

船舶の脱磁用超伝導コイル(海底設置)の冷却 Refrigeration of Superconducting Coil on Seabed for Ship Magnetic Deperming

廣田 恵 (艦磁研)
HIROTA Megumi (Naval Ship M&UEP R. C.)
E-mail: kanjiken@nmurc.com

1. はじめに

船舶を脱磁し磁気を低減して磁気機雷に対する安全を図る設備として海底に平らに設置する超伝導コイルについて論じる。船舶の脱磁に要する磁場は鋼材の磁気特性から数 mT と推測しているが、100m 前後の長さの船舶に離隔して磁場を印加するために約 1,100m のコイル電線に大電流を流す必要がある。コイルを設置する水深は大型船舶の水面での動揺から 12m を想定し、海底に最大電流 100kA を流す電線3条を設置する超伝導コイルを構想し、電線導体の構成、冷却構造、室温から稼働温度に冷却する時間を算出した[1]。このシステムの入手可能な技術による実現を論じる。

2. 電線導体の設計

磁場中特性の優れた材料で入手可能な導体として ReBCO(Rare Earth Barium Copper Oxide)テープを芯材に巻きつけた CORC(Cable on Round Core)線材を利用する製造提案[2]に基づき論じる。ReBCO テープの価格(約 5,000 円/m)から 1,100m、断面当たり 100kA を流す導体のテープ数 n 、テープ当たりの電流値 I_n に対し、超伝導材にかかる費用は $5.5 \times 10^6 \times 10^5 / I_n$ (円) となり、製造価格の低減のため I_n を可能な限り大としたい。製造工程からテープ多層巻きの CORC を使用する提案に対し、式(1)による発生磁場の計算と公開資料から導体構成を求めた。直径 10mm の銅線を芯とし巻き付けるテープとして SuperPower 社 M4(幅 4mm 厚み 0.1mm)を採用し CORC のテープ数を 30 とした場合、テープの経験磁場の最大値を計算し、超伝導特性[3]から稼働温度及び電流値を求めた。

$$\vec{H}(\vec{r}, \vec{r}_0) = \frac{di \times (\vec{r} - \vec{r}_0)}{2\pi(|\vec{r} - \vec{r}_0|)^2} \quad (1)$$

ただし、無限長の直線電流を仮定し H は位置 r にある電流素辺 di による位置 r_0 での磁場である。実績としてテープ当たり 140A、導体温度 50K、最大経験磁場 0.5T とする場合の導体構成として Fig. 1 に示す配置にし、各テープ上磁場の最大値から求めた導体部分の最大寸法を併せて示す。この CORC を6本結束する方法は電線製造上容易として提案された。直流送電用超伝導電線[4]の冷却構造を参考とした、脱磁用電線の断面の概念図及び参考寸法を併せて示す。

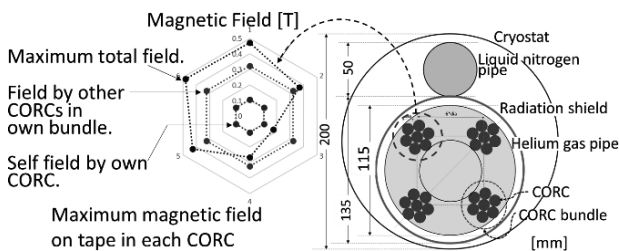


Fig. 1. A conceptual cross-section of 100 kA cable.

このほかの胴体構造として6本結束の対称配置及び、製造上の課題はあるが CORC 等間隔配置を Fig. 2 に示す。最大磁場 0.5T 以下という条件で求めた導体構造の直径はそれぞれ 0.13m 及び 0.09m となる。

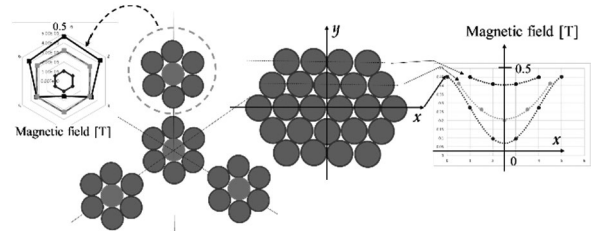


Fig. 2. Symmetric position and closed pack case and maximum magnetic field on each CORC.

3. 電線の冷却

Fig. 1 に示すヘリウムガス冷却及び液体窒素による輻射シールド(Cu 厚さ 2mm)冷却の電線について冷却時間を計算した。室温から稼働温度への冷却は、液体窒素管を窒素ガスで冷却し、次いで液体窒素を流入する。輻射シールドが液体窒素温度に達したところで導体をヘリウムガスで室温より冷却する計算とした。窒素ガス、液体窒素の温度 (T_{N_2}) を 77K、ヘリウムガス温度 (T_{He}) を 40K としたときの導体温度(T) の時間(t)変化は式 (2)で表される。Fig. 3 に $T(t)$ を示すとおり、稼働温度 50K に達する時間は、液体窒素供給 (300l/min)、ヘリウムガス供給 M_{He} (7000l/min, 8atm) により 14 日となる。

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{-\alpha(T-T_{He})C_{He}M_{He} + \epsilon(T_{N_2}^4 - T^4) \times \text{length} + \text{constheat}}{Q_{cond} \times \text{length}} \quad (2)$$

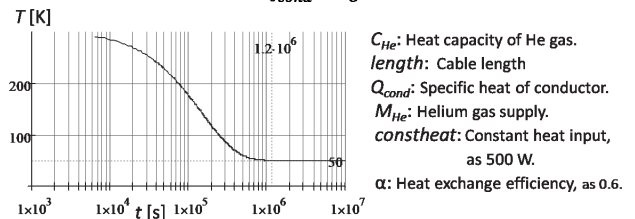


Fig. 3. Temperature dependence of the conductor while cooling by 40K helium gas.

4. 結論

船舶脱磁を簡易な方法で実施する海底コイルに向け、高温超伝導テープ線材による 100kA の電線導体の断面構造を磁場の条件から求めた。対象とした超伝導線材の費用を含む特性から冷却部分の直径が得られた。海底施工がより容易となる電線の設計を引き続き求める。

謝辞 この研究に事業別研究会の形で協力し、提案された高木智弘氏、福島弘之氏、向山晋一氏(古河電工)、吉田茂氏(九州大)、弘川昌樹氏(太陽日酸)に感謝します。また太刀川恭治氏(物質材料機構)のご指導に謝意を捧げます。

参考文献

[1] Hirota, M., 2018. *Journal of Ship. and Ocean Eng.* 8: 1-8.
[2] Mukoyama S., 2018. Distributed paper at *Joint Meeting of NMURC Work Groups*, 14 Sept., Tokyo.
[3] Wimbush, S., 2017, <https://figshare.com//collections>.
[4] Watanabe, H. et al., 2017, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 27 (4), 5400205.

