

PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

Tandem Accelerator Section, Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
 Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

Abstract

The tandem accelerator was operated over a total of 172 days and delivered 25 different ions to the experiments in the fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics and materials sciences. The superconducting booster was operated for a total of 21 days to boost the energies of 5 different beams from the tandem accelerator. The ${}^7\text{Li}$ and proton beams were supplied to the TRIAC (Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex) experiments for 17 days. The radioactivities of ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{123}\text{In}$ and ${}^{142}\text{Ba}$ were ionized and separated by the ISOL and injected into TRIAC. In accelerator development, the operating method of the tandem accelerator by a scaling rule of the beam optical parameter is developed. By taking advantage of the in-terminal ECR ion source, we have attempted to accelerate the cluster ions such as C_{60} . The high energy and intense cluster beams will be obtained since the charge exchange is unnecessary.

原子力機構-東海タンデム加速器の現状

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（JAEA）原子力科学研究所のタンデム加速器施設は 20MV タンデム加速器とその後段ブースターである超伝導線形加速器、および高エネルギー加速器研究機構（KEK）との共同研究で設置した短寿命核分離加速実験装置（TRIAC : Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex）の 3 種類の加速器を有している^{[1][2]}。

タンデム加速器は地上電位にある 3 台の負イオン源と高電圧端子内の ECR イオン源により H から Bi までの約 40 元素の多様なイオンを 10~300MeV のエネルギーまで加速することが可能である。タンデム加速器の後段には 40 台の 1/4 波長型超伝導加速空洞から構成される線形加速器が設置され、C 以上の重イオンのビームエネルギーを 2~4 倍に増強することが可能である。このタンデム加速器と超伝導ブースターは加速電圧を連続的に設定できるので、任意のエネルギーのビームを得ることができる。

TRIAC は同位体分離器（JAEA-ISOL）から引き出された 1 価の短寿命放射性核種イオンを、常伝導の分割同軸型 RFQ 線形加速器（SC-RFQ）と IH 型線形加速器により最大 1.5MeV/u のエネルギーまで加速することができる。SC-RFQ の上流にはこれら線形加速器で効率良く加速するために 1 価から多価イオンに荷電変換するチャージブリーダーが設置されている。

ここではおもにタンデム加速器についての運転状況および開発状況について報告する。

2. 運転状況及び定期保守・整備

2009 年度の加速器の運転状況および利用分野を

Correspondence to: M. Matsuda;
 E-mail:matsuda.makoto@jaea.go.jp

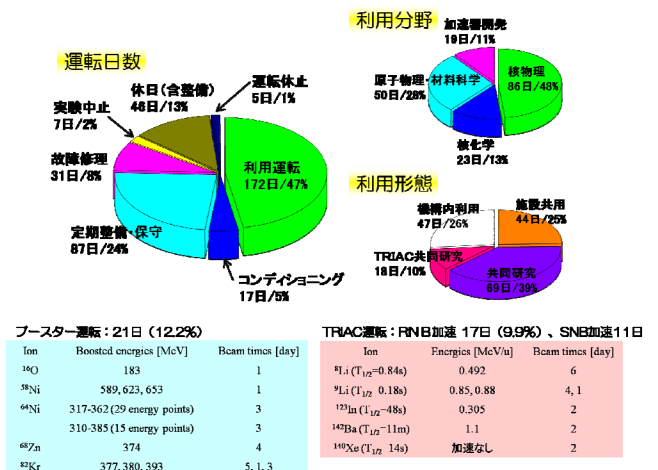


図 1: 2009 年度の加速器の運転日数および利用分野

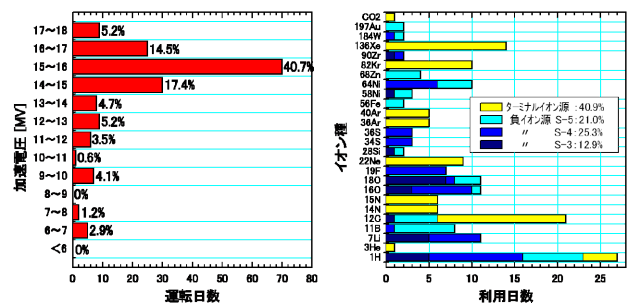


図 2: 電圧発生状況と加速イオン種

図 1 に示す。運転は 2 度のマシンタイム期間で行われ、タンデム加速器の運転日数は 172 日（約 3600 時間）であった。そのうち超伝導ブースターの運転は 21 日で運転日数の約 12% となっている。TRIAC の運転は短寿命核（RNB）イオンの加速で 17 日

