

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その1）

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

まずは、若輩の筆者に隔月連載記事執筆の機会を与えて頂いた編集委員各位に感謝申し上げます。筆者は、学生時代から超電導材料評価の研究をさせて頂き、京都大学に奉職後に超電導回転機の研究を開始したが、いつの間にか回転機本体やそのシステム化に興味に移り、回転機開発の側から超電導技術を展望するようになった。そうすると、超電導技術は素晴らしいポテンシャルを有しているものの、既存回転機の技術的成熟度を鑑みると、“極低温に冷やさなければならない”という古くて新しい問題が立ちはだかり、筆者が開発している超電導モータを含めて実応用の観点からどのようなシステムが成立するか苦悶の時期があった。即ち、電動機容量は発電機に比較して一般に小さく、超電導化に伴う高効率化などのメリットが冷凍機損失で相殺され、さらに現状はコスト高になることから、超電導発電機プロジェクト（Super-GM）のような強い導入のモチベーションを見つけていくことが大きな課題であった。

しかしながら、近年になって、我が国でも国家プロジェクトを中心とする大学・企業他の産学連携グループや、あるいは企業単独で高温超電導回転機開発が活発に進められており、少しずつその実現可能性が見えてきているように感じる。即ち、高温超電導材料作製技術進展に伴い、低温超電導線材に比較して、高温駆動化に伴う運転コスト低減や、あるいは比熱上昇によってクエンチしにくくシステム運転の複雑さが解消されることから、そのパフォーマンスが上記極低温冷却の障害を克服しつつあるという印象を強く持つようになってきている。現在では、例えばビスマス系やイトリウム系線材については市販される状況であり、まずは比較的低速の大形船舶搭載用の高温超電導モータを中心に研究開発が活発に進められており、例えば米国では 36.5 MW 級機の試験が実施され¹⁾、国内においても数百 kW 級の研究開発が行われている²⁾。また、最近では車載応用など、超電導モータにとってハードルがどんどん高くなる小形化についても挑戦的な研究開発が進められるようになっており³⁾、次世代の新しいタイプの回転機の一方向性につながっていくことが多いと期待される。

我が国の電力消費の 50% 以上は、回転機駆動によって消費されているが、その内の 8 割程度は中小容量機である。従って、超電導回転機によって真の技術革新を達成するには、如何にシステム全体としてのメリットを残したまま小形化・汎用性を追求出来るかが鍵であり、今その時期に来ているのでは無いかと予感される。さらには、モータを実駆動する場合には、超電導線材に優しいきれいな正弦波を与えていたのではダメで、高いキャリア周波数を有する PWM 波に対して安定・低損失である必要があり、さらには汎用性を追求するならば、目的指向的な可変速に対しても既存機に対する優位性を示す必要がある。つまり、超電導モータだけ素晴らしいものが出来ても役に立たず、駆動系やその他システムに組み込んだ形で性能を最大化する検討が極めて重要であり、システム側から超電導回転機を見直す作業も必要になってくると考えられる。

既存の永久磁石モータについては、高出力密度化を指向する場合、現在最も大きな課題の一つはその“冷却”法である。即ち、既存の IPM (Interior Permanent Magnet) モータでは、究極性能を追求するあまり非常に大きな発熱密度を許容した設計を余儀なくされ、“冷却”のために複雑な排熱機構が検討されている⁴⁾。一方、同一出力で比較した場合、超電導回転機本体の発熱密度は疑い無

く圧倒的に既存機に対して小さい（鉄損の割合が相対的に大きくなる極めて高速な回転時は除く）。このことは、実は既存機と超電導機で“冷却”の考え方が異なる。即ち、既存の常伝導機では、モータが発生する発熱を除くのにエネルギーを必要とし、つまり損失の補償に損失が必要である。一方、超電導機ではそれ自体損失は極めて小さく、そうした環境を提供する縁の下の力持ちとして最低限の“冷却”エネルギーを使用しており、“合目的”的である。従って、発熱・省エネの観点からは、超電導機は極めて合理的モータと言える。本連載記事では、上記背景をベースに、超電導モータの過去・現在・未来と題して、これまでの開発経緯と将来展望についてまとめさせて頂く。一年間、何卒お付き合い頂きたい。

回転機の出力 P は、大雑把には次の式で表わされる。

$$P \propto D^2 L \cdot AC \cdot B \cdot N$$

ここで、 D は回転子直径、 L は回転子有効長、 AC はアンペアコンダクタ（電気装荷）、 B は磁気装荷、および N は回転数である。上式より、同一の出力に対して回転子体格が同一ならば、 AC 、 B 、 N のいずれかを大きくして出力向上を図ることになる。既存の常伝導モータについては、 AC は Joule 発熱他によって制約され、 B は鉄心の磁気飽和によって制約される。また、 AC と B の分配を装荷分配と呼び、モータ設計の要であるが、この分配については経験則が支配しており、各社各様の方針によって決定されているようである。一方、超電導機については、形式的に抵抗ゼロの大電流を通電することができ、 AC 若しくは B 、あるいは両者を大幅に改善することが可能である。特に、 B を極端に大きくして鉄心を省略することにより、漏れ磁束は大きくなるものの、小形軽量化やあるいは同期リアクタンスの低減を達成できる巻線形同期モータの研究開発が主流と思われる。表 1 には、これまで超電導化が検討されていた、あるいは現在も検討されているモータの一覧を赤字で示す。次号以降では、各モータについてやや詳細に検討していきたい。

