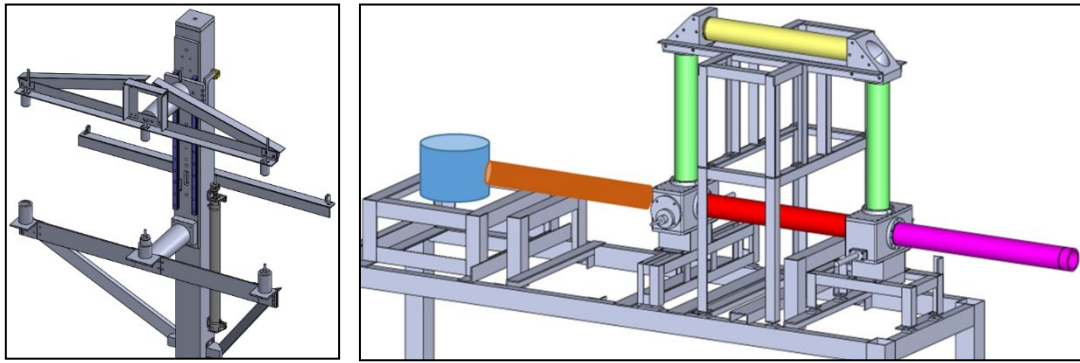


図1. 電源切り替え器（左）と導波管切り替え器（右）の設計例

2-2. マイクロ波照射設備の整備

民間企業との共同研究として、コンクリートや岩石試料への大電力マイクロ波の照射実験を行っています。マイクロ波の漏洩防止対策と熱冷却に注意を払ったマイクロ波照射設備を整備しました。レンガ積みの小さな「小屋」を作りジャイロトロンからのマイクロ波大電力を導波管経由でその内部に導きます。もともとマイクロ波電力の測定・吸収用途のものでしたが、内部に照射物を設置出来るように改良しました。「小屋」の内部には照射物に向けてマイクロ波を集光させるためのミラーと外部からの観測のための可視・赤外線カメラが設置されています。図2.は設備内部と実験の様子を示します。これまで国内外に手軽に扱える MW 級のマイクロ波電力の照射施設がなかったため、共同研究者から好評を得ています。



図2. マイクロ波大電力照射設備（左）と試験の様子（右）

3. イオンサイクロトロン共鳴加熱装置 (ICRF)

3-1. 液体スタブチューナーの改良による反射電力低減対策

LHD用ICRFでは、シリコンオイル用いたインピーダンス整合機が用いられています。同軸管伝送路の一部区間内に導入したシリコンオイルの液面位置を制御することにより、プラズマからの反射電力による発振器へのダメージを抑制します。従来、オイル液面位置は電動台形ねじを駆動源としたオイルシリンダーのみで制御されてきましたが、アンテナの改良により液面制御速度の不足が見込まれたためオイルポンプによる直接的な液面制御を加えました。シリンダーとポンプとの協調制御が工夫のしどころで、図3.ではその良好な制御状態の様子を示しています。これによりアンテナ性能をより引き出すことに成功しプラズマ加熱電力の向上を果たしました。

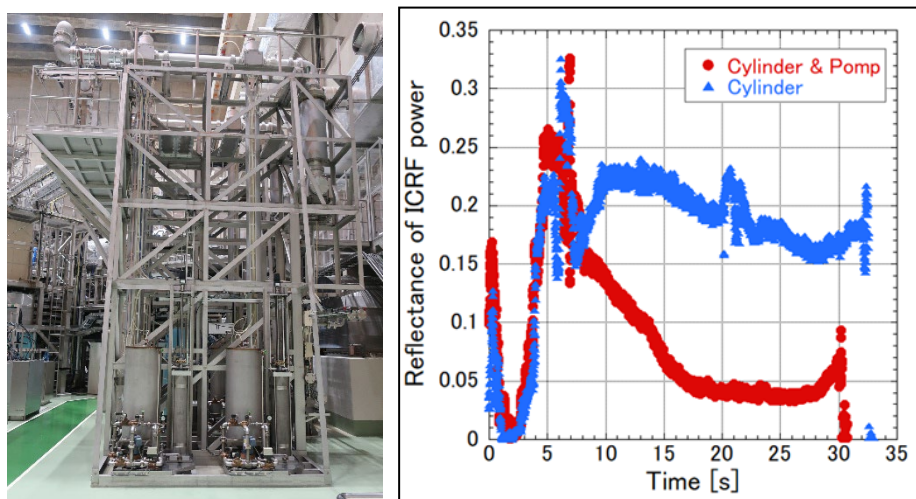


図3. 液体スタブチューナー（左）と反射電力制御の様子（右）

3-2. 高速光学測定システム「Ha-fast」の開発

プラズマからの $H\alpha$ (656.3 nm)、 HeI (587.6 nm)、 $HeII$ (468.6 nm)光を、1 MS/s を超える時間分解能で検出する光学測定システムを開発しました。これらのデータは LHD 実験データ収集系 (LABCOM) に診断名「Ha-fast」として登録されます。図4はこのシステムとその測定例を示します。このシステムにより ICRF 加熱によるプラズマ光を良好に観測できるようになりました。

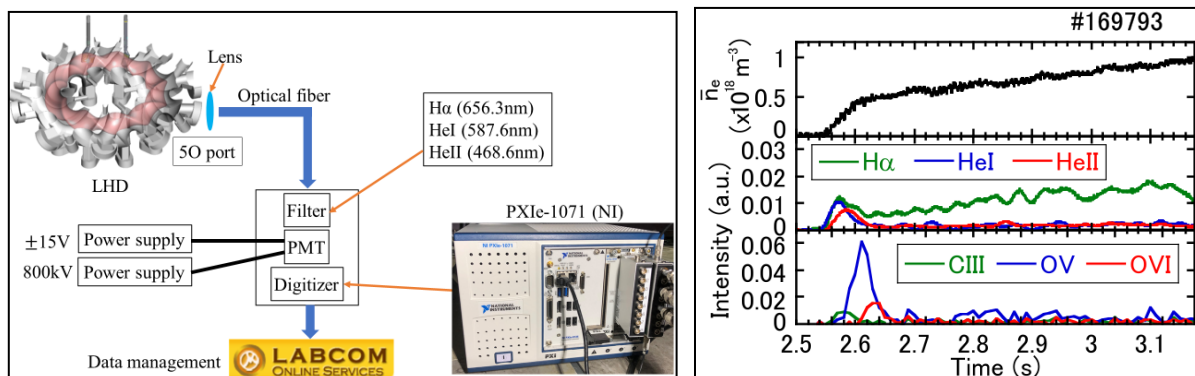


図4. 光学測定システム（左）と測定例（右）

4. 中性粒子入射加熱装置 (NBI)

4-1. 重水素実験に向けたイオン源整備環境の構築

NBI用イオン源の保守整備は長年その製作者の工場にて行われてきましたが、重水素実験開始後はイオン源を管理区域外に持ち出せなくなったため、管理区域内に専用のイオン源整備環境を構築しました。イオン源の整備では、電極とそれを支持し電気絶縁するための絶縁物の清掃と研磨が不可欠で粉塵が出るため、整備スペース内に防塵ハウスと集塵機を設置しました。このほか、リーク試験に用いる真空排気設備や作業に必要な各種ユーティリティ（圧空・ガス供給系）の整備も班員が行いました。図5. は防塵ハウス内での作業の様子を示しています。

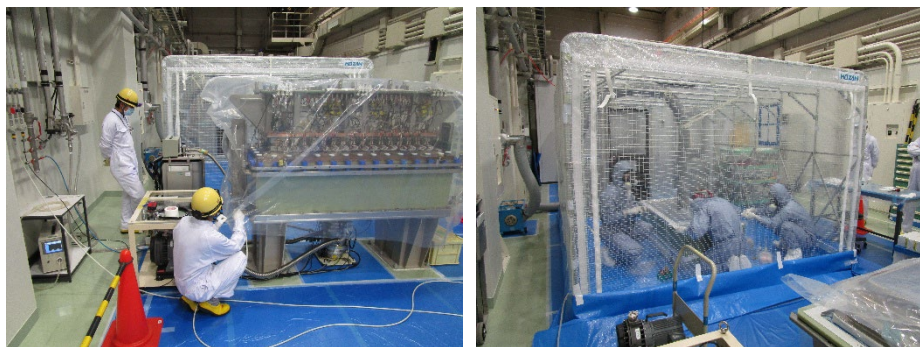


図5. イオン源用真空排気設備（左）と防塵ハウス（右）での作業の様子

4.2. イオン源の保守整備

LHDのメンテナンス期間中には、6台の負イオン源と8台の正イオン源が整備されます。どれも世界最大級の規模ということもあり、また限られた整備スペース事情から1台ずつの整備しかできないため、全台の整備に約半年を要します。重水素実験開始からはイオン源の製作者に來所してもらい整備してきましたが、業者から整備手順や方法を学び、徐々に班員による整備に移行していきました。どの部品も精密かつ大型であるため作業安全確保にはチームワークが欠かせません。

主な整備内容は、1) 電極やアークチャンバーからのセシウム除去、2) 電極や電気絶縁部品の研磨、3) タングステンフィラメントの交換、4) 電極の組み立て・軸合わせ、5) イオン源のヘリウムリーク試験等となります。図6.は負イオン源整備の様子を示します。



図6. アークチャンバーの切り離し（左）と電極の組み立て（右）の様子

5. おわりに

LHD計画は2025年度で終了を迎えました。本務の「LHD実験のための加熱装置の運転保守」の傍ら、時間を見つけ、必要に迫られ、事情は様々でしたが頭をひねり、汗をかきながらの技術開発の取り組みは振り返ってみればどれも素晴らしい経験でした。ここでは僅かな例しか挙げられませんでした。成功例だけでなく失敗例も経験してきました。協力業者も含めたLHD加熱装置運用班関係者一同の献身的努力により、いまだ加熱装置は「健在」です。「プラズマを生み出す」、「プラズマを加熱する」という加熱装置の基礎的役割はプラズマ・核融合を研究対象とするうえでこれからも無くなりません。ポストLHD計画の「超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学」計画においてもLHD計画で得た技術経験は必ず活かされていくものと確信しています。

2.5. LHD 計測装置運用班活動報告

(LHD)

計測分析技術課 林 浩

1. はじめに

技術部では、LHD 実験開始前より遠赤外レーザー干渉計 (FIR)、トムソン散乱計測器、重イオンビームプローブ (HIBP) を中心に、LHD プラズマ計測装置の開発、設置、運転、保守を計測運転員と共に支援してきた。LHD 実験は大規模学術フロンティア促進事業として実施されてきたが、2022 年度をもって同事業の支援期間 (2013~2022 年度) が終了した。それに伴い、8 名いた計測運転員は全員契約解除となった。

これまで実験期間中の計測装置の運転・点検・保守、メンテナンス期間の作業支援は計測運転員に大きく依存していた。しかし 2023 年度からは、技術職員による計測装置運用班を新たに組織し、これらの業務を引き継ぐこととなった。運用班の多くは LHD 実験中に他業務を兼務する必要があり、実質的に計測運転員の業務を引き継げるのは 3~4 名と半数以下であった。さらに、そのメンバーは計測装置の運用経験がほとんどない者で構成されていたため、短期間での業務習得は容易ではなかった。

2. 計測装置の立ち上げ、立ち下げ対応

計測装置の立ち上げ・立ち下げに関してはマニュアルが存在したものの、現場経験者向けのメモ書きに近い手順書も多く、それだけを頼りに操作を行うのは困難であった。例えば、遠赤外線レーザー干渉計について『STABILIZER の POWER を ON』とマニュアルに書かれていても、そもそも『STABILIZER』という機器がこういった装置でどこに設置されているかが、経験のない者にはわからず実験室内を探し回ることになる。幸い、契約解除後も別契約で研究所に来ていた元運転員から現場で直接指導を受けることができた。不明点については装置担当研究者に確認し、マニュアルの不足情報を補って更新した。初心者にも理解しやすいよう写真を大幅に追加し、操作時に抜かしやすい手順は強調表示などの改善を行った。

また、電源 ON という簡単な操作に関しても、スイッチは、押すもの、引くもの、ロックスイッチ、トグルスイッチ (引いて上下) と多種多様で最初は戸惑うことがあった。さらに、これらの機器は、設置から 30 年近く経過しているため、なかには老朽化のためスイッチが非常に硬くなっているものや、電源 ON を示す LED ライトが切れているような機器もあり、これらは実機操作を通じて習熟するしかなかった。

さらに立ち上げ手順に関しては、レーザーの様に暖機運転が必要な機器があるため、装置を順に立ち上げていくのではなく、待ち時間を考慮して複数の装置を並行して立ち上げる手順とした。このような工夫は運転員も行っていたが、対応する人数も装置も変更になったため全面的な見直しを行った。

3. 計測装置の点検対応

点検に関しては、計測運転員はシフトを組んで早朝から点検を行っていたが、人数的に不可能であったため、点検項目を重要度の高いものに絞り、それに従って点検票を改訂した。

実験時の計測装置の稼働監視も、LHD 実験の遂行に重要なデータや対応が遅れると故障につながる可

能性のあるものに絞り、その他は LHD 実験を実施している研究者からの連絡をもらうことにした。計測データの収集に関しては、サーバ監視スクリプトを作成し、運転監視の補助を行うなどの工夫により、監視員をなくした。また、計測装置の設置されている計測機器室と制御室での対応が必要であったが、制御室での対応はデータ監視と計測シャッターの操作などに限られていた。監視は、上記で述べたように簡略化し、必要な監視は遠隔で監視することにし、計測シャッターなど操作回数の少ないものは制御室の操作端末近くで他の運転をしている技術職員に依頼することにした。そのことにより、常時2カ所に人員を割り振らずに1カ所で対応できるようにした。

