

液体窒素冷却全超電導モータの開発

Development of Liquid Nitrogen-Cooled Full Superconductor Motor

竹 田 敏 雄 船用超電導推進事業室 部長
外 川 裕 之 船用超電導推進事業室
大 田 友 哉 船用超電導推進事業室

当社は、2005 年 1 月に世界初の液体窒素で冷却する超電導モータを発表した。引き続き 4 月には、世界初の全超電導モータを発表した。本稿ではこれらのモータの開発経緯、それぞれのモータ開発の技術的ブレークスルー、モータの特長などを紹介する。また、今後開発を予定している大型全超電導モータやイットリウム系線材の全超電導モータへの適用についても述べる。

IHI has released the world's first liquid nitrogen-cooled superconductor motor in January 2005. In April, IHI released the world's first full superconductor motor. The process of the development of these motors and the technical breakthrough, and the features of each motor are discussed. The introduction of the large full superconductor motor that will be developed in the future and application to the full superconductor motor of yttrium superconducting wire are also described.

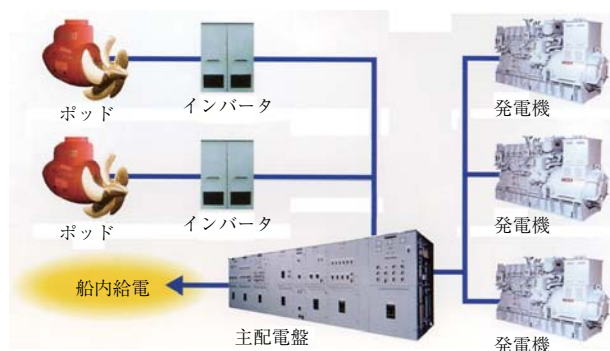
1. 緒 言

2003 年に海外のメーカによる発電機、配電システムを含んだ電気推進装置 (IPS) の売り込みが我が国の造船所や船主に対して行われた。IPS とは、Integrated Power System のことで統合電気推進システムといわれている。従来の機械推進システムで使用されている主機 (メインエンジン) の代わりに複数の発電機を装備して、これらの発電機から船内負荷と電気推進装置の両方へ給電するトータルシステムである (第 1 図)。ヨーロッパでは電気推進の実績が多く、我が国はメーカとしても、造船所としても、技術的およびコスト的に遅れをとった形になっている。

一方、地球環境では、地球温暖化問題が話題となり省エネ、CO₂ 削減の動きが活発になってきた。また、超電導の世界では、1986 年に高温超電導材が発見されたことによって、超電導ブームが起きたが、量産化の壁に阻まれて超電導の産業化に失敗し、世の中から忘れ去られていた。しかし、近年ビスマス系線材の量産化が可能になり、超電導線材を使用した工業製品の開発に明かりが差し込み始めていた。当社では、IPS、地球温暖化対策の両方に対応可能な超電導モータを開発すべく調査を開始した。

2004 年、社内に超電導モータを開発する組織ができ、当社を取りまとめ役とする 8 共同開発産学チーム (石川島播磨重工業株式会社、住友電気工業株式会社、大陽日酸株式会社、ナカシマプロペラ株式会社、新潟原動機株式会社、株式会社日立製作所、福井大学、富士電機システムズ株式会社：以下、8 産学と呼ぶ) によって、超電導モータの開発がスタートした。8 産学は、2005 年 1 月に kW クラスのモータ容量として世界初の液体窒素冷却超電導モータの開発に成功し、そのモータを内蔵したポッド推進装置とともに発表した。2005 年 4 月には、世界初の全超電導モータの開発にも成功して発表した。

本稿では、12.5 kW 超電導モータおよび 12.5 kW 全超電導モータについて紹介する。以下、8 産学で共同開発したモータを「開発した超電導モータ」、8 産学で発表したモータを「発表した超電導モータ」または「全超電導モータ」



