

2023年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

調査研究報告書(公開版)

【研究題目】 MgB₂ 線材を用いた液体水素冷却の超高速回転超電導モータの検討 II

【整理番号】 TK23-051

【代表機関】 東京大学

【調査研究代表者(氏名)】 寺尾 悠

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】 物質・材料研究機構 松本 明善
産業総合技術研究所 馬渡 康徳
高エネルギー加速器研究機構 菅野 未知央
東北大学 淡路 智

【TIA 外連携機関】 株式会社日立製作所

【報告書作成者】 寺尾 悠【報告書作成年月日】 2024 年 3 月 26 日

【連携推進(具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等)】

連携推進活動については、超電導関連の複数の学会等において、モータに使用する日立製の MgB₂ 超電導線材の機械的な特性、回転磁界中における電機子コイル部分の交流損失の理論計算や超電導モータに使用する超電導線材のあるべき性能に関して議論を行った。特に 2023 年 5 月にトルコにて開催された、8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2023)において招待講演を行った際には、「超電導モータの高速化」という観点で材料強度や高速であるが故の交流損失の増加等に関する質問が相次ぎ、議論を行った。一般に超電導コイルに発生する交流損失(ヒステリシス損失/結合損失)はそれぞれ、印加する交流電流や交流磁界の周波数の 1 乗及び 2 乗に比例するため、可能な限り回転周波数を減らして低損失とすることが定石であったが、今回の研究の様に通常よりも細線・多芯化した MgB₂ 線材の使用により高速回転、すなわち高回転周波数領域での使用も視野に入ったことで、新たな応用に関する議論を提起したといえる。そして学会発表後には Elsevier が出版するジャーナル論文誌の Physica C に「Electromagnetic Design of Ultra-High Speed Superconducting Motors Applied to Electric Pumps in Liquid-Propellant Rockets」と題した論文を投稿し採択された。本論文後の出版後に、英国の大学の航空宇宙学科から本論文に関する照会があるなど、電気電子工学分野の領域を超えた関心を得られたといえる。

上記の研究成果の外部公表に加えて、研究成果においては MgB₂ 線材の機械的なひずみ特性や交流損失に関して更なる実験的、解析的検討を行い、将来の液体水素ポンプ向けの高速回転超電導モータにおける極数や電機子巻線の巻き方等に関する考察も行った。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

今年度は、超電導モータの電気子巻線に不可欠である MgB_2 超電導線材に関して、機械的な特性と交流損失に焦点を当てて実験及び考察を行った。

まず図1に評価の対象とした3種類の MgB_2 線材の断面写真を示す。これらの線材に対し、室温および液体ヘリウム温度でのひずみ耐性を評価した。Wire AおよびWire Bには曲げによるひずみ印加を、Wire Cには引張りによるひずみ印加を用いた。曲げ負荷におけるフィラメント部の最大引張りひずみはフィラメント束領域半径/曲げ半径で求め、引張り負荷においては伸び計によるひずみ測定値を用いた。

図2(a)に、室温で加えたひずみへの耐性評価結果を示す。横軸は MgB_2 フィラメント部に加えられた最大印加ひずみ、縦軸は負荷なしサンプルの I_c で規格化した I_c の値である。室温におけるWire(A), (B), (C)におけるひずみ耐性はおよそ0.20%, 0.42%, 0.65~0.86%であった。図2(b)に、液体ヘリウム中で加えたひずみへの耐性評価結果を示す。Wire(A), (B)におけるひずみ耐性はそれぞれ0.40%~0.44%, 0.50%~0.55%であり、室温でのひずみ耐性からそれぞれ0.2%, 0.1%程度強い結果が得られた。

