

## ISSUE OF LINAC VACUUM AT URANIUM BEAM ACCELERATION IN RIKEN RI BEAM FACTORY

Shigeru Yokouchi<sup>1, A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Eiji Ikezawa<sup>A)</sup>, Hiroki Okuno<sup>A)</sup>,  
Kazuyuki Oyamada<sup>B)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>, Masayuki Kase<sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN

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

<sup>B)</sup> SHI Accelerator Service, Ltd.

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

### Abstract

The uranium beam acceleration is one of important schemes of the RIKEN RI Beam Factory (RIBF). At present a uranium beam with 0.4 p nA at an energy of 345 MeV/u is available for experiments, however, further improvements are required to increase the beam intensity more.

Focusing on the beam loss via the charge-exchange processes of the beam with residual gas, we investigated the effect of vacuum pressure on the transmission efficiency of the heavy-ion linac (RILAC). The increase in pumping speeds for the vacuum chambers where the transmission was degraded resulted in about 10 % increase of the transmission efficiency.

In the RIBF a new injector is planning to be constructed in order to upgrade the beam intensity, and a new pre-injector for the RILAC is now under construction. The vacuum level required for its MEBT line is estimated to be in the low range of  $10^{-6}$  Pa. Therefore the reduction of outgassing and the enhancement of vacuum pumping were emphasized in the vacuum design.

## RIビームファクトリーのウラン加速におけるリニアック真空の問題

### 1. はじめに

2006年7月のビームコミッショニング開始以来、理研RIビームファクトリー(RIBF)では新同位元素<sup>125</sup>Pdや<sup>126</sup>Pdの発見など著しい進展をみた。いっぽうで、ビーム通過効率、とりわけウランビームの効率が非常に悪いという問題にも直面した。現在、最大ビームエネルギー345 MeV/u において<sup>238</sup>Uで0.4 p nA、<sup>48</sup>Caで170 p nAのビーム強度が実験に供せられている<sup>[1]</sup>。しかしながら、ウランの目標値1 p μAを達成するためには、今後、さらなる改善が必要である。

ウランビームでは全体の通過効率が極めて低く、とくに重イオンリニアック(RILAC)における通過効率の悪さが問題となっている。そこで、ビームロスにおよぼす真空の影響を調べ、RILACの通過効率の改善を図った。以下にその詳細を報告する。

また、RIBFの新入射器計画<sup>[2]</sup>における先行入射器MEBTラインの真空設計についても報告する。

### 2. RILACのウランビーム通過効率改善

#### 2.1 RILACの真空と改善前のビーム通過効率

RILACのレイアウトを図1に示す。RILACのビームラインは、上流から高周波四重極加速器(RFQ)、

リバンチャー(REB)、6基のRILACキャビティ(CAVITY#i)、およびREBとCAVITY#i間ビームライン(014)とCAVITY#i,i+1間ビームライン(VACi,i+1)の14セクションに分割される。各セクションには、クライオポンCP- は直付けで、ターボ分子ポンプTP- はそれぞれの吸気弁(VH)を介して接続されている。各セクションの圧力はおおむね $10^{-5}$  Pa台である。

RILACのビーム通過効率はR1のe11に対するビーム電流の比で表される。改善前(2008年前半)の代表的な値であるFe<sup>13+</sup>約41%、Zn<sup>16+</sup>約53%などと比較して、U<sup>35+</sup>の通過効率は約31%と低い。

#### 2.2 U<sup>35+</sup>ビームロスの測定

RILACにおけるU<sup>35+</sup>のように高電荷の重イオンを加速あるいはトランスポートする場合、真空中の残留ガスとの荷電変換反応によるビームロスが大きいと通過効率が低下する。低エネルギーのU<sup>35+</sup>ビームトランスポートでは、ビームロスを無視できるくらい小さく抑えるために必要な真空レベルは $10^{-6}$  Pa台前半と推定される。しかしながら、前述のとおり実際の圧力は $10^{-5}$  Pa台と1桁高いので、通過効率の低い原因がビームロスにあることが懸念された。そこで、以下に述べる方法によりU<sup>35+</sup>のビームロスを測定することを試みた。