第 1 図 IPS システム (ポッドを使用した例)
Fig. 1 IPS system for POD propulsion

と呼ぶ。

2. 超電導モータの種類

モータの原理と分類について簡単に説明しながら、超電導モータを紹介する。交流モータの主なものは、誘導モータと同期モータに分類することができる。誘導モータは冷却方法が難しいため、超電導化された実績はない。以下は同期モータについて説明する。

同期モータは、界磁と電機子から成り立っている。界磁は通常、直流電流を供給して電磁石をつくるが、永久磁石の場合もある。電機子には交流電流を供給して回転電磁石をつくる。モータは、界磁と電機子の両磁石の吸引力・反発力によって回転する。

2.1 構造面からの分類

同期モータは、回転軸に対して界磁と電機子をどのように配置するかで、ラジアルギャップ型とアキシシャルギャップ型に分けられる。一般に使用されている同期モータは、製作のしやすさからラジアルギャップ型である。モータの効率は、小型モータの場合にはアキシシャル型の方が約 15% 高い。理由は、アキシシャル型が界磁の両側を利用しているのに対し、ラジアル型は片方しか利用していないためである。ラジアル型を片軸受けにして、電機子を界磁の間に設けると効率はアキシシャル型とほぼ同じになることが確認されている。

超電導モータを開発する場合は、界磁だけを超電導化する超電導モータでは、どちらでも同じであるが、界磁に加えて電機子も超電導化する全超電導モータの場合は、冷媒供給、電源供給の点からアキシシャル型が有利となる。

2.2 ロータによる分類

ロータ（回転部）を界磁にするか電機子にするかで、二つに分類される。回転界磁型モータは界磁を回転させるモータであり、固定界磁型（回転電機子型）は、電機子を回転させるモータである。

超電導モータでは、回転界磁型が一般的である。回転部には、回転軸を介して冷媒や電源を供給するのが通常の方法である。電機子に比べて小容量の電源供給で済むため界磁部を回転部にするのが一般的である。一部であるが小容量モータで、スリップリングを経由して電機子に給電し、界磁を固定して冷媒供給を容易にする場合もあるが、まれなケースである。

2.3 超電導化するコイルによる分類

超電導化できるコイルは、界磁と電機子の二つある。分

類方法としては、界磁を超電導化した超電導モータと電機子を超電導化した超電導モータがある。超電導コイルに交流を流すとヒステリシス損と渦電流損が発生するため、他社のものは、界磁を超電導化した超電導モータである。開発した超電導モータは、界磁と電機子の両方を超電導化したモータで、全超電導モータと呼んでいる（全超電導モータは、商標登録申請中）⁽¹⁾。

2.4 その他の分類

超電導モータを冷媒や線材の種類から分類すると次のようになる。

(1) 冷媒の種類による分類

超電導コイルを冷却する冷媒の種類によって、液体窒素、ネオン、ヘリウムの三つに分けられる。なお、液体酸素、液体水素もあるが実用的ではないので省略した。

価格面（液体窒素<ヘリウム（10 倍）<ネオン（さらに 10 倍））でも、断熱などの取扱い面でも液体窒素が優れている。しかし、磁場中では超電導コイルに大きな電流を流すことができないという課題が解決できないため、開発した超電導モータ以外は、ヘリウムかネオンを使用しているのが現状である。

(2) 超電導線材による分類

高温超電導と低温超電導に分けられるが、ここでは高温超電導線材を取り上げる。

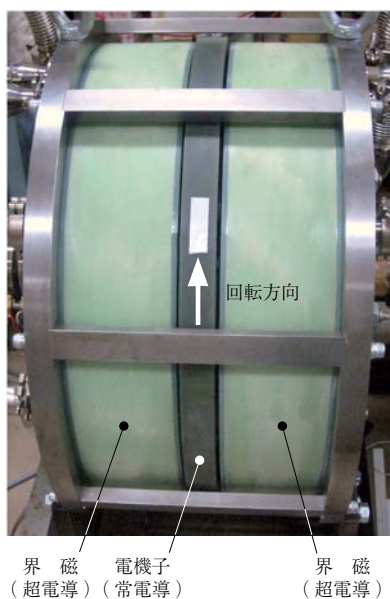
高温超電導線材としては、ビスマス系とイットリウム系がある。性能はイットリウム系が優れているが、量産化に問題があり、実用化されるのは 10 年後といわれている。現在、高温超電導線材といえば、ビスマス系線材を示す。

