

2023 年度  
技術職員報告書

2024 年 7 月  
核融合科学研究所技術部

## はじめに

技術部長 林浩己

核融合発電は、化石燃料を使用せず、将来のエネルギー不足と環境汚染の問題を同時に解決しうる技術として、世界中の研究機関でその実用化に向けた研究が推進されています。一方、核融合科学研究所は2022年度に大規模学術フロンティア促進事業における大型ヘリカル装置（LHD）計画プロジェクトが終期を迎え、2023年度から新たに学術基盤事業として3年間のLHD実験計画が開始されました。さらに、文部科学省の『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－』においては、核融合科学研究所が提案した『超高温プラズマのマイクロ集団現象と核融合科学』が掲載され、LHD実験計画終了後の2026年度より、本計画の開始を目指しています。このような変革期にも適応するため、核融合科学研究所技術部は2023年4月1日より組織改編を行い、新たな体制で業務を開始するに至りました（詳しくは、技術部ホームページを参照ください <https://etwww.nifs.ac.jp/>）。

これまで技術部は、主業務として、LHDに関わる様々な運転・保守・技術開発業務を行っており、その高い運転実績が技術力及び組織力の高評価に繋がっています。特に2022年度には、技術部の活動に対する外部評価が行われ、国内外の大学・研究機関で構成される評価委員から高い評価を受けました。これまでの技術部職員に係る技術成果や活動成果については、英文年報（参照URL <https://www.nifs.ac.jp/report/annrep.html>）として取り纏めていましたが、2025年度における学術基盤事業の終了を見据えて、広く一般の方々にも技術活動を周知するため、技術職員の様々な技術活動をひとつの報告書として毎年記録することが重要であると考えました。また、主業である技術開発のみならず、日常業務における創意工夫により生まれた知見・経験・ノウハウをきちんと言語化して文章として残すことにより、技術伝承や従来技術の改善・革新に資する契機ともなり得ます。さらに、技術職員が各自の業務成果等をまとめることは、当然ながら論理的で伝わりやすい文章が要求されるため、結果的に文章作成能力やプレゼンテーション能力の向上も期待できます。

2023年度は、2024年3月から始まるLHD実験に向けて、その実験準備が主たる業務となりました。このほか最近では、これまでの多様な研究支援で培った技術的な知見・経験・ノウハウを活かして、産学官連携した業務への参加も期待されています。その中で、他大学・研究機関や民間企業との共同研究や共同技術開発にも積極的に参画しました。そして、高度で専門的な技術支援を通じて、核融合研究における成果創出に大きく貢献しました。このように、技術職員の業務範囲は極めて多岐に渡るため、本報告書ですべての技術活動を取り扱うことは叶いませんが、出来る限り広範の活動を網羅することに努めました。本報告書が、核融合研技術部における活動に対する理解の一助となれば幸いです。

最後に、これまで技術部が活発に活動できたのは、ひとえに研究部および管理部をはじめとする多くの方々から頂いた、ご指導ご鞭撻のおかげと感謝しております。この場を借りて御礼申し上げます。

## 目 次

1. 機械システム技術課	5
1.1. マシニングセンターを使用した加工の精度向上について	5
1.2. イオン荷電交換分光計測装置（FIDA）はめ合い部の再設計と製作	8
1.3. 第 I 冷却水装置棟における 1-b 系冷却水装置の運用停止	9
1.4. 開発実験棟冷却設備のイオン交換樹脂塔の交換	10
1.5. 中央部品室 WEB ページの制作	12
2. 設計開発技術課	13
2.1. タングステンダイバータ試験体の設計開発	13
2.2. 請負運転員削減とそれに伴う技術職員の対応について	14
2.3. 放電プラズマ焼結法を用いた活性炭の焼結	17
2.4. コールドコンプレッサ分解点検の紹介	21
2.5. 赤外吸収分光法による水素同位体計測のレーザー計測プログラムの作成	24
2.6. 超伝導マグネット研究棟の温度可変低温設備等の維持・保守管理	25
3. 電気電子技術課	29
3.1. 高周波自動整合器の修理	29
3.2. NBI テストスタンド冷却水ポンプの省エネ運用	34
3.3. 色検知による警告システムの開発と運用	36
3.4. 電気電子技術課における様々な業務	39
3.5. ECH 電源等トラブル対応	42
3.6. 危険物質管理室におけるリスクアセスメント届導入	43
4. 計測分析技術課	45
4.1. 掃除用ロボットを用いた管理区域内床表面汚染監視手法について	45
4.2. 液体シンチレーション計数装置の ESCR 値と測定バイアル質量との相関	50
4.3. 発振器の入射方向表示器の製作	53
4.4. 実験データ収集系運転監視の省人化	55
4.5. イオンビーム解析装置におけるルビジウム（Rb）交換作業環境の整備	56
4.6. Google アカウント管理の省力化	57
5. 制御情報技術課	58
5.1. 低温システムの信頼性を向上させるため機械学習を用いたシステムの状態予測モデル開発	58
5.2. ITER 低温システムダイナミックシミュレーション	59
5.3. 危険物質リスクアセスメント届申請システムの構築	63
5.4. 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	65
5.5. リモートアクセスサービスの 10G 化と日頃のセキュリティ対策	66
6. 民間との受託研究及び共同技術開発	68
6.1. 産学連携活動	68
6.2. 受託研究、共同技術開発	69
6.3. 自然科学研究機構：ミッション実現戦略事業	71
7. 他大学、他機関における技術協力・技術支援	72
7.1. JT-60SA トカマク向け TESPEL 入射装置の制御システム開発	72

7.2. JT-60SA 用 TESPEL 入射装置制御ソフトウェアの開発 .....	73
7.3. 準軸対称ステラレータ CFQS の建設支援 .....	74
8. 海外出張 .....	77
8.1. 「CFQS」中国出張 .....	77
8.2. タイ ワライラック大学への訪問 .....	78
8.3. 韓国 KSTAR 出張 .....	79
8.4. General Atomics 社訪問および DIII-D 視察 .....	80
8.5. ISFNT2023 参加および発表 .....	81
8.6. フランス ITER 出張 .....	82
8.7. 日米 RF 加熱物理ワークショップ出席及び DIII-D 視察 .....	83
9. 令和 5 年度東海地区国立大学法人研修 .....	84
9.1. 令和 5 年度東海地区国立大学法人等「リーダーシップ研修」に参加して .....	84
9.2. 令和 5 年度東海北陸地区国立大学法人等技術職員合同研修（名古屋大学） .....	85
9.2.1. 「複合領域コース」 電気電子技術課 主任技術員 水野嘉識 .....	85
9.3. 令和 5 年度東海北陸地区国立大学法人等技術職員合同研修（金沢大学） .....	86
9.3.1. 「機械コース」 設計開発技術課 技術員 田上裕之 .....	86
9.3.2. 「機械コース」 機械システム技術課 技術員 清水貴史 .....	87
9.3.3. 「機械コース」 設計開発技術課 技術員 柳原悠人 .....	88
10. 採用 2 年を経過して 計測分析技術課 技術員 栗田紗緒里 .....	89
11. 学会発表リスト .....	91
12. 受賞記録 .....	92

※ 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）
  - （CHS 運用班）
  - （計算機部門運用班）

# 1. 機械システム技術課

(技)

## 1.1. マシニングセンターを使用した加工の精度向上について

機械システム技術課 清水貴史

本報告は、マシニングセンターを使用した機械加工の加工精度向上についてまとめたものである。加工精度を向上させる必要性があったのは、マイクロ波部品であるノッチフィルター（図1）の製作を行ったためである。この部品は、0.01mmの違いが性能に影響を与えるもので、非常に高い精度を求められる。加工工程は、すべてマシニングセンターによる切削加工で、素材はアルミニウム(A5052)、使用した工作機械は、MCV350[メーカー：OKK]（図2）である。

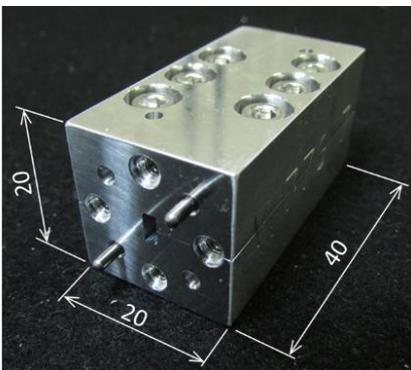


図1. ノッチフィルター



図2. MCV350

精度向上のきっかけとなったノッチフィルターとは、通過したマイクロ波を特定の周波数のみ減衰させるフィルターである。製作したフィルターの性能目標は、77GHzを減衰させ、50GHz~80GHzの周波数帯は損失なく通過させることである。目標の性能を実現するために、CAE解析を用いてマイクロ波が通過する空間の形状を設計する。解析ソフトは、ANSYS HFSSを使用した。解析に必要な3DモデルはCADソフト：Solid Worksを使用した（図3）。さまざまな形状の空間を解析し、目標性能を満足するように形状の最適化を行う（図4）。次に、解析で求めた空間形状を作るための筐体を設計し、加工の後、性能測定を行う。性能測定をした結果と解析の結果を比較したグラフを図5に示す。比較すると76GHz付近に、解析と異なる特性が見られた。その原因を見つけるため製作したものを寸法測定したところ、切削加工の位置ずれが生じていることを確認できた。図6に示した2つの寸法を比べると0.023mmの差があり、位置ずれがあることを示している。フィルターの構造は2分割になっており、組み合わせることでマイクロ波が通る空間形状を作っている。したがって、図6.に示した寸法は同一であると、組み合わせた時にずれのない円筒形状となる。また、円筒部と中央の溝を繋ぐように細溝が加工されているが、この細溝と円筒部の位置関係についてもずれがあることが分かった（図7）。確認された2箇所位置ずれを改善した内容を次に示す。

● 改善①：タッチセンサーの校正

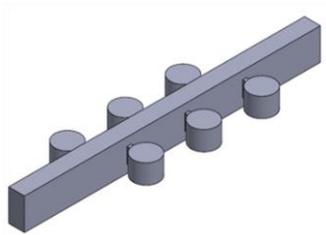


図 3. 3D モデルで再現した空間

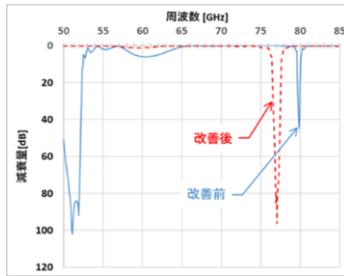


図 4. 解析による最適化

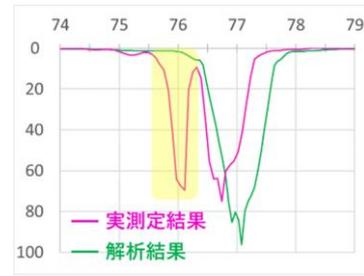


図 5. 解析と実測定結果

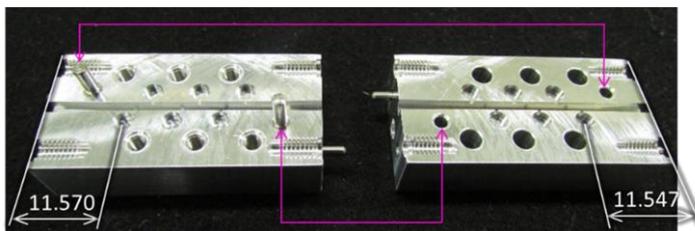


図 6. 寸法測定(円筒形状)の結果



図 7. 寸法測定(細溝)の結果

タッチセンサーは加工物の位置を測定する際に使用するが、主軸の振れやタッチセンサー自体の誤差の影響を受けるため校正をすることで、位置ずれに対して改善効果がある。校正の方法は、リングゲージを使った方法で行った。まず、回転する主軸の位置を毎回同じにするため、主軸定位置停止の機能を使用する。タッチセンサーは、180deg ごとに主軸に取付けることができるため、印をつけることで取付け位置を固定する。次に、リングゲージをテーブルに固定し、ゲージの中心をタッチセンサーで測定する(図 8)。測定した中心座標を記録して次に、ダイヤルゲージを使用してリングゲージの中心を測定する。図 9 のようにダイヤルゲージを主軸に取付けて主軸を回し、リングゲージの内径面を測定する。主軸を回した時に、ダイヤルゲージの針が振れない位置にテーブルを送り、調整する。この時の座標がリングゲージの中心と、主軸の回転中心が一致している状態であり、タッチセンサーで測定した中心座標との差が補正值となる。今回、実際に補正した数値は、X 軸：+0.012, Y 軸：+0.004 であった。この校正は、年に 1 度は実施すると精度の維持に繋がると考える。



図 8. タッチセンサーによる測定

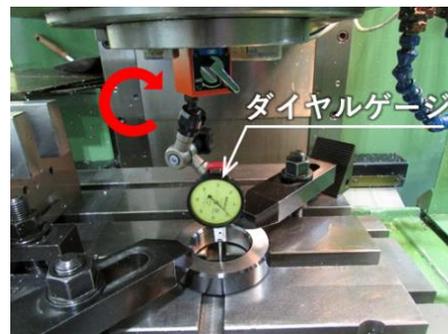


図 9. ダイヤルゲージによる測定

- 改善②：エアスピンドル使用時の補正

エアスピンドルは、マシニングセンターの主軸を回転させて切削するのではなく、主軸を停止状態にして圧縮空気を動力とし、工具を回転させ、切削する道具である。使用しているエアスピンドルは、SMS401-BT40（メーカー：ナカニシ）で回転数  $40,000\text{min}^{-1}$ ・回転軸の振れは  $0.001\text{mm}$  以内の性能を有している。小径のエンドミル等は、周速の関係から高回転にする必要があり、回転軸の振れがあると工具の破損に繋がるため、エアスピンドルが有効である。ノッチフィルター製作では  $\phi 2$  以下のエンドミルを使用する 경우가多く、エアスピンドルを使用することになるが、主軸回転中心とエアスピンドルの回転中心にはズレがあるので補正をすることで、高精度な加工が可能となる。補正值の求め方は、実際に切削をした後、寸法測定による評価を行う。

補正值の求め方は、適当な 4F 加工済みの材料に対して、中心にエアスピンドルを使用して溝加工を行う。次に、画像寸法測定器（図 10）を使用して加工した溝が中心にあるか、を測定してズレ分を補正值とする。X 軸と Y 軸を同様に行った実際の結果は、X 軸： $+0.007$ ，Y 軸： $-0.016$  であった。また、タッチセンサーと同様で、主軸を回転させると補正值は変わってしまうため、主軸の定位置停止と工具の取付け位置を固定する必要がある。

- 結果

上記の改善を行った結果を図 10 に示す。二つの各部品の端面から円筒形状中心までの寸法は  $0.003\text{mm}$  と僅かなズレになっていることがわかる。次に、性能特性を図 11 に示す。こちらも  $76\text{GHz}$  付近の不要な減衰はなくなり、解析結果と同等の特性が得られた。

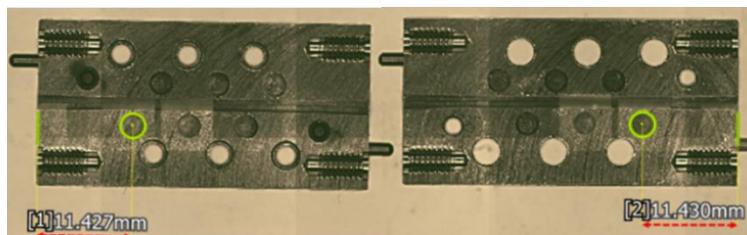


図 10. 寸法測定結果（改善後）

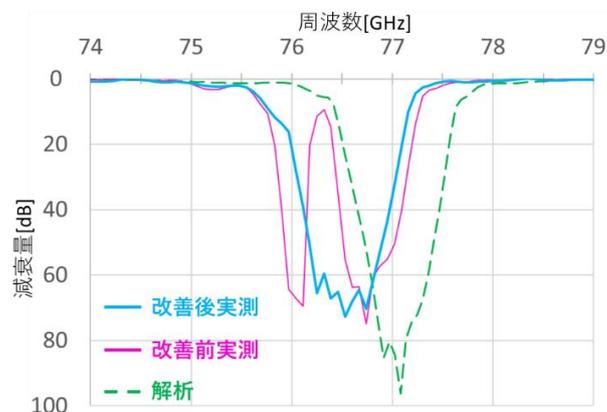


図 11. 性能特性（改善後）

(技)

## 1.2. イオン荷電交換分光計測装置 (FIDA) はめ合い部の再設計と製作

機械システム技術課 岡田光司、清水貴史

大型ヘリカル装置 (LHD) の真空容器内に設置されている高速イオン荷電交換分光計測 (FIDA) 装置の駆動部はプラズマ実験の休止期間毎にメンテナンスのため取り外す必要がある。これまで何度も取り付けと取り外しを繰り返したため、はめ合い部分にかじりが発生し軸と穴には多数の傷 (図 1) がついてしまっていた。ベアリングホルダーの軸は  $\phi 30\text{mm}$  に対して g6 (上公差-0.007、下公差-0.020)、軸受縦板側の穴が直径  $\phi 30\text{mm}$  に対して H8 (上公差+0.033、下公差 0.000) の公差で設計されており軸と穴の隙間は  $0.007\sim 0.053\text{mm}$  である。かじりは軸と穴のはめ合い部の隙間が狭いことが原因 (アルミ材料も原因の一つ) と考えられるため、はめ合い部を設計し直し製作することにした。次の点に注意して設計を行った。①ベアリングホルダーの軸と軸受縦板をそれぞれアルミニウム合金 A2017 (120HB:ブリネル硬さ)、A5052 (68HB) という硬さの違う 2 種類のアルミニウム合金を使用することにした。②軸全体がはめ合い部であった旧製品に対して、はめ合い部を軸の最奥部の 5mm に限定し先端からはめ合い部までのアプローチをテーパ形状に変更してスムーズに脱着できるようにした。(図 2) ③はめ合い部のかじりを防止するためベアリングホルダーの軸を  $\phi 30\text{mm}$  (上公差 0.000、下公差-0.020)、軸受縦板の穴を  $\phi 30\text{mm}$  (上公差+0.050、下公差+0.030) で設計し軸と穴の隙間を  $0.05\text{mm}$  とした。

これらの設計に基づき製品製作を行った。ベアリングホルダーの軸は  $\phi 29.99\text{mm}$ 、軸受縦板の穴は  $\phi 30.04\text{mm}$  で製作することができた。軸と穴の隙間は設計値  $0.05\text{mm}$  を実現している。ベアリングホルダーと軸受縦板はガタなく取付けを行うことができた。また、スムーズに取り外しを行うことも確認し、傷ついた旧部品との入れ替えを行い LHD 真空容器内への設置を行った。

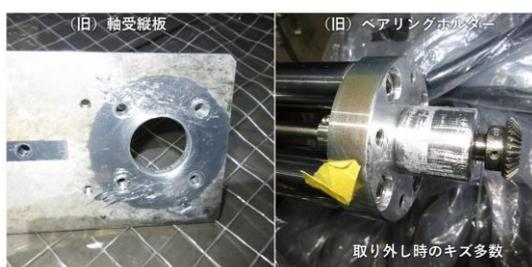


図 1. 傷がついた旧部品

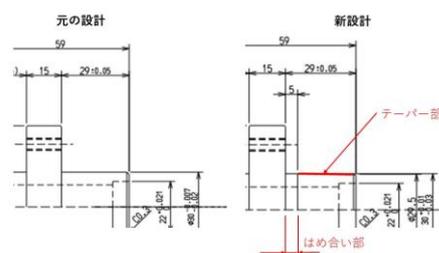


図 2. 設計による改良  
左: 旧設計 右: 新設計

### 1.3. 第 I 冷却水装置棟における 1-b 系冷却水装置の運用停止

機械システム技術課 河合将照、土伏悌之

#### 目的と概要

核融合科学研究所では大型ヘリカル装置（以下 LHD とする）の周辺機器を冷却する為の 1-a 系、1-b 系、4 系の 3 系統の冷却水装置を運用してきた。4 系冷却水装置（以下 4 系とする）は、主に低温システムに使用され 1-a 系冷却水装置（以下 1-a 系とする）は LHD の実験機器の冷却に使用されている。LHD の全体冷却水システムの説明は省く。

今回運用停止の処理を行った 1-b 系冷却水装置（以下、1-b 系とする）は、これまでの改造により機器の熱除去として使用されていなかったが、緊急時のバックアップや純水製造装置を備えていたため運転を継続してきた。運転経費の削減があり、LHD 全体の冷却水系を見直した結果 1-b 系の運用を停止することにした。1-b 系の運用を停止するためには、他の系統の運転に影響が無いことを確認する必要があり、どのような手順で運用を停止したか報告する。

#### 作業内容

1-b 系は、1-a 系及び 4 系を含めた全体システムの一つであり、電気・計装設備、制御システム、GN<sub>2</sub> 供給システムを共有していることから、運用停止手順を確認しながら作業を行った。

##### 【電気・計装設備及び制御システムの停止処置】

電気・計装設備及び制御システムについては、インターロックブロック図から他系統への影響が無いことを調査し停止した。特に電気系統については、間違えて運転することを避けるため、上位 NFB を遮断し絶対に再投入しないよう「投入禁止」の張り紙を貼って注意喚起を施した。

##### 【GN<sub>2</sub> の供給停止及び配管系統切替】

配管の撤去や閉止などを行うことで 1-b 系から GN<sub>2</sub> 供給システムを切り離した。そして、1-b 系の屋外クーリングタワーを 1-a 系で運用できるように配管系統を切替えた。この作業により 1-a 系の熱除去能力が向上することになった。

##### 【配管内の排水】

配管内に残っている冷却水は、腐れ水になることが懸念されるのと漏水が発生する恐れがあることから排水を行った。排水は最も低い位置で行った（図 1）。そして配管内の乾燥と鉄配管の錆を防止するため N<sub>2</sub> ガスを一昼夜流し続けた後、バルブを閉じて配管を密封した（図 2）。

#### 作業後の状況

1-b 系の停止以降、1-a 系及び 4 系の運用において 1-b 系運用停止作業が原因と思われる問題は生じていない。1-b 系を運用停止したことにより、保守点検及び定期運転費が年間約 700 万円（ポンプ電気代：約 460 万円、定期点検：約 160 万円、フィルター等：約 50 万円）削減されることになった。そして LHD の最終実験終了後は、他系統の冷却水装置の運用停止が予想されるため、今回の作業はその指標となり、作業工程や作業手順の効率化が期待できる。



図 1. 地下共同溝での排水



図 2. GN<sub>2</sub>カードを用いた配管内の水分除去

(CHS 運用班)

#### 1.4. 開発実験棟冷却設備のイオン交換樹脂塔の交換

機械システム技術課 野村吾郎  
技術部長 林 浩己

##### 目的・概要

Compact Helical System（以下、CHS とする）の再稼働に向け、開発実験棟の冷却水設備の改修作業を進めている。その1つとしてイオン交換樹脂など純水化システムの再整備があった。再整備の目的の1つに今後のランニングコストの軽減であり、そのためにイオン交換樹脂塔を新たなタイプのものに変更することとなった。

##### 作業内容

図 1 は開発実験棟北側にあるプレハブ小屋内の既設イオン交換樹脂塔が設置されていた現場状況である。既設のイオン交換樹脂には 300L の塔 2 本と 25L の塔 2 本があり、交換検討時は 300L の塔 2 本で純水化されている状況であった。検討に際し、25L の塔 2 本の運用でも十分であったという情報があったことから、ランニングコスト軽減のために 300L の塔 2 本は使用せずに新たな塔の設置を検討した。候補としては次の 2 つタイプが挙げられた。

- ① ステンレス製のイオン交換樹脂塔（樹脂交換は所員で実施可能）
- ② イオン交換樹脂塔を樹脂が入ったままメーカーの工場に送り、新しい樹脂に再生されて塔が送られ

てくる。

この内ステンレス製のイオン交換樹脂塔は予備品（栗田工業株式会社製デミエース DK-2 型）が大型ヘリカル実験棟冷却水設備室（1）に3本あったことから、初期費用も考慮した結果、このタイプを採用することとした。また、新しいイオン交換樹脂塔を設置した後では、全ての既設樹脂塔を撤去することが困難となることが明らかであった。そのため、配管を含めた既設物は撤去することにした。

図2は新しい樹脂塔及びその配管類の設置後の現場状況である。新しい樹脂塔の設置に当たっては配管類の交換と流量調整バルブ付き流量計を各塔に取付けた。



図1. 既設イオン交換樹脂塔  
(プレハブ小屋内)



図2. 新イオン交換樹脂塔及びその配管類の設置現場  
(プレハブ小屋内)

### 作業後の状況

比抵抗値については、以下の結果となった。

- ・既設イオン交換樹脂塔使用時

循環水（イオン交換樹脂塔と純水タンクとの配管）：約 11 MΩ・cm

冷却水（純水タンクと各装置のポンプの間の配管）：約 10 MΩ・cm

- ・新イオン交換樹脂塔使用時（1週間経過後の比抵抗値）

循環水：18.3 MΩ・cm

冷却水：12.6 MΩ・cm

樹脂が新しいこともあるが、比抵抗値は改善された。また、イオン交換樹脂塔に接続される配管径を 1 inch（300L の塔では 2 inch）としたことにより、各装置のポンプが全て停止している状況での循環流量（イオン交換樹脂塔と純水タンクとの流量）は 3.4 m<sup>3</sup>/h から 1.7 m<sup>3</sup>/h と減少した。もし、今後各装置への冷却水の比抵抗値を更に上げる必要がある場合は、まず配管径を見直すことで循環流量を増加させることで対応する。

## 1.5. 中央部品室 WEB ページの制作

機械システム技術課 妙中美智代

## 【目的・概要】

核融合科学研究所には、研究・実験遂行に必要となる回路部品/真空部品/ボルト/材料/工具など 1400 種類を超える部品を在庫した中央部品室がある。中央部品室は、新規部品/在庫切れなどの情報を提供するための WEB ページを運用しているが、制作から長年経過していたため、新たに WEB ページの制作を行った。

## 【改修作業】

- ・ HTML だけではページの見映えがシンプルになるため、CSS (Cascading Style Sheets) を使用してスタイルやレイアウトを設定し新規の在庫部品の写真を挿入した (図 1)。
- ・ ポップアップ機能を参考にフロアマップを構築した (図 2)。



図 1. WEB ページ (左:旧 右:新)

## 【結果】

リニューアル前の旧 WEB ページ(図 1)と比べ、新規在庫部品の写真を挿入する事でテキストだけでは伝えきれない情報を提供できるようになった。また、フロアマップを追加したことで在庫部品の保管場所を把握しやすくなり、利便性向上に繋がった。



図 2. フロアマップ

## 2. 設計開発技術課

(LHD)

### 2.1. タングステンダイバータ試験体の設計開発

設計開発技術課 村瀬尊則

#### 概要

将来の核融合炉では、炉壁に入る熱を如何に制御するかが核融合工学上、最も重要な課題のひとつとなっている。核融合科学研究所技術部では、ダイバータ部に適用する受熱機器の開発に取り組んできた。特に、受熱部のタングステン (W) とヒートシンク部の銅合金 (CuCrZr) の接合技術を確認、本技術を用いてダイバータ試験体を設計・製作した。また本設計では、有限要素解析を活用し、様々な冷却構造を評価することで試験体の熱除去性能を高めた設計を実現した。その後、本試験体を第 24 サイクル LHD プラズマ実験に供し、本試験体の熱的健全性を示すことができた。

#### 内容

LHD 内部のダイバータと呼ばれる高温のプラズマに曝される受熱機器には、高い耐熱性と除熱性能が要求される。世界のダイバータ研究では、表側が耐熱性の高い W、裏側が熱伝導性の高い CuCrZr、といった異種金属接合材が現在有力な候補材料となっている。

核融合研技術部では放電プラズマ焼結法 (SPS 法) を応用した接合技術を開発した。SPS 法は、型に充填した材料を機械的圧力とパルス通電加熱により焼結する方法である。本接合技術の確立を受け、本技術を用いた実機サイズのダイバータ試験体を設計・製作した (図 1)。本設計ではプラズマの熱を冷却水に如何に効率良く伝えられるかが重要である。一般に、流路内壁に凹凸構造を設け乱流を発生させる方法や、流路内部に整流子を挿入し温度境界層を剥離させる方法によって冷却水への熱伝達を促進させる。一方、冷却性能を高めようと流路構造が複雑になると、圧力損失も増大する傾向がある。LHD では冷却水系統の仕様により、試験体内で許容できる圧力損失に制限があるため、流路構造と圧力損失を考慮した設計が必要である。

#### 成果

- ・ダイバータ試験体の設計において、様々な冷却構造を考案し、有限要素解析を用いて LHD に適合する試験体の構造設計を実現した
- ・本試験体を LHD に実装し、第 24 サイクルプラズマ実験に供与、タングステンの亀裂や剥離といった大きな損傷無く、約 820 ショットのプラズマに耐えうることが確認された

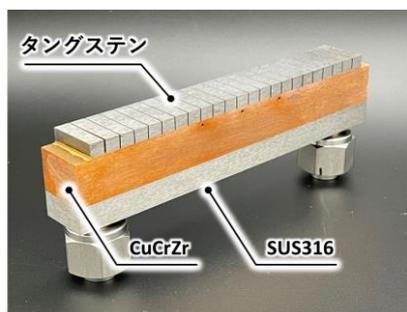


図 1. ダイバータ試験体

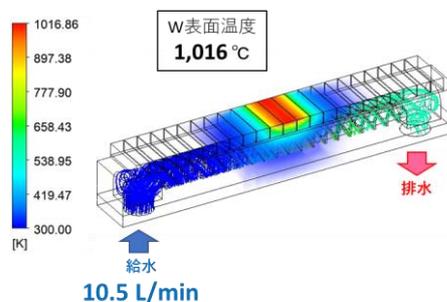


図 2. 有限要素解析

## 2.2. 請負運転員削減とそれに伴う技術職員の対応について

設計開発技術課 鈴木直之

## 目的

大型ヘリカル装置（LHD）を用いた核融合プラズマ生成実験（以下「実験」という。）は、令和4年度までは大規模学術フロンティア促進事業のプロジェクトに沿って実施されてきたが、令和5年度からは学術研究基板事業の計画に沿って実施されることになった。この計画移行に当たって運転経費の削減、つまり請負運転員（以下「運転員」という。）の削減が求められた。今回、この運転員業務削減計画のとりまとめと、LHD本体系運転員（以下「本体運転員」という。）業務削減の為の具体的な仕様作成、それに伴う技術職員の対応について担当したので報告する。

## 基本方針の策定

運転員業務削減の基本方針を策定するにあたり、令和4年度における運転員の構成と業務内容を精査した。削減にあたって前提となるのが、業務を削減しても実験の遂行に大きな影響を与えないことと、削減された業務を職員がカバーできることである。その結果、24時間運転監視が必要な業務（放射線監視機器、ヘリウム液化冷凍機の運転監視）と実験成果に大きな影響を与える装置（NBI）の点検業務は優先して残すべきと判断した。

次に計測運転員について検討した。業務内容を担当者に精査してもらったところ、必要最低限の業務を技術職員と研究職員で分担することで対応することが可能と判断された。よって計測運転員は廃止することとした。

業務時間についても検討した。令和4年度までの実験時間は9:00～19:00までであったが、加熱機器において装置立上げ、立ち下げに時間を有するため、加熱運転員はシフト制を採用していた。業務時間を削減する為には、実験時間を短縮せざるを得ない。実験時間を短縮すると電気代削減にも繋がるが、一方研究成果を挙げる観点からは望ましくない方向である。技術職員と研究職員で協議した結果、実験時間を9:30～17:00までとし、実験後のコンディショニング運転は基本的に行わないことで業務時間削減を図った。表1に策定された基本方針について示す。

表1. 令和4年度における請負運転員人数と令和5年度の方針

運転員種別	令和4年度 人数	令和5年度方針
本体	日勤 5名	当直は維持、業務量削減 放射線 24時間業務の追加
	当直 5名×4班	
加熱	日勤 17名	業務時間削減による業務量削減
計測	日勤 6名	廃止
放射線	日勤 3名	当直廃止
	当直 2名×5班	

