

Figure 2: Picture of the Surface changes of HBC and pure carbon foils by Ar ion irradiation.

3. 利用運転用純炭素フォイルの作製

3.1 HBC フォイルについて

炭素棒を電極としてアーク蒸着法により厚い炭素フォイルを蒸着する場合、炭素膜と基板との密着性が弱いため、成膜中に膜が基板から剥がれ落ちてしまう。このため、厚さ $120 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上の純炭素薄膜の成膜は困難であった[4]。RCS に入射される 400MeV の H-ビームを高

効率で荷電変換するためには厚さが $340 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度のフォイルが必要である。当時、RCS のための荷電変換フォイルを開発していた KEK では、少量のホウ素を電極の炭素棒に混ぜると顕著な密着性の向上が得られることを発見し、厚い炭素フォイルの作製が可能となった。このようにホウ素を添加してアーク蒸着法により作製したフォイルを HBC フォイルと名付け特許を取得した。

3.2 利用運転用純炭素フォイルの作製

HBC フォイルの作製では、蒸着膜を剥離しやすくさせるため、あらかじめガラス基板に剥離剤として界面活性剤をごく薄く塗布する。これにより蒸着後、炭素膜は空気中の水分を吸湿し膨潤状のシワが形成され、膜と基板との間に隙間が生じる。この隙間に水を浸透させると炭素膜は浮き上がり、基板から剥離可能となる。蒸着後のシワの形成は大気取り出し時の温湿度に大きく依存する。このため、HBC フォイルの作製では、蒸着後に恒温恒湿槽 (25°C 70%) 内で 1 日程度保管することでシワ形成を促進させ、シワ発生の再現性を上げていた。

これまで原子力機構では $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ を超える純炭素フォイルの作製したことはなかった。純炭素製フォイルは変形が少ないことが期待されるため、利用運転で使用することを目的とした厚い炭素フィルの作製を始めた。純炭素フォイルの作製では炭素電極に直径 10mm の東洋炭素社製 IG110 材を使用した。

はじめは HBC フォイルの作製手順と同様にガラス基板に剥離剤を塗布して蒸着を行ったが、蒸着途中で炭素膜が基板から剥がれてしまった。そこで剥離剤を塗布しない状態で蒸着を行ったところ、厚さ $170 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の純炭素膜が成膜可能であることがわかった。Figure 3 に剥離剤の有無による蒸着後の膜の違いを示す。剥離剤ありでは膜の一部が基板から脱落しており、残った部分も基板から大きく浮き上がっている。一方で剥離剤なしでは表面は鏡面で強固に基板に密着している。

この蒸着膜に対してこれまでと同様、 25°C 70% の環境でシワの形成を試みたが 5 日間以上静置してもほとんどシワが形成されず、鏡面状のまま密着しているため、基板からの剥離は困難であった。このため、恒温恒湿槽の環境を変えて試したところ、 30°C 80% の環境に静置することで膨潤状のシワが徐々に形成されるのが確認された。ただし、シワの形成は基板ごとの個体差が大きく、同一製作ロット間でも 3 日程度で全面がシワで覆われるものもあれば、7 日間以上静置しても全くシワが形成されないものもあった。Figure 4 に鏡面が徐々にシワで覆われてく様子を示す。シワが形成された蒸着基板を浅い角度で水に沈めると、蒸着膜は基板から剥離し膜のみが水面に浮かぶ。Figure 5 に示す様に厚さ $170 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の膜を短辺の中央から針金で二つ折りにするよう掬い上げて $340 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の純炭素フォイルを得た。蒸着膜の剥がれにくさと剥がしやすさを両立させることで目的の厚さの純炭素膜の作製に成功した。

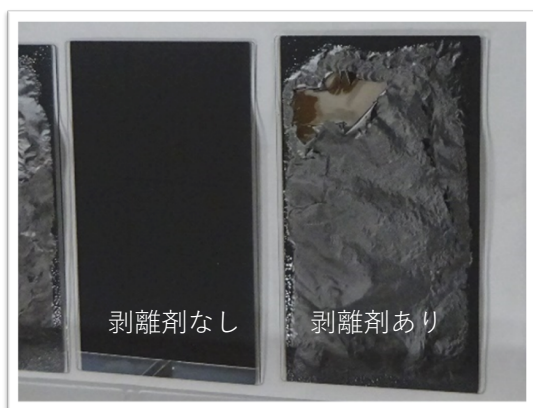


Figure 3: Picture of Comparison of deposited films with and without release agent.

