

# 浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -高真空保持のための吸着剤評価試験-

## Development of REBCO HTS Magnet for the Maglev -Evaluation Tests of Absorbents for Vacuum Retention-

水野 克俊, 小方 正文 (鉄道総研)  
MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi (RTRI)  
E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研では、RE 類系高温超電導磁石の開発と並行して、高温超電導磁石固有の課題の基礎研究も行っている。課題の一つとして挙げられるのがアウトガスの蓄積に伴う熱侵入の増加である。高温超電導化に伴い運用温度が向上する一方で、クライオポンプ効果が低減してしまうため、低温超電導磁石よりも高真空保持が難しくなる。これまでの研究で、アウトガスの種類と発生源についてはすでに知見が得られており、

1. 材料によらず主たるアウトガスは  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $H_2$  である
2. 樹脂材料のアウトガス発生量は金属材料の 100 倍以上となることもある
3. 樹脂材料であっても、低温であればアウトガスは実質的に発生しない

ということが明らかとなっている[1]。ただし、超電導機器においては荷重支持部など、樹脂材料の使用が必須となる場合もあるため、アウトガスの低減だけでなく、吸着剤を用いた高真空保持も併用する必要がある。高温超電導磁石の真空保持に効果的な吸着剤を選定するため、吸着剤評価試験装置を構築し、評価試験を実施したので報告する。

### 2. 吸着剤評価方法

吸着剤の具体的な使用方法としては、冷凍機や高温超電導コイルなど冷却される個所に設置しておき、磁石運用中はアウトガスを吸着させる。そして、冷凍機メンテナンス等で昇温する際に真空排気を行い、吸着剤の再生を行うことを想定している。

このような吸着剤の使用法においては、年単位で高真空を保持できるだけの吸着力があるか、ベーキングを行わない室温での再生で十分な吸着性能が確保できるか、が課題となる。そのため、昇温と真空排気を挟んで複数回同一条件での吸着材の性能評価試験を行うこととした。なお、吸着剤の性能は、吸着剤温度、吸着ガスの種類によって大きく異なる。高温超電導磁石を対象としているため、評価温度は 40 K と 50 K とし、アウトガスの主成分且つ吸着が困難である水素を対象ガスとした。評価対象の吸着剤には活性炭(ヤシ殻)、モレキュラーシーブ(ゼオライト)3A を用いた。図 1 に評価サンプル(活性炭)の外観写真を示す。均一に冷却されるように、アルミフィンに樹脂で接着されている。

図 2 に試験に用いた吸着剤評価試験装置の基本構造を示す。測定対象である吸着剤は GM 冷凍機によって冷却され、任意の温度に設定可能となっている。真空容器にはガス導入ラインが取り付けられており、ニードル弁の開閉によってガスを導入する。ガスの導入量はバッファタンクの圧力低下分から求められ、ガス導入後の圧力が安定したところ(平衡圧力)で再度ガスを導入する。この作業を繰り返していくことにより、高真空から低真空に至るまで吸着剤の性能が評価される。

### 3. 吸着剤評価結果

評価結果の一例として、40 K における活性炭の水素吸着能力を図 3 に示す。 $10^{-4}$  Pa 以下の高真空においては、1 回目から 2 回目まで性能が向上していることが分かる。それ以上

の圧力領域では、極めて高い再現性が確認され、3 回目は 2 回目と比較しても有意な差は確認できなかった。すなわち、ベーキングを行わなくとも、昇温と真空排気だけで吸着剤の再生ができることが確認された。詳細については当日報告する。



Fig.1 Test specimen of the activated carbon

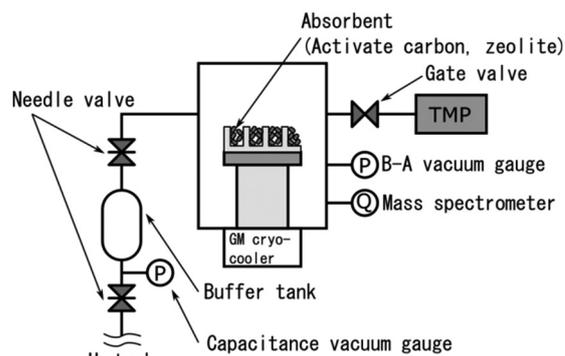


Fig.2 Configuration of the absorbents evaluation apparatus

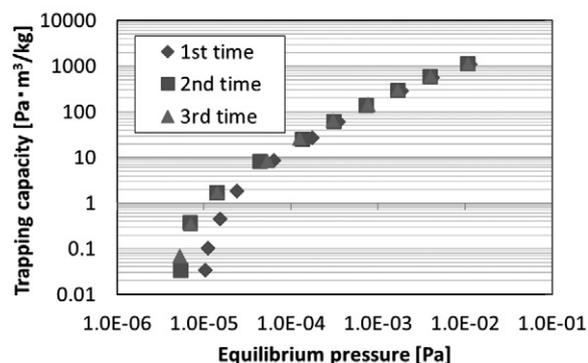


Fig.3 Hydrogen trapping capacity of the activate carbon at 40 K

### 参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.172

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

# LNG と電力を送るハイブリッド管の設計

## Design of LNG-electric hybrid energy transmission line

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

### 1. Introduction

An idea of using hybrid transmission of chemical and electrical energy by a single channel has been discussed for a long time. An advantageous combination can be a cryogenic pipeline with superconducting  $MgB_2$  cable cooled by transported liquid hydrogen. In the present report, we will alternatively justify the possibility of using liquefied natural gas (LNG) to provide effective thermal insulation of the conventional HTS DC power cable.

### 2. Design of hybrid line

The steady increase in electricity consumption since Edison requires permanent improvement of the transmission and distribution systems. It is expected that in the first half of the 21st century there will be a qualitative leap when introducing technical solutions based on HTS into the power grid complex. The advantages of HTS technologies will be fully manifested when creating power transmission lines of hundreds kilometers long. Currently, there are several dozens of experimental HTS lines in the world, some of which are incorporated in the commercial grids. However, the maximum length is only 1 km, and the laying of a 2.5 km line in Russia will be completed in about 2 years. This is very short in comparison with the target length. The main problem is the need to keep the HTS cable at low temperature by maintaining the circulation of refrigerant (liquid nitrogen,  $LN_2$ ) along the entire length of the cable route.  $LN_2$  is heated by heat penetrating through the thermal insulation. Therefore, it is necessary to build cooling stations along the route of the cable. The interval between the stations depends on the quality of the thermal insulation, taking into account the additional restriction imposed by the hydraulic resistance of the cryogenic channels. If the heat inleak to the cable is significant, the construction and operation costs will be too high.

To solve this problem, research group from Chubu University proposed the application of heat shield to protect the cable pipe from heat radiation. The cooling of the shield is provided by a return flow of  $LN_2$ . Therefore, incoming heat is redistributed in such a way that the main portion heats up the return  $LN_2$  flow, which has no contact with the HTS cable. The temperature of the return flow can reach relatively high value, but this does not affect the current-carrying capacity of the cable. This design was tested with HTS DC cable in Ishikari, Hokkaido. As a result, a record-low heat inleak of about 0.034 W/m into cable pipe was achieved. This will allow to build cooling stations separated by the interval of several tens of kilometers. It should be noted for the sake of comparison that the conventional value of heat inleak is 1-2 W/m. Therefore, heat shield-based design is considered as an optimal solution for long lines of the next generation.

Let us now turn to the long-distance transportation of chemical energy in the form of natural gas. As is known, the main methods of transportation are high-pressure gas

pipelines and liquefied natural gas (LNG) carriers. Since the boiling temperature of LNG at atmospheric pressure is about 112 K, transportation can also be carried out by means of cryogenic pipelines. Unfortunately, due to the high cost of cryogenic equipment such pipelines did not spread. However, if we have already incurred the unavoidable costs of constructing a cryogenic pipeline for HTS cable, it is interesting to consider the replacement of  $LN_2$  with LNG. In fact, the LNG temperature is too high to directly support the cable in the superconducting state. However, we can use LNG instead of the return flow of  $LN_2$  to cool the heat shield. In this case, the heat transfer to the cable pipe, which is still cooled by  $LN_2$ , will decrease by approximately 10 times as compared to a pipe without heat shield. A sketch of the design is shown in Fig. 1. Refrigerants flows in both pipes will move in one direction. The issue of utilization of  $LN_2$  on the consumer side should be considered separately. Alternatively, in order to close the  $LN_2$  loop, a third pipe can be added to the structure.

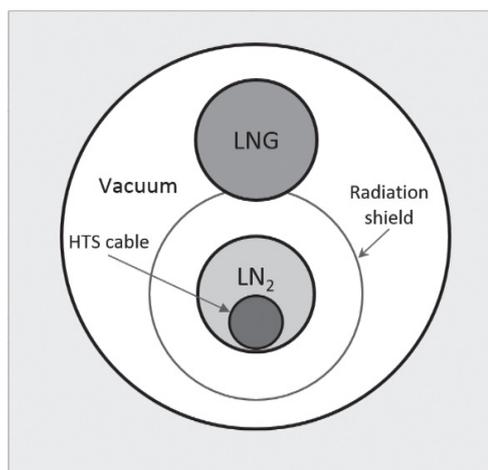


Fig. 1. Design of the hybrid power transmission line.

Convenience of the design is that the LNG performance can be controlled in a wide range by selecting the pipe diameter at the design stage and by changing the flow rate during operation.

### References

1. V. V. Kostyuk et al.: *Cryogenics* **66** (2015) 34-42
2. S. Yamaguchi et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** (2015) #5402504
3. S. Yamaguchi et al.: *Phys. Procedia.* **81** (2016) 182-186
4. H. Watanabe et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** (2017) #5400205
5. Y. V. Ivanov et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** (2018) #9500604

## Thermal behavior of liquid nitrogen heat pipe under wide range heat load condition

WANISON Ramnarong (SOKENDAI); KIMURA Nobuhiro (SOKENDAI, KEK);  
MURAKAMI Masahide (University of Tsukuba)  
Email: wanison@post.kek.jp

### 1. Abstract

A study of cryogenic heat pipe is ongoing as a fundamental research in cryogenic engineering. It is the primary research purpose to survey the thermal behavior of heat pipes under a wide range heat load condition; from the normal heat pipe action to the local dry-out states. The heat pipes tested are commercially available ones but working fluid was replaced by liquid nitrogen. The shape of the tubular copper heat pipes is; 6 mm in the outer diameter and 200 mm long, with axial grooves and sintered metal wick. The performance of heat pipes with different liquid filling ratios was tested. The effective thermal resistance and the axial temperature distribution were measured for a wide range of heat load. The thermal behavior in the local dry-out state for large heat input was also examined for the potential applications to a heat pipe heat switch.

### 2. Experimental Set up

Table.1 Specifications of heat pipe

| Parameter                 | Value            |
|---------------------------|------------------|
| Container wall material   | Copper           |
| Wick                      | Sintered-Grooved |
| Working Fluid             | Nitrogen         |
| Outer diameter (OD)       | 6.0 mm           |
| Heat pipe length          | 200 mm           |
| Evap, Adia, Cond length   | 15, 120, 65 mm   |
| Wick structure thickness  | 0.7 mm           |
| Porosity of wick material | 0.57             |

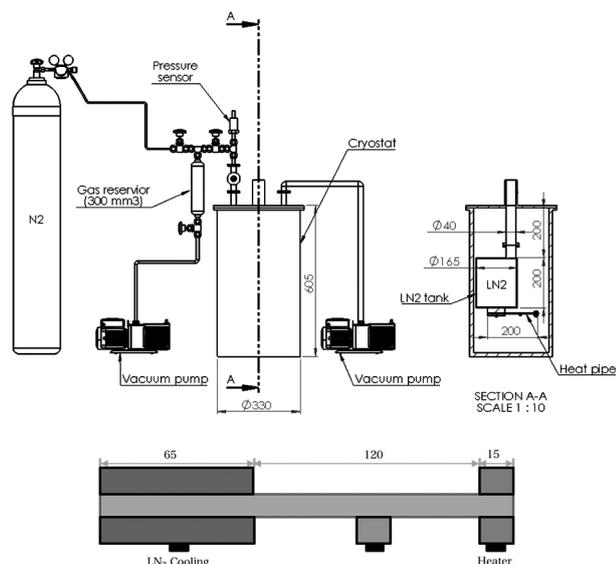


Fig. 1 Heat pipe experimental set up

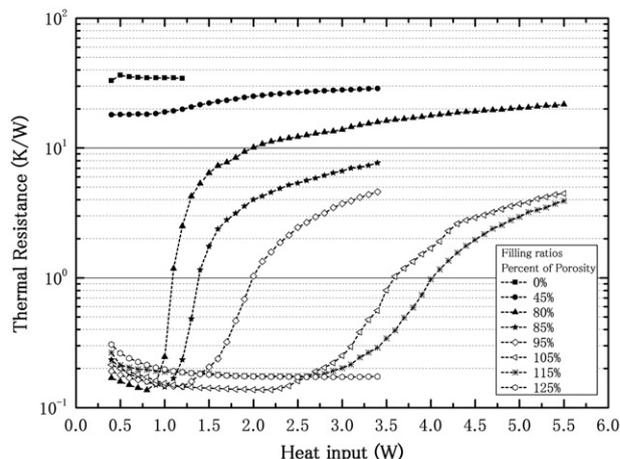


Fig. 2 Thermal resistance of the heat pipe for several filling ratios

### 3. Experimental Result

The fig.2 shows the experimental result of the thermal resistance for several filling ratios. Experiment was started at net 0.4 watt approximately due to the parasitic heat leak from room temperature environment to the experimental setup, mostly by radiation. Several filling ratios of working fluid were tested and the result were compared with that of simple copper tube (0% liquid fill). Obviously, too less filling ratio, 45%, was not sufficient for the normal heat pipe operation, and the thermal resistance was slightly lower than that of copper tube because of conductance of liquid. There is a minimum value, corresponding to the onset of the normal heat pipe operation. The low thermal resistance results from the normal heat pipe operation, and above that the thermal resistance gradually increases as a result of the transition to film boiling in the evaporator, and finally, rapidly increases because of the emergence of local dry-out.

### 4. Conclusion

The thermal resistance of the heat pipe was 100 times lower than that of simple copper tube. The two states of heat pipe operation can be used for a cryogenic heat switch that works on the basis of dry-out behavior of heat pipe. In the on-state of the heat switch, it works as a heat pipe having excellent heat transfer capability, while in the off-state, it is in the local dry-out state having very large thermal resistance.

### Reference

1. P. Sakulchangsattajai, et al.: Defect and Diffusion Forum, Vol. 312-315 (2011) p.1015-1020

## 磁性蓄冷材(Gd,Er)NiX (X = Ge, Si)の比熱特性

## Specific heat measurements of magnetic regenerator materials (Gd,Er)NiX (X = Ge, Si)

森岡 直矢, 松本 圭介, 平岡 耕一 (愛媛大)

MORIOKA Naoya, MATSUMOTO Keisuke, HIRAOKA Koichi (Ehime Univ.)

