

BEAM COMMISSIONING OF NEW LINAC INJECTOR RILAC2 FOR RIKEN RI-BEAM FACTORY

Kazunari Yamada ^{1,A)}, Eiji Ikezawa ^{A)}, Hiroshi Imao ^{A)}, Junichi Ohnishi ^{A)}, Hiroki Okuno ^{A)}, Masayuki Kase ^{A)}, Keiko Kumagai ^{A)}, Misaki Komiyama ^{A)}, Akira Goto ^{B)}, Naruhiko Sakamoto ^{A)}, Kenji Suda ^{A)}, Takahide Nakagawa ^{A)}, Yoshihide Higurashi ^{A)}, Nobuhisa Fukunishi ^{A)}, Tadashi Fujinawa ^{A)}, Masaki Fujimaki ^{A)}, Takeshi Maie ^{A)}, Hideyuki Yamasawa ^{A)}, Shigeru Yokouchi ^{A)}, Tamaki Watanabe ^{A)}, Hiroshi Watanabe ^{A)}, Yutaka Watanabe ^{A)}, Shigeaki Arai ^{A)}, Hiroshi Fujisawa ^{A)}, Yoichi Sato ^{C)}, Osamu Kamigaito ^{A)},
^{A)} RIKEN Nishina Center, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198, Japan
^{B)} National Institute of Radiological Sciences, Japan
^{C)} J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization, Japan

Abstract

A new linac injector called RILAC2 was constructed at the RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) in 2010 in order to increase the beam intensity of very heavy ions such as xenon and uranium ions, as well as performing independent RIBF experiments and super-heavy-element synthesis. The beam acceleration test of RILAC2 was started on December 21, 2010. After validating each equipment of RILAC2 step by step, we succeeded in accelerating the first beam on day one by using all the rf resonators of RILAC2. On May 2011, we extracted the xenon beam from SRC by using RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC acceleration mode.

RIBF 用新入射器 RILAC2 のビームコミッショニング

1. はじめに

理研仁科センター加速器基盤研究部では、Xe や U といった非常に重いイオンのビーム強度を増強し、RIBF 実験と超重元素探索実験を同時進行できるようにするため、2009 年度より新たに重イオン入射ライナック RILAC2[1,2]の建設を行った。RILAC2 は図 1 に示す様に、28 GHz 超伝導 ECR イオン源 [3,4]、4 ロッド型 RFQ ライナック [5]、Q 磁石分離型 QWR-DTL タンク 3 台 [5,6]、DTL タンク間 Q 磁石、プリバンチャー及びリバンチャー 2 台、LEBT [7] 及び HEBT で構成される。コンポーネントの設計、製作や建設状況については、2009 年度と 2010 年度の加速器学会にて報告されている。

RILAC2 の建設は 2010 年秋に完了し、同年 12 月に ^{124}Xe ビームで加速試験を行い、初日に無事ビーム加速に成功した。その後の数回の ^{124}Xe ビーム加速試験で、RILAC2 からのビームエネルギー及び運転パラメータの調整を行い、RIBF 後段のサイクロトロンまで用いた試験を行った。本年 5 月には RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC の全加速器を使ったビーム加速に成功した。本年 6 月には、 ^{238}U ビームを RILAC2-RRC-fRC で加速し、ガスストリッパーの試験を行った。

