

## Production of intense beams of highly charged ions from 18GHz SCECR-IS at RCNP

Tetsuhiko Yorita<sup>1</sup>, Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Mitsuru Kibayashi,  
Shunpei Morinobu, Hiroyuki Okamura, Atsushi Tamii  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University  
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan 567-0047

### Abstract

An 18 GHz superconducting ECR ion source has been installed and developed recently in order to extend the variety and the intensity of ions at the RCNP coupled cyclotron facility. Production of several ions like O, N, Ar, Kr, etc. has been developed and some of them have already been used for user experiments. Further optimizations for each component like mirror filed, extraction electrode and bias probe have been done and more intense ion beams have been obtained especially for O, N and Ar.

## RCNPにおける18GHz SCECR-ISによる大強度多価イオンの生成

### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)のサイクロトロン施設では、平成16年度より入射AVFサイクロトロン施設の更新計画が実施されている。この計画は更なるビームの高品質化、高安定化及び大強度化を目指すもので、AVF加速高周波パワーの増強や高調波の導入によるAVFのフラットトップ化などが行われている。イオン源に関しては、ビーム強度の増強及び加速可能な重イオンビーム種の拡大のため、18GHz超伝導ECRイオン源が新規導入され、平成18

年度以降様々なイオンの生成試験やサイクロトロンへの入射、加速試験などの開発が進められている<sup>[1]</sup>。

このイオン源の概要は図1に示したとおりで、理研の18GHz超伝導ECRイオン源RAMSES<sup>[2]</sup>をベースに設計されており、RAMSES開発時の結果を参考に6極磁石の内径を90mmに、プラズマチェンバーの内径を80mmに拡大するなどの改良が加えられている。ミラーコイルは、4つのNbTi/Cuの超伝導コイルで構成され、上流1コイルと下流コイルは共通の電源より励磁する一方、上流2コイルを順方向、中心コイルを逆方向にそれぞれ励磁することでミラー磁場分

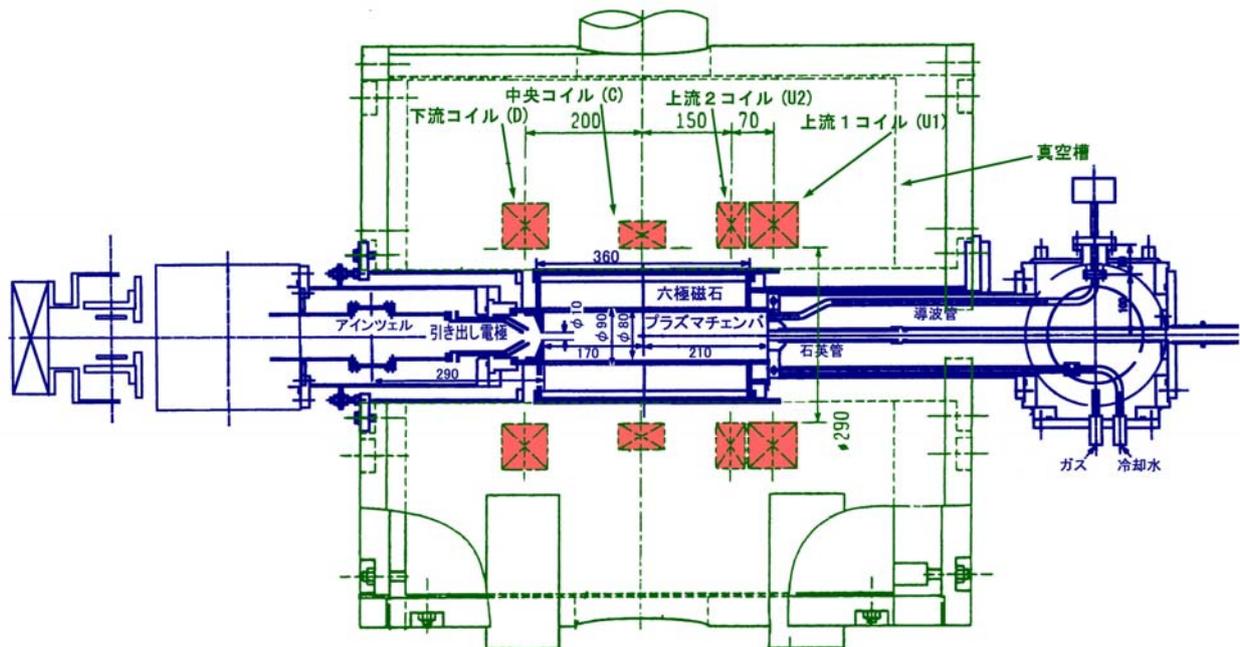


図1 : 18GHz 超伝導ECR

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

布を調整できるようになっている。ミラーコイル内部にはNEOMAX-44Hで構成された六極磁石が設置され、その内側にプラズマチェンバーが設置されている。プラズマチェンバー内は1 mm厚のアルミライナーが導入されている。プラズマチェンバーの中心軸上の上流側からはバイアスプローブが導入されている。

