PASJ2022 WEP042

J-PARC 3GeV シンクロトロンにおける荷電変換フォイルの最近の使用状況 RECENT USAGE STATUS OF CHARGE-EXCHANGE STRIPPER FOIL FOR 3GeV SYNCHROTRON OF J-PARC

仲野谷孝充^{#, A)}, 吉本政弘^{A)}, サハ プラナブ^{A)}, 竹田修^{B)}, 佐伯理生二^{B)}, 武藤正義^{B)}

Takamitus Nakanoya^{#, A)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Pranab Saha^{A)}, Osamu Takeda^{B)}, Riuji Saeki^{B)}, Masayoshi Mutoh^{B)}

A) JAEA

^{B)}NAT Corporation

Abstract

In the J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS), a 400 MeV H⁻ beam injected from the linac is exchange to an H⁺ beam by a charge exchange foil and accelerated to 3 GeV. The charge exchange foils mainly used in the RCS are HBC foil (Hybrid Boron mixed Carbon stripper foil), which are made by adding a small amount of boron to carbon rods and using them as electrodes by the arc deposition method. Since 2018, foils produced by JAEA have been used for user operation. So far, no major problems have occurred due to the foils. Meanwhile, the beam power of the RCS has been gradually increased from 500 kW to 830 kW since 2018. As beam power increases, the foil issues were identified to achieve the RCS design power of 1 MW. In this paper, we will report on the recent foil usage status and issue in the user operation.

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン(RCS: Rapid Cycling Synchrotron)では、前段加速器であるリニアックから入射 した 400 MeV の Hビームを荷電変換フォイルにより H+ ビームに変換して、3 GeV まで加速させている。RCS で 主に使用している荷電変換フォイルは、少量のホウ素を 炭素棒に添加し、これを電極としてアーク蒸着法により 作製した HBC フォイル(Hybrid Boron mixed Carbon stripper foil)である[1]。この HBC フォイルは KEK で開発 されたもので、当初は KEK で製作されたフォイルを使用 してきた。2017 年から原子力機構で HBC フォイルの内 作を開始し、2018 年以降これを利用運転で使用してい る[2]。これまでのところフォイルを起因とする大きな問題 は生じていない。一方でこの間、RCS のビームパワーは 500 kW から 830 kW へと段階的に上昇してきた。これに よりRCSの設計出力である1MWを達成するためのフォ イルの課題が徐々に明らかになってきた。本発表では近 年の J-PARC 利用運転でのフォイルの使用状況と課題 ついて報告する。

2. 利用運転で使用するフォイルの種類

2018年以降、RCSで利用実績のあるフォイルはJAEA 内作のHBCフォイルとカネカ社製の多層グラフェンシート[3]である。HBCフォイルは炭素にB4C粉末を添加して 焼結した炭素棒を使用して作製している。これまでホウ 素が20at%添加された東洋炭素製GB-220材を使用し てきたが、廃番となったため、代替材である東洋炭素製 KM-100B材を使用した成膜を開始した。KM-100B材は ホウ素添加量が10at%であり、炭素の原料やホウ素の分 散状態が従来使用していたGB-220材とは異なるため、 ビームに対する挙動や耐性が GB-220 材製と大きく異な る可能性がある。このため、KM-100B 材の利用運転で の使用に当たっては、まず QST 高崎の TIARA を用いて 事前評価試験を行い、GB-220 材と大きな性能差がない ことを確認した。その上で GB-220 材と並行しながら利用 運転での使用を開始した。また、内作の HBC フォイル以 外に荷電変換フォイルとして期待される材料のひとつに 多層グラフェンシートがあげられる。これまでも RCS では 使用実績があり、良好な結果が得られている。

HBC フォイル (GB-220 材製、KM-100B 材製)2 種類 及びグラフェンシートの計 3 種類について 2020 年から 2022 年における利用運転での実績を示す。

3. 利用運転での使用実績

3.1 2020-2021年の使用実績

Figure 1 に 2020 年 10 月から 2021 年 7 月までに RCS に入射した 1 時間当たりの入射粒子数とその積算数(総入射粒子数)の履歴を示す。ここで言う総入射粒子数とはリニアックから入射される H 粒子の積算値であり、周回ビームとしてフォイルに入射する粒子数はカウントして



Figure 1: History of beam power in J-PARC RCS at 2020-2021.