(約 10%)、安定核 (SNB) イオンの加速で 11 日であった。ブースターではそのエネルギー可変性を生かし 1 日に 16 点のエネルギーで実験が行われた。図 2 に 2009 年度のタンデム加速器の電圧発生状況と加速イオン種を示す。加速電圧に関しては 2006 年の真空事故などにより加速管が数か所絶縁不良となった。そのため 2007 年度は最高運転電圧を 16MV で抑えていたが、不調加速管を予備あるいは修理した加速管と交換することで徐々に加速電圧を回復し、2009 年度は真空事故前の 18MV に復帰している。利用されたイオン種は 20 元素 (25 核種) であり、H、⁷Li は主に TRIAC での一次ビームに利用された。¹¹B においては 1particle- μ A の強度のビームがターゲット上で得られた。高電圧端子内イオン源 (TIS : Terminal Ion Source) ^[1]からの CO₂ 分子イオン加速も行われた。タンデム加速器は 2007 年に行った高電圧端子内のビームライン機器の再アライメントや高電圧端子内イオン源を 14.5GHz の ECR イオン源に増強したこと等の成果により、建設以来最良の状態となっている。図 3 に高電圧端子内に設置された 14.5GHz の永久磁石型 ECR イオン源から 15~16MV の加速電圧で加速された各種多価イオンの電荷とビーム強度を示す。タンデム加速で行われる高電圧端子での炭素薄膜による荷電変換よりも高多価イオンが得られ、かつイオン源からの高強度ビームを直接加速できることから、高エネルギー・高強度のビームを得ることができている。

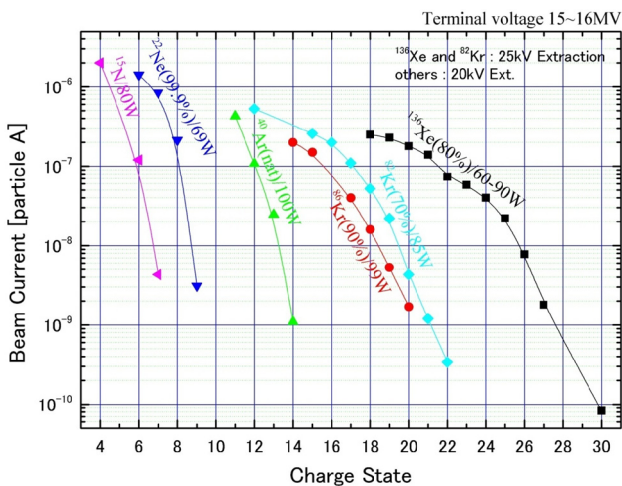


図 3 : 高電圧端子内 ECR イオン源からの各種多価イオンの電荷とビーム強度

定期整備は 2009 年 5 月の連休明けからと 2009 年 10 月後半からの 2 回実施され、それぞれ約 2 ヶ月作業を行った。通常の保守整備作業以外に行った作業として、前半の整備では 2008 年 8 月の放電以降不調であった高エネルギー側 12 段目の加速管を交換し、最高電圧を 18MV へ回復させることができた。後半の整備では高電圧端子内でのビーム診断のためにビームプロファイルモニタ (BPM) を設置した。また、高電圧端子内でのビーム軌道の修正に静電ステアラーを用いているが、その並行平板電極間の中

間電位が 12kV または 18kV と高電圧であるためにレンズ効果が生じていることが分かった。特に TIS からのビーム加速時の影響が大きいのでこの中間電位を制御し、レンズ効果を抑える中間電位制御回路を新たに設置した。これらの改良によりビームハンドリングが容易かつ自然なものとなった。