4. 支援作業

メンテナンス期間の作業支援は人数減により従来のようには行えなかったが、可能な範囲で対応した。LHD がシャットダウンされることもあり、新規装置設置などの依頼はなく、校正作業やクレーン作業など限られた内容であったため対応可能であった。

5. まとめ

2023 年度 3 月中旬より開始された第 25 サイクル LHD 実験、および 2025 年度 9 月下旬から開始された第 26 サイクル LHD 実験に対応した。第 25 サイクル実験の開始当初は、装置の立ち上げを一つ一つ確認しながら進めていたため、計測器の立ち上げ完了が実験開始直前になることもあった。しかし、作業を重ねる中で徐々に習熟度が向上し、時間的な余裕も生まれるようになった。

第 26 サイクルでは、実験開始が 1 時間延長され、開始時刻も 30 分早まったものの、立ち上げ作業を実験開始までに問題なく完了できた。研究者や他の運用班の技術部員からの支援も大きかったが、ほぼ経験ゼロの状態から短期間で業務を習得し、2 回の LHD 実験サイクルを大きなトラブルなく運用できたことは大きな成果であり、無事に実験を終えられたことに安堵している。

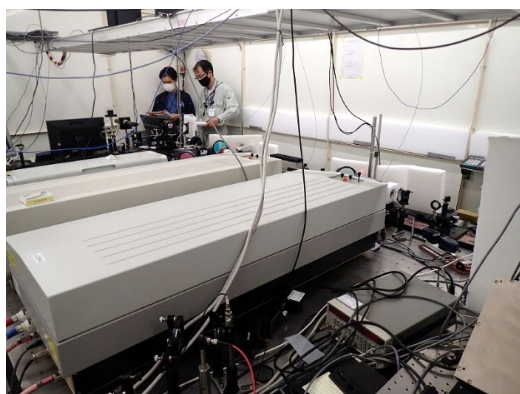


図 1. トムソン散乱計測レーザー立ち上げの様子

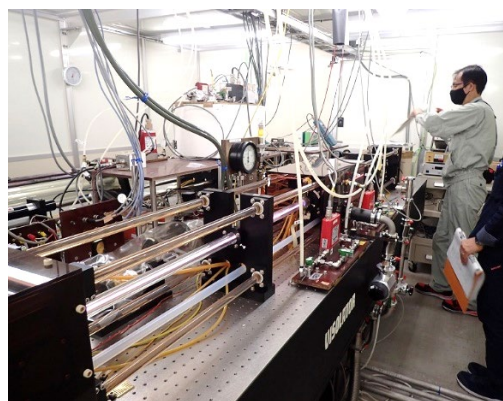


図 2. FIR レーザ立ち上げの様子

2.6. 装置開発運用班活動報告

(装置開発運用班)

設計開発技術課 村瀬尊則

1. 概要

装置開発運用班では、NIFSのみならず、大学・研究機関の研究活動への「①技術協力」、民間企業との共同技術開発などの「②産学連携活動」、核融合研究で培った技術を若手技術者へ継承する「③人材育成」、そして技術者同士のネットワーク構築を目的とした「④人的交流」の4つを柱として運営している。①および②については、班員の能力や意欲に応じて案件ごとに担当を割り当て、実施している。進捗は毎月の定例会議で共有し、あわせて意見交換や改善提案を促すことで活動の質向上を図っている。③および④については、班長が装置開発に有用な技術や人脈を踏まえて企画・実施している。

以下に、令和7年度に実施した活動の一例を紹介する。

2. 技術協力「タイ王国 TT-1 装置における超音速ビーム入射装置の開発」(担当: 長原 一樹)

タイ国家原子力技術研究所 (TINT) におけるトカマク装置 Thailand Tokamak-1 (TT-1) に導入予定の超音速分子ビーム入射 (SMBI) 用ラバールノズルの性能評価を目的として、シュリーレン法による射出ガスの可視化および発散角評価を実施した。

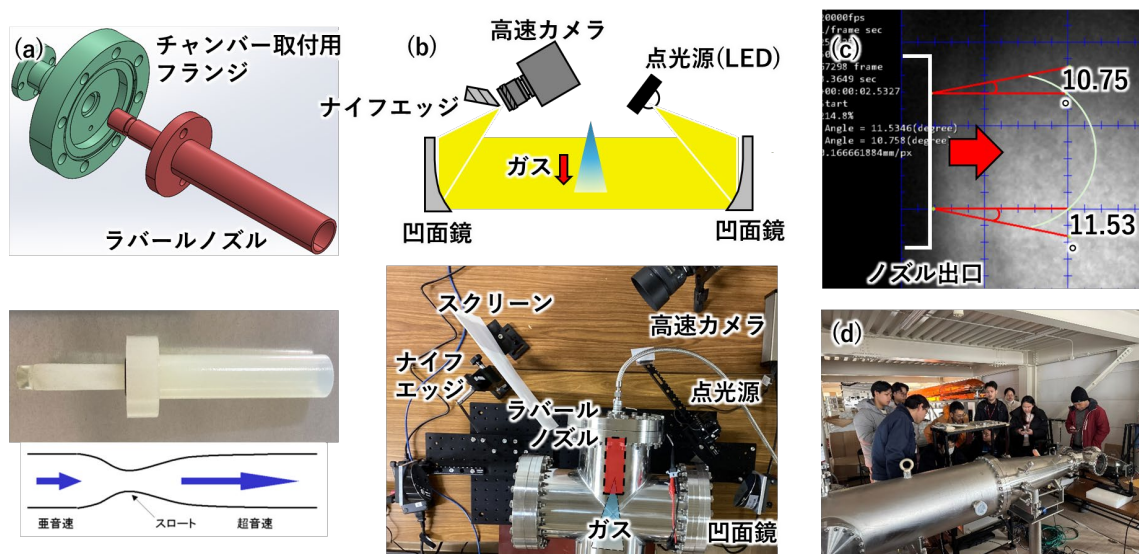


図1. ラバールノズル性能評価 (a)NIFS で設計したラバールノズルと 3D プリントで造形した評価用ノズル, (b)シュリーレンシステムの構成例, (c)シュリーレン画像の一例, (d)来日した TINT チームと共同で実施した検証実験の様子

本業務は、これまで LHD において積み重ねてきた SMBI 開発の実績が高く評価され、TINT より技術協力の要請を受けて始まった。技術協力を先立ち TINT を訪問、技術会合を開催し、ラバールノズルの技術仕様について協議した。特に、LHD における SMBI 実験時の総粒子数を基準として、TT-1 で必要となる入射ガス流量について検討した。さらに、粘性流から分子流への遷移や、気体から固体への相変化を考慮して、ラバールノズルの出口マッハ数 ($M=7, 10$) を決定した。その後、設計されたノズルの

射出性能を確認するため、NIFS において性能評価試験を実施することとなった。

まず、設計した2種類のラバーノズルを3Dプリンタにて造形し、評価用のノズルを製作した(図1(a)参照)。次に、ガスの流れを観察できるように、十分な大きさの真空チャンバーを用意し、専用の実験環境を整備した。これまでNIFSで実施したSMBI開発では、ビームの広がりにくさ(収束性)が求められる、その開発指標として発散角が測定・評価してきた。本研究では、より高感度にビームの発散角を捉えるため、シュリーレン法を採用した。

シュリーレン光学系は、点光源、凹面鏡、ナイフエッジ、高速カメラ等により構成され、ガスの密度変化を画像として見る事ができる(図1(b)参照)。当初はナイフエッジを通過した像を直接高速カメラで撮影しようと試みたが、十分なコントラストが得られなかった。そこで、スクリーンへの投影像を高速カメラで撮影する間接方式に切り替えるなど撮影方法を工夫した。また、点光源の絞り径についても調整を行い、空間分解能と光量のトレードオフを踏まえた最適条件を探索した。その結果、真空条件下においてもガス流の可視化に成功し、M=7で設計されたラバーノズルにおける水素ガスの発散角は約11.5度と評価された(図1(c)参照)。

一方で、密度勾配の低下による信号減衰、スクリーンを介した間接撮影による感度低下、露光時間の影響による時間平均化、光学系調整の不十分さなどが、真空条件下でのシュリーレン撮影における今後の課題として挙げられた。

なお、本評価は来日したTINTチームとも共同で行われ(図1(d)参照)、互いに設計の妥当性を確認することができた。今後は、本検証を踏まえて製作したステンレス製ノズルをTT-1装置に組み込み、プラズマ実験への適用を進める予定である。

3. 産学連携活動「水草由来活性炭の創製研究」(担当:柳原 悠人)

民間企業との共同技術開発の一環として、これまでLHDのクライオポンプ開発で培ってきた活性炭に関する知見を活かし、企業からの依頼に基づいて水生植物を原料とした活性炭の製作について調査した。

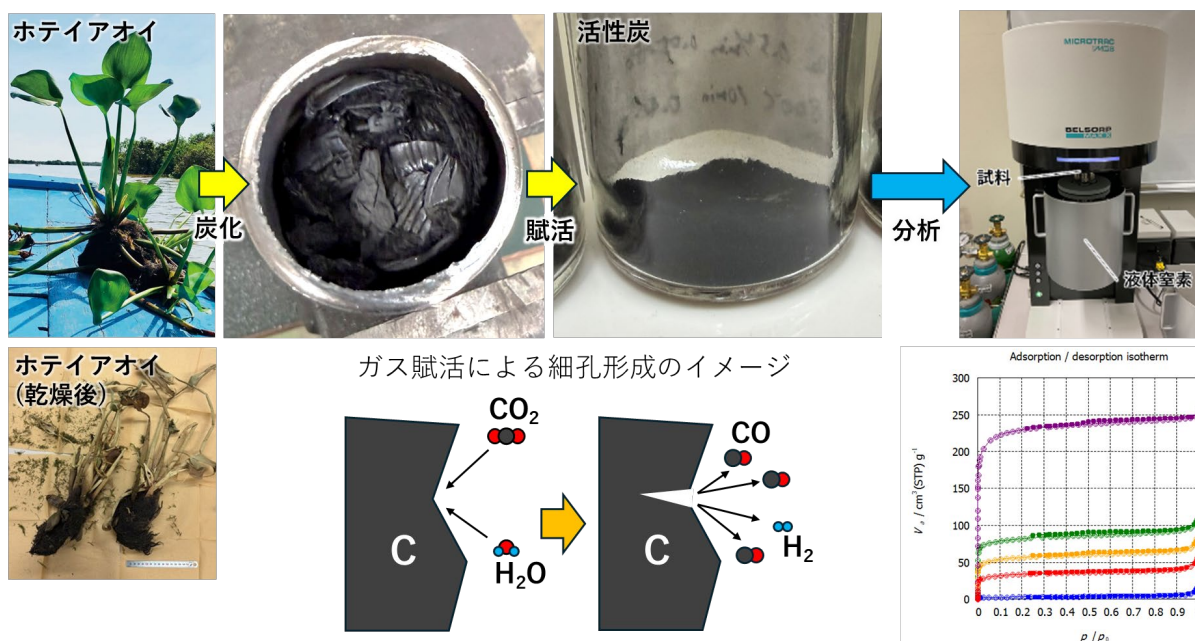


図2. 活性炭の作製から分析までの流れ

さらに、創製した活性炭について細孔構造の評価を実施した。適宜、企業側と協議しつつ、炭化・賦活・細孔特性評価までを一貫して行い(図2参照)、活性炭の細孔特性と賦活処理条件との関係を検証した。

まず炭化工程では、水草試料を細断後、密閉容器に封入して加熱処理を行い、炭化後に粉碎処理を施した。炭化過程では不純物ガスの発生や炭化物の収率変化が確認された。これは、原料である水草の内部構造に起因する脱気挙動の影響と考えられる。続く賦活工程では、これまでの知見で最適とされた条件を基準にCO₂およびH₂Oガスを用いた処理を行ったが、水草試料では同条件下でも灰化が発生するケースが見られた。過去の実験で得られた知見から、この灰化の原因は「過賦活」ではないかと考えるに至った。そこで、賦活温度の低減やガス条件の調整を行い、最終的に過賦活を回避するための条件を見出した。その結果、水草由来の活性炭を作製することができた。

その後の細孔特性評価の結果、水草由来の活性炭においてもマイクロ孔の形成が確認され、活性炭としての基本的な機能を有することが示された。特にH₂O賦活ではCO₂賦活よりも比表面積が大きくなる傾向が見られ、また原料による賦活度合いの違いも確認された。一方で、得られた比表面積は、他のバイオマス活性炭(稲わら炭)と比較して約35%程度にとどまり、今後、炭化および賦活条件の最適化が重要な課題であることが明確となった。

今後の改善提案としては、炭化段階で脱気を十分に行うための高温・長時間処理の検討、複数の賦活ガスの組み合わせによる細孔径制御などが挙げられる。これらの検討と並行して、より高性能な活性炭の作製手法を開発するとともに、付加価値の高い用途展開についても今後検討を進めたい。

4. 人材育成「電磁解析スクール」(担当:村瀬 尊則)

2025年度スクーリング・ネットワーキング事業として採択された電磁解析スクール「Fusion Design～電磁解析ハンズオンを通じて、フュージョンデバイス設計の視点を学ぶ～」の企画・運営を行った。

本スクールは、実践的な電磁力解析を通じて設計思考力の向上と技術者間の交流促進を目的とし、講義およびハンズオン実習を組み合わせたプログラムを作成した。また少人数制とし、参加者ひとり一人



図3. 電磁解析スクールの様子

に手厚く指導することに加えて、参加者間および講師との人的ネットワークを形成できるよう雰囲気づ

くりに心掛けた（図3参照）。

本スクールでは、実行委員および講師として、プログラム設計、講義内容の構成検討、当日の講義対応までを一貫して担当した。プログラムは、核融合実験装置の基礎理解から実践的な電磁力解析へと2泊3日の日程で段階的に学習できる構成とした。導入講義ではトカマク装置やヘリカル装置の特長、磁気シールド、ディスラプション時の電磁力といった背景知識を学習し、その後のハンズオン実習ではANSYSを用いた磁場解析、磁気シールド解析、渦電流を伴う過渡電磁場解析を実施した。特に実習では、単なる操作の習得だけでなく、パラメトリック解析や結果評価手法など、実務に直結する内容を重視した点が特徴である。