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

Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University)

PASJ2022 WEP042



Figure 2: Pictures of the foils before installation and after irradiation at 2020-2021.

2020/11/30 - 2021/2/18
2021/2/18 - 2021/3/4
2021/4/1 - 2021/4/30
2021/3/4 - 2021/4/1
2021/7/15 - 2021/7/17
2021/5/10 - 2021/6/9
2021/6/9 - 2021/7/15

いない。Figure 2 にこの間に使用したフォイルの使用前 後での写真を示す。2020/11/29 から 2021/4/4 まで、リニ アックから入射される Hビームは 1 時間当たり約 4.7× 10¹⁸ 個であり、RCS で加速されると 620 kW のビームとし て出力される。この間、GB-220 材製のフォイル 2 枚と KM-100B 材製のフォイル 1 枚を利用運転で使用した。 GB-220 材製のフォイルの変形の傾向は、これまでと同 様で表面が波打つような歪みが生じている。その後、 KM-100B 材製は利用運転で初めて使用したが、約 24 日間、問題なく使用可能であった。表面の変化の様子も

GB-220 材と大きく変わらないことが確認できた。

2021/4/5 からは RCS のビーム出力を 740 kW とするた め、リニアックからの 1 時間当たりの入射ビームを 5.8× 10¹⁸個に増やした。以後、使用したフォイルはGB-220材 製2枚(#030-01、#037-03)と多層グラフェンである。 #030-01 は 620 kW で使用していたもの再使用であり、入 射粒子の総数は最終的に 4.8×10²¹ に達したが、表面の 変化は#037-05 と同程度であった。#037-01 は垂直方向 のフォイル幅をこれまで使用してきた 20 mm から 14 mm へ狭めたものである。これはフォイルの幅を狭めることで 周回ビームのフォイルへの衝突回数を減らす試みである。 フォイル位置での入射ビームをこれまで以上にフォーカ スさせるため、リニアックのビーム調整が必要であったが、 狙い通りに周回ビームの衝突回数を減らすことができ、 入射部とその下流周辺での残留線量の低減に効果が あった[4]。一方で利用運転に支障はなかったものの、使 用に伴いフォイルの屈曲が進行し、最終的にはビーム上 流方向に大きく曲がってしまった。また、多層グラフェン も利用運転に支障はなかったものの、徐々に屈曲が進 行し、大きく屈曲してしまった。屈曲の方向は#037-01 と は逆でビーム下流方向であった。照射済みのフォイルは 一定期間冷却した後、アクリル製の密閉ケースに回収[5] し、表面観察等を行っているが、これら二つのフォイルは ケースの間口幅より大きく屈曲したため、ケースへの回収 不可となり、フォイルの表面観察ができていない。このた め、Fig. 2 (d),(e)に示した照射後の写真はフォイル交換 直前の運転中のフォイル観察像である。

これまで 500 kW 程度の運転では、後述する SiC ファ イバーが破断することは少なく、あっても数本程度であっ た。しかし、ビームパワーが定常的に 600 kW を超えてき た 2020-2021 年の利用運転では、解像度の低い運転中 のフォイル観察像でも SiC ファイバーの破断が確認でき るようになり、SiC ファイバーの破断が顕著になることが確 認された。運転開始後、数時間で切れはじめ、1 週間ほ ど破断の進行が続くことが観察された。

3.2 2021-2022 年の使用実績

Figure 3 に 2021 年 10 月から 2022 年 7 月までに RCS に入射した 1 時間当たりの入射粒子数とその積算数(総入射粒子数)の履歴を、Fig. 4 にその間の運転中のフォイル観察像を示す。 RCS のビーム出力は 650 kW からスタートし、その後すぐにリニアックからの入射粒子数を増やして 720 kW で約 2.5 カ月運転した後、最終的に 830



Figure 3: History of beam power in J-PARC RCS at 2021-2022.

Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University)

PASJ2022 WEP042

Before irradiation After irradiation (a) (b) (c) (d) (e) (f)

Figure 4: Pictures of the foils before irradiation and after irradiation at 2021-2022.

