

東京大学での磁気浮上内部導体装置RTプロジェクト RT Project with a floating internal coil device in the University of Tokyo

小川雄一
Yuichi OGAWA

自然科学研究機構
National Institutes of Natural Sciences

1. はじめに

内部導体装置での核融合プラズマ研究は米国の FM-1 スフェレータをはじめとして歴史的には古くから研究されているが、東京大学の RT プロジェクトは、Mahajan-Yoshida により提唱された二流体緩和理論[1]に基づく超高ベータプラズマのダイポール磁場配位での実験的検証をめざしたものである。従って、スフェレータなどとは違い、プラズマをトーラス外側の bad curvature 部に閉じ込める。また従来の装置は低温超伝導コイルを用いていたのに対して、RT プロジェクトは高温超伝導コイルを磁気浮上させた点においても今までにない革新的な技術開発が求められた[2]。

2. 内部導体装置の概要

内部導体装置 RT-1 の概要を図 1 に示す[3]。本装置では、真空容器下部で高温超伝導コイルを冷却・励磁し永久電流モードとした後に、真空容器中央部までリフトアップして磁気浮上させプラズマ実験に供する。冷却は、着脱式のトランスファーチューブを介しての低温ヘリウムガス循環方式を採用したので、高真空下でのチャッキ弁を開発した。スフェレータ等では

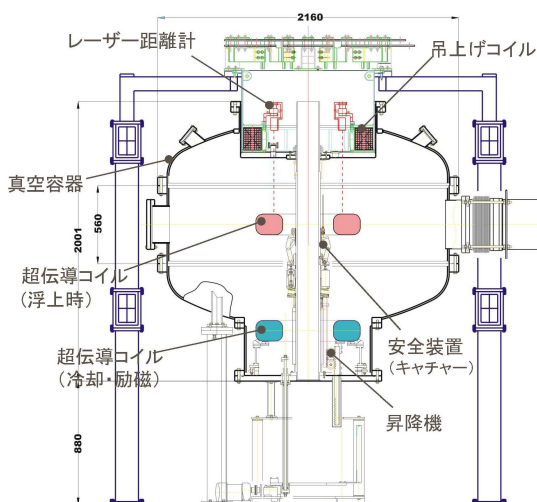


図 1 RT-1 装置の概要

誘導方式によりコイル電流を励磁しているが、高温超伝導コイルの場合、誘導コイル磁場を浸み込ますためにコイル温度を 80K レベルの常伝導状態まで昇温させる必要があるのと、比較的大きな励磁コイルが必要となる点を鑑み、本装置では誘導方式ではなく、外部電源からの直接励磁とした。そのため、着脱式の電極と永久電流スイッチを開発した。高温超伝導線材のコイル化技術および高温超伝導コイルの磁気浮上実験も未踏の領域であったので、RT-1 装置に先駆けて mini-RT を製作・運転[4]し技術開発とプラズマ実験での実績を踏まえて、RT-1 装置の最適化をはかりつつ設計・製作を行った。

3. 高温超伝導線材のコイル化

まず最初に Mini-RT 装置用として半径 15cm のコイルを Bi-2223 線材を用いて製作した。永久電流モードでの運転が達成されたが、電流の減衰時定数が 20 時間程度であったため、プラズマ実験の時間に大きな制約を課すこととなった。その原因として n 値の劣化が考えられた。引き続き製作した RT-1 装置(半径 25cm、250kAturn)では、その後改良された加圧焼結型 Bi-2223 線材を採用しコイル製作でもそれぞれの製作過程で n 値を常時チェックするなどの細心の注意を払った結果、8 時間の永久電流モ

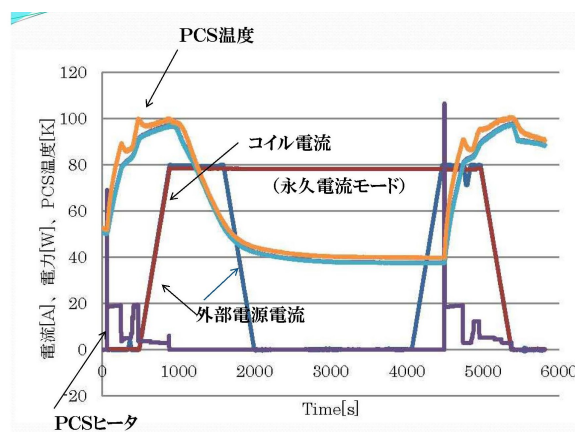


図 2 ReBCO コイルの永久電流モード運転

ードで1%程度の電流減衰という大変性能の良いコイルが製作できた。この減衰時定数は線材接続部の抵抗値でほぼ説明できる。

引き続き Mini-RT では ReBCO 線材を用いたコイル開発を行った。ReBCO 線材は薄膜多層構造なので、コイル冷却時の熱ひずみによる剥離が心配された。Mini-RT では ReBCO 線材製コイルの製作および冷却に細心の注意を払いコイル電流を励磁し永久電流モードで運転した結果、減衰時定数が300時間以上という特性の良いコイルを製作することが出来た[5]。図2にその代表的な通電波形を示す。

