

## RCNP 白色中性子源の利用再開

### RESTART OF THE RCNP WHITE NEUTRON SOURCE

神田浩樹<sup>#A)</sup>, 小林信之<sup>A)</sup>, 嶋達志<sup>A)</sup>, 民井淳<sup>A)</sup>, 永山啓一<sup>A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>,  
Zhao Hang<sup>A)</sup>, 安部晋一郎<sup>B)</sup>, 岩元洋介<sup>B)</sup>, 佐藤大樹<sup>B)</sup>  
Hiroki Kanda<sup>#,A)</sup>, Nobuyuki Kobayashi<sup>A)</sup>, Tatsushi Shima<sup>A)</sup>, Atsushi Tamii<sup>A)</sup>, Keiichi Nagayama<sup>A)</sup>,  
Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Zhao Hang<sup>A)</sup>, Shin-Ichiro Abe<sup>B)</sup>, Yosuke Iwamoto<sup>B)</sup>, Daiki Satoh<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

The white neutron source, which has been in operation since 2004 at the Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, has been used for testing semiconductors as it has an energy spectrum similar to the energy spectrum of cosmic ray neutrons near the surface of the earth. It has contributed to research of the single-event effects of semiconductor devices. Since 2019, we have been undergoing renovation work on the facility and the AVF cyclotron to increase the beam intensity. After the renovation, the white neutron source was adapted to a 300 mm diameter irradiation field, increased beam intensity. In October 2023 and March 2024, the beam was commissioned and in use again. During the commissioning, the neutron beam profile was measured using an imaging plate with an activation of aluminum plate. The obtained spatial uniformity was better than  $\pm 10\%$ , which complies with the requirement of the recommended test procedure defined by JEDEC. We also constructed a detailed geometry of the white neutron source with the PHITS code. For the verification of the geometry and the particle tracking system of the PHITS code, we measured ambient dose equivalent rate using the neutron dose detectors: DARWIN and Wendi-2 at various points near the white neutron source. The measured dose rates and the simulated results were consistent within factor 2. We restarted the use of our white neutron source. Its working time were 420 hours in FY2023 which is almost the same as before the renovation work.

#### 1. はじめに

近年、日々進歩を遂げる半導体技術(微細化)と情報化社会において、半導体デバイスの数と重要性がますます増大している。情報インフラとしてのネットワーク機能やミッションクリティカルな現場においてはこれらデバイスの誤動作による影響は重要になってきており、誤動作の原因となるようなソフトウェアそのもののバグや悪意あるセキュリティ侵害[1]に加えて放射線による「ソフト」エラーへの対策が不可欠なものとなっている。

大阪大学核物理研究センター(RCNP)は、2004年よりリングサイクロトロン棟西実験室にあるWNコースにおいて白色中性子ビームを半導体試験に供給してきた[2]。このコースでは392 MeVの陽子ビームをタングステンに標的に照射することで核破砕中性子や(p, xn)反応による中性子を、ビームラインから30度の方向に用意したコリメーターを通して照射場を形成している。このことによって、照射場における中性子のエネルギー分布は宇宙線中性子の海拔0 mにおける分布[3]に類似しており、宇宙線中性子による機器類への影響を現実に近い形で試験することが可能である。陽子ビーム電流の最大値は1.1  $\mu\text{A}$ であり、この時の加速係数(海拔0 mにおける中性子フラックスとの比)は $1 \times 10^8$ 程度である。2019年度から2021年度にかけて、RCNPでは施設改修作業(2019年度)[4]、AVFサイクロトロンアップグレード作業(2020年度)[5]、AVFサイクロトロンアップグレード後の周辺機器

