

令和7年度
核融合科学研究所

技術研究会報告集

日時 : 令和8年3月5日(木)～3月6日(金)

開催場所 : 多治見市産業文化センター

核融合科学研究所 技術部

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

Abstract

The Symposium on Technology in Laboratories was successfully held at Tajimi Industrial and Culture Center in GIFU, Japan from March 5th to 6th in 2026 hosted by National Institute for Fusion Science (NIFS). 160 participants attended the symposium. Participants were from Universities, research institutes and technical colleges. Fifty-seven papers were presented at the symposium. The participants discussed and reported the output of the new technology, techniques and technical experiences by five sessions of the technology of fabrication, the device technology, the diagnostic and control system, the cryogenics, and the information network technology.

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

はじめに

自然科学研究機構 核融合科学研究所
技術部長 鈴木 直之

2026年3月5日、6日にわたり、令和7年度核融合科学研究所技術研究会を開催いたしました。本年度の技術研究会は3研究所の持ち回り開催年度で、核融合科学研究所での開催は前身の名古屋大学プラズマ研究所時代も含めて11回目となります。今回も、多くの方にご参加いただきました。核融合科学研究所技術部を代表し、厚く御礼を申し上げます。

前回の核融合研主催の技術研究会は2022年に実施されましたが、コロナ禍ということもあり、オンラインでの開催でした。現地開催は2018年以来8年ぶりとなります。8年も経過しますと、人の入れ替わりがあります。人の記憶も薄れてきます。今回の実行委員は11名で構成されていますが、現地開催を経験していない委員は3名います。実行委員会を開催するにあたり、まず初めてに手掛けたのが、『2018年を思い出すこと』でした。そのために2018年開催時の写真、会場設営の資料、プログラム情報などを使って2018年を疑似体験することを行いました。実は2018年開催時の実行委員が非常に頑張ってくれたおかげで、開催ノウハウをはじめとした膨大な資料が残されています。例えば、開会式が行われた大ホールの椅子の並べ方も2018年の実行委員がcm単位で記録を残してくれています。もしこれがなければ、下見の回数を増やしたり、担当者の打合せ時間を多く費やしたりなど、我々の負担が増えたことでしょう。記録を残しておくことの重要性を実感しました。

記録を残しておくと言えば、(多少強引ですが)技術研究会の報告書です。分子科学研究所で管理されている技術研究会報告集データベース (<https://techsv.ims.ac.jp/>) によれば、第1回技術研究会は分子科学研究所において1976年2月26日に開催されており、本年度の開催はちょうど50周年に当たります。この文章を執筆するにあたり、50年前にご活躍されていた技術職員の方々の報告書を拝読しました。私ごときがここで感想を述べるのはおこがましいのですが、そこには50年前の先輩技術職員が抱いていた技術力向上への強い意思と、自身の技術を後進へ伝えようとする姿勢が明確に感じ取られました。その強い意志と姿勢を後輩たちに伝えていくことが我々の使命であると改めて実感しました。

最後になりますが、本技術研究会にご参加していただいた皆様、準備・運営・片付けに尽力していただいた実行委員、並びに核融合研スタッフの皆様、開会式でのご挨拶と特別講演を賜りました山田所長と坂本教授に、心より感謝申し上げます。

目次

口頭セッション 第1分野 (工作技術)

- (1) 同時多軸加工による複雑形状加工技術習得のための取り組み・・・・・・・・・・1
自然科学研究機構 分子科学研究所 磯谷 俊史
- (2) 宇宙科学研究所 工作室の取り組み・・・・・・・・・・3
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 加賀 亨
- (3) 創造工学基礎演習における板金加工実習の導入計画と準備状況・・・・・・・・5
釧路工業高等専門学校 教育研究支援センター 建築・生産グループ 遠藤 祭
- (4) ニッケル製スキマーの製作・・・・・・・・・・7
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部 宮崎 芳野

口頭セッション 第2分野 (装置技術)

- (1) Power Apps を活用した放射線測定業務のデジタル化・・・・・・・・・・9
高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター 古宮 綾
- (2) Copilot を使用した生物実験規則の作成・・・・・・・・・・12
量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu センター 千賀 信幸
- (3) 市販の空気入れを用いた広報用真空科学おもちゃの製作・・・・・・・・・・16
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 小笠原 舜斗
- (4) 光源加速器インターロックシステム更新作業時のトラブルとその対応について・・・・・・・・20
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 濁川 和幸
- (5) 熱負荷変動を最小化する機能を備えた熱応答試験装置の製作・・・・・・・・・・24
秋田大学大学院国際資源学研究科 小助川 洋幸

口頭セッション 第3分野 (計測・制御技術)

- (1) 続・GaN-FET を用いたインバータ電源の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 伊藤 康彦
- (2) プログラマブル多出力高電圧電源の基盤技術開発ー全体像と回路開発ー・・・・・・・・ 30
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部 豊田 朋範
- (3) 形から入る小型電子回路装置製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部 木村 和典
- (4) 次世代ケミカルエンジニアの育成を目的としたドローン実習の構築と展開・・・・・・・・ 37
一関工業高等専門学校 技術室 高嶋 あつ也
- (5) J-PARC MR 真空システムの機器情報の整理及び再整備・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 西川 雅章
- (6) プラズマリミターにおける ADC を用いた水冷系統監視システム構築・・・・・・・・ 42
九州大学 応用力学研究所 技術室 杉山 泉
- (7) 機械学習によるカメラ映像のリアルタイム異常検出・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 前野 博也

口頭セッション 第4分野 (極低温技術)

- (1) 小中学生向け科学体験教室の開催報告 47
千葉大学 理工系総務課技術グループ 吉本 佐紀
- (2) 小動物用 MRI からのヘリウム回収 50
大阪大学大学院工学研究科 津々美 章子
- (3) ヘリウム液化機 L280 タービンのトラブルとその対策 56
東京科学大学 コアファシリティセンター 金本 真知
- (4) 液体ヘリウム中の水素混入トラブル事例 59
東京大学 生産技術研究所 北原 直尚
- (5) ヘリウム液化委託の取組み 62
大阪大学 基礎工学研究科 伊藤 義浩
- (6) ヘリウムガス再液化事業概要 II 65
東京大学 物性研究所 鷺山 玲子
- (7) ヘリウム回収用の可搬式ガスバッグいろいろ 67
琉球大学 総合技術部 宗本 久弥

口頭セッション 第5分野 (情報・ネットワーク技術)

- (1) 核融合科学研究所における VPN システムの運用 71
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 中村 修

口頭セッション 第6分野 (その他)

- (1) 科研費 (奨励研究) 申請・採択のための組織的活動に関するアンケート調査 74
秋田大学大学院理工学研究科 加賀谷 史

ポスターセッション 第1分野 (工作技術)

- (1) アングルヘッドを用いた導波管角フランジ加工への挑戦と気づき・・・・・・・・・・76
高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 機械工学センター 伊藤 雄平
- (2) 陽電子源用フラックスコンセントレータの組立て・・・・・・・・・・79
高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 機械工学センター 牛谷 唯人
- (3) 機械仕上実習の改善について・・・・・・・・・・81
釧路工業高等専門学校 教育研究支援センター 江口 陽人
- (4) ワイヤ放電加工 ～効率化と安定化を目指して～・・・・・・・・・・83
九州工業大学 技術一課工作係 清田 栄一
- (5) 小中学生が機械加工に興味を示す「不思議なおもちゃ」の開発・・・・・・・・・・84
豊田工業高等専門学校 技術部 大竹 啓之
- (6) 冷やしばめを用いたコリメータ冷却部品の製作・・・・・・・・・・86
高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 機械工学センター 保住 弥紹

ポスターセッション 第2分野 (装置技術)

- (1) 大型ヘリカル装置用漏水検知システムの運用・・・・・・・・・・88
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 河合 将照
- (2) 個人キー保管器制御システムの更新・・・・・・・・・・91
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 白川 明広
- (3) 日米科学技術協力によるビームプロファイルモニターの開発とその輸出・・・・・・・・94
高エネルギー加速器研究機構 佐々木 知依
- (4) 可飽和インダクタを用いた高電圧大電流用機械的スイッチシステムの構築と特性評価・・99
熊本大学 研究開発戦略本部 技術部門 松田 樹也
- (5) ネガ型電子線レジストとしての SU-8 の薄膜化によるラインパターンの微細化・・・・・・・・102
東京科学大学 コアファシリティセンター 藤本 美穂
- (6) 極高真空計の感度調査・・・・・・・・・・103
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 羽生 智文

- (7) Belle II 実験 LS2 に向けた新型 RVC の設計開発 106
高エネルギー加速器研究機構 金山 高大
- (8) JT-60SA 上部共通架台の製作から組立まで 110
量子科学技術研究開発機構 トカマクシステム技術開発部 齊藤 優毅

ポスターセッション 第3分野 (計測・制御技術)

- (1) PF-AR の DCCT 更新に伴う制御系の整備 114
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 塩澤 真未
- (2) 大量のパルスデータで地震発生装置を動かす 117
東海国立大学機構 名古屋大学 全学技術センター 岡田 宏太
- (3) FE-SEM による複数焦点画像の合成手法の開発 119
金沢大学 総合技術部 情報部門 蟹屋敷 祐介
- (4) 4 列可変偏光アンジュレータ用補正データプログラムの更新 122
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 江口 柊
- (5) J-PARC MR コリメータ制御システムの改良 125
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 門脇 琴美
- (6) AI を利用したビームタイム配分システムの開発 128
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 成田 千春
- (7) ラジオクロミックフィルムのリアルタイム測定 131
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 設楽 暁
- (8) 放射線管理システム構築の事例紹介 ―汚染検査を例として― 134
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 中田 実希
- (9) シュリーレン法を用いたラバールノズルの性能評価 136
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 長原 一樹
- (10) KEK 電子陽電子入射器データロガーシステムの現状 139
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 佐武 いつか

ポスターセッション 第4分野 (極低温技術)

- (1) 高温超伝導コイル巻線試作機の開発状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・143
自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部 田上 裕之
- (2) MRI のトランスファー放出ガス回収の報告とヘリウム純度計の紹介・・・・・・・・・・147
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部 浅田 瑞枝
- (3) 福井大学工学部附属超低温物性実験施設における液化設備のトラブル事例紹介・・・・・・・・151
福井大学 工学部技術部 小林 英一
- (4) COMET ヘリウム冷凍設備用低温精製器の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・153
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 藤井 悠輝

ポスターセッション 第5分野 (情報・ネットワーク技術)

- (1) 演示実験における構造式の認識と分子モデルの生成・・・・・・・・・・・・・・・・・・155
大阪公立大学 杉本キャンパス 納品検収センター 長谷川 浩史
- (2) Google Workspace のアカウント管理について・・・・・・・・・・・・・・・・・・158
熊本大学 研究開発戦略本部 吉岡 昌雄
- (3) 静的 IP アドレス設定の有無を簡易判定する Web アプリケーションの作成・・・・・・・・・・160
自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部 金城 行真
- (4) 計算科学センターにおける低周波騒音による影響と対策・・・・・・・・・・・・・・・・・・163
高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 前田 裕文

参加機関及び参加人数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・166

あとがき・・167

口頭セッション
第1分野
(工作技術)

同時多軸加工による複雑形状加工技術習得のための取り組み

○磯谷 俊史^{A)}、近藤 聖彦^{A)}、宮崎 芳野^{A)}

^{A)}自然科学研究機構 分子科学研究所

1. はじめに

分子科学研究所の試作工場には多軸マシニングセンタと CAD/CAM が導入されている。これらを用いて切削加工することにより 3 次元的な複雑形状を加工できる。しかし、日常的な業務で同時多軸加工を必要とする複雑な形状を製作する機会は少ない。そこで、同時多軸加工の経験を積むため勉強会への参加や自身で加工課題を設けて実際に加工するなど技術習得・向上に努めてきた。またマシニングセンタを扱う中で必要だと感じて新たに整備した環境についても紹介する。

2. 同時多軸加工について

機械加工の多くは直交する直動軸 X、Y、Z の 3 軸を動かすことで加工を実現している。5 軸マシニングセンタや複合加工機では直動軸にさらに A、B、C 軸といった旋回軸を付与することで、ワークや工具の姿勢を同時に変化させながら加工することが可能になり、複雑な形状の加工が実現できる。しかし、多軸を同時に制御することで工具、ワーク、ワークホルダなどの動きが複雑になり、様々な干渉が発生する。そこでシミュレーションを用いながら干渉を避けるようにツールパスを設定しなければならないため、多くの経験が必要となる。

3. 多軸加工勉強会

令和 6 年度から名古屋大学(理学・工学)、国立天文台、分子科学研究所の若手を中心として不定期ではあるが勉強会を開催している。国立天文台は経験が豊富であるため、アドバイザーとしての役割も担っている。主に勉強会で提案された複雑形状を題材



図 1 勉強会課題『球状歯車』

として、多軸加工でどのようにアプローチするかを各機関で取り組んだ進捗状況を報告し、意見交換をおこなった。勉強会内で課題の一つとして取り組んだ『球状歯車』の完成品を図 1 に示す。

4. 多軸加工環境について

当研究所試作工場には FANUC 製のロボドリルに追加旋回 2 軸を付加したマシニングセンタが導入されている(図 2)。また NC プログラミングを支援する CAD/CAM ツール hyperMILL と干渉チェックを行うシミュレーション環境として VIRTUAL Machining Center を使用している。



図 2 マシニングセンタ外観

5. 加工課題

同時多軸加工において代表的な加工事例としては『インペラー』が挙げられる。しかし、よくある形状であるがゆえに多くの加工事例が存在するため、何か他の形状を課題として作りたいと常々考えていた。そこで、昨年度の総合技術研究会のポスター発表ブースに展示されていた削り出しスプーン形状に着想を得て『れんげ』の 3D モデルを作成し加工課題とした^[1]。CAD/CAM による NC プログラミングとツールパスの算出をおこない、干渉チェック・シミュレーション(図 3)を実施した後に NC コードを出力した。実際の加工において、被削材は $\phi 30 \times 130$ のジュラコンを使用し、工具は $\phi 10$ 、 $\phi 5$ のスクエアエンドミルと

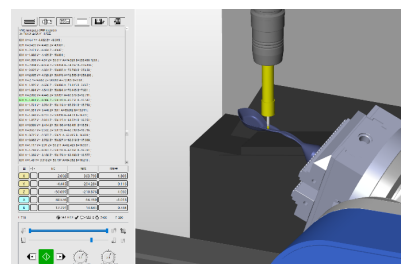


図 3 シミュレーション

R3、R1 のボールエンドミルを使用した。総加工時間については慎重に進めたため約 30 時間を要した。完成品を図 4 に示す。



図 4 加工課題『れんげ』

薄い部分で約 1mm まで削り込みかつ工具を長く突き出す必要があったため、材料や工具のビビリが生じやすい。そのため一気に 130mm の長さ全体を削り出すのではなく、30~40mm 長の 3 つのセクションに分けて加工を進めることで材料にある程度の剛性を持たせ、大きな欠陥を生じさせることなく加工ができた。

6. 新たな環境整備

マシニングセンタ加工の最大の利点として NC プログラムによる無人運転が挙げられる。ATC (Auto Tool Change) により複数の工具を 1 つのプログラムで使用できるため加工工程の集約が可能となる。そのため、一度スタートさせてしまえば今回の課題製作のように長時間の無人運転が可能となり、他の加工業務や設計作業を並行して進めることができる。しかし、加工の進捗を確認するにあたっては実際に機械まで行かなければならないため、カメラで遠隔監視する環境を作れないかを検討した。機械内へカメラを組み込むにあたり、加工中は常に切削液をかけながら運転しているため、防水性がある程度必要になる。機械内のカメラ監視システムが販売されており、その中でもカメラユニットをネットワークにつなげて遠隔監視が可能となるものが販売されていたが、セッティングなどが単純な反面非常に高額で導入するにはハードルが高いと感じた。しかし、映像出力に特化した廉価版も販売されていることを知り、キャプチャーボードを使用することで比較的安価に遠隔監視システムを構築できるのではないかと考えた。システム構成は以下の通りである(図 5)。

カメラの映像をキャプチャーボードを介して OBS (Open Broadcaster Software) をインストールした PC に取り込むことで映像の保存を可能にした。またネットワークに接続した PC を使用することでリモ

ートにより、遠隔地からでも映像を視聴することも可能にした。さらに、キャプチャーボードから映像をスルーすることでマシニングセンタ横に設置したモニターで確認することもできるように構成した。

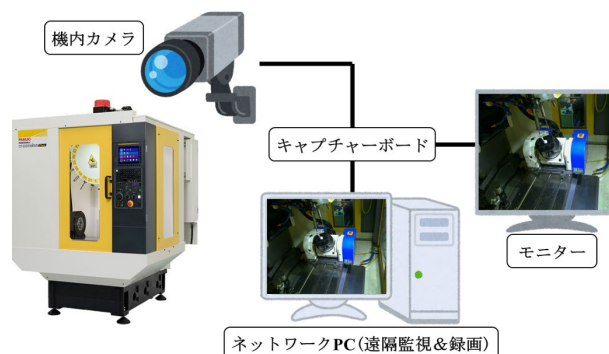


図 5 機内監視システム構成

7. 終わりに

今回、業務とは別に時間を確保して同時多軸加工による複雑形状加工の技術習得に集中的に取り組むことができた。課題の製作過程で CAD/CAM やマシニングセンタに触れる時間を長く確保ができたことで、操作への理解度が深まり現在では業務への積極的な利用につなげることができている。また、監視用のカメラ導入など、周辺環境も整備を進めることができ、より使いやすい環境を構築することができた。今後は経験を活かして、より積極的な業務への活用と技術研鑽、日々の維持管理とさらなる設備の充実にも取り組んでいく。最後に、本項で触れた多軸加工勉強会について現在参加している 3 機関に留めず、より多くの機関にも参加していただき技術力向上の一助となるようなオープンな会に発展していければと考えている。

参考文献

[1] 茶木智勝、総合技術研究会 2025 筑波大学報告書、219-220、2025

謝辞

業務以外での課題製作に際して、理解を示していただいた装置開発室員に感謝いたします。また、多軸加工勉強会での様々な助言にも感謝いたします。

なお、本研究は、令和 7 年度分子科学研究所所長奨励研究費を用いて行ったものである。

宇宙科学研究所 工作室の取り組み

○加賀 亨^{A)}、中坪 俊一^{A)}

^{A)} 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1. はじめに

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所には、大学の技術支援組織に相当する先端工作技術グループが設置されている。本グループは、学生実験や研究開発における試作を支える工作室として設計や機械加工、溶接、組立までを包括的に対応し多様な要求へ迅速かつ効率的に応える体制を整えている。

本報告では、当グループにおける工作室の機能に焦点を当て、製作事例と人員体制の現状について述べる。

2. 先端工作技術グループの構成

当グループは機械工作を主とする工作室とデバイス開発を行う宇宙ナノエレクトロニクスクリーンルーム（以下、宇宙ナノエレCR）の2つの分野で構成されている。

工作室は旋盤やフライス盤、ボール盤などの汎用工作機械に加え、5軸マシニングセンタや複合型NC旋盤、ワイヤ放電加工機といった数値制御工作機械を備えている。また、加工後の品質確認のため三次元測定機やマイクロスコープ、測定顕微鏡などの計測装置も設備されている（図1）。一方、宇宙ナノエレCRはシリコンエッチング装置やプラズマCVD装置、マスクレス露光機、電子線描画装置などを備えクラス1の清浄度を維持したクリーンルーム環境のもと、衛星搭載を目的としたMEMS応用デバイスや検出器の製作および微細加工技術の研究開発を推進している。

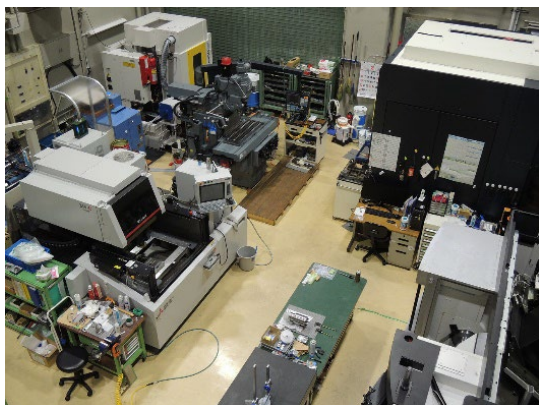


図1 1F工作室の様子

3. 業務と人員体制

本グループの工作室は、数値制御工作機械を中心に構成された1F工作室と、汎用工作機械を備える3F工作室の二つのフロアで運用されている。

1F工作室は、専門的な操作を要する工作機械であるため、機械に対しての担当者はある程度固定している。製作物はプロジェクト系の開発品や研究開発中の試作モデルなど複雑かつ高精度な加工に取り組んでおり機構内の研究開発チームに加わりながら詳細設計を担うこともある。

3F工作室は、学生や教員、職員が自ら手を動かし機械工作を行う場所として開放しており、加工方法の相談や機械操作のサポートを行っている。利用者は、Web上での講習会と工作室オリエンテーション（実技講習）を受講する必要がある。また、実際に作業する場合は、技術支援員が常時サポートを行い、安全性を確保している。

2026年2月時点の工作室に所属するスタッフと担当する業務を表1に示す。

表1 工作室スタッフの主な業務

配置場所	職名	人数（名）	担当業務
1F 工作室	常勤職員	1	製作調整
	出向者	3	設計製作
3F 工作室	常勤職員	1	加工相談
	出向者	1	設計製作
	技術支援員	1	利用者指導
エレショップ	技術支援員	1	物品管理

1Fと3F工作室の役割は、迅速性と加工内容に基づいて区分している。具体的には、製作期間の目安が3日以内の案件は3F、それ以上を要する案件は1Fが担当する。ただし、緊急性や加工の難易度、作業リソースによって柔軟に調整している。

また、基本的な担当範囲は前述の通りであるが、機器の稼働状況に応じて1Fと3Fの設備を横断的に活用し、効率的に製作業務を進めている。

次項では、製作業務の具体的な事例について述べる。

4. 滴下燃焼試験用可視化チャンバーの製作

当研究所の宇宙飛翔工学分野では、固体・液体ロケット燃焼の基礎から推進系要素試験まで幅広い研究が進められている。液体燃料の蒸発・燃焼速度、自発点火特性や冷炎の発生条件などを解明するため、多様な実験が実施されており、当工作室には年間を通じて燃焼実験に関連する製作依頼が寄せられている。今回の依頼は滴下燃焼試験中の燃焼現象を可視化するためのチャンバーの製作である。主要な要求事項を以下に挙げる。

- 燃料はヒドラジン (N₂H₄)
- 酸化剤は四酸化二窒素 (N₂O₄, NTO)
- 気密・耐圧試験による安全確認が必要
- 着火衝撃対策として二層構造とする

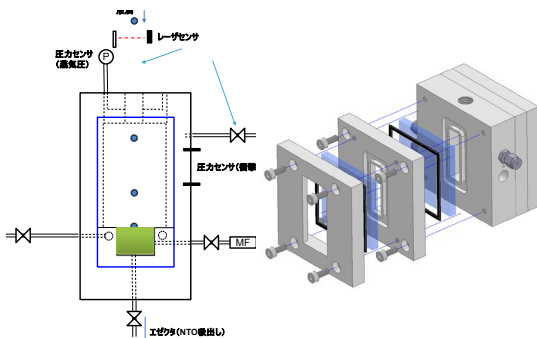


図 2 概略図と初期の設計案

図 2 に概略図と初期の設計図を示す。着火時の衝撃による破損や液漏れ対策は、従来の試験ではアクリル水槽への浸漬形態を用いていたが、今回は紫外域発光を用いた計測を行うため、大気中での試験を前提とし、防護壁を設けたうえでチャンバーは二層構造とした。

酸化剤の四酸化二窒素は入手性が低く高価であることと、実験中の取り扱いを考慮すると極少量を少量とすることが望ましく、供給と排出ラインは細径チューブを選定する必要がある。また、窓に用いる石英ガラスは着火衝撃で破損する可能性があるため、安価な市販品を採用して交換性を確保した。これらの要件を優先した結果、給排液ポートから燃焼室迄の流路は 1/16(in)チューブの内径を貫通させる必要があり深穴加工が必要となった。

製作相談から完成までの流れを以下に示す。

- 7月上旬 製作相談 1次案の提示
- 9月上旬 3Dデータ作成 (2次案)
- 9月中旬 設計変更及び材料発注 (3次案)
- 10月上旬 物品調達開始
- 10月中旬 シール部材 (既製品) 調達不調
- 10月下旬 シール部の設計変更&内作開始

11月上旬 外注手配 (溶接作業)

12月上旬 引き渡し

図 3 に製作したチャンバーを示す。

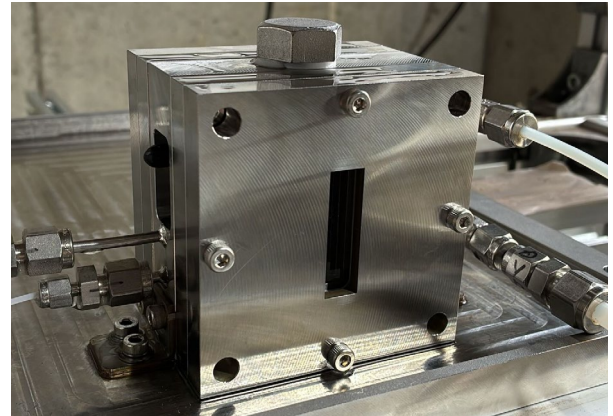


図 3 製作したチャンバー

製作を進めると 1/16 インチチューブの内径 (Φ 1.1 mm深さ 35 mm) を貫通させる加工は、内作の機械加工では困難であることが判明した。製作期限への影響を考慮し、1/8 インチに変更する判断を行った。また、全体に適用するシール材は、設計完成後に既製品を手配すると納期が間に合わないことが明らかとなり、PTFE シートをレーザー加工で切り出し対応した。

5. 今後の課題

当グループの課題は、製作技術と人員体制の二つの側面に整理される。技術面では、外注との差別化と高額な工作機械の更新が挙げられる。JAXA 内で長期的に貢献できる技術領域を見極め、協力企業の支援を得つつどこまで内製化を進めるかを判断し、それに対応する設備や人材を整備する必要がある。しかし、これらは現時点で明確に区別できていない。さらに、工作機械の更新については費用確保の見通しが立たず、継続的な課題となっている。

人員体制に関する課題として、工作系 JAXA 職員の増員が挙げられる。現在は大学出向者 4 名に大きく依存しており、将来的な組織運営を見据えると JAXA 職員の拡充が不可欠である。増員の実現には当グループの活動成果を継続的に示し、上層部の理解と支援を得る必要がある。

一方で、大学を含む外部機関からの出向者受け入れは JAXA のものづくりを広く知ってもらう良い機会であり当グループにとっても新たな工作技術を学ぶ貴重な機会となっている。将来的には、技術者育成の場としての機能を強化し、多様な機関との連携をさらに拡大していくことを目指している。

創造工学基礎演習における板金加工実習の導入計画と準備状況

○遠藤 祭^{A)}

^{A)}釧路工業高等専門学校 教育研究支援センター 建設・生産グループ

1. 導入

本校では平成28年度より学科改組を実施し、従来の5学科体制から1学科3コース制へ移行した^[1]。これに伴い、平成29年度よりスマートメカニクスコース2年次を対象とした「創造工学基礎演習」を創設している。本演習は情報工学分野と機械工学分野の横断的な実習として設計されており、情報工学分野の学生も実習工場で加工実習を履修する点に特色がある。しかし、機械工学分野の学生にとっては後続科目「機械工学実習・実験I・II」の手仕上げ実習と種目重複や作業の単調化、学習意欲の低下が課題となっていた。そこで、従来実習の重複課題を解消するため、板金加工を新規導入する計画を立案した。本実習では、従来のけがき・やすり掛けに加え、展開図の理解、塑性変形、および接合(スポット溶接)の板金加工の技能を多人数・設備制約環境でも成立する板金実習を構築することを目的とした。本報告では、令和8年度からの本格導入を目指し、板金加工の導入準備に向けた教材試作、学生へのアンケート調査、試作検証および実習計画の見直しについて述べる。

2. 実習教材の試作開発と予備調査

2.1 1次試作とアンケート調査の実施

実習課題の選定にあたり、図1(a)に示す工作実習例として公開されているペン立て^[2]を選定し、本校の工場設備での製作の可否を検証した。供試材は、亜鉛メッキ鋼板(板厚0.3mm)を用いた。設備面では、板金に必要な工具類、塗装用品等に加え、スポット溶接機等の板金加工に必要な主要設備があり、図1(b)に示すペン立ての製作が可能であることを確認した。一方で、折り曲げ機およびスポット溶接機は

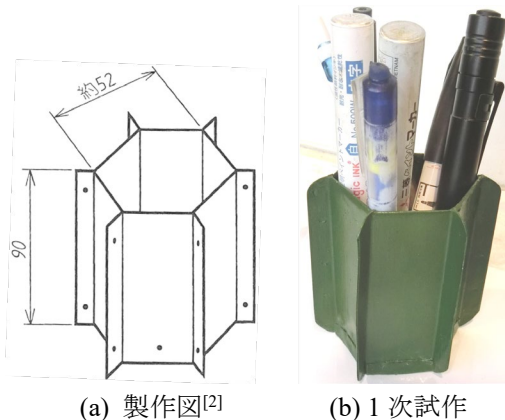


図1 板金加工によるペン立て製作品

いずれも1台のみの保有であるため、多人数実習環境下では工程の停滞が発生することが予想される。そこで、折り曲げ機の使用を廃止し、はげ組みを追加した手曲げ加工に変更し、スポット溶接打点数の最小化する方針を設定した。

また、教材の妥当性を検証するため、学生へのアンケート調査を実施した。令和7年度に本演習を履修した2年次学生61名(情報工学分野31名、機械工学分野30名)を対象に口頭調査を行った。調査項目は「実習で製作してみたいか」、「製作物を持ち帰った場合に使用するか」の2点とし、肯定(○)、条件付き肯定(△)、否定(×)の3段階で評価した。なお、本調査において条件付き肯定(△)は「製作に関心を示しているが、使用場面が限定的」と解釈し、△の回答は「興味はある」と判断し、肯定的評価に含めてアンケート集計した。図2に示す調査の結果、情報工学分野では肯定的評価(○・△)が75%、機械工学分野では87%となり、7~8割の学生から肯定的評価が得られた。その結果、教材選定の妥当性が確認されたため、板金加工における製作課題をペン立てに決定した。なお、否定(×)意見の中には、他の製作物を希望する意見も見られたが、今回は対象外とした。

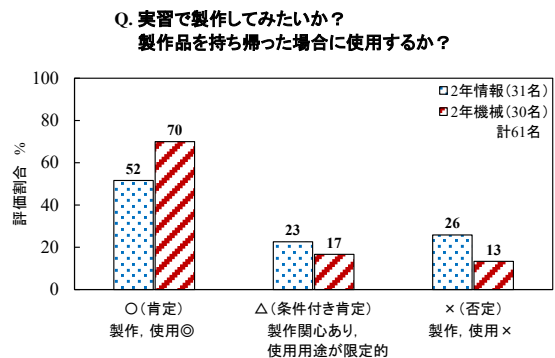


図2 学生へのアンケート調査結果

2.2 2次試作における溶接条件と実習計画

1次試作の結果を踏まえ、2次試作では多人数実習へ対応するため、スポット溶接条件の検討を行った。スポット溶接は卓上スポット溶接機(ART-7902, 大同興業製)を用い、はげ折り後の板厚0.3mmを3枚重ねた部位を評価対象とした。亜鉛メッキ鋼板の溶接条件^[3]を参考に、溶接電流と通電時間(サイクル)を変化させ、スポット溶接代および打点数を比較検証した。スポット溶接は3枚重ねたはげ組み部表面に施

すものとし、溶接代を(1)5mm・10mm, (2)7mm・10mm, (3)10mm・10mm と比較の結果、(3)以外は板材の継ぎ目上またはその近傍に溶接痕が形成されやすく、溶接外観評価による接合不良の発生が懸念された。また、側板同士の溶接におけるスポット打点数(2~5か所)を比較した結果、2か所の溶接によりペン立ての実使用に必要な強度が確保できることを確認した。そのため、溶接代は10mm・10mm、スポット打点数は側板同士が2か所で必要強度を確保できると判断し、側板と底板の溶接は1か所とした。

次に、実習(90分×3回)構成は、各回の工程を①けがきと切断、②手曲げ・組立とスポット溶接、③やすり掛けと塗装に配分した。担当者による図3(a)に示す2次試作の結果、①100分、②60分、③80分を要し、実習時間90分を超えた工程もあり、目標時間60分を大幅に超過した。また、実習時間内にはレポート作成時間(10~20分)が必要であり、工程の簡素化と作業時間の短縮が必須であることが分かった。

2.3 3次試作による形状変更と作業時間の検証

担当者による2次試作の結果から、試作時間が実習枠(90分×3回)を超過したため、底面形状を六角形から正方形へ変更し、側板枚数を6枚から4枚へ削減した図3(b)に示す3次試作を実施した。この形状変更で、板金加工に必要な「切断・曲げ・接合」の工程を保持しつつ、作業時間は①50分、②30分、③50分となり、作業時間を約4割短縮し、60分の目標に近接した。試作品を基に、学生への試作検証を行い、実習計画の妥当性と工程の課題把握を行った。



(a) 2次試作 (b) 3次試作
図3 ペン立て試作品の写真

3. 学生による試作と実習計画の見直し

3.1 学生による試作検証

実習計画の妥当性を確認するため、機械工学分野3年生3名を対象に、3次試作品を用いた実習形式での予備的検証を行った。学生は板金作業未経験で

あり、実習(90分×3回)を想定して試作を実施した。その結果、学生の作業時間は①80分、②90分、③80分を要し、45°のけがき作業、拍子木と当て金を利用した曲げ加工、および面取りの仕上げ工程がボトルネックであった。これにより、安全教育の説明を省略した条件でも、学生の製作時間が60分の目標に作業完了できないことが分かった。そこで、当初の計画から作業工程の更なる短縮化を図るため、実習計画の見直しに反映した。

3.2 実習計画の再検討

学生試作の結果を踏まえ、実習計画を再構成した。第1週のけがきと切断は、板金1枚から5枚の切り出し工程を省略する。第2週の手曲げ・組立とスポット溶接は、第2週に溶接の安全教育を実施し、スポット溶接の実作業を第3週に集約する。曲げ作業が早く完了した学生に対しては、第2週での前倒し対応を可能とする。最後に、第3週のやすり掛けと塗装は、スポット溶接後にやすり掛けによる仕上げを行う。塗装は、その目的や作業方法は必ず説明するが、時間内に完成可能な学生および希望者のみとする予定である。この改訂により、板金加工の基本技能やレポート作成時間(10~20分)を保持しつつ、全学生が時間内に製作を完遂可能な計画を再構築した。

4. まとめと今後の計画

本報告では、多人数・設備制約環境でも成立する板金実習の導入を目的として、教材試作、学生調査および工程検証を通じて実習計画を整備した。その結果、既存の工場設備を活用し、手曲げ加工と溶接条件の最適化によって、多人数実習に対応可能であることが示された。また、PDCAに基づく試作過程により、学生が時間内に製作を完遂できる実習計画を構築し、導入準備として有効な知見が得られた。

今後の計画は、工具・材料の準備と、実習資料およびレポート課題の作成を進め、令和8年度からの本演習に備える。本演習に正式導入後は、学生による板金加工の成果物評価をし、板金加工実習における実習内容の継続的改善を図る予定である。

参考文献

- [1] 釧路工業高等専門学校, ”沿革概要”, 釧路高専 HP, <https://www.kushiro-ct.ac.jp/2011/05/20/3254/>, (2026-02-04 参照)
- [2] 松澤和夫, 吉田政弘他7名, 機械実習1, 実教出版, pp.190-191(2022)
- [3] 奥田滝夫, スポット溶接入門<増補版>, 産報出版, pp.170-175(2011)

ニッケル製スキマーの製作

宮崎 芳野

分子科学研究所 技術推進部

1. はじめに

フランジ付円錐形状で、先端に開口を有する部品(以下、スキマーとする)は、真空容器内における分子線の実験などに使用される。これまでめっきを用いた銅製スキマーの製作をおこなってきたが、より高い剛性を有するニッケル製スキマーの製作相談があった。その際、国内で製作する会社が見つかり難いことを知り、試作に挑戦した。



図 1 自作した電鍍装置

2. 電鍍について

電鍍は、電気めっきによって母型の表面に金属を析出させ、それを母型から剥離して独立した金属部品として取り出す方法である。今回のスキマー製作では、目標とする厚みが 100 μm 以下と非常に薄く、切削加工による製作が難しいと判断したため、電鍍を用いて精密かつ再現性を重視した。

電鍍に先立ち、形状の基準となる母型を加工した。母型の加工には NC 旋盤を使用し、スキマーに必要な形状を精密に切削した。母型の材質には、めっき被膜が過度に密着せず、電鍍後の剥離が行いやすくなるのではないかと考え、難めっき材であるステンレスを使用した。母型のストレート部分はめっきが不必要なため、マスキングテープを巻き絶縁状態にしてめっきをおこなった。

ニッケルめっきは、50 $^{\circ}\text{C}$ 程度の温度で行う必要があるため、めっき液の保温・蒸発対策などを考慮した電鍍装置を自作した(図1)。めっきを行うためには主に、①めっき液を入れる浴槽、②めっき液に電気を流す陽極板、③陰極を兼ねる母型が必要である。膜厚の偏りを防ぐため、母型に対して2枚の陽極板を両側から挟み込むように配置し、母型をモーターで回転させながらめっきする。ただし、めっき液や回転している母型には電流を供給する必要があるため、電氣的に接続する構造に工夫が求められた。実際に回転軸の絶縁や、軸電圧への対策を図2に示す。

なお、加熱しためっき液の飛散は装置周辺の金具を腐食させやすい。腐食片がめっき液に混入すると、再現性を損ない、析出不良の原因となる。そのため、可能な範囲で飛散対策や材料選定を行い、めっき環境を安定させるよう配慮した。

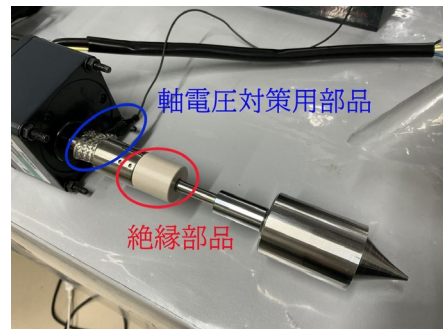


図 2 対策部品

3. めっきの条件

めっき液には、市販されているスルファミン酸ニッケル浴を使用した。電気ニッケルめっき液には、主にスルファミン酸浴とワット浴の2種類が存在するが、今回は微細なめっき処理が可能で、電子部品や精密機器などに適している点から、スルファミン酸浴を使用した。めっき液の液温は、バスタブとヒーターによる湯煎や、エアバルブによるめっき液自体の攪拌により、50 $^{\circ}\text{C}$ 程度に保ちながらめっきをおこなった。

何度もめっき作業を繰り返すと、黒い汚れが付着したり、ピット(小さな大量の穴)がめっき膜の表面に出現したりすることがわかってきた。これにより、めっき膜に穴があき、母型も黒ずんで汚れてしまう(図3)。これらの原因がめっき液の劣化によるものか、pHの偏りによるものかはまだ不明であるが、この現象が起こり始めた際は、めっき液のpHを調整し、それでもピットが無くならなければ、めっき液を新品に交換している。蒸発により液の量が減ってきた場合にも、適宜新品のめっき液を追加してい

る。なお、母型の汚れを除去する際には、図4のように希硝酸に数時間漬けた。

実際にめっきをするときは、目標とするめっきの膜厚や電流密度、電流をかける時間等から、電流値を算出する。最初に算出した電流値の2倍程度の大きさの電流を数十秒だけかけて、多めにめっきを析出させる。その後算出した電流値に戻すことで、析出しためっきを基として、そこから均一にめっきをおこなっていく。めっきをした後の様子を図5に示す。



図3 ピットや汚れの発生しているスキマーの様子

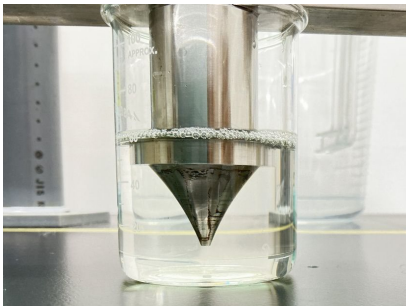


図4 汚れた母型を希硝酸に漬けている様子

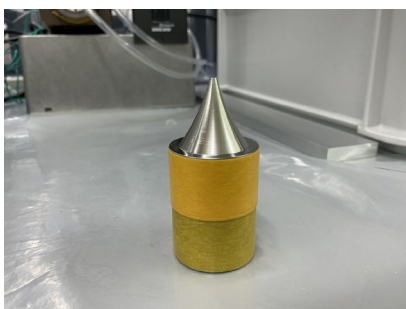


図5 めっき直後のスキマーの様子

4. 剥離作業

先述したとおり、めっきをおこなった後は母型から剥離する必要がある。ニッケルの内部応力により母型にスキマーが張り付いているため、常温での剥離は難易度がかなり高い。そこで、母型を液体窒素

に漬けたあと剥離した。室温での線膨張係数は、ステンレス (SUS304) が $17.3 \times 10^{-6} [K]$ に対して、ニッケルが $13.3 \times 10^{-6} [K]$ である。この差を利用することで、温度を下げると母型 (ステンレス) は大きく収縮するのに対し、スキマー (ニッケル) はわずかしこ収縮しないため、張り付いていた箇所に隙間ができると考えられる。

また、より剥離を容易にするため、めっきを行う前に母型に酸処理を施している。この工程により、剥離作業の時間が短縮される。

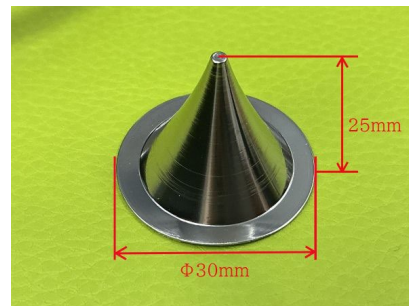


図6 対策部品

5. おわりに

今回、ニッケルめっきに関するノウハウをひと通り学び試作を繰り返したことで、ある程度スキマーの作製方法を確立させることができた。完成したニッケル製スキマーを図6に示す。本来このスキマーの先端は開口を有している必要があるため、最終的には穴を開ける必要がある。しかし、穴加工については現在検討中であるため、本報告では割愛した。

今後は穴加工とフランジ部分の仕上げまで行い、より良いスキマーの製作方法を確立させていきたい。

口頭セッション
第2分野
(装置技術)

Power Apps を活用した放射線測定業務のデジタル化

古宮 綾

高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター

1. はじめに

放射線測定業務では、測定器による線量測定、測定値の記録、データ整理、報告書作成といった一連の作業が発生する。本機構における測定対象設備は大型の加速器であり、電子陽電子入射器における測定点数は 1,000 を超える。従来の紙媒体による記録では、測定結果ごとに記入位置の特定および手書きでの記録が必要であり、放射線測定担当者に大きな負担が生じていた。さらに、測定後には事務所での再入力作業を要し、転記ミスの発生や報告書の作成・情報共有における非効率性が課題であった。また、加速器運転停止後には、現場担当者がメンテナンス作業のため可能な限り早期に加速器トンネルへ入域したいという要請がある。そこで、既存ライセンスの範囲内で利用可能な Microsoft Power Apps を用い、電子陽電子入射器の放射線測定業務を対象として、(1)測定値記録用アプリケーション、(2)線量表示用アプリケーションの 2 種類の業務支援アプリケーションを構築した。本報告では、これらのアプリケーションの導入による現場業務の効率化と安全管理向上の効果について報告する。

2. アプリケーション開発

2.1 開発方針

現場作業の特性および業務フローを踏まえ、以下を重点項目として設計を行った。

- ・スマートフォン利用を想定した画面構成の最適化
- ・文字入力を極力排除した選択式中心の入力方式
- ・入力データのリアルタイム共有と可視化
- ・データ自動集約と報告書作成の自動化

Power Apps は記述コード量が少なく、構造が視覚的に理解しやすい特徴を有する。このため、IT 専門知識を持たない担当者であっても改善・改修作業に参画可能であり、運用が特定メンバーに依存しない体制の構築を目指した。

2.2 システム構成

本システムの構成を図 1 に示す。システムは SharePoint を用いたデータベース部と Power Apps により構築したアプリケーション部から構成されてい

る。

データベース部では、測定器や測定者といった基本情報を管理するリストと、測定データを格納するテーブル (Excel 形式) を SharePoint 上に配置した。測定データはセクタごとに管理され、アプリケーションからの参照および登録が可能な構成とした。

アプリケーション部は、用途に応じて以下の 2 種類で構成されている。

1 つはスマートフォン上で動作する測定値記録用アプリケーションであり、測定条件および測定値の入力を行う。入力されたデータは SharePoint 上のデータベースへ即時に登録される。

もう 1 つは Web ブラウザ上で利用可能な線量表示用アプリケーションであり、登録された測定データを自動的に取得し、一覧表示、マップ表示、および報告書テンプレートへの反映を行う。

なお、測定値記録用アプリケーションでは、測定条件や測定箇所情報を SharePoint の基本情報リストから参照することで、入力作業の簡略化およびデータ整合性の向上を図っている。本構成により、記録、可視化、報告の各工程を単一の Microsoft 365 環境内で完結させることができた。

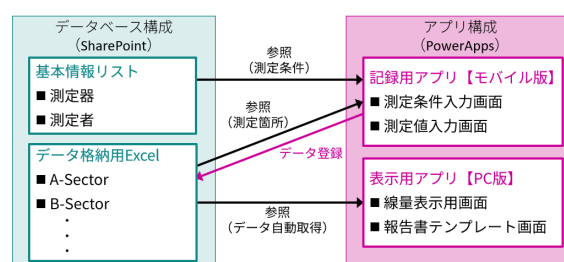


図 1 放射線測定業務支援アプリケーションのシステム構成概要

2.3 構築したアプリケーション

前節で示したシステム構成に基づき、2 種類のアプリケーションを構築した。以下に、それぞれの機能および特徴について述べる。

(1) 測定値記録用アプリケーション

測定値記録用アプリケーションは、スマートフォン上で動作し、電子陽電子入射器における多数の測

定点を効率的に記録することを目的として開発した。現場作業時の操作性を重視し、以下の機能を実装した。

- ・測定条件、線量値などを選択式入力とし、文字入力を最小限に抑制
 - ・入力セルの背景色を電磁石の色に対応させ、物理的配置との対応関係を直感的に把握可能
 - ・測定エリアの記録フォームのみを表示
 - ・入力済みセルを自動的に無効化することで誤入力防止と進捗の可視化を実現
 - ・入力データは SharePoint に即時反映
- なお、加速器トンネル内は Wi-Fi 環境が利用できないため、以下の運用方法で対応することにした。

- (1) Wi-Fi 環境下でアプリケーションを起動し測定条件を端末へ保持
 - (2) 加速器トンネル内で測定値を入力
 - (3) 退出後に Wi-Fi に再接続しデータを送信
- 測定値記録用アプリケーション画面を図 2 に示す。



図 2 測定値記録用アプリケーション画面 (左：測定条件画面、右：線量値入力画面)

(2) 線量表示用アプリケーション

線量表示用アプリケーションは、Web ブラウザ上で利用可能とし、測定結果の迅速な共有および放射線分布に基づく作業時間管理の支援を目的として構築した。本アプリケーションでは、測定値記録用アプリケーションにより登録された測定データを自動的に取得し、以下の機能を有する。

- ・測定データの即時情報共有
- ・放射線量分布の視覚的把握
- ・過去データとの比較
- ・報告書テンプレートへの測定結果の自動反映および出力機能

線量表示用アプリケーション画面を図 3 に示す。

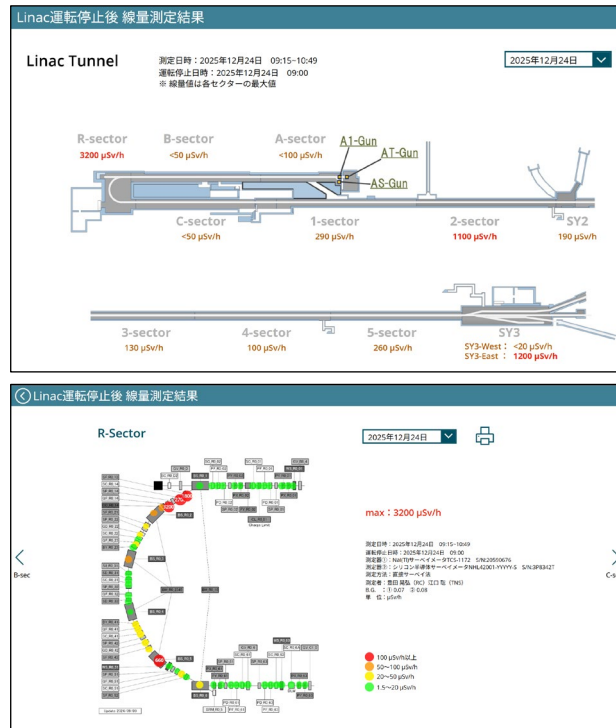


図 3 線量表示用アプリケーション画面 (上段：全体図、下段：詳細画面)

3. 効果と考察

3.1 現場での即時記録による業務効率化

スマートフォンを入力デバイスとして用いることで、従来は紙媒体で行っていた測定値の記録作業を、測定器を保持したまま片手で実施できるようになった。また、選択式入力を中心としたインターフェースを採用したことで、大多数の測定点においてワンタッチ操作で記録が可能となり、測定結果の入力に要する時間が大幅に短縮された。さらに、入力済みセルを自動的に無効化することで、現場での測定進捗の把握が容易となった。これにより、測定後に必要であったデータ整理や転記作業が不要となり、一連の作業負担が大幅に軽減された。こうした入力作業の効率化により、従来は測定点数の多さから記録を省略していた低線量領域についても容易に記録できるようになり、放射線量分布をより詳細に把握することが可能となった。

3.2 データ整合性の向上

手書き記録および転記作業の排除、加えて、選択式ユーザインターフェースおよび入力済みセルの自動無効化機能により、誤記、読み間違い、入力漏れといったヒューマンエラーが大幅に減少した。測定データは現場から直接データベースへ登録される構成としたため、データの整合性および信頼性が向上した。

3.3 報告書作成の迅速化

従来の報告書作成では、紙媒体で記録された測定値を基に、PowerPoint 上の図面へ1点ずつ手作業で色分けおよび転記を行っていた。測定点数が非常に多いこともあり、報告書の作成および関係者への配布までおよそ2週間を要していた。これに対し、本システムでは、測定データの自動集約および報告書テンプレートへの自動反映により、報告書作成作業を即日で完了できるようになった。

3.4 情報共有の円滑化

測定結果は Web ブラウザ上でリアルタイムに閲覧可能であり、他部署のスタッフが使える点も重要な利点である。現場担当者および関係者間における状況把握と情報共有が円滑になった。さらに、線量表示用アプリケーションにより線量分布をマップ形式で即座に共有できるため、現場担当者が放射線量の高い場所を直感的に把握することが可能となった。これにより、加速器停止後の入域判断や作業計画の策定を早期に行うことができ、運用面および安全面の双方において有効性が確認された。従来手法とアプリケーション導入後における報告書作成および情報共有の流れの比較を図4に示す。

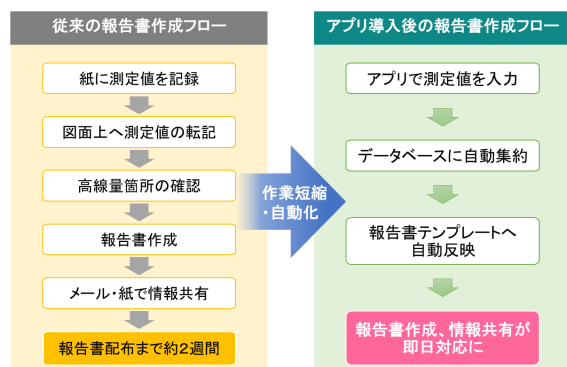


図4 報告書作成および情報共有フローの比較

3.5 過去データの参照

測定データは線量マップとして表示可能であり、過去データを切り替えて表示することが可能である。これにより、加速ビームのロス分布およびその強度が運転期間ごとにどの程度変化しているかを迅速に判断できるようになった。

また、入射器ではビーム輸送の高度化を目的として、一部の電磁石においてパルス制御化などの改修が段階的に進められている。本アプリケーションを用いることで、これらのビームライン変更の前後における線量分布の傾向を視覚的に確認することが容易となった。

3.6 導入・運用コストの抑制と属人化の回避

本システムは、Power Apps および SharePoint を用い、既存の Microsoft 365 環境上に構築した。このため、新たなソフトウェアライセンスの購入や専用サーバの導入を必要とせず、導入および運用に伴う費用負担を抑えた形でシステムを構築・運用することが可能となった。また、ローコード開発基盤を採用したことで、画面構成や処理ロジックの理解および修正が比較的容易となり、専門的なプログラミング知識を有しない担当者でも改善・改修に参画可能であった。これは、長期的な運用において、特定の技術者に依存する属人化を防止する上で、非常に重要な成果といえる。

4. おわりに

本報告では、Microsoft Power Apps を活用し、放射線測定における記録、可視化、報告作業を一体的に支援する業務支援アプリケーションを構築した。本システムの導入により、現場での即時記録の実現、データ整合性の向上、報告書作成時間の大幅短縮、可視化による放射線状況の把握向上、情報共有の円滑化といった多くの効果が得られた。

さらに、Power Apps の特徴であるローコード開発により、運用が特定個人に依存しない体制を構築でき、属人化を回避した形でシステムを継続的に改善できる点も有用であった。以上より、本報告で構築したシステムは放射線測定業務における効率化および安全管理の高度化に有効であり、同種の業務を持つ他施設においても有用な手法となり得ると考えられる。

Copilot を使用した生物実験規則の作成

○千賀 信幸

量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu センター管理部保安全管理課

1. はじめに

3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu（以下「NanoTerasu」という。）は仙台市の東北大学青葉山新キャンパスにある世界最高強度の放射光施設である。2024年5月から稼働しており、コアリッジョンビームライン7本、共用ビームライン3本の計10本（設計本数28ビームライン）を運用している。NanoTerasuは、官民地域パートナーシップに基づき、施設設置者であり国の主体である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（QST）に加え、地域パートナーの代表機関である一般財団法人光科学イノベーションセンター（PhoSIC）と特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律に基づく利用促進業務を行う公益財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI）の参画を得て運営している。利用制度は、成果公開型の利用である共用利用に加え、成果非公開の利用であるコアリッジョン利用も可能であるため、幅広い産業利用が可能である。表1に NanoTerasu の概要を示す。

表1 NanoTerasu の概要

施設名	3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu
施設設置者	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
地域パートナー [代表機関]	一般財団法人光科学イノベーションセンター
登録施設利用促進機関	公益財団法人高輝度光科学研究センター
整備費用	約380億円
電子ビームエネルギー	3GeV
蓄積電流値	400mA（設計値）
水平エミッタンス	1.14nm・rad
線型加速器長	110m
蓄積リング長	349m
ビームラインポート	最大28ポート

NanoTerasu は国内の放射光施設として初めて実験のためにユーザーが立ち入るエリア（実験ホール）

を放射線管理区域から除外することを実現した結果、放射線業務従事者以外の人も利用可能である。

2. ソフトマテリアルを観察するのに適した波長

NanoTerasu は軟 X 線（～2keV）からテnder-X 線（2keV～5keV）領域の X 線を発生させるのに最適化された放射光施設で、主にソフトマテリアルや軽元素の電子状態測定に用いられている。表2に稼働しているビームラインの利用目的の一覧を示す。

表2 ビームライン一覧

共用ビームライン		
BL 名	測定手法	研究テーマ
BL02U	RIXS（共鳴非弾性 X 線散乱）	強相関電子系、磁性励起、超伝導、軌道・スピン励起
BL06U	ナノ ARPES	トポロジカル物質、2次元材料、表面電子状態
BL13U	XAS / XMCD / ナノ吸収分光	元素選択分析、磁性材料、スピントロニクス
コアリッジョンビームライン		
BL07U	XPS / resonant PES / XAS	電子状態解析、化学結合状態
BL08U	operando XAS / XPS	作動中計測（電池・触媒）
BL08W	XRD + XAFS（複合）	結晶構造 × 電子状態
BL09U	operando XAS / 時分割分光	プロセス中の状態変化追跡
BL09W	SAXS/WAXS / 階層構造解析	マルチスケール構造
BL10U	コヒーレント回折 / タイコグラフィ	ナノ構造の実像観察
BL14U	X 線顕微分光（STXM 系）	化学・磁区イメージング

例えば新薬開発を想定した場合、NanoTerasu の高輝度放射光を用いると標的タンパク質の立体構造を

短時間かつ高精度で解析できる。また、豊富な X 線エネルギー領域により結合部位の電子状態変化を詳細に評価でき、新薬の作用の理解と候補化合物の最適化に寄与する。さらに、オペランド測定によって薬が実際に作用する瞬間をリアルタイムで解析でき、副作用やリスク要因の早期把握にも寄与する。このように、NanoTerasu の放射光は研究及び産業応用と幅広く利用することが可能である。

3. 安全管理の難しさ

NanoTerasu では管理運営基本規程に基づき建屋管理は PhoSIC、加速器管理は QST など分担して管理を行っているが、安全に関するルールや施設利用のルールなどの共通事項の決定は、取りまとめ機関である総括事務局が行うことになっている。

共通事項のルール作りは、その組織文化を反映するため、3 機関をまたぐ規則作りは意見の対立が多く難航する場合が多い。各機関の組織文化を理解しながら落としどころを見つけることが、規則作りの最も肝となる。また、安全衛生管理は各機関で実施することになっているため、例えば、安全衛生委員会の審議内容や衛生管理者巡視の内容などはブラックボックス化されており、どのような活動が行われているか分からない。そのような状況の中で重要なことは、お互いの意見を聴くことである。これにより相手の問題意識を共有し、効率的に落としどころを見つけることが出来る。

4. 生物関係の規則が必要な理由

NanoTerasu の放射光はソフトマテリアルの測定に向いている波長領域であるため、新薬開発や遺伝子組み換え植物などの測定に応用可能である。例えば、この新薬開発には、精緻な構造解析や反応過程の観察が必要不可欠であり、これらの試料の扱いには安全性・倫理性の観点から規則に基づく取扱いが求められる。特に、遺伝子組み換え体やレトロウイルス（バクテリオウイルス）を用いた実験は、産業利用と密接な関係を持つことから、物性実験のような非生物実験との両立を図るうえで生物実験に関する安全管理規則の制定が望まれていた。

5. 実験ホールを考慮した生物実験安全管理規則の設計

生物実験を実施するにあたり、関連する法令は大きく分けて以下の 3 つに分類される。

1. 遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律（通称、「カルタヘ

ナ法」）

2. 動物の愛護及び管理に関する法律（通称、「動物愛護法」）
3. 感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律（通称、「感染症法」）

これらの法律を遵守するような規則を作成しなければならないが、NanoTerasu の実験ホールは、その特殊性から法令順守はなかなか難しい。以下に実験ホールの特徴を列記する。

- ・実験ハッチ以外は、実験ホール内に一般的な生物実験を行えるような閉鎖空間はない
- ・実験ホール内は蓋付きの飲料のみ摂取可
- ・放射線発生装置使用施設ではあるが、実験ハッチ以外は非管理区域のため、一般の見学者が立ち入る

上記を踏まえ、施設としての制約及び法規制との整合を図るため、生物関係の規則を以下の方針に沿って作成することとした。

- ・実験動物に対する衛生基準（衛生管理）、施設基準を満たすことが困難であるため、動物実験は禁止
- ・別の施設で加工された状態の“生物試料”の測定は可能
- ・実験ハッチを“通常の生物の実験室（閉鎖空間）”として考え、確実に不活化をすることで P1 実験のみ可能
- ・実験ハッチ内で安全に作業を行うために必要な設備と手順を考慮し BSL1 実験のみ可能
- ・通常は各法令に対して各規則を作るが、重複する箇所が多いことから一つの規則とする

6. Copilot への指示と出力結果

本研究では、生物実験安全管理規則の原案作成に際し、Microsoft Copilot（以下「Copilot」）を文書作成支援ツールとして活用した。生物実験に関する規則類は、法令遵守だけでなく、各機関の組織体制や設備特性に即した構成が求められる。そこで、AI がどの程度まで「形式」と「内容」の双方を整えた規則案を生成できるかを検証し、実務への適用可能性を評価することとした。

Copilot への指示に際しては、まず QST および東北大学で実際に運用されている関連規程を読み込ませ、規程文書に共通する文体・条項構造を把握させた。その上で、表 3 に示すとおり、規則を構成する章立てと各章に登場する役割（生物実験安全責任者、実験責任者、実験者等）を明確に指定し、文書全体の枠組みを提示した。

生成された文書を確認したところ、章構成は指示

通りとなっていた。特に、総則、組織体制、通知・報告など、文書全体を構造づける部分については、事前に与えた枠組みが忠実に反映されていた点特徴的であった。一方で、内容については、用語の定義が簡略化されていり、生物実験安全責任者の職務に実務的作業が含まれるなど、役割整理にばらつきがみられる箇所も確認された。また、参照させた他機関の規則文の影響とみられる記述が一部に含まれており、NanoTerasu の体制と必ずしも一致しない部分もあった。全体的には、“雛形”としては良くできていたが内容は期待以下であったとの印象である。

表3 Copilot へ指示した章立て及び役割分担

章	登場人物
第1章 総則	生物実験安全責任者
第2章 生物実験	→生物実験の実施に関する総括
第3章 組織及び職務	
第4章 通知及び報告	実験責任者
第5章 区域・使用・保管・運搬	→生物実験の実施に関する実務
第6章 教育・健康診断・異常時の措置	実験者（共同実験者） →実験責任者の指示に従い行動する
第7章 記録・罰則	

7. Copilot からの結果を考察

内容が想定より抽象的になった理由として、指示した情報量の不足が挙げられる。特に記録管理に関する項目では、「誰が」「何を」「いつまで」管理するかといった基礎情報を与えないまま生成を行ったため、「実験者は実験結果を保管する。」といった、具体性や実務性を欠く表現が生じた。AI は不明瞭な部分を一般化して補完する傾向があるため、前提条件が曖昧な場合には最も一般的な規程像に収束してしまうものだと解釈される。

さらに、作成前に Copilot へ読み込ませた規程が影響したことで、NanoTerasu とは直接関係のない設備・組織構造（例：動物実験施設、遺伝子組換え実験支援部門等）が条文中に登場した。本来の目的は“章立ての参考”であったにもかかわらず、AI はそこから組織の存在自体を前提として推論し、規程に織り込んでしまったと考えられる。このことは、事前学習データと追加読み込みデータの双方が推論に強く影響する という LLM（Large Language Model：大規模言語モデル）の性質を示唆している。

一方、章立てや条項の並び順については、指示通りの構成が忠実に反映されていた。これは、LLM が構造化された指示（章立て）を特に高い精度で反映できる特性によるものだと考えられる。すなわち、形式的構造の生成は強いが、内容の専門性は入力具体度（入力情報の量）に依存するという傾向が今回の結果から確認できた。

8. Copilot による文書及び適法性の確認

Copilot により生成された規則案は、“雛形”の段階で既に体裁が整っていたため、以降の作業は主として内容の修正・補強を行うだけであった。従来、人手で一から作成する場合は、章構成の検討や条文間の整合性確認に多大な時間を要するが、AI が初期案を即時生成することで、文書作成工程の大幅な効率化につながることが確認できた。この点は、規程類のように構造が明確で、かつ形式的要件が多い文書において特に有効である。

人手による内容修正は、組織固有の体制や登場人物を踏まえた条文調整など、AI では判断が難しい領域を中心に編集を行った。修正後の素案を一通り完成させた後、Copilot を用いて適法性の確認、誤字脱字の検出、条文の矛盾点の抽出を実施した。この工程は、従来であれば複数名による校閲が必要であったが、AI によって迅速かつ一定の基準でチェックが行われるため、作業負荷の軽減と他条項との整合性向上が同時に達成された。特に適法性の確認では、生物実験に関係する複数の法令（例：感染症法、カルタヘナ法等）について、関連条文や指針等の公開資料を引用しながら、「本規則案の記述がどの法的要件に対応しているか？」をエビデンス付きで提示する機能が有効であった。この手法により、単なる文書校閲を超えて、適法令性の検証が可能となり、規則としての信頼性を高めることができた。さらに、条文内の矛盾点や重複表現についても、自動的に指摘され、確認した上で修正を行った。加えて、修正箇所を明示する“赤入れ版”を出力することで効率的に編集作業を進めることが出来た。

9. Copilot の適切な使用方法

現行の LLM は、基本的に文字情報をもとに推論を行う構造であり、人間同士のよう「行間」や「阿吽の呼吸」に相当する暗黙の了解や非言語的コミュニケーションを前提にできない。このため、入力情報が不足している場合には、AI が一般的な知識や典型事例を用いて内容を補完し、結果として一般化された条文や組織構造が生成される傾向がある。従っ

て、実務に適合した文書を作成するには、章ごとの目的、役割分担、法令上の要件など、必要な前提情報を丁寧に与えることが前提条件となる。

一方で、Copilotは構造化された情報の整理や文書の形式整備が非常に得意であり、特に 雛形作成・条文の整理・校閲作業の分野では、人手では時間を要する作業を短時間で高精度に実行できる点が大きな利点である。特に、適法性チェックや矛盾点指摘、誤字脱字の検出、条文間の整合性確認といった「論理的一貫性を検証する工程」においては、人手による読み合わせにも匹敵する精度を示した。

以上を踏まえ、Copilotを安全管理文書の作成に用いる際には、

- ① 人間による前提条件の明確化
- ② AIによる構造生成
- ③ 人間による内容調整
- ④ AIによる整合性チェック

というサイクルが最適と考えられる。特に校閲機能として利用する場合、誤記訂正・表現統一・矛盾個所の検出など、人間による校正作業の補助ツールとして極めて有効である。

10.まとめ

従来の規則作成業務は、関連法令の読み込み、条文要件の抽出、組織体制との整合性検証、章構造の設計、条文の起草、さらに複数名による校閲を経て、ようやく完成に至るといって、多大な時間と労力を要するプロセスであった。特に、条文構造の整理や用語統一、矛盾点の解消といった作業は、経験値に依存し、属人的になりやすい点が課題であった。

本研究で実施したように、Copilotを文書作成プロセスに組み込むことで、初期案の生成、形式面の整備、適法性の一次確認、条文間の整合性チェックといった工程を短時間で実行でき、作成者はより重要な「内容の精緻化」「組織固有の要件を反映」といった本質的な作業に集中することが可能となった。その結果、大幅な時間短縮と文書品質向上の両立が実現した。

以上の検討から、Copilotは安全管理規則のように形式要件と法令整合性が求められる文書に対しても、適切に使えば実務レベルで十分に適用可能なツールであることが明らかとなった。

市販の空気入れを用いた広報用真空科学おもちゃの製作

○小笠原舜斗^{A)}、西脇 みちる^{A)}、平木 雅彦^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設、^{B)}高エネルギー加速器研究施設 機械工学センター

1.はじめに

KEK では、広報・アウトリーチ活動の一環として、イベント「ニコニコ超会議」^[1]へ 2023 年から 3 年連続でブース出展^[2]している。2025 年は、「真空チャレンジ」と題したオリジナルの科学おもちゃを出展した。これは、加速器の要素の一つである「真空」を体験者に体感してもらうことを趣旨とした企画で、市販の空気入れを改造した手動真空ポンプを使って体験者に真空容器を排気してもらうというものである。ゲーム性を高めるため、体験者が真空容器の排気を始めると同時に油回転ポンプで別の真空容器を排気し、体験者と油回転ポンプで制限時間内の到達圧力を競う形式とした。このとき、制限時間の設定や油回転ポンプ側へのハンディキャップの付与で難易度を調整することで、体験型のゲームとして成立するように工夫した。

2.全体構成および体験の流れ

図 1 に、今回製作した装置全体の概要を示す。

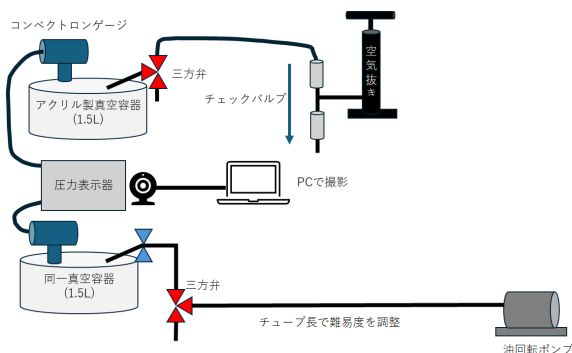


図 1 「真空チャレンジ」システム概要

体験装置は、手動真空ポンプ、2つの真空計付き真空容器、2ch 真空計コントローラ、油回転ポンプ (ULVAC G-25SA、実効排気速度 20L/min)、web カメラと PC で構成される。体験者は手動ポンプを使い、制限時間 10 秒間で真空容器のうち一つを排気する。開始の合図と同時に、油回転ポンプでもう一つの真空容器も排気する。10 秒経過後、2つの真空容器の圧力を比較し、体験者側の真空度が油回転ポンプよりも高ければ(到達圧力が低ければ)「勝利」として、到達圧力を記録した認定証を贈る。

3.手動真空ポンプの製作

改造のベースとした空気入れ(Captain Stag Y-7881)は、シリンダの直径が約 30 mm、長さが約 300 mm で、容積はおよそ 200 ml である。シリンダ内のピストンに収まっている O リングは、わずかに上下に動くことができるように設計されている。ピストンの動きに合わせて O リングが上下に動くことで、ピストンに設けられたスリットが閉鎖または開放され、ピストンの気密が一方のみ保たれる仕組みであった。また、シリンダの底にもボールを用いた逆止弁構造が設けられていた。

改造では、まず後述のようにピストン形状を変更し、吸気・排気のいずれの場合でも常に気密が保たれるようにした。次に本体から伸びるチューブ(直径 8 mm)を切断し、適合するワンタッチ式のティー分岐とチェックバルブ (CVPU8-8、最低作動圧 1×10^4 Pa) 2 つを取り付けた。チェックバルブにより、真空容器から吸気して大気へ排気する一方の排気経路を構成することで手動真空ポンプとした。

ピストンは、スリットが無く O リングも固定されるような形状のものを 3D プリンタで製作し、オリジナルのピストンと交換した。図 2 に試作した改造ピストンを示す。ピストンは光造形式 3D プリンタ製、FFF 式 3D プリンタ製(PLA 樹脂)、旋盤加工(アルミ合金)の 3 種類製作した。このうち光造形で製作したものは、ピストンをロッドに固定するためのネジ穴周辺の強度が弱く、数回の試行で破損してしまった。他の二つは強度に問題はなかったものの、重量が異なるために実際に装着したときのハンドルの手応えが大きく異なった。最終的には FFF 式 3D プリンタ製のピストンを採用している。

シリンダ底部と空気入れの土台は接着されているため、当初は底部の逆止弁を非破壊で分解することは困難と思われた。調査したところ、逆止弁を構成する部品にねじが切られており、シリンダ底部のねじ山に勘合して固定される構造であることが分かった。そこで、シリンダよりも長いアルミ丸棒の先端をマイナスドライバーのような形状に加工して即席のドライバーとし、ねじを回して取り外すことで、シリンダを破壊することなく逆止弁を撤去できた。



図2 試作したピストン(左)と元のピストン(右)

大きなリークが無い場合、最終的な到達可能圧力はチェックバルブの最低作動圧力で制限されることとなる。真空容器とシリンダとの圧力差がチェックバルブの最低作動圧力を下回ると、ピストンを引き上げてもチェックバルブが開かず吸気できなくなるためである。今回の場合はリークを最小限に抑えたとしても、 10^4 Paがこの真空ポンプの到達圧力の限界となる。

なお、ピストンは常に大気から押され、その力は真空容器を減圧するたびに増大していくため、体験者は排気すればするほどハンドルを重く感じるようになる。真空容器圧力が 1×10^4 Pa のとき、ピストンを引き上げるために必要な力は約 63 N である。

図3に、完成した手動真空ポンプの写真を示す。

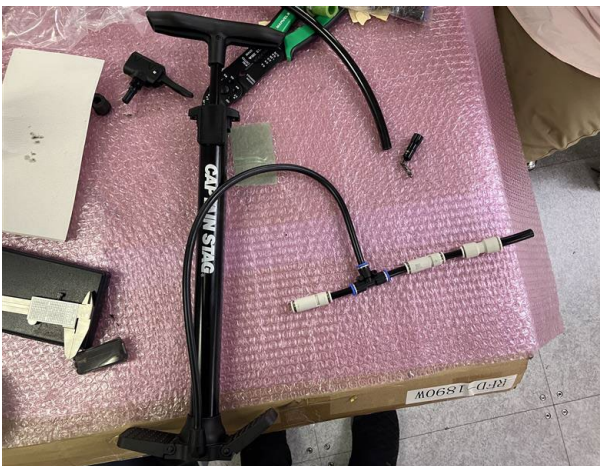


図3 製作した手動真空ポンプ

4. 真空容器の製作

排気する真空容器は、市販の科学実験用アクリル容器(アズワン VCP-15L、容量 1.5 L)をベースに製作した。図4に、製作した真空容器の写真を示す。

当該製品の蓋には、ブルドン管真空計と専用のハ

ンドポンプが付属している。ブルドン管真空計はコンパクトゲージ(MKS Granville Phillips 275)に置き換えた。ゲージは KF25 フランジで固定されるため、これと適合するアタッチメントを旋盤加工で内製し、真空容器へ取り付けした。コンパクトゲージの測定結果は、対応する 2ch コントローラ(Granville-Phillips 358 Micro-Ion Vacuum Gauge Controller)で表示する。

ハンドポンプの取付口はアクリルにねじが切られているので、これを利用してワンタッチ継手のアタッチメントを取り付けた。このワンタッチ継手の先に、エアチューブを介して真空ポンプを接続することになる。真空容器内には適当な個包装の菓子や風船を入れ、容器内の減圧の様子が視覚的にわかるようにした。これらの改造を施した容器を図4に示す。



図4 改造した真空容器とコントローラ

真空容器は2セット製作し、それぞれ手動真空ポンプまたは油回転ポンプにチューブで接続する。図1に示すように、それぞれのチューブの途中には手動の三方弁を設け、大気を導入できるようにしておく。油回転ポンプに繋ぐチューブには、三方弁の他に通常の手動弁も挿入する。

5. 難易度調整

体験時間がわずか 10 秒なので、時間内の到達圧力はポンプと真空容器の間のチューブ長に影響を受ける。これを利用して、チューブ長の設定を通じて 10 秒間での到達圧力(ひいては手動ポンプで油回転ポンプに勝つ難易度)を制御することとした。難易度設計にあたっては、筆者(運動習慣のない 20 代後半男性)を平均的な体験者像に近いものと想定し、「基本的にギリギリ勝てないが、5~10 回に 1 回は勝てる」程度の難易度を目標とした。なお、体験時間の 10 秒は体力的に無理のない時間として設定した。

手動ポンプ側のチューブ長は、実験により 4 m に決定した。これは、前述の通り手動真空ポンプの到達可能圧力が原理的に 1×10^4 Pa 程度であることから、

到達圧力がそれより少し高い値(2.3×10^4 Pa 前後)になるように調整した結果である。ポンプの取り回しの観点でも、十分な長さを確保することができる。

次に油回転ポンプ側のチューブ長を決定するため、同じくチューブ長ごとの 10 秒間での到達圧力を実験した。図 5 に実験結果を示す。図 5 上段(赤)のプロットが実際に使用した小型ポンプ、下段(青)のプロットは予備として用意した別のポンプ(ULVAC GVD-050A)の結果である。この結果より、油回転ポンプの到達圧力が手動ポンプの到達圧力を少し下回る(2.1×10^4 Pa 前後)長さとして、小型ポンプに対しては 10m、予備ポンプに対しては 15m の長さのチューブを採用することとした。

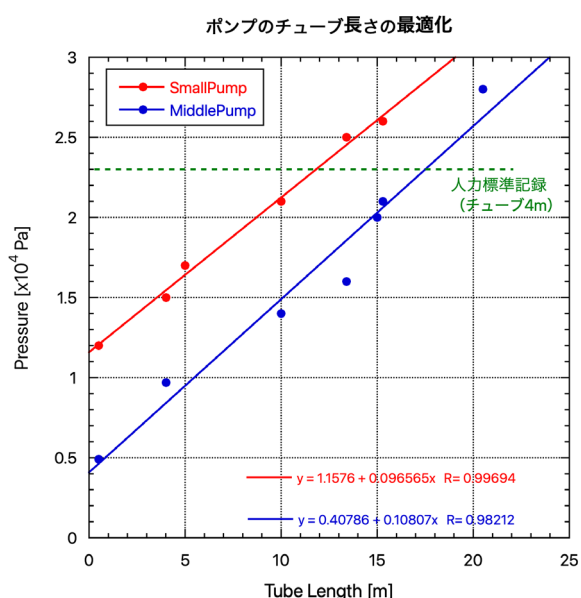


図 5 チューブ長と 10 秒間の到達圧力

6. ソフトウェアおよび勝敗判定

本企画の進行を補助するため、図 6 に示すようなソフトウェアを作成した。本ソフトウェアは以下の機能を有する。

1. 3 カウントの後、スタートの合図を合成音声で行う。
2. スタート合図の後、10 秒のカウントダウンを合成音声で行う。
3. 10 秒経過後、終了の合図とともに web カメラの画像を 0.1 秒間隔で 10 枚撮影する。
4. 撮影した任意の画像を表示する
5. 勝者数・挑戦者数を記録し、勝率を計算する



