

大強度重イオン生成用イオン源と高効率ビーム輸送系の開発

大城幸光、渡辺伸一、山家捷一、久保野茂、片山武司

東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

概要

原子核科学研究センターは理化学研究所の AVF サイクロトロンビームコースに不安定核生成装置 (CRIB) を設置した。この CRIB[1]へ大強度重イオンビームを供給するために、多価イオン生成用イオン源 (Hyper ECR) 及びサイクロトロン入射系へのビーム輸送系を設置した。この輸送系と Hyper ECR イオン源の組み合わせにより光学系は、サイクロトロン入射系までのビーム透過効率が最大になるように設計されている。また、Hyper ECR イオン源のビームエミッタンスを改善するためにイオン源のビーム引き出し系を改造中である。

1 はじめに

理化学研究所 AVF サイクロトロンにある在来の理研 10 GHz ECR イオン源のビーム入射系に Hyper ECR イオン源 [2]用のビーム輸送系を追加した。サイクロトロンへのビーム入射のために平成 12 年 10 月から新輸送系の設計を始め、平成 14 年 2 月 25 日には Hyper ECR イオン源からの初ビーム入射に成功した。以来、ビーム入射はマシンタイム計画に応じて Hyper ECR と理研 10 GHz ECR を切り換えて行っている。

サイクロトロンへ垂直入射するビームの約 70 %は入射系の中心付近で失われる。この入射系の透過効率を改善するために新ビーム輸送系の設計製作は次の方針で行った。1) 系全体はイオン源から 20 kV で引き出したイオンまで受け入れられるものにする、2) ビーム分析電磁石はイオン源に近づけて配置する、3) 分析電磁石の前方に 2 連の Q 電磁石を入れる、4) 分析電磁石の磁場均一度を高める等である。この個々の効果については現在調査中であるが、系全体としてのビーム透過効率は改善されている。

2 イオン源

Hyper ECR イオン源は原子核科学研究センターの旧田無キャンパスで開発[3]され、低速イオン実験室で原子物理実験に使用されていた。理化学研究所の AVF サイクロトロンに移設後、イオン源の動作試験を行った。この結果と性能は次の通りである。

1) RF アンプの周波数と最大出力は 14.2 GHz と 2 kW である。アンプから多価イオン生成のためにイオン源に供給する RF パワーは 200 W~700 W である。アンプのクライストロンに 8.4 kV の定格電圧を印加し、700 W までの出力を確認した。

2) 図 1 に Hyper ECR イオン源の概略図を示す。これに $^{12}\text{C}^{5+}$ 及び $^{14}\text{N}^{6+}$ イオン生成の場合のミラー磁場も示した。両端のコイルに 450 A と 550 A の電流を流し、最大と最小値が 12 kG と 4 kG のミラー磁場を得た。この場合、ミラー比は 2.7、ECR ゾーンの長さは 7 cm、消費電力は 40 kW

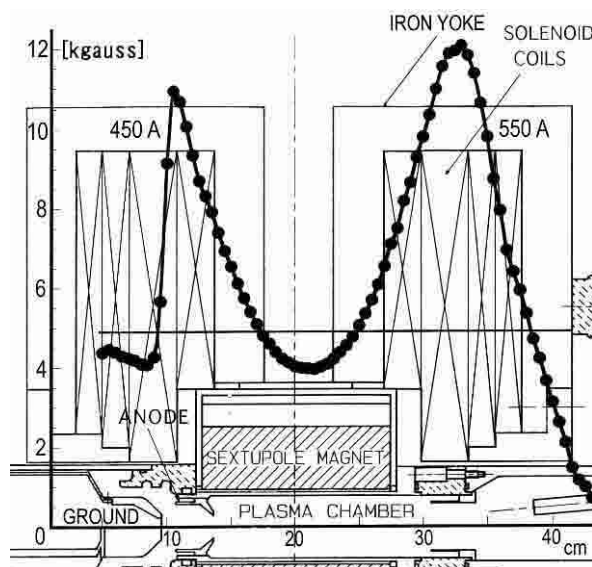


図 1 : Hyper ECR イオン源の概略図。

であった。図の六極磁石は Nd-Fe-B 製で、表面磁束密度は 11 kG であり、ミラーコイルは 600 A の最大励磁電流で、12.5 kG のミラー磁場が得られる。