昨年度は圧力タンクを開放して修理しなければならない故障が 4 回発生した。その故障内容と原因を以下に列記する。

- ターミナル電圧が上昇しない。
電流読み出し回路へのケーブル端子の接続不良が原因であった。
- ショーティングロッドの連結プラスチックボルトの破損。
経年劣化と考えられる。ボルトを金属ボルトとすべくロッドの改良中である。
- TIS の前段加速高電圧電源の故障。
出力部に設けた保護抵抗へのケーブルの接続不良および電源内部のリレーが圧力でつぶれていたことが分かった。
- 静電ステアラーの中間電位制御回路の故障。
放電によるサージ混入により IC が破壊されていた。サージ保護を強化して対応した。
- タンク内イオンポンプからの SF₆ ガスリーク
荒引きポートに設けたバルブフランジの溶接部からのリークであった。経年、振動により溶接部に生じたひびが進行したものと考えられる。圧力タンクの開閉作業はタンク内の絶縁高圧ガス (SF₆) の回収・置換作業のために 1 度のタンク開閉作業で 3 日を要する。このため昨年度の故障修理日数は 31 日となった。

タンク外の故障として、偏向電磁石のコイルおよび電磁石電源からの水漏れが発生した。12 月末の機器停止時にタンデム加速器で加速されたビームを各ターゲット室へ導く振分電磁石の片側のコイルから水漏れが発生しているのを発見した。コイルの被覆をはがし漏れ箇所を探したところコイルの巻き線内部 (電磁石内部) であることが分かった。修理はできないため、水漏れしているコイルをバイパスして使用していたが、絶縁不良が進行し約 3 ヶ月後に磁場が不安定となったため、現在は片側のコイルのみで運転を継続している。現在、交換のためのコイルを製作中である。また電磁石電源のシャント抵抗の冷却水銅配管にピンホールが開き水漏れが発生した。一時的にエポキシ樹脂で固めて使用していたが、現在は水冷の不要な直流変流器 (DC Current Transformer) に置き換えている。いずれの水漏れも銅管の継手部分などで発生したものではないが、銅管が水流で減肉したことが原因と考えられる。設置から 15 年以上で発生していることから、冷却水の管理などに注意する必要があると思われるが、減肉の理由は今のところ不明である。

3. 光学パラメータのスケーリングによる ビーム加速

静電加速器はそのエネルギー可変性においてすぐれた性能を有するが、東海タンデム加速器のような大型静電加速器ではビーム輸送に使用するステアラーや四重極レンズ、偏向電磁石などの光学機器のパラメータ数は約 40 点となり慣れたオペレータでもエネルギー変更に約 30 分程度を要する。そこでビーム光学機器のパラメータを簡単なスケーリング計算により制御系で一括設定することで、加速器運転の省力化と迅速なエネルギー・イオン種の変更を実施することを目指している。

加速粒子の質量、電荷、エネルギーと通過しようとする光学機器の強さの間には以下のような一定のスケーリング則が成立する。

$$\text{静電要素} \quad V = \left(V_{ref} \times \frac{q_{ref}}{\epsilon_{ref}} \right) \times \frac{\epsilon}{q} \quad (1)$$

$$\text{磁気要素} \quad B = \left(B_{ref} \times \frac{q_{ref}}{|p_{ref}|} \right) \times \frac{|p|}{q} \quad (2)$$

q : 電荷 V : 電極電圧
 p : 運動量 B : 磁場強度
 ϵ : エネルギー

まずは基準となるパイロットビームをオペレータの運転によりターゲットまで導く。このオペレータにより設定された光学パラメータから、変更したいビームのエネルギー、イオン種に合わせて(1)、(2)式から光学パラメータを計算し、光学機器に対し一括設定することで、ビーム切り替えを迅速に行うものである。

我々は単純化のために TIS からのビームを用い、以下に示すかなり乱暴な仮定をして加速試験を行った。

- 加速管および静電ステアラーの中間電位のレンズ効果は無視する。
- フォイルストリッパーの影響は考慮しない。
- 電磁石の電流-磁場特性はヒステリシスのない比例関係とする。
- 制御系の DAC、各電源等の誤差はないとする。

その結果、加速電圧が一定であればイオン種変更（質量、電荷の変更）に対しては、かなり良い精度で加速でき、ほとんど調整が不要であった。エネルギーの変更（加速電圧の変更）に対しては 15MV から 10MV とすることでビーム量は 10%ほどとなり、おもに加速管のレンズ効果が効いていることが分かった。しかし 20%ほどの加速電圧の変更であれば、実験の種類によっては十分実用となることが分かった。

