

原子力機構－東海タンデム加速器の現状

PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

杵掛健一[#], 松田誠, 中村暢彦, 石崎暢洋, 株本裕史,
乙川義憲, 遊津拓洋, 松井泰, 中川創平, 阿部信市

Kenichi Kutsukake[#], Makoto Matsuda, Masahiko Nakamura, Nobuhiro Ishizaki, Hiroshi Kabumoto,
Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui, Sohei Nakagawa, Shin-ichi Abe
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 136 days, and delivered 22 different ions, and maximum acceleration voltage was 15.4 MV in FY2022. The main experiments performed in our facility are in the research fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics, solid state physics and radiation effects in material. At the regular maintenance period, we carried out the maintenance of the infrared communication apparatus used for the communication with the high voltage terminal. During the period from January 10th to February 7th, we repaired the turbo molecular pump used in the high voltage terminal, and repaired the fire hydrant plumbing. This paper describes the operational status of the accelerator 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 正イオン源[2]により、陽子(H)からビスマス(Bi)までの約 50 元素の多様なイオンを 5～500 MeV のエネルギーまで加速することが可能である。現在、超伝導ブースターはヘリウム冷凍機を廃止し、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照射室を有しており、この特徴を活かして 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、核化学の実験を 2017 年度から開始している。本稿では 2022 年度の運転・整備状況等について報告する。

2. 加速器の運転・整備状況

2.1 2022 年度の運転・整備の概要

Figure 1 は 2022 年度の東海タンデム加速器の毎日の加速電圧の発生状況および施設の稼働状況である。

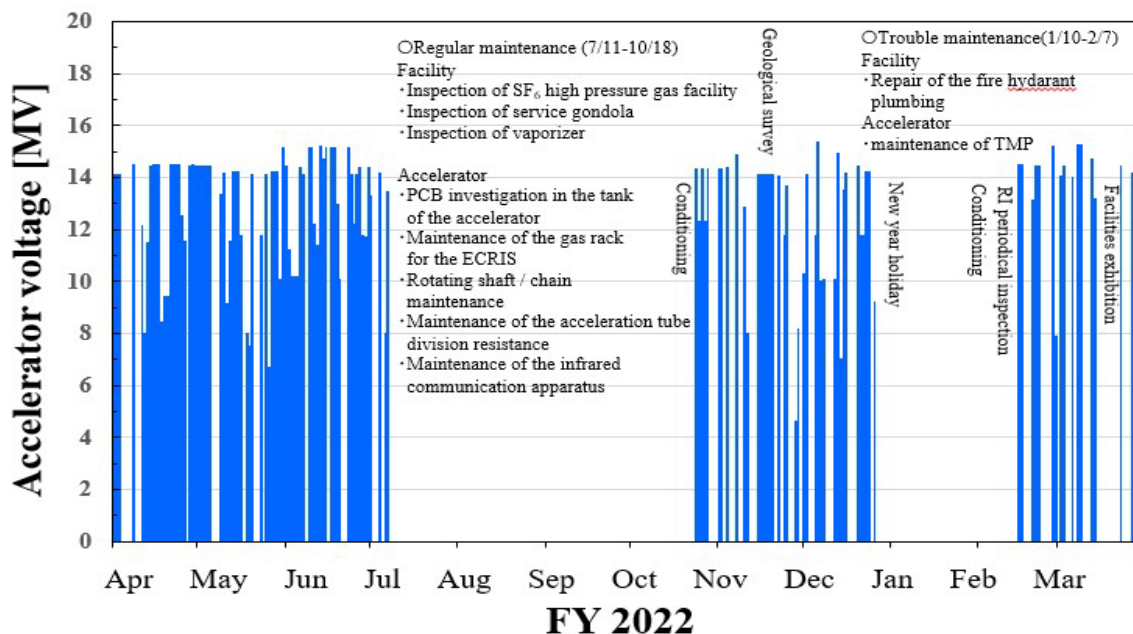


Figure 1: Daily accelerating voltage and operation status in the FY 2022.

