

DEVELOPMENT OF THE HEAVY ION INJECTOR IN THE HIGH VOLTAGE TERMINAL

Makoto Matsuda¹, Takamitsu Nakanoya, Kenichi Kutsukake, Susumu Hanashima, Suehiro Takeuchi
JAEA (Tokai), Nuclear Science Research Institute, Tandem Accelerator Section
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

Abstract

We are proceeding with a plan to replace the present permanent magnet type 10GHz ECR ion source by the 14.5 GHz higher performance one in order to increase the beam energy and beam intensity from the in-terminal ECR ion source. To install the new ion source, a new heavy ion injector was developed and it was installed in the low-energy side of the high voltage terminal. This reason is to secure built-in space of the 14.5GHz ECR ion source and to optimize an incident beam condition to the main accelerating tube by using the 180° bending magnet for the analysis of the beam from the ion source.

高電圧端子内重イオン入射装置の開発

1. はじめに

タンデム加速器は負イオンを正の高電圧端子に向けて加速し端子内で炭素薄膜により電子を剥ぎ取って正の多価イオンに荷電変換し、再び接地電位に向けて加速することで効率のよい加速を行っている。しかし、荷電変換に炭素薄膜を使用するために薄膜の消耗が激しく、大電流の重イオンビーム加速には適していない。したがって炭素薄膜を用いない加速方式でもビーム提供を可能にするため、高電圧端子内に永久磁石型電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源を設置し、生成した正の多価イオンを直接接地電位に向けて加速する重イオン入射装置の開発を行っている。さらに炭素薄膜通過後よりも高い電荷のイオンをECRイオン源により生成することでエネルギー増強も可能である。

現在設置されているイオン源は10GHzのRF周波数で動作する永久磁石型ECRイオン源 (Nanogan) である。これにより加速されたイオンビームと従来の負イオン源からの場合との実際に利用されたビーム電流の比較を図1に示す。軽い質量域では約2倍、重質量域では約10倍に増強されたことがわかる。しかしながら図2に示すようにNanoganから引き出されるイオンの電荷はストリッパフォイルによる荷電変換後の電荷に及ばないために、ビームエネルギーに関してはXeビームを除き十分な増強ができていない。図2中の青線は14.5GHzのRF周波数で動作する永久磁石型ECRイオン源 (SuperNanogan) により予想される電荷を示したもので、現在使用しているNanogan (赤線) より大幅なエネルギー増強が期待できる。したがって我々は計画の第2段階として、現在のNanoganをSuperNanoganに置き換える計画を進めている。

