

## RCNPにおける Fe 及び Ni ビームの開発 DEVELOPMENT FOR FE AND NI BEAM AT RCNP

依田 哲彦<sup>#,A)</sup>, 福田 光宏<sup>A)</sup>, 神田 浩樹<sup>A)</sup>, 畑中 吉治<sup>A)</sup>, 安田 裕介<sup>A)</sup>,  
鎌倉 恵太<sup>A)</sup>, 原 周平<sup>A)</sup>, 山野下<sup>A)</sup> 莉奈<sup>A)</sup>, Koay HuiWen<sup>A)</sup>  
Tetsuhiko Yorita<sup>#,A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>A)</sup>, Yuusuke Yasuda<sup>A)</sup>,  
Keita Kamakura<sup>A)</sup>, Shuhei Hara<sup>A)</sup>, Rina Yamanoshita<sup>A)</sup>, Huiwen Koay<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Japan

### Abstract

In order to provide the metal beam like Fe and Ni, the introducing system for MIVOC method has been installed to 18GHz Superconducting ECR ion source. The MIVOC stands for “Metal Ion from Volatile Compound” and the metallo-organic compound with high vapor pressure like metallocene is used for this method. The MIVOC system has temperature controller to control the vapor pressure of the metallocene. For the Ni and Fe beam, nickelocene and ferrocene has been used. With this system, 56Fe13+ beam with 25 euA have been obtained successfully.

### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、2005年に 18GHz 超伝導 ECR イオン源を導入して以降、Xe までの幅広い種類の重粒子ビームの供給を行ってきた[1]。Xe, Kr, Ar などのイオン種はガスをプラズマに導入することによりビーム生成される。一方、Fe, Ni など単体や化合物のガスが存在しないイオン種については、蒸気圧の高い有機化合物を利用したいわゆる MIVOC 法によりビーム生成される。RCNPでは Fe, Ni の MIVOC 法によるビーム供給を目指して、Fe, Ni を含有する金属有機化合物であるフェロセン、ニッケロセンを温度管理しながらプラズマチェンバーへ導入するシステムの開発を続けてきた。今回、特にフェロセン、ニッケロセンを封入する容器とイオン源のプラズマチェンバーとの間の経路の温度勾配を任意に制御できるよう、フェロセン、ニッケロセン蒸気導入経路を細かい区間に分けてそれぞれ独立に温度コントロールするシステムを構築した。

### 2. MIVOC 法

MIVOC とは“Metal Ion from Volatile Compound”の略であり、蒸気圧の高い有機化合物などを真空中で昇華させガスとしてプラズマチェンバーに導入することにより、

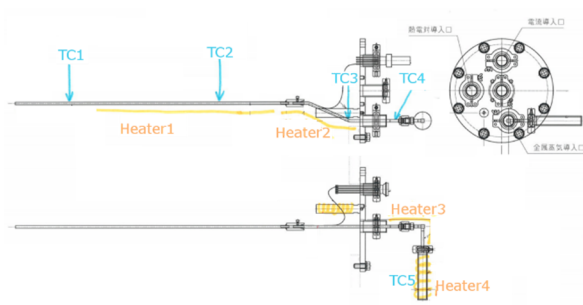


Figure 1: Structural drawing of metalocene introducing system.

安定にビームを生成する方法である。金属ビームについては金属原子と二つのシクロペンタジニル基が化合した状態である、メタロセンを使用することで、金属イオンビームの安定生成が使われることが多い。この MIVOC 法は、特にスパッタ法などに比べ非常に安定なビームが得られるため、近年広く普及している[2,3]。Ni、Fe ビーム生成のためにはニッケロセン Ni(C5H5)2、フェロセン Fe(C5H5)2 が用いられる。いずれの物質も室温において 0.6Pa 前後の蒸気圧を持ち[4]、また、温度上昇に伴い蒸気圧も上昇する性質を持つ。

### 3. 18GHz 超伝導 ECR イオン源の改造

今回、既存の 18GHz 超伝導 ECR イオン源にメタロセン導入システムを追加するという改造を行い Fe、Ni ビーム生成に対応した。超伝導 ECR の概要については[1]を参考にされたい。Figure 1 に今回追加したメタロセン導入システムの概要を示す。メタロセンを封入する容器からイオン源のプラズマチェンバーまで直接 SUS 管でつなぎ、そのメタロセン蒸気の導入経路の温度勾配を任意に制御できるよう、真空側で3つ、大気側で2つ、合計5つの区間に分けてそれぞれ独立に温度コントロールするシステムを構築した。ただし、一番プラズマチェンバーに近い

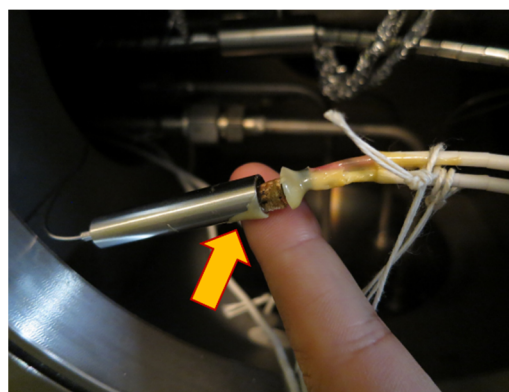


Figure 2: Sheathed thermocouple has been broken due to high heat load.