運営面では、参加者9名の少人数制とすることで、講師および実行委員による個別のフォローが行き届く体制とした。また、昼食時の自己紹介や懇親会を企画することで、参加者同士および講師との交流機会を設け、技術的議論や情報交換が活発に行われる環境を整えた。その結果、スクールを契機とした技術交流の継続やその後に続く技術交流会への講演依頼につながるなど、ネットワーキングの面でも一定の成果が得られた。

一方で、講習テキストは全300ページを超えるものとなり、スクール後に実施したアンケートでは、短期間での完全な習得は難しいという課題も指摘された。この点に対しては、事前に資料を配布することや、難易度別に課題を設定するなど、今後、改善の余地があると思われる。

以上、本スクールは実践的な解析技術の習得と技術者ネットワーク形成の両面において有意義な取り組みとなった。今後は、継続的な開催や講習内容の公開を検討することで、より効果的な人材育成プログラムとして発展させていきたい。

5. 人的交流「KEK 加速器施設見学および情報交換」（担当：村瀬 尊則）

高エネルギー加速器研究機構（KEK）において、加速器施設の見学および技術職員との情報交換を実施した。これにより、加速器業務の理解を深めるとともに、人材育成や業務評価に関する情報の収集を行った。また、KEKにおける施設運用や技術開発の実態を把握し、組織的な技術力向上や外部発信、産学連携に関する取り組みについても調査した。

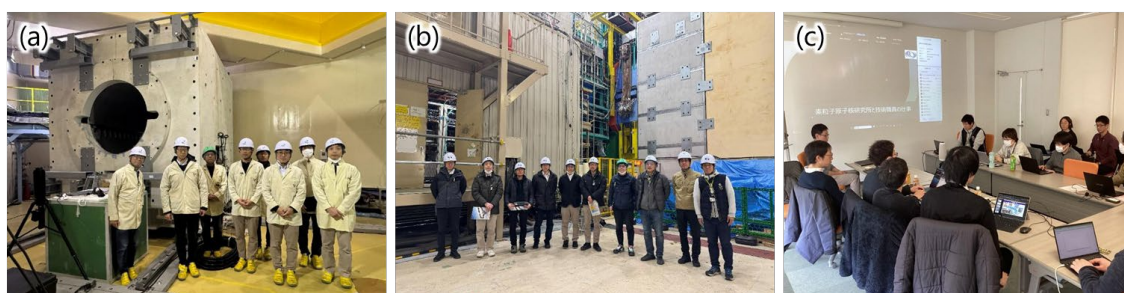


図4. KEK 技術職員との人的交流 (a) J-PARC ハドロン実験施設見学時の集合写真, (b) Belle II 測定器見学時の集合写真, (c) つくばキャンパスでの情報交換会

まず、KEK 東海キャンパス（J-PARC）およびつくばキャンパスにおける施設見学では、中性子源用水銀ターゲットや超伝導加速空洞、検出器システムなど、多様な加速器装置の運用状況について説明を受けた。特に印象的であったのは、各装置が少数の技術職員によって設計・製作・運用まで一貫して担

われている点であり、現場レベルでの主体的な改善活動が装置性能の向上に直結していることであった。

また、つくばキャンパスの機械工学センターにおいては、5軸加工機や電子ビーム溶接機、3Dプリンタなど高度な加工設備を活用した「ものづくり」体制を視察するとともに、講習会を開催し一部設備をユーザーに開放する仕組みなど、技術基盤の共有と人材育成を両立する取り組みについても紹介された。

その後行われた情報交換会では、双方の日常業務や技術開発事例について報告された。KEK側からは、ビームラインごとに異なるインターロックの自動生成システム、放射線量分布を可視化する新たな測定手法、極低温機器の開発など、現場で直面する諸課題に対して職員の創意工夫により解決した事例が紹介された。これらはいずれも、技術職員が主体的に課題発見から解決まで取り組んだ成果であり、成果を生み出す仕掛けとして、業務を評価する制度（KEK技術賞）や技術伝承の仕組みが整備されている点が特徴的であった。

その他、海外派遣制度や講習会、研究会、アウトリーチ活動などを通じて、技術の共有や伝承、そして外部発信などを戦略的に進めていることについても紹介された。特に、若手技術職員を長期的に海外へ派遣し、国際的な経験を積ませる取り組みや、開発した技術を他分野へ応用する取り組みは、人材育成と組織価値の向上の両面において重要である。これらは、NIFSにおいても今後さらに強化していく必要があると思われる。

以上の視察や交流を通じ、技術職員の主体性を引き出す組織運営、技術伝承の体系化、外部発信の推進といった点が重要であることを再認識した。今後は、これらの知見を踏まえ、業務成果の創出や技術の伝承、人材育成の方策に活かすとともに、引き続き他機関との交流によって相互発展を図りたい。

2.7. CHD 運用班活動報告

(CHD 運用班)

機械システム技術課 小淵 隆

1. はじめに

核融合科学研究所では、学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想－ロードマップ 2023－に採択された「超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学」計画を実施するために、2006 年まで稼働していたコンパクトヘリカル装置 (Compact Helical Device : CHD、以下「CHD」という。) の再稼働に向け整備を実施した。CHD の設備には、製造から 20 年以上経過し老朽化したものが多く、各設備の健全性確認及び更新が必要であった。関連設備の整備は 2024 年に技術職員で構成された CHD 運用班を中心に実施してきた。CHD 運用班は約 20 名で構成し、2025 年度は CHD 本体点検及び CHD 中央制御盤、真空排気装置、ガスパフ装置、ベーキング電源、Ti ゲッター電源、純水冷却装置、大型監視画面システム、入退管理・ITV システム等の更新及び CHD が設置されているサテライト装置室内の機器撤去作業を行った。また、大型ヘリカル装置 (Large Helical Device : LHD、以下「LHD」という。) 実験完遂に伴い、LHD で使用していた加熱装置の電源、グロー放電用電源を CHD に移設する作業を実施した。ここでは 2025 年度に行った主な整備状況を活動報告として記述する。

2. 各設備の整備内容

2-1. CHD 本体点検

CHD 真空容器 (図 1) は約 20 年間、真空引きの保管運転を繰り返し真空封じ切り状態を保ってきた。しかしながら同期間に於いて閉じ込め磁場を生成するコイルの健全性、コイル及び支持構造物の絶縁性能、真空容器ベーキングヒータと温度監視用の熱電対、冷却水流量計の健全性に関して確認は行ってこなかったため、再稼働前に点検・補修を行うこととした。

装置全体の目視確認では、ベーキング用の保温層の破れ、コイル絶縁材の剥がれが確認されたが運転には大きな影響は無いことが確認された。次に真空容器、架台、

支柱、支持脚、各コイル、冷却水配管、ヒータ等を締結固定しているボルト約 200 本のトルク確認を行った。ボルトにゆるみは確認されなかったが、架台、支柱に使用しているロックワッシャーに不良個所が確認された。不良といっても経年劣化等によるものではなく、機器取り付け等による干渉を回避するために人為的にワッシャーの曲げ方向を変えさせられたものと考えられる。ロック機能を損失しているため当該品の交換を検討したが、ボルトを一度外す必要があり締め付けが緩んでしまうことを避けるため交換作業を見送ることとした。

架台類の絶縁抵抗測定においては一部の架台間で導通が確認された。計測用信号線や排気ペローの接触によるものがあり接触箇所を浮かせることで解消した箇所もあったが、原因を特定することが出来ない箇所もあった。コイル抵抗や絶縁抵抗測定においては約 20 年前の点検結果と比較して異常は無く、

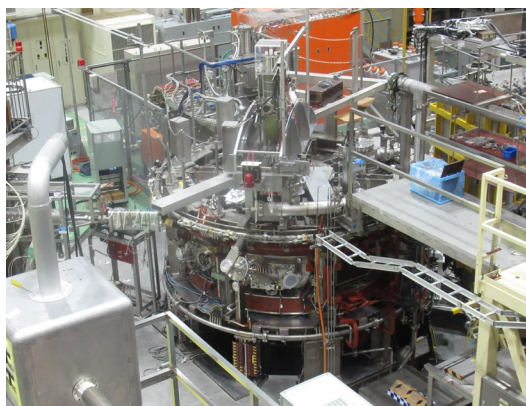


図 1. CHD 本体の外観

安心して通電できることが確認できた。真空容器周りにはベーキング用ヒータ線が 49 本、温度監視用熱電対が 32 本設置されているが、ヒータ線の 1 本のみ断線が確認された。絶縁抵抗においては若干の劣化が見られたが運用には問題がないと判断し経過観察することとした。

冷却水のフロースイッチに関しては半数以上が動作不良となっていることが確認された。更新を検討したが交換品、作業費が高価なことから断念し、流量、圧力計の表示値を監視し代替することとした。

長期間稼働させていないため不良個所が多くなることが懸念されたが、全体的に大きな劣化が無く約 20 年ぶりの再稼働に耐えうると判断された。

2-2. コイル電源用高圧盤の整備

コイル電源用高圧盤は 18 kV 発電機から受電する系統と 6.6 kV 商用電力から受電する系統からなる。

18 kV 発電機系統は 18 kV 真空しゃ断器（以下「VCB」という。）と 5 つの系統の断路器で構成されている。18 kV VCB はメーカーによる細密点検を実施し、他は 2023 年に実施した点検作業の結果をもとに補修・部品交換を実施した。18 kV VCB も製造から 20 年以上経過しているが真空劣化もなく問題なく機能することを確認された。VCB は当然真空封じ切りであるため真空劣化の評価方法に興味があり確認すると、点検時の規定電圧値の遮断に問題なければ真空劣化は無いと判断するとのことであった。また断路器の動作でも問題は確認されなかった。一方、盤内のヒューズとヒータは消耗品のため交換を行った。盤内ヒータに対して、機器の寿命は盤内の湿度に大きく影響を受けるため、特に屋外設置の盤にはヒータによる乾燥が重要であるという新たな知見を得た。

一方、6.6 kV 受電設備は 6.6 kV VCB 1 台の下流に 3 台の VCB を配置し 3 系統に配電している。これら VCB は前述の点検で自動蓄勢が出来ない、動作カウンターの動作不良等の報告があったため更新を行った。同容量の後継機は VCB 本体と固定枠の接続形状が変更になっていたため、固定枠の更新から必要であった。また、固定枠背面の入出力端子位置も変更となっているため、既設銅ブスバとの取り合いも別途製作を行った。

2-3. 中央制御システム更新

中央制御システムは実験シーケンス制御システム、実験タイミング配信システム等から主に構成されている。

実験シーケンス制御システムは従来の VME バス規格を採用したシングルボードコンピュータによる制御システムから、多くの設備、機器等に搭載され、複雑な制御を効率的かつ正確に行える装置として利用されている PLC を主とした制御システムへの構成変更を行った。今後はインターロックロジックの確認・更新及び実験シーケンス用ラダープログラムの作成を進める必要がある。実験タイミング配信システムは、クロック源とタイミング・モジュレータ、デモジュレータから構成される。従来のクロック源、タイミング・モジュレータには実験シーケンス制御システム同様に VME 規格のモジュールを利用してきたが、VME システムが古い規格であるため新しいクロック源、タイミング・モジュレータを導入することにした。また、クロック源に於いては大型装置におけるタイミング同期は PTP プロトコルによる時刻同期が主流になることが想定されるため、将来的な導入を考慮し 10 MHz 信号を出力する機能を持った PTP グランドマスタークロック製品を選定し導入した（図 2）。その結果、高精度時刻同期

に対応するための高性能な内蔵発振器が搭載されていることにより、10 MHz 信号の安定性も向上することになった。

タイミング・モジュレータは LHD 実験のバックアップ用に開発を進めてきた Xilinx 製 FPGA 搭載の基板を使ったタイミング・モジュレータを導入することにした。同モジュレータの出力は1台あたり 16 ch のため CHD 実験では予備品を含めあと 2 台製作する予定である (図3)。

一方、従来の実験では各監視情報はオペレータ席でのみ監視が出来ていたが、今後の実験では真空状態やコイルの温度監視、その他各設備、機器の監視状態、プラズマ実験データ等、プラズマ実験を安全に遂行する上で監視管理が必要な情報となるため関係者が常時確認できるように大型監視画面システムの整備を行った。大型監視画面システムの主要機器は 3 台の大型液晶ディスプレイと 3 台のマルチビューワで構成されている。それぞれの主な仕様を表 1 に示した。

主な特徴としては、大型液晶ディスプレイは制御室に設置するため、明るい室内でも見やすいよう高輝度の機種を選定した。また、制御室は横長の構造であることから、斜め方向からでも映り込みを抑え視認性を確保できるように、高ヘイズ値の機種としている。さらに、マルチディスプレイを組み合わせることで複数の PC からの映像表示が可能である。加えて、外部信号により遠隔での画面切替が可能のため、実験シーケンスに合わせてプラズマ映像と実験データなどの画面切替を自動で行うことができる仕様とした。

