

原子力機構-東海タンデム加速器の現状

PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR AND BOOSTER

松田 誠[#], 長明彦, 石崎暢洋, 田山豪一, 仲野谷孝充,
株本浩史, 中村暢彦, 沓掛健一, 乙川義憲, 遊津拓洋

Makoto Matsuda[#], Akihiko Osa, Nobuhiro Ishizaki, Hidekazu Tayama, Takamitsu Nakanoya,
Hiroshi Kabumoto, Masahiko Nakamura, Ken-ichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozo
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The tandem accelerator was operated over a total of 140 days and delivered 22 different ions to the experiments in the fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics, solid state physics and radiation effects in material. Maximum accelerating voltage is keeping up 18 MV and there was used for ten days on this voltage. However, electric discharge was occurred frequently in December and accelerating voltage fell to 12 MV. The damaged acceleration tubes were replaced with the spare tube at the regular maintenance period in March. The superconducting booster was not operated. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments.

1. はじめに

原子力機構の東海タンデム加速器施設には 20UR 型ペレットロンタンデム加速器と、その後段ブースターである 1/4 波長型超伝導空洞 40 台で構成される重イオン超伝導リニアックが設置されている[1]。

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[2]により H から Bi までの約 50 元素の多様なイオンを 10~500MeV のエネルギーまで加速することが可能である。またタンデム加速器からの重イオンビームを後段の超伝導ブースターで再加速することで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、任意のエネルギーのビームを高品質で得ることができる。

研究領域の拡大に伴い非密封 RI や核燃料を標的として利用できる新たな照射室(第 2 照射室)の整備を完了し、2014 年の秋からビーム提供が開始された。現在は RI 標的が利用可能である。

本報告では、2015 年度の原子力機構-東海タンデム加速器施設の運転状況について報告する。

2. 2015 年度の加速器運転状況

2015 年度のタンデム加速器の電圧発生状況を Figure 1 に示す。マシンタイムは 4~7 月と 11~2 月の 2 回に分けて実施した。2011 年の震災によりタンク内の整備用ゴンドラの性能検査の日程が加速器の定期整備期間と整合しなくなったため、時期を合わせるべく性能検査を 6 月と 11 月の 2 回受検した。次年度以降はゴンドラ整備が定期整備期間内に実施できるので、タンクの開放を 2 回/年に減らせる予定である。加速電圧は年度前半では最高加速電圧は 18MV を維持していたが、12 月には 17MV 超の加速電圧で計 21 回もの放電を発生させる無理な運転を継続したために不調な加速管を複数生じさせてし

まった。以降は最高加速電圧が徐々に低下し、3 月には 12MV となってしまった。3 月からの定期整備で不調加速管の交換作業を実施した。

Figure 2 に 2015 年度の加速器の運転状況を示す。タンデム加速器の運転日数は、140 日となり、東日本大震災以降のほぼこの日数で推移している。加速器の整備は 109 日であり、実験装置の故障などによる実験中止が 12 日であった。超伝導ブースターは原子力機構の福島

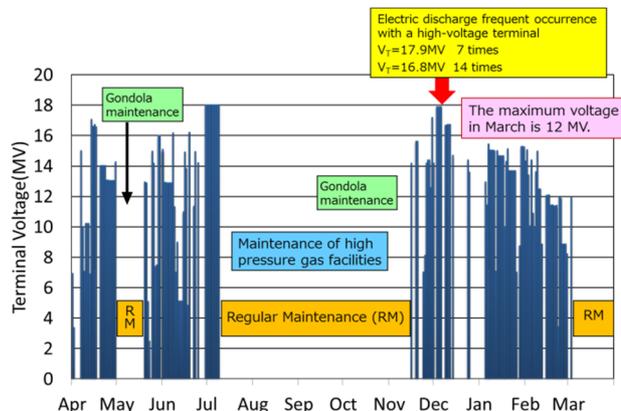


Figure 1: The terminal voltage generation and the operation status in the FY 2015.