再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの可能性(2)

Potential of Superconducting Cable with Energy Storage Function for Large-scale Introduction of Renewables (2)

東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)
 HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.)
 E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

再生可能エネルギーの大量利用にはその出力変動補償が大きな鍵となり、前回の発表ではエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルによって他の技術では困難な高速大容量の補償動作が行える可能性を示した^[1]。一方、この超伝導ケーブルは、そのエネルギー貯蔵量によってカバーできる機能が異なり、将来のマイクログリッドの電源構成を変え得るほどのインパクトがあるため、その実現可能性を超伝導線材の性能と関連付けて系統的に整理しておく必要がある。そこで本研究では、この超伝導ケーブルについてエネルギー貯蔵量とサイズと線材性能の関係を整理した。

2. 超伝導ケーブルの構成例

エネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの構成例を Fig. 1 に示す。巻線のインダクタンスにより磁気エネルギーを貯蔵するものであり、無限長ソレノイドコイルのようなものである。同図に示すように、巻線直径 d 、巻線密度 n 、巻線導体の断面積 a を定義している。また、この際にコアに発生する磁界を B としている。この磁界によりエネルギー貯蔵密度が定まり、体積を乗ずることでエネルギー貯蔵量が求まる。

3. 10 MW 級 10 km 長超伝導ケーブルの実現可能性

典型例かつ大規模展開の際の最小単位として周長 10 km の 10 MW 級マイクログリッドを想定し、電力変換の簡便さの観点から電圧は直流 1 kV、電流は 10 kA と設定した^[1]。この際、様々な貯蔵エネルギーに対して必要となる超伝導ケーブルのサイズを Fig. 2 の点線で示している。また、Fig. 2 (a) には、BHO 人工ピン入り GdBCO コート線材の現状の性能^[2]を考慮した際に少なくとも必要となる導体の断面積を示している。例えば、その交点に着目すると、前回の報告で取り扱った太陽光の出力変動補償には 2050 年の目標として 1 GJ のエネルギー貯蔵を設定したが^[1]、20 K 運転を想定してもよければ、断面積 5 mm² 程度の導体を直径 120 mm で巻き付けることで 5 T という高磁界を発生させ、極めてコンパクトな超伝導ケーブルでエネルギー貯蔵を行える可能性があることがわかる。あるいは、超伝導ケーブルの直径を大きくしてもよければ、1.5 T 程度の磁界を想定することで、65 K という液体窒素温度運転も視野に入ることがわかる。ここで重要なことは、エネルギー貯蔵規模によってその機能が異なることであり、1 GJ にこだわらなくとも様々な機能が見込まれる。

- ・10 MJ (秒オーダー) : スタンバイ済み燃料電池の応答補償
- ・100 MJ (十秒オーダー) : 電池類の充放電回数抑制など
- ・1 GJ (分オーダー) : 運転停止を含むガスタービンの応答補償
- ・10 GJ (数十分オーダー) : デマンドレスポンスの尤度拡大
- ・100 GJ (数時間オーダー) : 日負荷平準化

すなわち、その時点で実現可能な運転温度や線材性能をもとにこの超伝導ケーブルを想定するだけでも、本来は送電媒体に過ぎない超伝導ケーブルに重要な機能を付与することが可能となる。さらに、参考までに、2050 年という将来を想定し、上記線材の特性が 3 倍に向上した場合の結果を Fig. 2 (b) に示す。飛躍的なコンパクト化と液体窒素冷却運転の適用可能性の拡大が示されており、このような新たな応用においては、線材性能の向上も未だに重要な役割を担っていることがわかる。

謝辞 本研究は、NEDO 先導研究プログラム/未踏チャレンジ 2050 の一環として行うとともに、科学研究費補助金 (JP 18K18864) と岩谷直治記念財団による助成を得て行った。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., Abstract of CSSJ Conference 96 (2018) 162.
- [2] M. Inoue et al., IEEE TAS 23 (2013) 8002304.

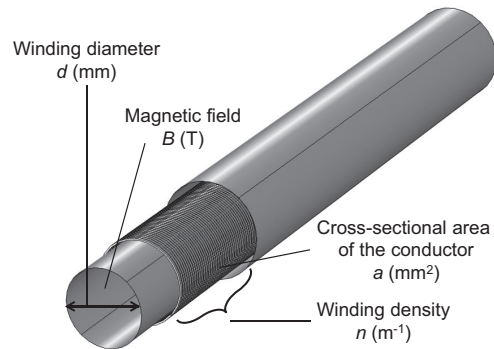


Fig. 1. Illustration for the parameters in the superconducting cable with energy storage function.

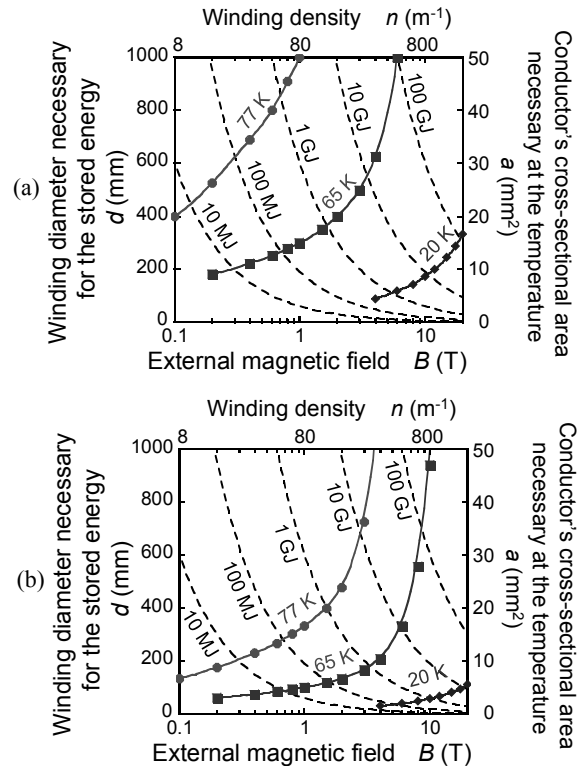


Fig. 2. Winding diameter necessary for the energy storage plotted along with conductor's cross-sectional area necessary for the transport current estimated (a) from a present performance of a PLD-processed GdBCO coated conductor with artificial pinning center ^[2] and (b) from a future performance assumed as triple as the present one.

