

Development of RIKEN 28 GHz SC-ECR Ion Source

Yoshihide Higurashi^{#A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Tsuneaki Minato^{B)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{B)} Mitsubishi Electric Corporation

1-1-2 Wadamisaki-cho, Hyogo-ku, Kobe, Hyogo, 652-8555

Abstract

To produce intense RI beam using projectile like fragmentation, the RIKEN RIBF (Radio Isotope Beam Factory) ^[1] requires an intense beam (1 μA on the target). However, to meet such a requirement, we still need to increase the beam intensity. For this reason, we started to construct the new superconducting ECR ion source (SC-ECRIS) which has an optimum magnetic field strength for operational microwave frequency of 28 GHz in the summer of 2007. In 2009, we started to produce ion beam with 18 GHz klystron, and we successfully produced highly charged U ion beam with 28 GHz gyrotron in 2011. In 2012, we obtained 60 μA of highly charged U^{35+} ions from RIKEN SC-ECRIS with sputtering method.

28 GHz 超伝導 ECR イオン源の開発

1. はじめに

2007 年にファーストビームの生成に成功した理化学研究所仁科加速器研究センターの RIBF (Radio Isotope Beam Factory)計画^[1]は、全元素を核子あたり 345 MeV まで加速することができる。数ある核種の中でも U ビームは不安定核生成の効率が高い事が確認され、RI ビームの生成に最も有効なビームの一つとされ、その強度の増強が望まれた。

RIBF では当初、1995 年に製作された RIKEN 18 GHz ECR イオン源を入射イオン源として使用していた^[2]。このイオン源では RIBF で U ビームを加速する際に要求される 35 価においては約 2 μA (約 60 pA) 程度の生成量であった。しかし、1 μA をターゲットに照射するという目標を達成するためには各加速器の通過効率が 100 %であってもストリッパの効率がある為、イオン源から 15 μA を生成することが要求される。この強度を RIKEN 18 GHz ECR イオン源では達成することは、これまでの様々な基礎研究^[3]の結果から難しいことが明らかになった為、新しいイオン源の製作を計画した。

磁場強度		
RF 入射側最大ミラー磁場 (Binj)		3.8T
最小ミラー磁場(Bmin)		1.0T 以下
ビーム引き出し側最大ミラー磁場(Bext)		2.2T
最大 6 極磁場 (チャンバー内壁) (Br)		2.2T
マイクロ波周波数		28GHz
マイクロ波強度		10kW
プラズマチャンパー	内径	15cm
	長さ	50cm
最大引き出し電圧		40kV

表 1 : 28 GHz 超伝導 ECR イオン源設計値

[#] higurasi@riken.jp

ビーム強度増強のためには高マイクロ波周波数、強磁場が必要不可欠であり、かつ U^{35+} イオンビーム生成に最適なイオン閉じ込め時間を確保するための最適なプラズマチャンバーサイズを決定する必要がある。過去 10 年に渡る基礎研究の結果^[3-5]を基に表 1 の性能を設定した。更に 6 つのソレノイドコイルを配置することによって ECR ゾーンでの磁場勾配、大きさを独立に変化できるようになっている。これにより図 1 のような軸方向での磁場分布の自由度が生まれ、従来の 2 倍近くの電子サイクロトロン共鳴領域のサイズを得ることが可能となった。また

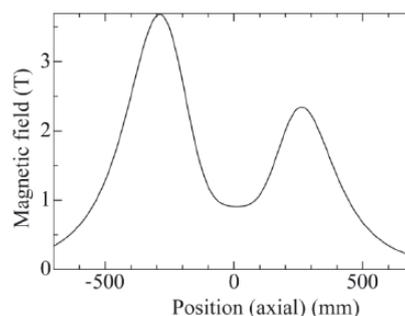
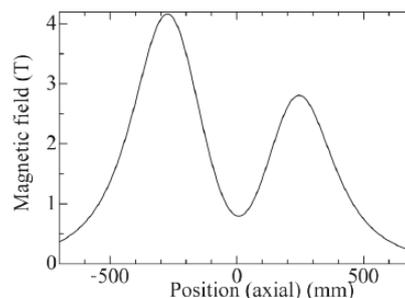


