

高磁場発生を目指した高温超電導バルク磁石の開発

材料技術研究部 超電導応用
研究室長 富田 優

1 はじめに

高温超電導バルク体¹⁾は、強い磁束ピン止め効果を利用し臨界電流密度が高いため、永久磁石の10倍以上もの磁場を発生することが可能であり、核磁気共鳴（NMR）、電流リード、フライホイール等の各種応用が期待されている。

近年の材料研究は溶融バルク材料の臨界電流密度は飛躍的に高くなり、それに伴って超電導材料が受ける電磁力も増大し、材料強度の負担が大きくなってきた。発生磁場値は強度の限界値に準じるほどにもなってきており、これは発生磁場特性の劣化にも通じる深刻な問題である²⁾。この実用上不可欠な発生磁場向上の課題に取り組み、樹脂含浸³⁾と金属含浸⁴⁾の合理的な強化・低温安定化法により、高温超電導で17.24テスラの発生磁界を持つ超電導磁石を開発した⁴⁾。

2 磁場発生の妨げ

2.1 電磁力の問題

近年、バルク体の開発で臨界電流密度の向上から、材料強度で捕捉磁場が制限されるという問題が浮上している。これは、機械強度が不充分であると、磁場中で励磁を行う際に図1に示すよう電磁力が働き、バルク体内部に破損が生じるためである。小さな破損が1テスラ以下でも見られ、より高い磁場となるとバルク全体にまで割れが生じやすくなる。また、冷却および昇温時の熱ひずみによっても内部応力が発生する。その結果、発生磁場特性の劣化を引き起こし、超電導バルク磁石の実用化の妨げになっている。

2.2 ボイドやクラックの存在

超電導バルク材料は正方晶から斜方晶への相転移による歪の影響で、結晶方向に微小クラックが生成しやすい。また、バルク体は熱膨張係数が大きくかつ熱伝導率が小さいことと、異方性が強く劈開しやすいことから、製造の冷却過程に試料内部と外部で引張応力が発生し、微少クラックが形成されてしまう問題がある。

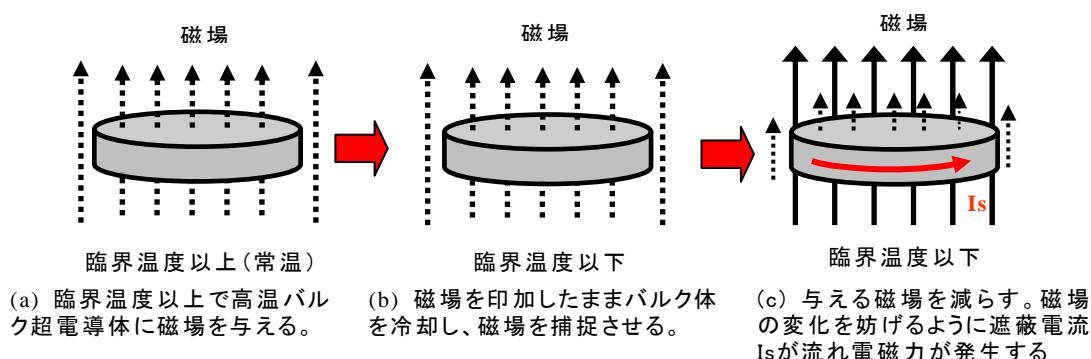


図1 電磁力発生メカニズム

強度不足の抜本的な対策なく、これまでバルク体を鉄等の金属で覆い、補強を行っている。しかし、この方法では、磁場は密閉空間でしか得られず、自由空間で利用できない。また、バルク体の外部からの補強では材料マトリックスそのものを強化していないため、ボイドやクラック部に集中して発生する局部的な内部応力を緩和することができない。

