

## 50T 高温超伝導無冷媒超伝導磁石の要素技術開発

Magnet technology development for 50T cryogen-free high temperature superconducting magnet

課題番号：18H05248

淡路 智（AWAJI, SATOSHI）

東北大学・金属材料研究所・教授



### 研究の概要

50 T 級の強磁場超伝導マグネットを目指して、REBCO インサートコイルの要素技術開発を行う。特に、REBCO 線材で問題となっている局所劣化とクエンチ保護について、その基礎特性を理解し、ロバストで焼損しないマグネット技術を確認、25T 無冷媒超伝導マグネットの Bi2223 インサートを置き換えることで、無冷媒超伝導マグネットの世界記録更新により実証する。

研究分野：応用物性関連

キーワード：超伝導磁石、高温超伝導

### 1. 研究開始当初の背景

1986 年に発見された高温超伝導材料は、30 年以上の年月を経て実用線材として販売されるようになり、応用化フェーズへ入っている。特に、高温超伝導線材はその優れた特性から 20 T を超える強磁場マグネットへの応用が期待されている。しかし、高温超伝導材料のマグネット応用における設計理論が、従来超伝導材料とは大きく異なるため、実用の強磁場マグネットは我々以外には実現していない。

### 2. 研究の目的

本研究では、我々が有する 52 mm の室温空間に 24.6 T を発生する世界最高実用無冷媒超伝導マグネットのノウハウを発展させて無冷媒超伝導マグネットの世界記録を更新することで、高温超伝導材料の持つ優れた性能を最大限に引き出し、50 T 超伝導マグネット開発のための基礎的現象の理解に基づく要素技術を開発する。

### 3. 研究の方法

強い磁場を安定に発生させる高温超伝導マグネット技術として以下の 4 課題を設定する。

- ① 伝導冷却を見据えたコイル化技術、
- ② 高い電磁力に対する機械的変形と補強、
- ③ クエンチ（熱暴走）現象の理解と保護、
- ④ 交流損失と不斉磁場、

コイル化技術としては、極力劣化防止を施し、さらに一部の劣化でも運電可能な無冷媒コイル化技術を実施。さらに、高い電磁力に耐

える補強コイルの変形挙動の解明、部分的に劣化した場合の熱暴走挙動の理解と保護方法に関しては、サーモグラフィによるクエンチ伝搬挙動の計測と、詳細なシミュレーションによるクエンチ挙動を理解し、保護方法を確立する。また、遮蔽電流や電磁気的な結合の影響を考慮した交流損失や不均一電流による影響を計算と実験から追求する。実用レベルの REBCO コイルを作製し、25 T 無冷媒超伝導マグネットのインサートを置き換えることで、無冷媒超伝導マグネットの世界記録 24.6 T を超える強磁場を発生させて、世界記録の更新を行い、将来の 50 T 級超伝導マグネットへの要素技術を実証する。

### 4. これまでの成果

アップグレード用 REBCO インサートコイルの概念設計の最適化を終了した。結果として、パンケーキコイルを用いることで約 250 A で 30 T を 32 mm の室温空間に発生できる見込みがたった。項目毎の成果を以下に示す。

#### ①コイル化技術

高磁場用線材として開発された人工ピン入り REBCO 線材の低温強磁場における臨界電流密度  $J_c$  特性と機械特性を詳細に評価し、その磁束ピンニング特性と機械特性を明らかにした。本コイルで予定している REBCO 線材 2 枚を組み合わせでバンドルして巻線し、エポキシ含浸したコイルを作製、4.2 K, 11 T における通電試験の結果、最大 540 MPa の電磁力まで問題無く通電できることが確認した。このとき、バックアップ磁

場 11 T 中での通電により、コイル内部では最大 540 MPa の電磁力が印加された計算である。電磁力試験前後で、液体窒素温度における通電試験を行った結果、コイル臨界電流はほぼ同じであるが、 $n$  値と呼ばれる  $IV$  特性の指数 ( $V \propto I^n$  の指数  $n$ ) が 27 から 19 へと若干の減少が見られた。これらは、線材の一部が電磁力により劣化した可能性を示唆しているが、それでも 2 枚バンドルの分流効果でコイル特性そのものは大きな劣化なしで通電が可能であることを示している。