<sup>1</sup> E-mail: yokouchi@riken.jp

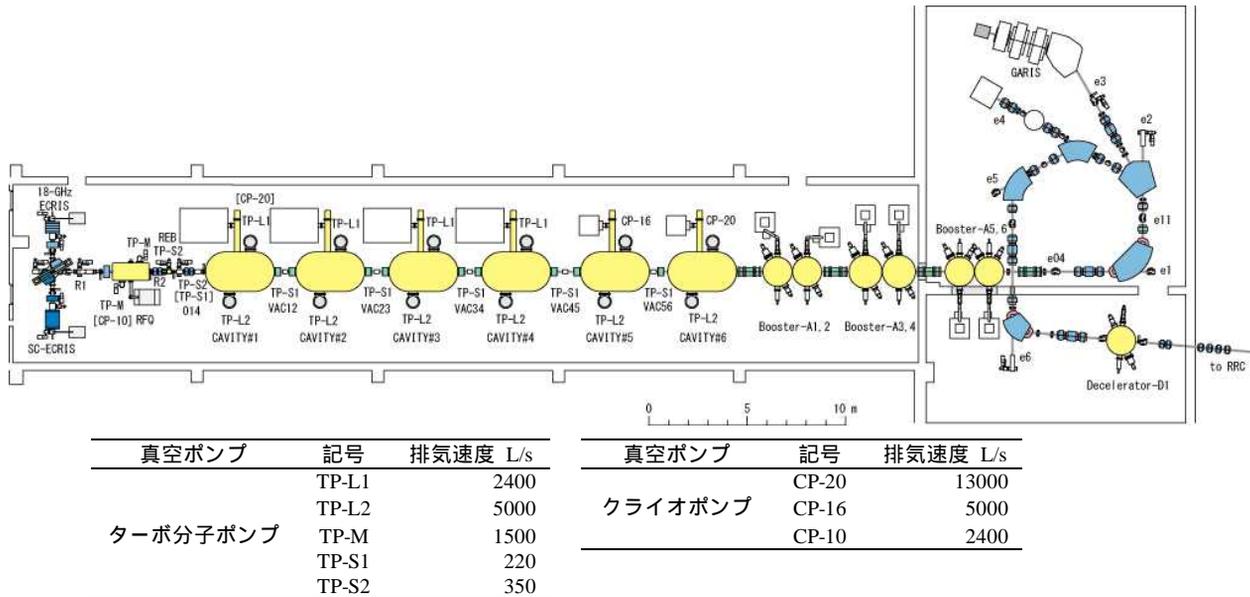


図1：RILACのレイアウト

十分なビームチューニング後、RILAC全体(RFQからCAVITY#6まで)の通過効率 $\eta_x$ および各セクション $x$ の圧力 $po_x$ を測定しておく。あるセクション $x$ の真空を、そのセクションのVHを閉じることによって意図的に悪くして、このときのRILAC全体の通過効率 $\eta_x$ とセクション $x$ の圧力 $pm_x$ を測定する。

$\eta_x'$ はセクション $x$ における通過効率の変化を意味するので、セクション $x$ において付加的に生じるビームロス $m_x$ は次式で表される。

$$m_x = 1 - \eta_x' \quad (1)$$

断面積とビーム行程長が一定であると仮定すれば、

$m_x$ は圧力の十分小さな増分 $pm_x (= pm_x - po_x)$ にほぼ比例する。したがって、セクション $x$ における固有のビームロス $\alpha_x$ は次式により計算できる。

$$\alpha_x = m_x \times (po_x / pm_x) \quad (2)$$

通過効率の測定値と各セクションの圧力の測定値を式(1)、(2)に代入して、各セクションの固有ビームロス $\alpha_x$ を計算した結果を図2に示す。予想されたように、上流側のセクションにおいてビームロスが大きいことが図からわかる。なお、図2( )でVAC12のビームロスが大きく観測されているが、作業ミスによる一時的な圧力増加によるもので、後日、下流側セクションと同程度のビームロスであることが判明した。

