

# 5MW 突極型 HTS 同期発電機の基本電気設計検討

## Fundamental Electrical Design Study of Salient-pole HTS Synchronous Generators

牧直樹, 小柴有, 和泉充 (東京海洋大)

MAKI Naoki, KOSHIBA Yu, IZUMI Mitsuru (Tokyo University of Marine Science)

E-mail: naokmaki@tuba.ocn.ne.jp

### 1. はじめに

風力発電などの超低速機には突極型高温超電導 (HTS) 同期発電機が適しており、5MW 機を対象に開発した設計プログラムを用いて基本電気設計を行い、各種パラメータの影響を考慮して最適化設計を行ったので報告する。

### 2. HTS 同期発電機の基本構造と設計プログラム

Fig.1 は突極型高温超電導 (Salient-pole HTS 略して SHTS) 同期発電機の基本構造の横断面を示す。回転子の界磁極にはレーストラック形状の HTS コイルが巻かれて極低温に冷却され、固定子には多数設けられた電磁鉄板スロットに電機子コイルが巻かれ空気冷却される。

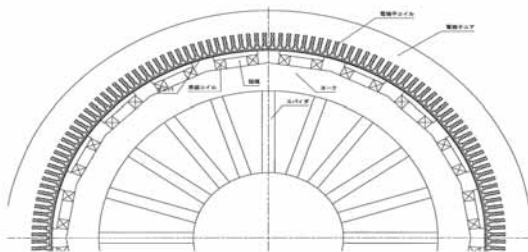


Fig.1 Cross-sectional view of conceptual structure of SHTS synchronous machines

Fig.2 は SHTS 同期発電機の基本電気設計プログラムのフローチャートであり、界磁巻線・電機子巻線の起磁力、発電機各部の寸法諸元と磁束密度、重量、損失や効率などの基本電気設計計算を行うことが出来る。

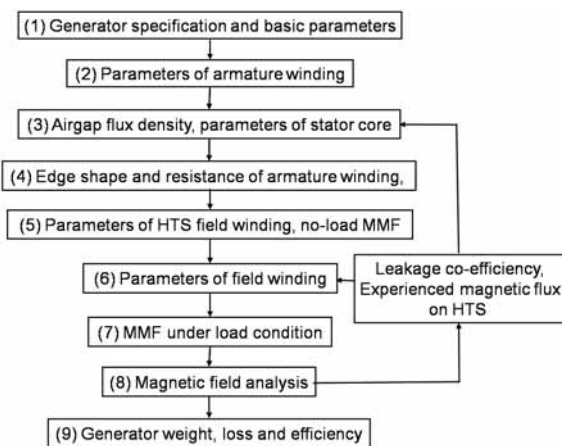


Fig. 2 Flow chart of fundamental electrical design program of SHTS synchronous generators

この設計プログラムの特徴は、①入力パラメータとして回転子外径、電気装荷、極数、界磁極の磁束密度、HTS の励磁性能などを用いて多数の自動設計を行い、主に発電機重量と効率、HTS 線材の使用量を考慮して SHTS 発電機の最適諸元と性能を定める。②設計手順で定めた発電機諸元を用いて磁場解析を行い、界磁漏れ係数とともに HTS 経験磁場結果から界磁動作電流を算定し、設計手順にフィードバックして設計の適正化を図る。

### 3. 5MW 機の基本電気設計

次の特徴をもつ SHTS 発電機の基本電気設計を行った。

- ・経済性を考慮して、HTS 回転子と現用固定子を組み合わせたレトロフィット機とする。
  - ・HTS 導体に Bi 系線材を 65K で使用し、巻線と冷却が容易なレーストラック型巻線を採用する。
  - ・界磁極とヨーク部の磁束密度を磁気飽和領域の 2.0 T、固定子ティース部の磁束密度は 1.65 T に設定する。
- 三次元磁場解析結果から、界磁漏れ係数 1.33、HTS コイルの運転電流負荷率 0.7 をフィードバックして用いた。

Fig.3 は極ピッチを 0.51m 一定に維持する条件における発電機基本性能に及ぼす極数の影響を示す。発電機重量と効率、並びに HTS 線材使用量の点からは 40~50 極が良いが、固定子コアの支持や発電機の機械強度を考慮すると、28~36 極が望ましいことになる。

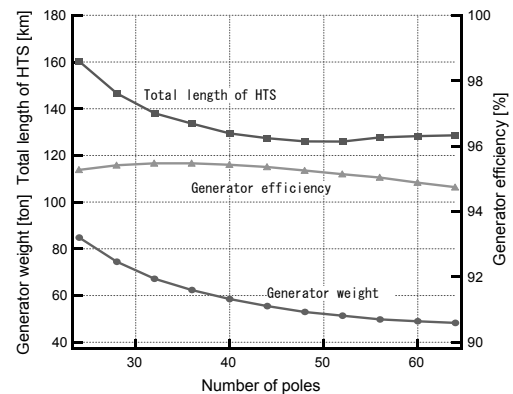


Fig.3 Influence of number of poles on basic performances of 5MW SHTS generators

5MW 機 A, B の基本電気設計結果を現用型機 C と比較して Table 1 に示す。B 機は A 機よりも HTS 使用量が多いが、発電機重量が軽くなっている。また、SHTS 発電機は現用型機よりも発電機重量が 1/2 以下に軽量化し、発電機効率が 7% 向上するなどメリットの大きいことが分かる。

Table 1 Main design results of 5MW SHTS generators (3.3 kV, 972 A, 15 rpm)

Generator	A	B	C
Number of poles	28	36	36
Frequency [Hz]	3.5	4.5	4.5
Rotor outer diameter [m]	4.52	4.56	4.56
Stator outer diameter [m]	5.16	5.14	5.14
Stator length [m]	1.10	1.08	1.08
Pole pitch [mm]	510	401	401
Slot pitch [mm]	57	45	45
Electric loading [A/cm]	1200	1200	1200
Total slot number	252	324	324
Flux /pole [Wb]	0.46	0.36	0.36
Magnetic flux density in air gap [T]	1.06	1.05	1.05
Magnetomotive force of field winding [kA/極]	50.3	43.4	63.3
Synchronous Reactance [pu]	0.68	0.61	0.36
Total volume of HTS [m <sup>3</sup> ]	0.117	0.123	(2.37)
Generator weight [ton]	75	69	168
Efficiency [%]	95.3	95.5	88.1

# 突極型高温超電導発電機の界磁巻線発熱量評価

## Estimation of the heat generation on field windings for salient-type HTS generator

小柴 有, 牧 直樹, 和泉 充 (東京海洋大学)  
 KOSHIBA Yu, MAKI Naoki, IZUMI Mitsuru (TUMSAT)  
 E-mail: m094023@kaiyodai.ac.jp

### 1. はじめに

高温超電導(HTS)発電機の基本電気設計に必要なとなる運転電流は、導体発熱量から決めるのが妥当である。そこで、界磁巻線の経験磁場と動作電流から発生する発熱量を、三次元磁場解析を用いて算定する方法を立案し、風力用 5 MW 機を対象に動作電流を評価したので報告する。

### 2. 三次元磁場解析

Table.1 に示す風力用 5MW 突極型 HTS 機の主要諸元を用いて三次元磁場解析を行った。Fig.1 に軸方向中心断面の要素分割図及び、磁場分布の計算結果を示す。HTS 導体の発熱量を正確に算定するため、界磁巻線部の最大要素サイズを 5mm 以下とした。磁場分布図から径方向最大磁束は 2.47T と高いが、界磁巻線における HTS 導体の c 軸方向磁場は 1T 以下に収まっていることが分かる。

Table.1 Main parameters of a 5MW HTS generator

Revolution	15 [rpm]	Rotor outer diameter	4.56 [m]
Number of poles	36	Pole pitch	0.40 [m]
Stator inner diameter	4.59 [m]	HTS material	Bi-2223
Stator outer diameter	5.13 [m]	Operating temperature	65 [K]
Stator length	1.08 [m]	Cross section of HTS	0.8 [mm <sup>2</sup> ]
Magnetic flux density in air gap	1.05[T]	Magnetomotive force of HTS field coil	43.4 [kA/pole]

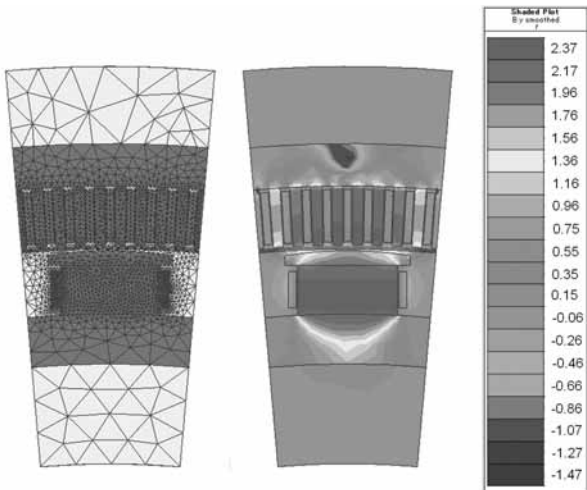


Fig.1 Simulation model and magnetic field distribution

### 3. HTS 導体発熱量算定法

HTS 界磁巻線の発熱量は直線部と曲線部の和として次式で表される。

$$W = \sum_{s,t,r} \left\{ Vcl \left( \frac{I}{I_c(B, \theta)} \right)^{n(B, \theta)} \Delta x \Delta y \Delta z \right\} + \sum_{s,r,\phi} \left\{ Vcl \left( \frac{I}{I_c(B, \theta)} \right)^{n(B, \theta)} r \Delta y \Delta r \Delta \phi \right\}$$

ここで、 $I_c$  及び  $n$  値は HTS 導体の経験する磁場の大きさ、その c 軸方向に対する角度によって決定される。 $I_c$  及び  $n$  値の磁場特性の実験結果を Fig.2 に示す。3 次元磁場解析によって得られた磁束分布から、HTS 界磁巻線の各要素における磁束密度の大きさ及び角度を計算し、各  $I_c$  及び  $n$  値を Fig.2 を用いて求め、その結果を上式に代入して発熱量を算定する。