66kV 級実規模 3km 高温超電導ケーブルにおける短絡事故時の冷媒挙動解析

Simulations of Liquid Nitrogen coolant in 66kV 3km HTS Power Cable systems with Short-circuit Current Accidents

堀田 大智, 我妻 洸, 石山 敦士(早稲田大学); 森村 俊也, 増田 孝人(住友電工); 三村 智男(東京電力)

HORITA Daichi, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Astushi (Waseda University);

MORIMURA Toshiya, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);

MIMURA Tomoo (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

E-mail: ekrrw_bb-rf9@ruri.waseda.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルは、従来のケーブルに比べ高密度かつ低損失な電力輸送が行える送電ケーブルであると考えられ、電力輸送システムの拡充という課題に対する解決策として期待されている。しかし、実用化には短絡事故時における安全性の評価が必要であるため、我々は 66kV 系統における短絡事故時の影響評価を行ってきた(1)。日本国内の 66kV 系統で想定されている短絡事故電流の最大値は 31.5kA-2.0s であり、実規模 3 km ケーブルにおける先行研究では、冷媒気化が起きないケーブル長と通電時間の検討をそれぞれ行ってきた。本研究では、同条件において冷媒気化が起きない冷媒初期圧力と気相体積について検討したので報告する。

2. モデルケーブルの解析条件

本研究で対象とする高温超電導モデルケーブルは、三心一括型構造を取り、コルゲート管内に挿入されている。短絡電流通過時を考えているため、解析においては、銅フォーマ/HTS 導体層、HTS シールド層/銅シールド層をそれぞれ銅層一層の導体層、シールド層と仮定して、以下の式に基づく長手方向一次元の非線形熱伝導方程式に基づいて有限要素法によりケーブルコアの温度を数値計算した。また、ケーブルコアからの熱伝達と外部からの侵入熱により冷媒温度を計算した。

$$\rho_{cu}c_{cu} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{cu} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{in} - Q_{out}$$

Q_{in} : 流入熱量 Q_{out} : 流出熱量

3. 解析結果

本研究では、実規模 3km のケーブルに対して、31.5kA-2s の短絡事故電流が通電された時の解析を行い、初期条件として、液体窒素の初期入口圧力と、冷却システムの初期気相体積を変化させた。初期気相体積は温度上昇に伴う液体窒素圧力の上昇に影響し、初期気相体積が大きいと圧力上昇は抑えられ、小さいとその逆になる。解析結果としては、液体窒素温度が飽和温度に達して解析が停止するか、液体窒素圧力が圧力限界に達して解析が停止するか、無事に完了するかのどれかであった。圧力限界は、使用しているプログラム GSPAK (Cryodata 社) によるものであり、ケーブルの耐久度などではない。解析結果の一例として、初期入口圧力 1200[kPa]・初期気相体積 5500[L] のときの液体窒素温度 (3km) を Fig.1 に、液体窒素圧力(0km) を Fig.2 に示す。Fig.1 より、最も温度が高くなる出口部 3 km で液体窒素温度は飽和温度に達しておらず、気化が起らないことが分かる。また Fig.2 より、最も圧力が高くなる入口部 0 km では液体窒素圧力が最大で約 3000[kPa] にまでなることが分かる。

4. まとめ

本研究の解析結果を用いれば、初期圧力・初期気相体積を変化させたときの、冷媒気化の有無や液体窒素の最大圧力などが分かり、短絡事故時の安全性評価ができる。

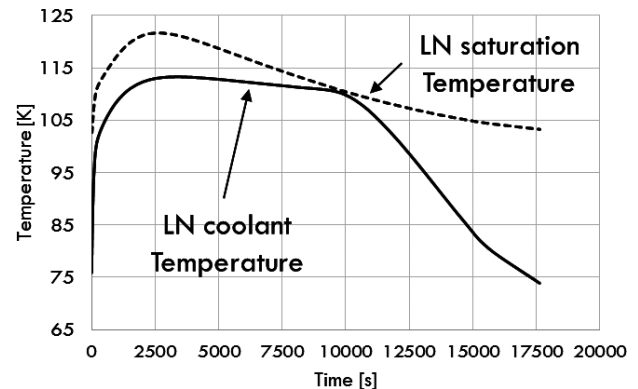


Fig.1 LN coolant temperature at 3 km (outlet)

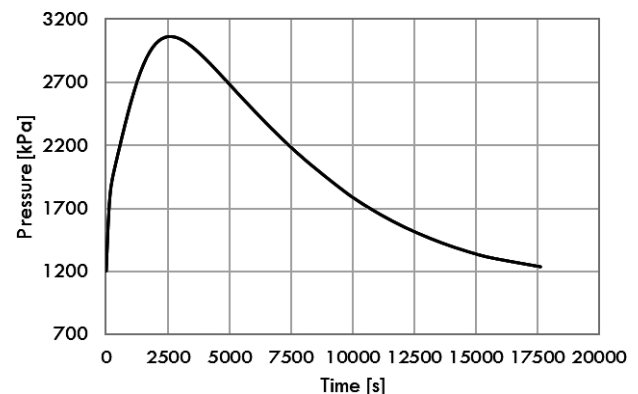


Fig.2 LN coolant pressure at 0 km (inlet)

謝辞

本研究は、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」の一環として NEDO の助成により実施した。

参考文献

1. [Tetsuo Yasui](#), Natsuko Takeda, Yusuke Yokoo, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama, Xudong Wang, Takato Masuda, Toshiya Morimura, and Tomoo Mimura, "Temperature and Pressure Distribution Simulations of 3-km-long High-Temperature Superconducting Power Cable System with Fault Current for 66-kV-class Transmission Lines" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, June, 2017, Art. no. 5400505

超電導ケーブル事故時の液体窒素漏洩に関する検討

Study on Liquid Nitrogen Leakage Accident of HTS Cable

森村 俊也, 増田 孝人(住友電工); 山口 博史, 棚澤 昌幸, 三村 智男(東京電力ホールディングス)

MORIMURA Toshiya, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);