図 6 開発したソフトウェアの画面

コンパクトロンゲージでは、真空容器内の空気が静止した状態でなければ正確な圧力が表示されない。そのため、終了の合図でポンプを停止したとしても、正確な値が表示されるまで少し待たねばならない。そこで、PC に接続した web カメラでコントローラの圧力表示を常に撮影しておき、終了の合図と同時に圧力表示器の写真を複数撮影し、撮影された写真の中で最も良い値を記録として採用する運用とした。

出展するイベントの性格を考慮し、GUI デザインはニコニコ動画のゲーム実況分野で馴染みのある画面配置を模したものとした。また、合成音声もニコニコ動画で馴染みのあるもの(所謂ゆっくりボイス)を利用した。ソフトウェア自体の開発は Python3.12 で、GUI の構築は PyQt6 で行っている。

7. 当日の運用方法

当日の運営はスタッフ 2 名(説明係、バルブ係)で行うこととした。以下に体験の流れを説明する。

1. 説明係が体験者へ注意事項を説明する。
このとき、「終了の合図で動作を止めること」をしっかりと説明する。
2. バルブ係が両方の真空容器が大気圧であること、両方の三方弁が大気開放されていないこと、油回転ポンプ側のバルブが閉鎖状態であることを確認する。
3. バルブ係が油回転ポンプのバルブに手を添え、説明係が PC のスタートボタンを押す。
4. 自動音声で 3 カウントの後、ゴングの効果音が流れる。ゴングと同時にバルブ係が油回転ポンプ側のバルブを開け、排気経路を開通させて排気を開始する。体験者も手動ポンプでの排気を開始する。
5. 10 秒の後、「終了」の合図が自動音声で流れると同時に、バルブ係がバルブを閉める。

6. 撮影された全ての写真を確認して、手動ポンプ・油回転ポンプそれぞれの最も小さい値を記録として採用する。
7. 認定証に到達圧力を記載して、体験者へ贈る。手動ポンプの圧力が油回転ポンプを下回っていれば、認定証にスタンプを押印する。バルブ係は記録確認後、両方の容器を大気開放してソフトウェアをリセットする。

8. 結果と反省

本企画はニコニコ超会議 2025 の会期二日間(15 時間)にわたって、KEK ブースにて実施された。二日間の体験者は合計 182 名、そのうち「勝者」は 38 名で、勝率は 20.1%であった。以下に、当日の主なトラブルや反省点を述べる。

当日は、手動真空ポンプの踏み板部分が次々に壊れてしまった。踏み板はゴム製のかんぬき状の構造でシリンダに固定されていたが、断続的に大きな力が繰り返しかかったことでゴム部分が断裂してしまった。予備を含め 4 台の手動ポンプを用意していたが、二日間で全て壊れる結果となった。この部分はオリジナル製品から無改造だったが、予め補強しておくべきであった。

二日目の途中で油回転ポンプも故障してしまった。布をかけた荷物に近接してポンプを置いていたため、ポンプが布を巻き込んでしまったことが原因である。予備の中型ポンプは持ち込んでいたものの、会期が残り数時間であること、予備ポンプが倉庫の奥にあり取り出しが困難だったことから、予備ポンプは使用しなかった。ポンプ故障後はその日の体験者の最高記録を掲示し、体験者単独でこの記録に挑む方式に変更した。

また、会期後半になるほど平均的な到達圧力が意図せず高くなっていた。大気開放と減圧を繰り返した結果、真空計の校正がずれたためと思われる。コンベクトロンゲージの測定原理上、周辺温度の変化も影響した可能性がある。いずれにせよ、会期中は校正を全く行っていなかったが、定期的な再校正が必要であった。

当日は油回転ポンプを常時稼働させ、バルブ係の操作で排気を制御する運用としていた。そのため、バルブ係が操作タイミングをわずかにずらす事で、油回転ポンプ側の記録を $\pm 0.1 \times 10^4$ Pa 程度の範囲で操作することが可能であった。当日この点が問題になることはなく、結果的に盛り上がりにも貢献できたものの公平性には欠けた。

本企画の体験者からは、「結局この数字(圧力)に何

の意味があるのか、すごいのかどうか分からない」という声があった。これに対しては標高と圧力の関係を示した図を用意し、「あなたは 10 秒間でエベレストに匹敵する圧力に到達したんですよ」等と説明し、更に加速器における真空度(10^{-8} Pa)が桁違いであることを説明した。

イベントの性質上、個性豊かなコスプレをした体験者も多く見受けられた。これらの体験者にとっては、適度に体を張った企画であることでユニークな写真を撮影して楽しんでいただくこともできたと考えている。

出展スタッフに向けては、4 ページにわたるスタッフマニュアルを作成したが、これはほとんど活用されなかった。代わりに養生テープにバルブの操作順を簡単に書いて貼り出したところ、こちらは分かりやすいと好評であった。

9. まとめ

ニコニコ超会議 2025 において、「真空チャレンジ」と題した科学おもちゃを製作・出展した。二日間で 182 名に体験していただき、好評をいただいた。ゲーム性と難易度設定を追求したことで、エンターテイメントイベントであるニコニコ超会議に馴染んだ形で広報活動に貢献できた。本企画で製作したシステムは、他のイベントでも流用可能なので、今後も活用していきたいと考えている。

謝辞

本企画の実施に当たって、KEK 物質構造科学研究所 大島寛子氏には、本企画のイメージキャラクター「バッキー」のデザインをはじめ、掲示物製作等で多大なご尽力を賜りました。KEK 機械工学センターの皆様には、部品製作やテストプレイで多大な貢献や助言を頂きました。他にも KEK 広報室 青木優美氏、物質構造科学研究所 成田千春氏をはじめ、たくさんの皆様からテストプレイや助言でご協力を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] <https://chokaigi.jp/2025/>.
- [2] <https://www2.kek.jp/outreach/chokaigi/2025/>

光源加速器インターロックシステム更新作業時のトラブルと その対応について

○濁川 和幸、長橋 進也、團 優菜

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

KEKの光源加速器では2021年度（R3年度）から老朽化したインターロックの更新作業を開始し、2024年（R6年）秋の運転から新インターロックシステムで加速器運転を開始した。

この更新作業は全てが順調に進んだわけではなく、幾つかのトラブルが発生し、その都度対応しながら進めていった。

本報告では、はじめに新インターロックシステムについて簡単に説明したのち、その更新作業中にどのようなトラブルが起こりどのような対応を行ったかについて報告をする。

2. 新インターロックシステムについて

2-1. 更新作業の基本方針

光源加速器のインターロックシステムは設置から40年以上が経過し、老朽化が問題になっていた。そこで、インターロックシステムを全面的に更新することとし、各種配線についても出来る限り新たに配線し直すこととした。また、更なる安全を考慮し、退避確認などの新たな仕組みも組み込むこととした。

ただし、インターロックシステムの基本ロジックに関する部分は変更しないこととし、インターロックシステムの更新で原子力規制委員会への変更申請などをする必要の無いように進めた。

2-2. 新インターロックシステム

新インターロックシステムについての詳細は第22回日本加速器学会の報告書^[1]やR3年度核融合科学研究所技術研究会の報告書^[2]に記載しているが、最終的なイメージは図1のようになっている。

配線には産業用Ethernetを使用したRemote IOを採用し^[3]、省配線に考慮した。また、加速器制御システムとも必要な情報をやり取りしているが、情報表示やPLC（Programable Logic Controller）のログ収集にSCADAを使用するなど、新システムだけで完結するようにシステム構築されている。

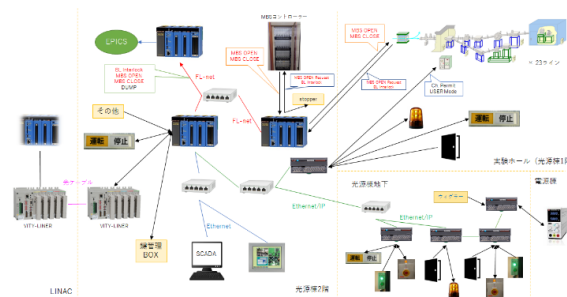


図1 新インターロックシステムのイメージ

3. 更新作業中のトラブルとその対応

新インターロックシステム更新時のトラブルとその対応について6つ紹介する。

3-1. 作業期間の遅延

当初、新インターロックシステムの更新作業は、2021年度当初から開始し2年間の歳月をかけて行うという余裕を持った計画を立てていた。さらに旧システムとある程度の期間は平行運用をすることで動作確認などをする予定であった。

しかしながら、作業開始直後から新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大に伴う部材調達の遅れなどから各調達機器の長納期化などが発生し、予定通りに進まないことが多く発生した。

これには画期的な対応策がある訳ではなかったが、工程の順番などはその都度臨機応変に対応し、出来ることから行うことで、作業期間の遅延が少なくなるように務めた。

それでも、結果として新インターロックシステムの本格運用は2024年10月からの運転となってしまい、当初予定よりほぼ1年遅れでの運用開始となった。

3-2. カメラの故障

新インターロックシステムの一部として、ネットワーク対応のカメラ(図2)を光源加速器の加速器室内に14台設置した。カメラの画像は、図3のように専用ソフトウェアを使用して確認が出来るようになっている。

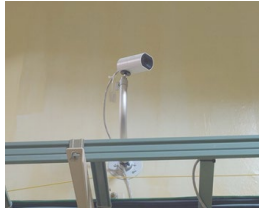


図 2 加速器室内に設置したカメラ

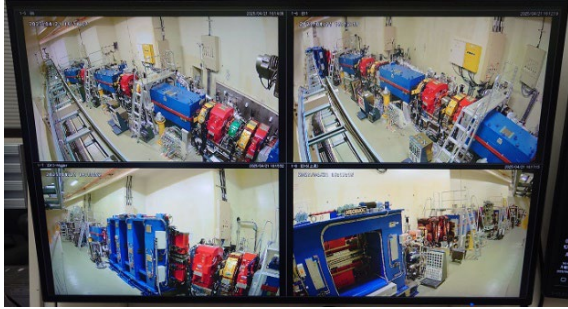


図 3 カメラ画像の表示

カメラは画角を考慮して、できる限り死角のないようにまんべんなく設置したが、放射線量が高い場所に設置することになってしまったカメラ 1 台が 1 年経たずに故障してしまった。

この故障は放射線量を考慮せずに設置したためであることが明らかであった。同じ場所に予備機を設置してもすぐに故障すると思われるため、同じ光源加速器の塩澤さんに協力していただき、ラジオクロミックフィルムを使用した放射線量の測定⁴⁾を行い、画角と放射線量の両方を考慮した場所にカメラを移設した。これにより、移設から 2 年以上経過した現在も故障することなく動作している。

3-3. 回転灯の故障

加速器室内には安全を確保するための非常停止ボタンが設置されている。この非常停止ボタンについても新しいものを作成し変更した。

新しい非常停止ボタンは図 4 のようになっており、加速器の運転開始に合わせて上部に設置した小型回転灯が点灯する仕組みになっている。



図 4 非常停止ボタンと回転灯

非常停止ボタンも加速器室内に均等に配置されているが、3-2 で述べたカメラ同様に、一部放射線量が高い場所に設置することになった非常停止ボタンの回転灯が 1 年経たずに点灯しなくなってしまった。この回転灯は LED タイプのものであったが、すでに cERL (compact Energy Recovery Linac) の非常停止ボタンでも使用したものであり⁵⁾、cERL では 10 年以上が経過した今でも故障なく動作しているものであるため、このように短い期間で点灯しなくなるとは思っていなかった。

カメラの場合と同様にラジオクロミックフィルムを使用して放射線量の少ないところに移設する対応で解決策とすることも出来たが、非常停止ボタンは旧システムで設置していたものと同様場所に配置したいという要望もあり、カメラの時とは違い非常停止ボタンの移設を行うのではなく、LED タイプの回転灯を違うもので代用することにした。

非常停止ボタンの作成と設置をしていただいた業者さんとも対応策を考え、壊れてしまった LED タイプの回転灯の中身をフィラメント電球に変更して点灯させるように改造することとした。LED の回転灯が外部から供給される 24V で動作していたこともあり、フィラメント電球には図 5 のように、トラックのウィンカー電球を入れて点灯するように改造を行った。



図 5 回転灯改造後のランプ部

改造したものは 24 時間連続点灯していることもあり、1 年程度で電球切れになってしまうこともある。しかしトラックで使用されているものであるため、安価ですぐに入手することが可能であり、また製品そのものがすぐに無くなることもないと考えられるので、良い改造案が見つかったと思っている。

放射線量の高い場所以外にある回転灯については、現在までに故障したものは無い。

3-4. ログの収集と表示

2-2 でも述べた通り、PLC のログの収集とその表示は、使用している SCADA ソフトに標準で搭載さ

れているログ機能によって行っていた。計画段階から、使用した SCADA ソフトのログ機能は SCADA ソフトを動かしている PC の時間でログの収集が行われることが分かっていたが、これについては PC とインターロックシステムの中核となる PLC の時間を同期させれば良いだろうと考えシステムを構築した。

しかし実際に使用していると、このログ機能ではタイムスタンプが秒単位でしか残らないため、同時多発的にアラートの発報があった場合などに、どれが最初に起こった現象かがわかり難いということなどに直面し、ログ収集について見直しを行う必要が出てきた。

この対策として、自身でのソフトウェア作り込みで PLC のログ収集と表示を行うか、比較的簡単に PLC のログ収集が出来て表示機能も行える製品を導入できないかの調査を行った。調査中に cERL のインターロックシステムで使用実績のある監視・制御システムである「EverGreenVision」が⁶⁾、ログ収集・表示機能のみに限定して使用すること可能であることが判明し、さらには今回使用した SCADA ソフトとの共存も可能であることがわかったため、「EverGreenVision」のログ収集・表示機能を新インターロックシステムでも採用することとした。図 6 が新しく導入したログ表示画面である。

名称	種別	発生日時	検知日時	確認
1	Event	2026/02/18 17:00:01		
2	Event	2026/02/18 17:00:01		
3	Event	2026/02/18 18:58:48		
4	Event	2026/02/18 18:58:45		
5	Event	2026/02/18 18:30:01		
6	Event	2026/02/18 15:48:37		
7	Event	2026/02/18 15:01:35		
8	Event	2026/02/18 15:01:35		
9	Event	2026/02/18 14:56:02		
10	Event	2026/02/18 14:56:02		
11	Event	2026/02/18 14:56:02		
12	Event	2026/02/18 14:55:16		
13	Event	2026/02/18 14:55:16		
14	Event	2026/02/18 14:44:43		
15	Event	2026/02/18 14:44:43		
16	Event	2026/02/18 14:44:43		
17	Event	2026/02/18 14:08:03		
18	Event	2026/02/18 14:08:03		
19	Event	2026/02/18 14:07:58		
20	Event	2026/02/18 13:52:04		

図 6 ログ表示画面

新しいログ収集・表示機能は PLC の時間でタイムスタンプが押され、その時間も ms 単位まで取得することが可能なため、アラート発報時のログも比較的容易に確認できるようになった。

3-5. その他

新インターロックシステムでは多くのリミットスイッチを使用しているが、屋外で使用していたリミ

ットスイッチの一つが設置から 1 年経過しないで接点不良が起きてしまった。

屋外に設置可能な防水型のリミットスイッチを使用していたが、更なる対策として、同型の「耐候型」となっているリミットスイッチに交換した。

配線についても忘れや配線間違えなどが発生してしまった。配線間違えについては、配線後に個別に確認も行っていたが、更新作業終了後の全体動作確認中に判明したものが数点あった。

こちらについては、このようなことがある前提で動作確認を行っていたこともあり、動作確認を行いながら配線のやり直しや新規配線するなどの作業を行いながら、動作確認を進めていった。

4. 現在進行中の作業

本来は新インターロックシステムの更新作業の進行と同時にリファレンスマニュアルなどの整備を行っていかなくてはいけなかったのだが、この整備が後回しになってしまい、運用開始当初には簡単なバージョンしか用意できなかった。常駐していただいている運転員さんには口頭での説明も行ったが、やはりリファレンスマニュアルなど文章作成の重要性を軽視しては行けないと反省している。

現在は、2025 年 4 月に新しく配属された技術職員が中心となって、わかり難い部分の書き換えを行うなどリファレンスマニュアルを日々更新している。さらにリファレンスマニュアルだけでなく、各種操作の手順書を用意するなど、加速器運転に必要なマニュアル類の整備も進んでいる。

これらマニュアル類は図 7 のように SharePoint のページにまとめて関係者が履歴なども確認可能なようになっている。

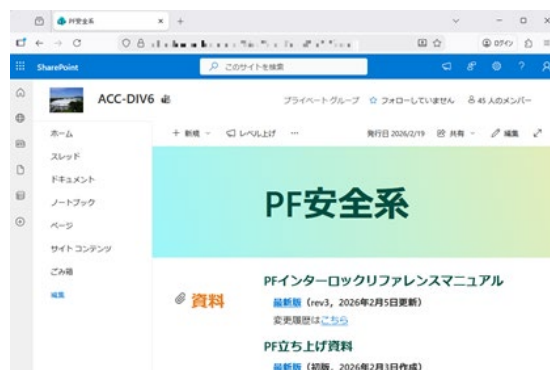


図 7 SharePoint のページ

さらには、AI や機械学習を使用する可能性も探っている。まずは生成 AI によるラダープログラム作成の可能性を探ることを開始した。

機械学習についても、何らかの問題が起こる前にアラートを出したりすることが出来ないかなど、その可能性を探ることから開始している。

5. 教訓として

今回の更新作業は小人数で行った作業でもあったとは言え、結果として十分な検討が出来ていなかった部分にトラブルが出てしまったものと思っている。当初から更新作業に必要な期間を少し長めに設定するなどして、細かい部分まで注意深く検討を重ねれば、新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大に伴う作業期間の延長は別として、最初から避けられたトラブルが多かったのではないかと思っている。

自分自身の今後の作業の教訓とするのは勿論こと、この報告書を読んでいただいた方の作業を行う前の参考になれば幸いである。

6. 謝辞

ラジオクロミックフィルムを使用した放射線量の測定など、トラブルの対応策を考えるために、光源加速器関係者や常駐して運転業務を行っていただいている三菱電機サービスの皆さんなど、多くの方の協力やアドバイスをいただいた。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 濁川和幸、他、KEK PF の新インターロックシステム、第 22 回日本加速器学会年会報告書、(2025).
- [2] 濁川和幸、他、光源加速器インターロックシステム更新計画、R3 年度核融合科学研究所技術研究会報告書、(2022).
- [3] 石井晴乃、他、放射光源加速器インターロックシステム更新に伴うフィールドバスの検討、R3 年度核融合科学研究所技術研究会報告書、(2022).
- [4] 塩澤真未、他、ガフクロミックフィルムによるビームロス評価、R3 年度核融合科学研究所技術研究会報告書、(2022).
- [5] 濁川和幸、他、cERL 安全管理システム、H24 年度愛媛大学総合技術研究会報告書、(2013).
- [6] 濁川和幸、他、cERL 安全管理システム-その 2、H25 年度核融合科学研究所技術研究会報告書、(2014).

熱負荷変動を最小化する機能を備えた熱応答試験装置の製作

○小助川 洋幸^{A)}

^{A)}秋田大学大学院国際資源学研究科

1. はじめに

配属先の研究室では、石油・天然ガス・地熱などの地下資源に関する研究を行っており、この中で筆者は主に地中熱利用関連の研究支援業務に携わっている。本報告では、業務で製作した現場試験装置について紹介する。

2. 地中熱とは

地中熱は、季節による温度変化が少ない地中の熱特性を示すものであり、この熱を利用することを地中熱利用という。地中の温度は、秋田市において深度 50m で約 15°C、深度 100m で約 17°C で年中一定である。夏は気温より冷たく、冬は気温より暖かいため、この気温との温度差が地中熱を利用する上でのメリットである。

3. 地中熱ヒートポンプシステム

地中の温度を直接使う場合、温度調整ができないため汎用性に乏しい。そこで、地中の熱をヒートポンプの熱源として利用する「地中熱ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump: GSHP) システム」を構築し、空調や給湯、融雪などを行うケースが多い。GSHP システムは、土壤に 100m 程度の井戸を掘削して熱交換チューブを埋設した地中熱交換器を設置し、チューブ内に水などの流体を循環して土壤と熱交換する (図 1)。原理的には一般的なエアコンと同様であるが、例えば夏に冷房する場合、エアコンは 30°C 程度の熱い空気に熱を捨てるのに対し、GSHP システムは 15°C 程度の土壤に熱を捨てるため、消費エネルギーを削減できる。特に夏冬のピーク時における省エネルギー効果が高いのが GSHP システムの大きな特徴である。

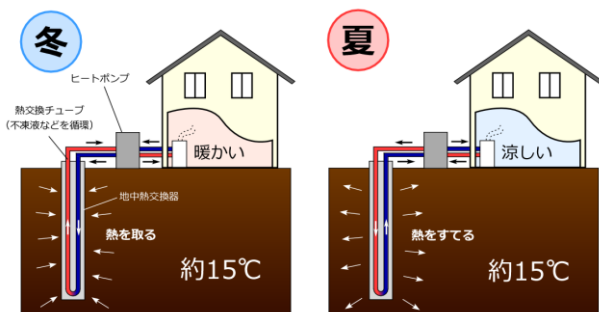


図 1 GSHP システムの概念図

4. 土壤熱伝導率の推定

前述の通り、GSHP システムは土壤の熱を熱源にするため、土壤の熱伝導率がシステムの効率を大きく左右する。この土壤熱伝導率を推定する手法として、熱応答試験 (Thermal Response Test: TRT) がある。図 2 に TRT および装置の概念図を示す。TRT は設置された地中熱交換器にヒーターなどで水を加温しながら循環し、その温度上昇傾向から土壤熱伝導率を推定するものである。TRT を行うための装置は、主にヒーター、循環ポンプ、流量計、温度センサーなどで構成されるが、基本的に装置としては市販されておらず、自前で製作するケースが多いため、配属先研究室でも製作することとなった。

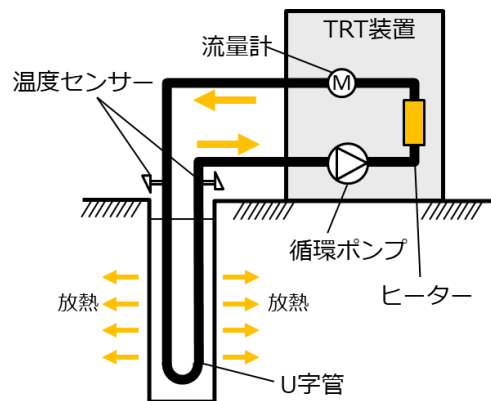


図 2 TRT および装置の概念図

5. TRT 装置の製作

TRT は、土壤に一定の熱負荷を 48 時間以上与えることが規定されており、また装置に使用する機器にも一定の能力や精度が求められる^[1]。装置の製作にあたり、他大学や企業が製作した装置や TRT 関連の文献を参考にしたが、TRT によって得られた循環水の温度変化に乱れがあるケースが散見された。TRT の解析では、地中熱交換器入口出口の平均水温を対数時間でプロットし、グラフの傾きから土壤熱伝導率を推定するのが一般的であるが、温度変化が不安定になると解析結果の精度に影響する (図 4 参照)。この要因として、電源電圧の変動、循環流量の乱れ、装置周辺の気温変化などが挙げられることから、これらの影響を最小化する熱負荷制御機能を備えた TRT 装置の製作に取り組んだ。

製作した TRT 装置を図 3 に示す。装置全体の制御には PLC (Programmable Logic Controller) を用いた。地中熱交換器入口出口水温と循環流量を取り込んで PLC 内で熱負荷を計算し、設定熱負荷を維持するようにヒーターの出力を調整する。循環流量は PLC からの制御信号をインバータに入力してポンプを稼働することにより設定流量を維持する。外気温変動の影響については制御による対応が難しいため、装置内外の配管に十分な断熱処理を施した。また、装置の稼働状況を常に監視し、漏水等による水涸れなどの異常が発生した場合に自動的に装置を停止する安全機能も備えている。



図 3 製作した TRT 装置 (1 号機)

装置完成後、秋田大学構内の試験井において、外乱として意図的に電源電圧を変動させた TRT を実施し、熱負荷制御の有無による解析結果を比較した (図 4)。制御なしの場合は電源電圧の変動により温度変化に乱れが生じ、グラフの傾きが不明確になったことによって、外乱がない場合の解析結果に対して 10~30%の差が現れた。それに対して制御ありの場合は安定した温度上昇が見られ、外乱を与えない場合と同等の解析結果が得られた^[2]。この結果より、熱負荷制御機能による土壌熱伝導率の推定精度の向上が明らかになったことから、本機能の有効性および製作した TRT 装置の動作安定性が示された。

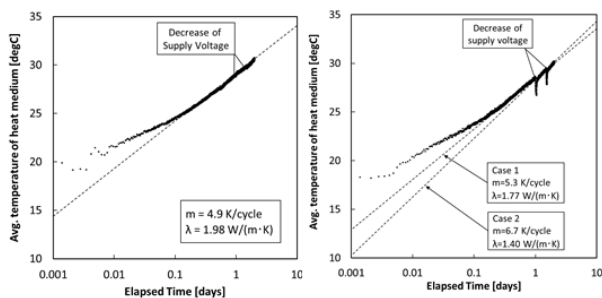


図 4 熱負荷制御機能の有無による TRT 結果の比較^[2] (左: 制御あり、右: 制御なし)

6. 海外における TRT の実施

TRT 装置 1 号機が完成した後、ある研究機関から東南アジアで TRT を実施したいとの相談があった。しかし、1 号機は大型で持ち運びが不便なうえ、海外の電源に対応しにくいことから、2017 年に小型の TRT 装置を新規製作することになった (図 5)。

まず、装置電源を海外で多く使われている単相 220V とし、それに合わせた機器を選定した。循環ポンプには、1 号機で使用した単相 100V のものではなく DC ブラシレスモーターを使用したものを採用し、計測制御機器を含めて DC24V のスイッチング電源で動作する。ケースには強固なプラスチック製の小型キャリアケースを用い、輸送時の衝撃に耐えるように各部品を強固に固定した。なお、1 号機で採用した熱負荷制御機能と安全機能も備えている。

完成した 2 号機は、計測制御ユニット、温水循環ユニット、およびケーブルやホースなどの付属品を収納するアクセサリボックスの 3 個構成となった。



図 5 海外用 TRT 装置 (2 号機)

本装置を用いて、これまでタイ、ベトナム、モンゴル、タジキスタン、台湾の 5 カ国において TRT を実施してきた。しかし海外における TRT では、日本では起こらないようなトラブルが発生するケースが多く、特に電源事情が乏しい国においては注意する必要がある。例えば、モンゴルの電源電圧は 220V であるが、TRT を実施した箇所では電圧がこれよりも低く、予定していた熱負荷より低い値で試験を実施せざるを得なかった。さらに昼と夜で電圧が変動する状況であったが、その影響は熱負荷制御機能により回避することができた。またタジキスタンでは、日常的に停電が発生することから TRT のために発電機を準備してもらったが、試験途中で発電機のエンジンから燃料漏れが発生したため、危険と判断して急遽商用電源に切り替え、停電が起きないことを祈りながら何とか TRT を終了した。



図6 ベトナム（上）およびタジキスタン（下）における TRT の様子



図7 TRT 装置 3 号機（高出力タイプ）



図8 TRT 装置 4 号機（ケーブルヒーター方式）

7. おわりに

現在は、1号機、2号機へ随時アップデートを施すとともに、現在の主力機である高出力タイプの3号機（2020年製作）、ケーブルヒーター方式の4号機（2024年製作）を製作し所持している。いずれの装置にも熱負荷制御機能を備えるとともに、3号機には Raspberry Pi を用いた遠隔監視制御装置も取り付け可能である。

これらの装置はこれまで様々なプロジェクトにおいて使用され、安定した成果を挙げている。しかし、TRTは途中で装置が停止するなどの事態が発生した場合、土壤の温度回復のために加熱時間の倍以上の期間を空けないと再試験ができないため、毎回慎重に取り組んでいる。特に海外における TRT の場合は、渡航期間が決まっているため、失敗は致命的である。これまで様々なトラブルはあったが、何とか回避して大事な試験データを得られてきたことは、自分にとって大きな自信となっている。

最後に、装置製作や現場試験をはじめ、数多くの貴重な経験をさせていただいている、配属先研究室の教授に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 北海道大学環境システム工学研究室編、地中熱ヒートポンプシステム 改訂第2版、オーム社、130-135、(2020).
- [2] Hiroyuki Kosukegawa et al., Development of Thermal Response Test Device with Automatic Control System, Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25, (2015).

口頭セッション
第3分野
(計測・制御技術)

続・GaN-FET を用いたインバータ電源の製作

○伊藤 康彦^{AB)}、中野 治久^{AC)}、富里 哲夫^{D)}

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

1. はじめに

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

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

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

2. インバータ電源回路

本回路及び周辺回路の構成を図 2 に示し、主要部の動作を説明する。

ハーフブリッジ構成のインバータ回路基板 (図 3) 2 枚をフルブリッジ構成として 8 並列接続し、直流電源 (最大 600V, 15A) 出力を最高 5MHz で高速スイッチングを行うことにより、アンテナコイルに高

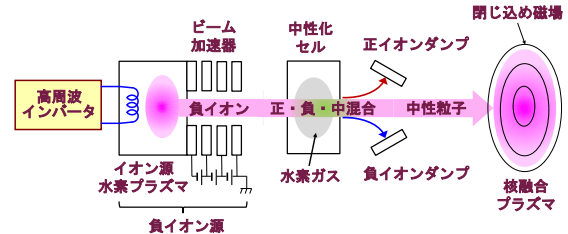


図 1 中性粒子ビーム入射装置

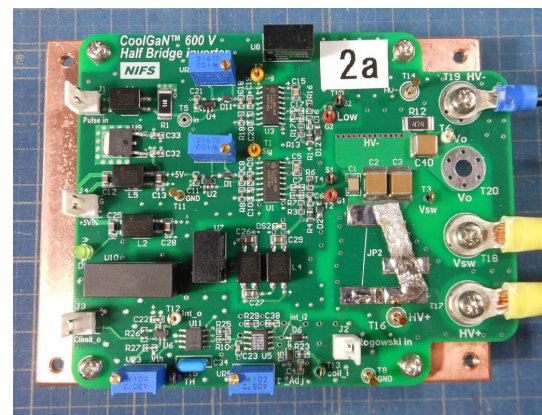


図 3、ハーフブリッジ・インバータ基板

周波電流を供給する。スイッチング素子には GaN-FET (Infineon, IGOT60R070D1) を用いる。本素子はドレイン・ソース間電圧 $V_{DS}=600V$ 、ドレイン電流 $I_{DS}=60A$ 、Slew-rate=200V/ns、ON 抵抗 70mΩ である。

本基板は Infineon 社の評価基板 EVAL_1EDF_G1B_HB_GAN を参考に改造したもので改造箇所は前回報告した^[1]。今回の改造箇所は主

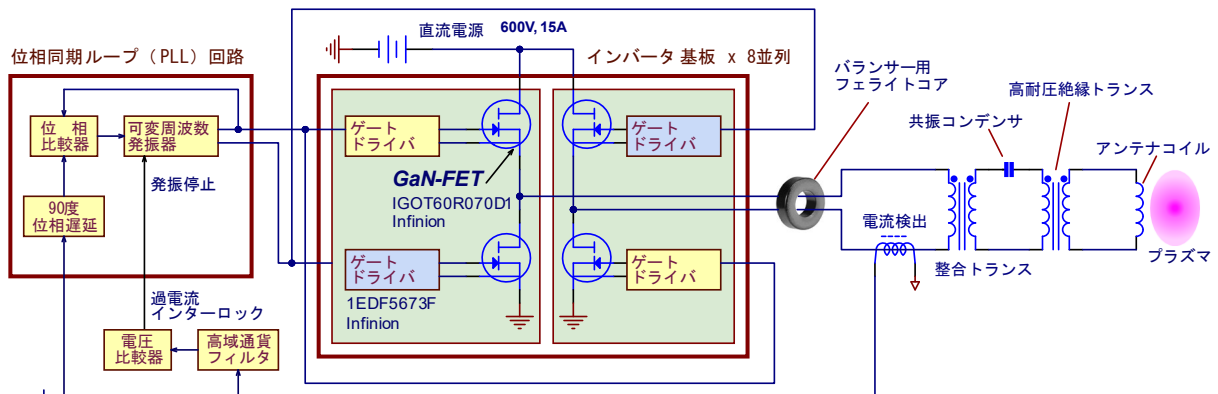


図 2 インバータ電源回路の構成

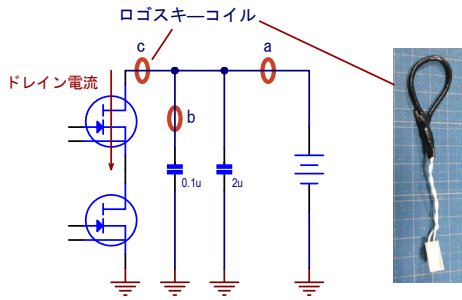


図 4、ドレイン電流検出用ロゴスキーコイル実装位置

に GaN-FET の保護回路で、ロゴスキーコイル (図 4 右) の実装方法を変更した。本コイル (2mmΦチューブに 0.2mmΦポリウレタン線を 40 回巻き) にて GaN-FET のハイサイド側ドレイン電流を検出し、しきい値以上でインバータの動作を停止させる。

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

そこでバイパスコンデンサのみの線路に本コイルを実装してみたが (図 4-b)、検出レベルが低下したのみで効果がなかった。次にドレインのみの線路に本コイルを実装してみたが (図 4-c)、応答速度が改善しなかった。また本コイルの直径を 25mm, 70mm の物でも試したが応答速度は変わらず本コイルの利用を諦めた。

この代替として富里提案による高域通過フィルタ (HP12CH3-0B、R&K 社) を利用することにした。インバータ出力端子直近の電流波形は共振周波数で正弦波に近いが、共振周波数から離れるほど高調波が増加する傾向がある。この性質を利用して本フィルタで高調波成分のみを抽出し、一定振幅値以上になった場合に全インバータ動作を停止させる。

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

3. 位相同期ループ (PLL) 回路

プラズマ放電状態の変動により共振周波数が変化すると、負荷に供給する電圧と電流の位相がずれ

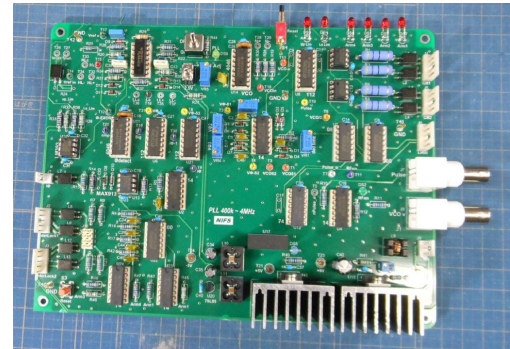


図 5、PLL 回路基板

る。この場合 GaN-FET の Low-side 及び High-side が同時に ON 状態となり、ドレイン供給電源が GND へ短絡し過大電流が流れ、素子が破損する原因となる。これをハードスイッチング状態と呼ぶ。これを避けるため PLL 回路 (図 5) により負荷供給電圧と電流の位相差に応じてスイッチング周波数を制御し、適切な共振周波数に合わせる。

本回路は富里設計による PLL 回路を参照し製作を行った。

4. インバータの並列接続

数 kW 以上の高出力を得るためには、インバータ回路の並列運用が必要となる。本基板は 2 枚 1 組のフルブリッジ又は 1 枚でのハーフブリッジ構成で利用でき、最大出力は 1.5~2kW 程度までである。全体で 16 枚の基板を 1 つの筐体の実装し最大出力 15kW までとし、更にこれを 4 台並列接続し 60kW での運用を計画している。

多チャンネル並列構成では、各基板特性のバラつきにより一部の GaN-FET が過負荷状態になる事を防止するためのバランサー回路^[1]として、各チャンネルの出力部にフェライトコアを挿入した。

5. 動作試験

フルブリッジ 2 並列接続で机上にて動作試験を行っている段階である。

GaN-FET のハードスイッチング動作を避けるた

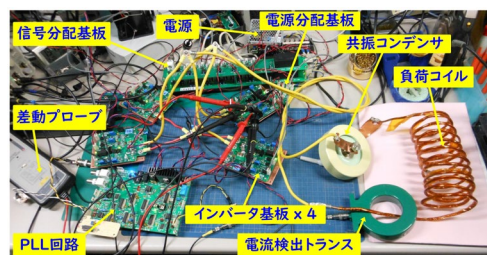


図 6、インバータ動作試験

め、ゲートドライバ IC の入力波形のデューティー比を、CR 積分回路を構成するトリマ抵抗の調節により行う。しかし、インバータ基板及び PLL 調整回路方式に問題があり適切な状態に至っていない。PLL による共振周波数の自動調整については 500k~4MHz に渡って安定した動作が得られている。

上記は机上での微小電力動作であるが、MHz を超える大電力動作になると大きなコモンモードノイズによる妨害を受けることが確実であり、ノイズ対策が必要となる。

5. まとめ

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

参考文献

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

謝辞

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

プログラマブル多出力高電圧電源の基盤技術開発—全体像と回路開発—

○豊田 朋範^{A)}、庄司 愛子^{B)}、松尾 純一^{A)}、木村 和典^{A)}、千葉 寿^{B)}

^{A)}分子科学研究所 技術推進部、^{B)}岩手大学技術部 理工学系技術部

1. 概要

飛行時間(TOF: Time of Flight)型質量分析器の検出器であるMCP(Micro Channel Plate)や、近年の放射線計測に用いられるGEM(Gas Electron Multiplier)などで、時系列に印加電圧を調整したり極性を変更したりすることが求められている。

我々は最大±5kV程度の出力を複数備え、出力電圧を独立に設定・制御可能な多出力高電圧電源の開発を進めた。本稿では、装置の全体像とD/Aコンバータを用いた高電圧モジュール制御を通信に報告する。なお、本稿は2026年2月上旬時点の進捗状況を基に執筆したため、内容に進展や拡張、変更がある場合がある。

2. 装置開発の技術的動機

図1のようなTOF型質量分析器において、イオン化されて電荷量 q を有する質量 m の原子や分子は、加速電圧 V に応じて運動エネルギー $E=qV=1/2(mv^2)$ を得て、フライトチューブ内を速度 v で等速飛行する。この時、飛行時間 t は m/q の平方根に比例するため、飛行時間差からイオンの質量電荷比が求められる。

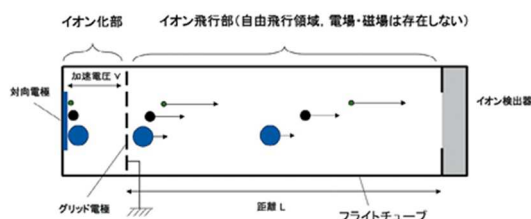


図1 TOF型質量分析器のイメージ図^[1]

図中の「イオン検出器」がMCPである

TOF型質量分析器では、イオン検出器の検出面積が広いほうが高効率であるため、一般に図2のような構造を持つMCP(Micro Channel Plate)検出器が用いられる。MCPにイオンが入射されると、チャンネルの内壁にイオンが衝突し、二次電子が壁面から放出される。入射面から検出面側へ電子を加速するような電場勾配を生成する高電圧を印加すると、放出された二次電子のチャンネル内壁での衝突電離が繰り返し引き起こされる。このアバランシェ効果により電子が増幅されるMCPは、印加する高電圧の極性

を適時切り替えることにより、イオン検出以外にも、例えば、電離作用を持つ電磁波や電子或いは中性励起種の二次元イメージングなどにも用いられている。

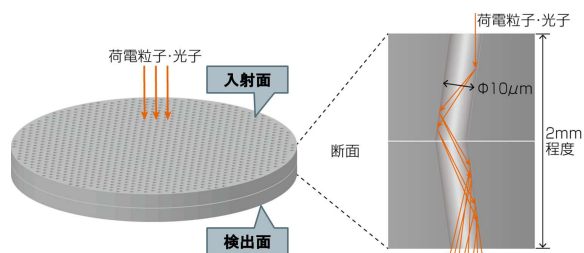


図2 MCP(Micro Channel Plate)の仕組み^[2]

MCPを検出器として用いる実験においては、測定対象に応じて極性を含めてMCPに印加する電圧を調節する必要がある。このため、様々な高電圧電源装置もしくはモジュールが利用されているが、1) 複数の出力を有する、2) 1つのコネクタから両極性を出力できる、3) パソコンなどで出力電圧の遷移をプログラミングする—という3項目を含有する電源装置は、単体としては存在しない。現在は、印加電圧を都度手で調整し、極性を変更する場合は電源装置を入れ替えて接続し直すのが一般的であり、時系列で印加電圧を調整することは非常に困難である。

MCP以外の検出器でも、高電圧を印加する信号増幅器では電圧の自動制御が強く求められている。その例として、近年広く放射線計測に用いられている、1997年にCERN研究所で開発されたGEM(Gas Electron Multiplier)検出器が挙げられる。GEMは、多孔の絶縁体フィルムを電極に挟んだ極薄シート状の信号増幅器であり、GEMを多段用いた二次元検出器として利用されている。放電による検出器の損傷を避けるため、各電極の電圧を数V単位で段階的に上げ、全電圧比を維持する必要がある。この操作もMCPと同様に手動で行われており、時間と労力を要するのみならず、誤操作のリスクがある。

そこで我々は、これらの問題を解決するため、最大±5kV程度の出力を2つ以上備え、それらの出力電圧を時系列でチャンネルごとに独立に設定・制御可能なプログラマブル多出力高電圧電源(図3)の開発に着手した。本装置の開発により、高電圧を印加する検出器を用いた実験において、誤操作や誤接続

とそれによる検出器の損傷のリスクを低減し、実験現場への技術的貢献が可能である。

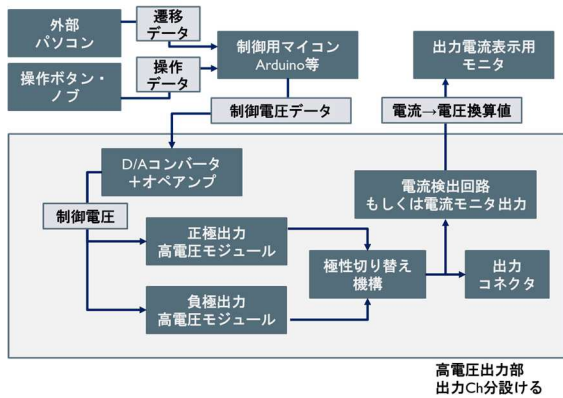


図3 共同開発中のプログラマブル多出力高電圧電源のブロック図 (Ver. 1.0)

3. D/Aコンバータを用いた高電圧モジュール制御

高電圧モジュールの出力制御では、外部可変抵抗を接続して制御する方法と、外部からDC電圧を入力して制御する方法の何れかが使用できる。「プログラマブル」を謳う本装置では後者を選択した。後述する実証試験で使用した HPMR-1.5N(松定プレジジョン)は、外部制御電圧として0-5Vを入力すると、入力に正比例する出力電圧を得られる(図4)。

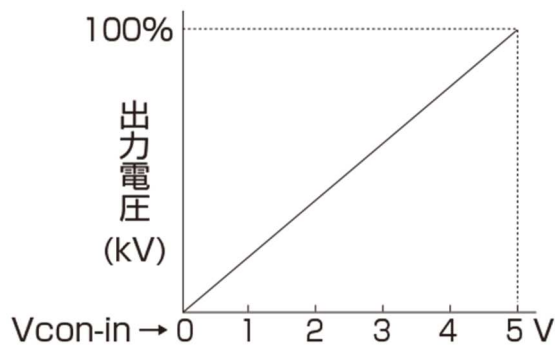


図4 高電圧モジュールの理想的な入出力特性の例^[3]

制御電圧の生成には、16bit SPI 制御 D/A コンバータ AD5683RARMZ (Analog Devices) と出力バッファ用オペアンプ AD8638ARZ (Analog Devices) を集約した D/A コンバータモジュールを使用した(図5)。本モジュールは、筆者らが分子科学研究所クリーンルームにおける FFU (Fan Filter Unit) の風量制御に用いたものであり、Pmod (Peripheral Module) インターフェース Type2 に準拠している^{[4][5]}。

D/A コンバータモジュールを用いた高電圧モジュール HPMR-1.5N (松定プレジジョン) 制御の実証試験を行なった。結果を図6に示す。良好な直線性を得

られることが確認され、高電圧モジュールの制御電圧として利用できると判断した。

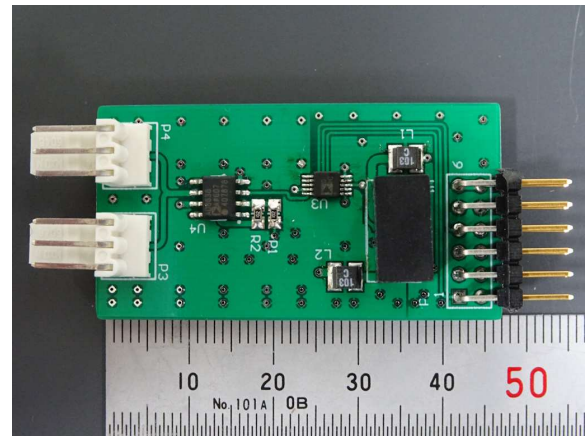


図5 D/A コンバータモジュールの全体像^[5]

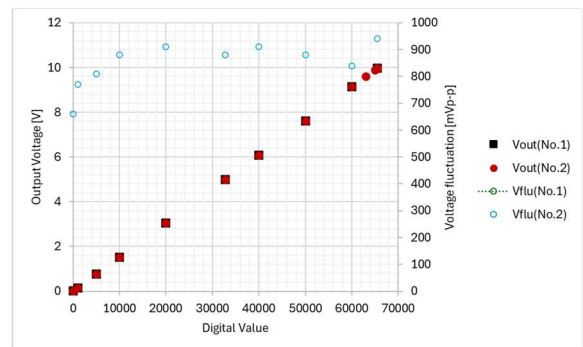


図6 Arduino で HPMR-1.5N を制御した際の D/A 値-出力電圧特性

右軸の Voltage fluctuation は、Arduino から D/A コンバータモジュールに D/A 値を送信した際に出力電圧に重畳するノイズの振幅である(図7)。



図7 SPI 通信のクロック波形(黄色)と出力に重畳する Voltage fluctuation(青色)

Voltage fluctuation が発生するのは SPI 通信で 16bit データを送信する時間、およそ $70\text{ns} \times 16 = 1.12 \mu\text{s}$ であり、一定電圧を持続する出力の時間に対して十分無視できる。

4. ICCF26 での試作機展示と討論を経て

実証試験の成果を基に、LAN を用いた遠隔制御を

見据えて制御用マイコンを Arduino から Raspberry Pi に変更し、制御電圧をフロントパネルのノブとボタンで設定して液晶画面に表示する試作機を製作した。2025年5月26-30日に岩手県盛岡市で開催された The 26th International Conference on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF26) に試作

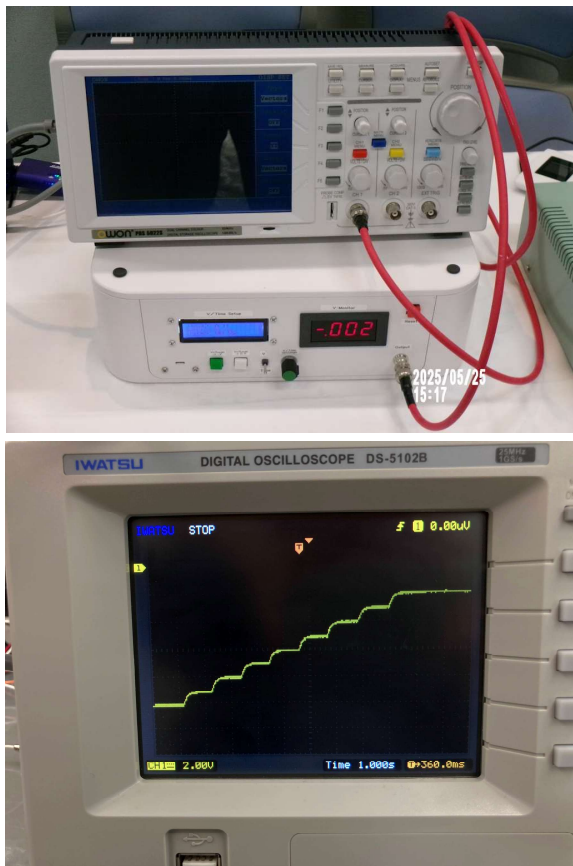


図8 ICCF26に出展した試作機(上)と出力電圧の遷移の様子(下)

機を出展し(図8)、ICCF26の参加者と討論した。

ICCF26の参加者は核融合など数十万Vの高電圧を対象とするため、最高出力電圧数kVの本装置は実験に使用できないものの、「実験現場に必要な機能を集約する」開発コンセプトと本装置の方向性は一様に強い賛同を得た。

出展と並行して、本開発のアドバイザーである古館守通氏と藤崎聡美氏(いずれも岩手大学理工学系技術部)を交えて本装置について断続的に討論した。その結果、1)複数の出力が不要な場合もあるため1台あたりの出力数は1つとしてカスケード接続で出力数を増やす方式に改める 2)出来るだけ実験装置に近い場所に配置できるよう小型化を重視するの2項目を加えることにした。改訂した本装置のブロック図を図9に示す。

この改訂を受けて、高電圧モジュールをオンボードタイプとし、電圧モニタ出力に加えて電流モニタ

出力も搭載した製品を再選定した。また、電圧モニタ/電流モニタを効率的に Raspberry Pi に取り込めるように、18bit I²C 制御 A/D コンバータ MCP3424-E/SL (Microchip) を採用し、回路とプリント基板を大

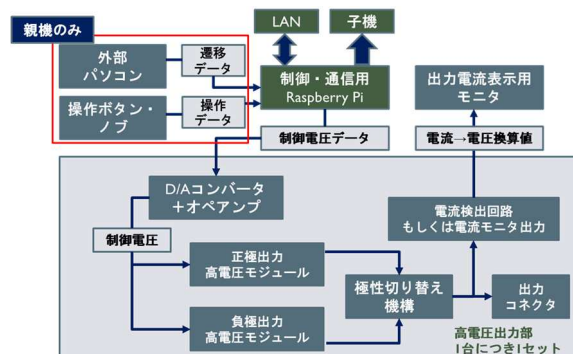


図9 共同開発中のプログラマブル多出力高電圧電源のブロック図 (Ver. 1.1)

幅に改訂した。

設計・製作したプリント基板を図10に示す。正負両極の高電圧モジュール HUR6-6P/HUR6-6N(いずれも松定プレジジョン)を各1台搭載し、高電圧制御という特質を考慮して十分な電氣的絶縁を行ないつつプリント基板を出来るだけ小型化できるよう配置配線を最適化した。

本稿執筆時点で、図10のプリント基板について、正負両極の入出力特性の概要を測定し、良好な直線性を示すことを確認した(図11)。また、Raspberry Pi の I²C 通信を有効にして、SPI 通信で出力電圧を制御しつつ I²C 通信で電圧/電流モニタ出力を読み取り、いずれも良好な直線性を示すことを確認した。引き続き、詳細な入出力特性の測定と評価、読み取った電圧/電流モニタ出力から出力電圧/電流を算出するプログラムの開発、最大±6kV 耐圧を有する極性切り替え機構の開発、図10のプリント基板や図5の D/A コンバータモジュール、駆動用スイッチング電源を収納した EIA 規格 1U ラックケースの機構設計などを進めている。



図10 共同開発中のプログラマブル多出力高電圧電源のプリント基板

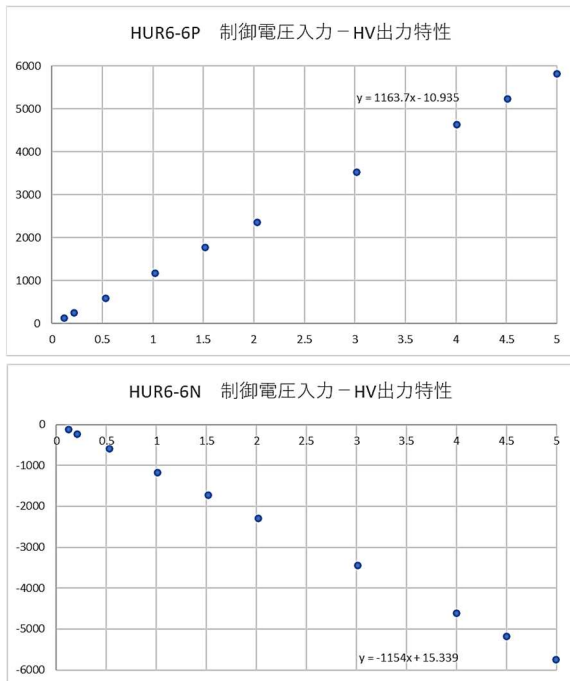


図 11 図 10 のプリント基板における
D/A 値－出力電圧特性の概要
(上：HUR6-6P／下：HUR6-6N)

5. まとめ並びに今後の展望－「組織や機関を超えた連携」の実効性－

D/A コンバータモジュールで生成した制御電圧を高電圧モジュールに入力することで、最大±5kV のデジタル制御を行ない、良好な直線性を示すことを確認した。将来の LAN を用いた遠隔制御を視野に入れ、Raspberry Pi で制御した。

極性切り替え機構との融合により、測定対象によって MCP などに加する電圧の極性を切り替えつつ時系列で印加電圧を遷移できる柔軟な装置を構築できる見通しである。

近年、「組織や機関を超えた連携」が提唱されている。分子科学研究所では 1900 年代後半から受入技術研修制度を実施している。また筆者らは 2012 年から共同開発を進めて、特許 4 件の出願・査定^[6]を得た。特に、うち 3 件の特許に基づく汎用警報通知システムである WAN-WAN(Wireless Alert Network for Wide Area Notification)については、全国の大学・研究機関の協力の下、実証試験を行ない、市場展開を含めた展開を調査検討している。

本装置の開発は、受入技術研修制度と OPEN MIX LAB 事業という 2 つの制度と、10 年を超える共同開発で培われた分子科学研究所と岩手大学の関係性を融合して進められたものであると同時に、中堅・若手技術職員の交流と育成を図る目的も含まれている。

博士号取得者やそれを目指す技術職員が増加する中、「実験・研究／教育現場の課題を技術で解決する」ことは、技術職員の在り方の 1 つであると共に、博士号取得など技術職員のキャリアアップにおける基本的かつ重要な視点であると考えられる。各機関の技術職員組織の運営側がこの視点に立脚し、「組織や機関を超えた連携」をより実効性あるものにすることを期待する。

6. 謝辞

本装置の開発は 2025 年度自然科学研究機構 OPEN MIX LAB 事業(課題番号 OML052502)並びに 2016-2025 年度分子科学研究所所長奨励研究費の助成を受けたものである。

本装置の開発と OPEN MIX LAB 応募においては、山本浩史 分子科学研究所教授、繁政英治 分子科学研究所技術推進部長、古舘守通 技術専門員、藤崎聡美 第三技術室長／技術専門員、紺野亮 技術職員(以上、岩手大学理工学系技術部)に多大なご支援ご協力をいただいた。各位に深い感謝の意を表す。

参考・引用文献・特許情報

- [1] 一般社団法人 日本分析機器工業会.
- [2] 松定プレジジョン
- [3] 松定プレジジョン
- [4] DIGILENT、「Digilent Reference / Pmods」、https://digilent.com/reference/pmod/start?srsId=AfmB0oo2atb7sIeQh3zOFR9rGlx0m1_OFzt6Suxi3CyBPU07c12oculq (2025 年 2 月 14 日データ取得)
- [5] 豊田朋範他、「マイコン開発における Pmod インターフェースの採用と活用事例」、第 30 回静岡大学技術報告会報告集 静岡大学学術リポジトリ、p11-16、(2024 年).
- [6] 千葉寿、豊田朋範、古舘守通、藤崎聡美：特許第 7341426 号、特許第 7170260 号、特許第 6954530 号、特許 7090242 号

形から入る小型電子回路装置製作

○木村 和典^{A)}

^{A)}自然科学研究機構分子科学研究所 技術推進部

1. はじめに

分子科学研究所装置開発室エレクトロニクスセクション(以下「回路工作室」とする)では、高速・高電圧のパルスジェネレータや微小定電流電源など、様々な実験用電子機器を製作し研究者に提供してきた。一方で近年では IoT や DX といった単語が広く喧伝され、多様なデータを取得する目的でこれまでにない小型の装置を製作する機会が増えてきている。今回は筆者が筐体まで一貫して設計・製作した小型装置の設計ワークフローや性能評価について紹介する。

2. 実験用電子機器の開発の流れ

電子機器の開発依頼を受けた場合、従来は回路工作室のスタッフがまず回路基板を設計し、その後でその基板が入るような筐体を選定・加工するというものがよくある工程であった。筐体設計については CAD で厳密に製図をすることもなく、Microsoft Visio 等で簡単な絵を描いて二次元的に確認をする程度であった。筐体加工に関しても、基板加工機を用いてパネル等を加工する取り組みが一時期行われていたものの浸透せず、ほとんどの場合は回路工作室のスタッフ自身が汎用工作機械を使用して対処していた。



図 1 回路工作室で製作された装置の一例 (ビームシャッターコントローラ Ver.4¹⁾)

筆者は 2018 年 4 月に回路工作室に着任し、CNC 工作機械や機械 CAD の経験があったため、まずは装置開発室メカトロニクスセクションの工作室(以下「工作工場」とする)の工作機械を使用させていただき、筐体加工を半自動化した。2018 年 6 月ごろに製作した最初の加工の図面と加工データを図 2 に示す。厚さ 2mm のアルミ板に $\phi 9\text{mm}$ の穴を 24 個、 $\phi 6\text{mm}$ の穴を 2 個、 $\phi 20.4\text{mm}$ の穴を 1 個、 $\square 45 \times 22\text{mm}$ の角穴を 1 個あけている。従来の工程では回路担当の職員が半日ほど拘束されていたが、CNC フライスで切削することにより 1 時間程度(実拘束時間はそれ以下)で加工が完了するようになった。

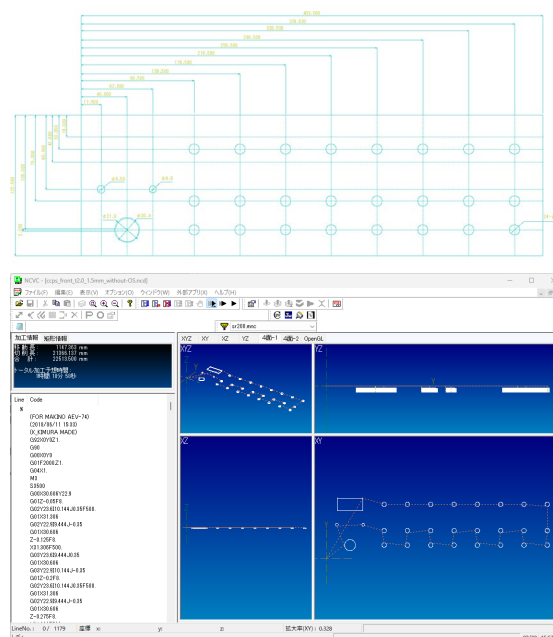


図 2 加工図面(上)と NC 加工データ(下)

またメカトロニクスセクションで導入されていた 3D CAD (SolidWorks)についても筆者に使用経験があったため、回路 CAD から 3D モデルを出力できる機能と組み合わせて筐体と内部レイアウトの 3D 設計も開始した。これにより加工を始める前に十分な配置検討を行えるようになり、従来の工程では多発していた組付け時の干渉発覚や手戻りをほぼ完全になくすことができた。

さらに 2019 年度末には回路工作室の備品として卓上型の CNC フライス(ORIGINALMIND SR-200、

製造終了)を導入した。加工対象の最大高さがやや低かったため改造を加えているものの、工作工場の機械の利用状況に左右されずに加工を行える体制が完成した。現在でも年間 100 件程度の工作依頼のうち 20~30 件程度について、このフライスを用いて筐体を加工している。

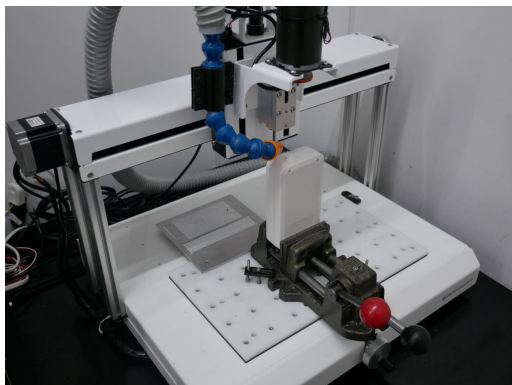


図 3 卓上 CNC フライスを用いた加工の様子

近年ではこれらの工程をさらに進め、依頼者の希望にあった筐体を選定しておいてからその筐体に収まるように回路基板のサイズや部品配置を調整するという設計の流れが多くみられる。

3. 開発例: ネットワーク対応 A/D コンバーター

研究者より「0-5V のアナログ信号をデジタル信号に変えて ssh で読み出すようなモジュールを作りたい」との依頼があり、ネットワーク通信に対応した小型の 4ch 入力 A/D コンバーターを製作した。開発した装置の外観の 3D 図面と写真を図に示す。

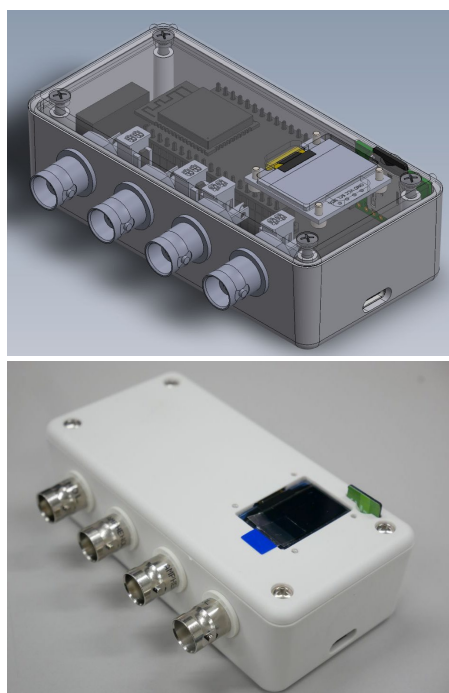


図 4 ネットワーク対応 A/D モジュール

サンプリングレートは 1 秒に 1 回程度でよいという条件であったため、A/D コンバーターには 4ch の入力を備えた MCP3424-E/SL を 16bit 分解能設定で使用している。A/D の入力前にプリアンプを設けており、装置としては最大±10V を入力することができる。メインのマイコン基板には ESP32-devkitC を使用しており、2.4GHz の Wi-Fi に接続できる。また ESP32 の内蔵メモリに HTML ファイル等一式を配置し、測定したデータをリアルタイムでグラフとして表示できるスタンドアロン計測器とした。測定データについては WebSocket で配信する API を設けてあり、任意のプログラムからデータを取得できる。搭載したグラフ表示ページもこれを用いている。

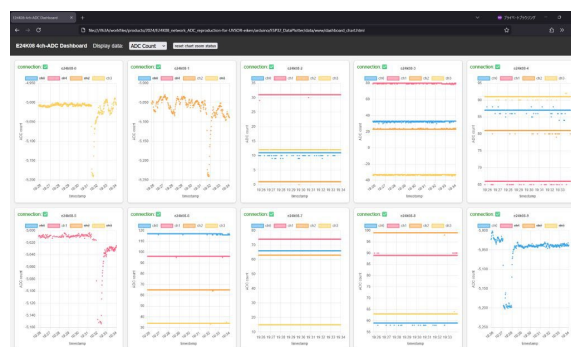


図 5 内蔵ダッシュボード Web ページ

当初は測定結果のデータも ESP32 の内蔵メモリに保存する予定であったが、数か月間のデータを保存したいという要望から容量が不足していることが判明したため、microSD カードを差し込んで使用できるように後からカードスロットを追加した。マイコンの開発キットがケースの体積のほとんどを占めておりスペースに限りがあったものの、かろうじて配線と microSD マウント基板が入る隙間を確保して実装した。

本装置はのちに分子科学研究所の放射光施設 UVSOR からの依頼を受け、10 台を追加製作した。

4. 開発例: 広範囲熱電対モジュール拡張版

回路工作室では K 型熱電対を用いて -270°C ~ 1800°C の範囲を測定できる広範囲測定ユニット^[2]を開発した実績がある。この熱電対モジュールについて、前述したネットワーク対応 A/D コンバーターモジュールと組み合わせて使えるよう拡張してほしいとの依頼を受けた。この開発では熱電対入力を 1 チャンネルから 4 チャンネルに増やし、また入力された温度に応じたアナログ電圧を BNC コネクタで出力する機能が求められた。一方で使用場所である UVSOR は測定装置や設備が雑多に並んでおり、装

置がコンパクトになることには肯定的であったため、従来品と同じ筐体を用いることとした。このため一部の電源や外部出力コネクタの搭載をあきらめることになったが、最終的には要望通りの機能を有する装置が完成した。初代熱電対モジュールと拡張版熱電対モジュールの回路の比較写真を図4に、全体の写真を図5に示す。拡張版を組み立てると BNC コネクタが基板の上に覆いかぶさるものの、事前に十分な形状検討をしたため、干渉などなく組み立てられるようになっている。

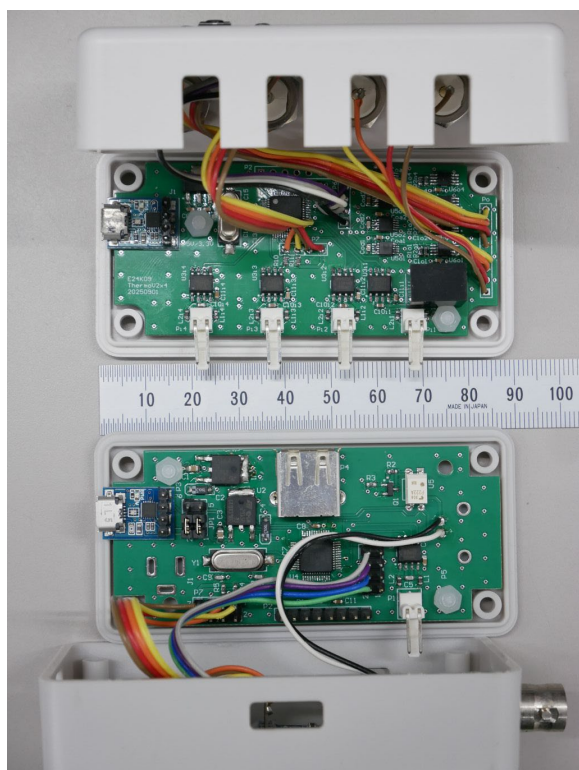


図6 広範囲熱電対モジュールの比較
上: 筆者による拡張版、下: 初版

5. まとめ

装置開発室エレクトロニクスセクションにおいて、装置筐体と回路基板の設計に3D CADを用いた事前検証とCNCフライスを用いた半自動加工を採用することで、従来の工程で問題になっていた筐体の加工効率を大幅に改善した。またこの工程を発展させることで従来にない小型機器の設計・開発を迅速に行える体制を確立した。

本報告では省略したが、適切な市販筐体がない場合は3Dプリンターで筐体を出力した例もある。少人数で多数の工作依頼に対応しているため、回路工作であってもその完成形状から逆算して設計を行うというワークフローは一定の効果を発揮している。

6. 謝辞

熱電対モジュール拡張版の開発と試験にあたっては初版開発者の豊田朋範 主任技師に設計情報を提供いただいた。またネットワーク対応 A/D コンバーターの開発にあたっては同じく豊田氏に助言をいただき、依頼者の木村真一 分子科学研究所教授(当時)には使用感の確認をはじめ機能面での多大なフィードバックをいただいたほか、中村永研 主任技師、岡野泰彬 主任技師には UVSOR での事前動作確認とトラブルシューティングにあたって多大な助言をいただいた。各位に深い感謝の意を表する。

参考文献

- [2] 装置開発室、「製作品: 18F02 ビームシャッターコントローラ Ver.4」、装置開発室 Annual Report 2018、p.42、2019
- [2] 豊田朋範 他、「K 型熱電対を用いた広範囲温度測定ユニットの開発」、静岡大学技術部技術報告、p.23-26、2024

次世代ケミカルエンジニアの育成を目的とした ドローン実習の構築と展開

高嶋あつ也

一関工業高等専門学校 技術室

1.はじめに

近年、化学プラントでは設備管理や保守点検の効率化・安全性向上を目的としてドローン活用の需要が急速に高まっている。一方、教育現場におけるドローン技術の導入は進んでおらず、特に化学系分野ではカリキュラム化された事例がほとんど見られない。DX 社会に対応できる技術者育成が求められる現在、この状況は大きな課題となっている。そこで本校では化学工学実習工場に設置された精留塔実験装置を活用し、化学系学生を対象としたドローン実習カリキュラムの構築と展開を試みた。本研究では、その教育的効果と導入にあたっての工夫・課題について報告する。

2.精留塔実験装置について

本装置は昭和 48 年 3 月に完成し、化学工学実習工場に設置された大阪化学機械株式会社製の精留塔実験装置であり、高さ約 8 m の 3 階建て構造を有する。原料にはメタノールと水の混合液を用い、製品メタノール 17 L/hr の処理能力を備える。本装置を用いた実験では精留塔の立上げおよび運転方法の習得に加え、物質収支・熱収支の比較検討を行うことができる。

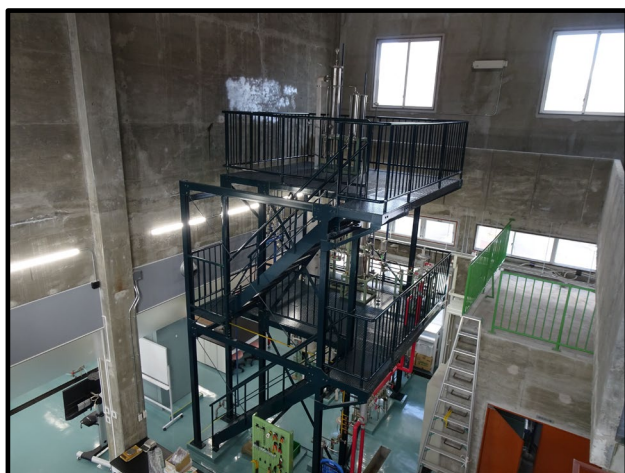


図 1 精留塔実験装置

3.ドローン実習について

本実習では初めにドローン実習の目的について説明を行い、その後に機体の基本操作に関するレクチ

ャーを実施した。続いて使用アプリのダウンロード方法およびデバイスとの接続手順を確認したうえで、実際の操縦に取り組んだ。実操作では機体の上下・前後・左右の移動操作や左右回転操作を順に練習し、さらにカメラ撮影やアプリに搭載された BackFlip や Circle などの自動動作機能の体験も行った。最後に学んだ操作を踏まえて工場内での自由飛行を実施し、ドローン操作の理解と習熟を深めた。



図 2 ドローン実習の様子

4.学生向けアンケートについて

ドローン実習後に実施した学生アンケートでは、まず「実習内容の理解しやすさ」について 82.4% (14 名) が「とてもそう思う」、11.8% (2 名) が「そう思う」と回答し、全体の 94%以上が肯定的に評価した。また、「時間配分の適切さ」についても同様に 82.4%が適切と回答し、実習構成に対する受容性の高さが示された。一方、ドローンの操作難易度に関しては「簡単」「普通」と回答した学生が合わせて 47.0%であったのに対し「少し難しい」「とても難しい」が 52.9%を占め、半数以上が操作に難しさを感じていた。これは使用機種の実操作性や機体の安定性が影響した可能性がある。しかしながら実習を通じたドローン技術への興味については 52.9%が「とても高まった」、41.2%が「少し高まった」と回答し、94%の学生で興味の向上が確認された。これらの結果よりドローン実習は教育的効果が高く、特に技術への関心を高める点で有用である一方、操作性の改善が今後の教育設計における課題であることが明らかとなった。



図3 学生アンケート主な集計(対象 17名)

5. ドローン実習のアップデートについて

学生向けのアンケート結果を反映する形で実習環境のアップデートを行った。限られた機材環境の中で1機のドローンを使用しながらグループ全員が効果的に実習へ参加できる方法を検討した結果、大型ディスプレイを新たに導入することとした。これによりドローンのプロポとディスプレイを接続して機体からの映像を共有できるようになり、操縦者以外の学生もリアルタイムでドローン目線の映像を確認しながら学習を進めることが可能となった。また、障害物検知や安定したホバリング、良好な画質および撮影角度・ズーム性能など新規導入ドローンの特性も相まって、安全性の向上と操作理解の促進が図られた。これらの改善によりグループ全員が一体的に実習へ参加できる学習環境が実現した。

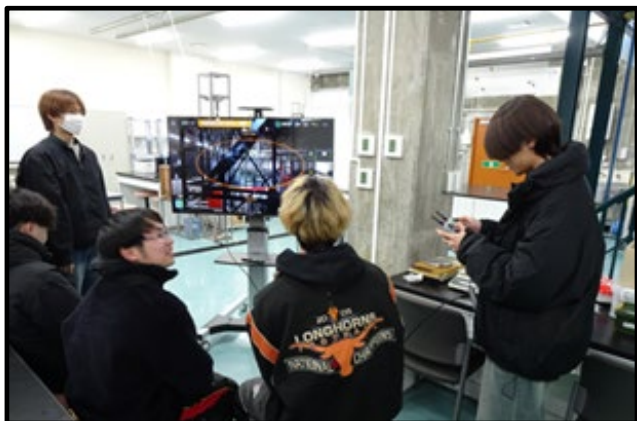


図4 ディスプレイ前で試運転する学生達

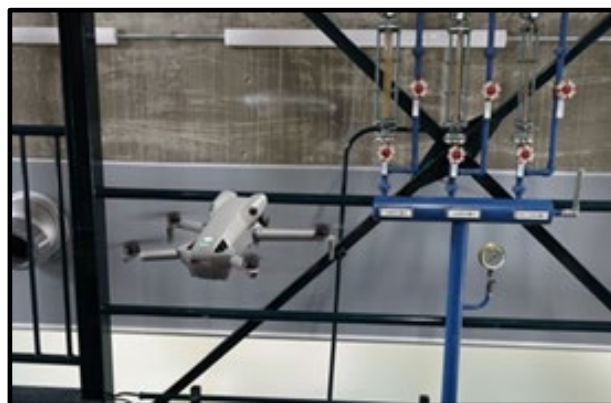


図5 流量を確認するドローン(DJI Mini5PRO)

6. ドローンに関連した自己研鑽

今後のドローン実習を継続的かつ安全に指導していく上で自身の専門性向上も重要である。まず、ドローンに関する基礎的知識レベルを客観的に示す資格としてドローン検定(1-4級)があり、法的効力は有さないものの機関によっては無人航空機操縦士の座学講習が免除される場合がある。また、産業用ドローン(5.7GHz帯)の操縦に必須となる陸上特殊無線技士(1-3級)は下位級でも難易度は大きく変わらず今後の指導内容の幅を広げるうえで取得が望ましい。さらにレベル4飛行(有人地帯における目視外飛行)が可能となる無人航空機操縦士(1等・2等)は実技審査や学科試験の難易度が比較的高く、登録講習費用も高額ではあるものの専門性をより高めた実習指導の実施に大きく寄与する資格である。これらの資格取得を段階的に進めることで、教育内容の高度化と指導者のスキル向上が期待される。

7. まとめ

本実習は化学系学生を対象としたドローン活用教育として当初不安もあったがアンケート結果から概ね好評であり、教育的効果が確認できた。一方で操作性に関する課題が多く指摘されたものの、新規導入した高性能ドローンにより改善が期待される。また、科研費の申請額に対して配分額が大幅に減額されたが大型ディスプレイの導入等の工夫により実習の質を確保することができた。今後はドローン実習を継続し内容のさらなる充実を図るとともに自身のスキル向上にも努め、より発展的な教育プログラムの構築を目指したい。

8. 謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金 奨励研究 JP25H00129 の助成を受け実施した。

J-PARC MR 真空システムの機器情報の整理及び再整備

○ 西川 雅章 ^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

J-PARC MR の真空システムは、大規模で多数の真空機器から成る。17 年余の間運用の間に、機器情報や作業情報の管理が「属人的」「断片的」になってしまった。2 年余り前の着任時に、筆者は体系的・網羅的にシステムを把握することに非常に困難を感じた。必要に迫られシステムを構成する機器と、それらのハード的・ソフト的接続の情報等を整理しつつある。継承と今後の展開をも視野に入れた情報の整理について報告するとともに、技術情報の継承についての今後についても考察する。

2. 対象システム

J-PARC MR の真空システム（以下、真空システムと呼ぶ）には、多数の真空コンポーネントが存在する。排気ポンプはスパッタイオンポンプ（SIP）、真空ゲージは主に B-A ゲージ（IG）、一部コールドカソードゲージ（CCG）を使用し、低真空領域を測定するコンパクトロンゲージ（CG）も使用している。また、真空領域を区切るゲートバルブ（GV）も存在する。また、上流の 3 GeV RCS からのビームトランスポートラインである 3-50 BT に設置しているコンポーネントについても、MR のシステムと同じようにシステムを構成して運用している。

図 1. に、PC 上の制御画面として準備されている画面を用いて、システム全体に機器が配置されている様子を示す。機器は、3 棟の電源棟ごとの 3 つのシステムと 3-50 BT の 1 システムにわかれており、それぞれの電源棟にコントローラが設置されている。3-50 BT のシステム及びコントローラについては、D1 棟に設置している。それぞれのシステムにおいて

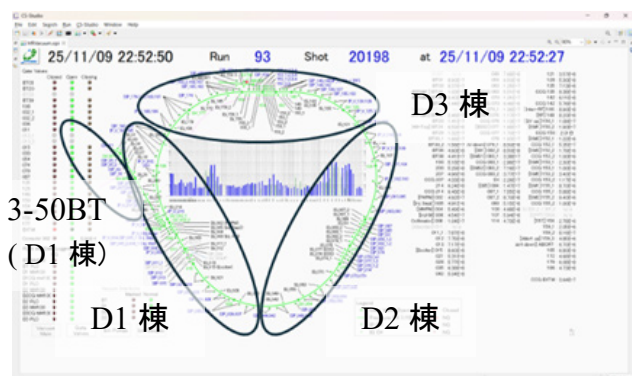


図 1. MR 真空システム全体(インタフェース画面).

