

## 2種類の高温超電導を用いて 30 テスラ超の高磁場発生 ～1.3 ギガヘルツ NMR に向けた大きな一歩～

理化学研究所（理研）、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社、科学技術振興機構の共同研究グループは、高温超電導線材をらせん形状に巻いた超電導磁石において、これまで困難とされてきた 30 テスラ超の高磁場発生に成功しました。

本研究成果により、創薬や医療への貢献が大きく期待される次世代 1.3 ギガヘルツ（30.5 テスラ相当）核磁気共鳴（NMR）装置の開発に向けた重要な技術要件が満たされ、その実現に近づきました。

今回、共同研究グループは、超電導磁石に内側から①高磁場での超電導特性に優れるがコイル化が難しいレアアース（RE）系高温超電導線材を巻いた内層コイル、②高磁場での特性は一步劣るがコイル化しやすいビスマス（Bi）系高温超電導線材を巻いた中層コイル、③工業製品として確立された金属系低温超電導線材を巻いた外層コイルの 3 層構造の配置により、磁場の発生効率を最大に高めることで 31 テスラの高磁場を実現しました。これは、らせん形状に巻いたタイプの超電導磁石としては最高記録です。また、高磁場発生の要となる RE 系高温超電導コイルは焼損が生じやすいという課題がありましたが、絶縁のない RE 系高温超電導線材をらせん形状にコイルに巻き、層間に銅とポリマーの複合シートを挟み込む新しい製造法を適用することで焼損の防止にも成功しました。

### <背景>

核磁気共鳴（NMR）装置や核磁気共鳴画像（MRI）装置には、超電導磁石が使われており、磁場強度が高くなるほど装置の性能（感度と分解能）が向上します。

現在実用化されている NMR 装置や MRI 装置には、ニオブ（Nb）系の金属系低温超電導線材が使われていますが、線材の物理的特性の制約から、24 テスラ程度が発生磁場の上限と考えられています。これに対して、レアアース（RE）系やビスマス（Bi）系の銅酸化物の高温超電導線材は、24 テスラを大幅に上回る高磁場においても超電導状態を保てると考えられています。そのためには、高温超電導線材で巻いたコイルを超電導磁石の内層高磁場領域に使う必要があり、この線材を活用した次世代超高磁場 NMR 装置の開発をめぐる国際的な競争が生じています。

共同研究グループは、次世代 1.3 ギガヘルツ永久電流 NMR 装置の開発を進めており、これには 30.5 テスラという超高磁場が必要となります。高温超電導線材は薄くて幅広のテー

ブ形状をしているため、これをコイルにするには、線材をロールケーキ形状に巻く方式が適しています（図 1 a）。この巻線方式のコイルを採用した 32 テスラの超電導磁石が、米国のグループにより既に開発されており、超電導磁石の磁場としてはこれが最高記録です。

しかし、上記の巻線方式では線材同士のつなぎ目の数が膨大になります。NMR 装置に求められる永久電流運転にはつなぎ目を超電導接合にする必要がありますが、外周側のコイルとのわずかな隙間に多数の超電導接合を配置することは困難です。これに対し、線材をらせん形状に巻いて、つなぎ目が少なく、それらをコイル上部の広い空間に配置できる巻線方式が、永久電流運転には適しています（図 1 b）。この巻線方式では、欧州のメーカーが開発を進める 1.2 ギガヘルツ NMR 装置における 28 テスラが最高で、1.3 ギガヘルツ NMR 装置に必要な 30.5 テスラの磁場の発生は達成されていませんでした。

