

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04080

研究課題名(和文) 空心単相高温超電導変圧器および超小型・軽量の交流大電流電源の開発

研究課題名(英文) Development of very small and lightweight AC current supply with an air-core high-temperature superconducting transformer

研究代表者

七戸 希 (Nanato, Nozomu)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：80362953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高温超電導線の通電特性測定に用いる、汎用性のある小型・軽量の交流大電流電源を、鉄心を不要とする空心高温超電導変圧器にて実現をする研究を行った。有限要素法を用いた電磁場解析にて変圧器の最適構造を求め、それに基づいて実機を作製し、通電試験を行った。その結果、電源の体積と重量を市販電源の1/200以下にすることができ、商用周波数で1 kApeak, 1 kHzでも300 Apeak以上の通電を可能とする電源を作製することができた。汎用できる体積・重量であり、市販の高温超電導線に対して十分な出力電流である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の市販の大電流電源では、体積と重量が大きかったため、特定の研究機関でしか導入ができず、通電試験を実施することが難しかった。本電源は小型かつ軽量であるため、利便性と汎用性が高くなり、国内外における高温超電導機器開発に関する研究を促進するものである。変圧器の設計値を学会発表等にて公表しているため、他研究者が自身で作製することも可能である。また、空心変圧器特有の現象を利用した常電導転移保護システムの開発も行っており、常電導転移に対する安全性の確保の一案を提供することもできた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a very small and lightweight AC current supply with an air-core high-temperature superconducting (HTS) transformer for measuring current transport characteristics of HTS wires. The optimal structure of the transformer was obtained by electromagnetic analysis using FEM and an actual transformer was fabricated based on the analysis. As the results, the volume and weight of the developed supply with the transformer were under 1/200 of those of the commercial current supply. Through the current transport experiments, it was found that the supply could output 1 kApeak at commercial frequency and over 300 Apeak at 1 kHz.

研究分野：超電導工学，電気機器学

キーワード：空心変圧器 高温超電導 交流電源 大電流 超小型・軽量

1．研究開始当初の背景

高温超電導電力機器はグリーンイノベーションのキーテクノロジーとして期待されている。同機器が小型・高効率・低コストなどを満たすように最適に設計されるためには、同機器に使用される高温超電導線の通電特性を十分に把握しておくことが必須である。同線の液体窒素温度・自己磁場下における臨界電流は現時点で、開発中のもので 500 A 以上、市販品でも 200 A 以上と非常に大きく、その値は年々、開発の進展に応じて増えつつある。このような高温超電導線の通電特性把握のためには大電流が通電可能な電源が必要である。しかしながら、市販の特に交流電源においては、非常に大型・大重量のものしか存在しない。したがって、ごく限られた研究機関でなければ設置できず、国内外において高温超電導機器開発に係る様々な研究が円滑に進め難い状況にある。

2．研究の目的

短尺線材への通電ができればよいため、電源の出力電圧は低くてよい。したがって、低電圧・大電流の電源を小型・軽量に作製することが目的となる。そのために、空心单相高温超電導変圧器の開発および同変圧器を用いた電源の開発を行う。本変圧器の一次側に低電流電源を接続し、二次巻線の巻数を一次巻線より少なくし、二次側にて大電流を達成するものである。変圧器の巻線として高温超電導線を用いることで、その高い電流密度特性から、変圧器巻線の体積と重量を小さくすることができる。さらに、出力電圧が非常に低い電圧でよいため、入力電圧も併せて低電圧にできることから、変圧器の励磁インピーダンスを小さくしても励磁電流は小さくすむ。一般的な変圧器では鉄心を用いて励磁インピーダンスを大きくし、励磁電流を小さくすることで損失を低減させている。この必要がないため、鉄心を使用しなくてもよくなる。その結果、鉄心分の体積と重量も削減することができる。以上のことに基づき、超小型・軽量電源を作製する。