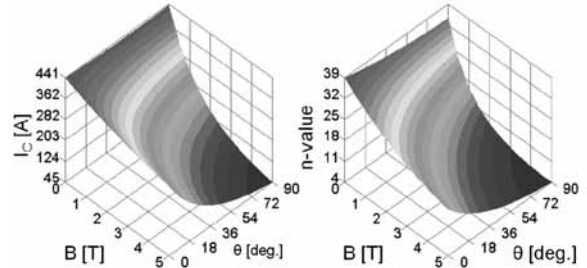


Fig.2 Influence of the magnetic field and angle on  $I_c$  and  $n$ -value

### 4. 5MW 機の発熱量と運転電流の評価

Fig.3 に 5MW 機の界磁電流に対する界磁巻線全体の発熱量を示す。運転電流 45A における発熱量は 7.3W、46A では 21.2W、47A では 68.2W となり、それ以上では急激に上昇することが分かる。実際には冷凍機の能力を考慮して運転電流を定めることになるが、許容発熱量を 100W とした場合には、運転電流は 47A となる。

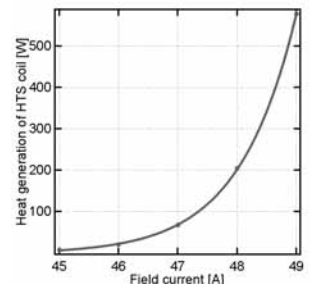


Fig.3 Electric loss of HTS field coil

Fig.4 に本提案の運転電流決定法を従来法と比較して示す。従来法では HTS 線材の安全性を考慮して、c 軸方向磁場に対する  $I_c$  特性と運転ロードラインの交点から運転電流を決定していた。これに対して本提案の方法は、運転電流が HTS 発熱量という固有の特性を基準にしているため、運転電流を正確に定めることができる。本提案の方法では運転電流は 47A となり、従来法の 33A よりも 1.4 倍大きくとれることが分かった。なお、いずれの場合にも安全マージンは必要になる。

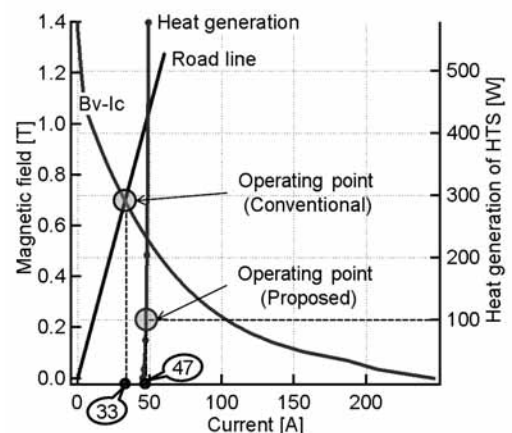


Fig.4 Comparison of operating current

### 5. まとめ

HTS 界磁巻線の発熱量算定法を提案し、風力用 5MW 機において、許容発熱量を 100W とした場合に運転界磁電流は 47A になり、従来法よりも 1.4 倍大きくなることを明らかにした。

## モータ固定子巻線用高温超電導レーストラックコイルの通電特性 Current transport property of HTS racetrack coils for motor stator windings

福井 昌則, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 長村 光造 (応用科研); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久(イムラ材研)

FUKUI Masanori, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OSAMURA Kozo (RIAS);

ITO H Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA)

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

1. はじめに 我々は、電気駆動式自動車を含む輸送機器への適用を指向し、高温超電導駆動システムの研究開発を実施している[1]。本研究開発では、高温超電導誘導同期機(High  $T_c$  Superconductor Induction-Synchronous Machine: HTS-ISM)[2]を対象とし、同回転機の効率ならびに出力密度化向上の観点から全超電導化を検討している。本講演では、固定子巻線用高温超電導コイルの通電特性を評価した結果について報告する。さらに、同コイルを適用して全超電導 HTS-ISM を試作・試験したので、その概要を説明する。

2. レーストラック形固定子コイルの試作 本研究では、SuperPower社のY系高温超電導テープ材を適用して固定子コイルを試作した。同テープ材は、曲げ歪に対する耐性が良好であり、少なくとも曲げ直径20mm程度までは応力-歪特性が可逆性を示している。従って、本研究の試作では固定子スロット間隔が27mm程度であることから、上記テープ材をコイル化して巻線を作製した。巻線に際しては、3相・4極・集中巻構成を採用し、毎極毎相のコイル巻数を14とした。図1には、試作したY系高温超電導レーストラックダブルパンケーキコイル(曲げ直径:29mm)の外観写真を示す。巻線に際しては、予めテープ材をポリイミドテープで絶縁し、かつコイル厚を2.0mm以下となるように作製した。

3. 通電特性の評価 試作したY系高温超電導レーストラックコイルを液体窒素中に浸漬し、定常状態に到達後、4端子法を用いて通電特性を調べた。図2には、固定子巻線に使用したコイルの77K(液体窒素浸漬冷却条件下)における測定結果を示す。1つのコイルにつき、2度測定を実施し、再現性をチェックした(数%の誤差があった)。その結果、各コイルにおける臨界電流のバラツキ $\Delta I$ は12A程度であった(図2参照)。また、試作した12個すべてのコイルにおいて、突然超電導状態が破れるクエンチ様の現象が観測された。同現象は、少なくとも巻線前の状態では観測されておらず、コイル化に伴って特長的に発生すると考えられる。従って、本回転機に関しては、少なくとも磁束フロー状態は使用することができず、実用低温超電導線材のように臨界電流に対する負荷率を設定する必要がある。上記特性の詳細については、現在検討中である。

4. 全超電導機の試作と試験の概要 Y系高温超電導固定子巻線を完成し、高温超電導回転子と組み合わせた全超電導試験を実施した。なお、回転子巻線にはDI-BSCCOテープ材を使用した。試作した全超電導HTS-ISMをメタルクライオスタット内に設置し、液体窒素浸漬条件下で無負荷試験を実施した。その結果、定常回転数300rpmの回転試験に成功することができた。

コイルの試作および通電特性の評価、全超電導機の試作および回転試験の結果についての詳細は、講演当日に報告する。

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



Fig. 1. Photograph of racetrack double-pancake coil made of YBCO coated conductor, which is insulated with polyimide tape.

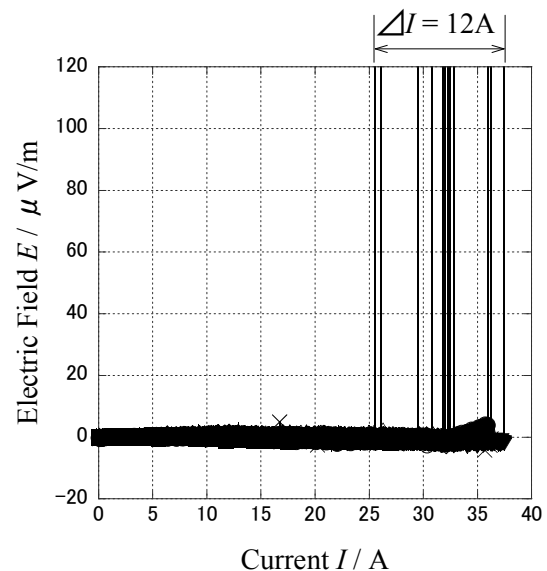


Fig. 2. Electric field versus current property of YBCO racetrack double-pancake coils used for the stator windings, at 77K.

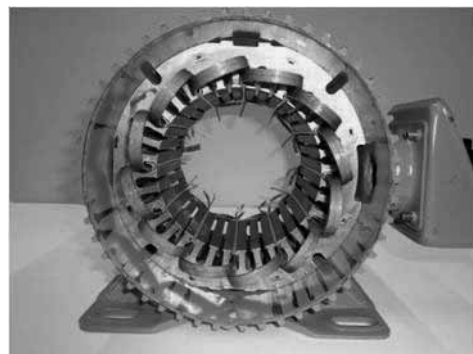


Fig. 3. Photograph of fabricated HTS stator.

### 参考文献

- [1] 中村武恒: 超電導 Web21, 2010年3月号, pp. 5-7 (2010)  
[2] T. Nakamura et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 20, pp. 911-918 (2007)

# 超電導化の観点からみた電管用主電動機の仕様

## Required spec for superconducting traction motor for railways

秦 広 (鉄道総研)  
 HATA Hiroshi (RTRI)  
 E-mail: hata@rtri.or.jp

### 1. はじめに

超電導応用の一つとして内外で船舶や自動車の駆動用電動機への応用が試みされている。電車は身近な存在であるので、その駆動用電動機(主電動機)は超電導化のターゲットとしてインパクトが大きいと考えられる。鉄道事業者にとっては、効率の向上による省エネ効果が得られ、コスト等が現在並みにできれば導入の動機となる。実現には多くの技術的ハードルがあり、短時間では困難と考えられるが、求められる条件をなるべく定量的に明らかにしたい。

### 2. 仕様

種類: 新製されるものはここ 20 年程度誘導機が主流である。最近高効率の永久磁石同期機が量産使用されるケースが出てきた。しかし誘導機は 1 台のインバータで複数機を並列駆動できるが、同期機はこれができないためインバータのコストが高くなる等のデメリットもあり、今後の趨勢が注目される。

出力: 通勤電車では一時間定格で 120~230kW。新幹線では数百 kW。

寸法: 台車に収まる必要から本体部分は 500mm、長さ 500mm 程度の概略円筒形であることが求められる (図 1)。



Fig. 1 Traction motor

重量: 400~600kg 程度

効率: 誘導機 92%、同期機 96%程度。

電流: 出力に対応して 1 時間定格で 100A~100A 程度

電圧: 最大 1100V。インバータ出力の矩形波。

トルク: 出力によるが数百 N・m

最高回転数: 5000~6000min<sup>-1</sup>

振動、衝撃: それぞれ、「JIS E4031 鉄道車両部品—振動試験方法」と「JIS E4032 鉄道車両部品—衝撃試験方法」に試験内容が記載されている。一部実情に沿わないため異なった内容で実施している部分がある。

取付: 台車枠に取り付けられる。

動力伝達: 車輪・車軸と台車枠の間にはばねが入っているので走行中は数十 mm の相対変位がある。これを許容してトルクを伝達する継手を介して車軸に取り付けられた歯車装置にトルクが伝達される。

電流波形: インバータの出力であるため高調波成分を含んでいる。

### 3. 運用上の条件

#### ・過負荷使用

電車の主電動機は起動時およびブレーキ時は出力と電流が先述の定格値の 1.5~2 倍で使われる。停車中、惰行中は無負荷であり、二乗平均が上記の定格値に納まっていればよいとしている。

#### ・夜間電源

電車は夜など車両基地に戻るとパンタグラフを下げるので電源はなくなる。冷凍機もこのときは稼働できない前提で考える必要がある。

#### ・準備時間

朝などパンタグラフを上げて電源を得てから出発まで最も緩く考えても 30 分以内が条件。できれば 5 分で出発したい。

#### ・保守

週に一度程度編成全体を 1 時間程度で検査する作業検査、3 カ月に一度程度一日かけて検査する交番検査を行うが、車体と台車の分離はしないので取付状態でできる範囲となる。オーバーホールは 8 年周期が一つの目安である。鉄道事業者はオーバーホール 2 回目、すなわち 16 年周期で分解整備という頻度を目指している。ちなみに直流主電動機の場合はブラシ、整流子などがあるため 2~4 年周期で分解整備している。

