

原子力機構－東海タンデム加速器の現状

PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

株本裕史[#], 長明彦, 石崎暢洋, 田山豪一, 松田誠, 仲野谷孝充,
中村暢彦, 杓掛健一, 乙川義憲, 遊津拓洋

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

Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 110 days, and delivered 22 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 FY2016. The damaged acceleration tubes by discharge were replaced with the spare tube at the regular maintenance period in March 2016, and the maximum accelerating voltage recovered to the 17 MV. However, an accident of vacuum breaking of all acceleration tubes was occurred in December, and accelerating voltage fell down to under 12 MV. Now, we're doing the maintenance to recover the performance of acceleration voltage. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments of our facility.

1. はじめに

原子力機構の東海タンデム加速器施設には 20UR 型ペル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、後段の超伝導ブースターを利用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。

本報告では、2016 年度の原子力機構－東海タンデム加速器施設の運転・整備状況について報告する。

2. 加速器の利用運転

Figure 1 は 2016 年度における加速器の運転・整備状況である。マシンタイムは 5～7 月と 10～2 月の 2 回に分けて実施した。近年はタンク内整備用ゴンドラの性能検査と加速器の定期整備との間に日程のずれがあったため、タンク開放整備を年に 3 回以上行う必要があった。日程を合わせるべく性能検査を 2015 年度中に 2 回受検したため、2016 年度よりゴンドラ整備が定期整備期間内に実施できるようになり、タンクの開放を 2 回/年に減らせるようになった。タンク開放作業では絶縁ガスとして使用している六フッ化硫黄 (SF₆) を数 Torr までの真空引きにより回収しているが、ごく一部のガスは大気へ放出せざるを得ない。SF₆ は温暖化係数が非常に大きいガスであるため、タンク開放の回数を減らすことは重要であると考えている。また、近年では夏期の節電要請等により、マシンタイムの実施を控えて定期整備に充てている。

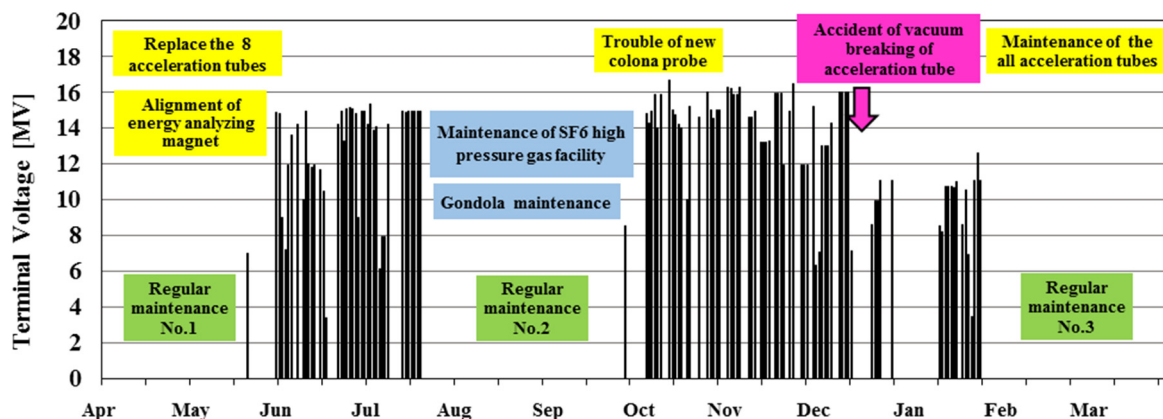


Figure 1: The status of voltage generation and accelerator maintenance in the FY2016.

[#] kabumoto.hiroshi@jaea.go.jp

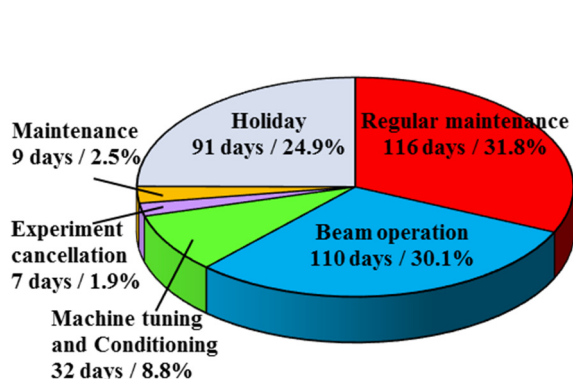


Figure 2: The operation status of the accelerator in the FY2016.

