

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560325

研究課題名(和文)バルク超伝導応用回転機実用化のための最適設計法

研究課題名(英文)The optimum design method for realizing a superconducting application bulk rotating machine

研究代表者

山岸 一人(YAMAGISHI, KAZUHITO)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・特別研究教員

研究者番号：10293177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導バルク回転機の実用化への技術的課題の一つとして挙げられている、変動磁界がバルクに及ぼす影響について、これまで行ってきた解析や実験により原因等を明らかにしてきた。また、その解析や実験の結果によりその対処法も提案されている。そこで、これらの取り組みにより得られたデータを下にして、より実機に近い試作機の製作を行った。この試作機の製作により、新たな問題点を抽出することができ、実用化に向けての第一歩となる。その試作機の設計、解析、製作、運転試験などの過程において得られたデータをまとめ、これらの過程を示すことで効率の良い超伝導バルク回転機の最適な設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：We clarified the cause by the analysis or experiment on the influence which is one of the technical problems for realizing a superconducting bulk rotating machine and which a fluctuating magnetic field exerts on bulk. And, we also proposed the ways of coping by the result of the analysis and experiment. This time, we made the experimental model modeled on the real machine using the DATA got by these measures. By manufacture of this experimental model, we could extract a new problem and became the first step towards realization. We collected the DATA got in processes, such as a design of this experimental model, an analysis, manufacture, and an operation test. We proposed the optimal design method of the high-performance superconducting bulk rotating machine by this process being shown.

研究分野：電気電子工学

キーワード：電気機器 超伝導バルク 回転機 シールドコイル

1. 研究開始当初の背景

ここ数年の高温超伝導(High Temperature Superconductor)バルクの製造技術の進歩により、高効率モータなどに多く利用されているネオジウム磁石など高い捕捉磁界を持つ永久磁石よりも遥かに高い捕捉磁界性能を持つ HTS バルクが製造できるようになってきており、これまで不可能とされていた大型化についても可能となってきている。HTS バルクの捕捉磁界として 10 T 級の試料に関しては、これまで比較的小さな試料しか製作できなかったが、最近では直径が 40mm を超えるもので 10 T 級の試料が製作できるようになり、100mm を超えるような大型の HTS バルクの製造についても実現できるようになってきた。このように大型化が可能になった HTS バルクを使って様々な応用に向けた活発な取り組みが行われてきている。これらの HTS バルク応用の中でも、産業や電力分野など応用範囲が広い回転機への応用がもっとも注目されてきており、全世界での研究開発が加速されてきている。日本でも 10MW 級の大型風力発電機の超伝導化に向けて研究開発が進められており、バルク回転機の有望性が指摘されている。バルク超伝導応用の回転機の場合、一般にその構造にかかわらず空隙部の磁界の空間高調波や電気的な負荷の不均衡・変動などにより HTS バルクは変動磁界にさらされる。HTS バルクは変動磁界にさらされると、バルク内への侵入磁界の変化により交流損失が生じる。このような変動磁界損失は場合によっては非常に大きくなり機器効率を低下させるだけでなく、我々の今までの研究によれば、HTS バルクの捕捉磁界の減少・消滅の原因となることが明らかとなっている。

2. 研究の目的

これまでの我々の研究により、この変動磁界による捕捉磁界の減少・消滅を抑制する対抗策として HTS バルクの回りに数ターンの HTS 線材で作ったシールドコイルを巻くことによって、余分なスペースを必要とせずに捕捉磁界の減少・消滅を抑制できることを明らかにし、解析によって最も効果的なシールドコイルの配置案を提案した。また、このシールドコイルに使用する HTS 線材の種類についても、実験により検討を行った。これらの実験データによって、バルクの損失だけでなく、シールドコイルを含めた全体の損失を考慮する必要があることがわかり、引き続き検討の必要性があることがわかった。さらに、HTS バルクがさらされる変動磁界について、回転機のステータ側の駆動電源を一般的なインバータ電源とした際に問題として考えられる高調波成分を含んだステータ電流による高調波磁界の影響についても実測データにより評価を行った。

しかしながら、実際にバルク応用回転機にした場合、バルクがさらされる変動磁界は回

転磁界であることから、回転磁界によるバルクの捕捉磁界への影響について検討する必要がある。その影響を抑制するためのシールドコイルの効果についても評価する必要がある。さらに、変動磁界を発生させる原因となるステータコイルについても検討を行う必要がある。

