

PRESENT STATUS OF RIKEN RI-BEAM FACTORY

Osamu Kamigaito¹, Masaki Fujimaki, Tadashi Fujinawa, Nobuhisa Fukunishi, Akira Goto, Hiroo Hasebe, Yoshihide Higurashi, Kumio Ikegami, Eiji Ikezawa, Tadashi Kageyama, Masayuki Kase, Masanori Kidera, Misaki Komiya, Hironori Kuboki, Keiko Kumagai, Takeshi Maie, Makoto Nagase, Takahide Nakagawa, Jun-ichi Ohnishi, Hiroki Okuno, Hiromichi Ryuto², Naruhiko Sakamoto, Yoichi Sato, Kenji Suda, Masanori Wakasugi, Hiroshi Watanabe, Tamaki Watanabe, Kazunari Yamada, Shigeru Yokouchi, and Yasushige Yano

RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

Abstract

Recent developments of accelerators of RIKEN RI-Beam factory (RIBF) are shown as well as the results of the acceleration test performed in this year. Intense beam of 270 pnA of ⁴⁸Ca was extracted from the Intermediate Ring-Cyclotron (IRC) at 114 MeV/u. Uranium beam of 0.34 pnA was also extracted from the IRC. Present status of the refrigerator system of the Superconducting Ring-Cyclotron (SRC) is outlined. Developments of the new ECR ion source with superconducting coils and the new injector system for RIBF are briefly illustrated.

理研RIビームファクトリーの現状

1. はじめに

理研RIビームファクトリー(RIBF)^[1]の加速器群は、重イオン線形加速器1式とサイクロトロン5台で構成され、水素からウランに至る全元素を、CWモードで光速の70%(345 MeV/u)以上に加速する能力を持つ。加速ビームを不安定核生成分離装置BigRIPS^[2]に入射して不安定原子核(RI)ビームを生成し、宇宙における重い元素の合成過程の解明・不安定原子核を含む究極の原子核モデルの構築・RIビームを用いた新しい応用分野の開拓を目指している。

2007年3月には超伝導リングサイクロトロン(SRC)^[3]によるウランビームの加速に成功し^[4,5]、同年6月にはBigRIPSによって新しい同位体¹²⁵Pdと¹²⁶Pdが生成された^[6]。これは、これまでの不安定原子核の生成限界を超え、到達不可能だった領域に足を踏み入れたことを意味しており、意義深い。

この稿では、その後のRIBFでの様々な開発状況と近い将来に向けた開発計画について述べる。

2. SRC・BigRIPS冷凍機の改修

SRCおよびBigRIPSの冷凍機は、2005年9月の運転開始以来、2ヶ月程度連続運転すると冷凍能力が低下するという不具合が起きていた。2008年2月に、He圧縮機からの油が冷凍機内に混入していることが明らかになり、この油が冷凍機のフィルタに付着して能力低下を招いていることが判明した。原因はHe圧縮機の油分離能力不足である。これまでに冷凍機

の分解・洗浄を行い、現在圧縮機内にオイルセパレータの増設を行っている。改修は2008年8月に終了する予定で、10月からSRC・BigRIPSともに運転可能になる予定である。

3. ビーム加速試験

2007年11月には⁸⁶KrビームをSRC出口(345 MeV/u)まで約30 pnA加速することに成功したが、今年度前半は上述の冷凍機改修を優先して行うことになった。これと並行して、昨年までの加速試験の結果の詳細な解析に基づいて、前段加速器群(RILAC・RRC・fRC^[7]・IRC^[8])におけるビーム通過効率向上とビーム強度の増強を図ることになった^[9]。

3.1 ⁴⁸Ca加速

2008年6月に⁴⁸Caを用いてRILAC・RRC・IRCの加速試験を行った。ECRイオン源でCa10+を生成し、これをRILACで加速後、2.7 MeV/uで16+に荷電変換してRRCで加速、その後46 MeV/uでふたたび荷電変換して20+にしてIRCで加速した。IRC出口のエネルギーは114 MeV/uである。荷電変換の効率はいずれも約35%、87%であった。加速器の構成は図1を参照されたい。

これまでIRCのRadial Probeが不安定であったが、この加速試験の前に原因が判明した。その一つは、IRCのフラットトップ空洞からの高周波がRadial Probeのシールドとビームチャンバーの間で共振し

¹ E-mail: kamigait@riken.jp

² Present address: Photonics and Electronics Science and Engineering Center, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8510