これまで $^{12}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ などのガスによるイオン生成やBイオンのMIVOCによる生成の開発が行われ、大強度の $^{16}\text{O}^{6+,5+}$ や $^{18}\text{O}^{6+}$ ,  $^{15}\text{N}^{6+}$ のビーム及び多価の $^{86}\text{Kr}^{23+,21+}$ のビーム等が既に実験ユーザーに供給されている。

ビームの更なる大強度化や安定化を目指し、超伝導コイル電流やガス流量などのパラメータの最適化の他、プラズマチェンバー内壁及び出口電極の素材の最適化やバイアスプローブの形状及び素材の見直しなどの開発が更にすすめられた。

## 2. イオン源の最適化

### 2.1 ミラー磁場及び引き出し磁場の最適化

ミラー磁場はこれまで各々のコイルの電流値は、上流1及び下流が36.3 A、中心が36.9 A、上流2が60.5 Aで、この値に対し数%の範囲で調整が行われてきた。これはRIKEN-RAMESSの参考値を元にえられたパラメータであった。この電流値により生成されるミラー磁場を図2の点線で示す。今回、大規模なパラメータサーチを行った結果、上流1及び下流が29.4 A、中心が30.3 A、上流2が59.6 A近傍に更なる最適値があることがわかった。新しいパラメータにより作られるミラー磁場は図2に実線で示されるとおりで、ミラー磁場の谷の部分の磁場は変化せず、下流側の山の部分のピーク値が1.14T から0.95Tへ

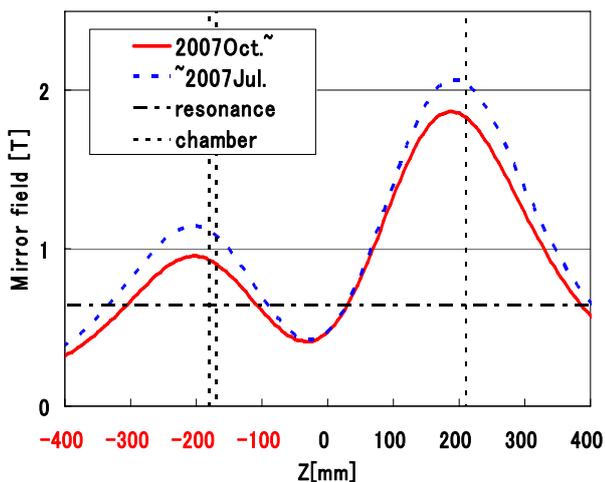


図2：ミラー磁場分布：青い点線が以前<sup>[1]</sup>の磁場、赤い実線が今回最適化された磁場を示す。いずれも電流値を基にした計算値。一点鎖線は18GHzの共鳴磁場を示す。黒い点線は+210mmの位置のものがプラズマチェンバーの上流端を、-170mmのものが以前<sup>[1]</sup>の出口電極位置、-179.5mmが今回の電極位置を示す

と変化している。この値はプラズマチェンバー表面、即ちビーム軸周り $r=40\text{mm}$ の円筒上での六極磁石が作る磁場の最大値 $\sim 1\text{T}$ に近い値であり、これによりビーム軸方向のプラズマ閉じ込めの力がビーム軸に対し鉛直方向の閉じ込め力と同等となったと考えられる。

また、プラズマチェンバー下流端の引き出し電極の材質をSUSからアルミに変更した。この変更は、素材をアルミとすることで、電極にプラズマ電子が当たった際に放出される2次電子の量が増大し、プラズマ密度が上がりイオンビーム量が増えることが期待されるため行われた。この際、電極位置も下流側へ9.5mm移動している。

これらの改良により表1のb)に示すとおり $^{40}\text{Ar}$ や $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{15}\text{N}$ イオンで軒並み3~4倍のビーム強度の増倍が実現した。

### 2.2 バイアスプローブの最適化

次にバイアスプローブの最適化を行った。バイアスプローブはこれまでSUS製で直径10mmの棒状のものを使用してきた。今回、プラズマチェンバー上流側での2次電子の増強とプラズマに対するバイアス電場の均一化を狙って、素材をアルミとし形状を直径50mm厚さ5mmのディスク形状としたプローブを導入した。

この改良の結果表1のc)に示すとおり $^{40}\text{Ar}$ では若干のビーム強度の増強が実現した。また $^{16}\text{O}$ では約1.5倍のビーム増強が実現した。

図3はバイアスプローブのディスク表面の位置と $^{40}\text{Ar}^{11+}$ の強度の関係を示したものであるが、 $z$ がミラー磁場が最大値となる辺りでビーム強度も最大となり、これは棒状のバイアスプローブの場合でも同様であった<sup>[1]</sup>。