## 本体運転員業務の仕様

次に本体運転員業務の仕様削減検討について示す。まず、令和4年度の運転員業務仕様書の業務項目を一つ一つ箇条書きにした。その数は約280個であった。これらの業務項目について、運転員で対応するか、技術職員で対応するか、廃止とするか検討した。選別の基本方針は、技術職員で対応できる業務は極力技術職員で対応し、できない業務、例えば夜間休日に必要な業務等は運転員で対応する、である。また、令和4年度までは業務量の多い装置については、専属の運転員が1名付いていたが、これは廃止とした。

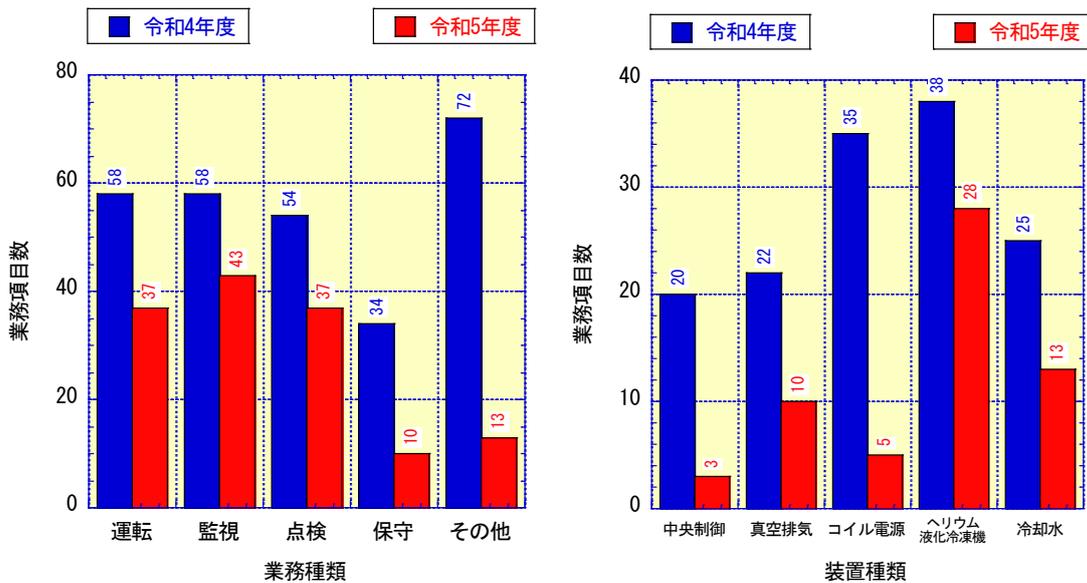


図1. 令和4年度と5年度における本体運転員の業務項目数  
(左図は業務種類別、右図は主要装置別、令和4年度仕様書内の業務項目が基準)

業務項目を「運転」「監視」「点検」「保守」「その他」と分類し、令和4年度と令和5年度の業務項目数を比較した図を図1の左図に示す。この図を見ると、「保守」「その他」の削減数が多いことが分かる。「その他」には、遮蔽扉開閉、計画停電の対応のような実作業の伴う業務、真空フランジ脱着作業立会などの管理業務、真空容器リーク試験支援や真空ポンプ分解点検支援など技術職員の作業支援業務などが挙げられていたが、令和5年度ではそれらのほとんどを技術職員のみで行うこととした。

図1の右図に装置別の業務項目数を示す。業務項目数が大幅に減少しているコイル電源、中央制御装置、真空排気装置、冷却水装置は専属の運転員が廃止された装置であり、これらの装置では必然的に技術職員が行う業務量が増えることとなった。

これらの検討の結果、280あった業務項目数は140まで減らすことが出来た。その結果、令和5年度における本体運転員業務の経費は令和4年度と比較して4割減となった。

## 技術職員の対応

本体運転員業務削減により、技術職員の負担は大きくなった。幸い令和5年度のLHD運転開始が令和6年2月とメンテナンス時間が大きく取れたため、大きな混乱は生じなかったように思われる。実験時に

おける基本的な対応策は、各装置に複数人の運転担当を指名し、日替わり交代で対応していくことである。表 2 に令和 4 年度と 5 年度における実験中に装置運転に従事する人数を示す。なお、筆者の担当外の機器も含まれているが、全体の方針を決定した責任もありここに掲載させていただいた。

表 2. 実験中に装置運転に従事する人数

装置名	令和 4 年度		令和 5 年度	
	運転員	技術職員	運転員	技術職員
中央制御装置	1	0	0	1
真空排気装置	1	0	0	2 (※1)
コイル電源 (LID 含む)	4	0	0	4 (※2)
ガス供給システム	0	2	0	2 (※1、※2)
遮蔽扉	2	0	0	2

(※1) 真空排気装置とガス供給システムの運転は兼ねる。

(※2) LID コイル電源とガス供給システムの運転は兼ねる場合がある。

メンテナンス期間中の対応で変更点があった装置として冷却水装置を挙げる。冷却水装置は技術部担当が 2 名と専属の運転員により運転保守を行っていた。実験が行われていない期間も水質維持のため、小流量ポンプで連続運転を行っていたが、専属の運転員が廃止された令和 5 年度は、電気代削減の観点から、必要最低限の運転にするよう要請があった。そのため、ポンプ運転停止操作、水質維持運転、を頻繁に行うこととなった。技術部担当の負担が大きくなることが予想されたので、設計開発技術課から 5 名を選出し、シフトを組んで対応することとした。結果としてこれまで冷却水にそれほど関わってこなかった 5 名も冷却水システムに関する知見を得られたことで、今後の業務に活かせるのではないかと考えている。

#### まとめ

請負運転員経費の削減を求められたため、その対応を行った。優先すべき業務を定め、それ以外の業務は削減するなどし、運転員全体の構成の見直しを行った。本体運転員業務については、業務項目一つ一つについて技術職員で出来るか検討を行い、運転員業務の経費を 6 割にすることができた。

運転員業務削減の分、技術職員の業務は増大したが、シフト制の採用等、技術職員全体で対応することによって、実験に対応出来ている。

## 2.3. 放電プラズマ焼結法を用いた活性炭の焼結

設計開発技術課 柳原悠人、村瀬尊則、田上裕之、中川翔

計測分析技術課 長原一樹

### 目的

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置では、活性炭の広大な比表面積にガス分子を吸着することによって真空に排気する「クライオポンプ」が採用されている。本研究は、クライオポンプの高性能化を指向した活性炭に関する研究から得た知見を活かして、バイオマスから高機能な活性炭を創製し、クライオポンプに限らない広範な分野へ産業応用することを目的としている。また本研究は、自然科学研究機構のミッション実現戦略事業に採択されており、未利用バイオマスの有効活用によって、SDGs への貢献を目指している。

稲わらやもみ殻といったバイオマスにはシリカが豊富に含まれており、シリカを除去することで吸脱着速度に優れた活性炭が得られることが知られている。令和4年度には、真空加熱によってバイオマスからシリカを除去する方法を考案し、特許を取得している[1,2]。本年度は、産業上重要とされる活性炭の固形化手法にフォーカスし技術開発を行った。

### 概要

一般に活性炭の製造後の状態は粉末であり、製品化の際は固形化する必要がある。固形化には、活性炭粉末とバインダー樹脂を混ぜ合わせて焼成する方法が用いられる。しかしながら、樹脂自体は吸着性能を持たないため、単位質量当たりの吸着性能を下げってしまう。そのため本研究では、バインダー樹脂を用いない活性炭の固形化方法として、放電プラズマ焼結(SPS)法を用いた焼結を試みた。

SPS 法は、機械的な加圧とパルス通電による粒子間のマイクロ放電加熱によって、主に金属粉末材料の焼結や異種金属接合に用いられる。本研究で

は、SPS 装置として株式会社シンターランド製「LABOX™-115」を使用した。図1に装置の外観を示す。



図1. SPS 装置の外観

活性炭の焼結においては、如何に活性炭特有の細孔構造を崩すことなく焼結できるかが重要な開発要素である。そこで今回、SPS による活性炭の焼結可否と、活性炭性能への影響を調査するために、焼結温度をパラメータとして焼結実験を行った。その結果、焼結温度を650 °C以上とすると固形化が可能であること、そして800 °Cより低温で焼結した活性炭では、原料の活性炭よりも性能が向上することを見出した。

### 内容

#### 実験手法

図2にSPS装置の概略図を示す。まず円筒形のダイに粉末活性炭を入れ、上下からパンチで挟みこむ。そして、チャンバー内を真空状態にしたのち、パンチを介して材料を加圧するとともにパルス電流を流す。

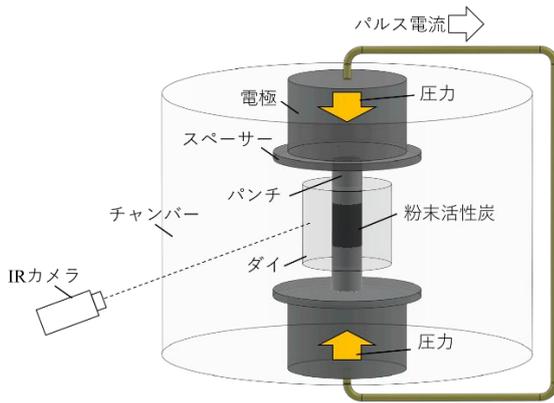


図 2. SPS 装置の概略図

表 1 に SPS 法における焼結条件を示す。ここで、焼結時間は焼結温度を維持する時間であり、焼結温度は IR カメラでダイの表面温度を参照している。また、SPS は昇温速度が速いという利点があり、焼結温度の 100 °C 手前までを 50 °C/min、焼結温度までの 100 °C を 20 °C/min で昇温した。

表 1. SPS 焼結条件

活性炭	焼結条件				
	質量 [g]	チャンバー-圧力 [Pa]	焼結温度 [°C]	加圧力 [MPa]	焼結時間 [min]
①	1.0	> 20	1600	30	10
②			1400		
③			1200		
④			1000		
⑤			800		
⑥			650		

なお、試料の粉末活性炭には、未利用バイオマスのひとつである、もみ殻を原料とした活性炭を使用した。

### 評価方法

焼結した活性炭の性能を評価した。まず作成した活性炭を試料管に入れて液体窒素温度に冷却し、窒素ガスを封入する。試料管内の窒素ガスの相対圧力を変化させたときの吸着量を測定し、吸脱着等温線を得る。

本測定には、アントンパール社製「Autosorb-iQ」を用いた。一般に活性炭の性能評価には、比表面

積 (m<sup>2</sup>/g) および細孔径分布が用いられる。これらは理論計算により求めることができ、本研究ではそれぞれ BET 法および BJH 法を用いた。

BET 法は、単分子吸着理論を多分子層吸着に拡張したもので、式(1)を用いる。

$$\frac{p}{V_a(p_0 - p)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

ここで、V<sub>a</sub> は圧力 p のときの吸着量、V<sub>m</sub> は単分子層吸着量、C は吸着熱に関するパラメータを表す。式(1)をプロットし、最小二乗法により直線に近似する。その直線の傾きと切片から V<sub>m</sub> を得て、吸着分子 1 個の占める断面積をかけることで比表面積を算出している。この関係式は、相対圧力 0.05~0.35 の範囲でよく成立する。

BJH 法は、細孔がシリンダー形状であると仮定する細孔径分布解析法である。BJH 法は細孔径約 2 nm~50 nm において有効な手法とされる。

### 結果および考察

表 1 で示したいずれの焼結温度においても、活性炭の焼結に成功した。ただし、650 °C の焼結体についてはクラックが入っており、他の焼結体については強度が弱いことがわかった。図 3 に焼結した活性炭の例を示す。今回、直径 15 mm のダイを使用したため、焼結体は直径 15 mm、高さはおおよそ 9 mm の円筒形となった。

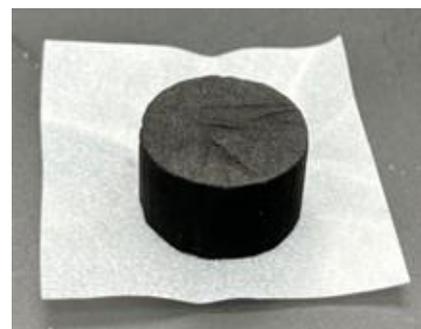


図 3 焼結した活性炭の例

図 4 に作成した活性炭に対する窒素の吸脱着等温線の例を示す。縦軸が窒素の吸着量を表しており、焼結の温度によって吸着量に差が生じたことが分かる。

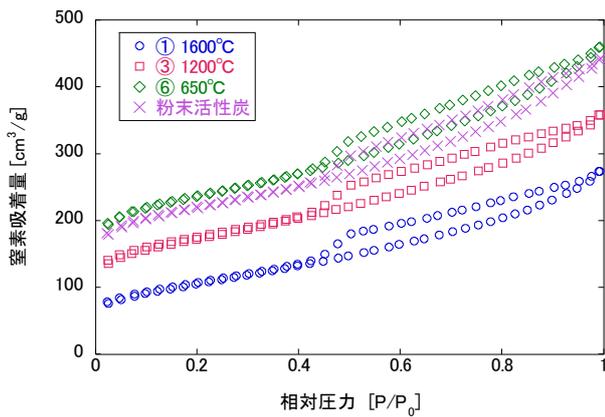


図 4. 吸脱着等温線

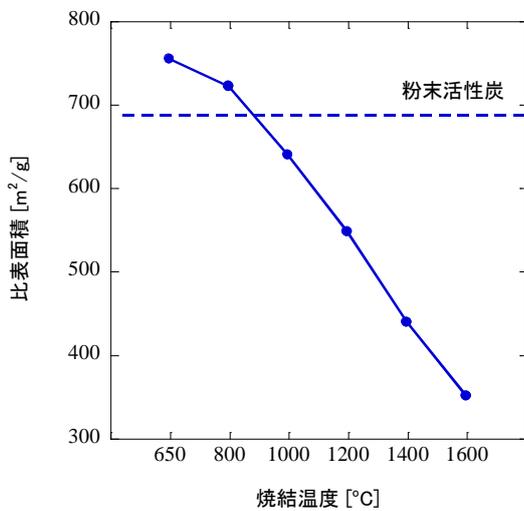


図 5. 焼結温度による比表面積の変化

図 5 に比表面積の焼結温度依存性を示す。焼結温度が高くなるほど、比表面積が減少することが分かる。しかし、特に 650 ° C 焼結体、800 ° C 焼結体の比表面積に着目すると、点線で示した元の粉末活性炭の比表面積よりも大きいことがわかる。

また、図 6,7 に BJH 法による細孔径分布の例を示す。吸着、脱着のどちらにおいても細孔径 4 nm 付近にピークを持つことが分かる。原料の粉末活性炭、1600 ° C 焼結体、650 ° C 焼結体のいずれにおいても、このピーク位置はほとんど変化していない。しかし、1600 ° C 焼結体においては、3 nm ~ 30 nm 付近の細孔径の容積が原料の粉末活性炭よりも減少している。650 ° C 焼結体においてはこの傾向はなく、さらにピークの細孔径の容

積が増加している。

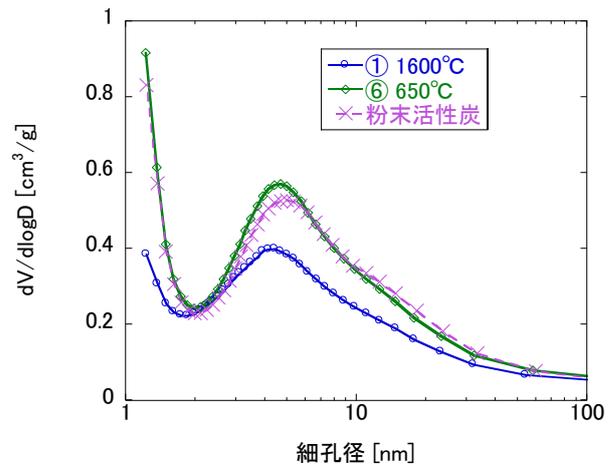


図 6. 細孔径分布(吸着)

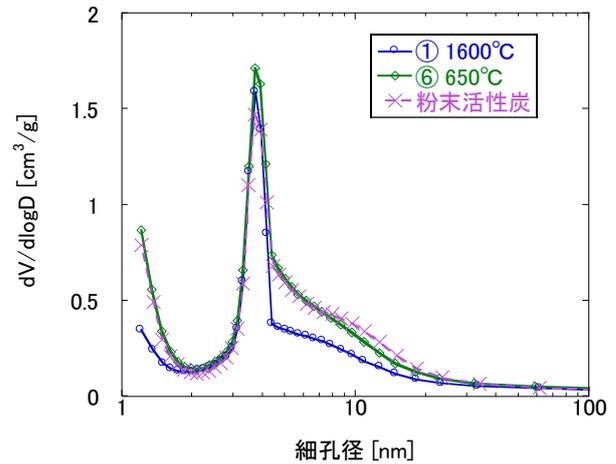


図 7. 細孔径分布(脱着)

これらのことから、より高温の焼結においては熱収縮によって細孔が収縮する効果が大きく、原料の粉末活性炭よりも細孔が減少し、比表面積も縮小してしまふことが分かる。一方、より低温の焼結においては、熱収縮の効果が小さいだけではなく、原料の粉末活性炭よりも細孔が増加し比表面積も増加している。これは、SPS 法におけるマイクロ放電が細孔を増加させる効果を持ち、低温の焼結においては、この細孔の増加が熱収縮の効果を上回るためであると考えられる。

以上の結果から、SPS による 800 ° C 以下の低温での焼結が、バインダーフリーで焼結可能であ

り、かつ活性炭の性能を向上させるという、画期的な活性炭の固形化手法となる可能性を見出した。本成果は特許申請するとともに国際会議等で発表した[3,4]。

[参考文献]

[1] Y. Yanagihara et al., Plasma Fus. Res. 19 (2024)

1205012.

[2]特許第 7301300 号

[3]Global Plasma Forum in Aomori, 青森, 2023 年 10 月

[4]第 40 回プラズマ核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月

## 2.4. コールドコンプレッサ分解点検の紹介

設計開発技術課 野口博基

### 1.背景

大型ヘリカル実験装置（LHD）では超伝導コイルの冷却安定度を向上させるため、サブクールシステムを導入している。当該システムの主要機器であるコールドコンプレッサ（IHI 回転機械エンジニアリング製）は回転機器のため、軸や軸受けの摩耗が避けられないが、2006年に設置して以降、定期的な分解点検を行うことにより、現在も問題無く稼働している。これまでは毎年、製作メーカーに依頼し、工場へ持ち帰り分解点検を行ってきたが、重水素実験開始に伴う管理区域の設定により、放射化エリアに設置してあるコールドコンプレッサは持出し不可となった。これを機に、製作メーカーに技術指導をして頂きつつ、現場（放射化エリア内）で職員が分解点検を実施しており、2016年の準備期間を含めると、昨年度までに8年間にわたりほぼ毎年分解点検を行ってきた。現在では点検技術も習熟してきており、技術指導も限られたポイントのみとなっており、ほとんどの工程を職員のみで実施している。

今回は、コールドコンプレッサの分解点検と、昨年度点検実施後の結果を紹介する。

### 2.分解点検の目的と概要

コールドコンプレッサは運転時間が長くなると、摺動部の摩耗により軸（ロータ）の振動値が増加する。また、1次成分（回転数と同じ周波数）より低い周波数帯での振動値が増加すると、ホワールが発生している可能性が高く、回転が不安定になる。この状態が進行すると、コールドコンプレッサは運転継続が不可能となり、サブクールシステムは停止となる。こうなる前に分解点検を実施し、摩耗したロータと軸受けを交換する必要がある。

具体的な数値は技術情報保護の観点から記載で

きないが、一般的な回転機器の管理値よりかなり小さな値を1次成分振動値の許容最大値として所内基準を設け、その値に達する前に分解点検を実施することにした。そうした場合、過去の振動計測データより、点検周期はおよそ2年毎（運転時間はおよそ8000h程度が目安）が妥当だと考えられた。

分解点検の工程は、クライオスタットから取外し→分解→部品洗浄→部品交換→組立て→クライオスタットに取付け→試運転（振動計測）※振動値に問題があった場合は再度分解し、調整後再組立て、試運転（振動計測）→リークチェックといった工程で、工期はおよそ1か月間におよぶ。

### 3.作業内容

（※以下写真は技術情報保護の処置をしてある）

クライオスタットから取外したコールドコンプレッサをデプスゲージやハイトゲージ（図1）を使用して、部品の取付け位置を測定、記録しながら分解していく。 $\mu\text{m}$ 単位まで測定する。



図1. ハイトゲージで測定

分解した部品はアルコールで拭取り洗浄を行い、摩耗した部品の状態を確認、記録する。

交換する新しいロータと軸受け、軸受け調整部品(シム板)の寸法をマイクロメータで測定する。我々はこの点検工程において、ロータと軸受けの寸法の関係が最も重要だと考えており、この測定に使用するマイクロメータは  $0.1\mu\text{m}$  まで測定可能な測定器を用いている。(図2)

軸受けとシム板は毎回 10 個程度注文しており、製作公差の範囲内で寸法に多少のバラつきがある。10 個全ての寸法を  $0.1\mu\text{m}$  単位まで測定し、交換する新しいロータに最も適合する軸受けとシム板の組み合わせを選定して使用している。



図 2.  $0.1\mu\text{m}$  まで測定可能なマイクロメータ

使用する軸受けとシム板が決定したら、新しいロータに組付けて、分解工程と同じ要領で部品の取付け位置を測定しながら組立てを行う。この時、分解工程で測定、記録した部品取付け位置を参照し、大きく違っていたら、嵌り具合やネジの締め具合を再確認しつつ、慎重に組み立てていく。

組立てが完了したら、クライオスタットに取付けて試運転を行う。モータの電圧/電流、インバータの出力周波数に対する実回転数(スベリ)、振動値を測定する。問題がなければ取外して最後の工程に進む。問題があれば再度分解して軸受けとシム板の選定からやり直す。

最後の工程は、リークチェックを行う。合格基準は  $1 \times 10^{-7} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$  以下としている。

#### 4. 昨年度点検後の結果

昨年度実施した分解点検の前後で振動値がどのように変わったかを紹介する。

まず、前回 2021 年 3 月に実施した分解点検直後の振動グラフを図 3 に示す。横軸は周波数で、縦軸が振動値の大きさである。こちらも技術情報保護の観点から振動値は記載できないがご了承頂きたい。

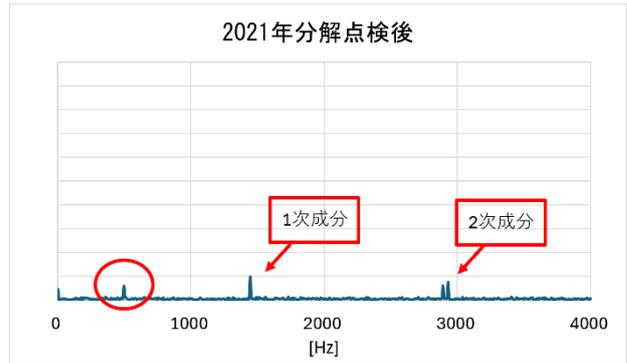


図 3. 2021 年分解点検後振動値グラフ

定格回転数 1500Hz 付近に 1 次成分のピークがあり、倍の 3000Hz 付近に 2 次成分がある。1 次成分振動値が小さく非常に良好な状態である。赤丸の辺り(低周波数帯)に小さなピークがあるが、極小さく、問題ないものと判断した。

次に、上記からおおよそ 6,750h 運転時間経過後の 2023 年分解点検前の振動グラフを図 4 に示す。1 次成分振動値が少し大きくなっている。問題なのは赤丸部分で、低周波数帯のピークが大きくなっており、ホワールが発生している可能性があるため分解点検を行う事にした。

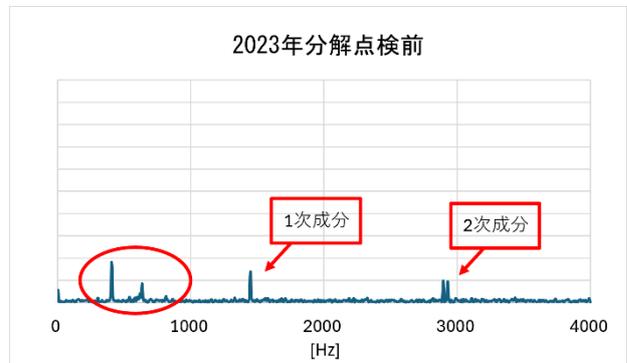


図 4. 2023 年分解点検前振動値グラフ

2023年分解点検後の振動グラフを図5に示す。ロータと軸受けを交換したことによって特性が変わり、1次と2次成分振動値は相対的に大きくなったが、所内基準値を十分下回った。問題だった低周波帯のピークがなくなり良好な状態と言える。なお周波数ゼロ付近（赤丸）のピークはノイズによるものと考えている。コールドコンプレッサは2023年の分解点検後、第25サイクル実験で、2024年2月12日から起動し、同年6月7日現在まで順調に稼働している。

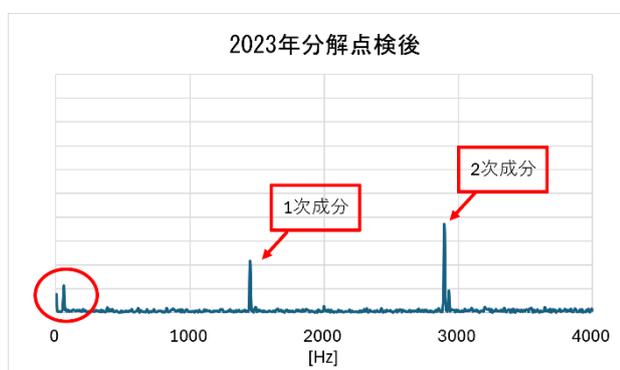


図 5. 2023 年分解点検後振動値グラフ

## 2.5. 赤外吸収分光法による水素同位体計測のレーザー計測プログラムの作成

設計開発技術課 千村大樹

### 目的

研究者からの依頼で赤外吸収分光法による水素同位体計測のレーザー計測プログラムを作成する。

### 概要

計測する気体を封入した容器にレーザーを通し、通過したレーザーを捉えることで気体の成分を特定できる。レーザーを出力する電源の制御や測定したデータの収集を行う。また、測定データからガスの成分がわかるように吸収ピークを検出し、ガス中成分の比率が計算できるようにレーザーの吸収の大きさを比較できるようにする。

### 作業内容

LabVIEW を用いてプログラムを作成し、テストと改善を繰り返した。レーザーの出力を連続して上昇させ測定するために出力設定値を外部制御によって変更して出力する手段では計測に時間がかかった。ファンクションジェネレータを用いて連続するレーザー出力設定を波形で作成し外部から入力することでレーザーの出力と計測を高速化した。レーザーの出力が大きくなるにつれノイズが大きく反映されていたが、計測を高速化したことで試行回数を増やすことができ、ノイズの除去を行えた。

### 結果

レーザーの出力範囲を変更することで計測する波長帯が変更できるようにした。計測結果をグラフで表し、吸収がみられるピークやフィッティングしたグラフとの差を面積で示し、測定気体の成分を比較できるように可視化した。

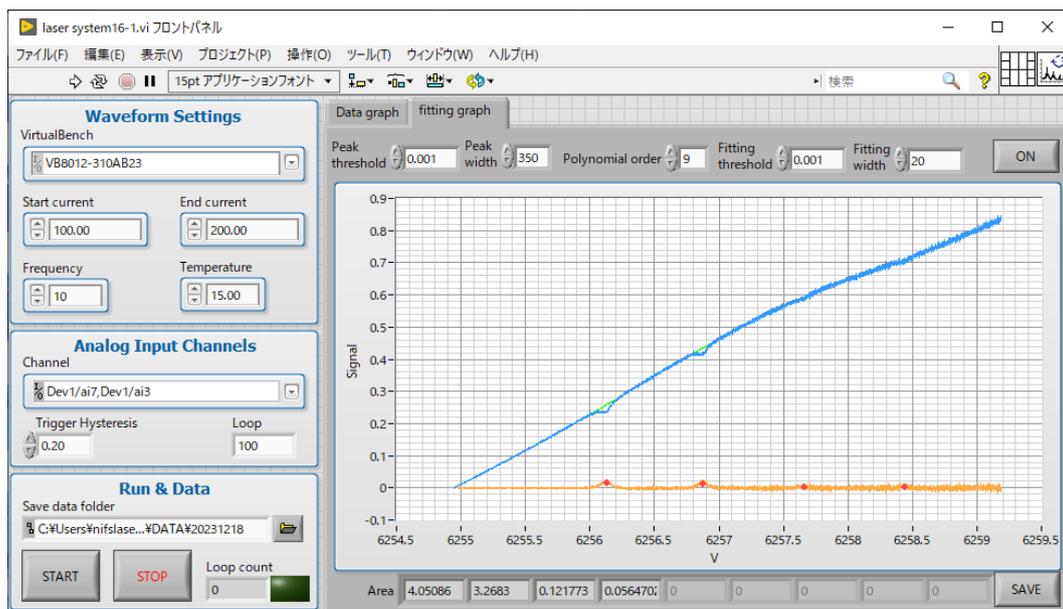


図 1. 計測プログラムインターフェイス

## 2.6. 超伝導マグネット研究棟の温度可変低温設備等の維持・保守管理

設計開発技術課 馬場智澄

### 1. 概要

超伝導マグネット研究棟には温度可変低温設備、強制冷却導体試験装置をはじめ 5 種類の試験設備、4 種類の電源、純水装置など多くの機器が設置されている。これらの設備は最も新しい温度可変低温設備でも既に 9 年が経過しており古い装置は設置後 30 年を超え経年劣化（老朽化）が進んでいる。各設備の維持整備（メンテナンス）保守計画等は実験計画・予算・各装置の経年劣化（老朽化）の度合い等により優先順位をつけ行われている。設備の中には高圧ガス保安法（一般高圧ガス保安規則等）の適用を受ける装置等もあり、これらの装置は高圧ガスの製造、取扱いに使用する設備に対する規制をうけることになる。各装置担当者と協力し、今年度行った維持整備（メンテナンス）、不具合対策等について報告する。

### 2. 対象設備概要

超伝導マグネット研究棟には、温度可変低温設備、強制冷却導体試験装置、大口径高磁場導体試験装置、小型導体試験装置、中型導体試験装置、大型導体試験装置、各種（75kA,6kA,10kA 等）電源、純水装置、クレーン設備等がある。

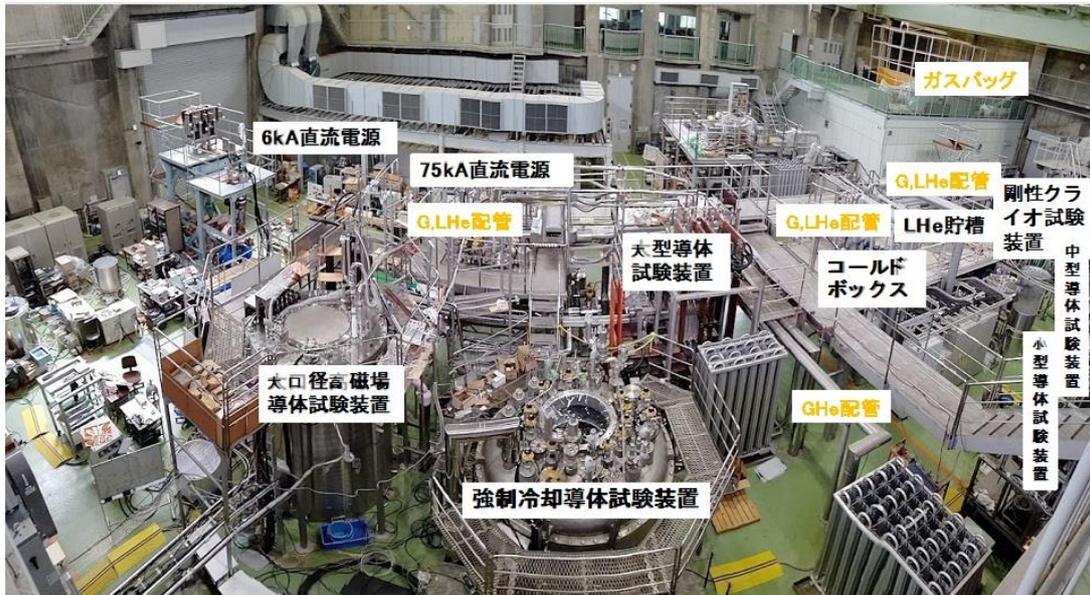


図 1. 超伝導マグネット実験棟内の設備

2014 年度に温度可変低温設備と大口径高磁場導体試験装置が整備され、大口径 13T マグネットが導入された。このとき、温度可変低温設備の内コールドボックス(CB)、ヘリウム圧縮機、制御装置を更新し、タンク貯槽類、精製器、液体窒素設備、ガス回収設備などは既設設備を再利用している。既存のガス回収設備や液体窒素設備は高圧ガス保安法（一般高圧ガス保安規則）の対象設備であるが、更新した設備の大部分は常用圧力を 1MPa 未満に抑えることで高圧ガス保安法（一般高圧ガス保安規則）の規制から除外されている。また、省エネルギー（節電）対策として 2022 年度に冷却塔ポンプの小型化、2023 年度は空

