

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

船舶推進機用高温超電導モータの実用化に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-06-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 柳本, 俊之 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1570

博士学位論文

船舶推進機用高温超電導モータの
実用化に関する研究

平成 29 年度
(2018 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

柳本 俊之

博士学位論文

船舶推進機用高温超電導モータの
実用化に関する研究

平成 29 年度
(2018 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

柳本 俊之

目次

要旨	・・・・・・・・・・・・・・・・	I
第1章	超電導回転機	1
1.1	序論	2
1.2	超電導回転機の特長	2
1.3	高温超電導回転機の研究開発状況	5
1.4	船舶推進機用高温超電導モータの実用化への取り組み	6
	参考文献	7
第2章	1 MW 高温超電導モータの開発	9
2.1	序論	10
2.2	1 MW 高温超電導モータ構造と仕様	10
2.3	要素技術開発	13
2.3.1	長尺レーストラック高温超電導コイルの開発	13
2.3.2	クライオスタット・ロータの開発	18
2.3.3	ヘリウム移送継手の開発	19
2.4	モータ出力試験	22
2.5	結論	24
	参考文献	25
第3章	3 MW 高温超電導モータの開発	26
3.1	序論	27
3.2	モータ構造	27
3.3	超電導界磁コイル	29
3.4	クライオスタット・ロータ	32
3.5	電機子コイル	34
3.6	結論	36
	参考文献	36
第4章	3 MW 高温超電導モータ負荷試験	38
4.1	序論	39
4.2	超電導モータ試験設備	39

4.3	一定負荷試験	42
4.3.1	性能試験	42
4.3.2	累積 100 時間耐久試験	43
4.4	変動負荷試験	44
4.5	試験後検査	47
4.6	結論	48
	参考文献	48
第5章	3 MW 高温超電導モータの損失分析技術開発	50
5.1	序論	51
5.2	超電導モータにおける損失	51
5.3	損失評価試験及び解析	53
5.3.1	Open-Circuit 試験と Short-Circuit 試験	53
5.3.2	非回転時のロータ内部計測試験	54
5.3.3	電磁解析による損失予測	55
5.4	損失の分析結果	56
5.5	結論	59
	参考文献	60
第6章	20 MW 級高温超電導モータ向けキーハード技術の開発	61
6.1	序論	62
6.2	船舶推進用大型超電導回転機設計技術	63
6.3	超電導コイル冷却技術	67
6.4	今後の計画	71
6.4.1	超電導コイル冷却技術の検証	71
6.5	結論	72
	参考文献	72
第7章	結論と実用化に向けて	74
7.1	結論	75
7.2	実用化に向けて	78
	謝辞	79
	List of Publications	80

要旨

本博士論文では、船舶推進機用高温超電導モータの実用化への研究開発について行った。以下にその要約を述べる。

第1章においては、商船の環境負荷低減を実現できる船舶推進システム用の革新的なモータとして非常に期待されている超電導モータの要求仕様、特長、研究開発状況、実用化への取り組みを述べた。商船向けの環境負荷低減推進システム用超電導モータへの要求仕様は、高効率、小型、高信頼性、低コストの4点である。大型超電導回転機械の実証機開発状況は、AMSC、Converteam、Doosan、IHI、東京海洋大学が行っており、高効率、小型が実証されており、それに必要な最適設計技術も開発されている。実用化に向けて更に進むためには、残りの要求仕様である高信頼性、低コストを実証し、それに対応した設計技術の開発を行うと共に、大出力向けの要素技術開発を行うこととした。

第2章においては、船舶推進モータの要求仕様である高効率、小型、高信頼性、低コストを満足させるための基本設計技術の確立を目的として行った1 MW 高温超電導モータの開発について述べた。開発した1 MW 高温超電導モータは国内最高の450 kWを達成し、効率は設計値とほぼ同じ97.7% (1 MW 出力) になることが確認できた。この開発により、超電導モータ開発の基礎設計技術である大型レーストラック超電導界磁コイルの設計・製作技術、超電導コイルの熱伝導冷却技術、クライオスタット・ロータの断熱技術、ヘリウム移送継手による低温Heガスの循環技術が確立できた。特に全長1478 mmの大型長尺レーストラック超電導コイルは国内最大の大きさで、高い臨界電流を保持し信頼性のあるコイルの製作が出来た。これにより、高効率、小型、高信頼性を実現できる基本設計技術が構築できた。

第3章においては、第2章において構築できた基礎設計技術を用いて、世界最高クラスの小型化、高効率、高信頼性の実証を目指した3 MW 高温超電導モータの設計について述べた。本設計は、高信頼性を確保し、高効率化、小型化を実現できる新技術を超電導界磁コイル、クライオスタット・ロータ、電機子コイルに適用し、世界トップクラスのトルク体積密度40 kNm/m³を達成し、更に高効率と高信頼性を満足するものとなった。この設計に基づく試作機を完成させ、特許を4件出願した。

第4章においては、小型化、高効率、高信頼性の実証を目的とした3 MW 高温超電導モータの負荷試験について述べた。船舶の実航行状況の変動負荷試験が実施できる設備の導入を行い、一定負荷での性能試験と耐久試験、実航行を模擬した変動負荷試験を実施した。性能試験では、運転領域全体を対象とした効率マップを作成し、最大

出力は 3.02 MW を達成し設計値の最大出力を実証し、耐久試験では、3 MW の定格出力での累積 100 時間運転を問題なく終了した。変動荷重試験では、3 ケースの船舶の緊急衝突回避運行を想定した試験を行い、20 秒での 167 kNm のトルク変化を発生させる厳しい試験であったが、問題なく終了できた。これらの試験終了時のトラックレコードは、3 MW 出力運転時間で 106 時間、全運転時間で 238 時間であった。試験終了の分解検査により主要部品が損傷していないことが確認できた。これにより従来に比べて高い信頼性の実証ができた。

第 5 章においては、損失分析技術開発について述べた。実用化を更に進めるためには、基本にある設計技術の更なる高度化が必要である。超電導モータの特長の 1 つである高効率に関する設計技術では、効率予測技術の精度向上が重要である。そのため、超電導モータの損失分析技術の開発を行った。Open-Circuit 試験、Short-Circuit 試験、非回転時のロータ内部計測試験、磁場解析により 3 MW 出力時の超電導モータの各損失分析を行い、更に 3 MW 高温超電導モータで適用した高効率化技術の効果を検証し、設計段階での予測がほぼ妥当であったことを確認した。電機子コイル端の転移接続、非磁性ティースは損失低減の効果はあったが、信頼性と製造性を考慮して従来型の銅巻線を採用したためジュール発熱損、単一素線の渦電流損が大きくなった。冷却損失については、超電導界磁コイルの発熱損失、電流リード部の熱伝導損失は小さく、磁場転向板、超電導電流リード採用の効果があった。しかし、トルクチューブ熱伝導損失、スライド機構熱伝導損失、電流リード部ジュール発熱損、輻射損失とその他が大きかった。この詳細な損失分析より、今後は効率予測技術の改善及び超電導モータの高効率化が可能となった。

第 6 章においては、大型船舶での実用化を目指したキーハード技術の開発について述べた。超電導モータの実用化は、コスト的にも有利である外航用大型船舶への適用の期待が最も大きい。これに応えるためのキーハード技術として、船舶推進用大型超電導回転機械設計技術、超電導コイル冷却技術の開発を行った。外航用大型船舶向けの 20 MW 級大出力高温超電導モータを対象とし、効率 99 %、トルク体積密度 56 kNm/m³ の世界最高レベルの概念設計を行い、各キーハード技術に対する要求仕様・着眼点を明確にした。超電導コイル冷却技術については、冷凍機・回転子一体型を採用し、負荷変動対応性に優れたヘリウム・ネオン混合冷媒によるサーモマルサイフオン方式冷凍システムを試作した。30 K で 120 W の冷却性能を実証し、冷凍システムについての特許を 2 件出願した。

第 7 章においては、本研究の成果のまとめと今後の実用化への取り組みについて述べた。超電導モータの実用化は超電導線材の開発とも密接に関係している。最近の材料技術の発達に伴い超電導線材の開発も活発に行われており、実用化を加速できる状況

になっている。このような状況では、本研究開発では超電導モータの試作、実証と大きく進むことができた。早期に、超電導モータ実用化を達成することが我々技術者の努めと感じている。今後、更なる新技術と従来からの工業技術の融合により、早期の実用化が達成できると期待されている。

第 1 章

超電導回転機

1.1 序論

近年、地球温暖化、排出ガス、海洋汚染、海洋生態系などの問題がクローズアップされており、商船に関しても環境負荷低減のための規制が強化されている。特に、推進システム関係では、国際海事機関(IMO)等が有害排ガス(NO_x , SO_x , PM)規制、燃費削減規制等を順次強化していくことになっている。

これに対応して船用推進機は、従来、主流であった2サイクルディーゼルエンジンによる推進システムから、新しい環境対応推進システムの適用が進められており、電気推進システムもその1つとして導入が進んでいる。電気推進システムは、環境に対応できるLNG燃料エンジンを動力源とし、二重反転プロペラやポッド推進などの高効率推進システム、推進モータの小型化、機器の最適配置により低推進抵抗船形の採用により燃費が低減できる。

この電気推進システム用モータへの要求仕様は以下となる。

- 1) 高効率
- 2) 小型
- 3) 高信頼性
- 4) 低コスト

超電導モータは、従来モータに比べ大幅な高効率化、小型化が図れるため、商船の環境負荷低減を実現できる船舶推進システム用の革新的なモータとして非常に期待されており、各国では実用化を目指して積極的な研究開発が行われている。

1.2 超電導同期回転機の特長

超電導同期回転機の基本構造は、トルクを発生させる磁界の方向が径方向を向いているラジアルタイプと、回転軸方向を向いているアキシアルタイプに分類でき(Fig. 1-1)、更に、磁界が回転子側にある回転界磁タイプと、電機子が回転子側にある回転電機子タイプに分類できる。超電導モータもラジアルタイプ、アキシアルタイプの両タイプの実証機開発が行われている。

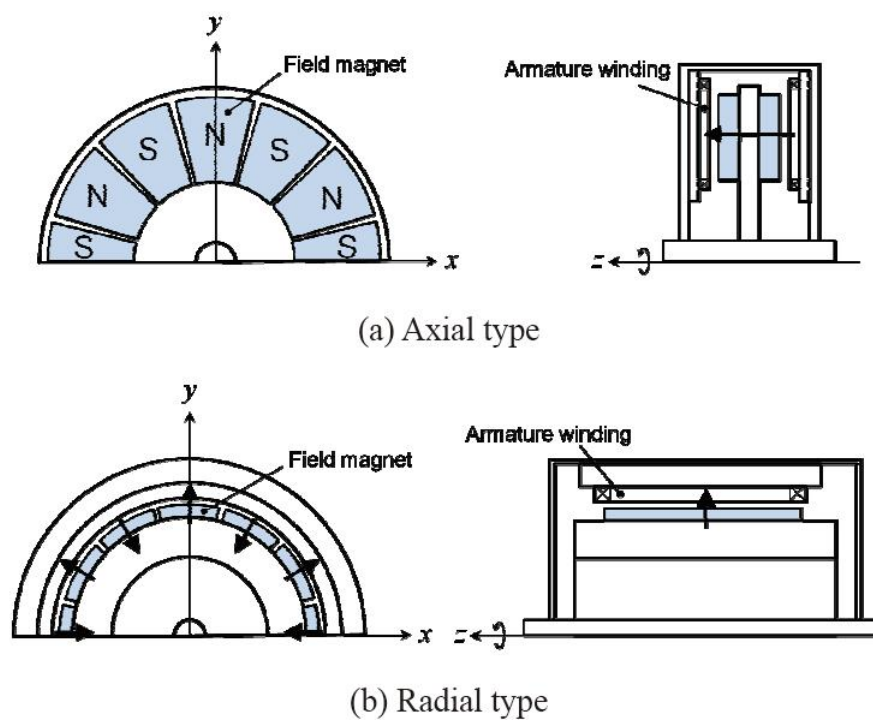


Fig 1-1. 回転機の基本構造（界磁主成分の向きによる分類）[1]

超電導回転機械の最も一般的な構造であるラジアル・回転界磁タイプを Fig. 1-2 に示す。回転側(Rotor)に高温超電導界磁コイル(high-temperature superconducting (HTS) filed coil)が配置されている回転界磁タイプで、界磁コイルで発生する界磁の方向が径方向であるラジアルタイプである。

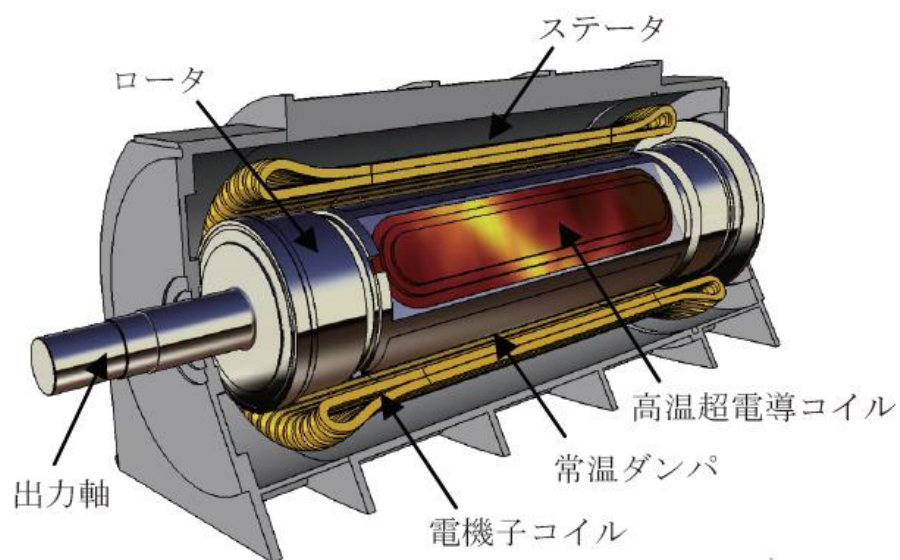


Fig. 1-2. 超電導モータ基本構造[2]

このラジアル・回転界磁タイプ同期機のトルク T [Nm]は、以下の式で表すことができる。

$$T \propto B \times AC \times D^2 \times L \quad (1.1)$$

B :ギャップ磁束密度（磁気装荷）[T]

AC :電気装荷[A/m]

D :回転子外径[m]

L :固定子鉄芯長[m]

$D^2 \times L$ は回転機の体積に相当し、これを一定にしてトルクを増大させるためにはコイルでギャップ磁束密度と電気装荷を増やす必要がある。超電導回転機では、超電導線材を採用した界磁コイルでギャップ磁束密度を大きくし、高トルクを達している。超電導回転機械の特長は以下となる。

1)大容量化、小型・軽量化

超電導回転機のトルクは、式(1.1)に示したように、回転機のサイズが同じなら、ギャップ磁束密度と電気装荷に比例するので、高電流密度の超電導界磁コイルの高ギャップ磁束密度により、高トルクが可能である。通常の回転機では高々1 T程度であるが、超電導コイルの採用により磁束密度が数倍程度に大きくなり、大幅な高トルク化が可能である。特に、船舶推進機用モータは低速・高トルクが求められているので、超電導化により大幅な小型が可能である。Fig 1-3 に低速の通常電動機と超電導電動機の電動機径の比較を示す。大出力になるほど電動機径が小さくなる。

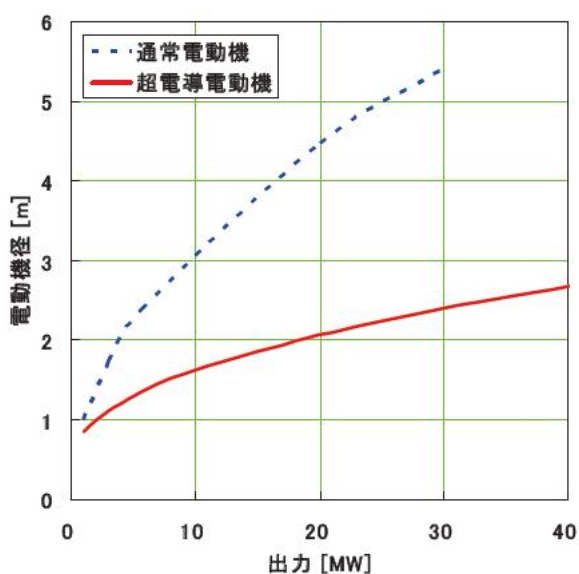


Fig 1-3. 通常電動機と超電導電動機の電動機径比較[2]

2)高効率

超電導線材を採用した界磁コイルでは、超電導線材の電気抵抗が非常に小さいため、高電流によって発生するジュール損失が大幅に低減できる。また、小型・軽量化により機械損や漂遊損なども低下し、高効率化を図ることができる。

1.3 高温超電導回転機の研究開発状況

超電導回転機械の研究開発は、1986 年の高温超電導材の発見以来、幅広い分野で盛んに行われている。特に 2000 年以降に、米国、欧州、日本、韓国、中国で、船舶推進機、水力発電機など向けに MW クラスのモータ、発電機の実証機が開発されている。更に、近年は、10 MW 級洋上風力発電機、航空機推進機の基本設計が行われている[3]。

この中で実証同期機開発の状況は、以下となる。米国の American Superconductor Corporation(AMSC)が船舶推進機用として、2004 年に 5 MW モータ、230 rpm を開発した[4]、[5]。更に、2007 年に 36.5 MW モータ、120 rpm を開発し、2008 年に 36.5 MW の full-power テストを成功させた[6]。いずれも、ラジアル・回転界磁タイプで BSCCO 線材を用いた界磁コイルを採用している。ドイツの Siemens は船舶推進機用として、2010 年に 4 MW モータ、120 rpm を開発した[7]、[8]。Converteam は、2010 年に 1.7 MW、214 rpm の水力発電用発電機の超電導回転子を開発し、運転を行っている[9]。同じく、ラジアル・回転界磁タイプで BSCCO 線材を用いた界磁コイルを採用している。Doosan Heavy Industries and Construction(Doosan)は船舶推進機用として、2015 年に 5 MW モータ、200 rpm を開発し、264 kW の出力試験を完了している。ラジアル・回転界磁タイプで 2G (ReBCO)線材を用いた界磁コイルを採用している[10]、[11]。

国内でも船舶推進機用として、2004 年から 2007 年に東京海洋大学のグループが、100 kW モータ、230 rpm を開発した。アキシアル・回転界磁タイプで BSCCO 線材を用いた界磁コイルを採用している[12]。また、IHI は、400 kW モータ、250 rpm の開発を行い、2009 年に定格の 400 kW、24 時間試験を完了させた。アキシアル・固定界磁タイプで BSCCO 線材を用いた界磁コイルを採用している[13]。

実証機開発の状況をまとめると、用途は船舶推進機向けが主である。回転機のタイプは、高温超電導界磁コイルを用いた回転界磁タイプが主である。高温超電導線材は BSCCO 線材が多く、一部新しい 2G (ReBCO)線材を採用している。船舶推進機の要求仕様（高効率、小型、高信頼性、低コスト）の中で、高効率、小型が既に実証されており、それに必要な最適設計技術も開発されている。

1.4 船舶推進機用高温超電導モータの実用化への取り組み

以上でまとめたように、船舶推進機用超電導モータの実用化へ向けた研究開発の現状は、実証機が開発され、要求仕様である高効率、小型は既に実証され、設計技術もある程度のレベルまで達成されている。

実用化に向けて更に進むためには、残りの要求仕様である高信頼性、低コストを実証し、それに対応した設計技術の開発が必要である。特に、最もコストインパクトの大きい超電導線材に関しては、低コスト線材の開発が必須である。また、信頼性と低コストを両立させるためには、出来る限り産業機械で使われている材料とその設計・製造技術を適用することが望ましい。適用先としては、コスト的なメリットを出しやすい大出力機の開発が望まれているが、開発費用の負担が大きくなりすぎるためまずは中出力機での実用化を目指すと同時に大出力向けの要素技術開発を進めることとした。

本論文の構成図を Fig. 1-4 に示す。基本設計技術の確立を目指した 1 MW 高温超電導モータの開発を第 2 章で述べる。その基本設計技術を用いた 3 MW 高温超電導モータの開発とそれを用いた負荷試験、損失分析技術開発を第 3 章から第 5 章で述べる。更に、20 MW 級高温超電導モータ向けキーハード技術の開発を第 6 章で述べる。ただし、低コスト化については新規線材の開発に期待することとする。

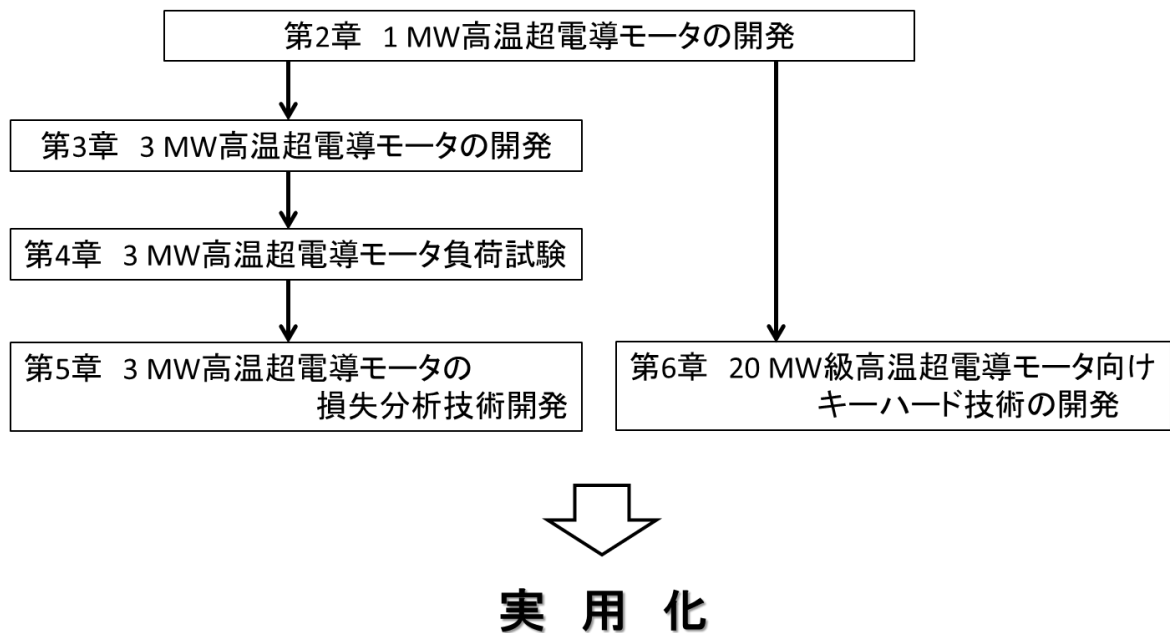


Fig. 1-4. 本論文の構成図

参考文献

- [1] H. Ohsaki, “Technology trends of superconducting rotating machines,” (in Japanese), *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, vol. 47, no. 6, pp. 354–361, 2012.
- [2] K. Umemoto and T. Yanamoto, “Current status of research & development of high-temperature superconducting motor for ship propulsion,” (in Japanese), *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, vol. 47, no. 6, pp. 377–383, 2012.
- [3] K. S. Haran, *et al.*, “High power density superconducting machines – development status and technology roadmap”, *Superconductor Science and technology*, vol. 30, no. 12, Dec. 2017. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/aa833e/meta>
- [4] S. Woodruff, H. Boenig, F. Bogdan, T. Fikse, L. Petersen, M. Sloderbeck, G. Snitchler, M. Steurer, “Testing a 5 MW high-temperature superconducting propulsion motor,” *Proc. 2015 IEEE Elect. Ship Technol. Symp.*, pp. 206-213, Jul. 27 2005.
- [5] G. Snitchler, B. Gamble, S. S. Kalsi, “The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2206 – 2209, Jun. 2005.
- [6] B. Gamble, G. Snitchler, T. MacDonald, “Full power test of a 36.5 M HTS propulsion motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1083 – 1088, Jun. 2011.
- [7] W. Nick, M. Frank, P. Kummeth, J. J. Rabbers, M. Wilke, and K. Schleicher, “Development and construction of a HTS rotor for ship propulsion application,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol.234, part 3, pp. 986–994, 2010, Art. no. 032040.
- [8] W. Nick, J. Grundmann, J. Frauenhofer, “Test results from Siemens low speed, high-torque HTS machine and description of further steps towards commercialisation of HTS machines,” *Physica C*, vol. 482, pp. 105–110, Nov. 2012.
- [9] R. Fair, C. Lewis, J. Eugene, M. Ingles, “Development of an HTS hydroelectric power generator for the Hirschaid Power Station,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, 2010, Art. no. 032008.
- [10] H. Moon, Y. Kim, H. Park, M. Park, I. Yu, “Development of a MW-class 2G HTS ship propulsion motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4,

Mar. 2016, Art. no. 5203805.

