

STATUS REPORT ON CONSTRUCTION OF RIBF ACCELERATOR COMPLEX

Nobuhisa Fukunishi, 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,
Masanori 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 RI Beam Factory (RIBF) project started in 1997 to produce various radioactive isotope beams with the world-highest beam intensities. Three new ring cyclotrons including the world-first super-conducting ring cyclotron are under construction. The whole accelerator complex will be commissioned at the end of this year. We will report our progress of construction of the RIBF accelerator complex. We also report results of acceleration tests of uranium beams with a newly constructed cyclotron.

理研RIビームファクトリー計画の加速器建設状況

1. はじめに

RIビームファクトリー計画¹⁾は、水素からウランに至る全元素を350 MeV/u以上のエネルギーに加速し、これをRIビーム生成分離装置Big-RIPSに打ち込み世界最大強度のRIビームを発生させ、安定線から離れた不安定原子核の構造や宇宙における元素合成の謎を解明することを目的として1997年にスタートした。Big-RIPSに打ち込む一次ビームの強度は1pμAを目標としている。これを実現するために、RIビームファクトリー計画においては既存の理研リングサイクロトロン(RRC)、その2種類の入射器、重イオン線形加速器群(RILAC+CSM)およびAVFサイクロトロンに加えて、新たに3台のサイクロトロンを建設中である。建設中の3台のサイクロトロンは上流から固定周波数リングサイクロトロン(fRC)、中間段リングサイクロトロン(IRC)および超伝導リングサイクロトロン(SRC)と名付けられた。施設の概要を図1に、3台の新サイクロトロンの性能をRRCと比較して表1にまとめておく。

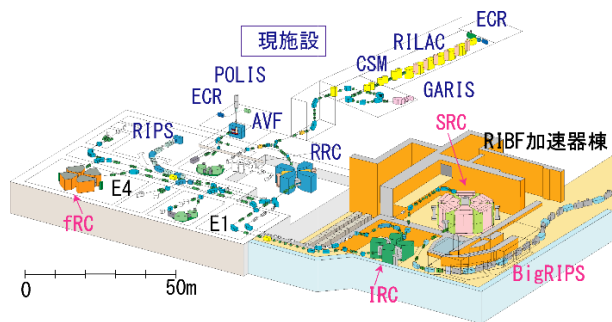


図1 RIビームファクトリーの概要

表1 RIBFのリングサイクロトロンの性能

	fRC	IRC	SRC	RRC
セクター数	4	4	6	4
K値 (MeV)	570	980	2500	540
速度ゲイン	2.1	1.5	1.51	4.0
周波数レンジ (MHz)	(固定)	18 ~ 38	18 ~ 38	18 ~ 38

2. 加速器コンプレックスの建設状況

以下に3台の新サイクロトロンおよびそれらを繋ぐビームラインの建設状況について簡単にまとめる。

2.1 SRC

SRCは世界初の分離セクター型超伝導サイクロトロンであり、K値は世界最大の2500 MeV、その蓄積エネルギーは240 MJ、総重量8300 tonという他に例を見ないサイクロトロンである。SRCは2003年3月に工場における部品の加工が完了し、2003年4月より現地組み立て工事が始まった。下ヨーク、断熱真空容器中に格納されるポール及び超伝導コイル部、上ヨークの順に組み立てが行われ、2005年9月上旬に超伝導電磁石系の建設工事が完了した。2005年9月16日より冷却励磁試験が始まり、約1ヶ月の冷却期間を経て励磁試験に移行し、11月7日には超伝導主コイルおよび超伝導トリムコイルの全コイル定格励磁運転に成功した。その後断熱真空系に補強工事を施し、2006年4月中旬より約2ヶ月間磁場測定を行った。2006年6月中旬よりRF共振器系の機器およびビーム真空系の据え付け調整工事が始まり、10月中旬に完成の予定である。完成後はRF共振器の実負

荷試験を行い、12月に試運転を予定している。SRCの建設状況に関しては文献[2]に、SRCの磁場測定に関しては文献[3]に詳しく記されているので参照されたい。

2.2 IRC

IRC^[4]は建設中の3台のサイクロトロンの中で最も先行して建設された。工場における設計、製作は1998年から2001年にかけて行われた。製作と平行する形で、2000年から2002年にかけて計122日間、磁場測定を行い、加速に必要な性能が得られている事を確認した^[5]。2003年10月から現地RIBF加速器棟における組み立て工事が始まり、2004年3月にはセクター電磁石が、2004年11月にはRF共振器や真空排気系の組み立てが完了した。その後2005年7月までに電磁石配線工事、冷却水配管工事、RF系とビーム診断系の配線工事などを行い、2005年9月からRF系の実負荷試験および焼き出しが始まった。2006年7月にはCWモードで必要電圧(550 kV)の励振に成功し、試運転を待つばかりの状況となっている。