図 1 : 従来(上図)、"Flat B_{min} "^[7](下図)磁場分布

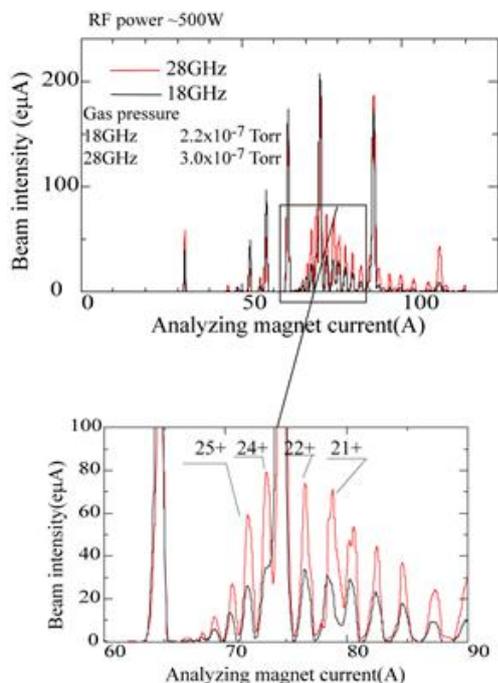


図2：18GHz,28GHz マイクロ波を用いた時のXeの価数分布。イオン源はXe²⁵⁺ビーム強度を最大にするように調整された。

この構造によって従来は不可能であった効果（磁場勾配、サイズ）が測定でき、性能向上に大きな役割を果たしている。^[6] 一方、磁場生成にはソレノイドと6極コイルの両方を超伝導で作る必要があるだけでなく、非常に高い性能が要求された。詳細を第3章に述べる。

本イオン源は2007年に製作を開始し、2008年に超伝導電磁石が完成した。2009年に100 kV 高压ステージ上で18 GHz マイクロ波源により約10 eqAのU³⁵⁺ビームをRIBFに供給に成功した。18GHz マイクロ波を用いたビーム生成実験の詳細に関しては文献[6,8,9]を参照されたい。2010年にはRILAC2の完成により新イオン源室に移設してビーム供給を行うとともに、28 GHz ジャイロトロンを設置運転を実施した。ジャイロトロン安定化のため電源改造を行った後、2011年に28 GHzでのビーム生成に成功した。28 GHzでは、Xe²⁵⁺イオンビームの強度に関して18 GHz入射に比較して約2倍程度のビーム強

度が得られた(図2)。詳しくは[10]を参照されたい。また2011年12月に約25 eqAのU³⁵⁺ビームを約1.5カ月間RIBFに供給に成功している。

2. RIKEN 28 GHz 超伝導 ECR イオン源の構成

本イオン源の外観と断面を図3に示す。ECRプラズマは超伝導ミラーコイルによって生成される磁場によって閉じ込められる。引き出し電極とプラズマ電極間に印加された電圧によりイオンが引き出された後、90度偏向磁石により価数が分離され加速器に入射される。プラズマチェンバーは内径150 mm、外径165 mm 二重管構造で管間に冷却水を流されている。また、プラズマ生成室内にはビーム強度を増強する為の工夫の一つとしてバイアス電極が設置され、-1 kVまでの電圧を印可することができ、電極位置はRF隔壁から100 mmほど0.1 mmの精度で移動させることができる構造となっている。

マイクロ波は18 GHzは最大1.5 kW出力のクライストロンから方形導波管を用い、28 GHzでは、最大10 kW出力のジャイロトロンより円形導波管を用第5章にて述べるようにUビーム生成においては現在スパッタ法が用いられており、その為の金属ウランが取り付けられる構造になっている。

3. 超伝導電磁石^[9,11~13]

