

# MAGNETIC FIELD CALCULATION FOR 2.45GHz PERMANENT MAGNET HIGH INTENSITY ECR ION SOURCE DEVELOPMENT

Hidenori Kawamata<sup>1</sup>, Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University  
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

## Abstract

We push forward the development that aimed at increase in intensity of a proton beam in the RCNP cyclotron facility. We started development of a 2.45GHz permanent magnet ECR ion source to generate a high intensity proton beam. The 2.45GHz ECR ion source SILHI using superconducting solenoid coils was first developed at CEA/Saclay to produce a high intensity proton beam. They also developed a compact 2.45GHz ECR ion source with a permanent magnet, but the proton intensity is limited to 70% of the first ion source.

We have designed the 2.45GHz permanent magnet ECR ion source by a magnetic field calculation OPERA-3D/TOSCA to achieve higher performance than SILHI.

In order to generate a magnetic field (875Gauss) satisfying an ECR condition, we arranged three rings-shaped permanent magnets to form a magnetic field distribution like the solenoid lens magnetic field of SILHI. We optimized a radial width and the thickness in the axial direction of the magnets, a position and thickness of the iron plate for correcting magnetic field distribution, a position and thickness of the iron for preventing electric discharge of the extraction electrode.

I report the results of magnetic field calculations and the design of the ion source.

## 2. 45GHz永久磁石型大強度ECRイオン源開発のための磁場設計

### 1. はじめに

阪大RCNPサイクロトロン施設では陽子ビームの強度増強を目指した開発を進めている。その一環として、大強度の陽子ビームを生成するための2.45GHz永久磁石型大強度ECRイオン源の開発に着手した。この論文では、永久磁石を用いた2.45GHz大強度陽子ECRイオン源開発のための磁石設計と、これからの計画を紹介する。

### 2. CEA/Saclayの2.45GHz永久磁石型大強度ECRイオン源についての検証

ECRイオン源は磁場中に閉じ込められたイオンや電子に電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 条件を満たす周波数の電磁波を入射することによって、プラズマ中の電子を加熱し、その結果原子の電離効率を高めて高密度のプラズマを生じさせるイオン源である。必要な電磁波の周波数 $f$ は電子サイクロトロン共鳴条件より次のように決まる。

$$f = \frac{eB}{2\pi m}$$

ここで $m$ は電子質量、 $e$ は単位電荷、 $B$ は軸方向の磁束密度である。今回は $f = 2.45\text{GHz}$ を使用するため、

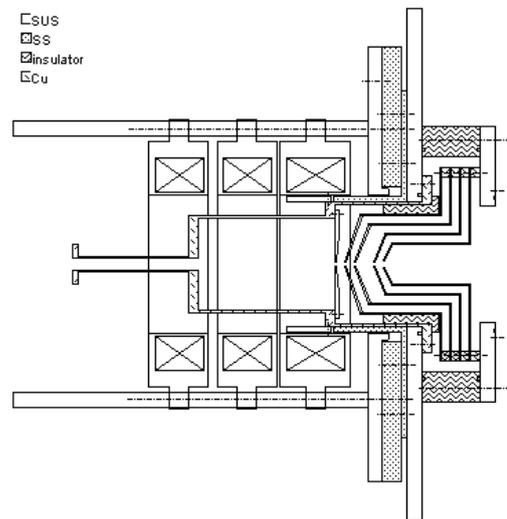


図1. 2.45GHz永久磁石型大強度ECRイオン源の構造

875Gaussの磁場が必要になる。

ソレノイドコイルを用いたECRイオン源としてはSILHIが開発されている。SILHIはcwモードで156mAものビーム強度を持つ。<sup>[1]</sup>その後継としてコンパクト化を図った2.45GHz永久磁石型大強度陽子ECR

<sup>1</sup> E-mail: kawamata@rcnp.osaka-u.ac.jp

イオン源がCEA/Saclayで開発が行なわれている。その結果はcwモードで110mAである。<sup>[2]</sup>永久磁石型ECRイオン源の方が引き出されたビームの強度は70%程度にとどまっている。このビーム強度低下の要因の一つとして磁場分布の違いが考えられる。SILHIではソレノイドコイルを使用しているため、磁場分布の調整が可能である。このためECRゾーンの位置の最適化を行なっており、その結果、ビーム強度は2箇所のECRゾーンに依存することが分かった。そして2つのECRゾーンはプラズマチャンバーの両端に位置したときにビーム強度が増強される。よって永久磁石を用いたECRイオン源の場合でも、ソレノイドコイルを用いたSHILIと同様の磁場分布を作り出すことにより、ビーム強度の増大を図ることができると考えられる。

また、ECRゾーンの位置の最適化について、永久磁石型ECRイオン源の場合は進行波管にマイクロ波電源を使用するため、その周波数を可変にすることにより最適化することが可能であると考えられる。

また、CEA/Saclayでは引出領域での磁場が0.2T程度と高かったために、電極間で放電が起こり電極間の電場を下げる結果となった。そこでCEA/Saclayでは引出領域に鉄材を配置することにより引出電極付近の磁場の大きさを下げることで問題を解決した。

