

同時発表：
筑波研究学園都市記者会（資料配布）
文部科学記者会（資料配布）
科学記者会（資料配布）



超伝導磁石の世界最高磁場 24 T を発生

— 酸化物高温超伝導線材を用いた小型・強磁場 NMR 装置へ道 —

平成 23 年 9 月 7 日

独立行政法人 物質・材料研究機構

ジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー株式会社

独立行政法人 科学技術振興機構

独立行政法人物質・材料研究機構（NIMS）（理事長：潮田 資勝）超伝導線材ユニット（ユニット長：北口 仁）マグネット開発グループ（グループリーダー：木吉 司）の松本 真治主任研究員らは、ジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー株式会社（JASTEC）（代表取締役社長：西元善郎）等と共同で実施する科学技術振興機構（JST）研究成果展開事業（戦略的イノベーション創出推進プログラム）の一環として、超伝導磁石¹⁾の世界最高磁場を更新する 24.0 T（テスラ）²⁾の磁場発生に成功した。

核磁気共鳴（NMR）装置³⁾に使用される超伝導磁石は、発生する磁場の増加とともに感度と分解能が増加するため、より強い磁場を発生することが要求される。一方で、磁場を強くするためには超伝導磁石が大型化し、冷却に必要とされる液体ヘリウムの使用量も増加する問題が生じていた。

研究グループは、強磁場中で優れた臨界電流密度⁴⁾と機械的特性を示す酸化物系高温超伝導線材である GdBCO 薄膜線材⁵⁾（株式会社フジクラ製）でコイルを製作し、17.2 T の磁場を発生する金属系超伝導磁石の内側に組み込み、磁石の中心部で 24.0 T の磁場を発生できることを確認した。これは超伝導磁石単独では世界最高の値である。

また、これまでの最高記録 23.5 T が温度を約 2 K まで下げることで到達していたのに対して、一般に普及している超伝導磁石と同様に、液体ヘリウムの沸点である 4.2 K で達成された。さらに、磁石全体のサイズも大幅に小さくなっている。この度の成果によって、GdBCO 薄膜線材を用いた強磁場発生用コイルの作製技術が大幅に進展し、強磁場中でのコイルとしての性能も実証できた。開発した技術を用いることで、強磁場 NMR 装置を大幅に小型化し、液体ヘリウムの使用量も低減することが期待される。

本成果は、以下の事業・研究開発テーマ・研究開発課題によって得られた。

研究成果展開事業（戦略的イノベーション創出推進プログラム）（S-イノベ）

研究開発テーマ：「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」

（プログラムオフィサー（PO）：佐藤 謙一 住友電気工業株式会社 フェロー、材料技術研究開発本部超電導担当技師長）

研究開発課題名：「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」

プロジェクトマネージャー（PM）：末松 浩人（(株) JEOL RESONANCE 技術部 統括部長）

研究リーダー：木吉 司（(独) 物質・材料研究機構超伝導線材ユニットマグネット開発グループグループリーダー）

参画機関：JEOL RESONANCE、物質・材料研究機構、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー、理化学研究所、千葉大学、山形大学、茨城大学、産業技術総合研究所

研究開発期間：平成 22 年 1 月～平成 31 年 3 月

S-イノベは、JST 戦略的創造研究推進事業（CREST、ERATO、さきがけ、SORST）などの成果から新産業創出の礎となる研究開発テーマを設定し、当該テーマの下で公募選定された産学連携による複数の研究開発チームが長期一貫した研究開発を進めるプログラム。

本課題では、NMR（核磁気共鳴）装置への高温超伝導材料の導入により、超伝導磁石の小型化と検出プローブの高感度化を実現し、スループットの飛躍的向上と NMR の普及拡大を目指している。

<研究の背景と経緯>

超伝導磁石の発生磁場は図 1 に示すように、NIMS（当時は金属材料技術研究所（NRIM））で 1999 年に 23.4 T を発生した後、長らく停滞し、2009 年に 23.5 T の NMR 磁石（1 GHz NMR 磁石）が製作されたにとどまっていた。

主な原因は強磁場化に伴う超伝導磁石の大型化および運転コストの増加である。1986 年以降の超伝導磁石の最高磁場は液体ヘリウム（沸点 4.2 K）をさらに約 2 K まで冷却することで達成されていた。これは金属系超伝導線材を 2 K まで冷却することで、臨界電流密度が増え強磁場の発生が可能となるためである。ただし、これには液体ヘリウム消費量の増加と新たな機器（減圧用ポンプ）の設置を必要としていた。