### 4. 市場規模

日本の電車の数は JR、民鉄、地下鉄をあわせて新幹線を含めて約 5 万両。主電動機がある電動車の割合を 50% とすると、電動車 1 両に主電動機は通常 4 台なので 10 万台になる。これが平均 30 年で入れ替わっていくとすると年間新製数は 3000 台あまりとなる。短い例としては、新幹線で 15 年程度という例もある。国土交通省の HP に掲載されている生産実績は 2008 年度で 8298 台。これは輸出用を含んでいる。上記 HP によると金額は 135.7 億円であり、1 台あたり平均 163 万円と計算できる。

従来、国内用と輸出用が概略半々であったが、最近中国を筆頭に海外で鉄道整備の資金投入が多くなる傾向があり、国内の各メーカーは従来以上に海外向けに力を入れている。

### 5. おわりに

超電導化ということを入れて電車用主電動機の仕様などをまとめた。今後の超電導応用技術開発の検討の参考になれば幸いである。

日本においては貨物輸送のシェアが低いなどの理由で電気機関車の保有数が数百両と非常に少ない。そのため本稿ではこれに触れなかったが、出力が 1000kW 程度で動輪が電車より大きいので許容寸法が大きくなるのが大きな違いで、運用上の条件などほぼ共通である。海外では貨物輸送などに活躍しているケースが多々あり、輸出用としては検討される意義がある。



## 磁気浮上搬送装置の搬送時振動特性評価 (2)

## Vibration characteristics of moving magnetically levitated conveyor system (2)

花本 豊彰, 小森 望充, 浅海 賢一(九工大)

HANAMOTO Toyoaki, KOMORI Mochimitsu, ASAMI Kenichi (Kyushu Institute of Technology)

E-mail: komori\_mk@yahoo.co.jp

## 1. はじめに

近年、半導体の製造環境では、微細な塵の存在が半導体の歩留まり向上のための問題となり、磁気浮上の搬送系への利用が注目されてきている。本研究では容易に強い浮上力が得られる超電導体のピン止め力を用いた無摩擦、無発塵の磁気浮上装置、位置決め可能な搬送装置を試作しこれらを組み合わせることにより搬送時の振動制御の有効性を検討してきた[1]。そこで、今回は搬送装置を改良し、様々な搬送状態における浮上体の振動特性データを得ることで再度振動制御の有効性を検討する。

## 2. 磁気浮上搬送装置

Fig. 1 に本研究で使用する磁気浮上搬送装置の概観と振動測定方法について示す。本装置では Fig. 1 に示すように浮上体を浮上ステージ、搬送部及び浮上体の制振機構を搬送ステージと呼ぶ。浮上ステージには永久磁石、搬送ステージには超電導体、制御用電磁石、より大きな浮上力を得るための反発永久磁石が配置される。超電導体は液体窒素を用いて磁界中冷却し、搬送ステージを移動させることで、永久磁石がピン止め力により追従して搬送を行う。搬送や荷重の変化によって生じた振動はピン止め効果により受動的に減衰されるが軸方向の振動に関しては、ホールセンサにより永久磁石の位置を検出し、電磁石の磁界を利用して能動的に制御を行い、搬送および荷重の移動によって生じた振動を減衰させる。得られた変位信号は PC 内で A/D 変換され、その後、算出された変位信号を基に得られた制御信号は D/A 変換された後、パワーアンプを用いて制御電流として増幅し、左右のコイルを励磁して、浮上ステージの振動に対して PD 制御を行う。

## 3. 実験

搬送を行った際の浮上ステージの振動は Fig.1 に示すようにレーザ変位計を用いて計測した。初期設定は初期浮上ギャップを 10mm とし、搬送距離は 100mm、搬送速度は約 100 mm/s とした。

Fig.2 に実験を行った際の搬送装置の変位を示す。Fig.3, Fig.4 は実際に搬送した際の y 軸方向の振動特性である。制御を行っていない場合に比べ、制御を行った方が振動は抑制されていることが分かる。これより、本磁気浮上搬送装置において y 軸方向にも制振が可能であることが分かった。

## 4. まとめ

今回の実験により本装置で横方向の振動制御も行えることが確認できた。今後は実際に搬送物を載せた状態での振動特性を調べていく。

## 参考文献

1. T. Uchiyama, et al.: Improvement of magnetically levitated superconducting conveyer using PMB, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 19, (2009) p.2107

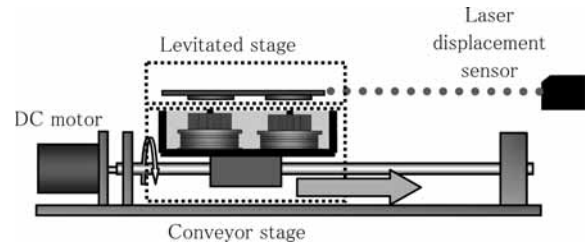


Fig. 1 Conveyor System

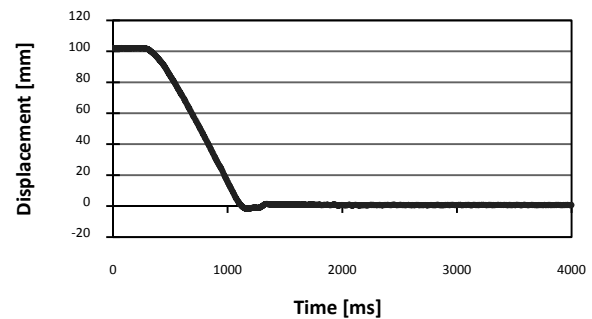


Fig. 2 Displacement of the conveyer

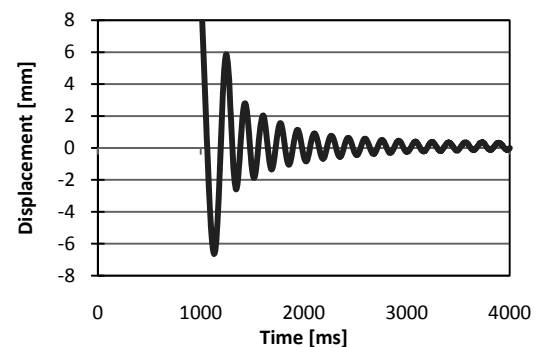


Fig.3 The vibration when the conveyer stopped (without control)

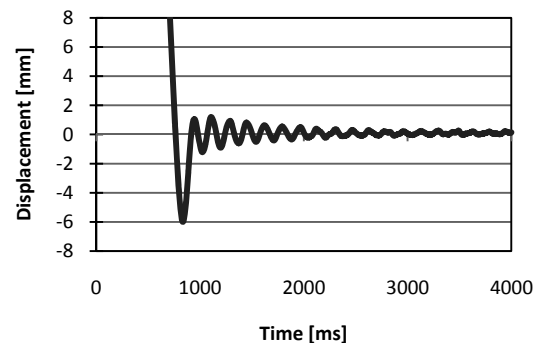


Fig.4 The vibration when the conveyer stopped (with control)

# HTS 磁気軸受でフライホイールを非接触支持する模型試験装置の開発

## Development of the model scale flywheel examination device with HTS magnetic bearings

荒井 有気, 清野 寛, 長谷川 均, 長嶋 賢 (鉄道総研)

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

E-mail: arai@rtri.or.jp

### 1. はじめに

超電導コイルと超電導バルク体を組合せた超電導磁気軸受を用いた鉄道用フライホイール蓄電装置の開発を進めている。これまでに、20 kN 対応超電導磁気軸受において、20 kN のスラスト荷重を浮上支持し、3600 rpm まで回転できることを確認している[1]。本件で開発した模型試験装置において、スラスト、ラジアル荷重の非接触浮上支持および回転を確認したので報告する。

### 2. 模型試験装置

超電導磁気軸受 (SMB) のステータは高温超電導コイル (BSCCO), ロータは超電導バルク体 (GdBCO) で構成され、1 つのクライオスタットの中に収められた。高温超電導コイルは冷凍機による伝導冷却、高温超電導バルク体は、内槽内に満たされた希薄ヘリウムガスによる分子伝導により冷却される。この SMB を上下に 1 組ずつ配し、ロータには、SMB の間に約 50 kg のフライホイールを、SMB の上方には、トルク伝達装置を接続した。トルク伝達装置は永久磁石の磁気結合を用い、クライオスタット容器を隔てて非接触でトルクを伝達する。クライオスタット外のトルク伝達装置は誘導電動発電機に接続され、回転させることができる。装置の概要を Fig. 1 に示す。

ロータを浮上させていないときは、フライホイールをロードセルで支持しており、この荷重の減少分を浮上力として計測した。

### 3. 浮上力測定

浮上力測定はクライオスタット外のトルク伝達装置を取外して行った。超電導コイルの励磁電流と発生浮上力の関係を Fig. 2 に示す。併せて示した有限要素法による計算値とよく一致している。また、上下変位が連続的に変化し、安定浮上していることを確認した[2]。なお、低温でのロードセルの校正は、浮上時の出力がロータ質量に一致するとして行った。

### 4. 回転試験

回転試験は、クライオスタット外のトルク伝達装置を取付けて行った。永久磁石による吸引力 (93 N) もはたらくため、浮上力測定するときよりも小さい励磁電流 (約 130 A) で浮上した。このため、回転試験は 135 A 励磁下で行った。Fig. 3 に 570 rpm までの回転試験の結果を示す。回転の間、浮上力の低下は見られなかった。

### 5. まとめ

高温超電導コイルと高温超電導バルク体を用いた超電導磁気軸受の全てをクライオスタット内に構成し、約 50 kg のフライホイールを非接触浮上支持することに成功した。永久磁石の磁気結合を用いたトルク伝達装置により、浮上しているロータを、非接触で 570 rpm まで回転させることに成功した。

