

J-PARC 加速器向けに製作したホウ素含有炭素製荷電変換薄膜の 使用前性能評価試験

Pre-use evaluation test of boron-doped carbon stripper foil for J-PARC

吉本 政弘¹⁾ 仲野谷 孝充¹⁾ 山本 春也²⁾
Masahiro YOSHIMOTO Takamitsu NAKANOYA Shunya YAMAMOTO

¹⁾原子力機構/J-PARC センター ²⁾量研

（概要）

J-PARC 3GeV シンクロトロン加速器(RCS)では、大強度陽子ビームを実現するために炭素を主成分とする荷電変換薄膜を用いた荷電変換ビーム多重入射方式を採用している。J-PARC では炭素電極を用いた直流アーク蒸着法により製膜しており、その際にカソード電極からの放出クラスター量の混合率を示すカソード比が重要なパラメータとして知られている。これまで純炭素薄膜に比べてホウ素を添加した HBC 薄膜はカソード比に対する照射寿命への影響は小さいと考えられていた。しかし、今回精密な寿命評価を行った結果、HBC 薄膜の寿命が純炭素薄膜とほぼ等しくカソード比に依存することが明らかになった。また、現在、我々はカソード比を容易に制御できる新しい蒸着方式を開発した。この方法で蒸着した純炭素薄膜についてカソード比に対する寿命特性を調べたところ、照射寿命はカソード比 0.4 付近を境に飛躍的に増加しており、カソード比が高いと照射寿命もほぼ一様に長いことが分かった。これは、比較的容易な条件確認で長寿命化を担保できることを示している。この画期的なカソード比を容易に制御する直流アーク蒸着法について、2025 年 3 月 28 日に特許出願を行った。

キーワード：大強度陽子ビーム、荷電変換炭素薄膜、直流アーク蒸着法

1. 目的

本研究の目的は、J-PARC 内で製膜している荷電変換薄膜に対して実機で使用する前に必要十分な照射寿命を有しているかを確かめる評価試験を実施すること、そして試験結果を薄膜蒸着時のパラメータにフィードバックしてさらなる性能向上をめざすこと、である。

J-PARC ではこれまでホウ素を添加した HBC 薄膜を使用していたが、1) 炭化ホウ素を添加した炭素電極の供給が先細りしている、2) カソード比の低い HBC 薄膜では照射寿命がかなり短くなる、3) 照射初期は純炭素薄膜の方が変形の進行が緩やかなため J-PARC 運転で有利、などの理由から現在は純炭素薄膜への切り替えを進めている。カソード比とは KEK の菅井氏が導入したもので薄膜中のカソード由来クラスターの混合率を示すパラメータである。菅井氏は、純炭素薄膜ではカソード比が 0.6~0.8 で照射寿命が長くなりそこから外れると短くなることを示した[1]。しかし、カソード比の制御方法については明らかにされてこなかった。また、HBC 薄膜においてカソード比に対する言及はほとんどなく、その影響はほとんどないと考えられていた。にもかかわらず、直近の TIARA での照射試験において、HBC 薄膜においてもカソード比が低くなると寿命が大幅に短くなることが示唆されてきた。そこで、カソード比が異なる HBC 薄膜及び純炭素薄膜において、寿命の差がどのように現れるかを改めて調べることにした。また現在、我々は純炭素薄膜においてカソード比を容易に制御する方式を開発した。そこで我々が製膜した純炭素薄膜について、カソード比がどのくらい寿命に影響するかを詳細に調べることにした。

2. 実施方法

照射試験は上期（5 月 29~31 日）と下期（1 月 28~29 日）の二回に分けて実施した。上期では、カソード比の異なる HBC 薄膜と純炭素薄膜において照射寿命がどのように変わるかを調べた。下期ではカソード比を細かく調整して製膜した純炭素薄膜において、照射寿命への影響を詳細に調べた。照射試験にはこれまでと同様にイオン注入器の IA1 ポートにある低エネルギーイオン照射チャンバーを使用した。ビーム条件は、イオン種：Ar⁺、エネルギー：300keV とし、また φ1mm のスリット

を使用してビームサイズがおおよそ 2mm×4mm の楕円状になるように調整した。ビーム電流については、上期では 1000nA, 500nA, 100nA と変化させて照射寿命について評価することとした。一方、下期ではビーム電流を 1000nA に固定し、カソード比による寿命への影響を評価することとした。上期及び下期に準備した照射薄膜の種類とカソード比についてそれぞれ表 1 及び表 2 にまとめる。

