

## 【隔月連載記事】

### バルク超電導磁石の誕生（その5）

SRL/ISTEC 第1・3研究部長  
村上雅人

#### 1. バルク超電導磁石の機械特性

高性能の単ドメイン高性能バルク超電導材料が合成できる種結晶法溶融プロセス技術が開発され、また、Y系よりも臨界電流密度の高いRE系が発見されたことで、超電導バルク磁石の捕捉磁場は飛躍的に向上した。

ところが、超電導バルク磁石を応用に供しようとする、いくつか問題点があることが判明してきた。まず、バルク磁石はREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>系からなるが、この系では超電導化するために酸素富化処理が必要となる。この際、正方晶から斜方晶への変態が生じるが、この変化にともない、c軸が長くなるが、その応力緩和機構がなくc軸に垂直な方向にクラックが形成される。これらミクロクラックが均一かつ微細に分散していれば機械特性という観点では、その向上につながるが、実際には不均一に分布し、マクロクラックも生成してしまう。このようなバルク体を液体窒素などで直接冷却すると、クラックが進展し、場合によっては破壊してしまう。目に見えるクラック進展がない場合でも、冷却や励磁を繰り返すと、次第に捕捉磁場が低下していく現象が観察される。これは、冷却や昇温時に熱応力が発生することに一因がある。バルク超電導体の熱伝導率は低いため、冷昇温時の表面と内部には大きな温度差が発生し、大型のバルク超電導体では、それにとまなう熱衝撃は100MPaを超えてしまう。この値は、バルク体の引張強度よりも大きい。

また、捕捉磁場が大きいほど、つまり超電導特性にすぐれたバルク磁石ほど、励磁の際に発生する電磁力が大きくなる。特に、磁場中冷却を行う際には、大きな外部磁場が存在する条件下で、誘導電流が発生するため、バルク体に大きな電磁力が働き、その結果バルク体が破壊されるのである。

#### 2. バルク超電導磁石の劣化

高温超電導体の特徴として、温度を低下させると、臨界電流密度が急激に上昇することが知られている。その結果、捕捉磁場が飛躍的に向上することから、世界各地で捕捉磁場の記録が競われるようになった。その値として10Tを超えるものも報告されたが、残念ながら、高い捕捉磁場をねらった実験では測定中にバルク体が破壊され、その後の測定ができなくなってしまうのである。しかも、高い捕捉磁場を記録しても、簡単に割れてしまうのでは、使いものにならない。バルク磁石の超電導特性から換算すると、その磁石性能は非常に高いが、低い機械特性のために、その性能を十分生かすことができないのである。

さらに、バルク超電導体を使った永久磁石の浮上デモが、各所の科学博物館で行われているが、その担当者から、使っているうちにバルク体がぼろぼろになってしまうという苦情が寄せられるようになった。実は、バルク体は水と反応してしまうのである。バルク超電導体にはわずかではあるが、未反応のBa-Cu-Oが残存している。特にクラックが発生している箇所には、このような未反応物質が存在する。これが水と反応して水酸化バリウム、炭酸バリウムへと反応が進んでしまうのである。

よって、機械特性の向上と耐食性の向上が実現されない限り、バルク超電導体の本格的な応用は難しいということが判明したのである。耐食性に関しては、なんらかのコーティングを行うことで対処できるが、機械強度は本質的な問題である。このため、バルク応用開発研究の課題は、超電導

特性向上ではなく、いかに機械特性を向上させるかに移行したのである。

### 3. バルク超電導磁石の機械特性向上

まず、超電導体そのものの機械特性向上には銀添加が有効であることが分かった。しかし、これだけでは不十分であるため、金属製のリングでバルク体のまわりを囲い、熱膨張係数の差を利用して、圧縮力がバルク体に加わるような処理を施す技術が開発された。しかし、この方法は円柱状の試料には有効であるが、四角形や六角形ものには適用できない。

ここで、画期的な技術が誕生した。樹脂含浸技術である。セラミックス材料では、表面欠陥の存在が、その機械特性の劣化につながるということが知られている。さらに、熔融バルク体には残留ガスや酸素の発生で空孔が形成される。この空孔の存在もバルク体の機械特性低下につながっている。

樹脂含浸技術は、低温超電導コイルにおいて電磁力による素線の動きによるクエンチを防ぐために開発された技術である。しかし、コイルではないバルク体に、どの程度の効果があるかは疑問であった。ところが、エポキシ樹脂を 100 前後に加熱して溶かした中にバルク体を浸し、外気を真空引きし、常圧にもどすと、図 1 に示すように、表面クラックを通じて樹脂がバルク体内に浸透することが分かったのである。しかも、クラックにつながっている空孔にも樹脂が浸透し、このおかげで機械特性が飛躍的に向上することが明らかになった。

