

# PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR AND BOOSTER

Makoto Matsuda #, Shinichi Abe, Nobuhiro Ishizaki, Hidekazu Tayama, Takamitsu Nakanoya, Hiroshi Kabumoto, Masahiko Nakamura, Kenichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Akihiko Osa  
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

## Abstract

The tandem accelerator was operated over a total of 106 days and delivered 18 different ions to the experiments in the fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics, solid state physics and radiation effects in material. The superconducting booster was operated for a total of 9 days to boost the energies of 4 different beams from the tandem accelerator. By the big earthquake on March 11, 2011, the activities of the tandem accelerator were suspended for about six months. However, operation of the accelerator has been resumed in September by the intensive restoration work. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments.

## 原子力機構-東海タンデム加速器の現状

### 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<sup>[1]</sup>。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と共同で開発を進めてきた RNB 加速器 (通称: TRIAC) は、研究の終了に伴い実験室より撤去を完了した<sup>[2]</sup>。現在その実験室を非密封 RI や核燃料を標的として利用できる照射室 (第 2 照射室) として整備を行っている。

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<sup>[3]</sup>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。

昨年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって東海タンデム加速器施設は震度 6 弱の揺れに襲われた。加速器は運転中であり、地震計のインターロック作動により自動停止した。施設内の人員は直ちに建屋外に避難し、負傷者の発生はなかった。タンデム加速器の圧力タンクからの SF<sub>6</sub> ガスの漏れも発生せず、また超伝導ブースターは停止中であつたため、冷凍機からの He ガスの放出もなかった。地震により加速管内に SF<sub>6</sub> ガスリークの発生や、整備用タンク内ゴンドラのカウンタウェイトのガイドレールの破損、絶縁カラムの支持柱であるカラムポストの多数のひび割れなどが確認された。地震の

揺れの割に被害が少なかったのは、絶縁カラム全体が免震機構によって支えられていたおかげである。タンク外のビームラインについては、大型の振分電磁石やブースターの偏向電磁石が、床のアンカーボルトを破壊して移動した。

本報告では、2011 年度の原子力機構-東海タンデム加速器施設の運転状況および加速器の開発状況と昨年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震による施設の被害状況とその復旧作業の概略について報告する。

### 2. 2011 年度の加速器運転状況

2011 年度の加速器の運転状況および利用分野を図 1 に示す。タンデム加速器の運転日数は震災の影響で 106 日 (約 2500 時間) となり、例年の 5 割ほどであった。そのうち超伝導ブースターの運転は 9

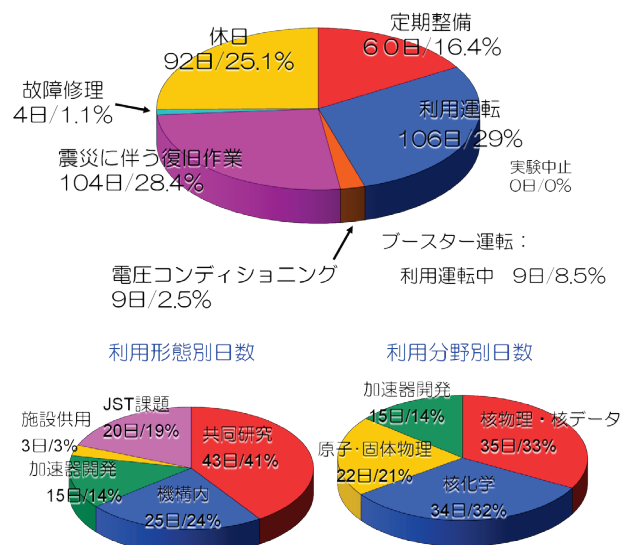


図 1: 2011 年度の加速器の運転状況

# matsuda.makoto@jaea.go.jp

日で運転日数の 8.5%であった。震災に伴う機器の復旧作業に約 100 日を要し、精力的な復旧作業の結果、9 月初めには加速器の運転を再開することができた。復旧作業において協力いただいた関係各所および筑波大学、東京大学の方々に感謝致します。