気圧縮機を小型空気圧縮機と切替できる様（低温システム運用班施工）にした。

### 3.整備点検保守計画

設備の点検保守・実験予定は共同研究者の実験予定も含め超伝導マグネット研究棟タスクグループ会で調整されている。各装置機器の整備点検は高圧ガス保安法の適用を受ける機器を第一優先とし、各装置機器に優先順位をつけ可能な範囲で行なっている。近年予算が非常に厳しい状況であり高圧ガス保安法（一般高圧ガス保安規則）対象設備の点検費用を優先しなければならないため、各設備の維持整備（メンテナンス）までは行き届かない。

高圧ガス保安法（一般高圧ガス保安規則）対象設備においても、気密試験を所員で実施し、高圧ガス設備申請状況等を確認し、安全弁・圧力計等点検個数の見直し、開放検査周期、不同沈下測定等項目を再検討し、経費削減を図っている。

### 4.整備点検保守実績（装置別）

- ・高圧ガス保安法（一般高圧ガス保安規則）対象設備

液体窒素貯槽(CE)、温度可変低温設備が高圧ガス保安法の対象設備であり、保守管理として日常点検、月例点検、年次点検を行った。日常点検は連続運転中の機器の運転状況の確認、停止中の機器の状態等について主として目視による点検を実施している。（高圧ガス保安法にて明文化されている）月例点検は各設備配管等の漏洩検査、バルブ開閉表示・非常用設備の状況確認を実施した。（高圧ガス保安法による自主点検項目）年次点検は高圧ガス保安法に基づく定期自主検査項目（気密試験含む）の実施と自動弁などの動作試験を実施した。



図 2. 気密試験の様子

- ・高圧ガス保安法（容器保安規則の適用設備）対象設備

液体窒素容器（120ℓ 容器 1 台） 高圧ガス容器は、容器検査を受けてから一定期間を経過したものは再検査に合格し、刻印がされていないと高圧ガスの充填ができないため再検査を受けた。現在 250ℓ 容器 1 台、120ℓ 容器 2 台所有しており、再検査期間は現在 250ℓ 容器 2 年毎、120ℓ 容器 2 台とも 5 年毎である。

- ・液体窒素配管真空排気

液体窒素配管は真空二重配管であり、真空で封じ切る構造のため脱ガスやバルブからの微小リークなどにより、真空度が徐々に劣化する。そのため定期的な真空排気が必要である。真空度が劣化すると外周部に結露が発生することがある。2023 年度真空二重配管の真空排気を行った。

- ・冷却塔(CT-2)

凍結防止対策として今年度は散水ポンプ、凍結防止ヒーター、凍結防止ユニット用ポンプ、の交換を行い、熱交換器、冷却塔充填材（半面分）の交換も行なった。

- ・10kA 電源

各種電源の整備を進めており今回電流制御補償回路を改修し動作試験を行った。

- ・クレーン設備

クレーン設備は導体サンプルの設置、設置に伴うトランスファーチューブ等周辺機器の移動に重要な役割を果たしている。導体サンプルの設置等には mm 単位の精度の運転操作を必要とするため、運転操作時に正常に動作しなければ、他機器へ大きな損傷を与えることになる。このクレーン設備は適切に管理使用しなければ非常に危険性が高い機器であり、突然の故障や不具合などのトラブルに備え予防保全運転などを行なった。

## 5.不具合と対処事例

- ・液体ヘリウム貯槽真空度低下

真空層真空度悪化により外壁結露、真空度確認時にシールオフバルブのパッキンが液状化しているのを発見した。シールオフバルブのパッキン交換を行い、再真空引を行なった。真空度が正常値であることを確認した。この際、ヘリウムガスの蒸発量が急増し緊急でヘリウムガスの精製運転を実施した。その結果、約 500 m<sup>3</sup>(約 300 万円)程度のヘリウムガスの放出を防いだ。

- ・液体窒素貯槽の液面計表示器不調

コントロールシステムの制御画面に液面表示がされなくなり、制御機器故障・断線等の確認を行った。断線と判明し場所を特定したが接続等ができないため、屋外の液体窒素貯槽から屋内の入力盤（～100m）まで代替配線を敷設した。

- ・回収圧縮機（インタークーラー部腐食による穴あき）

点検時（目視）にインタークーラー部から水漏れを発見し、漏れ箇所が鋳物製であることを確認し、補修方法等などを検討した。エポキシパテと補強布（グラスウール）で補修した。補修後概ね6ヶ月間漏水はない。

- ・温度可変低温設備コールドボックス（C/B）の循環冷却水圧力低下

日常点検を行っているがコールドボックスへ供給されている循環冷却水圧力が突然低下した。冷却水配管系統を現地にて確認しフィルターが原因である事がわかった。フィルター清掃を行い水圧が正常値になったことを確認した。

- ・循環圧縮機 警告表示及び重故障

停電後、重故障が表示され起動できない状態となった。メーカーと連絡をとりながら、コンタクターの作動状況、インバータへの速度センサー印加電圧などを調整確認し、冷却水系統を起動し循環圧縮機の動作確認を行い、正常に稼働することを確認した。これらは毎回現場を確認しているからこそ発見できたことであり、対応が遅れていたら実験計画に大きな支障が出るばかりか大きな事故になりかねない。



図 3. 不具合事例

## 6.まとめ

各設備の維持保守を行うことにより、計画した実験を全て予定通り実施できた。不具合記録シートを作成し、現在の担当者間等で情報を共有しているが、所内の改組などにより以前の各設備の専属担当者が不在となり不具合記録・メンテナンス時期など設備・機器の詳細な情報が不足している。これからの設備維持管理を行うためにもまず関係書類の整備等を行おうと考えている。設備費は予算削減により一層整備項目等の見直しが必要であり、設備の維持管理を行うには高压ガス保安法の適用を受ける機器の整備は必須である。その他の設備については非常に困難な状況であり、より詳細な検討が必要と考えている。

### 3. 電気電子技術課

(技)

#### 3.1. 高周波自動整合器の修理

電気電子技術課 伊藤康彦

○伊藤康彦<sup>A)</sup>、中野治久<sup>B)C)</sup>、星野航希<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>核融合科学研究所 技術部

<sup>B)</sup>核融合科学研究所 プラズマ装置学ユニット

<sup>C)</sup>名古屋大学大学院 工学研究科 総合エネルギー理工学専攻

#### 概要

核融合研究炉心プラズマのプラズマ加熱装置として、中性粒子ビーム入射加熱装置 (NBI) がある。核融合科学研究所 (NIFS) では、NBI にセシウムフリー高周波負イオン源を目指した研究を行っている。この負イオン源では電力 1.2 kW、周波数 13.56 MHz の高周波電源により高周波プラズマ放電を生成している。高周波電源と放電用アンテナコイル間にはインピーダンス整合をとるために自動整合器が用いられる。今回、この自動整合器 (アステック社製、DH-30-02A) の制御部 PIC マイコンが損傷し、内蔵プログラムも消失する故障が発生した。また外注修理が困難であったため NIFS で行っている修理についての経過を報告する。

#### 1.研究背景と目的

##### 1.1 中性粒子ビーム入射装置

磁場閉じ込め核融合炉心プラズマを 1 億度以上まで加熱する装置のひとつとして (重) 水素負イオンを用いた中性粒子ビーム入射装置 NBI (Neutral Beam Injector) がある。負イオン NBI は世界で日本のみ、核融合科学研究所と量子科学技術研究開発機構 (旧日本原子力研究開発機構) において実用化されている。負イオン NBI の基本構成を図 1 に示す [1]。

負イオン NBI では、まず水素負イオン源にて水素のイオン源プラズマ中に水素負イオンを生成する。生成された水素負イオンは、ビーム加速器によって水素負イオンビームとなる。水素負イオンビームは、中性化セルで水素ガスと衝突して電子が 1 つ脱離されて原子ビーム (中性粒子ビーム) となり、炉心プラズマに電力を供給する。国際熱核融合実験炉 ITER では 1 基の NBI 当たり静電加速により 1 MeV、40 A の水素負イオンビームを生成し、16.5 MW の電力を炉心プラズマに供給する。

実用化されている負イオン NBI ではフィラメント・アーク (FA) 放電型負イオン源が用いられている。ここでは、フィラメントの損耗や突発的な異常

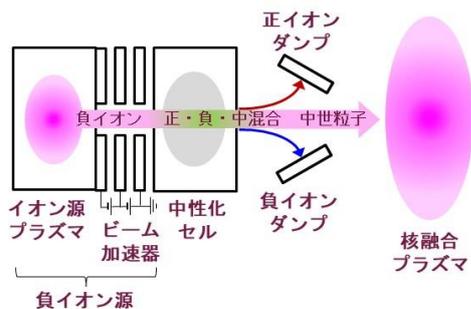


図 1. 中性粒子ビーム入射装置

放電によるフィラメント損傷が起こるためフィラメントの交換が必要となる。また、水素負イオン源では、イオン源プラズマに低仕事関数元素であるセシウム (Cs) を添加し、プラズマ・ビーム境界の電極 (プラズマ電極 (PG)) 表面に Cs を被覆することによって仕事関数を下げ、PG 表面に衝突する水素正イオンや原子に電子を付着させることによって水素負イオンを大量生成している。FA では、フィラメント材質であるタングステンが PG 表面に付着するため、Cs 添加量が多くなることが知られている。また、仕事関数が低い Cs はビーム加速器内で異常放電を起こしやすくする。このため、保守性や定常運転が必要な ITER や核融合原型炉の NBI ではフィラメントを用いない高周波 (RF) 放電型負イオン源が必須となり、ITER では RF 負イオン源が採用されている。

##### 1.2 Cs フリー水素負イオン源研究

日本の核融合原型炉では、ITER-NBI の RF 負イオン源から更に進んで Cs を用いない Cs フリー RF 負イオン源が求められている。核融合科学研究所では、Cs 被覆 PG の代替として日本発の機能性材料で

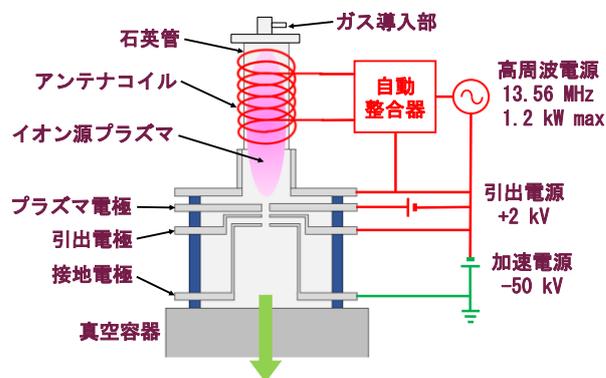


図 2. Cs フリー水素負イオン源研究の実験装置

あり、低仕事関数（～2.4 eV）かつ加工性に優れ、また原材料の入手性に優れた C12A7 エレクトライドの PG を用いた Cs フリー水素負イオン源の基礎研究が行われている。この研究では C12A7 エレクトライドの表面状態を保つ面からも RF 放電が必須となっている。

図 2 にこの研究の実験装置概念図を示す[1]。図 1 の負イオン源と同様にイオン源プラズマ部とビーム加速部に分かれている。イオン源プラズマ部はビームエネルギーに相当する電圧（最大 52 kV）分だけ（絶対値として）高電位となっている。イオン源プラズマ部では、水素ガスを上流側から内径 40 mm の石英ガラス管に導入する。石英ガラス管には外径 6 mm の銅管製のアンテナコイルが巻かれている。アンテナコイルには RF 電源より最大 1.2 kW（13.56 MHz）の電力が自動整合器を通して給電され、石英ガラス管内部に誘導結合により水素プラズマが生成される。

プラズマのインピーダンスはプラズマパラメータによって変化する。自動整合器は、高電位に置かれている RF 電源と負荷（アンテナコイルとプラズマ）との間でインピーダンス整合を自動的に行い、RF 電源への反射電力を抑制するとともに、高効率で RF 電力をプラズマへ結合させる。水素プラズマ内に生成された負イオンは、加速器の一部でもある PG と引出電極間に印加した電圧により両電極の穴から引き出され、更に引出電極と加速電極間の電圧により所定のビームエネルギーまで加速される。

### 1.3 自動整合器の故障と本報告の目的

上記装置を用いた実験中に、加速器内の異常放電が発生し、自動整合器が突然動作しなくなった。本報告では、自動整合器の故障原因を推定し、対策を施した上で自動整合器を修理することを目的とした作業を紹介する。

## 2. 自動整合器の仕様

故障した自動整合器を構成する主要部を図 3 に、内部の写真を図 4 に、仕様を表 1 に示す[2]。

表 1. RF 自動整合器の仕様

モデル名	DH-30-02A
使用周波数	13.56 MHz
最大定格電力	3k W
入力インピーダンス	50 Ω
負荷インピーダンス	2 Ω以下
整合精度	0.5 %以下
整合時間	1～2 秒以内
冷却	強制空冷
寸法(H×W×D)	245×188×360
重量	約 9 kg

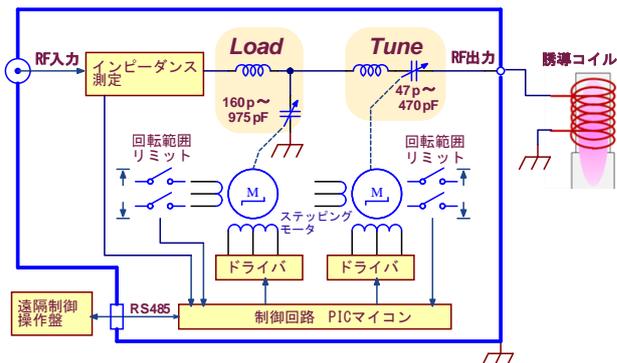


図 3. 高周波自動整合器の構成

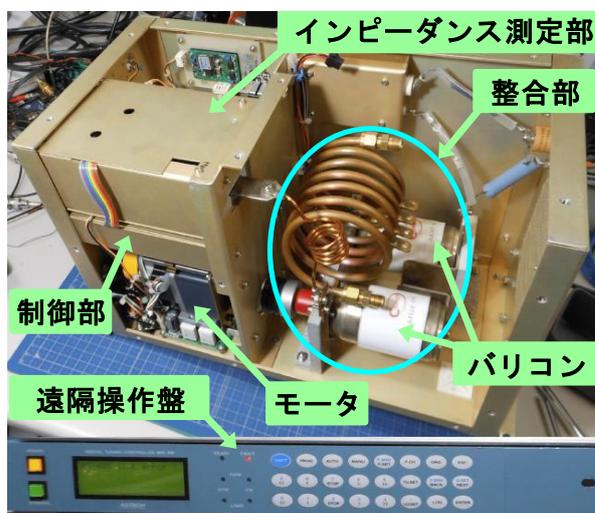


図 4. 高周波自動整合器内部

まず動作の概略を述べる。RF 電力はインピーダンス測定回路を経て負荷との整合状態を検出し、この情報は制御回路のマイコンによって処理される。マイコンは整合回路を構成する可変コンデンサ（バリコン）をステッピングモータによって回転駆動し、負荷となる誘導コイル側からの反射電力が最小となるように制御する。以下、各部について述べる。

RF 電力はトロイダルコイル 3 個を貫通し、2 次側となるインピーダンス測定回路に磁気結合され、6 系統の検波回路を経て H8 マイコン基板 AKI-H8/3664F（秋月電子通商）に取り込まれインピーダンス計算に利用される。

RF 信号は Load 及び Tune の各共振回路を通して負荷となるアンテナコイルに出力される。共振回路にはステッピングモータで駆動される 10 回転のバリコンがあり、制御方法は不明ではあるが、最終的に反射電力が最小となるように、制御部によってこれを調整している。

制御部の内部を図 5 に示す。主要部はマイコン PIC16F877-20/P（Microchip Technology Inc.）2 個で構成され、各々 Load と Tune バリコン調整用のステッピングモータを駆動する。その他の機能はモー

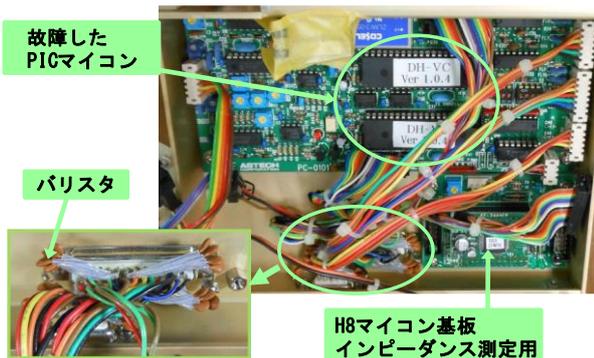


図 5. 故障した制御部内部

タの回転範囲の制限及び、遠隔操作盤との RS-485 規格による通信等を行っている。

本自動整合器の電源は遠隔操作盤内蔵のスイッチング電源から供給される。

### 3.高周波自動整合回路の故障箇所と対策

#### 3.1 故障原因

本自動整合器を調査してみると、5 V 系電源電圧が 2.2 V まで低下しており、制御部シールドボックス内で異常加熱していた PIC マイコン 2 個の不良であることが分かった。この原因は異常放電によるサージ電圧が制御部の D-sub コネクタを経由して PIC マイコンに印加され、ラッチアップしたものと思われる。

#### 3.2 手動操作で対応

PIC マイコンの不良により自動制御ができず、修理予算確保が困難であったため、応急対策として自動制御なしの手動遠隔操作で対応することにした。早急な対応が求められ、使用を終えていた超音波モータ操作盤を改造して適用した (図 6)。

#### 3.3 超音波モータ操作盤の改造

本自動整合器の操作盤は簡単な個別 TTL ロジック回路で構成され、超音波モータドライバ 2 個に対



図 6. 改造した超音波モータ操作盤

し、絶縁された CW/CCW (時計/反時計回転) パルスの送出及び、回転範囲リミット信号を受信するものである。モータ部との通信はパラレル方式である。

本自動整合器の製作会社は廃業しており、手元には主要部の結線図のみがあり、回路図がなかった。手動操作に必要な部分として本器のモータ駆動及びリミット部に絞って回路図を作成し、これらと適合するように手動操作盤回路を修正した。本整合器の制御部は不要となるので取り外した。本整合器専用の遠隔操作盤では、バリコンの回転位置情報をステッピングモータへの送出パルス数と回転方向を基に取得している。

これに対し手動操作盤では、アップカウンタ LC2H (Panasonic co.) を用いてモータ送出パルスを計数した。カウントダウンができないため不便であったが、応急的に利用した。

#### 3.4 手動操作の問題

プラズマ放電実験で利用した結果、以下の問題が分かった。

- 調整手順は Load から Tune の順で共振するポイントを探す操作を繰り返す行うため、最適値に到達するまでに時間を要する。
- Tune の共振周波数を調整する際、共振範囲が

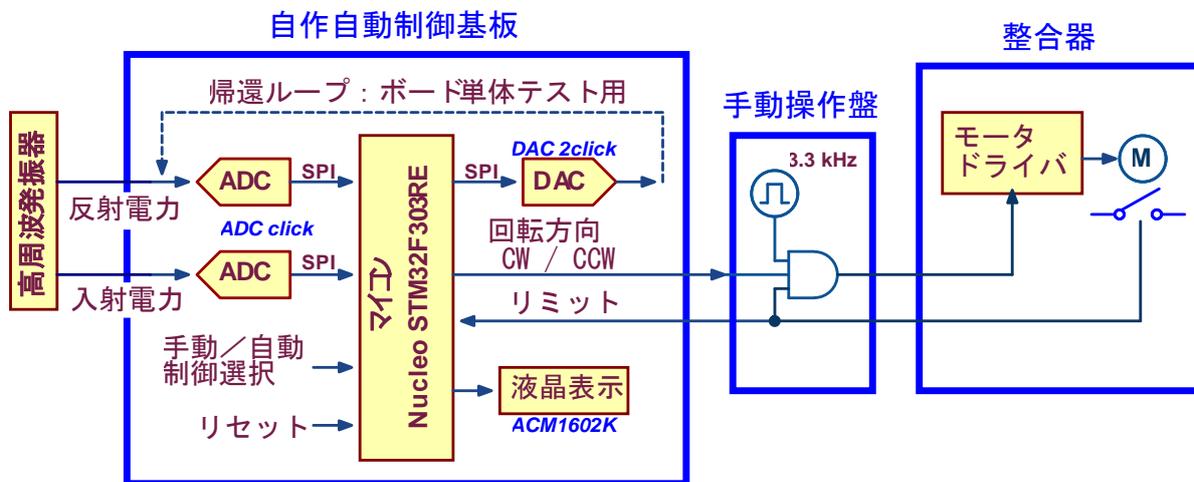


図 7. 製作した自動制御ボードの構成

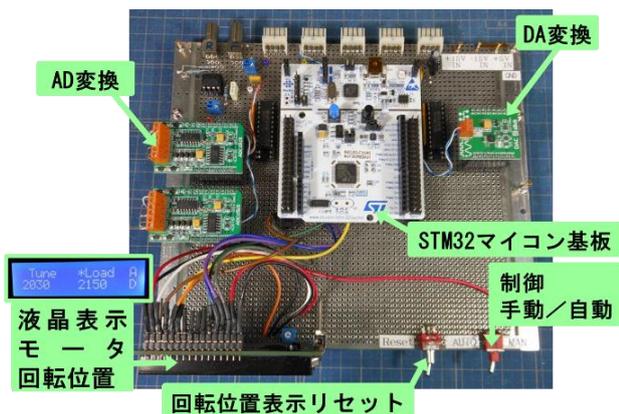


図 8. 自作した自動制御ボード

極めて狭く操作が容易でない。

- 実験条件及び放電状態が変化した場合、整合が大きく外れると早急に応答できない。
- 手動での最適値探索では、高周波発振器の定格電力の半分以下の 500 W 程度までの運用が限界である。

以上の事から手動では作業効率が極めて悪く、整合の自動制御が大変有効であったことが判明し、早急に自動制御の復旧が必要となった。

## 4. 自動制御回路の自作

### 4.1 制御用マイコンの選択

主要部となるマイコンは、使用経験のあったマイコンボード STM32F303E (STMicroelectronics NV) を選択し、プログラム言語は C を利用している。制御ボードの構成図を図 7 に、その外観を図 8 に示す。

### 4.2 整合状態の測定

整合器はインピーダンス測定回路を用いて整合状態を測定し、反射電力が最低となるように自動制御を行っていた。この回路を利用するためには、その回路動作と測定結果からインピーダンス計算方法を解析する必要があり、時間を要するため、今回は利用しなかった。

自作する回路では上記の代替として、RF 電源のモニタに表示される反射電力を最小にするという、手動整合時に行っていた調整方法を参考に、RF 電源からの入射及び反射電力モニタ信号を利用する方法とした。

これらの信号を取得する AD 変換器 (ADC) は、マイコン内蔵の物よりも低ノイズとなるよう、外付けで ADCclick (MicroElectronika) を利用した。

### 4.3.制御方式

制御方式を決めるにあたっては、故障した本自動整合器の方式が不明なため、以下の簡易的な方法を採用した。

モータ駆動用として 0.1 ms 周期のパルス を 0.5 ms ~ 10 ms の時間幅で送出した後、反射電力を測定し、これが減少するような回転方向のパルスをモータドライバへ送出する。この手順で最初は Load で反射

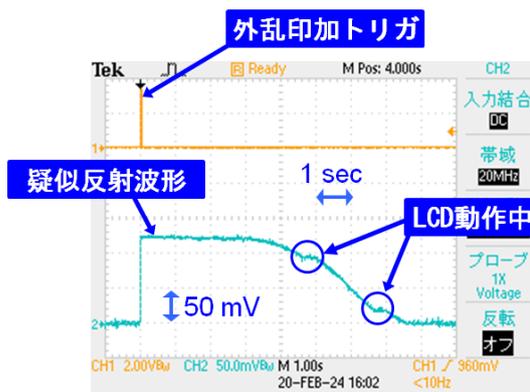


図 9. 制御ボード単体での制御波形

電力が最低になるまで調整した後、同様に Tune の調整を行う。以上の動作を反射電力が数ワット以下になるまで繰り返し行う。

### 4.4.疑似負荷、液晶表示

DA 変換器 DAC2click (MicroElectronika) はボード単体での動作試験用に疑似負荷信号を出力するために利用する。振幅反転したガウス関数波形を疑似共振波形として出力し、これを反射電力入力端子に接続して帰還ループを形成するために利用する。

液晶 (LCD) 表示は Load、Tune の各モードドライバへ送出するパルス数を表示させ、バリコンの静電容量の目安とする。バリコンが最大容量の場合を 0 とし、容量の変化に応じてカウント値が増減する。

## 5. 動作試験

### 5.1 制御ボード単体動作試験

模擬負荷を利用して机上で回路及び制御プログラムのデバッグを行った。反射が最低レベルの状態、つまり整合が取れた状態から、外乱として整合ポイントを大幅に外した所までずらした後、整合ポイントまで制御される応答性を見ながらプログラムの調整を行った。この時の応答波形を図 9 に示す。

外乱から整合までの時間が 8 秒と長くなっているのは、応答状態の観測の都合で故意に遅らせたことによるものである。制御中の波形で 200 ms に渡ってフラットになっている部分があるが、液晶表示用の LiquidCrystal ライブラリに含まれる print() 関数の実行中に制御が停止したためである。

### 5.2 実負荷動作試験

ボード単体で一応の結果を得たので現場での動作試験に移行した。実負荷となる放電部と自動整合部が実験装置の高所部に設置されており、この部位に頻繁にアクセスして調整することが容易でなかった。

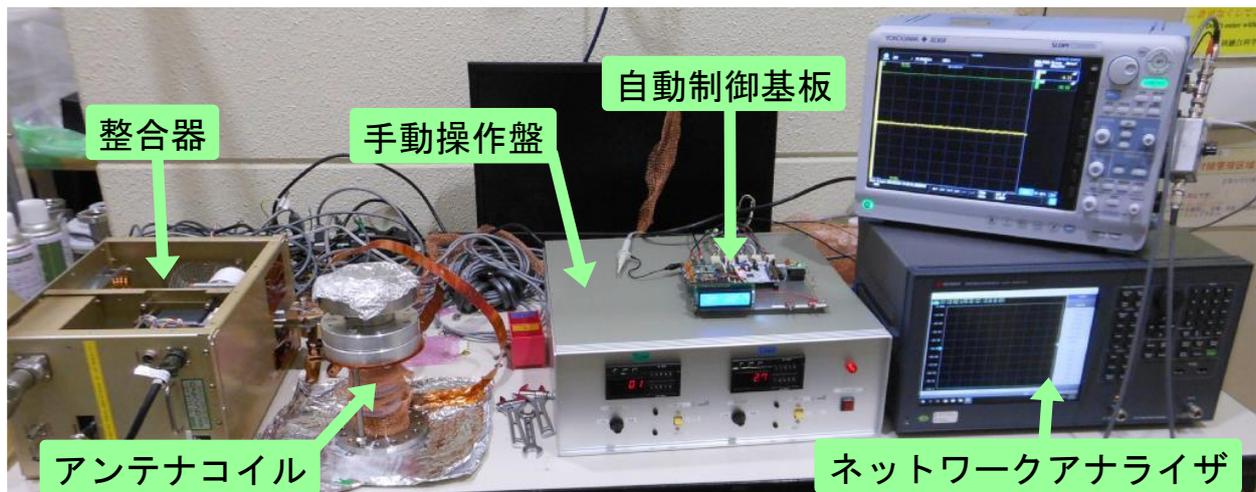


図 10. 実負荷へ接続しての動作試験

このため、まずは簡単に試験を進められるよう、実験装置から放電部を取り外し、机上に放電部や整合回路、測定機器を置き、低 RF 電力給電 (10 W) による無放電での動作試験を行うことにした (図 10)。10 W 以下の RF 給電であるため、全反射状態となっても各機器に損傷を与えることはない。

動作試験の結果、空間ノイズが大きいためマイコンが誤動作を起こして正常に機能しなかった。対策として網目状の銅線を電磁シールドとしてアンテナコイルに巻き付けることにより、誤動作は解消された。

## 6. まとめ

保守性に優れた高周波負イオン源で使用する高周波自動整合器が故障し、メーカー修理が困難となったため制御回路を自作し、制御ボード単体での動作試験を終えた。次に低 RF 電力給電による無放電での実負荷試験を行ったところ、ノイズの影響によるマイコンの誤動作が発生したが、ノイズ対策を施すことで問題は解消された。現在は自動整合プログラムの調整を行っているところである。

## 参考文献

- [1] 星野航希、“セシウムフリー水素負イオン源の性能評価に向けたイオン源開発”、令和 5 年度名古屋大学工学部エネルギー理工学科核融合炉工学グループ、田中・中野研究室卒業論文
- [2] “自動整合器モデル DH-30-02A-F01 取扱説明書”、アステック株式会社

(令和 5 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告資料)

## 3.2. NBI テストスタンド冷却水ポンプの省エネ運用

電気電子技術課 渋谷真之

## 概要

- A) 冷却水ポンプの運転操作を PC から遠隔操作できるようにし、制御の自動化を行った。
- B) 夜間用ポンプを増設し、負荷に応じて既設ポンプと切り替えて運用することにより、70%の省エネ化を達成した。(削減量：330,000kWh/年、660 万円/年)
- C) 冬期の凍結防止運転を連続運転から温度制御に変更することにより、97%の省エネ化を達成した。(削減量：50,000kWh/年、100 万円/年)

## 1. 目的

電気料金の高騰と研究予算削減を求められたため、総合工学実験棟の NBI テストスタンドで実験を継続するには消費電力を削減する必要がある。そのために、消費電力の大部分を占める冷却水ポンプについて改造や運用の変更を行った。

## 2. 作業内容

## A) ポンプ操作の遠隔化

NBI テストスタンド冷却水ポンプとその制御盤は総合工学実験棟北側の屋外ヤードに設置されており、運転操作も制御盤で行っていた。制御盤には将来用に遠隔操作の入出力端子が作られていたが使用していなかった。ポンプの省エネ運用するにあたり、NBI 制御室から操作できるようにした。

制御盤内にリモート I/O を設置し、それをネットワーク経由で制御室の PC から遠隔操作するプログラムを LabVIEW で作成した。制御対象は冷却水ポンプ 3 台と冷却塔ファン 2 台である。それぞれ PC 上のボタンで操作でき、タイマーや各種条件に応じて自動運転できるようにした。また運転時間をログして消費電力量を把握し、起動停止時やアラームを管理者にメール配信するようにした。

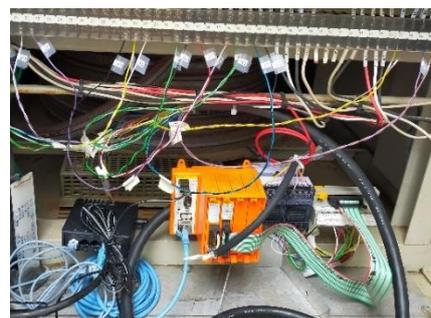


図 1. ポンプ操作の遠隔化

## B) 夜間運転用ポンプ設置

NBI 機器の冷却水ポンプとして、250kW のポンプを運用している。クライオコンプレッサの冷却やクライオポンプによるビームライン内部の冷却水凍結防止のために、実験を行っていない夜間もこのポンプを連続運転していたが、夜間用としてはオーバースペックであった。そのため、22 kW のポンプを並列

