

# 室温磁気冷凍機における磁性材料特性が冷凍性能に及ぼす影響

## Influence of Magnetic Material Characteristics on the Cooling Performance of Room Temperature Magnetic Refrigerator

和田 篤史, 岡村 哲至(東工大); 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力); 伊藤 孝治(蔵王精機)  
 WADA Atsushi, OKAMURA Tetsuji(Tokyo Tech);  
 HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.); ITO Kouji (Zaouseiki Co.)  
 E-mail: wada.a.ab@m.titech.ac.jp, tokamura@es.titech.ac.jp

### 1. 緒言

室温磁気冷凍機に使用される磁性材料には、Gd系・La系など様々な種類があり、現在も開発が進んでいる。一般的に Fig.1 に示す単位質量当たりの磁気エントロピー変化曲線が広く高い程性能が高い材料と言えるが、磁気エントロピー変化量が同程度な材料において、その比熱などの物性値の効果は不明確な部分が多い。よって、同一の磁気エントロピー変化曲線を有し、比熱と密度が異なる材料を仮定し、材料の物性値が冷凍能力に及ぼす影響を数値計算によって調べる。

### 2. 数値計算方法

本装置は、Fig. 2 に示すように磁性材料が充填された4つのダクトから構成されており、2つのダクトが対となって磁場変化が生じる構造になっている。今回、Fig. 1 の△プロットで示す性能曲線を用い、高温端温度 23°C、流量 5l/min 一定条件において、Table1 に示す磁性材料の物性値を変化させて磁性材料と冷媒の熱交換に関する1次元熱計算を行った。

### 3. 計算結果

Fig. 3 に低温端温度と冷凍能力の関係を示す。○と□・△と×で示される密度の違いにおいて密度が大きい方が良い結果を得た。これは、密度が大きいと単位体積当たりの充填質量が得られるため、より冷媒に多くの冷熱を供給できるためである。また、○と△・□と×で示される比熱の違いでは、比熱が小さい方が低温端温度、冷凍能力ともに向上した。これは、比熱が小さい方が、磁性材料と冷媒の温度差が大きく、短時間で多く熱交換ができるためである。

また、磁気冷凍機は単位時間当たりの熱量の発生回数が多い方が冷凍能力は高まることから、サイクルタイムを短くして運転することが有効であると考えられる。Fig. 4 に比熱を変化させた場合の、低温端温度  $T_L=7^\circ\text{C}$  (温度差  $\Delta T=16^\circ\text{C}$ ) における、サイクルタイムと冷凍能力の関係を示す。このように、サイクルタイムが短い方がより顕著に比熱の違いによる冷凍能力の差が確認できる。

### 4. 結言

同一の磁気エントロピー曲線を用い、磁性の物性値の影響を調査した。その結果、冷凍性能をより高めるためには、密度が大きく、比熱の小さな磁性材料を充填し、サイクルタイムを短く運転することが有効であることがわかった。

### 謝辞

本研究は、「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」に貢献することを目的とするエネルギーイノベーションプログラムの一環である「省エネルギー革新技術開発事業」として、独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

Table1 Physical properties

	Gd-alloy	La-alloy
density [kg/m <sup>3</sup> ]	7895	7200
specific heat capacity [J/(kg·K)]	250	470

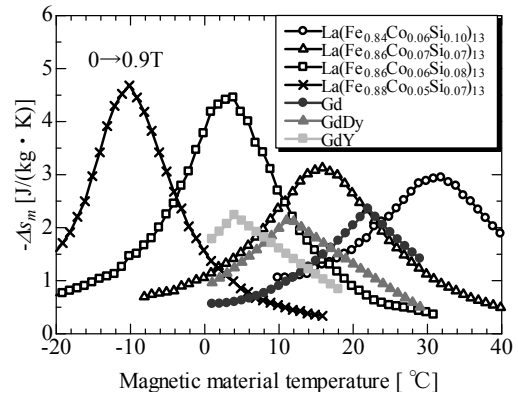


Fig. 1 Magnetic entropy change

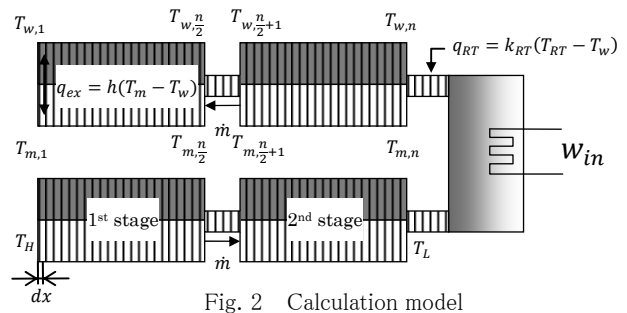


Fig. 2 Calculation model

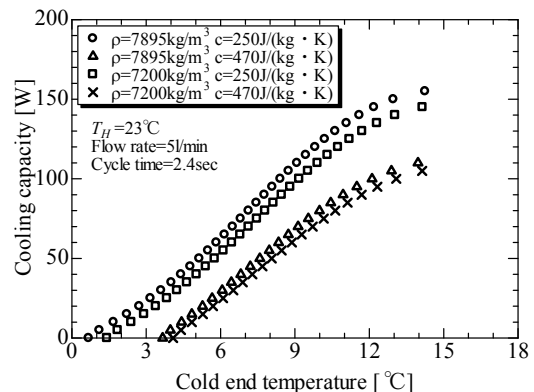


Fig. 3 Influence of density and specific heat capacity

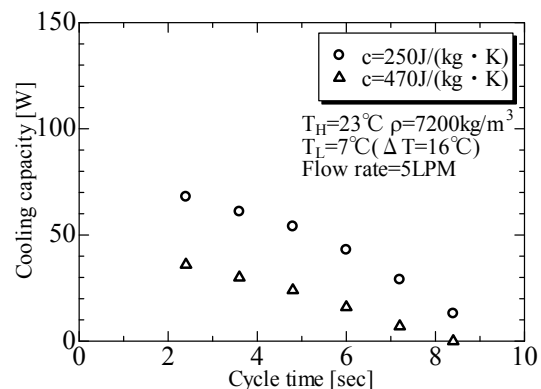


Fig. 4 Relation between cycle time and cooling capacity

## 球状 GdN の合成と AMR サイクルにおける性能評価 Evaluation of AMR cycle with spherical GdN

平山悠介(阪大), 岡田 裕之(阪大), 中川 貴(阪大), 山本 孝夫(阪大), 楠瀬 尚史(阪大),  
入江 年雄(三徳), 中村 英次(三徳), 沼澤 健則(NIMS), 松本 宏一(金沢大)

Yusuke Hirayama(Osaka Univ.), Takashi Nakagawa(Osaka Univ.), Takao Yamamoto(Osaka Univ.),  
Takafumi Kusunose (Osaka Univ.), Toshio Irie (Santoku), Eiji Nakamura (SANTOKU),  
Takenori Numazawa(NIMS), Koichi Matsumoto(Kanazawa Univ.)

