

## Performance of multiply charge ions and RF mode in ECR ion source

T.Hattori, N.Hayashizaki, A.Takano, D.Nagae, S.Ueda, T.Ito, T.Hata, T.Isibashi, J.Murata and N.Matsumoto  
Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

### abstract

The performance of  $\text{Ar}^{9+}$  intensity was measured according to change of frequency from 9.7 to 11.7 GHz in in fixed magnetic field of HiECR ion source. We measured resonant frequencies of plasma chamber of HiECR ion source in condition of no plasma (zero current of mirror coil). The data of intensity of  $\text{Ar}^{9+}$  were related to measured resonant frequencies. Their resonant modes were checked with a 3D electromagnetic simulator (HFSS). As a result, it became clear that the performance of the ion source depends on electric-field distribution of the RF resonance mode.

## ECRイオン源における多価生成とRF共振モード

### 1. はじめに

Electron Cyclotron Resonance (ECR) イオン源は、多価重イオンビームをかなりの強度で長時間安定して供給できるという性質を持っている。これまでのECRイオン源の開発は、Fig.1の右向き矢印のように電子密度・閉じ込め時間の増加から多価イオン生成を狙ってきた<sup>[1-3]</sup>。この場合、ウランなどイオン化エネルギーの高いイオンを全電離状態にすることは非常に困難である。そこで、周波数変調 (FM: Frequency Modulation) 型陽子サイクロトロン加速の原理<sup>[4]</sup>として知られているFM加速の方式を、電子加速のECRイオン源に応用することを考え、FM電子加速型ECRイオン源と呼ぶことにした。このイオン源では、Fig.1の上向き矢印のように電子温度の増加から多価イオン生成を狙うことになる。FM加速の方式以外にも電子加速は可能であるが、このイオン源の開発に成功すれば $\text{U}^{92+}$ 等のイオン化エネルギーの高い多価重イオンの生成が可能になる。

FM電子加速型ECRイオン源開発のなかで、マイクロ波周波数をスイープすると多価イオンの生成強度やマイクロ波電力が大きく変動することが分かった。そして、現在の信号発生器の性能では、マイクロ波 (10~15GHz領域) 領域において周波数を下げなが

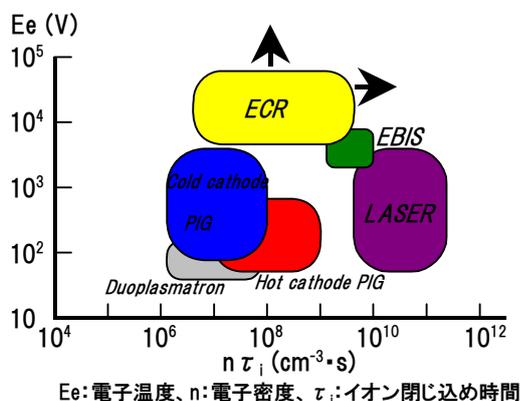


Fig.1 ローソン図

らスイープすることができなかつたため、研究内容をこの未解明な物理現象を解明することに変更した。

### 2. FM電子加速型ECRイオン源と実験方法

FM電子加速ECRイオン源の概念図をFig.2に示す。基本的な構造は一般的なECRイオン源であるが、2つのマイクロ波導入口を持ち、シンセサイズ型信号発生器 (SSG: Synthesized Signal Generator)、マイクロ波増幅器から構成される。このFM電子加速型ECRイオン源の、CWマイクロ波導入口からは一定のCWのマイクロ波を入力し、FMマイクロ波の導入口からは9.7~11.7GHzの範囲で周波数を変化させたマイクロ波を入力し、 $\text{Ar}^{9+}$ イオンの電流量を分析後に測定した。また補助データとして、 $\text{Ar}^{3+}$ 、 $\text{Ar}^{6+}$ も測定した。なお、真空度、アインツェルレンズの調整は各価数ごとにおこなった。