た。図 4 は TIS からの ^{15}N ビームを用い $p(^{15}\text{N}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ 反応により水素分析実験を行ったときのター

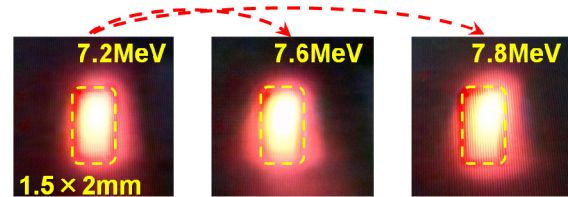


図 4: 簡単なスケーリング加速によってビームエネルギーを可変した時のターゲット上でのビーム位置の変化。

ゲット上でのビーム位置の変化を示したものである。基準ビームは $^{15}\text{N}^+$ の 7.2MeV であり、7.6、7.8MeVへスケーリングによりパラメータ変更を行った。ビーム位置は、ほとんど変化せず、エネルギー変更は 1 分程度で行うことができ、光学機器パラメータの再調整も不要であった。

今後加速管のレンズ効果の取り扱いやストリッパーフォイルを使用する負イオン源からのビーム加速の場合の検討・開発が必要である。

4. クラスタービーム加速計画

静電加速器はどのような重いイオンであっても加速できるという他の加速器にはない利点を有する。したがって C_{60} のような質量 720amu のクラスター分子イオンでも加速することが可能である。実際にフランス Orsay の 15MV の MP タンデム加速器^[4]や高崎研 TIARA の 3MV タンデム加速器^[5]において、数 MeV から数 10MeV のクラスターイオンの加速が行われている。東海タンデム加速器は折り返し型のタンデム加速器であり高電圧端子内に ECR イオン源を搭載している。この ECR イオン源からクラスターイオンを生成し、ビームとして引き出すことで、最大 20MV の加速電圧で加速することができ、イオン電荷が 1+であれば最大 20MeV の高エネルギークラスタービームが得られる。この場合、上記 2 施設のように高電圧端子での荷電変換が必要なタンデム加速ではないので、高強度のクラスタービームを得ることができると期待される。

図 5 に本計画での加速器系の概略を示す。まずは高電圧端子内に現在設置されている ECR イオン源からのクラスターイオンの加速を行う。ECR イオン源から数 kV の電圧で引き出されたクラスターイオンは 90° 入射電磁石で上方へ偏向され、最大 80kV の電圧で前段加速が行われる。その後、180° 偏向電磁石で加速するクラスターイオンの質量を選択する。その後、タンデム加速器の主加速管に導かれ、最大 20MV の電圧で加速される。加速されたイオンビームは既存の 90° 偏向電磁石 (BM 04-1) では曲げられないので、電磁石直下の地下 2 階の部屋をクラスタービーム専用のターゲット室として整備する。