### 2.3 排気系の増強と真空改善

RFQ～CAVITY#1の4セクションのビームロスが顕著であることが判明したので、2008年夏、これらセクションの真空ポンプを増強した。RFQの2台のターボ分子ポンプTP-M(1500 L/s)のうち1台をクライオポンプCP-10(2400 L/s)に置き換えた。ビームライン014にはTP-S1(220 L/s)を1台増設した。さらに、CAVITY#1のTP-L1(2400 L/s)をCP-20(13000 L/s)に置

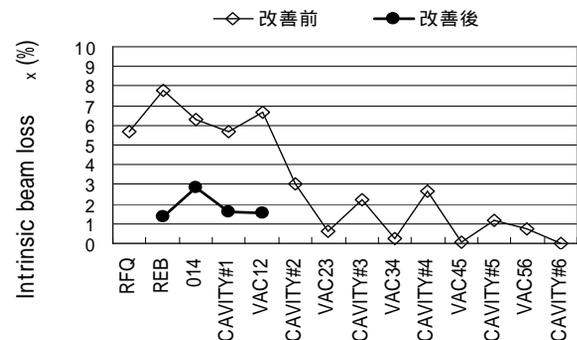


図2：U<sup>35+</sup>各セクション固有のビームロス

き換えた。なお、REBについては、現状の真空構造やスペースから増強工事が容易ではないと判断して、今回は断念した。RFQ～CAVITY#1について、増強前後の有効排気速度を表1に示す。また、排気系増強による真空改善の結果を表2に示す。

セクション	有効排気速度 (L/s)		1/増強比
	増強前	増強後	
RFQ	1114	1672	0.67
014	216	376	0.57
CAVITY#1	4426	10585	0.42

表1：RILAC真空排気系の増強

セクション	圧力 (Pa)		改善比
	改善前	改善後	
RFQ	$1.1 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-6}$	0.43
REB	$4.1 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	0.71
014	$8.5 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-6}$	0.24
CAVITY#1	$7.2 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-6}$	0.38

表2：RILAC真空改善結果

## 2.4 ウランビーム通過効率の改善

2008年秋のウランビーム加速運転において、 $U^{35+}$ 通過効率とビームロスの測定をおこなった。図2( )に示すとおり上流側セクションのビームロスは下流側とほぼ同じ程度にさがり、RILAC全体の通過効率は約40%にあがった。以上のことから、真空改善の効果によってビームロスが減少し、RILAC全体の $U^{35+}$ 通過効率が約10%改善されたと考えられる。

## 3. 先行新入射器MEBTラインの真空

### 3.1 要求される真空レベル

RILACと同様、先行新入射器MEBTラインでのウランビーム加速においてもビームロスの低減は重要な問題である。行程長を $L=10$  (m)、電子捕獲反応断面積を $\sigma=5.7 \times 10^{-14}$  (cm<sup>2</sup>)として、 $U^{35+}$ ビームロスを5%以下に抑えるために必要な圧力は $3.6 \times 10^{-6}$  Paと見積られた。ただし、断面積は、MullerとSalzbornに基づく式 $\sigma=8.9 \times 10^{-16} \times Q^{1.17}$  (cm<sup>2</sup>)<sup>[3]</sup>を用いて計算した。

非ベーク系のビームラインで前述の真空レベルを短時間で実現することは容易ではない。したがって、本MEBTの真空設計では、材料の放出ガス低減および排気系の強化に注力した。

### 3.2 放出ガスの低減

MEBTライン<sup>[4]</sup>真空部の材質はほとんどがアルミ合金である。そこで、アルミ合金の表面処理候補として、施工が比較的簡単で安価であるという特長をもつALpika<sup>®</sup> (アルピカ:アルバックテクノ社)にしばらく、処理の有無による優劣を見きわめるために実機チェンバを用いて評価試験をおこなった(表3参照)。

