

RT-1 における Bi-2223 高温超伝導コイルの自然昇温による消磁

齋藤 晴彦^{*1}, 吉田 善章^{*1}, 小川 雄一^{*1}, 森川 惇二^{*1}, 矢野 善久^{*1},
水島 龍徳^{*1}, 水牧 祥一^{*2}, 戸坂 泰造^{*2}

Demagnetization of a Bi-2223 High-temperature Superconducting Coil in RT-1 through Spontaneous Temperature Rise

Haruhiko SAITOH^{*1}, Zensho YOSHIDA^{*1}, Yuichi OGAWA^{*1}, Junji MORIKAWA^{*1}, Yoshihisa YANO^{*1},
Tatsunori MIZUSHIMA^{*1}, Shoichi MIZUMAKI^{*2} and Taizo TOSAKA^{*2}

Synopsis: The Ring Trap 1 (RT-1) device produces a magnetospheric configuration for the confinement of a high- β plasma with a Bi-2223 high-temperature superconducting magnet. Here we report the results of emergency demagnetization of the superconducting coil, where we could not connect current leads, temperature measurement connectors, and connectors for a persistent-current switch (PCS) heater to the coil. The spontaneous warming of the coil caused a rise in the flux-flow resistance of the superconducting coil, and the persistent current slowly decreased as coil resistance increased. Approximately 98% of the total stored magnetic energy was safely released before the quenching of the PCS, and there was no substantial damage to the coil.

Keywords: fusion plasma, magnetospheric configuration, RT-1, high-temperature superconductor, Bi-2223

1. はじめに

Ring Trap 1 (RT-1)¹⁾⁻⁵⁾は Bi-2223 高温超伝導コイル⁶⁾を備えた磁気圏型プラズマ実験装置であり、高 β (β は磁気圧力で規格化したプラズマ圧力) プラズマの安定閉じ込めを目指す研究が進められている。プラズマに与える擾乱を抑制する為に、RT-1 では真空容器中に超伝導コイルを磁気浮上させ、それにより実験室に人工的な磁気圏を作り出す。これまでに、RT-1 では磁気圏型配位において 30%以上の高 β プラズマの生成に成功しており、また電子のみから構成される「非中性プラズマ」の 300 s 以上の長時間閉じ込めを実現している⁵⁾。先進燃料を使用する advanced fusion の原理確立や、反陽子陽電子プラズマ等の反物質閉じ込めへの科学的応用を目指すこうした研究は、長時間に渡り安定に磁場を発生する、高温超伝導線材を用いた磁気浮上コイルの技術開発により可能となった成果である⁷⁾。

RT-1 において、2009 年 9 月 7 日のプラズマ実験終了後、超伝導コイルの昇降機の一時的な不具合が発生し、通常の

手順でのコイル消磁が不可能になった。本稿では、この際に実施された自然昇温による永久電流の消磁の経過について報告する。コイル温度上昇に伴う磁束流抵抗の増大により永久電流は緩やかに減少し、PCS が臨界温度を迎えてオフになるまでの約 34 時間に、コイル電流は定格値の 13%まで減衰した。これにより、コイルへの急激かつ過大な局所的入熱は回避され、コイル本体に損傷を与える事なく消磁が実現された。

2. RT-1 装置と超伝導コイルの励磁・消磁

Fig. 1 (a) は RT-1 装置の断面図である。超伝導コイルの冷却及び励磁・消磁は、装置底部において実施する。RT-1 では、3 台の GM 冷凍機によりコイルを 20 K まで冷却後、励磁電源からの直接給電により、コイルに内蔵した YBCO 薄膜による永久電流スイッチ (PCS)³⁾を用いて定格電流 116 A (起磁力 250 kA) に励磁を行う (Fig. 1 (b)参照)。励磁したコイルを昇降機を用いて装置赤道面まで上昇させた後、真空容器上部に配置した引き上げ電磁石により制御磁気浮上を行い、約 6 時間のプラズマ実験を実施する。プラズマ実験に先立ち、真空容器中で遠隔操作によりコイルから電流リード、冷凍機、計測線を全て切り離し、実験中は無冷却状態で永久電流を保持する⁴⁾。低温超伝導線材を使用した内部導体装置と異なり、RT-1 ではコイルケース内にヘリウムは充填されておらず、コイル巻線の固体比熱のみを利用して低温が維持される。プラズマ実験の

Received November 15, 2009

^{*1} 東京大学新領域創成科学研究科

〒277-08561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan.

