

# PRESENT STATUS OF RIKEN fRC

Nobuhisa Fukunishi<sup>1</sup>, Masaki Fujimaki, Masayuki Kase, Osamu Kamigaito, Misaki Kobayashi-Komiyama, Keiko Kumagai, Makoto Nagase, Naruhiko Sakamoto, Shigeru Yokouchi and Yasushige Yano  
Nishina Center for Accelerator Based Science, RIKEN  
2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

## Abstract

Construction of RIKEN fixed-frequency Ring Cyclotron has been completed in June 2006 and acceleration tests have been started in July 2006. We have succeeded in accelerating a uranium beam up to 50 MeV/nucleon on 21<sup>st</sup> July and extracting a uranium beam on 29<sup>th</sup> September with a beam intensity of 3 nA. To increase beam intensities, we have made various improvements not only on the fRC, but also on the injectors of the fRC. As a result, the beam intensity of a uranium beam has been increased up to 110 nA.

## 理研fRCの現状

### 1. はじめに

RIビームファクトリー加速器コンプレックスは水素からウランに至る全元素を核子当たり345 MeV以上に加速する能力を有するが、キセノンより重い原子核に対して核子当たり345 MeVを実現するには理研リングサイクロトロン(RRC)と中間段リングサイクロトロン(IRC)の間に導入された固定周波数リングサイクロトロン(fRC, fixed-frequency Ring Cyclotron)を用いねばならない。このfRCは近年の3次元磁場計算の高精度化を最大限活用して設計されたリングサイクロトロン<sup>[1]</sup>であり、固定周波数マシンであることも手伝ってRRCより大きなK値570 MeVを約半分の重量と1/3以下のコストで実現した加速器である。図1にfRCの構造を示す。fRCは2006年3月に電磁石、共振器などの主要構成要素の据え付けが完了し、2006年4月から6月の間にRF系の現地試験及びコンディショニング、加速パラメータを決めるための簡易的な磁場測定などを行い、2006年7月3日より加速試験を開始した。

2006年7月から11月の間に計7回の加速試験が行われたが、加速イオンは全てウランである。中期計画に示された2006年度内にSRCから核子当たり345 MeVのウランビームを取り出すという目標を達成するためにはウランビームの品質と量が成否を決める重要なファクターになるので非常に多くの試験時間をfRCにおけるウラン加速に割り当てた。ウラン加速においては、まず18GHz-ECRイオン源<sup>[2]</sup>にUF<sub>6</sub>ガスを導入して引き出した14個ウランを理研重イオンリアック(RILAC)で核子当たり0.67 MeVまで加速、RILAC下流のチャージストリッパ(20 μg/cm<sup>2</sup>の炭素薄膜を使用)で35個に荷電変換した後RRCを用いて11 MeVまで加速する。RRCから取り出されたビームは600 μg/cm<sup>2</sup>の炭素薄膜を用いて第2段の荷電変換を行い、73個ウランをfRCに送る。RRCとfRCの間に

はリバンチャーが設置され、fRCはこのビームを核子あたり50 MeVまで加速することとなる。加速試験は1回あたり約1週間で、既存施設の実験の間に行われた。RRCにおいても殆ど加速実績のないウランビームに対して、既存施設側にもトラブルが多発したが、7月17日より始まった第2回加速試験においてウランビームがfRC設計エネルギーに到達したことを確認した<sup>[3]</sup>。しかしながら加速されたビーム量は僅か3 nAであり、ビーム取り出しには失敗した。ここではfRCに至る加速器系が抱えていた問題、それに対する対策と効果、fRCに残された課題について報告する。

