

# BigRIPS の第一超伝導三連四重極電磁石 (STQ1) における励磁試験 EXCITATION TEST OF THE FIRST SUPERCONDUCTING TRIPLET QUADRUPOLE MAGNET (STQ1) IN BigRIPS

吉本雅浩\*, 日下健祐, 柳澤善行, 大竹政雄, 吉田光一, 道正新一郎

Masahiro Yoshimoto\*, Kensuke Kusaka, Yoshiyuki Yanagisawa, Masao Ohtake, Koichi Yoshida, Shin-ichiro Michimasa  
RIKEN Nishina Center

## Abstract

The first superconducting triplet quadrupole magnet (STQ1) at the RIKEN RI Beam Factory (RIBF) is a key focusing element of the in-flight RI beam separator BigRIPS. STQ1 enables large angular and momentum acceptance under high-radiation environments. This study analyzes the excitation test results of the P2 coils of STQ1, which constitute the second quadrupole magnet, conducted from 2009 to May 2025. In the tests, positive voltage spikes with durations of approximately 1 second were consistently observed at excitation currents of around 90 and 140 A. These spikes were presumed to be induced voltages caused by mechanical stress release in the four coils. Following a quench in April 2024, the frequency of irregular spike voltages with both positive and negative polarities increased. Simulations using PHITS estimated the accumulated radiation dose in STQ1 to be 1.8 Gy, approaching the critical dose of 2 Gy for epoxy resin, suggesting that material degradation may be contributing to the increased frequency of the irregular spike voltages.

## 1. はじめに

理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) は、安定核から遠く離れた不安定原子核の研究を目的とした加速器施設である [1]。2007 年の稼働開始以来、RIBF は大強度の不安定核ビーム (RI ビーム) を供給し、原子核物理や宇宙物理などの分野で多くの成果を挙げてきた。2025 年 7 月までに、174 個の新しい同位体を含む 1600 種類以上の RI ビームを生成してきた。

## 2. BIGRIPS と STQ1

### 2.1 BigRIPS

RIBF の大強度 RI ビーム生成を支える中心的装置が、インフライト型 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS である [2]。BigRIPS は超伝導リングサイクロトロン (SRC) [3] で光の速度の約 70% まで加速した重イオンビームを標的に衝突させることで、入射核破砕反応や核分裂によって不安定核を生成する。生成された不安定核は一次ビームとほぼ同じ速度で前方へ放出されるため、短寿命な原子核でも再加速することなく、そのまま RI ビームとして得られる。

BigRIPS は大きなイオン光学アクセプタンスと二段階分離手法により、高い収集効率と高純度での RI ビーム生成を可能にしている。特に、大立体角アクセプタンスの確保は、角度および運動量広がりを持つ RI ビームを効率的に収集するのに不可欠である。

### 2.2 STQ1

大立体角アクセプタンスを可能にする主要な集束要素が、標的のすぐ下流にある第一超伝導三連四重極電磁石 (STQ1、STQ は Superconducting Triplet Quadrupoles の略) である [4]。STQ1 は、半径 120 mm の大きなウォームボアをもち、極低温容器全体に対する放射線熱負荷

を減らすため空芯型で設計され、3 つの超伝導四重極電磁石 (上流から P1、P2、P3 コイル) で構成される。4 つのレーストラック形コイルで構成される P1、P2、P3 の有効長は、それぞれ約 50 cm、約 80 cm、約 50 cm である。P3 コイルの内側には超伝導六重極 (HEX) が配置されている。超伝導コイルの線材は NbTi で、素線絶縁にはポリエステルイミド、コイル整形の含浸剤としてアルミナフィラー入りエポキシ樹脂が使用されている。公称電流値は、P1 が 740 A、P2 と P3 が 628 A である。