^{*2} 株式会社 東芝

〒105-0023 東京都港区芝浦 1-1-1

Toshiba Corporation,

1-1-1 Shibaura, Minato city, Tokyo 105-0023 Japan.

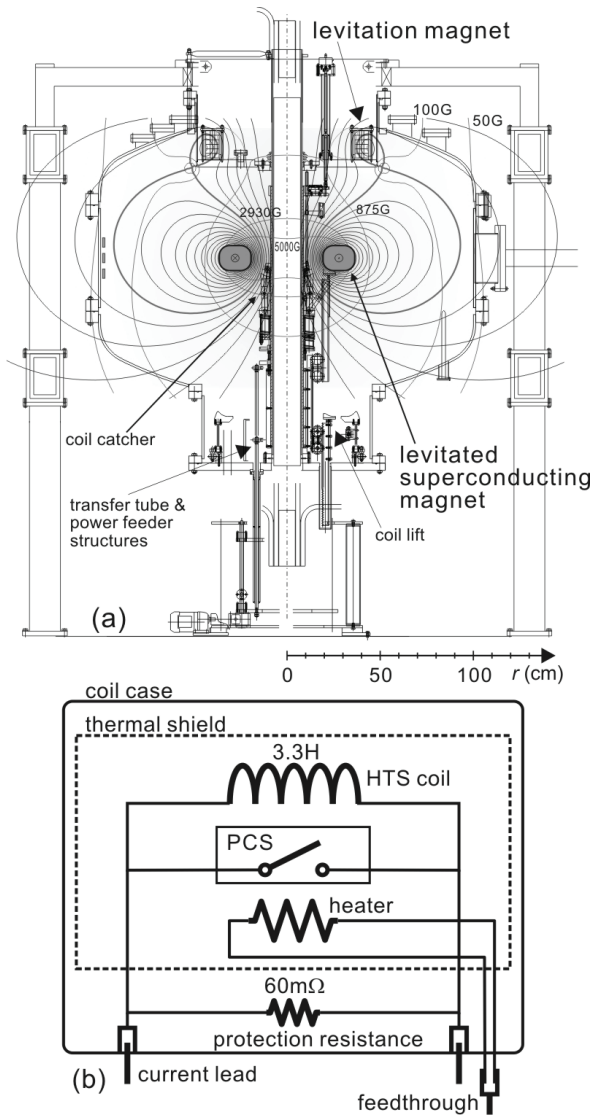


Fig. 1 (a) Cross-section of the RT-1 including the coil magnets, vacuum chamber, and magnetic surfaces. (b) Circuit diagram of the superconducting coil and PCS in the RT-1 device.

終了後は、昇降機によりコイルを再び真空容器底部に降下させ、計測線と電流リードを接続して励磁電源と PCS を用いて消磁を行い、冷凍機に接続してコイル再冷却を行う。冷凍機の切り離しから再接続を行うまでの温度上昇は 10 K 以下である。Fig. 2 に示す通り、通常の 8 時間の永久電流運転（うちプラズマ実験は 6 時間）を行った際の電流減衰は 0.14 A/hour であり、励磁から消磁までに定格電流 116 A からの電流減衰率は 1%以下に抑えられている。

2009 年 9 月 7 日の RT-1 におけるプラズマ実験終了時、真空容器内部でコイル昇降リフトに機械的不具合が発生した。この為、定格の永久電流が流れる超伝導コイルを装置底部へと回収して消磁と再冷却を行う事が不可能となった。

RT-1 では、何らかの原因で超伝導コイルと励磁電源が接続不可能となるトラブルに備えて、PCS 用ヒータや計測用コネクタをコイルに接続可能な場合には、PCS の強

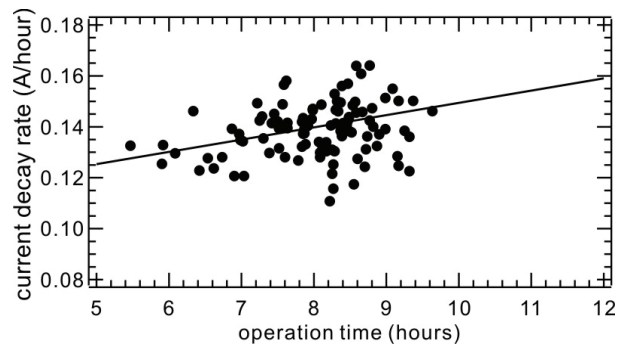


Fig. 2 Decay rate of the persistent current of the superconducting coil in the RT-1 device for various operating times without refrigeration.