E-mail : e843031u@mails.cc.ehime-u.ac.jp

## 1. 緒言

GM 冷凍機は主にヘリウムの液化に用いられ、蓄冷器に磁性蓄冷材を組み込むことで 2 K 付近までの冷凍を可能にしている。磁性蓄冷材には、10 K 以下で磁気転移に伴う大きな比熱のピークを示し、磁場によって比熱の温度依存性が変化しにくい反強磁性の材料が使用される。比熱のピークの大きさは基底多重項の縮重度に依存しており、一般的には Ho, Er など、全角運動量の大きな希土類が用いられる。

結晶中では、結晶場の静電ポテンシャルによって軌道のエネルギー準位が分裂し、転移温度付近でのピークが小さくなる要因となるが、Gd イオンは、全軌道角運動量が 0 であり、結晶場効果を受けないため、磁気相転移温度付近で大きな比熱のピークを示すと期待される。

先行研究において、GdNiGe のネール温度は 11.5 K<sup>(1)</sup>であり、大きな比熱のピークを示すことが報告されている<sup>(2)</sup>。一方、GdNiSi は、ネール温度 13.3 K<sup>(1)</sup>のみで、比熱に関する報告はない。

本公演では、GdNiSi および GdNiGe の Gd サイトに Er を置換することで、磁気相転移温度を 10 K 以下に低下させた試料を作製し、比熱を測定した結果を報告する。

## 2. 実験

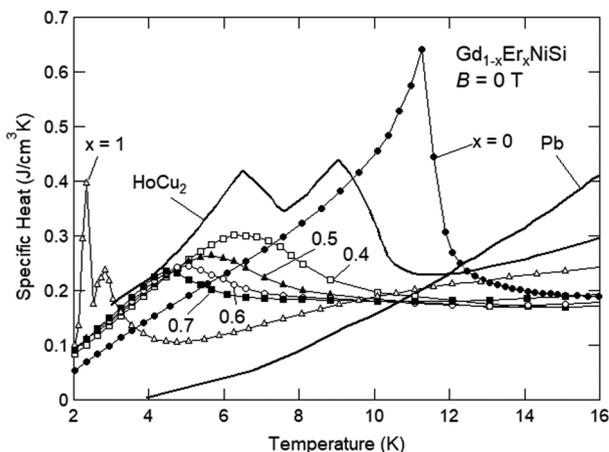
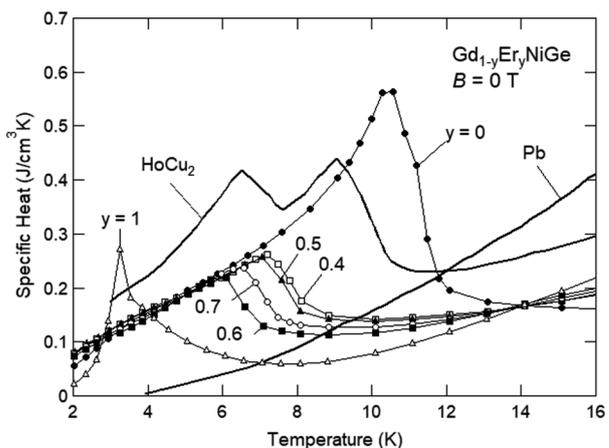
Gd (99.9%), Er (99.9%), Ge (99.999%), Si (99.99%) を原料とし、アーク溶解後、アニール処理 (800~1100 °C, 72 時間) をすることで、Gd<sub>1-x</sub>Er<sub>x</sub>NiSi および Gd<sub>1-y</sub>Er<sub>y</sub>NiGe を作製した。粉末 X 線回折によって構造解析をした後、熱緩和法により、比熱を測定した。

## 3. 結果

粉末 X 線回折測定の結果より、すべての主相が斜方晶 TiNiSi 型構造であることを確認した。

比熱測定の結果より、GdNiSi および GdNiGe 磁気相転移温度はそれぞれ 11.2 K と 10.5 K であった。磁場中において比熱の温度依存性がほとんど変化しないことから、反強磁性であることが示唆される。

Fig. 1, 2 に Gd<sub>1-x</sub>Er<sub>x</sub>NiSi, Gd<sub>1-y</sub>Er<sub>y</sub>NiGe 及び、実用材料である Pb, HoCu<sub>2</sub> の試料の零磁場での体積比熱を示す。x = 0, y = 0 は予想通り Gd<sup>3+</sup>イオンの 8 重縮退に起因する大きな比熱のピークを示す。Gd サイトに Er を置換すると、磁気相転移に伴うピークを示す温度は低下し、比熱のピークはなだらかになった。これは、結晶的な無秩序性と基底多重項の縮退数の減少に起因していると考えられる。0.4 ≤ x ≤ 0.7, 0.4 ≤ y ≤ 0.7 の

Fig.1 Specific heat of Gd<sub>1-x</sub>Er<sub>x</sub>NiSi and comparison with practical materials<sup>(3)</sup>Fig.2 Specific heat of Gd<sub>1-y</sub>Er<sub>y</sub>NiGe and comparison with practical materials<sup>(3)</sup>

比熱は、実用材料である Pb よりも大きく、HoCu<sub>2</sub> よりも小さかった。一方、x = 1, y = 1 では、3 K 付近で実用材料よりも大きな体積比熱を示した。

## 4. 結言

GdNiSi, GdNiGe は大きな比熱のピークを示すが、置換系の比熱のピークはなだらかになった。ErNiSi は 2.3 K と 2.8 K にピークを示し、3 K 以下の磁性蓄冷材として期待できる。

## 参考文献

- (1) P. Lemoine *et al.*, NRC Canadian Neutron Beam Centre Experimental Report, CNBC-2012-SD-7
- (2) Y. Long *et al.*, J. Appl. Phys., **78** (1995) 7410
- (3) 岡村正巳 他, 東芝レビュー, **55** 1 (2000) 64

## 蓄冷式冷凍機用鉛代替蓄冷材酸化銀の開発

Development of alternative regenerator material silver oxide to lead for regenerative refrigerators

山下 知大, 江口 朋子, 河本 崇博, 齋藤 明子(東芝); 増山 新二(大島商船高専)

YAMASHITA Tomohiro, EGUCHI Tomoko, KAWAMOTO Takahiro, SAITO Akiko (Toshiba Corporation);

MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College)

E-mail: tomohiro7.yamashita@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

Gifford-McMahon(GM)冷凍機に代表される蓄冷式冷凍機は、医療用MRIやクライオポンプなど、極低温環境が必要なシステムで幅広く用いられている。蓄冷式冷凍機の冷凍性能は、ヘリウムガスの圧縮比や流量などのサイクル動作条件や、ヘリウムガスと熱交換して冷熱を蓄える蓄冷材の比熱特性に大きく依存する。近年、医療機器へのRoHS指令適用により、10~100 Kの広い温度域で有用な蓄冷材として用いられてきたPbが使用できなくなることから、これに替わる蓄冷材としてBi系合金などが検討されている。我々は、これまでに、格子の秤動運動が低温比熱に寄与するAg<sub>2</sub>Oに着目し、蓄冷材としての可能性を検討してきた[1,2]。本研究では、Ag<sub>2</sub>Oを冷凍機に搭載した際の冷凍性能について、計算と実験にて検討したので報告する。

## 2. 実験

Ag<sub>2</sub>Oの粉末を用いてバルク体および粒子の試料を作製し、粉末X線回折法によりこれらの構造評価を行なった。また、バルク体と粒子の各々の試料について、Quantum Design社製のPhysical Properties Measurement System (PPMS)を用いて、2~300 Kの温度範囲で比熱特性を測定した。バルク体については熱伝導率の温度依存性も測定し、これらの熱物性値を基に、REGEN 3.3を用いてGM冷凍機で期待される冷凍性能の見積もりを行なった。さらに、試作した粒子をGM冷凍機に搭載して冷凍性能試験を試みた。

## 3. 結果

Fig. 1にAg<sub>2</sub>Oの粉末、バルク体および粒子のX線回折パターンを示す。バルク体および粒子ともに、粉末と同様の立方晶のピークが観測され、Ag<sub>2</sub>Oが生成していることが確認された。また、Fig. 2に2~100 KにおけるAg<sub>2</sub>Oのバルク体と粒子の比熱の温度依存性を、Pb、Biとともに示す。バルク体、粒子ともにBiより大きな比熱を示すことが分かる。但し、比熱測定には1 mm以上の大きな粒子数粒を用いたため、実際の蓄冷材に適した0.2~0.3 mm程度の球状粒子での更なる検討が必要である。Ag<sub>2</sub>Oバルク体の比熱および熱伝導率の温度依存性の物性値を基にREGEN 3.3により冷凍性能を計算した結果をFig. 3に示す。参照として示したPbを用いた場合の実験と計算の結果はよく一致しており、Ag<sub>2</sub>Oの計算結果もPbの結果に近い値が得られたことから、蓄冷材として期待がもてることが分かった。そこで、Ag<sub>2</sub>Oの粒子を実験室レベルで試作し、冷凍機に搭載して試験を行ない原始的な検討を行なった。結果は当日報告する。

## 参考文献

1. T. Eguchi, *et al.*: Abstracts of 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, (2016) p.119.
2. T. Yamashita, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, (2017) p.140.

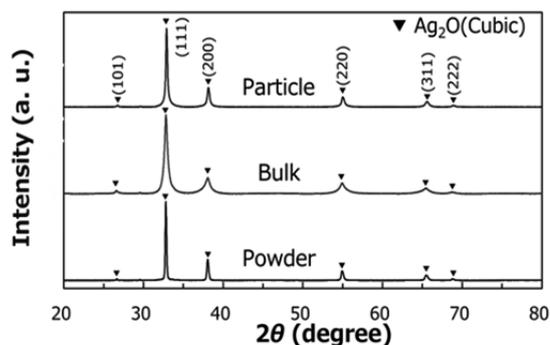


Fig. 1 X-ray diffraction patterns of Ag<sub>2</sub>O particles, bulk, and powder.

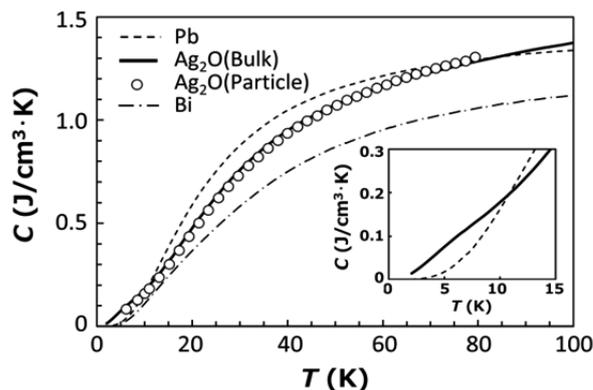


Fig. 2 Temperature dependence of specific heat of Ag<sub>2</sub>O (bulk and particle), Pb, and Bi.

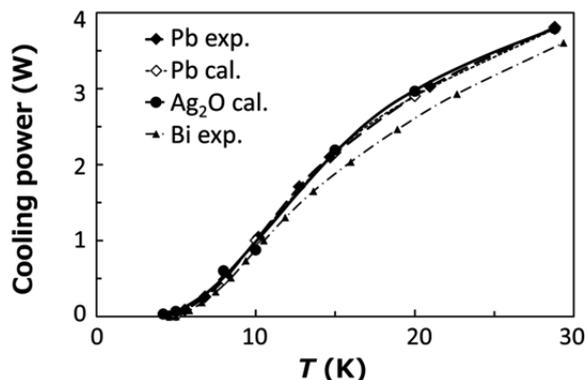


Fig. 3 Calculated and experimental results of cooling power of the GM refrigerator with different regenerator materials.

## 2P-p06 富士電機の小型冷凍機技術 A miniature Pulse Tube Refrigerator by Fujielectric

竹内 孝行, 松下 智行, 神田 尚明 (富士電機)  
TAKEUCHI Takayuki, MATSUSHITA Tomoyuki, KANDA Naoaki (Fujielectric)

### 1. はじめに

富士電機は、1975 年から赤外線センサー冷却用小型極低温冷凍機の開発を始め、ASTER 衛星搭載用冷凍機等のスターリング冷凍機、産業用パルスチューブ冷凍機を製品化し、販売してきた。製品コンセプトは、高い信頼性を有する小型冷凍機を広いニーズに適用することとして、現在に至るが、スターリング式とパルスチューブ式とに分けると、パルスチューブ冷凍機に特化しつつある。

ここでは、富士電機のパルスチューブ冷凍機の紹介をスターリング冷凍機と比較しながら、その技術的特徴を紹介する。

Fig.1 に富士電機の小型冷凍機の機種を示す。

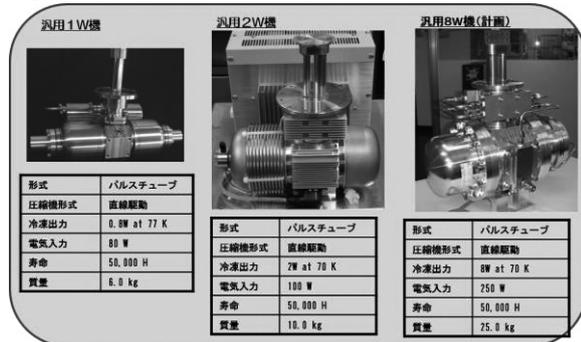


Fig.1 Type of Fuji's Pulse-Tube Refrigerators

### 2. スターリング冷凍機とパルスチューブ冷凍機の比較

スターリング冷凍機とパルスチューブ冷凍機の大きな違いは、膨張側に機械的駆動部を有するスターリング冷凍機と封入ヘリウムガスの運動だけで冷却するパルスチューブ冷凍機であることである。

構造から明らかなように、冷凍機特性の最適化のために、膨張機の駆動部を調整するスターリング冷凍機は、最適化や小型化が容易であることに反し、パルスチューブ冷凍機は、機構部品の幾何学的諸元で特性が決まってしまうため、完成後の最適化が困難である。

しかし、膨張機側に機械的駆動部を有しないことは、長期信頼性に長じていることであり、膨張機における発生擾乱が小さいことが利点として有する。

小型冷凍機の特徴から、長期信頼性や低擾乱を要求される用途には、パルスチューブ冷凍機を適用し、小型化や低消費電力を要求する用途にはスターリング冷凍機とすることが良いと考えられる。

Table 1 Comparison with Stirling and Pulse-tube

| 比較項目 | スターリング冷凍機 (ST) | パルスチューブ冷凍機 (PT) |
|------|----------------|-----------------|
| 構成要素 | 圧縮機、膨張機        | 圧縮機、膨張機、位相制御機構  |
| 消費電力 | 小さい            | STより大きい         |
| COP  | 高い             | STより低い          |
| 発生擾乱 | 大きい            | 小さい             |
| 大きさ  | 小さい            | STより大きい         |
| 質量   | 小さい            | 小さい             |
| 長期寿命 | 短い             | 長い              |

### 3. 小型冷凍機の長期信頼性

汎用小型冷凍機は、ピストンシールや駆動機構の支持ベアリングの摺動による初期故障や摩耗による運転寿命が信頼性を決める要素であったため、スターリング冷凍機においては数千時間の寿命であった。