一方、線材ではなく、バルク材料を使用した超電導モータも開発されている。バルク材料は、冷却して着磁することによって強力な永久磁石になるため、界磁部分に使用され永久磁石モータ（PM モータ）のように界磁制御をしないモータに使用される。PM モータは大容量になると大きな永久磁石を使用しなければならないが、大きな強い磁石は取扱いが難しくなる。

3. 開発した超電導モータ

2005 年 1 月に発表した超電導モータを紹介する（第 2 図）。液体窒素を冷媒とした kW クラスモータとしては世界初の超電導モータで、主な仕様を次に示す。

定格出力 12.5 kW



第 2 図 超電導モータ
Fig. 2 Superconductor motor

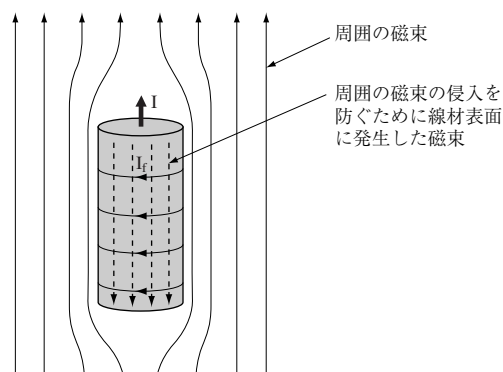
回転速度 100 min^{-1}
モータ直径 600 mm
モータ長さ 400 mm

界磁コイルを超電導化して固定し、液体窒素を外部から界磁コイルへ直接供給する。電機子コイルには、通常の銅線が使用されている。

3.1 超電導モータの技術的ブレークスルー

世界の超電導モータで使用されているビスマス系高温超電導線材は、液体窒素冷却温度が 77 K 付近では磁束に弱いのでモータの開発が困難となり、モータ用コイルとして使用するためには対策が必要であった。

ビスマス系高温超電導線材は周囲磁束が線材中に侵入するのを防ぐため、本来流すべき電流を使って周囲の磁束と逆向きの磁束を線材表面に作るという性質がある（第 3 図）。



(注) I : 本来超電導線に流れる大電流
 I_s : 線材表面に磁束を発生させるために流れる電流

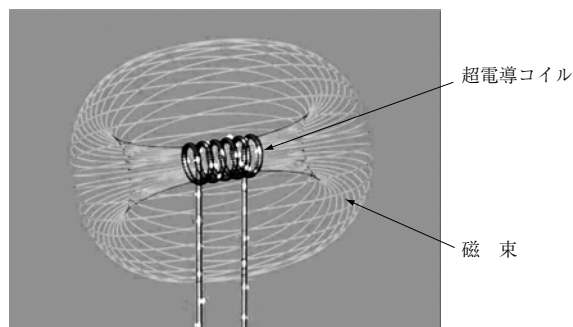
第 3 図 磁束中に置かれた超電導線材
Fig. 3 Superconductor wire in magnetic field

このため、周囲の磁束が強くなるとそれに比例して周囲の磁束を自分の内部に入れないようにするための逆向き磁束も強くしようとする。しかし、内部の電子の量には限りがあるため、やがて電子を使い果たしてしまい、超電導線に電流を流す電子がなくなり電流が流れなくなってしまう。つまり、強磁場中では、超電導線に電流を流すことができないという致命的な欠点をもっている線材である。このため、アメリカではモータの開発に当たってはネオンガスを使用し、温度を 30 K 付近まで下げることで、この問題に対応してきた。しかし、この方法では、ネオンの断熱層が大きくなるためモータの小型・軽量化が困難である。

