

# 炭素薄膜の膜厚測定

末長 清和<sup>1,A)</sup>、景山 雄生<sup>A)</sup>、宮田 智弘<sup>A)</sup>、山本 貢<sup>A)</sup>、成田 克久<sup>A)</sup>、小林 千広<sup>A)</sup>  
佐野 悦信<sup>A)</sup>、仲伏 廣光<sup>A)</sup>、村松 正幸<sup>B)</sup>、北川 敦志<sup>B)</sup>、村上 健<sup>B)</sup>、佐藤 幸夫<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 加速器エンジニアリング株式会社  
〒263-0043 千葉県千葉市稲毛区小仲台2-13-1  
<sup>B)</sup> 放射線医学総合研究所  
〒263-0043 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

## 概要

HIMAC[1]で使用される荷電粒子は線形加速器で6MeV/nまで加速された後、炭素薄膜でできたホイルストリッパーによって荷電変換される。

ビームラインには10~350  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ までの様々な厚さのホイルストリッパーが用意されており、基礎研究における荷電変換効率[2]の調査の他に供給ビームの価数調整のために厚さの異なるホイルが利用される。

荷電変換効率の調査やビームの価数調整を精度良く行うためにはホイルの厚さ（以下、膜厚）を知る必要がある。これまでの調査の結果、メーカーが測定した膜厚とビームラインに組込まれたホイルの膜厚が必ずしも一致しないことが分かっている。そのためHIMACではホイルストリッパーを通過したビームのエネルギー損失量を測定し、エネルギー損失量とストッピングパワーとの関係から膜厚を計算により求めている。

最近の測定の結果、期間を置いて測定した膜厚を比較すると使用頻度の大きい薄膜は膜厚が増加し、逆に使用頻度が小さい薄膜では膜厚が減少している傾向が見られた。

この論文ではHIMACで採用している膜厚測定方法を説明するとともに膜厚の経時変化に関する測定結果について報告する。

## 1. ホイルストリッパーの製作

ホイルストリッパーの製作で我々が採用している方法は一般的なものである。ガラスプレートに蒸着されたホイルを水に浮かばせてフレームに貼り付ける。図1に水に浮かんだホイルをフレームに貼り付けようとしているところの写真を示す。

水にはイオン交換樹脂により18 M $\Omega$  cmに浄化された純水を使用しているが、容器やガラスプレートの汚れ、剥離剤などが水に溶け込み、不純物としてホイルストリッパーを汚染する。

このようにして製作されたホイルストリッパーはアルバレ線形加速器の出射口から約10cmの位置に組込まれる（図2）。

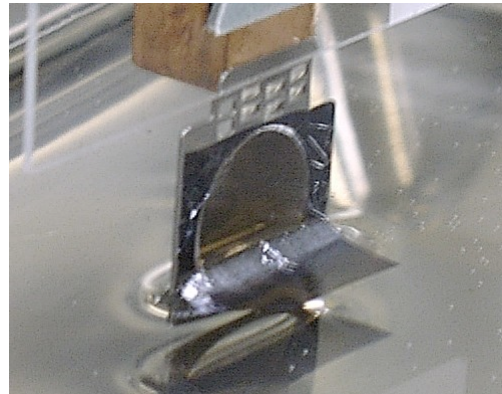


図1：水に浮かべた炭素薄膜をフレームに貼り付ける様子

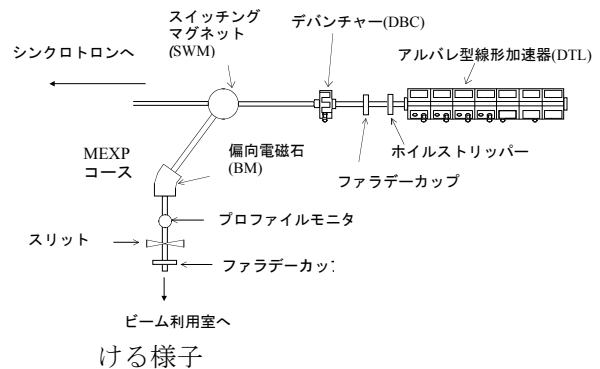


図2：測定系レイアウト

## 2. 膜厚測定方法

膜厚測定に利用するビームラインを図2に示す。

アルバレ型線形加速器（ドリフトチューブリナック；DTL）によりイオンビームは6 MeV/nまで加速される。加速された粒子はDTL出射口から約10cmの距離に置かれたホイルストリッパー（荷電変換器）を通過し荷電変換されるとともにイオン種とエネルギーによって決まるストッピングパワーに従いエネルギーを落とす。その後イオンビームは上下2台のシンクロトロン及び線形加速器直後の実験コース