3.1 超伝導コイルの概要

超伝導コイルは図4に示すように6個のソレノイドコイル(SL1~SL6)とその内側に置かれた6個のレーストラックコイルからなる6極コイル(内径径φ197mm)から構成され、機械的に一体化されて液体ヘリウムで浸漬冷却される。この超伝導コイルは室温ポア(φ172 mm)をもちプラズマチェンバーが挿入される。SL2とSL5の通電方向はSL1、SL6とは逆極性で、中央部に磁場の平坦部をもつミラー磁場を生成する。SL3とSL4は微調整用である。中央部の250 mmの領域は6極コイルに鉄の磁極を使用することにより6極磁場によるチェンバー表面での磁場の値を15%程度増加させている。一方、最大経験磁場が発生するSL1中心付近ではチェンバー壁面の磁場は強い為鉄磁極は使用しない。また、6極コイルの端部に働く動径方向の電磁力を緩和す

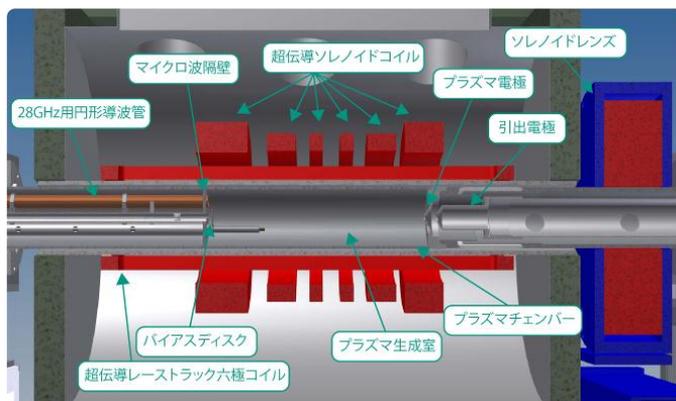
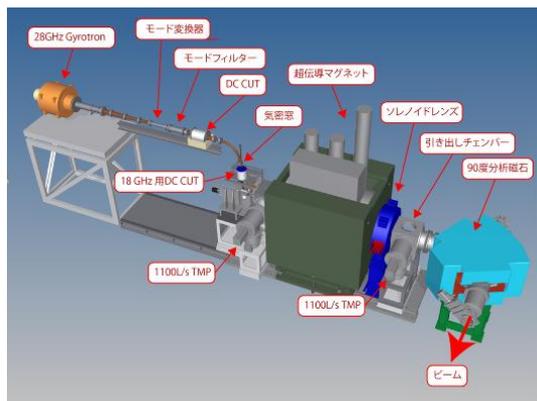


図3：28 GHz 超伝導 ECR イオン源外観図および断面図

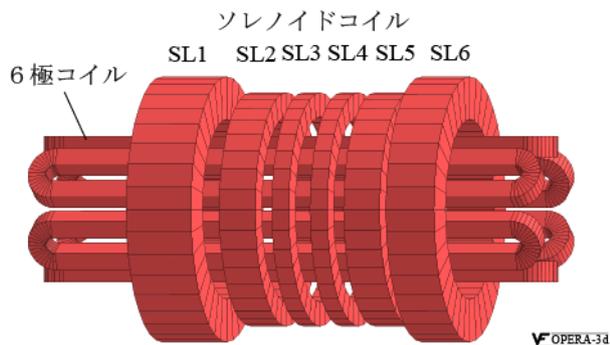


図4：超伝導コイルの配置

るため、コイルを長くしてソレノイド磁場の影響を小さくしている。超伝導線は Cu 安定化 NbTi 多芯線を使用した。SL3 と SL4 は銅比 6.5、直径 1.09 mm の丸型超伝導線、他のコイルは銅比 1.3、0.89 mm×1.25 mm の平角超伝導線を使用する。ソレノイドコイルの最大経験磁束密度は 7.2T であり、臨界電流に対する負荷率は 80 % である。6 極コイルの最大経験磁束密度は 7.4 T (線材と直角成分は 6.5 T) であり、線材と直角成分の磁束密度から計算した臨界電流に対する負荷率も 78 % と大きい。

