

J-PARC 3GeV シンクロトロンにおける荷電変換フォイルの 使用状況とフォイル駆動機構の交換作業概要

OPERATION STATUS OF THE CHARGE EXCHANGE FOIL AND REPLACEMENT WORK OF THE FOIL TRANSFER MECHANISM IN THE J-PARC 3GeV SYNCHROTRON

仲野谷 孝充^{#, A)}, 吉本 政弘^{A)}, Saha Pranab Kumar^{A)}, 竹田 修^{B)}, 佐伯 理生^{B)}, 武藤 正義^{B)} 御代 卓也^{B)}
Takamitsu Nakanoya^{#, A)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Pranab Kumar Saha^{A)},
Osamu Takeda^{B)}, Riuji Saeki^{B)}, Masayoshi Mutoh^{B)}, Takuya Miyo^{B)}
^{A)} JAEA
^{B)} NAT Corporation

Abstract

The J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron utilizes pure carbon foils produced in-house by JAEA as charge exchange foils. In November 2023, during beam commissioning just before the start of user operation, a malfunction occurred in a foil drive mechanism. The foil drive mechanism performs the replacement and insertion of foils into the beamline. This malfunction prevented the remote replacement of the foils. Therefore, when foil replacement was necessary, it was performed manually with visual confirmation near the mechanism. The foil drive mechanism was subsequently replaced and restored between the 2024 summer maintenance period. Despite the issue with the foil drive mechanism, the charge exchange foils demonstrated stability under beam irradiation, and there were no operational problems. Recent efforts have significantly enhanced the durability of the foils against beam irradiation through the implementation of two novel methods. One method involves the selection of an appropriate diameter for the carbon rod used in charge exchange foil fabrication. The other method utilizes carbon nanotube wire as a support material for the foils. In this paper, we report on the malfunction with the foil drive mechanism, the subsequent replacement work, and the performance of the charge exchange foils during user operation from 2023 to 2025.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン(RCS:Rapid Cycling Synchrotron)では、前段加速器であるリアックから入射した、400 MeV の H⁻(負水素イオン)ビームを荷電変換フォイルにより、H⁺(陽子)ビームに変換して、3 GeV まで加速させている。当初、RCS では KEK で開発された手法[1]を用いて、内作した HBC フォイル[2]やカネカ社製のグラフェン薄膜[3]を、荷電変換フォイルとして使用してきた。しかし、近年ではビーム照射による変形がより少ないことが期待される純炭素材を使用して、荷電変換フォイルの開発を進めてきた。

2023年3月にJAEA内作の純炭素製荷電変換フォイルを利用運転で初めて使用した[4]。その結果が良好であったため、以後現在に至るまで純炭素フォイルによる利用運転を行っている。最近、2つの新しい手法を導入することで、ビーム照射に対するフォイルの耐久性を大幅に向上させることに成功した。一方でそのような中、2023年11月には荷電変換フォイルの交換や位置調整を行うフォイル駆動機構にトラブルが発生し、遠隔操作でのフォイル交換が不可能になった。このため、2024年9月から10月にかけてこの装置の交換を行った。

本稿では、純炭素製フォイルによる利用運転の状況とフォイル駆動機構のトラブル対応について報告する。

2. フォイル駆動機構の脱調トラブル

フォイル駆動機構はトランスファーロッド方式により、フォイルの交換やビームラインへの挿入を行うための機構である[5]。Figure 1 に駆動機構の概略を示す。マグネットカップリング(MC)の直進動作により、フォイルを軸方向に移動させ、ビームラインへの挿入と引抜動作を行う。また、MCの回転により、インナーリングに連結された棒ネジを移動させ、クランプを開閉させている。

