

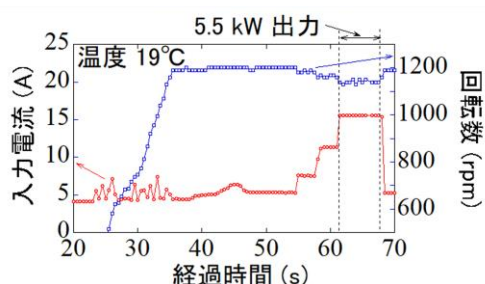
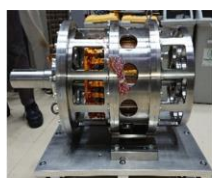
高温超伝導モータの室温運転に成功

－ 輸送機器など実用化に道筋 －

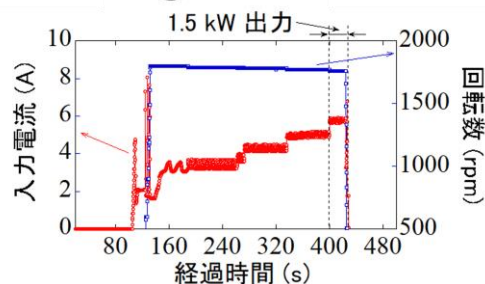
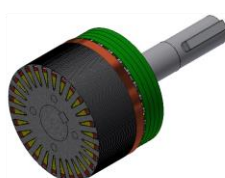
概要

我が国の電力の多くは発電機によって供給されており、一方で電力消費の 55%以上はモータによって担われています。従って、すべての回転機（発電機、モータ）¹の効率を平均値として 1%でも改善出来れば極めて大きな省エネ効果や低炭素効果を実現できます。上記効率改善を達成する旗手として超伝導²材料が期待されています。超伝導材料は、極めて大きな電流を抵抗 0 で流すことができ、また高い磁界を発生させることができることから、回転機の効率³を大きく改善しかつ小形・軽量・コンパクトにできます。しかしながら、一般的な超伝導回転機はマイナス 200℃程度以下の極めて低い温度に常に冷却しておく必要があります。従って、もしも冷却装置が故障して温度が上昇してしまうと超伝導状態で無くなり、抵抗発生に伴って爆発や焼損などの深刻な問題が発生する危険性があることから、超伝導回転機の実用化に際して大きな課題になっていました。

京都大学のグループ（研究開発代表者：京都大学 大学院工学研究科電気工学専攻 中村武恒 特定教授）は、中村特定教授が取り組んでいる高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine；以下、HTS-ISM)⁴を対象にして、同モータの巻線を**高温超伝導体と常伝導⁵体のハイブリッド構造**にすることで、**温度上昇に伴って室温になっても出力を低下させた上で連続駆動することに成功**しました。本開発は、それぞれイムラ・ジャパン(株)ならびに三菱重工業(株)と共に実施した共同研究成果として実現されました。なお、イムラ・ジャパン(株)との共同研究成果は 2022 年 10 月 23－28 日に開催された応用超伝導会議 (ASC'22、ハワイ)において発表され、雑誌 IEEE Transactions on Applied Superconductivity に採録されました [1]。また、三菱重工業(株)との共同研究成果は 2022 年 11 月 29 日－12 月 1 日に開催された第 35 回国際超伝導シンポジウム (ISS2022、オンライン&名古屋市)において発表されました。



イムラ・ジャパン(株)と共に開発した50 kW級高温超伝導誘導同期モータの外観写真 (上図；撮影：中村武恒)と温度19℃における回転試験結果 (下図)



三菱重工業(株)と共に開発した6 kW級高温超伝導誘導同期モータの鳥観図 (上図)と室温における回転試験結果 (下図)

1. 背景

高温超伝導体は、電気抵抗 0 で非常に大きな密度の電流を流せることから、モータの巻線に同導体を用いれば極めて大きなトルクや出力を実現でき、あるいは高い効率が実現されます。現在では、船舶や航空機、陸上車両などの輸送機器を中心に、国内外における開発が活発に行われています。中村特定教授のグループでは、これまで HTS-ISM の基礎回転理論や設計・制御理論を確立すると共に、応用研究に関しては、国家プロジェクトや企業共同研究を通して最大効率 99%超の実現可能性や高出力・トルク密度化（単位容積あるいは質量当たりの出力やトルク）、急速な始動や加減速に対しても極めて安定であるなどの先駆的成果を上げ、いよいよ実用化の声が聞こえて来てきています。

しかしながら、高温超伝導モータを運転するためにはマイナス 200℃程度以下の極めて低い温度環境を必要とします。地球上の室温空間にこのような極めて低い温度環境を実現するためには、極めて強力な冷却装置が必要です。もしも冷却装置が故障すると、室温の熱が一気に低温環境に侵入して温度が上昇し、高温超伝導モータは超伝導状態を維持することができません。上記したように、高温超伝導体には高密度の電流を流せるのですが、抵抗 0 の超伝導状態を維持できなくなると蓄えていたエネルギーを一気に放出してしまい、焼損や爆発が発生してしまうことになります。この事故がもしも運転中の船舶、航空機、自動車で起これば甚大な事故に直結することから、実用上の大きな足かせになっていました。

