

排水量型超高速船の開発研究 (その2)

——超電導電気推進プラントの試設計——

正員 宝田直之助* 塚本修己**
 森弘之*** 桜庭順二***
 端文昭*** 外岡幸吉***

R & D of a displacement-type high speed ship
 (Part 2: Design of a superconducting electric propulsion system)

by Naonosuke Takarada, Member Osami Tukamoto
 Hiroyuki Mori Jyunji Sakuraba
 Fumiaki Hata Koukichi Sotooka

Summary

One of the necessary conditions for a high speed ship is that a propulsive plant with big power has smaller size and lighter weight.

When we plan a displacement-type monohull high speed ship, in particular, it is difficult to get the hull form with the wave-making resistance minimum, because the stern shape is limited by an arrangement of propulsive machines and shafts.

If we have a small-sized and light-weight propulsive machines, we will expand the limit of hull form design.

Superconducting technology will have capability of realizing the small-sized and light-weight propulsion motor.

In this paper, we generally describe superconducting ship propulsion systems, and report the test results of the 480 kW superconducting motor which we have constructed for the purpose of developing superconducting electric propulsion system.

Showing the design of a 150,000~200,000 PS propulsive plant for a displacement-type monohull high speed ship, we discuss the possibility of the plant realizing, and pick up the subject for a future study.

1. 結 言

超高速船を達成するための一つの要件として、推進プラントの大出力、小型、軽量化が挙げられる。特に、単胴排水量型の船型を対象にした場合、造波抵抗を最小にしようとする、軸系配置によって船尾形状が制約される。この制約を逃れ、船型設計を自由にするために、推進器駆動部を小型・軽量化する必要がある。このため、超電導電動機による駆動方式が一つの解法となる。

筆者らは、日本船用機器開発協会と共同で、日本船舶振興会の援助のもとに、この超電導電動機を用いた駆動方式、すなわち、超電導電気推進システムの実用化を目的とした開発を進めてきた^{1,2,3,7,8,9,12)}。この開発では、超電導電気推進システムの主要機器である超電導電動機の開発を主体とし、出力37 kW及び480 kWの超電導電動機の試作を行った。この開発における成果を基礎とし、文部省〔民間機関等との共同研究〕として、超高速船に要求される超電導電気推進プラントの試設計を行った。この結果、本超電導電気推進システムを適用することによって、超高速船が実現できることが明らかになり、かつ、その実現までに必要な開発課題を摘出することができた。

本稿では、まず、第2章において、超電導技術の船舶推進への応用について概説する。ここでは、超電導船舶推進方式として考えられる電気推進方式と電磁推進方式につい

* 研究当時横浜国立大学工学部建設工学科

** 横浜国立大学工学部電子情報工学科

*** 住友重機械工業平塚研究所

**** 住友重機械工業船舶海洋鉄構事業部

て、その概要と開発の現状を示す。第3章では、筆者らが超電導電気推進システムの実用化を目的として試作した480 kW 超電動機について、その構造と性能試験結果について記述する。第4章においては、この超電導電動機の開発成果を基礎として、超高速船の超電導電気推進プラントを試設計した結果について示す。単胴排水量型超高速船型を対象として、その所要動力を150,000~200,000馬力と想定し、超電導電気推進プラントの要目を決定し、この推進プラントにおける問題点、及び、実用化に必要な開発課題について論じた。

2. 超電導技術の船舶推進への応用

超電導技術の船舶推進装置への応用として、電気推進方式と電磁推進方式の二つが考えられる。Fig. 1に、それぞれの推進方式の原理を概念的に示す^{1,2)}。基本的には、いずれの方式とも、磁界と電流との相互作用によるローレンツ力を推進力とするものであり、常電導磁石では得られない強い磁界を利用することによって推進システムの小型・軽量化が実現できる。

超電導電気推進システムは、推進用電動機や発電機を超電導化するもので、従来の電気推進システムと同様に、原動機によって駆動される発電機からの電力で電動機を作動させ、プロペラを駆動して推進力を得るものである。この超電導電気推進システムは、従来の電気推進システムの操船性の良さ、機器配置の自由度の高さ、低振動・低騒音などの利点を生かすとともに、容積・重量を改善するものである。電動機や発電機の、主に、界磁巻線を超電導化する

ことによって、超電導の特徴である完全導電性により、常電導では得られない高電流密度・高磁界が可能となる。その結果、出力を常電導の場合と同じにすれば、小型・軽量化が図れ、寸法を常電導と同じにすれば出力増加が図れる。したがって、推進機器所要容積の減少、排水量の減少、消費燃料の減少などが期待できる。さらに、電動機の小型化により、軸系に制約されず、船型の自由度を確保できる可能性がある^{1,3,4)}。

船用超電導電動機の開発は、英、米、日のものが代表的である。英国では、1970年代に出力1,000 kWの超電導電動機と発電機の組み合わせによる陸上での試験が行われた⁵⁾。米国では、1980年代に300 kWの超電導電気推進システムによる海上実験、及び2,250 kW機の試作が実施されている⁶⁾。日本では、1980年より日本船舶振興会の援助のもとに日本船用機器開発協会と住友重機械工業の共同開発を開始した。1983年に出力37 kWの超電導直流単極電動機の実証、動揺・傾斜に伴う液体ヘリウム冷却機構の安定性実証などを行った^{7,8,9)}。その後、次章に詳述する出力480 kW超電導直流単極電動機の開発へと進めた。

一方、超電導電磁推進システムは、船内に装備された超電導磁石による磁界と、海水中に通電された電流とによって電磁力を発生させ、海水を船体後方に押しやりその反発力で推進力を得る方式である。これは、従来の推進器であるプロペラが不要となるので、理論上速度の上限が無くなることを意味する。また、低振動・低騒音、高い操船性、簡単な推進機器構造などの利点がある。しかし、海水中に電流を流すことによる発生ガス・腐食の問題、海水の低導電率に伴う超電導磁石の大型化の問題などがある。この方式は、1961年に米国において、電磁ポンプの逆発想として着想され研究が開始された。その後、ウエスティングハウス社、神戸商船大学などでモデル船による実験がおこなわれ¹⁰⁾、現在、シップ・アンド・オーシャン財団による実験船(ヤマトI)の建造が進められている¹¹⁾。

3. 480 kW 超電導電動機の試作

3.1 概要

超電導電気推進システムの実用化をめざし、その重要機器である推進用超電導電動機の開発を進めてきた。超電導電動機を構成する要素機器(超電導コイル、ヘリウム冷凍機、集電子など)の開発研究、出力37 kW超電導直流単極電動機の実証に引き続き、出力480 kWの超電導直流単極電動機を試作したので、本章においては、その設計・性能試験結果について報告する。

推進用超電導電動機を設計するにあたり、船舶推進用としての特徴、機能を満足するためには次の点が重要である。

- ①小型、軽量であること。
- ②超電導界磁コイルが安定に冷却、励磁されること。
- ③電機子、集電子に大電流通電が可能なこと。

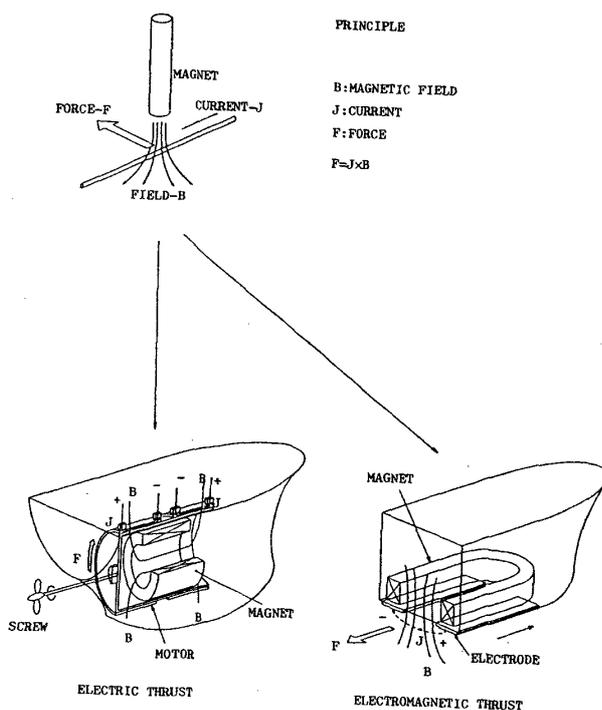


Fig. 1 Principle of superconducting ship propulsion

- ④トルク伝達に対して強度が十分であること。
- ⑤温度上昇による強度が十分であること。
- ⑥船用としての動揺、傾斜及び衝撃に対して安全であること。
- ⑦動的バランスが良く、振動の少ないこと。