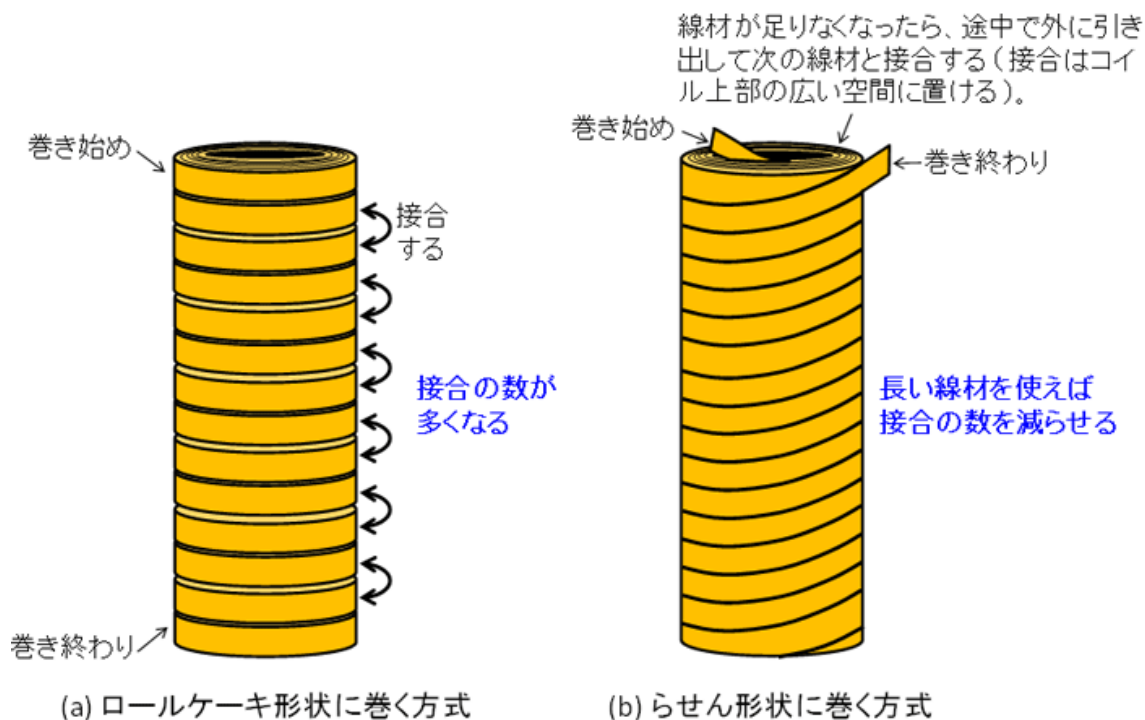


図 1 コイルの巻線方式

a) ロールケーキ形状に巻く方式では、線材をロールケーキ形状に巻いたコイルを積み重ね、コイル同士を接合する。接合の数が多くなる。

b) らせん形状に巻く方式では、線材をらせん形状に巻いてコイルにし、端まで巻いたら、次のコイルを外周側に積み重ねて巻く。途中で線材が足りなくなったら、線材を外に引き出し、新しい線材で次のコイルを巻き始める。以上を繰り返して巻き終えた後、引き出した線材同士を接合する。長い線材を使用すれば接合の数が少なくて済む。