BigRIPS を含むビームライン全体は 27 台の STQ で構成され、STQ1 を含む標的に近い 5 台の超伝導四重極電磁石 (STQ1 - STQ5) は大型冷凍機からの液体ヘリウムによって冷却され、残りの 22 台は小型冷凍機による個別冷却である。STQ1 - STQ5 は、年 2 回程度の実験前に約 10 日間かけて冷却され、励磁試験の後、数ヶ月にわたり実験で使用される。実験終了後は大型冷凍機を停止するため、自然に昇温し STQ1 は室温に達する。

## 3. STQ1 の励磁試験

### 3.1 試験手法

励磁試験は液体ヘリウムによる冷却後に実施した。試験の目的は、通電時におけるコイルの健全性を確認するとともに、長期安定性を調査することである。P1、P2、P3、HEX の各電磁石を個別に通電し、最後に一斉励磁試験を実施する。

励磁電流は、実験で予定されている最大電流値までランプアップする。四重極コイルのランプアップ速度は 0.4 A/s である。電流および電圧は、2009 年から 2022 年までは 8 Hz、2024 年以降は 1000 Hz でサンプリング取得した。2023 年は加速器の故障により実験を実施しなかった。測定は電源側で実施し、測定精度は電流は 70 mA で電圧は 2 mV である。

