

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14214

研究課題名(和文)短時間スタンドアロン運転可能な高熱伝達固体蓄冷媒方式高温超伝導誘導同期モータ

研究課題名(英文)High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor Cooled with High Heat Transfer Solid Cryogen aiming to Short Time Stand Alone Operation

研究代表者

中村 武恒(Nakamura, Taketsune)

京都大学・工学研究科・特定教授

研究者番号：30303861

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、超伝導モータ用のGM冷凍機付大容量固体冷媒作製装置を開発した。同装置を利用して、減圧法による固体窒素の形成過程を観察することに成功した。また、5 kW級高温超伝導誘導同期モータを上記固体冷媒中に含浸して、200 rpm～1800 rpmの回転数領域における回転試験に成功した。本結果により、短時間過負荷運転時の発熱を固体冷媒の高い熱容量によって吸収できる可能性が示された。

さらに、固体窒素+微量ネオン冷媒をGM冷凍機で60 K程度で冷却し、上記モータのスタンドアロン回転試験に成功した。本成果によって、高温超伝導回転機の新しい冷却法が実現された。

研究成果の概要(英文): In this study, we developed a large capacity solid cryogen production equipment which is coupled with a GM cryocooler, for cooling superconducting motors. With the use of the fabricated equipment, we succeeded in observing formation process of solid nitrogen by reducing the pressure of liquid nitrogen. Also, we completed the rotational test of a 5 kW class High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor (HTS-ISM), which was impregnated in the above cryogen. From the results, we can show that the generated heat from the short time overload operation could be absorbed by the use of solid cryogen that possess large heat capacity.

Furthermore, we could cool solid nitrogen-small amount of gas neon by the use of the GM cryocooler at around 60 K, and then realized so-called stand-alone operation of the HTS-ISM. Based upon our study, one of the cooling method of the superconducting rotating machines are newly realized.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導 誘導同期モータ スタンドアロン 固体冷媒 液体冷媒 冷凍機冷却 窒素 ネオン

1. 研究開始当初の背景

我が国における産業用モータの主流はかご型誘導機であり、その簡易な構造や安価であるメリットを活かして様々な分野で使用されている。一方で、永久磁石モータについても研究開発が進んでおり、その高効率性故に広く市販されるようになってきている。特に、電気駆動式自動車等の輸送機器駆動モータとしては、埋め込み磁石型永久磁石モータが広く実用されている。

今後、上記モータの更なる高効率化や出力密度改善のためには、従来技術の延長では限界があると考えられ、技術的ブレークスルーが不可欠である。その一つが高温超伝導技術と期待され、高温超伝導同期機を中心に世界的な研究開発が展開されている。一方で、研究代表者らは、高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) [1] を世界に先駆けて研究開発している。図 1(a)には、かご形誘導機のカットモデルを示すが、HTS-ISM の基本構造は本機と同様になる。また図 1(b)には、HTS かご形巻線概略図 [1] を示す。かご形巻線に高温超伝導 (損失ゼロ) 線材を適用することにより、定常状態で鎖交磁束が捕捉されて等価的に磁極が形成される。このことは、上記した誘導機の簡易な構造を有しながら高効率な同期回転が可能であることを示しており、また飛躍的な高トルク密度化、加減速に対して自律的な回転安定性など、従来の回転機では実現不可能な高性能化や高機能化を達成可能である。

しかしながら、高温超伝導回転機の冷却方法は一般に大きな技術開発課題であり、また冷凍機故障時に運転不可能になるなどの問題がある。そこで、研究代表者が固体蓄冷媒を上記モータに適用する着想に至った。即ち、特に始動時や過負荷時に発生する大きな発熱を固体蓄冷媒の大きな熱容量で吸収することによって、暫時運転を継続できる可能性を有している。しかしながら、例えば固体冷媒中に含浸された HTS-ISM の回転の可否など、上記アイデアの実現に際して不明な点が多い。