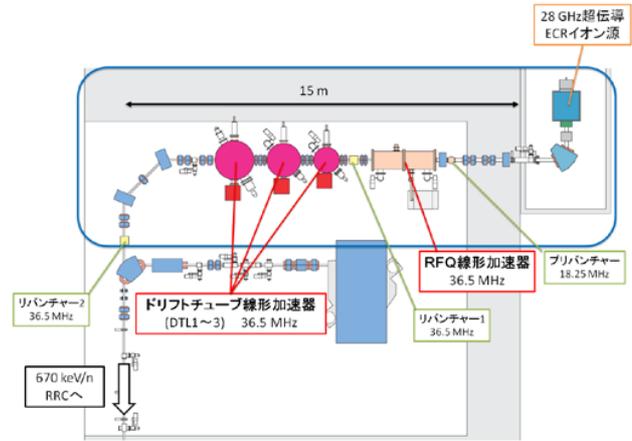


図 1 : RILAC2 概略

2. 加速試験へ向けての準備等

2.1 プリバンチャー

プリバンチャーは 20 年以上前に製作された、ダブルギャップの可変周波数型で、可変容量真空コンデンサーによって共振周波数を変更するバンチャーを、電極部分の改造を行って（主に口径を拡げて）流用したものである。2010 年秋の RILAC2 への設置、配管配線後に、カップリング調整、性能測定を行って励振テストをした。後術するように必要な性能が得られている。なお、搭載されていた可変容量

¹ E-mail: nari-yamada@riken.jp

真空コンデンサー駆動用のインダクションモーターのギヤ比が高く、回転速度が速すぎて自動同調ができなかったため、減速比 1800 のリバーシブルモーターに交換した。

2.2 RFQ ライナック

RFQ ライナックは昨年度の報告後、2010 年 8 月にハイパワー試験を行い、想定しているベーン間電圧 42 kV を約 18 kW の RF 入力で発生させることができた。マルチパクタリングの壁は当初 10 kV 程度まで見られたが、2 時間程度の RF 印加焼きだして見られなくなった。この時点ではチューナー駆動回路が準備できていなかったため、熱膨張による共振周波数のデチューニング分、シグナルジェネレータの周波数を変えて電圧を上げていった。RFQ 励振成功後、RFQ のアライメント、RFQ 真空排気装置遠隔制御の為に配線敷設、LEBT 及び HEBT の設置、リバンチャー1 の製作と設置、ビーム診断機器の設置、制御テスト等が行われ、RFQ はビーム加速試験へと投入された。図 2 に設置後のプリバンチャーと RFQ 共振器及び RFQ 用 RF 終段アンプの配置を示す。

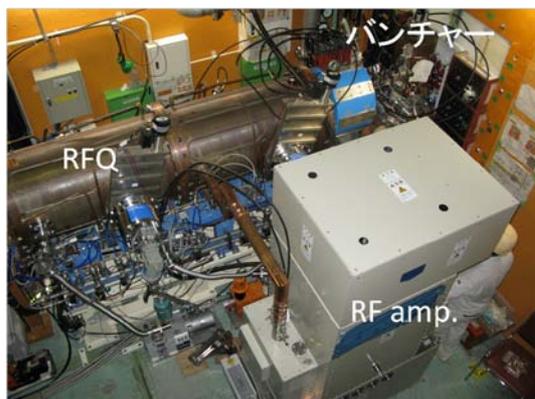


図 2 : 設置された RFQ ライナック

RFQ のチューナーは、ビーム加速試験初期は標準ロジック IC でバラックのパルス発生回路を組んで手で動かす、周波数同調を行っていたが、東日本大震災後の停止期間中に、PLC の位置決めユニットを使って自動同調が行えるようにした。真空排気装置も PLC を使って遠隔制御できるようにした。また、RF 安定度向上のため、自動振幅制御の微調整も行い、本年の 5 月までに RFQ ライナック部は完成した。

震災後、プレート電源のクローバー回路が誤動作し、高圧が印加できなくなる問題が生じたが、イグナイトロンのヒーターに付けてあるサーモスタットの故障によりヒーターが動作しておらず、イグナイトロンの耐圧が低下したことが分かり（ヒーター ON にしても戻らず）予備品と交換した。

2.3 ドリフトチューブライナック

図 3 に設置後のドリフトチューブライナックの配置を示す。ドリフトチューブライナックに関しては、ノイズによるプレート電源のクローバー回路の誤動作対策と、空洞共振器の RF ピックアップの放電問題を解決し、RF 電圧安定度 $\pm 0.03\%$ 以下、RF 位相安定度 ± 0.1 度以下を実現することができた。震災による影響は見られていない。詳細は本年会の MOPS105 を参照のこと。

