

# 三相同一軸型高温超電導ケーブルの長距離化に適したケーブル構成の検討

## Study on suitable cable structure for long distance HTS tri-axial cable

秋田 真志, 北谷 大貴, 榊原 稔二, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(前川製作所)

AKITA Masashi, KITAYA Daiki, SAKAKIBARA Ryouji, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);

HAMAJIMA Takataro (Mayekawa Mfg.)

E-mail: akita@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

超電導ケーブルは既存の銅ケーブルに比べ、大容量で低損失となるため、次世代の送電ケーブルとして期待されている。特に、三相同一軸型ケーブルは、三心一括型ケーブルよりも線材使用量や交流損失を大幅に削減できる上に、大きな冷媒流路を確保できるため、長距離送電に向いている。これまで、三相同一軸型ケーブルの電流平衡モデルを用いてケーブル内の冷却特性の検討を行い、各流路の断面積など、ケーブル構造を変化させた場合の送電可能距離について検討してきた[1]。本研究では前回の結果を踏まえ、ケーブル内部の発熱及び外部からの熱侵入をより詳細に考慮することで、長距離化に適したケーブル構成方法について検討した。

### 2. 解析手法

Fig.1 に三相同一軸ケーブルの解析モデルを示す。各相の導体部分は故障電流分担のための銅テープ、超電導線、絶縁のためのPPLP®により構成され、コルゲート管に收容されるとした。三相平衡運転時には外部への漏洩磁界がないため銅シールド層は断熱層の外側に設置している。ケーブルの冷却は液体窒素のリターンを考え向流を採用した。向流はケーブル一本で冷媒を往復せられるため、循環系が並流に比べて小さくなるという利点がある。

ケーブル内の伝熱特性の解析では、式(1)で表わされる熱平衡方程式を用いた。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

ただし、 $T$ は温度、 $\rho$ は密度、 $c$ は定圧比熱、 $k$ は熱伝導率、 $Q$ は発熱項として、交流損失、渦電流損失、誘電体損失、流体の摩擦損失を考慮している。境界条件として、ケーブル半径方向外側に熱侵入を与えた。

流入される液体窒素の流体特性は、扱う流れを Reynolds 数から判断し、全て乱流として熱伝達と圧力損失を考慮した。固体と熱流体間の単位時間当たりの熱伝達量  $Q_N$  は、次式で表わされるニュートンの冷却法則に従うものとした。

$$Q_N = h \Delta T A \quad [W] \quad (2)$$

ただし、 $h$ は熱伝達率、 $\Delta T$ は冷媒と固体の温度差、 $A$ は熱伝達面積である。熱伝達率は、滑らかな円管内における乱流熱伝達の式である Dittus-Boelter の式を用いて Nusselt 数を計算し、算出した。

次に本解析に用いた三相同一軸ケーブルの諸元を Table 1 に示す。主な諸元は、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」[2]を参考にしている。三相同一軸型は流路を2つ持つため、導体部の構成やケーブル外径によって各流路の断面積が変化する。そこで、今回は導体部の径を変化させ、導体部の発熱及び外部からの熱侵入が冷媒に与える影響について検討した。HTS テープ線は曲げ歪みを 0.3%以下に制約し、臨界電流の劣化は無いものとした。

### 3. 解析結果および考察

Fig.2 に 100 m のケーブルにおける液体窒素の伝熱特性と流体特性の流量依存性を示す。今回は導体部の外径が 82.0 mm(3.24W/m)、85.6mm(2.94W/m)、91.0mm(2.71W/m)に変化させた場合の結果である。ただし、()内の値は導体部の

損失を表しており、各相の交流損失、渦電流損失、誘電体損失を合計した値である。同図より、導体部の径を小さくして外側流路幅を大きくすることにより、液体窒素の温度上昇、圧力損失が抑えられることがわかる。これは外側流路幅を大きくすることで、侵入熱の影響が低減されたこと、流速の減少により圧力損失が低下したことが考えられる。また、流量が増加するにつれて、温度上昇の抑制効果が小さくなっているのは、冷媒の流速が増加することによって、摩擦損失の影響が大きくなったためであると考えられる。

以上の検討より、ケーブルの長距離化には外側流路を大きくしつつ、冷媒の流量を増加させ、流速を大きくすることが重要だと考えられる。従来の設計では、導体部の径を大きくし、導体部の損失を少なくすることで、冷凍機の負担を減少させる設計を行っていたが、ケーブルの長距離化には、導体部の径を小さくすることにより導体部の損失が増大したとしても、外側流路幅を確保することで、侵入熱の影響、及び流体の摩擦損失、圧力損失を低減させる必要があると考えられる。

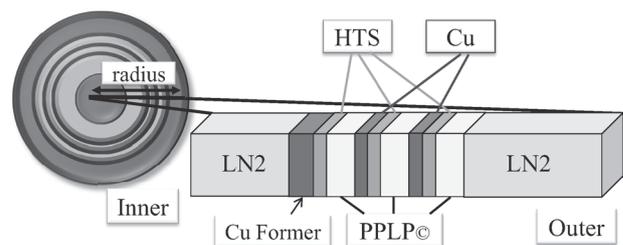


Fig.1 An analytical model of an HTS tri-axial cable

Table 1 Specifications of a model HTS tri-axial cable

Conductor composition	BSCCO 1-layer
HTS tape thickness	0.3 mm
Cu Former and Cu stabilizer	140mm <sup>2</sup> , 100 mm <sup>2</sup>
PPLP® insulation thickness	5.3 - 5.1 mm
Nominal power	230 MVA
Nominal voltage	66 kV
Transport current	2.0 kA
Outer diameter of corrugate pipe	108 mm

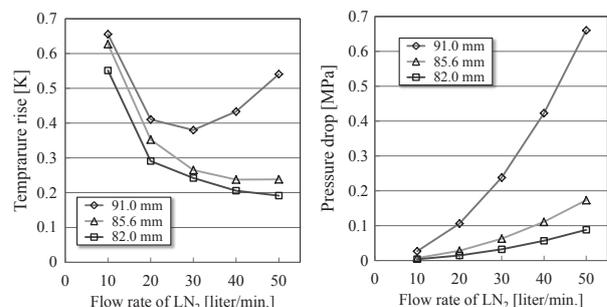


Fig.2 Dependence of cooling characteristics in an HTS tri-axial cable on the flow rate of LN2

### 参考文献

- M.Akita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.88 (2013) p.25
- M.Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.86 (2012) p.11

## 22kV/12kA 級大電流超電導ケーブルの開発(2)-通電試験-

### Development of 22kV/12kA-class large-current HTS Cables (2) -loading test-

森村 俊也, 大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 中野 哲太郎, 丸山 修, 本庄 昇一(東京電力)  
 MORIMURA Toshiya, OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);  
 NAKANO Tetsutaro, MARUYAMA Osamu, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company)  
 E-mail: morimura-toshiya@sei.co.jp

#### 1. はじめに

高温超電導ケーブルの実用化初期段階のターゲットとして発電機引き出し線(発電機～変圧器間)への適用を検討している<sup>(1)</sup>。発電機引き出し線を超電導化することにより、省スペース化による建設費削減や送電損失の大幅削減などのメリットがある。設計検討しているケーブルは超電導シールドを持たないため、二相短絡電流通過時にケーブルコアに電磁斥力が生じ、コアの特性劣化を引き起こすことが懸念される。故に、二相短絡電流通電試験を行ったので結果を報告する。

#### 2. 大電流ケーブルの構造

設計検討中の大電流ケーブルの構造を図1に示す。

- 三心一括型に比べて導体大径化による低損失化のメリットが大きいため、単心型ケーブルを採用した。
- フォーマは金属管に短絡事故電流のバイパス回路となる銅保護層を巻きつけた構造とし、液体窒素の往復冷却を行う。
- 超電導シールド層は設けず、銅線材で遮蔽層を構成した。通電時の損失を低減するため、銅遮蔽層は片端接地とし、遮蔽電流が流れない構造とした。
- 三相のケーブルは離隔 350mm 程度で配置することで定常時の他相磁場の影響や短絡事故電流通過時の電磁力を抑制する。

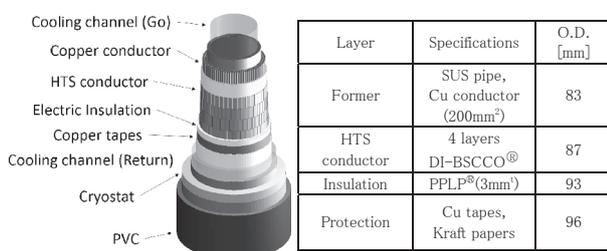


Fig. 1 Schematic view of large-current HTS cables.

#### 3. ケーブルコアサンプルの通電試験

二相短絡事故電流通過時、事故相には往復電流が通電するため、電磁斥力が生じる。このため、短絡事故電流通過による導体層の温度上昇の他、電磁力による線材への影響が考えられる。このため、ケーブルコアサンプルを用いた二相短絡電流試験を行い、ケーブルコアの健全性を確認した。

**試験形態:** 図2に示すように約3mのケーブルコア2本を離隔350mmで配置し、片端を短絡した。実際のケーブル構造を考慮し、ケーブルコアは断熱管の内面を模擬した半割れコルゲート管で把持し、端部のみを固定した。耐短絡電流の要求仕様である 63krms, 0.6sec の電流を通電し、発生する電磁力とコア内部の温度上昇、試験前後のI-V特性を測定した。電磁力の測定は、半割れコルゲート管に取り付けたSUS棒の伸びを歪ゲージで測定し、電磁力に換算して行った。

**試験結果:** 図3に測定した短絡電流波形と電磁力波形を示す。電磁力の最大値は、短絡電流の第一波ピークである150kA通電時の約1300kgf/mとなった。これは、事前に想定していた電磁力とほぼ一致しており、短絡事故電流通過時の状態を模擬できたことを示している。

短絡事故電流通過時の導体層の温度上昇測定結果は、事前のシミュレーション結果とよく一致しており( $\Delta T=10K$ )、銅保護層が適切に働き、導体層で過度な温度上昇が生じないことを確認した。

図4に試験前後のケーブルコアのI-V曲線を示す。試験前後でI-V特性は変化していない。短絡事故電流通過による導体層の温度上昇や電磁力によってケーブルコアの超電導特性が劣化しないことを確認した。

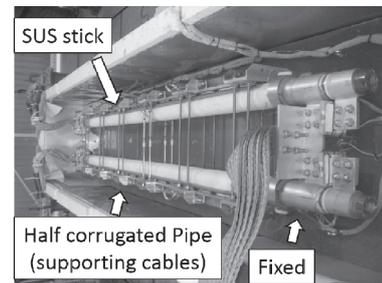


Fig. 2 Photograph of short-circuit current test.

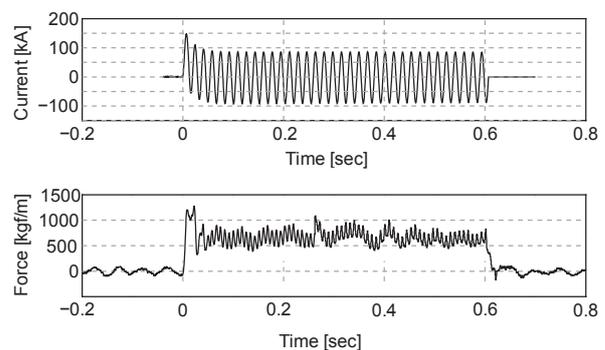


Fig. 3 Short-circuit current and electro-magnetic force.

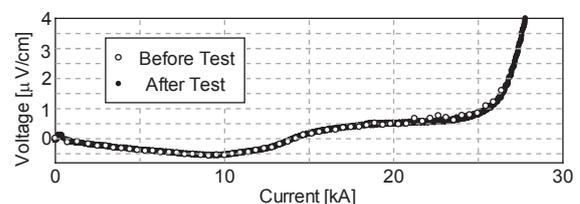


Fig. 4 I-V curves of the cable core.

