

高電圧端子内設置に向けた ECR イオン源のビーム生成試験及び機器開発

松田誠^{A)}、竹内未広^{A)}、吉田忠^{A)}、花島進^{A)}、藤井義雄^{B)}

^{A)} 日本原子力研究所(東海)物質科学研究部 加速器管理室

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{B)} 日本アドバンステクノロジー株式会社 東海事業所

〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松白根 146-5

概要

原研タンデム加速器では得られるビームのエネルギー、強度、イオン種の拡大を目的に高電圧端子内に ECR イオン源を設置している。計画の第1段階で、基本的な技術の取得及び機器の開発のため、加速器本体に大きく手を加えることなく搭載することが可能な小型のイオン源を設置した。現在、高電圧端子内 ECR イオン源 (TECRIS) により、He を除く希ガスおよび水素、窒素、酸素の加速が行なわれている。今回は計画の第2段階として 14.5GHz、200W の永久磁石型 ECR イオン源 (SuperNanogan) を設置する予定である。これによりさらに高多荷イオンの生成が可能となりビームエネルギー・強度ともに現状以上に増強することができる。

1 はじめに

タンデム型静電加速器は、地上のイオン源から生成された1荷の負イオンを高電圧端子に向かって加速し、高電圧端子内で正の多荷イオンに荷電変換し、再び地上電位に向かって加速することで高エネルギーのビームを生成することができる。しかし、この荷電変換後の電荷数は最近の ECR イオン源から得られる電荷数に比較しかなり低いものとなっている。ビーム強度については、タンデム加速器はストリッパフォイルの寿命により強度を制限されるが、ECR イオン源は高多荷イオンを直接に数 10 μ A の強度で容易に引き出すことが可能である。したがってシングルエンドの静電加速器のように高電圧端子に ECR イオン源を搭載し高多荷イオンを直接加速することで、高エネルギー、高強度のビームを得ようとするものである。

図1に端子電圧 16MV で運転したときのフォイルストリッピングによる最確電荷数を点線で、現在搭載されている 10GHz の ECR イオン源から 1 μ Ae 以上引き出すことのできるイオンの電荷を実線で示す。図中の●印は炭素薄膜による荷電変換後の電荷の実績データで、☆印は 10GHz の TECRIS からの実績データである。現在の 10GHz のイオン源では質量数 100 以上において電荷数がタンデム方式を上回っており、ビーム強度も最大で約 1 桁の増強ができた。TECRIS による加速では加速されるイオンの電荷が端子電圧に依存しないため電荷と端子電圧の選択が自由となり低エネルギーのビーム加速も可能となった。またストリッパフォイルを用いないためにそれによって生じるエネルギー分散が生じないため、質の良いビームの加速が可能となった。

しかし現在の TECRIS の入射系は水素、重水素専用の旧イオン源を置き換えて設置してあるために入射電磁石の

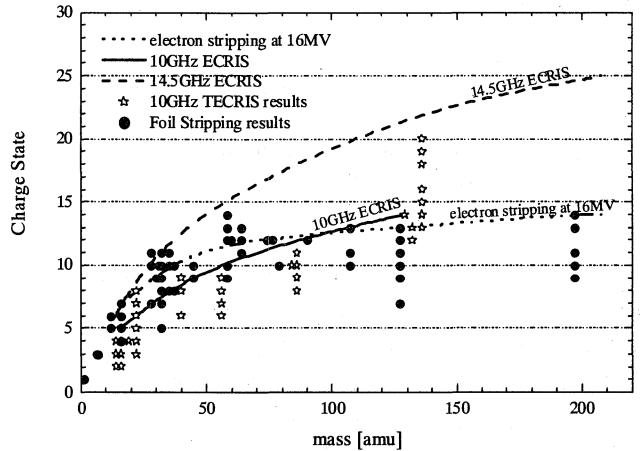


図1：高電圧端子での炭素薄膜による荷電変換後の最確電荷と 10GHz および 14.5GHz の ECR イオン源から 1 μ Ae 以上引きだれるイオンの電荷。

