

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, 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[#], 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 Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

Abstract

The tandem accelerator was operated over a total of 152 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. 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）の整備を進めてきており、2014 年の秋にはビーム提供が可能となる予定である。

本報告では、2013 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. 2013 年度の加速器運転状況

2013 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、152 日（約 3500 時間）となり、震災発生前の約 8 割にまで回復した。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。2013 年 5 月末に発生した J-PARC ハドロン施設での放射能漏れ事故により 2 日間の実験中止があった。その後、圧力タンク内のゴンドラ設備の定期検査のために約 2 週間のタンク開放による整備を実施した。ゴンドラの性能検査は毎年実施しなければならないため、本来は長期の整備期間に併せて実施すべきであるが震災の影響で整合が取れなくなっている。

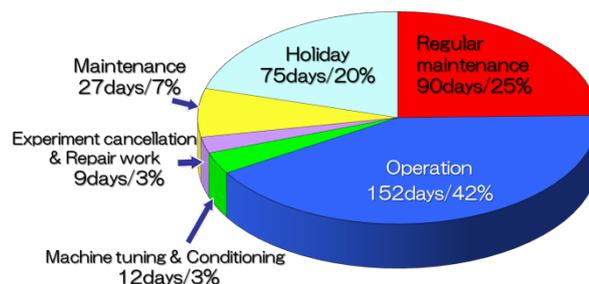


Figure 1: The operation status of the accelerator in the FY 2013.

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 33%、核化学関係が 24%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 36%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 7%で震災復旧作業後の加速器の診断や、イオンビーム照射技術の開発に利用された。

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

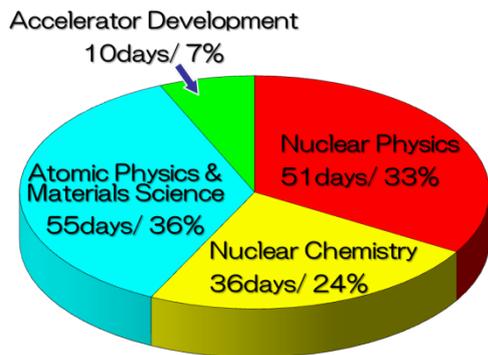


Figure 2: Usage of beam-times in different research fields.

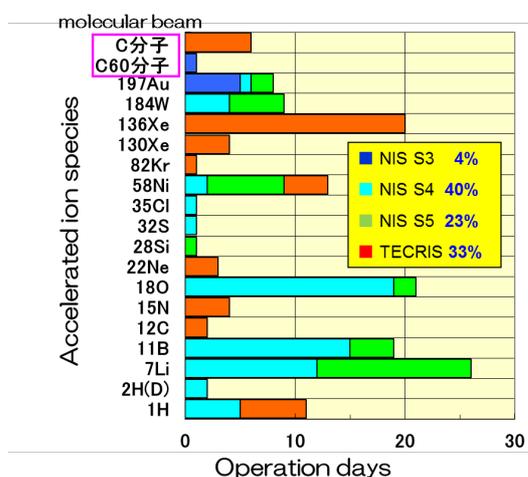


Figure 3: Distribution of accelerated ion beam species for experiments.

Figure 3 に 2013 年度の加速イオン種を示す。イオン種別では ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{B}$ 、 ${}^{18}\text{O}$ 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 33% を占めている。ターミナルイオン源からの C_2 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 3 において C_{60} 分子とあるが、これはタンデム加速器で加速されたものではなく、スパッター負イオン源 (SNICS) からクラスターイオンの生成試験を実施したものである。炭素粉末及びフラーレン粉末をスパッター試料として装填し、20kV でイオン源から引き出し、負イオン源デッキの加速電圧 240kV で加速した。予備的な結果であるが、得られた C クラスターイオンの収量を Table 1 に示す。 C_{16} 、 C_{26} 、 C_{58} はフラーレン試料を用いた。イオンのエネルギーは 250keV 程度であるので、照射チェンバーをタンデムビームラインの途中あるいは分岐することで、負イオンクラスターを用いた実験が展開できる

と考えている。

Table 1: Intensities of C Cluster Ion

Form	I [nA]	Form	I [nA]	Form	I [nA]	Form	I [nA]
C_2	850	C_6	83	C_{10}	2.5	C_{16}	2.9
C_3	100	C_7	10	C_{11}	0.58	C_{26}	0.35
C_4	150	C_8	25			C_{58}	0.025
C_5	16	C_9	5.8				

Figure 4 に 2013 年度のタンデム加速器の電圧発生状況を示す。電圧の発生状況も順調であり最高電圧は 17.5MV で 14 日間の利用があった。13MV 以上の運転が全体の 8 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 7MV 付近の低電圧での運転は、 C_2 分子クラスタービームを用いた実験に利用された。クラスターイオンの場合、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新実験室を整備しているところである。

