

バルク超電導磁石の誕生 Nature 誌への掲載

SRL/ISTEC 第1・3 研究部長
村上雅人

バルク超電導磁石誕生の物語は、2002年「隔月連載記事」に6回の連載を経て、無事ハッピーエンドで完結した。しかし、その物語は画竜点睛を欠いていたのである。実は、連載中には書きたくても書けない事情があったのである。それは低温安定性と呼ばれる超電導磁石の実用化に非常に重要な性質についてである。おそらく、超電導磁石の専門家は、バルク磁石の連載を読んで、安定性は大丈夫なのかと疑問に思っていたはずである。

なぜ、書けなかったかということ、その解決策を Nature へ投稿していたからである。ご存知のように、Nature は事前の情報漏洩を極端に嫌う。めでたく2003年1月30日号への掲載(M. Tomita & M. Murakami: Nature, vol. 421, pp. 517 - 520) が決まったので、大手を奮って書くことができるようになった。

超電導を強い磁石として使おうとすると、宿命として必ず低温不安定性という問題が顔を出す。低温超電導磁石では、超電導状態が突然壊れる「クエンチ」という現象でよく知られている。

高温超電導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。バルク磁石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、この磁束の運動にもなって必ず発熱が生じる。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がないが、発熱が続くと、局所的に温度が上昇してしまう。すると、その部分の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。英語でも flux avalanche つまり磁束なだれと呼んでいる。

強い磁場下では、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、超電導状態が破れるだけでなく、図1に示すように、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。

ところで、本連載でも紹介したように、大きな磁場を発生するためには、超電導バルク磁石の大型化が重要である。しかし、高温超電導体は酸化物であるため、熱伝導率がかなり低い。よって、大型になるほど熱的不安定性が増大するのである。例えば、表面から離れたバルク体内部で発熱が起こっても、その熱をすぐに取り去ることはできない。

実は、脆弱な機械特性とともに熱的不安定性は、バルク超電導磁石が抱える大問題として、海外の研究者から指摘されていたのである。バルク材料開発は世界の中で、日本が圧倒的な優位を誇っている。新しいRE系材料の開発、臨界電流密度、捕捉磁場、その大きさの世界記録もすべて日本で樹立されたし、いまだに日本の研究者が記録更新を続けている。さらに、機械特性問題を解決した樹脂含浸技術も日本が開発してきた。それだけに、日本の成果に海外の研究者がけちを付けるという、いままでの学問にはない面白い対立軸ができています。

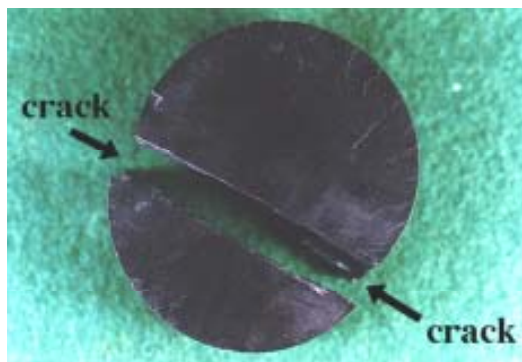


図1 磁場を捕捉させる実験中に、大きな電磁力でバルク体が破壊した例。

しかし、この熱的安定性の問題は、ある工夫をすれば解決できるだろうと個人的には確信していた。それは、バルク体に孔を空けて、金属を導入するという手法である。低温超電導体では、熱的安定性を高めるために、熱伝導率の高い銅やアルミニウムの中に超電導体を埋めるという手法を使っている。バルク磁石は、この逆で、バルク磁石の中に熱伝導率の高い金属を埋めればよいのである。孔は機械加工で簡単に開けることができ、しかも母体にダメージを与えない。

そこで、最初に取り組んだのが、銀の導入であった。バルク体に銀を添加するという手法は、機械特性向上のために一般に行われている。また、銀添加で熱伝導率が向上するという事も知られていた。顕微鏡で組織を観察すると、内部の空孔やクラックに銀が浸透している様子が観察できる。そこで、銀の棒を人工的に設けた孔に挿入して、熱処理を行えば、銀がうまい具合に孔のすみずみまで浸透するだろうと予想していたのである。しかし、予想したように浸透はせず、孔を空けた分、この付近の機械特性が劣化するという問題が生じてしまい、期待した結果が得られないことが分かったのである。

ここで、登場したのが樹脂含浸法である。実は、樹脂のかわりに低融点合金のウッドメタル (Bi-Pb-Sn 合金) を使っても含浸がうまくできるのである。そこで、人工孔を設けたバルク体にウッドメタルを含浸すると、図2のように人工孔を埋めるだけでなく、その孔とつながっているクラックを通じて内部の空孔などの欠陥をも埋めてくれることが分かったのである。これにより、内部の機械特性が飛躍的に向上することになった。さらに、熱伝導率を高めるために、孔にあらかじめ熱伝導率の高いアルミニウム棒を差込んでからウッドメタルで含浸するという手法を採用した。この手法により、バルク体の熱的不安定性も見事に解決し、実用化に十分耐えうるバルク超電導磁石が誕生したのである。