[#] kutsukake.kenichi@jaea.go.jp

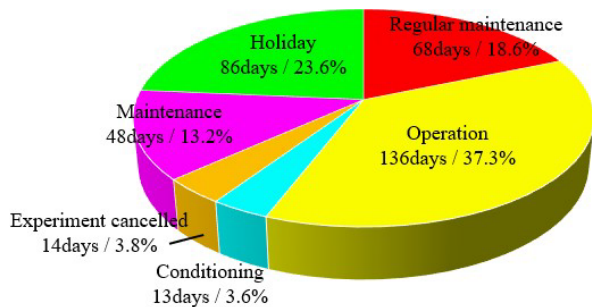


Figure 2: Operation status of accelerator in FY2022. Accelerator operation was 136 days.

2022年度は4月から7月にかけて加速器の運転を行った。定期整備は2022年7月から10月にかけて1回実施した。以前は定期整備を年に2回から3回行っていたが、近年、加速器の高電圧カラム内の発電用回転シャフト軸受けユニットの改良により、その寿命が大幅に改善し加速器の連続運転が可能になった[3]ことで、長期の連続運転が可能になり、定期整備の回数を年1回とし、施設をより有効に活用できるようにしている。2022年度は、2023年1月にタンク内ターボ分子ポンプの故障修理を行ったため、タンク開放を伴う整備は2回となった。

定期整備では、毎年、実施する項目として、六フッ化硫黄(SF₆)高圧ガス製造施設の定期自主検査、タンク内整備用ゴンドラの定期検査、ベーパーライザーの定期検査を行った。加速器の整備関係では、ターミナル赤外線通信機器の整備、動作不安定となっていたタンク内イオンポンプの素子交換、耐電圧性能が低下した加速管のギャップを短絡または抵抗値を下げる処置などを行った。

定期整備後、10月24日から12月26日まで加速器の利用運転を実施した。年明け後、2023年1月の建家消火栓水配管の補修の実施に合わせタンク内ターボ分子ポンプの故障修理を行った。

2.2 2022年度の利用状況

Figure 2に運転・整備日数を示す。利用運転日数は136日、定期整備の日数は68日と例年並みであったが、保守日・故障修理の日数は48日となり、昨年より36日増加した。これは、タンク内ターボ分子ポンプの故障修理などでタンクを開放しての臨時整備を実施したことが主な理由である。

実験中止は14日であった。主な理由は、加速器の放電によるデコンディショニング(加速電圧の不調)、加速器機器・実験装置の不具合などによるものである。

Figure 3に利用分野別の割合を示す。核物理が52日(38.5%)、核化学が23日(17.0%)、材料照射・原子物理が49日(36.3%)、加速器開発が7日(5.2%)であった。当施設では、2017年度から希少な超ウラン元素であるアインスタイニウム(元素記号Es、半減期276日、99番元素)を数マイクログラムの微量で入手して標的を作成し、実験を行っている。そのため、近年では核物理・核化学の利用割合が増加傾向になっている。また、非密封RIが利用できる実験室の利用が全体の約5割であった。国

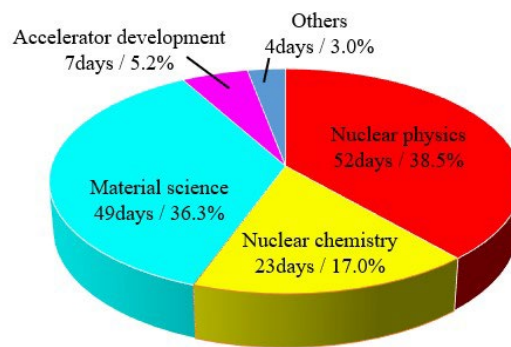


Figure 3: Usage of beam-times in different research fields in FY2022.

