

## J-PARC 3 GeV シンクロトロン 1 MW 運転状況(2)

### RESULTS OF 1-MW OPERATION IN J-PARC 3 GeV RAPID CYCLING SYNCHROTRON (2)

山本風海<sup>#,A)</sup>, 山本昌亘<sup>A)</sup>, 山崎良雄<sup>A)</sup>, 野村昌弘<sup>A)</sup>, 菅沼和明<sup>A)</sup>, 藤来洗裕<sup>A)</sup>, 神谷潤一郎<sup>A)</sup>, 仲野谷孝充<sup>A)</sup>, 畠山衆一郎<sup>A),B)</sup>, 吉本政弘<sup>A)</sup>, 田村文彦<sup>A)</sup>, 沖田英史<sup>A)</sup>, 菖蒲田義博<sup>A)</sup>, Saha Pranab<sup>A)</sup>, 金正倫計<sup>A)</sup>  
Kazami Yamamoto<sup>#,A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>A)</sup>, Yoshio Yamazaki<sup>A)</sup>, Masahiro Nomura<sup>A)</sup>, Kazuaki Suganuma<sup>A)</sup>, Kosuke Fujirai<sup>A)</sup>, Junichiro Kamiya<sup>A)</sup>, Takamitsu Nakanoya<sup>A)</sup>, Shuichiro Hatakeyama<sup>A),B)</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>A)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>A)</sup>, Hidefumi Okita<sup>A)</sup>, Yoshihiro Shobuda<sup>A)</sup>, Saha Pranab<sup>A)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>B)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

#### Abstract

The J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) is aiming to provide the proton beam of very high power for neutron experiments and the main ring synchrotron. We have continued the beam commissioning and the output power from RCS have been increasing. In recent years, we have been trying continuous supply of 1-MW high-intensity beam, which is the design value, to a neutron target. We tried to operate continuously for over 40 hours in June 2020. However, some trouble occurred and the operation was frequently suspended. In June 2021, we tried again 1-MW operation but it was suspended due to deterioration of the cooling water performance. Last summer shutdown period, we recovered performance of the cooling water system and retried in this June. In the final case, the outside temperature became extremely high. We could not keep 1-MW power, whereas 600 kW beam was delivered in stable.

#### 1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン(3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, RCS)は物質生命科学実験施設 (Materials and Life science experimental Facility, MLF) および主リング(Main Ring, MR)に最大 1 MW 相当のビームを供給する目的で建設された[1]。RCS は改良を重ねつつ徐々にビーム出力を上げていき、2015 年に 1 MW 相当の試験運転に成功した[2]。その後、供用運転としても段階的にビーム出力を増加しながら、1 MW の連続運転試験を断続的に行ってきたが、2020 年 6 月に二日間の連続運転試験を実施した際には、最終的に冷却水温度が上昇し、機器の温度を下げる事が出来なくなりインターロックが発報する事態となった[3]。本稿では、それ以降の RCS の運転状況および実施した改善内容と、2022 年 6 月に行った 1 MW ビーム連続運転試験の結果について報告する。

#### 2. 運転状況

図 1 に、2020 年 4 月から 2022 年 6 月末までの RCS の出力(加速粒子数)の履歴を示す。2020 年の 1 MW 連続試験前には、600 kW 相当のビーム出力で MLF の利用運転を行っていた。2020 年の夏季保守期間終了後、引き続き 600 kW での利用運転を再開し、2021 年の 4 月から 700 kW に出力を上昇した。例年であれば、6 月末には MLF の利用運転は終了していたが、2021 年度に関しては、はやぶさ2が持ち帰ったサンプルについてミュオンによる分析を行うため、サンプルを借りられる 7 月半ばまで運転を延長したスケジュールが組まれた。しかし

ながら、6 月末の気候と冷却水温度の状況を見て、ビームを停止することなく安定に運転するには 600 kW に下げることが必要であると判断し、7 月は 600 kW に下げて運転を継続した。その甲斐もあって、2021 年の夏前は順調に利用運転を終えることが出来た。2021 年の夏季保守では、3 節で述べる冷却水熱交換器の洗浄作業を行い、冷却性能の回復を図った。保守期間が明けた秋以降の運転では、700 kW で 2022 年 4 月まで安定に運転を継続することが出来、さらに 5 月の連休明けからは 800 kW に出力を上げて引き続き安定に運転することができた。利用運転は 6/24(金) AM 9:00 で終了し、それから二日間は 1 MW の連続運転試験期間を取った。試験結果については 4 節に詳細を記す。