#### 4. まとめ

発電機引き出し線を対象とした大電流ケーブルの開発を行っている。短絡事故電流通過時の温度上昇・電磁力を測定・評価し、超電導特性の劣化が起きないことを確認した。今後、ケーブルの低損失化などの課題について検討していく。

#### 謝辞

本研究の一部は、NEDOの委託により実施したものである。

#### 参考文献

- M. Ohya, et al.: 2014 National Convention Record I.E.E. Japan, Vol. 7, p.195

# ポインティングベクトル法を応用した 単相超電導電力ケーブルの交流損失測定

## AC Loss Measurement of Single Phase Superconducting Power Cable by Applying Poynting's Vector Method

假重 太智, 帯田 啓太, 川越 明史(鹿児島大学); 三堂 信博, 小泉 勉, 長谷川 隆代(昭和電線);  
岩熊 成卓(九州大学)

KARISHIGE Taichi, OBITA Keita, KAWAGOE Akifumi,  
MIDOU Nobuhiro, KOIZUMI Tsutomu, HASEGAWA Takayo, IWAKUMA Masataka  
E-mail:k9952770@kadai.jp

### 1. はじめに

超電導電力ケーブルの開発が進められている。ケーブルの交流損失は効率を低下させるため、その特性を定量的に明らかにすることは重要である。電力ケーブルのうち、三相同一軸超電導電力ケーブルでは、ケーブルを構成する線材に対し、輸送電流と外部磁界が同時に印加される、いわゆる同時掃引の状態にある。このため、電氣的に交流損失を測定することが困難である。我々は、三相同一軸超電導ケーブルの交流損失を測定するために、ポインティングベクトル法[1]を応用することを検討している。

ポインティングベクトルを正確に測定するには、超電導ケーブルを構成するすべての線材にポテンシャルリードを取り付ける必要がある。しかしながら実際のケーブルの線材すべてにポテンシャルリードを取り付けることは困難であるため、ここでは、ケーブル断面の周方向に一カ所の測定で代表させることを考えている。本研究では、その方法の妥当性を検証するために、単相電力ケーブルの測定を行った。

### 2. 測定原理

ポインティングベクトル法では、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルを用いて局所的な電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求める。本測定法では、電力ケーブル軸上のポインティングベクトルを測定する。そして、電力ケーブルの対称性に着目し、その値を電力ケーブル円周上で周回積分することにより交流損失を求める。

Fig. 1 に電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルの配置を示す。これらの測定素子は、サンプルケーブルの軸上直近と、距離を離れた位置にそれぞれセットしている。距離を離れた測定を行うのは、ケーブル周方向の磁界分布がほぼ均一になる場所で測定を行い、磁界分布の均一性が測定結果に及ぼす影響を調べるためである。

### 3. 単相超電導ケーブルの交流損失測定

単相超電導ケーブルに通電する交流輸送電流は、振幅 40 ~ 560A<sub>0-p</sub>、周波数 10, 50Hz とした。測定は全て液体窒素中で行った。

Fig. 2 に交流輸送電流を通電した時の交流損失特性を示す。横軸は交流輸送電流の振幅、縦軸は交流輸送電流一周あたり、ケーブル単位長当たりの交流損失を示している。測定された交流損失の特性は、通電電流の 2 乗に比例していた。

Fig. 2 より 2 つのポインティングベクトル法と四端子法の交流損失が一致している。したがって、ケーブル直上の不均一な電磁界環境下であっても、測定素子の測定長がケーブルのツイストピッチの整数倍をとると、平均のポインティングベクトル法による本測定装置の有効性を実証できた。

なお、本研究の一部は、経済産業省の「省エネルギー等国際標準化・普及基盤事業」の一環として実施したものである。

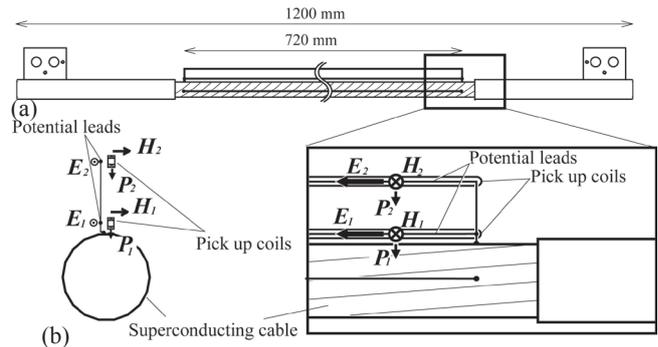


Fig.1 Principle of the measuring method, (a)measuring area, (b)array of pick up coil and potential lead.

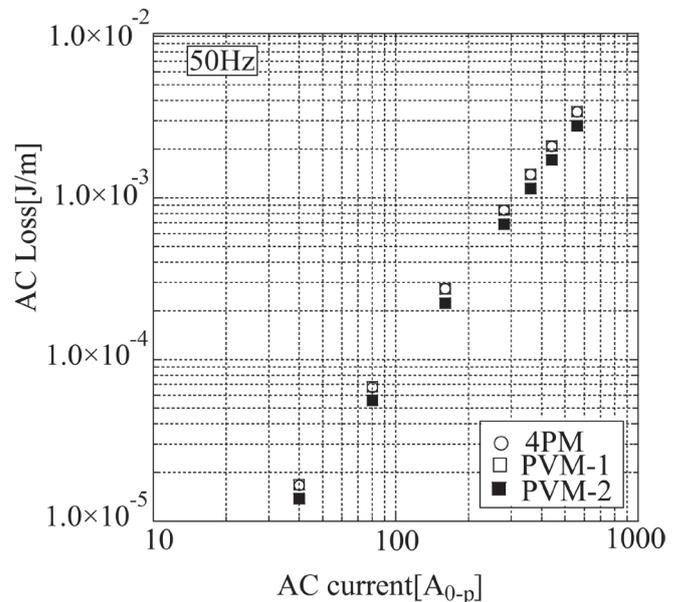


Fig.2 AC loss properties in a superconducting cable under ac transport currents.

### 参考文献

[1] F. Sumiyoshi, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.), 35 (2000) p. 575

# 1500mHTS 送電ケーブルにおける温度・圧力解析コードの開発

## Temperature and Pressure Analysis of 1500m HTS Power Cable.

安井 鉄郎, 佐藤 勇輔, 我妻 洸, 石山 敦士(早稲田大学);王 旭東(早稲田大学/KEK);  
大屋 正義, 増田 孝人 (住友電工);本庄 昇一 (東京電力)

YASUI Tetsuo, SATO Yusuke, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); WANG Xudong (Waseda University/KEK);  
OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);  
HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company, Inc.)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

高温超電導ケーブルは従来のケーブルと比べ、高密度化と低損失化という特性を兼ね備えているということから、将来の電力輸送システムの拡充という課題に対する解決策になると期待されている。しかしその実用化に向けてはkm級の長尺ケーブルにおける短絡事故電流通電時に対する影響評価が必要不可欠である。本研究では、実用化に向け実用時を想定した1500m長のケーブルについて導体温度及び冷媒となるケーブル内の液体窒素の温度・圧力を計算するプログラムコードを開発した。66kV系統では最大で31.5kA-2sの過電流が流れることが想定されており、今回我々はその際のケーブル内温度及び液体窒素の温度・圧力解析を行ったので報告する。

### 2. 1500mモデルケーブルの解析条件

本研究では図1に示す三心1括構造の1500m超電導ケーブル内温度・圧力分布を数値計算し、コルゲート管内部を流れる液体窒素の温度・圧力解析を行った。ケーブル内の温度分布は以下の非線形熱伝導方程式を数値的に解くことにより計算した。

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

$Q_{in}$ : 流入熱量  $Q_{out}$ : 流出熱量

液体窒素の特性は、流体の特性を計算するコンピュータプログラムであるGSPAKを使って計算した。図2はケーブルの長手方向断面の模式図及び各層における熱の出入りを示している。

なお本研究では計算を簡単にするために以下のように(a)~(d)を仮定した。

- (a). 銅フォーマ/HTS導体、及びHTSシールド/銅シールドをそれぞれ銅層一層とみなし、各層温度は幅方向で一定である。
- (b). PPLP層の長手方向の熱伝導は無視する。
- (c). 境界条件として入口の冷媒の温度と圧力は与えられる。
- (d). 冷媒の質量流量は一定である。

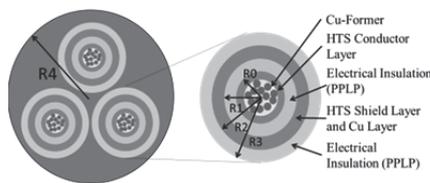


Fig.1 Model Cable Structure (Radial Direction)

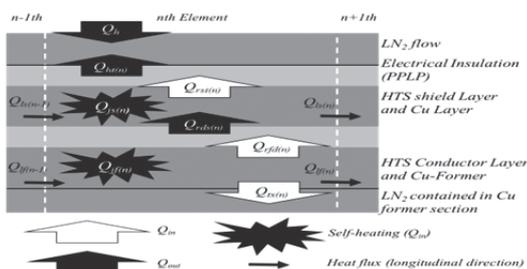


Fig.2 Model Cable Structure (Longitudinal Direction)

### 3. 解析結果

図3は31.5kA-2sの過電流が流れた際の結果であり、185sで下流部出口付近の液体窒素温度が飽和温度まで上昇していることが分かる。この結果は液体窒素が急激に気化することを示しており、安全弁による放圧対応が必要となると考えられる。この為電流値の低減や早期遮断等の対策をすべきと言える。そこで次に液体窒素温度が飽和温度に達しない通電時間を解析により求めたところ、図4に示す1.0s以内であれば温度上昇は23K程度となり飽和温度に達しないことが確認された。またその際の液体窒素の温度分布を図5に示す。

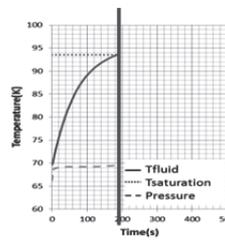


Fig.3 Calculation Result (31.5kA-2s)

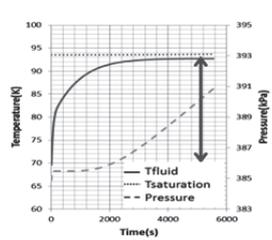


Fig.4 Calculation Result (31.5kA-1.0s)

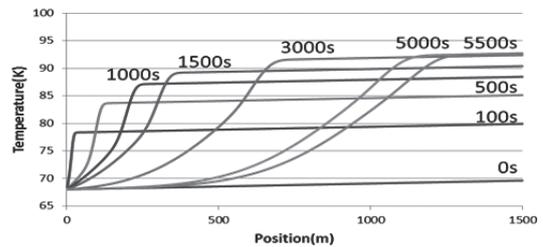


Fig.5 Calculation Result (Position-Temperature)

### 4. まとめ

本研究では、ケーブル内の冷媒の温度・圧力分布を求めるプログラムを開発した。このプログラムにより短絡事故時における最大想定過電流である31.5kA-2sにおいて温度・圧力解析を行ったところ、冷媒の温度が飽和温度に達する為安全弁による放圧対応が必要であると考えられた。そこで、遮断時間を1.0sまで短縮し再度解析を行った結果、冷媒の温度上昇を抑えられ安全に冷凍システムを運転できることが確認できた。今後は冷凍機運転の圧力を上げる等の他の対策についても検討したい。

### 謝辞

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

### 参考文献

1. M.Furuse, S.Fuchino, K.Agatsuma, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) p.1021
2. Y.Sato, X.Wang, K.Agatsuma, et al.; Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.88(2013)p.24

# 循環ポンプを加味した HTS 送電ケーブルにおける 温度・圧力連成解析コードの開発

## Temperature and Pressure Coupled Analysis of HTS Power Cable with Circulation Pump System

佐藤 勇輔, 安井 鉄郎, 我妻 洗, 石山 敦士(早稲田大学); 王 旭東(早稲田大学/KEK);  
大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 本庄 昇一(東京電力)

SATO Yusuke, YASUI Tetsuo, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ); WANG Xudong (Waseda Univ/KEK);  
OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);  
HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company, Inc.)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

超電導ケーブルは電力輸送の高密度化と低損失化という特性を兼ね備えていることから、電力輸送システムの拡充という課題に対する最善の解決策として期待されている。

しかしその実用化に向けては短絡事故に対する影響評価が必要不可欠である。実用化が想定される 66 kV 系統では事故時最大で 31.5 kArms-2 s の過電流が流れることが想定されており、我々は先行研究でこの過電流が流れた際のケーブル内及び冷媒である液体窒素の温度・圧力上昇を解析するコンピュータコードの開発を行ってきた。

本研究では、ケーブル内熱解析とポンプサーキュレーションモデルによる圧力解析を連成させることにより、短絡事故時のケーブル内液体窒素についてより詳細な挙動解析を行ったので報告する。

### 2. 計算モデル

過電流通電時における超電導ケーブル内の熱解析と循環ポンプを考慮した冷却システムをモデル化したポンプサーキュレーションモデルによる圧力解析の連成解析を行った。

熱解析は  $x$  方向は式(1)、 $r$  方向は式(2)を用いてケーブル内の温度上昇を算出し、ケーブルの外側を流れる冷媒である液体窒素に入る熱量を計算した。なお本研究では短絡事故時を想定しケーブルにおける HTS 導体・銅フォーマおよび HTS シールド・銅シールドは銅一層とみなす。

$$\rho_{cu} C_{cu} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{cu} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{in} - Q_{out} \quad \dots (1)$$

$$r = -2\pi k_p r \frac{dT}{dr} \quad \dots (2)$$

圧力解析には先行研究にて開発したポンプサーキュレーションモデルを用いた[2]。この解析では各部に入る液量及び気体の量により各部圧力変化を以下の式(3)で計算する。

$$P = \frac{P_0(1 + \Delta V_{Gas}/V_0)}{(1 - \Delta V_{Liq}/V_0)} \quad \dots (3)$$

この計算により算出した各部の圧力差から、システム内の流量の変化を計算し、次の時間の圧力を算出する。

連成解析のアルゴリズムを以下の図 1 に示す。

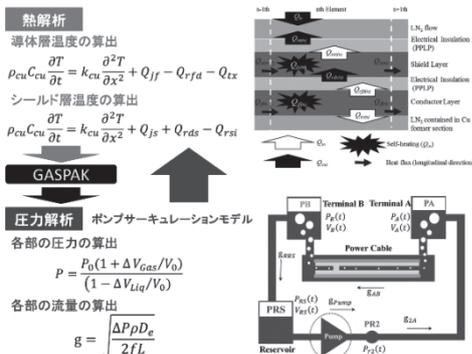


Fig.1 Model of Hybrid Analysis

### 3. 解析結果

連成解析結果を以下に示す。図 2 は連成解析により計算した各端末部の圧力変化について 2010 年に住友電工熊取試験場にて行われた 30 m ケーブルにおける過電流通電試験の結果と比較したグラフである。この結果より連成解析の結果は圧力変動をよく再現していることがわかる。また図 3 では結果を過去に行った圧力解析結果と比較しているが、結果が大きく改善していることがわかる。さらに図 4 はポンプ吐出口から A 端部までの流量を実験値及び過去の解析と比較したものであるが、この結果についても実験をよく再現しているといえる。

