

# PRESENT STATUS OF RI BEAM FACTORY ACCELERATOR COMPLEX

Nobuhisa Fukunishi<sup>1</sup>, Tomoyuku Dantsuka, Masaki Fujimaki, Akira Goto, Hiroo Hasebe, Yoshihide Higurashi, Eiji Ikezawa, Tadashi Kageyama, Masayuki Kase, Masanori Kidera, Misaki Komiyama, Hironori Kuboki, Keiko Kumagai, Takeshi Maie, Makoto Nagase, Takahide Nakagawa, Jun-ichi Ohnishi, Hiroki Okuno, Kenji Suda, Naruhiko Sakamoto, Hiroshi Watanabe, Tamaki Watanabe, Yutaka Watanabe, Kazunari Yamada, Shigeru Yokouchi and Osamu Kamigaito  
 Accelerator Group, Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN  
 Hirosawa 2-1, Wako-shi, Saitama, 351-0198

## Abstract

The RIKEN RI Beam Factory (RIBF) is pushing the limits of energy for heavy-ion cyclotrons. After the first experiments successfully finished with the discovery of new isotopes <sup>125</sup>Pd and <sup>126</sup>Pd in June 2007 with a 345-MeV/nucleon uranium beam, we have suffered from low transmission efficiency problem, especially in uranium beam acceleration. It spent two years to make the reasons of it clear and improve various equipments to obtain better transmission efficiency. As a result, 0.4-pnA of a 345-MeV/nucleon uranium beam and a 170-pnA of a 345 MeV/nucleon <sup>48</sup>Ca beam were supplied for experiments.

## RIビームファクトリー加速器系の現状

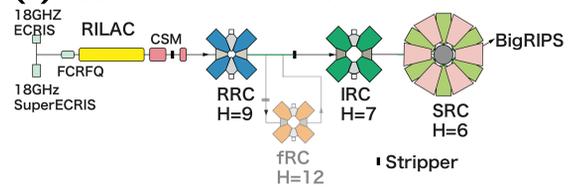
### 1. はじめに

理化学研究所仁科加速器研究センターでは、宇宙における元素合成の謎の解明を中心として短寿命原子核の実験的研究を推進するべくRIビームファクトリー<sup>[1]</sup>が稼働中である。RIビームファクトリーは2006年7月にビームコミショニングを開始、2006年12月に主加速器である超伝導リングサイクロトロンSRC<sup>[2]</sup>からのファーストビーム取り出しに成功した。翌2007年3月にはSRCの下流に設置されたRIビーム生成分離装置BigRIPS<sup>[3]</sup>のコミショニングが行われ、引き続き2007年5月から6月にかけてRIBFの初実験が核子当たり345 MeVのウランビームを用いて行われた。この実験では新アイソトープ<sup>125</sup>Pdと<sup>126</sup>Pd<sup>[4]</sup>が発見され、成功裏に終了した。しかしながらこの段階ではビームの通過効率が極端に低く<sup>[5]</sup>、改善が求められていた。極端に低い通過効率の原因解明およびそれに対する一連の対策の結果、約1年後の2008年11~12月に行われた実験では、ウランビームの通過効率、ビーム量ともに約10倍となり、本格的にユーザーに大強度ビームを供給しての本格的実験が始まっている。ここではRIBFファクトリー加速器系の現状及びそこに至る経緯について簡潔に報告する。

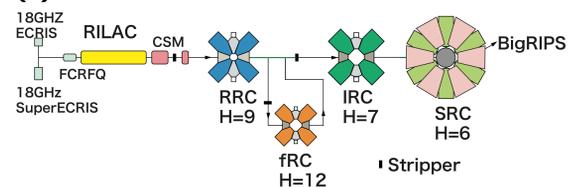
### 2. RIBFの加速器構成

RIビームファクトリー(RIBF)は4台のリングサイクロトロンを中心とした複合加速器システムであり、RARF(RIKEN Accelerator Research Facility)と呼ばれた旧施設の主加速器であった理研リングサイクロトロンRRC(K値=540 MeV)の後段に固定周波数リングサイクロトロンfRC(K値=570 MeV)<sup>[6]</sup>、中間段リ

