

## 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<sup>#</sup>, 長明彦, 阿部信市, 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<sup>#</sup>, Akihiko Osa, Shin-ichi Abe, Nobuhiro Ishizaki, Hidekazu Tayama,  
Takamitsu Nakanoya, Hiroshi Kabumoto, Masahiko Nakamura, Ken-ichi Kutsukake,  
Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu

Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

#### Abstract

The tandem accelerator was operated over a total of 156 days and delivered 19 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 use for eight days on this voltage. C<sub>3</sub> molecule was accelerated from the in-terminal ion source with the energy of 3.5MeV per atom. 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、2014 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. 2014 年度の加速器運転状況

2014 年度の加速器の運転状況を Figure 1 に示す。タンデム加速器の運転日数は、156 日（約 3500 時間）となり、東日本大震災以降ほぼこの日数で推移している。超伝導ブースターは原子力機構の福島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

<sup>#</sup>matsuda.makoto@jaea.go.jp

ているが、いつでも再稼働出来るように必要最低限の整備は行っている。

加速器本体は加圧された SF<sub>6</sub> ガスを封入するための直径 8m、高さ 26m の圧力タンクの中に設置されている。加速器の整備はタンク内の 2 台のゴンドラを用いて行う。ゴンドラの性能検査は毎年実施しなければならないが、震災により長期の整備期間に併せて実施することできなくなった。そのため昨年度は 6 月と 1 月にタンクを開放し検査を実施し、今年度から長期整備期間内にゴンドラ整備および検査ができるように計画している。

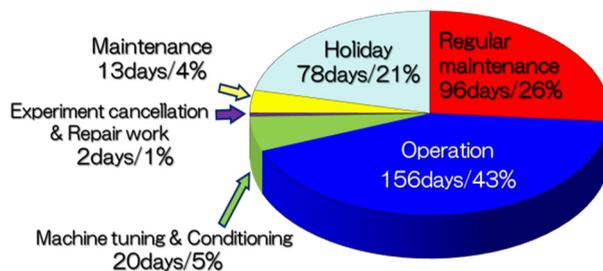


Figure 1: The operation status of the accelerator in the FY 2014.

Figure 2 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 29%、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 39%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 6%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。

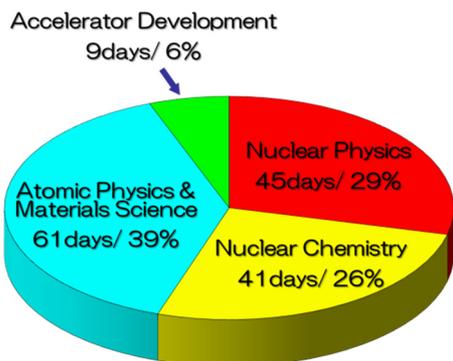


Figure 2: Usage of beam-times in different research fields.

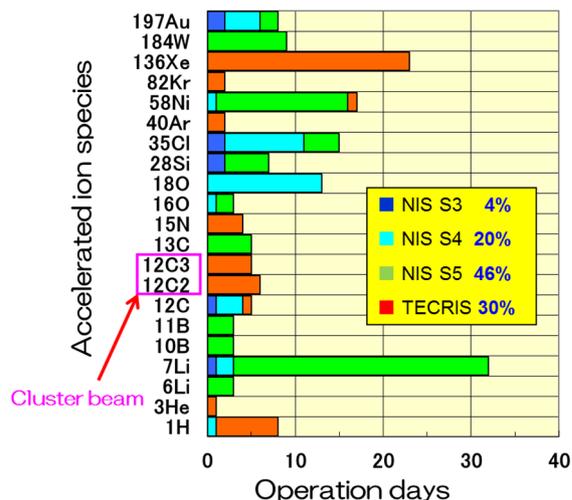


Figure 3: Distribution of accelerated ion beam species for experiments.