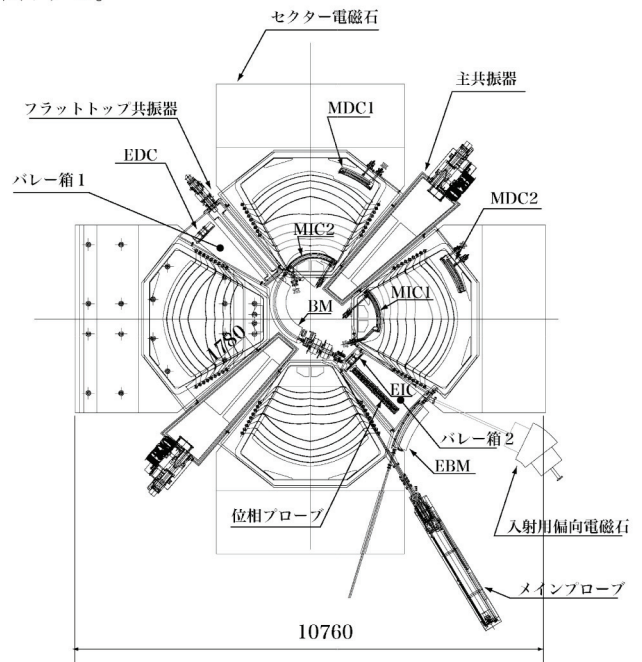


図1 fRCの構造

<sup>1</sup> E-mail: fukunisi@ribf.riken.jp

## 2. fRCによるウラン加速時の問題と対策

7月に行われた第2回のfRC加速試験において、RRCに入射したビーム量は800 nA、取り出しビーム量は500nA(ストリッパ下流の測定値である)、これを荷電分離して得られた73個ウランビーム量は40 nA、fRCに入射し設計エネルギーまで加速されたビーム量は前述の通り3 nAであった。RRC下流における第2段の荷電変換効率を考慮すると、ビーム損失がなければ300 nAのビームがfRCで加速されなければならない、実には通過効率1%と惨憺たる有様であった。数々の理由があったが、運転技術の未熟さや当該運転モードにおけるコンディショニング不足などを除いてその原因を列挙すると、(1)RILAC下流の第1ストリッパの寿命が極端に短いこと、(2)設計上必要なfRC入射リバンチャーが稼働していなかったこと、(3)RRC下流の第2ストリッパにおいて想定以上のビーム品質の悪化が認められたこと、(4)fRCにおいて精密な等時性磁場の生成に失敗したこと、などである。

(2)のfRC入射リバンチャー<sup>[4]</sup>は現地調整試験が8月にスケジュールされており、8月30日に定格の5.3 kW、472 kV(4ギャップの合計)におけるCW運転に成功し、9月以降の加速試験で実戦投入された。リバンチャーの実装により9月29日にfRCよりファーストビーム取り出しに成功した。

(4)の精度良い等時性磁場が生成出来なかった理由は位相プローブの信号がノイズに埋もれて検出出来なかったためである。位相プローブとはfRCのバレー部の内周側から外周側にかけて設置された14個のピックアップ電極のことである。各々の位相プローブの有感領域を通過する周回ビームの平均位相を測定し、その結果を基にメインコイル、トリムコイルの電流値を最適化することにより精度良い等時性磁場が実現される。fRCで要求される等時性磁場の精度は、0.01%程度の局所的なバラツキは許容されるものの全体として数ppm程度であり、磁場測定では決して実現出来ない精度であり、加速時の位相プローブデータが必要不可欠である。RRCでは位相プローブの信号をアンプで増幅した後、直接オシロスコープで観測しているが、fRCでは種々のノイズ対策を施しても状況は改善せず、結局ロックインアンプ(LIA、SR844を使用)を用いて測定することとした。図2は11月13日にLIAを用いて生成した等時性磁場の様子を示したものである。これにより漸く等時性サイクロトロンとして正しく機能する様になった。

ストリッパ関連の課題は重イオン施設において本質的に重要な問題である。リニアック下流の第1ストリッパの寿命が使用に堪えないほど短い可能性がある事は以前より指摘されていたが<sup>[5]</sup>、実際に10  $\mu$ Aビームに対しては数分でビームのエネルギー広がりが大幅に増大、30分以上連続して使用することは事実上不可能であった。少ないビーム量でも検討すべき課題が多数あるため加速試験自体はビーム量を1/10に絞って続行されたが、ストリッパの寿命を短期間に大幅に延ばすことは困難である。よってイオン源より35個イオンを供給してもらうことと

し、この問題を回避することとした。9月から精力的に行われたイオン源における35個イオン生成試験の結果<sup>[6]</sup>、イオン源引き出しビーム量は14個引き出しの10%にまで増大し、第一ストリッパにおける荷電変換効率11%とほぼ同等の値になったため、ビーム量の大幅な減少は免れた。イオン源から35個ウランを引き出しての加速試験は2007年3月から始まった。