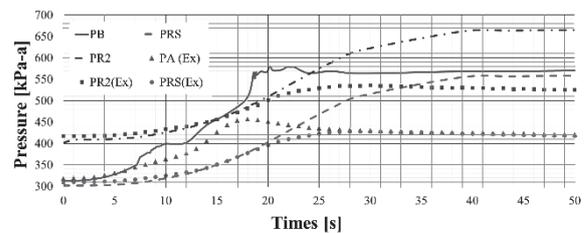


Fig.2 Calculation Result (Pressure)

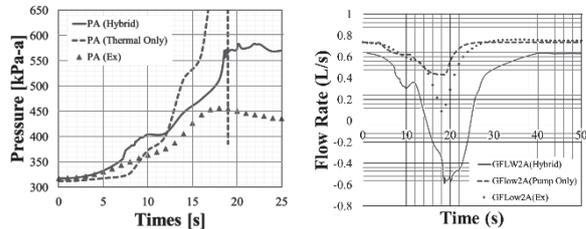


Fig.3 Calculation Result (Pressure-PA)

Fig.4 Calculation Result (Flow Rate-2A)

### 4. まとめ

本研究では過電流通電時の温度・圧力解析を行った。解析にはケーブル内の熱解析とポンプサーキュレーションモデルによる圧力解析を連成したプログラムを用い、解析対象は実証試験が行われた 30m ケーブルとし、プログラムの妥当性を試験データとの比較により確認した。解析結果では、圧力及び流量の挙動についてよく再現できているが、蒸発時の窒素挙動を明らかにすることがより正確な推定には必要である。

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

### 参考文献

1. M.Furuse, S.Fuchino, K.Agatsuma, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) p.1021
2. T.Yasui, Y.Sato, K.Agatsuma, et al.: “The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity, IEE Japan”, ASC-14-018, (2014)
3. H.Yumura, Y.Ashibe, M.Ohya, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol.23 (2013)

## 石狩での超電導直流送電実証研究について

### Demonstration studies of high-temperature superconducting DC power transmission system at Ishikari

筑本 知子, 渡邊 裕文, 浜辺 誠, ユーリ・イワノフ, 高野 廣久, 山口 作太郎(中部大, I-SPOT);  
 腰塚 博美(千代田化工, I-SPOT); 林 和彦(住友電工, I-SPOT); 澤村 徹(さくらインターネット, I-SPOT)  
 CHIKUMOTO Noriko, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto, IVANOV Yury, TAKANO Hirohisa,  
 YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ., I-SPOT); KOSHIZUKA Hiromi (Chiyoda Corp., I-SPOT);  
 HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries, I-SPOT); SAWAMURA Toru (Sakura Internet, I-SPOT)  
 E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

#### 1. はじめに

経済産業省からの委託による「高温超電導直流送電システムの実証研究」(平成 24 年度経済産業省からの委託)は、石狩新港地域を実証サイトとして、高温超電導直流送電システムを建設し、データセンタ等の直流需要施設と直流電源施設あるいは商用交流変電所からの送電を行うことによって、トータルシステムとしての実運用システムの構築、さらに将来の長距離送電システムを実用化するための技術的、制度的課題を抽出することを目的としている[1]。計画では2回線を設置し、回線1はさくらインターネット株式会社の石狩データセンタと同社保有の太陽電池を約 500m の超電導ケーブル(住友電工製 BSCCO ケーブル、同軸・双方向通電)で接続して通電安定性の検証に供する。回線2は当初計画では、交流変電所付近から km 級の送電システムを公道脇に設置し、長距離送電のための準備・検討を実施する予定であったが、諸事情により計画変更し、地上布設し、過酷試験を含む様々な検証実験に供することになった。なお、回線2の総長は1km であり、2カ所の中間接続部を設ける。

プロジェクトの初年度は主に設計及び機器の製造・購入を行い、2年目となる今年6月頃より、現地での布設工事が開始され、10月9日に回線1のケーブル布設が完了したところである。回線2については、計画変更等で当初計画より工事着手が遅れたものの、10月中には管路工事が開始される予定である。

#### 2. システムの設計コンセプト

直流超電導ケーブルシステムが経済的に成り立つためには、いかに冷却効率をあげるかが重要なポイントとなる。そのためには、ケーブル線路や端末部等からの熱侵入を抑える必要がある。そこで、本システムは、侵入熱を最小限にする機器構造を設計コンセプトに、低熱侵入のペルチェ電流リード及び、侵入熱及び圧力損失を小さくできる直管断熱二重管方式を採用する。事前検証試験の結果、本システムで採用するペルチェ電流リードからの熱侵入量は1端末あたり約 31W/kA 以下[2]、断熱二重管からの熱侵入量は概ね 1.5W/m 以下[3]であることが確認されている。

#### 3. 熱収縮対策

長距離の超電導送電システムの実現のためには、超電導ケーブルの敷設と同時にケーブル冷却時に生じる熱収縮対策が必要である。超伝導ケーブルは液体窒素温度に冷却されて運転されるが、室温と液体窒素の温度差により、ケーブルコアは約 0.3%収縮する。この熱収縮による応力の発生により、冷却や昇温時に、超電導ケーブルの破断や座屈等のダメージが生じる可能性があるため、対策を行う必要がある。

これについて、200m 設備での冷却・昇温時のケーブルコアの熱収縮挙動の観察から中部大学が見出された、ケーブルコアが熱サイクルによって自然にヘリカル状に変形することを積極的に活用(ヘリカル変形)することにより、熱収縮の吸収を行う予定である。



Fig.1 Installation of cryopipe.



Fig.2 Preparing for cable core installation

#### 謝辞

本研究は経済産業省 委託事業「高温超電導直流送電システムの実証研究」(平成 24 年度)、「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」(平成 25 年度)として実施した。

#### 参考文献

1. S. Yamaguchi et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.88 (2013) p.23.
2. N. Chikumoto et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.89 (2014) p.40.
3. H. Watanabe et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.89 (2014) p39.

## Bi-2223 テープを用いた高性能超伝導直流ケーブルの電流容量の検討

Estimation of current capacity of superconducting high-quality DC cable with Bi-2223 tapes

松下 照男, Vyatkin Vladimir, 木内 勝, 小田部 荘司 (九工大); 大屋正義  
 MATSUSHITA Teruo, VYATKIN Vladimir, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji (Kyushu Inst. Tech.);  
 OHYA Masayoshi (Sumitomo Electric Ind. Ltd.)  
 E-mail: matusita@cse.kyutech.ac.jp

## 1. はじめに

これまで直流超伝導電力ケーブルの電流容量を増加させる方法として、平行磁界下で臨界電流密度が大幅に増加するという縦磁界効果を利用することを提案し[1], 実際にBi-2223 テープを用いて1層のケーブルの模擬試験を行い、電流方向と磁界方向が一致したときに電流容量がピークをもつことを示した[2]。ここでは、この構造を発展させて3層としたときに電流容量がどのように改善されるかについて解析を行って検討した。

## 2. 電流容量の解析

$n$  層からなるケーブルを想定し、内側から  $i$  番目の層の超伝導線の中心からの距離  $a_i$ , 軸方向からの巻き角度  $\theta_i$  を

$$a_i = a + is, \quad \theta_i = \frac{(2i-1)}{2n} \theta_m \quad (1)$$

とする。各層における磁界と超伝導線に沿って流れる電流の間の角度を  $\varphi_i$  とし、垂直面内磁界および平行磁界下の臨界電流密度をそれぞれ  $J_{cm}$ ,  $J_{cm}$  で表し、 $i$  番目の層の臨界電流密度を

$$J_c(\varphi_i) = \frac{1}{2}(J_{cm} + J_{cm}) + \frac{1}{2}(J_{cm} - J_{cm}) \cos 2\varphi_i \quad (2)$$

と近似する。外側のシールド導体を流れる電流による軸方向磁界を  $B_{ext}$  とし、これと電流の自己磁界による全磁界の関数として電流が与えられる。これを自己無矛盾になるように解き、各層の電流分布ならびにケーブルの電流容量を求めた。解析に用いた Bi-2223 線材の臨界電流密度  $J_{cm}$ ,  $J_{cm}$  の磁界依存性を Fig. 1 に示す。

Fig. 2 は  $a = 10$  mm で 3 層とした場合にいろいろな  $B_{ext}$  の値に対して  $\theta_m$  を変化させたときの電流容量で、それぞれの  $B_{ext}$  の値で最適な  $\theta_m$  の値が存在することが分かる。この最適な場合の電流容量と  $B_{ext}$  の関係を Fig. 3 に示す。これから  $B_{ext} = 0.12$  T ( $\theta_m = 24^\circ$ ) において電流容量が 8.87 kA に達し、図に  $\circ$  で示す従来型ケーブルの電流容量 7.84 kA に対して 13.2% 改善されることが分かる。

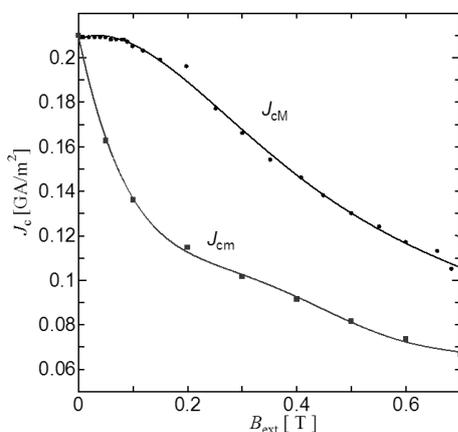


Fig. 1. Magnetic field dependence of the critical current densities of Bi-2223 tape.

## 3. 検討

今回の解析で縦磁界を利用したケーブル構造は Bi-2223 線材に対しても有効であることが明らかになった。これは、Fig. 1 に見られるように、従来の横磁界下では臨界電流が大きく減少するのに対し、縦磁界下では減少量が少ないからである。このため、縦磁界が 0.3 T 程度まではこうした特性が維持できると考えられ、したがって、超伝導層数を 4 層以上とした大電流容量化が期待できる。とくに層数が多くなると、一つの超伝導層がカバーする磁界の角度領域が狭くなり、よりフォースフリーに近くなることから、有利になると考えられる。

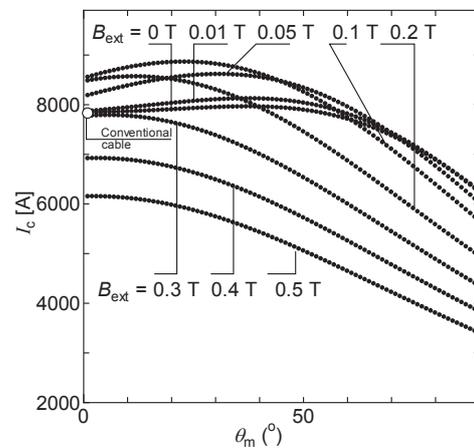


Fig. 2. Current-carrying capacity of three layer cable vs  $\theta_m$  under various values  $B_{ext}$ . The open circle shows the capacity of the conventional cable.

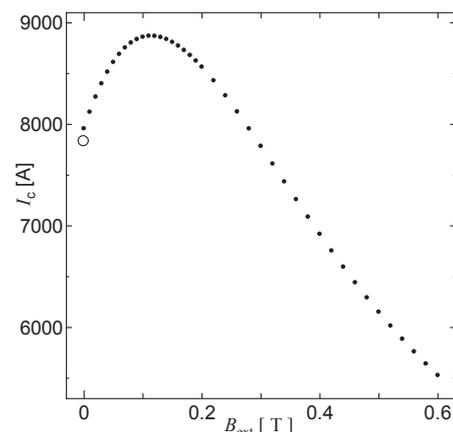


Fig. 3. Optimum current-carrying capacity of three layer cable as a function of  $B_{ext}$ . The open circle shows the capacity of the conventional cable.

## 参考文献

- [1] T. Matsushita *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 125009  
 [2] V. Vyatkin *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p. 100.