Figure 2 に 2016 年度の加速器の運転状況を示す。タンデム加速器の利用運転日数は、110 日であった。近年は年平均 150 日程度で推移していたが、2016 年 12 月に加速管の真空トラブルが発生したことにより、電圧性能が低下し、中止せざるを得ない実験が発生したため、利用運転日数が減少した。また、加速管の交換作業や電圧性能の診断に日数を要したため、定期整備(116 日)と調整運転(32 日)の日数が増加した。

超伝導ブースターは現在、休止状態となっており、運転は行わなかった。

Figure 3 に加速器の利用分野別の日数を示す。利用分野は核物理関係が 36.0%、核化学関係が 22.5%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利用された。原子物理・材料科学の実験が 37.8%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 3.6%で新規ビームラインへのビーム通過試験や加

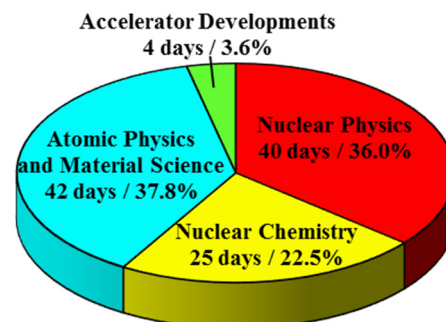


Figure 3: Usage of beam-times in the different research fields.

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 72.1%で大半を占めており、原子力機構単独の研究は 18.9%、施設共用利用は 5.4%であった。

2016 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 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^{18}\text{O}$, ${}^{30}\text{Si}$, ${}^{58}\text{Ni}$ が主として核物理・核化学の実験等に利用された。 ${}^{15}\text{N}$, ${}^{136}\text{Xe}$, ${}^{197}\text{Au}$ は、材料への照射研究等に広く利用された。イオン源の利用割合としては、地上電位に設置された負イオン源(SNICS-II)が 57%、高電圧端子内の ECR イオン源(ターミナル ECR-IS)が 43%であった。

3. 加速器の整備・開発状況

3.1 加速管の交換

2015 年 12 月の加速器運転中に発生した放電等により一部の加速管に不調が生じたため、しばらく加速電圧を 12MV 程度と低く抑えて運転を継続した。2016 年 3 月から 5 月にかけての定期整備で低エネルギー側 Middle-6 セクションの加速管 8 本の交換作業を実施し、10 月以降のマシントイムでは加速電圧は約 17MV まで回復した。しかし、後述するが 12 月に起きた真空トラブルのため、再び加速管に不調が発生し、加速電圧を低く抑えての運転を余儀なくされた。

3.2 エネルギー分析用偏向電磁石のアライメント

定期整備中の 5 月にエネルギー分析用偏向電磁石 (BM 04-1) のアライメントを実施した。この電磁石はタンデム加速器で加速されたビームエネルギーを決定するための重要な機器であるが、以前より電磁石から出射されるビームの横方向位置が中心軸よりずれており、ビームハンドリングを難しくしていた(横方向が X、縦方向が Y で、Y がビームエネルギーを決める偏向方向である)。このずれの原因は電磁石の傾き・回転方向等のずれにあるものと考え、アライメント作業を行った。Figure 5 はエネルギー分析用偏向電磁石の外観とアライメント前後のビームプロファイルである。電磁石のヨークが 1/1000 程度、南へ傾いていたので鉛直になるよう修正した。その後、回転方向がマグネット出入口位置で約 1mm、上から

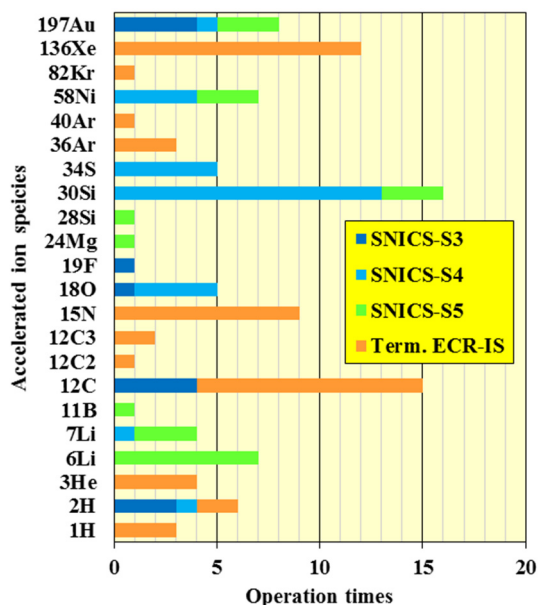


Figure 4: Distribution of accelerated ion beam species for experiments.

