

ECR イオン源の大型静電加速器への利用

松田 誠*

Use of an ECR Ion Source in the Large Electrostatic Accelerator

Makoto MATSUDA*

Abstract

A terminal ion injector using an all permanent magnet type electron cyclotron resonance (ECR) 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.

1. はじめに

1970年代に R. Gellar らの開発¹⁾によって誕生した電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源は、高多価・高強度の重イオンビームが生成可能であり、サイクロトロンやリニアックの入射器として利用され、それらの加速器の性能を大幅に向上させた。1980年代頃までの ECR イオン源は静電加速器の高電圧端子に搭載するには大きく、またミラーコイル用の電力を供給することは不可能であった。米国のオークリッジ国立研究所の大型の折り返し型である 25URC 型ペレトロンタンデム加速器において、ECR イオン源の高電圧端子への搭載が構想されたことがあるが実現には至っていない²⁾。ドイツの Hahn-Meitner-Institute の 6 MV の CN バンデグラーフでは 5 GHz の永久磁石型 ECR イオン源の高電圧端子への搭載に成功している³⁾。1990年代に入り、小型で高性能な永久磁石型 ECR イオン源が開発され市販されるようになってきた。永久磁石型はミラーコイル電源が不要であり消費電力も少ない。そこで我々は永久磁石型 ECR イオン源を原子力機構—東海タンデム加速器の高電圧端子に搭載し、ECR イオン源から生成される高多価・高強度ビームをシングルエンド加速器として直接加速することでビーム強度およびビームエネルギーの増強を行うこととした。

2. 静電加速器への ECR イオン源の利用

静電加速器の歴史は古くその詳細は磯矢により学会誌⁴⁾に掲載されており、ここでは省略する。タンデム加速器は 1950年代に登場し、静電加速器のビームエネルギーを飛躍的に向上させ、原子核物理などの研究に非常に有効な加速器となった。今日、大型静電加速器はそのほとんどがタンデム加速器である。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って電子を剥ぎ取って正の多価イオンに荷電変換し、再び地上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。このように2度の加速を行うことからタンデムの名が付けられている。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変換でき、高いエネルギー分解能の高品質なビームが得られる。また負イオンさえ生成できれば、どのような元素も加速でき、約 50 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、大電流のビーム加速には適さない。

一方、今日の高性能な ECR イオン源はタンデム加速器の高電圧端子での荷電変換で得られる電荷数以上の多価イオンを $1\ \mu\text{A}$ 以上の強度で容易に生成することが可能である。そこで、これらの ECR イオン源を高電圧端子に搭載し、引き出される高多価・高強度ビームを直接地上電位に向けて加速することで、従来

* 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 JAEA
(E-mail: matsuda.makoto@jaea.go.jp)

のタンデム加速方式よりも高いエネルギーでかつ高強度の安定なビームを得ることができる。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。

図1に炭素薄膜によって得られる荷電変換後の電荷と永久磁石型 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 16 MV 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をプロットしてあり、ECR イオン源のデータは $1\mu\text{A}$ 以上得られる最大の電荷をプロットしたものである。炭素薄膜によ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、10 GHz の永久磁石型 ECR イオン源ではほ

ぼ同程度であり、14.5 GHz の永久磁石型 ECR イオン源ではこれをはるかに凌駕する多価イオンが生成されることがわかる。質量数 100 以上では $20+ \sim 25+$ となり、ビームエネルギーの増強が期待される。

また、ECR イオン源で生成されるイオンの電荷はタンデム加速方式と異なり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低いエネルギーのビームを安定に得ることも可能である。タンデム加速器の場合は加速電圧を下げ、荷電変換後の電荷を小さくすることで低エネルギービームを得るが、加速電圧を下げることにより生じる加速管のビーム通過率の低下が避けられない。ECR イオン源では加速電圧を下げることなく、低エネルギービームの加速が可能なのでビーム通過率を犠牲にすることもない。

最後に ECR イオン源はそのプラズマ発生に電極やフィラメントを使用しないため、イオン源部品の消耗がほとんどなく一か月以上にわたる長時間の連続運転が可能である。これは大型タンデム加速器の高電圧端子に設置する条件として重要な要素である。

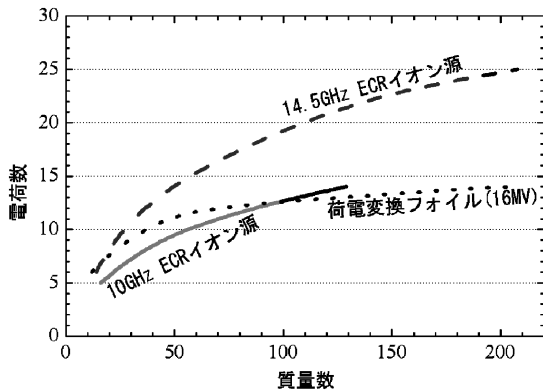


図1 高電圧端子でのイオン電荷の比較

3. 原子力機構-東海タンデムでの開発について

3.1 タンデム加速器の概要と開発方針

原子力機構-東海タンデム加速器は米国 NEC (National Electrostatics Corp.) 製のペレトロン 20UR 型の折り返し型タンデム加速器である。図2に加速器施

