

# Ho-Er 二元系窒化物による 4K-GM 冷凍機用蓄冷材の開発 — 冷凍機による性能評価 —

## Development of regenerator of Ho-Er binary nitrides for 4K-GM cryocooler -Performance tests by cryocooler-

増山 新二 (大島商船高専); 小林弘, 正田康平, 中川貴, 山本孝夫, 藤本靖 (阪大); 高田裕章, 栗岩貴寛, 山本和彦 (三徳)  
MASUYAMA Shinji, (Oshima National College); KOBAYASHI Hiroshi, SHODA Kohei, NAKAGAWA Takashi, YAMAMOTO A.  
Takao, FUJIMOTO Yasushi (Osaka Univ.); TAKATA Hiroaki, KURIHWA Takahiro, YAMAMOTO Kazuhiko (Santoku Co.)  
E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

### 1. はじめに

蓄冷式冷凍機の冷凍効率、蓄冷器内に充填される蓄冷材の物性特性に大きく左右される。特に重要視されているのが比熱特性であり、冷却対象温度領域で大きいほうが望ましい。そこで、われわれは希土類窒化物に注目し、4K レベルでの高効率冷凍機を開発を目指して研究を進めている[1]。

今回は、Ho と Er から成る Ho-Er 二元系窒化物を合成し、GM 冷凍機の 2 段階蓄冷材として充填し、性能評価を行った結果を報告する。

### 2. Ho-Er 二元系窒化物蓄冷材と GM 冷凍機

二元系窒化物は、 $\text{Ho}_x\text{Er}_{(1-x)}$  球を出発材料とし、HIP (Hot Isostatic Pressing) 法を使用し、200 MPa 程度の窒素雰囲気中で合成される。したがって、出発材料である球状合金粉の組成比 (x) を調節することで、任意の組成が選択可能であるとともに、球径も制御できる。代表的な  $x = 0 \sim 1$  までの比熱特性を  $\text{HoCu}_2$  とともに Fig. 1 に示す (なお、上部がカットされている  $\text{HoN}$  の比熱のピークは 13 K で  $2 \text{ J/cm}^3\text{K}$  である)。組成比 (x) を小さくすることで、比熱のピークが低温側に推移していることが見て取れる。なお、窒化物の熱伝導率は、ステンレスと同程度である。今回作製した二元系窒化物は、 $\text{Ho}_{0.25}\text{Er}_{0.75}\text{N}$  と  $\text{Ho}_{0.5}\text{Er}_{0.5}\text{N}$  の二種類で、球径は前者が  $180 \sim 212 \mu\text{m}$ 、後者が  $180 \sim 250 \mu\text{m}$  である。

試験に使用した 2 段階 GM 冷凍機は、コールドヘッド: RDK-101D (SHI), 圧縮機: CNA-11 (SHI) で電気入力 1.3 kW, 運転周波数は 1.2 Hz である。作製した二元系窒化物蓄冷材は 2 段階蓄冷器の低温側、体積割合で 40% に充填され、残りの 60% は鉛 (Pb) 球が充填された。2 段階蓄冷器の概略図を Fig. 2 に示す。なお、各蓄冷材を分離するため、境界部にはフェルトマットが挿入されている。

### 3. 冷凍能力実験方法・結果

GM 冷凍機は室温から運転され、各ステージの温度が安定した時を到達温度とし、その後、2 段階目ステージに取り付けてある電気ヒータにより定常熱負荷を加え冷凍能力を測定した。

作製した二元系窒化物の冷凍能力実験結果を Fig. 3 に示す。比較のために  $\text{HoCu}_2$  (球径:  $150 \sim 300 \mu\text{m}$ ) の結果も示す。二つの二元系窒化物とも、2 K 台の到達温度を示し、4K レベルで冷凍能力を有していることが分かる。しかしながら、測定された温度範囲で  $\text{HoCu}_2$  の能力を若干下回る結果となった。実験した蓄冷材における充填量、4.2 K での冷凍能力、ならびに最低到達温度を Table 1 に示す。本来であれば、二元系窒化物の密度は  $\text{HoCu}_2$  よりも高いため、充填量が多くなるはずである。しかしながら、実際の充填量は  $\text{HoCu}_2$  の 85% 程度である。これは、試料の球表面が粗く、空孔部が存在していることが原因であると考えている。

### 4. まとめ

高効率 4K 冷凍機を開発を目指して、Ho-Er 二元系窒化物蓄冷材を作製し、GM 冷凍機で性能試験を行った。作製した二つの試料とも、充填量に課題が残るものの 4K レベルで冷

凍能力を発揮できることが実証された。今後は、試料の表面状態を改善することで、さらなる性能向上が期待できると考えている。

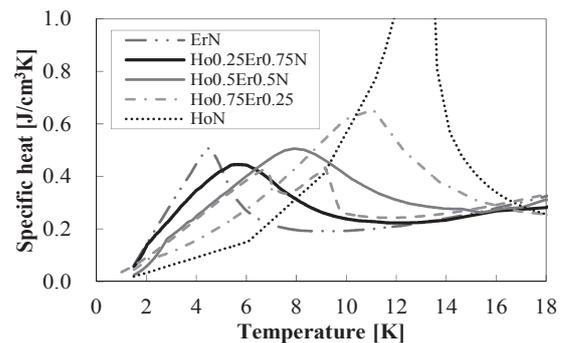


Fig. 1 Volumetric specific heat of Ho-Er nitride and  $\text{HoCu}_2$

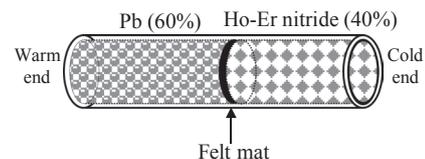


Fig. 2 Schematic drawing of the 2nd stage regenerator

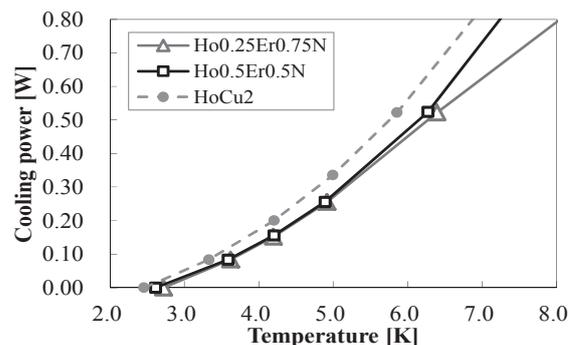


Fig. 3 Experimental results of cooling power

Table 1 Comparison of the filling weight, cooling power at 4.2 K, and lowest temperature

Regenerator material	Filling weight [g]	Cooling power at 4.2 K [W]	Lowest temp. [K]
$\text{Ho}_{0.25}\text{Er}_{0.75}\text{N}$	33	0.152	2.72
$\text{Ho}_{0.5}\text{Er}_{0.5}\text{N}$	35	0.156	2.61
$\text{HoCu}_2$	40	0.200	2.46

【謝辞】 本研究は、公益財団法人岩谷直治記念財団科学研究助成の一部により実施された。

### 【参考文献】

1. T. Nakano et al.: Applied Physics Letters, Vol.101 (2012) pp.19081-4

# Ho-Er 二元系希土類窒化物による 4K-GM 冷凍機用蓄冷材の開発 -試料の作製-

## Development of regenerator of Ho-Er binary nitrides for 4K-GM cryocooler -sample preparation-

小林 弘, 正田 康平, 中川 貴, 山本孝夫(阪大工); 藤本 靖(阪大レーザー研); 増山 新二(大島商船高専); 高田 裕章, 栗岩 貴寛, 山本 和彦((株) 三徳)

KOBAYASHI Hiroshi, SYOUDA Kouhei, NAKAGAWA Takashi, YAMAMOTO Takao (Osaka Univ.), FUJIMOTO Yasushi (ILE, Osaka Univ.), MASUYAMA Shinji (Oshima National college), TAKATA Hiroaki, KURIWA Takahiro, YAMAMOTO Kazuhiko (SANTOKU Co.)

E-mail: hr-kobayashi@mitj.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. 諸言

超伝導磁石が利用される MRI 画像診断装置等に利用される Gifford-McMahon (GM) 冷凍機の性能は、蓄冷部に充填される蓄冷材が持つ冷凍温度域での比熱に左右される。このため GM 冷凍機の性能向上にはより高性能な蓄冷材が必要である。希土類窒化物はこの冷凍温度域で高い磁気比熱と熱伝導度を示すため<sup>[1]</sup>、蓄冷材として有望である。特に Ho-Er 二元系窒化物は、現在蓄冷材として用いられている HoCu<sub>2</sub> よりも高い比熱を 4~15K で示すため<sup>[2]</sup>高性能な蓄冷材として最も期待される。しかしこれまでの球状試料には表面の突起と空孔や酸化物の析出が観察され、蓄冷器内に十分に充填できないためか、比熱から期待される通りの冷凍性能が出なかった<sup>[3]</sup>。今回、出発原料として酸素含有量のより少ない金属球を用いて、これらの突起や空孔が少ない Ho-Er 二元系窒化物の球材料の作製に成功した。

### 2. 実験

Ho<sub>0.5</sub>Er<sub>0.5</sub> 金属球 (φ 0.25-0.30 mm, 酸素含有量 0.30 wt%) と Ho<sub>0.25</sub>Er<sub>0.75</sub> 金属球 (φ 0.25-0.30 mm, 酸素含有量 0.35 wt%) を HIP (Hot Isostatic Pressing) 法により 200 MPa の N<sub>2</sub> ガス中で最高到達温度 1550°C に保持して窒化した。窒化後の球試料に超音波処理を施し、表面の突起を除去した。また、X 線回折法により生成した物質相を観察し、表面及び断面を SEM を用いて観察した。これらの結果をこれまでの酸素含有量が多い原料で合成した場合と比較した。さらに、PPMS-6000 (Quantum Design Ltd.) を用いて比熱を測定した。

### 3. 結果

X 線回折パターンから、両試料は単相の Ho<sub>0.5</sub>Er<sub>0.5</sub>N, Ho<sub>0.25</sub>Er<sub>0.75</sub>N の固溶体であることが分かった (Fig. 1)。また、低酸素含有の金属球から得た Ho<sub>0.5</sub>Er<sub>0.5</sub>N 球は高酸素含有からの試料に比べ、突起が少なく表面が滑らかだった (Fig. 2)。Ho<sub>0.25</sub>Er<sub>0.75</sub>N でも同様に低酸素含有の場合に滑らかな表面が見られた (Fig. 3)。超音波処理により表面の突起を除去することができた (Fig. 4)。このように、酸素含有量が表面の突起の形成に関係していると考えられる。講演では比熱の測定結果も報告する。

#### 参考文献

1. Y. Hirayama, *et al.*, IEEE Transaction on Magnetics (2008), **44**(11, Pt.1), 2997-3000.
2. Y. Hirayama, *et al.*, Journal of Alloys and Compounds (2008), **462**(1-2), L12-L15.
3. T. Nakagawa, *et al.*, Abstract of CSSJ Conf, vol. **86**, (2012) P. 148.

#### 謝辞

本研究の一部は公益財団法人岩谷直治記念財団科学技術研究助成により実地されたものである。

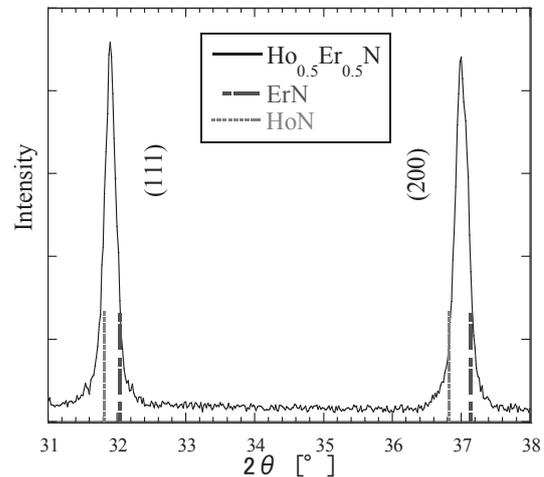


Fig.1 X-ray diffraction pattern of Ho<sub>0.5</sub>Er<sub>0.5</sub>N.

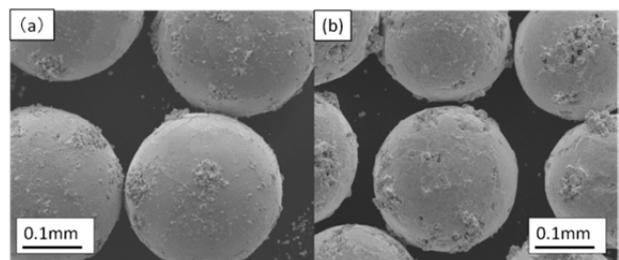


Fig.2 SEM images of Ho<sub>0.5</sub>Er<sub>0.5</sub>N spheres of (a) φ0.25-0.30 mm with oxygen content of 0.30%, (b) φ0.21-0.25 mm, 0.49%.

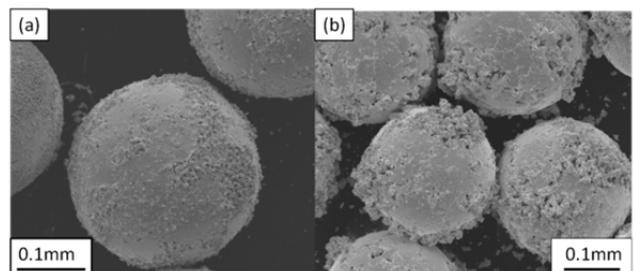


Fig.3 SEM images of Ho<sub>0.25</sub>Er<sub>0.75</sub>N spheres of (a) φ0.25-0.30 mm with oxygen content of 0.35%, (b) φ0.21-0.25 mm, 0.54%.

