

# 表面電離器の磁石の設計に関する検討

A. Tamii

ver 1.1 14-JAN-2005

## 1 序

偏極  ${}^6\text{Li}$  原子線は、表面電離器 (Surface Ionizer) において高温に熱した酸化タンゲステンに照射することにより 1 価にイオン化され、グリッド電極により加速されて引き出される。このイオン化の過程では、偏極を保持するための外部一様磁場を要する。このメモでは、表面電離器の磁場の要請に関する検討 [1] に基づき、磁石の具体的な設計について検討する。

## 2 要請

この節では、磁石に対する要請を各項目に分けて説明する。

### 2.1 減偏極からの要請

減偏極に関する考察から、表面電離器の中心部に関する磁場を下記の様に要請している [1]。

- a. 最大磁場 1 kGauss 以上
- b. 一様性: 磁場の主磁場方向に対する角度が  $10^\circ$  以下であること。
- c. 一様性を要する領域: 中心から半径 10 mm の球内

### 2.2 Li イオントランスポートからの要請

表面電離器から ECR イオン化器までの 1 価の  ${}^6\text{Li}$  イオンのトランスポート (入射エネルギー 19 keV) に関する検討から、下記のことが分かって来た [2, 3]。

- d. チューブ (加速) レンズでの強い収束作用を軽減するためには、表面電離器の引き出し電圧を高めるのが良い。2 段加速の場合で、引き出し電圧 1.4 kV 程度が望ましい。
- e. チューブレズ後に静電 Q を複数配置する構成をとる場合には、表面電離器の出口での磁場の Fringing Field の詳細は、静電 Q の調整によって吸収できるため、下流のトランスポートにとって重要ではない。
- e. チューブレズ位置への漏洩磁場が大きいと、表面電離器とチューブレズの調整がカップルしてしまい望ましくない。チューブレズ位置は、EFB より 50mm もしくはそれ以上の下流を想定している。

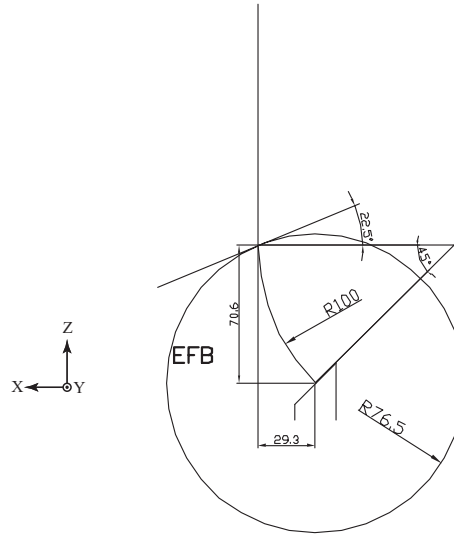


図 1: 有効磁場境界 (EFB) と曲率半径 100 mm、回転角  $45^\circ$  の場合の各値。座標系  $X, Y, Z$  は、装置に固定された座標系。

### 2.3 曲率半径

FSU の設計に倣い、下記のジオメトリを設定する。

- f. 表面電離器の磁場による平均曲率半径を  $\rho=100$  mm とする。
- g. 表面電離器の初期加速方向からビームが引き出されるまでの回転角を  $45^\circ$  とする。

この要請から、有効磁場境界 (Effective Field Boundary, EFB) の半径  $r_{\text{EFB}}$  は、

$$r_{\text{EFB}} = 2\rho \sin(45^\circ/2) = 0.765\rho = 76.5 \text{ mm} \quad (1)$$

となる (図 1 参照)[2]。

1.4 keV の 1 価の  ${}^6\text{Li}$  イオンの曲率半径が 100 mm の場合の磁場は、

$$\bar{B}_{6\text{Li}} = \frac{pc}{0.3q\rho} = \frac{\sqrt{2Mc^2E}}{0.3q\rho} = \frac{\sqrt{2 \cdot 5603 \cdot 1.4 \times 10^{-3}} [\text{MeV}]}{0.3 [\text{MeV}/\text{kGcm}] \cdot 1 \cdot 10 [\text{cm}]} = 0.882 \text{ kG} \quad (2)$$

