

## 原子力機構－東海タンデム加速器の現状

### PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

中川創平<sup>#</sup>, 株本裕史, 杵掛健一, 乙川義憲, 遊津拓洋, 松井泰, 池亀拓麻, 加藤佑太, 中村暢彦  
Sohei Nakagawa<sup>#</sup>, Hiroshi Kabumoto, Ken-ichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui,  
Takuma Ikekame, Yuta Kato, Masahiko Nakamura  
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated on a total of 92 days, and delivered 20 different ion species, and the maximum acceleration voltage was 15.6 MV in FY2024. 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. In FY2024, we mainly carried out the overhaul of in-terminal ECR ion source, and carried out the replacement liquid level meter of the SF<sub>6</sub> gas tank. The developments of the accelerator are as follows. We provided a new gas source for in-terminal ECR ion source. In addition, we introduced an irradiation facility for space equipment using heavy ions. 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(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(ターミナル)内の Electron Cyclotron Resonance 正イオン源(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。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核物理、核化学、材料照射・原子物理などの分野の研究に利用されている。本稿では 2024 年度の運転・整備状況等について報告する。

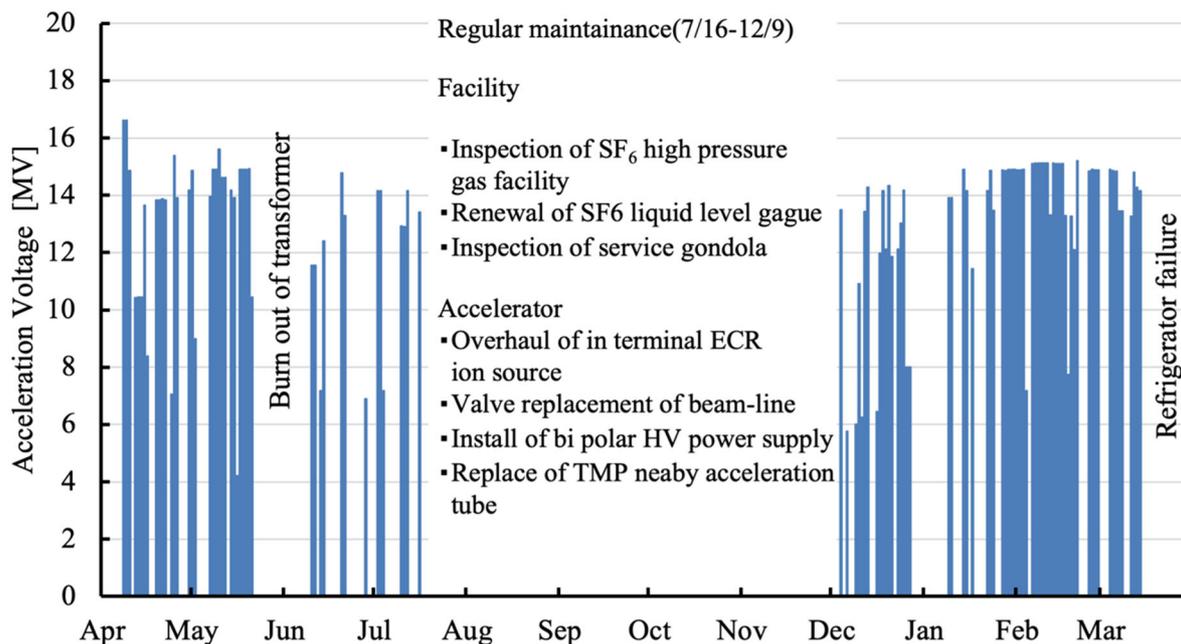


Figure 1: Daily accelerating voltage and operation status of FY 2024.

