

船舶電気への超電導技術導入への期待

(社)日本船舶電装協会 小原磯則

今回は新年号なので少し夢を含んだお話として「超電導」について纏めてみます。「環境にやさしい」をキャッチフレーズとした国の後押しもあって、最近電気推進船の建造が相次いでいます。船舶の電気推進化の流れは、わが国のみならず世界的なものですが、この流れを更に大きくしていくための技術として、電気機器への超電導技術の導入が期待されています。欧米の、主として艦艇で始まっているオール電化船（All Electric Ship）構想の実現に不可欠な要素技術と考えられているのです。

後で述べるように、超電導技術を導入すれば、電気抵抗を限りなくゼロにすることができるため、エネルギーを無駄なく使用することが可能になります。その結果、従来の技術に比べ多量の電気を流すことができるので、装置の小型・軽量化が可能になり、経済性も向上するというものです。

電気推進方式の船舶が普及してきたものの、現状の電動機は大型で設置上の制約があり、電力の変換効率も十分とはいえません。大きな界磁磁束が得られる高温超電導磁石を用いた電動機が実現すれば、小型・軽量で高トルク、さらに高効率が期待されることから、推進用電動機の実用化研究が各国で進められるようになりました。

また、電動機のみならず、発電機や送電、電力貯蔵まで、船舶用に限ってもかなり応用範囲は広いといえます。

超電導化すれば、どれだけ小型化できるかを示したのが図-1です。米国のメーカーの試算では、容積比、重量比とも、1/3程度になることが期待されています。

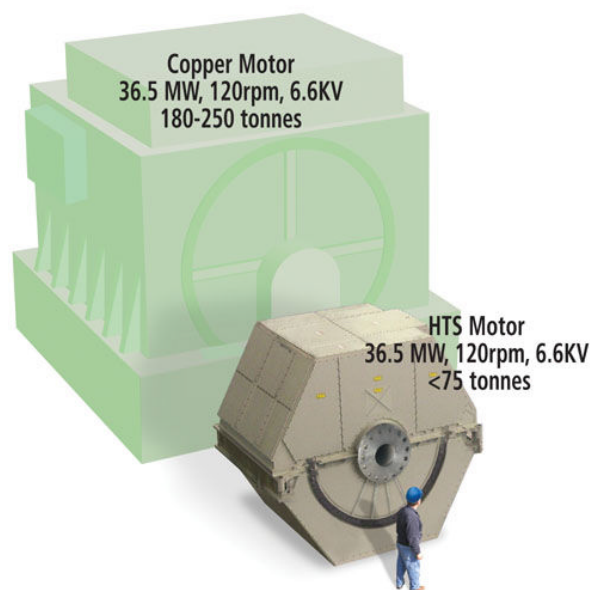


図-1 在来型と超電導型の寸法比較
(出典：AMSC 社ホームページ)

1. 超電導とは？

超電導現象とは、ある種の金属や酸化物などを冷却すると、ある温度以下で電気抵抗がゼロになる現象で、この超電導になる温度を臨界温度と呼んでいます。この現象は昔から知られていましたが、絶対零度（氷点下273℃）に近い温度を要求されたため、設計に困難なものがありました。従来開発されてきた超電導モータの冷却冷媒には液体ヘリウム（7 K・氷点下266℃）や液体ネオン（30 K・氷点下243℃）が使用されてきました。ヘリウムやネオンを使用すると極低温のため断熱構造が大きくなり、モータの小型化が難しいこと、液体窒素（77 K・氷点下196℃）と比較すると価格が約10倍（ヘリウム）から約100倍（ネオン）のため、オペレーションコストが高くなるなどの問題があったのです。後述するシップアンドオーシャン財団の超電導電磁推進船ヤマトの開発も、超電導現象を実現するための技術、特に冷却技術が大きなネックで、その後大きな進展はありませんでした。

しかしながら、80年代後半から、液体窒素冷却でも超電導現象が実現できる高温超電導（A high-temperature superconductor : HTS）材料の相次ぐ発見で、超電導利用の開発が勢いを増しました。材料に含まれる超電導物質によって、Bi（ビスマス）系、Cd（ガドリニウム）系、Y（イットリウム）系などと呼ばれます。

