

## 原子力機構-東海タンデム加速器の現状

### PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

松田誠<sup>#</sup>, 石崎暢洋, 田山豪一, 株本裕史, 中村暢彦, 杵掛健一,  
乙川義憲, 遊津拓洋, 松井泰, 阿部信市, 長明彦

Makoto Matsuda<sup>#</sup>, Nobuhiro Ishizaki, Hidekazu Tayama, Hiroshi Kabumoto, Masahiko Nakamura,  
Ken-ichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui, Shin-ichi Abe, Akihiko Osa  
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 118 days, and delivered 18 different ions to the experiments in the research fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics, solid state physics and radiation effects in material in FY2019. Maximum acceleration voltage was 16.3 MV. The electric discharge cracked the rotating shaft for driving generator in high voltage terminal and deteriorated the insulation performance. Therefore, a sudden discharge occurred and the acceleration voltage could not rise. The cracked shafts were replaced and accelerator operation continued. This event has never been experienced before, and we are still searching for the cause. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments of our facility.

#### 1. はじめに

原子力機構-東海タンデム加速器施設には 20UR 型ペレットタンデム加速器と、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(超伝導ブースター)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 10~500 MeV 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再加速する超伝導ブースターはヘリウム冷凍機の廃止により運転を休止している。

当施設は RI や核燃料を標的として利用できる特徴を

有する。昨年度は、99 番元素であるアインスタイニウム (Es) を標的とした核物理実験を 2 月から実施した。

本報告では、2019 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. 加速器の運転状況

2019 年度のタンデム加速器の日毎の加速電圧の発生状況および施設の稼働状況を Fig. 1 に示す。

前年度末に定期整備を終了し、1 週間の電圧コンディショニングを実施して利用運転を開始した。7 月の所内停電に合わせて定期整備を開始し 12 月初旬までの長期の整備となった。SF<sub>6</sub> 高圧ガス施設の定期自主検査において SF<sub>6</sub> ガスを液化して貯蔵しておくための貯槽の開

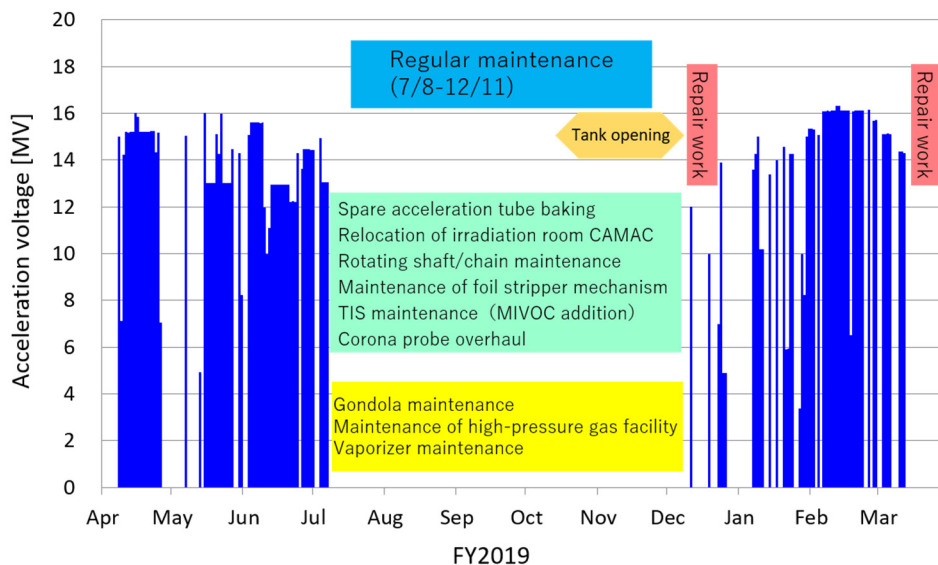


Figure 1: Daily accelerating voltage and operation status in the FY 2019.

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

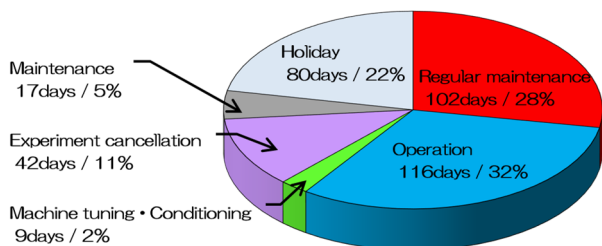


Figure 2: The operation status of the accelerator in the FY 2019.