に設置し、夜間はそれに切り替えて運用するようにした。それにより 70%の省エネ化を達成した。削減量としては 330,000 kWh/年、削減金額 660 万円/年で、1 年間の運用で改造費を上回る料金削減ができた。

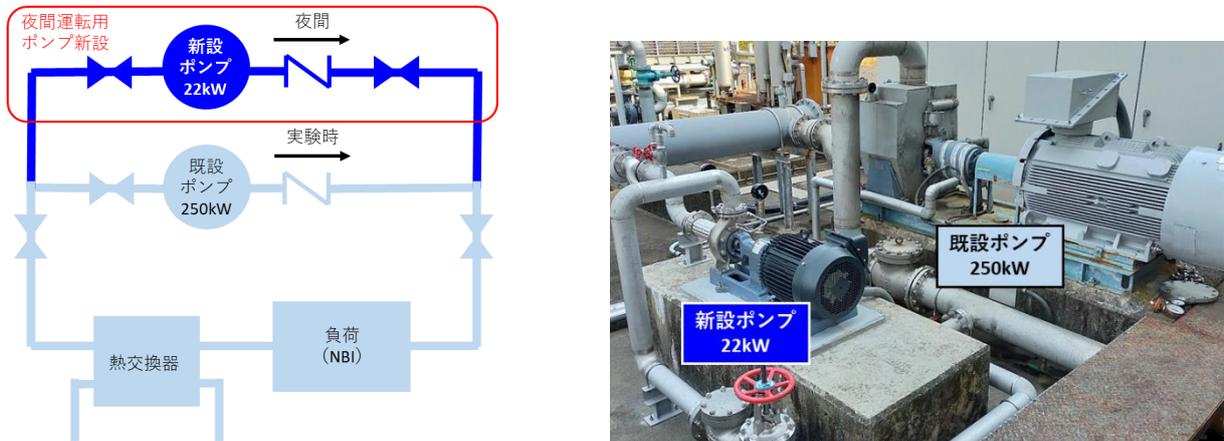


図 2. 夜間運転用ポンプの増設

### C) 凍結防止運転の温度制御

冷却水ポンプのある屋外ヤードは建屋の北側にあり、冬期は常に日陰となる。冷却塔ポンプ(22 kW)についてはポンプや配管の凍結による破損を防止するために、冬期は実験を行っていない時も 24 時間連続で凍結防止運転を行っていた。ポンプの運転を遠隔制御できるようになったことから、省エネのために気温が下がった場合のみ凍結防止運転を行うようにした。

屋外ヤードに設置した熱電対をリモート I/O に接続して外気温を計測し、誤差を考慮して 2°C 以下になったらポンプ「運転 10 分」「停止 50 分」を繰り返すようにした。この冬は 12/25~3/31 (98 日) で、2°C 以下になったのは 406 時間/2352 時間 (17%) であった。さらにポンプのデューティーを 1/6 にしたので、97%の省エネ化を達成した。(削減量：50,000 kWh/年、100 万円/年)

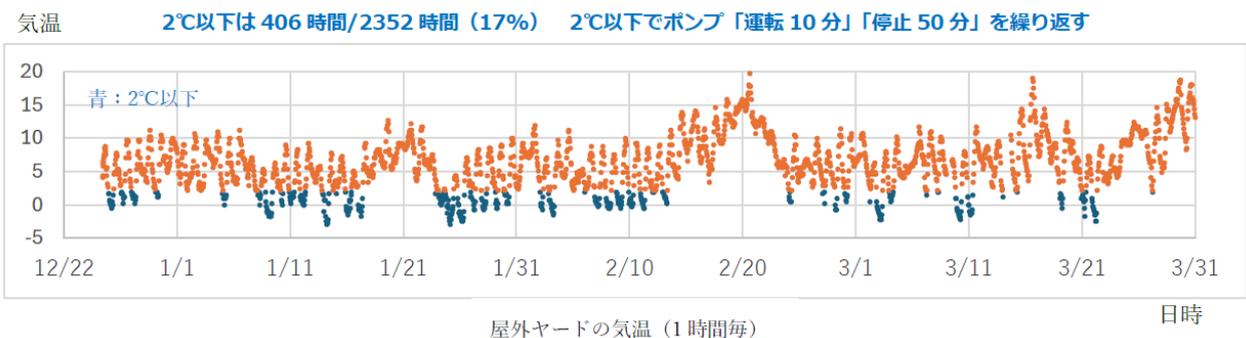


図 3. 屋外ヤードの気温

### 3.3. 色検知による警告システムの開発と運用

電気電子技術課 渋谷真之

#### 概要

管理区域の退出ゲートに USB カメラと PC を設置し、管理区域内作業着を着用したまま退出しようとした場合に色で検知して警告するシステムを開発した。その警告システムの内容と実際の運用状況について報告する。

#### 1. 背景

核融合科学研究所の大型ヘリカル実験棟には管理区域が設定されている。放射性物質による汚染拡大を防止するために、管理区域内では専用の作業着を着用する決まりとなっている。

しかし、うっかり作業着を着用したまま管理区域から退出してしまう事例がたまにあり、その度に退出してしまったエリアをサーベイメータで放射線測定していた。そのため、そのようなうっかりミスを起こさないような仕組みを作る必要があった。

#### 2. 管理区域の入退管理

管理区域への通常の入出口は入退管理室の 1 か所のみである。入退ゲートは個人線量計に貼られた QR コードを読ませることで開閉し、これにより人の出入りを管理している。退出時にはハンドフットクロスモニターで汚染検査を行い、問題なければ入退ゲートより退出できる仕組みとなっているが、管理区域内作業着の着用の有無までは管



図 1. 管理区域内作業着

理できない。

管理区域内作業着には、主に真空関連作業や床に膝をつくことがあるときに着用するつなぎの作業服と、軽作業を行うときに着用するジャンパーの作業着があり、どちらかを着用して作業を行う。ジャンパーは作業者を一目で識別できるように、赤・緑・黄色の派手な色が使用されている。また、管理区域内専用のヘルメットと黄色の安全靴も着用する。このうち、うっかり管理区域からの持ち出しミスが発生していたのは軽作業用のジャンパー

と安全靴であった。

入退ゲート手前に鏡を設置し自分の姿を確認するようにしていたが、それでも持ち出しミスは発生していた。持ち出される対象物は赤・緑・黄色の派手な色であることから、入退ゲート手前に色を検知して警告するシステムを設置することとした。

#### 3. 警告システムの構成

##### 3.1 設置場所

入退ゲート手前の管理区域境界に自動扉が設置されており、作業者は必ずその扉を通過するため、そこにシステムを設置することとした。



図 2. 設置場所

検知したい対象物は赤・緑・黄色の作業着および黄色の安全靴の計 4 点である。作業着の黄色と安全靴の黄色はほぼ同じ色合いである。持ち出しミスの状況としては、作業着は着用されたままであるが、安全靴は手に持たれている。作業者はカメラの前で静止するわけではなく通過するだけである。また、およそ通過するエリアは決まっているがバラツキはあり、複数人同時に通過することもある。部屋に窓はなく、24 時間およそ一定の明るさである。

##### 3.2 ハードウェア

ハードウェアとしては、USB カメラおよびノート PC で構成した。USB カメラの画像は常にノート PC のディスプレイに表示されている。対象物を検知するとノート PC のスピーカーから警告音が鳴らされる。システムの構成を表 1 に示す。

表 1. 警告システムの構成

USB カメラ	HOZAN L-835 1280×960 最大 30fps
ノート PC	HP Pavilion 15 Notebook Windows10 Pro Intel Core i5
ソフトウェア	LabVIEW

入退ゲートの管理区域側に設置されている高さ 1.5m 程度の下駄箱の上に USB カメラとノート PC を置き、管理区域境界の自動扉付近を横から撮影できるアングルとした。USB カメラは磁石付き雲台でスチールの下駄箱に固定した。



図 3. 警告システム

### 3.3 ソフトウェア

ソフトウェアは LabVIEW で作成した。Vision Development モジュールを使用して USB カメラの画像を取り込み、PC にリアルタイムで表示させている。対象物の検知にもリアルタイム性が求められるため、アルゴリズムとしては動きや形は考慮せず、対象範囲内で登録した色が一定割合以上になるとフラグを立てるといったものとした。

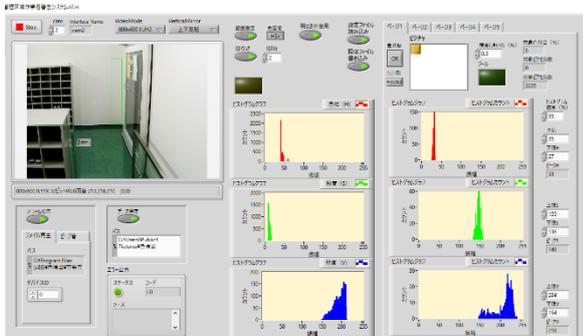


図 4. ソフトウェアの設定画面

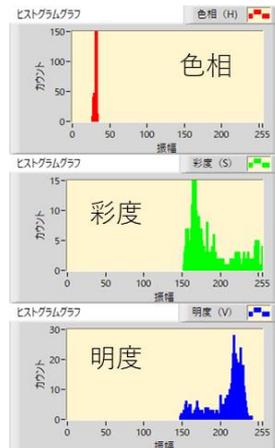
初めに検知したい対象物を USB カメラで撮影して色の登録を行う。24 ビット RGB 画像の 1667 万色のうちある一定幅の色を登録している。USB カメラで登録した色を検知すると、警告音を鳴らして静止画を記録するようにした。

USB カメラの画像を解像度 800×600、フレームレート 20fps で取り込み、マッチング処理を行っている。全ピクセルにマッチングを行うと 20fps で処理できないため、実際には対象エリアを限定し間引きを行い、4000 ピクセルほどにすることでリアルタイム処理を行っている。

### 3.4 色空間

検知したい対象物は赤・緑・黄色の作業着および黄色の安全靴の計 4 点である。作業着の黄色と安全靴の黄色はほぼ同じ色合いである。そのため、USB カメラで赤・緑・黄色の作業着を撮影し、その 3 色を検知対象色として登録した。

登録した色を RGB で扱うと、部屋の明るさにより単色の対象物でも違った色に見えてしまい扱いにくい。そこで、RGB を色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Value) の 3 要素で表す HSV 色



登録色

色相 27~35  
彩度 154~250  
明度 154~234  
に入る色を検知

登録色のヒストグラム



元の画像

登録色検知

図 5. 色の検知例

空間に変換する。色相は部屋の明るさで変化しないため、色相に重きを置くと精度よく検知ができる。

色相、彩度、明度が全て設定範囲内に入るとその色があると検知するが、設定範囲の幅によって検知の感度が変わる。感度を高くしすぎると誤検知も増えるため、実際の設置場所で動作テストを行い、100%検知するけれどもなるべく誤検知も少なくなるよう調整した。

#### 4. 運用実績

警告システムは 2019 年後半から運用を開始した。図 6 に 2020 年以降の検知件数を示す。

2020 年に比べ 2021 年以降は作業者の意識が向上したのか検知件数は減っているが、30 件前後の検知件数がある。警告システムによりこれだけの持ち出しミスを防止することができた。

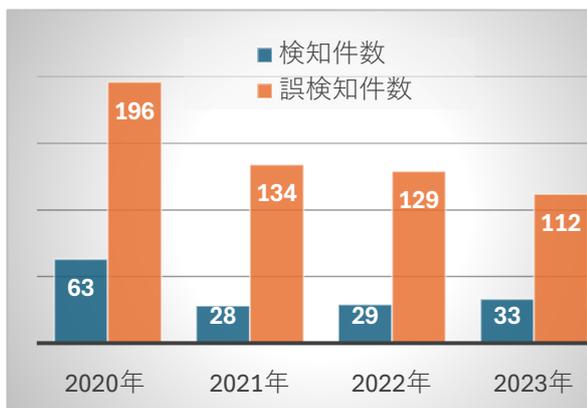


図 6. 検知件数

#### 5. 問題点

##### 5.1 検知漏れ

システム運用開始以降、2 件の検知漏れ（検知できずに持ち出しミスが発生）の事例があった。そのうち 1 件はシステムの不具合により登録された色データが消えてしまっていて検知できなかった。

そのため、それ以降は毎日システムの動作テストを行っている。

##### 5.2 システム停止

警告システムは 24 時間連続稼働しているが、1 ヶ月程度すると PC のメモリの空き領域がなくなって停止してしまうことがある。メモリの開放処理は入れてあるつもりなのだが原因がわからない。

そのため週に 1 回 PC の再起動を行い、システムが停止しないようにしている。

#### 5.3 誤検知

検知件数に対して 4 倍程度の誤検知件数が発生している。図 7 と図 8 に検知例と誤検知例を示す。

同じような色合いの服や道具に対しても誤検知が起こる。持ち出し時だけでなく持ち込み時にも誤検知は発生する。必ず誤検知が発生する服や道具もあるのだが、感度を下げると検知漏れが発生するため回避できていない。



図 7. 検知例



図 8. 誤検知例

#### 6. まとめ

色検知による警告システムを作成し、約 4 年間運用してきた。HSV 色空間で色を検知させることにより、ほぼもれなく警告することができている。システムの不具合や誤検知もあるものの、99%持ち出しミスを防止することができた。

### 3.4. 電気電子技術課における様々な業務

電気電子技術課 安井孝治

#### 1. 水素ガス検知器点検用インターロック一時解除回路の作製・設置

水素ガス検知器の日常点検の際、インターロックにより毎日誤報を発報(図1)するため、点検時にインターロックを一時解除する回路を検知器の台数に合わせ3台製作した。仕様は、タイマーまたは手動ボタンのオン/オフにより一定時間インターロックを解除するよう設計した。現場に設置、動作試験を実施し、点検時に誤報が出ないことを確認した(図2, 3, 4)。

アラームサマリー						
アラーム履歴		ガス供給設備		超音速ガスバフ装置		確認
		ブザー停止		ブザー停止		全確認
		リセット		リセット		
AlarmID	発生	確認	復帰	メッセージ	機器No	
8152	2023/04/12 10:08:00		2023/04/12 10:08:04	超音速ガスバフ装置 ガス漏洩 2段	超音速ガスバフ装置	
8151	2023/04/12 10:08:00		2023/04/12 10:08:04	超音速ガスバフ装置 ガス漏洩 1段	超音速ガスバフ装置	
1162	2023/04/12 10:05:28		2023/04/12 10:05:37	ガスポンプステーション1 ガス漏洩 2段	ガス供給設備	
1161	2023/04/12 10:05:28		2023/04/12 10:05:37	ガスポンプステーション1 ガス漏洩 1段	ガス供給設備	
1172	2023/04/12 10:04:43		2023/04/12 10:04:51	ガスポンプステーション2 ガス漏洩 2段	ガス供給設備	
1171	2023/04/12 10:04:43		2023/04/12 10:04:51	ガスポンプステーション2 ガス漏洩 1段	ガス供給設備	

図1. 水素ガス検知器の点検における誤報の履歴



図2. コイル電源室 (1)



図3. He 液化冷凍機室  
(ガスポンプステーション1)



図4. He 液化冷凍機室  
(ガスポンプステーション2)

#### 2. 所内電力使用量の調整

NIFSの実験設備では大電力を使用する機器が多数存在する。使用電力が契約電力を一瞬でも超過すると違約金を請求されるばかりか次年度の契約電力の増加に繋がる。つまり、電気料金が增加する。NIFSではデマンドサーバを設置し、所内どこからでも監視できるようにすると共に、100kW以上の大電力を使用する場合は事前に登録することになっている。第25サイクルLHD実験開始前にHe圧縮機の試運転の連絡を受け、電気設備の運用状況を確認し、電力使用量を調整することにより節電要請を行い、契約電力を超えないよう調整を行った(図5)。

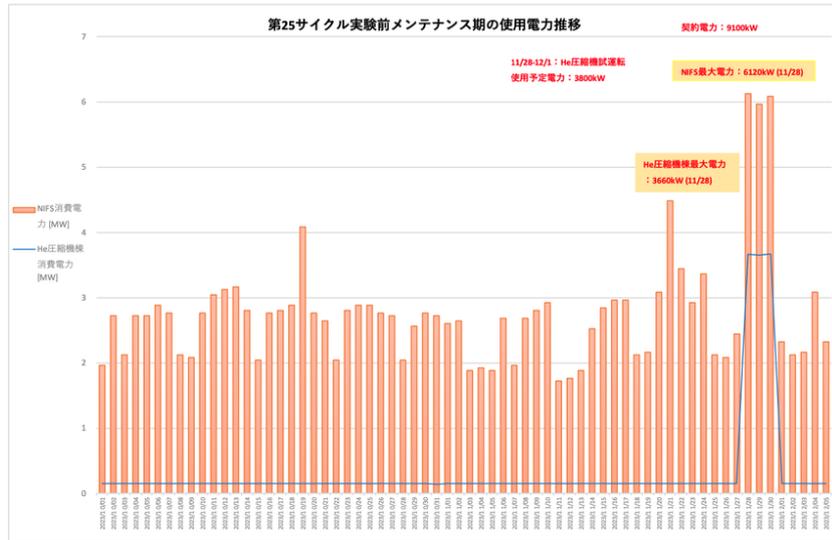


図5. 電力使用量の調整

### 3. 磁場コイル電源の整備

次期プラズマ実験に必要な磁場コイル用の電源整備に向け、CHSコイル電源の復旧を行うべく、屋外盤の制御基板などを修理で対応できるか調査・検討を行った（図6，7）。また、高圧受電盤・変圧器点検の仕様書・作業要領確認、点検作業立合いを行った。この点検報告書やCHSコイル電源の状況について所内打合せを行い、最善な方法を検討した。そして、CHSコイル電源の修理の検討、新規コイル電源の作製について、多くの業者と打合せを実施し、見積りを取った。



図6. CHSコイル電源の制御基板の状態

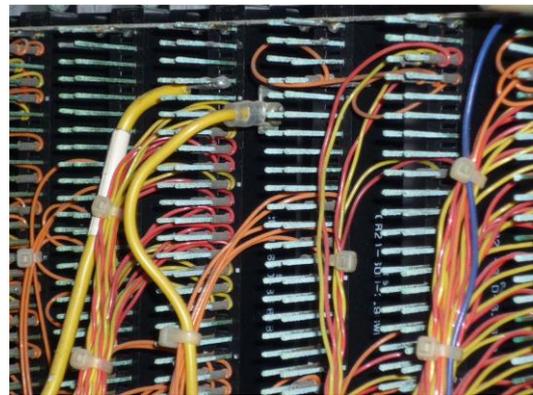


図7. 制御基板が接続されたコネクタの裏側

### 4. 冷却水ポンプのタイマー設置作業

開発実験棟において、冬場は凍結防止のため冷却水の通水を行っている。連続通水していると電気料金が多くなるため夜間のみ通水し節電できるよう純水冷却装置制御盤にタイマーを設置することとなった。8系統の冷却水ポンプに対し、既設制御盤の手動操作は残したまま（図8）、タイマーとリレーを増設し夜間のみ通水できるよう改修作業を行った（図9）。



図 8. 冷却水ポンプ制御盤の  
運転・停止ボタン（8系統）

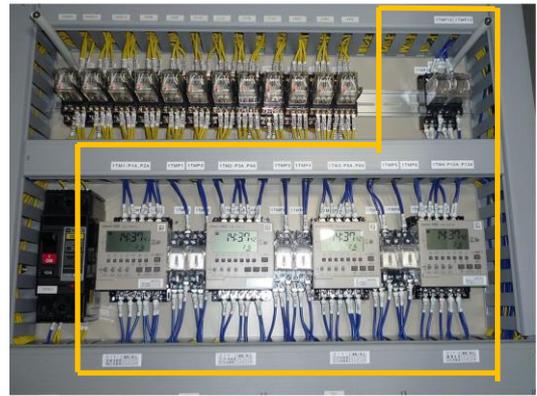


図 9. 増設したタイマーとリレー（8系統）

### 5. 各実験棟電力量計データ収集アプリの開発

各実験棟に各実験装置の電力消費量把握のため電力量計が多数設置された。この電力量計には FTP サーバ機能があり外部からデータ取得できるが、データの種類や数量が膨大であるため、自動で必要なデータのみ収集し定型化したファイルに保存すると共に、Web からデータファイルのダウンロードやグラフ表示などができるアプリの開発依頼を受けた。各実験棟電力量計データ収集アプリを開発するにあたりまず仕様の確認を行った。そして、実験棟毎に収集されたデータに対し、Web コンテンツの作成を行った。詳細としては、Web サーバの設置、トレンドグラフの表示（4種類）、過去データの検索およびダウンロード機能、過去グラフの検索およびグラフ表示機能（4種類）の作成を行った。



図 10. 消費電力監視システム  
（トップページ）

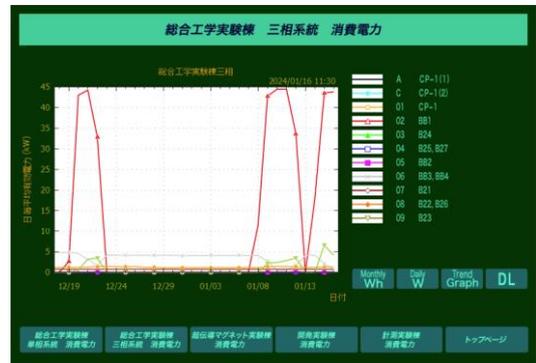


図 11. 最新トレンドグラフ  
（月毎電力の表示例）



図 12. ファイルダウンロード  
（収集ファイル一覧の例）



図 13. 過去のトレンドグラフ  
（月毎電力の表示例）

### 3.5. ECH 電源等トラブル対応

電気電子技術課 水野嘉識  
機械システム技術課 竹内俊貴

LHD-ECH では、#1,#2,#4,#5,#7,#8 の 6 台のジャイロトロンを運用している。研究職員 5 名、技術職員 2 名及び運転員と呼ばれる委託業者 3 名で、点検、運転、改造、トラブル等に対応している。以下に、2023 年度に実施したジャイロトロン運用や電気系のトラブル対応について記す。

2022 年度に#2 のジャイロトロンが故障したことも有り、共同研究及び 2024 年 3 月から開始された LHD 実験のためにジャイロトロンを入れ替えることになり、これに併せジャイロトロン用超伝導マグネット（以下 SCM）も入れ替えた。SCM の電源には OXFORD 社製品を使用しており、マグネットのインダクタンス等必要なパラメータ変更のみで通電を行ったが、クエンチが発生し所定の磁場に到達しないことが判明した。調査の結果、電源の容量上限付近で使用していることが分かり、予備品として保管されていた同社製同型番（ただし 200V 受電、既設品は 100V 受電）と交換したところ、目標磁場まで問題なく励磁できる様になった。

各ジャイロトロンには、コレクタ、アノード、ボディの高圧電源があるが、#8 のボディ電源で高電圧を出力していないにも関わらず常時高電圧が出力されたモニタ信号が出力されるというトラブルが発生した。他の信号及び図面を確認したところスイッチング電源の故障ではないかと推測され、メーカーにスイッチング電源の交換及び制御盤の点検を依頼した。結果、スイッチング電源の交換で故障は直り、ファンの劣化による交換推奨はあったがその他は正常であった。

ジャイロトロン及びジャイロトロン電源とその制御装置は加熱装置室に設置されており、運転は RF 制御室から遠隔操作で行うことになっている。遠隔操作が不調となり、光通信系等の調査を行ったが結局はハブの故障であった。ハブの交換により正遠隔操作が復旧した。尚、その後何点かハブを予備品として購入した。

#7 ボディ電源にて運転準備完了とならないトラブルが発生した。調査の結果、幾つかあるユニットの内、チョッパユニットのスイッチング電源が故障していることが判明した。スイッチング電源の予備品が無かったため、購入を検討したが品切れでしばらく手に入らなかった。このため、運転予定の無い他のボディ電源とチョッパユニットを入れ替えて運転を行った。その後、スイッチング電源が入手でき、交換の上チョッパユニットを元に戻し正常運転できることを確認した。

#1 コレクタ電源の制御盤にて不具合が発生、運転できなくなった。図面及び各種信号調査の結果、GTO 制御盤の光/電気信号変換器基板の不調であることが判明し、予備品と交換して運転可能となった。故障品は、メーカーでの修理及び新規購入を断られたため、当技術部の電気工作部署に修理依頼し部品交換（ラッチ関係）により無事動くようになった。こちらは、予備品として保管することになった。

#2 ボディ電源にて運転準備完了とならないトラブルが発生、#7 同様スイッチング電源の交換にて復旧した。

#4 ボディ電源にて運転準備完了とならないトラブルが発生した。#7 や#2 と同様のトラブルと思い、チョッパユニットのスイッチング電源を確認したが正常であった。図面と各種信号を調査し、制御ユ

ニットから信号が出ていないことが判明。制御ユニット内部を確認したところ、スイッチング電源に故障が見つかり交換により正常動作するようになった。

(安全衛生)

### 3.6. 危険物質管理室におけるリスクアセスメント届導入

電気電子技術課 水野嘉識  
機械システム技術課 野村吾郎

核融合科学研究所の安全管理体制は、安全巡視や衛生巡視を行い安全衛生の調査審議を行う安全衛生委員会と、安全衛生の推進及び環境保全に必要な事項の遂行を行う安全衛生推進センターからなっている。安全衛生推進センターは、電気、高圧ガス、放射線等それぞれ分野を担当する10の管理室があり、この中に危険物や化学物質等（以下、危険物質と呼ぶ）を担当する危険物質管理室というものがあり、技術部から7名が所属している。危険物質管理室は、室長及び室長代理、危険物質の使用、保管、廃棄の把握等を担当する危険物質管理者、各棟の保管庫管理を担当する危険物質保管庫責任者で構成されている。

化学物質規制に関しての法改正が有り、2024年に国大協のガイドラインとして発表された。リスクアセスメントに関し、3年以上の記録保管、化学物質を取り扱う本人が関わることを望ましい等が示された。これまで実施していたリスクアセスメントは、入手申請で気になったものに対し申請者と衛生管理者、危険物質管理室から3名の5名で実施し、議事メモをリスクアセスメント参加者に配布といった対応になっていた。室員の負担が大きいこと、全ての薬品に対応しているわけではないこと、記録保管が任意であったこと等から、法改正対応としてWebでの届け出制度を導入することにした。Webページの制作や管理等は情報システム・セキュリティセンターの方で担当してもらい、危険物質管理室では制度設計を主に行った。リスクアセスメント届を受理した際にIDを発行し、危険物質の入手申請時にリスクアセスメントIDが必須ということとし、従来の危険物質管理Webページ（入手、廃棄、使用済み等、主に数量管理用）と連動させることにした。リスクアセスメント届は最大3年間有効とし、サーバに記録が保管されることになった。延長は不可とし、有効期限1か月前に申請者に期限切れ通知のメールを送ることで、必要に応じて再申請を促す仕組みとした。肝心のリスクアセスメントは、連絡票（図1）というのを用意し、記入したものを届出時にアップロードする形とした。届出が出されると、危険物質管理者と保管庫責任者に連絡票と通知が送られ、それぞれの好き

リスクアセスメント連絡票

危険物質名	
用途	
1. 所要量の使用回数	
2. 所要量の作業時間	
作業頻度	
リスクアセスメント参加者	
作業手順	
リスク	
対策	

図1. リスクアセスメント連絡票

な時間に内容を審査し、不承認の場合は連絡票にコメントを書いて返すこととした。連絡票には、物質名（1つのリスクアセスメント届で1種類）、用途（例:機器の洗浄）、1回当たりの使用量及び作業時間、作業頻度、リスクアセスメント参加者、作業手順、リスクとその対策を記入してもらう。リスクアセスメントをしたことのないユーザーが大半なので、SDSを読むことと厚生労働省の職場のあんぜんサイト等を使って自学するよう案内している。2024年3月の終わりごろから運用を開始し、4月末時点で17件のリスクアセスメント届が承認されている。

## 4. 計測分析技術課

(LHD)

### 4.1. 掃除用ロボットを用いた管理区域内床表面汚染監視手法について

計測分析技術課 栗田紗緒里

栗田紗緒里<sup>A)</sup>、小淵隆<sup>A)</sup>、中田実希<sup>A)</sup>、岩田智恵<sup>A)</sup>、三宅均<sup>A)</sup>、加藤明己<sup>A)</sup>、林浩<sup>A)</sup>、  
田中将裕<sup>B)</sup>、磯部光孝<sup>B,C)</sup>、長壁正樹<sup>B,C)</sup>

<sup>A)</sup>核融合科学研究所 技術部

<sup>B)</sup>核融合科学研究所 研究部

<sup>C)</sup>総合研究大学院大学

#### 1. 概要

核融合科学研究所 (NIFS) では、2017 年 3 月から 2022 年 12 月まで、D<sub>2</sub>を用いた重水素プラズマ実験 (D 実験) を実施した (表 1)。D 実験の開始に伴い、大型ヘリカル実験棟内に新たに管理区域が設定され、同時期より管理区域内の自動清掃を目的として掃除用ロボットの運用を開始した。NIFS では安全管理計画に基づき放射線管理を実施し、これまでの放射線監視項目の結果は全て研究所管理値未満であることが確認されている[1][2]。また、作業環境測定として、月例のスミア採取、空气中放射性物質濃度測定等を実施し、各作業場所に汚染がないことを確認している。本研究では、管理区域内床表面の汚染状況を確認する新たな汚染監視手法として、掃除用ロボットが回収した粉塵を試料に用いることを検討した。本稿では掃除用ロボットが回収した粉塵を用いた測定手法及び結果について報告する。

表 1. D 実験実施期間

年度	実施期間
FY2016 - FY2017	2017/ 3/ 7 - 2017/ 7/ 7
FY2018	2018/10/23 - 2019/ 1/25
FY2019	2019/10/ 3 - 2020/ 1/10
FY2020	2020/10/15 - 2021/ 1/22
FY2021	2021/10/14 - 2022/ 1/21
FY2022	2022/ 9/29 - 2022/12/ 2

#### 2. 内容

##### 2-1. 試料採取

管理区域内の自動清掃には、iRobot 876、960 の掃除用ロボットを 10 台使用した。清掃エリアについては、各掃除用ロボットに 1 から 10 の番号を割り振り、各掃除用ロボットの番号に対応するエリア (表 2) において運用した。以降では、各掃除用ロボットを“LHD-〇〇 (対応する番号)”と記述する。

清掃条件は、掃除用ロボットが毎日 0 時以降の夜間に稼働するように設定し、1 か月間運用した。毎月末に各掃除用ロボットが回収した粉塵を 20 mL ポリエチレンバイアルへ全量採取し、これを試料として測定に使用した。

##### 2-2. 測定方法

20 mL ポリエチレンバイアルへ採取した試料は質量を測定した後、オートウェルガンマシステム (アロカ (株)、AccuFLEX  $\gamma$  7001) を使用して 1200 秒、3 リピートの条件で  $\gamma$  線エネルギー測定を行った。また、バックグラウンド試料には空の 20 mL ポリエチレンバイアルを使用し、前述した測定条件で測定を実施した。

採取した試料中に含まれる  $\gamma$  線放出核種の同定を目的として、エリア毎に採取された試料を数本選定して、高純度ゲルマニウム半導体検出器 (HPGe 検出器、ミリオンテクノロジーズキャンベラ (株)、GX3018、相対効率 35%) を用いて 3600 秒の測定を行った。

