



超電導モータ要素技術の開発

Development of Elemental Technology for Superconducting Motor

大丹生海里*
Kairi Onyu

山田悠介*
Yusuke Yamada

奥野良和*
Yoshikazu Okuno

折戸博*
Hiroshi Orito

虎谷智明*
Tomoaki Toratani

〈概要〉

1911年に発見された超電導はその後線材化の研究が進み、大電流を低損失で送ることができる超電導線材として実用化・商用化された。超電導線材を用いた超電導モータの構想は古くから議論され、数々の試作が行われたものの、商用レベルの実用化には極低温の冷却や極低温を維持する断熱技術を中心とする課題が多い。この課題に対し、従来技術より軽量で取扱性のよい真空断熱構造を提案し、この構造を反映させた超電導モータの試作評価を行った。試作した超電導モータは軽量の樹脂構造でありながら容易に超電導状態を成立させることを実証した。

1. はじめに

超電導現象とは極低温下で電気抵抗がゼロになる現象であり、1911年の発見から今日に至るまで長年研究され続けている。超電導材料を線材形状とした超電導線材は金属系材料で構成される低温超電導線材と、酸化物系で構成される高温超電導線材に大別され、古河電工グループは低温、高温の両方の超電導線材に取り組む世界的に稀有な企業である。

2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルの実現にむけて、モータの高効率化は重要となる。国内の消費電力量のうち約半数以上がモータ用途で消費されており、仮に運用されている全モータの効率が1%向上すると155億kWhの電力削減となり、これはCO₂排出量に換算すると690万tonの削減効果に相当する。

超電導モータの研究は古くから行われており、大学研究や産学連携プロジェクトで数々の試作が行われた。その狙いとしてはモータ損失の主要因の一つであるジュール損失の低減、高磁力による出力密度の向上が挙げられ、従来の銅線モータでは実現できない高出力密度化に必要な材料として超電導材料を適用するものである。しかしながら、超電導材料を扱うためには超電導業界では高温とされる高温超電導線材でも-196℃以下の冷却と高度な断熱技術が必要であるため、これらの付帯設備による大型化、総合効率の低下、コスト増加のデメリットが商用レベルの実用化にむけた課題となっている。

本論文では、超電導モータの実用化にむけ考案した真空断熱構造と、この構造を反映させた超電導モータの試作結果について報告する。

2. 従来の断熱技術

超電導分野における断熱技術としては従来から真空断熱容器が用いられている。用途に応じて形状や付帯部品が異なるものの、基本的な構造としてクライオスタットと呼ばれる冷媒を溜める密封容器を真空容器で格納した構成が用いられる。高磁場による渦電流損失の発生が問題となる用途では容器材料にガラス繊維強化樹脂を用いられるが、製作加工性やコスト面からステンレスで製作されることが多い。また、真空断熱部では気体分子による対流伝熱を抑制するために最低でも10⁻³ Pa以上の高真空度を保ち、かつ輻射による伝熱を抑制する反射材を導入するなど、外界からの熱侵入を極限まで低減する術が盛り込まれている。冷媒の代わりに冷凍機を用いる場合には冷媒の密封構造が不要となるため構造が簡素化するものの、断熱を目的とした真空容器は必須となる。これらの真空容器はポンプの性能や容器のサイズにもよるが、最低数時間以上の排気時間が必要であり、金属製の容器であることからシステム全体の重量増加に繋がる。発電機などの固定設備では影響が少ないものの、超電導モータの適用が望まれる電動航空機やモビリティなどの移動体用途では超電導によるメリットが失われることが考えられる。そこで本研究では、従来技術より取扱性がよく、軽量化が可能な断熱構造について検討を行った。

