

## 荷電変換薄膜の高性能化研究

Study on advanced charge exchange foil

吉本 政弘<sup>1)</sup> 仲野谷 孝充<sup>1)</sup> 山崎 良雄<sup>1)</sup> サハ プラナブ<sup>1)</sup> 金正 倫計<sup>1)</sup>  
山本 春也<sup>2)</sup>

Masahiro YOSHIMOTO Takamitsu NAKANOYA Yoshio YAMAZAKI Pranab SAHA Michikazu KINSHO  
Shunya YAMAMOTO

<sup>1)</sup>原子力機構/J-PARC センター <sup>2)</sup>量研

### (概要)

J-PARC 3GeV シンクロトロンにおいて荷電変換薄膜として使用している HBC フォイルは、ホウ素を添加した炭素電極を用いたアーク蒸着法で製膜している。今回、カソード電極とアノード電極の組み合わせを変えて、照射用サンプルフォイルを作成した。RBS による組成分析と TEM による構造観察の結果、組み合わせのパターンによって異なる特徴を持つことが分かった。また、Ar ビーム照射の試験結果では、フォイルの変化する様子が大きな違いが表れた。この変化の違いがフォイル寿命に帰結すると考えられることから、ビーム照射に対するフォイル寿命を決定する因子の特定に向けた可能性を示唆している。特にカソード・アノード両電極からの蒸着量の比と、その中に含まれているそれぞれのホウ素含有量の 2 つのパラメータの組み合わせが、重要な鍵となると思われる。

**キーワード**：大強度陽子ビーム、 荷電変換ビーム多重入射、 HBC フォイル

### 1. 目的

本研究の目的は、ビーム照射による荷電変換薄膜の破壊に至るメカニズムを解明し、その結果を薄膜製作にフィードバックすることでさらにビーム照射に対し強い耐性を持つ高性能化を実現させることである。これまで高崎研 TIARA のイオンビームを用いた照射試験や分析を通じて、HBC フォイルの素性を明らかにしてきた<sup>[1]</sup>。一方で、これまで KEK つくばで製作してきた HBC フォイルの蒸着装置を JAEA 東海サイトに移設し、新たな体制での製作を開始した。高崎研でのフォイル分析・評価試験を基にこれまでのフォイルと同等の性能を有することを確認した後に、J-PARC 加速器においても、500kW 利用運転で数か月問題なく使えることを実証した。そこで今年度は、さらに製膜条件をパラメータに振ったサンプル薄膜を製作し、HBC フォイルの長寿命化の原因探索と薄膜破壊のメカニズムの解明を目指した照射・分析試験を行った。

### 2. 実施方法

HBC フォイルは、純粋な炭素電極やホウ素を添加した炭素電極を組み合わせたアーク放電法を用いて製膜している。今回、カソード電極とアノード電極の組み合わせパターンについて、1) 両方ともホウ素添加炭素電極、2) ホウ素添加炭素電極と純炭素電極、3) 純炭素電極とホウ素添加炭素電極、の 3 通りの方法を実施してサンプルフォイルを製作し、それぞれのフォイルの特徴やビーム照射による寿命評価を実施した。

アーク放電で製作されたフォイルは、カソード電極から飛来する数 100nm の比較的大きな粒塊とアノード電極から飛来する数 nm の小さな粒子とが混合されている。この混合比はフォイルのビーム特性に大きく関与していることが分かっている。この混合比の評価値としてカソード比(カソード電極の減少量を両電極の減少量で割ったもの)を採用している。特に、片側に純炭素電極を用いた場合、フォイル中に添加されるホウ素の形状及び添加量が異なり、それがフォイルの寿命にどのように寄与するかが本試験の重要な課題となっている。