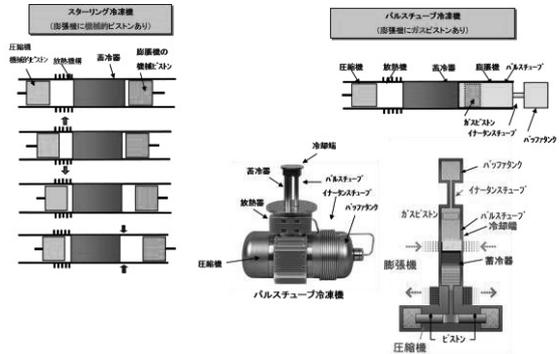


Fig.2 Principal of miniature Refrigerator

摺動対策としてのクリアランスシールやフレクシャーベアリングの採用により、約 10 倍の寿命が得られることができ、主たる寿命要素は、冷凍機内部のヘリウムガスの汚染が課題となると考えられる。

ヘリウムガスの汚染による冷凍機能力低下は、主に VCM に使用している絶縁材や接着剤等の有機材料が冷却端に固着することが原因であるため、冷凍機内部の有機材料の使用量を最小にすることが重要である。

富士電機では、ASTER 衛星搭載用冷凍機の開発において、最小限の有機材料量を寿命試験から求め、7 万時間以上の設計寿命となるような材料管理手法を産業用にも適用しているため、地上用途でも同等の寿命時間が得られる。

Table2 The Reliability Evaluation Method

| No. | 対象要素       | 材料・仕様  | 信頼性評価項目            | 信頼性評価試験方法                                      | 開始                                       | 評価結果 | 備考 |
|-----|------------|--------|--------------------|--|--|------|----|
| 1   | 92A ヴァツ    | 217Ni鋼 | 疲労強度・損傷            | 繰り返し動作目安後の健全性により評価する。                          | 1×10 <sup>7</sup> 回以上繰り返し動作を要す           | 問題なし |    |
| 2   | リード線       | 銅合金    | 疲労強度・損傷            | 繰り返し動作目安後の健全性により評価する。                          | 1×10 <sup>7</sup> 回以上繰り返し動作を要す           | 問題なし |    |
| 3   | 1-9376     | AW     | 繰返し運転による組織弛緩の低下    | 連続運転前後で組織弛緩の劣化を評価する。                           | 1×10 <sup>7</sup> 回以上繰り返し動作を要す。組織弛緩10%以上 | 問題なし |    |
| 4   | 冷凍機のガス汚染   | 銅合金    | 冷凍機能力低下            | 冷凍機能力から寿命時経過後に発生する汚染ガス量に相当するものによる冷凍機能力低下を評価する。 | 冷凍機能力の低下が許容値以下であること (90%以下)              | 問題なし |    |
| 5   | 圧縮機ピストンシール | 白金     | 打上時の振動加速による摩耗が起きる。 | 繰り返し運転時より振動試験前後で1ヶ月に亘り変化を評価する。                 | 10GPa・m <sup>3</sup> /sec以下の圧縮変化         | 問題なし |    |

### 4. 小型冷凍機の発生擾乱

小型冷凍機の発生擾乱(あらゆる方向の発生加速度)は、VCM で直線駆動された時のピストン運動から発生する。

低擾乱を要求される用途では、圧縮機の VCM 運動方向とピストン運動方向を対向配置として、両者の可動質量を合わせることで力を相殺させることで大部分の擾乱は小さくなる。

さらなる擾乱の低減には、2台の VCM の駆動制御において、可動質量の運動軌跡を同じ運転にできるように、高次周波数成分を合わせることで実現できる。

この制御には、特別なセンサを必要とせず、VCM の運転制御の電気量によって行える特徴を有する。

以上の方法により、富士電機のパルスチューブ冷凍機は、各軸に発生する擾乱加速度は圧縮機が 0.01m/s<sup>2</sup>rms 以下、膨張機で 0.05m/s<sup>2</sup> 以下であり、冷却端で発生する振動加速度は 0.2m/s<sup>2</sup> 以下、振幅 0.04 μm 以下であった。

以上

## 磁性基板を含む高温超伝導線材の導電特性の評価に関する検討

### The measurement and evaluation of electric field-current density characteristic of a coated conductor with magnetic substrate

李 陽, 雨宮 尚之(京大); 曾我部 友輔(京大・学振 DC1); PARKINSON Ben, GRANVILLE Simon, WIMBUSH Stuart (VUW)  
 LI Yang, AMEMIYA Naoyuuki (Kyoto University); SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1);  
 PARKINSON Ben, GRANVILLE Simon, WIMBUSH Stuart (Victoria University of Wellington)  
 E-mail: y-li@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. Background

In order to evaluate the shielding-current-induced field (SCIF) of the 1.5 T high-temperature-superconductor (HTS) MRI magnet [1] by the numerical electromagnetic field analyses, wide range of electric field ( $E$ )-current density ( $J$ ) characteristic of the coated conductor is required [2]. Two kinds of measurements are used to determine the  $E$ - $J$  characteristics: transport measurement, which is used to determine the  $E$ - $J$  characteristics at high electric field; magnetization relaxation measurement, which is used to determine the  $E$ - $J$  characteristics at low electric field.

The coated conductor used in the MRI magnet contains magnetic substrate (NiW). And the magnetic substrate might affect the  $E$ - $J$  characteristics determination, because the magnetic field seen by the superconductor might be affected by the magnetization of the substrate.

#### 2. Influence on transport measurement

Once a transport voltage ( $V$ )-current ( $I$ ) characteristic is measured, an  $E$ - $J$  characteristics can be calculated simply by dividing  $V$  with the voltage-tap separation and dividing  $I$  with superconductor cross section.

Note that the current is almost uniformly distributed in the coated conductor, when the transport current is close to the critical current  $I_c$ . Assuming such uniform current distribution in the coated conductor and using the measured magnetic characteristic of the substrate, a static magnetic field analysis was conducted to evaluate the influence of the substrate on the magnetic field seen by coated conductor in transport measurements. As shown in Fig. 1, the influence of the magnetic substrate on the magnetic field seen by coated conductor is negligible when the normal component (component perpendicular to the sample surface) of magnetic field is larger than or equal to 0.5 T.

The determined  $E$ - $J$  characteristic of the coated conductor with magnetic substrate are reasonable and similar to those of coated conductors with nonmagnetic substrate.

#### 3. Influence on magnetization relaxation measurement

$E$ - $J$  characteristics can be indirectly determined from the magnetization relaxation of a piece of sufficiently magnetized coated conductor [3]. In a sufficiently magnetized coated conductor, current, as well as electric field, should uniformly distributed in the sample. With this presumed distributions, current density  $J$  can be determined from the magnetization of the sample, and similarly, electric field  $E$  can be determined from the temporal changes of the magnetization of the sample.

A static field analysis done for the magnetized coated conductor sample with the magnetic substrate showed that the influence of magnetic substrate on the magnetic field seen by coated conductor should be negligible under sufficient external field. Therefore, we did not expect any peculiar behavior in the magnetization relaxation in the coated conductor with the

magnetic substrate, but an abnormally slow magnetization relaxation was observed.

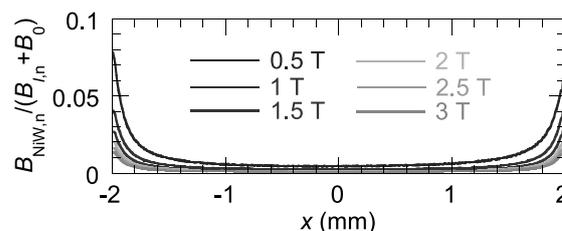


Fig. 1 Influence of magnetic substrate on magnetic field seen by coated conductor in transport measurement.  $B_{NiW,n}$ ,  $B_{l,n}$ , indicates normal component of magnetic field induced by magnetic substrate, conducted current respectively.  $B_0$  indicates the external magnetic field applied perpendicularly to the sample surface. “ $x$ ” indicates the coordinate along the sample width (4 mm).

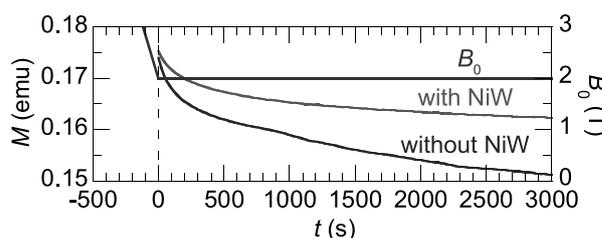


Fig. 2 Relaxation curve of the combined sample and control sample. “with NiW” indicates combined sample with NiW tape, note that the magnetization of substrate is subtracted. “without NiW” indicates the control sample without NiW tape.

To confirm that this phenomenon is caused by magnetic substrate rather than the property of the superconductor, experiments were conducted using two kinds of samples: the combined sample, which combined the coated conductor with nonmagnetic substrate and the magnetic NiW tape together; the control sample, which is made from the same coated conductor with nonmagnetic substrate. As shown in Fig. 2, slower relaxation was observed in the combined sample, indicating the magnetic substrate is the reason for the slower relaxation.

A possible explanation is that the sample is not sufficiently magnetized at beginning of the relaxation. Further measurements are planned in order to clarify the mechanism and to develop countermeasure.

#### References

1. B. J. Parkinson, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3 (2013) 4400405.
2. Y. Li, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3 (2018) 4601105.
3. Y. Onodera, *et al.*, *Phys. Procedia*, vol. 67 (2015) pp. 926.

# 高温超伝導テープ線材の電流分布に対する給電ターミナルの影響の実験的評価 (2)

## Experimental evaluation of the influence of the power supply terminals on current distribution in a high-temperature superconductor tape (2)

松永 信之介(総研大); 柳 長門, 尾花 哲浩, 寺崎 義朗(NIFS)

MATSUNAGA Shinnosuke(SOKENDAI); YANAGI Nagato, OBANA Tetsuhiro, TERAZAKI Yoshiro(NIFS)

E-mail: matsunaga.shinnosuke@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

ヘリカル型核融合炉用の超伝導マグネットは巨大で複雑な構造を有しており、従来の連続巻き方式では巻き線工期に数年以上費やす問題がある。高温超伝導 (HTS) テープ線材を用いた分割型マグネットの構成法はこの問題を解決できる方法として期待されている[1]。一方、分割された導体セグメントが持つ接続部は導体の輸送電流特性に影響を及ぼす可能性があり、その影響を評価することが求められている。前報に引き続き、HTS テープ線材と給電ターミナルの接触条件を変えることによって、導体の端部が輸送電流の電流分布に与える影響について調べたので報告する。

### 2. 実験方法

ホールセンサを用いて超伝導導体に流れる電流が作る自己磁場を計測することで、導体内の電流分布を評価できる[2]。HTS テープ線材サンプルとして 10 mm の幅を持つ Fujikura 製の GdBCO テープ線 (FYSC-SC10, 臨界電流値: 温度 77 K, 自己磁場で 600 A 以上) を用いた。冷却は液体窒素浸漬とした。本実験では、Fig.1 のように、5 つのホールセンサによってアレイを構成し、輸送電流がつくる自己磁場の分布を測定した。測定点は端部から線材長手方向に 15 mm 離れた位置とした。また、Fig.2 に示すような 2 種類の条件: (a) 正常な給電面の端部, (b) 半分切断された給電面の端部 を用意し、比較実験を行った。

### 3. 実験結果

それぞれの端部条件を持つサンプルに対して、10 A/s のランプレートで臨界電流値に達するまで通電した。500 A の輸送電流値における自己磁場分布の瞬時値を Fig.3 に示す。(b) の場合、超伝導層に対して幅方向に不均一に電流が供給されているにもかかわらず、自己磁場分布は(a)とほとんど差異はなかった。(c) はサンプルの超伝導層に様な電流分布を持つ輸送電流が流れたと仮定して計算した自己磁場分布である。実験値と計算値にほぼ違いがないことから、(a)と(b)のいずれの条件でも、測定位置における輸送電流は様な分布を持っていたことがわかる。

同時に両側の給電ターミナルの外側のサンプル部分に電圧タップを取り付け両端電圧の測定を行った。電界基準 0.1 mV/m とした n 値モデルで電界-電流特性をフィッティングした結果、臨界電流値は(a)で 600 A, (b)で 308 A であった。また、n 値は(a)で 31, (b)で 9 であった。

### 4. まとめと考察

本実験において、端部から 15 mm 離れた位置では、端部の状態は輸送電流の電流分布に対して影響を与えないことが示された。また、電流分布はほぼ同様であった。これは、一本の HTS テープ線材の超伝導層における電流分布を決定する要因は、その断面形状と空間の磁場が支配的であることを示唆している。また、Fig.2(b)のように超伝導層の電流経路が半分となる部分が伴うと、臨界電流値はほぼ半分になり n 値は小さくなった。これは端部付近の線材部分は臨界電流値に達して常伝導転移したが十分な冷却によって伝播が抑えられていたことによると考えられる。

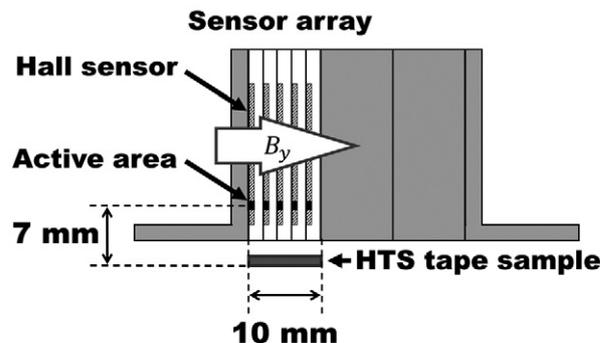


Fig.1 Schematic drawing of a Hall sensor array to measure self-magnetic field distributions. The arrow of  $B_y$  shows the measurement direction of the self-magnetic field.

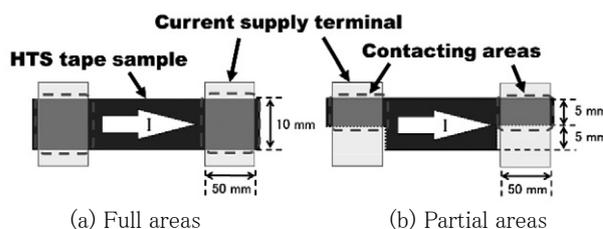


Fig.2 Electric contact conditions between the power supply terminals and the HTS tape sample: (a) Full areas, (b) Partial areas.

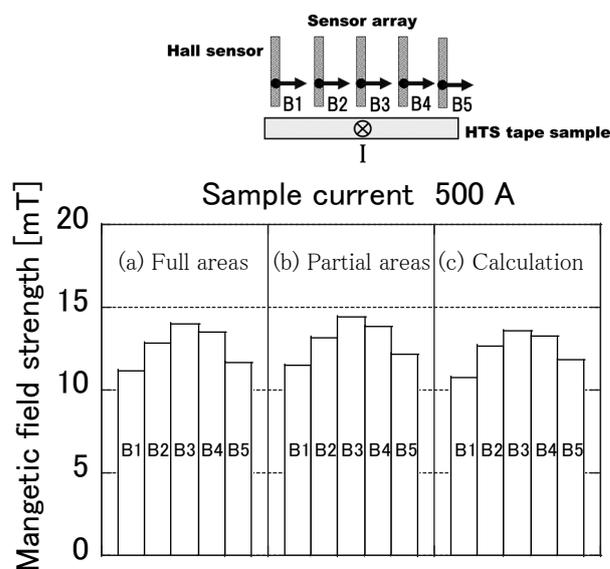


Fig.3 Self-magnetic field distributions.