※応用超電導・磁石技術分野では、a の巻線方式は「パンケーキ巻き」、b は「レイヤー

巻き」と呼ばれている。

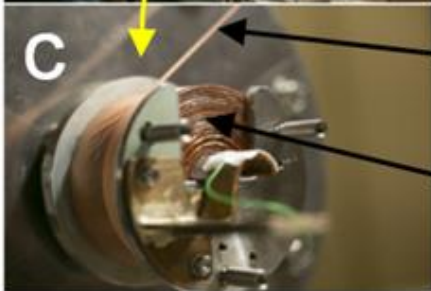
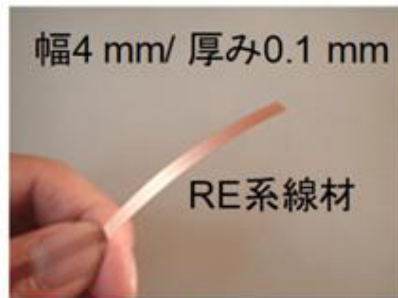
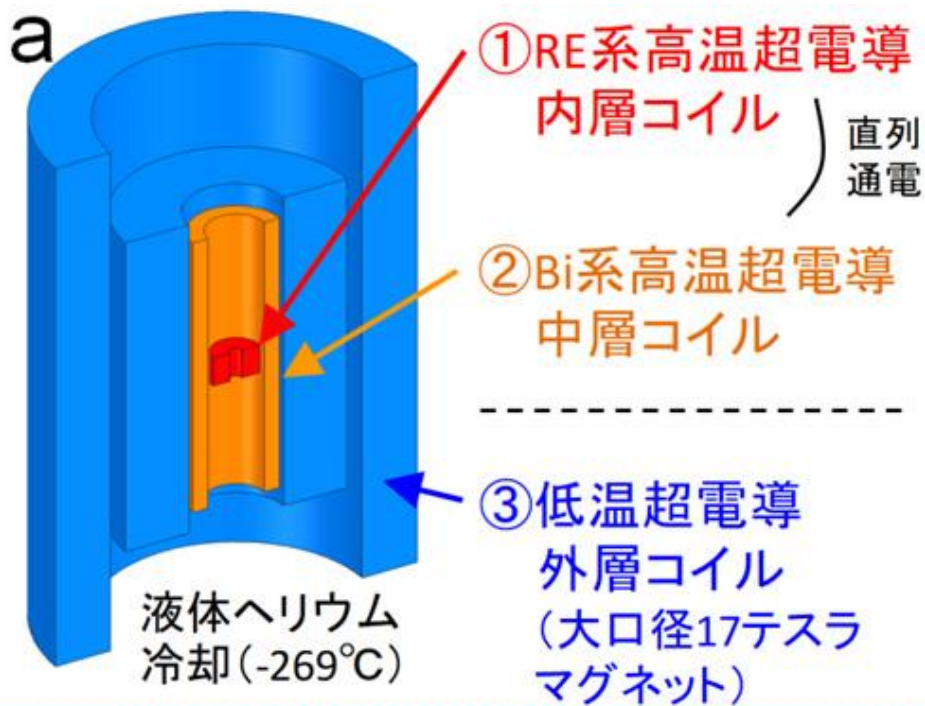
#### <研究手法と成果>

共同研究グループが開発を目指す 1.3 ギガヘルツ NMR 装置用の超電導磁石は、金属系低温超電導線材を巻いた外層コイル（以下低温超電導外層コイル）、Bi 系高温超電導線材の中層コイル（以下 Bi 系中層コイル）、さらに RE 系高温超電導線材の内層コイル（以下 RE 系内層コイル）から成ります。コイルは全てらせん形状で巻かれます。このコイル構成は、金属系低温超電導線材より Bi 系線材の方が、Bi 系線材より RE 系線材の方が、より高い磁場の中でも電流を流すことができるという物理的特性を生かしたもので、共同研究グループ独自の構成です。

共同研究グループは、物質・材料研究機構低温応用ステーションで運用されている大口径 17 テスラ超電導磁石を低温超電導外層コイルとし、Bi 系中層コイルと RE 系内層コイルを組み込むことで、1.3 ギガヘルツ NMR 装置の超電導磁石と同様のコイル構成の超電導磁石を開発しました（図 2 a）。今回の超電導磁石では、超電導接合は用いていませんが、コイルは全てらせん形状に巻かれています。低温超電導外層コイルが発生する 17 テスラの磁場に加え、Bi 系中層コイルが 4 テスラを、RE 系内層コイルが 9 テスラを発生することで、中心部における 30 テスラ超の高磁場発生を目指しました。

しかし、高磁場に置かれた RE 系内層コイルには、クエンチが起きた場合、コイル内部の局所的な常電導部が、わずかコンマ数秒で金属溶断温度にまで上昇して焼損してしまう問題があります。2016 年に 27.6 テスラを発生させた際にも、クエンチによって RE 系内層コイルが焼損しました。

そこで、今回、クエンチから RE 系内層コイルを守るために、絶縁を施さない線材を用いて、コイル層間に導体である銅フォイルと、絶縁体であるポリマーシートの複合材を挟み込んでコイルを巻く方式を適用しました。これによって、クエンチ時にコイル層内で電流が分流でき、過度な温度上昇を防ぐことが期待されます。この手法は「intra-Layer No-Insulation 法（以下 LNI 法）」と呼ばれ、共同研究グループは先行研究において、その効果を小さな試験コイルで確認していました（図 2 b、c、d）。