### 3.2 結果と考察

これまで、STQ1 ではトレーニングクエンチを除くと P2 コイルでのみクエンチが発生している。P2 コイル

\* masahiro.yoshimoto@riken.jp

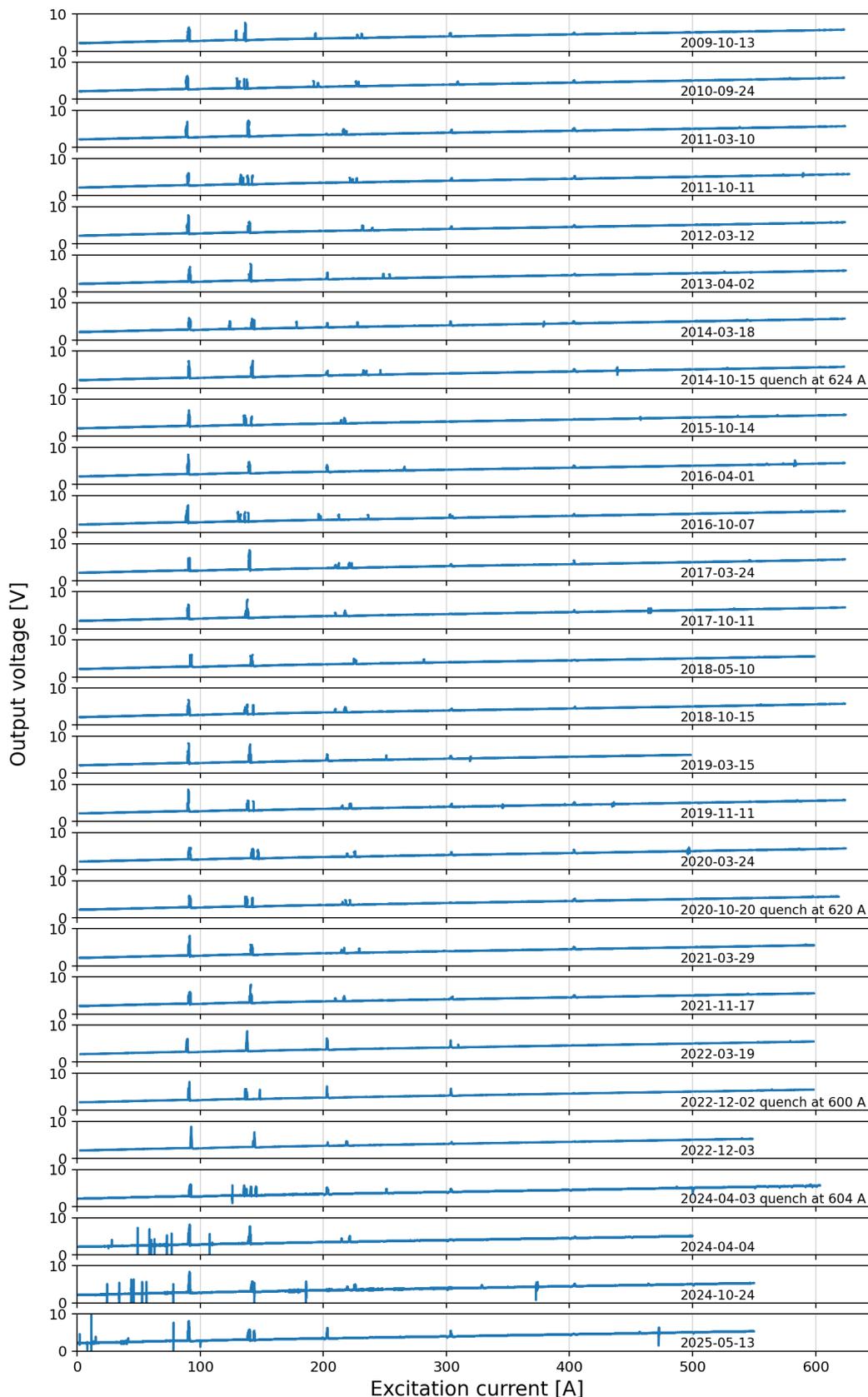


Figure 1: Correlation between excitation current and output voltage during the first ramp-up of the P2 coil in STQ1, the first superconducting triplet quadrupole magnet in BigRIPS, after cooldown. The sampling rate was 8 Hz until 2022 and 1000 Hz from 2024 onward.

のクエンチの発生日と発生時の電流値は以下とおりである。

- 2014年10月15日 624 A
- 2020年10月20日 620 A
- 2022年12月2日 600 A
- 2024年4月3日 604 A

今回は、P2 コイルの結果について解析した。

2009年から2025年までの、28回分のP2コイルの励磁試験の結果をFig. 1に示す。冷却後、初回のランプアップにおいて最初に到達した電流値を横軸に、その際に測定された電位差を縦軸に描画した。

ほぼすべての測定で、励磁電流が90 Aおよび140 A付近で、正の極性をもつスパイク電圧が発生していた。さらに、これより低い波高のスパイク電圧が190 Aから260 Aまでの電流値の間でランダムに発生していた。1000 Hzのサンプリングレートで記録を開始した2024年4月3日の測定で、92 A付近で観測された電流と電圧の波形をFig. 2-(a)に示す。電圧波形は1秒周期の4つの山なりの形状であり、これに同期した電流の変動も確認できた。このスパイク電圧は、発生後に電流値を0 Aにしてから再度ランプアップすると発生しなかった。よって、励磁に伴うコイルへの機械的応力の開放によってコイル全体が移動し、その結果生じた誘導電圧であると考えられる。電圧波形の4つの山はP2四重極コイルを構成する4つのコイルに対応すると考えられる。

2024年4月3日の126 Aで観測されたスパイク電圧の、電流と電圧の波形をFig. 2-(b)に示す。正と負の両方の極性を持ち、不規則な波形であり、約0.03秒継続した。電圧変動に同期した電流の変動はあまり見られなかった。2024年4月3日の580 Aで観測されたスパイク電圧は、正負の極性を持ち、126 Aのスパイク電圧と同様に不規則な波形で、振幅は小さいものの9秒間継続した。これらの正負の極性をもつ不規則なスパイク電圧の原因は未解明である。

2024年4月3日の604 Aでのクエンチ後、正負の極性をもつ不規則なスパイク電圧の発生頻度が増えた。コイルの材料の劣化による構造変化が関与している可能性がある。スパイク電圧の発生頻度、周期や振幅の定量解析は現在進行中である。