E-mail : y-hirayama@mit.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

次世代のクリーンエネルギーとしての水素エネルギーに期待が寄せられている。水素社会の実現に解決すべき課題として、水素の輸送・貯蔵形態の最適化法がある。コンパクトに輸送・貯蔵するには質量水素密度、体積水素密度がともに最大の液体水素が有利である。しかし、水素を液化するには 20K まで冷やす必要があり、低温で原理的に効率が高い磁気冷凍が注目されている。

我々は、磁気冷凍材料として希土類窒化物を研究してきた。希土類窒化物のキュリー温度は約 5~65 K に分布し、窒素液化温度以下で有望と報告された希土類の金属間化合物に比べ大きな  $\Delta S$  を持つ。また、二元系希土類の窒化物では  $\Delta S$  の最大値とそれが得られる温度が、両者の間に制御できることを報告してきた<sup>1</sup>。

しかしこれまで、液体窒素温度付近における磁気冷凍試験を実施した報告は見あたらない。今回我々は、希土類窒化物の中で最もキュリー点が高い GdN ( $T_c = 65$  K) による冷凍試験を行った。

### 2. 実験

金属 Gd 球 ( $\phi: 0.85 \sim 1.00$  mm, 99.9%) を出発材料とし、HIP 装置で 1600°C、200Mpa の  $N_2$  で窒化した。X 線回折で生成相を調べ、幾つかの磁場強度 (0, 1.2, 2.0, 3.8, 4.0, 5.0, 7.0 T) のもとで比熱を測定した。比熱曲線から  $S-T$  曲線を求め  $\Delta S$ 、 $\Delta T$  を評価した。この球材料を物質材料研究機構に設置された磁気冷凍機に装荷し冷凍試験を実施した。この装置では磁性体とガスを独立で動かすことで AMR サイクルを実現する。1 サイクルの所要時間は 8 秒で、吸熱・消磁・排熱・励磁に各 2 秒が割り当てられる。

### 3. 結果

GdN 球 (Fig.1) は NaCl 構造の窒化物単相であり、磁化測定により完全窒化を確認した。無磁場比熱は磁気転移点付近で顕著なピークを持ち、磁場が強くなるにつれ、そのピークは小さくなった (Fig.2)。Fig.3 に冷凍試験の結果を示す。サイクル始動後、低温側と高温側の温度挙動が分岐し、100 秒後には両方の温度差が一定となる定常状態となり、低温端と高温端の最大温度差約 5K を得た。このように GdN によりこの温度領域で初めて磁気冷凍サイクルの作動が実証できた。

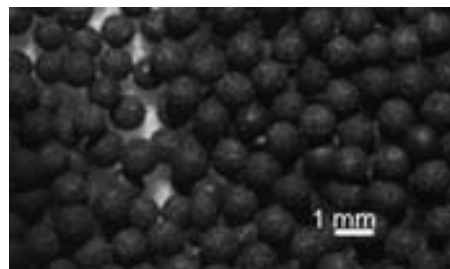


Fig. 1 Photograph of spherical GdN

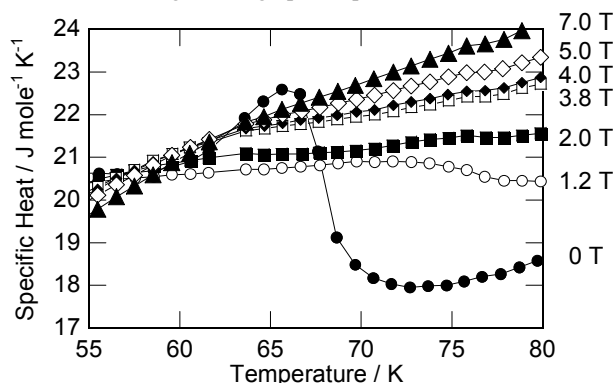


Fig. 2 Specific heats of spherical GdN as a function of temperature at various field.

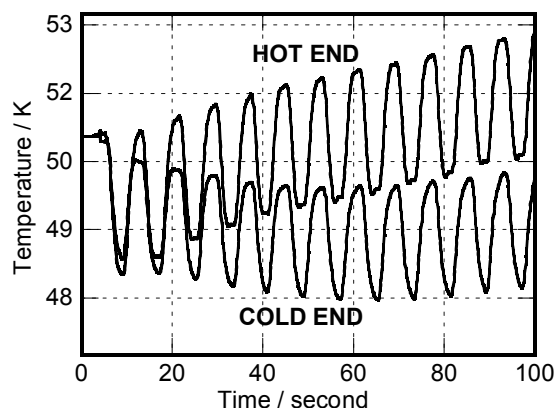


Fig. 3 Behavior of temperatures at HOT END and COLD END

### 参考文献

1. Y. Hirayama, et al., IEEE Transactions on Magnetics (2008), 44(11, Pt. 1), 2997-3000.

## 極低温用薄膜温度計の開発

### Development of Temperature-Sensor for Cryogenic region

四谷 任、田中峰雄(大阪府大21機構);佐藤和郎、笈 芳治(産技研);石田武和(大阪府大工院)

YOTSUYA Tsutomu, TANAKA Mineo (OPU-21th C); SATOH Kazuo, KAKEHI Yoshiharu (TRI), ISHIDA Takekazu(OPU)

E-mail: yotsuya@21c.osakafu-u.ac.jp

#### 1. はじめに

極低温用温度計に求められる機能は、小型で低熱容量、早い応答速度、温度サイクルに対する再現性、小さな磁気抵抗効果などである。また室温から1K以下までの測温領域を持つことが望ましい。このような要求を満足するものとしてZrN (Cernox) 温度計がすでに市販されている。しかし、Cernoxは温度計としての特性は優れているが、Zr-N-Oの三元系であり生産の再現性に乏しい。温度計に作成後に個々に特性を校正しグルーピングしていると云われている。

同じ特性を持つ温度計を作製するためには二元系の薄膜タイプで抵抗型が望ましい。筆者らは窒化クロム(Cr-N)が極低温用温度計としてのポテンシャルを持つことをみいだした。様々な作成条件でCr-N薄膜を作製し、室温から1.6KまでのR-T曲線、磁気抵抗効果などを測定したので報告する。

#### 2. Cr-N 薄膜の作製と特性評価

平行平板型のrf-マグネトロンスパッタ装置(13.56MHz)を用いてCr-N薄膜を作製した。ターゲットは金属Cr(99.99%)を用いN<sub>2</sub>ガスをArで希釈し(0~100%希釈) total 1Paで成膜した。基板はSiO<sub>2</sub>付きSiウエハー、石英を使用した。

Cr-Nの構造やRT特性は成膜条件に強く依存するので、rf-パワー、基板温度、窒素分圧などを制御して成膜した。作製した薄膜の構造はX線回折で構造解析をおこなった。また膜組成はCr<sub>2</sub>Nを標準にしてEDXで行った。またliq.Heに浸漬することで室温から1.6KまでのRT特性を測定した。

Cr-Nは組成のことなるCr<sub>2</sub>NとCrNの存在が知られており組成の違いがR-T特性に影響すると考えられる。成膜の基礎特性を把握するため、スパッタガス圧を1Pa, rf-power200Wに固定し、Arと窒素の比率をかえて成膜した。100%Arの場合pureな金属Cr薄膜が形成され $\rho \sim 10^{-5} \Omega \text{cm}$ であり温度の低下とともに電気抵抗も減少した。N<sub>2</sub>濃度を5%以上にすると急速に電気抵抗は増加し、

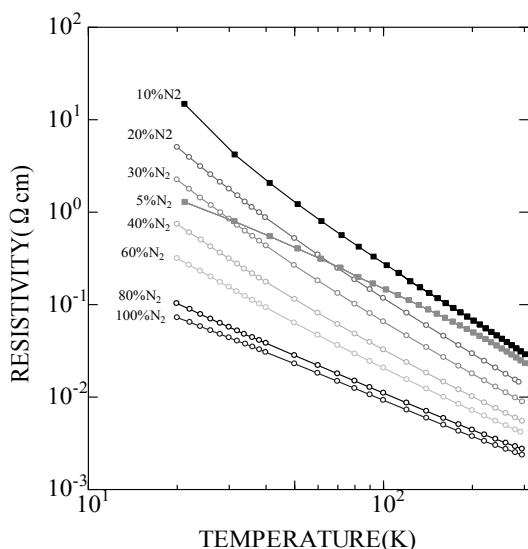


Fig.1 Temperature dependence of the Cr-N films. The films were deposited under various N<sub>2</sub> partial pressures.