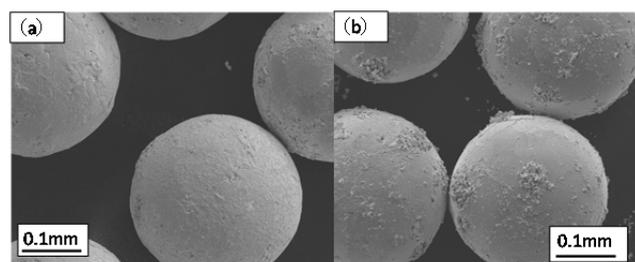


Fig.4 SEM images of Ho<sub>0.5</sub>Er<sub>0.5</sub>N spheres (a) after and (b) before the ultrasonic process.

# Gd系合金の充填配分比が室温磁気冷凍機の性能に及ぼす影響

## Effect of Gd-alloys Filling Ratio on Performance of Room-Temperature Magnetic Refrigerator

恒石 直樹, 岡村 哲至(東工大); 平野 直樹(中部電力); 伊藤 孝治(伊藤技研)

TSUNEISHI Naoki, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co.); ITO Koji (Itogiken Co.)

E-mail: tsuneishi.n.aa@m.titech,

### 1. はじめに

本研究では、磁気冷凍機の性能向上を目的とし、Fig.1 の①～④に示すキュリー点が異なる Gd 合金を用いた磁気冷凍機の性能について、数値解析による性能予測および実験的評価を行った。

### 2. 実験装置

本研究で製作した磁気冷凍機の概略図を Fig.2 に示す。磁性材料を充填するためのダクト (AMR bed) は、周方向に 90° 間隔に配置し、磁石を隔てて 180° の位置にあるダクトと直列接続した。各ダクト内は仕切り板を設けているため、1ダクトに最大 4 種類の材料を充填することができる。

永久磁石 (最大磁束密度 1T) は、停止と 90° 回転を繰り返すよう制御され、停止時間を任意に設定できる。熱交換媒体 (水) は磁石が停止した際にダクト内に流れ、その方向は磁石の回転と同期させたロータリー弁により制御を行う。そのため、磁場が印加されたダクトでは温度調節器側へ流れ、磁場が印加されていないダクトでは冷却部へ水が流れる。

### 3. 数値解析

本数値解析では、4 つのダクトが直列に接続された流路を一次元の直線流路へと簡略し、磁性材料と熱交換媒体である水との熱移動過程をモデル化している。ダクト内の磁性材料および熱交換媒体 (水) のエネルギー方程式 [1] は、以下のようになる。

$$\rho_w c_w \left( \frac{\partial T_w}{\partial t} + u \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{S}{V_w} h(T_{Gd} - T_w) \quad (1)$$

$$\rho_{Gd} c_{Gd} \frac{\partial T_{Gd}}{\partial t} = \lambda_{Gd} \frac{\partial^2 T_{Gd}}{\partial x^2} + \frac{S}{V_{Gd}} h(T_w - T_{Gd}) + \frac{\rho_{Gd} c_{Gd} \Delta T_{ad}}{\Delta t V_{Gd}} \quad (2)$$

ここで、 $S$ 、 $\Delta T_{ad}$  はそれぞれ磁性材料と水との間の伝熱面積、磁性材料の断熱温度変化である。また、流速  $u$  は一定とし、ダクト壁面は断熱条件として計算を行った。

### 4. 実験方法

実験では、ダクト内の磁性材料の充填比を①:②:③:④=3:1:2:2 (以後、比率のみ記載) とし、高温端温度  $T_h = 20.5^\circ\text{C}$ 、流量 2L/min、磁石停止時間 (熱交換時間) 0.5sec の条件で行った。このシステムの冷凍能力の評価は、冷却部に熱負荷を与え、低温端温度  $T_L$  が一定となった時、与えた熱量をその温度における冷凍能力としている。また、温度測定は、ロータリー弁入口および低温部の 2 点である。

### 5. 結果と考察

Fig.3 に数値解析による性能予測および実験結果を示す。材料充填比 3:1:2:2 における解析結果と実験結果は良い一致が見られ、実験で最大温度スパン  $\Delta T = 13.3^\circ\text{C}$  を得た。また、Gd のみ充填した場合 (1:0:0:0) の解析結果と比較すると、最大温スパンが 3°C 拡大され、キュリー点が Gd より低温域に存在する材料を充填した効果がみられる。さらに Gd の充填比を下げると、最大温度スパンが拡大し冷凍能力が低下する。

この最大温度スパンの拡大は、キュリー点が低い材料の充填量が増加するためである。一方冷凍能力の低下は、熱負荷を与えダクト内温度が上昇するにつれて、キュリー点が低い材料の断熱温度変化が減少するためであり、Gd 充填量の減少に伴い顕著に表れる。

### 謝辞

本研究は、「省エネルギー革新技術開発事業/先導研究 (事前研究一体型)/磁気ヒートポンプ技術の研究開発」として、独立行政法人新エネルギー・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。

### 参考文献

1. T.Kawanami, et al.: Proceedings of JSRAE Conference, Vol. 28(2011)p.213-223

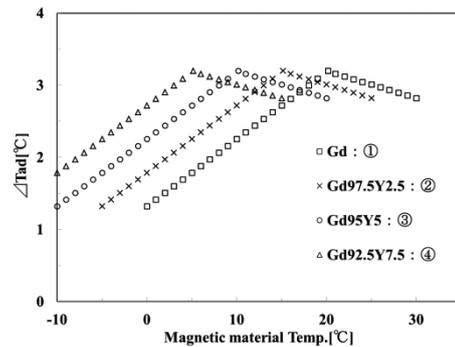


Fig.1 Adiabatic temperature changes of magnetic materials at magnetization

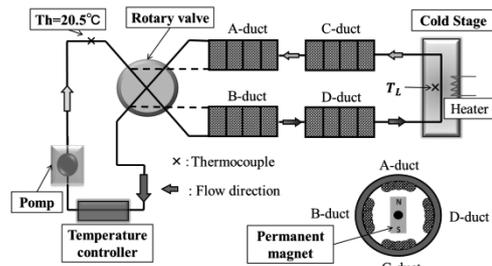


Fig.2 Schematic illustration of experimental apparatus

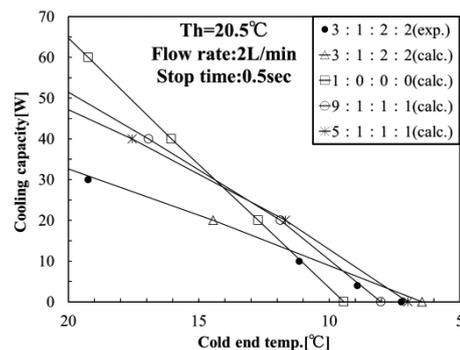


Fig.3 Calculation and experimental results for Cooling capacity vs. Cold end temperature

# 高温超電導冷却用スターリング型パルス管冷凍機の損失分析

## Loss Analysis of High Power Stirling-Type Pulse Tube Cryocooler

中野 恭介, 平塚 善勝(住重)  
 NAKANO Kyosuke, Hiratsuka Yoshikatsu (SHI)  
 E-mail: Kys\_nakano@shi.co.jp

### 1. はじめに

高温超電導線材の技術革新に伴い回転モータ, 限流器, SMES 等の研究開発が世界的に各研究機関ならびに企業で行われている。これら高温超電導線材を用いたデバイスの冷却には液体窒素温度である 77K において冷凍能力数百 W クラスの冷凍機が必要となり, 既存技術との兼ね合いから, 高温超電導デバイスがシステムとして経済的な合理性を得るためには, 高効率な冷凍機 (COP0.1 以上) の開発が必要不可欠となる。我々は, 2012 年高温超電導デバイスの冷却用としてスターリング型パルス管冷凍機を試作製作し, 性能試験結果 (電気入力 3.8kW, 運転周波数 49Hz, 冷凍能力 210W at 77 K, COP0.055) について報告を行った [1]。高温超電導デバイスの実用化に向けて, さらになる冷凍機性能の高効率化を目指し, 試作冷凍機内部の損失分析を行い性能向上のための課題を抽出し, 数値計算と合わせて評価検討を行なった。その結果内容について報告する。

### 2. 試作機概要と計測システム

高温超伝導機器冷却用として試作開発したインライン型膨張器について損失分析を行なった。冷凍機システムの効率と内部のエネルギー収支を把握するために冷凍能力, 圧縮機の P-V 仕事 (以後仕事流) ならびに各熱交換器の放熱量を計測した。さらに, パルス管常温端, バッファ空間のそれぞれに圧力センサを設置し, パルス管部での仕事流や各部の圧力損失を計算した。

### 3. 実験結果ならびに計算結果

実験で得られた結果を基に冷凍機内部のエネルギー流を算出し検討した。冷凍機への電気入力  $Q_{inp}=3.8$  kW は, 圧縮機の冷却部からモータ内部の銅損と鉄損分として熱量  $Q_{cp}=668$  W を放熱し, さらに圧縮機背圧側での損失仕事  $W_{cb}=140$  W が排熱され,  $W_{cp}=Q_{inp}-Q_{cp}-W_{cb}=2883$  W が膨張器側への仕事流として流入される。膨張器の各熱交換器における熱量は, それぞれアフタークーラー  $Q_{ac}=2609$  W, コールドヘッド  $Q_{ch}=210$  W, ホットエンド  $Q_{he}=549$  W となる。

Table 1. Experimental and Numerical results.

Symbol	Experimental(W)	Numerical(W)
$W_{cp}$	2883	2863
$Q_{ac}$	2609	2627
$H_{re}$	274	262
$Q_{ch}$	210	247
$W_{pt}$	598	570
$Q_{he}$	549	546
$Q_{pt}$	49	24

さらに蓄冷器内のエンタルピ流 (熱損失) は, (1) 式で求められ  $H_{re}=274$  W が得られた。

$$H_{re} = W_{cp} - Q_{ac} \tag{1}$$

パルス管常温端, バッファ空間の圧力差から計算したパルス管常温端仕事流は  $W_{pt}=598$  W となり, ホットエンドの冷却量  $Q_{he}(=H_{pt})$  からパルス管を流れる熱流  $Q_{pt}$  を計算した結果, 次式より  $Q_{pt}=49$  W が得られた。

$$Q_{pt} = W_{pt} - H_{pt} \tag{2}$$

以上の各諸量の計算結果をエネルギーフロー線図としてまとめた結果を Fig. 1 に示す。同図より, 蓄冷器内における熱損失が過大であることと同時に, 位相制御部で摩擦により消散されるパルス管常温端仕事流は, 圧縮機からの仕事量における約 20% となることが理解される。さらに, 蓄冷器内の摩擦損失は, パルス管の仕事流  $W_{pt}$  が常温側温度  $T_h$  (= 圧縮機温度  $T_{co}$ ) とコールドヘッド温度  $T_{ch}$  の比で, 増幅された仕事量が摩擦損失の無い賞味の仕事量  $W_{el}$  と考え, (3) 式から簡易的に摩擦損失によるエネルギー量  $W_{fl}$  を算出した [2]。

$$W_{fl} = W_{cp} - W_{el} = W_{cp} - W_{pt} \cdot \left( \frac{T_h}{T_{ch}} \right) \tag{3}$$

その結果,  $W_{el}=2485$  W,  $W_{fl}=398$  W と計算され, 先の蓄冷器内の熱損失と同様に, 摩擦損失が過大であることが理解される。また, これらの実験から得られた損失分析の結果についての妥当性の検証を数値計算との比較で行ない, おおよそ近似した値であることが確認された (Table 1)。

### 4. まとめ

高温超伝導機器冷却用として試作したスターリング型パルス管冷凍機の効率改善を目標とした損失分析を, 実験ならびに数値計算によって行なった。結果, 蓄冷器損失が内部損失の多くを占めていること, さらに効率を改善するためには位相制御部で消散される仕事流を回収する必要性が確認された。

### 参考文献

- Y. Hiratsuka, et al. : "Development of Orientation-Free High Power Stirling-Type Pulse Tube Cryocooler" *Cryocoolers 17*(2012), pp. 129-133.
- Masao ONO, et al. : "Performance Analysis of Free-piston Free-displader Stirling Cryocooler", *JSME No.920-57* (1992)

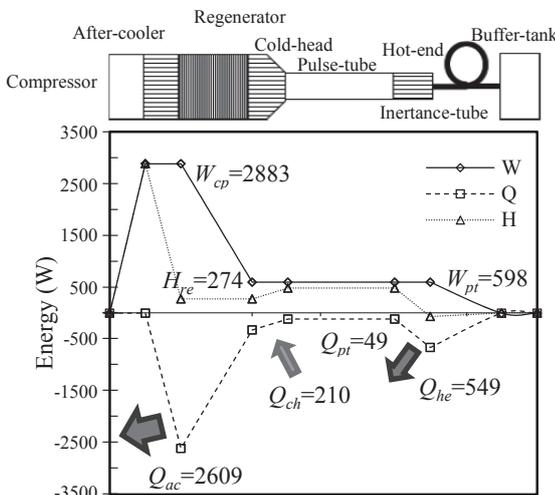


Fig. 1 Energy Flow chart in In-line pulse-tube cryocooler.