今各国で進められている船舶関係の高温超電導の研究開発は、電動機や発電機といった回転機です。これらに超電導の技術の導入をする場合にキーポイントになるのが、超電導磁石をどう実現するかです。現在進められている方法を大別すると、超電導線をコイル形状に巻いて電流を通すことによって磁場を発生するタイプと、バルク（かたまり）状態の超電導体に外部から磁場を印加して磁力線を固定し、磁石とするタイプがあります。コイル式は数十から数百MWまで高出力化できるのが利点で、バ

ルク式は、出力が数MWどまりといわれていますが、回転部分への電気の供給が容易なためエネルギーロスが少なく、小型化が容易といわれています。これまで内外とも両方式の開発が進められてきましたが、現状ではコイル式が主流のように思われます。

2. 先鞭切ったのは昭和の「ヤマト」でした

シップアンドオーシャン財団は、80年代後半に、スクリュープロペラを持たず、電磁流体力で進む船「ヤマトー1」の開発を行いました。今話題になっている回転機ではないのですが、船舶への超電導技術の導入としては、フロントランナーと言えるでしょう。

電磁気学の基本法則のひとつに「フレミングの左手の法則」と呼ばれるものがあります。左手の親指、人差指、中指を互いに直角になるように開き、人差指方向に磁場を加え、中指方向に電流を流すと、親指方向に電磁力（ローレンツ力）が発生するというものです。超電導電磁推進船の推進原理は、このフレミングの左手の法則を応用したもので、船体に固定した電磁石によって海水中に磁場をつくり、この磁場と直角に交わるように海水中に電流を流すと、海水に電磁力が発生し、その反力によって船が進みます。

スクリュープロペラに替わる「ヤマトー1」の推進装置は、海水中に強い磁場をつくるための超電導磁石と、海水中に電流を流すための電極とから構成



されていました。超電導磁石は、超電導線材を巻いてつくった超電導コイルと、これを収納して極低温状態に保つための容器（クライオスタット）からできていました。

実験船は、全長 30m、排水量 185 トンで、図-2 のように流線型のスマートな形していました。1992 年、神戸沖で海上航行を実現しました。当時としては画期的な試みで、技術的な可能性は確認できたのですが、実用化へのステップアップは見送られました。

図-2 電磁推進船ヤマトー1 (出典：三菱重工ホームページ)

2.1 世界の開発状況

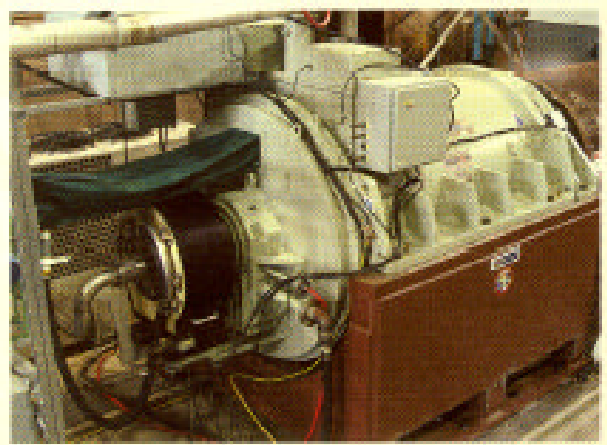
(1) 米国

米国科学アカデミーが、21世紀の艦艇や一般船舶用の推進動力として高温超電導を高く評価したのを受け、米国海軍研究所(Office of Naval Research:ONR)では、後述する艦艇のオール電化構想のもとで、Bi系高温超電導線材を界磁コイルとする36.5MW-120rpmの超電導電動機を開発を進めています。

図-1は、開発を担当しているAMSC社のホームページに出ているものですが、このHPには、製作中の電動機の写真が紹介されています。

図-3は、これに先立って開発が進められている5 MW-230 rpmの 高温超電導同期電動機で、米国フロリダ州Center for Advanced Power Systems (CAPS) において負荷試験中の様子です。タイプとしては同じくコイル式で、Bi系の高温超電導材を用いた回転界磁と冷却機構が米国で製作され、外側の電機子との組立て及び無負荷完成試験は英国のALSTOM社で行われました。

図-3 5 MW 超電導モーター (米国海軍 CAPS)



(出典：MER Jan2006)