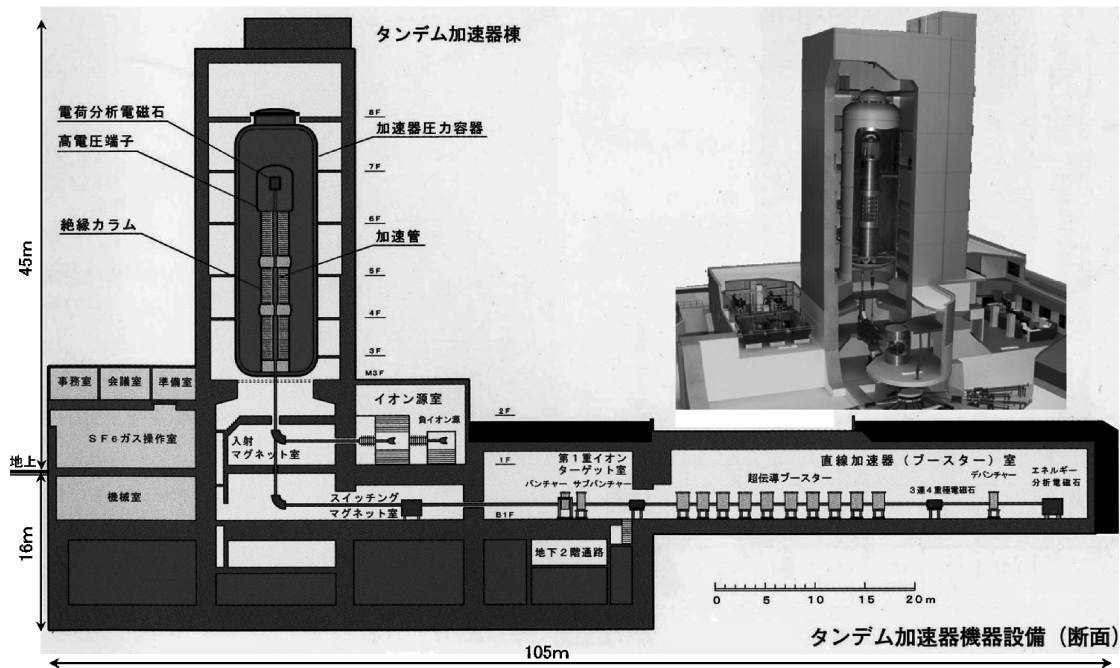


図2 原子力機構-東海タンデム加速器の概要

設の概要を示す。通常運転時の最高電圧は 18 MV である。ペレットの名の通り高電圧端子への電荷輸送は 2 本のペレットチェーンで行われる。圧力タンクは直径 8.3 m、高さ 26.6 m の大きさであり、運転時には内部に絶縁ガスとして 0.55 MPa の六弗化硫黄 (SF_6) ガスが充填される。高電圧端子は圧力タンクの底面から約 18 m の高さに位置する。高電圧端子には、電子ストリッパー、 180° 偏向電磁石やその電源、冷却装置のほか、その他ビーム輸送に必要な、静電四重極レンズや静電ステアラー、ファラデーカップなどが設置されている。ビームラインの真空排気はイオンポンプによって行われる。また、これまで、高電圧端子には水素、重水素加速用にデュオプラズマトロンイオン源が設置されていた。

これらの電力をまかなうために 400 Hz、 $3\phi/200$ V の発電機が 2 基 (15 kVA, 10 kVA) 備えられ、絶縁回転シャフトを用いて地上電位にあるモーターから発電動力を伝達している。内部機器の制御は地上電位の制御系から光通信によって CAMAC を経由して制御される。高電圧端子は、直径 3.5 m、高さ 4.5 m ほどの大きさで上記の機器を内蔵しているため、かなり複雑で狭い空間ではあるが、電力や制御、冷却装置などを備えているため、ECR イオン源を搭載することは不可能ではないと考えた。

設置スペースや、重量、使用できる電力などから、我々は消費電力の少ない小型の永久磁石型 ECR イオン源を高電圧端子に搭載し、大強度・高エネルギービームの加速を実現することとした。同時にタンデム加速器では不可能であった希ガスイオンの加速も可能となるので、従来のタンデム加速方式と両立させることでほとんどの元素がイオンビームとして利用可能となる。

高電圧端子は、絶縁高圧ガス中であり、かつ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。またタンデム加速器の運転は約 4 ヶ月間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。年間約 200 日の運転をマシンタイムスケジュールに沿ってイオンビームを実験者に提供しているため、既存のタンデム加速器の特長を犠牲にしないようにタンデム加速方式と両立させることとした。新たに取り付ける ECR イオン源及び入射装置が仮に故障しても加速器本体の運転系に与える影響を最小限に抑え、特にタンクを開けて修理しなければならないような事態はできる限り避けなければならない。故障時には直ちに圧力タンクを開放して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。圧力タンクを開放して行う修理では、ガス回収に 2 日、ガス充填に 1 日を要し、修理を 1 日で終わっても最低 4 日間は必要である。またタンク開放では少なからず加速管のデコンディショニング (発生電圧の低下) を引き起こしてしまう。そのためイオン源および入射器は必要最低限の機能を持ったものとし、確実に動作することを確認してから後に、性能向上の改良を行う方針とした。

