

KEK Proceedings 2022-4

February 2023

A/H/M/R/D

技術交流会・技術セミナー報告書

Proceedings of the Meetings on the Engineering Study and Engineering Seminar at KEK

KEK, Tsukuba, Japan

November 17, 2022

October 27, 2022

September 12, 2022

編集

川村 真人、藤田 陽一、武藤 史真、中村 惇平、
南茂 今朝男、片桐 広明、小笠原 舜斗、長畔 誠司

Edited by

M. Kawamura, Y. Fujita, F. Muto, J. Nakamura,
K. Nanmo, H. Katagiri, S. Ogasawara, S. Nagaguro



High Energy Accelerator Research Organization

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2023

KEK Reports are available from :

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi
Ibaraki-ken, 305-0801
JAPAN

Phone: +81-29-864-5137
Fax: +81-29-864-4604
E-mail: irdpub@mail.kek.jp
Internet: <https://www.kek.jp>

技術部門連絡会議

技術調整役 橋本 義徳

第 37 回の技術交流会が令和 4 年 11 月 17 日に開催されました。かつての高エネルギー物理学研究所時代から続いている技術職員を中心にした交流を行うイベントです。技術職員の業務への取り組みを機構内に発信していくものです。コロナ禍でここ 3 年はオンライン開催でした。今回はようやく本会場と zoom というハイブリッド開催となりました。オンライン時代よりも多い 137 名の方々が参加しました。会場の小林ホールには、登壇者をはじめ 36 名が集まりました。特に発表時間の緊張感や、登壇者の意気込みなどが感じられ、会場の雰囲気というのは PC の画面越しとは大きく違います。同じ場所で一緒に考えるという時間を共有する良い機会となりました。

今回は、「KEK の研究を加速する技術力」というテーマでした。加速する技術力という言葉は、推進力と躍動を感じさせます。Keep Accelerating という KEK のキャッチコピーにもなっているテーマにも通じます。KEK では、大型の加速器を用いた素粒子・原子核・物質・生命における多種多様な物理実験が、共同利用という形で行われています。ここで技術力はエッセンシャルな要素です。研究を加速するには、研究基盤となる安定した技術力と、新しい研究に発展させる技術力が必要になります。加速器、そしてそのビームを使う実験の技術は、基本的な工学分野をほぼカバーするような広範な領域に展開されています。加速器を中心とする実験装置においては、一人ひとりがいくつもの分野にその技術を展開していることがごく普通に行われています。それらの広範な技術が、安定な共同利用実験の遂行という形に集結されていることが KEK 技術職員の業務の特徴といえると思います。そして、KEK では、世界に伍する先進の実験を開拓するために、さらなる技術展開も要求されています。KEK の「無いなら作ってやろう」という文化が、これらの原動力と言えると思います。日頃の業務で培った技術と経験を次につなげていく、そして若い人たちにそのスタイルや新たな技術を学んでいただく、このような好循環につなげていきたいものです。

末筆となりましたが、技術交流会の企画と開催をしていただいた実行委員会のみなさま、そしてご参加いただいた多くのみなさまに感謝いたします。

令和4年度 技術交流会・技術セミナー報告集

技術交流会テーマ「KEKの研究を加速する技術力」

日時：令和4年11月17日（木）13:30 ～ 16:45

場所：KEKつくばキャンパス 研究本館 小林ホール（zoom とのハイブリッド）

<プログラム>

13:30 開会、令和4年度 新人紹介：5名

成田 千春（物構研）、沼井 一憲（加速器）、結束 汐織（加速器）、
伊藤 史哲（加速器）、津金 聖和（共通・放）

13:40 採用2年目の活躍報告：5名

金山 高大（素核研）、片岡 竜馬（物構研）、佐々木 知依（加速器）、
塩澤 真未（加速器）、伊藤 雄平（共通・機）

14:55 休憩

15:05 テーマ発表：「KEKの研究を加速する技術力」

牧村 俊助（素核研） 「「技術」と「人」と「お金」をめぐる戦略」
三浦 一喜（加速器） 「J-PARC MR 主電磁石システムの高繰り返し化対応」
岩田 宗磨（加速器） 「J-PARC MR 速い取り出し用セプトラム電磁石アップグレードの
進捗状況」
佐武 いつか（加速器） 「KEK 電子陽電子入射器におけるネットワーク機器監視システム」
黒澤 宣之（共通基盤・超伝導低温） 「ミュオンDライン冷凍機用圧縮機メンテナンス」

16:45 閉会

技術セミナー

<第1回>

日時：令和4年9月12日（月）13:30 ～ 15:15

会場：つくばキャンパス クライオ電顕実験棟

実施方式：リモート（zoom）および人数制限有の見学会

演題：「クライオ電顕実験棟の紹介」

講演者：川崎 政人 准教授（物質構造科学研究所）

<第2回>

日時：令和4年10月27日（木）14:00 ～ 16:00

会場：3号館セミナーホール（zoom とのハイブリッド）

演題：「AnsysによるCAE実践活用セミナー」

講演者：谷口 亮太 氏（サイバネットシステム（株））



目次

はじめに

橋本 義徳（技術部門連絡会議 技術調整役）

技術交流会採用2年目の活動報告

- 1) CMB 観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発 1
金山 高大（素粒子原子核研究所）
- 2) 軟 X 線用金蒸着光学素子表面への Cr 拡散に関する評価測定 6
片岡 竜馬（物質構造科学研究所）
- 3) 採用2年目の活躍報告 9
佐々木 知依（加速器研究施設）
- 4) 採用2年目の活動報告 13
塩澤 真未（加速器研究施設）
- 5) 金属、非金属材料の加工について 17
伊藤 雄平（共通基盤研究施設・機械工学センター）

テーマ発表「KEK の研究を加速する技術力」

- 6) 「技術」と「人」と「お金」をめぐる戦略 19
牧村 俊助（素粒子原子核研究所）
- 7) J-PARC MR 主電磁石システムの高繰り返し化対応 23
三浦 一喜（加速器研究施設）
- 8) J-PARC MR 速い取り出し用セプタム電磁石アップグレードの進捗状況 28
岩田 宗磨（加速器研究施設）
- 9) KEK 電子陽電子入射器におけるネットワーク監視システム 35
佐武 いつか（加速器研究施設）
- 10) ミュオン D ライン冷凍機用圧縮機メンテナンス 40
黒澤 宣之（共通基盤研究施設・超伝導低温工学センター）

技術セミナー報告 45

編集後記

CMB 観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発

金山高大*

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

素粒子原子核研究所 メカニカルエンジニアリンググループ

Abstract

私の所属するメカニカルエンジニアリンググループは、KEK で行われている最先端の研究に必要な実験装置の設計開発を様々な実験グループと行っている。私はその中で、CMB グループが中心に行っている POLARBEAR 実験の装置開発に携わっている。本稿では着任から約1年半の中で私が担当した業務のうち、アクティブ除振装置の設計開発について紹介する。

1. 研修背景

宇宙の起源は、ビッグバンと呼ばれる超高温・超高密度の火の玉が急膨張することによって誕生したとされている。ビッグバンがどのようにして起きたのかは解明されていないが、真空エネルギーに斥力が働いて急膨張起こり、その際に放出された熱エネルギーがビッグバンの火の玉になったとするインフレーション宇宙論が有力な仮説である。インフレーションほどの急膨張が起きたとすると原始重力波が生じるはずだが、地球に届く重力波は微弱であるため観測は困難である。しかし、宇宙のどの方向からも一様に飛来して 2.7 K の電磁波として観測することができる宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background : CMB) では原始重力波がぶつかることで B モードと呼ばれる大きな渦状の特殊な偏光(Polarization)パターンが作り出されるとされ、観測できればインフレーションの解明に繋がる。

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



図 1: POLARBEAR 望遠鏡

実験装置の望遠鏡は、大気の影響が少ないチリのアタカマ高地で観測が行われており、主鏡、副鏡、レーザーシステムから構成される反射型望遠鏡である。システム内部には、1 K 以下に冷却された超伝導検出器(Transition Edge Sensor : TES)と呼ばれる高感度で温度変化を測定できる検出器が組み込まれており、アンテナに入射した CMB のパワーを測定している。検出器を極低温に保つために複数の冷却システムが搭載され、その 1 つにパルスチューブ冷凍機(CRYOMECH : PT415-RM)が採用されている。

POLARBEAR はこれまで、重力レンズ効果による CMB の偏光パターンを世界で初めて観測した^[1]。また、インフレーションの原始重力波による偏光パターンを測定する試みや、望遠鏡を 3 台同時に使用する Simons Array 実験も進められている。

観測の中で、低周波ノイズが観測範囲を制限してしまうため大きな問題となっている^[2]。その主要原因の 1 つとしてパルスチューブ冷凍機の冷媒であるヘリウムの循環に起因する低周波振動が考えられる。低周波振動はパッシブな除振を行うことが難しく、アクティブな除振を行う手法を採用し R&D を行っている。図 2 に実験装置の構造を示す。

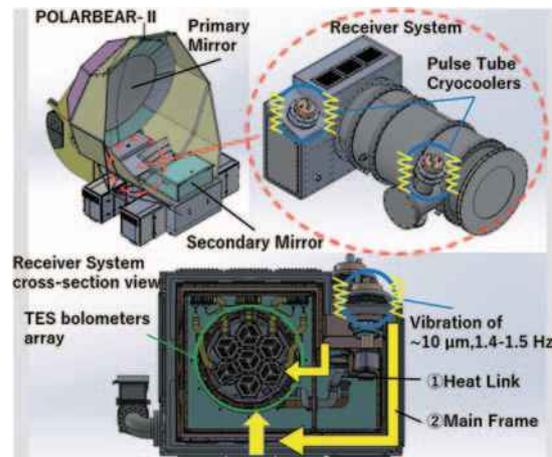


図 2: 実験装置の構造

*takahi@post.kek.jp

2. 設計・開発

2.1 開発の概要

KEK では、チリの実験装置を模擬した R&D 用のクライオスタットを用いて実験を行っている。問題となるパルスチューブ冷凍機も組み込まれており、KEK でアクティブ除振装置の設計開発及び実験を行った上でチリの望遠鏡に組み込む方針となった。また、台湾にある重力波実験グループも同様の振動問題を抱えており、協力して開発することになった。

2.2 設計要求

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

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

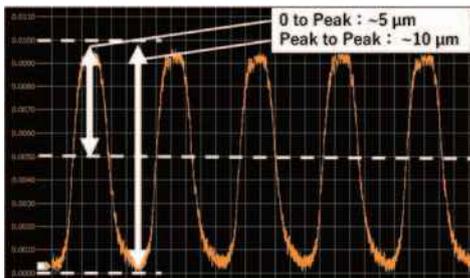


図 3: レーザー変位計による振動計測

また、レシーバーステムは内部を真空にするため、装置には大気圧による負荷がかかる。冷凍機はベローズを介して筐体と接続されており、除振装置は接続部で荷重を支える必要がある。断面積から荷重を概算すると約 2000 N だった。図 4 に内部の様子を示す。

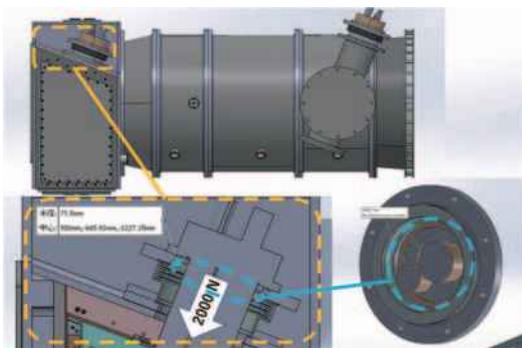


図 4: 装置内部における真空引き荷重

実験装置は既に運用されているため、組み込める場所や加工範囲は限られていた。これらの振動条件や荷重条件などの要求を満たすように設計を行った。

2.3 除振方法

防振ゴムなどのパッシブな除振方法は、 1.5 Hz の振動を防振するばね定数を算出すると耐荷重の要求を満たすことが困難であり、アクティブな除振方法が採用された。重力波実験の 1 つである TOBA 実験で用いられているアクティブ除振^[3]を参考に piezo アクチュエータを使用したアクティブ除振の方法を採用することになった。

2.4 アクティブ除振装置の設計

piezo アクチュエータは振動と荷重の設計要求をカバーできる Travel range $90 \mu\text{m}$, Push force capacity が 3000 N のもの (PI: P-844.60) が採用された。また、piezo アクチュエータは構造上せん断や曲げ応力に非常に弱いため、取り付け面の角度誤差によって生じる力や取り付け面が移動する際に生じる偏心を吸収する許容角度 $\pm 0.5^\circ$ のフレキシブルカップリング (メスチック: M-9914-FB88) を採用した。また、実際の装置は全天を観測するため角度をつけて運用する機会が多く、荷重を分散する目的で防振ゴム (NBK: FGBAS-30-40-M8-EE-55) を採用した。図 5 に設計したアクティブ除振装置を示す。

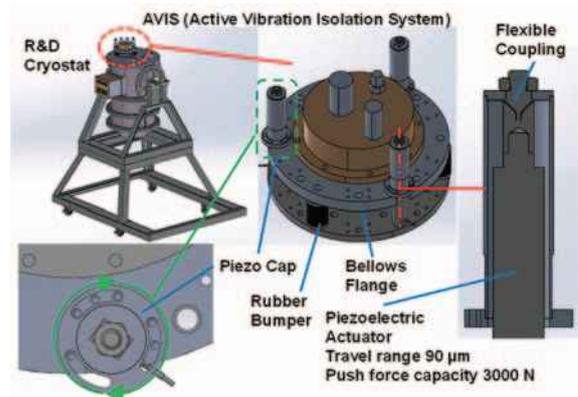


図 5: アクティブ除振装置(鉛直方向制御)

R&D 用のクライオスタットのうち、上部の AVIS (Active Vibration Isolation System) と呼んでいる箇所が今回設計した装置である。構造としては、piezo アクチュエータにカップリングを取り付けて、キャップのような部品を取り付けることで、ベローズフランジの上部を間接的に押し引きできるような構造を 3 箇所に取り付けている。piezo はタップ部分で締結するため回転方向の位置(ケーブルを通す位置)などが定まらないが、キャップがどの位置に来ても固定できる設計にして問題を解決したのが工夫した点である。また、防振ゴムも 3 箇所に取り付けている。

当初、piezo アクチュエータを斜めに組み込むことも検討された。しかし、せん断に弱い特性があることや組み込み可能範囲からまずは鉛直方向に取り付けて制御することでアクティブ除振の原理実証を行うことになった。

2.5 アクティブ除振装置の改良

設計したアクティブ除振装置は、除振の試験を行った結果、改良することとなった。鉛直方向のアクティブ除振だけでは水平方向の振動が残ってしまうため、水平方向の除振装置を設計した。こちらも組み込み可能範囲がかなり限られていたため、ストロークの短い piezo アクチュエータ (PI : P-844.10) を選定し、鉛直方向同様にカップリングを取り付けた。除振方法は鉛直方向で考えた間接的に押し引きする方法を応用した。また、台湾で開発中の PD (Photo Diode) と LED (Light Emitting Diode) を用いた距離計測システムを KEK 用に設計して組み込んだ。図 6 に改良したアクティブ除振装置を示す。

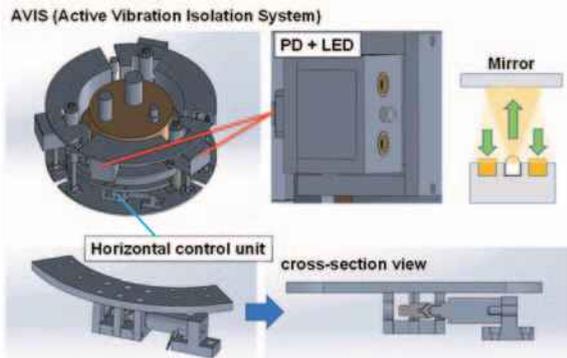


図 6: アクティブ除振装置(水平方向制御)

水平方向制御機構は、図のように piezo アクチュエータをベローズフランジ下部に固定し、振動してしまうフランジ上部を水平方向に押し引きできるような設計である。これを 120° 置きで 3 箇所組み込むことで、鉛直方向のアクチュエータとも組み合わせて全方向の除振に対応させた。構造を検討した際、この構造で本当に押し引きができるのか構造解析で確認した。図 7 に解析した様子を示す。

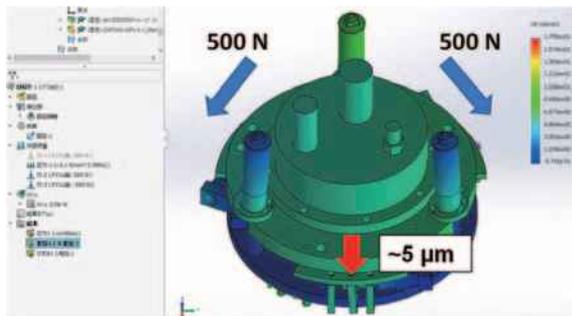


図 7: 水平制御の解析例

解析は Solid works の構造解析を利用した。荷重条件としては内部に真空引き荷重を加えた状態で、3 箇所の piezo アクチュエータで押し引きする面に荷重を加えることで上部フランジを任意の方向に動かすことができた。図では 2 箇所の面に 500 N 加えることで X 方向に 5 μm 程度動かしている図である。

距離計測システムの仕組みとしては、LED から出された光を振動している側に固定したミラーに反射させ、その反射光を PD で測定することで電圧値を換算して距離を計測する仕組みである。この値の変化を見ることでフィードバックに必要な振動の値を測定する。今回は PD を 2 つ使用して平均を取る方法が採用された。図 8 に距離計を示す。

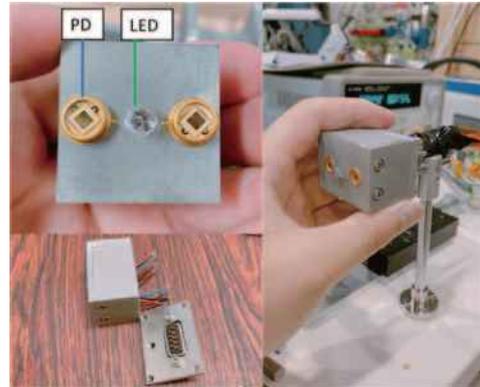


図 8: PD+LED 距離計

PD には回転方向で向きがあるため、PD についている突起に合わせて溝をつけることで位置決めした。更に、ノイズの影響を減らせるよう箱型の筐体で内部の配線を覆う構造を考えた。この距離計は piezo アクチュエータが組み込まれている 6 箇所と同じ位置に配置して振動をモニタする予定である。

2.6 開発状況

現在、R&D 用のクライオスタットには、鉛直方向と水平方向をそれぞれ制御する機構と振動の値をフィードバックするための距離計測の機構が組み込んである。図 9 に現在の状況を示す。



図 9: アクティブ除振装置の開発状況

もともと組み込まれていたベローズのフランジは各機構が組み込めるように追加加工を行い、拡張するためのフランジも組み込んだ。

今後の予定としては図のセットアップを用いて、全方向の振動を同時に除振する試験や、フィードバック制御の試験、性能評価などを行う予定である。また、それらの結果をもとに更に改良した構造を考え、実際の望遠鏡に搭載する装置を設計する。

3. 実験・結果

3.1 駆動試験

部品を選定した際、3つの Piezoアクチュエータ単体での駆動や制御方法の確認のため駆動試験を行った。Piezo素子には圧電効果を応用した逆圧電効果と呼ばれる現象が利用されており、電圧をかけることで伸び縮みさせることができる。今回は電圧を上げた時の変位と、電圧を下げた時の変位も記録した。アクチュエータの変位はレーザー変位計で計測した。図10に電圧と変位の関係を示す。

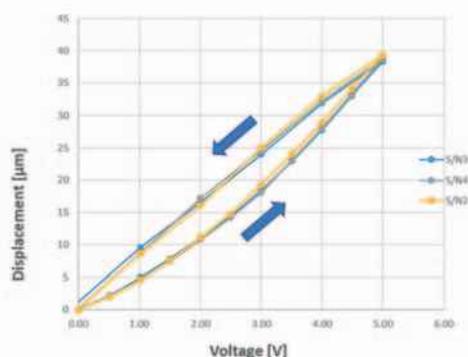


図10: 電圧と変位の関係

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

3.2 真空・耐荷重試験

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

3.3 アクティブ除振試験

これらを踏まえて R&D 用のクライオスタットにアクティブ除振装置と冷凍機を組み込み、アクティブ除振の試験を行った。図11に試験の様子を示す。

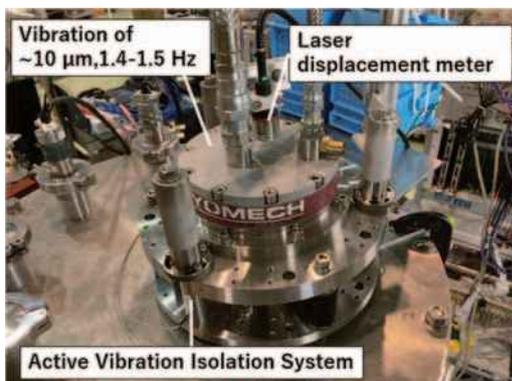
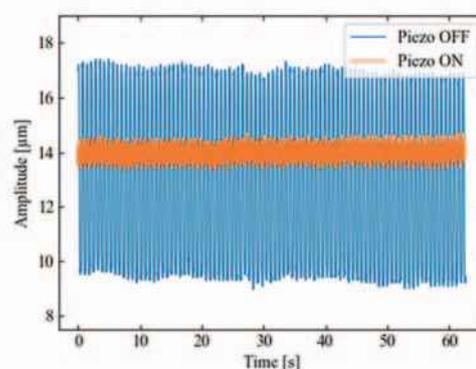
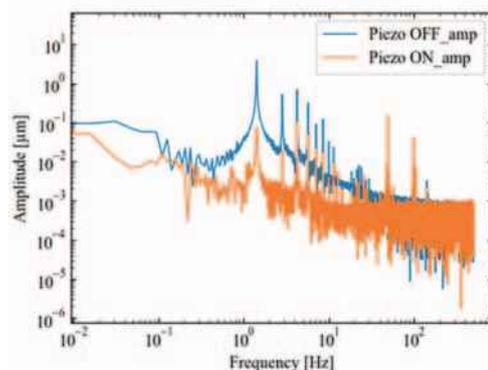


図11: アクティブ除振試験の様子

今回はオープンループ制御によって周波数や電圧を調整して Piezoアクチュエータを駆動させた。3つの Piezoアクチュエータは3又の BNCコネクタで駆動を同期させた。電圧や周波数などの制御にはマルチファンクションジェネレータ(NF: WF1974)を用いてオシロスコープでモニタした。レーザー変位計は冷凍機鉛直方向に取り付けた。初めは電圧などの調整が難しく、振動が増大することもあったが、調整すると振動を減少させることができた。また、位相などの細かいパラメータを上手く調整するとレーザー変位計で計測している冷凍機の 1.4 Hz ピークの鉛直方向の振動を約 7 μm から 1 μm 程度に除振させることができた。図12にアクティブ除振試験の結果 (Piezo ON と OFF の比較)を示す。



(a) 除振前後の時間と振幅



(b) 除振前後の周波数と振幅

図12: アクティブ除振の結果

図12(a)は時間と振幅の関係、図12(b)はフーリエ変換して求めた周波数と振幅の関係である。図より、1.4 Hz ピークの振動を 60 秒間除振できていることが分かる。残りのピークも 1.4 Hz の高調波であるため減少しているのが分かる。これらの実験結果から、アクティブ除振の原理実証に成功したと言える。

今回は鉛直方向だけのオープンループ制御だったため、水平方向の制御やクロズドループ制御が次の課題となった。また、上記の結果から 1 μm 程度には振動を除振できることが分かったため、全方向でこのレベルの除振を行うことが直近の目標となった。

3.4 振動測定と解析

振動の状態を詳しく知るために、計測範囲 0.1 - 400 Hz, 1 V 3.16 cm/s² (Gal) の高精度加速度センサ(特許機器: MG-102S)を用いて冷凍機の振動測定を行った。冷凍機のヘッドに 1~3ch、床面に 4~6ch を設置して、1 時間おきに 5 分間振動を計測し、5 日間分データを取得した。同時に温度も測定した。図 13 に振動計測の様子を示す。



図 13: 加速度計による振動測定

振動測定の結果から、方向による振動の大きさや、問題となる周波数で床振動との相関が低いこと、温度と振動レベルはある程度関係がありそうなことがわかった。

また、この中から、1 日置きの 3ch(鉛直方向)の PSD に着目すると、だんだんとピークの振幅値がずれていき、最終的にはピーク周波数がずれてしまうという結果が得られた。図 14 に示す。

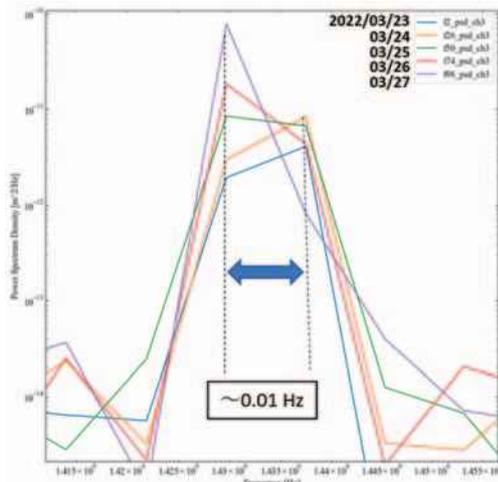


図 14: 時間経過によるピーク周波数の変化

周波数がもしずれていると位相もずれてしまい、振動が増幅するといった危険もあることから、フィードバック制御には重要な情報である。今回は微小な温度変化による振動状態の変化に起因して周波数もずれたのではと考えられる。