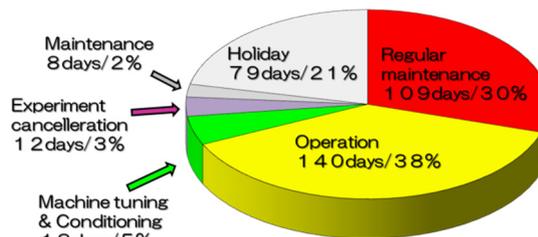


Figure 2: The operation status of the accelerator in the FY 2015.

[#] matsuda.makoto@jaea.go.jp

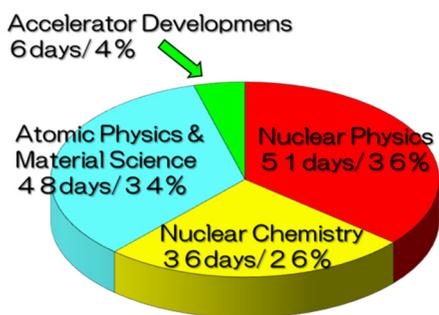


Figure 3: Usage of beam-times in different research fields.

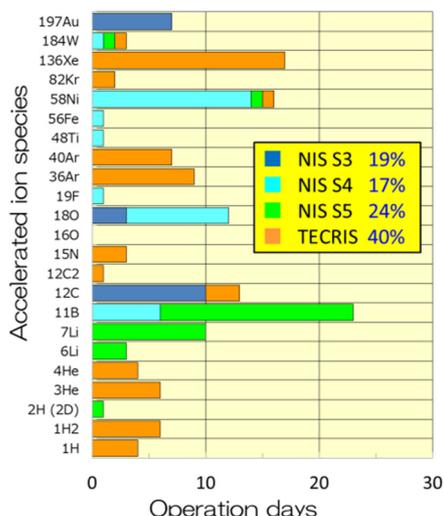


Figure 4: Distribution of accelerated ion beam species for experiments.

支援にむけた資源の再編成に伴い現在は休止状態となっているが、いつでも再稼働が出来るように必要最低限の整備は行っている。

Figure 3 は加速器の利用分野別の日数を示したものである。利用分野は核物理関係が 36%、核化学関係が 26%であり、大型タンデム加速器ゆえに可能な核反応を伴うイオンビーム実験に使用された。原子物理・材料科学の実験が 34%であり、Xe イオンなどを用いて原子炉材料の照射解析や材料改質などの実験に利用された。加速器開発は 4%で 3 本の新規ビームラインへのビーム通過試験や加速器の診断、イオンビーム照射技術の開発に利用された。施設の利用形態としては、大学や他の研究機関との共同研究による利用が 49%で約半数であり、原子力機構単独の研究は 28%、施設共用利用は 10%である。科学技術振興機構からの受託研究が 9%となっている。

2015 年度に利用された加速イオン種を Figure 4 に示す。イオン種別では ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{B}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{58}\text{Ni}$ が主として核化学、核物理実験等に利用された。 ${}^{136}\text{Xe}$ イオンは、材料への照射研究に広く利用された。高電圧端子内の ECR イオン源からのビーム利用は全体の 40%を占めた。

加速器の主な整備事項としては、高エネルギー側加速管の途中のデッドセクション(ファラデーカップや四重

極レンズが設置された部分)にある可変ビームアパーチャーの位置ずれが生じたために、加速管を真空ブレイクし修正を実施した。アパーチャーの固定ネジが緩みサプレッサ電極と干渉し位置ずれが徐々に進行したと考えられる。最近の通過率低下の原因であった。

ビーム軌道の光学計算と実際の光学パラメータのずれなどからエネルギー分析電磁石付近のミスアライメントが明らかとなってきた。電磁石への入射軌道を修正するためのステアラーを設置するなどの対応を施し効果を確認しているところである。

加速電圧の安定化のために SF6 絶縁ガスの圧力を 0.46MPa から 0.51MPa まで昇圧した。ガス圧の上昇による真空トラブルの発生はなかったが、他のトラブルもあってか電圧の安定化の明らかな改善は見られていない。