以上のように本研究はこれまでの我々の研究の成果に基づき、バルク応用回転機における回転磁界による変動磁界下でのバルクおよびシールドコイルへの影響について電磁的・熱的観点より解明を行うと共に、変動磁界の発生源でもある、ステータの構造および配置についても検討を行い、バルク応用回転機の試作機を製作する過程を示すことにより最適設計法を提案し、その早期実用化を目的としたものである。

3. 研究の方法

(1) HTS バルク回転子の変動磁界による影響評価

回転磁界下におけるバルクの損失評価を行うため、前研究課題として解決されていなかった回転機変動磁界による微小な損失を測定する方法をこれまで使用してきた熱電対を測定素子に用いた熱量法によるものに改良を加えた改良型熱量法を評価試験に用いる。また、さらに測定精度を上げるために、別の種類の温度素子から最も反応の良い素子を複数個選び同時使用する測定法も試み、HTS バルクの損失測定データ収集と評価を行う。同時に回転磁界下におけるシールドコイルの構成法および評価を行うため、新規購入したバルク超伝導体と超伝導線材の緒元をもとに磁界解析ツールを利用してシールドコイルの変動磁場による影響とその有効性について評価を行う。その評価内容をもとにして次の段階であるシールドコイルを含むバルク超伝導回転子の設計を行う。設計された評価用のシールドコイル付バルク超伝導回転子の製作を行うとともに、シールドコイルの有効性を実験により確認する。

(2) バルク応用回転機のステータの構成法

前項(1)で設計されたバルク超伝導回転子にあわせたステータの設計を行う。ここで設計された試作用のステータは形状や線材種類によっていくつか試作を行い、評価試験を行う。その後、試作した試験用ステータコイルを回転子が最適になるように改良を行い評価する。

(3) HTS バルク回転機の回転試験による評価

これまで行ってきた研究成果を実際に評価するために、試験用バルク回転機の設計及び製作を行う。その製作された回転試験装置を使用してバルク回転子の回転試験を行う。この回転試験は、回転時のバルク回転子の捕捉磁束や温度の状態を連続的に計測し、回転時の運転評価を行うと同時に、回転時のバル

ク損失評価を行う。また、シールドコイルの有効性についても、実際の回転機を模擬した試験装置によってその効果について検証する。

(4)研究成果のまとめ

本研究によって得られた多くの測定および評価結果をまとめ、最適な設計法を明らかにする。

4. 研究成果

(1)HTS バルク回転子の変動磁界による影響評価

バルク回転機の实用化を目指すにあたって、いくつかある技術的課題のひとつである変動磁界が回転子のバルクに与える影響について我々は研究を行ってきた。ここでは、最終的に目指す、バルク回転試験機の製作を念頭において、変動磁界がバルク回転子に与える影響についてのデータの収集を行った。まず、これまで行ってきた測定結果をもとにして、実際の回転試験装置に近いバルク回転子の設計をおこなった。

図1に設計した回転子を示す。回転子の一部であるバルクモジュールは、図で示されているように回転子に4つ設置されており、それぞれのモジュールは、HTS バルクと HTS シールドリングから成り立っている。設置される予定の4つの HTS バルクは、それぞれの緒元が若干異なっているが、解析では表1に示す Bulk-A の緒元を使用することとする。また、シールドリングに用いた HTS 線材の緒元も同じく表1に示す。シールドリングの配置については事前に行った実験や解析の結果、そして線材の曲げ半径などを考慮して図2に示された2つの配置を候補として選択している。

表1 HTS バルクとシールドリングに使用した HTS 線材の緒元

Bulk-A	GdBaCuO
Diameter	34.55mm
Height	10.46mm
Trapped Field	1.164T (at 77K) Field Cool
J_c	$6.84 \times 10^7 \text{ A/m}^2$
n value	20
HTS Wire	Bi2223/Ag-sheathed
Thickness	0.32mm
Tape Wire Width	2.8mm
I_c	64A at 77K, 0T
J_c	$7.14 \times 10^7 \text{ A/m}^2$
Min. Bending radius	25mm

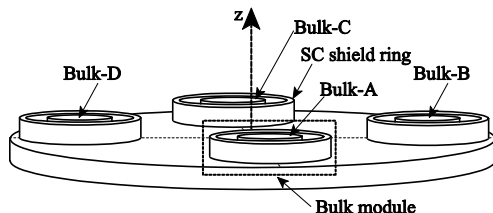


図1 HTS 回転子モジュール

以前の研究では、シールドリングの曲げ半径を考慮せず、バルクに直接巻くモデルを提案していたが、これはシールドリングの電流密度(J_c)の劣化とバルクへの熱伝達に悪影響を及ぼすことが確認されたため、図2に示すような配置モデル (AR1, AR2) を提案することとなった。これらのバルクモジュールについては、バルクの捕捉磁束を減少させる要因となる交流損失がどの程度発生するのか解析を行い、この結果により最適なシールドリングの配置を決定した。解析は、図2で示すシールドリングの配置 (AR1, AR2) とシールドリングを配置しないものを行った。図3に解析結果を示す。この解析はシールドリングの層数を 0~10 層まで変えたときの(a)バルクのみ、(b)シールドのみ、(c)トータル(バルク+シールド)の交流損失を計算した結果である。