表 1 超電導化が検討されている、あるいはされていた電動機のタイプ（赤字）

直流モータ-----	単極形 -----	ディスク形
		ドラム形
-----	整流子形 -----	他励式
		分巻
		直巻
		複巻
交流モータ-----	交流整流子機	
-----	同期形モータ -----	巻線形
		リラクタンス形
		誘導子形
		ステッピングモータ
-----	誘導モータ -----	かご形
		巻線形

参考文献

- 1) AMSC ホームページ <http://www.amsc.com/>
- 2) 高木健次, 超電導 Web21, 2007 年 11 月号 (2007)
- 3) 2009 年 11 月 30 日付日本経済新聞「超電導モーター 電気自動車向け開発加速」(p. 12)
- 4) R. H. Staunton et al., "Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System", U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Under contract DE-AC05-00OR22725 (2006)

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その2）

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

回転機は、機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機と、その逆変換の電動機（モータ）に分けられる。発電機とモータのエネルギー変換は、基本原理としては可逆過程として理解される。モータは、産業の米と呼ばれるほど広範な分野において使用されており、その容量も分数馬力モータから数十 MW 級機まで多岐に及ぶ。変換される機械力としては、回転力、直線力、振動他様々な形態があるが、本稿では一般的な回転力について説明する。モータのエネルギー変換には、マイクロマシンのような超小型機を除けば、エネルギー密度の観点から専ら磁界と電流の相互作用が利用される^{1), 2)}。従って、超低損失大電流輸送と高磁界発生を可能とする超電導材料の回転機への適用は、極めて自然な研究開発の流れである。

回転機の超電導化については、古くは 1960 年代頃から開始される³⁾。勿論、当時は低温超電導線材を適用したものが検討され、液体ヘリウム冷却を前提としている（なお、低温超電導バルク体の形状は熱安定性の問題から成立しないため、線材として適用した場合のみが検討対象であった）。ただし、低温超電導発電機に関しては国内外で大規模プロジェクトを含めて研究開発が実施されたが、モータに関しては単極機と呼ばれる特殊な直流機⁴⁾以外、あまり大きな研究開発は実施されていない。単極直流機は、特殊回転機ではあるが、回転に応じて導体に流れる電流を強制的（機械的）に切り替える整流器を必要とせず、また超電導界磁巻線が非回転構造ということもあり、電気推進船などを指向した研究開発が国内外で進められた⁵⁾。しかしながら、大電流集電法に問題があり、その後の進展は見られていない。一方、同期モータとしては、例えば佐賀大学が界磁に金属系低温超電導線材を適用したものを開発しているが⁶⁾、この種の低温モータについても検討例は多くない。

なお、全低温超電導モータの開発についても、筆者の知る限りこれまで行われていない。ただし、発電機に関しては、Alstom Atrantic 社（仏）他による 18 kVA 級機⁷⁾、横浜国立大学の 30 kVA 級機⁸⁾、佐賀大学のブラシレス励磁機を適用した全超電導発電機の開発例⁹⁾がある。佐賀大学のグループは、磁束ポンプブラシレス励磁系を導入した全超電導発電機を開発し、世界初となる出力試験に成功した（但し、駆動モータの容量限界もあり最大出力は約 3 kW；出力試験に成功した発電機は、牟田一弥先生（京都大学名誉教授、佐賀大学名誉教授）に寄贈頂き、現在京都大学の筆者の実験室に置かれている）⁹⁾。

1986 年の高温超電導体の発見を契機に、様々な電力応用機器の高温超電導化が実用化の期待と共に検討開始された。回転機についても同様であるが、当時は長尺線材の作製技術が成熟しておらず、Super-GM の発電機研究開発プロジェクト（1988 年度～1999 年度）¹⁰⁾が精力的に進められていたこともあり、高温超電導フィーバーの中でもモータ開発の機運はあまり高くなかったようである。その中で、高温超電導体の高い比熱により初めて実現されるバルク形状を利用したソリッドモータの研究開発が、小規模ながら始められたのでは無いかと考えられる。今回は、高温超電導バルク回転機に焦点を当て、材料開発技術の進展と合わせて説明する。

参考文献:

- 1) 野中作太郎, 「電気機器 (I)」, 森北出版 (1973) p. 7
- 2) 坂本哲三, 「電気機器の電気力学と制御」, 森北出版 (2007) pp. 111-124
- 3) 牟田一弥, 星野勉, “電動機の超電導化について”, 低温工学, vol. 24, no. 1 (1989) pp. 13-20
- 4) 例えば, A.D. Appleton, “Development of Engineering Applications of Superconductivity at IRD”, Cryogenics, vol. 22 (1982) p. 435
- 5) 岡田隆夫, 大西和夫, 仁田且三, 白井康之, 「大学課程 電気機器 (2) (改訂 2 版)」, オーム社出版局 (2004) pp. 155-156
- 6) T. Hoshino, I. Mua *et al.*, “Current Status of Superconducting Synchronous Motor in Saga University”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 4 (1996) pp. 2373-2376
- 7) P. Tixador *et al.*, “Experimental Behavior of a Fully Superconducting Machine”, Proceedings of ICEM92, Manchester, UK (1992) pp. 1117-1121
- 8) O. Tsukamoto *et al.*, “Development and Electrical Test of a 30 kVA Class Fully Superconducting Generator”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, no. 4 (1994) pp. 2308-2311
- 9) 築地浩, 牟田一弥 他, “磁束ポンプをもつブラシレス全超電導発電機の負荷特性実験”, 電気学会論文誌 D, vol. 116, no. 11 (1996) pp. 183-189
- 10) 超電導発電機の動特性調査専門委員会, “超電導発電機システムの動特性”, 電気学会技術報告, 第 639 号 (1997)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その3）

