

長寿命厚い炭素ストリッパフォイルの開発

菅井勲^{A)}、武田泰弘^{A)}、小柳津充広^{A)}、川上宏金^{A)}、入江吉郎^{A)}、荒木田是夫^{A)}、酒井泉^{A)}、川久保忠道^{A)}、山根功^{A)}、金正倫計^{B)}、野田文章^{B)}、倉持勝也^{B)}、高柳智弘^{B)}、島田太平^{B)}、鈴木寛光^{B)}、木代純逸^{B)}、服部俊幸^{C)}、川崎克則^{C)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 日本原子力研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{C)} 東京工業大学 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-1 2-1

要旨

J-PARC 加速器の 3 GeV、RCS リングには負水素イオンビームから電子を剥ぎ取り陽子イオンビームに荷電変換する厚い炭素ストリッパフォイル (~400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) が使われる。大強度ビーム電流で照射されると放射線損傷に加えて高温損傷が顕著になり通常のフォイルはすぐ破壊し短寿命化となり、加速器の運転効率の著しい低下、並びにフォイル交換作業者の多量被曝の重大な問題となる。~1500 K 以上の苛酷な条件下でも破壊しにくい長寿命の厚い炭素ストリッパフォイルの最近の開発成果について報告する。

1. 開発に到る背景とそのシナリオ

最近の加速器のイオン源の飛躍的な開発成果によってイオンビーム強度が大幅に高くなり、それに伴いイオンビームから電子を剥ぎ取る炭素ストリッパフォイルの寿命は著しく悪くなってきた。この短寿命の問題に対応し、解決することを目的に 18 年前に開発に着手した。まず、製膜法が最も簡便で、最も長寿命炭素ストリッパフォイルを製作できる製膜方法はどれかを具体的に実現するやり方の一つとして、従来から世界で使われてきた炭素薄膜の色々な製膜方法について世界の現状を認識することに努めた。即ち、各製膜法についての文献のデータをそのまま鵜呑みにせず、比較と確認のため、炭素フォイルの作りやすさ、そのフォイルの寿命そして機械的強度等について焦点をしばり、各製膜装置を手作りするやり方で、まずエビゴネン(猿まね) から始まった。但し、CW とパルスレーザ加熱蒸着装置は会社から借用した。

各方法で作成した炭素フォイルの膜厚はうすい $15 \pm 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ で東工大(理)の VdG 加速器の 3.2 MeV の Ne^+ イオンビームを用いて各炭素フォイルの寿命を系統的に測定し、最も長寿命を示す製膜法を見出す方法を探った。この中で、我々独自のアイデアを加味し、より良い製膜法を開発してきた。

2. 薄い炭素ストリッパフォイル

その結果は、以下に示すような日本独自の新しい長寿命の炭素フォイルを作れる 3 通りの製膜法の開発に成功した[1-7]。

1. 制御型 AC・DC アーク放電法 (CADAD)
2. 混合型イオンビームスパッター法 (MIBS)
3. 反応性窒素イオンビームスパッター法 (IBSRN)

上の各製膜法による炭素フォイルの電子顕微鏡による結晶構造を調べ、そして機械的強度も互いに異なることを確認した。これらの何れの製膜法でも寿命は市販のフォイルに比べて最低 20 倍以上の長寿命を示した。

3 つの製膜法の成功を機に各方法の性質の詳細を調べるため、まず上記 1. の CADAD 法に取り組んだ。その原理と特徴は：

DC のカソード電極から放出する ~0.2 μm の炭素クラスターから形成された炭素フォイルはイオンビームに著しく強いがメカニカルなストレスには弱い、一方 AC の電極から放出する ~0.005 μm のナノ粒子からなる炭素フォイルはイオンビームには著しく弱いメカニカルなストレスには強い等の相異なる特徴を見出し。この双方のメリットを活かすことにより長寿命の炭素フォイルを製作できる製膜法に成功した。そして DC 電極の炭素蒸発ロッドからの蒸発量を W_c 、AC 電極の炭素蒸発ロッドからの蒸発量を W_a とすれば、フォイルの寿命とその割合、 $R = W_c / (W_c + W_a) \times 100$ (%) の値との関係は図-1 に示す様に規則性があることを見出した[7]。