整備作業とRF系のコミッショニング(2021年度)[6]を実施してきた。2022年度にはAVFサイクロトロンビームコミッショニング、AVFサイクロトロンアップグレード後のリングサイクロトロンコミッショニングを兼ねて、改修前の標的および旧ビームコースを使用した中性子源の利用を実施した。2023年度に標的およびビームダンプなど陽子ビームラインに沿った要素を更新し、また中性子ビームコースの改修を行い、中性子源の本格的な利用を再開した。ただし、現状では施設外部への放射線量の計算結果によって、陽子ビーム電流はこれまでと同様に1.1  $\mu\text{A}$ に制限されている。2022年度の白色中性子源の総稼働時間は216時間であったが、2023年度は420時間となり、施設改修前と同程度の時間となった。

#### 2. RCNP 白色中性子源の改修

RCNPにおける一連の改修・アップグレード作業はAVFサイクロトロンビーム強度の増強を第一の目的としている。ビーム強度の目標は現行のビーム電流の約10倍であり、アップグレードによるビーム強度の増大に伴う放射線遮蔽機能の補強作業も施設改修の中で実施した。ビーム強度の増強によって、白色中性子源の加速係数を増大し、試験に要する時間を短縮するほか、より稀な事象の検出を容易にする。さらに、施設改修作業の中では、白色中性子源の中性子照射野の直径をこれまでの108 mmから300 mmに拡大するために、中性子生成標的を設置した標的室(ほこら)と実験室の間に新たにコリメーターとして利用する穴を貫通するなど大規模

<sup>#</sup> kanda@rcnp.osaka-u.ac.jp

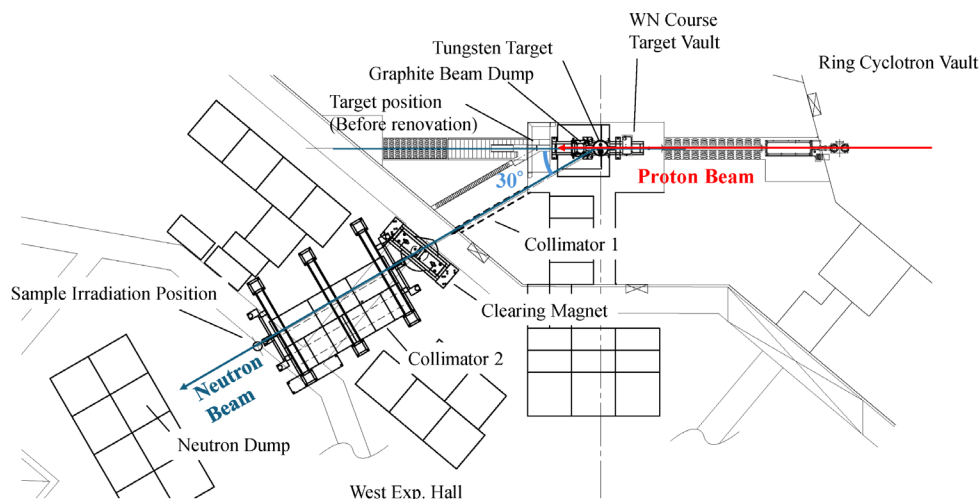


Figure 1: Setup of the RCNP white neutron source.

な工事も実施した。照射野の拡大により、多くの半導体素子に対して中性子を同時に照射することで試験を効率的に実施できるようになるだけでなく、素子単体ではなく基板全体に対する中性子の影響の評価も可能となった。

Figure 1 に白色中性子源の全体図を示す。リングサイクロトロンで加速された陽子ビームは WN ビームコースを通過してほこら内部に設置された厚さ 65 mm のタングステン標的に照射される。発生した中性子はほこらから西実験室に通じる直径 150 mm のコリメーター1を通過する。西実験室に入ると荷電粒子を偏向して中性子ビームコースから逸らすためのクリアリング電磁石、およびコリメーター2を通過して成形され試料に照射される。コリメーター2の下流の面と標的との間の距離は 8500 mm で、ここから標準的な試料照射位置までの距離を 500 mm としている。ただし、実験者の都合に応じて、コリメーターのすぐ下流から中性子ダンプ用のコンクリートブロックまでの間に試料テーブルを配置することが可能である。コリメーター2は可動式架台によって直径 108 mm と直径 300 mm を切り替えて使用することが可能である。また、この可動式架台の設置に伴い、周辺のコンクリートブロックによる放射線遮蔽の最適化を実施した。