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

1986年の酸化物系高温超電導物質の発見以来、臨界温度の更なる向上への期待と共に、様々な応用分野への適用可能性が精力的に検討された。ただし、上記物質はペロブスカイト構造と呼ばれる複雑かつ異方的な層状結晶構造を有しており、その材料化が金属系実用超電導線材のような早さでは進まなかったため、例えば低温超電導線材で検討されていた発電機が一足飛びに高温超電導材料に置き換わることは無かった。一方、モータは発電機に対して比較的小容量機が多いことから、低温超電導機では冷却ペナルティーに関してスケールメリットを生かすに難しかったが、高温超電導フーバーの後押しと共に、海外を中心に高温駆動化の開発機運が高まったようである。

高温超電導特有の材料化の新しい流れとして、バルク形状の成立が挙げられる。即ち、高温超電導体は高温運転に伴って比熱が高くなり、低温超電導材料で問題となるクエンチが起りにくく、バルク形状にしても安定な超電導材料として使用可能である。従って、高温超電導体の発見から数年は、高性能長尺線材はすぐには実現しなかったが、焼結体を中心に高温超電導バルク体の研究が基礎ならびに応用の観点から進められた。その結果、高温超電導モータに関しても、当初はバルクモータの開発が小容量機から中容量機で先行していたと思われる。

高温超電導バルク体の特長としては、非常に大きな磁束を捕捉できることが挙げられる。折しも、希土類系永久磁石モータが本格的に注目されるようになったのが1980年代後半頃であり、同磁石の現実的な残留磁束密度が1.5 T程度であることから、それをベンチマークとして、上記値を超える磁界発生を目標に多くの研究開発が行われた。特に、その後溶融法による単結晶的な高温超電導バルク材料も開発されるようになり、現在ではモータに即適用できるか否かを考えなければ、永久磁石を遥かに超える磁界発生が可能となっている¹⁾。また、バルク体のもう一つの特長として、大きな磁気遮蔽特性が挙げられる。そこで、高温超電導バルク体を磁気回路内に挿入し、その反磁性作用を利用することによって直軸と横軸のリラクタンس比を大きくすることが可能となり、その比を利用したリラクタンスマータを実現することができる。

Moscow Aviation Institute (露)・OSWALD -Elektromotoren (独) 他のグループやOxford大学(英)は、いち早くバルクモータの研究開発に着手した。開発当初は、バルク体内の量子化磁束のヒステリシスループに相当するエネルギーをトルクに変換するヒステリシスマータの研究から開始し²⁾⁻⁶⁾、その後バルク体の磁気遮蔽特性を利用したリラクタンスマータの研究開発に移行している⁷⁾⁻¹²⁾。ヒステリシスマータは、電機子による磁束と回転子遮蔽電流によって作られる磁束間の位相差を利用するモータであり、構造が簡単であるという特長を有するが、原理的に低効率・低力率は避けられず、これまで比較的小容量機しか検討されていない。一方、リラクタンスマータでは、150 kW@3000 rpm級機的设计も実施され、既存機に対して3~6倍程度の高出力密度化が達成可能であることを示している¹⁰⁾。ただし、リラクタンスマータもヒステリシスマータと同様に一般に低効率や低力率であることから、適材適所の使用法を見つけられない限り実用化は難しく、上記グループのバルクモータの研究

開発は現在下火のようである。応用例としては、Oxford 大学 (英) のグループが、液体燃料循環移送ポンプとして上記バルクモータの特許を取得しており¹³⁾、Moscow Aviation Institute (露) 他と共同で試作も実施している¹⁴⁾。また、九州工業大学は、液体窒素循環ポンプ用に高温超電導バルクモータを開発している¹⁵⁾。上記応用研究は、被循環液体が高温超電導バルクモータを冷却する冷媒にもなることから、基本的に冷却ペナルティーを考える必要が無く、有用な検討課題であると考えられる。このアプリケーションについては、筆者も財団からの助成を頂いて 2002 年頃に検討した。なお、上記バルクモータの回転メカニズムの基礎検討も、Oxford 大学 (英)¹⁶⁾⁻¹⁸⁾、東京大学^{19),20)}、京都大学²¹⁾⁻²³⁾、その他研究機関²⁴⁾⁻²⁶⁾で実施されている。例えば京都大学では、高温超電導バルク体の磁束ピン止め特性や中心到達磁界と回転特性との関係を実験的かつ解析的に検討している²³⁾。