[1] 中村武恒(研究代表者), 低温工学, vol. 47, no. 6 (2012) pp. 384-391

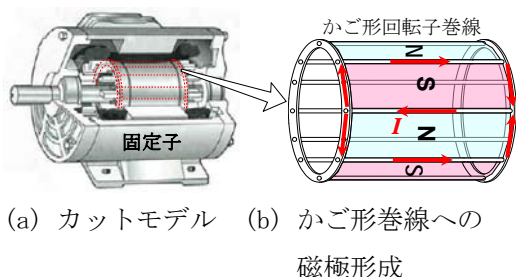
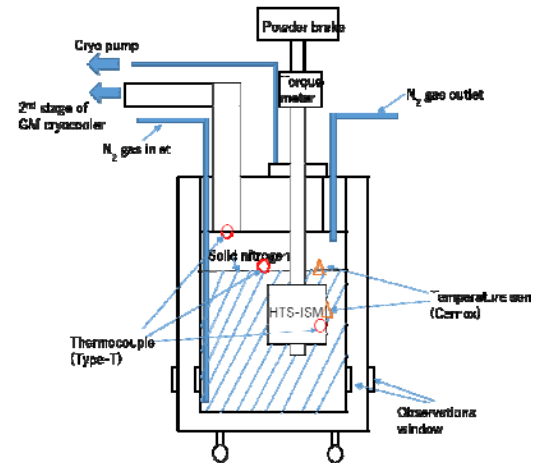


図 1 高温超伝導誘導同期モータの説明図 [1]



(a) 外観写真



(b) 内部概略図

図 2 固体冷媒冷却 HTS-ISM 回転クライオスタット*

* 基盤研究(B) (研究代表者: 中村武恒、研究課題番号: 26289076、2014~2016年度)の研究にて製作したものを有効利用)

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが先導研究を実施している HTS-ISM を対象として、冷凍機故障時も暫時運転継続可能な高熱伝達固体蓄冷媒冷却方式回転システムの実現に挑戦する。具体的には、5kW 級試作モータについて、固体蓄冷媒-微量ガス(液体)中にて含浸冷却して、上記固体冷媒の熱伝達特性を飛躍的に改善させるだけでなく回転子の冷却も担う。さらに、本ハイブリッド冷媒によって、冷却系が故障しても暫時運転可能なスタンドアロンシステムを実現する。