際原子力人材育成イニシアティブ事業の利用運転を3日間実施した。

Figure 4にイオン種別の利用日数を示す。当施設では地上電位にある3台のセシウムスパッター型負イオン源(SNICS-2)と、高電圧端子内にある1台のECR正イオン源(Super-Nanogan)を使用している。イオン種としては、陽子(¹H)から金(¹⁹⁷Au)まで17元素22種が利用された。イオン源の利用割合は、負イオン源(NIS)が約48%、ターミナル ECR イオン源(TIS)が約52%となった。ヘリウム(⁴He)や鉄(⁵⁶Fe)の利用が例年より増えたため、TISの利用割合が増加した。

Figure 5に加速電圧別の利用日数を示す。加速電圧3.5 MVから15.4 MVまでの利用となった。放電の頻発による加速電圧の低下のため、近年は16 MV以上での実験利用が実施出来ていない。加速管の計画的な再生処理や新品への更新などを検討している。

3. 加速器の整備関係

2022年度の定期整備は7月～10月に1回実施した。また臨時的故障整備を2023年1月～2月に実施した。主な整備事項について以下に記す。

3.1 ターミナル赤外線通信機器の故障

2022年10月6日に加速器タンク内機器の動作試験を行った際、ターミナル部の制御系通信エラーが多発した。制御系エラーが断続的に発生しており、エラーが発生しているときにしか原因調査を実施することができないため、原因調査は難航した。赤外線信号の正常時の波形と通信エラー時の波形をFig. 6に示す。

当施設では加速器タンク内機器の制御のため赤外線を用いて加速器タンク外との通信を行っている。通信エラーの原因調査では、ターミナル部の通信に使用している赤外線機器の光軸のズレ、レンズの汚れ、アンプの不良などの調査を実施していたが、過去にレンズ汚れで同様の通信エラーが発生した経験から、赤外線信号の発光または受光強度が低下したために断続的なエラーが発生すると思った。不具合機器の特定のため、複数枚のOHPシートで赤外線通信の窓を覆って人為的に光量を制限することで劣化傾向にあった機器を特定し、ターミナル内からタンク外への信号強度が弱いことを特定した。

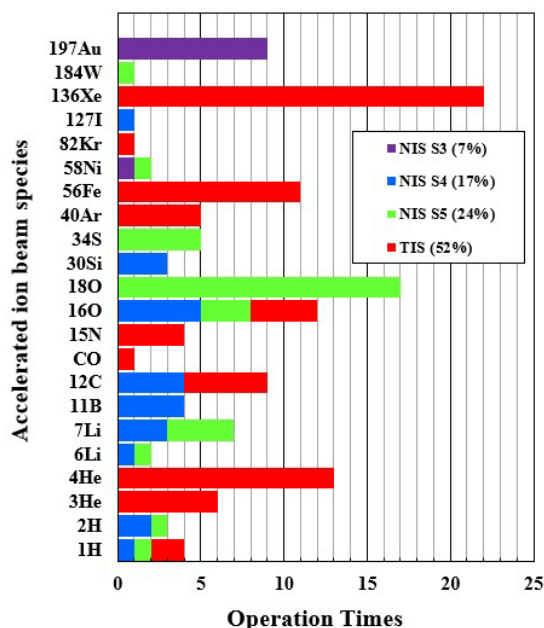


Figure 4: Distribution of accelerated ion beams species for experiment in FY2022.

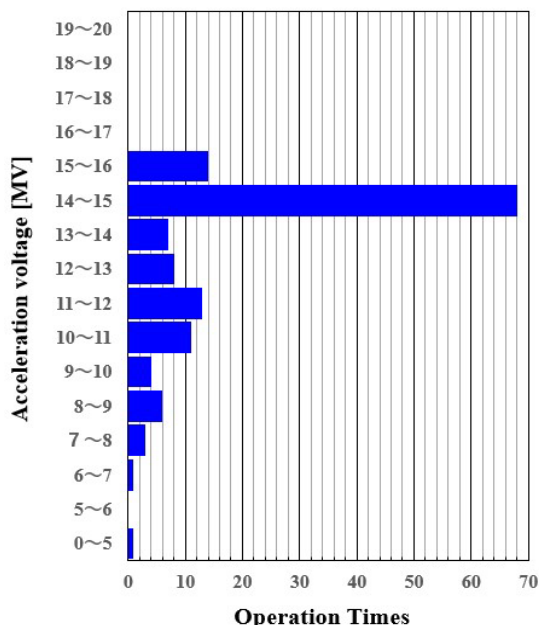


Figure 5: Distribution of acceleration voltages for experiment in FY2022.