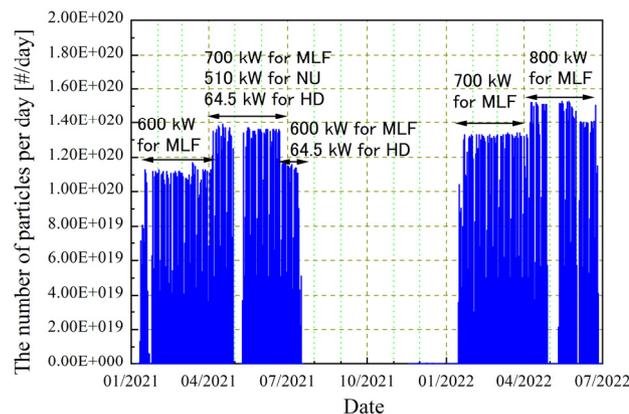


Figure 1: Accelerated particles per day.

<sup>#</sup> kazami@post.j-parc.jp

### 3. RCS の改善内容

#### 3.1 熱交換器洗浄

2020 年夏の試験結果から、RCS の冷却水システムは、夏場の高温湿潤な環境下では、冷却水温度を必要な条件以下に維持できないことが判った[3]。RCS の冷却水システムは、熱源である電磁石や空洞を直接冷やす一次系と、熱交換器を介して熱を受け取る二次系から構成されており、二次系の熱は開放型冷却塔によって気化熱として放熱される。このため、外気温と湿度が上がると冷却塔での冷却効率が下がるため、一次冷却水の供給温度を一定以下に保てなくなる。ここで、冷却水システムの一次系と二次系間の熱交換効率を評価する指標として、以下のような温度効率 $\phi$ を使用した。

$$\phi = \frac{T_{1\_in} - T_{1\_out}}{T_{1\_in} - T_{2\_in}}$$

式中の各  $T$  は、熱交換器に出入りする水温を示しており、定義は図 2 に示す通りである。

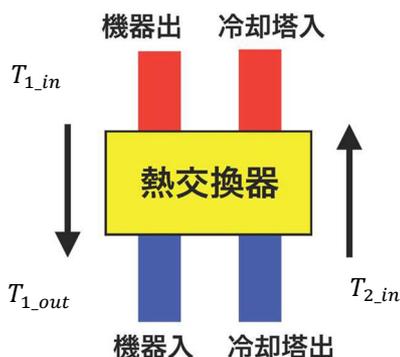


Figure 2: Schematic of thermal exchanger.

式の上辺は、一次系の冷却水の出入りの温度差であり、冷却効率を直接示す値である。下辺左の  $T_{1\_in}$  は熱源の負荷の大きさを反映しており、下辺右の  $T_{2\_in}$  は二次系の冷却性能を反映するため、これらの差で割ることで負荷と二次系の影響を大雑把に規格化することが出来る。RCS の冷却水システムは、2016 年に一次系のポンプの流量を増加させており、それ以前のデータは直接比較しづらいため、2016 年から 2021 年までの温度効率を評価した。その結果を図 3 に示す。図の縦軸が計算した温度効率、横軸はそのデータを取得した際の湿球温度を示している。データは年度毎に色に分けて示しているが、2016 年から毎年温度効率が下がっていることが判る。また、横軸の湿球温度にはあまり依存していないことから、式の下辺でうまく規格化できていると思われる。この結果から、冷却水システムの熱交換器が劣化していると判断し、2021 年の夏季保守期間に熱交換器を分解洗浄することとした。

図 4-6 に、RCS の熱交換器の洗浄時の写真を示す。熱交換器は、図 6 に示すようなプレートを数枚重ね、それを図 4 のように両側からかした構造であり、各プレート間の隙間を交互に一次冷却水と二次冷却水が流れ、プレートを介して熱のやり取りをする。分解洗浄に際しては、プレートを押し付けるボルトを緩め、図 5 にあるように 1 枚ずつプレートを取り外していく。この際、放射化

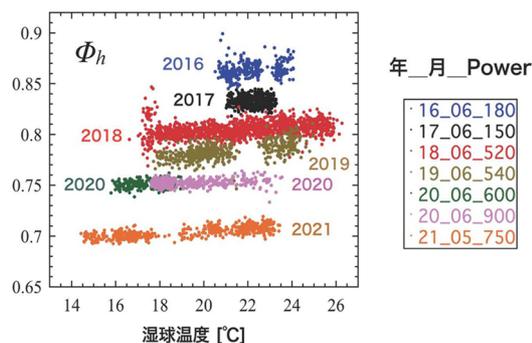


Figure 3: Thermal exchange efficiency.