2014年度に利用された加速イオン種を Figure 3 に示す。イオン種別では  ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{18}\text{O}$ 、 ${}^{35}\text{Cl}$ 、 ${}^{58}\text{Ni}$  が主として核化学、核物理実験等に利用された。Xe イオンは、核分裂反応による反跳エネルギーと同程度のエネルギーが得られることから原子炉材料の照射実験等に広く利用された。高電圧端子内の ECR イオン源からのビーム利用は全体の 30% を占めている。ターミナルイオン源からの  $\text{C}_2$  および  $\text{C}_3$  分子クラスターイオン[3]を用いた原子物理実験が実施された。

Figure 4 は 2014 年度のタンデム加速器の電圧発生状況であり、最高加速電圧は 18.0MV で 162MeV の  ${}^{18}\text{O}$  ビームが 8 日間利用された。ついで 17.6MV で 245MeV の  ${}^{58}\text{Ni}$  ビーム加速が行われた。Ni ビームでこのエネルギーを得るには高電圧端子の荷電変換薄膜（炭素薄膜）と正イオン加速側の途中に設けられた 2nd foil（炭素薄膜）によって 2 度の荷電変換を行うことで高いエネルギーを得ている。超伝導ブー

スターの運転が再開されればこのエネルギーは容易に得ることが可能である。

13MV 以上の運転が全体の 7 割、15MV 以上の運転が約 4 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。5MV 以下及び 7~8MV 付近の低電圧での運転は、 $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$  分子クラスタービームを用いた実験や  ${}^{15}\text{N}(p, \gamma)$  反応による水素分析の実験に利用された。クラスターイオンの場合、イオン電荷数が 1+ であるため、その質量電荷比 ( $m/q$ ) が大きい為、既存のターゲット室にビームを導くにはエネルギーを下げざるを得ない。現在、20MeV 程度の高エネルギーのクラスターイオンを利用すべく、タンデム加速器の直下に鉛直上方からイオンを照射する実験コースを整備している。

2014 年度は、超伝導ブースターの加速運転はなかった。

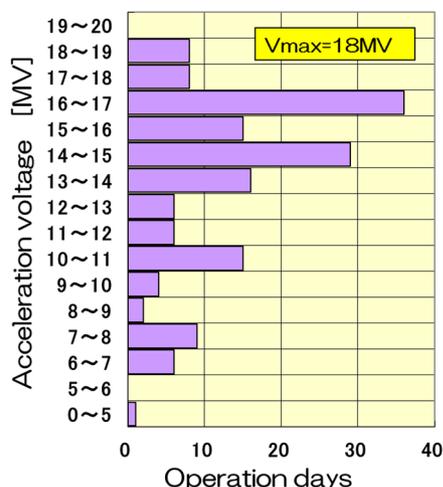


Figure 4: Distribution of terminal voltages for experiments.

### 3. 新規ビームラインの建設

近年、Figure 5 に示す照射室 (irradiation target room) の利用率が全体の 50% 近くになり実験室の有効な利用が困難となってきた。2011 年の RNB 加速器 (TRIAC) の撤去後の実験室に新たに 2 本のビームラインを整備した。また、高エネルギーの分子ビーム・クラスタービームの利用を開始するために、タンデム加速器の直下にビームラインを延長し、鉛直上方からのビーム照射が可能な実験室を整備した。

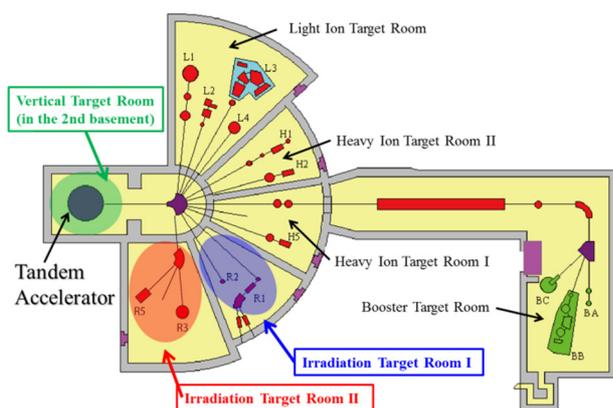


Figure 5: Floor plan on the first basement. 15 beamlines are in seven target rooms in total.

### 3.1 第2照射室

需要の多くなった非密封 RI や核燃料を標的とした実験に対応するため、これらの標的を扱える照射室（第2照射室）を新たに整備し、R3 および R5 ラインを設置した。昨年 11 月にビーム試験を行い、今年 2 月より実験利用が開始された。年度末までの 2 か月間に 18 日間の利用があった。現在は非密封 RI を標的とした照射等が可能である。

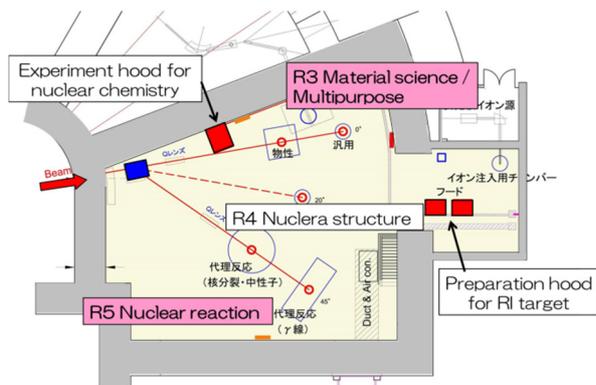


Figure 6: 2nd irradiation target room.