#### ② 機械的変形と補強

R&D コイルの電磁力下の変形挙動について評価した結果、コイル内面に現れるひずみは最大で約 0.3-0.4% となり、外面のひずみよりも若干高くなることが分かった。電磁力の計算結果を実験で得られたひずみを比較した結果、コイルの変形挙動は巻線が独立に変形する独立変形とコイル一体変形の間となることが分かった。これは、エポキシ含浸によってテープの端部分（コイルの上面と下面）のみが接着されることで、線材が機械的に独立な場合と一体変形の間となっていることが示された。

#### ③ クエンチ現象の理解と保護

クエンチによる焼損が問題となる REBCO コイルについて、有限要素法を用いて局所的に  $I_c$  が大きく劣化したと仮定して計算すると、サーモグラフィで実験的に得られたコイル内温度分布を再現できることが分かった。これを 4.2 K に拡張することで、局所劣化による発熱の場合のクエンチ挙動を調べることができる。実際に、25 T 無冷媒超伝導マグネットの内層 REBCO コイルのクエンチ挙動について計算した結果、25 T 無冷媒超伝導マグネットの内層 REBCO コイルのクエンチ挙動も再現できることが分かった。これらの結果から、伝導冷却のためにコイルに貼り付けたアルミ伝熱シートを介して、線材長手方向だけでなく径方向や、隣のパンケーキ間にも伝搬が起り、線材の熱容量が大きく寄与して焼損までの時間が確保できることが理解できた。加えて、補償コイルを用いることでコイルの遮蔽電流による発生電圧への異常な振る舞いについて、実験と計算の両面により理解することができた。

#### ④ 交流損失と不斉磁場

2 枚バンドル導体を巻いたパンケーキコイルで発生する交流損失に与える局所印加磁場の平行成分と垂直成分の影響を定量的に評価するために、有限要素法 (FEM) を用いた数値解析を実施した結果、導出した理論表式により数値解析結果を定量的に再現できることが分かった。

上記の理論表式を用いて HTS インサート

全体で発生する交流損失を評価した。その結果、2 枚バンドル導体における超伝導層間の安定化銅の厚さが 50  $\mu\text{m}$  の場合に発生する交流損失は、励磁開始後約 10 分で最大 20 W 程度となるが、温度上昇に伴う小型冷凍機の冷凍能力の劇的向上により、HTS インサートを安定に運転できる見通しを得ることができた。上記の結果に加えて、2 枚バンドル巻線コイルの場合には、テープ幅方向の遮蔽電流と 2 枚のテープ間結合のカップリング電流の 2 種類の遮蔽電流が存在する。この 2 つの遮蔽電流は中心磁場に対して、前者は遅れる方向に、後者は進む方向に（すなわち励磁中は前者が磁場を下げ後者は磁場を上げる方向）に作用する。両者の競合した結果が実験的に見られ、シミュレーションでもテープ間の距離に依存して効果が変化することが見出された。

#### 5. 今後の計画

これらの結果を踏まえて、4 積層コイルによる確認後、実証コイルの設計・製作を行い、25 T 無冷媒超伝導マグネット用 Bi 系高温超伝導コイルを置き換えて、実証試験を実施する。ここでは、現在無冷媒超伝導マグネットの世界記録である 24.6 T を超えて 30 T の発生を目指す。設計上は、400 MPa 以下の電磁力で 30 T が 32 mm 室温ボアに発生できる予定である。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 1) S. Fujita *et al.*, "Mechanical properties of BaHfO<sub>3</sub>-doped EuBCO coated conductors fabricated by hot-wall PLD on IBAD template," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **30** (2020) 8400205 (5pp).
- 2) S. Awaji *et al.*, "Field Stability Analysis of 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet and Upgrade Plans for 30 T System at HFLSM, IMR, Tohoku University," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (2019) 4300305 (6pp).
- 3) S. Fujita *et al.*, "Flux-Pinning Properties of BaHfO<sub>3</sub>-Doped EuBCO-Coated Conductors Fabricated by Hot-Wall PLD," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (2019) 8001505 (5pp).
- 4) A. Badel *et al.*, "Simulation of Local Dissipation Phenomena in the REBCO Insert of the 25-T CSM Magnet: Understanding and Preventing Destructive Thermal Runaway," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (2019) 4600605 (5pp).

#### 7. ホームページ等

<http://www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp/>