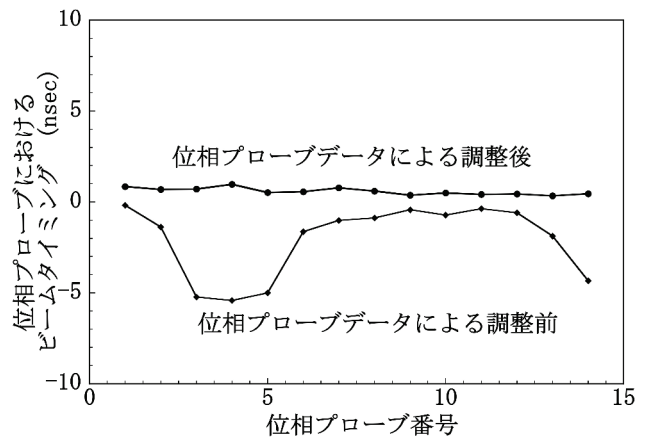


図2 fRCの等時性磁場(07年11月13日)

(3)のRRC下流第2ストリッパは膜厚600  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜を使用しており、これによるRRC取り出しビームのエネルギー損失は3%、fRCはこのエネルギーのビームを加速するべく入射半径が決められていた。等時性サイクロトロンにおいて、ビームエネルギーと軌道半径の間には決まった関係があり、設計エネルギーと異なるエネルギーのビームを入射すると入射点における分散を  $D$ 、 $\delta = \delta p/p$ 、 $p$ は運動量として  $D\delta$ の振幅でベータトロン振動が誘起される。適度なベータトロン振動は取り出し効率を上げるために有効であるが(所謂オフセンタリング加速)、振幅が大きすぎるとビームの質の悪化が顕著となり好ましくない。fRCの場合は71個まで加速可能であり、これには300  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜で十分であるが、エネルギー損失が3%から1.5%に減少し、この1.5%の違いは適正なベータトロン振幅の2倍以上の振幅を与えるためfRCの入射半径を変更することとした。軌道計算によればEICおよびその上流のMIC1を約1 cm外周側に移動する必要があり、MIC1に関してはその位置調整機能がカバーする範囲内であるが、EICにおいてはEICを取り付ける座の改造および、1 cm外側に移動した際に発生する位相プローブとの干渉を回避するための改造が必要となった。この改造は2006年11月下旬に行われた。

これらの改良の結果、fRC取り出しビーム量は図3の通り順調に増え続け、精密な等時性磁場の生成に成功した11月14日にはビーム量35 nA、通過効率30%に、71個ウランを加速した2007年1月20日には63 nA(通過効率48%)、イオン源から35個ウランを引き出して加速した3月24日には110 nA(通過効率92%)を実現した。これら数々の改良、改造の結果、3月の

加速試験では容易にウランビームをSRCで加速することができ、ビーム取り出しに成功した。その後も5月に予定されていたRIBF初実験に向けてRRC入射側のリバンチャーシステムの配置換えを行い、これまで以上に短いバンチ幅のビームをRRCに入射することに成功したためRRC取り出しビームのエネルギー広がりが小さくなり、結果的にfRC取り出しビーム量も約2倍に増加した。これが5月13日のビーム量210 nA (fRC通過効率100%)である。なお、ここに示したビーム量は改良前のファラデーカップの読みそのものの値であり、飛程の短いウランビームにより大量に発生する二次電子の影響が正しく較正されていない点に注意されたい。図中最後の測定点、07年6月29日のデータは二次電子サプレッサーに永久磁石を用いた改良型ファラデーカップによるもので、5月に比べて見かけ上ビーム量が約半分になっているが実際のビーム量には大差なく、旧来のファラデーカップは少なくとも2倍程度多めに読んでいたものと推察される。