# ステップピストン圧縮機型イナータンスチューブパルス管冷凍機

## Inertane tube pulse tube refrigerator with step-piston compressor

朱 紹偉(同濟大学)  
 ZHU Shaowei (Tongji University)  
 E-mail: swzhu(a)tongji.edu.cn

### 1. INTRODUCTION

In an inertane tube pulse tube refrigerator, the expansion work from the pulse tube becomes heat due to the heat transfer and friction in the inertane tube, so its theoretical efficiency is lower than that of a displacer type Stirling pulse tube refrigerator. In order to increase the efficiency of the inertane tube pulse tube refrigerator, a step-piston compressor is used. The step piston forms two working spaces, compression space which is connected to the after cooler, expansion space which is connected to the buffer. Due to the inertane tube, the pressure waves in the compression space and expansion space have about 180 degree phase difference, then the compression space inputs work, and the expansion space gets work, the efficiency is increased.

### 2. STRUCTURE

Figure 1 shows the schematic of the inertane tube pulse tube refrigerator with step piston compressor. The step piston and step cylinder form the compression space and expansion space. The compression space is connected to the after cooler, the expansion space is connected to the buffer.

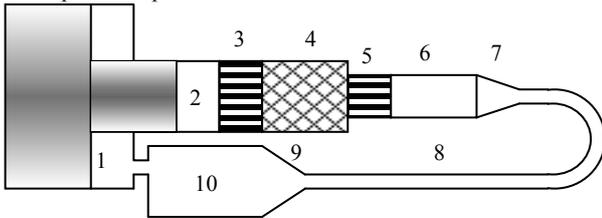


Figure 1 schematic of inertane tube pulse tube refrigerator with step-piston compressor

- 1.compression space    2.expansion space    3.after cooler
- 4.regenerator    5.heater    6.pulse tube    7.tipper
- 8.inertane tube    9.tipper    10.buffer

### 3. NUMERICAL RESULTS

Figure 2 shows the compression work, input work, expansion work ratio which is the expansion work over the input work, cooling power, and percent Carnot vs. swept volume ratio of expansion space over compression space in the pulse tube refrigerator with the inertane tube  $\Phi 30 \times 1200$  and working at 150Hz. There is an optimum swept volume ratio 0.625 with which the percent Carnot gets maximum. The expansion work ratio at optimum point is 15.5%.

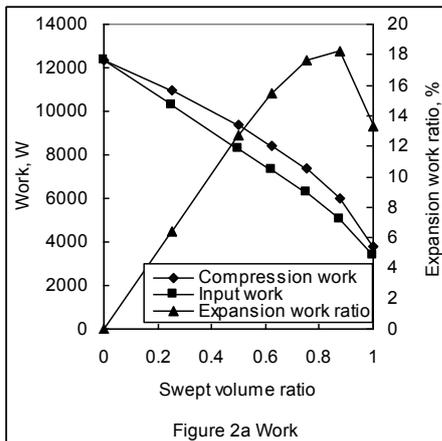


Figure 2a Work

Comparison with a solid displacer, the inertane piston is not so strong for recover expansion work. There must be some work lost in the inertane tube. But its moving part is only one though it is a little complex comparison to ordinary compressor. The working frequency also should be high for getting enough inertane effect.

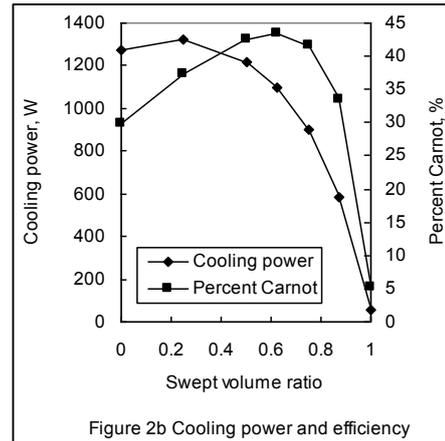


Figure 2b Cooling power and efficiency

Near room temperature, the work recover effect becomes strong because the expansion work is very large comparison with the input work.

Figure 3 shows the pressure waves in compression space and expansion space, and compression space volume at swept volume ratio 0.625. The phase difference between the pressures in the compression space and expansion space are about 180 degree, then the compression space can input work and the expansion space can get work though they have same phase angle.

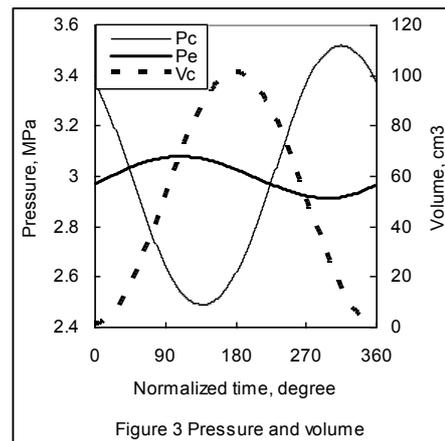


Figure 3 Pressure and volume

### 4. CONCLUSION

Numerical simulation results shown that step piston compressor is a possible method to recover the expansion work to let pulse tube refrigerator efficiency increase.

### REFERENCE

1. Shaowei Zhu, et al, Cryogenics 50(2010) pp320-330.
2. 朱, 特開 2007-40647

## 2013 年度 低温技術夏合宿 -77K 小型冷凍機を作ろう-

### Summer Seminar on Cryogenic Engineering—the challenge to make a 77K cryocooler-

上野 晃太 (フジクラ); 鈴木 雄太 (神戸製鋼); 奥山 昂 (アルバック・クライオ); 平山 貴士 (住重);

飛田 永二, 細井 昭宏 (超電導機構); 藤原 伸弘 (ジェック東理社); 小林 祐介 (鉄道総研)

UENO Kota(Fujikura), SUZUKI Yuta (KOBELCO); OKUYAMA Noboru (ULVAC CRYOGENICS); HIRAYAMA Takashi(SHI);

TOBITA Eiji,HOSOI Akihiro(JSO); FUJIWARA Nobuhiro(JECC Torisha); KOBAYASHI Yusuke(RTRI)

E-mail: kota.ueno@jp.fujikura.com

#### 1. はじめに

若手の研究者や技術者を対象とし、超電導や低温技術の理解を深めることを目的として開催されてきた低温技術夏合宿は、今回第2回目となる小型パルス管冷凍機製作の企画となった。

物質・材料研究機構にて2013年8月19日から23日までの一週間で学んだ内容や、製作した小型パルス管冷凍機の実験について報告する。

#### 2. 座学

本合宿は座学と小型冷凍機の製作実習により構成される。座学は、「パルスチューブ冷凍機」、「小型冷凍機の試作」、「製作する冷凍機」のパルスチューブ冷凍機の基礎と実習で製作する冷凍機についての講義及び「クライオスタートと冷凍機」、「冷凍機とその応用」、「真空、高圧ガスと安全」、「計測」の冷凍機の応用と計測・安全性についての講義から構成される。

#### 3. 小型パルス管冷凍機の製作

パルス管冷凍機の製作実習は3班に分かれて行った。パルス管冷凍機の諸元および各班で用いた蓄冷材の配合比をFig.1に示す。パルス管冷凍機は、パルス管、蓄冷管にSUS304パイプを用い、その間を内径10mmの銅パイプを取り付けてFig.2のような折り返しのある構造とした。また、各班ごとにSUS球、SUSメッシュ、SUSと銅メッシュを異なる蓄冷材を用いて実験を行った。

#### 4. 冷却試験および試験結果

製作したパルス管冷凍機を圧縮機と接続した。Fig.3において、パルス管のバルブ①、②の接続を切り換えることで、ベーシック型、オリフィス・ダブルインレット型に変更することができる。各班でオリフィスやダブルインレットの開閉タイミングを調整し、ベーシック型、オリフィス・ダブルインレット型の動作特性を確認できるよう実験条件を調整しながら目標到達温度77Kを目指した。当初の予定では4バルブ型についても実験を行う予定であったが、電磁弁の不調と時間の都合上、今回は4バルブ型の実験は一部の班でのみ行った。3台のパルス管冷凍機のうち、SUS球(φ0.3mm)を蓄冷材とした冷凍機は71K、SUSメッシュと銅メッシュを蓄冷材とした冷凍機は82K、SUSメッシュのみを蓄冷材とした冷凍機が69Kにそれぞれ到達した。今回の実験では、SUSメッシュのみを蓄冷材とした冷凍機の結果が最も冷えた結果となった(Fig.4)。

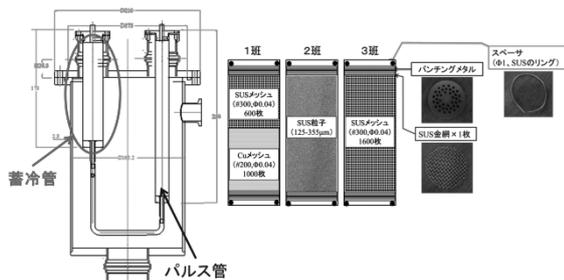


Fig.1 Pulse tube cryocooler and cold storage material

#### 5. おわりに

今回の夏合宿では初めて小型パルス管冷凍機の製作に取り組むこととなったが、パルス管冷凍機の冷却原理を座学と実習を通じ、あるいは動作実験を通して、パルス管冷凍機の原理、そのシンプルな構造を知ることができた。なにより講師の方々や受講者同士のつながりができたことは、受講者にとって貴重であった。今後もこのような実習が継続されることを希望する。

#### 6. 謝辞

今回の合宿に参加するにあたり、ご指導を頂いたColdTech 上岡泰晴先生、日本大学 松原洋一先生、物質・材料研究機構 西島元先生、東京農工大学 上田祐樹先生、産業総合研究所 淵野修一郎先生、古瀬充徳先生、高エネルギー加速器研究機構 細山謙二先生、クライオウェア 藤岡耕治先生、大陽日酸 平井寛一先生には座学および製作実習を通じて貴重な知識と技術をご教授賜りました。この場をお借りして講師の皆様へ深く感謝申し上げます。

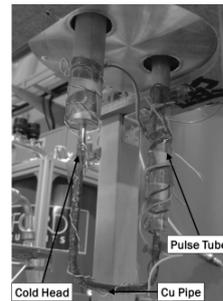


Fig.2 Photograph of pulse tube cryocooler

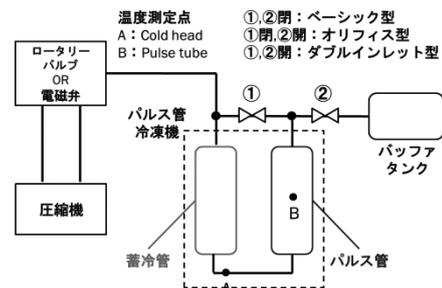


Fig.3 System configuration of cooling test

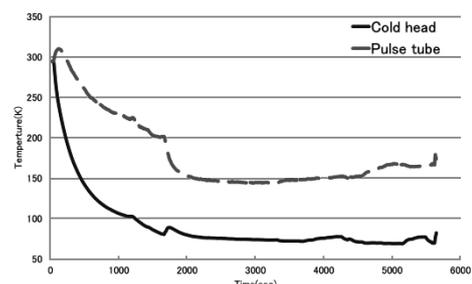


Fig.4 Cool down process of double-inlet pulse tube

## ITER 導体の製作進捗

### Progress of ITER conductor fabrication

布谷 嘉彦, 高橋 良和, 押切 雅幸, 堤 史明, 名原 啓博, 高村 淳, 中瓶子 伸二, 渋谷 和之, 諏訪 友音 (原子力機構);  
松田 英光 (新日鉄住金エンジニアリング)

NUNOYA Yoshihiko, TAKAHASHI Yoshikazu, OSHIKIRI Masayuki, TSUTSUMI Fumiaki, TAKAMURA Jun, CHUHEISHI Shinji,  
SHIBUTANI Kazuyuki, SUWA Tomone (JAEA); MATSUDA Hidemitsu (NSSE)

E-mail: nunoya.yoshihiko@jaea.go.jp

#### 1. はじめに

国際合意された日本調達分担に基づき、日本原子力研究開発機構は ITER 超伝導導体の製作を行っている。日本はトロイダル磁場(TF)コイル用導体と中心ソレノイド(CS)用導体の製作を担当している。導体はステレス製コンジットを用いた CIC 導体であり、Nb3Sn 超伝導線を多段で撚り合わせた撚り線を用いている。導体製作では直線状のジャケット管に撚線を引き込む方式で行っている。導体製作の概要とその進捗、及び引き込みの結果撚線の撚りピッチが進展する現象とその対応について説明する。

変化の読み取りが可能である原理を用いた。一方、撚線先端部に回転センサーを取り付けたところ、引き込み中に最終的には 50 回転することが分った(同 Rotation)。これらから、撚りピッチの伸びは最高 4 トンの引き込み力により、撚線の撚りが戻る現象によることが分った。その後、この現象は他国での導体製作でも発生していることが分り、対応を国際的に協議した結果、撚りピッチの伸びは最終段が支配的であり、交流損失への影響は極めて限定的であること、製作上の防止策が見いだせないことから、このままコイルで使用することで合意した。なお、この現象は CS 導体でも発生し、同様な議論を行った。

