

1000m 級超電導直流ケーブルシステムの熱負荷と電力消費

Heat load and consumption power in 1000 m class superconducting DC cable system in Ishikari

渡邊 裕文, イワノフ ユーリ, 筑本 知子, 山口 作太郎 (中部大);
石山 功太郎, 大石 前次 (千代田化工); 渡部 充彦, 増田 孝人 (住友電工)
WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);
ISHIYAMA Kotarou, OISHI Zenji (Chiyoda Corp.);
WATANABE Michihiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: h_watanabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

石狩プロジェクト(石狩PJ)では1000m級の超電導直流送電システム(回線2)を建設した[1]。前回2017年春の講演では、回線2の冷却循環システム、断熱配管の断熱性能、循環の圧力損失について報告した[2]。輻射シールド付き真空断熱配管の熱侵入特性は外管温度が -2.4°C の時、往復で $0.865(50)\text{W/m}$ だった。実際の使用では刻一刻と外管温度が変化するため、測定される熱侵入量は異なる外管温度での熱侵入量の足しあわせとなる。2016年度の冷却試験中の長期循環試験とロードサイクル試験で回線2を実際に運用した場合に熱侵入などによる冷凍機システムにかかる熱負荷とそれを冷やすのに必要な電力を測定したので報告する。

2. 長期循環試験とロードサイクル試験

Fig.1に回線2の冷却・循環システムの概要図を示す。TBはターボブレイトン冷凍機、STはスターリング冷凍機を示す。CPは循環ポンプを示し、冷凍機システム側に二台(CP1,2)、中間の端末B側に一台(CP3)備えられている。FMはコリオリ型流量計、Tで始まるラベルは温度測定、Pで始まるものは圧力測定を示す。断熱配管は石狩PJのために新しく開発されたものであり、一本の外管の中にケーブルを設置するためのケーブル管と液体窒素を返すためのリターン管を持つ[3]。

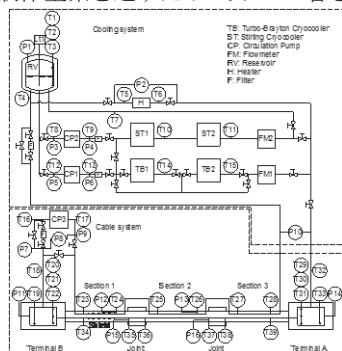


Fig.1 The piping and instrument diagram of Line 2.

2016年度の冷却試験中の長期循環試験とロードサイクル試験ではST1,2は使用せず、TB1,2のみ用いた。リザーバーから出た液体窒素はCP1で加圧された後、TB1,2により冷却される。FM1で質量流量を測定された後、端末に向かい、ケーブル管でケーブルを冷却する。端末を出た所でCP3により再加圧され、リターン管を通過し、リザーバーに戻る。

長期循環試験では液体窒素温度を冷凍機出口で70K、流量を40L/minの条件で、約一ヶ月にわたり循環を継続した。ロードサイクル試験では同じ循環条件で1日当たり8時間1kA通電、16時間非通電のサイクルを3週間にわたり継続した。試験中の液体窒素の温度上昇と、液体窒素流量から低温系への熱侵入量を求め、冷凍機への熱負荷を評価した。システムの中で電力を消費する機器として、ターボブレイトン冷凍機2台、冷凍機へ冷却水を供給するチラー2台及びポンプ2台が存在する。冷凍機及びチラーについては試験時電力計に

より消費電力を測定した。ポンプについては別途回転速度及び液体窒素流量に対し消費電力を測定し、試験時の回転速度と流量から消費電力を推定した。電力計は機器の電源側に取り付けたため測定された電力は機器を動かすことに必要な全電力である。

3. 熱負荷及び消費電力

長期循環試験では約一ヶ月にわたり、液体窒素を安定的に循環できることを確認した。また、CP1と1km離れたCP3との直列運転を行い、大きく離れたポンプを直列運転で用いるための条件出しを行い、安定的な循環が可能であることを確認した。

Fig.2に長期循環試験中とロードサイクル試験中の冷凍機

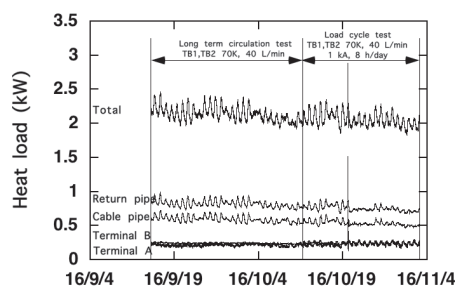


Fig.2 Heat load to the cryocoolers.

への全熱負荷とその内訳を示す。断熱配管は外置きのためリターン管とケーブル管での熱負荷成分は気温、日照に応じた変動をしている。ターミナルは室内置きのためそのような変動はないが、ロードサイクル試験中、通電サイクルに合わせて僅かに変動が見られる。長期循環試験時とロードサイクル試験時の熱負荷の期間の平均値はほぼ変わらず2.1-2.2kWであった。それに対し、冷凍機、チラー、ポンプ等を含めたシステムの稼働に用いた電力は116-118kWであった。

謝辞

本研究は経済産業省 委託事業「高温超電導直流送電システムの実証研究」、「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 助成事業「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」により行われた。

参考文献

1. S. Yamaguchi et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.23
2. H. Watanabe et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.140.
3. H. Watanabe et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.39.

超電導ケーブルシステムの長距離化にむけた液体窒素循環ポンプ直列運転試験 Series operation of liquid N₂ circulation pumps for a long-length superconducting cable system

筑本 知子, 渡邊 裕文, ユーリ・イワノフ, 山口 作太郎 (中部大);
石山 功太郎, 大石 前次(千代田化);渡部 充彦, 増田孝人(住友電工)

CHIKUMOTO Noriko, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);

ISHIYAMA Kotaro, OISHI Zenji (Chiyoda Corp.);

WATANABE Michihiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Ind., Ltd.)

E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルシステムにおいては、安全性・経済性の観点から液体窒素を循環冷媒とし、冷凍機冷凍方式によるクローズドサイクル冷却システムが様々な実証試験等で広く検討されている。しかしながら、ポンプ一基当たりの揚程には限りがあり、管路の圧力損失がそれを超えた場合には複数台のポンプの直列運転による対応が必要となる。そこで、本研究では、石狩の 1000m 級超電導直流送電システムを用い、2 台のポンプの直列運転時のそれぞれのポンプの協調運転において安定循環を得るための条件検討を行うとともに、その運転特性試験および長期運転時の安定性について確認を行った。その結果、2 台のポンプの直列運転の安定運転条件を見出したので、その結果について報告する。

2. 1000 m システムの概要

試験に用いた石狩の 1000m システム(回線2)の冷却・循環の概要図を Fig.1 に示す。今回は、スターリング冷凍機は使用せず、2 台のターボブレイトン冷凍機と CP1、CP3 の二台の液体窒素ポンプを用いて、試験を行った。液体窒素ポンプは AISIN 製の遠心型ポンプであり、単体試験において、文献1で報告した Q-H 特性と同じであることを確認した。リザーバタンクから出た液体窒素は CP1 で加圧された後、2 台のターボブレイトン冷凍機で冷却され、端末 A よりケーブル管 (65A) に入り、ケーブル (外径:40mm) を冷却する。端末 B を出たところで、CP3 で再加圧され、リターン管 (50A) を通過し、リザーバタンクに戻る。リザーバタンク、冷凍機、ポンプ、端末をつなぐ真空断熱配管の内管は 25A である。循環窒素の流量は、CP1 の出口に設けられたコリオリ式質量流量計にて測定を行った。またリザーバタンク、CP1、CP3、ケーブル管、リターン管それ