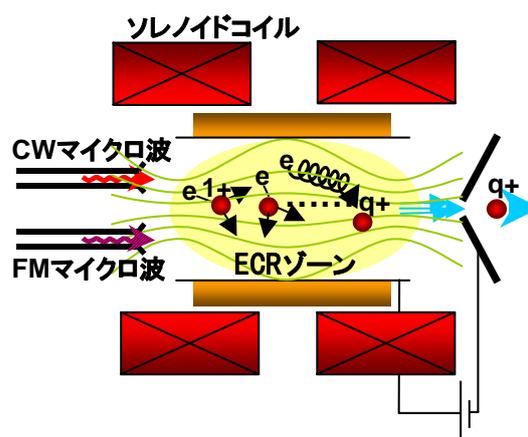


Fig.2 FM電子加速型ECRイオン源の概念図

### 3. ECRイオン源プラズマチェンバーの共振特性と多価イオン生成特性の測定

プラズマチェンバーを共振空洞として考え、プラズマを発生しない状態で共振周波数を少しずつ変え

ながら、CWマイクロ波導入口から100Wのマイクロ波を入力し、FMマイクロ波導入口をピックアップポートとして検出されるマイクロ波量を記録した。すなわち、プラズマチェンバー中の共振強度を指針とした。周波数の変化範囲は9.7~11.7GHzとし、共振特性を測定した。また、あわせてプラズマを発生させた場合のArイオンの価数を測定し、各周波数におけるビーム強度を測定した。すると多くの共振ピークが検出され、その強度にも大きな差があることが分かった。Fig. 3にその比較データを示す。そこで、共振が強く電流量が少ない場合のスペクトル①と、逆の場合のスペクトル②を特徴的なピークと考え、電磁場数値解析コードHFSSによる3次元電磁場シミュレーションをおこなった。

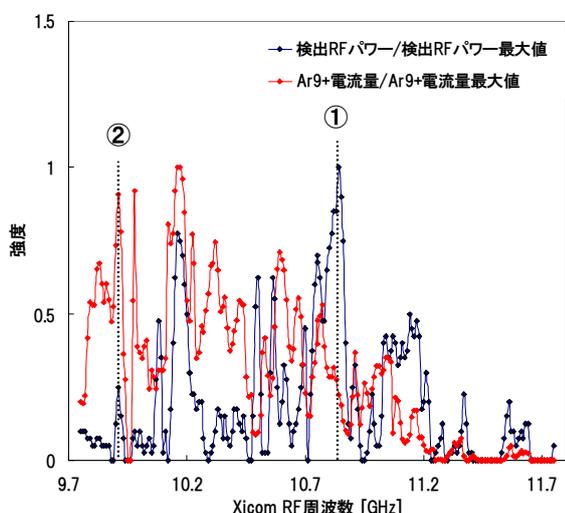


Fig.3 共振周波数とAr<sup>9+</sup>電流量周波数特性比較

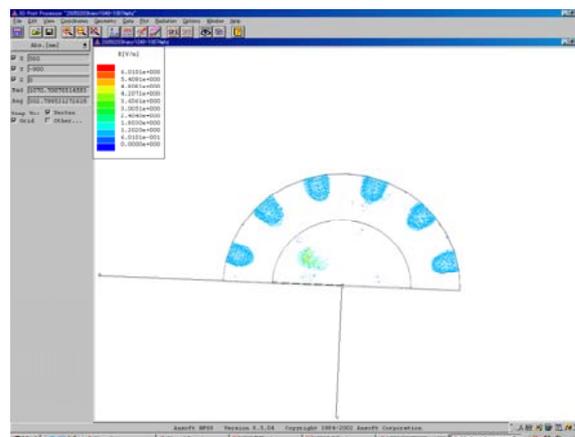
#### 4. 測定値とシミュレーションの比較

Fig. 3に示した特徴的な①と②のピークについて、測定データと3次元電磁場シミュレーションの結果を以下に示す。

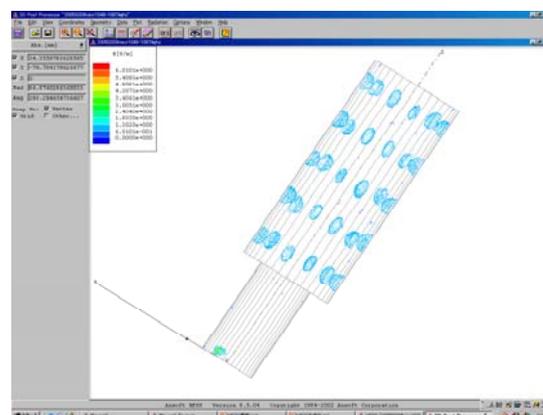
##### ①のピークの比較

検出RFのピーク周波数：10.84 GHz  
電流量のピーク周波数：10.82 GHz  
HFSSの計算結果：10.87 GHz  
共振モード：上流チェンバー なし  
下流チェンバー TE<sub>615</sub>

