テーマ解説

超電導電機子形モータの進展
—液体窒素冷却アキシアルギャップ同期モータ—深谷 敦子^{*†}, 津田 哲平^{*}, 大田 友哉^{*}Progress in Motors with Superconducting Armature Windings
—Axial-gap Synchronous Motors Cooled by Liquid Nitrogen—Atsuko FUKAYA^{*†}, Teppei TSUDA^{*} and Tomoya OOTA^{*}

Synopsis: An industry-academia research group, of which IHI Corporation is a representative, has performed trial manufacturing of several axial-gap synchronous motors with superconducting windings cooled by liquid nitrogen. In the development of these motors, we were faced with issues of AC loss and current imbalance among the coils connected in parallel due to the inductance difference, which are characteristic of AC applications of superconductors. We took measures for these issues and validated them in a newly constructed motor with a rated power of 400 kW. In this paper, the progress of our motors and a brief summary of the results of the load test for the latest motor are introduced.

Keywords: superconducting motor, superconducting armature winding, liquid nitrogen-cooled, axial-gap motor
(Note: Some figures in this article only appear in color in the electronic version.)

1. はじめに

近年、温室効果ガス削減をはじめとし、エネルギー・環境問題が注目されている。超電導は損失なく大電流を通電できることから、超電導モータは次世代省エネ機器として国内外で開発が進められている。

典型的な超電導モータはラジアルギャップ回転界磁形で、界磁巻線を超電導線、電機子巻線を銅線という構成をとる。超電導巻線はヘリウムガス、または液体ネオンを冷媒として 20~30 K 以下に冷却し、大電流を通電する。ギャップ磁場は、鉄心の飽和磁束密度の数倍に到達しうするため、界磁、電機子とも空芯とすることが多い。

一方、超電導体に交流を通電すると、交流損失が発生して発熱し、冷却が問題になる。そのため、電機子巻線に超電導線が使われる例は多くない。しかし、交流損失が発生するとはいえ、超電導コイルの損失は銅コイルよりも小さく、また電流密度も大きいことにより、電機子を超電導とした永久磁石形あるいは全超電導形とする試みもなされている。超電導線を用いた最近の例では、Cambridge 大学グループの全超電導モータ¹⁾、京都大学グループの全超電導かご形モータ²⁾が報告されている。株式会社 IHI をとりま

とめとする産学グループでは、超電導電機子形モータの開発を 2004 年より開始し、実用化を目指している。

本稿では、国内外の超電導線を電機子巻線に用いたモータの開発例、および、産学グループで開発したモータの進展と出力 400 kW 負荷試験結果の概要を報告する。

2. 超電導電機子形モータの開発例

オンネスにより超電導現象が発見された 1911 年から数十年、金属系超電導線材開発がある程度進んだ 1960 年代に超電導応用は始まった。界磁、電機子ともに超電導としたモータ、いわゆる全超電導同期機（発電機）の開発も試みられた。しかし、超電導電機子に発生する交流損失が重大な問題の 1 つであることが示され、超電導モータの構成は、超電導界磁形が主流となった³⁾。その後、交流損失対策が進み、1980 年代に NbTi 極細多心線が開発された。1990 年代には、NbTi 極細多心線を用いた全超電導形（15 kW）、および永久磁石形（150 kW）モータの開発がフランス国立科学研究センターのグループで行われている⁴⁾。NbTi は 4 K で使用され、1 W の発熱を冷却するために 500-1000 W の冷凍機動力が必要であるため、交流損失は依然重大な問題であった。

1986年には銅酸化物超電導体が発見され、まもなく超電導転移温度 T_c が液体窒素温度 77 K を超える銅酸化物群が発見された。これらの銅酸化物群の中のうち、Bi(2223)系 ($T_c \sim 110$ K)、YBCO 系 ($T_c \sim 90$ K) については線材開

Received February 24, 2012

^{*} 株式会社 IHI 新事業推進部

〒135-8710 東京都江東区豊洲 3-1-1

IHI corporation, 3-1-1 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8710, Japan

[†] E-mail: atsuko_fukaya@ihi.co.jp

発も進み、液体窒素温度での使用もターゲットになった。2000年中頃からは、Cambridge大学グループで YBCO 線材を電機子とした全超電導同期モータの開発がなされている¹⁾。このモータは回転界磁にYBCOのバルク、電機子巻線にYBCO テープ線材を用いる構成をとり、モータ全体を液体窒素に浸漬して冷却する。出力は 16 kW (設計値) である。