3. 断熱材の伝熱機構

上市されている主な断熱材はグラスウールに代表される繊維系断熱材、ウレタンやポリエチレン発泡体などの発泡系断熱材、シリカエアロゲルなどの粒子系断熱材が挙げられる。

断熱材の伝熱現象は固体熱伝導による固体伝熱、気体分子の対流移動に伴う対流伝熱、輻射熱の移動による輻射伝熱の3形

* 研究開発本部 エレクトロニクス研究所

態に分類され、各形態の総計による見かけの熱伝導率によって熱が移動する。固体伝熱は材料の密度に依存し、一般的には低密度になるほど熱を伝えにくくなる。対流伝熱は材料密度による影響をほとんど受けず、気体分子の平均自由行程が長くなるほど寄与が小さくなるため、真空度が一定以上の領域では見かけの熱伝導率への影響はゼロに近くなる(図1)。

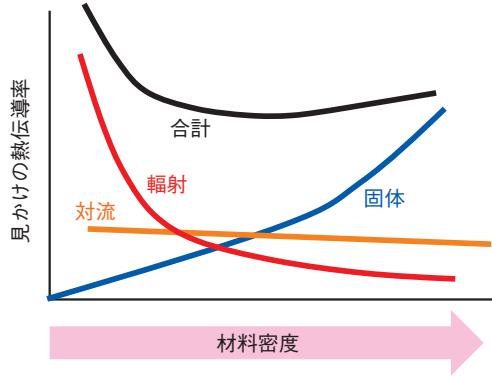


図1 断熱材における見かけの熱伝導率
Apparent thermal conductivity of insulation material.

真空中における断熱材の見かけの熱伝導率は断熱材の性状に強く依存し、繊維系断熱材では対流伝熱の寄与が大きく、高真空中下では見かけの熱伝導率が小さくなるものの、真空度が低下すると急上昇する。発泡系断熱材は対流伝熱の影響を受けにくく、真空度によらず安定した熱伝導率であるものの、ベースとなる固体熱伝導率が繊維系断熱材より高い傾向がある。粒子系断熱材として真空断熱材パネルの芯材などに用いられるシリカエアロゲルは、体積の9割以上が空隙である多孔質材料であり材料密度が小さい。また、粒子サイズと空隙サイズがともにナノレベルであることで、粒子間の固体熱伝導と空隙内の対流伝熱が抑制され、輻射散乱面の増加により断熱効果が高い。加えて、真空度の低下による熱伝導率の上昇が繊維系断熱材、発泡系断熱材より緩やかであることが知られている(図2)。

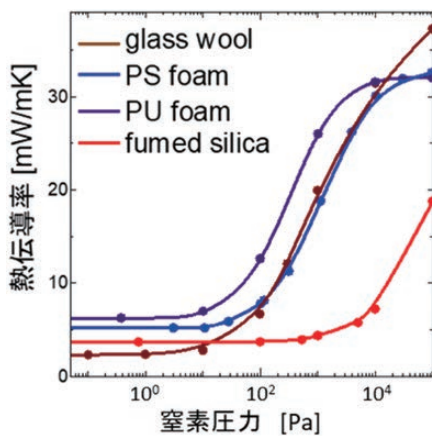


図2 断熱材の熱伝導率におよぼす雰囲気圧力の影響¹⁾
Effect of atmospheric pressure on thermal conductivity of insulation materials¹⁾.

4. 新規断熱構造コンセプト

我々は粒子系断熱材の熱伝導率における真空度依存性について、 10^2 Pa程度の低真空領域でも低い水準にあることに着目し、粒子系断熱材を低真空下で用いることによって、従来技術の高真空中下における断熱構造と同等の断熱性能をより簡便に得ることを検討した(図3)。断熱における要求真空度が低真空レベルまで緩和されることで、以下の利点が考えられる。

- ①真空プロセスの簡略化(真空排気設備が低～中真空ポンプのみであり、排気時間の大幅な短縮)
- ②材料アウトガスによる断熱性能への感度が小さいため、樹脂などの有機材料を積極的に使用できる
- ③真空容器設計における材料制約や加工精度の緩和

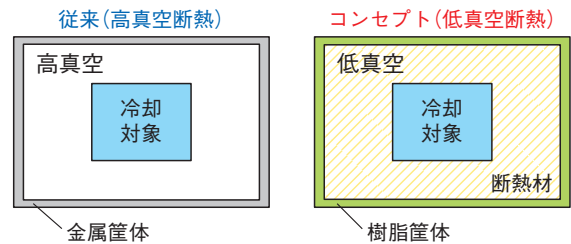


図3 断熱構造の概念図
Conceptual diagram of insulation structure.