<sup>#</sup> nakagawa.sohei@jaea.go.jp

## 2. 加速器の運転・整備状況

### 2.1 2024年度の運転・整備の概要

Figure 1 に加速電圧の発生状況および施設の稼働状況を示す。2024年度は4月から7月、12月から3月の2回、加速器の運転を行った。定期整備は2024年7月から12月にかけて実施した。

定期整備では、毎年、実施する項目として、六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)高圧ガス製造施設の定期検査、タンク内整備用ゴンドラの定期検査を行った。

高圧ガス製造施設では、3基中2基の貯槽の開放検査に加え、液面計の更新を行った。液面計をクリング式からマグネットフロート式に更新することで、分解点検に要する期間を短縮するとともに、チャッキ弁が無くなったことで毎年実施していたチャッキ弁作動確認時のSF<sub>6</sub>ガス放出が無くなった。

加速器の整備関係では負イオン源やチャージング用ペレットチェーンなどの通常整備に加えて、以下に示すような整備を主に行った。その他の故障修理などの対応については後述する。

- ・ECR正イオン源の分解整備
- ・ビームラインバルブの交換
- ・タンク下TMP用Sub-TMPの交換
- ・静電ステアラー用高圧電源のバイポーラー化
- ・タンク内コンデンサの交換

SF<sub>6</sub>ガスを液化するための圧縮機の配管にひび割れが発生し、対応の検討を進めた。気密検査時の、閉止板の挿入による配管の隙間の発生や、ボルト締めつけ時の無理な力により、鋳物製の配管が破断に至ったと考えられる。定期整備前は、通常は2台を並列でガスを回収するが、単独運転でガス回収を行った。また、当該配管の交換・新規製作を進めた。

加速器タンク内のSF<sub>6</sub>絶縁ガスの冷却系のチラーが故

障した。当該チラーは設置後40年使用しており、経年劣化による故障と考えられる。冷却系を停止しての加速器の運転は、温度上昇によるタンク内の機器の故障を招く恐れがあるため、マシンタイムを中止した。

チラーや熱交換器が設置されている場所への搬入路に階段があり、搬入に難があること、配管にアスベストが使用されており除去が必要なこと、冷凍能力6.18 t/日の大容量のチラーであり調達に時間を要することから、2025年12月の修理完了を予定している。

### 2.2 2024年度の利用状況

Figure 2 に運転・整備日数を示す。利用運転日数は例年よりも減少して92日であった。2024年度は経年劣化による分電盤内のトランスの焼損があり、分電盤の修理や、同様のトランスの健全性調査の間、運転を停止していたためである。2025年3月に発生したチラーの故障によりマシンタイムを中止した影響もあり、実験中止が47日に増加した。また、高圧ガス製造施設の貯槽開放検査のため、例年よりも長い93日の定期整備期間を要した。

Figure 3 に利用分野別の割合を示す。核化学が10日(10.9%)、核物理が43日(46.7%)、材料照射・原子物理が39日(33.7%)、加速器開発が3日(3.3%)であった。人材育成活動として、原子力人材イニシアティブ実習のための運転を5日(5.4%)行った。

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 II)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。イオン種は、陽子(<sup>1</sup>H)からビスマス(<sup>209</sup>Bi)まで16元素20核種が利用された。イオン源の利用割合は、負イオン源(NIS)、ターミナル ECR 正イオン源(TIS)がともに約50%であった。

Figure 5 に加速電圧別の利用日数を示す。加速電圧4.2 MVから15.6 MVまでの利用となり、13~16MVでの利用が中心であった。加速管の絶縁劣化などによる加

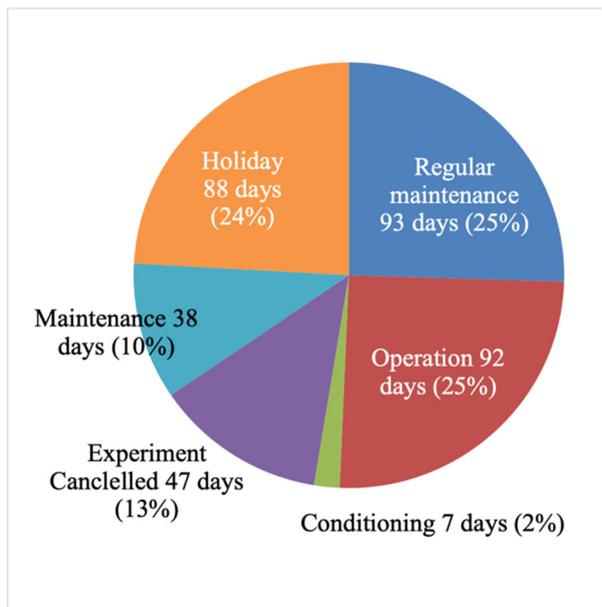


Figure 2: Operation status of accelerator in FY2024. Accelerator operation was 92 days.

