

# 強力中性子源IFMIF用高プロトン比イオン源の開発

渡邊和弘<sup>1</sup>、伊賀 尚、森下卓俊、柏木美恵子、井上多加志、  
花田磨砂也、谷口正樹、今井 剛

日本原子力研究所 那珂研究所  
〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

## 概要

IFMIF用イオン源開発の一環として、アーク放電型イオン源とマイクロ波放電型イオン源の開発及び性能比較を行った。アーク放電型では、フィルター磁場と陰極形状の改良で目標のプロトン比90%を得た。マイクロ波放電型ではミラー磁場配位の調整や加速部でのグロー放電抑制などによりビームの安定化を行い、プロトン比92%を得た。また、両方式イオン源のエミッタンス(rms)を比較したところ、60keV、120mAのビームで多極磁場型が $0.27 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ であるのに対して、マイクロ波イオン源では $0.34 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ と幾分か大きいことが分かった。

## 1. はじめに

国際核融合材料照射施設(IFMIF)<sup>[1,2]</sup>は、40MeV、250mAの重陽子ビームを液体リチウムターゲットに照射して、材料試験のための中性子を発生させる加速器ベースの強力中性子源である。この装置にはエネルギー100keV、重陽子電流155mAで原子イオン組成比が90%以上、エミッタンスが $0.2 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (rms)、 $1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (90%)の高輝度イオン源が要求されている。

イオン源方式の候補として、アーク放電型とマイクロ波放電型がある。これらのイオン源でビーム性能要求値を目指すとともに、ビーム電流、プロトン比、エミッタンス、メンテナンス頻度等を比較して実機イオン源の方式選択が必要である<sup>[2-6]</sup>。

原研では、イオン源方式の選択に向けて、アーク放電型とマイクロ波放電型イオン源の開発と性能の比較を行っている<sup>[2,3,6]</sup>。今回は、特にプロトン比とエミッタンスに注目し、開発試験を実施した。

## 2. イオン源および実験装置

### 2.1 アーク放電型イオン源

図1にアーク放電型イオン源の断面図を示す。アークチャンバーは内径120mmで深さ122mmの無酸素銅製の円筒型である。カusp磁場を形成させるために円筒側面に永久磁石を10極配置した。円筒上面やプラズマ電極面にも磁石を配置しプラズマの閉じ込めを良くしている<sup>[3]</sup>。陰極として直径1.2mm、長さ60mmのヘアピン型タングステンフィラメント2本を用いている。

<sup>1</sup>E-mail: watanabe@naka.jaeri.go.jp

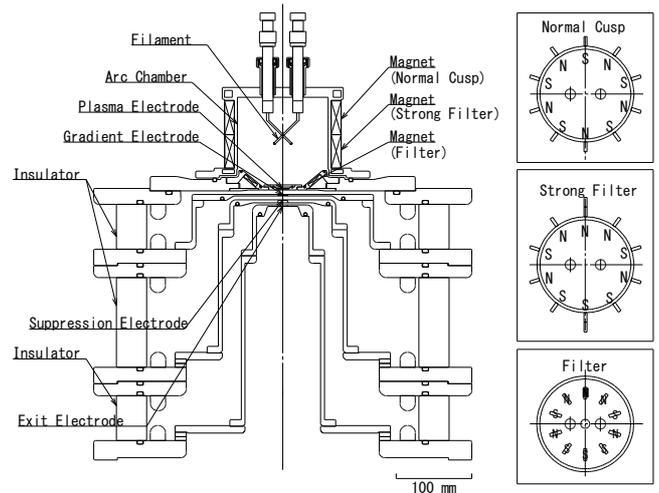


図1 アーク放電型イオン源

プロトン比のスケーリング則<sup>[7]</sup>では、プロトン比は、プラズマ体積と実効的なイオン損失面積の比の関数で示される。このスケーリングによると、本イオン源のような小型のイオン源では50%程度のプロトン比しか期待できない。そこで、プロトンの生成を促進させるために放電チャンバー内に高速電子を強く閉じ込めること、また、高速電子によるビーム引き出し部近傍での分子イオン生成を抑制することが必要であり、電子制御のためにフィルター磁場配位<sup>[8]</sup>を適用した。