タンク内の通信機器(送信部)のトランスミッター素子とレンズの交換を行い、ターミナルとの通信が正常に戻った。

3.2 タンク内ターボ分子ポンプ制御回路の故障

2022年12月20日からTISのターボ分子ポンプが正常に動作しなくなってしまったため、タンクを開放して修理を行った。故障の原因は、ターボ分子ポンプ制御回路の電源供給ラインにある機械式のハーメチックリレーの接点不良であった。

故障したリレーは1極当たり10Aの大容量のリレーであり、約0.5MPaに加圧されたSF₆ガス中で使用できる同等品が直ぐに手に入らなかったため、タンク内で使用実績のある機械式ハーメチックリレー(オムロン製、MY4ZH、1極当たり3A)を4極並列接続して、電源供給ライン1相にリレーを1個、計3個を使用してターボ分子ポンプ制御回路の電源供給部の改造を行った。Figure 7に故障し

たリレーと代替に使用したリレーの外観写真を示す。

タンク内で使用できるリレーには、今回の故障で代替品として使用したハーメチックリレーの他、半導体リレーやハイブリッドリレー(開閉はトライアックを使用し、通電はリレー接点を使用する方式のリレー)があるが、入手に要する時間とターボポンプ制御回路内のリレーを設置できるスペースを考慮して、上記のような修理方法を実施した。修理後、ターボ分子ポンプは正常に作動した。

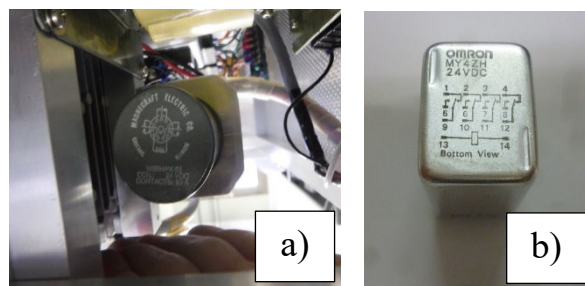


Figure 7: a) Mechanical relay that deterioration of the contact occurred. b) Hermetic relay used as a replacement.

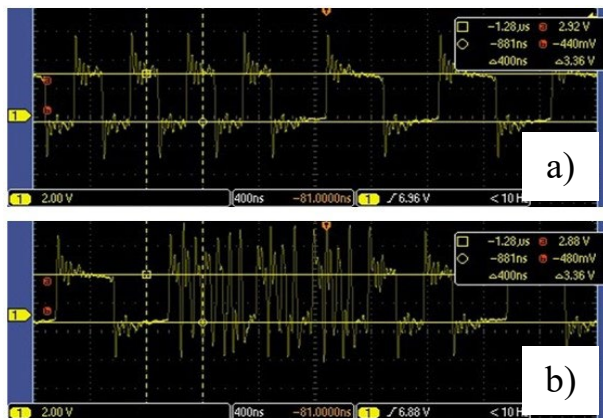


Figure 6: a) Normal wave form. b) Wave form at the time of the communication error.