京都大学グループでは、液体水素移送ポンプをターゲットに全超電導かご形モータの開発を行っている²⁾。なお、電機子巻線は、MgB₂ を用いており、その臨界温度 ($T_c \sim 40$ K) は液体水素の沸点 20 K よりも高い。

株式会社 IHI をとりまとめとする産学グループでは、超電導電機子形としては大容量の 400 kW モータを開発中である。次節以降で 2004 年から開始した開発の成果および 2009 年に実施した 400 kW 負荷試験の概要を紹介する。

3. 産学グループでのモータ開発状況

3.1 設計方針

産学グループ (株式会社 IHI, 住友電気工業株式会社、太陽日酸株式会社、ナカシマプロペラ株式会社、新潟原動機株式会社、株式会社日立製作所、福井大学、富士電機システムズ、[五十音順]) では、2004 年から電機子巻線に住友電工製の BSCCO 線材を用いた同期モータの開発を開始した⁵⁻⁸⁾。実用化を目指し、次の 2 点を開発の軸とした。

第一に冷媒は液体窒素冷却とした。液体窒素温度では、ヘリウムガスや液体ネオンを用いる場合の 20~30 K に比べて、冷却対象物、冷媒とも熱容量が大きく熱的に安定する上に、冷凍機の冷凍効率も数倍高い。また、クライオスタットの断熱構造もシンプルにすることができる上に、作業性、価格においても優位である。また、窒素発生器を用いれば、空気から冷媒ガスを取り出すことができることもメリットである。しかし、超電導線材の臨界電流とはトレードオフとなる。そこで、可能な限り大電流を通電するために、液体窒素はサブクールし、66~70 K で超電導コイルを冷却することにした。なお、BSCCO 線材を 66 K まで冷却すると、飽和液体窒素 77 K に比べて、1.5 倍程度の電流を通電することができる⁹⁾。

第二に低温部および通電部は固定とした。回転子に冷媒を循環させるためには、冷媒のもれを防ぐための工夫が必要である。また、回転子内に大電流を給電するためには大容量のスリップリングが必要となる。低温部、通電部を固定することで、クライオスタット構造が簡素化でき、メンテナンスも容易になるなど信頼性を向上できた。また、軸の両端が常温で利用できる、複数段タンデムが容易になるなどの実用上のメリットも大きい。船用では二重反転プロペラへの適用も容易である。

以上の方針により、電機子巻線に超電導線を使用し、固

定子とすることになった。前述のように、サブクールではあっても冷媒は液体窒素であり、ヘリウム冷却に比べて大電流通電は難しいため、鉄心を備えることにした。鉄心を備えることにより、反トルク、磁気力は主に鉄心に作用し、超電導コイル自体および支持部の強度、振動等の機械的な問題に対する技術ハードルは低くなるという副産物も得られた。モータ構造は、アキシアルギャップ形とし、クライオスタット構造をシンプルにしている。

3.2 開発経緯

産学グループでの開発において試作したモータを Table 1 に示す。開発は、2004 年に開始した全超電導モータ (IND モータ) に始まる⁵⁾。BSCCO 線材を電機子巻線、界磁巻線の両方に用いており、液体窒素冷却では世界初の全超電導モータ (出力 12.5 kW) である。構造の概要を Fig. 1 に示す。誘導子を用いることにより、界磁、電機子の両方を固定していることを特徴としている。

その後、小型化のため、界磁を永久磁石に変更し、3 基のモータを試作した (Table 1, PM2-PM4 号機)。これらのモータの基本構造は同じであり、概略構造を Fig. 2 に示す。回転子は永久磁石とヨークを備えている。固定子は、常温部に鉄心を備え、クライオスタット内に超電導コイル

Table 1 Series of synchronous motors with the superconducting armature windings constructed by an industry-academia research group of which IHI Corporation is a representative

year	type	output
2004-2005	fully superconducting motor (IND)	12.5 kW
2005-2006	Permanent magnet motor (PM2)	50 kW
2006-2007	Permanent magnet motor (PM3)	365 kW
2008-2009	Permanent magnet motor (PM4)	400 kW (continuous)

Fig. 1 Schematic structure of the fully superconducting motor, with a rated power of 12.5 kW (IND-motor).