タングステン標的には 392 MeV の陽子ビーム 10  $\mu$  A の通過によって 2.6 kW の熱が発生する。残りの 1.3 kW は標的を通過した陽子が黒鉛ビームダンプで停止する際に発生する。この熱を十分に冷却できるように、タングステンブロックの上下に銅板をロウ付けし、さらに冷却水を循環させるための銅パイプを銅板にロウ付けしている (Fig. 2)。黒鉛製のビームダンプも標的と同様にロウ付けした銅板を介して銅パイプを循環する冷却水によって冷却している。冷却水は 5 kW の冷却能力を持ったチャラーによって温度設定  $20 \pm 1.5$  °C で循環している。標的設置後、試験的に 100 MeV の  $^4\text{He}$  ビーム 5  $\mu\text{A}$  を標的に照射したところ、白金温度センサーを取り付けた標的側面での温度の測定値は 45 °C となった。この結果をもとに 10  $\mu\text{A}$  の陽子ビームを入射した際の温度上昇を予測するため、有限要素法 (CST Studio 2022 [7]) を用いてタングステン標的および銅板と銅パイプをモデル化して熱解析を実施した。100 MeV の  $^4\text{He}$  のタングステン中での

飛程と、WN コースのビームビューアで測定されたビームプロファイルを考慮して、照射したビームパワーに相当する 250 W の熱を標的の上流側の面に入力した。ただし、このモデルでは標的と銅板、銅板と銅パイプの間のロウ付け箇所の接触度合いが熱抵抗としてフリーパラメーターとなるため、銅パイプは銅板に貫通した水路とし、標的と銅板の間の熱抵抗を標的側面における温度上昇を再現するように設定した。この条件において、392 MeV の陽子ビーム 10  $\mu$  A を照射した際の熱解析を実行すると、タングステン標的の最高温度は 322 °C、黒鉛ビームダンプの最高温度は 120 °C となった。また、標的側面、ビームダンプ側面の温度センサーを取り付けた位置においても温度に大きな違いは見られなかった。いずれもタングステン、銅、黒鉛の融点よりは低く、また今回使用している白金温度センサーの測定可能な上限温度である 400 °C を下回っており、余裕は少ないものの十分に扱える程度の温度であることが分かった。

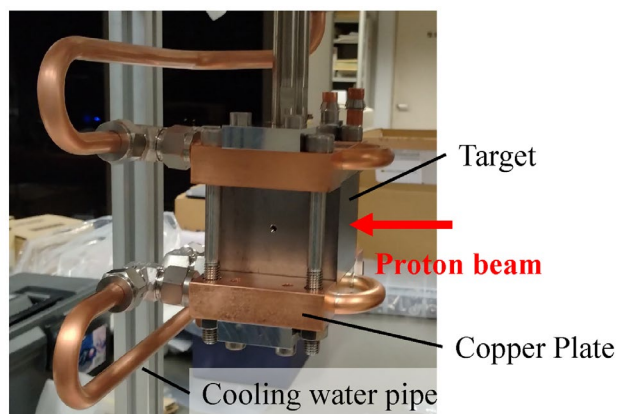


Figure 2: Photo of the target with cooling pipes.