3.2 コイルの巻き線

6 極コイルは巻線作業を容易にするために、巻線後にエポキシ樹脂を真空含浸し、加熱硬化する方式を採用した。エポキシ接着剤による塗り巻き法は類似コイルの過去の経験から採用が困難であると判断した。6 極コイルは実機と同等のコイルを試作してコイルの全断面にエポキシ樹脂が十分に浸透し、強固に超伝導線が接着することを確認した。一方、ソレノイドコイルは 6 極コイルと比してターン数が多く、導体に強い張力をかけて密に巻くため、真空含浸ではコイル内部までエポキシ樹脂が浸透しない可能性がある。このため、巻線時に超伝導線に樹脂を塗布する塗り巻き法を採用した。

3.3 6 極コイルの支持構造

6 極コイル直線部には自己磁場による電磁力の他に、ソレノイドコイルの作る動径方向の磁場成分によって周方向に、軸方向の位置とコイルの極性に依存する強くて複雑な電磁力が働く。この電磁力に対してコイルを強固に固定するため、6 極コイル直線部は図 5 に示す断面構造を採用した。コイルの内径側には鉄磁極とステンレス製スペーサーを挿入した後、三角形断面のチタン製スペーサーと共に組み立て、その周りに $\phi 0.65$ mm のステンレスワイヤーを 580 MPa の高張力で 4 層巻く構造とした。特に SL1 と SL2 の間はコイルの拡張力が極性によって大きく異なるので、外半径 250 mm、厚さ 30 mm のステンレスの円盤でコイルを支持することによりコイル変形を抑制した。コイルの変形と応力を計算するため、有限要素法(ANSYS)^[14]を用いた。図 6 に 6 極コイル直線部のモデルを示す。コイルは線材方向の弾性率を 97 GPa、横方向を 16 GPa として直交異方性材料

として扱った。冷却後のコイルの熱収縮量を 0.5 % とすると、バインドの張力は 25 % 程度減少する。コイルはバインドの張力と冷却時の熱収縮のため 0.16 mm 内周側に変位する。さらに励磁したときの変位量は 0.03 mm、コイル内のせん断応力は最大 7 MPa と許容できる数値であった。

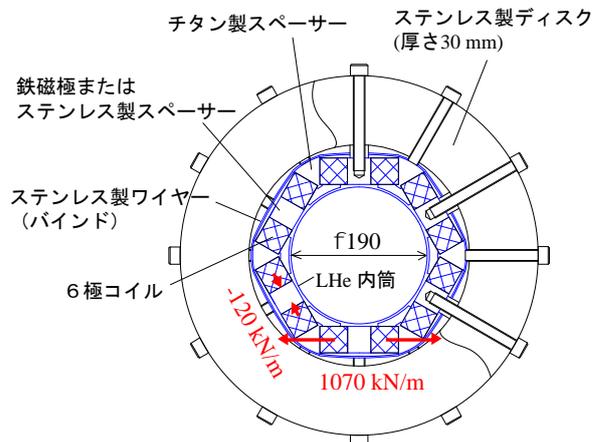


図5：6 極コイル直線部の断面構造。SL1 と SL2 の間とはとくに周方向の電磁力 (図示) が大きいため、ステンレス製ディスクを挿入しコイルの支持を強化した。