3.2 10 GHz ECR イオン源の搭載

計画の第 1 段階として、小型で信頼性のある 10 GHz の永久磁石型 ECR イオン源 (Nanogan)^{5,6)} を搭載することにした。このイオン源はフランスの GANIL の SPIRAL 計画用に開発されたもので、永久磁石部の大きさは直径 13 cm、長さ 22 cm で重量は約 20 kg と非常に小型である。1998 年に高電圧端子への 10 GHz ECR イオン源の搭載を行い、 Ar^{8+} ビームの加速が初めて行われた⁷⁾。図 3 に搭載した 10 GHz ECR イオン源と高電圧端子の高エネルギー側 (正イオンの再入射側) に設置された当時の入射系の概要を示す。図 4 は ECR イオン源の設置のために高電圧端子の上側のシェルを取り外した時の写真であり、高電圧端子内の様子がわかっただけだと思う。イオン源部はシールドパネルを取り外した状態である。中央部にイオン源があり、上方の扇状のものが 180° 偏向電磁石である。イオン源からのビームは 45° 偏向電磁石を 2 台を用いて高エネルギー側加速管へ入射される。この入射系はそれまで搭載されていた水素、重水素イオン用のデュオプラズマトロンイオン源のものを改造したものであり、イオン源、引き出し

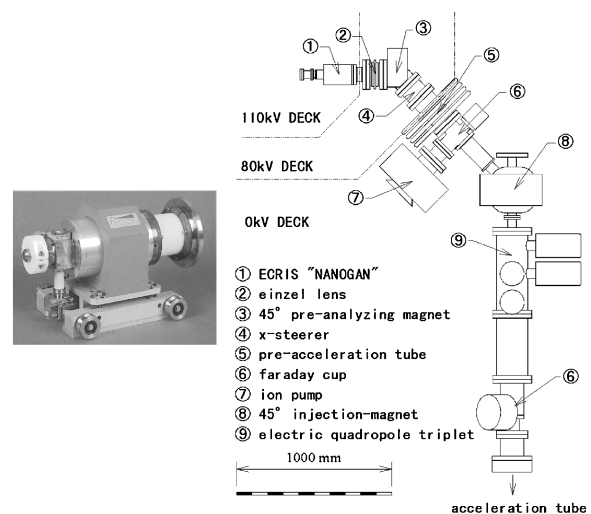


図 3 最初に搭載した 10 GHz 永久磁石型 ECR イオン源とその入射器の配置

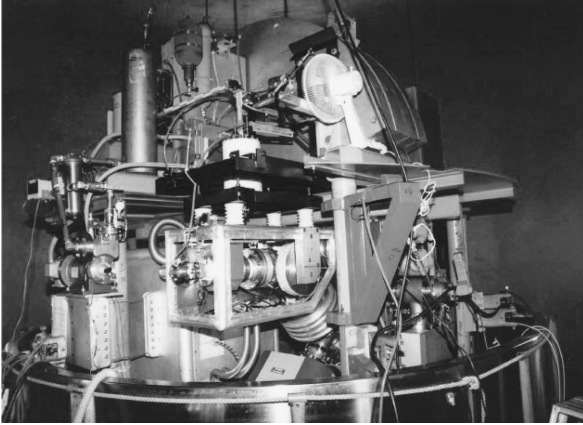


図4 10 GHz ECR イオン源と高電圧端子の内部

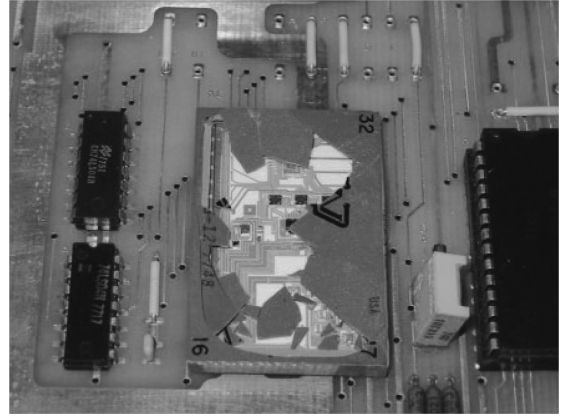


図5 加圧により破壊されたCAMACのADC

部および前段 45° 偏向電磁石が新たに設置した部分である。ECR イオン源からの多価イオンは最大 30 kV の電圧で引き出される。引き出し電流は最大 2 mA 程になるので前段 45° 偏向電磁石により必要なビームを大まかに選択することで、前段加速部の加速管および高電圧電源の負荷を抑えている。必要とするイオンは、その後、最大 80 kV の前段加速を受け、さらに後方の 45° 偏向電磁石により質量と電荷が選択され、タンデム加速器本体の高エネルギー側の加速管へ導かれる。加速管への入射条件は静電四重極レンズによって調整される。それ以後は既存のタンデムのビームハンドリング系となる。

設置当初は絶縁ガスの圧力による故障や高電圧の放電による制御機器の故障をたびたび起こしていたが、その都度、改良や対策を施すことで徐々に安定した多価イオン生成とビーム加速が実現できるようになった。

タンデム加速器で（シングルエンドであるが）、希ガスが初めて利用できるようになったことから新たな反応系での核物理実験に利用されはじめた。また重イオンの照射実験では従来は I イオンがよく用いられていたが、荷電変換フォイルを使用しなくて済むことから、ビーム強度も強く安定した Xe ビームに完全におきかわるなど、ECR イオン源は期待通りの性能を発揮した。