この第 2 照射室には、隣接する照射室の R2 ラインでイオンビーム照射により生成された核反応生成物を迅速に取出し、核化学実験ができるように R3 ラインの近くにフードを設置する。また非密封標的の調製用のフードも設置の予定である。Table 1 に利用可能なイオン種のエネルギーとビーム強度を示す。一部の遮蔽壁が薄いためにビーム強度が制約されている。

Table 1: Usable Energy and Intensity

Ion	Energy	Current
p, d	17 MeV	10 nA
He	40 MeV	10 pA
Li, Be, B	80 MeV	10 pA
C	120 MeV	10 pA
Heavy ion	10 MeV/u	10 pA

今後、20° のビームライン整備や核燃料標的の利用に向けた許可変更を申請する予定である。

### 3.3 垂直実験室

タンデム加速器の高電圧端子内イオン源から分子・クラスターイオンを加速することで最大 20MeV の高エネルギークラスタービームを得ることができる。しかし、クラスターイオンの電荷はほぼ 1+ であるので、質量電荷比が大きく既存のエネルギー分析電磁石では偏向できず既存のターゲット室にクラスタービームを導くことができない。したがって、タンデム加速器の直下に新たに実験室を整備し、鉛直上方からイオンビームを照射できるビームラインを地下 2 階に整備した。現在の状況を Figure 7 に示す。

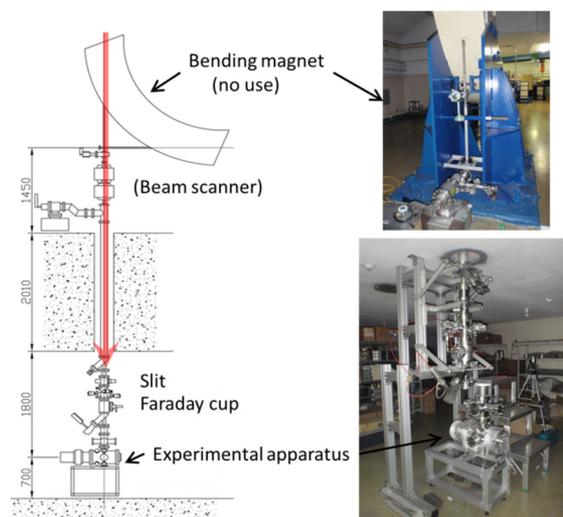


Figure 7: Vertical target room.

この実験室では炭素より重いイオンまたは分子・クラスターが 1.5MeV/u 以下のエネルギーで利用が可能である。核反応を起こさないので最大 20pμA の強度での照射が可能である。ビームが鉛直方向から入射するので、液体状の試料の照射等も可能となる。

## 4. 発電用回転シャフトの軸受けの改良

東海タンデム加速器では 180° 偏向電磁石や、ECR イオン源などの高電圧端子内機器への電力供給のために動力伝達用絶縁シャフトを使って端子内の発電機を駆動している。Figure 8 に発電用回転シャフトの概略を示す。地上電位にあるモーターにより高電圧端子内の 10kVA および 15kVA、デッドセクション部の 3kVA、5kVA の発電機を動作させる。動力伝達用絶縁シャフトは直径約 20cm のアクリルシャフトと軸受マウントから構成され、軸受マウントを全部で 28 台使用している。この軸受マウントのベアリングが所定の寿命に達せずに交換する必要があり、この交換に日数を要し整備性を悪くしてい

たので改良を行った。

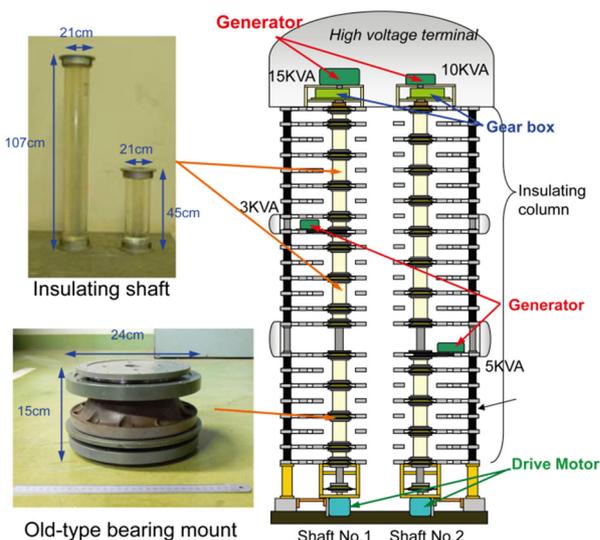


Figure 8: The outline of the rotation shaft for power generation.