図3は、このような処理を施したバルク Y-Ba-Cu-O 磁石の捕捉磁場である。直径たった 2.6cm の大きさで、なんと 29K で 17T 以上の磁場を捕捉している。しか

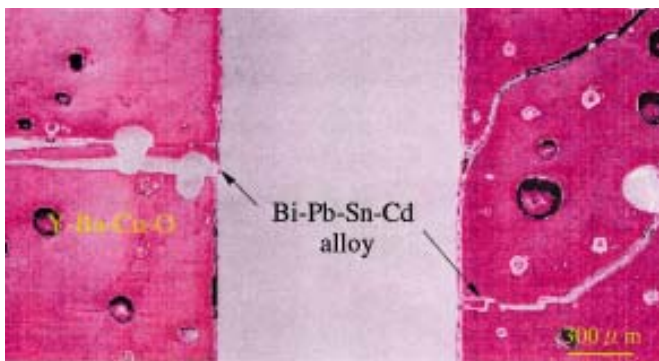


図2 人工孔を通してウッドメタル (Bi-Pb-Sn-Cd) がバルク体内部に浸透している様子。

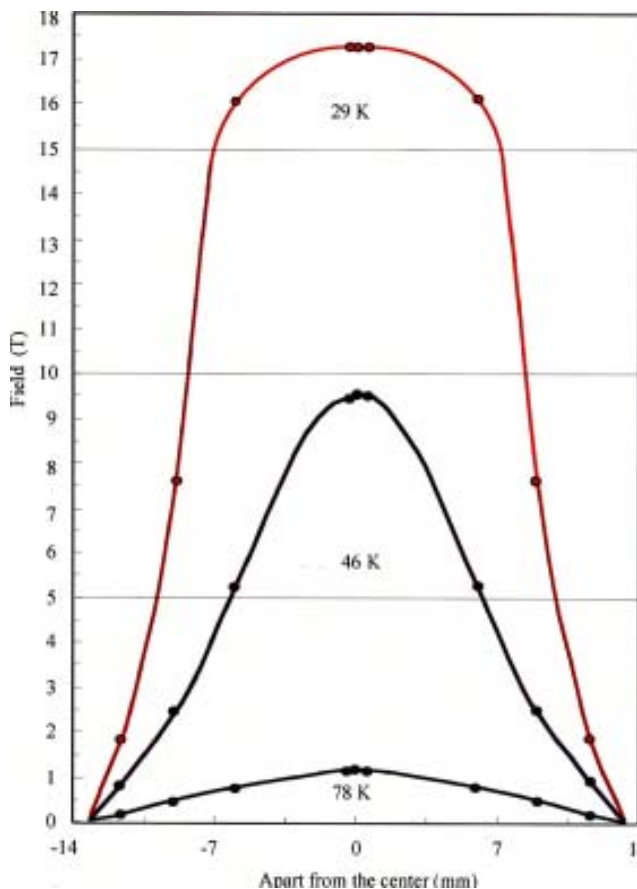


図3 樹脂含浸処理とウッドメタル含浸処理を施した Y-Ba-Cu-O バルク磁石 (2.6cm) の捕捉磁場。29K で 17T を超える磁場を捕捉している。

も、この図から分かるように磁場捕捉能はいまだ飽和していない。単純な試算でも 30T は優に超える。残念なことに、これだけ強い磁場を直流で発生できる施設は世界にも数えるほどしかなく、しかも実験のコストも 100 万円を超えてしまう。このため、30T バルク超電導磁石の実験はできない。

今回の 17T の捕捉磁場実験でも、つくばにある物質材料研究機構の強磁場センターの超電導マグネットをお借りしたくらいである。バルク超電導磁石の能力は、それだけ計り知れないということを示している。

今回の成果は、新しい学問分野の構築につながる可能性がある。バルク超電導磁石を冷凍機の先に着けて励磁すれば、超電導マグネットの狭いボアの中に限られていた超強磁場を自由空間に取り出せることになる。今回の磁石でも、すでに 17T という磁場を発生できることが分かっている。このような強い磁場を自由に持ち運べるという事実は、いままで磁場の影響を見ることのできなかった数多くの現象の実験が可能となる。磁場のエネルギーは、その大きさの 2 乗に比例するため、過去に磁場の効果が小さいと言われていた現象においても顕著な効果が現れる可能性が多いにある。新しい磁場科学の創製という観点からも期待したい分野である。

これで、ようやく龍の画に睛（ひとみ）をいれることができた。これが本当のバルク超電導磁石誕生物語の最終章である。

[超電導 Web21 トップページ](#)