しかし、入射 45° 偏向電磁石が軽イオン用のもので磁場強度が不足していたため、Xe イオンのような重い質量のイオンを加速する場合、前段加速電圧を 50 kV 以下にまで下げて入射せざるを得なかった。そのため加速管入口でのレンズ効果が大きく、ビームの通過率は半分ほどになっていた。また入射電磁石の分解能も低く同位体の分離が困難であるため Kr, Xe などは同位体濃縮したガスを用いていた。

その後、ビームの入射条件を改善するために高電圧

端子の負イオン入射側にイオン源および入射器を設置し、 180° 偏向電磁石をビーム分析に利用することにした。

3.3 絶縁高圧ガスおよび放電への対策

先も述べたが運転時は 0.55 MPa の SF_6 絶縁高圧ガス中である。また圧力タンクの開閉時には、 SF_6 ガスと空気との置換作業のために約 20 時間かけて 10 torr 以下まで真空排気も行われる。通常の機器は大気圧下での使用を想定しているため、加圧によって使用部品が変形し動作しなくなることが生ずるので、電源や制御機器に使用されるコンデンサや IC、リレーなどは注意が必要である。負圧状態では直径 3 cm 以上の大型の電解コンデンサは構造にもよるがその内圧により破裂することがあり、容量が必要な場合は小型のコンデンサを並列に使用するなどの対策が施される。また表面積の大きな IC など表面カバーが薄く機械的に弱いものは、図 5 のように破壊され動作しなくなる。またリレーなどはその接点が SF_6 ガスの分解生成物により接触不良を起こし動作不良を引き起こすので、完全密閉型のハーメチックシールタイプなどを使用したり、小電力のものは機械的接点のない Photo MOS リレーなどの半導体リレーを使用したりしている。

SF_6 ガスの分子量は 146 であり加圧されることで、その密度は大気圧空気に対し 20 倍以上となる。そのため空冷ファンが過負荷で動作しなかったり、過負荷による電圧降下で制御基板が動作しなくなったりすることがあるので、ファンの選定や電源の取り方には注意が必要である。自然空冷（ SF_6 ガス冷）を採用するのも良い。

ビームラインなどの真空機器なども大気圧下ではリークが見られなかったものが、加圧によりリークが発生することがある。大気圧下に戻すと正常となることがあるので、タンク内に設置する機器は可能な限り

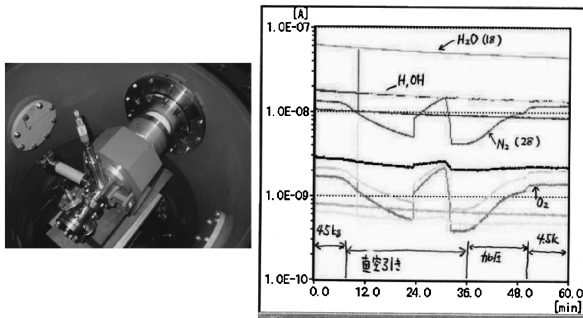


図6 左：イオン源本体の加圧試験の様子，右：リークがある場合のQ-massの分析例

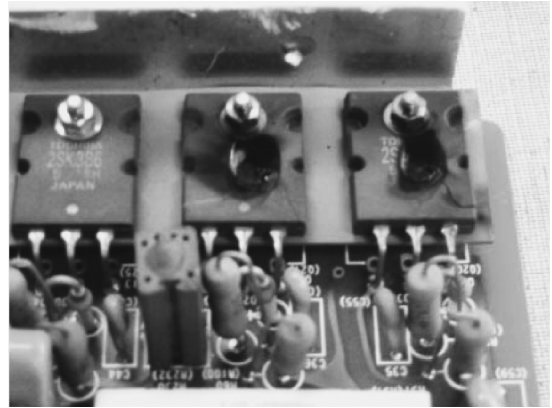


図7 放電の電氣的サージで壊れたFET

加圧下での動作試験および真空リーク試験を施している。

図6の左は10 GHzのECRイオン源を圧力試験容器にてSF₆ガス加圧下で動作試験（プラズマ点火とビーム引き出し）を行った時の写真である。イオン源本体も加圧に対し必要箇所を改造し手を加えている。イオン源はOリングを真空ガスケットとして使用しているためリーク試験にヘリウムは使用できない。従って圧縮空気を加圧しながら真空側をQ-massにて分圧測定しながら行った。図6の右はリークの発生した場合の例であり、圧力試験容器の加減圧に伴いN₂やO₂の量に変化し、リークが発生していることがバックグラウンドのH₂Oと比較するとよくわかる。また減圧時に一時的にN₂、O₂が上昇しているのは、OリングとOリング溝間にできた隙間に溜まっていた空気が、減圧によって膨張しOリングを移動させ、真空中に放出されたためである。

放電対策として、電源や制御機器は高電圧端子内のシールドボックス内に格納し、交流電源ラインや制御信号、負荷線などはシールド付きのツイストペアケーブルを用い、それを金属のコンジットに通してシールドを2重、3重と厳重に行っている。サージの入り込みやすい入出力部分にはフィルターやサージアブソーバーを挿入している。使用する電子デバイスは、できる限り耐電圧の高いものを採用することで故障や誤動作を減らすことができる。しかし放電サージ対策は、その発生源や侵入経路がいつも同じではなく特定も難しいため、故障時には対処療法的にフィルターを追加したり配線の引き回しを工夫することなどで応じているのが現状である。図7に放電のサージにより破壊された電磁石電源の出力部のFETを示す。サージ対策として制御信号などはプラスチック光ファイバーを用いた新制御方式の開発を行っており、同電位におかれる機器に対しても順次置き換えていくところである。