Figure 9 に新旧軸受けの比較を示す。旧型の軸受けはアクリルシャフトの上下のベアリングの取り付けに寸法差やシャフトの変形などが考慮された設計となっていない。つまり、長さ 1m ほど離れた上下の軸受けとそれをつなぐアクリルシャフトをかなり良い精度で組み上げなければベアリングに規定以上の負荷がかかることになる。この方式では据え付け調整が困難であるだけでなくシャフトやカラムキャスティングの変形に対応できないので、今回新たに軸受けマウントを設計しなおした。

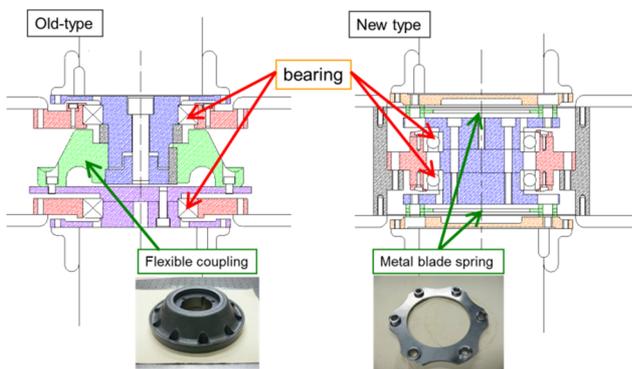


Figure 9: Comparison of an old and new bearing.

新型では、アクリルシャフトの上下に金属板バネを取り付けることで、上下の軸受けのアライメントが完全でなくてもベアリングに負担がかからない構造とした。また板バネの許容範囲内で軸受け間の距離の変化にも対応できる。

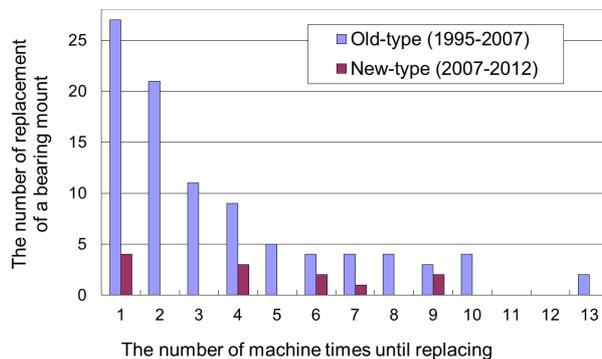


Figure 10: The life of bearing mount.

2007 年から不具合のあった旧式の軸受マウントを新型の軸受マウントに順次置き換えてきた。Figure 10 に交換を要するまでのマシンタイム期間と交換した軸受マウントの個数を示す。新型軸受のデータのうちマシンタイム 4 回以上の交換はベアリング調査のために交換したものであり不具合によるものではない。旧型では交換直後の 1~2 回の実験で約半数を交換する必要があり、設置時の調整が困難であることを示していると考えられる。新型では初期不具合の発生が減り、軸受け寿命が大幅に改善された。新型で生じた不具合は軸受け部の異常発熱によるグリースの溶け出しが主たる原因であり、この対応策も見出しており順次改良していくつもりである。

計算によると軸受けの寿命は封じ込められたグリースの寿命が制限となり、約 30,000 時間である。マシンタイム 1 回の期間は約 2000 時間であるので、15 回 (7~8 年) 程度で交換となることを期待している。

## 5. まとめ

2014 年度は運転日数が 156 日になり前年度とほぼ同じであり今後はこの日数で推移すると思われる。いわゆるホット施設の実験室を拡充したことで RI 標的試料を用いる研究や、垂直ビーム照射によるクラスター照射などの研究が実施可能となった。加速器整備でも省力化や効率化を計ることにより効率的な加速器運転を目指している。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] M. Matsuda et al., Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, Aomori, (2014) 410.