

DESIGN OF THE LOW ENERGY BEAM TRANSPORT FOR RIKEN NEW LINAC SYSTEM (RILAC2)

Yoichi Sato^{1,A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Akira Goto^{A)}, Yoshihide Higurashi^{A)},
Eiji Ikezawa^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)},
Hiroki Okuno^{A)}, Hiroshi Watanabe^{A)}, Yutaka Watanabe^{A)}, and Shigeru Yokouchi^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

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

Abstract (英語)

The RIBF project at RIKEN Nishina Center needs high intensity of the uranium ion beam. We are constructing a new injector, RILAC2, which would provide 100 times higher intensity. As a part of the RILAC2, we designed the low energy beam transport (LEBT) from the ion source to the RFQ entrance. In this paper we present its requirements and problems, and show our design as the solutions to them. Especially we focus a technique of a pair of two solenoids to treat a rotational operation and a focusing operation independently. Based on this design, the RILAC2 LEBT will be constructed by the end of FY2009. The RILAC2 will be operational during FY2010.

理研大強度ビーム用新入射器システム (RILAC2) における 低エネルギービーム輸送系の設計

1. はじめに

独立行政法人理化学研究所仁科加速器研究センターにおけるRIビームファクトリー (RIBF) では、RIビームを水素からウランまでの全元素を世界最大強度で発生させることを目指しています。新RI生成断面積の大きいウランビームの大強度化を目指して、新入射器システム (RILAC2) を今年度末までに建設し、2010年度運転開始予定です^[1]。RILAC2完成後は従来の100倍以上のウランビームが得られるだけでなく、RIBF実験とは独立に、現行入射器システム (RILAC) を使用した超重元素合成実験が可能です。

RILAC2はイオン源、バンチャー、RFQ、リバンチャー、DTL 3台からなります (図1)。イオン源は2009年に先行製作した28 GHz超伝導イオン源、RFQは京都大学から移設されたものを改造、DTLは新規製作です。バンチャーは第一ハーモニック (18.25 MHz)、RFQ以降は第二ハーモニック (36.5 MHz) で運転します。本稿では低エネルギービーム輸送系 (LEBT) と呼ばれる、イオン源からRFQベーン入口までの領域の仕様と設計を紹介し (図2)。また、LEBT設計で採用された、今まであまり用いられていない技法である、ペアソレノイド技法についても紹介します。

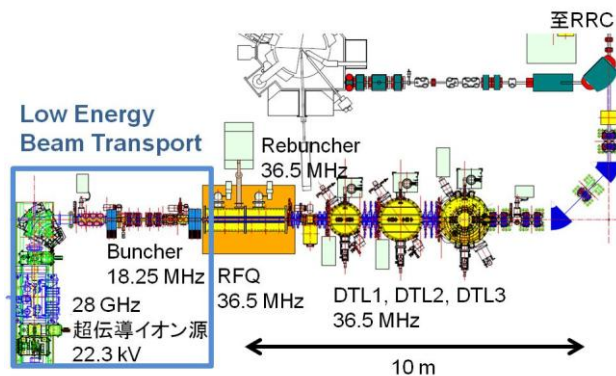


図1 : RILAC2配置図。

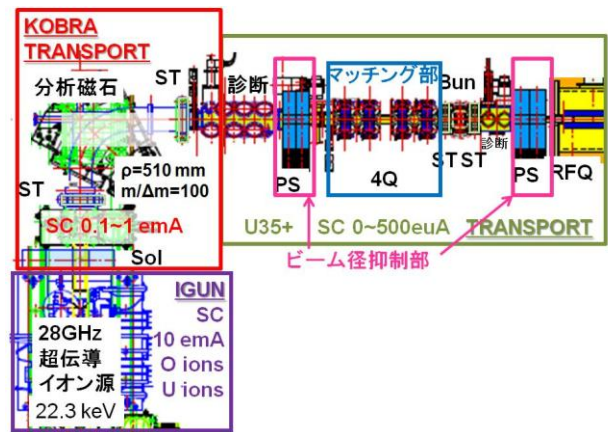


図2 : RILAC2 LEBTレイアウト。

¹ E-mail: yoichisato@riken.jp

2. RILAC2 LEBTの仕様

2.1 RILAC2 LEBT仕様

RILAC2 LEBTの基本仕様は表1です。加速ビームのエネルギーはRFQの入射条件によって決定されています。分析後エミッタンスはまだウランビームでの実験が行われていないため、推定値です。