ぞれの入口と出口に設けた圧力センサにより、液体窒素圧力の計測を行った。なお液体窒素温度は約 70K であった。

3. 液体窒素循環ポンプ直列運転試験

Table 1 に直列運転時に各ポンプの回転数を変えた時の、流量、ポンプの揚程、CP1 出口→CP3 入口 (ΔP_{go}) および CP3 出口→リザーバタンク (ΔP_{return}) の圧力損失をまとめる。当初、直列運転時にはポンプの回転数を揃えた方が安定すると考え、条件1、2にて運転を行った。その結果、条件2にて目標とする 40L/min が得られたものの、運転が安定せず、トリップした。条件3はトリップして CP3 が停止した時の状況である。Table 1 より下記のことがわかる。

① $\Delta P_{return} \ll \Delta P_{go}$ 、この両者の圧力損失の差は流量とともに大きくなる。② $\Delta P_{cp1} < \Delta P_{go}$ および $\Delta P_{cp3} > \Delta P_{return}$

ここで、CP1 が CP1 出口→CP3 入口を、CP3 が CP3 出口→リザーバタンクを分担していると仮定すると、条件2においては、実際の揚程と必要な揚程のアンバランスが大きくなっており、そのためにポンプの動作が不安定になりトリップしたと考え、揚程のバランスをとる条件検討を行った。その結果が条件4であるが、この条件において、約1ヶ月の無人運転を行い、安定循環が行えることが確認された。条件検討の詳細については、当日報告する。

謝辞 本研究は経済産業省の委託及び NEDO の助成により実施された。

参考文献

1.H. Watanabe et al., Proc. of 26th Int. Cryogenic Eng. Conf./Int. Cryogenic Mater. Conf. 2016, New Delhi, India, Mar 7-11, 2016.

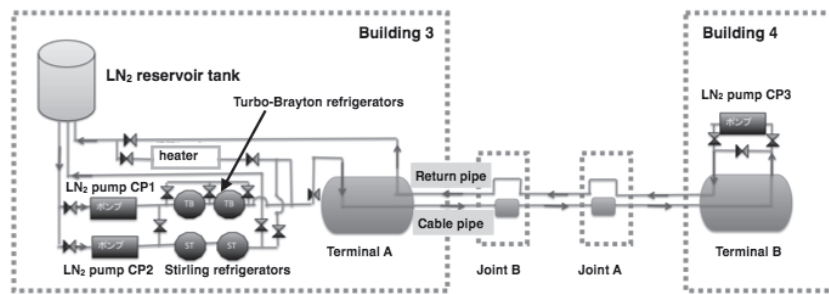


Fig.1 Schematic illustration of LN₂ circulation system of 1000m system

Table 1 Relationships between the setting rotation speeds of the LN₂ pumps, flow rate, pump head, and the pressure drop.

	CP1 回転数 (rpm)	CP3 回転数 (rpm)	流量 (L/min)	CP1入口 (Pp11)	CP1出口 (Pp12)	CP3入口 (Pp31)	CP3出口 (Pp32)	リザーバタンク (Pt1)	圧力 (kPa)				備考
									CP1 ΔP_{cp1}	CP3 ΔP_{cp3}	CP1-CP3間 ΔP_{go}	CP3-Pt1間 ΔP_{return}	
条件1	4000	4000	31.6	262.5	302.8	250.8	286.8	265.0	40.3	36.0	52.0	21.9	
条件2	5100	5100	40.2	260.9	325.9	243.3	300.9	265.0	65.0	57.6	82.6	36.0	トリップ
条件3	5100	停止	28.2	263.1	332.6	290.7	282.0	264.7	69.5	-8.7	41.9	17.3	
条件4	6000	4000	41.1	258.2	352.3	264.8	297.0	261.8	94.1	32.2	87.5	35.3	

石狩超電導直流ケーブルの断熱性能解析- 1

Thermal insulation analysis of cryogenic pipe in Ishikari Project - 1

山口 作太郎, 渡邊 裕文, イワノフ ユーリ, 筑本 知子, 神田 昌枝, 井上 徳之, 高野廣久(中部大)
 YAMAGUCHI Sataro, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, CHIKUMOTO Noriko, KANDA Masae,
 INOUE Tokuyuki, TAKANO Hirohisa (Chubu Univ.)
 E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

2017年春の学会では石狩プロジェクト・回線2の断熱2重管への熱侵入を輻射と熱伝導の2つのプロセスに分けて見積もりを行った。輻射は主に多層断熱膜 (MLI)を通じて侵入し、熱伝導は主に内管支持の G-FRP から侵入するとして外管の温度の変化に応じた熱侵入量の 0次元解析を行った。超伝導直流送電システムの経済性は熱侵入量によって決まるため、低熱侵入は最も重要な課題の一つであり、長距離ケーブルを作るための基礎である。低熱侵入断熱2重管の開発には、プロセス毎の熱侵入量を調べ、それに応じた対策をとることになる。このため、実験データ解析を続けている。

本講演では、石狩回線2で測定された熱侵入量データを並行平板及び同軸構造の輻射熱輸送解析モデル[1]を利用して、解析を行った結果を述べる。

2. 断熱2重管構造と熱侵入量

石狩プロジェクト回線2では異なった構造の断熱2重管を使い、一つは輻射シールド(Radiation Shield, RS)を用い、ケーブル管をリターン管に熱的に接続したアルミ製のRSで覆うような構造とした。もう一つは2本の内管をRSなしで配置した。

Table 1には外気温が異なったときの断熱2重管の熱侵入量が誤差評価を入れて示した。Part 1はRSが組み込まれ、ケーブル管の熱侵入量は極めて低い。Part 2は曲がり部を含んでいて、直線部であるPart 3に比べて熱侵入量は大きい。そして、Part 3はRSを組み込まれていない。回線2は地上に設置してあるために、外気温によって外管温度が夏季/冬季及び日中/夜間で異なる。このため、外気温によって熱侵入量は変わる。尚、この表では比較的溫度が安定する夜間のデータを元に熱侵入量をまとめた。

3. 数学モデルと計算結果

Ref. [1]によると、輻射による熱輸送は Fig. 1 に示すモデルでは下記のように熱輸送量 Q_{12} が書ける。

$$Q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{A_1 e_1} + \frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{e_2} - 1 \right)}$$

ここで、 σ は Stefan-Boltzmann 係数、 T_1, T_2 は2つの同軸状に向き合った面の温度、 A_1, A_2 は2つ面の面積、 e_1, e_2 は2つの面の輻射率を表す。したがって、Fig. 1 に示すモデルでは常温側を外管温度、内管温度は液体窒素温度として実験データを使った。面積及び輻射率については構造及びメーカ測定

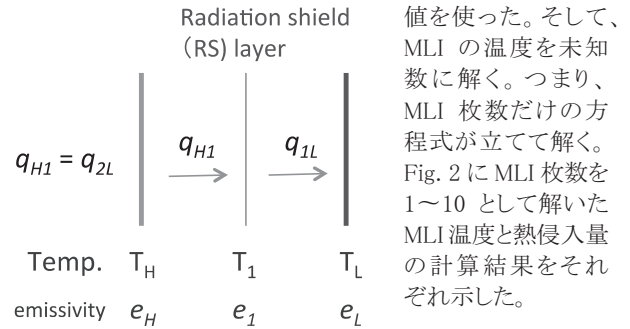


Fig. 1 Configuration of radiation shield (RS) and Equation of RS to solve the temperature & heat leak.

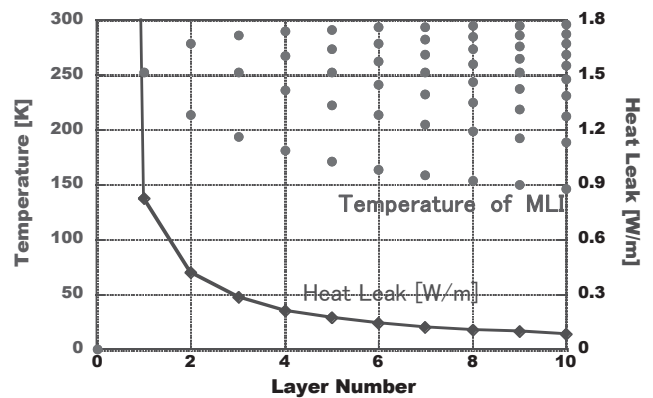


Fig. 2 Calculation results of 10 layers temperatures of MLI and heat leak.