3. 研究の方法

高温超伝導誘導同期モータ(回転子: ビスマス系高温超伝導巻線、固定子: 銅巻線)の固定子を固体窒素蓄冷材にて冷却する構造を検討する。そして、固体蓄冷媒必要量につ

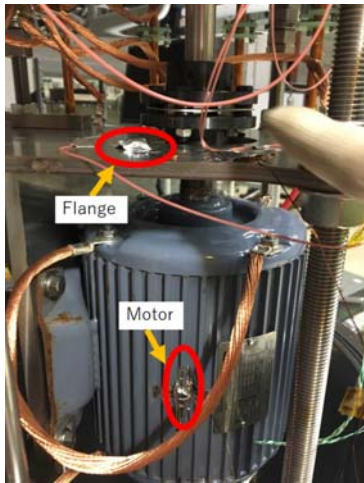


図3 5 kW級 HTS-ISM と温度センサー設置位置

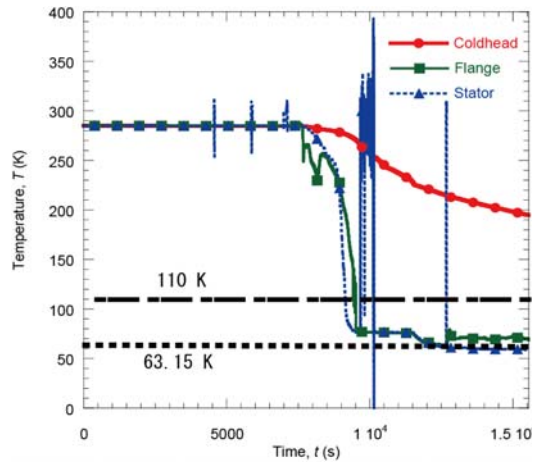


図5 窒素冷却過程における温度変化

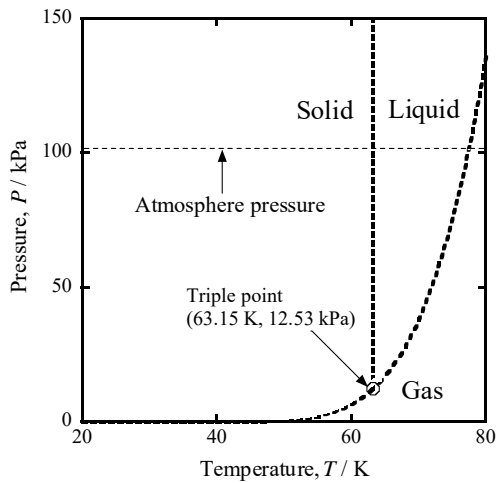


図4 窒素の相図**)

**）E-PROPATH, 汎用熱物性値プログラム
パッケージ propath 第11.2 版, (2000)

いて、想定されるモータの熱負荷に対して熱解析に基づいて定量化する。また、当初は上記に微量液体ネオン冷媒を導入する計画であったが、その後の超伝導モータの実用性を検討した別研究によって、当該冷媒の温度範囲(25 K~27 K)は冷凍機の効率の観点から実用的で無いことが明らかになった。そのため、本研究では 60 K 程度の温度領域を対象とした。

既設の回転クライオスタットを改造して、固体冷媒を作製できるようにした。図2には、固体冷媒冷却回転クライオスタットの(a)外観写真と(b)内部概略図を示す(基盤研究(B)、研究代表者: 中村武恒、研究課題番号: 26289076、2014~2016 年度の研究にて製作したものを有効利用した)。同図において、5 kW 級 HTS-ISM のシャフトが鉛直上向きになるようにクライオスタット内に固定する。そして、室温に延長したシャフトにトルク変換機や

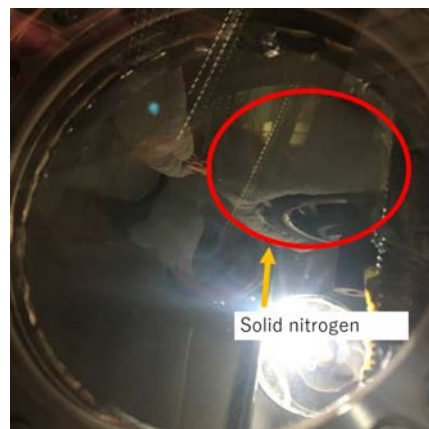


図6 固体窒素作製時のクライオスタット内の様子



図7 固体窒素完成時のクライオスタット観測窓の様子

負荷印加用パウダブレーキを設置している。さらに、GM 冷凍機も設置しており、固体冷媒を一定時間冷却維持することが可能である。

図3には、5 kW 級 HTS-ISM の外観写真を示す。同モータのケーシングが固体蓄冷媒に接触することになり、また上下のブラケットには、それぞれ4 点に無酸素銅の編線をねじ止めし、GM 冷凍機のコールドステージに接続し

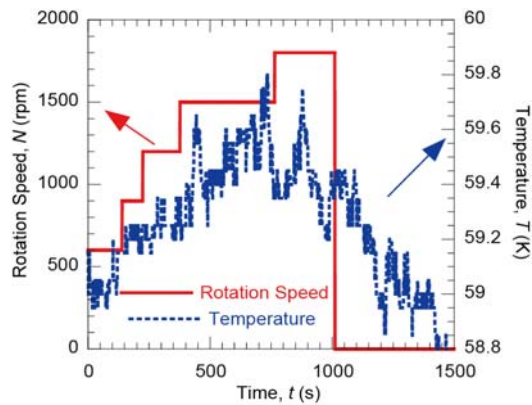


図8 固体窒素中における5 kW級 HTS-ISM
の無負荷回転特性

である。なお、温度測定用の熱電対をモータケーシング部やフランジ部他に設置している。

図4には、窒素の圧力(P)—温度(T)平面における相図を示す。固体窒素を作製する方法としては、液相にある窒素を減圧して、3重点(63.15 K、12.53 kPa)未満の温度にする方法が考えられる。