2023年11月、ビーム利用運転開始直前のビーム調整において、フォイル交換実行時に、MCの脱調トラブルが発生した。脱調が発生したのはクランプ閉動作中であつたため、当初は、フォイルのフレームとクランプの噛合いにズレが生じ、干渉による過負荷が原因と考えていた。しかし、現場にて再現確認をしたところ、フレームがない状態でも、クランプ閉動作で脱調は発生した。また、脱調はクランプ閉動作時のみ発生し、クランプ開動作や直進動作では発生しなかった。

目視可能なアウトターリングは、回転動作に不具合は認められなかった。このため、真空内部にあるインナーリング、棒ネジ、クランプ、これらの機構のどこかで動きを妨げる不具合が発生し、過負荷によるMCの脱調が発生したと考えられる。事象発生当初、再現確認での脱調する頻度は、クランプ閉動作数回に1回程であった。しかし、検証動作を繰り返す程、脱調の頻度は上がり、最終的には毎回脱調するなど、状況は悪化していった。一方で利用運転の開始は目前に迫っており、内部を開放しての

[#] nakanoya.takamitsu@jaea.go.jp

修理や予備機への交換は難しい状況であった。試行錯誤の中で、クランプ閉動作を手動操作で少しずつ断続的に行うと、脱調が発生しないことが判明した。このため、脱調事象の修理は断念し、フォイル交換が必要な際は、現場で目視確認しながら手動操作で対応することにした。

遠隔操作でのフォイル交換であれば、制御 PC 上から一人の操作にて約 20 分で完了する。しかし、手動操作での交換の場合、ビーム停止後の放射化した空気の高減に 4 時間、複数人での現場作業に 1 時間、合計 5 時間程要する。このため、フォイル交換は、交換時期の慎重な見極めと、事前準備が必要となり、大きく制限された。結果的に 2023-2024 年の運転期間では、合計 4 回、手動操作にてフォイル交換を行った。幸い、1 度も脱調することなく交換できた。

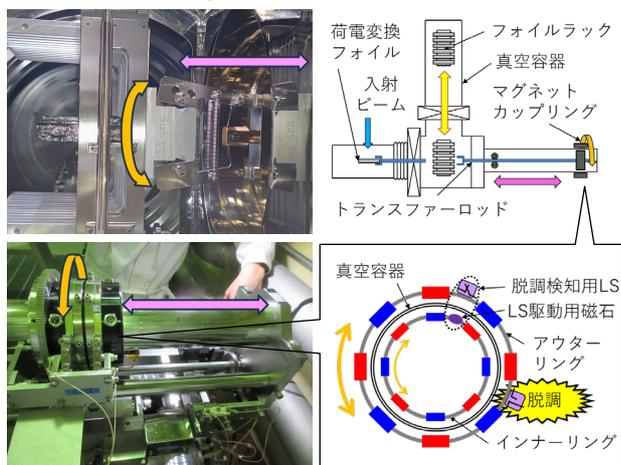


Figure 1: Photograph and Schematic diagram of the foil drive mechanism and the magnet coupling.

3. フォイル駆動機構の交換

2024 年の夏期メンテナンス期間で駆動機構の予備機 (2 号機) への更新を行った。駆動機構のロッドの直進方向の移動範囲は 0~1465 mm である。フォイル交換時のロッドの位置は 230 mm であり、ビーム運転中におけるフォイルの挿入位置は 1420 mm 前後である。また、その付近には、フォイルから発生した二次電子を捕集する黒鉛ブロック (エレクトロンキャッチャー) や、マルチワイヤービームプロファイルモニター (MWPM) 等の周辺構造物が存在する。特に、このブロックとロッド先端は非常に近接しており、その距離は 6 mm しかない。駆動範囲において、ロッド先端の垂直・水平両方向の変位が多いと、フォイル交換の失敗、周辺構造物との衝突、入射ビームに対してフォイルの位置がずれる等の深刻な問題が発生する。ロッドの変位の要因として、ロッド自重によるたわみや、摺動部のクリアランス量、駆動機構筐体の機械的精度が挙げられる。一方でロッドの荷重を支えるベアリングは原点近傍の 1 か所のみであり、駆動範囲内にロッドの荷重を受けるサポートや変位を補正するためのガイド等はない。このため、駆動範囲内全域でロッド先端の変位が少なくなる様、交換・設置前の軸精度の確認と調整を入念に実施した。

