

【隔月連載記事】

バルク超電導磁石の誕生（その6 最終回）

SRL/ISTEC 第1・3 研究部長

村上雅人

1. はじめに

材料開発の歴史を振り返ると、材料そのものの特性が十分であっても、周辺技術が整わずに、実用化には至らなかったという例がやまのようにある。超電導バルク磁石も、その磁場特性は永久磁石をはるかに凌駕するものの、機械特性が脆弱であるために、その本格的な実用化が危惧されたのである。

RE123系材料（実際にはRE123マトリックス中にRE211相が微細に分散した複合材料）は、高温でのピン止め特性にすぐれ、能力的には77Kにおいても3Tという永久磁石よりもはるかに高い磁場を捕捉することが可能である。ピン止め効果は温度低下にともなって飛躍的に向上するため、50K程度まで冷却すれば10T程度という非常に高い磁場を捕捉することも可能となる。これだけ、高い磁場を発生できるということは応用上の魅力はつきないが、一方で、この磁場を有効に利用できないという問題が生じた。

それは、励磁の際に、バルク超電導磁石が破壊することである。また、励磁だけではなく、液体窒素冷却を何度か繰り返すうちに、捕捉磁場性能がだいに低下していく疲労現象も観察されるようになった。これは、温度サイクル時の熱ひずみと、励磁の際の電磁力の組み合わせによるものである。

いずれにしても、機械特性に不安があったのでは、超電導バルク磁石の強磁場応用は難しい。

2. 超電導バルク磁石の機械特性の向上

この問題は、はやくから多くの研究者によって認識されており、その対策もいくつか講じられてきている。例えば、銀添加はバルク超電導体そのものの機械特性を向上させるのに有効であり、一般に市販されているものには銀が10%程度添加されている。しかし、銀を均一分散させるのが難しいため、破壊の起点そのものを完全に抑制することは難しい。

そこで、バルク超電導体のまわりを金属製のリングで囲う方法が考案された。いわば一種の焼きばめによる強化方法である。この場合、金属の熱膨張係数がバルク体よりも大きいため、低温に冷却すると金属がより縮もうとし、バルク超電導体に圧縮応力が予荷重として加えられる。実は、電磁力によって発生する力はフープ力、すなわちバルク体の外側に向かう力であるため、あらかじめ圧縮応力がバルク体に加わっていると、耐フープ力性が大幅に向上するのである。この処理により、超電導バルク磁石の捕捉磁場能力や、機械強度に対する信頼性は大幅に向上することになった。

しかし、この手法は間接な強化法であり、バルク超電導体そのものの機械特性を改善するものではない。ここで、思わぬ手法が効果を発揮することになる。低温超電導コイルにおいても強磁場を発生すると、大きな電磁力が働く。特に励磁の際には電流を変化させるため、その影響で超電導線が動くと、コイルがクエンチしてしまう。これを防ぐために低温用のエポキシ樹脂でコイルを線ごとしっかりと固定する方法がとられる。

この樹脂含浸法を超電導バルク体に適用すると、予想外の効果が得られたのである。バルク体は溶融法でつくられるため、見た目では高密度のセラミックス体であるが、複合組織に由来するクラックや、溶融時に発生する酸素ガスなどの影響で内部に空孔が存在する。

これら欠陥が割れの原因になることが知られている。特にセラミックスの場合、表面きずが破壊の起点になる。実は、溶液状のエポキシ樹脂にバルク体を浸し、外気を脱気すると、図1に示したように、バルク体表面のクラックを通して超電導体内部に樹脂が浸透することが分かったのである。しかも、このクラックを通して浸透した樹脂は図にみられるように、空孔をも充填する。この結果、飛躍的に機械強度が向上するのである。

樹脂とバルク体の熱膨張係数の違いによるクラックの進展なども懸念されたが、樹脂の熱収縮率が高いうえ、樹脂とバルク体との結合力が非常に強いと、結果としてバルク体の機械特性を高める方向に機能することがわかった。