加速器の利用形態では、大学等の他の研究機関と共同で行う共同研究や機構内単独テーマによる利用のほか、新たに科学技術振興機構（JST）からの受託研究である「高速系革新炉の成立性に影響する核データの新規測定技術開発」研究がおこなわれた。またクラスターイオンの加速試験等の加速器開発にも利用された。利用分野は例年とほぼ同じで核物理、核化学関係がそれぞれ 3 分の 1 を占め、残りが原子・固体物理や材料照射、加速器開発となっている。

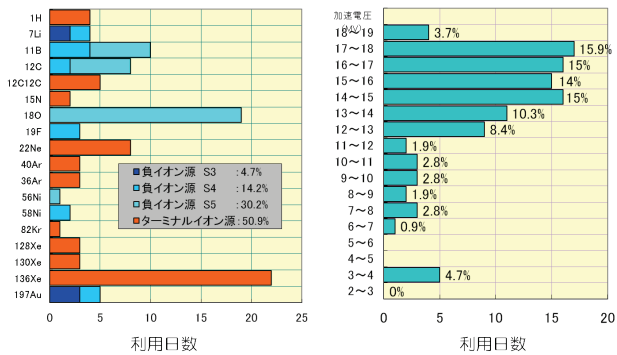


図 2：電圧発生状況と加速イオン種

図 2 に 2011 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。イオン種別では材料の照射実験等で Xe イオンの利用が最も多く、次いで <sup>18</sup>O が核化学、核物理実験等に利用された。近年、高電圧端子内の ECR イオン源からのビーム利用が増加してきており、全体の約半分を占めるようになっている。加速電圧は地震やその後の長期の停止期間があったにも関わらず最高電圧は 18MV を保持することができた。12MV 以上の運転が全体の 8 割、15MV 以上の運転が約 5 割であり、大型タンデム加速器として有効に活用されている。3MV 付近の低電圧での運転は、炭素分子クラスタービームの開発試験に利用された。

超伝導ブースターの加速運転は 9 日間実施され、<sup>128</sup>Xe、<sup>130</sup>Xe をそれぞれ約 550MeV に、<sup>136</sup>Xe を 816MeV に再加速した。2010 年 9 月には、タンデム加速器を当施設最高電圧の 18.5MV で運転し、<sup>136</sup>Xe<sup>26+</sup>を 481MeV まで加速した。さらに超伝導ブースター（加速電圧 23.8MV）で再加速することで、1314MeV のエネルギーのビームが得られた。当施設において提供できる重イオンビームのエネルギーが、数 MeV から 1GeV の広範囲にわたっていることを実証するものである。

### 3. 東日本大震災における施設の被害状況とその後の復旧

静電加速器は、高電圧端子部をセラミック製の絶縁支柱で支える構造となっているため、地震に対し

ては基本的に弱い。東北地方太平洋沖地震では、東海タンデム加速器施設も震度 6 弱の揺れに襲われ、その後も震度 3~5 級の余震を立て続けに受けた。建家周りの地盤は沈下したものの、加速器本体には深刻な損傷はなかった。加速器タンク内の絶縁カラムが免震構造となっていたことが、倒壊を免れた要因であると考えている。とはいえ、損傷した箇所の修復・整備が必要であり、インフラなどの復旧なども含めて運転再開までに約 6 カ月を要した。

#### 3.1 地震発生時の様子

地震発生時、タンデム加速器は 16.1MV で運転中であり、実験にビームを供していた。地震発生と同時に、地震計のインターロックによりペレットチェーンが停止し、加速器は自動停止した。さらに加速管の真空悪化に伴い、圧力タンク直下のガス・コンテイメントバルブ（加速管等が破損した場合に、タンク外の真空ラインに SF<sub>6</sub> ガスが流入することを防ぐための耐圧用ゲートバルブ）が閉まった。タンデム加速器で最も心配される事故は、加速器圧力タンク内の SF<sub>6</sub> 絶縁ガスの漏えいによる酸欠事故である。容積 1200m<sup>3</sup> の加速器タンク内には、5.5 気圧に加圧された約 40 トンの SF<sub>6</sub> ガスが詰められている。SF<sub>6</sub> ガスは空気よりも重いために、漏えいした場合には、地階のターゲット室等が酸欠になる危険性がある。そのため、地震時には速やかに屋外退避し、建家内に取り残された人がいないことを確認した。超伝導リニアック用のヘリウム冷凍機は停止中であつたため、He ガスの漏えいはなかった。冷凍機の運転中であれば、停電により He ガスの放出は避けられなかったであろう。