3.4 イオン源の運転パラメータの簡略化

10 GHzおよび14.5 GHzのどちらのECRイオン源も設置前に試験台において、端子内搭載を模擬しながら多価イオンの生成試験を行った。引き出し電極やレンズ系の試行錯誤を繰り返し、また周辺機器の開発も同時に行った。引き出し電極部のセラミクスはペニング放電により汚れてしまい絶縁不良を起こすが、内部に内溝を設けることで長期間にわたり絶縁性能を保持することが可能となった。加速器の運転は専任のオペレータだけでなく、休日や夜間は実験利用者も行うことになる。そのため操作ミスしても致命的な故障や不具合に至らないようにイオン源のパラメータを簡略化することにし、いつでも誰でも簡単に確実に安全に動作し、かつ必要十分な性能を発揮するようにすることを念頭に試験を行なった。安定な運転のためにイオン源パラメータの変化に対し、引き出されるビーム量の変化が緩やかに変化するように周辺機器の開発をおこなった。その結果、イオン源パラメータはソースガスバルブの開閉、バイアス電圧、RF出力の3つのみとした。高圧ガス中なのでRFチューナやバイアス電極などの駆動は省略した。

ECRイオン源は目的とする電荷のイオンが最大になるようにRFパワーやガス流量を調整する。ガス流量（真空度）がプラズマに与える影響は大きく、通常では流量が少ないほど多価イオンが生成でき、逆に流量を増やすと低電荷のイオンが生成されやすくなる。また目的とするイオンのガスとは別の軽いガスをサポートガスとしてプラズマ中に添加することで、多価イオンビームの強度を容易に増やすことができ、この混合比を変えることで引き出すイオンの電荷に合わせた最適化も可能である⁹⁾。図8に14.5 GHz ECRイオン源での、XeとO₂ガスとの混合比を変化させたときの多価イオンの収量を示す。Xe濃度が薄くなるに

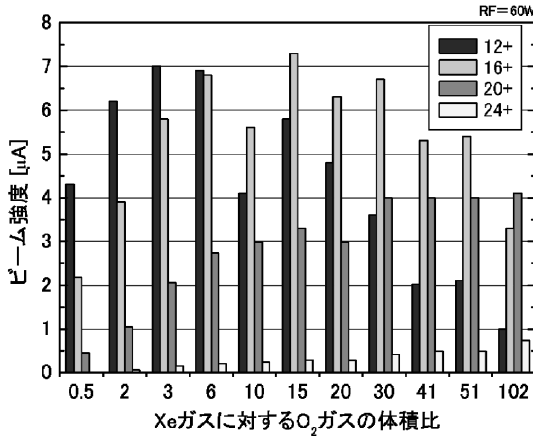


図8 多価イオンの混合比依存性

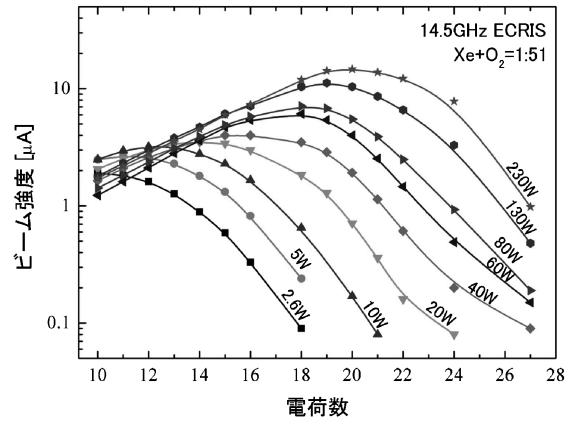


図10 多価イオンのRFパワー依存性

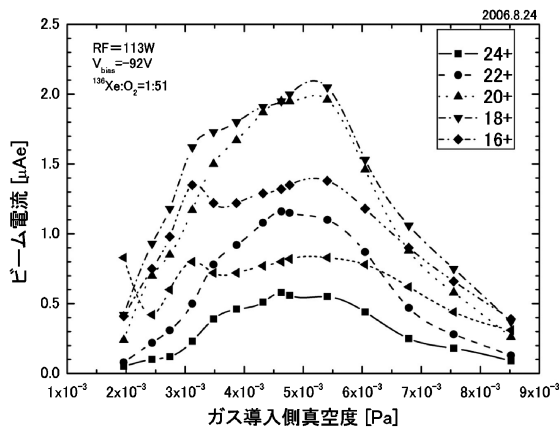


図9 多価イオンのガス流量（真空度）依存性

なっても加速器にダメージを与えない方法として、キャピラリーリークを用いた固定流量バルブを開発した。万一制御不能になってもガス流量が増加することではなく、またソレノイドバルブとしたことで、高電圧端子への通電をやめる（すなわち発電用回転シャフトをとめる）ことで、加速器を保護することが可能である。現在この定量リークバルブの付いたガスボトルが8本搭載されており、搭載前にガスボトルの圧力（一次側圧力）を調整することで最適流量にしている。この固定流量の方法は、イオン源運転の簡略化と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。