## 鉄道用超電導き電ケーブルシステムの開発 Development of superconducting feeder cable systems for railway

富田 優, 鈴木 賢次, 福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 小林 祐介, 前田 淳(鉄道総研)  
TOMITA Masaru, SUZUKI Kenji, FUKUMOTO Yusuke, ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, KOBAYASHI Yusuke,  
MAEDA Atsushi (Railway Technical Research Institute)  
E-mail: tomita@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導き電ケーブルの開発を進めている。超電導ケーブルを鉄道の送電線に適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制などが期待できる。

本講演では各種検討結果を踏まえ、鉄道用超電導き電ケーブルのプロトタイプを製作し、構内試験線で電車の走行試験を開始したので報告する。

### 2. 鉄道用超電導き電ケーブルシステムの開発状況

鉄道総研では2007年から鉄道用超電導き電ケーブルの開発に着手し、2010年には過密路線応用も視野に入る10 kA以上の臨界電流値を有するケーブルの製作に成功した。

2011年には冷却システムとして直接冷却方式、さらに冷媒である液体窒素を見かけ上1本で循環する対向流循環(Go-Return)方式を採用した鉄道用超電導き電ケーブルシステムを製作し、屋内試験を実施した。

2012-2013年には冷却システムの全てのユニットを一体化した、一体型冷却システムを開発し、300 m級鉄道用超電導き電ケーブルシステムを構内試験線に敷設した。通電、冷却、課電試験などの試験結果から、鉄道用超電導き電ケーブル

システムとしての健全性を確認した後、このケーブルを通じて給電する形で電車の走行試験に世界で初めて成功した(プレスリリース:2013年7月24日)。

2013-2014年には一き電分岐区間に相当する300 m級の鉄道用超電導き電ケーブルシステムを製作、実用化を意識し、線路跨ぎや踏切跨ぎの場所を組み入れて構内試験線に敷設し、電車の走行試験を開始した(プレスリリース:2014年7月3日)(Fig.1)。

現在までに構内試験線に敷設した30, 300m級鉄道用超電導き電ケーブルシステムを用い、冷却条件、走行条件などを変化させながら試験を進めている。

今後は更なる耐久性試験を行い、運用上の課題、問題点を抽出し、鉄道事業用として、費用対効果も含め十分に適用可能な超電導ケーブルを実現させ、営業線への導入を目指す。

### 3. 謝辞

本研究の一部は、国土交通省鉄道技術開発費補助金、ならびに(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における研究課題「次世代鉄道システムを創る超電導技術イノベーション」の支援を受けて進めたものである。

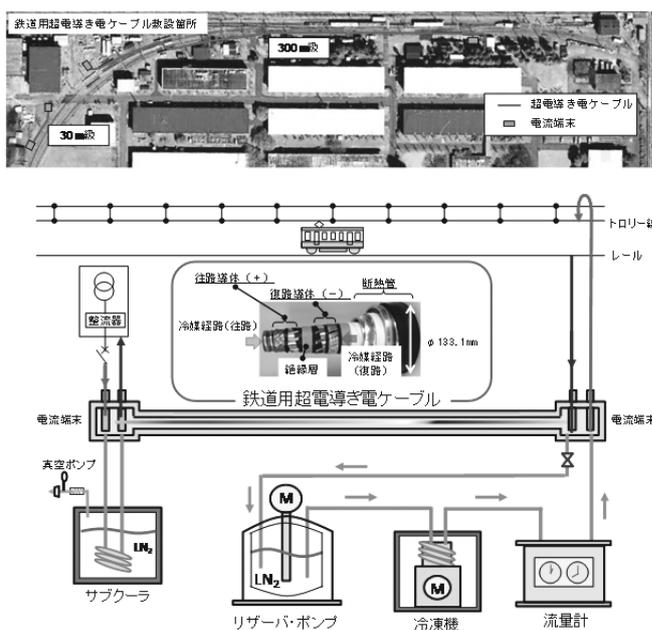


Fig.1 300 m-class superconducting feeder cable systems for railway

# 超電導フライホイール蓄電装置の開発概要

## Development of superconducting flywheel energy storage system for power plant

長谷川 均, 長嶋 賢(鉄道総研); 前田 忠和(クボテック); 松岡 太郎(古河電工)

堀内 伸一(山梨県); 清水 秀樹(ミラプロ)

HASEGAWA Hitoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI); MAEDA Tadakazu (KUBOTECK)

MATSUOKA Taro (FURUKAWA ELECTRIC); HORIUCHI Shinichi (YAMANASHI Pref.); SHIMIZU Hideki (MIRAPRO)

E-mail: hasegawa.hitoshi.10@rtri.or.jp

### 1. はじめに

現在、NEDO の助成事業により、系統安定化用蓄電装置をプロジェクト各社とともに開発している。蓄電媒体としては、寿命、コスト、蓄エネルギー容量、出力等を検討し、フライホイールを用いた蓄電装置の適用を検討している。フライホイール蓄電装置は、電力を回転エネルギーに変換して蓄エネルギーを行うため、電気化学的な反応を使用しない。このため、二次電池等で課題となっている、化学的な劣化を生じない。蓄電量に対し、繰り返し出し入れできるエネルギー量が大きい。また、鉛やカドミウムなどの有害物質を含まない、リチウムなどの希少な元素を蓄エネ部では使用しないなどの特徴がある。さらに、蓄電容量と出力を独立して設計できるため、高出力低容量や低出力高容量といった機器設計の自由度が大きい。一方で、体積当たりの蓄エネルギー量が二次電池等に比べると小さいといった課題があり、フライホイールの大質量化や高回転化の必要がある。

高容量化のポイントであるフライホイールの大質量化や高回転化については、円形螺旋織物技術を応用した炭素繊維による直径 2m の CFRP ロータの製作、高荷重高速回転に耐えうる超電導軸受の開発を行っている。

本報告では、現在製作中のフライホイール蓄電装置の概要について述べる。

### 2. 実証機の構成

実証機では、フライホイールの回転数は定格で  $3,000 \sim 6,000 \text{min}^{-1}$  で運転し、フライホイール質量  $3,000 \text{kg}$  で  $100 \text{kWh}$  級の容量を持った装置を設計製作している。

このような性能を実現するため、各実施者において、縦型発電電動機、真空シール、CFRP ロータ、超電導磁気軸受、真空容器、インフラ整備等を分担し開発製作を行っている。特に大直径 CFRP ロータや超電導軸受の開発については先行事例がないため、試作試験を繰り返し、実証機用装置を製作している(Fig.1)。

### 3. 太陽光発電所との系統連系

山梨県米倉山に  $1 \text{MW}$  級の太陽光発電所が完成し、発電を行っている。この発電所に、実証機を設置し、平成 27 年度より太陽光発電装置と  $6.6 \text{kV}$  交流系統で連系し、電力安定化実証試験を行う予定である。(Fig. 2)

### 4. おわりに

現在、系統安定化に限らず、安全、低コスト、安定な蓄エネルギー装置の要望が高くなってきており、国際的にもフライホイール蓄電装置が注目されている。我々は、超電導磁気軸受を使用したフライホイール蓄電装置を提案し、実証試験機の製作を進めているところである。実証機完成後は、太陽光発電所との連系運転を行う予定である。また、鉄道用定置蓄エネルギー装置としての実用化も検討している。

なお、この研究開発は NEDO 助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」にて行われている。

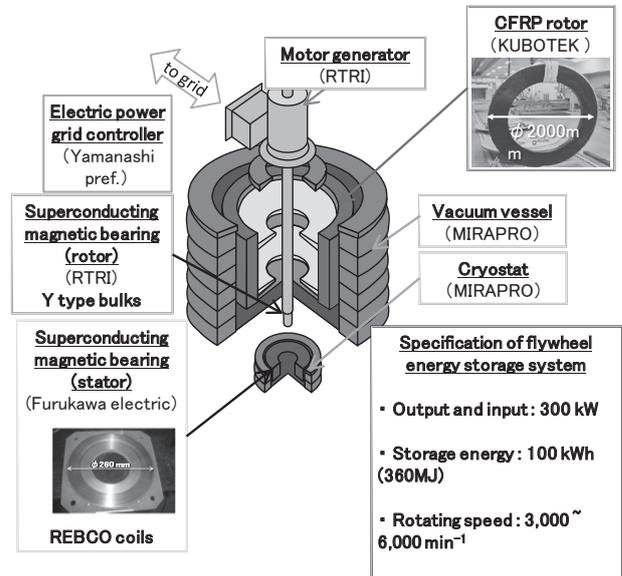


Fig.1 Flywheel energy storage system using superconducting magnetic bearing



Fig.2 Over view of photovoltaic power plant (Komekurayama hill)

### 参考文献

1. H. Hasegawa et al: "Study of superconducting flywheel energy storage system for power plant", Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88( 2013), p.202 (in Japanese)

# 超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発①～RE超電導コイル設計

## Development of Magnetic Bearing for HTS Flywheel energy storage system

### No.1, - Design of HTS Magnetic Bearing -

古川 真, 松岡 太郎, 笠原 甫 (古河電工)

山下 知久, 荒井 有気, 水野 克俊, 吉澤 佳祐 (鉄道総研)

FURUKAWA Makoto, MATSUOKA Taro, KASAHARA Hajime (Furukawa Electric)

YAMASHITA Tomohisa, ARAI Yuuki, MIZUNO Katsutoshi, YOSHIZAWA Keisuke (Railway Technical Research Institute)

E-mail: furukawa.makoto@furukawa.co.jp

#### 1. はじめに

超電導フライホイール蓄電装置は超電導軸受により浮上させた重量物を回転させることでエネルギーの出し入れを行う。軸受部分での機械的な接触がないため、機械式軸受よりも回転に伴う損失やメンテナンス面で優れている。

蓄電量 300kWh の超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受では 10t のフライホイールを超電導コイルで浮上させる必要があり、ダブルパンケーキ型の超電導コイル 7 枚と超電導バルク体 4 枚を採用することにした。

解析ソフト ANSYS のシミュレーションにより浮上に必要な磁場と強度面について電磁場解析と構造解析を行ったので、その結果を報告する。

#### 2. 電磁場解析

電磁場解析では超電導コイルへの通電電流と浮上力の関係を求めることで、10t 浮上に必要な磁場と通電電流を求めた。解析は 2 次元軸対称モデルを作成し、超電導コイルからの超電導バルク体浮上距離は 20mm で行った。解析結果から 10t 浮上時はコイルへの最大経験磁場は 5.7T であり、超電導コイルに 101A 以上通電する必要があるという結果になった。

また、経験磁場 5.7T に対して超電導コイルに 101A の通電が可能であることを、各温度における経験磁場と超電導線材の臨界電流との関係から確認した。その結果、40K までコイルを冷却すれば 101A の通電が可能で 10t に相当する 98kN の浮上力を確保できることが分かった。運転温度を 50K とするには、特性の優れた超電導線材を選別して設計する必要がある。

#### 3. 構造解析

構造解析では 10t 浮上時に超電導コイルに発生する電磁力に対して超電導コイル構成部材に生じる応力を求め、各超電導コイル構成部材の耐力との比較を行った。解析は超電導線材や冷却板の界面で接触を定義し、磁場分布は電磁場解析の結果を使用した。構成部材の FRP は強化繊維の積層方向によって耐力が異なるため、コイル径方向・軸方向・周方向の応力に対して耐力と比較を行った。

コイルにかかる応力は周方向が最も大きく、101A 通電時には 43.1MPa となった。各構成部材の耐力に対する応力は、冷却板と内筒 FRP が 15%程度であり、超電導コイルが 10t の浮上に耐えることを確認した。

#### 4. まとめと今後の展望

電磁場解析と構造解析の結果から、ダブルパンケーキ型の超電導コイル 7 枚と超電導バルク体 4 枚という構成で 10t に相当する 98kN の浮上力が得られ、且つ強度面でも問題ないことを確認した。

実証試験では、超電導コイル 5 枚と超電導バルク体 3 枚を蓄電容量 100kWh の超電導フライホイール蓄電装置に組み

込むこととした。そして山梨県米倉山のメガソーラ発電所で系統連系の実証試験を行う。

#### 5. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。本超電導コイルは中部電力(株)の「YOROI コイル」構造を用いた。

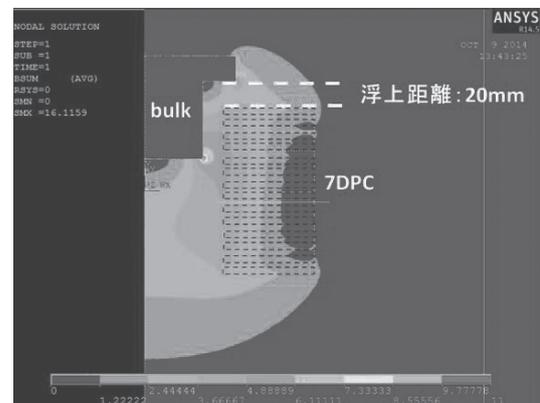


Fig.1 Magnetic flux density distribution (7 DPC, 4 bulks)

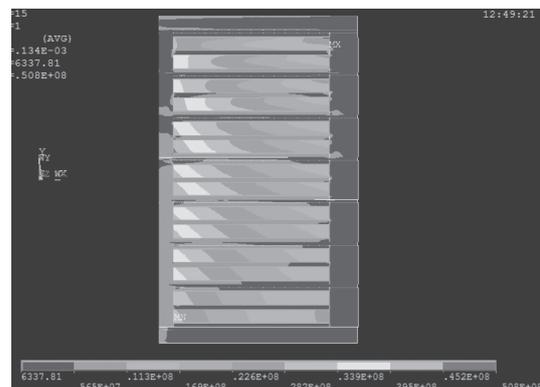


Fig.2 Von Mises stress distribution (7 DPC, 4 bulks)

Table.1 Rate of stress to proof stress

	Radial stress	Axial stress	Hoop stress
SUS Plate(%)	1.1	2.1	2.3
Inner FRP(%)	13.1	3.2	1.7
Outer FRP(%)	3.2	8.2	1.7
Other FRP(%)	8.5	1.7	2.0
Cu Plate(%)	15.1	8.0	4.4

# 超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発④～冷却試験結果

## Development of Magnetic Bearing for HTS Flywheel Energy Storage System No.4

### Cooling Test of HTS Magnetic Bearing

向山 晋一, 松岡 太郎, 笠原 甫, 古川 真, 中尾 健吾 (古河電工);

長嶋 賢, 山下 知久, 長谷川 均, 小方 正文, 宮崎 佳樹, 荒井 有気, 吉澤 佳祐 (鉄道総研)

MUKOYAMA Shinichi, MATSUOKA Taro, KASAHARA Hajime, FURUKAWA Makoto, NAKAO Kengo (Furukawa Electric);

NAGASHIMA Ken, YAMASHITA Tomohisa, HASEGAWA Hitoshi, OGATA Masafumi, MIYAZAKI Yoshiki, ARAI Yuuki,

YOSHIZAWA Keisuke (Railway Technical Research Institute)

E-mail: mukoyama@ch.furukawa.co.jp

#### 1. はじめに

再生可能エネルギーの出力変動を抑制する目的で、系統連系用の超電導フライホイール蓄電装置の開発を進めている。フライホイール蓄電装置は、フライホイールを高速で回転させることにより電気エネルギーを貯蔵するが、機械的軸受では重量、回転数に限界があった。そこで、本開発では軸受に超電導マグネットと超電導バルクの組合せた無接触軸受を実現させ、高速で回る回転体を浮上させて、機械式軸受に比べて低損失でメンテナンス・フリーを目標としている。

