

## USE OF AN ECR ION SOURCE IN THE LARGE ELECTROSTATIC ACCELERATOR

Matsuda Makoto<sup>1</sup>, Takuhiro Asozu, Ken-ichi Kutsukake, Takamitsu Nakanoya  
Susumu Hanashima, Suehiro Takeuchi

Tandem Accelerator Section, Department of Research Reactor and Tandem Accelerator  
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

### Abstract

A terminal ion injector using an all permanent magnet type electron cyclotron resonance ion source has been constructed in the high voltage terminal of the vertical and folded type 20UR Pelletron tandem accelerator at Japan Atomic Energy Agency at Tokai. The new in-terminal injector made it possible to accelerate highly charged heavy ions which have not been obtained from the tandem accelerator. Beam energy and beam intensity have been remarkably increased and the noble gas ion beams have become available.

## 大型静電加速器へのECRイオン源の利用

### 1. はじめに

タンデム加速器は負イオンを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良い加速を行っている。静電加速器であるため、ビームエネルギーを正確かつ容易に可変でき、高いエネルギー分解能の高品質なビームが得られる。また負イオン生成さえできれば、どのような元素も加速でき、約40種の多様な元素が利用可能である。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の加速には適していない。従って炭素薄膜を用いずに加速する方法として高電圧端子内にECRイオン源を設置し、生成した高多価イオンを直接接地電位に向けて加速することとした。さらにこれまで加速不可能であった希ガスイオンの加速も可能となる。

ECRイオン源から炭素薄膜通過後よりも高多価のイオンを生成することでエネルギーの増強も可能である。図1に荷電変換フォイルによって得られる電荷とECRイオン源から引き出されるイオンの電荷の比較を示す。荷電変換フォイルのデータはタンデム加速器を16MVの加速電圧で運転したときに最もビーム強度を得られる電荷数であり、ECRイオン源は数 $\mu$ A以上得られる最大の電荷をプロットしたものである。荷電変換では重いイオンにおいても高々14+程度であるのに対し、14.5GHzの永久磁石型ECRイオン源ではこれを凌駕する多価イオンの生成が可能であるがわかる。またECRイオン源からのイオンの電荷は端子電圧に依存しないので低電荷のイオンを加速することで非常に低いエネルギーのビームを得ることもできる。

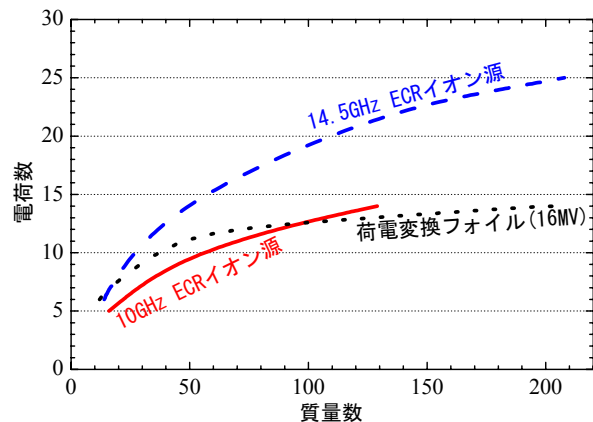


図1：加速イオンの電荷状態の比較

### 2. 高電圧端子内ECRイオン源入射器

原子力機構-東海タンデム加速器は米国NEC製のPelletron 20UR型の折り返し型タンデム加速器であり、通常の加速電圧は最高18MVである。高電圧端子は直径3.5m、高さ4.5mほどの大きさで、内部に180°偏向電磁石を有するかなり複雑な加速器である。大型とはいえないイオン源の設置空間と供給電力には限界があるために、我々は電力消費の少ない14.5GHzの永久磁石型ECRイオン源 (SuperNanogan) を採用した。

図2に搭載したイオン源及び高電圧端子内の入射系の概要を示す。イオン源の搭載は2007年に行った。従来の負イオン源からのタンデム加速方式と両立する配置とするために、イオン源は入射90°偏向電磁石を用いて水平に設置されている。イオン源は最大