3. 加速管更新とその後の加速電圧の経過

東海タンデム加速器は 1982 年から利用運転を開始し、建設当初は 17MV であった加速電圧は徐々に低下し 2000 年頃には 16MV となっていた。1994 年には後段加速器の超伝導ブースターが完成し、高エネルギーの重イオンビームを容易に得られるようになった。しかしブースターで再加速されたイオンビームが利用できるのは限られた実験室であり、またブースターで高質量のイオンビームを効率よく加速するためには、タンデム加速器の入射エネルギーを上げることが重要となった。ビームエネルギーの増強のために高電圧端子内に ECR イオン源を搭載し高多価イオンを直接加速することを開始した。研究の進展に伴い、さらなる性能向上を図り多様な高エネルギー重イオンを得るにはタンデム加速器の加速電圧を上げることが必要となり、新型の加速管への更新を行った。

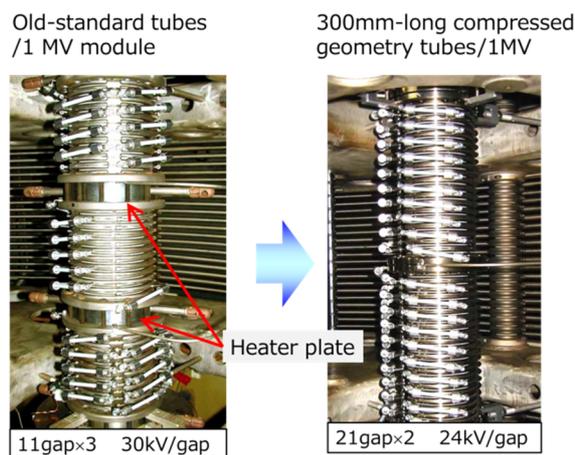


Figure 5: The photograph of an old standard tube and new long compressed geometry tube.

Figure 5 に 1MV ユニットで使用する新旧の加速管を示す。従来は 11gap の加速管 3 本とヒータープレートと呼ばれるベーキングヒーター部を含めて 1MV を保持する設計であったが、これを更新し、ヒータープレートを廃した 21gap の新型加速管 2 本に置き換えた。加速管の 1gap にかかる電圧を 30kV から 24kV に下げること放電の発生を抑制でき、その結果、高電圧の保持を容易とし 18~20MV の加速電圧を目指した。

加速管の更新に際しては、加速管の内部に放電の種となる塵や付着物を可能な限り除去することにした。加速管に超音波洗浄を施し、さらに超伝導空洞で用いられる高圧純水洗浄によって加速管内側を洗浄し十分なベーキングにより脱ガスを実施した[3]。これにより加速器の休止期間を短くすることができ、更新の 3 か月後には更新前の加速電圧である 16MV に復帰することができた。

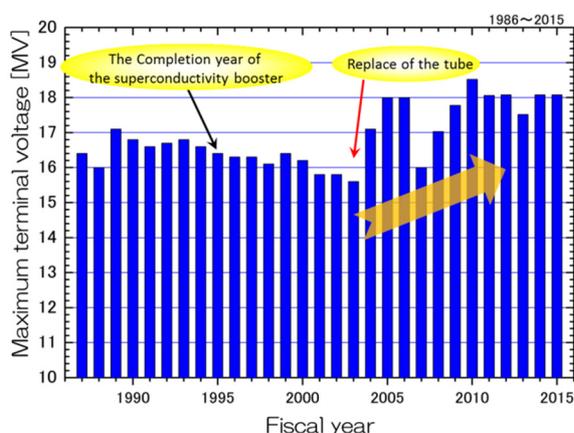


Figure 6: Transition of the accelerating voltage after replacing the new acceleration tubes.