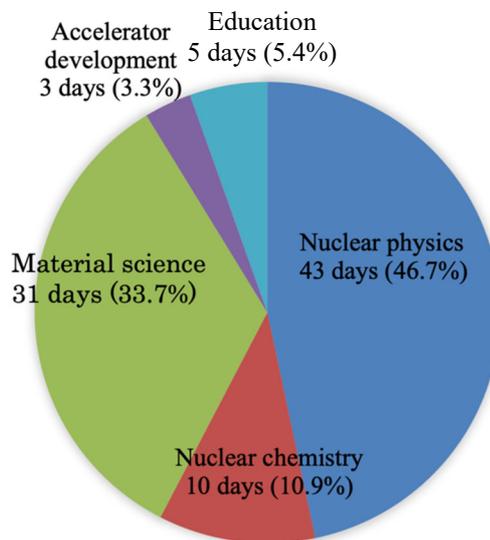


Figure 3: Usage of beam-times in different research fields in FY2024.

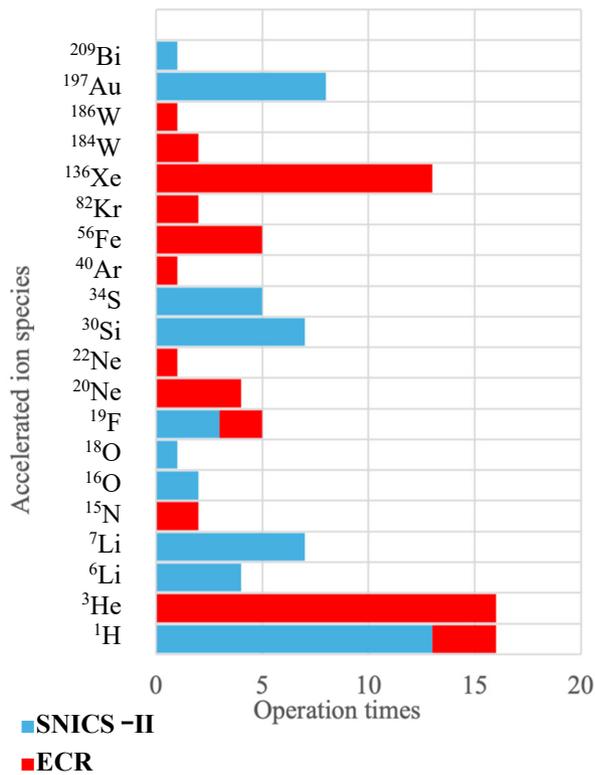


Figure 4: Distribution of accelerated ion beams species for experiment in FY2024.