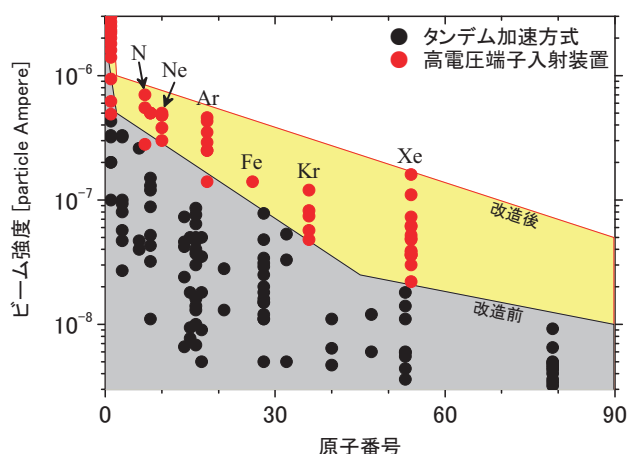


図1 高電圧端子内イオン源から得られるビーム強度

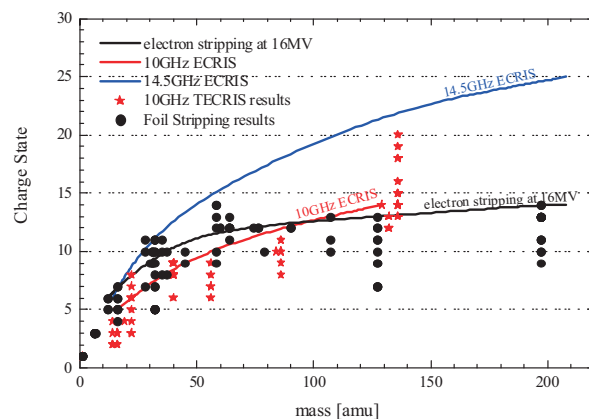


図2 高電圧端子での電荷状態

¹ E-mail: Makoto.matsuda@jaea.go.jp

2. 高電圧端子内重イオン入射装置の移設

Nanoganはφ13cm×22cmのサイズで重量は約25kgの非常に小型で軽量のイオン源であり、高電圧端子の高エネルギー側にある入射装置に設置されていた。一方、SuperNanoganは永久磁石部だけでφ38cm×40cmのサイズであり、その重量は約150kgにもなる。従ってこれまでの入射装置に設置することは不可能であるため、設置空間の確保と後述するビーム分析系の強化のために低エネルギー側に設置する新たな入射装置を開発した。この配置とするためにガストリッパー装置を撤去し、その部分に入射90°偏向電磁石を配置し、図3に示すように新たなイオン源入射装置を設置した。ビーム光学系の確認などのために、まずは使用実績のあるNanoganを設置し、入射系が予定通り動作することを確認した。当初の計画では今年度中にイオン源をSuperNanoganに置き換える予定であったが、イオン源駆動用のRF増幅器の故障により設置を延期している。

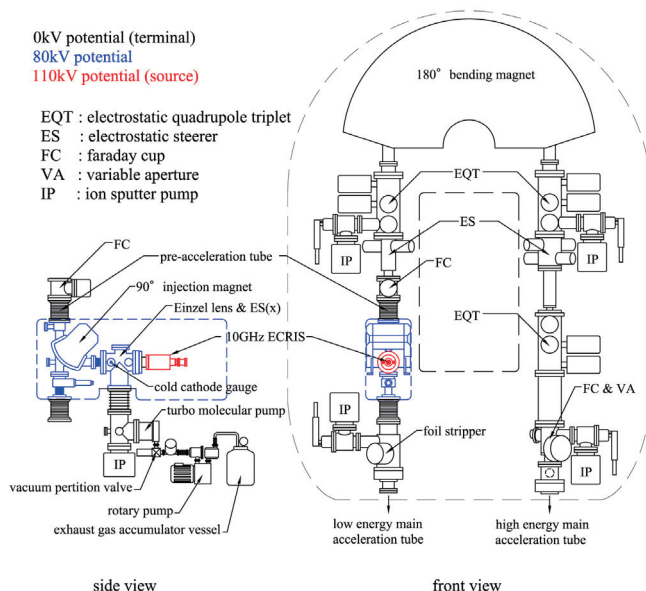


図3 新しい高電圧端子内入射装置の配置

ストリッパーフォイル側に水平に置かれたECRイオン源から最大30kVで引き出されたイオンビームはアインツェルレンズで収束され、入射90°偏向電磁石で上方へ偏向され大まかに電荷、質量を選別される。次に80kVの前段加速を受けて180°偏向電磁石に入射され、必要な質量、電荷のイオンが選別される。180°偏向電磁石は $M/\Delta M \leq 140$ 、 $ME/q^2 = 55$ であるのでイオン源からのビームを分析するには十分である。静電三連四重極レンズが180°偏向電磁石への入射前に1つ、出射後に2つ設置されており、静電ステアラーも利用可能なので、高エネルギー側加速管への入射ビームの調整が旧配置より容易となった。

この配置とすることで十分な磁場強度と分解能を有する180°偏向電磁石をビーム分析に利用することにより、二つの大きな利点がある。一つは高エネルギー側加速管への入射前にイオンビームの精度よ

い分析が可能となったことである。二つめは加速管の通過率に大きく影響する前段加速電圧を下げることなく電荷質量比の大きなイオンの加速が可能になった。それにより低電荷のイオンを引き出すことで端子電圧を極端に下げることなく、非常に低エネルギーのビームが加速可能となった。実際に Ne^+ ;12MeV、 Xe^{7+} ;100MeVなどのビームが安定に利用され、ガストリッパーを凌ぐ性能を得ている。