#### (1) 可変エネルギーモード



#### (2) 固定エネルギーモード



#### (3) AVF入射モード

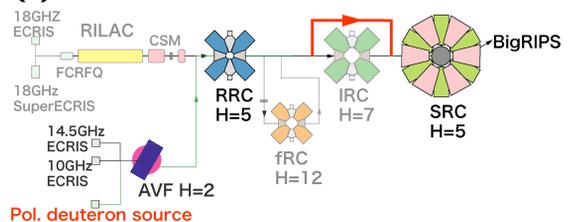


図1: RIBFの主要加速モード。図中薄く示されている加速器はそのモードでは使用されない。

ングサイクロトロンIRC(K値=980 MeV)<sup>[7]</sup>及び世界初となる超伝導リングサイクロトロンSRC(K値=2600 MeV)の3台のリングサイクロトロンを新たに建設した。これにより水素からウランに至る全元素を光速の70%にまで加速することが出来る。RRCには二種

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

類の入射器があり、一方は理研重イオン線型加速器(RILAC)<sup>[8]</sup>、他方はK値70MeVのAVFサイクロトロン<sup>[9]</sup>である。RIBFにおいては様々な加速モードが可能で、代表的なものを図1にまとめる。基本となるのは可変エネルギーモードで、Kr程度の質量のイオンを核子当り345 MeVまで加速することが出来る。中性子過剰核の研究で重用される<sup>48</sup>Caビームもこの加速モードで供給される。一方Xeより重いイオンに対しては可変エネルギーモードで到達可能なエネルギーは大きく下がり、結果としてin-flight schemeで得られる二次ビーム収量が低下するために、RRCとIRCの間にもう一台のサイクロトロンIRCを挿入することによりウランに至る非常に重いイオンに対しても核子当り345 MeVを実現する。一方、非常に軽い重陽子や窒素に対してはAVFサイクロトロンを入射器として計3台のサイクロトロンで同等のエネルギーまで加速することが可能で、この場合にはAVFサイクロトロン上流に設置された偏極イオン源を用いて偏極重陽子ビームをユーザーに供給することが出来る。偏極重陽子ビームは核力、特に三体力の研究に威力を発揮することが期待されている。

### 3. この二年間の運転統計及び運転履歴

#### 3.1 運転統計

2007年及び2008年の運転時間の統計を表1にまとめる。我々の加速器施設ではRRCの入射器であるAVF及びRILACも独自の実験用ビームラインを擁するが、表1にはこれら単独運転は含まれていない。旧施設の主加速器たるRRCはRIBF新施設への入射器として使用される一方多数の実験ビームラインを有し、精力的に実験が行われている。その結果RRCの運転時間の約半分のみがRIBF(新施設)関連の運転に使用されている。この二年間に限ればRIBF運転時間の約70%を加速器調整及び加速試験に使用し、残り30%で実験が行われた。加速試験に供せられた日数は2008年は31日であり、これにより後述の性能向上が実現した。加速器調整に要する時間も長く、この短縮が重要な課題となっている。

表 2: RIBF の運転時間統計(単位は時間)

Year	2008	2007
RRC運転	3961	3757
RRCビーム実験	1165	687
RIBF運転	2051	1845
RIBF(SRC)ビーム実験	685	414

#### 3.2 運転の履歴

2007年の5月から6月にかけて行われたRIBF初実験の後、2007年中はSRCを使用した加速試験は11月に行われた一回のみで、この加速試験では核子当り345 MeVの<sup>86</sup>Krビームの加速に成功し、最大ビーム強度1.1  $\mu$ Aが得られた。2008年前半は同年2月に見つ