表 1 上期に準備した薄膜リスト

	ロッド ID	種類	カソード比
①	#041	HBC 薄膜	0.835
②	#102	純炭素	0.014
③	#103	HBC 薄膜	0.285
④	#105	純炭素	0.794
⑤	#106	純炭素	0.089

表 2 下期に準備した薄膜リスト

	ロッド ID	種類	カソード比		ロッド ID	種類	カソード比
⑥	#116	純炭素	0.043	⑦	#112	純炭素	0.166
⑧	#118	純炭素	0.483	⑨	#117	純炭素	0.579
⑩	#119	純炭素	0.731	⑪	#113	純炭素	0.843
⑫	#114	純炭素	1.15	⑬	#105	純炭素	0.794

3. 結果及び考察、今後の展開等

これまでの TIARA での照射試験結果から、低エネルギーアルゴンビーム照射試験のような環境下ではフォイルの破損の主要因は温度上昇の効果ではなく、はじき出しの効果が支配的であることが示唆され、そのためビーム電流と照射寿命はほぼ反比例の関係を持っていることが示されてきた。そこで、上期の照射試験では照射寿命を詳細に評価するため、カソード比の異なる HBC 薄膜および純炭素薄膜に対して、ビーム電流値を変えて薄膜破損に至るまでの時間を計測し、詳細な寿命評価を行った。

図 1 は各薄膜のビーム電流量に対する照射寿命の関係を両対数でプロットしたものである。照射寿命はビーム電流にほぼ反比例していることがわかる。そこで、破損までの時間とビーム電流値を掛け算したものを実効照射寿命と定義し、HBC 薄膜と純炭素薄膜のそれぞれに対して各カソード比において実効照射寿命に焼きなおしてプロットした結果が図 2 になる。明らかに、低カソード比と高カソード比で照射寿命に大きな差が現れており、しかも HBC 薄膜と純炭素薄膜でほとんど変化がないことが分かった。つまり、照射寿命の長短はカソード比が支配的であり、ホウ素の有無はほとんど影響していないことを示している。これは、これまでの認識を大きく覆す結果であった。