3 樹脂含浸による機械的特性向上

3.1 エポキシ系樹脂による真空含浸

これまでの強化手法では、内部の微小クラックの進行を防ぐことは困難で、発生磁場の磁場低下が進行しやすい。

そこで、ボイドや微小クラック部を直接強化する含浸法を提案した。含浸材料としてはバルク超電導体の含浸に要求される最終性能に適合するエポキシ系樹脂で調製した。含浸工程は主剤樹脂と硬化剤のそれぞれを30°Cまで予熱した状態で、配合組成（重量比）100:32で混合させ、真空下で脱気を行う。次に、バルク超電導体を70°Cまで予熱し、真空槽の中で減圧した後、バルク体を脱気後の樹脂に浸し、この状態で、大気圧以上に加圧した。

3.2 機械的特性向上と磁場特性

バルク体の破壊は、磁場の捕捉過程による電磁力（ローレンツ力）と液体窒素の浸漬冷却による熱応力の二つの原因が考えられる。捕捉磁場が高くなるにつれ、次第に前者の電磁気力の破壊要因が支配的となってくる。バルク超電導体の巨視的な電磁現象はマックスウェルの方程式(1)で記述される。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

μ_0 、 J 、 E 、 B はそれぞれ真空の透磁率、電流密度、電場、磁束密度である。磁束密度 B は超電導体を流れる遮蔽電流 J_{SC} と外部電流 J_{ex} から生じる。

試料表面を完全に固定する条件下ではフープ・半径方向応力のピーク時における最大値がバルク中央に引っ張り応力として生じる。この時、直径 46mm 厚さ 15mm のバルク体の場合、樹脂が充分浸透できるバルク表面より約 5 mm 境界で最大応力が生じる。このことから、樹脂含浸をその領域まで施すことによって、超電導バルク体の内部ひずみが抑制でき、捕捉磁場特性が向上できる。

4 高磁場発生の妨げ

4.1 低温不安定性と発熱

これまで述べたように、樹脂含浸により超電導バルク体の強度は向上し、その捕捉磁場は飛躍的に伸びた。ところが、未知の領域である約14テスラの磁場値を超えたところで、いくら強化策を施しても、磁場を着磁する際、図2に示すように急激な温度上昇を伴い、磁場を捕捉できないことがわかった。

超電導を極めて強い磁石として使おうとすると、図3に示すような低温不安定性という問題が生じる。バルク体を励磁しようとすると、外部から量子化磁束が超電導体内部に侵入していくことになるが、この磁束の運動に伴って必ず微小発熱が生じる。この熱が外部の冷媒

によって、すぐに取り去られれば問題はないが、発熱が続くと、局所的に温度が上昇してしまう。その結果、その部分の臨界電流密度が下がることによって、超電導特性が低下し、磁場がこの超電導の弱い部分になだれのように突入する。その際、周辺では磁束移動が誘発され、さらに温度が上昇する。高い磁場下では、この磁束なだれ現象が生ずると、深刻な問題を引き起こす。それは、超電導が破れるだけでなく、局所的かつ急激な磁場変化による大きな電磁力で、超電導磁石自体が破壊してしまうという致命的な問題である。つまり、14テスラの磁場領域を境にこの現象が顕著に現れ、磁場捕捉ができなくなつたのである。なお、高温超電導の量子化磁束移動に伴う発熱現象を実験的に捕らえたのは、国内外で初めてである。

5 金属含浸による熱的特性の向上

5.1 低融点合金による真空含浸

超電導バルク体の場合の不安定性は、その熱伝導率の低さに起因している。加えて、樹脂材の熱伝導率も低い。しかも、高磁場捕捉に必要な温度50K以下では、低温になるに従って一般に物性の熱伝導率は一層低下する。樹脂の熱伝導性が劣るならば、含浸材料に伝熱性に富んだ物質を使い、逆に含浸技術で内部の発熱を外部に逃がすことができる。そこで、あらかじめ樹脂含浸したバルク体の中心部に削孔して、低温下で高熱伝導率のアルミ物質を挿入し、低融点合金による含浸を施した。