である。将来的な使用を見込んで、 ${}^7\text{Li}$  のビームを出せる様にしておきたい。1.4 keV の 1 価の  ${}^7\text{Li}$  の場合の磁場は、

$$\begin{aligned} \bar{B}_{7\text{Li}}/\bar{B}_{6\text{Li}} &= \sqrt{\frac{M_{\text{Li}^7}}{M_{\text{Li}^6}}} = \sqrt{\frac{6535}{5603}} = 1.080 \\ \bar{B}_{7\text{Li}} &= 0.952 \text{ kG} \end{aligned} \quad (3)$$

である。これらを目安とするが、実際には磁場は一樣ではないため、さらに強い中心磁場が必要である。最終的な磁場の値は軌道計算によって求める。

## 2.4 ギャップ

原子線のビームの広がりとして 20 mr を想定している [4]。原子線のノズルから表面電離器までの距離を 370 mm と想定している [5] ので、表面電離器でのビームの広がりには  $\pm 8$  mm 程度である。

この領域を覆うため、表面電離器のタングステンおよび引き出しグリッド (タングステンから 5 mm 位置、FSU では 10 mm [6]) のサイズを、磁場と平行な方向に  $\pm 10$  mm、垂直な方向に  $\pm 15$  mm ととっている。

タングステンは 1500 °C 程度の高温に熱して使用するため、熱シールドの設置を含め、熱放射を抑えて必要な高温を得ることができるとどうか、磁石のギャップを想定する上での主要因である。熱に関する検討は別途行う必要がある。

現時点では、磁石のギャップを 70 mm と想定して進める。

なお、表面電離器の容器は引き出しグリッドと同電位 (17.6 kV) にあるため、磁極をグラウンド電位に設定する場合には、表面電離器の容器との間の電氣的な絶縁をとる必要がある。

## 2.5 磁石形状

原子線の入射方向およびその逆方向 (原子線偏極度計の方向) は原子線の通り道を開ける必要がある。

また、1 価のビームの引き出し方向 (上方) および表面電離器電極の引き出し方向 (下方) は開ける必要がある。

これらの要請から、磁石の形状を C 型とし、リターンヨークの方向を斜め下向きとする。

## 2.6 要請に関するまとめ

以上の、磁石設計に関連する要請を下記にまとめる。

1. 表面電離器からの引き出し電圧を 1.4 kV とする。
2. 磁石形状を C 型とする。
3. 磁石の磁極間ギャップを 70 mm とする。
4. イオン曲率半径 100 mm
5. イオン回転角 45°
6. EFB 円半径、約 76 mm
7. 最大中心磁場 1 kGauss 以上、かつ引き出しビームを想定する軌道に載せるのに十分な磁場を有すること。
8. 中心から半径 10 mm の球内において、磁場ベクトルの主磁場方向に対する角度が 10° 以下であること。
9. Fringing Field の詳細は問わないが、EFB より下流 50 mm 以降の漏洩磁場による偏向角がビーム自身による角度広がりよりも十分小さいこと。

### 3 磁石の形状

前節の要請をもとに、磁石のデザインを行った。設計案を図 2 に示す。  
以下にポイントをまとめる。

- 磁極間ギャップを 70 mm としている。
- 磁極は直径 100 mm の円筒形。EFB 円半径は、フィールドクランプがない場合で 76.5 mm。この値は、EFB に垂直な線上の積分を使用する定義を用いて、図の  $Z$  方向磁場分布から計算している。

$$r_{\text{EFB}} \equiv \frac{\int_0^{\infty} B_Y(0, 0, Z) dZ}{B_Y(0, 0, 0)} \quad (4)$$