この仮説を検証するため、シミュレーションによる伝熱解析を行った。解析モデルは液体窒素の冷却源と、それを格納する真空容器があるモータを模擬した構造を設計し、外界が常温常圧の条件で外界から低温部への熱侵入量に対する真空容器の真空度依存性を算出した。結果を図4に示す。

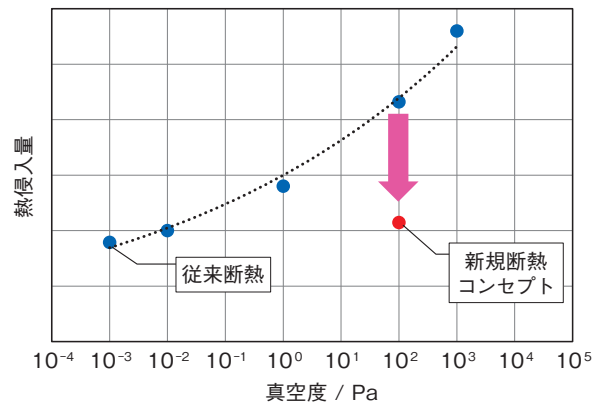


図4 断熱構造に対する熱侵入量
Heat intrusion into insulated structures.

従来技術における熱侵入量は、真空度の低下に伴い増大していく。一方で、真空容器内に断熱材を導入したコンセプトモデルでは低真空領域にもかかわらず熱侵入量が低減され、従来技術の高真空領域と近い水準を得られることがわかった。この結果は容器の体積や形状、断熱材の物性や性状の影響を受けるため全てのケースに適用できるものではないものの、伝熱解析に基づいて構造や材料を適切に設計することで、低真空での断熱が実現できることを示唆する。

5. 超電導モータの試作

コンセプトの解析結果をもとに、低真空の断熱構造を検証するための超電導モータの設計および試作を行った。過去に試作された超電導モータの構成は回転子の界磁コイルとして超電導材料を適用し、シャフト内に冷媒を循環させる構成を採用しているケースが多い。これは、超電導モータの設計思想として永久磁石以上の磁力を超電導コイルによって界磁し、出力密度の向上を図る目的と、固定子の電機子コイルを冷媒で冷却する場合と比較して冷却構造が単純化しやすいことによるものと推察される。

本研究では低真空での断熱構造コンセプトを検証することを目的としているため、小型軽量化を重視した低出力の超電導モータを設計した。その設計モデルを図5に、諸元を表1に示す。

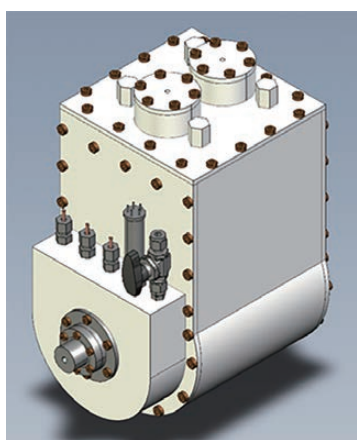


図5 超電導モータ設計モデル
Superconducting motor design model.

表1 超電導モータ諸元
Superconducting motor specifications.

