

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05941

研究課題名(和文)液体窒素温度で運転される高磁場性能の磁場源開発に関する研究

研究課題名(英文)Development of high-performance magnetic field source operated at liquid nitrogen temperature

研究代表者

金 錫範 (KIM, SEOKBEOM)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：00287963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液体窒素温度で冷却され、一度励磁された後は電源が不要となる小型で高磁場性能(高磁場強度・高磁場均一度・長時間安定度)を有する磁場源を開発するための基礎研究として、高温超伝導線材とバルク体を用いた磁場源について実験と電磁場数値解析による検討を行って来た。研究成果としては、高価の高温超伝導線材の使用量を抑えながら高性能磁場が発生できる高温超伝導マグネットの設計に成功し、NMR信号が計測できる高温超伝導バルク体による磁場源の試作にも成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, an experimental and analytical studies were carried out to develop a magnetic field source with small size and high performance of magnetic field (high magnetic field strength, high magnetic field uniformity and high time stability). The proposed magnetic field sources using high temperature superconducting (HTS) wires and bulks were cooled by liquid nitrogen and without any need of power supply after excitation. As a result, we succeeded in designing the HTS magnet which can generate a high performance magnetic field with reducing the amount of use of HTS wire because the cost of HTS wire is still very expensive, and the magnetic field source by stacked HTS bulks was successfully designed and fabricated. We can say that it is possible to obtain the NMR signal using the fabricated magnetic field sources.

研究分野：超電導工学

キーワード：高性能磁場源 超伝導 高温超伝導バルク体 高温超伝導線材 液体窒素運転

1. 研究開始当初の背景

近年、核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance : NMR) 分光法はタンパク質の機能・構造解析や化学反応分析などに有効なツールとして注目され、製薬分野をはじめとする様々な分野で活用されている。同じく、磁気共鳴効果を利用する MRI (Magnetic Resonance Imaging) は、一般的な治療はもちろん医学研究においても必要不可欠な装置となっており、最近では頭部、歯、足や手など局部撮影用の高性能 MRI の開発も要求されている。NMR/MRI 装置の解析精度は、磁場の強度に比例するので NMR/MRI 装置の高磁場化が進められる一方で装置の大型化、高コスト化により個人が手軽に使用できる装置とは言えないのが現状である。また、既存の NMR/MRI 装置に用いられている超伝導マグネットは、液体ヘリウムによって冷却されているが、天然ガスなので採集される液体ヘリウムは、石油と同じく有限の資源であり、最近では戦略物資として指定され、近い将来に使用が制限されるのは明確である。

局部撮影用の高性能 MRI 装置や磁化ベクトルが元の状態に戻る時間、すなわち磁気緩和時間を求めるだけで NMR 信号を得られる NMR relaxometry などは、比較的到低い磁場と磁場均一度が要求されるものの、必要な磁場強度は 1.5 T 以上であり、 100 ppm/cm^3 以上の磁場の空間均一度と共に磁場の時間安定性は既存の NMR/MRI 装置と同レベルの性能 (0.01 ppm/h) が求められるので常電導マグネットでは実現するのが難しいのが現状である。従って、液体ヘリウム冷却を必要としない高磁場性能 (強度・空間均一度・時間安定度) を有する超伝導マグネットの開発は、今後の医学分野をはじめとする製薬・化学・食品・化粧品開発において非常に重要となる。そこで、第一世代高温超伝導線材である BSCCO テープ線材を巻線とした小型 NMR/MRI 装置の開発が行われているものの液体窒素温度で運転される装置は未だなく、永久電流モードで運転される小型 NMR/MRI 装置は全くないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、液体窒素温度で冷却され、一度励磁された後は電源が不要となる小型で高磁場性能 (高磁場強度・高磁場均一度・高時間安定度) を有する世界初の磁場源を開発するための基礎研究として、具体的に下記の三つの磁場源について電磁場数値解析に基づく検討を行い、その結果についてプロットタイプの磁場源を試作して実証することを目的として行った。