実用機として、上記の性能を満足する超電導直流電動機を開発するために、1ステップとして出力 480 kW の超電導電動機を試作した。本機では、船用超電導電動機の最大の特徴が小型・軽量化であることから、その特徴を活かす電動機構造として外部円筒型を採用した。すなわち、界磁コイル（非回転）の外側に出力軸を伴った回転子（ロータ電機子、トルクチューブ）、トルク反作用を支持する固定子（ステータ電機子、磁気シールドヨーク）及び集電子を配置した構造である。ここで、超電導化した界磁コイルはクライオスタット内において、ヘリウム冷凍機及び凝縮熱交換器によって液体ヘリウム温度に冷却される方式を採用した。本試作機により、実用機へのスケールアップが円滑に進められるように、超電導電動機としての機能確認及び問題点の把握を目的とした開発研究を行った。具体的には、次の項目を設計、製作及び機能確認試験によって明らかにすることにある。

- ①超電導界磁コイルがクライオスタット内で冷凍機によって安定に冷却されること。
- ②超電導界磁コイルが永久電流スイッチによる永久電流モードで磁気シールドヨーク内において安定に励磁されること。
- ③クライオスタット内の超電導界磁コイル支持構造が動揺、傾斜、衝撃に対して十分安全であること。
- ④クライオスタットの侵入熱量が十分低く抑えられること。
- ⑤磁束の測定値と設計値との比較から、磁気設計手法を確立できること。
- ⑥磁気シールドヨークに磁束の飽和がなく、線形な無負荷飽和特性が得られること。
- ⑦出力特性の性能確認試験による測定から、電動機設計手法を確立できること。
- ⑧界磁コイルの外側に配置した円筒型電機子構造を持つ直流単極機の動作原理が実証されること。
- ⑨超電導界磁コイルにはトルク反作用がないので、電動機運転中でも超電導状態が安定に保持されること。
- ⑩多数個の集電ブラシを介して電機子の各セグメント導体に一様に通電できること。
- ⑪電機子導体とトルクチューブの接着強度が十分であること。
- ⑫回転する電機子の支持方法が安全であること。
- ⑬機械損と電気損の実測値と設計値との比較から設計手法を確立できること。
- ⑭水冷による電機子の温度上昇と冷却効果の確認から熱

設計手法を確立できること。

- ⑮電機子の温度上昇によるクライオスタットの侵入熱量変化を確認すること。
- ⑯超電導界磁コイル、電機子及び負荷設備等の異常時に対するシステムとしてのインターロック機構が把握できること。
- ⑰長時間運転に対して各要素機器及びシステム構成機器の安全性が十分であること。

3.2 480 kW 超電導電動機の構造

本 480 kW 超電導電動機は、超電導界磁コイルをもつ直流単極機であり、その設計上の特徴は以下のとおりである。

- ①超電導界磁コイルは、磁束利用率の向上と集電ブラシ個数の低減のためにスプリット型のソレノイド・コイルとする。
- ②超電導界磁コイルは、侵入熱量の低減のために永久電流モードにて励磁する。励磁速度を速めるためにクライオスタット内に保護抵抗としてダイオードを用いる。また、電流リードは励磁後に引抜く構造とする。
- ③配管による熱損失を低減し、コイル冷却システムのコンパクト化のために、凝縮熱交換器と冷凍機はクライオスタットに内蔵した構造とする。
- ④超電導界磁コイルは、液体ヘリウム浸漬冷却とし、蒸発ヘリウムガスはコイルを取り囲む形に配置された凝縮熱交換器によって再凝縮される構造とする。
- ⑤凝縮熱交換器の冷媒は、冷凍機から供給し、直接コイルを冷却する冷媒と分離して汚染を防止する。
- ⑥液体ヘリウム容器は、円筒状の断熱支持体によって真空容器から支持される。
- ⑦熱シールド板は、冷凍機から供給される 20 K と 80 K 冷媒による二重シールド方式とする。
- ⑧電機子は、セグメントに分割して電圧を高める構造とする。
- ⑨ロータ電機子の冷却は、ホロー導体を用いて純水による強制冷却とする。冷却水の導入は出力軸シャフトにシール部を設けて、純水製造装置、ポンプを介して行なう。
- ⑩集電子として、銅・カーボン固体ブラシを採用する。
- ⑪トルク反作用の支持、磁束の整形及び漏洩磁束の低減のために、ステータ電機子を固定するシールドヨークをロータ電機子の外側に置く。

以上の特徴を持った設計により試作した 480 kW 超電導直流単極電動機の鳥瞰図を Fig. 2 に、諸元を Table 1 に示す。

3.3 性能試験

480 kW 超電導電動機の性能試験における試験装置構成を Fig. 3 に示す。Fig. 4 は、装置全体を示す写真である。本超電導モータの性能試験装置は、出力測定のためのトルク変換器、負荷を与えるための水動力計、超電導モータの機

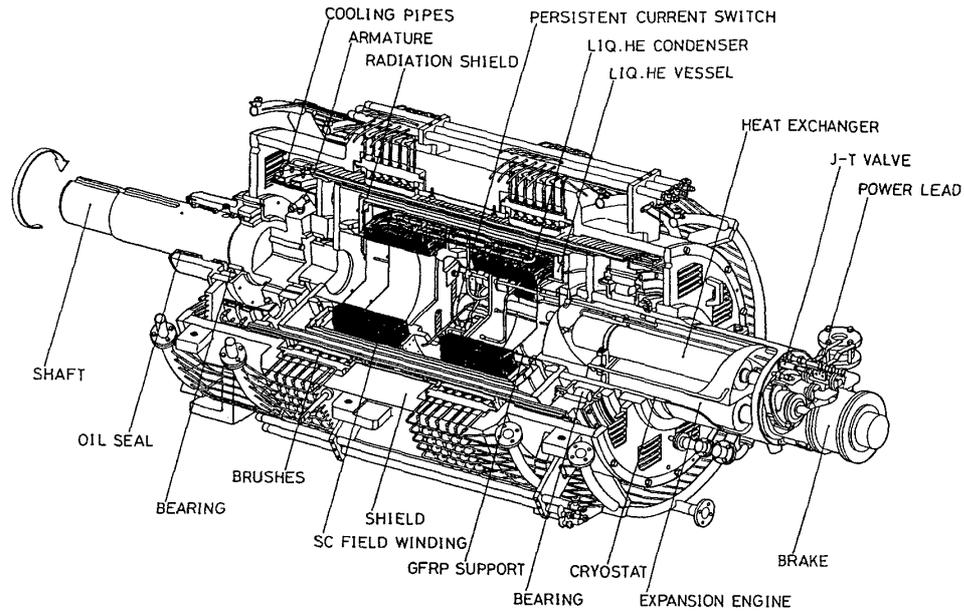


Fig. 2 A bird's eye view of the 480 kW superconducting motor

Table 1 Particulars of the 480 kW Superconducting motor

Type	DC homopolar motor with superconducting field winding	
Output power/speed/efficiency	480 kW / 480 rpm / 82.7 %	
Input voltage/current/power	218 V / 2,660 A / 580 kW	
Size	1,040 mm dia. x 2,865 mm length	
Weight	4200 kg	
Field winding	type	superconducting solenoid coil with persistent current mode
	cooling	liquid helium pool cooling with helium refrigerator
	current	400 A
	effective magnetic flux	0.866 Wb
Armature	type	segmented drum type
	number of segments	stator armature : 60 rotor armature : 150
	induced voltage	208 V at 480 rpm
	cooling	water cooling
Current collector	type	solid brush type
	number of brushes	5 x 120
	current density	41.5 A/cm ²
	brush pressure	air cylinder type
Loss	mechanical loss	72.4 kW
	electrical loss	27.3 kW
	total	99.7 kW

械損失測定, 集電子特性測定のためのモータ, 及び各種計測系配線, 水冷却配管, 電源配線などから構成される。

480 kW 超電導電動機を構成する主要機器である超電導界磁コイル, 電機子, 集電子の単独性能確認試験を終了した後, 直流単極電動機としての特性試験を実施した。試験手順は次の通りとした。

①超電導界磁コイル, クライオスタット, 冷凍機各部温

度がコイルを超電導状態に維持できる所定の値であることを確認する。

②超電導界磁コイルを励磁電流 380 A にて永久電流モード励磁する。

③集電ブラシ圧力が 600 g/cm² となるように, ブラシ圧力設定用空気圧縮機を作動させ, ガス圧をかける。

④電機子, 集電子の機械損失, 電気損失による発熱を除去するための純水冷却循環装置を起動する。また, 負荷装置としての水動力計への水循環装置も起動する。このとき, 負荷設定用の水路切り替えバルブは全閉としておく。

