

COMMISSIONING OF RI BEAM FACTORY ACCELERATOR COMPLEX

Nobuhisa Fukunishi¹, Masaki Fujimaki, Tadashi Fujinawa, Akira Goto, Hiroo Hasebe, Yoshihide Higurashi, Kumio Ikegami, Eiji Ikezawa, Naohito Inabe, Tadashi Kageyama, Osamu Kamigaito, Masayuki Kase, Masanori Kidera, Shigeo Kohara, Misaki Kobayashi-Komiyama, Makoto Nagase, Keiko Kumagai, Takeshi Maie, Takahide Nakagawa, Jun-ichi Ohnishi, Hiroki Okuno, Hiromichi Ryuto, Naruhiko Sakamoto,
¹Masanori Wakasugi, Tamaki Watanabe, Kazunari Yamada, Shigeru Yokouchi and Yasushige Yano
Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN
Hirosawa 2-1, Wako-shi, Saitama, 351-0198

Abstract

RIKEN Nishina Center started beam commissioning of the RI Beam Factory accelerator complex in July 2006. We succeeded in extracting the first beams from the fRC (fixed-frequency Ring Cyclotron), the IRC (Intermediate-stage Ring Cyclotron) and the SRC (Superconducting Ring Cyclotron) on September 29, November 25 and December 28, 2006, respectively. We also accelerated a uranium beam up to 345 MeV/u in March 2007. Our progress on beam commissioning and present performance of RIBF accelerator complex will be outlined.

RIビームファクトリー加速器系のコミッショニング

1. はじめに

RIビームファクトリー(RIBF)計画^[1]は水素からウランに至る全元素を核子あたり345 MeV以上に加速し、これを後段の不安定核生成分離装置BigRIPS^[2]に打ち込んで自然界に安定に存在しない不安定原子核ビームを生成し、宇宙における元素合成のプロセス、不安定原子核の構造、反応機構などを解明するために1997年度より理研和光キャンパスにおいてプロジェクトが始まった。2006年度は加速器系建設の最終年度に当たり、RIBF計画で建設された3台の新サイクロトロンビームコミッショニングが精力的に行われた。コミッショニングの経緯に関しては参考文献^[3]に詳しいので、ここでは経緯を簡単に記すにとどめ、コミッショニングの結果得られた現時点におけるRIBF加速器系のパフォーマンスについて述べる。RIBFのレイアウトを図1に示しておく。

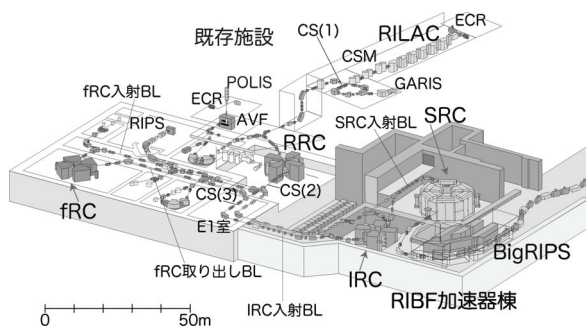
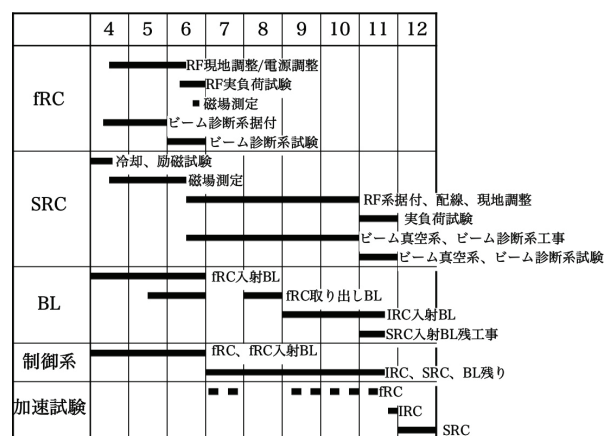