一方、高温超電導バルク体を界磁に利用したモータ開発は、ヒステリシスモータやリラクタンسモータに比較して高効率化が期待されることから本命と考えられていたが、当初は着磁束を大きく出来なかったことからあまり進展が見られなかった。その中で、(株)イムラ材料開発研究所・名古屋大学他のグループが電気駆動式ゴルフカートに液体窒素冷却バルク磁石モータを搭載する検討を実施し、世界初の走行試験に成功した²⁷⁾。このデモンストレーション走行は大きなインパクトがあったが、当時は冷却法や着磁の問題から、残念ながら研究開発は終了している。その後、熔融法による高臨界電流密度のバルク体が開発されるにつれて、大きな磁束捕捉特性を利用したモータ開発が活発になっていった。東京海洋大学のグループは、北野精機 (株)・福井大学他と共同で船舶推進用の低速バルクモータを開発している。渦巻型の電機子コイルで界磁バルクを着磁する構造であり、液体窒素間接冷却²⁸⁾や液体ネオン間接冷却²⁹⁾が検討されている。ただし、実用化のためには更なる着磁束の向上が重要と考えられ、精力的な検討が進められている³⁰⁾。高温超電導捕捉磁束型バルクモータに関しては、材料開発から着磁技術、システム化まで我が国が世界をリードしていると言っても過言では無く、今後更なる技術革新が期待される。なお、バルク超電導体を利用した全超電導モータの試験例は未だ報告されていない。筆者の知る限り、唯一 Cambridge 大学 (英) のグループが特性検証用として、着磁されたバルク界磁とイットリウム系電機子巻線を適用した全超電導モータを開発しているようであるが、諸々技術開発課題が多く、未だ回転試験には至っていないようである³¹⁾。

以上、今回は高温超電導バルクモータの研究開発経緯について説明した。高温超電導バルク体の開発は、我が国が世界的に先頭を走っていると言っても良く、企業や様々な研究機関の努力によって非常に高品質な大型バルク体を手に入れることが可能である。従って、そうした好環境を利用して優れたモータを開発するチャンスにあると思われる。今後、高温超電導バルク体のメリットを最大限生かしたモータ構造の最適化を図れば、大きな可能性を有しているのではないかと考えられる。

参考文献：

- 1) M. Tomita and M. Murakami, Nature, vol. 421 (2003) 517
- 2) T. Habisreuther, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7 (1997) 900
- 3) L.K. Kovalev, *et al.*: Mater. Sci. Eng., B53 (1998) 216
- 4) M.D. McCulloch, *et al.*, Inst. Phys. Conf. Ser., no.158, The Netherlands, 30 June – 3 July 1997 (1997) 1519
- 5) M.D. McCulloch, *et al.*, Proc. ICEM 2000, 28-30 August 2000, Espoo, Finland (2000) 812
- 6) L.K. Kovalev, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol.13 (2000) 498
- 7) B. Oswald, *et al.*, IEEE Trans. Applied Supercond., vol.9, no.2 (1999) 1201
- 8) L.K. Kovalev, *et al.*, Physica C, vol. 354 (2001) 34

- 9) L.K. Kovalev, *et al.*, Physica C, vol. 357-360 (2001) 860
- 10) B. Oswald, *et al.*, Physica C, vol. 372-376 (2002) 1513
- 11) L.K. Kovalev, *et al.*, Physica C, vol. 372-376 (2002) 1524
- 12) L.K. Kovalev, *et al.*, Physica C, vol. 386 (2003) 419
- 13) D. Dew-Hughes, *et al.*, UK Patent Application No. 9810361.7, 14th May 1998
- 14) L.K. Kovalev, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., 17(2003) S460
- 15) M. Komori, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., 14/2, 1659-1662 2004
- 16) G.J. Barnes, *et al.*, Inst. Phys. Conf. Ser. no.167, Spain,14-17, September 1999 (1999) 1075
- 17) G.J. Barnes, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol. 13 (2000) 229
- 18) G.J. Barnes, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol. 13 (2000) 875
- 19) H. Ohsaki and Y. Tsuboi, J. Mater. Proces. Technol., vol. 108 (2001) 148
- 20) Y. Tsuboi and H. Ohsaki, Physica C, vol. 357-360 (2001) 889
- 21) I. Muta and T. Nakamura, High Temperature Superconductivity 2 (Engineering Applications) (Springer) (edited by A.V. Narlikar) (2003) pp. 67-80
- 22) H.J. Jung, T. Nakamura, *et al.*, Physica C, vol. 405 (2004) 117
- 23) T. Nakamura, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol. 17 (2004) 1319
- 24) A.L. Rodrigues, ICEM 2000, 28-30 August 2000, Espoo Finland (2000) 802
- 25) X. Granados, *et al.*, Physica C, vol. 372-376 (2002) 1520
- 26) P. Tixador, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7 (1997) 896
- 27) 超電導コミュニケーションズ, vol. 4, no.1 (1996)
- 28) M. Miki *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol. 19 (2006) S494
- 29) T. Sano *et al.*, Mater. Sci. Eng. B, vol. 151 (2008) 111
- 30) E. Morita, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol. 19 (2006) 1259
- 31) M.D. Ainslie, *et al.*, Physica C, in press