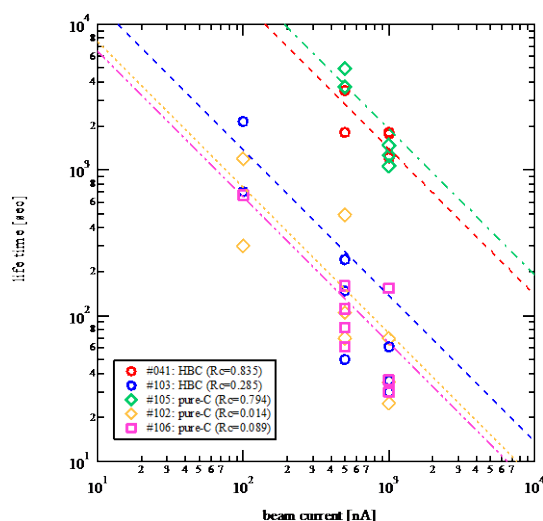


図 1. HBC 薄膜と純炭素薄膜におけるビーム電流に対する照射寿命

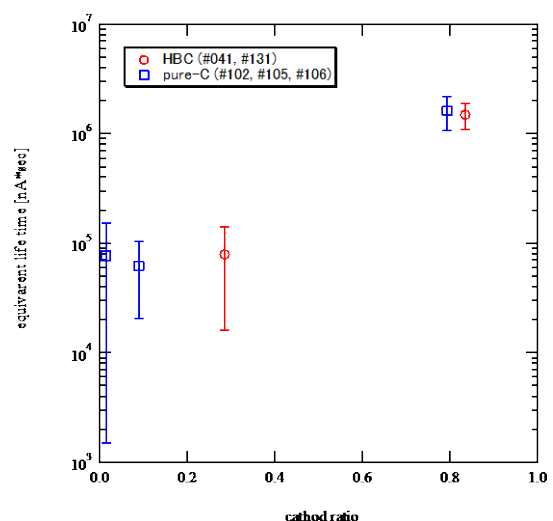


図 2. HBC 薄膜と純炭素薄膜におけるカソード比に対する実効照射寿命

J-PARC では、HBC 薄膜と純炭素薄膜のどちらも同じ直流アーク蒸着法によって製膜している。これまでカソード比の制御はほとんどできておらず、特に近年は 0.1 を下回るほど低くなっていたことが大きな課題となっていた。直流アーク蒸着法のみでカソード比を高めるためには、カソード電極からの放出量を増やすか、アノード電極からの放出量を抑制するか、のどちらかになる。そこで、我々はアノード電極では電子照射によって加熱され蒸発し炭素が放出されることに着目した。カソード電極に対してアノード電極の電極径を大きくすることで熱容量を高くし上昇温度を下げるのが可能となり、結果としてアノード電極からの炭素の放出量を抑制することができる。この手法によりカソード比を安定的に高めることを容易に実現できるようになった。そこで、下期の照射試験では、カソード比を詳細に調整した純炭素薄膜を準備し、照射寿命がどのように変わるかを調査した。ここで、表 2 に記載されているリスト⑫（ロッド ID: #114）のカソード比が 1 を超えていることに言及する。菅井氏が導入したカソード比 R_c とはカソード電極の減損量をカソード・アノード両電極の減損量の和で割ったものと定義され、カソード電極とアノード電極の減損量をそれぞれ N_c , N_a とすると以下の式で表すことができる。

$$R_c = \frac{N_c}{N_a + N_c}$$

リスト⑫の時、アノード電極の電極径を極端に大きくしたことで電極からの蒸発量はほとんどゼロになる。一方で、カソード電極から放出される炭素が基板だけでなくアノード電極にも蒸着するため、減損量 N_a が負の値になる。その結果、カソード比 R_c が 1 を超えることとなった。

表 2 にリストアップしたカソード比を詳細に制御した純炭素薄膜の照射寿命を計測した結果を図 3 に示す。図 2 の結果と同様に低カソード比と高カソード比で照射寿命が大きく異なっていることを示すことができた。一方で、先行研究[1]のカソード比に対し照射寿命は 0.6~0.8 においてピークとなりそこから外れると急激に減少するとの結果と一致せず、我々の純炭素薄膜ではカソード比 0.4 付近を境に照射寿命は大きく飛躍しており、カソード比が低いときは寿命も短く、カソード比が高くなると寿命も長くなる結果となった。

我々が J-PARC で実施している直流アーク蒸着法による製膜は、菅井氏による製膜方法をほぼ踏襲しているが、細部にわたって再現しているわけではない。特に今回我々が開発したカソード比の制御方法は菅井氏の手法と異なっているため、カソード比に対する寿命特性が異なっているても何ら本質的な問題ではない。一方で、今回我々が明らかにしたのは、カソード比がある閾値を超えると十分高い照射寿命を持つという特性は、ピークとなる範囲に収めなければいけないという条件に比べて、容易に実現できる条件といえる。またカソード比の制御方法もアノードとカソードの電極径を変えることがポイントであり、それほど複雑な工程を要しないところも大きな利点である。なお、この画期的なカソード比制御を実現する直流アーク蒸着法について、2025 年 3 月 28 日に特許出願を行った。

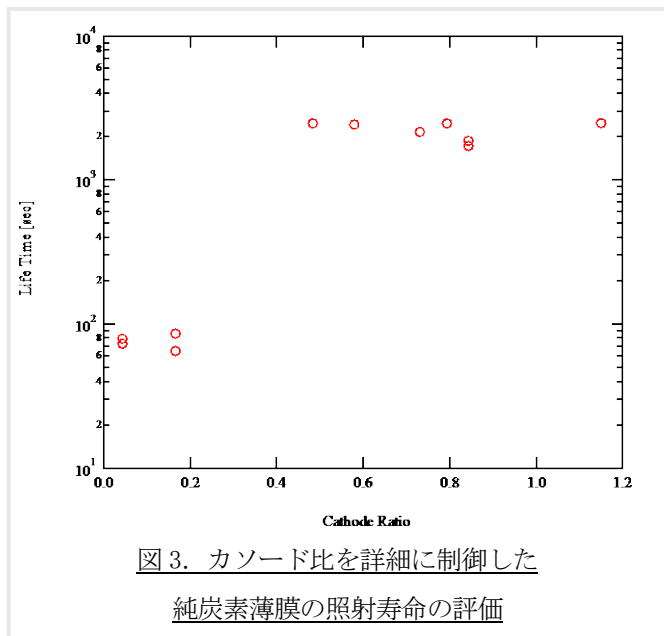


図 3. カソード比を詳細に制御した
純炭素薄膜の照射寿命の評価

今後は、照射試験回数を重ねてカソード比に対する寿命特性の精度を上げるとともに、ビーム照射による薄膜破損のメカニズム解明を通して、高カソード比を有する炭素系薄膜でのさらなる長寿命化を実現する新たな工夫を模索する。またこれまでの HBC 薄膜におけるホウ素の役割についても、引き続き研究を行う。

4. 引用(参照)文献等

[1] 菅井勲, 「重イオン加速器用荷電変換炭素薄膜の開発 長寿命・高強度への挑戦」, 日本物理学会誌 43 (1988) 44.