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#), 株本 裕史, 田山 豪一, 仲野谷 孝充, 中村 暢彦,
沓掛 健一, 乙川 義憲, 遊津 拓洋, 松井 泰, 石崎 暢洋, 長 明彦
Makoto Matsuda, Hiroshi Kabumoto, Hidekazu Tayama, Takamitsu Nakanoya, Masahiko Nakamura,
Ken-ichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui, Nobuhiro Ishizaki, Akihiko Osa
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 64 days, and delivered 13 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 FY2017. After the vacuum accident occurred in December 2016 the accelerating voltage dropped to 12 MV. In order to remove dust and broken carbon foil in the accelerating tube, all 80 accelerator tubes were removed and rewashed. It took 4 months for cleaning and 2 months for reassembly. Therefore about 10 months were a maintenance period of an accelerator from February 2017. Along with the reconstruction of the accelerating tube, re-alignment of the accelerating tube was carried out. The operation resumed in December 2017 and it was possible to recover the maximum voltage to 17.4 MV without beam and 16.6 MV with beam with periodic conditioning work. 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。

本報告では、2017 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. 2017 年度の加速器運転状況

2016 年 12 月に発生した真空トラブルにより加速管内に大気が混入した。この事故でビームラインに設置されている 3 か所の荷電変換用カーボンフォイルの一部が破損、またビームダクト内の塵なども同時に混入し、加速器の電圧性能が大きく低下してしまった。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 (59%) まで低下した。2017 年の 2 月から加速管内に混入した塵などを除去するための長期整備を実施した。総数 80 本の全ての加速管を取り外して洗浄し、再組立てを行うため約 10 か月の期間を要した。また全加速管を取り外す機会であるため、加速管のアライメント確認も行った。このため 2017 年度の運転は 12 月後半から再開された。

matsuda.makoto@jaea.go.jp

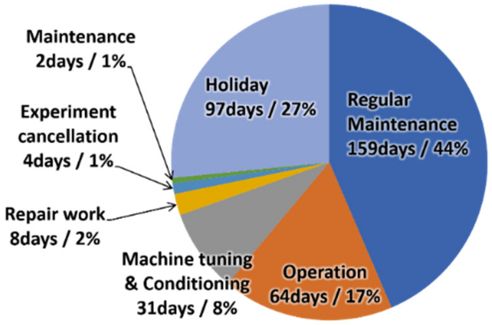


Figure 1: The operation status of the accelerator in the FY 2017.

2017 年度のタンデム加速器の運転状況を Figure 1 に示す。2017 年の 2 月から加速管再生のために長期定期整備を実施したため、定期整備日数が 159 日となった。休日の 97 日はそのほとんどが定期整備期間の休日で占めている。整備終了後、コンディショニング期間を経て、利用運転は 12 月 20 日から再開したが、直後に高電圧端子内の 180° 偏向電磁石の電源内の DAC の故障が発生した。この修理のために圧力タンクを再度開放し修理を行うことになり、その後の利用運転の再開は 2018 年の 1 月 11 日からとなった。この故障修理に 8 日を要した。これらの経緯から 2017 年度の利用運転日数は 64 日となった。

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 47%、核化学関係が 10%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 33%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 4%で主として加速管の再アライメントの効果

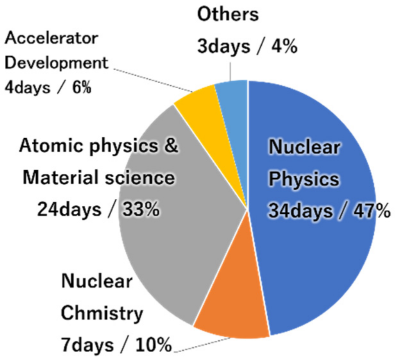


Figure 2: Usage of beam-times in different research fields.

