

| | |
|---------|-------------------|
| 氏名 | 仲村 高志 |
| 学位の種類 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 博甲第 7570 号 |
| 学位授与年月日 | 平成 27 年 11 月 30 日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 審査研究科 | 数理物質科学研究科 |
| 学位論文題目 | |

バルク超電導体を用いた高分解能 NMR・MRI 用磁石の開発

| | | | |
|----|---------|--------|------|
| 主査 | 筑波大学教授 | 理学博士 | 巨瀬勝美 |
| 副査 | 筑波大学教授 | 工学博士 | 喜多英治 |
| 副査 | 筑波大学准教授 | 博士(工学) | 柳原英人 |
| 副査 | 筑波大学助教 | 博士(工学) | 寺田康彦 |

論文の要旨

近年、超伝導体は、核磁気共鳴(NMR)現象を用いた化学構造分析装置や、同じく、NMR 現象を用いた医学診断装置である磁気共鳴イメージング装置(MRI)のための磁場発生装置(超伝導磁石)として、広く使われている。これらの超伝導磁石は、ほぼすべてが液体ヘリウムで冷却されているが、近年の液体ヘリウム価格の高騰や、将来的な液体ヘリウム資源の枯渇が、現在大きな問題となっている。このため、液体ヘリウムを使わない超伝導磁石が渴望されている。

これに対し有望視されているのが、1980年代後半に発見された高温超伝導体(YBCO, Bi系, MgB₂等)である。これらの高温超伝導体を用いたYBCO系やBi系の超伝導線材は、液体ヘリウムを使わない超伝導磁石の線材として、大いに期待されているが、価格が従来の低温超伝導線材(NbTi など)に比べると、100倍以上高価であることと、超伝導接合を作ることが難しいことなどから、ごく特殊な用途への応用のみ留まっており、近い将来に広く普及する可能性は極めて低い。

このような状況に対し、高温超伝導体を塊にしたバルク超伝導体は、安定に磁束が捕捉できることから、新たな超伝導磁石として大いに期待されている。これは、高温超伝導体では、超伝導遷移温度が100K近くと高く、数10Kで動作させた場合、格子比熱が大きく熱的に安定であるため、急激に超伝導状態が壊れるクエンチを起こさないからである。このような背景の中で、YBCO系の高温超伝導体であるSm-Ba-Cu-O系の円環状バルク超伝導磁石を用いて、2007年、仲村らはバルク超伝導磁石に着磁された静磁場(2.89T)を用いて、世界で初めてNMR信号(123 MHz)を観測することに成功した。そして、これがきっかけとなって、いくつかのプロジェクトが採択され、それによって円環状バルク超伝導磁石の大型化や結晶成長の高精度化などが進み、2011年、小川と仲村らは、バルク超伝導磁石を用いた世界で初めてのMR画像(化学固定マウス像:@4.7T)を取得することに成功した。このように、仲村らは、バルク超伝

導磁石を用いた NMR と MRI で、世界をリードしてきたが、今回の博士論文では、それをさらに発展させ、最終的には、化学構造分析用の NMR に使用できるバルク超伝導磁石を開発することを目的として研究を行った。

まず、バルク超伝導磁石を構成する 6 個の円環状バルク超伝導磁石として、従来のような一定の内径 (28mm) と厚み (20mm) を持つものではなく、両端の磁石の内径はそのまま (28mm) で厚くし (23mm)、その間の 4 個の磁石に関しては、内径を拡大して (36mm) 厚みを薄くする (18.5mm) ものを開発した (イムラ総合研究所との共同研究)。これにより、かつて玉田大輝氏と仲村氏らが発見した、勾配磁場コイルとバルク超伝導磁石との干渉がかなり低減された。