- [11] H. Moon, Y. Kim, H. Park, I. Yu, M. Park, “An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, no.3, Feb. 2016, Art. no. 034009.
- [12] D. Sugyo *et al.*, “Bi-2223 field-poles without iron core for an axial type of HTS propulsion motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, no. 3, pp. 1687–1691, Jun. 2009.
- [13] A. Fukaya, T. Tsuda, and T. Oota, “Progress in motors with superconducting armature windings -Axial-gap synchronous motors cooled by liquid nitrogen-,” (in Japanese), *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, vol. 47, no. 6, pp. 370–376, 2012.

第 2 章

1MW 高温超電導モータの開発

2.1 序論

超電導モータは、商船の環境負荷低減を実現できる電気推進システムのモータとして非常に期待されており、実用化に向けて積極的な研究開発が、各国で行われている。梅本らは推進モータの要求仕様である高効率、小型、高信頼性、低コストを満足させ、早期の実用化を達成するための基本設計技術の確立を目的として、1 MW の高温超電導モータの開発を実施した[1]、[2]。

川崎重工業株式会社は既に環境負荷低減を実現できるポッド式電気推進システムを開発しており、これに高温超電導モータを適用することにより推進システムの更なる高効率化が達成できる。本モータはポッド式推進システムへの適応を想定して開発を行った。Fig. 2-1 に Kawasaki “PODPELLER”を示す。

なお、本開発は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「船舶用高温超電導モータ内蔵ポッド推進システムの研究開発」（2007～2009 年）として実施したものである。

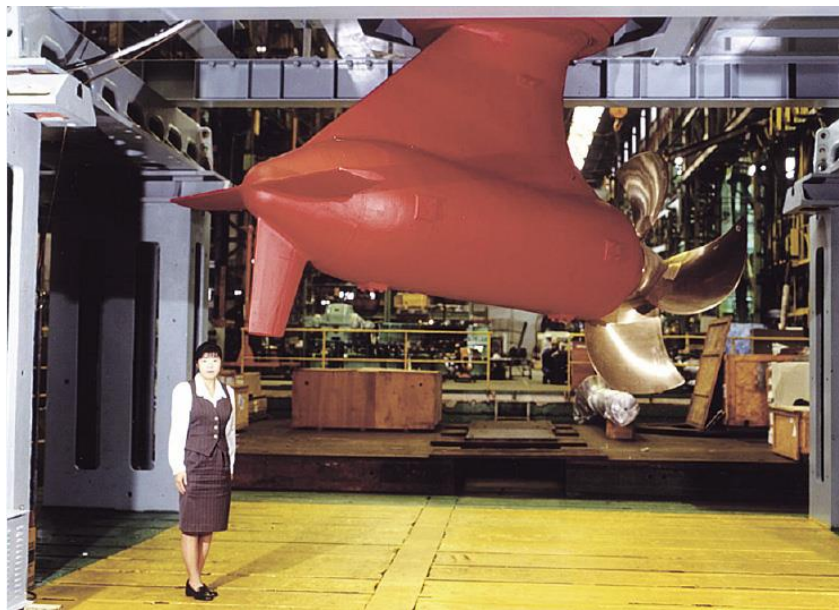


Fig. 2-1. Kawasaki “PODPELLER”[1]

2.2 1 MW 高温超電導モータ構造と仕様

本モータは、高効率、小型、高信頼性を目指した設計を行い、更に使用する高温超電導線材の長さを出来る限り短くして低コスト化を図った。1 MW 高温超電導のモータ構造図を Fig. 2-2 に示す。モータ仕様を Table 2-1、モータ外観と界磁コイルの写真を Fig. 2-3 に示す。最も一般的な構造であるラジアル・回転界磁タイプの同期モータで、今後の大出力モータへの展開を考慮して本タイプを採用した。本モータはポッド

に装着され、ダイレクトドライブでプロペラを回転させるため、モータ回転速度はプロペラ回転速度と同じ 190 rpm となる。

回転側のロータに超電導界磁コイルが配置されている。1 極の超電導界磁コイルは 6 層のダブルパンケーキ型レーストラック超電導コイルから構成されており、4 極の超電導界磁コイルがクライオスタットであるロータ内に設置されている。超電導線材は住友電工製の高温超電導線材 DI-BSCCO を用いている。超電導界磁コイルには直流 200 A が流され、最大で 2.5 T の磁場を発生させる。高磁場を実現するために超電導界磁コイルは非磁性体を巻き芯とする空芯構造となっており、また超電導界磁コイルを保持するロータにも非磁性体を採用し磁気飽和を回避している。ステータ側の電機子コイル(Armature coil)は銅巻線と非磁性ティースを採用しており、超電導界磁コイルによって発生する回転磁場による渦電流損を低減している。これにより、超電導界磁コイルが発生する高磁場による大電磁力を低損失に大トルクに変換することが可能となっている。Fig. 2-4.に 1 MW 高温超電導モータのロータ断面を示す。

ロータ内の高温超電導界磁コイルは低温 He ガスによって 30 K に冷却されている。低温 He ガスは外部の冷凍機からヘリウム移送継手を通してロータ内に供給され、超電導界磁コイルを冷却後、再度ヘリウム移送継手を通して外部の冷凍機に戻る。

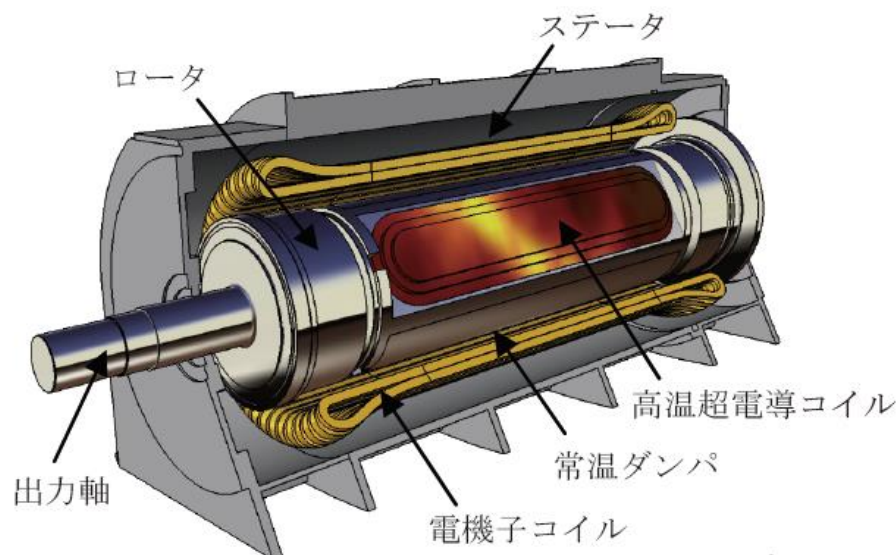


Fig. 2-2. 1 MW 高温超電導モータ構造図[2]

Table 2-1. 1 MW 高温超電導モータ仕様[2]

出力	(MW)	1
回転数	(rpm)	190
相数		3
極数		4
電機子電圧	(V)	1,200
高温超電導導体		BSCCO-2223
界磁電流	(A)	200
超電導作動温度	(K)	30
低温冷媒		低温ヘリウムガス
低温部設計冷却能力	(W)	100
設計効率	(%)	98 (冷却損含む)



Fig. 2-3. 1 MW 高温超電導モータ外観と界磁コイル[2]

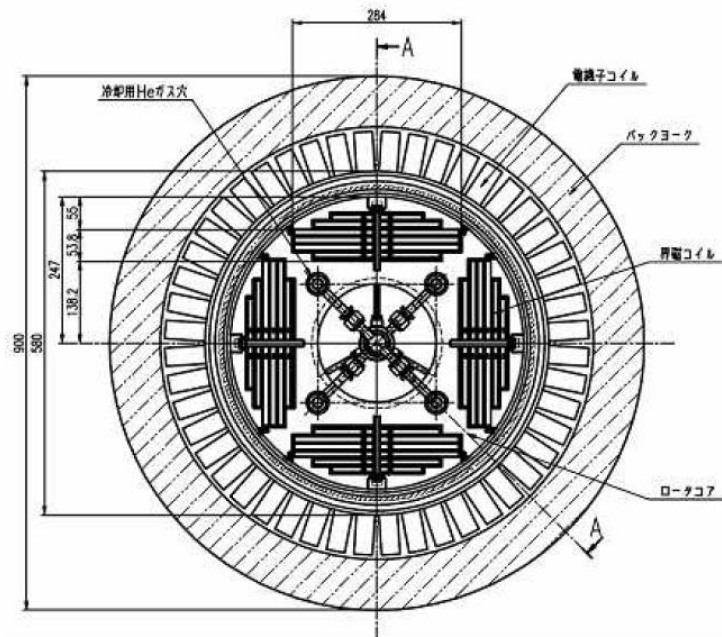


Fig. 2-4. 1MW 高温超電導モータ断面図

2.3 要素技術開発

本超電導モータの開発において、以下の3点の要素が新規の開発である。これらの要素開発を行ったので、本節ではそれを説明する。

- (1)長尺レーストラック超電導界磁コイル
- (2)クライオスタット・ロータ
- (3)ヘリウム移送継手

2.3.1 長尺レーストラック超電導界磁コイルの開発

Fig. 2-4 に示すように、1極の超電導界磁コイルは6枚の長尺レーストラック超電導コイルを積層している。Fig. 2-5 に、最も大きい長尺レーストラックコイルの仕様とコイルの磁場強度分布（絶対値表示）を示す。これらの超電導コイルは国内で製造実績が無く、設計技術及び製造技術を本開発で新規に確立した。この開発では、3種類の試作コイル（短尺コイルⅠ、短尺コイルⅡ、長尺コイル）の設計・製作・試験を行い、大型長尺レーストラックコイルの製作を可能とした。以下にそれらを述べる。

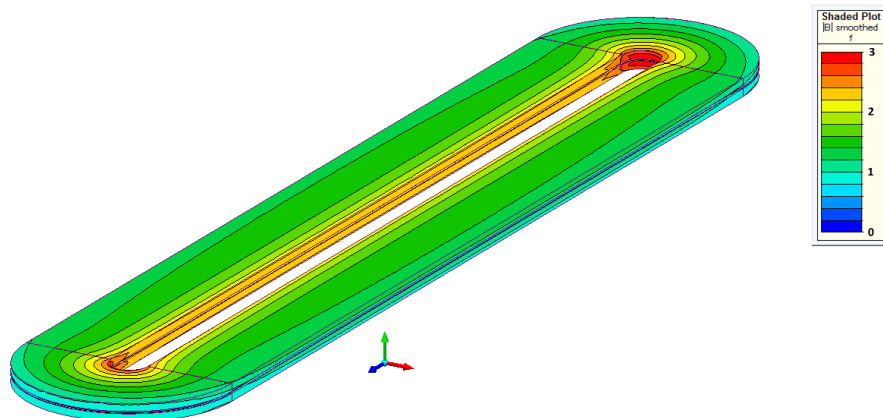


Fig. 2-5. レーストラック超電導界磁コイルの磁場強度分布（絶対値表示）

ダブルパンケーキ型、線材：DI-BSCCO、直線部：1200 mm、全長：1478 mm、線材長：1950 m、最小曲げ半径：35 mm、ターン数：670、励磁電流：200 A、冷却温度：30 K

1) 短尺コイル I の励磁試験

レーストラックコイルの曲線部では線材を曲げて巻いており、線材の中立線の内外に引張り応力、圧縮応力が発生し、この応力が高いと線材内部で微小破断が発生し臨界電流（ I_c ）が低下する。最小曲げ半径 35 mm は、超電導線材の仕様より決めたが、この仕様で線材単体の性能からの劣化が無いかを確認するために短尺コイル I を試作した。Fig. 2-6 に示す短尺コイル I を用いて低温下で 200 A の通電試験を行った。短尺コイル I の曲線部は長尺コイル(Fig. 2-5)と同じ最小曲げ半径とし、直線部を短くした。

Fig. 2-7 に 200 A 通電時におけるコイル端子間電圧（線材長で除した）とコイル温度の関係を示す。端子間電圧が 10^{-6} V/cm に達した時の励磁電流を I_c としており、それに比べて十分低い値となっており、最小曲げ半径 35 mm ではコイル内部で線材の劣化が発生していないことの確認が出来た。



Fig. 2-6. 短尺コイル I の外観写真と冷却プレートを外した時のコイルの写真

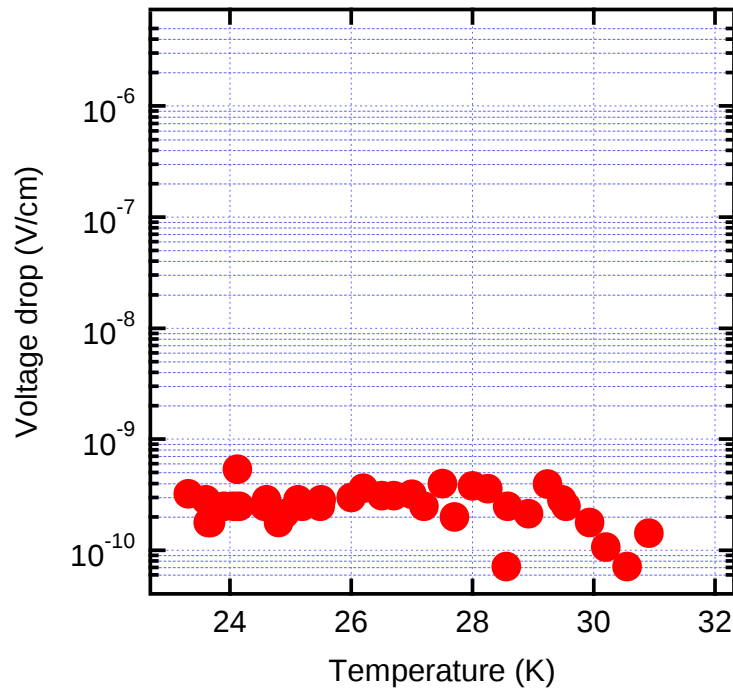


Fig. 2-7. 短尺コイル I の励磁試験時のコイル端子間電圧（励磁電流：200 A）

2)短尺コイルⅡの磁場下励磁試験

レーストラックコイルの曲線部では、自己磁場により線材に垂直磁場が発生し、これによっても I_c が低下する。励磁電流が 200 A の時の限界垂直磁場を求めるために、垂直磁場を変えて I_c を計測した[3]。

試験に用いた短尺コイルⅡと試験装置を Fig. 2-8 に示す。試験装置内に短尺コイルⅡを設置し、外周のマグネットにより最大 5 T の磁場を発生させることが出来る。短尺コイルⅡの曲線部に垂直磁場が加わった状態で、励磁電流を増加させて、 I_c を求めた。短尺コイルⅡ(レーストラックコイル)の I_c と超電導線材(テープ材)の I_c を比較して磁場強度との関係を Fig. 2-9 に示す。短尺コイルⅡと超電導線材の I_c はほぼ一致しており、200 A 通電時の限界磁場は 3 T と推定でき、今後の設計の指針を得ることができた。

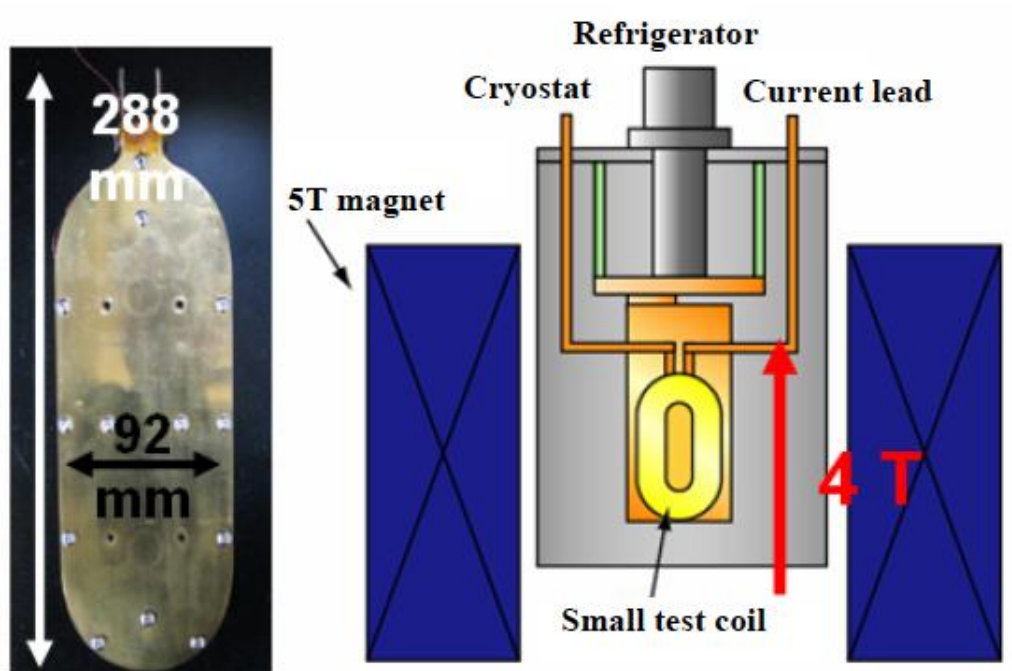


Fig. 2-8. 短尺コイルⅡと磁場下励磁試験装置[1]

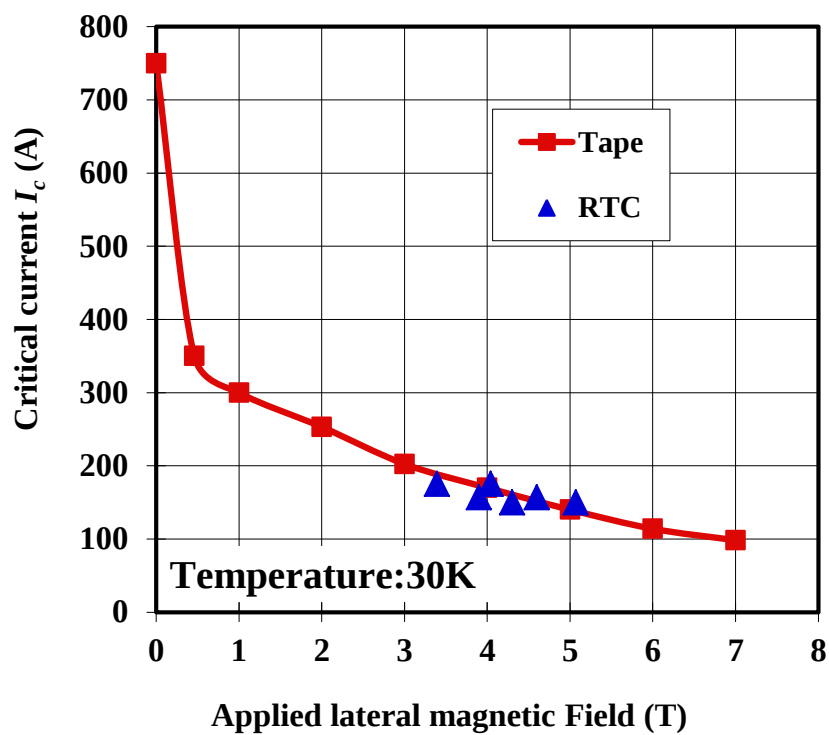


Fig. 2-9. 短尺コイルⅡの励磁試験結果
Tape (テープ材) と RTC(レーストラックコイル)の比較[1]

2) 長尺コイルの励磁試験

短尺コイルⅠの励磁試験、短尺コイルⅡの磁場下励磁試験により、最小曲げ半径 35 mm で線材の劣化が発生していないこと、200 A 通電時の限界磁場は 3 T との確認ができたので、Fig. 2-4 に示す仕様で長尺コイルの製作を行った。製作した長尺コイルを Fig. 2-10 に示す。2.3.2 クライオスタット・ロータの開発で述べるロータの冷却試験において、長尺コイルをロータ内に設置し 30 K に冷却し、通電試験を行った。Fig. 2-11 にコイル端子間電圧（線材長で除した）とコイル励磁電流の関係を示す。端子間電圧が 10^{-6} V/cm に達した時の励磁電流を I_c としており、それに比べて十分低い値となっており、問題が無いことを確認した。

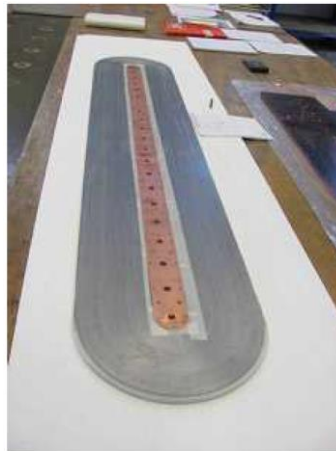


Fig. 2-10. 長尺コイル写真

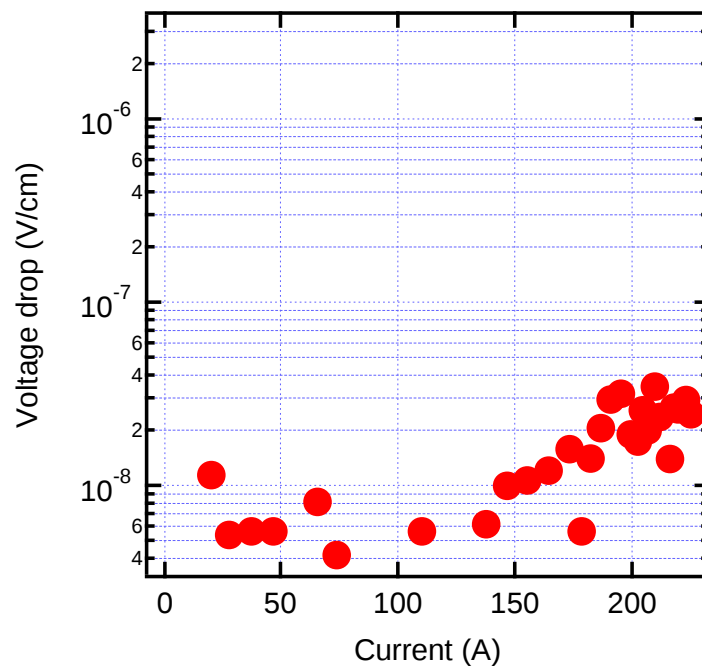


Fig. 2-11. 長尺コイルの励磁試験時のコイル端子間電圧(30 K)

2.3.2 クライオスタット・ロータの開発

1 MW 高温超電導モータ断面図(Fig. 2-4)に示すように、ロータ内に 4 極の超電導界磁コイルが配置されており、ロータ内は真空中に保持されたクライオスタットとしての機能を有し、外部からの熱侵入を防いでいる。ヘリウム移送継手を介してロータに供給された低温 He ガスはロータ中心部を通過してロータ端部の冷却配管で各極の超電導界磁コイルを保持しているホルダーに供給され、伝導冷却で内部の超電導コイルを冷却している。ホルダー内の 6 層の超電導コイルの最上下層に銅プレートが配置されており、伝導による冷却を促進している。Fig. 2-12 にロータ端部の冷却配管を示す。

梅本らはクライオスタット・ロータの冷却試験を実施し、冷却性能及び 30 K に到達するのに必要な時間の確認を行った[1]。Fig. 2-13 に試験状況を、Fig. 2-14 に試験結果を示す。本試験では、2.3.1 長尺レーストラック超電導界磁コイルの開発で述べた長尺レーストラック超電導界磁コイルをクライオスタット・ロータに設置し、長尺コイル試験も同時に行った。

