

Present Status of RIKEN Accelerator Facility

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, Takahide Nakagawa, Jun-ichi Ohnishi, Hiroki Okuno, Hiromichi Ryuto, Naruhiko Sakamoto, Masanori Wakasugi, Tamaki Watanabe, Shigeru Yokouchi, Akira Yoneda, Yukimitsu Ohshiro^{B)} and Yasushige Yano

RIKEN

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

^{B)} Center for Nuclear Study, University of Tokyo

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

Abstract

The RIKEN Accelerator Research Facility (RARF) has been supplying various kinds of high-intensity heavy-ion beams to experiments. Present status and recent developments of RARF will be reported. In addition, the world-top-class Radioactive Beam (RI) Facility, which is called "RIKEN RI Beam Factory" is under construction at RIKEN. We will also report the progress of the accelerator construction of RIBF.

理研加速器施設の現状

1. はじめに

K値540MeVの理研リングサイクロトロン(RRC)を主加速器とする理研加速器施設は、2004年度も延べ6000時間以上にわたってユーザーにビームを供給し、その中で113番元素の発見という大きな成果が得られた。加えて理研加速器グループは世界最高性能のRIビーム実験施設RIビームファクトリー(RIBF)を建設中^[1]である。RIBFはRRCを入射器とし、新設の3台のリングサイクロトロンを用いて水素からウランに至る全元素を350MeV/uに加速する。目標ビーム強度は1pμAである。RIBF計画も、主加速器である超伝導リングサイクロトロンの電磁石系が完成に近づくなど予定通りに進行している。ここでは現施設の運転状況およびRIBF計画の進捗状況を報告する。

2. 既存施設の状況

既存施設の主加速器RRCはAVFサイクロトロンとRILACという2種類の入射器を有する。これら2台の入射器はRRCにビームを供給するのみならず各々専用の実験コースを持ち、入射器として使用しない際は単独運転でユーザーにビームを供給出来る。以下にAVF、RILAC、RRCの最近のトピックスを記す。

2.1 AVFサイクロトロン

2004年度の運転統計^[2]を見るとAVF単独運転の対ユーザービーム供給時間は637時間であった。AVF単独運転では東京大学原子核科学研究センター(CNS)が理研に有する低エネルギー二次ビーム分離器CRIBを用いた天体核反応実験などが精力的に行われている。AVFサイクロトロンはビーム高品質化や

ビーム強度増強を目指したフラットトップキャビティの導入などの改造を行って来たが^[3]、2004年度は9MeV/u-¹⁴N⁵⁺ビームをCRIBに供給する為に主コイル電源を1100Aから1200Aに改造した。今後予定されているトリムコイル電源2台の改造と併せてAVFサイクロトロンはK値は70MeVから78MeVに増強される。

2.2 RILAC (RIKEN Linear ACcelerator)

RILACはその後段にCSM^[4]と呼ばれるエネルギーブースターを持ち、5.8MeV/uの重イオンビームを5つの実験ポートに供給する事が出来る。

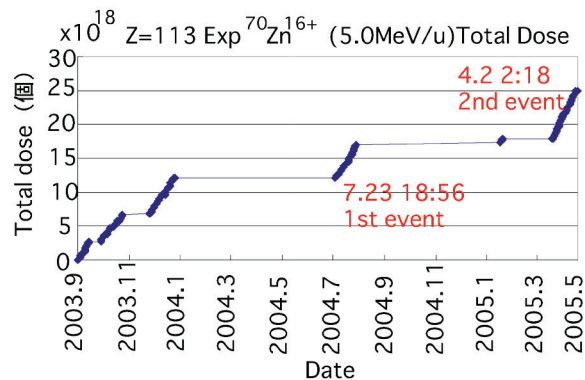


図1 113番元素探査実験の積分ビーム量

2004年度はRILAC単独運転で2132時間にわたってユーザーにビームを供給した。RILAC単独運転では

気体充填型反跳分離装置GARISを用いた113番元素探査実験を最優先の課題とし、2003年9月5日から2005年4月22日の間に110日にわたって5MeV/uの⁷⁰Znビームを供給した。2004年7月23日には113番元素を初めて確認し^[5]、2005年4月2日には第二のイベントを確認している。図1はこの間のビーム量の積分値をプロットしたもので、全供給ビーム量は 2.5×10^{19} 個、これは一秒あたり 2.7×10^{12} 個に相当する。