2.3 fRC

RIビームファクトリーの4台のリングサイクロトロンのうちfRCのみが固定周波数サイクロトロンである。これは、RIビームファクトリーの可変周波数加速器カスケード(RILAC+RRC+IRC+SRC)を用いて得られる最大ビームエネルギーが、ウランで150 MeV/uに制限され、不安定核ビームの効率的な生成に不十分であるという問題を解決するために導入されたからである。固定周波数の加速器とすることで低コストかつコンパクトな設計が可能となり、キセノンからウランに至る重元素に対して350 MeV/uのエネルギーが得られる^[6]。fRCの建設はIRC, SRCに遅れて始まったが、2005年3月には工場における製作が完了した。2005年8月からは既存施設E4実験室における据え付け工事が始まり、主電磁石、入射取り出し機器、RF系機器など主要構成要素の据え付けは2005年度末に完了した。2006年度に入って真空排気系、ビーム診断系の据え付け調整、電源調整、遠隔制御試験などが急ピッチで進められた。2006年6月にはRF共振器の実負荷試験^[7]および磁場測定を行い、2006年7月下旬にウランビームを用いて試運転を行い、設計エネルギーまで加速された事を確認した。加速試験に関しては別途3章で述べる。

2.4 ビームラインなど

ビームラインのうち、SRCより下流の部分は実験装置グループが担当し、我々加速器グループはSRCより上流のビームラインを担当している。RIビームファクトリーのコミッショニング時に必要なビームラインは以下の4系統である。第一はRRCで加速したビームをfRCに送るビームライン(fRC入射ビームライン)で、既存施設の実験用ビームラインの小規模改造でこれに充てる。fRCで加速されたビームはfRCが設置されるE4実験室からD室、E1実験室を経由してIRCに輸送されるが、E4-E1間が第二のビーム

ライン(fRC取り出しビームライン)である。RRCで加速されたビームはfRCを用いずIRCに直接入射出来るが、この場合は既設のRRC-E1室間のビームラインを通してE1室から新設のビームライン(IRC入射ビームライン)でIRCに入射される。fRC取り出しビームラインはE1室においてIRC入射ビームラインに合流する。第四はIRCとSRCを結ぶビームライン(SRC入射ビームライン)である。fRC入射および取り出しビームラインは2006年3月から6月にかけて据え付け工事を行い、入射側は2006年7月初旬に完成し、取り出し側は8月中に完成の予定である。IRC入射ビームラインは2006年9月から2ヶ月かけて整備される。SRC入射ビームラインは工程の都合で先行して据え付け工事が行われ、主要部分は2005年11月に完成した。

fRC入射ビームラインには後段加速器系におけるビーム品質の向上とビーム損失の低減を目的としてリバンチャー^[8]が挿入される。このリバンチャーも工場における製作が完了し、6月末に現地に据え付けられた。更に、加速器運転に必須の制御系やインターロック系の整備も着々と進行している^[9]。

3. ウランビーム加速試験

RIビームファクトリーで350 MeV/uのウランビームを得るには上流からRILAC, RRC, fRC, IRC, SRCの5台の加速器を用い、この間2カ所もしくは3カ所で荷電変換を行う必要がある。こうして加速されるウランビームはRIビームファクトリー計画において特別な重要性を持つ。既存施設における不安定核ビームの生成には一次ビームの核破砕片(projectile-fragment)をビームとして取り出すという方法が用いられてきた。しかしある質量数領域(80および130領域)では、ウランの核分裂片をビームとして取り出す方がより大強度の不安定核ビームが得られることが知られており、大強度ウランビームの開発が切望されている。このため我々はECRイオン源におけるウランイオンの開発、ウランビーム加速に適したチャージストリッパの開発^[10]、ウランビーム加速に係る放射線安全対策^[11]などを一から積み上げて漸く2006年2月にまずRILAC+RRCで、2006年7月にはRILAC+RRC+fRCでウランビーム加速試験を行った。fRCのコミッショニングはウランビームで行われた。

7月のfRC加速試験に先立って運転パラメータを決めるために6月に3日間かけてfRCの磁場測定を行った。既存RRCや新設IRC, SRCは運転パラメータを決めるために加速領域全域にわたってmedium plane上の磁場の2次元マップを測定したが、fRCは磁場計算をベースに二次元マップを測定しないで加速する事を前提に設計されており、今回行った磁場測定はセクター電磁石中心線上のみを対象にしたものである。磁場測定はリターンヨークの外側からNMRブ