### 参考文献

- H. Hashizume and S. Ito, Fusion Engineering and Design **89**(2014) 2241-2245
- K. Shimohata et al., TEION KOGAKU **37**(2002) 410-415

# はんだ接続した coated conductor の引張応力下における機械特性と通電特性

## Mechanical and transport properties for soldered joint of coated conductors under tensile stress

小野寺 裕紀, 小黒 英俊, 松村 義人(東海大); 神田 昌枝, 山口 作太郎(中部大)  
 ONODERA Hiroki, OGURO Hidetoshi, MATSUMURA Yoshihito(TOKAI Univ.);  
 KANDA Masae, YAMAGUCHI Satarou(CHUBU Univ.)  
 E-mail: 4bex1111@fuji.tokai-u.jp

### 1. はじめに

超伝導ケーブルは大電流を損失ゼロで送電できる為、その実用化が期待されている。ここで、REBCO(RE:Y または希土類金属)高温超伝導線材を用いた電力ケーブルを想定した場合に、長尺ケーブルとして使用する場合には必ずケーブル同士を接続する必要がある。また、超伝導ケーブルは室温から冷却するため、熱収縮によって 0.2-0.3%程度縮むこととなる。このとき、長さに応じて収縮長が長くなること、ケーブルが固定されていることから熱収縮により発生した熱応力が、一部に集中して大きな応力となる可能性がある。特に接続部は形状が異なるため、応力集中が起きやすい。このため、接続部に加わる応力に対する接続部の超伝導特性及び機械特性を調べることは、電力ケーブル利用にとって重要な課題となる。

そこで本研究では、REBCO 線材をはんだで接続し、電流を流しながら引張応力を加える方法を用いて、その超伝導特性が劣化する様子を観察したので報告する。

### 2. 実験方法

Fig. 1 に接続試料を示す。REBCO 線材(American Superconductor (AMSC)社製及び、フジクラ製)を 4 cm に切り取り、2 本用意した。これを Sn-Bi 低温はんだ(千住金属工業株式会社製)により Fig. 1 のように接続した。接続した試料の接続抵抗を四端子法により測定するため、電圧端子をはんだ接続部の両端に取り付けた。次にひずみゲージを接続部と超伝導線部の表裏に接着した。はんだによる接続及びひずみゲージの接着を確認し、通電引張試験機に試料を取り付け、液体窒素に浸漬した状態で引張試験及び、電気抵抗測定を同時に行った。電力ケーブル用線材を考えた場合には線材の臨界電流値が高く、臨界電流の測定が困難なことが予想されるため、一定の電流を流しながら引張り荷重を与える測定方法とした[1]。このとき、測定精度向上のため、できるだけ電流値を大きくして測定することを考えたが、接続部での温度上昇を考慮する必要があり、10 A 以下の電流で測定を行った。電流を流した状態で引張応力を加え、電気抵抗値とひずみから接続部の破壊の状況を評価した。

### 3. 結果

実験に先立ち、AMSC 社製の線材で接続部のはんだ量を変化させ、いくつかの試料を作成し結果の比較を行った。その結果、はんだ量が 0.3 g 以上の場合にはんだ部分から破壊しており、はんだ量が 0.2 g 以下では線材のはく離によって破壊することが確認できた。この時、はんだ量が少ない方が大きな応力まで低抵抗を保ったため、線材の比較実験ははんだ量 0.2 g 以下の条件で行った。

Fig. 2 に AMSC 社製の線材を用いたはんだ接続試料の実験結果を示し、Fig. 3 にフジクラ社製の線材を用いたはんだ接続試料の実験結果を示した。図中の数字は実験時の応力印加と除荷の推移を示している。Fig. 2 の結果に関して、荷重を加えたときに 560 N で  $0.7 \mu\Omega$  の電気抵抗が発生したため除荷を行った。しかし電気抵抗の値はゼロには戻らずに  $20 \text{ n}\Omega$  の抵抗が残った。その後再び荷重をかけたところ、再び 560 N で電気抵抗の値が上昇し始め、荷重を保ったままで電気抵抗は  $10 \mu\Omega$  まで上昇した。そこで除荷を行い実験を終了した。

除荷しても電気抵抗が戻ることが無かったため、接続試料に何らかのクラックが入ったことが電気抵抗が上昇した原因であると考えられる。Fig. 3 の場合も Fig. 2 と同様に、580 N で電気抵抗の値が上昇していることが確認できた。

この結果より、AMSC とフジクラの線材どちらにおいても、600 N 付近で劣化が始まるのが分かった。これらの線材の接続部分を詳しく観察すると、接続部分のはんだにクラックなどが見られないことから、超伝導層もしくは中間層のはく離が起ることで電気抵抗が急激に上昇したと考えられる。

### 参考文献

1. S. Ito, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25 (2015) 4201205

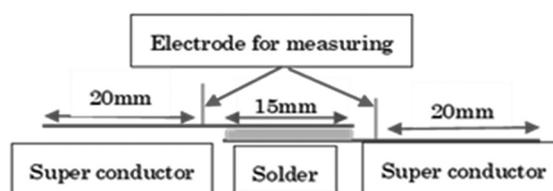


Fig.1 Schematic diagram of the sample with a solder joint.

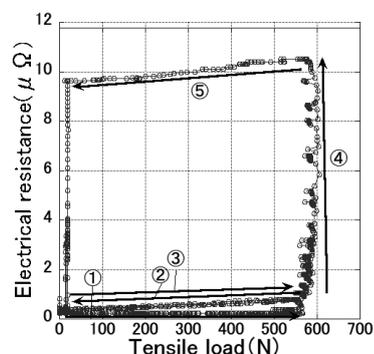


Fig.2 The electrical resistance as a function of the tensile load for the jointed samples of AMSC.

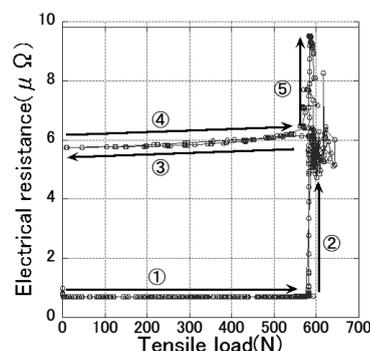


Fig.3 The electrical resistance as a function of the tensile load for the jointed samples of Fujikura.

## 様々な coated conductor の 77.3 K における機械特性評価 Mechanical properties for various coated conductors at 77.3 K

小黒 英俊, 樋口 雄飛, 小杉 悠大, 関尾 光, 目黒 良真, 久保田 猛, 佐藤 純平 (東海大);  
土屋 清澄 (高エネ機構); 菊池 章弘 (物材機構); 一瀬 中 (電中研)

OGURO Hidetoshi, HIGUCHI Yuhi, KOSUGI Yudai, SEKIO Hikaru, MEGURO Ryoma, KUBOTA Takeru,  
SATO Junpei (Tokai Univ.); TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS); ICHINOSE Ataru (CRIEPI)  
E-mail: h-oguro@tsc.u-tokai.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO coated conductor が市販されて 10 年以上が経過し、そのメーカーの数も増えてきたことで、coated conductor を用いた超伝導マグネットの開発への期待が高まっている。REBCO coated conductor は、REBCO が持つ、特に強磁場中での臨界電流の高さと、基板起因の機械特性の高さから、強磁場超伝導マグネット応用への期待が特に高い。加速器用超伝導マグネットもその一つである。

加速器用マグネット線材として利用する場合には、臨界電流や機械特性など様々な特性を考慮する必要がある。ここで、現在市販されている coated conductor は、作製方法、基板材料、RE の種類、安定化銅の厚さなどが異なっている。これらは、臨界電流の大きさや機械特性に大きな影響を与えていることが考えられる[1,2]。このため、我々のグループでは、様々な REBCO coated conductor の各種特性評価を行い、次世代加速器用マグネットへの適用可能性を検討している。

本研究では、機械特性に着目し、REBCO coated conductor の臨界電流と機械特性を、液体窒素冷却下において調べたので報告する。

### 2. 実験方法

試料には、REBCO coated conductor を用意しており、American Superconductor(AMSC)、フジクラ、SuNAM、SuperPower の試料を使用した。Table 1 にこれら coated conductor の詳細を示した[1]。

試料にはひずみゲージを線材の表と裏に貼り、両者の平均をとることで引張りひずみを測定した。電圧端子は、はんだ接続を行うことによる線材の劣化を防ぐため、自作クリップを用いて 10 mm の間隔で取り付けた。

引張り応力下通電試験は液体窒素中で行った。両端のつかみ具に、引張り試験器本体と絶縁をとった上で、Cu 電極とともに試料を取り付け、最大 300 A の電流通電を可能としている。荷重は、装置上部の室温領域に取り付けたロードセルを用いて測定した。冷却の際には、熱収縮によるひずみが発生しないように荷重を調整しながら冷却した。冷却後、引張りひずみを一定量与えては、臨界電流 ( $I_c$ ) を測定する作業を繰り返し、応力ひずみ曲線と臨界電流と引張りひずみとの関係を調べた。

### 3. 実験結果

Fig. 1 に、液体窒素冷却下における、 $I_c$  のひずみ依存性を示した。 $I_c$  の大きさはフジクラと SuNAM が大きく、AMSC と SuperPower が小さい結果となった。すべての線

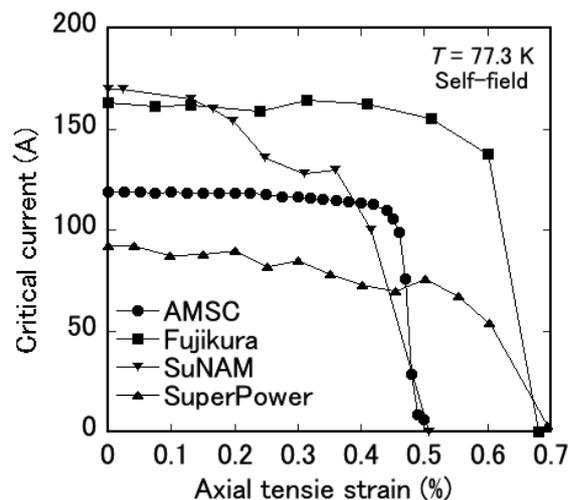


Fig. 1 The critical current as a function of tensile strain for various coated conductors at 77.3 K in self-field.

材に関して、ひずみを加えることでゆっくりと  $I_c$  が低下していく傾向が見られた。この傾向はこれまでの報告[2]と同じである。ひずみに対する超伝導特性の変化を見ると、フジクラと SuperPower が 0.5%以上のひずみに対しても劣化しておらず、ひずみに強い線材であることが分かった。AMSC と SuNAM は 0.4%まで劣化せず、それ以上のひずみで  $I_c$  が低下していくことが分かった。現状では、これらの線材の製法はバラバラであるため、製法による差異に関しては言及できないが、今後、他社の線材の測定を行い、比較する予定である。

また、すべての線材の破壊の様子を観察したところ、安定化銅の部分とハステロイの部分に、別々に破断している様子が見られた。今後、これが線材のどの層から破断しているのか、など詳しい分析を行い、線材の破壊と線材構造、製法などに関係があるかどうかを調べる必要がある。

### 謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである。

### 参考文献

1. K. Tsuchiya et al., Cryogenics, Vol. 85 (2017) 1
2. C. Barth et al., SupercondSci. Technol., Vol. 28 (2015) 045011

Table 1 The characteristics of REBCO coated conductors [1].

| Sample     | Fabrication technology | Substrate material | Substrate thickness (mm) | Cu stabilizer thickness (mm) | Dimension (width x thickness mm) |
|------------|------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| AMSC       | RABiTS/MOD             | NiW                | 75                       | 60                           | 4.8 x 0.20                       |
| Fujikura   | IBAD/PLD               | Hastelloy          | 75                       | 20                           | 4.1 x 0.12                       |
| SuNAM      | IBAD/RCE               | Hastelloy          | 60                       | 20                           | 4.1 x 0.10                       |
| SuperPower | IBAD/MOCVD             | Hastelloy          | 50                       | 20                           | 4.0 x 0.10                       |

# Y123 バルクのピン止め特性に及ぼすカーボンナノチューブ添加の効果

## Effect of carbon nanotube addition on the pinning properties in Y123 bulk superconductors

宇田川 耀平, 井上 和朗, MIRYALA Muralidhar, 村上 雅人(芝浦工大)  
UDAGAWA Yohei, INOUE Kazuo, MIRYALA Muralidhar, MURAKAMI Masato (SIT)  
E-mail: mb18004@shibaura-it.ac.jp

### 1. はじめに

Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体は超伝導転移温度が 90K 以上であり、高い臨界電流密度( $J_c$ )を有し、磁気分離装置や NMR などの応用分野の実用材料として期待されている。Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体の  $J_c$  を向上させるためには、超伝導体中に磁束の運動を抑制するピン止めセンターの導入が必要である。ピン止めセンターとしては常伝導粒子が有効であり、粒子径が小さいほど、ピン止め効果が大きくなる傾向にある。最近、新規ピン止めセンターとして多層カーボンナノチューブ (MWCNT) を添加したところ、 $J_c$  が向上することが明らかとなった[1]。

本研究では、MWCNT より小さな直径を有する単層カーボンナノチューブ (SWCNT) を Y-Ba-Cu-O に添加することにより、MWCNT よりも強力なピン止めセンターとして作用し、 $J_c$  および捕捉磁場の向上に寄与するかを調べた。

### 2. 実験方法

$YBa_2Cu_3O_7$  と  $Y_2BaCuO_5$  をモル比 10:4 となるように秤量し、 $CeO_2$  を 1.0wt% 添加し湿式混練法を用いて混合した。混合した粉末に MWCNT 又は SWCNT を 0~1.0wt% 添加し、アセトンを用いて超音波攪拌機で混合した。

圧粉は直径 20mm の治具を使用して、一軸プレス機を用いて圧力 95.5MPa で 5min 保持という条件で行った。

前駆体の上面中央部に Nd123 を種結晶として設置し、電気炉で 1038°C まで加熱後、1003°C から 989°C まで降温速度 0.15°C/h で徐冷して、結晶成長を行った。酸素アニール処理は 400°C において 100h 行った。 $J_c$  値は超伝導量子干渉磁束計(SQUID)による磁化測定から算出し、組織観察は走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。捕捉磁場の測定は走査型磁場分布測定装置を用いて行った。

### 3. 結果と考察

MWCNT および SWCNT 添加のいずれの試料においても、種結晶から試料端までファセット成長させることができた。

SWCNT を添加した試料の SEM 画像を Fig. 1 に示す。100nm クラスの針状粒子が、多数、母相内に分布している。針状粒子は、無添加の試料で観察されないことから SWCNT に由来する化合物と考えられる。

Fig. 2 に供試材の  $J_c$  の磁場依存性を示す。CNT を添加した試料は無添加の試料よりも  $J_c$  が高いことが確認された。また、SWCNT 添加試料は、MWCNT よりも  $J_c$  が高い。これは、SWCNT に由来する微小粒子がピン止めセンターとして、MWCNT よりも有効に作用しているためと考えられる。

Fig. 3 に無添加試料および SWCNT を 0.6wt% 添加した試料の捕捉磁場分布を示す。無添加 Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体の最大捕捉磁場値は 0.47 T であるのに対して、SWCNT を 0.6wt% 添加した試料の最大捕捉磁場値は 0.54 T であった。よって、SWCNT を添加したことにより、捕捉磁場を約 15% 向上させることができた。

以上の結果から、SWCNT 由来の微小粒子がピン止めセンターとして有効に作用し、Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体の  $J_c$  ならびに捕捉磁場の向上に寄与することが分かった。

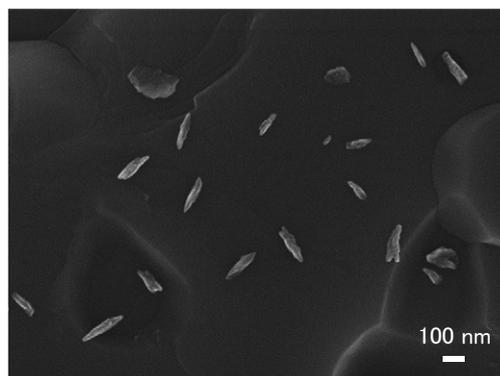


Fig. 1. SEM micrograph for melt-processed Y-Ba-Cu-O with 0.2wt% SWCNT addition.