確認などが行われた。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 60%であり、原力機構単独の研究は 22%、施設共用利用は 12%である。利用分野、利用形態はほぼ例年通りであった。

2017 年度に利用された加速イオン種を Figure 3 に示す。昨年度から高電圧端子内の ECR イオン源から ^{4}He の加速を開始した。この ECR イオン源からのビーム利用が全体の 6 割ほどであった。

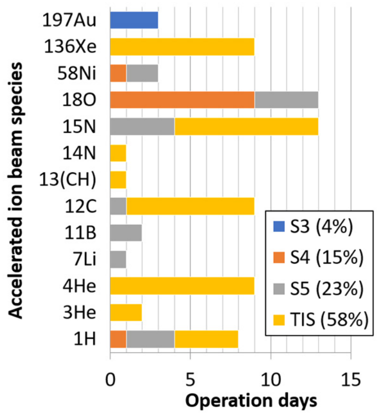


Figure 3: Distribution of accelerated ion beam species for experiment.

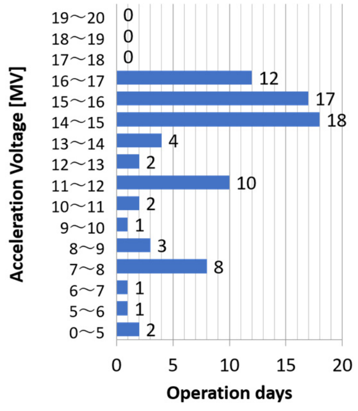


Figure 4: Distribution of acceleration voltages for experiments.

Figure 4 は 2017 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 16.6MV であった。2016 年の真空トラブル以降の加速電圧は 11.7MV まで低下していたが、加速管の再生作業により 15MV 以上の利用運転を再開することができた。

タンデム加速器で加速されたイオンビームのエネルギーを増強する超伝導ブースターは、ヘリウム冷凍機の廃止措置を行い、今後運転は行わないこととなった。

3. 加速管の復旧作業

3.1 加速管の真空トラブル

2016 年 12 月に発生した真空トラブルにより加速器の電圧性能が大きく低下した。原因は垂直実験室のビームラインの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中であった。加速管内の真空が大幅に悪化し、ビームラインに設置されている 3 か所の荷電変換用カーボンフォイルの一部が破損し、加速管内に混入した。

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%）まで低下した。

3.2 加速管の診断と整備概要

性能の低下した加速管の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。全 20 ユニットの加速管を 1 ユニットごとに分割し、各ユニットの到達電圧を測定した。本来であれば定格の 120%ほどの電圧まで安定に発生できるはずであるが、一部のユニットを除き、約 1MV（100%前後）程度までしか到達できなかった。低い電圧から X 線を発生することが多く、放電により X 線の発生が無くなる事象が多く見られた。このような X 線発生の状況から主に真空トラブルで破損したカーボンフォイル屑やビームラインの塵等が多くの加速管に混入したことが原因と考えられる。

全ユニットを使用するフルカラムでも最高到達電圧が 14.7MV で、安定に発生できる電圧は 10.1MV であった。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、混入した塵を除去しない限り、抜本的な解決にはならないと考えられた。また、電圧コンディショニングにより放電が発生すると放電によりチタン電極の金属蒸気が発生することがある。これが頻繁に起こると加速管内壁のセラミクスに蒸着され絶縁が劣化する可能性がある。そのため通常の加速管の再生においては加速管内壁にサンドブラスト処理を実施しチタンの蒸発痕などを除去している。

しかし、一方で、貴重な RI 試料であるアインシュタイニウム（原子番号 99、半減期 276 日）標的を用いた研究が 2018 年から開始されることとなった。このため 15MV を越える電圧での早期の運転再開が望まれたため、加速管を全数取り外し、内部洗浄のみを行うことで、性能回復を目指すこととした。

2017 年 2 月から加速器タンクを開放し、加速管全数の取り外し、再洗浄、再組立てを行う作業を開始した。加速管の全数取り外しという滅多にない機会であるため、加速管の再アライメントや劣化したイオンポンプの再生、ストリッパーフォイルの交換等の作業も併せて行うことにした。

