

J-PARC RCS における荷電変換フォイルの調製

PREPERATION OF THE CHARGE STRIPPING FOIL IN J-PARC RCS

佐伯理生二^{#,1)}, 吉本政弘¹⁾, 山崎良雄¹⁾, 飛田教光¹⁾, 岡部晃大¹⁾, 金正倫計¹⁾, 竹田修²⁾, 武藤正義²⁾

Riuji Saeki^{#,1)}, Masahiro Yoshimoto¹⁾, Yoshio Yamazaki¹⁾, Norimitsu Tobita¹⁾

Kota Okabe¹⁾, Michikazu Kinsho¹⁾, Osamu Takeda²⁾, Masayoshi Mutoh²⁾

¹⁾Japan Proton Accelerator Research Complex(J-PARC) / Japan Atomic Energy Agency(JAEA)

²⁾Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.

Abstract

At the J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS), the H⁻ charge exchange injection scheme using stripping foils is adopted. The 1st stripping foil is mounted on a C-shaped holder. One edge of the foil is supported by the holders and the other edge is sandwiched by 10 μm diameter SiC fibers. The holders with not only operation foil but also spare foils were stored on the holder storage rack.

The 1st stripping foil is one of the key elements deciding the beam performance in the RCS. Thus the foil preparation is very important issue. The foil preparation includes many work process as follows: a foil separation from glass substrates, salvaging the foil from the water, foil annealing, SiC fibers glueing and foil mount on the holder, and foil holders storing in the holder storage rack. In order to improve its reproducibility and increase the efficiency of work, attachment devices or support jigs are developed.

1.はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex(J-PARC)は3基の加速器から構成されており、その中の早い繰り返しの3GeVシンクロトロン(Rapid Cycling Synchrotron: RCS)は荷電変換フォイルを用いた荷電変換多重入射方式を採用している。荷電変換フォイルは膜厚約1μmと非常に薄い炭素性薄膜を採用しており、長時間のビーム照射により破損してしまうおそれがある。そこで荷電変換フォイルが破損しても加速器の利用運転をすぐに再開・継続できるように、あらかじめ同じ性能の予備フォイルを複数枚準備しておき、荷電変換フォイルが完全に破損する前に、遠隔で且つ自動的に交換できるシステムを構築している。また、加速器の利用運転時以外に荷電変換フォイルの特性を調べるビーム試験も行っており、膜厚や大きさ等が異なるフォイルも準備・使用している。

加速器利用運転時におけるビームの安定性を確保し、またビーム試験中に同一条件下での比較試験を行うためには、フォイルの品質を一定に保つ必要がある。従って、RCS荷電変換入射システムにおいて、荷電変換フォイルの調製方法を確立することは非常に重要な課題であった。フォイル調製には、フォイルのガラス基板からの剥離及び回収、フォイルフレームの準備とフォイルをフレームへの固定取付け、マガジンラックへの装填と様々な作業工程を行う必要がある。我々は、フォイル調製の全ての作業工程を見直し、精度や再現性を向上させ、品質の安定性を確保できるような装置を開発し、効率的な作業を

実現できる手法を確立した。

本発表では、RCSで確立したフォイル調製方法について詳しく説明する。

2. 荷電変換装置の概要

RCSでは3枚の荷電変換フォイルを用いた荷電変換入射をおこなっている^[1-3]。第1荷電変換フォイルはビーム入射期間中にリニアックから入射されるH⁻ビームだけでなく、RCSで周回しているH⁻ビームも当たり続ける。そのため、第1荷電変換フォイルは他のフォイルに比べて大きなダメージを受けてしまう。そこで、第1荷電変換フォイルに関しては、Fig.1に示す通り、ビーム運転中に遠隔で且つ自動でフォイルを交換できるシステムを構築している^[3]。

本システムでは、15枚の荷電変換フォイルをフレームに張り付けて、マガジンラックに装填し、真空容器内に収納する。ビーム運転時はトランスファーロードを用いて、マガジンラックから任意のフォイルフレームを1枚把持し、リング側真空容器のビーム入射地点まで移動させ、位置の調整を行う。