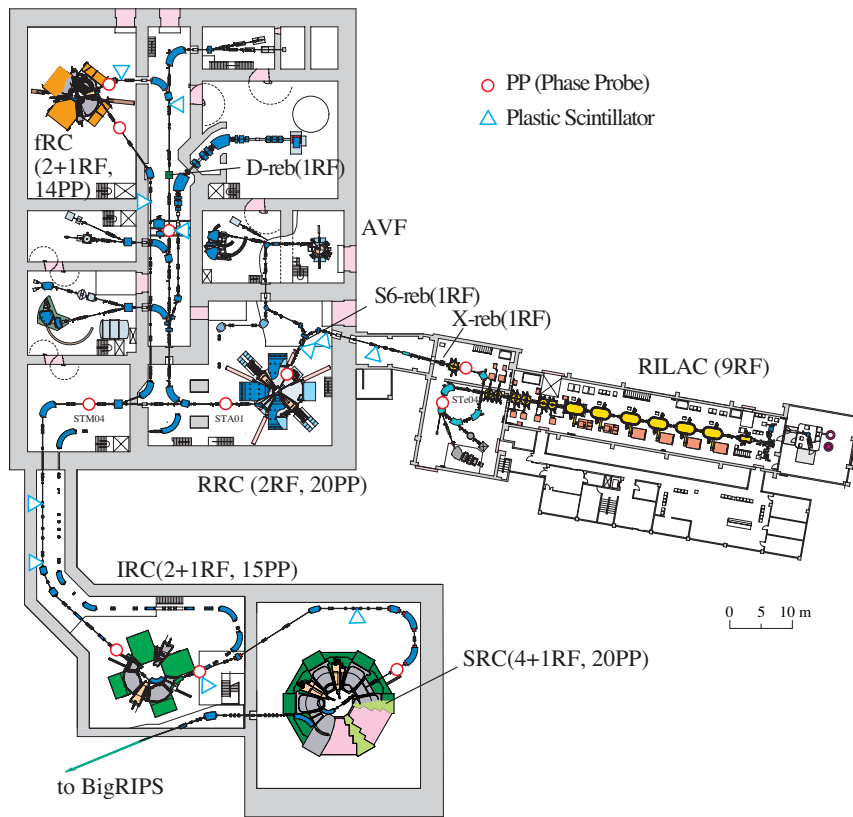


図1：RIBFの加速器構成。モニタしているRFの数と、サイクロトロン有位相プローブ(PP)の数も示されている。ビームライン中の位相プローブとシンチレータのおおよその位置も表示した。

ているというものであった。これを防ぐための処置をするとともに信号線を強化したところ綺麗なパターンが描かれるようになった。その結果フラットトップ空腔を含むRF系の位相合わせなど、ビーム調整の能率が向上した。これ以外にも後述するようにビームモニタ系の改良などを行った。

この加速試験ではイオン源・RF系・荷電変換膜も長時間安定であった。結果としてIRCからのビーム強度は最大で約270 p nA (1.5×10^{12} pps)を記録した。ビームパワーは約1.4 kW(CW)である。RILAC出口からIRC出口までのビーム通過効率は最大82%、RRCとIRCの通過効率はそれぞれ95%以上になった^[9]。10月以降にはこのビームをSRCで加速して実験に供給する予定である。

3.2 ^{238}U 加速

2008年5月と7月には、 ^{238}U を用いてRILAC・RRC・fRC・IRCの加速試験を行った。ECRイオン源でU35+を生成し、これをRILACとRRCで加速後、11 MeV/uで71+に荷電変換しfRCで加速、その後46 MeV/uでふたたび荷電変換して86+にしてIRCで加速した。IRC出口のエネルギーは114 MeV/uである。荷電変換の効率はそれぞれ約18%、28%であった。

5月の試験前には、fRC内の位相プローブに干渉

フィルタを導入してRF起因のノイズを大幅に低減でき、等時性磁場の調整を精度よく行えるようになった。7月の試験前にはRadial ProbeをIRCに準じて改良するとともに二次電子対策を施したことから、ターンパターンを正確に描けるようになった。これによりビーム調整の能率が向上した。

7月の試験ではイオン源やRFも安定で、IRCからのビーム強度は最大で0.34 p nA (2.0×10^9 pps)まで増加した。IRCでフラットトップ加速に成功したため、昨年と比べて通過効率も向上した^[9]。また、7月の試験では2番目の荷電変換膜にBeを用いた。

4. モニタ系の拡充・高度化

4.1 ロックインアンプを用いたRFおよびビーム位相監視システム

RIBF加速器群は広い範囲に分散して設置されており、かつ大規模なものであるため、ビーム位相の安定度は上流のさまざまな構成機器の安定度に大きく影響される。昨年までに整備されてきたロックインアンプを用いたRFおよびビーム位相監視システムを拡張して、図1に示すように全てのRFの電圧・位相および主要な箇所でのビーム位相を常時監視するシステムを構築した^[10]。データはオンラインで表示されるとともに、時系列としてPCに記録される。上述した加速試験では、このオンラインモニタをビーム強度とともに参照しつつ、ビーム通過効率の維持に努めた。