絶縁していないRE系線材を  
らせん形状に巻く

層間に銅/ポリマーの複合材  
を挟みながら巻く

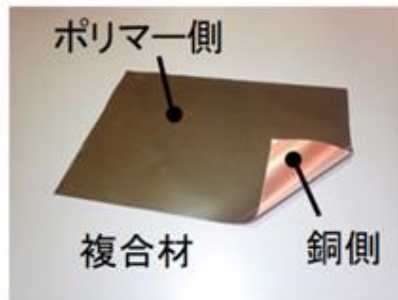


図2 超電導磁石内部のコイル構成とレアアース系高温超電導最内層コイルの製作風景・  
外観

- a) コイルの断面図を示しており、青色で示した部分が低温超電導外層コイル、橙色で示した部分がビスマス (Bi) 系高温超電導中層コイル、赤色で示した部分がレアアース (RE) 系高温超電導内層コイルである。
- b) RE 系高温超電導内層コイルの巻線の様子。
- c) 巻線の様子の拡大写真：intra-Layer No-Insulation 法 (以下 LNI 法) を適用した。絶縁を施さない線材を用いて、コイル層間に導体である銅フォイルと、絶縁体であるポリマーシートを挟み込んでコイルを巻く。
- d) 完成した RE 系高温超電導内層コイル。

開発した超電導磁石の試験では、全てのコイルを液体ヘリウム温度 ( $-269^{\circ}\text{C}$ ) まで冷やし、まず低温超電導外層コイルに 241 アンペアの電流を流して 17 テスラの中心磁場を発生させました。その後、直列に接続した Bi 系中層コイル/RE 系内層コイルに電流を流し、最終的に 266 アンペアの電流で 30 テスラの中心磁場の発生に成功しました (図 3)。その後、それぞれのコイルの電流値を順次下げ、消磁しました。