- リターンヨークの厚さは 50 mm。
- フィールドクランプの厚さは 20 mm。出射ビームに対して垂直に配置している。
- コイル断面は 50(径方向)×80(軸方向) mm<sup>2</sup>
- 起磁力は、<sup>6</sup>Li 1.4 keV の場合で 4,380 AT/Coil。<sup>7</sup>Li の場合の 8% 増と、さらに 10% の調整余裕をみると 5,200 AT/Coil。
- 80% のコイルパッキング率を仮定すると、コイル断面積は  $S=0.8 \times 5 \times 8=32$  cm<sup>2</sup>/Coil であるから、電流密度は、

$$J = \frac{AT}{S} = \frac{5200 \text{ A}}{32 \text{ cm}^2} = 163 \text{ A/cm}^2 \quad (5)$$

銅の体積比抵抗として  $\sigma=2 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}=2 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$  [7] を仮定する。コイルの平均長は  $\bar{L}=2\pi \times 7.5 \text{ cm}=47 \text{ cm}$  であるから、発熱量  $W$  は、

$$W = J^2 \sigma \bar{L} S = (163 \text{ A/cm}^2)^2 \times 2 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm} \times 47 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}^2 = 80 \text{ W/Coil} \quad (6)$$

## 4 シミュレーション

### 4.1 磁場分布

前節の磁石の形状を仮定し、Opera3D TOSCA を用いて磁場分布のシミュレーションを行った (SIB015)。

磁極、リターンヨーク、フィールドクランプの材質として、TOSCA に内蔵されている tenten を用いた。

<sup>6</sup>Li 1.4 keV 引き出しの場合の起磁力は 4380 AT/Coil であり、この値は <sup>6</sup>Li のトラッキングシミュレーションにより 45° の偏向角が得られる様に調整した値である。

以下、この磁場設定の場合に得られた数値を挙げる。

- 中心磁場は 1511 Gauss。
- 中心部半径 10mm 以内での、最小  $Y$  方向磁場は 1503 Gauss (-0.5%、対称面内)、最大  $Y$  方向磁場は 1525 Gauss (+0.9%、 $Y=\pm 10\text{mm}$ ) であった。

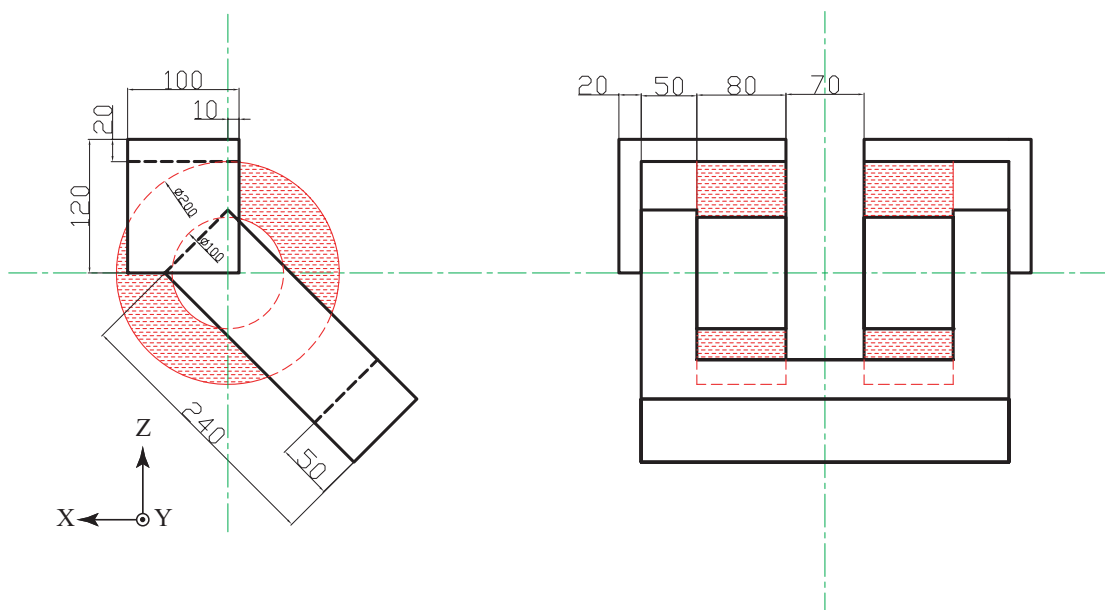


図 2: 磁場計算に使用した電磁石の構造。

- 中心部半径 10mm 以内で、磁場ベクトルの主磁場方向 ( $Y$  軸) からの最大ずれは  $0.3^\circ$  ( $Y$  軸から  $45^\circ$  方向の球面上の位置)。  $10^\circ$  以内という要請を十分に満たしている。
- フィールドクランプ出口 (EFB から  $Z$  方向へ 50 mm 位置) での  $Y$  方向磁場は、17 Gauss.