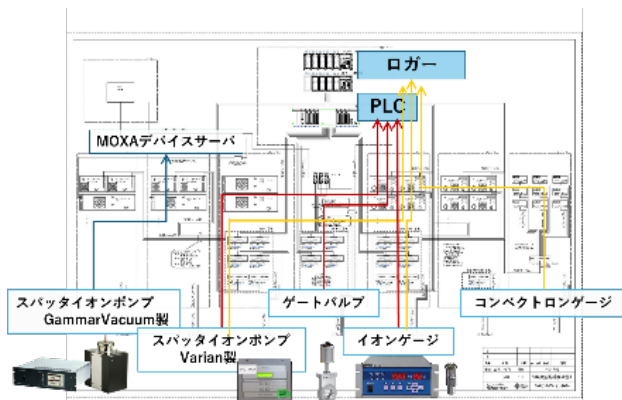


図 2. 真空制御システム模式図.

は、PLC、データロガー、デバイスサーバーなど介して上位制御系と接続している（図 2. 参照）。また、電源棟の現場でのローカル操作の便のため、タッチパネルが設置されている。

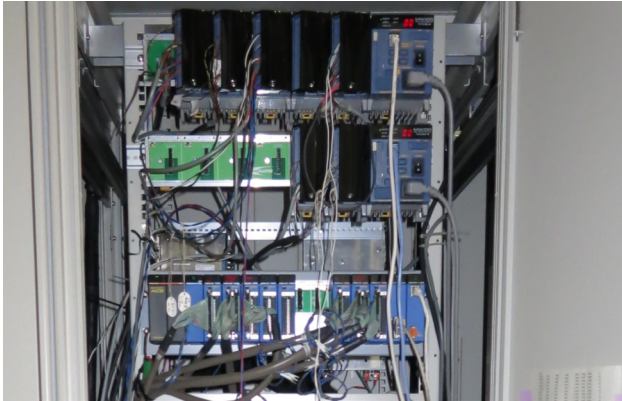
3. 従前の状況

この取り組みにあたる前の状況は、図 3. に示す配線の様子象徴されるように機器類は十分整理されているとは言えない状況であるとともに、システムの概要であっても理解するに足る文章化がされているとは言えない状況であった。また、詳細までを網羅的に押さえた情報はほぼない状況であった。同じグループでシステムの維持管理にあたってきた職員においても、経験をもとに管理することができていたが、人員の入れ替わりも徐々に進む中、失われてしまった情報もある様子であった。

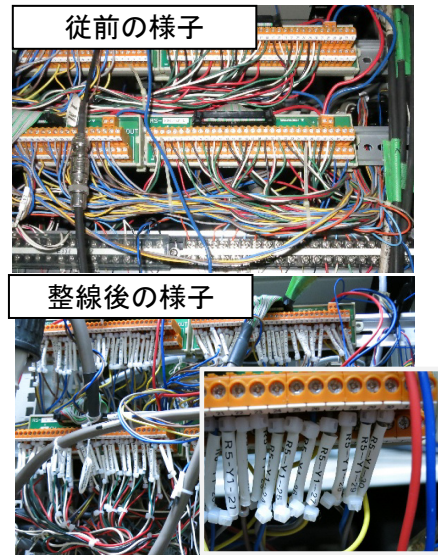
本取り組みに着手する前の真空システムについての、得ることができた情報を具体的に上げると次のようなものが存在した。

- 建設期のシステムの説明文章
- 実作業において伝えられる口頭での伝達情報
- 実際に運用している OPI のインタフェース画面
- ラック内に収まるコントローラ群（図 4.）
- タッチパネル画面インタフェース画面
- トンネル内の機器の配置の状況がわかる図面

これらの情報を確認していく中で、システムには以下のような問題点が挙げられた



(a). PLC 周り



(b). 端子台周り

図 3. 配線の様子

- ・ 確実にもれなくリストアップされた機器リストが存在しない。
- ・ 一部 I/O 接続情報が不明。
- ・ 上位制御系への接続がない機器の存在。
- ・ 絡まった配線で接続を追えない。
- ・ 機器の名称の表記に揺らぎがある。

さらに、機器の経年劣化が進んでいることが想定される中、特に真空システムの制御部分に不具合・故障が生じた場合、復旧する手法が確立されていないと言える状況であった。

4. 目的

このような状況を踏まえて、整理される情報には次のような要求が目的として定まった。

- ・ システム全体に亘って網羅
- ・ 故障時の復旧に資する内容であること
- ・ 機器の構成、動作が理解できる内容
- ・ 新人含め技術継承に資する教育的性格を持つこと



図 4: 電源棟ラック内コントローラ群.

具体的には、次のような情報の整理を進めていくことにした。

- ・ 真空コンポーネントのリスト
- ・ 同 I/O のリスト及び接続情報
- ・ PLC・ロガーの機器情報及び接続情報
- ・ PLC への入出力の回路の構成
- ・ PLC のラダープログラムの情報、及び各信号のアドレス情報
- ・ 上位制御系 (IOC、OPI) との接続対応情報 (PLC アドレスと EPICS レコードの対応情報)

5. 作業内容

PLC については、筆者は実際に扱うのはほぼ初めてであったので、取扱説明書等での情報収集とメーカー講習会への参加などで技能習得をおこなった。従来動いているラダープログラムを取り出す手順と、それを読み解く技能の習得が必要だった。現在、ラダープログラムの動きを把握できており、PLC の故障時等の対応は可能となった。故障時の対応に危機感を感じていたため、これは非常に意義のある成果になった。実際、4 システム中 1 システムについては、ハードウェアの更新にまで至ることがすでにできている。

さらに一方では、PLC への入出力の情報を、実際の配線を追い、コントローラごとの入出力ピンサインの情報を調べ、アドレスの情報を整理した。

圧力値等を扱うアナログ信号収録のためのロガーについても、同様にアドレスの情報の整理を行った。また、更新機器の選定を行い、機器入手も行ったが上位制御系との接続ソフトウェアの準備の問題でこ

ちらは機器更新に至っていない。制御担当者に対応いただける状況なのでその対応を待ちたいと思っている。

整線作業は、非常に大きな意味を持った。確証のもてるリスト及び結線の記録を作るためにはどうしても避けられない作業であり、その後も続く情報整理の効率を上げるために重要な作業となった。図 3. (b) のように逐一の線番の附番を行い、作業区切りごとに立ち止まり、方針を何度も作り直してから配線をやり直し、以降の作業における接続関係の推測が容易になるように整線した。非常に泥臭くためらいを覚える作業であったが、この手順の労を惜しまずに進めたことが、その後の作業において、配線状況のイメージを確立したこともあって、効率を上げることができたと考えている。

6. 成果及び今後の展開

6.1. 制御用機器

PLC については、機器更新・あるいは故障の場面での復旧の手順まで確立できた。ロガーについては、機種が完全に変わったためソフトウェア部分が対応できていない。しかしながら、こちらもアドレス情報を押さえられており、上位制御系への情報の接続機構もほぼ押えた。万一の故障の際でも多少時間は要するかもしれないが、上位制御系への接続が確立できているハードを探し出してきて使用すれば、復旧は可能と思われる。

タッチパネルについては、現場での作業性を考えて、引き続き準備しておきたいと考えている。この機器のリプレースまでを目指したものの、機器に対する理解は未着手なのでこれについてはこの先進めていく。

制御系の上位の EPICS IOC、そして着手している PLC などにおける各真空コンポーネントについての名称表記を見渡すと、十分確認できていない範囲は残っているが、同一のコンポーネントを指し示す部分に表現の揺らぎがみられる。また、片方に存在しながら他方に存在しない機器というものもある。これらを、明らかにしたうえで名称表記の統一を図るというタスクも残る。

6.2. 真空コンポーネント

また、ここまでは制御部分についてもつばら述べてきたが、真空システムの情報整理の進捗にかかわらず経年劣化は進み、それぞれの真空コンポーネントのコントローラの更新も必要になってくると考えている。現在、海外メーカー製のものが多く、予算

との兼ね合い、更新機あるいは部品の入手性も含めてのトータルコストで考えていく必要があると考えている。例えば、スパッタイオンポンプの電源などは、自作で製作した例^[1]はよく耳にする。同じような取り組みを我々の現場でも行うことで、機器に対する理解を深め、技術・技能を獲得する機会とできるかもしれないと考えている。

6.3. 継承について

さらに、経験知の継承についての取り組みは様々な組織で必要に迫られて、いろいろな取り組みも行われている。ここでは、熟練者などに内在する知識などを経験知と呼び、それをマニュアルや説明書きとして文章化したものと呼ぶことにする。今回、筆者もある意味経験知の断絶を経験した。まずは、情報を掘り起こして、形式知といえる文章化された状態に持っていくことを進めているわけであるが、それに費やせる時間・労力の資源について限界を感じる。

調査を行うと、そのような経験知の継承の問題について取り組んでいる研究^[2]も見つかる。同じような問題に直面している現場は多いと想像できる。この先には、経験知を経験知という形のないまま伝達していくことも適切に組み合わせ、進めたいと考える。

具体的には、機器の構成や信号配線の接続、ラダープログラムの内容は、同じ構成が繰り返されており類推が容易である。あまりに文章化により過ぎた知識の展開は後回しにして、作業をする中で伝えていくことも検討したい。

参考文献

[1] 路川、他、EPICS 制御イオンポンプ電源の開発と進捗、日本加速器学会年会プロシーディングス WEP008、461-465、(2024).

[2] 野中、他、組織における知の継承 - 知の継承における五つの誤解、特許庁技術懇話会誌 No.268、34-42、(2013).

謝辞

本取り組みを行うにあたっては、J-PARC MR 真空グループの魚田雅彦氏、佐藤吉博氏、佐々木知依氏には、日ごろからここに至るまでの経緯を含めての数々ご指導をいただきました。ここに感謝を申し上げます。

プラズマリミターにおける ADC を用いた水冷システム監視システム構築

杉山 泉

九州大学 応用力学研究所 技術室

1. はじめに

九州大学応用力学研究所高温プラズマ理工学研究センターでは、球状トカマク発生装置である QUEST (図 1) にてプラズマを生成している。本装置には、7 本の水冷配管が組み込まれた可動式プラズマリミター (図 2) が設置されている。各配管への注入前後の温度と、注入時の流量の計 21 つのアナログ信号を ADC で変換し、常時監視するシステムを構築した。本発表では、開発中の失敗談とその対処法を中心に報告する。

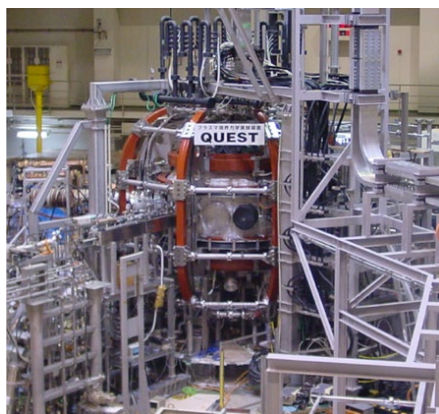


図 1 QUEST

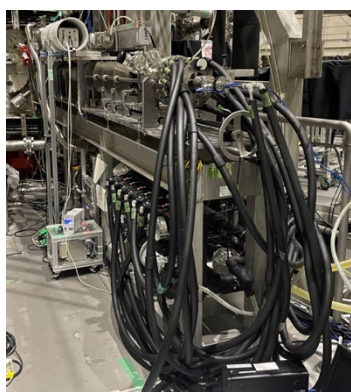


図 2 プラズマリミター

2. プラズマリミター

プラズマリミターとは、プラズマが真空容器壁に直接接触して壁を損傷させないように、その形状と位置を制限するために設置される構造物である。その性質上、先端が超高温のプラズマに接触するため、

リミター自身が溶け出さないように冷却を行わなければならない。したがって、リミターとして動作させている間は、冷却水の温度と流量のデータを常に取得し、異常がないか監視する必要がある。

本報告にて対象となるプラズマリミターは、真空容器の壁側に設置されており、可動範囲は容器の主半径位置 0.9–1.4 m である。リミターへの冷却水配管は 7 本となる。各管の流入側に流量計 (FD-H10) と温度計 (FI-T15) を 1 台ずつ、流出側には温度計を 1 台設置している (図 3)。温度計を流入・流出側に 1 台ずつ設置する理由は、両者の差から除熱量を計算するためである。以上、1 配管につき 3 台、全体で 21 台からの温度・流量データを一齐に収集・監視するため、NI 社製の ADC を用いた。



図 3 温度計 (左) と流量計 (右)

3. 冷却システムシステム

3.1 ADC

今回の冷却システムシステムの ADC として、NI 社製 8 チャンネルアナログ入力モジュール NI-9224 を 3 台、同社製コントローラ cRIO-9053 に組み込んで使用している (図 4)。NI-9224 のサンプリングレートは 1kS/秒/ch である。



図 4 ADC

3.2 ADC 制御 LabVIEW プログラム

上記 ADC に組み込む冷却水温度・流量監視プログラムを、ビジュアルプログラミング言語である

LabVIEW で作成した (図 5)。当該プログラムの要件を以下に示す。

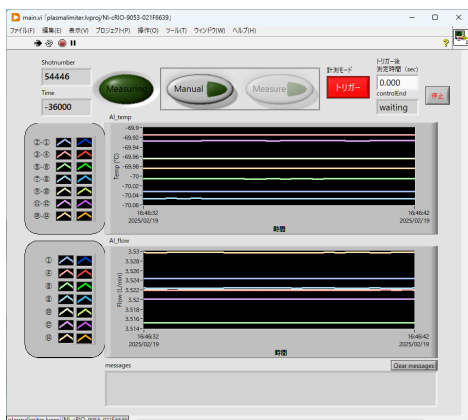


図 5 冷却水温度・流量監視プログラム

- 冷却水温度・流量のリアルタイム表示
入力電圧信号 (1 – 5 V) を、流量 (0 – 30 L/min) と温度 (-20 – 180 °C) に変換し、チャート機能を利用して常に表示するようにした。
- 温度・流量データのバイナリファイル保存
プラズマ点火トリガー入力から、指定秒数だけデータを保存するトリガーモードと、カウントダウン秒数を元にデータを保存するゲートモードを実装し、任意で切り替えられるようにした。温度・流量データは各々バイナリファイルとして cRIO に一時的に保存される。
- 保存ファイルを QUEST データベースへ転送
cRIO に保存されたバイナリファイルを、FTP 通信を用いて QUEST データベースに転送する。転送完了後は cRIO からバイナリファイルを削除する。

3.3 電流-電圧変換基板および保護ボックス加工

温度・流量計は電流信号を出力するが、NI-9224 のアナログ入力は電圧信号であるため、電流信号を電圧信号に変換する必要がある。出力電流の範囲は 4 – 20 mA であり、入力電圧信号の範囲を 1 – 5 V とすると、変換に必要な抵抗値は 250 Ω となる。したがって、1 kΩ 抵抗を 4 つ並列接続するようプリント基板を設計し、業者に発注した。基板が手元に届いた後は、ケーブル用コネクタと抵抗を基板に実装した (図 6)。

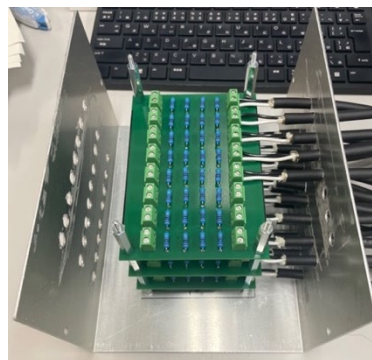


図 6 電流-電圧変換基板

また、基板は ADC と共にプラズマリミター近傍の 19 インチラックに設置することになる。したがって、プラズマ生成時に発生する X 線から保護するため、アルミ製ボックスを加工して当該基板を収納した (図 7)。

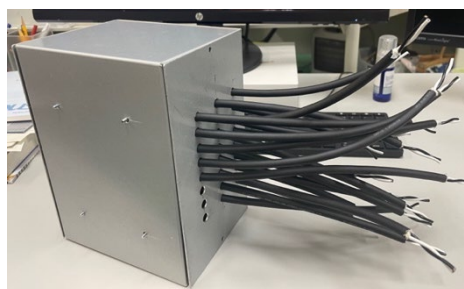


図 7 アルミ製ボックス

3.3 システム設置作業

プラズマリミター用冷却水配管への温度計・流量計の設置と、分電盤への電源供給用および電流信号用ケーブルの配線は完了していたため、以下の作業を実施した。

- 分電盤から電流-電圧変換基板への信号線の配線
- 電流-電圧変換基板から ADC への信号線の配線
- ディレイパルスジェネレータおよび ADC へのトリガーケーブル・イーサネットケーブル・電源供給ケーブルの配線

上記作業後の冷却系統監視システムの概略図を図 8 に示す。

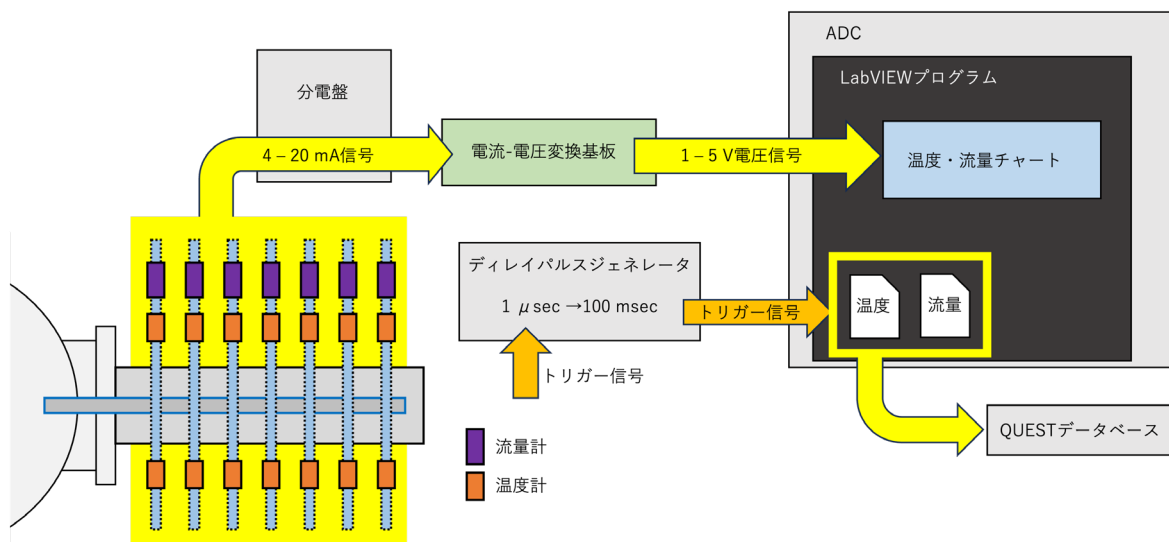


図8 冷却系統監視システム概略図

4. 失敗談とその対処

4.1 トリガー信号が検知できない問題

トリガーモードにおいては、QUEST 実験共通の 1 μsec 幅 TTL 信号をトリガー信号として利用している。ところが、本プログラムは 10 Hz、すなわち 100 msec ごとに動作する仕組みのため、上記トリガー信号を検知できない問題が発生していた。対処法として、ツジ電子株式会社製のディレイパルスジェネレータ T3965-02 を用い、トリガー信号のパルス幅を 100 msec まで伸長した (図 9)。その結果、当該プログラムでトリガー信号を検知可能になった。

図9 ディレイパルスジェネレータ

4.2 電流-電圧変換基板への実装トラブル

電流-電圧変換基板の電子部品実装時、用意した抵抗のサイズおよびケーブル用コネクタの足のサイズが基板設計時の想定よりも大きく、実装に困難をきたす事態となった。原因は、各々の購入時にサイズ確認をおろそかにしていたことである。抵抗に対しては、足を基板の穴に合うよう畳んで半田付けした。また、コネクタに対しては、基板の穴をドリルで拡張することで対応した。

4.2 ケーブル選定の失敗

本システムにおいて、分電盤と電流-電圧変換基板間および基板から NI-9224 間でのケーブル配線が必要となった。ケーブル選定の際には、接続部の許容断面積を確認し、発注した。ところが、導体部分が太ければよいと短絡的に考え、許容範囲ギリギリを狙いすぎた結果、接続部への固定が困難になってしまった。また、ケーブルが太くなったために、分電盤と電流-電圧変換基板間の長い配線時には重量が増し、接続部への加重によってケーブルが外れる事案が発生した。

5. まとめ

QUEST で用いるプラズマリミターの冷却系統監視システムを構築した。プラズマリミターの冷却管に既設の温度計・流量計から ADC までの信号線を配線した。また、ADC にて温度・流量データを保存する LabVIEW プログラムを作成し、動作確認を完了した。

来年度、プラズマリミターを用いた実験が実施される予定である。本システムも同時に運用再開される予定である。

機械学習によるカメラ映像のリアルタイム異常検出

○前野 博也^{A)}、水野 嘉識^{A)}、大場 恒揮^{A)}

^{A)} 核融合科学研究所 技術部

1. はじめに

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

2. 使用機材および環境

映像信号は解像度640x480、30fpsのHDMI信号である。キャプチャデバイスは一般的なHDMI-USB2.0変換であるサンワサプライのUSB-CVHDDUVC2を用いる。プログラムを動かすPCはWindows 11で、GPUとしてGeForce RTX 4070 Superを備える。機械学習に標準的に使用されるPython環境として、Anacondaを利用することとした。

3. 学習モデルの作成

異常検出に機械学習を利用するため、リアルタイム性に優れた物体検出アルゴリズムであるYOLO^[1]（Ultralytics社提供）を利用することにした。

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

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

次に、それらの画像に対しアノテーション（位置



図1 検出対象となる画像（四角は検出部分）

指定)を行う。画像内の検出対象を矩形で囲み、その座標情報をYOLOフォーマットのテキストファイルとして保存した。

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

4. 処理の流れ

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

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

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

5. ユーザーインターフェース

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

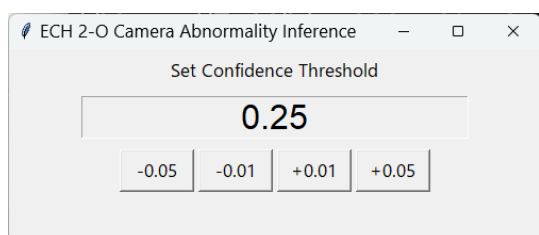


図 2 ユーザーインターフェース

6. 運用結果

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

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

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

7. まとめ

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



図 3 検出結果

参考文献

[1] <https://docs.ultralytics.com/ja/>

口頭セッション
第4分野
(極低温技術)

小中学生向け科学体験教室の開催報告

○吉本 佐紀、三矢 節子、石川 紘輝、小林 誠一、菊地 毅之、和田 淳、高橋 岳之
千葉大学 理工系総務課技術グループ

1. はじめに

千葉大学では長い間、技術職員の組織が無く、技術職員同士の横のつながりが無い状態がつい最近まで続いていた。2016年に有志で技術交流研修会を開催して以来、徐々につながりが強くなっていった。そして2024年に有志で小中学生向けに科学体験教室を開催する科学教室ワーキンググループ（以下、科学教室WG）が発足し、これまでに3回開催している（表1）。体験実験の題目は所属する技術職員の各専門分野を持ち回りで選んでいる。

筆者は低温寒剤（液体窒素と液体ヘリウム）の供給が担当業務であるが、早速第2回目の題目として液体窒素による実験が選ばれた。実は、これまで研究室からの依頼で小規模なデモ実験を行った事はあるものの、公式に参加者を募集して開催する科学体験教室なるものは今更ながら初めての経験であった。今回は開催にまつわる工夫や失敗談などの報告を通して、既に何度も開催していて経験豊富な方が居たら、ぜひとも改善点やアドバイスなどを受け賜りたい。

表1 科学体験教室 題目一覧

開催日	題目
2024/08/02	紫キャベツを使って身の回りの液体の性質を調べてみよう！
2025/03/26	液体窒素を使って科学体験しよう！
2025/08/01	Scratchでプログラミングしてみよう！

2. コンセプトと規模

液体窒素を用いた科学体験として、①見せるだけでなくなるべく触ってもらう、②簡単でシンプル、この二点を念頭に企画した。①に関しては対象が小中学生であるだけに特に安全に配慮する必要があり、どこまで触ってもらうかという点において科学教室WG内で意見集約があった。結果的には半分くらいは職員がサポートする形となった。

募集は児童と保護者のペアで6組とし、各ペアにスタッフ1名がサポートとしてついた。参加人数が少ないが、やはり安全面を考慮するとスタッフの目が届く範囲での規模となった（表2）。

表2 開催詳細

開催日	2025年3月26日（水）
対象	小学校4年生～中学校3年生
募集	2名（保護者とペア）×6組
運営	スタッフ8名
広報手段	大学HP/SNS、技術グループHP、イベント特設サイト、チイコミ

募集開始から設定人数が集まるまでに1週間程かかった。すぐに埋まるものと想定していたので意外であった。時期的に保護者の予定などが影響していると分析している。参加したのは男子4名、女子2名だった。近隣の千葉市で占めるかと考えていたが、印西市、船橋市、横浜市からの参加もあった。

3. 実施内容

体験実験は4テーマを企画した（表3）。所要時間は前半に3テーマで1時間、休憩10分を挟んで後半に1テーマ30分、合計1時間40分だった。

表3 実施した4テーマ

種別	内容	所要
低温脆性	バラとボールの冷却、破碎	0:30
熱膨張/熱収縮	空気袋の冷却、袋への封入	0:20
熱膨張	水に浸す、球浮き	0:10
酸素液化	空気の冷却、抽出液の性質	0:30

3-1. バラとボールの冷却、破碎

冒頭は定番中の定番ともいえるバラの冷却と握りつぶし。バラは高価なため練習では学内に生えている雑草を摘んできて代用した。本番では運良く直前に卒業式があったため残り物をもらうことができた。

ボールの冷却と落下では弾性を失ったボールが破裂するのがセオリーであるが、練習も含めて必ずしも全てが割れなかった。冷え方や落とす高さなどの条件によると思われる。本番では割れない事を逆手にとって割れるまで再挑戦させて盛り上げを狙っていたが、破裂音に怖がっている様子が見て取れて、これは大きな反省材料となった。ボールが破裂した

際に破片が飛散するのを防止するための囲いを用意して演台に集まってもらって一人ずつ挑戦してもらった(図1)。中には囲いの外へ跳ね出て割れるボールもあったが、囲いを用意した効果はあった。



図1 飛散防止の囲いを用意した

3-2. 空気袋の冷却、袋への封入

空気の冷却にはバルーンアートで使われるような細長い風船を使うのが適しているが、手元にあった物品の梱包材として使われるエアークッションを試してみると膨らませる手間も無く使い勝手が良かったので採用した(図2)。一方、液体窒素の袋への封入には傘袋を利用した。これも催し用に購入した在庫が大量にあったため使ってみた次第である。



図2 梱包用のエアークッションがお手軽

3-3. 水に浸す、球浮き

液体窒素を入れたペットボトルを水に浸す事で激しい蒸発を作り出し、噴出する気流の上に発泡スチロール製の軽量な球体を乗せて浮かせる体験。講師の実演時に球がバランスをとって浮いた瞬間、当日一番の大きな歓声が上がった。後述の酸素の液化よりも歓声が大きかったのが意外だった。球は大小二種類用意した。小さい方はバランスをとるのが難しくすぐに落ちてしまう。講師があえて失敗する事で、児童が上手く持続させると大喜びであった(図3)。



図3 球浮きは受けが良かった

ペットボトルの開口部にはシリコン栓にステンレスパイプを取り付けたものを挿入している。パイプ径は細いと内圧が大きくなってしまい栓が抜けやすくなり、太いと気流の勢いが弱い。外径5,6,7,8ミリで試したが、6ミリが最適であった。しかし本番でシリコン栓が飛び出してしまうトラブルが起きた。これを受けてシリコン栓方式を止め、スクリューキャップにパイプを取り付けることにした(図4)。

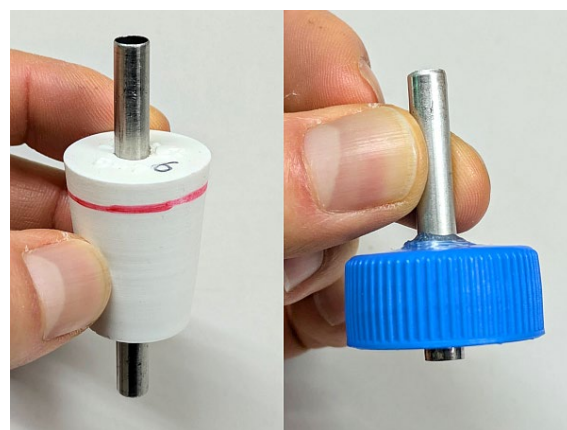


図4 栓をやめてスクリューキャップへ

3-4. 空気の冷却、抽出液の性質

熱伝導の良い銅板で作った円錐型容器(以下、銅板コーン)に液体窒素を注いで、その表面で空気中の酸素を液化させ、液体酸素の性質を確認する体験。集めた液体酸素の色を確認する際は、必ず液体窒素を横に並べて色の違いを比較してもらった。磁性の確認ではこれまで手に持った磁石を動かして液体酸素が吸い寄せられる様子を体験してもらってきたが、今回は手に持たせるのは危険と判断して、磁石は台座に固定して液体酸素が貯まったトレーを動かす方式にした(図5)。

最後に液体酸素を金属皿へ移して、線香の炎を近づけると燃焼が激しくなる事を確認する体験で締めくくった。この際金属皿は予め良く冷やしておかな

いと、せっかく作った液体酸素が蒸発してしまって液量が足らなくなってしまう。金属皿は前の過程が終わったら液体窒素に浸け込んでおくのが良い。

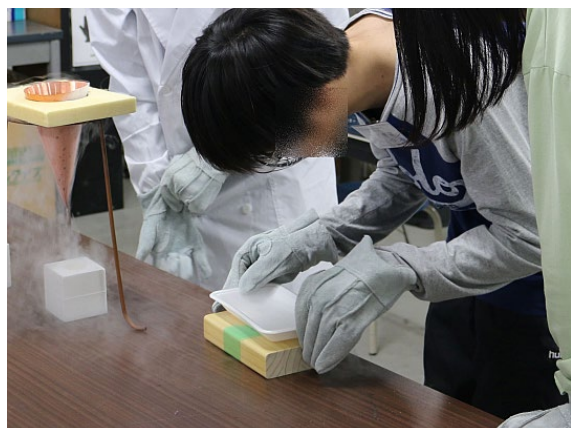


図 5 トレーを動かして磁性を確認する様子

銅板コーンは時間の経過とともに酸素の液化効率が落ちる。表面には白い付着物が付いており次第に堆積してくる。これは水蒸気由来の氷と二酸化炭素由来のドライアイスが付着しているものと思われる。酸素の液化効率を維持するためには、一旦暖めて付着物を除去すれば良いがそれは手間である。そこで検証実験として、A.銅板コーンに液体窒素を頻繁に補充して常に液面を高い水準で保持した場合、B.液体窒素が枯れてから補充した場合で酸素の液化量を比較してみた。結果は意外にもBの方が液化量が多い結果となった。銅板コーンから液体窒素が枯れるとコーンの表面温度が上昇し、付着していたドライアイスが昇華すると思われる。酸素の液化は一旦中断されるが、それでもドライアイスが除去される効果が大きいという事ようだ。

4. 運営上の工夫点

児童に液体窒素を取り扱ってもらうにあたって安全面を最優先に考慮して工夫したので紹介する。

4-1. 配置

参加者には説明を聞く「聴講座席」と作業を行う「実験台」の2箇所を用意して、都度移動してもらった。参加者の実験備品への接触事故防止およびスタッフの円滑な実験準備のためである。

4-2. 進め方

各テーマ毎に、導入説明⇒講師実演⇒参加者実演⇒講師解説、という順に繰り返した。まずは見てもらって自分達がどのような作業をするのか様子をつかんでもらう事で誤操作の防止と不安の払拭を図った。

4-3. 備品管理

実験台では4テーマの実験毎に、備品の準備と回収を繰り返して、机には必要備品だけが揃うよう管理した。備品はテーマ毎にカゴへ保管した。事前に各カゴに分けておく事でスムーズな準備と回収を実現した。備品が入り混じる事が防止でき、取り違いも起こらなかった。さらにカゴの色も4テーマに対して4種類の色違いをそろえた。各スタッフは参加者が聴講座席にいる間（講師の実演中や解説中）に備品の準備/回収を行った。

4-4. 明確化

「参加者がやる事」「スタッフがやる事」これらを各実験毎に実演直前にスライドで明確に提示して、勝手な行動をしないように誘導した。同時に各実験毎に起こり得る危険事項についても解説して、その都度注意を喚起した。

4-5. 質問形式

各実験での導入説明時に、これからどういう現象が起こるのか、簡単な三択質問形式にして出題した。それぞれに考えてもらう事で、受け身にならず能動的に参加できるようにした。

5. 落とし穴

当日、液体窒素は保存容器から発泡スチロール箱へ予め注いでおいた。しかし蒸発が早く3時間後には半分未満に減っていた。普段そのような使い方はしないため全くの想定外であった。予備の液体窒素を使い果たしたため新たに補充する必要が生じたが、液体窒素の充填手順は筆者にしかわからず、大急ぎで汲みに行く事となった。開始直前にコンテンツ主体者の不在はなるべく避けたい。以上より、液体窒素を多めに準備する事はもちろん、関係スタッフには実験操作に加えて充填手順についても覚えてもらえれば万全と言える。

謝辞

児童のサポート役を担う科学教室WGのメンバーには液体窒素の取り扱いに慣れてもらうため何度も練習をしてもらった。また、予行演習ではWG以外の技術職員に児童役として協力してもらい、第三者目線の意見をもらった。無事開催できた事は、多くの職員の協力なくしては成し得なかった事だと強く実感している。本企画は理工系総務課技術グループの予算支援を受けている。ご協力いただいた全ての皆様に深く感謝する。

小動物用 MRI からのヘリウム回収

○津々美 章子^{A)}、大城 秀治^{A)}

^{A)}大阪大学 大学院工学研究科 (コアファシリティ機構 低温科学支援部門)

1.はじめに

大阪大学 コアファシリティ機構 低温科学支援部門 吹田分室は、吹田キャンパス内に液体ヘリウムを供給している。ヘリウムは貴重な資源であるため、吹田分室から供給を受ける利用者には、ヘリウム回収配管の敷設を求めている。

小動物用 MRI を設置している保健学科は、現在ヘリウム回収配管の敷設に向けて検討・調整を進めているものの、複数の課題により実現には至っていない (図 1)。そのため、現状は業者から年間約 400 L の液体ヘリウムを購入し、小動物用 MRI の超伝導マグネットを維持している。しかし、この間も貴重なヘリウムが大気放出され続けている。

装置担当者がヘリウム回収に強い意欲を示していることを踏まえ、配管が敷設されるまでの暫定措置として、可搬型ガスバッグを用いたヘリウム回収を実施することとした。

本報告書は、読者が知見を活かしやすいよう、ヘリウム回収の上流から下流に向けて技術要素ごとに整理・記述する。必ずしも時系列順になっていない点にご留意いただきたい。

2.小動物用 MRI 装置上部の改造

小動物用 MRI は、クエンチ発生時に備えて、破裂板を介したクエンチダクトが標準装備されており、通常運転時に発生する自然蒸発ガスもクエンチダクト側へ排出される構造である。このように本装置はヘリウム回収を前提とした設計ではないため、標準仕様では回収ラインの接続ができなかった。そこで装置メーカー BRUKER と相談・検討し、装置上部の改造を依頼した (図 2、3)。具体的には、回収ライン接続用の T 字管、緊急時にクエンチダクトへ切り替え可能にするためのバルブ 2 つ、圧力計の取り付けを想定した T 字管を、全て NW25 継手で取り付けた。本取付工事は、2024 年 12 月に BRUKER により実施された。図 2 の赤バルブが半開なのは、トランスファー前に装置内部の圧力を開放している状態を撮影したためである。

BRUKER による工事が完了した後、上側の T 字管にフレキシブルホースを接続、その先に 500 cc/min

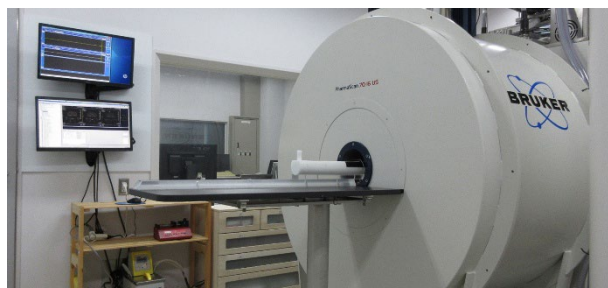


図 1 小動物用 MRI (年間 LHe 補充量約 400 L)

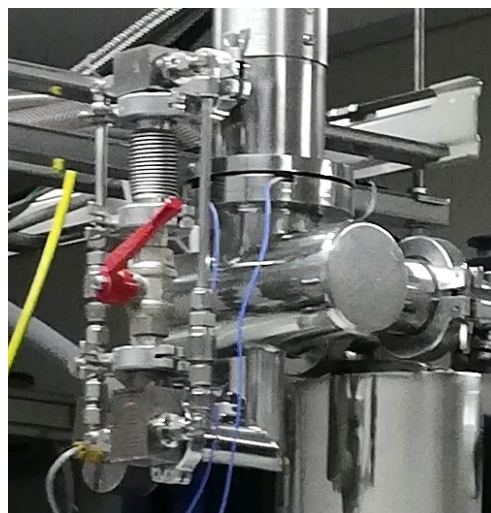


図 2 小動物用 MRI 上部 改造前



図 3 小動物用 MRI 上部 改造後

流量計や可搬型ガスバッグをポリウレタンホースでつなぎ、ヘリウム回収を試みた。しかし、試験開始当初、流量計は全く動かず、ガスバッグもわずかに膨らむ程度であった。流量計のレンジが大きすぎて抵抗になっている可能性を考え、より微量で動く流量計に交換してみたが、状況は変わらなかった。そこで、予想される回収量を計算したところ、計算結果と実際の回収量に大きな差異が見られた。具体的には、仮に 40 cc/min (流量計の最小目盛りは 50 cc/min) で流れているとすると、1 週間で 0.4 m³、すなわち 1 m³ ガスバッグが溜まるのに 2 週間以上かかる計算となる。また液体換算すると、1 か月で 2.5 L 程度、1 年で 30 L 程度の蒸発となり、トランスファー回数を考えると明らかに少ない。ここから、どこかでヘリウムがリークしている可能性を疑い、リークチェックを実施したところ、クエンチダクト側にもヘリウムが流れていることが判明した。

同部門豊中分室より、類似装置においてクエンチダクトにつながるフランジに挟まれている破裂板が損傷 (ヒビ、割れ) していたことで、ヘリウム回収率が悪くなった事例があるとの情報を得た。この点も踏まえて BRUKER に調査を依頼したところ、目視で破裂板に損傷は確認されなかったものの、新品への交換とフランジの増し締めを行った結果、リークが止まった。すると流量計が動くようになり、ガスバッグも相応に溜まるようになった。2025 年 1 月 29 日時点で 300 cc/min であった。

また装置内部の圧力を把握する手段がなかったため、BRUKER と相談・検討し、装置上部配管の下側の T 字管に 50 kPa 圧力計を取り付けた (図 4)。



図 4 小動物用 MRI 上部 圧力計取り付け後

3.自然蒸発ガス回収ユニットの製作、設置

±1 MPa 圧力計、2 kPa リリーフ弁、500 cc/min 流量計、および捨てバルブから構成される自然蒸発ガス回収ユニットを製作し、小動物用 MRI 上部からのフレキシブルホースと可搬型ガスバッグとの間に設置した (図 5)。

当初は、この回収ユニットの捨てバルブにトランスファーラインを接続し、トランスファー時に発生するガスについても回収する運用を想定していた。このため、トランスファー時にリリーフ弁等の各構成要素を遮断可能とする目的で、それぞれの手前にバルブを設けた。しかし捨てバルブにトランスファーラインを接続すると、フレキシブルホース径に対して流路断面の小さいバルブをヘリウムガスが通過することとなり、回収時に当該バルブが流動抵抗となる恐れがある。このため現在の運用では、トランスファー時には自然蒸発ガス回収ユニットを切り離し、フレキシブルホースとトランスファーラインを直接接続する方式を採用している。本来であれば、不要なバルブを除去することでユニットの軽量化を図りトランスファー時の着脱作業性を向上させることが望ましいが、本件は配管敷設までの臨時的対応であることから現状構成のまま運用を継続している。

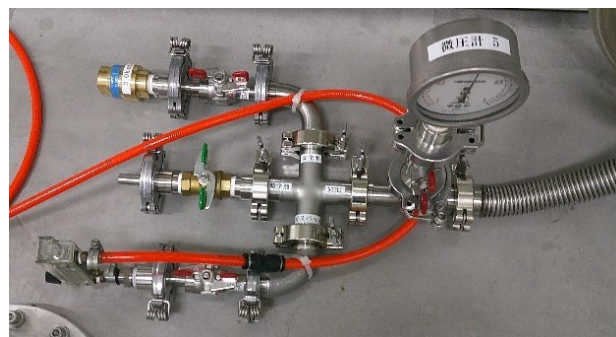


図 5 自然蒸発ガス回収ユニット

4.ガスバッグの設置、台車製作

ガスバッグの設置に向けて必要なスペースの確保を利用者に依頼したところ、設置空間に限られるためガスバッグを縦置きにできないかとの相談を受けた。この要望に対応するため、廃材のステンレス棒等をつなぎ合わせ、さらにガスバッグをそのまま運搬可能とするためのキャスターを取り付け、縦置き型台車 (1 m³ スカイピア版) を製作した (図 6、7)。ガスバッグ上部は、皮革用縫針セット (エスコ EA916J) でシルバーのポリエチレンシートを縫い付けて補強した。その後、15 mm 両面ハトメパンチ (藤原産業 SK11 No.1100) でハトメを 5 カ所取り付け、インシュロックで台車骨組みに固定した (図 8)。



図6 縦置き型台車



図7 ガスバッグと回収チューブの接続の様子

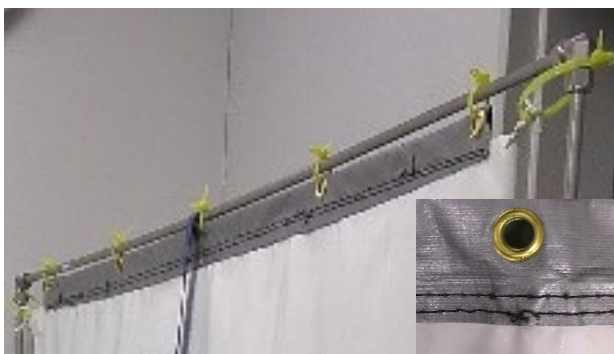


図8 ガスバッグ上部の様子 (右下は拡大写真)

実際に使用してみると、運搬時に船の帆のように風を受けるため扱いにくかった。加えて、骨組みのステンレス棒がガスバッグの重みに耐えられずに歪んでしまい、約2週間で使用を中止することとなった。

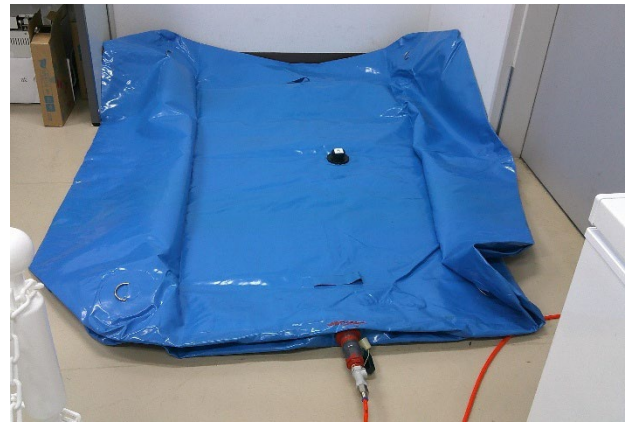


図9 直置きガスバッグ



図10 CPC コーラーを接続したガスバッグ先端



図11 直置き用台車、吊り下げ型台車

この経験を受け、その後必要なスペースを確保し、直置きで2m³ガスバッグを設置した(図9)。これは、医薬基盤研究所からNMRを移設する際に使用した水バッグである^[1]。

このガスバッグおよび回収ラインの先端には、切り離すと両側とも自動的に栓をされるCPCコーラーを使用している(図10)。またガスバッグの継ぎ手部分には、液状ガスケット(スリーボンド製液状ガスケット1207C)を塗布し、継ぎ手部分からヘリウムがリークしないようシールした。

ガスバッグの運搬には、スパーシア製パイプ(φ28mm)等を使用して製作したガスバッグ運搬台車を使用した(図11)。沖縄県工業技術センターの荻氏

から作り方を教わり、自分たちで製作したものである。使用中に一度キャスターが外れたことがあったが、付け直して以降は問題なく使用できている。

また、スぺーシア製パイプ ($\phi 19\text{ mm}$) 等を用いて吊り下げ型台車 (1 m^3 水バッグ版) も製作した (図 11)。しかし実際に使用してみると、ヘリウムの軽さのイメージとは異なり、ガスバッグはきれに上方へ膨らまず、下方で横に広がろうとする力が働いた。その結果、接続口が下向きになってしまい、使い勝手が悪かった。また、ベルトを接着している部分が剥がれやすく、頻繁にメンテナンスが必要であった。

しばらくは両方の台車を併用していたが、徐々に吊り下げ型台車を使用しなくなった。そこで、トランスファー時に 2 m^3 ガスバッグを 2 個同時に運ぶことを想定し、吊り下げ型台車を平型台車へ組み替えた (図 12)。この台車は、写真下部に写っているベルトを台車の前後に装着し、前方ベルトで台車を引き、後方ベルトで方向を調整する仕組みである。この平型台車は強度が弱く、早々に破損してしまった。



図 12 ガスバッグ平型台車



図 13 直置き用台車 2 号

そこで、破損した平型台車を直置き用台車 2 号に組み直した (図 13)。この台車は使用中にパイプが外れることがあるものの、現在も使用している。

以上より、パイプ径 $\phi 19\text{ mm}$ では強度が弱く、実用性・安定性の面で課題が生じた。台車製作においては、パイプ径 $\phi 28\text{ mm}$ が適切だと考えられる。また利用者より、台車は一体型より分離型の方が融通が利いて使い勝手が良く、ガスバッグの容量は 1 m^3 より 2 m^3 の方が作業しやすいとの意見が得られた。

5. 近くの既設配管に回収受入口を設置

ヘリウムを可搬型ガスバッグで回収すると、ガスバッグからヘリウムを抜き取る作業が必要となる。そして少数のガスバッグかつ省スペースで運用するには、ガスバッグを頻繁に持ち運ぶ必要がある。さらに屋外を運搬する場合、天候の影響も受ける。加えてガスバッグからのヘリウム抜き取り作業は、低温センター職員ではなく利用者自身に実施していただく運用を想定していた。これらを踏まえて、保健学科からの距離、利用者が抜き取り作業を行うスペースを確保できること、さらには将来的な配管延長の可能性を考慮し、小動物用 MRI から約 120 m 離れた薬学部の既設配管に回収受入口を新設した (図 14)。本工事は、2024 年 12 月 18 日に配管施工業者により実施された。



図 14 既設配管に新設した回収受入口

小動物用 MRI のある保健学科は医学部に属しているが、回収受入口を設置した配管は薬学部位置している。そのため、本計画の実現には部局を越えた調整が必要であった。低温センター職員が薬学部へ相談した結果、回収受入口の使用が回収時のみであること、ならびに使用エリアが限定的であることから、薬学部の了承を得た。また、将来薬学部で配管を延長する可能性を考慮し、この部分を分岐ポイントとして利用できるよう、捨てバルブを設けた。

回収受入口は、分岐バルブ、既設配管との縁切りバルブ、配管、ガスメーター、回収ポートから構成される。将来的に保健学科まで配管を延長する可能性を踏まえ、分岐バルブは下向きに設置し、その下には免振フレキシブルホースを取り付けられるスペースを確保した。また、将来配管を敷設した場合、縁切りバルブより上部は不要となることから、撤去作業性を考慮し、ガスメーターは壁面固定とせず、仮支持金物を用いて既存配管部に取り付けた仮設パネルに固定した。

この回収受入口を設置した配管の上流側には NMR1 台、下流側には NMR6 台とその他装置が接続されている。工事中に既設配管へ大気が混入することを防ぐため、既設配管に切り込みを入れる前に工事箇所の前後のバルブを閉め、上流側の NMR の蒸発ヘリウムは 30L サンプルングバッグ (アズワン 1-6332-18、1 ロック) に回収した (図 15)。

回収受入口の設置後、ヘリウムパージを実施して工事完了とし、その後工事箇所前後のバルブを下流側、上流側の順に開け、さらにサンプルングバッグに回収していたヘリウムを通常通りガスメーターを通して低温センターへ向かう配管に流した。

6. ダイヤフラムポンプの設置

当初はポータブル電源を使用し、抜き取り作業の度にダイヤフラムポンプとポータブル電源を台車に乗せ、ガスバッグとともに持ち運ぶ運用を想定していた。しかし回収受入口の設置にあたり、この建物内で液体ヘリウムを利用している教員 (工事箇所の上流側 NMR の管理者) へ一報を入れたところ、同一壁面沿いの外階段下にポンプを常設する案をご提案いただいた。さらに配管近くにある屋外コンセントの使用についてもご了承いただき、ポンプ使用時の音に関してご理解を示していただいた。加えて、「ヘリウム回収率を向上させることは、すべてのヘリウム利用者にとってメリットがあり、そのためにわずかな電力を使用することは全く問題ない」との非常に協力的かつ心強いご意見をいただいた。



図 15 工事中サンプルングバッグにヘリウム回収



図 16 ダイヤフラムポンプ等の保管の様子



図 17 ダイヤフラムポンプ保管箱の内部の様子

これを受けて薬学部の事務に相談したところ、マンホールの定期点検の際にすぐに移動できるようにすることを条件に了承を得た。ポンプ類は防水仕様の青箱に入れて、台車に乗せて保管している (図 16)。

青箱の中には、ダイヤフラムポンプとホース類を収納している (図 17)。ダイヤフラムポンプはアルバック製 DA-121D で、医薬基盤研究所から NMR を移設する際に使用した実績があり、今回も使用可能と判断した^[1]。性能は 0.13 m³/min (実測値) であり、

2 m³ ガスヘリウムを抜き取るのに 18 分かかる計算となる。また 2 本のホースをガスバッグ側とガスメーター側のどちらに接続するかが一目でわかるように、ポンプの上部にテプラで表示を付けた。

青箱の蓋は、本体の内側からも外側からもマジックテープで固定できる仕様である。雨風をしのぐためには蓋を外側に出して固定する方が良いため、そのように運用するよう利用者に伝えた。青箱の上に置いている脚立は、ガスメーターの値を読むときに使用している。



図 18 ヘリウム抜き取り時の様子

表 1 ガスバッグ回収状況

回	実施日	ガスバッグ	回収量
1	2025 年 1 月 31 日	白 1 m ³	0.99 m ³
2	2025 年 2 月 5 日	青 1 m ³ 、青 2 m ³	2.44 m ³
3	2025 年 2 月 7 日	白 1 m ³	1.05 m ³
4	2025 年 2 月 7 日	青 2 m ³	1.30 m ³

※2025 年 2 月 7 日に圧力計設置

※白 … スカイピアガスバッグ

青 … 水バッグ (Amazon にて購入)



図 19 ガスバッグ運搬の様子

7.ダイヤフラムポンプによる抜き取り作業を実施

2025 年 1 月より、ダイヤフラムポンプによる抜き取り作業を実施している (図 18、表 1)。1 回目は低温センター職員のみで行ったが、2 回目以降は利用者にも実施していただき、抜き取り方法を覚えていただいた。

純度は回収受入口から少し進んだ配管の既設の純度計で確認しており、これまでのところ問題なく回収できている。また、ガスバッグの先端に CPC カプラーを使用したことで、学生が接続・切り離しを行うときに汚染を気にせず作業できている。

運搬は 2 名以上で行い、回収のペースは週あたりおよそ 1.5 回である (図 19)。利用者は研究の一環として週 2~3 回ほど動物の床敷交換や給餌作業を行っており、その際に発生する廃棄物もこまめに処理している。元々定期的な作業に慣れていることもあり、ガスバッグの回収も無理なく進められている。

8.まとめと今後

小動物用 MRI からヘリウムを回収することに成功した。利用者と協力しながら体制を整えていき、低温センター職員の業務を圧迫することなくガスバッグにて自然蒸発ガスを回収する仕組みを整えた。

今後は、引き続きヘリウム回収配管敷設の検討を進めるとともに、配管が敷設されるまでの間はガスバッグによるトランスファーガスの回収も実施する。ガスバッグによるトランスファーガスの回収はすでに数回実施済みで、その詳細は改めて報告したい。

9.謝辞

本件は、大阪大学 大学院医学系研究科保健学専攻 齋藤茂芳 教授、齋藤研 森井麻美 秘書、齋藤研の学生の皆様のお力添えにより実施できた。ここに感謝する。また、ポンプの設置等にご協力いただいた大阪大学 大学院薬学研究科 吉田卓也 教授、部局を越えた事務手続きにご協力いただいた大阪大学 大学院薬学研究科 藤田玲子 事務職員、スカイピアガスバッグや水バッグ使用の先駆者であり、運搬台車の製作方法を教えていただいた沖縄県工業技術センター 荻貴之 主任研究員にも感謝する。

参考文献

[1] 大阪大学コアファシリティ機構低温科学支援部門、大阪大学低温センターだより No.175、NMR 装置移設のためのヘリウム回収作業、p16-28、(2026)。

ヘリウム液化機 L280 タービンのトラブルとその対策

○金本 真知^{A)B)}、藤澤 真士^{A)B)}

^{A)}東京科学大学 リサーチインフラ・マネジメント機構 コアファシリティセンター

^{B)}東京科学大学 リサーチインフラ・マネジメント機構 極低温研究支援センター

1. 概要

東京科学大学大岡山キャンパスで起こったヘリウム液化機 L280 タービン(Linde 社製)のトラブル^[1]について報告する。起動時にタービンが回り始めず液化が不可能になってしまうという深刻なトラブルであるが、一度本体から取り外して組み立てなおすとなぜか動いたため、液体ヘリウムの供給停止やヘリウムガスの大気放出などの損失を伴う事態までは至っていない。2026 年 2 月現在でも原因は未だ不明でトラブルは継続中である。以下では時系列に沿ってトラブルの詳細を説明する。

2. トラブル詳細

2.1 2022/10/27

初めて不具合が確認されたのは 2022/10/27 で、液化運転を始めようとしたところ、直列に 2 段あるうちの後段のタービン(以後タービン 2 と呼ぶ)が回転せず、“Coldbox Turbine 2 pressure ratio in-/Out too high-”というエラーメッセージが出て液化機が緊急停止するというトラブルが起こった(図 1)。何度か起動をかけてみたが、同様のエラーが出て動かなかった。この時点では 2 つの可能性が考えられた。(1)タービンは回っているが計測系が働いていない。(2)タービンが回っていない。

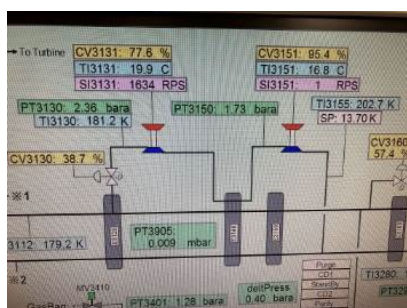


図 1 モニターPC の画面。右側のタービンが回っていない。

まず(1)について確認を行った。コネクタを外し速度センサー本体の抵抗値を計測したところ、問題ない値であった。また、発振器からダミー信号を送るとモニター上で回転数が変化した。これらのことか

ら、計測系の問題である可能性が低くなり、(2)の可能性が高まったため、タービンを取り外し内部を確認することになった。タービンを取り外すと LP ラインが大気にさらされるため、液化機内部を昇温する必要がある。真空断熱槽に窒素ガス約 1L を入れ、熱交換ガスとした。

2.2 2022/11/2~11/10

11/2 にタービンを液化機から取り外し、内部を確認した。タービンの羽は綺麗で傷などは確認できなかった(図 2)。指で触ると特に抵抗なく回転した。問題点が見つからなかったため、再度組み立てなおして運転してみると、タービン 2 は回転し、ヘリウムを液化することができた。その後 11/4 にも正常に運転できたが、11/7 にまた止まってしまった。熱交換ガスを入れ昇温し、11/10 にタービンを再び取り外した。タービンベアリングガスの逆止弁が固着することがあるらしいのでそれも確認したが、問題はなかった。タービンを指で回した際にごくわずかな引っ掛かりを感じる部分があったが、それが不調の原因であるとは考えづらかった。前回同様に組み立て直すとなぜかまた動いた。



図 2 上:タービン(上側)。下:タービン(下側)。指で触ると抵抗なく回転する。異常はない。

2.3 2022/11~2025/12

原因が分からないまま直ってしまったが、その後、2024/12 までの 2 年と少しの間は一度も止まることなく液化ができていた。しかし、気になる点として、タービン 2 が回り始めるタイミングがだんだんと遅くなっていた。液化機の運転を開始すると HP ラインからタービンへつながるバルブがゆっくりと開き、ガスが流れ始める。タービン 1 はガスが流れ始めたらほとんど同時に回り始めるが、タービン 2 はかなり遅れて回り始めていた。図 4 はタービン 2 が回り始めた瞬間のタービン 1 の回転数をグラフにしたものである。時間の経過につれてタービン 2 が回りにくくなっていることが分かる。また、それとは別に気温の影響も見取れる。夏になって気温が上がるとグラフが少しだけ下向きになり、冬になると上向きに戻る。念のため 2024 年から冬季の寒い時期には電気毛布を用いてタービンを温めてから運転を行った。前日から電気毛布を点けばなしにすると安全装置が働いて切れてしまうので、コンセントを予約でオンオフできるデジタルタイマーを使用した。

2025/1/6 に再びタービン 2 が動かなくなったが、前回同様に液化機内部を昇温してタービン 2 を取り外して組み立て直すと再び動くようになった。その後 2025/12 までは止まらず運転することができた。

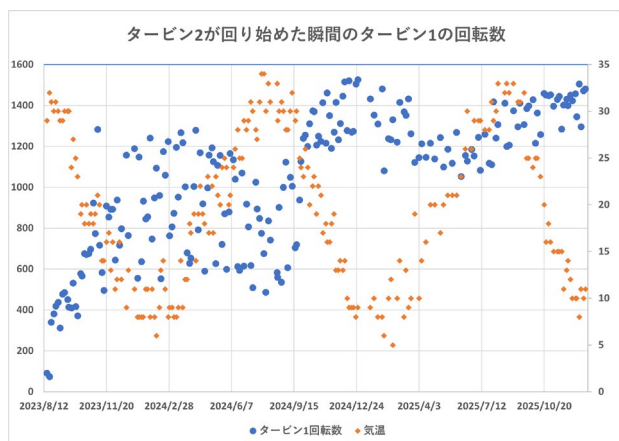


図 4 タービン 2 が回り始めた瞬間のタービン 1 の回転数。数字が大きいくほど回りにくい。

2.4 2026/1/6~16

2026/1/6 にも同様の症状でタービン 2 が回らなくなった。1/8 にタービン 2 を取り外して組み立て直し、運転を試みたが、今度はなぜかタービン 1 も回らなくなってしまった。翌 1/9 に運転を試みたところ、タービン 1 は回ったが、タービン 2 が回らず、起動に失敗した。複数回起動をかけたが、タービン 1 は回ったり回らなかったりで、タービン 2 は一度も回らなかった。念のため計測系のチェックを行っ

たが、異常はなかった。

週明けの 1/13 の運転では、Linde 社からのアドバイスで、タービンベアリングガスの圧力を変えてみることにした。タービンベアリングガスは起動時に外部からガスを流すことでタービンを浮かせて回転しやすくするためのものだが、圧力が高くなるとかえって回りにくくなってしまうこともあるらしい。液化機の起動をかけるとベアリングガスのバルブが開くので、その後にレギュレーターを調整して圧力を変化させる。初期の 4.8 bar(ゲージ圧)から下げていくと、4.0 bar と 3.5 bar ではタービン 1 だけが回り、タービン 2 は回らなかった。3.0 bar では逆にタービン 1 が回らず、タービン 2 だけが回った。再び圧力を上昇させていくと、4.0 bar でタービンが両方とも回り、液化をすることができた。

翌 1/14 にベアリングガスは 4.0 bar のまま運転を試みたが、タービン 1 が回らず、タービン 2 だけが回った。その後ベアリングガスの圧力を変えながら 1/16 までの間に数十回も起動をかけたが、いずれもうまくいかなかった。タービン 2 は一度も回らず、タービン 1 は回ったり回らなかったりであった。タービン 1 はベアリングガスの圧力が高いと回りやすい傾向はあったが、再現性はあまり高くなかった。1/16 に熱交換ガスを入れて液化機内部を昇温した。

2.5 2026/1/19~

1/19 に液化機を起動すると、なぜかあっさりと起動に成功した。内部の温度の影響があるのかもしれない。その後 1/22 も起動に成功したが、1 週間あけて 1/30 の起動では動かなかった。再び昇温すると 2/2 は起動に成功した。それから 2/5,9,12,16,19 と 6 回連続で起動に成功しており、2、3 日おきだと起動しやすいのかもしれない。

3. 対策

液化が長期間できなくなった際の損失を最小限に抑えるべく、対策を講じている。長期間ヘリウム液化ができなくなると、回収したヘリウムガスを貯めておく長尺容器がいっぱいになり、貴重なヘリウムガスを放出しなくてはならない。液化不能になってからの時間的猶予を増やすため、一部の長尺容器を空にして切り離して運用している。また、運用している容器の圧力も低めに維持している。

根本的な対策としてタービンのオーバーホールを検討している。2,3 カ月を要し、その間の液化はできなくなってしまうので、回収ヘリウムガスをできるだけ放出しなくて済むよう計画を立てる必要がある。

本学すずかけ台キャンパスにヘリウムガスを輸送して液化を代行することを考えている。

4. まとめ

2022/10にヘリウム液化機 L280 のタービン 2 が動かないというトラブルが発生した。取り外して目視しても問題点は見当たらず、再組立てによって直った。その後しばらくは運転できていたが、時間とともに状況は悪化しているようであった。2025/1 に一度止まり、その後 1 年は問題なく動いたが、2026/1 からより深刻な事態となった。タービン 2 だけでなくタービン 1 も止まるようになった。現在はベアリングガスを調整することなどによって何とか長期間止まることなく運転ができています。タービンのオーバーホールを検討中である。

参考文献

[1] 藤澤真士 東京工業大学 極低温研究支援センターだより No. 36 (2022)

液体ヘリウム中の水素混入トラブル事例

○北原 直尚、 山口 映理子

東京大学 生産技術研究所

1. はじめに

当施設では2001年より、ヘリウムの液化・供給・回収・再液化を行うリサイクルシステムを運用している。近年の年間供給量は約20,000~30,000 L、回収率は約95%、回収ガス純度は99.5~99.9%を維持してきた。2025年3月頃、当施設から供給した液体ヘリウムを使用している複数研究室において、微細流路を有するヘリウム冷却型クライオスタットで閉塞が発生し、実験が長期間停止する事態となった。本報告では、トラブルの発生状況、原因推定の経緯、実施した対応、および再発防止策について報告する。

2. トラブル発生状況

閉塞は液体ヘリウム導入用キャピラリーを有する装置約5台で発生した。いずれも4 Kより下の温度域で流量低下または閉塞が確認された。複数研究室で同時期に発生したことから、本施設で供給した液体ヘリウムに起因する可能性が高いと判断した。

3. 原因推定の経緯

当初は固化空気成分の影響も疑われたが、発生温度帯および微細流路機器でのみ発生している点から、水素混入の可能性を検討した。今回の状況が再現できる水素チェッカーを用いた評価では、問題が発生した液体ヘリウム容器で水素による閉塞が確認された。一方、他部局の液体ヘリウムでは各実験装置においても閉塞は発生しなかった。よって、高い可能性で本研究所のヘリウム貯槽(2,500L)と100L容器に許容範囲を超えて水素が混入しているという結論となった。

4. 混入要因の考察

本設備は2001年の運用開始以降、同一リサイクル系を継続使用している。回収ガスには空気成分が含まれるため、高圧ドライヤーで水分を除去し、内部精製器で空気成分を除去しているが、内部精製器は35Kまでの冷却による精製器のため水素は除去できずシステム内に残留することになる。水素除去用の精製器は未設置であったため、水素は意図的に排出しない限り、長期間にわたりリサイクル運用を続

けた場合、蓄積し得る構造である。本来、液化機内部には水素の吸着が期待できるアブソーバーが2カ所設置されているが、本液化機(2010年度導入)の精製器にはアブソーバーが設置されていない仕様となっていた。そのため、1カ所のみ設置されているJT弁前の20Kアブソーバーに、より負荷がかかる構造となっている可能性があった。アブソーバーでトラップされた水素は、運転後温まって分離したタイミングで液化機から定期的には排出する必要がある。しかし、本来1~2ヶ月の間隔でこの排出作業を実施していたが、液化用圧縮機更新(2024年3月)後、約8か月間(運転時間約400時間)液化機系内(HP、LP)の真空引きを実施しておらず、この期間にアブソーバーが飽和し、経年でシステム内に溜まった水素が貯槽内に徐々に蓄積したことが主因と考えられる。

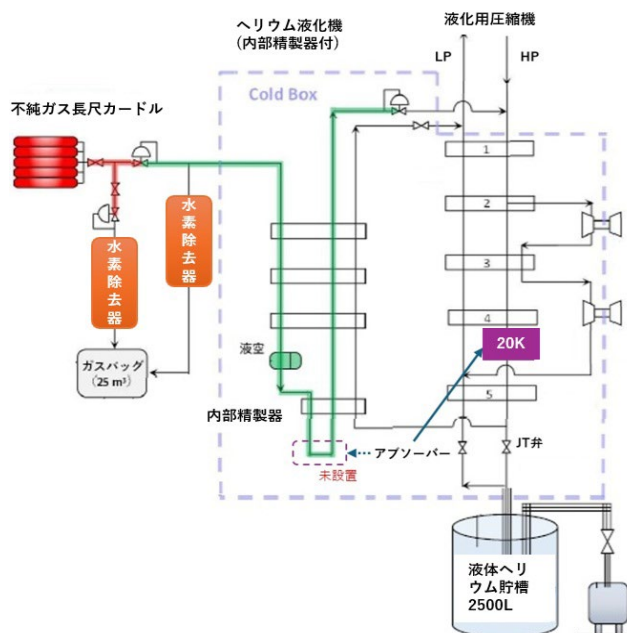


図1 液化システムフロー略図

5. 初期対応

水素は液体ヘリウム雰囲気での温度では固化するので、初期対応として2μm焼結金属のフィルターを通したが効果がなかった。容器内で固化した水素には効果があったかもしれないが、本件に関連する論

文で『液体ヘリウム中に微量に含まれる水素は、低温領域（特に3 K 付近以下）で溶解度が著しく低下し、固体として析出することで微細流路閉塞を引き起こす可能性が示されている』^[1]とあったのでこちらの要因が高いと考える。10K 領域の実験では問題は発生していない。

6. 本格的な対応

急ぎ、水素が一番蓄積していると思われるヘリウム貯槽の昇温を行うこととなった。しかし液体ヘリウム価格高騰を踏まえ、液体を廃棄せず退避させる方針とした。当施設では約 6,000 m³のヘリウムを保有しており、当時の市場価格（7,500~9,500 円/m³）を考慮すると、全量廃棄は大きな損失となるためである。ヘリウム貯槽を昇温させる作業が1か月程度となる見込みから、その間の貯槽の液や長尺カードルのガスを本システム外へ保管する必要があった。そこで多種多様なヘリウム容器を各所から借りて再生し、貯槽の液を容器へ移す作業を行った。その他ヘリウムを充填した容器を他部局へ預ける作業などを行い、前準備に3か月ほど費やしてようやく昇温作業をスタートした。



図2 ヘリウム貯槽昇温時の様子
(手前の袋は真空層に充填する用の窒素ガス)

貯槽の昇温作業は、メーカーに依頼をかけた共同作業で実施した。液体ヘリウムを汲出しして貯槽内を空にした後、真空層に窒素ガスを充填し真空をブレ

イク、液層を室温まで昇温させた。その後、10日間の真空引きを行い、液層は3回の真空置換を実施した。再液化時の時間短縮と安定運転のため、800L分の液体ヘリウムを外部から購入し、貯槽へ逆トランスファーを行った。貯槽に溜まった液量は当日の計測で235Lであった。翌日、液化運転を行い問題なく液化出来ていることを確認した。

7. 復帰後の容器の検証

2種類の容器を用意して復帰後の液体ヘリウムを研究室に使用してもらった。1つは水素を含んだ液体がまだ容器内に少し残ったまま充填したものと、もう1つは昇温させた容器に新しく復帰後の液体だけを充填したものである。前者はまた同様の詰まりが発生し、後者は問題ないと報告を受けた。前者の容器に滞留している水素の量に関係すると思うが、これは以前の液体ヘリウムの状態が非常に悪かったことを示しており、小分け容器すべてを昇温させることが望ましいという結論となった。

8. 再発防止策

再発防止策として、水素除去器を設置した。(図3) 吸着材としてAg400 B3 (Silver Zeolite) を約1.8Kg 充填した。



図3 水素除去器

設置場所は、不純ガスカードル～ガスバック間と内部精製器～ガスバック間の2カ所(図1)に設置できるように配管を作成したが、通常時は内部精製器の方に設置することにした。理由としては、液化運転終了後にアブソーバーから分離した水素を含ん

だガスが通るためである。実際にそれぞれ場所で水素ガス分析を行った結果、不純ガスカードルでは 1ppm 未満であったが、HP ガスは 200ppm を超えていた（不純ガスは 1ppm 未満でも水素問題が発生し得ると考えている）。また、現在は週 1 回の液化機系内の真空引きを実施しており、折を見て再度ガス分析を行う予定である。

9. まとめ

液体ヘリウム貯槽昇温後、5 か月経過したが微細流路の詰まりが再発することなく運用できている。問題のあった液体ヘリウムを全量廃棄することなく復帰できたことにひとまず安堵している。回収純度が良いと言っても、ヘリウムの長期リサイクル運用においては、水素濃度の定期的な分析が重要だと感じた。その上で計画的な水素排出作業を確実にしながら、今後の液化業務および液体ヘリウムの安定供給を行っていきたい。

10. 謝辞

今回のトラブル対応時には大変多くの方にご協力をいただきました。心より御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] M. Gabal et al., Hydrogen-Free Liquid-Helium Recovery Plants: The Solution for Low-Temperature Flow Impedance Blocking, PHYSICAL REVIEW APPLIED 6, 024017, (2016).
- [2] 野島勉、液体ヘリウムへの水素混入問題とその対策、センターだより、No14 p.11
- [3] 木村憲彰 他、ヘリウム液化システムへの水素除去装置の導入、センターだより、No.17 p.17

ヘリウム液化受託の取組み

○伊藤 義浩^{A)}、笹尾 愛^{B)}、日高 志郎^{B)}、
^{A)}大阪大学 基礎工学研究科、^{B)}大阪大学 理学研究科

1. はじめに

近年、ヘリウム価格の急騰により、液体ヘリウムを使用する分析装置の停止件数が増加している。ヘリウムガスを再液化するシステムの運用は、大学をはじめとする研究機関等に限られている。

2023年7月、本学と奈良工業高等専門学校（以下「奈良高専」）との間で開始したヘリウムリサイクルの取組みについて報告する。

2. NMR とヘリウム

奈良高専にはNMR(JNM-ECX 400)が1台設置されている。これまで装置内の液体ヘリウムはボイルオフガスとなり大気へ放出されていた。減少した液体ヘリウムは4ヶ月に一度の頻度でメーカーが補充を行ってきた。この液体ヘリウムの支払いは年間保守契約に含まれている。ヘリウムの市場価格の高騰に伴い保守料金が値上がりし、装置の運用が維持できなくなる可能性が出てきた。

装置停止を回避すべくヘリウム液化機を所有している本学にヘリウムガス再液化の相談が寄せられた。

3. 琉球大学（以下「琉大」）の取組みに学ぶ

これまでにガスボンベに充填されたヘリウムガスを本学に受け入れ、液化依頼を受託したことはあった。しかし、ボイルオフガスそのものの状態で液化依頼を受けたことがなく、その実現可能性から検討する必要があった。そこでヘリウムリサイクルについて先進的な取組みを行っている琉大[1]の手法を参考にした。琉大では学外の3機関とヘリウムのリサイクルを行っており2つ方式で運用している。

3.1 ガスボンベ方式

沖縄科学技術大学院大学（以下「OIST」）には圧縮機があり、ヘリウムガスをガスボンベ10本組のカードルに充填して琉大まで移送している。両機関間の距離40kmをOISTのスタッフがトラックで運送している。

3.2 ガスバッグ方式

沖縄県工業技術センター（以下「工技センター」）と沖縄健康バイオテクノロジー研究開発センターにそれぞれNMRが1台設置されている。ガス回収用の圧縮機がないため、両センターともに1m³サイズ（縦2.0m 横1.6m）のガスバッグを活用してヘリウムガスを琉大まで移送している。移送作業は主に運送

業者である赤帽への委託によって行われ、一部はヘリウムユーザー自身が自家用車で運んでいる。両センターと琉大との距離は20km弱である。この拠点間におけるガスバッグの運送費を検討した結果、最も安価な赤帽が選択された。赤帽は距離制運賃であり20kmまでは一律5,500円で、3m³近くのヘリウムを運ぶことができる。ヘリウムガス運送単価はおよそ1,800円/m³となる。

また液体ヘリウムの充填作業時にはボイルオフガスが10m³以上発生する。そのガスを全て回収するためにガスバッグ12個程度準備する。



図1 スカイピアバッグ1m³（ダイゾー社製）

4. 奈良高専のリサイクルシステム設計

奈良高専には圧縮機が設置されておらず取り扱うガス量が少ないことから、ガスバッグ方式で実施することを第一候補とした。この時点ではガス蒸発量を把握できていなかったが、メーカーによる液体ヘリウム補充量から1ヶ月に7から9m³程度ではないかと推測した。

4.1 回収設備

ヘリウムガスを回収するための設備としては、ブレードホースと複数のガスバッグを設置できることが望ましい。初めから多くのガスバッグを用意できれば一度に回収できるガス量が増え、液体ヘリウム充填作業時などの運用面におけるバッファとなる。しかし、スカイピアバッグは1個25万円であるため、いくつ用意できるかは予算次第となる。工技センターではガスバッグの数をまず1つからスタートし、少しずつ増やして6個程度で安定運用に至った。このような立ち上げに関する経緯を聞くことができ大変参考になった。

4.2 ガスバッグ方式の運送費

まず運送費について試算を行った。本学と奈良高専の距離は、自動車での移動距離にして 45 km。奈良高専がガスバッグを 6 個準備できるものと仮定した場合、トラックをチャーターし一度に 5 個のガスバッグを運び、残りの 1 個は奈良高専でガスを回収用として使用する。このときトラックのチャーター料金を 5 (m³) で割った値がヘリウムガス運送単価 (円/m³) となる。大阪や奈良の運送会社に見積もりを取った結果、ヘリウムガス運送単価はおおよそ 5,000 円/m³ となった。上記 2 センターで活用している赤帽に運送委託した場合と比較すると運送単価が約 3 倍高くなる。これに本学が奈良高専に課す液化料金を (1,200 円/L) を加算すると、奈良高専が液体ヘリウム 1L を得るためのコストが約 5,000 円/L となる。奈良高専がメーカーと結んでいる保守契約料金を比較すると、トラックで本学へ運送しリサイクルの方がランニングコストは安価となる。

しかし、初期に準備するガスバッグが 6 個だけでは液体ヘリウム充填作業中に発生するボイルオフガスを全て回収することは難しい。このガスを全て回収するために必要なガスバッグ 12 個を初めから揃えることが可能であれば、1 m³あたりの運送単価およびランニングコストを削減できる。

初期にガスバッグの個数をなるべく多く揃えるかあるいは順次追加購入をすれば中長期的なコストダウンにつながる。

4.3 定置式圧縮機

ガスバッグ移送方式の試算と並行してガス回収用圧縮機設置についても検討を行った。小型の圧縮機のラインナップを調べたところ次のようなものがあることがわかった。Bauer 社の G60-V は 0.5 m³ のガスバッグを内蔵、吐出量が 3 m³/h。価格は 1,000 万円。東亜潜水社の YS-55A、YS-75A は吐出量が 5～11 m³/h。価格は 300～400 万円。ガスバッグは別途必要である。

NMR1 台だけのボイルオフガス (月間 7～10 m³) を回収するためだけに圧縮機を設置するには初期コストが高すぎるのではないかと思われた。また第二種製造者 (処理量 300 m³/日未満) として行政へ届出をする心理的ハードルは、ヘリウムユーザーにとって低くはない。更にこの場合にはガスボンベも必要になり、圧縮機の定期自主検査を行う負担も生じる。これらの理由により圧縮機の設置は見送ることになった。



図 2 G60-V



図 3 YS-55A

4.4 移動用圧縮機

奈良高専とのガスの移送方法についてどうするか模索していた折に、本学の高圧ガス製造施設の定期自主検査を委託している大和熔材の上林専務に相談にのっていただいた。上林氏は、約 50 年前レシプロ式ヘリウム液化機を取り扱う営業マンとして小池酸素工業に勤務し、その後、産業ガスや工作機械を取り扱う大阪の大和熔材へ移られた経歴をお持ちである。そうした背景もありヘリウムリサイクルについて強く共感を示してくださった。上林氏から提案されたプランは次のとおりである。

大和熔材が空気充填用として使用している移動用圧縮機 YS-75A (東亜潜水機社製) を、ヘリウムも充填できるようガス種追加の届出を行う。奈良高専に設置したガスバッグにヘリウムが一定量貯まった時点で、大和熔材が移動用圧縮機とガスポンペを奈良高専へ持ち込む。ガスバッグと移動用圧縮機をホースで接続し、ヘリウムガスをボンベへ充填する。そのガスポンペを大和熔材が本学へ運送する。

この方式では、ボンベ 1 本でガスバッグ 6 個分のガスを運べるため運送コストを大きく削減できる。また液体ヘリウムを NMR へ充填作業中に生じるボイルオフガスも、移動用圧縮機を用いることでほぼ全量を回収可能となる。ガスバッグを直接運送する方式や定置式圧縮機を新設する方式いずれも導入コストが高額となるが、ガスの圧縮作業を協力会社に外注することでインシヤルコストを最小限に抑えることができる。

本学と奈良高専間の液体ヘリウム容器運搬とガスボンベの貸与に関しても、大和熔材が引き受けてくれることになった。これによりヘリウムの物理的移送方法について目処が立った。実際にヘリウムガス回収を始めたところ 4 週間で 6m³ が貯まったため、ボンベへの充填作業を 4 週間に一度行なうことになった。



図 4 移動用圧縮機 YS-75A

5. 本学における受け入れ準備

5.1 利用者に対する規程

学外のヘリウムユーザーが、本学に液化依頼をするために必要な規程の整備を行った。

5.2 回収ガスの計測

47L のガスボンベに 14.7MPa の圧力まで充填すると、ガスの体積は約 7 m³ と認識していたが正確には異なるものだと判明し、その認識を改めることとなった[2]。本学内ではヘリウムガスの計測は都市ガス用のメーターを使用している。しかし体積は圧力と温度に依存するため、ガス量を正確に計測するには不向きである。そこでマスフローメーター（質量流量計）を用いることとした。

5.3 購入物品

マスフローメーター（Azbil 社製）、ダイヤフラム型ドライ真空ポンプ、スカイピアバッグ（ダイゾー社製）。

6. ヘリウムリサイクルの課題

6.1 移送コスト

液体ヘリウムの消費地とヘリウム液化施設の拠点間が離れている場合、ヘリウムの移送コストが課題のひとつとなる。移送コストを下げるために研究者が自分で運ぶという選択肢もある。しかし、その場合には研究時間が削られるため、よほど近距離でない限り適さないであろう。拠点間の距離が 20 km 未満であれば、琉大のケースのように赤帽に委託することで、比較的安価なリサイクルシステムを構築できる。それ以上の距離になると、初期投資により圧縮機の導入する方が、中長期的にトータルコストは安くなる。また、ヘリウムの移送距離が短い場合でも、ヘリウム消費量が多い場合は圧縮機導入の経済的メリットが大きい。しかし、圧縮機を設置したとしても、拠点間距離が 100 km を超えるような場合には移送コストの負担は重くのしかかる。

琉大のケースで確立された赤帽に運送委託する方式は、工技センターのヘリウムユーザーが試行錯誤を重ねた結果、生み出されたものである。奈良高専

における移動用圧縮機を活用した方式も、本学のスタッフがあらゆる可能性を探るなかでたどり着いたものである。ヘリウムの移送方法については、他にもっと効率の良い方法を探っていく余地があると思われる。

6.2 ユーザーの負担

液体ヘリウムの補充をメーカーに委託している場合、ユーザーは装置内のヘリウムレベルを確認する程度であり、ヘリウムを管理しているという意識はそれほど高くない。一方、ヘリウムのリサイクルを始めると、ユーザー自らでガスバッグの管理や液体ヘリウムの充填作業を行なう必要が生じることもある。これまでヘリウムの管理をメーカー任せにしていたユーザーにとっては、大きな負担と感ずるかもしれない。

6.3 液化施設側の業務負担

奈良高専の NMR1 台に対して、年に 3 回、50L の液体ヘリウムの供給している。供給サイドで新たに発生した業務は以下のおりである。バラ瓶 18 本からのガス移送と計測、液体ヘリウム容器の予冷、容器移送中のガスバッグとボイルオフガスの管理。また事務手続きとして、ヘリウムの数量管理、見積書と請求書の作成が挙げられる。

7. 展開可能性

ヘリウム価格が高止まりしている昨今、苦境に立たされているヘリウムユーザーは潜在していると思われる。今後ヘリウム価格が更に高騰することになればリサイクルを求める声が増加するかもしれない。琉大と本学の取組みから見えてきたことは、事案に応じて移送方法などのシステム設計を行なわなければならないということである。真似できるところは流用できるが、個別に改良や工夫が必要なこともでてくる。このようなシステムの構築に取り組める人材と継続的な運用を担うことができる組織体制が必要となるであろう。

8. 謝辞

本リサイクルを進めるにあたり、ご助言をいただいた関係者の方々に感謝を申し上げます。特に多くの有益なご助言をいただいた琉球大学の宗本久弥技術主幹に、心より御礼を申し上げます。

参考文献

[1] 沖縄県で進行する液体ヘリウムのリサイクル, ガスレビューNo.911[2022.9.1]

[2] 宗本久弥「ヘリウムはガスボンベ 1 本で何リットル液化できるのか」平成 25 年度 核融合科学研究所技術研究会, 4-01 (2014).