(a) #040-01 (GB-220)	2022/1/15 - 2022/1/19
(b) #050-03 (GB-220)	2022/1/20 - 2022/3/2
(c) #040-03 (GB-220)	2022/3/2 - 2022/4/28
(d) #032-05 (KM-100B)	2022/5/10 - 2022/6/8
(e) multilayer graphene	2022/6/8 - 2022/6/24
(f) #032-04 (KM-100B)	2022/6/24 - 2022/6/26

kW まで引き上げた。この間、GB-220 材製を3 枚、KM-100B 材製1 枚、多層グラフェン1 枚を使用して運転を 行った。いずれのフォイルも使用開始直後から SiC ファ イバーの破断が始まり、数日以内にビームスポット付近 のファイバーの多数が破断してしまうことが観察された。 また、3/2以降に使用した4種類のフォイルはいずれも幅 14 mm である。前年に試験した結果が良好であったため、 本年より定常的に 14 mm 幅のフォイルを使用していくこ ととした。20 mm 幅と比較して入射ビームの密度は上が るため、より負荷のかかる条件であったが、約 800 kW の ビームパワーに対して、GB-220 材製、KM-100B 材製、 多層グラフェンのいずれもが問題なく使用できた。また、 利用運転終了後に 1 MW の大強度ビーム試験を実施し た。使用したフォイルは KM-100B 材製である。外気温上 昇に伴い、RF の真空管冷却能力が限界に達したため、 1 MW での運転時間は約 3 時間であったが、問題なく使 用できることが確認できた。

これらのフォイルは利用運転で使用した直後のため、 密閉ケースへの収納はまだ実施していない。運転中の 観察像及びビーム停止時の現場での目視観察した結果 からは全体的に屈曲の度合いは少なかった。

4. SiC ファイバーの破断

2020-2022 年の利用運転を通して現状のフォイルの課題が明らかになってきた。フォイルは厚さが 1 µm 程度と 非常に薄いため、それ自体では形状を安定に保つこと ができない。このため、2 枚の C 字型のアルミ製フレーム に張った 42 本の SiC ファイバーにより両側から挟むこと で形状を安定させている。この SiC ファイバーのパターン とフレームにマウントした状態のフォイルを Fig. 5 に示す。 青い線で示す縦に張った SiC ファイバーの間隔は先端 部で 5 mm、後端部で 10 mm である。また、先端付近の



Figure 5: Schematic view of the SiC fiber pattern and C shape frame.



Figure 6: Picture of the used foil with broken SiC fiber.

Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University)

PASJ2022 WEP042

みピンク色の線で示す様に斜め方向からも SiC ファイ バーを張っている。ビーム出力の上昇に伴い、運転中に SiC ファイバーの破断が顕著なってきたことが確認された。 ビームパワー500 kW での運転に使用した時期はいずれ も SiC ファイバーの破断は数本程度であった。しかし、 ビームパワーが 600 kWを超えてくると数日以内でビーム が当たるエリアの SiC ファイバーは破断してしまうことが 確認された。Figure 6 に複数の SiC ファイバーが破断し た使用済みフォイルの写真を示す。

SiC ファイバーが切れる原因として、これまでビーム照射による損耗とフォイルの屈曲に伴う引張応力の発生の2 種類が複合して破断に至ると考えてきた。しかし、ビームパワー600 kW 以上では屈曲の進行より先にビームスポット周辺の SiC ファイバーが破断してしまうため、ビームによる損耗が支配的であると考えられる。

SiC ファイバーが破断することによる悪影響として、① 周回ビームの散乱、②周辺機器への接触による干渉、 ③フォイル回収時の汚染誘発、④フォイルの屈曲・変形 の促進などが挙げられる。

Figure 7 に切れた SiC ファイバーが発光しているフォ イルの観察像を示す。この写真は 2022/3/2 から使用開 始したフォイルで 3/10~3/19 まで発光が観測された。破 断したファイバーが横方向に垂れ、それが周回ビームに 曝されることにより発光していると考えられる。SiC ファイ バーの直径は 13 µm であり、フォイルの厚さ 1µm よりも だいぶ厚い。このため、SiC ファイバーが周回ビームと接 触することで周回ビームが散乱され、ビームロスの原因と なり、周辺機器の放射化につながる。

Figure 8 に切れた SiC ファイバーがその近傍にある Multi Wire Profile Monitor (MWPM)に引き寄せられて接 触しいる様子を示す。幸い MWPM の計測機能に異常 は確認されなかったが、このような異物との接触は計測 不良やノイズになるおそれがある。この他、切れた SiC ファイバーがフォイル交換機構の駆動部に対して挟み込 まれや、巻き込まれることにより機械的な固着の発生や、 ゲートバルブのシール面に付着することで真空リークな どが発生するなどの悪影響が考えられる。