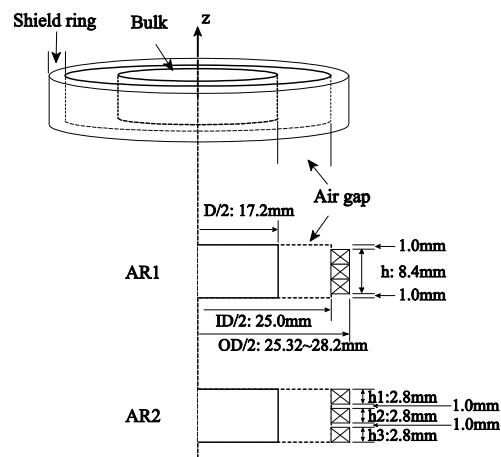
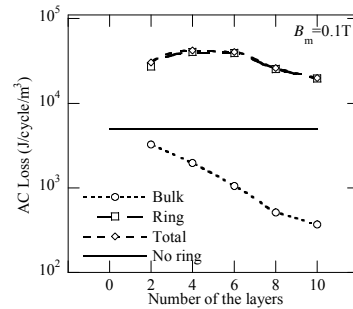
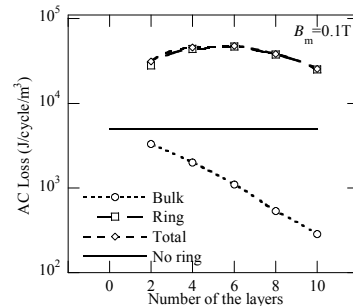


図2 HTS シールドリングの配置



(a) Shielding ring AR1.



(a) Shielding ring AR2.

図3 シールドリングの層数によるバルクモジュールの交流損失解析結果

交流変動磁界(B_m)は、 z 軸方向に 0.1T 印加する。シールドリング配置 AR1 も AR2 も層数を増やすことによりバルクの損失は小さくなっていくことがわかり、リングの損失はバルクの損失に比べて非常に大きくリングによってバルクが効果的にシールドされていることがわかる。また、AR1 と AR2 の値を比較すると、グラフではわかりにくいですが、AR2 のリングによるバルクの損失の方がより小さくなっている。よって、バルク回転子のシールドリングの配置は AR2 を採用することとした。

次に、この AR2 の配置とした、バルクモジュールについて、実験による評価を行い、そのデータ収集を行った。実験に用いたサンプル図を図 4 に示す。

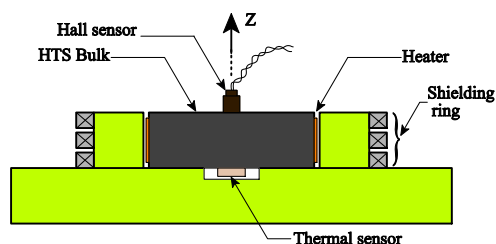


図 4 バルクモジュール評価用サンプル

この実験は、バルクモジュールを一旦磁化させた後に解析と同じくサンプル面の z 軸方向から交流変動磁界を印加して、その時に発生する交流損失による温度上昇を計測すると同時にバルクの捕捉磁束の変化も計測を行う。サンプルのバルク側面には冷却チャネルとしてスリットを設けてあり、バルクへの十分な冷却が得られるよう設計されている。そして、さらにそのバルクの側面にはシールドリングとは別に着磁調整用のヒータが均一に巻かれており、冷却してから磁場をかける(ZFC)磁化法で着磁を行い、その磁化最中にこのヒータを加熱することでバルク温度を調整し、磁化磁束がバルク内部に侵入しやすくするよう制御するために設置されている。捕捉磁束の変化は、バルク上面の中央に設置されたホールセンサにより測定され、バルクの底面には温度センサが設置されており、温度の変化も同時に測定できるようになっている。その結果の一部を図 5,6 に示す。バルクにシールドリングを付加した場合と、付加しない場合の捕捉磁束 B_p の時間変化である。 B_{p0} は B_p の初期値であり、この時の値は 1.16T であった。この結果より、シールドリングを付加した場合の捕捉磁束はほとんど変化せず、状態を保持できていることがわかる。また、シールドが付加されない場合は、600 秒印加時点で 25%以上減少していることがわかる。これらの結果より、シールドコイルの性能が十分発揮されていることが確認でき、このバルクモジュールを回転子に組み込んで、本試験装置のバルク回転子とすることとした。