2013 年度は、超伝導ブースターの加速運転はなかった。

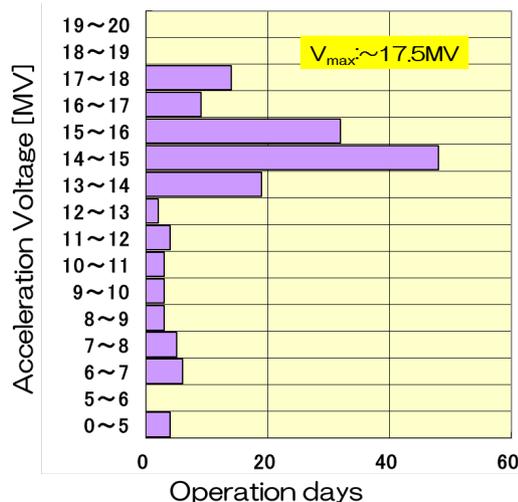


Figure 4: Distribution of terminal voltages for experiments.

3. 主な整備・故障

3.1 加速電圧の周期的な小放電を伴う変動

2014 年 1 月 10 日からの 6 日間の利用運転において運転開始から 3 日目あたりから約 30 分周期で小放電を伴う加速電圧の変動現象が発生した。Figure 5 にその時の加速電圧及び加速管の真空、X 線モニターのレコーダーチャートを示す。(時間は右から左に流れている。)

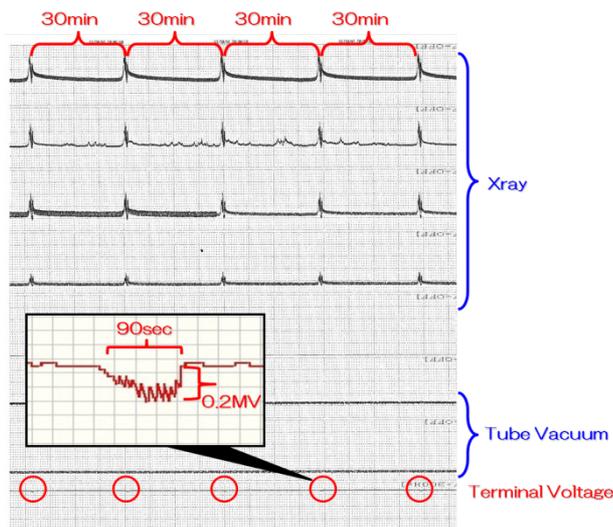


Figure 5: Recorder chart of X ray monitors, Tube Vacuums and Terminal Voltage.

加速電圧は 17.5MV で、157MeV の $^{18}\text{O}^{8+}$ イオンを加速していた。加速電圧を拡大してみると約 0.2MV の電圧低下が発生し 90 秒かけて電圧が回復することを約 30 分周期で繰り返すようになった。加速管内の真空に変化は見られないことから、加速管外部に原因があると予想された。幸いマシンタイム期間最後の利用運転であったため、そのまま定期整備に入ることとなった。

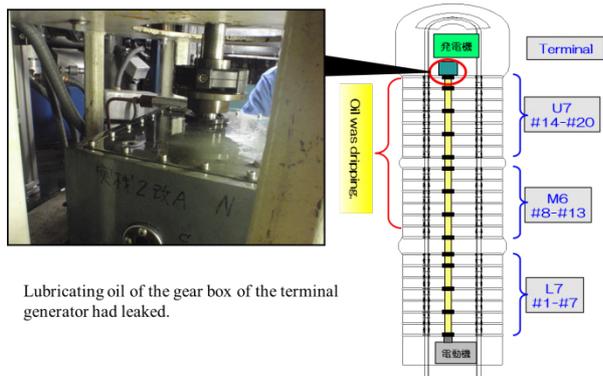


Figure 6: Electric discharges were caused whenever oil dripped the insulated column.

タンク内を目視にて点検したところ、ターミナル発電機用の増速ギアボックスの蓋部から潤滑用のオイルが漏れ出していた (Figure 6)。前回の利用運転開始直後からオイルがじわじわと漏れ出し、ターミナルに溜まりきらなくなったオイルが絶縁カラムに沿って滴りはじめたことで小放電が起きたと考えられる。オイルの痕は#20 から#4 までのカラムキャスティングまで確認できた。漏れたオイルを取り除き、ギアボックスの蓋部は液体パッキンを塗布して復旧

した。現在は順調に稼働している。

3.2 その他の主な整備事項・故障

タンク開放を必要とする故障は 1 件発生した。原因は高電圧端子内に設置したイオン源の引き出し電圧印可のためのケーブルコネクタが適合していないために起こった接触不良であった。加速器の主要部である圧力タンクの内部を整備するにはタンク内の SF_6 ガスを回収する必要があるが、1200 m^3 の容積の圧力タンク内に 0.45MPa に加圧されたガスが充填されているため、その回収と空気置換に 3 日を要する。また作業用ゴンドラの設置、格納も行うので、実質 4 日間がタンクの開閉に必要な日数となる。したがって些細なトラブルであっても日数を要する修理となってしまう。

