

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

- (a) #037-05 (GB-220) 2020/11/30 - 2021/2/18
- (b) #030-01 (GB-220) 2021/2/18 - 2021/3/4
- (c) #032-01 (KM-100B) 2021/3/4 - 2021/4/1
- (d) #037-03 (GB-220) 2021/5/10 - 2021/6/9
- (e) multilayer graphene 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  $4.7 \times 10^{18}$  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  $5.8 \times 10^{18}$  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利用であり、入射粒子の総数は最終的に  $4.8 \times 10^{21}$  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

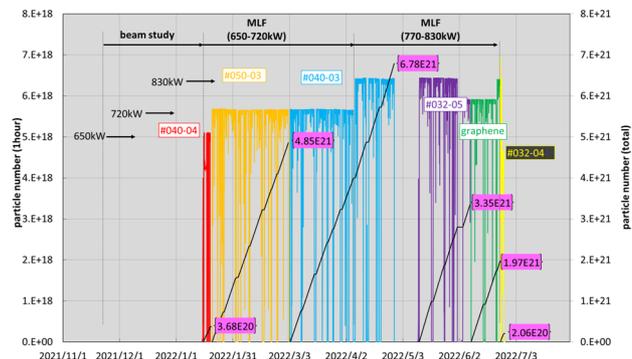


Figure 3: History of beam power in J-PARC RCS at 2021-2022.

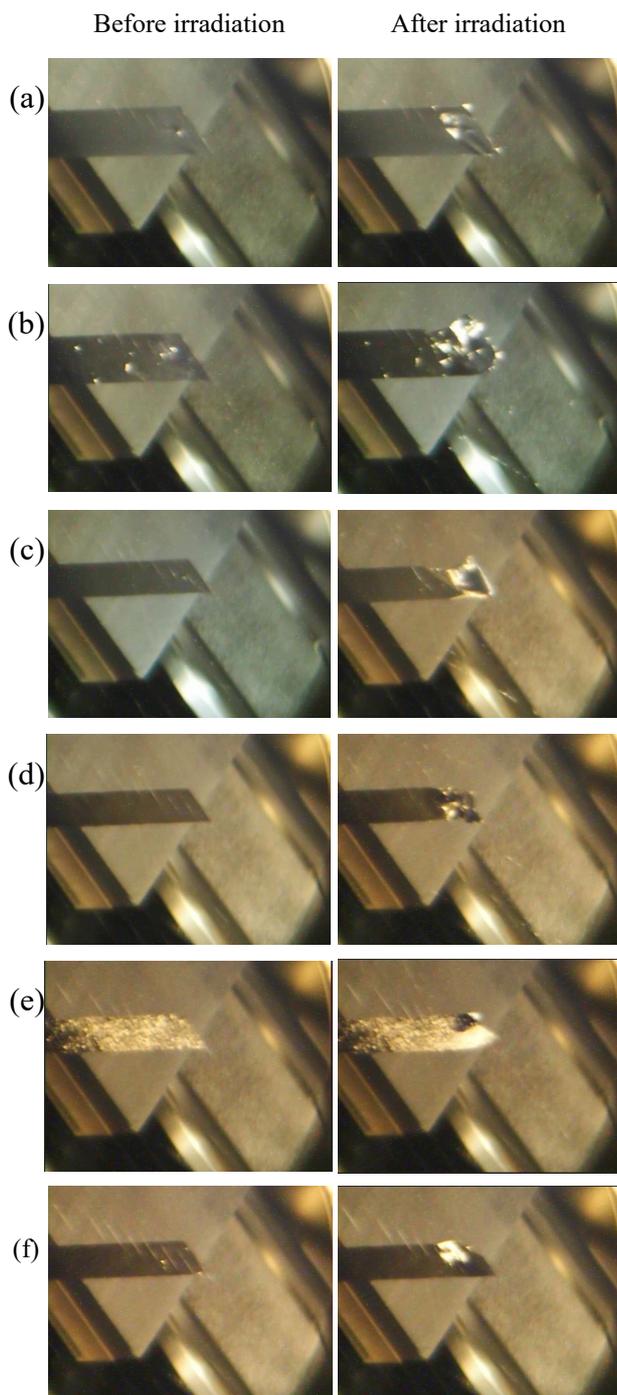


Figure 4: Pictures of the foils before irradiation and after irradiation at 2021-2022.

- (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  $\mu\text{m}$  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

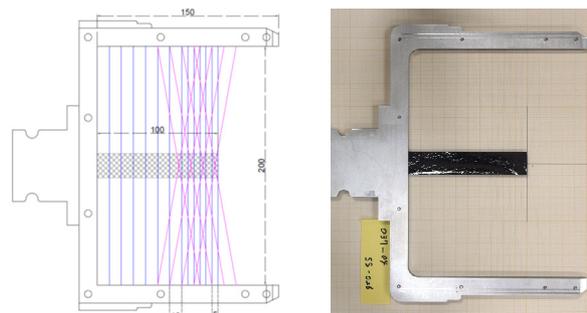


Figure 5: Schematic view of the SiC fiber pattern and C shape frame.

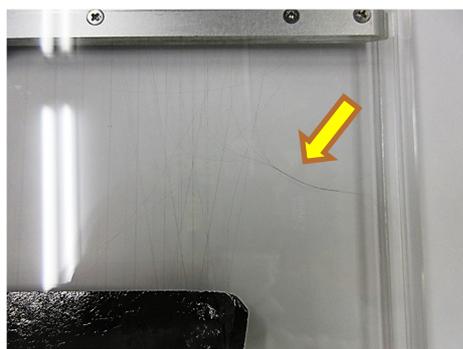


Figure 6: Picture of the used foil with broken SiC fiber.

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に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  $\mu\text{m}$  であり、フォイルの厚さ 1  $\mu\text{m}$  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ている様子を示す。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

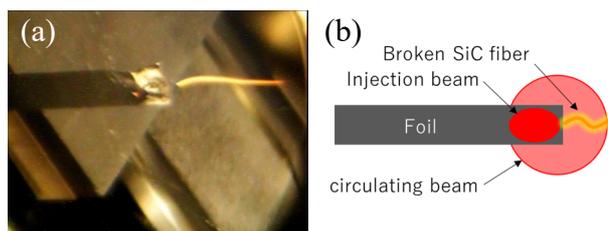


Figure 7: Picture of the foil and SiC fiber in beam operation.

(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.

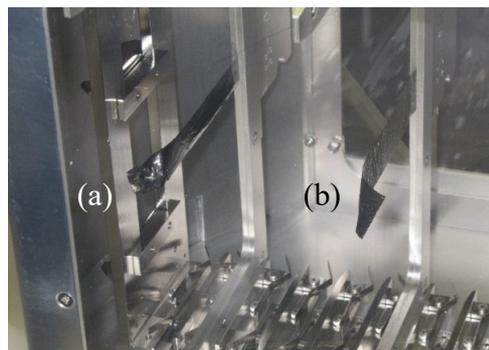


Figure 10: Picture of foils that could not be stored in sealed case due to largely curled. (a) #037-03, (b) multilayer graphene

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. 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, 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.

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

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