#### 2. 導体製作

図 1 に TF 導体の製作方法を示す。TF 導体用撚線は超伝導素線(外径 0.82mm)900 本と銅線(同)を 5 段階で撚り合わせた構造である。長手方向に溶接した円管の空ジャケット(SS316LN 製)を用意し、片端から撚線をワイヤーロープを用いて最高 4 トン程度で引き込み、圧縮成径(compaction)することにより、規定の断面寸法を持つ導体を製作する。導体長は 760m 又は 415m である。CS 導体用撚線では超伝導素線 576 本、銅線 288 本用いており、外は角形、内は円形のジャケット材を用いるが、製作方法は TF 導体と同様である。導体長は 918m 又は 613m である。

#### 4. 製作の進展

TF 導体の製作はほぼ終了し、来年度 2 導体を製作することにより、日本分担の 33 本の製作を終了する。CS 導体は、既に銅線を用いた模擬導体の製作を終了しており、1 本目の超伝導導体製作を本年 12 月初めに予定している。日本分担の 49 本の製作終了は、2017 年に予定している。

#### 3. 撚線の撚りピッチの変化

TF 用撚線の最終段の撚りピッチは 420mm で製作したが、導体製作後に導体先端部を分解しピッチを計測したところ、480mm 程度に変化していることが分った(図 2 Destructive Ex.)。このピッチの伸びは、先端部を最大として導体長手方向に連続的に変化していることも分かった(同 Laser Meas.)。ここで、ジャケット材は比較的薄肉(2mm)であるため、レーザーを用いて非常に精密に導体の外径計測を長手方向に連続的に行うことにより、内部の撚線の撚りピッチに対応した外径

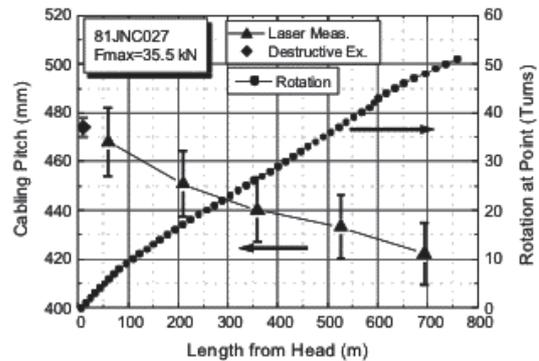


Fig.2 Twist pitch elongation and cable head rotation during pulling of the cable.

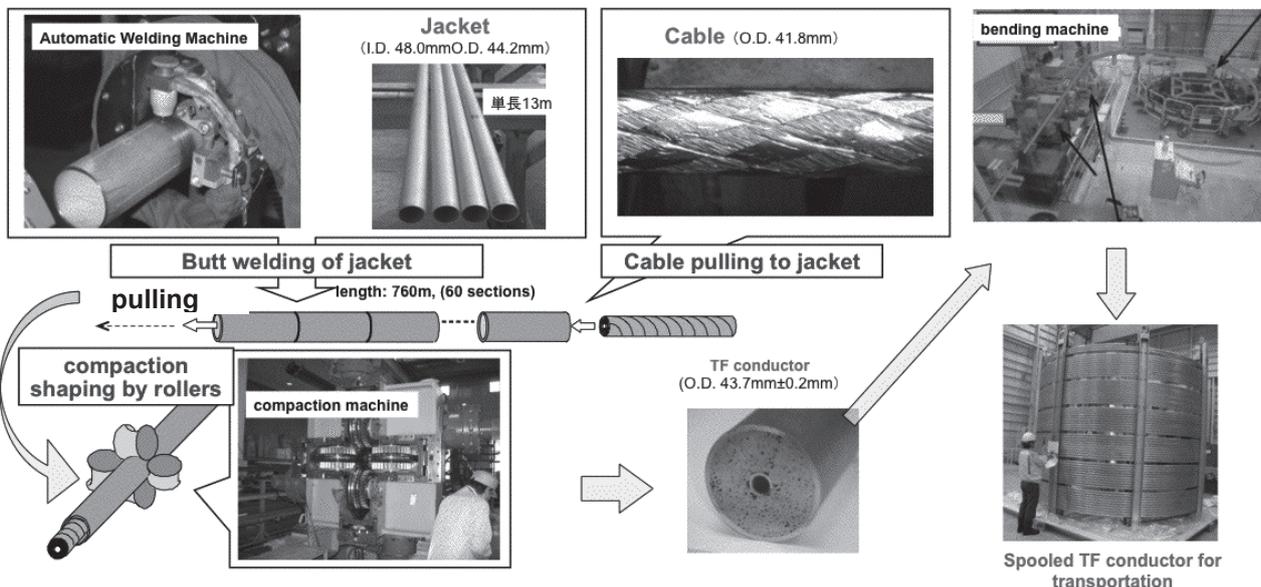


Fig.1 TF conductor fabrication process

## ITER 導体用 Nb<sub>3</sub>Sn 撚線の開発と製作 Development and Production of Nb<sub>3</sub>Sn Cable for ITER

高橋 良和、名原 啓博、布谷 嘉彦、諏訪 友音、堤 史明、押切 雅幸、尾関 秀将、渋谷 和幸、河野 勝己、川崎 努、高村 淳、中瓶子 信二、辺見 努、磯野 高明、宇野 康弘 (原子力機構); 村上 幸伸 (JASTEC); 谷 正則 (三菱電線); 佐藤 豪 (日立電線); 杉本 昌弘 (古河電工)

TAKAHASHI Yoshikazu, NABARA Yoshihiro, NUNOYA Yoshihiko, SUWA Otone, TSUTSUMI Fumiaki, OSHIKIRI Masayuki, OZEKI Hidemasa, SHIBUTANI Kazuyuki, KAWANO Katsumi, KAWASAKI Tsutomu, TAKAMURA Jun, HEMMI Tsutomu, ISONO Takaaki, UNO Yasuhiro, (JAEA); MURAKAMI Yukinobu (JASTEC); TANI Masanori (Mitsubishi Cable); SATO Go (Hitachi Cable); SUGIMOTO Masahiro (Furukawa)  
E-mail: takahashi.yoshikazu@jaea.go.jp

### 1. はじめに

ITER計画において、原子力機構は中心ソレノイド(CS)コイル用導体の調達[1]を担当し、製作したCS導体をコイル製作担当の米国に送付することになっている。導体はケーブル・イン・コンジット型と呼ばれるもので、576本のNb<sub>3</sub>Sn素線と288本の銅素線で構成される撚線を、矩形の中に円形の穴がある高マンガン鋼(JK2LB)製ジャケットに挿入し、ジャケットを圧縮成型したものである。撚線は5段階の撚線で構成され、6本の4次撚線を中心チャンネルの周りに撚り合せたものである。最近、従来の設計より短い撚りピッチの撚線の導体が短尺導体試験(サルタン試験)[1]において、繰り返し通電による超伝導性能劣化がない非常に良好な特性を示した[2]。しかし、撚りピッチが短いため、同じ外径の撚線を製作するには、より大きな圧縮を撚線製作時に加える必要があるため、圧縮成型ローラの形状を工夫し、超伝導素線へのダメージを小さくする必要がある。この短い撚りピッチの撚線の製作技術及び素線へのダメージの検査方法について、前回報告した[2]。本講演では、人工的に素線に凹みをつくり、その臨界電流値を評価し、ダメージの許容限界を報告するとともに、CSコイル用Nb<sub>3</sub>Sn撚線の製作状況を報告する。

### 2. 人工的なダメージのつけ方

撚線作業中の素線のダメージを模擬するために、室温において、Fig.1のようにNb<sub>3</sub>Sn素線を下に置き、素線どうしが圧縮を受けてできる凹みをサンプル素線の中央部につける。凹みの深さを0.1mmから0.4mmぐらいまで段階的

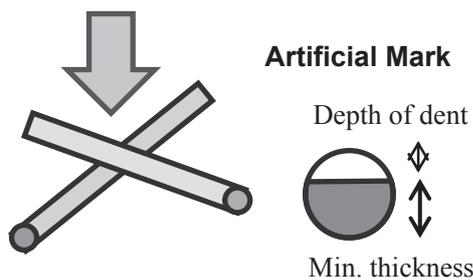


Fig. 1 Making method of artificial mark on Nb<sub>3</sub>Sn strand.

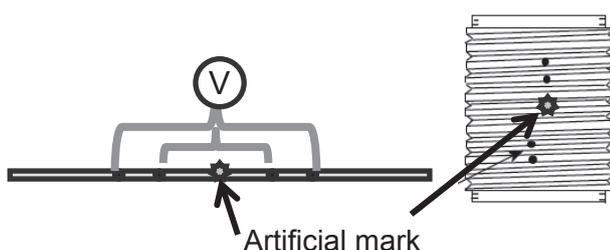


Fig. 2 Position of voltage taps and configuration of Ic measurement for Nb<sub>3</sub>Sn strand with artificial mark

に変化させた。この素線をFig.2の右図に示すTi合金製ボビン(直径3cm)に巻き付けて、熱処理を行い、そのままの状態でも両端に電流端子を半田付けして測定を行った。電圧タップは人工的凹みを挟むように取り付けられた。

### 3. 臨界電流値の測定結果

臨界電流値の測定は、温度4.2K、外部磁場12Tにおいて測定した。臨界電流値は、電圧が10μV/m発生したときの電流値と定義した。

凹みの深さに対する臨界電流測定の結果をFig.3に示す。本来の素線の臨界電流値は約320Aであり、凹みが0.25mm以下では、臨界電流値はほとんど低下しないことが示された。

### 4. まとめ

人工的に素線に凹みをつくり、その臨界電流値を評価し、ダメージの許容限界を確認した。この結果、凹みが0.25mmまでは臨界電流値の低下が見られなかった。また、撚線作業中の凹みは、前回報告したように、0.2mm以下であったので、製作された撚線の素線ダメージによる臨界電流値の低下はないと言える。更に、低下の大きい素線のフィラメントの状態を観察し、低下の原因を調査する予定である。

確立した撚線技術を用いて、既に実機コイル用約630mと約920mのNb<sub>3</sub>Sn撚線が1本ずつ完成した。今後、約630mの撚線を6本と、約920mの撚線を41本製作する予定である。

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

### 参考文献

1. Y. Nunoya, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.221.
2. Y. Takahashi et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.186.

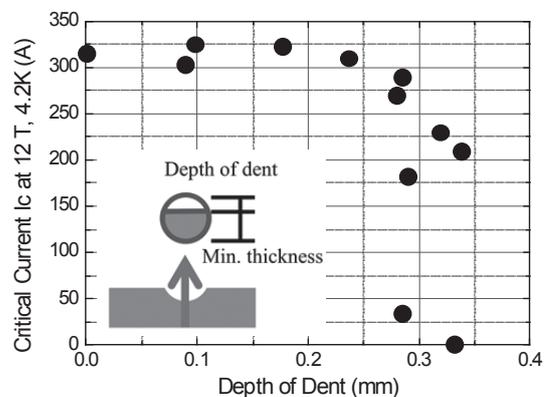


Fig.3 Measured critical current of strands with various marks vs. depth of dent at mark. The critical current was measured at 12 T and 4.2K.

# ITER CS コイル用 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導導体の性能試験

## Performance Examination of Nb<sub>3</sub>Sn Superconductor for ITER CS coil

名原 啓博, 諏訪 友音, 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, 高橋 良和, 奥野 清 (原子力機構)

NABARA Yoshihiro, SUWA Tomone, HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, OZEKI Hidemasa, SAKURAI Takeru, IGUCHI Masahide, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, TSUTSUMI Fumiaki, UNO Yasuhiro, KAWASAKI Tsutomu, OSHIKIRI Masayuki, SHIBUTANI Kazuyuki, TAKAHASHI Yoshikazu, 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 Nb<sub>3</sub>Sn 導体 (定格電流 40kA, 最高磁場 13T) として、長さ 613m の導体を 7 本、918m の導体を 42 本、全て日本が調達する。CS のパルス運転による導体への繰り返し荷重に対し、撚りピッチを短くすることで分流開始温度  $T_{cs}$  の低下を防ぎ得ることが示されており、前稿では日本製のブロンズ法素線を用いた 4 本の導体の性能を示した [1]。本稿では、米国製及び韓国製の内部拡散法素線を用いた 3 本の導体の性能を報告し、日本製導体と比較する。

### 2. 分流開始温度について

サイクル数に対する  $T_{cs}$  (通電電流 40kA、印加磁場 10.85T) を Fig.1 に示す。日本製導体を JA1~4、米国製導体を US1、韓国製導体を KO1, 2 と表し、これらは各々異なる素線を用いている。導体によって  $T_{cs}$  に約 0.6K の差異があるが、これは各素線の臨界電流の差異に概ね関連している。どの導体に関しても、サイクル初期に  $T_{cs}$  が約 0.1K 上昇した後、ほぼ一定化した。また、室温への昇温・再冷却に関しても、全ての導体の  $T_{cs}$  は上昇傾向を示した。したがって、この  $T_{cs}$  の上昇と一定化は素線の製作方法にはよらず、短い撚りピッチを持つ導体に共通して生じ得る現象であることが確認された。

サイクル試験後に JA1 のジャケット管の残留歪みを測定したところ (Fig.2)、高磁場部では低磁場部に比べて 52ppm の差異があり、サイクル試験中に高磁場部で歪みの緩和があったことを示唆する結果が得られた。Fig.1 で各導体の  $T_{cs}$  はサイクルを通して約 0.23K 上昇したが、これは素線の歪みに換算して約 45ppm の緩和に相当し、52ppm に近い値である。