3.5 PD+LED のキャリブレーション

組み立てた PD+LED 距離計を駆動するステージに載せてミラーとの距離をずらしていくとその距離に応じて電圧値が変化する。図 15 に結果を示す。

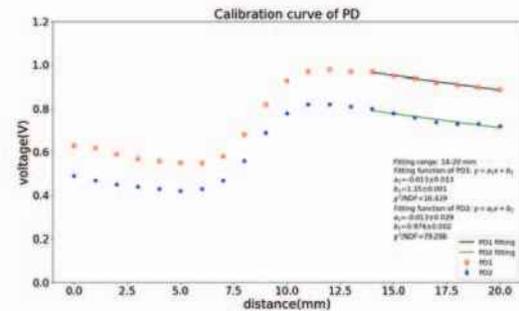


図 15: PD+LED のキャリブレーション

2 つのプロットの位相や電圧値のオフセットは PD の角度や向き、ミラーとの相対的な位置関係、ノイズなどによって生じる。得られた値の線形な箇所をフィッティングすることでキャリブレーションし、その範囲内で距離を計測することで変位計として利用する予定である。

4. まとめ・展望

アクティブ除振装置の設計開発を行い、KEK にある R&D 用のクライオスタットで実験を行った。実験の結果より、アクティブ除振装置を搭載することによってパルスチューブ冷凍機の 1.4 Hz ピークの振動は、レーザー変位計による計測では 7 μm 程度から最大 1 μm 程度に除振でき、アクティブ除振のオープンループでの原理実証に成功した。

装置は改良を行って水平方向の制御機構などを組み込んだので、これらについても検証を行う予定である。また、振動の値をフィードバックしてアクチュエータを動かすクローズドループ制御のシステムも導入予定である。これらが完成し、性能評価を行った上でチリの望遠鏡に組み込んで運用する。

最後に、設計のアドバイスをしてくださった鈴木氏、振動測定を教えてくださいました山岡氏、加工を担当して頂いた機械工学センターの方々、実験を一緒に行った CMB グループの方々や重力波実験グループの方々に感謝したい。

参考文献

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

活動2年目の報告： 軟 X 線用金蒸着光学素子表面への Cr 拡散に関する評価測定

片岡竜馬[#]

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設

Abstract

採用からこれまで、主に軟 X 線ビームラインに関する光学設計や光学素子性能評価を行ってきた。本報告では、その中でも光学素子蒸着材の評価について紹介する。真空紫外軟 X 線 (VUV-SX) 用の金蒸着光学素子表面への Cr 拡散の原因を調べるため、蒸着過程における拡散、加熱や白色光照射による拡散が起こるか調べた。金膜厚を 25 nm から 200 nm まで変えた金蒸着膜試料の 2 度入射における反射率を測定したところ、Cr の吸収は見られなかった。また、金膜厚 25, 50 nm 試料を 100°C、2 日加熱し、加熱前後の反射率を測定したが、いずれも Cr の吸収は見られなかった。さらに、金膜厚 50 nm 試料に白色光を 65 時間照射したが、Cr の吸収はなかった。したがって、蒸着、100°C 程度の加熱、65 時間程度の白色光照射では金蒸着膜表面に Cr が拡散しないことが分かった。

1. 序論

真空紫外軟 X 線 (VUV-SX) は約 10 eV ~ 1 keV の光で、物質に吸収されやすい性質を持つ。そのため、VUV-SX ビームラインでは、X 線用ミラーや反射型回折格子などの表面反射型の光学素子を組み合わせることで集光や分光を行う。光学素子表面の材質は、反射率に直接影響を与えることから、VUV-SX 領域で良好な反射率特性を持つ材質を選ぶことが重要である。

VUV-SX の光学素子は、形状加工した Si や SiO₂ の基板の表面に金属蒸着膜を成膜した構造をしている。表面の蒸着材には、金や Ni などが用いられる。特に、金は SX 領域で 60% 以上の反射率を持っているため、表面材としてしばしば選択される。これらの蒸着材は Si や SiO₂ との接着性に乏しいことから、Cr 蒸着膜の上に成膜されることが一般的である。

設 (PF) だけでなく、他の放射光施設でも観測されており、放射光施設共通の問題だといえる。例として、図 1 に示すように、PF BL-11D の最下流では、560 - 580 eV で Cr の L_{II} 、 L_{III} 吸収に起因するビーム強度低下が見られる。このような局所的なビーム強度低下は、スペクトル測定における除算処理で誤差が大きくなる原因となるため、高いエネルギー分解能を要求する実験で問題となる。しかし、光学素子表面に Cr が拡散する原因は明らかにされていない。

そこで、われわれは、金蒸着光学素子表面への Cr 拡散の原因を 3 つ検討したので報告する。表面への Cr 拡散が Cr 下地材に起因すると考え、①蒸着過程での Cr 拡散や蒸着ムラによる Cr 露出、②加熱による Cr 拡散、③白色光の照射による拡散が起こるかどうかが、各条件に対応する試料を作成し、反射率を評価した。

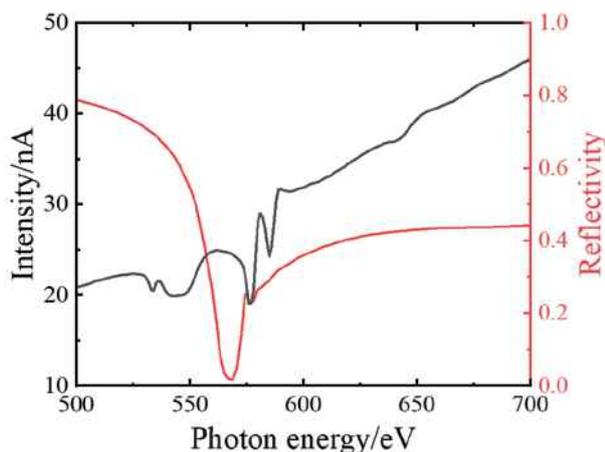


図 1 : BL-11D 最下流でのビーム強度と 2 度入射における Cr 反射率計算値^[1]。

これまで、これらの光学素子の蒸着膜表面に Cr が拡散し、Cr の L 吸収端でビーム強度が大きく減衰することが問題になっている。これは、放射光実験施

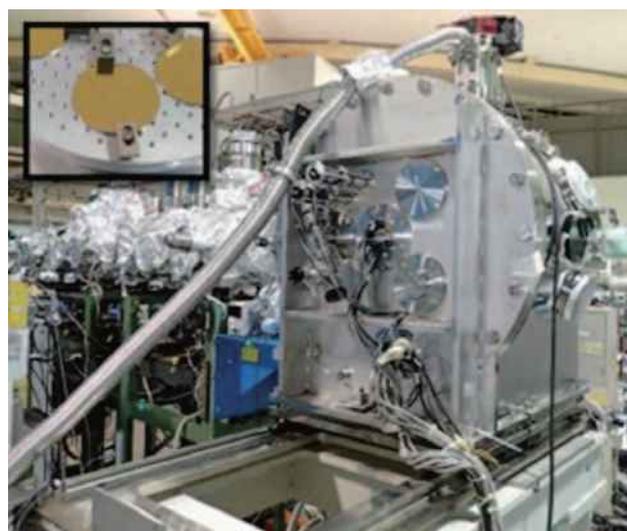


図 2 : BL-11D 常設の反射率計^[2, 3]。内枠写真は反射率計ステージに試料をマウントした様子。

[#] ryoma.kataoka@kek.jp

2. 方法

各条件について試料を作成し、2 度入射における反射率を測定した。まず、①蒸着過程での Cr 拡散や蒸着ムラによる Cr 露出 を調べるため、直径 50 mm、厚さ 1 mm の Si 基板に Cr 下地材を約 10 nm 蒸着し、その上に金を 25 nm, 50 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm 蒸着した試料を作成し、各試料の反射率を測定し、Cr による吸収が見られるか調べた。次に、②加熱による Cr 拡散 を調べるため、金膜厚 25 nm, 50 nm の試料を大気雰囲気下で 100°C、2 日加熱し、加熱前後での反射率の変化を調べた。さらに、③白色光の照射による拡散 を調べるため、PF AR-NE5C で金膜厚 50 nm の試料に Be 窓を通過した白色光 (5 keV~) を 2 度入射で約 65 時間照射し、白色光照射前後での反射率の変化を調べた。

試料の反射率測定には、図 2 の PF BL-11D 常設の反射率測定計^[2,3]を用いた。反射率スペクトル $R(E)$ は、フォトダイオードを用いて検出した、試料反射光強度スペクトル $I(E)$ と素通しの光強度 $I_0(E)$ の比

$$R(E) = I(E)/I_0(E) \quad (1)$$

で求めた。

3. 結果・考察

3.1 蒸着過程における拡散

金膜厚 25 nm, 50 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm 試料の 2 度入射における反射率を図 3 に示す。測定したすべての試料において、Cr 吸収端近傍での反射率減少は見られなかった。金の厚みによらず Cr による吸収が見られないことから、蒸着過程で Cr の拡散は起こっていないことが確かめられた。

3.2 加熱による拡散

金膜厚 25 nm, 50 nm 試料の 2 度入射における 100°C・2 日加熱前後の反射率を図 4 に示す。いずれの試料も加熱前後どちらも Cr 吸収端近傍での反射率減少は見られなかった。したがって、100°C・2 日程度の加熱では Cr の拡散は起こらないことが確かめられた。また、図 5 に、Cr の金への拡散係数の温度依存性を示す^[4]。943 K 以下の領域については、振動数因子 D_0 、活性化エネルギー Q を用いて次式であらわされる拡散係数の式

$$D(T) = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

で補外した。ただし T は絶対温度、 R は気体定数である。式(2)から見積もった 100°C における拡散係数は約 2×10^{-31} m/s² であるため、48 時間加熱しても 2×10^{-4} nm 程度の拡散しか見込まれないことが示唆される。したがって、実験、計算の双方において 100°C 程度の加熱では内部からの拡散は起きないことが示された。

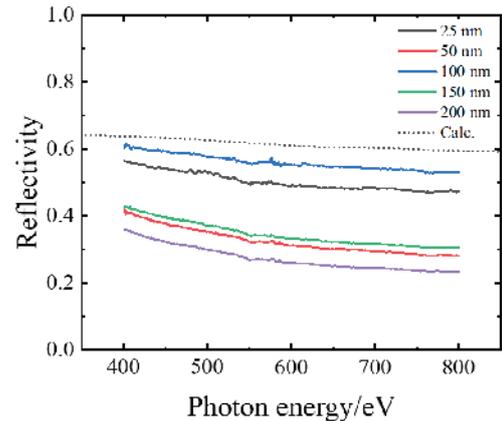


図 3 : 2 度入射における金膜厚 25 nm (黒), 50 nm (赤), 100 nm (青), 150 nm (緑), 200 nm (紫) 試料の反射率。点線は計算値^[1]。

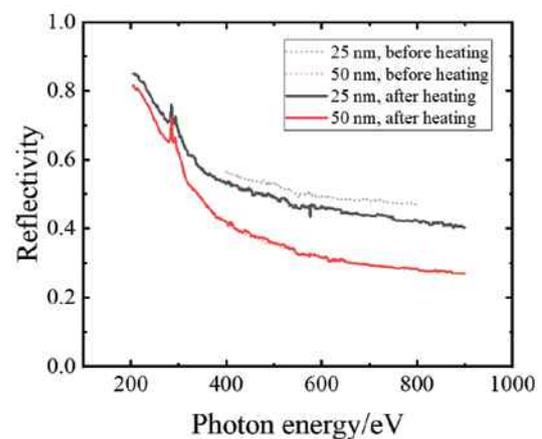


図 4 : 2 度入射における金膜厚 25 nm (黒), 50 nm (赤) 試料の反射率。点線は加熱前、実線は加熱後。

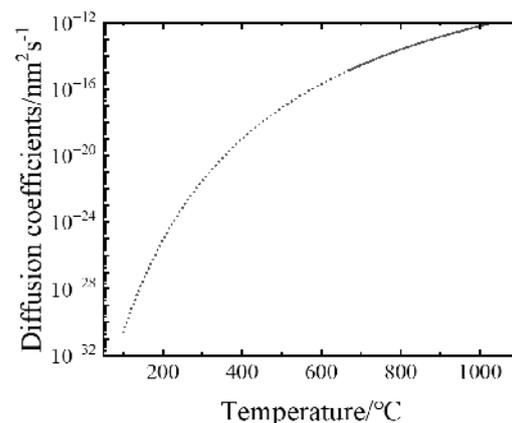


図 5 : Cr の金への拡散係数の温度依存性^[4]。点線は拡散係数の式(2)を用いて補外した曲線。

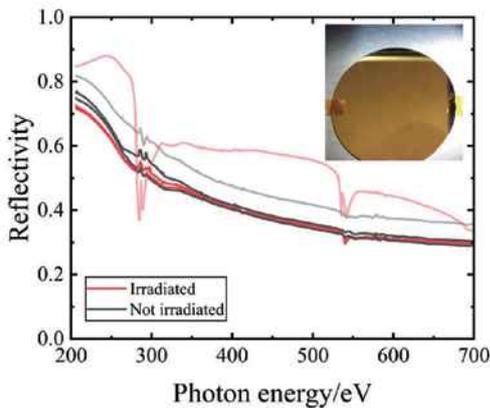
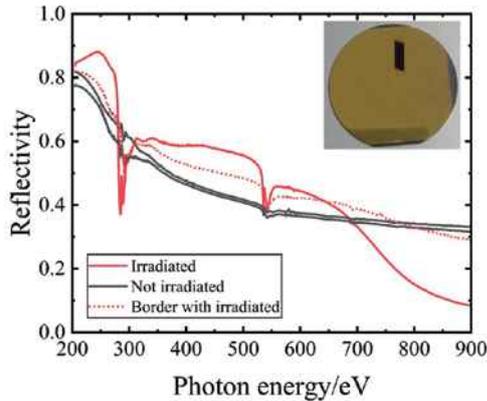


図 6 : 2 度入射における、金膜厚 50 nm 試料の、炭素層除去前 (上)、炭素層除去後 (下) での、白色光を照射した箇所 (赤実線)、照射しなかった箇所 (黒実線)、照射した箇所としなかった箇所の境界 (赤点線) での反射率。

3.3 白色光照射による拡散

金膜厚 50 nm 試料に Be 窓を透過した白色光を照射したところ、図 6 上の写真のように照射箇所に炭素が付着した。試料付近の炭化水素などの有機化合物が光分解されて生じた炭素が表面に付着したと考えられる。炭素層がある状態での 2 度入射における反射率を図 6 上に示す。280 – 290 eV に 2 箇所、530 – 550 eV に 2 箇所、強い吸収ピークが見られた。これはそれぞれ炭素と酸素の吸収端に帰属される。プローブ光が炭素層で反射しており、スペクトルが炭素層の下の状態を反映していないことが疑われたため、エキシマ洗浄装置を用いて炭素層の洗浄を行ったところ、図 6 下の写真のように、炭素層が目視で観測できない程度まで除去された。この時の反射率を図 6 下に示す。炭素の吸収ピークが見られなくなり、炭素がほぼ除去できていることを示している。除去後のスペクトルに Cr の吸収ピークが見られないことから、白色光の照射による Cr の拡散が起きなかったことが分かる。白色光を照射した箇所の反射率スペクトルでは、540 eV 近傍に小さい吸収ピークが見られるため、エキシマ洗浄で除去されなかった酸化物が付着していることが示唆される。

4. まとめ

金蒸着光学素子表面への Cr 拡散の原因を検討するため、蒸着過程での拡散や Cr 層露出が起きているか、また、100°C 程度の加熱による拡散、白色光の照射による拡散が起こるか評価したが、いずれの過程においても、表面への Cr の拡散が起きていないことが確かめられた。今後は、白色光照射の影響についてさらに検討を進める。金膜厚の薄い試料への白色光照射、試料端への白色光照射を行い、反射率測定評価を行う予定である。

参考文献

- [1] B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis, “X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50\text{--}30000\text{ eV}$, $Z=1\text{--}92$ ”, *At. Data Nucl. Data Tables*, **54**, 181-342, 1993.
- [2] T. Hatano, S. Aihara, “Monochromator operation in the carbon window region at the reflectometry beamline BL-11D of the Photon Factory”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **425**, 152018, 2013.
- [3] T. Hatano, S. Aihara, K. Uchida, T. Tsuru, “Performance of the post-focusing mirror system at the reflectometry beamline BL-11D of the Photon Factory”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **463**, 012010, 2013.
- [4] K. Richter, D. Bergner, A. Müller, C. Kirbach, S. Lorenz, Ch.J. Raub, D. Ott, “Impurity Diffusion of 3d-Transition Metals in Gold”, *Defect Diffus. Forum*, **143-147**, 103-108, 1997.

採用2年目の活躍報告

佐々木知依[#]

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

J-PARC Main Ring(MR)では、30 GeV に加速した陽子ビームをニュートリノビームラインとハドロンビームラインに取り出して様々な実験に利用している。2021年7月から2022年6月にかけて長期シャットダウンし、ビーム出力 500 kW から 1.3 MW への大強度化のための各種改造を行った。改造の中で、3-50BT グループと真空グループの共同で行った高放射化エリアでの新規コリメーターの設置作業について報告する。また、モニターグループの高感度ビームプロファイルモニターOTR/FL-II のビームから見たインピーダンスの低減対策にも挑戦し、電磁波吸収体を積極的に利用した試験を行った。その結果、最大 3.7 Ωであったインピーダンスを 0.8 Ω以下に低減することができた。

1. 採用から1年半の仕事のまとめ

表1にこの1年半で経験した仕事をまとめた。真空の仕事に加えてモニターグループの仕事も行った。また、仕事での成果をまとめて加速器学会でのポスター発表も行った。資格ではクレーン運転士と玉掛けを取得した。研修では初任者研修をはじめ、5つの専門研修を受講してスキルアップを図ってきた。

表1：経験した仕事のまとめ

研修	初任者研修 専門研修(真空、Ansys、PLC、英文、RaspberryPi)
資格	クレーン運転士 玉掛け技能講習
真空 Gr	真空作業(Abort ダクト外し、FX 部接続、コリメーター設置など) 工場視察 アウトガス測定
モニターGr	OTR/FL-II インピーダンス対策 PMT 校正

2. 高放射化エリアでの新規コリメーター設置作業

2.1 コリメーター設置作業の概要

J-PARC Main Ring(MR)ではビーム出力の大強度化が進行中である。ビームが大強度になればなるほど、ビームロスが大きな放射化につながり、これがネックとなる。

MR のコリメータは入射直線部 (図 1(a)) に設置されており、タングステン製のジョーで不要なビームハロー (ビーム周辺に空間的に広がる低密度の陽子の領域) を削ることが目的である。コリメーターによりビームロスはコリメータエリアに集中し、そのほかのエリアの放射化を抑えることができる。このコリメーターの増強もビームの大強度化に必須である。一方で、コリメーターエリアに放射化が局在することにより、既設のコリメーターではそれ自身

が強く放射化してしまっている。例えば、Col-C 下流フランジから、ダクト内のタングステンジョーが見える状態で空間線量率を測定したところ 780 μSv/h であった。このような背景から、コリメーターエリアの作業では被ばく量の管理・低減対策が特に要求される。図 2 にコリメーターの配置を示す。Col-A, B, C, H の 4 台が既設で、Col-D, F, G の 3 台が新設予定である。このうち Col-D, G の設置作業を 2022 年 1 月に行った。この作業について、主に高放射化エリアでの真空作業時における作業員の被ばく管理・低減対策の観点で報告する。なお、Col-F の設置は 2023 年夏以降の予定である。

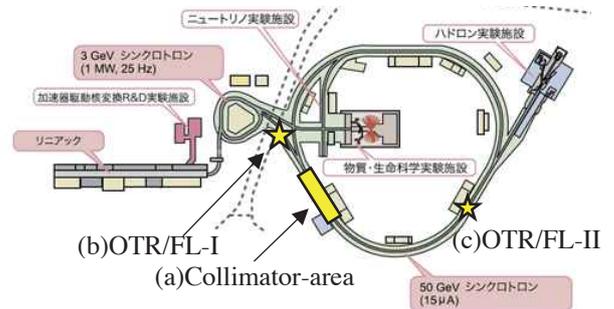


図1：J-PARC のレイアウト^[1]

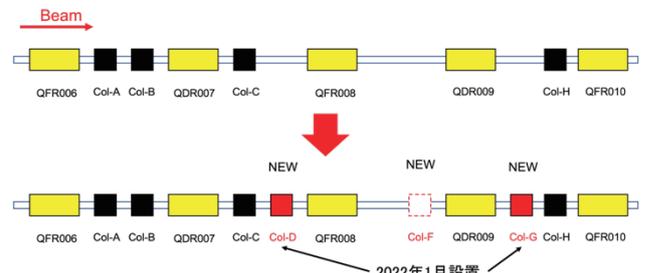


図2：コリメーターの配置

2.2 作業員の被曝低減対策

外部被ばく低減の3原則 (距離、遮へい、時間)^[2]の観点に基づいて作業員の被曝量を可能な限り減らす対策をした。

[#] tomoi.sasaki@kek.jp



図3：コリメーター設置作業（Col-D の例）

『距離』の観点では、ビームダクトをラインアウトさせるときに、作業員が抱えて移動させるのではなくハンドリフターに乗せて移動させること、可能であれば腕を伸ばして作業をすることで放射化物との距離をとる対策をした。

『遮へい』の観点では、コリメーターを設置する際に、設置位置の上流・下流に鉛遮へい体を置き、作業員の被ばくを低減させる対策をした。ただし、鉛遮へい体は重量が大きいため移動や設置に時間がかかってしまい、その間にも作業員は被ばくしてしまう。このため、設置するか否かは設置作業による被ばくと、鉛遮へい体による被ばく軽減効果を比較して決定する必要がある。

『時間』の観点では効率良く作業を行い、作業時間の短縮に努めた。真空グループのミーティングで工程をひとつずつ分解し、作業にかかる時間、作業人数、作業場所の空間線量を書き出した。このように詳細な作業表を作成しておくことで、現場で思案する時間や工具を探す時間を減らし、作業時間を短縮した。また、書き出した作業工程をもとに1工程ごとに被ばく量を算出し、さらに各工程での被ばく量を合計して作業全体での被ばく量を見積もった。見積の結果、真空グループ4名での被ばく量の合計は506 μSv であった(表2)。また、作業本番では1工程ごとに全員の被ばく量を記録しながら作業を進め、計画外の被ばくをしないように管理した。

2.3 現場での設置作業

現場での設置作業は、以下の手順で行った。

- ① 真空 Gr：QFR010 下流のアクセスポートから窒素パージを行う。
- ② 真空 Gr：Col-C と QFR008 の間のダクト(図3(A) 黄色矩形)を外す。
- ③ 3-50BT Gr：ダクトを外して空いたスペースに Col-D を設置(図3(B))。
- ④ 真空 Gr：ビームラインと Col-D を接続する(図3(C))。
- ⑤ ②～④と同様の手順で Col-G も設置する。
- ⑥ 真空 Gr：再排気およびリークテスト。

2.4 作業後の振り返り

作業は大きな問題もなく無事終了し、コリメーター新設後のリークテストも合格であった。真空グループ4名の被ばく量の集計結果は表2の通りである。作業員Dの被ばく量が他の作業員より極端に少

ないのは、被ばく量の記録を担当していたからである。4名全員での被ばく量の合計は252 μSv と事前の見積の506 μSv のおよそ半分に抑えることができた。

表2：被ばく量の集計結果[単位: μSv]

作業員	A	B	C	D	合計
結果	59	95	83	15	252
見積	見積もり段階では個人毎は算出せず				506

2.5 コリメーター設置作業まとめ

外部被ばく低減の3原則²⁾に基づいて、対策を講じ、特に作業時間を短縮できるように事前に工程を細かく検討してから作業を行った。その結果、大きな問題なく作業を完遂することができ、被ばく量も事前の見積の半分程度に抑えることができた。

今回の設置作業ではコリメーターの設置作業に関して、各工程にかかる時間などのデータを得ることができた。2023年夏以降にCol-Fの設置が予定されているが、今回の経験を活かしてより安全に作業を進めたい。

3. OTR/FL-II インピーダンス低減対策

3.1 OTR/FL-II の概要

MRの入射ビームライン(3-50BT)で、OTR(Optical Transition Radiation: 高エネルギーのビームが金属薄膜を通過する際に放出する可視光領域の遷移放射)と蛍光(Fluorescence)を利用した6桁程度の広いダイナミックレンジを持つ2次元ビームプロファイルモニターの1号機(OTR/FL-I、図1(b)の位置に設置)が運用されている^{13,4)}。さらにこの1号機と組み合わせるMR入射直後20ターン程度の周回ビームの測定¹⁵⁾に用いるMR用2号機(OTR/FL-II、図1(c)の位置に設置予定)が開発中である¹⁶⁾。この2号機の光学系を収納するMirror Chamber(図5, 6)において、ビームとのカップリングインピーダンス(インピーダンスZを n ：=周波数/ビームの周回周波数で除した形のZ/nで表す)は、ベンチベンチ測定の結果、1GHzまでの周波数範囲で、140MHzにおいて3.7 Ω の最大値であった。将来の更なる大強度ビームにおいてもビームへの影響が出ないようにするために、この値を0.5 Ω 程度以下にする。その低減化を、誘電体である炭化珪素SiCによる電磁波吸収を行うことで、Z/nは0.6 Ω 程度以下にまで低減が期待できるシミュ