全長 (イオン源プラズマ電極ーRFQ Vane入口)	6.8 m
加速ビーム	$^{238}\text{U}^{35+}$
加速電圧	22.3 kV
分析後非規格化エミッタンス VENUSからの推定値 $^{136}\text{Xe}^{20+}$ テストでの推測値	~150 π mm mrad ~120 π mm mrad
B ρ	0.056 Tm
核子当たりのエネルギー	3.28 keV
90度分析磁石 曲率半径 質量分解能 (m/ Δ m)	510 mm 100
RFQアクセプタンス ϵ_x, ϵ_y xmax, ymax x'max, y'max r12, r34	200 π mm mrad 4.47 mm 49.0 mrad -0.410

表1 : RILAC2 LEBT基本仕様。

2.2 28 GHz 超伝導ECRイオン源

イオン源は新規に作成し、28 GHzマイクロ波での共鳴運動電子を閉じ込める磁場生成が可能な超伝導ECRイオン源です^[2]。同程度の磁場強度のイオン源として1998年から計画され、現在Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)で稼働中のVersatile ECR ion source for Nuclear Science (VENUS)イオン源があります^[3]。新イオン源はVENUSよりも高性能が期待されますが、ウランビームでのテストが2009年11月のため、RILAC2 LEBT設計においてはVENUSの結果の加速電圧への換算値を参考にしました。VENUSイオン源では $^{238}\text{U}^{35+}$ の規格化RMSエミッタンスが鉛直・水平方向ともに0.1 π mm mrad程度です。90度分析磁石はLBNLの了解を得てVENUSと同設計のものを採用しました。ヨークにウイング加工することで6極補正を掛けています^[2,3]。

先行製作された新イオン源と90度分析磁石によるテストは、2009年7月からXeビーム、18 GHzマイクロ波、加速電圧17 kV、127 kV (高圧ターミナル使用時)で行われ、プロファイルから20euAの $^{136}\text{Xe}^{20+}$ に対し規格化80%エミッタンスが鉛直・水平方向ともに0.07 π mm mrad程度と推測されています。

2.3 イオン源に関するLEBT設計での課題

イオン源の生成目的イオンは0.5 emA程度の $^{238}\text{U}^{35+}$ ですが、プラズマ維持用サポートガスに由来する酸素イオンも大量に生成され、ウランビームと共にイ

オン源から引き出される酸素イオンは10 emAオーダーが予想されます。低エネルギー領域のため、分析磁石により酸素イオンが $^{238}\text{U}^{35+}$ から分離されるまでは空間電荷効果の取り扱いが大きな課題です。対策としては二次電子の利用による空間電荷効果緩和があります。二次電子は主に残留ガスのイオン化とロスビームがダクトをスクラッチする時に発生します。この二次電子ガスが、イオンビームにトラップされるとその分イオンビーム自身の空間電荷効果は中和されます。そのためには、2枚の引出し電極によるミラー電場の発生、LEBTに静電レンズを使用しないといった、対象領域で電子ガスがプラス電極に吸い出されない環境が必要となります。空間電荷効果緩和度は各研究所で意見がわかれています。99%~80%とされています^[3,4]。そこで私たちがLEBT設計基準として選んだのは、実効空間電荷効果を、イオン源引出し部で100%、酸素とウランが混在している分析磁石上流までは10%、ウランのみとなる分析磁石下流では100%とした取り扱いです。

もうひとつの課題としてイオン源からのビーム分布があります。一般にECRイオンビームは、プラズマ電極、引出し電極形状が円筒形にもかかわらず、正三角形形状となっているので、ビーム中央部に強度分布ピークがない可能性があります。しかし、対象ビームの強度分布は分析磁石下流でのみ測定できるため、数値計算と測定のすり合わせから推測するしかありません。先に紹介した実効空間電荷効果と測定点までのアクセプタンスを複合的に考慮する必要がありますが、新イオン源に対するウランビームでの試験を十分に行った上でのLEBT設計が時間的制約から出来ないため、想定しうる様々な条件にも対応できるゆとりを持ったLEBT設計が必要です。以上二つの課題は多価イオン源のLEBT共通の未解決課題であり、LEBT診断システムにおいて課題解決に向けた分析力を用意しなければなりません。