MLI が 10 枚になると、計算熱侵入量は 0.1W/m 以下となる。一方、実験結果は MLI が 21 枚あるにも拘わらず、この 10 倍ほど高い。この差は MLI 層間の接触による熱伝達と考えている。また、MLI 層間の温度差は低温側で大きくなるが、常温側では数 K しかない。層間に接触による熱伝達のために計算とは異なった温度になると、熱侵入量は増大すると考えられる。このため、良い指標になる可能性があり、MLI 温度の測定を今後予定している。

参考文献

1. R. Byron Bird et al, Transport Phenomena, p. 447, 1960, John Wiley & Sons, Inc.

Table1 Heat leaks of cryogenic pipes in Ishikari Line 2

Temp. of outer pipe	270.75±2.7 [K]			290.55±2.6 [K]		
	Cable pipe [W/m]	Return pipe [W/m]	Sum of two pipes [W/m]	Cable pipe [W/m]	Return pipe [W/m]	Sum of two pipes [W/m]
Part 1	0.033±0.035	0.832±0.036	0.865±0.050	0.024±0.034	1.204±0.038	1.228±0.051
Part 2	0.92±0.13	0.51±0.14	1.42±0.19	1.34±0.13	0.63±0.17	1.96±0.21
Part 3	0.79±0.45	0.431±0.046	1.222±0.065	1.021±0.045	0.535±0.063	1.556±0.077

275kV 系統実規模級 HTS ケーブルの短絡事故時における冷媒の挙動解析

Simulation of Coolant in 275 kV HTS Cable on Short-circuit Current Accidents

横尾 祐輔, 竹田 夏子, 堀田 大智, 我妻 洸, 石山 敦士(早稲田大学); 高木 智洋, 福島 弘之(古河電工)
 YOKOO Yusuke, TAKEDA Natsuko, HORITA Daichi, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
 TAKAGI Tomohiro, FUKUSHIMA Hiroyuki (Furukawa Electric Co., Ltd.)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. 研究背景・目的

超電導電力ケーブルは、その持つ高電流密度、経済性、環境性などの特徴から、電力システムの拡充や、超長距離送電、環境を配慮した電力輸送の技術及び手段として期待をされている。しかしながら、実用化に向けた課題として、事故時の影響評価や断熱管への侵入熱の低減といったものが存在する。我々は、短絡事故時の安全性評価に焦点を当て、事故時に生じる発熱によって変化する、ケーブル内各部の温度や冷媒の挙動を計算するシミュレーションコードの開発を行っている。[1] このシミュレーションコードを開発することにより、コスト面や経済面で長尺での実験が難しいとされる HTS ケーブル運用時のリスク評価や、敷設時に必要となる冷凍機の設置位置の検討などに対するツールとしての利用も期待できる。

2. モデルケーブルの解析条件

本研究では、Fig. 1 に示すような複数の冷媒流路を持つ単心構造の高温超電導ケーブルを対象とし、各種パラメータは Table 1 に示す通りである。短絡電流によって超電導ケーブル内に生じる熱の移動を、数値解析によって算出した。計算の際には、計算速度向上と CPU メモリの負担低減のため、3次元の円柱座標系の非線形熱伝導方程式を次式のような長手方向 1次元の方程式に変形し、計算を行った。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{in} + Q_{out}$$

なお、ケーブルコア内側壁面における冷媒への熱の移動は、強制熱伝達によるものとして算出した。また、冷媒の特性は GASPAC[®] (Cryodata 社)を用いて計算した。

3. 解析結果

ケーブルの出口部における、各層の温度変化を Fig. 2 に示す。ケーブル長が 20m のものが Fig. 2(a)、3km のものが Fig. 2(b)である。両者を比較すると、シールド層の最高温度が大きく異なっている。これは、通常運転時の外部侵入熱や AC ロス、誘電損失の積分値が温度上昇(約 9[K])に影響していることや、銅抵抗の温度依存性を加味して計算したこと起因していると考えられる。解析時には液体窒素の染み込みは無視しているが、シールド層の温度上昇を踏まえると染み込んでいる液体窒素は気化する可能性がある。そのため、シールド層の発熱を抑えるべく銅の容量を大きくすることが望ましい。また、冷媒の温度について長尺と短尺での結果を比較すると、外側流路と内側流路の冷媒温度の大小関係が入れ替わっていることが見て取れる。これはシールド層の温度上昇によって外側流路の温度上昇が増大したためである。よって、構造次第では、長尺にすると両者の値が逆転する場合があるため、ケーブルシステムの設計の際に出口部における両流路の温度が同程度になるよう設計するのが望ましいと考えられる。

参考文献

[1] Y. Yokoo et al., "Temperature Simulation of a 20 m HTS Power Model Cable System in a Fault Current for 275 kV Transmission Lines": IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.27 Issue. 4, 2017.

謝辞

本研究の一部は NEDO の助成事業「高温超電導実用化促進技術開発」により実施した。

Table. 1 Specifications of the Model Cable

Symbol	Quantity	Value
r_{00}	Inner radius of conductor layer	7.00 mm
r_0	Outer radius of conductor layer	17.70 mm
r_1	Outer radius of dielectric layer	40.50 mm
r_2	Outer radius of shield layer	44.00 mm
r_3	Outer radius of insulation layer	44.50 mm
r_4	Inner radius of corrugated pipe	55.00 mm
S_{cuc}	Cross-sectional area of former layer	400.00 mm ²
S_{cus}	Cross-sectional area of shield layer	210.00 mm ²
$T_{LN(0,t)}$	Inlet temperature of LN	70.0 K
$P_{LN(0,t)}$	Analytic inlet pressure of LN	800 kPa-G
$V_{LN(0,t)}$	Inlet flow rate of LN	30 L/min
Q_h	Heat load	1.8 W/m
Q_{AC-co}	AC loss of conductor layer	0.15 W/m
Q_{AC-sh}	AC loss of shield layer	0.05 W/m
Q_{DI}	Dielectric loss	0.60 W/m
k_{pplp}	Thermal conductivity of insulation	0.23W/m/K

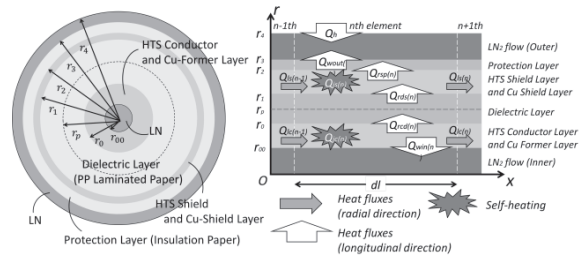


Fig. 1 Model Cable Structure and Heat flow

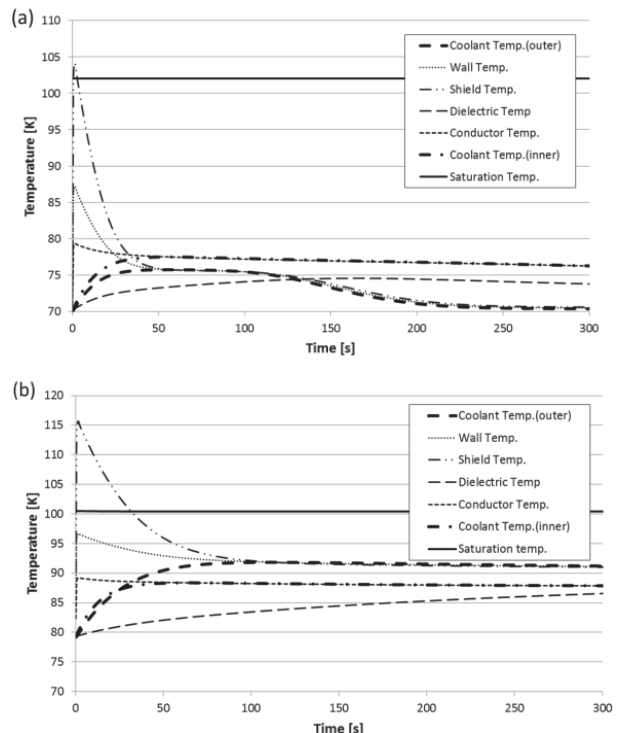


Fig. 2. Calculated temperatures of the coolant and at each layer at the outlet. (a) 20 m cable. (b) 3 km cable.