イオンビームの質量分析は高電圧端子内で行えるので、加速後の分析機能は設けない。

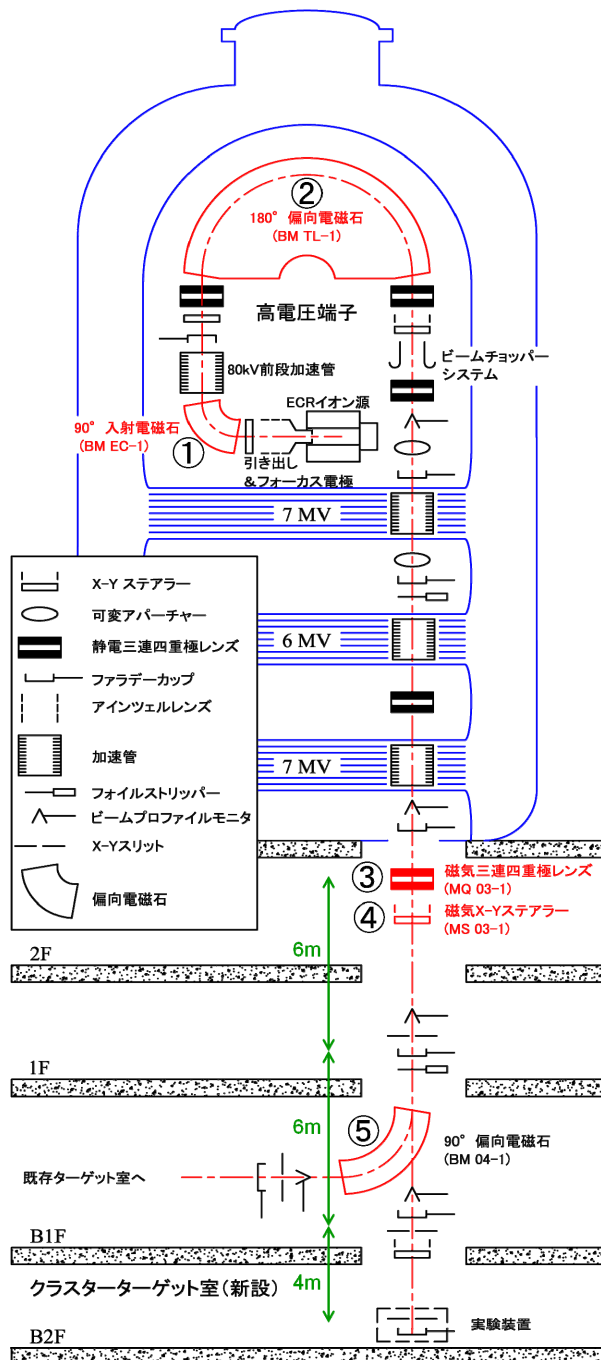


図 5 : クラスターイオン加速時の加速器系の概略図。地下 2 階に新ターゲット室を新設する。

ここでクラスターイオンの質量電荷比 (mass/charge) は通常加速している原子多価イオンと比較しかなり大きな値であるため、磁気的な光学要素の強度についての検討が必要である。特に入射 90 度偏向電磁石 (BM EC-1) の磁場強度が $ME/q^2 \leq 0.28$ と低いため、クラスターイオンの質量によって引き出し電圧を大きく下げなければならない。表 1

は各引き出し電圧に対する加速可能なイオンの質量を計算したものである。参考に炭素クラスターにおける原子数も示している。

表 1 : 90° 入射電磁石で偏向できるクラスターイオンの質量

引出電圧[kV]	20	10	5	2.5	1.56	0.78	0.39
質量数[amu]	14	28	56	112	180	360	720
原子数 (C)	1	2	4	9	15	30	60

図 6 は ^{136}Xe 多価イオンの電流値を引き出し電圧を変えながら測定したものである。現在の光学系でも 1.5kV の引き出し電圧において約 1nA であるがビームとして得ることができた。したがって ECR イオン源からのクラスターイオンの生成が可能であれば、130amu (C_{10}) 程度までは加速可能であると考えられる。低電圧でのビーム引き出しは非常に効率が悪いため、将来は初段のビーム偏向を静電偏向器とすることで引き出し電圧を上げるなどの開発が必要である。

180 度偏向電磁石 (BM TL-1) は磁場強度が $ME/q^2 \leq 55$ であるので、質量電荷比が 680amu 以下では 80kV の前段加速電圧を下げずに入射が可能である。720amu (C_{60}) でも 70kV の前段加速が可能であり主加速管の通過率を大きく犠牲にすることはないと予想される。

加速されたクラスターイオンを新ターゲット室で収束させるには、主加速管で加速された後の圧カタンクの外にある磁気四重極レンズ (MQ 03-1) の磁場強度について確認が必要である。また実際に新実験室へのビーム輸送が可能かを検証するために BM 04-1 直下にビームプロファイルモニタ (BPM) とファラデーカップ (FC) を設置し、加速試験を行った。加速電圧 15MV で ^{136}Xe の多価イオン (3+, 6+, 9+, 14+ および 22+) を加速し、フォーカスポイントは MQ 03-1 より 12m 下流の BPM 位置とした。ビームは BM 04-1 の直径 19mm のダクト部をロスなく輸送された。その時の MQ 03-1 の励磁電流をプ