### 3. 白色中性子ビームのコミッションング

これらの改修を行った後、2023 年 10 月と 11 月、また 2024 年 3 月にビームのコミッションングとユーザーによる半導体デバイスへの中性子照射を実施した。コミッション

ングとしては、前節で述べた新しい標的およびビームダンプの熱耐性の試験、また直径が 300 mm のコリメーターを使用した際の中性子ビームのプロファイル測定および中性子、光子による線量の測定を実施した。

### 3.1 熱試験

まずは 392 MeV、1.1  $\mu$ A の陽子ビームを照射した際の温度上昇の測定を行った。標的側面の温度は33.6 $^{\circ}$ C、ビームダンプ側面の温度は22.3 $^{\circ}$ C となり、ビーム停止時の温度からの上昇は、それぞれ12.0 $^{\circ}$ Cと1.5 $^{\circ}$ Cであった。このことから、ビームパワーを 10 倍にすると、それぞれの測定値は140 $^{\circ}$ C、36 $^{\circ}$ Cになると予想され、熱解析の結果よりは小さな値となった。この原因は熱解析に使用した熱抵抗の設定値の違いに由来すると考えているが、いまのところ定量的に説明できる設定値は得られていない。このように、実測によって標的とビームダンプの冷却能力が十分であることは確認されたものの、計算結果と測定値の間に差異があることを考慮し、温度変化を監視しつつ十分に注意してビーム強度を増大させる必要があると考えている。

### 3.2 ビームプロファイル

直径 300 mm の照射野を得るために直径 150 mm のコリメーター1と直径 300 mm のコリメーター2を組み合わせ使用している。これらの位置はレーザー墨出し器を用いて $\pm 2$  mm 程度の配置精度で調整しているが、位置のずれがある場合、あるいは中性子を遮るようなものがコース上にある場合にはこの中性子分布から判別可能である。また、JEDEC のパワー半導体の試験基準 [8]により、強度分布の一樣性として $\pm 10\%$ 以内であることが求められている。そこで PHITS [9]によるシミュレーションおよびアルミ板とイメージングプレートを利用したビームプロファイルの測定を実施した。

まずは PHITS を用いて、タングステン標的、コリメーター1、2 およびクリアリング電磁石を含んだ簡易的な体系を構築し、標的に 392 MeV 陽子を照射した際のシミュレーションを実施した。Figure 3 にシミュレーション結果の二次元中性子強度分布を示す。PHITS を用いて求めた、 $1.05 \times 10^{10}$  個の陽子をタングステン標的に照射した際に中性子照射位置まで届く中性子の数を  $2 \times 2$  cm<sup>2</sup> のビンにまとめて合計すると、1ビンあたりの中性子数は平均 880 個であった。またその個数の標準偏差は 28 個と、

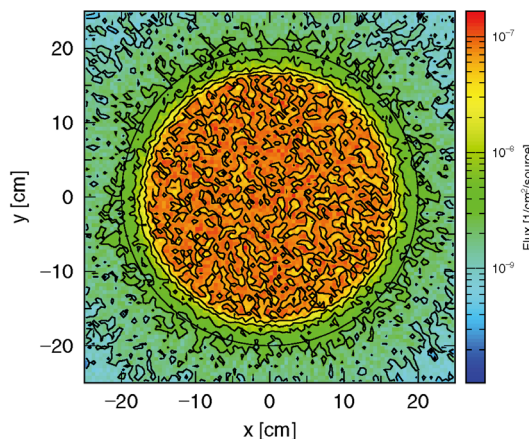


Figure 3: Simulated neutron beam profile.