#### 2. ダブル・パンケーキコイルの試作と通電試験

最終目標の 300 kWh の 1/3 モデルとなる 100 kWh フライホイールの実証試験に向けて、イットリウム系超電導線材を用いたコイルの適用性の実験を行った。用意した線材は、スーパーパワー社が製造した REBCO 線材であり、高磁場での性能向上を図り、ピン導入した線材を用いた。試作した超電導マグネットは、内径 120 mm、外径 260 mm のダブル・パンケーキコイルで、中部電力が開発した「よろい」コイル技術を用いて製作した。「よろい」コイル技術とは、コイル内の超電導線材に作用する電磁力を超電導線材に接するコイル側板で支える方法で、大きな荷重に耐える必要のある本コイルに適したコイル構成と考えた[1]。本ダブル・パンケーキコイルの仕様を表1に示す。通電試験は、本コイルを真空容器の中で、GM 冷凍機で伝導冷却し、54 K の温度に保持した状況で実施し、定格電流 (110A) 以上通電可能なことを確認した。図2にコイル通電時の電流－電圧特性を示す。

TABLE 1 SPECIFICATION OF THE HTS DOUBLE-PANCAKE COIL

Item	Specification
Wire	Product of Superpower
Width of tape	6 mm
Thickness of tape	0.1 mm
Inner diameter	120 mm
Outer diameter	260 mm
Height of the coil	17.6 mm

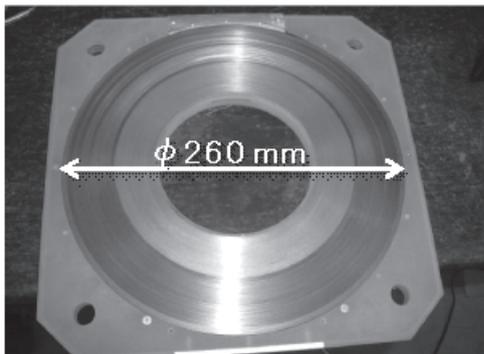


Fig. 1 2G HTS double pancake coil

#### 3. 浮上力測定試験

ダブル・パンケーキコイルの定格通電を確認したことから、新日鉄住金製の超電導バルク体と5組のダブル・パンケーキコイルを組み合わせて、浮上力実験を行った。ここでは、コイル温度を 30 K 以下に冷やして、十分なマージンを持ったもつで実施した。また、超電導コイルと超電導バルク体の反磁性効果による反発力は、延長した中心軸を冷却容器外まで引き出して、ロードセルを用いて測定した。通電により浮上力が増加して、図3に示すようにほぼ設計値どおりの 40 kN (4.1 ton) の荷重を達成した。この成果より、本コイルを 100 kWh の実証機に組み込む。

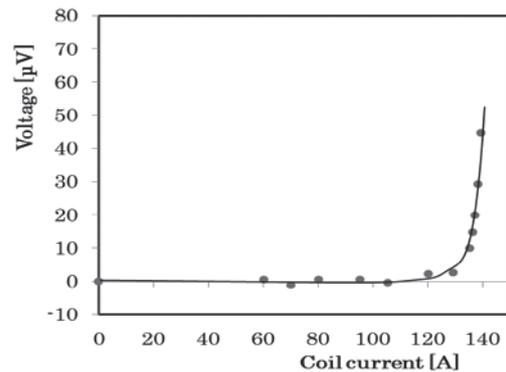


Fig. 2 I-V curve of HTS double pancake coil at 54K.

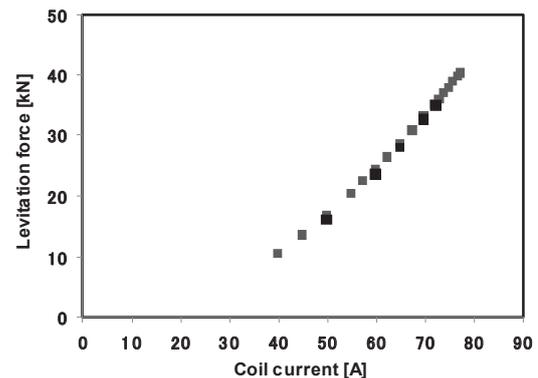


Fig. 3 Result of levitation test of HTS bulk and 5 double pancake coils.

#### 4. 謝辞

本研究は、NEDO の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」プロジェクトのうち「次世代フライホイール蓄電システムの開発」として実施したものある。また、超電導コイルの製造で協力いただいた中部電力の長屋氏および羽衣電機(株)に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] S. Nagaya, et.al, Applied Superconductivity, IEEE Transactions, Vol. 23, Iss. 3, 4601204, 2013

# 超電導フライホイール蓄電装置用磁性流体真空シールの開発(第2報)

## Development of Magnetic Fluid Vacuum Seal for Superconducting FESS (Second Report)

荒井 有気, 山下 知久, 長嶋 賢(鉄道総研); 高田 寛, 大澤 芳夫, 西田 真司, 高野 祥央(イーグル工業)  
 ARAI Yuuki, YAMASHITA Tomohisa, NAGASHIMA Ken (RTRD); TAKATA Hiroshi, OSAWA Yoshio, NISHIDA Shinji, TAKANO Yoshihisa (EKK)  
 E-mail: arai.yuki.77@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研では、NEDO 助成事業により、プロジェクト各社とともに、2012 年度より系統安定化用の超電導フライホイール蓄電装置を開発している。数 t オーダのフライホイール(弾み車)を  $3000\text{--}6000\text{ min}^{-1}$  で回転させることで、100 kWh 超の蓄電容量と MW 級の出力を目標としている。フライホイールのスラスト荷重は RE 系超電導コイルと RE 系超電導バルク体を組合せた超電導磁気軸受で非接触支持する。フライホイールの風損低減および超電導部材への断熱のため、これらは真空空間に設置される。

真空空間へのエネルギー授受のための従来の磁気カップリングを用いたトルク伝達装置[1]では、大型化・高回転化が困難であった。そこで、筆者らは磁性流体真空シールの開発を行い、直径 100 mm の軸の真空封止と、 $6000\text{ min}^{-1}$  を超える高速回転状態でのトルク伝達が両立できることを実証した[2]。今回、放熱性を向上した軸とすることで、磁性流体の温度を低下させ、磁性流体真空シールの長期耐久性に目途を得たので報告する。

### 2. 磁性流体真空シールおよび試験装置

磁性流体真空シールは、磁性体でできたロータ(回転軸)と、磁石・磁性材等でできたステータと、その間に塗布される磁性流体からなる。付帯構造としては、ロータ・ステータの接触防止のための機械軸受、発熱を冷却するための水冷ジャケット・配管等がある。

試験装置の系統図を Fig.1[2]に示す。回転軸径 100 mm の供試体は真空チャンバに取付けられ、真空引きはドライポンプで 10 Pa 以下まで行った。真空度はクリスタルイオンゲージで測定した。供試体の大気側には、トルク計を介して、AC スピンドルモータにより、回転駆動された。冷却配管には、チラーで  $20^\circ\text{C}$  に温調した冷却水を流した。また、回転軸端(真空側)の温度を赤外線温度計により、真空チャンバ外から非接触で計測した。

今回、供試体の軸は、内側からステンレス鋼、クロム・銅合金、ステンレス鋼の複合軸とし、従来[2]の中実ステンレス鋼よりも熱伝導率を向上させたものを用いた。

### 3. 試験結果

$7000\text{ min}^{-1}$  を含む 100 時間超の耐久試験結果を Fig.2 に示す。 $7000\text{ min}^{-1}$  までトルク・圧力に異常は見られず、 $7000\text{ min}^{-1}$  でも 0.01 Pa 程度を保った。また、回転軸端の温度も、中実ステンレス鋼を用いた供試体での温度より低下し、最大でも  $130^\circ\text{C}$  程度となった。試験後に分解調査をしたところ、接触等の痕跡は見られなかった。また、磁性流体にも劣化は確認されなかった。

### 4. 考察および今後の予定

フライホイール蓄電装置の実際の運転を模擬した、100 時間超の試験の間、トルク・圧力に異常は見られず、また、回転軸端の温度から推定した磁性流体温度は磁性流体の耐久性に問題の無い範囲であることを確認した。よって、直径 100 mm の軸の真空封止をしたまま、 $6000\text{ min}^{-1}$  以上の高速回転の長期耐久性に目途を得た。

今後は、フライホイール軸との接続を含めたインタフェースを有する実証機用磁性流体真空シールを製作し、フライホイール実証機へ組込む予定である。

### 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

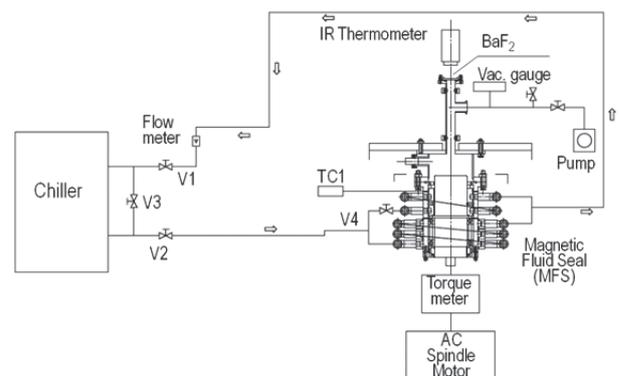


Fig.1 Schematic view of experimental apparatus[2]

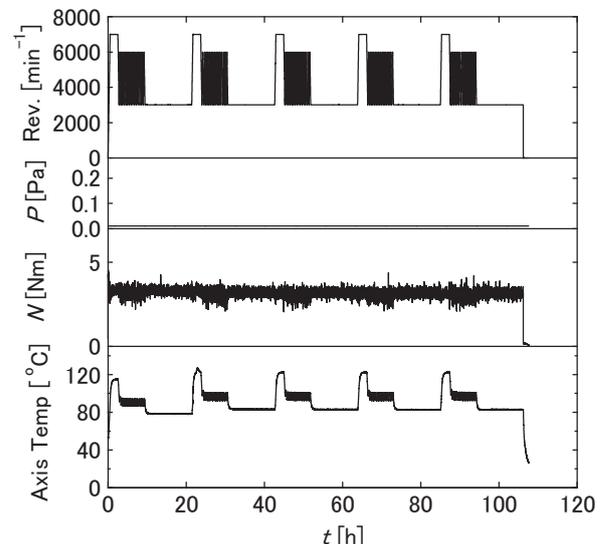


Fig.2 Experimental result of magnetic fluid vacuum seal with multi-shaft (SS/Cr-Cu/SS)

### 参考文献

1. Y. Arai, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.89
2. Y. Arai, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.23

# 超電導フライホイール蓄電装置用高熱伝導・複合回転シャフトの開発

## Development of High- $\lambda$ Multi-Material Shaft for Superconducting FESS

山下 知久, 小方 正文, 荒井 有気, 長谷川 均(鉄道総研);  
 松井 義, 土肥 哲也(松井鋼材); 上島 史生, 竹谷 剛(ステンレスプロダクト)  
 YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi, ARAI Yuuki, HASEGAWA Hitishien (RTRI);  
 MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya (Matsuikozai Corp) ; UEJIMA Fumio, TAKETANI Tsuyoshi (Stainless-product Corp)  
 E-mail: yamashita.tomohisa.91@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研は、RE 系超電導線材による円形コイルと RE 系パルク体を組合せた超電導磁気軸受で大質量フライホイールを非接触支持することを特徴とした超電導フライホイール蓄電装置を提唱し、現在、NEDOの助成を受けて真空中で数トン級の大質量フライホイールを 3000 $\leftrightarrow$ 6000min<sup>-1</sup> で回転(加速・減速)させ、100kWh 超の蓄電と放電が可能であることを実証するモデル機の開発を進めている[1]。蓄電装置内部を真空中に維持するのは、 $\Phi$ 2000mm の大質量フライホイールの風損低減および超電導磁気軸受の低熱侵入化のためである。

現在開発中のモデル機では発電電動機と大質量フライホイールの中にトルク伝達と真空シールを両立することが可能な磁性流体真空シールを採用している[2]が、その耐久性を確保するためには高速回転時の kW レベルの摩擦発熱を効率良く大気側に放熱し、温度上昇しにくい高速回転シャフトとする必要があり、今回独自の製法を考案し、直径 $\Phi$ 100mm の大口徑3層(SUS/放熱部材/SUS)の高熱伝導・複合シャフトの開発の目的を立てたので報告する。

### 2. 高熱伝導・複合シャフトの開発コンセプト

今回の新しい回転シャフトが満足すべき条件は以下のとおり

- ① 高速回転に対応するため、高い同心性を有すること
- ② 蓄電装置の運用上必要なトルク伝達ができること
- ③ 磁性流体シールの機能を満足すること
- ④ 磁性流体シール部での摩擦発熱を効率良く放熱できること
- ⑤ 複合軸そのものに耐真空リーク性を有すること
- ⑥ 構成部材の硬度低下をきたす加熱はせず一体化すること

### 3. MMS 法の特徴と3層複合シャフトの試作結果

SUS や銅・アルミを液体窒素温度付近まで冷却すると 0.2~0.3%程度収縮することが知られている。[3]今回、我々が考案した製法の特徴は、パイプ材と軸材の組合せの仕方であり、軸材のみ液体窒素温度まで冷却、嵌合に必要な収縮量を確保、嵌合・一体化するもので、高い同心性が実現できる。この新しい製法を Multi-Material Structure 法(略称:MMS 法)と名付けた。

Fig.1 に MMS 法が適用可能な軸径の設計カーブを示す。グラフより収縮率が 0.2%の場合、軸径が $\Phi$ 50mm 以上であれば本法が適用できること、軸径が大きいものほど収縮量も大きくなるので回転軸の大径化にも適用可能であることがわかる。