YAMAGUCHI Hirohito, TANAZAWA Masayuki, MIMURA Tomoo (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

E-mail: morimura-toshiya@sei.co.jp

1. はじめに

超電導ケーブルの実系統適用を考慮した場合、万一の地絡事象を想定する必要がある。地絡発生時に流れる地絡電流は系統により様々である。本研究では 66kV 系統地絡電流実績から地絡電流条件を最大 1500A-2sec とし、挙動・発生エネルギーなどをサンプル試験で測定してきた[1]。

超電導ケーブルを安全に運転するためには、地絡事象などに伴う液体窒素(LN2)漏洩状況がどの程度のものか検証することが重要である。これまでに断熱管の穿孔により、LN2 がケーブル外部へ漏洩する可能性を考え、小型のコンクリート容器を用いた LN2 漏洩要素試験を実施し、結果を報告した。今回、実規模級の模擬マンホール(MH)を用いた試験を実施したので、結果を報告する。

2. 実規模級の模擬 MH を用いた LN2 漏洩試験

超電導ケーブルは基本的に地下埋設となることから、まず MH 内での漏洩を模擬することとした。この場合、MH 内圧力上昇、酸素濃度低下、温度低下による他設備や周囲土壌への影響などがリスクとして挙げられるため、これらを検証項目と考えた。MH の大きさや周辺環境、条件は千差万別のため、解析コードによる現象模擬が必須である。よって、検証用として 2×3×2m 級の模擬 MH を用いた LN2 漏洩試験を行った。

模擬 MH の概略図を図 1 に示す。試験は開放状態の容器に LN2 供給源から液を注入し、容器温度変化や床面部の液面レベル、酸素濃度変化などを測定した。なお、液面レベルの測定は床面から 20mm, 50mm の位置に熱電対を配置し、温度測定を行う簡易のものとした。容器は鉄筋コンクリート製であり、床面厚は 300mm, 床面以外は 200mm とした。また、漏洩量は LN2 の消費量と試験時間から簡易的に導出した。

実測した床面部の温度挙動と液面レベル、酸素濃度変化を図 2(a)(b)(c)にそれぞれ示す。LN2 漏洩量は、約 32L/min とした。図 2(a)より、LN2 漏洩時の床面温度は、容器内面側(A 側)から順に低下する様子が確認された。また、後述する液溜まりにより、LN2 が全て蒸発するまで床面の温度低下が継続することが特徴である。図 2(b)より、20mm, 50mm の位置に取り付けた熱電対がそれぞれ試験開始から 16 分、25 分の時点で LN2 温度まで低下した。漏洩停止後もしばらく温度を保持していたことから容器内に液溜まりが生じる様子を確認した。また、図 2(c)に示す容器内酸素濃度の推移より、換気状態であっても短時間で低酸素状態となる。容器内の LN2 が全て蒸発してから酸素濃度が復帰していくことから、酸素濃度は容器内の液溜まりの有無やその程度に大きく影響する。

3. まとめ

超電導ケーブルシステムの安定性・安全性検証として、地絡事象時の挙動検討を行っており、MH 内への LN2 漏洩現象の模擬試験を実施した。要素試験結果なども併せて温度・圧力挙動や液面レベル推移、酸素濃度の特性を取得した。今後は、試験結果をフィードバックした解析コードを構築し、漏洩現象の解析を実施する予定である。

謝辞

本研究の一部は、NEDO の助成により実施したものである。

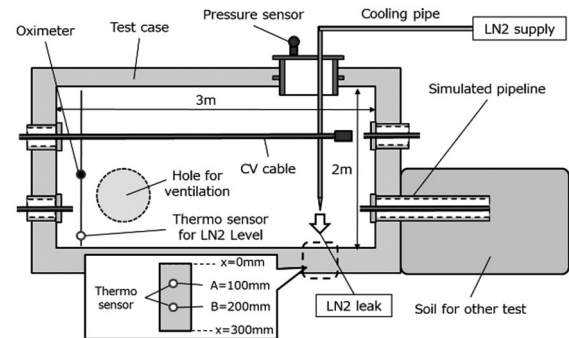
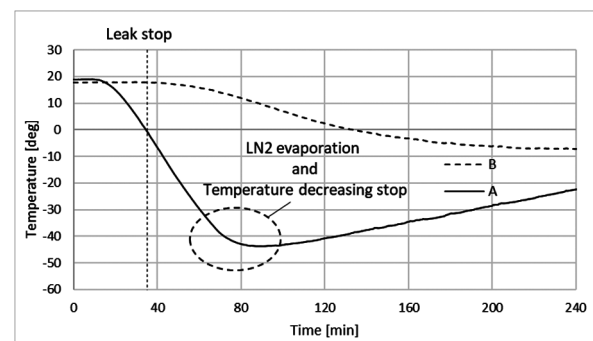
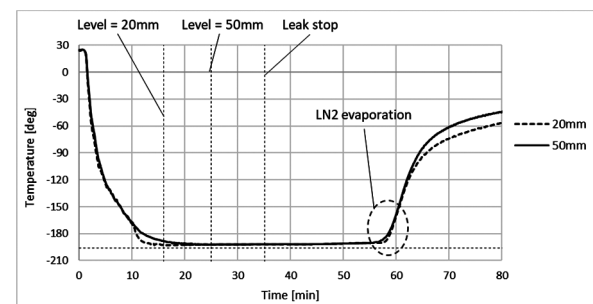


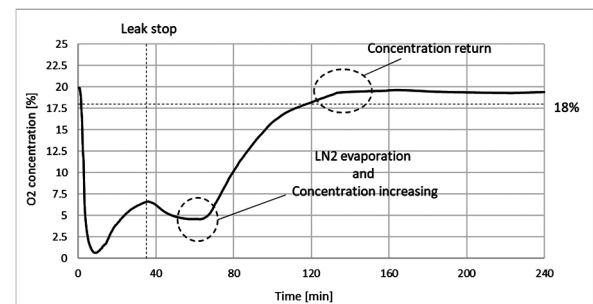
Fig. 1 Schematic view of LN2 leakage test system.



(a) Temperature



(b) LN2 Level inside Test Case



(c) O2 Concentration

Fig. 2 Experimental result of LN2 leak test.