ほぼ統計誤差に相当する程度のばらつきに過ぎないことが分かった。このことから、シミュレーション上では中性子ビーム強度に十分な均一度が確保されることが分かった。

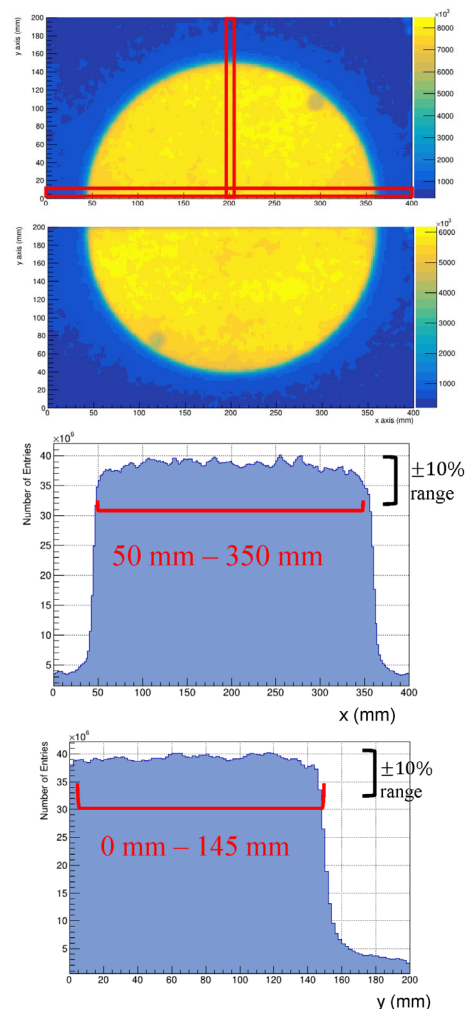


Figure 4: Measured neutron beam profile. Two-dimensional contour (top), horizontal projection (middle), and vertical projection (bottom).

ビームコミショニングではアルミ板を中性子コリメーターの下流の中性子ビーム出口に取り付けて放射化を行った。アルミ板では高速中性子と <sup>27</sup>Al の原子核反応により <sup>24</sup>Na などの放射性同位元素が生成する。中性子ビーム照射直後からイメージングプレートとアルミ板を重ねて配置し、周囲を鉛ブロックで遮蔽を行った上で放射線による“感光”を行い、生成した放射性同位元素の相対的な量の分布を測定した。感光後のイメージングプレートはイメージングリーダーを用いて読み出し、得られた像の画像解析を行った。Figure 4 に測定結果の二次元強度分布と赤線の帯の内部の輝度を短軸方向に射影した水平方向および垂直方向の強度分布を示す。二次元強度分布より、ビームの直径は 300 mm であり、欠けている箇所が見られないことが分かった。なお、中性子の分布の右上と左下の直径 2 cm の円形の影は像の上下左右を区別するために配置したニッケル製の円柱によるものである。また二次元強度分布ではビームの強度にはいくらかムラが見られるものの、赤い線で示されている帯の中

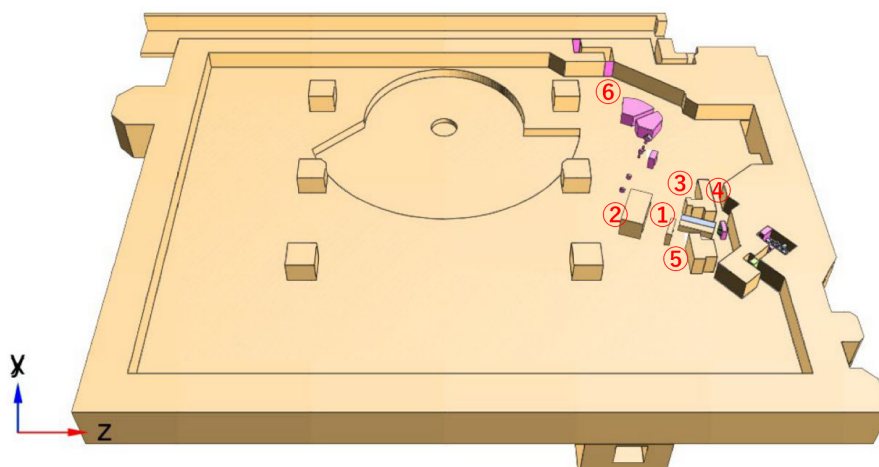


Figure 5: Simulation geometry of the RCNP white neutron source and points for dose measurement.