ロータを磁気による力のみで、無制御安定浮上、回転駆動することができた。今後はロータ変位測定やステータの組立精度向上により、回転速度の向上を目指す予定である。

本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

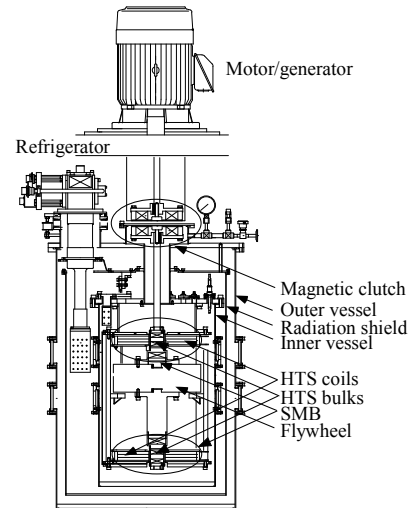


Fig. 1 Schematic view of the flywheel examination device

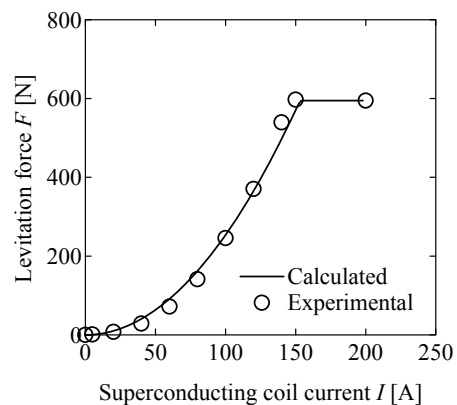


Fig. 2 Experimental and calculated result of static load tests

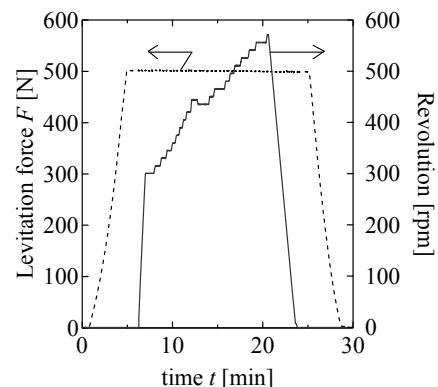


Fig. 3 Experimental and calculated result of rotation test

### 参考文献

- H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.134
- Y. Arai, et al.: Abstracts of 19<sup>th</sup> MAGDA Conference (2010) (submitted)

# 実用化に向けた高粘性流体のための超電導高勾配磁気分離装置の開発

## Development of Superconducting High Gradient Magnetic Separation System for Highly Viscous Fluid for Practical Use

林信吾, 三島史人, 秋山庸子, 西嶋茂宏(阪大)

HAYASHI Shingo, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.)

E-mail: hayashi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

食品や工業製品のような高粘性流体を扱う工場において、配管やプロベラから混入する金属磨耗粉の除去が必要であるが、媒質が高粘性であるために重力分離法や膜分離法が適用できず、有効な分離技術は未だ確立されていない。そこで、分離のための物質移動の推進力として分離対象粒子の磁気的性質に着目した磁気分離法による不純物分離を試みている。今までに、ポリビニルアルコール(PVA)を高粘性流体のモデル材料として、粘度 1 Pa·s では高粘性流体中の金属磨耗粉を高効率で分離可能であることが確認できた[1]。1 Pa·s の粘度は、サラダ油、洗濯のり程度である。本研究では、さらに粘度の高い食品や工業製品を想定し、粘度 10 Pa·s (マヨネーズ、はちみつ程度の粘度)で粒子軌跡シミュレーションを行い、分離可能性について検討した。

### 2. 磁気分離の理論

磁気分離法とは、粒子に働く磁気力の違いを利用して、分離対象となる粒子のみを選択的に分離する技術である。流体中からの磁気分離では、被分離粒子には主に磁気力、ドラッグ力が働く。被分離粒子に働く磁気力を式(1)、ドラッグ力を式(2)に示す。

$$\mathbf{F}_M = \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_D = 6\pi\eta r_p (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{F}_M$  は磁気力、 $\mathbf{F}_D$  はドラッグ力、 $r_p$  は粒子半径、 $\mathbf{M}$  は磁化、 $\mathbf{H}$  は磁場強度、 $\eta$  は粘度、 $\mathbf{v}_f$  は流体速度、 $\mathbf{v}_p$  は粒子速度である。磁気力がドラッグ力を上回っている場合に、磁気分離可能となる。式(2)より、ドラッグ力は粘度に比例して大きくなる。そのため、高粘性流体からの強磁性粒子の分離を考えた場合、粘度が低い場合と比較してドラッグ力が大きくなる。粘度が 10 Pa·s の場合では、1 Pa·s と比較して 10 倍、水の場合と比較して 10000 倍もドラッグ力が大きくなる。このように、高粘性流体からの磁気分離の場合はドラッグ力が大きくなるために、分離に必要な磁気力も非常に大きくなり、分離が難しくなる。そのため、高粘性流体からの磁気分離を行うためには、磁気勾配を高めるために超電導磁石と強磁性材料による磁気フィルターが必要となる。

### 3. 計算方法

ソレノイド型超電導磁石と磁気フィルターを利用した HGMS によって、どの程度の分離率が得られるのかを調べ、さらにフィルター設計の指針を得るため、粒子軌跡計算を行った。計算体系を Fig. 1 に示す。この体系は、ソレノイド型超電導磁石のボア内に流路を配置し、流路内に磁気フィルターを配置することを想定している。流路は、管径 30mm である。磁気フィルターは SUS430 製として考えた。磁気フィルターのワイヤーは 1 辺 1mm の角柱とした。この、ワイヤーの断面について、粒子軌跡計算を行った。また、隣のワイヤーとの間隔は 4.1mm である。これは、5mesh フィルターの使用を想定している。また、フィルターの前段、後段は十分離れており、互いの影響はないものとして考えている。有限要素解析ソフト ANSYS® Ver.10.0 (ANSYS, Inc.) を用いて磁場及び流速の分布の解析を行った。磁場分布と流速分布の解析結果を式(1)、(2)に代

入して、磁気力、ドラッグ力を求め、運動方程式から被分離粒子の軌跡を 4 次のルンゲ・クッタ法により連続的に計算した。磁束密度は、ワイヤーが十分飽和磁化に達するように 2T とした。粘度は 10 Pa·s で計算を行った。分離粒子は SUS304 粒子 (飽和磁化: 0.72T, 粒径: 20 μm) として計算を行った。

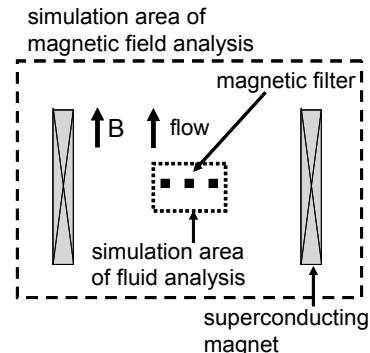


Fig. 1. The computational system of magnetic field and flow velocity analysis.

### 4. 結果と考察

粘度 10 Pa·s の場合のフィルター設計を行うため、フィルター枚数をパラメータとした計算を行った。結果を Fig. 2 に示す。2.5~30 mm/s の流速範囲では、フィルター枚数 10 枚では分離率は 81~41%であった。フィルター枚数 50 枚では、流速 10.0 mm/s で分離率 99%、流速 30 mm/s でも 93%の分離率であった。この結果より、低流速域ではフィルター枚数 50 枚程度で良好な分離率を得られることがわかった。また、このシミュレーションを用いれば、高流速域でも、どの程度の数のフィルターを使用すれば要求される分離率に達することができるのかを調べることができると考えられ、圧力損失等を考慮した上でフィルター設計を行う予定である。

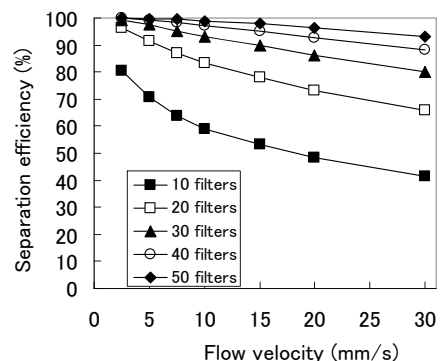


Fig. 2. Change in theoretical separation efficiency by the number of filters.

### 参考文献

- [1] S. Hayashi, F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima "Development of high gradient magnetic separation system for a highly viscous fluid," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, pp. 945-948, 2010.



# MHD 型海水・油分離装置内の海水の流れと電気分解に関する研究

## Seawater flows and electrolysis in a MHD-based oil separator

赤澤輝彦, 中本雄也, 岩本雄二, 梅田民樹 (神戸大)

AKAZAWA Teruhiko, NAKAMOTO Yuya, IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki (Kobe Univ.)

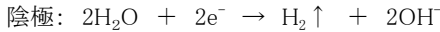
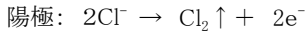
E-mail: akazawa@maritime.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

海水に磁場を印加し、磁場と垂直な方向に通電を行うと、海水には磁気力が作用する。一方、不導体である油には電流が流れないため、磁気力は作用しない。この磁気力の作用の違いを利用することにより、海水と油を分離する装置の研究を行っている。現在、我々は、海水に含まれるイオンが海水の電気伝導を担っていると考え、ミクロな視点に基づいた分離装置の数値計算モデルを確立することを目標に研究を進めている。前の学会[1]では、海水を電解液と考えた計算モデルを用いて、零磁場での分離装置の特性パラメータを見積もり、これらの値が実験結果とほぼ一致していることを報告した。本研究では、この数値モデルに、イオンに作用するローレンツ力の効果を取り込み、装置内の海水の流れと電気分解についての数値計算を行ったので、その結果を報告する。

### 2. 数値計算モデル

本研究の数値計算で想定した分離装置の形状は、1辺3cmの正方形流路断面をもち、全長が60cmダクトである(Fig.1)。この中央に対向する1組の陰極と陽極(長さ20cm)が取り付けられている。ダクト入り口から流入する海水の初期流速 $u_0$ は一律であり、印加磁場 $B$ は、初期流速に平行かつダクト内で一律である。簡単のため、初期流入の海水を濃度 $600\text{mol/m}^3$ のNaCl水溶液とし、電極で起きる化学反応は以下のものに限定した。



また、電極板で発生する気体の海水への影響は無視した。

海水中の各イオンの濃度 $C_i$ 変化は、Nernst-Planckの式に磁気力の効果を取り入れ

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla \cdot [-C_i \vec{u} + D_i \nabla C_i + \lambda_i C_i \nabla \phi - C_i \vec{A}_i] \quad (1)$$

に従うと仮定した。海水はイオンの移動により力を受けるので、ダクト内の海水の運動は、Navier-Stokesの式より

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \sum_{i=1}^3 \frac{\vec{A}_i C_i}{\mu_i} \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $\rho$ と $\nu$ は海水の密度、粘性係数であり、 $\phi$ は電気ポテンシャル、 $D_i$ と $\mu_i$ は各イオンの拡散係数、移動度を表す。また、イオンの価数 $Z_i$ とファラデー定数 $F$ を用いると、 $\lambda_i = Z_i F \mu_i$ であり、

$$\vec{A}_i = \frac{\lambda_i \vec{u} + \lambda_i^2 (-\nabla \phi + \vec{u} \times \vec{B}) - \lambda_i^3 (\nabla \phi \times \vec{B})}{1 + \lambda_i^2 B^2} \times \vec{B}$$

となる。(1)、(2)の方程式について、有限要素法を用いて数値的に解いた[3]。数値計算に必要な $D_i$ の値は、参考文献2より引用した。

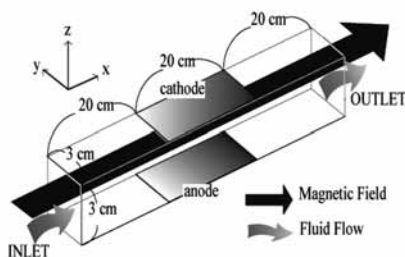


Fig.1 The device assumed in this study.