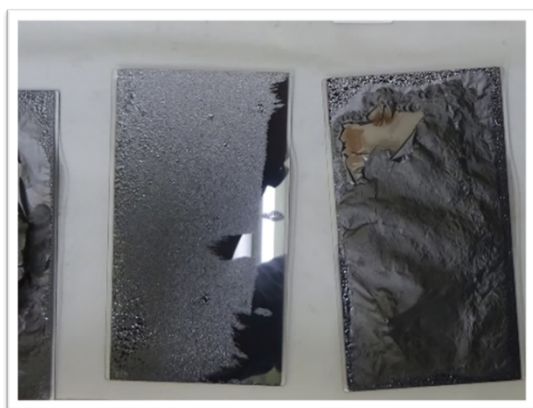


Figure 4: Picture of mirror-like surface gradually covered with wrinkles under 30°C 80% environment.

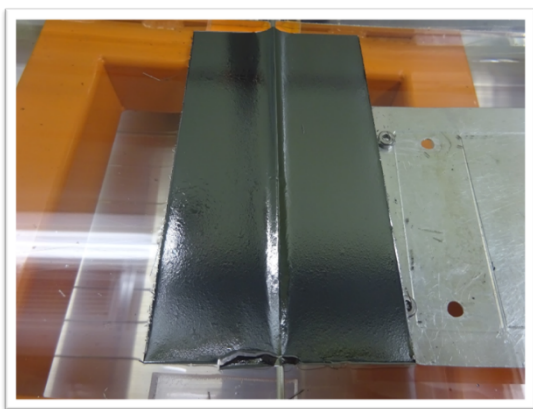


Figure 5: Picture of foil floating on the water and pulled up from the center with a stick.

4. 利用運転での使用実績

Figure 6 に 2022 年 11 月から 2023 年 6 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)の履歴とその間のビームダンプ温度の推移を示す。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計上していない。また、Fig. 7 にその間に使用した 6 枚の荷電変換フォイルの観察像を示す。垂直方向の幅は全て 14 mm である。

2022/11/15 からビームスタディを開始し、11/21 よりビームパワー 780 kW で利用運転を開始した。使用した荷電変換フォイルは SiC ファイバーの間引き処理をした HBC フォイルである。フォイルは形状を安定させるために Fig. 8 に示す様に SiC ファイバーによって両側から支えられている。ビームパワーの増大に伴い、ビームが当たる先端付近のファイバーは数時間から数日で次々に破断してしまう。破断した SiC ファイバーはビームを散乱させるなどの悪影響及ぼす可能性がある[5]。このため、短時間で破断してしまう位置の SiC ファイバーは初めから良いのではないかと考え、このフォイルは先端から両側 8 本の SiC ファイバーを試験的に間引きしている。結果はビームスタディの弱いビームでもフォイルの変形が確認され、利用運転が開始されてからはフォイルの変形がよりも顕著に現れた。また、同時にビームダンプに廃棄されるビーム量の増加しビームダンプ温度の上昇が確認された。Figure 9 (A) に変形したフォイルと入射ビームの模式図を、Fig. 9 (B) に荷電変換フォイル周辺でのビーム軌道の模式図を示す。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 成分は最終的にはビームダンプへ廃棄される。フォイルの変形によりフォイルを通過せず荷電変換されない H 成分が増えたため、ビームダンプ温度が上昇したと考えられる。ビームダンプ温度が 75 °C を超えると保護システムが作動して加速器は自動停止し、運転再開まで数時間を要するおそれがある。11/23 午後にはビームダンプ温度が管理上限値の 70 °C に達した。荷電変換されない H 成分を減らすため、一時的にビームを止めて垂直及び水平方向のフォイル挿入位置の調整を実施した。位置調整に要する時間は数分程度である。位置調整により廃棄されるビーム量は減少し、ビームダンプ温度は速やかに低下した。しかし、フォイルの変形の進行が早く、再度の温度上昇が予想されるため、利用運転での使用はわずか 3 日であったが、11/24 にフォイル交換を実施した。