Fig. 2 Schematic structure of the permanent-magnet motors with superconducting armature windings (PM2 - PM4 motors).

スタックを配置している。磁束変化により発生する渦電流を防ぐため、クライオスタットは繊維強化プラスチック（FRP）製とした¹⁰⁾（**Fig. 3**）。液体窒素の充填時間は、室温から3～5時間と、20-30 K に冷却する場合に比べて非常に短いことも実用上の優位性の1つである（**Fig. 4**）。冷凍機起動後、約2時間で 67 K に到達する。

開発初期のステージで試作した PM2 号機では、出力 50 kW の負荷試験を実施し、永久磁石形モータの成立性を確認した。その後、より大容量の PM3 号機を設計、2007 年に負荷試験実施し、液体窒素冷却では世界最高出力の 365 kW を達成している⁶⁾。PM2、PM3 号機の2基のモータの性能試験により、第4節で述べるような超電導の交流応用特有の問題を把握した。これらの問題解決のため、3基目のPM4号機を製作し、定格出力 400 kW、24時間連続運転を終了した。現在、さらに残っている課題の確認、および、MW 級モータのプロトタイプとして、4基目の永久磁石形モータを、現在、開発中である。

次節では PM2、PM3 号機で課題となった超電導の交流応用特有の問題について、第5節では 2009 年に負荷試験を終了した 400 kW モータ（PM4 号機）の負荷試験結果の概要を述べる。

4. 超電導線の電機子巻線適用における問題と対策

超電導線に交流を通電すると、交流損失、電磁振動、偏流等の交流電に特有の問題が生じる。産学グループでのモータ開発においても、これらは課題となった。本節では、現在までに提案されている交流損失および偏流に対する対策例、および、産学グループで開発したモータで採用した対策について紹介する。なお、電磁振動対策については、文献11を参照されたい。

Fig. 3 Cryostat made of glass fiber reinforced plastics (FRP) for the superconducting armature windings cooled by liquid nitrogen.

Fig. 4 Temperatures at the inlet and the outlet in the cryostat, from the beginning of liquid nitrogen transfer until reaching the subcooled condition. In this cryostat, the inlet was located at the bottom of the cryostat, and the outlet was located at the top. The outlet temperature reached 77 K, when liquid nitrogen was fully filled.

4.1 交流損失対策

交流損失低減のために、線材の工夫、線材加工、コイルスタック構造のそれぞれにおいて、対策が提案されている。

線材の工夫としては、組成、細線化、母材高抵抗化などがなされている¹²⁾。線材加工による工夫としては、線幅、ツイスト、スリット^{12,13)}、線材の幾何学的配置¹³⁾、シースあるいは線材近傍への磁性体配置¹⁴⁾等が報告されている。

Fig. 5 Examples of the coil stack designs to reduce AC loss.

スリットにより分割された YBCO 線材は交流損失低減のため、変圧器でも適用されている¹⁵⁾。

コイルの工夫による低減対策のイメージを、Fig. 5 に示す。超電導コイル配置の最適化¹⁶⁾、磁性体の利用¹⁷⁾である。

産学グループで開発中のモータでは、線材加工技術を新たに開発せずに対応できる方法として、磁性体配置による対策を行った。コイル間に低鉄損、高透磁率磁性体を配置することで、超電導線材幅広面に垂直な方向から磁束が貫通することを防ぐことができる。しかし、磁性体配置により超電導線の交流損失を低減することができても、磁性体自身のコアロスが大きければ、損失低減につながらない。そこで、磁性体としてフェライトを選択した。飽和磁束密度が比較的高く、低温においてもヒステリシス損失が小さい上に、電気抵抗率が大きく、渦電流損失が無視できるほど小さいためである。この対策は、磁場中における超電導線の臨界電流低下に対する対策としても有効であり、超電導線材長、あるいは、コイル数低減の役割も同時に担う。磁性体の配置は、通常はコイル端部のみであることが多いが、我々はコイル間にも配置し、磁性体サイズについても最適化を図った^{7,18)}。この対策は PM4 号機から採用している。

コイル両端あるいはコイル間に磁性体を配置するデザインは、超電導コイルの臨界電流対策として、Southampton 大学グループの超電導発電機 (100 kVA) のでも試みられており¹⁹⁾、磁性体はインバー合金が選択されている。また、変圧器 (10 kVA) においても、AC loss 対策として、鉄粉とエポキシ樹脂の複合材を配置する試みがなされている²⁰⁾。