### 3. 磁石設計

以上を踏まえて、SILHIのビーム強度を目標として2.45GHz永久磁石型大強度ECRイオン源磁石設計を行うこととした。設計を行うに際しての方針は以下のとおりである。

(i) プラズマを生成するため、電子サイクロトロン共鳴条件である875Gaussを超える磁場分布を持つ磁場分布を形成する。

(ii) 大きなビーム強度を得るため、実績のあるSILHIのソレノイドコイル磁場と同様の磁場分布を形成する。

(iii) 電極間の放電を抑制するため、引出領域に鉄材を導入し引出領域の磁場の大きさを小さくする。

また、以下の制約を加えるものとする。

(1) 永久磁石の製造段階での製作磁場の不確定さのため磁石の配置により磁場分布を変化させる必要性が出てくることを考えて、リング型永久磁石は3個を並べるものとする。

(2) SILHIのビーム強度を目標とすることから、プラズマチャンバーはSILHIで使用されたプラズマチャンバーとほぼ同じサイズとする。

(i) は、リング型永久磁石の外径、内径、軸方向の厚さ、形状に大きく依存すると考えられる。

(ii) は、3個のリング型永久磁石の相対的配置、永久磁石間に挿入する鉄板の厚みに大きく依存すると考えられる。(iii) は、引出領域の鉄材の厚さ、永久磁石と電極の間に挿入される鉄板の長さ

に大きく依存すると考えられる。それぞれの条件と条件を構成する要素に対してOPERA-3D/TOSCAを用いて磁場計算を行ない、磁石設計を行なった。

なお、リング状永久磁石の材料としては日立金属株式会社のNMX-48BH (20度での残留磁化1.39T)、鉄材としてはSS400を使用する。

#### 3.1 875Gaussを超える磁場分布の形成

まず(i)を考える。磁場分布の絶対値はリング型永久磁石の外径、内径、軸方向の厚さ、形状に依存する。内径は75mm、形状はリング状とし、外径の大きさを変数として磁場計算を行なった。

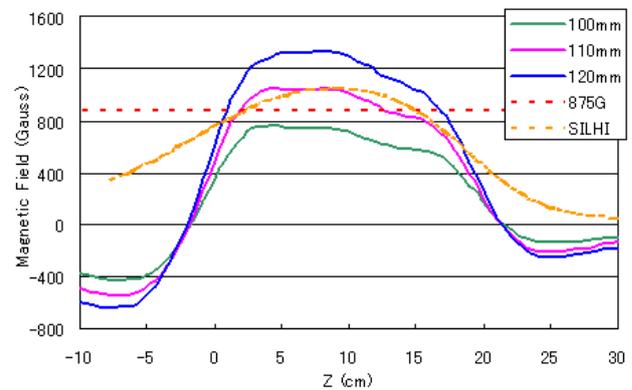


図2、磁石の外径と磁場分布の関係

磁石の外径の変化について磁場計算を行なう際、CEA/Saclayと同様の引出領域の鉄材が存在し、3個の永久磁石の厚さは50mmと仮定して磁場計算を行なった。その結果が図2である。外径を110mmとした場合が(i)の方針を満たしつつ、最もSILHIの磁場分布に近い。そのため永久磁石の外径は110mmを採用した。ただし、鉄材のため引出領域での磁場分布が小さくなり、磁場の大きさを補完する必要がある。

そこで最も引出領域に近い永久磁石の軸方向の厚さを厚くして再度磁場計算を行なった。その結果を図3に示す。引出領域の磁場の大きさを補完し、かつ、より875Gaussに近い分布として、SILHIの磁場分布よりも若干低く、全体が875Gaussに近いという理由で、最下流の磁石の厚さは60mmを採用した。

以上より、軸方向の厚さは35mm、軸方向の厚さ

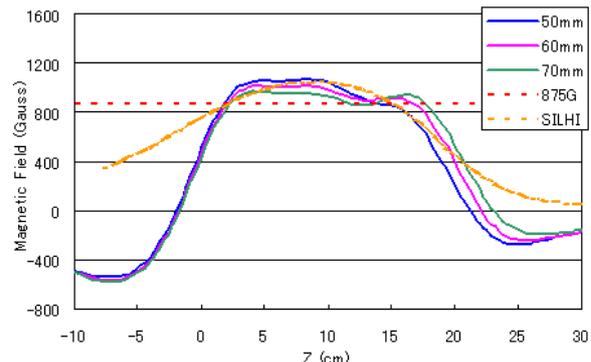


図3、最下流の磁石の厚さと磁場分布の関係

は50mm2つと60mm1つとした。

### 3.2 軸方向の磁場分布の最適化

次に (ii) を考える。磁場分布は3個のリング型永久磁石の相対的配置、永久磁石間に挿入する鉄板の厚みに大きく依存すると考えられる。永久磁石間の間隔、永久磁石間に挿入する鉄板の厚さを変数とし磁場計算を行なった。