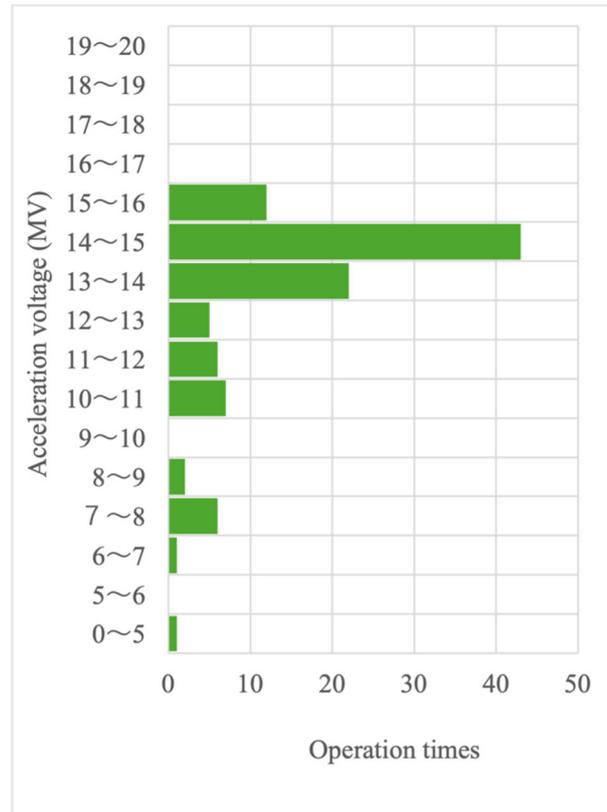


Figure 5: Distribution of acceleration voltages for experiment in FY2024.

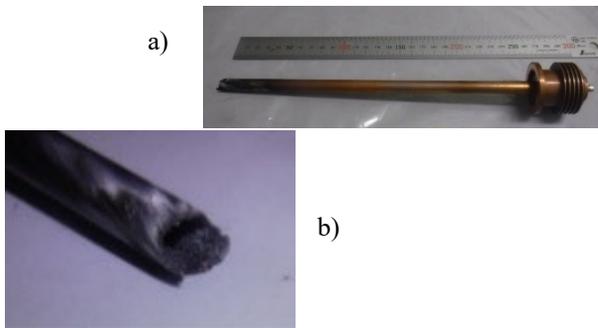


Figure 6: Photo of bias copper rod for control of plasma in ECR ion source (a) and its tip sputtered and damaged by plasma (b).

速電圧の低下のため 16 MV 以上での実験利用はできなかった。今後は電圧上昇のために計画的な加速管の更新が必要である。

### 3. 加速器の整備関係

2024 年度の定期整備は 7 月から 12 月にかけて 1 回実施した。主な整備事項について以下に記す。

#### 3.1 TIS の分解整備

ターミナル ECR 正イオン源 (TIS) は、前回のオーバーホールから 4 年が経過し、内部が汚れてきており、引き出し電流の増加や真空悪化により、通常 80 W 入射できる高周波電力が、35 W までしか入射できなかった。これら

のクリーニングが必要な症状が見られたため、オーバーホールを行った。オーバーホール後は、50W を安定して入射できた。

ECR イオン源のプラズマ調整に使用するバイアスロッドの劣化があり (Fig. 6)、先端の修繕を行った。先端から 154 mm の位置で切断し、新たな銅製のパイプを電子ビーム溶接で取り付けた。バイアスロッドの修繕作業は、原子力科学研究所 工作技術課により行われた。

#### 3.2 低エネルギービームアッテネータの変形

タンデム加速器へ入射するビーム量を調整するため、ビームアッテネータが導入されている [3]。アッテネータは、積層されたスリットの角度を 10 度程度傾けることで、ビーム量を連続的に制御する装置である。通常、減衰率が 100% となる角度まで傾けても、ビーム量が 0 とならない問題があったため、アッテネータの調査を行った。ビューポートから目視で確認できる程度にアッテネータの板が変形しており (Fig. 7)、この変形のために正しくビーム量を制御できていないことが分かった。アッテネータはタンタル製であるが、積極的な冷却機構を搭載していないため、想定以上の大電流ビームを遮断したことによる熱変形であると考えられる。2025 年度に、アッテネータに使用しているスリット板の交換を予定しており、また、アッテネータを使用する際のビーム電流制限の検討を行った。

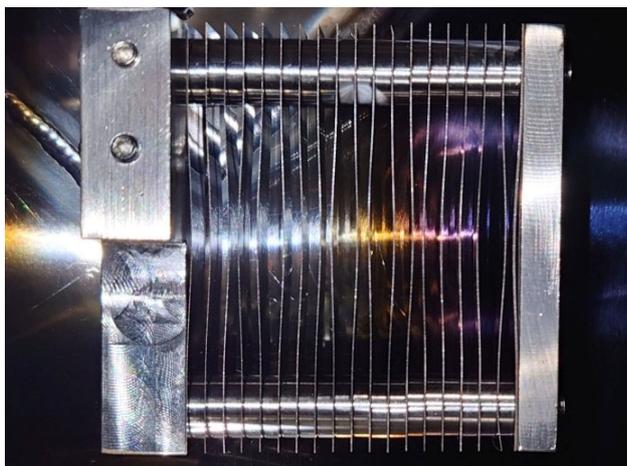


Figure 7: Photo of bended attenuator. Installed in low energy beam-line.