66kV 級 40m 高温超電導ケーブルにおける短絡事故解析

Simulations of 66kV 40m model HTS Power Cable in Short-circuit Current Accidents

堀田 大智, 横尾 祐輔, 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)

Daichi Horita, Yusuke Yokoo, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama (Waseda University);
Toshiya Morimura, Takato Masuda (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);
Tomoo Mimura (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

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(1,2)。先行研究では、40m の高温超電導モデルケーブルを対象に、日本国内の 66kV 系統で想定されている最大値である 31.5kA-2.0s と、等価エネルギーとなる 16kA-8.4s の短絡電流を通電した模擬試験の結果(3)と、解析結果の比較を行った。本研究では、同条件において改良を加えた解析を行った。

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. 解析と模擬試験結果の比較

先行研究の結果として図 1 にケーブル入口から 30m 地点の冷媒温度、図 2 に 40m(出口)地点の冷媒圧力に関する解析結果及び模擬試験結果を示す。図 1 から、温度に関しては試験結果を解析結果で再現できていることが分かるが、図 2 から、圧力に関しては再現できていないことが分かる。このことから冷媒圧力に関して、解析コードの改良が必要だと分かる。冷媒圧力に関して、試験結果での一つ目の上昇(図 2 ①)はケーブル線材の隙間にしみ込んだ冷媒の気化であると考えられ、二つ目の上昇(図 2 ②)は冷媒の温度上昇に伴う体積膨張が原因だと考えられる。そこで本研究では、冷媒の温度上昇に

伴う体積膨張を考慮した解析コードを作成し、その結果は発表にて報告予定である。

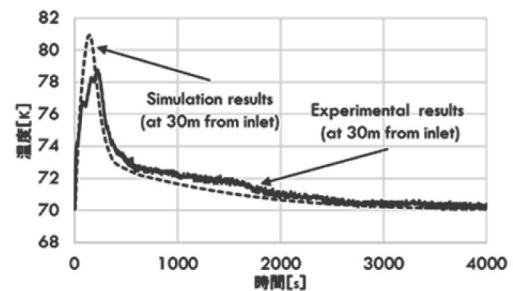


Fig.1 Comparison of Tested and Simulated LN temperatures

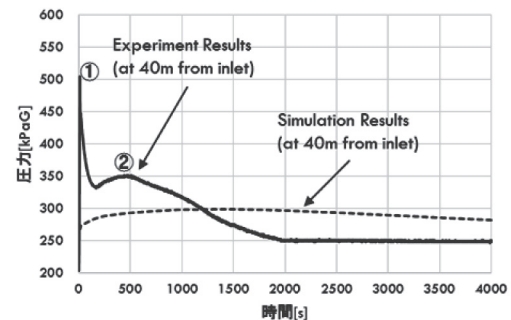


Fig.2 Comparison of Tested and Simulated LN pressures

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。

文献

- (1) T. Yasui, Y. Sato, K. Agatsuma, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 3, Apr. 2016, Art. no. 5402005.
- (2) N. Takeda, T. Yasui, Y. Yokoo, K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.93(2016)p.135
- (3) T. Morimura T. Minamino, T. Masuda et al.: 1st Asian

内層の電磁条件の違いによる二層高温超伝導ケーブルの交流損失特性

AC loss characteristics of different electromagnetic conditions in inner layer of HTS two-layer cables

小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 小川 智也, 菅井 護 (新潟大学)

OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, OGAWA Tomoya, SUGAI Mamoru (Niigata University)

E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導ケーブル全体の交流特性については入力されたエネルギーから測定することが可能であり、多数の実験結果の報告がなされている。しかし、超伝導ケーブルの各層における交流損失特性については測定法が確立されていないことから、解析による損失の導出は報告されているが実験結果の報告が行われていない。そこで本研究では熱的測定法により超伝導ケーブル内の各層の特性について調査を行い[1]、特に外層がつくる磁界が超伝導ケーブルの内層の交流損失特性に及ぼす影響について評価を行った。

2. 二層高温超伝導ケーブルの構成

表1に示すような3種類の二層高温超伝導ツイストケーブルを作成した。内層はすべて同じ線を使用し、外層の線のツイスト方向とツイストピッチを変化させ内層に及ぼす影響についての調査を実施した。ツイスト方向を変えることにより、内層に印加される磁界の方向が逆となる。また、ツイストピッチを変えることにより、同じ電流値でも外層が作る磁界が大きくなる。Cable Aを基準とすると、Cable Bはツイスト方向は同じでツイストピッチを倍とし、Cable Cはツイストピッチが同じでツイスト方向を逆とした。外層の臨界電流値はツイストピッチが同じであるためCable AとCは近い値をしめしており、Cable Bはツイストピッチがきついため臨界電流値が減少している。また、各層の高温超伝導線は直列接続により接続されているため、各線に流れている電流値は等しい。

交流損失を測定するために各層のケーブルの中央付近の導体表面に絶縁処理を施した熱電対を配置し、発泡スチロールにより50mm程度断熱を行った。あらかじめ、臨界電流値付近で直流通電を行いジュール損失と温度上昇の関係を示す校正表を作成した。交流電流を行ったときに生じる温度上昇から校正表を用い損失を導出した。本研究では内層に生じる損失に着目し損失特性について示す。

3. 外層の磁界が二層高温超伝導ケーブルにおける内層の交流損失特性に及ぼす影響

図1に外層と内層を直列接続したときの内層における1サイクルあたりの線1本の通電損失を示す。Cable Aを基準とし

て考えると、Cable Bは外層が作る縦磁界が大きくなっているため全体として損失が上昇していることがわかる。Cable AとCable Cを比較した場合、外層の作る磁界の大きさは等しく、方向のみが違うことにより損失の大きさに差が生まれていると考えられる。

ここで、内層の超伝導線が晒される磁界の大きさと方向について検討を行う。外層に100Aを通電したときCable Aでは外層から6.3mTの導体軸に対し平行な縦磁界が印加される。もし、内層に通電していない場合には内層の線に晒される磁界はCable AとCable Cでは位相が異なるだけであり、損失の大きさには影響しない。そこで内層に通電したときに生じる周方向磁界についても考慮しなければならない。内層に100A通電したときに生じる周方向の磁界は内層表面で22.0mTである。ここで外層が作る縦磁界と、内層が作る周方向磁界の合成磁界の大きさはCable AとCable Cともに22.9mTである。この磁界が内層のS撚りの線に対しどのような角度で印加されているかを求めると、Cable Aの場合には96.7deg、Cable Cの場合には51.3degの角度で線に対し印加されている。一般に同じ磁界の大きさの条件では線軸に対し磁界が垂直に印加されている条件において損失が最大となり、平行磁界に近づくのに伴い、損失が小さくなることが知られている。これは磁束の侵入長に関係するものであり、侵入長が長ければ損失が大きくなる。この考察から図1の損失特性に着目すると、Cable CのほうがCable Aより損失が小さくなっていることから、内層における外層のツイスト方向の違いは内層の線が晒される磁界の方向の違いが影響しているものとして説明が可能である。