ヘリウムガス再液化事業概要 II

○鷲山 玲子、佐々木 貴子、土屋 光

東京大学 物性研究所 低温液化室

1. はじめに

東京大学物性研究所では、2019年10月1日より「ヘリウムガスの再液化事業」を開始している。本事業は、ヘリウムの入手困難・価格高騰により困窮している研究者・学術機関^[1]の支援を主たる目的としたものだが、2024年4月1日より容器冷却管理業務も加えるなどして事業内容の拡大を行った。この事業に関する概要説明および今後の課題等について報告する。

2. 事業概要

2019年10月1日から開始した再液化事業の詳細は前回の報告^[2]他^[3]に譲るが、概要は学外の申請者が持ち込んだヘリウムガスを受け入れ、当学が所有するヘリウム液化システムで精製及び再液化した液体ヘリウム(以下、LHe)を申請者に提供する、という至ってシンプルな内容である。

3. 拡大の経緯と拡大事業内容

2019年10月～2022年2月までに計13件、17,232Lの申請と利用があったが実際に再液化事業を行っていく上でいくつかの課題があげられたので2024年度からはそれらに対応する形で事業の拡大を行った。以下に経緯と拡大した事業内容を記す。

この再液化事業の申請者の多くはヘリウム液化・回収設備がない機関に所属していた。それらの多くの方はLHeの容器を保有していない。また、保有していたとしても大部分はLHe不足から常温に戻っていた。LHeを速やかに容器に充填して供給・引き渡すためには十分に予冷されたLHe容器が準備されていることが大前提である。容器冷却には多大な時間と労力がかかるが、それらの作業は原則としてLHe輸入業者や供給業者が担っていたため一般ユーザーには知られていなかった。

我々が通常行う手順^[4]での容器冷却には、最短2週間(常温から・真空引き含む)程度かかるので、急な容器冷却対応はできない。また出来たとしても通常業務時間内では対応しきれず、超過勤務での対応等で労力が大きくなり、これらの作業は非常に負担となった。

そもそも、回収設備のない場所でLHe容器を保管すると図1のように蒸発したヘリウムガス(以下、GHe)は大気放出される事となる。装置の冷却や容器を予冷する際に発生するGHeも同様である。LHeが安価で供給業者から潤沢に提供されていた時期には、何かしらの要因で蒸発し発生したGHeは回収するよりも大気放出の方が経済的なので、その手法が頻繁にとられていたし、現在でも回収設備がない場所や販売業者では同様に放出され続けている。

しかし、LHeもGHeも潤沢でない時期においては、この大気放出による損失は致命的であり、再液化事業の申込と共にGHe放出削減目的でLHe容器冷却とLHe自体の長期保管の要請が非常に多く寄せられ、これらが想定外であったことと人的・スペースにおいてのリソース不足などから対応に非常に苦慮した。

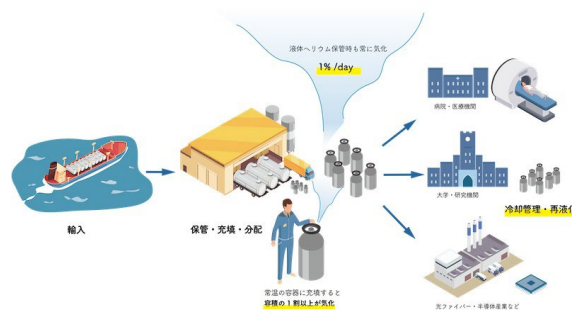


図1 LHeの流通とその過程で気化し放出されるGHe
物性研究所プレスリリース^[5]より引用

また、事業の申請希望者の対応をする上で対象エンドユーザーに関する要望が多かったのが病院のMRI等で、事業拡大を機に公共性が高い病院のMRI等も対象エンドユーザーに含める事とした。これはHe危機時には緊急性の高いMRIを利用する病院などへの供給を優先するために、大学・研究機関などへの供給をカットせざるを得ないケースが発生し、結果、学術機関への供給が滞ることが発生した。そこで病院のMRIへの供給安定性を確保すれば、我々にも安定してLHeが流通される様になる互助的な流通構造の改革を狙ったものである。

これらの経緯をふまえ再液化事業の業務をより円滑に進められるよう、いくつかの設備投資と制度整備を行い、2024年度より図2のような「容器冷却管理」業務を追加し事業拡大を行った。

液体ヘリウム容器の冷却管理

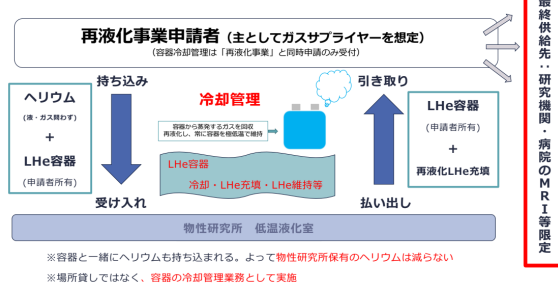


図2 LHe容器の冷却管理の概要

ガス回収を行う事と、それらを簡便に行える小型移動式 He 圧縮機の開発が必要と考えられる。

事業を始めてから5年ほど経過するが、収益が一切ない年度もあるが、困窮時には申込が増え、本来の目的である LHe のセーフティネットとして十分機能することは実証されたと考えられる。また、現在の様な世界情勢が不安定な状況下においてヘリウムの安定供給は安全保障面でも非常に重要なことなので、前述の課題を解決しつつ今後も継続して事業を行っていく予定である。

参考文献

[1] 勝本信吾
 2019年 日本における「ヘリウム危機」問題
<https://www.jps.or.jp/information/docs/seimeishiryu20191220.pdf>

[2] 鷺山 玲子他
 ヘリウムガス再液化事業概要
 令和5年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会

[3] 鷺山 玲子、ヘリウムガス 再液化事業概要、研究基盤協議会「共創の場」シンポジウム@岡山大学
https://www.jcore2023.jp/wp-content/uploads/2025/01/expo2025_kyoso1_sagiyama.pdf

[4] 東大 物性研 低温液化室 HP
 液体ヘリウム容器について
 -断熱槽の真空引き(再排気)について
 -予冷について
https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/cryogenic/he_supply/he_youki.html#saihaiki

[5] 物性研究所プレスリリース
 ヘリウム再液化事業を拡大 容器冷却管理業務を開始 一流通過程で放出されるヘリウムガスを再液化リサイクル—
<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=22130>

4. 実績

実績を図3に示す。事業拡大前の2023年度は液化量0Lだったのに対して、翌年度の2024年度は最終的に42,476Lの液化を行い大幅に供給量が増えた。これは病院のMRIをエンドユーザーに含めた事に大いに起因している。なお、2025年度は2026年2月現在、申込数も含めて0Lという結果となっている。この結果については、2024年頃よりヘリウムが潤沢に市場に出回るようになったことが要因と推測されている。の、容器冷却管理については2024年度も含めて現在まで実績は0件である。

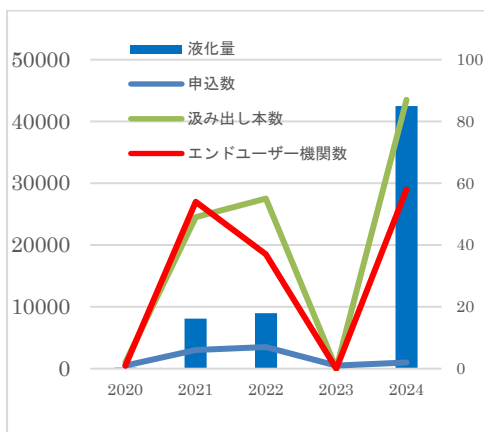


図3 ヘリウム再液化事業実績推移

5. 今後の課題とまとめ

容器冷却管理の実績が0件となった原因としては費用が申請者の想定より高かったことが推測される。容器冷却管理業務の今後の課題としては現在の申請は年単位としているが要望があれば日・月・週単位での課金体制を整えることを検討している。他、2025年度は現時点で再液化事業への申請がないので今後も年度内は申請がないことが予想されるが、定期的な申請を確保する必要があるのであれば、積極的な

ヘリウム回収用の可搬式ガスバッグいろいろ

宗本 久弥

琉球大学 総合技術部 (研究基盤統括センター 極低温施設)

1. はじめに

ヘリウムは希少資源である。近年その輸入不安定や高騰により、廃棄ヘリウムガスの回収・リサイクルの必要性が増した。^[1]

液体ヘリウム利用で発生するヘリウムガスの回収を新たに始める場合、消費が小規模な NMR 等では導入の容易な可搬式ガスバッグを用いるケースが増えてきた。当地では琉球大学(本学)、沖縄県工業技術センター(工技センター)、沖縄健康バイオテクノロジー研究開発センター(バイオセンター)、沖縄科学技術大学院大学(OIST)で活用している。そこで5種類の可搬バッグを紹介し、得失を検討する。

2. 古式回帰

数十年前、液体ヘリウムは1 L程度のガラスデューワーでよく用いられた。液化室でガラスデューワーに液を直接充填、それを実験室へ持ち帰り、可搬式ガスバッグを担いで液化室へガスを返しに行くのも日常であった^[2]。それが消費量増大と共にキャンパス内へ回収配管が張り巡らされ、可搬式ガスバッグは大学から消えていった。

一方で NMR、ESR、MRI 等がヘリウムの使い捨て前提で普及したが、近年のヘリウム危機(入手難、高騰)によりこれらもガス回収も急務となった。本格的設備導入(回収配管延長や圧縮機設置等)には費用も時間もかかるが、猶予はない。そこで再び可搬式ガスバッグが使われ始めた。

なお、可搬式ガスバッグ自体は現代でもバイオガスや SF6 回収などで現役である。

3. 円筒形ゴム引布ガスバッグ

基布の入ったゴムシートでできており、ゴムといっても伸び縮みはしない。液化室の据付式のガスバッグ(日本では直方体が多い)でも一般的な材質で、ナイロン基布 + CR(クロロプレンゴム、デュポンの商標でネオプレン)が用いられている。

可搬式は従来球形が多かったように思われるが、本学では NMR 用に 1 m³の円筒形を多数用いている(千葉大学の吉本佐紀氏から教わり採用、製造元: 清水防水布、代理店: 明治工業、ガスバルーンと呼称)。



図 1 円筒形ゴム引布ガスバッグ



図 2 円筒形ガスバッグをトラックに積み

片側の端面中心にガス出入口のゴム管があり、円筒面には持ち手が付いている。カスタムメイドのため、寸法は NMR 室の扉幅や所有するトラックの荷台に合わせ直径 77 cm、長さ 2,250 cm とした。トラックには 3 本積むと丁度よい。重量は空のとき 5 kg、ヘリウムで膨らむと浮力で 4 kg に減る。

ガスの透過は多少あり(ヘリウムの漏出、空気の侵入とも)、膨らませて数日放置すると少しずつ萎み純度も低下する。しかしいずれも若干のため気にせず、定量的データは取っていない。

清水防水布は元々救命用ゴムボート等を製造しており、ガスバッグもその技術で作られ信頼性が高い。丈夫で、2017 年より使用しているが破れたり漏れたりといったことは経験していない。(NMR のガス回収はそれより前の 2015 年より開始している)

ゴム引布ガスバッグは他に藤倉コンポジット、ニッタ化工品(旧・東洋ゴム工業から移管)、気球製作所などが扱っている。

4. ポテチ袋型スカイピア

ダイゾー(旧・大阪造船所)のスカイピアは飛行船の技術で作られている。ガスバリア性に優れたラミネートフィルムでできており、ガス透過は極少である³⁾。ポテトチップス等の袋(の内側)と同じくアルミ蒸着のため銀色だが、傷防止カバーに覆われていてわかりづらい。スカイピアも液化室で直方体ガスバッグの設置例が多い。

ポテチ袋型の可搬式スカイピアは、沖縄県工業技術センターの荻貴之研究員がダイゾーへ相談したことから生まれ、製品化された(2022年)。ガスバッグは平面のシートを貼り合わせて作るため、球や円筒形、直方体は製作に手間がかかる。そこでコストを抑えられる形状としてポテチ袋型となった。空のときは200 cm × 160 cmの封筒型だが、1 m³のガスが入り膨らむと形状も正にポテチ袋である。



図3 ポテチ袋型スカイピア
(試しにカバーを外してみたところ)



図4 赤帽にポテチ袋型スカイピア3個積載

本体のフィルム単体は軽くてヘリウムが入ると浮くが、カバーが重く、またガス出入口もSUSのねじ込みフランジ(20A)のため、合わせて5 kg ~ 7 kg程度になる(バリエーションあり)。荻氏がダイゾーへ使い勝手などフィードバックし、初期バージョンから順次改良が加えられている。カバーが初めの1個は青、2個目からは白、その後緑となってから全国へ普及したが、色により素材が異なり、緑が軽量でよい。

後に輸送手段の改善を図り、赤帽⁴⁾の幌付き軽トラックに積んでみると、偶然にも丁度3個収まった。そこまで意図した寸法ではなかったが、真に良い設計であった。

5. 水バッグ

PVC引布(ターポリン)の直方体で、天面にホースを突っ込む吸水口、片側の妻面下部に吐水口のボール弁が付く。国産品は知らないが、Amazon.co.jpにて「貯水袋 1500L」等で検索すると中国製の出品がいくつも出てくる(「水バッグ」はガスバッグと対比した私の呼び方で、この表記を見たことはない)。

メーカーは複数あり、色は青が多いが水色や緑、黒も見られる。サイズは50 L~20,000 Lの商品があるようだが、可搬式として使いやすいのは1,000 L~2,000 L(1 m³~2 m³)であろう。素材は丈夫だが重い(引布の厚みにより異なり2,000 Lで9 kg~12 kg、寸法は200 cm × 150 cm × 70 cm程度)。あまり大きなものは移動が困難になる。

この水バッグも工技センター荻氏の開拓である(2023年)。商品を見つけ、実際に購入してヘリウム回収に使えるかチャレンジされた。その成果も全国に広まりつつある。

特長は何といても安価な点であり、ガス回収を試行するハードルがぐっと下がる。また液体ヘリウム充填は数か月毎で、そのときだけ大量のガスが発



図5 2 m³水バッグ(附属のボール弁は不使用)

生するという施設では、それに見合う量(やサイズ)のガスバッグ(や圧縮機)は高価で揃えにくく、さらに据付式となれば設置スペースにも難がある。そこで水バッグの出番である。費用が抑えられ、充填時だけ展開すれば場所も占有しない。

欠点はやはり透過で、これも定量的データは取っていないが、数日間であってもガスを貯蔵するのには向かない。工技センターとバイオセンターでは、日々の少量のヘリウム蒸発はスカイピア数個で回し、液充填時のみ水バッグを多数投入してその日のうちに本学へ輸送(4t 箱車)、ガス抜き取りまで完了するように運用している。

他にも難点として、仕様が Amazon の記載どおりでない、写真が違う、持ち手の有無や形状が不明、吐水口の口径が届いてみるまでわからない等がある。吐水口はガス出入口に用いるが、太過ぎる(25A~40Aを経験)。40Aは異径継手2段重ねにした。

給水口は無用だが、その蓋は気密性が悪く、荻氏の案により二通りの対策を取っている(図6~7)。液状ガスケットでもよいが、ここは平行ねじのためシールテープでは厳しい。品質管理も甘く、新品でも



図6 水バッグ給水口の漏れ対策例1
シリコン栓を詰めて余分をカットし蓋をする



図7 水バッグ給水口の漏れ対策例2
外周に厚手のパッキンを入れる

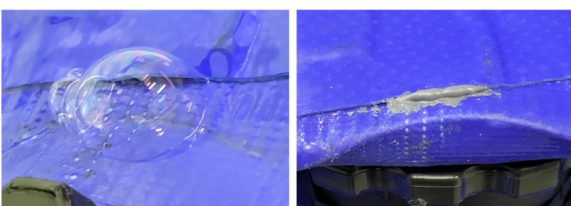


図8 新品水バッグの漏れ補修(液状ガスケット)

シーートの継目から漏れたことがある(図8)。

また直方体のため、ガスを吸い出すとき形を調えるのに苦勞し、上手くやらないと折り畳めなくなる。

軟質 PVC に特有の注意点も挙げる。当地ではないが、気温が低いと硬くなるかもしれない。経年で可塑剤が滲出し、べたついたり脆化する可能性がある。保管時は他の樹脂製品との接触を避ける。これらは可塑剤の配合次第なので、個々の製品により異なり、数年かけて様子を見ないとわからない。

補足:PVC(polyvinyl chloride、ポリ塩化ビニル、塩ビ)には硬質と軟質があり、硬質は例えば塩ビ管である。引布に使われる軟質 PVC は軟質塩ビやソフビ(ソフトビニール)とも呼ばれ(例:ソフビ人形)、添加される可塑剤が分子間に入り込むことで柔らかくなっている。その可塑剤が抜け出ると上記問題を生じる

6. 布団圧縮袋

ポテチ袋型スカイピアを見て思いつき、百均の商品でもヘリウムを回収できないか試作した。110 cm × 100 cm の布団圧縮袋に継手を付け、膨らませると 0.25 m³ のガスが入った。放置すると一週間近く浮き続けたが、やはり段々萎みヘリウム純度も低下した。



図9 布団圧縮袋でガスバッグを試作

作業時はうっかり飛ばしてしまわないよう錘が要り、また平車に積むのは危険である。パンパンに膨らむとファスナーが開いてしまうので、気温や気圧(輸送時の標高)の変化にも注意を要する。傷ついて穴が空かないよう、スカイピアを真似てブルーシート等でカバーもした方がよい。しかし容積が小さく実用性が低いため、試用にとどめている。



図10 布団圧縮袋でNMR からガス回収(お試し)

7. バランスボール

空気穴にホース継手を差し込むだけで簡単にでき、また布団圧縮袋よりずっと扱いやすい。基布のない軟質PVC製のため、パンパンに膨らませると多少伸展する(今回取り上げたもので唯一)。

容積は直径65 cmの製品でも0.14 m³しかないが、学内の液体ヘリウム輸送で容器からガス回収するには丁度よい。(長距離では回収し切れず複数個必要)



図 11 バランスボールで輸送中のガス回収(実用)

8. ガスバッグの選択

本学で使用するには、所有する平車に積みやすい円筒形がよいが、本学に合わせた寸法では赤帽やバイオセンターの軽トラックに積むのが難しかった。逆にポテチ袋型は赤帽に好適だったが、平車に積むと固定が難しく、トラックシートを被せるなど手間が増える。貨物自動車でない区間(手持ちや台車)の運びやすさや、膨らんだときだけでなく空にしたときの収納なども使い勝手に影響してくる。輸送手段等に応じた形状の設計が大切であり、逆にガスバッグに応じた輸送手段の検討も必要である。

材質はガスバリア性でいえばスカイピアが最高であるが、扱いやすさやコストも無視できない。素材の厚みにもよろうが、個人的にはゴム引布が柔らかく軽めで扱いやすく感じる。収納時に折り畳んだり円柱状に巻き取るのも容易である(図12左)。スカイピアのカバーや水バッグはそれに比べると少し堅いが、平たく巻き取ることはできる(図12右)。また、耐久性は今後の検証課題である。



図 12 ガスバッグを巻き取って収納

9. まとめ

ヘリウム回収用の可搬ガスバッグとして円筒形ゴム引布、ポテチ袋型スカイピア、水バッグ(PVC引布)、布団圧縮袋、バランスボールの5種類を紹介し、各得失を述べた。それぞれ形状と材質が異なるため比較は単純でない。比較表は取って作らなかった。

バイオガスやSF6用のガスバッグが流用できないか探しているが、手頃なものはない。水バッグの活用は傑作である。新たなアイデアによる従来ないガスバッグの登場も期待する。

ガスバッグが可搬(輸送用)であるからには、ホースや配管との着脱を伴う。それには継手も重要だが、その話は機会を改めたい。

最後に、ガスバッグに関する情報や資料の提供、ご助言をいただいた諸氏に感謝し、特に本報告書作成にまでご協力いただいた沖縄県工業技術センター主任研究員の萩貴之氏に厚くお礼申し上げます。

参考文献 (urlは2026年2月20日現在)

- [1] https://www.ltc.u-ryukyu.ac.jp/helium_recycle/
- [2] 和田裕文、液体ヘリウムと付きあって40年、九州大学低温センターだより No.17、1-5、(2024)
- [3] <https://www.daizo.co.jp/skypia/membrane/membrane.html>
- [4] <https://okinawa.akabou.jp/>

口頭セッション
第5分野
(情報・ネットワーク技術)

核融合科学研究所における VPN システムの運用

○中村 修^{A)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部 制御情報技術課

1. はじめに

コロナウィルスが流行したことを機に、在宅勤務での対応が急激に増えることとなった。自宅から職場の機器へアクセスして業務を遂行するためには、VPN システムを利用することが不可欠となり、VPN システムの利用者が急激に増えることにもつながった。

本報告では、核融合科学研究所における VPN システムの運用について報告する。

2. VPN システムの構成機器

本研究所では、VPN アプライアンス製品として Ivanti 社製の ISA8000c を採用している。また、認証サーバとしては株式会社ソリトンシステムズ製の NetAttest EPS (EPS-ST05-A) を運用している。認証方式としては、パスワード認証に加えてクライアント証明書による二要素認証を行い、セキュリティ強度を高めている。

ISA8000c の本体写真を図 1 に、VPN システム全体の構成図を図 2 に示す。



図 1. ISA8000c の本体写真

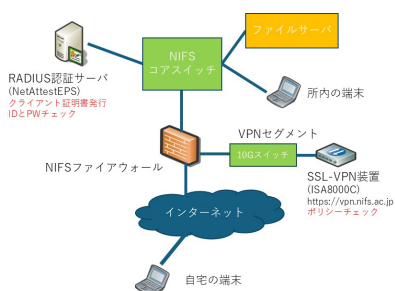


図 2. VPN システム全体の構成図

3. 運用

本研究所で発行するアカウントは 4 種類に分類され、それぞれアクセス可能なネットワーク範囲が区別されている。

本研究所の職員であれば、研究基盤 LAN のみにアクセスできる kiban から始まるアカウントか、研究基盤 LAN に加え LHD 実験 LAN にもアクセス出来る nifs から始まるアカウントが付与される。LHD 実験に参与する共同研究者においては、日本国内の共同研究者であれば、LHD 実験 LAN のみにアクセス出来る lhd から始まるアカウントが付与されるが、日本国外の共同研究者に対しては、LHD 実験 LAN 内の限られたサーバのみにアクセス出来る flhd から始まるアカウントが付与されることになっている。

SSL-VPN 接続時には、接続端末が定められたポリシーを満たしているかのチェックを行っている。

Windows 端末であれば、

- ・サポート対象の OS であること
- ・Windows パッチが適用されていること
- ・14 日以内の定義ファイルでアンチウィルスが動作していること

この 3 つに関してポリシーチェックを行っている。

mac 端末に関しては、

- ・サポート対象の OS であること
- ・14 日以内の定義ファイルでアンチウィルスが動作していること

この 2 つに関してポリシーチェックを行っている。

4. Ivanti (旧 Pulse Secure) の導入経緯

本研究所における Ivanti (旧 Pulse Secure) 製品の導入は 2020 年度に開始された。当初は Pulse Secure 製品としての導入を進めていたが、2020 年の 12 月に Ivanti による Pulse Secure の買収が発表された。導入途中での発表ではあったものの、仕様に沿った納品が可能であったため、そのまま 2020 年度内に PSA5000 の導入を完了した。

しかし、導入から約 1 年後の 2022 年 7 月に、PSA5000 の販売を 2023 年 1 月で終了すると Ivanti より通知があった。2023 年 1 月をもって重大なバグや脆弱性対応を除く機能アップデートの終了も通知さ

れた。さらに 2024 年 6 月で解析サポートも終了することになり、脆弱性対応も無くなるということで、後継機種への移行が提示された。

当時運用していた PSA5000 からは、後継機種へと移行するのが円滑であると判断し、現在運用している ISA8000c への移行を 2023 年 1 月に実施した。

5. ISA8000c における不具合等

5-1. ファームウェア更新に伴う不具合

macOS 14 対応のため、2023 年 12 月にファームウェアを 22.6R2.1 へ更新したところ、二要素認証に用いるクライアント証明書の検証が失敗するようになり、従来の運用が不可能となった。当日の解決を断念してロールバックによりサービスを再開し、config や失敗時のログを取得してサポートへ調査を依頼した。

約 3 か月後、当該事象はファームウェアの不具合であるとの回答を得た。それから約 2 か月後に公開されたファームウェア 22.7R2 へ更新したが、同様の不具合が再発した。さらに約 3 か月後、接続アプリ ISAC (Ivanti Secure Access Client) の更新案内があったものの、改善は見られずサポートへの調査依頼を継続することとなった。

最終的に 2025 年 1 月、「Allow legacy certificates for end to end communications」の設定を有効化することで回避可能との回答を得たため、当時の最新ファームウェア 22.7R2.4 への更新を行い、設定変更を行うことで不具合は解消された。しかし、設定変更で解消する事象に 1 年以上を要し、その間に macOS 15 がリリースされるなど、サポート対応の遅延が目立った。

5-2. 脆弱性対応

2024 年 1 月に、非常に深刻度の高い脆弱性 CVE-2024-21887 (CVSS スコア 9.1) が発表された。サポートからは「即時の XML ファイル適用、または適用不能な場合は機器停止」という強い勧告があった。機器を停止させるわけにはいかないため、XML ファイルを適用して運用を継続することにした。

その後も追加の XML ファイルの適用指示があり、対応して運用を継続した。改ざんを受けたかチェックするツールを試してみたが、幸いにして改ざんはみられなかった。多くの機関が攻撃を受けて改ざんを受けたものの、本研究所では改ざんされるまでには至らなかったが、ファイアウォールのログからは、XML ファイルを適用した後に攻撃を受けている痕

跡が確認された。

恒久対策としては、脆弱性に対応されたファームウェア 22.3R1.1 への更新が必要とされたが、サポートからは改ざんの有無にかかわらず工場出荷時へ戻してからアップグレードパスに従って更新するよう指示があったため、更新作業に丸一日を要した。

その後 2025 年 1 月には CVE-2025-0282 (CVSS スコア 9.0)、一か月後の 2 月には CVE-2025-22467 (CVSS スコア 9.9) の重大な脆弱性が立て続けに発見され、ファームウェアの更新を行うこととなった。その際もサポートからの指示は、工場出荷時に戻してから行う手順であった。

5-3. Windows Update Agent の更新による接続障害

Windows Update の適用後、VPN 接続が失敗する事象が繰り返し発生した。原因は Windows Update により、Windows Update Agent のバージョンが更新され、Windows パッチのポリシーチェックが失敗するためであった。

2024 年度では、4 月、5 月、7 月、11 月。2025 年度には 4 月、9 月、12 月と Windows Update Agent が更新され、対応するまで Windows Update を行わないようにアナウンスを行っている。

対応するには OPSWAT 社の提供する ESAP (Endpoint Security Assessment Plug-In) の更新が必要なのだが、サポート会社からの提供に 2 週間程度を要する。サポートに対して、例えばバージョンを無視するなどしてバージョンが上がっても Windows パッチのチェックが行えるようにならないか相談したが、バージョン管理は重要と考えているので対応予定はないとの回答であった。

5-4. サポート終了の通知

2023 年 1 月に導入を決定した ISA8000c であったが、2025 年の 8 月に販売終了が発表され、2027 年 1 月でサポートを終了するとの通知を受けた。ISA8000c での運用を開始してから 2 年程度での通知であり、サポート終了までの実運用期間は 4 年に満たない結果となってしまった。

6. まとめ

Pulse Secure の Ivanti による買収は、本研究所の VPN システム運用に大きな影響を及ぼしたと考えられる。買収に伴う方針の変化は、しばしばユーザに不利益をもたらすことがあるが、本研究所における事例でも同様の傾向がみられた。

現在、本研究所では Ivanti 製品の後継機ではなく、代替となる別製品の検討を進めている。特に脆弱性対応の負荷が高いことを踏まえ、クラウド型サービスへの移行も選択肢として検討している。また利用者の要望に基づき、アクセス制御パターンの増加に対応可能な設計もあわせて行う必要がある。

参考文献

[1] JPCERT/CC
<https://www.jpCERT.or.jp/at/2024/at240002.html>

口頭セッション
第6分野
(その他)

科研費（奨励研究）申請・採択のための組織的活動に関するアンケート調査

○加賀谷 史^{A)}、大平 俊明^{A)}、高橋 圭太^{A)}、齋藤 憲寿^{A)}、伊藤 悠大^{B)}

^{A)}秋田大学大学院理工学研究科、^{B)}秋田大学情報データ科学部情報データ科学科

1. はじめに

科学研究費補助金（科研費）のうち、奨励研究はほぼ全ての技術職員が申請可能であり、本研究会の参加者でも毎年申請されている方は多いと思われる。また本学では申請率及び採択率向上を目的とした組織的支援も存在する一方、本学以外の支援実態は不明であり、故に支援内容の妥当性も評価困難である。

本発表では、科研費申請における組織的支援の実態を調査するため、全国の大学等技術職員を対象に行ったアンケートの内容及びその結果について報告する。

2. 科研費申請支援における本学の取り組み

秋田大学理工学研究科技術部では、技術職員のスキルアップの一環として、奨励研究並びに公益財団法人等が募集する研究助成金といった外部資金の獲得を推奨しており、2020年度よりその支援を目的とした組織「外部資金チャレンジプロジェクト（CP）」を立ち上げ、現在まで活動している。主な活動としては、「申請書類の添削・相談」「新人職員向けの研修の主催」「申請・採択状況の情報収集及び分析」の3つに大別される。

外部資金 CP 発足からの6年間の実績として、新人職員向け研修は3度開催（2021, 2023, 2024年）、奨励研究採択件数は13件を数える。

3. アンケート調査の内容と結果

今回のアンケートは、2024年8-9月の間に行い、全国28の技術部（以下、組織）に所属する計33名の方々から回答をいただいた。回答者の所属組織は、北は弘前から南は鹿児島と、広範に渡っての調査となった（図1）。また回答者の職位は44%が技術専門員であることから、ある程度組織の内情を踏まえた回答となっていることが推測される。

図2に科研費申請への方針について示す。申請に対しては「任意」または「推奨」が96%を占めており、強制しない組織が大多数となった。また申請者に対する評価は、「プラス」が22%と「推奨」の割合を下回り、申請だけでは評価に繋がらない傾向が見られた。一方で採択者については「プラス」が59%



図1 回答者の所属機関所在地

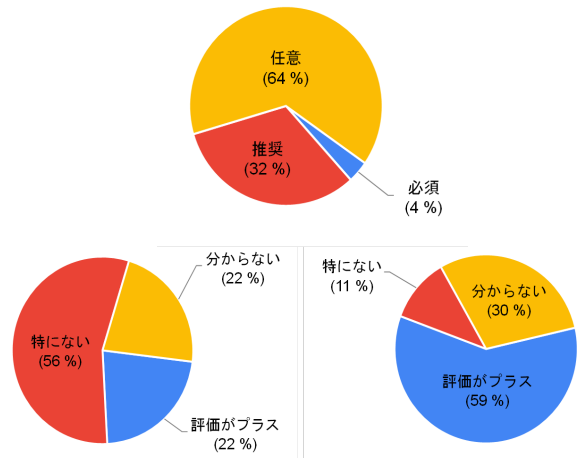


図2 科研費申請への方針等

上：方針，左下：申請への評価，右下：採択への評価

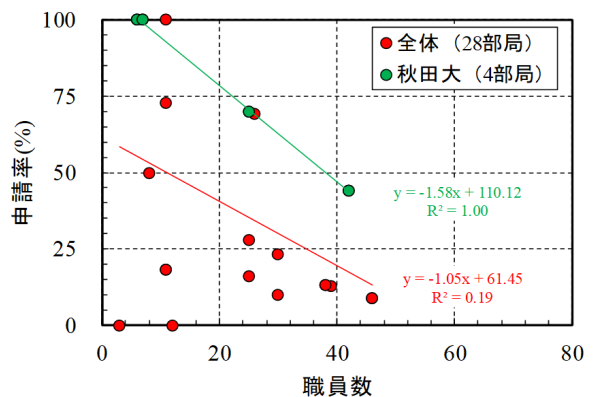


図3 職員数と申請率の相関

と、「推奨」と「必須」の合計割合を大きく上回っており、結果を出せば方針としては任意の組織であっても評価される傾向が見られた。

図3に全組織及び秋田大学内における職員数と申請率の相関を示す。ばらつきは大きいものの、傾向としては職員数と申請率には負の相関が見られた。これは、人数が少ない組織ほど所属職員の動向が透明化されやすく、特に申請を義務または強制に近い任意とする場合は、方針の共有並びに申請しない職員へ「圧がかかりやすい」ためと推測される。秋田大学についても同様の相関が見られるが、最大規模の理工学研究科(約40名)においても申請率は40%超と、同規模の他組織と比較して高い結果となった。

直近5年間での申請率の変化(図4)では、過半数の54%が「横ばい」となった。横ばいの要因としては、「職員全員が申請するようにしている」等の組織側の号令、または「近年の新規採用職員が申請するようになった」ことで申請者の減少が抑制されている一方、「日々の業務で手一杯」「研究室に配属されておらず、研究テーマを設定しにくい」と回答した職員、あるいは元から申請に対して消極的な職員は、組織の支援や号令の有無に関わらず非申請層のままであり、全体として「申請者が固定されている」状況を形成しているためと推測される。ただし、わずか4%ながら「増加傾向」との回答もあり、その要因にも先述の「近年の新規採用職員が申請するようになった」が挙げられていることから、申請率の向上を目指す上では、既存職員への啓蒙よりも新規採用職員の育成、支援が効果的であると示唆されている。

組織としての支援体制の有無については、28組織のうち32%が「ある」と回答しており(図5)、申請率向上のために、単純な号令だけではなくバックアップも行う組織が少なくないことが判明した。具体的な支援内容(図6)としては、「申請書の添削」「データ収集および情報公開」「講演」が多かった。一方でこれらは主に、過去に申請経験がある、あるいは普段から文章を書いている、所謂ある程度鍛えられた職員に向けたものであり、申請未経験の職員にとって重要性が高いと考えられる「申請テーマ立案に関する相談」は比較的少ない結果となった。特に前項で有効性が示唆された「新規採用職員を対象としたセミナー」は、アンケート集計時点ではほぼ見られない結果となった。

4. 総括

科研費(奨励研究)の申請・採択に対する組織的

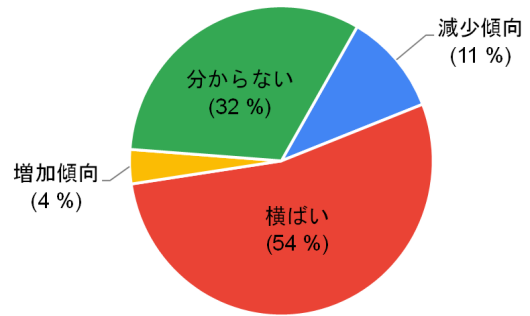


図4 直近5年間における申請率の変化

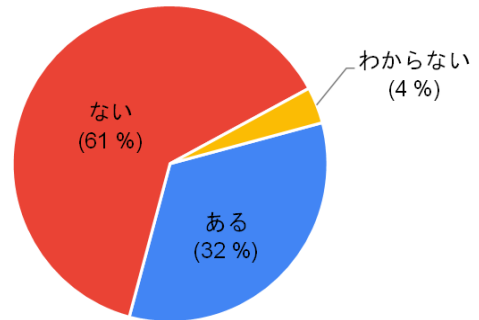


図5 所属組織における支援体制の有無

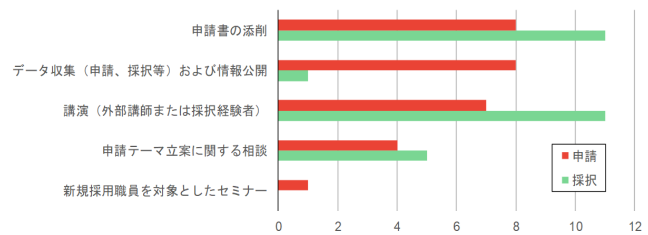


図6 申請・採択への具体的な支援内容

活動について、全国の技術部を対象にアンケート調査を実施したところ、28組織、33名からの回答をいただき、その結果より以下の事実、傾向が判明した。

- 1) 申請に対する技術部の方針は任意または推奨が多いが、採択により評価はプラスされる傾向にあった。
- 2) 全国の約3割の組織に支援体制があり、その支援内容としては、申請書の添削・データ収集・講演が多い。
- 3) 申請率の向上は新規採用職員による影響が大きいものの、新規採用職員を対象としたセミナーの開催は少ない。

謝辞

今回ご回答をいただいた28組織、33名の技術職員の方々に対し、記して感謝を申し上げます。

ポスターセッション

第1分野

(工作技術)

アングルヘッドを用いた導波管角フランジ加工への挑戦と気づき

○伊藤 雄平^{A)}、東 憲男、高富 俊和^{A)}、保住 弥紹^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 機械工学センター

1. はじめに

機械工学センターでは、機構内における実験機器や各種装置の開発・製作支援を行っている。特に加速器研究施設からの依頼には、特殊加工を要する案件が多く、加工方法の検討を重ねながら製作を進めている。加速器では、クライストロンで発生した高周波電力を加速管へ伝送するために、長尺の矩形導波管を使用している。これらの導波管は内部を真空とするため、角フランジにより接続されている。しかし、角フランジのシール面不良などによりリークが発生すると、導波管として使用できなくなる。導波管は長尺構造であるため、通常の立型フライス盤では角フランジ部の修正加工が困難である。そこで本件では、既存の立型フライス盤にアングルヘッドを装着し、ワークを横置きで安定保持した状態のまま角フランジ部を加工できる図1の方法を採用した。本発表では、製作事例を取り上げ、傷の生じた角フランジのシール面を再加工するために工夫した治具の構成および、アングルヘッドを用いた具体的な加工方法について紹介する。

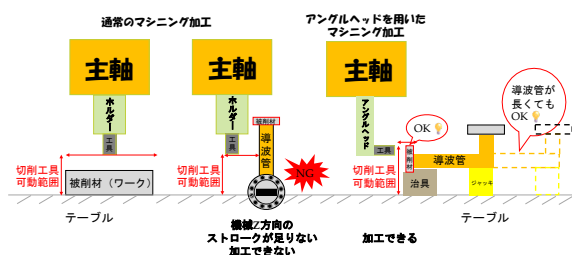


図1 アングルヘッドを用いた加工方法

2. 製作物について

2.1 導波管について

導波管とは、大出力の電波発生装置であるクライストロンで発生した電波を加速管に送るために使われる。導波管の中は真空に保たれ、電波は金属の壁にガイドされるようにして管の中を進む^[1]。しかし、導波管の取り付けや取り外しの際に、フランジのシール面へ傷が生じると、真空を維持できなくなる問題がある。

2.1 修正箇所について

今回加工した導波管を図2に示す。全長は約1mであり、銅製の導波管は90°に曲がった形状を有している。また、ステンレス合金製の角フランジのシール面には、取り外しの作業時に生じた深さ0.2~0.5mm程度の傷が確認された(図3)これらの傷を除去する為、切削加工が必要となった。さらに、導波管の長さには複数の長さが存在する為、長さの違いに対応可能な加工方法を検討する必要がある。



図2 加工する導波管角フランジ

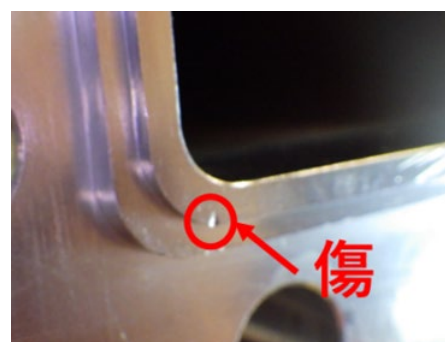


図3 シール面の傷

3. 加工方法について

3.1 加工機とアングルヘッドについて



図4 FNC128 (アングルヘッド装着時)

加工機には立型フライス盤のFNC128を使用した。

本機は、所有するフライス盤の中でも XYZ のストロークが大きく、大型部品の加工に適した機械である。図 4 に、アングルヘッドを装着した FNC128 の外観を示す。

本加工で使用したアングルヘッドは、「大昭和精機株式会社製の ANGLE HEAD BBT50-AG90/NBS20-230S」であり、シャンク径 $\phi 20 \text{ mm}$ の工具も把持可能である。立型フライス盤に本アングルヘッドを装着することで、横型フライス盤と同様の加工が可能となる。なお、本アングルヘッドは FNC128 用として過去に導入されていたが、現職員による使用実績がなく、加工ノウハウも蓄積されていなかった。そのため、本加工では立ち上げ作業から実施した。

本機械および工具を使用することで、導波管の長さに依存せず、角フランジの加工が可能であると考え、本加工方法を採用した。

3.2 加工治具について

アングルヘッドを用いて導波管角フランジの加工を行うためには、角フランジの固定のためのアルミの治具が必要となる。このため、図 5 に示すアルミ製治具を新たに製作した。治具はフライス盤を用いて荒加工を行い、ベースへの固定を目的としたボルト穴加工を実施した。角フランジが接触する面およびフランジ固定用の穴加工については、アングルヘッドを装着した状態で一連の加工を行うことで、工具と治具の位置関係による誤差を低減し、加工精度の確保を図った。

また、アルミ製の治具にはボルト、おさえ板およびシム板を組み合わせて使用することで、フランジの水平、垂直方向の傾きを調整、固定できるよう工夫した。



図 5 アルミ治具製作中の様子

3.3 加工条件について

フランジ加工では、切削条件と工具オフセットを調整しながら、シール面の傷が完全に除去されるよう切削を行った。使用した加工条件等を表 1 に記す。

表 1. 加工条件等

工具	$\phi 6 \text{ mm}$ 2 枚刃超硬エンドミル
回転数	1200 rpm
送り速度	48 mm/min
1 回の切込	0.1 mm
総切込量	0.2~0.5 mm
加工液	ステンコロリン (塗布)

また、加工中に導波管内へ切削油等が侵入することを防ぐため、角フランジに蓋を設け、内側にエアを供給し陽圧にすることで、内部に油が入らない工夫を施した。加工中の様子を図 6 に示す。



図 6 導波管フランジの加工中の様子

4. 加工結果について

4.1 目視結果

加工後はバリ取りを行い、シール面を傷つけないよう、スポンジタイプのヤスリと、ダイヤモンド砥石を使用し研磨した (図 7)。目視の結果、シール面についていた傷を除去できている事を確認した。

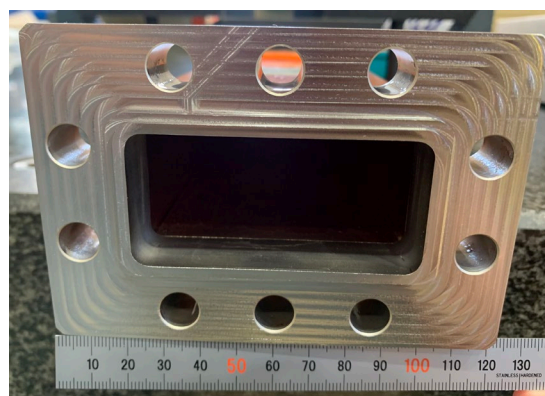


図 7 バリ取り後のフランジ表面の様子

4.2 表面粗さ測定について

次に、加工面の表面粗さ測定を実施した。V 溝付柵型ブロックにフランジを固定し接触式表面粗さ計を用いて図 8 のように測定を行った。測定方向を図

9 に、測定結果を表 2 に示す。その結果、フランジを、 $Ra0.375 \mu m \sim Ra0.674 \mu m$ で加工することができていることを確認した。加工後はリークなく無事納品することができた。

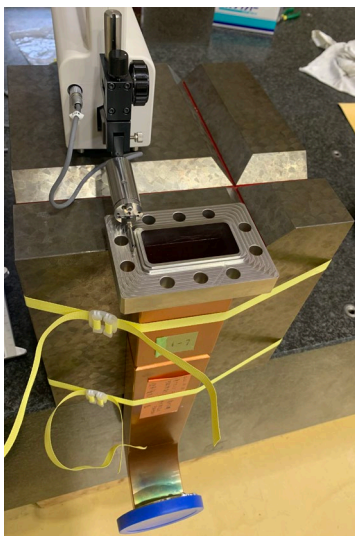


図 8 測定中

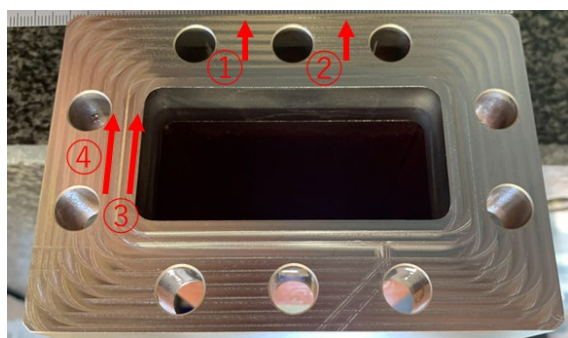


図 9 表面粗さ試験の方向

表 2 表面粗さの測定条件と結果

表面粗さ 測定場所	1 条件目	2 条件目
	$\Lambda c : 2.5 \text{ mm}$ $L_n : 12.5 \text{ mm}$ $Spd : 0.3 \text{ mm/s}$	$\Lambda c : 0.8 \text{ mm}$ $L_n : 4.0 \text{ mm}$ $Spd : 0.3 \text{ mm/s}$
表面粗さ $Ra[\mu m]$		
①	0.427	0.375
②	0.674	0.559
③	0.645	0.554
④	0.464	0.408

5. まとめ

今回の加工では、立型フライス盤では対応できない長尺の導波管フランジに対し、アングルヘッドおよび自作のアルミ製治具を活用し、横型による加工を実施した。切削加工によりシール面の損傷を除去し、フランジの再利用を可能とした。

加工精度を確保するため、フランジの角度および位置の微調整が可能な構造とした治具を製作し、導波管の長さ依存しない加工方法を確立した。また、最適な切削条件の選定・調整を行うことで、安定した加工精度を実現した。

参考文献

- [1] 高エネルギー加速研究機構 ILC 準備室. ILC 通信 加速器図鑑：導波管. 2012-04-01, <https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2012/04/01/zukan-waveguide/column>, (参照 2026-01-19)

陽電子源用フラックスコンцентрレーターヘッドの組立て

○牛谷 唯人^{A)}、榎本 嘉範^{B)}、森川 祐^{B)}、高富 俊和^{A)}、保住 弥紹^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 機械工学センター

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 応用超伝導加速器イノベーションセンター

1. はじめに

高エネルギーコライダー実験では、より高いミノシティーを得るために、大電流化が進められている。フラックスコンцентрレーター (Flux Concentrator, FC) は生成した陽電子を効率よく捕獲することが目的のデバイスである。FC の組立は 20 点以上の部品を TIG 溶接によってリークなく溶接を行う必要がある。仮組状態では自立安定性が低い構造であるため、溶接時の変形や位置ずれを防止する目的で、事前の溶接手順の検討および専用ジグの設計が不可欠であった。FCヘッドの中心部には、スパイラル状に巻かれた銅パイプが挿入される構造となっており、密閉性を確保するため、銅パイプと SUS パイプの 2 か所の接合部において銀ロウ付けを行う必要がある。予備品がなく再製作が困難であること、また銀ロウ付けの作業経験が十分でないことから、本作業に先立ち模擬部材を用いた練習およびリーク試験による検証を実施した。

2. 溶接手順の検討

フラックスコンцентрレーターヘッド (以下 FC ヘッド) は 20 点以上の部品で構成されており、すべての接合部においてリークの無い溶接品質が要求される。そのため、組立てに先立ち、3D モデルを用いて溶接手順の検討を行った。各部品の溶接順序や作業姿勢、トーチの進入方向を事前に確認することで、干渉や作業困難箇所の洗い出しを行った。

2.1 狭小部における溶接可否の検証

FC ヘッドには、溶接作業空間が狭い箇所が 3 か所存在する。内訳は、フィードスルー内側の溶接部が 2 か所、隙間 7mm のパイプ溶接部が 1 か所である。これらの箇所については、溶接トーチが物理的に届くかどうかの事前確認が必要であった。

センターが保有する中で最も小型の溶接トーチ先端部品と実際の部品を並べて確認を行った結果、いずれの箇所においても溶接が可能であることを確認した。

3. 溶接作業用ジグの設計および製作

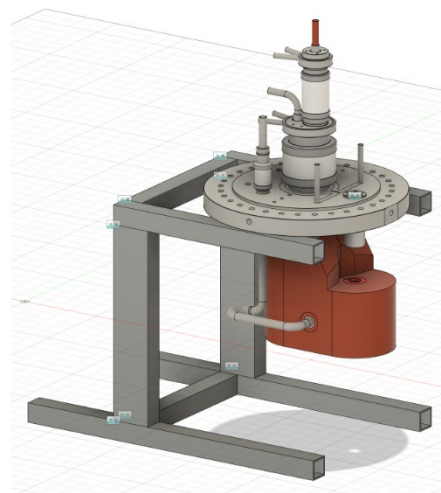


図 1 ジグの設計

FC ヘッドは重量が約 39kg あり、安定した状態で溶接を行うためには専用ジグが必要である。このため、溶接作業用ジグの設計および製作を行った(図 1)。

ジグは SS400 製の 30×30mm 角パイプを用い、溶接構造により製作した。ジグの製作完了後には錆防止を目的とした塗装を施した。本ジグにより、FC ヘッドを安定して保持した状態で溶接作業を行うことが可能となった。

4. 銀ロウ付け作業の実施

FC ヘッドの中心部には、スパイラル状に巻かれた銅パイプが挿入される構造となっており、密閉性を確保するため、銅パイプと SUS パイプの 2 か所の接合部において銀ロウ付けを行う必要がある。

銀ロウ付けの作業経験が多くないことから、本作業に先立ち、SUS 製のボルトおよびナットを用いて練習を行った。その後、SUS パイプと銅パイプを用いた実践的な練習を行い、リーク試験による確認も行った。

十分な手順確認と練習を行ったうえで、本番作業を実施した。銀ロウ付け部以外の周辺構造に湿らせたウエスを巻き付けることで放熱を促し、局所的な温度上昇によるロウ付け部以外の溶融や部材変形を防止した。リーク試験を行ったところ、リークレートは $5.8 \times 10^{-11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であり問題が無いことを確認した。

5. フィードスルーTIG 溶接時のリーク発生と対策

中央部のフィードスルーに対して TIG 溶接を行った後、リークが発生した。補修溶接を試みたがリークは改善せず、最終的に溶接部に穴が開いた。この対策として、問題箇所をリューターにより切除し、延長パイプを新たに製作した上で再度溶接を行った。

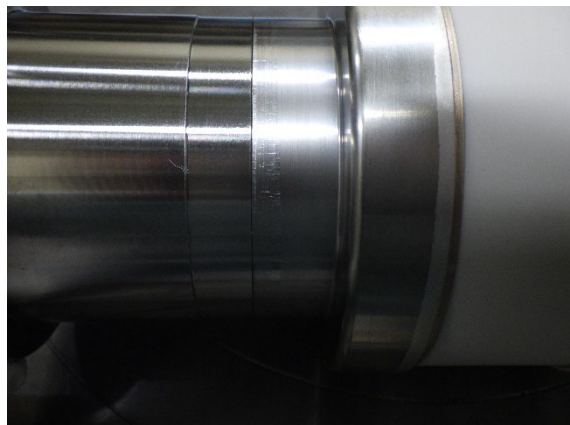


図 2 フィードスルー外観

原因調査の結果、フィードスルー表面をワイヤーブラシで研磨した際、外観が SUS と同様に見えたことから、材質の誤認が生じていた可能性が考えられた。フィードスルーはセラミックと SUS を銀ロウ付けた構造であり、表面に銀ロウ成分が残存していた可能性がある(図 2)。そのため、再溶接に際してはワイヤーブラシによる十分な研磨と洗浄を行った後に溶接を実施した結果、リークレートは $3.8 \times 10^{-10} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であり問題が無いことを確認した。

6. 最終組立ておよび真空試験結果

上記の対応後、残りの TIG 溶接箇所についてはすべてリーク無く溶接を完了し、FC ヘッドを納品した(図 3)。

しかし納品後、回転ターゲットに組み込んだ状態で真空試験を実施したが、その結果リークが確認された。溶接時の写真を確認したところ、フランジ内部に傷状の痕跡が認められた。3D モデルを用いて構造を確認した結果、該当箇所はネジ穴と段穴の壁との距離が 0.47mm と極めて近い構造であることが判明した。

この対策として、該当するネジ穴の奥に接着剤を注入する方法を採用することとし、併せてリーク試験用チェンバーを製作した。リーク試験用チェンバーを用いて再度リーク試験を実施した結果、リークが無いことを確認した。



図 3 溶接後の FC ヘッド

7. まとめ

その後、FC ヘッドは回転ターゲットと合わせて組み込みと真空試験まで完了した。今年度中に電源の製作が行われ、2027 年度にテストを行う予定となっている。

参考文献

[1] Y. Enomoto et al., "Development of a flux concentrator for positron source", Proceedings of the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 21, pp.502 - 506 (2024)

機械仕上実習の改善について

江口陽人

釧路工業高等専門学校 教育研究支援センター 建設・生産グループ

1. はじめに

現在の釧路高専機械工学分野における実習・実験科目は、2 学年前期の機械工学・情報工学分野共通「創造工学基礎演習」から始まり、後期より機械工学分野単独となり機械工学実習・実験Ⅰ、3 学年通年の実習・実験Ⅱと続き、学年が進むに従って実習を減らし実験を増やしつつ5 学年まで継続していくカリキュラムとなっている(表 1)。

表 1 実習・実験実施状況

2年前期	旋盤	手仕上	機械仕上	レゴSPIKE
2年後期	旋盤	手仕上	機械仕上	鍛造
3年前期	旋盤	手仕上	機械仕上	制御実験
3年後期	NC旋盤	材料実験	機械仕上	機械力学実験

4 年次には溶接、マシニングセンタ実習を実施
5 年次では全て実験種目

本報告では機械仕上実習において 2025 年度より導入している教材(小型 V ブロック作製)の開発経緯及び 2026 年度に向けた実習材料の変更について述べる。

2. 機械仕上実習について

上述の機械工学実習・実験Ⅰ・Ⅱにおける「機械仕上」では、フライス盤、平面研削盤などの汎用機による基礎的な加工を学ぶ。Ⅰでは機械の基本的な操作を学び、Ⅱではそれを応用した工作を行う流れとなっている。

2024 年度までは機械仕上実習を通して全てグループ作業で実習を行っていたが、①意欲のある学生と消極的な学生間での実習への取り組み度合に差が生じる問題が見られた。他にも以下のような問題点があったため改善を図ることとした。

- ②製作図の製品が完成しない。
- ③一つのワークについて加工スケジュールが散らばっている。
- ④製作物を持ち帰ることができない。

3. 新教材の開発

新教材は、①・④に対しては「個人作業で各自、作品を完成させて持ち帰る。」、②に対しては「完成させることができる課題を設定する。」、③について

は「実習計画を見直し整理する。」ことで問題を解決することとした。以下に実施までのプロセスを述べる。

1) 製作品の選定

製作品は、個人で作業を進め完成後に持ち帰るには加工時間短縮と持ち運びの観点から小型であることが望ましい。そのため形状が特徴的であり小型であっても実用性を失わないことから小型 V ブロック(測定などに用いる工具、図 1)を候補とした。V ブロック作製(途中まで)は 2024 年度までも行っており内容的な飛躍がなく実施に際してトラブルが起こりにくいとも考えられた。さらに、2025 年度からの新たな要素として二個組で行う加工、クイルでの穴あけ加工を加えることで実習内容の拡充を図ることとした。

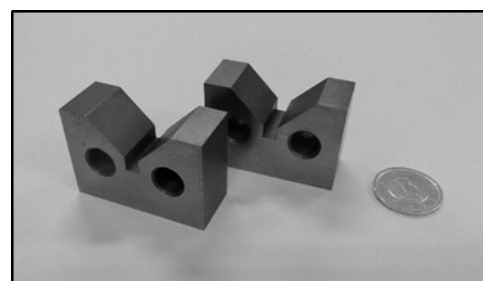


図 1 実習で作製した小型 V ブロック

2) 実施に向けての準備

手元にあった材料を用い試作、実習で実施可能な加工難易度であることを確認。4 時間 3 回の実習で完成するための工程を策定。市販の材料から作製可能な寸法などを決定した後、学生に協力を仰ぎ実習形式で試作会を行い工程の修正を行った。

3) 2025 年度より実施

材料の購入・事前加工、指導書の作製を行い 2025 年度より小型 V ブロック作製実習を実施した。結論として①～④の問題を解決できた。

4. 新教材から得られた知見

実習を実施するにあたり、学生に配布する材料の

予備加工を行った。内容は20×45mmのFC250(ねずみ鋳鉄)デンスバーをバンドソーにて32mmに切断後、正面フライスにて各面を1mm切削して6面体(43×18×30mm)に加工するものであった。実習ではそこから40×16×28mmのVブロックを作成する。これを約60個作製したが、同様の加工をSS400(一般構造用圧延鋼材)で行った場合と比べて工具の消耗が少なく、チップ交換(図1)の頻度は明らかに少ないものと考えられた。

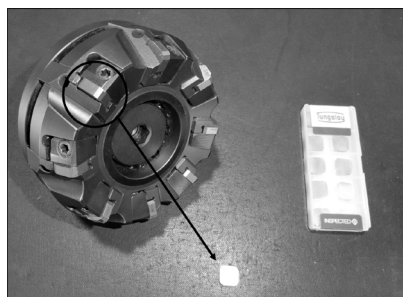


図1 チップ交換式の正面フライス

チップ交換は、チップ自体のコストのみではなく実習中に交換となった場合は実習時間のロスという問題も抱えている。

今回使用したFC250については、その他にも実習で用いる上で(SS400と比較して)有利な性質が確認できたため使用範囲の拡大を検討することとした。鋳鉄について、実習で用いた結果顕著であった長所と一般的な短所を表2に示す。鋳鉄の性質に広範にわたるが本論では工作実習の材料としての性質について考える。

表2 鋳鉄の長所と短所

長所	短所
I 工具の消耗が少ない	A 巣が入っている場合がある
II 錆びが発生しにくい	B 介在物により工具を痛める場合がある
III バリが小さい	C 切粉が溝等に詰まりやすい
IV 切粉の温度が低い	D 黒鉛が含まれるため周囲が汚れる
V 切削油を必要が不用	E 価格が高い

A、Bについては、この度用いたデンスバーは鋳造品ではなく温度管理下で引抜きによって製造された材料であるため考慮の必要はないものと考えられる。実習中にもそのような欠陥は見られなかった。

Cについては、Vブロック作製ではそのような加工が工程に含まれないため問題とならなかったが、使用する際には注意を要する点である。

Dについては、現在のところ清掃で対応できているが、観察を続ける必要がある。粉じんの健康についての影響も注意が必要である。

Eが現在最も重要な点で長所の①と併せて考えるべき問題である。切削性の指標として被切削指数があり、硫黄快削鋼の工具寿命20分に対応する切削速度を基準としたものがあるが、条件により値が異なるため資料により数値がまちまちであり^[1]我々が行う加工とも大きく異なる条件下での指標である。そのため、チップの寿命までの時間を我々の加工条件下で収集する必要が生じている。

Vについては、業者の違いなどによりばらつきがあるが現在、鋳鉄の価格は概ねSS400の倍程度である。この価格差とチップの消耗、I~Vで得られる利点を総合して考える必要がある。

5. 2026年度実習にあたって

価格の問題はあるものの表2の長所から得られるメリットは大きく、またチップの消耗に関するデータを収集するために、2学年における機械仕上実習(丸棒→角柱への加工)において使用材料をSS400から鋳鉄へと変更することとした。これは、2学年の情報工学分野ではPOM樹脂を用いており静電気で機械にまとわりつく切粉の掃除が非常に煩雑であったためその解消のためでもある。

2026年度は、鋳鉄材料利用の適切な範囲を教育面、効率、経済性といった多方面から検討できるよう情報を収集しながら実習を進めていく予定である。

参考文献

[1] 山根八州男, 関谷克彦, 難削指数による難削性の評価、精密工学会誌、407、Vol.70, No.3, 2004

ワイヤー放電加工 ～効率化と安定化を目指して～

清田 栄一

九州工業大学 技術一課工作係

1. はじめに

九州工業大学戸畑キャンパスでは、2018年、ワイヤー放電加工機を導入し、今年で8年となる。導入以来、ワイヤー放電加工への加工依頼は、新たな要望に応えられるとあって、増加している。現在、年間120件程度の加工依頼があり、年間を通して、フル稼働している。また、様々な要望に対応すべく、薄物加工をはじめとした加工条件、クランプの工夫など、実経験と様々な方のアドバイスで、技術の向上を図ってきた。その結果、大学の研究室からの依頼は、ほぼ対応できている。しかし、全く歯が立たない素材など難しい加工もあり、現在の課題になっている。今回の研究会では、その突破口になる情報収集ができればと願っている。今後も様々な研究会などで、他機関の担当者の皆様から学ばせていただき、更なる技術力の向上を目指していきたい。

2. 使用機器紹介

ワイヤー放電加工機：

ソディック VL-400Q※写真1

最大加工寸法：380×280

ワイヤー径：φ0.2（はやぶさEX）

導入時期：2018年1月より稼働。

加工依頼：年間120件程度

周辺機器：

精密ワイヤーカットバイス：J.A.M JWS947
(最大開口170mm程度)

ワイヤーカット割出し台：NEOTEC WX-30 など

3. これまでの試み

- ①加工液に純水を試用した。応用化学系の学科で、純水を作ってもらっていたが、手間の割には、効果が無いように感じた。フィルター、イオン交換器などの消耗品への効果も不明のため、現在は水道水を使用。
- ②ワイヤー線をφ0.3に変えてみたが、一卷の消耗の早さとそもそも本機に設定が無く、あまり恩恵を感じなかった。確かに加工時間は短縮したように感じたが、加工音がうるさい。



写真1 使用機器

4. 今後の課題

断線の頻度は、加工経験数に比例して、少なくなってきた。その原因が初歩的な問題が多かったためである。また、断線させないやり方も様々な方の助言を実践してみて、感覚的に分かるようになってきた。理論的な数値も大事だが、やはり加工時の音、すなわち断線しやすい時と快削時の音は大事な確認条件である。しかし、弱電導率素材の加工条件やワークスの切断加工もこれからの課題だ。

表1 加工設定条件

加工可能加工 可能サイズ	380 mm×280 mm
Z 限界範囲 素材の厚み	上：200 mm, 下：5 mm ※5 mm 以下は、条件付き
標準クランプ 代	10 mm

5. まとめ

機械を操作し加工できることイコールものづくりではない。私自身、まだそのレベルである。金型など、はめ合わせの精度やコツが必要な加工に対しては、まだまだ知識も経験も乏しい。さらに、弱電導率素材やワークスなどの加工に対しては、まだ解決していない。今後も現在の状況に甘んじることなく、積極的に最新の技術やベテランと言われる方々から学んでいきたい。

小中学生が機械加工に興味を示す「不思議なおもちゃ」の開発

大竹 啓之

豊田工業高等専門学校 技術部

1. はじめに

本校のオープンキャンパスでの見学者数は年々増加傾向であり、本校の実習工場である、ものづくりセンターの見学者数も増加している。しかしながら、流し見で見学することが多く、機械に興味を示し見学する小中学生数は減少している実態に気がついた。

対策を考えていたところ、YouTube や機械加工コンテンツ作品を閲覧している時に「不思議なおもちゃ」を視聴する機会を得たことから、これらを、展示したいと考えるに至った。動画等で紹介されていたおもちゃを小中学生に実際に触れてもらった上で、機械加工を学ばばそれらを自分で造れる技術を身に付ける事ができると説明する。この経験から面白いものを自分で造れるようになると小中学生が理解する事ができれば、機械加工に興味を持ってくれるようになると考えた。

そこで、本研究では機械加工に興味を示す「不思議なおもちゃ」を量産し、オープンキャンパス等で展示することにより、興味を持った状態で実習工場内を見学してもらうことを目的とする。小中学生が機械加工に興味を持てば、結果的に工学系の学校の受験者増加に寄与すると考えている。

2. 製作品

数年にわたり本校のオープンキャンパス中に「不思議なおもちゃ」を実習工場入口で遊べるようにしている。その結果、小中学生が機械に興味を持ち見学しているような場面を見た。しかし、「不思議なおもちゃ」の数が少ないために、じっくり一人ひとり見たり触ったり試したりしてもらうことが出来ず、効果の有無ははっきりしなかった。このため、反応が良かった「不思議なおもちゃ」の総数を増やし誰でも遊べるようにすることで、多くの人の興味を得ることができると考えた。製作した「不思議なおもちゃ」を図1、図2に示す。

図1のキューブ・イン・キューブは立方体の中に取り出せない立方体が複数個あるものである。工夫点は汎用旋盤のみで加工した事である。加工中の工夫点は5方向から加工後、中の部分を固定して切り



図 1 キューブ・イン・キューブ

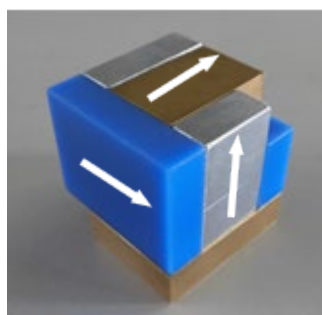


図 2 立方体パズル

離す事により、切り離された瞬間に中の部分が動かないようにした事である。

図2の立方体パズルは全く同じ形状の3部品を組み合わせた立方体である。立方体の辺に対し、図2に示した2方向、又は、3方向同時に力を加えると外すことができる。また、3部品を同時に動かさないと組むことができない。工夫点は部品の中を三角柱で残すことで取付けや取外しが出来る構造になっている。

3. 調査方法

研究の効果を確認する為に調査を実施した。調査対象は本校のオープンキャンパス中に実習工場を見学して下さった小中学生とその付き添いの方々とした。質問の前にアンケートへの協力を伺い、承諾して下さった方から回答を確認した。

実習工場の見学では、入り口前に「不思議なおもちゃ」を設置した。そこで、見学者は実習工場に入る前に置かれているものに手を伸ばし遊んでいく流れとした。そして、工場内では、機械工学科1年生と2年生の実習で製作する課題を見学し、次に、機械工学科3年生が4班に分かれ、各班が1年をかけ

て製作した作品展示を見学し、手回し計算機の展示を見学後、実習工場内の設備を見学し、最後に卒業研究を見学するという流れになっている。各場所では、流れて見学することもできるが、必要な時には立ち止まって説明を受けることも可能としている。

「不思議なおもちゃ」の説明では、作品の説明と共に、何の機械で製作したかを伝え、加工途中の動画を見れるようにした。実習では今遊んでいるものを製作できる技術等も学ぶことができると伝えた。

実習工場見学後に、見学者に機械加工への興味が変化しているか調査した。また、何の展示に興味を惹かれたかも質問した。

4. 調査結果

4. 1 興味の变化

興味の变化に関する調査では小中学生と、付き添いの方と区別し筆者がどの項目に当てはまるか直接確認した。集計結果は表1の通りである。

今まで興味があつた見学者が、興味を持ったまま見学をできたことは良かった。特に、今まで興味があつた見学者が見学後に興味を失くしてしまうことが無く安心した。また、興味が無かつた見学者が、見学を通して、興味を持つ方向に変化したのは喜ばしかった。それでも、興味が持てなかつた見学者が少数いるが、万人受けはできないため仕方ないことだろう。

4. 2 何の展示に興味を惹かれたか

何の展示に興味を惹かれたかは、一番興味を惹かれたものと、その他にも興味を惹かれたものがあるかを調査した。集計結果は表2の通りである。

今回製作した「不思議なおもちゃ」に興味を持った見学者はいたが、票数は少なかつた。他の展示も印象深いものが多かつた為、最後まで見学をすると印象に残りづらかつたかもしれない。一番興味を持たれたのは機械工学科3年生の作品展示であつた。これは、前年度3年生だつた学生たちがオープンキャンパスで展示されることも視野に入れ、造りたいものを自由に造つた作品である。そのため、内容は毎年違ふものの、遊戯性があるものや、見栄えが良いものなど様々で面白く興味を持たれることであろう。卒業研究ではロボットを動かしている所や、丁寧に説明を行つており人気があつた。手回し計算機は、現在の電卓が昔では機械式のものがあつた。仕組みを説明されて感心してゐた。機械工学科1年生と2年生の課題は楽しむためのものではないため票は集まりづらいかもかもしれない。実習工場の設備に関し

表 1 興味の变化

機械加工に	興味が持てた		興味ない	
	小中学生	付き添い	小中学生	付き添い
今まで興味があつた	48	30	0	0
今まで興味が無かつた	17	10	3	0

表 2 興味を惹かれた展示

	一番	その他	合計
不思議なおもちゃ	6	12	18
1・2年生の課題	5	8	13
3年生の作品	40	26	66
手回し計算機	17	11	28
卒業研究	29	11	40
実習工場の設備	5	8	13
特にない	1	0	1

て説明を行つていないため、これも票は集まりづらいい。どこにも興味を持てなかつたと回答があつたが、先にも言つた通り万人受けはできない面はあつたので仕方ないだろう。

5. まとめ

興味の变化の結果より「不思議なおもちゃ」に触ることによって機械加工に興味を持てなかつた人の足をとめ、興味を持ち、実習工場への見学を促すことができた。しかし、展示内容としては「不思議なおもちゃ」が一番興味を持たれる結果には至らなかつた。だが、一番興味を持てるものになつた場合、その他の展示内容にインパクトが足りないと考えられてしまう可能性がある。その場合、実習工場内を見学しても満足しないだろう。そのため、「不思議なおもちゃ」が一番興味を惹かれるものである必要はなく、入り口で興味を持ってもらう切っ掛けになれば良いと考えている。

失敗談になるが本研究前に5分以上遊べるおもちゃを展示したことがある。これも興味を持たれたが、遊びたい人で行列ができた。人の流れが止まつてしまうとスムーズに見学へ促すことができないため、限られた時間での展示には向いていないと感じた。

今後は、オープンキャンパスへ複数年来てくださる人もいるため、短い時間で遊べる簡単な「不思議なおもちゃ」の製作を続けていく。

謝辞

本研究は令和7年度科学研究費補助金(奨励研究)課題番号 25H00031 の助成を受けて行なつたものである。

冷やしばめを用いたコリメータ冷却部品の製作

○保住 弥紹^{A)}、森川 祐^{B)}、榎本 嘉範^{B)}、牛谷 唯人^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 機械工学センター、

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 応用超伝導加速器イノベーションセンター

1. はじめに

加速器のビーム発生源近傍へ設置するコリメータ冷却部品の製作・組み立てに冷やしばめを用いた。これは、真空雰囲気中への冷却水漏洩を確実に防止しつつ効率の良い冷却を行う為の構造として採用したもので、本件ではその製作過程における冷やしばめの作業内容詳細と結果を報告する。

2. 冷却部品の形状

冷却部品の材質は無酸素銅で、水冷配管が接続されるジャケット部（外側）と、流路を加工した円筒（内側）の2部品で構成される（図1）。冷やしばめを行う円筒部は直径125 mmで、完成時の全体サイズは直径150 mm、長さ150 mm、取付け用フランジが張り出した形となる。また、ジャケット部と流路部を冷やしばめで組み合わせた後には、円筒上下の縁部分を電子ビーム溶接にて接合し、水路の配管部分以外を完全に封じた。

さらに、水冷部品の中央には直径100 mm、長さ150 mm、内径60 mmの円筒形をしたタングステン製のコリメータが入り、こちらも冷やしばめで挿入する形をとり、同種材と異種材による2段階の冷やしばめ構造となっている（図2）。