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その4）

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

ある程度応用検討が可能なビスマス系高温超電導長尺線材が開発されるようになると、まずは欧米を中心に高温超電導モータの研究開発が開始された¹⁾⁻⁵⁾。開発ターゲットの主流は、回転界磁形の同期機であり、界磁巻線を高温超電導化するレトロフィット機であった。なお、ビスマス系線材を使用した回転機に関しては、近年になりその性能向上に足並みを揃えるように韓国⁶⁾や我が国⁷⁾においても同様のモータ開発が実施されており、また誘導子形回転機⁸⁾、永久磁石形回転機⁹⁾、単極機¹⁰⁾、かご形誘導機¹¹⁾他、実応用を指向した応用だけでもバラエティーが増えている。

巻線形高温超電導機の特長として注目すべき点は、既存機のように過負荷耐量や短時間定格の概念がある程度成立することが挙げられる。銅巻線を用いる従来形常伝導機では、銅線に連続的に流せる電流（積極的な冷却をしなければ、室温で $4\sim 5\text{ A/mm}^2$ 程度）によって連続定格を決定するが、短時間であれば上記値を超える大電流を流すことができ、冷却方式やケーシング構造に応じて短時間定格が別途設定される。この場合、例えば始動加速時に要求される最大出力は短時間定格で対応することになる。しかしながら、低温超電導線材では臨界電流を超える電流を通電すると瞬時に常伝導転移し、また所謂不可逆磁界 \equiv 上部臨界磁界¹²⁾であることから、損失状態を積極的に使用することは一般に不可能であり、さらに熱安定性の問題も重なり、短時間定格を設定するシステムは成立しない。つまり、低温超電導回転機に関しては、たとえ最大出力を要求する時間が極めて短時間であっても、最大出力 \equiv 連続定格出力として設計しなければならない。一方、高温超電導線材では、高温運転に伴う高い比熱とブロードな電界-電流密度特性が幸いして、ある程度の損失が発生しても、冷却系や抜熱特性とのバランスさえ問題無ければ、磁束フロー状態を過負荷耐量として積極的に利用する可能性が期待される。このことは、高温超電導巻線形モータの最適設計の考え方の変更を促すものであり、低温超電導回転機で行われていたような、使用線材の臨界電流密度-磁界特性と巻線磁界ロードラインの交点を基準に設計するのではなく、電界-電流密度特性の形そのものを精密に議論する設計法の見直しが必要である（この概念は、モータ以外の応用分野においても重要と考えられ、筆者らは大分前より同概念に基づくマグネットやケーブル特性解析・設計を実施している¹³⁾）。

高温超電導モータの導入が最も精力的に検討されている応用分野は、船用推進システムと考えられる。上記分野では、モータに要求される運転モードが比較的可変速頻度の低い低速（数百 rpm）回転であることから、まず米国で軍事利用目的の研究開発が進められた。AMSC 社（米）は、同社で開発したビスマス系線材を適用し、5 MW 級機（230 rpm, 6 極）の開発に成功した後¹⁾、36.5 MW 級大形機（120 rpm, 16 極）²⁾を開発している。構造は、一般的な回転界磁形同期機であり、界磁巻線を高温超電導化するレトロフィットタイプモータである。

近年になり、我が国においても船舶用高温超電導モータの開発が活発になった。当初は、前号¹⁴⁾で説明した高温超電導バルクモータ開発が先行していたが、その後長尺線材の特性改善に伴って幾つかの検討が実施されている。(株)IHI を取りまとめ役とする産学グループは、まず電機子ならびに界磁巻線の両者を高温超電導化した誘導子形モータを開発し、回転試験に成功した⁸⁾。同モータは、アキシヤルギャップ構成であり、電機子と界磁子の両者を非回転とし、誘導子と呼ばれる強磁性材

料において電磁-機械エネルギー変換を行う。誘導子を伴う回転子は、常伝導であることから極低温冷却の必要が無く、また高温超電導機としては世界初となる全超電導化に成功している。さらに、同グループはその後高出力化を検討し、365 kW の実負荷試験に成功したが、その際は界磁子が永久磁石に変更された⁹⁾。この改良機では、界磁子が高温超電導巻線→永久磁石に変更されたが、これまでと発想の異なる超電導回転機の新しい流れであり、興味深い。即ち、既述したように¹⁵⁾、回転機の出力は電気装荷と磁気装荷の積で与えられ、従来の高温超電導機では磁気装荷を上げる検討が殆どであった。一方、上記 IHI のモータは電気装荷を大きくする思想のモータと考えられる。従来の誘導子形常伝導回転機は、一般に高速回転領域で用いられ（研究開発そのものもあまり行われていない）、船舶推進のような低速でメリットを見出せるか不明である。それに対し、永久磁石を適用したタイプでは、高温超電導電機子は依然として非回転であり、界磁は同磁石の着磁束で制約されるものの、電機子起磁力を大きくすることで高出力密度化を図ることが出来るだけでなく、低速におけるトルク特性・効率が改善すると期待される。さらには、回転数も数百 rpm であることから、永久磁石回転子の影響で電機子巻線に発生する逆起電力もあまり問題にならない。従って、高温超電導電機子巻線の交流損失の問題があるものの（フラックスコレクタと呼ばれる強磁性体をコイル内に挿入する方法で低減しているが、どこまで低減されるか不明）、高温超電導回転機開発の一方方向性として今後の展開が大いに期待される。(株)川崎重工・東京海洋大学・海上技術安全研究所他の産学グループは、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託のもとで、船舶用高温超電導モータ内臓ポッド推進システムの研究開発を実施した⁷⁾。小形かつ大トルクの鉄心レス高温超電導モータを開発し、200 kW の実負荷試験に成功するとともに、冷却ペナルティーを含めても 98 %程度の効率が達成できることを検証した。船舶推進用モータは、いよいよ実用化のフェーズに入ってきたという印象を強く持つようになった。