Figure 6 は加速管更新前後の最高加速電圧を示したものである。16MV あたりまで徐々に低下した加速電圧が加速管の更新により約 2 年後には 18MV に到達した。2007 年には真空事故が発生し電圧性能が低下したが、不調となった加速管を交換するなどして 18MV の加速電圧を現在まで維持している。

新型加速管に交換してから現在までの主な事象を Table 1 に記述する。これまでに真空破壊事故および運転中の放電のダメージにより不調となった加速管を 19 本交換している。この中には交換作業時のミスにより真空リークを発生させたものが 1 本ある。

Figure 7 に示す写真は、2007 年 8 月に電圧分割抵抗の破損が見つかり、翌年の 2008 年 5 月に交換のために取り外した加速管の内側である。抵抗の折れたギャップ部は他より高い電圧が発生するため放電を起こす。この放電が時に 1 ギャップあるいは数ギャップで留まらずに複数本の加速管に亘って大放電を引き起こしてしまい高電圧を発生させることが困難となる。Figure 7 の左右の写真は同じ位置の加速管の外側と内側であり、ギャップ位置が同じとなるように並べたものである。抵抗の折れた部分およびその下のギャップの内面にセラミクス上に金属の蒸発痕が見られる。加速管はセラミクスとチタン金属を

Table 1: The History After Acceleration Tube Replacement

Date	Subject
2003. 6	Replaces to the new acceleration tube.
2006.10	Replacement of the HE side voltage divider resistance. (1.2GΩ→0.4GΩ)
2006.12	The vacuum break accident from a negative ion source. → LE side 1MV & 2MV tubes became bad condition
2007. 4	Replace the LE side acceleration tubes (1MV, 2MV & 8MV lower parts sections). (5 tubes replacement)
2007. 8	Three voltage dividing resistors were broken in the HE side 1-2MV section .
2008. 5	Replace the HE side acceleration tubes (1MV & 2MV sections). (4 tubes replacement)
2008. 8	HE side 12MV section tubes became bad condition. (The full spark caused.)
2009. 5	Replace the HE side acceleration tubes (12MV section). (2 tubes replacement) The electric field of the middle aperture of an acceleration tube was reduced by half.
2011. 3	Great east Japan earthquake. (Vacuum leak of an acceleration tube occurs)
2014. 7	Rise the insulating gas pressure. (0.44→0.46MPa)
2015.11	The vacuum at the HE side tube was broken for the D2 repair work. Rise the insulating gas pressure. (0.46→0.51MPa)
2015.12	Electric discharge occurs frequently and the LE side acceleration tubes (11MV & 13MV section) became bad condition.
2016. 3	Replace the LE side acceleration tubes (8 - 13MV sections). (8 tubes replacement)

特殊技術により接合したもので、1 ギャップの間隔が 1/2 インチである。下側のギャップ部の絶縁抵抗値は、取り外し時は 0Ωであったが空気中に放置している間に徐々に絶縁が回復した。このことからチタンがセラミクス表面に蒸着され空気中の酸素の反応することで絶縁体の酸化チタンに変化したと考えている。

同様な蒸発痕は Figure 8 のように加速管の中央部にあるアパーチャー電極付近に多く見られた。この部分はアパーチャー径が 1 インチと小さくなっていて放電などに

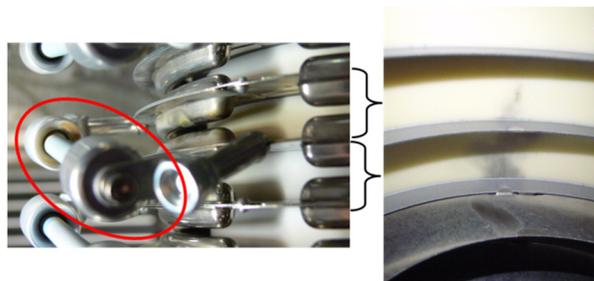


Figure 7: The broken voltage dividing resistor and the surface of the inside ceramics of the acceleration tube.

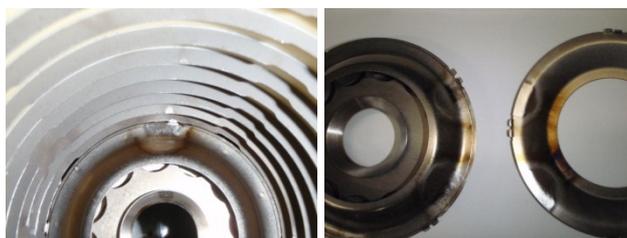


Figure 8: Evaporation marks of the titanium metal of the aperture electrode area.