⑤超電導電動機運転用電機子電源 (定電圧直流電源) を起動し, 定電圧モードにて, 電機子回路へ通電する。

⑥電動機の起動を確認した後, 電機子電圧を上昇させ, 電動機回転数を定格 480 rpm に設定する。

⑦負荷装置としての水動力計の負荷設定用の水路切り替えバルブ操作ボタンにより, バルブを開け始め負荷を加えてゆく。このとき, 電機子電源は定電圧モードとすることによって負荷に応じて電機子電流が増加し, 一定回転数での電動機運転が出来る。

上記の運転操作にしたがって, 本 480 kW 超電導電動機の出力行を行った。Fig. 5 に, 回転数 480 rpm 一定の条件で, トルク変換器によって測定した出力トルクと電機子電流との関係を示す。図中の○印が出力トルクの実測値であり, ×印は電動機自身の損失トルクである。電機子電流 2,610 A にて最大 8,650 N・m のトルクを出力した。損失トルクは, 出力にほとんど依存せず, 1,500~2,000 N・m であった。

直流電動機の発生するトルクは次式で表される。

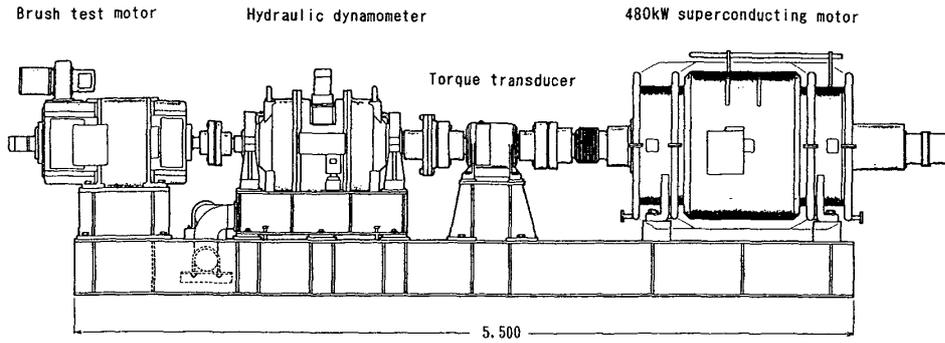


Fig. 3 The test apparatus of the 480 kW superconducting motor

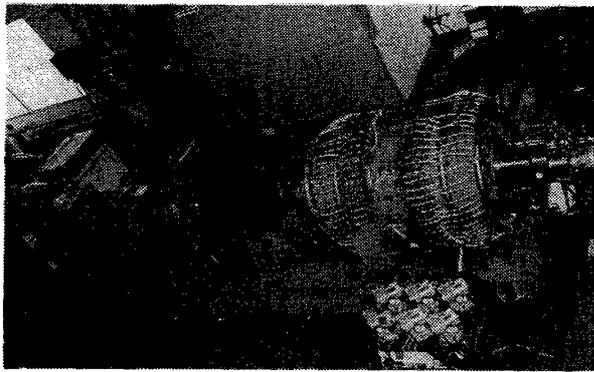


Fig. 4 A photograph of the 480 kW superconducting motor

$$T = \frac{P \cdot Z \cdot \Phi_e \cdot I_a}{2 \cdot a \cdot \pi}$$

ここで、記号は次の諸量を示す。

T : 発生トルク; (N·m)

$2P$: 極数 (=1)

$2a$: 並列回路数 (=2)

Z : 導体数 (=60)

Φ_e : 有効利用磁束; (Wb)

I_a : 電機子電流; (A)

超電導界磁コイル電流 380 A のとき、 $\Phi_e = 0.832$ (Wb) であるから、発生トルクと電機子電流の関係は次式となる。

$$T = 3.97 \cdot I_a$$

この関係式による発生トルクから、測定した出力トルクの値を引いた値が損失トルクである。本超電導電動機の損失トルク的设计値は、機械損失が 72.4 kW であるので、回転数 480 rpm のとき 1,440 N·m である。この设计値に対して実測値が 1,500~2,000 N·m で、5~38% 大きな値をとっている。この原因は、機械損的设计値が集電ブラシ 1 個の測定結果から求めたものであるため、実機では 600 個同時使用している結果、全体の誤差が大きくなったものと考えられる。

Fig. 6 に、定格回転数 480 rpm における出力 (kW) と電

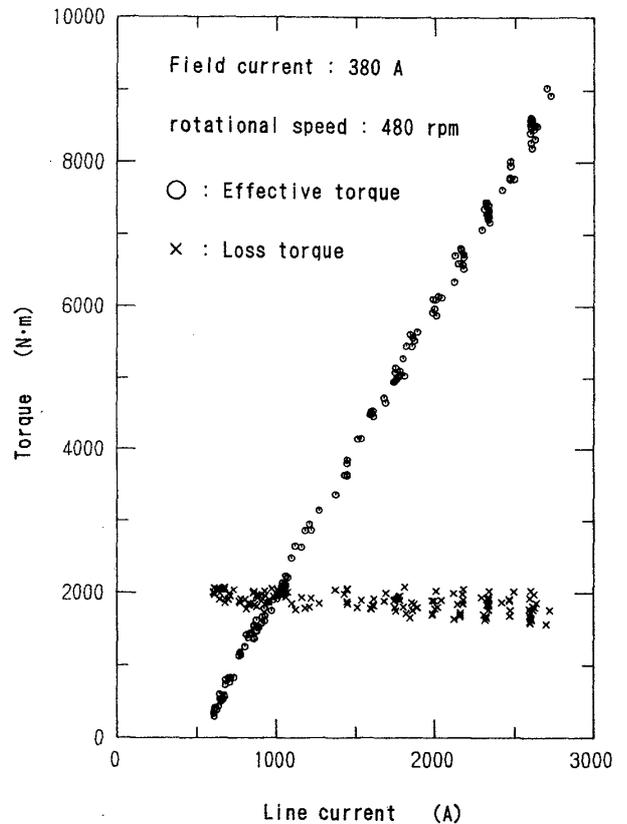


Fig. 5 Torque characteristic (torque vs. line current at 480 rpm)

機子電流の測定結果を示す。電機子電流 500 A にて、480 rpm の無負荷運転し、回転数一定 (電機子電圧一定) の条件で電機子電流を増加させ、電機子電流 2,610 A にて、出力 435 kW が得られた。この間、電機子電流に比例した出力が発生できている。Fig. 7 は、効率 (電動機出力を電機子入力で割った値) と出力の関係を示す。出力 400 kW 以上での効率は、およそ 80% であった。この値は設計値に対して 2% 程度低い値である。この原因は集電ブラシの摩擦損失が設計値よりも大きくなったことにある。全損失の 80% がブラシの摩擦損失であることから、超電導電動機における低損

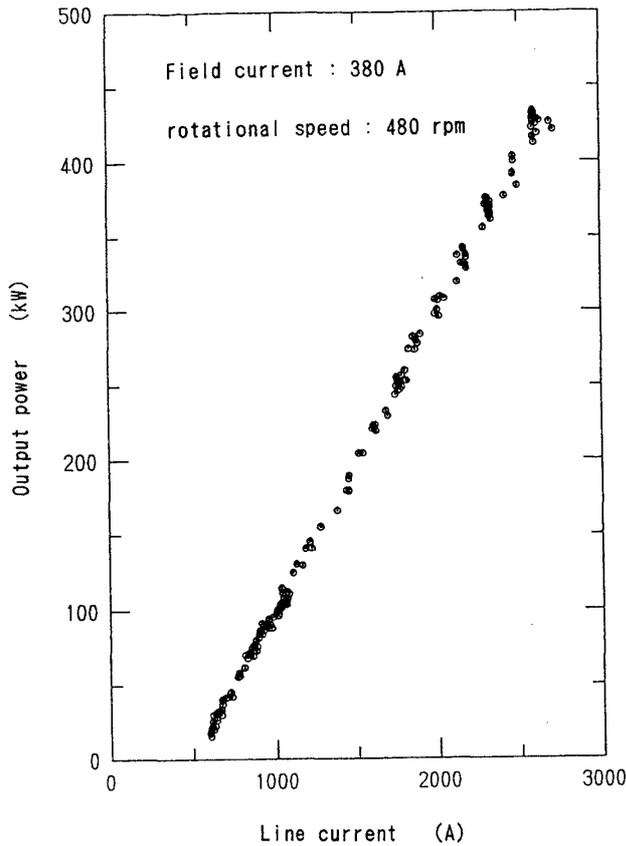


Fig. 6 Output characteristic (output power vs. line current at 480 rpm)