本研究では超伝導ケーブル内の損失を内外層分離して測定が可能となったため得られた知見をもとに、損失特性についての検討を実施した。この結果より、超伝導ケーブル内の各層の交流損失を導出するためには、導出したい層より外の層が作る縦磁界、導出したい層より内側の層が作る周方向磁界、導出したい層自身が通電により生じる周方向磁界の合成和により損失特性を検討する必要がある。

参考文献

1. J. Ogawa, et al.: presented at Magnet technology 25

TABLE I
SPECIFICATION OF HTS CABLES

	Cable A (standard)	Cable B	Cable C
Inner layer			
Diameter	20 mm		
Twist pitch	150 mm		
Twist direction	S		
Number of HTS tape	11		
Critical current	151.0 A		
Outer layer			
Diameter	27 mm	27 mm	27 mm
Twist pitch	300 mm	150 mm	300 mm
Twist direction	Z	Z	S
Number of HTS tape	15	14	15
Critical current	184.2 A	157.5 A	188.1 A

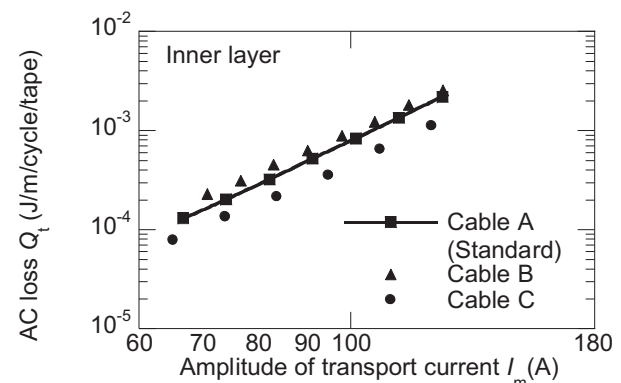


Fig. 1 AC loss characteristics in the inner layer of the HTS two-layer cable comparison between Cable A, B and C.

超電導フライホイール蓄電装置実証機の状況 ー米倉山 2017ー

Status of HTS flywheel energy storage system demonstration machine in 2017 Komekurayama

清水 秀樹, 澤村 秀次, 小澤 孝仁(ミラプロ); 宮崎 和也(山梨県); 向山 晋一(古河電工);
長嶋 賢, 山下 知久, 小方 正文(鉄道総研)

SHIMIZU Hideki, SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPRO); MIYAZAKI Kazuya (Yamanashi Pref.);
MUKOYAMA Shin-ichi (Furukawa Electric); NAGASHIMA Ken, YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi (RTRI)
E-mail: shimizu.hideki@mirapro.co.jp

1. はじめに

NEDO 助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」により、超電導磁気軸受を用いたフライホイール蓄電装置(FESS)の実証機を開発、山梨県米倉山の太陽光発電所の実証実験施設に設置、2015年秋から太陽光発電電力の出力変動の平滑化効果検証試験や異常時想定試験等、系統安定化用蓄電装置として確認すべき各種機能検証試験を実施してきた[1]。NEDO 助成期間終了後も開発した米倉山実証機を有効活用する形で、商用機上市に必要な新規技術の開発検証試験を計画的に進めている。その概要を報告する。

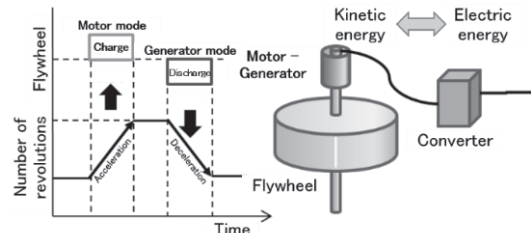


Fig. 1 Principle of operation for FESS.

2. 超電導フライホイール蓄電

Fig.1 に FESS の原理を示す。質量 M 、半径 r の円盤形状のフライホイールが、回転角速度 ω で回転する場合のフライホイールの貯蔵エネルギー量 E は、下記のとおり表される。

$$E = (1/4) M (r \omega)^2$$

すなわち貯蔵エネルギー量 E はフライホイールの質量、大きさ、回転数で設計できることがわかる。貯蔵したエネルギーの出し入れはフライホイールの回転数を上昇(加速)させたり下降(減速)させたりする単純な制御で、発電電動機を介して電気エネルギーを充電したり放電したりできる仕組みである。

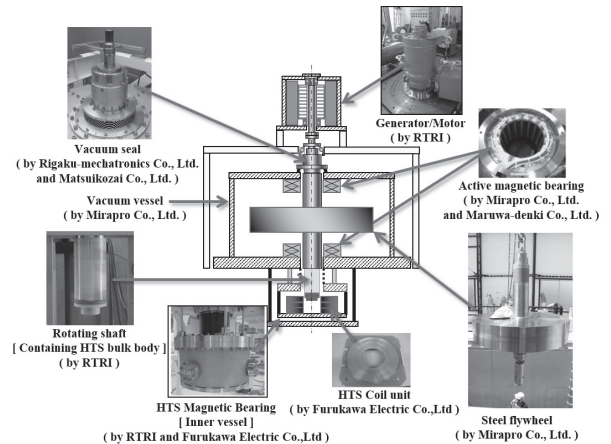


Fig. 2 Configuration of FESS demonstration machine.

3. 米倉山実証機の有効活用と新規技術の有効性検証

Fig.2 に FESS 実証機構成を、Table 1 に仕様を各々示す。

<米倉山実証機改良に関する主な技術変更内容>

- 1)フライホイールの許容不釣り合い量基準見直し
- 2)デジタル制御方式の制御型磁気軸受(AMB)の技術検証
- 3)低損失真空シールと大径回転軸(複合軸)の技術検証

4. 最高回転数での安定浮上実証および今後の展開

Fig.3 に改良後の FESS 実証機の高速回転試験時の超電導磁気軸受(SMB)の各部温度の時間変化を示す。

グラフより質量 4,000kg のフライホイール[スラスト荷重:39.2 kN]が最高回転数 3,000min⁻¹で約 30 分間回転させてもスラスト荷重を負担する SMB のコイル温度の温度上昇は 0.3K と小さく実用上問題になる発熱もほとんどない。最高回転数 3,000min⁻¹ で SMB が非接触安定浮上を維持できたことは、SMB の部分冷却法の妥当性を示す知見を得たと考える。

今回、許容不釣り合い量基準見直しにあたり、試作した鋼製のフライホイールの残留アンバランス量は基準値を大幅に下回る 40g まで最小化することができた。その結果、回転数向上試験途中でのバランス調整作業を一回もせずに最高回転数の安定浮上回転確認まで到達でき、鋼製フライホイールの商用機開発の設計指針を明確にすることができたと考えている。

また、FESS 実証機の最高回転数での必要トルクも 12N・m と小さく、新しく採用した磁性流体真空シール構造の回転損失が設計どおり低い特性であることも確認できた。

今後は、147 kN 超の大荷重浮上を実証した SMB の開発成果と今回の安定浮上回転確認の結果を元に、超電導フライホイール蓄電システムの商用機の開発を推進していく。

Table 1 Specifications of FESS.

Output power	300 kW
Storage capacity	10 kWh
Maximum operating speed	3,000 min ⁻¹
Flywheel material	Steel (CrMoVNi alloy)
Flywheel mass / dimensions	4,000 kg / 1.44 m in diameter and 0.29 m in height
Thrust bearing	Magnetic bearing composed of RE HTS coils and bulks
Radial bearing	Active magnetic bearing for assistance

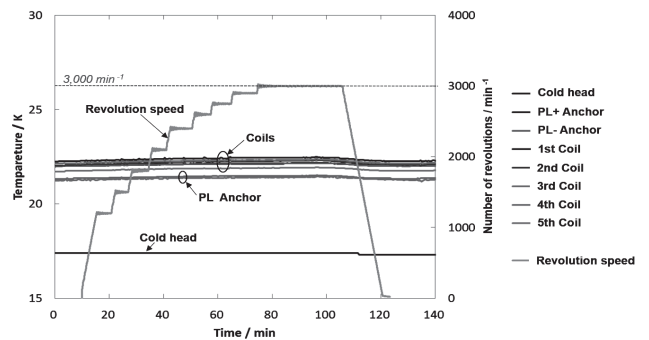


Fig. 3 Stability of SMB for the highspeed revolution test.