### 3. 結果と考察

$u_0=0.1\text{m/s}$ 、電極間電圧を10V、印加磁場を1Tとした場合のダクト内の圧力勾配をFig.2に示す。電極板の間において磁気力により発生する圧力勾配は、電極板に平行で、かつ磁場に垂直であることがわかる。このとき見積もられる圧力勾配の大きさは油粒子を分離可能な値である。また、印加磁場を大きくしても、圧力勾配の方向はほとんど変化せず、大きさのみが単調に増加することがわかった。

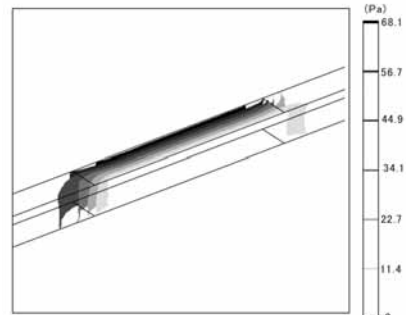


Fig.2 Pressure gradient in the duct.

陰極側から見たダクト内の海水の流れをFig.3に示す。(a)は印加磁場1Tの場合、(b)は10Tの場合である。ゼロ磁場で流路に平行であった海水の流れが、磁場印加により歪められ、10Tでは、電極板の入口および出口側の端で渦が形成されることがわかる。磁気力の増大は、分離力となる圧力勾配を強めるが、分離装置内の海水を攪拌するため、油の分離性能を下げることになる。圧力勾配による装置内での海水の攪拌を抑制する方法を見つけることが、装置開発の鍵となる。

電極面に対し垂直な仕切板を電極板の出口側に挿入し、出口流路を2等分した実験的研究[4]では、2つの出口流路から排出される海水の流量が、磁場印加とともに等しくなくなり、強磁場で片方の出口から海水が排出されなくなることが報告されている。この実験結果と、我々の計算結果は矛盾しない。

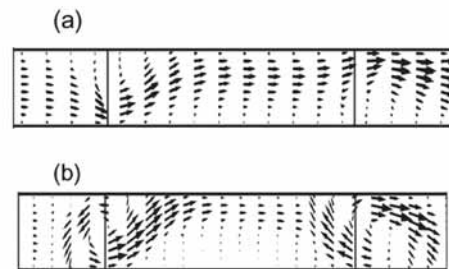


Fig.3 Velocity of the seawater viewed from above.

### 参考文献

1. T. Akazawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.189.
2. J. Lu, et al.: Electrochimica Acta, Vol. 53 (2007) p.768.
3. Comsol Multiphysics User's Guide, Version 3.5a, Comsol AB, 2009.
4. M. Takeda, et al.: IEEE T. Appl. Supercond., vol. 14, (2004) p.1543.

# 超電導電磁攪拌装置によるトルネード攪拌

## Tornado stirring for superconducting magnet system

笠原 奉文(電中研); 谷口 尚司, 上野 和之, 嶋崎 真一(東北大); 宮下 克己(日立電線)  
 KASAHARA Hirofumi (CRIEPI); Taniguchi Shoji, Ueno Kazuyuki, SHIMASAKI Shin-ichi (Tohoku Univ.);  
 MIYASHITA Katsumi (Hitachi Cable)  
 E-mail: kasa@criepi.denken.or.jp

### 1. はじめに

材料製造過程において、攪拌を行うことにより結晶の微細化や成分濃度の均一化など多くの効果を得ることができる。中でも電磁攪拌は制御性が優れている。

我々はこれまでに回転電磁力のみを与える超電導電磁攪拌装置を試作し、その強力な攪拌力を示した[1]。しかし回転磁界だけでは強力であっても流体が剛体回転になり攪拌力が弱まってしまう可能性がある。

今回、垂直方向に移動磁界を発生するマグネット群を用いて、二軸電磁攪拌とし、その性能検証[2]と評価を行った。

### 2. トルネード電磁攪拌装置

本装置は回転方向と垂直方向に任意の周波数で電磁力が印加できるため、流体の動きを3次的に制御でき強力なトルネード攪拌が可能となる。NbTi 交流超電導マグネットを用いているため、実用機として十分な電磁力を印加できる。装置の構成を Fig. 1 に示す。

### 3. 攪拌性能

熔融ガリウムを用いた攪拌実験を行った。回転攪拌に関しては容器の底面が露出するほどの強力な攪拌を実現した。

Fig. 2 に垂直方向攪拌による液面形状の変化を示す。Fig.2の X 軸左側が容器中心で、右側が容器の外壁部である。この図の実線は回転磁界のみを与えたとき、遠心力により外壁部の液面が上がっている。一点鎖線は垂直磁界のみを与えたときの液面である。外壁部に下向きの電磁力を印加することにより、中心部が盛り上がった液面となっている。点線が、回転と垂直を同時に印加したトルネード攪拌である。遠心力による外壁部の液面上昇を抑えつつ、回転攪拌を与える事により強力な攪拌が可能となる。

### 4. まとめ

トルネード攪拌時の電磁力の印加状況を電磁界解析ソフト

トJMAG により解析した結果を Fig. 3 に示す。容器周辺部で下向きの電磁力が印加され、また回転方向の電磁力も同時に加わっている様子が確認できた。

今回の解析により流体の大きさや導電率により、最適な周波数と磁界強度を求めることができ、実機の設計に反映させ、省エネルギーでかつ従来得られなかったような材料プロセスを提供できる。

### 参考文献

1. H.Kasahara, et al.:J. Cryo. Soc. Jpn, Vol.42 No.11 (2007)
2. H.Kasahara, et al.;CRIEPI Report H09016 (2010)

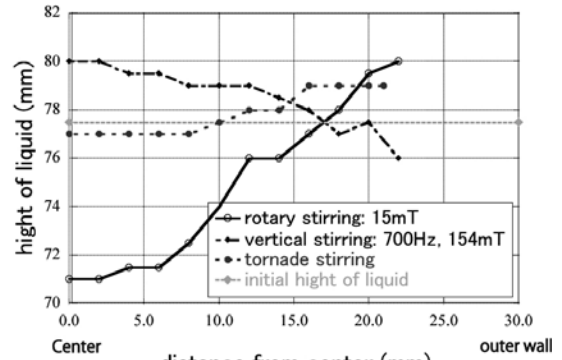


Fig. 2 face of liquid

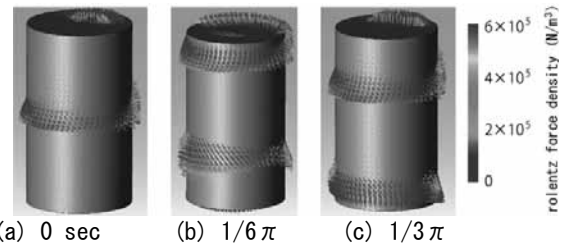


Fig. 3 electromagnetic analysis of tornado stirring

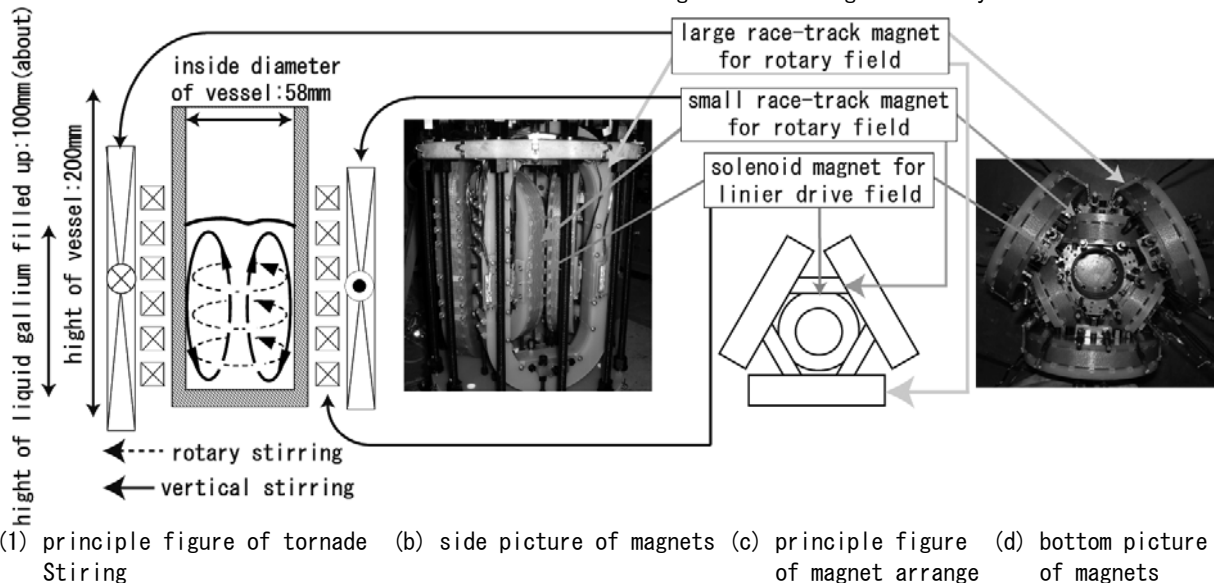


Fig. 1. Superconducting electromagnetic stirring system

# 流体の運動への磁気力の影響のシミュレーション

## Simulation of fluid motion in gravitational and magnetic fields

岡田 秀彦, 廣田 憲之, 松本真治, 和田 仁(物材機構)

Hidehiko Okada, Noriyuki Hirota, Shinji Matsumoto, Hitoshi Wada (NIMS)

E-mail: OKADA.Hidehiko@nims.go.jp

### 1. はじめに

タンパク質の構造を X 線解析で精確に決定するために必要な高品質なタンパク質結晶を得る方法として、微小重力環境が注目されている。これはタンパク質溶液中での結晶化過程において、重力による溶液の対流等を抑制できると考えられているからである。