室温からの冷却時間を短縮するために、冷却初期には液化窒素による冷却を行った。急速な冷却によるロータ内の温度分布差によって発生する熱応力の悪影響を防ぐために、一時冷却を停止し一定温度に保持を行い温度分布の均等化を図った。ロータ温度が約 130 K からは、低温 He ガスによる冷却を実施した。低温 He ガスが冷凍機から He 配管を通してロータに供給され、その後冷凍機に戻る循環冷却方式を採用した。冷却開始から約 3 日で、ロータを 30 K まで冷却することができ、冷却途中のロータ内温度分布も最大で 30 K 以下に抑えることができた。ロータ内に設置した長尺コイルも 30 K まで冷却でき、通電試験も問題なく行うことができた。ロータ内部の超電導コイルが 30 K に冷却できたことにより、クライオスタット・ロータが必要な断熱性能を有していることが確認できた。

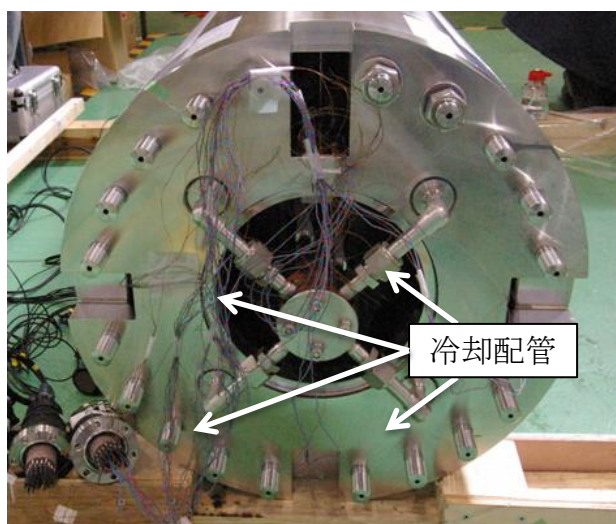


Fig. 2-12. ロータ内冷却配管



Fig. 2-13. クライオスタット・ロータ冷却試験[1]
(He ガス流量 : 4 g/s、冷却能力 : 100 W@30 K)

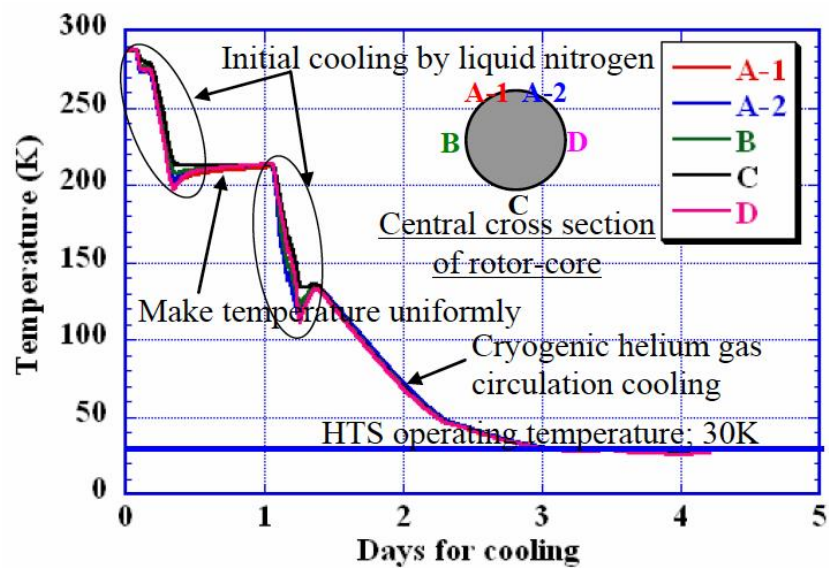


Fig. 2-14. クライオスタット・ロータ冷却試験結果[1]

2.3.3 ヘリウム移送継手の開発

高温超電導コイルが回転する回転界磁コイルタイプの超電導モータの場合、ヘリウム移送継手を用いて回転する超電導界磁コイルに固定側の外部冷凍機器から冷媒を供給する。このヘリウム移送継手の開発が大きな技術課題となる。E. Kosuge らは信頼性の高いヘリウム移送継手の開発を新規に行った[4]。

Fig. 2-15 にヘリウム移送継手の内部構造図を示す。冷凍機から供給される He ガスは静止側配管からロータ側の回転している二重管の中央部を流れ込んで、ロータに至る。ロータから戻る He ガスはロータの側の回転している二重管の外周部を流れて静止側配管を経て冷凍機に戻る。この構造では供給側と戻り側の間に隙間シール(Gap seal)があり、このシールからの漏洩を最小限にしておく必要がある。本開発では、隙間シールの候補を Fig. 2-16 にある Grooved nozzle seal と Ejector nozzle seal の二種類とし、開発目標を漏洩量 5 %以下とした。Fig. 2-17 にヘリウム移送継手試験装置を示す。ヘリウム移送継手のロータ側配管を外部の駆動モータで回転させて、25 K の He ガスをヘリウム移送継手に供給して、その時の漏洩量の計測を行った。Table 2-2 に試験結果と隙間シール部の CFD(Computational Fluid Dynamic)解析によって推定した漏洩量を示す。Grooved nozzle seal は漏洩量が 5%で、CFD 解析では 6 %でほぼ近い値となっている。Grooved nozzle seal を採用することで目標性能を確保する見込みが得られ、特許の出願も行った[5]。

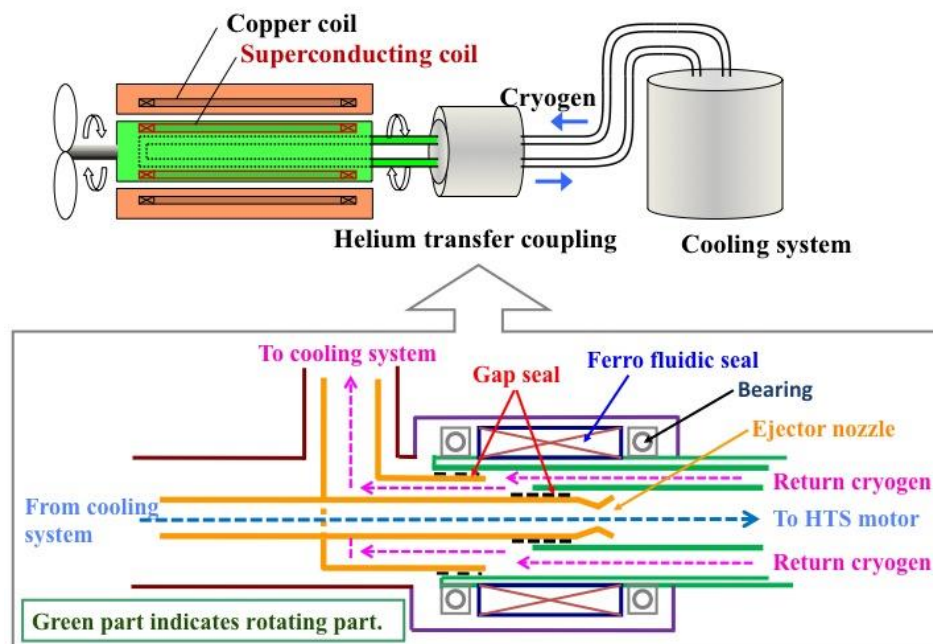
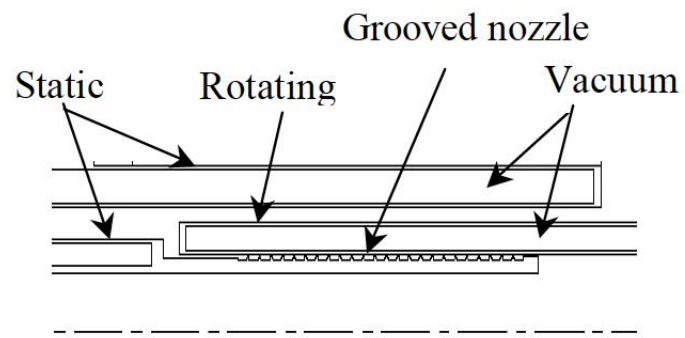
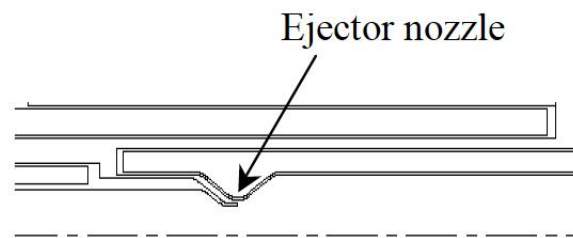


Fig. 2-15. ヘリウム移送継手の内部構造図



(a) Grooved nozzle seal



(b) Ejector nozzle seal

Fig. 2-16. ヘリウム移送継手の隙間シールの2種類の候補[4]

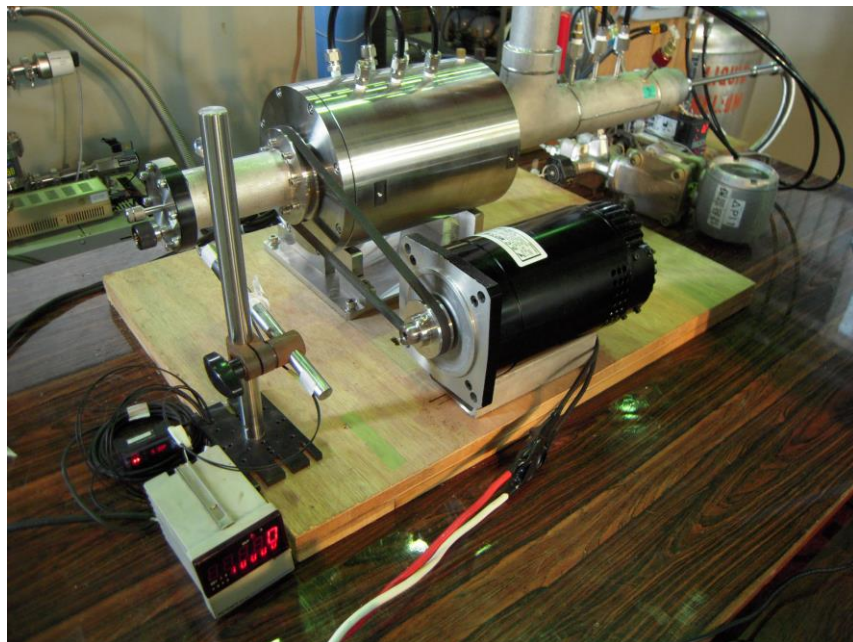


Fig. 2-17. ヘリウム移送継手性能試験[1]

Table 2-2. ヘリウム移送継手性能試験結果と CFD 解析の比較 [4]

漏洩量/全流量×(%)

Seal structure	Test result	CFD Analysis
Ejector nozzle	24	25
Grooved nozzle	5	6

2.4 モータ出力試験

前節の要素技術開発により 1 MW 高温超電導モータの成立についての目処がついたので、高温超電導モータの製作を行い、出力試験を実施した。Fig. 2-18 に モータ出力試験の状況を示す。モータの出力軸は増速機を経て負荷装置を駆動している。モータの出力軸と反対側にヘリウム移送継手が接続されており、別置の冷凍機から低温の He ガスがヘリウム移送継手を介してロータ内に供給されて、超電導界磁コイルを冷却している。1 極の超電導界磁コイルは 6 枚のダブルパンケーキ型レーストラック超電導コイルを積層する設計であるが、その内の各極 2 枚の超電導コイルだけを装着してモータ出力試験を行った。2 枚装着時の最大出力は 450 kW である。モータ出力試験での最高出力 450 kW を達成した。これは、この種の同期超電導モータで国内の最高出力となった。Fig. 2-19 にその時のモータ効率マップを示す。モータ効率は式(2.1)より求めた。式(2.1)にあるように超電導界磁コイルの冷却損失は考慮していない。

$$\text{モータ効率} = \frac{\text{トルク} \times \text{ロータ回転速度}}{\text{モータ入力電力}} \quad (2.1)$$

Table 2-3 に 1MW 高温超電導モータの 1 MW 出力時の設計値と、モータ出力試験での 450 kW 出力時のデータから 1 MW 出力時を推定したものの比較を示す。これには、冷却損失も考慮している。設計値とほぼ同等のモータ性能が出ていることが確認できた。

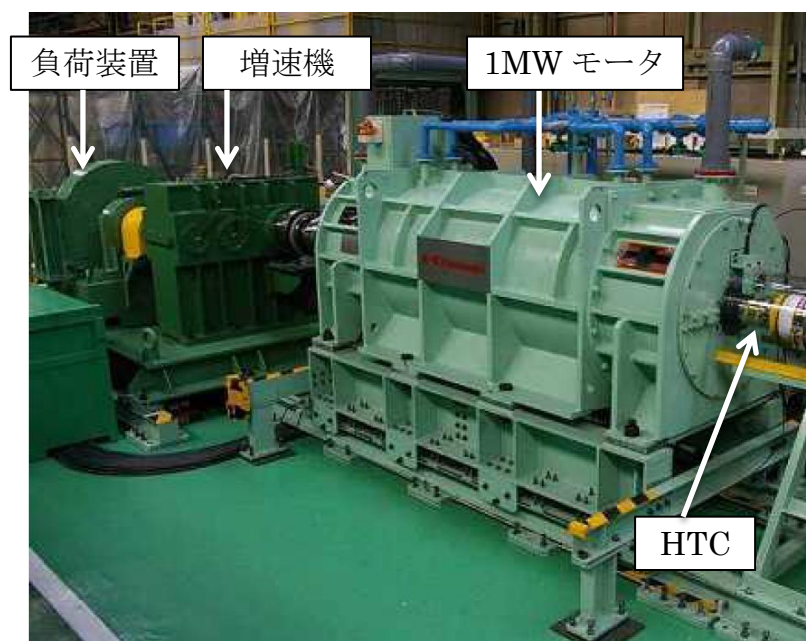


Fig. 2-18. モータ出力試験

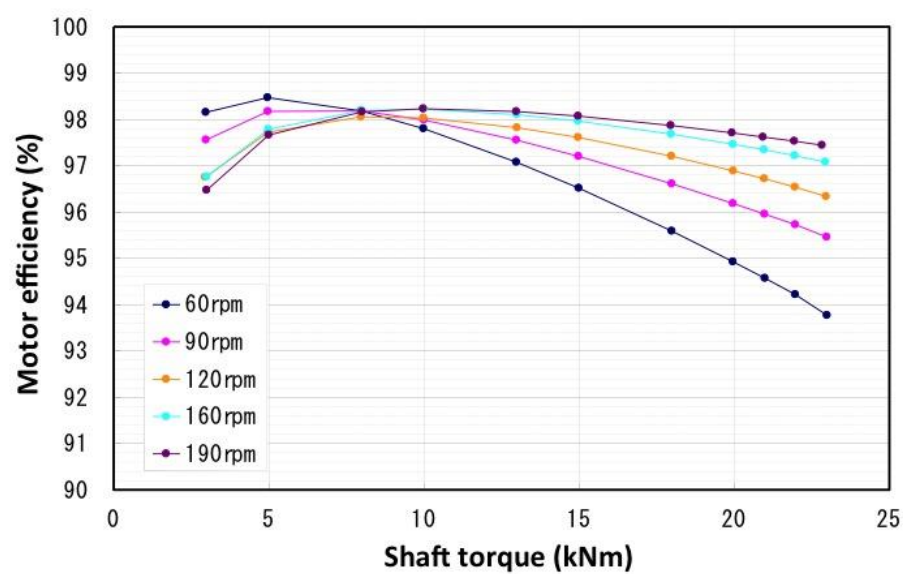


Fig. 2-19. モータ出力試験結果 (モータ効率)

Table 2-3. 1 MW 出力時の設計値とモータ出力試験結果からの推定値の比較

Loss	1MW output Designed values	1MW output Estimated values by extrapolating from 450kW test data
Ohmic loss@75°C	11.5kW	11.5kW
Iron loss	5.8kW	6.2kW
Electric loss	17.3kW	17.7kW
Motor efficiency	98.3%	98.3%
Cooling loss Assumed COP:0.017@30K	6kW	6kW
Total loss	23.3kW	23.7kW
Total efficiency	97.7%	97.7%

2.5 結論

1 MW 高温超電導モータの開発は、早期の実用化を達成するための基礎設計技術確立を目的として行った。また、実用化への道筋をより明確にして効率的に開発を進めることが出来るように、ポッド式電気推進システムへの適用を想定して高効率、小型、高信頼性を目指した要素技術開発と設計技術開発を行った。新規要素開発としては、長尺レーストラック超電導界磁コイル、クライオスタット・ロータ、ヘリウム移送継手の開発を行った。

- 国内最大サイズの全長 1478 mm で、高い I_c を保持し信頼性のある大型長尺レーストラック超電導コイルが開発できた。
- 界磁コイルを熱伝導冷却できるクライオスタット・ロータを開発し、冷却試験において界磁コイルが問題なく 30 K まで冷却することができた。
- 新規にヘリウム移送継手を開発し、性能試験にて目標の内部漏洩量 5 % 以下が達成できた。
- 各極 2 枚の超電導コイルを装着したモータ出力試験を行い、国内最高出力 450 kW を達成した。その試験結果から 1 MW 出力時の性能を推定し、それが設計値とほ

ば同等であることが確認できた。

- この開発により 3 年の短期間で超電導モータ開発の基礎設計技術が確立でき、早期の実用化を目指した大型、高効率、小型、高信頼性を実現できる開発が可能となった。

参考文献

- [1] K. Umemoto, *et al.*, “Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, 2010, Art. no. 032060.
- [2] K. Umemoto and T. Yanamoto, “Current status of research & development of high-temperature superconducting motor for ship propulsion,” (in Japanese), *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, vol. 47, no. 6, pp. 377–383, 2012.
- [3] S. Yuan, Y. Kimura, M. Miki, B. Felder, K. Tsuzuki, T. Ida, M. Izumi, K. Umemoto, K. Aizawa and M. Yokoyama, “Development of a field pole of 1 MW-class HTS motor, ” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, Part 3, 2010, Art. no. 032067.
- [4] E. Kosuge, Y. Gocho, K. Okumura, M. Yamaguchi, K. Umemoto, K. Aizawa, M. Yokoyama, S. Takao, “Development of Helium Transfer Coupling of 1 MW-Class HTS Motor for Podded Ship Propulsion System”, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, part 3, 2010, Art. no. 032032.
- [5] K. Umemoto, S. Takao, and K. Aizawa, “Refrigerant supply/exhaust device and superconductive rotator device provided with same,” WO2014/068971 A1, PCT/JP2013/006422, Oct. 30, 2013.

第 3 章

3MW 高温超電導モータの開発

3.1 序論

第2章では、超電導モータの早期実用化を目指した基礎設計技術確立を目的とした1 MW 高温超電導モータの開発を報告した。要素技術として長尺レーストラック高温超電導コイル、クライオスタット・ロータ、ヘリウム移送継手の開発を行い、更に1 MW 高温超電導モータの出力試験を行い、国内最高の450 Wを達成することが出来た。

本章では、更なる高出力、高効率、小型、高信頼性を目指して、3 MW 高温超電導モータの開発を行った。適用対象として、ほとんどの内航船の出力レンジをカバーできる3 MW 級の船用推進モータとした。小型化の目標としては世界最高クラスとし、高効率と高信頼性を達成するものとした。

なお、本開発の一部は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「船舶用高温超電導モータ内蔵ポッド推進システム実用化のための研究開発」（2010～20012年）として実施したものである。

3.2 モータ構造

Fig. 3-1 にモータ外観写真、Fig. 3-2 にモータ構造図、Table 3-1 にモータ仕様を示す。1 MW 高温超電導モータ[1]と同様のラジアル・回転界磁タイプの同期モータである。出力が3 MWに増大したことにより6極となった。更なる小型化を目指して設計を行い、トルク体積密度が40 kNm/m³となった。1 MW モータに比べて約1.4倍の小型化となっており、世界最高クラスである。

1極の超電導界磁コイルは4層のダブルパンケーキコイル(DPC: Double Pancake Coil)から構成されており、線材は住友電工製の高温超電導線材 DI-BSCCO である。各超電導コイルは非磁性体を巻き心とする空芯構造となっており、また超電導界磁コイルを保持するロータにも非磁性体を採用し磁気飽和を回避している。ステータ側の電機子コイルは銅巻線と非磁性ティースを採用しており、超電導界磁コイルによって発生する回転磁場による渦電流損を低減している。ロータ内の高温超電導界磁コイルは低温 He ガスによって温度 30 K に冷却されている。低温 He ガスは外部の冷凍機からヘリウム移送継手を通してロータ内に供給され、超電導界磁コイルを冷却後、再度ヘリウム移送継手を通して外部の冷凍機に戻る。次節以降に、超電導界磁コイル、ロータ、電機子コイルの詳細を述べる。



Fig. 3-1. 3 MW 高温超電導モータ外觀写真[2]

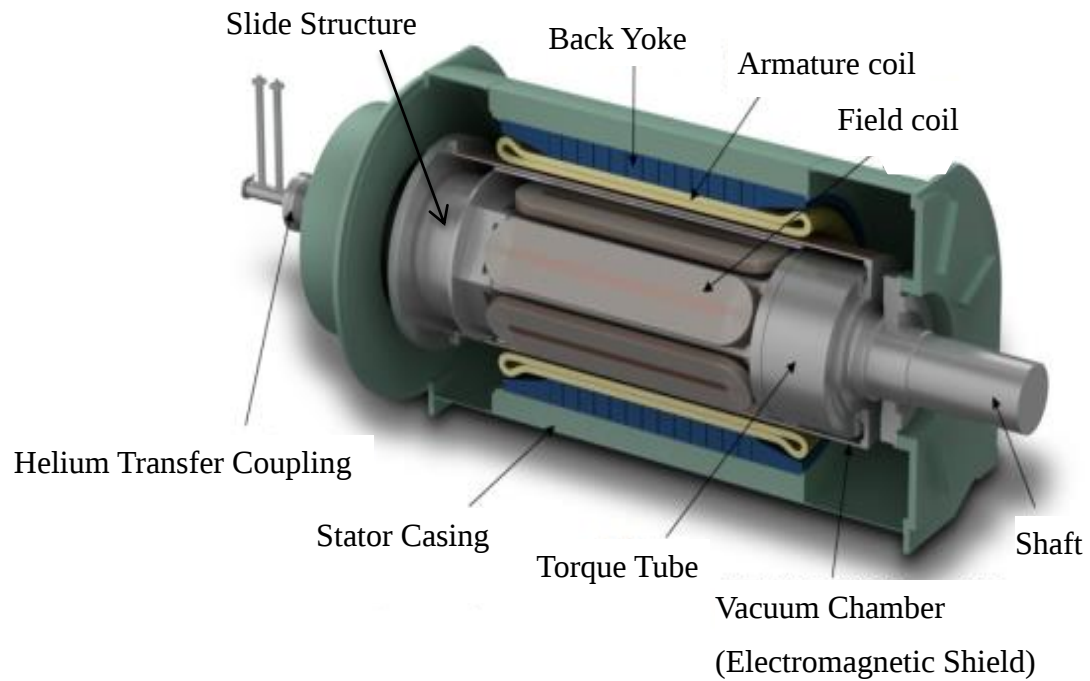


Fig. 3-2. 3 MW 超電導モータ構造図[3]

Table 3-1. 3 MW 高温超電導モータ仕様[3]

Rated power	3 MW
Rated speed	160 rpm
Number of poles	6
Rated current of field coil	200 A
Field coil windings	DI-BSCCO
Field coil cooling	Helium gas
Maximum field coil operating temperature	30 K
Armature coil cooling	Air cooled
Volumetric torque density	40 kNm/m ³
Dimension	D 1.4 m × L 2.8 m

3.3 超電導界磁コイル

トルク体積密度 40 kNm/m³を達成するために、2 種類の高温超電導線材を用いて超電導界磁コイルの小型化を行った。Fig. 3-3 に超電導界磁コイル写真、Table 3-2 に 2 種類の高温超電導線材の比較を示す[4]。線材 Type-HT はステンレステープで補強されており、厚いが最小曲げ半径は小さい。一方、線材 Type-H は補強されておらず、薄く最小曲げ半径は大きい。超電導界磁コイルの曲げ半径の小さい内周側では線材 Type-HT を用い、曲げ半径の大きい外周側では線材 Type-H を用いることにより、コイル幅を 321 mm に抑えることが出来た。