## 4. 加速器の開発関係

### 4.1 ターミナル正イオン源(TIS)への新規ガスの搭載

TIS から様々なイオンを引き出すため、混合ガスを封入した 9 本のガスボトル、液体、固体試料を封入したボトルを ECR 正イオン源に搭載している。 $^{20}\text{Ne}^{8+}$  は 10 pA 引き出せていたが、 $^{20}\text{Ne}^{8+}$  100 pA のより大電流の需要に応えるため、新規ガスの搭載を行った。搭載するガスについて、次に示す試験・検討を行った。

#### 4.1.1 イオンポンプへの影響調査

ECR 正イオン源で大電流ビームを得るには、目的のガスをイオン源に多く流し込む量を多くすることが必要である。一方で、タンク内の真空を主に維持しているイオン

ポンプは、貴ガスの排気量が他のガス種に比較して小さく、特に排気量の小さい He ガスが原因と思われるイオンポンプの不調が過去に発生した[4]。イオンポンプへの影響を抑えながら、大電流ビームを提供するため、イオンポンプの試験を行い、安全な搭載量を決定した。

イオンポンプと TMP による排気後のガス残留量を測定し、イオンポンプによる排気では、TMP による排気に比べ、残留ガスがヘリウムで 50 倍、ネオンで 5 倍多いことが分かった。過去に搭載し、影響がなかった He ボトルのガス圧の 10 倍まではイオンポンプの影響はないと予測できたため、He ボトルガス圧の 10 倍の圧力で充填したネオンガスボトルを TIS に搭載した。

#### 4.1.2 混合比の調整

ECR 正イオン源からより多くの多価のイオンを引き出す手法の一つに、目的のガスに加えて、より原子番号の低いガスを混合する手法がある[3]。運転期間中にメンテナンスのできないタンク内に設置されている TIS には、故障のリスクを減らし、安定した運用をするために、混合比の調整機能が搭載されていない。最適な混合比のガスを搭載するために、タンク外に設置されている 10 GHz ECR 正イオン源で試験を行った。ガス混合比の変化による多価の  $^{20}\text{Ne}$  ビーム電流の変化を Fig. 8 に示す。高周波(RF)出力は、30 W 以内の、ビーム電流が最大となる出力で測定を行った。ネオンガスの割合が 50%より低いガスでは、約 16 W でビーム電流が最大となり、安定していた。ネオンガスの割合が 50%より高くなると、RF 出力が高くなるにつれビーム電流が微増する傾向がみられた。一方で、20 W 程度で一時的にビーム電流が上昇することがなど、不安定であった。大強度に安定して引き出すことのできた、Ne :  $\text{H}_2$  の割合が 1:1 の割合の混合ガスを TIS に新たに搭載した。