の強度分布は水平方向、垂直方向ともに $\pm 10\%$ を超える非均一性は見られなかった。したがって、この白色中性子源において JEDEC JEP151A に準拠した半導体試験が可能であることが示された。

### 3.3 放射線量の測定と詳細な PHITS 用体系の構築

この白色中性子源は、RCNP と JAEA の共同研究として改修作業を進めてきた。改修後の中性子、光子による線量の測定値と、PHITS で構築した現実的な体系による粒子輸送計算結果との比較を行うことは、中性子源の利用再開と PHITS そのものの検証のためにきわめて重要である。

白色中性子源を含む、RCNP リング棟西実験室のシミュレーション用の体系では、WN コース用ほこらと西実験室の東側、西実験室地下にあたる共同溝の壁、床、天井の位置と寸法を建築図面および、実測した測量結果による修正を加えたビームライン図面をもとに再現した。また、体系には WN コース用ほこら内部の陽子ビームコースの真空ダクト、標的チェンバー、チェンバー内部のタングステン標的、黒鉛製ビームダンプ、および周囲の放射線局所遮蔽体を正確に配置した。また、中性子ビームコース沿いのクリアリング電磁石、コリメーター、放射線遮蔽用のコンクリートについても、配置図面と実測値を元に体系に含め、中性子ビームのシミュレーションを可能とした。配置したクリアリング電磁石の発生する磁場による荷電粒子の偏向もシミュレーション内で行っている。さらに、線量測定は西実験室内の中性子コース付近の各所で実施していることから、中性子生成標的のから測定位置を結ぶ直線付近に存在するコンクリートブロックや、ビームダンプ下流に配置してある遮蔽体、他のビームコース用の電磁石についても図面をもとに体系内に配置し、より現実的なシミュレーションを可能とした。この体系を3次元的に表示した図を Fig. 5 に示す。この図に含まれている数字の位置で放射線量の測定を行った。中性子と光子による線量の測定には JAEA にて開発された有機液体シンチレーターを検出器とする放射線モニタの DARWIN [10, 11] を使用し、高速中性子を含む中性子線量の測定には  $^3\text{He}$  比例計数管を検出器とした Thermo Scientific 製の Wendi-2 [12] を使用した。

まず、中性子ビームのエネルギー分布の評価を

PHITS にて実施した。PHITS のバージョンは 3.34 であり、20 MeV 以下の陽子、中性子に対しての反応断面積には JENDL-5、それ以上のエネルギーの粒子による反応断面積にはデフォルトの INCL 模型、古いバージョンの PHITS にて用いられていた Bertini 模型、PHITS においてはデフォルトでは高エネルギー反応に用いられている JAM 模型の 3 通りの理論計算断面積を組み合わせる計算を実施した。陽子ビーム  $1\mu\text{A}$  でスケールした中性子フラックスについて、シミュレーション結果と、Iwamoto らによる改修前の RCNP 白色中性子源にて測定された中性子のエネルギー分布[2]の比較を Fig. 6 に示す。この図から分かるように、INCL 模型を組み合わせ使用したシミュレーション結果と文献[2]による測定値は誤差の範囲内で一致している。また、文献[2]中のシミュレーション結果として示された Bertini 模型による中性子エネルギー 10 MeV から 30 MeV の領域における実験値からの逸脱も、今回のシミュレーション結果で再現されている。これら

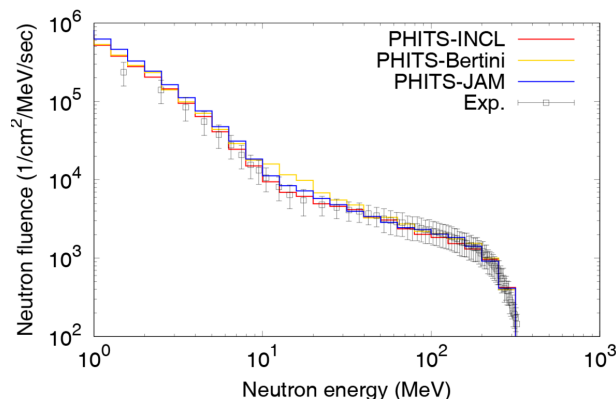


Figure 6: Energy distribution of neutron flux for  $1\mu\text{A}$  proton on target.