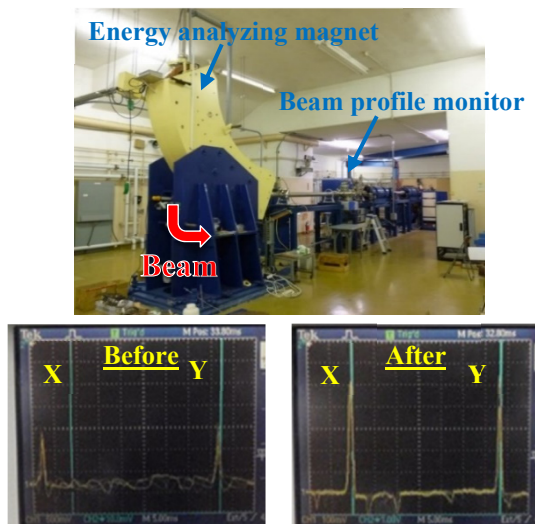


Figure 5: Out view of energy analyzing magnet, and beam profiles of before and after alignment.

見て時計回りにずれていたのを修正し、ビーム軸に合わせた。ビームプロファイルモニターは電磁石出口から約3mの位置に設置されており、以前はX方向で約10mm南へずれた位置にビームが射出されていたが、アライメント後は中心付近に射出されるようになった。

3.3 新型コロナプローブの開発

本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、高電圧端子に向けた針状の先端から流れるコロナ電流を制御することで加速電圧の安定化を行う。旧型のコロナプローブでは挿入位置の調整がモーメント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(マグネスケール読出、パルスモータ制御)とし、0.1mm精度で設定できる新型コロナプローブを開発した。

2016年度より運用を開始したが、コロナ電流が三極真空管に流れなくなり、安定化回路が正常に動作しなくなるトラブルが発生した。これは高圧ケーブル(DC30kV耐圧)と金属性カバーの絶縁が充分でなかったためで、5kV絶縁チェッカーでも放電が確認された。対策としてプラスチック製スパイラルチューブやアクリル板の支持具設置等で絶縁性を高めることにより放電がなくなり、加速器の実運転でも新型コロナプローブの使用が可能となった。

我々は、加速器運転の省力化や迅速なビームエネルギー・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進めており、この新型コロナプローブはその一環である。半自動運転の実現のためには、①加速電圧の連動制御、②光学要素のパラメータを算出するスケールリングプログラムの開発、③光学要素系電源類の高精度化・高分解能化、④高電圧端子内180度偏向電磁石の磁場フィードバック制御等が必要である。本報告の新型コロナプローブは①に含まれ、現在、上記の①②はほぼ完成しており、③についても試験運用をする程度の精度は確保されている。今後は④の180度偏向電磁石電源の更新・磁場制御化等を進め

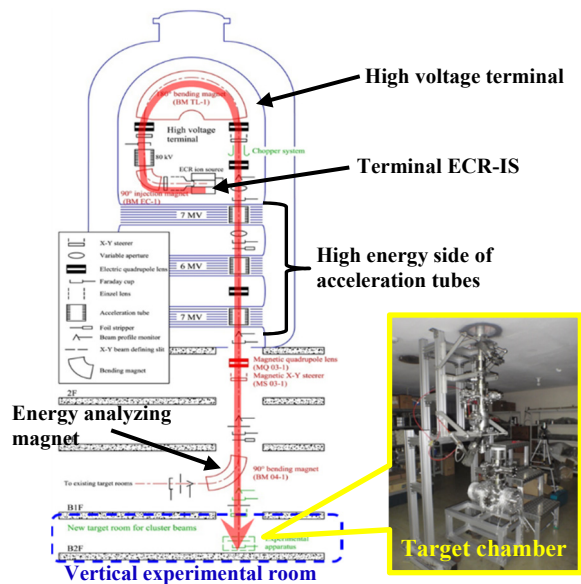


Figure 6: Outline of vertical experimental room.