参考文献

1. M.Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.31

高温超電導ケーブル技術資料の制定

Technical report of HTS power cable

林 和彦 (住友電工); 三村 智男 (東京電力); 向山 晋一 (古河電工); 増田 孝人 (住友電工); 明石 一弥 (フジクラ); 青木 裕治 (昭和電線); 池内 正充 (前川); 弘川 昌樹 (大陽日酸)

HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric); MIMURA Tomoo (Tokyo Electric Power Company);

MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); MASUDA Takato (Sumitomo Electric); AKASHI Kazuya (Fujikura);

AOKI Yuji (Showa Cable Systems); IKEUCHI Masamitsu (MAYEKAWA); HIROKAWA Masaki (Taiyo Nippon Sanso)

E-mail: hayashi-kazuhiko@sei.co.jp

1. はじめに

超電導機器を安全に取扱い、運用する上で、特に冷媒の取り扱いに関しては高圧ガス保安法を順守する必要がある。一方、高圧ガス保安法では、第三条において適用除外される高圧ガスが規定されており、第三条六項では、送配電線路等の電気工作物内における高圧ガスは適用が除外される。このため、従来の電気工作物では、油絶縁の OF ケーブルにおけるガス加圧装置や、LNG 等の液化ガスの扱いは、電気事業法の下で取り扱いが決められている。超電導ケーブルについても実系統に導入されれば、電気工作物として取り扱うのが妥当と考えられるが、現行の電気事業法の下では、超電導ケーブルの取り扱いが想定されていない状況である。

超電導ケーブルに関しては、全世界で実系統での長期実証運転試験が進められており、ドイツの AmpaCity プロジェクトでは 4 年を超える長期運転の実績がある。このように近い将来に実用化が期待される状況の下で、超電導ケーブルの安全規制に関して、(一社)日本電線工業会に設置された、超電導ケーブル規格化部会(主査:東京大学大崎教授)において種々検討を行ってきた。

超電導ケーブルの電気試験を中心とする試験方法については、IEC の専門委員会(TC: Technical Committee)である TC20 (電力ケーブル)が TC90 (超電導) と協力して規格化を進めている。また、電気工作物としての超電導ケーブルを考えた場合、一般的な電力ケーブルが備える要件はもちろんのこと、冷却用の液体窒素の扱いなど、超電導ケーブル固有の要件を考慮する必要がある。

今後、超電導ケーブルシステムの冷却等に関わる安全を確保するために、事故時対応を含めた安全上の取り扱いに必要な技術要件、電力ケーブルとして備えるべき一般的な要件や電気試験方法についての現状を取りまとめ、今後の安全規制ルール制定に向けての基礎となる技術資料とした。

2. 高温超電導ケーブル技術資料の構成と概要

資料は、(一社)日本電線工業会の技術資料「技資第 152 号 : 超電導ケーブルシステムの概要及び安全上の取り扱い」として 2018 年 5 月に発行された。[1] 目次と各項の記載概要は以下の通りである。

1. 総論

関連法規(高圧ガス保安法と電気事業法)における、超電導ケーブルに関連する内容及び超電導ケーブルに適用した場合の不具合点など

2. 超電導ケーブルシステムの概要と法令との関係

超電導ケーブルシステムの構成と常電導ケーブルシステムの設備構成の違い。一般的な地中送電ケーブルの電気設備基準における確認項目
法令上の課題等

3. 超電導ケーブルシステム一般

超電導ケーブルシステムを構成する材料、ケーブル・端末設計、試験方法の概要など

4. 超電導ケーブルの冷却に用いるガス類

ケーブルの冷却に用いる冷媒ガスや冷凍機の作動ガスの物性

5. 超電導ケーブルの冷却技術

超電導ケーブル冷却システムの原理と実施例、構成機器の概要、高圧ガス保安上の検査、点検項目等

6. 計測・監視システムと想定されるトラブルと対応例

超電導ケーブルシステムの監視、計測装置の概要。想定される事故と保護システムの例

7. 提言

今後の電気事業法における超電導ケーブルの安全規制ルールを検討する上での提言事項

3. 今後の取組み

超電導ケーブルの研究開発は、実系統での実証レベルに進んだとは言え、まだ本格的に商業線路に適用された例がないことから、安全規制のルール化のためには本技術資料に基づいて実績を積み重ねるのがまずは肝要である。

その後、過去の新規技術のルール化にならうとすれば、以下のステップが考えられる。

1. 技術資料に基づく実績の積み重ね
2. 技術資料の改訂
3. 民間規格化(JESC 等)
4. 電気設備技術基準の改訂(民間規格の引用等)

なお、AC ケーブルを対象とした超電導ケーブルの試験法規格(Superconducting AC power cables and their accessories for rated voltages from 6kV to 550kV - Test methods and requirements) については、IEC TC90 との連携により、TC20 のプロジェクトチーム PT63075 を中心に標準化の議論が進められてきた。投票用委員会原案(CDV)に対する投票が行われ、CDV 投票結果(RVC)が 2018 年 10 月 12 日付けで発行されたところである。今後は最終国際規格案(FDIS)が発行され、回覧の後、来年早々には最終投票が行われて、国際規格(IS)が制定される見込みである。

参考文献

1. 技術資料は、日本電線工業会の以下のホームページから購入できる。
<https://www.jcma2.jp/gijutsu/shiryou/index.html>

洋上風力発電用海底ケーブルに適した 三相同一軸型高温超電導ケーブルの送電容量とケーブル構成

Suitable transmission capacity and structure of tri-axial HTS cable for submarine power cable for offshore wind power generation.

遠藤 夏実, 長崎 陽, 宮城 大輔, 津田 理(東北大)

ENDO Natsumi, NAGASAKI Yoh, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: natsumi.endo.t7@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 再生可能エネルギーの導入が急速に拡大しており, その中でも洋上風力発電が注目されている。現在, 洋上風力用の海底送電ケーブルには銅ケーブルが用いられているが, 我々は, 銅ケーブルよりも大容量かつ低損失で送電可能な超電導ケーブルの適用を考えている。超電導ケーブルは, 低電圧で大電流を通電することが可能なため, 洋上変圧施設の省略を期待できる。また, 洋上風力発電施設の多くが, 沿岸より 0~10 km の海域に敷設される見込みであるため, 陸上に設置した 1 つの冷却ステーションで冷却可能な 10 km 程度の超電導ケーブルが要求される。そこで, これまでは, ある送電容量の三相同一軸型高温超電導ケーブルに着目し, ケーブル内の熱収支の内訳やケーブルの長距離化に有効なケーブル構成に関して検討してきた^[1]。しかし, ケーブルの長距離化に適したケーブル構成は送電容量に依存する。そこで, 本研究では, 送電容量と長距離化に適したケーブル構成の関係を明らかにし, 洋上風力発電用海底ケーブルに適した送電容量やケーブル構成方法について検討した。