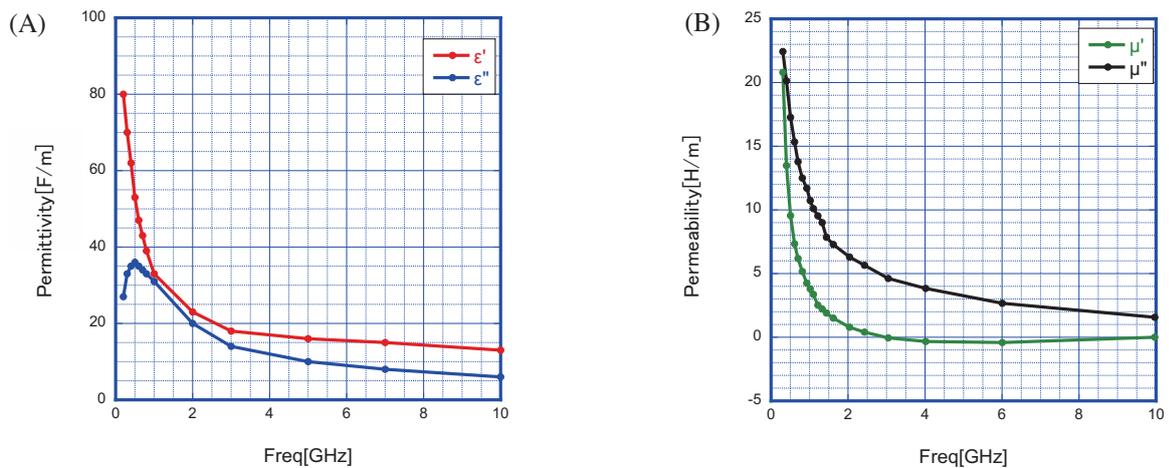


図4：(A) SiC の誘電率 (ϵ' : blue, ϵ'' : red)[10], (B) フェライトの透磁率 (μ' : green, μ'' : black)[12]

レーション結果が報告された¹⁷⁾。Mirror Chamber では、電磁波吸収体を用いた低減試験が行われている。吸収体としては、誘電体である SiC と磁性体であるフェライトを導入した。

3.2 SiC・フェライトによる電磁波吸収

Mirror Chamber のもつインピーダンスのうち、 0.5Ω 以上のピークは500 MHz 以下の領域に存在している。このため吸収体としては、この領域で効率が高いものが望ましい。そこで我々が試験に採用した吸収体の特性を図4に示す。同図(A)は、KEKB やKEKB DR などで使用実績のある誘電体の SiC^[6,9-12]である CERASiC-B の誘電率であり、同図(B)は KEKB の照井氏が実用化を進めている^[13]フェライト HF70 の透磁率である。いずれも希望する 500 MHz 以下の領域で効果が見込めると判断した。

3.3 Mirror Chamber の構造と実験方法

図5の Mirror Chamber(SUS316L 製、肉厚 35 mm)には、測定光学系として大口径凹面鏡 2 枚(直径 350 mm)と凸面鏡(直径 200 mm)、それらを支える Mirror Unit が入っており、これらは全てアルミ合金(A5052)製である。容器側面には ICF253 の真空ポート 6 枚(両面で12枚)がある。このポートから吸収体を挿入し、ベクトルネットワークアナライザとワイヤー(放電加工用銅合金：直径 200 μm)を用いたワイヤー法^[6,7]によるインピーダンス測定を行った。

また、実験では電磁波吸収体と Mirror Unit との距離を変えつつ測定するが、この距離を D と定義した(図6)。

3.4 電磁波吸収体の取り付け方法

図7は、Mirror Chamber 側面のポートに入れる SiC(A)、およびフェライト(B)と、固定治具の写真(C)である。SiC は CERASiC-B ブロック(48×48×15 mm³、クアーズテック社)、フェライトは HF70 トロイダルコア(HF70RH16x28x9; 外径 16 mm、内径 9 mm、高さ 28 mm、TDK 社)を用いたセットである。

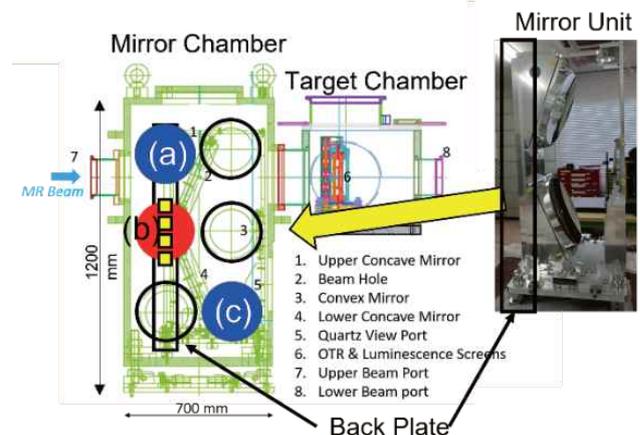


図5：OTR/FL-II の構造と電磁波吸収体の配置

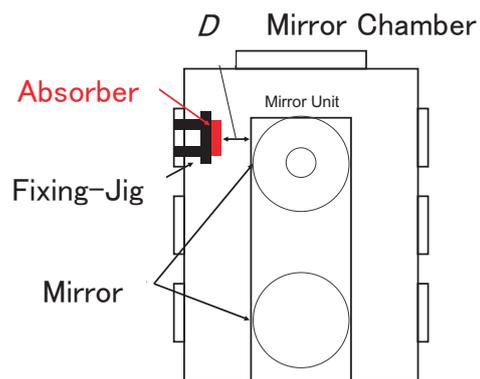


図6：電磁波吸収体-Mirror Unit の距離 D

SiC は図のように 4 ブロックを 1 セットとし、縦 1 列に並べることで Mirror Unit の背板(図5)に対面する面積が大きくなるように配置した。トロイダルのフェライトコアは、7×7 (計 49 個) を 1 セットとして配置した。SiC の 1 セットの体積は $13.6 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 、フェライト 1 セットの体積は $18.6 \times 10^5 \text{ mm}^3$ であり、

フェライトの方が約27%大きい体積であった。(C)は固定治具で、アルミ板(300×300 mm²)のフランジからスタッドボルト(SUS-M8)を伸ばし、アルミ板(150×150 mm²)をナットで固定した。スタッドボルトは10 mm径の真鍮パイプでカバーした。アルミ板に吸収体をボルトで固定した。このようにすることで真鍮パイプの長さで距離 D を調整した。

3.5 実験結果

インピーダンスの低減試験では吸収体の設置位置と体積、配置や組み合わせでの低減効果を試験した。その結果、電磁波吸収体の配置を、

- 上段上流ポート(図 5(a)、青色円で強調)に Set_Ferrite(図 7(B))、距離 D : 100 mm。
- 中段上流ポート(図 5(b)、赤色円で強調)に Set_SiC(図 7(A))、距離 D : 47 mm。
- 下段下流ポート(図 5(c)、青色円で強調)に Set_Ferrite(図 7(B))、距離 D : 40 mm。

としたところ、最も大きくインピーダンスを改善することができた。この結果を図 8 に示す。吸収体なしでは最大 3.7 Ω、0.5 Ω以上のピークが10本存在していたが、SiC とフェライトを上述のように配置したところ、インピーダンスは最大 0.8 Ωまで小さくなり、0.5 Ω以上のピークは3本にまで減じることができた。

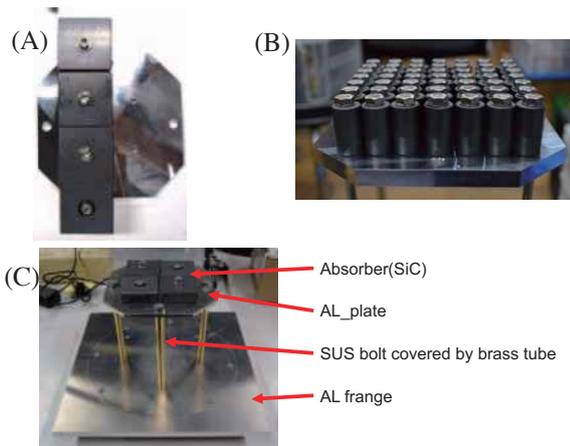


図 7 : 電磁波吸収体のセットアップ; (A)Set_SiC, (B)Set_Ferrite, (C)固定治具(Set_SiC の例)

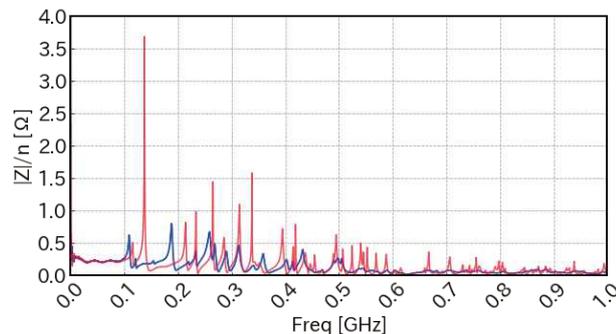


図 8 : インピーダンス (Z/n); 赤実線: 電磁波吸収体なし, 青実線: SiC・フェライト挿入(図 5)

3.6 OTR/FL-II インピーダンス低減対策まとめ

シミュレーションだけでなく、実際の吸収体のマテリアルを使った低減対策の効果を、吸収体の並べ方や構造物(チャンバー内部の Mirror Unit)との距離、挿入するポートを変えながら実測することができた。そしてインピーダンスを最大で 0.8 Ωまで低減することに成功した。0.5 Ωの目標まであと少しのところに来た。その詳細を私のはじめての発表となった2022年加速器学会年会で報告した^[14]。

参考文献

- [1] KEK 一般公開パンフレット 2007
- [2] <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-04-03-01.html>
- [3] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. IBIC2013, Oxford, UK, Sep. 2013, pp338-341; <https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2013/papers/tucl2.pdf>
- [4] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. HB2014, East-Lansing, USA, Nov. 2014, pp187-191; <http://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf>
- [5] Y. Sato *et al.*, proc. PASJ2019, Kyoto, pp1125-1129; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI038.pdf
- [6] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki Online, Japan Aug.2021, pp481-485; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP024.pdf
- [7] 外山 毅, “ビームインストルメント”, OHO 2009; <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt3.htm>
- [8] T. Toyama *et al.*, Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, Jun. 2022; DOI:10.48550/arXiv.2208.09217
- [9] T. Kageyama *et al.*, Proc. PASJ2011, Tsukuba; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS126.pdf
- [10] T. Abe *et al.*, proc. PASJ2012, Tsukuba; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THLR/THLR06.pdf
- [11] Y. Takeuchi *et al.*, proc. PASJ2011, Tsukuba; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS137.pdf
- [12] S. Terui *et al.*, proc. PASJ2017, Sapporo; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP1/TUP121.pdf
- [13] S. Terui *et al.*, Development of ferrite higher order mode absorber for SuperKEKB vacuum system (In preparation).
- [14] T. Sasaki *et al.*, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu Online, (In preparation)

採用 2 年目の活動報告

塩澤 真未[#]

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

2020 年 12 月に Photon Factory(PF)の加速器室内で水漏れが発生した。加速器を停止して職員が対処したがユーザー運転再開までに 4 時間ほど要した。当時、加速器室内に漏水を検知するシステムは存在していたものの、限られた場所でしか漏水を検知できなかったために動作せず、漏水の発生から発見までに 30 分以上かかってしまい、水漏れが広範囲にまで広がってしまった。このような従来のシステムからの反省を活かし新たに PF リングに導入した漏水検知システムについて紹介する。

1. はじめに

KEK つくばキャンパスの放射光実験施設 PF は学生や企業など多くのユーザーを抱えている。ユーザーラン中になんらかのトラブルが発生して加速器が停止することは、ユーザーに多大な迷惑が掛かる上に職員の負担も増える。しかしながら PF は運用開始後 40 年以上経過している加速器であるため、軽微なものから甚大な被害を引き起こすものまでトラブルは尽きない。トラブルを未然に予防することがベストではあるものの予算や人手の問題等により困難であることも少なくない。そこでトラブルが発生した際に運転員が気付いて素早く対応することが、被害を最小限にとどめるためには重要である。本稿ではその一例として PF 加速器室に導入した漏水検知システムについて紹介する。

2020 年 12 月に PF 加速器室内で発生した水漏れ(図 1)は、BL-12 の光モニターでシンフレックスチューブが抜けたことが原因であった。当時の加速器室内に漏水検知システムはあったものの、この時は動作しなかった。従来のシステムでは配水盤などの水漏れが予測される場所にしかセンサーがなく、BL-12 光モニターからの漏水はこのセンサーにかからない領域で発生したためである。そのため、加速器室の床とその地下のトレンチの天井を貫く貫通孔から流れ出た水を通りかかった職員が発見したことで漏水が発覚し、推定される漏水発生時刻から約 30 分以上経過した後に発見されたため、漏水箇所が広範囲にまで広がってしまった。そこで本件では漏水をできるだけ早期に検知するシステムを作製した。

新しい漏水検知システムに求めたのは以下の様な要件である。

- リング全域をカバーすること
- 漏水箇所の特定
- EPICS への組み込み
- Archiver Appliance(AA)への登録
- CSS アラームへの登録
- メンテナンス性の高さ
- 信頼性

[#] mami@post.kek.jp



図 1: PF 加速器室内の水漏れの様子

どの場所で発生した漏水も検知し、漏水発生後に素早く対応できることを一番の目標とした。また、EPICS を組み込んだり、AA、CSS アラームへの登録をしたりすることで制御室にいる人がリング内の異常に気づき、後ほど原因究明などに使うために漏水の履歴を残せるような機能をもたせることにした。さらに、従来のシステムでは金属の板にキムタオルを挟んだものをセンサーとして利用しているため一度濡れてしまうと再びセットするのに手間がかかっていた。そのため、メンテナンス性が高く設置後も長期間にわたって維持管理ができることも要件に含めた。

2. 漏水検知の仕組み

漏水検知の仕組みは水が電気を通すことを利用した非常にシンプルなものである。図 2 にその概略を示す。漏液監視状態では図中の緑矢印で示すように検知帯の一方の電極に信号を送っており、検知帯間は開ループとなっている。この状態で検知帯(センサー)に水がかかると漏液を通じて検知帯のもう一方の電極に信号が流れて(オレンジ矢印)検知器に戻る(赤矢印)。すると、検知器は抵抗値の違いから漏水と判断する。

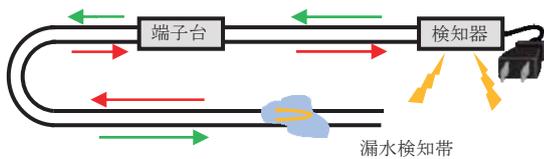


図 2：漏水検知の概略図

3. 部品について

実際にテストベンチにてパーツを組み立てて動作試験を行ったあと、加速器室内に仮設置して放射線耐性や検知帯の設置のしやすさなどの確認を行いパーツの選定を行った。

3.1 漏水検知器

漏水検知器は工場等で用いられているオムロンの 61F-GPN-V50(図 3)という製品を使用した。半導体不足の影響もあり、比較的すぐに入手できる製品がこれしかなかったためである。表 1 に主な仕様を示す。なお、この製品は 2023 年 6 月に受注終了予定となっている。



図 3：漏水検知器 61F-GPN-V50

表 1：漏水検知器の仕様^[1]

形式	61F-GPN-V50
電源電圧	AC100V、AC200V 50/60Hz
電極間電圧	AC24V
消費電力	3.2VA 以下
応答時間	動作時：80ms 以下 復帰時：160ms 以下
接点仕様	2c 接点
使用周囲温度	-10～+50℃
使用周囲湿度	45～85%RH

3.2 漏水検知帯(センサー)

漏水検知のセンサーはスポットでの検知が可能なポイントセンサータイプと広範囲での検知が可能な検知帯タイプの二種類が広く用いられているが、加速器室内の広い領域をカバーするには検知帯タイプが向いている。そこで、図 4 に示すようなオムロン社製の F03-16PE と F03-16SFC の二種類の検知帯を購入して実際に加速器室内に仮設置をした。



図 4：漏水検知帯(上：F03-16PE、中：F03-16SFC(乾燥時)、下：F03-16SFC(漏水検知時))

F03-16PE はオムロンの検知帯の中で最もオーソドックスな製品である。電極は SUS316 で絶縁被覆部はポリエチレン製である。一方で F03-16SFC の電極は 0.75 mm² の錫メッキ軟銅撚り線で絶縁被覆部は吸水性と撥水性の特殊プラスチック繊維の編組となっている。吸水すると内部の赤い被覆が見えるようになることで漏水箇所を容易に確認できるという特徴がある。

3.3 仮設置

2021 年度第三期運転(2022 年 1 月 31 日～2022 年 3 月 24 日)の際に PF 加速器室内の超伝導ウィグラー下流に仮設置をした(図 5)。その結果、F03-16PE は検知帯自体が固く配線の取り回しが難しい上に検知帯をしっかりと固定しないと床から浮いてしまうことが分かった。また、検知帯を仮設置した場所が PF リング内でも比較的放射線量が高い場所であったため、絶縁被覆部がペタペタするなどの放射線によるものとみられる劣化があった。一方で F03-16SFC は検知帯自体が柔らかく施工性に優れていた上に目立った劣化もなかった。以上より本設置では検知帯は F03-16SFC を採用することにした。さらに、メーカー推奨の端子台はスクリーレスタイプのものであったが端子台自体が小さく加速器室内には固定しづらいことが分かった。作業中に誤って検知帯をひっかけてしまうことも考えられるため、検知帯や配線ケーブルがより抜けづらくするために圧着端子を付けて、端子台をねじ式のものに変更

することにした。

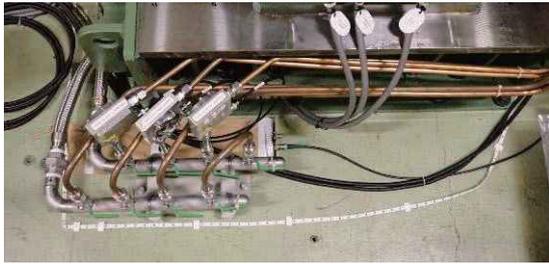


図 5 : PF 加速器室内での仮設置の様子

4. 本設置

仮設置をしたことで得られた知見を活かしてパーツを購入し、PF リング全域への設置を行った。

4.1 PF 加速器室内全域への設置

全体の構成の概略図を図 6 に示す。ノイズや放射線の影響を避けるために本体は地下トレンチにあるモニターステーション#6 として利用していた 19 インチラックに DIN レールを介して固定した(図 7)。このラックは 100V コンセントがついているので各機器の電源はそこからとっている。ノイズ対策のために検知器と検知帯との間はできるだけ近い方がよいのでその間は約 5 m となっている。検知帯は 1 周 187 m ある PF リング全域をカバーできるように 100 m の長さのものを 2 本使用した。また、前述した既存の漏水検知システムは撤去せず新システムと併用をし、二重で監視することとした。

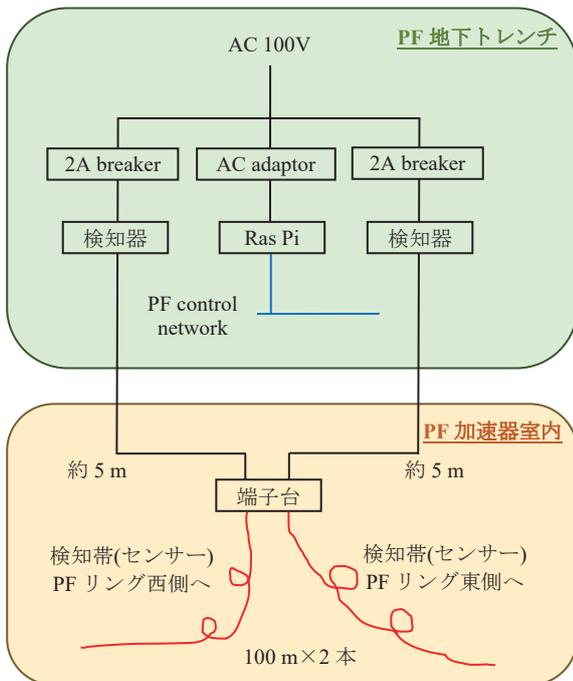


図 6 : 全体の構成

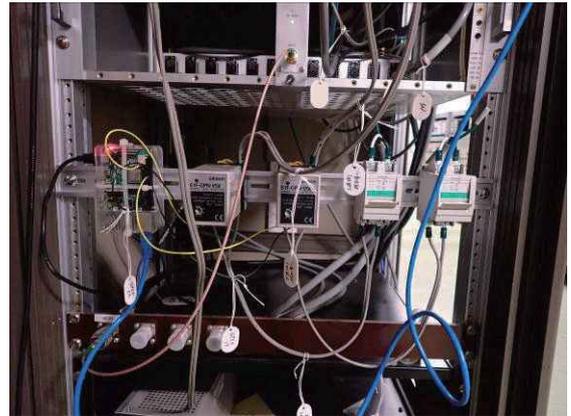


図 7 : 地下トレンチに設置した本体

4.2 EPICS への組み込み

漏水検知器が漏水を検知した際は、本体表面の赤いランプが点灯する。しかし地下トレンチにある本体ランプが点灯してもほとんどの人が気付くことはなく実用的ではない。そこで、漏水検知器本体からのリレー出力を Raspberry Pi に取り込み、Raspberry Pi 上で EPICS の IOC を立ち上げることで、PF 制御ネットワーク上にあるどの端末からも漏水情報をリアルタイムで監視できるようにした。レコード名は既存のものにならない、"PFRMON:WTRLEAK:WEST" および "PFRMON:WTRLEAK:EAST" とした。Raspberry Pi には procServ をインストールすることで IOC を起動し続けるようにした。procServ には自動で再起動する機能があるため、万が一プロセスが落ちてしまってもすぐに IOC が立ち上がる。また、Raspberry Pi 上で crontab の reboot の箇所に procServ 情報を記述することで再起動した際にも自動的に IOC が立ち上がるようにした。

AA への登録および CSS アラームへの登録は東日本技術研究所の路川氏に依頼した。AA へ登録をすることで漏水履歴の確認が行え、他のレコードと比較することで漏水原因の究明などに役に立つ。図 8 の一部飛んでいるデータは動作試験中のものであり、きちんと動作していることが AA から確認できた。さらに、漏水履歴をモニターするだけでなく、CSS アラームへの登録をすることで、光と音で漏水に気付くことができ、早期発見および対応が見込める。

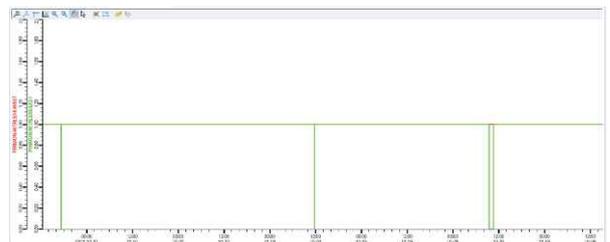


図 8 : AA に登録したレコード

5. 今後の展望

PF の加速器室はドーナツ状であり、今回検知帯を設置したのは図 9 の赤線で示したような加速器の内側の領域である。BL12 の光モニターの漏水は外側(加速器室内のビームライン側)で発生したこともあり、漏水の早期発見のためにも今後は外側にも検知帯を設置する予定である。

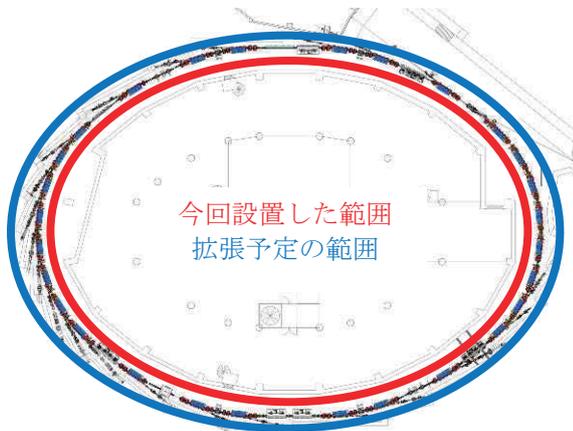


図 9：今後の拡張予定

また、漏水は加速器室内だけでなく地下トレンチや地下機械室においてもたびたび発生している。本稿で紹介した漏水検知システムは運転中に人の立ち入ることのできない加速器室内を最優先に設置したが、加速器室内に限らずどこでも設置が可能である。地下トレンチや地下機械室には電源や各ラックなどの加速器運転のための重要な機器が数多く設置されているため、機器保護の観点からも将来的にはそちらへの設置も考えている。

本件の検知帯は漏水箇所の色が変わる仕様であり、加速器の内側という比較的人がアクセスしやすい場所に敷設された(図 10)。そのため、加速器停止中のメンテナンスなどの加速器室内での作業の際に検知帯を踏むことを想定している。そのため実用上は断線検知機能を付けることが必要である。