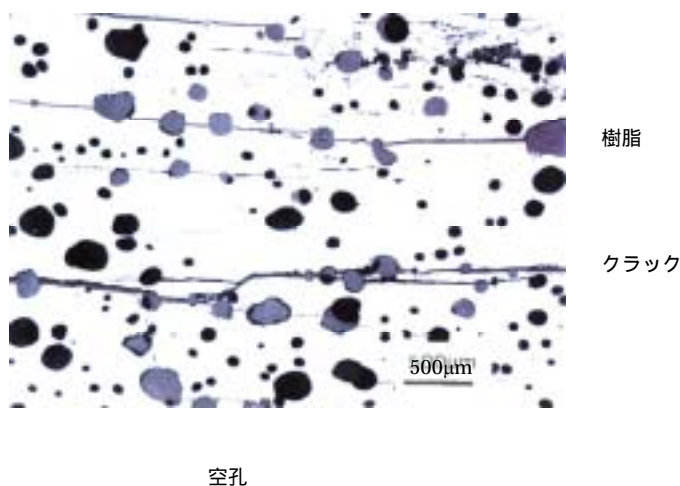


図 1 エポキシ樹脂含浸処理を施した熔融 Y-Ba-Cu-O バルク超電導体の断面図。バルク超電導体には、図に示すようなクラックや空孔が内在する。バルク超電導体を熔融したエポキシ樹脂に浸し、脱気すると、表面クラックを通して、樹脂がバルク体内に浸透する。写真において、グレーの領域が樹脂の浸透した部分である。クラックを通して、内部の空孔まで樹脂が浸透し、充填している様子が見られる。

さらに、樹脂含浸には、さらに大きな効果があった。まず、樹脂が表面を覆うことで耐食性が飛躍的に向上したのである。完全にバルク体と外気の接触が遮断されるため、腐食性雰囲気においても、まったく問題がなくなったのである。さらに、樹脂の熱伝導率が低いため、バルク体を急激な熱変化にさらしても、バルク体に働く熱応力が大幅に緩和されることも分かった。よって、たとえ、液体窒素中にバルク体を直接浸しても、劣化するという心配がない。素人のデモにも耐えることができる。もちろん、冷却には時間を要するが、その分、冷却装置が止まっても、すぐに温度が上がらずに、超電導状態をしばらく保つことができる。さらに、樹脂含浸は金属リング強化と一緒に施すこともできる。この技術の開発で、バルク体をいろいろな環境下で自由に使いこなせるようになった。

#### 4. 磁気分離装置

樹脂含浸バルク磁石の応用の第1号は、水浄化用の磁気分離技術である。この装置の原理を図2に示している。この磁気分離では、バルク磁石の強い磁場と磁気勾配を利用して、汚水からフィルターによって漉された汚濁物質(磁性粒子と結合させフロックとしたもの)を分離するものである。この装置には四角形状のバルク磁石が使われているが、超電導コイルを利用して3T程度まで励磁している。この装置開発の成功は、バルク磁石が温度変化、励消磁という条件に耐える機械特性を有することを証明した。さらに、実際の磁気分離は実地で行われるため、耐環境性が要求されるが、この装置開発によって、バルク超電導磁石は、いろいろな環境下で自由に使えることが明らかになったのである。

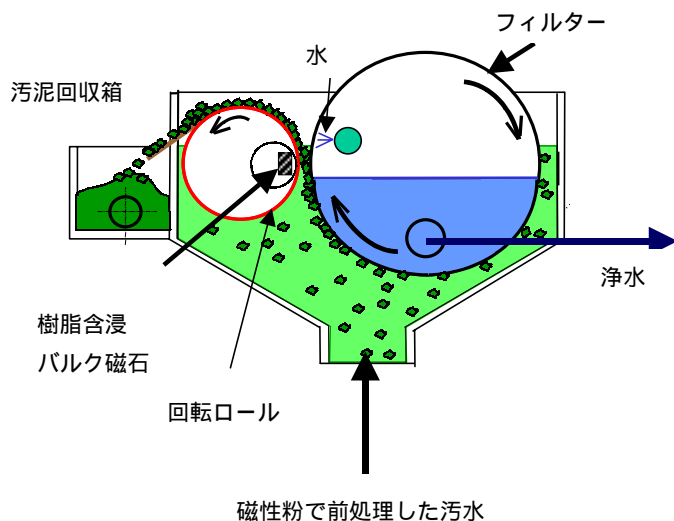


図2 日立製作所が開発した水浄化用の磁気分離装置。フィルターで漉した汚濁物質(磁性フロック)を樹脂含浸処理を施したバルク超電導磁石の強力な磁力でフィルターから引き離して回収する。フィルターの洗浄が不要となるので、連続運転が可能となる。

しかし、樹脂含浸技術でも解決できない新たな問題が生じた。それは熱伝導率が低いがために、バルク体内で一度熱が発生すると温度が上昇してしまうという問題である。このため、磁場変化で磁束が運動して発熱すると、バルク磁石の温度が上昇し、常電導になってしまうのである。当然、大型になればなるほど、この問題は深刻である。なんと発熱の問題があるためにバルク超電導磁石は使いものにならないという論文を発表するグループまで出る始末である。この問題への対処方法は次回最終章で紹介する。

[超電導 Web21 トップページ](#)