4.2 偏流対策

モータの大容量化に伴い、限られた電源電圧のもとでは超電導コイルの並列接続が必要になる。超電導コイルの電気抵抗はほぼゼロであるため、隣接した並列コイルに通電すると、インダクタンスの相違により、特定のコイルに高電流が流れ、あるコイルには殆ど電流が流れない現象（偏流）が起きる。また、電流の位相にもずれが生じる。偏流が起き、超電導線に想定外の電流が流れて臨界電流を超

Fig. 6 Examples of the measures for current imbalance among superconducting coils connected in parallel due to the inductance difference.

えると、熱暴走が起こるリスクがある。また、偏流を想定して電流設定を行うと、線材性能を十分に生かすことができない。そこで、偏流を抑制し均流化する対策が提案されてきた (Fig. 6)。

Fig. 6(a) は、転位によりインダクタンスをそろえる方法であり、変圧器で採用されている¹⁵⁾。Fig. 6(b) は各巻線が軸対称になるように巻く方法である²¹⁾。Fig. 6(c) は転位および絶縁層厚さを層ごとに覚えてインダクタンスをそろえる方法²²⁾、そして、Fig. 6(d) はリアクトルを用いて対策する方法²³⁾である。並列コイルそれぞれに電流リードを備えて、抵抗成分で均流化を図る方法²⁴⁾ (Fig. 6(e)) も提案されているが、周波数やコイルのインダクタンスに応じて、電流リードの抵抗を大きくしなければならず、損失が大きい。

産学グループで開発したモータでは、巻線技術を新たに開発することなく対策できるものとして、リアクトルを用いる方法をとった。通常は各コイルに均一な電流を通電させるが、我々は各コイルの環境に応じて異なる電流を通電させることにした。このリアクトル回路を電流調整器と呼び、PM3 号機から備えている^{6,25)}。

5. 400 kW 負荷試験結果概略

前節で述べた交流損失と偏流の両方に対して対策を施したモータを 2008 年より設計 (PM4 号機)、負荷試験を実施した。PM4 号機の諸元を Table 2 に示す。鉄心は扇形とし、それに伴い超電導コイルも扇形とした。

定格出力 400 kW 負荷試験を行い、24 時間連続運転試験を実施した。常温部の温度の時間変化を Fig. 7 に示す。各部とも 6-9 時間で温度静定に至り、熱的にも安定運転できることを確認した。

Table 2 Specifications of the PM4 motor with a rated power of 400 kW.

Rated power	400 kW
Rated speed	250 rpm
Number of pole	8
Number of slot	6
Rated voltage	680 Vrms
Rated current	554 Arms
Cooling (rotor and iron core)	Air-cooled
Armature windings	BSCCO type H, Ic150A

超電導コイルを備えたクライオスタット内についても、熱的に安定運転できることを確認した。同じく定格出力 400 kW でのクライオスタット入口、出口温度の時間変化を **Fig. 8** に示す。液体窒素流量は、15 L/min である。試験開始直後および 8 時間後の温度のピークは冷凍機運転が ON/OFF 制御であることによるものである。冷凍機位置での液体窒素温度が 66 K 以下になると窒素の凝固を防ぐため冷凍機が停止し、68 K 以上になると冷凍機が起動する制御方法をとっている。そのため、冷凍機停止時にはクライオスタット内の液体窒素温度が一定時間上昇し、**Fig. 8** のように温度がピークを示す。液体窒素温度は、クライオスタット出口で最高 69 K にとどまり、モータは 24 時間安定運転を保つことを確認した。

出力 400 kW 負荷試験時のクライオスタット内熱負荷についても計測を行い、計画値以下であることを確認している。クライオスタット内の熱負荷は、超電導コイルの交流損失だけではなく、交流損失対策のため配置した磁性体のコアロス、リード線ジュール損、リード線や真空断熱層等を介した侵入熱などがあり、一部を除き、これらを分離することはできない。熱負荷実測値と計画値が同程度であったことから、超電導線材の交流損失も計画値と同程度であったと考えている。参考のため、磁性体による交流損失低減対策を行わなかった場合の熱負荷を試算した結果、対策を行わない場合は、熱負荷は 5 倍以上に増加すると推定している。

次に電流分布について述べる。PM4 号機では、12 並列コイルにそれぞれ電流を分配した。各コイルの定格電流に対する電流比率の計画値および 400 kW 負荷運転時の実測値を **Fig. 9** に示す。電流は、計画値どおりに分配することができ、リアクトルによる偏流対策の有効性を確認した。

6. おわりに

産学グループにおける超電導電機子形モータの開発状況について紹介した。2009 年に実施した出力 400 kW 負荷 24 時間運転試験により、各部の温度静定を含め、安定運

Fig. 7 Representative temperatures of the ambient parts operated for 24 hours with a rated power of 400 kW.