SF<sub>6</sub> ガスの漏えいは発生しなかったものの、余震で漏えいが発生する恐れがあつたため、早急に貯蔵タンクに SF<sub>6</sub> ガスを回収する必要があつた。また加速器タンク内部を点検するためにも、ガスの回収は必要であつた。しかし、研究所構内の水や電気のインフラは大きく損傷し、復旧に 1~2 週間を要した。また、SF<sub>6</sub> ガス関連の配管類や圧縮機等の健全性を確認する必要もあつたため、SF<sub>6</sub> ガスを回収し、加速器タンク内に入って加速器本体を確認できたのは、4 月 8 日となった。

#### 3.2 被災状況

地震による加速器の被害状況とその対応状況を以下に記述する。

##### (1) ゴンドラのカウンタウェイトの支持レールの破損

東海タンデム加速器は縦型の大型タンデムであるので、加速器の整備時にはタンク内の整備用ゴンドラを使用する。このゴンドラはバランス型であり、整備用プラットフォームの荷重とバランスさせるために約 4 トンのカウンタウェイトが備わる。カウンタウェイトは、非整備時には 7 階（地上 35m）の高さに保持されているが、地震で大きく揺れたことにより、そのガイドレールが曲げられ、取り付け部のアンカーボルトが破損した。ゴンドラは加速器点検に

不可欠であるため優先して修理をした。

### (2) カラム免震機構のベアリングのずれ

東海タンデム加速器の絶縁カラムは圧力タンクの底部に設置されたカラムベースと呼ばれる基礎部分によって支えられている。そのベースの6本の柱は、ベアリングの上に設置されており、横揺れに対する免震機構となっている。そのベース部はバネとオイルダンパーを備えた6本の支桁（ビーム）により横から保持することで、振動を吸収する構造となっている（図3）。この横支柱には、約±4cmの移動跡が確認された。免震機構になっていなければ、加速器が倒壊していた可能性は高い。免震機構は横揺れを抑えてくれたものの、ベアリングは、柱の中心からずれたままで止まっているため、柱の中心位置に戻す作業を8月初旬に3日間をかけて実施した。



図3：タンデム加速器の免震機構。絶縁カラムはベアリングの上に設置されバネとオイルダンパーを備えた横からの支柱で揺れを抑える。右写真は地震により中心からずれたベアリングである。

### (3) カラムポストの破断とひび割れ

東海タンデム加速器の絶縁カラムは、1MVのユニットが20段積み重なって構成されている。1MVのユニットは、12本のカラムポスト（絶縁支柱）で重量を支える（図4）。カラムポストはセラミックとチタン電極が交互に接着されてできている。地震後の調査で、総数240本のカラムポストのうち、33本にひび割れが確認された。5本のカラムポストにひび割れがある段もあり、この状態での整備作業は危険であるので、カラムポストの交換を最優先で実施することにした。予備品以外に筑波大、東大からの協力を得て、20本のカラムポストを準備することができ、交換を行った。完全に破断しているものが4本あった。取り外したひび割れカラムポストのうち、比較的健全そうなものは強度（剪断力）試



図4：カラムポストの交換作業

左：カラムポスト交換のためのフープ外し  
右：フープを外した状態。1MVユニットは12本のカラムポストで支えられている。

験を実施し、メーカーの基準値を満たしたものは、ひびの状態の悪いカラムポストと交換し、再利用した。ひび割れのあるカラムポストがまだ13本残っているが、各段で1本以下になるように交換した。軽度なひび割れは、それほど深刻なものではないと考えている。当面は、この状態で運転を行うこととし、新たなカラムポストを入手次第、今後の定期整備時に順次交換していく予定である。