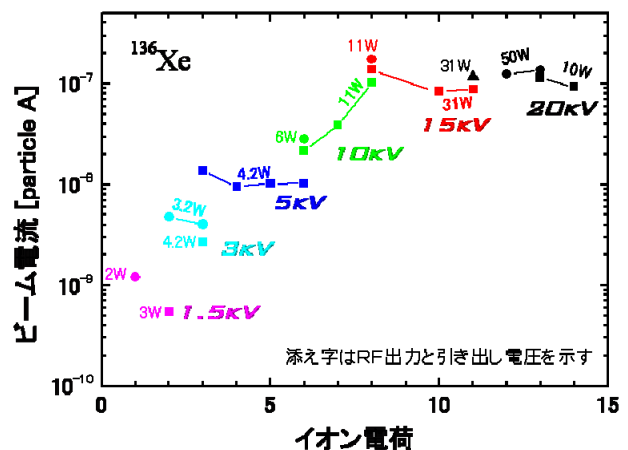


図 6 : 引き出された ^{136}Xe 多価イオンの電荷と電流 ; 図中の数字は引き出し電圧を示す。

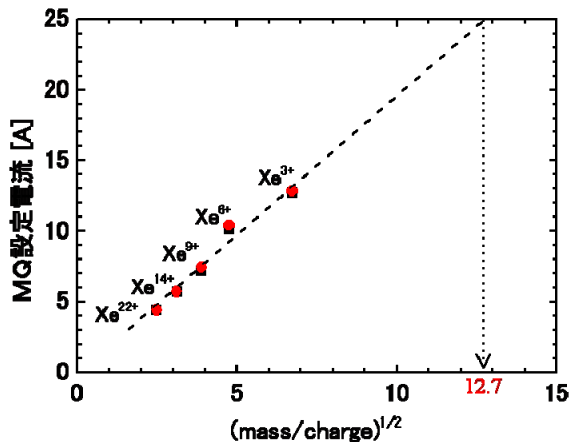


図 7: 加速電圧 15MV における加速イオンの質量電荷比と磁気四重極レンズの励磁電流の関係

ロットしたものが図 7 である。MQ 03-1 の最大励磁電流は 25A であるので、図 7 の結果から外挿すると 160amu (C₁₃) 程度までは収束可能である。実際のターゲット位置はさらに 4m 下流となるので 200amu (C₁₇) 程度までは収束したビームが得られると予想される。

高電圧端子の入射ラインには、繰り返し 20μsec、パルス幅 0.1~10μsec 程度の静電デフレクター型のビームチョッパーシステムを設け、毎秒 10~1000 個にクラスターイオン数を減らしたシングルイオンヒット実験や、パルスビームによる二次イオンの Time-Of-Flight 実験などに対応する予定である。

今後、新ターゲット室の整備と既存 ECR イオン源からガス状あるいは高蒸気圧の有機化合物試料からの高強度クラスタービーム加速を行う予定である。

5. まとめ

2009 年度の東海タンデム加速器の運転は 172 日で、最高電圧は 18MV に回復した。加速したイオンは 20 元素 (25 核種) であり、高電圧端子内イオン源からのビーム供給が 41%であった。超伝導ブースター、TRIAC も順調に稼働しておりそれぞれ 21 日および 17 日の運転が行われた。タンク開放を伴う機器の故障が計 4 回生じ、その修理に 31 日を要した。

静電加速器の利点である多様なイオンの加速とエネルギー可変性を高度化すべく、光学パラメータのスケーリングによるビーム加速技術の開発を開始し、条件付きではあるがビーム変更時間を従来の 30 分から 1 分へと大幅に短縮することに成功した。また静電加速器はどのような重いイオンであっても加速できることから、高電圧端子内イオン源からのクラスター (分子) ビーム加速計画を進行させている。18MV の高電圧を生かし、荷電変換も不要であることから高エネルギー・高強度のクラスタービームが得られると考えている。

参考文献

- [1] S. Takeuchi et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A382(1996)153-160.
- [2] H. Miyatake et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B204(2003)746-751.
- [3] M. Matsuda et al., Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, 2009, JAEA, Tokai, (2009)827-829.
- [4] B. Waasr et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A382(1996)348-356.
- [5] Y. Saitoh et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A452(2000)61-66.