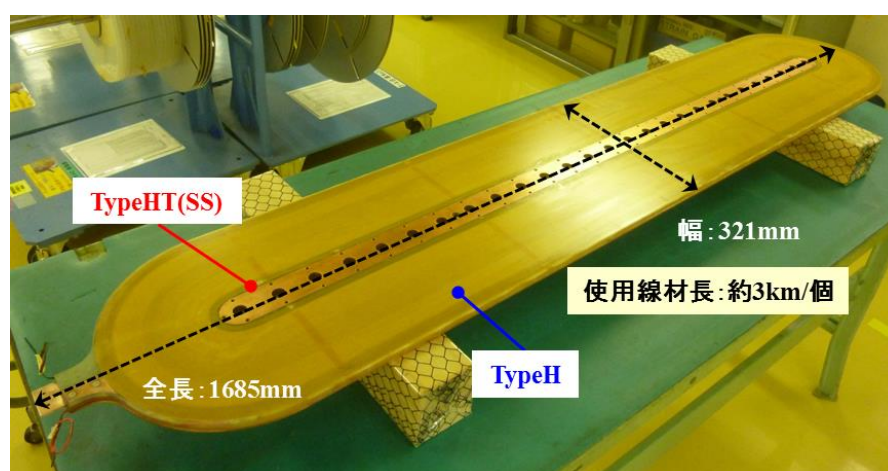


Fig. 3-3. 超電導界磁コイル写真

Table 3-1. 界磁コイル用超電導線材比較[2]

Type	Cross-sectional view	Thickness	Minimum bend radius
H		0.23 mm	70 mm
HT		0.30 mm	50 mm

高効率化のためには冷却システムのエネルギー低減が必要となる。発熱低減のために磁場転向(MFD: Magnetic Flux Deflectors)板を超伝導界磁コイルに採用した。Fig. 3-4 に磁場転向板の効果を示す。積層された超伝導界磁コイルでは、最上層と最下層のコイルで磁場の曲がりにより超電導線材への磁場の垂直成分が増え、超伝導コイルの臨界電流 (I_c) の低下、発熱の増加を招く。磁場転向板を積層コイルの上下面に配置することにより、磁場の向きが制御され、最上層と最下層のコイル線材への垂直磁場が低減され、発熱の低減が図れる。

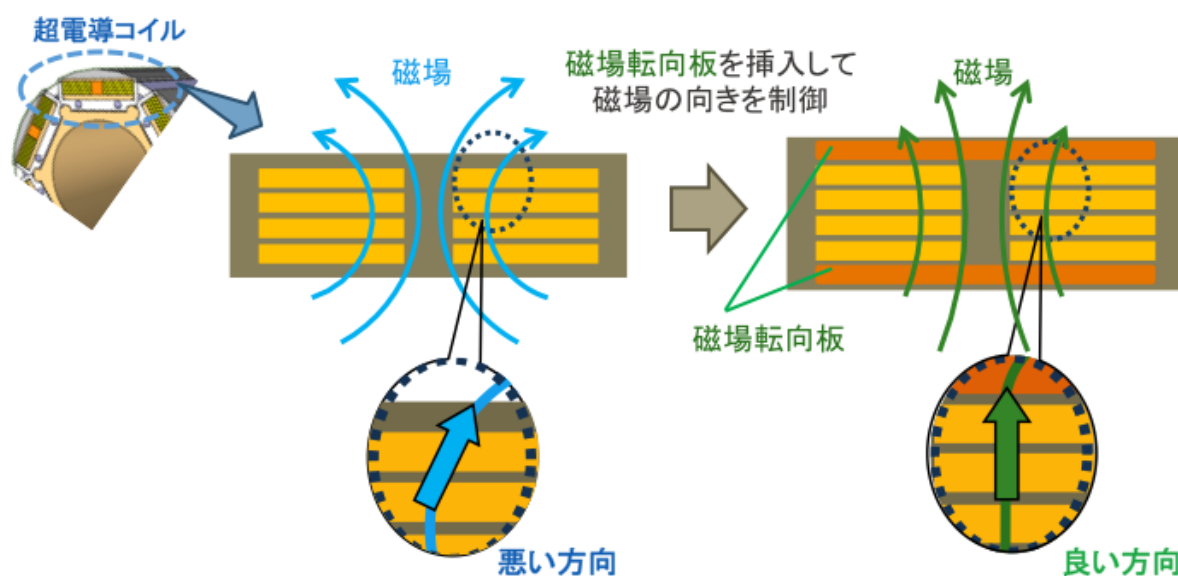


Fig. 3-4. 磁場転向板の効果

磁場転向板による発熱低減効果を確認するために磁場転向板を組み込んだ超伝導コイルを試作し、要素試験を実施した[5]、[6]。Fig. 3-5 に磁場転向要素試験用小型コイルの写真と、Table 3-3 に磁場転向要素試験用小型コイル仕様を示す。3 MW 超伝導モータ向けの超伝導コイルと同様の 4 層の DPC で、上下面に磁場転向板を配置している。Fig. 3-6 に磁場転向要素試験結果を示す。温度 30 K に冷却した時の励磁電流

と発熱量の関係を、磁場転向板を取り付けた場合と取り付けていない場合の比較として示す。励磁電流 155 A においては、磁場転向板の無い場合には、215 mW の発熱であったが、磁場転向板の設置により、101 mW の発熱にとどまり、53 % の発熱量低減を示した。効果が確認できたの、この試験結果と磁場解析に基づき、3 MW モータの超電導界磁コイル向けの磁場転向板の設計を行った。超電導モータの空芯ロータへの磁場転向板の適用に関する特許を 1 件出願した[7]。

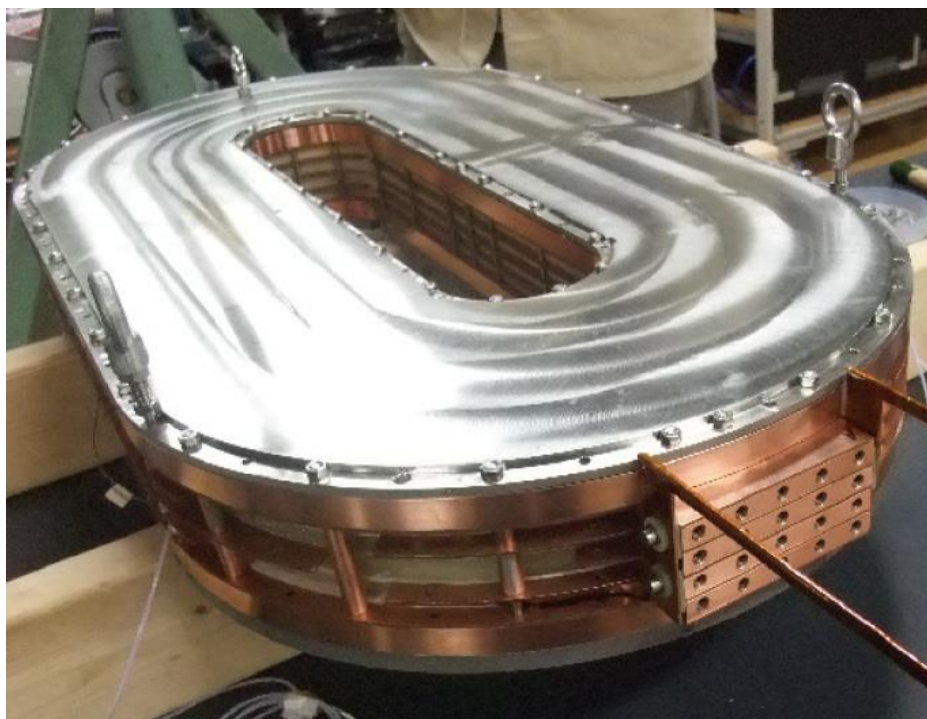


Fig. 3-5. 磁場転向要素試験用小型コイル写真[6]

Table 3-3. 磁場転向要素試験用小型コイル仕様[6]

HTS conductor	Sumitomo Bi2223
I_c @ 77 K, self field	(co-winding together with stainless steel tape) 150 A
Average thickness of the tape	0.31 mm
Number of turns per single DPC	848 turns
Length of HTS tape per single DPC	1235 m
Number of DPCs	4
Length of the straight part	350 mm
Inner and outer diameters of winding	ID: 55 mm, OD: 186 mm

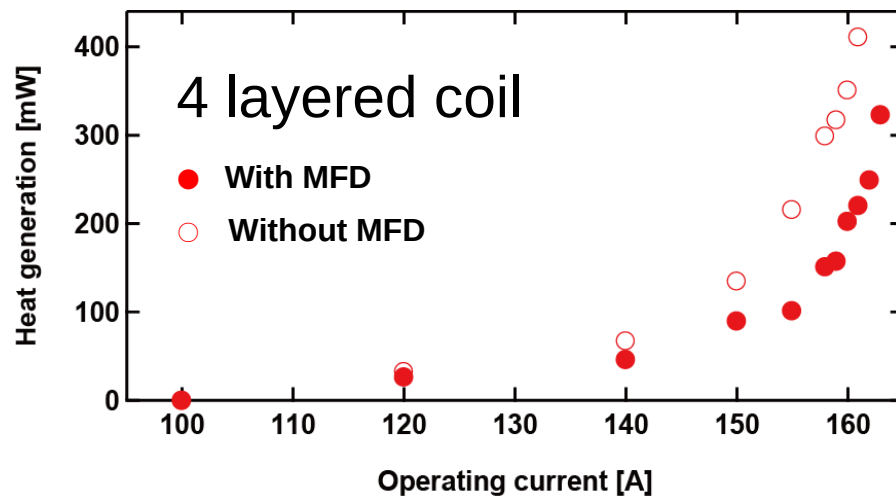


Fig. 3-6. 磁場転向要素試験結果[6]

3.4 クライオスタット・ロータ

Fig. 3-6 にクライオスタット・ロータの構造概略を示す。クライオスタット・ロータは、トルク出力機能、界磁コイルの低温保持機能即ちクライオスタット機能を有している。クライオスタット機能には真空中の内部に冷媒と電流を導入する機能も含まれる。これらの機能を発揮し、小型、高効率、高信頼性、低コストが求められている。超電導界磁コイルが発生したトルクをアウトプットシャフトに伝達するトルクチューブは、トルクを伝達できる能力と外部からの熱侵入を防ぐ低熱伝導性が要求されている。トルクチューブの材質は、強度が高く、熱伝導率の低いニッケルベースの超合金を採用した。強度解析よりトルクチューブの肉厚はできる限り薄くし、熱伝導による入熱を防ぎ、冷却損失を低減させた。

低温時のクライオスタット・ロータの熱収縮を緩和するために設けられているスライド機構は、材質として FRP(Fiber reinforced plastic)を採用して、スライド機構と低熱伝導性の両立を行った。

超電導界磁コイルへの電流を通電する銅線の途中に超電導電流リードを入れて、銅線を介しての外部からの熱伝導を防ぎ、冷却損を低減させた。

外部の冷却システムから冷媒をクライオスタット・ロータに導入するヘリウム移送継手は、1MW 高温超電導モータで開発したシール機構を有するものを採用した。

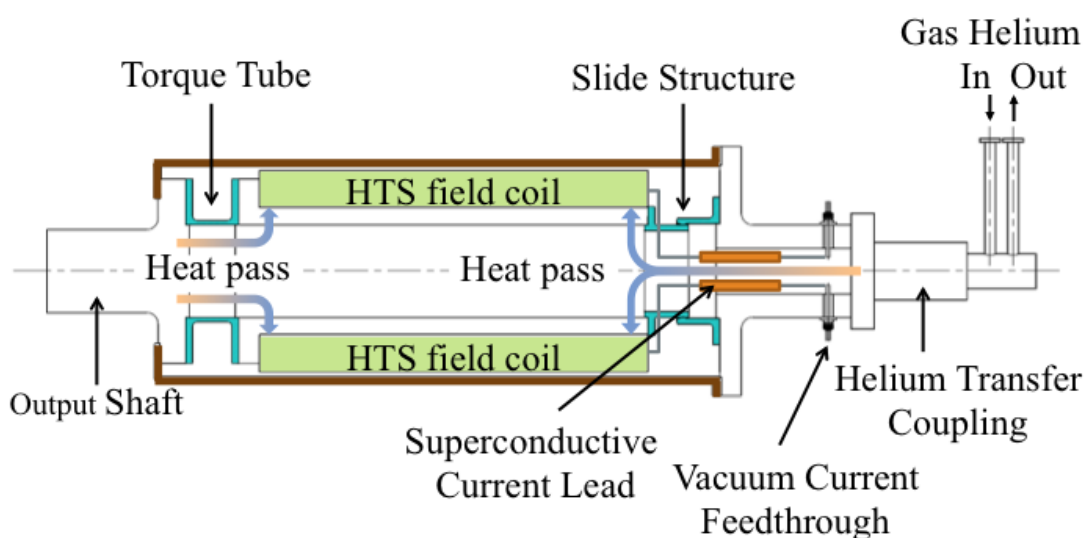


Fig. 3-6. クライオスタット・ロータの構造概略[8]

クライオスタット・ロータ単体の冷却試験を実施して、コイルの温度分布及び 200 A 励磁の電圧を計測し、性能の確認を行った。Fig. 3-7 にクライオスタット・ロータ単体の冷却試験の状況を示す。ロータ内には、1 極分の 4 層積層した界磁コイルを装着している。外部の冷却システムから冷媒の He ガスを供給して冷却を行った。その時の冷却過程を Fig. 3-8 に示す。冷却途中で、夜間においける冷却停止を 2 回行ったが、それを除くと一様に温度が低下しており、約 4 日で全体が 20 K まで冷却することができた。その後、温度調整を行うことによって超電導界磁コイルを 28 K に均一に冷却することができた。その結果を、Fig. 3-9 に示す。この結果により、適切な温度調整を行うことにより超電導界磁コイルを 26 K・30 K の任意温度で均一化することが可能であると確認できた。スライドチューブ機構[10]とクライオスタット・ロータの構造[11]に関する特許を出願した。



Fig. 3-7. クライオスタット・ロータの冷却試験の状況[9]

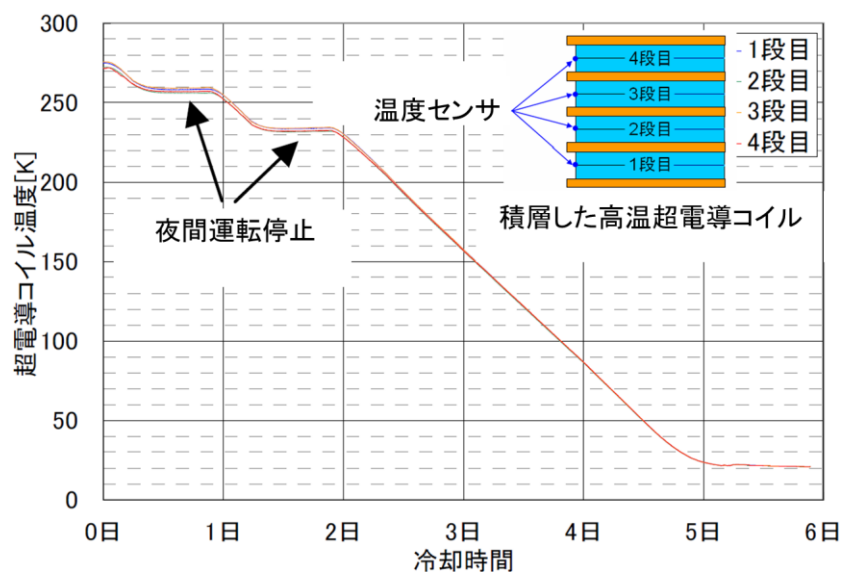


Fig. 3-8. クライオスタット・ロータ冷却試験における
界磁コイル温度の時間変化[9]

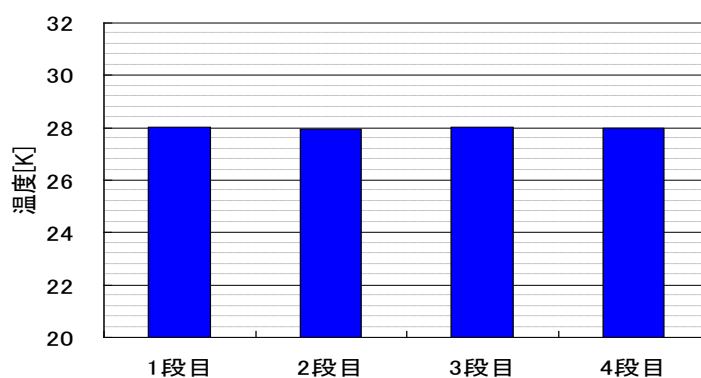


Fig. 3-9. クライオスタット・ロータ冷却試験における
界磁コイルの4層の温度分布

3.5 電機子コイル

電機子コイルは、信頼性と製造性を考慮して従来型の銅巻線を採用した。銅線の渦電流損失を低減するために、多数の絶縁素線とコイル端転移接続を採用した。これを Fig. 3-10 に示す。転移接続はコイル端でのみ行う方法を考案して、渦電流損失を低減すること小型化が達成できた。更に、非磁性ティースを採用して鉄損の低減を行った。これらの損失低減の最適設計を行った。そのときに使用した電磁場解析のモデルを Fig. 3-11 に示す。コイル端での転移接続に関する特許を1件出願した[12]。

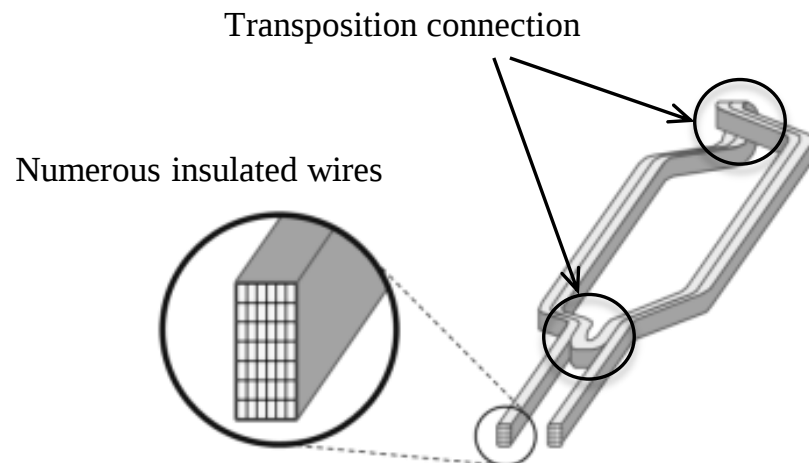
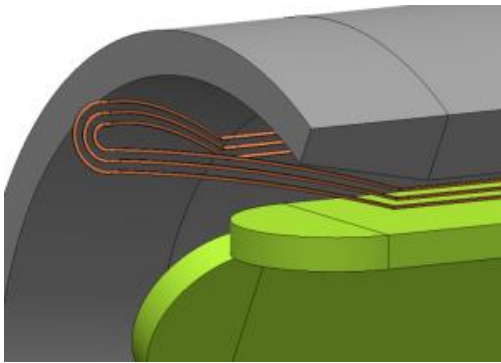
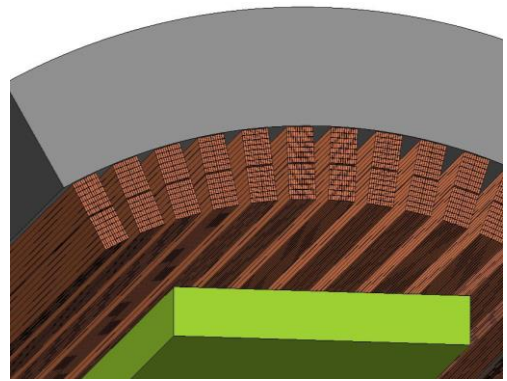


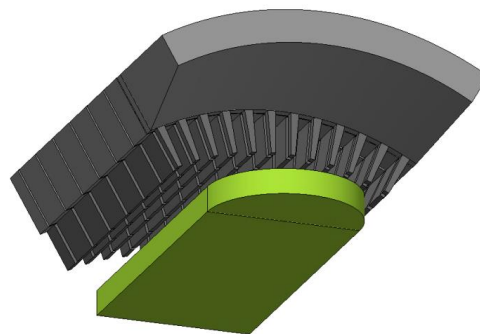
Fig. 3-10. 電機子コイルにおける多数絶縁素線とコイル端転移接続[8]



(a)単一素線内の渦電流損失解析モデル[8]



(b)循環渦電流損失解析モデル[8]



(c)鉄損解析モデル。

Fig. 3-11. 電磁場解析モデル

3.6 結論

本章では、3 MW 高温超電導モータの開発について述べた。第2章の1 MW 高温超電導モータの開発で構築できた基礎設計技術を用い、更なる小型、高効率、高信頼性に向けた設計を要素試験も行いながら進めた。

- 超電導界磁コイルでは、2種類の超電導線材を使い分けることによって、小型化を達成した。また、解析と要素試験により磁場転向板を積層した低発熱超電導コイルの設計技術を開発し、超電導界磁コイルに適用した。
- クライオスタット・ロータにおいては、ニッケルベースの超合金製トルクチューブ、FRP 製スライド機構、超電導電流リードを採用して、冷却損失を低減させた。冷却試験により、4層積層の高温超電導界磁コイルの各層が 28 K に均等に冷却できることを確認した。
- 電機子コイルでは信頼性と製造性の理由から銅巻線を採用したのが、多数絶縁素線とコイル端転移接続の効果を考慮した電磁場解析による最適設計を行い、電機子コイル損失を低減させた。
- これにより、世界トップクラスのトルク体積密度を 40 kNm/m^3 を達成することができ、更に高効率と高信頼性も満足させることができた。特許に関しても4件出願した。

参考文献

- [1] K. Umemoto, *et al.*, “Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, 2010, Art. no. 032060.
- [2] T. Yanamoto, M. Izumi, M. Yokoyama, and K. Umemoto, “Electric propulsion motor development for commercial ships in Japan,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2333-2343, Dec. 2015.
- [3] T. Yanamoto, M. Izumi, K. Umemoto, T. Oryu, Y. Murase, and M. Kawamura, “Load test of 3 MW HTS motor for ship propulsion,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 27, no. 8, Dec. 2017, Art. no. 5204305.

- [4] E. Ueno, T. Kato, K. Hayashi, “Race-track coils for a 3MW HTS ship motor,” *Physica C*, vol. 504, pp. 111–114, Sep. 2014.
- [5] S. Kase, K. Tsuzuki, M. Miki, B. Felder, M. Watasaki, R. Sato, and M. Izumi, “Three dimensional analysis of magnetic flux deflector,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun. 2013, Art. no. 4900905.
- [6] K. Tsuzuki, M. Miki, B. Felder, M. Watasaki, S. Kase, R. Sato, and M. Izumi, “Flux deflection on rotating field pole magnets for HTS machines,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun. 2013 Art. no. 4603304.
- [7] Y. Murase, K. Umemoto, M. Izumi, and K. Tsuzuki, “Superconducting field-pole magnet,” WO2014/041768 A1, PCT/JP2013/005257, Sep. 5, 2013.
- [8] T. Yanamoto, M. Izumi, Y. Murase, and T. Oryu, “Loss Analysis of a 3 MW HTS Ship Propulsion Motor”, submitted to *IEEE Trans. Appl. Supercond.*
- [9] K. Umemoto and T. Yanamoto, “Current status of research & development of high-temperature superconducting motor for ship propulsion,” (in Japanese), *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, vol. 47, no. 6, pp. 377–383, 2012.
- [10] Y. Sato, K. Umemoto, T. Ito, H. Iwasaki, and Y. Tsumura, “Field rotor for superconducting rotating machine,” WO2014/061189 A1, PCT/JP2013/005222, Sep. 4, 2013.
- [11] K. Umemoto, Y. Sato, and S. Takao, “Field rotor of superconducting rotating machine,” WO2013/128813 A1, PCT/JP2013/000741, Feb. 12, 2013.
- [12] T. Oryu and K. Umemoto, “Stator for superconducting rotating machine and superconducting rotating machine,” WO2014/068827 A1, PCT/JP2013/005202, Sep. 3, 2013.