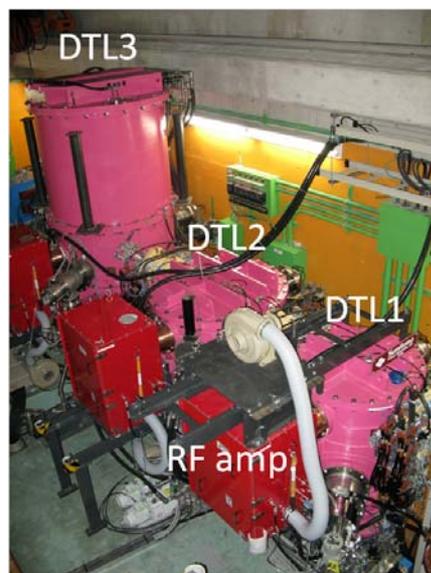


図 3 : 設置されたドリフトチューブライナック

2.4 リバンチャー

RILAC2 では RFQ-DTL1 間 (B2-REB) と HEBT 用 (B7-REB) の、2 台のリバンチャーを使用するが、2010 年度にこれらの新規設計、製作、設置を行った。

B2-REB は 4 ギャップ同軸 QWR 型で共振周波数 36.5 MHz のリバンチャーであるが、ビーム軸方向のスペースが制限されていたため、ギャップ長が 10 mm - 20 mm - 20 mm - 10 mm と変則的になっている。ドリフトチューブ内径は $\phi 35$ mm である。電極間及びチャンバーとの間の容量を増やして共振周波数を下げ、全体をコンパクトにした。設計時の計算では Q_0 が 8500、シャントインピーダンス (回路定義、1 ギャップ) が 550 k Ω となっている。図 4 に組み立て後の電極部を、図 5 に全体の外観を示す。各加工部品納入後、2010 年 11 月に理研仁科センターで組立、試験を行った。半日の RF 印加焼きだしの後、1 kW のトランジスタアンプを使用して、設計通りに必要なトータル電圧 100 kV 以上を発生させることができた。B2-REB は RILAC2 ビーム加速試験直前の 2010 年 12 月頭にビームラインへ設置された。

B7-REB も同様に 36.5 MHz の 4 ギャップ同軸 QWR 型であるが、トータル電圧 200 kV 以上を発生

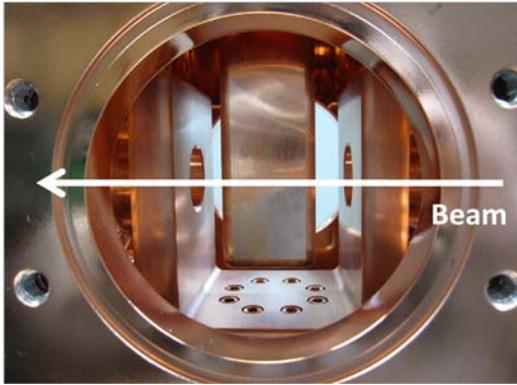


図 4 : B2-REB 電極部

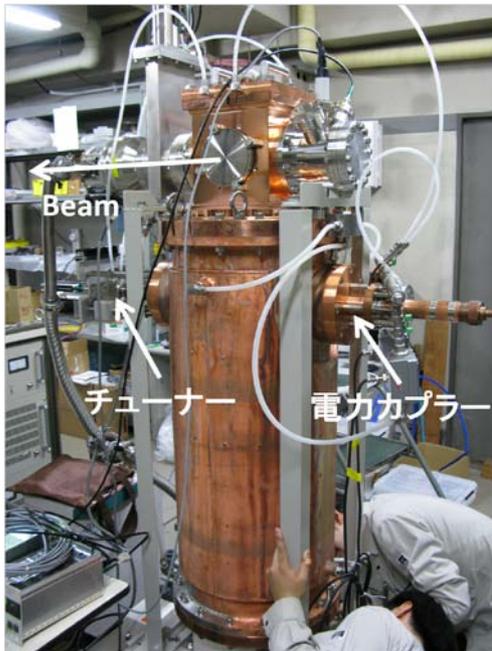


図 5 : B2-REB 外観 (試験時)