### (4) タンク内ビームラインの真空リーク

地震後に、加速管を含むタンク内ビームラインは少なくとも数十 torr まで真空が悪化した。当初は本体の主加速管の破損を心配したが、幸いにも真空リークはなかった。真空リークは高電圧端子内に設置された ECR イオン源の入射装置部の前段加速用の加速管（図5）と、イオン源と真空排気装置を接続する絶縁管の2ヶ所で発生していた。ECR イオン源装置の架台の強度が大きな振動に対しては不十分であったようである。これらの前段加速管と絶縁管は予備品に交換した。



図5：リークを発生した ECR イオン源入射部の前段加速管。振動でセラミクスが破壊された

### (5) 大型偏向電磁石の移動

タンデム加速器のビームを各ターゲット室に振り分けるための重量35トンの振分電磁石（図6）が地震により約15mm移動した。架台の移動痕をみると瞬間的には30~40mm移動したものと考えられる。真空チェンバーは電磁石に固定されていないため、移動によりビームラインを破損することはなかった。また、架台についても床にアンカーボルト等で固定されていないため、アンカーボルトや架台の破損もなかった。この電磁石については、そのまま基準位置へ戻した。

超伝導ブースターのエネルギー分析電磁石（重量14トン）と振分電磁石（重量21トン）は、地震によって架台固定用のアンカーボルトを一部、引き抜いて30~40mm移動した。そのため、架台の周辺にアンカーボルトを打ち直し、抑え金具を製作して床への固定を行った。ブースターラインの電磁石では真空チェンバーも共に移動したため、電磁石前後のベローズが押し潰され、そのうち1つが破損して真空リークを起こしていた（図7）。これは予備のベローズと交換を行っている。また、振分電磁石については、電磁石の位置調整機構のシャフトが引きちぎられて破損したため、一旦、電磁石より取り外して修理を行った。その後にエネルギー分析電磁石、

振分電磁石とも基準位置へ戻した。

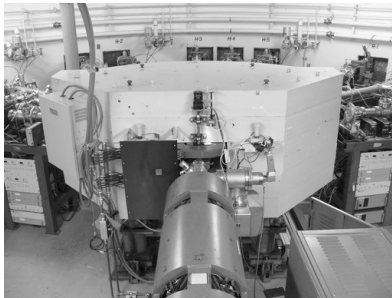


図 6：ビーム振分電磁石



図 7：ブースターの振分電磁石チャンバの前後の押し潰されたベローズ

#### (6) 超伝導ブースターの再アライメント

超伝導ブースター建家は増築建家であり、地震によりタンデム建家との接合部でブースター側が約 10mm 沈下し段差が生じた。平成 22 年（2010 年）にブースタービームラインの位置計測を実施しており、ブースター建家がタンデム加速器建家との接続部分に向かって沈降する傾向があることは把握していた。今回の地震で、この傾向を増長したようである。このままではビーム加速が困難であるので、ブースタービームラインの再アライメントを実施した。加速空洞は 1 台のクライオスタットに 4 台、合計で 10 台のクライオスタットに収められている（図 8）。約 2 トンの重量のクライオスタットをジャッキで持ち上げて基準高さまで調整した。持ち上げた量は最上流部のクライオスタットで約 8mm、最下流部のそれでは約 3mm であった。再アライメント前後のクライオスタットの高さを図 9 に示す。