近年、磁気力によって重力を相殺し、微小重力環境を地球上で実現しようとする研究が注目されるようになってきた。しかし重力は質量に作用し、磁気力は磁化に作用するから、これらの微小重力現象は全く同一の現象ではない。その違いを明らかにし結晶化過程への影響を明らかにすることは、タンパク質結晶生成の技術開発にとって非常に重要である。

重力と磁気力が存在する環境での結晶成長へ影響を及ぼす因子を調べるために、第一段階としてタンパク質溶液の溶媒である水に磁場と重力が作用した場合に生じる現象のシミュレーションを行った。そのために、重力と磁気力をとり入れた「Navier-Stokes 方程式」を用いて、流体の運動モデルを構築した。このモデルでは、今までは考慮されていなかった、実際の実験環境で生じる磁気力の不均一性や流体の磁化率の温度依存性の影響も考慮している。

本発表では、モデルの説明とそれを使ったシミュレーションの結果を示し、磁気力の非一様性や磁化率の温度依存性の影響について調べた結果を示す。

### 2. 計算モデル

重力と磁気力が作用する流体の運動を以下の Navier-Stokes 方程式を基にしたモデルによってシミュレーションした。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \bar{\nabla}) u_i = -\frac{1}{\rho} \bar{\nabla}_i p + \nu \bar{\nabla}^2 u_i + g_i + \frac{1}{\rho} (\bar{M} \cdot \bar{\nabla}) H_i$$

ここで  $\bar{u}$  は流速、 $\rho$  は流体の密度、 $p$  は圧力、 $\nu$  は粘性係数、 $\bar{g}$  は重力加速度のベクトル、 $\bar{M}$  は流体の体積磁化、 $\bar{H}$  は磁場である。添字  $i$  は各ベクトルの成分を表す。実際のシミュレーションでは熱対流を調べるために使われる Boussinesque 近似によって変形した式を用いた。

開発しようとする結晶生成システムでは、効率良くタンパク質結晶を得るために、多くの異なる条件下で同時に結晶を成長させる。そのため、超電導マグネットの室温空間内にタンパク質溶液を入れた容器を多数導入するので、ボアの中心軸から外れた位置にも容器を配置する。通常の磁気力の実験では磁気力が比較的一様な中心軸上で行われるが、開発中のシステムでは、磁気力の大きさは一様ではない。

### 3. 計算結果

以下の例は、磁気力の対流などへの影響などを見やすくするため、実際とは多少異なる条件で計算を行っている。計算は 2 次元で、上部は 20°C、底は 22°C、横の壁は断熱とする 1 cm × 1 cm の容器内に満たされている水の運動のシミュレーションを行った。

図 1 は一様磁気力、本シミュレーション条件での磁気浮上条件 ( $(\bar{B} \cdot \bar{\nabla}) B_x = -1350 \text{ T}^2/\text{m}$ ) での対流の様子である。矢印は水の流速の方向と大きさを示している。等高線は温度分布を

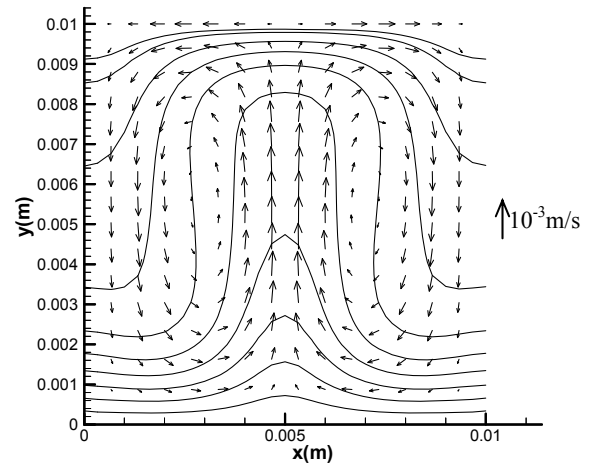


Fig. 1 Calculation result under gravity and homogeneous magnetic force when  $(\bar{B} \cdot \bar{\nabla}) B_x = -1350 \text{ T}^2/\text{m}$ .

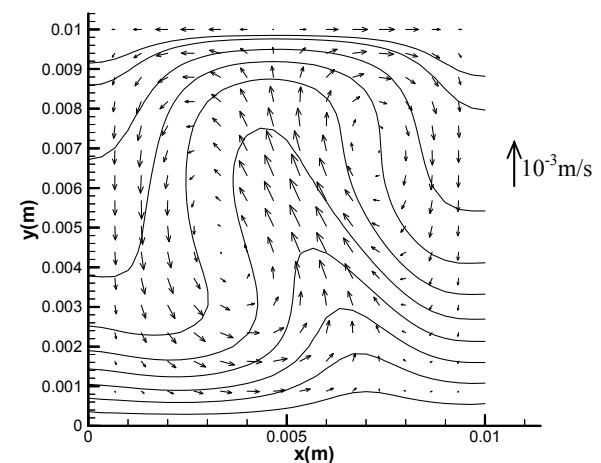


Fig. 2 Calculation result under inhomogeneous horizontal magnetic force.

表し、0.2°C 間隔である。磁気浮上条件にもかかわらず、質量磁化率の温度依存性のために、完全には重力が相殺されず、重力のみの場合と比べ対流は抑制され流速は遅くなっている。図 2 は磁気浮上条件の一様垂直磁気力と水平の非一様磁気力が作用した場合の例である。水平磁気力の条件は  $(\bar{B} \cdot \bar{\nabla}) B_x = 3.8 \times x / 0.01 \text{ T}^2/\text{m}$  である。つまり右に行くほど水を左に押す力が強くなる。そのため、対流の形が大きく変形している。また、同じ大きさの一様水平磁気力を作用させた場合よりも変形の程度は大きくなっている。

### 4. まとめ

今まではあまり考慮されていなかった、磁化率の温度依存性や非一様な磁気力の水の運動への影響を調べ、条件によっては対流等へ影響する場合があることが分かった。

本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業機器開発プログラム 高効率・高品位タンパク質結晶生成システムの開発」の支援を受けて実施している。

# ヘリカル型海流 MHD 発電機の流動特性および性能予測

## Hydraulic characteristics of helical-type seawater MHD power generator and prediction of performance

BUI ANH KIET, 武田実(神戸大学);木吉司(物質・材料研究機構)  
E-mail: kietthujp@yahoo.co.jp

### 1. はじめに

本研究室ではクリーンな自然エネルギーとして海洋エネルギーに着目し、超伝導技術の海事科学分野への応用として超伝導マグネットの強磁場を利用した海流 MHD 発電の研究が行われてきた。ここで、MHD とは電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics) の略であり、海流 MHD 発電とは海流が超伝導マグネットによる磁場を横切る時に発生する起電力を取り出す、いわゆるフレミングの右手の法則を利用した発電方法のことである。この海流 MHD 発電では海水が作動するだけなので、機械的駆動部がなくメンテナンスが不要である。また、海水の運動エネルギーを電気エネルギーに変換しているため、地球温暖化の原因となっている二酸化炭素の排出がないというメリットがある。現在では、リア型よりも有効に印加磁場を利用できるヘリカル型発電方式の研究<sup>1)~4)</sup>を行っている。ヘリカル型において発電出力および効率を上げるためには、流体損失を低減し流速を増加させることが重要である。そのためには、回転数、ピッチ長、電極直径等を含む発電機形状を最適化することが重要である。本研究では回転数、ピッチ長、電極内直径を変えた流体損失の実験値を基にして、最大発電出力を予測した。この結果より、最適形状について考察した。

### 2. 実験装置および実験方法

実験装置の構成機器は、圧力分布測定装置、循環ポンプ (CMP6-63.7 寺田ポンプ社)、流量制御バルブ、流量計 (UZG FROW UZU-VTS2-L 日本フローセル株式会社)、整流器、1000L 貯水タンク、バルク形半導体圧力トランスデューサー (PMS-5WE 豊田工機株式会社)、定格圧力がそれぞれ 100 kPa、30 kPa の 2 種類の拡散形半導体圧力トランスデューサー (DD101K 株式会社ジェイテクト)、循環用ホース、各配管である。流量と圧力の計測は、株式会社デイスシー製のデータ集録装置 FE300 によって、20 ms 間隔で 512 個のデータをパソコンに取り込む自動計測を各 3 回ずつ行い、解析にはこれらの平均値を用いた。作整した実験装置 (ヘリカルモデル) には、ポリ塩化ビニル製で直径 100 mm、内径 10、20、30 mm、ピッチ長 30、37.5、45 mm、回転数 3、5、7 のヘリカルガイドが入っている。次に実験方法について述べる。まず循環ポンプを使い、整流器を介してヘリカルモデル内に水を流した。次に、流量をゼロから 10 m<sup>3</sup>/h ずつ増やし、循環ポンプで流すことのできる最大流量 45 m<sup>3</sup>/h まで増加させ、バルク形半導体トランスデューサーを 1 つ、拡散形半導体トランスデューサーを 2 つ、計 3 つの圧力センサーを同時に使用して、それぞれの流量における各測定孔の圧力の測定を行った。

### 3. 実験結果および性能予測

回転数 7、ピッチ長 37.5 mm、内径 10、20、30 mm のヘリカルモデルを用いて、圧力分布の測定を行った。Fig.1 に内径をパラメータとして測定した流体損失 (ヘリカルモデルの入口と出口の圧力差) と流量の関係を示す。図中の曲線は、最小二乗法による 2 次の多項式近似曲線である。この図より、流体損失は流量の二乗にほぼ比例して増えることが分かる。また、流量が一定の時に内径が増加するとヘリカルモデルの流体損失が増えることが分かる。

次に、回転数、ピッチ長、内径を変えた流体損失の実験

値に対する近似式を用いて、最大発電出力を計算した。そして、最高の計算値を示す形状を最適形状と考えた。ヘリカル型の最適形状 (7 回転、ピッチ長 37.5 mm、内径 30 mm) の最大発電出力を Fig.2 に示す。Fig.2 より、発電開始流量は磁場 7T の場合 24m<sup>3</sup>/h、磁場 12T の場合 14m<sup>3</sup>/h であることが分かる。また、最大発電出力は流量が 40m<sup>3</sup>/h の時、磁場 7T の場合 1.6 W、磁場 12T の場合 12 W であった。

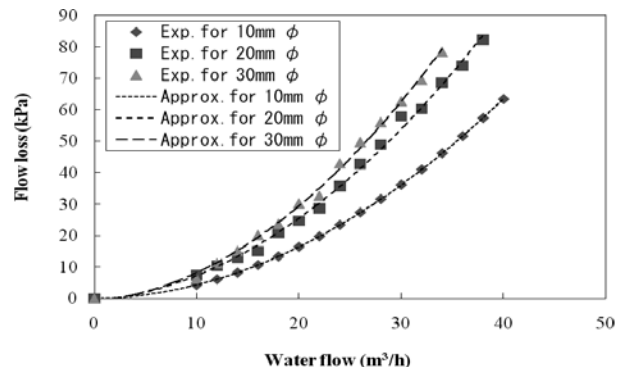


Fig.1 Flow dependence of flow loss for diameters of 10, 20 and 30 mm (a rotation number of 7 and a pitch length of 37.5 mm) with approximation curves.