2.3 RRC (RIKEN Ring Cyclotron)

2004年度の利用ビーム供給時間は3421時間であり、このうち78%は原子核物理学研究に、残り22%を非原子核分野の研究に供給した。原子核物理学研究は理研RIビーム生成分離装置RIPS^[6]を用いた不安定原子核ビーム実験が中心である。CSM稼働後はRILAC+CSMを入射器とし、RRCをハーモニック数8で運転する事で63MeV/uの中重核ビームを実験者に供給している。この運転モードでは、大強度ビーム生成に適した18GHz-ECRイオン源^[7]、加速効率に優れたfolded-coaxial型RFQ^[8]を使用し、CSMでより高いエネルギーに加速したイオンに対して荷電変換を行うので大強度ビームの供給が可能になった。ビーム強度は従来の10倍以上となり、⁴⁰Arで1000pnA、⁴⁸Caで150pnA、⁷⁰Znで120pnA、⁸⁶Krで90pnAのビームがRRCから出力されている。

これまで偏極重陽子ビームを用いた実験などに使用されてきた磁気スペクトロメーターSMARTは2005年6月にシャットダウンされた。SMARTは解体撤去され、この場所にRIBFで建設中の固定周波数サイクロトロンfRCが据え付けられる。

3. RIビームファクトリー

RIビームファクトリーはRRCを入射器とし、後段加速器として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の3台のサイクロトロンを擁する複合加速器施設であり、水素からウランに至る全元素を350MeV/u以上のエネルギーに加速する。重イオンビーム強度は1pμAを想定している。SRCで発生させた大強度重イオンビームをRIビーム生成分離装置Big-RIPSに打ち込んで世界最大強度のRIビームを発生させ、安定線から離れた短寿命原子核の構造研究や宇宙における元素合成の謎の解明に取り組む。1997年より建設が始まり、2002年度末にメーカー工場における(fRCを除く)主要装置の製作が完了した。2003年4月からは理研和光キャンパス内に新設されたRIBF加速器棟における現地工事が始まり、以後2年間順調に進行している。後述の主要加速器の建設と並行してRIビームファクトリーで使用する回転型荷電変換機の製作^[9]、荷電変換機で使用する長寿命炭素薄膜の製造^[10]、大強度ビームを安全に取り扱う為のビームインターロックシステム^[11]の開発なども順調に進展している。

3.1 SRC (Superconducting Ring Cyclotron)

SRC^[12]は世界初の分離セクター型超伝導リングサ

イクロトロンで、6セクターの可変周波数サイクロトロンである。そのK値は2500MeV、最大発生磁場は3.8T、総重量は8300トンである。この他に類を見ない性能を実現するために以下のような特徴を持つ。まず良好な等時性磁場を実現するために超伝導トリムコイルと常伝導トリムコイルという2種類のトリムコイルが各セクター電磁石に組み込まれている。4種の超伝導トリムコイルで0.1%精度の等時性磁場を作り、22種の常伝導トリムコイルで等時性からのずれを0.02%以下に抑え込む。これらのコイルはミディアムプレーンから順に、常温の常伝導トリムコイル、4Kの超伝導トリムコイル、常温のポール、更に4Kの超伝導主コイル(連結板)の順に配置され、互いに断熱真空層で隔てられ、断熱真空容器に格納されてヨークに据え付けられる。この断熱真空系のリーク試験は2004年秋に行われ健全性を確認した。また強大な漏れ磁場を遮蔽するためにバレー部を厚さ80cmの鉄で覆う構造を採用した点も他に例を見ない。この磁気シールドは放射線シールドも兼ねる。