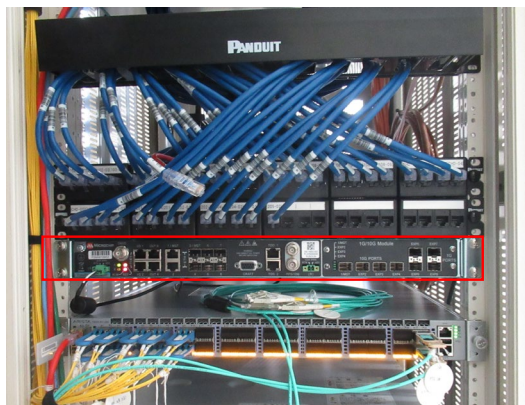


図 2. 10 MHz 信号を出力する機能を持った PTP グランドマスタークロック源



図 3. 開発してきた Xilinx 製 FPGA 搭載の基板を使ったタイミング・モジュレータ

表 1. 大型監視画面システム構成機器仕様 2

大型液晶ディスプレイ		マルチビューワ	
画面サイズ	98V型	映像入出力	4入力1出力
解像度(ドット)	3840×2160	解像度(ドット)	3840×2160
輝度	780cd/m2	外部制御	RS-232Cによる遠隔切替制御が可能
ヘイズ値(%)	47	映像切替	シームレス切替可能

2-4. 純水冷却装置更新

冷却用ユーティリティとして純水冷却装置 (以下「冷却装置」という) が整備されているが、運用開始から 25 年以上経過しており、複数のポンプが動かないなど多くの不具合が発生している状態であった。そのため、実験再開に向けて、冷却装置の更新を実施した。今回は主に、1 次冷却水用ポンプ 11 台と 2 次冷却水用ポンプ 1 台、純水タンク、プレート熱交換器の更新を行った。

既設の1次冷却水用ポンプはインバーター一体型であったが、現在市販されているポンプでは既設と同等以上のスペックを持つものにインバーター一体型がほとんど存在していない。そのため、2次冷却水用ポンプも含め今回更新した全ポンプに外部インバータを設けることとした（図4、図5）。このインバータ制御は、既設ポンプの遠隔運転に使用していたPLCのAO（Analog Output）モジュールを介して出力制御（0～10V に対して 30～60Hz）を可能とした。例えば冬季の凍結防止運転では、従来出力制御が出来なかったためフル出力運転を行い、運転時間の調整のみで省エネ対策を試みてきたが、ポンプの出力制御が可能になったことにより必要最小限の出力で凍結防止運転が可能となり更なる省エネが見込まれる。



図4. 更新後の1次冷却水用ポンプ

また、図6にはポンプ操作画面を示した。制御プログラムには先に述べた凍結防止運転シーケンスの他、ポンプの運転操作時において逆電力を防止するためにインバータ起動から3秒後にポンプを始動するシーケンスや、ポンプ停止操作時にはインバータ内部の冷却ファンによる冷却時間を確保するため、ポンプ停止完了から5分後にインバータ電源を停止するシーケンスなど開発を行い組み込む作業を実施した。



図5. 新設したインバータ盤（片面）

2-5. ベーキング電源更新

真空容器ベーキングシステムのベーキング電源盤に関しても製造から30年以上が経過し老朽化していたため更新を行った。既設のベーキング電源盤は指定したベーキング温度に対して、ヒータと対で設置された熱電対で真空容器温度を監視しヒータ電力をON/OFF制御する機能を有していたが、更新したベーキング電源盤には、ヒータ電力を一定値で制御する方式と、指定したベーキング目標温度と真空容器の現在温度を参照してヒータ電力をPID制御する方式を切り替えて使用できる電力調整器の導入を行った。これによりベーキング温度の不均一性解消が期待される。



図6. 純水冷却装置操作画面

2-6. グロー放電用電源移設作業

CHDのグロー放電用電源は更に古く、また内製の電源を使用していたため更新の検討を行ってきた。しかしながらLHD実験が完遂したことを受け、以降LHD以外での使用予定が決まっていない電源があることから、CHDに移設を行った。

2-7. 開発棟圧縮空気用配管更新

開発実験棟内に張り巡らされた圧縮空気（以下「圧空」という。）供給配管にドレン水の排出口が無か

ったことから、配管内に溜まったドレン水が圧空と共に供給され機器を破損するなど、また配管内でドレン水が腐敗し異臭を放つなどの問題が発生していた。そのため、圧空供給配管の更新を行うと共に、主配管の各要所、主に配管ルート上で下に凸となる箇所にドレン水を排出するオートドレンを設置した。

2-8. 開発実験棟及び周辺の放射線監視装置更新

磁場閉じ込め装置では磁場生成時、磁場が時間的に変化することで誘導電場が発生し、電子に力が働いて加速される現象が発生する。加速された電子が閉じ込め磁場に沿ってトラス方向に周回する際に制動輻射として X 線が発生する可能性がある。CHD では X 線発生を未然に防ぐリミッターを有しているが、可能性がある以上人体に影響のない安全なレベルか常に発生状況を監視する必要がある。核融合科学研究所では、開発実験棟付近を含む 9 地点にモニタリングポストを設置し、敷地境界等の放射線量を測定・監視している（図 7）。また、CHD が設置されるサテライト装置室および隣室の制御室にはエリアモニタが設置されている（図 8）。しかしながら、エリアモニタは設置から約 30 年が経過している。またモニタリングポストについては 2014 年度に更新作業を行ったものの、それから 10 年以上が経過しており、構成機器に故障が生じた場合、部品の入手が困難で修理が事実上不可能な機器も存在するため、CHD の再稼働に先立ち、耐用年数を超過した開発実験棟のエリアモニタおよび周辺のモニタリングポストの更新を実施した。モニタリングポストに於いては局舎の再塗装も実施した。



3. まとめ

2025 年度はその他に、真空排気装置の更新、ガスパフ装置の機器調達、Ti ゲッター電源の調達、実験室の入退管理・ITV システムの更新、等々も行った。また、ECH や NBI の加熱装置の電源を LHD から移設する作業も行った。加熱装置に関する内容は電気電子技術課で報告書が作成されている。そちらを参照されたい。

2026 年度は 12 月からの CHD 再稼働に向け、11 月から真空引き、リーク試験を実施する計画である。それまでに真空容器内作業及び計測ポートの取り付け作業を完了させる必要がある。その他インターロック制御機器整備、プログラム作成に関しては夏季を目標に準備を行い、以降サブシステムとの取り合い確認等を進めていく計画である。

2.8. 情報システム運用班活動報告

(情報システム運用班)
制御情報技術課 小川英樹

1. 情報システム運用班の紹介

情報システム運用班は、研究所における各種情報システム（Web システム、仮想化サーバ、Microsoft 365、制御システムなど）の開発・運用を担当するグループである。

当班のメンバーは技術部制御情報技術課の技術職員で構成されるが、プロジェクトの遂行にあたっては、課や班の枠を超えた組織横断的なチーム体制で業務を進めている。このような体制を取ることにより、技術部内の多彩なプロジェクトで培われたノウハウを共有し、新しいシステムの開発・運用に生かすことができると考えている。

以下に 2025 年度の主な活動概要について報告する。なお、一部のシステムの詳細な技術報告については本報告書の別章でも紹介されているので、併せて参照されたい。

2. 活動の概要

2-1. Web システム開発

2025 年度は危険物申請システムをはじめとした各種 Web 申請システム、論文情報データベース (NRAD)、研究会開催支援システム (Indico) などの改修および機能追加を実施した。

NRAD システムにおいては、管理者機能の拡張を進めており、本機能の運用が開始されると、これまでシステム担当者が手動で行っていた DB 操作を運用者へ移譲することが可能となる。コーディングにおいては、PHP のフレームワーク (Laravel) を試験導入し、開発生産性と保守性の向上を確認した。今後は長年の運用でコードが複雑化した各種 Web 申請システムの刷新 (Laravel 化) を段階的にすすめる予定である。

Indico については 2025 年度中に 27 の研究会の開催を支援し、ユーザからの問合せに応じた Q&A の充実やシステムのカスタマイズ等もすすめている。

2-2. サーバ構築運用とセキュリティ対応

当班では現在、5 台の仮想ホスト (RockyLinux)、20 台以上の仮想マシン (KVM)、および 1 台のバックアップサーバを運用している。

システム拡大に伴う管理/監視コストの増大と、トラブル発生時の体制の不足が以前からの懸案事項となっていたことから、これら状況を改善するため、従来の Zabbix、Prometheus(図 1)、LogWatch を利用した監視体制に加え、統合管理に対応した仮想化プラットフォーム (Proxmox VE) を試験導入した。今後は HA (高可用性) 構成の技術検証も行い、ハードウェア障害時にも迅速に復旧可能なインフラ基盤を整備したいと考えている。

セキュリティ対応については、年次のサーバ定期点検、脆弱性チェックのためのエージェントの導入、サーバ証明書の更新などの対応を実施した。

2-3. Microsoft365 の運用

2026 年 3 月末時点で約 400 のアカウント (約 50 の学生使用特典を含む) に対し、Microsoft365 A3 ライセンスを運用している。日常的な業務としてはアカウントのライフサイクル管理 (追加/削除) が中

心であるが、エンドユーザ対応および業務 DX 化の推進にも取り組んでいる。具体的には、「Power Automate」を活用して、従来メールで運用されていた周辺建屋扉開錠申請の承認プロセスを半自動化するアプリの構築を支援し、業務効率化に貢献した。

2-4. 制御システム開発・運用

LHD 関連では、実験最終年度ということもあり、新規の開発案件は限定的であったが、一方で、稼働年数に起因する装置のトラブルシューティング対応が増加する傾向にあった。Pellet 装置での入射タイミング不具合や HIBP の加速器不具合 (図 2) においては、FPGA 搭載マイコン上のソフトや周辺回路のデバッグなど、制御系に限った原因切り分けだけでなく、圧空バルブや流量計などハードウェアの物理的な動作確認も実施し、原因の特定に貢献した。

新規開発としては、ECH グループから「真空容器の壁発光検知システム」の構築要請を受けた。このシステムは、特定の磁場配位においてプラズマが真空容器壁に接触し、壁材料が溶損するトラブルを防ぐため、壁の発光を検知してオペレータに警告を発するための装置である。本システムの開発には YOLO と呼ばれる深層学習ベースの画像検出アルゴリズムを採用した。制御システムでの AI 技術の利用は当班での初の試みであったが、技術部内で先行していた AI 導入の知見を情報共有することで、短期間でのプロトタイプ実装を実現した。

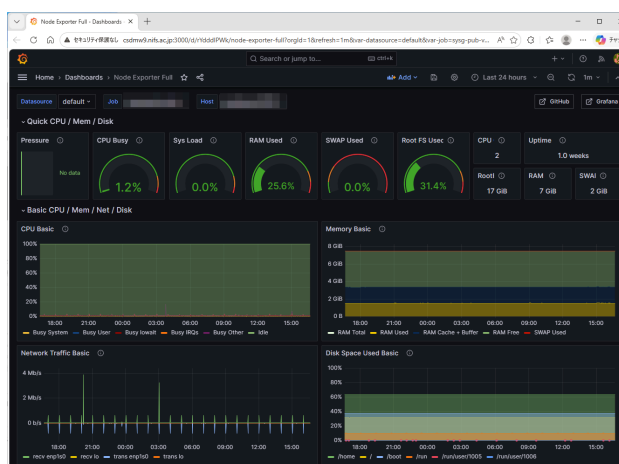


図 1. Grafana による Prometheus 監視情報の可視化

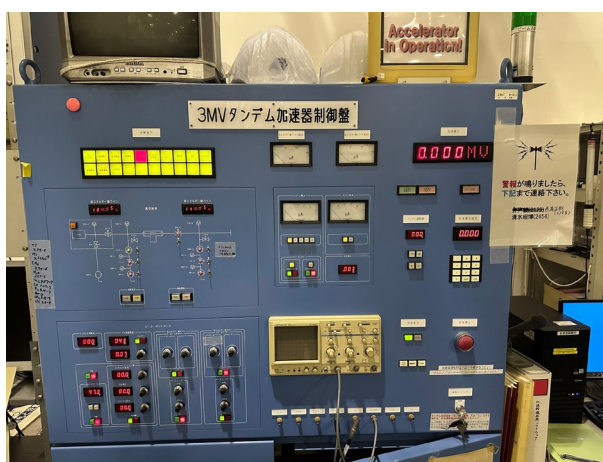


図 2. HIBP の加速器制御盤

3. 海外出張報告

3.1. ITER 機構への出張

制御情報技術課 鷹見重幸

1. 目的

核融合科学研究所（NIFS）は、ITER 機構との技術契約に基づき、国際熱核融合実験炉（ITER）における超伝導マグネットを含む低温システムのダイナミックシミュレーションを実施してきた。本年度は契約の最終年度にあたるため、シミュレーション結果の報告および建設中の ITER 施設の視察を目的として出張を実施した。

出張には、オークリッジ国立研究所の前川龍司氏が同行し、2025 年 6 月 30 日から 7 月 2 日までの 3 日間、フランス共和国サン・ポール・レ・デュランスに所在する ITER 機構を訪問した。

2. シミュレーション結果の報告

本技術契約では、これまで定常運転時のパルス的な熱負荷の定量的な解析や運転方法の最適化をシミュレーションによって実施してきた。そして最終年は ITER 低温システムの冷却運転について、ITER 機構が作成した冷却シナリオに沿って冷却シミュレーションを実施した場合のシミュレーション結果を報告、議論を行い、一部修正点があり後日、再シミュレーションが必要になったが、全体的なシミュレーション結果について了承を得ることができた(図 1 報告会風景)。

3. ITER 施設見学

ITER 機構内においては、現地職員の案内のもと、低温システムを中心に、冷凍機建屋、PF コイル巻線建屋、トカマク建屋および制御室の見学を行った。冷凍機建屋では冷凍能力 25kW の非常に大きな He 液化冷凍機 3 台を見学、現場では単独運転確認が行われていた。PF コイル巻線建屋では、本体組立の遅れに伴う期間を利用して、実機 TF、PF コイルの単独冷却・定格通電試験の準備が進められていた。トカマク建屋のアセンブリホールでは、高さ 10m を超える大型の真空容器に対し、サーマルシールドおよび TF モジュールの組み付け作業が進められており、その規模の大きさを実感した (図 2)。機器の組立作業は中仏コンソーシアム（合同企業体）により実施されており、中国が将来的な工学的核融合実証炉の建設に向けて、組立技術およびノウハウの獲得を図っている様子が見えた。