5.2 热的特性向上と高磁場特性

高磁場特性金属含浸を施した超電導バルク体について、発熱が顕著に現れる14テスラ付近をさらに超える着磁実験を行った。実験試料は直径26.5mmのイットリウム系超電導バルク体である。図4に使用した試料の内部構造とその断面顕微鏡写真を示す。バルク体周辺にはあらかじめ含浸した樹脂の浸透が認められ、バルク材本体が強化されている。真空含浸によって、低融点合金がバルク内のクラック内部まで侵入し、バルク材とアルミ材の間の熱を伝達するための重要な役割を担う構造である。その結果、発熱時においても素早く熱が伝達され、その熱は外部に導かれる。その結果、高磁場の着磁が可能となり、温度29Kにおいて、

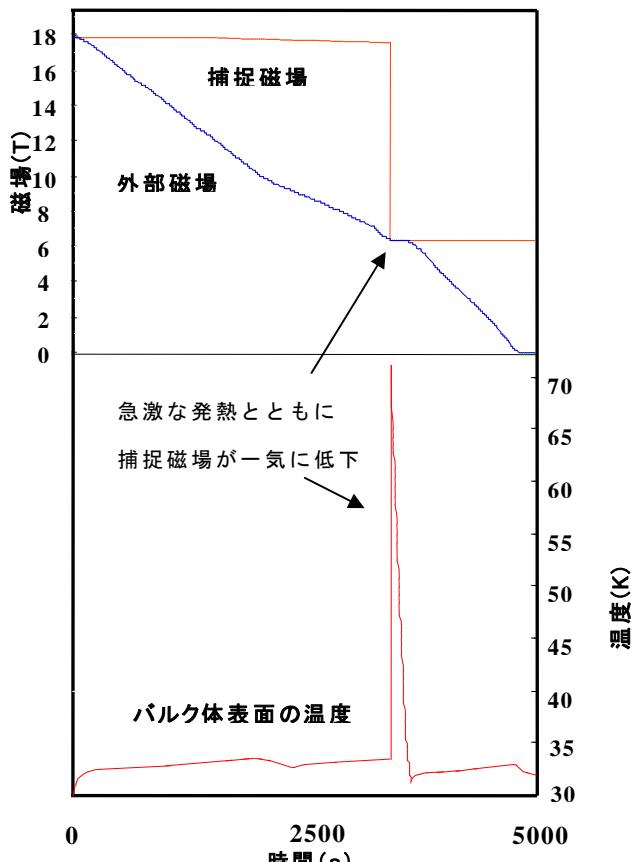


図2 高磁場捕捉時の発熱と捕捉磁場

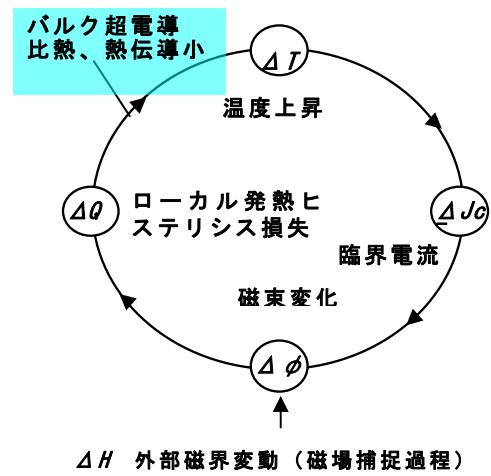


図3 超電導の低温不安定性サイクル

外部磁界変動→磁束が変化→温度上昇→臨界電流値低下→捕捉が不可となる

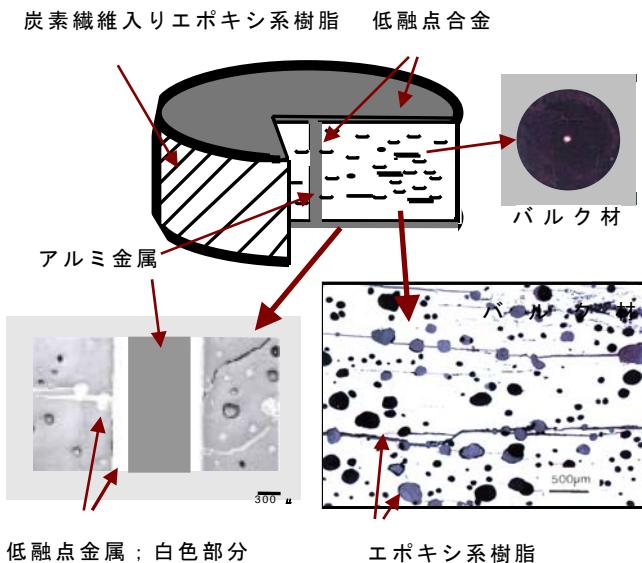


図4 樹脂含浸と金属含浸を施した

高温超電導バルク磁石

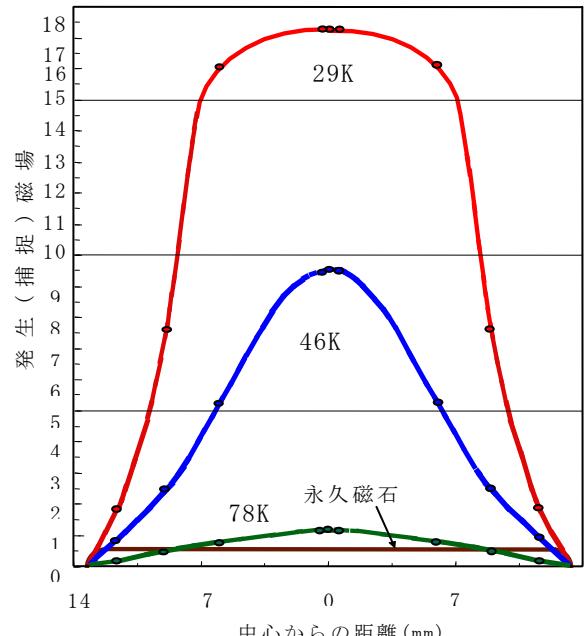


図5 開発した高温超電導バルク磁石の発生磁場

17.24テスラの極めて高い磁場を捕捉することができた。

6 おわりに