理研におけるセクター電磁石の組み立ては2004年1月より始まり、セクター電磁石本体の組み立ては終了した。現在は2005年7月中の電磁石完成に向けて液体He輸送系、Heコントロールデュアー、ジョイントボックスなどHe系の工事および入射取り出し系の据え付け、ケーブル配線工事、冷却水配管工事などが行われている。2005年8月中旬より冷却試験、引き続き励磁試験を行い、その後3ヶ月の予定で磁場測定を行う。主要機器のうち未着手のRF共振器の据え付け調整およびバレー箱の据え付け作業は磁場測定終了後2006年5月にかけて行われる。その後RF系のパワー試験などを経て2006年秋にビーム試験を予定している。SRCの進捗状況については参考文献^[13]に詳しい。

3.2 IRC (Intermediate-stage Ring Cyclotron)

IRC^[14]はK値980MeVの4セクター常伝導リングサイクロトロンであり、その最大発生磁場は1.9T、可変周波数タイプのサイクロトロンである。IRCはSRC、fRCに先行して製作に着手したので、IRCが設置されるRIBF加速器棟の竣工前に製作メーカー工場にて磁場のマッピングを行った。この時点で加速に必要な磁場の発生を確認している。2003年度後半からセクター電磁石の現地組立を開始し、2004年11月までにセクター電磁石、RF共振器、真空排気系の組み立てを終了し、ビーム真空部の真空排気試験とセクター電磁石の励磁試験を実施した。図2はリークテスト後の排気曲線を示したもので約6日程度の排気で設計真空度 1×10^{-5} (Pa)を達成している。励磁試験ではセクター電磁石中心線上の磁場測定を行った。工場における磁場測定結果と比較して1.4T領域では60~80ガウス程度の磁場の減少が観測された。これは理研に搬入する際に工場にてセクター電磁石を解体した後にヨーク材の表面塗装をやり直したためと考えている。これらと並行して2004年度中にケーブル配線工事、冷却水配管工事、入射取り出し系、ビーム診断系の据え付け調整作業などを行った。

2005年度はRF系とビーム診断系の配線工事及び調整作業を行っており、2005年夏からRF共振器のパワー試験を計画している。

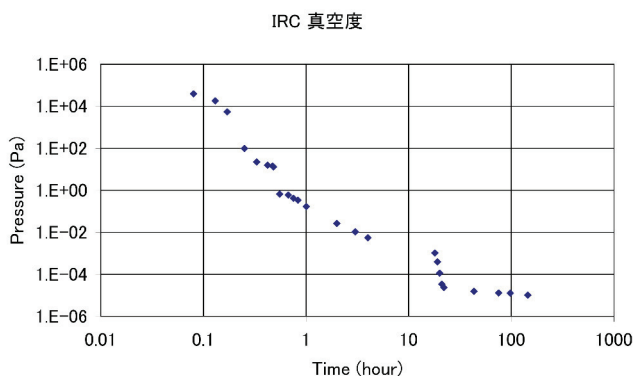


図2 IRC真空排気曲線

3.3 fRC (fixed-frequency Ring Cyclotron)

fRC^[15]はK値570MeVの常伝導4セクターリングサイクロトロンである。新設の3台のリングサイクロトロンの中でfRCのみが固定周波数である。RIBFではRILAC、RRC、IRC、SRCの4台の可変周波数型加速器を使って順に加速する事により⁴⁸Caを400MeV/uに、⁸⁶Krを350MeV/uに加速する事が出来る。しかしこのモードではKrより重いイオンに対しては最高加速エネルギーの減少が著しく、例えば²³⁸Uに対しては150MeV/u以下となる。fRCは全元素の最高エネルギーを350MeV/uとするためにRRCとIRCの間に挿入される加速器で、既存施設E4実験室内に設置される。2002年度から3年間かけてセクター電磁石、加速共振器、バレー箱等主要構成要素の製作が工場にて行われた。2004年度末には4つのセクター電磁石が完成し、工場にて磁場測定を行った。