[#] saeki.riuji@jaea.go.jp

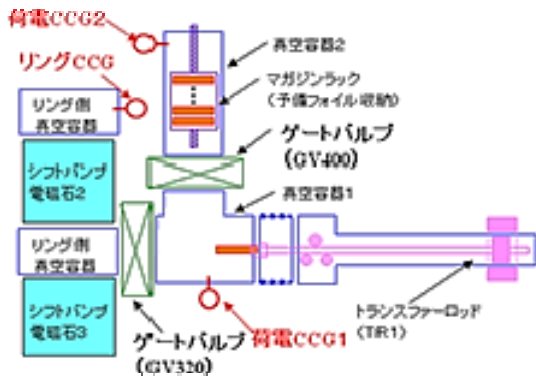


Figure 1: A schematic view of the 1st stripping foil device.

3. 荷電変換フォイルの調製

RCS で開発した荷電変換装置では、フォイルをフレームに固定し、フレームを操作することでフォイル交換や位置調整をすることが可能である。この時、1章でも説明した通りフォイルフレームをマガジンラックに装填するフォイル調製が非常に重要になる。これまでは、フォイル調製作業を実施するにおいて全て手作業で行っていた。従って、作業時間が多く必要となることに加え、調製されたフォイルセットの品質が均一では無いという欠点があった。そこで荷電変換フォイルの剥離から、マガジンラックへの装填までの手順を見直し、必要な治具の開発を行った。本章では、実際の作業工程に沿ってフォイル調製方法の詳細を説明する。

3.1 ガラス基板に蒸着しているフォイルの剥離と回収

荷電変換フォイルは作成段階において、ガラス基板に剥離剤を塗布し、その上から炭素を蒸着させて薄膜形状に成形させている。ガラス基板からフォイルを剥離させるために、ガラス基板ごと水に浸けることによって、ガラス基板に塗布された剥離剤が溶解、ガラス基板からフォイルが離れ回収が可能になる。この時の課題は、水の表面張力の影響によりフォイルを破損させないように剥離させ回収することである。さらに、RCS で使用する荷電変換フォイルは、膜厚が薄いにもかかわらず比較的大きなサイズのため、フォイル形状を破損させず完全な形で剥離回収することは容易ではない。表面張力の影響を軽減するためには、水面とガラス基板の侵入角度を一定に保ち続けること、剥離剤の層に水がゆっくり浸透させることが重要である。

これまでの剥離作業はガラス基板を手で持ち、蒸留水を満たした水槽につけていたが、手で保持させたまま水にゆっくり浸けていくのは難しい。そこで新たにサイフォンの原理を応用したフォイルの剥離装置を製作した。Fig.2 は装置の外観図を示したものである。フォイル剥離装置は水槽の横に高低差を付

けた上下2つのタンクと複数の調整弁を組み合わせることでできおり、水槽に蒸留水をゆっくりと注水、排出できるようにした。フォイルを剥離させる際にはFig.3に見られるような、ガラス基板に傾斜をつけて取り付けられる治具を使用し、水に接した端部からゆっくり水を浸透させることで大型のフォイルを安定して剥離させることが可能となった。実際に荷電変換装置に装填するフォイルの剥離作業を行う前にテストフォイルを用いて、ガラス基板の傾き流速の調製を何度も行い、膜厚毎に最適な条件を見つけた。

フォイルを回収する際は、Fig.4 に示すような回収バーを取り付けられる治具を利用する。回収バーはあらかじめ水槽内にセットしておき、水面上に浮いているフォイルを回収バー上部まで移動させた後、水を排出することにより水面が降下してフォイルが回収バーに吊り下げられる形で回収できるようにしている。回収バーの形状は膜厚に応じて工夫することにより、フォイルを破損させずに回収することが可能となった。



Figure 2: A photo of a foil separation device.



Figure 3: A photo of a support jig for a foil separation from glass substrates.