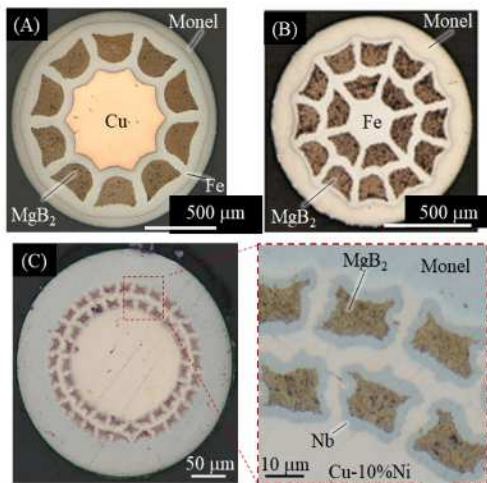


図 1. 3 種類の MgB_2 線材の断面

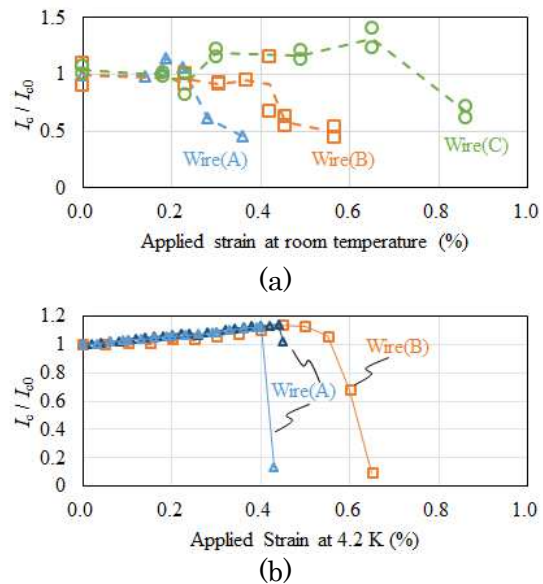


図 2. MgB_2 線材の曲げ特性

続いて、上記の線材の中から、Wire C を使用した超電導モータの電気子巻線を集中巻及び分布巻で構成した場合の 100 kW 級超電導モータ交流損失を示す。横軸の周波数は、モータの回転数 50,000 rpm に対して 2、4、6、8 極の場合の回転周波数を示しており、それぞれ 833.3、1666.6、2500、3333.3 Hz である。電気子巻線への回転子界磁からの印加磁界は、0.33 T としている。いずれのケースも分布巻構造の方が、3%程度交流損失が大きい結果となった。これは、モータのコイルエンドの長さが、分布巻構造が長くなるためである。また、交流損失の内訳としては、印加される磁界と周波数の 2 乗に比例する「結合損失」がすべての交流損失内訳（ヒステリシス損失、結合損失、渦電流損失、通電損失）の中で最も高い割合を占めており、特に 3333.3 Hz (8 極) の場合には全損失の 97% を占めていた。しかし、いずれにしても 100 kW の出力に対して高々 3.5 kW すなわち僅か 3.5% 程度の損失であり、回転周波数が kHz レベルの高速な回転磁

界が印加されても非常に低損失、言い換えれば高効率な超電導モータが実現できる可能性があるといえる。

ロケットの液体水素燃料ポンプへの適用を考え、図4に示す液体水素燃料(20 K)の一部をモータの冷媒として使用する(サブマージド構造)ことを前提とした場合、可能な限り交流損失を押さえることを前提とすれば回転周波数を最も低い833.3 Hz(2極)を選定すべきである。しかしトルクの発生に寄与しないコイルエンド部分が増加することとなり、電機子巻線の無駄が多くなる。よって、コイルエンド部分を可能な限り低減し、50,000 rpmの高速回転環境下で交流損失や他の損失含め96-97%以上を得るためには4極機もしくは6極機当たりの選定が妥当であると考えられる。また、損失の中でも機械的な損失をなくすためには磁気軸受を採用することが必須であると考えられる。

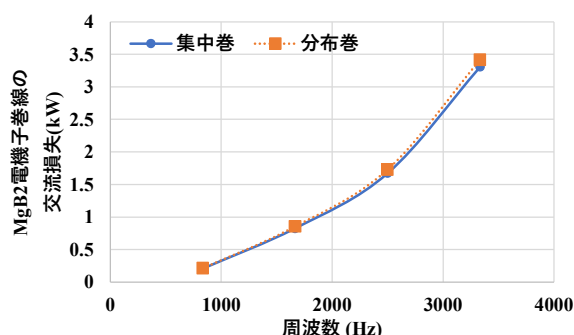


図3. MgB₂ 電機子巻線の交流損失の見積り結果

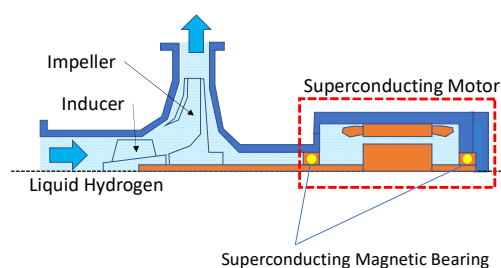


図4. 超電導モータを使用した液体水素ポンプ

【今後の活動予定】

2年間にわたる調査研究チームの活動は一旦これで終了となり、しばらくは各自で専門分野の研究を行っていく中で、分野の近い案件等があれば適宜議論や資金獲得等に向けて活動していくことになる。

今回はMgB₂線材の具体的なアプリケーションとしてロケットエンジンの液体水素燃料用高速回転ポンプを前提に検討を行ってきたが、本ポンプを実現するために高速回転に対応した磁気軸受や液体水素という特殊な環境下で起こる「水素脆化」に対応した材料選定など、実用化には様々な課題があるため、今回のチームメンバーの様に材料、理論、コイル化技術、応用と様々な分野のメンバーが集まって今後も議論を重ねていく必要がある。

【SDGs17 目標について、調査研究成果について、貢献ができると思われる項目があれば、最大3つまで☑をご記載下さい。】

研究成果に関連する SDGs 目標がある。

関連する SDGs 目標は無い

1 <input type="checkbox"/> 貧困をなくそう	2 <input type="checkbox"/> 飢餓をゼロに
3 <input type="checkbox"/> すべての人に健康と福祉	4 <input type="checkbox"/> 質の高い教育をみんなに
5 <input type="checkbox"/> ジェンダー平等を実現しよう	6 <input type="checkbox"/> 安全な水とトイレを世界中に
7 <input checked="" type="checkbox"/> エネルギーをみんなに、そしてクリーンに	8 <input type="checkbox"/> 働きがいも経済成長も
9 <input checked="" type="checkbox"/> 産業と技術革新の基盤を作ろう	10 <input type="checkbox"/> 人や国の不平等をなくそう
11 <input type="checkbox"/> 住み続けられるまちづくりを	12 <input type="checkbox"/> つくる責任、つかう責任
13 <input type="checkbox"/> 気候変動に具体的な対策を	14 <input type="checkbox"/> 海の豊かさを守ろう
15 <input type="checkbox"/> 陸の豊かさを守ろう	16 <input type="checkbox"/> 平和と公正をすべての人に
17 <input type="checkbox"/> パートナリシップで目標を達成しよう	

以上