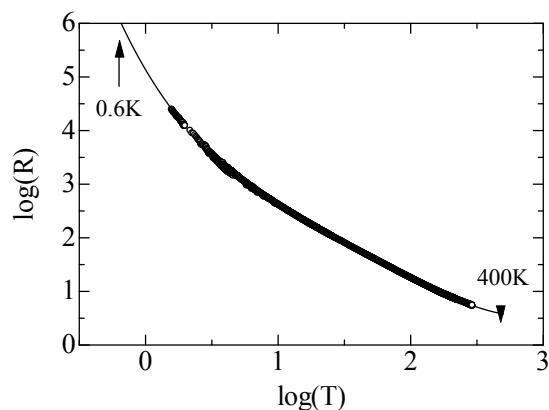


Fig.2 Resistance change as a function of temperature. The Cr-N sensor can be applied from 0.6 to 400K.

$\rho \sim 10^{-2} \Omega \text{cm}$ 以上になり、negativeなTCRを示すようになる。更に窒素分圧をあげて成膜すると徐々に抵抗、TCRが下がり80%を越えると $\rho \sim 10^{-3} \Omega \text{cm}$ となる。図1から明らかなように窒素分圧が比較的低い領域で作製したCr-N薄膜は10K以下の低温で電気抵抗がupturn的に増加するため広い測温領域が確保できない。従って以下は窒素分圧を80%以上にしてCr-N薄膜を作製した。図2に窒素分圧80%、rf-power600Wで作製したCr-N薄膜のRT特性を示す。rf-powerを増加させることで低温におけるTCRが下がり外挿ではあるが0.6K~400Kの測温領域を持つことが期待される。絶対感度Sもこの領域で0.5~4であり実用的な感度を持つことがわかった。図3は窒素分圧80%rf-power200Wで作成したCr-N薄膜の磁気抵抗効果である。4.2Kおよび1.85Kで5Tまでの磁場下で測定した結果である。磁気抵抗効果は十分小さいことがわかるがすべての試料においての測定は現在継続中である。この研究はH21年度JSTシーズ育成研究の成果である。

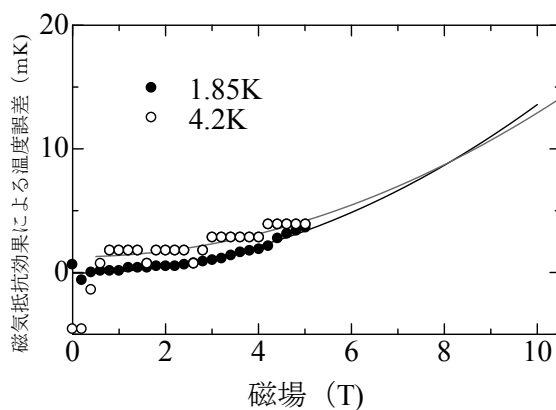


Fig.3 Magnetoresistance at 1.85 and 4.2K. Temperature error due to magnetoresistance was less than 15mK.

# テラヘルツ帯での伝送線路型超伝導検出器の設計

## Design of Transmission-line Superconducting Detector in Terahertz Band

高橋 研太, 有吉 誠一郎(理研);野口 卓(NAOJ);大谷 知行(理研)

TAKAHASHI Kenta, ARIYOSHI Seiichiro(RIKEN);NOGUCHI Takashi (NAOJ);OTANI Chiko(RIKEN)

E-mail:k-takahashi@riken.jp

### 1. はじめに

光周波数が1THz 以上で動作する高効率検出器、伝送線路型超伝導検出器の研究開発を進めている。これは超伝導トンネル接合素子 (STJ) を用いたクーパ対破壊型検出器の一つで、超伝導ギャップ周波数以上(超伝導材料に Nb を用いた場合は約0.7THz 以上)で動作する。この伝送線路型 STJ 検出器の特徴は、超伝導体-絶縁体-超伝導体 (SIS) の 3 層膜構造の接合長を十分長く取ることにより、ほぼ 100%の光検出効率が期待できる点にある。この検出器の設計および作成、評価を行っているが、今回は設計を中心に述べる。

### 2. 伝送線路型 STJ 検出器の解説

従来の SIS 接合を用いた STJ 検出器では、微小面積の SIS 接合を用いているが、伝送線路型 STJ 検出器では長い SIS 接合を利用する。長い SIS 接合は一種の伝送線路とみなすことが出来るため(Fig.1)、入射してきた電磁波は線路を伝わるように SIS 接合の長さ方向へと伝播すると考えられる。このとき、入射電磁波の周波数がギャップ周波数よりも高い場合は、電極のクーパ対を破壊し、準粒子を励起しながら減衰して伝播していく。ここで接合長を十分に長く取っておくことにより、入射電磁波のエネルギーをすべて準粒子励起のエネルギーとして吸収することが出来る。この電極にバイアス電圧を印加しておくことにより、準粒子はトンネルしてバイアス電流の変化として読み取ることが出来る。

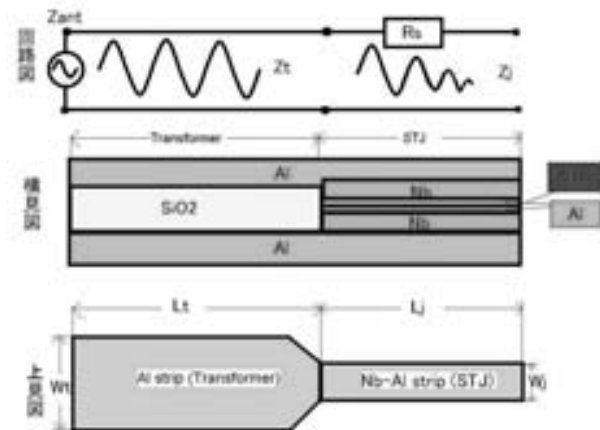


Fig.1 Schematic of a transmission-line STJ detector

### 3. 伝送線路型 STJ 検出器設計における計算

伝送線路型 STJ 検出器の設計にあたり、電磁波を十分に吸収する STJ の長さ  $L_j$  について求めることが必要となる。これを求めるためには、伝送線路における減衰定数  $\alpha$  を考えなくてはならない。これと減衰  $A$  の関係式、

$$A = \exp(-\text{Re}(\gamma)L_j) \approx \exp\left(-\frac{G_m Z_j}{2}\right) \quad (1)$$

から十分に減衰  $A$  が小さくなる  $L_j$  を求める。  $G_m$  は損失コンダクタンス、  $Z_j$  は STJ のインピーダンスである。

ここでは、減衰が  $1/e, 1/10, 1/10000$ ,  $<10^{-8}$  となるように設定し、それぞれ、  $2.9 \mu\text{m}, 6.7 \mu\text{m}, 26.7 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m}$  と設計した。  $1/e$  となる長さでは減衰がさほど起こっていないと思われるので計算結果の整合性を確認し、  $1/10, 1/10000$  の長さでは、  $50 \mu\text{m}$  との比較から十分な長さを考察するために利用する。