よって発生する二次電子が衝突しやすい。またこの部分の内部電極のギャップ間隔は他の部分と比較して約60%と狭いため放電を起こしやすいと考えられた。対策としてこの中間アパーチャー部のギャップ部の電圧分割抵抗の値を半分にする措置を実施した。

最近では加速管内壁がチタンで蒸着されていることから、加速管の真空ブレイク時には窒素でなく乾燥空気を導入し積極的にチタン膜を酸化させることを試みている。また SF₆ 絶縁ガスの圧力を 0.46MPa から 0.51Mpa にして絶縁性能を上げることも実施している。しかしながら加速器が大型でかつ他の細かなトラブルなども不定期に発生する中で、これらの措置による高電圧発生のはっきりとした改善効果を得られるには至っていない。

昨年度は、17MV 及び 18MV の電圧発生時に 20 回を超えるフルスパーク(放電により地上電位まで電圧が下がる)を発生させる無理な運転を行ったために 8 本の不調な加速管を生じさせた。その結果加速電圧が 12MV までしか上げられない事態となった。このことは大いに反省すべきことである。

この不調な加速管は今年 3 月からの定期整備で全数を交換し現在 16MV まで加速電圧が回復している。

4. 加速器周辺技術の開発

4.1 光学パラメータのスケーリングによるビーム加速

加速器運転の省力化や迅速なビームエネルギーの変更加速イオン種の変更などに対応するために加速器の半自動運転に向けた技術開発を実施している。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。具体的には制御卓のシャフトエンコーダでビームエネルギーという変数を変化させれば、加速電圧や偏向電磁石、四重極レンズなどの光学要素のパラメータがリアルタイムに追従し、



Figure 9: The new style corona probe driver under development.

ビームを照射しながら加速エネルギーを変化させることなどを目指している。

この実現のために、光学要素のパラメータを算出するスケーリングプログラムの開発や光学要素電源類の高精度化・高分解能化、偏向電磁石の磁場フィードバック制御、加速電圧の連動制御が必要である。

現在、スケーリングプログラムはほぼ完成し、実際の加速パラメータとの差異などを検証することで完成度を高めているところである。

4.2 新型コロナプローブの開発

東海タンデム加速器では発生した高電圧の安定化にコロナプローブを用いている。コロナプローブは圧力タンクの壁面に設置され、高電圧端子に向けて針状の先端から流れるコロナ電流を制御することで発生させる電圧の安定化を行う。このプローブの先端位置と高電圧端子との距離は、発生させる電圧によって調整が必要であるが、これまでの装置では位置調整がモーメンタリー制御であり自動制御には不向きであった。これを高精度な位置制御方式とした新型プローブを開発した。Figure 9 に開発中のコロナプローブを示す。加速器カラムの電圧分割が抵抗方式となったため、旧型で 2m 程度であったプローブの挿入長は必要ないので約 1m と短くした。位置はマグネスケールで読み出し、パルスモータで制御することで 0.1mm の精度で設定可能である。保守性を考慮し加速器の圧力タンクには耐圧バルブを介して設置するようにした。新型プローブにトラブルが生じてもプローブを抜き出し、バルブを閉じることで SF₆ ガスの回収をすることなく保守作業が可能である。現在、旧プローブと併用できるように新型プローブは実機に取り付けて動作試験中で、放電などへの耐性評価をしているところである。

4.3 カラム電圧の動的測定法の開発

加速器の加速電圧は高電圧端子の近くの圧力タンクの内壁に設置された発電電圧計 (GVM : Generating Volt Meter) によってモニタされ発生電圧の制御も行われている。加速器は 1MV のカラムユニットを 20 段積み重ねることで高電圧を発生するが、その途中の電圧分布がどのようになっているかを知ることができていない。恐らくビーム加速時には発生する二次電子等によって分割抵抗で得られるはずの電圧分布にならないことも考えられる。また不調な加速管がある場合についても同様と考えられる。そこで 20 段ある各カラム間の電圧測定のための開発を始めた。可能となればビーム入射時の電圧変化や不調加速管の情報などを得ることができ、加速器の安定運転に寄与することができる。