マシンタイムを終了した 1 月後半に 1 ユニットごとの加速管の診断を行い、2 月初旬に圧力タンクを開放し整備を開始した。2 月末から 3 月中頃まで加速管の取り外しを行った。加速管の再洗浄は 4 月後半から 8 月中頃まで 4 か月ほど要し、その間加速管の再アライメントや、不具合イオンポンプの再生、ストリッパーフォイルの交換を実施した。8 月後半から 1 月半で加速管の再組立てを行い、取り付け後のベーキングを実施して、11 月中旬に全作業を終了した。以降に、各作業についての詳細を記す。

3.3 加速管内部の観察

加速管は基本的に再洗浄して復旧するが、状態の悪いものについては予備加速管に交換を行う。交換の判断基準のため、加速管内部のセラミクスの状態をファイバースコープで観察した。Figure 5 は各セクションの加速管内部の汚れ（主にチタン蒸着痕）をある基準で計数したものである。高エネルギー（HE）側 5L には 10MΩまで絶縁劣化したギャップがあり、電圧診断の結果も悪かった。よって加速管内壁のセラミクスの汚れ具合と電圧性能には相関があると考えている。また加速管内壁のセラミクスにヒビが入っている加速管が 2 本（HE 側 12U、19U）見つかっており、表面の状態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、ストリッパー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屑が見られた。Figure 6 に加速管内部の汚れやヒビ、フォイル屑などの写真を示す。

3.4 加速管アパーチャーの残留放射線測定

加速管には、加速管同士を接続するフランジ部と加速管の中央部に直径 25mm のチタン製アパーチャーが取り付けられており、アパーチャーの放射線測定を NaI サーベイメータで行った。結果を Figure 7 に示す。低エネルギー（LE）側の加速管アパーチャーには放射化は確認されなかった。LE 側ではビームエネルギーが低く、かつビームも良く収斂されているためと考えられる。HE 側では加速管中央部のアパーチャーおよびフランジ部のアパーチャーに放射化が確認された。ビームエネルギーの高い加速器の出射側や、ビーム広がりの大きなデッドセクション部で線量が高くなっている。最もエネルギーの高くなる HE 側の出口ではなく、その手前の 1～2MV ユニット部のアパーチャーが高線量であるが、この原因は後述する加速管のアライメントのずれが原因であると考えている。アパーチャーを取り外した加速管本体には放射化は見られなかった。

取り外した加速管フランジ部のアパーチャーを Ge 検出器により測定し生成核種を調べた。最も線量の高かった HE 側 1.5MV 位置のアパーチャーのガンマ線スペクトルと、放射化の原因と考えられる最近の利用ビームを Figure 8 に示す。主な生成核種は ^{46}Sc、^{48}V、^{51}Cr、^{54}Mn、^{56}Co、^{58}Co、^{60}Co、^{75}Se であった。また核種ごとに加速管の放射化分布が異なっており、運転時のビーム軌道の違いや、通過するビームエネルギーによるものだと考えている。

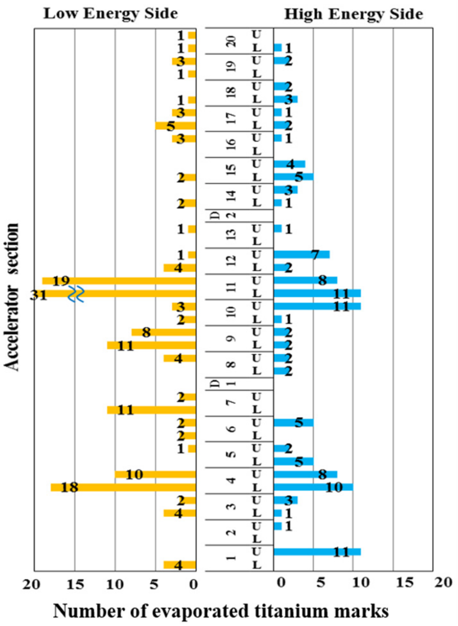


Figure 5: The number of evaporated titanium marks on ceramic of acceleration tube.