Figure 4: Thermal exchange unit.



Figure 5: Disassemble of the exchanger plates.

水が流れていた一次冷却水側は全面スミアを実施し、汚染の無いことを確認してから持ち出しのための梱包を行った。分解した際の、一次冷却水側および二次冷却水側のプレート表面の状態を図 6 に示す。図の左が一次冷却水側、右が二次冷却水側の写真である。一次冷却水側は分解直後でも金属表面が見えているが、二次冷却水側に関しては茶色い汚れが全面にわたって付着しているのが判る。これは、一次冷却水システムはフィル



Figure 6: The exchanger plates. The left picture shows the primary loop side, and the right picture shows the secondary loop side.

ター等の付いたクローズループであるのに対し、二次冷却水システムは開放型の冷却塔を採用しており、蒸発した分の水を工業用水(工水)から常時足しているためである。工水は J-PARC を内包する原子力科学研究所が一括して所内に引きれた後、J-PARC 各施設に分岐して流入しているが、原子力科学研究所に入れる際にフィルタリング施設が無く、十分にろ過されずに使用されている。今回の分解によって工水の汚濁の状況を把握したので、今後定期的に熱交換器の洗浄を行う、あるいは二次系に十分なフィルターを入れる、等の対策を検討していく予定である。

今回の洗浄前後の冷却水温度を図 7 に示す。図の縦軸は冷却水温、横軸が屋外の湿球温度である。洗浄前の 600 kW 出力時の水温に対して、洗浄後は 800 kW を超える出力での運転でも 2 °C 程度低い水温を保てていることが判る。このことから、熱交換器の洗浄は効果があったと考えられる。

### 3.2 高周波空胴の更新

近年、余裕をもって 1 MW の運転を実施できるように、1 MW を越えるビーム出力の実現に関して検討と試験を進めてきた。これまでの予備試験の結果からは、RCS は 1.5 MW 相当の粒子を入射しても、加速初期段階では問題となるような大きなロスが発生しないことが判っている[4]。一方で、高周波空胴は大強度ビームを加速しようと

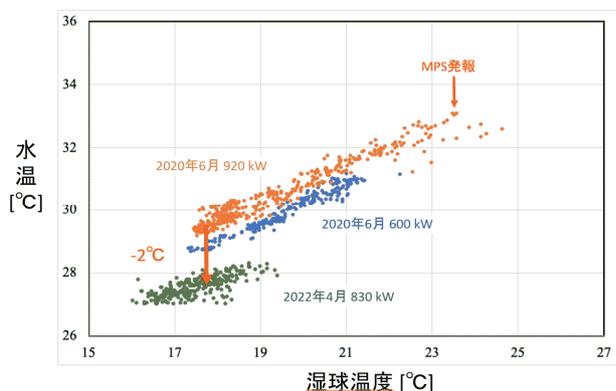


Figure 7: Cooling water temperature.

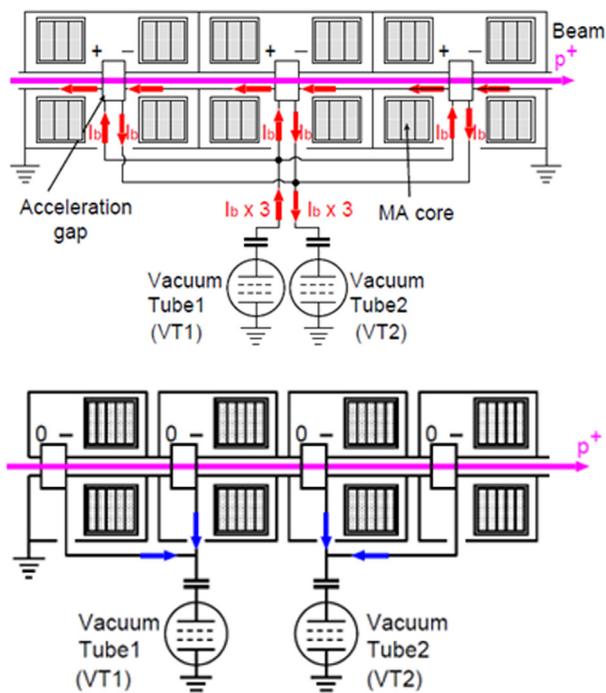


Figure 8: Schematic of the RF cavities. Upper figure shows the original cavity system, and Lower figure shows the new cavity system.