参考文献

- 1. T. Yamashita, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.128

大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発(1) —融着材法を適用した新型コイルの設計—

HTS magnetic bearing for heavy load (1) -New coil design using bonding process-

中尾 健吾, 坂本 久樹(古河電工); 水野 克俊, 宮崎 佳樹, 山下 知久(鉄道総研)

NAKAO Kengo, SAKAMOTO Hisaki (Furukawa Electric);

MIZUNO Katsutoshi, MIYAZAKI Yoshiki, YAMASHITA Tomohisa (RTRI)

E-mail: kengo.nakao@furukawaelectric.com

1. はじめに

RE系超電導コイルとRE系超電導バルクを組み合わせたフライホイール蓄電装置(FESS)向け高温超電導磁気軸受(SMB)の開発を進めている。2015年から山梨県米倉山の太陽光発電所にてSMBを用いたFESS実証機による実証試験を行ってきた[1]。実証試験に用いたFESSはSMBによって質量4,000 kgのフライホイールをギャップ20 mm浮上, 縦回転でき, 非接触浮上により軸受部での摩擦や機械的な損失が無いため高効率でメンテナンス性も優れている。SMBの浮上原理は, 超電導コイルで発生する磁界と零磁場冷却した超電導バルクのシールド効果により得られる大きな反発力を利用するものである[2]。

FESSの蓄電容量の向上にむけ大荷重対応のSMBの開発を進めており, 融着材法を用いた新しいSMB構造の小型コイルの試作・開発を進めてきた[3]。今回, 実サイズにスケールアップした新しいコイル構造を設計・試作したので報告する。

2. 融着材法によるSMB用超電導コイル構成

SMB用の超電導コイルはダブルパンケーキコイル(DPコイル)を5段重ねた構成となっており, 各コイルは熱伝導板による伝導冷却で冷却している。超電導バルクに近いコイルの熱伝導板は回転に伴う渦電流の発熱に対応する為, 銅すだれを融着材で硬化させた「低発熱銅すだれ材」を用いている。従来はDPコイルの抑え板をGFRPとして熱伝導板を挟み込む構造であったが, 新型コイルではDPコイルの両面の抑え板に銅板又は銅すだれ材を熱伝導(冷却)板としている。これにより抑え板の分コイルの薄型化が可能となる。中板・線材・熱伝導板はいずれも熱可塑性樹脂を主成分とする融着材を加熱・硬化しコイル線材と一体化させる。

超電導コイルは2種類設計し, 超電導バルクに近く渦電流の抑制を必要とする箇所には銅すだれを両面に用いたA仕様(Fig.1)を用い, 他には片面のみに銅すだれ材を用いたB仕様(Fig.2)を用いた。熱伝導板とする銅すだれ材は縦と横に並べた物を重ねて等方的な熱伝導を狙っている。他は1層のみで使用している。超電導コイルは6mm幅の線材を使用したDPコイルで内径120mm, 外径260mmとしている。

3. SMB用超電導コイルの試作とSMBへの組み込み

A仕様のコイルを1枚とB仕様のコイルを2枚試作した。各コイルの製造過程で融着材を加熱硬化する前後に臨界電流の測定を行い(Fig.3)劣化などの異常が無いことを確認した。今回作製した3枚の新型コイルと従来のコイル2枚の5枚のコイルからなるSMBを組立て, 通電・荷重負荷試験を行った。

なお, 大荷重負荷をかけた試験後, SMBは分解し, コイル毎の外観及び臨界電流特性の調査結果は当日報告する。

参考文献

1. T. Yamashita, *et al.* Abstracts of CSSJ conference, vol. 93 (2016) p.127
2. K. Nagashima, *et al.* QR of RTRI, vol. 49 No. 2 (2008) 127-132
3. K. Mizuno, *et al.* Abstracts of CSSJ conference, vol. 94 (2017) p128

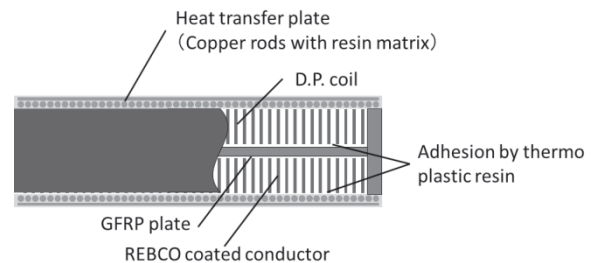


Fig. 1 A model coil structure (reduce eddy current)

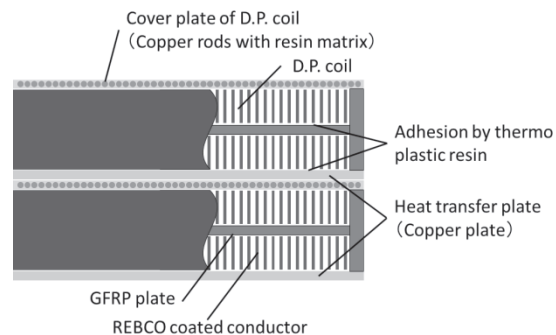


Fig. 2 B model coil structure (normal model)

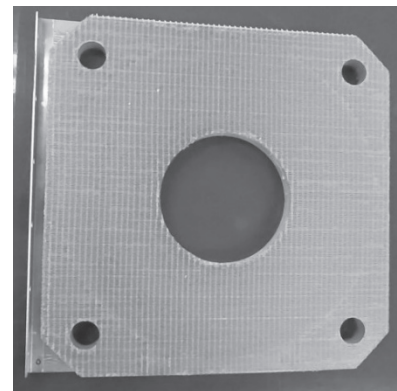


Photo 1 New structure D.P. coil (B model)

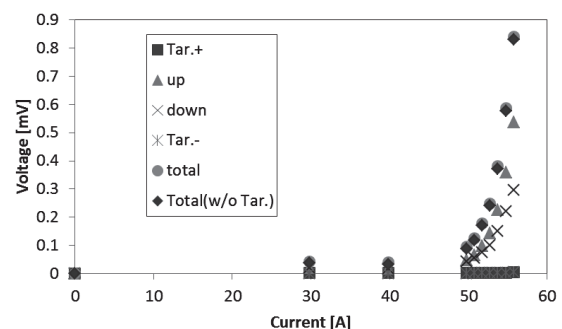


Fig. 3 I-V curve of D.P. coil

大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発(2)

—大荷重試験結果—

HTS magnetic bearing for heavy load (2) –Results of heavy load tests–

水野 克俊, 宮崎 佳樹, 山下 知久(鉄道総研); 中尾 健吾, 坂本 久樹(古河電工);
清水 秀樹, 澤村 秀次, 小澤 孝仁(ミラプロ); 松井 義, 土肥 哲也, 上島 史生(松井鋼材)

MIZUNO Katsutoshi, MIYAZAKI Yoshikij, YAMASHITA Tomohisa (RTRI);

NAKAO Kengo, SAKAMOTO Hisaki (Furukawa Electric); SHIMIZU Hideki, SAWAMURA Hidetsugu,
OZAWA Takahito (MIRAPRO); MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya, UEJIMA Fumio (Matsuikozai Corp)