### 3. 交流損失について

サイクル運転後の交流損失を Fig.3 に示す。KO1, 2 は他の導体に比べて交流損失が 30~50%程度低い。US1 が JA1~4 と同程度であることから、内部拡散法とブロンズ法の違いが原因ではないと思われる。KO1, 2 の素線のヒステリシス損失は JA1~4 の素線よりも約 45%高いため、交流損失は撚線での結合損失が支配的になっていると思われる。素線の残留抵抗比は、JA1~4 が 107~166、KO1, 2 は 101~160 で、同程度である。各導体の隣接部を解体検査した結果、素線の安定化銅部の潰れ具合は JA1~4 に比べて KO1, 2 の方が大きく、素線同士の接触面積は KO1, 2 の方が大きいと思われる。このように、現状では KO1, 2 の交流損失が低い原因は明らかになっていない。なお、CS 導体とは素線も撚りピッチも異なるが、TF 導体の交流損失も韓国の方が日本よりも約 30%低く (素線のヒステリシス損失は韓国の方が高い)、何か共通した原因があるかも知れない。例えば素線の Cr メッキの電気抵抗は韓国の方が高いことも考えられ、今後の調査を要する。電気抵抗を高めると素線間の電流の乗り移りが妨げられ、導体の安定性の低下に繋がり得るので、仮に電気抵抗が原因であっても、日本も電気抵抗を高めるべきかは議論を要する。

KO1, 2 に関しては、9T において 45.1kA を通電した状態でも交流損失を測定した (Fig.3(b) の破線)。通電しない場合に比べ、交流損失は約 1.5 倍高くなる事が分かった。今後試

験する日本の導体に対しても同様の測定を実施し、導体間で比較する予定である。

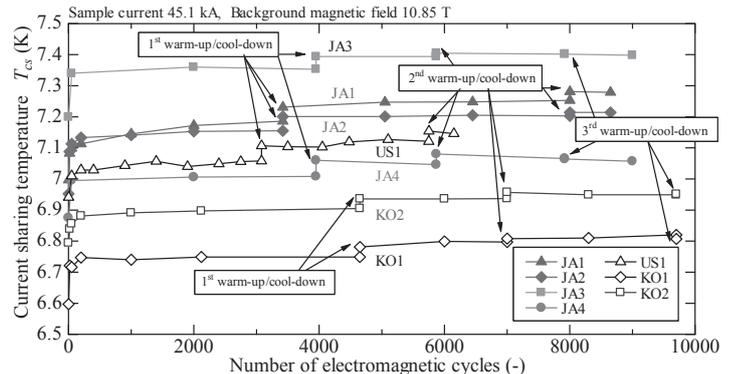


Fig.1 Current sharing temperature against number of cycles.

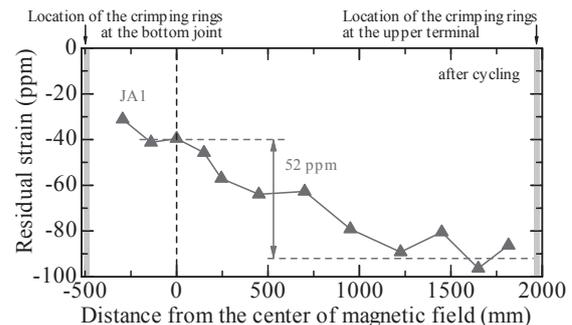


Fig.2 Longitudinal residual strain distribution of JA1 after cycling.

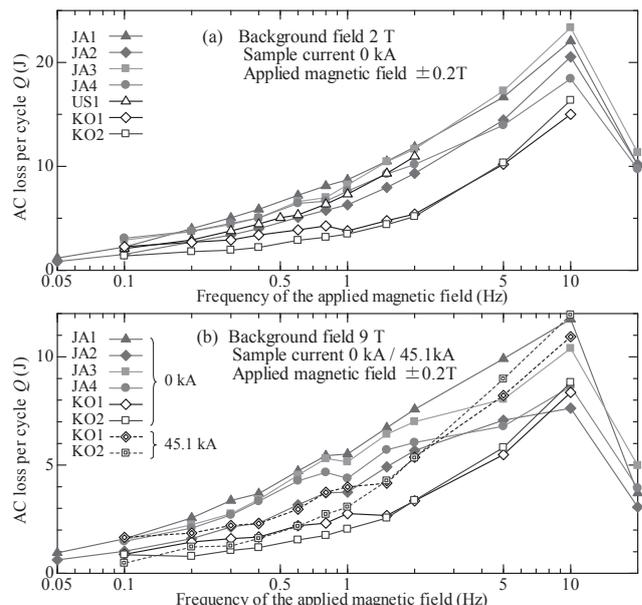


Fig.3 AC loss against frequency of applied magnetic field.

### 参考文献

- Y. Nabara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.185

# ITER TF コイルの調達進捗

## Status of ITER TF coil procurement

小泉 徳潔, 中平 昌隆, 松井 邦浩, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 櫻井 武尊, 高野 克敏, 山根 実, 安藤 真次 (原子力機構)  
 KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, SAKURAI Takeru,  
 TAKANO Katsutoshi, YAMANE Minoru and ANDO Shinji (JAEA)  
 E-mail: koizumi.norikiyo@jaea.go.jp

### 1. はじめに

原子力機構は、ITER 計画において、9 個の TF コイル (Fig.1)と 19 個(予備 1 機を含む)の TF コイル構造物の調達を担当している[1]。詳細な TF コイルの構造については、[1]を参照されたい。本稿では、TFコイル第一号機の製作を成功裏に進めるための戦略と、このために実施している試作・試験の位置付けについて説明し、加えて、第二号機以降も含めた TF コイル調達の進捗について説明する。

### 2. TF コイル第一号機の開発戦略

TF コイルの製作では、ラジアル・プレート(RP)の製作に長期間を必要とするため、この製作に先行着手する必要がある。第1号機の製作をITERの工程を満足するように完了するためには、2013 年の秋から RP 製作を開始し、これに引続き 2014 年始めから、その巻線に着手する計画である。

一方、TF コイルでは、熱処理によって 500~800ppm 以上伸縮する[2]大型 CIC 導体を、±200ppm の嵌め合い精度で、RP 溝に挿入しなければならない[1]。さらに、2012 年度以前に実施した試作の結果から、熱処理以外にも、巻線及び RP 製作で 100ppm のオーダーの誤差が発生することが分かっており、当初想定した製造計画の修正が必要となった。

そこで、原子力機構は、熱処理後の巻線寸法に合わせて、RP の最終組立・加工を実施するように製作方法を変更することで、嵌め合い公差を±500ppm まで増やして、これらの誤差を吸収できるようにした[1,4]。

以上より、TFコイル1号機の製作着手のためには、巻線技術、熱処理時の導体の伸縮量の評価、及び高精度の RP の製作技術の検証がキー・マイル・ストーンとなる事が分かる。このため、これらの技術検証を実規模ダミー・ダブル・パンケーキ (DP) で検証し、実機製作を進める計画である。一方、熱処理後の巻線を RP 溝に挿入するトランスファー[1]の完了により技術検証することとすると、長期間を要し、工程的に問題となる。そこで、以下の実規模試験で技術検証を行うこととした (Fig.2)。

- 1) 既存のダミー標準 RP (rRP) に対して、その溝長さを光学的に正確に測定し、これに合わせて巻線した実規模巻線[5]をトランスファーする。これにより、巻線精度及び RP の測定精度 (±200ppm) を検証する。
- 2) 熱処理時の導体の伸縮[2]を考慮して、実規模 TF 導体を巻線し、熱処理後の巻線寸法を測定する。これにより、熱処理後による巻線寸法の伸縮が、想定している誤差 (±200ppm) 内であることを確認する。
- 3) 新製作方法で実規模 RP を製作し、高精度の製作誤差 (±100ppm) を達成できることを確認する[4]。

上記試作以外にも、ジョイント、冷媒入口部、構造物の試作試験も実施している[6-7]。

### 3. TF コイル調達の進捗

原子力機構では、2013 年 7 月までに、三菱重工業及び東芝と第 5 号機までの製作の契約を締結している。2013 年度中に残りの 4 機の契約を締結する計画であり、2014 年より、本格的に TF コイルの製作を進める予定である。

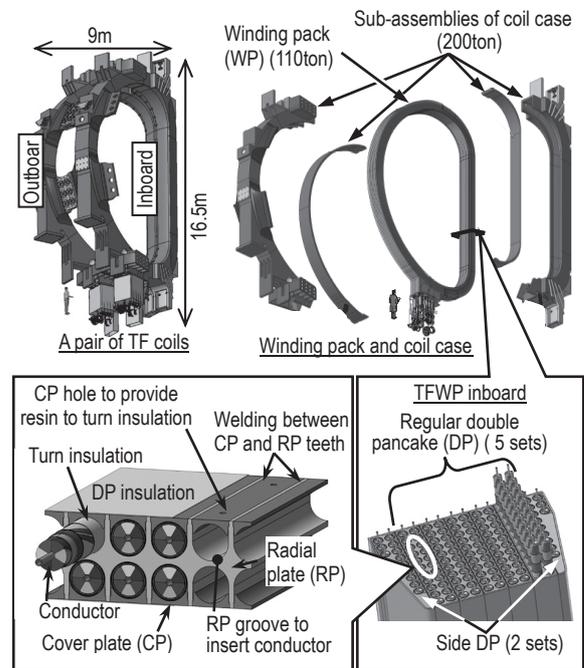


Fig.1 ITER TF coil.

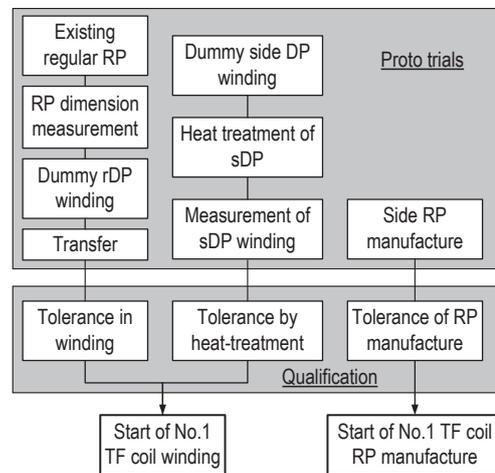


Fig.2 Strategy to start series production of TF coil

### 参考文献

1. N. Koizumi, et al. : TEION KOUKUKU, Vol. 47 (2012) pp.135-139
2. M. Yamane, et al.: Abstracts of this Conference, 1C-p06
3. K. Matsui, et al.: Progress of ITER TF Coil Development in Japan, IEEE Trans. ASC, Vol.24 (2014) To be published
4. K. Takano, et al.: Abstracts of this conference, 1C-p08
5. K. Matsui, et al.: Abstracts of this Conference, 1C-p05
6. T. Sakurai, et al.: Abstracts of this Conference, 1C-p07
7. T. Hemmi, et al.: Abstracts of this Conference, 1C-p09
8. H. Kajitani, et al.: Abstracts of this Conference, 1C-p10

## ITER TF コイル巻線の試作結果 Results of winding trial for ITER TF Coil

松井 邦浩, 山根 実, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔(原子力機構)  
MATSUI Kunihiro, YAMANE Minoru, HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki,  
TAKANO Katsutoshi, ANDO Shinji, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)  
E-mail: matsui.kunihiro@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ITER TF コイルの調達を担当しており、実機 TF コイルの製作に先駆けて製造設計、実規模試作、TF コイル製作装置の製作をメーカーと協力して進めている。この中で、高い巻線精度が求められる巻線製作に関して、巻線製作装置を製作するとともに、模擬導体を用いたダミー・ダブル・パンケーキ (DP) 用の巻線を製作し、巻線製作技術の検証及び巻線精度の評価を行った。本講演では、これらの巻線製作に関する試作の結果について報告する。

### 2. 巻線装置

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、導体長測定装置、巻線ヘッド及び巻線テーブルで構成され、その全体像を Fig.1 に示す。

導体の長さは巻線ヘッドに取り付けられたエンコーダで連続的に測定するが、導体とエンコーダ間で滑りが発生して、これによる誤差が蓄積されるため、これまでの試作で $\pm 0.01\%$ の精度で導体長さを管理できた光学的な導体長測定手法を採用している[1]。具体的には、レーザーマーカと2台のCCDで構成される導体長測定装置により、3m 毎に光学的に導体の長さを測定し、この長さでエンコーダにより測定された導体長を補正して、高精度に導体長を管理する。本装置の測定精度を評価した結果、目標の $\pm 0.01\%$ 以下で導体長さを測定できることを確認した。一方、これまでの試作により、巻線ヘッドにより曲げられた導体は、中心軸が移動して長さが増減することが確認されている[1]ため、事前に測定した曲げによる導体伸び量を巻線形状に反映した上で巻線を実施することにより、巻線後の導体長さを管理する。

上記の手法により理論上は導体長さを管理できるが、様々な誤差により巻線後の導体長さに誤差が生じることから、製作したターンの赤道面 2 箇所に付けたマーキングと設計位置との差を順次測定し、その差を次に巻線するターンの長さへフィードバックして、巻線全体として導体長さを管理する手法を採用している。この手法による導体長さの管理精度は、次項に示すダミーDPの製作において確認している。