ビームライン設置前に、駆動機構単体で実施したロッ

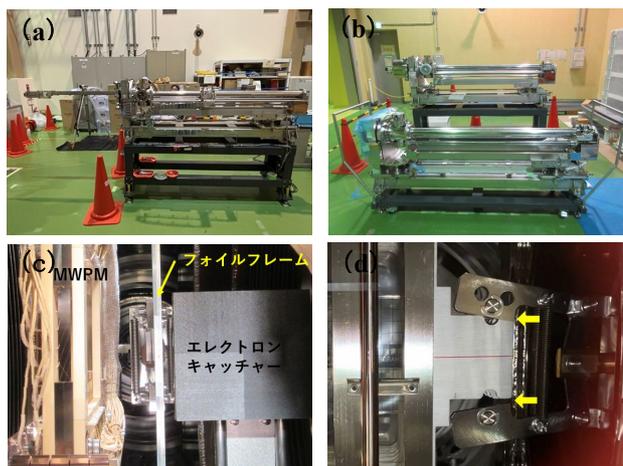


Figure 2: Photograph of the foil drive mechanism replacement work.

(a) Measurement of displacement of rod tip and alignment
(b) The removed the unit 1 (front side) and the unit 2. (rear side) before installation.

(c) Confirmation of interference between TR and surrounding structures.

(d) View of frame and clamp misalignment.

ド先端の変位量の測定とアライメント調整の様子を Fig 2 (a)に、結果を Fig. 3 に示す。調整前は変位量が大きく、垂直方向で最大-6.6 mm の垂れが確認された。また、水平方向では下流側に最大 3.1 mm の変位があった。1 号機に対して垂直方向の変位量が大きい。これは、ロッドに使用している特殊鋼の板厚が、1 号機は 5 mm であったのに対し、2 号機では入手性により 9 mm を使用したことで、自重が増したためである。この状態では、挿入した際にエレクトロンキャッチャーとの干渉や、フォイルの位置ずれが生じる可能性がある。このため、駆動機構の前方を支点にして後方を 5 mm 下げ、ロッドに仰角を付けた。また、基準軸に対して平行になるよう、後方を下流側に 3 mm 移動させた。この調整により、挿入位置での垂直方向の垂れ下がり は 1 号機と同水準に、水平変位は基準軸に対して ±1 mm 以内に調整できた。

駆動機構単体での調整後、2 号機を加速器トンネル内に運搬し、ビームラインに設置を行った。Figure 2 (b) に取り外した 1 号機と搬入した 2 号機の写真を示す。

ビームラインと接続後、さらに変位量の測定と調整を行い、最終的には挿入位置での垂直変位量を-2.9 mm、水平変位量を-2.3 mm と 1 号機と同水準に調整できた。TR 挿入時における周辺構造物との干渉確認の様子を Fig. 2 (c)に示す。

次に確実にフォイル交換が可能かの確認を実施した。当初は、フォイル交換位置でフォイルフレームに対してクランプの位置にズレがあり、円滑なフォイル交換ができなかった。このズレはロッドに仰角を付けたことにより、フォイル交換位置でクランプが上方に変位したことで、フォイルフレームとクランプの平行度にわずかなズレがあるため、クランプを開く際に、フレームを上側に引きずるためであった。この様子を Fig. 2 (d)に示す。引きずりが発生したため、クランプとフレームの隙間が上下で均等でないことが確認できる。このズレを解消するため、駆動機構

全体を 3 mm 下げ、かつ反時計方向に約 0.15 度回転させた。この調整により、フォイルラックに装填される 15 枚全てのフォイルが円滑に交換可能であることを確認できた。