3.3 ターミナル部のイオンポンプの素子交換

加速器運転中に度々瞬間的な真空悪化が発生するなどターミナル部に設置されているイオンポンプ(IP TL-2)の動作不安定が見られたため、定期整備においてイオンポンプの動作不安定の原因調査を行った。調査中にイオンポンプに高電圧が印加できなくなったが、イオンポンプ内部にチタンのスパッタ層が張り付いたことが原因と考えられたため、強制的に大きな電流を流してスパッタ層を焼き切ることを実施し、一時的に動作が復旧した。しかし、何度かイオンポンプへの高電圧の投入、切

断を繰り返したところ、再度、高電圧を印加できなくなり、上記と同様のスパッタ層を焼き切る対応では状況が改善しなかったため、イオンポンプの分解整備を実施することとした。内部観察の結果、チタン板の亀裂、スパッタ層が少量確認できたが、イオンポンプに高電圧が印加できない直接の原因は分からなかった。内部クリーニング、イオンポンプ素子交換、素子の取り付け金具の改造、真空ベーキング(約 200 °C、合計 17 時間)などを実施し、現場に復旧した。

近年、加速器タンク内のイオンポンプにおける瞬間的な真空悪化などの動作不安定が増加している。これは、TIS で⁴He を長期間使用したことによって真空中に残留する He の量が多くなったことが原因と考えている。当施設は、現在の TIS に更新する前のデュオプラズマトロンイオン源をターミナルに搭載している頃から、イオンポンプでは He を排気できないため、He リークテスト時のバックグラウンドが上がってしまい整備性が悪くなるという理由で He の加速は禁止していた。2008 年度から実験者側の強い要望により、リークテストに影響しない極微量の³He 加速を試験的に開始した。その後、ガスの配合やガス圧を変更してきた。2018 年度からは⁴He²⁺加速の要望に対応するために⁴He 単独のガスボトルに変更し、充填圧も 0.3 MPa abs に増加させた。これにより、真空中の⁴He 分圧が大きく増加し真空中に残留する⁴He 量が多くなったこと、また、1 か月間ほぼ連続的に⁴He を使用したことが原因で近年のイオンポンプの動作不安定が発生したと考えられる。

現在は、⁴He のガス圧を低くするとともに⁴He の実験利用を制限することでタンク内イオンポンプの不安定動作は収まっている。今後は、He ビーム供給を負イオン源(アルファトロス等)からに切り替えることを検討している。

3.4 加速管分割抵抗の整備と最高加速電圧の推移

定期整備において絶縁劣化した加速管のギャップを短絡又は抵抗値を下げる処置を行った。当施設は、1 MV を発生するユニットが 20 段積み重なっており、No.3 ユニットとは下から 3 段目を表す。各ユニットには上下合わせて 2 本の加速管で構成されている。処置を行った加速管は低エネルギー側の No.3 上下と No.5 下、高エネルギー側 No.5 上の 4 本の加速管である。整備後の利用運転期間の 12 月に 2022 年度の最高加速電圧 15.4 MV での運転を実施した。加速電圧は、加速管抵抗整備前より多少の改善はみられたものの大幅な電圧性能回復には至らなかった。

2022 年度の整備で分割抵抗の整備を行った低エネルギー側加速管の No.3、No.5 ユニットは、2020 年度と 2021 年度に 2 年連続で加速管交換を実施しており[4]、2021 年度の加速管交換後、一度は 17.6 MV まで電圧上昇を確認したが、その後の加速器運転中に放電が幾度か発生したため、2022 年度の定期整備までの期間、最大加速電圧を 15 MV 程度として運転を継続していた。

タンデム加速器の最高加速電圧の推移を Fig. 8 に示す。2003 年に加速管を全数更新し、18 MV 超での運転を実現したが、2016 年度に加速管内に大気が混入する真空トラブルが発生し、それ以降 17 MV 以下での運転となっている。加速電圧回復のため、2017 年度に加速管を全数取り外して高圧純粋洗浄と超音波洗浄を実施し

て加速管内に混入した塵を除去したが、加速管の内部監察ではセラミックス部に蒸着した金属膜は残ったままであった。この金属膜が加速管の絶縁劣化の主な原因と考えている。2003 年に現在の加速管(コンプレッド・ジオメトリ型)に更新してから約 20 年経過しており、セラミックス表面が全体的に蒸着跡などで汚れてきている可能性がある。今後は、計画的な加速管の再生処理(サンドブラストによる金属蒸着膜の除去)や新品への更新などを検討している。

