

DEVELOPMENT OF THE CARBON FOIL FOR HIGH INTENSITY URANIUM BEAMS

Hiroo Hasebe[#], Hironori Kuboki, Hiroki Okuno, Nobuhisa Fukunishi, Osamu Kamigaito, Hiroshi Imao, Akira Goto, Masayuki Kase,

Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

Abstract

A carbon foil (C-foil) is commonly used as a charge stripper in a heavy-ion accelerator such as RIKEN RIBF. Since 2005, we have been fabricating polymer-coated carbon foils for developments of larger and thicker C-foils. However, C-foils with adequately high quality and long lifetime have not been fabricated. We started fabrication of C-foil using a new evaporation system since August 2009. Lifetimes of the new C-foils were measured with uranium beam irradiation in the cases that a C-foil was attached to fixed holder and that a foil with larger area was attached to a “rotating cylinder stripper” device. In this contribution, we report the results of the lifetime measurements and the quality of the C-foils.

大強度ウランビーム用炭素薄膜の開発

1. はじめに

重イオン加速器ではカーボン・フォイル (C-foil) を、荷電変換膜として主に使用している。しかし市販されている C-foil の寿命は短く、長時間安定な大強度ビームの供給を行う事は難しい。我々はこの問題を解決するため、1999 年より長寿命 C-foil の開発^[1]を行ってきた。

理研 RI ビームファクトリー (RIBF) は 2006 年 12 月に稼働し、翌年にはウラニウム (U) ビームの加速が行われた。現在、新入射器 RILAC2 の設置工事も進んでおり、2010 年度中に U ビームの強度はさらに増大する予定である。

2005 年より U ビーム用の、大面積、やや厚めの C-foil は、高分子で C-foil をコーティングしたポリマー・コーティング・カーボン・フォイル (PCC-foil^[2]) を、多層にすることで製作に成功した。この多層 PCC-foil は、固定のホルダーを用いてビーム照射すると市販品と同等の寿命、品質となった^[3]。しかし大面積の膜を回転シリンダーストリッパー装置^[4]の大きなホルダーに貼りつけ、回転させると、固定膜より短時間で破れてしまう結果となった^[3]。

2. 新装置による C-foil の製作

2.1 新マグネトロンスパッタ源蒸着装置

さらなる長寿命、高品質な C-foil が早急に必要のため 2009 年 8 月、高真空スパッタ源蒸着装置 (SH-350 by ULVAC^[5]) (図 1) を導入した。装置は蒸着槽を含む本体、コントロールラック、直流電源の三筐体で構成され、蒸着槽は $\phi 500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (高さ) の容量、ターボ分子ポンプ (1800 L/s) とロータリーポンプを用いて排気される。図 2 は蒸着時の内部の様子の写真である。上部に位置する蒸着源はマグネトロンスパッタ源 ($\phi 6$ インチのグラフイトターゲットが取り付けられる) で、基板はターゲットの真下に位置し下に向けて蒸着を行う。

$\phi 5$ インチのシリコンウエハーかガラス板を基板として使用する。膜厚分布を一様にするため基板を回転させることができる。さらに基板はヒーターを用いて加熱 (最大 250°C) することも可能である。ターゲットと基板の面間距離は 35mm から 85mm の範囲で任意の値に設定される。マスフローメーターを用いて装置内にアルゴンガスを供給し真空度を約 0.6 kPa に一定に保ち、直流 (DC) もしくは高周波 (RF) をマグネトロンスパッタ源に印加しプラズマを発生させ蒸着をする。図 3 は 1 時間で生成できる C-foil の膜厚をプラズマの DC パワー別に示したグラフである。大型のターゲットを用いる事で成膜レートは以前のマグネトロンスパッタ源蒸着装置より 10 倍に向上した。膜厚は基板から剥がした膜の重さを面積で割ることによって算出する。水晶発振子等の膜厚モニターは装備していない。プラズマパワーと時間で生成される膜厚は決定される。