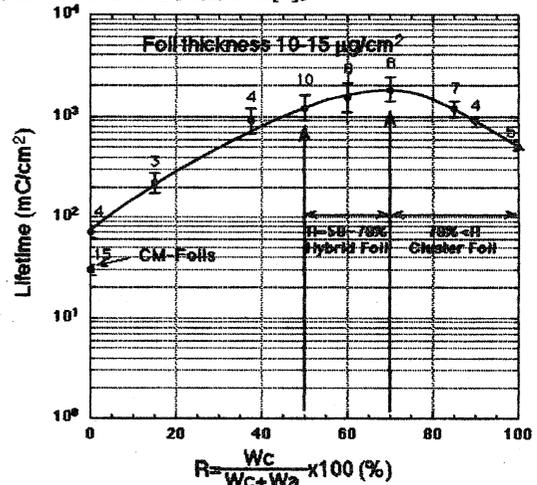


図-1 Relationship between the ratio R and the lifetime (Lifetime measurements were performed with a 3.2 MeV, Ne^+ at $3.0 \pm 0.5 \mu\text{A}$ of 3.5 mm ϕ beam spot) Error bars represent mean square errors and the numbers attached to the points are measured sample numbers.

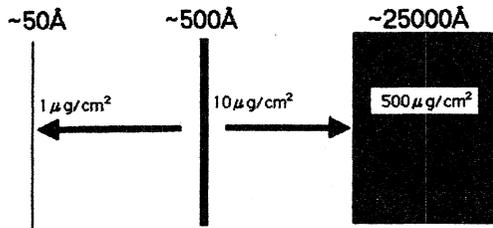


図-2 Challenge to the utmost limit thickness by using CADAD method

CADAD 法の製膜法で出来る厚さの極限の性能を探るために薄い ($\sim 1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) から厚い ($\sim 500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) ものまでの試作を開始した (図-2 に示す)。

色々な厚さの炭素フォイルの寿命を 3.2 MeV の Ne^+ イオンビームで系統的に測定した。その結果、イオンビームのエネルギーと電流が一定の時、膜厚によって図-3 に示すように、(1). 膜厚が薄いとき ($\leq 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) は膜厚増加 (炭素ビルドアップ)、(2). 膜厚が $10 \sim 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ のとき、膜厚一定、そして(3). 膜厚が厚いとき ($\geq 50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) は膜厚減少の異なる 3 つの現象を見出した。本来ストリッパーフォイルは(2)のようにビーム照射中膜厚が変化しないで一定であることが理想的であり、これがわれわれの開発の最終目標である。所でこの膜厚変化の現象は市販のフォイルでは短寿命のため観測されない。

上記の炭素ビルドアップは真空中の残留ガスがイオンビームとの衝突によって解離された炭素が薄い炭素フォイル上に付着する現象でこの制御法の開発に取り組んだ。その結果、このビルドアップ現象はフォイル自身の温度に依存することを見出した。そしてフォイル温度を 600°C 以上にするとビルドアップ現象は現れないことを発見した。これにより、我々はビルドアップを完全に制御することに成功した。この完全制御の結果として、ストリッパーフォイルの寿命が平均 1.5 倍以上に伸びた。この結果から、ビルドアップはストリッパーフォイルの寿命にネガティブに働くことを見出した。この炭素ビルドアップの制御法の詳細については、本加速器研究発表会のポスターセッションに詳しく報告されているので参考にして頂きたい。

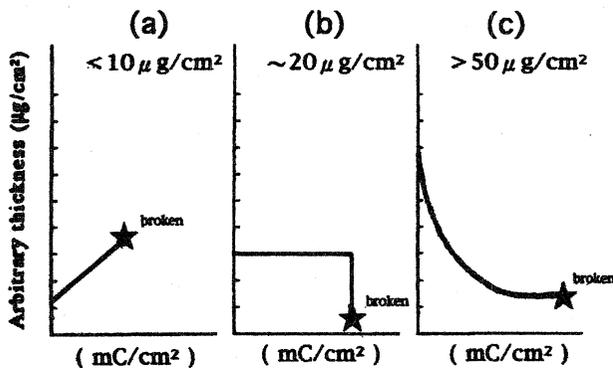


図-3 The thickness change depending on the foil thickness under irradiation of a 3.2 MeV, Ne^+ 3.4 μA and 3.5 mm in beam diameter