### 3. ダミー・ダブル・パンケーキ巻線の製作

実機 TF コイル用巻線の製作に先立ち、製作手法及び製作装置の検証のために、760m 長の模擬導体を用いて実規模

のダミーDPの巻線を製作した (Fig.2)。

巻線を製作した後に、レーザトラックを用いて巻線の導体長さを評価した。P 側パンケーキでは、各ターンの設計長さとの測定長さの差は $-0.0044\% \sim 0.0083\%$ 、評価が可能な 10 ターンの平均で約 0.005%であり、目標の 0.01%を十分に満足する精度で導体の長さを管理できていることを確認した。今後、430m 長の超電導導体を用いてもう1体のダミーDPを製作し、巻線製作の精度確保をより確実なものとするとともに、これらの結果を既に作成した製造計画書に反映した上で、実機 TF コイル巻線の製作に着手する予定である。

### 4. まとめ

TF コイル巻線に向けて、巻線装置の製作を行い、導体の長さを $\pm 0.01\%$ の精度で管理できることを確認した。また、ダミー・ダブル・パンケーキの巻線を試作し、導体長さが目標の $\pm 0.01\%$ 以下で管理達成した。これらの試作結果を製造計画書に反映し、実機 TF コイルの巻線の製作に着手する。

### 謝辞

TFコイルの調達活動にご協力頂いた三菱重工業(株)、三菱電機(株)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.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 160

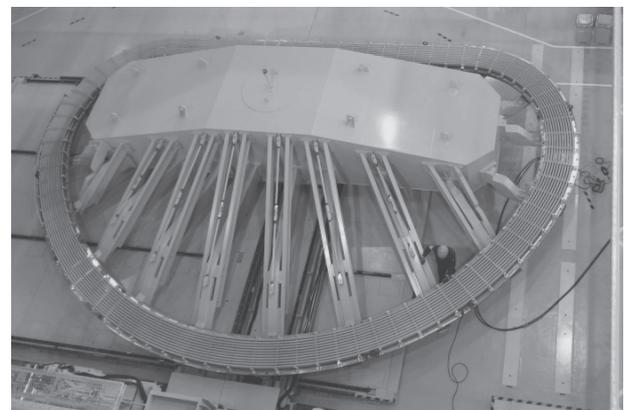


Fig. 2 Fabricated winding for the dummy regular DP.

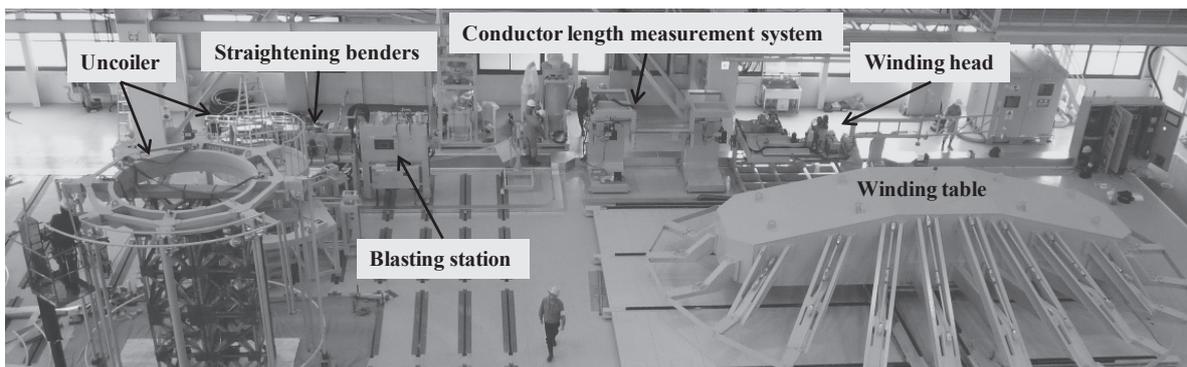


Fig. 1 Winding system for fabrication of TF coil winding

## ITER TF コイル熱処理試作結果 Results of Heat Treatment Trial of ITER Toroidal Field Coil

山根 実, 松井 邦浩, 梶谷 秀樹, 辺見 努, 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔 (原子力機構)  
YAMANE Minoru, MATSUI Kunihiko, KAJITANI Hideki, HEMMI Tsutomu, TAKANO Katsutoshi, ANDO Shinji, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)  
E-mail: yamane.minoru@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おり、実機コイルの製作に先駆けて製造設計、実規模試作、TF コイル製作装置の製作をメーカーと協力して進めている。この中で TF コイル巻線の超伝導生成熱処理による導体伸縮量を把握するために、熱処理サンプルによる TF 導体熱処理試作を実施した。本講演では、この試作結果について報告する。

### 2. 熱処理サンプルによる伸び量の評価

TFコイルでは、機械加工されたラジアル・プレート(RP)の溝へ熱処理後の導体をミリ単位の高い精度で挿入するトランスファーの工程がある。そのために巻線された導体の熱処理による導体長変化を正確に評価しておく、熱処理後に RP の溝に入る様にあらかじめ熱処理変形を予測して巻線時の形状に反映させる必要がある。

熱処理による導体の伸縮量を評価するサンプルとして、直状導体のサンプルと、巻線の影響を評価するための曲状サンプルの 2 種類で試験を行った。試作サンプルには導体表面に実機と同様のプラスト処理(Ra=6.3 $\mu$ m)を施し、実機と同様の温度パターンで熱処理を実施した。

#### 2.1 直状導体の伸縮量評価

直状導体サンプルは長さ 1.5mの導体を使用し、導体の両端には、熱処理時のジャケットと撚線の滑りを防ぐために、端部拘束治具が取り付けられている。この導体長変化の測定には、原子力機構が開発した直状導体熱歪測定装置[1]を使用した。

サンプルの外観と熱処理中の導体長さ変化の測定結果を Fig.1 に示す。熱処理前後の常温での長さの変化は、約 0.05%と評価された。

#### 2.2 曲状導体の伸縮量評価

ソレノイド形状に巻線した導体での伸縮量の評価用に、直径 2m の 3 ターンの曲状導体サンプルを用意し、その熱処理による導体長変化を測定した。測定は、①巻線装置で製作した曲状導体サンプルを、Fig.2 に示すように測定治具に巻き付けて導体表面に罫書き線を入れ、②これを治具から外して熱処理し、③熱処理後に再度測定治具に巻き付けて罫書き線のずれ量から伸び量を評価した。この曲状導体サンプルでは約 0.08%の伸びが測定された。

これらの伸び量は、TF コイル 1 ターン(約 34m)あたりでは 17~27mm 程度の伸びに相当する。熱処理後の巻線を寸法裕度の小さい RP の溝に精度良くはめ込む上で、熱処理前の巻線形状をその分だけ小さめに成形する必要がある。今回の結果では、D 型形状のTFコイルには直線部と曲線部で異なる伸縮量を適用する必要があるが、熱処理後の導体形状測定結果を受けてから実施する RP の 1/4セクター間溶接での溝長調整と曲線部の溝幅裕度を利用して直線部と曲線部の伸び長さの差を微調整が可能であることから、巻線においては平均的な一律の伸縮量を設定し、相似形での成形を行うこととした。

### 3. まとめ

今回の試作により、熱処理による伸びを考慮した巻線への反映方法を決定した。今後実施するダミー・ダブル・パンケーキ(ダミーDP)製作で、熱処理後の巻線形状変化を評価し、

続く実機TFコイル巻線の製造計画に反映する予定である。現在は、そのための熱処理炉及びトランスファー装置(Fig.3)の製作、動作確認などを進めている。

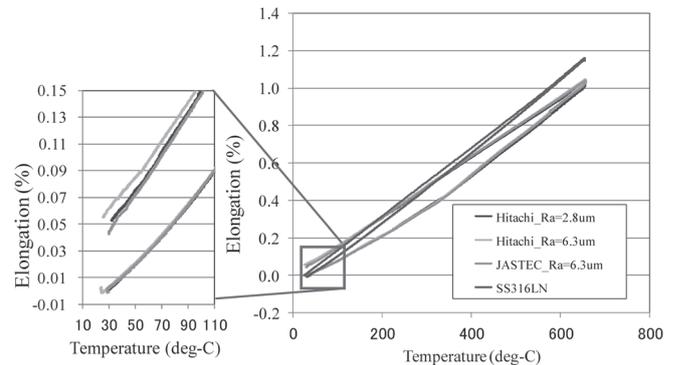


Fig.1 Measured elongation of a straight TF conductor due to the heat treatment

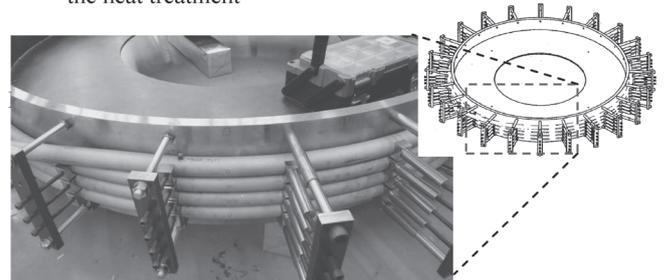


Fig.2 Test sample for curved conductor wound around the gauge before heat treatment



Fig. 3 Fabricated transfer machine

### 謝辞

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

### 参考文献

1. K. Matsui, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.), 42 (2007) p.311

# ITER TF コイル構造物実規模試作結果

## ITER TF coil structure full scale trial production result

櫻井 武尊, 井口 将秀, 中平 昌隆 (原子力機構); 峯村 敏幸, 柳 寛, 大勢持 光一 (東芝)  
 SAKURAI Takeru, IGUCHI Masahide, NAKAHIRA Masataka (JAEA); MINEMURA Toshiyuki,  
 YANAGI Yutaka, OHSEMOCHI Koichi (TOSHIBA)  
 E-mail: sakurai.takeru@jaea.gp.jp

### 1. はじめに

原子力機構では2012年8月からTFコイル構造物の調達を進めており、現在、実規模試作、実機材料調達を実施している。TFコイル構造物は高さ16.5m、幅9mのD型形状の超伝導巻線部を格納するサブアッセンブリと、TFコイル及び他の機器とを接続する付属品で構成される。サブアッセンブリはFig.1に示すベーシックセグメントを溶接接合することで製作するが、TFコイル構造物の最終寸法公差には2mm(約1/8000)以下という厳しい公差が要求されている。公差達成のためには、溶接後にTFコイル構造物を機械加工する必要がある。合理的な製造を実現するには、ベーシックセグメントでの詳細な溶接変形を把握し、溶接変形に対する余肉量を適正化し、機械加工量を低減することが重要である。

フェーズIIと呼ばれるTFコイル構造物製作前段階の試作試験では、溶接方法として片側狭開先TIG溶接を基本としてFig.1に示すB3ベーシックセグメント試作を実施し、溶接変形挙動の把握を行った。その結果、要求公差を満たせる設計余肉量を導いた。原子力機構では更なる溶接変形低減を実現し、余肉量の最適化を行うために、B3ベーシックセグメントを模擬した実規模構造物において、溶接中に溶接変形を制御可能な両側狭開先TIG溶接での変形抑制の適用の可能性を検討した。本講演では、上記の実規模試作結果について報告する。

### 2. B3ベーシックセグメント実規模試作条件

Figure 2に示すようにコイルケース側板が開く向きを+とし溶接変形量を評価した。フェーズIIでB3ベーシックセグメントに実施した油圧ジャッキと拘束治具を用いた片側狭開先TIG溶接では、両側板の溶接変形量が7.1~9.8mmであった。また、Fig.2に示すように溶接変形量から変形角度 $\theta$ を算出すると、片側板の変形角度が0.61°であった。溶接変形抑制と治具取り付け等の作業低減のため、拘束治具を用いずに溶接変形を制御可能である両側狭開先TIG溶接の適用を検討した。本講演で報告する実規模試作の最終溶接変形目標値は開先が縮む向きの変形である横収縮とFig.3に示す断面毎に異なる変形のバラツキ等を考慮し、片側板の溶接変形量7mm(変形角度0.55°)とした。

溶接方法はFig.2に示す両側狭開先TIG溶接であり、溶接ワイヤとしてオーステナイト系ステンレスワイヤであるFMYJ1を使用した。溶接手順として、まずFig.2に示すように、外開先を溶接し、溶接変形量と変形角度が基準に達したならば、試験体を反転し、内開先を溶接するという手順を繰り返した。変形量の計測は光学式3次元レーザースキャナーを用い、変形量が予想より大きい場合は反転時期を早め、小さい場合は反転時期を遅らせるというように制御を実施した。反転時期判断は1回目の反転は2.0°(または積層高さ30mm)、2回目の反転は-1.5°(または積層高さ60mm)、3回目の反転は2.0°(または積層高さ30mm)の最低3回の反転を計画した。

### 3. B3ベーシックセグメント実規模試作結果

Figure 4に溶接変形計測結果を示す。片側板の最終溶接変形量は-2.2~-3.4mmと計測され、変形角度は-0.30~-0.19°となり目標値内に制御可能であった。外開先1回目

溶接では積層30mmを超えた時点で変形量は+0.86mmと予想よりも少なかったが反転を行った。このため内開先1回目は-0.5°を目標に溶接を行い、積層50mmで-0.4°を超えたため反転をした。外開先2回目は0.2°(積層68mm)、内開先2回目は-0.2°(積層89mm)をそれぞれ超えた時点で反転し、内外3回目は開先表層までの溶接を行った。本結果から両側開先溶接による変形抑制が可能であり、機械加工に対する設計余肉量を当初想定量よりも低減できると考えられる。