## 4.2 電場分布

図 3 の様な電極および容器を仮定して、電場分布のシミュレーションを行った (SIE009,010,011)。電離器表面の電位を +1.4 kV、引き出しグリッドおよび真空容器の電位を 0 V にとっている。実際に使用する電離器表面の電位は +19 kV、グリッドおよび真空容器の電位は +17.6 kV である。電離器およびグリッドの面積は  $20 \times 30 \text{ mm}^2$  で、ともに一様電位を使用している。即ちグリッドの格子形状は取り込んでいない。

## 4.3 イオン軌道トラッキング

シミュレーションによって得られた電場および磁場の値を 1 mm グリッドにてテーブルとして保存し、4 次の Runge-Kutta 法により粒子のトラッキングを行った。

電離器表面上の指定された初期位置にエネルギー 0 の  ${}^6\text{Li}$  イオンを生成し、粒子位置の時間変化を追って計算を進めている。

電離器中心に生成された  ${}^6\text{Li}$  イオンが  $Z$  軸に平行に引き出される様に磁場の値を調整した。

引き出された軌道の  $Z$  軸からの  $X$  方向へのずれは 29 mm であり、EFB からの計算値 29.3 mm と良く一致している。フィールドクランプの影響および電離器表面からグリッドへの加速の影響が EFB の計算には取り込まれていないので、これほどの精度で一致しているのは偶然と考えられる。

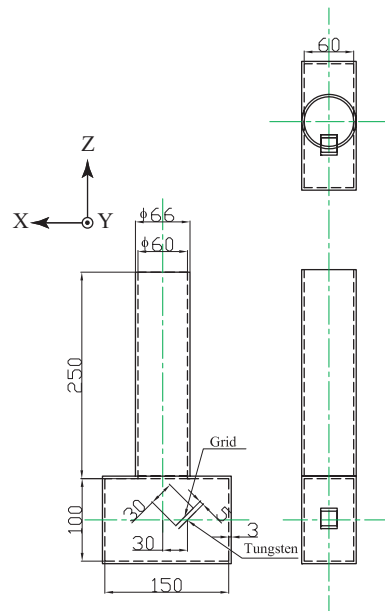


図 3: 電場計算に使用した電極と真空容器の構造。

フィールドクランプ出口 (EFB から  $Z$  方向へ 50 mm 位置) から下流の漏洩磁場による回転角度は 3 mr であり、後に示すように、ビームの角度広がりよりも十分小さいため、要請を満たしていると考えられる。なお、フィールドクランプがない場合の値は 46 mr である。

#### 4.4 表面電離器ビーム軌道マトリックス

シミュレーションにより、フィールドクランプ出口から 150 mm 下流 (EFB から 200 mm 下流) までビームをトランスポートした場合の、オプティクスパラメータを表に示す

$(x x)$	-0.609	
$(\theta x)$	-6.05	rad m <sup>-1</sup>
$(y y)$	0.291	
$(\phi y)$	-1.93	rad m <sup>-1</sup>
$(x \delta)$	0.186	m
$(\theta \delta)$	0.80	rad
$(x xx)$	9.76	m <sup>-1</sup>
$(\theta xx)$	61.6	rad m <sup>-2</sup>
$(x y)$	0	
$(x yy)$	-11.7	m <sup>-1</sup>

このパラメータの座標軸は森信氏の定義と同じく、ビーム軌道に沿って進行方向に  $z$  軸、磁場の方向に  $y$  軸、右手系をなす様に  $x$  軸を取っている。

2 次の効果は、効いてはいるが比較的小さい。

初期条件の角度変位に依存する量を計算することは、初期条件でイオンが静止しているため、現在の計算方法ではできない。引き出しグリッド位置での角度変位は、主にグリッドの電場の理想