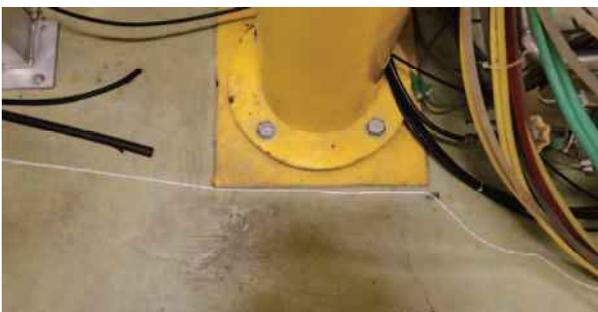


図 10：設置した検知帯

オムロン社の製品で断線機能付きの漏水検知器 K7L-UD という製品がある^[2]。この製品では検知帯の端にターミネータを付け、送る信号の種類を分けて断線と漏水を区別している。漏水監視時は AC 2.5

V の矩形波の信号を送っていて通常はターミネータでカットされる。漏水時には水を通じて信号が流れて検知器に戻ることで抵抗値の違いにより漏水を検出する。一方で断線監視時には Max DC 10 V, 200 ms の信号を送っていて、これはターミネータでカットされずに検出器に戻ることで通常状態と判断される。しかし断線時には信号は検出器には戻らないので断線と判断される。この断線監視信号は 7 秒に 1 回の頻度で発信される。今後はこの漏水検知器を導入して EPICS に組み込んで運用していきたいと考えている。

6. まとめ

PF リングに新たに漏水検知システムを構築した。このシステムではリング全域をカバーしており、色が変わる検知帯を 2 本用いたことでおおよその漏水箇所を特定できるようになった。また、EPICS への組み込みや CSS アラーム、AA への登録をしたことで、加速器室内の漏水に簡単に気付けるようになり、漏水履歴の確認も行えるようになった。使用した検知帯は漏液をよく拭き取ればすぐに再利用が可能のためメンテナンス性の高さも向上したといえる。この漏水検知システムは加速器室内に限らずどこでも設置が可能のため、断線検知機能を追加した上で PF 加速器室内の敷設面積を増やすことができる。さらに、将来的には PF 地下トレンチや地下機械室、他の加速器などへの展開を考えている。

参考文献

- [1]<https://www.fa.omron.co.jp/products/family/566/download/catalog.html>
- [2]<https://www.fa.omron.co.jp/products/family/1819/download/catalog.html>

金属、非金属材料の加工について

伊藤雄平[#]

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

Abstract

機械工学センターでは A5052 や A5056 といったアルミニウム合金をはじめ、ステンレスやニオブ、銅や真鍮、またガラス繊維強化樹脂 GFRP(G10) といった様々な材料を用いた実験機器部品の設計から製造、測定までを行っている。今回は、私がこれまでの 2 年間で行った金属、非金属材料の加工性の特徴や加工について工夫した点を紹介する。

1. はじめに

機械工学センターでは機構内で使用される実験機器や部品など、年間 450 件を超える依頼業務に対応している。これらの実験機器等には様々な材料が使用されており、特殊金属から非金属や樹脂材料などの加工が必要となる。加工には、旋盤、フライス盤、ワイヤーカット放電加工機などの様々な工作機械を使い、材料の最適な加工条件の選定や、問題点と問題解決を行ってきた。今回は材料加工を行った際に工夫した点を紹介する。

2. 様々な材料の機械加工性の特徴

アルミニウム合金をはじめ、そのほか SUS304 や 316L などのステンレス、C1020 の銅合金や、SS400、S50C、ニオブ、G10、ホウ素入りポリエチレン、MC ナイロン、グライトロン、鉛など、様々な金属、非金属材料の加工を行った。また、上記の様々な材料を加工することで、多くの知識と経験を得ることができた。

例えば、SUS304 は、切削によって加工硬化層が生じ加工不良が起きる問題がある。その対策として、仕上げ加工において、加工硬化していない層まで刃を切込み (0.3 mm 以上)、回転数を落とす事で刃の摩耗を減らし、金属表面を仕上げる技術を学んだ。

難削材のニオブの表面仕上げ加工においては、Ra0.8 μm 以下に仕上げる加工をフライス盤で行った。難削材の表面仕上げ加工は、回転数や送り速度、使用する工具、刃の枚数等の加工条件出しが難しかったが、加工を行う中で最終的には、刃物枚数を 1 枚に減らす事と、仕上げ加工の切込み量を 0.02 mm としたことで表面を Ra0.18 μm に仕上げる事ができた。

また、ガラス繊維をエポキシ樹脂で硬化させた GFRP (G10) 料は、絶縁性、断熱効果^[1]や経済性の観点から、機構では使用されている。G10 のフライス加工では、エンドミルの刃の摩耗が激しい事が問題となる。これらを解決するために、回転数を下げたり、切込み量を 0.3 mm 以上持たせたりする事で刃の剛性を持たせ摩耗を抑えた。

このように、機械加工を通して材料の特徴をつかみ、機械加工技術を向上させてきた。

3. 機械加工で工夫してきたこと

3.1 鉛の加工法

赤外自由電子レーザー加速器の放射線遮蔽に利用する、鉛ブロックの加工内容と加工時に行った工夫点を次に述べる。

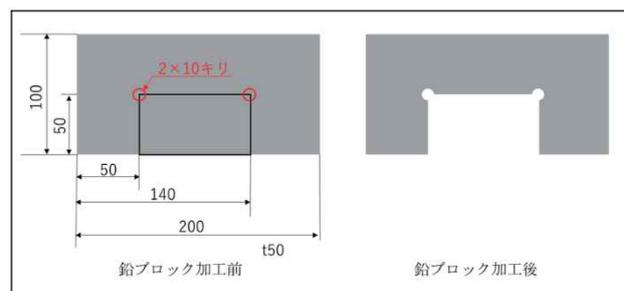


図 1: 鉛ブロックの寸法と回転用に追加した貫通穴

赤外自由電子レーザー加速器を覆うように鉛ブロックを配置するため、ブロックの切り抜き加工を行った。材料は 200×100×50 mm の鉛ブロックである。

鉛を加工する上では鉛中毒を抑えるためにも鉛を拡散させない必要がある。そのため切りくずの処理が簡単なコンタマシンとボール盤を選択した。コンタマシンは直線しか加工できないため、角部に穴 (図 1) を開けておき、刃を 90° 回転させられるようにした。また、直線部の加工を容易にするために、鉛ブロックと刃物が平行になるガイドを活用 (図 2) し加工を行った。

加工時には、防塵マスク、ゴム手袋と保護メガネを着用^[2]し加工を行った。加工後には、鉛の切り屑を作業場に残さないよう掃除を徹底した。

また、鉛は融点が低く柔らかい材質のため、コンタマシンでは、加工熱により溶けた鉛がノコ刃に溶着する事で加工が困難となる。対策として、ノコ刃の側面に油をかけることで溶着を抑えた。加工後、エタノールを用いて洗浄と脱脂を行い、計 17 個を完成させた。図 3 は赤外自由電子レーザー加速器への設置後の写真である。

[#] itoyuhei@post.kek.jp



図 2：コンタマシン加工時の様子



図 3：赤外自由電子レーザー加速器へ組み込み

3.2 多数個加工品の製作方法の検討

次に、コンデンサの銘板を 40 枚製作する依頼に対して行った工夫点について紹介する。

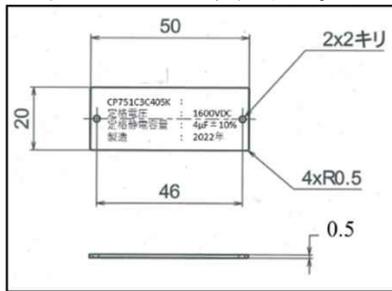


図 4:ステンレスの銘板の寸法など

一枚の銘板の寸法は図 4 のように、 $20 \times 50 \times 0.5$ mm で厚さが 0.5 mm と薄い。そのため、そのままワイヤーカットで切断すると、ジェットの水圧で材料が振動し切断加工が不安定になる問題がある。その問題を解決するために次のように工夫した。

$300 \times 55 \times 0.5$ mm のステンレスの板を 5 枚シャーリングで切り出す。その後切り出した板を 5 枚まとめてスポット溶接機にて外周部を溶接した。溶接することで、板厚が 0.5 mm から 2.5 mm と厚くなり、強度が増すことで加工を安定させ、5 枚同時に切断加工可能となった。

また、外形 (20×50 mm) と穴 ($\phi 2$ mm) を一度に加工できるよう、サブプログラムを活用し加工プログラムを製作した。

ワイヤーカットで切断した後の写真が図 5 となる。



図 5：ワイヤーカット後

次に、レーザーカット加工の工夫点を紹介する。今回は 40 枚の銘板を刻印する必要があり、まとめて刻印ができるようコピー用紙を材料の寸法に切り

出して、切り出し箇所を基準として、切り出した板を設置することで、まとめて刻印が行えるように工夫した。(図 6)

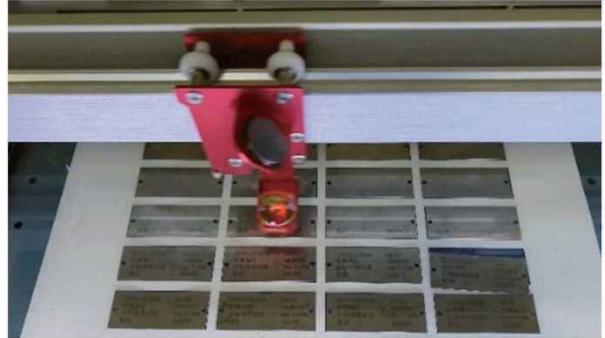


図 6:レーザーカットで刻印中の様子

4. まとめ

これまで 105 件の製造支援業務を通して、様々な材料の加工を行い、加工性の特徴とそれらに応じた機械加工技術を習得する事が出来た。

今後はさらに、多くの実験機器や部品の製造支援業務を通じて、加工法に関するノウハウや新技術を習得していきたいと考えている。また、培ったモノづくりの技術を応用して、装置の設計、開発などの業務にも努めていきたいと考えている。

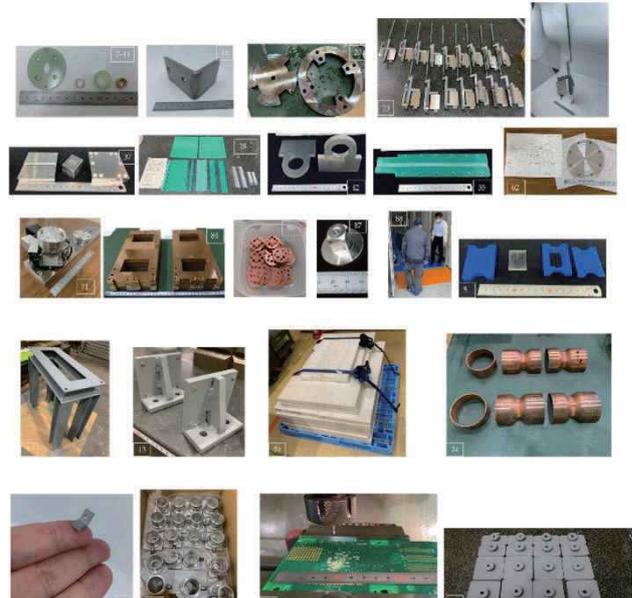


図 7：これまでに製作した代表的な加工品（一部）

参考文献

- [1] 坪井 弘司, ガラス繊維の特性と加工, 繊維学会誌/20 巻 (1964) 10 号, p. S148-S150.
- [2] 日本鋳業協会鉛亜鉛需要開発センター, ホーム→鉛について→鉛の環境・安全・リサイクル→安全な取り扱いパンフレット(PDF), 鉛の安全な取り扱い, 鉛遮音・遮蔽委員会(2015) 2022 年 10 月 26 日閲覧. https://jlzda.gr.jp/pdf/pamphlet_1.pdf

「技術」と「人」と「お金」をめぐる戦略

牧村俊助 #

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

Abstract

加速器科学の先端研究機関である KEK において世界をリードする新しい技術、すなわちイノベーションを創出することは技術職員の重要な責務です。世界をリードする技術を創出するのであれば、世界の技術を知らなくてはなりません。現代の産業は、日々、進化する先鋭化かつ細分化された技術の組み合わせで構成されており、新たな技術の多くは、これらの先鋭化・細分化された技術をつなぐことによって創出されています。そのため、加速器科学の分野外の技術を学ぶことによって自らの「技術」に異分野の文化を吹き込むことが出来ます。大規模な技術を開発するためには「人」と「お金」が必要ですが、自立した技術職員として自らの力で外部資金を獲得することが望まれています。私は、大学等・研究機関・企業の共同研究や共同利用を利用し小さいことから始めて、得られた成果を可視化して大きな「技術」につなげています。さらに国際協力や産学連携を含めると技術開発の規模も大きくなり、内容も高度化することができます。本報告では、私が「技術」をどのように創出しようと考え、そのために必要な「人」と「お金」を、どのように獲得しようとしているのか、きわめて個人的な戦略をご紹介します。

1. はじめに

例年、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の技術交流会では、発表テーマが決まっているのですが、私が今回の技術交流会の発表を依頼された時には、テーマは決まっていませんでした。そこで、テーマの候補として、施設建設の話や装置開発の話に加えて、国際協力、国内協力、産学連携活動を通じた仕事の進め方に関する話を提案したところ、仕事の進め方の話を聞きたいという要望がありました。技術交流会は新規採用技術職員と採用二年目の技術職員が発表する場も兼ねているので、仕事への考え方や進め方を話すことによって、今後のキャリア構築に役立つのではないかと考えました。また、何より自分でも話したことのない内容でもあり、自分の仕事の進め方を振り返るためにも意味があると考え、この話題を選びました。

加速器科学の歴史は、物理と技術の両輪で進むと言われてきました。KEK では、新たな技術を創出し、加速器科学の発展に貢献することが使命ですが、その中で技術職員がどのような種類の仕事に取り組むかは、何十年にわたり議論されてきました。しかし、いまだに結論が出ていませんし、これからも出ることは無いでしょう。これまでの議論では、技術職員の仕事には設計・開発・統括と考えられる技術的な仕事や製作・運転・維持管理と考えられる技能的な仕事があると言われていました。一方で、物理にしても技術にしても、明確な線が引かれているわけでもなく、さらに各職員に求められる技術・技能の配分等は参加しているプロジェクトや所属している研究系の時期・状況によって異なります。そして、実験期間に応じて割合が変化しようとも、この幅広い種類の仕事がどれも重要です。また、技術職員が自分の仕事の割合を技術と技能のどちらに振り分けるか

は、個人の価値観やキャリアにも依存します。しかしながら、加速器科学の先端研究機関である KEK において世界をリードする新しい技術、すなわちイノベーションを創出することは技術職員の重要な責務でもであると断言できます。

本発表では、技術をイノベーションと定義して、私が「技術」をどのように創出しようと考え、そのために必要な「人」と「お金」を、どのように獲得しようとしているのか、きわめて個人的な戦略をご紹介します。

2. 「技術」を創出するために

世界をリードする技術を創出するのであれば、世界の技術を知らなくてはなりません。ここでいう世界とは、必ずしも海外を意味しているわけではなく、国内研究機関や産業界も含めた KEK の外部のことを指しています。実際に装置を開発して運用に至るためには、構想、設計、試作、試験、製作、導入、運転、改良、保守というプロセスを踏みます。また、設計で考慮すべき点も、機械設計、構成部品、材料特性、製造法、検査法、放射線に対する影響や保守の仕方と全てのプロセスで幅広い知識が必要となります。現代の産業は、日々、進化する先鋭化かつ細分化された技術の組み合わせで構成されており、新たな技術の多くは、これらの先鋭化・細分化された技術を結び付けることによって創出されています。そのため、従来の価値を超える装置の開発には、技術の情報を常に更新し続ける必要があります。また、競争相手であると同時に課題を共有する海外の研究機関の情報を得ることも世界の基準を理解することに役立ちます。

加速器科学の分野外の技術を学ぶことは新たな技術を創出することに有効に働きます。これは、組み

shunsuke.makimura@kek.jp

合わせの選択肢を増やすことにも役立ちますが、多くの技術を創出する気付きにもつながります。技術は、過去から未来へのビジョンや目的といった、創出された技術の背景とも呼ぶべき文化を反映してシステムに組み込まれます。すなわち、技術を学ぶということは、その効果だけでなく分野外の文化を学ぶことにも等しく、加速器科学に新たな考え方を吹き込むことにつながります。先に述べた技能的な仕事も新たな考え方によっては、これまで身近にあるのに気づけなかったイノベーションにつながることもあります。

よって、戦略①は、「自らの「技術」に異分野の文化を吹き込む」です（図1）。

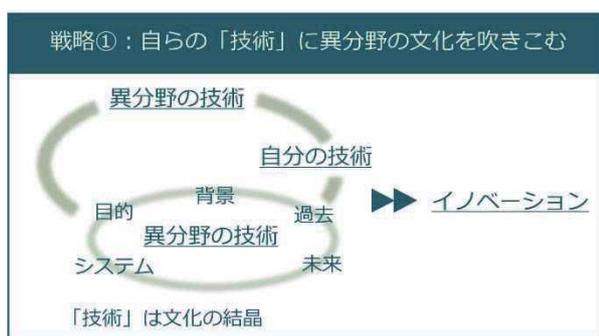


図1：戦略①：自らの「技術」に異分野の文化を吹き込む。

3. 「人」と「お金」をめぐる戦略

3.1 「人」と「お金」を確保する必要性

KEKは大学共同利用機関であるため、施設を運転し続け、実験の機会を提供し続けることは至上命題です。そのためには、「人」と「お金」が必要です。一方で、先鋭化かつ細分化された技術の組み合わせで構成されている現代の科学技術では、一人で出来ることは限定されるため、技術を開発するためにも「人」と「お金」が必要です。しかし、従来の価値を凌駕する新たな技術には独自の技術開発が必要になる上に、失敗のリスクが伴います。そのため、大規模な技術を開発しようとする場合には、施設の運転経費の他に、自らの力で外部資金を獲得することが望まれます。また、自らが創出した技術のアイデアから開発を進め、実装することは技術職員として自立することを意味しています。

3.2 外部資金を獲得するために

とは言いながらも、外部資金を獲得するのは、それほど容易ではありません。実際、私の場合は、2005年度から毎年、科学研究費補助金の申請をし続け、試行錯誤をしながら2016年度に初めて採択されました。実に11年の挫折を経ています。しかし、その後は現在まで途切れることなく採択されています。この突如、採択率が上昇した要因の一つには申請書を書き続けることによって審査員が読みやすいよう

に書き方が洗練されたことがあります。それに加えて、書き方だけでなく普段の技術開発の中で下準備をするようにしたことも、大きな要因となっています。それは、科研費や外部資金の審査員の視点に立ってみると容易に想像できます。審査員は主に、その研究に価値があるかどうか、研究を実現できるかの二点を評価します。研究に価値があるかどうかは、分野が共有する課題を解決できる技術を提案できるかどうかということです。その提案を成功させるためには、客観的な視点で価値がある必要があります。そのためには、先に述べた戦略①に示したように異分野の文化を参考にすることが有効です。もう一つの研究を実現できるかどうかは、申請者の実績、研究体制の完成度の高さ、提案する技術に関する仮説の検証の有無で判断されます。この評価を高めるために、私は大学等・研究機関・企業の共同研究や共同利用を利用しました。戦略②は、「小さいことから始める」です（図2上）。



図2：戦略②：小さいことから始める。戦略③：成果を可視化して大きな「技術」につなげる。

多くの大学等の研究機関では、国の予算で共同利用を展開しています。この共同利用では、大きな予算は期待できず、主に旅費のみが支給されることが多いです。しかしながら、この制度の最大の利点は、小規模ながら最先端研究を無料または安価に専門家の支援のもとで利用できることにあります。魅力的な研究を提案できれば、それは協力者の実績にもなるので、技術開発への積極的な参加も期待でき、外部資金申請の分担者としての参加へつなげることが出来ます。それにくわえて、共同利用で提案する技術の検証を行い、実績を作ることが出来れば、それはそのまま、研究を実現できるか？という問いへの回答にもなっています。つまり、まずは「人」と小さな「お金」を足掛かりに開発を始めて、「技術」を検証し、実績を作るということです。

実際に、私も2016年度に申請した新材料を加速器に利用することを目標にした科研費では、2014年度に室蘭工業大学の共同利用で材料を試作して、その実績を元にして採択されました。また、その後のいくつかの科研費では、過去に採択された科研費のテーマに関連付けて申請を行い、採択されています。一つのテーマに関しては、大型の産学連携予算の獲

得にもつなげています。「人」を本格的に集めるためには、大型の外部資金を獲得する必要がありますが、先に述べた共同利用や共同研究を活用することでも、技術開発への協力を得ることはできるでしょう。これは、小さく始めて大きく育てたとも言えます。

3.3 成果の可視化

このとき、開発を拡大し、継続していくためには成果の可視化をすることが重要です。外部資金の獲得は、それ自体が成果とも呼べますが、その外部資金を元に、国際会議や学会などでの受賞歴、査読付き論文、招待講演、知財申請の有無などで技術開発が評価されます。大型の外部資金につなげる場合には、客観的に評価の高い成果の可視化は必須だといえます。これらが達成できない場合でも、KEKであれば加速器学会のプロシーディングや共同利用の報告書など査読が無くても、成果が可視化されていれば、一定の評価を受けることができます。これらの成果は、申請者に紐ついて、審査員が把握できないと意味はありません。この場合、researchmap^[1]やORCID^[2]などの研究者情報データベースが役立ちます。特に、前者は科研費の審査員が必要に応じて、参照できるようになっているので、情報は一年に一度、申請時期に合わせて必ず更新しましょう。よって、戦略③は「成果を可視化して大きな「技術」につなげる」です（図2下）。

3.4 国際協力と産学連携を進めるために

国際協力や産学連携を含めると技術開発の規模も大きくなり、内容を高度化することができます。しかし、技術職員が中心となって国際協力を始めるには、いくつか存在するハードルを努力によって超えなくてはなりません。それは、語学力の向上、人脈の構築、旅費の確保です（図3上）。

語学力の向上と人脈の構築は、ある程度、関連していて同時に達成可能です。語学力に関して、writing や listening は独学でも向上しやすいと思います。しかし、speaking は話さないと向上しません。また、人脈の構築にも speaking がハードルになります。あくまで個人の取り組みですが、私は国際会議で発表する際に、speaking の機会を強制的に作り、人脈を構築するために、次のようなノルマを設けていました。それは、「口頭発表で申し込み、納得いくまで練習する」「他人の発表に、一日に一度は質問する」「Coffee break や Banquet で自分の技術に関係する人に話しかける」です。後者の二つは簡単なようで難しく、他人の短期間の発表に的確な質問をしたり、対面で長時間の議論をしたりするためには、事前に下調べが必要です。よって、私の場合は事前に配布される abstract 集を読み、関連する発表を選定し、発表者の論文を調査し、質問事項を検討してから国際会議に臨んでいました。そのためには、自分のスライドを発表直前まで作成しているわけにはいかず、早めに取り組むことが必要となります。しかし、これが出来れば、人脈を作るのはかなり容易になります。

技術職員に限らず、旅費の確保はいつでも課題です。初めのうちは国内で開催される国際会議に参加して人脈を作りましょう。次に、国際会議への参加や海外出張で施設の運転に貢献できることを示して、上司または外部資金を獲得している人に旅費を捻出してもらうように依頼します。自分で外部資金を獲得していれば、それを利用することも出来ます。また、KEK には海外に出張・滞在するための制度もいくつか存在し、CERN 研修や日米協力事業の特別枠を利用することも出来ます。機構からの案内は見逃さないようにしましょう。

産学連携のための外部資金は、科研費などの物理実験を推進する研究費とは異なるシナリオが必要です。産学連携の外部資金は動く「お金」も大きく、産業分野からの「人」の協力も得られます。しかし、大型の産学連携の外部資金の場合は、研究費の一部を企業が負担する場合がほとんどであるため、ビジネスモデルのビジョンが明確で企業または産業分野の利益につながる必要があります。例えば、世界で最も性能の高い材料を開発しますというよりも、配分された額の十倍の売り上げを達成できると提案したほうが採択率は高くなります。低炭素やバイオマテリアル、IoT (Internet of Things) など、近年の潮流に乗らないと採択されない場合も多くあります。これらの観点からも KEK の外部の文化に触れておくことが重要となります（図3下）。

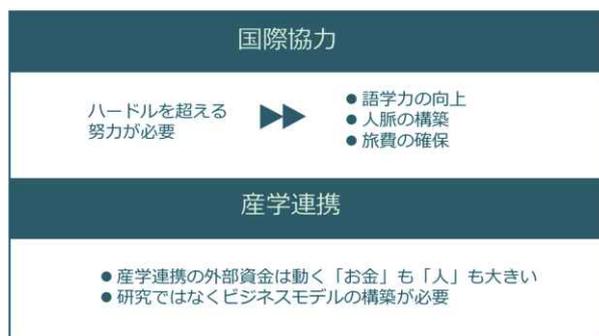


図3：国際協力と産学連携

4. おわりに

KEK の技術職員として「技術」の開発をどのように進めてきたのか、そのための「人」と「お金」をどのように集めようとしてきたのか、個人的な経験をもとに、いくつかの戦略をご紹介します。以下に整理します。

- 戦略①：自らの「技術」に異分野の文化を吹き込む
- 戦略②：小さいことから始める
- 戦略③：成果を可視化して大きな「技術」につなげる

後半には、国際協力や産学連携研究にどのように取り組んできたかも述べました。どのような仕事の進め方をするにしても、自分でよく考えて、本気で取り組んで、楽しむことが大切です。若い技術職員の参考になることを祈ります。

参考文献

- [1] <https://researchmap.jp/> , accessed in November, 2022
- [2] <https://orcid.org/> , accessed in November, 2022