<sup>#</sup> yorita@rcnp.osaka-u.ac.jp

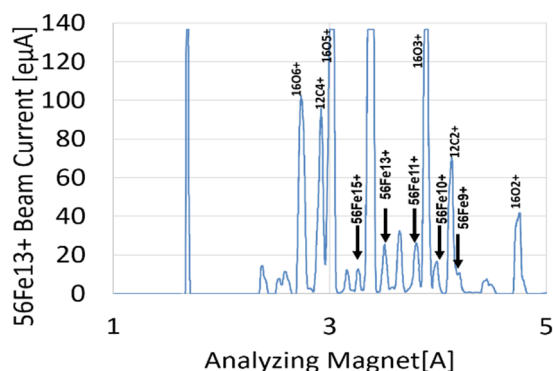


Figure 3: Typical Spectrum of  $^{56}\text{Fe}$ . Some peaks of carbon and hydrogen from ferrocene are seen. Oxygen peaks of support gas are also seen.

領域はプラズマチェンバーからの熱流入が一番大きいのでヒーターは付けず、温度の監視のみ行った。この温度制御により、導入経路の温度がニッケロセン、フェロセンの試料容器の温度より常に高い状態を作り上げることができ、その結果、導入途中で試料の蒸気が再固化することを防ぐことなどができ、長期的ビーム安定性を実現できると期待される。先述の通り、導入経路の先端部分はプラズマチェンバーからの熱流入が大きい、イオン源を実際に運転してみて200度程度の温度になることがわかった。このため、当初温度モニターとして採用したシース熱伝対が熱で破損するという事故があった(Figure 2)。この対策として、シース熱伝対をカプトンチューブで絶縁したアルメルワイヤ、クロメルワイヤに置き換え、この結果問題なく温度モニターができるようになった。

#### 4. ビームテスト

試料容器にフェロセンを導入しビームテストを行った。導入した試料の量は1gと3gの二通りで、 $^{56}\text{Fe}$ の13価及び15価に注視して調整を行った。典型的な生成イオンスペクトルをFigure 3に示す。超伝導 ECR の各パラメータの最適化を行い、メタロセン容器の温度を45°Cとし、サポートガスとして酸素を導入し、Figure 4の実線で示されるミラー磁場を形成した場合に $^{56}\text{Fe}^{13+}$ について25e $\mu$ Aのビームが得られた。SC-ECRのミラー磁場とビーム強度の関係についてはFigure 4の破線で示されるミラー磁場も試したが、ECRゾーンを広くした場合、あるいは出口方

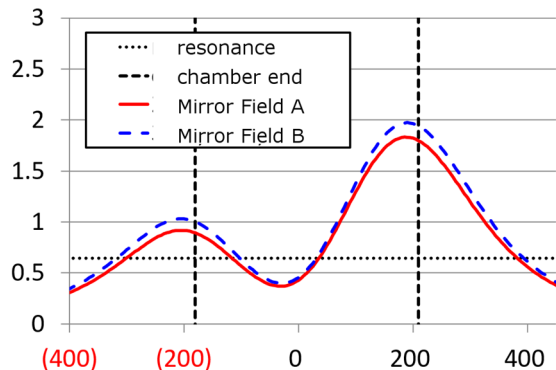


Figure 4: Mirror field distributions for  $^{56}\text{Fe}$  beam.

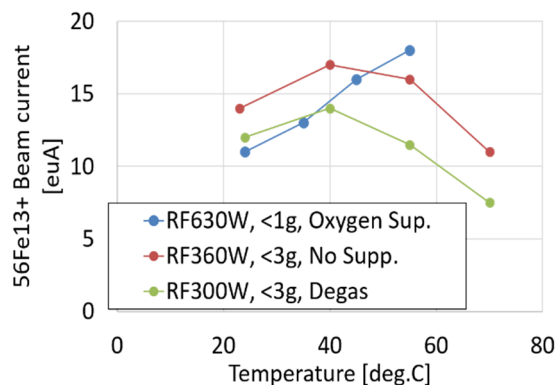


Figure 5: Temperature dependence of  $^{56}\text{Fe}^{13+}$  beam current. The temperature is that of TC5 on metallocene chamber shown in Figure 1.