図1 RIBFのレイアウト

2. コミッショニングの経緯

RIBFのビームコミッショニングは2006年7月より

始まった。RIBFでは3台の新サイクロトロンを建設したが、まず最上流のfRC^[4]のビームコミッショニングを既存施設の実験の間に、かつIRC、SRC、ビームラインなどの建設工事と並行する形で行った。図2は2006年12月までの建設および加速試験のスケ



ジュールを示したものである。

図2 2006年中の建設および加速試験スケジュール

まずfRCにおいて2006年9月29日に核子あたり50 MeVのウランビーム取り出しに成功した。7月から11月の間に計7回、fRCを用いたウラン加速試験を行いビームの品質および通過効率の向上に取り組み^[5]、その後IRC入射ビームラインの完成を承けて11月21日よりIRC^[6]において加速試験を行った。加速ビームは⁸⁴Kr³¹⁺であり、11月25日にはビーム取り出しに成功、加速開始から取り出しまで1時間50分を要したのみで、非常に容易に取り出しに成功した。一方、

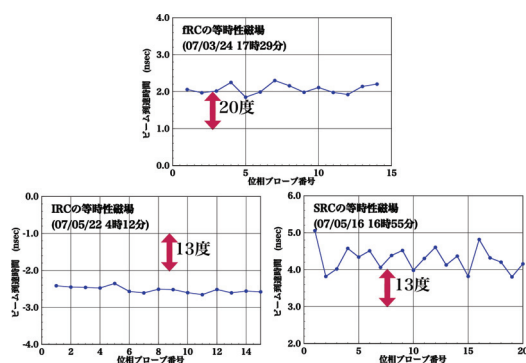
¹ E-mail : fukunisi@ribf.riken.jp

世界初の分離セクター型超伝導サイクロトロンSRC^[7]の加速試験は非常に難渋したが、12月28日16:00にファーストビーム取り出しに成功した。加速ビームは²⁷Al¹⁰⁺、345 MeV/nucleonであった。その後数々の改良を加えながら2007年3月15日にはSRC下流のBigRIPSにおいてRIビームの生成に成功、翌週3月23日にはSRCから核子あたり345 MeVのウランビーム取り出しに成功した。これにより中期計画に示された目標を全て達成したこととなる。更に3月加速試験時に放射線発生施設としての施設検査も受検し、IRC、SRCに関しては3月22日に、fRCに関しては4月4日に合格の通知をいただいた。これにより実験目的でユーザーにビームを供給する事が可能となった。その後5月中旬から6月初旬にかけて核子あたり345 MeVのウランビームを用いたRIBFの初実験が行われ、新アイソトープ¹²⁵Pdの発見^[8]という成果が得られた。

3 現時点におけるRIBFの性能

3.1 新サイクロトロンの等時性磁場

サイクロトロンにおいて等時性磁場の精度は生命を制する問題である。図3の測定データはサイクロトロン加速領域を半径方向に14~20分割する形で設置されたピックアップ電極(位相プローブ)に対する周回ビームのタイミングを示したもので、測定はロックインアンプ(SR844)を用いて行われた。3台ともほぼ良好な等時性磁場が得られている。なおSRCの等時性磁場が他に比べて精度が悪いが、これはビーム量が少なくロックインアンプの測定精度(S/N比)が上がらないためであり、ビーム量が増えれば



fRC、IRCと同等になると期待している。

図3 新サイクロトロンの等時性磁場

3.2 通過効率

図4に2007年6月29日のビーム量、通過効率のデータを示す。加速イオンはウランである。図にはRIBF加速器系の主要ポイントにおけるビーム量(nA)が示され、括弧内の数字はイオン源からそのポイントまでの加速器系の通過効率である。なお、ビーム量および通過効率の値は未校正のファラデーカップの読みそのものであり、2倍程度の誤差が含まれている可能性がある。RRCの通過効率が100%を越えてい