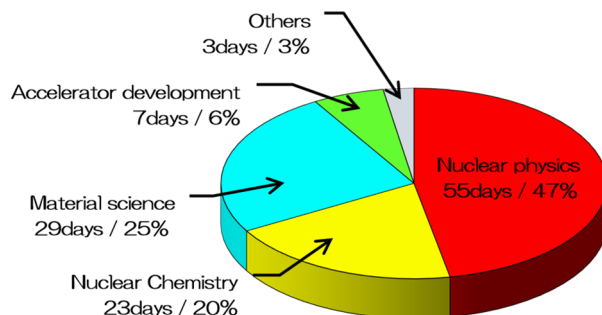


Figure 3: Usage of beam-times in different research fields.

放電検査を実施したためである。ガス施設の整備期間に予備加速管のベーキングや CAMAC 制御装置の移設、新型の無線通信機器の整備を実施した。高圧ガス施設の点検の終了の後、10/15 から加速器タンク内の整備を開始した。この整備で発電用回転アクリルシャフト(回転シャフト)に大きな放電痕があり、一部アクリルが剥離し絶縁劣化しているものを発見し、予備品と交換した。

12 月中旬から後期のマシンタイムに入る予定であったが、運転開始前のビーム試験において高電圧端子内イオン源の前段加速電圧(80 kV)が不安定であること分かり、直ちに加速器タンクを開放して修理を実施した。電圧不安定の原因は、高電圧ケーブルの断線であった。この修理を終えて 12 月後半から後期のマシンタイムを再開した。

2 月後半から、X 線や真空のわずかな変動や高電圧端子電圧のふらつきなどの前兆がなく、突然放電するようになり、日時の経過とともに頻度が増えてきた。このままでは安定にマシンタイムを遂行できないので 3/17 から加速器タンクを開放して修理を実施した。放電の原因は回転シャフトの絶縁劣化によるもので、直前の定期整備で発生していたことと同様の事象が発生していた。予備はないため過去に外したのから再使用が可能なものに置き換え運転を再開した。

タンデム加速器の運転状況を Fig. 2 に示す。加速器の利用運転は例年より少なくなり 116 日であった。定期整備の日数は高圧ガス施設の整備のため例年より多く 102 日であった。実験中止は例年 10 日程度であったが、昨年度は 42 日と非常に多くなった。主として回転シャフトの放電破壊により加速電圧を安定に発生することが出来なかったことが原因である。その関係もあり予定

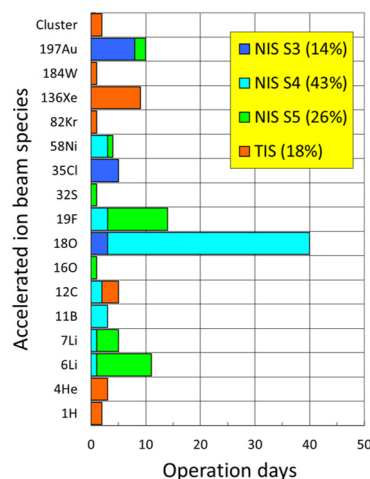


Figure 4: Distribution of accelerated ion beam species for experiment.

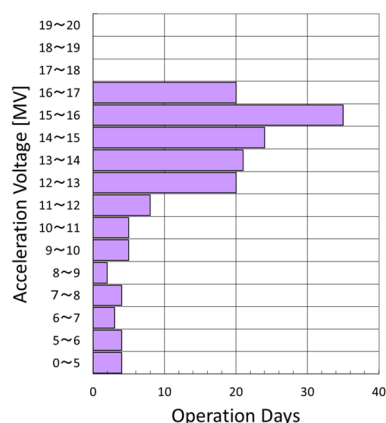


Figure 5: Distribution of acceleration voltages for experiments.