次に 11/25 から 12/22 まで使用したフォイルは製作ロットの異なる HBC フォイルである。この間、RCS のビームパワーは 740 kW ~ 800 kW である。フォイルは使用開始後、徐々に変形していく様子が観察された。ビームダンプ温度は当初は漸減していったが、約 3 週間経過後からは上昇に転じた。このため、フォイル位置調整を 3 回行ったが、温度上昇は止まらず、最終的には 60 °C に達したところで年末年始の運転休止期間を迎えた。

2023/1/12 から製作ロットの異なる HBC フォイルを使用した。このフォイルにはもうひとつの SiC ファイバーの破断対策として、従来から用いていた SiC ファイバーよりも高引張耐力、高耐熱性を有する上位モデルを試験的に使用した。しかし、運転中の観察映像から確認できる範囲では破断の進行度合いは従来の SiC ファイバーと

同程度であった。このフォイルでは使用開始直後からビームダンプ温度の上昇が確認された。位置調整を行うことで一時的に温度は下がるが、数日後には上昇し始めた。2/1 にフォイルを交換するまで計 4 回の位置調整を実施した。

2/2 からはビームパワーを 810 kW に上げて利用運転を行った。使用したファイルは GTF である。ビームダンプ温度は約 2 週間、42 °C 付近で安定していたが、その後、徐々に上昇し始めた。これまでと同様に位置調整をすることで一時的に温度は下がるものの、1 日から数日後に再び上昇することを繰り返した。3/1 にフォイル交換するまでに 5 回の位置調整を要した。

3/2 からは純炭素製のフォイルを初めて利用運転で使用した。ビームパワーは 810kW から始まり、840kW まで上昇した。3/15 に利用運転を一時休止するまでの 2 週間のビームダンプ温度は約 53 °C で安定していた。その後、4/16 に運転再開し、4/25 まで 10 日間運転を行った。この間もダンプ温度は約 45 °C で安定であった。休止を挟んでダンプ温度が下がった理由は運転再開時のビーム調整によりビームプロファイルが改善したためと考えられる。再度の休止期間を挟んだ後、5/13 から 5/31 まで運転を行った。この間もダンプ温度は約 45 °C で安定していた。しかし、5/31、3:50 頃より 1 時間で約 7 °C のダンプ温度の急激な上昇が確認された。幸い毎週行っている定期メンテナンスのため 5:30 でビーム停止が予定されていたため、フォイルを起因とする計画外の加速器停止には至らなかった。フォイルの観察映像を確認すると、ビーム照射点より約 30 mm 根本側に離れた位置を支点としてビーム下流方向に大きく屈曲していた。これまでフォイ

ルの変形はビーム照射点であるフォイル先端部のみで起きていたが、照射点から大きく離れた位置で変形が起きるのは初めてであった。Figure 8 に示すフォイルを支える SiC ファイバーが先端から屈曲の支点付近まで全て破断してしまったためと考えられるが、ビームが直接当たらない位置のファイバーまでもが使用中に破断してしまった原因については調査中である。これ以上の使用は不可能と判断し、フォイル交換を行った。しかし、使用期間中のダンプ温度の上昇はこの時のみで位置調整は 1 度も行う必要はなかった。

5/31 からは引き続き同一作製ロットの純炭素フォイルを使用した。ビームパワーは 840 kW でスタートしたが、6 月の高温多湿環境下では RF 出力に制限がかかるため [6]、段階的にビームパワーを下げ、760 kW で 6/22 まで運転を行った。この間、ダンプ温度は上昇することなく 46 ~ 41 °C で安定しており、位置調整の必要はなかった。フォイルの変形の進行も初期段階であり、まだ十分に使用可能と考えられる。

5. まとめ

2018 年より JAEA 内作の 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。2022-2023 年の利用運転ではこれまで使用してきた HBC フォイル、GTF に加えて、作製に成功した純炭素フォイルを初めて利用運転で使用した。結果、GTF、純炭素フォイルでは変形に伴うビームダンプ温度の上昇が頻繁に発生した。ダンプ温度を常に注視し、管理上限値の 70 °C に達する前にフォイルの位置調整を行い、運転を継続してきた。一方、純炭素フォイルはダンプ温度の上昇がほとんどな