### 4. 変換線路(Transformer)の設計

アンテナと SIS 素子とのインピーダンス整合をとる場合、アンテナと SIS 素子の伝送線路としてのインピーダンスを考える。また、アンテナのインピーダンス  $Z_{ant}$ 、トランスフォーマーのインピーダンス  $Z_{trans}$ 、STJ のインピーダンス  $Z_j$  において、

$$Z_{trans} = \sqrt{Z_{ant} \cdot Z_j} \quad (2)$$

の関係を満たした場合に吸収効率が最もよい。

$Z_{trans}$  を求める場合、  $Z_{ant}$  は固定とし、  $Z_j$  を変更することにより整合をとる。この場合の  $Z_j$  は STJ の幅に依存し、幅が狭くなるほどインピーダンスは大きくなる。そのため、大きなインピーダンスである  $Z_{ant}$  との整合性が取りやすくなるために、STJ の幅  $W_j$  が細いほど広帯域で動作できるようにする。

ここでは、理研の露光装置 (i 線ステッパー) との兼ね合いから  $W_j$  を  $0.5 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}$  と設計し、動作帯域についての比較も行えるようにした。

### 5. 今後の展望

STJ の長さ  $L_j$  3 種類と STJ の幅  $W_j$  4 種類の設計から 12 種類のパターンを盛り込んだ試作品 (Fig.2) をサファイア基板に作製し、測定を開始している。この評価により、STJ の長さ、幅、変換線路と STJ 膜厚の最適化を行う。

この伝送線路型 STJ 検出器は、従来の微小 SIS 接合を用いた検出器を上回る高い検出感度を秘めており、将来的にはテラヘルツ帯での天文応用やテラヘルツ光の透過性を利用した産業応用への展開が期待される。

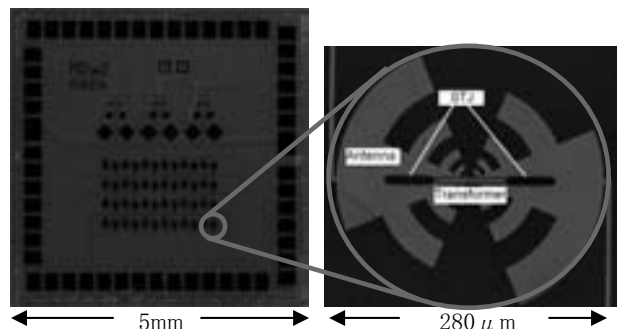


Fig.2 Left : Photograph of transmission-line STJ detectors

Right : Microscope photograph of one detector pixel

### 参考文献

- [1] C.E.Tong and R.Blundell : IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.7, No.2,(1997) p.3597

## 液体水素用 MgB<sub>2</sub> 液面センサーの外部ヒーターに対する熱応答性

### Thermal response of MgB<sub>2</sub> level sensor for liquid hydrogen using external heater

前川 一真, 武田 実(神戸大学); 松野 優, 藤川 静一(岩谷瓦斯); 熊倉 浩明, 黒田 恒生(物材機構)  
 MAEKAWA Kazuma, TAKEDA Minoru (Kobe University); MATSUNO Yu, FUJIKAWA Shizuichi (Iwatani Ind.Gas.);  
 KUMAKURA Hiroaki, KURODA Tsuneo (NIMS)  
 E-mail: 101w522w@stu.kobe-u.ac.jp

#### 1. はじめに

水素エネルギーを地球規模で大量に貯蔵・輸送する場合、貯蔵効率の観点から液体水素(沸点 20 K)が優位である。液体水素は蒸発しやすいため、これを貯蔵・輸送するには蒸発損失を軽減するとともに、液量を正確に管理するための高精度液面計の開発が重要である。我々は、高精度の超伝導 MgB<sub>2</sub> 液面計を開発中であるが[1]、MgB<sub>2</sub> 液面センサーの外部ヒーターの熱応答性は未だ明らかになっていない。そこで、本研究では、低温用の熱電対温度計(金鉄対クロメル)を用いて、液面変化時の液面センサーの温度分布を計測するとともに、外部ヒーターに対するセンサー出力電圧およびセンサー温度の過渡的な熱応答性について調べた。

#### 2. 実験方法

全長 800 mm の MgB<sub>2</sub> 液面センサーに熱電対①、②、③をそれぞれ、350 mm、550 mm、750 mm の液面検知位置に取り付けた。これらの熱電対の起電力を計測するためにデータロガーを取り付け、サンプリング周期を 5 秒、入力レンジを ±10 mV に設定した。また、センサー出力電圧測定用のデータロガーは、サンプリング周期を 5 秒、入力レンジを ±100 mV に設定した。そして、測定電流を 10 mA 流し、ヒーター入力値が 9 W と 3 W のときに、液体水素の液面が 790 mm から 100 mm に下がるまで計測を行った。

次に、MgB<sub>2</sub> 液面センサーの熱応答性を見るために、センサー出力電圧計測用のデータロガーのサンプリング周期を 100 ms、入力レンジを ±100 mV に設定し、また熱電対の起電力測定用データロガーのサンプリング周期を 100 μs、入力レンジを ±10 mV に設定した。そして、外部ヒーター入力値を瞬間的に 3 W、6 W、9 W、12 W 入力できるように設定し、センサー出力電圧及び 3 カ所の MgB<sub>2</sub> 液面センサーの温度がそれぞれ一定になるまでの時間を計測した。

#### 3. 実験結果

外部ヒーター入力値 9 W の時の液面変化と液面センサーの温度分布との関係を Fig.1 に示す。全ての熱電対が液中にある場合では、温度が 20 K であり、超伝導状態になっていることが分かる。液面が 750 mm より下がり始めると、熱電対③の温度は上昇し始め、ヒーターの効果が出ていることが分かる。熱電対②では 550 mm より液面が下になると温度が上昇し始め、熱電対①では 350 mm より液面が下がり始めると温度が上昇していることがわかる。全ての熱電対が液面より上にある場合(例えば液面が 300 mm)、液面より上になるほど熱電対の温度が高いことがわかる。また、各熱電対が液面より上になってから温度上昇はかなり直線的になっていることが分かる。一方、ヒーター入力値 3 W のときは、温度上昇の直線の傾きは 9 W のそれより約 15% 小さかった。

次に、MgB<sub>2</sub> 液面センサーの熱応答性の実験結果を Fig.2 に示す。ヒーター入力値を瞬間的に 9 W 入力したとき、ヒーター入力値及びセンサー出力電圧は約 0.4 秒以内で定常状態となった。すなわち、外部ヒーターに対するセンサー出力電圧の過渡的な熱応答時間は約 0.1 秒以内である。これらの値はヒーター入力値にほとんど関係なく、外部ヒーターに対するセンサー出力電圧の過渡的な熱応答性は非常に

良いことがわかった。さらに、外部ヒーターを入力してからセンサーの温度が定常状態になるまでの時間は、液面が 490 mm のときに熱電対②は約 4 秒、熱電対③は約 5 秒であった。これらの値はヒーター入力値にほとんど関係なかった。

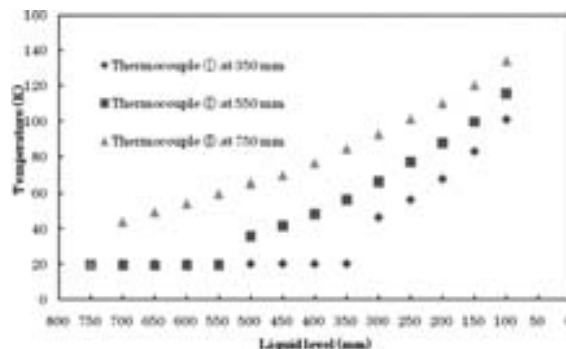


Fig.1 Relationship between temperature of level sensor and liquid level at heater input of 9 W.