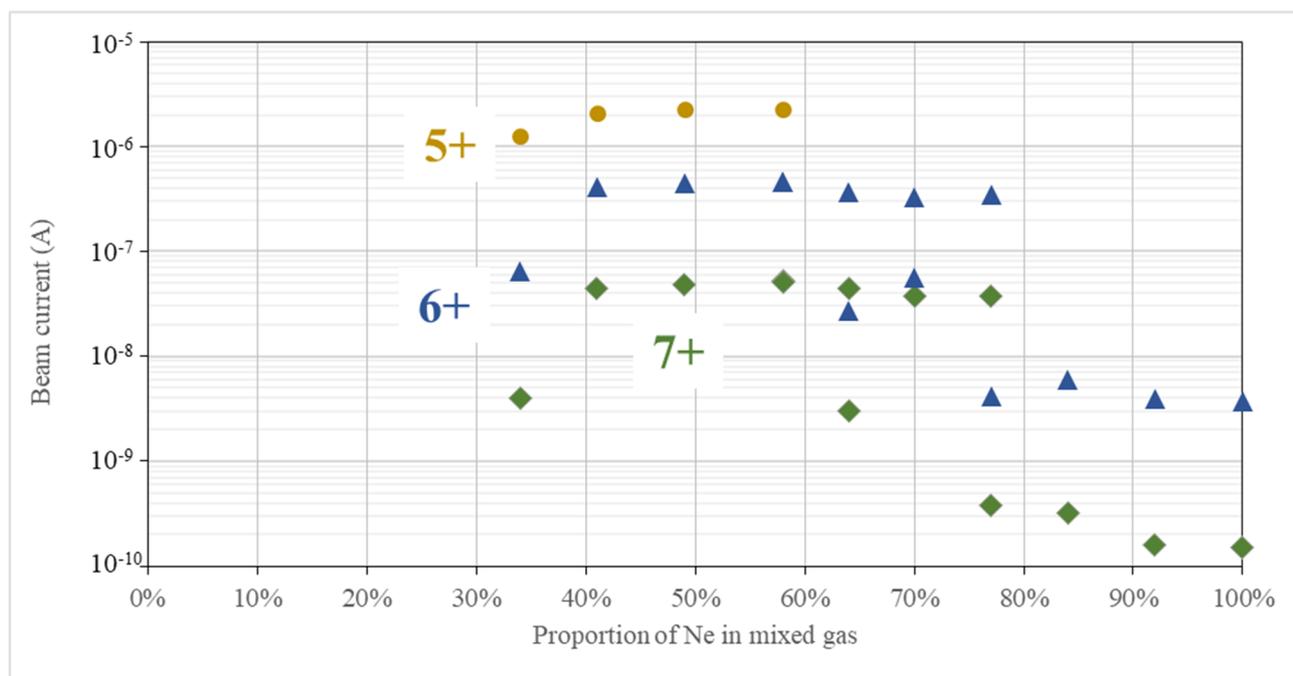


Figure 8: Neon-20 Beam current transition by proportion of  $^{20}\text{Ne}$  in mixed gas of natural Ne and  $\text{H}_2$ . Gas pressure was 5 kgf/cm<sup>2</sup> (absolute). We obtained strong and stable beam from 50% Ne gas source.

#### 4.1.3 新規ガス種の利用

新たに搭載したガスを利用して、 $^{20}\text{Ne}^{8+}$  を TIS から最大 89 pnA で引き出し、実験に利用した。開発前と比較し、ビーム電流は約 8 倍に増加した。10 GHz ECR イオン源での試験時は 6 価のイオンまでしか引き出せなかったが、ターミナルに搭載されている 14.5 GHz ECR イオン源からは、8 価のイオンを引き出した。

また、試験時は RF 入射が 16 W 程度で最大電流が得られたが、14.5 GHz ECR イオン源では、RF 入射が高くなるほど大電流が得られ、50 W で 89 pnA の  $^{20}\text{Ne}^{8+}$  ビームを得た。