3. 厚い炭素ストリッパーフォイル

J-PARC の 3 GeV, RCS リング加速器に使用する炭素ストリッパーフォイルは $300 \sim 400 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の厚い炭素ストリッパーフォイルが予定されている。表-1 に 3 GeV, RCS リング加速器の仕様性能をしめす。一方、米国の BNL の SNS や MSU の RI ビーム加速器ではダイヤモンドフォイルの使用テスト実験が精力的に行なわれている[10-11]。

Table 1 Injection beam properties of J-PARC 3 GeV RCS ring

Kinetic energy	400 MeV
Beam pulse length	0.5 ms
Repetition rate	25 Hz
Average beam current	0.335 mA
Beam size	10mm x 10mm

KEK-JAERI 炭素ストリッパーフォイル開発グループは上に述べた炭素粒子の蒸発量の大きい、かつ、大規模で厚い製膜法に適している CADAD 法を改良した方法を用いて開発を進めることにした。現在、各種アーク蒸発源、大型高性能アーク蒸着装置、並びに低速イオンビーム照射装置を設計、組み立て中である。

現在、計画しているストリッパーフォイルの大きさは幅 $\sim 40\text{mm}$ 、長さ $\sim 150\text{mm}$ のリボン型でカーボンあるいはシリコンカーバイドの $5 \sim 7$ ミクロンのファイバーでフォイルの両面をサンドイッチ構造にしてフォーク型のアルミニウムホルダーに取り付けられる。図-4 にその概略図を示す。

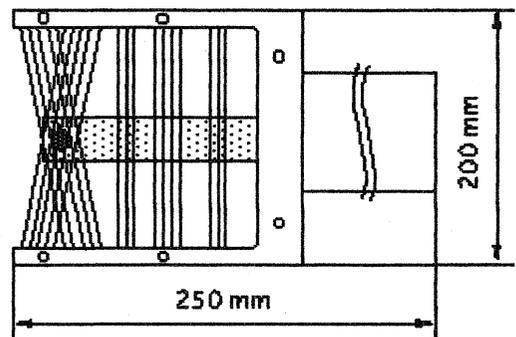


図-4 A mounting scheme for a fork type of ribbon carbon stripper foil and the ribbon carbon foil is mounted with carbon fiber or silicon carbide fiber.

しかし、ストリッパーフォイルの開発の中で CADAD 法には製作できる膜厚に限界がある。 $\sim 100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上の膜厚のデポジションになると蒸着基板よりデポジションした炭素膜が自然に剥離する。これはクラスター粒子の多孔質による問題で解決せねばならない課題である。

図-5 に 3 GeV, RCS リング用に向けた R and D による最近の成果の 1 例として $130 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の厚い炭素フォイルの寿命と膜厚変化を示す。フォイルは直径 10 mm の

穴のあいた SUS-304 のターゲット枠に取り付け、3.2 MeV の Ne⁺イオンビームで照射を行ない、膜厚はフォイルの後方にセットした SSD により前方散乱法により測定した。この場合、寿命は積算イオン照射量 4100 mC/cm² の長寿命を示した。この値は市販の 100 倍に相当する。しかしながら、図から分かるように膜厚減少が明らかに観測されている。破損に到るまでの膜厚減少量はやく 86 μg/cm² で最初の膜厚の 66% に相当する。結果として、この膜厚減少はフォイルの膜厚の一様性を悪くし、それによる境界での歪みによりフォイルの破損をもたらす。この場合のビームスポットに於ける熱は 3.2 MeV, 2.5 μA の電流では約 10 W に相当する。J-PARC のフォイルの熱計算については本研究会のポスターセッションで詳細に報告されているので参照してほしい。赤外放射温度計ではビーム照射初期 (1000 mC/cm²) は約 1300±100 °C を観測し、その後厚さ減少と共に約 800°C に下がった。膜厚減少量は上記の 1. CADAD, 2. MIBS それに 3. IBSRN の各製膜法による測定では若干の違いを見出ししているが、本質的には厚膜デポジッションと共に解決しなければならない重要な問題である。