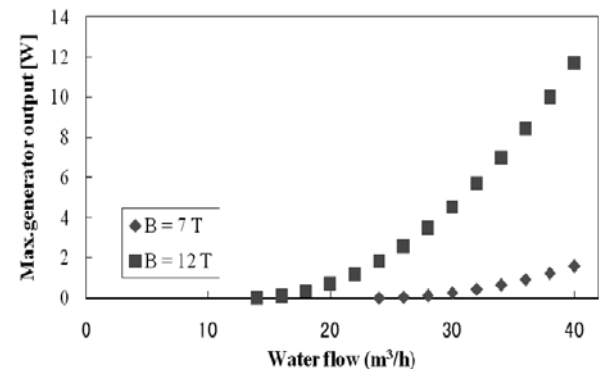


Fig.2 Maximum generator output with the helical wall optimized the form (a rotation number of 7, a pitch length of 37.5 mm and a diameter of 30 mm).

### 参考文献

- 1) M. Takeda *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2 (2005) pp. 2170-2173
- 2) M. Takeda *et al.*: J. JIME, Vol. 43, No. 1 (2008) pp. 130-134
- 3) K. A. Bui *et al.*: Abstracts of CSJ conference, Vol. 82 (2010) p.137
- 4) M. Takeda : Adv. Sci. and Tech., Vol. 75 (2010) pp. 208 - 214

### 謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(B)(21360429)の助成を受けたものである。

## ILC 用クライオモジュールの開発 (1) - S1-Global 総合試験

## Development of cryomodule for ILC superconducting cavities (1) - S1-Global cryomodule test

大内徳人、加古永治、小島裕二、近藤良也、佐藤昌史、宍戸寿郎、土屋清澄、寺島昭男、仲井浩孝、野口修一、早野仁司、東憲男、原和文、細山謙二、久松広美、山本康史、山本明、渡辺謙 (高エネルギー加速器研究機構)

OHUCHI Norihito, KAKO Eiji, KOJIMA Yuuji, KONDOU Yoshinari, SATOH Masasi, SHISHIDO Toshiro, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio, NAKAI Hirotaka, NOGUCHI Shuichi, HAYANO Hitoshi, HIGASHI Norio, HARA Kazufumi, HOSOYAMA Kenji, HISAMATSU Hiromi, YAMAMOTO Yasuchika, YAMAMOTO Akira, WATANABE Ken (KEK)

E-mail: ohuchi@post.kek.jp

## 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、国際線形衝突型加速器 (ILC) 用クライオモジュールの研究開発として米国 FNAL 研究所、ドイツ DESY 研究所から各々2台の超伝導空洞をイタリア INFN 研究所で製作したクライオスタットに組み込み、KEK が開発したクライオモジュールと接続し冷却試験を行うプロジェクト (S1-Global) を進めている [1, 2]。S1-Global クライオモジュールの組立は今年1月から4月にかけて行われ、又トンネルへの据付作業は5月に完了した。6月からは冷却試験が始まっている。本学会では、S1-Global クライオモジュールの試験計画・建設及び冷却試験について報告する。

## 2. S1-Global での試験課題

S1-Global クライオモジュールでは、8 台の超伝導空洞を ILC の運転加速電界 31.5MV/m で運転することを第1テーマとしている。又、以下に示すテーマも重要な研究課題である。

- 異なる設計の超伝導空洞を含んだクライオモジュールの設計、組立、アライメントの経験をえること。
- 定常状態と31.5MV/mの負荷運転での熱負荷測定。異なる設計の超伝導空洞とクライオモジュールの熱的な性能の比較。
- 設計の異なる周波数チューナーおよびインプットカップラーを装着した超伝導空洞パッケージの性能比較。
- ILCクライオモジュールの基本的な設計概念として受け入れられている“Plug-compatible-concept”の先導的な実施。

## 3. S1-G クライオモジュール

図1に示すように、S1-Global クライオモジュールは2台の6m長のクライオモジュールAとCから構成されている。S1-G クライオモジュール全長は14.9mである。FNALとDESYの4台の超伝導空洞はクライオモジュールCに、又KEKの4台の超伝導空洞はクライオモジュールAに組み込まれている。表1にクライオモジュールAとCの主要パラメータを示してある。2Kまで冷却する必要のあるコールドマスは、超伝導空洞8台が約800kg、冷却配管が850kgである。又、2Kへの定常熱負荷は計算値として約6Wである。

## 4. S1-G クライオモジュールの冷却試験

クライオモジュールの冷却試験期間は、夏期シャットダウンを挟んで6月から12月まで予定されている。超伝導空洞の冷却は既に2回行われており、図2には9月に行われた冷却曲線を示している。冷却は昼間のみ行い、夜間は温度保持状態とした。室温から200Kまでの冷却には90Kのヘリウムガスを用い、200K以下の冷却は液体ヘリウムにより行った。室温から4Kまでの冷却に9日間要したが、4Kから2Kまでの冷却は3時間で完了した。

Table 1: S1-Global Cryomodule Parameters

	Module-A	Module-C
Vacuum vessel, m	L=6.09, O.D.=0.965	L=5.8, O.D.=0.965
Gas return pipe, m	L=5.83, O.D.=0.32	L=6.0, O.D.=0.31
80 K shield, m	L=6.0 (210 kg)	L=5.9 (182 kg)
5 K shield, m	L=6.1 (185 kg)	L=6.0 (167 kg)
Cavity package	KEK-a/KEK-b	FNAL/DESY
Cold mass, kg	100×2 / 100×2	100×2 / 100×2

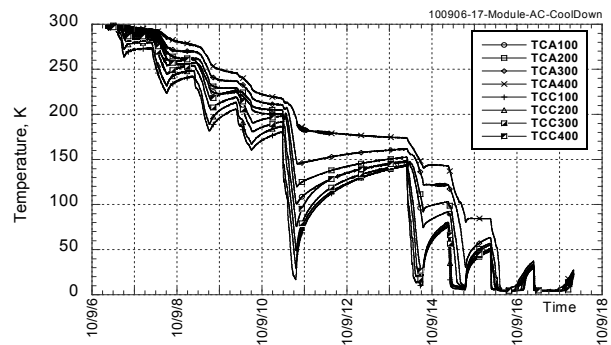


Fig. 2 Cool-down of 8 cavities in S1-Global cryomodule

## 参考文献

- [1] N. Ohuchi, et al.: Abstract of CSJ Conf. 82 (2010), P. 67.  
 [2] N. Ohuchi, et al.: Proceedings of LINAC10 Conf. Tukuba, Japan (2010), MO302.

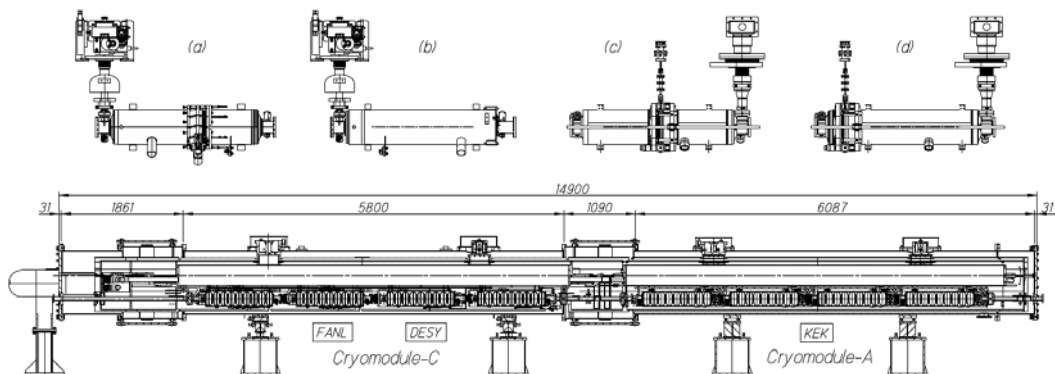


Fig. 1 S1-Global cryomodule. (a) FNAL cavity: 2 sets, (b) DESY cavity: 2 sets, (c) KEK cavity-a: 2 sets, (d) KEK cavity-b: 2 sets

# ILCクライオモジュールの開発(2)-S1-Global クライオモジュール計測システム

## Development of Cryomodule for ILC Superconducting cavities(2)

### - S1-Global Cryomodule measurement system -

近藤 良也、大内 徳人、土屋 清澄、仲井 浩孝、早野 仁司、小島 裕二、寺島 昭男、東 憲男、山本 明(KEK)  
野口 隆志(池上技術)

KONDOU Yoshinari, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, NAKAI Hiroataka, HAYANO Hitoshi, KOJIMA Yuuji,  
TREASHIMA Akio, HIGASHI Norio, YAMAMOTO Akira (KEK)  
NOGUCHI Takashi (Ikegami technology)  
E-mail yoshinari.kondou@kek.jp

#### 1. はじめに

KEK では ILC 計画における S1-Global 計画[1]に基づき、クライオモジュールが建設され、現在空洞の性能試験を含め様々な要素技術の開発が行われている。

空洞は、2K の超流動ヘリウムによって冷却される。空洞が性能を発揮するには、空洞の十分な冷却とその保持を必要とし、そのためにはクライオモジュール内の温度を正確に把握しなければならない。ここでは各種センサーの取付け位置やモニターの実態等を含めた、クライオモジュールの計測系について報告する。

#### 2. クライオモジュール内センサーについて

S1-Global 用クライオモジュールはモジュール A とモジュール C の二つを結合して構成されている。[2]

クライオモジュールには 2K 近傍の温度を示す超電導空洞容器やそれに付属する各種カップラー、空洞へ超流動ヘリウムを供給する供給配管、空洞容器からの蒸発ガスを戻す蒸発ガス戻り配管 (Gas Return Pipe, GRP) が内部に存在し、その周りが 5K, 80K の熱輻射シールドで囲まれ、最外殻には真空容器が存在し、蒸発ガス戻り配管を吊り下げているサポートポスト (Support Post, SP) において、真空容器と接する部分は常温である。さらに本計測システムは冷却システムの運転状態も併せてモニターしている。