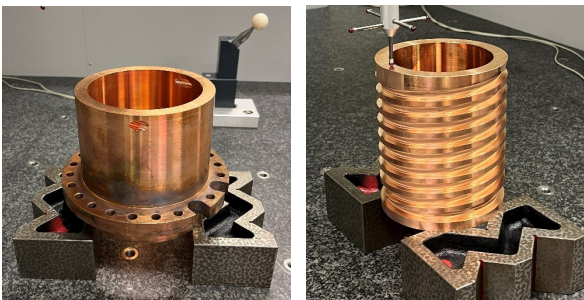


図1 冷却部品（左：ジャケット部 右：流路部）

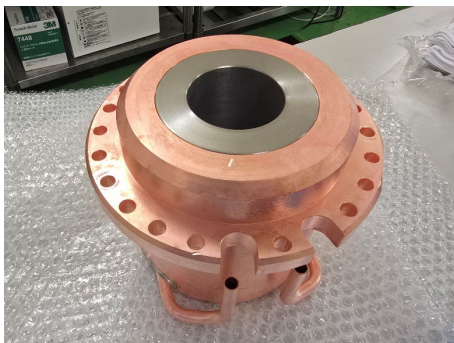


図2 冷却部品（完成品）

3. 冷やしばめの作業条件

冷やしばめを行うにあたり設定した温度条件としては、内側部を液体窒素によりおよそ -196°C まで冷却、外側部をヒーターにより 230°C 前後まで加熱することで温度差を十分に取り、挿入時における隙間が約0.9 mmとなるように準備をした。

また、常温状態では約 $60\mu\text{m}$ の締まりばめとなるように各々の内径と外径を切削仕上げしている。これは接触する内面の応力が約6 MPaとなる設計で、冷やしばめを用いることで接触面全域に圧力が掛かり冷却部品としての熱伝導性能が十分に得られることが分かっている。

4. 冷やしばめ1回目

残念ながら1回目の冷やしばめは挿入途中で止まってしまい、失敗となった（図3）。

これは、円筒挿入時の角度が想定よりも大きく傾く形状であったことが原因であり、流路を加工した円筒の形状に起因するものであった。

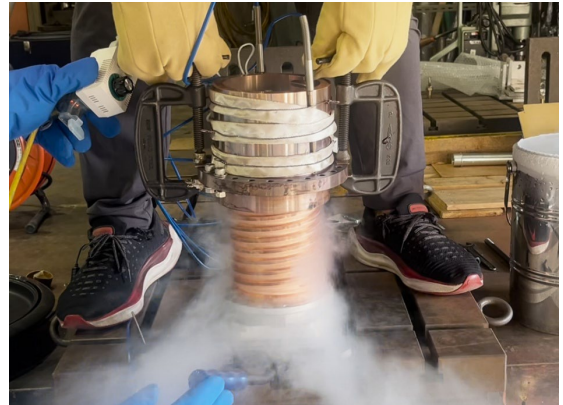


図3 冷やしばめ1回目

冷やしばめ部分の直径は125 mm、長さ150 mm、冷却・加温による隙間0.9 mmから、単純円筒形状同士を組み合わせた場合に2部品のなす傾き角度は約 0.34° となり、スムーズに挿入出来る予定であった。しかしながら、冷却側の円筒部品には流路が加工してあり、実際の傾きは流路溝開始位置の高さ10 mm位置で約 5.1° 度、流路溝幅を考慮した高さ15 mmでも約 3.4° 度の傾きが発生する可能性があり、この傾き量では挿入初期段階でジャケット部が流路溝の段

に乗ってしまう状態であった。

失敗により中途半端に組み合わされた2部品は同種材での冷やしばめであることから取り外しが困難かと思われたが、流路溝の始まり側に乗ったことで挿入量自体は短く、油圧プレスによる取外しが可能であった(図4)。多少の傷は付いてしまったが、この失敗を元に次項の改善策を施した。



図4 油圧プレスによる取外し

5. 冷やしばめ2回目

挿入時の傾きを抑制するには円筒の長さ方向を延長することが最も簡単と思われる。冷却・加温による隙間を少なくすることで傾きを抑制することも可能ではあるが、この場合、挿入時の接触による熱伝導が増してしまい、締めりばめが効き始めるまでの時間が短くなり、根本的に作業性が悪くなってしまふ。したがって、まずは傾きの抑制に必要な治具の長さを検討した。

治具の長さで傾きの制限量は反比例の関係にあり、治具長が20mmで約2.5度、30mmで約1.7度と、わずかな長さでも治具として有効であることが分かったが、3章の作業条件に記載した外側部の加熱に関しては、ヒーターによる局所的な加熱であることから厳密な温度管理はできておらず、安全を見て治具長50mm、傾き制限量約1.0度となる値を採用した。これは、温度差によるはめあい間隔が2mm(銅の融点を超えるので実際には不可能な値)に達した場合においても傾き制限量が約2.3度に収まり、1回目の失敗で発生した可能性のある3.4度の傾きを確実に下回ることから、十分な安全性を確保できるといえる。

実際にこの治具を使用することで、冷やしばめがスムーズに成功した。(図5)

ジャケット部と流路部は水冷配管の都合で回転方向の位相も目視レベルで合わせる必要があったが、挿入後から10秒程度は調節出来る時間的余裕があり、位相調整も問題無くできた。

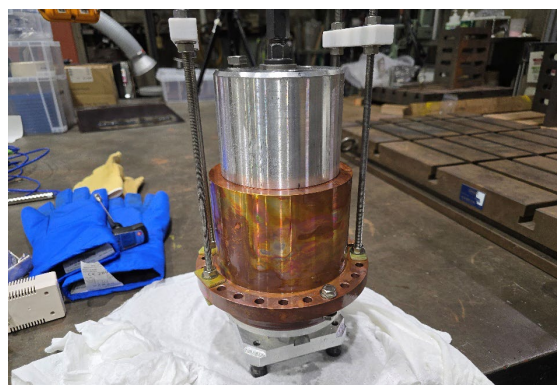


図5 成功した冷やしばめ(上部はアルミ製治具)

6. コリメータ部の冷やしばめ

2段階目として、2章に記載したタングステン製コリメータの冷やしばめを行った。こちらはタングステン側を冷却するため、線膨張係数の違いにより同じ温度条件下においてもはめあい間隔が約0.5mmと少なくなり、挿入時の接触による熱伝導量増加が危惧される。2回目の冷やしばめで作業性の向上は明確となっていることから、同様の治具を用意して冷やしばめに臨んだ。

結果としては2回目と同様に、スムーズかつ快適に冷やしばめが成功した(図6)。

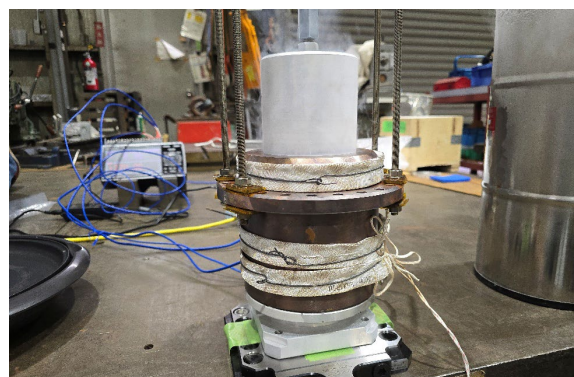


図6 コリメータの冷やしばめ

7. まとめ

本件では、冷やしばめにおける治具の重要性が明確となった。計3回の結果を比較すると、挿入作業に要した時間が1回目は5~6秒、2回目と3回目2~3秒と、明らかに作業性が良くなっており治具による改善効果が得られている。

冷やしばめにおける治具は材料挿入時の角度誤差を減らすために有効であり、同種材料での冷やしばめ等、失敗の許されない作業を安全かつ確実にを行うためには必須とも言える。

今後もより多くの実績を重ね、部品サイズによる違いや、材質による違い等、より安全に冷やしばめを行うための知見を蓄えていきたい。

ポスターセッション
第2分野
(装置技術)

大型ヘリカル装置用漏水検知システムの運用

○河合 将照、 村瀬 尊則、長原 一樹、林 浩己、伊藤 康彦、田窪 英法
佐藤 守、水野 嘉識、野村 吾郎
核融合科学研究所 技術部

1. はじめに

漏水検知システムは実験装置等の冷却水の漏洩を早期に検知し、実験装置等の安全な運用保全を支える重要な設備である。核融合科学研究所では、実験中に立ち入りが制限されるエリアがあるため遠隔監視による迅速・確実な漏水検知が必要とされている。技術部で構築したシステムを約 20 年運用してきたが、数年前に誤作動や故障が多発した。本発表では誤作動や故障に対して実施した対策について報告する。

2. 漏水検知システムの構成

本システムは大型ヘリカル実験棟の本体室及び本体室地下における漏水を検知し発報するシステムである。本体室には大型ヘリカル実験装置（以下 LHD）

と計測・加熱に必要な周辺装置が数多く設置されており、冷却水を使用する機器も多数存在する。一方、本体室地下においても、真空ポンプなど冷却水を使用する機器が多数存在するとともに、LHD 全体に冷却水を供給する設備も備わっている。万が一、本体室および本体室地下で漏水が発生すると、機器の故障や漏電による火災など、様々なトラブルの恐れがあるため、漏水の発生を速やかに把握する必要がある。しかしながら、本体室及び本体室地下は管理区域に設定されており、実験中は入室禁止となる。そのため大型ヘリカル実験棟における漏水を 300 m ほど離れた制御棟の制御室において常時監視するシステムを構築した。

本漏水検知システムの概要図を図 1 に示す。本体室及び本体室地下の冷却水使用箇所（全 142 箇所）

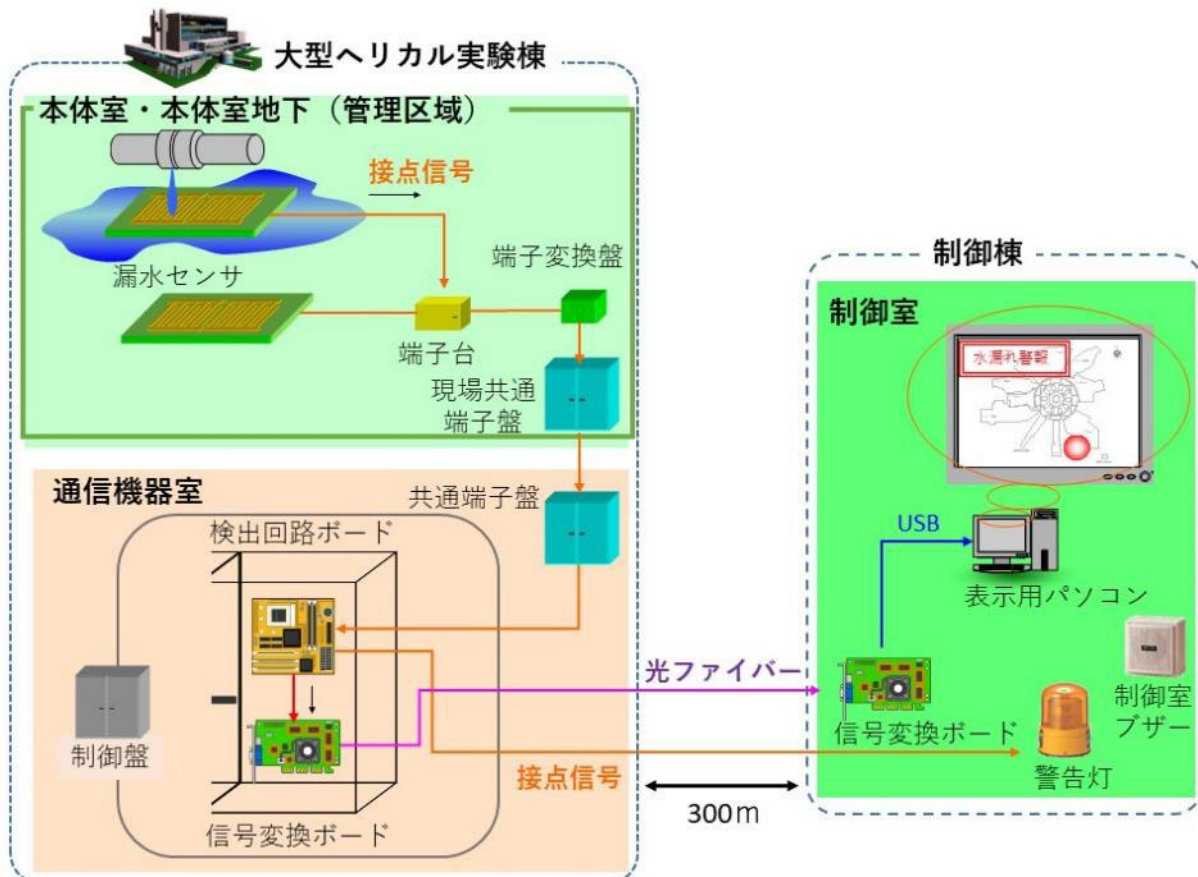


図 1 漏水検知システム概要図

に漏水センサを設置した。センサは櫛（くし）型電極構造を採用しており、櫛の間に水分が入ることで、水を介して通電する「接点」の役割を果たす。各センサからの接点信号は設置エリア（全37エリア）ごとに端子台でまとめ、端子台単位で漏水エリアを区分することとした。端子台でまとめられた接点信号は端子変換器を経由し、共通端子盤を経由して管理区域外の通信機器室にある制御盤に送られる。さらに、検出回路ボードで各センサの接点信号を統括し正常・異常（漏水）の状態データを生成、光ファイバーを介して制御室に伝送する。この状態データを表示用PCで処理し監視画面に反映している。監視画面では漏水情報（漏水発生日時、場所、現場写真）が一画面で確認できる。

本漏水検知システムは、多数の検知点を効率的に監視することを目的として設計されている。特に、検知点数を多く確保するため、センサ構造や信号処理は極力単純化し、信頼性と保守性を重視した構成とした。このような設計により、142箇所という多数の冷却水使用箇所に漏水センサを設置することが可能となり、本体室および本体室地下全域を網羅的に監視できるシステムを実現した。

また従来は、機器ごとに独立した漏水検知システムが構築されており、加熱装置である中性粒子入射加熱装置、電子サイクロトロン加熱装置、イオンサイクロトロン共鳴加熱装置についても、それぞれ専用の漏水検知システムを有していた。

これらのシステムは個別に維持したまま、発報信号を大型ヘリカル装置用漏水検知システムへ入力する構成とした。これにより、加熱装置で漏水を検知した場合でも、制御室において警報が発生するようになり、本体室、本体室地下における全ての漏水事象に対して24時間対応が可能となった。

また、これらの機器はLHD本体グループの管轄外の機器であったため、特に夜間や休日に漏水が発生した場合の対応マニュアルを用意し、連絡不能時に備えて、複数名による連絡体制を構築した。漏水発生時には監視画面上に対応手順や連絡先がポップアップ表示されるよう表示用PCアプリケーションの改修を行った。これにより、発報から初動対応までの判断時間を短縮することができた。

3. 不具合事例

長期運用に伴い、様々な誤検知、経年劣化、および予期せぬ外部要因による故障が発生した。

3.1. 発報事例

これまで実際に発生した漏水事象について未検知事例はない。主な検知事例としては、冷却水配管フランジからの漏水、流量計などの機器破損による漏水、冷却水配管、液体窒素配管や液体He配管からの結露水、現場作業時の誤散水、さらには現場作業中の漏水センサへの接触による検知などが挙げられる。

一方で、現場確認で漏水痕跡が確認できない発報事例が複数回発生している。過検知の可能性も考えられるが、漏水の見逃しリスクを考慮し、感度設定は変更していない。これらの事例については、検知信号が発生したセンサ周辺に水分で変色するテープを貼付し、実際に水分が存在したかを事後確認する対応としている。

また、本システムは放射線管理区域内を対象としているため、発報後であっても直ちに現場へ立ち入ることはできない。特に実験中は入室が禁止されており、現場確認のため実験中止になる可能性がある。このため、発報が漏水か否かを慎重に判断する運用が求められる。

実際の運用では、発報時に監視カメラ映像による現場状況の確認や、冷却水タンク水位の変化の有無など、複数の間接情報を組み合わせて漏水の可能性を判断している。（図2）

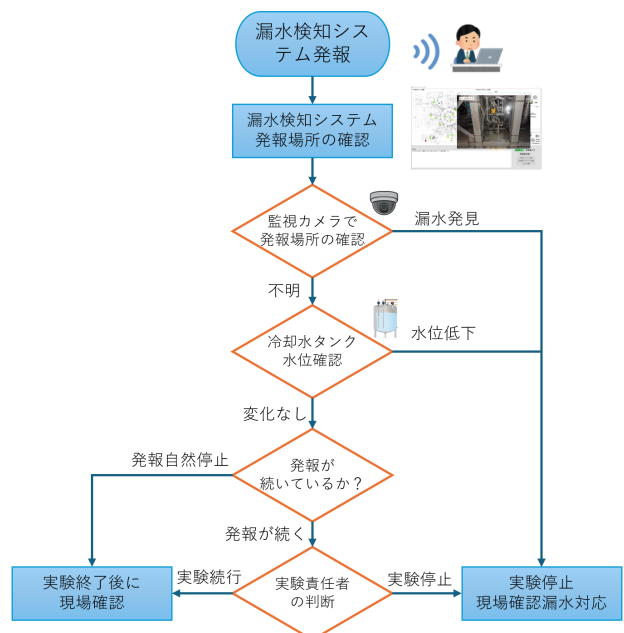


図2 発報時の対応フロー

3.2. 経年劣化による故障事例

本漏水検知システムは約 20 年運用しており、経年劣化による故障も発生していた。近年の主な故障箇所は、PC のデータ取り込み装置、電源アダプタ、信号変換ボード (O/E 変換機) などである。

表示用 PC も 10 年以上使用していたため更新を行ったが、従来の信号変換用アプリケーションは新しい PC 環境では動作しなかった。データ取り込み機器が NI (National Instruments) 社製であったことから、開発環境に LabVIEW を採用し、データ取り込みおよび信号出力用アプリケーションを新たに作成した。(図 3)

なお、故障が発生したのは既製品であり内製化した基板などは故障していない。

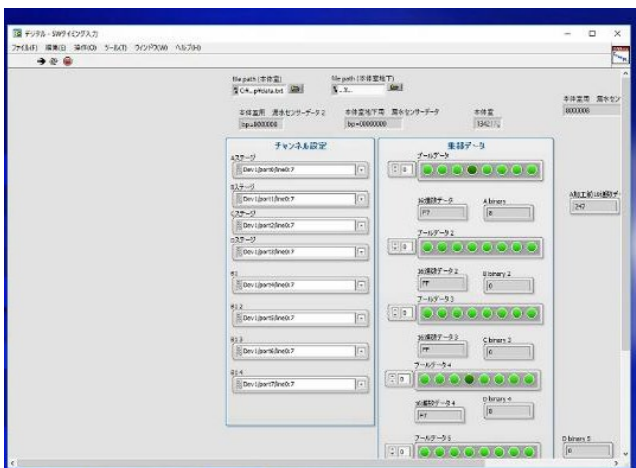


図 3 LabVIEW で制作した信号取り込みアプリ

3.3. 漏電に起因する故障と対策

漏水やその痕跡が確認されないにもかかわらず警報が連続して発報した。この時、複数のチャンネルが同時期に異常信号を出力していたことから、検出回路ボード上の IC 故障が判明した。当初はこの故障の原因を経年劣化によるものと判断したが、交換した IC も故障した。

原因調査を進める中で、漏電が関与している可能性が浮上したが、それが原因とすぐには断定できなかった。さらに調査を進めた結果、実験終了後も電位が残留している回路が存在した。その回路に接続されているチャンネルの電位を測定したところ、漏電が確認され、その痕跡 (図 4) も発見された。現場調査で異常が確認できなかったのは漏電が起こった機器の電源が実験中以外は遮断されているためであった。

これを受け、当該機器に対して速やかに絶縁対策



図 4 漏水センサ放電痕

を実施した。また、当該機器の漏水センサ信号線については、検出回路ボードへ直接接続せず、リレーを介する構成へ変更した。さらに、漏電によるサージ電流から漏水検知システムを保護するため、検出回路に過電圧保護素子 (バリスタ) を追加した。これにより、サージ電流が流入した場合にはバリスタが動作し、回路へのサージ電流の流入を防止する構成とした。

なお、バリスタが動作したチャンネルは短絡状態となり警報が継続発報されるため、サージ電流が発生したことを把握可能となった。

一連の漏電により 6 個の IC が故障したが、単価はいずれも 1 個 1900 円程度であった。近年は接点信号出力を備えたユニットも市販されているが、本システムは内製化していたため予備品コストを抑えられ、速やかに漏水検知システムを復旧することができた。

4. まとめ

近年発生した誤作動および故障に対して、機器の更新、漏電対策、サージ対策を実施することで、漏水に起因する装置停止や電気系統の損傷といった重大故障を未然に防ぐことができた。また、多系統の機器を統合監視する場合、漏水検知システムに漏電対策、サージ電流対策が不可欠であることを確認した。

個人キー保管器制御システムの更新

白川 明広

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

放射線発生装置である電子陽電子線形加速器の放射線管理区域への入域管理の一環として、入域時に個人キーを各自携帯している。個人キーは専用の保管器に格納しており、ID カード照合によりキーの貸出を行う。一連のキーの貸出・返却・保管の制御は長年にわたりオンボードコンピュータが担っていたが、経年劣化に備えて更新することとし、保守性や工期・コスト低減を勘案して PLC を採用した。また省配線システムを導入して PLC を保管器の外部に設置し、既存のハードウェアを最大限活用した。

2. 加速器室への入室管理

線形加速器本体は地下トンネル内にあり、電子・陽電子を加速するための大電力高周波源や電磁石電源、真空機器等が地上部にある。加速器運転中は地下加速器室の空間放射線量が高くなり入域不可となる。運転中の無人を担保する方策の一つとして、停止時に入域する際には各自「個人キー」(図 1) を携帯することとし、運転再開時には全ての個人キーが返却されていることを必要条件に加える。地下加速器室は全長約 700 m で出入口は 2 か所にあり、個人キーはその入口扉を解錠するための鍵を兼ねている。

なお個人キーを携帯して入域するのは本来加速器運転期間として計画されている日に短時間だけ停止する場合であり、元より停止期間とされている間は個人キーの貸出管理が困難となるため個人キー携帯を免除している。



図 1 入域管理用個人キー

3. 個人キー保管器の仕様

個人キーは 50 個あり、すなわち最大 50 名が同時に入域可能である。これらの個人キーは加速器入口近くに設置した専用の保管器に格納している。保管器には上記の入域用キーの他に、地下加速器室に通じるすべての扉の鍵を格納している。更に、入域管

理に直接関係しないものの加速器運転に関わりの深い鍵も合わせて保管している(図 2)。キータグに付着している黒い物体は、建屋外への持ち出しを防止するための自鳴式 RF タグである^[1]。格納されているキーの種別と数量を表 1 に示す。表中で「保守モード切替キー」は加速器停止期間に個人キー携帯を免除するモードへ切り替えるためのキーである。

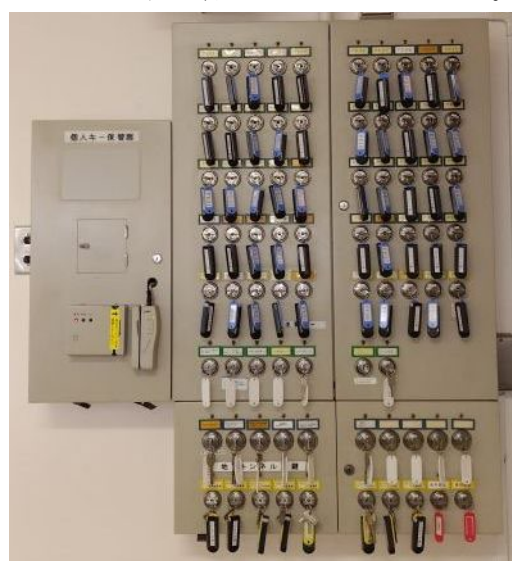


図 2 個人キー保管器

表 1 保管器に格納されているキー

キー種別	数量
入域用個人キー	50
加速器室境界扉キー	10 (うち休止 2)
入域管理以外の重要キー	17 (うち休止 4)
保守モード切替キー	1

キーの貸出に当たっては、各人の ID カードの磁気データを読み込みの上、可否を判断している。当該加速器への入域をあらかじめ登録している者に対し、個人キーが貸出可となる。

キー保管器制御システムの入出力信号の種別と点数を表 2 に示す。「内部」は保管器制御システム内で完結する信号である。鍵の貸出制御はキーシリンダに連なるコイルに励磁してストッパーを解除するもので、解除状態のときに LED 表示灯を点灯させる。「対外」は加速器の安全インターロックシステムとの間で授受を行う信号である。加速器停止時に「入域

許可」信号が ON となり、個人キー貸出が可能となる。また全ての個人キー及び境界扉キーが返却状態のときに「キー全数返却」信号を送信する。

表 2 個人キー保管器の制御入出力信号

	入力		出力	
	信号種別	点数	信号種別	点数
内部	キー返却状態	78	鍵の貸出制御	78
	磁気カード読取	1	貸出可能表示灯	78
対外	入域許可	1	キー全数返却	1
			長期保守モード	1

4. 更新前の個人キー保管器制御システム

個人キー保管器の制御システムに求められる機能は表 2 に記載の入出力信号を所期の目的に沿うよう取り扱うことである。更新前の制御システムでは回路基板上に IC チップを組み合わせて配列した所謂オンボードコンピュータ上にこの制御機能を持たせていた。オンボードコンピュータは保管器内部に設置していた(図 3)。すべてのキー及びカードリーダーからの信号をここに集約しており、また保管器の情報を表示するための PC との間で RS-232C で通信を行っていた(図 4)。加速器室に入域可能な人員は時折変更があるが、入域許可者の登録更新作業はその PC から可能としていた。



図 3 保管器に内蔵されたオンボードコンピュータ

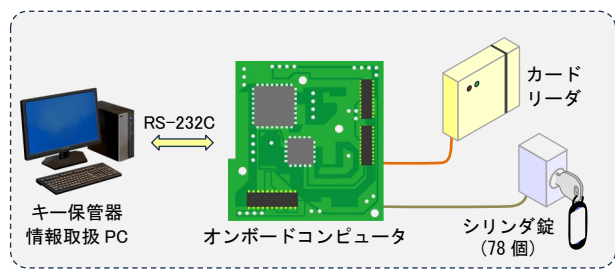


図 4 更新前のキー保管器制御システム概略図

この制御システムは当然ながら本保管器向けに特化したものであり、オンボードコンピュータもオーダーメイドであった。システム構築以来何回か更新を経ていたが、最終更新から 20 年以上を経過しており、新規製作当時の機器担当者及び施工会社が既に不在となっていた。経年劣化等による動作不良がひとたび発生すると加速器運転停止に直結する恐れがあり、システム更新が喫緊の課題となっていた。

5. 更新後の個人キー保管器制御システム

制御システム更新に際しては幾つか制約があり、また合わせて保守性を改善するため、次のような点を踏まえて新システムの構成を検討した。

- 加速器が連続して停止する期間は最長で実質約 1 カ月半であり、その間に更新を完了させる
- 個人キーが建屋の解錠機能を兼ねているため、キーは継続して使用する(もしキーを刷新すると建屋側にも工事が発生し、工期の伸長とコストの増加を招く)
- 加速器安全インターロック系に対して更新工事による影響を必要最小限に抑える
- 極力特注品を減らし、汎用品を使用する

検討の結果、ボードコンピュータに代えて PLC を使用することとした。なお PLC によりキー保管器制御を行った実績が既に当方に存在し^[2]、その経験も踏まえて本件を設計している。

オンボードコンピュータの他には、既存のカードリーダーが PLC との通信が難しかったため、RS-232C 通信が可能なタイプに交換した。キーシリンダ錠とキー保管器本体は継続使用とした。なお PLC はキー保管器内部に格納できないため、数十メートル離れた加速器制御室内に設置し、I/O 信号線を延長することとした。新制御システムの概略を図 5 に示す。キー保管器情報を取り扱う PC との通信は LAN 経由

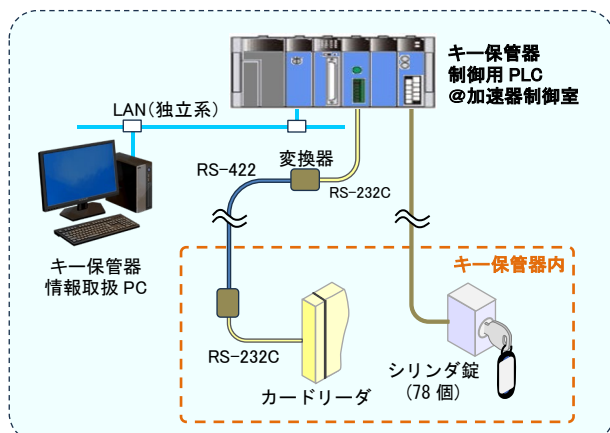


図 5 更新後のキー保管器制御システム概略図

としているが他の機器とは接続が無い独立系ネットワークである。カードリーダーと PLC の間は距離があり RS-232C 信号の許容延長距離を大幅に上回るため、途中で RS-422 に変換している。システム更新の前後でキー保管器の外観上はカードリーダー以外には変化が無い。

シリンダ錠 1 個あたりの入出力信号数は 3 系統あり、78 個では都合 234 系統の信号数となる。数十メートルの距離に 234 ペア (=468 芯線) もの配線を行うのは容易ではないため、省配線システムを導入して配線を簡素化した (図 6)。本件で採用したシステムは 4 芯のフラットケーブルで通信を行うもので、実信号を一旦入出力ターミナルで集約し、シリアルデータ通信に変換して送受信を行う。PLC 側には専用の入出力マスターモジュールを装着している。

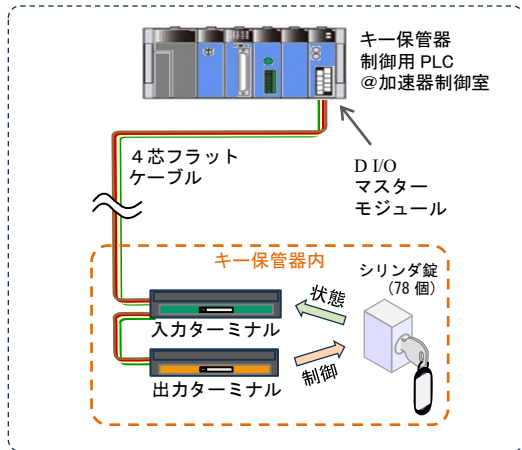


図 6 省配線システムを使用した入出力結線

入出力ターミナルは可能な限り各シリンダ錠の近傍に設置するのが効果的である。キー保管器の内部スペースには余裕が無いながらも、かろうじて必要数のターミナルを配置することができた (図 7)。また、既存の信号線を活用するために、新ターミナルとの間で信号を仲介する回路基板を合わせて製作して設置した。

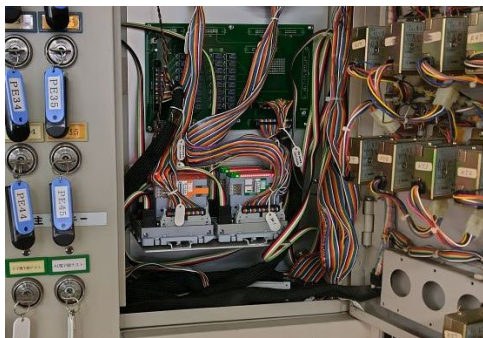


図 7 キー保管器内部に設置した入出力ターミナル

制御システム更新を完了し運用を開始したところで、実信号からシリアルデータ信号への変換時に生じるタイムラグが PLC のプログラムスキャンとの間で僅かに齟齬をきたす可能性が発覚し、対処に少し時間を要した。この問題は対策済みであり、その他には特に支障は無く、安定した運用を行っている。

キー保管器の情報統括 PC 上のソフトウェアも新たに用意した。各キーの貸出/返却状態や貸出履歴の表示が可能である (図 8)。

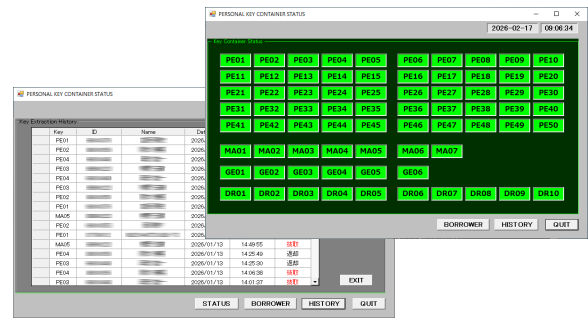


図 8 キー保管器情報統括 PC 上の管理画面

加速器室への入域許可者のデータは PLC プログラム内に記述しており、許可者リストに変更が生じた場合は、PLC プログラム内の該当データ領域を更新することとなる。

6. 考察

制御システム更新に際して既存の機器・部品類を最大限活用し、また加速器停止期間中に無事終わることができた。PLC や省配線システムは市販品であり、保守性が格段に向上した。前章で述べた新システム構築に際しての諸条件はクリアしたと言える。

他の選択肢として、各キーを「小箱」に格納し、その小箱を集積し管理するような形態を持つ市販の保管器を使用する案もあった。この場合、加速器安全インターロック系との整合に多少の特注改造が必要となり、何より費用が数倍に跳ね上がる見通しであったため、採用に至らなかった。

参考文献

- [1] 白川明広、「RF タグ監視システム導入による放射線立入制限区域無人管理の円滑化」、平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会 装置技術研究会報告集、pp. 152-155、2007 年。
- [2] 白川明広、他、「加速器入域管理システムの増設」、平成 22 年度熊本大学総合技術研究会報告集、11-P-239、2011 年。

日米科学技術協力によるビームプロファイルモニターの開発とその輸出

○佐々木 知依^{A)}、橋本 義徳^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

米国 Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) では陽子ビーム入射器のアップグレード(PIP-II^[1])が進んでいる。それに合わせて、8 GeV 陽子 Booster から Recycler Ring のビーム輸送路(図1)でのハロー測定とそのためのビームプロファイルモニターの開発が計画された。ハロー測定には、J-PARC で運用実績のある遷移放射光(Optical Transition Radiation: OTR)と蛍光(FL)の2種類の光を利用した6桁までの高感度なビームハローを診断する OTR/FL モニター^[2,3]の技術を FNAL に導入することである。日本で設計・製作された装置は2025年12月に船便で輸出された。2026年2月14日から3月1日にかけて日本メンバーが FNAL に出張し、開梱及び装置の組み立てと調整を行った。本報告では装置の概要を説明したのち、輸出前の寸法精度確認と FNAL での再組み立て、寸法精度の再確認の結果について述べる。

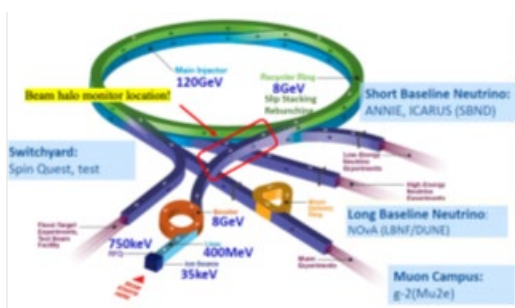


図1 FNALの加速器群とビームハローモニターの設置場所

2. ビームモニターの測定原理

測定原理は J-PARC で運用している OTR/FL モニター^[2,3]と同様である。装置にはチタンフォイルターゲットとアルミナセラミックターゲットが実装されている(図2)。陽子ビームがターゲットを通過する際に、チタンフォイルターゲットからは OTR、アルミナセラミックターゲットからは蛍光が放射される。これらの光は大口径のオフナーリレー光学系^[4]で集光され、ビーム直下に設けた拡散スクリーン上に結像される。その像を CMOS カメラで撮影することでビームプロファイルを得る。ビームコアの部分は OTR、コアと比較して微弱なビームハローはア

ルミナセラミックターゲットの厚みを 0.5 mm としたときに OTR の約 1300 倍^[2]の発光量になる蛍光を用いることで、J-PARC ではおよそ 6 桁のダイナミックレンジを達成した。

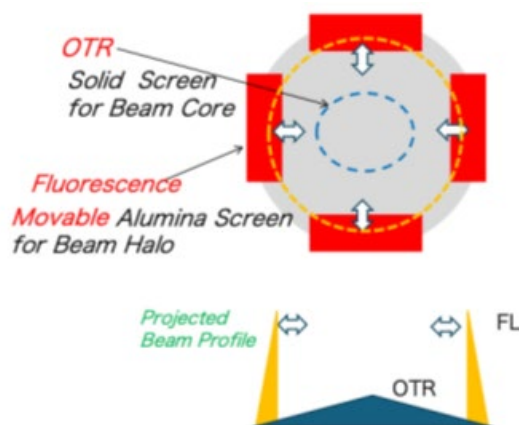


図2 ターゲットの配置

3. 装置の概要

装置は J-PARC の 3-50BT(RCS から MR へのビーム輸送ライン)で運用実績のある OTR/FL モニターの技術を、FNAL の 8 GeV 陽子ビーム用に再設計したものである。図3は本モニターの外観、図4は断面図である。L1135×W765×H873 mm の大きさの真空チャンバー内部に、ハローターゲット(水平/垂直)、OTR3連ターゲット、ターゲットステーション(TS)、ミラーユニットが収められている。TSはTS-HとTS-Vに大きく分けられる。水平ハローターゲット及び

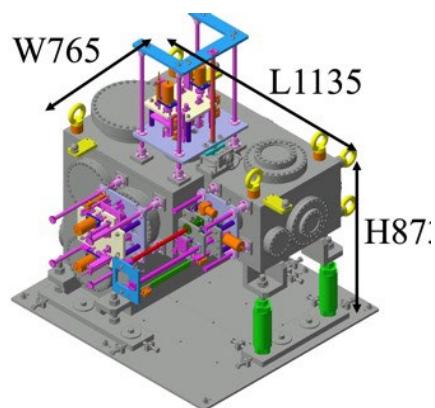


図3 装置の外観

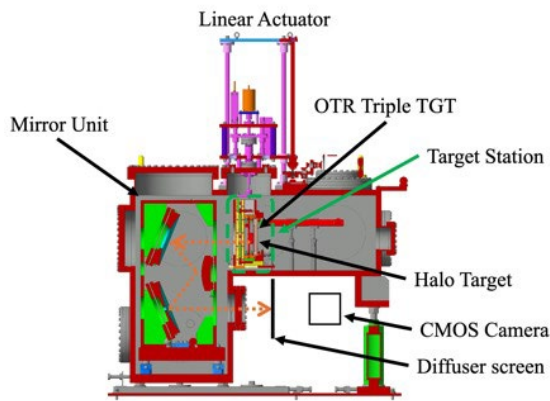


図 4 装置の断面図

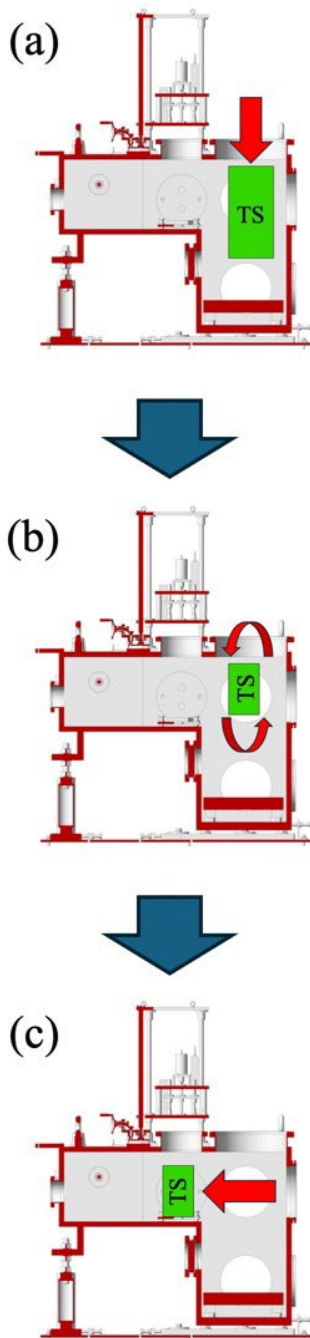


図 5 TS-H 取り付け手順

OTR 3 連ターゲットのスライドガイドを持つ TS-H と、垂直ハローターゲットのスライドガイドを持つ TS-V である。ミラーユニットは 2 つの凹面鏡と 1 つの凸面鏡から構成される。これら 3 枚のミラーはオフナーリレー光学系を構成し、ターゲットから放射される光をチャンバ下部の拡散スクリーンに結像する役割を担う。チャンバ外部には、各ターゲットを位置決めする直線導入機が取り付けられている。これら設計の詳細は過去に報告^[5,6]されている。

4. 組み立て手順

組み立てにおいては、ターゲットが組み込まれる TS と集光を担うミラーユニットの位置が輸出前の位置を再現することが特に重要である。

これを踏まえて、組み立ては以下の手順で行なった。

Step1 TS の取り付け

TS の取り付け作業にはメイン作業員 1 名と方向転換、ステージまでの移動に補助者 2 名が必要である。

1. チャンバートップの大フランジから TS-H をチャンバ内に入れる(図 4(a))。
2. 横のフランジから手を入れて 2 人でサポートしつつ、TS-H を 90°回転させる(図 4(b))。
3. ステージ上に TS-H を載せ(図 4(c))、押しボルト 1~3(図 5)に当たる位置まで移動させる。

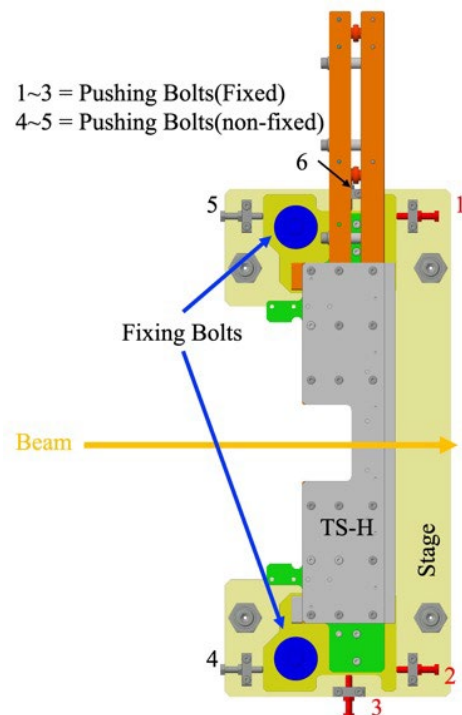


図 6 TS-H と押しボルト、固定ボルトの位置関係

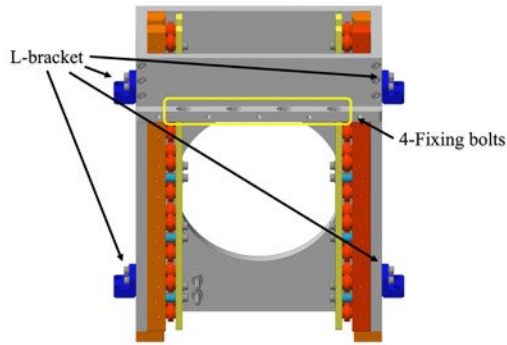


図 7 TS-V の L 字ブラケットと固定ボルト

4. 押しボルト 4~6 を TS-H に当て、ロックナットを締める。TS はアルミ製なので、強くボルトを当てないように注意する。押しボルト 1~3 は輸出前に正確にアライメントし、そのまま固定しておいた。これにより簡便かつ正確に位置合わせができた。
5. 固定ボルト 2 本(図 5)で TS を固定する。
6. TS-V を大フランジからチャンバー内に導入し、TS-H に載せる。
7. TS-V 側面の L 字ブラケットがツライチになる位置に調整し、ブラケットをボルト締結する。上部の 4 本の固定ボルトも締結する。

Step2 水平・垂直方向直線導入機の取り付け

垂直方向直線導入機(LA-V)及び水平方向直線導入機(LA-H)を取り付ける。まず LA-V を取り付けてから LA-H を取り付ける。さらに、LA-V の垂直ハローターゲットが全開の位置でないと水平ハローターゲットを取り付けられない。この順番でないと、垂直ハローターゲットと水平ハローターゲットが干渉

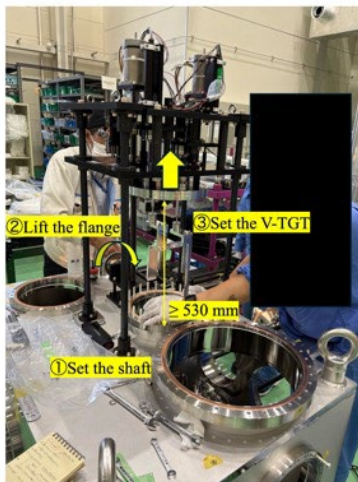


図 8 垂直方向直線導入機の取り付け

するので注意する。また、直線導入機のガイドシャフトをシャフトホルダに固定する際は、ホルダ側面の貫通タップに真鍮製セットピースを入れた上で、芋ネジを占めて固定する。セットピースを入れ忘れやすいのでこの点についても注意して作業した。

1. LA-V をクレーンで吊り、ガイドシャフトをシャフトホルダにセットする(図 8 ①)。
2. ハンドルを回し、フランジ間距離が 530 mm 以上になるまでフランジを持ち上げる(図 8 ②)。
3. 垂直方向ターゲット(V-TGT)を取り付ける(図 8. ③)。
4. LA-H をクレーンで吊り、ガイドシャフトをシャフトホルダにセットする。
5. LA-H を全開にし、水平方向ハローターゲットを取り付ける。
6. LA-H を押し込み、最終締め付けトルク 9 Nm で締結する。
7. LA-V のフランジを押し込み最終締め付けトルク 9 Nm で締結する。

Step3 OTR 用直線導入機(LA-OTR)の取り付け

1. LA-OTR をクレーンで吊り、ガイドシャフトをシャフトホルダにセットする(図 9 ①)。
2. LA-OTR を押し込み、最終締め付けトルク 9 Nm で締結する(図 9 ②、③)。
3. OTR 3 連ターゲットをチャンバー側面のサービスポートから TS に挿入する。
4. OTR 3 連ターゲットとアームを接続する。接続部は 4 面嵌合になっているので、面を合わせてビス止めするだけで再現性よく固定することができる(図 10)。
5. コネクティングロッド(LA-OTR)とアームを M20 ナットで締結する(図 11)。

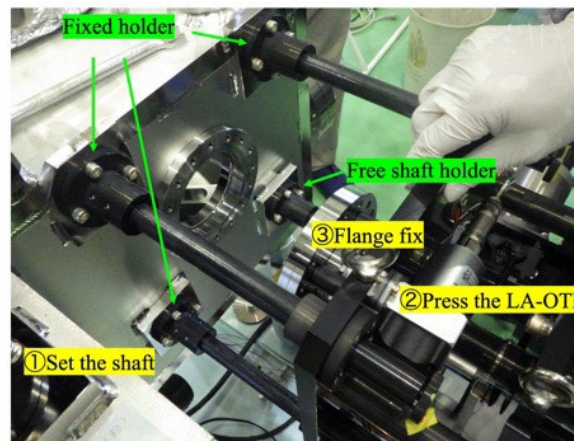


図 9 OTR 用直線導入機の取り付け

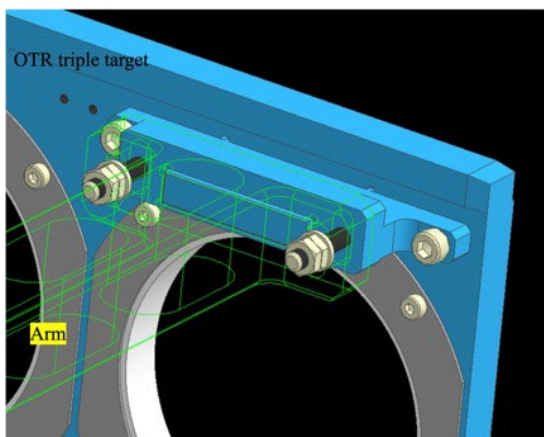


図 10 OTR 3 連ターゲットとアームの固定

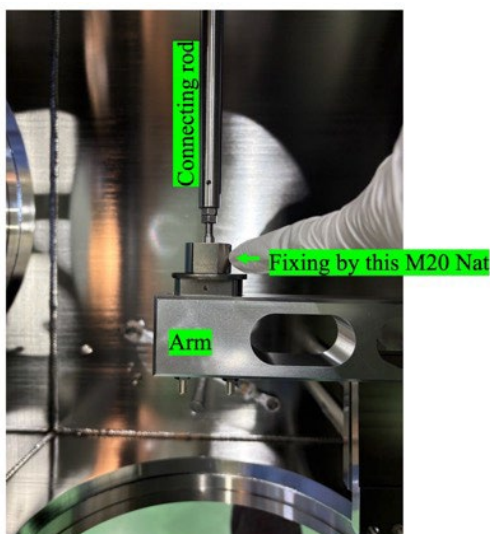


図 11 OTR 3 連ターゲットとアームの固定

Step4 ミラーユニットの取り付け

1. 図 12 のようにミラーユニットの 2 分割する。
2. 凸面鏡サポートをミラーベースに乗せ、固定ボルト 2 本で固定する。ミラーベースには位置決めピン(図 13)が設けられており、簡便してかつ再現性のよい取り付けが可能である。
3. 凹面鏡サポートをミラーベースに乗せ、固定

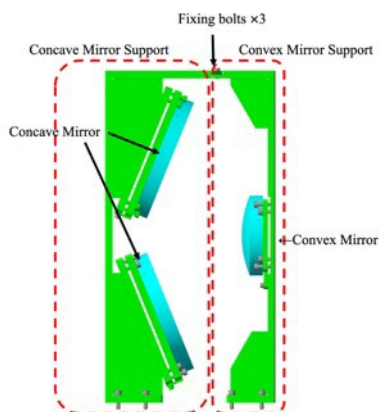


図 12 ミラーユニットの構造

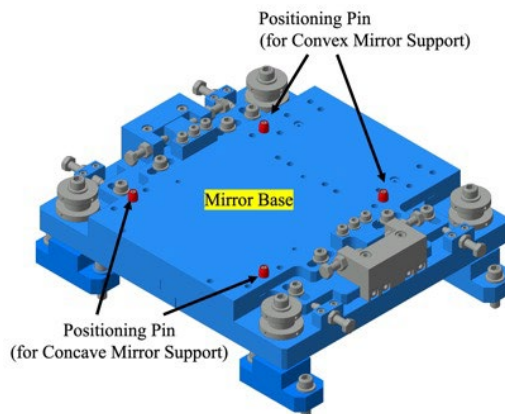


図 13 ミラーベースと位置決めピン

ボルト 2 本で固定する。凸面鏡サポートの取り付けにはクレーンが必要である。

4. 凹面鏡/凸面鏡サポート上部の固定ボルトでミラーユニットを連結する。

5. 測定の基準点

図 14 は測定の基準点とその設計位置である。上流側ビームポートフランジの中心を原点とし、鉛直方向を Y 軸、上流側ビームポートフランジから下流側ビームポートフランジを結ぶ直線を Z 軸とする座標系である。チャンバー外側に取り付けた基準板 ref_1~3 と TS 表板開口部の中心 ref_TS の座標を測量し、輸出前後で変化がないか確認した。

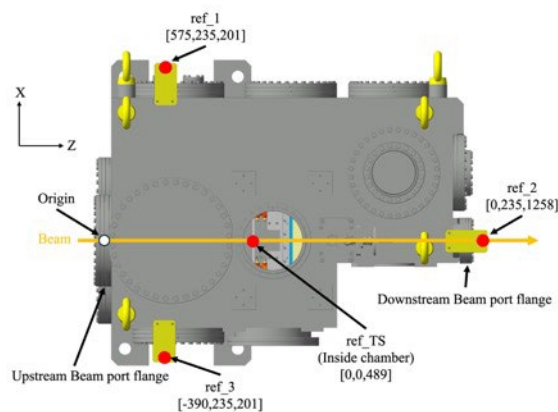


図 14 基準点とその設計位置

6. 輸出前の寸法精度確認

寸法精度の確認では、レーザートラッカー(LT)を用いて各基準点の座標の測量を行った。

ビームポートフランジの中心はフランジの円周を測定することによって定義されるが、1 台の LT では上下流両方のビームポートフランジの円周測定をすることができない。そこで、2 台の LT を使い、それらに共通の測定点を持たせることで座標系を統合する手法をとった。共通の測定点を設ければ、LT1 台でも測量可能であったが、2 台の LT を用いることで

作業時間を短縮できた。

測定結果を表1に示す。測定は3回の平均であり、そのばらつきは最大 30 μm であった。LT の公称精度の $\pm 50 \mu\text{m}$ より小さい値に収まった。

表1 日本での測量結果

	X	Y	Z
ref_1	574.217	234.743	200.187
ref_2	0.297	235.010	1256.103
ref_3	-389.527	234.747	200.360
ref_TS	-0.09	0.19	488.8

7. FNAL での再組み立て及び寸法精度の再現性確認

日本メンバーが FNAL に出張し、4 節で説明した手順で再度組み立てを行った。また、FNAL のアライメントチームと協力して測量を行った。FNAL では、10 点の共通測定点を、チャンパー周辺の壁や床に設け、LT1 台で測量を行った。その結果を表2に示す。日本での結果との差は最大である点は ref_1 の Y 座標で 200 μm であったが、そのほかの点は概ね 100 μm 程度以下に収まった。Y 座標での差が大きい傾向になったが、その原因として水平アライメントが不十分だった可能性がある。FNAL では時間短縮のため最低限のアライメントしか行わなかった。輸出前の測量時と同等の水平アライメントを行えば、差はより小さくなると考えている。

表2 FNAL での測量結果

	X	Y	Z
ref_1	574.279	234.538	200.188
ref_2	0.347	234.955	1256.090
ref_3	-389.436	234.863	200.372
ref_TS	-0.106	0.09	488.696

表3 輸出前後の測量結果の差

	X	Y	Z
ref_1	-0.062	0.205	-0.001
ref_2	-0.050	0.055	0.013
ref_3	-0.091	-0.116	-0.012
ref_TS	0.016	0.100	0.104

8. まとめ

日米科学技術協力事業で FNAL の 8 GeV 陽子ビーム用のビームプロファイルモニターの開発を進めている。装置は完成し、FNAL への輸出は完了してい

る。2026年2月には現地に出張して組み立てを行い、日本での組み立て時と同様の高い精度で組み上がったことを確認した。本報告を執筆した 2026年2月20日時点で、FNAL での組み立て調整は進行中であり、現時点で完了したところまでを記載した。次のステップは、加速器へのインストールである。インストール作業の際には日本メンバーも参加する予定である。その後、早ければ秋のビーム運転において運用が始まる。

謝辞

株式会社トヤマ殿には本モニターの製作において多大なる貢献をいただいている。

参考文献

- [1] The PIP-II Reference Design Report”, Fermilab, Batavia, IL, USA, Rep. FERMILAB-DESIGN-2015-01, Jun. 2015.
doi:10.2172/1365571
<https://lss.fnal.gov/archive/design/fermilab-design-2015-01.pdf>
- [2] Y. Hashimoto et al., “A Development of High Sensitive Beam Profile Monitor using Multi-Screen”, in Proc. IBIC'13, Oxford, UK, Sep. 2013, paper TUCL2, pp. 3
- [3] Y. Hashimoto et al., “Two-Dimensional and Wide Dynamic Range Profile Monitor Using OTR / Fluorescence Screens for Diagnosing Beam Halo of Intense Proton Beams”, in Proc. HB'14, East Lansing, MI, USA, Nov. 2014, paper TUO2AB04, pp. 187-191.
<https://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf>
- [4] A. Offner, “New concepts in projection mask alignment”, Optical Engineering, Vol. 14, No.2, 1975, p.130-132.
- [5] Y. Hashimoto et al., “A Wide Dynamic-Range Halo Monitor for 8 GeV Proton Beams at FNAL” in Proc. NaPAC2022, NM, USA, Aug. 2022, paper MOPA14, pp. 75-78.
<https://www.jacow.org/proceedings/napac2022/papers/mopa14.pdf>
- [6] Y. Hashimoto et al., “A Development of Wide Dynamic-Range Halo Monitor for 8 GeV Proton Beams at FNAL” in Proc. IBIC2024, Beijing, China, Sep. 2024, paper WEP12, pp. 274-278.
<https://accelconf.web.cern.ch/ibic2024/pdf/WEP12.pdf>

可飽和インダクタを用いた高電圧大電流用機械的スイッチシステムの構築と特性評価

○松田 樹也

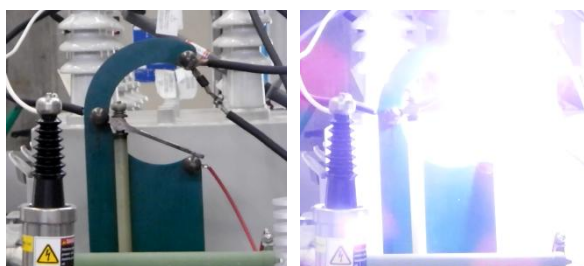
熊本大学 研究開発戦略本部 技術部門

1. はじめに

現在、高電圧パルスパワーの応用研究が盛んに実施されており、その応用先は、環境・生物・医療・食品・加工・デバイス分野など多岐にわたっている。パルスパワー発生装置に使用される機械的スイッチは、スイッチング時、激しいスパークを伴うアーク放電の発生により様々な問題が生じている。本研究では、機械的スイッチのアーク放電を抑制するために、可飽和インダクタを付加したスイッチシステムを提案し、その有効性を示すことを目的としている。本稿では、その提案システムの構築ならびに得られた実験結果による特性評価について報告する。

2. 研究の背景と目的

機械的スイッチは、他のスイッチ方式に比べて、非常に高い耐電圧、膨大な許容電流、簡素なドライブ方法で駆動可能、構築される電気回路においてハイサイド・ローサイドに関係なく使用可能、比較的安価などの多くのメリットがあり、高電圧大電流用スイッチとして非常に有能なデバイスである。しかしながら、機械的スイッチは、高電圧大電流のスイッチング時において、激しいスパークを伴うアーク放電が発生してしまう（図1）。このアーク放電により、非常に膨大な衝撃音が発生する。また、激しい放電発光を目視することによる眼へのダメージも大きい。また、アーク放電による超高温および衝撃波の発生による電極の消耗が短寿命の原因ともなっている。さらにアーク放電エネルギーは、損失となり、加えてスパークの発生による周囲への膨大な電磁ノイズの放出も大きな問題となっている。



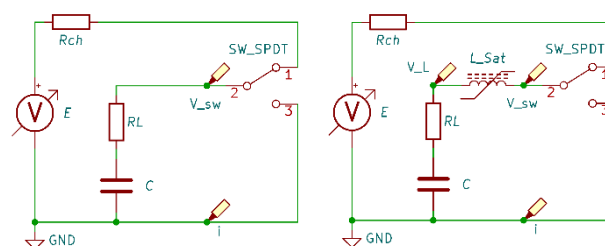
(a) スイッチング前 (b) スイッチング時

図1 スイッチング時のアーク放電。

本研究では、機械的スイッチのスイッチング時に発生するアーク放電を抑制するために、可飽和インダクタを付加したスイッチシステムを提案する。本システムは、インダクタを付与することにより、急峻な電流の立ち上がりを抑制し、電極が接触完了した後の低インピーダンス時に大電流が流れることから、アーク放電空間領域の縮小化またはアーク放電そのものの抑止が見込まれる。アーク放電の抑制により、低衝撃音、スパーク時の減光、電極消耗の低減化による長寿命化、低スイッチング損失、電磁ノイズの低減が期待される。

3. 実験方法

本研究遂行のための検証用回路方式は、キャパシタバンク放電回路を用いた（図2）。高電圧直流電源（ E ）により充電抵抗（ R_{ch} ）および検証用の機械的スイッチ（SW-SPDT）を介し、キャパシタに充電（ C ）する。充電完了後、スイッチをキャパシタの放電側に切り返し、キャパシタのエネルギーを急峻に負荷に転送することによりパルスパワーを出力する。この時の負荷は臨界制動条件を満たす抵抗負荷（ RL ）とする。付与する可飽和インダクタ（ L_{Sat} ）は、抵抗負荷と直列に接続する。各回路の素子の条件は、表1に示す。



(a) 従来回路 (b) 提案回路

図2 検証回路の回路図

従来回路方式（可飽和インダクタのない回路）と提案回路方式における、スイッチング時の衝撃音響強度を測定し比較検証を実施した。また、スイッチング時のスイッチの印加電圧ならびに流れる電流の特性を取得することで、従来の機械的スイッチ単体のスイッチング損失と提案回路の可飽和インダクタ

も含めたスイッチング損失を算出し比較検証する。

表 1 各回路素子条件

項目	記号	値・条件
直流電源	E	0 - 40 kV
充電抵抗	R_{ch}	2.0 M Ω
負荷抵抗	R_L	3.9 Ω
キャパシタ	C	1.6 μ F / 40 kV
インダクタ	L_{Sat}	ファインメット、巻数 5

4. 衝撃音響強度

充電電圧に対する衝撃音の音圧レベルの特性を、可飽和インダクタの有無について比較した実験結果を図 3 に示す。充電電圧が高くなるほど、音圧レベルが大きくなっている。スイッチング時のスパークのエネルギーも大きくなるため、音圧レベルも上昇する。また、可飽和インダクタを付与したスイッチが、付与していないスイッチの音圧レベルより低い値になったことが分かる。これにより、スイッチング時のアーク放電のエネルギーを低下することが可能となったと言える。

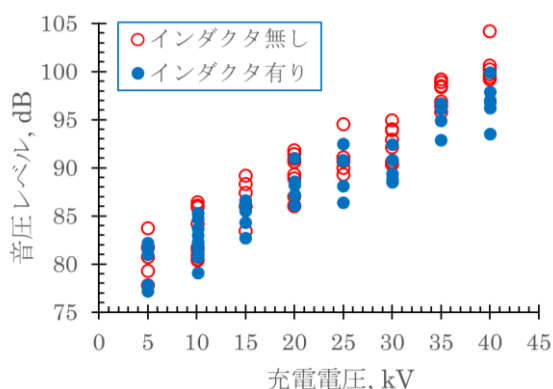
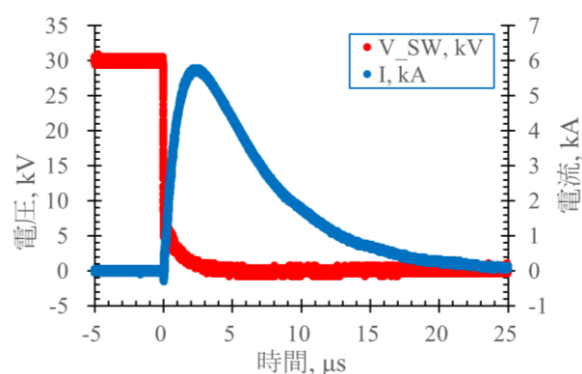


図 3 可飽和インダクタの有無における充電電圧に対する音圧レベル特性

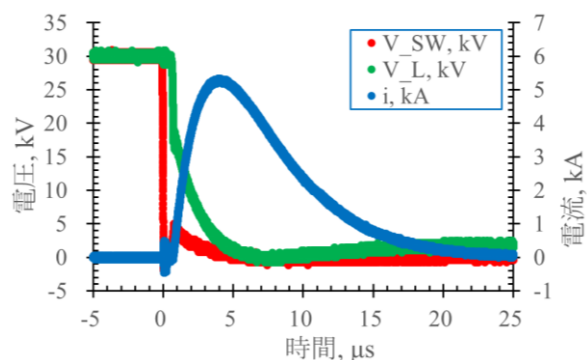
5. 電圧電流波形およびスイッチング損失

可飽和インダクタの有無におけるスイッチの電圧 (V_{SW}) およびインダクタを含むスイッチシステムの電圧 (V_L) ならびに電流 (i) の波形を図 4 に示す。これらの波形より、可飽和インダクタを付加したことにより機械的スイッチの電流において、スイッチの電圧がゼロに達し、約 1 μ s 遅れた後に電流が流れていることが確認できる。このゼロ電圧ソフトスイッチングにより、スイッチング時の音圧レベルの低下が、可能となったと考える。この時のスイッチング損失を算出すると、インダクタ無しでは 28.2 J であったのに対し、インダクタ有りでは 98.0 J となった。このことからスイッチング損失では、イン

ダクタによるエネルギー損失の方が、影響が大きい結果となった。



(a) インダクタ無し



(b) インダクタ有り

図 4 機械的スイッチの電圧電流波形

6. スwitching時のスパーク画像比較

スイッチング時のスパーク画像をカメラで撮影し、輝度値の発光領域内での総和を算出した。充電電圧に対する総和輝度値を図 5 に示す。このグラフより、充電電圧 25 kV までは、可飽和インダクタにより、輝度が抑制されていることが分かる。しかし、30 kV 以上の電圧では、輝度の抑制が低減している結果となった。これは、電圧が上昇することより、電流遅延時間が短縮され、機械的スイッチのターンオン時間に十分間に合うことができず、電極間の距離が長

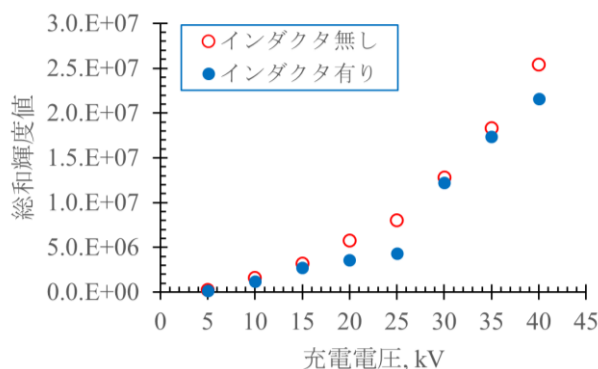


図 5 充電電圧に対する総和輝度値

い状態でアーク放電が形成されるため、スパーク時の発光の抑制が困難であったと考察する。

7. まとめ

本研究では、機械的スイッチのアーク放電を抑制するために、可飽和インダクタを付加したスイッチシステムを提案し、その提案システムの構築ならびに得られた実験結果による特性評価を実施した。スパーク時の衝撃音の音圧レベルは、可飽和インダクタの付加により抑制することを可能とした。しかし、スイッチング損失は、インダクタのエネルギー損失が大きいことから、改善には至らなかった。さらにスイッチング時のスパークによる発光強度は、インダクタによる減光が実証できた。しかし減光には、十分な電流の遅延時間が必要となり、電圧が高くなるとその時間が短縮され、減光効果が低減していくことが分かった。

8. 謝辞

本研究の遂行にあたり、熊本大学産業ナノマテリアルの浪平准教授および王准教授には、高電圧電源などの実験回路装置および高電圧大電流計測機器などの利用、ならびに研究遂行のための助言等を賜り、心より感謝の意をここに表明する。また、本研究は、令和7年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金)奨励研究「研究課題名：可飽和インダクタを用いた高電圧大電流用機械的スイッチシステムの構築と特性評価、課題番号：25H00193」の採択における助成により、遂行した。

ネガ型電子線レジストとしての SU-8 の薄膜化によるラインパターンの微細化

○藤本 美穂

東京科学大学リサーチインフラ・マネジメント機構コアファシリティセンターマイクロプロセス部門

1. はじめに

エポキシ樹脂ベースのネガ型フォトレジスト SU-8 は電子線レジストとしても利用可能であり、フォトリソグラフィでは実現が難しい線幅 1 μm 以下の高アスペクト比のパターン形成に用いられている^[1]。微細パターンの形成には、レジストの薄膜化^[1]や PEB 温度の最適化^[2]が有効である。今回は SU-8 の膜厚の薄膜化により、線幅約 440 nm の高アスペクト比のラインアンドスペースパターンを作製したので報告する。

2. 実験方法

図 1 に、本実験の電子線描画の概略図を示す。15 \times 15 mm^2 に劈開した厚さ約 300 μm の Si (100)ウェハ上に、PGMEA で希釈した SU-8 2002 を 500 rpm で 10 秒間、3000 rpm で 30 秒間スピコートし、ホットプレート上で、110 $^{\circ}\text{C}$ で 60 秒間プリバークした。これにより、通常のスピンコートで得られる約 2.4 μm の厚さを約 3 分の 1 に薄膜化した。

電子線描画は、加速電圧 30 kV、ビーム電流 10 pA、ドーズ量 1 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ で行った。描画後の基板をホットプレート上で、69 $^{\circ}\text{C}$ で 60 秒間 PEB を行った^[2]。SU-8 developer で 60 秒間現像後、IPA で 15 秒間リンスを行った。描画したラインアンドスペースパターンの倒れや結合の有無を SEM で観察した。

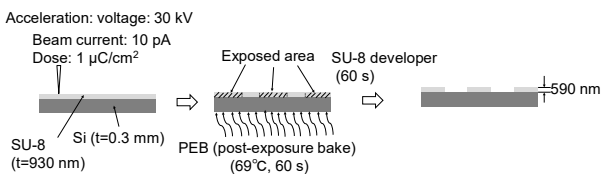


図 1 本実験の電子線描画の概略図

3. 結果と考察

図 2 に、膜厚約 590 nm の SU-8 のラインアンドスペースパターンの SEM 像を示す。図 2 に示すように、線幅は約 440 nm、アスペクト比は約 1.3 の SU-8 のラインアンドスペースパターンが製作できた。先行研究^[1]の膜厚約 500 nm のアスペクト比 1 のラインアンドスペースパターンよりも高いアスペクト比の構造を実現することができた。

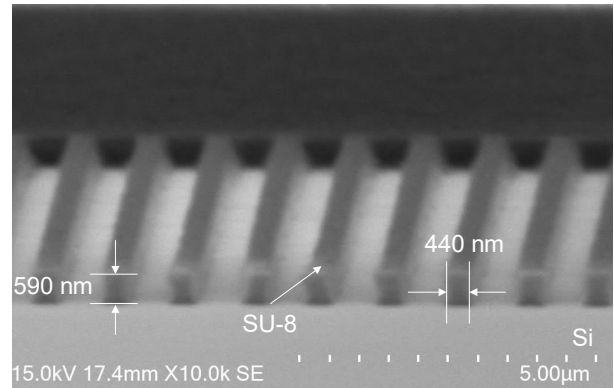


図 2 膜厚約 590 nm の SU-8 の最小ラインアンドスペースパターン

4. まとめと今後の展望

SU-8 の膜厚を薄膜化することで、電子線描画によりアスペクト比 1.3 のラインアンドスペースパターンを実現した。今後は本実験で得られたアスペクト比を維持したまま SU-8 の微細パターンの高密度化と、更なる高アスペクト比のパターンの製作を目指す。

参考文献

- [1] J. Vinje et al., “Electron Beam Lithography Fabrication SU-8 Polymer Structures for Cell Studies”, J. Microelectromechanical Syst., Vol. 29, No. 2, (2020).
- [2] M. Yasui et al., “Effects of post exposure bake temperature and exposure time on SU-8 nanopattern obtained by electron beam lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 11RF03, (2014).

極高真空計の感度調査

○羽生 智文^{A)}、内山 隆司^{A)}、田中 窓香^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac : ERL) は、2008 年から将来光源として開発が行われてきた。現在では加速器開発の実証試験機として 2013 年にコンパクト ERL (cERL) が建設され、電子銃や超伝導空洞や極紫外光自由電子レーザー (EUV-FEL) などの鍵となる多くの加速器要素開発に貢献している。電子銃では大強度電子源を安定に供給するため光陰極半導体カソードを使用している。カソードの長寿命化を実現するために極高真空領域 (1×10^{-9} Pa 未満)^[1]が必要不可欠である。このほか真空機器装置の状態を正しく把握することにより、機器の更新時期の予測も可能になると考えている。今回は、開発当初から使用している極高真空計 (エクストラクタ真空計 : EXG) の調査として較正済みの EXG を基準球とし、およそ 10 年間使用してきた EXG について高真空領域 (1×10^{-1} Pa 未満 1×10^{-6} Pa 以上)^[1] 及び超高真空領域 (1×10^{-6} Pa 未満 1×10^{-9} Pa 以上)^[1] における真空感度について試験を行った内容を報告する。

2. 測定装置

2-1 エクストラクタ真空計 (EXG)^[2]

極高真空領域を測定可能な真空計として IONVAC IE514 (Leybold 社製) が販売されている。EXG の外観を図 1 に示す。この真空計は、軟エックス線効果や電子励起脱離 (ESD) イオン効果を除去する構造になっているため極高真空領域の測定が可能であるほか、購入時に較正された状態で納品される。ユーザー側で感度係数を入力することで正しい圧力が測定できる。表 1 に比較調査に使用した EXG のシリアルナンバー (S/N) と感度係数を示す。コントローラは IONVAC IM450 (Leybold 社製) を使用して測定をする。



図 1 エクストラクタ真空計

表 1 比較調査に使用した真空計

	S/N	感度係数
基準球	4626	5.36
比較球	1846	5.83
	1983	5.20
	1901	6.55

2-2 スピニングロータ真空計 (SRG)

真空計の較正には測定誤差 1 %以内の高精度で測定できるスピニングロータ真空計が使用される。高真空領域の較正には不向きだが、低真空領域ではガス粘性 (摩擦) を利用して圧力測定を行うため誤差が少なく一般に較正球の基準として使用されることが多い。今回の真空計比較較正では予め較正済みの SRG-3 (MKS 社製) を新規に購入して測定を行うことにした。SRG の外観を図 2 に示す。

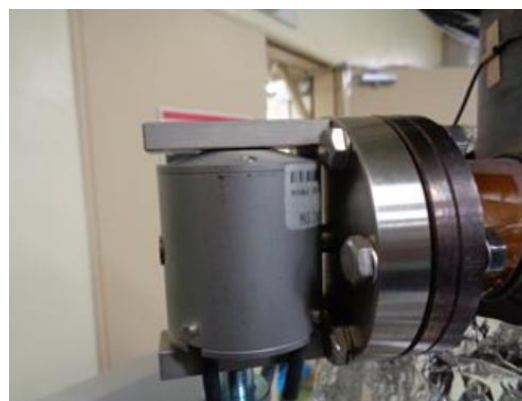


図 2 スピニングロータ真空計

2-3 較正用チャンバの構成

較正用チャンバとして使用する装置の外観を図3に示す。この装置は、ステンレス鋼製で内径145 mm、高さ260 mmの円筒形で真空計の測定条件を揃えるため同位置に4ポート取り付けられるように構成されている。またガス導入部においては図4のように真空計にガスが直接当たらないように配慮された構造になっている。ガスの流量とチャンバ内圧力の調整は、バリアブルリークバルブを使用して制御している。



図3 較正用チャンバ

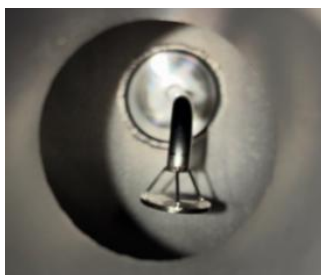


図4 ガス導入部

3. 真空計の配置及び測定方法

較正用チャンバにはSRGが取り付けられており、対角には新規で購入したEXG（較正済み基準球）を配置した。SRG及び基準球とするEXGの両隣に10年間使用したEXGの配置（比較球）とした。ターボ分子ポンプで排気後にヘリウムリークディテクタにてリークチェックを行ったのち、較正用チャンバを180℃で40時間ベーキングを行った。ベーキング途中に取り付けた真空計のガス出しを行った。ベーキング終了後も同様にガス出しを十分に行ったのち、室温状態での到達圧力 10^{-8} Pa台を確認した。この時、真空計も同様にガス出しを行った。

測定方法は、バリアブルリークバルブより高純度乾燥窒素ガスを一定量流し、ターボ分子ポンプ（TMP）で排気しながら圧力の平衡状態を保持する。バリアブルリークバルブの開閉度によりガス流入量

を微調整して到達圧力から 8×10^{-3} Paまで加圧、減圧の順で測定した。コントローラの桁替わりによる影響を考慮し、測定点は同じ桁の3点（2, 5, 8付近）で行った。

また、コントローラ及びケーブルによる依存性についても確認する。基準球に接続していたコントローラ及びケーブルを比較球に入れ替え測定した。

4. 測定結果

真空計の経年劣化について調査を行うためSRGを基準球としてEXGの感度係数を測定した。SRGは低真空領域で使用されるため、低真空領域で高真空計であるEXGの感度係数の調整を試みた。しかしSRGを基準球としてEXGの感度係数を調整した場合、圧力範囲に応じて測定値が変動した。このため、測定の一貫性と信頼性を確保するには、現状では較正済みEXGを基準球として採用することが最も合理的である。

基準球と比較球（S/N 1846, 1901, 1983）の比較結果を図5に示す。10年間使用したEXG（比較球）は、基準球と同じような圧力を示すことが分かった。なお、S/N 1983の比較球は、ガス出しの際に自動デガスモードが途中で終わってしまったため、ガス出しが十分でない可能性がある。

また、コントロール及びケーブルの依存性を確認した結果を図6, 7に示す。入替前後で測定圧力のばらつきがないことから、コントローラ及びケーブルの依存性はないと考えられる。

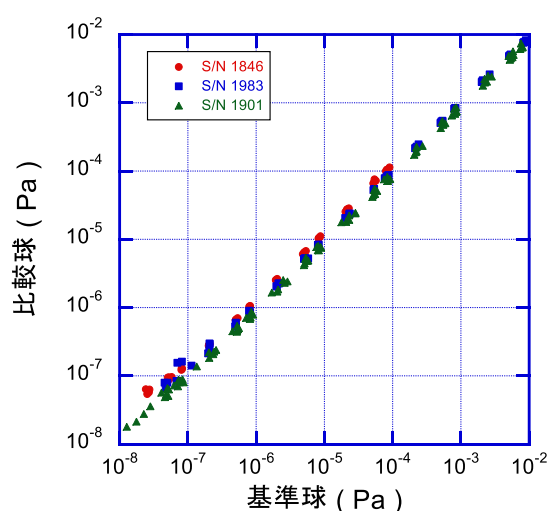


図5 比較球（S/N 1846, 1901, 1983）毎の基準球と測定値の変化

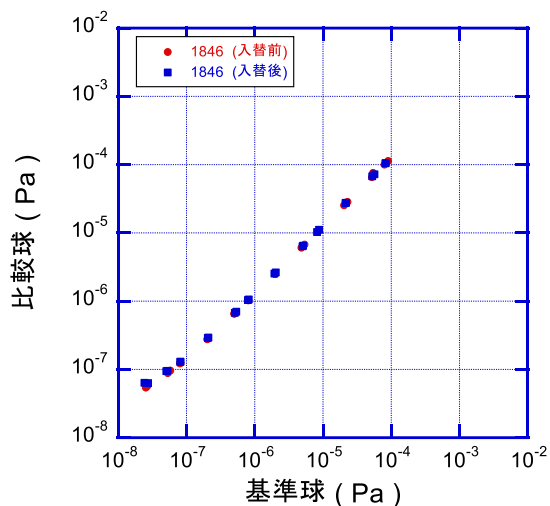


図6 基準球と比較球 (S/N 1846) のコントローラ
及びケーブルの入替前後の測定値の変化

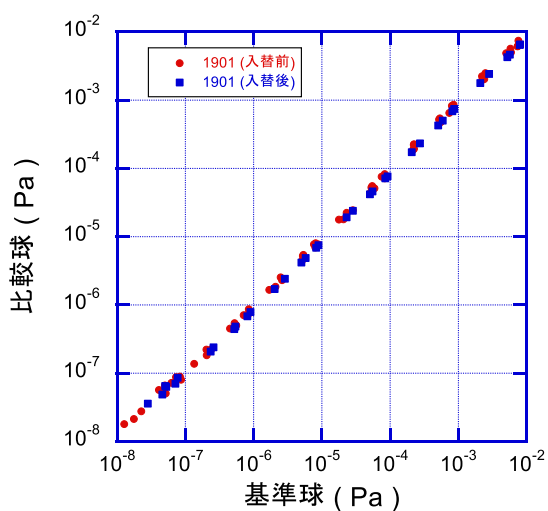


図7 基準球と比較球 (S/N 1901) のコントローラ
及びケーブルの入替前後の測定値の変化

5. まとめ

SRG を基準球とした EXG の較正は実施できなかったが、較正された EXG を基準球として比較調査を実施した。10年間使用した EXG は、基準球と測定値に大きな差がなかったことから、引き続き使用可能であることが確認された。

参考文献

[1] JISZ8126-1 : 2021 真空技術—用語—第1部 : 一般用語.