移設に併せ排気系のロータリーポンプを直接高压ガス中に設置できるように耐圧仕様の物を開発した。この改良によりフォアライン真空度が向上しターボ分子ポンプ停止時の真空悪化を約1桁低く抑えることができた。ガス流量のモニタのために真空ゲージも新たに設置した。

3. 14.5GHz ECRイオン源のビーム生成試験

永久磁石型ECRイオン源の主な運転パラメータは、ソースガス流量、RF電力、バイアス電圧の3点に簡略化される。我々は高多価イオンを引き出すためにガスマキシング法を採用している。ガスマキシング法とは目的とするイオンとは別の軽いイオンを同時にプラズマ中に生成することにより、目的のイオンが軽いイオンとの衝突により冷却され、イオンの閉じ込め時間を長くする方法であり、多価イオン生成に有効な手法である。イオン源の動作試験ではそれらのパラメータを変化させて、各パラメータの最適化を図った。高電圧端子への設置前に、各運転パラメータの変化により生成されるイオンビームがどのように振舞うかをあらかじめ確認しておくことは、イオン源の安定運転に重要である。我々はイオン源運転の簡略化のためにソースガスとして目的とするイオンガスと酸素または窒素との混合ガスを用いており、その混合比は試験により最適化してある。

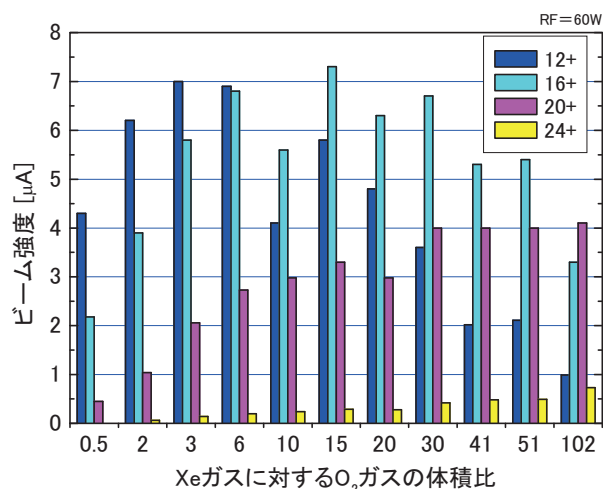


図4 ソースガス混合比とビーム強度及び電荷分布

図4にXeとO₂ガスの混合比を変えながら行った多価イオンの生成試験の結果を示す。イオン源の調整は高多価イオンのビーム量が最大となるように最適化を行った。O₂ガスが増えるに伴い多価イオンの

20+, 24+が増えていき、低電荷の12+は減っていくことがわかる。ここで我々は多様な電荷のイオンを数 μA のビームとして取り出したいのでここでは混合比 ($\text{Xe}:\text{O}_2=1:51$) を選択した。以下はこの混合比での試験結果である。

図5にRF出力、バイアス電圧を固定しガス流量(真空度)を変化させたときの結果を示す。4~ $6 \times 10^{-3} \text{Pa}$ の特定の真空領域で強いビーム強度が得られ、領域外では激減している。RF出力とビーム強度の関係は図6に示すようになり、RF出力を上げるに伴い高多価イオンの強度が増していくことがわかる。現状では高電圧端子でのイオン源冷却を強制空冷 (SF_6) 方式で行っているためRF出力は200Wまでを上限としているが、出力を上げることでさらに高多価のイオン生成が可能となることを示唆している。各種希ガスイオンの生成試験の結果、多価イオンの生成のためのガスの混合比およびガス流量は現在使用している10GHzのイオン源 (Nanogan) とほぼ同じ結果であった。