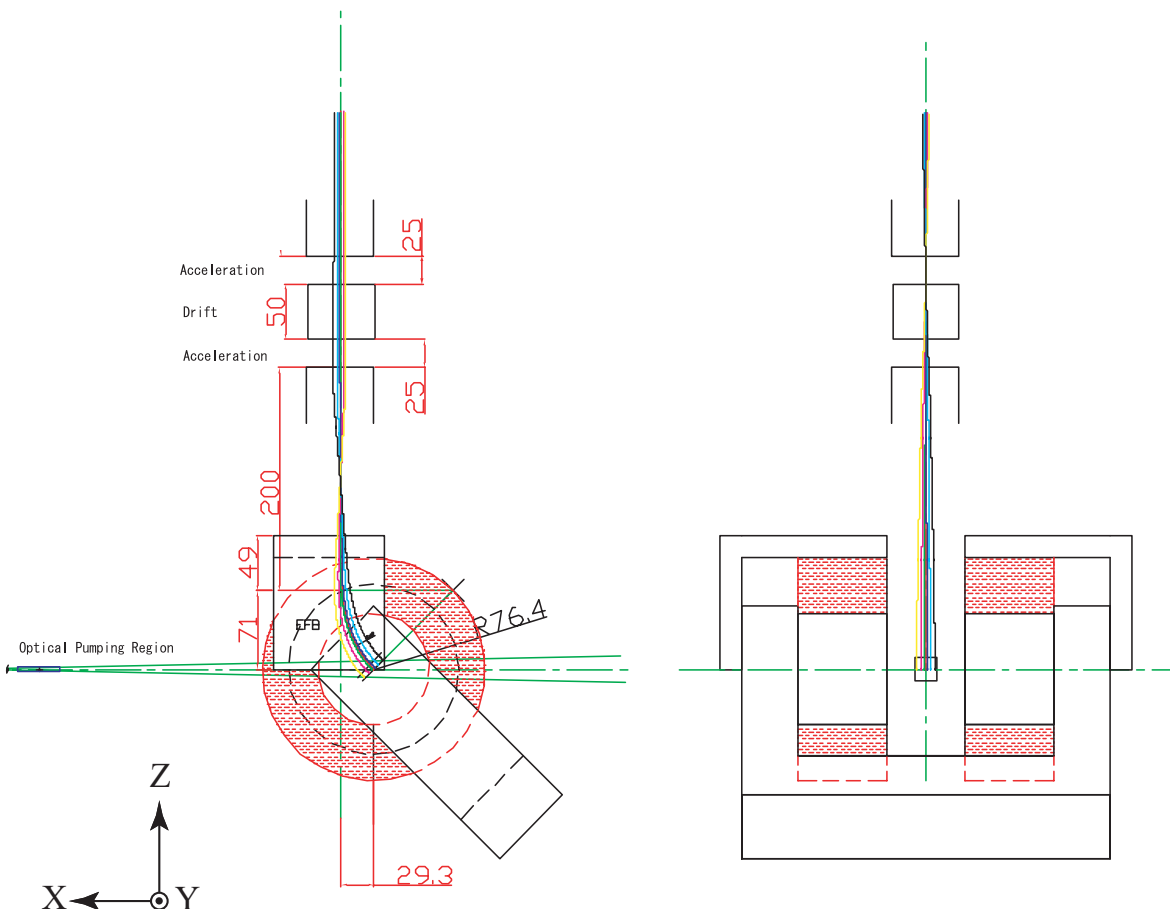


図 4: 3次元電場磁場計算によるマップを使用したイオン軌道のトラッキングシミュレーション結果。初期位置を  $x=0, \pm\sqrt{2}, \pm4\sqrt{2}, \pm8\sqrt{2}$  mm (左図)、 $y=0, \pm1, \pm4, \pm8$  mm (右図) ととっている。 $x, y, z$  は、イオン軌道に沿った座標系をあらわしている。なお、この図の軌道には加速チューブ中での軌道変化が含まれている。