外の加速器整備が 17 日となった。

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 47%、核化学関係が 20%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。2 月からアインスタイニウムを用いた核物理実験に注力したこともあり核物理実験の日数が割格的に多くなった。原子物理・材料科学の実験が 25%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。鉛直方向よりビーム入射が可能な V1 ビームラインにおいて液体の鉛ビスマスの上に浮いた試料に対し Fe イオンによる照射実験が実施された。加速器開発は 7%で主として加速器パラメータの一括設定に向けた加速器の試験を実施した。

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 86 日で 74%を占め、原力機構単独の研究は 17 日で 15%、施設共用利用は 4 日で 3%であった。その他 RI 定期検査や原子力機構職員を対象にした加速器の運転教育に 3 日を充てた。

2019 年度に利用された加速イオン種を Fig. 4 に示す。H から Au まで 14 元素、18 種のイオンが利用された。イ

オン源の利用では S4 イオン源の利用が 43%と多くなった。高電圧端子内の ECR イオン源の利用は 18%にとどまった。2 月からの Es 試料を標的とした核物理実験のために  $^{18}\text{O}$  イオンの利用が多かった。

Figure 5 は 2019 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 16.3 MV であった。ビーム加速を行わない状態では 2 月初めに 18.2 MV を確認したが、前述の回転シャフトの絶縁性能の劣化に伴い加速電圧は徐々に低下していった。加速電圧の回復のため 7 月から約 2 か月かけてメーカーにて再生処理を行った加速管のベーキングを実施し、いつでも更新ができるように準備を進めている。

### 3. 加速器の開発・整備状況

2019 年度の定期整備は 7/8~12/11 の 1 回の実施であった。しかし、定期整備直後に高電圧端子内イオン源の前段加速電圧の不安定が生じ、加速器タンクの開放修理を実施した (12/12~12/18)。3/17 から年度末にかけては回転シャフトの絶縁性能劣化により加速器タンクの開放修理を実施した。2018 年度のトピック的な整備事項について以下に記す。

#### 3.1 発電用回転シャフトの絶縁破壊

前期マシンタイム期間中の 6 月頃から、X 線発生や真空悪化の兆候がなく突然加速器が放電することが発生していた。運転中はその原因が不明であり、全部で 20 段の加速ユニットの内下から 7 段目までの電圧発生性能の劣化が見られていた。特に下から 2 段目の #2 ユニットの性能劣化が酷く、電圧が印可されないようにショートした状態で運転を継続していた。

10 月に入り加速器タンクを開放し内部の整備を開始したところ、回転シャフト No2 系統の #0 から #2 ユニット間をつなぐアクリル製の回転シャフトが Fig. 6 のように放電により破壊されていることが分かった。数 MV 以上の高電圧の放電によりアクリル表面に放電痕が発生し、度重なる放電の度に徐々に傷の程度がひどくなっていったと考えられる。ひびや剥離した部分は黒く炭化しており、絶縁性能が著しく劣化したと言える。この回転シャフトに発生した放電痕がさらなる放電発生の原因となり、加速器運転期間に放電を頻発したと考えられる。加速管 #2 ユ



Figure 6: Rotating shaft cracked by electric discharge. Left is an enlarged version.

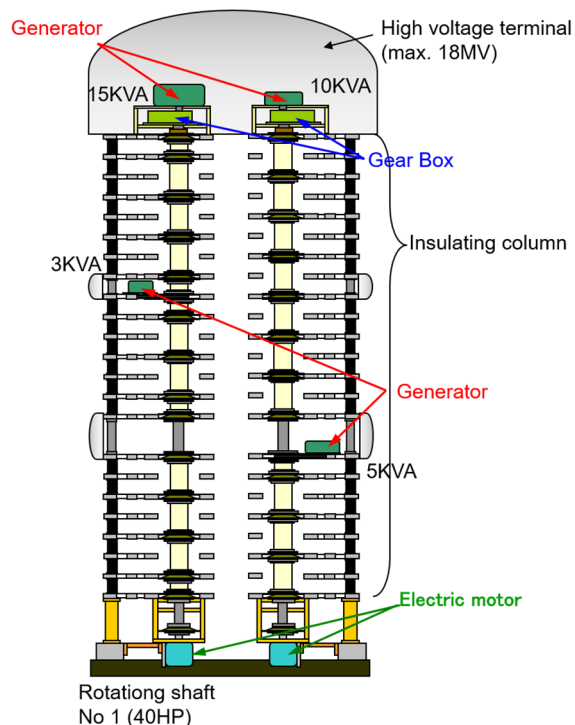


Figure 7: Schematic diagram of rotating shaft mechanism for power generation.