一方、近年急速に開発が進んでいるイットリウム系高温超電導モータについても、米国¹⁶⁾や日本¹⁷⁾で試作・試験が行われている。同線材は、77 K 程度の高温領域においても臨界電流密度の磁界依存性が優れており、また曲げ歪に対する耐性も良好であることから、次世代線材として注目されているが、上記した過負荷耐量の概念を含めて、ビスマス系で開発されて来た設計法がそのまま適用できるか更なる検討が必要と思われる。

以上、今回は高温超電導巻線形モータ開発の考え方と、船舶推進システムへの適用現状を紹介した。船舶推進用モータは、大形機で冷却ペナルティーを相殺出来れば大きな可能性を有しており、米国、ドイツ、日本、韓国で精力的な研究開発が進められている。特に、我が国では産学連携の研究開発によって実用化への力強い流れを感じる。これからの進展が大いに期待される。次号では、船舶以外の輸送機器や産業機器について、高温超電導モータの導入現状を紹介する。

参考文献:

- 1) G. Snitchler, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.15, no.2 (2005) 2206
- 2) AMSC ホームページ: <http://www.amsc.com/>
- 3) S.S. Kalsi, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2 (2007) 2026
- 4) H.W. Neumüller, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol.19 (2006) S114
- 5) M.K. Al-Mosawi, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.15, no.2 (2005) 2182
- 6) Y. K. Kwon, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2 (2007) 1587
- 7) NEDO, 「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」「省エネルギー革新技術開発事業」平成 21 年度終了テーマ事後評価委員会, 平成 22 年 6 月 24 日開催分資料 (2010)
- 8) T. Okazaki *et al.*, Power Engineering Society General Meeting, IEEE (2006) 6 pages,
IHI プレスリリース: <http://www.ihico.jp/ihitopics/topics/2005/0414-1.html>
- 9) IHI プレスリリース: <http://www.ihico.jp/ihitopics/presssm/10075.html>

- 10) S.H. Lee *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.18, no.2 (2008) 717
- 11) T. Nakamura, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., vol. 20 (2007) 911
- 12) 山藤馨, 低温工学, vol. 32 (1997) 374
- 13) 中村武恒, 機能材料 (シーエムシー出版), 2月号 (2004.01) pp. 40-49
- 14) 中村武恒, 超電導モータの過去・現在・未来 (その4), 超電導 WEB21, 2010年6月
- 15) 中村武恒, 超電導モータの過去・現在・未来 (その1), 超電導 WEB21, 2010年2月
- 16) J. Voccio *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2 (2007) 1591
- 17) M. Iwakuma *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3 (2009) 1648

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その5）

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

高温超電導回転機的应用は、主として輸送機器応用と産業・電力応用に分けられる。高温超電導輸送機器開発の主流は、前号¹⁾で説明したように船舶推進であり、数百 kW 級機から数十 MW 級機まで広範な容量の回転機が研究開発されている。船舶推進用超電導モータは、産学連携の研究開発によって、高温超電導回転機として最も早期の実用化が期待される。一方、その他の超電導利用輸送機器としては超電導磁気浮上式列車（Super-MAGLEV）が挙げられる。東海旅客鉄道（株）は、低温超電導マグネットを適用したりニア同期モータによって着々と実用化への検討を進めているだけでなく²⁾、高温超電導マグネット³⁾を適用した走行試験にも成功している（本連載では、回転機に焦点を絞っていることから詳細な説明は割愛する）。なお、鉄車輪 - 鉄レール方式列車に高温超電導回転機を適用する研究は、諸事情によって現在ほとんど検討されておらず、直流電車について回生との関係から解析的検討結果が報告されている程度である⁴⁾。