強磁場超伝導磁石の有力な用途の代表が NMR 装置である。NMR 装置において感度は非常に重要であり、これまで NMR 磁石の強磁場化およびプローブの低温動作化によって高感度化が図られてきたが、既存技術では限界に到達している。図 2 に既存の NMR 装置のサイズが磁場とともに増加する傾向を示す。磁石の大型化は、設置場所を限定し、強磁場 NMR 装置の普及の妨げとなっていた。

研究グループは、JST の戦略的イノベーション創出推進プログラムの研究開発課題「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」では、磁石およびプローブに酸化物系高温超伝導材料を使用することで、超伝導磁石の小型化とプローブの高感度化を実現し、処理能力の飛躍的向上と NMR の普及拡大を目指している。特に超伝導磁石については、酸化物系高温超伝導線材を使用することで、コイルの電流密度を増やし、強磁場化と小型化の両立を目指している。

<研究の内容>

研究グループは、酸化物系高温超伝導線材の中で GdBCO 薄膜線材に着目し、そのコイル化に取り組んだ。本線材は、長手方向（長辺の方向）に優れた機械的強度を有し、4.2 K では 30 T を超える磁場でも十分な臨界電流が得られるため、本線材でコイルを作製した場合に、強磁場中で大電流を流すことができ、なおかつ通電中に線材長手方向に働く電磁力に対しても特性が劣化しないことが期待された。

ところが GdBCO 線材を使用してコイルを作製し、実際に通電すると狙い通りの特性が得られない事例が頻発し、図 3 に示すように線材の一部が焼損した例もあった。研究グループは特性評価後にコイルを分解し劣化した箇所を特定することで、線材はテープに垂直な力に対し非常に敏感で、巻線、コイルの樹脂含浸、冷却、通電による磁場発生すべての過程で線材の一部に力が集中しないように工夫する必要があることを見出した。

これを受けてコイル作製法を改善するとともに、線材としては、臨界電流密度が高く、厚いハステロイ（ニッケル合金）基板で剛性に優れ、巻線時の固定も容易な GdBCO 線材（(株)フジクラ製、幅 5 mm × 厚さ 0.16 mm、図 4）を使用した。製作したコイルは内径 50 mm、外径 112 mm、高さ 88 mm で総長 516 m の線材を使用した。図 5 にコイルの外観写真を示す。本コイルを図 6 に示すように液体ヘリウム中で 17.2 T を発生する金属系超伝導磁石の内側に組み込んだ。本コイルを 17.2 T の磁場中で 321 A まで通電することで、磁石中心部に 24.0 T の磁場が発生することを確認した。このときの巻線部の電流密度は 234 A/mm²、線材に加わる長手方向の応力は 408 MPa で、通常の金属系超伝導コイル（100 A/mm²、200 MPa）に比べて倍以上高い値で動作することが確認できた。これまで酸化物系高温超伝導コイルを水冷銅磁石に組み込み 26.8 T を発生した例や、ハイブリッド磁石に組み込み 33.8 T を発生した例はある

が、磁石すべてが超伝導状態を保った超伝導磁石単独としては、発生磁場 24.0 T は世界最高の値で、液体ヘリウム温度での更新は 1986 年以來である。また、コイルの電流密度を大幅に増加できたため、24 T を発生した磁石のサイズは、図 6 に示したように 1999 年に 23.4 T を発生した磁石と比べて外径で 1/2 以下と大幅に小さくなっている。

本コイルは巻線内部で接続を 1 箇所行っているが、この度の成果でその接続技術の信頼性も確認された。この接続技術を使うことで、超伝導線材の接続を繰り返し、さらに大きなコイルを製作することも可能である。

<今後の展開>

この度の成果によって、GdBCO 薄膜線材を用いた強磁場発生用コイルの作製技術が大幅に進展し、強磁場中でのコイルとしての性能も実証できた。これによって GdBCO 薄膜線材が持っている優れた臨界電流密度と機械的強度を超伝導磁石として有効に活用することが可能となった。