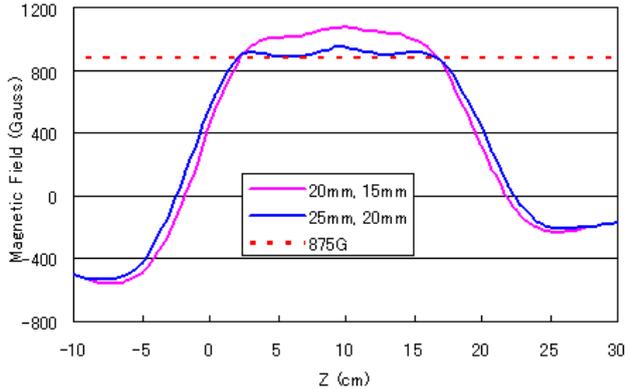


図4、永久磁石間の間隔と磁場分布の関係 (凡例は2箇所の間隔値を示す)

永久磁石間の間隔についての結果は図4のようになった。磁場の大きさが875Gauss以上の部分の磁場分布が比較的平坦であることから、永久磁石間の間隔は20mm・15mmを採用した。25mm・20mmについては磁場分布が平坦ではあるが全体を通して875Gaussに近すぎる。製造段階での磁石の磁化の不確定さにより全体が875Gaussより小さくなる可能性も含んでおり、今回は採用しなかった。

永久磁石間に挿入する鉄板の厚さについての結果は図5のようになった。鉄板を挿入しない場合が最もSILHIの磁場分布に近いので、永久磁石間に挿入する鉄板はなしとした。

### 3.3 引出領域の磁場の絶対値の低減

最後に (iii) を考える。引出領域の磁場分布は、引出領域の鉄材の厚さ、永久磁石と電極の間に挿入される鉄管の長さによって大きく依存すると考えられる。

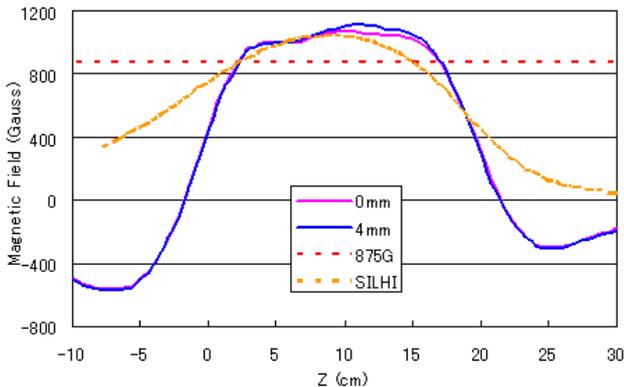


図5、永久磁石間に挿入する鉄板の厚みと磁場分布の関係 (凡例は厚みを示す)

鉄材の厚さ、鉄管の長さを変数とし、磁場計算を行

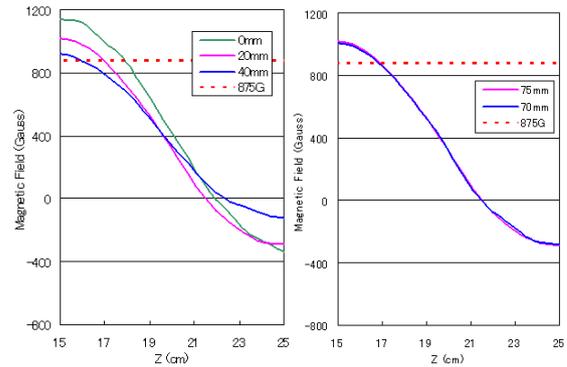


図6、引出領域についての磁場分布 (左：引出領域の鉄材の厚さについて、右：鉄板の長さについて)

なった。

引出領域の鉄材の厚さ、永久磁石と電極の間に挿入される鉄管の長さについての結果は図のようになった。引出領域の鉄材の厚さについては、電極の配置される  $19 \leq z \leq 21$  の領域において20mmの場合が磁場の大きさが最も低く、鉄材の厚さについては20mmが最適と考えられる。永久磁石と電極の間に挿入される鉄板の長さについては、ほぼ変化が見られなかった。そこでCEA/Saclayの永久磁石型イオン源に倣い75mmとした。

以上より、鉄材の厚さは20mm、鉄板の長さは75mmとした。

## 4. まとめと今後の計画

RCNPでは大強度の陽子ビームを生成するため2.45GHz永久磁石型大強度ECRイオン源の開発に着手し、イオン源に使用する磁石設計を行なった。その結果、これまでに示した磁石設計・配置が最適だと判断した。

今後、引出部設計、組立、磁場測定等を経て年内のビーム生成試験を目指す。

## 参考文献

- [1] J.-M. Lagniel, et al, "Status and new developments of the high intensity electron cyclotron resonance source light ion continuous wave, and pulsed mode (invited)", Review of Scientific Instruments 71, 2000
- [2] R.Gobin, et al, "Development of a permanent magnet light ion source at CEA/Saclay", Review of Scientific Instruments 77, 2006