4. まとめ

ITER 低温システムダイナミックシミュレーション結果の報告を行い、概ねその内容について ITER 機構の了承を得ることができた。(後日、シミュレーション結果のレポート提出により本契約は完了となった)。また、ITER 施設の現地視察を通じて、低温システムを含む各設備の建設および試験の進捗状況を把握するとともに、大規模装置の組立作業や国際協力体制の実態について理解を深めることができた。



図 1. 報告会風景

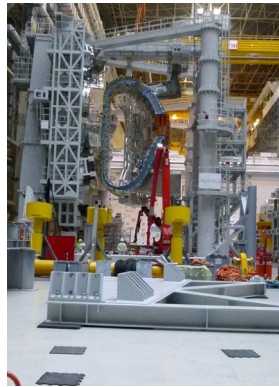


図 2. アッセンブリホール
真空容器組立風景

3.2. NIFS 次期装置設計に向けた CFQS 1 T 化改修工事現地視察

設計開発技術課 中川翔、松本大輝、柳原悠人、田上裕之、村瀬尊則
機械システム技術課 清水貴史
計測分析技術課 神田基成

1. 概要

核融合科学研究所（NIFS）は、2017 年 7 月に中国・西南交通大学と国際学术交流協定を締結し、以降、トカマクとヘリカルの利点を兼ね備えた先進ステラレータ：CFQS 準軸対称ステラレータの設計・建設を共同で進めてきた。約 7 年にわたる準備・建設期間を経て、2024 年 8 月に 0.1 T でのファーストプラズマ点火を達成した。弱磁場下でのプラズマ実験を成功裏に終えた後、2025 年 5 月から 1 T 運転に向けた装置改造が始まり、2025 年度はその改造作業が進められた。

技術部は 2018 年 12 月より本プロジェクトに参画し、物理及び装置工学設計の初期段階から関与してきた。設計初期から基本的な設計思想に触れつつ、設計モデル作成及び各種構造解析に携わる機会を得たことは、環状プラズマ装置設計、特にモジュラーコイルを備え、且つ低アスペクト比で特徴付けられる先進ステラレータのエンジニアリング面での理解を深める上で極めて有意義であった。また、中国側の研究者及び製造業者との議論を通じて、装置開発プロジェクトのマネジメント能力の向上にも努め、その獲得へと繋がった。

これらの活動は、筆者らの学びの機会にとどまらず、LHD 業務を通じて得た技術・知識を還元することで、CFQS プロジェクトの円滑な推進に貢献してきた。さらに、本プロジェクトへの参画は、NIFS の次期装置設計に貴重であり且つ必要な経験の蓄積という点においても重要な意義を有する。

2025 年度の活動として、以下の内容を報告する。

2. CFQS 1 T 運転に係る技術打合せ及び工場視察を通じた進捗確認

2025 年 11 月 12 日から 14 日にかけて中国・合肥市を訪問し、CFQS の製作者である Keye 社にて CFQS の 1 T 運転への改造に係る技術打合せや工場の視察を実施した。本訪問には、NIFS の岡村昇一名誉教授及び NIFS 技術部から 7 名（うち新規参加者が 4 名）が参加した。図 1 に現地参加者の集合写真を示す。NIFS 関係者に加えて、共同研究先である中国・西南交通大学及び Keye 社からの数多くの関係者が参加したことが分かる。

2-1. 技術打合せ

CFQS は、三次元状に捻じれた複雑な構造を有する 4 種類 16 個のモジュラーコイル(MC)を備えている。これらの電磁力支持構造物(サポート)の強化が 1 T 実験に向けた改造の主な内容となる。技術打合せでは、先ず 1 T 実験用の MC サポートの製造や MC とのアセンブリ作業の進捗確認を行った。MC サポートは、MC の周方向に 40~50 cm 程度のブロックに分割して削り出しによって製作されるが、この三次元機械加工に要する時間が全体のボトルネックとなっている。これらが予定通りに進めば、2026 年 3 月中に 1 T 運転への装置本体の改造が完了し、工場から中国・成都市に新設する実験建屋へ向けて出荷する計画が示された。

次に、NIFS 田上裕之技術職員から、装置本体改造後の各種検査項目案が提示され、1 T 化に向けた装

置の仕様や検査方針に関する認識を共有した(図2)。これらの試験は、実験装置の性能を担保する上で重要である。本試験項目の策定にあたって、CFQSの工学設計根拠の理解を深めたことに加え、NIFSの核融合プラズマ実験装置であるLHDやCHS、並びに京都大学のHeliotron Jを参考にすることで、装置開発に必要な知見が広がった。

また、真空容器内で使用する可動式リミターについて設計内容の最終確認を行った。ここでは、CFQSプラズマの最外殻磁気面とリミターに搭載されたプローブ間の距離や最外殻磁気面との干渉面の形状などの妥当性について、NIFS中川技術職員、オンライン参加したNIFSの研究教育職員、並びに西南交通大学の研究者を中心に意見が交わされた。

2-2. 工場視察

工場視察においては、MCサポートの製作状況及びコイルとの組立状況、並びにMCとの組み立て待ちである真空容器の状態を確認することができた。図3に示すように、複雑な三次元形状同士の部品でも位置合わせが可能な特殊な治具上でMCとMCサポートの組み付けが行われていたが、設計時に懸念された溶接による大きなひずみやMC対地絶縁表面へのダメージは見られなかった。熟練の溶接技術者による施工、並びに溶接時のMC表面の温度管理等がこのような優れた溶接組み立てを成し遂げた。その他、MCサポートの部品の開先形状、MCとMCサポート間のギャップを充填する樹脂の状態、及び切削面の加工痕など、図面や完成後の装置からは把握が難しい製造過程特有の技術的要素について具体的な知見を得た。

2-3. その他交流

さらに、滞在期間中の移動や休憩時間などの場においても様々な意見交換を行うことができた。これらの交流は、技術交流に加え、今後の連携のための人脈の構築という観点において有意義である。NIFS技術部の新規参加者にとっては、本訪問はCFQSプロジェクトに今後関わっていく上での正式な顔合わせの機会であったことに加え、英語でのコミュニケーション能力向上や国際的且つ多角的な視点の涵養を図る大変良い機会となった。

以上より、本出張は、モジュラーコイルを備えた先進ステラレータの設計及び製造に関する知見の獲得に加え、国際共同研究の基盤強化という点で重要な役割を果たした。今後も引き続き、CFQSプロジェクトの発展に寄与するとともに、本プロジェクトを通じて獲得した装置設計・建設に係る経験やノウハウをNIFS次期装置設計へ確実にフィードバックさせる。



図1. 集合写真



図2. 田上氏による装置改造後の
試験項目についての報告

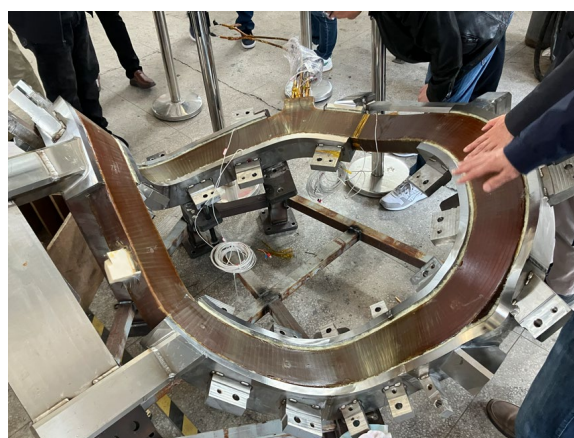


図3. コイルサポートの組み立て状況

3.3. マサチューセッツ工科大学（MIT）及びコモンウェルス・フュージョン・システムズ（CFS）への出張

電気電子技術課 竹内俊貴
計測分析技術課 神田基成

1. 目的

Cambridge の MIT Plasma Science and Fusion Center において開催された「高周波電力による加熱及び電流駆動の物理に関する日米ワークショップ」の聴講及び Commonwealth Fusion Systems（CFS）社の核融合プラズマ実験装置である SPARC、超伝導マグネットの製造施設の視察を通して、今後の核融合研究および関連機器設計に活用できる知見を得ることを目的として出張を実施した。

2. ワークショップ出席

2026年2月17日から19日にかけて、日米 RF 加熱物理ワークショップを聴講した。本会議では、RF 加熱物理における最新の研究発表だけでなく、新しい核融合プラズマ実験装置の提案や、日米共同研究の進捗や今後の予定なども報告され、積極的な議論が交わされた。特に低域混成波を励起するためのアンテナのためにプラズマを模擬したダミーロードを 3D プリンタで製作したという研究発表が技術職員として大変興味深く、設計・製作技術の知見を得ることができた。



図 1. 日米 RF 加熱物理ワークショップの様子



図 2. 集合写真

3. 見学内容

2026年2月20日に、CFS 社の SPARC 本体室や高温超伝導（HTS）コイル製作工場、加熱装置室の見学を行った。SPARC とは CFS 社と MIT が共同開発しているトカマク型核融合装置であり、核融合反応によって投入エネルギーを上回る出力を得ることと、商用炉 ARC の実現に向けた技術的基盤を確立する役割を担っている。HTS の REBCO（希土類イットリウム・バリウム銅酸化物）テープを用いた磁石により、従来の大型トカマクに比べて大幅な小型化が可能となっている点が特徴であり、その構造や製作過程を学ぶことができた。

また、我々のような研究機関では、加熱装置の種類やパワーを増強し、多様な電流駆動手法を追求することで放電時間を延ばそうとすることが多いが、SPARC では放電時間を 10 秒に限定し、加熱方式も

ICRF 加熱のみに絞り込んでいる。このように、核融合発電の実現に向けて必要最小限の要素に集中し、最短経路で成果を得ようとする CFS 社の姿勢は、研究所と民間企業のアプローチの違いを強く感じさせるものであった。



図3. コモンウェルス・フュージョン・システムズ (CFS) 社への訪問

4. まとめ

高周波電力による加熱及び電流駆動の物理に関する日米ワークショップ聴講及び CFS 社の SPARC と超電導マグネット製造施設の見学を通じて、最新の研究を確認するとともに、担当分野に関する技術的理解を深める有意義な出張となった。今後は、今回得られた知見を活かし、関連機器開発に一層貢献していきたい。

3.4. 米国 General Atomics 社訪問およびダイバータ共同設計

設計開発技術課 村瀬尊則

1. 出張の概要

本出張は、核融合炉内でプラズマと直接向き合う「第一壁」や「ダイバータ受熱機器」の設計技術をさらに高めることを目的として実施された。2025年9月4日から30日にかけて、米国サンディエゴにある General Atomics (GA) 社を訪問し、同社が運用する DIII-D 装置を対象に、その設計思想や解析手法を現地で学んだ。

滞在中は、装置の視察や技術討議だけでなく、実際の設計現場において、業務の流れそのものを体験した。そこで得られたのは、数値解析を軸に据えた合理的な設計手法だけではない。複雑な課題に対して、どのように意思決定を行うのかという「考え方」そのものの習得にも価値がある。また GA エンジニアとの交流を通じて、将来につながる人脈を築くことができたことも大きな収穫であった。

2. GA 社における設計体験

今回の訪問では、DIII-D 装置および関連施設の視察を通じて、ダイバータ受熱機器に関する設計と解析の手法を体系的に学んだ。同時に、GA 社における設計業務の実態にも深く触れることができた。特に印象的だったのは、設計や解析における意思決定が、一体となって進められている点である。エンジニア同士が主体的に議論を重ねながら設計を磨き上げていくその姿勢は、単なる技術力以上に、GA の組織としての強さを感じさせるものであった。

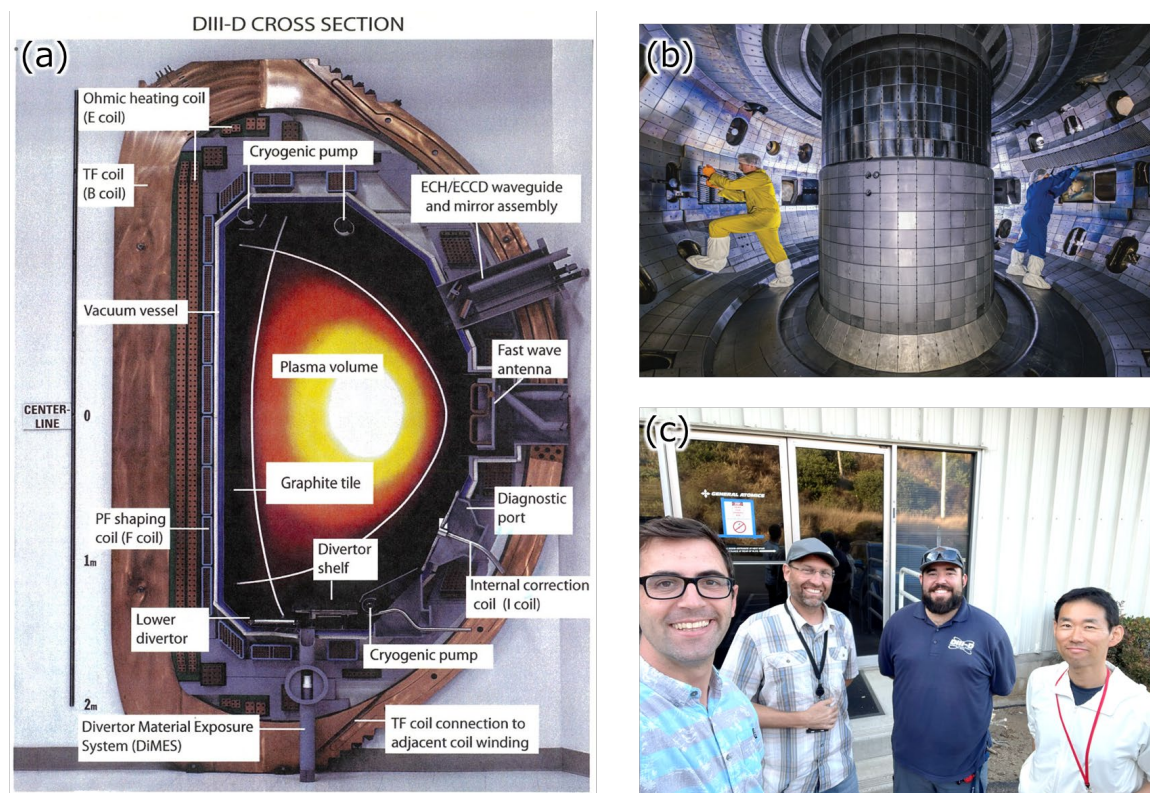


図 1. (a)DIII-D 装置断面模式図, (b)DIII-D 真空容器内写真, (c)GA エンジニアとの記念写真

2-1. 設計現場における解析業務

GA の設計現場では、解析は「後から確認するための作業」ではなく、設計の初期段階から積極的に使われていた。つまり、アイデアの段階でその妥当性やリスクを数値的に把握し、設計の方向性を早い段階で見極めているのである。例えばダイバータ設計では、プラズマが不安定になる際に生じる「ハロー電流」の影響を考慮する。その評価には、まず過去の実験や測定から①ハロー電流の大まかな分布や大きさを仮定し、②ANSYS Maxwell による電磁場解析を用いて電流と磁場の相互作用で生じる電磁力を算出し、その結果を③ANSYS Mechanical による構造解析へと引き継ぐ。この①～③の一連の流れがすでに確立されており、複数の解析を連携させることで設計の信頼性を高めていた。