つれて低電荷イオンは少なくなり高多価イオンは同程度あるいはやや増える傾向にあることがわかった。ここで高電圧端子の真空排気にはイオンポンプを使用していることから希ガスであるXeガスは少ないほうが好都合なことから、10 μA 以上のビーム加速は高電圧保持の点から困難であるので、XeとO₂との混合比を1:50に決定した。同様の試験を他の希ガスイオンに対しても行いNe:H₂は1:2, Ar:O₂では1:10, Kr:O₂では1:20程度にしている。重い希ガスほど希釈割合が多くなるところが興味深い。

このようにして決定したXeとO₂の混合比とガス流量で、RFパワーを変化させ得られた多価イオンの電荷分布を図10に示す。きれいなRFパワー依存性を示しており、10+から27+にわたって1 μA 以上の強度でビームが得られる。ビーム量の調整は主にRF出力を変化させることで行う。プラズマチャンパー内に差し込まれるRF導入用の中心導体に0から-1 kV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。

図9はXeとO₂の混合比を1:50と固定した時の、真空度に対する電荷ごとのビーム量を測定したもので、4~6 $\times 10^{-3}$ Paの真空度であればよいことがわかる。このときのガス流量を測定すると2.0 $\times 10^{-5}$ ($\pm 30\%$) Pa $\cdot\text{m}^3/\text{sec}$ であった。高電圧端子に搭載する場合、このガス流量の制御は安全で確実でなくてはならない。ガス流量が多過ぎ真空を悪くすると加速管内部で放電を引き起こし、高電圧の保持が不可能だけでなく加速管に大きなダメージを与えてしまう。従って高電圧の放電によって流量制御機器が制御不能に

ここでは14.5 GHz ECRイオン源での試験結果を示したが10 GHz ECRイオン源でも同様の結果が得られ、ガス流量の最適値もほぼ同じであった。ガス流量の制御に関してはXeとO₂を混合したガスボトルの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（停電時閉）を用い、流量調整を行えるようにしてある。これを用いて25+以上のXeの高多価イオンは生成されている。

4. 14.5 GHz ECRイオン源による高電圧端子内重イオン入射器

現在の14.5 GHzの高電圧端子内ECRイオン源と

その入射系の配置レイアウトを図 11 に示す。タンデム加速方式と両立するために、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。

入射器の高エネルギー側から低エネルギー側への移送は 2005 年に行い、まずは実績のある 10 GHz ECR イオン源でビーム加速を行った。入射 90° 電磁石の位置には、ガスストリッパ装置が設置されており、低電荷イオンによる低エネルギービームを用いた材料・照射実験に利用されていたが、ECR イオン源から低電荷のイオンを引き出すことで代替できるので撤去した。2007 年に 14.5 GHz の永久磁石型 ECR イオン源に更新し、同時に引き出し系や RF 増幅器、導波管の交換を行った。イオン源の大きさは永久磁石部で直径 30 cm、長さ 40 cm で重量は周辺機器も含めると約 200 kg である。イオン源が大ききことと、先に述べたが旧入射系での入射電磁石の磁場強度・分解能の問題を解決するために、180 度電磁石をビーム分析に利用する現在の配置とした。

イオン源は最大 200 W の RF で動作し、引き出し電圧は 10~30 kV 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 +80 kV 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 2 mA 近くになるので、80 kV 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 180° 偏向電磁石によって質量、電荷を選択され、高エネルギー側加速管へ入射される。180° 偏向電磁石の磁場強度は、 $ME/q^2 = 55$ と十分であり、1+ の鉛イオンでも前段加速電圧を下げることなく偏向が可能である。分解能は、 $M/\Delta M \leq 140$ であるので、旧配置に比較し加速するイオンの選別が容易である。両偏向電磁石の磁場はホールプローブによりモニタされ、イオンの選別を容易にしている。静電四重極レンズが 180° 偏向電磁石の入射側に 1 つ、出射側に 2 つ、及び静電ステアラーも装備されているので、それらによってタンデム加速器の高エネルギー側加速管への入射条件を調整する。

図 12 に高電圧部分の機器配置と RF 電源および真空排気系の概略を示す。イオン源の各電源、制御回路は大別すると高電圧端子電位と高圧デッキ (80 kV と 110 kV) に設置される。110 kV デッキ (イオン源電位) にはバイアス電源が、80 kV デッキには引き出し、ガス導入回路、アインツェルレンズ、入射 90° 偏向電磁石、ステアラーの各電源および磁場測定器が入っている。高圧デッキ上の機器はプラスチック光ファ