するとビームローディング補償に費やされる電力が飛躍的に増加し、電源容量を超えるため、現在のシステムでは 1 MW 以上のビームを 3 GeV まで加速することはできない。また、1.5 MW のビーム加速に必要なと予想される電力を賄うためには、非現実的な電源の増強が必要な状況である。そこで、大強度ビーム加速中の空胴システムの電力消費について詳細調査を行ったところ、終段アンプ内の真空管のプッシュプル動作と、空胴内のマルチハーモニック駆動の組み合わせにより、加速ギャップの上下流を励振する 2 台の真空管のバランスが崩れている

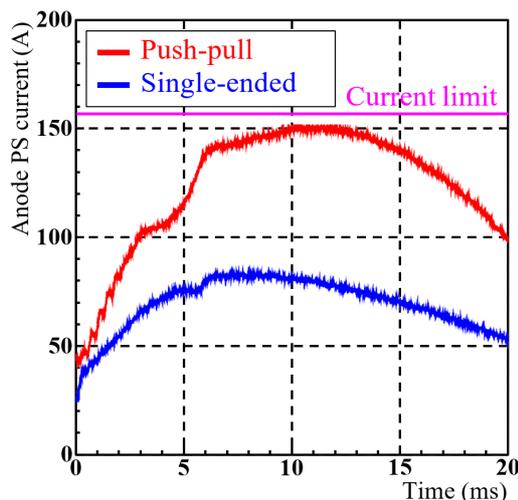


Figure 9: Input currents of the cavities.

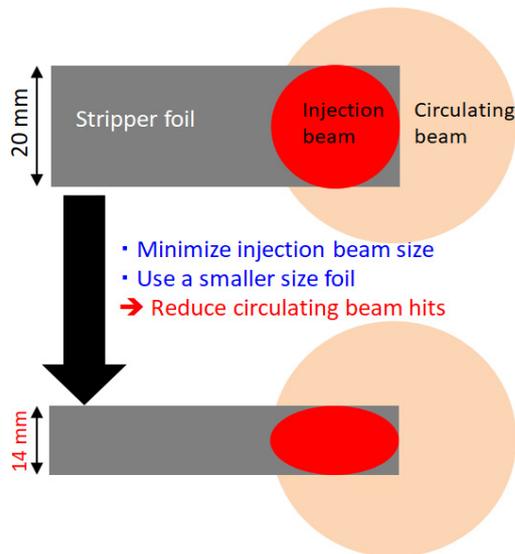


Figure 10: Injection beams and foils.

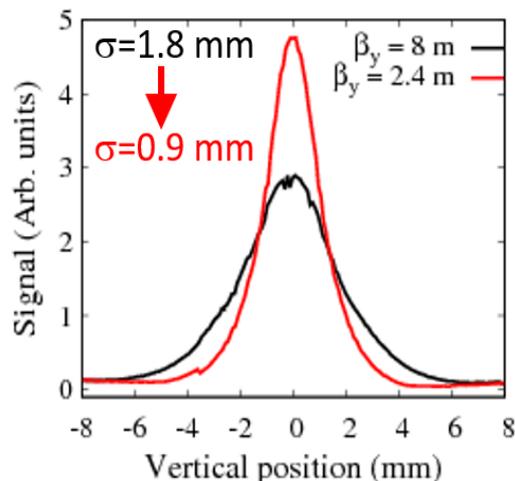


Figure 11: Injection beam profiles.