E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

1. はじめに

我々はREコイルとREバルク体を組み合わせた非接触超電導磁気軸受(SMB)を開発しており、フライホイール蓄電装置の蓄積エネルギーの向上のために大荷重対応を進めている。山梨県米倉山太陽光発電所の実証実験施設のフライホイール蓄電実証機のSMBの負担荷重は39.2 kN [1, 2]であるが、今回開発したSMBは負担荷重147 kNで設計されている。基本構成は米倉山実証機のSMBと同じであるものの、負荷率の増加に合わせて一部REコイルを最新(2016~2017年度製 I_c :200 A以上@77 K)のSuperPower社製線材で新規製作し、浮上力評価試験を実施した。なお、SMB用REコイルの製作には、浮上式鉄道用の実機大高温超電導コイルの開発成果を導入している[3]。

2. SMB構成および負荷率予測

Fig. 1にSMBのREコイルとREバルク体の非接触浮上時の位置関係を示す。5個のダブルパンケーキ(D.P.)コイルのうち、負荷率の高くなる上3コイルを熱融着材法で再製作した。従来は伝熱のための銅板、あるいは銅すだれ板は独立した部品であったが、再製作にあたってD.P.コイルと伝熱部材は一体化され、薄型化されている[4]。そのため、米倉山実証機のSMBと比較してREコイルの線積率が向上している。

磁場解析から浮上力147 kNに必要な励磁電流は160 Aであり、このときの負荷率を予測した。Fig. 2にコイル温度30 Kにおける負荷率分布予測を示す。なお、上2コイルは短尺の線材を接続して製作しており、負荷率の高くなる個所に臨界電流の高い線材が来るように配置している。そのため、負荷率は最大でも0.6(上から2段目と3段目のD.P.コイル最内周)に抑えられており、30 Kで十分な裕度を持って励磁できることが確認できた。

3. 新型SMBによる浮上力検証試験

試作したSMBを試験用クライオスタットに収めて励磁試験を実施した。REバルクに発生する浮上力は、クライオスタットフランジ上部(大気側)に設置されたロードセルによって測定された。Fig. 3に励磁電流に対する浮上力を示す。通電電流が20 Aを超えた辺りで浮上力が大気圧荷重(0.93 kN)と均衡し、20 A以上の領域ではほぼ通電電流の2乗で浮上力が増加している。160 Aにて目標の浮上力147 kNが実証された。試験結果の詳細については当日報告する。

参考文献

- [1] T. Yamashita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p. 127.
- [2] K. Nakao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p. 128.
- [3] K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p. 9.
- [4] K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p. 128.

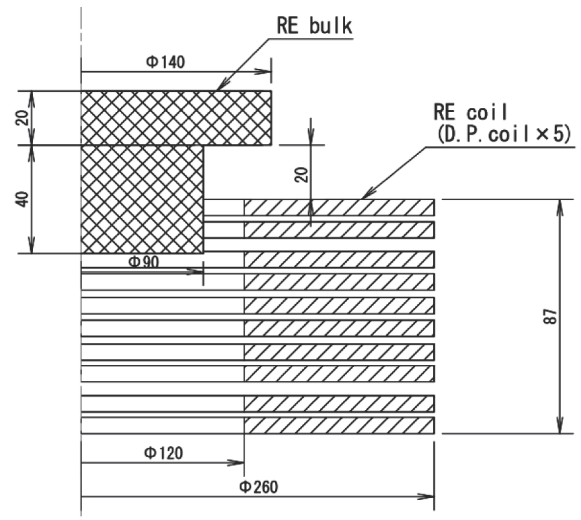


Fig. 1 Dimensions of the RE coil and the RE bulk.

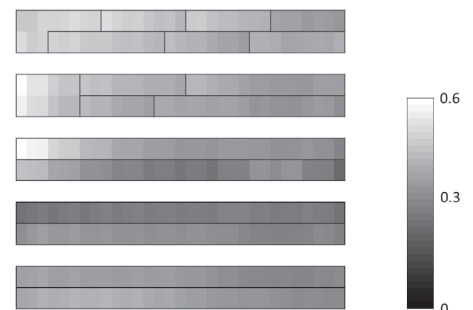


Fig. 2 Load factor distribution on the cross section of the RE coil.

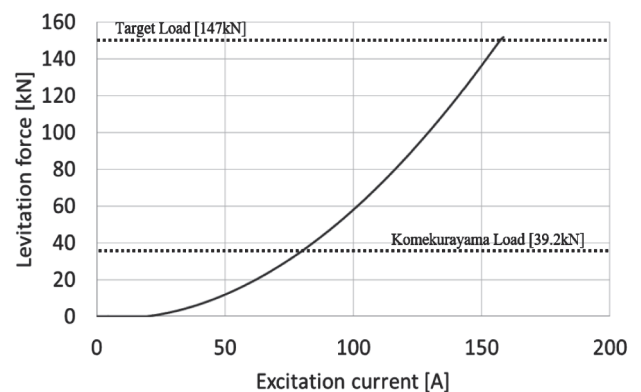


Fig. 3 Levitation force of the SMB.

大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発(3) —断熱荷重支持材の大荷重試験結果と信頼性検証—

HTS magnetic bearing for heavy load (3)

—Test results of heavy load and reliability for thermal insulating support—

宮崎佳樹, 山下知久, 水野克俊(鉄道総研); 松井義, 土肥哲也, 上島史生(松井鋼材);
浅野幸雄, 風間竜也(三星工業); 中尾健吾, 坂本久樹(古河電工)
MIYAZAKI Yoshiki, YAMASHITA Tomohisa, MIZUNO Katsutoshi (RTRI);
MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya, UEJIMA Fumio (Matsukoza Co., Ltd.);
ASANO Yukio, KAZAMA Tatsuya (MITSUBOSHI);
NAKAO Kengo, SAKAMOTO Hisaki (Furukawa Electric Co., Ltd.)
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

我々はRE コイルとRE バルク体を組み合わせたフライホイール蓄電装置(FESS)向け高温超電導磁気軸受(SMB)の開発を進めている。山梨県米倉山太陽光発電所実証実験施設のFESSではSMBにより質量4,000 kgのロータの安定浮上を実証した[1, 2]。FESSのさらなる蓄電容量向上にむけ147 kNの浮上力を発生可能なSMBを開発した。大荷重に対応するにはSMB内槽と外槽を接続する断熱荷重支持材についても高強度化を図る必要がある。本発表では試作した断熱荷重支持材の荷重特性と、信頼性評価の考え方について報告する。

2. 断熱荷重支持材

Fig. 1にSMBの構成を示す。フライホイールロータは高温超電導コイルと高温超電導バルクの反発力により非接触で浮上するが、その反力は4組の断熱荷重支持材を介して外槽容器で支持する構造となっている。断熱荷重支持材は断熱性と耐荷重特性を両立する必要があるため、熱絶縁特性と引張強度に優れるアルミナ繊維複合材(AFRP)を採用した。147 kN浮上時に断熱荷重支持材が受け持つ反力は、1本あたり36.8 kNとなる。

断熱荷重支持材の安全率は2以上確保を目安に98 kN/本まで弾性変形領域として使用可能であることを実験的に確認し、安全率2.7を有することを確認済みである[3]。

3. 荷重特性

Fig. 2に試作した断熱荷重支持材の引張試験の様子を示す。歪ゲージはAFRP中央部に設置した。Fig. 3に引張試験結果の一例と、FEM解析による応力分布図を示す。最大引張力49 kNとした場合、AFRPの弾性率は応力歪線図より407 MPa程度であり、引張試験の最大応力は110 MPaであった。FEM解析からも、測定点における応力値は110 MPa程度であり、両者はよく一致した。また、FEM解析から、最大応力発生箇所はAFRPのテーパ部で120 MPa程度であることもわかった。

4. 信頼性評価

今後はAFRPの強度(破断荷重)の評価ならびに期待寿命30年相当の繰り返し引張荷重試験を実施し、SMBの重要な構成部材である断熱荷重支持材の信頼性を検証していく予定である。

参考文献

- [1] T. Yamashita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p. 127.
- [2] K. Nakao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p. 128.
- [3] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p. 127.