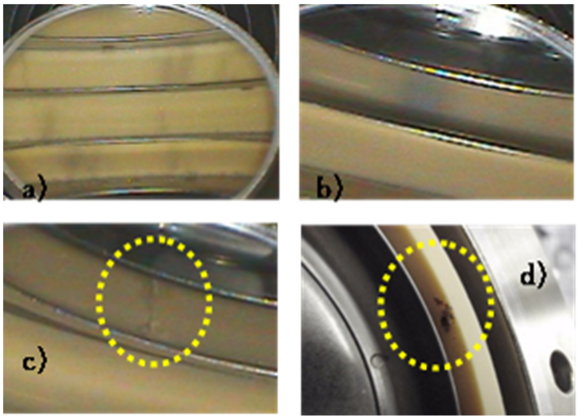


Figure 6: Inner-side view of acceleration tube.

a) Evaporated titanium marks on ceramic (LE-11L)
b) Electric resistivity of this gap was 10MΩ (HE-5L)
c) Crack on ceramic (HE-19U)
d) Carbon stripper foil in an acceleration tube

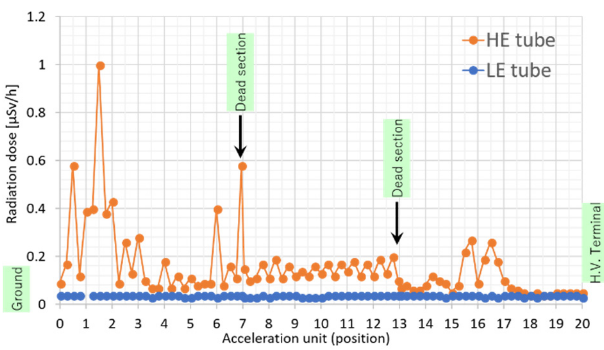
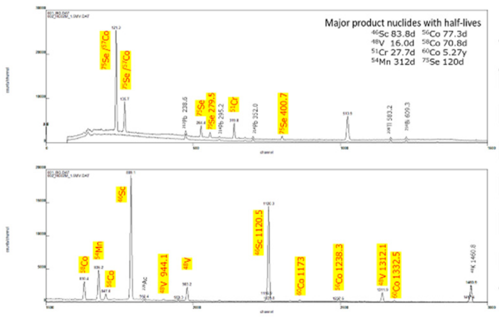


Figure 7: Dose distribution of the aperture of the removed acceleration tube.



ion	Energy [MeV]	Time [day]
p	4-7	3
d	30-32	4
^{6,7}Li	52-60	11
^{11}B	73	1
^{12}C	75-77	4
^{15}N	90	7
^{16}O	144-148	5
^{19}F	117	1
^{24}Mg	132	1
^{30}Si	140-200	16
^{34}S	190-220	5
^{36}Ar	180-195	3

Figure 8: Gamma ray spectrum of the aperture of 1.5 MV unit on the HE side with a large dose rate, and recent used ion beams.

3.5　加速管およびビームラインの再アライメント

最近のビーム加速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、Figure 7 に示す加速管アパーチャーの線量分布の結果から加速管および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 9 は加速管及びビームラインのアライメント作業前の測定結果である。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。この原因として 2007 年のターミナルイオン源の設置によるターミナルの重心移動や 2011 年の東日本大震災により、2003 年の加速管更新時と現在とでターミナル位置が 5mm 程度ずれたのではと考えている。このわずかな加速管の鉛直軸からのずれはビームハンドリング上、特に問題なかったと考えている。しかし HE 側加速管の出口部（Figure 9 中の〇部）で加速管が大きく曲がっていることが確認された。また加速管とタンク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 5～10mm のずれが確認された。このことから Figure 7 に示す加速管出射部での異常な線量分布の原因と考えられ、再アライメントを実施することにした。

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 側はタンク外の鉛直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と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、このずれの修正は見送り、加速管のみ鉛直にアライメントを行うことにした。加速管への入出射は 2 連のステアラーによりビーム軌道を平行移動させて入射する方式を採用することにした。