3．研究の方法

まずは空心高温超電導変圧器の設計を行い、続いて実機の作製と実験検証を行った。

[1]空心高温超電導変圧器の設計・作製

鉄心無くすことで一次巻線と二次巻線の磁気結合度が下がることが懸念されるため、必要十分な結合度を確保できる構造設計が重要になる。そこで、FEM による電磁場解析に基づいて設計を行い、実機を作製した。

[2]実験検証

実機による通電試験を行った。目標の電流値は商用周波数から 1 kHz の周波数範囲において最大 1 kA_{peak} であり、その達成度を検証する実験である。1 kA_{peak} としたのは、背景における通電特性の把握にて、今後の線材の臨界電流の向上を見込んだものであり、周波数範囲は線材が送電ケーブルやモーターの巻線のような高調波電流が流れる機器に应用されることを想定したものである。

4．研究成果

変圧器の構造について、シングルパンケーキ型（一次巻線と二次巻線の両方が渦巻き型の空心変圧器）とし両巻線を密着させることで磁気結合度を十分に高くできると考えた。図 1 に設計した変圧器構造を、図 2 に設計のための解析例を示す。図 1 のオレンジ色の部分が一次巻線であり、黄色部分が二次巻線である。二次巻線を一次巻線の中央に内接する形状とすることで磁気結合度を高め、巻数比を 200:1 にすることで必要な変流比を確保している。なお、高温超電導線は

テープ形状をしているため、シングルパンケーキ型は作製し易く、かつ巻線時に線材に不要な応力がかからないため、最適な構造でもある。各巻線は GFRP ボビンに巻かれており、変圧器全体を液体窒素にて浸漬冷却する。図 2 は変圧器の二次元軸対称モデルの磁場解析例であり、横軸の寸法は巻線中心からの長さである。本解析により通電時の磁場分布を確認するとともに、必要な変流比を得られる構造を検討した結果として図 1 の構造を得た。この構造に基づいて作製した変圧器の写真を図 3 に示す。

しかしながら、変流比として 1 kApeak の出力電流は達成できる構造ではあるものの、漏れインダクタンスの影響により、特に高周波時において一次電圧が大きくなり、一次電源の定格電圧が過剰になってしまう問題があり、構造設計で避けることが難しいこともわかった。そこで、一次巻線に可変コンデンサを接続し、漏れインダクタンスによる電圧降下を直列共振にて低減する方法をとることとした。

通電試験を行ったところ、200 Hz 程度までは 1 kApeak 出力が可能であったが、周波数を高くしていくにつれ最大出力電流は低下し、1 kHz では 330 Apeak でとどまった。この値は共振させない場合と比較すると 15 倍以上であり、市販の高温超電導線の特性把握に対しては十分であるものの目標の 1 kApeak には到達しなかった。その原因を分析したところ、一次巻線と二次巻線の隣接箇所における交流損失が大きく、その抵抗および温度上昇による臨界電流の低下により一次電流の励磁回路への分流が大きくなり、二次電流を大きくすることができないと考えられ