2.4 RFQ、バンチャー、診断システム

RFQは鉛直および水平方向に対し45度の角度を持つ4枚ベーン構成の4-rod RFQで、京都大学から移設されたものです。36.5 MHz用に改造して運用し、 $^{238}\text{U}^{35+}$ に対し22.3 kV、円筒対称入射を要求しています^[1,5]。アクセプタンスとのマッチングには最低4つの自由度がレンズ要素として必要となります。

RFQ上流に18.25 MHzのバンチャーが必要です。バンチャーは内径 ϕ 40 mm、全長15 cmの2ギャップ構成で、ギャップ間64.5 mmです。電圧からRFQ上流1 mあたりに置く必要があり、また電場形状からバンチャー内ビーム径を ϕ 25 mm以下にする必要がTRACKコード^[6]による計算(表2)で示されます^[7]。

バンチャー内ビーム径	RFQ通過効率
18 mm	78%
26 mm	77%
35 mm	60%

表2 : バンチャー内ビーム径とRFQ通過効率。

診断システムは2カ所に配置します。第一診断システムは90度分析磁石の下流に設置し、同一チェンバー内に分析用水平・鉛直方向スリット、エミッタンススリット、2枚のプロファイルモニター、ビューイングターゲット、アテネーター、ファラデーカップ、真空ポンプを装備しています。10%程度のエミッタンス測定精度を期待しています。上記装備のため、分析用スリットから第一診断システム直下レンズの距離は最短で0.6 mとなり、Q電磁石の場合、ビーム径はφ100 mm以上となります。

第二診断システムは、RFQアクセプタンスのビーム径φ10 mmのため、RFQ上流に配置する強収束レンズとの兼ね合いを考慮した上で、RFQ上流に専用チェンバーを設置します。RFQのペーンが45度水平面より傾き、DTL出口までのQ電磁石も45度傾けて使用することから、45度傾いたエミッタンスモニターおよび2枚のプロファイルモニター、ビューイングターゲット、真空ポンプを装備させます。

各診断システムの2枚プロファイルモニターでビーム軸出し、ビューイングターゲットで横方向分布測定を行います。

3. RILAC2 LEBTの設計

3.1 RILAC2 LEBT設計計算

RILAC2 LEBTの設計計算にはLEBTをイオンビームの分布に応じて3つのセクションに分けて対応しました。第1セクションはイオン源からのビーム引出し部、第2セクションは引出し部下流から分析磁石下流まで、第3セクションは分析磁石下流の分析用スリットからRFQペーン入口までです。二次電子とイオンの相互作用は直接計算せず、空間電荷効果緩和度を仮定した相当イオン流（実効SCイオン流）を基に計算しました（表3）。第1セクションでのイオン分布は理研18 GHz常伝導ECRイオン源で得られたU³⁵⁺生成時の分析結果を全電流10 emAに比例配分したものです。但し、この分析は90度分析磁石下流診断システムで得たものです。第2セクションは第1セクションの結果を初期条件とし、第3セクションは第2セクションの結果を初期条件の一つとしています。

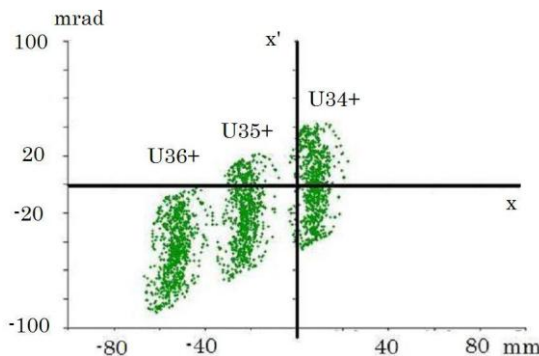


図3：第2セクションのKOBRA計算による分析スリットでの水平方向エミッタンス。

セクション	使用コード	実効SCイオン流 (イオンビーム)
1	IGUN	10 emA (O and U ions)
2	KOBRA	0.1 ~ 1 emA (O and U ions)
2	TRANSPORT	0.1 ~ 1 emA (U35+) 分析磁石上流部 0 ~ 0.5 emA (U35+) 分析磁石下流部
3	TRANSPORT	0 ~ 0.5 emA (U35+)

表3：設計計算で使用したコード、想定イオン。

第2セクションでは2種類の計算を行いました。酸素イオンとウランイオンを合わせたKOBRA計算の場合（図3）と、U³⁵⁺のみで実効SCイオン流を構成したTRANSPORT計算でほぼ相似形のエミッタンスを得ました。ただし、第2セクションの初期条件で非規格化エミッタンスは~600 π mm mradとなり、VENUSからの推測値150 π mm mrad（表1）の3倍となっています。RFQのアクセプタンスが200 π mm mradのことから、第3セクションでは、第2セクション終端と相似形エミッタンスで200 π mm mradのものを初期条件の一つとして採用しました。