図 1 : 高真空スパッタ源蒸着装置 SH-350 by ULVAC

[#]hasebe@riken.jp

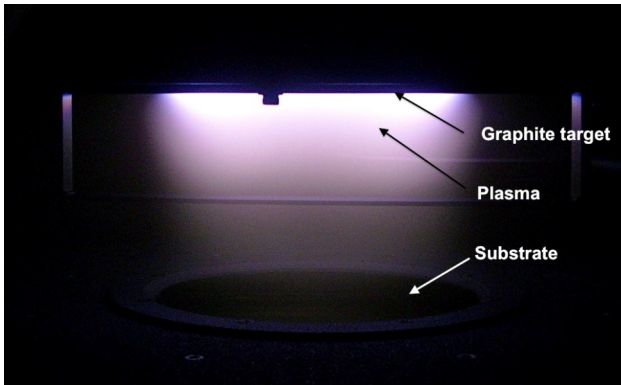


図 2 : 蒸着時の蒸着槽内部の様子 (DC プラズマ)

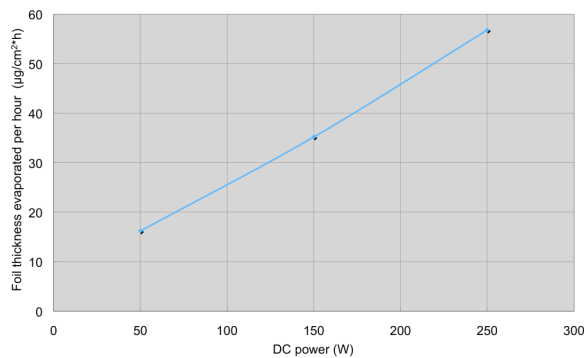


図 3 : スパッタ源のプラズマのパワー (DC) と 1 時間あたりの C-foil 生成膜厚の関係

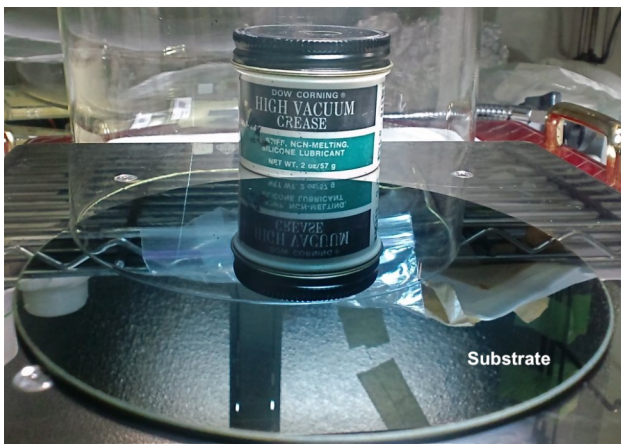


図 4 : 0.3 mg/cm² のカーボンが蒸着された φ5 インチガラス基板

2.1 生成される膜

図 4 はカーボンが 0.3 mg/cm² 蒸着された φ5 インチガラス基板の写真である。大気中に取り出しても表面は鏡の様を反射する。0.3 mg/cm² 蒸着された 5 インチ Si ウエハー基板を光干渉式膜厚計にて 50 mm × 50 mm の範囲、25 点で膜厚を測定するとカーボンは ±1% 以内の分布となった。図 5 は原子間力顕微鏡 (AFM^[6]) で基板から剥がした膜を 5 μm × 5 μm の範囲で観察した画像である。図 5 (a) は基板に面した側の C-foil の表面ではほぼフラットである。図 5 (b) はターゲット側で、表面はごつごつしている。しかしこの粗さは数 nm の凹凸であり市

販品や以前の PCC-foil とは比べものにならないほど平坦である。目視で面の違いを見分けるのも難しい。現在この装置で作られるストリッパー膜として使用可能な C-foil は 0.2 mg/cm² から 1.5 mg/cm² である。大面積で使用する場合は 1.0 mg/cm² を越える膜は基板から剥がす時に割れが入りやすいので PCC-foil に加工する。また剥がした膜は丸まりやすいので剥がす前に 200°C のオーブンに 5-6 時間入れアニーリングを行う。