超伝導磁石の主な応用である NMR 装置は、タンパク質、高分子材料、薬品、新素材などの開発に不可欠な基本分析ツールであり、性能の向上（強磁場化による感度と分解能の向上）とともに設置性の向上（小型化および運転コストの低減）が期待されている。この度の成果は、この両方に寄与することが可能で、現在、触媒の高性能化等で威力を発揮している NIMS の 930 MHz (21.8 T) NMR 装置と同程度の大きさでより性能の優れた 30 T 級 NMR 装置の開発や、800 MHz (18.8 T) 程度の NMR 装置を大幅に小型化し、通常の実験室でも設置可能にする、といった貢献が期待される。

<JST 戦略的イノベーション創出推進プログラム佐藤プログラムオフィサーのコメント>

高温超伝導を用いることにより、従来の金属系超伝導では不可能だったことが可能になってきています。今回の成果も NMR に新しい局面を切り開いた技術成果として世界にアピールできるものです。

問い合わせ先

報道に関すること：

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

独立行政法人物質・材料研究機構

企画部門 広報室 TEL: 029-859-2026 FAX: 029-859-2017

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1 丁目 5-5

ジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー株式会社

企画管理部 TEL: 078-991-9445 FAX: 078-991-9446

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3

科学技術振興機構 広報ポータル部

jstkoho@jst.go.jp TEL: 03-5214-8404 FAX: 03-5214-8432

研究内容に関すること：

松本 真治

〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

独立行政法人物質・材料研究機構

超伝導線材ユニットマグネット開発グループ

MATSUMOTO.Shinji@nims.go.jp TEL: 029-863-5524 FAX: 029-863-5599

濱田 衛

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1 丁目 5-5

ジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー株式会社

hamada.mamoru@kobelco.com TEL: 078-991-9445 FAX: 078-991-9446

(不在時)

木吉 司

〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

独立行政法人物質・材料研究機構

超伝導線材ユニットマグネット開発グループ

KIYOSHI.Tsukasa@nims.go.jp TEL: 029-863-5526 FAX: 029-859-2025

JST の事業に関すること :

科学技術振興機構 イノベーション推進本部 産学基礎基盤推進部

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3

s-innova@jst.go.jp TEL: 03-5214-8475 FAX: 03-5214-8496

<用語解説>

1) 超伝導磁石

超伝導線材を使用して製作される電磁石。超伝導状態を保つため冷却する必要があり、多くは液体ヘリウム中で運転される。超伝導線材部分の抵抗は零であるため、極めて少ない消費電力で強い磁場を発生することが可能。ただし、磁場の増加とともに通電できる電流値は減少し、ある磁場以上では超伝導状態は失われる。その磁場強度は超伝導線材の種類によって異なる。このため低い磁場を発生するためには安価で巻線も容易な NbTi が使用され、10 T 以上の磁場では強磁場となる磁石の内側部分に Nb₃Sn 線材が使用されるが、2 K 以下に冷却しても 24 T 程度が限界とされる。これら実用段階にある金属系超伝導磁石に対し、酸化物系高温超伝導磁石は 30 T 以上の磁場も発生できると期待されており、また液体ヘリウムを使用しない 20 K 程度での運転も試みられている。

超伝導磁石は NMR 装置の他に、MRI (磁気共鳴イメージング)、磁気浮上列車、核融合炉等に使用されている。

2) T (テスラ)

磁束密度の単位。最も強力な永久磁石 (ネオジウム磁石) の表面磁束密度は約 1.5 T。

3) NMR 装置

NMR 装置は外部磁場を発生する磁石(NMR 磁石)とプローブを含む分光計システムから構成される。NMR 磁石は MHz (メガヘルツ) や GHz (ギガヘルツ) という周波数の単位で呼ばれることが多いため誤解されやすいが、発生する磁場は時間的に一定である。さらに、測定する試料全体に対して磁場は均一でなくてはならない。この一様な磁場に置かれた試料に対して、ある周波数の電磁場を加えると、特定の原子核との間で共鳴現象(核磁気共鳴: Nuclear Magnetic Resonance) が起こる。代表的な水素(プロトン)の原子核の場合、2.3487 T の磁場中で 100 MHz の周波数の電磁場に共鳴する。共鳴する周波数は磁場に比例することから、この 10 倍の 23.5 T の磁場を発生する磁石を 1 GHz の NMR 磁石と称する。