J-PARC MR 主電磁石システムの高繰り返し化対応

三浦一喜 #

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

J-PARC メインリング(MR)では、運転周期を 2.48 秒から 1.36 秒に短縮、高繰り返し化することでビームパワーを増強する計画が進められている。これを実現するためには主電磁石システムの高繰り返し化対応アップグレードが必要となる。この高繰り返し化対応の一環として、2021 年度の J-PARC MR の長期メンテナンス期間中、新電源のインストール、既存電源の再構成、主電磁石負荷の分割、電力ケーブル再配線など、多岐にわたる主電磁石システムのアップグレードが行われた。このような大規模アップグレードの後には、配線作業の正確性とさまざまな安全性を慎重に確認することが不可欠となる。本稿では、J-PARC MR の高繰り返し化対応に向けた主電磁石電源システムのアップグレード概要および、アップグレード後に実施した各種確認作業の一例を紹介する。

1. はじめに

J-PARC ではビーム大強度化のために、主リングの運転周期を 2.48 秒から 1.36 秒へと速める高繰り返し化が求められており、その実現のためには主電磁石電源の高繰り返し化対応が必要となる。この要求に対し我々は 2 つの手法で対応することにした。

一つは、高繰り返し化対応の新電源開発である。この新電源については過去にも報告^[1]しているため、詳細は省略するが、既存電源の約 2 倍の高出力電圧に対応するためのパワーユニット、交流系統における電圧変動の抑制のためのコンデンサバンク^[2]および電力制御、出力電流変動を小さくするためのデジタル制御^[3]の要求を満たし、高繰り返し化に対応した電源である。ただし、全ての主電磁石電源を新電源に交換するには莫大なコストが必要となる。そこで我々はもう一つの手法として既存主電磁石電源の再編成を検討した。この再編成では既存の大型電源を負荷の軽い電磁石ファミリー用に変更することで高繰り返し化に対応する方法と、既存の 1 ファミリーを 2 分割することで負荷を半減させたうえで、既存電源 2 台でドライブする方法の 2 通りで検討を行った。ここで述べたファミリーとは一台の電源でドライブする主電磁石群の呼称であり、1 文字目が電磁石種別 (Bending / Quadrupole / Sextupole)、2 文字目が Defocus / Focus、3 文字目がファミリー固有名を表している。

我々はこの新電源インストールおよび既存電源再編成を 2021 年度長期シャットダウンにおいて並行して実施することで、J-PARC MR の主電磁石システムを高繰り返し化に対応した状態にアップグレードした。このアップグレードによる電磁石ファミリーと電源の対応および変更点について概要を表 1 に示す。本報告では新電源インストールおよび既存電源再編成の概要、それら大規模アップグレードに伴う各種配線作業の確認手法や実施した安全性確認について紹介する。

表 1: 主電磁石システムのアップグレード概要

Mag family		PS	Changes
-2021	2022-		
BM	BM	New	New PS with C-BANK
QDN	QDN	New	New PS with C-BANK
QFN	QFN	New	New PS with C-BANK
QDX	QDX1	Pre-BM5	Halved load & PS replacement
	QDX2	Pre-BM6	Halved load & PS replacement
QFX	QFX1	Pre-BM1	Halved load & PS replacement
	QFX2	Pre-BM2	Halved load & PS replacement
QFP	QFP	Pre-QFR	PS replacement & rewiring
QDR	QDR	New	New PS & rewiring
QFR	QFR	Pre-QDX	PS replacement
QDT	QDT	New	New PS & rewiring
QFT	QFT1	Pre-QFT	Halved load
	QFT2	Pre-QDT	Halved load & PS replacement
QDS	QDS1	Pre-QDS	Halved load
	QDS2	Pre-QDR	Halved load & PS replacement
QFS	QFS1	Pre-QFS	Halved load
	QFS2	Pre-QFP	Halved load & PS replacement
SDA	SD	New	New PS & Family integration & rewiring (SDA & SDB)
SDB			
SFA	SFA	New	New PS

kazuki.miura@kek.jp

2. 新電源インストール

既存電源の流用では対応できないファミリーについては、開発を進めていた新電源で対応した。この新電源は、既存電源に対して出力電圧 2 倍、系統変動抑制、デジタル制御を可能としたものである。この新電源では制御装置を KEK 独自開発することによって、新電源の開発、設計をメーカーと KEK での分担、協力による体制で行うことを可能としたことで参入メーカーの敷居を下げ、大幅なコストダウンを達成している。2016 年度の初号機を始めとして順次インストール準備を進めてきたものであり、2021 年度長期シャットダウン中に最終納品分が全て J-PARC に納品され、計画された新電源 12 台全てがインストールされた。なお、新電源中最大となる偏向電磁石(BM)電源では図 1 に示す通り、一台当たりで電源本体全長 20 m 超に加えてコンデンサバンクとして使用する海上コンテナ 3 台という規模の大型電源となり、BM 電源 6 台を設置するために電源棟 D4～D6 の新築が行われ、既存の D1～D3 電源棟に加えて、J-PARC MR では電源棟 D1～D6 の全 6 棟編成となった。



図 1: 新電源 (BM3)

3. 既存電源再編成

既存電源を高繰り返し化対応にして使用するための再編成においては、2 種類のアプローチが行われた。一つは負荷の重い電磁石ファミリー用に使用していた大型電源を負荷の軽い電磁石ファミリーに流用して再利用（出力電圧 2 倍での運用が可能な既存電源への置き換え）する方法、もう一つは主電磁石負荷を半減（現状の主電磁石ファミリーを 2 分割して、半減させた負荷を出力容量に近い 2 台の既存電源でそれぞれにドライブ）する方法である。更に一部ファミリーではこれらの手法を併用することで、高繰り返し運転に対応させた。それぞれの手法について紹介する。

3.1 既存大型電源への置き換え

負荷の重いファミリーをドライブしていた大型の既存電源については、出力電圧 2 倍での運転が可能な負荷の軽いファミリー用に再編成を行い、既存電源での 1.36 秒運転に対応させた。この一例として QFR ファミリーの電源流用について表 2 を示す。

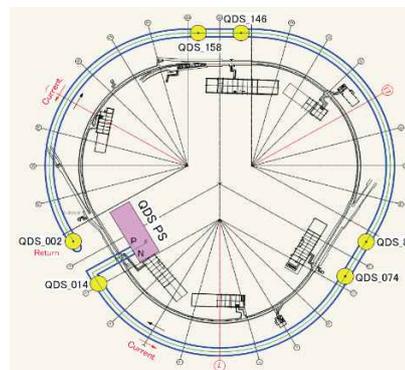
表 2: 既存大型電源への置き換え例 (QFR)

PS	Old	New
Rated output current	1038 A	1037 A
Rated output voltage	800 V	2100 V
Output power (Peak)	0.81 MW	2.07 MW

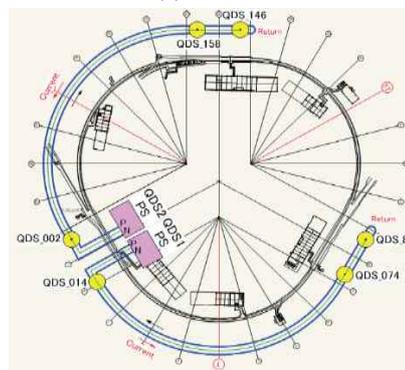
この大型電源への置き換えであるが、単純に定格出力電力が大きければ良いという訳では無い。主電磁石電源ではパワー素子として IGBT や IEGT が使用されている。パワー素子は最小パルス幅で最小出力が決まるため、それらで構成された電力変換ユニットは定格出力に対して小さすぎる出力は制御できない。そのため、今回のように 2 倍の出力電圧を目的とする場合には、出力電力において約 2 倍のものを選定する必要がある。我々はそれらを前提としたうえで事前にシミュレーションによる検討を実施し、置き換え先の既存電源を決定している。

3.2 主電磁石負荷の 2 分割

これまでの主電磁石ファミリー 1 つを 1 台の電源がドライブする構成から変更し、一部ファミリーの主電磁石負荷を 2 分割することで、負荷を半減させて既存電源の定格容量での高繰り返し運転に対応させる。これには電源棟、MR 加速器トンネル内およびそれらをつなぐサブトンネルを含めて各ファミリーで数百メートルを超える大規模な配線変更が多岐にわたって実施された。負荷分割に伴う配線変更の一例として QDS を図 2 に示す。



(a) Before



(b) After

図 2: 主電磁石の負荷分割例 (QDS).

青線がパワーケーブルを表しているが、元々は MR トンネル内を一周して QDS 主電磁石全 6 台を繋いでいた配線経路を電源棟から最遠部で分割している。これは光学的な対称性を崩すことになってしまうが、コスト削減のためにケーブル長がなるべく短くなる形での再編成を行っている。また高繰り返し化対応に伴い、一部ファミリーでは敷設していた低圧ケーブルを全区間において高圧ケーブルに張替える作業も実施された。これらケーブル撤去、敷設工事は莫大な量であり、2021 年度長期シャットダウン期間中における主電磁石系アップグレード作業においても大きな割合を占める工程となった。

4. 電源再編成後の確認

電源の再編成においては、地上部の電源棟やトンネル内も含めて大規模な配線変更や新規敷設(地上部: 約 39 km、加速器トンネル内: 約 12 km)が実施された。これら大規模な配線作業に対する確認作業の一例を紹介する。

4.1 新電源受電部での配線確認

新電源インストールに際しては受電系の新規配線作業、既存電源からの負荷配線接続など大規模なケーブル敷設工事が行われた。これら配線工事の確認として新電源立ち上げに先行して受電配線の確認を実施した。新電源受電配線の確認としては新電源の受電部ケーブルをリフトし、トランスからの 3 相交流受電部の電圧をオシロスコープで確認した。結果としてケーブルスワッピングが発生していた箇所が見つかった。発見されたケーブルスワッピングの一例として図 3 を示す。

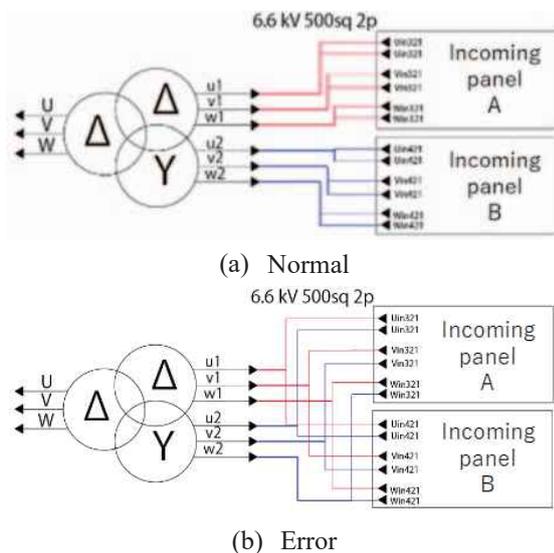


図 3: 新電源受電部における誤配線事例

新電源では Dd0y11 形式の受電トランスを採用しており、受電トランス二次側からデルタ(Δ)およびスター(Y)の 2 系統で受電している。このデルタとスターそれぞれで 3 相を 2 並列にケーブル配線している訳であるが、その並列配線が新電源受電盤とデル

タ、スター間で混在した状態になっていた。このまま電源を立ち上げればデルタ、スター間の位相差(30°)によって受電ケーブル間に電流がループしてしまい、ケーブル損傷の危険もあった。この結果を基にした再配線および再度の受電電圧測定において正常性が確認され、新電源は無事に立ち上げ調整が実施された。大電力機器のインストール、立ち上げにおいては今回のように事前の安全確認が非常に重要である。

4.2 主電磁石負荷配線の健全性確認

本章冒頭で述べた通り、本アップグレードでは長大な距離での配線作業が実施された。配線変更においては、ケーブルの配線間違いを予防するためにケーブルのタグ付け目視確認や導通チェック、電源出力部でのインピーダンスアナライザでの負荷測定などといった方策は取られ、それらの成果として配線間違いの発見、修正が随時行われた。しかし、これらの手法では配線のショートなどといった負荷として異常が現れるものまでしか発見は出来ない。ケーブルが長大であることもあり、配線作業が完了した後、ビーム運転前の最終確認として全ての配線変更部における確実性のある健全性確認方法について検討が行われた。

主電磁石のパワーケーブル配線が間違っていた場合であるが、もし極性が反転して配線されていた場合でも、電源から見た場合には負荷としては正常であるため、インピーダンスアナライザによる負荷測定や電源の試験運転では異常に気付くことが出来ない。もし、この状態のままビーム運転を実施した場合には主電磁石は想定外の逆磁場を発生させている状態であるため、ビームの大ロスや、それによる加速器機器の重大な故障に繋がる可能性もある。それらトラブルを防ぐためにも、配線確認は確実な方法で行う必要がある。そこで我々がとった方法は小型アンプを使用して配線作業完了後の主電磁石をドライブし、その磁場を測定することで主電磁石の極性が正しい方向に働いているかを確認する手法である。今回は DC 2.5 kW 容量のアンプを使用して 12 A の電流を流すことで主電磁石を励磁した。この電流値での磁場は主電磁石ファミリーによって異なるものの 10~20 mT 程度である。これは主電磁石電源の定格運転時に比べれば非常に小さな値ではあるが、主電磁石の残留磁場~3 mT 程度に対しては十分に有意な値であり、今回のように磁場極性の確認を目的とする場合には充分である。

この方法を選択した理由は 3 点ある。1 点目は配線変更直後にはまだ再編成後の主電源が通電可能な状態まで立ち上げ出来ていないため、通電がそもそもできないことである。もし通電可能状態になるまで待ってこの磁場測定を行う場合、工程上ビーム運転開始までに極性確認が間に合わない。2 点目は、磁場測定は通電状態の主電磁石に接近する必要があるため、定格運転時(高電圧)の主電磁石の磁場測定

には危険が伴うため、今回のように多くの対象に対して、磁場測定を行うのは危険である。3 点目として、仮に配線間違いがあった場合の事故 (ケーブルや主電磁石の破損) を懸念したものである。以上の点から、今回は低容量の小型アンプを用いてドライブするこの手法を採用した。

結果としては、配線間違いから極性が反転している磁石が 3 ファミリー発見され、配線の修正が実施された。これらは懸念していた通りに極性のみ反転して配線されていたもので、電源側からのインピーダンスアナライザ測定では発見できなかったものである。これにより簡易磁場測定による配線確認の有用性が確認された。

5. アップグレード後の出力電流較正

J-PARC MR の既存主電磁石システムであるが、各ファミリーの電源は指令値に対する出力電流値にそれぞれ異なるオフセット(1 A 未満)が乗っており、それが個体差となっていた。我々は主電磁石システムのアップグレードの準備として、これら電源間個体差を把握するために各電源の出力電流値を 1 台の可搬型 DC-CT を用いて同一測定条件下で測定するシステム(測定エラー1 mA 以内)を用意し、2018 年から電源間個体差の測定を実施していた^[4]。

J-PARC MR では高繰り返し化対応に向けて、主電磁石システムだけでなく、RF システムやビーム入射出システムなども含めた多岐にわたるアップグレードが行われており、アップグレード後のビーム試験初期では、アップグレード前のビーム状態を再現できるかが重要となる。そこで我々はアップグレード後の主電磁石電源に対して、可搬型 DCCT による出力電流測定およびアップグレード前の各主電磁石ファミリーの個体差を再現させるための較正を実施した。

出力電流較正の手法としては、アップグレード前後で可搬型 DC-CT による各電源の出力電流測定結果を比較することで補正値を算出し、各電源制御盤のパラメータ調整や出力電流指令値を作成する際に補正値を自動で適用するように上位制御ソフトの改修が行われた。較正後の出力電流測定結果として、各電源の出力電流値の個体差はオフセット 10 mA 未満までアップグレード前の状態を再現した。この値は電源の持つ出力電流偏差(約 100 mA)に対して十分小さく、較正結果としては充分である。

6. まとめ

J-PARC ではビーム大強度化のために、主リングの運転周期を 2.48 秒から 1.36 秒へと速める高繰り返し化が求められており、その実現のためには主電磁石電源の高繰り返し化対応が必要となる。我々は

この要求に対し、高繰り返し化対応の新電源開発および既存電源の再編成という 2 つの手法を 2021 年度長期シャットダウンにおいて並行して実施することで、J-PARC MR の主電磁石システムを高繰り返し化に対応した状態にアップグレードした。

しかしながら、J-PARC MR 主電磁石電源のような大電力機器においては、大規模アップグレードによる多岐にわたる変更に対して、各種配線作業の確認や安全性確認について入念な検討が必要である。本報告ではアップグレード概要に加えて、それら確認作業についても一例を紹介した。約 1 年間(2021 年 7 月～2022 年 5 月)という長期シャットダウン期間ではあったが、本報告で紹介した以外にも旧電力配線の撤去や制御システム系の配線変更や更新などの作業も行われており、これだけ大規模なアップグレードを重大な故障や事故無く完遂することは困難を極めた。実際に各種確認の結果として修正を行った点も多く、いずれも確認を怠っていれば機器故障やビーム試験に多大な影響を与えるものであったが、それぞれを事前に把握、修正することで、図 4 に DC-CT によるビーム測定結果を示す通り 2022 年 6 月から行われた J-PARC MR ビーム試験^[5]において、ビーム試験初期からビームは正常に MR を周回、加速開始前の 0.13 秒に想定通りの取り出しを行うことができた。

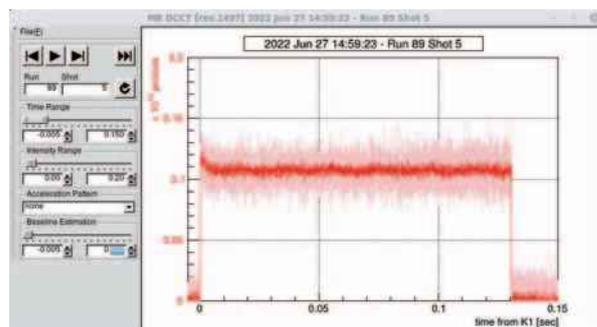


図 4: J-PARC MR ビーム電流測定(2022.Jun).

これは我々の主電磁石システムアップグレードが確実に行われた結果であり、主電磁石システムにおけるアップグレード後の各種確認が正しく行われた証明である。現在 J-PARC MR はビーム試験を終えてシャットダウン期間に入っており、我々は今冬からのビーム試験再開に向けて、アップグレード後の J-PARC MR 主電磁石システムの調整を鋭意進行中である。

参考文献

- [1] Y. Morita *et al.*, “Development of J-PARC MR Main Magnets Power Supplies for High Repetition Rate Operation,” JPS Conf. Proc., vol. 8, Sep. 2015, ID. 012006.
- [2] Y. Morita *et al.*, “Capacitor bank of power supply for J-PARC MR main magnets”, Nuclear Instrument and Method, Vol.901, pp.156-163, Sep. 2018.
- [3] T. Shimogawa *et al.*, “A Control System of New Magnet Power Converter for J-PARC Main Ring Upgrade”, IEEE

Trans. Nucl. Sci., Vol. 66, pp.1236-1241, Jul. 2019.

- [4] K. Miura *et al.*, “Magnet Power Supply Calibration with a Portable Current Measuring Unit at the J-PARC Main Ring”, Proceedings of the IPAC'19, 19–24 May 2019, Melbourne, Australia.
- [5] T. Yasui *et al.*, “Results of high repetition beam commissioning in J-PARC MR” Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Kyushu-University Online, Japan.

J-PARC MR 速い取り出し用セプタム電磁石アップグレードの進捗状況

岩田 宗磨[#]

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

J-PARC メインリング(MR)は、ニュートリノ実験施設へ速い取り出し(FX: Fast eXtraction)で陽子ビームを供給しており、515 kW から 1.3 MW への高出力化が計画されている。運転周期を 2.48 秒から 1.16 秒へ短縮し、ビーム粒子数も 30 %程度の積み増しを目指す。FX のセプタム電磁石(SM: Septum Magnet)も短い運転周期への対応や高出力ビームに対する放射化低減のためのアパーチャ拡張が必要とされ更新中である。しかし、1 台の高磁場 SM に初期不良がありインストールが延期された。延期期間中はこの SM を欠いた状態でビーム試験や供給を行う必要があり急遽対応した。ビーム軌道計算から 1 台の SM 欠如の状態でのビーム取り出し可能な条件を見出すことにより、2022 年 6 月のビーム試験で Abort ラインへの 3 GeV ビーム取り出しに成功した。Abort ライン上のプロファイルモニターで確認された 3 GeV ビーム位置は軌道計算結果と一致し、ビームダクトの残留線量分布も矛盾のないものだった。また、新 SM のインストールでは、軌道計算から設置位置を決定し、レーザートラッカーを使用した設置精度 ± 0.1 mm 以下の精密アライメントを実施した。

1. はじめに

J-PARC^[1]は LINAC (LINear ACcelerator), RCS (Rapid Cycling Synchrotron), MR (Main Ring) の 3 つの加速器で構成されている。MR はハドロン実験施設とニュートリノ実験施設へ陽子ビームを供給している。図 1 に J-PARC の概略図を示す。

FX とは陽子ビームが MR を 1 周する $5.2 \mu\text{s}$ の間に全てのビームをニュートリノ実験施設へのビームライン(NU ライン)に取り出す手法である。NU ラインへの分岐点は FX セクションにあり、リング内側へビームが取り出される。同じ分岐点から、外側へビームが取り出され、アボートダンプへ周回ビームを送る Abort ラインがある。MR のビーム調整や試験、機器の異常検知や各種モニターからの異常信号発報などの理由で運転を中断する際に使用される。図 2 に NU, Abort ラインを示す。

FX セクションはビーム上流側のキッカー電磁石(KM: Kicker Magnet)群と下流側の SM 群から構成され、KM, SM の配置は NU, Abort ラインで対称となっている。KM はビーム通過の瞬間に合わせて、周回軌道に磁場を作り、ビームを取り出しライン側へ蹴り出す。SM は周回軌道から分かれてきた取り出しビームの軌道をさらに偏向し、取り出しビームラインへ導く。SM は周回ラインに近接した位置に磁場を生成するため、周回ライン側への漏れ磁場低減対策も必要とする。

NU ラインへ取り出された陽子ビームは NU ターゲットステーション内の NU 用標的中の原子核に衝突し、 π 中間子を発生させる。 π 中間子が崩壊し生成されるニュートリノをスーパーカミオカンデ^[2]へ送る。2027 年以降はハイパーカミオカンデ^[3]が稼働予定である。ニュートリノ振動測定の実験精度を上げる

ために、より多くのニュートリノ生成が必要で、MR の高出力化が計画^[4,5]されている。2020 年 1 月に 515 kW の NU への供給ビーム出力を達成しており、現在はさらに運転周期を 2.48 秒から 1.16 秒へ短縮(通称 1 Hz 運転)し、ビーム粒子数も約 1.3 倍の 3.3×10^{14} PPP (Particles Par Pulse)とすることで、1.3 MW への増強を目標とする。

MR 高出力化に向けて、1 Hz 運転に対する発熱対策やビームロス低減のためビームダクト開口部のサイズ(アパーチャ)拡張が必要とされ、FX SM のアップグレードを 2022 年 5 月までに実施した。ただし、1 台の SM(新 SM32)には初期不良があったため、2023 年の夏季メンテナンス期間までインストールが延期されている。本報告では、FX SM のアップグレード進捗状況を記述する。また、新 SM のインストール作業においてビーム軌道計算と精密アライメントの 2 つの技術を駆使して貢献できたので、詳細を紹介する。

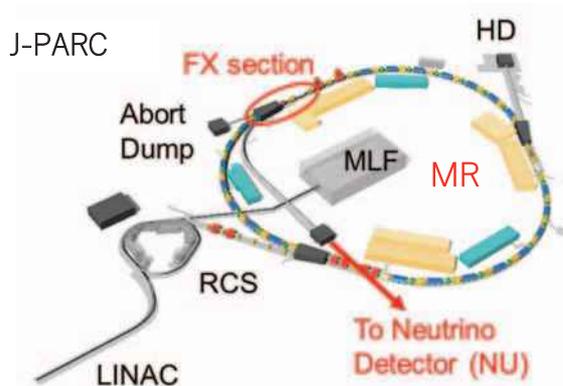


図 1: J-PARC の概略

[#] soma.iwata@kek.jp

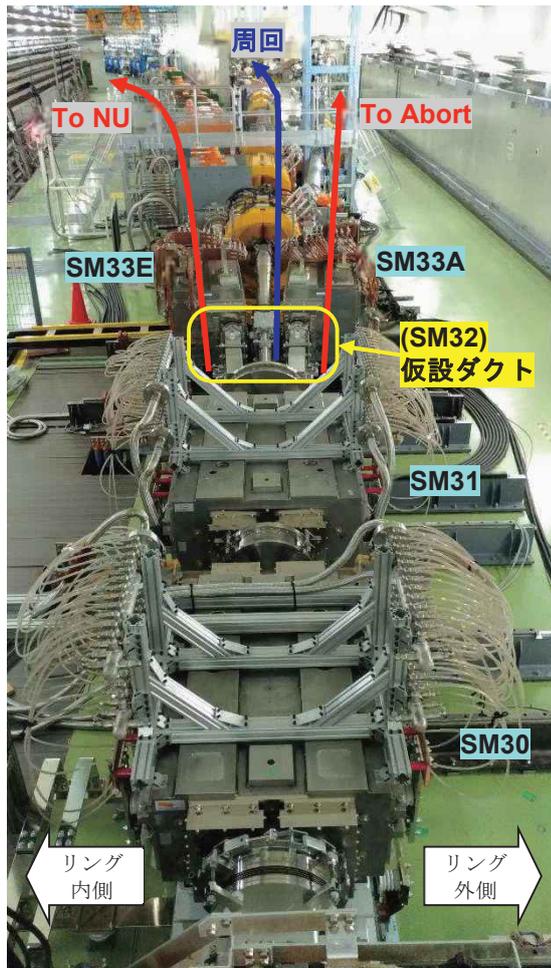


図 2: FX ビームライン

2. FX SM アップグレードの進捗状況

FX SM のアップグレード前後のレイアウトを図 3 示す。新レイアウトについて、ビーム上流側に約 0.3 T の低磁場 SM (Eddy1, 2)、下流側に約 1 T の高磁場 SM (SM30~SM33) があり、低磁場 SM のすべてと高磁場 SM の SM30~SM32 が新規製作 SM と交換されている。SM33 は旧高磁場 SM を使い再構築した。