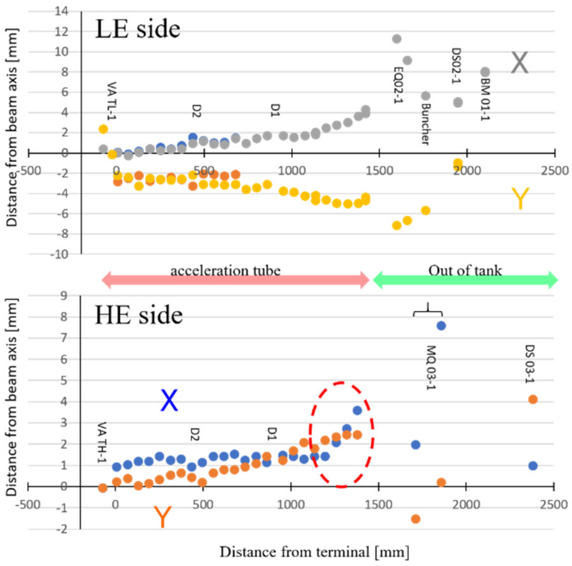


Figure 9: The result of alignment measurement of acceleration tubes and beam-line devices.

3.6　加速管の再洗浄作業

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スド・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]。当時この手法を用いることで加速管の更新直後にも関わらず 1 週間で 16MV（80%）の加速電圧を達成できた実績がある。今回は放電原因となるストリッパーフォイル等の汚れ微粒子を高圧純水洗浄等により除去し、早期のマシンタイム再開を目指した。Figure 10 は実際の作業の様子である。

一連の洗浄作業は加速管の外周の洗浄、内部の超音波および高圧超純水洗浄、乾燥処理、約 10 日間の真空ベーキング（200℃）となる。洗浄から乾燥処理までは 1 日に 6 本程度で進捗できた。加速管の数が 80 本と多いが、真空ベーキングは一度に 12 本までしか実施できないため、ベーキング時間を律速として 2 週間程度で 12 本を処理するという作業工程となった。なお、一部の加速管およびアパーチャーは放射化物となるが、洗浄により放射性物質で汚染されないことを確認して本洗浄を行った。洗浄後、ベーキング処理された加速管は 6 本組で再組み立てまで一時保管した。全ての加速管の洗浄作業が終了したのは 8 月中頃となった。

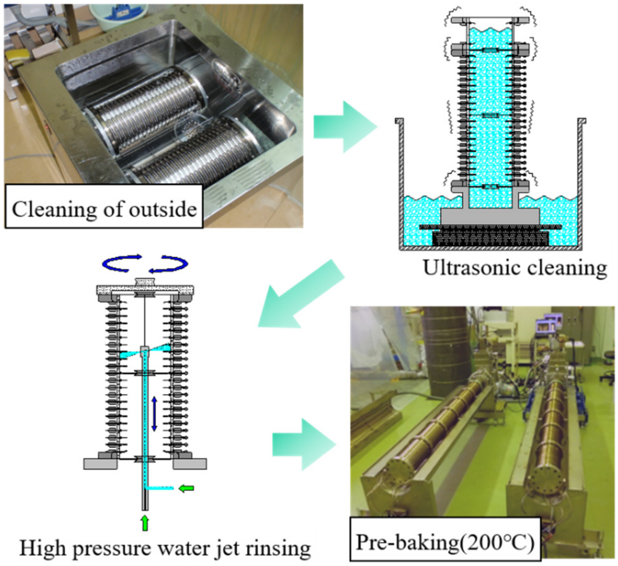


Figure 10: Cleaning procedure of acceleration tube.