表1に、今回試作した複合シャフトの設計諸元を示す。アウター材は磁性流体シールの機能維持のため SUS630 を、中間材は放熱部材として銅合金を、コア材は回転力伝達部材として SUS403 を各々選定した。3層構成の複合シャフトは最初にアウター材と中間材を嵌合・一体化し、その後コア材を嵌合・一体化する二段階のプロセスで試作した。

Fig.1 に今回試作に成功した、直径 $\Phi$ 120mm の大口徑3層(SUS630/銅/SUS403)の断面を示す。試作品の同心度は目標の0.01mm以下を達成できた。またフード法による漏れ量は規定の  $1 \times 10^{-9}$  Pa $\cdot$ m<sup>3</sup>/s 以下を満足し、耐真空リーク性を有することを確認した。今回試作した複合軸の剛性等、機械的特性の評価結果は当日報告する。

### 4. 今後の予定

今回開発に成功した高熱伝導・複合シャフト構成を 100kWh 超の蓄電・放電実証モデル機用の高速回転シャフトの設計に反映していく。

### 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

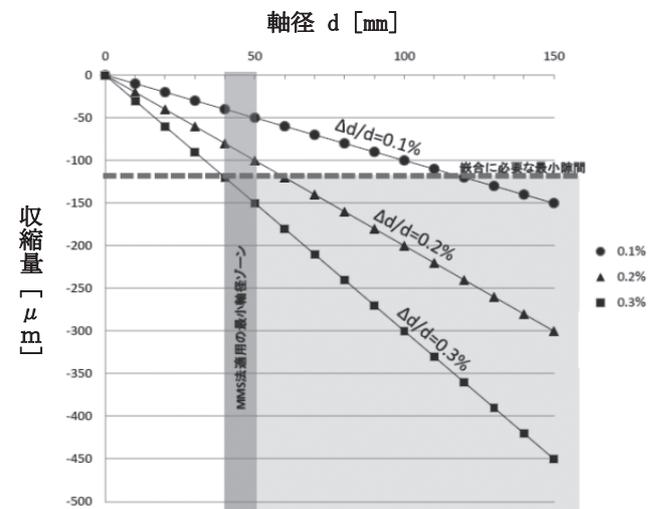


Fig.1 Desing map of MMS method

Table 1 Specifications of Multi-Material Shaft

Diameter	$\Phi$ 120
Length	Around 300
Number of materials	3
Core material	SUS403
Middle material	Cr-Cu alloy
Outer material	SUS630

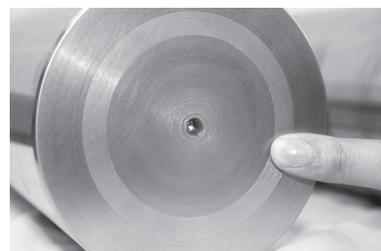


Fig.1 Cross section of Multi-Material Shaft

### 参考文献

1. H. Hasegawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2014) p.202
2. Y. Arai, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.23
3. 例えば、超伝導・低温工学ハンドブック (1993) p.1098

# ITER トロイダル磁場コイルの調達進捗

## Progress of ITER TF Coil procurement

松井 邦浩, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 高野 克敏, 安藤 真次, 山根 実, 水谷 拓海,  
中野 俊英, 片山 賢治, 井口 将秀, 小泉 徳潔 (原子力機構)

MATSUI Kunihiko, HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, TAKANO Katsutoshi, ANDO Shinji, YAMANE Minoru, MIZUTANI Takumi,  
NAKANO Toshihide, KATAYAMA Kenji, IGUCHI Masahide, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)

E-mail: matsui.kunihiko@jaea.go.jp

### 1. はじめに

原子力機構は, ITER 計画における日本国内機関として, 9 個のトロイダル磁場 (TF) コイルと, 予備 1 機を含む 19 個の TF コイル構造物の調達を担当している。これまでに, 実機 TF コイルを製作する契約を三菱重工業及び東芝と, 欧州国内機関が製作する TF コイル用の構造物を製作する契約をイーエナジー及び東芝と締結し[1], 各メーカーにおいて実規模試作を実施してきた[2,3,4]。また, TF コイルの製作工程を順守するために, TF コイルの製作を実施する各メーカーでは, TF コイル製作装置の製作を実施してきた(三菱重工業:第一製作ライン、東芝:第二製作ライン) [5]。

これらの結果を踏まえて, 実機 TF コイル及び TF コイル用構造物の製作に着手した。本稿では, 第一製作ラインを用いた TF コイル第 1 号機の製作, 及び TF コイル第 1 号機用構造物の製作の進捗について報告する。

### 2. TF コイル第 1 号機用巻線の製作

D 形状の巻線の製作では, ラジアル・プレート (RP) の溝に精度良く導体を挿入するために, 導体長と巻線形状を高精度に管理する必要がある。これまでの実規模試作及びダミー DP の製作において,  $\pm 0.01\%$  の高精度での導体長管理が可能な巻線装置の開発及び巻線技術を確立しており, これらを元に TF コイル第 1 号機用巻線の製作を開始した。これまでに, TF コイル第 1 号機用の 7 体の巻線のうち, 上下対称の標準ダブル・バンケーキ (rDP) 巻線を 4 体, 上下非対称のサイド・ダブル・バンケーキ (sDP) 巻線を 1 体, 計 5 体の巻線を製作した (Fig.1)。また, これらの巻線作業後に各巻線の導体長を測定し, 全ての巻線において  $\pm 0.006\%$  の高精度で導体長を管理できていることを確認した。

### 3. TF コイル第 1 号機用巻線の熱処理

D 形状巻線の製作後には, 冷媒入口部及びジョイント部を施工し, その後, 超伝導生成のための熱処理 ( $650^{\circ}\text{C}$ , 100 時間) を実施する。これまでの実規模による熱処理試作において, 新たに製作した熱処理炉が温度の均一性 ( $650^{\circ}\text{C}$  で  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) や導体内で 200ppm 以下の酸素濃度を達成可能であることを確認しており, この熱処理装置及び熱処理技術を元に, TF コイル第 1 号機用の第 1 本目の標準 DP に対して熱処理を実施した (Fig.2)。熱処理後には本巻線の導体長を測定し, その結果, 熱処理による導体の伸縮量は約  $0.070\%$  と評価した。この伸縮量は, 短尺導体の伸縮量を元に想定した伸縮量  $0.06\% \pm 0.02\%$  の範囲であった。この導体の伸縮量を元に RP の最終形状を決定し, RP の最終組み立て, 機械加工を実施する[6]。

### 4. TF コイル第 1 号機用構造物の製作

TF コイル構造物は, 大きくインボード側の AU とアウトボード側の BU に分けられ, これらの製作を合理的に進めるために, 先ず AU については 3 つのセグメント (A1, A2, A3), BU については 4 つのセグメント (B1, B2, B3, B4) を製作した後に, それらを溶接接続して 1 つの AU 及び BU を製作することとしている。このうち, TF コイル第 1 号機用構造物の A1 セグメントの製作を開始した。A1 セグメントの製作では, 左右 2 枚の側板及び 1 枚の背板の機械加工を実施し, その後それらを溶接接続

する。現在, 各板材の機械加工及びそれらの溶接接続の作業を完了し, 他のコイルと取合うための支持構造材の取り付け作業を実施している。

また, 欧州国内機関が製作する TF コイル第 1 号機用の構造物の製作も開始し, 現在, B1 セグメントの組立作業を実施しているところである。

### 謝辞

TF コイルの調達作業にご協力頂いている三菱重工業(株), 三菱電機(株), イーエナジー(株), 現代重工業(株), (株)東芝並びに関連会社に厚く感謝申し上げます。

### 参考文献

1. N. Koizumi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.29
2. M. Yamane, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.30
3. T. Mizutani, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.31
4. Y. Hong, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.190
5. H. Kajitani, et al.: Abstract of this conference, 1B-p07
6. K. Takano, et al.: Abstracts of this conference, 1B-p08

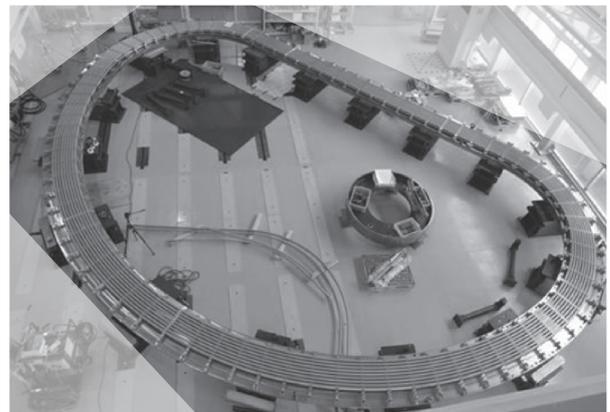


Fig.1. Fabricated side DP winding for DP7 of TF01.

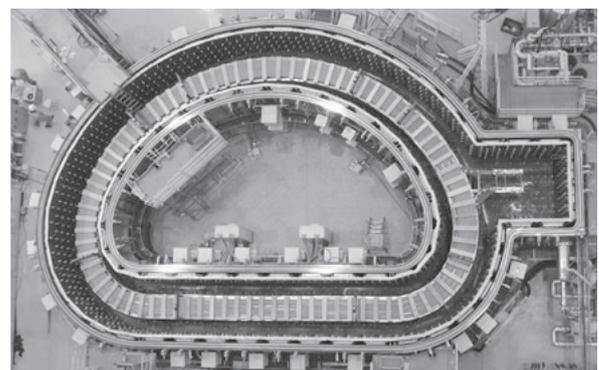


Fig.2. Heat-treated regular DP winding for TF01.

## TF コイル巻線の実規模試作の進捗

### Results of winding trial and manufacturing developments for ITER TF coil

梶谷 秀樹, 辺見 努, 水谷 拓海, 松井 邦浩, 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔(原子力機構)

KAJITANI Hideki, HEMMI Tsutomu, MIZUTANI Takumi, MATSUI Kunihiro, TAKANO Katsutoshi, ANDO Shinji,  
KOIZUMI Norikiyo (JAEA);

E-mail: kajitani.hideki@jaea.go.jp

#### 1. はじめに

原子力機構は、ITER 計画における日本国内機関として 9 個のトロイダル磁場(TF)コイルの調達を担当している。TF コイルの製作では ITER に要求される工程を満足するため、2 ラインで TF コイルの製作を進めることを計画している[1]。東芝で進めている第二製作ラインでは、実規模試作巻線及び TF コイル製作装置の製作を実施している。本講演では、巻線システムの技術検証及び熱処理炉の進捗について報告する。

#### 2. 巻線システム

TF コイルの巻線では、ラジアル・プレート(RP)の溝に絶縁された導体の隙間から、 $\pm 0.02\%$ で熱処理後の導体長を管理できれば、RP 溝に挿入できる。このため、巻線システムでは  $\pm 0.01\%$ で導体長を管理することをターゲットとした。TF コイル巻線を製作する装置は、アンコイラ、直線化ベンダ、ブラスト装置、導体長測定システム、巻線ヘッド及び巻線テーブルから構成した。その全体像を Fig.1 に示す。巻かれた導体は、Fig.2 に示す楕型の溝に格納され、設計形状を維持する構造としている。

高精度に導体長管理を実現するために、CCD カメラでマーカ間の距離を測定し、エンコーダで測定した導体長を補正するという方法を開発し、 $0.005\%$ で導体長を管理できることを確認した。加えて、1/4 ターン毎に付けたマーキングと設計位置を順次比較し、その差を導体長にフィードバックすることにより、CCD カメラを通過した後に導体長の変化が生じても対応できる導体長管理手法を用いた。これまでに、実規模巻線試作を通して本手法の検証を実施し、Fig.3 に示すように、ターゲットとした  $\pm 0.01\%$ を達成できることを実証した。これより、現在は巻線システムの技術検証を完了し、試作の最終段階である実規模コイル巻線試作(ダミーDP)の巻線製作を行っている。

#### 3. 熱処理炉

D 型に形成された巻線は、超伝導生成のための熱処理が施される。熱処理炉の全体像を Fig.4 に示す。熱処理では、高さ 13m×幅 6m の重さ約 8 トンの巻線全体にわたり、 $650^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ の精度で熱処理しなければならない。

熱処理炉内の温度分布を検証するため、模擬導体を用いて、熱処理炉の運転を行い、温度制御の無かったターミナル部では  $2^{\circ}\text{C}$ だけ外れたが、D 型部では  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ を達成することを確認した。今後は、ターミナル部での温度制御を追加するとともに、実機と同じ内部拡散法導体を用いた超伝導生成熱処理を実施し、その後、ダミーDPの熱処理を実施する予定である。

#### 4. まとめ

高精度の巻線技術の確立及び熱処理炉のコミッションングを実施した。今後は、TF コイル製作手法の最終確認として、ダミーDPの製作を実施した後、実機 TF コイル製作を開始する予定である。

TF コイルの調達活動にご協力頂いている株式会社東芝並びに関連会社に、厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

1. K. Matsui, et al.: Abstract of this conference, 1B-p06

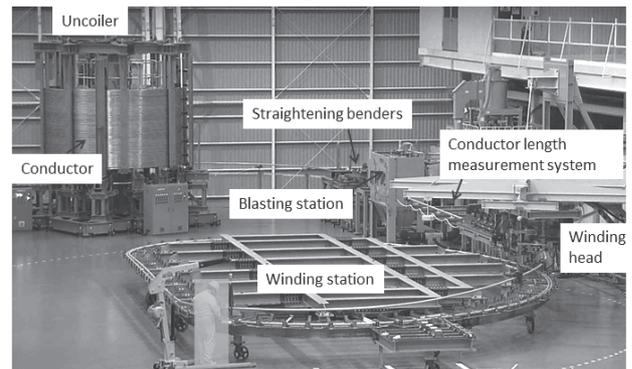


Fig.1 Overview of winding system.