2.1 低磁場 SM のアップグレード

低磁場 SM^[6-12] はパターン動作の電流型からパルス動作の渦電流誘導型 (Eddy SM) に変更した。図 4 に真空チャンバー内の Eddy SM を示す。Eddy SM の導入の目的は、コイル発熱の軽減、周回ラインと取り出しラインの間のセプタムコイルが不要となることによるコイル絶縁被膜の摩耗問題の解消、アパーチャの拡張および漏れ磁場の低減である。発熱について、Eddy SM はパルス動作になり、通電されている時間は 1 ms 程度であるため、1 Hz 運転でも発熱は無視できる程度となった。また、セプタムコイルは渦電流を発生させるセプタム板に代わる。電流型の旧低磁場 SM は、セプタムコイル表面にセラミック溶射を行い、絶縁を取っているが、励磁時のコイル間のアンペール力に起因するコイルの振動から絶縁被膜の

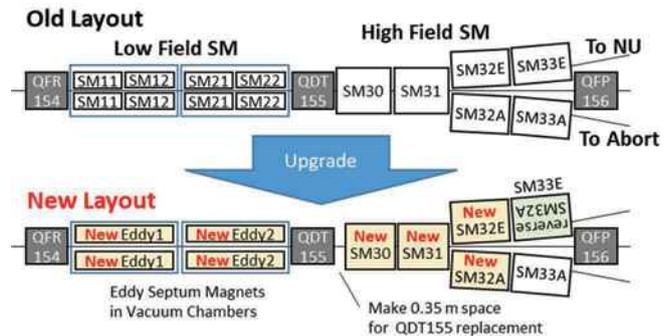


図 3: FX SM 新旧レイアウト

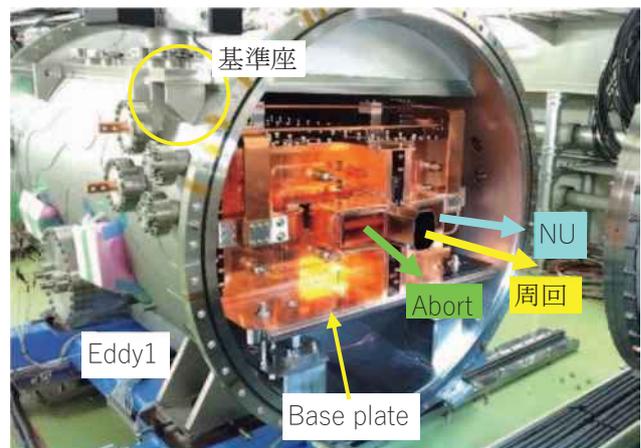


図 4: 真空チャンバー内の Eddy SM

摩耗が懸念されていた。Eddy SM は、セプタムコイルを使用しない事で、その問題を解決し耐久性が向上した。さらにセプタム板厚 6 mm はセプタムコイル 9.5 mm より薄いので、合計 2 mm 厚の磁気シールドを追加することができた。Eddy SM は電流型よりも周回ラインへの漏れ磁場が少なく、さらに磁気シールドが追加されたことにより、旧低磁場 SM と比べ 1/10 以下への低減に成功^[13]した。アパーチャについても磁気シールドを含めたセプタム面合計厚が 9 mm となり、旧低磁場 SM と比べ、0.5 mm の拡張ができた。

図 5 に低磁場 SM アップグレード前後の外観を示す。

2.2 高磁場 SM のアップグレード

高磁場 SM^[14-16] のうち、SM30, SM31, SM32 が交換対象となった。交換の目的は、周回ラインと取り出しラインの各ビームダクト間に流れる誘導電流遮断による発熱対策と、ビームロス低減のための周囲の電磁石も含めたアパーチャ拡張である。

発熱対策について、SM30~SM32 は周回ラインと NU, Abort ラインが近接しているため、SM30 と SM31 の上流と下流、および SM32 の上流では、1つの大きなフランジに 3 本のビームダクトが溶接されている。旧 SM のダクトは全て金属製で、各ダクト間でループ回路ができるため、SM パターン励磁による誘導電流が生じていた。1 Hz 運転時では、誘導電流による発熱を考慮し、NU, Abort ラインのダクト

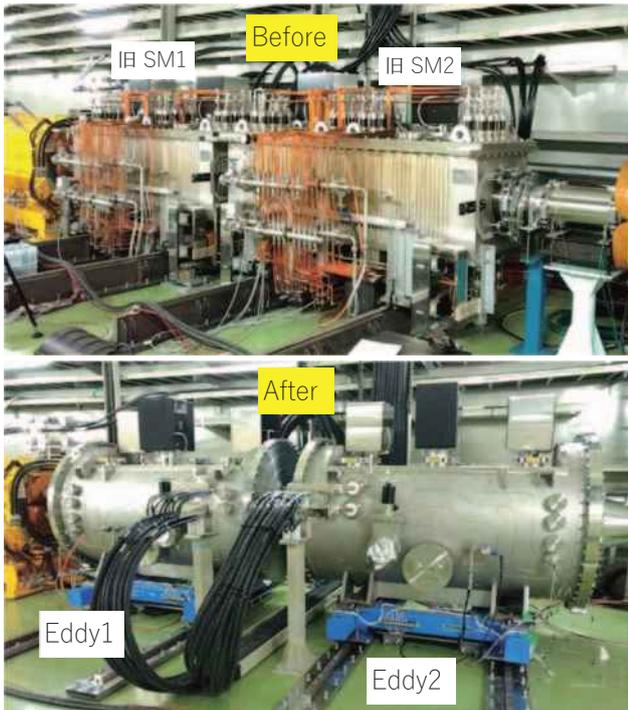


図 5: 低磁場 SM アップグレード前(上)と後(下)

材質をセラミックに変更することで、誘導電流を遮断した。セラミックダクトの壁厚は強度確保のため 9 mm で、旧 SM ダクトより 4 mm 厚い。アパーチャは狭くできないので、新 SM は磁極間距離を拡張した。

ビームロス低減に関して、SM30 の上流側にある四極電磁石 QDT155 が既知のビームロス点となっている。詳細は後述するが QDT155 のアパーチャは図 9 に示す通り、垂直方向が特に狭く、ビームに干渉する。これを解消するため大口径化が計画^[17]されている。これに伴い磁極長も大きくなるため、新 SM30 の上流側磁極端面は旧 SM に比べ、約 350 mm 下流側へオフセットされる。しかし、SM33 より下流側の機器の設置位置は変更できないため、SM30 ~ SM32 は磁極長を短縮する必要があった。一方でビーム軌道維持のため、積分磁場は下げられない。通電電流は旧高磁場 SM に対して 20~30 % 程度増加する。

新 SM も周回ラインのアパーチャを拡張しており、新 SM31 の上流側では、水平方向に片側 11 mm ずつ計 22 mm 拡張された。

SM33 については、新規製作はせず、旧高磁場 SM の磁極とコイルを再利用し、新規製作した真空ダクトを組付けた。Abort ライン側については旧 SM33A を設置位置変更なしで使用した。NU 側に使用されていた旧 SM33E は磁極間距離が旧 SM33A に比べて 20 mm 小さく、垂直アパーチャも狭くなっていた。旧 SM33A と同形状の旧 SM32A を新 SM33E として使用することで NU ラインの垂直アパーチャを 20 mm 拡張した。

図 6 に高磁場 SM アップグレード前後の外観を示す。

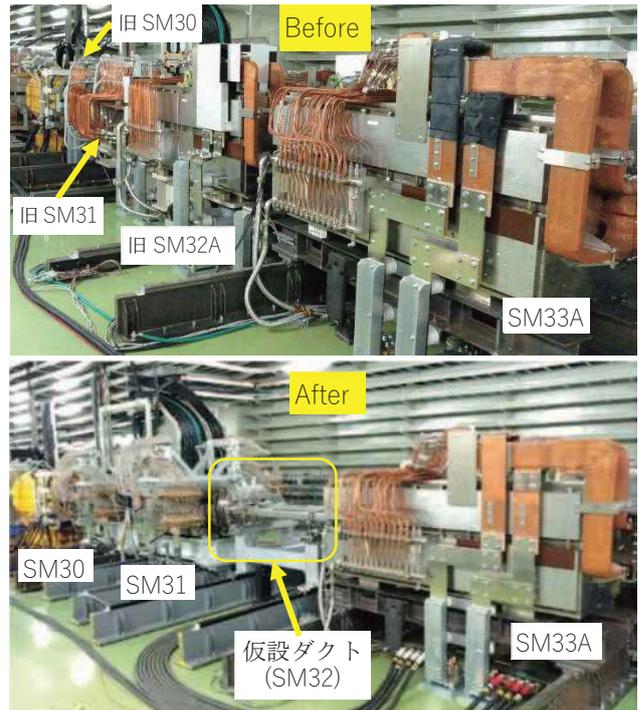


図 6: 高磁場 SM アップグレード前(上)と後(下)

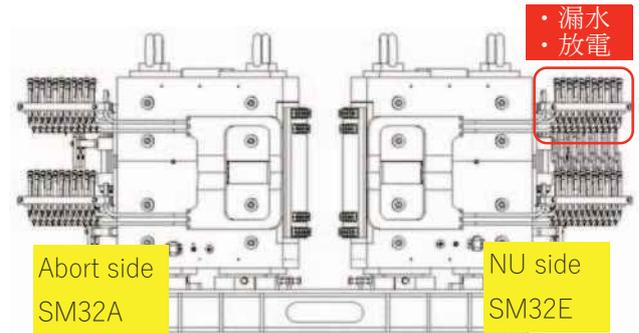


図 7: ビーム下流側から見た新 SM32



図 8: 放電発生後のロウ付け部分

2.3 新 SM32 の初期不良

新 SM32 は、2021 年 8 月にオフラインで通電試験及び磁場測定を行う予定だったが NU ライン側の上コイル冷却水配管接続部(図 7 の枠で囲った箇所)に 2 つの独立した初期不良が発覚した。まずホローコンダクタ(以下ホロコン)屈曲部の微細なクラックの内、

2カ所から漏水が確認された。それらはエポキシパテを巻いて止水し、通電可能な状態にした。尚、漏水のない微細なクラックは、Abortライン側のコイルでも確認されている。運用中に漏水するリスクを持つため、使用期間は最低限にし、交換することが確定した。もう1つはホロコンのロウ付け不良に起因する放電だった。ロウ付け部の接触抵抗が高かったため、運用時のフラットトップ電流約3kAに対し、1kAのパターン通電で発熱し、銀ロウが融解して出来た隙間で放電が発生した。放電後の様子を図8に示す。これにより、新SM32は使用不能となり、コイルの再製作に着手したが、納期は2022年度内であり、インストールは2023年夏季メンテナンス期間へと延期された。それまではSM32無しでのビーム取り出しが必要となる。SM32の代わりに仮設ダクトを用意し、上下流の真空ダクトを接続した。

2.4 SM32無しでのビーム取り出し軌道計算

新SM32無しでのビーム取り出しについて、2022年6月と12月のビーム試験(3 GeVまたは30 GeVビームのAbort取り出し)と2023年1月以降にニュートリノ実験施設へのビーム供給が予定されている。

FX SM群はSM33を除き1台が故障しても、他のSMの生成磁場を上げて30 GeVビーム供給が継続できるように設計^[18]されている。SM32無しでのビーム軌道をSAD (Strategic Accelerator Design)^[19]を用いて計算した。チューンはFX運転で使用されている $(v_x, v_y) = (21.35, 21.43)$ とした。Momentum Compaction Factorは0.4%、Closed Orbit Distortionは1mmとした。

ビーム試験に向けて、SM32無しの条件で3 GeVと30 GeVビームのAbort取り出しについて軌道計算した結果を図9に示す。ビームエンベロップの幅を決めるエミッタンスについて、3 GeVビームは、MR入射時にコリメータで絞られ 60π mm mrad程度(青点線)だが、QDT155の垂直アパーチャが狭いため、水平 30π mm mrad、垂直 15π mm mrad(青実線)で検討した。30 GeVビームは、 2σ 相当の 15π mm mrad^[20](赤実線)とした。軌道計算の結果、それらのエミッタンス値によるビームエンベロップは、水平・垂直方向ともにアパーチャ(黒実線)と干渉しないことがわかった。実際は、図9で示したビームエンベロップの範囲外にも、全体の数%に満たないわずかなビームやビームハローが存在し、ダクト等の放射化に影響する。また、QDT155垂直アパーチャでビームロスが発生し、周囲を放射化させることが明らかである。FX SMアップグレード以前もQDT155周辺の残留線量は高かった^[21]。QDT155大口径化で解決が見込まれる。

2.5 SM32無しでの3 GeVビーム取り出し結果

2022年6月27日から7月7日までMRのビーム試験^[22]が実施された。ビーム加速はせず、3 GeV DC運転に限られたが、SM32無しの条件で、Abortライン上のビームプロファイルモニタ(MRPM#23)でおおよそ想定通りのビーム位置を確認した。MRPM#23の水平方向のビームプロファイルデータを図10に示す。上のグラフは縦軸が時間軸となっており、取り出し

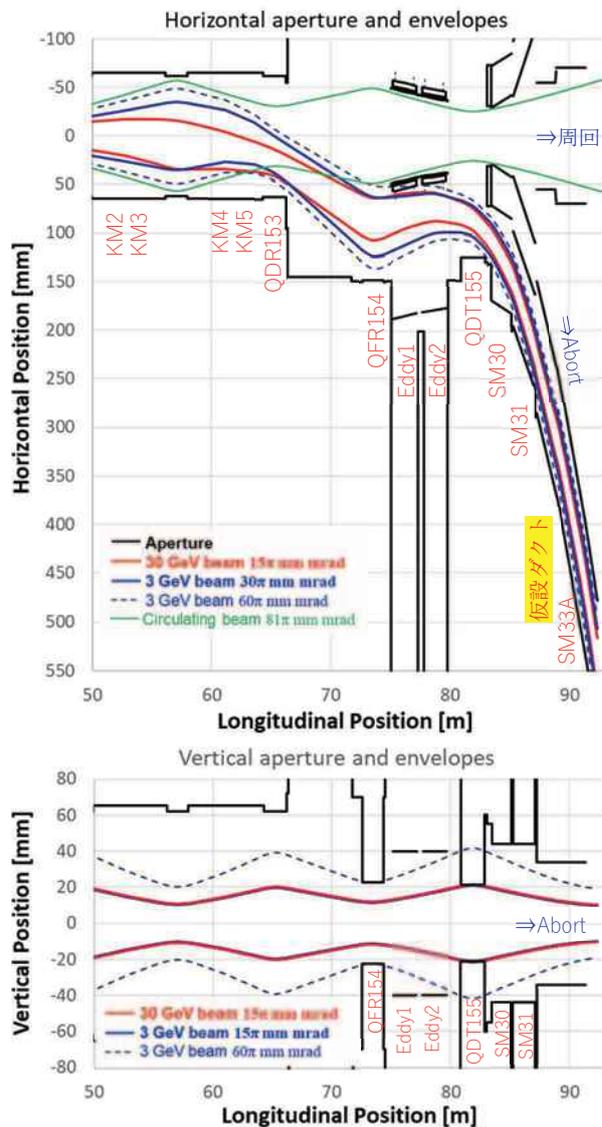


図9: SM32無しビーム取り出しの軌道計算結果

ビームの時間構造を示す。MRを周回する8バンチが全て取り出されたことがわかる。また、下のグラフから、ビーム位置がMRPM#23中心に対して約7mm外側(リングから遠ざかる方向)にあることがわかる。ビーム軌道の調整は実施しておらず、軌道計算から得られた電源出力設定値に対して実際の電源出力値にずれがあった。そのずれを考慮して軌道計算すると、SM33下流側の四極電磁石QFP156の上流側磁極端面位置に相当するFXセクションとNU, Abortラインとの取合い点において、水平方向の周回ラインからの距離が理想値543mmに対し545.9mm、周回ラインに対する角度が理想値77.22 mradに対し77.440 mradであり、想定より2.9mm外側を通り、曲げ角も0.22 mrad大きかった。MRPM#23は取合い点より約15m下流にあるため、MRPM#23では約6mm外側を通ると推測される。実測とは1mmの差が残っているが、概ね軌道計算結果と一致していると判断できる。

ビーム試験終了後、ビームロスの状況を確認する

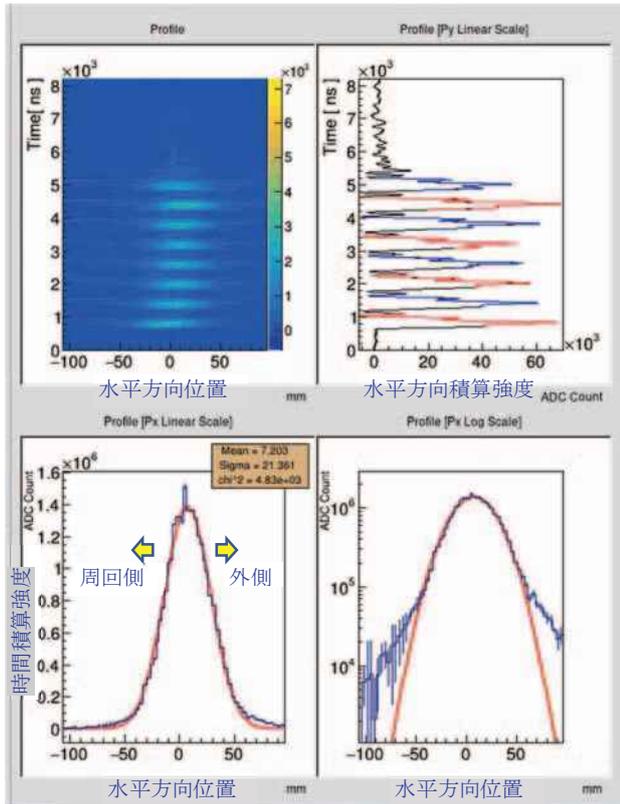


図 10: MRPM#23 の出力
3 GeV beam extraction to the abort dump
Jun. 30, 2022, 22:29 Run#89 Shot No.1182

ため、FX SM エリアのビームダクト表面の残留線量を測定した。線量計には CANBERRA 製 RADIAGEM を使用した。校正済みのサーベイメータと比較して、差分は±10 %程度だった。最も高い値を示したのは、SM30 上流側のダクトで、ビーム運転停止 5 時間後に Abort ライン側の側面の表面線量が 4 mSv/h を記録した。7 月 19 日には 250 μ Sv/h まで低下した。同日の FX SM エリアのダクト表面線量測定結果を水平ビームエンベロップとともに図 11 に示す。バックグラウンドは 0.1~1 μ Sv/h 程度である。残留線量が高かった場所と値を記載しており、多くの箇所は 10 μ Sv/h 程度であった。新 SM のダクトは初めてビームを通してあるので、有意に放射化していることがわかるが、10 μ Sv/h 程度であれば既存ダクトの放射化と大差ないので妥当な結果と言える SM32 がない分、Eddy SM~SM31 の区間で取り出しビーム軌道は外側を通り、水平アパーチャに近接する。SM31 上下流のダクト端部で 20 μ Sv/h 程度であるのは、ビームが近接していることが原因と予想される。QDT155 と SM30 間だけ、他よりも 10 倍ほど線量が高いのは、前述の通り QDT155 の垂直アパーチャが狭いので、そこでビームロスが発生した影響である。残留線量の分布は軌道計算と矛盾しない。MRPM#23 でのビーム位置が軌道計算と一致したことと併せて、SM32 無しでの 3 GeV ビーム取り出しは想定通りだったと言え、軌道計算の信頼性が確認できた。2022 年 12 月には 30 GeV ビーム取り出しが予定され

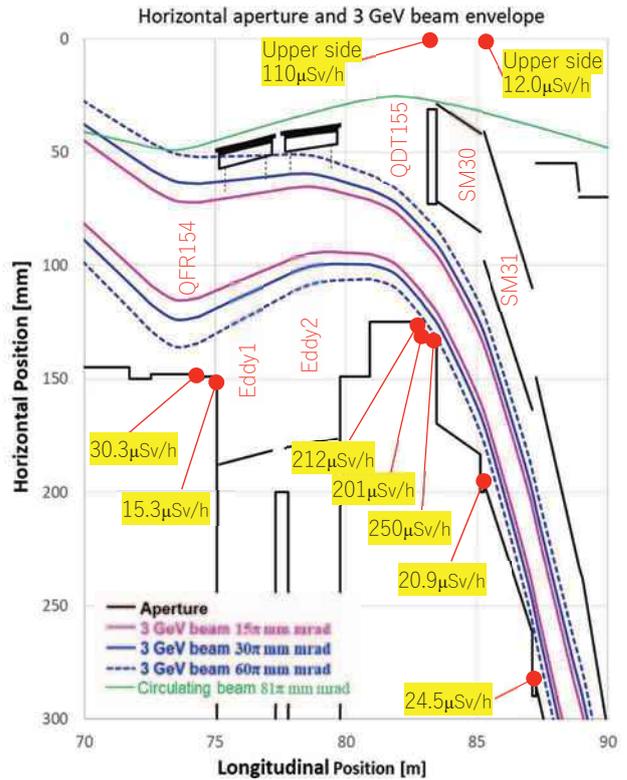


図 11: ビーム停止 12 日後の残留線量測定結果

ているが、軌道計算通りの結果が期待できる。文献 [23] に詳細をまとめている。

3. 新 SM インストールへの技術的貢献

FX SM アップグレードにおける新 SM のインストール作業について、ビーム軌道計算とレーザートラッカー(LT)を使用した精密アライメント [24] の 2 つの技術を組み合わせることで、効率的に作業を進めることができた。

軌道計算により、新 SM の設置位置を詳細に決定 [25] したが、ビームに対して高精度のアライメントが必要な箇所とそうでない箇所も明確になった。ビームエンベロップに対し、アパーチャが十分に大きい箇所は、無理にアライメント精度を求めず、労力と作業時間の削減ができた。

一方で、周囲の機器の設置位置が図面と異なっていたり、真空ダクトのフランジ溶接の精度が出ていなかったりしたため、設計通りに設置できない箇所があった。軌道計算の情報から、各 SM の位置ずれ許容範囲や、ビームへの影響を最小限にする位置ずれの分配をその場で判断でき、アライメント作業を長時間中断することなく、ほぼ計画通りのスケジュールで新 SM インストール作業を終えることができた。

3.1 アライメント作業

測量およびアライメントに使用した LT は、API 社製の Radian R-50 である。SM アライメントの様子を図 12 に示す。ビームライン上では、ビームダクト内壁面などの測量が難しいため、真空チェンバー

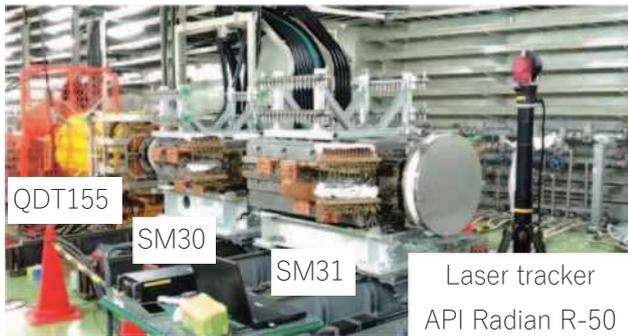


図 12: SM30 と SM31 のアライメント

(Eddy SM の場合)や SM 磁極の基準座を介して、2 段階の測量が必要となる。まず、ビームライン上に設置する前に基準座に対するビームダクト内壁面を測量し、理想的なアパーチャとなるときの周回ビーム軸に対する基準座の座標を計算する。ビームライン上では、アライメント対象 SM に最も近い上流と下流の四極電磁石の基準座を結んだ直線を周回ビーム軸相当の基準として座標軸を得る。基準座が計算で求めた座標に近づくように位置調整し最終的な基準座位置を測量する。2 段階の測量の誤差の積み重ねとして、アライメント精度は約±0.05 mm と見積もっている。

アライメントを高精度で行う必要があるのは、周回ビームとアパーチャの近接箇所である。取り出しビームは NU または Abort ラインを 1 度しか通らないが、周回ビームは 15 万回ほど通過するので、わずかなビームロスでも放射化に大きな影響を与える。そのため、周回ラインのアパーチャ確保が最優先される。図 9 では緑実線が周回ビームエンベロープを示すが、特にアパーチャと近接しているのは、水平方向では Eddy1 の上流側と SM30 の上流側である。加えて、Eddy1 上流側は取り出しビームとも近接するため、特に注意が必要とされた。Eddy1 と SM30 の水平方向位置は±0.1 mm 以下の設置精度が要求される。アライメント精度は±0.05 mm なので、要求に対して十分であると言える。垂直方向では特に厳しい箇所はなかった。