さらに興味深いのは、常に高精度な解析に頼るわけではない点である。初期段階では過去の実験データや経験則をもとに簡易的な評価を行い、有望な案に絞ってから詳細解析へ進む。この段階的なアプローチにより、限られた時間と計算資源を有効に使いながら、効率的に設計が進められていた。

また、意思決定においては、単に技術的に成立するかどうかだけでなく、コストや加工のしやすさ、メンテナンス性、発生するリスクといった実務的な要素も可視化され評価されていた。この点において、研究主体の設計とは異なる「実装を見据えた現実的な設計思想」が強く感じられた。

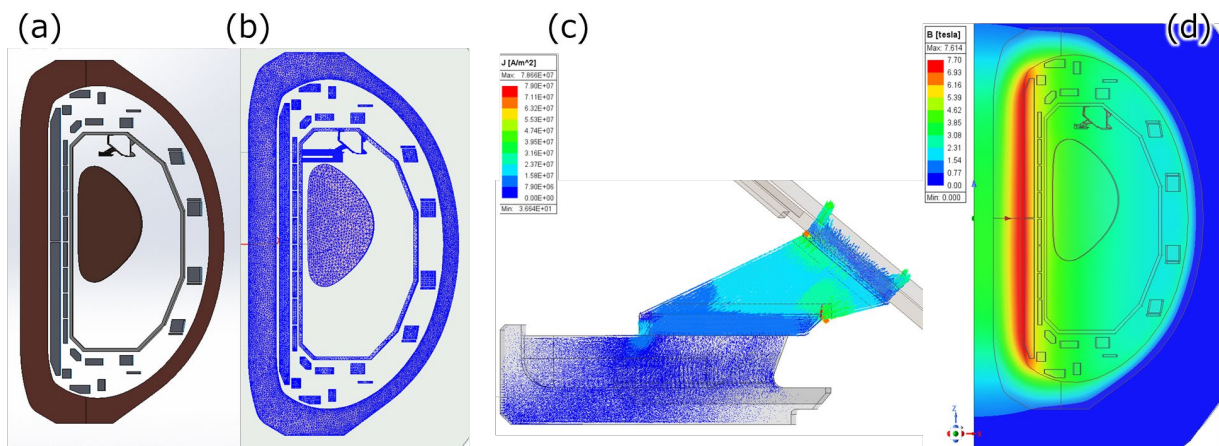


図 2. DIII-D ダイバータ設計のための解析例 (a)15度にカットされて製作された解析モデル断面 (真空容器、コイル、プラズマ、ダイバータ) , (b)計算メッシュ (真空容器、コイル、プラズマ、ダイバータ) , (c)ダイバータタイルに流れる電流分布, (d)解析空間を含む磁場分布

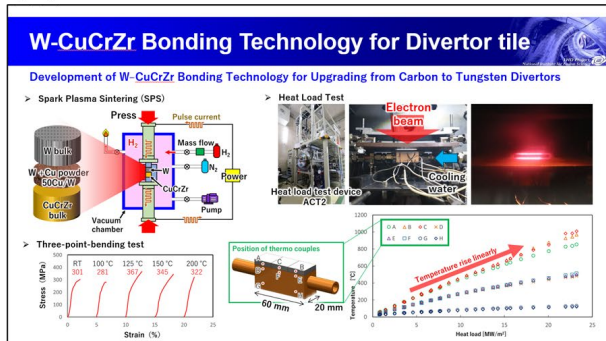
2-2. GA 技術者との議論

現地の職場環境で際立っていたのは、エンジニア同士の距離の近さである。会議室だけでなく、廊下や居室でも日常的に活発な議論が交わされ、疑問や課題が生じれば、その場で関係者が集まり、即座に方向性を決めていく。こうしたオープンなコミュニケーションは、設計の質を高めるだけでなく、若手エンジニアの成長を大きく後押ししているように感じられた。

また技術交流の一環として、LHD におけるタングステンダイバータ技術を紹介し、異種金属の接合や高い熱負荷への対応について関係者と議論を行った。その結果、DIII-D においても LHD と同様の課題が存在することがわかり、双方の知見を組み合わせることで課題解決の可能性が広がるように感じた。

特に、繰り返し加わる熱 (パルス熱負荷) に対する構造の健全性評価や、材料の選び方に関する議論は非常に活発であり、今後の共同研究に向けた具体的なテーマも共有することができた。

(a)



(b)



図3. LHDにおけるタングステンダイバータ技術の紹介 (a)プレゼンテーション資料の一部、
(b)GAにおける Technical ミーティングの様子

2-3. ダイバータ構造における設計検討

さらに、負三角度ダイバータ（NTD）計画の設計検討にも参加し、GA のエンジニアと協働で構造案の検討を行った。ここでは、黒鉛タイトルの配置や固定方法に加え、製造のしやすさを考慮した一体構造の提案など、実際の導入を見据えた議論がなされた。

特に材料選定においては、単に熱をよく伝えるかどうかだけでなく、コスト、加工性、入手のしやすさといった現実的な条件が重視されていた。この点は、NIFS での設計との違いを強く意識する契機となり、設計に対する視野を広げる貴重な経験となった。

2-4. 今後の展開について

今後に向けては、今回得られた知見を組織内で共有するための勉強会の開催や、設計初期における簡易評価手法の導入が有効と考えられる。また、解析結果の活用方法や意思決定の流れを標準化することで、設計の効率化と品質向上が期待できる。さらに、GA との継続的な連携を通じて、国際的な技術協力を強化していくことも重要である。

3. 所感

本事業を通じて、核融合実験炉のダイバータ受熱機器設計に関する、長年の運用に裏打ちされた実践的な知識と手法に直接触れることができた意義は大きい。それ以上に、エンジニア同士が率直に議論しながら課題を解決していく現場を体感できたことは、自身の業務に向き合う姿勢を大きく変える経験となった。

今後は、この経験で得た知見を日々の業務に生かすとともに、技術部内へと広く共有し、技術力の底上げと人材育成に貢献していきたい。

4. 研修報告

4.1 令和7年度東海地区国立大学法人等「マネジメント研修」に参加して

機械システム技術課 課長 小淵 隆

令和7年9月19日（金）、令和7年度東海地区国立大学法人等リーダーシップ研修に参加した。本研修は東海地区の国立大学法人、大学共同利用機関法人、独立行政法人国立高等専門学校機構及び独立行政法人国立青少年教育振興機構の機関の管理職員（課長級）に対し、国立大学法人等の組織運営の中核を担う管理職に長期的・短期的の観点と高い視点から現状をとらえ、大学運営の在り方を再確認すると同時に必要なマネジメント能力の向上を目的として実施された。開催場所は国立大学法人名古屋工業大学 NITech Hall2 階ラーニング・コモンズ「EPSON STUDIO」。参加者は9機関34名。本研修の講師は株式会社ビジネスコンサルタントから招き、参加者は7グループに分かれ、テーマとして大学を取り巻く環境変化と動向、組織マネジメントを担う管理職の7つの役割の確認、上位概念（MDCVS）の確認、人材育成の思いと現状、今後の大学運営における私達管理者の役割行動を題材に各所属機関における状況を情報共有し意見交換を行った。

優良組織の創造には、将来像と文化の合致性に加えリーダーシップが必要であることの紹介があった。その将来像に対して、これまでの組織の文化を無視しては到達できない。文化として変えなければならないこと。変えてはいけないこと。変わらないこととは何かを理解し、戦略に合った組織体質作りが必要であるとのこと。グループでの情報共有において各々の組織で独特の文化が存在することを認識する機会となった。何かを始めるにもその文化を考慮に入れ、合致した内容を検討することが必要であることを考えさせられる機会となった。また優良基準の一つに社員満足が挙げられ、組織に貢献している実感を与えられるような仕組み作りが大事であることが説かれ印象に残った。

マネジメントの2大機能として戦略的機能と業務的機能の紹介があった。戦略的機能とは、ミッション・ビジョンに基づいて新しい取り組みや強化する取り組みを明確にすること。ミッション・ビジョンに貢献しないことを止める・切る・捨てること。である。前者はイメージ出来ていたことであったが、後者には大きな気付きを得られる内容であった。これまで先人たちが築き上げてきたものを保守的に継承し、その上に新たな取り組みを積み上げることを前提に考えていた。マネジメントにおいても断捨離が必要であることを感じさせられた機会であった。

本研修を通して、組織の目的・使命を職員に浸透させることが組織運営の大前提であること。人を動かすためには人の感情・気持ちを奮い立たせること。そのためには認知、期待の伝達が一つの手段であることを強く意識させられ、多くの気付きを得ることができた。今後の課題として学び、気付きを実践していくための仕組み作りを検討していきたい。

4.2 プログラムマネージャー人材育成プログラム参加報告

設計開発技術課 村瀬尊則

本研修は、「社会課題の解決」をキーワードに、研究開発から社会実装までを一体的に構想できる人材の育成を目的とした2段階のステージで構成される研修プログラムである。選抜審査を経て参加し、第1ステージでは構想設計や思考法、マネジメント等を体系的に学びつつ自身の研究テーマを構想し、フィジビリティ・スタディ (FS) 計画としてまとめた。続く第2ステージでは「未利用バイオマスの高度利用」をテーマに、排熱活用と未利用材の有価物への転換を組み合わせた新たな価値創出モデルを検証し、技術的な実現性と事業性の両面から評価を行った。最終的に、これらの検討結果を FS 実施報告書として取りまとめ、有識者による評価会で報告を行い、研修を修了した。

1. 概要

2. プログラムマネージャー人材育成プログラム

本研修は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) が実施するプログラムマネージャー (PM) 人材育成プログラムであり、2段階のステージで構成される (図1参照)。社会課題の解決を起点として研究開発を構想し、その成果を社会実装までつなげていくことのできる人材の育成を目的としている。単に技術力を高めるだけではなく、「何を解決すべきか」という課題設定の段階から、「どのように実装し価値を生み出すか」という全体設計までを一体として捉える点に特徴がある。



図1. プログラムマネージャー人材育成プログラム

2-1. 研修生選抜審査 (2022年6月～9月)

参加にあたっては、複数の審査が設けられている。一次審査は書類選考であり、社会課題の解決に資する独自の研究開発テーマについて小論文を作成し、課題設定の妥当性や着想の独創性、社会的意義などが評価された。ここでは、「身の回りにおける光・熱・電磁波・振動のエネルギーを電力に変換する統合デバイスの開発」を構想した。そして、その実現可能性や技術的課題について整理し、実用化の観点から成立性を論じた。続く二次審査は面接選考であり、小論文の内容に関するプレゼンテーションおよび30分程度の質疑応答が行われ、これまでの実績や課題解決能力など多面的に評価された。これらの審査

を経て、第8期生として20名が選抜され、2022年10月より本研修に参加することとなった。

2-2. 第1ステージ（2022年10月～2023年12月）

約1年間に及ぶ第1ステージ（隔週金曜日、JST東京本部で開催）では、講義とグループワークを組み合わせた体系的なカリキュラムが展開され、社会課題の構造化や要求機能の抽出、技術要素の分解と統合といった構想設計の基本的な手法について理解を深めた。また、システム思考やデザイン思考といった課題解決の枠組みに加え、ロジカルシンキング、思考展開法、シナリオプランニング、知財戦略、組織マネジメントなど、研究開発を社会実装へと結び付けるための多様な知識を横断的に学んだ（図2参照）。これらの内容は、それぞれが独立した知識ではなく、相互に関係しながら構想全体を支えるものであり、自身の業務においても視野を広げるうえ有意義な研修機会となった。