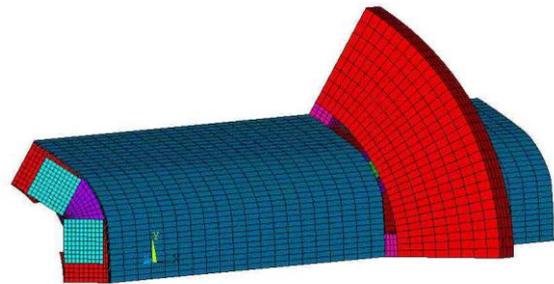


図6：6 極コイル直線部の構造計算(ANSYS)用モデル

3.4 クライオスタット

図 7 にクライオスタットの構成図を示す。超伝導コイルは液体ヘリウム約 330 L で浸漬冷却される。コイルへの電流供給は 9 本の高温超伝導体(HTS)電流リードを通して 7 台の直流電源で行なう。電流リードの破損やクエンチ時に発生する過電圧からコイルを保護するため、各コイルの両端子に双方向のクランプ用ダイオードを設置した。電磁ヨークは側面が 50 mm、RF 入射側とビーム引出し側端面は 80 mm で断熱真空容器の一部を構成する。液体ヘリウムは 2 段の 10 K GM 冷凍機 2 台と同じく 2 段の 4 K GM 冷凍機 1 台によって蒸発することなく維持されるが、入熱量を低減するため以下を採用した。(1) ヘリウム容器の断熱支持を GFRP 棒で行ない、2 段

のサーマルアンカを採用した。(2) 輻射シールドは2層とし、液体ヘリウム容器への熱侵入を最小とする設計とした。ただし、室温ボア部は6極コイルと真空容器間の距離(断熱部)が11.5 mmと非常に小さいため、低温側の輻射シールド1層のみとした。低温側シールドへの熱負荷が大きくなるが、室温に対面する面積は0.5 m²であり、許容範囲と判断した。完成試験において4 K GM冷凍機の冷凍能力(1 W 強@4.2 K)のほとんどはヒーターで消費され、熱負荷は0.2 W程度であった。一方、イオン源を運転したときはプラズマから大量の制動X線が発生するため大きな熱負荷となる。^[9] このため、4 Kで約4 Wの冷凍能力をもつGM-JT型小型冷凍機を2台設置した。現在イオン源は最大2 kWのRF電力で運転されており、4 KでのX線による熱負荷は約3.5 W程度である。液体ヘリウム槽の圧力はヒーターで安定に制御されている。

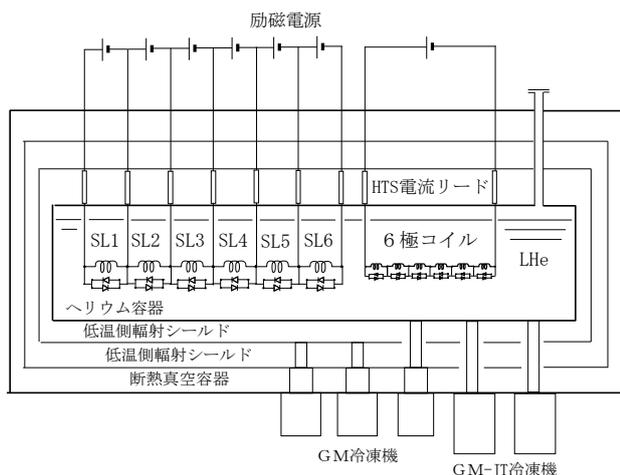


図7：クライオスタット構成図

4. 28 GHz ジャイロトロン

28 GHz 超伝導 ECR イオン源のマイクロ波源としてジャイロトロンを使用する。ジャイロトロンはマグネトロン型電子銃からの電子ビームをソレノイド磁場に沿って開放型空洞共振器内でマイクロ波を共振させる。ジャイロトロンの概要図を図8に示す。電子ビームの定格出力は22 kV、1.6 Aで、最大10 kWのマイクロ波が出力される。電源としてはカソードおよびフィラメント電源とメイン及びサブソレノイドコイルを励磁する直流電源が使用される。ジャイロトロンの出力は電子ビームの電流または加速電圧によって制御される。ジャイロトロンからイオン源までの伝送系は図3に示されたとおりである。ジャイロトロンはTE02モードのマイクロ波を連続出力する。出力されたマイクロ波はモード変換と