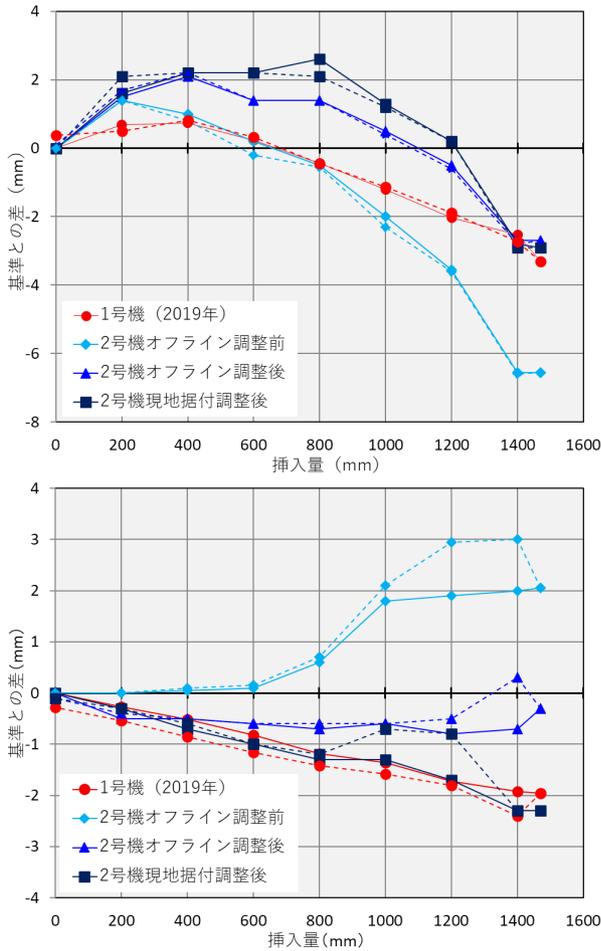


Figure 3: Vertical and horizontal displacement of the rod tip as a function of rod insertion distance.

4. 利用運転におけるフォイルの使用状況

4.1 炭素棒条件の最適化

純炭素フォイルは、炭素棒を電極とした真空アーク蒸着法で作製している。参考文献[6]によれば、蒸着後のアノード・カソード両電極の減損量の和に対するカソードの減損量の割合をカソード比と呼び、Eq. (1)で表される。

$$\text{カソード比} : R_{cat} = \frac{\Delta m_{cathode}}{\Delta m_{cathode} + \Delta m_{anode}} \quad (1)$$

同文献よれば、このカソード比の値により、ビーム照射に対するフォイルの寿命が大きく変化し、0.6-0.7 で最大となる。しかし、カソード比の制御方法については、具体的な記述がなく不明であった。これまでは、アノード・カソード共に直径 10 mm の純炭素製の丸棒を使用していたが、カソード比は 0~0.2 以下の低い値で制御できていなかった。カソード比を高めめるには、アノードからの蒸発成分を減らせば良い。アノードの体積を増やして熱容量を上げれば、アノードからの蒸発量を抑制しできるの

ではと考えた。そこで、カソード側の電極径を 10 mm に固定し、アノード側を 10 mm~45 mm まで変化させたとこ、蒸着膜のカソード比を幅広く制御できることが分かった。Figure 4 に、各アノード電極径に対するカソード比の変化を赤丸で示す。アノード径の太さに比例し、カソード比が上昇することがわかる。アノード径 45 mm でカソード比が 1 を超えているのは、蒸着後にアノードの重量が増加したためである。これは、アノードの蒸発量が極わずかで、カソード側から蒸発した炭素がアノードに付着した量の方が多いためと考えられる。