一方、最も多くかつ身近な輸送機器は自動車であり、今後の電気駆動化率向上を鑑み、パワートレインの最適構造が検討途上の現状において、高温超電導技術を含めて新技術を導入するチャンスと思われる。車載用モータに要求される制約条件の一つは、限られた空間に冷却系を含めて高効率な駆動系を収納しなければならないことであり、俄かな高温超電導モータの導入は難しいものの、最近になって積極的な検討が進められている。住友電気工業（株）は、クローポール形の界磁高温超電導直流直巻モータを搭載し、実用的乗用車として世界初の走行試験に成功した⁵⁾。DI-BSCCOパンケーキマグネットが液体窒素で浸漬冷却されており、同コイルが経験する最大磁束密度は 2 T を超えるということであった。筆者も乗車させて頂く機会があったが、完全な電気駆動のため勿論エンジン音は無く、高温超電導モータで動いているという感慨に耽ることができ、開発者の努力に敬意の念を禁じ得なかった。上記成功は、超電導電気自動車実現の重要なマイルストーンと位置づけられ、同社では現在も研究開発を続けているということであった。また、京都大学・アイシン精機（株）を中心とする産学グループは、NEDO の「H21 年度省エネルギー革新技術開発事業（第二次公募）」として、自動車を含む輸送機器用冷凍機一体型高温超電導誘導同期モータの研究開発を進めている⁶⁾。本プロジェクトでは、京都大学のグループが高温超電導回転機ならびに同ドライブ技術開発を実施し、アイシン精機（株）のグループが高効率小形冷凍機ならびに冷却構造の研究開発を担当している。H22 年度中にパイロット機の開発ならびに試験を予定している。

Florida state University（米）のグループは、航空機用の高温超電導モータを検討しており⁷⁾、様々なアイデアによってその可能性を追求している（但し、未だ基礎検討段階のようである）。超電導飛行機については、国内でも（独）産業技術総合研究所において検討されている⁸⁾。

産業・電力用高温超電導モータとしては、まず AMSC 社（米）が、電力系統の力率改善用 8 MVAR 級高温超電導同期調相機（13.8 kV）を開発している⁹⁾。同期調相機は、既存機としても存在し、巻線界磁形同期機をモータとして無負荷運転し、界磁電流によって電機子電流の位相を、進みから遅れまで自由に变化できる電力機器である。上記特性を利用することによって、電力系統の力率を改善することが可能となる。AMSC 社では、開発機を Tennessee Valley Authority（TVA）に実際に設置し、試験を順調に実施した。University of Southampton（英）のグループは、ビスマス系高温超

電導線材を適用した 100 kW 級の界磁超電導モータを研究開発しており、電力系統や産業応用への適用を目指している。これまで、コア付界磁巻線を使用したモータ開発に成功すると共に、減圧液体窒素や液体空気浸漬条件で各種試験を実施している¹⁰⁾。また、コアレス界磁巻線を適用した 2 極モータの設計・制作も終了し、現在は各種試験を開始している¹¹⁾。なお、コアレスにすることにより、総重量がほぼ半減する結果が報告されている¹¹⁾。Korea Electrotechnology Research Institute (KERI) (韓)と DOOSAN heavy industry (韓)のグループは、産業応用への投入を目指して、ビスマス系線材を適用した 1 MW 級 (3,600 rpm, 2 極) 高温超電導モータの研究開発を実施している¹²⁾。九州大学・京都大学のグループは、NEDO の「産業技術研究助成事業費 (若手グラント)」の助成によって、日立研究所協力のもとで液体水素循環移送ポンプ用高効率モータの研究開発を実施している。液体水素の大気圧沸点が 20 K 程度であることから、MgB₂ 単芯線材を使用して低価格化を指向し、京都大学で開発している超電導誘導同期機の構造を採用している¹³⁾。これまでに、MgB₂ 回転子の開発ならびに試験に成功し、現在は MgB₂ 固定子巻線の開発を進めている。最終的には、九州大学が上記モータと MgB₂ 液面計を統合したシステムを完成する予定である。なお、MgB₂ 固定子巻線には交流電圧に伴って交流損失の発生が懸念されるが、九州大学を中心として同特性の詳細な検討が実施され、20 K 冷却銅巻線に比較して十分低くなることが解析的に示されており¹⁴⁾、さらなる低減法も提案されている¹⁵⁾。

以上、今回は船舶以外の輸送機器応用ならびに産業・電力応用にターゲットを絞り、高温超電導巻線形モータの研究開発現状を紹介した。上記は、これからの低炭素かつ持続的発展社会の実現を担う重要な技術開発の一つと位置付けられ、高温超電導回転機技術の導入が強く期待される。今後とも、継続的かつ着実な研究開発によって、その実用化が切望される。

参考文献：

- 1) 中村武恒, 超電導 WEB21, 2010 年 8 月 (2010) 25
- 2) 東海旅客鉄道(株)ホームページ : <http://linear.jr-central.co.jp/index.html>
- 3) 五十嵐基仁 他, 低温工学, vol. 39, no. 12 (2004) 651
- 4) T. Konishi, T. Nakamura, *et al.*, presented at ASC'10 (1LPE-07), Aug. 1-6, Washington DC (2010)
- 5) 尾山仁 他, SEI テクニカルレビュー, vol. 173 (2008) 59
- 6) 中村武恒, 超電導 WEB21, 2010 年 3 月 (2010) 5
- 7) P.J. Masson and C.A. Luongo, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, (2007) 6 pages
- 8) 岩田拓也, 松本治, 第 57 回応用物理学関係連合講演会 超伝導分科会企画「超伝導で”進む”未来技術の最新動向～超伝導の物流・交通への展開～」(3月17日), 17p-ZM-5 (2010)
- 9) S.S. Kalsi, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2 (2007) 2026
- 10) H. Wen *et al.*, presented at ASC'10 (1LPG-05), Aug. 1-6, Washington DC (2010)
- 11) W. Bailey *et al.*, presented at ASC'10 (1LPG-04), Aug. 1-6, Washington DC (2010)
- 12) Y. K. Kwon, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2 (2007) 1587
- 13) K. Kajikawa and T. Nakamura, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3 (2009) 1669
- 14) K. Kajikawa *et al.*, Superconductor Science and Technology, vol.23, no.4 (2010) 045026
- 15) 久家広嗣 他, 第 63 回電気関係学会九州支部連合大会(9月25-26日), 06-1A-13 (2010)