かったSRC用He冷凍機のオイル混入問題<sup>[10,11]</sup>に対処する必要からSRCの運転は行われず、その間にIRCまでの加速試験がウランに対して二度、<sup>48</sup>Caに対して一度行われた。これら一連の加速試験により通過効率が極端に悪い原因を特定し、必要な改良を行うことが出来た。2008年10月末からは約1ヶ月間連続で核子当り345 MeVのウランビームを実験者に供給し、これを用いてBigRIPS下流に設置されたゼロ度スペクトロメータ<sup>[12]</sup>と呼ばれる新実験装置のコミッショニング及び新アイソトープ探査実験が行われた。新アイソトープ探査実験ではBigRIPSにおける平均ビーム量が前年実験の40倍に増強されたことからスムーズに実験が進み、一週間以内の実験で少なくとも20個以上の新アイソトープが発見されたとの報告を受けている(現在投稿論文執筆中)。引き続き行われた<sup>48</sup>Caビーム実験では最大ビーム強度170 pnAでユーザーにビームを供給し、不安定原子核<sup>32</sup>Neの巨大変形が実験的に確認される<sup>[13]</sup>などの成果が得られている。

一連の実験と並行する形で、AVF入射モードを実現するべく、IRCをバイパスしてRRCビームを直接SRCに入射するビームラインの建設が2008年度中に実施され、これを用いた加速試験及び実験が2009年2~4月に行われた。2009年3月には核子当り250 MeVの窒素ビームを用いて東京大学CNSがRIBFに設置した高分解能スペクトロメータSHARAQ<sup>[14]</sup>のコミッショニングが行われ、4月には核子当り250 MeVの偏極重陽子ビームを用いた初実験が行われ、いずれも成功裏に終了した。

### 4. 通過効率の改善

2007年7月に行われたウランビーム加速試験におけるRIBF加速器系の通過効率は4%と報告されている<sup>[5]</sup>。ここで言う通過効率には荷電ストリッパを使用することによるビーム量の必然的減少、つまり荷電変換効率は含まれておらず、純粹に加速器系におけるビーム損失を反映する数字である。この4%という値自体、ビーム電流モニター(Faraday cup)の二次電子に起因する過大評価を補正しておらず、実際のビーム量はその2~3分の1であった。この極端に低い通過効率の原因は様々考えられたが、これまでに行った一連の改造とその効果から判断するに、本質的には以下の3点であったと考えている。

第一に、我々のビーム診断機器はサイクロトロンにおいてもビームライン上においてもビームを直接診断機器に当てて測定する破壊型のモニターを採用している。これに対して、設計時の想定を越えて高エネルギー二次電子が大量に発生したための正確な情報が得られず、結果として運転パラメータの最適化に失敗したことが挙げられる。

第二に、ウラン加速においては最大磁気剛性値が8 Tmに限定されているRIBFにおいて核子当り345 MeVという高エネルギーウランビームを実現するために二段階の荷電変換を行う必要がある<sup>[15]</sup>。これに用いる非常に厚い炭素薄膜及び炭素の薄板を通過した後のビームのエネルギー広がりが設計時想定より

も大きく、一部が後段加速器系のアクセプタンスに収まり切れなかったことが挙げられる。これは炭素薄膜下流に設置されたプラスチックシンチレータによるバンチ長測定から結論される<sup>[16]</sup>。ストリッパにおける膜厚不均一性によるエネルギー広がりが増大がバンチ長が伸びた原因であると理解されている。

第三に、初段加速器であるRILACから供給されるビームの位相及びエネルギーが微妙に変動し、建物の制約上遠く離れて設置された後段のRRCにおける入射条件が変動するためにビームの長時間安定度が不足し、調整が困難になるという事象がしばしば起こったことが挙げられる。現時点から振り返ってみると第一の要因が主原因で、残る二つが状況をより複雑にしていたと考えている。