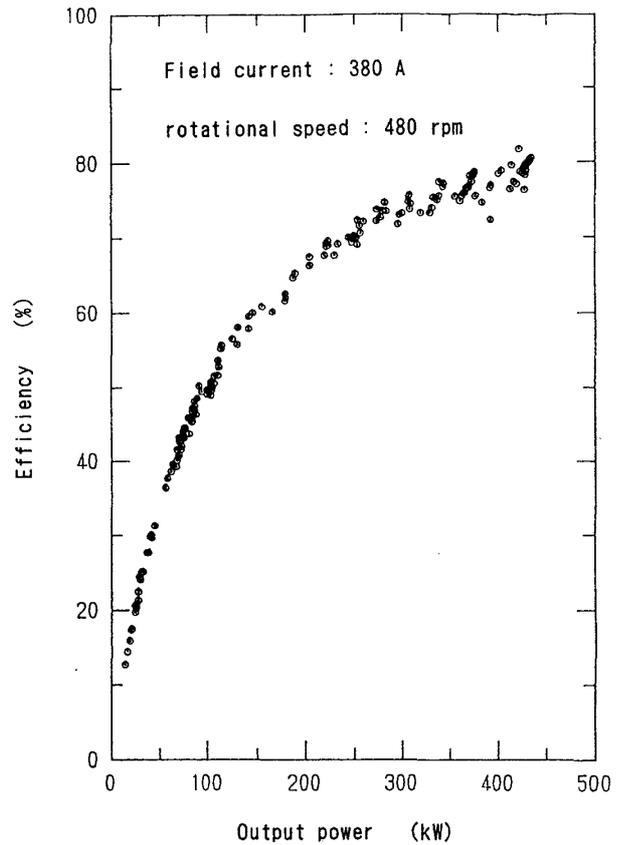


Fig. 7 Output characteristic (efficiency vs. output power at 480 rpm)

失の集電子開発の重要性が強く認識された試験結果である。

Table 2 に、出力 19 kW (無負荷相当) と 435 kW における電動機パラメータの実測値を示す。同時に、出力 435 kW での設計値も併記している。機械損失が設計値よりもおよそ 10% 増加しているが、ほぼ設計値に一致した試験結果が得られたと判断できる。

3.4 試作機の性能試験結果に対する考察

出力 480 kW/480 rpm の超電導直流単極電動機を試作し、設計とほぼ一致した性能試験結果が得られた。また、3.1 節に示した本試作機の開発研究目標を、ほぼ達成することができた。ただし、以下の項目については、まだ未確認である。

- ① クライオスタット内の超電導界磁コイル支持構造が動揺、傾斜、衝撃に対して十分安全であること。
- ② 長時間運転に対して各要素機器及びシステム構成機器の安全性が十分であること。

本超電導電動機は、超電導界磁コイルを永久電流モードで励磁し、冷却用液体ヘリウムを小型のヘリウム冷凍機によって凝縮再液化する方式に大きな特徴がある。超電導電動機の出力運転中、本方式による超電導界磁コイルの冷却、励磁が安定して行えたことは、将来の超電導電気推進システムの実用化に向けて大きく前進したものと考えられる。

Table 2 Design and operating parameters of the 480 kW superconducting motor

Parameters	Design	without load	with load
Output power (kW)	435	19	435
rotational speed (rpm)	480	480	480
torque (N·m)	8,650	380	8,650
Input power (kW)	535	125	542
line voltage (V)	208	200	207.5
line current (A)	2,570	632	2,610
Field winding current (A)	380	380	380
magnetic flux (Wb)	0.823	0.823	0.823
induced voltage (V)	197.5	197.5	197.5
Brush current (A)	1,285	316	1,305
current density (A/cm ²)	40.2	9.8	40.8
temperature (°C)	50	50 ~ 80	60 ~ 110
Loss mechanical loss (kW)	72.4	104	81
electrical loss (kW)	25.7	2	26
total loss (kW)	98.1	106	107
Efficiency (%)	81.3	15.2	80.2

しかしながら、実用化に至るまでには、まだ多くの解決すべき課題がある。本電動機試験を通じて得られた今後の課題として次の点があげられる。

- ① 超電導界磁コイル、クライオスタット、冷凍機システムの長時間安定性、信頼性を確保するための要素開発。
- ② 超電導界磁コイル、クライオスタット、冷凍機の振動

に対する安定性, 信頼性を確保するための要素開発。

- ③電動機の小型化を図るための超電導界磁コイルの強磁場化の開発。
- ④損失が小さく, 保守性の良い集電機構の開発。
- ⑤電動機の軽量化を図るための磁気シールド, 軸, トルクチューブ等を対象とした新材料開発。

4. 排水量型超高速船への適用

船型の如何を問わず, 小型, 軽量, 大出力化は船用推進プラントの願望であるが, 特に従来の軸系配置の制約から解放されて船型設計の自由度を確保することを目標とする本開発研究にとっては重要である。

元来直流機と交流機を比較すると, 交流機がこの目的に合致しているが, 交流機には特有の交流損失の問題があり, 超電導では冷却系に及ぼす影響を考慮しなければならない。また, 小型軽量化を最優先とするならば, 界磁コイルのみならず, 電機子コイルをも超電導化する全超電導同期電動機を考えることができる。この方式は国内外を通じて極めて情報が少ないが, これを含めて, 直流, 交流の問題について電動機単体及び付帯設備について概念設計を行い, これらの結果から実用上最も望ましい推進プラントの型式を選定した。

本章では合計出力約 15 万馬力と仮定した時の各主要要素の検討結果について述べ, 次いで超高速船性能上船体部より要求される出力に対する計画について述べることにする。

4.1 推進プラントの主要要素の検討

15 万馬力を 3 軸に配分して, その出力配分はセンター軸, 両ウイング軸にて 1:3:1 とした。すなわち, センタ

ー軸用電動機で 63,000 kW, 両ウイング軸用電動機で 21,000 kW とした。

4.1.1 超電導推進用電動機の検討

(1) 全超電導交流同期電動機

液体ヘリウムの給排機構が回転軸上に必要となり, 複数基のタンデム配置が無理であるので, センター軸は 63,000 kW, 120 RPM 1 基, ウイング軸は, それぞれ 21,000 kW, 120 RPM 1 基とし, 概念設計を行った。

紙数の関係上, これらの概念設計図は省略する。

(2) 超電導直流単極電動機

主軸用電動機は 21,000 kW, 120 RPM 3 基構成のタンデム, ウイング軸はそれぞれ 21,000 kW, 120 RPM 1 基とし, 概念設計を行った。超電導単極直流電動機 of 概念設計図を Fig. 8 に示す。

(3) 超電導電動機の諸元の比較

交流/直流両方式の概念設計に基づいた電動機単体の諸元を Table 3 に示す。

4.1.2 超電導発電機の検討

電動機と発電機は各々が直流型と交流型とあり, その組合せは各種考えられる。常電導では「AC 発電機+AC 電動機」の組合せが保守及び制御上の優位性より最良とされ実績も多くなってきた。一方, 超電導 (超電導発電機と超電導電動機の組合せ) の現状では保守及び制御上の問題点が明らかでないので主として発電機単体の問題点, 特徴を評価することにした。評価に当り, 下記の交流超電導発電機/直流超電導発電機単体の概念設計を行った。

交流発電機……23,300 kW×3,600 RPM

超電導交流同期発電機

5 基

直流発電機……23,300 kW×600 RPM

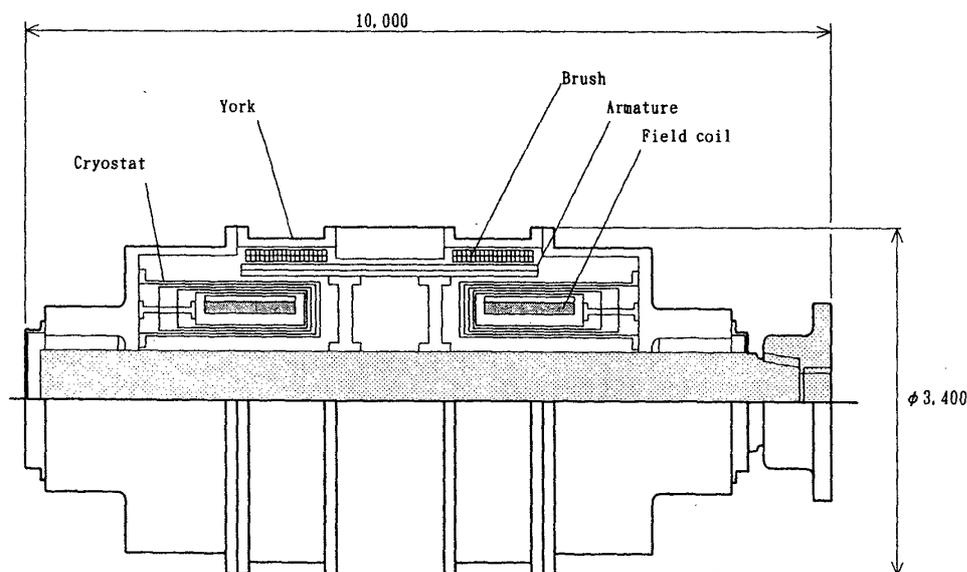


Fig. 8 Superconducting D.C. homo-polar motor (21,000 kW/120rpm)