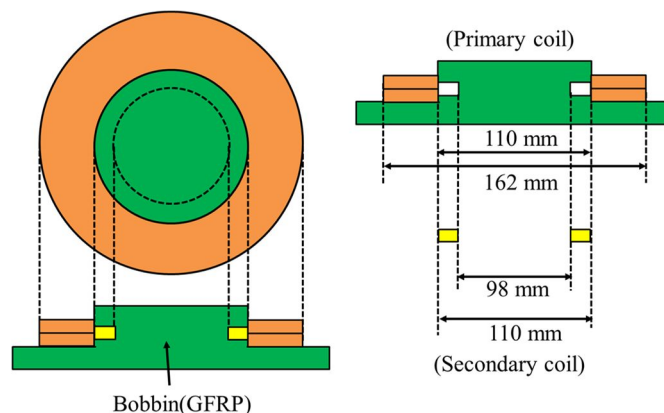


図 1 空心高温超電導変圧器の構造

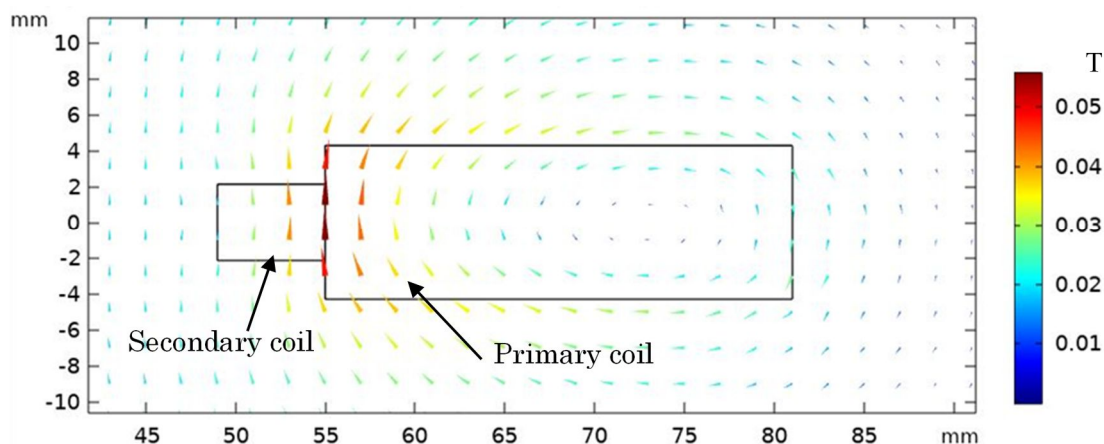


図 2 FEM による空心高温超電導変圧器の二次元軸対称モデルの磁場解析例

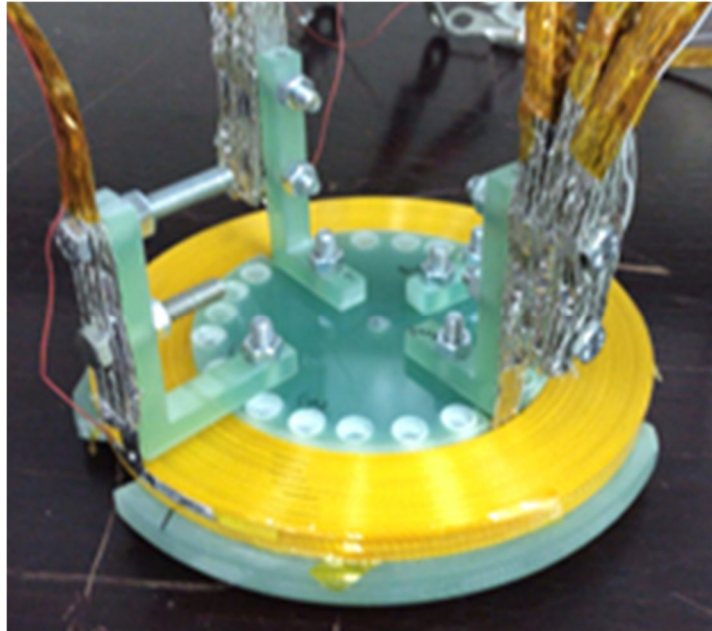


図3 作製した空心高温超電導変圧器

た。そこで、その隣接箇所を解析にて検討し、交流損失の原因となっている隣接箇所での巻線への印加磁場の低減と、冷却チャンネルを設けることで温度上昇を抑制する構造を提案した。図4にその構造を示す。横軸の寸法は図2と同様に巻線中心からの長さである。一次巻線と二次巻線の間隙を設け、巻線に印加する磁場を低減して交流損失を低減させ、かつその隙間が冷却チャンネルとなり、交流損失にて生じた熱による温度上昇を抑制することで、臨界電流の低下も抑制できると考えられる。また、隙間を設けると磁気結合度が低下することになるが、巻線直径を大きくすることでその低下を防止している。今後、この設計に基づいて変圧器の作製および実験検証を行っていく予定である。