3) ビーム引き出し系のアノード電極 (図 1 に示す) の位置とアノードに印加する引き出し電圧を変えてビーム強度を測定した。アノード電極がプラズマに接近し過ぎるとビームは不安定になり、また、引き出し電圧に比例してビーム強度は増加する。アノード電極入口位置は六極磁石の中央面から 6.5 cm 下流でビームサイズの変動が小さく強度も高い所に固定した。引き出し電圧が 10 kV と 20 kV の時のビーム強度を測った。結果は 10 kV の場合、例えば、 $^{14}\text{N}^{6+}$ イオンは 22 μA 、 $^{14}\text{N}^{5+}$ は 110 μA のビーム強度が得られ、20kV で 57 μA 、300 μA が得られた。

しかし、サイクロトロンの加速条件で引出し電圧 (入射電圧) が決まるので、現在の設計条件では入射ビーム強度は 11 kV で最大値を示す。

3 ビーム輸送系

図 2 に Hyper ECR イオン源とビーム輸送系 (BT)[4]の平面図を示す。これはイオン源、四極電磁石 (Q1、Q2)、分析電磁石 (BM)、ビーム診断装置 (PM、FC)、ソレノイド電磁石 (SOL) からなる。この構成で、イオン源から出たビームは電荷と質量比別に分離し、強度とサイズを測定して、サイクロトロン垂直入射部に導かれる。

サイクロトロンの真上には回転偏向電磁石 (図 2 RBM) を新規に取り付け、サイクロトロン入射部へ 2 台のイオン源からのビームを切換入射できるようにした。サイクロトロン入射系の中心軸の回りに RBM を 200 度回転させ、

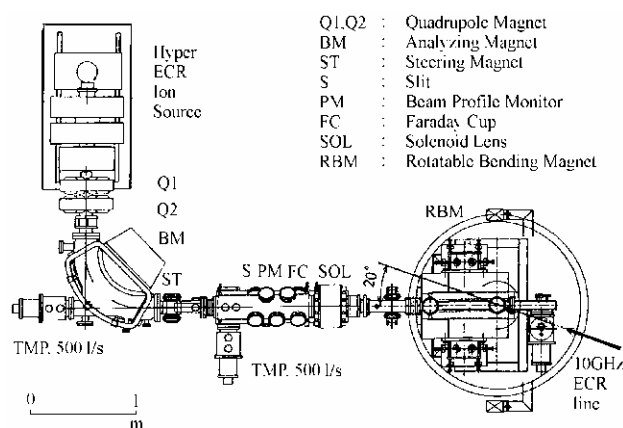


図2：Hyper ECR イオン源用 BT 系と回転偏向電磁石。

Hyper ECR または理研 10 GHz ECR からのビームを受け取った後、垂直方向に 90 度偏向させ入射する。この磁石は両イオン源の準備状況により切り替えて使用している。

表1：ビーム輸送系の主構成要素。

四極電磁石[Q1,Q2]	
磁極長：10 cm	磁極間隙：12 cm
磁場勾配：0.24 kG/cm (20 A)	
分析電磁石[BM]	
物点(像点)間距離：108.5 cm	
入(出)射角：29.6 度	偏向角：90 度
曲率半径：50 cm	磁極間隙：8 cm
最大磁束密度：2.37 kG (220 A)	
ソレノイド電磁石[SOL]	
磁極長：20 cm	磁極径：12.4 cm
最大磁束密度：2.5 kG (100 A)	
回転偏向電磁石[RBM]	
入(出)射角：29.6 度	偏向角：90 度
曲率半径：50 cm	磁極間隙：8 cm
最大磁束密度：1.5 kG (102 A)	

表1に新ビーム輸送系の主な構成要素を示す。これらの要素の配置でビーム透過効率を改善するために、この輸送系は次の特色を持っている。

1) イオン源からこれまでの2倍の引き出し電圧で取り出したビームまで制御できる輸送系にした。イオン源の引き出し電圧を高め、ビームエミッタンスを小さくし、透過効率を改善する試みである。この新輸送系は最大 $B\rho$ 値が 118.5 kGcm で、20 kV 引き出しの Ar^+ まで制御できる。

2) イオン源に分析電磁石を接近させて配置した。イオン源のアノード電極の位置と分析電磁石の物点を一致させたことである。この配置ではビームウエストを分析電磁石の前方に作らず、ビームの性質は引き出し電極付近の条件で決まる。また、ビームのドリフト距離 (108.5 cm) も短くなるので、分析電磁石までのビーム損失を小さくすることもできる。