### 4. まとめ

原子力機構は、より合理的なTFコイル構造物製作を実現するために、実規模試作を実施した。本試作結果から、両側開先溶接は強拘束片側開先溶接の半分以下に変形角度の抑制が可能であり、溶接後の機械加工量を低減でき、TFコイル構造物製作工程を短縮できる可能性が示された。

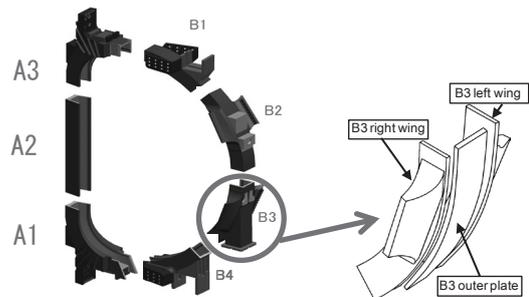


Fig.1 basic segments and part name of B3 Segment

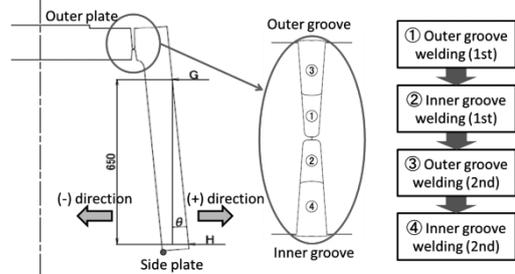


Fig.2 groove shape and reversal sequence

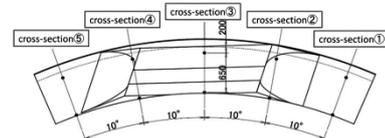


Fig.3 cross-section of measuring

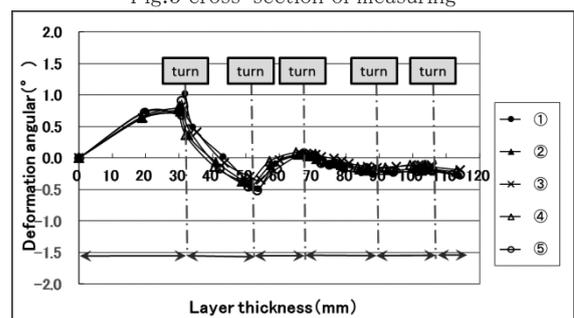


Fig.4 welding deformation measuring result

# ITER・TFコイル・ラジアル・プレート製作

## Manufacture of radial plate for ITER TF Coil

高野 克敏, 安藤真次, 松井 邦浩, 小泉 徳潔 (原子力機構) ;  
TAKANO Katsutoshi, MATSUI Kunihiro, 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。また、ITER 計画における製作工程を満足するため、1 枚の RP は数週間ピッチで製作する必要がある。このため、原子力機構では、高精度で合理的な RP の製作方法を策定するための試作試験を進めてきた。本講演では、試作試験の結果と実機 RP の製作方法について報告する。

### 2. 実規模 sRP セグメントの試作

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 4 mm が要求され、RP セグメント単体で 1 mm の平面度、RP 組み立て後は、CP 溶接における面外変形も考慮して、平面度 2 mm を達成する必要がある。また、TF コイルの製作工程を満足するために、10 個の RP セグメント製作における機械加工は、合理的で高精度な機械加工技術の開発が求められている。このため、実機 RP 製作前の実証試験として、実規模のサイド RP (sRP) セグメントの試作試験を実施した。試作の結果、Fig.1 に示すように、全ての RP セグメントにおいて、平面度 1 mm 以下の高精度な製作精度を達成した。また、機械加工条件を最適化することにより、機械加工時間の短縮が図られ、TF コイルの製作工程を十分に満足する加工技術を確立した。

### 3. 実規模 RP セグメント溶接試作試験

RP は、10 個の各セグメントを溶接して組み立てる計画であるが、超伝導生成熱処理された導体を収納するため、RP の輪郭度としては、1 mm を達成する必要がある。また、輪郭度 1 mm を達成するためには、溶接部における面内、面外変形及び収縮量を把握する必要がある。このため、Fig.2 に示すように、実機 RP セグメントを組み立てる際に使用する治工具の検証を兼ねた実規模 RP セグメントの溶接試験を実施し、溶接収縮量を評価した。その結果、溶接部の溶接前後における面内、面外変形は測定誤差範囲内であり、RP 溝長手方向の収縮量は約 1.5 mm であった。この結果、RP セグメント組立時に各セグメントの両端に溶接収縮による余肉を設けること、また溶接収縮量のばらつきを考慮しても、輪郭度 1 mm 以下を十分に満足することを確認した。以上の結果により、実機 RP の組み立てにおいて、要求公差を満足できる見通しを得ることができた。

### 4. 実機 RP の製作方法

RP の製作は、TF コイル製作工程を満足するために合理的に製作する必要があるとともに、熱処理によって伸縮した巻線寸法に合わせて、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。そこで、RP は以下の計画で製作する予定である。1) 10 分割された各 RP セグメントは機械加工機で並行して製作する。ここでは、各 RP セグメントの両端には、溶接収縮量を見込んだ余肉を持たせる。2) 製作した 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。ここで、各セクターの長手方向には、RP の溝周長が調整可能なように余肉を持たせる。3) 4 つのセクターを溶接接続して、最終の D 型に組立てる計画である (Fig.3)。本製作方法を実証するために、2 項で製作した実規模 sRP セグメントを用いて、試作試験を進めている。

### 5. まとめ

実規模 sRP セグメント試作、実規模 RP セグメント溶接試作試験の結果、実機 RP 製作における合理的で高精度な製作技術に目途を立てた。また、試作結果を基に実規模 sRP の試作試験を進めている。

### 参考文献

[1] N. Koizumi, et al.: Abstracts of this conference, 1C-p04

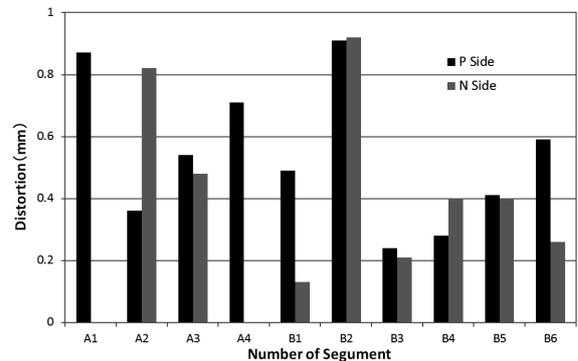


Fig.1 Distortion of RP Segments.

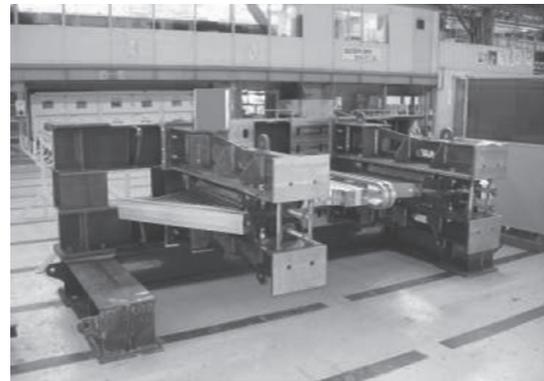


Fig.2 Full-scale trial RP Segment Welding Test.

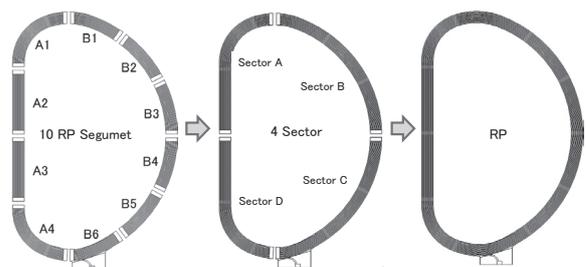


Fig.3 RP Manufacture Procedure.

# ITER TF コイル冷媒入口部試作

## Manufacture Trial of He-inlet for ITER TF coils

辺見 努, 山根 実, 梶谷 秀樹, 松井 邦浩, 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔(原子力機構)  
 HEMMI Tsutomu, YAMANE Minoru, KAJITANI Hideki, MATSUI Kunihiko, TAKANO Katsutoshi, ANDO Shinji,  
 KOIZUMI Norikiyo (JAEA);  
 E-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

### 1. はじめに

原子力機構は ITER 計画において、9 個のトロイダル磁場 (TF) コイルの製作を担当している。TF コイルの導体には、コイルを冷却するための超臨界圧ヘリウムを導入することを目的として、**Fig.1** に示す冷媒入口部を取り付ける必要がある。TF コイルの冷却及び電磁力により発生する歪の評価結果から、冷媒入口部では 3 万回の繰返しとなる  $0.102 \pm 0.023\%$  の歪が生じることわかっている。これに対して、最も厳しい応力となる箇所は、カバー・シェルとジャケットの周方向隅肉溶接部の応力集中部であるが、溶接品質のバラツキを考慮して、99.86%の確率でこれに耐えることとするため、2 サンプルの疲労試験を実施して、26 万回の繰返し歪に耐えることが要求されている。このため、繰返し歪に耐える冷媒入口部の製作手法を確立する必要がある。本発表では、TF コイル冷媒入口部の製作手法の確立及び実規模疲労試験の結果について報告する。

### 2. 製作手法の確立

冷媒入口部の製作は、1) 導体のステンレス・ジャケットに穴加工してノズルとし、2)  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  素線に局所的な曲げが加わらないようにディフューザー・グリッドを取り付け、3) 半割れのカバー・シェルを導体に取り付け、カバー・シェル間及びカバー・シェルとジャケット間の溶接の手順で実施する。冷媒入口部の構造解析の結果から、カバー・シェルとジャケット間の隅肉溶接の形状は **Fig.2a** とし、溶接部の溶け込み深さはジャケット厚さ 2 mm の 1/3 以上とすることが要求される。加えて、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  素線への熱影響を最小限とするため、導体内の撚線表面の温度を  $300^\circ\text{C}$  以下とする必要がある。これらを実現するため、ガス・タングステン・アーク溶接 (GTAW) を用いて溶接条件の最適化を行い、**Fig.2b** のように、溶接後にグラインダ加工することで、要求される溶接形状を満足し、溶接時に撚線表面に取り付けた熱電対が  $300^\circ\text{C}$  以下となる条件を確立した。

### 3. 実規模冷媒入口部試験体の疲労試験結果

確立した冷媒入口部の製作手法を用いて、実規模冷媒入口部試験体を製作し、カールスルーエ工科大学 (KIT) が所有する 650kN サーボパルサーを用いて、液体ヘリウム中で疲労試験を実施した。**Fig.3** に試験体及び試験装置に組み込んだ状況を示す。冷媒入口部を囲む導体長手方向 246.7mm の領域の歪を伸び計で計測し、印加歪が  $0.102 \pm 0.023\%$  となるように歪制御で疲労試験を実施した。0.125%及び 0.079%の歪を加えたときの荷重は、それぞれ、約 150 kN 及び約 80 kN であった。2 体の疲労試験の結果、26 万 1000 回の繰返し歪を加えても試験体は破断せず、試験後に室温にて試験体の状況を確認したが、外観に変化はなかった。これより、確立した製作方法で製作した冷媒入口部が、要求される機械特性を満足することが確認された。

### 4. まとめ

以上の結果より、溶接条件の最適化を含む TF コイルの冷媒入口部の製作方法を確立するとともに、冷媒入口部に要求される疲労特性を有することを確認した。今後、TF コイルの製

作手法の最終確認として、ダミー・ダブル・パンケーキの製作を実施した後、実機 TF コイルの製作を開始する予定である。

### 謝辞

TF コイルの調達活動にご協力頂いた三菱電機株式会社並びに関連会社に、厚く御礼申し上げます。加えて、実規模疲労試験を実施して頂いた KIT の K. P. Weiss 氏に深く感謝いたします。

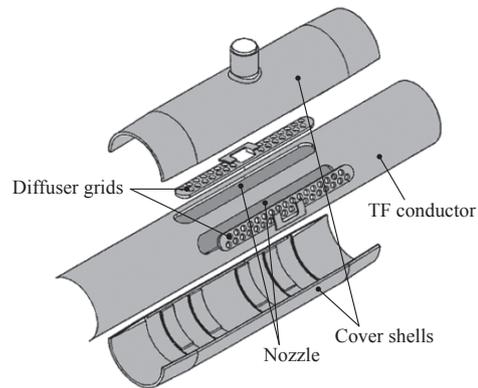


Fig.1 He-inlet for ITER TF coils.

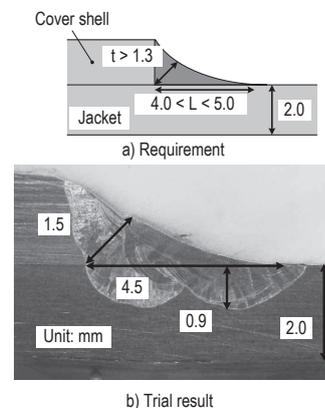


Fig.2 Fillet welding between jacket and cover shell.