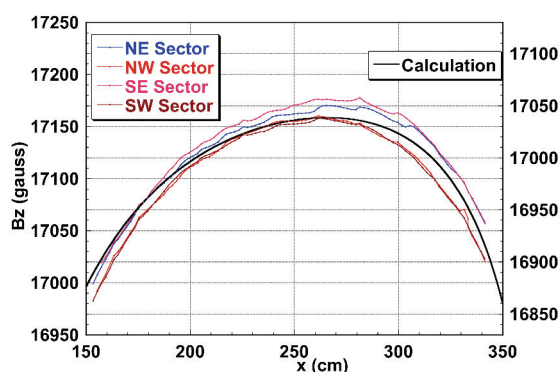


図3 fRC磁場測定結果

図3はセクター中心線上の磁場をNMRプローブで測定した結果および磁場計算(BH曲線の補正なし)結果を示したものである。両者の違いは励磁レベルで約100ガウス、磁場のプロファイルで30ガウス程度であった。2005年度には入射取り出し機器とFT共振器を製作する一方で8月から現地E4実験室内における

組み立て工事が始まる。建設は急ピッチで進み今年度中にはセクター電磁石、RF共振器、入射取り出し機器、真空系の据え付けおよびケーブル配線工事、冷却水配管工事を完了する予定である。2006年度よりRF系の現地調整を行い2006年7月には完成の予定である。

4. RIBFコミッショニングに向けて

前述の様にIRCは今年度中に完成し、fRCは2006年7月、SRCは2006年10月までに完成の予定である。主要加速器以外にも、ビーム輸送系、制御系、放射線管理系などの建設が今年度より本格化している。2006年7月にはfRCビーム試験、2006年10月からIRCとSRCのビーム試験が予定されている。その後BigRIPS下流に設置される大規模実験装置ゼロロスペクトロメータの完成を待つて2007年度から本格的に実験者にビームを供給する予定である。

参考文献

- [1] Y. Yano, Proc. of Cyclotron and their Applications 2004, Tokyo, Japan, Oct. 18-22, 2004, p169.
- [2] E. Ikezawa et al., "Present Status of Accelerators in RIKEN Accelerator Research Facility", in these proceedings.
- [3] S. Kohara et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **526** (2004) p230.
- [4] O. Kamigaito et al., Rev. Sci. Instrum. **76** 013306 (2005).
- [5] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn Vol.73 No.10 pp.2593-2596 (2004).
- [6] T. Kubo et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **70**, 309 (1992).
- [7] T. Nakagawa and Y. Yano, Rev. Sci. Instrum. **71** 637 (2000)
- [8] O. Kamigaito et al., Rev. Sci. Instrum. **70**, 4523 (1999).
- [9] H. Ryuto et al., "Charge Strippers in the RIKEN RI-Beam Factory", in proceedings of Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, USA, May 16-20 2005.
- [10] H. Hasebe et al., "Carbon Foils Development for the RIKEN RI-Beam Factory", in these proceedings.
- [11] M. Komiyama, M. Fujimaki and M. Kase, "Beam Interlock System at RIKEN RI Beam Factory", in these proceedings.
- [12] H. Okuno et al., Proc. of Cyclotron and their Applications 2004, Tokyo, Japan, Oct. 18-22, 2004, p373.
- [13] H. Okuno et al., "Status of the RIKEN Superconducting Ring Cyclotron", in these proceedings.
- [14] T. Mitsumoto et al., "Construction of the RIKEN IRC", AIP Conf. Proc. **600**, 167 (2001).
J. Ohnishi et al., Proc. of Cyclotron and their Applications 2004, Tokyo, Japan, Oct. 18-22, 2004, p197.
- [15] N. Inabe et al., Proc. of Cyclotron and their Applications 2004, Tokyo, Japan, Oct. 18-22, 2004, p201.
T. Mitsumoto et al., Proc. of Cyclotron and their Applications 2004, Tokyo, Japan, Oct. 18-22, 2004, p384.