

ACCELERATION TESTS OF URANIUM BEAM IN RI BEAM FACTORY

Nobuhisa Fukunishi^{1,A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Akira Goto^{A)}, Hiroo Hasebe^{A)}, Yoshihide Higurashi^{A)},
Eiji Ikezawa^{A)}, Tadashi Kageyama^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Misaki Komiyama^{A)},
Hironori Kuboki^{A)}, Makoto Nagase^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Ryo Koyama^{A,B)}, Takeshi Maie^{A)},
Takahide Nakagawa^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Hiroki Okuno^{A)}, Hiromichi Ryuto^{A,C)}, Naruhiko Sakamoto^{A)},
Kenji Suda^{A)}, Masanori Wakasugi^{A)}, Tamaki Watanabe^{A)}, Kazunari Yamada^{A)}, Shigeru Yokouchi^{A)},
Osamu Kamigaito^{A)} and Yasushige Yano^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

1-17-6 Osaki, Shinagawa, Tokyo, 141-0032

^{C)} Photonics and Electronics Science and Engineering Center, Kyoto University
Kyoto Daigaku Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8510

Abstract

A 114-MeV/nucleon uranium beam with the intensity of 0.35 pA was successfully extracted from RIKEN Intermediate-stage Ring Cyclotron. Transverse and longitudinal emittances of the uranium beam were estimated based on detailed analysis of observed data.

RIビームファクトリーにおけるウランビーム加速試験

1. はじめに

理研仁科センターのRIビームファクトリー¹⁾は2006年12月に主加速器であるSuperconducting Ring Cyclotron (SRC)²⁾からのファーストビーム取り出しに成功³⁾、2007年5月には核子当たり345 MeVに加速したウランビームをRIビーム生成分離装置BigRIPS⁴⁾に打ち込み、新放射性同位体¹²⁵Pd⁵⁾の生成に成功した。しかしながら、最大で5段階加速を行うRIビームファクトリーにおいて、各段階のビーム通過効率は極めて低く、多くの解決すべき問題があることが認識されていた⁶⁾。これらを解決すべく2007年9月以降、計5回のサイクロトロンを使った試験運転が行われた。本報告では一連の試験運転の到達点を示すものとして、2008年7月初旬に行われたウランビーム加速試験の結果を報告する。

2. 試験運転時の通過効率

この一年間に実施した主な加速試験を表1にまとめる。10日から2週間程度の試験運転を計5回行い、そのうち3回はウランビームを加速した。なお、本年度SRCを使った加速試験が行われていない理由は参考文献(7)を参照されたい。表2にはRIBFの各段階におけるビーム通過効率がまとめられている。表に示された通過効率は加速試験期間中ベストの値であり、荷電変換効率を除外した値である。荷電変換効率は実測の荷電分布から決定した値を用いた^{8,9)}。な

お、比較のため示した2007年7月3日のデータでは、ビーム量の較正が未だ成されておらず、測定に用いたRRC以降のファラデーカップが全て2倍多く読んでいると仮定して評価した。RIBFにおいてはKrやCaなどの比較的軽いイオンはfixed-frequency Ring Cyclotron (fRC)¹⁰⁾を使わずに核子当たり345 MeVまで加速することが出来るが、ウラン加速にはfRCが必須で、かつfRC前後に各々エネルギー損失1.5%と10%という厚いストリッパを用いる必要がある。KrやCaでは少なくとも最終段のSRC以外に関してはRIBFの第一段階の目標たる通過効率90%をほぼ実現することが出来たが、ウランの場合は一年前に比べて大きく改善したとは言え、未だかなり低い値に留まっている。

表1 この一年間に実施されたRIBF加速試験
表中イオン価数は最終段加速器における価数である。

試験運転期間	加速イオン	試験時最終段加速器
07/09/21 - 10/04	²³⁸ U ⁸⁶⁺	RRC
07/11/02 - 11/10	⁸⁶ Kr ³⁴⁺	SRC
08/04/18 - 05/02	²³⁸ U ⁸⁶⁺	IRC
08/06/01 - 06/09	⁴⁸ Ca ²⁰⁺	IRC
08/07/01 - 07/10	²³⁸ U ⁸⁶⁺	IRC

ウランビームの通過効率が上がらない理由はビームの質が設計値より悪いためであると推察される。よってウランビームの質を推定することを目的とし

¹ E-mail: fukunisi@ribf.riken.jp

て2008年7月に行われた加速試験のデータを解析した。

表2 RIBF各段階における通過効率

RILACは理研重イオンリニアック、RRCは理研リングサイクロトロン、IRCは中間段サイクロトロン¹⁾を意味する。RILACの通過効率はイオン源からRILACの出口まで、RRC以降は前段加速器出口から当該加速器出口までの通過効率を示す。