るのはこのためである。ウラン加速時にはRRC下流及びfRC下流の2ヶ所で荷電変換を行うが、括弧内の通過効率は荷電変換効率を除いた値である。荷電変換効率はその価数分布測定から実験的に求められ、トータル5%である。図中右上の赤字で示されたTotal 0.2%は荷電変換効率まで含んだRIBFの全通過効率である。図から明らかな様にウラン加速における通過効率は極めて低く、イオン源からSRC取り出しまでの加速器系の通過効率は4%である。ウランビーム加速においては理研重イオンリニアック(RILAC)から始まりRRC、fRC、IRC、SRCの計5台の加速器で加速するが、十分な通過効率を与えるのはRRC、fRCのみである。原因は調査中であるが、その

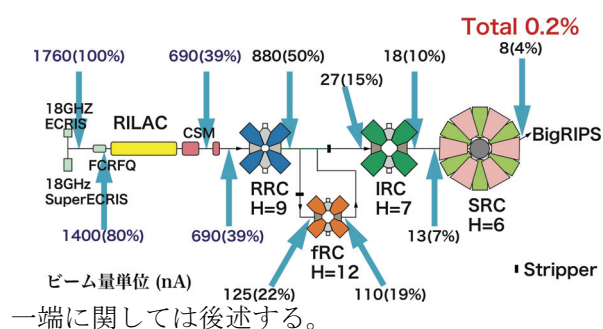


図4 ウラン加速の際のビーム量と通過効率

3.3 長時間安定度

加速器系の長時間安定度は、施設の生産性を決める重要なファクターである。RIBFはRFQと6台の加速タンク、入射バンチャー及びリバンチャーからなる重イオンリニアック系と4台のリングサイクロトロン、これに加えて3台のリバンチャー、更に2ヶ所に設置されたチャージストリッパーからなる複合システムである。システム全体としての長時間安定度はサイクロトロンの等時性磁場の安定度、チャージストリッパーの寿命、RFシステムの安定度に支配される。このうちチャージストリッパーに関しては、fRC下流のストリッパーの寿命は十分に長く、事実コミッショニング期間中同一の炭素板(14 mg/cm²)を使用し続けている。一方RRC下流のストリッパーは12時間程度でビーム量の有意な減少が見られるため、一日に二回程度の割合で交換している^[9]。サイクロトロンの磁場に関しては、RRCとfRCにおいてNMRプローブによる常時監視を実行している。電磁石立ち上げ後1週間程度経過した時点の長時間安定度を見るとfRCでは一時間あたり1.2ppmの変動がみられ、サイクロトロンにおいては5ppmの磁場変動は許容できないため3時間に一回程度の調整が必要になっている。IRC、SRCに関してはNMRによる磁場のモニタリングは今後の課題である。RF系の長時間安定度はRILACの一部に関してベクトル電圧計を用いた測定が行われ仕様を満たすことが確認されているが、常時監視システムの構築は今後の課題となっ

いる。

上記はハードウェアの状態監視について述べたものであるが、RIBFにおいてはビーム位相をピックアップ電極とロックインアンプを用いて常時監視するシステム^[10]を構築中であり、現在はRILACからfRCの間計4カ所でビーム位相の常時監視が可能である。図5は2007年6月21日に行われたウラン加速試験の際のRILAC下流e11におけるビーム位相測定の結果である。図中縦線で表される短時間の急激な変動は我々の調整を反映したものであるが、それ以外にも1 nsec程度の変動が見られる。我々の要求する安定度は0.2 nsec以下であり、この不安定性の原因説明、対策も早期に解決すべき課題である。