ることで、加速器の半自動運転を実現させることができると考えている。

3.4 垂直実験室の利用開始

我々は既存のエネルギー分析電磁石で偏向できないような重い分子イオン・クラスタービーム($ME/q^2 > 400$)を加速する計画を進めている。そのためタンDEM加速器直下に「垂直実験室」を整備し、2016年度より利用を開始した。Figure 6は垂直実験室の概要であり、特徴としては以下のようなものが挙げられる。

- 高電圧端子の ECR イオン源からクラスタービームを加速 (シングルエンド方式での加速となり、荷電変換が必要ないため、高エネルギー・高強度クラスタービームが利用可能となる)
- 低価数イオンの利用
- 大電力ビームの利用
- 鉛直方向からの照射により、液体試料などの照射が可能

2016年度には実験用照射チェンバーを整備し、液体ターゲット(液体鉛ビスマースステンレス)による実験を1件行った。現状で引き出し可能なクラスタービーム等の質量の上限は ECR イオン源初段の90度偏向電磁石($ME/q^2 > 0.28$)によるところが大きいので、この90度偏向電磁石を静電偏向器へ更新し、高エネルギー・高強度クラスタービームを実現する計画を立案しており、さらなる利用の拡大を目指していく。

4. 加速管の真空トラブルと復旧作業

4.1 加速管の真空トラブル

2016年12月に加速器の電圧性能が大きく低下する真空トラブルが発生した。これは垂直実験室の照射チェンバー整備中にバルブ操作を誤り、加速管内に大気が混入したためである。加速器は電圧コンディショニング(No.8~13)を行っている最中で

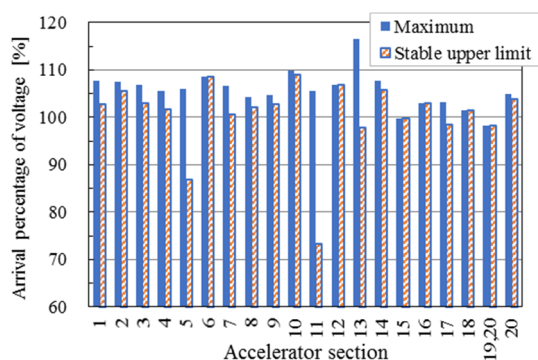


Figure 7: Arrival percentage of voltage of each 1MV units of accelerator.

あったため、フルスパークして停止した。垂直実験室と加速管の間には緊急遮断バルブが設置してあったが正常動作しなかったため、加速管内部の真空が大幅に悪化してしまった。ビームラインに設置されている3か所のカーボンストリッパフォイルの一部が破損し、加速管内に混入した。

トラブル直後に加速器の電圧性能を確認したところ、加速電圧が11.7MV（最大加速電圧の59%）まで低下していた。電圧性能は低下したが、予定されていたマシンタイムのうち、実施可能な実験については対応を行い、2017年2月まで加速器の運転を継続した。

4.2 加速管の診断と整備

加速器の電圧性能を回復させる手法を検討するため、加速管の診断を行った。Figure 7に1MVユニットごとに発生できた電圧を示す。一部のユニットを除き、100%前後（100%：フルカラムで20MVの発生に必要な1MVユニットの電圧性能）であった。本来の性能であれば約120%以上発生できるため、全体的に性能が落ちていることが確認できた。また、フルカラムでは最大電圧が14.7MVで、安定に発生できる電圧は10.1MVであった。状態があまり良くないユニットでは、低い電圧からX線が発生することが多く、放電によりX線が無くなる事象が見られた。このX線発生は主に真空トラブルで破損したカーボンストリッパフォイルの塵等が原因と考えられる。電圧コンディショニングにより、ある程度の電圧性能の回復は可能と思われるが、塵を除かない限り、抜本的な解決にはならないと考えられる。また、電圧コンディショニングにより頻繁に放電が発生すると、放電のエネルギーによりチタン電極の金属蒸気が発生し、加速管のセラミック内壁が汚れて絶縁劣化する可能性がある。以上の理由から、加速管を全数分解し、内部クリーニングを行うことで性能回復を目指すことにした。

2017年2月から加速器タンクを開放し、加速管全数の分解整備を開始した。期間は半年以上かかる見込みである。加速管の全数取外しという滅多にない機会であるため、ビームラインの再アライメントや劣化したイオンポンプ素子の交換、ストリッパフォイル交換等の作業も併せて行うことにした。