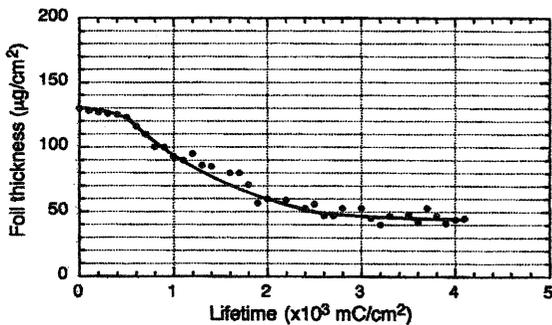


図-5 The significant result showed a great achievement of the new record-breaking lifetime (4100 mC/cm²). Thickness change of the foil made by the mCADAD method was measured under beam irradiation with 3.2 MeV, Ne⁺, 2.5μA ions beam current and a 3.5 mm diameter beam spot. Thickness reduced to 1/3 of the initial thickness.

4. 結論と今後の課題

1. ~3 μg/cm² の薄い炭素ストリッパーフォイル上に堆積 (ビルドアップ) する炭素の完全制御法の開発に成功した。
2. 30~100 μg/cm² の厚さの寿命は市販のフォイルに対して平均 30 倍以上を示した。

今後の開発の主な課題は次の 3 と 4 である。

3. 如何にして CADAD 法を用いて剥離しないで 100 μg/cm² から 500 μg/cm² の厚い炭素膜のデポジッションをできるか?
4. ~1500 K 以上の高温に於いても膜厚減少の少ない炭素フォイル、あるいは複合物質からなるストリッパーフォイルを実現できるか?
5. 最近、ダイヤモンド (Density: 3.5 g/cm³) はグラファイト (Density: 2.2 g/cm³) に比べて熱伝導率

(Wcm⁻¹K⁻¹) が極めて大きいことからグラファイトの代わりにストリッパーフォイルとして使用する試みが世界でさかんに行なわれている。しかし、本当にイオン照射に対して長寿命であり、かつ高温 (> 1500 K) にも耐られるのか、実際に確かめて確認する必要がある。

6. 我々の厚い炭素ストリッパーフォイルの開発目標は市販のフォイルに対して最低 10 倍、最高 30 倍以上である。

文献

- [1] I.Sugai, T. Fujino, K. Yamazaki and T. Hattori, Nucl. Instr. and Meth. A236(1985)576
- [2] I.Sugai, M.Oyaizu, H.Kawakami, C.Ohmori, T.Hattori, K.Kawasaki, M.J.Borden and R.J.Macek, Nucl. Instr. and Meth. A362(1995)70
- [3] I. Sugai, M. Oyaizu, T. Yano, T. Hattori and K. Kawasaki, A 320(1992)15
- [4] H.Muto, M. Oyaizu, I.Sugai and H.Hattori, Nucl. Instr. and meth. B83(1993)291
- [5] I.Sugai, M.Oyaizu, Y.Hattori, K.Kawasaki and T.Yano, Nucl. Instr. and Meth. A303(1991)59
- [6] I. Sugai, T. Hattori, H. Suzuki and K. Yamazaki, Nucl. Instr. and Meth. A251(1986)596
- [7] I. Sugai, T.Hattori, K.Yamazaki, Nucl. Instr. and Meth. A265(1988)376
- [8] I. Sugai, T. Hattori, H. Muto, Y.Takahashi, H. Kato and K. Yamazaki, Nucl. Instr. and Meth. A 282(1989)164
- [9] M.J.Bordenn, M.A..Plum and I.Sugai, Proceedings of PAC, 12-16 May(1997)189
- [10] U.I.Uggerhoj, S.P.Moller and J.P.F.Sellschop Proceedings of EPAC (2002)1061
- [11] C.J.Liaw, Y.Y.Lee, and J.Tuozzolo, Proceedings of PAC. 18-22 June(2001)1538
- [12] I.Yamane and H.yamaguchi, Nucl. Instr. and Meth. A2548(1987)225
- [13] I.Sugai, Y.Takeda, M.Oyaizu, H.Kawakami, Y.Hattori, K.Kawasaki and N.Hayashzaki, Nucl. Instr. and Meth. A480(2002)191