第3セクションでは、第2セクション終端相似形エミッタンス以外に、ビームウエストをスリット位置から±200 mm程度ずれた場合、ビームウエストが水平・鉛直方向で異なる場合、VENUS結果から推測された場合それぞれを初期条件としました。各条件のエミッタンス面積は200 π mm mradです。スリット下流のLEBT設計にあたり、全初期条件で実効空間電荷効果0 ~ 0.5 emAの範囲のU35+ビームがRFQペーン入口でのマッチングが一次計算95%以上となる輸送系を構築しました。ソレノイドでの収差はTRANSPORTではなく、KOBRAなどの3次元軌道計算を用いました。ソレノイドの前で最大10%以下のエミッタンス増加が見られました。

3.2 RILAC2 LEBT設計結果

RILAC2 LEBT設計結果レイアウトは図2です。レンズ要素は上流から、イオン源引き出し後のソレノイド、90度分析磁石、ペアソレノイド、4連Q電磁石、ペアソレノイドを配置し、RFQへビームを輸送します。ビームマッチングのみの観点からは分析磁石-RFQ間に4連Q電磁石だけあれば要素として十分ですが、その場合は高額となる大口径Q電磁石を使用する必要があります。ボア径を抑える比較的安価な手段としてソレノイドがあります。しかし、ソレノイドレンズは収束要素であると同時にビーム軸動径方向の回転要素でもあるため、水平・鉛直方向への射影エミッタンスが診断システムで測定したエミッタンスに比べ変化する可能性があります。そこで同磁場を互いに逆向きに発生させたソレノイド2枚を一組として回転要素を打ち消しあったレンズを、第一診断システム下流に一組、第二診断システムとRFQの間に一組採用しました。その結果、第一診断システム下流で広がったビームを等方的に収束させ、ボア径φ100 mmのQ電磁石4枚でマッチン

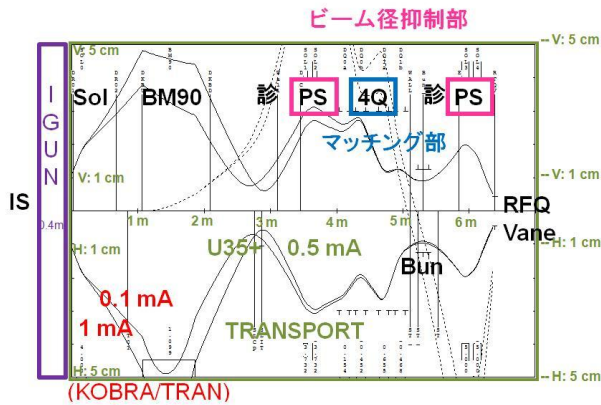


図4：イオン源プラズマ電極0.4 m下流からRFQ入口までのビームプロファイル。

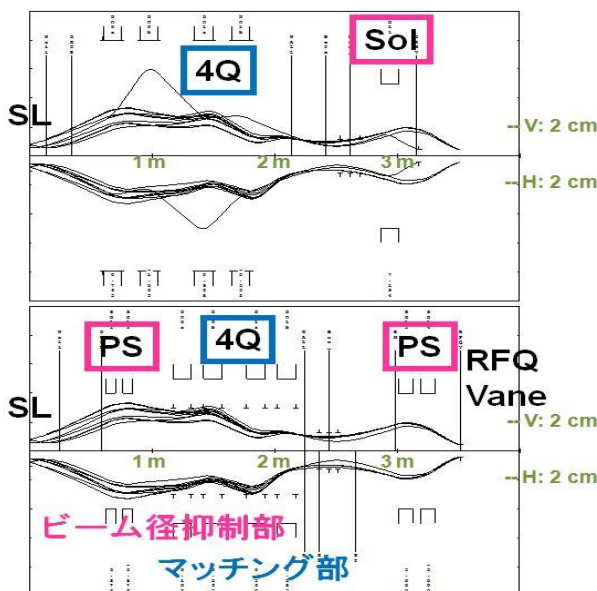


図5：分析スリットからRFQ入口までのビームプロファイル。上図は第一診断システム直下にQ電磁石を配置した場合。ただし、LEBT設計結果（下図）と重ね合わせている。下図はLEBT設計結果。