その後2003年に米国海軍研究所に引き渡され、CAPSでの負荷試験が続けられました。回転界磁巻き線は極低温に冷却されるので周囲から真空断熱することとあわせて、回転している界磁子に外部から冷媒を導入循環させる機構が大きな技術開発要素だったといわれています。

(2) ドイツ

ドイツのシーメンス社が、ニュルンベルグにある同社の試験施設で、世界初の高温超電導発電機の開発を進めていることは、これまでも業界誌(Shipping World and Shipbuilding (SWS) 誌 2005 年 9 月号等)で報じられてきましたが、2007 年 4 月のハノーバー展では、次のような発表をしています。

「回転数が毎分 3600 回転で、出力が約 4MW。シーメンスグループは、1999 年頃から別途超電導電動機を開発してきたが、2009 年には、超電導発電機と電動機を組み合わせた推進装置用運転台で実機試験に入る。この開発は、オール電化船(AES)の実現に大いに貢献するだろう。このプロジェクトは、連邦政府教育研究省の支援で進められている。」



図-4 シーメンス社超電導発電機試験(出典：同社ホームページ)

SWS 誌では、最大のメリットとして、重量・容積で在来型に比べ 50%削減できることと、電氣的効率の改良することを挙げています。また、最新のクルーズ船はガスタービン発電で 70MW、約 3 分の 1 がユーティリティ、3 分の 2 が電気推進システムに使われているといわれ、超電導の採用により、船内スペースの大幅な削減と消費されるエネルギーコストの低減が期待されるとしています。

図-4 は、2005 年 8 月、同社が記者発表をした際の映像で、シーメンスでテストラン中の 4MW 高温超電導発電機。中央の装置が発電機である。

2.2 わが国の開発状況

(1) IHI グループ

2005 年 4 月、石川島播磨重工 (I H I) を取りまとめる産学グループは、世界で初めての液体窒素冷却全超電導電動機 (12.5kW-100rpm) を完成したことを発表しました。同グループは、これに先立って、世界で初めて液体窒素冷却超電導同期電動機を開発し、図-5 に示すように、これを内蔵したポッド型推進装置を完成させていました。

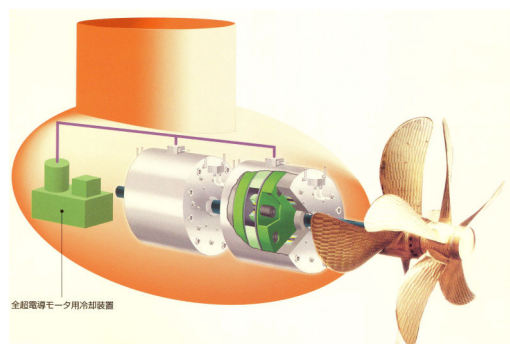
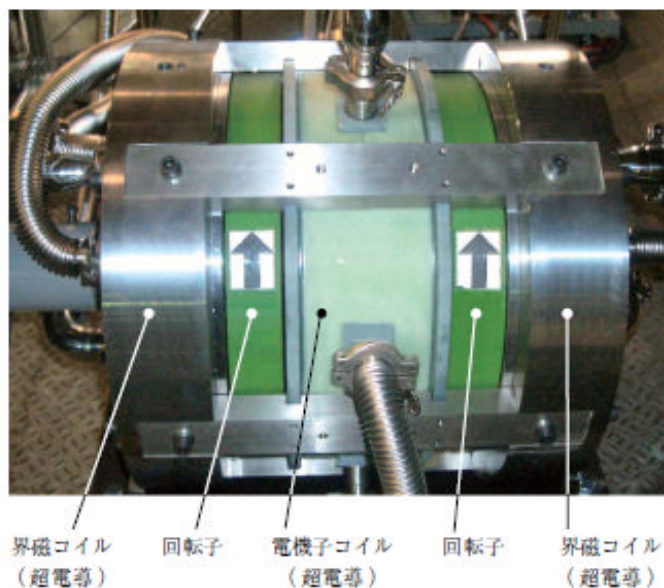


図-5 IHI グループのモータの構成とポッド型推進装置 (出典：IHI 技報及びカタログ)