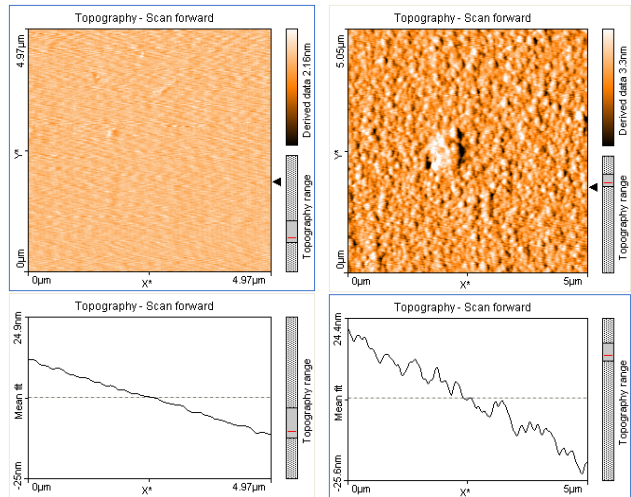


図 5 : C-foil 表面の AFM 画像 (5 μm × 5 μm)
(a): 基板側 (b): 蒸着源側

3. C-foil の寿命

3.1 固定膜

厚みが 0.3 mg/cm² の C-foil は 2009 年 12 月、²³⁸U³⁵⁺、E=11 MeV/n、ビーム電流 2 - 3 eμA、ビームサイズ約 Φ5mm、回転しない固定膜 (ホルダー開口部形状: オーバル、サイズ 23 mm × 14 mm) にて実際にマシンタイムで使用し寿命を計測した。しかし投入当初は最大ビーム量にする途中で破れ非常に短い寿命となってしまった。ビームによって膜が変形する力の影響で破損したようだった。そこで使用する前に写真用ストロボにて閃光を照射^[7]し皺を寄せ若干弛ませ膜の機械的なストレスを除去させた (図 6)。すると短時間で破れることなく 5-9 時間使用 (照射電荷総量: 20 - 40 mC) できるようになった。皺を寄せると表面積が広がるために厚みは若干薄くなり、得られる U イオンビームのピーク電荷は 71+ より 1、2 価下となった。ストロボ加工後の C-foil の厚みの確認の為、2010 年 4 月膜厚が 0.4 mg/cm²、0.5 mg/cm²、0.6 mg/cm² の C-foil にストロボの閃光を与えた C-foil を 12 月と同条件でピークの電荷をサーチした。0.4 mg/cm² の C-foil (ストロボ) が 0.3 mg/cm² の厚さ相当と判明した。