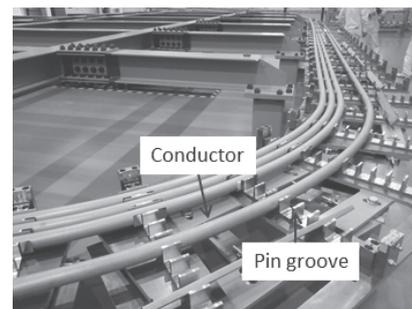


Fig.2 Conductor in the groove.

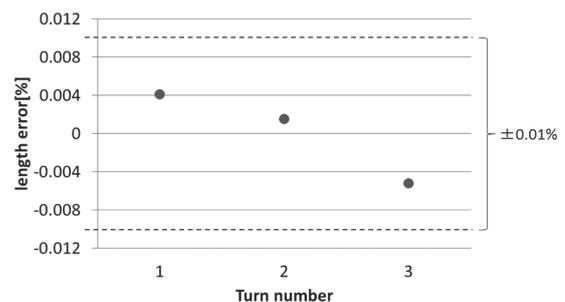


Fig.3 Length error in each turn.

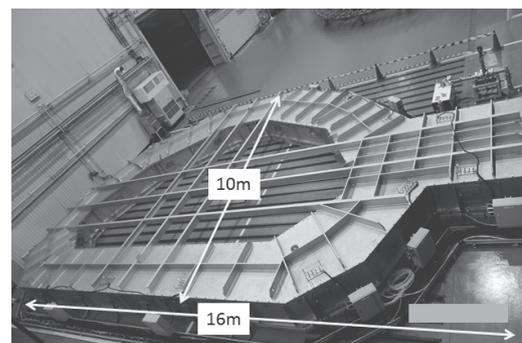


Fig.4 Heat treatment oven.

## ITER・TFコイル・ラジアル・プレートの製作に関する進捗

## Status of radial plate Manufacture for ITER TF Coil

高野 克敏, 安藤 真次, 松井 邦浩, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 小泉 徳潔 (原子力機構)

TAKANO Katsutoshi, MATSUI Kunihiro, HEEMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)

E-mail: takano.katsutoshi@jaea.go.jp

## 1. はじめに

TF コイルの巻線部に使用されるラジアル・プレート(RP)は、超伝導生成熱処理された導体を収納するため、高さ 13m、幅 9m、厚さ 10cm の大型構造物であるにも拘らず、数 mm の高精度な製作公差で製作することが求められている。このため、原子力機構では、実機製作に先駆けて、実規模サイズによる試作試験を実施した。また、試作結果を踏まえて、実機コイル1号機の製作に着手した。本発表では、実規模試作の結果及び実機製作の進捗状況について報告する。

## 2. RP の製作方法及び技術要求

TFコイルの巻線部は、7枚のDPを積層して、1体の巻線部を形成するため、DPの平面度として4mmが要求され、RPセグメント単体で1mmの平面度を満足する必要がある。また、RPは、超伝導生成熱処理された巻線導体を劣化させないように挿入する必要があるため、巻線形状を計測し、その导体周長に合わせてRPの溝周長が調整可能なように製作することが要求されている。このため、巻線の周長とRP溝周長の差を $\pm 0.023\%$ 以内に管理する必要があり、RP単体としての各溝の周長公差は約 $\pm 0.01\%$ で製作する必要がある。そこで、RPは以下の計画で製作する予定である。10分割された各RPセグメントの両端に溶接収縮量を見込んだ余肉を持たせて製作し、2~3個のRPセグメントを溶接接続し、4つのセクターを製作する。各セクターの長手方向にRPの溝周長が調整可能なように、余肉を持たせて4つのセクターを溶接接続し、最終のD型に組立てる計画である。詳細なRP製作方法については、[1]を参照されたい。

## 3. 実規模 RP 試作試験

2項に記載したRP製作方法を検証するために、実規模RP試作試験を実施した(Fig.1)。試作の結果、平面度は要求値である1mm以下を満足するN面:0.94mm、P面:0.87mm以下の製作精度を達成した。また、RPの溝周長公差については、N面:+0.0004%、P面:+0.003%となり、要求値である $\pm 0.01\%$ を満足した。さらに、N面、P面における巻線導体の周長とRP溝周長の差は、N面:0.0078%以内、P面:0.0005%以内となり、こちらについても要求値である $\pm 0.023\%$ を満足した。また、各ターン毎における巻線導体の各周長とRPの各溝周長の差は、Fig.2に示すように、N面の6溝目で最大0.0134%、P面においては、1溝目で最大0.0059%となり高精度な周長調整が可能な製作方法であることを実証した。

## 4. 実機 RP 製作

実規模RP試作試験の結果を基に、実機RPの製作を進めている。これまでTFコイル第1号機については、RP7枚分となる全てのRPセグメント製作(70枚)が完了し、RP5枚分のセクター製作が進められている。また、第2号機については、RPセグメント製作が進められている。

## 5. まとめ

実規模RP試作試験の結果、高精度かつ巻線がRPに挿入可能なRP製作方法を実証することができた。現在、試作試験の結果を基に、実機RPの製作を進めている。

## 謝辞

TFコイルの調達活動にご協力頂いている三菱重工株式会社並びに関連会社に、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] N. Koizumi, et al.: Abstracts of CSSJ conference, Vol. 89 (2014) p.29  
 [2] K. Takano, et al.: Abstracts of CSSJ conference, Vol. 88 (2013) p.45  
 [3] K. Matsui, et al.: Abstracts of this conference, 1B-p06

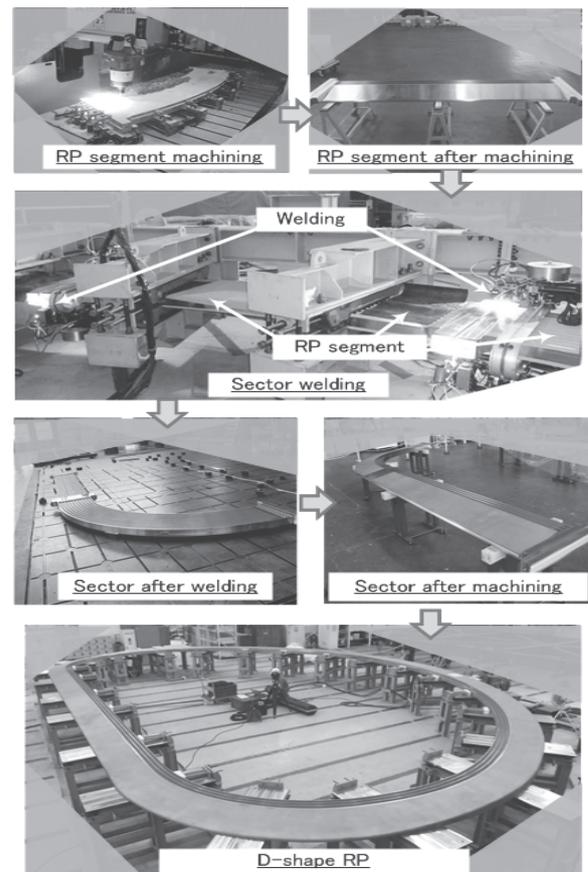


Fig.1 Full-scale trial RP Manufacture.

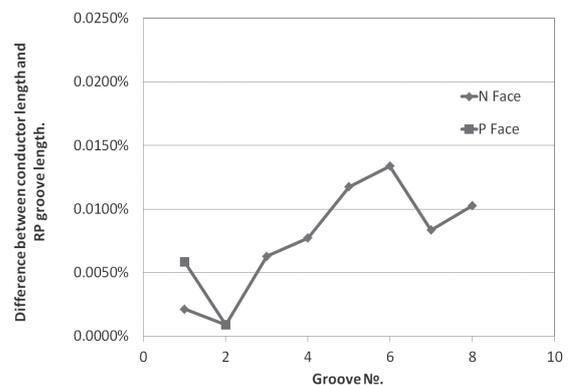


Fig.2 Difference between conductor length and RP groove length.

## ITER TF コイル・カバー・プレート溶接試作の進捗

## ITER TF progress of coil cover plate welding trial

安藤 真次, 高野 克敏, 松井 邦浩, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 小泉 徳潔 (原子力機構)

ANDO Shinji, TAKANO Katsutoshi, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)

E-mail: ando.shinji@jaea.go.jp

## 1. はじめに

トロイダル磁場(TF)コイル巻線部は、ラジアル・プレート(RP)と呼ばれる D 形の溝付きステンレス板に超伝導導体挿入し、カバー・プレート(CP)と呼ばれる蓋を被せ、RPとCPを溶接することでダブル・パンケーキ(DP)を製作する(Fig.1)。この DP は高さ 13m、幅 9m、厚さ 10cm の大型構造物を平面度 2mm の高精度で製作することが要求されている。このため、原子力機構は、CP 溶接時における高精度、かつ合理的な溶接方法を検証するために、溶接条件選定試験、実規模試作試験、及びダミーDP の試作試験を進めている。本講演では、溶接条件選定試験、実規模試作の試験結果、及びダミーDP 試作の進捗について報告する。

## 2. CP 溶接条件選定試験

RP-CP 間溶接部においては、それぞれの設計寸法公差により最大 0.5mm のギャップが生じる可能性がある。一方、RP-CP 間はレーザー溶接により、溶接溶け込み深さ 2mm 以上で接合する必要がある。このため、溶接条件を選定するために平板を用いた溶接条件選定試験を実施した。継手部のギャップ量が、溶け込み深さに影響するため、ギャップ量を 0~0.5mm まで変化させた 6 つの試験体を準備した。試験の結果、全ての試験体において溶接品質を満足し、かつ溶け込み深さ 2.6~3.2mm を確保可能であることを確認した。なお、溶接深さについては、全てのギャップにおいて要求値を満足する溶接条件を選定する必要があるため、要求値に対し裕度のある溶け込み深さとなっている。

## 3. CP 溶接実規模試作試験

2 項で確立した溶接条件を基に、CP 溶接による溶接変形を把握するため、レギュラー・ラジアル・プレート(rRP)セグメントを用いた実規模試作試験を実施した。rRP には、直線部(Fig.2)及び曲線部(Fig.3)があり、これらは溶接による変形の挙動が異なると考えられる。このため、これら 2 種類の rRP セグメントの試作試験を実施することとした。また、CP 溶接の際、溶接収縮により、RP-CP 間のギャップ量が変化することが考えられるため、本試作試験では、CP 溶接時における RP-CP 間のギャップ量も合わせて評価することとした。加えて、CP 溶接の手順として、溶接変形及び RP-CP 間のギャップ量の増加が小さくなるように、解析による変形評価を行い、最適化した溶接手順で CP 溶接を実施した。試作試験の結果、最適化した溶接手順により、RP-CP 間のギャップ量は、直線及び曲線 rRP セグメントともに、要求値である 0.5 mm 以下を満足する 1)直線 rRP セグメント:0.35 mm 以下、2)曲線 rRP セグメント:0.3 mm 以下となった。また、平面度については、要求値の 2 mm 以下を満足する 1)直線 rRP セグメント:0.5 mm 以下、2)曲線 rRP セグメント:0.8 mm 以下を達成した。

## 4. ダミーDP 試作試験

3 項で得られた結果を基に、実機 D 型サイズにおける溶接変形及び RP-CP 間のギャップ量を評価するため、ダミーRP を用いた CP 溶接試作試験(ダミーDP)を進めている(Fig.4)。これまで、片面の CP 溶接を終え、2014 年 11 月末までに全面の CP 溶接を完了する計画である。

## 5. まとめ

CP溶接条件選定試験、及び実規模試作試験結果を基に、現在ダミーDP による CP 溶接試作を実施中であり、実機製作に向けた準備を進めている。

## 謝辞

TF コイルの調達作業にご協力頂いた三菱重工業(株)、並びに関連会社に厚く感謝申し上げます。

## 参考文献

1. N.KOIZUMI, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2013) p.29

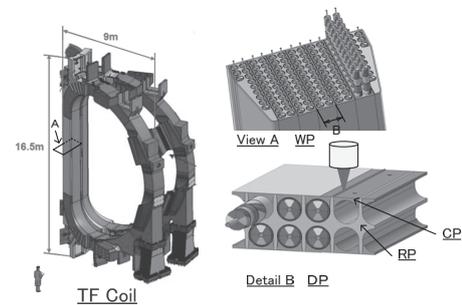


Fig.1 Section of RP-CP welding.



Fig.2 Test for CP welding of rRP straight mockup.



Fig.3 Test for CP welding of rRP curved mockup.

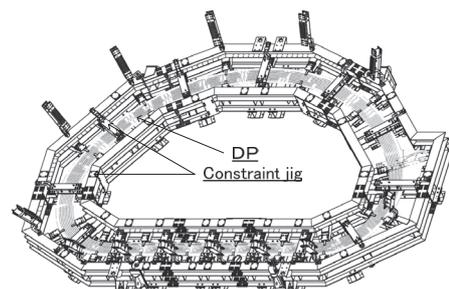


Fig.4 Test for CP welding of Dummy DP.