日時	ion	RILAC	RRC	fRC	IRC	SRC
07/07/03	$^{238}\text{U}^{86+}$	29	86	36	50	44
07/11/04	$^{86}\text{Kr}^{34+}$	28	89		82	45
08/06/05	$^{48}\text{Ca}^{20+}$	62	95		88	
08/07/10	$^{238}\text{U}^{86+}$	31	73	85	83	

3. ウランビームのエミッタンスの推定

3.1 測定に用いたビーム診断装置

RIBFのレイアウトを図1に示す。RILACで加速されたウランビームは2台のリバンチャーを通してRRCに入射される。RRCで加速されたビームは図中ストリッパー1で71+に荷電変換され、その後リバンチャーで位相圧縮された後fRCに入射される。fRCからIRCまでは全長120mのビームライン(BL)を通して輸送されるが、ほぼその中間点で第2回の荷電変換を実施し、IRCに入射される。fRCからIRCに至るビームラインを便宜上分割し、第2ストリッパーより上流をfRC出射ビームライン、第2ストリッパー以降をIRC入射ビームラインと呼ぶこととする。

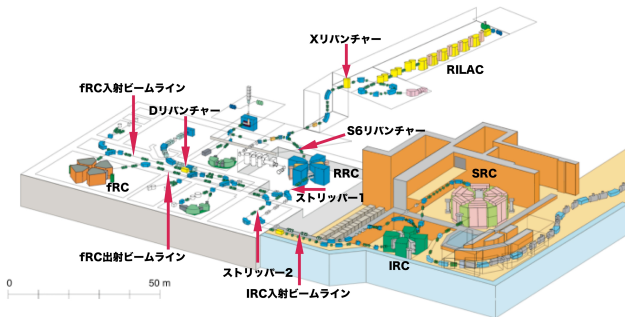


図1 RIBFのレイアウト

各加速器を繋ぐビームラインにはビームのhorizontal、vertical方向の分布を測定するビームプロファイルモニター(PF)、ビーム量を測定するファラデーカップ(FC)、ビームエネルギーをTOF法で測定するためのプラスチックシンチレータが常設されている。今回の加速試験に関連する範囲のモニター系を表3にまとめる。各PFで測定されるビームの空間的な広がり情報は、transverse方向におけるビームエミッタンスを反映する量である。分散の大きな場所にPFがあれば、エネルギー広がりに関する

情報を引き出すことが可能である。Longitudinal方向の分布、例えばエネルギー広がりなどはTOF測定用のプラスチックシンチレータで測定されるビームの時間方向分布から推定することができる。更に、各サイクロトロンに備え付けられたMain Differential Probe (MDP)により、加速されるビームのターンパターンが測定されるが、ターンパターンはサイクロトロンに入射されるビームの位相幅やエネルギー幅の情報を有している。これらを総合的に解析することによりビームの質を推定した。

表3 ビームラインに設置されたモニターの個数

	長さ(m)	PF	FC	TOF
fRC入射	78	12	9	2
fRC出射	60	9	6	0
IRC入射	59	15	5	2

3.2 解析結果

PFデータ解析の一例として、fRC 入射BLの解析結果を図2に示す。fRC入射BLにおいてはRRC取り出し領域におけるhorizontal、vertical方向のエミッタンスの形状を楕円形状の外縁を持つガウス分布と仮定し、楕円を特徴付けるパラメータを変数としてフィッティングを行う。Longitudinal方向に関しては位相幅、エネルギー広がり(ガウス分布)をパラメータとするが、RRCはフラットトップ共振器を持たないため、正弦波加速に特徴的な位相とエネルギーの相関を考慮して解析した。本質的にはビームラインの輸送行列を電磁石電流値から再構成してフィッティングしただけの解析であるが、リバンチャーに関してのみ静電近似で求めた電場分布から微分法的式を数値的に解く事とした。

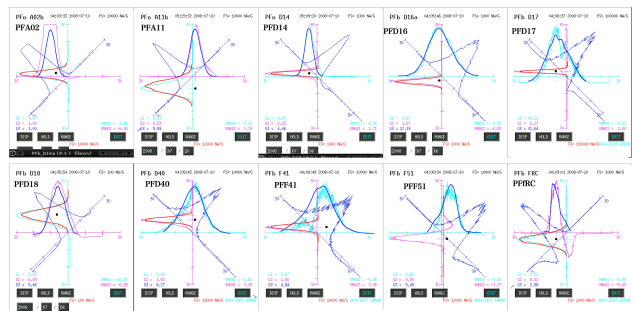


図2 fRC入射ビームラインPFデータ解析結果。図は上流から見たビームプロファイルで薄い線が実測、青と赤の濃い線が計算結果。

fRC出射BL、IRC入射BLに関する解析結果もほぼ同様のフィッティングを与える。PFの設置されている場所は無視出来ない分散があるため、horizontal方向のフィッティングにおいては分散によるエネルギー広がりとの分離が一般的に悪く、horizontalエミッタンスはvertical方向ほど正確には決められない。この意味で多少不正確ではあるが、得られた結果を