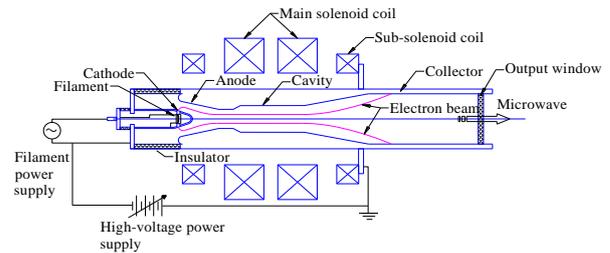


図8：ジャイロトロン概要図

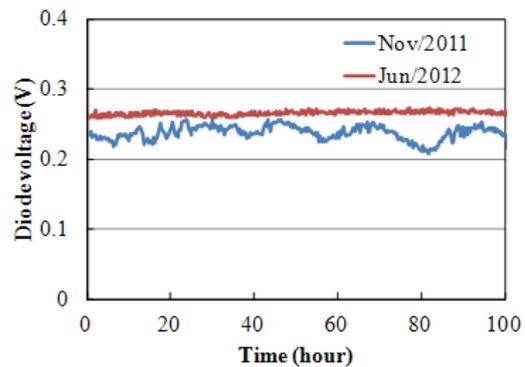


図9：マイクロ波進行波電力

モードフィルタを通すことによりTE01モードに変換してイオン源に入射される。進行波電力と反射波電力は方向性結合器に付けられた検波ダイオードで測定する。^[9]

4.1 ジャイロトロン電源の安定化

ダミーロードを使用した最初の試験において、マイクロ波電力のリップルが10%程度あり500 W以下では安定して発振させることができないことが分かった。この原因は1%程度のカソード電圧のリップルが増幅されて出力されるため、整流回路の容量を10倍に増加することによって電力リップルを約1/10に削減した。その後、ジャイロトロン出力にDCカットと90度ベンド及び真空窓を設置してマイクロ波をイオン源チェンバーへ導入した。2011年4月に初めて28 GHzによるECRイオン源を運転し^[9]、Xe²⁰⁺を70 μA引き出すことに成功した。2011年10月から12月にUとXeビームを、2012年6月にXeビームをRIBF実験に供給するため、ジャイロトロン及びイオン源の連続運転を行った。同期間中の連続100時間における方向性結合器のダイオード出力(マイクロ波進行波電力)を図9に示す。2011年11月のものはマイクロ波電力に換算して800 Wから1000 Wの範囲で変動おりビーム電流値に影響を与えていた。その後の調査でこの変動はジャイロトロン電源の置かれた部屋の温度と相

関が見られ、ソレノイド電源が 1℃あたり 100 ppm の温度係数をもつことによることが判明した。2012 年 6 月の運転ではソレノイド電源を高精度のものに更新することによってマイクロ波電力とビーム電流値の安定化が図られた。

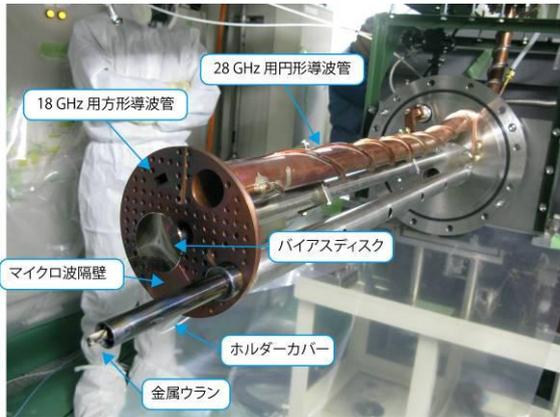


図 10 : マイクロ波および金属ウラン導入システム

5. U ビーム生成

現在 U ビーム生成にはスパッタリング法を用いている。プラズマチェンバー内に設置されたスパッタリングシステムの構造を図 10 に示す。現在、金属ウランにはチェンバーに対して最大 -6 kV の電圧をかける事が可能である。プラズマからイオンを引き込み金属ウランをスパッタリングすることにより、中性粒子をプラズマに供給する。RF パワーが 1.5 kW 程度までの詳しい結果は[15]に報告がされている。