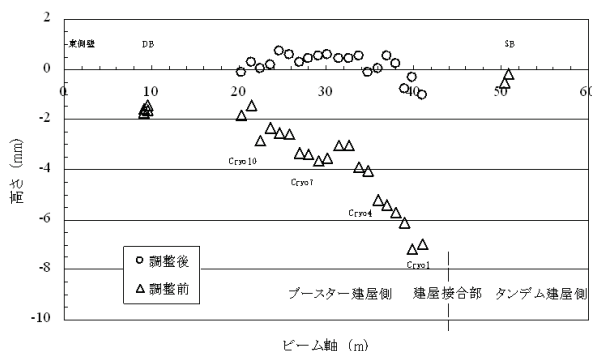


図 9：再アライメント前後のクライオスタットの高さ

横方向についてはクライオスタットのビームラインフランジに取り付けた治具の位置を元に、セオドライトを用いて調整を行った。内部の空洞に関しては、クライオスタットの開放が必要なため詳細に調査を行っていないが、He ガスや真空リークが見られないことから大丈夫であろうと判断した。四重極電磁石などのその他のビームライン機器についても再アライメントを行った。11 月に実施したブースターの加速運転の結果は良好であったので、クライオスタット内部の空洞等は健全であると判断している。

#### (7) タンデム加速器建家および建家周りの損傷

タンデム加速器建家については、傾斜角を算定した結果、基礎は「無被害」と判定された。上部構造については多数の被害を受け、最も被害が激しいのは壁の薄い 2 階の居室部分であると判定され、壁等には複数のひびが入っており、早急に修理する予定である。建家の地下部分は総じて揺れが小さかったようで大きな被害はなかった。建家の上層階は地震時、かなりの振幅があったと思われるが、重要な機器は設置されておらず、また放射線遮蔽のための厚い壁で構築されている為に被害はほとんどなかった。建家周りの地盤は、100 から 200mm ほど沈下した。建家の外階段や、別建家との地下連絡通路などにも亀裂が生じ、順次修復する予定である。被災調査の結果に基づき、建家及びその周辺の補修工事を実施することになるが、平成 23 年度は予算の確保が困難であったため、今年度、補正予算を執行し、建家、建家周辺及び地盤沈下の補修工事について年度内の補修工事完了を目指して手続きを進めている。

## 4. ビーム利用の開発

### 4.1 クラスタビーーム加速計画

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 のクラスタ分子イオンでも加速することが可能である。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のもので、このイオン源で直接クラスタイオンを生成し、加速することで、最大 20MeV の高エネルギークラスタビーームが得られる。この場合、荷電変換が必要ではないので、高強度のクラスタビーームを得ることができるかと期待される。現在、 $C_2$ 、 $C_3$  イオンを既存実験室に導き実験を開始したところである。本格的なクラスタイオン加速のために、現在タンデム加速器直下に新たな実験室を整備している<sup>[4]</sup>。

### 4.2 デュアルビーーム照射システムの開発

1 台の大型静電加速器から異なる 2 種類のイオンビーーム（デュアルビーーム）を同時に加速し、標的に照射するデュアルビーームシステムの開発試験を行った。デュアルビーームの加速は、高電圧端子に設置した ECR イオン源からビーームを加速することで実現する。ECR イオン源は 2 種以上の元素の多価イオンを同時に生成することが可能であるので、その中から質量電荷比の同じイオンを引き出すことでデュアルビーームの加速が可能となるはずである。加速試験では質量電荷比の同じ  $^{132}\text{Xe}^{11+}$  イオンと  $^{12}\text{C}^+$  イオンを用い、加速電圧 15MV でビーーム加速を行った。実

際に、この2種のイオンが標的上で同じ位置に照射されているかを確認するために、薄い金薄膜のストリップ標的を用いラザフォード後方散乱分析(RBS)測定を行うことで入射ビームを確認した。ストリップ線を移動させることでビームスポットでの各イオンのプロファイル分布を測定することが出来る。図10に石英によるビームビューワで確認したビーム形状と、金のストリップ線を移動させて得たCとXeビームの標的位置でのビームのプロファイル分布を示す。