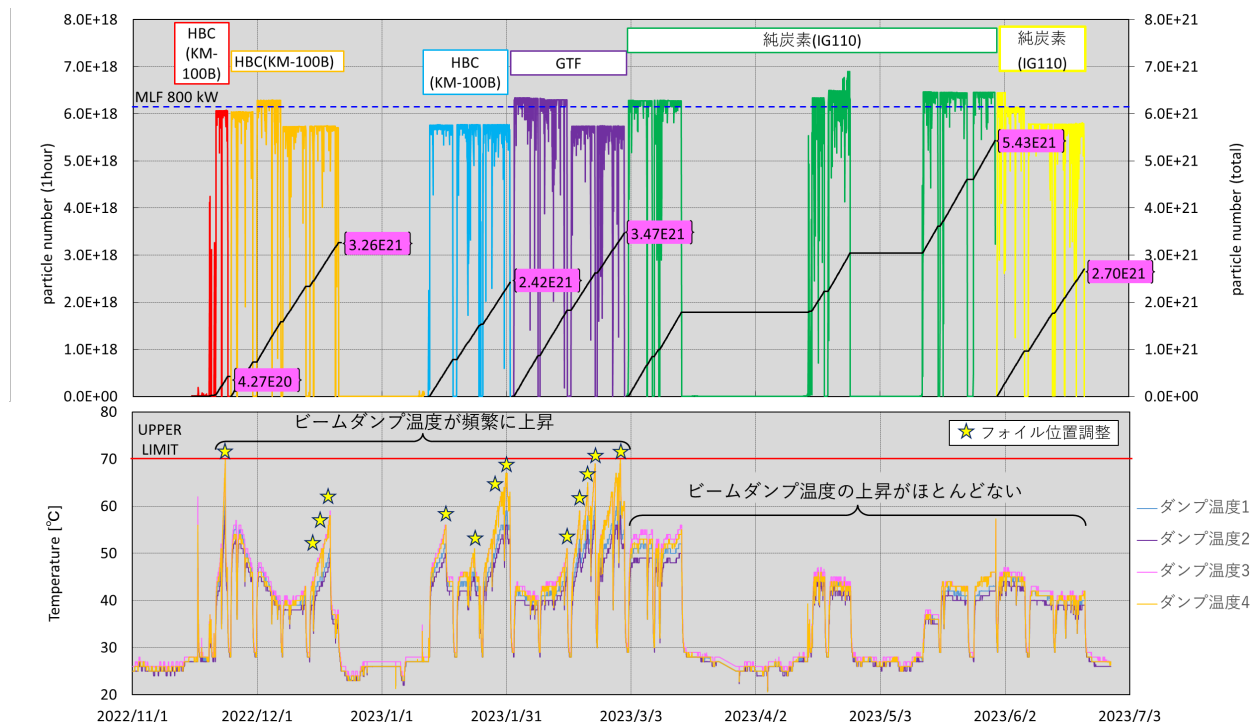
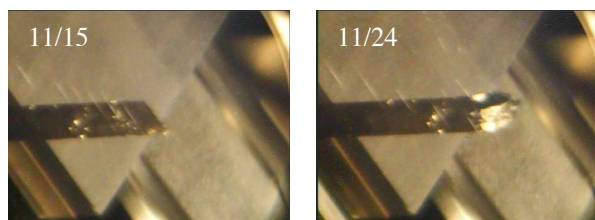
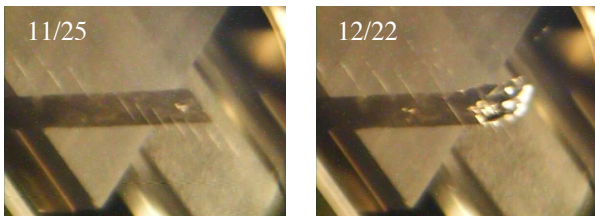


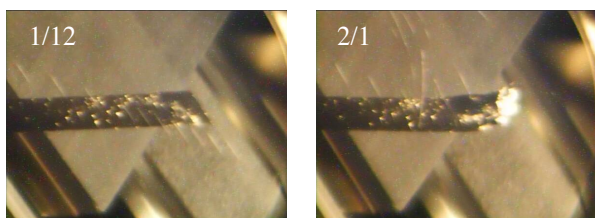
Figure 6: History of the beam power (upper) and the beam dump temperature (under) in J-PARC RCS at 2022-2023.