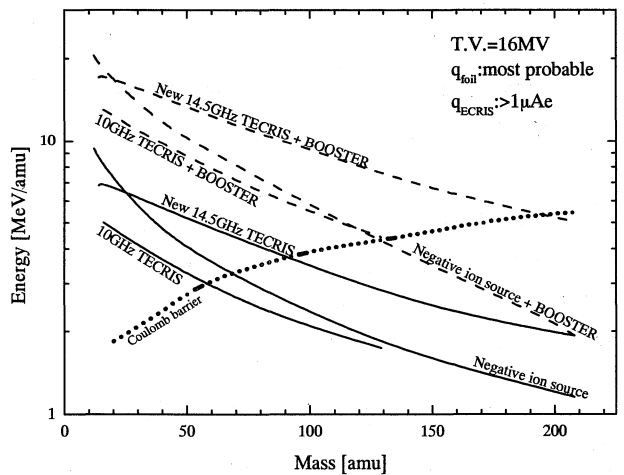


図2：14.5GHz の TECRIS を使用したときに予想されるビームの到達最大エネルギー。破線は後段ブースターを使用した場合を示す。

磁場強度、分解能に限界がある。そのためキセノンイオンのような大きな質量数のイオンを加速する場合、前段加速電圧を下げて入射しているが、主加速管入口でのレンズ効果によりビームの透過率が悪くなり、定格の 80kV に対し 60kV の加速電圧では約 70%となっている。さらに分解能