Belle II 実験 LS2 に向けた新型 RVC の設計開発

○金山 高大^{A)}、高力 孝^{A)}、鈴木 純一^{A)}、田中 秀治^{A)}、中村 克朗^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(以下 KEK)で行われている SuperKEKB/Belle II 実験では、ビーム衝突点用超伝導電磁石(QCS)と衝突点ビームパイプとの接続に、遠隔真空接続(RVC)と呼ばれる方法が使われている。しかし、今後予定されているルミノシティ向上を目的とする長期シャットダウン(LS2)に向けたアップグレード案では、スペースの都合から現在の RVC が使えなくなる可能性が高い。そのため、新型 RVC の検討を開始した。新型 RVC では、現在の RVC と比べて、衝突点側に集約されたメカ機構が省略でき、先端部直径が 1/2 以下となる。本発表では、新型 RVC の設計開発について進捗報告する。

2. 設計開発

2.1 概念設計と開発状況

現在の RVC では、回転式ロックシリンダーで噛み合わせたビームパイプの接続部に、窒素ガスで圧力をかけて真空を維持する方法^{[1][2]}なのに対して、新型 RVC では、ボルトの締結力で真空接続を行うシンプルなコンセプトで設計を開始した。図 1 に新型 RVC の概念図を示す。

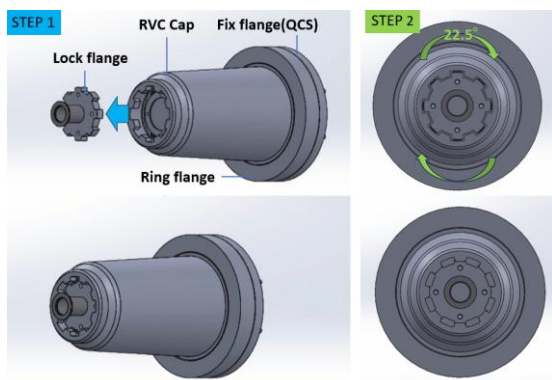


図 1 新型 RVC 概念図

衝突点ビームパイプ接続部の歯車型フランジ(Lock flange)へ、QCS と一体となった RVC 構造体(RVC Cap)を挿入し、22.5° 回転させることで爪を歯車型フランジに引っ掛けて噛み合わせ、遠隔操作ロッドでボルトを締結して真空接続する構想である。

開発状況として、既にグループで検討されていた上記の構造案に対して、実現可能か構造解析を行い、モックアップ製作及び試験を進めている状況である。

2.2 基本設計と構造解析

真空接続を実現するためには、接続部に搭載したメタルシールに対して、つぶれるために必要な荷重を RVC でかける必要がある。今回、メタルシールはヘリコフレックスシールの HNV タイプを使う予定である。締付時の必要ボルト荷重 F_j は、直径 D_j と設計締付圧力 Y_2 、係数をかけて下記のように求まる。

$$F_j = \pi * D_j * Y_2 * 1.1 \quad (1)$$

(1)式より必要ボルト荷重を求めると、直径の大きいものを 1 つ使う案では、 $F_j \approx 27000 \text{ N}$ 、直径の小さいものを 2 つ使う案では、 $F_j \approx 18000 \text{ N}$ となった。

ボルトの締結に加えて、荷重に余裕を持つために、少ない撓み量で高荷重を得ることが出来る皿バネを使用する事にした。皿バネのばね定数 k は非線形だが、荷重 P と撓み量 δ から下記のように求まる。

$$k = \frac{dP}{d\delta} \quad (2)$$

(2)式より使用予定の皿バネでばね定数を求めると、 $k = 3.8 \text{ kN/mm}$ となった。1 枚辺りの撓み量は推奨値の 75 % までとすると 0.3375 mm、4 枚重ねで 4 段重ねると 1.35 mm、これを 8 箇所を使用する場合、皿バネでかけられる荷重は $3800 * 1.35 * 8 \approx 41000 \text{ N}$ 程度、データシートのばね力から計算すると、1 枚当たり $1520 \text{ N} * 4 \text{ 枚} * 8 \text{ 箇所} \approx 48600 \text{ N}$ 、従って、41000~48600 N 程度の荷重をかけることができる。

上記の案に対して、実現可能かシミュレーションソフトウェア ANSYS での構造解析を行った。図 2 に解析の様子を示す。

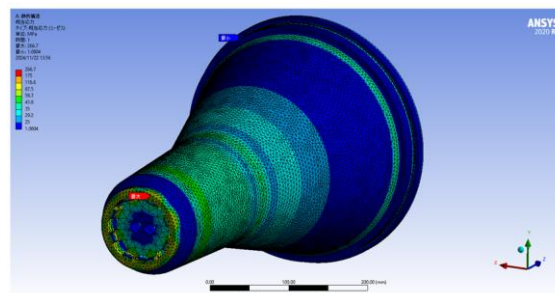


図 2 構造解析の様子

荷重 48000 N の条件で応力集中が起こらないように設計変更と解析を重ね、安全率 1.5 に収まるよう設計し、モックアップを製作することにした。

3. RVC簡易モックアップによる原理実証 (2024年度)

3.1 簡易モックアップによる真空接続試験

2024年度、まずは接続部周辺を抜粋した簡易的なモックアップを製作することにした。このモックアップでは、遠隔操作の機能はまだないが、メタルシールをボルトの締結力で密着させて皿バネで荷重に余裕を持ち、真空接続を行う原理実証を目的とした。図3に新型RVC簡易モックアップの概要を示す。

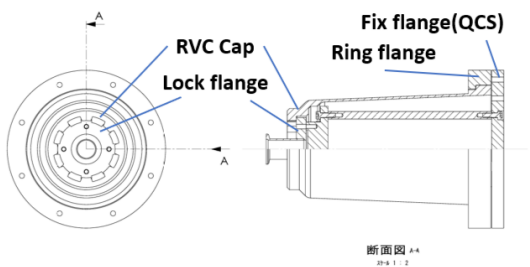


図3 RVC簡易モックアップ半断面図

試験手順としては、QCSを模擬した固定端にメタルシールを取り付け、歯車型のLock flangeを位置決めボルトで仮固定した。その後、円筒形のRVC Capを回転させてLock flangeの歯車部に爪を噛み合わせた。後方ではRing flangeでRVC Capを押さえて皿バネを75%位置まで8箇所のボルトを90°ずつ締結することで規定の荷重をかけて、メタルシールを密着させ、真空接続を行う。図4に試験の様子を示す。



図4 RVC簡易モックアップ試験の様子

また、Lock flangeが密着するまでの変位量はダイヤルゲージで測定した。図5にその際の変位量を示す。図のように、ボルトが2.75回転から3回転に回した際、変位の値が変わらず平行に推移しているのが分かる。これは、メタルシール密着し、皿バネに

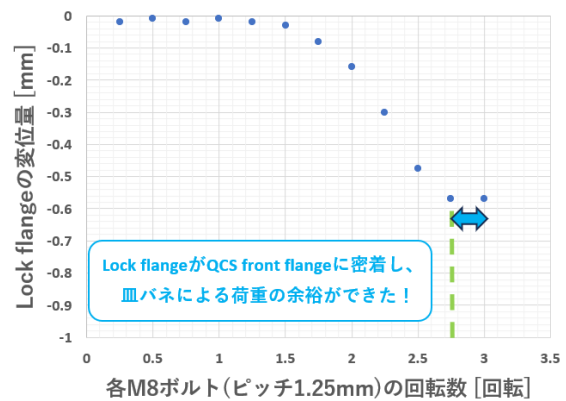


図5 皿バネによる荷重の余裕

より、荷重の余裕を持つことができた証拠である。(荷重の余裕としては、 3800N/mm (ばね定数) * 0.3125 (M8並目ねじのピッチ1.25mm * $1/4$ 周) * 8箇所 = 9500N 程度である。)

3.2 ヘリウムリーク試験 (2024年度)

上記試験の後、真空接続が本当に成功しているか、ヘリウムリーク試験を行った。図6に試験の様子を示す。



図6 ヘリウムリーク試験の様子

ヘリウムリークディテクタには Adixen ASM 142 を使用した。試験手順としては、メタルシールをつぶした Lock flange の接続箇所へヘリウムを吹き付けてから密封して数分待ち、リーク量を確認した。途中、継ぎ手部分からリークしていることが判明し、袋で覆った。

試験の結果、 $1.4 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ オーダーの結果が得られ、ボルト締めで真空接続を行う原理実証に成功した。

次は実際の大きさと遠隔操作機構も含めた試験を行うことや、先端部構造の具体化などが課題となり、2025年度にフルサイズのモックアップを製作する方針となった。

4. RVC フルサイズモックアップ (2025 年度)

4.1 フルサイズモックアップによる真空接続試験

2025 年度、新型 RVC のフルサイズモックアップを製作した。このモックアップでは、実際の大きさ且つ接続部の部品をより本番に近づけて製作し、遠隔操作機構も後から取り付けることを想定している。また、2024 年度のモックアップでは 1 つだったメタルシールも、ビームパイプの数に合わせて 2 つとなり、より正確さが求められる。図 7 にフルサイズモックアップの概要を示す。

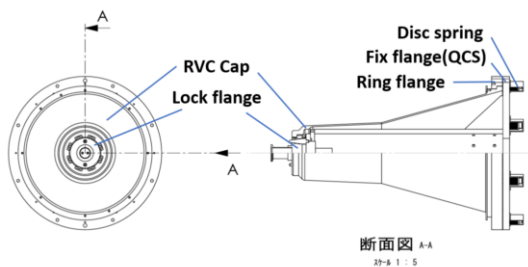


図 7 RVC フルサイズモックアップ半断面図

今回、全長約 500 mm で厚み約 3mm の RVC Cap を製作するにあたり、2024 年度で使用した RVC Cap を切断して後方部分と溶接することで、製作した。また、2024 年度と大きく違う点として、ビームパイプを模擬した構造、RVC Cap の回転機構、Lock flange と RVC の隙間を調整するための、皿バネとボルトのブラケット構造等である。

今回、全体を組み立てると重さが 4~50kg と重たく、たわみの影響を受けることなどを考え、段階的に試験を行う事にした。まずは縦置きの手動でボルトを締結するシンプルなセットアップで試験を行い、成功したら横置きにして遠隔操作ロッドを加えて再度試験を行う方針となった。図 8 に縦置きでの試験の様子を示す。

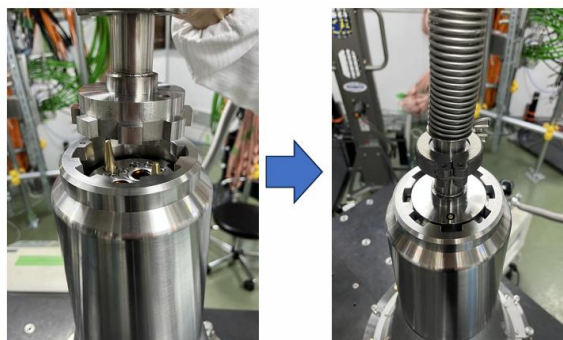


図 8 フルサイズモックアップ真空接続試験

また、メタルシールのつぶれしろは設計値で 0.7 mm であるが、つぶす際に RVC Cap と QCS 固定端の変位をダイヤルゲージで測定することで、実際につぶれていることを確かめた。図 9 にその時の様子を示す。

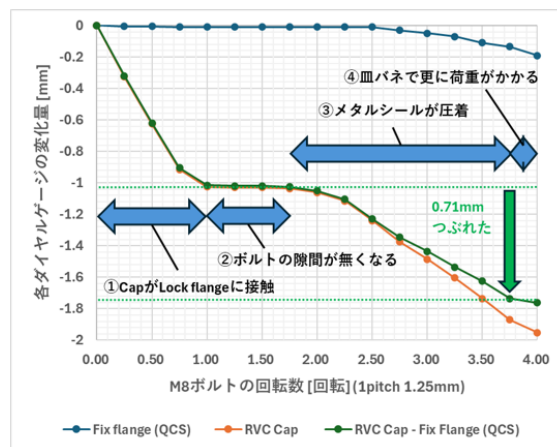


図 9 メタルシールがつぶれる様子

本来であれば動かないはずの固定端 (Fix flange) も変形していることが分かり、RVC Cap との差を取ることで、実際につぶれ量を求めた。すると、約 0.71 mm つぶれており、設計値と合うことを確かめた。

4.2 ヘリウムリーク試験 (2025 年度)

ヘリウムリーク試験では、継ぎ手部分には空気を流すことで気密を保ち、RVC の接続部へヘリウムを吹き付けた。図 10 に試験時の様子を示す。



図 10 ヘリウムリーク試験の様子

結果、リークレート $5.0 \times 10^{-13} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ からヘリウムを吹き付けて 10 分間 $10^{-13} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ オーダーを維持することができた。これは、加速器でも十分使えるとても良い結果となり、まずは縦置き状態でのフルサイズモックアップ試験に成功した。

4.3 今後の開発予定

今回、縦置きでの真空接続試験に成功したので、次のステップとしては横置きで遠隔操作ロッドにより同様の試験を行う予定である。図 11 に横置きにしたフルサイズモックアップと遠隔操作機構を示す。



図 11 遠隔操作試験に向けて

現在、遠隔操作機構には、ボルトを遠隔で操作するロッドを1箇所のみ取り付けてある。規定のトルクをかけてボルトを締結することに成功したため、部品を発注し、ロッドの追加製作を予定している状況である。準備が整い次第、横置きでの試験を行う。

また、今後の開発項目としては、2つのメタルシールを直径の異なるものにした際の試験、ケーブルを通すために RVC Cap を削った際の構造解析、などを行う予定である。

また、昨今 SBL(Sudden Beam Loss)が問題となっているが、現 RVC で使用された真空用接着剤もその要因の1つという可能性が考えられている。そのため、接着剤を使わずにメタルシールを平行に保持したまま真空接続を行うことが理想であり、そのための試験も予定している。

5. まとめ・展望

LS2 に必要となる、新型 RVC の設計開発を始め、2024年度は簡易モックアップの製作し、原理実証を行った。2025年度にはフルサイズモックアップを製作し、まずは縦置き状態で真空接続試験を行った。ヘリウムリーク試験の結果、加速器でも使える結果が得られた。

今後は新型 RVC を実際の実験時と同じ横置き状態で遠隔操作ロッドを用いて上記と同様の真空接続試験を行い、本番に向けて改良を重ねていく予定である。

6. 謝辞

RVC のモックアップを設計開発するにあたり、多くのアドバイスをくださった Belle 関係者の皆様、部品の製作をしてくださった KEK 機械工学センターをはじめとする担当者の皆様に感謝したい。

参考文献

- [1] RVC operation manual forward v1.0 K.Gadow
27.08.2019
- [2] RVC operation manual backward v1.0 K.Gadow
27.08.2019

JT-60SA 上部共通架台の製作から組立まで

○齊藤 優毅^{A)}、 笹島 唯之^{A)}、 佐伯 寿^{A)}、 柳生 純一^{A)}、 芝間 祐介^{A)}

^{A)}量子科学技術研究開発機構 トカマクシステム技術開発部 JT-60SA 本体開発グループ

1. 概要

JT-60SA 装置は世界最大のトカマク型超伝導プラズマ実験装置(幅約 13.5m、高さ約 15.5m)である。次期プラズマ実験運転に向け、トカマク本体と加熱装置を増強する工事の一環として、トカマク本体の上部に架台を整備し、運転中の真空容器内機器を除熱する冷却水配管を支持するとともに、プラズマを診断する計測装置の設置を行う。架台にはプラズマ計測装置が据え付けられるため、製作精度±5mm、据付精度±10mm で設計された。本架台の製作と据付の結果について報告する。

2. 背景

2.1 製作の経緯

JT-60SA は 2023 年にファーストプラズマの着火に成功し、初期段階のプラズマ実験運転を実施した。

初期実験運転の終了後、装置の性能向上を目的とした増強期間へ移行し、次期プラズマ実験運転に向けて、関連機器の増設が計画されている。

JT-60SA は前任装置である JT-60U の設備を一部流用しており、長期間にわたり多様な機器が逐次据え付けられている。その結果、装置周辺の設置スペースは極めて限られた状況にある。

このため、増設機器を効率的かつ健全に支持するための新たな支持構造として、JT-60SA 上部共通架台(以下、上部架台)を整備する計画が立案された。

3. 上部共通架台の概要

3.1 架台仕様

上部架台は、本体室(JT-60SA 本体組立建屋)床面に建てられた高さ約 17 m の 4 本の支柱と、水平方向の振れを抑える振れ止め支持体により支持される。構造形式は鉄骨造とし、X 方向および Y 方向ともにラーメン構造とした。主要構造部材の材質は SUS304 とし、架台の総重量は約 72 t である。

上部架台には精密機器であるプラズマ計測装置が据え付けられるため、高い位置精度が要求される。架台寸法約 17m×17m に対して、製作精度±5 mm、据付精度±10 mm を要求仕様とした。上部架台の鳥瞰図を図 1 に示す。

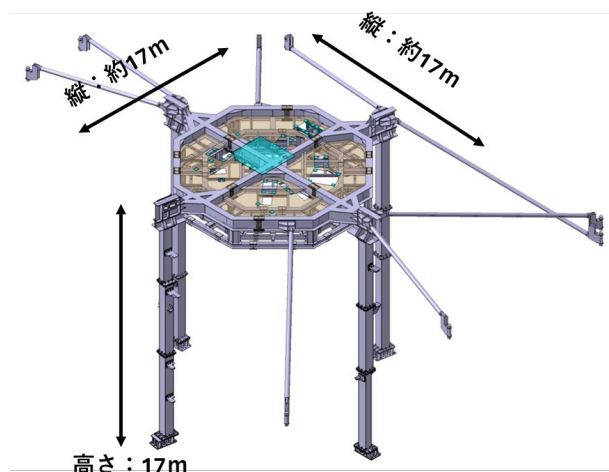


図 1 上部架台鳥瞰図

3.2 積載機器仕様

上部架台上には、主に以下の機器を積載する。

(1) プラズマ計測装置

プラズマの可視分光測定や波長解析を行う機器を上部架台上に据え付ける。プラズマ計測機器の総重量は約 19 t である。

(2) 冷却水配管

実験運転中に真空容器内機器を冷却する役割を担う。配管系は呼び径 350A とし、満水時の総重量は約 20 t となる。

(3) その他の機器

プラズマ着火時に使用するグロー放電電極装置、中性ガス注入装置、歩廊用ステージ板等を据え付ける。これらの総重量は約 20 t である。

3.3 上部架台の構造検討

項目 1 で述べた通り、上部架台の組立および据付には複数の制限が存在する。これらの制限に対する構造設計上の対応方針について、以下に示す。

(1) 建屋内における制限

JT-60SA 建屋内は既設機器が密集しており、架台設置スペースが極めて限定されている。このため、3D-CAD モデルを用いた干渉確認および施工

動線検討を実施し、既設機器との配置整合性を確保した。

(2) 工期上の制限

本体室での組立作業は、他機器の据付作業と並行して実施されるため、短期間での施工が要求された。別建屋である超伝導コイル巻線棟において、予め上部架台と冷却水配管を一体化した後、架台構造を二分割構造とすることにより、現地での組立作業時間の最小化を図った。図2に架台二分割構造の概要を示す。

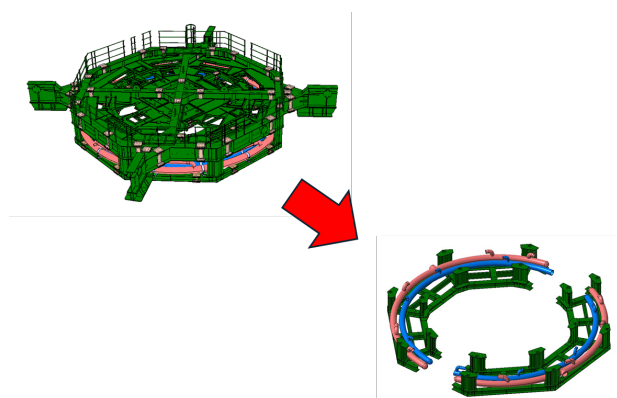


図2 上部架台の二分割構造概要図

(3) クレーン揚程に関する制限

本体室内天井クレーンの揚程制約により、大型の吊り治具の使用が困難であった。そのため、吊り治具を廃止し、架台本体に直接吊りピースを溶接する設計とすることで、吊り治具構造の簡略化および揚程制約への対応を図った。

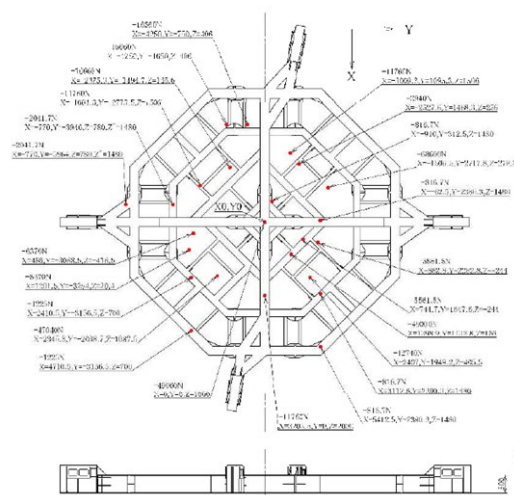


図3 プラズマ計測装置節点位置

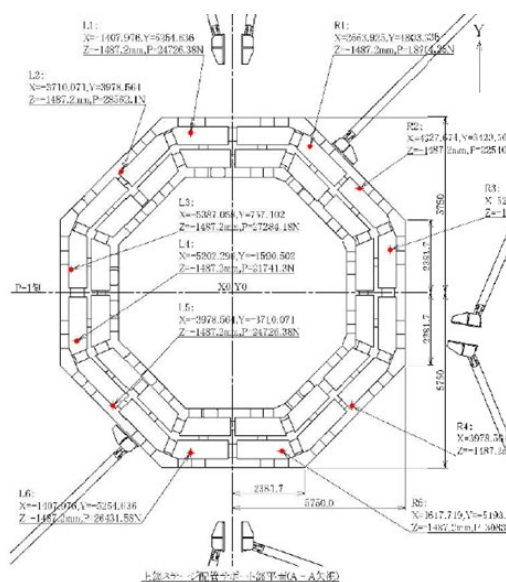


図4 冷却水配管節点位置

4. 構造健全性の評価

本架台の設計目的は、(1) 地震時における架台ベース部の水平変位量を 10 mm 以内に抑制すること、(2) 機器荷重に対して十分な耐荷重能力を確保すること、の2点が求められた。

5.1 耐荷重設計

プラズマ計測装置及び冷却水配管の荷重作用点に節点を設定した有限要素 (FEM) モデルを構築し、耐荷重能力を評価した。

それぞれの荷重作用点を図3、図4に示す。

荷重条件は、固定荷重 (床) : 400 N/m²、積載荷重 (架構・機器) : 2000 N/m²とした。

5.2 耐震設計及び強度解析

耐震設計において、「建築設備耐震設計・施工指針」に基づく設計用水平震度 0.4 を設計地震動として採用し、架台構造の耐震性能を評価した。

初期設計では振れ止め支持体を 7 本構成としたが、FEM 解析により局所的に大きな変位集中が生じることが判明した。そこで、振れ止め支持体を 1 本追加し、最大変位量を ±10mm に抑制するよう設計を改良し、耐震要求性能を満足する構造とした。

6. 超伝導コイル巻線棟での仮組

設計および製作を完了後、2024年12月から2025年2月にかけて、巻線棟において業者による上部架台の仮組立を行った。

上部架台は、冷却水配管を支持する配管支持体(以下、下半とする)と、計測装置等を支持する架台本

体（以下、上半とする）からなる二分割構成とし、仮組立を行った。上半および下半の鳥瞰図を図 5 及び図 6 に示す。

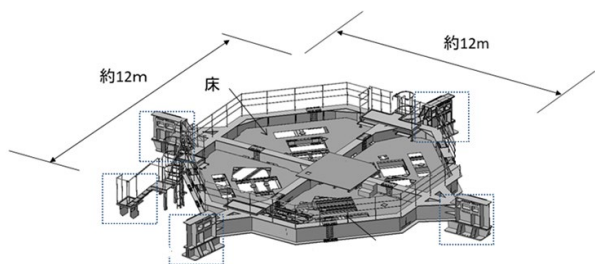


図 5 上半鳥瞰図

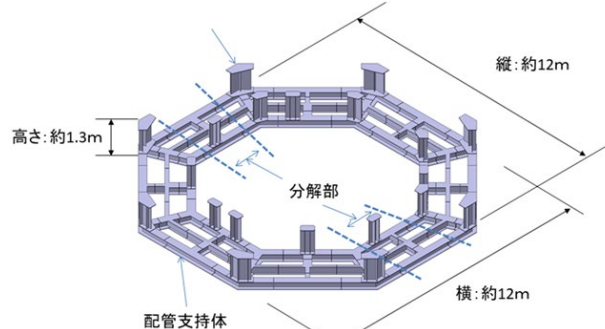


図 6 下半鳥瞰図

まず、下半から上半までを順次組み立て、冷却水配管未敷設状態で架台全体を仮組み立てし、組立精度確認のための検査を行った。計測はレーザー墨出し機および測量機を用いた。

その結果、組立精度が所定の組立公差内に収まっていることを確認した。

その後、本体室への搬入性向上を目的として、上半を 32 ブロックに分割した。上半を分解することで、配管支持体上への冷却水配管敷設が可能となるため、配管の敷設を行った。

さらに、冷却水配管と一体化した下半については、図 2 に示した二分割構造へ分解し、超伝導コイル巻線棟内にて保管した。

7. トカマク本体への据付

2025 年 11 月より、JT-60SA 本体への上部架台据付作業を開始した。まず、二分割した下半部をそれぞれ本体室内へ搬入し、現地で下半部の一体化組立を実施した。次に、32 ブロックに分割した上半部を順次搬入し、下半部と上半部の現地一体化組立を行った。

下半部および上半部の現地一体化組立完了後、クレーンによる吊り込み据付作業へ移行した。上部架台の上架には定格荷重 250 t の天井クレーンを使用

し、室内高さ約 20 m の空間内で搬送した後、4 本の支柱上端部に据え付けた。図 7 に据付時の状況を示す。

クレーン切離し前に、支柱上部と上部架台取合い部の三次元座標の整合性を確認し、微調整をした。

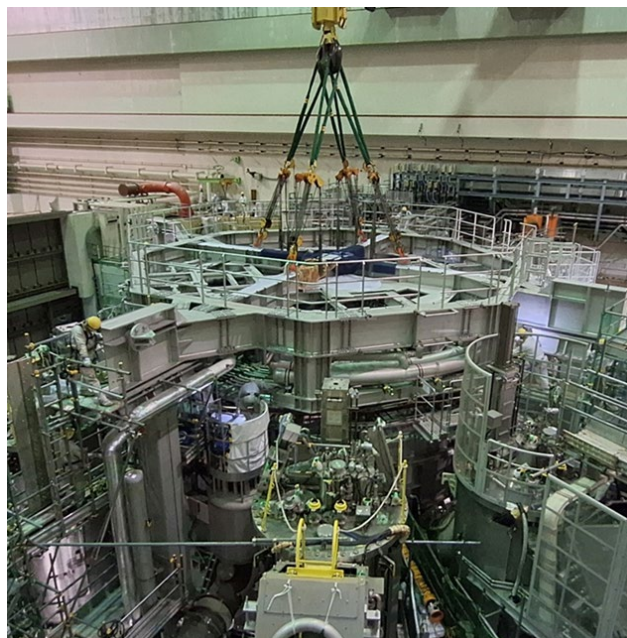


図 7 JT-60SA 上部への据付時

7.1 据付精度

上部架台の据付精度を確認するため、三次元計測による据付位置の精度評価を実施した。測定には、レーザートラッカー（Leica Absolute Tracker AT401）を用い、上部架台平面上に計 32 点の計測点を設定し、各点の三次元座標を取得した。設定した計測点を図 8 に記す。

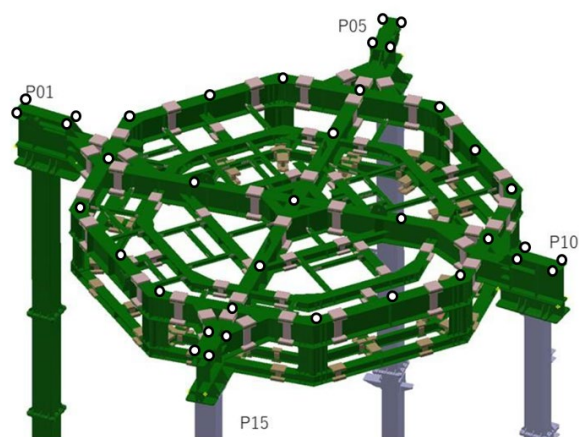


図 8 計測点設置位置

取得した測定座標を CATIA 上の設計 3D モデルに位置合わせし、設計基準位置からの偏位量を算出した。

7.2 測定結果

設計基準位置からの偏位量の測定結果を表 1 に示す。

表 1 測定結果

項目	偏位量	許容値	判定
中心位置X	-0.232mm	±10mm	OK
中心位置Y	-0.094mm	±10mm	OK
中心位置Z	-3.967mm	0~-20mm	OK
平面度	最大+6.9mm	±10mm	OK

上記の結果より、上部架台の中心位置が設計値に対して許容範囲内に収まっていることを確認した。

8. まとめ

本報告では、上部架台の製作及び組立作業について、プラズマ計測機器及び冷却水配管の支持構造として十分な据付精度を有することを示した。主な結果を以下に示す。

- (1) 分割構造設計の採用により、JT-60SA 本体室での現地組立工期の短縮を実現した。
- (2) 仮組およびレーザートラッカーによる三次限計測に基づき、据付精度±10 mm を達成した。
- (3) 据付時の架台中心位置および平面度が設計値に対して許容範囲内であることを確認した。

ポスターセッション

第3分野

(計測・制御技術)

PF-AR の DCCT 更新に伴う制御系の整備

○塩澤 真未

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) つくばキャンパスの大強度パルス放射光源加速器 Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) において、ビーム電流計 DC Current Transformer (DCCT) の更新作業を、2023 年より約 2 年かけて段階的に実施した (表 1)。本更新では、DCCT コアや検出回路などのハードウェアに加え、読み出し制御系のソフトウェア改修も行った。本稿では、制御系の更新内容について、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から報告する。

表 1 主な作業内容と完了日^[1]

作業名	完了日
DCCT 専用ケーブルの敷設作業	2024 年 7 月
ビームダクトの組み立て作業	2024 年 12 月
インストールのための真空作業	2025 年 1 月
冷却水管・温度モニターの整備	2025 年 2 月
デジタルマルチメータの制御系整備	2025 年 2 月

2. DCCT の概要と更新背景

DCCT とは図 1 に示すような機器で直流電流を高精度で測定できる電流計のことで、リングに蓄積された電子ビームの平均電流を測定するためのビームモニターである。PF-AR などの蓄積リング型の加速器にとっては運転に欠かせない重要なビームモニター

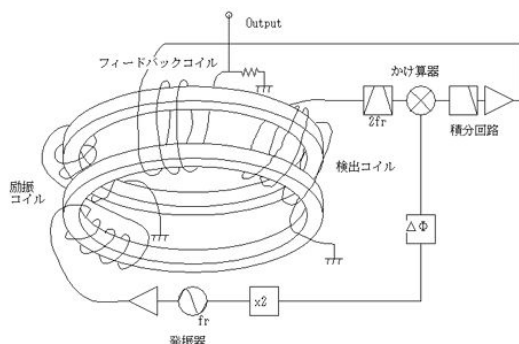


図 1 DCCT 概略図^[2]

速器にとっては運転に欠かせない重要なビームモニター

ターのひとつである。

PF-AR には運転に使用しているメイン DCCT と予備のサブ DCCT の 2 台がインストールされていたが (図 2)、2022 年 5 月にサブ DCCT の検出回路が故障していることが判明した。しかし 30 年近く前の古い回路でありメーカーによる修理が不可能であったため、更新することになった。更新した新 DCCT をメイン DCCT とし、旧メイン DCCT をサブ DCCT とすることで冗長化を図った。現在、現実的な DCCT の入手先は工藤電機 (日本) か Bergoz (フランス) の二択となっているが今回の更新では入札の結果 Bergoz 製の DCCT コアと回路を調達した。なお、旧メイン DCCT は工藤電機製である。

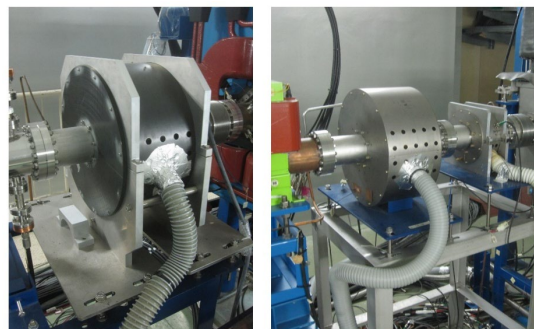


図 2 PF-AR の DCCT (左: 旧メイン DCCT、右: 旧サブ DCCT)

3. EPICS について

EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) ^[3]とは加速器などの大型実験装置における制御システムを構築するためのフレームワークであり、KEK 内外の大型加速器施設や物理実験装置などで広く利用されている。PF-AR においても EPICS を用いている。

EPICS を用いて分散制御システムを構築することで、機器とコントローラ間の配線を最小限に抑えることができ、さらに機器の追加や変更にも柔軟に対応できるという利点がある。EPICS では Channel Access というプロトコルで Process Variable (PV≒レコード) の値を読み書きすることで機器を監視・制御している。レコード名さえ分かれば同じネットワーク内のどの端末からでも通信が可能である。

レコード名は例えば「OPAAR:BEAM:CURR」のようにコロン(:)でつないで表記するのが一般的である。レコード名のつけ方は大抵加速器ごとにルールを設けてあり、それに従って他のレコードと被らない名前を命名する。

4. ハードウェアの整備

DCCT 更新に伴うハードウェアの整備は表 1 や図 3 に示した通りだが、ここでは特に制御関係のハードウェア整備について紹介する。機器は図 4 のような構成になっている。まず、DCCT コアからのセンサーケーブルは DCCT 回路に入る。回路からの電圧出力は BNC ケーブルを介してデジタルマルチメーター (DMM) に入ることによって電圧値が読める。これに測定レンジに応じた係数をかけることでビーム電流としての値が得られる。なお、使用した DMM (Keysight 3458A) には LAN ポートがなかったため、LAN/GPIB を用いて LAN ケーブルを用いて制御ネットワークにつなげた。

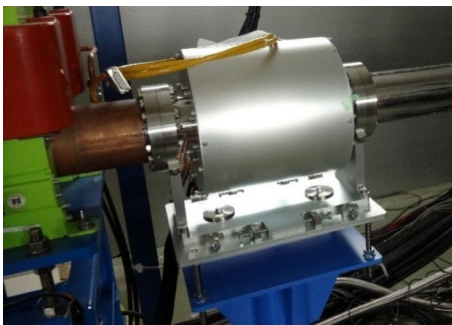


図 3 PF-AR にインストールされた新 DCCT

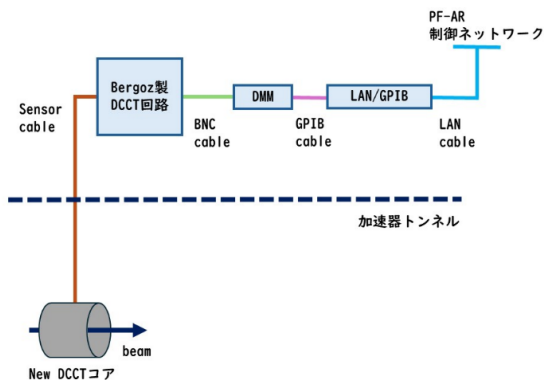


図 4 DCCT 機器構成

整備として以下の 3 つの作業を行った。

- DCCT 回路、DMM、LAN/GPIB を収める 19 インチラックの調達
- LAN ケーブルの配線
- 実験盤からラックまでの電源ケーブルの配線

まず、ラックの選定であるが筆者は経験がないた

め分厚いカタログの中からどのラックを選ぶべきかわからず頭を抱えてしまった。しかし、メーカーの分かりやすいホームページや担当者の手厚い対応により、図 5 のような適切なラックを選定することができた。個人的に重要と感じたのは以下の点である。ここさえ押さえておけばラックの選定で大きなミスは防げるのではないだろうか。

- どこに置くのか (ラックの寸法、オープンラック or キャビネット)
- どんなサイズの機器を収めるのか
- JIS 規格 or EIA 規格
- 電源タップの有無
- クレーンで吊るためのアイボルト

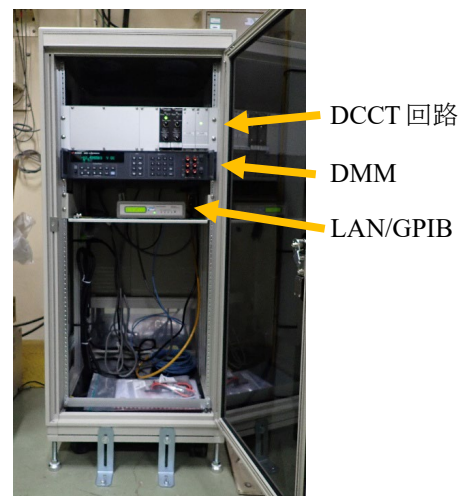


図 5 機器を収めた 19 インチラック

次に、LAN ケーブルの配線を行った。ラックから最寄りのネットワークハブに接続する必要があるが、既設の未使用ケーブルを一部用いることで、コスト削減を図った。そのため実際に配線を行ったのは、フリーアクセスの床下を 15 m 程度であった。LAN ケーブルの端末処理を行ったのは初めてだったのでいい経験になった。また、ネットワークケーブルテスターの使用方法も習得することができた。

最後に、ラック付近に電源を取れる場所がないことが発覚したため最寄りの実験盤から電源ケーブルを引いた。この作業は第二種電気工事士の資格を持つ業者の方に依頼した。(筆者も後日資格を取得した。)

5. ソフトウェアの整備

ビーム電流は運転に欠かせない重要なパラメータであることから、ソフトウェアの更新は関係者に周知しつつ図 6 に示すように段階的に実施した。

2024 年第三期運転の際に新しい DCCT を導入したが、その際運転に使用しているビーム電流のレコ

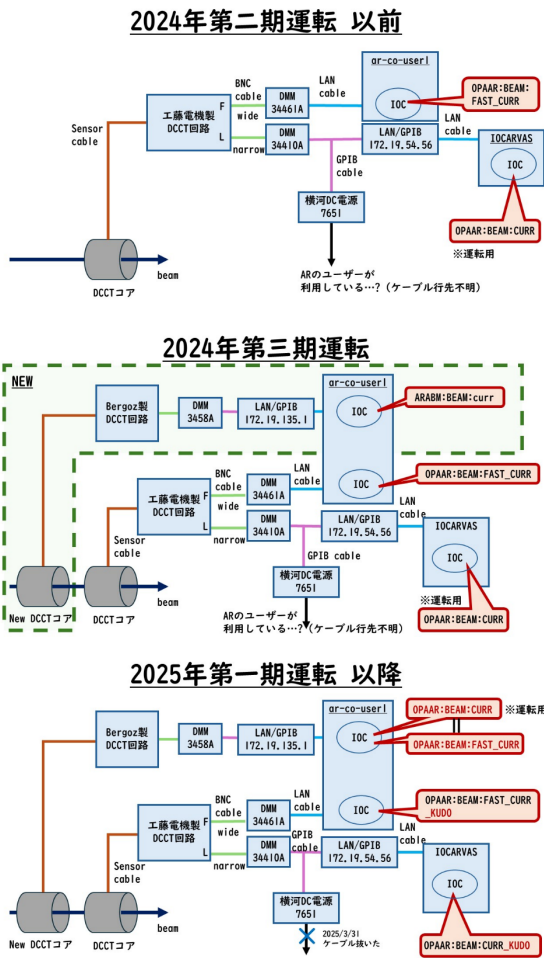


図 6 レコード変更の履歴

ードは旧メイン DCCT（工藤電機製）に接続したままであった。この運転期間に新 DCCT の制御系に不具合がないかを確認した後、2025 年第一期より運転に使用した。この際、運転に使用しているビーム電流のレコード名はそのまま、接続している DCCT が Bergoz 製の新 DCCT となるように整備し、これをメイン DCCT とした。レコードはどこで誰がモニターし、使用しているかはわからないため、突然接続不可となる等の混乱を避けるためである。一方、旧メイン DCCT はレコード名を変更することで、サブ DCCT として使用することにした。また、OPAAR:BEAM:CURR と OPAAR:BEAM:FAST_CURR は別レコードではあったものの両方とも 2 Hz でデータを取っており、オフセットが異なるだけだと発覚したため、新 DCCT では両方とも同じデータが入るようにした。

故障が発覚した後は DCCT 一台のみで運転していたが、今回の DCCT 更新や整備によって、Bergoz 製のメイン DCCT と工藤電機製のサブ DCCT の 2 台が利用可能となった。

6. まとめ

KEK の PF-AR において DCCT の更新に伴い、制御系の整備を行った。ラックや LAN ケーブルなどハードウェアの整備や EPICS を用いたソフトウェアの整備を行った。機器が変わっても運転に使用するレコードは変更しないことで、ユーザーがスムーズに利用できるよう工夫した。

謝辞

本作業を行うにあたり、様々な方にご協力を頂きました。特に、株式会社 アルテンジャパンの路川徹也氏には EPICS について多くのご助言を賜りました。また、高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 帯名崇氏には、制御系更新の方針についてご相談に乗って頂きました。この場をお借りして深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 高井 良太, 「PF-AR 用直流ビーム電流トランスの更新」, 第 2 回測定器開発テストビームライン研究会, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 2025 年 4 月 3 日.
- [2] 飛山 真理, 「電子加速器のビームモニター概要～電氣的モニター～」, OHO08 テキスト, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), <https://accwww2.kek.jp/oho/oho08/text.html> (参照日: 2025 年 2 月 20 日).
- [3] EPICS Controls, “EPICS — Experimental Physics and Industrial Control System”, <https://epics-controls.org/>, (参照日: 2025 年 2 月 20 日)

大量のパルスデータで地震発生装置を動かす

○岡田 宏太^{A)}

^{A)}名古屋大学 全学技術センター

1. なぜ、どのように地震を起こすか

精密に制御された地震波を起こすことで地面内部の情報を取得することができる。その際データ解析を容易にするために地中を伝わる地震波は再現性が高く精密な信号が求められる。地震発生装置はバランスの悪いおもり(偏心おもり)をモーターで回し、地面に衝撃を与えることで地震波を発生させている。高精度なモーター制御によって精密な地震波を実現するのである。

2. 地震発生装置

地震発生装置の概略を図1に示す。主要な構成要素はモーター、インバータ、偏心おもり、パルス発生装置、制御PCとなっている。インバータは位置制御モードで動いており、外部から与えられる位置決めパルス(RS422)に応じてモーターを動かしている。モーターの分解能は使用するエンコーダによるが、我々の装置では2048[step/rev]が一般的である。パルス発生装置は制御PCから送られてくる周波数に応じたパルス列を生成してインバータに送っている。例えばモーターを10Hzで動かす場合は、20.48kHzのパルスを送出することになる。

従来のパルス発生装置はマイコンとDDS(Direct Digital Synthesizer)で構成されており、マイコンがPCからの指令に応じてDDSの発振周波数を設定する方式となっていた。つまり設定単位は周波数であり、地震波としては正弦波しか発生させることができない。また周波数を掃引するには制御PCが必須となっており、長期間の信頼性に不安があった。装置の老朽化により改修が必要となったため、より自由度の高い運転が可能な新しいパルス発生装置を開発することになった。

3. パルス発生装置

開発したパルス発生装置の仕様を表1に示す。

項目	仕様
パルス列データ	テキスト形式
入出力ロジックレベル	RS422, TTL
クロック、トリガ	GNSS同期
時刻同期	NTP
制御PCとの通信	Ethernet

新しいパルス発生装置は生成するパルス列そのものをテキストファイルとして持たせることにした。テキストファイルの中身は1行ごとにパルス間隔のクロックカウンタ数を記した単純なものである。例えば100回転分のデータであれば100 x 2048行の数値が並ぶことになる。モーターの回転速度は最大50Hzで200秒間の連続運転を想定している。50Hzでの運転は1秒当たり102400パルスなので、200秒間だと20.48 x 10⁶パルスとなる。モーター動作の全てが記述されるテキストファイルは2千万行を超える膨大な量になるため、読み込むだけでも相当な時間を要することになり、後述するデータ形式の変更が必要になった。

パルス送付は正確な時刻に同期する必要があるため、トリガおよびクロックはGNSSモジュールからの正確な1PPSと10MPPSを利用する。1PPSは動作開始のトリガとして使用し、10MPPSは逡倍して50MHzとし、パルス生成の基準クロックとして使用する。

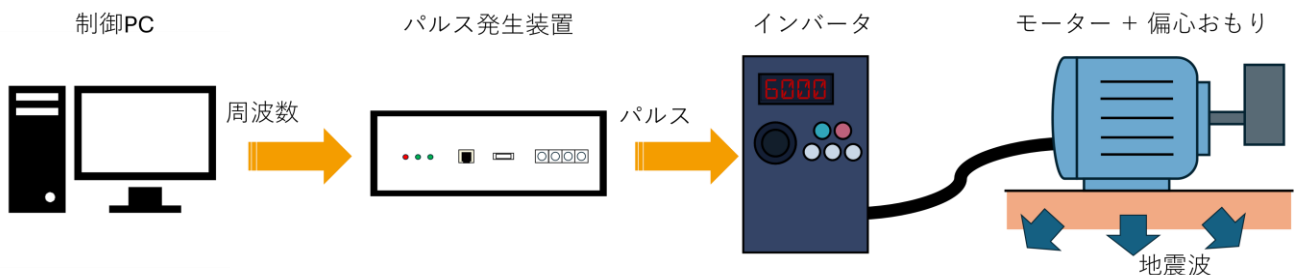


図1 地震発生装置の概略

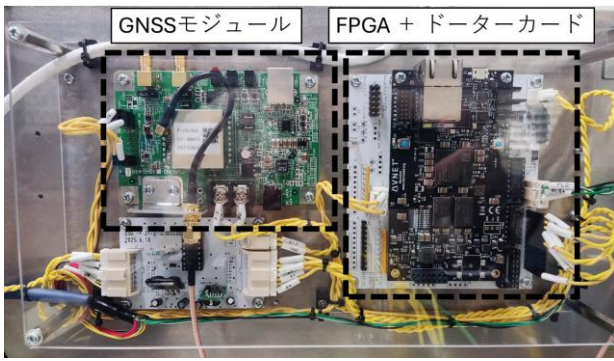


図2 パルス発生装置

図2に製作したパルス発生装置を示す。GNSSモジュールは古野電気 VF-81 を、制御デバイスとしてFPGA 評価ボード(MicroZed)を採用した。大量のパルスデータを柔軟に扱う必要があったので、FPGA にはLinux が動作可能なタイプを選定している。Linux を使うことで NTP サーバーとの時刻同期も簡単に実現できる。FPGA はロジックレベルが3.3V までしか対応できないため、別途製作したドーターカードに搭載することでRS422 や TTL 互換の信号の受け渡しを可能にしている。パルス列データ(テキストファイル)はSFTP などを使ってLinux のファイルシステムに保存する。設定変更などの指令はUDP を使って実現した。

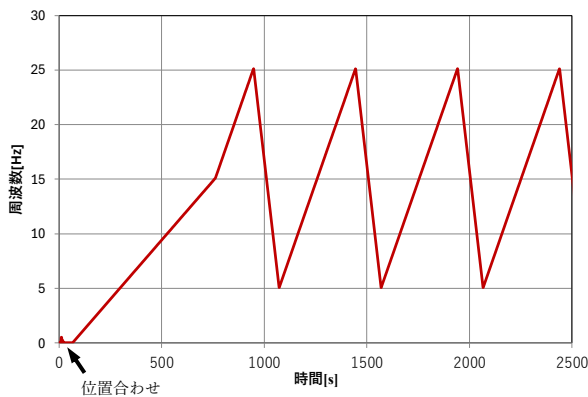


図3 動作例

図3に実際の動作例を示す。縦軸にモーターの回転周波数、横軸に動作開始後の経過時間をプロットした。動作開始直後にわずかに動いているのは偏心重りの位置合わせを行っているためである。複数台の地震発生装置を動かす場合は偏心重りの位相を同期させる必要があるため、最初に重心が下になるように位置合わせをしている。位置合わせが完了したら待機状態となり、動作開始予定時刻1秒前にトリガ入力待ち状態となる。トリガ入力後は徐々に回転速度を上げていき、その後 $15 \pm 10\text{Hz}$ の運転を継続的に行っていることがわかる。

4. パルス列データのファイル形式

テキスト形式パルス列データはLinux 上のファイルシステム(SD カード)に保存されている。このデータは専用のプログラムで解析され、パルス間隔を表す各行の文字列を32bit の符号なし整数型に変換してFPGA のPL 部との共有メモリに展開される。回転数が低速(10Hz 以下)の場合は1分以内に展開が完了するのだが、30Hz を超える高速回転の場合5分以上を要する場合もあり、ユーザーに長い待ち時間を強いることになっていた。

対策としてデータ形式をテキストからバイナリに変更した。含まれるデータはパルス間隔を表す32bit の符号なし整数型の羅列とすることで文字列を解析する必要がなくなり、読み込んだバイナリファイルを直接メモリにマッピングすることができる。この改造により100MB を超えるデータでも数秒で展開することが可能になった。

5. 次世代機の開発

新しいパルス発生装置はFPGA にMicroZed を採用したが、このボードは発売から10年以上たっており、今後の入手性に懸念がある。一方、地震発生装置については現在も新規製作が行われており、パルス発生装置が継続的に必要になることから、最新のFPGA を採用した次世代機の開発が進行中である。図4に開発中の次世代機を示す。FPGA には入手性の良いZUBoard を採用した。すでに基本的な動作検証を完了しており、今後製作される地震発生装置に搭載予定となっている。



図4 開発中の次世代機

5. まとめ

地震発生装置は精密な地震波の生成を目的としており、その方法としてインバータへの位置決めパルスを送出するパルス発生装置が必要である。今回開発したパルス発生装置は大量のパルス列データを直接送出することができ、自由度の高い運転が可能になった。

FE-SEM による複数焦点画像の合成手法の開発

○蟹屋敷 祐介^{a)} 今村 幸祐^{b)} 杉山 博則^{c)}

^{a)} 金沢大学総合技術部情報部門 ^{b)} 金沢大学理工研究域電子情報通信学系

^{c)} 金沢大学総合技術部機器分析部門

1. 概要

FE-SEM (電界放出形走査電子顕微鏡) は、電子ビームの照射による二次電子や反射電子により撮像を行う。その際、低加速では物体表面、高加速では内部の観察が可能となる。本検討では、電子加速度の異なる複数の画像から、物体表面と内部の両方を観察できる画像を合成する手法を開発した。開発した手法は、画像のエッジ検出と焦点合成の技術を用いている。実際に表面・内部両方を良好に観察できる合成画像が生成できることを主観的に確認し、実用のための GUI も作成した。

2. 開発環境

表 1 に開発環境の詳細を示す。画像を合成するソフトウェアは、プログラミング言語の Python を用いて実装した。画像の入出力のため、画像処理ライブラリの OpenCV[1]を使用している。また、GUI を実装するため Python に標準でインストールされている tkinter を使用した。

表 1 開発環境

OS	Windows11
開発環境	Anaconda3[2]
プログラミング言語	Python 3.8
ライブラリ	OpenCV 4.0.1, tkinter

3. 複数焦点画像の合成アルゴリズム

開発をおこなった FE-SEM による焦点が異なる複数の画像を合成する手法について、そのアルゴリズムを説明する。

入力画像には電子加速度の異なる複数の画像を扱うが、加速電圧を変えただけの同じ撮影対象であっても微小な位置のずれが発生する。また、異なる位置の画素との輝度値相対関係も大きく変化する。そのためアルゴリズムの主な流れは、それらを補正しつつ、画像の合成を行うことになる。

まず、エッジ画像に基づくテンプレートマッチングにより大まかな整数画素制度での位置ずれを算出し、それを用いてサブピクセル精度での位置補正をパラボラフィッティング[3]で行う。次に画像全体の輝度値の違いを補正するため、ポアソンエディティング[4]で二つの画像の輝度値の差を小さくし、全

焦点[5]の技術を応用した手法を用いて二つの画像の特徴を反映した画像合成を行う。

各処理の詳細を説明する。まず、エッジ画像に基づくテンプレートマッチングでは、それぞれの画像からソーベルフィルタによりエッジ画像を作成する。ソーベルフィルタは画像のエッジを強調する空間フィルタとなっており、フィルタ処理を行う際は周囲の画素からカーネル係数を用いて、フィルタ適用後の画素値を算出する。カーネル係数を図 1 に示す。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

横方向

-1	-2	-1
0	0	0
-1	2	1

縦方向

図 1 ソーベルフィルタのカーネル係数

図 1 のカーネル係数を用いて求めるフィルタ適用後の画素値の算出式を式(1)に示す。

$$T = \frac{1}{2} |g_x + g_y| \quad (1)$$

g_x , g_y はそれぞれ横方向、縦方向のカーネル係数から算出したフィルタ適用後の画素値である。また、ソーベルフィルタによるエッジ画像を図 2 に示す。

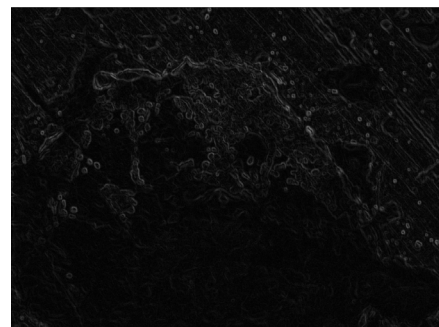


図 2 ソーベルフィルタによるエッジ画像

位置合わせの基準として画像中央の 512×512 画素を基準テンプレートとする。位置補正する対象画像は式(2)に示す。アフィン変換を適用した後、画像中央 512×512 画素に対してテンプレートマッチングで整数画素精度の位置ずれ量を推定する。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} \quad (2)$$

θ は回転補正する角度であり、 (dx, dy) は水平、垂直方向の位置補正值である。テンプレートの類似性を評価する評価関数は、式(3)に示す画素値の2乗誤差である。

$$\arg \min_{i,j} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} \{I'(x+i, y+j) - T'(x, y)\}^2 \quad (3)$$

ここで、 $I'(x, y)$ が対象画像の画素値、 $T'(x, y)$ が基準テンプレートの画素値、 N, M がテンプレートのサイズ、 i, j が位置ずれ量を表す。今回、補正範囲は $-5 \leq \theta \leq 5$ 、 $-40 \leq dx, dy \leq 40$ に設定した。

パラボラフィッティング[3]はテンプレートマッチングによる整数画素精度の評価関数値に2次の対象関数をフィッティングすることで、サブピクセル精度の最小値位置を推定する手法である。概要図を図3に、サブピクセル位置の算出式を式(4)に示す。

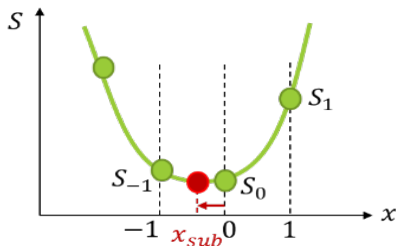


図3 パラボラフィッティング

$$x_{sub} = \frac{S_{-1} - S_1}{2 \cdot S_{-1} - 4 \cdot S_0 + 2 \cdot S_1} \quad (4)$$

図1および式(4)において、 S_i が整数画素評価値であり、 x_{sub} が推定値である。得られた推定値により、サブピクセル精度の総合的な位置ずれ量 x_{diff} は、式(5)で得られる。

$$x_{diff} = x_{min} + x_{sub} \quad (5)$$

x_{min} は先に推定された整数画素精度の位置ずれ量である。これを各座標軸方向に行うことで、2次元座標上のサブピクセル位置ずれ量の推定を行う。サブピクセル位置ずれ量が得られた後、位置の補正を適用する。

次のポアソンエディティング[4]は画像の一部を別の画像に合成する際に境界を滑らかにする手法で、画像間の輝度値の差が小さくなる。今回は合成前に対象画像の画素値を基準画像の画素に近く補正することで、自然な合成結果となるようにする。画素の補正は式(6)の画素更新式を繰り返し適用することで行われる。

$$f_p = \frac{(\sum_{q \in N_p} f_p + \sum_{q \in N_p} (g_p - g_q))}{|N_p|} \quad (6)$$

ここで f は求める画像、 g は貼り付ける画像、 p は注目画素を示し、 N_p は隣接画素の集合、 q は隣接画素である。

最後に全焦点による合成を行う。文献[5]の手法では評価関数により二つの画像のうちより鮮明な画素を選択して合成画像を作成する。評価関数を式(7)に示す。

$$r_p = \frac{f_p}{Ave_p} \quad (7)$$

f_p 注目画素の輝度値、 Ave_p 注目画素周囲の平均輝度値である。

これをそのまま適用したところ、今回扱う二つの画像では、特徴が違いすぎていることから、うまく合成画像が作成できなかったため、ソーベルフィルタによるエッジ強度の比率に基づくアルファブレンディングによる重み付き和で合成後の画素値を算出した。合成する画素の算出式を式(8)に示す。

$$f'_{(x)} = \alpha \cdot f_1(x) + (1 - \alpha) \cdot f_2(x) \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{|S_1(x)|}{|S_1(x)| + |S_2(x)|}$$

f_1, f_2 はそれぞれの画像、 x は注目位置、 S はソーベルフィルタによるエッジ強度である。

5. 評価

評価として、電圧加速度の違う二つの画像と合成画像との主観による比較を行った。電圧加速度の違う画像と合成画像の比較を図4に示す。図4より、低加速度の画像では、溶媒由来の汚れを観測しており、汚れの表面形状を観察できる。高加速度の画像では、汚れの内部に存在している金粒子を観測できている。また、合成画像では汚れの表面形状を観測しつつ、金粒子も観察できる画像となっている。

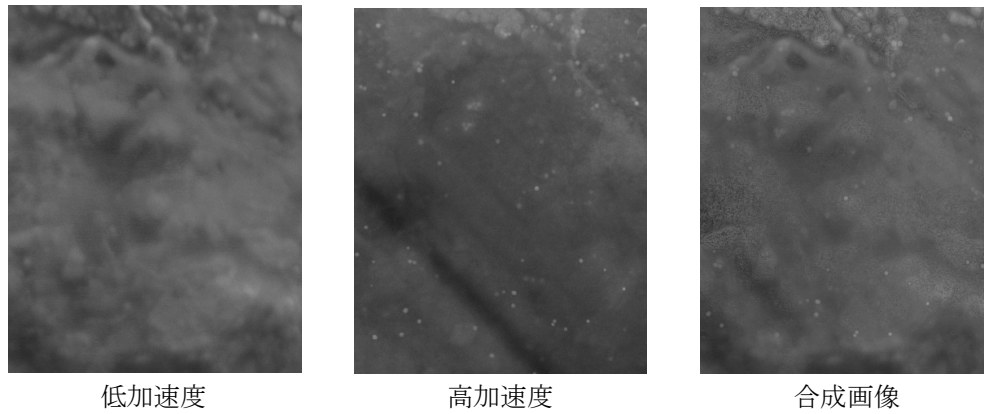


図 4 電圧加速度の異なる FE-SEM 画像

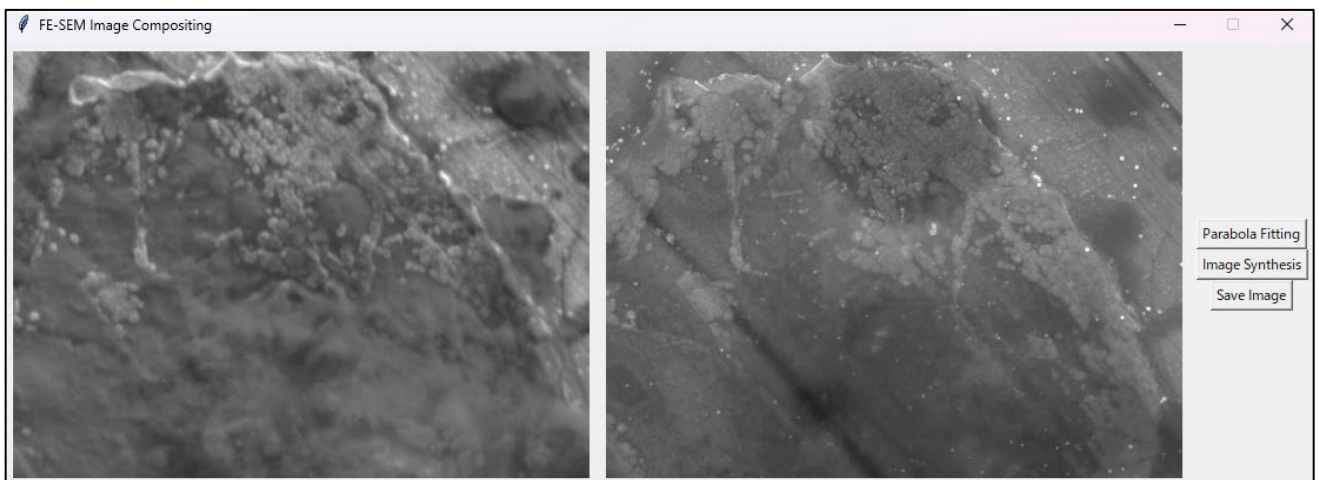


図 5 GUI ソフトウェア外観

4. GUI の実装

合成画像を作成するソフトウェアの外観を図5に示す。パラボラフィッティングによる位置補正に掛かる時間が大きいため、パラボラフィッティングとポアソンエディッティングを含めた画像合成を別の処理として実装した。

6. まとめ

FE-SEM による複数焦点画像の合成手法の開発を行った。主観的な評価により、電圧加速度の違うそれぞれの画像の特徴を観察できる合成画像を作成することができた。また、ソフトウェアとして GUI で実装し、問題なく動作することを確認した。

参考文献

- [1] OpenCV, <https://opencv.org/>
- [2] Anaconda3, <https://www.anaconda.com/>
- [3] デジタル画像処理委員会, “デジタル画像処理 改訂第二版”, 画像情報教育振興協会, 2020.
- [4] P. P_rez, M. Gangnet and A. Blake: "Poisson image editing", Proc.SIGGRAPH, 22 (3), pp.313-318 (2003)
- [5] 川本章太, 佐藤和弘: "複数の同一被写体画像を用いた全焦点画像の生成",画像電子学会誌 35 (5), 576-581, 2006

4 列可変偏光アンジュレータ用補正データプログラムの更新

○江口 柊^{A)}、阿達正浩^{A)}、齊藤寛峻^{A)}、塩屋達郎^{A)}、土屋公央^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

1. はじめに

KEK には PF リングと呼ばれるビームエネルギー 2.5 GeV の光源用電子シンクロトロンが稼働している。PF リングの直線部には 12 台のアンジュレータが設置されており、すべてのアンジュレータについて磁石列が移動した際の軌道変動を抑えることは放射光ユーザー実験を行うために欠かせない。その軌道変動を抑えるためにアンジュレータ前後に設置している補正電磁石を用いてフィードフォワードで補正している。これまでフィードフォワードで補正するために各磁石列位置と補正電流値をまとめた補正電流テーブルを作成するためのプログラム（以下、プログラム）は MATLAB を使用していたが、Python スクリプトを使用したプログラムへの更新を行っている。そして実際に Python スクリプトを使用して更新したプログラムによる 1 軸アンジュレータの COD 補正の結果について報告した^[1]。本稿では 1 軸アンジュレータ用プログラムを応用した 4 列可変偏光アンジュレータ用のプログラムの更新と更新したプログラムを使用して作成した補正電流テーブルによる COD 補正の結果について報告する。

2. 4 列可変偏光アンジュレータ

図 1 のように入射した電子ビームが周期的な磁場によって蛇行することで放射光を取り出すための装置を挿入光源と呼び、その中で光の干渉効果を利用して高い輝度の光を発生させる装置をアンジュレータと呼ぶ^[3]。以下電子ビームの進行方向を Z 軸とし、X 方向の磁場を水平磁場、Y 方向を垂直磁場と定義してする。

PF リングでは、光子エネルギーの変更を磁石列上下方向移動（以下、Gap 動作）のみで行う 1 軸アンジュレータの他に、偏光モードの変更を行うために複数の磁石列が独立して動作可能な APPLE-II 型の可変偏光アンジュレータ(EPU)^[4]も運用している。1 軸アンジュレータで実現できる偏光は直線偏光のみであることに對し、例えば磁石列を $\pm 1/4$ 周期分電 Z 軸方向に対して水平にスライドさせること（以下、位相動作）で図 2 に示すような円偏光を実現することができる。

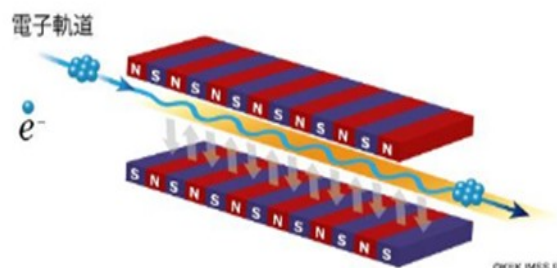


図 1 アンジュレータの概略図^[2]

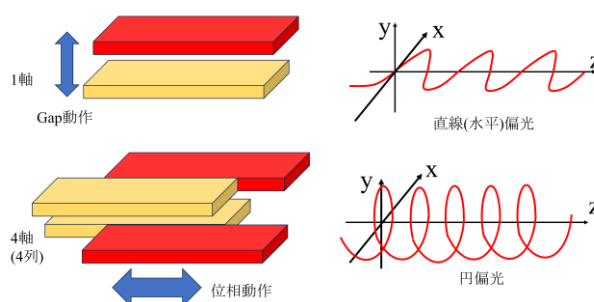


図 2 各アンジュレータの動きと実現可能な偏光例

PF リングの APPLE-II 型 EPU の特徴は、4 列の磁石列を全て独立に動く構造である。Gap を固定したまま上下または左右の磁石列を位相動作させて光子エネルギーを調整する adjustable phase undulators (APU)^[5]として利用できる特徴を持っている。通常の EPU 方式より制御方式は簡素化されており、プログラム実行時間の短縮にもつながっている。APU 方式では EPU 方式として使う際の磁石列の位相差 EPU phase(以下、 $\phi(\text{mm})$)に追加して、上下の磁石列ペアの間に位相 $\rho(\text{mm})$, $\sigma(\text{mm})$ を与えて制御しており、それぞれ APU- ρ モード、APU- σ モードと呼んでいる。図 3 に Symmetric mode における APU- ρ モード、APU- σ モードの磁石列の動きを示す。斜めに対向する磁石列を対として位相 $\pm\phi/2(\text{mm})$ 動かし、追加的に $\rho/2(\text{mm})$, $\sigma/2(\text{mm})$ を動かしていく。APU- ρ モードでは、上部磁石列を電子ビーム進行方向に $\rho/2(\text{mm})$ 動かしており、下部磁石列を逆方向に動かしている。APU- σ モードでは、それぞれ左右磁石列をペアにして電子ビーム進行方向に $\pm\sigma/2(\text{mm})$ 動かしている。

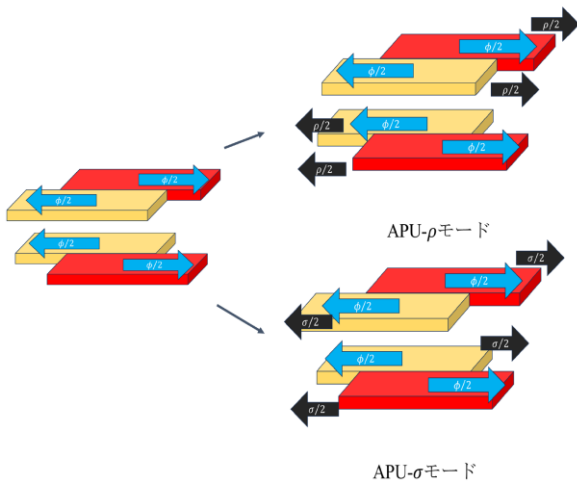


図 3 APU- ρ モード、APU- σ モードの磁石列の動き

3. 補正電流テーブル作成の流れ

現在補正データプログラムは「補正電流値算出プログラム」と「補正電流テーブル作成プログラム」の2つのプログラムによって構成されている。図4に測定対象モードにおけるプログラムの流れを示す。測定する偏光モードの光子エネルギー可変範囲へと磁石列を移動し、生じた軌道変動を補正するために必要な各補正電流値を、応答行列を用いて算出する。算出した補正電流値を設定した後に軌道を再測定し、測定終了条件（トレランス： $5(\mu\text{m})$ 、もしくは標準偏差： $2(\mu\text{m})$ ）を満たすか判定する。測定終了条件を満たさない場合には、応答行列を用いた補正電流値の算出へと戻る。この内容を、測定終了条件を満たすまで複数回繰り返す。これをイタレーションと呼んでいる。そして設定したイタレーションの上限回数内に終了条件を満たせば次の光子エネルギーへ移動し、満たせなければプログラムは停止し、基準軌道の再測定を実施する。

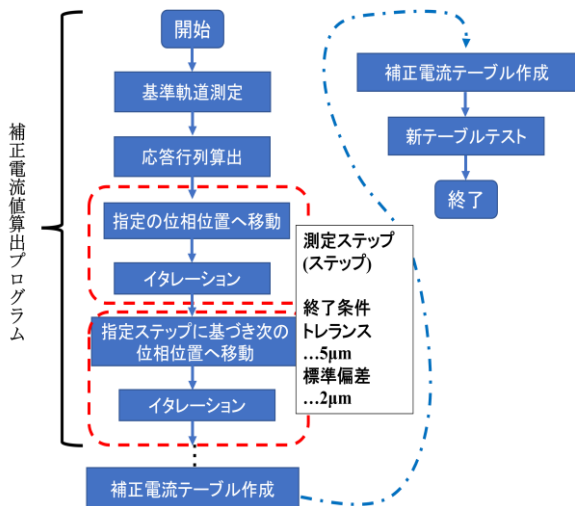


図 4 測定対象モードにおけるプログラムの流れ

測定ステップで指定したステップ幅で区分した、光子エネルギー可変範囲内のすべての測定点に対して測定終了条件を満たす補正電流値が得られれば、「補正電流テーブル作成プログラム」を使用して補正電流値と位相位置を対応させた補正電流テーブルを作成する。測定点の間の区間については前後の測定データを用いて線形補完して電流値を与える。補正電流テーブルは水平上流、水平下流、垂直上流、垂直下流それぞれ作成する。

その後の補正用電磁石電源に対して作成した補正電流テーブルを用いて軌道補正の確認を行う。確認には、PF リング立ち上げ時に実施しているアンジュレータ軌道チェック用プログラムを使用する。その後われていることが確認できれば、作成した補正電流テーブルを更新してユーザー運転に用いる。プログラムの構成は1軸アンジュレータ用のプログラムと変わらないが、1つのアンジュレータに対して1つの補正データプログラムのみ存在していた1軸アンジュレータに対して、APUでは、複数ある偏光モードおよびそれらのモード遷移動作に対してそれぞれプログラムを作成している。

ID19の運転モードと各モードのデータ取得の順序について、表1と図5に示す。表1から運転モードは直線偏光(LHR,LVS)モード、円偏光(C \pm S)モード、楕円偏光(E \pm S)モードの6モードであるが、各モード間を移動するために必要な遷移(TRS)モードが存在し、合計7モードが測定対象となる。各偏光モードの測定をするためには、TRSモードを測定しTRSモード用の補正電流テーブルを作成した後、補正電流テーブルのデータを使用して各偏光モードの基準軌道測定位置における補正電流値を求める必要がある。そのためTRSモードは最初に測定を実施しなければならない。これはPFリングで運用されている他のAPUについても同様である。

表 1 ID19の運転モード一覧

水平直線偏光 LHR	APU- ρ モード
垂直直線偏光 LVS	APU- σ モード
左右円偏光 (Bx/By=1) C \pm S	APU- σ モード
左右楕円偏光 (Bx/By=1/2) E \pm S	APU- σ モード

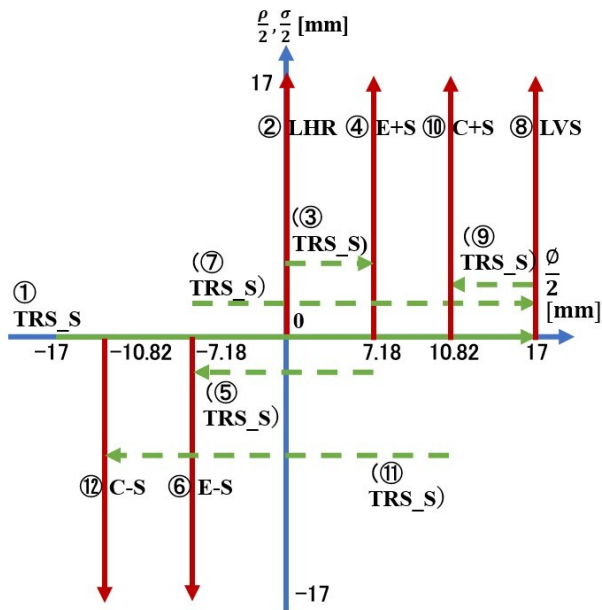


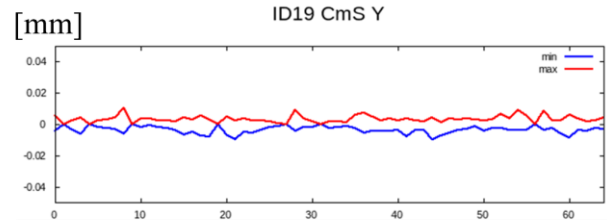
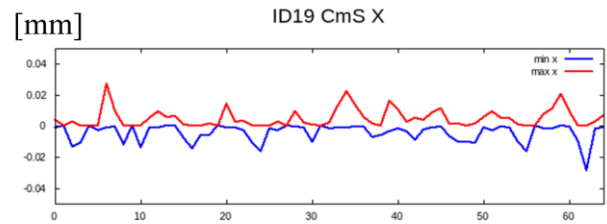
図 5 遷移・偏光モードのデータ取得の順序

4. 補正電流テーブル更新後の COD 補正の結果

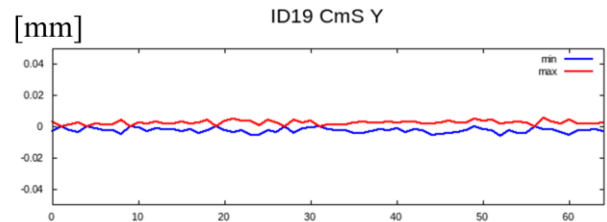
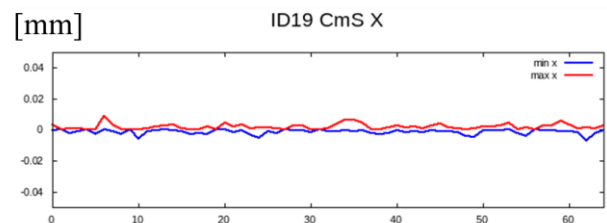
開発したプログラムを使用して作成した補正電流テーブルに対して、アンジュレータ軌道チェック用プログラムを使用して COD を確認した結果を図 6 に示す。いずれのグラフも縦軸は各 BPM における基準軌道との差分で横軸が BPM 番号である。「min」と表記しているものが各 BPM における X/Y 軸マイナス方向の差分の最大値で、「max」と表記しているものが各 BPM における X/Y 軸プラス方向の差分の最大値である。図 6(a)はC-Sモードにおける補正電流テーブル更新前の状態で図 6(b)が補正電流テーブル更新後の状態である。おおよそ X が $\pm 20(\mu\text{m})$, Y : $\pm 10(\mu\text{m})$ 以内であれば運転に用いることができる。補正電流テーブルを更新したことで特に水平方向が大きく改善していることがわかる。他の偏光モードについても同様の結果が得られた。