超電導バルク体を樹脂含浸によって強化し、発生磁場特性を向上させた。磁束移動による発熱現象を確認し、金属含浸を施す工夫によって、問題となる熱的特性を改善した。これらの複合技術によって、バルク体の機械的特性と低温安定性向上を図り、17.24テスラの磁場捕捉（発生）に成功した。バルク超電導磁石を汎用の冷凍機で冷却することで、高磁場を自由に持ち運ぶことができ、多くの応用分野へ波及効果が見込まれる。この技術は、電流リード⁵⁾、フライホイール、磁気分離装置、超電導モータ、NMRやMRI等⁶⁾の開発に活用されている。

参考文献

- 1) S. Jin, et al.; Stress and field dependence of critical current in Ba₂YCu₃O_{7-d} superconductors, *Appl. Phys. Lett.*, 51, 855-857, 1987.
- 2) 富田優; 樹脂含浸技術による高温超電導体の特性向上と超電導応用, 鉄道総研報告, 17, 5, 35-40, 2003
- 3) 富田優他; 酸化物超電導体及びその製造方法 特願平10-361722, 1998
- 4) M. Tomita, et al.; High temperature superconductor bulk magnets that can trap 17.24 T at 29K, *Nature.*, 421, 517-520, 2003.
- 5) 富田優他; 樹脂含浸したREBaCuOの磁気浮上式鉄道用パワーリードへの応用, 電気学会リニアドライブLD-00-76 49-54 2000
- 6) Y. Iwasa, et al.; A "persistent-mode" Magnet Comprised of YBCO Annuli, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15 2352-2355, 2005.