させるために、既存の 3 kW トランジスタアンプを流用することにし、B2-REB よりは Q 値を上げ、ビーム軸方向長さ 700 mm 以下、ビームラインまでの高さ 1250 mm 以下に収まるように設計した。ギャップ長は 20 mm で、ドリフトチューブ内径は $\phi 40$ mm、設計時の計算では Q_0 が 10700、シャントインピーダンスが 910 k Ω となっている。ドリフトチューブを高精度でアライメントする為に、最近 IH 型ライナックなどで適用例のある、ドリフトチューブ、ステム、リッジ、内筒、外枠を無酸素銅の一枚板から削り出す方式を採用した。この一体型センターフランジを二つの半割れ外筒で挟むことにより同軸共振器となる。図 6 に B7-REB の内部、ドリフトチューブ周辺部を示す。

B7-REB は 2011 年 1 月に工場にてローパワー試験を行い、必要な性能が得られていることを確認した。特に内筒からドリフトチューブにかけて継ぎ目のない構造のため、 Q_0 に関しては計算値の 9 割程度を実現できた。B7-REB は 2011 年 2 月頭に納入され、



図 6 : B7-REB ドリフトチューブ

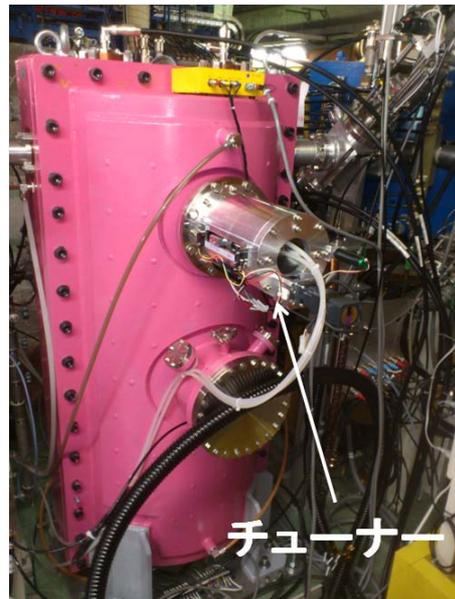


図 7 : 設置された B7-REB

即刻 HEBT に設置され、2 月の加速試験から実戦投入されている。設置された B7-REB の外観を図 7 に示す。

3. ビーム加速試験

RILAC2 のビーム加速試験は 2010 年 12 月に開始された。表 1 に 2011 年夏現在までに行った加速試験の一覧を示す。まずは RILAC2 単独で、各装置の動作を確認しながら $^{124}\text{Xe}^{20+}$ ビームを加速した。イオン源からの最大ビーム量は 42 μA であったが、イオン源出口のスリットでビーム電流を 10 μA 程度に減らして加速調整を行った。細かい不具合はあったが、大きな問題はなく、初日に RILAC2 の全 RF 共振器 (B7-REB を除く) を使って ^{124}Xe ビームを設計エネルギーまで加速することが出来た。ワイヤスキャナーで測定した、RILAC2 下流の偏向電磁石後 (B71) のビームプロファイルを図 8 に示す。イオン源からのビーム電流が 9.5 μA の時、B71 でのビーム電流は 7.1 μA となった。懸念されていた、

表 1 : 2011 年夏現在までに行った加速試験

2010/12/21	^{124}Xe RILAC2 初ビーム加速成功
2010/12/22	^{124}Xe RILAC2 単独
2011/01/21	^{124}Xe RILAC2 単独
2011/02/14-16	^{124}Xe RILAC2-RRC-fRC
2011/05/07-21	^{124}Xe RILAC2~SRC フル加速
2011/06/15-30	^{238}U RILAC2-RRC-fRC (主にストリッパー試験)