そこでまず始めに、電極の組み合わせの違いがフォイルの組成比や構造にどのように顕れるかを調べた。組成分析は、シングルエンド加速器において 3MV の陽子ビームを用いた RBS (Rutherford backscattering) 法により行った。そして構造観察は TEM (透過型電子顕微鏡) を用いて行った。次に、フォイルの寿命評価を目的とし、イオン注入機において 400kV の Ar ビームによる照射試験を

行った。ビーム照射に伴う変形によりフォイルには強い張力がかかり、場合によってはこの張力によりフォイルを固定している境界面から亀裂が生じることがある。ビーム照射によるフォイル自身の変形・劣化を、境界面からの亀裂・破損と区別して評価するために、ビームサイズをフォイルフォルダの開口径よりも小さく絞って実験を進めた。

### 3. 結果及び考察、今後の展開等

図1は、1)~3)のHBCフォイルのRBSを用いた組成分析の結果を示したものである。1)の場合、蒸着中にカソード電極に欠けが生じたため正確なカソード比は求められなかったが、両電極ともに20%ホウ素を添加した炭素電極を使用しているため、蒸着膜に含まれるホウ素の組成比は元の電極の割合が反映されていると考えられる。一方、2)及び3)について、カソード比はそれぞれ0.331及び0.318であり、どちらもアノードからの蒸着量が多くなる結果となった。どちらも電極中のホウ素の割合は20%であるため、蒸着膜に含まれるホウ素の組成比はそれぞれ6.6%及び13.6%と見積もることが出来る。実際にRBSの結果を見ても、2)の方が3)よりもホウ素の含有量が多くなっていることが分かる。また、今回のRBSで特徴的だったのが、2)と3)が1)に比べて酸素の割合が減っていたことである。この原因はいまだ不明だが、フォイルの性能に大きく関与している可能性があるため、引き続き調査を続ける。

RBS measurement H-3MV result 01 (2019/02/14)

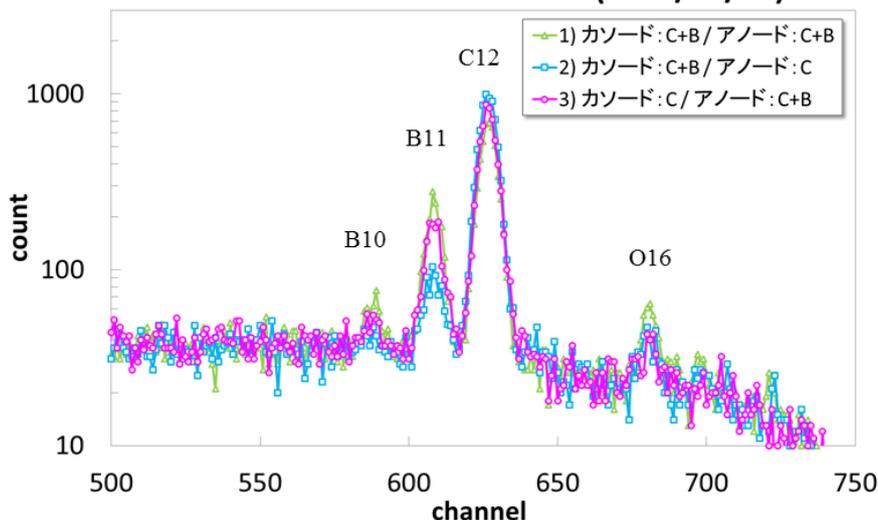
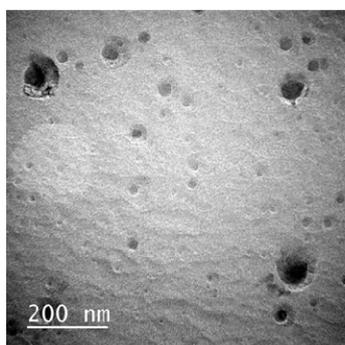
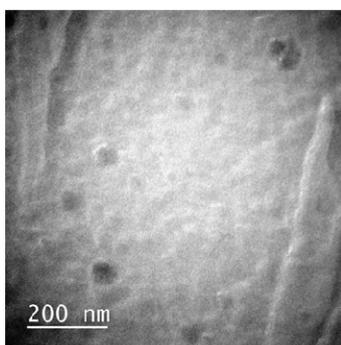