2. 解析方法

本解析に用いた三相同一軸型ケーブルの諸元を Table. 1 に, 解析モデルを Fig. 1 に示す。各相は, 故障電流分担用の銅テープ, 超電導層, 絶縁用の PPLP®により構成され, コルゲート管に収容されるとした。また, 断熱管内半径は, 各条件下においてケーブル長が最も長くなるように最適化した。ケーブルの冷却は循環系の構築が簡易な向流を採用した。各相における超電導線の交流損失特性は, 有限要素法による薄板近似モデルを用いた電磁界解析^[2]により評価した。また, ケーブル内の熱解析では, 超電導線の交流損失, 銅テープ線材における渦電流損失, PPLP®の誘電体損失, 冷媒の摩擦損失, ケーブル外部からの侵入熱を考慮した。冷媒となる液体窒素の流体解析では, 流れを Reynolds 数から判断し, 熱伝達と圧力損失を考慮した。液体窒素を循環させてケーブルを冷却する際, 液体窒素の気化を抑制する必要があるため, ケーブルの最長距離は冷媒温度と冷媒圧力の両者の制約を受ける。このため, ケーブル最長距離は冷媒温度で決まる最長距離と冷媒圧力で決まる最長距離の短い方に依存するとした。

3. 解析結果及び考察

Fig. 2 より, 低熱伝導層なしの場合, 送電容量が 30 MW の時にケーブル長が最大の約 2.2 km となることがわかった。これは, 電圧階級 6.6 kV かつ U 相電流負荷率 0.8 の条件下で送電容量が 10~30 MW の場合, 通電電流が小さく, 必要な線材本数が少ないために内側冷媒流路が狭くなり, 内側冷媒流路の大きな圧力損失がケーブル最長距離に影響を及ぼすためと考えられる。一方, 送電容量が 40 MW 以上の場合は, 通電電流が大きく, 必要な線材本数が多くなるために, 内側冷媒流路が十分に確保され, 冷媒圧力は抑制された。しかし, ケーブル外径も大きくなるために, 外部からの侵入熱が増加し, ケーブル最長距離は冷媒温度に依存して, 送電容量の増加と共に減少することが確認された。このため, さらなるケ

ーブルの長距離化に向けて, 内側冷媒流路の冷媒の温度上昇を抑制するために, 導体と外側冷媒流路間に低熱伝導層を設けた^[1]。Fig. 2 より, 低熱伝導層を適用することにより, 内側冷媒流路の冷媒の温度上昇が抑制され, ケーブル最長距離が長くなることがわかった。特に, 送電容量 40 MW 以上で大きく増加することが確認された。これは, 送電容量 10~30 MW の場合は冷媒圧力の制約を受け, 送電容量 40 MW 以上では, 冷媒温度の制約を受けるためである。送電容量 40 MW における低熱伝導層がある場合のケーブル最長距離は, 低熱伝導層なしの場合の約 2.9 倍の約 6.3 km となることがわかった。

Table. 1 Specifications of analytical model of an HTS tri-axial cable

Nominal voltage [kV]	6.6
Transmission capacity [MW]	10 - 80
Load factor of U phase	0.8
Twist pitch [mm]	500
Cu thickness [mm]	0.01
PPLP® insulation thickness [mm]	2.0
Thickness of low heat conduction layer [mm]	12
Flow rate of LN ₂ [L/min]	60
LN ₂ inlet temperature [K]	65
LN ₂ inlet pressure [MPa]	1.0

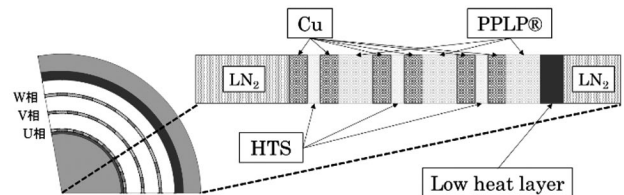


Fig. 1. Analytical model of an HTS tri-axial cable.

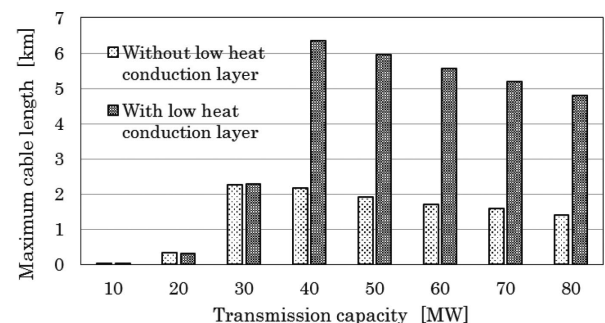


Fig. 2. Dependence of maximum cable length on transmission capacity.

参考文献

- N. Endo, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.159
- 雨宮尚之: “高温超伝導体の交流損失—超伝導線から超伝導送電ケーブルまで—”, 低温工学, Vol. 45, No. 8, 2010, pp. 376-386

超電導き電の開発状況

Development of superconducting feeder cables

富田 優 (鉄道総研)

TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)

E-mail: tomita.masaru.19@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道き電システムに超電導技術を適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制など様々な効果が期待できる。鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導き電ケーブルの開発を進めている^[1,2]。

2. 超電導き電ケーブルの開発状況

これまで2007年から直流区間用超電導送電の研究開発に着手し、2009年に国立開発研究法人 科学技術振興機構 (JST)の長期の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の研究課題である「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」が始動し(Fig. 1)、現在最終ステージを迎える(Fig. 2)。

超電導ケーブルの開発では、超電導線材の評価、過電流特性の評価、ケーブル化、漏洩磁場評価など各種実験を行った。冷却システムの開発では当初、直接冷却方式、対交流循環方式を採用した超電導き電システムを製作し、屋内において試験を実施した。その後、間接冷却方式を応用した冷却システムの全てのユニットを一体化した一体型冷却システムを開発し、超電導き電ケーブルを構内試験線に敷設した。通電、冷却、課電試験などの試験結果から、鉄道現場に設置するシステムとしての健全性を確認した後、試験列車への超電導送電を実施し、電車の走行試験に初めて成功した。