分子を構成する原子は、例えば同じ水素原子でも分子中での位置が異なると、化学結合の違いなどによってそれぞれの原子核の感じる磁場が微妙に異なり、それが NMR の共鳴周波数の変化となる。これを観測して有機材料、タンパク質や無機材料などの構造を決定していく。

磁場が大きくなり対応する共鳴周波数が増加すると、感度と分解能が向上するため、より微細な構造の決定や微量試料の分析が可能となる。また分子量の大きなタンパク質は NMR による構造解析が困難であるという欠点があるが、これを克服する有力な手段が磁場の増加である。また近年の固体材料用 NMR 技術の向上により、無機材料の分析にも磁場の増加が有効であることが知られている。

4) 臨界電流密度

超伝導線材に流す電流は無限に大きくできる訳でなく、ある電流値を超えると超伝導状態が失われる。この超伝導状態が失われる限界の電流が臨界電流で、これを線材の断面積等で割った値が臨界電流密度。実用上は線材の断面積で割った値が用いられるが、線材の開発では、線材に含まれる超伝導体の面積で割った値を用いることもある。臨界電流密度は一般に温度および磁場の増加によって減少するため、より高温、より強磁場で高い臨界電流密度を持つ線材の開発が不断に行われている。

5) GdBCO 薄膜線材

酸化物系高温超伝導線材の 1 つ。1987 年にいわゆるイットリウム (Y) 系超伝導体である YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) が 90 K 以上の臨界温度を持つことが発見された。Y の代わりにガドリニウム (Gd) やホルミウム (Ho) を用いても 90 K 以上の臨界温度が得られるため、まとめて ReBCO (Re は希土類元素) と称されることもある。本研究では磁場中の臨界電流特性が YBCO より優れていることから、GdBCO ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) を超伝導体として用いた。図 4 に示すように基板にハステロイを使用した線材は、線材の長手方向に 500 MPa の応力が加わっても超伝導特性が殆ど劣化しない。このためコイルとして通電したときに生じる、磁場と電流密度に比例した線材の長手方向に加わる応力を他の超伝導線材(補強した Nb_3Sn 線材、Bi-2223 線材で約 300 MPa) よりも大きな値とすることが可能である。これは従来のコイルと比較して同じ体積でより電流密度を高くできることを意味し、強磁場の発生およびコイルの小型化に有利と期待されていた。

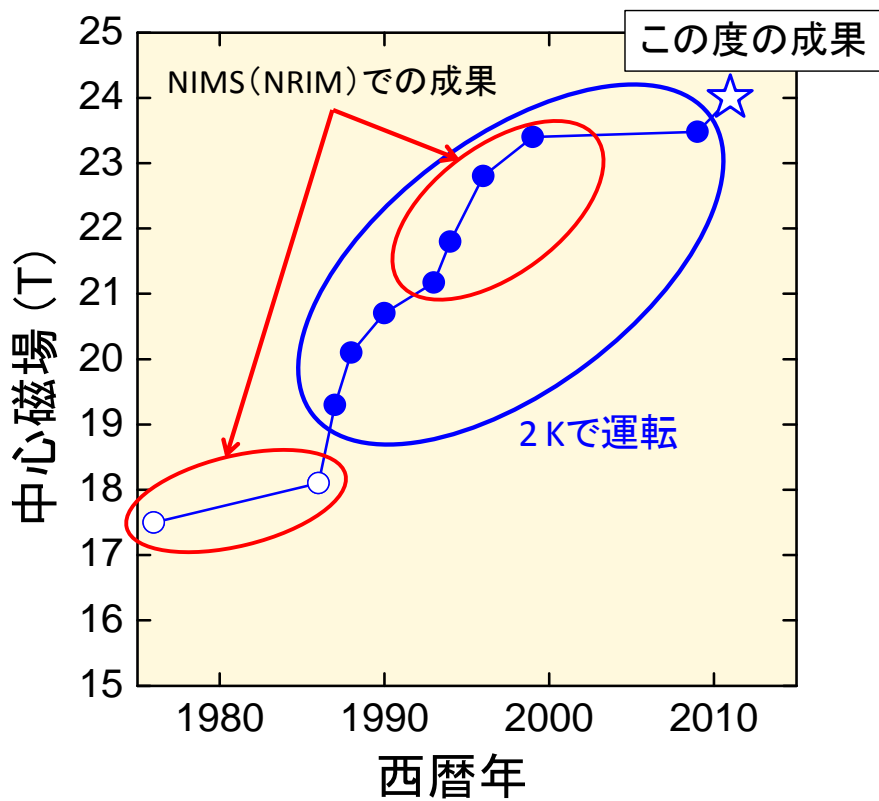


図1 超伝導磁石の最高磁場の推移。NIMS（当時は金属材料技術研究所（NRIM））はこれまで多くの貢献を行ってきた。白抜き記号は液体ヘリウム中（4.2 K）で運転された。