また、本研究では並行して変圧器の常電導転移保護システムの構築も行った。二次巻線については、常電導転移が生じたとき、二次電流の一部が励磁電流として分流し、二次電流が減衰していくという空心変圧器特有の現象が生じるという実験結果が得られたため、変流比の低下を検出することによって常電導転移を検出する方法を考案した。一次巻線については代表者らがこ

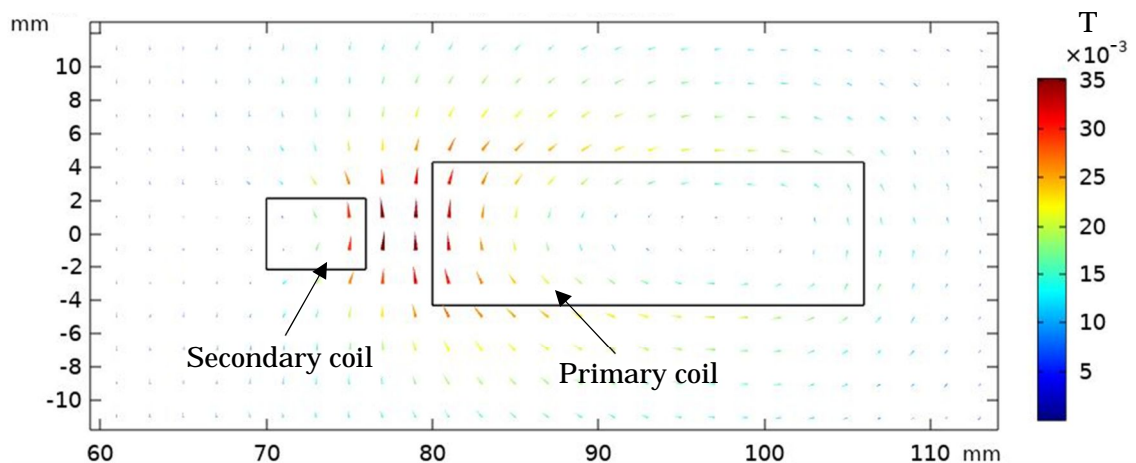


図4 交流損失低減のための巻線構造

れまでに提案してきている有効電力法を空心変圧器に適した方法に改善することで常電導転移

を検出可能にした。以上の方法を組み合わせて保護システムとして構築し、空心変圧器の常電導転移に対する安全性を確保した。

以上のように、市販の高温超電導線の特性測定に対しては、十分な汎用性と利便性を持ち、さらには安全性が確保された電源を開発することができた。今後は本研究にて見出した新たな構造にて変圧器を再作製し、さらなる電流容量の向上を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Hokuto YAMADA, Nozomu NANATO, Keisuke SHIRAI, Tetsuhiro OBANA	4. 巻 Vol.16, 2405007
2. 論文標題 Study of an Air-Core High Temperature Superconducting Current Transformer for Large Current Supply	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.16.2405007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tetsuhiro OBANA, Nozomu NANATO	4. 巻 Vol.16, 2405051
2. 論文標題 Modeling of stacked single-layer coils wound with Bi2223 tapes using a lumped constant circuit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.16.2405051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Aoto YAMAGUCHI, Nozomu NANATO, Tetsuhiro OBANA	4. 巻 Vol.16, 2405065
2. 論文標題 Identification of Normal Transition in a Bundle HTS Cable Used for an HTS Transformer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.16.2405065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 N Nanato and H Aoyama	4. 巻 1293,012062
2. 論文標題 Early Detection of Normal Transitions in a High Temperature Superconducting Transformer Wound with a Plurality of HTS Tapes Using the Active Power Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/issn.1742-6596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 N Nanato, T Adachi and T Yamanishi	4. 巻 1293, 012072
2. 論文標題 Development of Single-phase Bi2223 High Temperature Superconducting Transformer with Protection System for High Frequency and Large Current Source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/issn.1742-6596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N Nanato, S Tanaka and S Tenkumo	4. 巻 1054, 012070
2. 論文標題 Study on a Magnetic Flux Detection Coil for Detection of Normal Transitions in a Hybrid Single-phase Bi2223 Superconducting Transformer by the Active Power Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/issn.1742-6596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N Nanato and H Kumagai	4. 巻 1054, 012069
2. 論文標題 High resolution locating of normal transitions in a high temperature superconducting coil by capacitor type voltage terminals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/issn.1742-6596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N Nanato, T Ono, T Adachi and T Yamanishi	4. 巻 1054, 012068
2. 論文標題 Protection System for Normal Transitions in a Single-phase Bi2223 Full Superconducting Transformer by the Active Power Method under Flowing Currents of Various Frequencies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/issn.1742-6596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Hokuto YAMADA, Nozomu NANATO, Keisuke SHIRAI, Tetsuhiro OBANA