ビーム診断機器の問題について以下にもう少し詳しく述べる。RIBFは建物の制約上サイクロトロン間の距離がかなり離れている。RRC-fRC間距離は約80 m、fRC-IRC間距離は約120 mである。ビームのエネルギー広がり大きいと長距離を飛行する間にビーム位相が後段加速器のアクセプタンスを遥かに越えて伸びてしまう。これを防ぐために新設のサイクロトロンにおいてはフラットトップ共振器が設置され、エネルギー広がり小さなビームを後段加速器に供給することがRIBFの前提である。一方、フラットトップ共振器を持たないRRCに対しては、上流の二台のリバンチャーとRRC-fRC間に新設されたリバンチャー<sup>[17]</sup>、計3台のリバンチャーを用いてビームの質を保証するというのが設計思想である。そのためfRC以降はフラットトップ共振器のみが頼りで、その位相及び電圧を精度良く合わせる必要がある。これを実現するためのプローブがビームの周回パターンを測定するMDP(Main differential probe)である。しかしながらこのMDPが新設の3台のサイクロトロンのいずれにおいても二次電子の影響で正しく読めていなかったために運転パラメータ、とりわけフラットトップ共振器の位相合わせに失敗、質の悪いビームを後段加速器に送り込むという運転を繰り返したために通過効率が激減したというのが現在の理解である。

MDPに関しては、fRCとSRCにおいてはプローブヘッドの形状を変更して二次電子の影響を受けにくい構造に改造した。IRCには二本のMDPがあり、一方(IRC-MDP2)はプローブヘッドの角度が二次電子の影響を受けにくい様な設計となっており、この点には問題がなかったものの、別の問題としてフラットトップ共振器の電場がカットオフ周波数以上であるため、フラットトップ共振器から発生した電場を検波しビームに関する情報が得られないという問題があった。これに関してはプローブ全体を接地するという対策を施した<sup>[18]</sup>。fRC、SRCに関しても同様の対策が施された。MDPの改造の効果は図2にある通り顕著で、これにより図3の様にフラットトップ共振器の位相を精密に合わせることが出来る様になった。これら一連の改造に伴う通過効率の向上は表2の通りである。