3.2 アライメント結果

新 SM アライメントによって得られた実際のアパーチャ(赤線/青線)を図 13 に示す。ほぼ設計通りに設置できたため、黒線の設計アパーチャとほぼ重なっている。水平方向の周回ビームエンベロープと近接する Eddy1 上流側と SM30 上流側については、詳細なアライメント結果を図 14, 図 15 に示す。Eddy1 では、周回ラインのダクト型磁気シールド内寸が、設計より 0.3 mm 小さくできており、アパーチャ中心は 0.04 mm NU 側にずれている。SM30 上流側は、周回ダクト(インナー磁気シールド)内壁面が平行四辺形状に歪んでいた。ダクトの 4 隅を測量しており、ビーム高さでの内壁面水平位置は平均して求めた。NU 側、Abort 側共に設計よりも 0.01 mm 狭く、アパーチャ中心のずれは 0.00 mm でビーム軸と一致している。Eddy1 と SM30 の要求設置精度±0.1

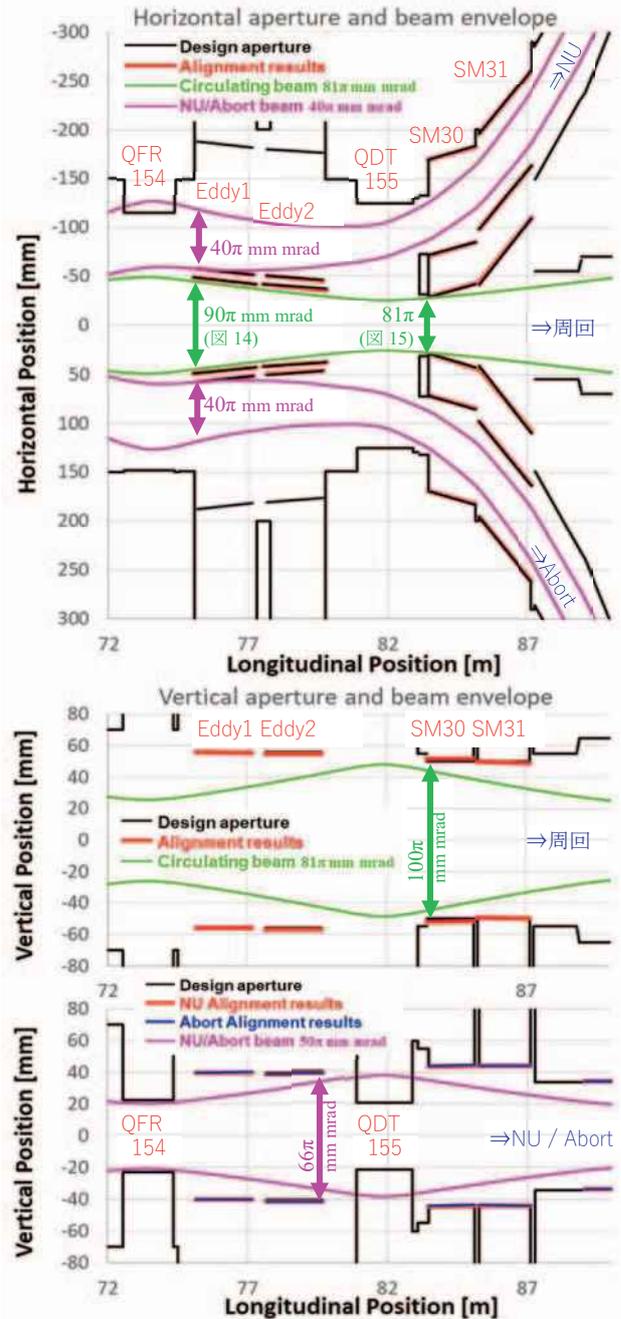


図 13: FX SM アライメント結果

mm に対して十分な結果だった。それら以外のアクセプタンスに影響しない箇所については、設計アパーチャに近付くことよりも、磁極の回転や傾き、真空ダクト締結に支障が出ないことを優先した。真空ダクトのフランジ溶接は、位置がずれていたり傾きがあったりするので、フランジ中心がビーム軸に対して±0.5 mm の範囲内にあるように気を付けた。よって、設計アパーチャに対してずれが大きいところも生じた。ずれが最大となったのは Eddy2 の垂直方向で 1.2 mm 低く設置された。ビームに対して問題ないと判断したが、Eddy2 に関しては真空チェンバー内の磁極のアライメントが十分でなかったことも要因なので、機会があれば修正したい。

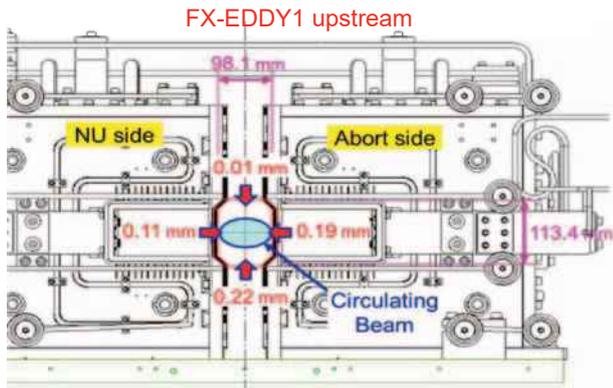


図 14: Eddy1 上流側のアライメント結果

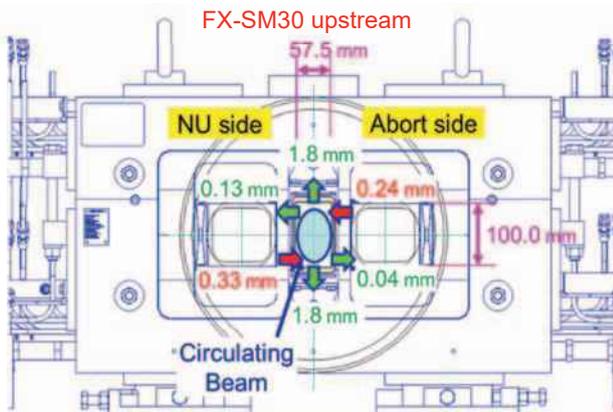


図 15: SM30 上流側のアライメント結果

図 13 には、アライメントで得られたアパーチャについてアクセプタンスも記載している。周回ビームについては、最も狭い SM30 上流側でも MR への入射ビームのエミッタンス 81π mm mrad に相当するアクセプタンスが確保できた。取り出しビームについても、目標値 30π mm mrad に対して、水平方向は 40π mm mrad、垂直方向は 50π mm mrad のアクセプタンスが確保できた。

3 GeV ビーム取り出し試験結果から、ビーム軌道がほぼ計算結果と一致し、残留線量分布も、想定と矛盾しなかったことから、正しくアライメントができたと判断している。

4. まとめと今後の予定

1.3 MW への J-PARC MR 高出力化に向けて、運転周期短縮やビーム粒子数の積み増しが必要になる。FX SM も 1 Hz 運転における発熱対策や、ビームロス低減を考慮した改修など、アップグレードを行った。新たに製作した Eddy SM、SM30～SM32 の交換作業を 2021 年 7 月から 2022 年 5 月の長期メンテナンス期間で実施した。しかし SM32 についてはインストール前の通電試験で、NU 上側のコイルに漏水と放電の不具合が発生し、使用不能となった。コイルの再製作を進めているが、長納期のためインストールは 2023 年夏季メンテナンス期間に延期された。それまでの期間は、SM32 無しでのビーム取り出しが必要になる。

SM32 無しでのビーム軌道計算を行い、2022 年 6 月のビーム試験では、概ね想定した軌道で 3 GeV ビームを Abort ラインへ取り出すことができた。残留線量の分布も軌道計算結果とアパーチャの条件に矛盾しないものであり、新 SM が正しくインストールできたと判断できた。新 SM インストール作業では LT を使用した精密アライメントを実施し、軌道計算結果と比較しながら、効率的に作業することができた。

2022 年 12 月に予定されているビーム試験では、30 GeV ビーム取り出しが予定されているが、3 GeV ビーム取り出し結果を踏まえ、SM32 無しでも問題なく取り出せると考えている。

今後の予定としては、再製作中の SM32 用コイルは NU 側が 2022 年内、Abort 側が 2023 年春までに納入予定である。順次 SM32 磁極への組み込みを進め、オフラインでの通電試験・磁場測定を実施した後、2023 年の夏季メンテナンス期間にビームラインへのインストールを行う。また、FX SM 以外のアパーチャ拡張が必要である。QFR154 の真空ダクトは左右非対称で、NU 側が狭く作られている。このため NU ラインの水平アクセプタンスが目標値の 30π mm mrad に及ばない。これを 2023 年度に左右対称なダクトに作り直したいと考えている。NU / Abort ライン双方の垂直アクセプタンスを制限している QDT155 の大口径化計画も進めていきたい。

参考文献

- [1] <https://j-parc.jp/c/index.html>
- [2] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
- [3] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/>
- [4] S. Igarashi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01.
- [5] <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/06/KEKSAC2021reportJ.pdf>
- [6] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.86-90.
- [7] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p.1204-1208.
- [8] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2017, p.1051-1055.
- [9] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p.499-503.
- [10] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p.361-365.
- [11] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2020, p.594-598.
- [12] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, p.262-266.
- [13] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, FROB12.
- [14] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p.85-89.
- [15] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2020, p.388-392.
- [16] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, p.826-830.
- [17] K. Fan *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.951-954.
- [18] S. Iwata *et al.*, Proc. of IPAC, 2022, p.2100-2102.
- [19] SAD code; <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [20] S. Igarashi *et al.*, Proc. 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2018), Daejeon, Korea, Jun. 2018, p. 147-152.
- [21] S. Iwata *et al.*, Proc. of IPAC, 2021, p.3103-3105.
- [22] T. Yasui *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, FROA01.
- [23] S. Iwata *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, FROA05.
- [24] S. Iwata *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, FRP006.
- [25] S. Iwata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, p.461-465.

KEK 電子陽電子入射器におけるネットワーク監視システム

佐武いつか[#]

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

KEK 電子陽電子入射器では、SuperKEKB 電子/陽電子、陽電子ダンピングリング、PF、PF-AR の異なる 5 つの下流リングに対して、電子及び陽電子ビームを供給している。安定したビーム入射のため、加速器制御システムには迅速な異常検知にもとづく信頼性の高い運用が求められる。より効率的なネットワーク機器監視システムを構築するため、監視ソフトウェアツールである Zabbix と、データ可視化ツールである Grafana を新たに導入することとした。これらを用いることで、サーバーやネットワークスイッチの監視に加えて、異常検知と障害発生のアラート通知が可能となった。KEK 入射器のネットワーク機器運用状況に合わせて、トリガー条件や設定変更を実施した。ネットワーク障害発生時には、接続不良となる前のスイッチを検知することができ、迅速な対処につながった。

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では、SuperKEKB 電子/陽電子、陽電子ダンピングリング、PF、PF-AR の異なる 5 つの下流リングに対して、電子および陽電子ビームを供給している^[1]。安定したビーム入射実現のため、加速器制御システムには迅速な異常検知にもとづく信頼性の高い運用が求められる。ネットワーク機器の障害には様々な要因が考えられ、即座に原因を特定できないケースもある。そのため、システム監視によって可能な限り速やかに障害を把握することが重要である。

KEK 入射器では、これまで IT インフラ監視のために Cacti を利用してきた。より詳細なネットワーク情報を取得・表示するため、近年ではネットワーク情報の可視化ツールとして Kibana^[2]の利用を開始している。さらに、機能と保守性の面でより効率的な監視システムを構築するため、新たに監視ソフトウェアツールである Zabbix^[3]と、データ可視化ツールである Grafana^[4]を導入することとした。これらを用いることで、サーバーやネットワーク機器などの監視だけでなく、異常検知およびアラート通知が可能となった。新たに導入した監視システムおよび運用状況について報告する。

2. 監視システムの概要

2.1 動作環境とシステム構成

Zabbix と Grafana はともに、1 台の仮想マシン上で動作している。Zabbix で使用するデータベースである MySQL も同じホスト上で動作している。Zabbix は v6.0 LTS、Grafana は v8.3.6 を使用している。どちらのソフトウェアも、長期メンテナンス中にアップデートをおこなうこととしている。表 1 に、Zabbix と Grafana が動作する計算機の構成を示す。現在 Zabbix では、ホスト数 123、アイテム数は 25191、トリガー数は 13112 を監視している。

2.2 トリガーとアラート通知

表 1:サーバー計算機のハードウェア仕様

Model name	HP DL385 Gen10 Plus 上の仮想マシン
CPU	4CPU(CORE 4) (32 CPUs x AMD EPYC 7302 16-Core Processor)
Memory	64 GB (319.74 GB)
Disk	20 GB (system) 1 TB (data)
OS	CentOS 7.9.2009

トリガーとは、アイテムが収集したデータを評価し、最新のシステム状態を表示する論理条件式のことである。この条件式を用いて、アイテムが更新されるたびに評価を行い、真となった場合に障害と判断する。またトリガーの深刻度により、トリガーの重要度が定義されている。深刻度には、以下の 5 段階がある。

- ・情報
- ・警告
- ・軽度の障害
- ・重度の障害
- ・致命的な障害

それぞれの深刻度について、条件式や通知条件を設定することができる。KEK 入射器では、「警告」・「軽度の障害」と、「重度の障害」以上の深刻度の障害で異なるトリガーアクションを設定している。「警告」・「軽度の障害」に対しては、障害が 1 時間継続した場合に 1 回のみメール通知される。「重度の障害」以上の深刻度の障害に対しては、障害発生時に即時メール通知される。軽度レベルの障害のなかに深刻度の高い障害が埋もれてしまい、アラートを見逃すことがないように必要最低限の通知と

[#] itsuka.satake@kek.jp

している。Zabbix のアラート通知機能により、いち早く障害発生に気づくことが可能となった。

2.3 監視ソフトウェアツール

監視ソフトウェアツールとして、Zabbix^[3] を使用している。これは、Alexei Vladishev 氏によって作られた、サーバーやネットワークを集中監視するためのオープンソースの統合監視ソフトウェアである。現在は Zabbix 社によって開発が継続されている。統合監視に必要な監視機能、障害検知、通知機能を備えている。Zabbix サーバーは、監視対象からのデータ収集や条件判定、アラート通知のアクションなどをおこなう。Zabbix によって収集されたデータと同様に、設定情報もデータベース内に保存される。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 1)。収集データは、グラフ化やマップ化することができ、効率的に監視状況の把握や分析をおこなうことができる。Zabbix でのデータ表示画面を図 2 に示す。ユーザーによって、閲覧と設定の権限を設定できる。

データ収集方法として、SNMP (Simple Network Management Protocol)や ping 疎通による監視も可能であるが、Zabbix エージェントを用いる方法もある。監視対象システム上に Zabbix エージェントを導入することで、システムのローカルのリソースやアプリケーションを監視することができる。収集したデータは Zabbix サーバーに送信される。



図 1: Zabbix における Global view 画面



図 2: Zabbix におけるデータ表示画面

2.4 データ可視化ツール

データ可視化ツールとして Grafana^[4]を用いている。これは、Grafana Labs によって開発されているオープンソースのログ・データ可視化ツールである。KEK 入射器では、Zabbix で収集したデータを表示している。Zabbix 以外にも、Elasticsearch などの様々なデータソースの情報を可視化することができる。様々な情報を 1 つの画面上にまとめて可視化するダッシュボードを作成する。ダッシュボードを用いることで、監視システムの状況を把握しやすくなる。WEB インターフェースにより、ダッシュボードやパネルの作成を視覚的に行うことができ、様々なデータ表示形式があるため、柔軟にグラフを作成することが可能である。アクセス制御も設定可能のため、安全な運用と管理が実現できる。

2.5 Kibana

Kibana^[2]は、Elastic 社によって開発されたデータの可視化ツールである。同社で開発されたドキュメント型データベースである Elasticsearch に対応しており、Elasticsearch のデータを表示するのに適している。様々な形式の文書データを横断的に検索することに優れた索引型検索を採用しており、大量のデータに対して高速検索が可能である。KEK 入射器では、ブロードキャストパケットやビーコン情報など、ネットワーク状態を表示している(図 3)。

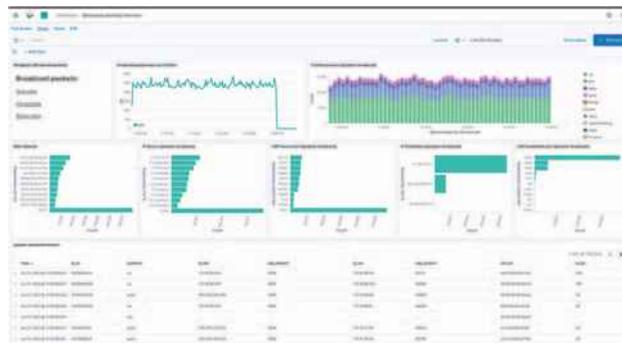


図 3: 入射器制御ネットワークのブロードキャストパケット情報を示す Kibana のダッシュボード

3. 計算機サーバーと NAS の監視

表 2 に、2022 年 7 月現在の計算機サーバー監視のためのデータ収集方法と台数を示す。データ収集方法としては、2 種類ある。すでに SNMP が有効になっているものは、SNMP 監視情報を取得し、Zabbix サーバーが受け取っている。一方、新しい

表 2: サーバー計算機の監視状況

データ収集方法	台数
Zabbix エージェント	3 台
SNMP	60 台

サーバー計算機については、Zabbix エージェントを用いてデータ収集をおこなっている。ファイルシステムについても同様に、Zabbix エージェントを用いている。

Zabbix には、複数のアイテム、トリガー、グラフなどの監視設定をまとめた、「テンプレート」がある。Zabbix エージェントによるサーバー計算機監視では「Template OS Linux by Zabbix agent」、SNMP による計算機監視では「Template OS Linux SNMP」を使用している。MySQL を動作させているアーカイブサーバーなどの計算機では、「Template DB MySQL by Zabbix agent」についても使用している。

Grafana のダッシュボードでは、計算機サーバーのシステム情報として、CPU 使用率、平均負荷、メモリ、ネットワークトラフィック、ストレージを表示している(図 4)。また、ファイルシステム監視については、NAS のディスク使用率と i ノード使用率を表示している(図 5)。これらの表示には、データソースプラグインとして Zabbix plugin for Grafana を用いている。



図 4: サーバー計算機の監視情報を示す Grafana のダッシュボード画面

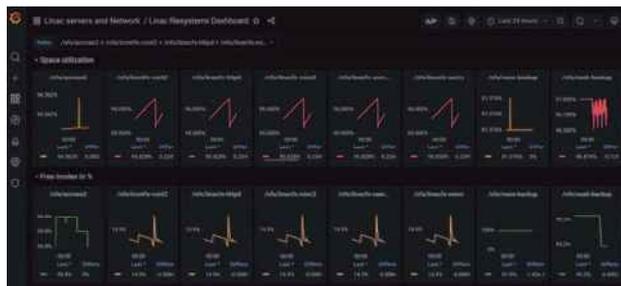


図 5: NASの監視情報を示す Grafana のダッシュボード画面

4. ネットワークスイッチ

表 3 に、2022 年 7 月現在の監視しているネットワークスイッチのベンダーおよび台数を示す。すべて SNMP によってデータを収集している。

監視設定としては、Cisco 製のスイッチは、「Template Net Cisco IOS SNMP」を使用している。上記のように主要なスイッチのテンプレートは、あらかじめ Zabbix で用意されている。そのため、取得したいアイテムなどの監視設

定は比較的簡単な設定のみで完了した。Buffalo 製のスイッチは、SuperKEKB で作成された「Template Net Buffalo Device SNMPv2」を使用している。トリガー設定については、ほとんどがデフォルトの設定を使用しているが、一部変更している。コアスイッチ 1 台の温度異常アラートが重度の障害として検知されていた。運用に問題のない温度であったため、スイッチ固有の閾値に合わせて値に変更している。

表 3: ネットワーク機器の監視状況

ベンダー	台数
Cisco	49 台
Buffalo	4 台

Grafana のダッシュボードでは、CPU 使用率、メモリ、応答速度、稼働時間、ブロードキャストパケット、ネットワークトラフィック、ディスクカードエラーパケット情報を表示している(図 6)。



図 6: ネットワークスイッチのディスクカード/エラーパケット情報を示す Grafana のダッシュボード画面

5. アーカイバシステム

5.1 アーカイブサーバーの監視

アーカイブサーバーの監視には、Zabbix エージェントを用いてデータ収集をおこなっている。それらに加えて、HTTP エージェントにより登録 PV 数やストレージ情報、データ転送速度などの情報を取得している。HTTP エージェントは、Zabbix サーバーから http/https 接続を使用して値を収集している。テンプレートとしては、SuperKEKB で作成された「Template App Archiver Appliance by HTTP」を使用している。この中のマクロで、データの場所やクラスタごとのポートを指定している。図 7 に、AA 監視情報を表示している Grafana のダッシュボード画面を示す。

5.2 アーカイバデータの表示

KEK 入射器ではアーカイバソフトウェアとして、2 台の Archiver Appliance (AA)を運用している^[5, 6]。現在のアーカイブ対象は約 13 万点である。これらのデータを Grafana 上で表示するために、データソースプラグインとして Archiver Appliance Datasource^[7]



図 7: AA の監視情報を示す Grafana のダッシュボード画面

を用いた。これは、平均値や最大/最小値などのデータ加工方法の指定ができ、オフセットなどの後処理が可能であるなど、多数の機能を備えている。上記プラグインをインストールし、データソースである AA の URL を設定することでデータの取得が可能である。Grafana から AA サーバーに HTTP リクエストを送り、取得したデータを可視化する。Grafana のダッシュボードでは、機器の周辺温度やビーム電荷量などの情報を表示している。

6. CSS アラーム

6.1 CSS アラームの監視

KEK 入射器では、Control System Studio (CSS) を利用したアラームシステムである CSS アラームを利用している。アラームの設定や履歴情報の保存には、リレーショナルデータベースである PostgreSQL を使用している。

Grafana に JSON API プラグインをインストールし、データソースを作成した。さらに、beastrest^[8] という REST API サーバーを用いた。この REST API サーバーは、Python と Flask を利用して作成されている。

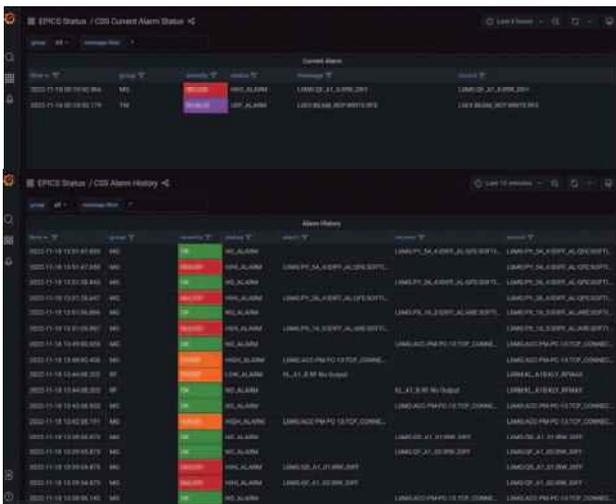


図 8: CSS アラームの Current 情報と history 情報を示す Grafana のダッシュボード画面

beastrest によって、CSS アラーム情報(current)とアラームログ(history)を取得している。Grafana のダッシュボードでは、現状を示す current とログを示す history のダッシュボードを作成し、表示している(図 8)。

6.2 CSS アラーム情報表示の不具合

current は即座に表示されるのに対し、history はタイムアウトエラーとなり、表示に失敗していた。psql コマンドを用いて PostgreSQL へ接続し、SQL 実行時間を測定したところ、1 時間のデータ取得に約 5 秒かかっていた。

タイムアウトの設定を 10 秒以上に設定すると、タイムアウトエラーはほとんど発生せず、改善が見られた。対処として、データベースにおける message テーブルの type 列、datum 列に対してインデックスを作成することとした。対処後に psql コマンドにより測定したところ、1 時間のデータ取得にかかる時間は、約 10 ミリ秒となり、大幅に改善された。その結果、Grafana 上での表示も即座に更新されるようになった。

7. ネットワーク障害の発生事例

5 月下旬にコアスイッチの接続不良が発生した。メーカーによる調査が進められ、コアスイッチにおけるファームウェアのバグによる、メモリリークが原因だと判明した。数日後、多数のエッジスイッチで接続不良が発生した。これらのエッジスイッチは、



図 9: エッジスイッチ接続不良発生時のエッジスイッチ監視情報を示す Grafana のダッシュボード画面

コアスイッチと同じバージョンのファームウェアであった。エッジスイッチ数台の ping 情報より、ネットワーク接続が短時間で何度も途切れているのが見られた。それらのスイッチでは、エラーパケットが発生し(図9)、CPU 負荷も高い状態であった。根本的解決ではないが、接続が切れると思われるスイッチを迅速に把握することができ、再起動の対処を実施することができた。この事象は、長期メンテナンス期間中のファームウェアアップデートにより解決した。

8. まとめ

KEK 入射器では、新たに Zabbix と Grafana を導入し、ネットワーク機器監視システムを構築した。これにより、多数のネットワーク機器の監視やデータの可視化をおこなっている。さらに、異常検知およびアラート通知機能を取り入れたことで、様々な障害を迅速に把握することが可能となった。入射器の運用状況に合わせて、障害の条件式の精度を高めていく必要がある。