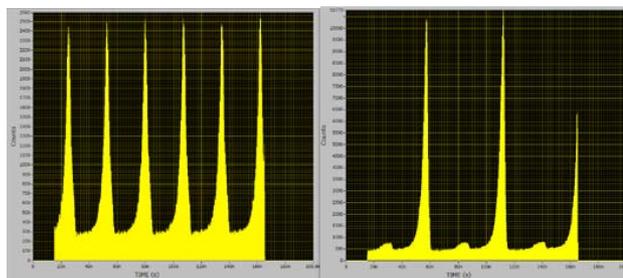


図 9 : プリバンチャー-off/on 時のビームの時間スペクトル

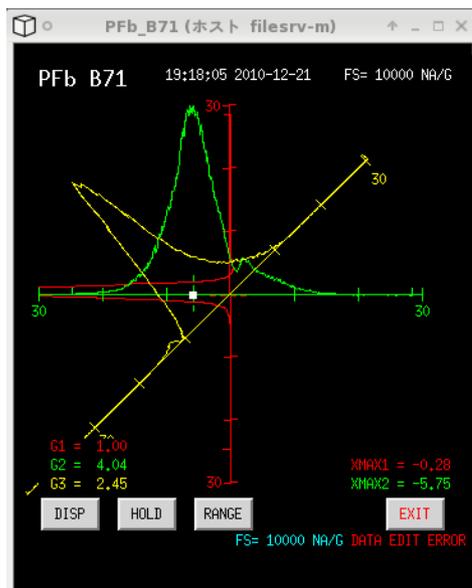


図 8 : 初ビーム加速時のビームプロファイル

RFQ 電場の上下非対称によるビームの蹴り飛ばしは見られなかった。その翌日から、通過効率の向上を目指し加速共振器の電圧・位相の最適化を行った。図 9 にプラスチックシンチレータで測定した RILAC2 下流でのビームの時間スペクトルを示す。左がプリバンチャー-off のとき、右がプリバンチャー-on のときのスペクトルである。RILAC2 の RF 周波数 36.5 MHz に対して、下流の RRC は 18.25 MHz なので、ビームを有効な 18.25 MHz 繰り返しのバンチに入れる必要があるが、設計通りプリバンチャーによって 8 割以上回収できている。また、この時の運転真空度 (一部 10^{-6} Pa 台に入ったところ) では、 ^{124}Xe の荷電変換によるビームロスが 1 割弱見られた。

2 月に入り B7-REB が設置されたので、RILAC2-RRC-fRC を使った ^{124}Xe ビームの加速試験を行った。RRC で加速された 10.7 MeV/nucleon の $^{124}\text{Xe}^{20+}$ を窒素ガスストリッパーで 38+ に荷電変換し、fRC で加速し取り出すことができた。しかし、まだエネルギー測定環境が揃っておらず、サイクロトロン周囲のビームパターンから、RILAC2 のエネルギーを合わせきれていないことが分かった。

大震災の後 5 月には、RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC の全加速器を使って ^{124}Xe ビームを加速し、加速器

の健全性をテストした。RILAC2 加速ビームのエネルギー測定準備が整ったので、測定を繰り返しつつビームエネルギーが 665 keV/nucleon となるように RILAC2 の調整を行った。これにより RRC 及び fRC の通過効率が 9 割以上となった。このビームを使ってガスストリッパーの試験を行った。また、イオン源出口のスリットを開けてビーム量を増やし、現状の RILAC2 の施設許可電流値 40 μA まで加速できることを確認した。健全性テストの結果震災による悪影響は見られず、無事に SRC からビームを取り出すことが出来た。しかし、RRC のメインコイルに層間短絡があり、磁場が変動する問題が判明し、IRC、SRC まで含めた調整は充分には行えなかった。