2. 発表標題 Study on an Air-core High Temperature Superconducting Transformer for a Large Current Supply
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aoto YAMAGUCHI, Nozomu NANATO, Tetsuhiro OBANA
2. 発表標題 Identification of Normal Transition in a Bundle HTS Cable Used for an HTS Transformer
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuhiro OBANA, Nozomu NANATO
2. 発表標題 Modeling of stacked single-layer coils wound with Bi2223 tapes using a lumped constant circuit
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白井 佳輔, 山田 北斗, 七戸 希
2. 発表標題 変流比計測による空心高温超電導変圧器の常電導転移検出
3. 学会等名 2020年度（第71回）電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田 康希, 七戸 希
2. 発表標題 ハイブリッド型高温超電導変圧器の常電導転移検出・保護システムの高精度化
3. 学会等名 2020年度(第71回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本 昌也, 七戸 希
2. 発表標題 単相高温超電導変圧器の高周波通電時における常電導転移の検出
3. 学会等名 2020年度(第71回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾花 哲浩, 七戸 希
2. 発表標題 多重単層型高温超伝導コイルの電流分布解析
3. 学会等名 2020年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahito Yamanishi, Nozomu Nanato, Masaya Okamoto
2. 発表標題 Development of a High Temperature Superconducting Transformer for a 1 kA - 1 kHz Class Compact Power Supply
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Tenkumo, Nozomu Nanato, Koki Matsuda
2. 発表標題 Basic Study for an Air-core Hybrid Bi2223 High Temperature Superconducting Transformer for a Compact Current Source and its Protection System for Normal Transitions
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 碧斗, 七戸 希
2. 発表標題 Bi2223高温超電導変圧器における二次側並列導体巻線の常電導転移検出
3. 学会等名 令和元年度(第70回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 北斗, 七戸 希
2. 発表標題 空心高温超電導変圧器における常電導転移時の自己保護に関する基礎検討
3. 学会等名 令和元年度(第70回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takafumi Adachi, Nozomu Nanato, Takahito Yamanishi
2. 発表標題 Structural Study on a Single-phase Bi2223 High Temperature Superconducting Transformer for a 1 kHz-1 kA Class Power Supply
3. 学会等名 31th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikishi Kondo, Nozomu Nanato, Hokuto Yamada
2. 発表標題 Design of an Air-core Bi2223 High Temperature Superconducting Transformer with Pancake Structure for a Large AC Current Supply and its Protection System for Normal Transitions
3. 学会等名 31th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Aoyama, Nozomu Nanato
2. 発表標題 Early Detection of Normal Transitions in a High Temperature Superconducting Transformer Wound with a Plurality of HTS Tapes Using the Active Power Method
3. 学会等名 31th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山西 隆仁, 七戸 希
2. 発表標題 交流大電流電源用の单相高温超電導変圧器へのYBCO巻線導入に向けた基礎的検討
3. 学会等名 平成30年度(第69回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天雲 捷太, 七戸 希
2. 発表標題 交流大電流電源用のハイブリッド高温超電導変圧器の構造および常電導転移保護に関する検討
3. 学会等名 平成30年度(第69回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者ホームページ
<https://aem-nn.sakura.ne.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------