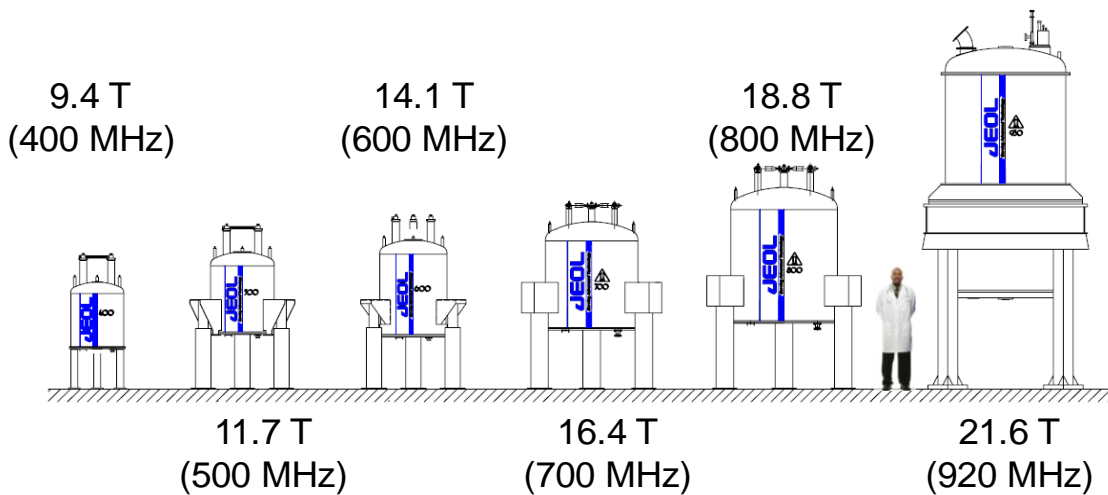


図2 NMR装置の発生磁場によるサイズの増加。図中の人は身長175 cm相当。

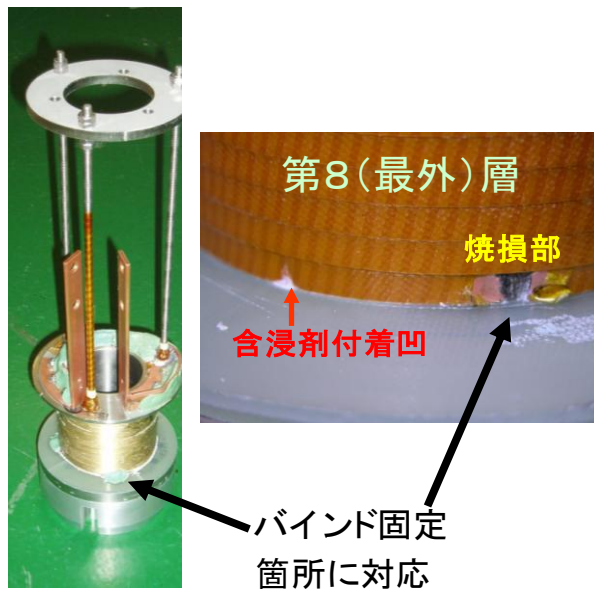


図3 先行で試作した GdBCO コイルの外観および通電後の分解写真。局部的に焼損している。焼損部はバインドを固定した箇所に対応しており、周辺部には含浸材が浸入し線材が凹んだ箇所も見られた。