##### 2-3. 表面汚染密度の評価方法

表面汚染密度の評価期間は 2017 年 4 月から 2023 年 6 月までとした。この期間に掃除用ロボットが回収した粉塵試料を測定して、表面汚染密度の評価を行った。なお、LHD-10 に関しては 2017 年 9 月から運用を開始したため、2017 年 9 月から 2023 年 6 月までに回収された粉塵試料を対象に、測定及び表面汚染密度の評価を試みた。 $\gamma$  線エネルギー測定で得られた試料の計数率が全て人工放射性核種由来と仮定して、正味計数率を  $n$  [cps]、計数効率を  $\epsilon$ 、拭取り効率を  $F$ 、清掃面積を  $S$  [cm<sup>2</sup>] (表 1 参照) として、(i) 式を用いて、各エリアで採取された試料の表面汚染密度  $A_{SR}$  [mBq/cm<sup>2</sup>] の評価を試みた。ここで、計数効率  $\epsilon$  の値は、オートウェルガンマシステムの測定エネルギー範囲内において、<sup>51</sup>Cr に対する計数効率 0.04 が最低値であるため、安全側の評価のためにこの値を採用した。また、拭取り効率  $F$  については JIS Z4504 [2] に基づき、安全側の評価として 0.1 の値を採用した。

表 2. 各掃除用ロボットの清掃エリア

掃除用 ロボット 番号	エリア名	清掃面積 [m <sup>2</sup> ]
LHD-01	分析エリア通路	79
LHD-02	汚染検査室	20
LHD-03	保守作業室への通路	167
LHD-04	機器保管室	23
LHD-05	本体室地下入口前	89
LHD-06	地下 2 階搬入室	42
LHD-07	保管廃棄室 (2) 前 の通路	38
LHD-08	空調機械室 (南)	343
LHD-09	空調機械室 (北)	343
LHD-10	地下 1 階搬入室	184

$$A_{SR} = \frac{n}{\varepsilon \times F \times S} \quad \dots (i)$$

表面汚染密度の評価は、正味計数率が検出下限値以上となった試料を対象に行った。検出下限値 $n_{DL}$ は3 $\sigma$ 法に基づき(ii)式より算出した。ここで、 $K$ は包含係数、 $t_s$ は試料の測定時間[s]、 $t_b$ はバックグラウンド(BG)の測定時間[s]、 $n_b$ はBGの計数率[cps]である。本稿では $K=3$ 、 $t_s = t_b = 1200$  sとして計算を行った。

$$n_{DL} = \frac{K}{2} \left( \frac{K}{t_s} + \sqrt{\left( \frac{K}{t_s} \right)^2 + 4n_b \left( \frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right)} \right) \quad \dots (ii)$$

### 2-4. 入退人数の計数方法

大型ヘリカル実験棟管理区域内の各エリアのゲートや扉にはSQRC認証による入退管理システムが導入されており、入退人数が記録されている。各エリアで採取された試料の正味計数率及び試料量と、各エリアの入退人数の相関関係を調査するために、入退管理システムを導入しているエリア(LHD-01、02、03、04、05、10)について、入退履歴から入退人数のデータを抽出して比較を行った。

## 3. 結果

### 3-1. 各エリアで回収された内容物の傾向

各エリアで共通して回収された試料の主な内容物として、表3(a)より、埃や粉塵、木屑などが確認された。特定のエリアで回収された試料の内容物として、表3(b)より、LHD-05の清掃エリアでは、ビニール被覆や比重の大きい金属ゴミが確認された。この理由として、LHD-05は本体室地下の入口近辺に設置されているため、本体室地下内の作業で生じたゴミを回収していることが推察される。また、LHD-05、06、08、09、10の清掃エリアでは、比重の大きいコンクリート片が高頻度で回収された。この理由として、これらのエリアは管理区域外と隣接するエリア、または物品の搬出入やクレーンの利用があるエリアのため、コンクリート片が混入しやすい環境であることが推察される。

(a) 各エリア共通して回収された内容物	(b) 特定のエリアでのみ確認された内容物
<ul style="list-style-type: none"> <li>・埃、粉塵</li> <li>・木屑</li> <li>・ラミクロス、紙片</li> <li>・虫</li> </ul>	<p><b>【LHD-05】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ビニール被覆</li> <li>・プラスチック片</li> <li>・金属ゴミ(銅線、ばね、シールドなど)</li> </ul> <p><b>【LHD-05、06、08、09、10】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート片</li> </ul>

### 3-2. 表面汚染密度の評価

オートウェルガンシステムの測定で得られた試料の正味計数率が、全てD実験で生成した人工放射性核種由来と仮定して、(i)式を用いて試料の表面汚染密度を算出した。算出した表面汚染密度の頻度分布を図1へ示した。図中の赤枠内に、各エリアで採取された試料の表面汚染密度の最大値を表記した。管理区域外への物品搬出基準値は、 $\alpha$ 線を放出しない核種については表面汚染密度が4 Bq/cm<sup>2</sup>以下とされている。図1より、各エリアにおいて検出下限値以上の試料が多数確認された。一方で、各エリアで採取された試料の表面汚染密度の最大値は、LHD-04の清掃エリアにおける2.8 mBq/cm<sup>2</sup>であった。この結果より、各エリアで採取された全ての試料の表面汚染密度が、管理区域外への物品搬出基準値を大きく下回ることが確認された。

一方で、(i)式を用いた表面汚染密度の算出方法では清掃面積で正味計数率を除いているため、過小評価の可能性を考慮する必要がある。対して、拭取り効率、計数効率については安全側の評価のために最小値を設定しているため、過大評価の可能性が懸念される。また、本手法による汚染評価を異なる作業環境や施設に適用するには、作業場所の床材、取り扱う放射性核種の種類等に応じて最適な効率値を選択することが、より適切な汚染評価を行う上で重要と考える。本稿では、清掃面積と各効率値の条件等を加味しても表面汚染密度が物品搬出基準値の1000分の1未満であることから、各エリアの床表面に汚染は無いと評価した。

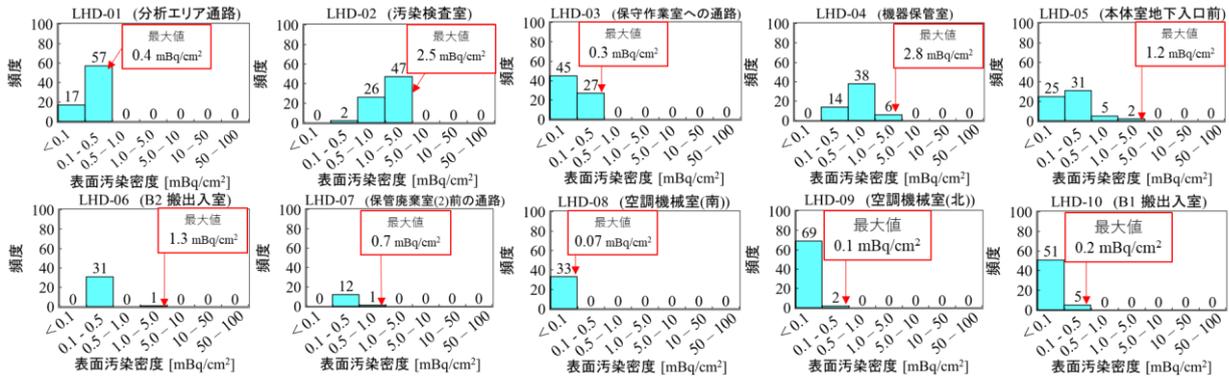


図1. 各エリアで採取された試料の表面汚染密度の頻度分布

### 3-3. 試料の正味計数率と試料量、各エリアの入退人数の相関関係

採取した試料の正味計数率が何に起因しているかを調査するため、試料量及び入退人数との比較から考察を試みた。採取した試料の正味計数率と試料量の経年変化を図2へ示した。なお、バイアル複数本分の試料が採取された月は、正味計数率と試料量をそれぞれ積算して結果をプロットした。図2より、正味計数率及び試料量は、いずれもD実験期間外の実験準備期間中に増加する傾向を示し、概ね同じ挙動を示すことが確認された。また、3-2節で仮定したように、試料の正味計数率がD実験で生成した人工放射性核種由来だと仮定すると、D実験期間中もしくは直後に試料の正味計数率が高くなるのが予想される。しかし、図2から、D実験期間外に試料量とともに正味計数率の値が増加することが確認された。D実験期間外に試料量が増加する理由として、この期間に実験準備に係る作業者の管理区域への立ち入りが増え、人の出入りに伴い各作業場所に粉塵や埃、衣類の繊維等が蓄積しやすいたことが挙げられる。また、採取された粉塵や埃等が含有する放射性核種からの放射線が、計数率として検出されていることが推察される。以上から試料の正味計数率は試料量、そして各エリアへの入退人数と相関があることが推測される。

そこで、各エリアで採取された試料の正味計数率と試料量の相関関係を図3に示す。図2と同様に、バイアル複数本分の試料が採取された月は、正味計数率と試料量をそれぞれ積算した結果を図中に黄塗でプロットした。図3より、いずれのエリアも試料の正味計数率と試料量の相関係数Rが0.8以上と、強い正の相関を示していることが確認された。一方で、回帰直線の傾きはエリア毎に差異が確認された。

入退人数と試料の正味計数率及び試料量の相関関係を確認するため、入退管理システムが導入されているエリア(LHD-01、02、03、04、05、10)を対象に、入退人数と回帰直線の傾きを比較した。比較結果を表4に示す。表4より、LHD-01、02、03、04のように、1か月平均入退人数が1000人を超えるエリアで採取された試料の場合、回帰直線の傾きは0.14-0.16となる傾向が確認された。この要因として、入退人数に比例してエリアに蓄積する粉塵や埃が増加し、これらが含有する放射性核種に起因して回帰直線の傾きが高計数率側に大きくなるのが推察される。一方で、LHD-05の清掃エリアでは、1か月平均入退人数が1000人を超えているにも関わらず、回帰直線の傾きが0.08-0.09と小さかった。この理由として、表3より、LHD-05の清掃エリアで採取される試料の内容物に、比重の大きい金属ゴミが多く含まれることが要因として推察される。また、採取された金属ゴミのみを20mLポリエチレンバイアルに入れて、オートウェルガンシステムを用いて計数測定したところ、金属ゴミの計数率は検出下限値(0.2 cps)未満であった。このように、比重の大きい金属ゴミの計数率が低いことも、傾きを小さくする要因となっていることが推察される。LHD-10の清掃エリアでは、他のエリアと比較して回帰直線の傾きが小さいことが確認された。この要因として、LHD-10の清掃エリアでは入退人数が1000人未満であること、表3で示したように、採取される試料の内容物に比重の大きいコンクリート片が含まれる

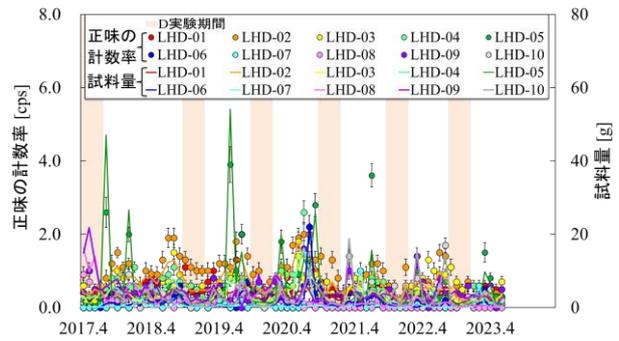


図2. 試料の正味計数率及び試料量の経年変化

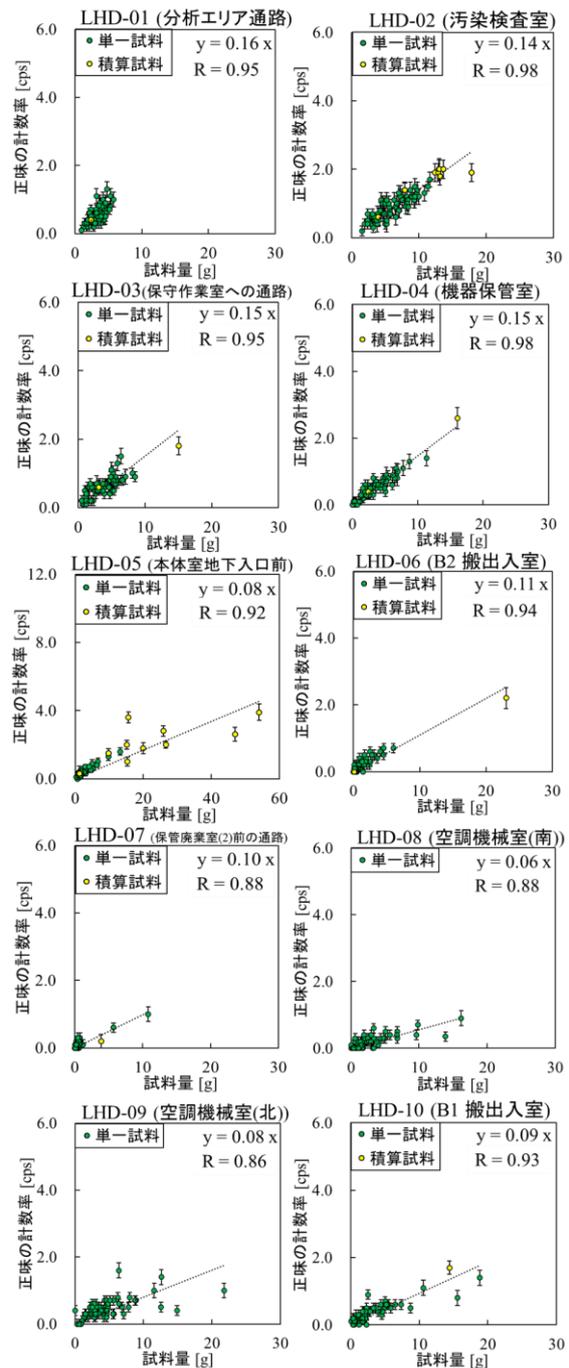


図3. 採取試料の正味計数率と試料量の相関関係

ことなどが挙げられる。LHD-06、07、08、09の清掃エリアには入退管理システムが導入されているゲートや扉がないため、本稿では入退人数と回帰直線の傾きの比較ができなかった。しかし、これらのエリアの回帰直線の傾きが小さい理由として、LHD-10と同様に、試料中に比重の大きい物が含まれていることが要因の一つとして挙げられる。以上の結果から、試料の正味計数率は試料量及び入退人数と相関があることが示唆された。また、計数率は人の出入りに伴い蓄積する粉塵や埃等に含まれている放射性核種に由来するものであることが推察される。試料の計数率と試料量の散布図の回帰直線の傾きは採取される試料の内容物と入退人数に依存することが示唆された。

表 4. 回帰直線の傾きと1か月平均入退人数

	(a)回帰直線傾き	(b)入退人数 [人/月]
LHD-01	0.16	1742
LHD-02	0.14	5691
LHD-03	0.15	1345
LHD-04	0.15	5691
LHD-05	0.08	1522
LHD-10	0.09	783

### 3-4. 試料中に含まれるγ線放出核種定性分析結果

試料から検出された放射線が、粉塵や埃等に含まれる放射性核種に起因する可能性が3-3節で挙げられた。そこで本節では、試料中に含まれている放射性核種を同定するため、HPGe検出器を用いてγ線放出核種の定性分析を行った。定性分析は、図3で示した回帰直線上の試料をエリア毎に一点選定して実施した。各エリアで採取された試料の定性分析結果を図4に示した。図4の結果より、いずれのエリアもPb-210やPb-212、Pb-214などの天然放射性核種のみが検出され、検出される放射性核種にエリア間で差異がないことが確認された。

以上の結果より、試料が含有する放射性核種にエリア間による差異はないことが確認された。また、各エリアで採取された試料から検出された放射線は、D実験で生成しうる人工放射性核種由来の放射線ではなく、埃や粉塵等に含まれる天然放射性核種に起因していることが確認された。

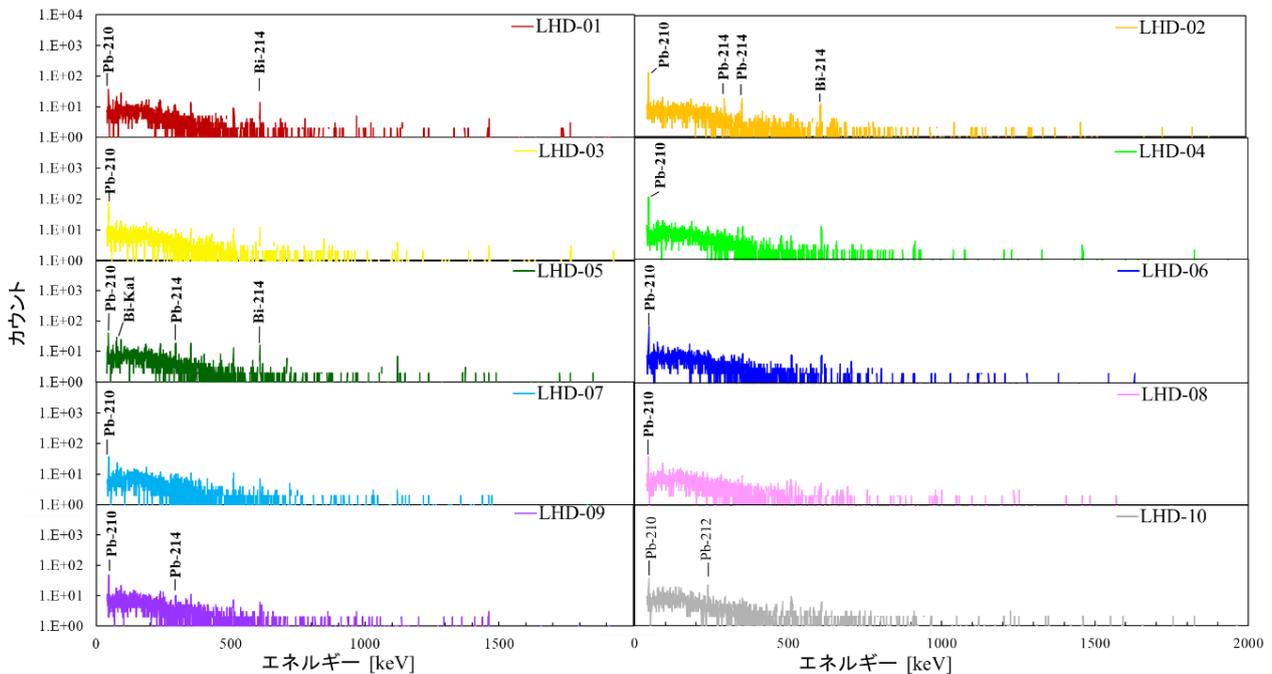


図 4. 試料中に含まれるγ線放出核種定性分析結果

## 4. まとめ

掃除用ロボットが回収した粉塵を測定試料として用いて、管理区域内床表面の汚染監視を試みた。本稿で提示した表面汚染密度の算出式を用いて表面汚染密度を評価した結果、これまでに採取された試料は全て管理区域外物品搬出基準値 (4 Bq/cm<sup>2</sup>) 未満であることが確認された。また、試料の正味計数率は試料量と入退人数に依存することが示唆された。γ線放出核種の定性分析結果より、各エリアで採取された試料から検出された放射線は、天然放射性核種に由来することが確認された。

本稿で提示した汚染監視手法は、管理区域内の清掃と同時に試料採取をできる利点がある。また、スミア法と比較して、測定対象エリアの床全体に堆積している粉塵やそれに付着した遊離性汚染を概ね全量採取し、汚染評価できることも本手法の利点の一つである。本手法による汚染評価方法を異なる作業環境や施設に適用する際には、各作業環境 (床材、取り扱う放射性核種の種類) に応じた効率値を選択することで、より精度の良い汚染評価ができることが期待される。

## 5. 本稿に関する学会発表

<国内学会・研究会>

1. ○栗田紗緒里、小淵隆、中田実希、岩田智恵、三宅均、加藤明己、林浩、田中将裕、磯部光孝、長壁正樹：  
「掃除用ロボットを用いた管理区域内床表面の汚染監視手法」日本放射線安全管理学会第 22 回学術大会ポスター発表、2023
2. ○栗田紗緒里、小淵隆、中田実希、岩田智恵、三宅均、加藤明己、林浩、田中将裕、磯部光孝、長壁正樹：  
「掃除用ロボットを用いた管理区域内床表面の汚染監視手法について」令和 5 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会ポスター発表、2024

## 6. 参考文献

- [1] 大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所安全衛生推進センター、「LHD 重水素実験放射線管理年報（2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日）」、2023 年 7 月.
- [2] 自然科学研究機構核融合科学研究所ヘリカル研究部、「大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画<改訂版>」、2012 年.
- [3] 一般財団法人日本規格協会、「JIS Z4504 放射性表目の線の測定方法－ $\beta$  線放出核種（最大エネルギー 0.15 MeV 以上）及び  $\alpha$  線放出核種」、2008 年.

## 4.2. 液体シンチレーション計数装置の ESCR 値と測定バイアル質量との相関

計測分析技術課 岩田智恵 栗田紗緒里 中田実希

### [はじめに]

NIFS では、トリチウム (T) の環境挙動を評価するため、大気環境中トリチウム濃度を測定している [1, 2]。大気中に存在するトリチウムは、水蒸気状 (HTO)、水素ガス状 (HT) 及び炭化水素状 (主に  $\text{CH}_3\text{T}$ ) に大別されるため、化学形態別にトリチウムを捕集している。

環境トリチウム濃度の測定には、低バックグラウンド液体シンチレーション計数装置である LSC-LB7 (アロカ株式会社) を 3 台使用している。以降では、3 台の LSC-LB7 をそれぞれ LB7-I、LB7-II、LB7-III と記述する。液体シンチレーション計数装置の測定試料には、放射線と相互作用すると発光する蛍光物質 (液体シンチレータ) と放射性核種を含む試料を混合した溶液 (カクテル) を使用する。液体シンチレーション計数装置では、カクテルからの発光を装置の内部にある光電子増倍管 (PMT: photomultiplier tube) により検出し、電気信号に変換して放射線を計数する。このとき、カクテル内部でクエンチング (消光: Quenching) と呼ばれる現象が生じると試料の発光が阻害されるため、放射線の適切な計数が困難となる。そこで液体シンチレーション計数装置の測定では、事前にカクテルのクエンチングの指標を求めて補正することで、試料の放射能濃度を算出する。LSC-LB7 では、クエンチングの指標を求める際に、外部標準チャンネル比法 (ESCR: External Standard Channels Ratio) による算出方法を使用する。クエンチングは ESCR 値変動要因にもなり、計数効率に影響を与える。

2023 年 11 月以降、LB7-III でのバックグラウンド (BG) 試料と HTO 試料の ESCR 値が増加していることが確認されたため、その原因を調査した。ESCR 値は、30 回の繰り返し測定を行った平均値である。

### [結果]

通常、被測定試料量が同じ場合には ESCR 値は概ね同じ値となるが、2023 年 11 月以降、LB7-III の測定結果は、被測定試料量が同じにも関わらず ESCR 値は 11 月以前よりも増加傾向にあった。LB7-II でも同一試料の測定を行ったところ、同じ傾向が確認され、特定の装置に起因した事象ではないことがわかった。

ESCR 値の変動要因について、以下の 3 つの影響ではないかと仮説を立てた。

- ① 所内計画停電に伴う LB7 の電源立下げ及び立上げによる装置側の影響
- ② 試料作成に使用する液体シンチレータのロット番号切り替わりによる影響
- ③ 試料測定に使用するバイアル(以下、測定バイアル)のロット番号切り替わりによる影響

そこで、BG 試料と HTO 試料の ESCR 値の経年変化を図 1 に示し、図 1 より ESCR 値の変動時期を調べることにより、変動要因の特定を試みた。

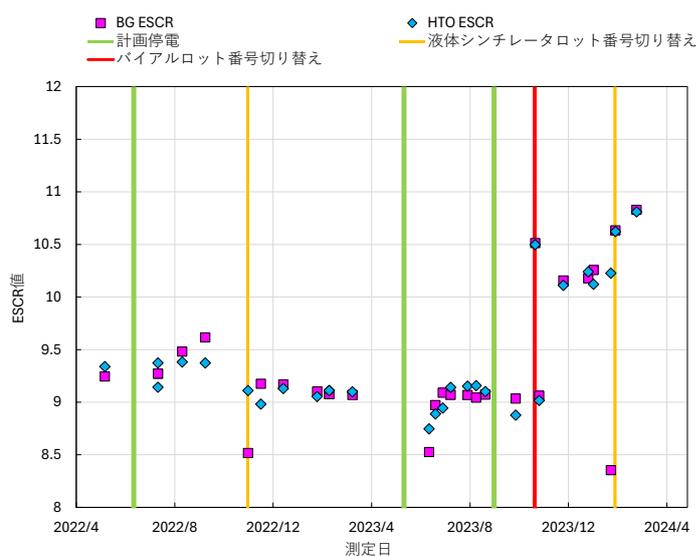


図1. BG 試料と HTO 試料の ESCR 平均値の経年変化

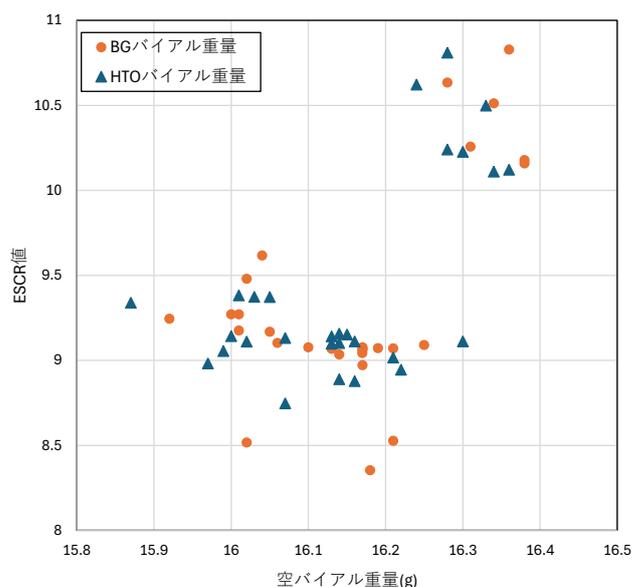


図2. BG 試料と HTO 試料の ESCR 平均値と測定バイアル質量との相関

ESCR 値の変動時期は、測定バイアルのロット番号が切り替わる時期と概ね一致した。測定バイアルのロット番号が異なると、バイアルの平均質量も異なる傾向にあることがこれまでの業務の中で判明しているため、ESCR 値の変動要因はバイアルの質量にあると推察した。

さらに仮説を検証するために、BG 試料と HTO 試料の ESCR 値と、測定バイアル質量の相関関係を調査した。結果を図2に示す。

図2より、測定バイアルの質量が大きいと、ESCR 値が増加する傾向が確認された。

### [考察]

バイアルのロット番号が異なる場合でも、同一商品のバイアルであれば、測定バイアルの素材(材料の密度)及び内容積は同じである。このことから、バイアルの質量の違いは測定バイアル容器の壁厚に起因することが推察される。測定バイアルの質量が大きくなると容器の壁厚が大きくなり、容器内で生じた発光の透過率が低くなる。その結果、クエンチングを抑制して、ESCR 値に影響するのではないかと推察した。

### [結論]

ESCR 値の変動要因を調査し、測定バイアルのロット番号切り替わり(平均重量の変動)によるものであることを特定することができた。今後の対策として、同一ロットのバイアルを使用し、同一ロットでも質量の異なるバイアルは使用しないこととする。

### [参考文献]

1. T. Uda *et al.*, Fusion Engineering and Design **81** (2006) 1385-1390.
2. M. Tanaka and T. Uda, Radiation Protection Dosimetry **167** (2015) 187-191.

## 4.3. 発振器の入射方向表示器の製作

計測分析技術課 神田基成

## 目的と概要

大型ヘリカル装置 (LHD) において、プラズマ加熱方法の一つとして、数十 MHz の電磁波を用いたイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱がある。核融合科学研究所の ICRF 加熱装置は大きく分けて高周波発振器 (以下、発振器という。)、同軸伝送路 (以下、伝送路という。)、液体スタブチューナー、アンテナで構成されている (図 1)。このうち加熱装置室の伝送路には同軸切換器 (以下、切換器という) が接続されている。その切換器によって伝送路を容易に組み換えられ、発振器の入射先をアンテナ或いはダミーロードに変えることができる。

従来の発振器の入射方向確認は、伝送路を目で追う方法で行われていた。しかし、切換器の戻し忘れと確認ミスにより、アンテナに入射されるべきところをダミーロードに入射されるというエラーが発生した。このようなエラーを低減するため、発振器の入射方向表示器を設計・製作した。

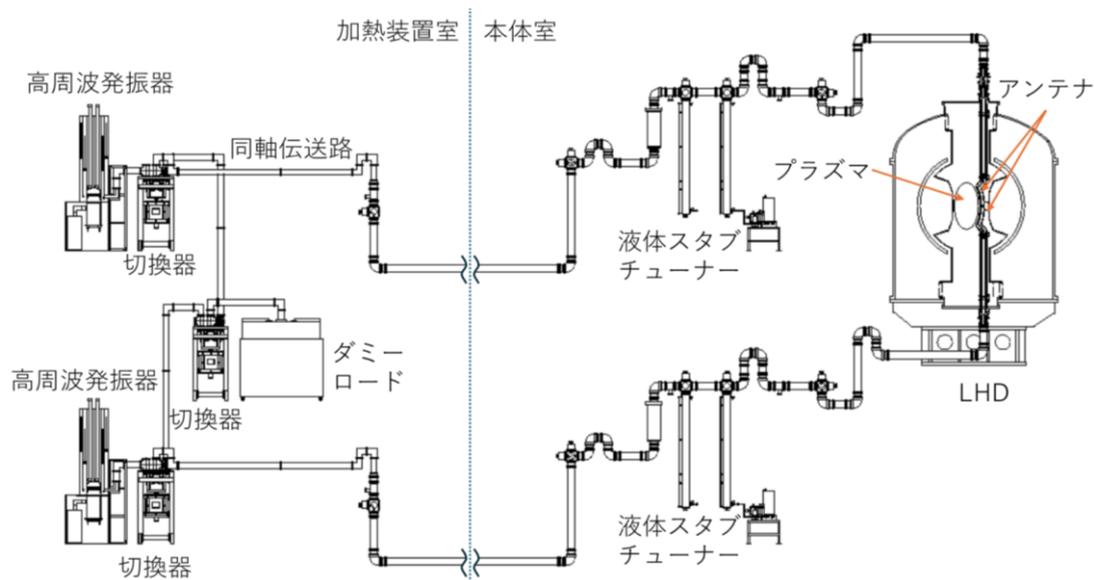


図 1. ICRF 加熱装置の概略図

## 作業内容

表示器の導入対象とした切換器はその U 字伝送路部をエアシリンダーによって下降 (切り離し) 及び上昇 (接続)、そして回転 (接続方向の変更) をさせることで発振出力の入射先を切り換えている。設計にあたっては U 字伝送路部の接続完了と接続方向、そしてロックバーの挿入の情報を切換器の制御盤内のリレー接点から取り出した。このロックバーはエアシリンダーに供給されるエアの圧力が低下した際に生じる U 字伝送路部の下降防止のために取り付けられているものである。入射方向表示の情報としては先の接続完了と接続方向だけで十分であるが、このバーが挿入されないと入射方向の表示がされないようにした。これによって先の下降発生を防ぐことも期待できるからである。これらの情報を組み合わせリレーと表示灯を用いて入射方向表示器を製作した (図 2 及び図 3)。また、確認・点検をし易く

するため、設置位置は図4のように動線の近くとした。

## 結果

この入射方向表示器の導入以後、発振器の入射方向の確認は伝送路を目で追う方法と表示器の確認というダブルチェックをしており、間違っただ象に入射するというミスは生じていない。今後は、入射方向表示器から入射方向の情報を発振器の入射制御システムに取り込み、その情報が制御システム上の入射方向と異なる場合は発振不可とするインターロックを追加する予定である。



図2. 発振器の入射方向表示器（表）



図3. 発振器の入射方向表示器（裏）



図4. 同軸切換器に取り付けた入射方向表示器

#### 4.4. 実験データ収集系運転監視の省人化

計測分析技術課 大砂真樹

##### 概要

実験データ収集系は核融合研 LHD、九州大学 QUEST、筑波大学 GAMMA10、東京大学 TST-2、計 4 サイトの核融合装置において、各サイトに設置している複数の PC とデジタイザによりデータの収集・保存を行っている。特に LHD において運転員の削減等の状況変化もあり、各機器の運転稼働と状態監視において自動運転化と監視のしやすさを以前よりも進めることを目指した。