このアノード径を変えて作製した炭素膜のビーム照射に対する耐久性を比較するため、量研機構高崎 TIARA にて、Ar イオン 300 keV による照射試験を行った。試験したフォイルの厚さは約 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、ビームスリット径は 1 mm である。結果を Fig. 4 に示す。フォイルが破壊に至るまでの時間はアノード径によって大きく異なることがわかった。アノード径 10 mm と 15 mm で作製した試料は、100 秒以下で破壊に至るが、アノード径 18 mm 以上の試料では、飛躍的に寿命が延び、1500 秒以上の寿命を示した。また、[6]の方法では、フォイルの寿命はカソード比 0.6~0.7 の範囲以外では低下を示したが、本方法ではカソード比 0.48 以上では一定して長寿命を示した。

このアノード径を変えてカソード比を制御する方法を用い、RCS の利用運転用の厚いフォイル (340 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) の作製を試みた。これまでのフォイルよりも基板から剥離しやすい傾向はあるが、欠損や割れのないフォイルの作製に成功した。このフォイルの耐ビーム性能を利用運転でテストするため、Run91 用のフォイルとして、1 枚試験導入した。

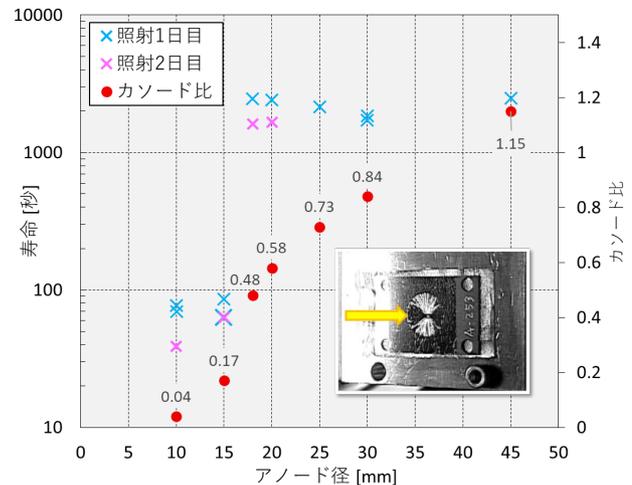


Figure 4: Cathode ratio and foil lifetime for each anode electrode diameter.

4.2 2023-2024 年 (Run91) における使用状況

Figure 5 に 2023 年 11 月から 2025 年 5 月までに RCS に入射した陽子ビームの 1 時間当たりの入射粒子数と、その積算粒子数、及びその間のビームダンプ温度の推移を示す。また、Fig. 6 にこの間に使用した代表的なフォイルの使用前後の観察像を示す。2023 年 11 月から 2024 年 6 月までの Run91 では、計 5 枚の純炭素製フォイルで利用運転を行った。このうち、11 月 6 日から 6 月