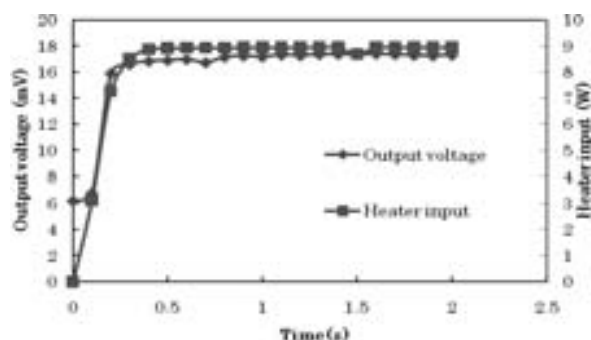


Fig.2 Time chart of output voltage and heater input of 9 W.

#### 4. まとめ

外部ヒーター入力値によって全長 800 mm の液面センサーの温度分布に違いがあった。また、センサーが液面より上になってから、温度上昇の直線の傾きはヒーター入力値とともに大きくなった。一方、外部ヒーターに対するセンサー出力電圧の過渡的な熱応答時間は、6 W 以上では約 0.1 秒以内であることが分かった。このことから、液面が変動した場合でも十分追従できると予測できる。また、外部ヒーターに対するセンサー温度の過渡的な熱応答時間は約 5 秒程度であった。

#### 謝辞

本研究の一部に対して、日本郵船・ヘイエルダール記念事業による助成金の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

1. Y. Sera, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.230; T. Morita et al.: ibid. p.231

# 高温超伝導界磁を有する大規模風力用同期発電機の電磁設計

## Study of Electric Design of Large Scale Wind Turbine Synchronous Generators with HTS Field Windings

福井 聡, 荒川 研人, 小川 純, 佐藤 孝雄(新潟大学); 塚本 修己(横浜国立大学); 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)  
 FUKUI Satoshi, ARAKAWA Kento, OGAWA Jun, SATO Takao (Niigata University);  
 TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CHUBU Electric Power Co. Inc.)  
 E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

風力発電では発電サイト単位面積から取り出せる電力が発電機単機容量の増大とともに増大することが知られており、特に海外では単機容量5MW以上の大規模風力発電の開発が進められている。10MW級の大型風力発電では、強大な入力トルクに耐え得る増速機の開発が困難になることが予想されており、その場合はダイレクトドライブが必要になる。しかしながら、低回転の直結駆動では、発電機は鈍重な設計にならざるを得ず、タワー重量が過大になり、土木コストの増大につながる。従って、低回転・高トルクでかつ高効率・軽量の同期発電機の開発が重要な課題であり、これを解決するために高温超伝導の適用が検討されつつある。本研究では、風力発電用の界磁超伝導型の10MW級空心同期発電機概念設計を行うことにより、その電磁設計例を示すことを目的とする。

### 2. 大規模風力発電用同期発電機概念設計

超伝導の特徴（高電流密度・高磁界・直流では損失ゼロ）を十分に生かすには、界磁巻線のみを超伝導化して3T以上の高空隙磁界化を図ることが良いと考えられる。空心の超伝導界磁巻線では、その外側のみならず内側にも高磁界領域が存在する。を電機子で挟み込む構造を考える。本研究では次世代の大規模風力発電でターゲットとなる容量10MVA/電圧3.3kVを想定し、回転数は10rpm、極数は8とする。界磁巻線は20K冷却の高温超伝導線材の臨界電流特性（Engineering Ic）を考慮して、巻線部の最大磁界を10T以下としつつ、電機子巻線部の磁界が3T程度になるようにする。

電機子巻線は短節・分布巻/2層巻とし、毎相毎極のスロット数を  $q=3.5 \times 2$  (内外) とする。まず、電機子巻線の必要直列導体数を見積もる。空隙磁界の基本波成分の振幅を  $B_0=3T$  として計算する。相電圧は  $E_0=1905V$  から、毎相の直列導体数は  $n_0=14$  (外側: 10, 内側: 4) とする。Tab.1 に発電機設計諸元をまとめた。Fig. 1 に本機の概略断面構造を示す。Tab.1 の設計値の元で FEM 解析を行った。無負荷時のギャップ磁界分布及び相電圧・電流波形を Fig. 2 に示す。相電圧・電流の基本波成分の実効値は 1860V (内外合計) 及び 1764A となり、概ね設計値通りとなった。他方式との比較等の詳細は当日発表する。

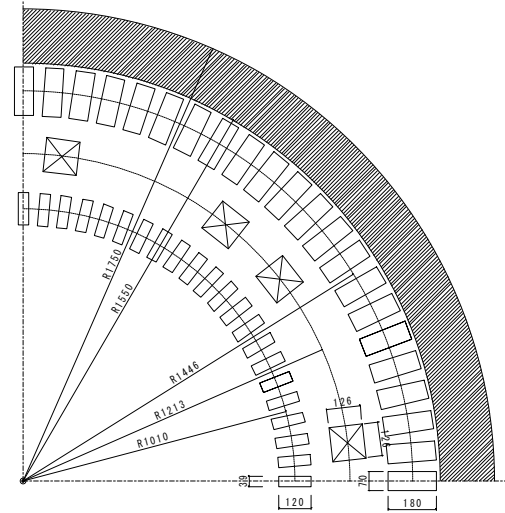


Fig. 1 Cross section

Tab.1 Specification of 10MVA HTS wind generator

界磁巻線			
超伝導線材	4mm×0.25mm	巻線寸法	126×126 mm <sup>2</sup>
電流密度	$1.65 \times 10^8$ A/m <sup>2</sup>	最大磁界	9.7 T
運転温度	20K程度	中心半径	1213mm
設計空隙磁界	3T	線材長	381 km
電機子巻線			
スロット数/相・極 q	7	スロット寸法	
スロット数/相 Q	28×2	内側	39×120 mm <sup>2</sup>
導体数/slot	内側 4	外側	70×180 mm <sup>2</sup>
	外側 10	巻線抵抗	0.0129Ω
電流密度 (導体)	3 A/mm <sup>2</sup>	銅重量	8.72 t
導体寸法	内側 28×21 mm <sup>2</sup>	バックヨーク	
	外側 25×24 mm <sup>2</sup>	厚さ	200 mm
		重量	23.7 t
		外直径	3.5 m
発電機特性			
相電圧	1860V	電機子銅損	120 kW
線電流	1764A		
出力 (力率~1)	9.84MVA		
同期インピーダンス	0.134Ω		