第4章

3 MW 高温超電導モータ負荷試験

4.1 序論

船用推進システム向けの高温度超電導モータの陸上設備による実稼働試験は、米国の American Superconductor Corporation(AMSC)が 5 MW モータ[1]、[2]と 36.5 MW モータで行っており、2008 年に 36.5 MW の full-power テストを成功させている[3]。一定負荷であるが、小型、高効率の実証がなされている。Center for Advanced Power Systems at Florida State University(CAPS)では、変動負荷での 5 MW モータの試験を実施している[4]。

本章では、小型、高効率、高信頼の実証を目指した 3 MW 高温超電導モータの負荷試験を報告する。一定荷重試験と変動荷重試験が実施できる試験装置を新たに導入し、一定負荷試験では性能試験と累積 100 時間の耐久試験、変動荷重試験では航行中に衝突を回避する緊急停止運用を想定した試験を行った。これらの試験により長時間の運転、緊急停止時の急激なトルク変動の運転により信頼性の確認を行った。更に、一連の試験後に、分解検査を行い主要部品の損傷の有無の確認も行った。尚、本試験設備の導入は経産省の支援を受けて行った。

4.2 超電導モータ試験設備

Fig. 4-1 に新規に導入した超電導モータ用の試験設備を示す。この設備導入により長時間運転及び変動負荷の試験が行えるようになった。Fig. 4-2 に超電導モータ試験設備システム図を示す。

超電導モータの出力はギアボックスで増速されて、2 台の 1.75 MW のダイナモメータを駆動する。ダイナモメータで発電された電力はコンバータ、インバータ、電力受電盤を経て超電導モータ駆動用のインバータに供給される。電力の循環システムとなっており、超電導モータ等のロス分だけの電力供給を外部から行えば良く、省エネとなっており、また工場内の電力需要に関係なく長時間の運転が行えるようになった。インバータとして、低歪みの 6 相 5 レベル・セルインバータを新たに開発した。超電導モータの効率化、静粛化のためには、電機子コイルからの発熱や電磁雑音を軽減することが必要で、そのためには超電導モータの駆動電流を低歪み化する必要がある。これを可能とする 5 レベル・セルインバータを新たに開発した。Fig. 4-3 にこれを示す。Fig. 4-4 に、定格出力 3 MW、160 rpm における 5 レベル・セルインバータの出力電流波形を示す。全高調波歪は 1.2 %で、当社の従来のインバータの歪みを 1/4 に低減することに成功した。

ロード・シミュレーション・コントローラーから負荷の変動指令が 2 台のダイナモメータに出され、それに対応して超電導モータが駆動力を出力し、変動負荷運転が行われる。超電導モータは前進と後進時の運転、更に前進と後進のブレーキングモードで

の運転が可能で、これにより実海域における操船を模擬した運転が可能となる。

モータ冷却システムの系統図を Fig. 4-5 に示す。外部のコールドボックス内に設置された GM 冷凍機によって極低温に冷却された He ガスがロータ軸端のヘリウム移送継手を経て回転側のロータ内に供給され、ロータ内の超電導界磁コイルを冷却する。その後、He ガスは再びヘリウム移送継手を経て外部のコールドボックスに戻り、熱交換器で室温まで一度暖められコンプレッサーで加圧されて、更に熱交換器である程度冷却されて GM 冷凍機で再度極低温まで冷却される。超電導モータ用冷却システムとしては信頼性が高く温度制御性の良いシステムを設計・採用した。GM 冷凍機は住友重工製の SRDK-500B を使用している。3 MW のロータの冷却は室温から 30 K まで、約 4-5 日で冷却ができる。GM 冷凍機のメンテナンスは、9000 時間毎に分解点検し、シールとグリスの交換を行っている。

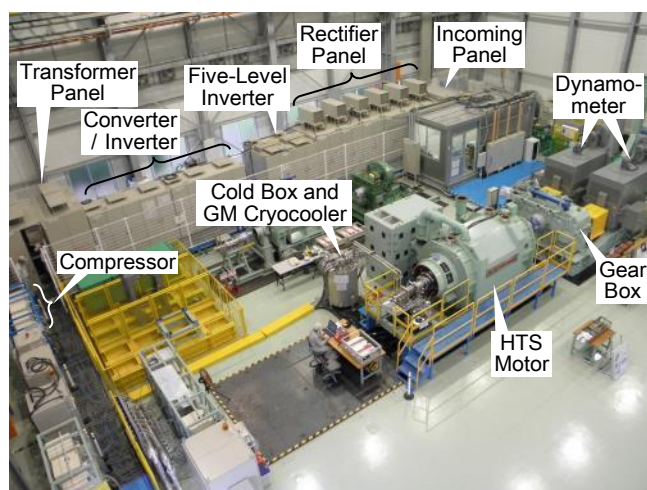


Fig. 4-1. 超電導モータ試験設備外観写真[5]

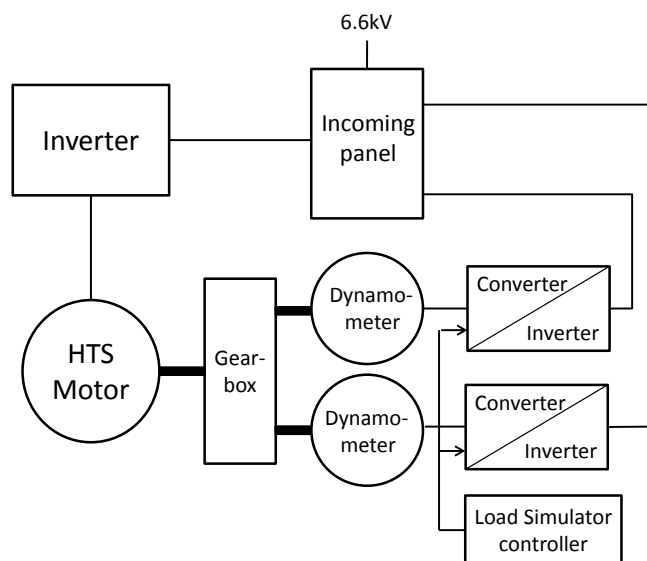


Fig. 4-2. 超電導モータ試験設備システム図[5]



Fig. 4-3. 超電導モータ用 5 レベル・セルインバータ外観写真[5]

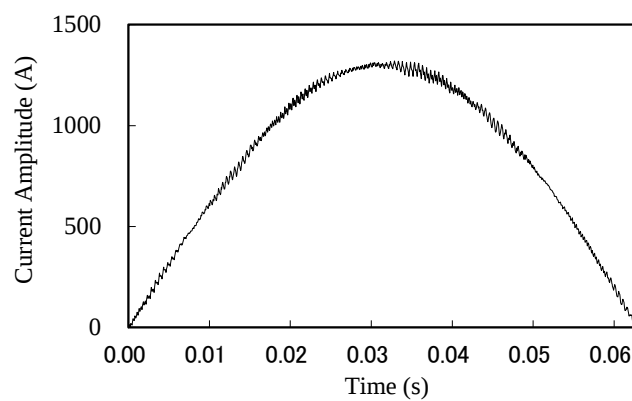


Fig. 4-4. 5 レベル・セルインバータ出力電流波形
(出力 3MW、回転速度 160 rpm 運転時) [5]

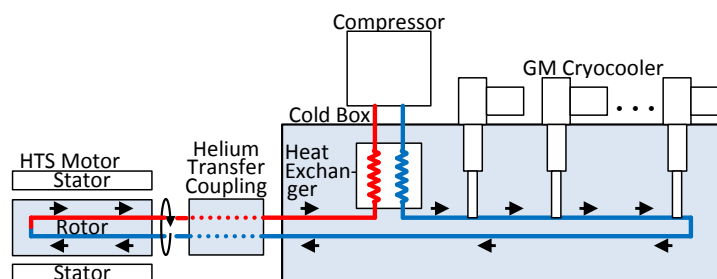


Fig. 4-5. 冷却システムの系統図[5]

4.3 一定負荷試験

一定負荷の試験は、性能試験と累積 100 時間試験の 2 種類の試験を実施したので、以下に報告する。本試験においては、設計通りの 4 層積層界磁コイルを 6 極に実装して、設計値との比較、信頼性評価のために最大出力までの試験を行った。

4.3.1 性能試験

性能試験では、運転領域全体を対象とした 3 MW 高温超電導モータの効率マップの作成を行った。効率の計測条件は、回転速度が 20 rpm から 160 rpm の 8 点、トルクが 30 kN から 180 kN の 6 点、合計 48 点で行った。各計測点での計測は、温度が一定になるのを確認してから行った。主な温度計測点は、超電導界磁コイル、電機子コイル、電流導入部、ヘリウム移送継手などである。最大出力は 3.02 MW（回転速度 160 rpm トルク 180 kNm）を記録した。設計値の最大出力が確認できた。

効率マップの一例として、回転速度 160 rpm の効率曲線を Fig. 4-6 に示す。3 MW 出力時の効率は 98 %で、その他の運転条件での効率も設計値とほぼ同じ結果が得られた。本試験中、超電導界磁コイルの温度は安定しており、電磁ノイズも非常に小さく、本試験は問題なく終了することができた。新規に開発した 5 レベル・セルインバータも全測定点で問題なく作動した。

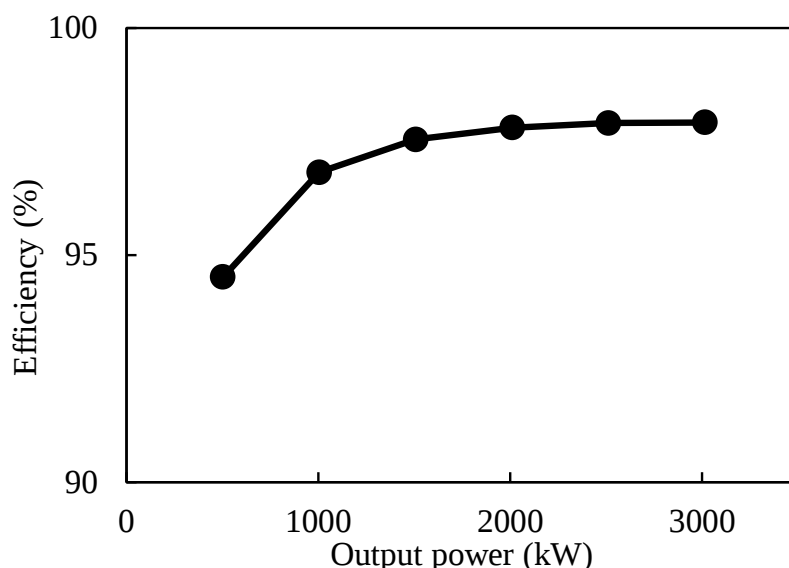


Fig. 4-6. 性能試験における回転速度 160rpm の効率曲線[5]

モータ効率は以下の式(4.1)により求めた。

$$\text{モータ効率} = \frac{\text{トルク} \times \text{ロータ回転速度}}{\text{モータ入力電力} + \text{冷却動力}} \quad (4.1)$$

トルクはモータ出力軸のトルク計、ロータ回転速度はモータの回転速度計により計測した。モータの入力電力は 5 レベル・セルインバータ内で計測を行った。冷却動力は、He ガスの循環流量とクライオスタット・ロータの入口と出口の He ガス温度差から求めたクライオスタット・ロータの冷却熱量を 0.01 で割って求めた。この時の冷却システムの成績係数を 0.01 と仮定した。

3 MW 出力時の損失の内訳を Table 4-1 に示す。ここでは、超電導モータの損失を、軸受損失と風損(Friction and windage loss)、鉄損(Iron loss)、電機子損失(Armature loss)、冷却損失(Cooling loss)、その他(Others)に分けて分析した。損失分析には、ダイナモメータで超電導モータをモータリングする Open-circuit test、Short-circuit test と電磁場解析により行った。詳細は、第 5 章で報告する。

Table 4-1. 3 MW 出力時の損失内訳[5]

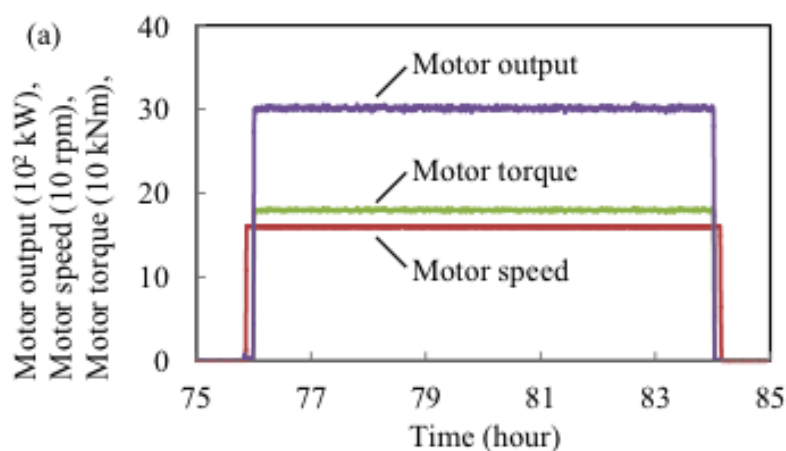
Loss	Percentage
Friction and windage loss	0.9%
Iron loss	10.6%
Armature loss	67.1%
Cooling loss	15.2%
Others	6.2%
Total	100%

4.3.2 累積 100 時間耐久試験

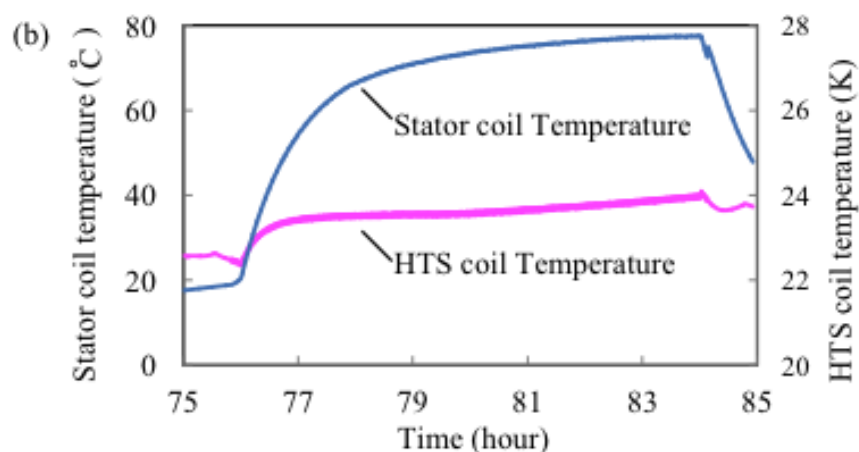
3 MW 高温超電導モータの長時間運転時の安定性及び耐久性の確認のため累積 100 時間耐久試験を行った。一日当たり最大 8 時間の 3 MW の定格出力運転を繰り返し、累積で 100 時間に到達するまで行った。回転速度は 160 rpm、超電導界磁コイルの励磁電流は 200A。冷却用の He ガスは運転中に循環させ、停止中には循環も止めた。真空ポンプは運転中に停止させ、運転停止中に動作させた。超電導界磁コイルの電流、電圧、温度は常に監視し、運転中に問題が発生していないこと確認しながら試験を実施した。

Fig. 4-7 に 76-84 時間の試験状態を示す。電機子コイルの温度は運転開始から 7 時間後に温度上昇率が 2 °C/h 以下になっており定常状態になっている。超電導界磁コイ

ルの温度も安定しており、安定した運転状態にある。



(a) モータ出力、モータ回転速度、モータトルク



(b) 電機子コイル温度、界磁コイル温度

Fig. 4-7. 累積 100 時間耐久試験における 76-84 時間の試験状態[5]

4.4 変動負荷試験

変動負荷試験では、船舶運航時の緊急衝突回避運航を想定した試験を行った。船舶の緊急衝突回避運航は、短時間でプロペラシャフトの回転を逆転するため推進システムにとっては厳しいものとなっている。緊急衝突回避運航を想定した 3 ケースの試験を実施した。テストプランは船舶の運航シミュレーションを行い決定した。運航シミュレーションは、船舶が定常走行時の状態を初期値とし、時間毎の推進モータ出力と船速から決まる船体流体抵抗を考慮して船速と位置を求めて、船舶の挙動をシミュレーションするもので、この結果からテストプランを決定した。3 ケースの船舶モデルを

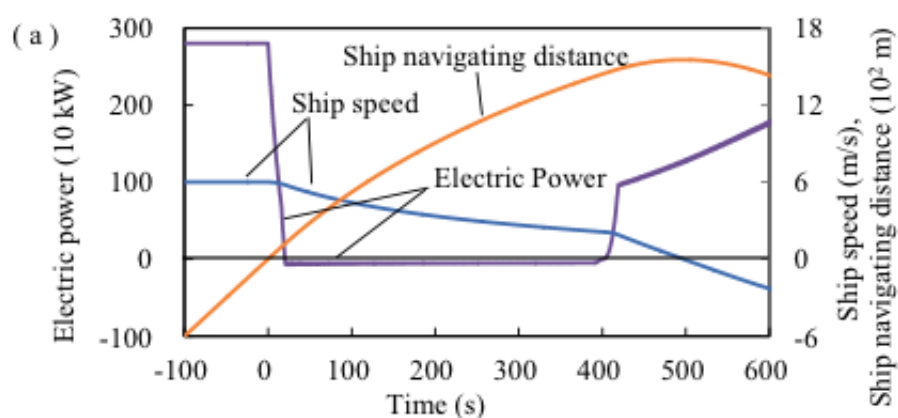
以下に示す。

Test 1: 3,000 ton-class ship で最大モータ出力は 1.0 MW

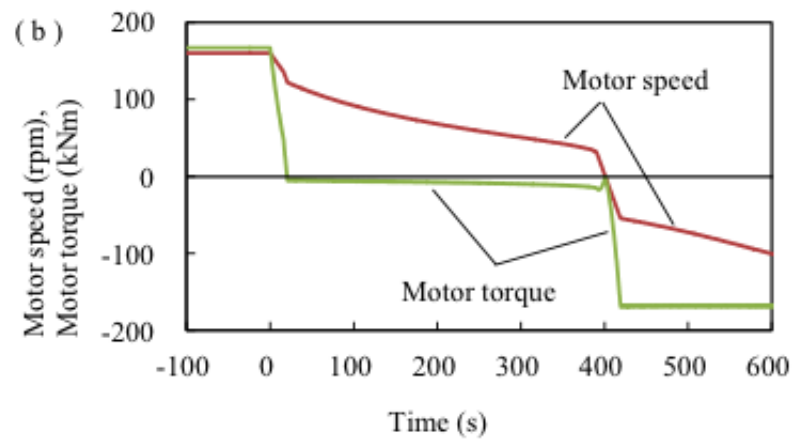
Test 2: 3,000 ton-class ship で最大モータ出力は 1.8 MW

Test 3: 12,000 ton-class ship で最大モータ出力は 2.8 MW

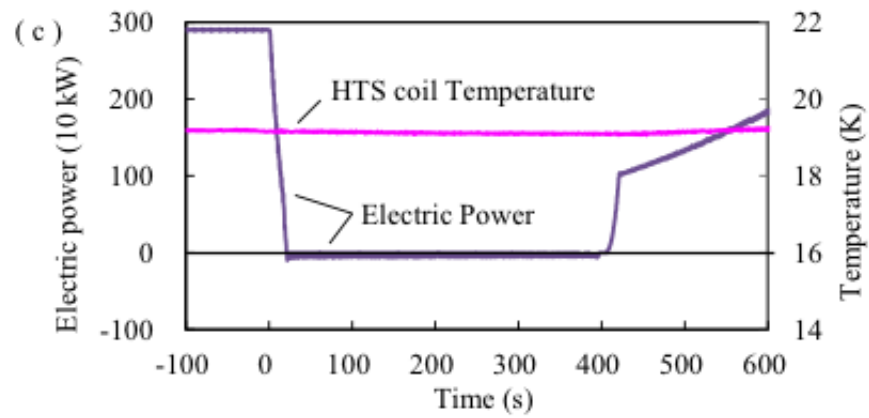
Fig. 4-7に Test 3 のテストプラン(a), (b) と Test 3 の試験結果(c), (d) を示す。Fig. 4-7 の(a), (b) のテストプランに示すように、Test 3 における船舶の初期速度は 6 m/s、モータ出力は 2.8 MW (160 rpm, 167 kNm) で定常の運航をしている。0 秒で緊急衝突回避運航を開始し、20 秒間でモータトルクは急激に低下する。その時点では船舶は慣性力を受けて前進方向に移動しているため、プロペラは流体力を受けて同方向へ回転を続けるが、モータはブレーキングを行っている。その時の回生パワーは試験設備の回生パワー消費能力の-50 kW を超えないようにコントロールされる。モータ回転速度が 0 となる約 400 秒までこの状態が続き、その後モータが逆回転を始め、モータトルクが 20 秒で-167 kNm まで急激に増加する。約 500 秒で船舶の速度が 0 となり、船舶は逆方向に進みだす。この 20 秒での 167 kNm のトルク変化は、モータ内部の磁場を変化させ、モータにとっては厳しい状態になる。Fig. 4-7 の(c), (d) の試験結果に示すように、モータ回転速度とモータスピードはほぼテストプランと同じ挙動を示しており、超電導界磁コイルの温度も安定しており、本試験はテストプラン通りの試験を問題なく終了できた。Test 1、Test 2 も同様に問題なく終了できた。



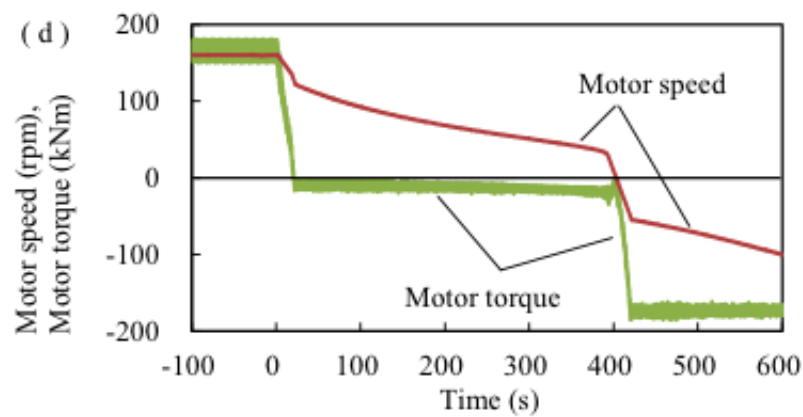
(a) テストプラン (モータ入力電力、船舶速度、船舶移動距離)



(b) テストプラン（モータ回転速度、モータ出力トルク）



(c) 試験結果（モータ入力電力、界磁コイル温度）



(d) 試験結果（モータ回転速度、モータ出力トルク）

Fig. 4-8. Test 3 のテストプランと試験結果[5]

4.5 試験後検査

一定負荷試験と変動負荷試験の終了時の運転時間は以下となる。

- ・ 3 MW 出力の全運転時間：106 時間
- ・ 全運転時間：238 時間
- ・ 超電導界磁コイルの全励磁時間：785 時間
- ・ 超電導界磁コイルの全励磁回数：135 回
- ・ 超電導界磁コイルの全冷却回数：23 回

負荷試験終了後に 3 MW 高温超電導モータを分解し、主要な部品の目視検査を行った。Fig. 4-9 に負荷試験後の超電導界磁コイルの写真を示す。超電導界磁コイル、トルクチューブ、スライド機構、超電導電流リード、ヘリウム移送継手の主要部品には問題は発見されなかった。更に、超電導界磁コイルは、試験の後に 77 K での電流-電圧特性を計測し、試験前と比較したが、ほぼ同じ結果であった。これらの検査により超電導界磁コイル及び主要部品で損傷が発生していないことを確認した。本負荷試験により、我々の従来の研究に比べてより高い信頼性の実証が行えた。



Fig. 4-9. 負荷試験後の超電導界磁コイルの写真

4.6 結論

本章では、3 MW 高温超電導モータの負荷試験を報告した。以下の成果が得られ、これにより従来に比べて高い信頼性の実証が行えた。実用化に向けては、更なる信頼性の実証確認のための実運用下でのフィールドテストを行っていく必要がある。また、フィールドでの運用上の問題点も洗い出し、解決を行っていききたい。

- 3 MW 高温超電導モータを対象として、一定負荷と船舶の実航行の状況が模擬できる超電導モータ試験設備の導入を行った。工場内の電力負荷に影響なく試験が実施できる動力循環式を採用した。効率化と静粛化のために超電導モータ駆動用の低歪み 5 レベル・セルインバータを新規に開発した。
- 性能試験では、一定負荷下での運転領域全体を対象とした効率マップが作成できた。最大出力は 3.02 MW を達成し、設計値の最大出力が確認できた。3 MW 出力時の損失の内訳の算出ができた。
- 累積 100 時間耐久試験では、3 MW 定格出力の累積 100 時間の運転を問題なく終了できた。
- 変動荷重試験では、3 ケースの船舶の緊急衝突回避運航を想定した試験を行った。20 秒での 167 kNm のトルク変化を発生させる厳しい試験であったが、問題なく終了できた。
- 3 MW 出力の全運転時間は 106 時間、全運転時間は 238 時間に達した。
- 試験終了にモータの分解検査を行い、超電導界磁コイル、トルクチューブ、スライド機構、超電導電流リード、ヘリウム移送継手の主要部品で損傷が発生していないことを確認した。

参考文献

- [1] S. Woodruff, H. Boenig, F. Bogdan, T. Fikse, L. Petersen, M. Sloder-beck, G. Snitchler, M. Steurer, “Testing a 5 MW high-temperature superconducting propulsion motor,” *Proc. 2015 IEEE Elect. Ship Technol. Symp.*, pp. 206-213, Jul. 27 2005.
- [2] G. Snitchler, B. Gamble, S. S. Kalsi, “The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2206 – 2209, Jun. 2005.