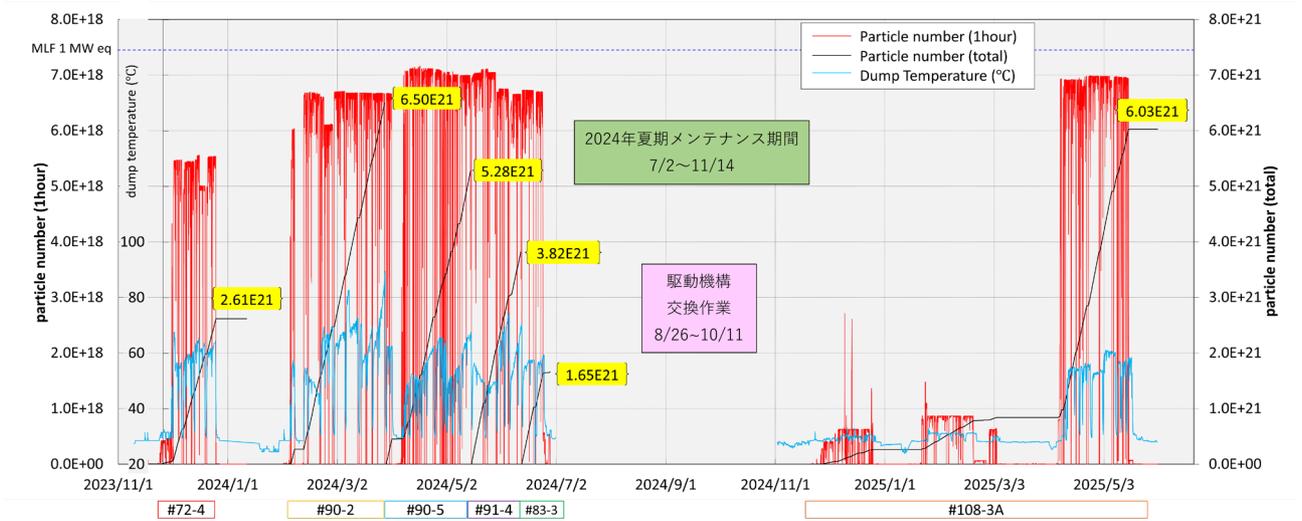


Figure 5: History of the beam power and the beam dump temperature in J-PARC RCS at 2023-2025.

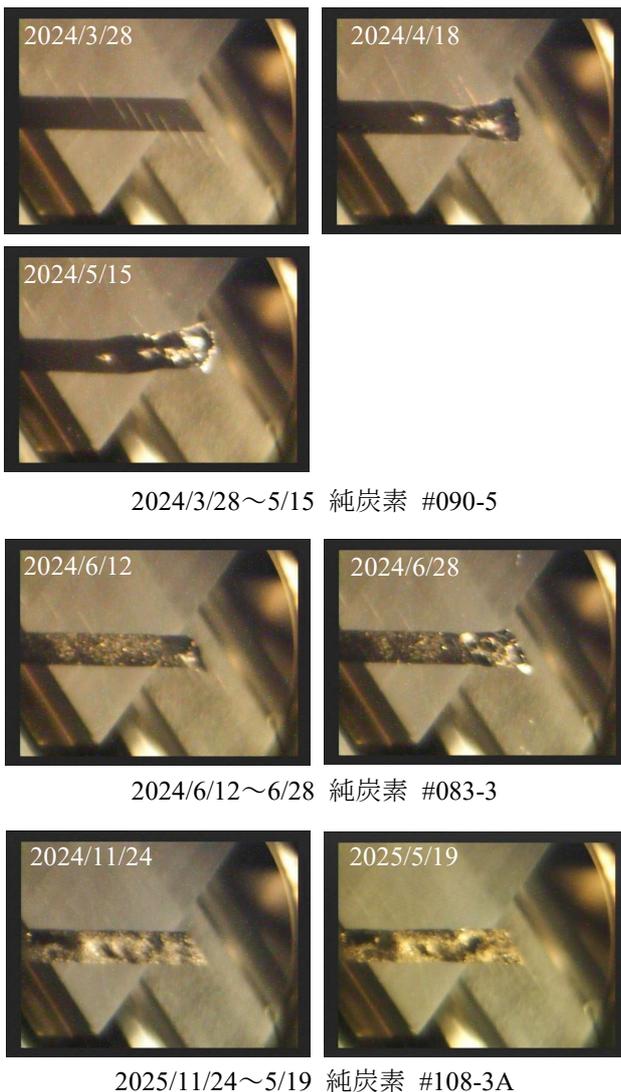


Figure 6: Pictures of the foils before irradiation and after irradiation at 2023-2025.