制クエンチにより消磁を行う事が想定されている^{3) 4)}。Fig. 1 (b)に示すように、PCS クエンチ時のコイルへの急激な熱侵入を防止する為に、RT-1 のコイル内には熱絶縁の外側に 60mΩの保護抵抗が組み込まれており、強制クエンチ時には磁気エネルギーの大部分は保護抵抗で消費される。この場合には、定格の永久電流運転時に PCS オフにより強制クエンチを行った際にも、コイル本体に障害を発生させる事無く消磁可能である事が、実機試験により確認されている。

一方、正常なコイル回収が出来ない今回のケースでは、励磁電源への再接続に加えて計測線の再接続も不可能であり、PCS 操作や温度計測が一切出来ない状態からの消磁を行う必要がある。コイル冷却配管の真空は装置本体の真空と共通であり、真空度の悪化は、急激な入熱に伴う歪みを生じコイルの破損に至る為、真空容器の大気解放を伴う復旧作業の実施は不可能である。この場合には、コイルの自然昇温による消磁を待つ以外に有効な方策は存在しない。数値シミュレーションによれば、コイルの磁束流抵抗の増大により永久電流が減衰し、コイルの焼損を回避して消磁に至る可能性が示されている³⁾。しかし、この場合についての実機試験は実施されておらず、定格の永久電流が流れる高温超伝導コイルが外部操作不可能になった際、コイルに損傷を与えずに自然消磁が可能であるか否かは実験的には確認されていなかった。以下では、RT-1 の高温超伝導コイルにおいて発生した、定格永久電流通電時からの自然昇温の経過について報告する。Hall 素子によりモニタした電流減衰とクエンチ時の電流変化の測定結果について述べ、以前に実施されたシミュレーションによるコイル電流減衰の予測結果³⁾と比較する。

3. 定格永久電流の自然昇温による消磁の経過

当日の実験と電流減衰の経過は以下の通りである。9 月 7 日 10:00 にコイルを 116 A の定格永久電流に励磁し、再冷却を経て 12:20 に冷却系及び計測系を切り離し、コイルを上昇させプラズマ実験を開始した。切り離し時のコイル

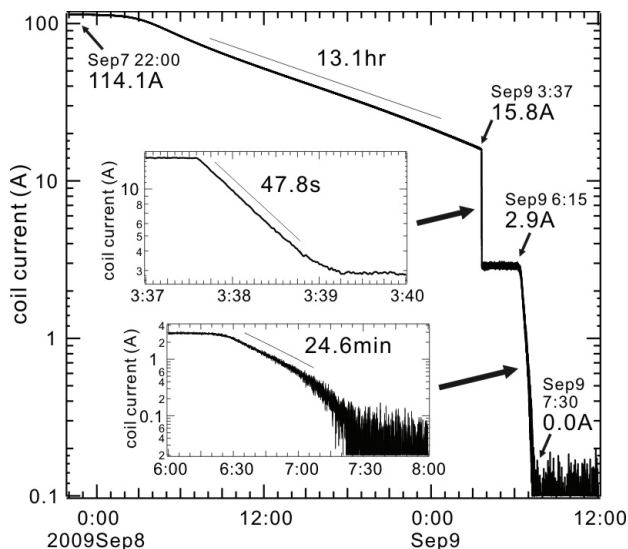


Fig. 3 Temporal evolution of the persistent coil current and the decay time constants measured using a Hall probe. Fitting curves are shifted vertically in order to avoid the overlapping of lines.