Table 3 Comparison table of superconducting motor for ship propulsion

Particulars	Main-propulsion motor		Ving-propulsion motor	
	A. C motor	D. C motor	A. C motor	D. C motor
①Motor Type	Fully superconducting synchronous motor	Superconducting homopolar D. C motor	Fully superconducting synchronous motor	Superconducting homopolar D. C motor
②Motor Output				
Output power (KW)	63,000 × 1	21,000 × 3	21,000	21,000
Rotational Speed (rpm)	120	120	120	120
③Field coil				
Type	Race-track	Split-solenoid	Race-track	Split-solenoid
Number of Poles	8-poles	Homo-pole	8-poles	Homo-pole
Max. flux density (T)	6.33	8.0	6.33	8.0
Cooling method	Liquid helium	Liquid helium	Liquid helium	Liquid helium
④Armature coil				
Type	Super-conducting	Normal-conducting	Super-conducting	Normal-conducting
Current	A. C 3-phase, 8Hz	Direct current	A. C 3-phase, 8Hz	Direct current
Cooling method	Liquid helium	Water	Liquid helium	Water
⑤Motor dimension and weight				
Width (mm)	2,500	3,400	2,300	3,400
Height (mm)	2,800	3,800	2,700	3,800
Length (mm)	16,200	10,000	11,000	10,000
Weight (ton)	350	330	100	330
⑥Helium consumption rate (l/hr)	630	28	210	28

超電導直流単極発電機

5基

(1) 超電導交流同期発電機

超電導交流同期発電機は推進用電動機とは異なり外径寸法の制約条件はない。従って、回転子(界磁コイル)のみを超電導化し、固定子(電機子コイル)は常電導のままとした。

交流同期発電機単体は、23,300 kW, 3600 RPM, 60 Hz とし概念設計を行った。

(2) 超電導直流単極発電機

直流発電機は直流電動機と同じ外部円筒型超電導直流単極型とした。最初、交流同期発電機と同一仕様の23,300 kW, 3,600 RPMにて概念設計をした。

これは同一トルクの交流同期発電機との体格比較を目指したもののだが、電機子ブラシ位置における回転電機子の周速度が約260 m/secとなり、給電性能上、無理と判った。そこで回転数を落し出力定格23,300 kW, 600 RPMにして概念設計を実施した。600 RPMでも回転電機子の周速度は約60 m/secでありブラシ給電可能な限界速度となる。回転数を低下させてもトルク上昇で界磁コイルが大きくなるため周速度は比例では降下しない。

(3) 超電導発電機の諸元の比較

交流/直流両方式の概念設計に基づいた発電機単体の諸元の比較を Table 4 に示す。

4.2 冷却設備の検討

超電導電動機及び超電導発電機を搭載した船舶には交流・直流方式に拘らず冷却設備が必要である。要求される冷却設備のスペースを求め、本船に収容可能かどうかを検討した。冷却設備の型式と規模は超電導電動機及び超電導発電機の交流・直流方式によって異なるので概念設計を通

じて得た知見に基づき組合せを検討し、下記の3ケースを検討対象とした。

超電導電動機

超電導発電機

<CASE-1> 直流単極電動機
(5基合計出力 ; 105,000 kW)

直流単極発電機
(23,300 kW × 5基)

<CASE-2> 全超電導同期電動機
(3基合計出力 ; 105,000 kW)

交流同期発電機
(23,300 kW × 5基)

<CASE-3> 直流単極電動機
(5基合計出力

交流同期発電機
(23,300 kW × 5基)

Table 4 Comparison table of superconducting generator

Particulars	A. C Generator	D. C Generator
①Generator Type	Superconducting Synchronous generator	Superconducting Homopolar D. C generator
②Generator Output		
Output (KW)	23,300	23,300
Rotational speed (rpm)	3,600	600
③Field coil		
Type	Race-track	Split-solenoid
Number of poles	2-poles	Homo-pole
Cooling method	Liquid helium	Liquid helium
④Armature coil		
Type	Normal-conducting	Normal-conducting
Current	Direct current	Direct current
Cooling method	Water	Water
⑤Gene. dimension and weight		
Width (mm)	1,300	2,600
Height (mm)	1,500	3,000
Length (mm)	4,700	5,500
Weight (ton)	24	120
⑥Helium consumption rate (l/hr)	25	25

; 105,000 kW)

(1) ヘリウム消費量と設備能力

上記3ケースにおけるヘリウム消費量及びヘリウム再凝縮用熱負荷を Table 5 に示す。この消費量または熱負荷を基に各ケースでの設備の冷却能力を設定した。

(2) 冷却設備規模

冷却設備の規模検討においては条件を揃える必要が有り下記①~④を考慮した。

- ①前記の冷却能力を満足すること。
- ②液化機又は冷凍機の故障時にヘリウムが回収出来ること。
- ③発電機又は電動機の故障時にヘリウムが回収出来ること。
- ④液化機又は冷凍機が1機のみ故障した時にも液体ヘリウムを供給出来ること。

3ケースにおける設備サイズと設備重量を Table 6 に示す。

(3) 冷却設備の比較

<CASE-1>DC 発電機+DC 電動機

冷却設備としては再凝縮用冷凍設備が発電機用に5基、電動機用に5基が必要となる。また冷却関連の付帯設備としてヘリウム回収設備が必要となるが3ケースの組合せでは最も小型設備となる。

<CASE-2>AC 発電機+AC 電動機

大型ヘリウム液化設備が必要となる。このケースではコンテナスペースがCASE-1と比較して55%減少し、コンテナ船としての成金が非常に困難となる。

<CASE-3>AC 発電機+DC 電動機

AC 発電機用にヘリウム液化設備が必要になる。DC 電動機用に再凝縮用冷凍機設備が5基必要になるが、このケースでは上下コンテナスペースがCASE-1と比較して各々15および35%減少する。

4.3 推進システムの比較

(1) 推進用電動機の比較

以上、概念設計した全超電動交流同期電動機と超電導直流単極電動機の電動機単体の検討結果を比較すると Table 7 の通りとなる。

常電導では一般的に、<CASE-2>「AC 発電機+AC 電動機」の組合せが保守及び制御性に優れ実績も多い。超電導においても、電動機単体をとらえた場合は小型軽量化されて魅力的だが、<CASE-2>の組合せでは大型ヘリウム液化設備が必要となり占有面積が大きく、超高速コンテナ船の成立において致命的となる。

<CASE-1>「DC 発電機+DC 電動機」及び<CASE-3>「AC 発電機+DC 電動機」での冷却設備は船内配置上設置可能な範囲に収まっている。この点が電動機選定の大きな理由となり、推進電動機は直流型とならざるを得ない。

(2) 発電機の比較

以上、概念設計した超電導交流同期発電機と超電導直流単極発電機の発電機単体の検討結果を比較すると Table 8 の通りとなる。

超電導同期発電機と超電導直流発電機の単体を比較すると後者は低速化せざるを得なく寸法、重量は格段に大きくなる。又、漏洩磁界、ケーブルサイズの観点からも同期発電機が望ましい。これらの理由により発電機は交流型の同

Table 5 Liquid helium consumption rate and heat load for helium recondensing refrigerator

<CASE> Combination of generator and motor	<CASE-1> D.C generator and D.C motor	<CASE-2> A.C generator and A.C motor	<CASE-3> A.C generator and D.C motor
①Liquid helium consumption rate (# /hr)			
Superconducting motor	N/A	1.050	N/A
Superconducting generator	N/A	125	125
Total	N/A	1.175	125
②Heat load for recondensing refrigerator (W)			
Superconducting motor	100	N/A	100
Superconducting generator	100	N/A	N/A
Total	200	N/A	100
③Cooling facilities and capacity to be provided onboard (# /hr, W)			
Helium liquefier	N/A	1.400	150
Helium refrigerator	200	N/A	100