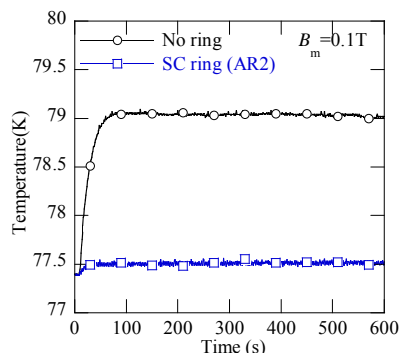


図 5 バルクモジュールの温度変化の様子 (シールドリング有・無)

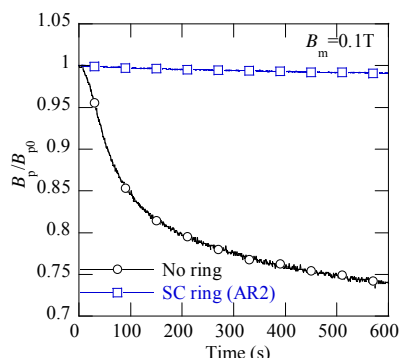


図 6 バルクモジュールの捕捉磁束変化の様子 (シールドリング有・無)

(2)バルク応用回転機のステータの構成法

前項(1)で製作されたバルク回転子にあわせてステータの設計を行った。ここで設計された試作用のステータはビスマス(Bi)、レアース(RE)系の代表的な高温超伝導線材と一般的な産業用に用いられている Cu マグネットワイヤを使用することとし、ステータの形状を変化させながら磁界解析を行い、最も大きな回転磁界を発生させることができる形状を探った。しかし、HTS 線材をステータコイルに使用した場合、線材の形状や曲げ半径などの制約が非常に厳しく、特に本試験用バルク回転子用のステータは、バルクの直径が小さいためステータコイルの直径も小さくする必要があった。そこで、試作するステータは、一般的な Cu マグネットワイヤを使ったステータを 77K で使用した場合の方がより高密度の磁界を得られることから、回転試験用のステータコイルは、Cu マグネットワイヤを使ったコイルを製作することとした。また、試作した試験用ステータコイルを回転子が最適動作できるように改良を行った。

(3)HTS バルク回転機の回転試験による評価

これまで評価してきた、バルク回転子と評価試験用ステータコイルを組み合わせる回転試験を行い、バルク回転子の評価を行った。また、シールドリングを使った試験も行った。本試験装置は、図 7 で示されているように

回転子とステータコイルが回転軸を中心として縦に配置されたアキシャル型の同期モータをモデルとしている。回転子は、超伝導バルクと超伝導シールドリングをセットにしたモジュール（バルクモジュール）が4つで構成されている。超伝導バルクの底部（裏側）の中心にはバルクの温度変化を測定するための温度センサが設置されているものと、捕捉磁束を測定するホールセンサが設置されているものがある。設置スペースの関係で一つのバルクに2種類のセンサを設置できないため、バルク A, C にはホールセンサ、バルク B, D には温度センサが設置されている。これら回転子の測定信号は、常温部のスリップリングを介して引き出されている。また、回転速度は常温部に設置されている回転計によって測定される。ステータは銅のコイルで構成されており、ステータコイルが発生させることができる磁界の最大値は50mTである。回転子を吊り下げているベアリングは、常温部にあるが、回転子とステータは液体窒素で冷却されている。回転子およびステータの材質は、GFRP であるので磁界の影響を受けない。また、回転子とステータの間隔は調整することが可能であり、今回の回転試験ではその間隔を 2mm で行った。超伝導シールドリングの配置は、図 2 の AR2 とし、捕捉磁束の減少抑制効果が認められたものである。シールドリングは、10 層のものを使用した。