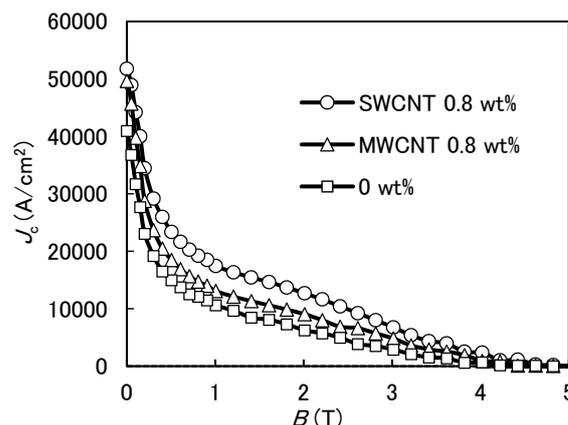


Fig. 2. Magnetic field dependence of  $J_c$  at 77K for CNT-added Y123 bulk superconductors.

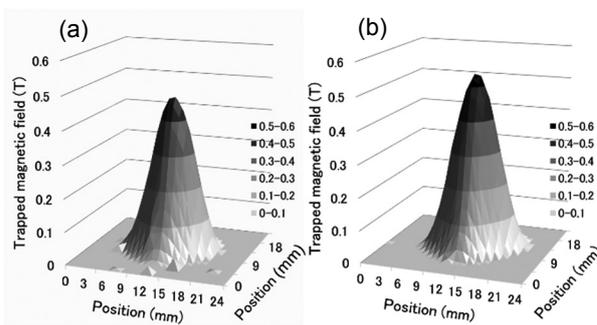


Fig. 3. Magnetic field distribution trapped by (a) Y-Ba-Cu-O superconductor without SWCNT addition and (b) that with 0.6wt% SWCNT addition.

### 参考文献

[1] K. Inoue, Y. Miyake, M. Miryala, and M. Murakami, J. Phys.: Conf. Ser., 871 (2017) 012051.

# 超電導ケーブル地絡事故時のマンホール内液体窒素漏洩に関する検討

## Study on Liquid Nitrogen Leakage Accident inside Vault

森村 俊也, 南野 忠彦, 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, MINAMINO Tadahiko, 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において、ケーブルが絶縁破壊し、地絡事故が発生し得る。東京電力管轄の 66kV 系統における地絡電流は、最大で 1500A-2sec と想定されている。このような地絡電流が流れた場合の挙動・発生エネルギーなどをサンプル試験で測定してきた[1]。

地絡事故が発生した場合、発生エネルギーによっては断熱管が穿孔し、液体窒素(LN2)がケーブル外部へ漏洩する可能性がある。よって、このような LN2 漏洩現象に関して要素試験を実施したので、結果を報告する。

### 2. 模擬 MH を用いた LN2 漏洩試験

地下埋設の超電導ケーブルを想定すると、LN2 漏洩が発生する位置は、地下マンホール(MH)内と管路内に大別される。このうち、MH 内への LN2 漏洩した場合の挙動把握を検討している。MH 内に LN2 が漏洩した場合、LN2 蒸発に伴う MH 内の圧力上昇や酸欠、MH 温度低下による他設備や周囲土壌への影響などが考えられる。MH の大きさや周辺の環境、条件は千差万別であるため、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 2×2×3m 級の模擬 MH を用いた LN2 漏洩試験を行い、温度・圧力挙動や他設備への影響を評価し、解析コードへフィードバックする予定である。

模擬 MH 試験に先立ち、MH 容器の熱的な特性や温度・圧力挙動の基礎特性取得のため、1m 四方の小型容器を用いた要素試験を実施した。要素試験イメージと試験時の写真を図 1(a)(b)に示す。要素試験は、供給圧力一定とした LN2 供給源から小型容器内に LN2 を注入し、容器温度変化や容器内圧変化を測定した。小型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。なお、容器内圧が閾値に達した場合、圧力を開放する措置を取った。

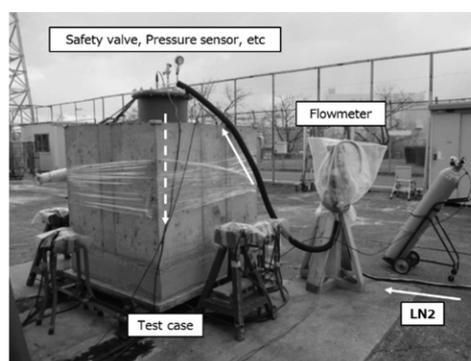
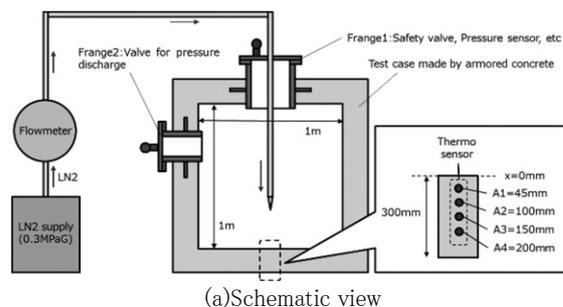
実測した内圧挙動と MH 容器床面のコンクリート温度挙動を図 2(a)(b)に示す。図 2(a)より、LN2 漏洩量が内圧の上昇に従い、低下している。LN2 供給源の圧力が一定のため、供給源圧力-内圧の差圧が低下するためである。内圧挙動について、LN2 漏洩量と蒸発時の体積変化を考慮した解析結果が実測結果と一致した。図 2(b)より、LN2 漏洩時の床面部温度変化について、容器内面側(A1 側)から順に低下する様子が確認された。また、コンクリート熱伝導率を温度依存性の無い一定値とした簡易の温度解析結果と実測結果が一致した。以上より、LN2 漏洩時のコンクリート製小型容器の温度・圧力挙動の基礎特性を取得し、解析模擬可能であることを示した。

### 3. まとめ

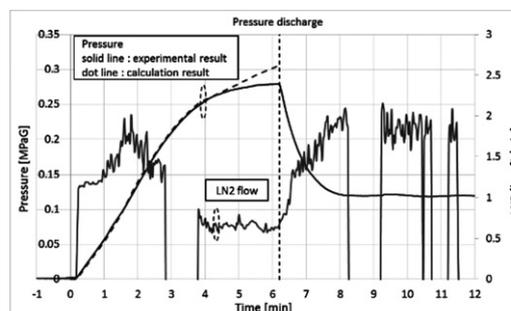
超電導ケーブルシステムの安定性・安全性検証として、地絡事故時の挙動検討を行っている。地絡事故発生時の LN2 漏洩現象の模擬試験を実施・計画している。このうち、小型容器を用いた LN2 漏洩要素試験において、コンクリート製 MH 容器の物性や温度・圧力挙動の基礎特性を取得し、解析模擬を実施した。2×2×3m 級の模擬 MH 試験の準備及び解析コード構築による詳細解析を実施予定である。

### 謝辞

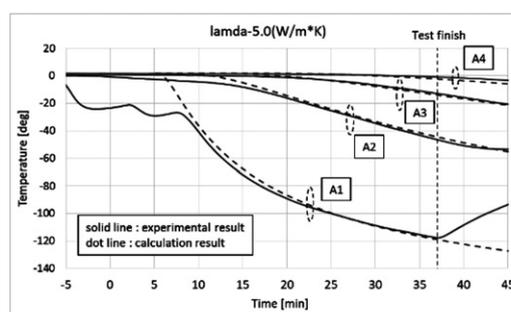
本研究の一部は、NEDO の助成により実施したものである。



(b) Photograph  
 Fig. 1 LN2 leakage test system.



(a) Pressure



(b) Temperature

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

## 石狩超電導直流ケーブルの断熱性能解析-2

### Thermal insulation analysis of cryogenic pipe in Ishikari Project - 2

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

#### 1. はじめに

2017年秋までに石狩プロジェクト・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及び多層断熱膜(MLI)を通じての熱侵入量解析[1]を述べた。また、MLIの反射率、断熱2重管外管、内管の表面の反射率の実測値を入れた熱侵入量解析では、輻射熱輸送モデルの熱輸送方程式[2]を解析的に解いて、熱輸送量の見積もりを行った[3]。その結果、石狩プロジェクトで利用した21層MLIでは、多めの見積もりでも熱侵入量が0.02W/m以下となり、実験データとは50倍以上低いことが分かった。一方、石狩での熱侵入量は、LNC/CERNのドリフト管の熱侵入量に比べて、単位面積当たり2倍ほど大きく、NASAの宇宙空間での値に比べて50倍以上大きい。このため、引き続き熱侵入量低減のために解析を継続している。

本講演では、石狩回線2で利用されたMLIの熱輸送について、その後の検討結果をのべると同時に断熱2重管の更なる性能向上について議論を行う。

#### 2. 多層断熱膜(MLI)モデルと熱輸送計算結果

MLIモデルをFig. 1に示した。ここでは外管温度を300K、内管温度を77Kとし、MLIはアルミ蒸着フィルム(実線)と互いに接触を防止するための不織布等(破線)が入っている。そして、それぞれの温度をT1, T2, … Tnとする。また、放射率を $e_M$ とし実測データを使い、それぞれの膜の間の熱輸送量を $q_i$ とする。すると、下記の、方程式が成り立つ。

$$q_0 = q_1 = \dots = q_n \quad (1)$$

方程式の数と未知数の膜温度の数が等しいため、温度についての4次元方程式を解析的に解くことができ、膜温度と熱輸送量を解析的に求めることができた。Fig. 2にその結果の一部を示す。此に見られるようにMLIの放射率と熱侵入量はほぼ比例関係にある。MLIの放射率(=放射率)は実測され0.015以下と見積もられているが、最初に述べたようにこの値を利用して計算すると実験と大きな差が発生する。

このため、アルミ蒸着フィルムの接触による熱伝達が重要と考えられ、Fig. 1に示した様にフィルム間の熱伝達を減少させるための不織布などが挟まれている。実際、不織布などを挟むと熱侵入量は減少する。しかし、その熱伝達係数を実験的に求めることは実際ほとんど無理な状況である上に実効的な放射率を却って増大させる。

#### 3. 新しい計測方法の提案

石狩での断熱2重管熱侵入量を冷媒の常圧ガス発生量で測定するには、数mを越す規模の実験装置が必要になる。今後、更なる熱侵入量が低下すると、更に大型装置が必要になる。しかし、式[1]から熱侵入量は、MLI各層間の熱輸送量に等しくなる。そして、熱輸送が輻射によって行われると絶対温度の4乗に比例するため、MLI層間の温度差は低温になるほど大きくなる。したがって、もしMLIの各層温度を1K程度の精度で測定できれば、それぞれの層間で熱輸送量を見積もることができ、最終的な熱侵入量を見積もることができる。もし、計算値より温度差が小さいようであれば、それは層間接触

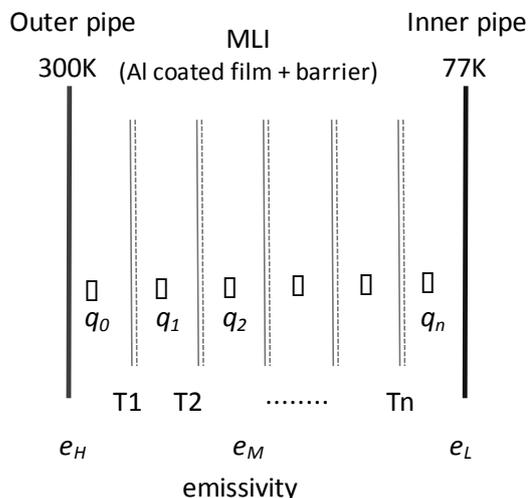


Fig. 1 Model of Multi-Layer Insulation (MLI)

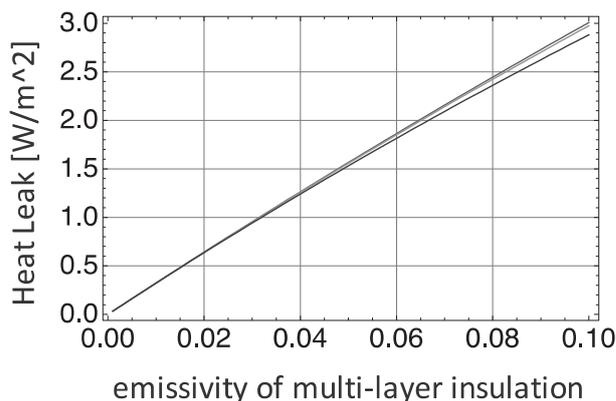


Fig. 2 Calculation results of MLI emissivity and heat leak for 7 layers MLI in Ishikari Line 2.

による熱伝達による熱輸送が重畳されたことが推測される。このため、直径50 $\mu$ mの超小型TCを用いて温度計測を開始した。大きな温度差のため誤差を含めても測定が容易と考えたからである。但し、熱容量がフィルムは極めて低いため、TCの取付方法にも工夫が必要であり、複数の取付方法及びTC校正を試しながらの測定と計算値の比較を行っている。

謝辞: (株) 栃木カネカからのサンプル提供及び石狩技組の支援に感謝する。

#### 参考文献

- 山口他、「石狩プロジェクトでの断熱2重管での輻射と熱伝導による熱侵入の分離」第94回2017年度春期低温工学・超電導学会講演概要集 3A-a03, p. 138.
- R. Byron Bird et al, Transport Phenomena, p. 447, 1960, John Willey & Sons, Inc.
- 山口他、「石狩超電導直流ケーブルの断熱性能解析-1」第95回2017年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集 3B-a03, p. 161.