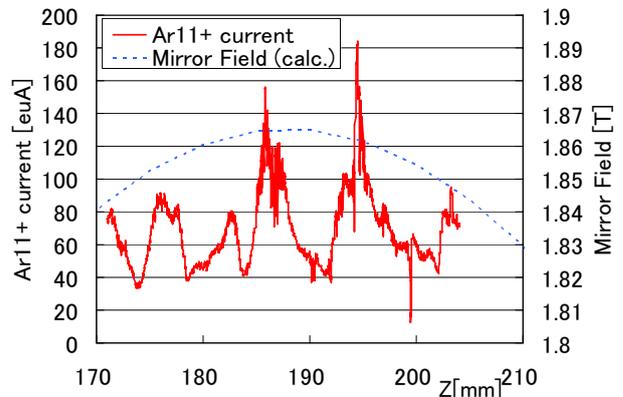


図3：バイアスプローブ下流面位置に対する $^{40}\text{Ar}^{11+}$ の電流値。点線はミラー磁場の値を示す。

## 4. まとめと今後

大阪大学RCNPではAVF更新の一環として、18GHz超

伝導ECRイオン源がビーム強度の増強及び加速可能な重イオンビームの拡大を目指し新規導入され、イオン生成試験開発が行われており、その結果、大電流化や重イオンビームの増強が実現し、ユーザー実験にも供給されてきた。

今回、更にミラー磁場の見直しや引き出し電極、バイアスプローブの改良などを行い $^{40}\text{Ar}$ や $^{18}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{15}\text{N}$ といったイオンの強度について大幅な増強が実現した。

一方、より重いイオンである $^{136}\text{Xe}$ については、図4や表1に示すように、30価より多価のビーム強度が現状では非常に弱い。そのため、より多くの多価ビーム生成を目指して、各種パラメータの最適化や各コンポーネントの見直しを引続き行っていく。

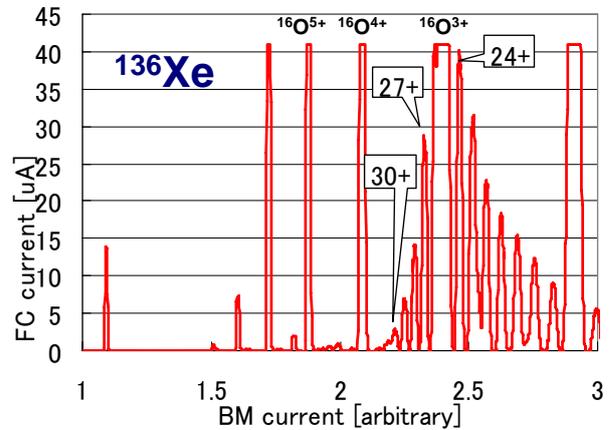


図4： $^{136}\text{Xe}$ イオン分布：RFは750W投入。サポートガスは酸素を使用。

### 参考文献

- [1] T. Yorita, et al., Review of Scientific Instruments79 (2008) 02A311  
[2] T. Nakagawa, et al., Review of Scientific Instruments75 (2004) 1394

a)

	2+	3+	4+	5+	6+	7+	Ext. Voltage	
$^{11}\text{B}$ ( $^4\text{He}$ )	1.3	4.1	9.3	*82			15kV	
$^{15}\text{N}$ ( $^4\text{He}$ )	71	85	114	158	*75	7	15kV	
$^{16}\text{O}$ ( $^4\text{He}$ )	136	190	—	264	*400	53	15kV	
$^{18}\text{O}$ ( $^4\text{He}$ )		76	140	142	*238	37	18kV	
	11+	12+	13+	14+				
$^{40}\text{Ar}$ ( $^{16}\text{O}$ )	*46	*27	*12	*39			12kV	
	20+	21+	22+	23+	24+	25+	26+	
$^{86}\text{Kr}$ ( $^{16}\text{O}$ )	32	*26	*21	*13	8.1	4.5	2.1	15kV

b)

	2+	3+	4+	5+	6+	7+	Ext. Voltage
$^{15}\text{N}$ ( $^4\text{He}$ )		167	477	*725	117		15kV
$^{16}\text{O}$ ( $^4\text{He}$ )	33	192	—	*463	421	30	15kV
$^{18}\text{O}$ ( $^4\text{He}$ )		88	235	475	*673	39	15kV
	11+	12+	13+	14+			
$^{40}\text{Ar}$ ( $^{16}\text{O}$ )	*165	70	17	3			15kV

c)

	2+	3+	4+	5+	6+	7+	Ext. Voltage	
$^{12}\text{C}$ ( $\text{CH}_4$ ) ( $^4\text{He}$ )		—	410	*115	—		15kV	
$^{16}\text{O}$ ( $^4\text{He}$ )	10	178	—	*779	517	27	15kV	
	11+	12+	13+	14+				
$^{40}\text{Ar}$ ( $^{16}\text{O}$ )	*188	87	28	7			15kV	
	22+	23+	24+	27+	28+	29+	30+	
$^{136}\text{Xe}$ ( $^{16}\text{O}$ )	22	32	40	29	*14	7	2.8	15kV

表1：各イオン種の各価数に対するイオン電流値(e $\mu$ A)。サポートガス種や引出電圧を併記する。\*印はビームテストの際にその価数に対して各パラメータの最適化が行われていることを示している： a) 以前[1]の電流値。b)ミラー磁場及び出口電極最適化後の電流値。c)バイアスプローブ最適化後の電流値。