<sup>1</sup> E-mail: matsuda.makoto@jaea.go.jp

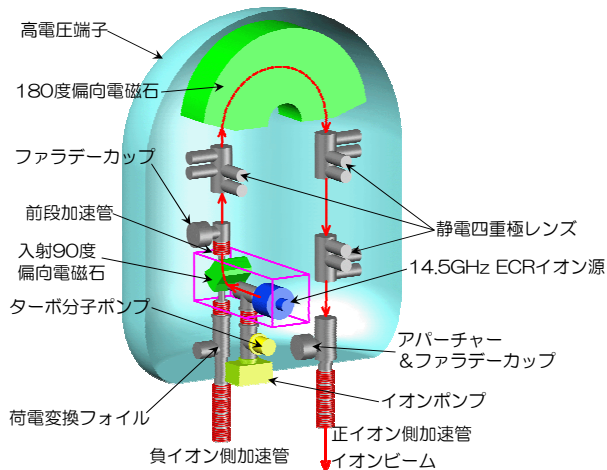


図2：高電圧端子内ECRイオン源入射器

200WのRFで動作し、引き出し電圧は10～30kVで運転される。イオン源とこの入射90°偏向電磁石部分は、正イオン側加速管への入射条件を良くするために、高電圧端子に対し+80kVの高電位に置かれている。イオン源から引き出されるイオンの全電流量は2mA近くになるので、80kVの前段加速管の負荷を抑えるため、入射90°電磁石によって上方へ偏向し、大まかにイオンの質量・電荷を選別する。加速するイオンは前段加速後に180°偏向電磁石によって質量・電荷が選択され、正イオン側加速管へ入射される。180°偏向電磁石の前後にある3台の静電四重極レンズを使用し、ビームの入射条件を調整する。

イオン源使用時の真空排気には、イオン源直下のターボ分子ポンプを使用し、希ガスの排気を行う。イオン源停止時の真空保持のためにイオンポンプも追加設置されている。

### 3. 周辺機器の開発

イオン源および入射装置を設置する高電圧端子は0.5MPaのSF<sub>6</sub>絶縁高圧ガス中であり、しばしば発生する高電圧の放電による電氣的サージに晒される特殊な環境である。使用する機器は可能な限り耐圧試験を行い、必要に応じ高圧ガス対策を行った。耐放電性能に関しては電源や制御機器はシールドを2重、3重と厳重に行い、電源や負荷線および制御信号線などのサージの入り込みやすい部分にはフィルターやサージアブソーバーを施した。

加速器の運転は約4ヶ月連続で行われるため、長期にわたり保守不要でなければならない。また故障に際しても直ちに圧力タンクを開放し修理を行うことが不可能なため、緊急時のフェールセーフ機能を有する必要がある。

図3にイオン源および引き出し系の概略を示す。

#### 3.1 イオン源

イオン源のプラズマチャンバーなどは0.6MPaの加圧試験を行い必要な部分に耐圧加工を施した。イオン源は設置前に動作試験をおこない、運転パラメータの最適化や簡略化を行った。ソースガスはガスマ

キシング法を採用し、ビームガス (Ar, Kr, Xe, …) とサポートガス (N<sub>2</sub> or O<sub>2</sub>) をあらかじめ混合したガスを使用している。ソースガスの流量 (プラズマチャンバーの真空度) の調節は高多価のイオンを引き出すのに非常に重要なパラメータであるが、流量制御を行わず、流量固定の定量リークバルブを採用した。高電圧Deck上に8系統のキャピラリーバルブ付きのガスボトルが搭載され、それぞれのガス圧はキャピラリーを通したときに最適流量になるように調整されている。この固定流量の方法は、イオン源運転の簡略化、安定確実な動作に非常に有効であり、多少の性能の犠牲を十分補う手法である。ただし、1系統のみ流量調整可能なサーモメカニカルリークバルブを用いたガス導入系を採用している。これを用いて25+以上のXeの高多価イオン生成を行った。ビーム量の調整は主にRF出力を変化させることで行う。プラズマチャンバー内に差し込まれるRF導入用の中心導体に0から-1kVの範囲でDC電圧を印加するバイアス法により、多価イオン電流を約10倍に増やすことができる。

#### 3.2 RFシステム

14.5GHzの発振器出力を出力制御用のアッテネーターを通して進行波管増幅器に入力することで0～200Wの出力を得る。それらは圧力および放電対策のため、内部を大気圧にした耐圧容器内に内蔵している。耐圧容器出口には反射波防止のサーキュレータと出力モニタのために検波ダイオードが接続されている。消費電力が約1kWのRF増幅器はターミナルの冷却システムで水冷される。RFアンプはターミナル電位に設置され80kV、30kVの絶縁導波管を通してイオン源にRFを導く。ECRイオン源のプラズマチャンバーの冷却はダイアフラムポンプでSF<sub>6</sub>ガスを吸引し循環させることで冷却する。