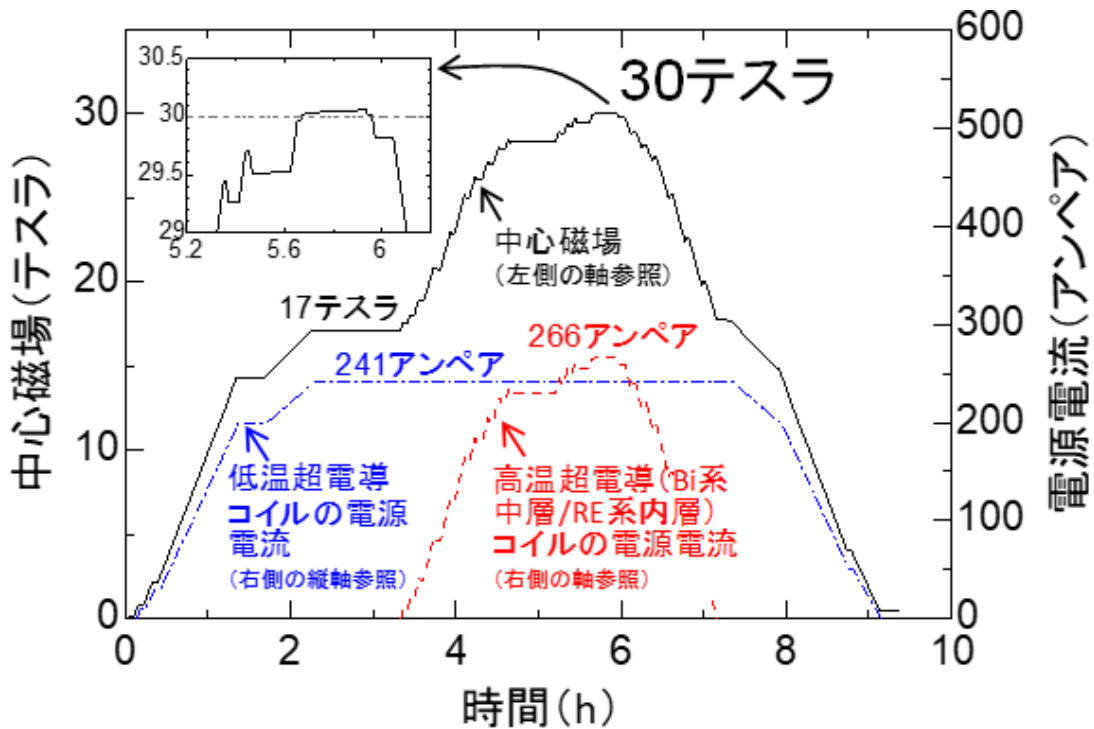


図 3 開発した超電導磁石による 30 テスラ超の高磁場発生試験結果  
低温超電導外層コイルと高温超電導 (Bi 系中層/RE 系内層) コイルに順次電流を流し、30 テスラの中心磁場発生に成功した。30 テスラ到達後は、順次コイルの電流を下げて消磁した。

次に、超電導磁石の限界試験として、クエンチが発生するまで Bi 系中層コイル/RE 系内層コイルの電流値を増加させました。すると、290 アンペアの電流に至ったところで、31 テスラの中心磁場が発生し、RE 系内層コイルがクエンチしました。電圧検出機能によって高温超電導に供給されている電流が遮断され、その後 1 秒程度で Bi 系中層コイル/RE 系内層コイルの磁場が消失しました（図 4）。残っていた低温超電導外層コイルの電流・磁場は、保護回路を使って消磁されました。

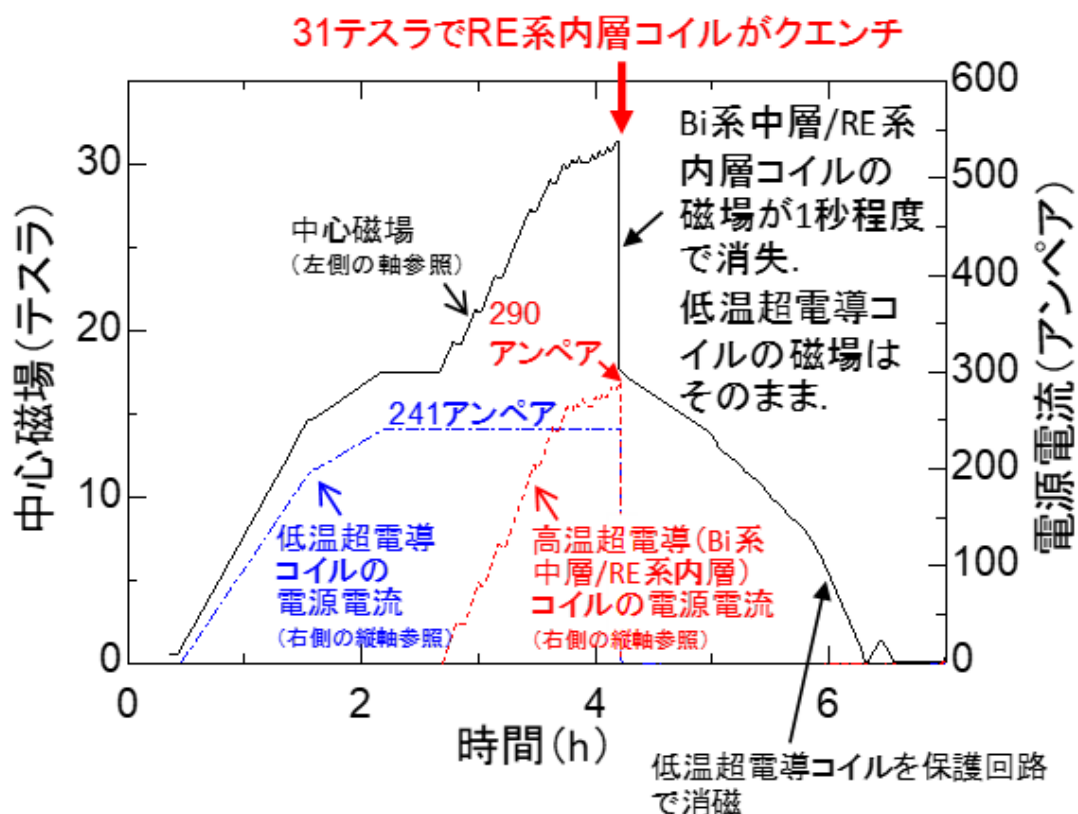


図 4 開発した超電導磁石の限界試験結果

図 2 の試験後に、限界試験を実施した。31 テスラ発生時にレアアース系内層コイルでクエンチが発生した。電源の検出電圧機能によって供給電流が遮断され、Bi 系中層/RE 系内層コイルの磁場が 1 秒程度で消失している。