アルピカ処理をすることによって、到達圧力は1/2に下がり、ガス放出量は1/6に減った。表3に示すとおり排気中のおよそのガス放出量は、ビルドアップ法による測定値より大きな値を示す。しかし、ビルドアップ法によるガス放出量が流量法によるよりも小さく観測されることはしばしば報告されており、また、ガス放出量の排気速度依存性についての研究<sup>[5]・[6]</sup>でも指摘されていることから、本試験における不一致は妥当と考えられる。そこで、到達圧力が1/2になった結果に基づき、アルピカ処理された今回のアルミ合金のガス放出率は従来の1/2になるとみなして設計をすすめた。なお、一部に使用されているSUS304の処理は、電解研磨、またはSUS pika<sup>®</sup> (アルバックテクノ社)によった。

### 3.3 真空排気系

RIBFにおける従来のビームラインでは、ライン長さ約10mに対して小型ターボ分子ポンプ1台設置を設計のおおまかな目安としている。ライン引き口での有効排気速度は約160 L/s (N<sub>2</sub>)で、各セクションの圧力の平均として、およそ $1 \times 10^{-5}$  Paが得られている。

本MEBTラインでは、小型ターボ分子ポンプ3台にくわえ、6インチクライオポンプ2台を設置し排気系を強化した。ライン引き口での有効排気速度の合計は1480 L/s (N<sub>2</sub>)となり、従来と比較して約9倍の排気能力を有することになる。3.2項の放出ガス低減効果1/2を加味すると、単純計算で従来のおよそ1/20程度の圧力となる。しかしながら、排気速度の増加が圧力低減にどの程度寄与するかははなはだ疑問であり、運転結果を待つしかない。詳細な排気計算によるフォローと、所定の圧力が達成できなかったときの対策を検討することが今後の課題となる。

試験系の仕様			
チェンバ名称/材質	モニタチェンバ(中)/A6063-T5		
チェンバ内表面積A (m <sup>2</sup> )	0.39		
チェンバ内容積V (m <sup>3</sup> )	0.015		
排気ポンプ	クライオポンプ		
有効排気速度S (m <sup>3</sup> /s)	~0.002		
試験結果			
	未処理	アルピカ	放置後 <sup>*4</sup>
到達圧力p (Pa) <sup>*1</sup>	$3.0 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$
ガス放出量Qb (Pam <sup>3</sup> /s) <sup>*2</sup>	$2.9 \times 10^{-6}$	$4.6 \times 10^{-7}$	$4.4 \times 10^{-7}$
ガス放出量Qt (Pam <sup>3</sup> /s) <sup>*3</sup>	$\sim 6 \times 10^{-6}$	$\sim 3 \times 10^{-6}$	$\sim 3 \times 10^{-6}$

<sup>\*1</sup> 排気後15時間の値 <sup>\*2</sup> ビルドアップ法による <sup>\*3</sup>  $Q_t = S \times p$ の概略参考値(流量法に相当) <sup>\*4</sup> アルピカ処理後、非クリーンの保管室に1.5ヶ月放置した値

表3：アルピカ評価試験

## 4. まとめ

- 1) RILACビームラインにおいて、各セクションの圧力を変化させたときの圧力と通過効率の変化から、各セクション固有のビームロスを推定できた。
- 2) 1)の結果に基づき真空改善をおこない、RILACの通過効率を約10%改善することができた。
- 3) 先行新入射器MEBTラインで採用する表面処理アルピカの放出ガス低減特性を評価するため、実機アルミ合金チェンバの排気試験をおこなった。処理した場合、到達圧力で1/2に、ビルドアップ法によるガス放出量で1/6に低減される結果を得た。

## 参考文献

- [1] N.Fukunishi, et al., Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference in Canada, Vancouver, May 4-8, 2009, MO3GRI01.
- [2] O.Kamigaito, et al., Proceedings of the 11th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology in Italy, Venice, Jun. 8-12, 2009
- [3] The K500 x K1200-A Coupled Cyclotron Facility at the National Superconducting Cyclotron Laboratory: NSCL Report MSUCL-939, 64 (1994)
- [4] Y.Watanabe, et al., Proceedings of PASJ6, Aug. 2009, Wako-shi Saitama, TPOPA22
- [5] G.Horikoshi and M.Kobayashi, J. Vac. Sci. Technol. **18**, 1009 (1981)
- [6] K.Akaiahi, et al., J. Vac. Sci. Technol. **A19**, 365 (2001)