受動式磁場補正と高温超伝導バルク体の一体化型高性能磁場源

積層構造の次世代高温超伝導コイルの永久電流モード高性能磁場源

高温超伝導バルク体と次世代高温超伝導コイルを組み合わせた Hybrid 高性能磁場源

3. 研究の方法

本研究では、MRI 装置や NMR relaxometry 装置に使える小型で高磁場強度 (1.5T 以上)・高磁場均一度 (150 ppm/cm^3 以上)・高時間安定度 (0.01 ppm/h 以上) を有し、液体窒素温度で運転できる高磁場性能磁場源を開発するための基礎研究として、高温超伝導バルク体と磁場補正用の字磁性体を組み合わせた磁場源、永久電流モードで運転される高温超伝導コイル、高温超伝導バルク体とコイルを組み合わせた Hybrid 形状の磁場源について、その有効性と形状最適化を 3 次元電磁場数値解析に基づく検討を行い、小型試験マグネットを用いて実証する。

4. 研究成果

液体窒素温度で運転される小型・高磁場性能 (高磁場強度・高磁場均一度・高時間安定度) の磁場源を開発するために 3 次元電磁場数値解析による各磁場源の形状最適化を行い、試作品による実験的検討を行った結果、下記のような研究成果が得られた。

受動式磁場補正と高温超伝導バルク体の一体化型高性能磁場源

：高温超伝導バルク体は、強力なピン止め効果により印加された磁場に対して強度と形状をそのまま捕捉することができる。直径 100 mm の室温空間に 10 T の磁場発生が可能な現有している超伝導マグネット (図 1 (a)) の軸方向への磁場均一度は 690 ppm/cm であるため (図 1 (b)), 目標値である 150 ppm/cm^3 以上の磁場均一度を得るために形状 (図 2 (a) と (b)) と配置位置を最適化した鉄リング (図 2 (d)) による磁場補正を行い、最大 67 ppm/cm の磁場均一度を得た (図 3 (a))。

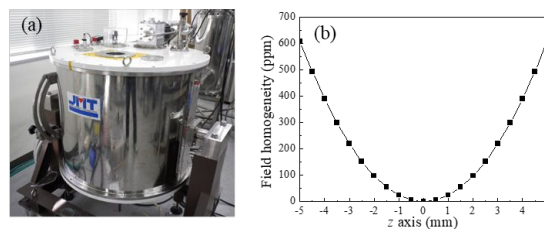


図1 (a)現有の 10 T 用超伝導マグネット, (b)軸方向の発生磁場の均一度

そして、磁場補正用の鉄リングと積層バルク体マグネットを一体化させ (図 2 (c)), 積層バルク体の間隔を最適化することで NMR 信号が計測できる 392 ppm/cm の磁場均一度が得られている (図 3 (b))。従って、高温超伝導バルク体による NMR relaxometry 用マグネットについては、超伝導特性が均一なバルク体を用いることで目標値である 150 ppm/cm^3

が可能であると考えている。

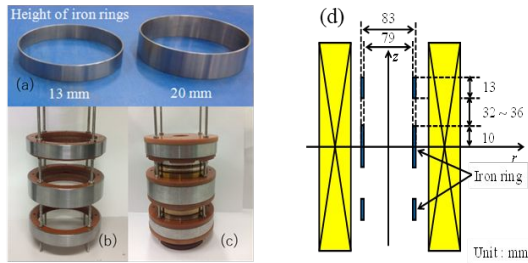


図2 (a)磁場補正用の鉄リングの写真, (b)組み立てられた鉄リング, (c)鉄リング+積層構造高温超伝導バルク体マグネット, (d)鉄リングの配置図

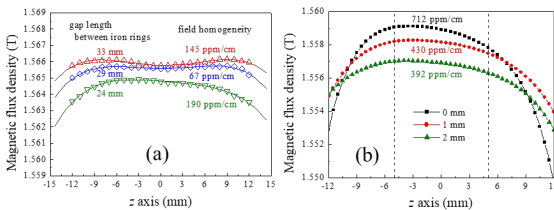


図3 (a)鉄リング間の間隔をパラメータした鉄リングの配置により補正された磁場分布, (b)鉄リングと高温超伝導バルク体マグネットを組み立てたときの磁場分布測定結果

積層構造の次世代高温超伝導コイルの永久電流モード高性能磁場源

: 基本形状である円筒型高温超伝導コイルに加えてバルジ型とノッチ型コイル(図4)の形状依存性について3次元電磁場数値解析を行い,目標値である1.5 Tの磁場強度と150 ppm/cm³以上の磁場均一度が得られる形状設計に成功した。電磁場数値解析結果の一例としてノッチ型コイルとバルジ型コイルの発生磁場の径方向と軸方向成分の分布を図5に示す。