表4にまとめる。図中のRMS-deviationはフィッティング対象となったビームの空間分布の幅 σ に対して評価したものである。

表4 PFデータ解析で得られたウランビームエミッタンスの推定値(unnormalized, 単位 π mm \cdot mmrad)

	horizontal emittance	RMS (H, mm)	Vertical emittance	RMS (V, mm)
fRC入射	2~5	1.4	2.2	0.8
fRC出射	7.2	1.3	1.4	0.5
IRC入射	13	1.4	2.8	0.7

次にMDPパターン解析例として、PFデータ解析で得られたビームをfRCまで輸送し、加速シミュレーションを行った結果と実測との比較を図3に示す。実測データは加速領域の中盤から後半にかけて、二次電子の影響が顕著でベースラインが下がってしまう。この点を無視して比較すれば本解析でfRCの周回ビームパターンが良く再現されていることが分かる。

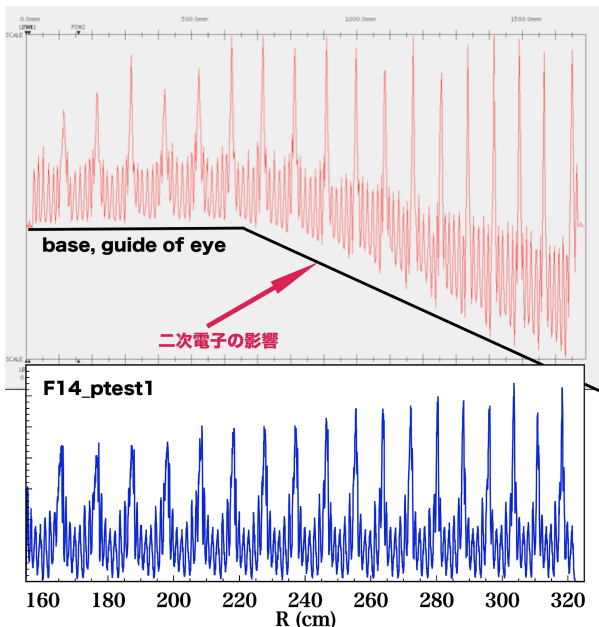


図3 fRCターンパターン解析結果。fRCの加速電圧は測定結果を再現する様にフィットした。

このターンパターン解析結果とTOF測定用プラスチックシンチレータで得られたビームの時間構造に関する情報を総合的に判断し、各サイクロトロンに入射されるビームの位相幅を推定した結果をまとめると表5の通りとなる。

表5 サイクロトロンに入射されたビーム位相幅の推定値(4σ 領域、単位は度)

RRC	fRC	IRC
20	25	50

3.3 エミッタンス推定値が意味するもの

これまでに得られた推定値はIRCに入射されたビームに関して、horizontal方向のエミッタンス及び位相広がり設計値のほぼ2倍になっていることを示している。RIBFにおいては2008年10月以降、本格的な実験が開始される予定であるが、このままではSRCにおいて高い通過効率(90%)を期待することは出来ないため、改善が必要と判断される。

4. 今後

現段階ではビームの質を推定したのみで、ビームの質の悪化の原因追求には更なる解析が必要である。IRCに入射するビームの位相幅が長過ぎるという問題は、第一ストリッパの膜厚不均一によるエネルギー広がり増大が本質的であることはほぼ間違いない。fRC入射ラインに設置されたリバンチャーの効果により質が悪くなったビームをfRCのアクセプタンスに収めることが出来るが、代償としてfRCに入射されるビームのエネルギー広がりが増大し、これが約120m下流にあるIRCにおける位相広がり原因となる。ストリッパ1に用いられる炭素薄膜の高品質化が強く望まれる。一方、これまで行ったシミュレーションによればfRCの運転パラメータの微妙な違いによって簡単にIRC入射ビーム位相幅が20%以上増減することが示されており、我々がこれまで行ってきた調整方法では不十分であることが分かった。ビームの時間構造とビーム量を同時に読めるモニターをIRC入射領域に設置する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth. B 261 (2007) 1007
- [2] H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1063.
- [3] A. Goto et al., 18th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Giardini Naxos, Italy, Sep30 – Oct5, 2007.
- [4] T. Kubo et al., Nucl. Instr. and Meth. B 204 (2003) 97.
- [5] T. Ohnishi et al., J. Phys. Soc. Jpn. (2008) 083201.
- [6] N. Fukunishi et al., Proc. PASJ4-LAM32 (2007) p. 1.
- [7] O. Kamigaito et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WO04.
- [8] H. Ryuto et al.: Proc. of 18th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, 314 (2007).
- [9] H. Hasebe et al., PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WP046.
- [10] T. Mitsumoto et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (2004) p. 384.
- [11] J. Ohnishi et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (2004) p. 197.