3章で述べたように、APUの各偏光モードの測定を実施するためには、TRSモード用の補正電流テーブルを作成する必要がある。そして補正電流テーブルを作成するためには、TRSモード用の「補正電流値算出プログラム」が完遂しなければならないが、測定終了条件を満たさず、プログラムが終了してしまうことが多かった。そこでイタレーション回数を増やしたりしたもの、プログラムの実行時間が延びるだけで、測定終了条件を満たさなかった。そこでイタレーション回数を少なくして、測定終了条件を満たさなかった場合は測定終了条件を満たした位置まで戻って基準軌道を再度取得する「基準軌道の

複数回取得」を実施するようなプログラムを、6列 EPU 用プログラムを用いて開発中である。位置を戻ることによって作業時間がかかる可能性は高いが、基準軌道を再度取得することで測定終了条件を満たしやすくなる可能性がある。結果的に作業時間の時間短縮につながると考えられる。さらに、各モードおよびモード遷移の接続点における電流値の反映など、省力化および時間短縮を目指したプログラムの改良を行う予定である。



(a)補正電流テーブル更新前



(b)補正電流テーブル更新後

図 6 C-Sモードにおける COD 補正結果

参考文献

- [1] 江口 柊、他、アンジュレータ用補正データプログラムの更新、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集、p.277-280、(2024).
- [2] <https://www2.kek.jp/imss/pf/about/sr/pf1.html>.
- [3] T. Tanaka、"3.アンジュレータ"、OHO' 13 高エネルギー加速器セミナー、p.1-13、(2013).
- [4] S. Sasaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A331, 763-767 (1993).
- [5] R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A306, p. 391,(1991)

J-PARC MR コリメータ制御システムの改良

○門脇 琴美^{A)}、白形 政司^{A)}、山田 秀衛^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

茨城県東海村に位置する大強度陽子加速器施設 J-PARC には、LINAC、RCS、および Main Ring (MR) の3つの加速器が設置されている。MR ビームの大強度化に伴いビームロスが増加しており、その低減は重要な課題の一つである^[1,2]。MR では、コリメータ設置エリアにビームロスを局在化させることにより、その他のエリアにおけるビームロスを低いレベルに抑制している。

MR コリメータの設置位置を図1に示す。MR コリメータは、ビーム外周部に存在するビームハローを削ることで、ビームロスの局在化を実現している。MR コリメータは、MR のビーム強度増加に対応して、構造変更や設置台数の変更などの増強が段階的に行われてきた^[3]。本報告では、これらのコリメータ増強に伴って実施した制御系の整備について報告する。

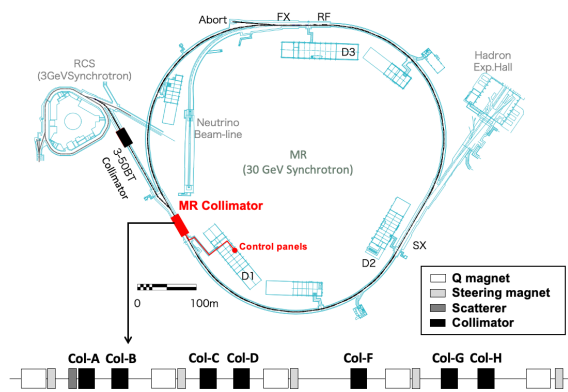


図1 MR コリメータの位置

2. MR コリメータの機器構成

J-PARC 建設当初、MR コリメータは散乱体と吸収体から構成される複合型であった。しかし、MR ビームの大強度化に伴い、直接ビームロスを削り取るシングルパス型へと変更された。さらに設置台数の変更が行われ、2026年現在では、2軸型および4軸型からなる計7台構成が最終形として運用されている。

MR コリメータには、1台で水平方向および鉛直方向のビームハローを削ることを目的として、L字型のjawが設置されている。jawはコリメータダク

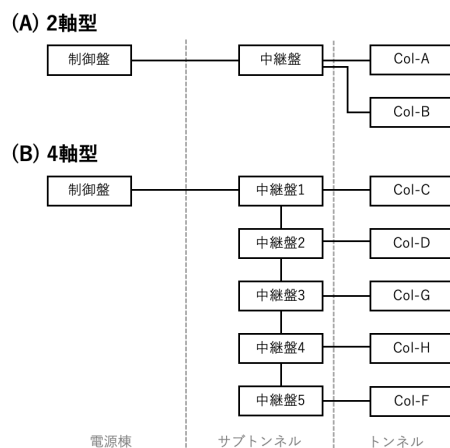


図2 制御機器の構成

トに溶接されており、動作時にはダクトごと移動する構造である。当初は水平方向および鉛直方向に移動する2軸型のみであったが、その後、2方向の回転自由度を追加した4軸型が導入された。

MR コリメータの制御機器構成を図2に示す。制御盤は地上の電源棟内に設置されており、サブトンネル内に設置された中継盤を介して各コリメータを制御する。2軸型コリメータでは、制御盤から1台の中継盤に接続され、当該中継盤を介して2台のコリメータを制御している。一方、4軸型コリメータでは、中継盤1台が1台のコリメータを制御する構成となっており、コリメータと同数の5台の中継盤が直列に接続されている。これらの中継盤は、コリメータの導入順に配置されており、実際の物理的配置順序とは一致していない。

MR コリメータの制御には EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)^[4]を使用している。制御は電源棟内の制御盤からも可能であるが、通常は制御室からネットワーク経由で操作を行っている。

3. 制御システムの再整備

前章で述べたコリメータ本体の増強に伴い、EPICS データベースや GUI を含む制御環境の整備が進められてきた。しかし、これらの整備はコリメータ台数の増加に対応するための必要最小限の対応にとどまり、操作性の向上や機能追加は十分に行われ

ていなかった。今回、コリメータ増強が完了し機器構成が確定したことを受け、制御システム全体の再整備を行った。

3.1 EPICS データベースの再整備

MR コリメータの EPICS データベースでは、各コリメータの動作指令や状態監視に用いられる信号名が定義されている。MR コリメータの EPICS データベースはコリメータ増強に伴い逐次拡張されてきたため、信号点名には中継盤の ID 番号などコリメータの名称と一致しない番号が用いられていた。このような複雑な命名は誤操作の要因となり得ることから、すべての信号点名をコリメータ名称に基づく表記へ統一した。さらに、移動方向などの情報読み出しに用いられる信号点名についても、開発の歴史的経緯を反映して「上下左右」や「±X、±Y」などの表記揺れが存在していた。これらの呼称についても整理・統一し、信号点名に反映させた。

また、コリメータの操作方法についても改良を加えた。コリメータを動作させるには、動作軸、動作モード、移動距離、およびコリメータ ID の 4 つの情報が必要である。これらの情報は全コリメータで共通のレコードを用いて指定されているため、いずれか一つでも指定を誤ると、意図しない動作が実行される可能性があった。実際に、動作軸や動作モードの指定に起因する誤操作が発生する事例があった。

この状況を改善するため、EPICS シーケンサ⁵⁾を用いた新たな操作方式を開発した。今回作成した EPICS シーケンサの構成概要を図 3 に示す。本方式では 2 軸コリメータと 4 軸コリメータを合わせて 1 つのシステムとし、EPICS シーケンサでステートマシンを記述して動作させている。コリメータ動作は動作軸、動作モード、およびコリメータ ID の組み合

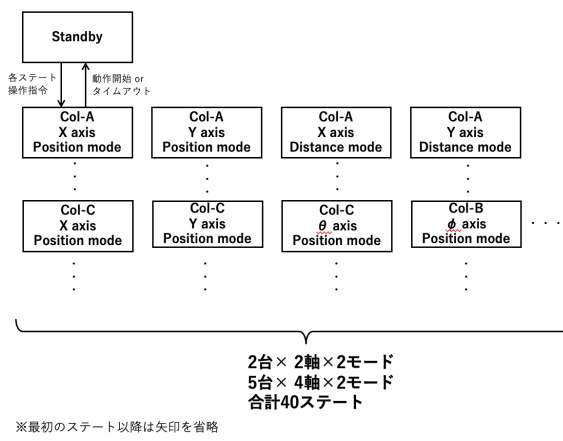


図 3 作成した EPICS シーケンサの概要

わせごとに個別のステートとして定義した。例えば 2 軸コリメータの場合、動作軸 2 通り、動作モード 2 通りの組み合わせにより合計 4 個のステートが設定される。操作時には各ステートに対応した専用の操作レコードを用い、共通レコードを直接操作しない設計とした。

3.2 GUI の再整備

2022 年時点での 2 軸型コリメータ操作画面 (以降は MEDM 版と呼ぶ) を図 4 に示す。GUI 環境は MEDM⁶⁾が使用されている。操作時は①現在の設定値を確認②動作軸を指定③動作モードを指定④移動量を設定⑤目的のコリメータの動作ボタンを押すという 5 つのステップが必要であった。ステップ数が多いため設定ミスやボタンの誤操作が生じやすく、操作動線にも改善の余地があった。さらに、故障時のみ必要となる詳細情報が常時表示されており、通常操作時の画面構成が複雑化していた。

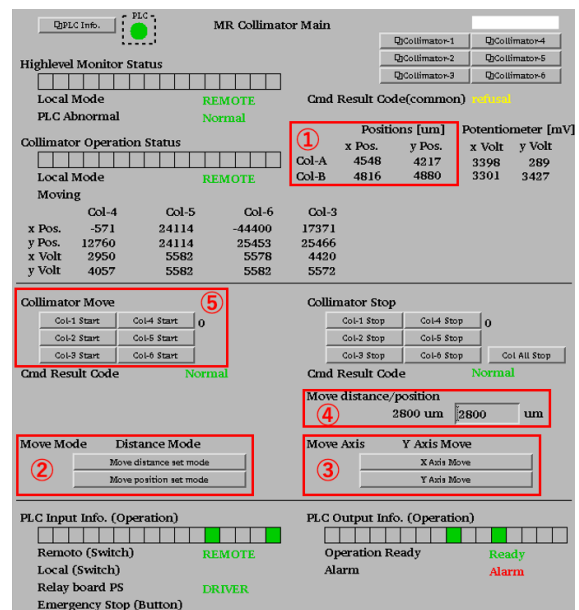


図 4 MEDM 版の操作画面

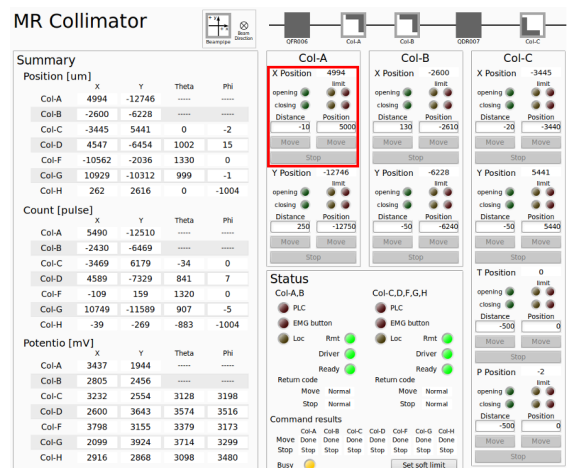


図 5 CSS 版の操作画面の一部

この問題を解決するため、前述の EPICS レコードの再整備と合わせて GUI を一新し、新しい操作画面を開発することとした。新しい GUI 環境としては、MR 機器で多く使用されている CSS (Control System Studio)^[7]を選択した。改良後の画面（以下 CSS 版と呼ぶ）を図 5 に示す。コリメータ、動作軸およびモードごとにパネルを分けることにより②③⑤の選択動作が不要となり、ステップ数を削減することができた。それぞれの動作軸での操作は赤線で囲んだ範囲で完結する設計とし、操作時の移動量を最小化するレイアウトとした。

また、操作画面に表示する情報を精査して情報量を削減し、空いた表示領域にコリメータの模式図を追加した。これにより、操作前にコリメータの向きを視覚的に確認でき、入力する設定値が意図した方向の動作に対応しているかを事前に確認可能となった。これらの変更により、操作性が向上し、誤操作の低減が図られた。

今回作成した CSS 版画面は、2025 年 11 月より運用を開始した。運用開始から約 3 か月が経過しているが、誤操作はほぼ確認されておらず、設定に要する時間の短縮も認められている。

4. おわりに

2024 年 9 月に MR コリメータは 7 台体制となり、ハードウェア構成としては完成形に至った。今回報告した制御系の整備は 2022 年から 2025 年にかけて実施され、当初の目標であった視認性および操作性の向上、ならびに誤操作の低減が達成された。

一方で、メンテナンス用画面の整備や、移動量の保存・読み込み機能の追加など、検討すべき課題も残されている。今後はさらなる操作性の向上を目指し、制御系の開発および機能拡張を継続する予定である。

参考文献

- [1] S. Igarashi et al., Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC main ring, Prog. Theor. Exp. Phys. Vol. 2021, 033G01, (2021). doi:10.1093/ptep/ptab011
- [2] Y. Kurimoto and Y. Sato, Upgrade plan of J-PARC Main Ring, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 18, No.1, pp. 10-20, (2021).
- [3] M. Shirakata et al., Beam collimator system which consists of seven units in J-PARC Main Ring, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, pp. 756-760, (2022). https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/THP0/THP017.pdf
- [4] EPICS - Experimental Physics and Industrial Control System, <http://epics.anl.gov/>

- [5] EPICS Sequencer, <https://epics-modules.github.io/sequencer/>
- [6] MEDM - Motif Editor and Display Manager, <http://www.aps.anl.gov/epics/extensions/medm/index.php>
- [7] CSS - Control System Studio, <http://controlsystemstudio.org/>

AI を利用したビームタイム配分システムの開発

○成田 千春^{A)}、 仁谷 浩明^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

1. 背景

高エネルギー加速器研究機構 放射光実験施設 (KEK-PF) では年に 3 回、500 以上の課題からビームタイムの申請があり¹⁾、各ビームライン担当者が配分作業を実施している。配分ルールはビームラインごとに異なり、現在は主に Excel を用いて手作業で配分が行われている。

申請数の増加および制約条件の複雑化に伴い、配分業務の効率化が重要な課題となっている。そこで本研究では、生成 AI を用いたビームタイム自動配分の可能性を検討するとともに、配分結果の妥当性を評価する専用アプリケーションの開発を行った。

本システムが実用化されれば、従来約 2 週間を要していた配分作業の短縮が期待される。また、配分処理の標準化により、公平性向上や申請締め切り設定の柔軟化など、利用者側にも利点があると考えられる。

2. 現状と課題

現行の配分作業には、長い場合で約 2 週間を要する。この期間中、配分担当者は配分業務に拘束され、他業務への影響が生じることなどが問題視されている。また、ユーザー要望の整理、配分案作成、確認作業までを手作業で行うため作業負荷が高く、人的ミスリスクも内在している。特に配分と確認は作業量が多く時間がかかるため、負担の大きい工程である。

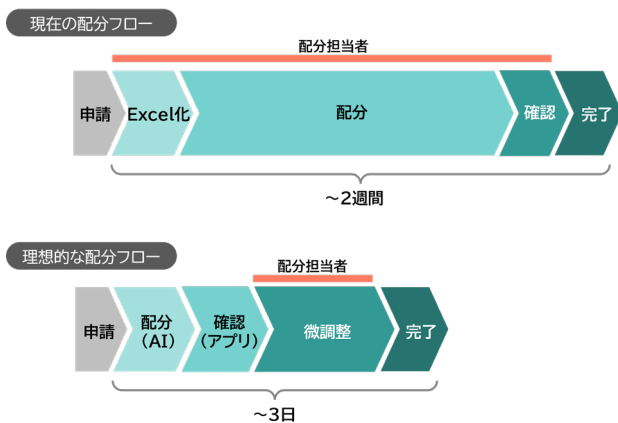


図 1. 配分フローの現状と目標

理想的には、大まかな配分案の作成と確認作業を自動化し、配分担当者が手作業で行う業務は最終確認や微修正のみに留めることが望ましい。配分作業にかかる時間も数日程度に収まれば、他業務への影響も最小限になることが期待できる。

このような課題を踏まえ、本研究では負荷の大きい工程を分離し、以下 2 つのアプローチを実施した。

- 配分結果の検証を自動化する「配分チェッカーアプリ」の開発
- 生成 AI を用いた配分案自動作成の検討

3. 試行

3-1 配分チェッカーアプリの開発

従来の方法では、配分結果がユーザー要望を満たしているかの確認作業には多くの時間を要すうえ、人的ミスリスクが高い。そこで、作業時間短縮と配分ミスの正確な検出を目標に、配分結果の妥当性を自動評価する「配分チェッカーアプリ」を開発した。

複数の配分担当者が各自の環境で利用できるように、本システムはインストール不要の Web アプリケーションとして構築した。

請求ID	ビームライン	開始時刻	終了時刻	実行時間	状況	請求ID	ビームライン	開始時刻	終了時刻	実行時間	状況	
14	線形1	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12	線形1	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12
9	線形2	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形2	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
8	線形3	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形3	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
14	線形4	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12	線形4	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12
9	線形5	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24	線形5	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24
8	線形6	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24	線形6	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24
14	線形7	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12	線形7	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12
9	線形8	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24	線形8	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24
8	線形9	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24	線形9	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24
14	線形10	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12	線形10	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12
9	線形11	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24	線形11	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24
8	線形12	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24	線形12	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24
14	線形13	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12	線形13	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12
9	線形14	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形14	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
8	線形15	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形15	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
14	線形16	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12	線形16	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12
9	線形17	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24	線形17	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24
8	線形18	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24	線形18	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24
14	線形19	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12	線形19	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12
9	線形20	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形20	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
8	線形21	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形21	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
14	線形22	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12	線形22	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12
9	線形23	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24	線形23	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24
8	線形24	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24	線形24	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24
14	線形25	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12	線形25	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	12
9	線形26	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形26	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
8	線形27	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24	線形27	2024-01-28	09:00	2024-01-28	21:00	24
14	線形28	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12	線形28	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	12
9	線形29	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24	線形29	2024-01-27	09:00	2024-01-27	21:00	24
8	線形30	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24	線形30	2024-01-26	09:00	2024-01-26	21:00	24

図 2. チェッカーアプリの概要

本アプリによるチェックでは、まず配分結果およびユーザー要望を記載した Excel ファイルをそれぞれアップロードする。アップロード後に比較処理を実行すると、両データを自動的に照合し、設定した評価項目に基づいて不一致箇所を検出する仕組みとしている。これにより、従来は目視で確認していた配分ミスを迅速かつ網羅的に抽出することが可能となった。また、本アプリは KEK 所内ネットワークか

らのみアクセス可能な環境に構築しており、外部アクセスを遮断することでセキュリティ面を担保している。

課題番号	責任者	希望BL	希望日	不可日	希望実験時間	エラー
課題131	氏名74	BL-15A1_XA FS	All OK	2026/02/17-2026/02/17	36	・配分不可
課題3	氏名2	BL-9A, 9C, 12C	2026/02/15-2026/03/10	2026/01/31-2026/02/01, 2026/02/10-2026/02/10, 2026/02/12-2026/02/13, 2026/02/24-2026/02/25	48	・配分日時が希望外
課題7	氏名5	BL-9A	2026/02/01-2026/03/31	2026/01/26-2026/02/01, 2026/02/12-2026/02/13, 2026/02/07-2026/02/07, 2026/03/04-2026/03/10	24	・配分日時が希望外 ・配分日時が不可日
課題22	氏名15	BL-9A	2026/01/26-2026/02/06, 2026/02/24-2026/03/06	2026/02/07-2026/02/23	24	・配分日時が希望外
課題33	氏名17	BL-9A, 9C, 12C	All OK	2026/01/26-2026/01/26, 2026/02/24-2026/02/28, 2026/03/11-2026/03/14, 2026/03/16-2026/03/20	24	
課題34	氏名17	NW10A	All OK		24	

図 3. エラーや警告の表示

チェッカーアプリによる妥当性の評価は、以下の3項目における不一致を検出することで行う。

- ① 希望ビームラインに配分されていること
- ② ユーザーの不可日に配分されていないこと
- ③ 希望実験時間を満たしていること

いずれかに不一致が検出された場合は赤色で「エラー」を表示する。また、希望より多く配分されている場合など重大ではない不一致は、黄色で「警告」として表示する。希望条件を満たせず配分不可となった課題は灰色で「配分不可」と表示し、全体の配分率を自動算出する。

課題番号	責任者	開始日	開始時刻	終了日	終了時刻	実験時間	編集
課題47	氏名27	2026-01-26	09:00	2026-01-26	21:00	12	編集
課題93	氏名52	2026-01-26	09:00	2026-01-26	21:00	12	編集
課題29	氏名17	2026-01-26	09:00	2026-01-27	09:00	24	編集
課題55	氏名32	2026-01-26	09:00	2026-01-27	09:00	24	編集
課題66	氏名39	2026-01-26	09:00	2026-01-27	09:00	24	編集
課題73	氏名42	2026-01-27	09:00	2026-01-27	21:00	12	編集
課題75	氏名43	2026-01-27	09:00	2026-01-28	09:00	24	編集

図 4. 編集機能とファイル保存機能の搭載

さらに、エラー箇所をアプリ上で直接修正できる機能や、修正後データを Excel・PDF で出力できる機能を実装した。なお本アプリは、AI による自動配分と併用することを想定して設計したものであるが、従来どおり配分担当者が手作業で作成した配分案に対しても適用可能である。

本アプリの導入により、配分ミスを高精度で検出

することが可能となった。従来数日を要していた確認作業は数分で完了し、確認工程の大幅な効率化が実現した。

一方、正確な比較には所定フォーマットへ整形された Excel ファイルが必要であり、入力データ整形が新たな負担となっている。現在はビームラインごとに申請形式が異なるため、統一フォーマットへの変換に時間を要する。今後は多くのビームラインにおける申請フォーマットの標準化を検討し、さらなる効率化を目指す。

本アプリは PF 2025 年度第III期運転の配分作業で実際に導入され、複数の人的ミスの発見に寄与した。

3-2 AI による自動配分の検討

配分作業の自動化を目的として、生成 AI の導入可能性を検討した。ビームタイム申請には実験者氏名や連絡先、課題番号などの個人情報が含まれるため、クラウド型 AI の利用は適切ではない。そこで所内専用サーバー上にローカル環境を構築し、LLM を用いた自動配分を試みた。

配分手順としては、まず申請データを CSV 形式に変換し、配分条件を記載したプロンプトとともに AI へ入力する。出力された配分結果を評価し、必要に応じて修正指示を与えることで精度向上を図る。この工程を繰り返し、最終的に担当者が確認・微修正を行い完成形とする運用を想定している。

検証では、フリーソフト LM Studio 上において openai/gpt-oss-120b モデル^[2]を使用し、PF BL-19 における 2025 年度第III期運転の実際のユーザー申請 24 件を対象に配分を実行した。AI の処理時間は 1 回あたり平均約 4 分であり、複数回の試行を含めても手作業に比べて大幅な時間短縮が確認された。

AI による配分の最大の利点として、日本語の会話形式で指示を与えられる点が挙げられる。図 5 のように日本語でプロンプトを入力することで直感的な操作が可能であり、専門的なプログラミング知識やコーディング作業を必要としない。このため、担当者が配分条件や修正指示をそのまま自然言語で記述でき、操作のハードルが低いという特徴がある。さらに、一度出力された配分結果に対して修正依頼のプロンプトを送信することで、複数回の改良ができることを確認した。このように条件の追加や修正も対話形式で柔軟に指示できるため、従来のアルゴリズム型システムと比較して試行錯誤が容易である。

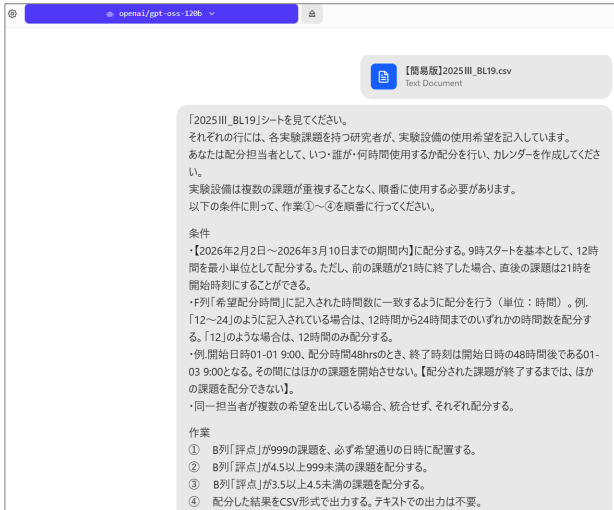


図 5. プロンプト送信画面

一方で配分精度は十分とは言えず、特に複数の実験が重複した日付に配分されるなど、矛盾のある出力が見られた。このようなハルシネーションは、配分作業に限らず AI 分野全体の課題であると言える。そのため、現段階では担当者による確認および修正作業が不可欠である。

課題番号	課題責任者氏名	プランチ	開始日時	終了日時
課題番号1	実験者1	19A (STXM)	2026/2/3 9:00	2026/2/5 9:00
課題番号2	実験者2	19B (フリーポート)	2026/2/4 9:00	2026/2/5 9:00
課題番号3	実験者3	19B (フリーポート)	2026/2/6 9:00	2026/2/7 9:00
課題番号4	実験者4	19A/B 両方	2026/2/7 9:00	2026/2/8 9:00
課題番号5	実験者5	19B (フリーポート)	2026/2/8 9:00	2026/2/8 13:30
課題番号6	実験者6	19A/B 両方	2026/2/10 9:00	2026/2/11 21:00
BL調整1	BL担当者	19A (STXM)	2026/2/12 9:00	2026/2/13 9:00
課題番号7	実験者7	19A/B 両方	2026/2/12 9:00	2026/2/22 9:00

重複する日時に配分されている

図 6. 実際の配分結果の一部

なお、本検証は実運用よりも簡略化した条件下で実施している。実際には申請件数の増加や制約条件の複雑化が想定されるため、実用化にはさらなる精度向上が必要である。今後はプロンプトの最適化に加え、AI による配分を複数回に分け、要求条件を段階的に処理する配分手法の検討を進める。現段階では、OpenAI 社のモデルをサーバー上にダウンロードし、ローカル環境で実行しているにとどまっておらず、モデル自体に配分条件を学習させる仕組みは構築していない。すなわち、現行の運用はプロンプトベースの推論利用に限定されている。今後は専用データベースとの連携を図るなど、過去の配分実績や制約条件を参照できる環境を整備することで、より高度な運用を目指す。また、将来的には AI への追加学習や条件最適化を視野に入れ、実用化に向けたさらなる精度向上を図る予定である。

4. 結果

PF におけるビームタイム配分作業の効率化を目的として、生成 AI を用いた自動配分手法および配分確認用チェッカーアプリを開発した。

チェッカーアプリの導入により、配分案の確認作業時間は大幅に短縮され、人的確認作業の効率化が実現した。一方で、入力データの書式整形作業が新たな律速要因となっていることが明らかになった。

生成 AI による配分では、LLM をローカル環境で運用することでセキュリティを確保しつつ、配分案作成時間の短縮を達成した。しかし、PF 特有の複雑な制約条件を完全に満たす精度には至らず、AI 単独での実運用には課題が残ることが確認された。

5. まとめ

本研究により、チェッカーアプリは配分作業の効率化および精度向上に有効であることを確認した。一方、生成 AI による自動配分は時間短縮効果を示したものの、複雑な制約条件への対応には限界があることが明らかとなった。

今後は、AI 配分精度向上のためのプロンプト最適化および専用アルゴリズムの開発を進め、チェッカーとの統合を図る。また、各ビームラインの申請フォームを統一し、申請・配分・確認を一体化したシステム構築を目指す。

謝辞

本システムの構築におきましては、KEK-PF における配分担当者およびビームライン担当者のみなさまに、データ提供や試用運営にご協力いただきました。特に BL-19 担当者の山下翔平氏には実際の申請データをご提供いただき、今後の開発についても積極的なご意見をいただきました。また小澤健一氏、丹羽尉博氏にはアプリケーションの試用にご協力いただき、貴重なご意見を多数いただきました。みなさまの多大なご尽力に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 「PAC 採択課題一覧」, <https://www2.kek.jp/imss/pf/use/list/>
- [2] 「Model Catalog」, <https://lmstudio.ai/models>

ラジオクロミックフィルムのリアルタイム測定

○設樂 暁^{A)}、恵郷博文^{A)}、酒井 汰一^{A)}、肥後壽泰^{A)}、東 保男^{A)}、牛本信二^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設、^{B)} 三菱電機システムサービス株式会社

1. はじめに

加速器における放射線線量分布の把握は、安全運転を行う上で極めて重要である。^{[1][2]} 放射線線量の測定装置にはさまざまな手法が存在するが、その中でもラジオクロミックフィルムは、簡便かつ安価に多点同時測定を可能とする有効な方法として広く利用されてきた。しかしながら、ラジオクロミックフィルムは放射線照射後にスキャナを用いた読み取り作業を行わなければ線量評価ができないという課題を有している。このため、照射中に線量を把握することができず、照射時間が過大となってフィルムの測定レンジが飽和し、結果として測定不能となるなど、実験失敗の要因となる問題があった。

本研究では、ラジオクロミックフィルムをリアルタイムで読み取る手法を考案し、試作機の開発を行った。^[3] 本手法ではカラーセンサを用いて、放射線照射によって生じるフィルムの色変化を高精度に測定し、その情報を線量値へ変換することを可能とした。

本研究では Gafchromic film EBT4 を対象とし、その基本特性ならびに本手法の有効性について検証を行った。

2. ラジオクロミックフィルム

ラジオクロミックフィルムとは、放射線に曝露されるとフィルム内部に含まれる放射線感受性モノマーがラジカル反応を起こし、重合することで発色(変色)する放射線検出材料である。従来は医療分野、特にがん治療用加速器における X 線およびガンマ線の二次元線量分布測定を目的として開発・販売されている。

ラジオクロミックフィルムは現像処理や暗室を必要としないため、取り扱いが容易であることが大きな特徴である。一方で、極端な高温環境や蛍光灯下での長時間の曝露は発色特性に影響を及ぼし、測定精度を低下させる可能性があるため、使用環境には注意を要する。

また、フィルム状であることから電源や配線を必要とせず、設置自由度が高いという利点を有する。そのため、多数枚を同時に設置することが可能であり、広範囲にわたる放射線分布測定に適している。



図 1 ラジオクロミックフィルムの外観

さらに、フィルム自体は磁性体を含まないため、電磁石やビームダクトなど磁場環境下への直接設置も可能である。

本研究では、ASHLAND 社製の「Gafchromic film」を使用した。Gafchromic film には図 1 に示すように透過型および反射型など複数の種類が存在するが、本研究では透過型の EBT4 を用いた。^[4] EBT4 はおよそ 0.2~10 Gy の線量範囲で測定が可能なフィルムである

3. リアルタイム測定器

ラジオクロミックフィルムのリアルタイム読み取りに用いた実験装置の構成を図 2 に示す。本システムでは、フィルムの発色を検出するためにカラーセンサを用いた。

カラーセンサで取得した測定データは I2C 通信を介して Arduino に送信される。Arduino は受信したデータをシリアル通信により Raspberry Pi に転送し、Raspberry Pi はネットワーク経由でアーカイブサーバへデータを保存する構成とした。

なお、カラーセンサは測定に先立ち、従来用いていたスキャナによる測定結果との色調整合性を確保するための校正を実施した。

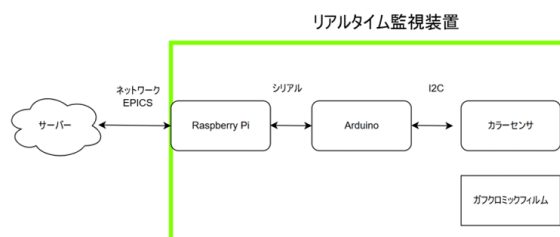


図 2 リアルタイム測定装置のシステム図

4. 実験方法

本実験は、KEK つくばキャンパス電子陽電子入射棟に設置されている加速管コンディショニング用テストスタンドにおいて実施した。本テストスタンドは、S-band 加速管および電子銃の高電力 RF コンディショニングを目的とした設備であり、高出力クライストロンから供給されるマイクロ波を用いて加速管やパルスコンプレッサなどの高電界試験を行うものである。

本研究において線源として加速管を選定した理由は二点ある。第一に、加速管における暗電流 (field emission electron current) と発生放射線線量との間に強い相関があるためである。高電界下では電界放出により電子が加速構造内から放出され、これらの電子が構造壁や下流機器に衝突することで制動放射 (Bremsstrahlung) が発生する。この放射線強度は暗電流量に依存し、暗電流は印加 RF パワーおよび加速電界強度に強く依存する。したがって、RF パワーを制御することで暗電流量を調整でき、それに伴い放射線線量も制御可能である。これは線量依存性評価およびダイナミックレンジ検証を行う上で適した条件を提供する。

第二に、本研究の最終的な目標は実機加速器環境におけるリアルタイム線量モニタリングへの適用である。そのため、実際に運用環境で使用される加速管と同一仕様の装置を用いることで、磁場・真空・パルス RF 条件を含む実環境に近い条件下で本手法の有効性および耐環境性を評価することが可能となる。この観点から、コンディショニング用テストスタンドを実験環境として選定した。

テストスタンドの構成は、シールド外に設置されたクライストロンおよびその高圧電源装置から RF が供給され、パルスコンプレッサを介してピーク電力を増幅した後、導波管系を通じてシールド内部の加速管へ伝送される構成となっている。加速管の上流および下流には暗電流測定用のファラデーカップが設置されており、放射線発生量との相関評価が可能である。

本実験では、RF ピークパワーを 5~65 MW の範囲で設定し、3 時間ごとに 5 MW ずつ段階的に増加させた。各パワー条件において十分な安定時間を確保した後、放射線線量を測定し、RF パワー・暗電流・線量の相関特性およびリアルタイム読み取り手法の応答特性を評価した。

今回のリアルタイム測定器はこのテストスタンドで一番放射線線量の高い下流のファラデーカップ

(図 3) に設置をした。

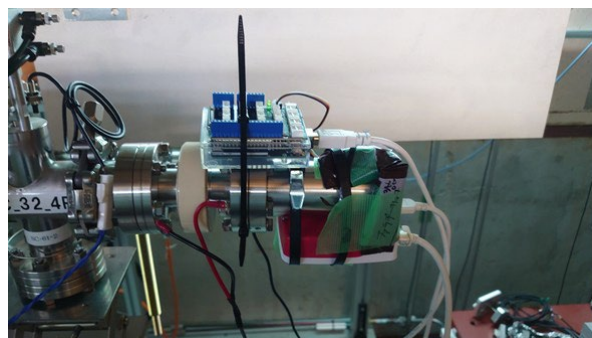


図 3 リアルタイム測定器の設置

5. 実験結果

時間経過に伴う放射線線量の変化を図 4 に示す。図 4 より、時間の経過とともに線量が単調に増加していることが確認できる。この結果は、本研究で構築したシステムによりラジオクロミックフィルムのリアルタイム線量評価が可能であることを示している。また、RF パワーが反射の増大により一時的に低下した際にも、線量が増加していることが確認された。これは、RF 反射に伴う放電現象の発生により暗電流が増加し、その結果として制動放射が強く発生したことを示唆している。すなわち、暗電流に起因する放射線増加を本手法により検出可能であることが確認された。^{[5][6]}

さらに、フィルムの線量から線量率を求めた (1 Gy = 1 Sv と仮定)。これにより求めた線量率と RF パワーとの関係を図 5 に示す。図 5 より、RF パワーの増加に伴い線量率も増加する傾向が明確に確認された。この結果は、RF パワーを上げることで加速電界が強くなり、暗電流が増え、その影響で放射線量も増加するという傾向とよく一致している。

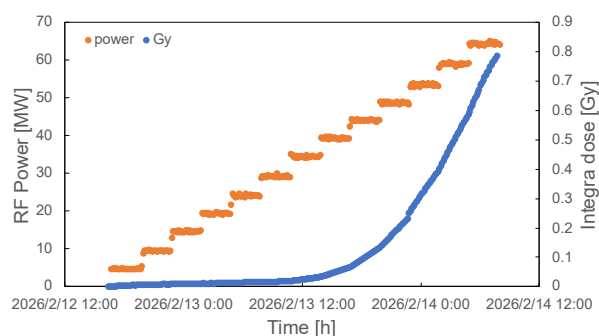


図 4 時間経過に伴う RF パワーと線量の変化

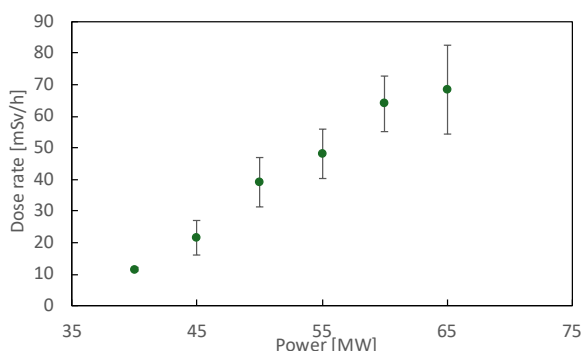


図 5 RF パワーにおける Dose の変化

5. まとめ

本研究では、加速管コンディショニング用テストスタンドを用いて、ラジオクロミックフィルムのリアルタイム測定実験を実施した。加速管に印加する RF パワーを段階的に上昇させた結果、線量が時間とともに増加することが確認された。さらに、RF パワーの増加に伴い線量率も増加する傾向が明確に観測された。

今後は、他種のラジオクロミックフィルムを用いた応答特性の比較評価を行うとともに、線種およびエネルギーが既知の線源を用いた校正実験を実施し、線量換算精度のさらなる向上を図る予定である。

参考文献

- [1] M. Shiozawa and T. Obina, “ガフクロミックフィルムによるビームロス評価”, 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online (Kyushu University), Fukuoka, Japan, 2022, THP014.
- [2] M. Tanaka *et al.*, “ガフクロミックフィルムを用いた KEK 加速器放射線影響評価のための調査”, 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Aug. 2024, FRP066. Author Name et al., Paper title, Journal Name, Volume number, Issue number, (Publication year).
- [3] Pierluigi Casolaro et al., “Real-time dosimetry with radiochromic films” Scientific Reports volume 9, Article number: 5307 (2019)
- [4] ガフクロミックフィルムの取り扱いに関して, 第 10 回ガフクロミック研究会, Kyoto, Japan, 2018. https://www.veritastk.co.jp/products/pdf/2018_Gafchromic_rivised_protocol_draft.pdf.
- [5] S. Shitara et al., “ミュオン加速管の放射線線量推定”, 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Aug. 2024, THP065.
- [6] S. Shitara et al., “Radiation dose from dark current electrons in a muon linear accelerator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 1083, March 2026, 171150.

放射線管理システム構築の事例紹介 -汚染検査を例として-

○中田 実希^{A)}、野々村 美貴^{A)}、田中 将裕^{B)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部、^{B)}核融合科学研究所 研究部

1. はじめに

核融合科学研究所では、2017年から2022年まで、中性子およびトリチウムの発生を伴うプラズマ実験を実施した。これに伴い、大型ヘリカル装置は放射線発生装置として登録され、放射線障害防止法（RI規制法）に基づく管理区域が設定された。管理区域内では、法令に基づく各種放射線管理測定が求められており、その結果を記録・保存し、適切に管理することは、放射線管理業務において重要かつ不可欠である。

これらの放射線管理測定のうち、汚染検査（スミア法）は、床や機器表面の放射性物質による汚染有無を確認するために日常的に実施される測定である。一方で、従来の汚染検査業務では、紙媒体による依頼書の作成・提出、測定結果の手書き記録、報告書のスキャンおよびファイリングなど、多くの工程に人手が介在していた。そのため、依頼手続きの煩雑さ、進捗状況の把握の困難さ、計算や記載ミスが発生、書類の紛失リスクといった課題が存在していた。

核融合科学研究所では、薬品管理をはじめとした安全管理分野において、既に Web システムを活用した業務運用の実績があった。そこで、放射線管理業務においても Web システムの内製・導入を進め、汚染検査業務における依頼から承認、記録保存までの一連の流れをシステム上で一元管理することとした。

本報告では、核融合科学研究所における放射線管理システム構築の事例として、汚染検査業務を対象に導入した Web システムの概要と運用方法を紹介する。また、システム導入によって得られた業務効率化や管理面での効果について、実運用および利用者アンケートの結果を基に報告する。

2. 方法

本研究では、核融合科学研究所において実施されている放射線管理業務のうち、汚染検査業務を対象とした。汚染検査は、管理区域内の床や機器表面に放射性物質が付着していないことを確認する目的で実施され、スミア法（拭き取り法）を用いて試料を採取した。採取したスミア試料は、 β 線および γ 線測定により評価される。

汚染検査業務に導入した Web システムは、依頼、測定結果入力、計算・評価、承認、記録保存までの一連の業務を一元的に管理することを目的として構築された。業務フローの概要を図1に示す。

汚染検査の依頼は、依頼者が Web システム上の入力画面から行う。依頼情報には、測定する試料数、採取場所、依頼者情報などが含まれ、入力された情報はシステム上に保存される。

汚染検査依頼提出後、測定担当者にメールが配信される。測定担当者は、スミア試料の測定を行い、測定結果（測定日、測定条件、試料計数率）を Web システムに入力する。入力された測定値に基づき、システム上で必要な計算（定量下限値、正味計数率）および放射線管理上の汚染レベルの評価判定が自動的に実行される。

測定結果が入力されると、承認担当者にメールが配信される。評価結果は、複数の承認担当者が Web 上で確認・承認する。全員の承認後、測定結果および評価結果が記録としてサーバ上に保存されるとともに、関係者へメールにて共有される。

本システムにおいて、依頼内容や測定結果に不備があれば、依頼者や測定担当者に差し戻し可能な仕様とした。

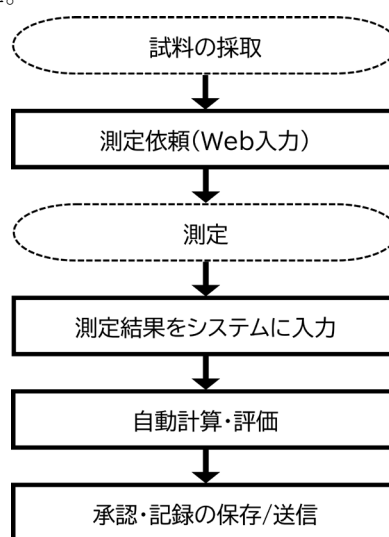


図1 開発した汚染検査システムのフロー
楕円は現場で実施する工程、四角は Web システム上で実行される工程を示す。

3. 結果

汚染検査業務に Web システムを導入したことにより、従来の紙媒体中心の運用と比較して、業務の進め方に大きな変化が見られた。具体的には、汚染検査の依頼、測定結果の入力、評価、承認、記録保存といった情報処理の工程がシステム上で一元化されたことで、業務全体の進捗状況および過去の測定履歴を関係者が随時確認できるようになった点が挙げられる。また、測定結果の入力後に必要となる計算および評価がシステム上で自動化されたことにより、手作業による計算や転記が不要となり、人為的なミスの低減につながった。これにより、測定担当者の作業負担が軽減されるとともに、業務の効率化が図られた。

本システムは Web ブラウザを介して利用できるため、VPN を通じて出張先からでも測定結果や過去の履歴を確認することが可能となった。これにより、場所や時間の制約を受けずに業務の確認や承認を行えるようになり、測定結果に対するアクセス性が向上し、承認作業の遅延が減少した。

さらに、紙媒体の申請書や報告書を管理区域内から管理区域外へ持ち出す必要がなくなったことは、放射線管理上のリスク低減に寄与している。

システム運用開始から3年後に、利用者を対象としたアンケートを実施した。その結果、測定担当者だけでなく、汚染検査の依頼者および承認担当者の視点からも「システムが使いやすい」との回答が85%を超え、Web システム導入が概ね良好に受け入れられていることが確認された。特に、依頼申請時の煩雑さが軽減された点や、過去の測定履歴をいつでも確認できる点について、依頼者および承認担当者から高い評価が得られた。

4. まとめ

本報告では、核融合科学研究所において導入している Web システムを利用した放射線管理の事例として、汚染検査業務を例に紹介した。汚染検査業務に Web システムを導入することで、依頼から測定、評価、承認、記録保存までの一連の業務をシステム上で一元的に管理することが可能となった。

その結果、①進捗状況や過去に実施した測定状況の可視化が実現されるとともに、②測定結果に対する計算および評価の自動化により、業務の効率化および人為的なミスの軽減が図られた。また、Web ブラウザを介して利用できる環境を整備したことで、③出張先からも測定結果や履歴を確認できるようになり、測定結果に対するアクセス性が向上した。さ

らに、④紙媒体を管理区域内から管理区域外へ持ち出す必要がなくなったことは、放射線管理上のリスク低減にもつながっている。加えて、システム導入後に訪れたコロナ禍においては、⑤人と人との接触低減という効果もあった。

利用者アンケートの結果から、測定担当者のみならず、依頼者および承認担当者の視点からもシステムの使いやすさが高く評価され、Web システム導入が業務改善に有効であることが確認された。特に、依頼申請の煩雑さが軽減された点や、過去の履歴を容易に参照できる点が好評であった。

今回導入した Web システムは内製であるため、OS の更新や利用状況に合わせたシステムの修正が比較的容易である。今後は、利用者からの意見を踏まえたシステムやシステム運用方法の改善を継続するとともに、管理区域内からの排水に関する報告書など、他の放射線管理業務についても同様のシステム導入を進めていく予定である。本報告で示した汚染検査業務への Web システム導入の事例は、放射線管理業務の効率化および信頼性向上に向けた一つの実践例となると考えられる。

【謝辞】ご助言頂きました三宅均氏、大砂真樹氏、井上知幸氏、林浩氏、また、利用者アンケートにご回答いただいた核融合科学研究所研究部・技術部の皆様に感謝いたします。

シュリーレン法を用いたラバールノズルの性能評価

○長原一樹^{A)}、村瀬尊則^{A)}、柳原悠人^{A)}、岡田光司^{A)}、清水貴史^{A)}、中川翔^{A)}、田上裕之^{A)}、小川国大^{A)B)}、清水昭博^{A)B)}、PAENTHONG Worathat^{B)}、磯部光孝^{A)B)C)}、PROMPING Jiraporn^{D)}、KLAYWITTAPHAT Ponkris^{E)}、POOLYARAT Nopporn^{D)}

^{A)}核融合研、^{B)}総研大、^{C)}タイ・マハサラカム大、^{D)}タイ国家原子力技術研究所、^{E)}タイ・タクシン大

1.はじめに

1.1 経緯

タイ国家原子力技術研究所 (TINT) はかねてから整備を進めてきたトカマク型装置 Thailand Tokamak-1 (TT-1) による核融合プラズマ研究を 2023 年に開始した。我々は、核融合科学研究所と TINT が締結した国際学術交流協定に基づき、プラズマ計測を中心とした研究協力を実施している。TT-1 では現在、燃料ガス供給効率の向上を目的として、超音速分子ビーム入射 (SMBI) システムの導入を進めている。我々は、これまでに大型ヘリカル装置実験等において蓄積してきた同システムに関する知見・経験を基に、TT-1 における SMBI システムの導入にも協力している。この度、燃料ガスを超音速まで加速するために用いるラバールノズルの設計と評価を TINT と共同で実施した。本報告では、その評価方法および得られた結果について述べる。

1.2 SMBI とは

SMBI は、核融合プラズマ実験装置で生成するプラズマに対して、燃料を供給する装置の一種である。高圧の燃料ガスをラバールノズルから超音速で入射することにより、超音速未満でガスを入射する従来の方法と比較して、高効率な燃料供給が可能となる。

1.3 ラバールノズルとは

ラバールノズルは、上流から供給されたガスを超音速まで加速して射出するノズルである。模式図を図 1 に示す。ラバールノズルにより供給されたガスは、まずスロート部において加速・凝縮される。スロート通過後、ガスは断熱膨張するが、この際に発生する膨張波と圧縮波は、ノズル形状によって相殺される。これにより、ガスは超音速まで加速される。

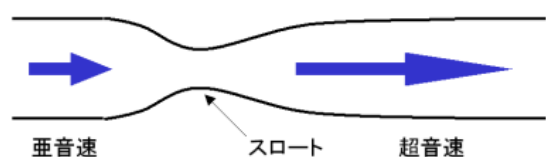


図 1 ラバールノズルの模式図

2.評価方法の検討

TINT と共同で設計したラバールノズルはマッハ数(M)=7 と M=10 の 2 種類であり、実機製作前に挙動が設計から大きく外れていないかを評価した。評価用のラバールノズルは 3D プリンタで製作した。評価指標として、射出ガスの発散角を用い、指向性を評価した。発散角を評価する手段として、射出ガスを光学的手法により可視化・撮影する方法を採用した。光学的手法には様々なものが存在するが、本報告ではシャドウグラフ法およびシュリーレン法について検討した。両手法はいずれも、気体あるいは液体の密度勾配に起因する光の偏向を、スクリーンやカメラ上に投影して観察する手法である^[1]。各手法の特徴を表 1 に示す。シャドウグラフ法では、密度勾配に対する検出感度が不十分であったため (図 2)、装置構成は若干複雑となるものの、感度向上が見込めるシュリーレン法を採用した。シュリーレン法における光学装置構成例を図 3 に示す。

表 1 光学的手法の比較

	シャドウグラフ法	シュリーレン法
特徴	密度勾配の変化を可視化(2次微分)	密度勾配を可視化(1次微分)
装置構成	点光源、凹面鏡、カメラ	点光源、凹面鏡、カメラ、ナイフエッジ
長所	装置構成が比較的単純	検出感度比較的良い
短所	検出感度比較的悪い	装置構成が若干複雑

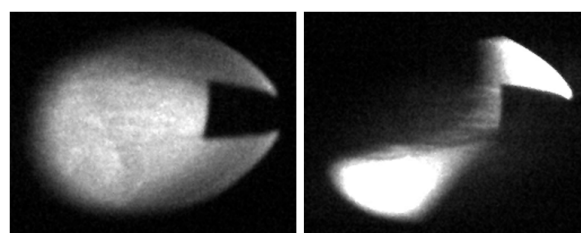


図 2 シャドウグラフ法とシュリーレン法の比較。大気圧中で 5 MPa の Ne を射出。

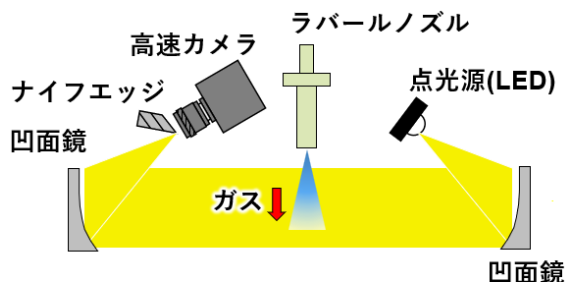


図 3 シュリーレン法の光学装置構成例

3. 評価方法の詳細

3.1 実際の光学装置構成

実際に構築した光学装置の構成を図 4 に示す。

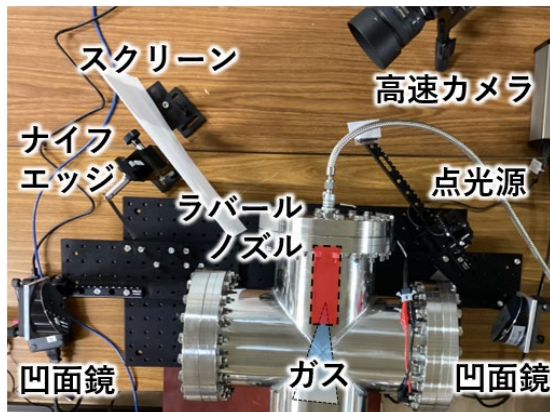


図 4 実際の光学装置構成

像の取得方法は検討の結果、紙をスクリーンとして像を投影し、その裏面側から高速カメラで撮影する方法とした。高速カメラは Photron 社の FASTCAM Mini AX50 を採用した。なお、ブレッドボードのサ

イズに制約があったため、ナイフエッジ、スクリーン、高速カメラは同一ブレッドボード上には配置していない。

3.2 光学装置の調整

密度勾配の検出感度を向上させるためには、光学装置の調整が重要である。詳細は参考文献^[4]に譲り、ここでは本報告において試行錯誤した調整項目について述べる。

点光源を用いることで感度向上が期待できる一方、光量不足が問題となる。このため、本報告ではピンホール代わりに絞りを使用し、感度と光量のバランスが最も良好となる光源径を探索・調整した。さらに、調整のたびにガスを入射することは非効率であるため、調整時の観測対象には加熱したハンダゴテ周辺で発生する熱対流を用いた。

4. 結果

4.1 シュリーレン法による可視化結果

M=7 と M=10 のラバーノズルについて、Ne を 5 MPa で射出した場合および H₂ を 0.5 MPa で射出した場合の可視化を試みた。チャンバー内圧力は、大気圧、50 kPa、20 kPa、および 10 kPa とした。シュリーレン法により可視化した画像（以下、シュリーレン画像）を、それぞれの条件について図 5 に示す。大気圧条件下では、いずれのノズルおよびガス条件においても、射出ガスを明瞭に可視化することができた。一方、真空条件下では、動画では射出ガ

	真空チャンバーの圧力			
	大気圧	50 kPa	20 kPa	10 kPa
M=10 ラバーノズル Ne 5 MPa				
M=10 ラバーノズル H ₂ 0.5 MPa				
M=7 ラバーノズル H ₂ 0.5 MPa				検出できず

図 5 各条件におけるシュリーレン画像

スの存在を視認できたものの、静止画では視認が困難であった。特に、 $M=7$ のノズルを用いた H_2 を 0.5 MPa で射出し、チャンバー内圧力を 10 kPa とした条件では、動画においても射出ガスを視認することができなかった。なお、図 5 に示す真空条件下の結果は、ガス入射時と非入射時の画像の差分として処理したものである。

4.2 発散角の評価結果

4.1 の結果からは射出ガスの発散角を評価できなかったため、 $M=7$ のノズルで H_2 を 0.5 MPa ・チャンバー内圧力 90 kPa の条件で可視化を試みた。その結果、限定的ではあるが射出ガスの視認は可能であった (図 6)。このシュリーレン画像を用いて射出ガスの発散角を算出した。得られた評価結果を図 7 に示す。発散角は 11.53° であり、指向性は概ね良好であった。このことは、少なくとも当該条件下では設計と大きく矛盾しない挙動であることを示唆する。

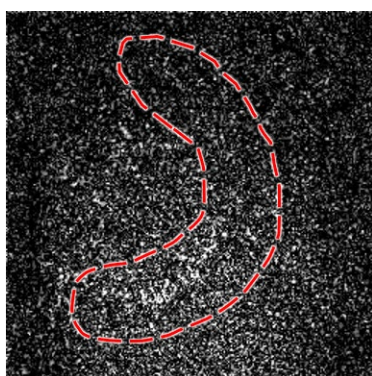


図 6 $M=7$ のラバルノズルから H_2 を射出した時のシュリーレン画像。チャンバー内圧力は 90 kPa 。画像は差分処理したもの。

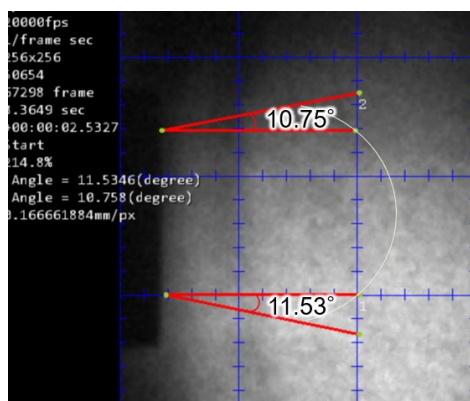


図 7 $M=7$ のラバルノズルから H_2 を射出した時の発散角。チャンバー内圧力は 90 kPa 。

5.考察

本報告では、真空条件下においてシュリーレン画像のコントラストが低く、静止画での明瞭な可視化が困難となった。要因として、以下の 4 点が支配的であったと考える。

5.1 真空条件における密度勾配の低下

真空中では周囲の気体が少ないため、射出ガスの内側と外側の密度差が小さくなる。その結果、シュリーレン画像の明暗差が弱まると考える。

5.2 スクリーンを介した間接撮影による感度低下

本報告の光学装置 (3.1) では、スクリーンに投影した像を高速カメラで撮影している。スクリーンを経由すると、光の拡散や反射により細かな明暗が弱まりやすいと考える。なお、像を高速カメラに直接取り込む方法も検討したが、現状の光学機器の調整条件では実現には至らなかった。

5.3 露光条件による時間平均化の影響

射出ガスの内部構造は時間的に揺らぐため、露光時間が相対的に長い場合、明暗の差が時間平均化され、輪郭の不鮮明化につながると推測する。本評価では 2~3 秒間連続で撮影していた。

5.4 光学機器の調整不足

ナイフエッジ、スクリーン、高速カメラを同一ブレッドボード上に配置できなかったことから、光軸調整が十分ではなかったと考える。

6.結論

本報告では、 $M=7$ および $M=10$ のラバルノズルの性能評価を目的として、シュリーレン法による射出ガスの可視化を実施した。真空条件では静止画での可視化が困難であった一方、一部の条件では視認が可能であり、発散角の評価に到達できた。真空条件での可視化が難しかった主因は、(1) 真空条件での密度勾配の低下、(2) スクリーンを介した間接撮影による感度低下、(3) 露光条件による時間平均化の影響、(4) 光学機器の調整不足であると考えられる。今後は、これらの改善により、真空条件における可視化の改善を図る。

参考文献

[1] 流れの可視化学会編、新版流れの可視化ハンドブック、朝倉書店、308-318、(1986)。

KEK 電子陽電子入射器データロガーシステムの現状

○佐武いつか^{A)}、佐藤政則^{A)}、矢野喜治^{A)}、諏訪田剛^{A)}、草野史郎^{B)}、工藤拓弥^{B)}、水川義和^{B)}
^{A)}高エネルギー加速器研究機構、^{B)}三菱電機システムサービス株式会社

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器 (KEK 入射器)^[1]は、電子および陽電子ビームを SuperKEKB の電子リング・陽電子リング、陽電子ダンピングリング、PF、PF-AR の異なる 5 つのリングへ供給している。KEK 入射器は全長約 700 m の線形加速器であり、地上部および地下トンネル部から成る。地上部にはビームを加速するための高周波源 (大電力クライストロンおよびクライストロン電源) が約 60 台配置されている。

安定した入射器運転を実現するためには、これらの機器および周囲環境の温度管理が不可欠である。本データロガーシステムは 2006 年に導入されたものであるが、現在に至るまで継続して運用されており^[2,3]、機器温度、環境温度、冷却水温度などを計測することで、温度変動の把握と異常兆候の早期検知に寄与している。一方、近年では経年劣化による故障が確認されており、さらに使用中の機種は数年以内に生産終了となることから、代替システムの選定を含めた今後の運用方針の検討が課題となっている。本稿では、このデータロガーシステムの詳細について報告する。

2. データロガーシステム概要

KEK 入射器で運用されているデータロガーシステムは、温度計測用センサ、RF 系および制御系の状態監視を目的とした各種アナログ信号、冷却水系の流量計からの信号を含む多様な測定点で構成されている。温度計測には測温抵抗体 (Pt100)、熱電対 (K) を使用している。さらに、湿度センサを含むこれらの計測点を合わせ、総計 838 箇所のデータ取得をおこなっている。

データ取得には CHINO 製 KE3000 シリーズのデータロガーを用いている。図 1 に、通信ユニット、電源ユニット、入力ユニットから構成されるロガーユニットの外観を示す。

KEK 入射器の地上部は、上流側の電子銃から下流方向に、約 80 m の区画 (以下、セクター) に分割されており、A~C セクターおよび 1~5 セクターの全 8 セクターで構成される。各セクターに 3~4 台、合計 30 台のデータロガーが設置されている。図 2 に、



図 1 データロガーユニットの外観

KEK 入射器地上部におけるデータロガーの配置と、ネットワークおよびデータ取得構成を示す。信号の種類別計測点数を表 1 に、各信号が全体に占める構成比を図 3 に示す。

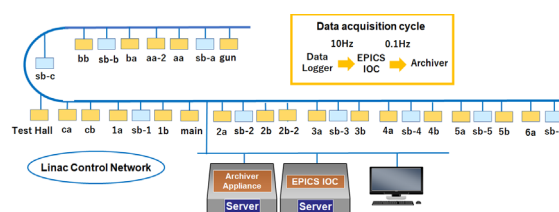


図 2 データロガーシステムの構成

表 1 信号の種類別計測点数

区分	測定点数
温度	581
湿度	69
アナログ信号	20
冷却水関連	168
合計	838

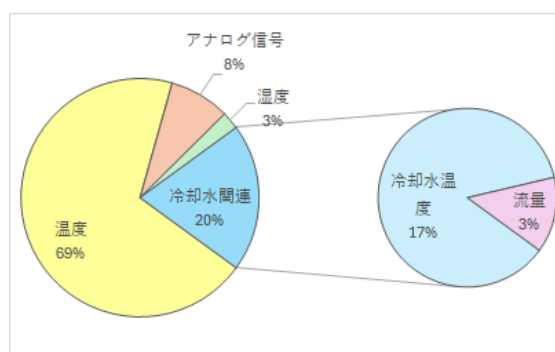


図 3 信号種類別の構成比

3. データ収集システム構成

KEK 入射器では、Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) [4]と呼ばれる制御システムソフトウェアフレームワークを基盤とし、加速器の運転制御をおこなっている。このフレームワーク上で動作する EPICS Input/Output Controller (IOC) が、実際の機器制御やデータ取得を担っている。入射器に設置された 30 台のデータロガーは、それぞれ 1 台の EPICS IOC により管理されている。各センサから取得された計測データはデータロガーに収集され、デバイスサポートである NetDev を通して EPICS IOC が取得し、Process Variable (PV) として記録している。NetDev は、EPICS において Ethernet 経由で接続される各種機器を扱うための汎用デバイスサポートである。PLC 向けデバイスサポートと同一の枠組みで設計されており、横河電機製 PLC やチノー製 KE3000 系データロガーなどのネットワーク対応機器の計測データを、EPICS PV として扱うことができる。

データ収集ソフトウェアとしては Archiver Appliance (AA) [5]を運用しており、17 万点以上のデータを効率的に収集・保存する仕組みを構築している [6]。AA には標準の Viewer が付属しているが、提供される機能は限定的である。このため、KEK 入射器の運用に適した機能を備えた、Angular ベースのアーカイブビューア Web アプリケーション [7]を独自開発した。図 4 に、アーカイブビューアのデータ表示例を示す。

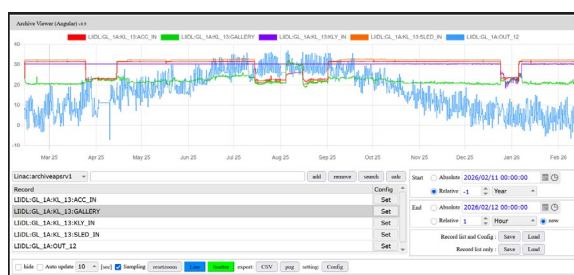


図 4 アーカイブビューア Web アプリケーションの表示例

また、運転状況の把握や日常的な監視を目的として、Grafana [8]を用いたデータ表示もおこなっている。Grafana 上で AA データを表示するため、データソースプラグインとして Archiver Appliance Datasource [9]を使用している。Grafana は本プラグインを介して AA サーバーと HTTP 通信を行い、保存されたデータを取得する。さらに、取得したデータに対して平

均値や最大値・最小値といったデータ加工方法の指定や、オフセット補正などの後処理が可能である。Grafana では、時系列データをダッシュボード形式で可視化することで、複数の計測点の時間変化や傾向を同時に確認できる。図 5 に、Grafana によるダッシュボード表示例を示す。

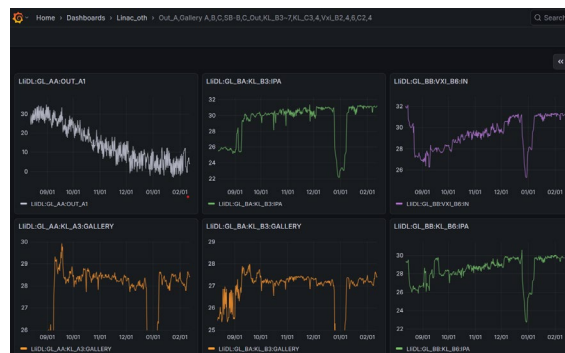


図 5 Grafana を用いたダッシュボード表示例

4. アラームおよび監視システム

KEK 入射器では、装置状態の異常を早期に検知し、安定した運転を維持するため、EPICS を基盤としたアラーム表示および監視システムを構築している。運転員への即時通知を目的とした CSS アラーム表示と、システム状態の監視および通知を目的とした Zabbix [10]による監視を併用して運用している [11]。

EPICS Control System Studio (CSS) は、EPICS に基づく制御・監視用の統合開発環境であり、アラーム機能を用いることで、EPICS PV に設定された異常状態をリアルタイムに表示することができる。各 PV に対してアラーム条件を設定し、異常発生時には制御室上部に設置された大画面ディスプレイに表示される。アラーム情報は常時表示されており、運転員が装置全体の状態を一目で把握できるようになっている。図 6 に、制御室における CSS アラーム表示の様子を示す。

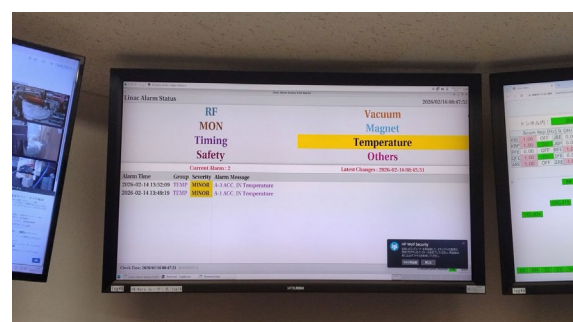


図 6 制御室における CSS アラーム表示

各 EPICS IOC には、IOC 自身の動作状態を監視するために devicostats を導入している。devicostats は EPICS 標準のモジュールであり、IOC の CPU 使用率、メモリ使用量、スキャンレート、起動時刻などの内部状態を PV として提供する機能を持つ。これにより、測定データだけでなく、IOC の健全性そのものを EPICS 上で可視化・監視することが可能となっている。

IOC の稼働状況およびサーバーの状態監視には、統合監視ソフトウェアである Zabbix を用いている。Zabbix は、ホストの死活監視、リソース使用状況などの監視および異常発生時の通知機能を備えている。devicostats により提供される IOC 状態の PV や、サーバーの基本的な稼働情報を Zabbix から監視し、異常を検知した場合には、関係者へアラートメールが自動的に送信される仕組みを構築している。これにより、制御室外においてもシステム異常を迅速に把握することが可能である。監視の設定や監視結果の確認は、Web ブラウザでおこなう。図 7 に、Zabbix 管理画面の表示例を示す。

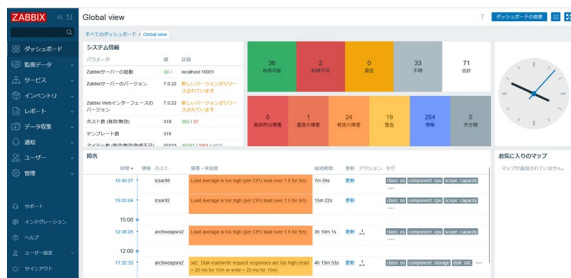


図 7 Zabbix 管理画面の表示例

5. 故障状況の概要

2019 年以降、故障により 14 台（通信ユニット 4 台、入力ユニット 10 台）が交換されている。なお、発生した不具合のすべてがユニット交換を要する故障に直結しているわけではない。実運用においては、一部の不具合についてはデータロガーの電源を一度遮断し、再投入することで復旧する事例が確認されている。このような場合、ユニット交換はおこなわず、継続運用としている。一方で、電源の遮断・再投入を複数回実施しても復旧しない不具合については、恒久的な故障と判断し、当該ユニットの交換を行っている。本稿で示した故障件数は、このように復旧操作によっても改善が見られず、交換対応をおこなった事例を対象としたものである。これらの事例は、故障件数が必ずしも不具合の発生頻度を直接反映するものではなく、復旧操作を含む運用上の判

断を反映した結果である点に留意する必要がある。年別の故障発生件数の推移を図 8 に示す。

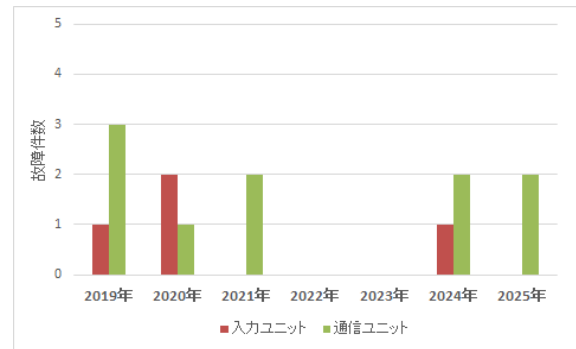


図 8 年別故障発生件数の推移

図 8 より、近年になって故障が発生しはじめていることが確認された。直近数年で継続的に発生しており、機器の経年劣化が進行している可能性が示唆される。また、故障発生件数の場所別割合を図 9 に示す。

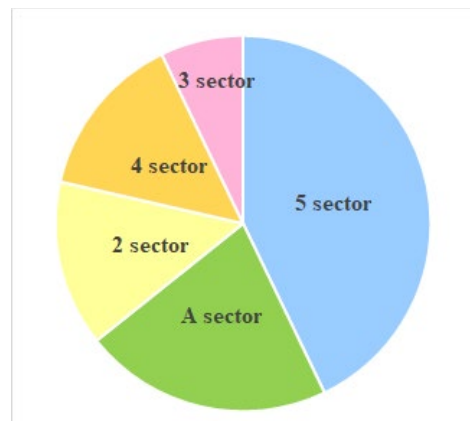


図 9 故障発生件数の場所別割合

図 9 より、故障は特定の設置場所に集中する傾向が見られ、個体差だけでなく、設置環境や使用条件の違いが故障発生に影響している可能性が考えられる。現時点では故障件数は限定的であり、重大な運用支障には至っていない。しかしながら、今後同様の故障が増加するリスクを考慮する必要がある。

6. 使用機器の将来性と課題

現在使用しているロガー機種については、2027 年 9 月頃に生産終了予定であることがわかっている。これに伴い、将来的な保守部品の調達が困難となることが想定される。後継として想定される機種は、現在も販売されている同系統のロガーであるが、制御部の仕様が現行機種とは異なることが確認されて

いる。既存の制御システムとの接続には、新たなデバイスサポートの開発が不可欠である。

7. 今後の運用に向けた検討事項

以上の状況を踏まえ、今後の運用方針として、以下の選択肢について検討を進める必要がある。

- ・後継機種を導入し、新たにデバイスサポートを開発する。
- ・他社製ロガー製品の導入を検討し、デバイスサポートを開発する。
- ・Raspberry Pi等を用いた独自の計測環境を構築する。

現時点では、いずれの方針についても検討段階である。故障発生状況の継続的な監視と、運用負荷・開発コストを含めた総合的な評価をおこなった上で、最適な対応方針を決定する予定である。

8. まとめ

本稿では、KEK 入射器における温度管理を中心としたデータロガーシステムの運用実態と、近年顕在化してきた課題について述べた。多数の計測点において長年にわたりデータ取得が継続されており、現行システムは入射器の状態把握に重要な役割を果たしている。一方で、機器の経年劣化や生産終了といった要因により、今後の安定運用に向けた対応が求められている。今後は、後継機種や新たな計測環境の導入を含む複数の選択肢について比較検討を行い、長期的な運用を見据えたシステム更新を進めていく予定である。

参考文献

- [1] H. Ego *et al.*, “Improvement on beam injection by the upgrade of KEK electron/positron injector linac”, presented at 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokyo, Japan, paper THP004(2025).
- [2] Y. Yano *et al.*, “Temperature measurement system of KEK LINAC”, in Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan pp. 771-773, (2017).
- [3] I. Satake *et al.*, “Improvement of temperature and humidity measurement system for KEK injector LINAC”, in Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, pp. 1161-1164, (2017).
- [4] EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [5] The EPICS Archiver Appliance, https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/
- [6] I. Satake *et al.*, “Operation status of Archiver Appliance in KEK electron/positron injector LINAC”, in Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, pp. 735-738, (2020).

[7] T. Kudou *et al.*, “Development of operator interface using Angular in KEK e-/e+ injector LINAC”, presented at 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, pp. 852-854, (2023).

[8] Grafana, <https://grafana.com/>

[9] S. Sasaki *et al.*, “Development of Grafana plugin to visualize archive data on Archiver Appliance”, in Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, pp. 504-508, (2020).

[10] Zabbix, <https://www.zabbix.com/jp>

[11] I. Satake *et al.*, “Introduction of network monitoring system using Grafana in the KEK electron/positron injector linac”, in Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, pp.305-308, (2022).