12 日まで使用した 4 枚は、いずれも炭素棒電極の径を 10 mm で作製した従来型のフォイルである。フォイル交換の時期は、フォイルの観察像における変形量やダンプ温度の上昇量を指標としている。これらのフォイルはまだ使用可能と考えられていたが、遠隔でのフォイル交換ができない状態であり、フォイルを起因とするトラブルのリスクを下げるため、早めの交換を実施した。

6 月 12 日からは、アノード径 20 mm、カソード径 10 mm にて作製したフォイルを使用して利用運転を行った。このフォイルのカソード比は 0.71 である。Run91 終了間際での交換であったため、積算入射粒子数は、 1.65×10^{21} 個であり、他の 4 枚と比較して少ないが、端部の変形の度合いは少なかった。Figure 6 に示す#090-5 の 2024/4/18 の観察像は、積算入射粒子数が 1.65×10^{21} 個の時点のものである。入射粒子数が同じ状態で比較すると、変形は#083-3 の方が明確に少ない。これより、電極径比を変えることでカソード比を高めたフォイルは、RCS で使用するビームに対しても、高いビーム耐性を持つことが確認できた。

4.3 カーボンナノチューブ製支持ワイヤーの採用

フォイルは形状を安定させるため、Fig. 7 (a)に示す様に、フォイルフレームに張られた支持ワイヤーによって両側から支えられている。これまでは SiC 繊維の素線を支持ワイヤーに使用してきたが、ビーム強度の増加に伴い、ワイヤーの破断が顕著になってきた[7]。Figure 7 (b)に SiC 繊維を支持材として使用したフォイルのビーム運転後の写真を示す。フォイル先端付近の複数の SiC 繊維が破断して、絡み合っている様子が確認できる。

入射ビームの大部分は荷電変換され H^+ となるが、一部の荷電変換されなかった、 H^- や H^0 成分はビームダンプへ廃棄される。支持ワイヤーが破断すると、フォイルの変形の抑制が効かなくなり、端部に変形による反りが発生する。反りが進行すると、入射ビームの一部はフォイルに当たらず、荷電変換されないビーム成分が増え、ダンプ温度は上昇する。ダンプ温度が上限値に達した時が実質的なフォイルの寿命である。このため、SiC よりもビーム照射に対して強い耐性を持つ支持材を検討して

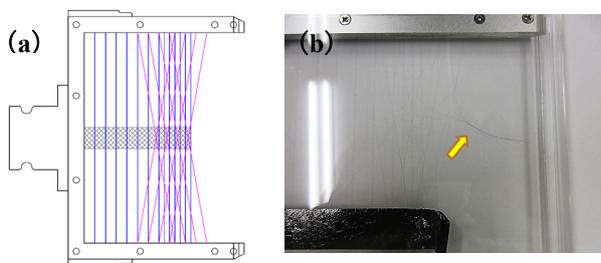


Figure 7: Schematic image of the support wire pattern (a) and Picture of the used foil with broken SiC fiber. (b).

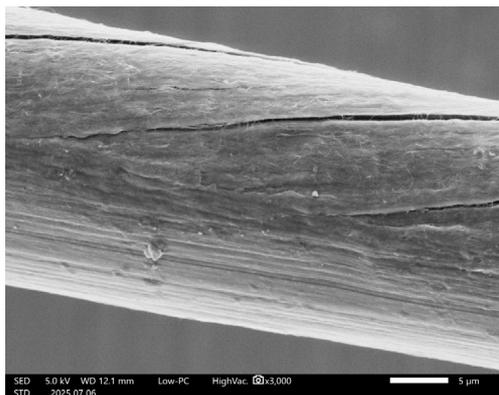


Figure 8: SEM image of CNT wires.

きた。その候補として、すでに J-PARC にてビームモニタのプロープとして使用実績[8]のある、CNT ワイヤーを試験した。Figure 8 に、使用した CNT ワイヤーの SEM 写真を示す。CNT ワイヤーは、配向した CNT 単繊維を繊維状に引き出し、撚り合わせたものである[9]。支持材としての性能をテストするため、SiC 繊維の代わりに直径 $20\ \mu\text{m}$ の CNT ワイヤーで支持パターンを構成したフォイルを、Run92 用に 1 枚試験導入した。