- [3] B. Gamble, G. Snitchler, T. MacDonald, “Full power test of a 36.5 MW HTS propulsion motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1083 – 1088, Jun. 2011.
- [4] M. Steurer, S. Woodruff, H. Boenig, F. Bogdan, M. Sloderbeck, “Hardware-in-the-loop experiments with a 5 MW HTS propulsion motor at Florida State University’s power test facility,” *Proc. 2007 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting*, Jun. 24–28, 2007.
- [5] T. Yanamoto, M. Izumi, K. Umemoto, T. Oryu, Y. Murase, and M. Kawamura, “Load test of 3 MW HTS motor for ship propulsion”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 8, Dec. 2017, Art. no. 5204305.

第 5 章

3 MW 高温超電導モータの 損失分析技術開発

5.1 序論

前章までで、3 MW 高温超電導モータの小型、高効率、高信頼の実証を行ってきた。実用化に向けては、船舶推進機用モータの要求仕様である高効率、小型、高信頼性、低コストを高レベルで満足させることが必要である。そのためには、低コスト線材、新素材等の新技術採用が必要で、それらの新技術を効率良く適用するためには、基本にある設計技術の高度化が必要となってくる。

超電導モータの特徴の1つである高効率に関する設計技術では、効率予測技術の精度向上が重要であり、そのためには、損失分析技術の構築化必要である。

第4章で述べたように、3 MW 高温超電導モータでは、界磁コイル、ロータ構造、電機子コイルでは高効率化対策を採用しており、これらの詳細な分析を行った。本章では、これらを報告する。

超電導モータの損失分析に関しての研究は、R. Fair らが水力発電用の高温超電導発電機の開発において低温部の熱負荷の分析を行っている[1]。また、S. K. Baik らは、1 MW クラスの高温超電導モータの 500 kW 出力時の損失分析を行っている[2]。

5.2 超電導モータにおける損失

Fig. 5-1 に 3 MW 高温超電導モータの構造図、ラジアル型の回転超電導界磁コイルの同期モータにおける損失内訳を Table 5-1 に示す。

軸受損失と風損(Friction and windage loss)は、ロータを支持する軸受けの摩擦損失とロータが回転することによって発生する空気抵抗による損失である。鉄損(Iron loss)は、バックヨーク等の磁性体で発生する損失である。

電機子損失(Armature loss)の内訳は、電機子コイルのジュール発熱損(Joule heating loss)、電機子コイルの単一素線の渦電流損(Individual wire eddy current loss)、電機子コイルの循環渦電流損失(Circulating eddy current loss)である。

冷却損失(Cooling loss)はクライオスタット・ロータ内を冷却するための損失で、その内訳は、超電導界磁コイルの発熱損失(HTS field coil heating loss)、電流リード等で発生するジュール発熱損(Joule heating loss)、トルクチューブ等で発生する熱伝導損失(Thermal conduction loss)、ヘリウム移送継手における低温 He ガスの漏洩による熱漏洩損(Heat leakage loss)、輻射による入熱である輻射損失とその他(Radiation loss, etc.)である。その他(Others)は、漂遊負荷損である。これらの損失の分析を次節以降で行った。

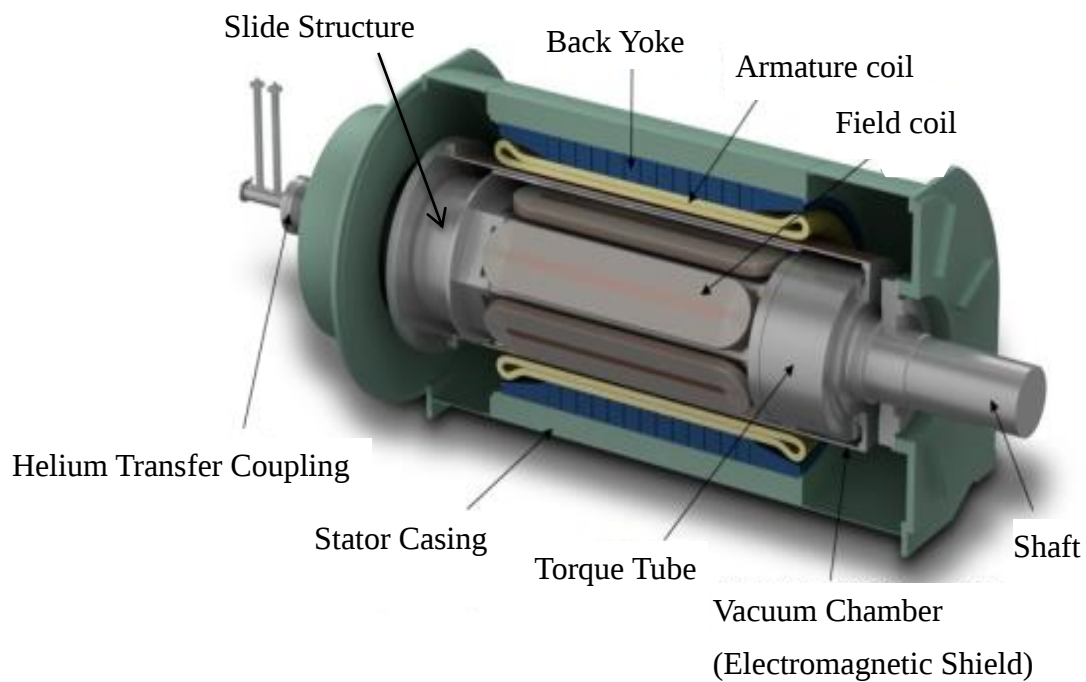


Fig. 5-1. 3 MW 超電導モータ構造図[3]

Table 5-1. 3 MW 高温超電導モータにおける損失内訳[4]

Friction and windage loss	
Iron loss	
Armature loss	Joule heating loss
	Individual wire eddy current loss
	Circulating eddy current loss
Cooling loss	HTS field coil heating loss
	Joule heating loss
	Thermal conduction loss
	Heat leakage loss
	Radiation loss, etc.
Others	Stray load loss, etc.

5.3 損失評価試験及び解析

3 MW 超電導モータの各損失を算出するために、Open-Circuit 試験、Short-Circuit 試験、非回転時のロータ内部計測試験を実施したので、これらを報告する。

5.3.1 Open-Circuit 試験と Short-Circuit 試験

軸受損失と風損、漂遊負荷損を算出するために、同期モータでの損失分析として規格化されている Open-Circuit 試験と Short-Circuit 試験を実施した[5]。Open-Circuit 試験は電機子全端子開放の状態ダイナモメータにより 160 rpm で 3 MW 高温超電導モータを駆動し、超電導界磁コイルの励磁電流を増加させて試験を行い、電機子電圧、超電導界磁コイル励磁電流、トルクを計測し、計測したトルクと回転速度を積算して駆動損失を算出した。Short-Circuit 試験では、電機子全端子短絡状態で、同様に電機子電流、励磁電流、トルクを計測した。Open-Circuit 試験結果を Fig. 5-2 に、Short-Circuit 試験結果を Fig. 5-3 に示す。

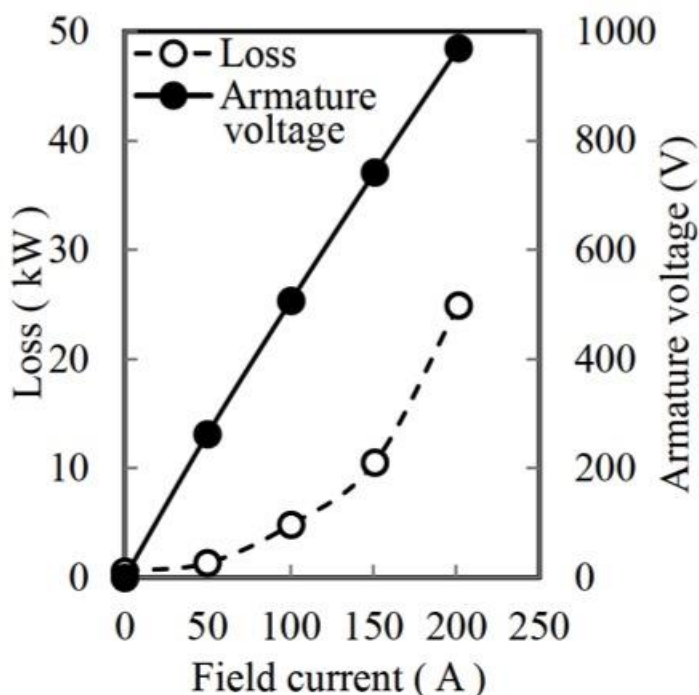


Fig. 5-2. Open-Circuit 試験結果（回転速度 160 rpm） [4]

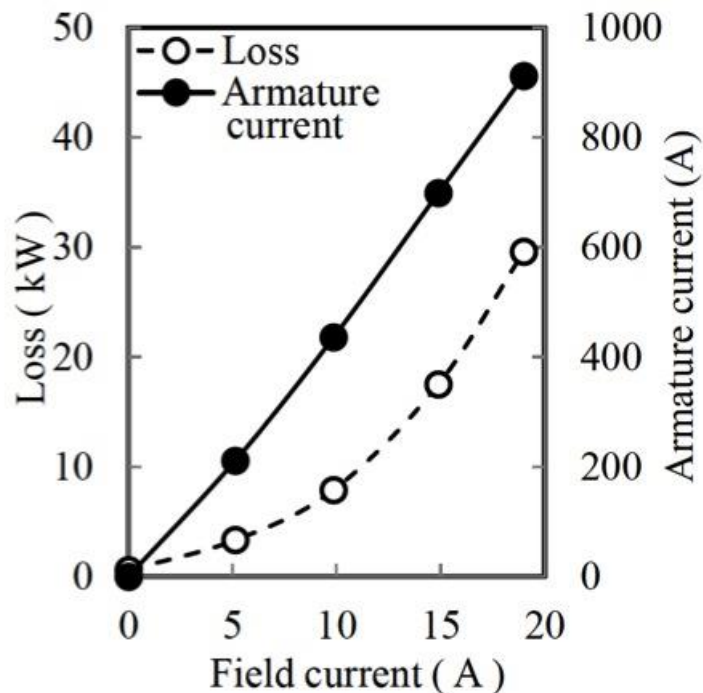


Fig. 5-3. Short-Circuit 試験結果（回転速度 160 rpm） [4]

5.3.2 非回転時のロータ内部計測試験

負荷試験では、回転時のロータ内部の計測はスリップリング経由のため監視用に限定して行っており、十分な冷却損失の分析はできなかった。冷却損失の分析を行うため非回転時のロータ内部の電圧、電流、温度の詳細計測を行なった。

<回転時>

- 電圧：7 点（超電導コイル、励磁電源出力）
 - 電流：1 点（励磁電源出力）
 - 温度：6 点（超電導コイル、電流リード部等）
- ※電圧 6 点、温度 6 点はスリップリング経由で計測

<非回転時>

- 電圧：41 点（超電導コイル、電流リード部等、励磁電源出力）
- 電流：1 点（励磁電源出力）
- 温度：65 点（超電導コイル、電流リード部、トルクチューブ、スライド機構、ロータコア、冷媒用配管部等）
- 磁束密度：1 点

非回転時は、上記に示す様に詳細な計測を行った。非回転時のロータ内部計測点の例を Fig. 5-4 に示す。非回転時のロータ内部の温度分布は、回転時の温度分とほぼ同じことを確認している。

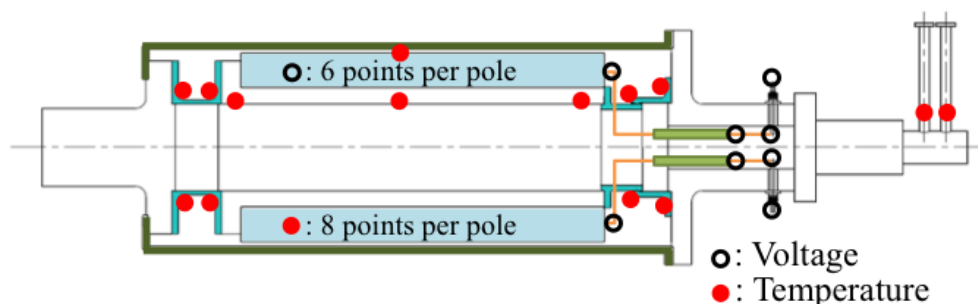
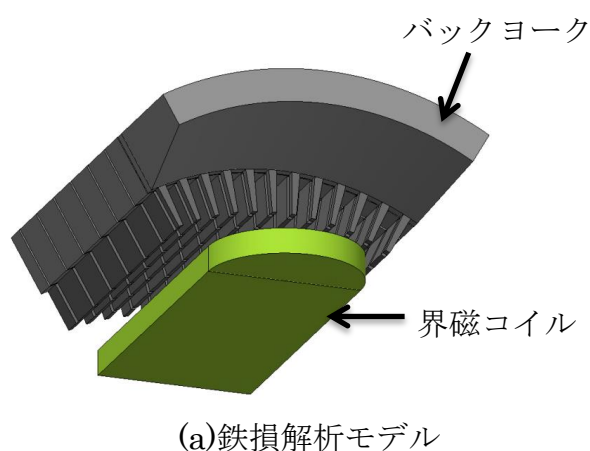


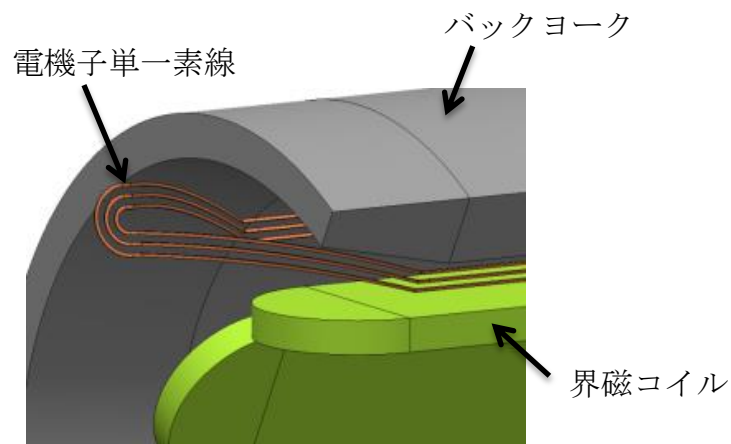
Fig. 5-4. 非回転時のロータ内部計測点の例[4]

5.3.3 電磁解析による損失予測

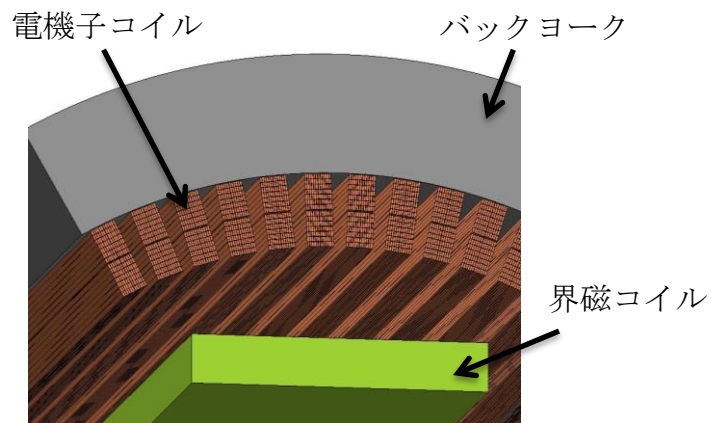
電磁解析により鉄損、電機子コイルの単一素線内渦電流損、電機子コイルの循環渦電流損失の予測を行った。

鉄損は、Fig. 5-5(a)に示す界磁コイル、バックヨークをモデル化して求めた。電機子コイルの単一素線循環渦電流損失は、Fig. 5-5(b) に示す電機子単一素線、界磁コイル、バックヨークをモデル化して求めた。電機子コイルの循環渦電流損失は、Fig. 5-5(c) に示す電機子コイル、界磁コイル、バックヨークをモデル化した電磁解析とコイル端転移接続をモデル化した電気回路の連成解析で求めた。





(b)電機子コイルの単一素線内渦電流損失解析モデル



(c)電機子コイルの循環渦電流損失解析モデル

Fig. 5-5. 電磁解析モデル

5.4 損失の分析結果

3 MW 出力時の各損失を以下に説明する。

- (1) 軸受損失と風損については、Open-Circuit 試験での超電導界磁コイルの励磁電流 0 A の駆動損失を軸受損失と風損とした。
- (2) 鉄損は、電磁解析から求めた。
- (3) 電機子損失の詳細は以下の様に算出した。
 - ① ジュール発熱損は、3 MW 性能試験で計測した電機子電流と、同じく 3 MW 性能試験で計測した電機子温度における電機子コイルの DC 抵抗値を推定し、それらを積算して求めた。
 - ② 単一素線の渦電流損は、電磁解析から求めた。
 - ③ 循環渦電流損失は、電磁解析から求めた。

- (4) 冷却損失は、第4章で述べたように、3 MW 性能試験における He ガスの循環流量とクライオスタット・ロータの入口と出口における He ガス温度差から求めたクライオスタット・ロータの冷却熱量を 0.01 で割って求めた。この時の冷却システムの成績係数を 0.01 と仮定した。
- (5) その他は漂遊負荷損とし、Short-Circuit 試験の駆動損失から、電機子電流値と試験中の電機子温度における電機子コイルの DC 抵抗値を積算して求めたジュール発熱損を引いて算出した。
- (6) 冷却損失の詳細は以下の様に算出した。
- ① 超電導界磁コイルの発熱損失は、非回転時のロータ内部計測試験で計測した界磁コイルの電圧と電流を積算して算出した。
 - ② 電流リード等で発生するジュール発熱損は、非回転時のロータ内部計測試験で計測した電流リード部の電圧と電流を積算して算出した。
 - ③ 熱伝導損失は、非回転時のロータ内部計測試験で計測したトルクチューブ、スライド機構、電流リード部の温度分布より算出した。
 - ④ 熱漏洩損は、ヘリウム移送継手要素試験より求めた。
 - ⑤ 輻射損失とその他は、クライオスタット・ロータの冷却熱量から上記の超電導界磁コイルの発熱損失、ジュール発熱損、熱伝導損失、熱漏洩損を差し引いて算出した。

3 MW 出力時の損失詳細を Fig. 5-6 に示す。効率化対策として行った電機子コイルのコイル端転移接続は、循環渦電流損失が 4.7% と低減できており、その効果はあったと考えられる。また、非磁性ティースの採用も、鉄損が 10.6 %と低減できており、その効果はあったと考えられる。これらの効果は設計ステージでの予測とほぼ一致している。

電機子コイルに信頼性と製造性を考慮して従来型の銅巻線を採用したため、電機子のジュール発熱損 39.8 %、電機子の単一素線の渦電流損 22.6 %が大きくなっている。これらも設計ステージでの予測とほぼ一致している。この対策としては、リッツ線が知られているが、信頼性と製造性、更に高いコストの課題から採用を行わなかった。更に効率向上のためには、リッツ線及びそれと同等の対策が必要で、そのためには設計技術と製造技術の向上が必要である。

冷却損失 15.2 %の内訳を Fig. 5-7 に示す。超電導界磁コイルの発熱損失は 2.8 %で、磁場転向板の対策も含めて小さい損失となっている。電流リード部の熱伝導損失は 8.3 %で、超電導電流リードによる対策が効果的であった。

冷却損損失で大きいのは、トルクチューブの熱伝導損失 27.9 %、輻射損失とその他

24.0 %、スライド機構の熱伝導損失 17.1 %、電流リード部のジュール発熱損 16.7 % である。トルクチューブは強度が高く、熱伝導率の低いニッケルベースの超合金を採用し、その肉厚はトルク伝達ができる範囲でできる限り薄くし熱伝導損失を低減させた。更なる低減のためには、FRP がトルクチューブの材質候補と考えられるが、低温での強度データが不十分のため採用を見送った。FRP を採用するためには低温での強度試験が必要である。同様にスライド機構の熱伝導損失低減のためには、新たなスライド機構の考案が必要である。輻射損失とその他に関しては、輻射損失対策の更なる検討が必要である。

これらの損失の分析結果から、高効率、小型、高信頼性を狙った現状のロータ設計は効果的であると考えられる。更なる効率化に向けては、新たなロータ構造の考案が必要と思われる。これらの分析結果は、輻射損失とその他を除いて、設計ステージの損失予測とほぼ一致している。

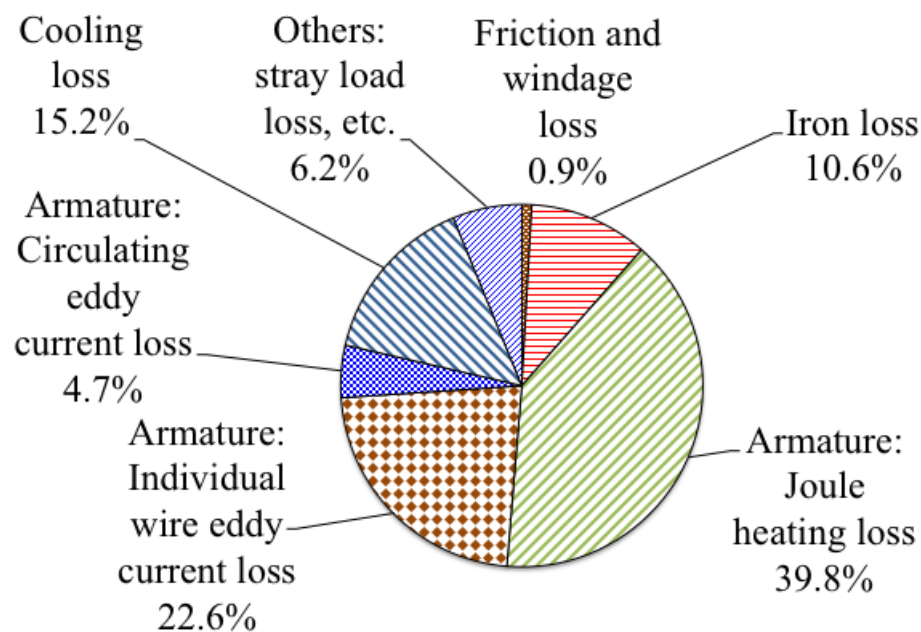


Fig. 5-6. 3 MW 出力時の損失詳細[4]

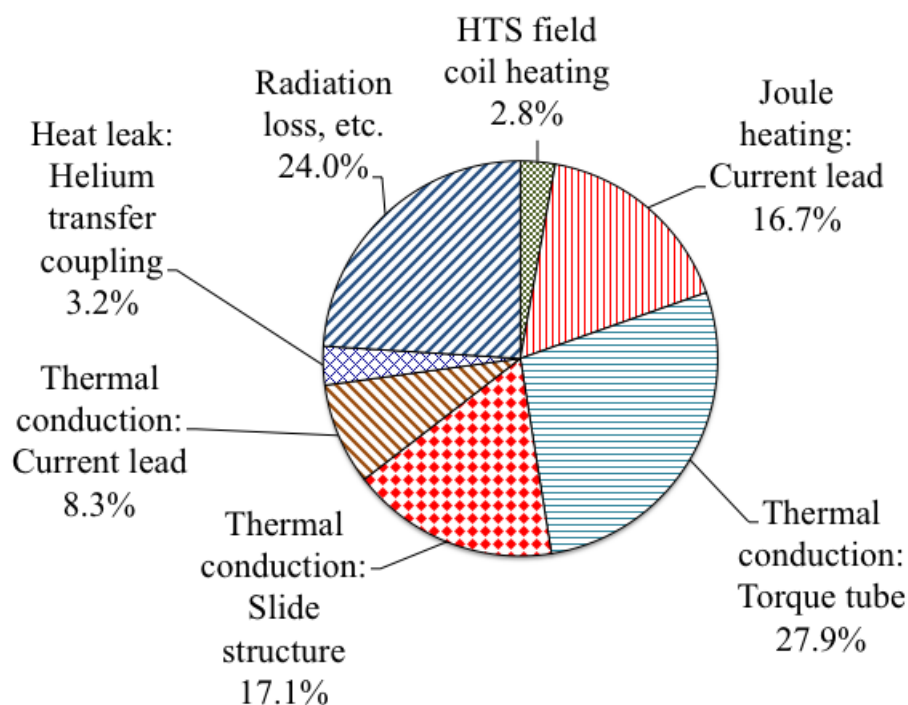


Fig. 5-7. 3 MW 出力時の冷却損失詳細[4]

5.5 結論

本章では、効率予測技術の精度向上のための 3 MW 高温超電導モータの損失分析を行った。その成果を以下に纏める。

- Open-Circuit 試験、Short-Circuit 試験、非回転時のロータ内部計測試験、磁場解析により 3 MW 出力時の超電導モータの各損失を算出した。
- 電機子のコイル端転移接続、非磁性ティースは損失低減の効果があった。
- 電機子コイルに信頼性と製造性を考慮して従来型の銅巻線を採用したため、ジュール発熱損、単一素線の渦電流損が大きくなった。これらは、設計段階での予測とほぼ同じで、更なる低減のためには新たな対策の考案が必要。
- 冷却損失の内、超電導界磁コイルの発熱損失、電流リード部の熱伝導損失は小さく、磁場転向板、超電導電流リード採用の効果があった。
- 冷却損失では、トルクチューブ熱伝導損失、スライド機構熱伝導損失、電流リード部ジュール発熱損、輻射損失とその他が大きかった。これらは、輻射損失とその他を除いて設計段階での予測とほぼ同じで、更なる低減のためにはロータの新機構、新材料の適用等が必要である。
- 本研究で行った詳細な損失分析より、今後は効率予測技術の改善及び超電導モータの高効率化が可能となった。

参考文献

- [1] R. Fair, C. Lewis, J. Eugene, M. Ingles, “Development of an HTS hydroelectric power generator for the Hirschaid Power Station,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, 2010, Art. no. 032008.
- [2] S. K. Baik, *et al.*, “Loss analysis of a 1 MW class HTS synchronous motor,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 153, 2009, Art. no. 012003.
- [3] T. Yanamoto, M. Izumi, K. Umemoto, T. Oryu, Y. Murase, and M. Kawamura, “Load test of 3 MW HTS motor for ship propulsion”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 8, Dec. 2017, Art. no. 5204305.
- [4] T. Yanamoto, M. Izumi, Y. Murase, and T. Oryu, “Loss Analysis of a 3 MW HTS Ship Propulsion Motor”, submitted to *IEEE Trans. Appl. Supercond.*
- [5] *IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part I Acceptance and Performance Testing Part II Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis*, Revision of IEEE Std 115-1995.