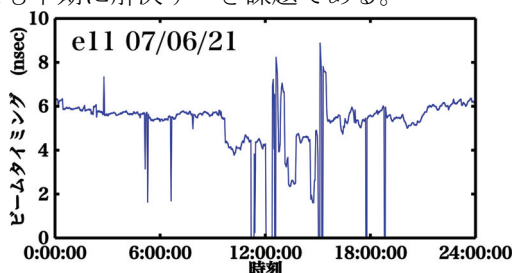


図5 RILACビームの長時間安定度

3.4 ビームの質

図6にウランビームの縦方向(時間方向)分布の一例を示す。RIBFでは各加速器の下流に各々2,3カ所、プラスチックシンチレータを設置し、ビームエネルギー及び時間構造を測定できる^[11]。図はIRC下流K01における測定結果である。ウラン加速において、IRC加速共振器は36.5 MHzで運転されるがRILAC及びRRCが18.25 MHzで運転されるためビームは本来18.25 MHz周期でIRCから取り出されなければならない。実際には18.25 MHz周期の中間に強度の弱いピークが見られる。このピークはハーモニック7のIRCにおいて、正規の周回数に比べて1ターン余分に加速されたビームが取り出されたため生じる現象であり、IRCに入射されたビームの位相広がりが大きすぎるという事実の反映である。18.25 MHz周期の主要ピークも詳しくみると複数の成分で構成されており、混入しているのは正規の周回数に比べて2ターン余分に加速されたものである。これらの結果などからIRCに入射されたビームの位相広がり50度程度であったことが分かった。位相アクセプタンスは高々25度であり、図4の通過効率測定時にはIRCのフラットトップ共振器を使用していなかった事とあわせてIRC、SRCの通過効率が上がらない理由となっている。IRC入射ビームの位相幅が想定以上に広い理由としてはRRC下流ストリッパーおよびfRC下流ストリッパーの品質(膜厚均一度)やfRCの調整技術の未熟さなどが可能性として挙げられる

が、定量的な原因追及は秋以降の加速試験で行う予定である。

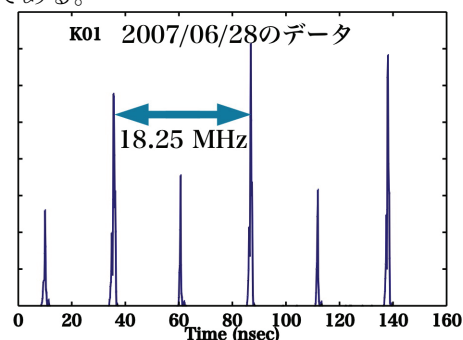


図6 IRC下流K01におけるビームの時間方向構造

4 まとめ

2006年7月よりRIBFのビームコミッショニングを開始し、中期計画に記された2006年度中に達成すべき目標は全て達成した。核子あたり345 MeVのウランビームを用いて新RIを生成する実験にも成功した。一方複合加速器システムとしてのRIBFはこの一年間順調にビーム量の増大、通過効率の向上を実現してきたが未だ数多くの解決すべき問題が残り、今年度中に予定されている加速試験においてこれら諸問題を解決することが求められている。これにはビーム診断系の高精度化、システム全体としての安定度向上が必須であり、現在精力的に対策を講じている。

参考文献

- [1] Y. Yano, "The RIKEN RI Beam Factory Project: A Status Report", Nucl. Instr. Meth. B (2007), doi:10.1016/j.nimb.2007.04.174 (in press).
- [2] T. Kubo, Nucl. Instr. Meth. B204, 97 (2003). T. Kubo et al., "Status and Overview of Superconducting Radioactive Beam Separator BigRIPS at RIKEN", IEEE transactions on applied superconductivity, in press.
- [3] N. Fukunishi, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 4. No.2 112 (2007).
- [4] T. Mitsumoto et al., Proc. 17th Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, 384 (2004).
- [5] N. Fukunishi et al., Proceedings of PASJ4-LAM32, August 2007, Wako-shi Saitama, WP12.
- [6] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, 197 (2004).
- [7] H. Okuno et al., Proc. 17th Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, 373 (2004).
- [8] Y. Yano, "Status of the RIKEN RIB Factory", Proceedings of Particle Accelerator Conference 07, June 2007, Albuquerque, USA.
- [9] H. Ryuto et al., Proceedings of PASJ4-LAM32, August 2007, Wako-shi Saitama, FO21.
- [10] R. Koyama et al., Proceedings of PASJ4-LAM32, August 2007, Wako-shi Saitama, WP38.
- [11] T. Watanabe et al., Proceedings of PASJ4-LAM32, August 2007, Wako-shi Saitama, WP37.