イオンビームの引き出し電極系は、プラズマ電極、中間電極、逆流電子抑制のための減速電極そして接地電極から構成される2段加速系である。電極厚さはそれぞれ2mm、2mm、4mm、2mmであり、電極間隔は、プラズマ電極側から6.4mm、5.4mm、3.4mmである。ビーム引き出し孔は直径12mmの円孔である<sup>[3]</sup>。

### 2.2 マイクロ波放電型イオン源

マイクロ波イオン源の断面図を図2に示す。2.45GHz駆動のもので、放電チャンバーは無酸素銅製で直径148mm、深さ280mmの円筒型である。2個のソレノイドコイルによりチャンバー内部にミラー磁場を発生させる。磁場の分布や強度は、コイル電流の調節とコイル位置の調整で変えることができる。

2種のプラズマ源で生成されるイオンビームの特性を比較するために、イオン引き出し加速電極系については、アーク放電型イオン源に使用したものと同じ物を用いた。

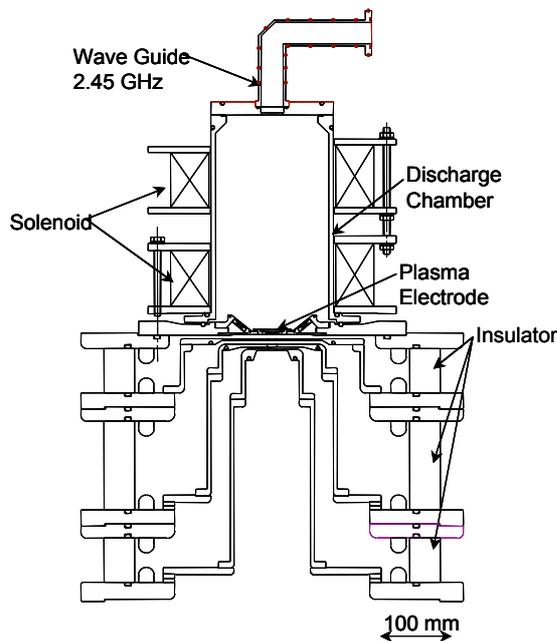
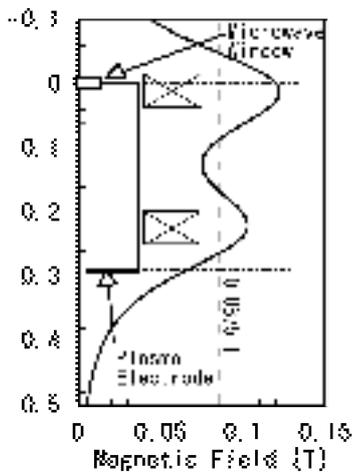


図2 マイクロ波放電型イオン源



Magnetic field distribution along the axis

図3 マイクロ波イオン源磁場分布

イオン源の実験は、イオン源テストスタンド(ITS-2M)で行った。実験では水素ガスを用い、ビームのエネルギーは試験装置の電圧の制限から60keVまでとした。イオン組成比は、 $H\alpha$ 光のドップラーシフト分光法で測定した。ビームのエミッタンスは、接地電極から約90cm下流のマルチチャンネルエミッタンススキャナで測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 $H^+$ イオンビーム電流

表1にIFMIFでの要求値及びアーク放電型イオン源とマイクロ波イオン源の一連の実験で得られたビーム特性の結果を示す。

引き出し加速電圧を一定に保ちビーム電流を変えてビーム発散角最小の電流値を測定した。60keVで双方のイオン源とも約130mAであり、軌道計算での設計値に良く一致した。実機のエネルギー100keVでの電流をChild Langmuir則で外挿すると $H^+$ で279mAとなり、 $D^+$ に換算して197mAとなる。実験ではアークパワー6kWまでとしたが、この範囲で電流はアークパワーに比例しており、パワーを増せば8kW程度で定格ビーム電流の生成が可能と考える。