6 月には RILAC2 で初めて ^{238}U ビームを加速し、さらに RRC 及び fRC で加速して、ストリッパーの長期試験を行った。ウランビームに関してはイオン源、LEBT を含めて RILAC2 の調整はまだ不十分であり、ビーム強度の向上までには至っていない。図 10 に RILAC2 の各ファラデーカップでのビーム電流値を示す。それぞれ、B12 が RFQ 入口に、B50 が DTL3 出口に、S71 が RRC 入射直前に対応して

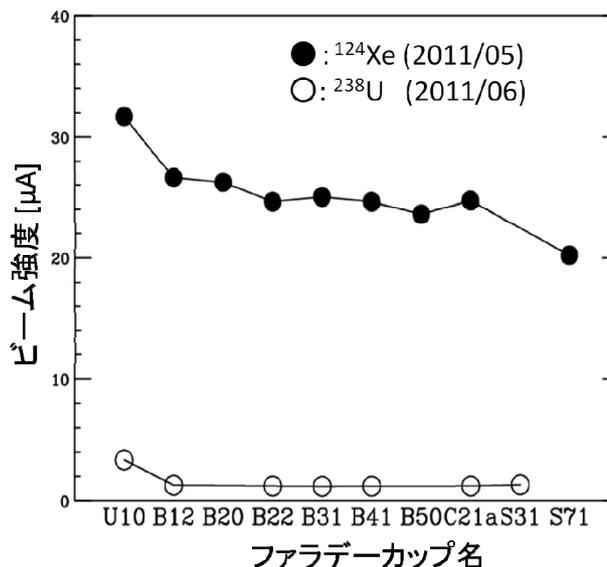


図 10 : RILAC2 各位置のビーム電流



図 11：ウランビームの強度と位相の変動

いる。また、図 11 に RRC 入射直前 (赤紫)、RRC 周回 (水色)、RRC 取りだし後 (黄色) のウランビーム強度と位相を静電ピックアップで約一日分測定した結果を示す。RILAC2 からのビーム位相は 0.1 nsec 以下で安定しているが、RRC のビームにはメインコイルの異常による大きな変動が見られる。なおグラフに見られるヒゲ状のパルスは測定の問題である。

4. 今後の予定

2010 年 12 月から行われてきた RILAC2 の加速試験で、 ^{124}Xe ビームのエネルギー及び通過効率に関してはまずまずの結果が得られているが、現状では RF 電圧及び位相の調整が最適であるかを定量的には評価できていない。RILAC2 が設計性能を発揮できているか評価するために、RILAC2 加速後の横方向エミッタンスを測定し、イオン源出口でのエミッタンス測定結果から求められる加速後のエミッタンスとコンシステントかを調べる予定である。また、縦方向のエミッタンスを定量的に測れる様にし、DTL3 直後で設計通りのエネルギー拡がり、位相拡がりの関係になっているかを求める必要がある。特に、これまでの加速試験ではイオン源を 18 GHz の RF 源で運転していたが、秋以降は 28 GHz で運転してビーム強度も増加するので、SRC まで 9 割以上の通過効率で加速するために、測定に基づいた加速パラメータの最適化を行わなければならない。10 月には、RILAC2-RRC-fRC-IRC-SRC で加速された ^{238}U ビームを使った実験が開始される予定である。

参考文献

- [1] O. Kamigaito et al., Proc. of PASJ3-LAM31, WP78, Sendai, 2006, p.502.
- [2] O. Kamigaito et al., Proc. of HIAT'09, MO-11, Venice, 2009, p.21.
- [3] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. 79 (2008) 02A327.
- [4] J. Ohnishi et al., Proc. of EPAC'08, MOPC153, Genoa, 2008, p.433.
- [5] K. Yamada et al., Proc. of IPAC'10, MOPD046, Kyoto, 2010, p.789.; Proc. of LINAC'10, TUP070, Tsukuba, 2010, p.572.
- [6] K. Suda et al., Proc. of IPAC'10, THPEA023, Kyoto, 2010, p.3726.
- [7] Y. Sato et al., Proc. of PASJ6, FOBTA01, Tokai, 2009, p.801..