図1. RBSを用いた組成分析

1) カソード:C+B  
/アノード:C+B



2) カソード:C+B  
/アノード:C



3) カソード:C  
/アノード:C+B

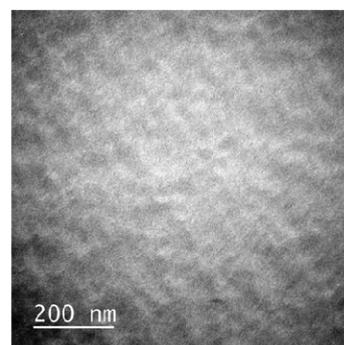


図2. TEMを用いた構造観察

図2は、1)~3)のHBCフォイルのTEM画像である。ホウ素添加炭素電極はB4C(炭化ホウ素)を細かくした

ものを炭素粉体に混入させて成型・焼結させている。そのため、カソード電極からホウ素は数 100nm の B4C の粒塊として飛来することが分かっている。図 2 の観察結果をみると、カソード電極にホウ素添加炭素電極を使用している 1) 及び 2) のみに大きな B4C 粒塊が存在していることがはっきりとわかる。一方、3) のアノード電極由来のホウ素は大きな粒界とはなっていない。しかし今回の場合は RBS の結果からも 3) の方が 2) よりもホウ素の添加量が多いことが明らかになった。このことがフォイルの寿命にどのように影響するか、着目する必要がある。

次に、Ar ビーム照射試験の結果を図 3 にまとめる。φ1mm のビームスリットを使用したため、ファラデーカップでのビーム電流は 25nA、また照射位置でのビーム径はおおよそ 4~5mm 程度であった。このようなビーム条件で 10 分間照射と、30 分間照射の 2 つのパターンで比較した。1) 及び 2) は比較的最初から照射点でフォイルの鏡面化が始まり、周辺を引っ張る張力のために放射状のしわが出来ている。しかし 3) の場合は、フォイルの変化はゆっくりで、15 分過ぎたあたりからようやく照射点での鏡面化及びしわの発生が始まった。フォイル自体の変化の度合いがフォイル寿命に関連していると考えれば、3)、1)、2) の順でフォイル寿命は長いと考えることが出来る。(因みに、1) の境界部からの破損は真空容器から取り出した際に生じたもので、ビーム照射による直接的な原因ではないことに注意が必要である。)



図 3. Ar 照射によるフォイル変化の様子

3 つの組み合わせを比較した場合、単純にホウ素の含有量がフォイルのビーム照射に対する寿命を決めているわけでは無い事が分かる。一方、カソード比に着目すると、これまでは HBC フォイルの耐久性能はカソード電極由来の B4C 粒塊に何らかの要因があると考えてきた。しかし、今回の照射試験では B4C 粒塊がほとんどない 3) が結果として長寿命の可能性を示しており、真逆の結果となった。つまり、カソード・アノード両電極からの蒸着量の比と、その中に含まれているそれぞれのホウ素含有量の 2 つのパラメータの組み合わせがビーム照射に対するフォイル寿命を決定する因子になりうることを、少し飛躍して考えるとアノード電極由来の細かな粒径になっているホウ素が重要な役割を果たすことを示唆している。今後はビーム寿命の評価も含めてもう少し慎重にかつ詳細に製膜条件のパラメータ組み合わせについて調査・試験を継続する。

#### 4. 引用(参照)文献等

[1] Yoshio. Yamazaki et al., “Analyses and the effect of impurities contained in charge stripper foils for the 3-GeV RCS of J-PARC”, in JRNC, 3, 305 (2015), PP 859-864