Table 6 Cooling facilities dimensions and weight

<CASE> Combination of generator and motor	<CASE-1> D.C generator and D.C motor	<CASE-2> A.C generator and A.C motor	<CASE-3> A.C generator and D.C motor
①Helium liquefier facilities			
Dimensions (m)	N/A	55×15×8	35×15×5
Weight (ton)	N/A	487	221
②Recondensing refrigerator facilities			
Dimensions (m)	0.8×1.5×10	N/A	0.8×1.5×5
Weight (ton)	10	N/A	5
③Helium recovery facilities			
Dimensions (m)	15×15×5	N/A	N/A
Weight (ton)	100	N/A	N/A

Table 7 Comparison table of studies on propulsion motors

項目	全超電導交流同期電動機	超電導直流単極電動機
軽量小型化	優れる 総重量で約550TON	劣る 総重量で約1,650TON
漏洩磁場	優れる	劣る
冷却設備	不利 * AC 発電機との組合せで大型ヘリウム液化設備が必須である (800W2)	有利 * DC 発電機との組合せで回収設備必要 (200W2) * AC 発電機との組合せで液化設備必要 (500W2)
給電機構	有利 * 給電ブラシ不要	不利 * 給電ブラシ必須
技術課題	多い * 技術上の問題点及び克服すべき R & D 項目が多い	少ない * 大電流ブラシ、電機子の課題中心

Table 8 Comparison table of studies on generators

項目	超電導交流同期発電機	超電導直流単極発電機
軽量小型化	優れる *重量は1基で約25TON	劣る *重量は1基で約120TON
漏洩磁場	優れる	劣る
冷却設備	不利 *ヘリウム液化設備が必要	有利 *ヘリウム再凝縮冷凍機設備は小型
集電機構	有利 *集電ブラシ不要	不利 *大電流集電ブラシ必須
技術課題	多い *技術上の問題点及び克服すべきR&D項目が多い	少ない *同期発電機に比べて少ない

期発電機を選択せざるを得ない。発電機と電動機の組合せとして提案出来るのは「CASE-3」AC発電機+DC電動機である。しかしながら必要なヘリウム液化設備の規模を勘案すれば、更に常電導型の交流同期発電機が考えられるので検討を行った結果、発電機単体で比較すると、超電導交流同期発電機の場合、常電導交流同期発電機に対して、重量で1/2、容積で1/9となった。超電導界磁コイルの冷却に必要なヘリウム液化機を含めると、重量で1.3倍、容積で7倍となり、超電導化のメリットがなくなってしまう。従って、発電機は常電導機とした。

4.4 推進プラントの基本概念

超電導電気推進プラントの主要素として、推進用電動機及び同電源用発電機の交流方式あるいは直流方式について

の単体の概念設計、又、これらの超電導化のための冷却設備について(DC発電機+DC電動機)、(AC発電機+AC電動機)および(AC発電機+DC電動機)の3ケースの組合せについて、ヘリウムの消費量、設備能力、サイズ、重量等について詳細な検討を行った。その結果、下記理由により(常電導AC発電機+超電導DC電動機)の組合せとする。

電動機：単体のみでとらえた場合はDC電動機に比較しAC電動機の方が重量は約30%、最大径は約70%となり、小型、軽量化されるが大型ヘリウム液化設備が必要となり占有面積が大きく、超高速コンテナ船の成立上、致命的となるため、DC電動機を選定することにした。

発電機：単体で比較するとDC発電機は600 r/mに低速化せざるを得なくなるため、AC発電機に対し重量は約5倍、最大径は約2倍となり、AC発電機の方が大幅に小型、軽量化される。AC発電機を超電導機とした場合と常電導機とした場合は単体では超電導機の方が有利であるが冷却設備を含めると発電機は常電導機の方がメリットが多いので常電導AC発電機を選定することにした。

以上の結果をまとめた電気推進プラントの基本概念をFig.9に示す。

4.5 推進プラントの仕様

本節では船体、機関、電気の初期検討の結果をふまえ、50 kts超高速船として要求される船体の主要目について再度 design spiral を回し、1軸2重反転仕様、軸馬力18万psとして再計画を行った。

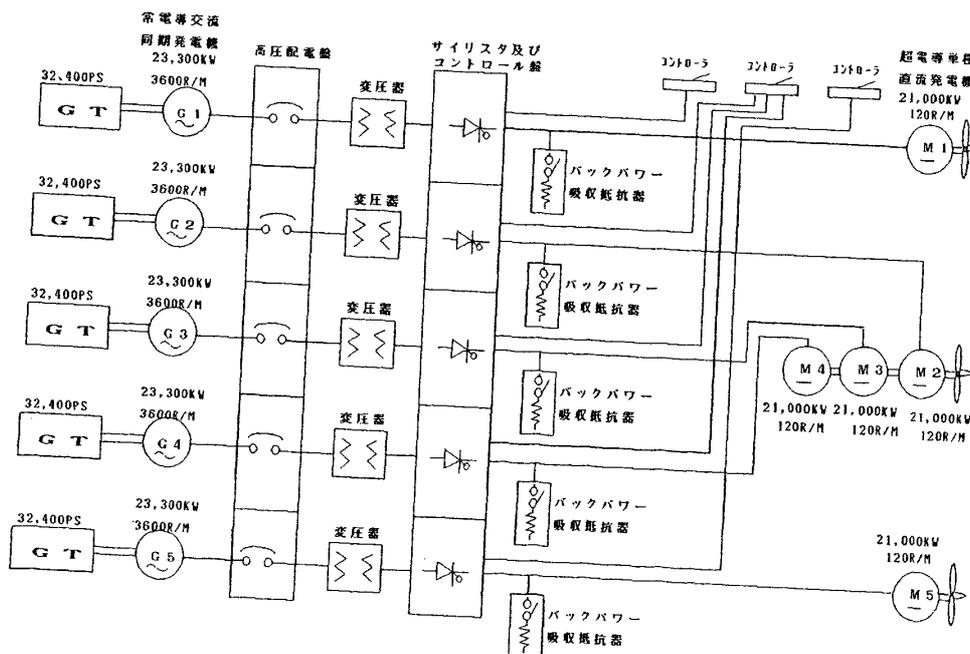


Fig.9 Functional block diagram of electric propulsion system.

4.5.1 推進プラントの構成

電気推進システムは推進用電動機及び同電源用発電機との組合せの形態により次の3種に分類される。

①直流方式 (直流発電機+直流電動機)

(ワードレオナード制御, 定電流制御等)

②交流方式 (交流発電機+交流電動機)

(一次周波数制御, 二次励磁制御, 低速度電動機のCPP制御等)

③交直併用方式 (交流発電機+直流電動機)

(サイリスタレオナード制御, AC+R+DC制御等)

前節で決定したシステムは, 交直併用方式 (ACG+DCM)であるが, この方式としては, サイリスタレオナード制御方式及びAC-R-DC制御方式の2種がある。両者共DCMを用いるため, トルク特性に優れ大きな相違はないが, AC-R-DC制御方式はACGの界磁制御によりDCMの電圧を制御し, 速度制御を行なうため, 応答性がサイリスタレオナード方式より若干劣ることや, 交流発電機が複雑化することを考慮して制御方式は, サイリスタレオナード制御方式とする。

この方式はサイリスタにより交流を直流に変換するだけでなく, サイリスタの位相制御を行い直流電圧の大きさを変化させて直流電動機の世界制御を行なうものである。以下, サイリスタレオナード制御方式の電気推進プラントの主要構成機器の仕様についてTable 9に示す。

Fig. 10に電気推進システムの系統図を示す。

4.5.2 推進プラントの制御

(1) サイリスタレオナード方式による速度制御

サイリスタレオナード制御による電気推進装置1基分の速度制御ブロックをFig. 11に示す。

制御部の構成は下記の通り。

電機子制御；

速度設定部

フィードフォワード制御部

速度比較部

極性反転部

電流変化率制御部

電機子電流比較部

位相制御部

界磁制御；

界磁電流制御部 (一定制御)

(2) 逆転制御

速応励磁式電動機が実現すれば界磁の極性反転で逆転させるところであるが, 本システムは界磁コイルを超電導化して一定電流を流しているため, 電機子電流の極性を反転することにより逆転制御を行なう方式とする。