STQ1は、RIビーム生成標的のすぐ下流に設置されており、実験中に高放射線環境にさらされている。PHITSを用いた熱負荷のシミュレーション[5]を元に、2024年時点でSTQ1のコイルの蓄積線量は1.8 Gyと見積もられている。CERNの技術レポート[6]によると、含浸材に使ったエポキシ樹脂は2 Gyの蓄積線量で深刻な損傷(severe damage)を受けるとされており、STQ1の含浸材は臨界線量に近づいている可能性がある。

特に、2024年のクエンチ後に発生した新たなスパイク電圧はその予兆である可能性がある。今後、励磁試験におけるスパイク電圧の発生パターンが、コイルの健全性を予測する指標となり得るか検討する。

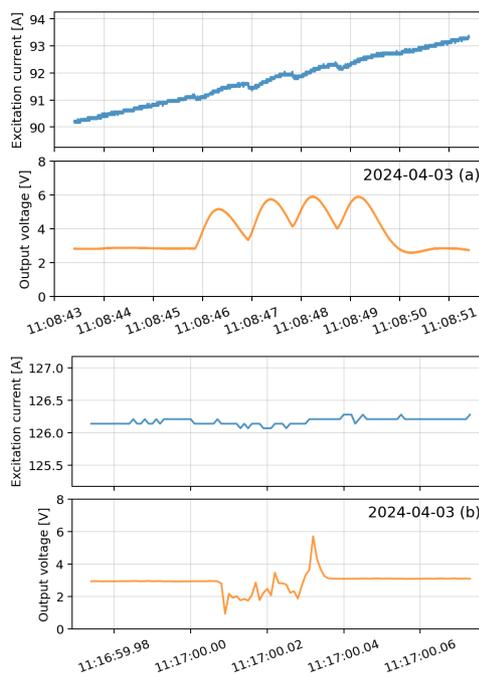


Figure 2: Excitation current and output voltage on April 3, 2024. (a) Around 92 A; (b) Around 126 A.

#### 4. まとめ

本研究では、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) における第一超伝導三連四重極電磁石 (STQ1) の P2 コイルについて、2009年から2025年5月にかけて実施した励磁試験の結果を解析した。P2 コイルでは、過去17年間の励磁試験において、特定の電流値で約1秒の周期をもつスパイク電圧が一貫して観測されており、機械的応力の開放によるコイルの移動が原因と考えられる。

2024年4月のクエンチ以降、周期の短い不規則なスパイク電圧の頻度が増加した。STQ1のコイルに蓄積した線量が、含浸剤のエポキシ樹脂の臨界線量に近づいており、劣化の可能性を示唆していると考えられる。装置限界の評価の為、スパイク電圧とコイルの健全性との関係性についての考察を引き続き進めていく。

#### 参考文献

- [1] Y. Yano, “The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report”, *Nucl. Instrum. Meth. B* vol. 261, pp. 1009-1013, 2007. doi:10.1016/j.nimb.2007.04.174
- [2] T. Kubo *et al.*, “BigRIPS separator and ZeroDegree spectrometer at RIKEN RI Beam Factory”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* vol. 2012, 03C003, 2012. doi:10.1093/ptep/pts064
- [3] H. Okuno *et al.*, “The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 17, pp. 1063-1068, 2007. doi:10.1109/TASC.2007.899864
- [4] K. Kusaka *et al.*, “An Air-Core Type Superconducting Quadrupole Triplet for the BigRIPS Separator at RIKEN”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 18, pp. 240-243, 2008. doi:10.1109/TASC.2008.920801

- [5] K. Kusaka *et al.*, “Beam Heat Loads to Superconducting Quadrupoles for BigRIPS In-Flight Separator at RIKEN”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 25, pp. 1-4, 2015. doi: 10.1109/TASC.2014.2365957
- [6] F. Guarino, C. Hauviller and M. Tavlet, “Compilation of radiation damage test data Part IV: Adhesives”, *CERN Geneva* 2001. doi:10.5170/CERN-2001-006