建屋施設の経年化対策として、高圧受変電設備およびエレベータの制御システムの更新を実施した。

4. ビーム開発

4.1 大面積均一照射法の確立

イオンビームの産業利用のために広い面積に均一に正確な量のイオンを照射したいとの要望が出てきた[4]。既存ビームラインで対応できる 5cm×15cm のサイズの試料に均一に照射するために、ビームを幅 5cm で横方向にスキャンし、試料を縦方向に移動させることとした。

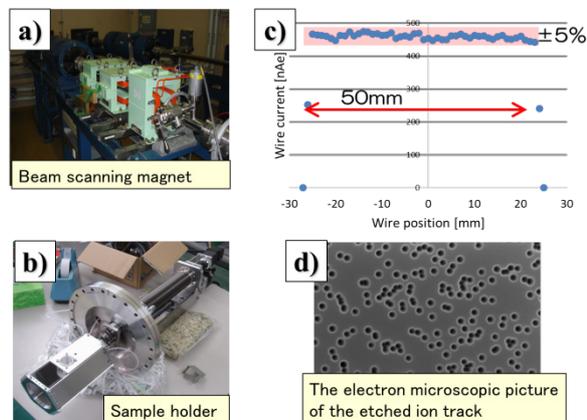


Figure 7: The large area uniformity irradiation method. a) beam scanning magnet. b) sample holder. c) the result of beam uniformity measurement by wire probe. d) The electron microscopic picture of the etched ion track.

Figure 7 に装置の概要と照射結果を示す。ここで用いているイオンは比較的照射効果の大きい 200MeV の Xe イオンである。既存のスキャン電磁石ではスキャン幅が足りないため水平方向の 2 台の電磁石を利用した。一度に 6 枚の試料に照射し、かつ 15cm の移動を行うために b) のサンプルホルダーを用いている。照射前にビームの均一度を確認するため、ビームに対し水平方向にワイヤーを挿入

しながらその位置とワイヤー電流を測定しており、c)はその一例である。要求される性能は幅 5cm で均一度が±5%以内であり、その要求を満たしていることがわかる。d)は照射した試料の電子顕微鏡写真であり、良好な結果を得ている。照射に要する時間は、加速器の立ち上げから実際に照射が始まるまで約 3 時間である。

4.2 ニッケロセン化合物による Ni ビームの加速

核物理ユーザーから 50pnA の 270MeV の Ni ビームが要求されている。超伝導ブースターを利用すれば可能なエネルギーと強度であるが現在運転を休止しているため、負イオン源からのタンデム加速では高エネルギー側加速管の途中にある 2nd foil によってさらに電荷を上げること、エネルギーを上げているが、ビーム電流は 5pnA が限界である。そこで高電圧端子内の ECR イオン源にニッケロセン； $Ni(C_5H_5)_2$ と呼ばれる昇華性の有機金属化合物を搭載し、 Ni^{18+} イオンを直接加速することでビーム強度を増すことを試みている。現在のところタンデム加速と同程度の 5pnA が得られている。今後ニッケロセン試料の増量や同位体濃縮、イオン源周りの高効率化をはかる予定である。

4.3 新照射室 (HOT) の整備

近年、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) を新たに整備しており、ビームラインについては完成し、施設の許可変更手続きも完了した。現在、加速器インターロック及び制御系を既存システムと統合する作業を実施している。今年の 10 月にビームテストを行い 12 月には運用が始まる予定である。

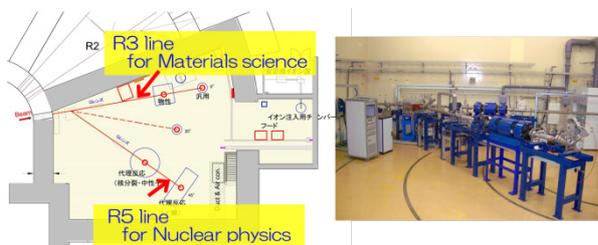


Figure 8: 2nd irradiation target room.

5. まとめ

2012 年度までに震災復旧関係の作業を終えたこともあり、2013 年度は運転日数が 152 日になり震災前の 8 割に回復した。福島復興へ向けた予算・人員の重点化により当施設の予算は大変厳しくなっているが、米国オークリッジ国立研究所のタンデム加速器の運転が停止したことから、今や世界的にも唯一のユニークな大型静電加速器でありその価値は重要であると認識している。

静電加速器の利点を生かすべくクラスターイオンや高分子イオンの利用が展開を目指すつもりである。また利用ユーザーの要望に沿うべく照射技術の開発を行っており、大面積均一照射には一定の目途を得ることができた。今後も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 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-11, Osaka, (2012) 362.
- [4] 藤巻 真 et al., 第 25 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告集, 2012 年 7 月 20 日, 名古屋 (2012) p83.