次に、バルク超伝導磁石の着磁過程において、バルク超伝導磁石内部に生成される静磁場の分布を、MRI により、直径 6mm × 長さ 6mm の円柱状の領域にて詳細に計測した。すなわち、まず、バルク超伝導磁石のクライオスタットを、4.7T の均一な静磁場を発生している着磁用の高均一超伝導磁石 (室温開口径 89mm) の中に入れて 100K (バルク超伝導磁石の遷移温度 (93K) の直上) まで冷却し、そこで一次の超伝導シムコイル (x, y, z) を調整して静磁場をさらに均一化して静磁場分布を計測し、それからバルク超伝導磁石をさらに冷却して、92K, 84K, 77K, 60K, 50K において静磁場分布を同様に計測した。その後、50K において、着磁用超伝導磁石のメインコイルの電流をゆっくりと減少させ、外部磁場強度が 4.0T, 3.0T, 2.0T, 1.0T, 0T となる条件下で、バルク超伝導磁石内部の静磁場分布を同様に計測した。その結果、磁場中冷却過程においては、共鳴周波数は 202.080MHz から 202.134MHz へと 54kHz (+264ppm) 上昇し、静磁場不均一性は 7.2ppm から 4.5ppm へとわずかに改善され、消磁過程においては、共鳴周波数は 202.134MHz から 202.051MHz へと 83kHz (-413ppm) 減少し、静磁場不均一性は 4.5ppm から 27.9ppm へとかなり上昇することを観測した。そして、このような磁場中冷却過程における共鳴周波数 = 静磁場強度の上昇は、温度の低下と共に、バルク超伝導磁石の下部臨界磁場 (H_{c1}) が上昇することにより、バルク超伝導体を貫く磁束が、バルク超伝導磁石のボアの部分に押し出されることによるものではないかと考えられた。一方、50K における消磁過程においては、バルク超伝導磁石のボアを貫いていた着磁用超伝導磁石による磁束の総量を保存するような超伝導電流が、バルク超伝導磁石に流れることにより、バルク超伝導磁石に磁束が捕捉される。この時、静磁場強度はやや減少 (-413ppm) し、静磁場不均一性はかなり低下する (+23.4ppm) が、これは、結晶の不完全性や、微少なクラックなど、さまざまな原因によるものと考えられた。

さて、直径 6mm × 長さ 6mm の円柱状の領域にて 27.9ppm の不均一性を有する静磁場を着磁したが、この静磁場不均一性は、MRI には不足ではないものの、高分解能 NMR には 3 桁程度不足であった。そこで、空間的に二次関数の対称性を持つ二次シムコイルを作成し、それを装着した上で、外径 2.3mm、内径 1.3mm、長さ 10mm のガラス管にエチルアルコールを封入した試料をソレノイドコイルに入れ、その NMR スペクトル幅を計測した。その結果、シム無しの時に 15ppm であった共鳴線の半値幅を、一次シムにより 0.5ppm (30 分の 1)、それに二次シムを追加することにより 0.1ppm (さらに 5 倍) まで狭くすることができた。一方、実用的な NMR 高分解能スペクトルの計測には、さらに 1 桁の静磁場不均一性の向上が必要であるが、これに関しては、サンプルスピニングや、磁化率マッチングを行った RF コイルを使えば達成可能であるため、本論文では、バルク超伝導磁石を用いた NMR 高分解能スペクトル取得のための静磁場を、生成することができたと結論した。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本研究は、仲村氏が開拓してきたNMR・MRI用のバルク超伝導磁石における最近のオリジナルな研究成果をまとめたものであり、そのオリジナリティやインパクトに関しては、非常に高く評価できる。この成果は、2015年8月に、専門ジャーナルであるJournal of Magnetic Resonance誌に公表されており、世界的にも高く評価されている。そして、これらの成果は、永年に亘って培われた日本の高温超伝導材料技術や、それらを活かした政府系のファンディング(NEDO や JST)によるところが大きいですが、それらのチームを率いてきた仲村氏の力量によるところが特に大きいものと評価される。

〔最終試験結果〕

平成27年10月20日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。