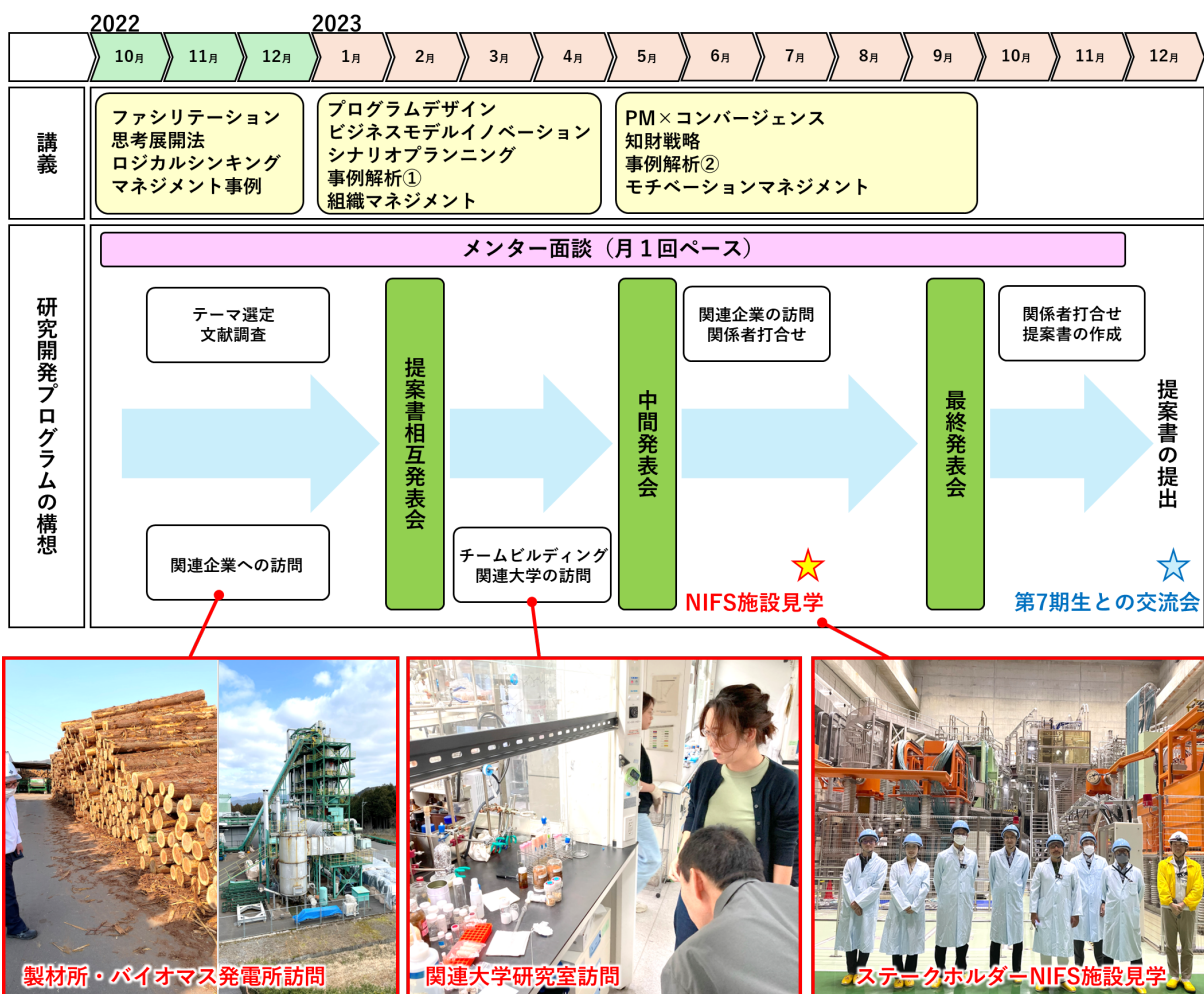
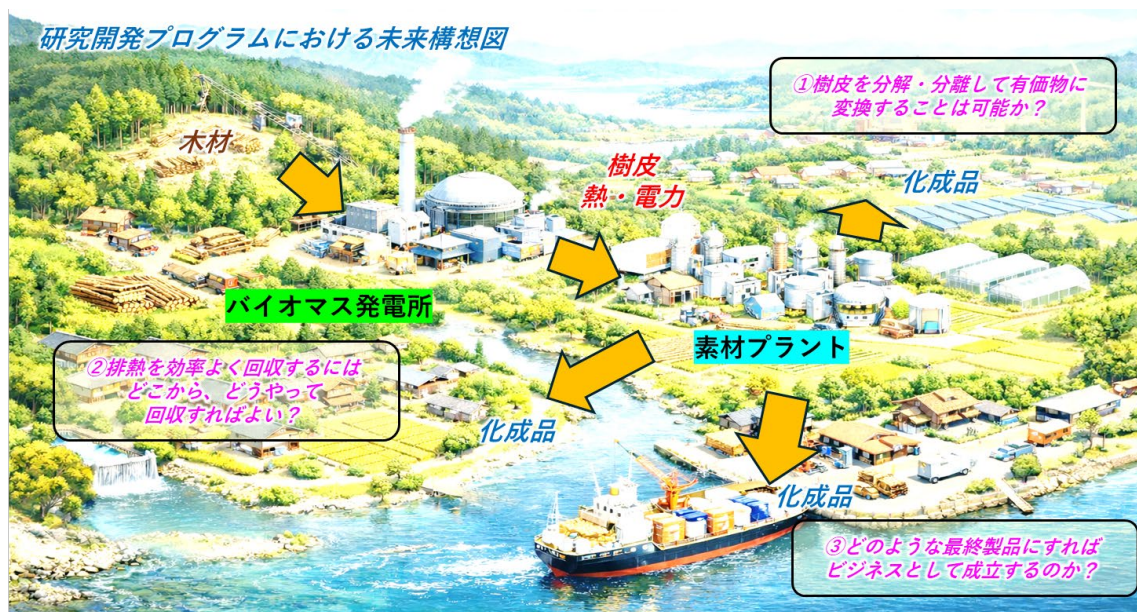


図2. 第1ステージのスケジュール

こうした学びと並行して、研修生一人ひとりに選任されるメンターの助言を受けながら、自身の研究開発テーマについて構想するとともに、FS計画として具体化した。計画の策定にあたっては、技術的成り立ちだけでなく、大学・事業者への訪問や面談を通じて社会的ニーズを把握することで、社会実装性についても意識することが強く求められた。そうしてチームビルディングを行い、未利用バイオマスに関する研究計画書を提出、外部有識者により審査され、新規性や社会的インパクトといった観点から評価が行われた。その結果、20名の参加者の中から8名が選抜され、第2ステージへ進むこととなった。

2-3. 第2ステージ（2024年1月～2025年12月）

第2ステージは約2年間に及ぶ調査研究である。JSTより研究費の支援を受けながらFSを実施し、構想の具体化に向けた検討を進めた。プロジェクト推進においては、第1ステージで提案・採択された研究プロジェクトに基づいて、メンターとの継続的な議論を通じて構想の実現性をさらに高めていった。また、単なる技術的検討のみならず、ステークホルダーとの調整や打合せ、意思決定のプロセスなど、実務的なマネジメント経験を積む貴重な機会ともなった。



①-1未利用材（樹皮材）を用いたセルロース加水分解技術の検証

北大の固体触媒法を用いて加水分解条件を探索し、グルコース収率68%（当初目標60%）を達成

①-2未利用材（樹皮材）を用いたセルロース分離技術の検証

京大の分離手法を用いて樹皮からセルロースを収率約85%で分離可能であることを確認

②バイオマス発電所における熱回収方法の検討

A) 復水器における熱回収（200～400℃）

復水器 約2.6-2.9 MWの熱を回収可能と試算（発電出力2MW級のバイオマス発電所）

B) 排気塔における熱回収（60～80℃）

外気と直接熱交換するため、季節による影響が顕著

約0.4-0.6 MWの熱を回収可能と試算

木材の乾燥原料の予熱 糖液濃縮 建屋設備の保温など

③製品展開への検討

燃料系	化学品・素材系	食品・機能性素材
バイオ燃料（バイオエタノール等）	バイオ化学中間体（フルフラール等）	機能性糖（キシロオリゴ糖）
工業向けには薄利一般消費者向けに用途を限定	バイオマス由来が必須の少ない化学品	小規模・高付加価値食品用途は要認可
市場価格（円/kg） バイオエタノール 600-900	フルフラール 250-350	キシロオリゴ糖 2,000-5,000

図3. 未利用バイオマスの利活用に関する検証

今回構想したテーマは、「未利用バイオマスの材料利用によるバイオマス発電の高度化」である。バイオマス発電は天候や気候に左右されない再生可能エネルギーの一つとして、大規模災害時に重要な役割を担っているが、発電効率や経済性の面では依然として課題が残されている。特に、発電過程で生じる排熱の有効活用は大きな改善余地の一つであり、本計画ではこの点にも着目した。

具体的には、廃熱を単なる未利用エネルギーとして捉えるのではなく、材料製造プロセスに活用することで付加価値を創出することを目指した。さらに、バイオマスを燃料として消費するだけでなく、有

価値へと変換するプロセスと排熱を組み合わせることで、新たな収益源の創出につなげる構想である。また、従来は含水率が高く利用が難しいとされてきた樹皮などの未利用資源についても、加水分解技術やセルロース分離技術を工夫することで原料として活用できる可能性を調査し、資源利用の幅を広げることを試みた。

この構想では、バイオマス発電所を単なる電力供給設備としてではなく、「素材・熱・電力を一体的に供給するプラットフォーム」として捉え直している。このような視点に立つことで、発電事業の付加価値を高めるとともに、地域に存在する資源や需要に応じた多様な展開の可能性を見出すことができると考えた（図3参照）。

技術検証は三つの段階に分けて実施した。まず、北海道大学の福岡教授、京都大学の中村教授との協力体制のもと、①セルロースの加水分解・分離に関する基礎実験を行い、反応条件の最適化や生成物の特性について評価を行った。次に茨城県だいがバイオマス発電所の協力のもと、②熱回収方法の検討や上記実験に基づいてマテリアル変換に必要なエネルギーを割り出し、高機能材料の製造プロセスにおける排熱利用の可能性を検証した。さらに、実証規模での展開を見据え、株式会社ダイセルの協力のもと、量産性や製品適用に関する課題の抽出を行い、③最終製品への展開を検討した。

2-4. 修了評価会（2026年2月）

2026年2月に行われた修了評価会にて、FS実施内容に関するプレゼンテーションおよび30分程度の質疑応答が行われた。評価は様々なバックグラウンドを持つ外部有識者で構成される評価委員会によって行われ、審査の結果、本研修プログラムを無事修了するに至った。

修了所見では、技術に偏ることなく複数の事業シナリオを描き、全体最適の観点から検討を進めた点が評価された。また、FS開始当初は技術的成立性の検討が中心であった構想が、市場性やエネルギー需給といった観点を取り入れることで、より実装を意識した内容へと発展した点についても、研修を通じた成長であるとして評価された。さらに、異なる技術分野を横断しながら検討を進めた経験についても意義があると評価された。

一方で、社会実装までの段階的な目標設定や達成度の評価基準の明確化、市場や需要家の視点に基づく最終製品の具体化、それに伴う経済性や供給安定性の更なる検討などについて、今後の課題として指摘された。特に、ビジネスモデルや出口戦略に関しては、より具体的かつ定量的な裏付けを持たせる必要があると指摘された。

3. 研修を終えて

本研修は、技術開発を個別要素として最適化するだけでなく、社会実装までを見据えたシステムとして設計する視点の重要性を、改めて強く認識する機会となった。本研修を通じて得られた構想力やマネジメント力、思考力などは、今後の技術部業務においても強力な強みとなると考える。また、異分野の専門家との交流を通じて得られたネットワークも、大きな財産である。これらを活かし、装置開発や技術開発にとどまらず、研究開発全体を俯瞰した視点から、技術的な課題の解決に取り組むとともに、産学連携活動など新たな価値の創出にも貢献していきたい。

4.3 令和7年度 東海・北陸地区国立大学法人等技術職員合同研修 「物理・化学」コース Eコース：半導体試料の TEM 観察と EDS 分析 への参加

設計開発技術課 松本大輝

令和7年度 東海・北陸地区国立大学法人等技術職員合同研修 「物理・化学」コース “E コース：半導体試料の TEM 観察と EDS 分析”への参加について報告する。

開催場所は場所名古屋工業大学及び近隣の施設 STATION Ai であった。参加人数は15名（男7名、女8名）であった。日程は2025年8月27日～29日の3日間であった。1日目は講演2題と自己紹介、意見交換会が行われた。2日目は装置の実習が行われた。3日目は講演1題と施設見学会が行われた。

1日目の講演は名古屋工業大学 設備共用部門 山本義哉准教授『技術職員が知っておくべき 知的財産権～著作権と秘密保持～』と長岡技術科学大学 近藤 みずき 主任副技術長『TC カレッジ遠隔分析 DX 系 TC コースによる人材育成の取り組み』を拝聴した。講演のあとに参加者全員による自己紹介が行われた。研修後、初日の夜に構内で意見交換会が行われ、賑やかなムードの中で活発な話し合いが行われた。

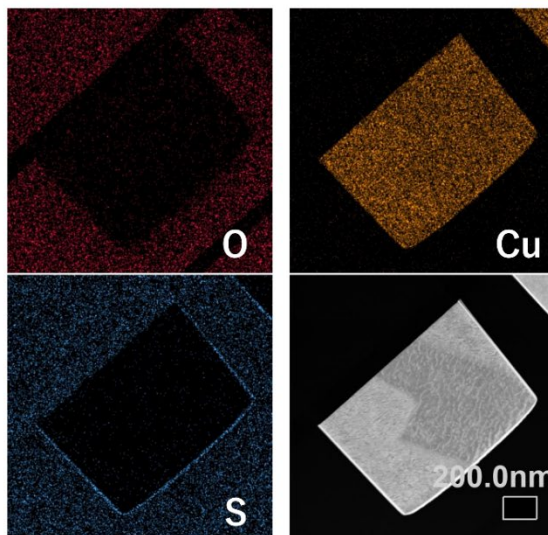
2日目の実習は午前には FIB による薄膜の切り出し、午後には TEM/STEM 観察と EDS による元素分析を行った。実習は名工大技術職員の講師による説明ののち参加者全員が順番に装置を操作した。内容は半導体薄片の切り出し、メッシュへの貼り付け、TEM によるピント調整と観察、EDS による元素分析の実習であった。