温度は 16.5 K である。17:30 にプラズマ実験を終了してコイル下降中に、コイルが装置赤道面と真空容器底部の中間に位置する状態で昇降操作が不可能となった。22:00 までにコイル下降を断念し、自然昇温による消磁を目指して Hall 素子による磁場強度（永久電流）のモニタを開始した。この時点のコイル電流値は、昇降機の機械的不具合によりバックラッシュが増大しコイル位置を正確に把握出来ない事と、昇降機の傾きによりコイルに傾きが生じた為に測定が困難である。Fig. 2 で、励磁から 12 時間の永久電流運転を行った際に外挿して得られるコイル電流減衰率は 0.16 A/hour であり、ここから 22:00 のコイル電流は 114.1 A と推定される。この値は Hall 素子による実測値と誤差範囲内で一致している事から、ほぼ正確な値であると考えられる。なお、RT-1 の真空容器はメカニカルブースタポンプとターボ分子ポンプにより排気され、プラズマ実験の終了から消磁まで 10^{-5} Pa 以下の真空度が保たれた。

Fig. 3 は 22:00 以降のコイル電流 I_{coil} の時間経過の測定結果であり、**Fig. 4** は測定結果と磁束流抵抗の増大によるソフトランディングシナリオの数値計算結果³⁾を比較したグラフである。数値計算では、フラックスフロー抵抗の増大と輻射及び熱伝導による熱負荷を考慮している。コイル温度 30 K 時の入熱は 0.9 W であり、その内訳は、多層熱シールドを介した輻射が 0.21 W、シールドの無い電流リード部からの輻射が 0.03 W、コイル支持材及び電流リード部、計測線等を介した熱伝導が 0.66 W、フラックスフロー抵抗による入熱が 0.004 W である。プラズマに面するコイルケースの表面温度は、室温に近い 300 K と想定しており、コイル支持状態と浮上状態で入熱の差異は考慮していない。フラックスフロー抵抗による以外に入熱は、実際には冷却完了時から時間的に増大するが、計算では平

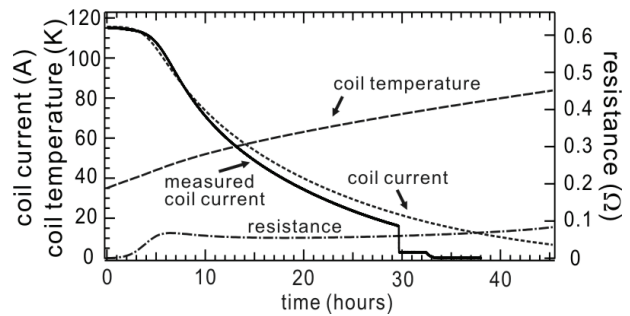


Fig. 4 Numerical simulation results³⁾ of the coil current, temperature, and flux-flow resistance of the superconducting coil without refrigeration. Measured coil current values are also plotted as a solid line.

均値として 2 W に固定している。Hall 素子による測定によれば、温度上昇による磁束流抵抗の増加に伴い、励磁から 16 時間が経過した翌 8 日の 2:00 頃から電流の減少率が増大し、その後は約 13.1 時間の時定数で減衰した。翌 9 日 3:37 に急激な電流減衰が発生し、 $I_{\text{coil}}=15.8$ A から 2.9 A まで 47.8 s の時定数で降下した。YBCO 薄膜を用いた PCS の常伝導転移温度は 85 K であり、この時点で PCS が転移温度まで昇温して PCS クエンチが発生し、電流が減衰したと考えられる。コイルの自己インダクタンス $L=3.3$ H と、並列に接続された保護抵抗 60 mΩ と PCS のオフ抵抗 1 Ω（合計 $R=56.6$ mΩ）による電流減衰時定数は $\tau=L/R=58$ s である。観測された時定数はこの値をやや下回り抵抗成分が約 12 mΩ 不足しているが、今回のケースでは保護抵抗の電流リードやコイル線材が通常の運転時よりも高温であり、電気抵抗値が高まっていた可能性を考慮すると妥当な値と考えられる。