の結果より、RCNP の白色中性子源は改修前後で中性子エネルギー分布に変化がなかったと示唆される。

また、実験室内の中性子及び光子による線量については測定値とシミュレーション結果がいずれの箇所においても基本的によく一致していることが分かった。しかしながら場所によっては中性子による線量、光子による線量ともに factor 2 程度の違いがあり、現在その原因の追

及を行っている。

なお、この共同研究で構築した体系は、RCNP 白色中性子源の利用者および PHITS の利用者に対して公開し、利用していただくことを検討している。著作権は私たちの共同研究者が持つこととし、MIT License の適用を予定している。

#### 4. まとめ

2019 年から 2021 年にかけて実施した、RCNP の施設改修、AVF サイクロトロンアップグレード作業において、RCNP の白色中性子源に対しても陽子ビームの増強に対応した標的、ビームダンプの熱対策と放射線対策、また照射野の大口径化を図る改修作業を実施した。2023 年度より新しい標的を導入して陽子ビームを使用したコミッションングを実施し、熱対策の有効性、中性子ビーム強度の空間的な均一性が測定の結果として得られた。また、PHITS を使用して可能な範囲で現実を再現したシミュレーション用の体系を構築した。PHITS ver. 3.34 を用いてシミュレーション計算で求めた中性子エネルギー分布は、改修前の測定値と誤差の範囲内で一致しており、改修前後での変化が無かったことが示唆された。また中性子源付近において放射線量を測定し、シミュレーション計算との比較を行った。いずれ測定位置においても測定値とシミュレーションによる計算値は基本的によく一致しており、いくらか値が離れている場合も factor 2 程度にとどまっていた。この白色中性子源は、共同研究契約を結んでいるユーザーによる利用を再開した。2023 年度の稼働時間は 420 時間と、改修前と同程度となった。

#### 参考文献

- [1] World Economic Forum (Jan. 2020), “The Global Risks Report 2020”.  
<https://www.weforum.org/publications/the-global-risks-report-2020/>
- [2] Y. Iwamoto *et al.*, “Evaluation of the white neutron beam spectrum for single-event effects testing at the RCNP cyclotron facility”, Nuclear Technology, vol 173, 2011 pp. 210-217.
- [3] M. S. Gordon *et al.*, “Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 51, 2004, pp. 3427-3434.
- [4] H. Kanda *et al.*, “Status of the RCNP Cyclotron Facility”, Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020), Online meeting, Sep. 2-4, 2020, pp. 944-945.
- [5] T. Yorita *et al.*, “Status of the RCNP Cyclotron Facility”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), Online meeting, Aug. 9-12, 2021, pp. 981-982.
- [6] H. Kanda *et al.*, “Status of the RCNP Cyclotron Facility”, Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyushu (Online meeting), Japan, Oct. 18-21, 2022, pp. 1141-1143.
- [7] CST Studio Suite,  
<https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [8] JEDEC, “Test Procedure for the Measurement of Terrestrial Cosmic Ray Induced Destructive Effects in Power Semiconductor Devices”, JEDEC PUBLICATION, JEP151A, January 2022.
- [9] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N., Hunter, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, “Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33”, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 61, 2024, pp. 127-135.  
DOI: 10.1080/00223131.2023.2275736
- [10] T. Sato, D. Satoh, A. Endo *et al.*, “Development of dose monitoring system applicable to various radiations with wide energy ranges”, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 42, 2005 Sept 1, pp. 768-778.
- [11] T. Sato, D. Satoh, A. Endo *et al.*, “Upgrades of DARWIN, a dose and spectrum monitoring system applicable to various types of radiation over wide energy ranges”, Nucl. Instrum. Meth. A., 637, 2011 May 1, pp. 149-157.
- [12] R. H. Olsher *et al.*, “WENDI: an improved rem meter”, Health Physics, vol. 79, 2000, pp.170-181.