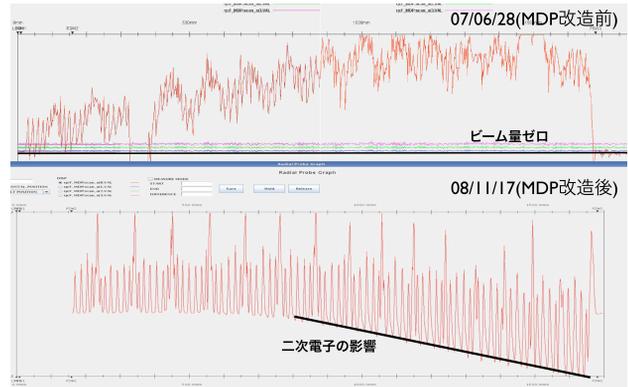


図2: MDP改造前後のfRCターンパターンの比較。改造後も二次電子の影響は多少残っている。

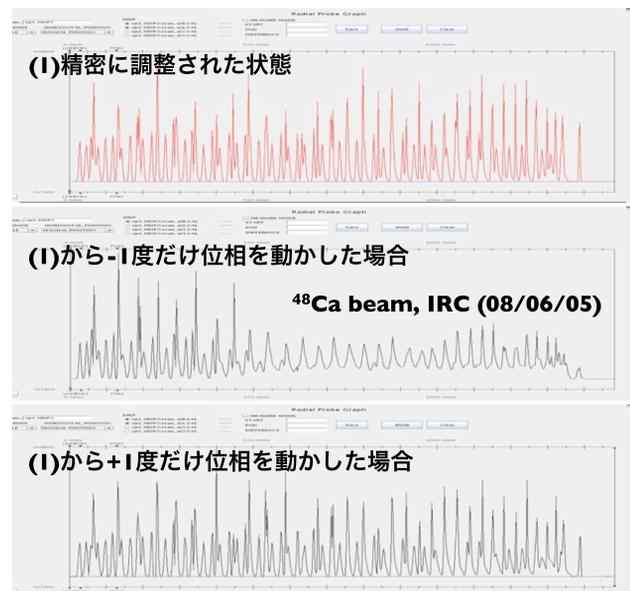


図3: MDPパターンによるフラットトップ共振器位相合わせの例。

表2: イオン源から各加速器出口への通過効率(%). 荷電変換効率を含まず。最下段はこれまでに得られた最大ビーム強度。

	<sup>238</sup> U	<sup>86</sup> Kr	<sup>238</sup> U	<sup>48</sup> Ca
	07/07/03	07/11/04	08/11/16	08/12/21
RILAC	29	47	40	55
RRC	25	28	30	51
fRC	9	不使用	35	不使用
IRC	5	20	23	50
SRC	2	9	16	36
	4 nA	1.1 μA	34 nA	3.4 μA

なお、我々はフラットトップ共振器の位相を実際にMDPパターンを見ながら合わせているが、これは以下の理由で現状では必要不可欠である。第一にfRC、IRC、SRCのフラットトップ共振器は各サイクロトロンに一台ずつしかなく、主共振器との配置の対称性が悪いこと。第二に、この様な配置において、

取り出し効率をあげるべくオフセンタリング運動(ビーム集団の重心のベータatron振動)をさせると一次のpath length differenceによる位相振動が発生する。これはサイクロトロン加速に要する200~300周回では完全にキャンセルせず、オフセンタリング運動の振幅及び位相といったサイクロトロン入射時の条件に依存してしまうためである。入射条件の特定もMDPパターンの解析により可能であるが、こちらの方が不定性が大きいと直接パターンを見てフラットトップの位相を合わせるのが現実的選択である。

### 5. エミッタンス解析

MDPの改造によりビームの質が向上し、大きなビーム損失が消失したことによりビームライン上に設置されたビームプロファイルモニターのデータからエミッタンスを推定することが出来る。方法は一次のイオン光学の枠内で多数のプロファイルモニターのデータをビームラインの始点におけるビーム行列( $\sigma$ -matrix)をパラメータとしてフィットするという単純なものである。<sup>48</sup>Caに対するフィッティング結果の例は図4に示す通りである。<sup>48</sup>Ca加速においては、ビームエミッタンスは加速に伴いほぼ設計通りに減少し、目立ったエミッタンス増大は見られない。

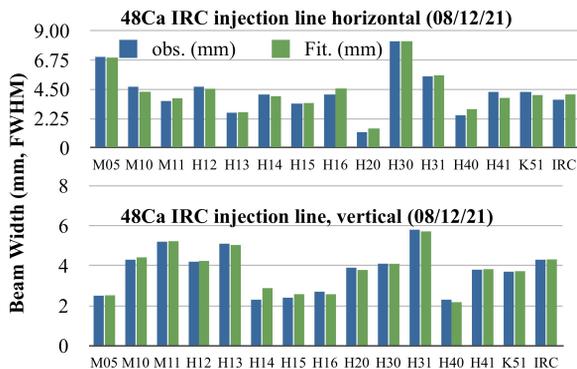


図4: ビーム幅(RMS)のフィッティング結果。

一方、ウラン加速において同様の解析を行うと、一部にデータ数の不足からhorizontal方向とlongitudinal方向の分離が悪く不定性が残るものの、表3の結果が得られた。ウラン加速においては非常に厚いストリッパーを二回使用し、多重散乱におけるエミッタンス増大が不可避であるが、fRCによる加速によってその分はキャンセルされるというのが設計時のシナリオであり、実際にvertical方向に関しては<sup>48</sup>Caよりも小さなエミッタンスの値が得られている。一方horizontal方向はvertical方向の約3倍のエミッタンスとなり、エミッタンス増大は顕著である。RRC出口からSRC入射までの一連の解析によれば、観測されたエミッタンス増大の約半分はfRC入射時のエミッタンスミスマッチに起因するfRC加速中のエミッタンス増大である。RRC-fRC間に設置された第一ストリッパーによるエネルギー広がりが設計時想定よりも大きく、fRC入射時のビーム損失を避け