## CS 撚線引き込み中のツイストピッチ分布

## Twist pitch distribution in the Central Solenoid cable during insertion into the conduit

諏訪 友音, 名原 啓博, 高橋 良和, 押切 雅幸, 堤 史明, 渋谷 和幸, 布谷 嘉彦(原子力機構); 関口 信雄, 松田 英光  
(新日鉄住金)

SUWA Tomone, NABARA Yoshihiro, TAKAHASHI Yoshikazu, OSHIKIRI Masayuki, TSUTSUMI Fumiaki, SHIBUTANI Kazuyuki, NUNOYA Yoshihiko (JAEA); SEKIGUCHI Nobuo, MATSUDA Hidemitsu (NSSE)  
E-mail: suwa.tomone @jaea.go.jp

## 1. はじめに

原子力機構は, ITER 計画における調達機関として中心ソレノイド(CS)およびトロイダル磁場(TF)コイル導体の調達を担当している. 導体は, Nb<sub>3</sub>Sn 線と Cu 線から構成される撚線を用いたケーブルインコンジット導体(CICC)である. これまでの結果から, 製造過程におけるステンレス鋼管に撚線を引き込む際に, 撚線先端はツイストピッチが伸びる方向に回転することがわかっている. また, 導体製造後のツイストピッチ分布を調べた結果から, 撚線の回転によってツイストピッチが変化していると考えられている[1]. しかし, 引き込み中における撚線挙動を直接調べることは難しく, 回転とツイストピッチ変化の関係は明らかになっていない.

そこで本研究では, Cu 線から成るダミー撚線を用いてステンレス鋼管への引き込みを行い, 引き込み中の撚線のツイストピッチ分布や回転分布を連続的に調べた.

## 2. 実験

本実験では, CS 導体製造過程を模擬するため, 撚線やジャケットの寸法などは CS 導体に準じている. ダミー撚線は Cu 線から成り, CS 撚線と同じ構造を持った 5 段階の撚線である. ダミー撚線は外形が 33.6 mm, ツイストピッチが 24-47.5-87.5-157.5-450 mm となるように製造された. ステンレス鋼管(ジャケット)には CS 導体と同じ内径の 35.2 mm の SUS304 製円管を用いた. 引き込みは CS 導体とほぼ同じ約 900 m 行った. 引き込み中の撚線の回転挙動や 5 次ツイストピッチを直接調べるために, ジャケット上面にスリットを設けた. Fig. 1 のように, ある長さまで撚線を引き込んだら引き込みを

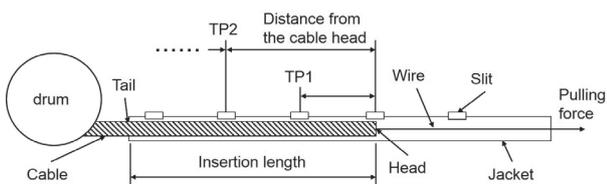


Fig. 1 Schematic view of the insertion of the cable into the jacket.

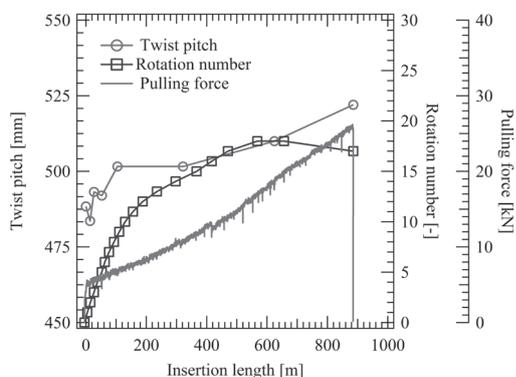


Fig. 2 Twist pitch, rotation number and pulling force at the cable head. The twist pitch at the cable head is elongated with the increase of the insertion length.

停止し, その状態でスリットから撚線表面を観察しツイストピッチを測定した. ツイストピッチは約 100 m 間隔で測定した. また, 撚線の回転及びねじれの分布も撚線全長にわたって測定した.

## 3. 結果

Fig. 2 に, 引き込み中の撚線先端におけるツイストピッチ, 回転, 引き込み力の変化を示す. 引き込み力は最大で約 26 kN となった. 撚線先端の回転は 200 m までは引き込み長さに対してほぼ線形に増加していたが, 引き込み長さが 200 m 以上になると回転数の増加は緩やかになった. また, ジャケット後端における撚線の回転は, 引き込み長さが約 300 m から撚線の回転方向が逆向きになっていることがわかった. 撚線先端のツイストピッチは引き込むにつれて伸びていることがわかった. これは, 撚線先端が緩む方向に回転していることが原因と考えられる.

ある引き込み長さにおけるツイストピッチの分布を, Fig. 3 に示す. 横軸は撚線先端からの距離を表す. いずれの引き込み長さにおいても, ツイストピッチは撚線の先端から後端にかけてほぼ線形な分布を持っていることがわかった. 撚線後端においては引き込み長さ~300 m 以上から, ツイストピッチは 450 mm 以下になっていることがわかった. これは, 300 m 以上の引き込みにおいてドラムからジャケット入口までの間で, 撚線が縮まる方向に回転していたことが原因と考えられる. 撚線のねじれからツイストピッチを計算することができる[1]ので, 実測値と計算値を比較し撚線の回転挙動とツイストピッチ変化の関係を明らかにする. 詳細結果は当日発表する.

## 参考文献

[1] Y. Takahashi, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23 (2013) 4801504

\*The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the ITER Organization.

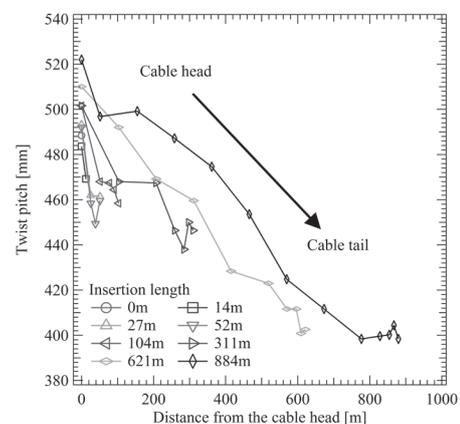


Fig. 3 Twist pitch distribution along longitudinal direction at each insertion length. The twist pitch is decreased from the head to the tail of the cable.

# ITER 中心ソレノイド用超伝導導体の量産化と導体性能

## Performance of Mass-Produced Superconductor for ITER Central Solenoid

名原 啓博, 諏訪 友音, 高橋 良和, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 尾関 秀将, 櫻井 武尊, 井口 将秀, 布谷 嘉彦, 磯野 高明,  
松井 邦浩, 小泉 徳潔, 堤 史明, 宇野 康弘, 川崎 勉, 押切 雅幸, 渋谷 和幸, 奥野 清 (原子力機構)

NABARA Yoshihiro, SUWA Tomone, TAKAHASHI Yoshikazu, HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, OZEKI Hidemasa, SAKURAI Takeru, IGUCHI Masahide, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki, MATSUI Kunihiko, KOIZUMI Norikiyo, TSUTSUMI Fumiaki, UNO Yasuhiro, KAWASAKI Tsutomu, OSHIKIRI Masayuki, SHIBUTANI Kazuyuki, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

E-mail: nabara.yoshihiro@jaea.go.jp

### 1. はじめに

ITER の中心ソレノイド (CS) 用超伝導導体は全て日本が調達する。現在、導体の量産を進めており、本年 10 月の時点で長さ 613m の導体を 1 本、918m の導体を 4 本製作した。この製作過程で 5 次撚りピッチの伸長が見られ[1]、これが導体性能に影響を及ぼし得るかを調べる必要があった。本稿では、Table 1 に示す 3 本のサンプルに対し、実規模導体試験装置 (SULTAN) を用いた試験結果を報告する。sample A は短尺で製作してほとんど 5 次撚りピッチが伸びていないもの、sample B は長さ 80m の導体から切り出したもの、sample C は長さ 918m の導体から切り出したもので、sample B と C は 5 次撚りピッチが伸びている。

### 2. 分流開始温度

繰返し通電回数に対する、分流開始温度 ( $T_{cs}$ ) の初期値からの差 ( $\Delta T_{cs}$ ) を Fig.1(a) に示す。sample B は sample A と同様に、 $T_{cs}$  が上昇または一定化の傾向を示した。また、昇温・再冷却 (wucd) に対して毎回  $T_{cs}$  が上昇した。一方、sample C の  $T_{cs}$  は 50 サイクル時に上昇したが、それ以降は低下傾向が現れ、10002 サイクル以降は単調に低下した。昇温・再冷却に関しては、3 回目まで  $T_{cs}$  は上昇したが、4 回目では低下した。Fig.1(b) に、10002 サイクル以降の温度  $T$  に対する電界  $E$  を示す。sample B の  $E-T$  曲線は 10002 サイクル以降で全く動かないのに対し、sample C は曲線全体が徐々に左へシフトしており、僅かずつ性能が低下した。ただ、この低下率は  $-4.50 \times 10^{-6}$  K/cycle と非常に小さく、6 万サイクル (CS の 20 年間の運転に相当) で  $-0.27$  K の低下であり、ITER の要求性能 (10.85T, 45.1kA で  $T_{cs} \geq 6.5$  K) を満たす。

撚りピッチの伸長が、繰返し通電に対する  $T_{cs}$  の僅かな低下を誘起し得る原因は、以下のように考えられる。CS 導体は、繰返し通電による  $T_{cs}$  の低下を防ぐため、1 次から 4 次の撚りピッチを短くしている。撚りピッチを短くすることで素線同士の結びつきを強め、個々の素線が電磁力によって隙間に移動 (変形) することを抑制している。しかし、5 次撚りピッチの伸長 (撚りの解放) はポイド率を上げるため、電磁力で撚線がまとまって移動 (変形) できるだけの空間を部分的に生じ得る。Table 1 では sample B と C でポイド率がほぼ同じだが、これは試験前の導体断面の全体的な値であり、今後、試験後の導体を分解して撚線の状態を詳細に調査する予定である。

### 3. 交流損失

5 次撚りピッチの伸長によって交流損失が増加する場合、CS のパルス運転に障害となり得る。しかし、Fig.2 に示す通り、5 次撚りピッチが長いほど交流損失が高くなる傾向は見られなかった。この原因は以下のように考えられる。サンプルに隣接した導体の破壊検査の結果、sample B, C とも 1 次から 4 次の撚りピッチは伸びていなかった。各々の 4 次撚線は個別にステンレスシートで被覆しているため (被覆率 70%)、変動磁場により誘起される電流は各 4 次撚線の中にもほぼ制限される。したがって、5 次撚りピッチだけが伸びても、交流損失にはほとんど影響しなかったと考えられる。

TABLE I PRIMARY CONFIGURATIONS OF CONDUCTOR SAMPLE

sample ID	sample A	sample B	sample C
5 <sup>th</sup> stage twist pitch	465 mm	514 mm	528 mm
Cable diameter	32.6 mm	33.0 mm	33.0 mm
Void fraction	31.9%	33.6%	33.5%
Avg. strand $I_c$	303 A	286.7 A	305.9 A
Avg. strand $Q_h$	239 mJ/cm <sup>3</sup>	245.2 mJ/cm <sup>3</sup>	248.6 mJ/cm <sup>3</sup>
Avg. strand RRR	150	179.7	169.3

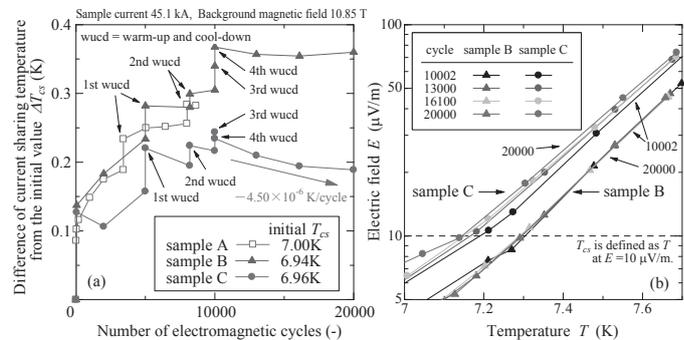


Fig.1 (a) Difference of  $T_{cs}$  from the initial value ( $\Delta T_{cs}$ ) against the number of electromagnetic cycles and thermal cycles and (b)  $E-T$  curve.

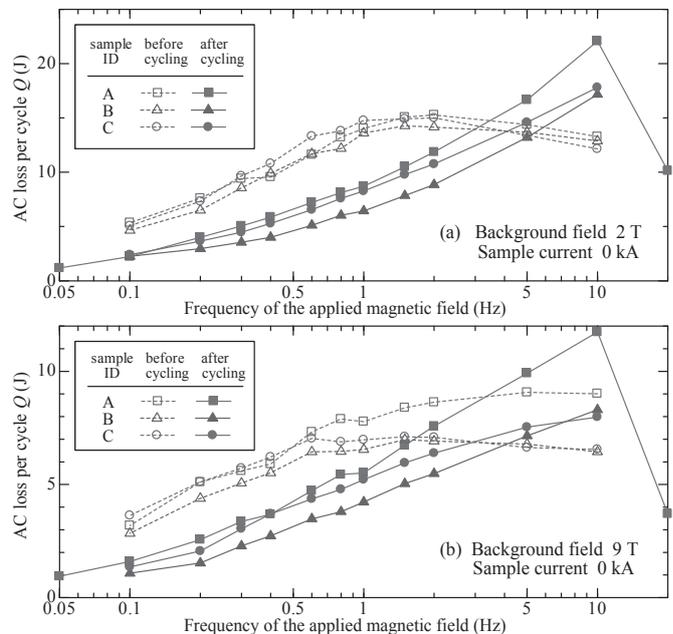


Fig.2 AC loss per cycle against the frequency of the applied magnetic field with a background field of (a) 2T and (b) 9T before and after cycling.

### 参考文献

1. Y. Nabara, et al.: "Behavior of Nb<sub>3</sub>Sn Cable Assembled with Conduit for ITER Central Solenoid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25 (2015) (in press)