# 直流き電鉄道の複数路線モデルへの超電導ケーブル導入効果の検討

## Study on Benefits of Introducing Superconducting Power Cables to a Multiple-route model of DC Electric Railway systems

岩月 駿, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大); 富田 優 (鉄道総研)

IWATSUKI Shun, TERA0 Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: lwatsuki.shun17@ae.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

直流き電鉄道でのき電線の電圧降下や回生失効といった課題への対策案として超電導ケーブルの導入があり、電車本数の多い路線の方が効果的であると考えられている[1]。本研究では数値解析を用いて超電導ケーブル導入による変電所負荷低減効果、回生失効を調査し、単路線と複数路線モデルの比較によってより効果的な導入箇所を検討を行った。

### 2. 解析方法

本研究では変電所、電車、超電導ケーブルモデルからなる路線モデルについて現実の路線を参考に設定し、時間ステップごとに各要素のエネルギー入出力等の解析を汎用解析ソフトウェア Matlab/Simlink を用いて行った。

路線モデルは、全長 15 km で平均駅間が短い(1.3 km)区間に 6 つの変電所(SS A1-6)を持つ Route A と、全長 27 km で平均駅間が長い(2.3 km)区間に 6 つの変電所(SS B1-6)を持つ Route B の 2 路線からなる。2 分間隔の運行パターンを設定した (Fig. 1)。2 路線を別個として扱う単路線モデルと、Fig. 1 のように変電所 A3 で 2 路線が電気的に接続された複数路線モデルを使用した。単路線モデル時は Route B において変電所 A3 の代わりに変電所 B3 を接続した。

### 3. 解析結果

超電導ケーブルを全線に導入したときの変電所入力エネルギー及び変電所最大出力の低減効果について、超電導ケーブルを敷設しない単路線モデル(I)と複数路線モデル(II)、全線に超電導ケーブルを敷設した単路線モデル(III)と複数路線モデル(IV)、複数路線で超電導ケーブルを Route A (V)、Route B (VI)のみ敷設するモデルについて比較した(Fig. 2)。全変電所への入力エネルギーは(IV)複数路線モデルへ超電導ケーブルを全線に導入した際が最も小さく、(III)単路線モデル時と比べ 8 %削減できる。変電所最大出力は(VI) Route B にのみ超電導ケーブルを導入した際が最も小さく、次いで(IV)で (II)導入前と比べ 21 %低減できる。(V) Route A にのみ超電導ケーブルを導入した際には変電所最大出力の低減効果が見られないため、(IV)全線導入によって路線ごとの出力に偏りがある際に平滑化が見込めることがわかる。

また、複数路線モデルにおける効果的な導入箇所を検討するため、変電所 A3 に近く出力補助の役割を担いやすい変電所 A4 の代わりに超電導ケーブルを敷設する方法として以下の 3 つを比較した。複数路線モデルで変電所 A4 を設置しないモデル(i)と設置するモデル(ii)、超電導ケーブルを(iii)SS A3 から放射状(SS A2, A3, A5, B2, B4 間を接続)、(iv)SS A3 から直線状(SS A3, B4, B5, B6 間を接続)、(v)SS A3 を含まない路線末端(SS A1 と A2, A5 と A6, B1 と B2, B4 と B5 と B6 をそれぞれ接続)に設置するモデルを解析した(Fig. 3)。変電所入力エネルギーは(iii)放射状に超電導ケーブルを敷設した際に約 9 %削減できる。変電所 A3 の最大出力は(ii)変電所 A4 を設置した方が最も小さくなるが、(iv)直線状に超電導ケーブルを敷設した際に(i)と比べ約 20 %の低減となる。超電導ケーブルを末端に敷設する(v)は(iii)、(iv)に比べ変電所入力エネルギー及び変電所 A3 の最大出力の両方において効果が小さく、変電所 A3 を含む導入形態が望まれる。

### 4. まとめ

本研究は直流き電鉄道の複数路線モデルにおける超電導ケーブル導入効果について検討した。変電所入力エネルギーは複数路線モデルにおいて約 8%削減でき、超電導ケーブル導入形態として複数路線への電力供給を行う変電所を含む方法が望まれる。

### 参考文献

- M. Tomita, et al.: Energy, Vol. 122 (2017) p.579-587

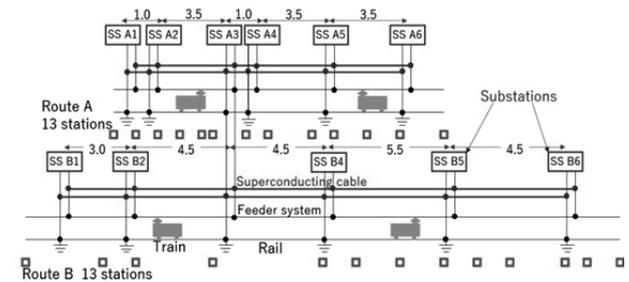


Fig. 1 Analysis model

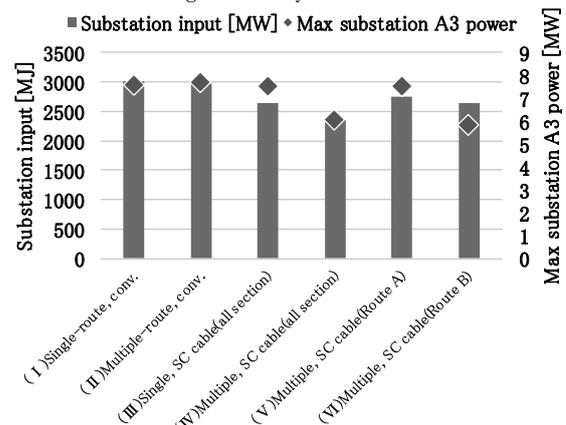


Fig.2 Substation input energy and maximum substation power in case of superconducting cable introduction to all section.

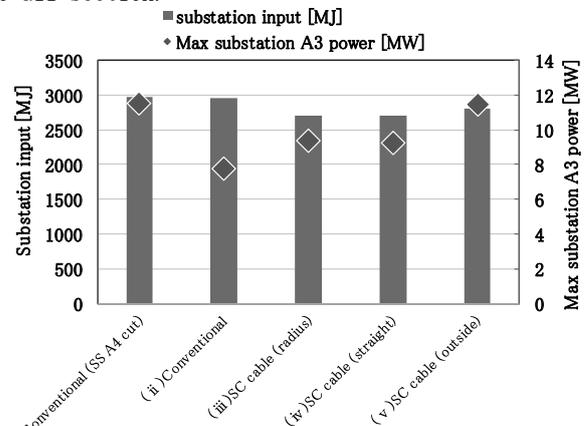


Fig.3 Comparison of substation input energy and maximum substation power in case of the SC cable introduction.

# 超電導限流器用 REBCO コイルの三次元過渡熱解析 —線材特性による限流性能と温度上昇への影響—

## Three-Dimensional Transient Thermal Analysis of SFCL REBCO Coils

### -Influence of Tape Characteristics on the Limiting Performance and Temperature Rise-

銭可楨, 白谷 俊樹, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

QIAN Kezhen, SHIRATANI Toshiki, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: qiankezhen@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

#### 1. はじめに

近年、抵抗型超電導限流器(SFCL)は、事故電流に対する応答速度が速く、構造がシンプルで小型化が可能であることから、広く注目を集めている。特に REBCO 線材は臨界電流特性が優れ、運転温度が高く、設計と製造において柔軟性が高いため、現在強く期待されている。しかし、実用化にあたって、REBCO 線材の臨界電流密度( $J_c$ )の不均一などに起因するホットスポット問題が課題としてあげられる。本発表では、抵抗型超電導限流器用の無誘導巻きソレノイド REBCO コイルを対象に(Fig. 1)、三次元の電磁界・熱伝導場連成解析を用いて、過電流が流れる際のコイルの限流特性と過渡温度分布を考察した。まず、REBCO 線材の局所的な  $J_c$  低下を模擬し、過電流が流れる際  $J_c$  低下範囲と程度による過渡温度分布への影響を考察した。さらに、異なる基板と銀保護層の厚さを持つ REBCO 線材を想定し、それらによる限流特性と温度上昇への影響を考察し、設定した回路条件に適する基板と銀保護層の厚さを検討した。

#### 2. 数値解析手法

超電導特性の強い温度依存性を考慮し、本研究では電磁界・熱伝導場連成解析を行った。REBCO 線材には薄板近似を利用し、電流ベクトルポテンシャル  $T$  ( $J = \nabla \times T$ ,  $J$  は電流密度)を変数として定式化し、有限要素法による電磁界解析を実現した[1]。支配方程式は次式で表わされる。

$$\nabla \times (\rho \nabla \times T) = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

ここで  $\rho$  は抵抗率、 $B$  は磁束密度である。ここでは、超電導体の  $E$ - $J$  特性は  $n$  値モデルにより近似し、 $J_c$  の温度、磁界依存性は(2)のように考慮した[2]。

$$J_c(T) = \alpha \left\{ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right\}^2 / (1 + kB/B_c)^b \quad (2)$$

一方、三次元熱伝導場解析では、熱伝導率や比熱の温度依存性を考慮し、液体窒素冷却や REBCO 線材のジュール発熱は境界条件で表現した[1]。

#### 3. 解析結果

想定した無誘導巻きソレノイド REBCO コイル(Fig. 1)のパラメータを Table 1 に示す。電源とコイルから成る簡単な直列回路を想定し、100 ms 間の過電流を模擬する。まず、 $J_c$  低下について3つのケースを想定し(63 mm×2.4 mm の範囲で25%定格  $J_c$  まで低下、63 mm×7.2 mm の範囲で75%定格  $J_c$  まで低下、63 mm×12 mm の範囲で85%定格  $J_c$  まで低下)、過電流が立ち上がる時の温度分布を解析した結果を Fig. 2 に示す。狭い範囲での大きな  $J_c$  低下は電流を周囲の正常部に転流させるため、 $J_c$  低下部の温度上昇が周囲より遅い。一方で、広い範囲の  $J_c$  低下は電流が転流しきれないため、温度上昇が周囲より激しく、ホットスポットになる可能性も高い。

次に、基板と銀保護層の厚さが過渡温度上昇と限流特性へ与える影響を考察した。基板厚さ(50  $\mu$ m, 75  $\mu$ m, 100  $\mu$ m)による限流特性への影響は低いが、基板が厚いほど線材の熱容量が大きくなるため、全体の温度上昇が緩やかになる。銀保護層として2~10  $\mu$ m で6つのケースを解析し、2  $\mu$ m

のケースでは明らかなホットスポット現象が見られ(Fig. 3(a))、3  $\mu$ m 以上になるとホットスポット現象が緩和されることがわかった。特に4  $\mu$ m のケースでは線材温度が概ね一様に上昇するため(Fig. 3(b))、発生抵抗が2  $\mu$ m の場合よりも高く、より優れた限流特性と温度安定性を示した。

Table 1 Specifications of simulation circuit and REBCO coil.

|                                   |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| Applied voltage                   | AC 500 V           |
| Coil diameter                     | 31.8 cm            |
| Number of turns for both windings | 5                  |
| Number of tapes per turn          | 1                  |
| Coil pitch                        | 1.35 cm            |
| Over current duration             | 100 ms             |
| REBCO tape                        | SuperPower SF12100 |
| Ag over-layer thickness           | 2 $\mu$ m          |
| Substrate thickness               | 100 $\mu$ m        |



Fig. 1 Structure and schematic diagram of nonintersecting type non-inductive winding type based REBCO coil.

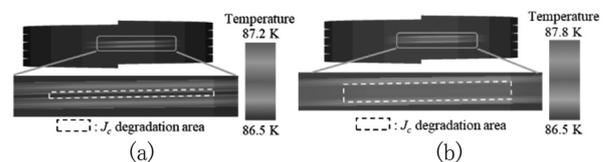


Fig. 2 Temperature distribution of the REBCO coil with a  $J_c$  degradation at the rising phase of current  $t = 0.725$  ms: (a) degrading to 25% of the rated  $J_c$  in 63 mm×2.4 mm; (b) degrading to 75% of the rated  $J_c$  in 63 mm×7.2 mm.

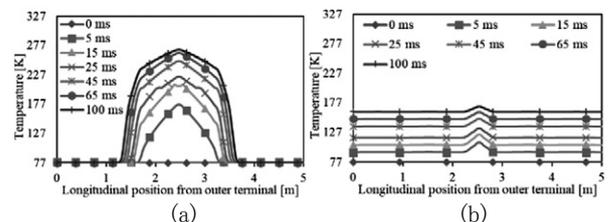


Fig. 3 Temperature distribution along the REBCO tape with (a) 2  $\mu$ m; (b) 4  $\mu$ m Ag over-layer in longitudinal direction, which starts from the outer terminal of the outer winding, at different times.

#### 参考文献

1. 銭可楨ら: 第 95 回 2017 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 1P-p06
2. Zermeno V M R and Grilli F, Supercond. Sci. Technol. 27 044025, 2014

## 異なるバルク超電導体配置による埋込磁石同期モータの電磁特性の比較

## Comparison of electromagnetic characteristics of IPM synchronous motors with different bulk superconductor arrangement

赤田 渉、寺尾 悠、大崎 博之(東大)

AKADA Wataru, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: akada.wataru17@ae.k.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

家電製品や輸送機器、産業用機械など我々の生活の様々な場面でモータが使用されている。中でも近年では高効率・高出力化を目的として埋込磁石同期モータ(IPMSM)が幅広く使用されている[1]。IPMSM は磁石によるマグネットトルクだけでなくロータ構造による磁気エネルギーの変化をリラクタンストルクとして利用できるという特徴がある。

本研究では電気飛行機をはじめとする輸送機器用の 1MW 級モータとして、永久磁石の代わりに着磁されたバルク超電導体を用いた IPMSM を提案する。ここでは実用的な IPMSM に採用されている複数のロータ構造において解析を行う。

## 2. バルク超電導体を用いた IPMSM

一般にバルク超電導体を臨界温度以下で外部磁界によって着磁することで強力な永久磁石として使用することができる。IPMSM の永久磁石をバルク超電導体に変えることで、まず高い磁束密度によるマグネットトルクの向上が見込める。また、超電導状態にあるバルク超電導体の磁気遮蔽効果によってモータの d 軸と q 軸の磁気抵抗の差が大きくなり、リラクタンストルクの向上にも期待できる。

## 3. バルク超電導体を用いた IPMSM の解析

ここでは実用的な IPMSM に採用されている 3 種類のロータ構造において、それぞれ永久磁石をバルク超電導体に変えた場合について JMAG-Designer を用いて解析し、比較検討を行う。解析対象とするロータ構造を Fig. 1 に示す。

解析に用いるモータの特性を Tab. 1 に記す。厚さはバルク超電導体の機械的強度を考慮して 5.0 mm に設定した。バルク超電導体は 1.0 T と 1.5 T の 2 通りに着磁して解析を行う。また、バルク超電導体の磁気遮蔽効果を模擬するため、バルク超電導体領域の比透磁率を 0.01 としてリラクタンストルクを求めた場合の解析も行。

Table 1 Motor Specifications

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| Magnet Thickness                 | 5.0 (mm)   |
| Number of Poles                  | 6          |
| Number of Stator Slots           | 36         |
| Stator Outer Diameter            | 115 (mm)   |
| Rotor Outer Diameter             | 74.2 (mm)  |
| Stator Core Thickness            | 40 (mm)    |
| Rotational Speed                 | 1800 (rpm) |
| Rated Current                    | 14.1 (A)   |
| Number of Armature Winding Turns | 20         |