2. 研究手法・成果

中村特定教授のグループは、HTS-ISM を対象にして、上記課題に取り組んできました。HTS-ISM は、世界的に最も汎用されているかご形誘導モータ⁶と同様の構造を有しており、他の超伝導モータよりも単純な構造でかつ低コストで実現できます。図 1 には、かご形と呼ばれる回転子巻線の概略図を示します。この巻線に、図 2 に示すような高温超伝導体／常伝導体を並列化したハイブリッド構造（以下、**ハイブリッドかご形巻線**）を考案しています。ハイブリッドかご形巻線に流れる電流は、図 2(b)に示すように、高温超伝導体を流れる電流 I_S と常伝導体を流れる電流 I_N の和になり、これら電流は各々導体の電気抵抗の逆数に比例します。従って、高温超伝導体が超伝導状態のときには電気抵抗が 0 であることから、ある限界値までは損失の無い I_S のみが流れます。一方で、もし上記ハイブリッドかご形巻線の温度が上昇して超伝導状態で無くなった場合には、高温超伝導体にも有限の抵抗が発生し、かつ

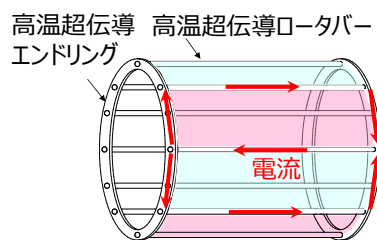
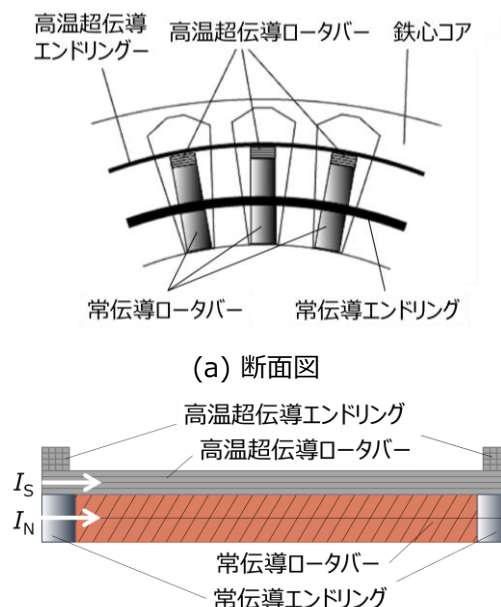


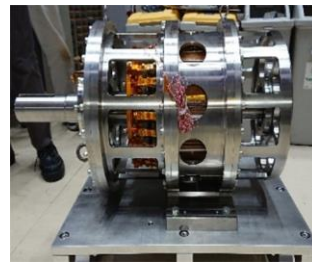
図 1 : かご形回転子巻線と電流が流れている様子



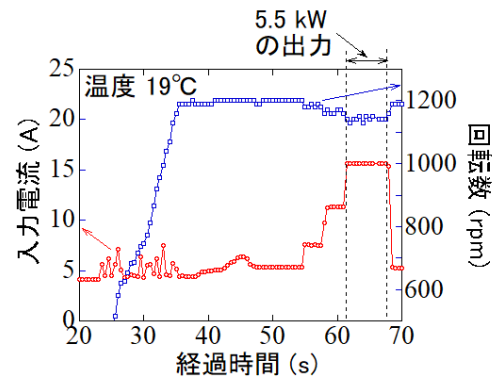
(b) 側面図 (I_S : 高温超伝導体を流れる電流, I_N : 常伝導体を流れる電流)

図 2 : 図 1 のかご形巻線を高温超伝導導体と常伝導導体のハイブリッド構造とする場合の概念図

その抵抗値は常伝導体の値よりも大きくなります。即ち、高温超伝導体が超伝導状態を維持できなくなると、殆どの電流が常伝導体を流れることになります($I_N > I_S$)。超伝導状態に無い高温超伝導体にある程度以上の電流が流れてしまうと焼損してしまうのですが、ハイブリッドかご形巻線とすれば、常伝導体に殆どの電流が流れて焼損のリスクを回避出来ます。よって、上記ハイブリッド巻線を最適に設計することによって、高温超伝導体が抵抗 0 の超伝導状態では同導体に超低損失で高密度電流を流せ、超伝導状態で無くなれば常伝導体にほとんどの電流が流れて高温超伝体が焼損することなく運転が続けられます。