ニットの性能が劣化した原因は回転シャフトと同じ場所にあるため、この回転シャフト起因の放電により大きな放電電流が加速管にも流れることとなり絶縁性能劣化に至ったと考えられる。

Figure 7 に回転シャフト機構の模式図を示す。回転シャフトは 2 MV ユニット間をつなぐ長尺の物が 18 本、1 MV ユニット間をつなぐ短尺の物が 6 本の合計 24 本使用されている。使用されている回転シャフト全てを目視で点検した結果、小さいが放電痕があるものが 10 本確認された。回転シャフトの予備は 3 本しかなく、調達も困難であるため程度の悪い 3 本を予備品と交換し、運転を継続することにした。

これまで小さな放電の痕跡があるのは認識していたが、今回のようなトラブルが発生したことはなく、直接の原因は不明であり、調査中である。

#### 3.2 スリッパフォイルチェンジャーの整備

東海タンデム加速器は高電圧端子内に 230 枚ほどの荷電変換フォイルを装着しており、フォイルチェンジャーにより 1 枚ずつビーム軸に対し直角に挿入される。Figure 8 にフォイルチェンジャーの写真を示す。フォイルの使用状況はカメラによって制御室からモニタ出来るようになっている。最近、フォイルの挿入位置が所定の位置から時折ずれることが発生したため、取り外して原因を調査したところ、回転導入を行うマグネットカップリング部の薄い真空隔壁の真空側に磁石の擦れ痕が確認できた。この隔壁は内部の真空と外部の圧力差がかかる部分であり、外部に  $\text{SF}_6$  ガスを 0.5 MPa まで充填することにより変形し、マグネットカップリングがスムーズに動かなくなることが原因として推察された。加圧された状態を再現して調整する



ことは困難であるため、カップリング間の距離を拡大するように再調整した。その後の運転では、ずれる頻度は減り改善したが、まだ挿入位置がずれることがある。

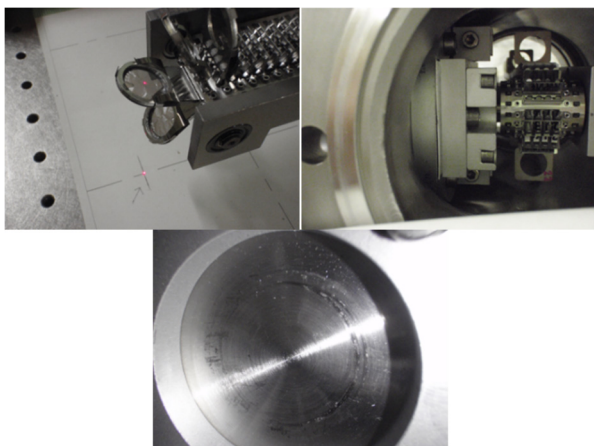


Figure 8: Photo of the foil changer mechanism. Below is a photograph of the scratch marks on the vacuum partition. Down) Rubbing marks on the vacuum partition.

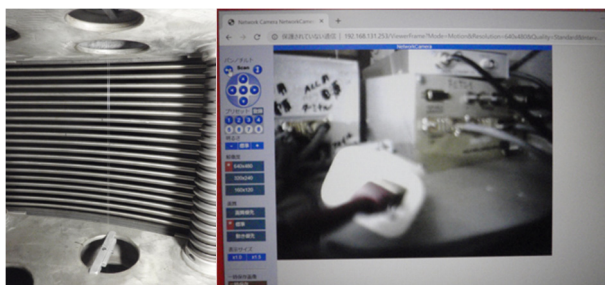


Figure 9: Left) POF wired along the insulated column. Right) Video from LAN camera in high voltage terminal.

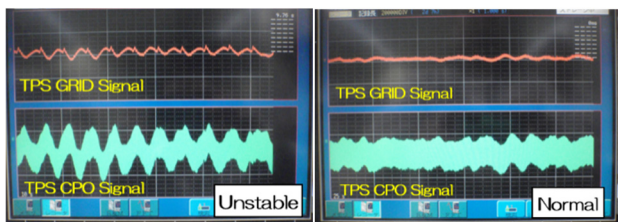


Figure 10: Difference between TPS signal in unstable and normal condition.