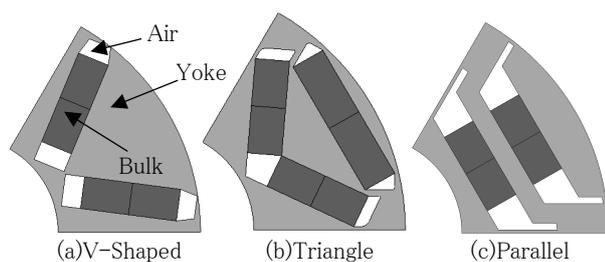


Fig. 1 Three types of rotor used in IPMSM

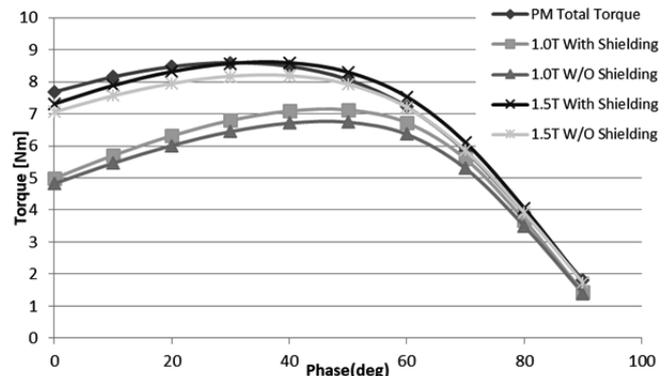


Fig. 2 Result of simulation for Type (a)

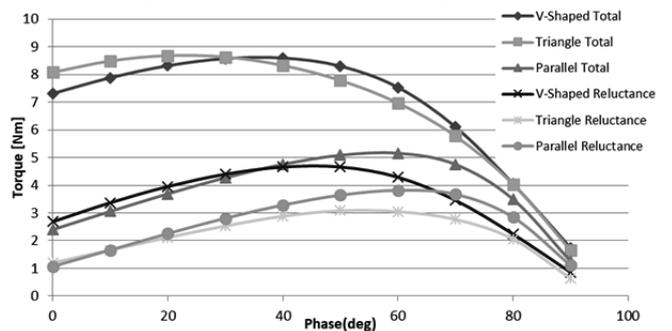


Fig. 3 Comparison of IPMSMs with three rotor types

## 4. 解析結果

構造(a)において永久磁石を用いた場合とバルク超電導体を用いた場合とで総トルクを比較した解析結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示す通り、バルク超電導体を高い磁場で着磁するほど総トルクが高くなるのがわかる。また、バルク超電導体の磁気遮蔽の影響を考慮することでリラクタンストルクが 0.4 Nm ほど向上した。

次に 3 種類のロータ構造においてバルク超電導体を 1.5 T で着磁した時、総トルクと磁気遮蔽を考慮したリラクタンストルクを比較した解析結果を Fig. 3 に示す。V 字型でリラクタンストルクが最も高くなっている。

## 5. まとめ

永久磁石の代わりにバルク超電導体を用いた IPMSM を提案し、実用的な IPMSM に採用されている 3 つのロータ構造において解析を行い、比較検討した。その結果、バルク超電導体の磁気遮蔽効果を考慮することでリラクタンストルクが向上すること、そしてロータ形状によってリラクタンストルクが大きく異なることがわかった。バルク超電導体を用いた IPMSM の実現には冷却機構、そして着磁方法を考える必要がある。今後はそれらを踏まえた上で永久磁石の場合よりも出力密度が高くなるロータ構造やモータモデルを模索していきたい。

## 参考文献

[1] Y. Shimizu, et al: Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems (2017) pp. 429-434

# 電気推進式航空旅客機用の 1MW 級全超電導モータに関する 理論解析式ベースの電磁設計

## Electromagnetic Design Based on Theoretical Analysis Formula of 1MW Class Fully Superconducting Motors for Electric Propulsion Aircrafts

勢田 晃久, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大); 小島 孝之, 岡井 敬一 (JAXA)

SETA Akihisa, TERAOKA Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); KOJIMA Takayuki, OKAI Keiichi (JAXA)

E-mail: seta\_akihsa@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

近年、化石燃料の高騰・環境面への配慮から電気自動車をはじめ輸送機器の電気推進化が活発である。しかしながら航空旅客機に関しては、他の輸送機器と比較して重量制限が厳しいため、実用化の目途が立っていないのが現状である。しかし、高い電流密度を持つ超電導材料をモータに適用してモータの出力密度を上げることで、全電動化実現の可能性はある。本研究では、全超電導モータの電磁設計を理論解析式ベースで行い、全超電導モータの出力密度及び効率のパラメータ依存性について考察を行ったので報告する。

### 2. 全超電導モータの解析方法

本研究では、理論解析式を用いることよってモータの電磁設計を行った。電磁設計の理論解析式として以下基本的なモータの出力の式及び、参考文献[1]を用いた。

$$P_M = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \times k_w \times B_s \times A_s \times D_a^2 \times l_{eff} \times \frac{N_{rot}}{60} \quad (1)$$

ただし、 $P_M$  (W): モータ出力、 $k_w$ : 巻線係数(≒ 1)、 $B_s$  (T): 磁気装荷(振幅値)、 $A_s$  (A/m): 比電気装荷、 $D_a$  (m): 電機子コイル部の平均直径、 $l_{eff}$  (m): 有効長、 $N_{rot}$  (rpm): 回転数(= 5000 rpm)である。今回解析する全超電導モータの解析モデルを Fig. 1 に示す。電磁設計の際には、線材の厚みを考慮して電機子巻線部最外直径  $D$  [mm] として計算を行った。全超電導モータは、界磁側に RE 系の YBCO 超電導線材、電機子側には、 $MgB_2$  線材を使用することを想定しており、出力は 1 MW 級で考える。界磁コイルが電機子コイル部分に作り出す磁束密度は、正弦波分布を仮定した。出力密度の導出は、出力 1 [MW] と理論解析式より導出したモータ重量(Back Yoke 重量、 $MgB_2$  重量及びその他の重量)より導出した。

### 3. 解析結果

Fig. 2 と Fig. 3 に航空旅客機用の全超電導モータの出力密度と効率が、界磁が作る磁界の磁束密度及び電機子巻線部直径  $D$  にどのように依存するかを解析した結果を示す。磁界が大きくなるとともに、また  $D$  が小さくなるほど、出力密度が上昇する。 $D=300$  [mm]、磁束密度 1 [T] で出力密度 18.1 [kW/kg] が得られた。一方、効率は磁界が大きくなると、つまり出力密度が上がると低下している。Fig. 2 において最大出力密度を示した  $D=300$  [mm]、磁束密度 1 [T] の条件では、効率 94.6 [%] を示した。これらの結果は、界磁が強くなることによってモータの重量を小さくすることが可能であるが、電機子巻線である  $MgB_2$  線材が受ける磁束密度が増加することによって交流損失が増加し、効率の低下に繋がるのがわかった。また、電機子巻線部最外直径が増加することによって  $MgB_2$  線材の重量が増加する。つまり、直径  $D$  の増加によって出力密度及び効率が下がる。

### 4. まとめと今後の課題

電気推進式航空旅客機の全超電導モータの電磁設計を理論解析式ベースで行った。全超電導モータのパラメータの関係性を調べ、さらに出力密度を増加させるために全超電導モータの重量の大半を占める Back yoke の厚みを減らす解析を行った。今後は、Back yoke の厚みを減らした影響について調査する。

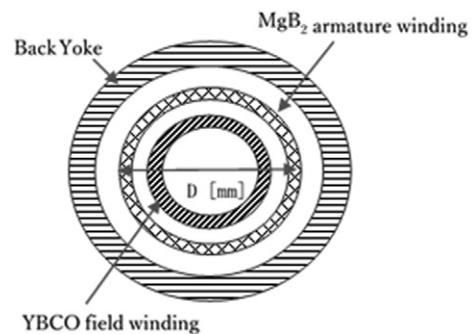


Fig.1 Analysis model of a fully superconducting motor.

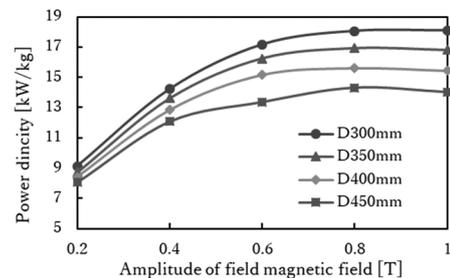


Fig.2 Dependence of motor power density on magnetic flux density and armature winding diameter  $D$ .

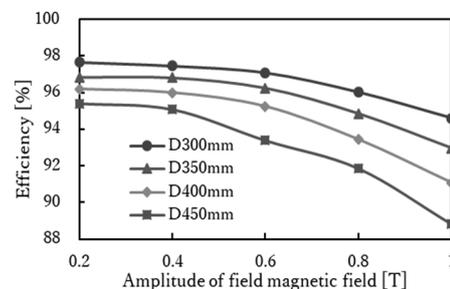


Fig.3 Dependence of motor efficiency on a magnetic flux density and armature winding diameter  $D$ .

### 参考文献

1. S. S. Kalsi, "Applications of high temperature superconductors to electric power equipment," IEEE PRESS (2011).

# 固定子側の損失と冷却も考慮した 全超電導回転機の低圧ガスによる回転子冷却の解析

## Analysis of rotor cooling by low pressure gas of fully superconducting rotating machines considering stator loss and cooling

加藤 幹人, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)

KATO Mikito, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: kato.mikito18@ae.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

全超電導回転機は機器の小型軽量化が可能であり、航空機用モータや風力発電機などへの応用が期待されている。しかし、固定子と回転子それぞれを冷却する必要があり、特に回転子内部への冷媒供給流路の設計では構造の複雑化が問題となる。また、固定子側の超電導線材では交流損失が生じる。本講演では構造を簡略化できるギャップ中の低圧ガスを用いた回転子冷却[1]について、固定子側の損失と冷却も含めた熱解析を行い、考察した結果を報告する。

### 2. 解析方法

本研究では回転数 3600 rpm、液体水素冷却 (20 K) の全超電導回転機 (Table 1) について解析を行った。周方向は一樣であると近似した軸対称モデル (Fig. 1) を用いて有限要素法解析ソフト COMSOL により定常状態熱解析を行った。液体水素部は右端の境界温度を 20 K とし、電機子巻線との境界には強制対流の熱伝達の実験式 (Dittus-Boelter の式) より熱伝達係数を与えた。電機子巻線部には交流損失を一樣な発熱として設定した。エアギャップにはガス He の熱伝導率を温度依存性を考慮して与え、回転子および電機子巻線との境界には軸方向流れがない場合の回転二重円筒間の熱伝達の実験式 [2] より熱伝達係数を与えた。回転子両端に一樣には侵入熱を与える。熱解析では侵入熱を変数とし、回転子温度が 50 K を超えない最大の侵入熱 (許容侵入熱) を算出し、風損や侵入熱の推定値と比較して回転子冷却が可能かを検討する。また、交流損失を変化させて、冷却への影響を調べた。

### 3. 解析結果

風損を考慮すると、エアギャップ中のガス He の圧力は 100 Pa 以下である必要がある。Fig. 2 に 10 Pa のときの許容侵入熱と液体水素の流速の関係を示す。交流損失は 5~20 kW とした。

Table 1 Parameters of analytical model

|   |      |
|---|------|
| Motor output power [MW]                 | 10   |
| Rotational speed [rpm]                  | 3600 |
| Rotor radius [mm]                       | 279  |
| Air gap [mm]                            | 20   |
| Thickness of armature winding area [mm] | 6    |
| Axial length [mm]                       | 600  |

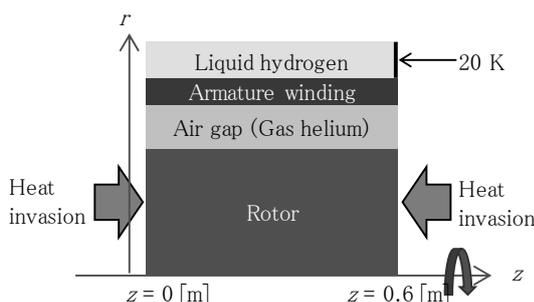


Fig. 1 2D axisymmetric model

Fig. 2 より交流損失が 20 kW のときでも 5 m/s 以上の流速であれば侵入熱の推定値と風損の合計よりも許容侵入熱のほうが大きいので、回転子冷却が可能であることがわかる。

次に電機子巻線の冷却の確認のため、径方向の温度分布を調べた。Fig. 3 に回転子両端からの侵入熱を 15 W、電機子巻線の交流損失を 5 kW にしたときの径方向温度分布について液体水素の流速による違いを示す。Fig. 3 より流速が大きくなるほど熱伝達が促進されるため、電機子巻線の温度が下がっていることがわかる。

### 4. まとめ

本研究では、固定子側の交流損失と液体水素による冷却も考慮した熱解析を行い、低圧ガスによる回転子冷却の可能性について検討した。算出した許容侵入熱と径方向温度分布から、液体水素の流速を大きくすることで、検討した冷却方法により、全超電導回転機の回転子および電機子巻線の冷却が可能となることを明らかにした。

### 参考文献

1. S. Tanaka, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.94. (2017) p.43
2. M. Fenot, et al.: International Journal of Thermal Sciences, Vol.50 (2011) pp.1138-1155

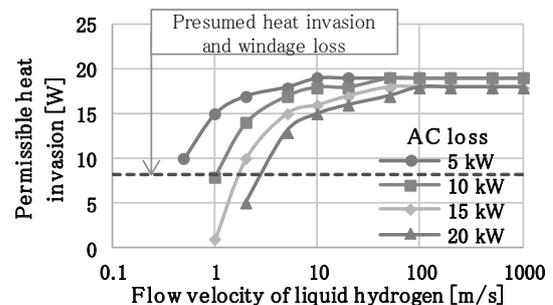


Fig. 2 Relationship between flow velocity of liquid hydrogen and permissible heat invasion

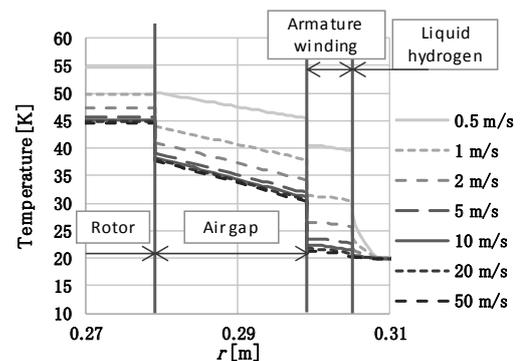


Fig. 3 Difference of radial temperature distribution on flow velocity of liquid hydrogen

# 超電導フライホイールの開発① ー米倉山実証機 2018 春ー

## Development of HTS flywheel energy storage system demonstration machine in 2018 spring Komekurayama

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

YAMASHITA Tomohisa, NAGASHIMA Ken, OGATA Masafumi (RTRI); SHIMIZU Hideki, SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPRO); MUKOYAMA Shin-ichi (Furukawa Electric); MIYAZAKI Kazuya (Yamanashi Pref.)  
E-mail: yamashita.tomohisa.91@rtri.or.jp

### 1. はじめに

山梨県米倉山太陽光発電所の電力貯蔵技術研究サイトでは数年後の商用機上市にむけ「超電導フライホイール蓄電システム(FESS)」の開発として NEDO 助成事業で開発した米倉山実証機を有効活用する形で鋼製フライホイールを用いた実証実験を計画的に進めている[1]。昨年 10 月の回転数  $3,000\text{min}^{-1}$  での安定回転確認に続き,  $2,100\text{min}^{-1} \leftrightarrow 3,000\text{min}^{-1}$  の実運用の繰り返し充放電を日の出から日没までの長時間に渡る連続運転でも超電導磁気軸受の温度上昇が小さく実用上問題ないこと等, 将来の自動(無人)運転化や商用機の設計に役立つ有益な知見も数多く得られている。この半年間に検証された米倉山実証機の主な成果を報告する。