Fig. 8 Liquid nitrogen temperature at the inlet and outlet in the cryostat measured in the 400 kW load test. The flow rate of liquid nitrogen to the cryostat was 15 L/min.

Fig. 9 Current ratio of each coil to the rated current, measured in the 400 kW load test.

転できることを確認した。

性能向上、大容量化のためは、解決すべき様々な課題が残っている。まず、液体窒素温度での超電導線材の臨界電流である。前述のように液体窒素の手軽さと臨界電流の

小ささはトレードオフの関係にあるわけであるが、液体窒素温度での臨界電流および磁場中特性が更に向上すれば、モータの性能アップ、小型化につながる。次に、交流損失をはじめとする液体窒素への熱負荷である。産学グループでは、超電導コイル間に磁性体を配置することで超電導線の交流損失を低減したが、今後、大容量化、大電流通電を見据え、更なる工夫が必要となる。また、大容量化に伴い、電流容量も増加する。並列回路の偏流対策のみでなく、リード線を介した侵入熱、コイル冷却への対策が更に重要になると思われる。更に、短絡耐力、クエンチ保護、長期耐久性等の検討および実績が求められる。

市場投入のためには、温度等のモニタ、保護、制御、操作性等、用途に応じたシステムの構築も課題になる。また、法・規定への対応も求められる。例として、低温冷媒の陸上での使用は、高圧ガス保安法により規制の対象となっている。また、モータの一般規則としては、日本電機工業会規則 (JEM1487) により、使用者と製造者との協定がある場合を除き、定格出力の 150%, 1 分間の過負荷耐力が求められており、クエンチというリスクをもつ超電導線材には厳しい条件となっている。これらは、法・規定が超電導応用を想定していないこともあるが、今後、解決しなければならない課題の 1 つである。

超電導モータ開発にあたり、産学グループの住友電気工業株式会社、大陽日酸株式会社、ナカシマプロペラ株式会社、新潟原動機株式会社、株式会社日立製作所、福井大学、富士電機システムズ株式会社 (五十音順) の共同開発者の方々に感謝致します。

産業技術総合研究所 古瀬研究員には、超電導コイルの交流損失について、東京工業大学 佐藤准教授には低温での接着技術について、アドバイスをいただきました。イーグル工業株式会社には液体窒素循環ポンプについて、共同開発をさせていただきました。この場を借りて、感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Q. Jiang, et al.: "Design and AC loss analysis of a superconducting synchronous motor", Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) 1164-1168
- 2) K. Kajiwara and T. Nakamura: "Proposal of a fully superconducting motor for liquid hydrogen pump with MgB_2 wire", IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 1669-1673
- 3) P. N. Barnes, M. D. Sumption and G. L. Rhoads: "Review of high power density superconducting generator: Present state and prospects for incorporating YBCO windings", Cryogenics **45** (2005) 670-686
- 4) P. Texador: "Superconducting electrical motors", Int. J. Refrigeration **22** (1999) 150-157
- 5) T. Takeda, H. Togawa and T. Ota: "Development of liquid nitrogen-cooled full superconducting motor", Journal of the JIME **41** (2006) 77-82 (in Japanese)