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その6）

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

本連載では、“モータ”という応用機器を舞台とし、超電導技術の過去と現在について紹介させて頂いた。モータは、便利な電気エネルギーを使って様々な機械的仕事をして给我们的生活に欠かせない電気（電力）機器である。我が国の電力供給事情を鑑みると、一次エネルギーを直接利用する動力源・駆動源に比較して、圧倒的に二酸化炭素排出量の少ない電気エネルギー利用のモータを使用することは、これからも極めて重要な技術として位置付けられる。

既存のモータを振り返ると、制御性の良い直流機の時代から、安価でメンテナンスの容易な誘導機に置き換わり、パワーエレクトロニクス技術の進展に相俟って産業分野や輸送分野他で広く使われるようになった。特に産業分野では、産業の米と呼ばれるほどモータは不可欠となっている。その後、永久磁石回転機の実用化と制御法の進展により、可変速駆動の趨勢の中でモータは更なる進化を遂げている。

従来形（常電導）モータの性能を評価する指標の一つは、出力密度やトルク密度（単位体積若しくは単位重量当たりの出力やトルク）である。一般に、電気機器は体格を大きくすれば効率が高くなる傾向にあるが、同一出力・同一効率で如何に小形のモータを実現できるかは研究開発者の重要な課題の一つと考えられる。しかしながら、出力密度を上げていけば発熱密度即ち単位体積当たりの発熱が大きくなり、冷却が苦しくなってくる。従って、さまざまな冷却方法が考えられており、冷却系まで含めてモータ仕様を考える必要が生じている。例えば、筆者の実験室に置かれているあるメーカーの永久磁石モータ（30 kW）は、小形で高効率であるが、連続駆動の条件として、搭載されている冷却ファン駆動用の 200 V 誘導機を常時駆動しなければならない。

一方、本質的に冷却システム（上記発熱を冷却するのではなく、極低温度に冷却するシステム）が必要な高温超電導モータも、これからのモータの選択肢として検討されるべきと思われる。繰り返しになるが、高温超電導モータをある程度の汎用機として実用するならば、冷却の課題を解決する必要がある。ただし、上記高出力密度化・高トルク密度化を指向する場合、高温超電導モータは大変有利であり、つまりモータ本体からの発熱は極めて小さい（鉄心を使用するモータの場合、鉄損が大きくなる高速回転時は除く）。また、ある程度のコンパクトなサイズまでは、超電導状態を実現するための冷凍機負荷も軽減されると期待される。その場合、“既存（常電導）機の発熱に対処するための冷却”と、“（発熱が極めて小さい）高温超電導機を運転するための冷却”を比較して、どちらにメリットがあるかという観点から検討されるのではないかと考えられる。既述したように¹⁾、上記冷却の観点からは、論理的には高温超電導機の冷却の考え方は“合目的”的に感じる（低損失の高温超電導機を実現するための、最低限の冷却という意味）。勿論、極低温冷却用冷凍機の成績係数（COP）を考えると、技術的に簡単な問題で無いことは容易に理解される。しかしながら、例えば蓄冷材との組み合わせで暫時冷凍機を停止するなどのアイデアによって、発熱を冷却するために電力を必要とする既存常電動機を圧倒できるシステムサイドのブレイクスルーが期待される。さらに、室温超電導に近い新材料が開発されれば、技術革新が起こることは間違いないと思われる。

やや話は飛躍するが、高温超電導体における磁束格子融解の指標として Lindemann criterion c_L が用いられる²⁾。高温超電導体においては、 c_L が 20 数%に達すると熱力学的な一次の相転移が起こ

り、量子化磁束格子の融解が起こる。仮に、この **critereion** が高温超電導モータの実用化度（ある分野における高温超電導モータの利用率）にも当てはまると仮定すると、結構敷居が高いように感じる。あるアプリケーションに関して、5台に1台は高温超電導モータである必要があることになる。しかしながら、特に近年の産官学の研究開発によって、船舶用のモータについては実用化の足音が聞こえているように感じる。勿論、他のアプリケーションに関しても精力的開発が実施されている。我が国における、モータ開発技術や同制御技術は世界一である。また、我が国の高温超電導材料技術も世界一と言っても過言で無い。従って、二つの世界一を有機的に結び付けることによって、モータの新しいイノベーションやあるいはパラダイムシフトが起こると大いに期待される。どの回転機が一番乗りで **Lindemann criterion** を超えるか、わくわくしながら筆を置く。

一年間、浅学な筆者にお付き合い頂き、ありがとうございました。

参考文献：

- 1) 中村武恒, 超電導モータの過去・現在・未来（その1）, 超電導 WEB21, 2010年2月
- 2) 野々村禎彦 他, 日本物理学会講演概要集 53(2-3) (2010) 634

[超電導 Web21 トップページ](#)