### 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  $\omega$  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。

### 3. 米倉山実証機の有効活用と開発検証課題

Fig.2 に米倉山実証機構成を, Table 1 に仕様を各々示す。<おもな開発検証課題>

- 1) 太陽光発電電力の安定化, 連続運転特性検証
- 2) 超電導磁気軸受(SMB)の連続運転・安定性検証
- 3) 制御型磁気軸受(AMB)の信頼性検証
- 4) 低損失真空シールと大径回転軸(複合軸)の信頼性検証

### 4. 連続運転試験での安定浮上実証および今後の展開

Fig.3 に米倉山実証機の高速回転試験時の SMB 各部の温度の時間変化特性を示す。

グラフより質量  $4,000\text{kg}$  のフライホイール[スラスト荷重: $39.2\text{kN}$ ]を日の出から日没まで約 12 時間に渡り  $2,100\text{min}^{-1} \leftrightarrow 3,000\text{min}^{-1}$  の繰り返し充放電試験時のスラスト荷重を負担する SMB のコイル温度の温度上昇は  $0.3\text{K}$  以下と小さく実用上問題になる発熱もほとんどないことを実証することができた。今回の長時間運転試験を含め SMB が延べ 7,800 時間超も非接触安定浮上を維持し続けられことは, SMB の部分冷却法の妥当性を裏付ける知見が得られたと考えている。

また, 連続運転前後の米倉山実証機の  $3,000\text{min}^{-1}$  での回転軸の振動振幅が  $15\mu\text{m}$  で必要トルクも  $24\text{N}\cdot\text{m}$  と変化なく, 新規技術の AMB ならびに回転軸を大径化した磁性流体真空シールの回転抵抗の低さを示す知見が得られたと考える。

今春, 鉄道総研と山梨県は, 鉄道用 FESS の技術開発に関する基本合意書を JR 東日本と締結した[2]。

今後は米倉山実証機を有効活用した開発成果をベースに鉄道用 FESS の開発に注力, 推進していく。

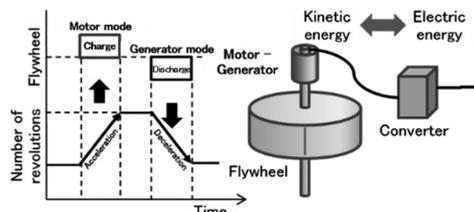


Fig. 1 Principle of operation for FESS.

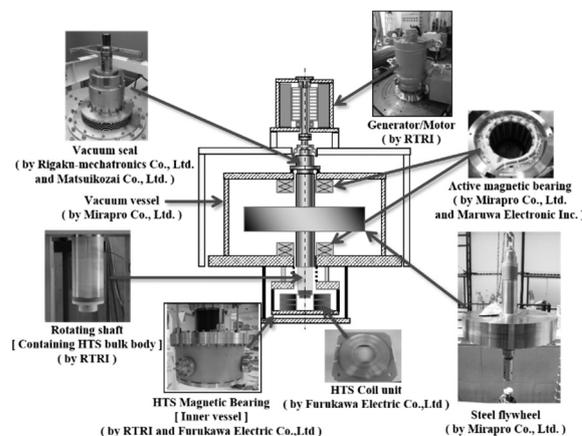


Fig. 2 Configuration of FESS demonstration machine.

Table 1 Specifications of FESS.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Output power               | 300 kW  |
| Storage capacity           | 10 kWh  |
| Maximum operating speed    | $3,000\text{min}^{-1}$                                |
| Flywheel material          | Steel (CrMoNi alloy)                                  |
| Flywheel mass / dimensions | 4,000 kg /<br>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                |

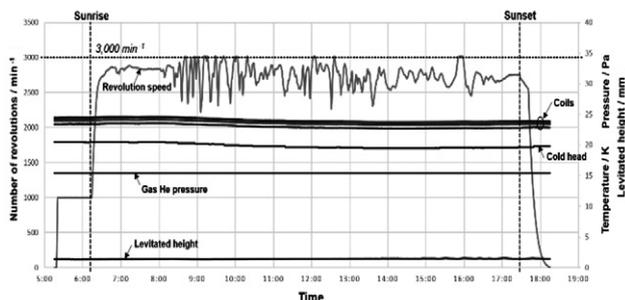


Fig. 3 Stability of SMB for the long-term revolution test from sunrise to sunset.

### 参考文献

1. H. Shimizu, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.165
2. 例えば <http://www.jreast.co.jp/press/2017/20180320.pdf>

## 超電導フライホイールの開発③ -大荷重対応超電導磁気軸受-

### Development of a Superconducting Magnetic Bearing Able to support Large Loads in a Superconducting Flywheel Energy Storage System

宮崎 佳樹, 水野 克俊, 山下 知久 (鉄道総研); 中尾 健吾, 坂本 久樹 (古河電工);  
澤村 秀次, 小澤 孝仁 (ミラプロ); 松井 義, 土肥 哲也 (松井鋼材); 浅野 幸雄, 風間 竜也 (三星工業)  
MIYAZAKI Yoshiki, MIZUNO Katsutoshi, YAMASHITA Tomohisa (RTRI),  
NAKAO Kengo, SAKAMOTO Hisaki (Furukawa Electric Co., Ltd.), SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPRO),  
MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya (Matsukoizai Co., Ltd.), ASANO Yukio, KAZAMA Tatsuya (MITSUBOSHI),  
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ている[1]。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、浮上力試験[2,3]ならびに、断熱荷重支持材信頼性評価試験を実施した。

#### 2. SMB 内槽設計

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しており、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。

今回内槽容器の構造簡素化を目的とした新設計を行った。従来の内槽容器と新設計容器の比較を Fig. 2 に示す。これまでの内槽設計では、内槽容器底面板と上面板を直結する 4 本の荷重伝達部材を用いて容器を補強していた。新設計では、内槽底面板を厚肉化することで、剛性を保ったまま内槽容器内の荷重伝達部材を省略し、構造を簡素化することとした。

#### 3. 断熱荷重支持材繰返し引張荷重試験

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) を採用している。147 kN 浮上時に断熱荷重支持材が受け持つ反力は 36.8 kN/本となるが、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している[4]。

断熱荷重支持材について、期待寿命 30 年相当の耐久性を評価するため、常温で 49 kN×150 サイクル (1 年に 1 回の昇温メンテナンスとして、30 年相当の 5 倍のサイクル数) の引張試験を実施した。FRP は低温で剛性が増加することから、常温試験は安全側の評価法であると考えている。Fig. 3 に 1 サイクル、100 サイクル、150 サイクルの応力-歪線図を示す。AFRP の引張弾性率と繊維充填率から求めた理論弾性率は 87 GPa 程度である。一方、応力-歪線図から求めた弾性率は 77.5 ~ 83 GPa で理論値の 90~95%であった。各サイクルの応答は線形でサイクル毎の変化もみられず、150 回程度の繰返し引張荷重での劣化はなかった。

今後は、SMB についても実運用条件を想定した繰返し励消磁、連続浮上試験などを実施していく予定である。

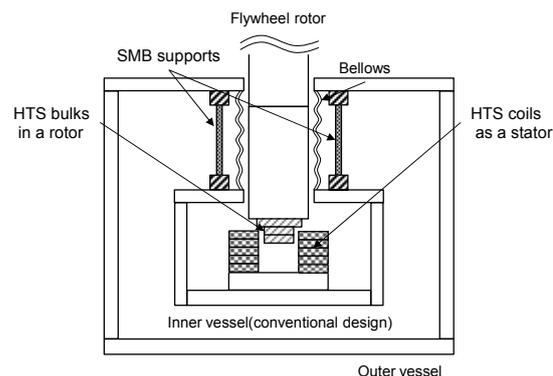


Fig. 1 Schematic of experimental set up for the SMB.

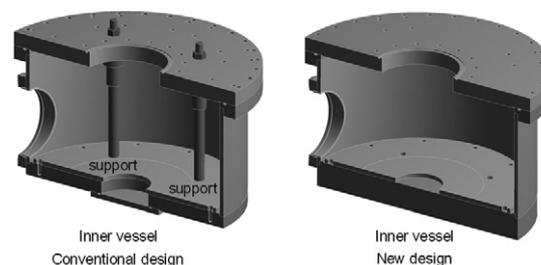


Fig. 2 Comparison of the conventional and new SMB inner vessel.

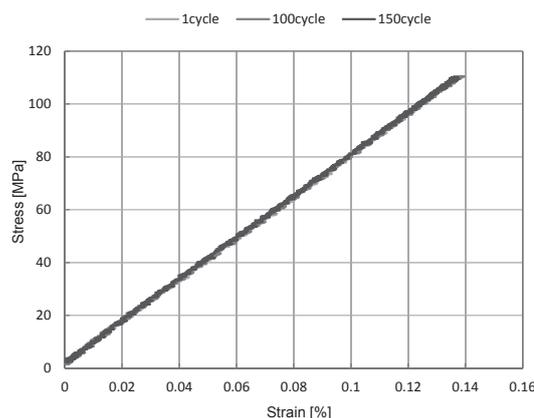


Fig. 3 Experimental stress-strain diagram of the SMB support.

#### 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. 95 (2017) p. 166.
- [3] K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p. 167.
- [4] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p. 168.

# 超電導フライホイールの開発② — 大口径高速回転磁性流体シール —

## Development of large diameter high speed rotary magnetic fluid seal for superconducting flywheel energy storage system

嶋崎 靖幸, 和田 高広, 小林 徹(リガク); 松井 義, 土肥 哲也(松井鋼材);  
清水 秀樹, 澤村 秀次(ミラプロ); 山下 知久, 小方 正文(鉄道総研)

SHIMAZAKI Yasuyuki, WADA Takahiro, KOBAYASHI Toru (RIGAKU); MATSUI Yoshi, DOHI Tetuya (Matsuikozai);  
SHIMIZU Hideki, SAWAMURA Hidetsugu (MIRAPRO); YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi (RTRI)  
E-mail: simazaki@rigaku.co.jp

### 1. はじめに

山梨県米倉山太陽光発電所の電力貯蔵技術研究サイトでは数年後の商用機上市にむけ「超電導フライホイール蓄電システム(FESS)の開発として NEDO 助成事業で開発した米倉山実証実験を有効活用する形で鋼製フライホイールを用いた実証実験を計画的に進めている[1]。今回、超電導フライホイール向けの高速回転磁性流体シールにおいて、回転安定化のため軸径をφ100 mmからφ200 mmに大径化すると共に、高剛性化、低損失化した新しい大口径高速回転磁性流体シールを開発したので、その概要を報告する。

### 2. 磁性流体シール(MFS)

磁性流体とは磁性に反応する酸化鉄の超微粒子に界面活性剤を混ぜ合わせコロイド状にし、分散させた機能性流体の一種である。Fig.1 に磁性流体を使った MFS の構造を示す。永久磁石と透磁率の高い極磁片、回転軸によって構成された磁気回路の数十ミクロンの微小間隙に磁性流体を注入すると、磁気回路に応じた液体の Oリングが形成されて、非接触で空気をシールできる回転シールとなる。このシールの耐圧は1段当たり 0.2 気圧~0.4 気圧のため複数段を持つ多段シールとして 1 気圧を保持可能な真空シールを設計できる。

### 3. 高速回転用新磁性流体と大口径 MFS 仕様、構成

当社従来の MFS は大型 X 線回転ターゲット向けとして周速が 20m/s が限界とされていた。これ以上の周速(回転)では磁性流体の攪拌熱によって磁性流体自身が熱劣化、ベアリングにも熱影響を与えて、短時間に寿命を迎えてしまう。

そこで今回低損失化と安定化のため、低粘度で耐熱性が高い磁性流体を新たに開発し米倉山用の MFS へ採用した。

Fig.2 に FESS に組み込まれた今回新たに設計した大口径 MFS を、Table1 に仕様および構成について示す。

今回は 30m/s 超の高周速であるため磁性流体以外にもベアリングや冷却機構も強化し、回転軸には松井鋼材製の異種金属複合軸[2]を採用し冷却効率を高めた設計とした。

### 4. 新磁性流体を使用した熱解析と温度試験結果の比較

MFS の寿命は磁性流体、ベアリングの温度によって大きく左右される。MFS の温度を Table2 の条件によって解析した結果を Fig3 に示す。解析結果から MFS の温度測定ポイントは MFS 部:+1°C, ベアリング部:+20°Cが想定された。

Fig.4 に FESS 実証機の 1 日の充放電試験の温度の時間変化特性を示す。グラフより約 12 時間に渡り 2,100min<sup>-1</sup>⇔ 3,000min<sup>-1</sup> の繰り返し充放電試験の結果、温度上昇は水温から MFS 部:+7°C, ベアリング部:+20°Cであった。

寿命が心配される温度は MFS 部:+20°C, ベアリング部:+30°Cであり、十分少ない範囲にある。解析結果との差異は MFS とベアリングの発熱量の設定の乖離と考えられる。今後、設定を変更し再度解析を実施する。

### 5. 今後の展開

今後は、今回得られた知見を元に、温度解析方法の精査を行い、鉄道用超電導フライホイール蓄電システム向け MFS の設計へフィードバックし、開発を推進していく。

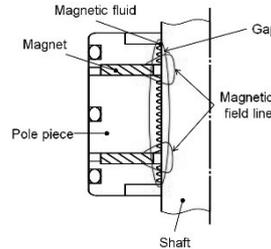


Fig. 1 Basic structure of Magnetic fluid seal. Fig.2 Magnetic fluid seal on FESS

Table1 Specification of Magnetic Fluid Seal.

|                 |                                  |
|-----------------|----------------------------------|
| Max speed       | 3,000min <sup>-1</sup> (31.4m/s) |
| Pressure        | 10Pa                             |
| Shaft dia       | φ 200 mm                         |
| Shaft Materials | Multi-Material-Structure         |
| Bearing         | Ceramic Ball bearings            |

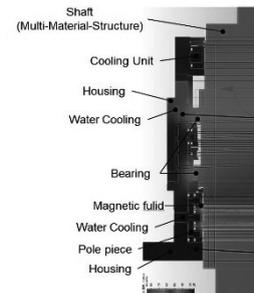


Fig.3 Structure of MFS and thermal analysis.

Table 2 Analysis Conditions of thermal analysis.

|                   |   |
|-------------------|---|
| Heat Source       | Bearing 0.8[kW]<br>Magnetic fluid 1.16[kW]                          |
| Water temperature | 25[°C]  |
| Shaft Materials   | Multi-Material-Structure<br>Outer SUS304<br>Inner Cu<br>Core SUS304 |
| Other Materials   | SUS304  |

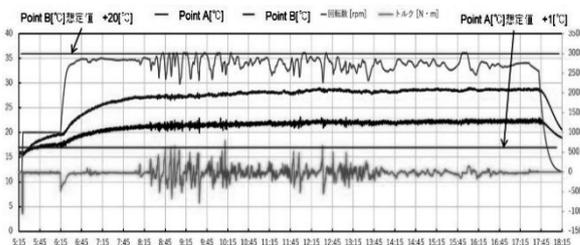


Fig. 4 Stability of MFS for long-term test from sunrise to sunset.

### 参考文献

- H.Shimizu, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.94 (2017) P165
- 例えば  
<http://www.matsuikozai.com/mms/pdf/20160825-01.pdf>