### 3.3 汎用 LAN 機器を用いたタンク内通信

東海タンデム加速器は、加速器タンク内部にペレットチェーンや発電用回転シャフト、ギアボックスなど大型の機械要素で稼働する加速器であり、どれかが故障すると運転を継続することができない。よってこれら機械要素の振動や発熱などをモニターすることで故障の予兆を捉え致命的な故障に至る前に保守整備を実施することを計画している。これまでも高電圧端子部の軸受の温度など測定しているが、測定箇所は要素数に比較し非常に少ない。既存制御系にこれらのモニター機能を付加することは、制御系の負担の増加や各種センサに合わせた変換器の開発や製作が必要となる。そこで、既存の制御系に頼らず市販の LAN 機器を使うことで開発費や導入コストを下

げることを試みている。

最近、種々の測定機器やセンサ類に LAN 接続が可能なものが多数市販されており、映像などの通信が気軽に可能なばかりでなく、時間応答を気にしなくて済むのであれば、多チャンネルの信号伝送が可能でかつ測定要素の追加も容易である。幸いなことに LAN ケーブル信号をプラスチック光ファイバー (POF) に変換するモジュールが市販されているので、多少の工夫を施すことで 18 MV の電位差に対しても通信を行うことが可能である。設置する環境は 0.5 MPa に加圧された SF<sub>6</sub> ガス中であり、年に数回は加速器タンクのガス移送のために真空中に晒される環境である。また高電圧の放電により電氣的サージに晒される環境でもある。まずは、地上での圧力試験により使用に耐えることを確認し、放電に対しては実機に設置して試験を実施することにした。

検証が簡単な LAN カメラ(ネットワークカメラ)と、POF 変換器を高電圧端子内の電源ボックス内に設置した。加速器タンク底部の地上電位側にも POF 変換器を設置し、その間を送信用、受信用の 2 本の POF で接続した。POF の配線の様子と LAN カメラの映像を Fig. 9 に示す。POF は外皮を取り去ったものを使用し、長さが 30 m ほどであったが問題なく信号伝送できることが確認でき、タンク内の LAN 通信による制御の実現性を確認できた。しかし放電が発生するとサージによるノイズの混入により通信が不能となる。この場合、だれもがやる手法、つまり電源の入切により今のところ 100% 復帰することは確認できている。今回の試験ではノイズ対策はシールドボックス内に設置するのみでまったく措置していない状態であるため、サージ保護回路を付加するなどの対策を施せば改善するものと期待できる。さらにリアルタイムなモニタが必要であれば定期的な電源リセット回路を組み込むことも考えている。今後は種々のセンサの動作確認を行うと同時に電力供給のない部分への発電機構を開発する予定である。

### 3.4 商用電源の乱れによる高電圧端子電圧の不安定現象

1/17 に 14 MV の電圧を発生させ、GVM モードで電圧安定化を行っている時に、端子電圧が約 2.5 秒の周期で変動していることが分かった。この周期は J-PARC の MR の加速周期であることが後に判明したが、原因は、原子力科学研究所内の受変電設備の補修作業により受電トランスが容量一杯で運転していたため、商用電源に同周期の変動が重畳されたためである。モーター以外の機器はすべて安定化電源経由で動作しているが、GVM モーターは商用電源のまま使用していたためモーターの回転が 2.5 秒周期でわずかに変動したものと推察している。

GVM モーター電源の安定化を図る予定である。Figure 10 はターミナルポテンシャルスタビライザー (TPS) 回路の信号をレコーダーに描かせたものである。端子電圧を制御する GRID 電圧に 2.5 秒周期の変動があり、このため端子電圧が変動している。

## 4. まとめ

2019 年度の運転日数は 116 日で、高圧ガス施設の定

PASJ2020 FRSP02

期自主検査および放電の頻発により例年より少なくなった。加速電圧は一時的に 18.2 MV まで到達したものの回転シャフトの絶縁破壊による劣化のため年度後半には徐々に電圧が低下し 16 MV での運転が困難になっていった。2 度目となる、貴重な RI 試料の 99 番元素アインスタイニウム (Es) を用いた実験が 2 月から開始され、核物理関係の利用が半数を占めた。非密封 RI を利用可能な照射室・第 2 照射室の利用が全体の 7 割近くとなった。

施設を有効に活用するため、加速器の定期整備を年 1 回とすることの検討をすすめ、加速器タンク内機器の LAN 通信によるモニタを試験的に開始した。定期整備回数を減らし運転期間を長くできるようになれば、人的にもマシンのにも負担を増やさずに効率的な施設運用ができると考えている。先述のような RI・核燃料を標的としたユニークな研究を推進するためにも、電圧性能の向上や静電加速器の特徴を生かした加速器・ビーム開発を進める。

### 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.