グをとり、第二診断システムでの水平・鉛直方向に45度傾けた診断内容を基に、軸周り回転角を気にせずRFQ下流での45度傾いた輸送系調整を行えると期待されます。

ステアラーは、90度分析磁石を挟んで2枚、小チェンバー上流にバンチャーを挟む形で2枚配置します。各ステアラーは10 mradの偏向能力を持っています。第一、第二診断システムの持つ各2枚のプロファイルモニターと組み合わせることでビーム軸出しを可能とします。

3.3 ペアソレノイド

同磁場を互いに逆向きに発生させたソレノイド2枚一組による回転要素を打ち消しの技法は、ミュオンコライダークーリングチャンネルで考えられましたが^[8]、低エネルギー輸送系では適用されずきました。このペアソレノイドの技法は、ソレノイド

の軸周り回転要素と収束要素が可換、軸周り回転要素とドリフト部が可換であることに由来します。利点としては、水平・鉛直方向の射影エミッタンスを増加・混在させることなくボア径を抑えた等方的収束が可能となる点、ペアソレノイド間距離を比較的自由に選択できるため、間にレンズ以外の要素を組み込める点、磁場レンズであるため、電子による空間電荷効果緩和を阻害しない点が挙げられます。また、本設計においてペアソレノイドは共通の電源を使用していますが、各ソレノイド独立の電源を用意すれば、軸周り回転角度と収束力を独立にコントロールできるレンズとしての使用が可能です。これにより、射影エミッタンスの極小値を探った上で収束力を調整することが出来ます。ペアソレノイドの収差は、ソレノイド間の距離、内径の調整により、ペアソレノイド前後で5%以下のエミッタンス増加に抑えられます。

$$R_{\text{SOLENOID}}(B_{\text{Solenoid}}, L_{\text{eff}}) \otimes \text{Drift}(L) \otimes R_{\text{SOLENOID}}(-B_{\text{Solenoid}}, L_{\text{eff}}) = \begin{pmatrix} C^2 - KLSC - S^2C & LC^2 + 2C^2S/K & 0 & 0 \\ -2KSC + K^2LS^2 & C^2 - KLSC - S^2C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C^2 - KLSC - S^2C & LC^2 + 2C^2S/K \\ 0 & 0 & -2KSC + K^2LS^2 & C^2 - KLSC - S^2C \end{pmatrix}$$

$$K = \frac{B_{\text{Solenoid}}}{2B\rho_0} \quad C = \cos(KL_{\text{eff}}) \quad S = \sin(KL_{\text{eff}})$$

4. 結論

RIBF計画の一環として、大強度Uビームを目指した新入射器システムRILAC2は今年度末整備完了予定、2010年度中旬から運用予定です。イオン源は新規に先行製作され、RFQは既存のものを使用します。イオン源からRFQまでの低エネルギービーム輸送ライン（LEBT）は本稿の設計に基づき今年度末整備完了予定です。LEBT設計で採用したペアソレノイドの技法は、軸周り回転なしに等方的収束を可能とし、ボア径を抑えた設計に寄与しました。とくに軸周り回転要素と等方的収束要素の独立操作性は、理研以外の低エネルギービーム輸送系の構成にも有用であると考えられます。

参考文献

- [1] 上垣外 他, 第6回日本加速器学会, Tokai, Japan, 2009.
- [2] 日暮 他, 第6回日本加速器学会, Tokai, Japan, 2009.
- [3] D. Leitner, et al., "High intensity production of high and medium charge state uranium and other heavy ion beams with VENUS", Proceedings of the 12th international conference on ion sources, Jeju, Korea 2007, URL: http://icis2007.snu.ac.kr/ICIS/issue_OV.htm.
D. Leitner, et al., NIMB B235 (2005) 486-493.
D. Todd, et al., ECRIS08, Chicago, U. S. A., 2008.
- [4] P. Spaedtke, et al., ECRIS08, Chicago, U. S. A., 2008.
- [5] H. Fujisawa, NIM A345 (1994) 23.
- [6] P. N. Ostroumov, V. N. Aseev, and B. Mustapha., PRST-AB 7, 090101 (2004).
- [7] 奥野 他, 第6回日本加速器学会, Tokai, Japan, 2009.
- [8] J. C. Gallardo, et al., "An ionization cooling channel for muon beams based on alternating solenoids", Proceedings of the Particle Accelerator Conference, 1999, Page(s):3032 - 3034 vol.5.