今後は、どのような障害が多いのか、加速器運転期間および長期メンテナンス期間での障害の傾向を見ることで、それらの情報をシステムの改善に役立てたい。また、EPICS IOC の情報を取得するよう整備を進め、監視対象の幅を広げていく予定である。

謝辞

本システム導入にあたり、ご協力いただきました SuperKEKB 佐々木信哉氏、関東情報サービス 櫻井雅哉氏、入射器および入射器制御グループのみなさま、いち早く Grafana をご活用いただきました矢野喜治氏に深く感謝いたします。誠にありがとうございました。

参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, “Achievement of 200, 000 Hours of Operation at KEK 7-GeV Electron 4-GeV Positron Injector Linac”, in Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2465-2468.
- [2] Kibana;
<https://www.elastic.co/jp/kibana/>
- [3] Zabbix;
<https://www.zabbix.com/jp>
- [4] Grafana;
<https://grafana.com/>
- [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, Sep. 2-4, 2020, pp. 735-738.
- [7] 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, Sep. 2-4, 2020, pp. 504-508.
- [8] beastrest;
<https://github.com/sasaki77/beastrest>

ミュオン D ライン冷凍機用圧縮機メンテナンス

黒澤宣之 #

高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 超伝導低温工学センター

Abstract

J-PARC 物質・生命科学実験施設にはミュオン科学実験施設があり、4 つのビームラインがある。その中でも D ラインの実験ユーザーは非常に多く、ビームラインで使われる機器の安定性が求められる。D ラインにはミュオンを輸送するための約 6 m の超伝導ソレノイド電磁石が設置されており、その冷却のためにヘリウム冷凍機を用いている。

本稿では、ヘリウム冷凍機システムには欠かせない圧縮機ユニットについて説明し、2021 年度におこなった圧縮機オーバーホール及びモーターメンテナンスと、2022 年度におこなった 2 次オイルセパレータエレメント交換について紹介する。また、オイルセパレータのメンテナンス周期最適化の検討についても報告する。

1. はじめに

J-PARC 物質・生命科学実験施設にはミュオン科学実験施設がある。RCS と呼ばれるシンクロトロンで 3 GeV に加速された陽子を黒鉛標的に衝突させる。そこで生じたパイ中間子が崩壊することでミュオンは得られる。ミュオン科学実験施設には、D ライン (Decay/Surface Muon Beam Line)、U ライン (Ultra Slow Muon Beam Line)、S ライン (Surface Muon Beam Line)、H ライン (High Momentum Muon Beam Line) の 4 つのビームラインが設置されている^{[1][2]}。建設中のビームラインもあるが、ミュオンを用いた実験が日々盛んに行われている。特に、D ラインの実験ユーザーは非常に多く、ビームラインを構成する機器の安定性が求められる。

D ラインには、ミュオンを輸送するための超伝導ソレノイド電磁石 (約 6 m) が設置されており、Linde 製 TCF50 のヘリウム冷凍機を用いて冷却をおこなっている。冷凍機とセットである圧縮機は、前川製作所製 HE2520MSC (2014 年製) である。このような冷凍機システムは、高圧ガスによる災害を防止する目的で定められた高圧ガス保安法に沿った運用が行われる。また、機器をトラブルなく運転するためには、計画的なメンテナンスが必要である。メーカーから提示される推奨年数等の情報はあがるが、コストの面でもメンテナンス周期の最適化が大変重要な課題である。

2. D ライン冷凍機システム

2.1 D ライン冷凍機の概要

ヘリウム冷凍機は、圧縮機により高圧にされたヘリウムガスをタービンや JT (ジュール・トムソン) 弁等により極低温のヘリウムにするシステムである。

ミュオン科学実験施設の D ライン超伝導ソレノイド電磁石を冷却しているヘリウム冷凍機は、回転数

制御された高速で回転する 2 個のタービン (T1 : 約 3450 rps T2 : 約 2300 rps) を全体の約 80 % のヘリウムガスが通る。タービンを通ったヘリウムガスは断熱膨張によって冷却される。それらの冷却されたヘリウムガスは、残り約 20 % の高圧のヘリウムガスを冷却するために使われ、圧縮機へと戻される。その時活躍するのが冷凍機の中に複数配置された熱交換器である。冷却すべきガスと加温すべきガスを熱交換させることによって効率よくガスの冷却が行われる。冷却された高圧のヘリウムガスは、液体ヘリウムを溜めるラインと、超伝導ソレノイドコイルを冷却するラインとに分かれる。液体ヘリウムは、冷凍機の JT 弁の開度を調節し断熱膨張させ液化することによって作られる。超伝導ソレノイドコイルを冷却するラインは、液体ヘリウム貯槽に配管が浸かっており、安定な冷却状態が維持されている。

D ライン冷凍機システムの概略図を図 1 に示す。

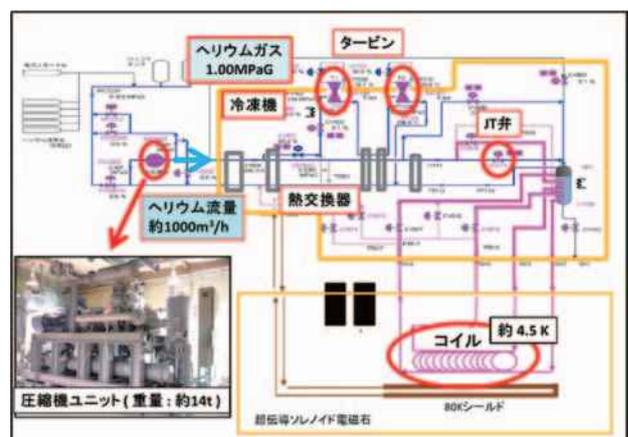


図 1 : D ライン冷凍機システムの概略図

2.2 冷凍機用圧縮機ユニットの概要

図 2 は、D ラインヘリウム冷凍機システムの中で重要な役割を果たす圧縮機ユニットの概略図である。

noriyuki.kurosawa@kek.jp

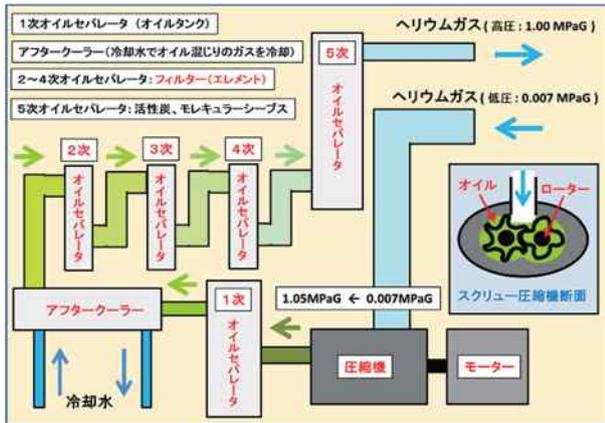


図2：圧縮機ユニットの概略図

この圧縮機ユニットは主に、スクリーユ式2段圧縮機、圧縮機用モーター、1次～5次のオイルセパレータ、オイルクーラーで構成されている。また、概略図にはないが、サクシヨンストレーナや逆止弁、オイルクーラー、オイルを循環させるオイルポンプ等も重要な役割を果たしている。

使用している圧縮機のスクリーユは、断面形状が4つの凸であるMローターと、断面形状が6つの凹であるFローターがかみ合うことによって、ヘリウムガスが圧縮される構造になっている。なお、圧縮機用のモーターは、カップリングを介して圧縮機低段のMローターに直結している。また、低段と高段のMローターはギアカップリングによって連結され、いずれも2950 rpmで回転している。低压である吸入側のヘリウムガス(約0.007 MPaG)は、高速で回転する低段の2本のローターによって、オイルと混じりながら圧縮され、中間圧力となり高段へと送られる。高段でも同様にオイルと混じりながら圧縮され吐出圧力となる。なお、圧縮機ユニット内で圧力損失があるため、運転圧力+約0.05 MPaGが吐出圧力となる。風量の調節は、圧縮機のアンローダ(スライドバルブ)で行うことができる。

圧縮機でオイルが使われる主な理由は、3つある。1つ目は、ローター間の潤滑である。2つ目は、圧縮効率を上げるため、3つ目は、圧縮時に出る熱を除熱するためである。特に、3つ目の除熱の効果は非常に大きい。しかしながら、ヘリウム冷凍機に於いて不純物は厳禁である。そこで、オイルの除去が大きな課題となる。万が一、オイルを含んだヘリウムガスが冷凍機に送られると冷凍機内でオイルが固化し、重大なトラブルを引き起こす。しかも、冷凍機内のオイル除去には、非常に大きな労力とコストがかかってしまう。

Dライン冷凍機用圧縮機ユニットの大きな特徴の1つは、5段階のオイルセパレータである。1次オイルセパレータはオイルタンクとも呼ばれ、オイルの貯蔵容器を兼ねている。オイルゲージが取り付けられており、常にオイル残量が確認できるようになっている。オイルの量が多すぎると、オイル温度が高くなりすぎ、オイルの劣化が早まる等の問

題が生じるので、注意が必要である。

2～4次オイルセパレータは、エレメントと呼ばれるフィルターによってオイルの除去を行う。1つの容器に6本の筒状のフィルターが並列に取り付けてあり、オイルを下に落とす。図3のように容器下部にオイルポットと呼ばれるオイルを溜める容器があり、内部に組み込まれたフロートでオイルレベルを検知し、上限に達すると電磁弁が自動で開きオイルを低压側に戻す構造となっている。このオイル戻しの機構は、3次・4次のオイルセパレータにもついており、それぞれのオイル戻しの時間間隔及び累積回数を記録している。なお、4次オイルセパレータのみオイルポットの容積は小さくなっている。

5次オイルセパレータは、容器下側(入口側)に活性炭、容器上側(出口側)にモレキュラーシーブスが充填されており、オイルや水分を吸着する。これら吸着剤の容積割合は、活性炭が8割、モレキュラーシーブスが2割である。吸着剤の下端と上端には、メッシュの金網とフィルターが取り付けられてあり、吸着剤が通り抜けられないようになっている。

これら5つのオイルセパレータの構成で高いオイル除去率を実現している。ただし、これらオイルセパレータは、使用時間とともに性能が低下し、オイル除去率が下がるため、定期的な交換が必要となる。

表1は、圧縮機ユニットの主な仕様である。



図3：2次オイルセパレータオイルポット及びオイルポット内液位検出用フロート

表1：圧縮機ユニットの主な仕様

圧縮機型式	MYCOM 2520MSC (前川製作所製)
圧縮方式	スクリーユ式2段圧縮
オイルセパレータ	5段階
圧縮機出口残油量	≤ 0.01 ppm
モーター 電圧	AC 400 V (3相)
モーター 定格出力	300 kW
Mローター回転数	2950 rpm
定格風量	70 g/s
許容圧力	1.5 MPaG

2.3 Dライン冷凍機システムの運転条件

冷凍機システムの安定な運転をしつつ、運転コスト及びメンテナンスコストの削減を行うことは、非常に重要な課題である。

2014年夏に導入した前川製作所製圧縮機の運転圧力は、1.0 MPaGを予定していたが、それまでに使用していた圧縮機の運転圧力が0.85 MPaGであったため、比較する目的で2016年夏までは、0.85 MPaGで運転をおこなった。0.85 MPaG 運転の方が消費電力は小さく運転コストは少なく済むが、1.0 MPaG 運転に比べヘリウムの流速が大きいというデメリットがある。オイルセパレータの観点では、1.0 MPaG 運転を行うことのメリットは非常に大きく、メンテナンスコストが大きく削減できる。

2016年夏に運転圧力変更のための、冷却試験をおこなった。なお、タービンの回転数制御の値は変更せずに運転圧力のみ変更し冷却をおこなった。その結果、今までのプログラムのままでタービン1入口弁の開度変化に伴う圧力変動が以前よりも大きくなり、タービン1回転数が急激に上昇し、緊急停止することが分かった。そこで、冷却プログラムの変更を行うことにした。冷却初期のタービン1入口圧の設定及び圧カステップ幅の変更をすることで、圧力変動が少なくなるようにし、タービン回転数の急激な変化を抑制した。

3. 圧縮機ユニットメンテナンス

3.1 圧縮機の搬出

2021年度、圧縮機オーバーホールをおこなった。2014年に圧縮機ユニットを導入してから初めての圧縮機取り出しである。図4から分かるように圧縮機を取り出すためには、低压配管の配管サポートやサクシヨンストレーナ及び逆止弁の取り外しが必要である。特にサクシヨンストレーナの上部には配管及び配管サポートがあるため容易には取り出せない。何度もメーカー及び下請業者と現場打合せを行い、最終的に、リフターでサクシヨンストレーナを下からすくい上げる方法をとることにした。サクシヨンストレーナを取り除いてしまえば、上部にスペースが出来るので、門型クレーンを設置することが出来る。

搬出の当日、周囲に人を配置し慎重にリフターの操作をおこなった。配管に当たらないようにゆっくり持ち上げ、配管サポート間の隙間を通しサクシヨンストレーナ及び逆止弁を取り出した。また、圧縮機の吊り位置上部にレールが来るように門型クレーン2台を平行に設置した。かつ、転倒防止としてそれら2台の門型クレーンを連結した。圧縮機吊り上げ時は、バランスをとるために4つのチェーンブロックを用いて取り出しを行い、圧縮機を取り出し後は、足の部分に4つのチルローラを取り付け横引きしてユニック車まで移動した。

取り出しから搬出まで、トラブルなく予定通りの手順で作業を行い、使用した門型クレーン2台は、再取付けの時のために設置したままにした。

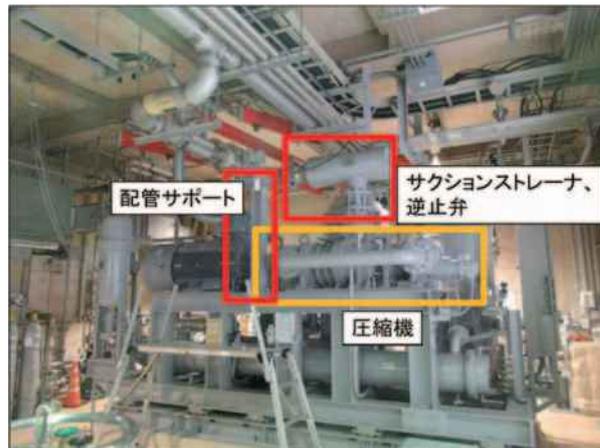


図4：圧縮機ユニット

3.2 モーターメンテナンス

圧縮機を取り出しをおこなった後、空いたスペースを使って、圧縮機用モーターのベアリング交換をおこなった。圧縮機のオーバーホール同様、初めての作業である。

まず、モーター後部のファンカバーの取り外しをおこなった。ファンカバーを外してみると、ファン周辺のカバーフランジの錆がひどかったので、カバーフランジ取り外し後、ヤスリがけを行い錆止めの塗装を施した。前後のカバーフランジを取り外した後、専用工具でベアリングの取り外しをおこなった。少々グリスがはみ出していたが、問題ないレベルであった。グリスアップの動作を出来るだけゆっくりおこなった方が良いということであった。新品のベアリングの取り付けやファンの再取付けは、電磁ヒーター等で加熱し取付けをおこなった。

十分なメンテナンススペースをとれたので、非常にスムーズに作業が出来た。

3.3 圧縮機の分解・点検

搬出した圧縮機は、メーカー工場にて分解・点検及び部品の交換をおこなった。ケーシングやローターに対して、浸透探傷試験を行い、小さな傷やヒビなど目視では見つけにくい劣化の検査も行われ、特に大きな問題は見られなかった。また、スラストベアリング等、常時大きな負荷がかかる部品は交換となる。図5は浸透探傷の様子であり、図6は、分解・点検中のケーシングやローターなどである。



図5：浸透探傷試験の様子

分解・点検が済んだ圧縮機は、再組立てを行い工場内で単体の気密試験を行い健全であることを確認後、元の圧縮機ユニットに再取付けをおこなった。再取付けは、圧縮機取り外し時と同様の方法で行い問題なく再設置出来た。

何度も現場打合せを行い議論し、入念に前準備をおこなったので、問題なく圧縮機オーバーホールを実施することが出来た。



図6：分解・点検の様子

3.4 2次オイルセパレータメンテナンス時期の決定

2次、3次、4次のオイルセパレータエレメントのメーカー推奨交換時期は、2年となっている。圧縮機の運転条件や運転環境によって、エレメントなどの交換部品の劣化具合は変わるはずである。そこで、2次、3次、4次のオイルセパレータオイル戻しの時間間隔及び累積回数から適正なメンテナンス時期の検討をおこなっている。

図7は、2014年に前川製作所製圧縮機を導入して以来のオイル戻し時間の記録である。このグラフは、He流量(g/s)、2次オイルセパレータオイル戻し時間(min)、3次オイルセパレータオイル戻し時間(h)の比較と夏におこなったメンテナンス内容に対する変化を表している。また、2016年夏に運転圧力を0.85 MPaGから1.00 MPaGに変更しており、その前後の変化も読み取ることが出来る。この図から分かることは、2次オイルセパレータオイル戻し時間は、概ねHe流量に依存し、流量が増えればオイル戻し時間が短くなり、流量が減ればオイル戻し時間が長くなるのに対し、3次オイルセパレータオイル戻し時間は、He流量にあまり依存しないということである。また、2016年夏におこなった1.00 MPaGへの運転圧力変更で、2次オイルセパレータのオイル戻し時間の変化は約1.4倍、3次オイルセパレータのオイル戻し時間は10倍以上長くなっている。つまり、運転圧力を上げた結果、流速が遅くなり、オイル分離の効率が格段に良くなったことを示している。さらに、2019年夏の2次オイルセパレータエレメント交換前後から分かることは、メンテナンス前後で大きく変化しているのは、2次オイルセパレータではなく、3次オイルセパレータのオイル戻し時間だということである。つまり、2次オイルセパレータのオイル戻し能力が良くなったことで、3次オイルセパレータ

に来るオイルが減ったためだと考えられる。したがって、3次オイルセパレータのオイル戻し時間の変化から2次オイルセパレータの劣化具合が分かることになる。これらの事を総合的に検討し、2次オイルセパレータエレメント交換の時期は、3年周期にすることにした。



図7：オイルセパレータオイル戻し時間

3.5 2次オイルセパレータメンテナンス

2022年度、2次オイルセパレータエレメント交換をおこなった。メンテナンスは、2016年度、2019年度と同じ手順で実施した。

2次オイルセパレータの容器本体(約250kg)を床に降ろすために、建屋天井のH鋼(2か所)に固定された吊り金具を用いる。それぞれの吊り金具にチェンブロックを取り付け、バランスを取りながら吊り上げる。また、自立できるようにC型鋼を足に取り付けてから床に降ろす。作業自体は、何度もおこなっている作業なので、特に問題はなかった。

4. まとめ

- 圧縮機オーバーホール及びモーターベアリング交換を2021年におこなった。設置から7年(運転時間:35249h)経過していたが、特に大きな異常は見られなかった。次回の圧縮機オーバーホールは2028年を予定している。
- 次回のモーターメンテナンスでは、ベアリング交換だけでなく、絶縁劣化対策としてワニスの塗り直しを予定している。
- 現在の運転圧力(1.00 MPaG)と以前の運転圧力(0.85 MPaG)と比較すると、2次オイルセパレータのオイル戻し時間は約1.4倍、3次オイルセパレータのオイル戻し時間は10倍以上長くなっている。
- 2次オイルセパレータエレメントの交換時期は、3次オイルセパレータのオイル戻し時間の変化を目安にしており、今のところ3年周期としている。
- 現在、3次と4次のオイルセパレータオイル戻し時間及び累積回数から3次、4次、5次のオイルセパレータメンテナンス周期適正化の検討をおこなっている。

参考文献

- [1] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jccj/19/3/19_2020-0016/_html/-char/en
- [2] <https://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ms.html>

技術セミナー報告

第1回技術セミナー

演題：クライオ電顕実験棟の紹介

講演者：川崎 政人 准教授（物質構造科学研究所）

日時：令和4年9月12日（月）13:30 - 15:15

会場：つくばキャンパス クライオ電顕実験棟

要旨：

タンパク質の立体構造を高分解能で決定する手法として知られるクライオ電子顕微鏡（クライオ電顕）が、2022年春に新しく建設されたクライオ電顕実験棟に移転しました。クライオ電顕実験棟では、クライオ電顕の他にタンパク質の精製のための実験室も移転し、電顕用の試料作成から電顕による観察・データ解析までが行われます。そこで、KEK技術職員を対象に令和4年度第1回技術セミナー「クライオ電顕実験棟の紹介・見学」が Zoomでの講演会と見学会という形式で開催されました。

前半は川崎政人准教授によるオンライン講演で、参加者は講師・世話人含めて15名でした。クライオ電子顕微鏡の分解能を劇的に改善させる技術的なブレークスルーが2016年頃にあり、急冷技術によりタンパク質溶液の水をガラス状に凍結させる事などが紹介されました。後半の見学会は田辺幹雄特任准教授にウェットラボ、池田聡人研究員にクライオ電顕室を案内いただき、世話人含めて9名が参加しました。大腸菌などを用いてタンパク質をいかにつくるのか、溶液を入れる微細なグリッドをピンセット等でどのように扱うのか説明いただきました。



技術セミナー報告

第2回技術セミナー

演題：Ansys による CAE 実践活用セミナー

講演者：谷口 亮太 氏 (サイバネットシステム(株))

日時：令和4年10月27日(木) 14:00 - 16:00

会場：つくばキャンパス 3号館1階セミナーホール

要旨：

Ansys は有限要素法を用いた構造解析ソフトウェアで、KEK でも装置開発に関係する業務を行う技術職員、教員、学生に幅広く利用されています。以前より、初心者も含めて有用性を理解できる内容のセミナーを企画してほしいとの声も多くあり、令和4年度第2回技術セミナーでは、「Ansys による CAE 実践活用セミナー」が会場および zoom リモート配信のハイブリッド形式で開催されました。講師としてサイバネットシステム株式会社のエンジニアの谷口亮太氏にお越し頂き、総勢 45 人（他機関 6 人含む）の参加がありました。

講演では、Ansys の機能の実践的な活用方法や活用事例、及び操作と解析のデモンストレーション等が行われました。特に熱や流体と構造との連成問題など、具体的なテクニックの紹介もありました。事前に KEK 技術職員のユーザーから講演内容についてのリクエストを送り、それらの紹介にも時間を割いて頂いたことで、より実践的な内容となりました。講演後には、データの入力方法及びメッシュの切り方、ソフト使用方法等について活発な質疑応答も行われ、Ansys の初心者から経験者まで幅広い利用者の技術力向上に役立つセミナーとなりました。



ご講演いただいているサイバネットシステム株式会社のエンジニアの谷口亮太氏

例年 CERN 派遣研修及び長期海外派遣研修の報告がされていましたが、CERN 派遣研修は、コロナウイルス等の影響で派遣開始が当初の予定より遅くなり、令和 3 年度は令和 4 年 3 月ようやく派遣された職員が、同年 12 月時点で CERN に滞在中です。またその他の長期海外派遣研修は行われませんでした。その結果、これら派遣研修の報告を行うことができませんでした。CERN 派遣研修の報告会は、令和 5 年度の開催が期待されています。

今年度の技術交流会・技術セミナー実行委員会では、先ずセミナーについてテーマの提案が行われました。そして交流会について開催日と会場の決定が行われました。

第 1 回技術セミナーは、令和 4 年 9 月に、特に KEK 技術職員を対象とした見学会を行い、それに先立って当該施設担当の職員による Zoom でのオンライン講演会を行いました。第 2 回技術セミナーは、令和 4 年 10 月に、ソフトウェア「Ansys」のセミナーを行いました。「Ansys」のセミナーにつきまして、講師の会社からは、今後も同様のセミナーを開催したい、とのご意向を伺っています。いずれのセミナーにつきましても、詳細は 45、46 ページを参照願います。

技術交流会は、令和 4 年 11 月に、つくばキャンパス研究本館小林ホールおよび Zoom の、ハイブリッド形式で行いました。詳細は、交流会当日の様子は巻頭言の「はじめに」を、発表内容は本冊子「技術交流会・技術セミナー報告書」の論文を、それぞれ参照願います。今年度新人の紹介は、コロナ禍において多くの先輩職員が、現地およびリモートで新人を見守る貴重な機会でした。採用 2 年目の活動報告は、まだ KEK に入所して 1 年 7 ヶ月程の皆様が、与えられた時間内に、自身の専門とする仕事を口頭で堂々と発表され、質問にも適切に返答される姿に感心しました。最後に「KEK の研究を加速する技術力」をテーマとした発表が行われました。今年度はテーマを初めに決めず、発表者と発表題目を先に募って、出された発表題目からテーマのタイトルを実行委員会で決める、という手順を踏みました。昨年度の 2 年目発表に引続き連続で発表した方もあり、さすがに落ち着いた発表がなされ、KEK の技術業務の中核を担っている、という自負を垣間見る思いがしました。3 時間以上に及び、活発な質疑応答もありながら、発表者はじめ皆様のご協力もあり、ほぼ予定時間内に収まる交流会でした。

今年度からの試みとして、国立大学や、他の大学共同利用機関にもお知らせして、リモートの参加者を募りました。第 2 回技術セミナーでは 6 名の外部からの参加がありました。今後も引き続き外部への働きかけを行う予定です。

最後に、専門の業務や技術部門の仕事などが多忙の中、発表と論文作成を行われた発表者の皆様、会場準備や原稿の校閲等に協力頂いた実行委員の皆様には、深く感謝を申し上げます。

令和 4 年技術交流会・技術セミナー実行委員長 川村真人