Fig. 4から第1ECRゾーンが存在しないことがわかる。電場は下流チェンバーの中心から28mm付近に発生している。磁場測定の結果から、第2ECRゾーンの外周は中心から20mm程度で発生している。よって、第2ECRゾーンと共振電場とが重なっていないことがわかる。これにより、第2ECRゾーンも存在しないと考えられる。これらの理由により、電子が加速されていないと予想することができ、多価イオン生成がなされていないと考えられる。



下流チェンバー



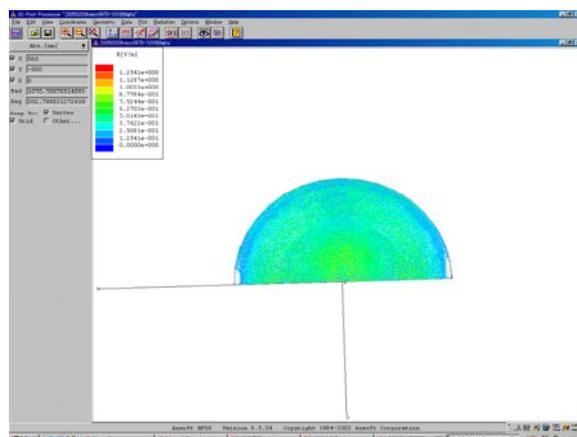
チェンバー断面

Fig.4 HFSSによる電場分布

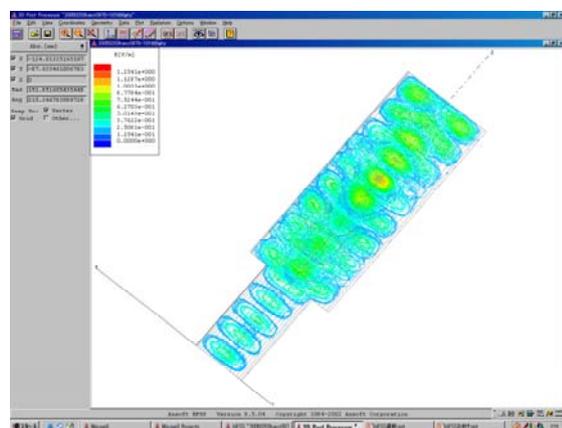
##### ②のピークの比較

検出RFのピーク周波数：9.91 GHz  
電流量のピーク周波数：9.91 GHz  
HFSSの計算結果：9.93 GHz  
共振モード：上流チェンバー TE<sub>115</sub>  
下流チェンバー TE<sub>128</sub>

Fig. 5より、第1ECRゾーンは存在している。また、共振電場はチェンバー全体に発生しているため第2ECRゾーンも存在していると考えられる。TEモードで共振しているため、電場は軸方向に対して垂直に発生している。電子の運動に支配的なミラー磁場は軸方向に発生している。そのため、ローレンツ力により効率よくECRが起きていると考えられる。よって、多価イオンの生成効率が非常に高く電流量が多く検出されたと考えられる。



下流チェンバー



チェンバー断面

Fig.5 HFSSによる電場分布

## 5. まとめ

電流量の周波数特性は、共振モードと関係していることがわかった。以下に、多価イオン生成条件を記す。

- ・第1ECRゾーンが必要
- ・ECRゾーンを覆うように共振電場が発生することが必要
- ・軸方向に対して垂直な共振電場が必要

## 参考文献

- [1] T.Hattori, T.Katayose, et al., Proc.of the 12th International Workshop on ECR Ion Source, INS-J-182(1995)277-280
- [2] T.Katayose, T.Hattori, et al., International Workshop on ECR Ion Source, INS-J-182(1995)281-283
- [3] T.Hattori, T.Katayose, et al., Rev. Sci. Instrum., 67(1996)1186-1188
- [4] J. Livingood "Cyclic Particle Accelerators" Argonne National Laboratory, D.VAN NOSTRAND COMPANY, INC.