4.4 2024-2025 年 (Run92) における使用状況

2024 年 11 月から 5 月までの Run92 で使用したフォイルは #108-3A の 1 枚のみである。このフォイルは、アノード径 $20\ \text{mm}$ 、カソード径 $10\ \text{mm}$ にて作製し、支持材に CNT ワイヤーを使用したもので、カソード比は 0.65 である。

11 月から 3 月までの期間、ビームの行先の一つである、物質生命科学実験施設の都合により、ビーム強度は最大で $100\ \text{kW}$ 程度での断続的な運転となった。その後、4 月 8 日から 5 月 16 日まで、 $950\ \text{kW}$ 相当で約 1 カ月のビーム運転を行い、5 月 19 日に Run92 を終了した。

この間のフォイルの観察像を Fig. 6 に示す。ビーム運転期間を通して、CNT ワイヤーの破断は全く確認されなかった。これまで、ビーム強度 $600\ \text{kW}$ 以上では、SiC ファイバーを支持材に使用した場合、使用開始から数時間程度でファイバーの破断が確認されてきた。これと比較すると CNT ワイヤーのビームに対する耐久性は極めて高い。また、このフォイルの積算入射粒子数は 6.03×10^{21} 個であり、Run91 で使用した 3 枚目のフォイル (#090-5) よりも多い。しかし、#090-5 は使用後の端部

の変形が明瞭に確認できるが、#108-3A は使用前後で、フォイルの表面形状の変化はほとんどない。また、Fig. 5 に示すようにダンプ温度の上昇もなかった。このことは、変形により荷電変換されずに、ダンプに廃棄されるビーム量の増加がないことを裏付けるものである。支持材として CNT ワイヤーを使用し、アノード径を拡大して作製したフォイルは、ビームに対して極めて強い耐久性を持つことが確認できた。

5. まとめ

2023 年にフォイル駆動機構の脱調トラブルが発生し、遠隔操作でのフォイル交換ができなくなった。交換が必要な都度、現場で異常がないことを目視確認しながら手動操作での交換で対応してきた。2024 年の夏期メンテナンス期間でフォイル駆動機構の交換が完了し、以後は遠隔操作でのフォイル交換が可能となった。

フォイルの使用状況においては、炭素棒径を適切に選定することで、カソード比を高めた純炭素フォイルは、ビーム照射に対してより変形が少ないことが分かった。さらに、2024 年からフォイルの支持材として試験導入した CNT ワイヤーは、ビーム照射による破断が全くなく、極めて強いビーム耐性を示した。高カソード比純炭素フォイルと CNT ワイヤーの組み合わせは、RCS の $1\ \text{MW}$ 安定運転を実現するのに非常に有望であり、今後の利用運転を通してさらに検証を続ける。最終的には 1 枚のフォイルで 1 年間の $1\ \text{MW}$ 安定運転の実現を目指す。

謝辞

量研機構高崎 TIARA で実施した Ar 照射試験では、同機構の山本春也博士に多大なご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] I. Sugai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 561, pp. 16-23, 2006.
- [2] T. Nakanoya *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31- Aug. 3, 2019, Kyoto, Japan, pp. 545-549.
- [3] A. Tatami, M. Tachibana, M. Murakami, T. Yagi, M. Murakami, AIP Conf. Proc., Vol. 1962, p. 030005, 2018.
- [4] T. Nakanoya *et al.*, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 29- Sept. 1, 2023, Funabashi, Japan, pp.937-941.
- [5] M. Yoshimoto *et al.*, Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, May 23-28, 2010, Kyoto, Japan, pp. 3930-3932.
- [6] I. Sugai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 265, pp. 376-382, 1988.
- [7] T. Nakanoya *et al.*, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 629-633.
- [8] A. Miura *et al.*, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, 29 Apr - 4 May, 2018, Vancouver, Canada, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1067 072020.
- [9] N. Fujimoto *et al.*, 配向カーボンナノチューブ (HiTaCa®) の用途開発, Hitz 技報, Vol.79 No.1 2018.11.