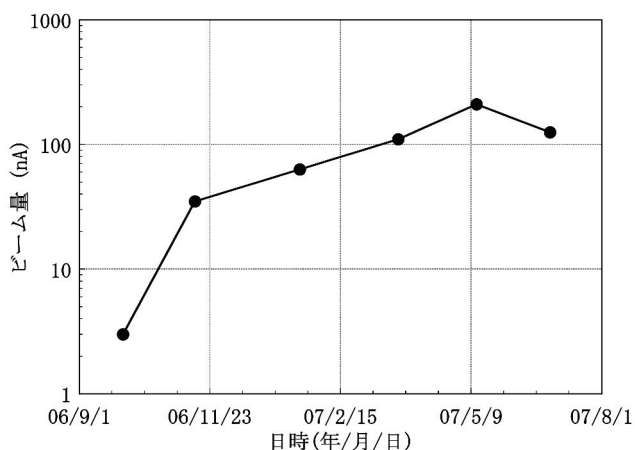


図3 fRCから取り出されたウランビーム量の変化

### 3. 今後の課題

最も新しい加速試験、つまり07年6月29日のデータによればfRCの取り出し効率は90%であり、この値を信ずれば既にコミッションング時としては十分に調整されていることとなる。一方、fRCにはMDP (Main Differential Probe) と呼ばれるビームのターンパターンを測定する装置が取り付けられており、このパターンが奇麗であれば十分に調整されていると判断される。図4はfRCのMDPで測定したパターン(図中上側)とシミュレーションによる計算結果(図中下側)を示したものである。先に述べた「奇麗な」ターンパターンとはビームのベータトロン振動を反映して現れるピーク構造において、ピークとピークの分離が良いという意味である。fRCのビーム取り出しの第一段階には静電セプタムが用いられ、ピークとピークの分離が悪いとセプタム電極にビームが当たって失われるので問題なのである。図中下側のシミュレーション結果はfRCに入射されるビームの質を設計値よりわざと悪くして評価したもので

あるが、それでもピーク間の分離は良好で、このようなパターンであれば90%に近い取り出し効率が期待される。一方、実測はピーク間の分離が悪く、期待される効率は高々60%程度であろう。つまりビーム量を指標に考えればfRCは良く調整されている様に見えるし、ターンパターンを信ずれば調整が不十分である。この様に未だ種々のプローブによる測定量の間には不整合が残り、徹底的な原因究明が必要である。ファラデーカップによるビーム量の読みに関しては、前述の通り二次電子の影響を完全に除去出来ているかという問題があるため、仮にMDPによる測定結果が正しくfRCで未だ奇麗に加速出来ていないとするならば、RRC直後におかれたストリッパの品質に問題があるか、fRC入射リバンチャーもしくはfRCのフラットトップ共振器の位相の設定精度が不十分である可能性が高く、次回の加速試験ではこの問題を詳細に調べる予定である。いずれにせよ、これまで多くの問題を解決して来ており、fRCに残された問題も早期に解決し、質の良いビームを後段のIRC、SRCに送る事が2007年内の目標である。

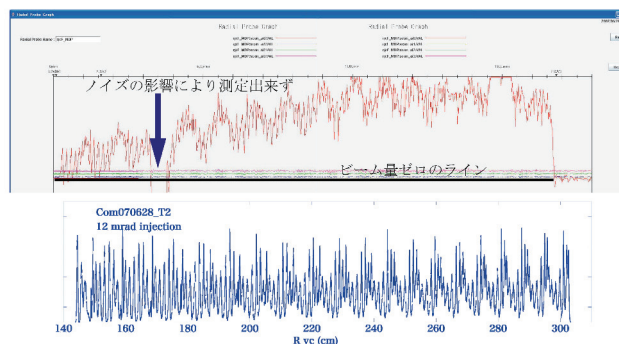


図4 fRCのターンパターン

### 参考文献

- [1] T. Mitsumoto et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, October 2004, Tokyo, p. 384.
- [2] T. Nakagawa et al., Nucl. Instrum. Methods B226 (2004) 392.
- [3] N. Fukunishi et al., Proceedings of PASJ3-LAM31, August 2006, Sendai, WO13.
- [4] T. Aoki et al., Proceedings of PASJ3-LAM31, August 2006, Sendai, FP20.
- [5] H. Ryuto et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, October 2004, Tokyo, p. 307.
- [6] Y. Higurashi et al., Proceedings of PASJ4-LAM32, August 2007, Wako-shi Saitama, FO14.