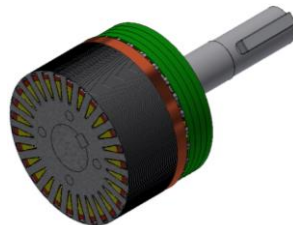


(a) 外観写真

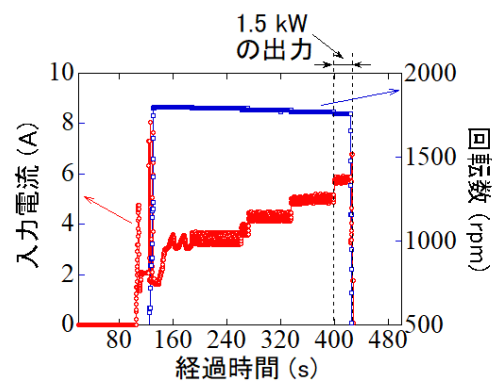


(b) 回転試験結果

図 3 : イムラ・ジャパン(株)と共に開発した 50 kW 級 HTS-ISM の外観写真と温度 19℃における回転試験結果



(a) 鳥観図



(b) 回転試験結果

図 4 : 三菱重工業(株)と共に開発した 6 kW 級 HTS-ISM の鳥観図と室温における回転試験結果

図 3(a)には、JST-ALCA プロジェクトとしてイムラ・ジャパン(株)と共に開発した 50 kW 級 HTS-ISM の外観写真を示します。この回転機によって、図 3(b)に示すように室温においても 5.5 kW の出力運転(時間：61.5 秒～67.5 秒)に成功しました。また、この時の入力電流は 15.6 A であり、ハイブリッド巻線には 460 A 程度の電流が流れていると考えられますが、焼損等のトラブルなく運転出来ました。さらに、図 4(a)には三菱重工業(株)と開発した 6 kW 級機の外観写真を、同図(b)には室温運転結果を示します。本機においても、室温において出力 1.5 kW 強(時間：399 秒～426 秒)の連続運転に成功しました。

3. 波及効果、今後の予定

本成果によって、高温超伝導モータの実用化に道筋が示されました。つまり、通常運転時は高温超伝導モータの高性能性を最大限に活用し、かつ故障時にも安全・安心を保証するフェールセーフ機能を具備した信頼性の高いモータが実現されます。本技術を用いれば、例えば自動車、船舶、航空機などの輸送機器が運転中に故障しても、常伝導状態の従来型モータとして出力を落としながらも暫時運転を継続して最寄りの安全地点まで移動可能になります。今後は、企業プロジェクトや産官学連携プロジェクトとして、本技術を用いた具体的システム検討やモデルベースデザインを進めて行く予定であり、一部既に開始している状況です。最終的には、本技術によって超伝導回転機が扱いにくいという既成概念を打破し、グリーンイノベーション実現の一端を担えるモータテクノロジーの一つに成長させる予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、科学研究費補助金(22H01471)の支援を受けて実施されました。イムラ・ジャパン(株)と共に開発した 50 kW 級モータは、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の支援を受けて試作されたものです。

<用語解説>

- 1 回転機（発電機、モータ）：電気エネルギーと回転エネルギーを相互に変換する装置です。機械エネルギーを電気エネルギーに変換する装置を発電機と呼び、逆の変換装置をモータと呼んでいます。
- 2 超伝導：非常に低い温度で電気抵抗がゼロになる現象です。超伝導になる温度がマイナス 245℃程度以上(厳密に定められているわけではありません)の物質を高温超伝導体と呼びます。日本語表記として、「超電導」と書く場合もあります。
- 3 効率：入力に対する出力の比です。効率が高いほど、入力が効果的に出力に使われることになります。
- 4 高温超伝導誘導同期モータ：京都大学・中村武恒特定教授グループの独自技術として研究開発が行われている高温超伝導モータです。かご形誘導モータ(用語解説 6 を参照)と同様の簡易構造ながら、高効率、高出力密度、急激な可変速に対して安定、世界的にあまり報告例の無い全超伝導化（全ての導体を超伝導化）などに成功しています。
- 5 常伝導：銅やアルミニウムなど、地球上のほとんどの電気伝導体が有している電気的特性であり、電圧が電流に比例するという特徴(オームの法則)を示します。
- 6 かご形誘導モータ：世界中のモータの中で最も汎用しているモータであり、その多くは産業用途に用いられています。図 1 の回転子巻線に電流を誘導することで回転します。他の回転機よりも構造がシンプルで安価であり、堅牢で保守が容易です。

<研究者のコメント>

「私たちが研究開発している高温超伝導誘導同期モータは、2005 年の研究開始からの努力を重ねてようやく実用化の目途が立ちそうな状況です。本成果では、このモータの超伝導状態が壊れても、高温超伝導材料の賢い特性を巧みに制御することで回転状態を持続することに成功しています。今後は、この技術を活かして応用開発を加速し、賢くてクールな超伝導モータの社会実装を目指します。」（中村武恒）