項目	構成
モータ種別	DC ブラシレス インナーロータ型
界磁源	永久磁石
電機子	超電導コイル
超電導線	REBCO
極数	4極
スロット	3スロット
全体外寸	L 287 × W 180 × H 324 mm
重量	13 kg
冷却方法	超電導コイルの液体窒素浸漬
最大トルク	3.0 N・m
最高回転数	1770 rpm
電源電圧	24 V
最大電流	30 A
制御方式	インバータを用いたPWM制御

小型軽量化にあたり、界磁源は永久磁石とした回転子を採用し、固定子の電機子コイルに超電導コイルを適用した。超電導

コイルは当社グループSuperPower Inc.のREBCO高温超電導線材で製作した。また、出力が比較的小さく、高磁力を必要としないことから電磁鋼板を積層したステータコアを用いた。電磁界解析により、ステータコアに磁気飽和を生じさせないこと、超電導コイルに生じる経路磁場を極力低減することを念頭に、所望のトルク・回転数を得られるモータの寸法形状・磁石・コイル構成を設計した。また、低真空の断熱構造の利点を活用し、真空容器部分には樹脂材料を採用した。試作した超電導モータの外観を図6に示す。

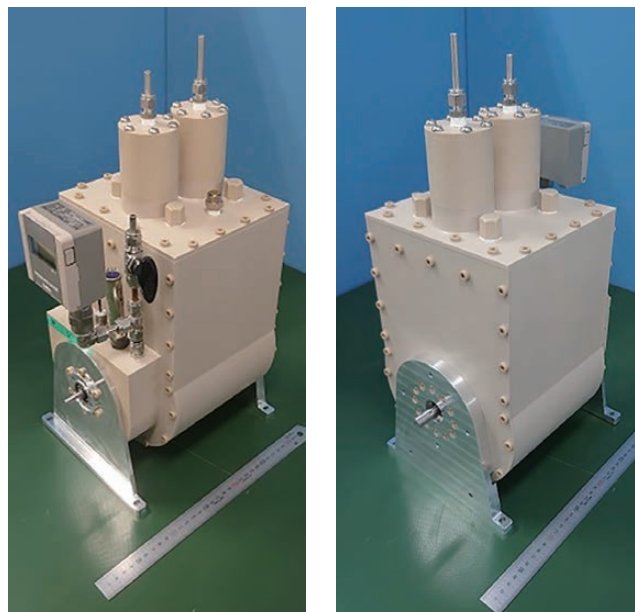


図6 試作した超電導モータ
Prototype superconducting motor.

試作したモータに液体窒素を用いて冷却を行った結果、真空容器表面に霜が付着することもなく内部の低温容器に液体窒素を溜めることができ、超電導コイルが超電導状態でモータ回転できることを確認した。

6. 超電導モータの評価

超電導モータの効率を算出するため、超電導モータの回転力に対し、負荷モータの回生で反力をかけ、その状態のトルク・回転数・投入電力から(1)式に基づいて効率を算出した。また、同等出力の銅線モータに関しても効率測定を行った。銅線モータを構成する磁石やコイル構成は超電導モータと異なるため厳密な比較はできないものの、出力の目安となる電磁鋼板の体格に近いものを用いることで参考値として用いた。測定系の構成図を図7に、効率の比較結果を図8に示す。

一般的にモータの効率は動作点により変動するため、定格動作で高効率になるように最適化されている。自動車のような幅広い動作領域が必要となるモータでは低速・高トルク領域におけるジュール損失の割合が大きくなり、効率低下の要因となる。超電導モータでは電機子コイルにおけるジュール損失がゼロとなることから評価した各動作点において超電導モータの効率が高いことを確認できた。