##### 詳細内容

- ・ LHD データ収集系のスケジュールによる機器電源 ON/OFF の改良

LHD データ収集系では省電力のため実験のない夜間に極力機器類の電源を落とし、実験日の朝に電源を入れるようにしている。電源管理にはメーカー製の PDU を利用しているが、PDU の老朽化に伴い、電源コマンドに正しく反応しないケースが増えてきた。そのため、単純に電源 ON/OFF コマンドを送るのではなく、コマンド送信後の応答メッセージを見てコマンド再送信や PDU 自体のリブートを行う等の改良を行った。

- ・ QUEST、GAMMA10 のシーケンス配信サーバ監視の強化

遠隔サイトである QUEST と GAMMA10 では実験が始まったことに気づきにくいいため、シーケンスが始まった際に通知するようにスクリプトを作成した。また、先方での停電や機器トラブル等の影響でシーケンス配信サービスが落ちることがあるので、停止した場合に通知を送るよう監視スクリプトを作成した。

- ・ 収集サービストラブル時の自動再起動化

主に横河製 WE デジタイザにおいて収集側プロセスがハングアップしたり、WE との通信時にエラーが発生したままになったりすることがあり、その対処の自動化を行った。具体的には、監視用スクリプトを作成し、ハングアップを検知した場合は収集側プロセスを強制終了させてから再起動するようにした。通信エラーが発生したままになる場合は WE デジタイザ側の状態に問題がある場合がほとんどで、WE デジタイザの電源入れ直しと収集 PC のリブートという手順が必要になり、こちらの自動化は今のところ実現できていない。

#### 4.5. イオンビーム解析装置におけるルビジウム (Rb) 交換作業環境の整備

計測分析技術課 田窪英法

設計開発技術課 千村大樹

##### 目的

イオンビーム解析装置（以下 IB 解析装置とする）で使用しているルビジウムの充填を行う作業環境を整備する。

##### 概要

IB 解析装置は、正イオンビームを複数の試料に照射して表面分析の元素を測定する装置である。イオンビームを生成するためにはルビジウムによるイオン交換が必要であり、使用するルビジウムを年 2 回充填している。ルビジウムは大気中の水分に触れるだけでも燃焼する為、グローブボックス内部をアルゴンや窒素に置換してから充填作業を行う必要がある。IB 解析装置では専用のグローブボックスを持っていなかった為、これまでは他の実験装置のグローブボックスを借用して対応していたが、グローブボックス内部にはルビジウム以外の薬品等が置いてあることがありルビジウムが気化した場合に危険であること、ルビジウム輸送中の発火の危険性があること、使用時間が限られることなどの問題があったため IB 解析装置専用のグローブボックスを設置することで問題を解消することにした。

##### グローブボックス内の作業内容

ルビジウムをタンクと呼ばれる筒に 5g 充填し、イオン源に取り付けることでイオンビームを生成することが可能になる。ルビジウムを充填するためには、使用するグローブボックス内部の酸素濃度が 21% から 0.5% 未満になるまで、約半日かけて酸素をアルゴンや窒素などで置換する。固体状態になっているルビジウムを融点温度の 39 度以上にする為、ヒートガン（ドライヤー）を使用して約 70 度まで温度を上昇させる。液体になったルビジウムは粘性があり、表面張力によってアンフル（ルビジウムを入れているガラスの瓶）から流れ出ない為、振動を与えながらタンクに充填する（図 1）。



図 1. ボックス内部での作業様子

## グローブボックス設置作業

内部でルビジウムを温めるためのヒーターを使用することから 100V 電源が内部で使用できること、アルゴン雰囲気下で作業ができることを基準にグローブボックスを選定し、設置を行った。アルゴンガスの供給経路を整備し、作業中やバルブの不具合を想定し酸素濃度計を設置した。また、ルビジウム充填マニュアルを作成し、充填作業を行い、作業環境に問題がないことを確認した。

## 結果

IB 解析装置室内に専用グローブボックスを設置したことで輸送時、及び作業時の危険性を抑えることができ、IB 解析装置の実験スケジュールに合わせて何時でもルビジウムを充填することができるようになったことでメンテナンス作業の効率を改善することが出来た。

(情報システム運用班)

## 4.6. Google アカウント管理の省力化

計測分析技術課 井上望未

### 目的

退所者宛て案内メール送付時の省力化と誤送信防止

### 概要

Google に関する業務のひとつとして、アカウントの管理を行っている。特に停止対象のアカウントに関しては、退所後の転送設定希望調査に加え、期限までにユーザーに対応を依頼する事項（メーリングリストのオーナー変更や検疫認証システムの機器登録者変更など）が多いため、案内の内容がよりわかりやすく伝わるよう検討し続けている。対象が判明すると、対象者へ上記内容の案内メールを送付する。すると、転送希望の連絡が入り、同時に問い合わせも届く。各々の事情により不明点や要望が発生するため、対象者数に比例して対応も増加する。過去に問い合わせのあったものは FAQ を作成しているが、個別に対応が必要なケースも残る。

特に年度末に集中する退所者への対応時期は、他業務も集中する。個別の対応に余裕を持つためにも、第一報の期限案内メールを一斉送信とし、省力化できればと考えた。従来、定型文を作成しメールテンプレートを用いていたが、更なる省力化を図るため、Google Apps Script (GAS) を用いた一斉送信を行うこととした。

### 作業内容

機構事務局情報セキュリティ推進室から公開されているメール誤送信防止対策 GAS を利用し、退所予定者へのメール送信に利用できるよう一部変更し設定した。テスト送信を重ね、体裁を整えた上、使用に至っている。宛先や件名などはスプレッドシートに入力、本文はドキュメントで作成し、スプレッドシートから宛先など挿入する形式となっている。

### 結果

送付件数が多い時期において、1 件ずつメールソフトのテンプレートを用いて送付していた時期と比較し、メール送付に費やす時間が格段に節約された。また、宛先や宛名などをスプレッドシートに表形式で入力することで、誤送信や同報忘れのチェックをまとめて行うことができ、省力化につながった。

## 5. 制御情報技術課

(LHD)

### 5.1. 低温システムの信頼性を向上させるため機械学習を用いたシステムの状態予測モデル開発

制御情報技術課 大場恒揮

#### 目的

低温システムの信頼性を向上させるために機械学習を用いたシステムの状態予測モデルを開発するためのノウハウやデータの蓄積を行う。

#### 概要

近年 Python プログラミング言語は人工知能やデータ分析、アプリケーション開発、自動化等幅広く使われている。Python を使用して LHD 低温システムの信頼性を向上させるために機械学習を用いたシステム状態予測モデルを開発することになった。システム状態予測モデルは過去のデータに基づいて将来のシステム状態を予測するモデルで異常検知や予防保全、最適化などに使用できる。LHD 低温システムでは高次元データを低次元データに圧縮しデータの主要な特徴を抽出する統計手法である主成分分析を用いて異常検知のためのモデル開発ノウハウやデータを蓄積している。

#### 作業内容

- ・ LHD 低温システム LAN 内に流れている UDP データを LabVIEW にて主成分分析で必要なデータを毎秒共有フォルダ内の csv ファイルに保存するために設定変更。
- ・ 主成分分析する系統及び成分数は膨張タービン 7 成分を各 7 台、ヘリウム圧縮機 12 成分、ポロイダルコイル 8 成分を各 6 系統、低温排気圧縮機 7 成分、超伝導バスライン 8 成分を各 3 系統、超伝導バスライン電流リード 10 成分を各 3 系統で開発プログラムは全 21 個作成。
- ・ ラズベリーパイやパソコンで全 21 個起動し csv ファイルを読み込ませて分析。
- ・ 分析結果をグラフ化するプログラムを作成し画面上に表示。

#### 結果

開発を行った全 21 個の主成分分析プログラムにおいて LHD 定常運転時のデータやノウハウが蓄積されてきている。

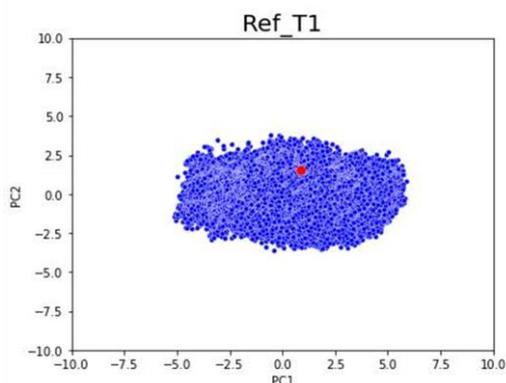


図 1, 主成分分析波形の一例  
(第 1 膨張タービン 監視 7 成分)

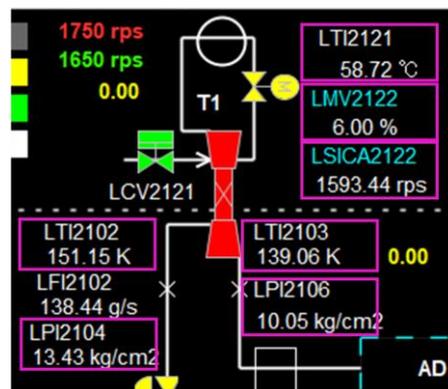


図 2, 第 1 膨張タービンの監視点

## 5.2. ITER 低温システムダイナミックシミュレーション

制御情報技術課 鷹見重幸

## 【概要】

核融合科学研究所(以下、NIFS)ではフランスの ITER 機構との間で技術契約を結び、NIFS にある極低温プロセス実時間シミュレータ(C-PREST)を用いて、ITER の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行ってきた。これまでに極低温定常状態におけるプラズマ実験時に発生するパルス的な非常に大きな熱負荷変動の影響を調査するためのシミュレーションを実施してきた。そして新たに 300K の常温から 4.5K の極低温までの冷却運転に向けた冷却シミュレーションを行うこととなった。2023 年度は超伝導マグネットシステム単独モデル(ヘリウム液化冷凍機や補助コールドボックス等を含まないモデル)による、300K から 80K までの冷却運転シミュレーションを実施した。

## 【内容】

## ・ ITER 低温システムの概要

シミュレーション対象となる ITER 低温システムの概略図を図 1 に示す。ITER 低温システムは冷凍能力 25kW の非常に大きな液化冷凍機 3 台を並列に接続し、4 つの超伝導マグネットシステム(CS, ST, TF, PF&CC)と 1 つのクライオポンプ(CP)の 5 つの被冷却体を 4.5K まで冷却維持する。He 液化冷凍機と被冷却体との間には補助コールドボックス(ACB)が設置され、プラズマ実験時に被冷却体で発生する熱負荷による変動がダイレクトに He 液化冷凍機へ戻らない構成となっている。冷却運転時は 3 台のヘリウム液化冷凍機のうち 2 台を用いた運転となる。

ST,CS,TF,PF&CC の 4 系統の超伝導マグネットシステムは図 2 に示すように冷却流路的には複数の超伝導コイルを並列に接続された構成となっている。これら超伝導マグネットシステムの冷却重量は表 1 に示すように超伝導マグネット部分で 8166ton にも及ぶ。

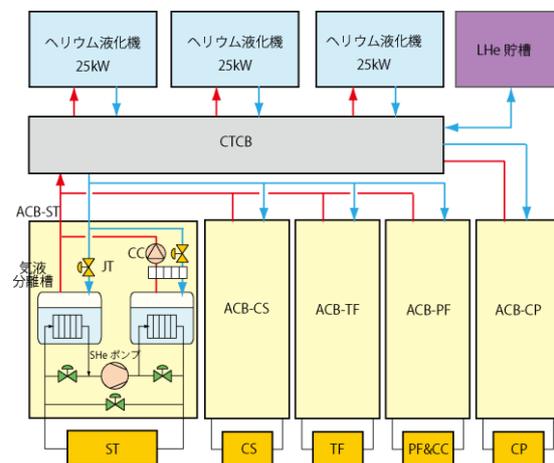


図 1. ITER 低温システムブロック図

表 1. 超伝導マグネット重量と重量比

N	名称	重量(t)	重量比(%)
1	STR	4559	55.83
	TFC	1813	22.20
2	CS	609	7.46
3	PF1	118	1.44
4	PF2	109	1.34
5	PF3	256	3.13
6	PF4	234	2.86
7	PF5	207	2.53
8	PF6	241	2.95
9	TCC	6.74	0.08
10	SCC	7.25	0.09
11	BCC	6.74	0.08
合計		8166	100.00

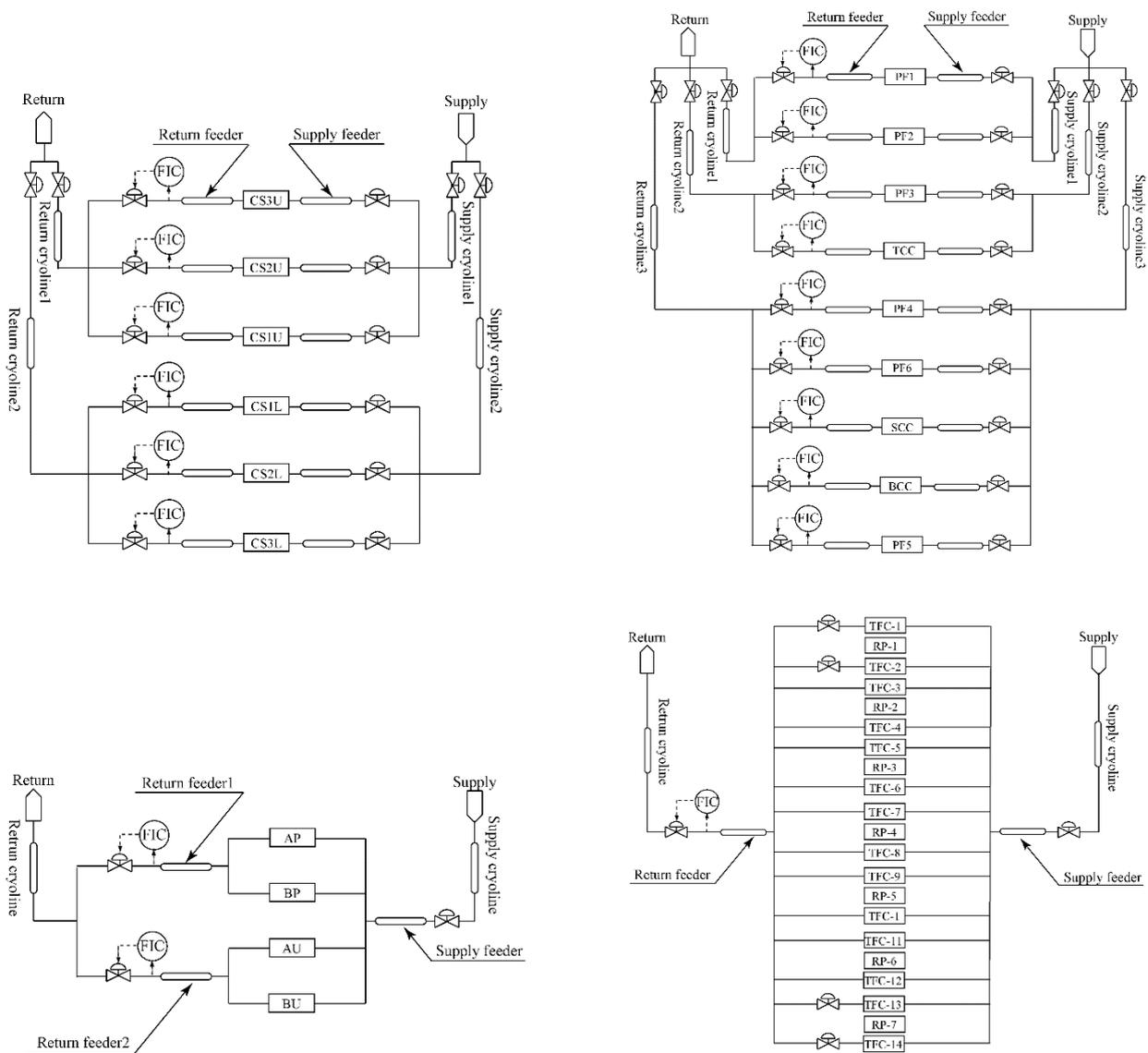


図 2. 各超伝導マグネット

・超伝導マグネットシステムモデル

基本的には先に実施した極低温定常状態シミュレーションで作成したモデルを使用した。ただし冷却シミュレーションでは 300K から 4.5K まで温度変化を伴うため、熱伝導率、比熱、熱伝達率、管摩擦係数などは大きく変動する。このため超伝導マグネットを構成する超伝導導体ユニットモデルを改造した。熱伝導率、比熱といった物性値については物性データを基に温度に対する近似式を求め、ユニットモデルへ組み込んだ。熱伝達係数と管摩擦係数については、流体の慣性

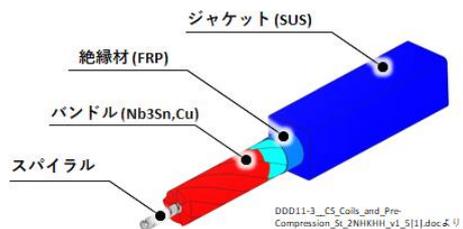


図 3. CS 用超伝導導体の構造

力と粘性力の比を表すレイノルズ数を用いて以下の計算式を用いて計算した。超伝導導体は図3に示すようにヘリウムが流れる流路としてスパイラル部分とバンドル部分となるため、別々の流路として取り扱うように変更した。

### 熱伝達係数

$$h = \frac{k \times Nu}{L} \quad \text{乱流} : Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}}, \text{層流} : Nu = 3.66$$

h:熱伝達係数(W/m<sup>2</sup>-K)、k:ヘリウムの熱伝導率(W/m-k)、Nu:ヌセルト数(-)、  
L:代表長さ(L)、Re:レイノルズ数(-)、Pr:プラントル数(-)

### 管摩擦係数

$$\text{バンドル部分} : \lambda_{bundle} = a \times void^b \times (c + d \times Re^e)$$

$$\text{スパイラル部分} : \lambda_{spiral} = f \times Re^g$$

λ:管摩擦係数(-)、void:空間率(-)、a~g:各超伝導導体に応じた定数(-)

### ・シミュレーションの設定と制御

冷却速度は-0.8 K/hr に設定し、熱歪みを避けるため各超伝導マグネットの入口出口の温度差が50K 以上となった場合には、冷却速度を 0 K/hr にして供給温度をホールドする。前出の通り ITER の超伝導マグネットシステムの冷却対象は 4 系統あり、各超伝導コイルで重量が異なる(表1)。均一に冷却するため、重量に応じて冷媒であるヘリウムガスの流量配分するように、各超伝導マグネットの出口バルブで流量制御(FIC)を行った。

シミュレーションの境界条件としては、供給圧力、供給温度、戻り圧力と、FICへ設定する目標流量となる。供給温度の設定については前出の通りである。供給圧力、戻り圧力、目標流量については、ITER側で実施したヘリウム液化冷凍機単独シミュレーションの結果を元に、近似式を求め、境界条件として与えた(図4, 図5)。各超伝導コイルの目標流量については、表1の重量比率に全体の目標流量を掛け合わせて求め設定した。

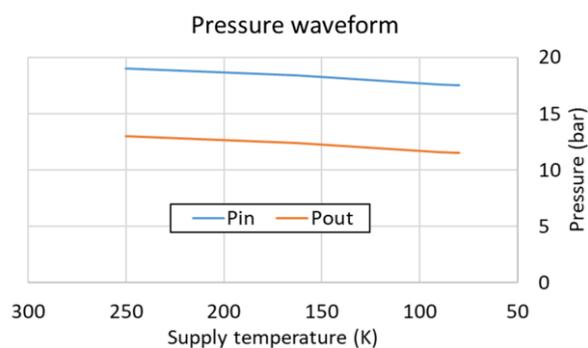


図4. He 液化冷凍機供給戻り圧力

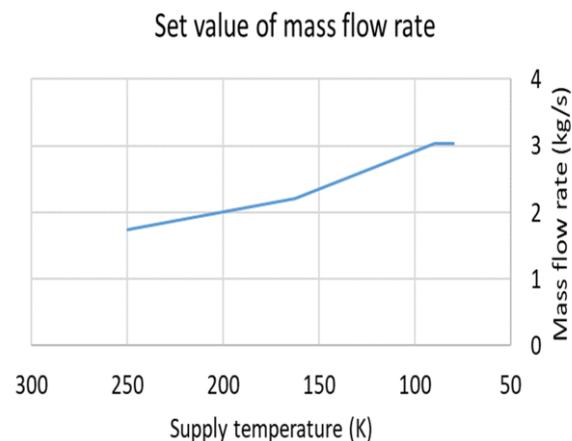


図1. He 液化冷凍機供給流量

## 【結果】

300K から 80K までの冷却シミュレーションの結果を図 6 に示す。4 系統のうち最も重量が重い ST の出入口温度差 50K となり冷却速度は平均-0.4 K/hr となり、80K への冷却には 20 日間ほど要する。80K への到達時間は 4 系統とも同じになっており、全体的に均一に冷却されていることがわかる。

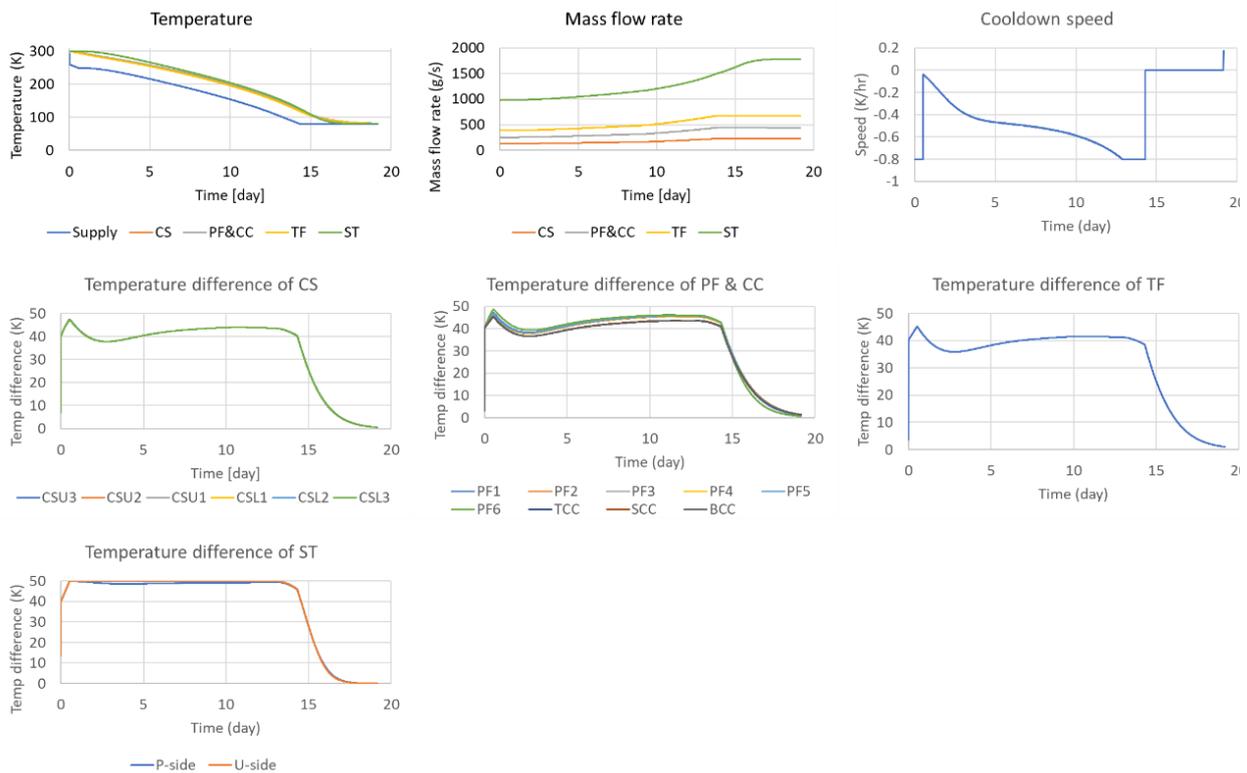


図 6. 冷却シミュレーション結果

## 【まとめ】

超伝導マグネットモデル単独での冷却シミュレーションは、超伝導導体ユニットモデルを広い温度レンジに対応するように改造することにより問題なく実施することができた。

今後、このモデルと ITER 機構側で作成されたヘリウム液化冷凍機モデルとをネットワークを介して接続した協調シミュレーション(Co-simulation)をおこなうことにより 300K から 4.5K までの ITER 低温システム全体の冷却シミュレーションを行う予定である。

## 5.3. 危険物質リスクアセスメント届申請システムの構築

制御情報技術課 野々村美貴

## 目的

危険物質リスクアセスメント届申請システムの構築を行う。

## 概要

化学物質規制に関しての法改正によりリスクアセスメントの実施及び記録保管が義務化された。これまで紙媒体で行われてきたリスクアセスメント申請を自動化して担当者の負担を軽減するため、リスクアセスメントの届出を Web システム化すると共にその記録をサーバに保管するシステムを構築した。

## 作業内容

以下の画面及び機能を作成した。

- ・ リスクアセスメント連絡票をアップロードしてリスクアセスメントの届出を行う申請画面を作成 (図 1)
- ・ 申請時に危険物質管理者と保管庫責任者に通知
- ・ 危険物質管理者と保管庫責任者が内容を確認して承認・却下を行う承認画面を作成 (図 2)
- ・ 承認時にリスクアセスメント ID が記載された許可証を発行。却下時にはコメントを申請者に通知
- ・ 作業期間終了日の 1 ヶ月前に必要な応じて再申請を行うよう申請者に通知
- ・ 承認されたリスクアセスメント届の一覧を閲覧・検索できる画面を作成 (図 3)
- ・ 既存の危険物質入手順にリスクアセスメント ID 項目を追加、必須とする設定

※は必須入力欄です

作業責任者※

所属※ (選んで下さい)  
※字主/運転員の方は担当職員に申請を依頼して下さい

E-mail※

電話番号※

作業名※

作業場所※ (選んで下さい) 部署名※

薬品保管場所※ (選んで下さい)

作業期間※ ~ ※最長3年

使用薬品名※  
文字を入力すると候補が表示されます

確認事項※  
 現在の作業者全員で本危険物のリスクアセスメントを実施しました  
 新たな作業者に対して、最初の作業従事前に本危険物に関する安全指導等を行います

作業概要※  
 参照... ファイルが選択されていません。  
 リスクアセスメント連絡票に記入後、アップロードしてください  
 リスクアセスメント連絡票 (記入例1) docx pdf  
 リスクアセスメント連絡票 (記入例2) docx pdf

危険物ID  
※使用薬品の危険物IDを記入してください (入手前の場合は空白のまま結構です)

申請内容に間違いはありませんか? 間違いはありません (確認画面へ)

危険物申請WEBサイトTOP >> リスクアセスメント届

図 1. 申請画面

リスクアセスメント届管理者ページ

危険物質管理者

でログイン中 ( logout ) 一覧へ戻る

ID	240516140241
申請日	2024/05/16 14:02:41
作業責任者	藤越太郎
所属	制御情報技術課
E-mail	kato.taro@nifs.ac.jp
電話番号	1111
作業名	真空部送等クリーニング
作業場所	大型ヘリカル実験棟
担当者	加藤 謙吾
薬品保管場所	大型ヘリカル実験棟
作業開始 (開始)	2024/04/01
作業終了 (終了)	2027/04/01
使用薬品名	エタノール
作業概要	riskform_240516140241.docx
危険物ID	40 ※IDをクリックすると詳細が表示されます。

危険物質管理者 が本申請を

- 承認する
- ここに却下理由を記入してから、下記の「却下する」ボタンを押してください  
参照... ファイルが選択されていません。  
※却下理由以外のコメントは、リスクアセスメント連絡票 (作業概要) に追記後、ファイルをアップロードしてください。

却下する

危険物申請WEBサイトTOP >> リスクアセスメント届管理者ページ

図 2. 承認画面

## 結果

依頼された画面及び機能の追加を全て作成し、2024年3月末ごろから運用を開始した。これまでリスクアセスメントを実施する為に関係者の日程調整や準備等をする必要があったが、承認画面でリスクアセスメント連絡票の表示、使用する危険物等の詳細表示ができることで集まる必要がなくなり、画面上だけで実施できるようになった。サーバに申請内容・リスクアセスメント連絡票を保存することによりいつでもそれらを確認できるようになった。このように、Webシステム化することにより担当者の負担が軽減した。

ID	申請日	作業責任者	所属	E-mail
24-001	2024/04/24 13:16:15	山田一郎	制御情報技術課	yamada.ichiro@nifs.ac.jp
24-002	2024/04/24 13:21:13	田中花子	制御情報技術課	tanaka.hanako@nifs.ac.jp
24-003	2024/04/24 13:23:16	佐藤太郎	制御情報技術課	sato.taro@nifs.ac.jp

危険物申請WEBサイトTOP >> 管理者ページ >> リスクアセスメント届検索

図 3. 検索画面

#### 5.4. 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

制御情報技術課 井上知幸

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3名(3月から4名)、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。2023年度の活動トピックスは以下の通り。

##### システム更新

###### Akamai Secure Internet Access Enterprise 導入

研究所のDNSサーバの参照元を、脅威ドメインのデータベースを持つAkamai社サーバに変更することにより、DNSによる名前解決時に、悪意のあるドメイン、IPアドレスへの通信を防ぐ。2023年6月下旬から導入試験を実施し、同9月から正式運用開始。

###### タイムサーバの更新

2024年3月末にサポートが終了するタイムサーバ(SEIKO TS-2210)を後継機(TS-2220)に更新。設置からかなりの年数が経過しているGPSアンテナの損失増大が危惧されたが、問題なく衛星を捕捉できることが確認できたため、そのまま運用することとした。

###### CentOS 7 サポート終了対応

2024年6月末でサポートが終了するCentOS 7上で動作している各種ネットワーク運用サーバの更新を計画。移行するディストリビューションとしてAlmaLinux 9を選択した。作業効率化のため、インストールひな形を作成した上で、順次更新作業を実施予定。

##### 脆弱性対応

###### Ivanti Connect Secure : リモートアクセス、LHD アクセスゲートウェイ

2024年1月 : CVE-2023-46805 (認証バイパスの脆弱性)、CVE-2024-21887 (コマンドインジェクションの脆弱性)、CVE-2024-21888 (権限昇格の脆弱性) CVE-2024-21893 (SSRFの脆弱性)

2024年4月 : CVE-2024-21894 (Heap Overflow)、CVE-2024-22052 (Null Pointer Dereference)、CVE-2024-22053 (Heap Overflow)、CVE-2024-22023 (XML entity expansion or XXE)

複数の脆弱性情報が立て続けに公開されたため、対応するファームウェアのメーカーからの提供が遅れたが、即時回避策を適用し、運用を継続しつつ対応を完了。

###### VMware vCenter Server

2023年6月 : VMSA-2023-0014 (任意のコードを実行できるなどの複数の脆弱性)

対策バージョンへのバージョンアップ作業を実施。

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

2023年4月 : CVE-2023-25610 (ヒープベースのバッファアンダーフローの脆弱性)

2024年2月 : CVE-2024-21762 (SSL-VPN 境界外書き込みの脆弱性)、CVE-2024-23113 (FortiOS fgfmd デーモンの脆弱性)

回避策を適用した上で、対策バージョンへのバージョンアップ作業を実施。

##### ユーザー問い合わせ対応

2023年度の問い合わせ対応は、大きなシステム変更等がなかったため、前年度と比較して若干減少(445

件→381件)したが、登録作業については、組織改編の影響を受け増加した(646件→852件)