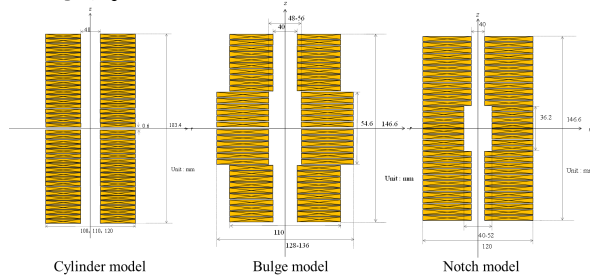


図4 次世代高温超伝導線材を巻線とするダブルパンケーキコイルを積層した3種類の超伝導マグネット

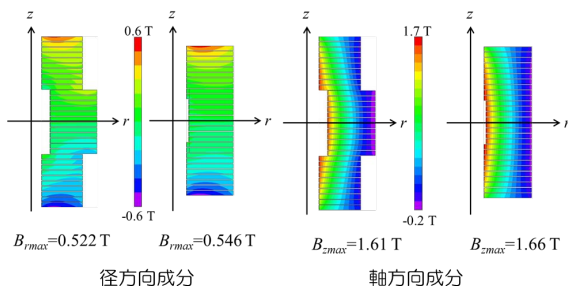


図5 電磁場数値解析によるバルジ型コイルとノッチ型コイルの径方向と軸方向の磁場成分の相違

さらに、三つの異なる形状のコイルについて発生磁場の目標値を達成させると同時に線材の消費量を抑制できる形状についても検討し、ノッチ型コイルが最も適して気いることを明らかにした(表1)。そして、永久電流モードを実現させるための永久電流スイッチ用の含浸材の選定と永久電流スイッチのコイル化について実験的に検討し、有効な含浸材材料を決定した。

表1 3種類のモデルコイルの電磁場数値解析結果

	Cylinder model	Bugle model	Notch model
Field strength	1.82 T	1.52 T	1.62 T
Field homogeneity	442 ppm/cm ³	26.1 ppm/cm ³	102.6 ppm/cm ³
Large sample space	X	○	○
Downsizing	X	○	○
Wire length	4021.2 m	3081.9 m	2793.8 m

高温超伝導バルク体と次世代高温超伝導コイルを組み合わせた Hybrid 高性能磁場源: 形状の異なる高温超伝導バルク体と高温超伝導コイルを組み合わせることで目標値である1.5 Tの磁場強度と150 ppm/cm³以上の磁場均一度が達成できる形状設計は出来たものの、次世代線材が持っている曲げ特性を考慮した場合、現在設定している内径20 mmの制限下では製作するのが難しいと判断した。しかしながら、内径を40 mm以上にした場合は適用可能であると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 26 件)

R. Hirano, S.B. Kim, H. Ueda, T. Nakagawa and Y. Tomisaka, Fundamental study on the magnetic field control method using multiple HTS coils for Magnetic Drug Delivery System, Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, 871 (2017)012104, DOI:10.1088/1742-6596/871/1/012104

R. Okamura, Y. Ozaki, S.B. Kim and H. Ueda, Study on the Rotation Properties and the Design Issue of Non-Contact Rotating System Using HTS Bulks and Permanent Magnets, Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, 871 (2017) 012096, DOI:10.1088/1742-6596/871/1/012096

S. Fukada, S.B. Kim, T. Nakagawa and H. Ueda, Numerical study to obtain the improved field homogeneity of HTS bulk magnet with enlarged inner diameter for compact NMR, Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, 871 (2017)012088, DOI:10.1088/1742-6596/871/1/012088

K. Sugo, S.B. Kim, R. Nomura, H. Ueda, Study on the Persistent Current Switch in HTS Coils Wound with 2G Wire for Compact NMR Magnets, Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, 871 (2017) 012087,

DOI:10.1088/1742-6596/871/1/012087

S. B. Kim, K. Hojo, and D. Miyazawa, Study on the Magnetic Field Homogeneity of HTS Bulk Magnets Including the Degraded HTS Bulk for Developing the Compact NMR Relaxometry, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, VOL. 26, NO. 4, p 4302104, JUNE 2016, DOI: 10.1109/TASC.2016.2521381

S. B. Kim and K. Nakamura, Development of Non-Contact Levitated Rotating Machine Using HTS Bulks and Permanent Magnets, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, VOL. 26, NO. 4, p 5202204, JUNE 2016, DOI: 10.1109/TASC.2016.2518021