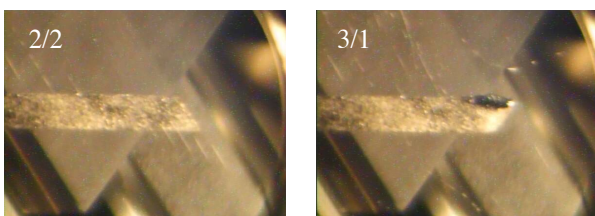
2022/11/15~11/24 HBC #070-03 (KM-100B 材)



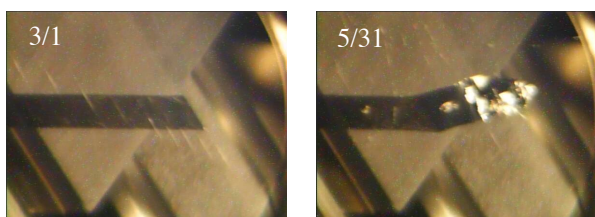
2022/11/25~12/22 HBC #052-01 (KM-100B 材)



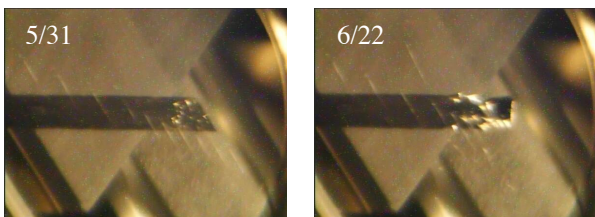
2023/1/12~2/1 HBC #071-05 (KM-100B 材)



2023/2/2~3/1 GTF (KANEKA 製)



2023/3/1~5/31 純炭素 #072-05 (IG-110 材)



2023/5/31~6/22 純炭素 #072-04 (IG-110 材)

Figure 7: Pictures of the foils before irradiation and after irradiation at 2022-2023.

く、位置調整が不要であった。これはビーム照射に対する変形が緩慢であり、荷電変換されずにビームダンプに

漏れる H 成分の発生が少ないためだと考えられる。ビームダンプ温度の上昇を抑制することでビーム監視担当者の負担を大幅に軽減し、加速器の安定性向上に大きく寄与できた。まだ使用を開始したばかりの純炭素フォイルであるが、RCS の 1 MW での安定運転に向けた荷電変換フォイルの期待される候補の一である。今後も継続してビームに対しより高い耐久性を持った長寿命なフォイルの開発を進める。

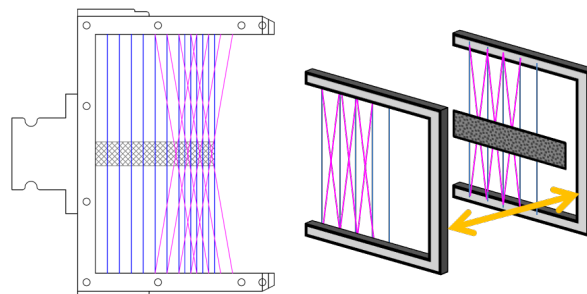


Figure 8: Schematic image of the SiC fiber pattern.

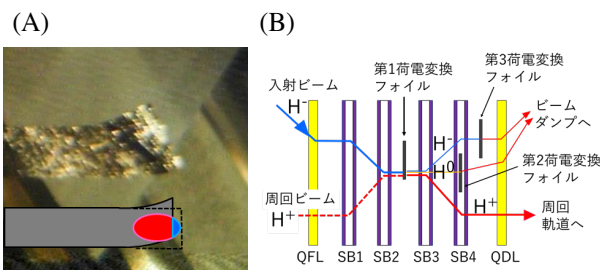


Figure 9: Schematic diagram of the injection beam leakage due to foil deformation (A) and the beam orbit around charge exchange foil (B).

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、岡崎宏之博士に多大なご協力をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] I. Sugai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 561, pp.16-23, 2006.
- [2] A. Tatami, M. Tachibana, M. Murakami, T. Yagi, M. Murakami, AIP Conf. Proc., Vol. 1962, p. 030005, 2018.
- [3] 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.
- [4] M. Oyaizu *et al.*, Proceedings of the 27th Meeting for Tandem Accelerators and their Associated Technologies, July 4 - 5, 2014, Kyoto University, pp.68-71.
- [5] 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.
- [6] K. Yamamoto *et al.*, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University), pp.277-281.