るために設計以上にhorizontal方向にビームを絞り過ぎたためにこの様な結果になった。第一ストリッパー下流にはdispersiveな領域にリバンチャーが設置され、ここでは必然的にlongitudinal方向とhorizontal方向のエミッタンスがカップルする。これによるエミッタンス増大は設計に織り込まれているが、第一ストリッパー(C, ~280  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )の膜厚の均一度が想定より悪かったためにエネルギー広がりが大きくなり、想定以上のエミッタンス増大となった。運転パラメータの見直しとより薄いストリッパーの使用、これにはfRC電源の小規模な改造が必要であるが、これによりエミッタンス増大を現在の半分にすることが可能で、早期に実現したい。

表3: 各加速器に入射された非規格化エミッタンス。エミッタンスの定義は $4\sigma$ 、単位は $\pi$  mm mrad。Hはhorizontal、Vはverticalの略。

	<sup>48</sup> Ca (08/12/21)		<sup>238</sup> U (08/11/07)	
	H	V	H	V
fRC入射			5.0	2.6
IRC入射	2.3	2.2	5~6	2.1
SRC入射	1.2~	1.7	4	1.4

### 6. これまで行われた改良

これまでに述べた以外にもRIBFでは大強度ビームを安定にユーザーに提供するために種々の改良が行われてきた。2008年に見られた通過効率の向上、ビーム量の増大は以下に述べる種々の技術的改良の積み重ねによるものである。

主たる入射器であるRILACにおいては低エネルギーウランビームの残留ガスによる荷電変換反応抑制のために真空排気系を増強し、これによりRILAC通過効率が30%から40%に向上した。同時にRILAC RF系の一部に対してローレベル回路の改造が行われ、電圧安定度が向上した<sup>[19]</sup>。また、RIBFにおける全RF機器の位相及び電圧安定度をモニターするシステムの整備も進み、日常的に使用されている<sup>[20]</sup>。fRCにおいてより良い等時性磁場を得るために位相プローブに干渉フィルターを導入しSN比が改善された。

大強度ビーム対策として、SRCの取り出し用静電チャンネルEDCのセプタム電極に熱電対温度計を取り付け、一定以上の熱負荷に対してビームを瞬時に遮断するインターロックシステムを構築した。これと合わせて加速器システムの様々な異常信号を検知してビームを瞬時に遮断するビームインターロックシステム<sup>[21]</sup>が各種試験を経て<sup>48</sup>Caビーム実験時に運用を開始した。大強度ビームに対して必要不可欠な非破壊電流モニターとして、コアモニターと高温超伝導体を用いたSQUIDモニター<sup>[22]</sup>の開発も進められている。

SRCのRFにおいては他のサイクロトロンに比べてシビアなマルチパクタに短時間で打ち勝つコン

ディショニングの方法が確立されつつあり、アイドルタイムの大幅な減少につながった<sup>[23]</sup>。電圧、位相安定度は設計時仕様を凌駕する値が既に得られている。

RRC下流のストリッパに対して炭素薄膜ではなくガスストリッパの使用の可能性が検討され、Xeに対してはfRC加速に必要な価数が得られることが確認され<sup>[24]</sup>、実際にfRCからビーム取り出しに成功している。

## 7. 今後の課題

RIBFの各加速器はファーストビーム取り出しから二年弱を経過した2008年11月にはほぼ設計時の想定通りの性能を発揮する様になった。RIBFの最終目標はビーム強度1 pμAである。ビームの大強度化の際に本質的な問題はサイクロトロンを取り出し効率で、これが悪いと取り出し機器への熱負荷の問題、発生する放射線量の問題からビーム量を制限せざるを得なくなる。表4に示された各加速器の取り出し効率から考えて、<sup>48</sup>Caに対してRRCとIRCは現状で既に1 pμA加速に要求される取り出し効率を実現し、残るはSRCの取り出し効率である。表4の<sup>48</sup>CaのデータはSRCの4台の加速共振器のうち一台が不調で3台で加速していた際のデータであり、4台で加速すれば一層の改善が見込まれる。しかしながら1 pμAビームに必要な取り出し効率は97%以上であり、簡単に達成出来る値ではない。これを実現するには現在能力不足であることが明白なRRC入射直前リバンチャーのリプレース及びSRC入射時におけるエミッタンス制限が必要不可欠である(現時点はイオン源からSRCに至るまで一切エミッタンスの制限を行っていない)。