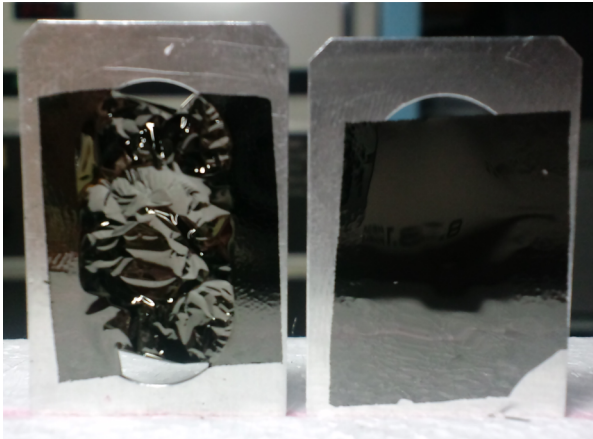


図 6 : 固定用のホルダーに張られた厚さ 0.3 mg/cm^2 の C-foil、右がストロボ照射前、左ストロボ照射後



図 7 : 回転シリンダーストリッパー用のホルダー (穴径 80mm) に貼り付けた PCC-foil に写真用ストロボで閃光を照射

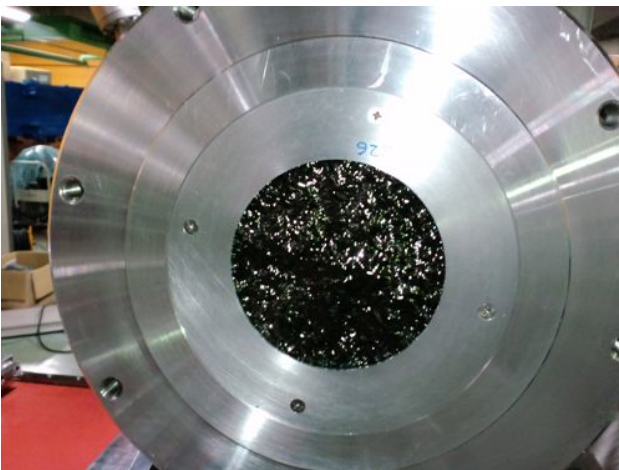


図 8 : 38 時間照射した後の回転ストリッパー膜

3.2 回転シリンダーストリッパー

固定膜と同じ厚さの 0.4 mg/cm^2 の C-foil は PCC-foil にし、 $\phi 80 \text{ mm}$ の開口のホルダーに貼り付け、あらかじめ全面にストロボ光を照射し(図 7)回転シリンダーストリッパー装置に取り付けた。2010 年 4 月、 $^{238}\text{U}^{35+}$ 、 $E=11\text{Mev/n}$ 、ビーム電流約 $1.7\text{e}\mu\text{A}$ 、膜の回転速度を非常にゆっくり (0.05rpm) にして寿命を計測した。38 時間 (照射電荷総量: 230 mC) 連続照射したがビームの減衰やビームの質、及び回転膜に変化はなかった(図 8)。照射面積は固定膜の場合より 48 倍広がっている。

4. まとめ

新マグネトロンスパッタ源を用いて 0.2 mg/cm^2 から 1.5 mg/cm^2 の膜厚の C-foil を短時間に 1 層で作ることに成功した。現在市販されているどの C-foil よりも高品質で長寿命である。しかし U ビーム照射においてこの C-foil は、ストロボ光を用いて前処理しなければならなかった。U ビームで実践投入する前にキセノンビームでテストを行った時はストロボ照射なしでも短時間で破損しなかった。U のような重いイオンビームは薄膜に熱以外でダメージを非常に大きく与えていると考えられる。回転ストリッパー膜の寿命測定では 38 時間、照射電流値は減衰せずビームのプロファイルにも変化は無かった。ストロボによる膜の機械的なストレスの除去と回転を非常にゆっくりにしたため、寿命に至らせる力は膜にほとんど働かなかったのが長寿命となった原因と思われる。しかし回転膜を通過した下流のビーム強度は回転と共にゆっくりと大きく変化してしまった。皺の付いた膜が回転するのでビームに対して膜厚がゆっくり変化するためである。この回転ストリッパー装置を実際に投入するのであれば膜厚の変化をなんらかの方法で補填するような装置の導入が必要となる。今後は生成できる膜厚の範囲を拡大しさらに高品質で長寿命の C-foil の製作を行う。

参考文献

- [1] H. Hasebe, M. Kase, H. Ryuto, and Y. Yano: Proc. The 17th International Conference on Cyclotrons and their Applications (Cyclotrons 2004), Tokyo, Japan, October 2004, p. 313.
- [2] H. Hasebe, H. Ryuto, N. Fukunishi, A. Goto, M. Kase, and Y. Yano: Nucl. Instr. and Meth. A **590**, 13 (2008).
- [3] H. Hasebe, H. Okuno, H. Kuboki, H. Ryuto, N. Fukunishi, O. Kamigaito, A. Goto, M. Kase, and Y. Yano: Nucl. Instr. and Meth. A **613**, 453-456 (2010).
- [4] H. Ryuto, H. Hasebe, N. Fukunishi, S. Yokouchi, A. Goto, M. Kase, and Y. Yano: Nucl. Instr. and Meth. A **569**, 697 (2006).
- [5] ULVAC, Inc. URL: <<http://www.ulvac.co.jp/>>
- [6] Nanosurf AG, URL: <<http://www.nanosurf.com/>>
- [7] H. Hasebe, M. Kase, E. Ikezawa, Y. Miyazawa, M. Hemmi, T. Aihara, T. Ohki, and H. Yamauchi: Proc. The 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, Japan, July 1999, p. 287.