3) 分析電磁石の前方に2連のQ電磁石を入れた。分析磁石に入るビームを水平垂直面で別々に制御し、像点での収斂を高める工夫である。分析電磁石入口の縦横比は約1/2で、Q電磁石の水平面補正励磁電流に対して垂直面では約

2倍の電流で使用している。

4) 分析電磁石の磁場均一度を高める工夫をした。この磁石は真空槽に排気口やモニターポートを取り付けるためC型である。この磁石の両磁極に2 mmのパーシャルギャップを設け、磁極表面に高さ2 mm、幅22 mmのシムを取り付けた。結果、ビーム軸から水平に±10 cmの範囲で±0.1%以内の均一度を得ている。また、分析電磁石の入口と出口のフリンジ磁場は鉄フレームで補正することで、有効磁場境界(EFB)を7 mmまで近づけた。

個々の効果の調査のために分析磁石前方のプロファイル測定モニターやエミッタンスモニターを製作中である。

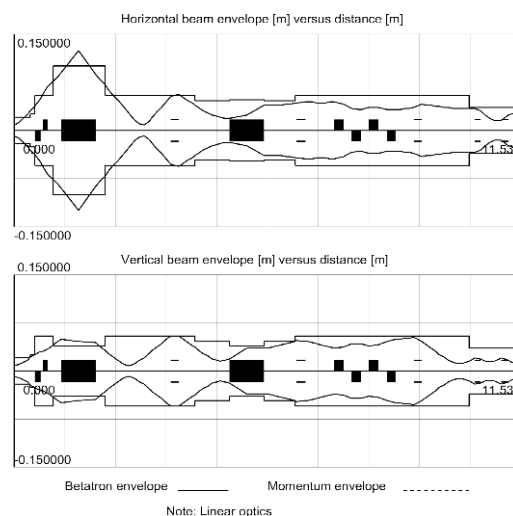


図3：サイクロトロン中心付近までのビームエンベロープ。

図3にイオン源のアノード電極からサイクロトロンのインフレクター入口までのビームエンベロープを示す。これは WINAGILE コード[5]を用い、ビームエミッタンスは水平面 138、垂直面 91 π mmrad、 $^{14}\text{N}^{5+}$ ビームで $B\rho$ 値は 30 kGcm と仮定して計算した。この計算結果はイオン源から出たビームの約 95 %がサイクロトロンのインフレクターに届く解である。これを基準にビーム輸送系を設計した。

4 ビーム透過効率

図4にイオン源から照射室 (CRIB) までのビーム輸送経路を示す。イオン源から水平方向に輸送したビーム (図中

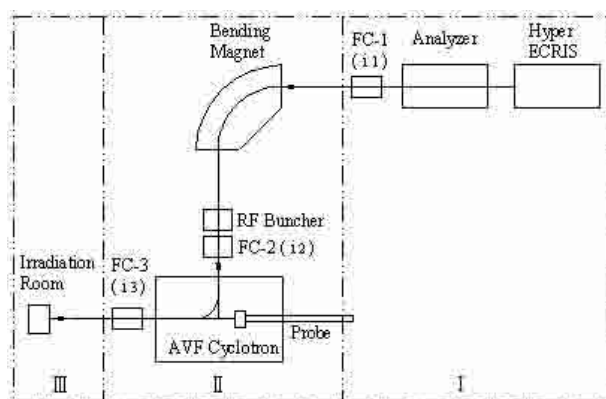


図4：照射室までのビーム輸送経路。

の I) は、回転偏向磁石で垂直方向に曲げる。垂直入射系 [6] でビームは 4 連の四極電磁石、5 個のソレノイド電磁石を通して、サイクロトロンの主電磁石の上ヨーク上方からメディウムプレーン (軌道平面) に入射する (図中の II)。サイクロトロンの軌道平面中心から上方の約 2 m の位置に RF バンチャーがある。

この経路内のビーム強度を測定し、透過効率を求める。図 4 に示す FC-1~FC-3 のファラデーカップとサイクロトン内部のビームプローブでビーム強度を測定し、比較する。これまでに Hyper ECR 入射でサイクロトンから取り出したことのあるビームの例を表 2 に示す。