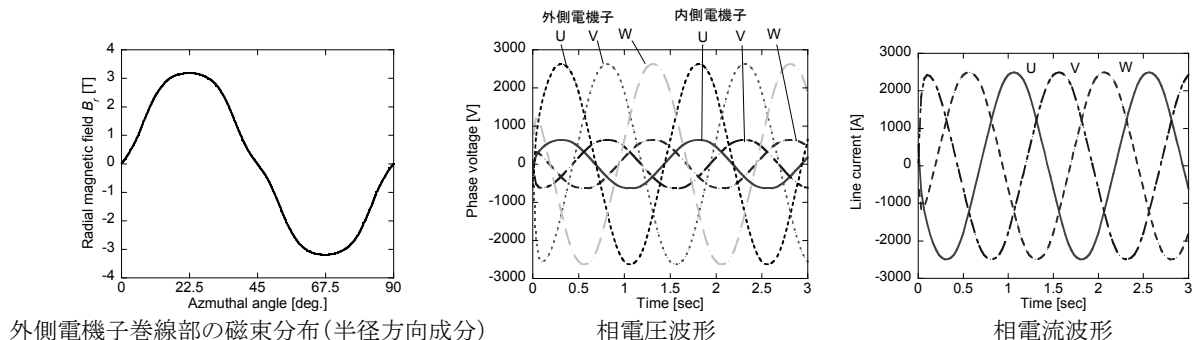


Fig.2 Analytical results

## MgB<sub>2</sub> 回転子巻線を有する超電導かご型誘導機の基礎的負荷特性

### Fundamental load characteristics of superconducting squirrel-cage induction motor with the use of MgB<sub>2</sub> rotor windings

中村 武恒 (京大); 柁川 一弘 (九大); 和久田 毅 (日立)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); WAKUDA Tsuyoshi (HITACHI)

E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに 我々は、来るべき水素エネルギー社会の到来を展望し、インフラ整備のための液体水素移送ポンプ用モータの研究開発を実施している<sup>[1]</sup>。液体水素の大気圧沸点は約 20 K であるが、同温度においては MgB<sub>2</sub> 線材が超電導状態であり、高効率なポンプ用モータを実現できると期待される。即ち、本応用は本質的に極低温条件下における使用であり、基本的に冷却のペナルティーを考えなくて良いことから、超電導材料のメリットを最大限発揮できると考えられる。本講演では、前回に引き続き<sup>[2]</sup>、基礎負荷試験結果について報告する。

2. 開発した MgB<sub>2</sub> モータの概要 モータの基本構造は、京都大学のグループが開発している高温超電導誘導/同期機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) [3]と同様である。本報告では、かご型回転子巻線のみ MgB<sub>2</sub> 線材で作製した回転子巻線超電導 HTS-ISM で試験を実施している(固定子: 銅巻線(8/9 分布短節巻), 3 相 4 極, 200 V)。Fig. 1 には、試作した MgB<sub>2</sub> 回転子の外観写真を示す。回転子巻線は、無酸素銅に MgB<sub>2</sub> 線材をハンダ含浸することによって作製している。なお、固定子巻線の超電導化については現在鋭意検討中である<sup>[4]</sup>。

3. 試験システム 試作した MgB<sub>2</sub> モータは、メタルクライオスタット中に縦置きされ、つまりそのシャフトを鉛直上向きにして吊り下げ固定されている。シャフトは、カップリング・磁性流体シールを介して常温シャフトに接続され、各種試験が実施される。また、前回の報告<sup>[2]</sup>では液体ヘリウム浸漬冷却条件下の試験についてのみ実施可能であったが、本報告ではヒータを使用したヘリウムガス温度制御システムを別途制作し、液体ヘリウム大気圧沸点(4.2 K)以上の温度についても試験可能となっている。Fig. 3 には、試験システムの外観写真を示す。

試験に際しては、まずクライオスタットを所定の温度まで冷却し、定常状態に落ち着くまで待機する。その後、無負荷状態の MgB<sub>2</sub> HTS-ISM を 60 Hz, 200 V で励磁し、同期回転状態(1800 rpm)に引き入れる。そして、プロニーブレーキで負荷を印加し、回転数とトルク値を計測した。

4. 試験結果と考察 まず、MgB<sub>2</sub> 回転子は無負荷条件下において、同期回転可能であった。また、負荷印加用ブレーキの問題で精密なデータを取得することはできなかったが、少なくとも 18 Nm 程度の最大同期トルクを有することを確認することができた。さらに、液体ヘリウム温度(4.2 K)以上の温度領域においても、同期回転を確認することができた。現在は、負荷印加方法の改良を行っている。詳細は講演当日に報告する。

謝辞 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成 20 年度産業技術研究助成事業(課題番号: 08B38006a)の一環として実施したものである。

#### 参考文献

- [1] K. Kajikawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1669-1673 (2009).
- [2] T. Nakamura et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 p. 43 (2009).
- [3] T. Nakamura et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 20, pp. 911-918 (2007)
- [4] K. Kajikawa et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 23, 045026 (2010)



Fig. 1 Photograph of developed MgB<sub>2</sub> rotor.



Fig. 2 Photograph of test cryostat.



Fig. 3. Experimental system in conjunction with the GHe temperature controller.

## 次世代車載用高温超電導誘導同期機のトルク密度に関する解析的検討

### Analytical study on torque density in HTS induction-synchronous machine for next generation automobile

関口 大輔, 中村 武恒, 松村 一弘, 西村 敏治, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久 (イムラ材研)  
 SEKIGUCHI Daisuke, NAKAMURA Taketsune, MATSUMURA Kazuhiro, NISHIMURA Toshiharu, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);  
 ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA)  
 E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに 我々他のグループは、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託のもと、車載用高温超電導誘導同期機(High- $T_c$  Superconducting Induction-Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を行っている<sup>[1]</sup>。本研究開発では、HTS-ISM の可変速駆動に対する高効率化だけでなく、ダイレクトドライブを指向した高トルク密度化の実現も極めて重要である。

本講演では、トヨタ自動車(株)の第二世代 Prius<sup>®</sup>に搭載されている埋め込み磁石型同期モータと同一体格の HTS-ISM について、そのトルク密度を有限要素法解析に基づいて検討したので報告する。

2. 解析対象の第二世代 Prius<sup>®</sup>搭載永久磁石モータ 解析に際しては、比較対象として第二世代 Prius<sup>®</sup>に搭載されている永久磁石モータ(最大出力 50 kW)を選択した。同モータは、ハイブリッド自動車用のモータであることから、純粋な電気駆動式モータでは無いが、現状詳細な情報が得られるモータであることから検討対象とした<sup>[2]</sup>。上記モータのステータコアは直径 269 mm、長さ 84 mm である。

3. 解析方法 第二世代 Prius<sup>®</sup>と同一のコア体積についてモデルを作成し、解析を行った。Fig. 1 には、作成した解析モデルを示す。ステータコア体積は Prius<sup>®</sup>搭載モータと同一とし、回転子をかご型巻線(スロット数: 44)とした。本報告では、第一ステップとして 2 次元モデルを考え、過渡解析を実施した。解析は、JMAG((株)JSOL 社)を使用した。固定子巻線抵抗は  $5 \mu \Omega$  とし、外部抵抗として与えられる。また、回転子巻線については、可能な限り大きな導電率で検討しており、 $3 \times 10^{11} (\Omega m)^{-1}$  である。時間ステップとしては、45 周期解析を実行し、十分定常状態に到達後の結果を採用して比較検討を実施した。

4. 解析結果と考察 Fig. 2 には、解析によって得られた磁束密度分布の一例を示す。また、Table 1 には定常状態における特性解析結果を示す。同図は、回転数を 1722 rpm に固定して得られた結果である。この回転数は、タイヤ径 600 mm<sup>φ</sup>の自動車をダイレクトドライブした場合の速度において 195 km/h に相当する。また、HTS-ISM の重量については、コア体積を Prius<sup>®</sup>搭載モータと同一としていることから、同一値(45 kg)としている。

同表から明らかなように、HTS-ISM の最大トルクは速度 1722 rpm であるにもかかわらず 2206 Nm に達しており、非常に大きな出力が Prius<sup>®</sup>搭載モータと同等の体格に対して得られている。また、巻線の銅損減少に伴って効率が飛躍的に改善されている(99%)。上記結果から、Prius<sup>®</sup>搭載モータにはギア比 4.113 のギアが挿入されていることを考えると、HTS-ISM ではギア無しで同様のトルクが実現されており、つまりダイレクトドライブの実現可能性が示されている。詳細は、講演当日に報告する。

謝辞 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「H21 年度省エネルギー革新技術開発事業(第二次公募)」の一環として実施したものである。

#### 参考文献

- [1] 例えば、中村武恒: 超電導 WEB21, 3 月号, pp. 5-7 (2010).  
 [2] R. H. Staunton et al., U.S. Department of Energy Report (DE-AC05-00OR22725) p. 34 (2006).