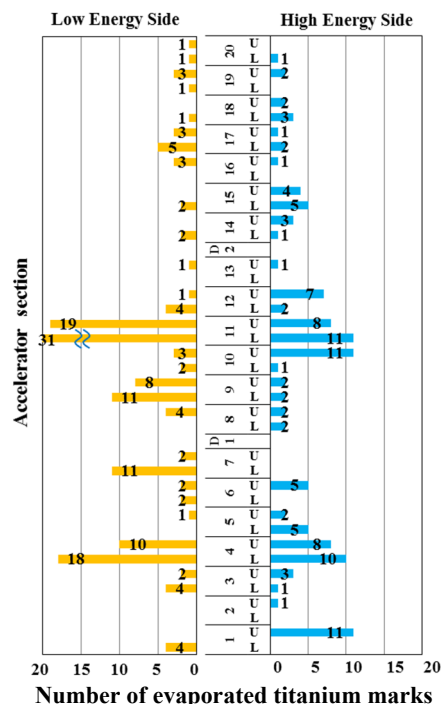


Figure 8: The number of evaporated titanium marks on ceramic of acceleration tube.

4.3 加速管内部（セラミック等）の観察

加速管は基本的にクリーニングをして復旧するが、予備を8本所有しているため、状態が悪いものについては交換を行う予定である。交換の判断基準の一つとするため、ファイバースコープで加速管内部の観察を行った。Figure 8は各セクションの加速管内部の汚れ（主にチタン蒸着痕）の数で、Figure 9は加速管内部の汚れ等の様子である。

LE側11Lの加速管については、内面汚れが多く、電圧性能の診断で安定度が低かった原因と考えられる。HE側5Lには10MΩまで絶縁劣化したギャップ

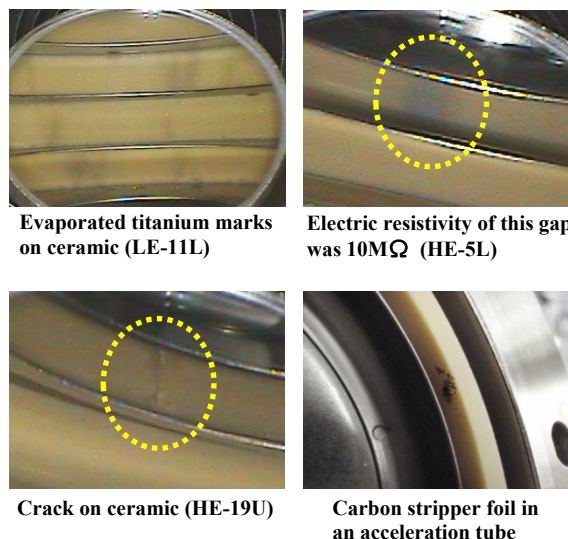


Figure 9: Inner-side view of acceleration tube.

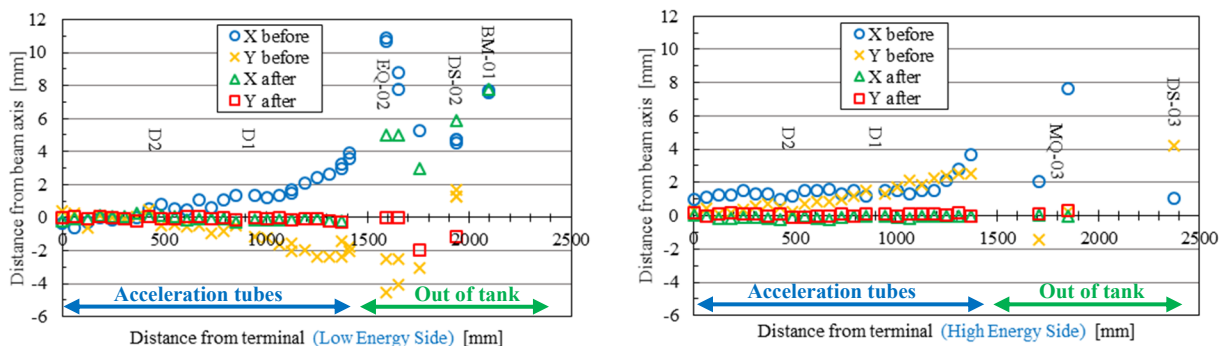


Figure 10: The alignment result of acceleration tubes and beam-line devices.