4. 研究成果

(1) 大容量クライオスタットにおける固体蓄冷媒の作製

まず、モータをクライオスタット内に設置して、GM 冷凍機停止状態にて真空引きした。そして、クライオスタット内を窒素ガスでパージ後に液体窒素を充填し、その後大容量ロータリー真空ポンプによって減圧した。

図5には、固体窒素作製過程の温度変化を示す。なお、各部の温度は熱電対によって計測した。 $t = 10^4$ s 付近においてステータ温度が急激に変化しているが、これは熱電対の接触不良によるものであると考えられる。まず、液体窒素充填時の温度特性を測定したところ、8000 s 付近からフランジならびに固定子の温度が急激に低下し、9500 s 辺りでモータ全体が液体窒素浸漬状態に到達した。その後、大容量ロータリー真空ポンプによって減圧して固体窒素にしたところ、 1.5×10^4 s 程度でほぼ定常状態に到達し、その温度が窒素の3重点(63.15 K)付近であった。なお、冷凍機のコールドヘッドは窒素液面(あるいは固体上面)に位置していることから、その温度は200 K程度となっている。

また、クライオスタットにはその下部に石英ガラス製の観測窓が取り付けられており、内部

の固体窒素形成の様子を観測することが可能である。本観測により、液体窒素を減圧することによって、まず固体窒素の微粒子が形成されて、それが少しずつ凝集することによって、やがてモータケーシング外表面に付着形成される様子を明らかにすることができた。図6には、モータケーシング周りに固体窒素の層が形成されている様子を示す。最終的に、観測窓から臨める窒素は全て固体状態に相変化していた(図7; 固体窒素が白くなっていたことから、多孔質窒素になっていると推察される)。

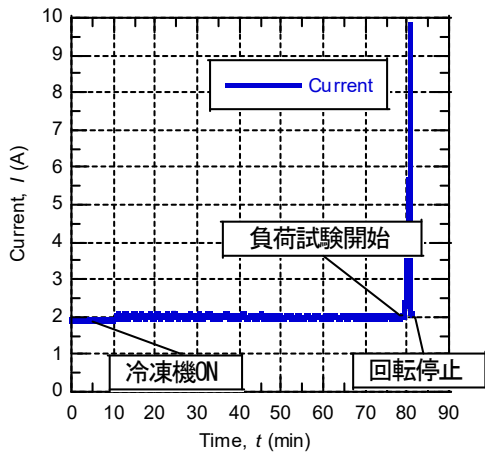
(2) 5 kW級 HTS-ISM の回転試験とスタンドアロン運転

項目(1)によって、5 kW 級高温超伝導誘導同期モータの固体窒素含侵冷却に成功したので、次に無負荷回転試験に挑戦した。図8には、異なる回転数における無負荷回転特性を示す(回転数: 600 rpm (20 Hz)、900 rpm (30 Hz)、1200 rpm (40 Hz)、1500 rpm (50 Hz)、1800 rpm)。同図に示すように、ベアリングの凍り付きなどが心配されたが、試作機はうまく回転状態を維持できており、かつ600 rpm ~ 1800 rpm の広い回転数領域において、磁束捕捉に伴って同期回転が実現していた。このことから、回転子付近の固体窒素が若干の発熱に伴って昇華したものと推察される。また、上記回転状態におけるモータ温度も同時に示すが、初期温度59.0 Kの温度は59.5 K程度で飽和し、その後回転数1800 rpm まで上昇させたにも拘らず低下している。このことから、本システムの温度は固体窒素含侵条件においても十分冷却可能であることが示された。なお、本試験中に液体窒素供給もGM 冷凍機運転も停止していたことから、即ちHTS-ISM を可変速運転させた場合においても、少なくとも数十分間のスタンドアロン運転が可能であることが示された。このことから、冷凍機故障時の暫時運転継続が可能と期待される。