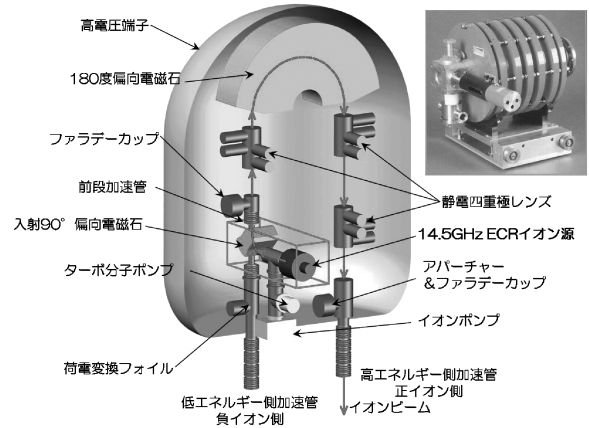


図 11 高電圧端子内 14.5 GHz ECR イオン源入射器のレイアウト

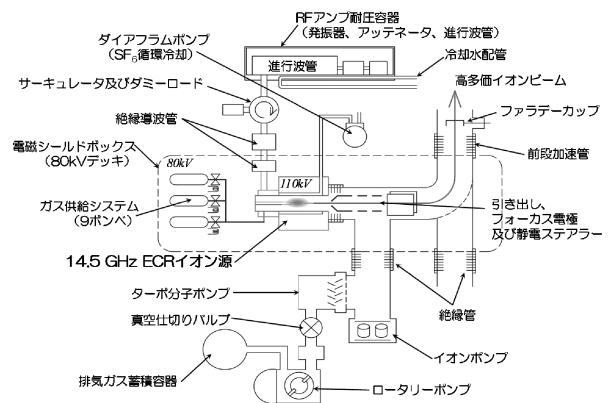


図 12 イオン源および周辺機器の概略図

イバーにより高電圧端子電位の CAMAC システムと通信を行う。高圧デッキ内への交流電源は絶縁トランスを通して供給される。高電圧端子電位には RF アンブ、TMP 排気系、冷却装置、制御通信回路等が置かれる。

4.1 RF 増幅器

イオン源を動作させるのに必要な RF は、14.5 GHz の発信器出力を出力制御用の可変アッテネータを通して進行波管増幅器に入力することで 0~200 W の出力を得ている。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 1 kW の RF アンブの冷却には 180° 偏向電磁石用の冷却水が使用される。RF は 80 kV と 30 kV の絶縁導波管を通してイオン源に導かれる。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 SF₆ ガスを吸引し循環させることで冷却する。高電圧端子は 400 Hz の交流電源であり、かつ SF₆ ガ

スを吸引する負荷も大きいのでダイヤフラムポンプはインバーターを使用して回転数を落として使用している。

4.2 真空排気システム

加速器運転時の高電圧端子ビームラインの真空排気は110 L/sのスパッタイオンポンプ4台で行われている。10 GHzのECRイオン源を搭載した当初は、高圧ガス中に設置することから密閉・吸着式であるスパッタイオンポンプ(220 L/sec)を図3に示すように追加設置していた。Arでは40 L/s程度の排気速度があることから問題はなかったが、利用希望が多くなったKrやXeなどはイオンポンプのみの排気系では、排気しきらず頻繁にガス放出を起こすようになり、長時間の連続運転は無理であった。そこでターボ分子ポンプ(TMP)を用いた新たな排気系を追加し、この問題を解決した。

図12は現在のTMP排気系の概略を示しており、基本的には設置当初と同じで磁気浮上のTMPとロータリーポンプから構成されている。このようなメカニカルなポンプを高圧ガス中で使用するにはイオンポンプのように密閉式ではないので、停電時の排気ガスの逆流に対処したシステムでなければならない。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25 Lの排ガス蓄積容器内に溜め込む構造とした。イオン源で使用するガスの総量は1年間の連続運転でも1 Lに満たないので、蓄積容器の圧力上昇はわずかである。TMPは排気速度450 L/sの完全磁気浮上型のアウトガスの少ないポンプを採用した。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ヘッドのゲートバルブは無しとした。停止時の真空保持にはTMP排気口に設けたソレノイド駆動の真空仕切りバルブを使用している。排気系の運転は以下のように行われる。まずロータリーポンプを起動しフォアラインの真空度が数PaになったらTMPを起動する。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。真空仕切りバルブは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ようにしている。

高圧ガス対策として、使用機器は全体ないしは部分的に耐圧容器に入れて保護した。TMPは制御ケーブルの導入部に耐圧補強を施し、真空仕切りバルブは全体を密閉式に改造している。ロータリーポンプはモーターとローターの接続が磁気結合のものを採用し、鋳物であったローターハウジングはリークを発生するのでステンレスによる耐圧密閉式に改造して使用してい

る。TMP電源は加圧下では動作せず、数多くの検出回路で構成されていて回路を改造することが困難だったため、内部を大気圧にした耐圧容器に入れて使用している。50 Hz/200 Vの交流電源は完全サイン波インバーターによって高電圧端子で発電される400 Hz/200 Vから変換して供給している。

TMP排気システムを設置してからは、希ガスの加速時でも真空の悪化は見られずイオン源の安定動作が実現した。

4.3 漏れ磁場対策

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の最大値は約2 mT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3 cm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3.2 mm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。また保守作業の安全性も確保することが出来た。

5. 加速試験とその性能

図13に高電圧端子内に設置された14.5 GHz永久磁石型ECRイオン源入射器から15~16 MVの加速電圧で加速された各種希ガスイオンの電荷とタンデム加速器出口でのビーム強度を示す。図中のテキストは元素記号(濃縮度)/RF出力を示している。100 pA以上の強度が、Ne⁸⁺、Ar¹²⁺、Kr¹⁷⁺、Xe²²⁺で得られており、図1で期待された通りとなっている。図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