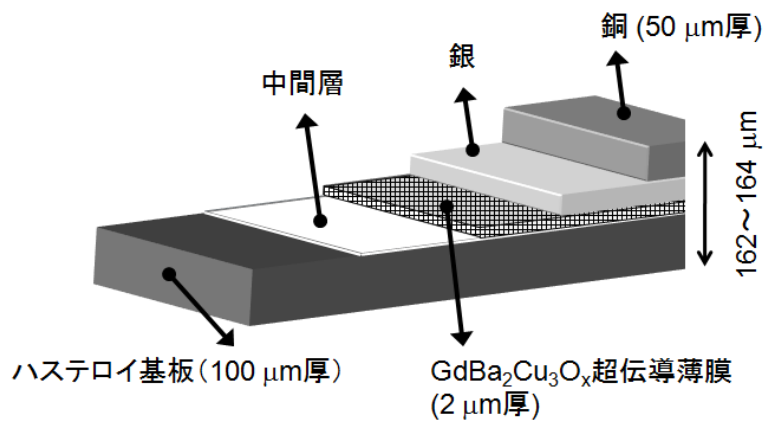


図4 24.0 T を発生したコイルに使用した GdBCO 線材の模式図。

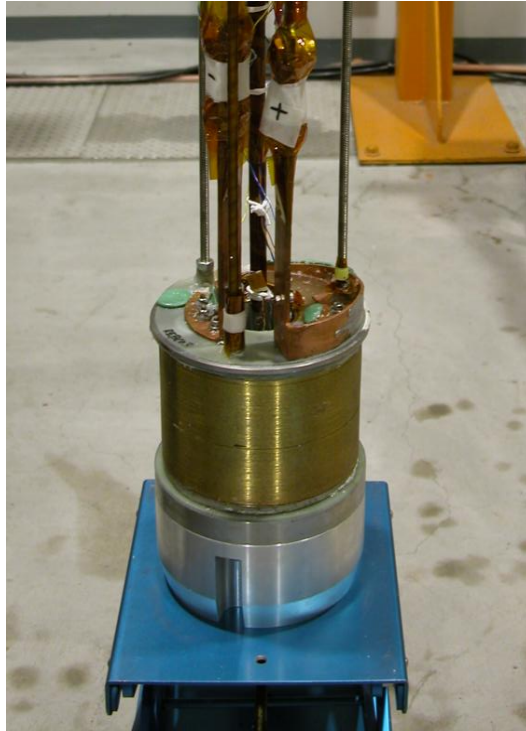


図5 24.0 Tを発生した GdBCO 内層コイルの外観写真。

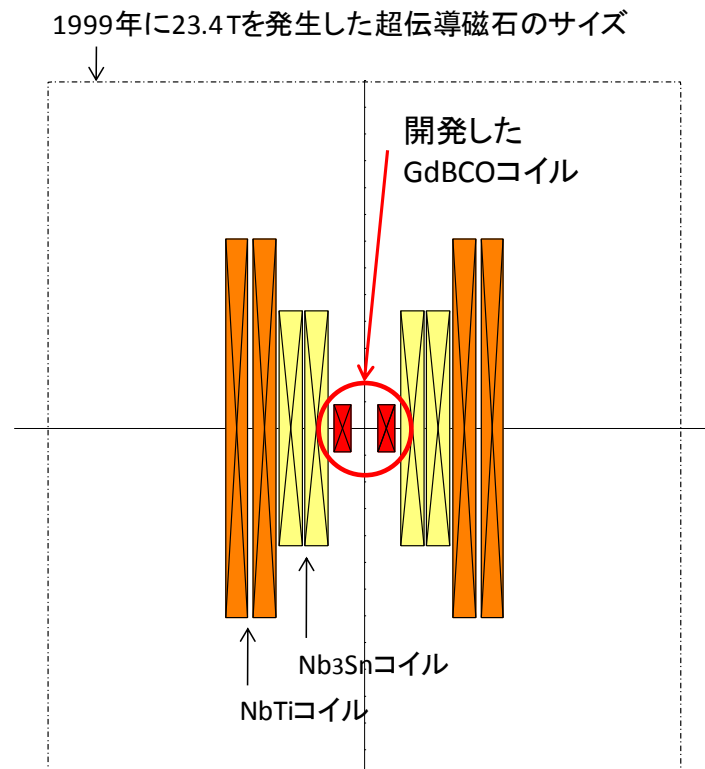


図6 中心磁場 24.0 Tを発生した超伝導磁石の構成。NbTi と Nb₃Sn コイルで 17.2 Tを発生する超伝導磁石に GdBCO コイルを組み込んだ。外側の一点鎖線は 1999年に 23.4 Tを発生した超伝導磁石のサイズ。