(3) クラッシュアスターン制御

クラッシュアスターン時は推進用電機子の電圧をしぼり, 一定時間後電機子回路を正転側より, 逆転側に切り替

Table 9 Particulars of electric propulsion system

主要機器	仕様
(1) 主原動機 型式 台数 定格出力 回転数 燃料消費量 使用燃料油 始動方式	インタークーラ付再生サイクル、 航空転用型ガスタービン (ICRガスタービン) 6台 32,400 PS 3,600 rpm 約140 g/ps-h 軽油、又はA重油 圧縮空気
(2) 発電機 型式 容量 電圧 電流 効率 定格 台数	3相交流ブラシレス同期発電機 全閉型、空気冷却器付き 23,350 kW AC11kV、3相、60Hz 1,532A 80% 2 連続 6台
(3) 推進用電動機 型式 容量 電圧 電流 回転数 台数 制御方式	超電導直流電動機 33,100 kW DC1,950 V 17,682 A 120 R/M 4台 サイリスタレオナード制御方式
(4) 軸系及びプロペラ (a) 軸数 出力 回転数 船尾管軸受 (b) プロペラ 型式 直径	1 (二重反転軸) 132,400 kW (外軸: 66, 200kW, 内軸: 66, 200kW) 外軸: 120rpm 内軸: 120rpm オイル潤滑式、特殊平軸受 固定ピッチプロペラ 外軸 (船首側): 約7.4m 内軸 (船尾側): 約7.0m
(5) 高圧配電盤 型式 電圧 容量 台数	キュービクル AC11kV、3相 1面
(6) 変圧器 型式 容量 電圧 台数	送油水冷式、3相変圧器 3,500 kVA/17,500 kVA - 17,500 kVA AC11kV/1.5kV(Δ)-1.5kV(Y) 連続 4台
(7) サイリスタ及びコントロール盤 型式及び数量	キュービクル 1面
(8) 相間リアクトル盤 型式及び数量	キュービクル 1面
(9) 直流リアクトル盤 型式及び数量	キュービクル 1面
(10) バックパワー吸収抵抗器 容量 電圧 定格 台数	33,100 kW DC1,950 V 30分定格 4台

える。極性を反転した後, 電機子に電圧をかけると, 船体からの逆トルクを吸収し, 推進用電動機は直流発電機として作用する。

船体の慣性エネルギーの吸収方法として回生制動により吸収する場合は, 吸収負荷がないこと及び原動機の許容逆転容量が小さいことにより困難であるため, 吸収抵抗を設

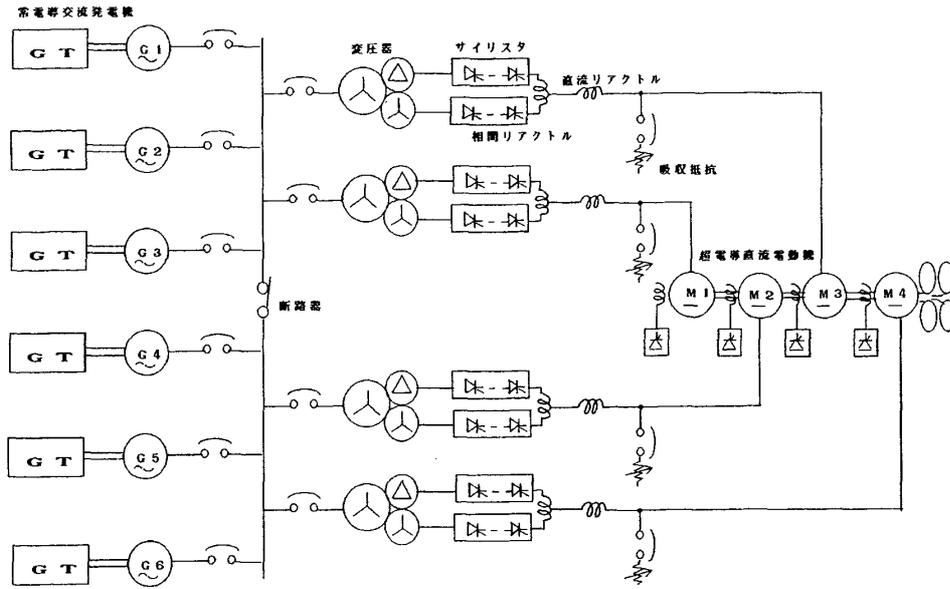


Fig.10 Wiring diagram of electric propulsion system

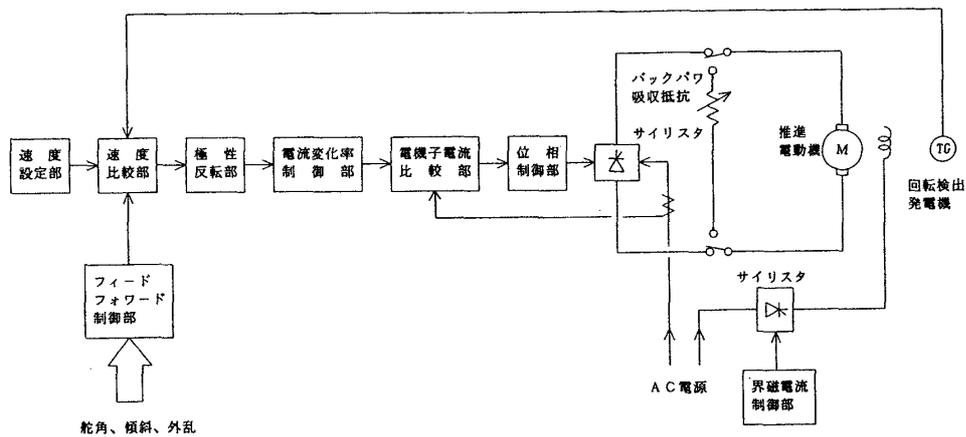


Fig.11 Block diagram of speed control system of superconducting propulsion motor

けて発電制御を行なう方式とする。

プロペラ回転数とプロペラの発生トルクの特性曲線を Fig.12 に示す。

(4) 旋回時の推進軸制御

旋回時にはプロペラトルクが増加するので、船速、舵角、船体傾斜等をあらかじめ考慮して負荷が正常域以内に入るような制御及び許容傾斜以内に入るよう推進軸のトルク制御を行なう。フルスピード時のフル旋回は行なわない。

4.5.3 推進プラントの配置

ガスタービンプラントの機関室配置の概略検討図を Fig.13 に示す。本検討は本船の一般配置の検討に伴い船尾機関室、船尾操舵室として検討したものである。

機関室の配置は本船の特殊船型である幅の狭い甲板を有効に使用するため推進用発電機を上段(第2甲板)に配置した。ガスタービン、発電機の据付位置を上甲板から第2

甲板に、また吸気及び排気装置を船楼甲板から上部コンテナ甲板に下げた事により、主原動機であるガスタービンの吸気および排ガスダクトは短かく、導設が容易となり重量の軽減と重心位置の低下になっている。

また、ガスタービン主機関の特徴である大きな吸気および排気装置はすべて上部コンテナ甲板の船尾側にまとめて配置することにより、船楼甲板は完全なフラッシュ型となり、高速船に適した形状を確保した。下段は冷却海水ポンプおよびその他の補機器類を装備するスペースとした。

超導電動機の冷却装置はセンタ軸用および各ウイング軸用共、夫々の電動機の船首側に装備するものとした。

なお、電気推進用の高圧配電盤、変圧器、サイリスタおよびコントロール盤等は、相当なスペースが必要となるので一般配置に示すごとく第2甲板に機関室外の区画に装備するものとした。

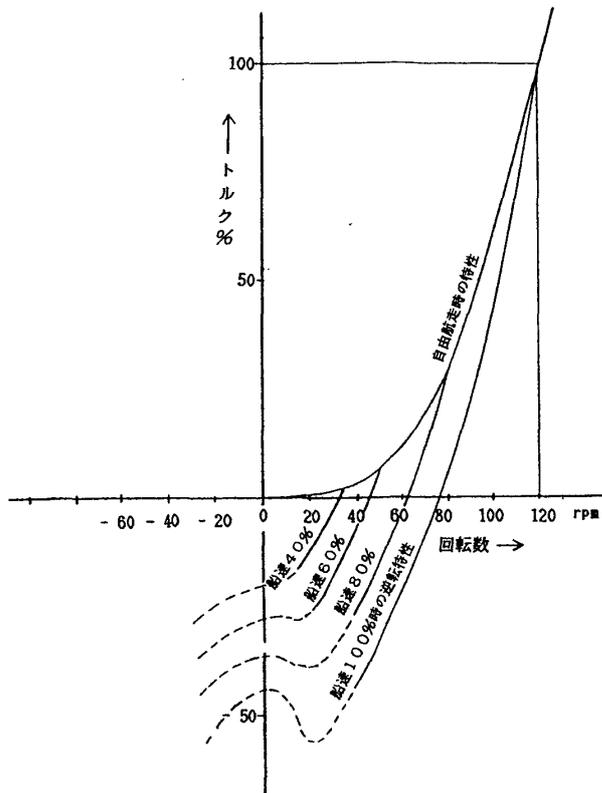


Fig. 12 Propeller Torque Characteristics (Robinson's Curves)