第6章

20MW 級高温超電導モータ向け キーハード技術の開発

6.1 序論

新興国の経済発展、エネルギー源の多様化により海運物流が増大しており、そのような状況下で、大型の液化天然ガス運搬船、超大型コンテナ船、超大型自動車運搬船等は、荷主の環境意識の高さもあって、環境対応、省エネルギーが最も求められている。この解決策として、これらの大型船への超電導モータの適用が従来以上に期待されている。これに対応すべく、大型船での超電導モータ実用化を目指したキーハード技術の開発を、Fig. 6-1 に示す研究目標と実施体制で、(独) 科学技術振興機構の戦略的イノベーション創出推進事業として支援を受けて行った。

本課題は高効率、コンパクトかつ高い運転信頼性を持つ実用超電導回転機の実現を可能とする下記キーハード技術の確立を目標とするものである。

- 以下のキーハード技術を統合し、船舶用 20 MW 級超電導回転機を実現するための設計手法
- 冷凍機を回転子と一体化させた超電導コイル冷却システムの確立
- 超電導界磁コイルの受ける機械的ストレス下でロバストかつ高い信頼性で超電導性能（高電流密度、低損失性能）を維持するための導体/コイルの設計技術
- 超電導界磁コイルの変動磁界に対する損失の低減技術
- クエンチに対してコイルが損傷を受けないためのクエンチ保護技

本論文では、上記の船舶用 20 MW 級超電導回転機設計技術と冷凍機・回転子一体型冷却システムについて述べる。

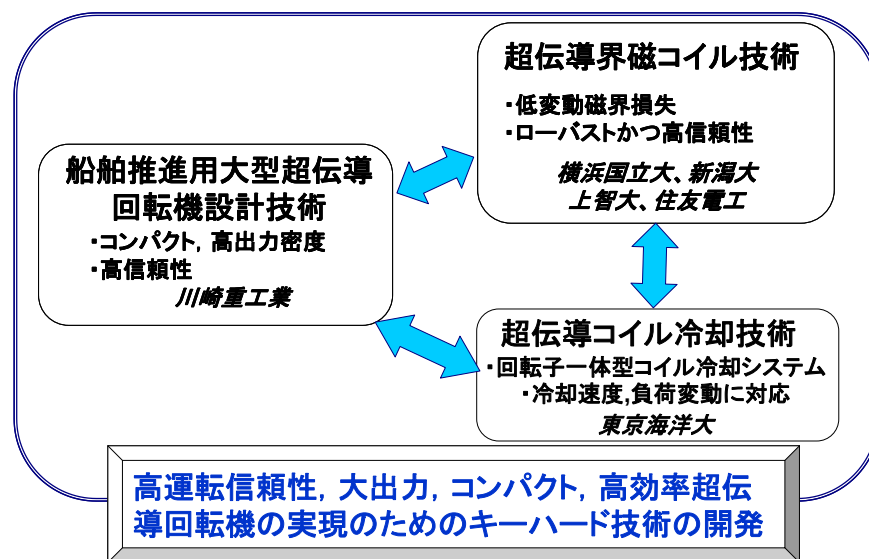


Fig. 6-1. 研究目標と研究体制[1]

6.2 船舶推進用大型超電導回転機械設計技術

外航を航行する大型電気推進船の推進用主電動機として 20 MW 級大出力高温超電導モータを採用することを想定し、その概念設計を実施した。その基本仕様を Table 6-1 に示す。20 MW の出力があれば、大型の液化天然ガス運搬船、超大型コンテナ船等の大型の外航商船の出力レンジをほぼカバーできる。大型船の船用推進器としては、一般にプロペラ型推進器が採用される。同一出力のプロペラ型推進器では、大直径すなわち大トルクでかつ低回転とした方が原理的に高効率となるため、大型船舶では、90 rpm 以下の低回転プロペラが採用されるのが一般的である。本開発では、伝達効率の向上より、推進用電動機とプロペラとは直結することを想定しており、この場合、プロペラの回転数は推進用電動機の回転数と等しくなる。

概念設計基本方針を Table 6-2 に示す。電気推進船の省エネ化を実現するためには、電動機をはじめとする電気機器の高効率が不可欠であり、99 %以上の高効率を目指すこととした。また、電動機のトルク密度を極大化すること、すなわち究極の小型化を目指すこととした。超電導材としては 77 K、自己磁場における臨界電流 300 A の BSCCO 系将来線材を念頭におく。また、ReBCO 系超電導線材を採用した場合のモータ設計に与える影響についても検討する。特に ReBCO 系線材に対しては、ロバスト性、クエンチ特性、交流損に注目した。

高温超電導界磁コイルの冷却方式としては、冷凍機・回転子一体型のネオン-ヘリウム混合ガスを冷媒としたサーモサイフォン方式を採用することとした。これは、船舶推進用電動機の負荷変動への対応、高信頼性に直結する部品点数の少なさ、小型の理由によるものである。超電導動作温度としては、冷却損の低減、初期冷却時間の短縮、メンテナンス性の向上等の観点よりできるだけ高温であることが望ましく、そのため、モータの高効率化・小型化と超電導動作温度の高温化の両立を目指した。

Table 6-1. 20 MW 級大出力高温超電導モータ基本仕様[1]

用途	船舶推進用
出力	20 MW
回転数	90 rpm
形式	界磁巻線型 同期電動機
回転子	直流印加型超電導界磁子（空芯構造）
固定子	常電動電機子巻線（空芯構造）

Table 6-2. 様概念設計基本方針[1]

効率	99 %以上（冷却損失含む）の高効率を目指す
体格	トルク密度（単位体積当たりトルク）の極大化
構造	空芯構造を採用
超電導	300 A 級将来線材を考慮
	BSCCO 系及び ReBCO 系線材の適用
冷却	冷凍機・回転子一体型ネオン-ヘリウム混合ガス使用 サーモサイフォン方式を採用
	超電導動作温度の高温化により冷却損低減

基本仕様や基本方針に基づき 20 MW 級高温超伝導モータの概念設計を行った。概念設計は、電磁場解析、熱伝導解析、強度解析等の各種の数値シミュレーション解析を援用することで効率的に行った。概念設計の結果として、20 MW 級高温超電導モータ構造図を Fig. 6-2 に、モータ断面形状と概念設計における電磁解析結果を Fig. 6-3 に示す。また、設計データ一覧を Table 6-3 に示す。

本高温超電導モータのトルク密度は、 56.3 kN/m^3 となった。これは、国内外の他の超電導モータと比較しても最高レベルに達している。超電導界磁コイルは、300 A 級 BSCCO 系線材のレーストラック形のダブルパンケーキコイル(DPC: Double Pancake Coil)とした。超電導コイルの動作温度は 37 K に設定された。この場合の冷却負荷は、超電導コイルの発熱、電流リードからの入熱、軸方向からの熱伝導入熱、径方向からの放射入熱を考慮し 400 W@30 K と推定された。ここでは、全体効率 99 % を満足するため、超電導コイルの発熱に占める超電導線材の許容交流損を 30 W と設定し、キーハード技術の一つである交流損失低減の達成目標とした。また、超電導コイルの動作温度設定値や冷却負荷の推定値、冷却システムを基本設計するための重要な要求仕様となる。

超電導コイルへの界磁電流の給電は、6 極毎の 4 系列方式とし、電流リードからの入熱量を推定した。この場合、1 系列の電流ループの超電導コイルのインダクタンスは約 100 H となった。インダクタンスや超電導コイルの基本構造は、クエンチ保護システムを基本設計するための重要なパラメータとなる。

超電導界磁コイルに負荷される電磁力の計算結果について、Fig. 6-3 に示す。各界磁極には 200 トン近い巨大な電磁力が作用していることがわかる。この様な巨大な電磁力を超電導コイル単体で支持することは困難であり、界磁極構造や周囲のコイル保持部の構造も併せて設計することが不可欠となる。このため、基礎データを取得するため、超電導コイルの内力分布を、コイル物性や周辺の支持条件を加味して詳細に推定

することで、キーハード技術の一つである超電導コイルや超電導線材のロバスト性評価技術の確立を目指している。

以上のように、20 MW 級大型高温超電導モータの概念設計を行うことで、開発対象としている各キーハード技術に対する要求仕様・着眼点を明確にすることができた。

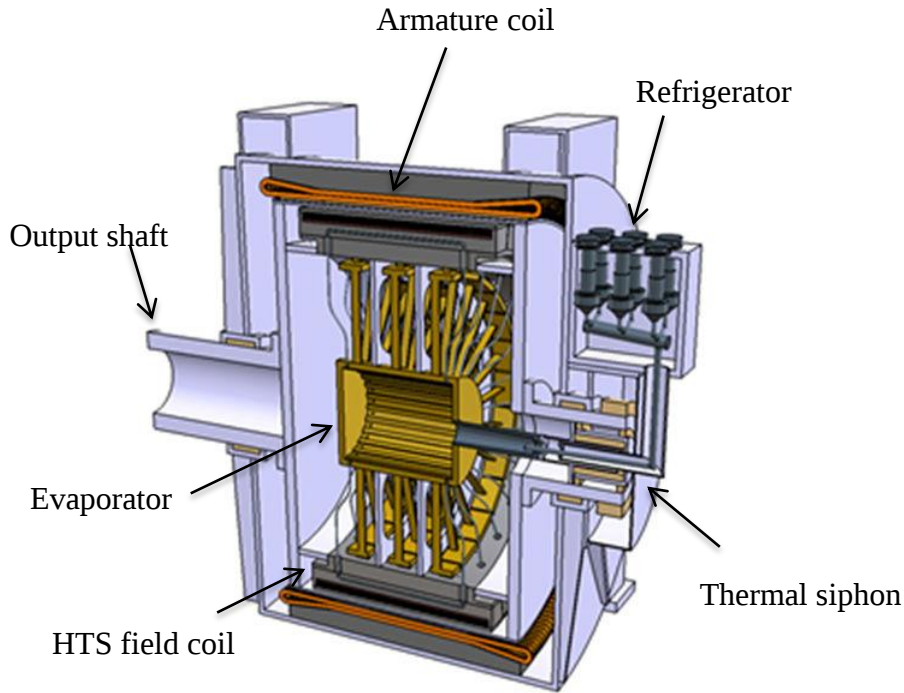


Fig. 6-2. 20 MW 級高温超電導モータ構造図[2]

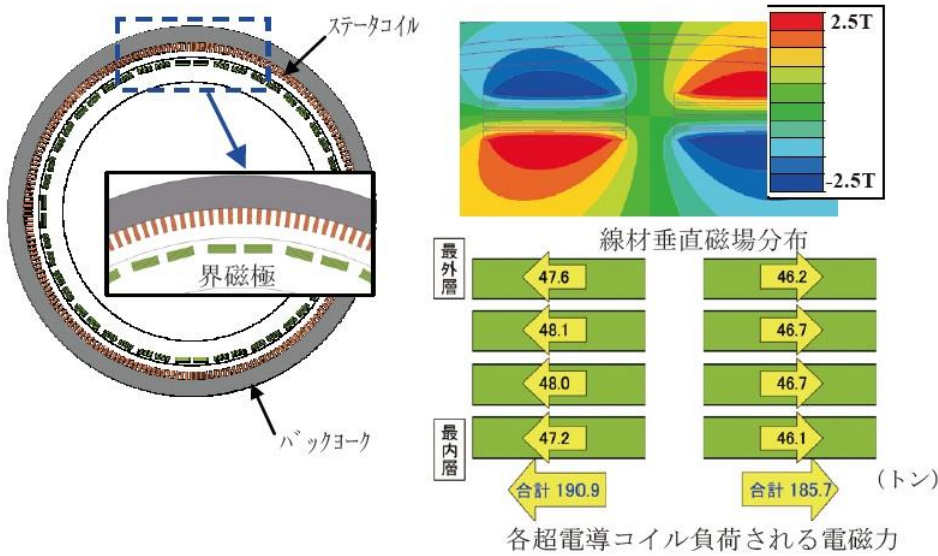


Fig. 6-3. 20 MW 級高温超電導モータ概念設計結果

Table 6-3. 20 MW 級高温超電導モータ設計データ一覧[1]

項目		値
電動機 基本 仕様	定格出力	20,000 kW
	定格回転数	90 min ⁻¹
	定格トルク	2,123 kNm
	極数	24
	相数	9
	スロット数	216
	電機子電圧	4,700 V
	モータ外径（バックヨーク外径）	4,000 mm
	軸受け間距離	3,000 mm
	モータ体積	37.7 m ³
	トルク密度（単位体積当りのトルク）	56.3 kNm/m ³
超電導	超電導コイル動作電流	200 A
	超電導コイル動作温度	37 K
	超電導線材の種類	BSCCO 系
	超電導線材の 77 K・自己磁場性能	300 A
	超電導コイル形式	レーストラック DPC
	超電導コイルターン数（1 コイル当り）	1,000 ターン
	超電導コイル直線長	1,300 mm
	超電導コイル積層数（1 極当り）	4
損失	電気損（電機子銅損、鉄損、漂遊負荷損）	133 kW
	冷却損（超電導コイル発熱、入熱他） （冷却システム COP=0.01@30 K）	400 kW
	機械損失（軸受損、風損、電源電力他）	29 kW
	合計	202 kW
全体効率		99%

6.3 超電導コイル冷却技術

20 MW 級高温超電導モータでは、コンパクトな冷却システムとして、冷凍機そのものをモータのロータと一体化させたネオン-ヘリウム混合ガス使用サーモサイフォン方式を採用する。超電導モータのロータ端部に取り付けた概念図を Fig. 6-4 に示す。本システムを用いると、システム全体がコンパクトになり、部品点数も少なくなり、信頼性も向上する。更に、冷却システムと超電導モータ間の冷媒輸送に伴う損失を最小化できるため効率が向上する。加えて、冷媒としてネオンとヘリウムの混合ガスを使用することで熱負荷変動に対する冷却のロバスト性も確保できる。この冷却装置の基本設計を行うとともに試作を行ってシステムの成立性の基本的な検証を行った。

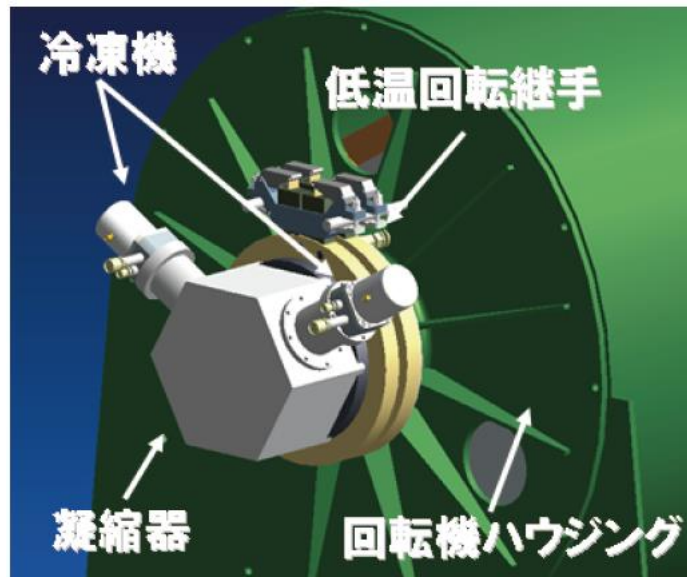


Fig. 6-4. 冷凍機・回転子一体型ネオン-ヘリウム混合ガス使用
サーモサイフォン概念図

ネオンガス単体冷媒によるサーモサイフォン冷却の場合、ネオンガス凝縮後、サーモサイフォン内の圧力が下がる。すると、冷却速度や熱負荷変動に対する制御性が低下する[3]。そこで、凝縮後も圧力低下させない様に、ネオンの凝縮温度では凝縮しないヘリウムガスをネオン冷媒に混合した。まずは、Fig. 6-5 に示すように、GM 冷凍機のコールドヘッド部に凝縮器を取り付け、下部に蒸発器を取り付けたサーモサイフォン冷却システムにより、ヘリウム混合の効果を検証した[4], [5]。

凝縮ネオンにヘリウムガスを加えることで、サーモサイフォン内の圧力は上昇し、それに伴って、凝縮ネオンの温度は飽和曲線に追従しながら上昇することを確認した。Fig. 6-5 の蒸発器の底に設置したヒータを使い、60 秒ごとに大きさを変えながら熱負

荷を加えた。その熱負荷に対する蒸発器の温度変化を調べた。熱負荷試験の熱負荷および得られた蒸発器の温度応答を Fig. 6-6 に示す。ヘリウムガスの供給量の増加に伴う温度変化の平均値の増加はネオンの飽和曲線に追従する。

熱負荷に対する蒸発器の温度変動は、加えるヘリウムの増加にともなって小さくなり、最終的にはネオンガス単体の場合に比べ、2 K から 1 K まで減少した。たとえば、ネオン 50 L とヘリウム 15 L を供給した場合 2.1 K の範囲で温度変動した。これは、冷却システム内の圧力の増加が、広範囲の伝熱と冷却効率に効果をもたらしたことを示している。

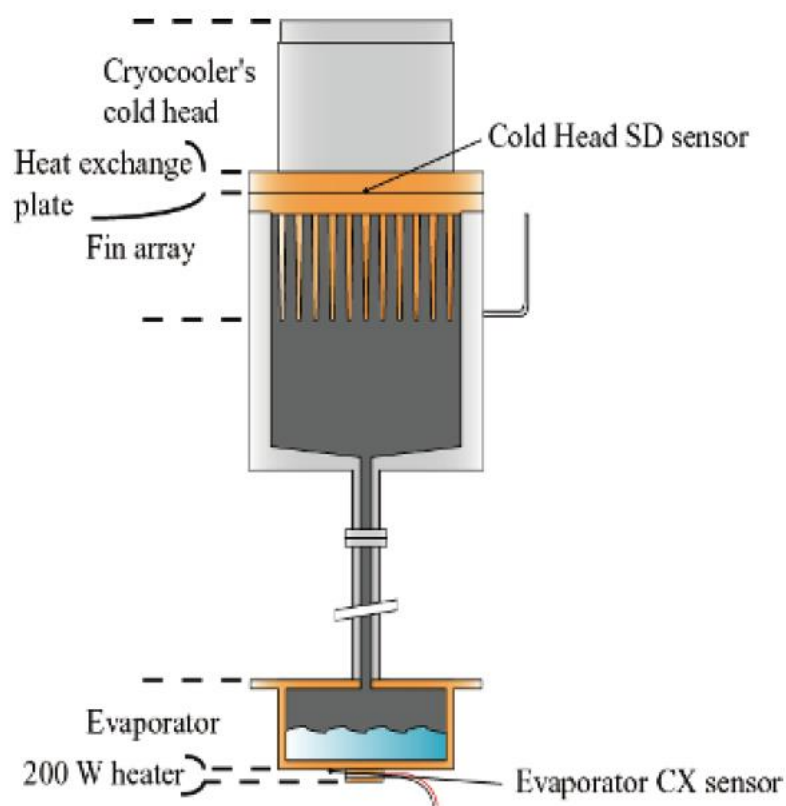


Fig. 6-5. サーマサイフォン予備試験装置概念図[5]

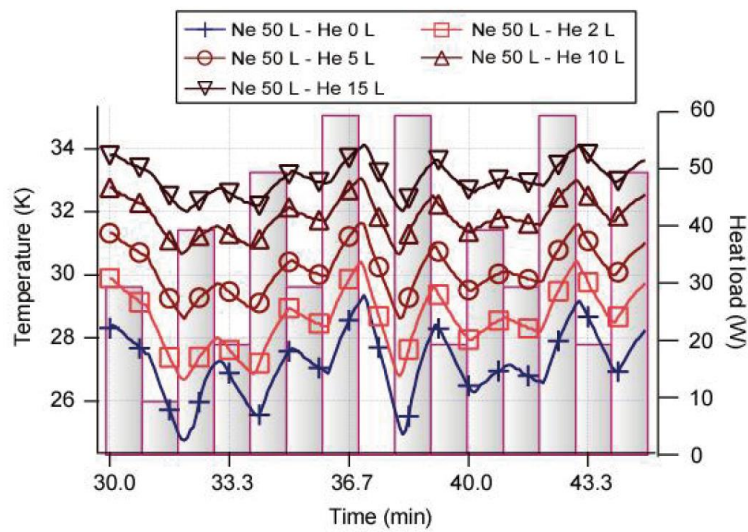


Fig. 6-6. サーモサイフォン予備試験における熱負荷変動による蒸発器温度変化[5]
 ヘリウム-ネオン混合比：ネオン 50 L、ヘリウム 0-15 L
 (ガス体積は 273.15 K、1 atm における計測値)

これらの効果を踏まえ、実際にこの冷却システムを用いて小型超電導モータのロータの冷却を行った。50 L のネオン単体の場合、室温から 30 K までの冷却に 500 分以上要したが、ヘリウムガスを 5 L 混合すると 340 分となり冷却時間は大幅に短縮される。以上の結果からネオンとヘリウムガスの混合媒体による冷却の優位性が実証された。