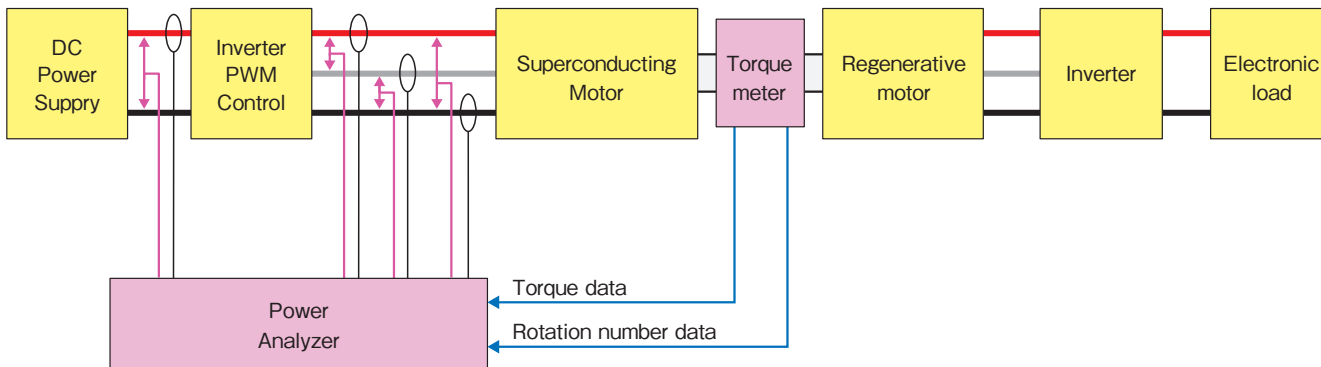


図7 モータ効率評価の概念図
Conceptual diagram of motor efficiency evaluation.

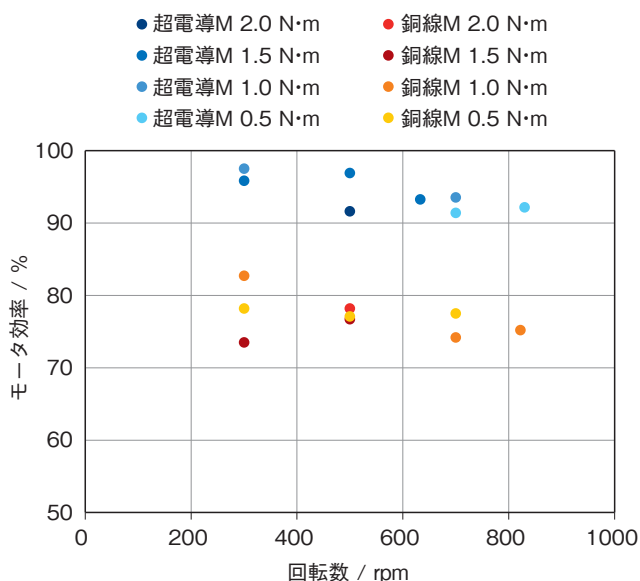


図8 モータ効率評価結果
Motor efficiency evaluation results.

超電導モータの運用は、真空排気時間が15 min以下で所望の真空度に到達するため、冷却開始までの工程が従来技術より大幅に短縮できた。また、低真空での運用は、汎用品のシーリング材や接着剤を用いた補修やリーク対応が容易であることが利点である。また、試作したモータの重量は約13 kgであるが、真空容器部分を従来のステンレス製とした場合の試算重量は35 kg以上となることから大幅な軽量化が実現できた。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{2\pi}{60} \times \frac{T \times N}{P_{in}} \quad (1)$$

- η : モータ効率
- P_{in} : モータへの投入電力
- P_{out} : モータの仕事量
- T : 出力トルク (N·m)
- N : 出力回転数 (rpm)

7. おわりに

超電導現象が発見されて112年が過ぎ、古河電工においても長年研究を続けているものの、実用化に至った超電導応用製品はMRIマグネットや、加速器分野、核融合分野など、現用の常電導材料ではできない機器用途に限られ、その事業規模は小さい。その主要因として、超電導材料自身が高価であること、超電導現象を利用するための冷却・断熱ハードルが高いこと、超電導技術そのものが研究段階であること、かつ未解明部分が多いことがあり、超電導材料自身の研究が多く行われているものの超電導技術を使いこなす要素技術が成熟していないことが挙げられる。

本研究は超電導モータにむけた取り組みであったが、本研究の成果を超電導分野に関わる実験・評価へ応用することで超電導技術をより身近で使いやすくするための研究開発へ貢献していく。

謝辞

本研究を行うに当たり、様々な協力と助言をいただきました九州工業大学の児玉教授、東京大学の柁淵准教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) J. Fricke et al: Journal of Thermal Envelope and Building Science, 28 (2005), 319.