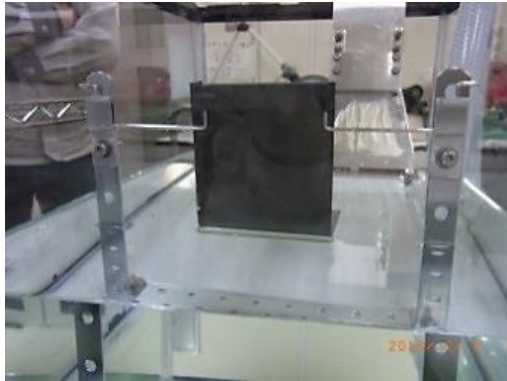


Figure 4: A photo of a foil salvage jig.

3.2 剥離したフォイルの乾燥及び切り出し

現状のところ、フォイルを回収するためには、水を用いてガラス基板から剥離させている。結果としてフォイルには大量の水分が含まれることになり、このまま真空容器に入れ排気を行っても、アウトガスにより真空圧力が下がらなくなる。また、ガラス基板に蒸着した時にフォイルに加わる残留応力により、フォイルが屈曲する問題もあった。そこで水から回収したフォイルに対して、回収バーに吊り下げた状態でハロゲンヒータを使用したアニールを実施した。しかし、アニールの温度や時間に対する最適化についてはまだ検討段階にあるため今後の課題のひとつとして残っている。

アニール後の乾燥したフォイルは、ビームの運転条件に合わせ適切なサイズに切り出される。通常ではガラス基板に蒸着している状態で切れ込みを入れ、ガラス基板から剥離させれば適切なサイズが完成する手法を取ることが多い。しかし RCS で使用するフォイルのサイズは大きいので、ガラス基板に蒸着しているサイズで回収する必要がある。回収したフォイルは、トレーシングペーパーの方眼紙で軽く挟み込み、紙ごとハサミで切り出す方法を採用した。この方法でも、ハサミを入れた端部に大きな損傷は少ない。またフォイルを回収した後で任意のサイズに調整できることは、この方法の大きな利点といえる。

3.3 SiC ワイヤの準備とフレームへの張り付け

フォイルの固定方法は 2 枚のフレームに SiC ワイヤを張り付けて、挟み込むようにして固定している。フォイル固定のためのワイヤは、ビームへの影響を極力少なくするために、直径が $10\mu\text{m}$ の SiC ワイヤを使用する。SiC ワイヤは非常に細いため単独では入手することができない。市販品の SiC ワイヤは約 800 本束のより線として販売されているため、より線から 1 本ずつほぐして取り出す必要がある。大気中でより線から 1 本ずつ単独で引く抜くことは非常に困難であるが、蒸留水に浸すとより線をほぐすのが比較的容易になり、効率よく引き抜くことが可能となった。

SiC ワイヤは Fig.5 で示すようなパターンでフレームに張り付けられる。ワイヤの張り付けには現在、

瞬間接着剤を使用している。しかしアウトガスを低減するという観点から、瞬間接着剤を使用しない別の張り付け方法についても検討している。

従来のワイヤ張り作業では、貼り付け位置をプリントした台紙の上にフレームを乗せ、プリント位置に合わせてワイヤを張っていた。この手法はプリント位置へ目視により貼り付けるため、正確な位置へ貼り付けが難しく、ワイヤのテンションを一定に保つことも出来なかった。

これらの課題を克服するためにワイヤ張り装置を新たに開発した。Fig.6 にワイヤ張り装置の全景を示す。ワイヤ張り付け位置の精度を確保するために、装置の両側にワイヤパターンに沿った溝を付けたテフロンカバーを取り付けている。またテンションを一定にするためワイヤの片側を固定しておき、反対側に均一の重りを付け張力の均一化を図った。フレームにワイヤを取り付けるのは、中央部の上下スライド機構の上にフレームをセットしておき、手前のハンドルでスライドを動かし、フレームがワイヤに接するまで上昇させて一度の作業で接着させるようにした。この方法により作業効率は大いに上がり、作業時間も短縮できるようになった。

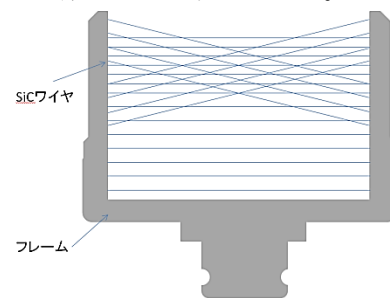


Figure 5: A schematic view of a foil frame and SiC-wire pattern.