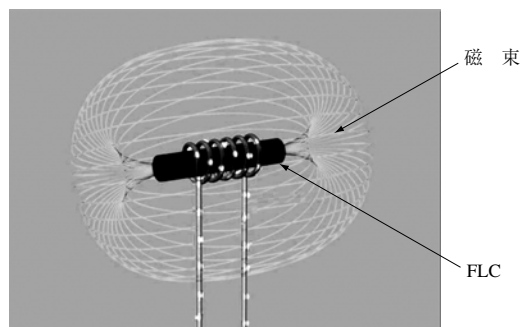
8 産学は、液体窒素を冷媒に用いることによって断熱層を小さくし、モータの小型・軽量化を図った。技術的ブレークスルーは、従来困難だった液体窒素を冷媒に使用し、モータを回せる技術の工夫をしたことである。それは、フラックスコレクタ (FLC) をコイルの中に入れる技術である (FLC は、商標登録申請中)⁽²⁾。FLC には、大きな磁束を流すことができる金属を使用した。第 4 図に FLC の効果を示す。FLC をコイルに挿入すると、第 4 図-(b) に示すように周囲の磁束、コイルから発生する磁束は FLC 内部を流れるようになり、コイルに磁束がかからなくなる。

FLC を使用することによって、液体窒素冷媒でモータを

(a) FLC がない時の磁束の流れ



(b) FLC を挿入した時の磁束の流れ



第 4 図 FLC の効果

Fig. 4 The role of FLC in the magnetic field

回転させることが可能になった。また、FLC に磁束が流れるため、モータのトルクは FLC にかかり超電導材料にはかからないという点も大きなメリットである。

3.2 超電導モータの特性

超電導モータの特性を次に示す。

(1) 誘起電圧－回転速度特性（第5図）

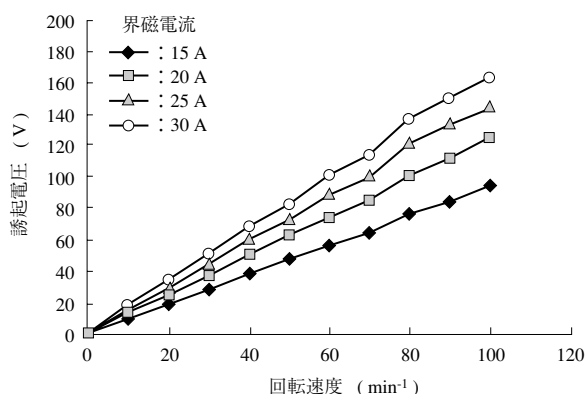
超電導モータを外部モータで回転させて、発生した電圧と回転速度の関係を示す。各界磁電流ではほぼ直線の特性が得られており、モータとして定トルク特性をもっている。

(2) 電流－トルク特性（第6図）

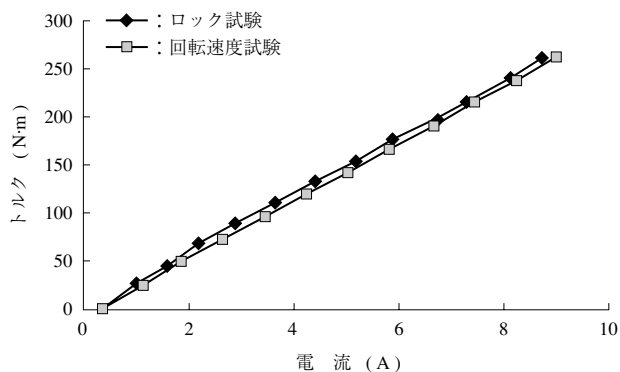
ロータをロックして計測したデータとロータを 100 min^{-1} で回転させて計測したデータを比較して示す。両データは直線ではほぼ重なっており、期待した特性が得られた。