ことがわかった[5]。オリジナルの設計では、加速ギャップの上下流を2本の真空管によって独立に励振するプッシュプル方式を採用していた。理想的なプッシュプル動作では、上下流の真空管は加速電圧の半分を賄えば良いはずであるが、RCSでは空胴に複数の高調波を同時に励振するマルチハーモニック駆動をしているため、高調波の位相のずれの影響で、ギャップが要求する電流が片側の真空管に極端に偏る状況が生まれていた。この問題を解決するために、加速ギャップの下流のみを励起する新しい空胴(Single-end空胴)を開発し、入力電流を減らすことが可能となった[5]。図8に、新旧の空胴の概念図を示す。この新しい空胴を1台製作し、オフライン試験の後2021年の夏季保守期間中にRCSトンネルに設置して、ビーム加速試験を行った。その結果、新空胴は既設空胴と同様に1MWのビームを加速することが出来ることを確認し、しかもその際の消費電力は設計通り低減できることを確認した。図9に、新旧の空胴の加速中の消費電流を示す。空胴一台当たり、1MWの加速時

には電力消費量を820kWから487kWに抑えることができた。今後、予算の許す範囲で空胴の更新を進める予定である。

### 3.3 入射ビームとフォイルサイズの縮小

RCSでは、これまで実施してきたビーム調整及び改良によってビームロスを1MWに耐えられる状態まで低減してきた。現在発生しているビームロスの主要な原因は、入射フォイルによる周回ビームの散乱であることが判明しており、それをさらに軽減するため、入射ビームの垂直方向のサイズを小さくし、入射フォイルの垂直方向の幅も小さくする改善を試みた。図10に入射ビームとフォイルの関係の概念図を、図11に新たに試みた垂直方向ビームサイズの小さなビームのプロファイルを示す。具体的には、入射ビームの垂直方向のベータ関数をこれまでの8mから2.4mまで小さくすることで、ビームサイズの小型化を図った。これにより、入射フォイルの幅を従来の20mmから14mmまで狭めることができ、周回ビームがフォイルの当たる回数を30%削減することが出来た。さらに、実際にこの条件で利用運転を行い、目論見通り線量が低下することを確認した。

## 4. 1 MW 運転試験結果

3節で述べた熱交換器の洗浄の効果を確認するため、2022年6月24日(金)AM9:00より6月26日(日)AM9:00までの48時間、1MWのビーム試験を試みた。しかしながら、試験当日は6月としては記録的な猛暑となり、結果としてそのような気候においては、より抜本的な改善が必要であることを認識することとなった。図12に、試験の際のビーム出力と終段アンプの真空管周辺の冷却水温度、外気温の推移を示す。

試験は、9時より1MW用(実際には、申請値である1MWを越えないよう、CTの誤差等も考慮して910kW程度のピーク出力)のビームパラメータ調整を行い、実際に連続運転を開始したのは11:14からであった。一方、真空管を冷やす冷却水の温度も1MW運転開始直後よりじわじわと上がり始めた。その後、13時頃から外気温が急激に上昇し始め、最終的には13:33にRF真空管温度高のインターロックが発報し、ビームがストップした。停止後も外気温が高い状況で、冷却水の温度も下がっていかないことから、ビームパワーを800kWまで下げて14:21から再開した。しかしながら、800kWの条件でさえも運転途中で真空管の温度がしきい値近傍まで度々上がり、都度止めて冷却水の温度が下がるのを待ってから運転を再開する、という状況であった。ともかくも、夕方まではその状況で断続的に運転を継続し、19時以降外気温が下がるのを待って1MW運転の再開を試みた。しかしながら、冷却水温度はなかなか下がらず22時になってもトリップする状況であったため、あきらめて800kWで朝まで運転する事とした。翌6月25日(土)の朝8:30頃、真空管の温度がしきい値直前まで上がったため、インターロックが発報する前に停止した。このように、朝の時点で800kWですら運転できない状況であったことから、700kWでの運転も不可能と判断し、9時から600kWで