さらに、測定された時系列データを用いて、RFの電圧・位相とビーム位相の相関を調べる試みが始まっている^[11]。今後ほかの測定量(受電電圧・室温・サイクロトロン磁場など)との相関も調べ、長時間安定度の向上を図っていく予定である。

4.2 ファラデーカップの高度化^[12]

昨年までの加速試験ではファラデーカップの精度が不十分であったが、昨年度よりサプレッサー電極の二次電子抑制効果を向上させた新型のファラデーカップが導入された。このうちの数台の電流表示については、ウランビームの加速試験において、長尺(深さ約30 cm)のファラデーカップを用いて校正した。また、ウランビームを用いて新型ファラデーカップのサプレッサー電圧を変化させ、発生する二

次電子の量を測定したところ、それがビームのエネルギーだけでなく価数にも大きく依存することが判明した。

5. 長寿命荷電変換薄膜の開発^[13]

大強度重イオンビームを安定に加速するには、一様な厚さで長寿命の荷電変換膜が不可欠である。RIBFのウランビーム加速における第一荷電変換膜(RRC後:11 MeV/u)に使用すべく、ポリマーコーティング炭素薄膜(PCC-foil)の開発を2005年から行ってきた。今年度は大面積の多層PCC-foil(300 μ g/cm²)を回転円筒荷電変換装置^[14]に取り付けて試験したが、短時間で破損した。一方、この多層PCC-foilをあらかじめ熱処理して固定式薄膜で使用すると、最大24時間程度の使用に耐えられるものとなった。この寿命はArizona社製の市販品と同等である。

RILAC後の低エネルギー用の炭素薄膜(40 μ g/cm²)の試験も精力的に行われた。1 p μ A程度の⁴⁸Ca¹⁰⁺(2.7 MeV/u)に対してはほとんど劣化が見られなかったが、同程度の強度の⁸⁶Kr¹⁸⁺(2.3 MeV/u)と¹³⁶Xe²⁰⁺(1.86 MeV/u)では短時間で破損した。実用に供するには薄膜上でのビーム径を広げるなどの工夫が必要かもしれない。

6. ビーム増強に向けた開発

ウランなどの重いビーム強度をさらに増強するため、超伝導ECRイオン源の開発を行っている^[15]。これまでにミラー磁場および六極磁場を生成する超伝導コイルの製作と励磁試験が行われた。今年度中に完成する予定である。また、このイオン源のための分析電磁石も今年度中に出来上がる予定である。これらの機器をRILAC上流の高圧ターミナル上に設置し、RFQを通さず直接RILACに入射することを検討している。

RIBFと超重元素合成実験^[16]を両立するための新入射器^[17]の開発も行われている。昨年11月に、京都大学のご厚意により、イオン注入器として開発された



図2 : RIBF実験棟に搬入された4-Rod RFQ^[18]

RFQ^[18]が理研に譲渡された。昨年度に真空引きと冷却水配管を行い、今年度はRF電力増幅器の再生を行っている。

7. まとめと今後の予定

以上述べたように、RIBF加速器は着実にビーム強度を増強させつつある。冷凍機改修後の10月からは、SRCとBigRIPSを用いて本格的に実験を行う予定である。

2009年はじめには、AVFサイクロトロンからの軽いビームをRIBFで加速する計画もされており、現在ビームラインの改造が進んでいる。

来年度には超伝導ECRイオン源の試験を開始する予定である。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth B 261 (2007) 1007.
- [2] T. Kubo et al., Nucl. Instr. and Meth. B 204 (2003) 97.
- [3] H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1063.
- [4] N. Fukunishi et al., Proc. PASJ4-LAM32 (2007) p. 1.
- [5] A. Goto et al., 18th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Giardini Naxos, Italy, Sep30 – Oct5, 2007.
- [6] T. Ohnishi et al., J. Phys. Soc. Jpn. (2008) 083201.
- [7] T. Mitsumoto et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (2004) p. 384.
- [8] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (2004) p. 197.
- [9] N. Fukunishi et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, TO13.
- [10] R. Koyama et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WP007.
- [11] K. Suda et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WP048.
- [12] T. Watanabe et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WP058.
- [13] H. Hasebe et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WP046.
- [14] H. Ryuto, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 569 (2006) 697.
- [15] J. Ohnishi et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WP057.
- [16] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 2593.
- [17] O. Kamigaito et al., Proc. PASJ3-LAM31 (2006) p. 502.
- [18] H. Fujisawa, Nucl. Instr. and Meth. A 345 (1994) 23.