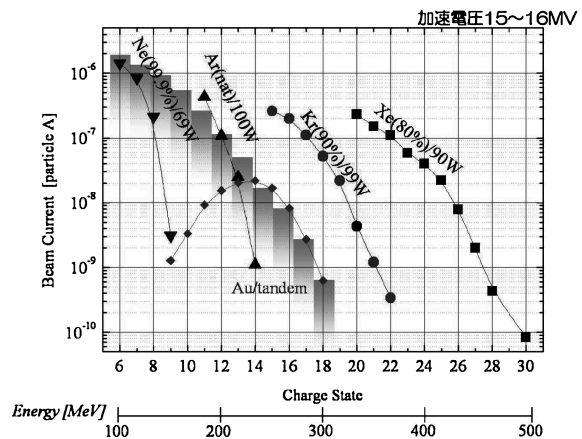


図13 14.5 GHz ECRイオン源から加速された多価イオンの電荷とビーム強度

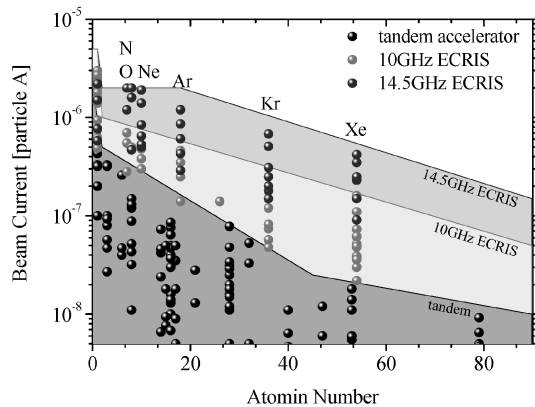


図14 高電圧端子内 ECR イオン源から加速したイオン種とビーム強度

ンのデータである。ビーム強度で 10~100 倍、ビームエネルギーで 50~80% ほど増強されていることが分かる。加速管のビーム通過率も非常に良く、12 MV 以上の電圧ではほぼ 100% である。イオン種の切り替えもガスボトルの選択と二つの偏向電磁石の磁場を設定するだけでよいので、数分で切り替えが可能である。

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 500 MeV 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 5+~30+へと加速イオンの電荷を変えることで 50~500 MeV のエネルギー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。また静電加速器であるのでビームのエネルギーを正確に容易に可変することができる。図 14 は従来のタンデム加速方式と今回の高電圧端子内に設置した ECR イオン源 (10 GHz および 14.5 GHz) の実績データを示したものである。

ECR イオン源からのビームは高強度で安定であるため超重核の合成実験だけでなく、軽水炉燃料体中での核分裂片である Kr, Xe のエネルギー領域のビームが利用できるようになったので、燃料体に与える照射効果の研究に使用されている。また他の加速器では加速の難しい Ne⁺ などの 1 価の高エネルギービームが得られるので原子物理研究にも使用されている。

6. まとめ

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

オンビームの強度はおよそ 10~100 倍、エネルギーは 50~80% 程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にわたりビーム通過率を犠牲にすること無く高品質なイオンビームを供給することが可能である。

炭素薄膜を使用しないので長時間にわたり安定に高強度のビーム加速が可能である。また炭素薄膜を通過することによって引き起こされるエネルギー分散やエミッタンス増加がないので、かつてのシングルエンド加速器の様に非常に高品質なビームが得られ、ビームエネルギーも正確にかつ容易に可変できる。

特殊環境であるにもかかわらず安定動作を実現したのは、機能を絞ってシステムを簡略化したことで、簡単、確実に安全なイオン源の運転ができるようになったことが大きい。そのため多少の性能の犠牲はあるがきわめて安定な運転を可能にしている。高価なイオンの生成と安定なビーム加速は、高電圧端子内に搭載した TMP による真空排気システムが鍵となっている。

ECR イオン源の静電加速器への利用は、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。エネルギー利得もさることながら、小型であれば放電エネルギーも小さく、メンテナンスも容易である。静電加速器メーカーである NEC でも高電圧端子に永久磁石型 ECR イオン源を搭載した小型のシングルエンド静電加速器が製品化されている¹⁰⁾。また搭載した ECR イオン源の性能向上あるいは更新によって、加速器本体を更新することなく、加速エネルギー、ビーム強度を向上させることが出来る。

参考文献

- 1) R. Geller, et al., Rev. Phys. Appl., 16 (1980) 995.
- 2) D. K. Olsen, symposium on northeastern accelerator personnel. Oak Ridge, Tennessee 22-27 Oct 1989.
- 3) P. Arndt et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, B89 (1994) 14.
- 4) 磯矢 彰, 「日本の静電加速器の歴史」, 加速器 Vol. 2, No. 2 (2005) 136.
- 5) P. Sortais, et al., Proc. of 12th Int. Workshop on ECR Ion Sources, 1995, Wako, 1995, INS-j-182 p44.
- 6) Pantechnik S. A., <http://www.pantechnik.fr>
- 7) M. Matsuda, et al., Proc. of 8th Int. Conf. on Heavy ion accelerator technology, AIP Conf., 473 (1998) 65.
- 8) M. Matsuda, et al., J. Phys. Conf. Series, 163 (2009) 012112.
- 9) B. H. Wolf, Handbook of Ion Source, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- 10) <http://www.pelletron.com>