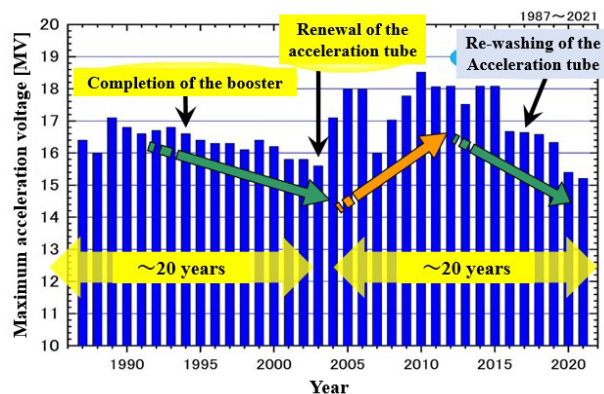


Figure 8: Transition of the maximum acceleration voltage from 1987 through 2021.

4. 加速器の開発関係

当施設は 1 MV のユニットが 20 段直列に積み重なって 20 MV の高電圧を発生する静電加速器である。現在は合計の電圧を GVM(Generating Volt Meter)という回転電圧計を用いて測定しているが、1 MV カラムユニットの個別の電圧を測定する手法の開発を進めている[4, 5]。カラムユニット毎の電圧を測定することで、不具合カラムユニットの検出が可能となる。また、イオンビーム加速時の電圧変化を測定することで、ビームロス発生箇所の特特定、放電の予兆を捉えることができ、静電加速器の加速電圧の維持・向上の一つの解決策を提示することができると考えている。

カラム電圧測定器の概要を Fig. 9 に示す。これまでにプロトタイプ 1 台を設置し、電圧変化がきれいに測定できることを確認した。しかし、加速器の放電によるサージで測定器が故障することが問題であった。対策として、測定部・電気回路部へのフェライト及びアモルファスノイズ抑制素子の追加、カラム電圧測定器を密閉構造とすることによりサージに対する強化を行った。これにより放電によるサージで故障することは無くなったが、密閉構造としたために真空引きによる減圧、SF₆ ガスによる加圧で出力値にオフセットが発生してしまい、出力電圧が電源電圧で飽和してしまうことが分かった。このオフセットを無くすために、2022 年度の整備で密閉構造とした電圧測定器にφ10 mm ガス抜き穴開け加工を 2 箇所に行った。プロトタイプと穴開け加工をした電圧計を加速器の 1 段目に設置してカラム電圧を測定した結果を Fig. 10 に示す。穴開け加工をしたことでカラム電圧測定器の出力電圧が電源電圧で飽和することは無くなったが、まだオフセット

が 6 V 発生しており、出力に個体差が出てしまった。ガス抜き用の穴のサイズを大きくするか、穴の数を増やせば、出力に個体差が出てしまう問題は解決できると考えている。

今後は、上記課題を克服するためのガス抜き穴開け加工方法の見直しを行う予定である。また、カラム電圧測定器の設置想定場所は、加速器の高電圧上にあり、現在は電力供給機構や通信機器がない。そのため電力供給機構の開発が必要であり、バッテリーの使用、または新たな発電機構の検討を進めていく。

通信機器については、プラスチック光ファイバ (POF) による LAN を使用したシステムの構築を目指して開発を進めている。LAN を使用したタンク内通信システムの概要を Fig. 11 に示す。この LAN 通信のシステムをタンク内機器の監視カメラ、振動計、温度計やその他の測定機器類にも応用し、タンク内機器の異常などを早期に検知できるようにしていくことで、安定的に定期整備の年 1 回化の実現を目指している。