4.6 現状での問題点と将来

本開発における検討の結果、超電導・極低温技術の現状を踏まえ、推進システム全体として最も小型・軽量で、且つ制御性の良い方式として、次の組合せを選定した。

- ①推進用発電機：常電導交流同期発電機
- ②推進用電動機：超電導直流単極電動機
- ③制御方式：サイリスタレオナード制御方式

ここで選定した推進システムを構成する機器において、さらに小型・軽量化、信頼性、保守性を向上させるために、以下に示す項目が検討課題として挙げられる。

①超電導直流単極電動機

- ・信頼性、保守性に優れた集電機構（例えば液体金属集電方式）の開発
- ・構造材（例えば軽量・高強度材）の見直しによる小型・軽量化
- ・ヘリウム冷凍装置の効率、信頼性、保守性、軽量化の向上
- ・高温超電導材の開発と、その適用（強磁場化することによる小型・軽量化）
- ・軽量の磁気シールド材の開発

②制御用電力機器

- ・冷却方式、構造材（例えば軽量・高強度材）の見直しによる小型・軽量化

上記のように、本開発においては常電導交流同期発電機と超電導直流単極電動機によるサイリスタレオナード制御方式を採用したが、各種の発電機、電動機について検討した結果、発電機・電動機単体で比較すると超電導交流機が最も小型・軽量化出来ることが判明している。特に、電動機については、回転数が低いことから界磁コイルのみならず電機子コイルをも超電導化でき小型・軽量に適することが分かった。しかしながら、超電導状態を維持するために必要なヘリウム液化設備が大型化し、システム全体で判定すると超電導交流機の選定は困難となった。従って、舶用に適した小型・軽量のヘリウム液化設備の実現、超電導交流損失の小さい超電導材料の実現、液体窒素温度で利用できる超電導材料の実現などが可能となれば、超電導交流システムが有望となる。現在、常電導電気推進システムとして、同期発電機・同期電動機とコンバータ/インバータ、

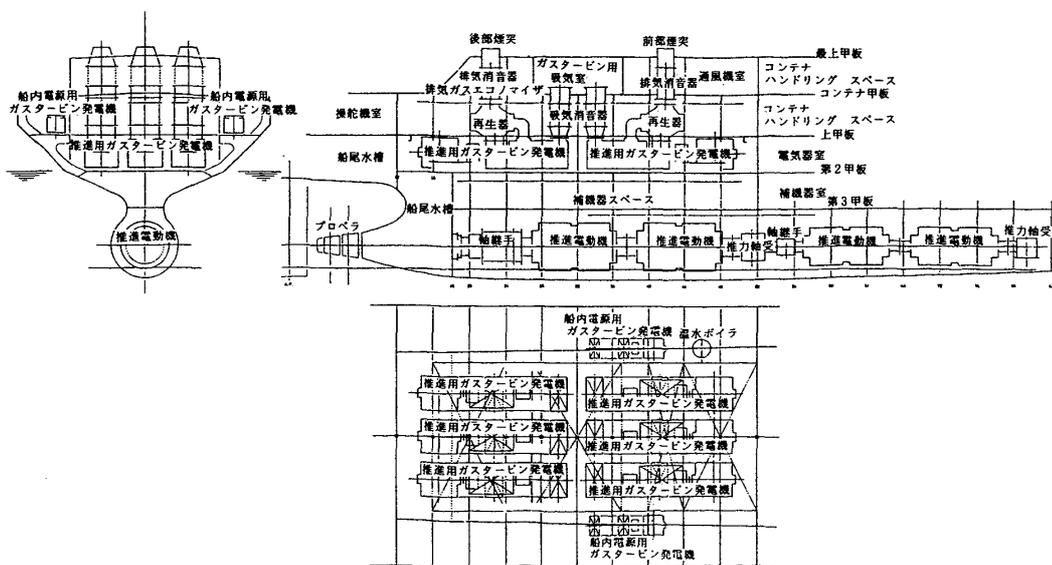


Fig. 13 Arrangement diagram of engine room

またサイクロコンバータとの組合せによる AC-AC 方式が注目されている。これは、一定周波数の電源から広範囲にわたって、高い変換効率で、他の周波数へ変換できる周波数変換器を適用することによって、サイリスタレオナード方式と同等の性能、機能を持ち、悪環境にも適し、かつブラシおよび整流子など機械的摺動部分がないので保守整備の省力化が図れるためである。

このように、電気推進システムの動向に注目すると、超電導電気推進システムにおいても AC-AC システムの適用は必然と考えられる。従って、先ず、本開発の結論である AC-DC システムによる超電導電気推進コンテナ船を実現し、その後、超電導・極低温技術の進展を待って、交流システムへ移行することになろう。ここで、交流システム実現に至る研究開発課題として、次の項目が挙げらる。

- ①小型、軽量、高効率、高信頼性のヘリウム液化機の開発
- ②交流損失の少ない超電導材料の開発
- ③熱伝導率が小さく、高強度のトルク伝達部材の開発
- ④回転界磁巻線の有効冷却方法の開発
- ⑤回転界磁の性能維持方法の開発
- ⑥空隙電機子巻線の支持方法の開発

以上の課題が完結されれば、本試設計の結果よりも更に小型・軽量が達成され、船型設計の自由度も増し、振動、船内環境にも適し、高効率で制御特性も優れ、保守、点検の容易な電機推進プラントの実現が期待される。

5. 結 言

電気推進システムにおける推進用電動機を超電導化することによって、電動機の小型・軽量化が図れる。この利点を生かして、単胴排水量型超高速船型が実現できる。本稿では、出力480kWの超電導電動機を試作、性能試験を実施し、その結果を基礎として、単胴排水量型超高速船の超電導電気推進プラントを試設計した結果について記述した。

480 kW の超電導電動機の性能試験を実施した結果、設計とほぼ一致した性能が得られ、高速の船舶推進用電動機として要求される小型・軽量化に必要な設計手法に関して多くの知見が得られた。また、実用レベルの超電導電動機を実現するために必要な技術課題が抽出できた。この試作開発結果を基礎として、単胴排水量型超高速船に要求される150,000ないし200,000馬力の超電導電気推進プラントを試設計した。推進用電動機及び発電機について、直流機、交流機、及び超電導化に伴うそれぞれの液体ヘリウム冷却設備について比較検討を行い、超電導直流単極電動機と常

電導交流同期発電機の組み合わせが、推進プラントの小型・軽量化に最適との結論が得られた。さらに、この電気推進システムにおける問題点と今後の技術課題を抽出した。

最後に、超電導電気推進システムの利点をより発揮するには、超電導電動機の交流化が期待されることを明らかにした。

本研究開発は、(財)日本船用機器開発協会一住友重機械工業(株)による船用超電導電動機の開発を基礎に、文部省[民間機関等との共同研究]として、横浜国立大学一住友重機械工業(株)で実施したものである。その間、日本船用機器開発協会、日本船舶振興会、並びに運輸省当局の多大な援をいただいた。関係各機関、各位に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 宝田直之助：“新しい推進システム”，第11回造船学会夏季講座，(1985年9月)217。
- 2) 森 弘之：“超電導応用技術”，第14回造船学会夏季講座，(1988年9月)109。
- 3) 外岡幸吉他：“超電導電気推進システム”，日本船用機関学会誌，第16巻，第11号，(1981年11月)58。
- 4) 桜庭順二：“超電導モータについて”，日本造船学会誌，第715号，(1989年1月)36。
- 5) A. D. Applton：“Superconducting D. C. Machines”，IEEE Trans. on Mag., Vol. MAG-13, No.1 (1977) 767。
- 6) H. O. Stevens, Jr.：“Superconducting Machinery for Ship Propulsion”，Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 35, (1990) 539。
- 7) 宝田直之助他：“船用超電導電気推進システムの開発(I)”，住友重機械技報，Vol. 30, No. 89, August (1982) 43。
- 8) 桜庭順二他：“船用超電導電気推進システムの開発(II)”，住友重機械技報，Vol. 31, No. 93, December (1983) 15。
- 9) J. Sakuraba, et al.：“Superconducting DC Motor for Ship Propulsion”，Proceedings of the 10th International Cryogenic Engineering Conference, August (1985) 723。
- 10) 岩田 章，佐治吉郎：“超電導電磁推進船の研究”，船の科学，Vol. 37, No.2 (1984) 38。
- 11) 竹澤節雄：“超電導電磁推進船の開発研究計画について”，日本造船学会誌，第709号，(1988年7月)33。
- 12) Naonosuke Takarada：“Development of a Marine Superconducting Motor and High Speed Ship”，15th meeting UJNR Marine Facilities Panel, May (1988)。