4. 真空容器内でのコイル冷却

Mini-RT ではチャッキ弁の先端部にテフロン性パッキンを用いた。そのため、冷却中の定期的な増し締めによりヘッド部の熱収縮を補償した。一方、RT-1 では金属パッキンの VCR 方式を採用することにより冷却中のリークを格段に減らす事ができるようになった。

Mini-RT では2台の GM 冷凍機で約10時間を、RT-1 では3台の GM 冷凍機で約2日間で所期の運転温度 20K まで冷却できた。

5. 永久電流スイッチと着脱式電流リードの開発

外部電源によるコイル電流の直接励磁の場合、コイル回路内にスイッチ機能（永久電流スイッチ PCS : Persistent Current Switch）が必要となる。一般的に PCS として超伝導線材の常温・超伝導転移が利用されている。図2に示すように、PCS の超伝導線材を昇温し常伝導化させ高抵抗状態としてスイッチオフ状態とし、超伝導コイル電流が励磁された後に、PCS を再冷却し超伝導化しスイッチオン状態として永久電流スイッチとしての機能を発揮させる。

Mini-RT 装置では Bi-2223 線材を、RT-1 では YBCO 薄膜を用いた PCS を開発した。前者は主コイルとほぼ同寸法の無誘導巻き方式のコイルを 0.3%Mn 添加の Bi-2223 線材で製作した。一方、RT-1 では、MAGLEV で開発された YBCO 薄膜製の PCS を採用した[6]。PCS の昇温はヒーターで行い、冷却は Mini-RT の場合、低温ヘリウムガスで、RT-1 の場合は超伝導コイルからの伝導冷却で行った。従って、Mini-RT では昇温・冷却に数分～数十分を要したが、RT-1 では数十秒から2分程度で十分だった。

着脱式の電流リードには、接触抵抗が低い、外部電源（室温部）からの熱浸入を抑える、真

空容器内での遠隔着脱が容易な構造である、などの要件が課せられた。

Mini-RT 装置では、装置が小型であるため、ハステロイ製のスプリングコンタクトを5本巻きつけた電流リード（直径6mm）を開発した[7]。一方、RT-1 では、MultilamTM コンタクトを採用した。その結果、いずれの装置でも、接続抵抗を 0.2 mΩ 程度まで低減できた。

超伝導コイルの励磁時は、外部電源（室温）と超伝導コイル（20 K レベル）が電流リードを介して機械的につながっているため、室温部からの熱浸入および接触抵抗による発熱に対して熱シールドをいかに確保するかが問題となった。その対策として、着脱式の電流リードを低温（数十 K）に冷却することとした。Mini-RT では着脱式の電極の大気側を液体窒素で冷却した。RT-1 では GM 冷凍機の1段目（50-70 K レベル）で冷却された低温ヘリウムガスを循環させて冷却する構造とした。

6. 磁気浮上制御とプラズマ実験

実験では、まず電流リードを挿入し永久電流モードを達成し、メカニカルに真空容器中央部までリフトアップする。その後、真空容器上部に設置された引上げコイルを駆動させ内部導体コイルを浮上させる。なお RT-1 装置では内部導体コイルを100ミクロン以下の精度で数時間にわたり安定に浮上させ、高周波によりプラズマを生成している。

謝辞：本研究を進めるにあたり、東京大学の吉田善章氏、森川惇二氏、斎藤晴彦氏、核融合科学研究所の三戸利行氏、柳長門氏、および九州大学の岩熊成卓氏に感謝します。

参考文献

- [1] S.M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. **81**, 4863 (1998).
- [2] 小川雄一、他、プラズマ・核融合学会誌、**82**(12) (2006) 807-816
- [3] S. Mizumaki, T. Tosaka, Y. Ohtani et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **16**, 918 (2006).
- [4] Y. Ogawa, J. Morikawa, T. Mito et al., J. Plasma Fusion Res. **79**, 643 (2003).
- [5] Y. Ogawa, J. Morikawa, et al., Plasma and Fusion Research, **9**, 1405014-1~12 (2014)
- [6] T. Tosaka, K. Tasaki, K. Marukawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond **15**, 2293 (2005).
- [7] 大國浩太郎, 小川雄一, 森川惇二他, 低温工学 **38**, 560 (2003).