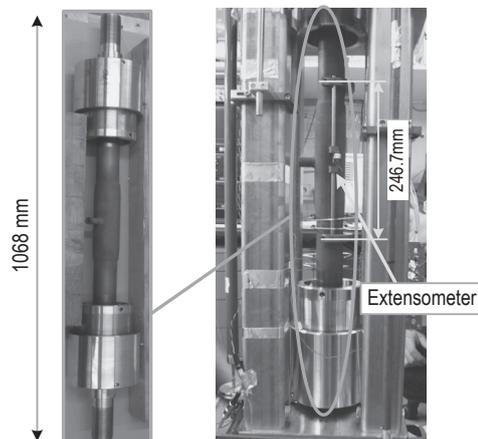


Fig.3 He-inlet mock-up and set-up of fatigue testing.

## ITER TF コイルジョイント部の性能評価

### Evaluation of ITER TF coil joint performance

梶谷 秀樹, 辺見 努, 松井 邦浩, 山根 実, 小泉 徳潔(日本原子力研究開発機構); 尾花 哲浩, 濱口 真司, 高田 卓, 力石 浩孝, 夏目 恭平, 高畑 一也, 今川 信作(核融合科学研究所)

KAJITANI Hideki, HEMMI Tsutomu, MATSUI Kunihiro, YAMANE Minoru, KOIZUMI Norikiyo (JAEA); OBANA Tetsuhiro, HAMAGUCHI Shinji, TAKATA Suguru, CHIKARAISHI Hiroataka, NATSUME Kyohei, TAKAHATA Kazuya, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

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。そのうち、TF コイルのジョイント部では、実機コイル製作前に、その性能を検証し、接続抵抗が要求値の $3n\Omega$ 以下であることを示す必要がある。そのため、原子力機構は、実機のジョイント部と同構造を有する試験サンプルを製作し、実規模ジョイント性能検証試験を行った。本講演では、本試験の結果について報告する。

#### 2. 実規模ジョイント性能検証試験サンプル

実規模ジョイント性能試験に用いる試験サンプルの形状を Fig.1 に示す。試験サンプルは、2 本の長さ約 1.5m の TF 導体で構成され、各導体の両端には実機 TF コイルで採用されるジョイント・ボックスが取り付けられる。予めクロムメッキを除去しておいたジョイント・ボックス内の撚線の上にジョイント・カバーを被せ、ポイド率が 20%程になるまで圧縮し、超伝導生成熱処理で銅スリーブと撚線が融着することで、電気的接触を確保する構造である。試験サンプル下部では、実機と同構造のジョイント部を形成し、試験サンプルの上部では、試験装置の電流ターミナルと接続するための銅ブスバが取り付けられる構造である。試験サンプルの各導体部には、接続抵抗を測定するための電圧タップが、ジョイント圧縮部から約 70mm の位置に取り付けられた。

#### 3. 実規模ジョイント性能検証試験

実規模ジョイント性能検証試験では、ジョイント部の運転条件である 68kA の通電電流、及び 2T 以上の印加磁場の下、接続抵抗を評価する。そのため、本試験では、75kA 通電電源、100kA 電流リード及び 9T マグネットシステムを有する NIFS の大型導体試験装置を用いた。

外部磁場及び試験サンプルの温度を変化させ、その時のジョイント部での発生電圧を導体上の電圧タップから測定し、電圧法により接続抵抗を求めた。

#### 4. 試験結果

試験結果を Fig.2 に示す。外部磁場は、サンプル長手方向に沿って変化するため、試験対象であるジョイント部において磁場分布が発生する。Fig.2 中の横軸はジョイント部に印加される最大磁場を示し、その最大-最小磁場の関係と同じく Fig.2 内に示してある。例えば、最大磁場が 4.8T の時、最小磁場は 3.0T となる。また、Fig.2 中の磁場極性は、「+」がサンプル拡張方向、「-」が圧縮方向に電磁力が働く外部磁場の向きを示す。

試験結果より、外部磁場の増加に伴い、接続抵抗も増加傾向であり、4K と 6K での接続抵抗はほとんど違いがないことがわかる。これは、主にジョイント部銅スリーブの磁気抵抗の増加が影響していると考えられる。

接続抵抗値は、最大でも約  $1n\Omega$  であることから、ITER TF コイルの要求値である接続抵抗  $3n\Omega$  に対して、十分小さい値

であり、実機に適用するジョイント部の性能として、十分に満足できる結果である。

#### 5. まとめ

実規模ジョイント性能検証試験結果から、実規模ジョイント部は、実機 TF コイルに適用可能な良好なジョイント性能であることが実証された。今後、実規模ダミー TF コイル試作にて、ジョイント部施工の最終確認を行った後、実機コイルの製作を開始する計画である。

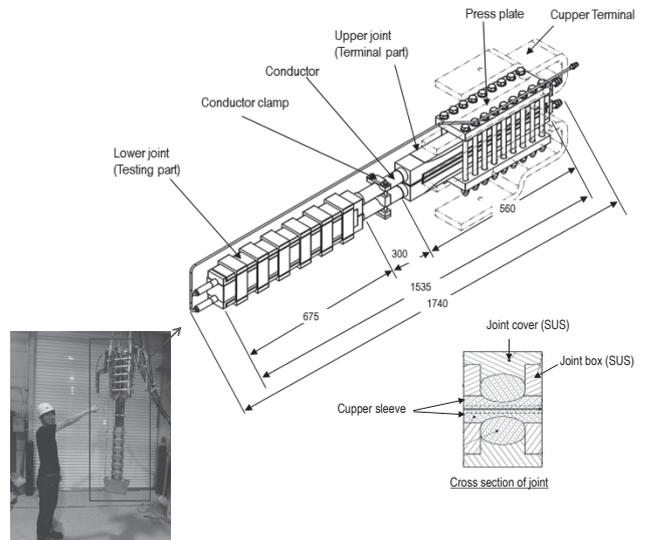


Fig.1 Full size joint test sample

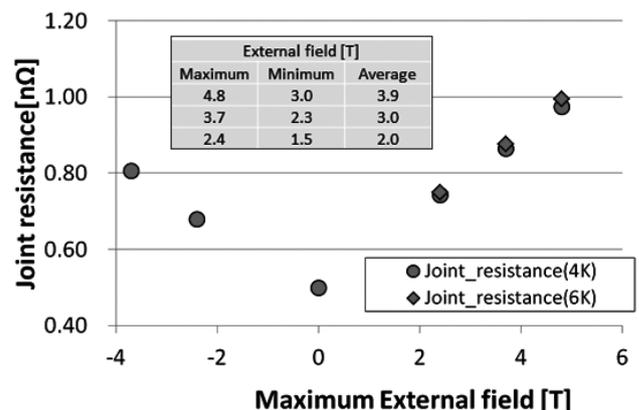


Fig.2 Test results of joint resistance

#### 謝辞

TFコイルの調達活動にご協力頂いた三菱電機株式会社並びに関連会社に、厚く御礼申し上げます。

# ITER-TF 導体接続抵抗測定試験における高温超伝導ブスバー追加による銅ブスバーの発熱低減

## Heat generation reduction of copper busbar by adding high temperature superconductor busbars at ITER-TF conductor joint resistance measurement

佐浦 啓介(名大);今川 信作, 尾花 哲浩, 濱口 真司, 高田 卓, 力石 浩孝, 夏目 恭平, 高畑 一也(NIFS);  
梶谷 秀樹, 松井 邦浩, 辺見 努, 小泉 徳潔(JAEA)

SAURA Keisuke(Meidai);, IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, HAMAGUCHI Shinji,  
TAKADA Suguru,NATSUME Kyohei,CHIKARAISHI Hirotaka,TAKAHATA Kazuya(NIFS);  
KAJITANI Hideki,MATSUI Kunihiro,HEMMI Tsutomu,KOIZUMI Norikiyo(JAEA)  
E-mail:saura.keisuke@i.mbox.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所の大型導体試験装置を用いて、ITER-TF 導体の接続抵抗測定を行った。その際、電流リードと導体サンプルを接続する銅ブスバーの発熱を定格 68 kA 通電時に 100 W 程度に低減する事を目的に、高温超伝導ブスバー (Bi2223 線材:住友電工) を銅ブスバーに並列に取り付けた。ログスキーコイルを用いて各ブスバーの電流を測定し、68.1kA 通電時に高温超伝導ブスバーが約 20 kA を分担しており、銅ブスバーの抵抗発熱が銅ブスバーのみの場合と比べ 60%程度に低減されていることを確認した。また、高温超伝導ブスバーの電流分担割合は予想していた傾向と異なり、電流値の増加に伴い緩やかに低下するという結果が得られた。簡易回路モデルに基づいた数値解析と実測結果と比較することにより、その理由について考察した。

### 2. 実験方法

Fig.1 に示すように、U 字に曲げた銅ジャケットに Bi2223 線材(住友電工,  $I_c > 200A@77K$ )1 列 35 層を差し込み、PbSn 共晶はんだを流し込で HTS ブスバーを作成した。この HTS ブスバーを銅ブスバー側面の直線部に同じはんだで接続し、複合ブスバーを作製した。

0~68kA までの通電試験を行い(@6~13K),その際の各ブスバーの電流値を各ログスキーコイルで測定した。また、銅ブスバー両端電圧を測定した。

### 3. 実験結果・考察

HTS テープが Ic に到達するまでは大半の電流が HTS ブスバーを流れると予想していたが、実際の I-V 特性は Fig.2 に示すように、HTS テープの Ic 以下の電流値でも銅ブスバーに一定割合の電流が流れ、電流値が大きくなるにつれて HTS ブスバーの電流比が低下する結果となった。この原因は銅ブスバーと超電導線間に大きな(数  $\mu\Omega$ )接触抵抗が存在すること、および自己磁場による  $I_c$  値の減少によると考えられる[1]。そこで、HTS ブスバーを接触抵抗を介した 35 の HTS テープの並列回路と見なし、接触抵抗をパラメータとして、実験で観測された I-V 特性の再現を試みた。35 層の HTS テープの電流は銅ブスバーから直接流れ込む電流と幅広面からの電流に分け、幅広面からの電流は外側から順に  $I_c$  を超えると隣に流れ込む回路モデルとした。 $I_c$  の自己磁場依存性については、簡易的に、HTS ブスバーの電流値 0 から 21 kA に増えると各 HTS テープの  $I_c$  が一様に 1,000 A から 600 A に直線的に低下すると仮定した場合の計算結果を Fig.3 に示す。HTS テープ間に比較的大きな接触抵抗を仮定することにより実験値と非常に良い一致を示した。

上記解析モデルの詳細は当日に報告する。

### 参考文献

1. T.Takeshi, et al.:SEIテクニカルレビュー, Vol.168 (2006) p.19-23

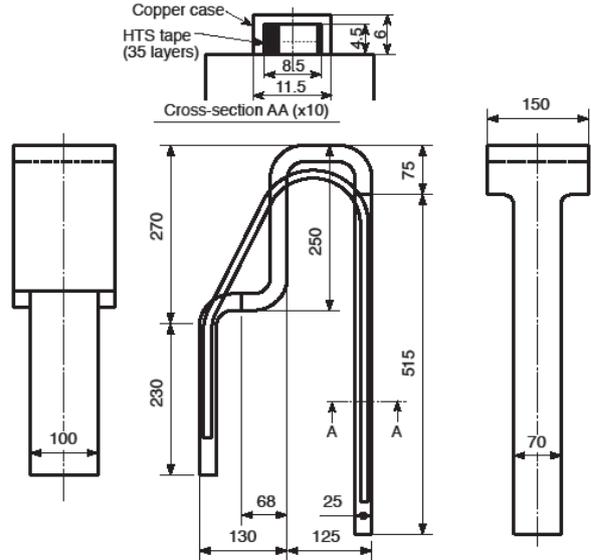


Fig. 1 Schematic illustration of copper and HTS busbar

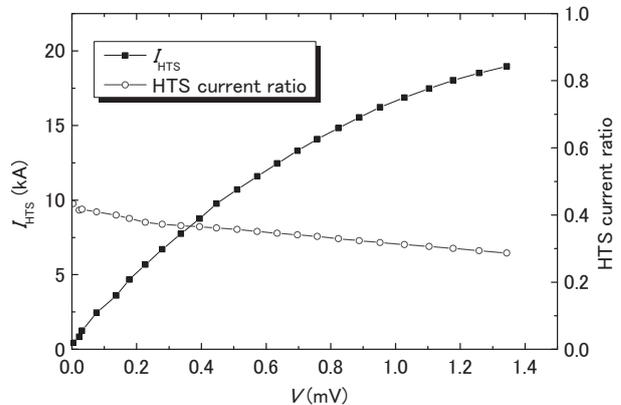


Fig.2 Current and current ratio of an HTS busbar versus the terminal voltage of Cu busbar.

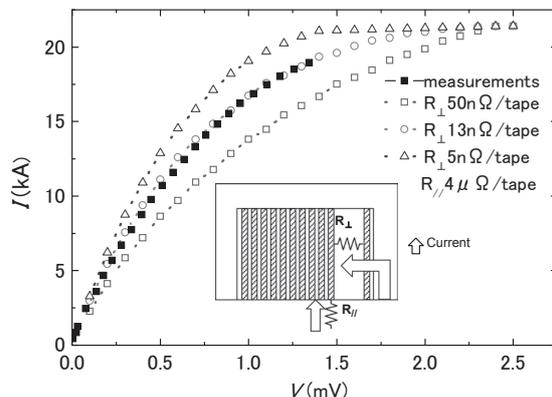


Fig.3 Calculated results with the parallel circuit model.