更に IHI は、2007 年 9 月、365kW-250rpm (大きさ：直径 1.2m×長さ 0.8m、重量：4.4 t) の超電導電動機の開発に成功したこと、同時に、今後の船用機器市場における省エネ化への期待に応えるべ

く、2008年内に400kW級超電導電動機の市場投入を目指し、また2500kW級の大型化への開発も継続していく予定である旨の発表をしています。

(2) 海洋大/北野精機グループ

東京海洋大学・北野精機等の産学グループは、2003～2005年にかけて、海洋政策研究財団の助成を受けて、バルク式の超電導電動機の開発を行いました。超電導材料としては、液体窒素の冷却で駆動可能なGd（ガドリニウム）系で、試験機の製作・実験は北野精機が担当しています。

2005年7月の発表では、「Gd系バルクは90K（氷点下183℃）で超電導となることから、液体窒素での冷却が可能となり、冷却設備を大幅に簡略化できる。試作したモータは直径400mmで長さ500mmの外形寸法で、出力60kWを実現した。産学グループでは、従来の永久磁石に比べてモータの容積を1/3程度に小型化できる」としていますが、その後の進展状況については公表されていません。

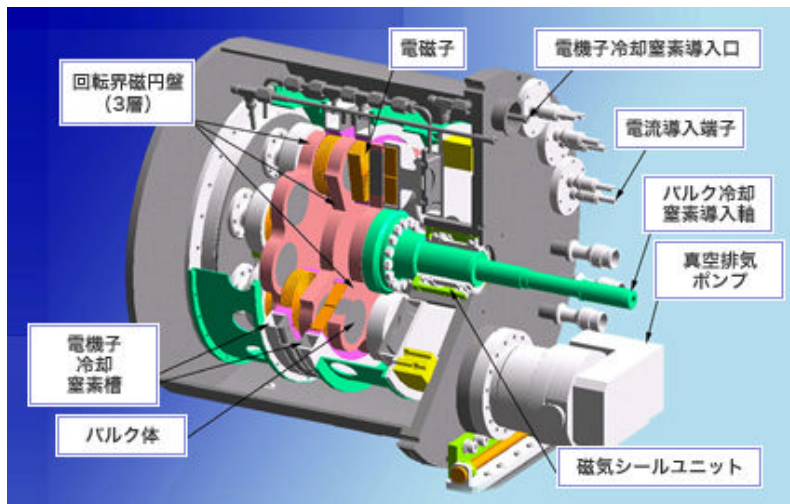


図-6 バルク式超電導電動機の構成と実験中の様子（出典：北野精機ホームページ）

3. オール電化船にむけて

「オール電化」というとどこかの電力会社のコマーシャルみたいですが、船の世界でも着実に進んでいます。All-Electric Ship(AES)の概念は、一次エネルギー源を用いて、ディーゼル機関やガスタービン駆動の発電機あるいは燃料電池等によって生み出された電源を、一元化されたネットワークで推進から荷役、居住区サービスまで供給しようとするものです。

AES国際会議が、1997年に始められてから隔年で開催され、2007年9月にロンドンで10周年記念の会議が開かれました。AES構想についての会議での議論は、商船、艦艇問わず、かなりオープンに行われているようです。とくに欧米各国の海軍でその推進が図られているのが注目されます。米、英、仏、蘭などが、毎回、艦艇に関する論文を多数発表していますが、日本からの発表はほとんどありません。

7月号でも触れましたが、これまで船の設計は、船体→機関→電気の流れで、電気は最後のつじつま合わせをやらされると言われてきました。AESの時代になれば、船を先ず電気の観点で考える逆転の発想が必要になるでしょう。英国のある業界誌の「Fueling the AllElectric Future」というタイトルの記事で、「今世紀の終わりには、船の推進は、機械的というより電氣的ということになる」とありました。

今後パワーエレクトロニクス技術や超電導技術を用いた電気動力システムの省エネ化に加え、電源として、今月号で渦潮電機さんから寄稿頂きました燃料電池、更には風力・太陽光といった自然エネルギーの活用も進むと思われます。このなかで、超電導が果たしていく役割は極めて大きいといえるでしょう。船舶電気の出番は、これからますます多くなっていきます。このような動きは、われわれ船舶電装業界としては追い風であり、前向きに取り組むべきと考えます。