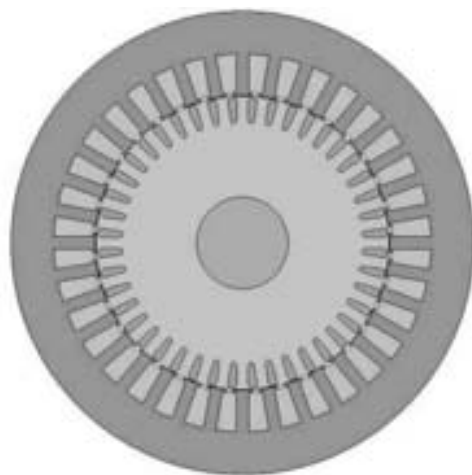


Fig. 1 Analysis model.

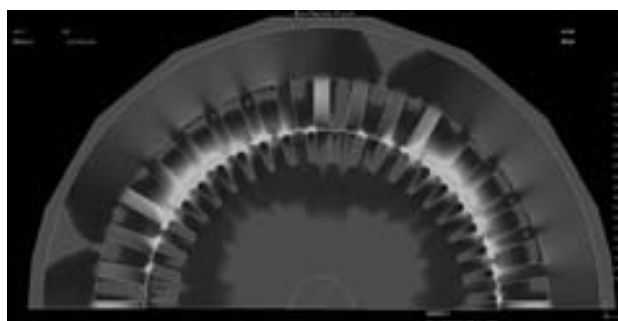


Fig. 2 Magnetic flux density contour.

Table 1 Analysis results of HTS-ISM and its comparison to 2004 TOYOTA Prius<sup>®</sup> motor

Items	2004 Prius <sup>®</sup> motor <sup>[2]</sup>	HTS-ISM
Maximum torque (Nm)	400 Nm @1200 rpm	2206 @1722 rpm
Maximum torque density (Nm/kg)	8.9 @1200 rpm	~49.0 @1722 rpm
Maximum output (kW)	50	~398
Loss (kw)	10	1.67
Efficiency (%)	83	99
Weight (kg)	45	~45



## 20kN 対応超電導磁気軸受の回転試験結果

Rotation test result of superconducting magnetic bearing with 20kN-levitation capacity

清野 寛, 荒井 有気, 長嶋 賢(鉄道総研)

SEINO Hiroshi, ARAI Yuuki, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute)

E-mail: seino@rtri.or.jp

## 1. はじめに

超電導磁石と超電導バルク体を組み合わせた磁気軸受(超電導磁気軸受)の開発を進めている。鉄道用フライホイール蓄電装置の支持軸受に適用することを目的としている。開発の第一段階では、液体窒素冷却した超電導バルク体を回転体側に配置し、固定側に超電導磁石を配置する構成とし、これをスラスト軸受に適用した。試験用超電導磁気軸受を製作し、20kNの静荷重試験を行った[1]のち、20kN 負荷での回転試験を実施した。本件では、回転試験の結果について報告する。

## 2. 試験用超電導磁気軸受

Table 1 に 20kN 対応の試験用超電導磁気軸受の仕様を示す。ステータ側の超電導磁石には Nb-Ti コイルを適用し、2 つのコイルを上下に直列配置して、電流方向を逆転させることでカスプ磁場を発生させる。ロータ側の超電導バルク体は直径 60mm、厚さ 20mm の Gd 系バルク体(QMG<sup>®</sup>)を 4 個使用している。

Table 1 Properties of SC-bearing for 20kN-levitation

Rotor = levitation side: HTS-bulk		Stator = ground side: SC-magnet	
HTS-bulk properties		Magnet properties: Cusp field, Nb-Ti SC-coils, Dry magnet	
Material: Gd-Ba-Cu-O, LN <sub>2</sub> cool		Magnetic flux density (Bz, 100% output)	
Ring: ID30/OD80, t20, Disk: OD80, t20 (mm)			
	Position-1 Z=-20 (mm)	Position-2 Z=190 (mm)	
Amount of HTS bulks	2 disks	2 rings	
			1.6 T      2.3 T
Levitation load capacity	Maximum		24 (kN)
	Rated		20 (kN)

## 3. 回転試験装置

Fig.1 に超電導磁気軸受の回転試験装置を示す。フライホイールは直径 1m、厚さ 0.3m で、回転体質量は 2000kg である。最高回転速度は 3600rpm で、フライホイールの蓄積エネルギー(最高速度~1/2 速度の蓄積量)は 12MJ (3.3kWh)である。

超電導磁気軸受の負担荷重を計測するために、超電導磁石はロードセルを介して装置に固定されている。また、フライホイールの回転速度、浮上位置は、光学式変位計で計測した。

試験用超電導磁気軸受で回転体を浮上支持した状態で、3600rpm までの速度向上を行い、加速中、急激な浮上高さの変化や、支持荷重の低下などの現象がないことを確認した。

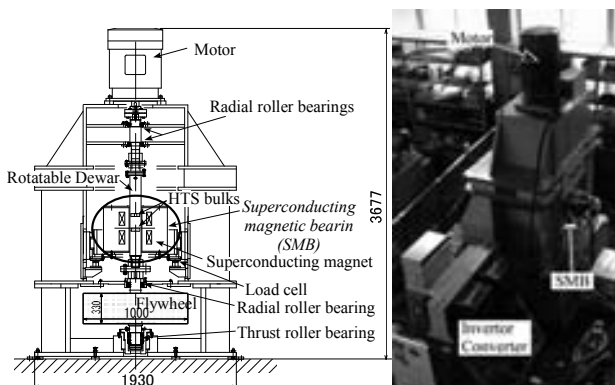


Fig.1 Schematic diagram of the bearing test stand

Fig. 2 に 3600rpm 回転試験のデータを示す。横軸を回転速度とし、縦軸に超電導コイル負担荷重とフライホイール浮上位置をプロットしたものである。軸受負担荷重、浮上位置とも安定していることが確認できる。現在のところ、回転体側の液体窒素の保持時間の問題で、高速回転時の安定性までは評価できていない。

Fig. 3 にフライホイールの充放電繰り返しを模擬した試験のタイムチャートを示す。若干の軸降下が見られるものの、顕著な位置変動や、荷重支持能力の変化がないことが確認できた。軸降下は、バルク体外周部での磁束侵入の影響、ロータとステータ間の軸芯変位の影響と考えられる。従って、より低温に冷却することや、初期変位を矯正することで改善できる可能性がある。