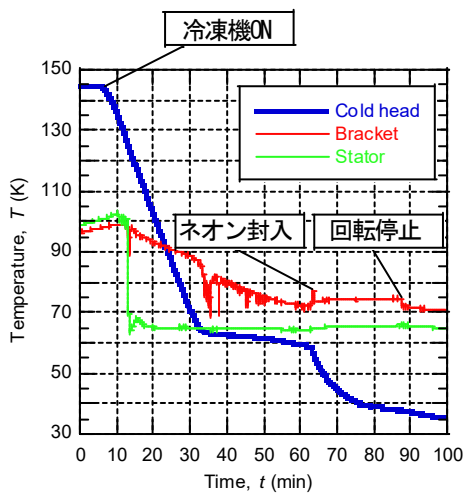
(3) 冷凍機による再冷却回転試験

最後に、固体窒素含侵冷却された5 kW 級 HTS-ISM について、総合的な回転試験を実施した。

まず、項目(1)と同様の方法(液体窒素の減圧)によって固体窒素を作製した。その後、クライオスタットを封じ切り、かつHTS-ISM を1800 rpm の同期回転数(線間電圧: 156 V、駆動周波数: 60 Hz)で連続駆動し、ネオンガスを微量(約5 kPa)封入したところ、大容積の固体窒素中にもかかわらず固定子温度が1 K 程度上昇し、即ち温度が敏感に反応することが分かった。



(a) 一次電流



(b) 各部温度

図9 5 kW級 HTS-ISM を固体窒素-微量ネオンガス冷却し、GM 冷凍機運転した際の特性評価例

次に、HTS-ISM の回転状態を維持したまま、クライオスタットに付属の GM 冷凍機を運転して、再冷却試験を実施した。図9には結果を示す。同図(a)に示すように、80 min 程度までは一定の励磁電流(2 A 程度)に制御しており、消費電力は約 90 W であった。また、同図(b)に示すように、冷凍機運転後にコールドヘッドは線形的に温度変化しているが(32 min 程度で窒素の3重点付近に到達)、一方で、固定子は速やかに窒素3重点付近に到達するという興味深い結果が得られた。一方で、ブラケットの温度低下は緩やかであり、本試験中に窒素3重点に達することは無かった。なお、コールドヘッドの温度は、63 min 程度経過後にさらに低下しており、このときクライオスタットの全ての窒素が固化したのと考えられるが、詳細は今後さらに検討し

ていきたい。

最終的に、80 min 程度経過後に瞬間的に負荷を印加したが、固定子の温度上昇は認められなかった。勿論、今後は回転子部の温度上昇も調査する必要があるものの、本試験によって、少なくとも瞬間的な発熱に対して固定子温度上昇を熱容量の大きな固体蓄冷媒によって吸収できる可能性を示すことができた。

(4) 実応用の検討

以上、本研究では、固体冷媒含侵型の高温超伝導回転機システムの基礎システムを実現し、GM 冷凍機によるスタンドアロン運転に成功した。本システムの応用分野として、大型車載応用が挙げられる。即ち、窒素ガスを冷凍機で冷却し、その3重点以下で運転しておき、冷凍機事故時に暫時運転を継続できるシステムが実現すれば、その高温超伝導誘導同期モータシステムの安全性が格段に向上する可能性を有する。本成果をもとに、上記応用分野について現在企業共同研究者と検討中である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

- ① 黒田 健太朗, 中村 武恒, 西野 竜平
「固体蓄冷媒冷却高温超伝導誘導同期モータの基礎特性」, 2018 年電気学会金属・セラミックス/超電導機器合同研究会, 名古屋大学, 名古屋市, 2018 年1月18日, 1MC-18-017/ASC-18-017
- ② K. Kuroda, T. Nakamura, R. Nishino, Applied Superconductivity Conference (ASC' 18), Seattle, USA, Oct. 28-Nov. 2, 2018, accepted for presentation

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 武恒 (NAKAMURA, Taketsune)
京都大学・大学院工学研究科・特定教授
研究者番号: 30303861

(2) 研究協力者

伊藤 佳孝 (ITOH, Yoshitaka)
株式会社イムラ材料開発研究所・研究開発グループ・主席研究員
研究者番号: 20527478