ローブを挿入して測定した。この測定結果をもとに計算に用いたBH曲線をフィットしたり、更にポールの変形の効果などを考慮して計算結果をリファインした。図2はリファイン後の運転パラメータを決める際に用いた計算結果と実測値の比をプロットしたものである。計算結果は励磁レベルに0.3%程度のずれが残り再度BH曲線の微調整が必要であるが、NW, SWセクターにおいてその分布はほぼフラットで良好な結果が得られた。一方NE, SEセクターは分布において0.3%程度のずれが残り、入射取り出し機器の影響は全て計算に取り込まれている事から考えて、このずれは電磁石の個性と理解されている。運転パラメータの決定に際しては、図に示されたセクター中心線上のずれの結果を、適当と思われる関数を仮定して全域に拡張してパラメータを決めたがその妥当性は今後の検討課題である。

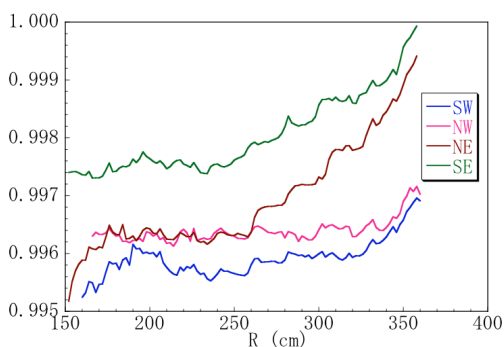


図2 セクター電磁石中心線上における磁場分布。
計算結果と実測の比をプロットした。

こうして得られたパラメータをもとに、ラディアルプローブでビーム電流の増減を確認しながらメインコイル、トリムコイルの電流値を微調整しながら外側まで加速された事を確認した。図3はfRCのラディアルプローブを設計最外周軌道に設置し、そのビーム電流を測定した結果である。上流のビームチョッパーに対応してビーム電流が変動している様子を示した。

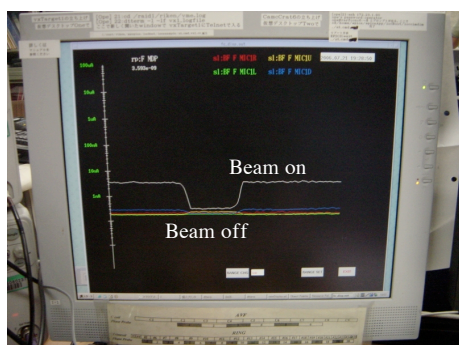


図3 設計最外周軌道におけるfRCビーム電流

4. 今後の予定

前述のfRCの試運転結果は既存施設のマシンタイムの合間を縫って実質10時間程度の時間で得られた結果であり、加速器の基本性能が検証されただけである。fRCの調整は不十分であり、またRILAC, RRC, fRCの3台の加速器間のエミッタスマッチングも不十分である。これら諸問題は9月から11月の間に計20日程度予定されている試運転で解決されなければならない。併せて現時点で未完成のSRCと一部ビームラインの建設を10月中旬に完了し、遠隔制御試験などを行った後、11月20日からIRCの試運転を、12月1日からSRCの試運転を開始し、年内にSRCからウランビームを取り出す予定である。

参考文献

- [1] Y. Yano, Proc. 17th Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, October 2004, Tokyo, p. 169.
- [2] H. Okuno et al., "Status of RIKEN Superconducting Ring Cyclotron", in this proceedings.
- [3] J. Ohnishi et al., "Excitation Test and Magnetic Field Measurement of the Superconducting Ring Cyclotron", in this proceedings.
- [4] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, October 2004, Tokyo, p. 197.
- [5] J. Ohnishi et al., AIP Conf. Proc. 600, 351 (2001).
- [6] T. Mitsumoto et al., Proc. 17th Int. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, October 2004, Tokyo, p. 384.
- [7] N. Sakamoto et al., "Construction of the rf systems for fRC in RIBF", in this proceedings.
- [8] T. Aoki et al., "Rebuncher resonator between RRC and fRC in RIKEN", in this proceedings.
- [9] M. Kobayashi-Komiyama et al., "Control System for the RIKEN RI Beam Factory", in this proceedings.
- [10] H. Ryuto et al., "Charge Strippers for U beam acceleration at RIBF", in this proceedings.
- [11] H. Sakamoto et al., "Safety Aspects of Uranium Acceleration at RIKEN RIBF", in this proceedings.