表 2 : AVF サイクロトン取り出しビーム例。

イオン種	加速エネルギー [MeV/u]	イオン源ビーム強度 i_1 [eμA]	ビーム透過効率 i_3/i_1 [%]
H^+	9.9	56	14
$^{12}C^{4+}$	7.0	28	19
$^{13}C^{4+}$	4.0	16	11
$^{14}N^{5+}$	7.0	33	13
$^{14}N^{6+}$	6.4	6	29
$^{20}Ne^{7+}$	6.3	12	25

Hyper ECR イオン源の分析電磁石の像点からサイクロトン出口までの透過効率を同じく表 2 に示す。FC-1 の電流値 i_1 に対する FC-3 の i_3 (図 4 に i_1 と i_3 を示す) の比である。この結果から Hyper ECR ビーム入射ラインでの最大透過率は 29 % に達している。ちなみに、現状の理研 10 GHz ECR ラインでの透過率は 10 % 近傍であり、これに比較すると 3 倍近く改善されている。

表 3 : サイクロトン内部でのビーム透過効率の例。

測定位置 (サイクロトン半径)	透過効率 (%)
中心付近通過後の半径 7.5 cm	32.0
デフレクター入口半径 64.5 cm	26.8
デフレクター出口半径 82.5 cm	21.4

サイクロトン内部でのビーム透過効率の例を表 3 に示す。 $^{14}N^{6+}$ ビームを内部プローブで測定した電流値とイオン源取り出し値 i_1 (FC-1 の値) の比で示してある。表示値はサイクロトンの中心付近を通過し、その半径が 7.5 cm、及びビームデフレクターの入口と出口近傍で半径が 64.5 cm と 82.5 cm の位置までの透過効率である。これによると、サイクロトンの中心付近通過後の入射効率は 32 % で、イオン源から出たビームの約 70 % はサイクロトンの中心付近で損失する。

5 ビーム引き出し系の改造

イオン源の引き出し電圧を高めることは垂直入射したビームをサイクロトンから大強度で得るための一つの手段である。しかし、引き出し電圧はサイクロトンの入射電圧で決まる値で、これを一時的に高めるために、Hyper ECR イオン源の引き出し系に加減速電極を取り付けた。図 5 に加減速電極ユニットの写真を示す。このユニットはイオン源のプラズマ室のアノード電極に写真の右側の電極 (グラウンド電極) を接近させて取り付ける。この引き出し系には次のような特色がある。



図 5 : Hyper ECR 用加減速引き出し電極ユニット。

1) 真空を破らずにグラウンド電極 (穴径 16 mm) とアノード電極 (穴径 12 mm) 間のビーム引き出しギャップが変えられる。真空槽の外から操作して、現在使用している 50 mm のギャップから ± 10 mm の範囲で調整ができる。

2) 従来のグラウンド電極を絶縁して負の電圧が印加 (負電圧電極) できるようにした。例えばアノード電極が +10 kV で負電圧電極に -10 kV を印加した場合、イオン源で生成されたイオンは 20 kV で引き出すことになる。しかし、下流の電極はグラウンドレベルにあるためビームは減速される。このように、一時的に引き出し電圧を高めることでビームのエミッタンスを小さくし、透過効率を高める試みである。

3) 負電圧電極の下流にある 4 個の電極は全て絶縁した。これらの端子を外で接続を変えて、アインツェルレンズや電流モニターとして使用することができる。

これは既にイオン源に組み込まれて定常運転に使用している。これから加速減速試験を行う予定である。

6 おわりに

我々は理化学研究所の AVF サイクロトンに Hyper ECR イオン源と BT 系を取り付けた。このラインでのサイクロトン取り出しビーム透過率は 29 % に達した。また、理研 10 GHz ECR ラインとの切り替えで、入射前のイオン源の準備やオフラインテストも十分に行えるようになった。Hyper ECR イオン源の引き出し系を改造し、3 倍のビーム強度が得られた。現在は透過効率改善のための研究を進めている。

参考文献

- [1] T. Teranishi *et al.*, CNS Ann. Rep. 2001 (2002) 7
- [2] Y. Ohshiro *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. 36 (2003) 279
- [3] Y. Yamashita *et al.*, Proc. 8th Symp. on Accelerator Science and Technology, 1991, Saitama, Japan, pp. 84 - 86
- [4] Y. Ohshiro *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. 35 (2002) 256
- [5] Philip Bryant, AC division, CERN, private communication.
- [6] N. Nakanishi *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. 20 (1986) 188