<sup>1</sup> E-mail: aec2g@nirs.go.jp

(MEXPコース)に輸送される。

MEXPコースにはストレートラインからMEXPコースにビームを偏向する(偏向角20度)1台のスイッチングマグネット(SWM)とビームを更に偏向して(偏向角70度)ビーム利用室に導くための1台の偏向電磁石(BM)がある。また偏向されたビームの位置を検出するためのプロファイルモニタ(PM)が下流に設置されている。

PMにはタングステンワイヤを使用しており、径0.1mm、間隔1.25mmである。

ホイルストリッパーの膜厚測定ではMEXPコースを利用する。厚さの異なるホイルを通過して発生したビームのエネルギーの違いが偏向電磁石通過後のプロファイル重心位置の変化として観測できるためである(図3)。

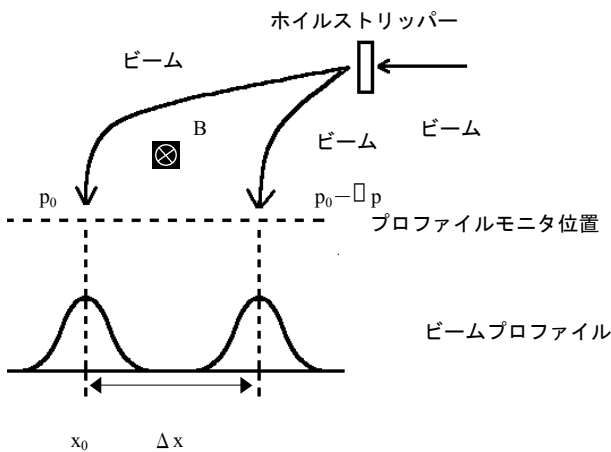


図3: ホイル有無によるビームプロファイルの変化

図3において $p_0$ はホイルがない状態での運動量、 $\Delta p$ はホイルを入れた時の運動量の変化、 $x_0$ はホイルがない状態でのビームプロファイルの重心、 $\Delta x$ はホイルを入れた時にビームプロファイルの重心が移動した量を表している。

運動量に変化したビームのPMにおけるプロファイル重心の移動量 $\Delta x$  [mm]は次式によって表される。

$$\Delta x = D \frac{\Delta p}{p} \quad (1)$$

$D$ は分散関数でMEXPラインでは $D \approx 2$ [m]、 $p$ はDTLから出射するビームの運動量、 $\Delta p$ はホイル通過により変化した運動量である。

運動量とエネルギーの間には次の式が成り立つ。

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta p}{p} \quad (2)$$

$E$ はDTL加速後のエネルギー(6 MeV/n)である。式(1)と(2)から、ホイル通過によるエネルギー変化量 $\Delta E$ が得られる。

$$\Delta E = \frac{2E}{D} \Delta x \quad (3)$$

$E$ と $D$ はそれぞれ定数であり $\Delta x$ は測定により得られる。

以上の方法によって得られた $\Delta E$ とストッピングパワー[3](単位厚さあたりのエネルギー損失量;  $S$  [keV/n/( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )])とから炭素薄膜の厚さ $t$  [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ]を計算することができる。

$$t = \frac{\Delta E}{S} \quad (4)$$

膜厚測定に利用するビームには $N^{6+}$ を採用した。

既に記したように、我々の測定ではホイルが無い状態でのPMにおけるビーム重心位置を基準にしており、ホイル内での荷電変換過程により基準にしたビームの価数が変化してビームがなくなってしまうと膜厚の評価ができなくなる。 $N$ ビームの一部は $350 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ までの炭素薄膜ではフルストリップされず $N^{6+}$ がMEXPコースに輸送される。

6MeV/n  $N$ ビームのストッピングパワーは $20.7 \text{ keV/n}/(100 \mu\text{g}/\text{cm}^2)$ である。またビームプロファイルの重心位置検出精度が0.1mmであることから、エネルギーについての分解能は $0.6 \text{ keV/n}$ であり、これは $2.90 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の膜厚に相当する。つまり $2.90 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ よりも厚いホイルの膜厚測定を精度良く測定することができる。