向の閉じ込め磁場をゆるくした場合に相当する実線で示されるミラー磁場の方が、ビーム電流が1.5倍程度大きくなること分かった。メタロセン導入システムのメタロセン容器の温度はFigure 1のTC5で示された熱電対でモニターされるが、ヒーターによってこの温度を制御しビーム強度の容器温度依存性も調べた。メタロセン容器温度を上げるとメタロセンの蒸気圧が上がるためFigure 5に示す通り $^{56}\text{Fe}^{13+}$ ビーム電流は増える傾向にある。ただし300-360W程度のRFパワーではヒーター温度40°Cでビーム電流が頭打ちになる。このときサポートガス無しの場合にビーム電流が大きくなったため、サポートガスは使用していない。なお、300WのRFパワーのときの運転時はチェンバーからの脱ガスが多めだった。一方RF630W導入時は、より高いヒーター温度、即ち高いメタロセン蒸気圧でもビームがヒーター温度に比して増え続けることが分かった。これらの現象は、大きなRFパワーが入っているときはプラズマ温度が高くなり、多価のイオンにもエネルギーが十分分配されていることが示されていると考えられる。Figure 6を見てもわかる通り、630W入っている場合に高いプラズマチェンバーの圧力でも多価のビームが出ているわけである。Figure 7で示したプラズマチェンバーから放出される全電流であるドレンカレントと $^{56}\text{Fe}^{13+}$ の電流との相関を見ても、630W入っているときは多価ビームにRFパワーが分配されているのがわかる。よって、大きなRFパワーと高いヒーター温度による高

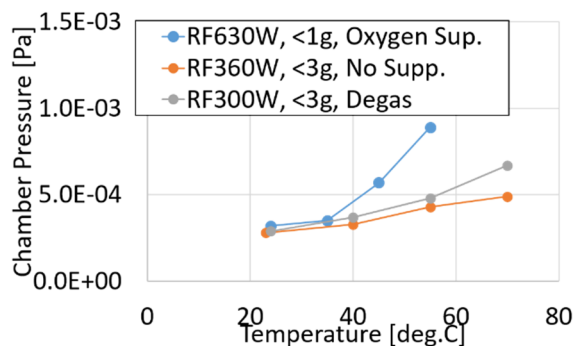


Figure 6: Temperature dependence of plasma chamber pressure.

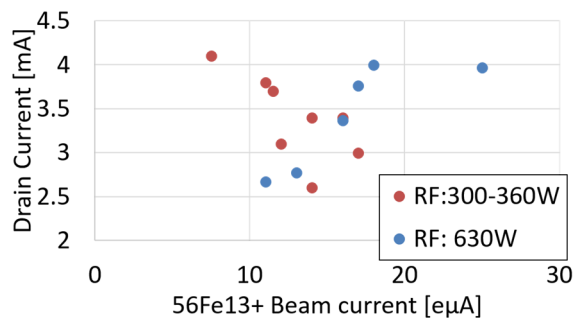


Figure 7: Correlation between  $^{56}\text{Fe}^{13+}$  beam current and total drain current.

いメタロセン蒸気圧により、更なるビーム強度が期待できるといえる。

## 5. まとめ

今回、Ni, Feビームの供給を目指し、温度制御可能なメタロセン導入システムを既存の 18GHz 超伝導 ECR に導入しフェロセンを使って Fe ビームの生成試験を行った。その結果、最大で  $25\text{e}\mu\text{A}$  の  $^{56}\text{Fe}^{13+}$ ビームが生成された。ビーム生成についていくつかの RF パワーとメタロセン容器温度制御、ミラー磁場などのパラメータについて詳細に調べた結果、より大きな RF パワーとより高いメタロセン蒸気圧により、更なるビーム強度が期待される。今後、ハイパワーの高周波の導入ができるよう耐熱などの対応を施し、更に強度の高い金属ビームの生成を目指す。

## 参考文献

- [1] T. Yorita *et al.*, “Production of highly charged heavy ions by 18 GHz superconducting electron cyclotron resonance at Research Center for Nuclear Physics”, *Review of Scientific Instruments*. 81, 02A332 (2010).
- [2] J. Arje *et al.*, “Status report of the JYFL-ECR ion sources”, *Proceedings of the 14th International Workshop on ECR Sources, ECRIS99*.
- [3] M. Kidera *et al.*, “Production of intense  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{64}\text{Ni}$  beam using the MIVOC method and new analyzing system of RIKEN 18 GHz ECRIS”, *Review of Scientific Instruments*. 75 (2004) 1473.
- [4] Luis Alfonso Torres-Gómez *et al.*, “Vapour pressures and enthalpies of sublimation of ferrocene, cobaltocene and nickelocene”, *Thermochimica Acta.*, Vol.124, 18 Feb. 1988, P179-183.