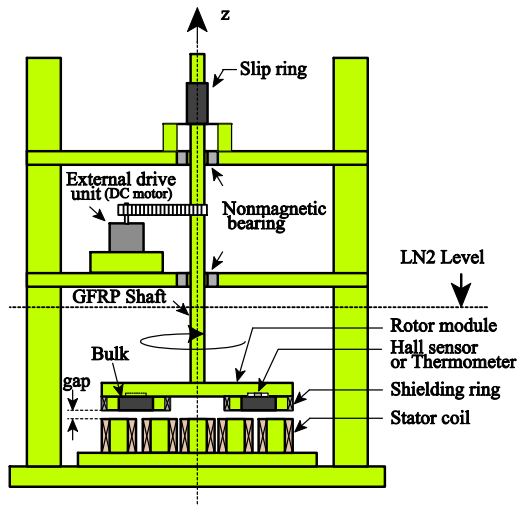


図 7 バルク回転子試験装置

回転機の回転速度とステータ発生磁界は駆動電源を PC によって制御を行い、定常時のステータコイルの発生磁界は一定値とした。定常速度運転時の回転速度は、100, 200, 300rpm で行った。この時のステータ電流周波数は、6.7, 13.4, 20Hz である。定常速度運転時間は 600 秒とし、その時のバルク温度および捕捉磁束の変化の測定を行った。図 8 にシールドリングを付けた場合と付けない場合のバルクの捕捉磁束の変化について比較した結果を示す。比較した回転試験は、回転速度 300rpm で、ステータ磁界を 50mT で行

ったものである。この結果よりシールドリングを使った場合、捕捉磁束の減少はシールドリングがない場合と比べて変化が小さく、捕捉磁束減少抑制に効果的であることが示された。

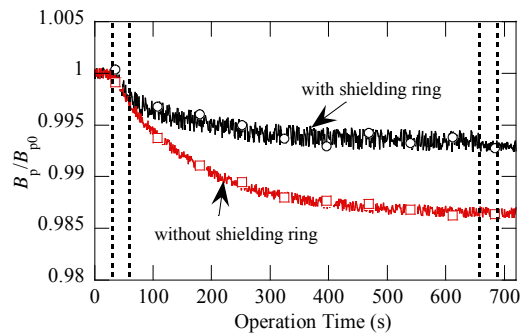


図 8 回転子時のバルク捕捉磁束の様子（シールド有・無）

(4)研究成果のまとめ

以上のように、より実機に近い試験装置によって得られた試験データは、今後の実用化に向けての基礎データとなり、非常に有用となった。そして、この試作機の設計、解析、製作、運転試験などの過程において得られたデータもすべて有用となった。さらに、本研究過程を示すことで高効率の超伝導バルク回転機の最適な設計法を提案したこととなる。

(5)国内外へのインパクトと今後の展開

国内外で行われている関連学会で本研究の成果発表を行った際、関係分野の研究者から非常に多くの質問を受け、学術的な興味を引いたと思われる。またその質問や技術的な意見から、これまで検討していなかった方法による問題解決の重要な情報が得られ、新たな検討課題として今後も研究を続けていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

K Yamagishi, J. Ogawa and O. Tsukamoto, "Rotation Test of a Superconducting Bulk Rotor Shielded With Superconducting Rings", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.25, No.3, Article#: 5201905, 2015, DOI:10.1109/TASC.2014.2379703, 査読有。

山岸一人, 小川純, 塚本修巳, 「超伝導バルク回転子の回転試験」第 90 回 2014 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 2P-p30, 2014, 査読なし。

K Yamagishi, J. Ogawa and O. Tsukamoto, "Effects of fluctuating magnetic fields on a superconducting

bulk rotor shielded with superconducting rings”, Journal of Physics: Conference Series, Vol.507, No.3, _032060, 2014, DOI:10.1088/1742-6596/507/3/032060, 査読有 .
山岸一人, 小川純, 塚本修巳, 「HTS バルク回転子の捕捉磁束に及ぼす変動磁界の影響」, 第 88 回 2013 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 2P-p30, p.153, 2013, 査読なし .

〔学会発表〕(計 4 件)

山岸一人, 「超伝導バルク回転子の回転試験」, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, 2014 年 11 月 6 日, 福島 .

K Yamagishi, “Rotation Test of a Superconducting Bulk Rotor Shielded With Superconducting Rings”, The Applied Superconductivity Conference 2014, Aug. 14, 2014, Charlotte, NC, USA.

山岸一人, 「HTS バルク回転子の捕捉磁束に及ぼす変動磁界の影響」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 2013 年 12 月 5 日, 名古屋 .

K Yamagishi, “Effects of fluctuating magnetic fields on a superconducting bulk rotor shielded with superconducting rings”, 11th European Conference on Applied Superconductivity 2013, Sep. 18, 2013, Genoa, Italy.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山岸 一人 (YAMAGISHI KAZUHITO)
横浜国立大学・工学研究院・特別研究教員
研究者番号 : 10293177