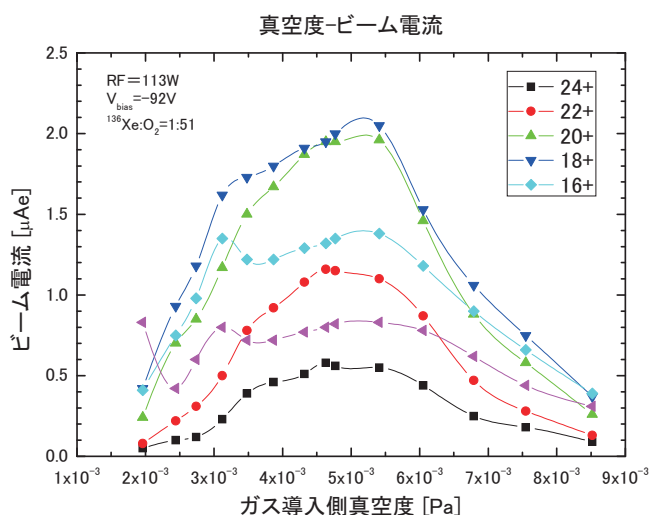


図5 真空度 (ガス流量) とビーム強度

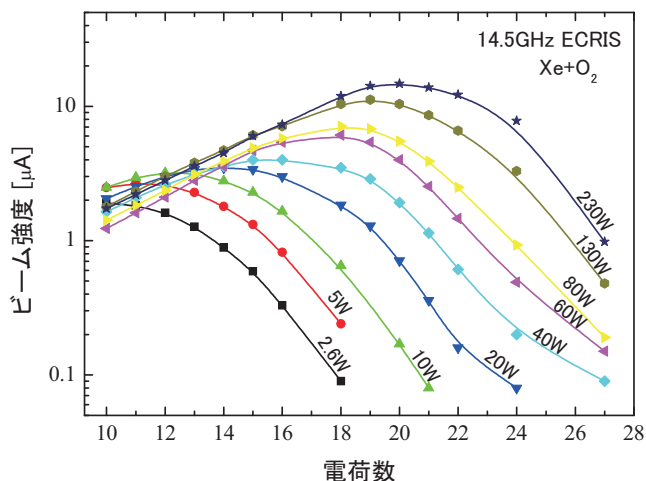


図6 RF出力とビーム強度

表1にテストベンチでのSuperNanoganのビーム生成試験で得られた各種イオンのビーム電流を示す。ほぼイオン源のスペック通りのイオン生成に成功し、図2に示した通りの多価イオン生成が確認できた。例えばXeイオンにおいては $1\mu\text{A}$ 引き出せる最高電荷は27+で現在の約2倍となり、同じ電荷の場合、ビーム電流値は10倍以上となっている。したがってイオン源の更新を行うことで期待されるビームエネルギーは約2倍となり、ビーム電流に関してはタンデム加速器の加速管のビーム負荷の制約があるが約2倍から10倍に増強されることが期待できる。例えばXe²⁴⁺を加速する場合で450MeV、 $5\mu\text{A}$ のビームが得られることが予想される。さらにタンデム加速器の後段ブースターを利用することで数MeV~1 GeVの広範なエネルギー領域で任意のエネルギーのビームが得られる事となる。

表1 14.5GHz ECRイオン源から生成されるビーム強度

q	4	5	6	7	8	9	11	12	RF出力<200W Xe以外はガス流量固定 高電圧端子内設置を模擬 単位:[μA]				
Ne	31	26	13	3.6	0.8								
Ar	→	→	→	→	21	13	2.2	0.5					
q	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	24	27
Kr	9.3	9.6	9.3	5.1	4.7	1.4	1.1	0.4					
Xe	→	→	→	→	→	→	→	→	15	14	12	7.8	1.0

参考文献

- [1] P. Sortais et al., Rev. of Sci. Instrum. (1998) p.656.
- [2] M. Matsuda et al, Use of an ECR Ion Source in the High Voltage Terminal of the Tandem Accelerator at JAERI, Heavy ion accelerator technology Eighth International Conference, AIP conference proceedings 473, 1998, p65.
- [3] 松田誠ほか, 高電圧端内設置に向けたECRイオン源のビーム生成試験及び機器開発, 第14回加速器科学研究発表会報告集, 2003, p170.