20 MW 級大出力高温超電導モータ基本仕様を考慮し、上部に 2 つの冷凍機を取り付けて、100W 級サーモサイフォン冷凍システムの基本設計と試作を行った。その試作機の写真を Fig. 6-7 に示す。上部に 2 つの凝縮器、下部に蒸発器を取り付けた垂直型のサーモサイフォンによる熱負荷試験を行い、その結果を Fig. 6-8 に示す。27.8 K で 100 W、29.9 K で 120 W、33.3 K で 150 W の冷却力を実証した[6]。冷却システムに関して特許を 2 件出願した[7]、[8]。

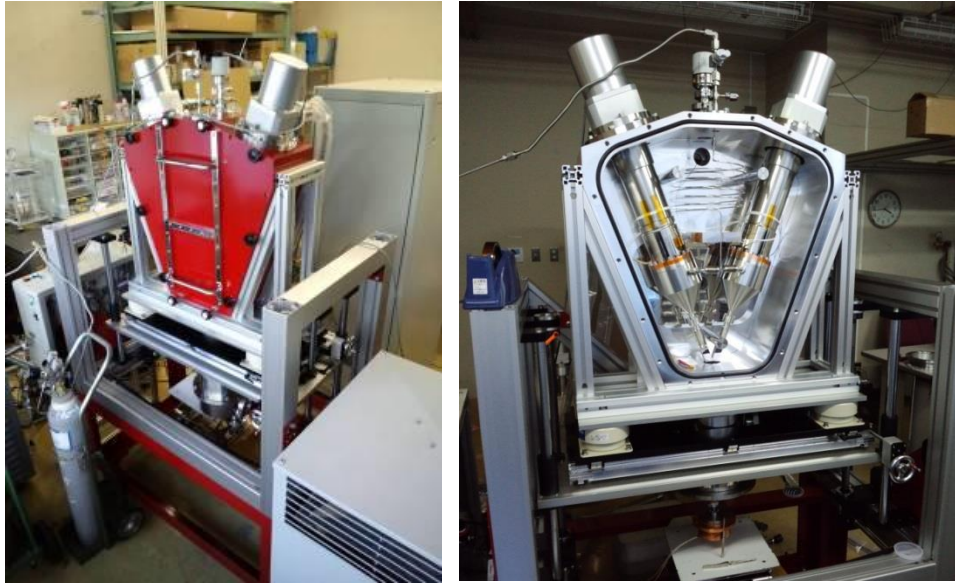


Fig. 6-7. 左図：100W 級サーモサイフォン冷凍システム外観写真
右図：内部構造写真[6]

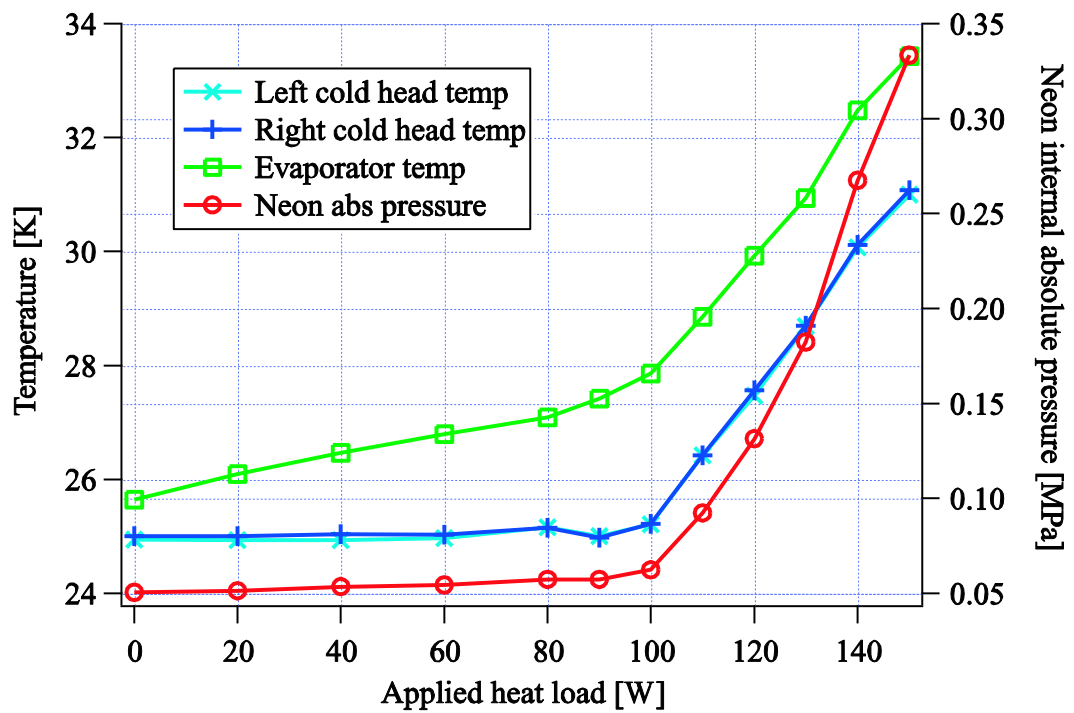


Fig. 6-8. 100W 級サーモサイフォン冷凍システム性能試験結果[6]

6.4 今後の計画

今後は、本研究開発で構築されたキーハード技術の開発成果を反映させて 20 MW 級大出力超電導回転機の実現にむけた設計技術の確立を目指すとともに、キーハード技術については実機スケールに近いモデルでの技術検証を行う。

6.4.1 超電導コイル冷却技術の検証

20 MW 級大出力超電導回転機ではそのロータ径は約 3m となるが、そのような大口径ロータを効率よく冷却し、超電導状態を安定的に維持することは、大出力超電導回転機の重要な成立条件となる。20 MW 級超電導回転機の実機ロータの約 1/2 縮尺モデルを試作し、ロータ一体型ネオン-ヘリウム混合ガス使用サーモサイフォン式冷却システムと結合することで、静止時及び回転時における、大口径ロータの成立性の検証を行う。そのような縮尺モデルを「ロータ模擬モデル」と名づけることとした。Fig. 6-9 にロータ模擬モデルの概念図を示す。ロータ模擬モデルは、外部モータで駆動することでロータを強制回転させ、冷却システムの成立性確認や各部温度データの時系列変化を把握する。

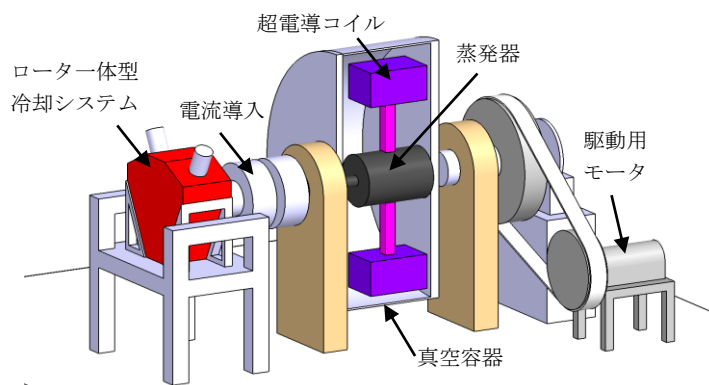


Fig. 6-9. ロータ模擬モデル概念図[1]

6.5 結論

大型船での超電導モータの実用化に向けて、20 MW 級超電導回転機設計技術開発と冷凍機・回転子一体型冷却システムの開発を行った。その結果を以下に纏める。

- 外航向けの 20 MW 級超電導モータを対象として、効率 99%、トルク体積密度 56 kNm/m³ の世界最高レベルの超電導モータの概念設計が完了した。これにより、開発対象としている各キーハード技術に対する要求仕様・着眼点を明確にできた。
- 低コスト・低損失が達成できる冷凍機・回転子一体化形式を採用し、負荷変動対応性に優れたたへリウム・ネオン混合冷媒によるサーマルサイホン方式冷凍システムを試作し、30 K で 120 W の冷却性能を実証した。冷凍システムについての特許を 2 件出願した。
- 今後の計画として、ロータ模擬モデルを試作し、回転子一体型冷却システムの検証試験を行う予定である。

参考文献

- [1] 柳本 俊之, 塚本 修巳, 梅本 勝弥, 林 和彦, 加藤 武志, 和泉 充, 孝雄智明, 福井 聡, 藤本 康孝, 「大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発」, 低温工学, vol. 48, no. 1, pp. 12-22, 2013.
- [2] T. Yanamoto, M. Izumi, M. Yokoyama, and K. Umemoto, “Electric propulsion motor development for commercial ships in Japan,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2333-2343, Dec. 2015.
- [3] B. Felder, M. Miki¹, K. Tsuzuki¹, M. Izumi, H. Hayakawa, “Optimization of a condensed-neon cooling system for a HTS synchronous motor with Gd-bulk HTS field-pole magnets,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, part 3, 2010, Art. no. 032009.
- [4] B. Felder, M. Miki, Z. Deng, K. Tsuzuki, N. Shinohara, M. Izumi, H. Hayakawa, “Development of a cryogenic helium-neon gas mixture cooling system for use in a Gd-bulk HTS synchronous motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 2213 – 2216, Jun. 2011.
- [5] B. Felder, et al.: “Advances in a Gd-Bulk HTS Synchronous Motor,” (in Japanese), *TEION KOGAKU*, vol. 46, pp. 86-93, 2011.

- B. Felder, 都築 啓太, 三木 基寛, 和泉 充, 「Gd 系バルク高温超電導体を用いた同期モータ」, 46 巻, 3 号, pp. 89-93, 2011.
- [6] B. Felder, M. Miki, K. Tsuzuki, N. Shinohara, H. Hayakawa, M. Izumi, “A 100-W grade closed-cycle thermosyphon cooling system used in HTS rotating machines,” *Proc. AIP Conf. Proc.*, vol. 1434, pp. 417-424, 2012.
- [7] 「回転機」, 村瀬陽平, 柳瀬悦也, 柳本俊之, 和泉充、三木基寛、山口康太, 特願 2015-172527, , PCT/JP2016/003564
- [8] 「回転機」, 村瀬陽平, 柳瀬悦也, 柳本俊之, 和泉充、三木基寛、山口康太, 特願 2015-172528, PCT/JP2016/003565

第 7 章

結論と実用化に向けて

7.1 結論

超電導モータは、従来モータに比べ大幅な高効率化、小型化が図れるため、商船の環境負荷低減を実現できる船舶推進システム用の革新的なモータとして非常に期待されている。超電導モータの実用化のためには、船舶推進用モータの要求仕様、すなわち高効率、小型、高信頼性、低コストを満足する必要がある。本研究ではこれを早期に満足するために、実証機開発、実証機による信頼性実証、実用化に必要な設計技術、及び大出力化に向けた要素技術開発を行った。

まずは、早期の実用化を達成するための基礎設計技術確立を目的として、1 MW 高温超電導モータの開発を行った。実用化への道筋をより明確にし、開発を効率良く進めることが出来るようにポッド式電気推進システムへの適用を想定して高効率、小型、高信頼性を目指した要素技術開発と設計技術開発を行った。要素技術開発としては、超電導界磁コイル、クライオスタット・ロータ、ヘリウム移送継手の開発を行った。超電導界磁コイルについては、超電導コイルの各種要素試験を行い、高い I_c を保持し信頼性のある国内最大サイズの全長 1478 mm の大型長尺レーストラック超電導コイルが開発できた。クライオスタット・ロータでは、内部の界磁コイルを熱伝導冷却する方式を採用し、クライオスタット・ロータ単独での冷却試験において界磁コイルを 30 K まで冷却することができた。ヘリウム移送継手については、目標の内部漏洩量 5 % 以下の性能が達成できた。これらの技術を用いて 1 MW 高温超電導モータを開発し、国内最高出力 450 kW を達成し、この試験結果から 1 MW 出力時の性能が設計値とほぼ同等であることを推定確認した。この開発により 3 年の短期間で超電導モータ開発の基礎設計技術が確立できた。

1 MW 高温超電導モータ開発によって構築できた基礎設計技術を用いて、世界最高クラスの小型化、高効率、高信頼性の実証を目指した 3 MW 高温超電導モータの開発を行った。設計に当たっては、高信頼性を確保し、高効率化、小型化の新技术を超電導界磁コイル、クライオスタット・ロータ、電機子コイルに採用した。超電導界磁コイルでは、新規にステンレステープで補強されている強化型超電導線材の採用と従来材の併用によりコイル内径及びコイル幅が小さくでき、超電導界磁コイルの小型化に成功した。更に、解析と要素試験により磁場転向板による超電導界磁コイルの発熱低減効果を確認し、3 MW 高温超電導モータの界磁コイルに適用し、発熱低減と超電導モータの高効率化を達成した。クライオスタット・ロータの冷却損失を低減させるため外部からの熱伝導損失および電流リードでの発熱損失の対策として、ニッケルベースの超合金製トルクチューブ、FRP 製スライド機構、超電導電流リードを採用した。また、クライオスタット・ロータ単独での冷却試験により、4 層積層の高温超電導界磁コイルの各層が 28 K に均等に冷却できることを確認した。電機子コイルでは信頼性

と製造性の理由から銅巻線を採用したのが、多数絶縁素線とコイル端転移接続の効果を考慮した電磁場解析による最適設計を行い、電機子コイル損失を低減させた。これらの新技術の採用により、世界トップクラスのトルク体積密度 40 kNm/m^3 を達成し、更に高効率と高信頼性を満足する 3 MW 高温超電導モータの試作が完了した。特許を 4 件出願した。

小型化、高効率、高信頼性の実証を目的とした 3 MW 高温超電導モータの負荷試験用に、船舶の実航行状況の変動負荷試験が実施できる設備の導入を行った。また、電機子コイルからの発熱や電磁雑音を軽減するために、駆動電流を低歪化できる 5 レベル・インバータを新規に開発した。この試験装置を使って、一定負荷での性能試験と耐久試験、実航行を模擬した変動負荷試験を実施した。性能試験では、運転領域全体を対象とした効率マップを作成した。最大出力は 3.02 MW を達成し、設計値の最大出力が確認できた。更に、 3 MW 出力時の損失の内訳を算出した。耐久試験では、 3 MW の定格出力での累積 100 時間運転を問題なく終了した。変動荷重試験では、3 ケースの船舶の緊急衝突回避運航を想定した試験を行い、20 秒での 167 kNm のトルク変化を発生させる厳しい試験であったが、問題なく終了できた。これらの試験終了時のトラックレコードは、 3 MW 出力運転時間は 106 時間、全運転時間は 238 時間であった。試験終了後の分解検査により、超電導界磁コイル、トルクチューブ、スライド機構、超電導電流リード、ヘリウム移送継手の主要部品の健全性が確認できた。これにより従来に比べて高い信頼性の実証が行えた。実用化に向けては、更なる信頼性の実証確認のため実運用下でのフィールドテストの実施し、運用上の問題点を解決していきたい。

実用化を更に進めるためには、基本にある設計技術の更なる高度化が必要となってくる。超電導モータの特徴の 1 つである高効率に関する設計技術では、効率予測技術の精度向上が重要である。そのため、超電導モータの損失分析技術の開発を行った。

Open-Circuit 試験、Short-Circuit 試験、非回転時のロータ内部計測試験、磁場解析により 3 MW 出力時の超電導モータの各損失分析を行い、更に 3 MW 高温超電導モータで適用した高効率化技術の効果を検証し、損失予測精度の向上を図った。これらによって、次の事が得られた。電機子のコイル端転移接続、非磁性ティースは損失低減の効果はあったが、信頼性と製造性を考慮して従来型の銅巻線を採用したためジュール発熱損、単一素線の渦電流損が大きくなった。これらは、設計段階での予測とほぼ同じで、更なる低減のためには新たな対策の考案が必要。冷却損失については、超電導界磁コイルの発熱損失、電流リード部の熱伝導損失は小さく、磁場転向板、超電導電流リード採用の効果があった。しかし、トルクチューブ熱伝導損失、スライド機構熱伝導損失、電流リード部ジュール発熱損、輻射損失とその他が大きかった。輻射

損失とその他を除いて設計段階での予測とほぼ同じであった。更なる低減のためにはロータの新機構、新材料の適用等が必要である。この詳細な損失分析より、今後は効率予測技術の改善及び超電導モータの高効率化が可能となった。

超電導モータの実用化は、コスト的にも有利である外航用大型船舶への適用の期待が最も大きい。これに応えるために、大型船舶での超電導モータ実用化を目指したキーハード技術の船舶推進用大型超電導回転機設計技術、超電導コイル冷却技術の開発を行った。外航用大型船舶向けの 20 MW 級大出力高温超電導モータを対象とし、効率 99 %、トルク体積密度 56 kNm/m³ の世界最高レベルの概念設計を行い、各キーハード技術に対する要求仕様・着眼点を明確にした。超電導コイル冷却技術については、低コスト・低損失が達成できる冷凍機・回転子一体化形式を採用したヘリウム・ネオン混合冷媒サーモサイフォン方式冷凍システムを試作した。30 K で 120 W の冷却性能を実証した。冷凍システムについての特許を 2 件出願した。

7.2 実用化に向けて

近年、環境負荷低減のための規制強化されており、商船の推進システムに関連しては、有害排ガス(NO_x , SO_x , PM)規制、燃費削減規制等が順次強化されている。これらへの対応策として、環境対応に優れている超電導モータを用いた電気推進システムが注目を集めている。

超電導モータの実用化は超電導線材の開発とも密接に関係している。最近の材料技術の発達に伴い超電導線材の開発も活発に行われており、実用化を加速できる状況になっている。

このような状況では、本研究開発では超電導モータの試作、実証と大きく進むことができた。早期に、超電導モータ実用化を達成することが我々技術者の努めと感じている。今後、更なる新技術と従来からの工業技術の融合により、早期の実用化が達成できるように邁進していく所存である。

謝辞

本博士学位論文を結ぶにあたり、本研究の遂行と本論文の作成において、終始ご指導を賜りました東京海洋大学 学術研究院海洋資源エネルギー学部門 和泉充教授に心より感謝いたします。

本論文を纏めるにあたり数々の有益なご助言を頂きました東京海洋大学 学術研究院海洋電子機械工学部門 岩本勝美教授、同学術研究院海洋電子機械工学部門 地引達弘教授、同学術研究院海洋電子機械工学部門 大貫等教授に心より感謝します。

本論文に纏めるにあたり東京海洋大学大学院後期博士課程への入学を快諾していただき、学位取得に関し多大なご支援を頂きました川崎重工業株式会社 顧問 牧村実博士、常務執行役員技術開発本部長 門田浩次博士には心より感謝いたします。

開発初期から一緒に開発を行った技術研究所機械システム研究部長 横山稔博士、船舶海洋カンパニー 基幹職 梅本勝弥博士、機械システム研究部 基幹職 尾立圭巳氏、同上 基幹職 佐藤寿恭博士、同上主事 村瀬陽平氏、同上主事 高雄悟氏、業務部 合澤清志氏、技術企画推進センター 副部長 柳瀬悦也博士には、本研究が遂行できたことに感謝します。また、システム技術開発センターの機電システム開発部部长 久保田哲也氏、課長 松尾和也氏、基幹職 川村正英氏、機械ビジネスセンター 基幹職 黒田雅教氏には電力変換器開発等開発とご助言を頂きました。

機械ビジネスセンター 水力機械部 小野寺達也氏からは、船舶推進器への適用に関する有益な助言を頂きました。海上技術安全研究所 沼野正義氏からは、船舶運航に関する助言を頂きました。

横浜国立大学 塚本修巳名誉教授、上智大学理工学部機能創造理工学科 高尾智明教授、新潟大学大学院自然科学研究科 福井聡教授、横浜国立大学大学院工学研究院 藤本康孝教授からは数々の有益なご助言を頂きました。

また、超電導コイルの開発については、住友電気工業株式会社 超電導製品開発部 技師長 林和彦氏、部長 加藤武志氏、上野栄作氏の支援に心から感謝します。

最後に、陰なら支えてくれた妻久見子、長野にいる息子健太、娘紗耶と朝希、母和子の理解と協力に感謝します。

List of Publications

1. 梅本 勝弥, 柳本 俊之, 「船舶推進用高温超電導モータの研究開発の状況」, 低温工学, Vol. 47 (2012), No. 6, p. 377-383.
2. K. Tsuzuki, M. Miki, B. Felder, Y. Koshiba, M. Izumi, K. Umemoto, K. Aizawa, T. Yanamoto, “Reduction of Thermal Loss in HTS Windings by Using Magnetic Flux Deflection,” *Physics Procedia*, vol. 36, pp. 1175-1179, 2012.
3. 柳本 俊之, 塚本 修巳, 梅本 勝弥, 林 和彦, 加藤 武志, 和泉 充, 高尾 智明, 福井 聡, 藤本 康孝, 「大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発」, 低温工学, vol. 48, No. 1, pp. 12-22, 2013.
4. T. Yanamoto, M. Izumi, M. Yokoyama, and K. Umemoto, “Electric propulsion motor development for commercial ships in Japan,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2333-2343, Dec. 2015.
5. T. Yanamoto and M. Yokoyama, “Radial-Gap Motor for Ship Propulsion”, in “Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires”, Edited by Kenichi Sato (Sumitomo Electric Industries Ltd, Japan), Chapter 3.21, *World Scientific World Scientific Series in Applications of Superconductivity and Related Phenomena*, vol. 1, pp. 463-472, 2016.
6. T. Yanamoto, M. Izumi, K. Umemoto, T. Oryu, Y. Murase, and M. Kawamura, “Load test of 3-MW HTS motor for ship propulsion”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 8, Dec. 2017, Art. no. 5204305.
7. E. Shaanika, K. Yamaguchi, M. Miki, T. Ida, M. Izumi, Y. Murase, T. Oryu and T. Yanamoto, “Comparison of simulated and experimental results of temperature distribution in a closed two-phase thermosyphon cooling system,” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 278, conf. 1, 2017.
8. T. Yanamoto, M. Izumi, Y. Murase, and T. Oryu, “Loss Analysis of a 3 MW HTS Ship Propulsion Motor”, submitted to *IEEE Trans. Appl. Supercond.*

9. List of Presentations

1. M. Azuma, K. Nagasawa, T. Yanamoto, T. Kaneko, H. Sakurai, “Development of Surface Treatments for Marine Diesel Engine Cylinder Liner,” presented at the CIMAC Congress 2004, Jun. 7-11, 2004.
2. K. Nishimura, K. Yamaguchi, M. Miki, M. Izumi, Y. Murase, T. Oryu, T. Yanamoto, “Experimental Study of Thermosyphon Cooling System for HTS Motor,” presented at the 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver (USA), Sep. 4-9, 2016.
3. K. Yamaguchi, K. Nishimura, M. Miki, M. Izumi, Y. Murase, T. Oryu, T. Yanamoto, “The effect of neon quantity in the evaporator of thermosyphon cooling system,” presented at the 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver (USA), Sep. 4-9, 2016.
4. E. Shaanika, K. Yamaguchi, M. Miki, T. Ida, M. Izumi, Y. Murase, T. Oryu, T. Yanamoto, “Comparison of simulated and experimental results of temperature distribution in a closed two-phase thermosyphon cooling system,” presented at the 2017 Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Madison, WI, Jul. 9-13, 2017.
5. K. Yamaguchi, M. Miki, M. Izumi, Y. Murase, T. Oryu, T. Yanamoto, “The Effect of Condensation Area and Operating Temperature on Heat Transfer Capacity of a Closed Loop Thermosyphon,” presented at the 2017 Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Madison, WI, Jul. 9-13, 2017.
6. T. Yanamoto, M. Izumi, T. Oryu, Y. Murase, “Loss Analysis of a 3 MW HTS Ship Propulsion Motor,” presented at the 2017 European Conference on Applied Superconductivity, Geneva, Switzerland, Sep. 17-21, 2017.

特許

1. 「回転機」，村瀬陽平，柳瀬悦也，柳本俊之，和泉充、三木基寛、山口康太，特願 2015-172527, , PCT/JP2016/003564
2. 「回転機」，村瀬陽平，柳瀬悦也，柳本俊之，和泉充、三木基寛、山口康太，特願 2015-172528, PCT/JP2016/003565

補助金

1. NEDO 省エネルギー革新技术開発事業 「船舶用高温超電導モータ内蔵ポッド推進システムの研究開発」(2007～2009 年度)
2. NEDO 省エネルギー革新技术開発事業 「船舶用高温超電導モータ内蔵ポッド推進システム実用化のための研究開発」(2010～2012 年度)
3. (独) 科学技術振興機構 戦略的イノベーション創出推進事業 「大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発」(2009～2013 年度)