※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

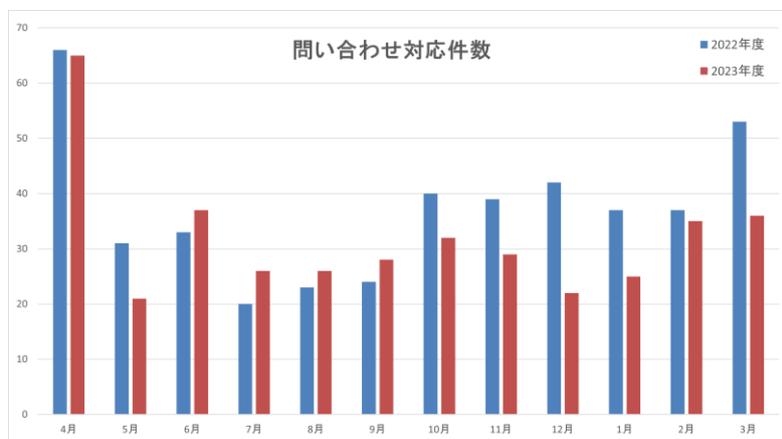


図1. 問い合わせ件数 (2022～2023)

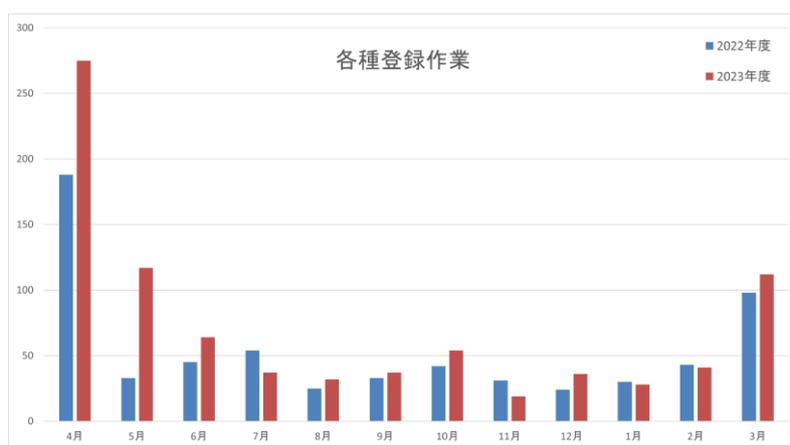


図2. 各種登録作業 (2022～2023)

(情報システム運用班)

## 5.5. リモートアクセスサービスの10G化と日頃のセキュリティ対策

制御情報技術課 中村修、大西優子

### 目的

リモートアクセスに接続して遠隔で何かを行おうとすると、“遅い”との意見があがっていた。リモートアクセスサービスはVPNを利用して安全に所外から所内のネットワークを利用するサービスであるため、SSL接続をしておいた操作になりスピード的には遅くなるのは当然ではある。しかし、少しでも体感的にストレスを感じない様にするため、接続部分を1Gから10G接続とする事を目的とする。

## 概要

自宅から職場のサーバへアクセスして業務を遂行するためには、リモートアクセスサービスが不可欠であり、NIFS では ivanti 社の ISA8000 を用いて VPN 接続を実現している。新型コロナウイルスの流行によって、在宅勤務での対応が急激に増えることとなり、リモートアクセスサービスの利用者が急増することにもつながった。利用者の利便性をあげるため 10G での接続とする事で体感のスピードを向上するとともに、日々のデータベースのアップデートや運用上脅威となる新たな脆弱性への対応も行った。

## 作業内容

### 3-1. ESAP の更新

7月にセキュリティソフトのアップデートに対応させるため、ESAP をバージョン 4.2.1 へ更新。8月にユーザーの不具合解消を図るため、バージョン 4.2.4 へ更新。2024年1月には ESET のメジャーバージョンアップに対応させるため、バージョン 4.3.3 へ更新。3月にはセキュリティソフトのアップデートに対応させるため、バージョン 4.3.6 へ更新した。

### 3-2. ファームウェアの更新

12月に macOS 14 への対応のため ps-ics-sa-22.6r2.1 へのファームアップを試みるも、クライアント証明書チェックが出来なくなり、認証に失敗する不具合が起きたため、ロールバックを行うこととなりメーカーによる原因調査待ちとなった。しかし、2024年1月に CVE-2023-46805 の非常に深刻度が高い脆弱性が発表され、1月11日に一時的な対策の XML を適用した。それでも不十分だったようで、2月2日には更新された XML ファイルを適用し直した。多くの機関が攻撃を受けて改ざんを受けたようであるが、幸いにして対応が早かった NIFS では改ざんされるまでには至らなかった。しかしファイアーウォールのログからは、一時的な対策の XML を適用した後に攻撃を受けているログが確認出来ている。脆弱性の恒久的な対策を優先し、機能アップをせず ps-ics-sa-22.3R1.1 へのファームアップを3月4日に行い、CVE-2023-46805 への恒久対策は完了した。その後 macOS 14 へ対応させるための機能アップのファームは、調査の結果ファームの不具合であるとの連絡があり、修正されたファームの提供を待っている状況である。

### 3-3. 10G 接続への切替え

12月にリモートアクセスサーバが接続されているスイッチを、アライドテレシス社の 10 ギガビットイーサネットスイッチ AT-XS910/8 に交換して、1G から 10G への接続へと切り替えを行った。

## 結果

10G での接続変更は、問題無く完了することができた。この結果、10G 接続となった区間での通信速度は申し分ないはずだが、VPN の特性上暗号化処理が絡むため体感速度に限界はある。加えて、クライアント側までの通信区間にボトルネックが存在した場合、トータルの速度は低い方に引っ張られるので、ユーザーの利用環境に大きく依存している。しかし、体感で遅いと感じた時、NIFS で運用しているリモートアクセスが原因となるリスクは減らすことが出来た。

## 6. 民間との受託研究及び共同技術開発

設計開発技術課 村瀬尊則

技術部では、核融合研究を支援する技術を企業等に技術提供し、産学連携活動を推進しており、2017年（平成29年）9月、東邦金属株式会社（大阪市）と異種金属接合技術に関する共同研究契約を締結した。

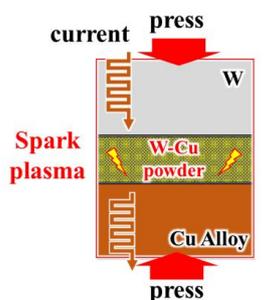
その他、LHD プラズマ実験を支える設計技術を活用して、企業等からの依頼により装置の設計や数値解析等を請け負う「受託研究」を積極的に推進してきた。令和4年度までに計6件の受託研究を行ったほか、令和5年度からは技術職員を主体とした「共同技術開発」の枠組みが開始され、令和5年度で9件の共同技術開発契約を締結した。なお、共同技術開発の依頼外部資金の用途は、受託研究や共同技術開発に必要なハード、ソフトの購入の他、技術職員の数値解析技術の向上等、教育活動にも活用できた。

また令和4年度から自然科学研究機構から「ミッション実現戦略事業」の予算が配分され技術部からもSDGsに資する技術開発提案を行い、令和4年度および令和5年度、それぞれ1件採択された。

### 6.1. 産学連携活動

#### 【金属接合技術】

技術部では、核融合研究を支援する技術を企業等に技術提供し、産学連携活動を推進しており、平成29年9月、東邦金属株式会社と異種金属接合技術に関する共同研究契約を締結した。本契約は、従来困難であったタングステン（W）と銅（Cu）合金の接合に関する技術開発である（図1.左）。本開発では、通電加熱法の一つである放電プラズマ焼結法（SPS）を用いた。従来のSPS法では、真空中やアルゴンなどの不活性ガス雰囲気下で接合を行うが、接合処理中に装置内に残存する酸素によりWが酸化し、材料の接合強度が低下する課題があった。そこで、接合時のWの酸化を防止するため、高純度の水素還元雰囲気における接合プロセスを確立し、課題を克服した。加えて、WとCu合金の熱膨張差により接合界面に大きな熱応力が生じ、界面に剥離や亀裂が生じる課題があった。そこで、中間層としてWとCuの混合粉末を用いた。この混合粉末の効果により、熱応力を緩和すると同時に、WとCu合金をプラズマ放電で高強度に接合することに成功した。この一連の接合プロセスを特許化し、粉末固体接



異種金属接合技術の模式図



開発した異種金属接合技術PSB法の接合例



東邦金属との共同記者会見  
(令和2年9月18日)

図1. 異種金属接合技術

合（PSB）法と命名するとともに、本技術に関して東邦金属株式会社と共同記者発表された（令和2年9月18日）（図1右）。

さらに、本技術をLHDのダイバータ受熱装置へと応用すべく、テストモジュールを製作した。本テストモジュールはWと銅合金、そして銅合金とステンレスをPSB法により接合することで作製される。また銅合金部はヒートシンクとして水冷却されるが、熱除去能力向上を目的にヒートシンク内部にスクリー状水冷ガイドを挿入する。このように製造されたテストモジュールをLHDにインストールし、計830ショットものプラズマ放電による熱負荷を与えた。実験期間中、熱電対や赤外線カメラを用いてテストモジュールの温度を監視したが、特異な異常は確認されなかった。第24サイクルプラズマ実験終了後、真空容器内に入り本テストモジュールを目視にて確認したが、亀裂や接合界面の剥離といった損傷は見られなかった。今後、電子顕微鏡を用いてマイクロクラック等の損傷に関して詳細に検査される予定である。本成果に関して、東邦金属株式会社との共同記者発表が行われた（令和5年3月9日）。

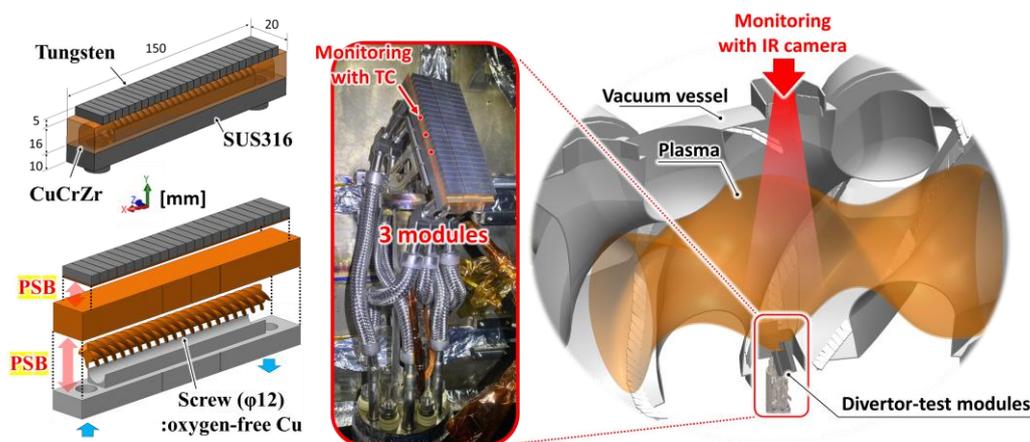


図2. LHD にインストールされたテストモジュール

## 6.2. 受託研究、共同技術開発

### 【受託研究・共同技術開発事例】

技術部では、企業等からの委託を受けて職員が業務として行う受託研究および共同技術開発を積極的に推進している。表1.にその実績を示す。

表1. 受託研究および共同研究実績

受託研究タイトル	
2018.04	核融合実験装置における磁気シールドの設計評価
2018.11	核融合実験装置における磁気シールドの設計評価
2019.11	冷却水配管の耐震解析
2020.03	電源盤の耐震解析
2021.03	電源盤の耐震解析
2021.09	計装制御盤の耐震・構造解析

共同技術開発タイトル	
2023.05	冷却水配管の耐震・構造解析
2023.06	原子力設備における設備防護柵の応力解析
2023.06	非常用発電設備における燃料配管の流体解析
2023.06	核融合実験装置における磁気シールドの設計評価
2023.09	核融合実験装置における真空ポンプ用多孔質炭素材の開発
2023.10	核融合実験装置における電力ケーブルの熱評価
2023.12	原子力設備におけるケーブル架台の耐震解析
2023.12	ブスバー碍子用架台の耐震解析
2024.01	高熱伝導黒鉛材の開発

実験装置や制御盤等、構造物の耐震解析や高磁場環境下における磁気シールドの性能検証といった、これまでLHDプラズマ実験を支える設計技術を活用して受託研究を実施した(図3.)。磁気シールドの評価では、企業から提出された磁気シールドの図面をもとに3D-CADソフトを用いて3次元立体構造を製作し、これに磁場を印加することでシールド内部の磁場強度を算出した。シールド内部の磁場強度が定められた許容磁場を下回っているかを評価する。環境磁場や材料物性値(B-H曲線等)は企業担当者と十分協議した上で設定した。

耐震解析では依頼先の要望により、以下の2種類の解析方法から選択した。①水平加振加速度を構造物に加えて、構造物にかかる応力を算出し、構造材料の許容応力以下であるかを評価した、あるいは②構造物の固有振動数を解析し、第一固有振動数モードが地震動に含まれる周波数(~20 Hz)以上であるかを評価した。初期条件や境界条件など具体的な解析手法は、業務を委託する企業の担当者と綿密な協議の上、決定した。また解析結果は全て報告書に纏め、受託研究報告会にて企業等の関係者に報告された。

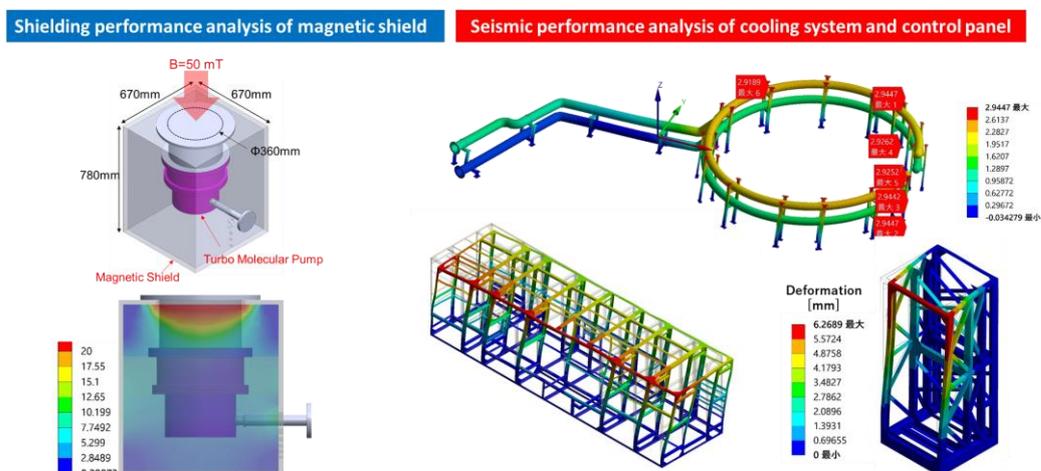


図3. 解析事例

### 6.3. 自然科学研究機構：ミッション実現戦略事業

令和4年度より自然科学研究機構から「ミッション実現戦略事業」の予算が配分された。事業名は「核融合先端技術の汎用化によるSDGsへの貢献」である。

技術部では、核融合研究を支援する技術開発を活用した事業「未利用バイオマスを用いた高機能活性炭の創製とその社会実装」(図4.)について応募し、採択された。

令和4年度は、稲わらの炭化処理のための管状加熱炉や賦活処理のためのロータリーキルン炉を整備したほか、シリカ除去試験を実施するための放電プラズマ焼結装置 (SPS 装置) を整備するなど、実験環境整備を実施した。並行して、稲わら内部のシリカを除去する研究を進めた結果、真空加熱炉を用いて効率的なシリカ除去に成功、特許申請後、高専機構国際シンポジウム「KRIS2023」にて口頭発表した。また活性炭研究で著名なタイ・ワライラック大学との国際共同研究に着手した。令和5年度はSPS装置を用いてバイオマス活性炭をバインダフリーで固形化することに成功、さらにSPS処理により活性炭の細孔特性が向上することを発見した。本知見を特許申請するとともに国際学会「Global Plasma Forum in Aomori (2023年10月)」で発表した。

また令和5年度から新たに「グリーン水素生成用水電解装置の低コスト、高性能化によるCO2フリーな水素社会の実現」が採択され、令和4年度は実験環境整備と並行して、ワライラック大学との共同研究であるSPS法による水素電極触媒のバインダレス焼結を計画している。



図4 ミッション実現戦略事業

「未利用バイオマスを用いた高機能活性炭の創製とその社会実装」

## 7. 他大学、他機関における技術協力・技術支援

### 7.1. JT-60SA トカマク向け TESPEL 入射装置の制御システム開発

機械システム技術課 横田光弘

電気電子技術課 古田紘己

制御情報技術課 前野博也

#### 目的・概要

量子科学技術研究開発機構那珂フュージョン科学技術研究所（以下、QST とする）では、同研究所において日欧共同プロジェクトとして進めている大型超伝導トカマク装置 JT-60SA での不純物輸送研究を推進するための装置として、本研究所（以下、NIFS とする）の田村直樹准教授らが開発したトレーサー内蔵固体ペレット（TESPEL）入射装置を取り付けるために、田村直樹准教授とクロスアポイントメント契約を締結し、その準備を進めている。今回、田村直樹 NIFS 准教授/QST 主幹研究員より、既に QST にある JT-60SA 向け TESPEL 入射装置の制御システム開発の技術協力依頼が技術部にあった。

JT-60SA 向け TESPEL 入射装置は、2 バレル式入射装置となっており、以前大型ヘリカル装置

（LHD）向けに開発された 2 バレル式 TESPEL 入射装置とほぼ同様なシステムである。そのため、過去に開発を担当した 3 名の技術職員が引き受ければ短期間で制御システム開発が対応可能と判断し、技術協力を受け入れることになった。制御システム開発の作業は NIFS で実施し、JT-60SA 向け TESPEL 入射装置本体に制御システムを取り付けての動作試験は現地（QST）で行った。

#### 作業内容

##### 1) 作業分担（3 人）

- ・制御機器周りの配線
- ・PLC プログラムの開発
- ・遠隔制御ソフトウェア開発（7.2.を参照）。

##### 2) 制御システムの構成

NIFS で仮組してから QST にて取付・動作確認を行うため制御系のハードを以下の三つに分けて準備することとした。

- ・制御機器を収める制御ボックス

制御に使用する機器として、圧空マニホールドと PLC 間の配線を簡単にできるよう専用ケーブルで接続できるものを選定し、制御ボックスに入れることにした。制御ボックスは 19 インチラックに収納可能な物を前提に選定したが、前述の圧空マニホールドが大きい上に重く、圧空配管の出入りも考慮すると PLC を同一制御ボックス内に納めることが難しくなったため、PLC のみパネルマウントとした。

- ・制御対象機器との接続ケーブル
- ・遠隔制御用 PC

#### 現地動作試験

動作試験は、現地（QST）で配線接続も含めて 2 日間で行った。初日は各機器との配線及び配管（圧空チューブ）接続を行い、二日目午前は遠隔制御用 PC を設置し、同日午後に、田村直樹 NIFS 准教授/QST 主幹研究員の指示の下、動作試験を行った。その結果、主要な機器の動作に問題がないことが確認できた。

## 制御システムに使用した PLC について

今回の制御システムに使用した PLC について、製造メーカーから 2024 年 4 月 1 日付で「2027 年 3 月末に受注終了」のアナウンスがあった。推奨代替商品は、今回使用した PLC より一回り小さいが、I/O モジュールの互換性がない機種である。このため、今後、JT-60SA 向け TESPEL 入射装置において入出力を増やす必要がある場合、検討が必要となる。今回受注終了アナウンスのあった PLC は、LHD でも使用している機種であることから、今後の対応を検討すると共に、新たな装置の機器選定の際には PLC のアプリケーション開発の効率化（メーカーに依存しない等）を目的とした PLCopen に対応しているものを含めて検討していく。

## 7.2. JT-60SA 用 TESPEL 入射装置制御ソフトウェアの開発

制御情報技術課 前野博也

### 背景・目的

大型ヘリカル装置（LHD）では、トレーサー内蔵固体ペレット（TESPEL）入射装置を用いてプラズマに不純物を入射する実験が行われている。同入射装置は本体室、同入射装置の制御を行っている PLC は本体室地下に設置してあるため、同入射装置の制御は遠隔で行う必要があり、そのためのソフトウェアを技術部で開発してきた。現在、LHD には 2 つの TESPEL 入射装置が設置されており、各々に遠隔制御ソフトウェアを構築した。JT-60SA（7.1.を参照）においても、LHD とほぼ同様の TESPEL 入射装置が導入される予定であり、同入射装置に対応した遠隔制御ソフトウェアの開発を NIFS の技術部で行うこととなった。

### 作業内容

TESPEL 入射装置の制御構成は LHD のものとほぼ同様であるが、細かい点でいくつか違いがある。そのため、これまでの遠隔ソフトウェアと同様に、Microsoft Visual Studio における WPF（Windows Presentation Foundation）を用いた GUI アプリケーションとして作成しつつ、Blend for Visual Studio も用いて画面の修正を行うことで、短期間で JT-60SA 向け TESPEL 入射装置の仕様に対応することができた。監視・制御にあたって、開発したアプリケーションは Programmable Logic Controller（PLC）を介して、ゲートバルブ、真空計やターボポンプなどと接続される。これまでと比較して、PLC のメモリアドレスにも変更があったが、XML 形式で記述することで柔軟に対応することができた。

### 成果

開発した遠隔制御ソフトウェアによる JT-60SA 向け TESPEL 入射装置の動作確認を QST にて行ったところ、何の問題もなく、円滑に動作することが確認できた。開発した遠隔制御ソフトウェアの特徴として、画面のバルブやポンプのアイコンをクリックすることで開閉や運転停止の操作を容易に行うことができることから、初めて見る人にも分かりやすい点が上げられる。この点は、立ち会っていただいた QST の方々にも好評であった。

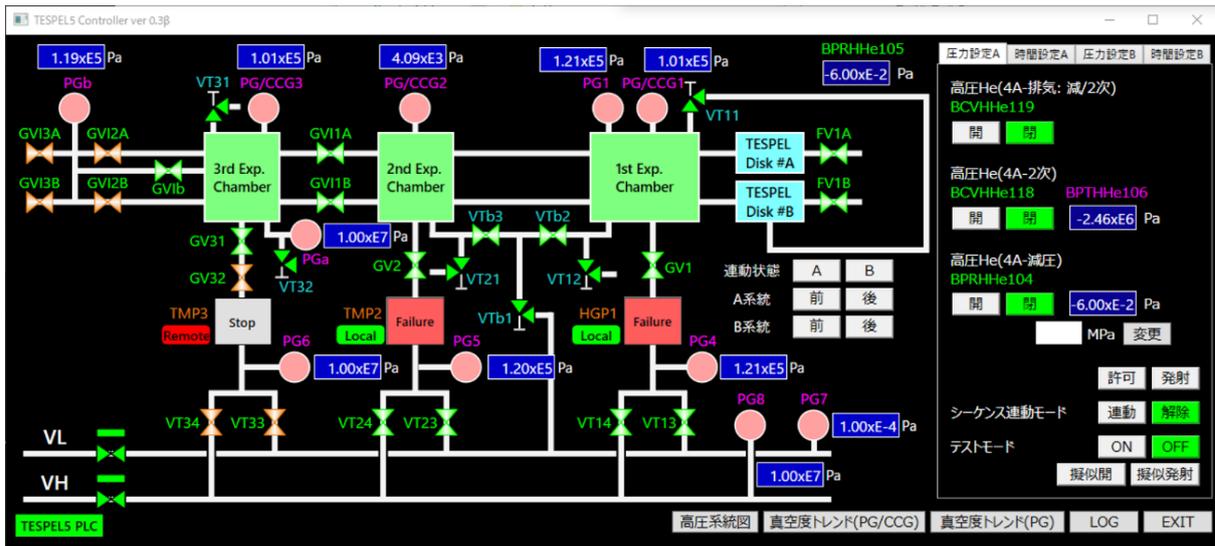


図 1. JT-60SA 用 TESPEL 入射装置制御ソフトウェア

### 7.3. 準軸対称ステラレータ CFQS の建設支援

設計開発技術課 中川翔、田上裕之、村瀬尊則

#### 1. 概要・目的

核融合科学研究所(NIFS)は、2017 年度より中国四川省成都市にある西南交通大学との国際共同プロジェクトとして、図 1 に示す通り大半径 1m、アスペクト比 4、磁場強度 1 T の核融合プラズマ実験装置である準軸対称ステラレータ CFQS の建設を進めている。技術部は 2018 年 12 月より本プロジェクトに参画し、中国側の研究者、製造業者らと英語を介した技術的な打合せを定期的に行いつつ、機器設計や組み立てに係る技術支援を行っている。本支援にて、CFQS の早期竣工に加え、実験装置の設計・開発に係る知見、スキル、ならびに語学力の向上を図り、NIFS の既存装置の改良や次期実験装置の設計に資することを目的としている。

#### 2. 取り組み内容

2023 年度は主に以下を行った。このうち、(1)と(4)について次ページにて詳細を報告する。

- (1) 真空容器のベーキングヒーター・熱電対設置位置の提案
- (2) トロイダルコイルの設計に関する提案
- (3) 真空容器の製作誤差に対する対応検討や 3 DCAD を用いた干渉の確認
- (4) 製作した磁場コイルの品質検査要領の策定
- (5) 磁場コイル保護用温度センサーの設置・配線ルートの検討
- (6) 中央制御システム、磁場コイル励磁電源の制御システムの検討

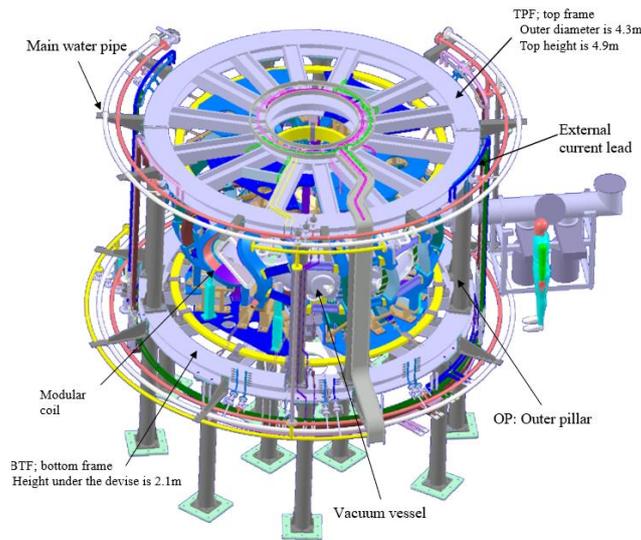


図1. 準軸対称ステラレータ CFQS 本体の 3D モデル

### 3. 作業内容

#### 3.1 真空容器のベーキングヒーター・熱電対設置位置の提案

CFQS 真空容器のベーキングには、シースヒーターを用いる。真空容器表面にはポートの開口やトロイダル磁場コイル等によってヒーターを巻ける場所が分断されており、それぞれの場所に巻いたヒーターを別々の電源で制御することとなっている。したがって、ベーキング時の真空容器の温度を均一にするために、各ヒーターに必要な容量を見積もり、電源電圧の調整範囲の中でその容量を得られる抵抗値、すなわちヒーターの長さを適切に決定する必要がある。

まず、ヒーター容量の見積もりのために、CFQS と同規模の真空容器をもつ CHS のベーキング電源を参照した。同電源の総容量は 25 kW であり、これを CFQS 真空容器のベーキングに必要な総容量とした。そして各ヒーターが担当する部分の体積比に基づき、この総容量を分配することで、それぞれに必要な容量を見積もった。

ついで、ヒーターの長さを決定するため、3DCAD を用いてベーキングヒーターの配線ルートを検討した。形状的な制約（密度が均一となる、曲率が小さくなり過ぎない、渦電流が一方に流れない等）をクリアした上で、抵抗値が仕様を満たすような長さであることを確認した。その後、この 3D モデルを説明資料とともに中国メーカーに提供した。

上記にくわえて、真空容器の温度監視のため熱電対を真空容器表面に設置する必要があり、全体に偏りなく配置する設計案も作成した。この設計案も同様に中国メーカーに提供した。

#### [結果]

設計案に基づき、図 2 右図に示されているように、真空容器の製作が進んでいる。実際に設置されたヒーターは中国の製品であり、初期設計と仕様が異なると考えられるため、ベーキングヒーター抵抗測定を依頼した。抵抗は電源の電圧を決定するうえで重要であるので、試験要領の策定を行った。さらに、2023 年度の真空容器の製作について、第 15 回核融合エネルギー連合講演会でポスター発表を行った[1]。

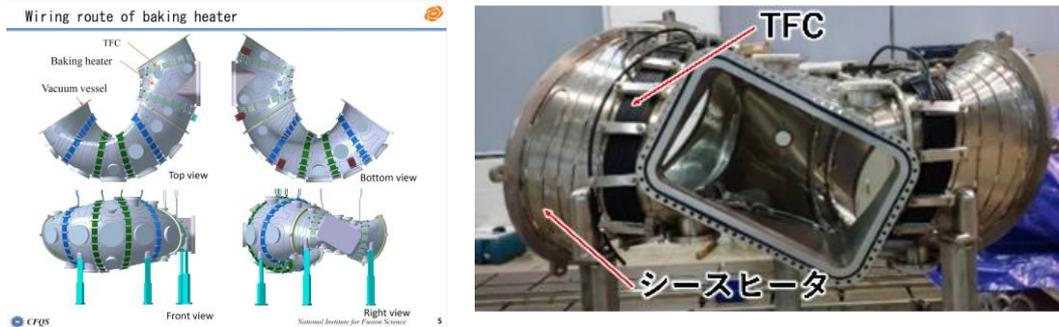


図 2. ベーキングヒーターの設計提案書の一部 (左図)と  
実際のベーキングヒーター設置後の真空容器 (右図)

[1] 中川翔、“準軸対称ステラレータ CFQS の真空容器製作および組み立て状況”、第 15 回エネルギー  
連合講演会、2024 年 6 月、ポスター発表

### 3.2 製作した磁場コイルの品質検査要領の策定

CFQS は、基幹部品として 4 種類 16 個の常伝導モジュラーコイル(MC)を備える。本コイルは 3 次元  
状に捻じれた複雑な構造を有し、世界的に見ても製作実績が乏しいことから製作手法や品質検査方法を  
確立する必要があった。本件について、2019 年より技術部を中心に中国の製造業者らと議論を重ねつつ  
MC の製作および品質検査を進めてきた。

2023 年度は、図 3 左部に示す通り MC の単体最終検査として通電試験要領の策定を主に行った。策定  
の際、NIFS や国内の様々な常伝導コイルの製作実績を参照したが、MC の設計に適した具体的な試験条  
件と合否判定基準については独自に考案する必要があった。

通電試験は、定格通電を行った場合の MC の最大温度上昇と室温に戻るまでの冷却時間の確認が主な  
目的となるが、ここで問題になったのが MC の温度測定方法である。MC の表面には測温抵抗体(RTD)  
が複数個取り付けられているが、RTD と MC の導体の間に 3 mm の対地絶縁が施されていることから、  
RTD の計測温度が実際の MC の導体温度と乖離する可能性が考えられた。そこで、通電試験にて MC の  
印加電圧と通電電流から抵抗値を求め、その値を温度に換算することで MC の導体温度の推定を行うこ  
とを考えた。このアイデアをベースに試験条件や構成、手順などの検討を進め、英文 25 ページに及ぶ  
要領書を作成した。その後、図 3 右側で示す通り中国の MC 製造業者を訪問し、試験構成の確認を行っ  
た。

[結果]

MC の製作・品質検査が 16 個分すべて完了し、設計要求を満足していることを確認した。本件につい  
ては、第 40 回プラズマ・核融合学会にてポスター発表を行っている。[2] 2024 年度は、装置完成後の総  
合動作試験手順の検討などを中心に支援を行う予定である。

[2] 田上裕之、“準軸対称ステラレータ CFQS のモジュラーコイル製作および装置組み立ての進展状  
況”、第 40 回プラズマ・核融合学会年会、2023 年 11 月、ポスター発表

## 8. 海外出張

### 8.1. 「CFQS」中国出張

設計開発技術課 中川翔、田上裕之、村瀬尊則

計測分析技術課 長原一樹

核融合科学研究所と中国・西南交通大学(Southwest Jiaotong University、SWJTU)との国際共同プロジェクトのもと、核融合プラズマ実験装置 CFQS の建設が進んでいる。本研究所から研究者や技術職員が定期的に中国へ訪問し、製作中の装置の視察を行うとともに大学や中国メーカーとの技術的な打ち合わせを行っている。これらの活動を通じて本研究所の技術職員は、大型ヘリカル装置 (LHD) で培った技術や知識を共有し、本プロジェクトを支援することを目的としている。また、技術職員自身の語学や特に若手職員の技術的知見、スキル向上も目指しており、将来の本研究所における次期装置の設計・建設管理に資することも主要な目的の一つである。