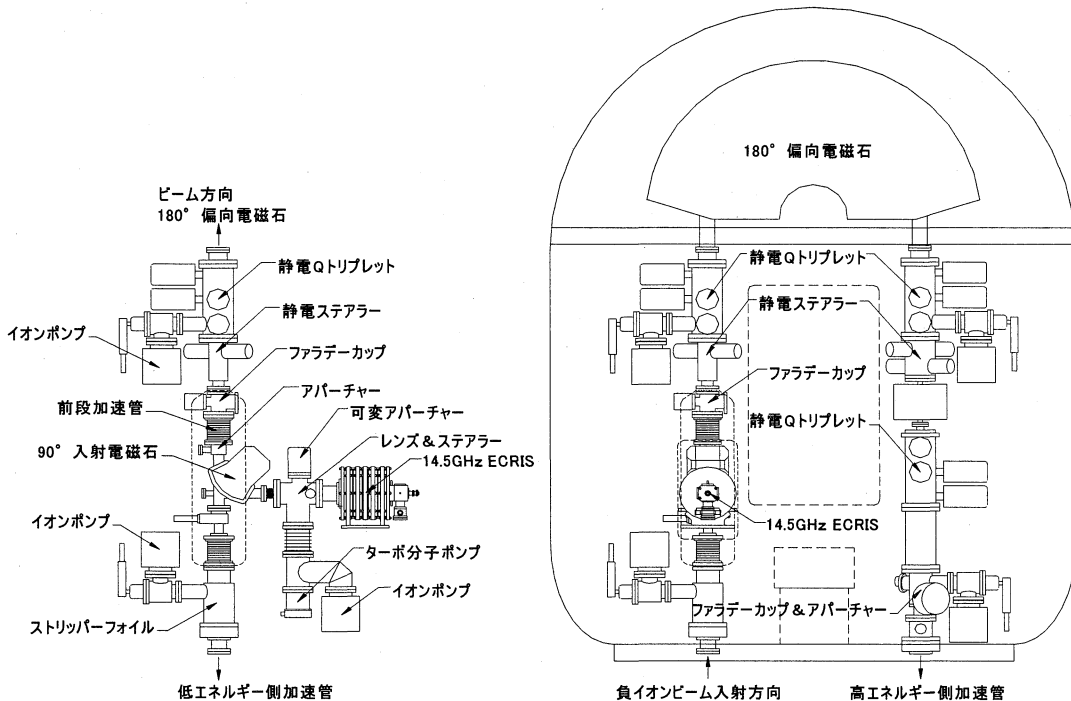


図3：14.5GHz TECRISの配置計画図

が低いためにクリプトン、キセノンなどでは同位体の分離が困難であり、ビームハンドリングに支障をきたすため同位体濃縮したガスを用いている。

これらの問題を解決するために計画の第2段階では、より高性能なイオン源を最適な位置に設置する計画を進めている。高電圧端子の特殊な環境を考慮し、イオン源には14.5GHz、200Wの永久磁石型 ECR イオン源を採用する。図1中の破線は14.5GHzのイオン源から $1\mu\text{Ae}$ 以上引き出すことのできるイオンの電荷を示している。

図2には端子電圧16MVで加速したときに得られるビームのエネルギーを示す。質量数30以上のイオンについてエネルギーを増強でき、重いイオンについてはこれまでの約2倍となることが分かる。図2中の破線はタンデム加速器からのビームを直接後段ブースターに入射したときに得られるビームのエネルギーを示しており、ほとんどの原子核同士の組み合わせで核反応を起こすことのできるエネルギーに達することが分かる。

2 NEW TECRIS の配置・制御の改良

2.1 レイアウト

イオン源は従来の負イオン入射による加速も行えるように配置する。イオン源は現在のものと比較するとかなり大きく、かつ入射系の問題点も解決するために現在の位置への置き換えは行わず、図3のように配置する。金属イオン生成なども考慮しイオン源を水平に設置できるようにし、既存のガストリッパー装置を撤去した空間に新たに入射90度電磁石を配置し、入射側にイオン源を設置する。ガストリッパーは主に低エネルギービームを用いた物

性・材料実験に用いられているが、TECRIS から低い電荷のイオンを加速することで代替することが可能である。

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度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（あるいはそれ以上）の前段加速を受けて180度偏向電磁石に入射され、必要な電荷、質量のイオンが選別される。180度電磁石は $M/\Delta M \leq 140$ 、 $ME/q^2 = 55$ であるのでビームの分析には十分である。静電トリプレットQレンズが180度電磁石の入射側に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、タンデム加速器の主加速管への入射は容易になると考えられる。

2.2 制御パラメータの回復

現在のTECRISシステムでは特殊な環境である高電圧端子に設置するためにいくつかイオン源の制御パラメータを省略したものがあがるが、今回はこれまでの経験を踏まえて新たに制御機器を開発し以下のものを制御することを考えている。

・ガス流量の制御

現システムではソースガスにメインとサポートの混合ガスを用いており、重要なパラメータであるガス流量の制御はスライダックによるサーモメカニカルリーク (TML) バルブ駆動の1系統のガスボトルを除き他の8系統は固定流量で行う簡単な方式としている。今回はTMLバルブ用にPWM変調技術による専用の電源を設計し数値制御でバルブ開度の制御を行なう。そのために専用の真空ゲージも取り付ける。これまで約4ヶ月ごとの定期整備にあわせガスボトルの調整を行っていたがこれを簡略化できる。

• 可変アパーチャー

ECR イオン源は強度の強いビームを発生することができるが、逆にビーム量を少なく抑えることが難しい。特に軽イオンにおいては加速器の無用な放射化を避けるためにイオン源付近でビーム量を調整できる可変アパーチャーの設置を試みる。