- 竹田敏雄、外川裕之、大田友哉: 「液体窒素冷却全超電導モータの開発」, 日本マリンエンジニア学会誌 **41** (2006) 77-82
- 6) H. Sugimoto, et al.: "Development and test of an axial flux type PM synchronous motor with liquid nitrogen cooled HTS armature windings", J. Phys. Conf. Ser. **97** (2008) 012203
- 7) H. Sugimoto: "High-temperature superconducting motor for low-speed applications", TEION KOGAKU **43** (2008) 460-467 (in Japanese)
杉本英彦: 「高温超電導体を使用した低速用超電導モータ」, 低温工学 **43** (2008) 460-467
- 8) T. Tsuda: "Development of the liquid nitrogen-cooled high temperature superconducting motors", Journal of Society of Automotive Engineers of Japan **62** (2008) 108-113 (in Japanese)
津田哲平: 「液体窒素冷却高温超電導モータ開発事例の紹介」, 自動車技術 **62** (2008) 108-113
- 9) N. Ayai, et al.: "Progress in performance of DI-BSCCO family", Physica C **468** (2008) 1747-1752
- 10) S. Yoshida: "Refrigerating and cooling technology for superconducting apparatus - Development of cryogenic system for superconducting motors", Superconductivity Web21, Oct. 17 (2005)
- 11) K. Fujino, et al.: "Development of superconducting coil for ship pod-propulsion motors", SEI TECHNICAL REVIEW **65** (2007) 41-45
- 12) N. Amemiya: The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics **7** (1999) 124-133 (in Japanese)
雨宮尚之: 「高温超電導線材の交流損失」, 日本 AEM 学会誌 **7** (1999) 124-133
- 13) N. Amemiya: "AC losses in high T_c Superconductors - AC loss characteristics of tapes and power transmission cables", TEION KOGAKU **45** (2010) 376-386 (in Japanese)
雨宮尚之: 「高温超伝導体の交流損失—超伝導線から超電導送電ケーブルまで—」, 低温工学 **45** (2010) 376-386
- 14) Y. Xie, et al.: "Development of 2G HTS wire for AC applications at SuperPower", presented at EUCAS '09, Dresden, Germany, held in 2009
- 15) H. Hayashi, et al.: "Development of REBCO power transformers", TEION KOGAKU **46** (2011) 342-349 (in Japanese)
林 秀美ら: 「イットリウム系超電導変圧器の開発」, 低温工学 **46** (2011) 342-349
- 16) H. Hayashi, et al.: "A study for designing YBCO power transformer", Physica C **463-465** (2007) 1233-1236
- 17) M. Furuse, H. Tanaka, J. Kondoh and M. Umeda: "Experimental study on AC loss reduction of HTS coils by use of ferromagnetic disks", IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 1090-1093
- 18) "Superconducting coil and magnetic field generation device", Japanese Patent, Publication No. 2010-240823 (in Japanese)
「超電導コイルおよび磁場発生装置」, 公開特許公報 特開 2010-40823
- 19) M.K. Al-Mosawi, et al.: "Design of a 100 kVA high temperature superconducting demonstration synchronous generator", Physica C **372-376** (2002) 1539-1542
- 20) K. Maitham, et al.: "The effect of flux diverters on AC losses of a 10 kVA high temperature superconducting demonstrator transformer", IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 2800-2803

- 21) S. Nagano, et al.: “Technology development status of yttrium based coil for SMES”, TEION KOGAKU **46** (2011) 327-334 (in Japanese)
長屋重夫ら：「SMES 用イットリウム系コイル技術開発の状況」, 低温工学 **46** (2011) 327-334
- 22) N. Atomura, et al.: “Homogeneous current distribution experiment in a multi-laminated HTS tape conductor for a double-pancake coil of SMES”, Physica C 471 (2011) 1395-1398
- 23) “Current equalizer circuit made of superconductor”, Japanese Patent, Publication No. 2003-332121 (in Japanese)
「超伝導体の均流化回路」, 公開特許公報 特開 2003-332121
- 24) S. Yamaguchi, K. Seo and M. Morita: “A small-scale experiment demonstrating the current lead resistance method of preventing a current imbalance”, Cryogenics **38** (1998) 875-880
- 25) “Superconducting coil apparatus, inductor type synchronous machine, and transformer”, Japanese Patent, Publication No. 008-218717 (in Japanese)
「超電導コイル装置、誘導子型同期機、及び変圧装置」, 公開特許公報 特開 2008-218717

深 谷 敦 子 1997 年お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士課程修了。1997 年より理化学研究所他に勤務。物性物理学（超伝導、磁性体）の研究に従事。2007 年より株式会社 IHI 勤務。超電導モータ開発に従事。理学博士。

津 田 哲 平 2007 年福井大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2007 年より株式会社 IHI 勤務。超電導モータ開発に従事。

大 田 友 哉 1997 年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了。1997 年より株式会社 IHI 勤務。船舶の機関部設計および超電導モータ開発に従事。