一連の試験後、RE 系内層コイルを取り出し、液体窒素 (-196°C) で冷やして電流を流して検査したところ、コイルの電圧-電流特性が試験の前後で変わっていないこと、すなわちクエンチから保護されていることが確認できました（図 5）。



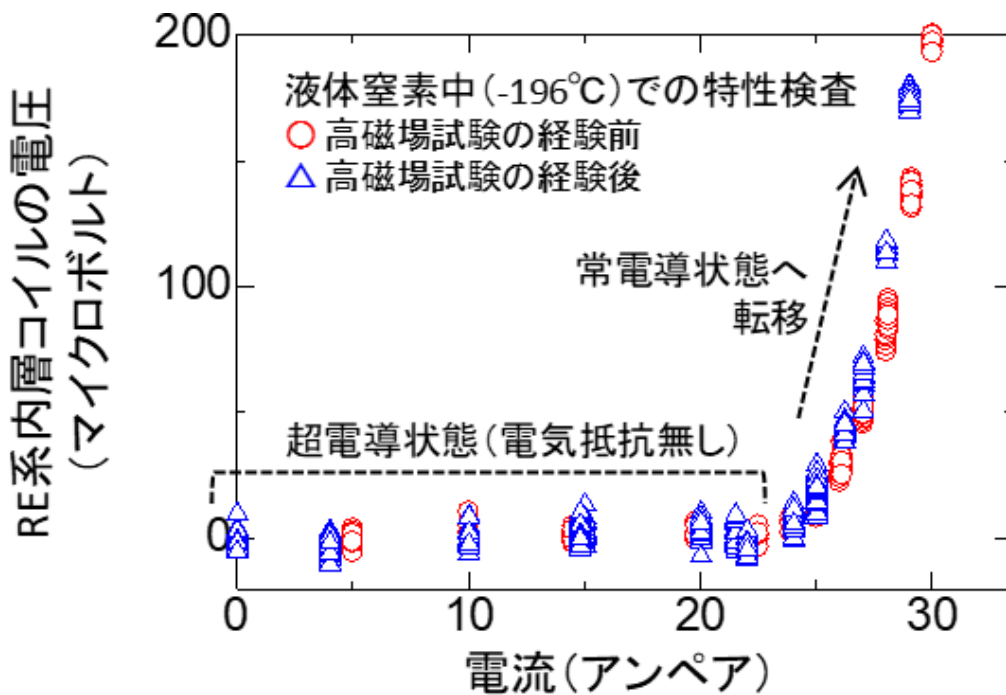


図5 超高磁場試験の前後のRE系内層コイルの特性

一連の高磁場試験の後に、RE系内層コイル単体で液体窒素温度（-196°C）において通電試験を実施した。コイルの電圧電流特性が高磁場試験の経験前と変わらないことを確認した。

今回の試験によって初めて、らせん形状コイルの超電導磁石で30テスラ超の高磁場発生に成功しました。さらに、LNI法によって、RE系内層コイルをクエンチによる焼損から保護することにも成功しました。

<今後の期待>

今回の成果によって、次世代1.3ギガヘルツNMR装置の開発に向けた重要な技術課題の1つがクリアされ、その実現に近づきました。今後、別途開発を進めている超電導接合技術/永久電流運転技術と組み合わせて装置の実現を目指します。

次世代1.3ギガヘルツNMR装置が実現できれば、アルツハイマー病などの神経変性疾患の要因とされるアミロイドβペプチドの構造情報の取得技術が飛躍的に進展するなど、創薬や医療への展開が期待できます。また、1.3ギガヘルツNMR装置の開発を通して得られる先端技術により、すでに普及しているレベルの磁場のNMR装置の小型化・省ヘリウム化などといった波及も期待できます。

日文新聞发布全文 <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190928/index.html>

文：JST 客观日本编辑部翻译整理