• チューナー駆動

モーター駆動を行なう。

• 金属イオン生成

金属イオンの生成法には各種の方法があるが、これらを実現できるように設置スペース、制御チャンネルを増やす。

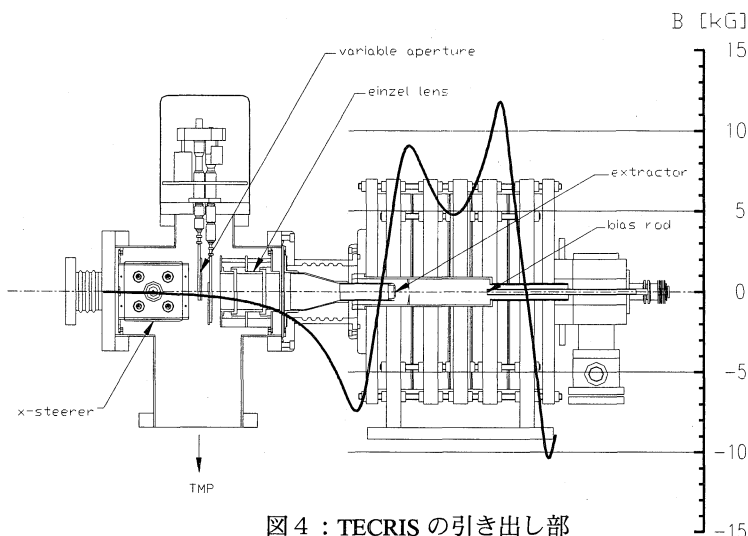


図4：TECRISの引き出し部

2.3 制御系

採用したイオン源が永久磁石型でRF電力も200Wであるから電力供給および制御方式は現在の方式が踏襲でき、末端電源及びその制御系は既存の物を利用あるいは改造する予定である。しかし度々発生する放電によって引き起こされる機器の故障によりイオン源が運転できない事態が生じることがこれまでにあった。対策として放電耐性を高めるために新たな制御方式の採用を試みる。

高電圧端子内の末端電源類は地上電位からの光デジタル通信により端子内のCAMAC経由で制御されている。放電耐性を高めるためにCAMACから各末端電源類に直接光ファイバーで制御信号を送る方式を開発している。これまでは周波数信号を用いていたために1本のファイバーで1つの制御点しか扱えなかったが、パルス符号を扱うことで複数の制御点を制御できるようにする。汎用のモジュールでは静電Qレンズなどを想定し4チャンネルのDACと8チャンネルのADCを1本のファイバーで制御できるように考えている。新たに製作する電源類はこの方式で制御を行なうようにしていく。

3 イオン源試験

試験台においてイオン源の動作試験を行なっている。実際に設置する状態でイオン源引き出し部は試験しており、その断面図を図4に示す。表1に現在得られているイオン源の引き出し試験の結果を示す。

表1：イオン電荷とビーム電流

Ar	電荷	8+	9+	11+	12+	
	電流 [μ Ae]	58	34	5.3	1.2	
Xe	電荷	15+	17+	18+	19+	21+
	電流 [μ Ae]	17	9.6	7.5	3.0	0.2

イオン源のカatalogデータと比較し十分な性能が発揮されていない。現在パラメータを振りながら特性を試験しているが原因の究明に至っていない。ほかにレンズ部の改良が必要なことがわかったので、レンズ径を大きくし引き出し部に近づけることを考えている。またビームのエミッタンスが悪いため引き出し部の形状や途中にアパーチャーを設けるなどする必要がある。予想はしていたが可変アパーチャーはそこからほじき出される2次電子がレンズに悪影響を与えたり、真空の悪化を招いたりするためにイオン源動作が安定せず現在は取り払って試験を行なっている。今後、引き出し部の改良を行うと共に所定の性能が出ていない原因を調査していく。

4 スケジュール

高電圧端子への装着は2004年の夏以降の定期整備にあわせて行なう予定である。それまでに整備期間を利用してガスストリッパーなどの不要物の撤去や使用する機器を高電圧端子内に設置し放電等に対する耐久試験を行なう。

参考文献

[1] M. Matsuda, *et al.*, Proceedings of the 11th Symposium of Accelerator Science and Technology, Harima, Oct. 21-23, 1997.
 [2] M. Matsuda, *et al.*, Proceedings of the 12th Symposium of Accelerator Science and Technology, Wako, Oct. 27-29, 1999.
 [3] P. Sortais, *et al.*, Proceedings of the 12th international Workshop on ECRIS, Riken, Japan, INS-J-182, Sep. 1995.
 [4] P. Sortais, *et al.*, Rev. Sci. Instrum., Vol69, No2, Feb. 1988, p.656