マイクロ波イオン源では、放電パワー効率は多極磁場型イオン源に比べて約3.6倍高く、定格ビーム電流生成に2.3kWの小電力で良いことが分かった。アーク放電型でパワー効率が低いのは、次に述べるプロトン比改善のためにフィルター磁場を適用しているため、引き出し部のプラズマ密度が低いためである。

#### 3.2 $H^+$ プロトン比

小型のアーク放電(多極磁場)型イオン源では、プロトン比のスケーリング則から予想されるように50%程度の値しか期待できない。そこで、円筒側面のカスプ磁場を形成している永久磁石のビーム引き出し部側下半分の磁石極性をフィルター磁場配位に変えた(図1参照)。これによってプロトン比80%が得られた。

さらに、高速電子の引き出し部流入を抑制するために、直線状のフィラメント形状を45度に曲げて、フィラメント先端部の電子放出点をプラズマ電極から遠ざける形状を適用した。この陰極形状の変更により、プロトン比は約5%向上した。

これらに加えて、さらにプロトン比を高めるために、フィルター磁場を強化した。チェンバー周囲のフィルター配位の磁石中央列に磁石を追加し、磁石の高さを2倍にした。これによって、プロトン比は90%に達した。この場合のフィルター磁場強度は約580Gauss $\cdot$ cmである。カスプ磁場配位でのプロトン比実測値は58%程度であり、フィルター磁場の適用とフィラメント陰極形状の改良でプロトン比を30%以上も改善できた。

また、レート方程式によるイオン生成の解析からは、小型のイオン源におけるプロトン生成機構は、分子イオン $H_2^+$ からの解離反応が主要な生成機構であること、磁気フィルターによって高速電子のビーム引き出し部への流出が抑制され分子イオンの生成が抑えられるとともに、熱電子によって分子イオンの解離が促進され高いプロトン比が生成されることが明らかになった<sup>[9,10]</sup>。

マイクロ波イオン源においては、ソレノイドコイ

表1 IFMIF 要求値及びアーク放電型とマイクロ波イオン源の性能比較  
 ルからの磁場によって加速電極間でグロー放電が発

Ion source type	Requirement	Results	
	ARC or ECR	ARC	ECR
Beam particle	D <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
Beam energy	100 keV	60 keV	60 keV
Beam current/ input power	155 mA (200 mA H <sup>+</sup> )	134 mA / 5.4kW	128 mA / 1.5kW
Ion species	D <sup>+</sup> > 90 %	H <sup>+</sup> 90%	H <sup>+</sup> 92%
Pressure, Gas flow rate	-	1.4Pa, 0.028 Pam <sup>3</sup> /s	0.4Pa, 0.014 Pam <sup>3</sup> /s
Current noise	±1 %	-	-
Normalized rms emittance	0.2 π mm mrad	0.27	0.34
Normalized 90%emittance	1 π mm mrad	0.7	0.85
Duty factor	CW	Pulse 1-3 s	Pulse 1-3 s
Life time	300 h - 1000 h	-	-

生しやすいことが分かった。放電を抑制するために磁気シールドを兼ねた磁性体製の電極支持棒<sup>[11]</sup>を適用するとともに、支持棒間の排気を促進させるためのガス抜き穴を設けた。

ミラー磁場配位の調整も行った。図3に本実験で安定なビームを得た代表的な磁場分布を示す。二つのコイルの調整で、マイクロ波入射窓位置とプラズマ電極位置直前に共鳴磁場強度0.0875 Tを超える二つの山がある磁場配位である。

表1に示すように、マイクロ波イオン源は、アーク放電型に比べパワー効率3倍以上高く、また、低いガス圧力で動作するためガス流量も半分以下で済むことも分かった。

当初、マイクロ波共鳴による高速電子によってビーム引き出し部での分子イオン生成が活発に起こり、高いプロトン比の生成が阻止されることが懸念された。しかしながら実験では、マイクロ波イオン源においてプロトン比92%が得られた。