(3) 効率特性（第7図）

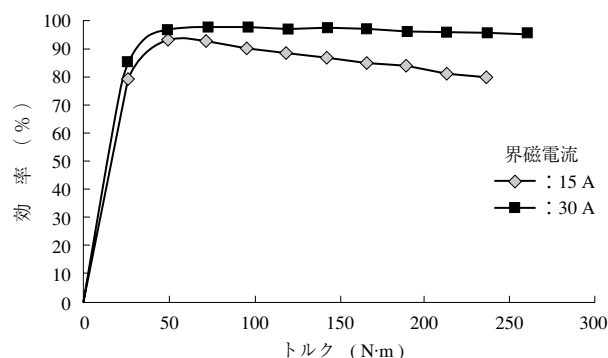
トルクによる効率特性のデータを示す。界磁電流が 15 A と少ない時は効率が悪いが、界磁電流を計画値



第5図 誘起電圧－回転速度特性
Fig. 5 Characteristic of generator mode



第6図 電流－トルク特性
Fig. 6 Characteristic of motor torque



第7図 効率特性
Fig. 7 Characteristic of motor efficiency

の 30 A にすると高い効率が得られる。低負荷時の特性でも、約 13% 負荷付近まで高効率となっており、容量の大きいモータでは、99% に迫る効率が得られる見通しがついた。

(4) 回転速度偏差特性（第1表）

回転速度指令値に対する回転速度偏差のデータを示す。オシロデータは示していないが速度応答は十分であることが確認できた。

(5) 漏れ磁束、騒音、振動

漏れ磁束はガウスメータで計測した結果、計測不可能であった。また、騒音も計測した結果、周囲の暗騒音との差はほとんど計測できなかった。振動についても計測結果から問題にならない値であることが確認できた（第8図）。

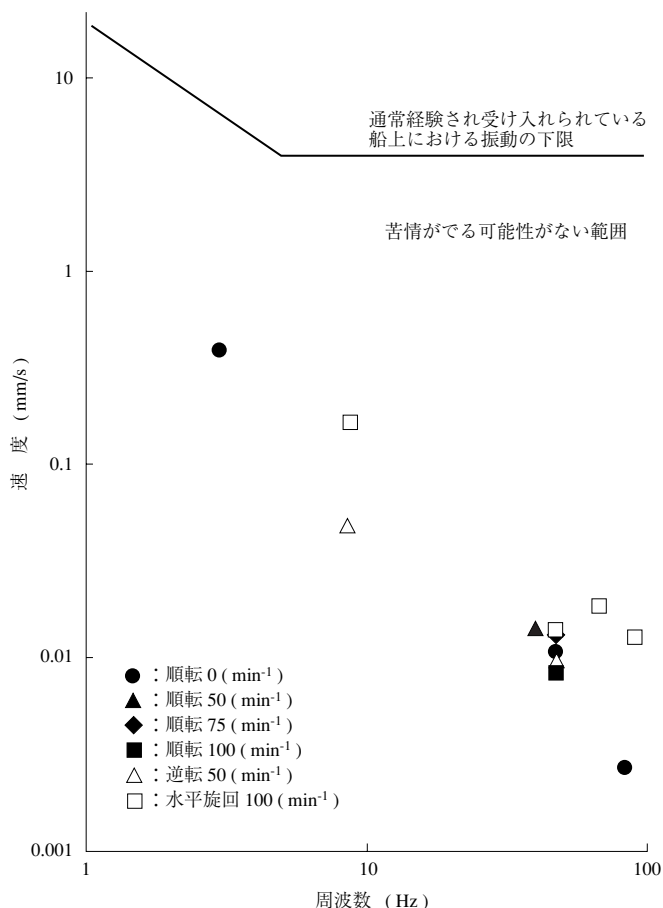
4. 開発した全超電導モータ

2005 年 4 月に発表した全超電導モータを紹介する（第9図）。電機子コイルも超電導化してすべてのコイルを超電導化した世界初の全超電導モータで、主な仕様を次に示す。