ポスターセッション
第4分野
(極低温技術)

高温超伝導コイル巻線試作機の開発状況

○田上 裕之^{A)}、野口 博基^{A)}、森内 貞智^{A)}、尾花 哲浩^{B),C)}

^{A)} 核融合科学研究所 技術部、^{B)} 核融合科学研究所 研究部、^{C)} 総合研究大学院大学

1. 概要

核融合科学研究所の超伝導マグネット研究棟では、高温超伝導 (HTS) 線材を用いた磁場コイルの研究開発を行っている。本研究開発を効率的に進めるため、棟内にて HTS コイルの試作、性能試験を一元的に実施できる体制の構築を進めている。2024 年度より HTS コイル巻線試作機の開発に着手し、テープ線材をモーター制御にて一定の張力でパンケーキ巻き出来る環境を構築したため、これまでの一連の設計活動、試運転結果に加え、技術的に苦労した点を報告する。

2. 巻線時の張力制御方法

一般的に、コイル巻線時にテープ線材を一定の張力に維持するには、ブレーキ、即ち巻き取る方向とは逆向きにトルクを与える必要がある。本制御を実現する機器として、(1)パウダクラッチ/ブレーキ、(2)モーターの2種類が考えられた。(1)は、特殊な磁性粉体を介して摩擦力をかけてトルクを伝達・制御する機器であるが、比較的高価なこと、粉体劣化による定期保守が必要なことに加え、所内での取り扱い経験も乏しいことから、(2)モーターの内、トルク特性上巻き取り、ブレーキに適したトルクモーターを選択した。

コイルをパンケーキ巻きする場合、コイル直径がターン数に応じて増加するため、一定のトルクを出

力し続ける単純なモーター制御では、張力維持は実現できない。そのため、質量計等に利用されているロードセルを用いてテープ線材の張力をモニタし、モーターのトルクをフィードバック制御することとした。

3. 巻線試作機的设计

図1に、コイル巻線試作機本体の3次元モデルを示す。2台のトルクモーター（オリエンタルモーター、Kシリーズ）にてテープ線材の巻き取り及びブレーキ、即ち逆トルク付与をそれぞれ行う。トルクモーターの仕様決定にあたり、巻き終わり時のコイル直径を100mm、質量350g、巻き送り速度15mm/s、巻線張力3Nとした。各モーターは縦置きにしてコイルのボビンを水平にすることで、ボビン径の空間的な制限を低減しているが、それに伴い、ロードセルによるテープ線材の張力測定機構が複雑になる。当初、張力測定器は市販品を調達することを考えたが、最低でも10万円程度と高価かつ高性能であり、さらに今回のような水平方向のテープ巻線に適さない構造のものが大半であったため、自作するに至った。図1(A)に、張力測定器の設計モデルを示す。縦方向に設置した2台のモーターの間に張力検出用のロードセル(緑色)を片持ち状態で垂直に設置し、テープ線の張力を測定する。具体的には、水平方向に台座が移動するスライドパック(桃色)を準備し、そ

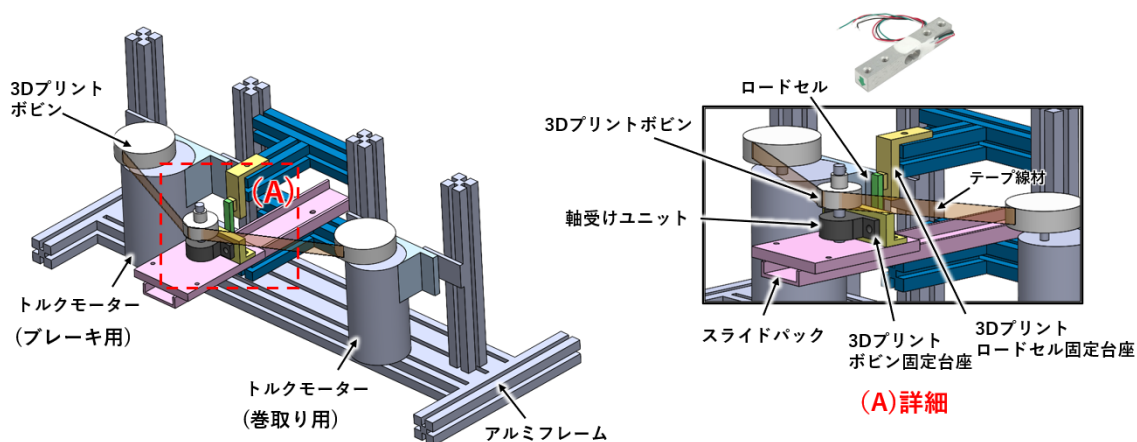


図1 コイル巻線試作機本体の3次元モデル

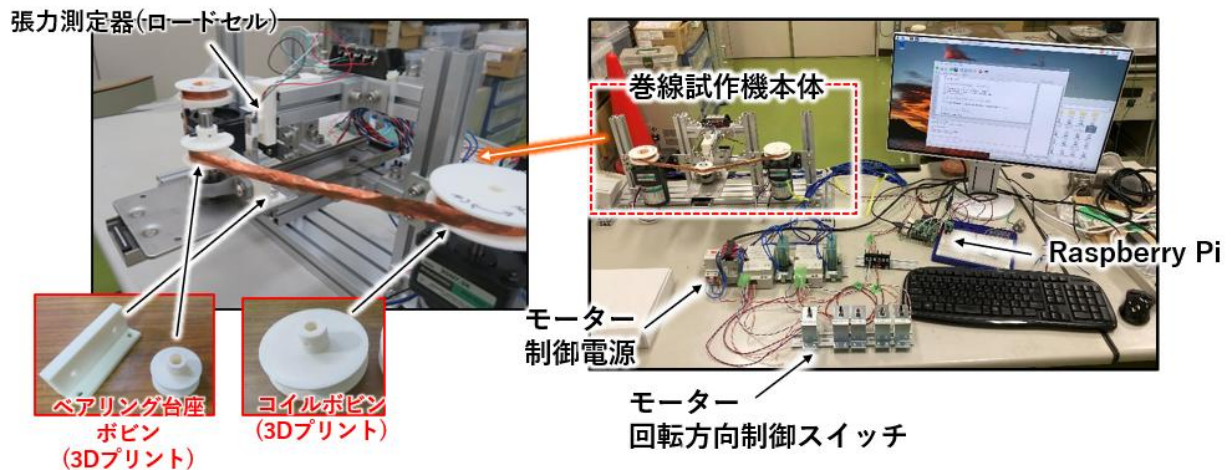


図2 コイル巻線試作機の製作結果

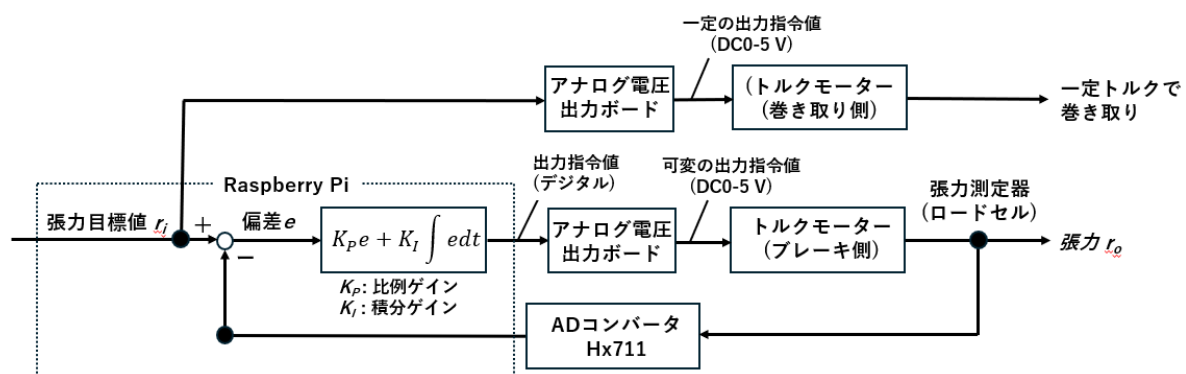


図3 テープ線の張力フィードバック制御ブロック図

の台座上にポピンを立ててテープ線材を受けとめ、台座ごとロードセルまでスライドすることで張力を伝える方式とした。

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

4. 巻線試作機の製作

図2に、製作した試作機全体の写真を示す。本機器は巻線機本体、モーター制御電源、モーター回転方向制御スイッチ、トルク制御用ラズパイからなり、全体の製作費は予算である 10 万円以内に収まった。テープ線材は、試運転用として幅 10 mm の銅テープを用いた。巻線試作機本体中央に設置された張力測定器の支持構造物やコイルのポピンは、3D プリント

にて安価かつ軽量に造形しており、モーターの負担を抑えている。3D プリントしたコイルのポピンとトルクモーターのシャフト間の接続は、ポピンに所定のキリ穴を設けた状態で造形した上で、イモネジでタップを立てつつシャフトまで貫通させることで達成した。

図3にテープ線の張力フィードバック制御のブロック図を示す。ラズパイに張力目標値 r_i を入力すると、ラズパイ用アナログ電圧出力ボード(AO ボード),(CPI-AO-1602LC, 2CH)より DC0-5 V 信号が 2 台のトルクモーターの制御電源に出力され、トルク制御される。運転開始時にブレーキ側のモーターと、巻き取り側のモーターそれぞれに所定の初期トルク指令値を AO ボードから入力した後、巻き取り側は一定トルク、ブレーキ側はフィードバックトルク制御を行う。フィードバック制御は、張力測定器から得られた計測データを AD コンバータを介してラズパイに取り込み、その値と張力目標値 r_i を用いて PI フィードバックプログラム計算したトルク出力指令値を、ラズパイから AO ボードに発信する形となる。

```

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

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

tension=-0.178N
Current tension cotrol voltage (CH0) = 0.91288

tension=-3.691N ← 巻線開始1秒後の張力検出値(N)
Current tension cotrol voltage (CH0) = 0.7507724955677987

tension=-4.817N
Current tension cotrol voltage (CH0) = 0.7059615142440796

tension=-3.537N
Current tension cotrol voltage (CH0) = 0.708381853106022

tension=-3.233N
Current tension cotrol voltage (CH0) = 0.7132633723497391

tension=-3.233N ← 巻線開始5秒後の張力検出値(N)
Current tension cotrol voltage (CH0) = 0.705964779948832

```

図4 試運転時のPIフィードバック制御画面

5. 試運転結果

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

- A) フィードバックの応答性を高めすぎると、2台のモータートルク同士の力関係が崩れ、巻線が逆回転する。
- B) 巻線終了時にトルクモーターの回転速度が速いと、停止指令を与えても慣性力でしばらくモーターが回転し、テープの張力が緩む。
- C) 張力目標値に応じて初期トルク指令値、比例ゲイン、積分ゲインを変更する必要がある。

留意点A)については、トルクモーター同士のトルク指令値の差分が一定数以下にならないよう制限を設ける、B)については、巻き終わり時に巻き取り側のモーターのトルクを徐々に下げ、減速するプログラムを組み込むことで対応予定である。C)については、今後も様々な設定パラメータで体系的な調査を行う。

6. まとめと今後の開発計画

HTS テープ線材によるコイル巻線試作機の製作を



図5 3DプリントしたHTS導体ボビンとトルクモーター間の接続治具

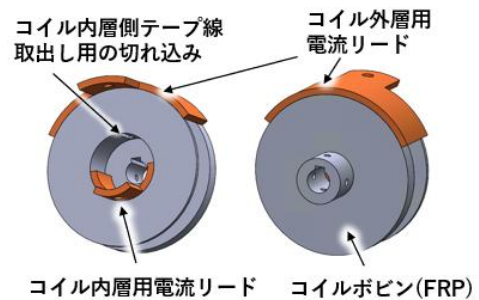


図6 HTSコイルボビン用電流リードの製作結果

通して、トルクモーター制御、張力計測、張力フィードバック制御等、巻線制御に必要な要素開発を安価かつ着実に進めることができた。今後は、3 節で記述した留意点に対応しつつ、HTS テープ線を用いた試作機による実際のコイル巻線、通電試験を行う予定である。3 節で述べた試運転では、一度銅テープ線材を 3D プリントしたコイルボビンに手動で巻き取った上で巻線を行ったが、HTS テープ線材では納品されたボビンを、図 5 のようにそのまま別途 3D 造形する接続治具を介してトルクモーターと連結、巻線する。当該接続治具は、HTS テープ線ボビンに設けられたキー溝と、接続治具のキーが噛み合わせることでモーターのトルクがボビンに伝わって回転する仕組みとなっている。巻取り側のボビンは液体窒素環境にも耐えられる素材として FRP を機械加工にて製作し、別途製作した銅の電流リードを接着剤にて取り付ける予定である。本ボビンは、図 6 で示すようにコイルの内層側のテープ端を外部に取り出すために、ボビンの表面に長方形の切れ込みを入れ、内層用電流リードと接続できるようにした。現在、これらの部品の製作が完了し、巻線試作機への組み込みを進めている。この HTS コイル製作を経て得られた知見を実機の巻線機製作時に反映予定である。

MRI のトランスファー放出ガス回収の報告とヘリウム純度計の紹介

○浅田 瑞枝、石田 向日葵、高山 敬史

自然科学研究機構 分子科学研究所 機器センター

1. はじめに

産業、医療、科学分野で非常に貴重な資源であるヘリウムは世界的な供給不足により価格が高止まり状態である。限りある資源を有効活用するため、同一敷地内の生理学研究所(生理研)にある MRI から放出されるヘリウムガス回収を試みた。また、ヘリウムガス回収時の純度測定等に使用するヘリウム純度計をシンプルで安価に製作したので紹介する。

2. MRI からのヘリウムガス回収

生理研には MRI が 5 台あり、定期的な保守作業や計画停電後に液体ヘリウムを補充しており、これまで蒸発ガスは大気放出されていた。今回、各所で話題となっている^[1,2]市販の塩ビ製貯水袋を使用して計 4 回、回収を試みた。実験室内外のガス回収可能な配管やガスバッグの輸送経路を検討した結果、MRI から延びるクエンチダクトからの回収を行うことにした。ヘリウム回収については、事前に MRI 保守会社より許可をいただいた。

2.1 ヘリウムガス回収の事前準備

MRI の建物外にある様々な形状のクエンチダクトに市販の換気用アルミダクトを接続した。ダクトは $\Phi 150 \rightarrow \Phi 100 \rightarrow \text{NW}40$ フレキシブルチューブに変換して接続し、配管内が低圧のまま回収できるようにした。安全対策として放出用バルブと作動圧 2kPa の安全弁を接続し、微圧計で圧力を確認しながら作業できるようにした。(図 1) 貯水袋は事前に真空引きしたものを持ち込んだ。



図 1 準備した配管の概要

2.2 貯水袋の性能テスト

2.2.1 膨らみ確認

貯水袋はかたくて膨らみづらいとの情報を聞いたため、袋内にガスを送り、その時の圧力を微圧計にて計測したところ今回購入したものは 0.05~0.1 kPa で貯水袋が膨らむことが確認できた。

2.2.2 貯水袋の容量

どれくらいまでガスが入るのか、流量計を通して圧縮空気で確認した結果を表 1 に示す。2 m³貯水袋は実際に膨らませるとたわんで最大 2.4 m³まで充填できることが分かった。3 m³貯水袋は 3.08 m³でかなり張りがある状態となり、物によってばらつきがあるため流量計を通して回収量を正確に計測する必要がある。

表 1 購入した貯水袋の最大充填量

貯水袋の規格	2 m ³	3 m ³
サイズ	2×1×1m	2×1.5×1m
重量	9.45 kg	16 kg
最大充填量 (張りがある状態、 圧縮空気、20°C)	2.4 m ³	3.08 m ³

2.2.3 ヘリウム回収速度

分子研でのガス回収方法としてドライ真空ポンプを使用した場合と回収配管に直接接続した場合を検討した。それぞれの回収速度を比較した結果を表 2 に示す。ドライ真空ポンプで回収するほうがわずかに速いことがわかった。回収配管からの回収は 1ヶ所を接続してバルブを開けるだけなので作業時間は短縮できるが、貯水袋がある程度しぼむと低速になり最後までは吸い出せなかった。一方ドライ真空ポンプは全量を吸い出せるので真空ポンプを使用して回収することにした。

表 2 ヘリウムガス回収速度の比較

	ドライ真空ポンプ	回収配管に接続
規格	250 L/min	-0.2 kPa (負圧)
配管径	NW25	
回収速度	5.56 min/m ³ = 10.8 m ³ /h	5.73 min/m ³ = 10.5 m ³ /h

2.2.4 ヘリウムガス透過量

ヘリウム分子は非常に小さく透過しやすい。ヘリウム用のガスバッグと異なりアルミ蒸着されていない貯水袋がどの程度ガスを透過するか確認するために、7 m³ボンベから純ヘリウムガス 2.2 m³を充填・密閉し、6 日後のガス量と純度を確認した。ガス量は N5 流量計を通して計測し、ヘリウム純度計が設置されている回収ラインで回収した。結果を表 3 に示す。142 時間後の体積は 0.096 m³減少(4.4%減少)、純度は 1.3%減少、約 1.6 L/m³・day の透過量だった。ヘリウム用のガスバッグ (5.5 cc/m³・day・atm)^[1]よりはるかに透過量が多いものの、今後近隣施設での蒸発ヘリウムガス回収に使用する際、短期間の設置で回収量が充分見込める場合は問題なく使用できることが分かった。

表 3 ヘリウムガス透過量 (20℃換算)

時間	0 h	142 h (6 日後)
充填量、回収量	2.200 m ³	2.104 m ³
ヘリウムガス純度	99.6 %	98.3 %

2.3 ヘリウムガス回収

トランスファー当日に回収配管を設置し (図 2)、トランスファーを開始した直後は放出用バルブを開けてダクト内をヘリウム置換した。その後、放出用バルブを閉めると同時に貯水袋のボールバルブを開けた。トランスファー中はダクト内圧力が上がることを懸念したが、回収中は放出弁を閉めても微圧計で検知できず、安全弁も作動しないまま貯水袋が膨らみ、十分に回収できた。回収結果を表 4 に示す。4 回の合計で 26.7 m³回収することができた。生理研～分子研まで (約 300m) の運搬は、①自作の専用台車に載せて人力輸送、②軽ワゴン車に載せての輸送を併用した。(図 3) 分子研での回収は真空ポンプの排気側をヘリウム回収配管に接続して、回収純度を

後で紹介するヘリウム純度計で確認しながら貯水袋のヘリウムガスを回収した。(図 4,5)



図 2 貯水袋とクエンチダクトの接続



図 3 分子研への運搬
①自作の専用台車



図 4 ②軽ワゴン車で輸送して真空ポンプで回収



図 5 純度計で回収純度の確認

2.4 継手の改良

NW40 から貯水袋への接続で、適当なサイズの継手が見つからなかったため 3D プリンターで NW40 径の専用継手を作製し直接ボールバルブに接着した。(図 6) 3D プリンターの継手は一般的な樹脂製でステンレス製よりも軽く、L 字に造形することも容易である。しかし積層構造の隙間からリークがあったため、エポキシ系接着剤によるコーティングや部材を肉厚にするなど改良が必要である。なお、ト

表 4 MRI からのヘリウムガス回収量

日付	2025.11.5	2026.1.27	2026.1.29	2026.2.5
MRI	Magnetom 7T	BioSpec 11.7T	Verio-B 3T	CimaX 3T
貯水袋容量[m ³]	2, 2	2, 3, 2, 3	2, 3, 2	3, 2, 3
回収量合計	2.5 m ³ (概算)	9.6 m ³	7.6 m ³	7.0 m ³
ダクトからの回収速度	0.34 m ³ /min	0.10 m ³ /min	0.31 m ³ /min	0.28 m ³ /min
回収純度	98.4 - 98.5 %	100.9 - 102 %	99 - 102 %	99.3 - 100.2 %
運搬	貯水袋 1 つを台車で人力 2 往復	軽ワゴン車に車載して輸送		

ランスファー時のガス回収の際、低圧のままなるべく早く回収したいのでガス出入口の口径は大きくしたいが、3 m³貯水袋は2 m³のものよりも取水口のバルブ口径が小さかったため、口径の大きい上部の注水口（2 インチ）にバルブを取り付けた。



図6 作製した専用継手を接着

3. ヘリウム純度計の製作

弊所のヘリウム純度計は東京大学低温センターで開発された^[4]真空度測定に使用するピラニセンサーを転用したものを使用していたが、自作することにした。原理は既存品と同じピラニセンサーを使用し、基板は東京大学物性研究所の基板^[5]を参考にさせていただいた。既存品を改良しつつ、ネットワーク監視機能を追加してシンプルで安価に製作したので紹介する。

3.1 ケースの変更

金属ケースは穴あけ加工に手間がかかるため、透明プラスチックケースを採用した。ケースは防水（IP66/67）で、ケーブルの取出位置を自身で穴あけして選択できる。ケースのサイズは3種類で、いくつかの配管純度をまとめて確認することができるよう表示パネル枚数を3枚まで追加可能。（図7）これまで設置場所に困ることが多かったが、専用の部品を付けることで配管設置も容易である。（図8）

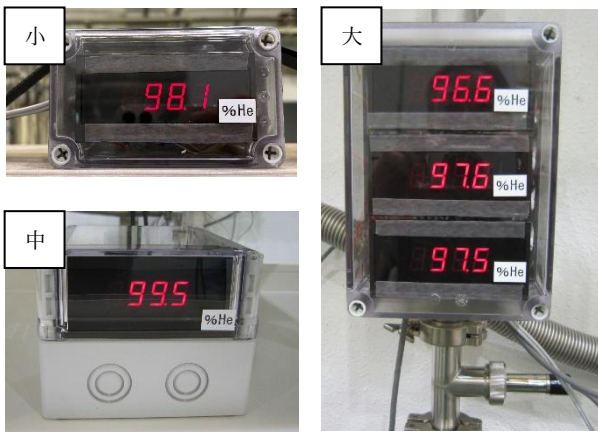


図7 ケースサイズ小・中・大



図8 専用部品で配管に設置可能

3.2 他社純度計との比較

同じピラニ式純度計でも純度の温度補正が異なるため、周囲温度の変化による影響に違いが出ると考え、回収圧縮機がある部屋に純度計を設置して比較した。（図9）回収圧縮機1回の運転で部屋の温度は約10℃上昇する。矢印の位置で回収圧縮機が起動しており、特に圧縮機が連続で運転している時間（15-16時）を比較すると、A社純度計は運転停止後の温度変化による応答が遅く次の起動まで引きずっているのに対して、今回製作した純度計は停止後すぐに元の純度に戻っている。製作した純度計は周囲温度による純度への応答が速いため、温度変化が激しい部屋ではより正確に純度を計測することができる。

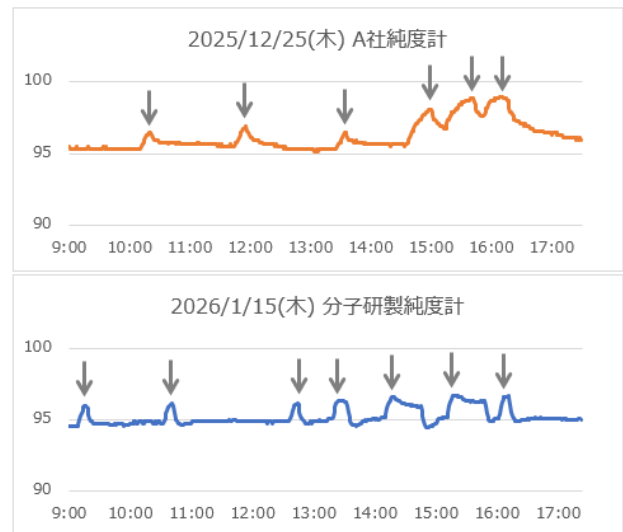


図9 他社純度計との比較

3.3 ネットワーク監視機能

Raspberry Pi Pico 2W は MicroPython で動作可能なマイコンで、A/D コンバータと Wifi 機能が搭載されている。ヘリウム純度計内部で純度表示するための電圧を A/D コンバータ用端子で読みとり、ネットワーク経由のアクセスに対し純度換算した値を提供するプログラムを組むことで、PC のブラウザ等を経由して遠隔監視可能になった。ただし Raspberry Pi Pico のメモリ容量は少ないため、純度変化をグラフ化する場合に別途サーバーにデータ蓄積する必要がある。

4. 謝辞

ヘリウムガス回収について、シーメンスヘルスケア株式会社とアジレント・テクノロジー株式会社のご担当者様、ならびに、生理学研究所生体機能情報解析室の福永教授、同研究所技術課河合主任にヘリウムガス回収に多大なご協力を賜りました。貯水袋の利用について、千葉大学理学部極低温室の吉本技術専門職員にご助言を賜りました。3Dプリンターによる継手製作にあたり、分子科学研究所装置開発室の松尾主任技術員にご協力を賜りました。また、ヘリウム純度計の基板製作にあたり、東京大学物性研究所の土屋技術専門員より回路図を参考にさせていただき、分子科学研究所装置開発室の豊田主任技師に回路設計で多大なご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献 (URL は 2026 年 2 月 13 日現在)

- [1] 宗本久弥、沖縄県での液体ヘリウムリサイクル実施状況、研究基盤 EXPO2025 研究基盤協議会「共創の場」シンポジウム、(2025) https://www.ltc.u-ryukyu.ac.jp/helium_recycle/helium2025jan.pdf
- [2] 中村光輝、他、他機関とのヘリウムリサイクルシステム構築、2025 年度 埼玉大学 機器・分析技術研究会、O-007、(2025)
- [3] ㈱ダイゾー スカイピア事業部 膜材について <https://www.daizo.co.jp/skypia/membrane/membrane.html>
- [4] 早坂洋、大塚洋一「簡単なヘリウムガスモニター」分子科学研究所技術研究会、4-21、(1993)
- [5] 東京大学 物性研究所 低温液化室「ヘリウムガス純度計取扱説明書」
<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/cryogenic/download/pdf/manual.pdf>

福井大学工学部附属超低温物性実験施設における 液化設備のトラブル事例紹介

○小林 英一^{A)}

^{A)}福井大学 工学部技術部

1. はじめに

本学文京地区の工学部附属超低温実験施設にはヘリウム液化機があり、技術部職員3名（兼務）が交代制で液化運転を担当している。

2. 液化設備

本学の液化設備データを表1に示す。特に注記のないものは令和6（2024）年度～7（2025）年度初めにかけて確認した実績値である。

表1 液化設備データ

項目	福井大学 超低温物性実験施設
液化機メーカーと型式	Air Liquide HELIAL SL (H26年3月更新)
液体ヘリウム年間供給量 (液換算) [L]	5813 (R3～R6年度の平均)
回収率 [%]	89.2
液化能力 [L/H]	41.6
液化機クリーニング時間 [H] (運転初日)	7.6
液化機クリーニング時間 [H] (2日目)	3.6
液体ヘリウム貯槽容量 [L]	1,000
長尺(液換算) [L]	1,440
液化機運転頻度 [回/月]	9.7
液化機運転頻度 [回/週]	2～3
液体窒素貯槽 [L]	8,000

3. 液化設備トラブル事例の内容

トラブルは数多く存在するが、今回はその中から3つを紹介および報告する。メーカー側の不注意やミスによるもの、ならびに現時点で原因不明または未対処の事例は除外した。

3-1. ベビコン動作エラー (Err 5)

本学のベビコンは日立製 POD-1.5MNA6CSDX162である。令和5（2023）年5月にエラーが頻発し、動作できなくなった。原因を調査したところ、マグネットスイッチのR相接点がアーク放電で劣化・消失していた。R相接点が導通しない場合、電動機を

動かす際にS相、T相のみ（実質的に単相200V）で動かそうとし、サーマルリレーの閾値7Aを超えてしまい、Err5となっていた。Err5はサーマルトリップを意味するが、本件では温度上昇が原因ではなかった。当初は空気弁を疑っていたが、ベビコン単体の漏れ確認では問題なく空気弁に異常は認められなかった。日立産機の技術者が来訪し、サーマルリレーを交換したことによりErr5は発生しなくなった。

なお、根本原因は計装空気の消費量が増加したことに伴いベビコンの稼働頻度が上がったことと予想されたが、この時点では計装空気の消費量がなぜ多くなったか、原因は特定できていなかった。

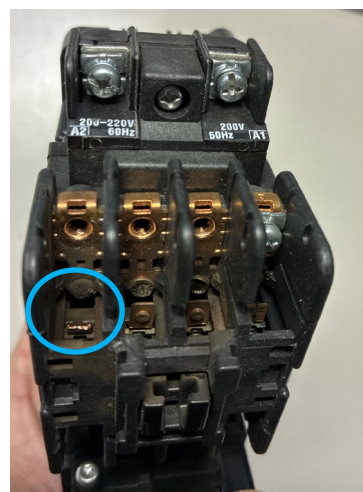


図1 R相の接点が消失したサーマルリレー

3-2. 液化用圧縮機の制御ケーブル修理

本学の液化用圧縮機はKAESER製CSDX162である。令和6（2024）年9月中旬から、液化運転中に不意に液化用圧縮機がアイドリングモードへ移行し、液化運転が緊急停止する症状が始め、徐々に発生頻度が高くなっていった。10月28日にAL技術者が来訪するも、その場で解決はできず、10月末から11月中旬まで、液化運転は全くできなくなっていた。11月13日にKAESER技術者が来訪し、デバッグモードを使った検証により、液化用圧縮機の入力段に位置する電磁弁の制御信号ケーブルが断線しかけていることが判明し、導通が確保される向きに固定する応急処置をした。しかし12月11日に再発し、そ

の後頻発して症状が悪化したため、信号ケーブルの断線が進行したものと判断した。よって、ケーブルの断線部（コネクタ）を切断し、線端に圧着端子（鉛蓄電池用の LTO-41T-187N-8）を付けて電磁弁の端子に直接接続したところ、それ以降、同症状は再現していない。

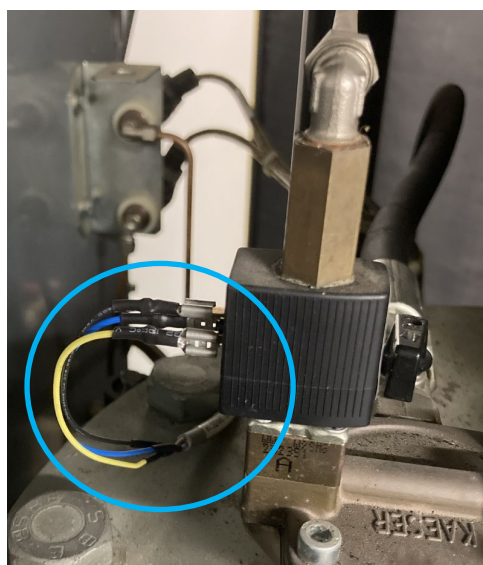
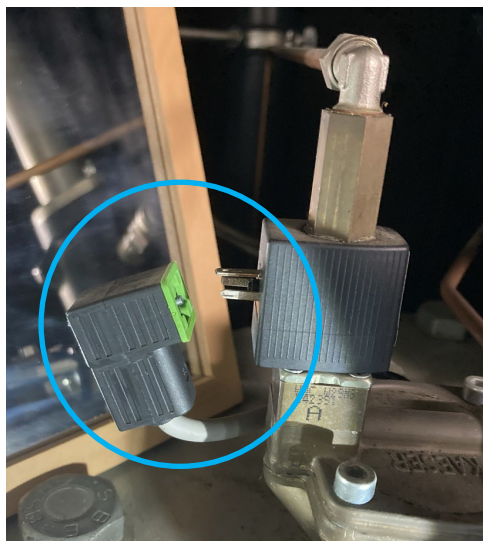


図2 液化用圧縮機の制御ケーブル修理

3-3. 中圧ガス乾燥機のエアー弁の動作異常

本学の中圧ガス乾燥機は東洋テクノ製 DR60D である。窒素ガスによる加熱再生式かつ全自動制御であり、エアー弁の方が電磁弁よりも 2 次→1 次へ逆流しにくいことに加え、2 筒切り替え式であるため、エアー弁が計 11 個も使用されている。

令和 7 (2025) 年 7 月末、B 筒→A 筒の切り替わり時に問題が発生し、B 筒脱圧モードで Close となるべきエアー弁が Open のままとなり、不純ガス入口がガスバッグへ直結する状態となり、ガスバッグレベル異常のサイレンが鳴った。

調査を進めると、2 方弁である KOGANEI 製 110E1-J61-83 (識別番号 3SV-2) からの漏れが大きいと疑われる状況証拠が増えたため、3SV-2 をスペア品と交換した。交換後は 3SV-2 周辺に指を近づけると感じられた空気漏れがなくなり、症状も再現しなくなった。

さらに、ベビコン起動間隔は 3SV-2 交換前の 6:07 から 9:27 へ大きく改善した。結果として、3-1. ベビコン動作エラーで懸案だった、中圧ガス乾燥機でのエアー消費量が大きくなっていた根本原因も除去することができた。

なお、取り外した状態で外観を比較しても、故障品と新品との間に外観上の差異は認められなかった。3SV-2 は計 11 個のエアー弁の中で最も稼働率が高いものだったため、劣化が早かったものと推察される。



図3 2方弁 3SV のエアー漏れ箇所

4. それ以外の問題

液化機本体を構成する Siemens 製シーケンサーの劣化に起因する問題が徐々に増えてきている。外付けで放出弁を追加設置するなどの暫定対応を行っているが、根本解決にはシーケンサーのソフトウェアおよび入出力端子の変更が必要であり、今後の重要課題となっている。

COMET ヘリウム冷凍設備用低温精製器の開発

○藤井 悠輝^{A)}、岡村 崇弘^{A)}、大島 洋克^{A)}、大中 政弥^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 J-PARC センター 低温セクション

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、大強度陽子ビームを用いてミュオンが電子へ転換する希少事象を探索する COMET 実験 (J-PARC E-21) が進行中である。本プロジェクトでは複数の超伝導磁石を冷却する (図 1) ため、ヘリウム冷凍設備が必要となる。その設備で用いるヘリウムガス中の不純ガスを除去するため精製器が必要となるが、市販品は高価であるため、我々は低温精製器を開発した。

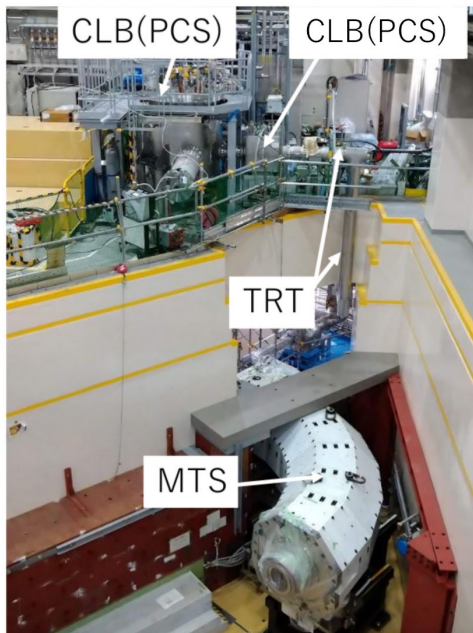


図 1 COMET 実験の冷凍機系

2. 低温精製器

開発した低温精製器 (図 2) は活性炭トラップと熱交換器で構成され、これを既存の液体窒素貯槽に挿入する。液体窒素により活性炭トラップを冷却することで、ヘリウムガス中の不純ガスを活性炭が吸着し、ガスを精製する。

本精製器の開発費は 150 万円以下であり、市販の精製器に比べて大幅なコスト削減を実現した。また、液体窒素供給や活性炭トラップ再生の自動化、複数のセンサー監視により精製試験や運用を行いやすくなったのも、本精製器の特徴である。

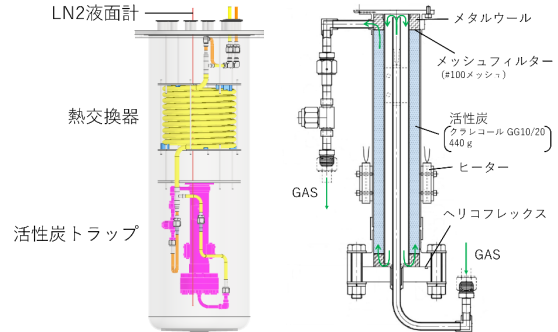


図 2 低温精製器 図 3 活性炭トラップ

3. 精製試験

本精製器の不純物除去性能を調べるため、精製試験を行った。精製試験はヘリウム液化設備の回収ヘリウムを使用して行った (図 4)。

精製時にはバルブ①を調整し、ガス流量を一定に保ちながら精製した。精製開始からしばらくすると活性炭が破過して、精製器出口での窒素濃度が急上昇する (図 5)。精製器出口の窒素濃度が 10 vpm を超えた時点で精製終了とした。精製終了後、液体窒素を抜きヒーターで活性炭トラップを加熱すると、活性炭から不純ガスが離脱し、精製器の内圧が上がる。精製器の内圧が 0.3 MPaG になると電磁弁が開いて不純ガスを大気に放出し、N₂ 流量計で不純ガスを測定する (図 6)。活性炭トラップが常温に戻るまでに N₂ 流量計で測定された値を積算し、精製器の吸着量とした。

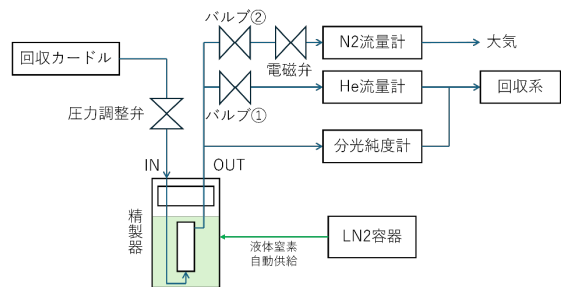


図 4 精製試験フロー図

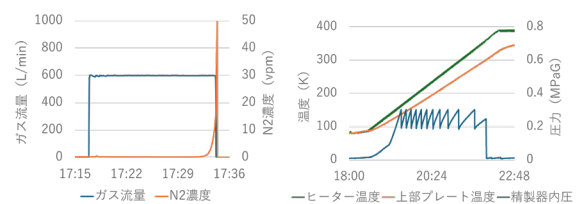


図 5 精製トレンド 図 6 再生トレンド

4. 精製試験結果

精製試験での流量とガスの吸着量の関係を図5に示す。不純ガスの吸着量は、精製時のガス流量 600–700 L/min でピークとなることが分かった。

活性炭トラップ内でガス流速が速いと、ガスと活性炭がよく混ざり吸着量が増える。一方で流速が速すぎると吸着しきれないガスが出てくる。この結果、中間的な流量で吸着量のピークとなったと考える。

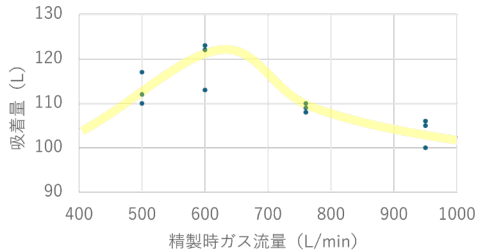


図7 不純ガス吸着量

5. 最大吸着量測定

精製器の最大吸着量を測定した。活性炭が破過し、窒素濃度が上昇した後もしばらくガスを精製器に流し続けた後で、測定した吸着量を精製器の最大吸着量とする。

精製器にガスを流し続けると、活性炭が破過して少し経った後、精製器出口圧力がわずかに上がるということが分かった (図8)。

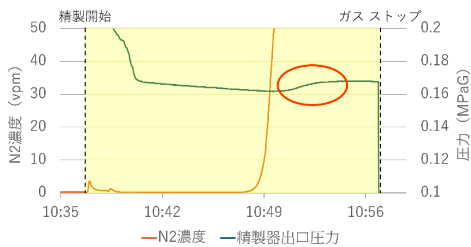


図8 最大吸着量測定

精製時の流量などの条件を変え、最大吸着量を測定した結果が表1である。2回目の測定の際には精製の差圧が大きく、出口圧力が他より低くなっている。3、4回目の測定では破過後の出口圧力上昇を確認し、圧力上昇が落ち着いた時点でガスを止めている。

精製器の最大吸着量は、精製時の流量に寄らないことがわかる。また、破過後の圧力上昇後すぐに止めても、20分流しても吸着量が変わらないことから、圧力上昇した時点で活性炭が完全に飽和したと考える。2回目測定で最大吸着量がわずかに他より少なくなっているのは、精製器内の圧力が他より小さくなっていることも起因していると考えられる。

表1 最大吸着量

精製時流量	備考	最大吸着量
760 L/min	破過後 25分流す	137 L
680 L/min	差圧が大きい	130 L
600 L/min	出口圧力が上がり	137 L
500 L/min	きったら終了	137 L

6. 精製運転

2026年1月中旬に3日程度かけて、本精製器を使用してヘリウム冷凍設備系内の循環精製を行った (図9)。精製運転開始直後には、精製器出口の窒素、水分濃度が 0 vpm であり、精製器が十分に機能していることを確認してから精製運転を行った。精製運転時の冷凍機内窒素濃度の変化を図10に示す。精製開始時には 6 vpm あった窒素濃度が終了時には 0 vpm、2.5 vpm あった水分濃度は 0.0 vpm となり、系内の不純ガスを十分に除去できた。

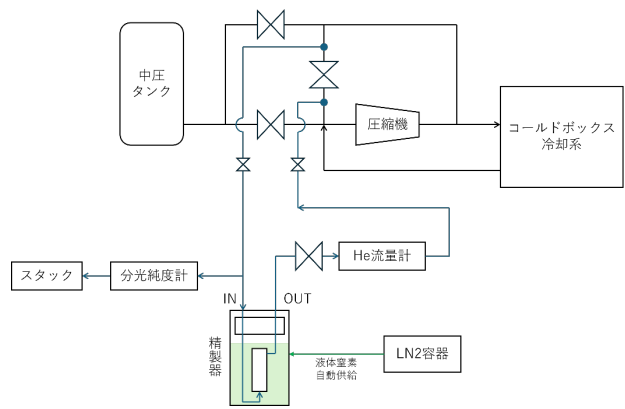


図9 精製運転時フロー図

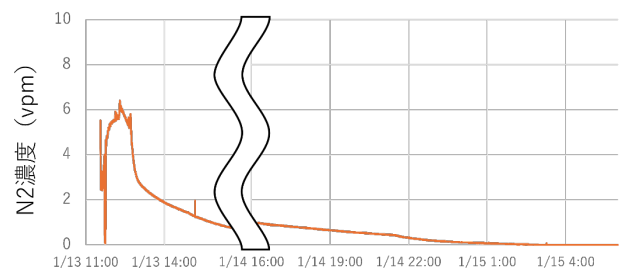


図10 精製運転時 N2 濃度変化

ポスターセッション
第5分野
(情報・ネットワーク技術)

演示実験における構造式の認識と分子モデルの生成

長谷川 浩史

大阪公立大学 杉本キャンパス 納品検収センター

1. はじめに

筆者は、以前、大阪市立大学基礎教育実験棟における基礎化学実験の支援を担当したことがあり、現在も実験棟技術職員の方と共同開発を行っている^[1]。担当した基礎化学実験の支援業務の中に、実験棟施設の見学者への化学実験の演示がある。この業務の担当中に、演示する実験で使用する試薬の分子モデルを生成して見ていただくのも良いのではと思い、量子化学計算プログラムの利用を検討した。演示では、モデルの生成結果の表示だけでなく、量子化学計算プログラムを操作し、生成していくのもよいと思える。その際、試薬名等を音声で入力し操作させると、見学者により興味を持っていただけるのではないかと考え音声駆動について検討を行った^[2]。コンピュータの入力方法には音声以外に、キー、マウス、文字、視線制御等があり多様である。システムは、この多様な入力方法にも対応できることが望ましいと思われる。それで、マウスのワンクリックによる構造式の描画と分子モデルの生成についても報告した^[3]。本報告では、構造式の画像入力と、多様な入力法に対応するシステムの統合について述べる。システムは、フリーソフトにより画像から構造式を認識し、認識した構造式を描画し、分子モデルを生成する。画像からの構造式の認識には、OSRA(Optical Structure Recognition Application)を、分子モデルの生成には、Avogadroを用いている。又、操作を簡単にするために、マウスとキーの操作を記録し再生するフリーソフトのHiMacroExを用いている。

2. OSRAによる構造式の認識とAvogadroによる生成

画像から構造式を認識するソフトウェアとして本報告ではOSRAを利用する。OSRAは、Kekule構造で図示された化学構造をOCR(Optical character recognition)等により読み取り、SMILES(simplified molecular input line entry system)、又は、SDF(Structure

Data File)に変換する。図1は、OSRAに入力する構造式の画像(拡張子.jpg)を示す。この画像は、Ketcherにより描画させ、切り出したものである。図2は、OSRAのwebページの「OSRA Web Interface」のクリックにより、表示されてくるインターフェース画面を示す。操作は、まず、この画面下の「ファイルを選択」をクリックする。画像ファイル選択画面となり、ファイルを指定する。指定したファイル名は、「ファイルを選択」の右側に表示される。「submit」のクリックで認識処理が開始され、処理が終了すると、Edit Structureに認識された構造式が描画される。「Get SMILES」のクリックによりSMILES記法に変換される(図2下部)。これをコピーし、Avogadroのツールバーの「Build」「Insert」「Smiles」を選択後、貼り付ける。分子モデルが生成される(図3)。同様にKetcherで他の構造式を描画させたものについても認識できている。

3. マウスとキー操作の記録と再生

音声認識やマウスのワンクリックのシステムでも用いたHiMacroExを本報告でも用いる。HiMacroExは、マウスやキーの操作をマクロ命令で記述し記録する(テキストファイル)。記録内容は、編集が可能で、待ち時間の調節、プログラムの起動、アクティブウインドウの指定、テキストボックスへの文字の入出力等の機能を持ち、変数も利用できる。HiMacroExは、図4の基本画面の「記録」と「終了」ボタンのクリック間のマウスとキーの操作を記録する。この記録を、「保存」のクリックでテキストファイルとして保存する。「読込」は、テキストファイルに記録した内容をHiMacroExに読込。「再生」のクリックにより、記録した操作を再生する。マクロ命令列を編集し、OSRAへ入力する画像選択のために再生の開始から待ち時間を設定している。画像の選択後の操作は、HiMacroExで自動再生される。そのため

に、演示者等の操作は簡単になる。

4. 多様な入力法に対応するシステム

これまで音声、マウス、画像を入力として構造式を描画し、分子モデルを生成するシステムについて報告してきた。これらを別々のシステムではなく一つのシステムに統合する。理由は、多様な入力法に対応できると、見学者により興味を持っていただくと考えられるからである。その統合システムの構成を図5に示す。音声や画像入力には、認識技術が必要である。画像入力では、カメラからの直接入力とマウスや音声による選択との組合せがある。本報告では、マウスとの組合せを用いている。認識された、又は、マウスで選択された試薬の構造式が、OSRAやKetcherで描画され、Avogadroにより分子モデルが生成される。描画と生成は、HiMacroExを用いた再生である。

5. おわりに

構造式の画像からの認識、描画、分子モデルの生成についてと、音声、画像、マウス入力を統合したシステムについて述べた。システムは、フリーソフトと自作のプログラム等からなり安価である。又、HiMacroExの再生機能を利用していることから操作が簡単になり、個々のソフトの操作に慣れていない方でもシステムを使用することが容易になる。この機能は、マウスカーソルの動きのトレースと、機能表示の時間を長くする等のマクロ命令列の編集により、操作の学習にも応用できると考えられる。

参考文献

- [1] 長谷川浩史、電子回路シミュレーター、2025埼玉大学機器分析技術研究会要旨集、74-75、2025
- [2] 長谷川浩史、音声認識を用いた量子化学計算プログラム、生理学・生物学合同技術研究会報告集、70-71、2017
- [3] 長谷川浩史、演示実験における構造式の描画と分子モデルの生成、生理学・生物学合同技術研究会報告集、114-115、2025

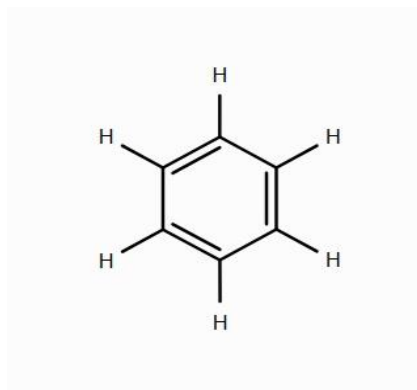


図1 構造式画像

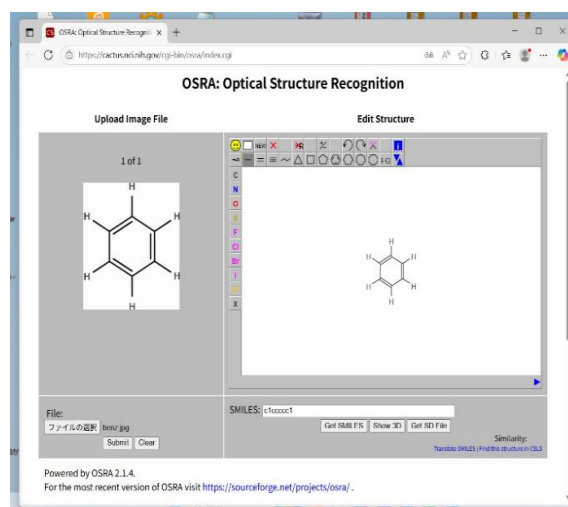


図2 OSRAによる認識

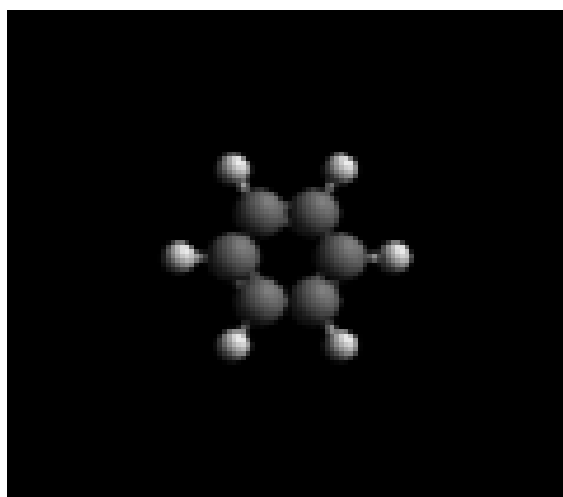


図3 Avogadroによる生成

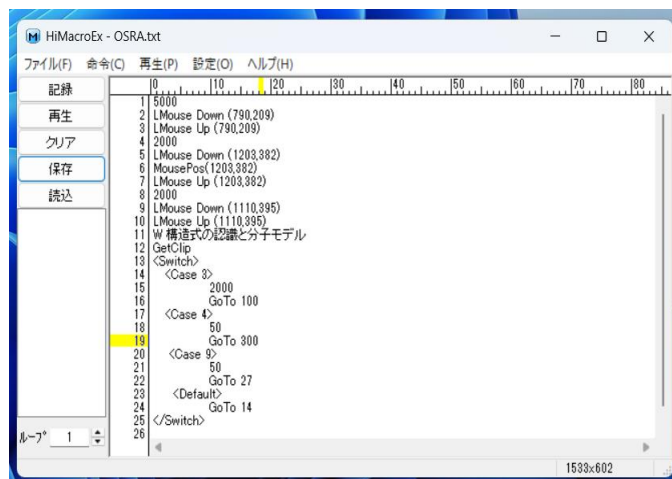


図 4 HiMacroEx の基本画面とマクロ

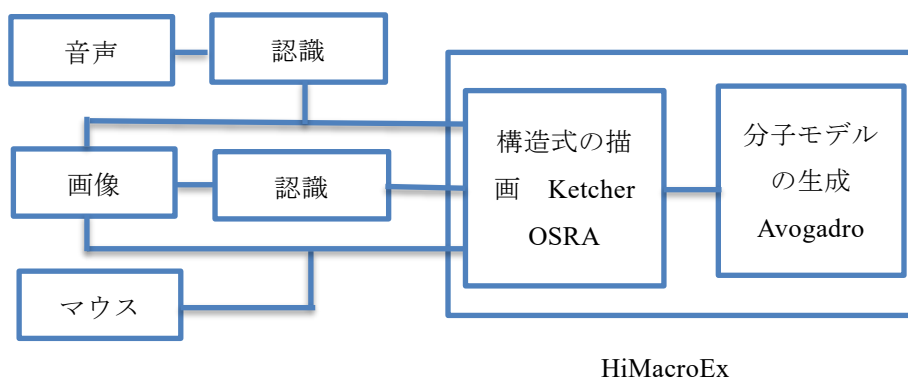


図 5 統合システム

Google Workspace アカウント管理について

○吉岡 昌雄^{A)}

^{A)}熊本大学 研究開発戦略本部

1. はじめに

熊本大学工学部情報電気工学科では、学科計算機システムの一部に Google Workspace^[1]を利用しています。本システムを導入するにあたり、アカウント登録を行いました。登録は既存システムで動作している LDAP 認証からデータを生成し、GoogleAppsScript を用いることで登録作業を省力化しました。登録に際して検討した内容について報告します。

2. Google Workspace とは

Google Workspace とは Google が提供する教育機関向けの無料クラウド型学習プラットフォームで Gmail, Drive, Meet, Classroom など様々なサービスを利用することができます。本学科計算機システムでは、既存のサービスに Google Workspace を追加することで学生の教育に利用しています。

3. アカウント登録

アカウント登録は、既存システムで運用している LDAP 認証からユーザ情報を生成して行いました。登録したデータ項目は

- 氏名
- メールアドレス
- パスワード
- 学生番号
- 所属

です。登録の概略を図 1 に示します。

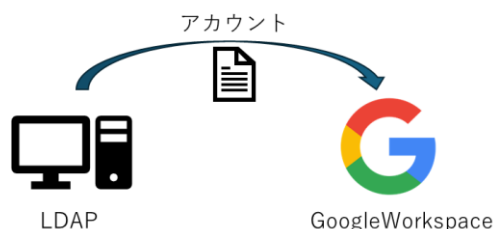


図 1 アカウント登録

4. 登録時に検討した内容

アカウント登録を行う際、事前に以下の項目について検討しました。

1. どのような登録方法があるか
 2. アカウント重複について
 3. 初期パスワードの配布方法
 4. メーリングリストの運用について
- それぞれ説明していきます。

まず登録方法についてです。登録するにあたり、どのような方法が考えられるか検討しました。一つ目は登録作業の代わりにアカウント同期を行う方式です。アカウント同期を用いれば登録作業が不要となり、運用面の負担が軽減されます。同期方法は Google Cloud Directory Sync(GCDS)を用いることで可能となります。GCDS を使用すると Google アカウントを Active Directory や LDAP と同期することができます。しかし今回のケースでは、既存 LDAP 認証システムに変更が必要となるため、事前テストが難しい事に加え、移行対象は既存アカウントのうち特定の条件に当てはまるユーザになるため、同期で実現することが難しく候補から除外しました。結局、同期ではなく登録データを生成し Google Workspace に流し込む方式を採用しました。



図 2 アカウント重複

二つ目のアカウント重複についてです。登録するメールアドレスが、すでに個人用 google アカウントとして利用されている場合、図 2 のようにアカウント重複の問題が発生します。移行作業の最初に管理対象外で自組織ドメインのメールアドレスが使われ

てないかを確認する必要があります。この問題は Google Workspace の管理者ツール^[2]を用いることで確認することができます。今回は幸いに対象となるアカウントはありませんでした。

三つ目は初期パスワードの配布方法についてです。初期パスワードの配布はアカウント作成時の悩みの一つです。大学では4月に大量のアカウントを作成するため、パスワード配布は、確実かつ簡単に行う必要があります。連絡方法は紙配布による通知方法や全員が同じパスワードにする方法などが考えられますが、セキュリティや管理者の負担を考量し、今回は MoodleLMS^[4]による通知機能を用いることにしました。初期パスワード配布の問題の一つが大学に不慣れな新生入生にどのように通知するかです。その点 MoodleLMS は新生入生も入学後すぐ操作方法を習うため、パスワード周知を行う際、管理者に新たな負担なく周知することができます。

四つ目はメーリングリストの運用についてです。これまでは SMTP サーバのエイリアスによってメーリングリストを運用してきましたが、Google Workspace に移行したため、この機能が使用できなくなりました。そこで Google Workspace のグループ機能を利用して実現しました。メーリングリストメンバは既存 LDAP の情報から抽出し作成しました。

5. 作業の手順化

登録作業が進むにつれ、当初の想定より作業が煩雑になっていきました。また学生アカウントの登録という性質上、一度作業すると次に登録作業を行うまでしばらく期間が空いてしまい、作業内容を思い出すのに時間を要するようになりしました。そこで登録作業を手順化しマニュアル化しました。マニュアル化するにあたりできるだけ属人化できるように心がけました。

マニュアルは全部で7編作成し、全てではありませんが、手作業の個所を Google Apps Script を使い自動化しました。Google Apps Script とは Google サービスを自動化するスクリプト言語です。今回は「初期パスワード生成」「メーリングリスト登録」「アカウント登録」をスクリプト化しました。作業を自動化することで、手作業によるミスを減らすことができました。

6. アカウント削除

アカウント管理には、削除も含まれます。アカウントを削除する場合 Google Workspace で利用しているデータも消失するため、注意が必要です。特に、

削除対象が共有しているファイルや、グループのオーナーになっている場合は、アカウントが削除されるとデータにアクセスできなくなるため、移行を含め慎重な対応をする必要があります。今回、削除の方針は次のようにしました。

まず、卒業など既存 LDAP から削除されると、アカウントをロックし所属を変更します。一定期間経過した後に Google Workspace から削除します。また削除前に、利用者に対してアカウント削除についての注意を周知して、データ移行など必要な作業を事前にすませるよう案内します。この周知は卒業など削除予定者だけではなく、研究室在学学生や教職員にも行います。広く周知することで、意図しないデータ削除のリスクを減らすことができます。

7. まとめ

今回 Google Workspace を導入するにあたり既存 LDAP からアカウントを抽出し登録しました。登録作業は煩雑でしたが、Google Apps Script を用いるなど自動化を図り運用を省力化することができました。また作業内容を手順化し属人化したマニュアルを作成することで、登録ミスの軽減につながりました。

参考文献

- [1] <https://workspace.google.com/intl/ja/>
- [2] <https://admin.google.com/>
- [3] <https://moodle.org/>

静的 IP アドレス設定の有無を簡易判定する Web アプリケーションの作成

○金城 行真^{A)}

^{A)}自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部

1. 背景

分子科学研究所(以下、分子研)内の端末情報の管理は、DHCP サーバと連携した専用の管理システムによって運用されている。端末の IP アドレスを変更する場合、当該端末が DHCP 設定であれば、管理システムの WebUI 上で編集することで端末側の設定値も更新される。

一方、端末側で静的 IP アドレス設定が有効化されている場合はその限りではない。この場合、管理システム上の編集に加え、利用者に対して端末の設定変更を依頼する必要が生じる。また、SSID を所内無線ネットワークから別のネットワーク(eduroam 等)に切り替えた場合、端末が切り替え前の IP アドレスを保持し続けることで通信不能に陥る、といった課題も存在する。

管理者側としては、静的 IP アドレス設定の有無を遠隔から判定できることが好ましい。しかし、実際は管理者がユーザの元へ出向き、端末側の設定を直接確認していた。従って静的 IP アドレス設定に起因する通信不能などのトラブルが発生した場合、原因の特定までに時間を要し、管理者・利用者双方の負担となるケースが散見されていた。

そこで、端末の IP アドレス及び MAC アドレスを予め収集したデータと照合し、静的 IP アドレス設定の有無を簡易的に判定する機能を開発した。更に本機能を Web アプリケーションとしてデプロイした。考案した判定方法や技術的構成、実際の使用ケースについて報告する。

2. 静的 IP アドレス設定の判定方法

分子研の所内ネットワークにおいて、端末が IP アドレスを取得する手法は、DHCP による自動割り当て、もしくは静的 IP アドレス設定のどちらかに限定される。DHCP を利用する場合、端末(DHCP クライアント)は LAN 上に DHCPREQUEST メッセージを送出する。これは、一度 DHCP サーバから IP アドレスのリースを受けた端末が、リースの更新(延長)を要求する場合も同様である。つまり、DHCPREQUEST の送付状況を、当該端末における静的 IP アドレス設定の有無を判定する指標として活

用できる。

また、現行のネットワークの設計上、LAN に接続した端末が他端末と通信する際、各棟に配置されたフロアスイッチを経由する。そのため、あるタイミングでどの端末がネットワークに参加しているかは、フロアスイッチが保持する MIB 情報(Management Information Base) から把握することが可能である。

従って、ある端末から DHCPREQUEST が送われておらず、かつフロアスイッチ上で当該端末の接続を示す MIB 情報が取得できた場合、その端末は DHCP を介さず IP アドレスを保有している。すなわち、静的 IP アドレス設定が施されていると判定できる。

3. バックエンドの作成

以上の方針を定めた後、判定システムの構築に着手した。まず、判定材料となる DHCP ログ(DHCPREQUEST)及びフロアスイッチへの接続情報を収集・管理するバックエンド環境を設計した。DHCP ログについては、既存のログ収集サーバに集積されているデータから DHCPREQUEST メッセージのレコードを抽出し、データベース(MariaDB)に格納することにした。一方、フロアスイッチへの接続情報については、各スイッチに対して snmpwalk を実行し、現在接続されている端末の IP アドレス及び MAC アドレスを取得し、同じデータベースに格納する手法を採った。

システム基盤として、Rocky Linux 9.7 で稼働する仮想マシンを構築し、MariaDB 10.5.29 をインストールした。データベース内には、DHCP ログ用および SNMP データ用のテーブルをそれぞれ作成した。各データの収集・登録処理には、OS 標準の Python 3.9 を用いてスクリプトを実装した。加えて、保持期間が 1 年を経過した古いレコードの削除や、テーブルの最適化などを行うデータベース保守用スクリプトも併せて Python3.9 で実装した。これらのスクリプトは、systemd.timer を用いて定期的に自動実行されるよう構成している。

以上の実装により、静的 IP アドレス設定の判定に必要な情報を、一元的に収集・管理するバックエン

ドの仕組みが完成した。

4. フロントエンドの作成

続いて、収集したデータベース内のレコードへ Web ブラウザ経由でアクセスし、静的 IP アドレス設定の判定を行うためのフロントエンド環境を構築した。

Web フレームワークには Django を採用した。Rocky Linux 9 の標準パッケージ(dnf)で提供される Django 3.2 は旧バージョンであったため、長期サポート(LTS)対象である Django 5.2 系の導入を決定した。しかし、Django 5.2 系は Python 3.10 以降を要求するため、OS デフォルトの Python 3.9 環境とは分離し、venv を用いて Python 3.11 の仮想環境を新たに構築した。その上で pip により Django 5.2.7 をインストールしている。その後、Django の関連ファイル (views.py 等) を編集し、ローカルの MariaDB から DHCP ログおよびフロアスイッチの接続情報を検索する機能を開発した。

WebUI の構築においては、視認性と操作性を高めるため CSS フレームワーク Bootstrap の拡張ライブラリである django-bootstrap5 を導入した。また、本番環境の Web サーバとしてのデプロイは Apache 2.4.62 上で実施した。

完成した WebUI を図 1 に示す。

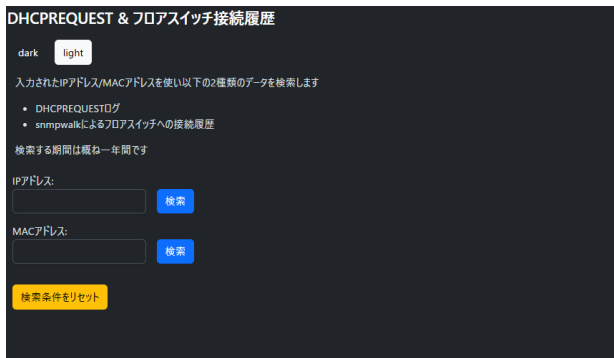


図 1 Web アプリケーションのフロントページ

利用者がフロントページのフォームに IP アドレスまたは MAC アドレスを入力して検索を実行すると、バックエンドで各テーブルへの照会が行われる。その検索結果(DHCP ログと接続情報の有無)に基づき、以下の 4 パターンのいずれかの判定結果が画面上に表示される仕組みとなっている。

- 両方のログがヒットした場合、DHCP 設定で IP アドレスを取得していると判定する。
- フロアスイッチへの接続情報のみがヒットした場合、静的 IP アドレス設定の可能性が高いと判定する。

- DHCPREQUEST のログのみがヒットした場合、ネットワーク上に端末が存在しないにもかかわらず DHCP 要求の記録があるため、データベースの収集に不整合が生じていると判定する。
- 両方のログがヒットしない場合、ネットワーク未接続、または端末の電源がオフである等の理由により、判定不能とする。

ある IP アドレスで検索し、静的 IP アドレス設定と判定された際の様子を図 2 に示す。



図 2 静的 IP アドレス設定と判定される例

5. 実際の使用ケース

分子研のネットワーク環境では、1つの部門(研究グループ等)に VLAN を1つ割り当て、/24 で切る構成が標準的である。しかし、特定の部門において IoT 機器の接続台数が増加しており、割り当てられた IP アドレス空間が枯渇する懸念が生じていた。

この問題を回避するため、当該部門へ追加の VLAN を割り当て、利用可能な IP アドレスを拡張することとした。しかし、単純に新規端末を追加 VLAN に収容した場合、既存 VLAN に属するプリンタ等のブロードキャストが新 VLAN の端末へ到達しない、といった運用上の課題が予見された。そこで、日常的に使用する PC やプリンタ等を一斉に新 VLAN へ移行し、IoT 機器等を既存の VLAN へ残留させ、新規端末はその性質によって所属させる VLAN を割り振るセグメント分離運用を実施することとした。このネットワーク環境の更新に伴い、新 VLAN へ移行する端末において IP アドレスの変更作業が必要になった。

移行作業に先立ち、対象となる端末群に対して開発した Web アプリケーションを適用し、静的 IP 設定の有無を事前に判定した。その結果、数台の PC、プリンタ、および NAS において静的 IP アドレスが設定されていることを検知できたため、該当機器の利用者へ事前に情報共有と注意喚起を行った。運用

上の事情により、これらの機器を事前の段階で DHCP 設定へ変更することは見送られた。しかし、「どの端末で静的 IP アドレス設定に起因するトラブルが発生しうるか」を事前に把握できていたため、移行時のトラブル発生に対して、原因の切り分けや復旧対応をスムーズに行うことができた。

結果として、冒頭で課題として挙げた「原因特定に長時間を要し、管理者・利用者双方の業務負担となる」事態を回避することができ、実運用における本システムの有効性を確認できた。

6. 謝辞

この Web アプリケーションを作成するにあたり、岩橋建輔氏、神谷基司氏、内藤茂樹氏、長屋貴量氏（以上、分子研）に技術面・運用面での多数の助言という形でご協力いただいた。ここに深く感謝の意を表す。

計算科学センターにおける低周波騒音による影響と対策

○前田 裕文^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設

1. KEK と計算科学センター

高エネルギー加速器研究機構（KEK）は大型粒子加速器を使って、素粒子・原子核、物質や生命の研究を推進する研究所で、つくばと東海にキャンパスがある。東海キャンパスには、日本原子力研究開発機構（JAEA）と KEK が共同で建設・運営を行っている研究施設である、J-PARC がある。KEK 計算科学センターは、KEK-LAN と JLAN（J-PARC の基幹ネットワーク）を擁する機構ネットワークや、中央計算機システム（KEKCC）、スーパーコンピュータシステム、電子メール・Web システムといった情報システムの運用だけでなく、データ解析環境を構築するための開発・評価や、Geant4^[1]と呼ばれている放射線シミュレーションの開発など計算科学の研究を行うことにより、加速器科学の研究を支えている。

計算科学センターのヘルプデスクが運用管理室であり、上記システムの質問や相談を電話とメールで受け付けている。夜間や休日は遠隔のサポート窓口に転送される。

今回の内容は、つくばキャンパスの設備に起因すると思われるものである。

2. 労働安全衛生上の問題

2024 年 8 月ごろ、その室員複数名が頭痛などの体調不良を訴えた。状況を把握するため、運用管理室の室員へ聞き取りをしたり、室員が残した体調不良の記録の提供を求めたりした。飛行機や新幹線に乗っている時のゴーというような音が聞こえたり、頭部周辺で膨満感を覚えたりしたことが分かった。

3. 原因の追及

安全衛生推進室に環境音の録音と解析を依頼し、室員が運用管理室の部屋と隣の講習室の中で、スマートフォンで環境音を録音し、解析した。その結果、低周波音が含まれていることが分かった。低周波音は、人の話し声や車やバスなどのエンジン音などに含まれる、1[Hz]～100[Hz]の周波数の音である。その影響は大きく二つあり、不快感や圧迫感などの人への影響（心身に係る影響）と窓や戸の揺れなど建具への影響（物的影響）である。一例として、10m 離

れた家庭用灯油ボイラーの音のため不快感により眠れないという苦情とその対処が示されている。^[2]

体調不良の報告と環境音の解析の結果、産業医からの助言を踏まえ、体調不良を訴える者の就労場所を変更した。最初の報告から 1 ヶ月後、運用管理室の室員から、電気室の前や中で症状が悪化するととの報告を受けた。図 1 に運用管理室の部屋と電気室の位置関係を示す。電気室には変圧器などの電気設備があり、それらが発生した熱を排熱するための排気ファンが天井に設置されている。その稼働音が運用管理室の部屋に建築物を伝播していた可能性を考え、電気室と変電室を仕切る扉を開放したところ、症状は和らいだと聞いた。

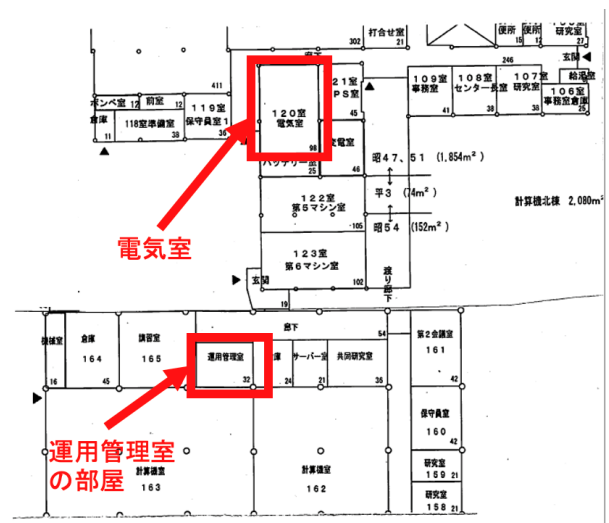


図 1 運用管理室の部屋と電気室の位置

4. 電気室の排気ファン

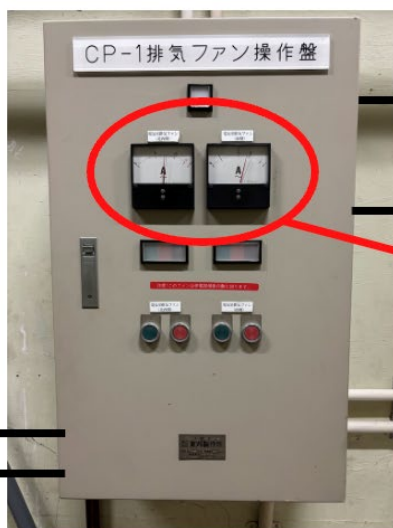
体調不良の報告時、電気室の排気ファン 2 台（1 台は北西側、もう 1 台は南側）が同時に稼働していた。2 台が同時に稼働した場合に騒音が発生していたが、1 台だけ稼働した場合には発生していなかったとの報告も受けた。

施設部が電気室を管理しているため、排気ファンの異常や運用状況の調査を依頼した。南側の排気ファンに異音が発生しており、修理が必要であった。このほか、これまで 2 台の排気ファンは定期的な点検や設置後の部品交換も行われてこなかったことも

ファンのサーモスイッチ
しきい値温度: 0~60°Cの範囲で可変
しきい値は25°C
運転モード(切/自動/連続)切替可能
ファン(北西側) ファン(南側)



2024年9月、2台の排気ファンは稼働していた。
変電室(電気室の隣室)の扉は閉まっていた。



CP-1排気ファン操作盤

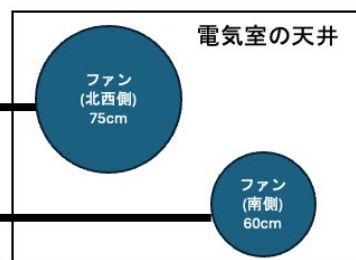


図2 電気室の排気ファンの仕組み

分かった。

図2に電気室の排気ファンの仕組みと状態を示す。排気ファン1台ごとにサーモスイッチがあり、室温がしきい値(25°C)を超えると自動的に作動するようになっている。

5. 低周波音の測定

2024年10月、安全衛生推進室員が運用管理室の部屋で精密騒音計を用いて、以下の条件で低周波音を測定した。北西側の排気ファンを排気ファンA、南側の方をBとし、電気室と変電室の間を開放した場合と閉めた場合それぞれ以下の4パターンで行った(計8パターン)。

- 排気ファンA: ON, 排気ファンB: ON
- 排気ファンA: ON, 排気ファンB: OFF
- 排気ファンA: OFF, 排気ファンB: ON
- 排気ファンA: OFF, 排気ファンB: OFF

その結果、全てのパターンで低周波音が観測されたが、扉を閉めて2台のファンを稼働させた場合、最大だったことを確認した。

6. 対応方針の検討と実施

これまでの調査を受けて、2つの対応方針を検討した。1つは電気室の排気ファン2台を新品に交換

すること、もう一つは運用管理室の部屋を移動することである。作業の安全を確保するため、排気ファンの交換はつくばキャンパスにおける夏季の機構全所停電時に限定される。それまで症状が酷い人のみの一時的な就労場所変更を続けるわけにもいかないため、運用管理室の部屋を変更することを検討したり、移動候補先で症状が発言しないかの現地を確認したり、部屋の管理者への使用許可を得たりした。結局、2025年度の機構全所停電期間のうちの一日に排気ファン2台を交換した。

7. 実施後の効果

電気室の排気ファンの交換後、2台同時に稼働させたところ、体調不良の報告を受けなくなった。また、安全衛生推進室の室員が交換前と同様の条件で、2025年12月に低周波音を測定した。図3に排気ファンの交換前後の測定結果を示す。全体的には数[dB]音が大きくなったものの、100Hz以下の成分の音の大きさは、2[dB]程度小さくなっていること(太い枠内の波打った2本の線で、破線が交換前の測定結果、実線が交換後の測定結果)を確認した。しかし、低周波音による人体への直接的な影響の評価を行っておらず、測定時期が稼働期ではないこともあり、今後の稼働期に、同様の症状が再現しないか注視することが必要だと考えている。

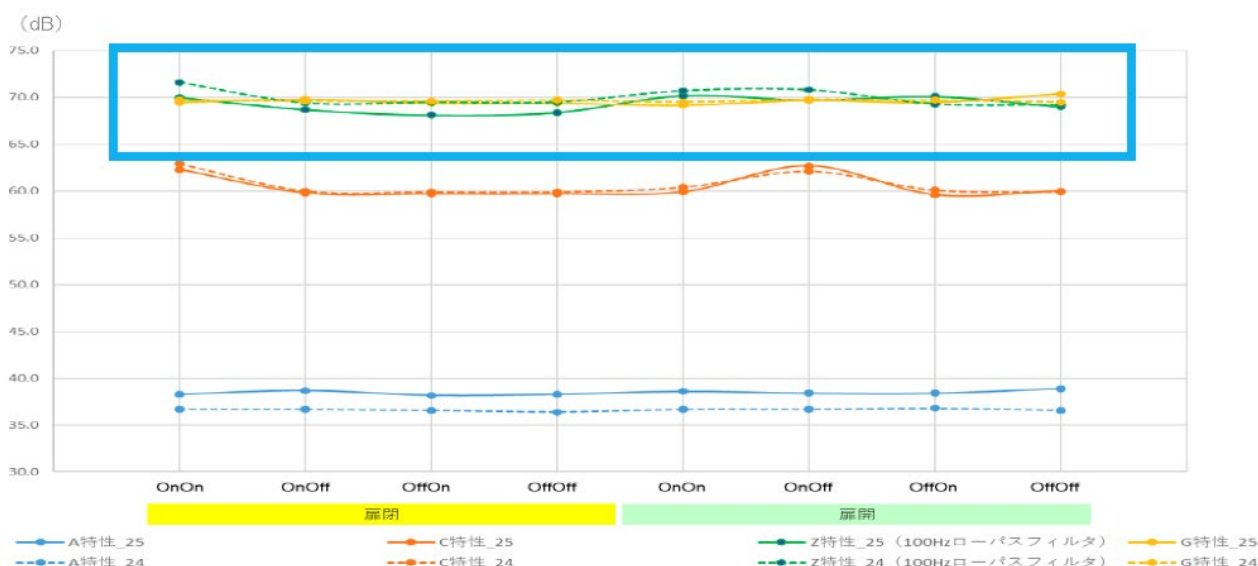


図3 排気ファン交換前後の低周波音の測定結果

8. まとめ

安全衛生上の問題と思われる体調不良が発生した。運用管理室の複数の室員からの情報提供により、体調不良の原因が絞られた。電気室の排気ファンの故障によって発生した低周波音が原因と推定された。しかし、排気ファンは稼働中の電気設備の直上にあるため、即時に交換できなかつた。排気ファンが稼働している間も症状が酷い人は別室で業務に従事した。排気ファンの交換後、体調不良の報告は聞かれなくなった。また、交換後の低周波音は、交換前と比べて減弱していることを確認した。安全衛生推進室と施設部と連携し、就業環境を改善し、継承を目的として資料を保存した。今後、他部署と密接に協議を重ねたり、計算科学センターの部屋の温湿度などの環境のリアルタイムな監視や設備の把握に努めたりしていきたい。

9. 謝辞

安全衛生上問題と思われる体調不良に対処するため、可能な限りの情報を提供してくれた運用管理室の皆さまと環境の録音など調査に協力して頂いた安全衛生推進室の皆さま、施設部の皆さま、交換作業に従事された皆さま、同じ施設担当としてサポートして頂いた松永浩之研究機関講師、多面的にご支援頂いた計算科学センター長中村智昭教授、本報告の準備にお付き合い頂いた金子敏明名誉教授にこの場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] <https://www.geant4.org>
- [2] よくわかる低周波音, 環境省水・待機環境局大気生活環境室
<https://www.env.go.jp/air/teishuha/yokuwakaru/full.pdf>

参加機関及び参加人数

【大学】

機関名	口頭	ポスター	聴講	合計	
岩手大学			2	2	
東北大学			2	2	
秋田大学	2			2	
宇都宮大学			1	1	
埼玉大学			1	1	
千葉大学	1		1	2	
筑波大学			1	1	
電気通信大学			1	1	
東京大学	2		3	5	
東京科学大学	1	1		2	
金沢大学		1		1	
福井大学		1		1	
名古屋大学		1	6	7	
名古屋工業大学			4	4	
京都大学			3	3	
大阪大学	2		4	6	
大阪公立大学		1		1	
神戸大学			1	1	
岡山大学			2	2	
徳島大学			1	1	
九州大学	1		2	3	
九州工業大学		1		1	
熊本大学		2	2	4	
琉球大学	1			1	
機関数計	24	10	8	37	55

【研究機関】

機関名	口頭	ポスター	聴講	合計	
国立天文台			1	1	
宇宙科学研究所	1			1	
高エネルギー加速器研究機構	4	15	16	35	
量子科学技術研究開発機構	1	1	1	3	
核融合科学研究所	3	4	37	44	
分子科学研究所	4	2	11	17	
機関数計	6	13	22	66	101

【高等専門学校】

機関名	口頭	ポスター	聴講	合計	
釧路工業高等専門学校	1	1		2	
一関工業高等専門学校	1			1	
豊田工業高等専門学校		1		1	
機関数計	3	2	2	0	4

【総計】

機関数	口頭	ポスター	聴講	合計
33	25	32	103	160

【分科会別講演数】

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

あとがき

技術研究会副実行委員長 野村吾郎

令和7年度核融合科学研究所技術研究会は、令和8年3月5日、6日の2日間にわたり、多治見市産業文化センターにて現地開催という形で実施することができました。核融合科学研究所主催の技術研究会としては、前回の令和3年度が新型コロナウイルス感染症の影響によりオンライン開催となったため、対面形式での開催は平成29年度以来、実に8年ぶりとなります。開会前に参加者同士が挨拶を交わす様子や、休憩時間や情報交換会で自然と会話が弾む光景を見ていると、オンラインではなかなか味わえない現地開催ならではの空気を改めて感じました。あちらこちらで交流が生まれている様子を目にするたび、「これが技術研究会の風景だな」としみじみ思ったのが印象に残っています。

今回の技術研究会では、5つの技術分野で口頭発表とポスター発表を行うとともに、技術部で毎年実施している「有限要素法による解析技術」をテーマとした技術交流会も開催しました。本研究会への参加を通じて、日頃取り組まれている業務の課題解決や改善のヒント、あるいは新しい取り組みのきっかけなど、何か一つでも持ち帰っていただけるものがあつたなら、主催者としてこれほど嬉しいことはありません。また、この場で生まれた交流が今後につながっていくことを願っています。

一方、運営の面では、この8年の間に技術部職員の約2割が現地開催の運営を経験していない状況でした。さらに、受付でQRコードを利用するなど新しい運営方法の導入や、物価上昇など環境の変化もありましたが、技術部職員全員の協力のおかげで無事に開催することができました。

最後になりますが、本技術研究会の開催にあたりご協力・ご支援を賜りました核融合科学研究会、核融合科学研究所の研究部・管理部をはじめとする関係者の皆様に、この場を借りて心より御礼申し上げます。

技術研究会実行委員	実行委員長	鈴木直之	
	副実行委員長	野村吾郎	
	実行委員	野口博基	千村大樹
		佐藤 守	橋本茂弘
		大砂真樹	神田基成
		鷹見重幸	野々村美貴
		清水貴史	