高プロトン比生成の理由について、チェンバー軸方向のプロブ測定の結果に基づき考察する。図3の磁場分布に示すように、マイクロ波入射窓側から約10cm内側に共鳴磁場領域がある。この領域における浮動電位は大きな変動が有るもの-15V以下の低い値を示している。これに対して、プラズマ電極直前での浮動電位は僅か-3V程度であることが分かった。即ち、高周波窓から入射されたマイクロ波は、チェンバー中央部で吸収されており、ビーム引き出し近傍で分子イオン生成を増加させるほどの高速電子は生じていないことが分かった。この様な理由によって、高いプロトン比が得られると考えられる。

### 3.3 エミッタンス

表1に規格化エミッタンスの比較を示す。アーク放電型イオン源からのビームの規格化rmsエミッタンスが0.27 π mm・mradであるのに対して、マイクロ波イオン源からのビームでは0.34 π mm・mradとなっ

た。実験では、ビーム引き出し加速電極系や測定系などイオン生成部以外は両者のイオン源で全く同じものを用いている。従って、エミッタンスの差は放電の種類による差であることが明らかになった。即ち、これらエミッタンスの違いは、イオン生成部におけるイオンの持つ初期エネルギー（イオン温度）<sup>[12]</sup>や引き出し面の安定性などの違いに起因するものと考えられる。

両者のビームをイオンビームの輝度として比較すると、アーク放電型イオン源からのビームは186mA/(mm・mrad)<sup>2</sup>、マイクロ波イオン源では112mA/(mm・mrad)<sup>2</sup>となり、マイクロ波イオン源は多極磁場型イオン源のビームの約60%程度である。

## 4. まとめ

IFMIFに向けてのアーク放電型イオン源とマイクロ波放電型イオン源の開発及び特性の比較を行った。プロトン比については、双方のイオン源で要求値90%以上を満足できた。一方、エミッタンスに関しては、アーク放電型とマイクロ波放電型の違いが明らかになったが、双方のイオン源共に要求値を満足する値には至っていない。今回の実験は60keVでの測定であり、エネルギー上昇に合わせてビーム電流を増すとエミッタンスは増加すると思われる。放電パラメータの詳細な調整や引き出し電極系の電圧比や形状の最適化等によりエミッタンスを下げるのが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] Office of Fusion Materials Research Promotion, "IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility Key Element Technology Phase Interim Report", JAERI-Tech 2002-022(March3,2002).
- [2] IFMIF International team, "IFMIF-KEP report",JAERI-Tech 2003-5(2003).
- [3] 伊賀尚、奥村義和、柏木美恵子、"IFMIF用高輝度イオン源の開発と初期実験結果"、JAERI-Tech 2001-028(2001).
- [4] R. Gobin, P-Y Beauvais, D. Bogard, et al., "Saclay high intensity light source status", EPAC2002,La villettePARIS 2002.
- [5] R. Hollinger, K. Volk, H Klein, Rev. Sci. Instrum., **73** (2) 1017-1029, 2002.
- [6] 渡辺和弘、小特集"強力中性子源IFMIFのためのイオン源開発"J.Plasma Fusion Res. **78**(6),535-540,2002.
- [7] Y. Okumura, H. Horiike, and K. Mizuhashi, Rev. Sci. Instrum. **5** (1), 1-7,1984.
- [8] 宮本直樹、関正和、金正倫計、他、"FNS用バケットイオン源の開発",JAERI-Tech 99-010(1999).
- [9] 森下卓俊、井上多加志、伊賀尚、他、"アーク放電型イオン源における高プロトン比プラズマ生成機構",JAERI-Tech 2003-007(2003).
- [10] T. Morishita, et al., to be submitted R.S.I.
- [11] J. Sherman, A. Arvin, L. Hansborough, et al., Rev. Sci. Instrum, **69**(2).1017-1019(1998).
- [12] N. Sakudo, Rev. Sci. Instrum. **69**(2), 825-830, 1998.

---