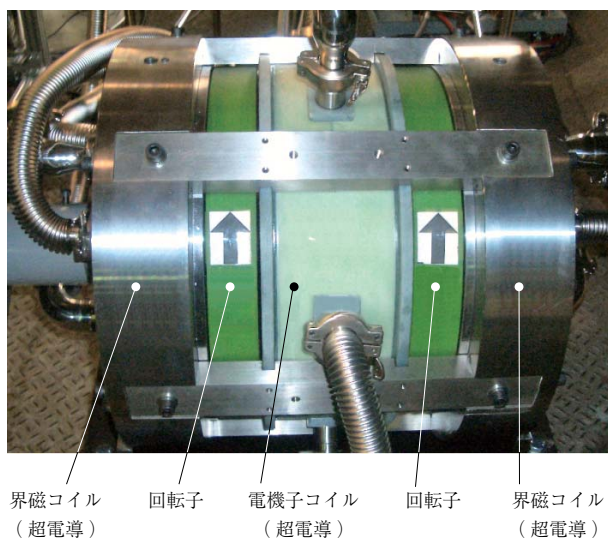
定格出力 12.5 kW

第1表 回転速度偏差特性
Table 1 Revolution deviation to the input signal

回転速度指令 (min^{-1})	回転速度検出 (min^{-1})	回転速度偏差
10	10	なし
20	20	なし
30	30	なし
40	40	なし
50	50	なし
60	60	なし
70	70	なし
80	80	なし
90	90	なし
100	100	なし



第 8 図 振動計測データ
Fig. 8 Vibration test data



第 9 図 全超電導モータ
Fig. 9 Full superconductor motor

回転速度 100 min^{-1}

モータ直径 400 mm

モータ長さ 450 mm

全超電導モータの開発に当たっては、電機子を超電導状

態にする必要がある。このため、電機子コイルは冷媒を軸から導入して冷却しなければならなくなる。冷媒を軸から導入するためには、軸端にロータリジョイント（以下、RJ と呼ぶ）を設けなければならない。第 10 図に冷媒導入用ロータリジョイントを示す。図は、他社の超電導モータで用いられている方法である。RJ を設けると、シールで冷媒を遮断する構造になり、RJ のメンテナンス作業が必要になる。このため、モータの信頼性が低下する。

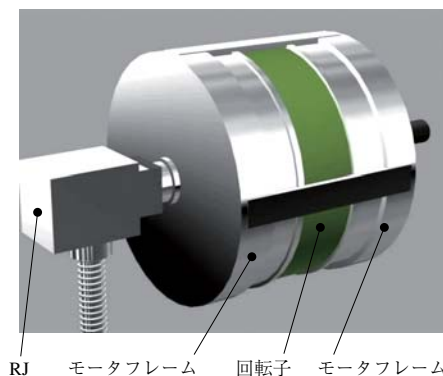
当社は、RJ を設けない方法つまり、超電導部分はすべて固定する構造に着眼し、界磁と電機子の間に誘導子を入れる構造を開発した（第 11 図）。これが、二つ目の技術的ブレークスルーである。界磁コイルで磁化された誘導子と電機子コイルの間に働く磁石の吸引力・反発力でモータを回転させる構造にした。世界初の超電導部分がすべて固定された全超電導モータが完成した。

5. 全超電導モータの特長と舶用化

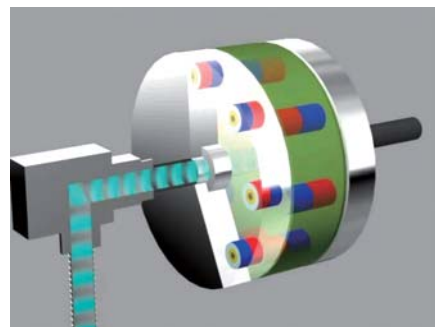
全超電導モータの特長として次が挙げられる。

- (1) 小型・軽量（常電導モータ＋減速機の半分以下）
- (2) 高効率（特に低負荷時に顕著）
- (3) 音漏れほとんどなし
- (4) 磁束漏れほとんどなし