3.7 加速管の再組立て

8月後半から加速管の再組立てを開始した。組み立てに際し絶縁カラムに HEPA フィルターを装着し清浄な環境で作業を行うことにした。再組立てに要した日数は準備期間も含め32日であった。フランジを接続する真空ガスケットは全てアルミ線を用いた。2003 年の加速管更新時には一部の真空ガスケットに金線を用いたが、ベーキングによりリークを発生しやすかった経験がある。また加速管フランジを締結する全てのボルト及びナットを洗浄後、グリースを塗布してかじりつきを防止し確実に適正トルクで締結するようにした。

全加速管の取付が完了したのちに内部を 0.1 気圧に加圧し大きな漏れがないことを確認した。その後、加速管の真空引きを開始した。これらの処置の結果、100 ヶ所ほどの加速管フランジの接合部に対し、発生したリーク箇所は1ヶ所のみであり、増し締めで回復できた。2003 年の加速管更新時は 20 数か所でリークが発生しこの対応に 3 週間ほど要したことから、ボルト類の処理は有効であったと言える。

組み上げた加速管は組立て時の水分の吸着を除去するため120℃で1週間の真空ベーキング処理を施した。

3.8 電圧回復状況

11 月後半に加速器の整備が終了した。その後、当初11.7MV であった電圧が、約2週間の電圧コンディショニングを行った結果、16.8MV まで回復し、利用運転を再開することができた。その後 1 月毎に 4 日間のコンディショニングを行うことで 17.4MV まで回復させることができた。

4. 加速器の整備

2017 年度に実施した、加速管の再洗浄以外の主な整備項目について記す。

4.1 D2 デッドセクションのイオンポンプの再生

東海タンデム加速器は20ユニットの絶縁カラムを垂直に積み上げた構造をしているが、下から7番目および13番目にはデッドセクションと呼ばれるユニットが存在する。このデッドセクション内にはイオンポンプやファラデーカップ、静電四重極レンズなどの機器が収められている。今回の整備では下から13番目の D2 セクションのイオンポンプの排気能力がほぼ失われていることが分かったので素子交換を実施した。使用期間は35年ほどである。

デッドセクション内のイオンポンプを取り出すのは初めてのことであり、その設置された場所の高さは約 10m、かつゴンドラ上でその作業を行わなければならないため、専用治具を製作し慎重に作業を行った。(Figure 11)

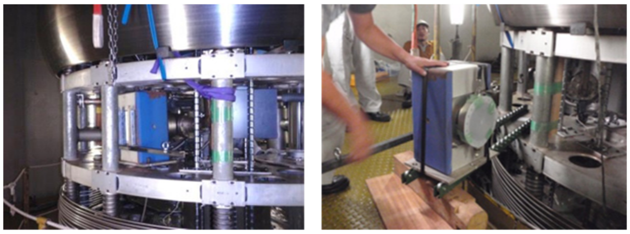


Figure 11: Removal of ion pump from dead section.

取り外した素子は吸着板に穴があくほど損耗しており、予備の素子に交換した。

4.2 高電圧端子内 180° 偏向電磁石電源の修理

整備後、利用運転を開始して数日で高電圧端子内の偏向電磁石の電源に異常が発生した。症状は電流の制御が約8A おきに追随しない領域が生じていることであった。このまま利用運転を行うことは困難であるのでタンクを開放し修理を行った。電源に内蔵された 20bit DAC のリレーの接点が 1 ヶ所固着していることが原因であった。固着した水銀リレーを交換し、利用運転を再開した。

5. まとめ

2017 年 2 月から約 10 か月をかけて加速器の電圧性能を回復させるべく、加速管の再洗浄を行う長期整備を実施した。加速電圧は洗浄前の 11.7MV から 17.4MV まで回復させることができ、加速管内に混入した塵が電圧低下の主原因だったと考えている。しかし、加速管内壁の多数の蒸着痕(今回のトラブルとは無縁なものもあるが)は残ったままであり、今後の電圧性能の向上に影響するものと考慮している。

実質1月からの運転再開により2017年度の加速器の利用運転は64日となった。無事に電圧性能が16MV 付近まで回復させることができ、原子力機構のプロジェクトであるアインシュタイニウム標的を用いた実験を遂行することができた。このような RI や核燃料を標的としたユニークな実験を推進するためにも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.