ウランに対しては通過効率以前の問題としてイオン源から供給されるビーム量が少なく、既存18GHz-ECRイオン源<sup>[25]</sup>が加速に必要な35+イオン生成に適したデザインではないためであり、ビーム量を100倍以上にするべく新たに28GHz-ECRイオン源<sup>[26]</sup>を製作し試験を行っている段階である。イオン源の大強度化と合わせてRRC直後の第一荷電ストリッパの長寿命化がRIBFの最大の課題である。今後暫くの間はウランビームの大強度化に対する様々な取り組みが行われるものと思われる。

表4: 各サイクロトロンを取り出し効率(%). RRC及びIRCに対しては同じ周回ビーム量と取り出しビーム量を同じradial probeで測定出来るので取り出し効率は正確に測定出来るが、fRCとSRCに関してはビーム量の校正が不十分で誤差が大きい。

	48Ca (08/12/21)	238U (08/11/16)
RRC	95	86
fRC		117
IRC	93	86
SRC	82	66

## 参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. Meth. B261 p. 1009 (2007), doi:10.1016/j.nimb.2007.04.174 .
- [2] H. Okuno et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 373 (2004).
- [3] T. Kubo et al., Nucl. Instr. Meth. B204, p. 97 (2003).
- [4] T. Ohnishi et al., J. Phys. Soc. Japan, Vol. 77, No. 2, p.1069 (2007).
- [5] N. Fukunishi et al., Proc. of PASJ4-LAM32, WO01, (2007).
- [6] T. Mitsumoto et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 384 (2004).
- [7] J. Ohnishi et al., Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 197 (2004).
- [8] M. Odera et al., Nucl. Instrum. Methods A227, p. 187 (1984).
- [9] A. Goto et al., Proc. 12<sup>th</sup> Int. Cyclo. Conf. p. 51 and p. 439 (1989).
- [10] O. Kamigaito et al., Proc. of PASJ5-LAM33, WO04, (2008).
- [11] T. Dantsuka et al., in this meeting.
- [12] Y. Mizoi et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 38 (2005) 297.
- [13] P. Doornenbal et al., Phys. Rev. Lett. 103, 032501, (2009).
- [14] T. Uesaka et al., Nucl. Instr. and Meth. In Pys. Res. B 266 p. 4218 (2008).
- [15] H. Ryuto et al., Nucl. Instr. And. Meth. A 569 p. 697 (2006).
- [16] N. Fukunishi, PAC09, Vancouver, Canada, May (2009).
- [17] T. Aoki et al., Nucl. Instr. Meth. A592, p. 171 (2008), doi:10/1016/j.nima.2008.04.004.
- [18] K. Yamada et al., 11<sup>th</sup> Conf. on Heavy Ion Accelerator Conference, Venezia, Italy, June (2009).
- [19] K. Suda et al., in this meeting.
- [20] R. Koyama et al., in Proc. of EPAC08, TUPC052.
- [21] M. Komiyama et al., in Proc. of PASJ2-LAM30, p. 615 (2005).
- [22] N. Sakamoto et al., 11<sup>th</sup> Conf. on Heavy Ion Accelerator Conference, Venezia, Italy, June (2009).
- [23] T. Watanabe et al., 11<sup>th</sup> Conf. on Heavy Ion Accelerator Conference, Venezia, Italy, June (2009).
- [24] H. Kuboki et al., in this meeting.
- [25] T. Nakagawa et al., Nucl. Instrum. Methods B 226, 392 (2004).
- [26] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. 79 02A327 (2008).