中国での打ち合わせは、各機器の担当者が設計検討や製作状況の進捗を報告・議論する場であり、本研究所の技術職員も技術的な提案や意見交換を行ってきた。

2023年7月10日にSWJTUで行われた打ち合わせでは、田上氏がコイル電源の制御や中央制御装置との制御・アラーム信号のやり取りについて設計案を示した。この設計案は、実験中、磁場コイルを保護するインターロック仕様に関わるもので、極めて重要である。LHDやCompact Helical System (CHS)の運転制御仕様や実際の運転経験に基づき、技術部で設計した。MCの導体温度が許容値以上とならないように、コイル絶縁表面、電流リード部、コイル冷却水の出口温度、流量監視に加え、コイルの測定抵抗からコイル導体温度を推定する機能を導入する仕様としている。また、2023年12月10日の打ち合わせでは、長原氏がLHDのガスパフシステムを紹介し、CFQSのガスパフ設計の担当者と意見交換を行った。製作中のCFQSは西南交通大学にインストールされた後、大学が用意するコイル電源やガスパフ装置などの周辺装置との接続が行われるが、今回技術職員との意見交換した内容を取り込み、それらの準備が本格的に進められている。今後も継続的な打ち合わせと情報交換を通じて、CFQSプロジェクトの成功に向けた支援を続けていく。

2023年度中国出張履歴	1) 2023年7月9日～13日	村瀬、田上、中川
	2) 2023年12月7日～12日	村瀬、長原、田上、中川
	3) 2024年3月10日～13日	村瀬、中川



図1. 中国での意見交換の様子

## 8.2. タイ ワライラック大学への訪問

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

### 概要・目的

2-3 節にて紹介したミッション実現戦略事業「未利用バイオマスを用いた高機能活性炭の創製とその社会実装」の事業拡大を図り、2023 年 6 月 5 日から 7 日にかけて、国際共同研究の候補先としてタイのナコーンシータマラート県にあるワライラック大学 Functional Materials & Nanotechnology CoE(FuNTech) を訪問した。先方ではバイオマス由来の活性炭を含む高機能ナノ材料の研究開発を主に行っており、我々技術部が行っている事業と親和性が高い。

現地での打ち合わせの結果、NIFS 技術部が有する放電プラズマ焼結(SPS)技術を活用して FuNTech が合成した各種ナノ材料をバインダーフリーで固形化する研究を行うこととなった。現在、焼結研究を進めている。活性炭などのナノ材料を固形化するには、通常バインダーと呼ばれる結着材が必要だが、SPS が得意とするバインダレス固形を果たすことができればバインダーによるナノ材料の性能低下を抑制することが期待される。

### 結果

本事業の一部が、2023 年度ミッション実現戦略事業「グリーン水素生成用水電解装置の低コスト、高性能化による CO2 フリーな水素社会の実現」として採択された。すでに研究に着手しており、図 1, 2 に示す通り 1 月 23 日から 1 月 24 日にかけて再度 FuNTech を訪問し、NIFS にて放電プラズマ焼結したナノ材料の電気化学性能試験に立会った。

本試験結果に基づき、今後様々な温度、圧力パラメータ下で放電プラズマ焼結を行い、焼結体をワライラック大学にて性能評価するサイクルを繰り返す。これにより、最適な焼結条件を調査し、最終的には焼結技術の特許出願することを目指す。

#### 2023 年度タイ出張履歴

- 1) 2023 年 6 月 1 日～7 日 (シーナカリンウィロート大学訪問含む) 村瀬、長原、田上、柳原、中川
- 2) 2024 年 1 月 21 日～25 日 長原、田上、中川



図 1. 焼結したナノ材料の試験の様子



図 2. 現地での議論の様子

### 8.3. 韓国 KSTAR 出張

計測分析技術課 長原一樹

#### 目的

Korea Superconducting Tokamak Advanced research(韓国超伝導トカマク先端研究 (KSTAR)) は、ITER などの各種核融合実験装置と連携して核融合研究を進めている。本研究所も KSTAR と共同研究を行っており、その一環で 2023 年 2 月 4 日から 7 日の間 KSTAR に出張する研究者に同行する機会をいただいた。本出張の主な目的は、著者が LHD にて担当しているガスパフ装置に関する情報交換と、KSTAR のガスパフ装置の機械的構造の見学である。

#### KSTAR について

KSTAR は核融合炉の科学的・技術的基盤を確立するための、定常運転に対応できる先進超伝導トカマクを目的とし、2007 年に建設された。これまでの実験で、1 億度を超えるイオン温度などを達成した。

#### KSTAR 見学

見学当日は実験日であり、見学は実験終了後に実施された。遅い時間にも関わらず、KSTAR の研究者のみならずガスパフ装置の担当者もご同行くださり、ガスパフ装置について詳しく説明いただいた。ガスボンベが実験室の地下に設置されていたことが印象的だった。見学時に撮影した写真を図 1、2 に示す。

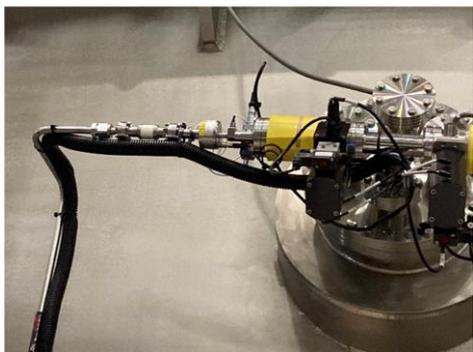


図 1. ピエゾバルブ



図 2. ガスボンベ

#### 情報交換

まず KSTAR のガスパフ装置についてご説明いただいた。KSTAR では、ガスパフによって密度制御を行う際、フィードバック制御信号は、Plasma Control System(PCS)というガスパフとは独立した制御システムから出力されるとのことだった。LHD のガスパフ装置が、単体でフィードバック制御信号を生成することとは対照的である。

次に LHD のガスパフ装置について紹介したところ、フィードバック制御のパラメータはどのように決めたか、などいくつかの質問をいただいた。ガスパフ装置単体で密度のフィードバック制御を行っていることについて、高い評価をいただいた。

#### まとめ

KSTAR のガスパフ装置の見学、KSTAR・LHD のガスパフ装置に関する情報交換を行った。他の実験装置におけるガスパフ装置の設計思想や運用方法を学ぶことができ、大変有意義な出張となった。

## 8.4. General Atomics 社訪問および DIII-D 視察

設計開発技術課 村瀬尊則

### 概要

令和 5 年 7 月 19～25 日の日程で、米国・サンディエゴにある General Atomics 社を訪問し、核融合実験装置 DIII-D を視察した。また、LHD ダイバータ受熱機器の開発状況に関して説明するとともに議論を行った。

### 内容

米国 General Atomics 社に出張し、米国を代表するトカマク装置である、DIII-D 装置を見学した。本期間はメンテナンス期間中であり多くの研究者、技術者が本体室で作業中であった。真空容器内も同様にカーボンタイルのメンテナンスや新規装置の設置等、作業が行われていた。いずれの作業も、製作されて 30 年以上経過した装置と思えないほどの活気があった。

また LHD におけるダイバータ受熱機器の開発状況について説明した。LHD では装置全体にタングステンダイバータを適用する前に、テストモジュールを開発・製作し第 24 サイクルのプラズマ実験に供したこと、そして実験サイクルを通して外観上、致命的な損傷は見られなかった事を報告した。一方、DIII-D ではコストや改造期間を鑑みて、従前の黒鉛製ダイバータタイルにタングステンコーティングする方法を検討しており、ドイツの研究機関との共同研究を進めている旨、報告があった。今後、核融合研の技術開発状況に応じてタングステン-黒鉛接合技術を用いたダイバータ開発を検討する予定である。

### 成果

- ・核融合実験装置 DIII-D 装置を見学し、本体室および制御室を視察できた。
- ・LHD のダイバータ受熱機器の開発状況を説明するとともに DIII-D の情報収集ができた。



図 1. DIII-D 装置の本体室および制御室

## 8.5. ISFNT2023 参加および発表

設計開発技術課 村瀬尊則

### 概要

9月10～15日の日程で、スペイン・ラスパルマス(グラン・カナリア島)で開催された15th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-15)でポスター発表を行うとともに、核融合研究における工学課題に関しての情報収集を実施した。

### 内容

International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-15)に参加し、題目「Development of Divertor Heat Removal Component Using Tungsten-Copper Alloy Bonding with SPS Method」にて、放電プラズマ焼結法 (SPS 法) を用いたダイバータ受熱機器の開発についてポスター発表を行った。本会議は核融合に係る工学研究が主テーマであり有限解析技術を用いた発表が豊富で活発な議論がなされた。高熱負荷を受けるダイバータ受熱板の開発に係る発表も多く興味深く聴講した。また LHD ダイバータ受熱機器におけるタングステンと銅合金の接合技術やその接合品質に係る調査研究についても同様の研究を行う研究者と現地で議論を行った。特にタングステンと銅合金の接合界面状態(中間層の金属粉末が溶融せず固体のまま接合している)や接合強度が発現するメカニズムについての質問が多く、現地参加ならではの質の高い議論が出来た。

また、KIT (The Karlsruhe Institute of Technology) からは特殊な流路構造を用いた受熱機器の冷却性能検証や、金属3Dプリンターを用いたダイバータ受熱機器の製造技術に関する発表があった。ダイバータ受熱機器の開発はこれまで30年以上世界中の研究機関で進められているが、最新の製作技術や解析技術を用いて現在でも開発が盛んであることが興味深く感じた。

### 成果

- ・ SPS 法を用いたダイバータ受熱機器の開発について国際会議で発表した。
- ・ 海外の研究者・技術者と LHD ダイバータ開発について活発な議論を行った。
- ・ 所外の海外の研究者・技術者との人的ネットワークを構築でき、共同研究に繋がった。

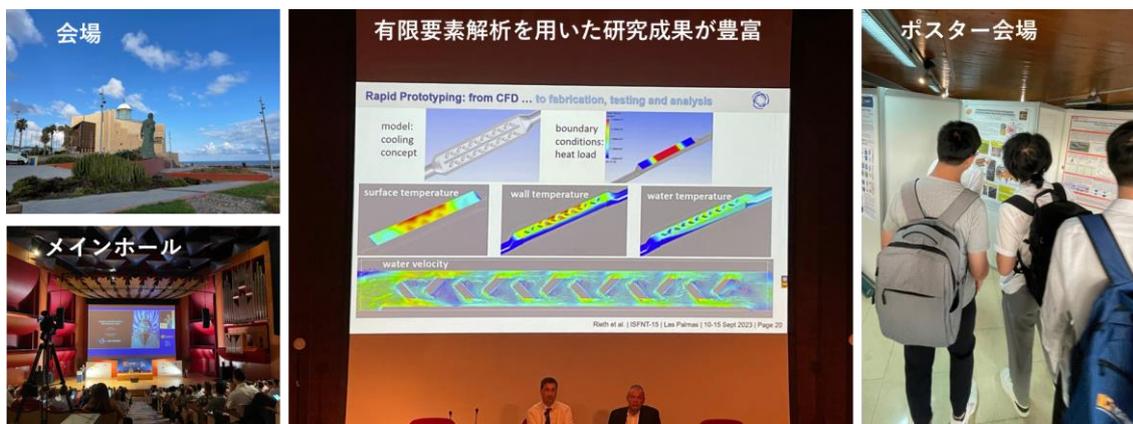


図 1. ISFNT 会場

## 8.6. フランス ITER 出張

計測分析技術課 長原一樹

設計開発技術課 村瀬尊則

### 目的

ITER は核融合の科学的、技術的な実証を目的として、実験炉を建設・運用する国際共同プロジェクトである。2024年2月20日から28日にかけて、フランスのサン・ポール・レ・デュランスにある ITER を訪問した。本出張での目的は、ITER の建設状況・現場の見学と、出張者が担当している実験装置の、主に機械的構造に関する情報交換である。

### ITER 見学

広大な ITER 構内を職員の方にご案内いただいた。諸事情により組み立てが一旦停止しており、真空容器は解体された状態だった。様々な国籍の作業員が見受けられ、国際共同プロジェクトたる所以を感じた。

### 情報交換

ITER/LHD におけるガスパフ技術・ダイバータ技術に関する情報交換を実施した。

LHD におけるガスパフ装置の主な役割は、プラズマ放電に必要な燃料の供給だが、ITER では燃料供給は、燃料ガスを固形化して打ち込む、通称ペレット装置によって行う。ペレット装置は燃料供給のみならず、プラズマ放電中や、突然のプラズマ消失時に発生する不安定性の低減にも使われるとのこと。将来の核融合炉におけるガスパフ技術の役割について改めて考えさせられた。固体のペレットを敢えて砕いてプラズマに入射することで、プラズマ消失時の不安定性を低減するなど、斬新なアイデアによる研究・開発が随所で行われていることを知り、刺激を受けた。

ダイバータ技術に関する打ち合わせでは、LHD のタングステンダイバータ受熱機器の開発状況について説明したのち、構造の問題点に関して議論した。問題点としては、まず冷却性能を高めるために内挿する整流子と銅合金製ヒートシンクの接合を確認する品質検査が困難なこと、そして整流子により流速を高めると、キャビテーションが発生することで冷却流路の銅合金が損耗する恐れがあることが指摘された。今後、これらの指摘事項の改善策を検討しながらダイバータ受熱機器の開発活動を継続する予定である。

### まとめ

ITER 構内の見学、出張者の担当装置に関する意見交換によって、ITER の情報収集を実施した。核融合の科学的、技術的な実証のために、絶え間なく行われている研究・開発の一端に触れ、大いに刺激を受けた。



図1. ITER 本体設置予定場所



図2. 情報交換の様子

## 8.7. 日米 RF 加熱物理ワークショップ出席及び DIII-D 視察

計測分析技術課 神田基成

### 概要

令和6年2月19～24日の日程で、米国・サンディエゴにある General Atomics 社を訪問し、日米 RF 加熱物理ワークショップに出席した。また、核融合実験装置 DIII-D を視察した。

### 内容

米国 General Atomics 社に出張し、「US-Japan Workshop on RF Heating Physics」に出席した。本会議では RF 加熱に関する研究が主なテーマであり、23名の研究者による発表があった。中でも、Realta Fusion というスタートアップ企業のタンデムミラー型核融合装置の製作の報告に興味をもった。一般的にタンデムミラーの核融合装置は閉じ込め性能が低いことが課題であるが、Realta Fusion では、SPARC で使用されている高温超電導体 (HTS) で 17T という高磁場で閉じ込めを行うことでその課題を克服する計画である。

21日の会議終了後、米国最大のトカマク装置である、DIII-D 装置を見学した。本期間はメンテナンス期間中であり、多くの研究者、技術者が本体室及び真空容器内で作業中であった。また、DIII-D で使用されている加熱装置も見学することができた。ECH 加熱装置として、出力が 250kW のクライストロンが 8 本使用されており、さらに 2 本のクライストロンを設置予定とのことだった。NIFS とは対照的に製作されてから 30 年以上たった装置に新規装置を設置していく様子が印象的だった。

### 成果

- ・日米 RF 加熱物理ワークショップに出席し、RF 加熱物理に関する情報収集できた。
- ・核融合実験装置 DIII-D 装置を見学し、本体室および制御室を視察できた。



図 1. 日米 RF 加熱物理ワークショップ及び DIII-D 装置

## 9. 令和5年度東海地区国立大学法人研修

### 9.1. 令和5年度東海地区国立大学法人等「リーダーシップ研修」に参加して

設計開発技術課 課長 鈴木直之

令和5年9月7日、8日の2日間、「令和5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。本研修は国立大学法人等機関の管理職員に対し、立場と役割を認識し、能力及び識見を確立させ、職員の資質向上を図る目的で開催された。形式はZoomのブレイクアウトルームを活用したグループワーク中心のオンライン研修であり、11の機関から28名が参加した。研修は株式会社インソースに委託されて行われた。

1日目の研修は、リーダーに求められる役割、職場リーダーの仕事力、リーダーに求められるコミュニケーションスキルについて学び、それを元にグループワークが行われた。その中で、仕事に再現性を持たせるためには結果ではなく過程を評価すること、人を育てる最も効率的な方法は任せること、傾聴・共働の心構えでコミュニケーションを取ることと言われたことが印象に残った。

2日目の研修は、5年後、10年後の将来を見据え、組織に有用な変革を実現させるにはどうすればよいか、ということについて講義とグループワークが行われた。その中で、変革を実現するために最も重要なことはスピードであること、その為には51点主義で物事を進めていくことも検討すること、達成状況を数値化すること、変革を進めるチームのメンバーには、目標と方針、目標達成後のイメージ、メンバーへの期待を自らの言葉で論理的に自分の言葉で感情を込めて伝えることと言われたことが印象に残った。

グループワークでは他機関の管理職の方々とお話をする機会を得た。筆者以外はほとんど事務職員の方ばかりであったため、普段訊くことができない貴重な話を訊くことができた。その中で印象に残ったのが、人事異動で新たな機関に配属された時に、仕事の進め方を効率的に変えようとしても、その機関に長年所属している方から反対意見を述べられ中々「変革」ができない、「変革」するためには、周囲の人間の説得から始めていかないといけないため、非常に労力を必要とすると言った意見であった。これは転勤が非常に希である我々技術職員においては気をつけなければいけない事柄であり、本研修で学んだことを活かして、仕事の進め方を常に客観的に見直していかなければならないと感じた。

## 9.2. 令和5年度東海北陸地区国立大学法人等技術職員合同研修（名古屋大学）

### 9.2.1. 「複合領域コース」 電気電子技術課 主任技術員 水野嘉識

令和5年8月28日-30日、名古屋大学にて開催された本研修について報告します。本年度の複合領域コースのテーマは、「法令改正に伴う化学物質管理と大学でのリスクアセスメント実施方法の習得等」であり、危険物質管理室長としての自己の業務に適った内容であることから志願のうえ参加しました。参加者総勢18名。各大学にて化学物質の管理や安全衛生に携わっている方々が参加しており、全体的に若い方が多いという印象を受けました。技術職員同士、化学物質管理等について情報交換することができ大変有意義でした。例えば、化学物質の安全対策実務において、「目は再生しない組織」という事で保護メガネ着用の重要性を再認識しました。また、検知管を用いた環境測定実習では、測定の簡便さを実感しました。この手法であれば費用や資格面での負担も小さく、職場における環境測定への適用ヒントを得ました。本研修の参加にあたり、管理部及び技術部の関係者のご支援に感謝します。



図1. 研修集合写真（名古屋大学：2列目の右から3番目 水野）

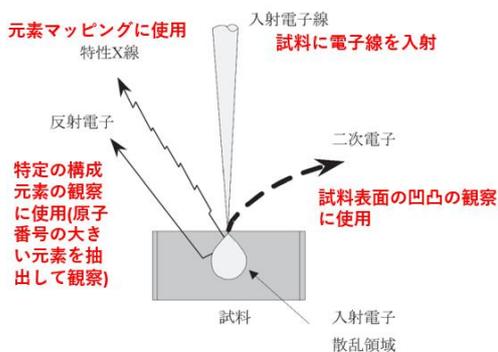
### 9.3. 令和5年度東海北陸地区国立大学法人等技術職員合同研修（金沢大学）

#### 9.3.1. 「機械コース」 設計開発技術課 技術員 田上裕之

本年度の機械コースは、令和5年8月30日(水)―9月1日(金)に金沢大学角間キャンパスにて開催された。参加者は報告者も含め19名であり、主に機械工作関係に従事している職員が大半を占めていた。主な講義内容として、工作機械の診断方法、最新の加工技術、金属3Dプリンティング技術、材料研究の紹介などがあった。材料研究として、組み紐を用いた軽量で強固な炭素繊維材料を紹介いただいた。立体的に複雑な形状をティラーメイドできることが本研究の特徴のようである。金属3Dプリンティング技術の紹介では、製作例に加えて主要な造形方式についてそれぞれのメリット、デメリットを解説頂いた。方式によっては、異種金属を組み合わせたプリンティングもできるようである。

金沢大学技術職員によるJAXA宇宙科学研究所への出向(2年間、2人)の報告もあった。出向の目的は先方との人事交流であり、金沢大学理工研究域と宇宙科学研究所との連携協定に基づくものである。出向者の内1名ははやぶさ2のサンプルリターン用カプセル回収の助成のために、オーストラリア南東部に2カ月程度の滞在をするなど、通常の業務に加え貴重な知見を得られたようである。今後、NIFSでも同様の機会があることを期待したい。

上記講義に加え、3コースに分かれた実習も用意されており、報告者は図1に示す走査電子顕微鏡(SEM)・機器分析を受講した。SEMの使用方法は報告者の業務に直結する内容であったため、大変有意義であった。



SEMによる観測及び元素分析の原理



実習の様子

図1. 走査電子顕微鏡の測定原理と実習の様子

### 9.3.2. 「機械コース」 機械システム技術課 技術員 清水貴史

本研修は、令和5年8月30日(水)―9月1日(金)に金沢大学角間キャンパスにて開催された。主な講義内容は、機械加工の振動について、工作機械の最新動向、最新の加工技術、実習である。実習は3コースに分かれており、「地域貢献・機械加工」コースを受講した。小学5年生から中学2年生までを対象とした工作教室の内容を体験した。工作教室ではミニハンマー(図1)の製作を行っており、旋盤・フライス盤・ボール盤を使った作業であった。作業は、治具を活用するなど工夫されており、安全性を重視していた。



図1. ミニハンマー

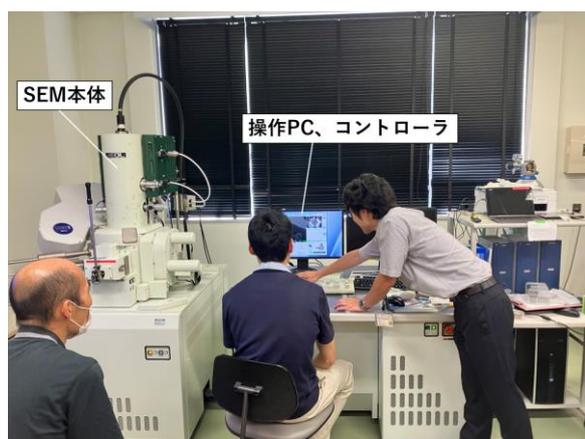


図2. 合同研修集合写真(金沢大学) 最前列右から清水、田上、柳原

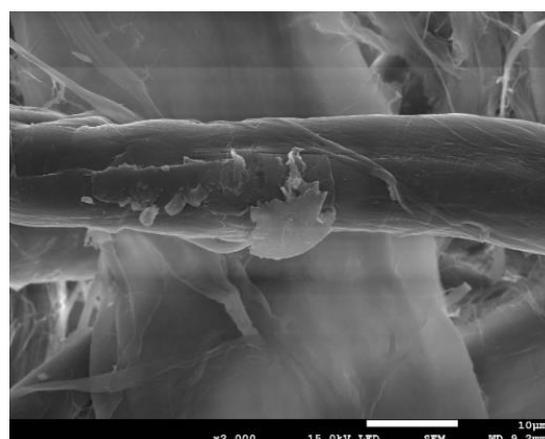
### 9.3.3. 「機械コース」 設計開発技術課 技術員 柳原悠人

本研修は令和5年8月30日ー9月1日の日程で、金沢大学角間キャンパスにて開催された。講義においては、金沢大学の教員・技術職員および企業の方を講師として、工作技術に関わる研究の紹介があったほか、JAXA に出向した技術職員の成果報告や、最新の工作機械の動向についての講義が行われた。また、学内見学において、金沢大学の加工センターや近年設立されたバイオマスイノベーションセンターの見学も行われた。

実習は3つのコースに分かれて実施され、報告者は「走査電子顕微鏡 (SEM) ・ 機器分析コース」の実習に参加した。SEM は電子線を試料に当てた際に生じる二次電子や反射電子を検出し、試料表面の微細な凹凸を反映した像を得ることができる装置である。また、同様に電子線照射によって生じる特性 X 線のエネルギーもしくは波長を検出し、試料に含まれる元素の同定やマッピングを行うことが可能である。(EDX または WDX) 実習においては、図1に示すように参加者が実際にコントローラを操作し、活性炭や銅など様々な試料の観察を行った。本実習で使用した SEM は、偶然ではあるが核融合科学研究所 (NIFS) が所有するものと同じ、日本電子株式会社の JSM-7100F であった。そのため、基本操作の他に便利な機能を紹介いただくなど、NIFS での業務においても大変役立つ情報が得られた。



実習の様子



実際の測定画像

(掃除機フィルターの付着物)

図 1. 走査電子顕微鏡実習の様子と測定画像

## 10. 採用2年を経過して 計測分析技術課 技術員 栗田紗緒里

令和4年4月1日付で計測分析技術課に配属され、早くも2年が経過しました。配属後は、主に放射線管理、計測に関わる業務に携わっています。自らの知識・経験不足を痛感する毎日ですが、職場の方々の手厚いご指導、ご支援のお陰で、日々楽しみながら業務に取り組むことができます。

この2年間で改めて振り返ると、入所間もない頃、計測分析技術課の中田実希様、岩田智恵様に研究所の案内とともに定例業務について丁寧に教えていただいたことが思い出されます。主な定例業務は、管理

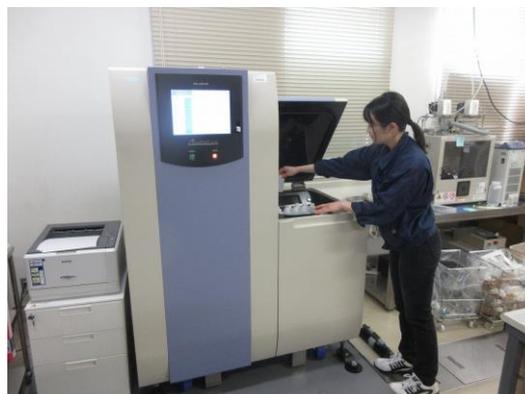


図1. 放射線測定

区域内の作業環境測定や、施設周辺の環境放射能測定、所内の職員や共同研究者からの依頼試料の測定等です。試料測定の際には低バックグラウンド液体シンチレーション計数装置や高純度ゲルマニウム半導体検出器等の放射線測定装置を使用します。着任するまで、これらの装置の使用経験はなかったため、試料調製方法や装置の測定原理を理解することからスタートしました。装置や測定結果に関する質問を受けて答えられず、知識不足を痛感することもありました。しかし、依頼者の方から温かいお声がけや研究状況の報告をいただく度に、未熟ながら自分も依頼者の業務に貢献できているようで嬉しく、『さらに専門性を身に付けて貢献したい』というモチベーションにつながりました。

施設周辺の環境放射能測定では、重水素プラズマ実験により生成した微量のトリチウムが施設周辺に与える影響の有無を調査するために、大気中トリチウムを捕集し、放射能濃度を測定しています。大気中トリチウム濃度の測定結果をまとめる過程で、研究部の田中将裕准教授より「環境放射能」研究会での口頭発表を勧めいただき、弘前大学赤田尚史教授との共同研究に携わる機会にもつながりました。研究会や共同研究への参加によって他機関の方々との情報交換の機会が増え、トリチウム研究や分析手法に関する知識や理解を深められただけでなく、業務に対する視野が広がったように思います。

大型ヘリカル装置の放射化測定業務では高エネルギー加速器研究機構（KEK）放射線科学センターの方々との合同測定に携わりました。放射化測定に関する知識が全くない状態だった私にとって、KEKの方々から学ぶ事柄は非常に多く、同じ技術職員として、専門性を発揮して活躍されているKEKの技術職員の方々の姿に大変刺激を受けました。放射化測定業務に関連して、現在は粒子・重イオン輸送計算コード（PHITS）を用いて、多様な測定条件下における検出器の検出効率のシミュレーション計算を試みています。プログラミング未経験の状態からのスタートのため、四苦八苦しながら日々計算に取り組んでいますが、数日前の自分ができなかったことが今日の自分ではできる、わかるようになっていくことに楽しさとやりがいも感じています。

未熟な状態で着任した私がこの2年間で着実に知識と経験を積み重ねて成長できたのは、丁寧なご指導だけでなく多くの機会を与えてくださった職場の方々のお陰だと深く感じております。これからも勉

強し続けいく姿勢を忘れず、3年次職員として、これまでに得られた知識や経験を活かして業務に貢献し、自発的に課題を見つけて知識や技能の向上に努めていく所存です。今後ともご指導、ご鞭撻のほどよろしく願ひいたします。

## 11. 学会発表リスト

会議名	ISFNT2023	
開催期間	2023/9/10～15	
開催場所	スペイン	
発表者 発表題目	<b>Takanori MURASE</b>	Development of Divertor Heat Removal Component Using Tungsten-Copper Alloy Bonding with SPS Method

会議名	International Symposium on Natural and Artificial Radiation Exposures and Radiological Protection Studies (NARE2023)	
開催期間	2023/9/19～21	
開催場所	弘前大学	
発表者 発表題目	<b>Miki Nakada</b>	$^7\text{Be}$ and $^{210}\text{Pb}$ characteristics in the atmospheric environment at Toki, Japan by weekly sampling

会議名	Global Plasma Forum in Aomori	
開催期間	2023/10/15～18	
開催場所	青森（青森文化観光交流施設ねぶたの家ワ・ラッセ）	
発表者 発表題目	<b>Yuto Yanagihara</b>	Low-temperature sintering of activated carbon using spark plasma sintering
	<b>Kazuki Nagahara</b>	Enhancement to gas puffing control system in LHD
	<b>Sho Nakagawa</b>	Surface observation on heat-treated activated carbon derived from unutilized biomass

会議名	日本放射線安全管理学会 第22回学術大会 静岡	
開催期間	2023/11/11～13	
開催場所	静岡（静岡県コンベンションアーツセンター）	
発表者 発表題目	<b>栗田紗緒里</b>	掃除用ロボットを用いた管理区域内床表面の汚染監視手法

会議名	第40回プラズマ・核融合学会年会	
開催期間	2023/11/27～30	
開催場所	盛岡（アイーナ・いわて県民情報交流センター）	
発表者 発表題目	<b>村瀬尊則</b>	LHDにおける放電プラズマ焼結法を用いたダイバータ試験体の開発
	<b>田上裕之</b>	準軸対称ステラレータCFQSのモジュラーコイル製作および装置本体組立ての進展状況
	<b>柳原悠人</b>	放電プラズマ焼結法を用いた活性炭の低温焼結
	<b>中川翔</b>	未利用バイオマス活性炭の高温処理における表面観察
	<b>長原一樹</b>	LHDにおけるガスパフ制御の高性能化

会議名	令和5年度 高エネルギー加速器研究機構 技術研究会	
開催期間	2024/3/7～8	
開催場所	つくば 高エネルギー加速器研究機構	
発表者 発表題目	<b>加藤ひろみ</b>	無人観測を目的とした環境トリチウム補集装置の開発
	<b>渋谷真之</b>	色検知による警告システムの開発と運用
	<b>伊藤康彦</b>	高周波自動整合器の修理
	<b>小川英樹</b>	核融合科学研究所におけるMicrosoft365の運用について
	<b>栗田紗緒里</b>	掃除用ロボットを用いた管理区域内床表面の汚染監視手法について
	<b>村瀬尊則</b>	核融合科学研究に向けた異種金属接合法の開発とその応用展開
	<b>中川翔</b>	未利用バイオマスを用いた高機能活性炭開発事業
<b>横田光弘</b>	ITVシステム及びインターロックシステムの運用	

## 12. 受賞記録

- 村瀬尊則 技師は、令和 5 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 研究支援賞を受賞(2023.4)

受賞対象

「数値解析技術の実践と普及による核融合科学への貢献」

<https://www.nifs.ac.jp/news/award/230407-01.html> (NIFS Web サイト)

- 中田実希 係員は、第 24 回環境放射能研究会にて若手奨励賞を受賞 (2023.3)

受賞対象

「大型核融合試験施設における大気浮遊じんと降下物に含まれる  $^7\text{Be}$  及び  $^{210}\text{Pb}$  の測定報告」