最新のデータとしては 28 GHz 約 2 kW、スパッタ電圧 -5.5 kV、引き出し電圧 22 kV にて U^{35+} を 60 μA のビーム強度で生成することに成功している。典型的なスペクトルを図 11 に示す。ほぼ U^{35+} 中心のスペクトルになっている事がわかる。 U^{35+} のビーム強度の RF パワー依存性を図 12 に示す。この図が示す通りビーム強度は RF パワーの上昇に対して頭打ちになっておらず、RF パワーを増強することでビーム強度を増強することが期待できる。エミッタンス測定も行っており、例えば RF パワー 2kW 弱で U^{35+} ビームの強度が約 45 μA では、縦方向、横方向共に約 $110 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ という測定がされている。詳しい最新のエミッタンスの報告は[16]を参照されたい。

6. 今後の計画

現在、プラズマチェンバーをステンレス製よりアルミニウム製の物に換装中である。また今年春に GM-JT 冷凍機を、前述のとおり 2 台に増設した為、ECR プラズマからの X 線のヒートロードに対する 4 K における冷凍余剰能力が 4.6 W から 7.8 W に増強された。これにより現在よりも高強度のマイクロ波で運転を行えるようになる予定である。

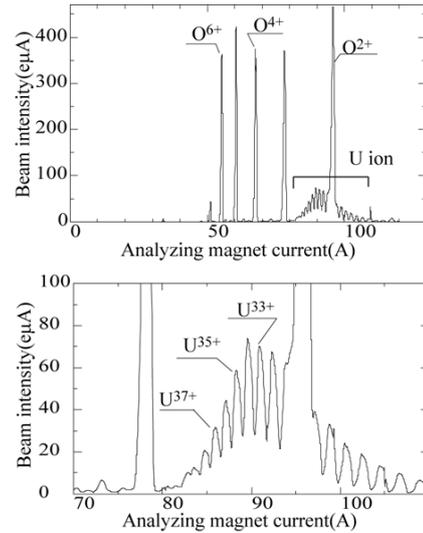


図 11 : U ビームスペクトル

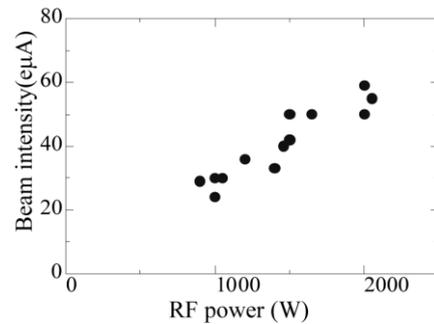


図 12 : U^{35+} ビーム強度の RF パワー依存性

さらに中性ウラン粒子の供給法としてスパッタ法から ECR プラズマを攪乱しない高温オープンに変更し、大強度化を図る予定である。

大強度化に伴いエミッタンスが増大することが予想されるが、加速器の入射に使用するため、輝度を上げるための開発が必要になる。また、ビームの安定度が長期、短期ともに問題になる。今後ジャイロトロン安定化を行った様に、ビームを安定化するための開発を進めたい。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B261(2007)1009
- [2] Y. Higurashi et al, R.S.I 79(2008)02C714
- [3] H. Arai et al, NIM A 491(2003)
- [4] M. Imanaka et al, Nucl. Instrum. Methods B237, 674(2005)
- [5] A. Girard et al, rev. Sci. Instrum. 75,1381(2004)
- [6] 日暮他、第 7 回加速器学会報告集 p243(2010)
- [7] G. D. Alton, and D. N. Smithe, Rev. Sci. Instrum. 65(1994)775
- [8] 日暮他、第 6 加速器学会報告集 p375(2009)
- [9] Y. Higurashi et al, 「加速器」 No.4 (2009) p.346
- [10] Y. Higurashi, et al., R.S.I 83, 02A308(2012)
- [11] 湊恒明他、「28GHz ECR イオン源用超電導磁石の開発」、電気学会,ASC09025, (2009)
- [12] J. Ohnishi et al., Proc. EPAC08, pp. 433-435(2008)
- [13] 大西他、第 5 回加速器学会年会/第 33 回リニアック技術研究会報告集, PP.406-408(2008).
- [14] <http://ansys.com>.
- [15] Y. Higurashi, et al., R.S.I 83, 02A333(2012)
- [16] K. Ozeki et al., in these proceedings