があり、電圧性能も悪かった。セラミックにヒビが入っている加速管も2本見つかっており（HE側12U、19U）、表面の様子から使用中にセラミックが剥離したものと考えられる。また、カーボンストリッパフォイルの設置場所近くの加速管内部には多数のフォイル層が見られた。

4.4 加速管-ビームラインの再アライメント

最近の加速器運転でビームローディングが発生しやすくなっていたことや、アパーチャーの線量分布の結果から加速管-ビームラインのアライメントを確認することにした。鉛直（縦）方向の測定となるため、天底鉛直器などを用いて作業を実施した。Figure 10は加速管-ビームラインのアライメント測定結果である。ターミナル側機器を基準に鉛直に軸を設定したところ、低エネルギー(LE)側、高エネルギー側(HE)ともに、鉛直ではなく斜めの直線軸でアライメントされていた。また、タンク内と外のビームライン機器の間でもずれが確認され、HE側加速管の出口付近ではタンク内外のビームライン機器間で約5mmのずれが確認された。

今回の整備では可能な範囲で鉛直にアライメントを行うことにした。HE側はタンク外ビームラインまで鉛直にアライメントを行った。LE側はアライメント前の状態ではタンク内外のビームライン機器間でX方向に5~8mm程度のずれが生じていた。このずれを全て鉛直に修正しようとする、地上電位にある負イオン源までアライメントを行う必要が出てくるため、加速管は鉛直にアライメントを行い、タンク外の機器は中間位置とすることにした。加速管への入射は2連のステアラーによりビーム軸を平行移動させて入射する方式を採用することにした。

4.5 加速管の洗浄作業

加速管内に混入した塵の除去については、2003年に加速管を旧型からコンプレソド・ジオメトリ型へ更新した際に施した高圧純水洗浄を用いることにした[3]。これは放電原因となるストリッパフォイル等の微粒子を高圧純水ジェットスプレー等により除去することでコンディショニング時間を短縮し、早期のマシントイム再開を目指すためである。洗浄手順の概要を以下に示す(Figure 11)。全ての加速管(80本)について洗浄処理を施すため、4~5ヶ月を要する見込みである。

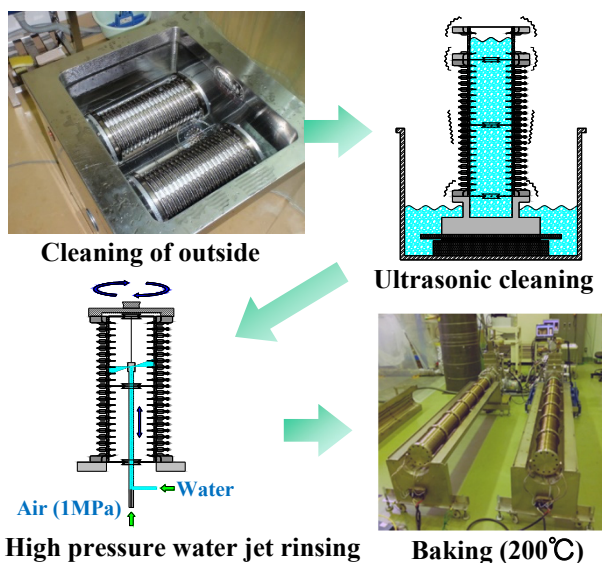


Figure 11: Cleaning procedure of acceleration tube.

- ① 加速管外周の手洗いと超音波洗浄
- ② 加速管内面の超音波洗浄
- ③ 高圧純水ジェットスプレーによる内面の洗浄
- ④ 200°Cの真空ベーキング（約1週間）

5. まとめ

2016年度の加速器の利用運転は110日であり、加速管真空トラブル等の影響で例年よりも減少した。現在、加速器の電圧性能回復のための整備を進めており、早期の運転再開を目指している。また、加速器の技術開発や利用拡大においては、運転の省力化・半自動化に向けた開発や垂直実験室を有効利用したクラスタービームの開発を進めている。今や世界的にも数が少なくなった大型静電加速器の特徴を活かした加速器・ビーム開発を進め、今後もユニークな研究を展開・支援していきたい。

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.