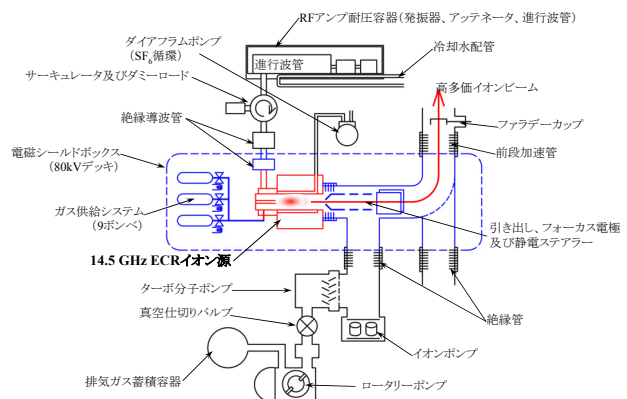


図3：イオン源および引き出し系の概略

### 3.3 真空排気システム

希ガス排気のために450L/secの完全磁気浮上型ターボ分子ポンプ(TMP)とロータリーポンプからなる排気系を開発した。ロータリーポンプのローターハウジングをステンレス製作の耐圧仕様とし、真空リークの発生も防いでいる。高圧ガス中での大型ゲートバルブの使用は困難であり故障時の緊急遮断も難しいことから、TMPの引き口にはバルブは設けず、停止時の真空保持はTMPの排気側の真空仕切りバルブ(電磁バルブ)にて行う。ロータリーポンプの排気は高圧ガス中に放出できないため、内部を大気圧程度とした容量25Lの排ガス蓄積容器内に溜め込む構造とした。

TMPの回転数が上昇しノーマル運転に入ると真空仕切りバルブが自動で開き排気を開始する。仕切りバルブはTMPの異常または停電等で直ちに閉じ、ビームラインの真空を保護する。複雑な電子回路で構成されるTMP電源は、厳重にシールドされた耐圧容器内に入れられている。

### 3.4 磁気シールド

ECRイオン源は強力な永久磁石で構成されるためその漏洩磁場がイオンビームに与える影響は無視できない。垂直ビームライン上で約2mTであり、そのままでは負イオン源からのビームは180°偏向電磁石入口で最大3cmほどビーム軌道がずれることが予想された。そこでイオン源および引き出し部を厚さ3.2mmの鉄板で覆い磁気シールドを施した。漏洩磁場は1割程度となり、実際のビーム加速に与える影響を抑えることが出来た。

## 4. ビーム加速の結果と性能

図4に高電圧端子内に設置されたECRイオン源から15~16MVの加速電圧で加速された各種イオンの電荷と強度を示す。100pnA (particle nano ampere)以上の強度が、Ne<sup>8+</sup>, Ar<sup>12+</sup>, Kr<sup>15+</sup>, Xe<sup>22+</sup>で得られており、図1で期待された通りとなっている。図4中の灰色の領域はタンデム加速方式(負イオン入射)で得られる電荷、強度の上限を示し、プロットはAuイオンのデータである。ECRイオン源からのビームはエネルギー・強度ともにタンデム加速方式を凌駕し、新たに希ガスイオンの加速を可能とした。Xeイオンでは30価近くまでビーム加速に成功し、そのエネルギーは約500MeVに達した。低電荷のイオン加速も可能なので、Xeイオンでは50~500MeVの範囲のビームをタンデム加速器のみで供給することが可能である。またフォイル通過によって引き起こされるエネルギーストラグリングやエミッタンス増加がないのでビームは非常にシャープで高輝度である。

## 5. まとめ

原子力機構-東海タンデム加速器の高電圧端子にECRイオン源を設置した。その結果、加速されるイ

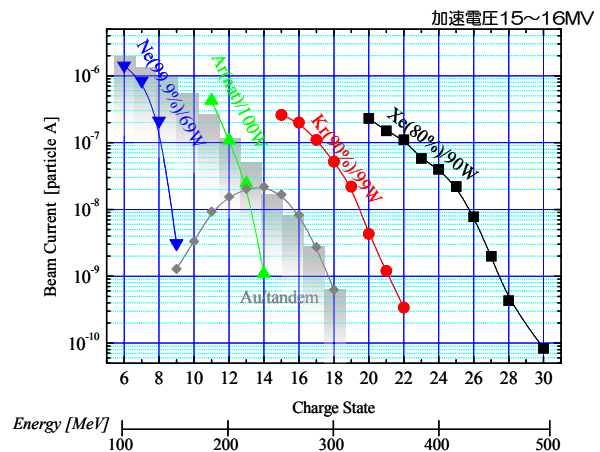


図4：加速されたイオン電荷とビーム強度

オンビームの強度はおよそ10~100倍、エネルギーは50~80%と大幅に増強できた。また新たに希ガスイオンの加速も可能となった。低電荷のイオン加速も行えるので、広範なエネルギー領域のビーム供給も可能である。

ECRイオン源の利用は、むしろ端子電圧の低い小型静電加速器の方がその恩恵は大きい。小型であれば放電サージも弱く、メンテナンスも容易である。また静電加速器ではイオン源の高性能化により、加速エネルギー、ビーム強度を容易に向上させることが出来る。

## 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 8th 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.
- [4] M. Matsuda et al, Highly Charged Ion Injector in the Terminal of Tandem Accelerator, 14th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Journal of Physics Conference Series 163(2009)012112.