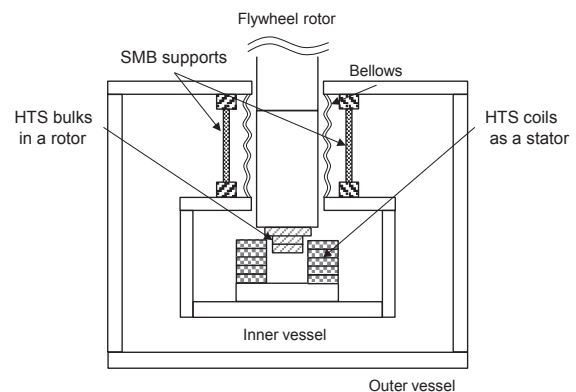


Fig. 1 Schematic of experimental set up for the SMB.

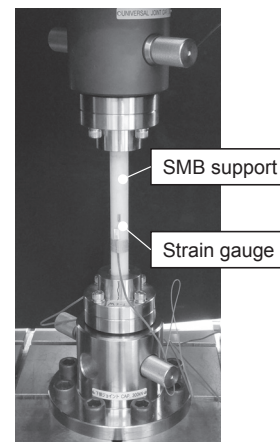


Fig. 2 Tensile test for the SMB support.

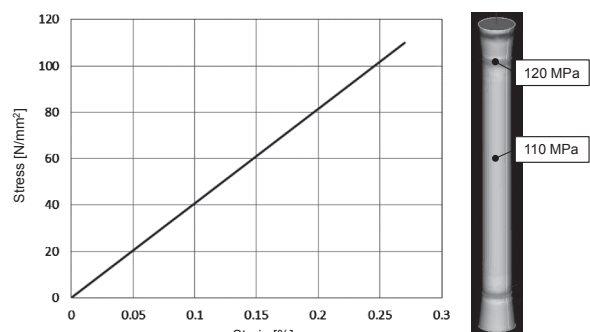


Fig. 3 Experimental stress-strain diagram and calculated stress distribution of the SMB support.

インフレーション探索を目的とした宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のための超電導軸受を用いた偏光変調器実証器の開発現状

Demonstration model of a polarization modulator using a superconducting magnetic bearing for a CMB polarization satellite, LiteBIRD

松村知岳, 桜井雄基, 片山伸彦, 菅井肇 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構); 金井啓晃, 中村正吾 (横浜国立大学); 下村俊貴, 廣田幸真, 寺尾悠, 大崎博之 (東京大学); 今田大皓, 宇都宮真, 片坐宏一, 山本亮 (JAXA/ISAS); 鈴木純一, 牧宗慶 (高エネルギー加速器研究機構)

MATSUMURA Tomotake, SAKURAI Yuki, KATAYAMA Nobuhiko, SUGAI Hajime (Kavli IPMU); KANAI Hiroaki, NAKAYAMA Shogo (Yokohama National Univ.); SHIMOMURA Toshiki, HIROTA Yukimasa, TERAOKA Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); IMADA Hiroaki, KATAZA Hirokazu, UTSUNOMIYA Shin, YAMAMOTO Ryo (JAXA/ISAS); SUZUKI Junichi, MAKI Muneyoshi (KEK)

E-mail: tomotake.matsumura@ipmu.jp

1. はじめに

本講演では、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background=CMB) 偏光観測により初期宇宙の物理を探索するための観測機器開発にて用いる超電導磁気軸受の開発状況について紹介する。

2. 科学目的

宇宙論という分野は、ビッグバンにて始まったとする標準宇宙論が近年の理論及び観測により確立されている。しかし、我々が住む宇宙の構造の起源、宇宙の平坦性、また宇宙の地平線問題など、標準宇宙論では未解決の観測事実が存在する。これらを一挙に説明するため、宇宙初期に起きたとされるインフレーション仮説が提唱されている。この仮説は宇宙が始まった後 10^{-38} 秒の事象を記述するモデルである。実験的に検証が不可能に思える物理事象であるが、CMB の偏光観測により仮説の実験的検証が可能である。さらにCMB 偏光観測は、インフレーション仮説の検証だけでなく、宇宙の大規模構造、ニュートリノの質量などにも CMB 偏光シグナルは感度を持つ。このための世界的に地上、気球、衛星による観測、またその準備が進んでいる。

3. 観測機器としての偏光変調機と要求機能

CMB 偏光を観測するために、偏光に感度のある望遠鏡及び検出器が必要となる。CMB は 3 K の黒体放射であることが知られており、特にインフレーション由来の信号は 3 K の黒体放射に対して nK 程度の揺らぎだと期待される。こうした信号を受信するための望遠鏡は、望遠鏡自身の熱放射を低減するため冷却する必要がある。また、検出器はサブケルビンに冷却された超電導検出器を用いることで高感度を実現する。

CMB 望遠鏡の中で鍵となる観測機器の一つに偏光変調器がある。これは、微弱な入射偏光信号に変調をかけることで、検出器の時間的不安定性や系統誤差の低減を実現する。変調を実現する具体的な方法は、光学素子である半波長板を望遠鏡の光路内にて連続的に 1 Hz 程度で回転させることで実現できる。

望遠鏡の光路に置くことから半波長板の直径は 0.5 m 程度、そして望遠鏡の環境温度は 10 K 以下である。結果として、0.5 m 程度の半波長板を 10 K 以下で連続回転させることが求められ、従来の機械式軸受では発熱源となり実現性が低い。

この困難を克服するため、低温での軸受に超電導磁気軸受を採用した。この軸受は非接触式であることから摩擦が低く、低温でも連続的な回転が実現できる。こうしたシステムは米国 CMB 偏光観測気球実験 EBEX にて採用され、科学観測にて搭載された。[1]

4. 超電導磁気軸受の回転子温度

超電導磁気軸受は浮上式磁気軸受であるため、回転中は放射以外の熱交換がない。結果として回転子の温度の計測、また温度制御が難しい。

CMB 偏光観測では回転子にサファイア波長板を搭載して回転させる。望遠鏡はこのサファイアを通して天空を観測するため、サファイアの温度が 10K 以上になると、サファイア自身の熱放射の影響が大きくなり、検出器ノイズの増大に直結する。回転子への熱流入は、回転中の回転磁石及び駆動系モーターに起因する磁場変動が生み出すヒステリシス損失と渦電流によるエネルギー損失が考えられる。

本発表では、回転子に対するエネルギー損失の推定をシミュレーションを元に導出する。エネルギー損失による排熱が回転子と固定子に対してどの割合で失うかの推定は難しく、いくつかの可能性に分けて議論を行う。現在回転子に 1mW 入力された場合を想定する。そして、そのエネルギー損失が与える熱的影響を推定するため、熱モデルを構築する。熱モデルには回転子と固定子を繋ぐ低温保持機構による熱接触が含まれ、この接触熱抵抗は 4K での測定に基づきモデルを構築した。このモデルに基づき 1mW の熱入力があった場合、回転子に搭載されたサファイアの温度は 4K から 10K に温度上昇するのに 24 時間程度の時間がかかり、結果として観測期間及び観測効率として十分であることを示す。

6. まとめ

本公演では、計画概要、要求及び試作機試験の現状を紹介する。特に、超電導磁気軸受の運用温度 10 K 以下でのエネルギー損失を推定し、回転子が温度上昇をした場合でも 10K 以下で観測を行うための運用案について議論を行い、衛星環境での実用に向けた今後の開発項目を紹介する。

参考文献

1. J. Klein, et al.: A Cryogenic Half-Wave Plate Polarimeter Using a Superconducting Magnetic Bearing, Cryogenic Optical Systems and Instruments XIII, edited by James B. Heaney, E. Todd Kvamme, Proc. of SPIE Vol. 8150, 815004 · 2011 SPIE.
2. T. Matsumura, et al.: Design and Performance of a Prototype Polarization Modulator Rotational System for Use in Space Using a Superconducting Magnetic Bearing, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 26, NO. 3, April 2016.