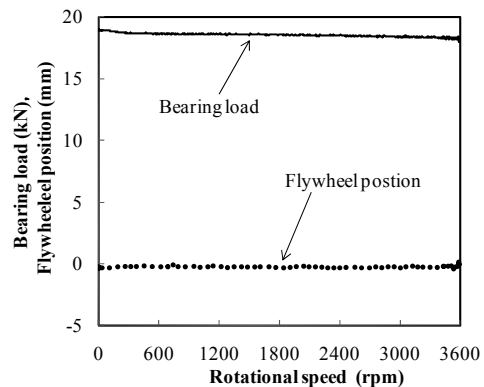


Fig.2 Result of 3600rpm rotation test

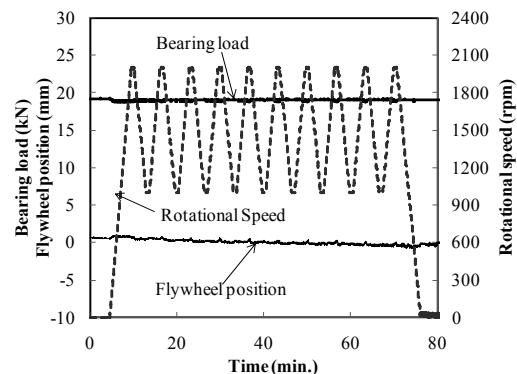


Fig.3 Example of simulated charge/discharge run curve

## 4. まとめ

超電導磁石と超電導バルク体で構成する超電導磁気軸受で、20kN 負荷での回転試験を実施し、3600rpm までの浮上支持能力を確認した。

本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

## 参考文献

1. H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.47

# ポインティングベクトル法による超伝導変圧器の運転モニタリングシステムの開発 2 — 巻線異常とエネルギーフローの関連 —

## Development of A Monitoring System of Superconducting Transformer by Using the Poynting's Vector Method —Relativity between energy flows and abnormal conditions in winding—

羽生 大仁、小坂 亮大、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工); 岡元 洋 (九州電力)  
HABU Kisato, KOSAKA Ryota, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);  
 OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.,Inc.)  
 E-mail: k6994843@kadai.jp

### 1. はじめに

超伝導変圧器を実用化するためには、変圧器が正常に運転されていることを運転中常時監視しておく必要がある。このためには、変圧器巻線に電気的な接触を伴わずに監視できることが重要である。我々は、超伝導変圧器の運転監視システムとして、ポインティングベクトル法を用いた運転監視システムを提案し、システムの開発を行ってきた。このシステムの特長は、コイルに直接電圧リードを取り付けなために放電事故を誘発しないこと、電気的な測定法であるため、感度が良いことである。

これまで、超伝導変圧器に対して非接触の測定センサーで運転状態の監視が可能であることを実験的に示している。このシステムは、変圧器周辺のポインティングベクトルを測定することによって運転状態を監視する。今回は、変圧器の一次側巻線と二次側巻線のそれぞれの異常と測定センサーの関連性について検討を行った。小型の超伝導トランスを Bi-2223 のテープ線材を用いて試作し、一次側巻線と二次側巻線の異常を測定センサーで判別可能であるか実験的に検討したので報告する。

### 2. 測定方法と測定装置

本測定方法は、超伝導コイル周辺のポインティングベクトルを測定することによって異常の検出を行っている。超伝導コイル周辺の磁界と電界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求める。磁界の測定にはピックアップコイル、電界の測定にはポテンシャルリードを用いる。ピックアップコイル電圧を使ってポテンシャルリードの誘導性電圧をキャンセルし、電界測定の精度を上げた。測定される電界と磁界の二つの成分から求めたポインティングベクトルの分布の変化を観測することにより、超伝導コイルの状態を監視することができる。

今回の測定装置の概略図を Fig.1 に示す。高さ約 100mm、一次側内径 110mm、二次側内径 80mm の小型の超伝導トランスを、臨界電流が 88A の高強度 Bi-2223 多芯テープ線材を用いて試作した。容量 500VA、一次側 47 ターン、二次側 24 ターンである。漏れインピーダンスは 3.4% であり、二次側には抵抗 0.34Ω の負荷を接続している。測定装置は、12 ターンのポテンシャルリードと 60 ターンのピックアップコイルを用いてポインティングベクトルの測定を行っている[2]。そして、超伝導トランス周囲のポインティングベクトルの時間的変化を観測することにより超伝導トランスのモニタリングを行った。

### 3. 実験及び結果

次の手順で実験を行った。試作した超伝導トランスに、50Hz、20Arms の交流電流を定電流モードで通電したまま、熱絶縁の悪いデュワを用いて液体窒素のレベルを減らしていき、超伝導トランスの上部から強制的に常伝導に移させた。また、二次側の負荷は変化させずに、巻線だけに温度上昇が生ずるようにしている。一次側と二次側別々に液体窒素のレベルを減らし、異常を発生させ、その時の変圧

器中心部のポインティングベクトルを観測した。試作したトランスに用いている超伝導コイルの状態をモニタするために、超伝導コイル一次側の両端電圧と各ターンの温度も同時に測定した。

一次側コイルと二次側コイルを、別々に異常を発生させた際に測定したポインティングベクトルと、超伝導コイル一次側の両端電圧の測定結果を Fig. 2(a), (b) にそれぞれ示す。横軸は、測定開始からの経過時間である。試作した超伝導コイルの両端電圧が変化していると同時に、エネルギーフローも変化していることがわかる。さらに、測定センサーに近い一次側巻線で異常が発生した方が、エネルギーフローが大きく変化している。また、一次側と二次側で、ポインティングベクトルの向きも違う。このことから、変圧器のそれぞれのコイルのどちらで異常が発生したかを判別可能であることがわかった。

### 4. まとめ

超伝導変圧器に使用されているコイルのそれぞれの異常を判別可能であるかどうか調べるために、試作した超伝導トランスの一次側と二次側別々に異常を発生させ、その時の超伝導トランス周囲のポインティングベクトルを測定した。その結果、エネルギーフローの変化に違いがあり、それぞれのコイルのどちらで異常が発生しているかの判別が可能であることを示した。

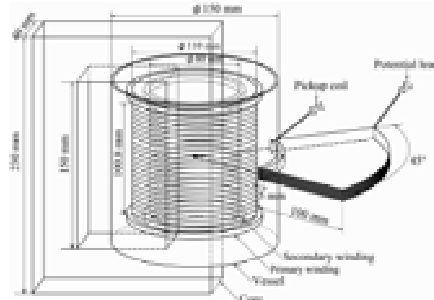


Fig.1 Experimental set up

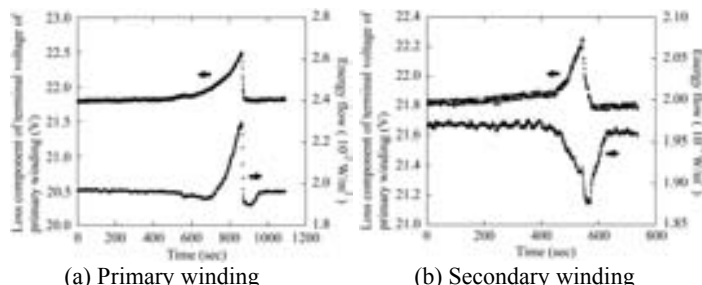


Fig. 2 Result of unusual condition

### Reference

- [1] K. Kaminohara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p.210
- [2] K.Habu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009) p.121