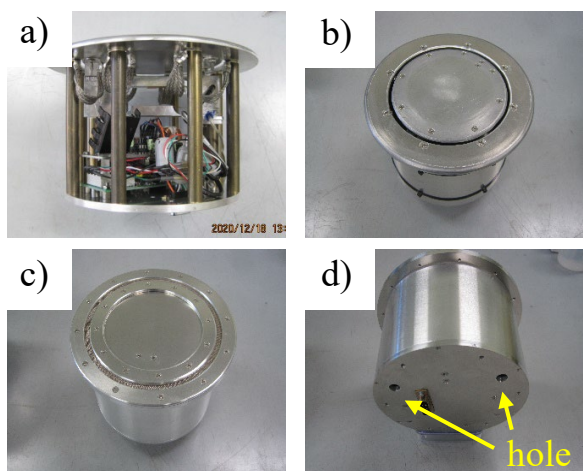


Figure 9: a) Inside the developed voltmeter. b) Developed voltmeter (prototype). c) Voltmeter remodeled into the sealing structure. d) Voltmeter which was made two holes for the degassing.

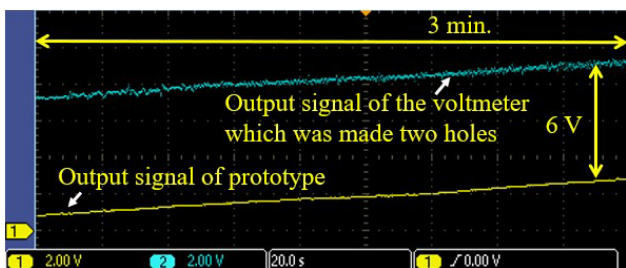


Figure 10: The output voltage change of the first-stage column voltage measuring system when the voltage is upped. The voltmeter which was made two holes has the offset voltage of 6 V in comparison with prototype.

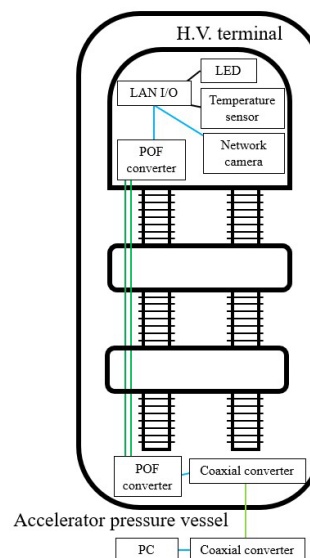


Figure 11: Overview of the communication system in the tank using the LAN.

5. まとめ

2022 年度の運転日数は 136 日であった。施設を有効活用するために定期整備の回数を年 1 回としていたが、ターミナル部のターボ分子ポンプの故障修理により、2022 年度のタンクの開放を伴う整備は 2 回となった。加速電圧は 2016 年度の真空トラブル以降、やや低迷し、加速管の絶縁劣化などの影響もあり、2022 年度以降は

16MV に達しない状態である。今後、計画的な加速管再生処理、新品への更新などが必要である。TIS からの ${}^4\text{He}$ や ${}^{56}\text{Fe}$ のビーム利用が増えたことで、TIS の利用割合が 5 割以上となった。一方で、 ${}^4\text{He}$ の長期利用によって真空中に残留する ${}^4\text{He}$ 量が増えたことにより、加速器タンク内のイオンポンプが動作不安定となった。現在、TIS の ${}^4\text{He}$ ガスボトルのガス圧を低くするとともに ${}^4\text{He}$ のビーム利用を制限している。今後、負イオン源からの He ビーム利用を検討する。貴重な RI 試料の 99 番元素アインスタイニウム (Es) を用いた実験などにより、非密封 RI を利用可能な実験室の利用が全体の 5 割を占めた。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活かした加速器・ビーム開発を進めるとともに、後継施設の計画立案、検討を進めていく。

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 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, Tsuruga, (2015) 357.
- [4] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, QST-Takasaki-Online, (2021) 394.
- [5] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2-4, Matsuyama-Online, (2020) 948.