ただし、表面に付着している樹脂は熱サイクル時のひずみによってひびが入る。しかし、この問題も、樹脂にガラス繊維を添加したり、あるいは、炭素繊維でバルク体を覆ったうえで樹脂含浸することで、バルク超電導体との樹脂層の熱膨張係数の差を小さくすることで回避することが可能となった。このような樹脂含浸処理したバルク超電導体の機械特性は飛躍的に向上する。

もちろん、バルク体の内奥部まで樹脂が浸透できるわけではなく、その深さは5mm程度である。このため、大型のバルク体では、内部の機械特性がほとんど改善されないという問題が残った。しかし、これにも解決策が見つかった。要は、バルク体の中央付近に人工的な穴を設けて、そのうえで樹脂含浸処理を施すのである。すると、この穴を通して樹脂がバルク体内部に浸透し、さらに穴に通じているクラックを通して、内部の空孔を樹脂で充填することも可能となる。この簡単な手法により、バルク体の周辺部だけでなく、バルク体内部の機械強度を高めることが可能となったのである。

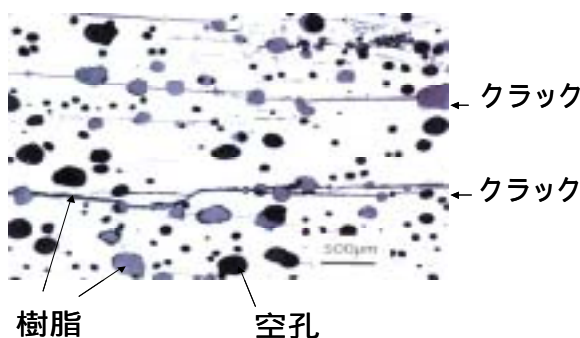


図1 エポキシ樹脂含浸処理したバルク Y-Ba-Cu-O の断面写真。クラックに沿って樹脂が浸透し、内部の空孔を充填している様子が分かる。

3. 超電導バルク磁石の捕捉磁場特性

このようなエポキシ樹脂含浸処理した超電導バルク磁石の機械特性は飛躍的に向上する。このため、繰り返し励消磁を行っても、捕捉磁場特性が劣化しない。また、機械特性が向上するので、低温における捕捉磁場特性が大きく改善され、図2に示すように、約2.5cm直径の小さなバルク Y-Ba-Cu-O 磁石が 30K では約15T という驚異的な磁場を捕捉することも可能となった。このような大きな磁場は、他の磁性材料では発生不可能な強磁場である。

また、樹脂含浸処理は機械特性の向上という利点だけではなく、耐食性をも大きく向上させるという副次的な効果ももたらした。これによって、強磁石をいろいろな環境で利用することが可能となったのである。この磁石を利用した水浄化用磁気分離装置もすでに開発され商品化されている。何よりも、10T を超える磁場を発生する磁石を開発できたということは、従来にない新しい応用の道が開けたことを意味している。

超電導バルク磁石の誕生は、超電導の歴史において、まったく新しい超電導の機能が見つかったといっても過言ではない。今後、この分野が大きく発展することを期待して、この物語を終わりたいと思う。

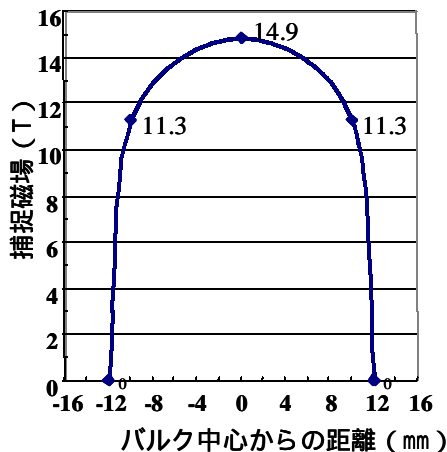


図2 直径2.6cmのY-Ba-Cu-Oバルク超電導磁石を30Kまで冷却し、18T超電導コイルを使った励磁した場合の捕捉磁場分布。中心で約15Tの磁場が捕捉されている。

[超電導 Web21 トップページ](#)