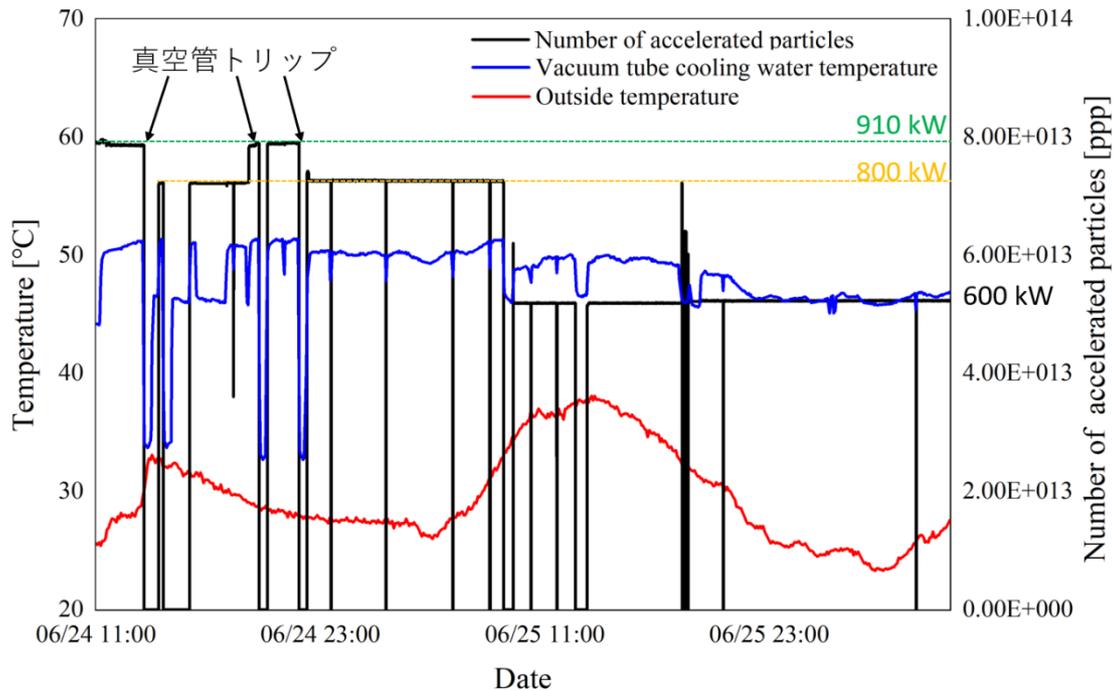


Figure 12: Trend of the accelerated particles, cooling water temperature and outside temperature.

の連続運転を再開した。その後、12:38頃、RF10号機で異常が発生しインターロックでビーム運転が停止した。今度は、温度異常ではなく屋外の受電盤でオーバーカレントが出ており、リセットしてもすぐに発報する状況であった。詳細調査にはRFの電源ヤードすべての機器の停電処置が必要であり、一方で600 kWであれば一台停止して10号機を除く11台でも運転可能であったことから、10号機のみ停止した状態で運転を再開した。冷却水温度が下がり始めた夕方18時頃からビーム出力を800 kWに戻そうとしたが、空洞が一台止まっているため800 kWおよび700 kWでは加速途中でまれにロスが発生し連続運転できない事が判明した。そのため、結局600 kWにパワーを戻して翌朝まで運転を行った。

## 5. まとめ

J-PARC RCSは、設計値である1 MWの大出力運転に向け、ビーム調整および各機器の改良を重ねてきた。2015年に単パルスでの1 MW試験に成功し、以降は安定な連続運転に必要な改良点の抽出を行ってきた。その結果、夏場の外気温及び湿度が高い状況では、冷却水システムの性能が落ち、機器を十分に冷やすことが出来ず1 MWの運転を維持できない事が判明した。冷却水システムの性能の指標となる温度効率の経時変化を調べたところ、年々悪化していることが判明し、2022年夏期保守期間中に洗浄を行い、性能の復旧を試みた。その結果、洗浄の効果は確認できたが、残念ながら酷暑、湿潤な日本の真夏の環境では冷却水システムの容量自体が不十分である事が判明した。一方で、このような環境でも600 kWで安定に運転することが出来ることも確かめられた。今後は、冷却水システムの増強を検討するとともに、6月以降の運転では計画的に出力を下げることも視野に置いて、運転計画を作っていく必要がある。

## 参考文献

- [1] K. Yamamoto *et al.*, “Design and actual performance of J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high intensity operation”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 59, (9), 2022; doi:10.1080/00223131.2022.2038301
- [2] 山本風海他, “J-PARC 3 GeV シンクロトロンでの1 MW 出力の達成”, *高エネルギーニュース*, 34(1), 19-28(2015).
- [3] K. Yamamoto *et al.*, “J-PARC 3 GeV シンクロトロン1 MW 運転状況”, *Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020*, pp. 209-213.
- [4] H. Hotchi *et al.*, “1 MW J-PARC RCS beam operation and further beyond”, *Proceedings of the 61st ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2021)*, Batavia, IL, USA, Oct. 4-8, 2021, MOIPI1.
- [5] M. Yamamoto *et al.*, “Conceptual design of a single-ended MA cavity for J-PARC RCS upgrade”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1067, 5 (2018) 052014.