Figure 9 に照射済みのフォイルを専用の密閉ケースに 収納してている様子の写真を示す。ケースへの収納はグ ローブボックスを介して行うが、切れた SiC ファイバーは 片側しか固定されておらず不安定な状態であるため、収 納作業時に意図せず手や周辺に接触し、汚染を引き起 こすおそれがある。

Figure 10 に使用中に大きく屈曲したため密閉ケース に収納できなかった#037-03 と多層グラフェンの写真を 示す。運転中に屈曲が急激に進行した場合、入射ビー ムがフォイルから過大に漏れる可能性がある。漏れた入 射ビームは荷電変換されないため、ビームダンプに廃棄 されるが、ビームダンプの容量を超えると長時間のビー ム停止を招くおそれがある。

このように SiC ファイバーの破断は様々な悪影響を及 ぼし、場合によっては長期間のビーム停止に至る可能性



Figure 7: Picture of the foil and SiC fiber in beam operation.

(a) Foil observation image during user operation.

(b) Schematic image of foil hit by injection and circulating beam.



Figure 8: Picture of the broken SiC fiber pulled toward MWPM.



Figure 9: Picture of the used foils being stored in a sealed case.



Figure 10: Picture of foils that could not be stored in sealed case due to largely curled. (a) #037-03, (b) multilayer graphene

がある。このため、SiC ファイバーの破断対策として、現 在使用しているSiCファイバーと比較してより高引張耐力、 高耐熱性を付与したSiCファイバーの使用を検討してい る。また、先端付近ほど切れやすい傾向があるため、フ レームにSiCファイバーを張る段階で切れやすい位置の SiCファイバーを間引くことを検討している。2022年夏以 降にこれらの対策を施した荷電変換フォイルを実装し、 利用運転で使用しながらその効果を検証していく予定で ある。

5. まとめ

Tabel 1 にフォイル種類毎の各ビームパワーに対する これまでの運転実績を示す。2018 年以前は KEK で製 作されたオリジナルの HBC フォイルを使用して運転を 行ってきた。2018 年より JAEA で製作された HBC フォイ ルを中心に数種類のフォイルを利用運転で使用してきた。 この間、利用運転のビームパワーは 500 kW から 830 kW へ段階的に上昇してきており、それに合わせて各フォイ ルの耐久性を慎重に確認してきた。これまでのところ運 転中にフォイルの致命的な破損等はなく、フォイルを起 因とする長時間のビーム停止するような事態には至って いない。

これまで HBC フォイルを製作する際に使用してきた GB-220 材に代わり KM-100B 材で作製したフォイルで利 用運転を行い、GB-220 材と比較して遜色ない耐ビーム 性能があることが確認できた。また、短時間ではあるが 1 MW のビーム試験でも問題なく使用できた。GB-220 材 の代替材として KM-100B 材が使用可能であることを確 認できた。

一方でビーム出力の増大に伴い、フォイルを支える SiC ファイバーが破断してしまう問題が出てきた。これに ついては今夏に対策を実施し、以後の利用運転でその 効果を検証していく。

今後もビームパワーの上昇に合わせて各フォイルの耐 久性確認しながら改良を重ね、最終的には 1 MW の ビーム供給に 1 年間耐えることが可能なフォイルの開発 を目標とする。

参考文献

- [1] I. Sugai, Y. Takeda, M. Oyaizu, H. Kawakami, Y. Irie, Y. Arakida, K. Hara, H. Hattori, K. Kawasaki, J. Kamiya, M. Kinsho, Nucl. Instum. 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, Jul. 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] P.K.Saha *et al.*, Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp.1616-1619.
- [5] N.Tobita *et al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp.915-919.

Foil type	RCS beam power					
	<500 kW	500 kW	600 kW	700 kW	800 kW	\sim 1 MW
Orijinal-HBC	202d	-	-	-	-	-
HBC (GB-220)	-	40d	44d	35d	16d	37h
HBC (KM-100B)	-	-	24d	-	18d	3h
Multilayer graphene	45d	57d	19d	12d	14d	-

Table 1: Operating Results for Each Beam Power for Each Foil Type