2015年には、営業線である伊豆箱根鉄道駿豆線において、超電導き電ケーブルを用いた電気回路(変電所→超電導線→き電→電車)による電車走行試験に成功した。

さらに、国土交通省の補助事業により、都市部の過密路線(容量 8kA 程度)で使用可能な、10kA 級の大容量化超電導き電ケーブルの開発を行った^[3]。また、実践的な敷設工事を模擬するため、き電分岐一区間に相当する300m級の超電導き電ケーブルを製作し、CV ケーブルの通常の敷設と同様にドラムから構内試験線内の線路に平行に引き込み、営業路線に含まれる線路跨ぎや踏切跨ぎの箇所を組み入れ、冷却試験と電車の走行試験により、ケーブル内部の品質評価を行っ

た^[4]。現在、都市路線の電気抵抗削減による電圧降下の抑制についての実証試験を実施している。

鉄道の実用化においては長距離冷却が必要であり、NEDOの「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」を受け、km級の技術開発が始動した。また、超電導き電ケーブルの輸送単位長さは400~500mで、敷設に必要な長さは数kmにおよび、接続箇所が必要であり、JST 未来社会創造事業の「高温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への社会実装」が始動した。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)の研究成果展開事業・戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)、国土交通省鉄道技術開発費補助金の助成を受けて実施した。

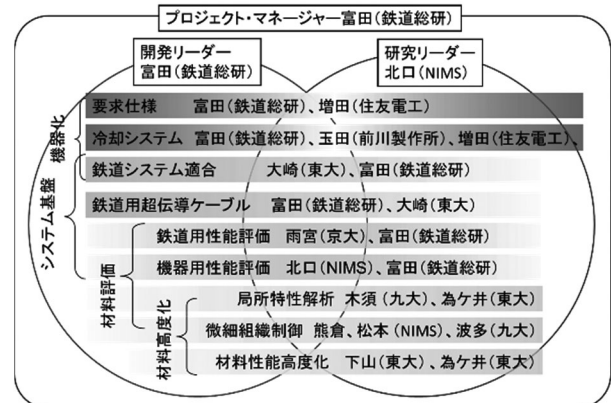


Fig.1 S-innova program first stage.

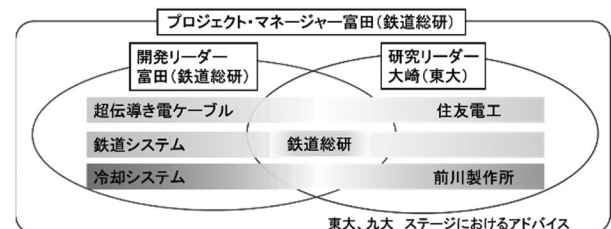


Fig.2 S-innova program final stage.

参考文献

- [1] M. Tomita *et al.*, *Energy* **122** (2017) 579-587.
- [2] Superconductors drive trains, *Nature* **542** (2017) 275.
- [3] M. Tomita *et al.*, *J. Appl. Phys.* **111**, 063910 (2012)
- [4] M. Tomita *et al.*, *Cryogenics* **89** (2018) 125-130.

超電導き電ケーブルの敷設方法の検討

Laying method of superconducting feeder cable

赤坂 友幸, 福本 祐介, 石原 篤, 小林 祐介, 恩地 太紀, 鈴木 賢次, 富田 優(鉄道総研)

AKASAKA Tomoyuki, FUKUMOTO Yusuke, ISHIHARA Atsushi, KOBAYASHI Yusuke,

ONJI Taiki, SUZUKI Kenji, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)

E-mail: akasaka.tomoyuki.65@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道き電システムに超電導技術を適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制など様々な効果が期待できる。鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導き電ケーブルの開発を進めている^[1-3]。本講演ではこれまで実施した超電導き電ケーブルの敷設技術について報告する。

2. 結果と考察

超電導ケーブルを極低温に冷却すると、熱応力によりケーブル自体が収縮するため、特に長尺の超電導ケーブルを敷設する際には、このことを考慮し冷却、運用する必要がある。ここでは、長尺の超電導ケーブルの最適な敷設方法の検討を行い、実際に 300 m 級の超電導ケーブルの敷設試験を行った。超電導き電ケーブルは、室温から液体窒素温度への冷却過程において、0.3 %程度収縮する。つまり、300 m 長のケーブルにおいては、ケーブルは 0.9 m 収縮することになる。この場合、超電導き電ケーブルには熱応力が加わるため、ケーブルコアや電流末端が破損する恐れがある。長尺ケーブルの冷却応力の緩和手法として、電流末端を可動式とする方法、超電導ケーブルをスネークして敷設する方法、ケーブルが直線にならないようにずらして敷設する方法(オフセット)がある。部分的に円弧状のオフセット部分を設けて敷設することで、ケーブルを冷却すると直線的に変位して収縮量を吸収することができ、今回敷設した 300 m 級超電導き電ケーブルの敷設においては、実際の鉄道路線を想定したため、敷設経路上に線路跨ぎや踏切跨ぎ箇所を設けており、複数の曲がり箇所を有している。

超電導き電ケーブルの試験線への敷設は、あらかじめ敷設ルート上にトラフ橋を設置し、キャタピラやケーブルローラーを用いてケーブルを送り出すことによって行った。曲げ半径は 2.5 m 以上を確保し、踏切横断部のほか、高低差 2.4 m の軌道横断部を設けた。なお、軌道横断部および電流末端直前においては、クリートは使用せずにガイドのみ取り付けこ

とで可動状態とし、簡易的なオフセットとなっている。敷設した電流端末間の距離は 310 m 程度となっており、線路横断部や、道路横断部分の箇所においても、ケーブルを繰り出す方法で敷設することができ、問題なく敷設を行うことができた。次に、敷設した超電導ケーブルの冷却試験を行った。冷却は、急激な熱応力を加えないようにし、冷却ガス温度を調節しながら、徐々に冷却を行い、初期冷却には、約 80 時間かけて全長の温度が液体窒素温度になったことを確認し、その後、液体窒素を充填させ冷却を完了した。冷却後、超電導ケーブルを目視にて確認しましたが、特に大きく変位した箇所や、ケーブルに過大な応力がかかっている箇所がないことを確認した。

当日は、X 線による内部評価 (Fig.1) や、他の敷設技術についても報告する予定である。

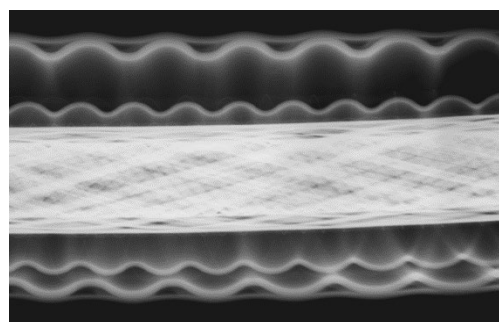


Fig.1 Internal structure observation of 300 meter superconducting feeder cable.

謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導ノベーション」の支援を受けて進めたものである。

参考文献

- [1] M. Tomita *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference* **80** (2009) 181.
- [2] M. Tomita *et al.*, *Energy* **122** (2017) 579-587.
- [3] *Nature* **542** (2017) 275.

超電導き電用液体窒素循環ポンプの開発

Development of liquid nitrogen pump for superconducting feeder system

鈴木 賢次, 富田 優 (鉄道総研); 関根 大地, 栗原 和昭, 吉永 誠一郎 (IHI)

SUZUKI Kenji (RTRI); SEKINE Daichi, KURIHARA Kazuaki, YOSHINAGA Seiichiro (IHI); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: suzuki.kenji.64@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道き電システムに超電導技術を適用することで、回生失効および送電損失の低減による省エネ効果のみならず、電圧補償による輸送力の増加や変電所の集約化、変電所の負荷平準化、レール電食の抑制などの様々な効果が期待できる。鉄道総研では、直流電気鉄道での電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導き電ケーブルの開発を進めている [1-3]。一般に、変電所間隔は、地方で 5-10km、都市部で 2-5km 程度であり、超電導き電ケーブルの導入には、km 級の長距離冷却技術の確立が求められている。本研究では、揚程 0.6MPa、流量 50L/min を性能目標として、鉄道き電に対応する液体窒素循環ポンプの開発を進めたので報告する。

2. 動圧式ガス軸受の採用

従来の液体窒素循環ポンプは玉軸受を適用したポンプが一般的であり、定期的(数千時間ごと)にポンプを停止して、軸受を交換する保守・点検を行う必要がある。また、磁気軸受を適用したポンプにおいても、制御機器や補助軸受(玉軸受)が必要のため、小型化、低コスト化の課題がある。このような現状の課題を克服するため、本研究では、動圧式ガス軸受を採用し、保守・点検間隔の長期化、ポンプ軸の回転数向上によるインペラの小型化など性能の向上を目指した。

3. 液体窒素循環ポンプの設計・製作

動圧式ガス軸受には、バンプフォイル式を採用した(図 1)。ガス膜が生成しない低回転領域では、バンプフォイルにより回転軸を支持し、一定回転数以上の領域ではガス膜の生成によりガス軸受が機能し、回転軸を支持できる。動圧式ガス軸受の設計にあたっては、スラスト方向、ラジアル方向ともに本ポンプの性能範囲において、回転軸を安定して支持できる構造とした。

回転軸は、伝達マトリクス法を用いた軸振動解析により、危険速度に対し十分な安全マージンを確保する設計とした。また、有限要素法による遠心応力解析から、スラスト軸受のディスク部には、許容応力以下となる材料を使用した(図 2)。

その他インペラ等の構成部品について、性能目標に対応した設計を進め、図 3 に示す全体設計を完了し、製作を進めた。

4. おわりに

全体組立後、これまでに耐圧気密試験により、設計圧力 2.1MPa において耐圧ケーシングに漏れ等の異常がないことを確認している。当日は、回転試験等の結果についても報告する予定である。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」の委託を受けて実施したものである。

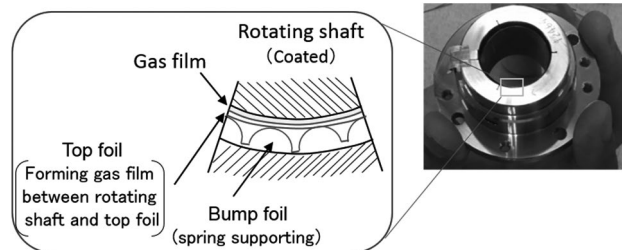


Fig.1 Structure of radial hydrodynamic gas pressure bearing

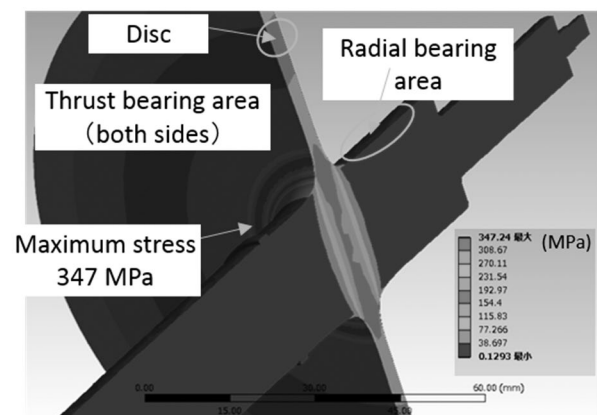


Fig.2 Centrifugal stress analysis of rotating shaft

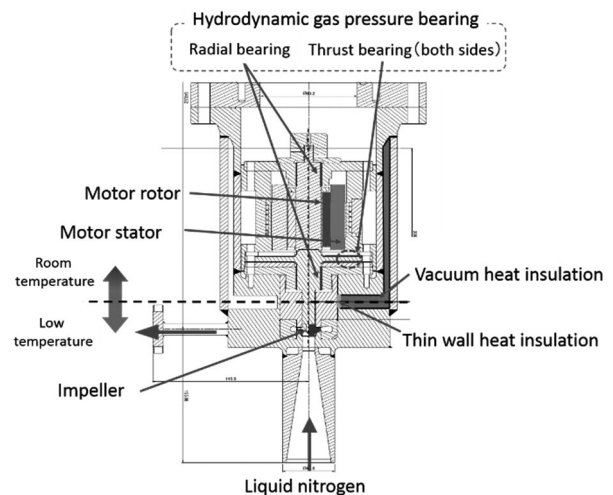


Fig.3 Structure of hydrodynamic gas pressure bearing type liquid nitrogen pump

参考文献

1. M. Tomita *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) 181.
2. Superconductors drive trains, Nature 542 (2017) 275.
3. M. Tomita *et al.*: Energy 122 (2017) 579-587.