S.B. Kim, S. Ozasa, and M. Sawae, Dynamic Characteristics of a 3-D Superconducting Actuator with Arranged Permanent Magnets and Electromagnets, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, VOL. 26, NO. 4, p 3601604, JUNE 2016,

DOI: 10.1109/TASC.2016.2536440

S. B. Kim, R. Saito, M. Takahashi, Y. J. Park, M. H. Lee, Y. K. Oh, and S. Noguchi, Shape Optimization of the Stacked HTS Double Pancake Coils for Compact NMR Relaxometry Operated in Persistent Current Mode, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, VOL. 26, NO. 4, p 4301704, JUNE 2016,

DOI: 10.1109/TASC.2016.2518487

S. B. Kim, M. Sawae, and S. Ozasa, Study of the Dynamic Properties of HTS Bulk Movers for Traveling Along Vertical Walls as a Three-Dimensional Actuator, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, VOL. 26, NO. 4, p 3602004, JUNE 2016,

DOI: 10.1109/TASC.2016.2535665

S. B. Kim, D. Ishizuka, H. Kitamura, and D. Miyazawa, Study on the Shape Optimization of the HTS Bulk Magnets with Active Compensation for Compact NMR Relaxometry Magnets, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, VOL. 25, NO. 3, p 4602404 (2015),

DOI: 10.1109/TASC.2014.2374337

〔学会発表〕(計 79 件)

Yoshikazu Tomisaka, Ryota Nomura, Kento Kotani, Naoki Arioka, Hiroshi Ueda, SeokBeom Kim, Study on the basic design of multiple HTS magnets for single-sided compact MRI device, 30th International Symposium on Superconductivity, Tokyo, Japan, 2017, 12, 13-15

SeokBeom Kim, Development of magnets using 2G wire, HTS bulks and permanent magnets for compact NMR relaxometry, Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics, Jeju, Korea, 2017, 11, 5-8

石井翔己,菅生圭登,喜来雅人,金 錫範,植田浩史,小型 NMR relaxometry 装置用の高温超電導マグネットの形状に関する基礎研

究,平成 29 年度(第 68 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会,2017.10.21(岡山理科大学)

美濃孝明,野村亮太,金 錫範,植田浩史,小型 NMR 装置用のハルパツ八配列永久磁石の磁場均一度向上に関する研究,平成 29 年度(第 68 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会,2017.10.21(岡山理科大学)

乙倉孝輔,深田 進,金 錫範,植田浩史,高温超電導バルク体による積層構造小型 NMR 装置用マグネットの試料測定用空間拡張に関する基礎研究,平成 29 年度(第 68 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会,2017.10.21(岡山理科大学)

SeokBeom Kim, Kentoro Tami, Haruyoshi Okusa, Hiroshi Ueda, Characteristics of current bypassing and transient stability in partial insulation HTS coil, 25th International Conference on Magnet Technology, Amsterdam, Netherlands, 2017, 8, 27-9.1

A. Ishiyama, Y. Ozone, H. Ueda, T. Koizumi, S.B. Kim, S. Noguchi, Reduction effect of irregular magnetic field due to screening-current in copper-plated multifilamentary REBCO tape, 25th International Conference on Magnet Technology, Amsterdam, Netherlands, 2017, 8, 27-9.1

SeokBeom Kim, Susumu Fukada, Ryota Nomura, Hiroshi Ueda, Development of HTS bulk NMR relaxometry with ring-shaped irons, 25th International Conference on Magnet Technology, Amsterdam, Netherlands, 2017, 8, 27-9.1

S. Noguchi, R. Miyao, S. Hahn, H. Ueda, S. Kim, and A. Ishiyama, An Extended Thin Approximation Method to Simulate Screening Current in REBCO Coils, 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Compumag2017, PC-A6-5, Daejeon, Korea, 2017, 6, 18-22

武藤 優真,石山 敦士,小泉 智暉,植田浩史,金 錫範,野口 聡,銅メッキ付き多芯 REBCO 線材における遮蔽電流による不整磁場の低減効果,2017 年度春季低温工学・超電導学会,2017.5.22-24(東京)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ec.okayama-u.ac.jp/~ase/>

<http://soran.cc.okayama-u.ac.jp/view?l=ja&u=215a11277e8f1e6574506e4da22f6611&n=%E9%87%91&sm=name&sl=ja&sp=2>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 錫範 (KIM SeokBeom)

岡山大学・大学院理自然科学研究科・教授
研究者番号: 00287963