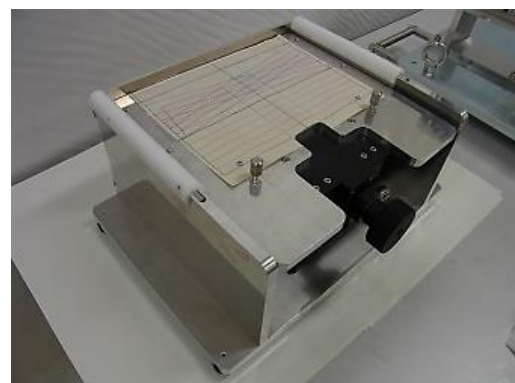


Figure 6: A photo of a SiC-wire attaching device.

3.4 フォイルをフレームへ固定

フレームへのフォイルの固定方法は、前工程でワイヤを張り付けておいた 2 組の C 型フレームでフォイルを挟んだ状態で固定する方式を採用した。SiC ワイヤだけで固定すると、フォイルは不安定なため、根元部分のみフレーム本体で押さえてフォイルが動かないようにしている。フォイル貼り付けの位置調整は、フレームの下の方眼紙等でフォイル固定位置

を下書きしておき、フォイルをその上に移動させ挟み込む手法のため、正確な位置出しは難しい。そこでフレームにフォイルを取り付けた後に、フレームに対するフォイルの相対的な位置を測定して、ビーム入射位置に合わせるためのオフセット値として用いるようにした。

3.5 マガジンラックへの装填

フォイルを取り付けたフレームセットはマガジンラックに装填する。マガジンラックには予備フォイルを含めフレームを 15 枚収納することが可能である。Fig.7 に現在 RCS 荷電変換入射装置で使用しているマガジンラックを示す。このラックは箱型の形状で上下にスリットがあり、スリットに沿ってフレームを収納するが、フレームは上下にある板バネ (Fig.8) で挟み込んで支持するだけで、固定点で支えているようにはなっていない。これはフレームを出し入れする際に、フォイルに衝撃が加わらないようにすることを優先させたためである。そのためにフレームは空中に留まっている状態になる。

これまで手動にてマガジンラックにフォイルフレームを収納していたが、フレームの位置精度が全く取れなかった。そのためフォイル装填後に加速器トンネル内において、トランスファーロードでフレームが把持できるためのずれ量を、15 枚全てについて確認する工程が必要であった。この工程は、比較的残留線量の高いエリアでの作業であり、且つ時間がかかるため被ばくのリスクが非常に高い。

これらの課題を克服するために、フォイルをマガジンラックに精度良く収納するための治具を開発した。Fig.9 にその装置の全体図を示す。フレームの把持機構は実機と同じものを使用し、リニアガイドでマガジンラックに滑り込ませる構造になっている。そしてリニアガイドを横に移動させることにより 15 枚のフォイルフレームを収納することが可能である。マガジンラックとリニアガイドは、ベース板に対してピンで取り合うことで取付け位置を担保している。



Figure 7: A photo of the holder storage rack.



Figure 8: A photo of a leaf springs for foil support.



Figure 9: A photo of a foil storage device into the magazine-rack.

4. まとめ

荷電変換フォイルの調製法の確立は、加速器の利用運転やビーム試験において、非常に重要な要素の一つである。そのためフォイル調整法の全工程を見直し、精度や再現性の向上、作業効率を図る装置や治具を開発した。また作業手順にも改善を施し、品質の高いフォイル調製ができる手法を確立した。特にマガジンラックへの装填治具は、昨年度末に完成したもので、事前テストでは良好な結果が得られている。今夏期メンテナンス終了後に本調整法を本格的に導入し、実機でのテストを行う予定である。

参考文献

- [1] R.Saeki, et al., The 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [2] M.Yoshimoto, et al., Journal of Physics: Conference Series, 417, 012073 (2013)
- [3] M. Yoshimoto, et. al., Proceedings of IPAC2010, pp.3930-3932 (2010)