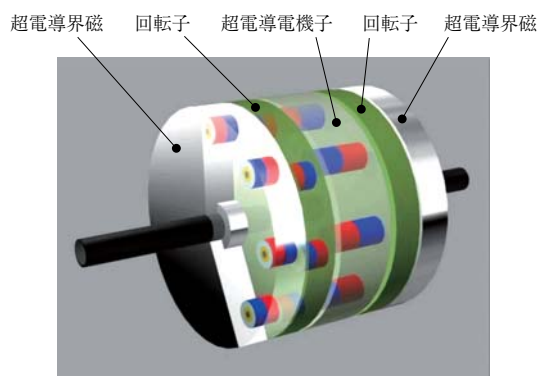
(a) モータ軸に装備された RJ



(b) RJ からモータへ流入する冷却媒体



第 10 図 冷媒導入用ロータリジョイント
Fig. 10 Rotary joint for cooling liquid



第 11 図 全超電導モータの誘導子と回転子
Fig. 11 Inductor and rotor of full superconductor motor

- (5) モータ表面は常温
- (6) 液体窒素で冷却
- (7) すべてのコイルを超電導化
- (8) すべてのコイルを固定
- (9) モータ軸の両端が自由（超電導線材を冷却するために必要な RJ を軸に装備していないため）

全超電導モータは上記のような特長をもっているほか、船用モータとしての使用も可能である。当社は、12.5 kW 超電導モータと 12.5 kW 全超電導モータを JIS-F の規定に基づいて、主な船用化試験を実施した。この結果、船用化要求仕様は満足することを確認した。実施した試験項目を次に示す。

- (1) 共振試験
- (2) 定振動数耐久試験
- (3) 可変振動数耐久試験
- (4) 横傾斜試験（30 度）
- (5) 縦傾斜試験（10 度）
- (6) 片側自由落下試験（250 mm）

6. 結 言

12.5 kW 全超電導モータで得られたデータを基に、定格出力 400 kW、回転速度 250 min^{-1} の全超電導モータを

開発中であり、2006 年 3 月ごろから 400 kW 全超電導モータ 2 台を内蔵した、二重反転ポッド推進装置の試験を岸壁で実施する予定である。400 kW モータは、主に内航船用に使用される。この後、モータの開発は大型化へと進み、2 500 kW そして 12 500 kW の大型全超電導モータを開発する計画である。将来ビスマス系線材に代わりイットリウム系線材が超電導線材の主流となると思われる。イットリウム系線材は、磁界中でも電流を流すことが可能になり、電流密度も格段に改善されるといわれている。

8 産学は、ビスマス系線材を使用した大型モータの開発と同時に、イットリウム系線材を使用した場合に FLC が必要かどうかの検討も含め将来の線材に対応できるモータの部材と構造開発を早急に実施して、全超電導モータで引き続き世界のトップを走り続ける所存である。

— 謝 辞 —

本モータの開発と一緒に携わった共同開発産学チームの住友電気工業株式会社 岡崎 徹氏、大陽日酸株式会社 吉田 茂氏、ナカシマプロペラ株式会社 吉岡 勝氏、新潟原動機株式会社 松浦正男氏、株式会社日立製作所 田中利雄氏、福井大学 杉本英彦 教授、富士電機システムズ株式会社 藤田 昌孝氏（以上、五十音順）をはじめ関係各位には、多くのご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 商標出願 2005-080396, 商標出願 2005-080397
- (2) 商標出願 2005-021357
- (3) 杉本英彦, 本堂義記, 秋田義文, 西川友啓, 津田哲平, 竹田敏雄, 吉田 茂, 岡崎 徹, 大橋紳悟: 高温超電導電動機の試作 電気学会全国大会講演論文集 2005 年 3 月