Figure 10 に測定装置の概略を示す。カラムキャスティング上に円盤電極を付けたロードセルを配置しカラム間に生じる電界により働く力を測定する。Figure 11 は設置する条件を模擬して円盤電極に電圧

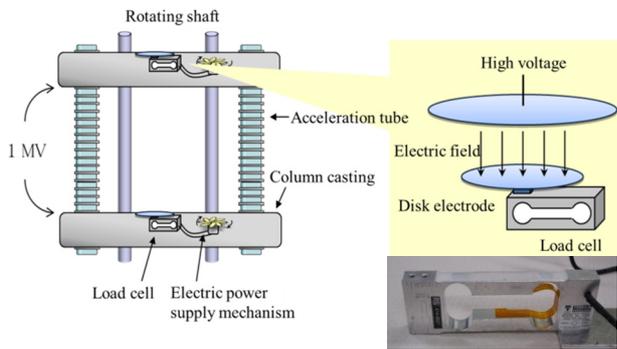


Figure 10: The schematic view of the column voltage measurement system by a load cell.

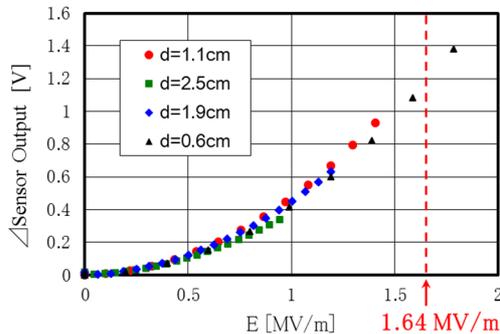


Figure 11: The result of the electric field measurement by a load cell.

を印可しロードセルからの出力信号を測定したものである。1MV 発生時の電界は 1.64MV/m の電界となり、十分測定が可能であることが分かる。

ロードセルを設置する場所は高電圧部位であるため、電力の供給システムの開発が重要となる。地上電位との通信には光ケーブルなどを用いることを想定している。まずは、電力供給や通信機器の備わる地上電位側や高電圧端子、途中のデッドセクションなどに設置し改良を進めていく予定である。

5. まとめ

2015 年度の加速器の利用運転は 140 日であった。1 年ほど前から通過率が低下していた原因の高エネルギー側加速管の途中にあるビームアパーチャーの位置ずれを修正した。年度前半までは 18MV の加速電圧で運転を継続していたが、無理な運転により放電が頻発し加速管にダメージを与えてしまい、加速電圧が 12MV まで低下した。不調となった加速管は予備の加速管への交換を実施し現在 16MV まで回復している。

2003 年の新型加速管への更新以降の履歴をまとめてみた。更新から約 2 年後に 18MV に到達(最高電圧は 18.5MV)したが、以降は他のトラブルなどもあり、20MV には届いていない。一方、度重なる放電により不調な加速管が発生し、その都度交換を行うことで 18MV を維持している。不調となる原因は、放電により電極表面に電流(電子)が集中し、瞬間的に融点を超え電極金属が蒸発することでセラミクス表面に付着した蒸着膜により絶縁

不良や電位勾配の不均一化が生じるためと考えられる。これを防止するには、加速管内部での突起などをなくし、ごみ・付着物を混入させないことが大事である。また大規模な放電を引き起こさないような加速器運転を行うことも、重要である。

加速器周辺の技術開発では、運転の省力化・半自動化のためにスケーリング則による加速技術に開発を進めている。計算プログラムの開発や位置制御機構を有したコロナプローブの開発などを実施している。また加速電圧の安定化のためにカラム電圧の測定技術の開発も進めている。加速器整備でも Gondola 点検時期を変更し効率化を計った。静電加速器の特徴を活かした加速器・ビーム開発により、ユニークな研究を展開・支援していく。

参考文献

- [1] S. Takeuchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A382 (1996) 153-160.
- [2] M. Matsuda *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A654 (2011) 45-51.
- [3] S. Takeuchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A513 (2003) 429-438.