9 日 3:37 の PCS クエンチまでに、励磁時にコイルに蓄えられた磁気エネルギーの 98% が磁束流抵抗によるジュール熱として緩やかに開放された。PCS は、定格の永久電流運転時にクエンチした場合にも損傷を受けない設計となっており、コイルや保護回路が損傷を受けた可能性は非常に低いと言える。Fig. 4 で、電流の実測値と数値シミュレーションによる予測値は比較的良い一致を示しており、磁束流抵抗の増大が電流減衰の主因である事を示している。実測された電流減衰の速度は計算をやや上回っており、30 時間後の両者には 5 A 程度の差異が生じている。また、この時点のコイル温度のシミュレーション結果 (70 K) は PCS の転移温度 85 K を下回っている。これらから当初の予想以上の磁束流抵抗の発生が存在した可能性も考えられるが、上述のシミュレーションは、ソフトランディングの可能性評価を目的として、輻射と熱伝導による入熱が一定と簡略化したモデルを用いており、この事が実測値と計算値の差異の原因である可能性が高い。

9 日 3:37 に 2.9 A まで減衰した電流は、2 時間 38 分に渡り減衰の小さいほぼ定常的な値を保ち、続いて 6:15 頃

に 24.6 分の時定数でゼロまで減衰した。計測ピンが接続不能な状態にありコイルの温度計測が実施されていない事もあり、このように 2 段階に分けてコイル電流が減衰した理由は明らかになっていない。予想される原因の候補として、永久電流の減衰に伴う磁場強度の低下により PCS の転移温度が上昇し、PCS が再びオンとなり再度永久電流モードが実現された可能性が考えられる。あるいは、PCS の転移温度 85K と Bi-2223 の転移温度 110 K が異なる為に、PCS クエンチが発生した時点以降も超伝導線材に残留磁化が存在した影響が考えられる。6:15 に電流が完全に減衰した際には、観測された減衰時定数がコイル回路の時定数 $\tau=L/R=58$ s よりも長い事から、磁束流抵抗の増大により緩やかな電流減衰が発生したものと推定される。

4. まとめ

本稿では、RT-1 において発生した Bi-2223 高温超伝導コイルの自然昇温による消磁の経過について報告した。永久電流運転を行うコイルを真空中に放置した結果、定格磁場への励磁と電源の切り離しから約 42 時間、冷却停止から約 40 時間が経過した時点で、自然温度上昇により PCS のクエンチが発生した。この間に磁束流抵抗によりコイルの磁気エネルギーの内 98%は緩やかに開放され、PCS 及びコイルに損傷を与える事なく消磁が実現された。今回の自然昇温による消磁の前後で、RT-1 ではコイルの電流減衰率や温度上昇率には有意な変化は観測されておらず、従来と同等のプラズマ実験が支障無く実施されている。

参 考 文 献

- 1) Z. Yoshida, et al.: "First plasma in the RT-1 device," Plasma Fusion Res. **1** (2006) 008 1-2.
- 2) Y. Ogawa, et al.: "Construction and operation of an internal coil device, RT-1, with a high-temperature superconductor," Plasma Fusion Res. **4** (2009) 020 1-8.
- 3) T. Tosaka, et al.: "Development of persistent-current mode HTS coil for the RT-1 plasma device," IEEE Trans. Appl. Supercond. **16** (2006) 910-913.

- 4) S. Mizumaki, et al.: "Development of the magnetically floating superconducting dipole in the RT-1 plasma device," IEEE Trans. Appl. Supercond. **16** (2006) 918-921.
- 5) Z. Yoshida, et al.: "High-beta (hot electron) plasma in Ring Trap 1 (RT-1)," IAEA Fusion Energy Conference, EX/P5-28 (2008).
- 6) T. Kaneko, et al.: "Status of Bi-2223 tapes performance and development," IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 2465-2468.
- 7) Y. Ogawa, et al.: "System design of a magnetically levitated internal coil device Mini-RT," TEION KOGAKU **39** (2004) 175-181 (in Japanese).
小川 雄一ら：「磁気浮上内部導体装置 Mini-RT の全体設計」, 低温工学 **39** (2004) 175-181.

齋藤 晴彦

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 助教.

吉田 善章

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授.

小川 雄一

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授.

森川 惇二

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 助教.

矢野 善久

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 博士課程.

水島 龍徳

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 修士課程.

水牧 祥一

株式会社東芝 電力システム社 京浜事業所 機器装置部.

戸坂 泰造

株式会社東芝 電力・社会システム技術開発センター 計測・検査技術開発部.