以上に記した膜厚測定方法は薄膜を実際に使用する条件と同条件で実施される点で膜厚評価をする上で信頼性が高いと思われる。

### 3. 結果

#### 3.1 膜厚のメーカー測定値と実測値

上記測定方法に基づいて測定、算出した値を表1の右欄に示す。また、同時にメーカー測定値も併記する。メーカー測定値に比べ実測値が大きくなっているのは次の理由によると考えられる。炭素薄膜をフレームに装着する工程として水に一旦浮かべなければならない。この時に水に溶け込んだ汚れや剝離剤が膜に付着されたことにより膜厚に影響を与えたのではないかと考える。

表1：膜厚のメーカー測定値と実測値  
(単位： $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

公称値	メーカー測定値	実測値
10	8.9	11
20	22.6	20
30	30.9	28
40	42.9	39
50	53.2	52
100	98.1	115
200	192	206
300	317	329
300	322	351

### 3.2 膜厚の経時変化

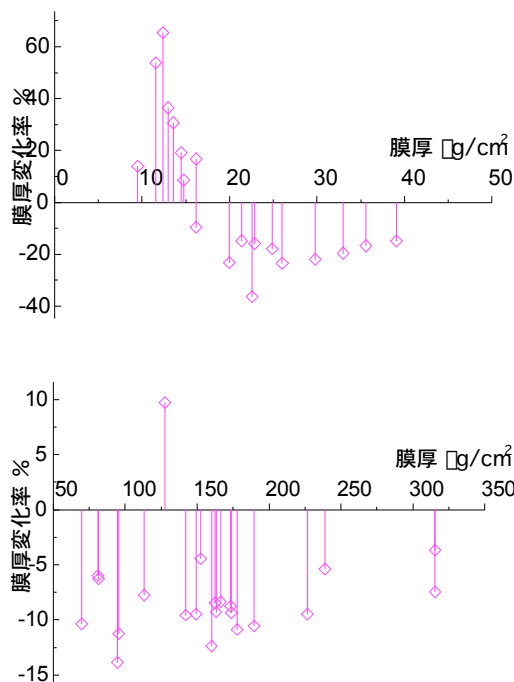


図4：膜厚の経時変化

上図は10～40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、下図は50～350 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の薄膜の膜厚変化率を表す。膜厚変化率は2002年9月の実測値に対する2003年4月の実測値の変化率を表す。

図4をみると約20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 未満の薄膜の膜厚は増えていてそれ以上は減っている。ただし普段よく使用している128 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の薄膜だけは例外的に増えている。

約20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 未満の薄膜の膜厚が増えていることについては良く分からないので現在調査をしている。

一方、約20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上の薄膜の膜厚が減っているのは、薄膜をフレームに取り付ける際に付着したと思われる水や付着物がスパッタリング等により徐々に放出されたためではないかと考えられる。ただし普段ビーム供給で頻繁に使用している128 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の薄膜については逆に膜厚が増加している。これについては使用中に薄膜に撓みが生じて見かけ上膜厚が増加したように見えたのではないかと考える。

### 4. 今後の課題

以上のことから今後の課題として

- ・フレームに炭素薄膜を装着した後の工程として真空乾燥工程の導入を検討している。
- ・炭素薄膜の使用可能な頻度（又は期間）を確認する意味で炭素薄膜の観察をしていきたい。

### 5. 謝辞

本論文を完成するまでに、独立行政法人 放射線医学総合研究所の諸先生から、貴重なご意見を賜りここに深く御礼申し上げます。また、薄膜の購入先である薄膜メーカー及びフレームメーカーの方にはご協力戴き有難うございました。最後に膜厚測定にあたり御尽力戴きました加速器エンジニアリング株式会社の諸氏に深く感謝申し上げます。

### 6. 参考文献

- [1] A. Kitagawa, et al., Status of ion sources for the heavy ion medical accelerator HIMAC, Rev. Sci. Instrum. 67, No. 3, Part II (1996) 962-964.
- [2] Y.Sato et al, Nucl. Instrum. and Meth. In Phys. Res. B201(2003)571 - 580
- [3] HAND BOOK of STOPPING CROSS-SECTIONS FOR ENERGETIC IONS IN ALL ELEMENTS Volume 5 of The Stopping and Ranges of Ions in Matter, edited by J.F. ZIEGLER, IBM-Reserch, Yorktown Heights, N.Y.10598, pp.93(1980)