値からずれによって引き起こされると考えられる。この変位の見積もりは、後段のトランスポートと関連して検討すべき課題の1つであるが、表面電離器の磁石設計に対する影響は小さいと考えられる。

トラッキングにより得られた軌道を、図 4 に示す。図示した軌道は、初期位置が  $x$  方向に、 $0, \pm\sqrt{2}, \pm4\sqrt{2}, \pm8\sqrt{2}$  mm の場合、および  $y$  方向に  $0, \pm1, \pm4, \pm8$  mm の場合である。なお、この図の軌道には加速チューブ中での軌道変化が含まれている。

#### 4.5 引き出しビーム軸の調整

引き出されたビームが、理想的に下流エレメントの中心軸上に乗らない場合に備えて、調整代を用意しておく必要がある。面对称な  $Y$  軸方向 (磁場方向) は良いとして、 $X$  軸方向に関する調整が必要である。

必要なパラメータ数は 2 つである。表面電離器の磁場とグリッドによる引き出し電圧はほぼ同

一の調整パラメータであるので、ここでは磁場を固定し、引き出し電圧をパラメータの1つと考える。

もう1つのパラメータとしてFSUで使用しているのは、表面電離器のタングステン板の上下(Z方向)位置である。タングステン板は下に引き出せる様に製作するので、上下位置を調整することは比較的容易である。

タングステン板を上下方向に $\pm 1$  mm ずらした場合の、原子線軸上から引き出されるイオン軌道のEFBから200 mm 下流位置での変化、および引き出し角度がZ軸に平行になるように引き出し電圧を調整した場合の変化を下記表にまとめる。

上下位置	$\Delta x$	$\Delta \theta$	引き出し電圧変化 %	$\Delta x$	$\Delta \theta$
	mm	mrad		mm	mrad
下へ 1 mm	-2.8	-7.6	2.0	-1.0	0.0
上へ 1 mm	1.9	+4.4	-1.1	+0.9	0.0

従って、引き出しイオンの角度が同じになる様に引き出し電圧を調整する条件下では、タングステン板を鉛直上(+Z)向きに $\pm 1$  mm 変化させた場合の、引き出し軌道のずれは+X向きに $\pm 1$  mm である。

この軌道のずれは、イオン発生位置のずれをそのまま反映していると言える。

## 5 まとめ

このシミュレーションにて想定した磁石は、2節に挙げた要請を満たしていると考えられる。

- 磁極直径 100 mm
- 磁極ギャップ 70 mm
- 起磁力 5,200 AT/Coil
- フィールドクランプあり

この検討において想定していない項目およびコメントを下記に掲げる。

- タングステン板の熱シールドおよび電氣的絶縁を考慮した場合、ギャップ 70 mm 間に設置することが可能かどうかを検討する必要がある。
- Fringing Field の詳細を下流のエレメントにて吸収できるかどうかは、下流エレメントの構成に依存するが、下流エレメント決定後に必要であればフィールドクランプの設計の微修正を行う程度で対応できるものと予想する。
- タングステン板の上下により調整することができる引き出し軸の調整幅は $\pm 2 \sim 3$  mm 程度である。これ以上の調整は、表面電離器と引き出しビームラインとの相対位置を動かすことにより行われなければならない。



## 参考文献

- [1] A. Tamii, 「表面イオン化器の磁場についての検討」, ver 1.0.
- [2] S. Morinobu, 「表面電離器から ECR イオン源へのイオン輸送」.
- [3] S. Morinobu, Private Communication.
- [4] A. Tamii, 「 ${}^6\text{Li}$  原子のオプティカルポンピングに必要なレーザー強度に関する検討」, ver 1.3.
- [5] FSU の値を基礎にしている。See E.G. Myers *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. **B56/57** (1991) 1156.
- [6] A.J. Mendez, Phd Thesis, Florida State Univ., 1993, unpublished.
- [7] 理科年表 2002 年版、(丸善,2001) pp. 424 より  $0^\circ\text{C}$  で 1.55、 $100^\circ\text{C}$  で 2.23 ( $10^{-8}\Omega\text{m}$ ).