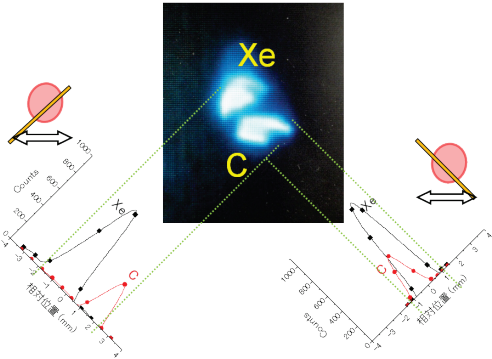


図10：デュアルビームのビューワによるビーム形状の確認と標的位置でのCおよびXeイオンのプロファイル分布

標的位置で2mmほどXeイオンとCイオンが分離していることが確認され、僅かな質量の違いが現れたが、ビーム加速は安定に行うことが出来た。我々の加速器の光学系では、ビーム位置を同一にすることは困難であるため、ビームをスキャナーで走査し、両イオンが混ざり合った部分を利用することにした。スキャナーによるビームの均一化法の模式図と均一化後のビームのプロファイルを図11に示す。

このように形成した165MeVのXeイオンと15MeVのCイオンとのデュアルビームをBi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>標的に同時照射することで、Xeイオンによる重イオン照射効果を、CイオンをプローブにしたRBS測定によりリアルタイムに測定することに成功した。図12にその結果を示す。Xeの照射量が増えるに伴い、Biの厚みが厚くなっていく様子が見られる。

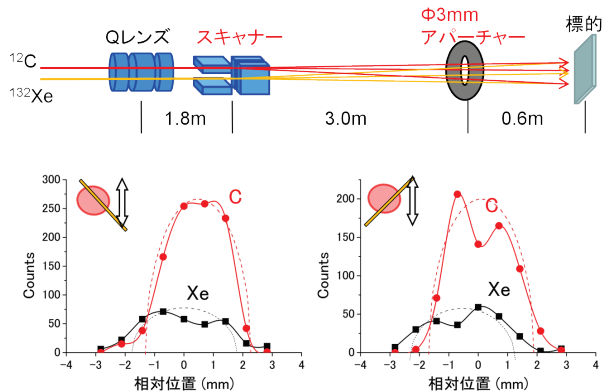


図11：ビームの均一化のためのスキャナーの配置と、均一化後の標的位置でのCおよびXeイオンのプロファイル分布

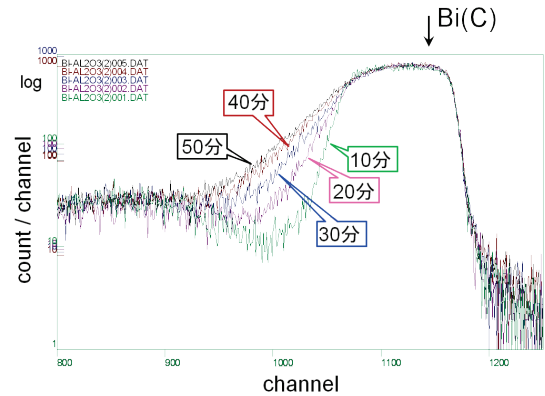


図12：Xeによる照射効果のリアルタイム測定の結果。照射を重ねるに伴いBiピークの形状が変化している。

## 5. まとめ

東北地方太平洋沖地震において、東海タンデム加速器は免震機構を備えていたおかげで大きな損壊を免れることができた。加速器や施設の復旧に約半年を要したが、9月初旬には利用運転を再開することができ、加速電圧においても震災前の18MVを保持している。

2010年9月には、当施設最高電圧の18.5MVでXeを加速し、超伝導ブースターで再加速することで、1.3GeVのエネルギーのビームも得られている。今後、利用運転をしながら、徐々に震災前の加速性能を回復していく予定である。

一方、原子力機構としては、福島第一原発事故への対応を重点化するために、タンデム加速器の予算が厳しくなることが予測される。東海タンデム加速器は、今や日本で唯一の大型静電加速器となった。タンデム加速器の高輝度かつエネルギー連続可変の重イオンビーム、さらにRI・核燃料標的の利用といった特徴を活かして、ユニークな研究が今後とも展開できると信じている。大地震に耐えた東海タンデム加速器をぜひ有効に活用してもらいたい。

## 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., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A654(2011)45-51.
- [4] M. Matsuda et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 4-6, 2010, Himeji, (2010)15-19.