FIB、TEM、EDS研修



FIB 薄膜切り出し

TEM/STEM観察
EDS元素分析



6/10

画像1. 実習内容 FIB による薄膜切り出しと TEM/STEM 観察（EDS 元素分析）

説明はレジユメの他手作りの模型を使用しており、わかりやすい説明であった。実習は普段の業務を別の視点から見ることで有意義だった。例えば Rohntigram の設定において教本では伝わらない繊細な操作を口頭で微妙なニュアンスの言葉で教えていただき、また電子ビームの軸合わせを私が過剰に調整している点を指摘いただけた。また、設備の違いによる手順の違いも知ることができた。NIFS におけるマイクロサンプリングは FIB-SEM に付属したプローブを用いて in situ でメッシュに移動するが、名工大においては FIB-SEM から一度大気中に取り出し、別の装置のプローブを用いてメッシュに移動する方式だった。実習の合間の装置の待ち時間に別コースの見学をさせていただくことができた。

3日目は名古屋工業大学近隣の施設 STATION Ai で行われた。STATION Ai はスタートアップと企業のオフィスを混在させ交流を促す施設である。講演は名古屋工業大学北川啓介教授による『地球上のどこでも誰でも 数時間で建てられて酷暑でも極寒でも 快適なインスタントハウス』を拝聴した。講演の後施設担当者の方に STATION Ai の施設案内をしていただいた。

今回の研修は電子顕微鏡の知識・技術、同業者交流、その他交流の面において非常に有意義であった。装置の実習について注意点があるとすれば、装置を一人で操作できる程度まで習得してから参加し、疑問点を挙げておく方が良いと感じた。理由は装置の利用法を 1 から教えてもらえる場ではないため一連の手順を知っておいたほうが学びが多いと感じたためである。今回の研修で培った交流をもとに技術職員間で相互に成長し会える関係を目指したい。



画像 2. 研修終了後の集合写真 Station AI にて

5. 技術研究会開催報告

1. 概要

令和7年度核融合科学研究所技術研究会は、全国の大学、高等専門学校及び大学共同利用機関、研究所等33機関から約160名の技術職員の参加をいただき、2026年3月5日、6日の両日、岐阜県多治見市産業文化センターにおいて開催された。核融合科学研究所（以下「本研究所」という）主催の技術研究会としては、2018年以来8年ぶりの現地開催であった。

2. 準備

2-1. 実行委員会

第1回実行委員会は2025年1月29日に開催された。実行委員長は鈴木で副実行委員長は野村主任技術員、各課2名ずつ実行委員を選抜し、11名体制とした。実行委員会は計9回行われた。

2-2. 開催方針

分科会はこれまで通り5つとした。口頭発表とポスター発表を選択できるようにした。口頭発表は講演15分、質疑応答5分、ポスター発表は70分とした。技術研究会と並行して「有限要素法による解析技術」技術交流会を開催することとした。

2-3. 改善点、新たな試み

今回の技術研究会では、過去に研究所で開催された技術研究会にはなかった、以下のような新たな取り組みを行った。

- 各機関へ開催案内を郵送しない。ポスターを作成しない。
- QRコードでの受付、および電子領収書の採用。
- 会場無線LANの使用。
- 運営協議会におけるオンラインと現地のハイブリッド開催。
- 紙の予稿集、報告書の廃止。
- 口頭発表用スクリーンの大型化。
- 本体室見学時に、LHDを上部から見学できるよう上階のキャットウォークを使用する。

3. 研究会当日

3-1. 設営、片付け

2026年3月5日9時より会場設営を開始した。設営および片付け作業は、会場に出勤可能な全技術職員で対応した。2018年度の現地開催時に作成された詳細な資料、各実行委員による事前準備、そして当日に対応した技術職員の協力により、会場設営、および片付け作業は非常にスムーズに進んだ。

3-2. 開会式、特別講演

開会式では、実行委員長として筆者が挨拶を行った。引き続き、山田所長より「技術研究会を活用して、人的ネットワークを構築し、機関を超えた技術研鑽機会の構築に役立てて欲しい」との挨拶を賜った。途中、プロジェクタの映像が映らないトラブルが発生したが、担当職員が迅速に対応したことで大きな問題へと発展することなく解決できた。その後、坂本隆一研究部長より、「核融合研究の現在地と2

030年代の展望」と題した特別講演が行われた。

3-3. 口頭発表、ポスター発表

25件の口頭発表と、32件のポスター発表が行われた。分科会別講演数を表1に示す。第6分科会「その他」は、当初予定になかったが、技術職員の科研費申請に関わる発表希望があったため、対応することとした。筆者もこの講演を聴講したが、とても興味深い内容の講演で、活発な議論が行われていた。

表1. 分科会別講演数

分科会	口頭	ポスター
第1分科会 工作技術	4	6
第2分科会 装置技術	5	8
第3分科会 計測・制御技術	7	10
第4分科会 極低温技術	7	4
第5分科会 情報・ネットワーク技術	1	4
第6分科会 その他	1	0
合計	25	32

3-4. 施設見学

施設見学の対象は制御室、本体室、ヘリウム液化冷凍機室とした。管理区域に入域するため、事前申し込み制を採用し、40名の方が見学された。

4. 次回開催にむけた申し送り事項

6年後の2031年度にも本研究所主催の技術研究会が開催される。次回開催への申し送り事項とするため、開催後に参加者に向けてアンケートを実施した。その中で多かった意見を紹介する。また運営協議会で議論された研究会参加費についても報告する。

4-1. 名札に記された氏名、所属の文字が小さい。

名札の見本が実行委員会で提示された際には、文字の大きさについて言及はなかった。が、改めて確認すると、研究会のロゴが大きく、名前と所属が小さく見える印象を受けた。Indicoの機能を使って印刷したが、文字サイズに関して特に制約はない。今回は、名前と所属がより目立つような名札を作成する。

4-2. 報告書を開催前にアップロードできないか。

発表を聴く事前準備として報告書を読みたいという参加者の要望は理解できる。そのため、今回の技術研究会でも、開催前のアップロードに向けて努力を試みた。しかし、3月2日ごろに断念した。最も大きな理由は、開催前の事前準備と報告書編集作業が日程的に重なったためである。これを回避するためには、報告書編集者の人数を増やす、報告書編集者が開催前の事前準備に深く係わらない、などが挙げられる。

4-3. 研究会参加費の設定

研究会参加費は基本的に所属機関の予算から支出される。本研究所で開催される技術研究会は、外部の会場を借りることになるため、どうしても必要経費が高くなる。そのため、研究会参加費を適当な値に設定（今回は2000円）とし、残りは技術部の予算から支出している。

一方、今年度開催された運営協議会では、開催機関が予算を支出すること、つまり赤字となる開催はなるべく避けるような意見が出された。研究会参加費が基本的に所属機関の予算から支出され、個人負担とはならないため、ある程度高くても問題ないであろう、という意見である。6年後の2031年度にも本研究所主催の技術研究会が開催されるため、今後の動向に注目しながら研究会参加費を設定することが望まれる。

5. さいごに

令和7年度核融合科学研究所技術研究会は、参加者、実行委員、研究所職員の協力のもと、大きなトラブルが発生することもなく成功裏に終わった。本研究所技術部は、数年に1度、技術研究会の運営を担当している。参加者約150名規模の研究会を安定して運営できるスキルは、本研究所技術部が有する重要な技術の一つであると考えている。



図1. 研究会当日の写真

6. 採用1年を経過して

採用 1 年を経過して

設計開発技術課 松本大輝

私は令和 7 年 4 月に技術部設計開発技術課の技術員として着任いたしました。業務内容は電子顕微鏡 (FIB-SEM、S/TEM) の運用と、設計開発 (CAE 解析、3D プリンター) の大きく分けて二つに従事してまいりました。

電子顕微鏡業務は、これまで本研究所の技術部では対応してこなかったものであり、令和 7 年度より新たに開始された業務でした。私は採用の途中段階から本業務について打診を受け、入所間もないながらも担当させていただくという大変光栄な機会を得ました。電子顕微鏡はミクロな現象の解明や精密加工において必要不可欠な装置です。一方でその運用や理解には物性物理分野の知識が求められますが、この点については物理学を専攻してきた自身のバックグラウンドを活かすことができました。電子顕微鏡の操作については FIB-SEM、S/TEM ともに使用経験がありませんでしたが、研究部プラズマ・複相間輸送ユニットの時谷先生、森下様に多大なるご指導とご協力をいただき、夏頃には FIB-SEM および S/TEM の双方を用いた業務に従事できるようになりました。さらに新型装置の導入も完了し今後はより一層の貢献が求められていると感じております。

私が配属された装置開発運用班では、研究所内外からの設計・開発案件に対応しております。本研究所では 3D CAD (SolidWorks)、解析ソフト (Ansys)、3D プリンターを自由に利用できる環境が整っています。もともと CAE 解析技術者として応募していたことから、どのように貢献できるかを検討した結果、3D プリンターを活用した業務改善に注力することとしました。特に電子顕微鏡技術者としては未熟である点を踏まえ、実験治具の製作や格子モデルの作成などを通じて 3D CAD 技術を維持・活用しながら貢献する方法を模索しました。一方で、十分に取り組めていなかった解析業務についても年度末には担当させていただく機会を得ることができ、微力ながら CAE 技術者としての役割を果たせたのではないかと考えております。

また、LHD の最後の実験に携わることができたことは大変光栄であり貴重な経験となりました。中でも私は最終ショットにおけるガスパフ担当の一人として立ち会うことができました。LHD とともに歩んできた多くの方々が集い、その実験を見守る中で感じた緊張感は今も忘れられません。一方で LHD という象徴的な存在がなくなった現在、NIFS の技術職員として今後どのように貢献していくのかが問われていると感じています。そのような中同世代の先輩方は「核融合」という枠組みにとらわれず多様な分野で活躍の場を広げておられます。成果に対するプレッシャーを感じる場面も少なくありませんが、この貴重な機会を逃すことなくポスト LHD における NIFS を担う一員としての自覚を持ち積極的な活動を目指してまいります。未熟な点も多くありますがこれまで述べた二つの柱を軸に研鑽を続け、学会発表および論文執筆を目標として 2 年目を迎えたいと考えております。今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしく願いいたします。

7. 学会発表リスト

論文

- “Enhancement to gas puffing control system towards precise control of electron density in LHD”, Kazuki Nagahara, Kohji Yasui, Hiromi Hayashi, Hiroshi Hayashi, Takanori Murase, Akihiro Shimizu, Mitsutaka Isobe, Fusion Engineering and Design 222 (2025) 115519.
- “Engineering design and manufacturing of the modular coil system for the quasi-axisymmetric stellarator CFQS-T”, Hiroyuki Tanoue, Sho Nakagawa, Kazuki Nagahara, Takanori Murase, Akihiro Shimizu, Kunihiko Ogawa, Hiromi Takahashi, Mamoru Shoji, Shoichi Okamura, Mitsutaka Isobe, Masaki Osakabe, Dapeng Yin, Haifeng Liu, Yuhong Xu, Fusion Engineering and Design 212 (2025) 114853.

口頭・ポスター発表

- 第 62 回アイソトープ・放射線研究発表会 2025 年 7 月 2 日～4 日
 - 天然放射性核種を用いたガスフロー検出器の点検用線源の試作と評価 中田実希
 - モレキュラーシーブスを用いたトリチウム放出量評価手法の検討 加藤ひろみ
- 第 37 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会 2025 年 7 月 3 日～4 日
 - 核融合科学研究所におけるタンデム加速器の現状について 田窪英法
- 第 42 回 プラズマ・核融合学会 2025 年 12 月 1 日～4 日
 - エンジニアリング側面からみる準軸対称ステラレータ CFQS 及びその IT 化に向けた装置改造に係る進捗 田上裕之
 - CHD-U の工学設計 中川 翔
 - 未利用バイオマス由来活性炭の製造方法の最適化 柳原悠人
 - Thailand Tokamak-1 における超音速分子ビーム入射システムの導入準備と技術的検討 長原一樹
 - LHD-NBI1 号機アーマタイトルのトリチウム分析 加藤ひろみ
- 令和 7 年度核融合科学研究所技術研究会 2026 年 3 月 5 日～6 日
 - 続・GaN-FET を用いたインバータ電源の製作 伊藤康彦
 - 核融合科学研究所における VPN システムの運用 中村 修
 - シュリーレン法を用いたラバールノズルの性能評価 長原一樹
 - 高温超伝導コイル巻線試作機の開発状況 田上裕之
 - 漏水検知システムの運用 河合将照
 - 放射線管理システム構築の事例紹介―汚染検査を例として― 中田実希
 - JT-60SA におけるミリ波ドップラー反射計アンテナの電磁力解析 柳原悠人
 - 機械学習によるカメラ映像のリアルタイム異常検出 前野博也

採択

- 令和 8 (2026) 年度科学研究費助成事業 (科学研究費補助金) (奨励研究)

核融合炉の長期安定運転に向けた水素同位体保持・放出特性の高温非破壊評価 田窪英法

- ・ 2026 年度放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点共同研究助成金（若手）
化学形態別トリチウム捕集用パッシブサンプラーの開発 中田実希
- ・ 2026 年度 OPEN MIX LAB (OML) 公募研究プログラム（技術開発型）
3He-NRA 測定技術と周辺装置の開発 田窪英法

受賞・表彰

- ・ 令和7年度 放射線安全管理功労表彰並びに原子力規制委員会委員長賞
三宅 均

資格

- ・ 第一種衛生管理者 田窪英法 2025 年 10 月 28 日取得
- ・ 玉掛け技能講習 中川 翔 2026 年 2 月 25 日修了