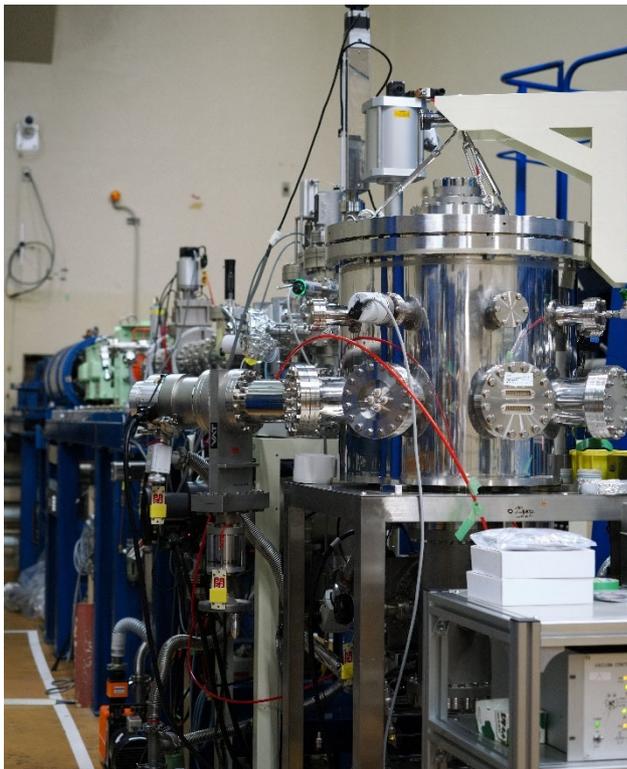


Figure 9: Photo of the chamber for investigating single event upsets of space equipment by heavy ion.

#### 4.2 宇宙機器照射実験

宇宙機器に使用する半導体等の放射線耐性の評価の需要が高まっている。重イオンによる Single Event Upset を測定し、シミュレーションの妥当性を検証するための、「宇宙機器照射用ビームライン」を整備した[5]。

2023 年度より設置を進めてきた、専用の真空チャンバーについて、真空機器の増強、実験室への設置、ビームラインへの接続を行った。ビームラインに取り付けられたチャンバーを Fig. 9 に示す。

設置後に、宇宙用機器照射をするための予備実験を行った。SEU の試験では、数百～数千 cps の低フラックスビームを、試験体に一様に照射する必要がある。通常、タンデム加速器からのビームは直径 1～10 mm のスポットビームであるため、数 cm 四方に一様に照射する試験を行った。スキャナーでの掃引、Qレンズのデフォーカス

条件での使用、金薄膜による散乱を使用し、3cm 四方で一様なビームを形成できることを確認した(Fig. 10)。また、低フラックスビームは、電流計を使ったファラデーカップによるビーム量の測定ができないため、検出器を用いたビーム調整を行い、ビーム量を測定できることを確認した。

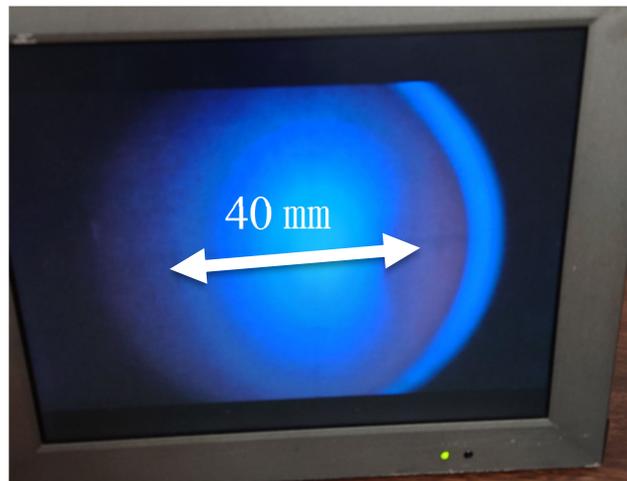


Figure 10: Photo of uniform beam visualized by fluorescent screen.

## 5. まとめ

2024 年度の運転日数は 92 日であり、例年よりも減少傾向となった。5 年に 2 度の高圧ガス設備の長期整備があり、整備期間が長期に渡ったことに加え、火災や冷凍機の故障といった時間を要するトラブル・故障も相次いだ。老朽化した設備の更新を進め、運転日数が増加することを目指している。また、加速電圧は現在、約 15 MV が上限となっており、16 MV を超える運転は難しくなっている。今後は計画的な加速管の再生処理、新品への更新などが必要な状況である。現在、宇宙機器照射の実試験の準備等、新たな利用分野の開拓も進め、2025 年度中に本測定の利用を目指している。今後も大型静電加速器の特徴を活かした加速器・イオンビーム開発を進めていく。

## 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 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 – August 3, 2019, Kyoto, Japan, 1270.
- [4] K. Kutsukake *et al.*, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29 – September 1, 2023, Funabashi, 1080.
- [5] H. Kabumoto *et al.*, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2024, Yamagata, 1165.