また温度以外に、冷却時における蒸発ガス戻り配管の機械的変位を測定するレーザー距離計と、熱収縮によるサポートポストの移動を測定するポテンショメーターが取付けられている。

この様に本計測システムの測定対象には 2K から 300K までの温度領域が存在し、さらに機械的変位も測定しており、目的に合わせた様々なセンサーを使用している。

#### 3. センサー取付け及び計測線処理等

クライオモジュール内には、温度計等各種センサーが多数実装されているため、導線からの熱侵入を極力抑える様に配慮しなければならない。また真空中の 2K レベルでの温度測定では、サーマルアンカーや配線の取り廻しを含めたセンサーの実装状態が測定精度に大きな影響を及ぼす。このため温度センサーの取付けにあたっては、脱脂・洗浄を充分に行い、接触熱抵抗を減少させるためアピエゾングリスを塗布し、センサーを貼り付けて固定するために用いるアルミテープは、充分な貼り付け面積を確保する等に留意し施工を行った。

#### 4. クライオモジュール計測システムの概略

本計測システム全体の計測点数はクライオモジュールと冷却システムを合わせて 363 点であり、その内訳を Table 1 に、また本計測システムの系統図を Fig.1 に示す。メインコンピューター以外の計測システム、データロガーやセンサー駆動電源等は、地下のトンネル内クライオモジュールの近傍に設置されている。クライオモジュールからの温度等のデータはまずデータロガーに取り込まれ、メインコンピューターによってリアルタ

イムに処理される。処理されたデータは『測定値』として端末を通じ、各所でモニター出来る。

この他に蒸発ヘリウムガス戻り配管及び、空洞の熱収縮による変位を測定するための Wire Position Monitor(WPM)の信号があるが、本計測システムとは別個にモニターシステムが構成されている。

Table 1: Sensors List

	Cryomodule	Cooling system
Cernox	55	17
Carbon	32	-
Pt-Co	53	1
Pt100Ω	-	3
Thermo couple	75	9
Strain gauge	48	-
Pressure	-	7
Flow	-	2
LHe level, Etc.	9	4
Pin diode	48	-
Total	363 (Without WPM)	

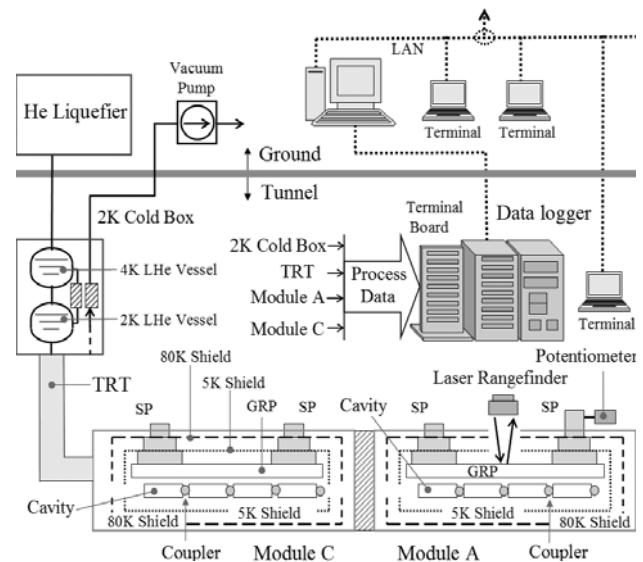


Fig.1: System diagram

#### 5. 参考文献

- [1] N.Ohuchi, et al.: Abstract of CSJ conf, 82(2010)p.67
- [2] N.Ohuchi, et al.: Proceedings of LINAC10 Conf. Tsukuba, Japan(2010), MO302.

# ILC用クライオモジュールの開発(3) – S1-Globalクライオモジュール熱負荷測定 –

## Development of cryomodule for ILC superconducting cavities (3)

### – Heat loss measurements of S1-Global cryomodule –

大内徳人、加古永治、小島裕二、近藤良也、土屋清澄、寺島昭男、仲井浩孝、早野仁司、  
東憲男、原和文、細山謙二、久松広美、山本明 (高エネルギー加速器研究機構)

OHUCHI Norihito, KAKO Eiji, KOJIMA Yuuji, KONDOU Yoshinari, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio, NAKAI Hirotaka,  
HAYANO Hitoshi, HIGASHI Norio, HARA Kazufumi, HOSOYAMA Kenji, HISAMATSU Hiromi, YAMAMOTO Akira (KEK)

E-mail: ohuchi@post.kek.jp

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、国際線形衝突型加速器(ILC)用クライオモジュールの研究開発としてS1-Globalクライオモジュールによる国際研究協力プロジェクトを進めている[1,2]。S1-Globalクライオモジュールは今年5月に完成し、6月からは冷却試験が始まっている。本学会では、S1-Globalクライオモジュールの2Kでの定常熱負荷測定について報告する。

#### 2. S1-Globalクライオモジュールの熱設計及び熱負荷

S1-Globalクライオモジュール[3]は、イタリアINFN研究所で製作したクライオモジュールとKEKクライオモジュールから構成され、米国FNAL・ドイツDESY・KEKの8台の超伝導空洞が組込まれている。2台のクライオモジュールは、DESY-TTF-IIIを基本として設計され、超伝導空洞は2Kの飽和蒸気圧液体ヘリウムで冷却される。図1にクライオモジュールの断面図を示してある。超伝導空洞が組込まれている液体ヘリウム容器は、蒸発ヘリウムガスを冷却システムに戻す内径300mmのSUSパイプ(Gas Return Pipe, GRP)から支持されている。このGRPは真空容器からG-10パイプにより吊り下げられている。超伝導空洞容器とGRPは、5Kと80Kの2組の熱輻射シールド板により熱遮蔽されている。超伝導空洞へRFパワーを供給する入力カップラーは、一端を真空容器に固定され、他端は超伝導空洞ビームパイプに接続されているため、熱輻射シールド板から5Kと80Kの温度アンカーが取られている。

表1に2K空洞容器への定常熱負荷(計算値)を示してある。各々の熱負荷は、KEKが4.8W、FNAL/DESYが1.3であるが、KEK側の熱負荷が多いのは主にケーブルからの熱負荷の違いによる。S1-Gクライオモジュール8台の超伝導空洞への熱負荷は全体として6.1Wである。

#### 3. S1-Gクライオモジュール定常熱負荷測定

クライオモジュールの熱負荷は、液体ヘリウムの蒸発量を減圧ポンプ出口の室温・大気圧状態で測定し、蒸発潜熱から計算した。又、熱負荷測定は、システム全体の2K液体ヘリウム領域を含んだ測定と8台の空洞のみに液体ヘリウムを溜めた測定の2種類が行われた。空洞のみに液体ヘリウムを溜めた測定値が表1に示した熱負荷に対応する。図2に熱負荷測定時の蒸発ガス量を示してある。図2に示すようにシステム全体の測定は2回行われ、測定された蒸発量は11.0m<sup>3</sup>/hと11.2m<sup>3</sup>/hであった。この時の熱負荷は、各々11.6Wと11.8Wに相当する。8台の空洞に液を溜めた蒸発量は7.1m<sup>3</sup>/hで7.5Wの侵入熱となる。計算値との差は1.4Wあることになる。又、2種類の測定に於ける約4Wの熱負荷の差は2K冷凍機と低温配管部にあることが分かっている。図3には測定時のヘリウム圧力と液温を示しており、圧力は3.05~3.09kPa、温度は1.95~1.96Kに制御されていた。

#### 4. 温度分布からの熱解析

熱負荷は液体ヘリウムの蒸発ガス量から計算される為、2台のクライオモジュールの熱負荷を分離することが出来ない。こ

の為、各要素の熱負荷を計算するために、多数の温度計が取り付けられている[4]。温度分布から得られた結果との比較も今後行っていく予定である。

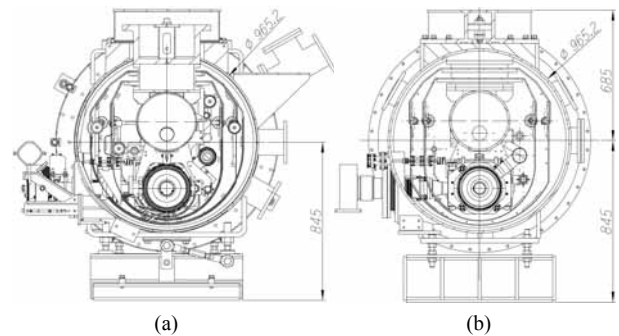


Fig. 1 Cross sections of INFN (a) and KEK (b) Cryomodules

Table 1: Calculated Static Heat Load to 4 Cavities (W)

	Module-A KEK	Module-C FNAL/DESY
Four input couplers	0.17	0.25
HOM RF cables	1.24	0.02
Thermal radiation	~0.0	~0.0
Four tuner driving shafts	0.48	-
Piezo cables	0.84	0.03
Wires of sensors	1.9	1.0
WPM connection pipe	0.17	~0.0
Total	4.8	1.3

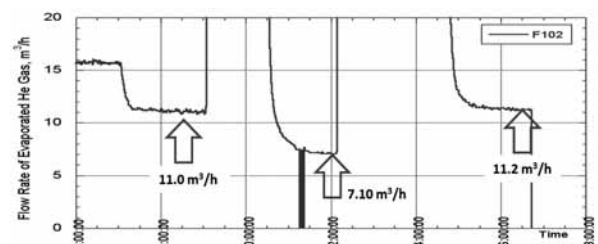


Fig. 2 Evaporated flow rate of He gas while heat load measurement

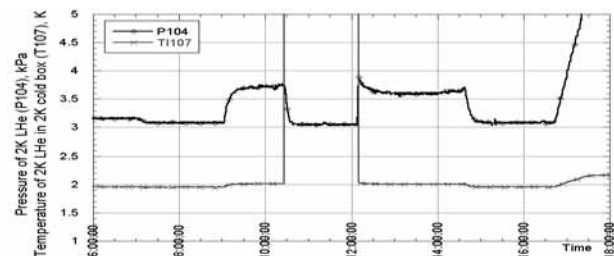


Fig. 3 Pressure (P104) and temperature (T1107) of helium

#### 参考文献

- [1] N. Ohuchi, et al.: Abstract of CSJ Conf. 82 (2010), P. 67.
- [2] N. Ohuchi, et al.: Proceedings of LINAC10 Conf. Tukuba, Japan (2010), MO302.
- [3] N. Ohuchi, et al.: Abstract of CSJ Conf. 83 (2010), 1B-p01.
- [4] Y. Kondou, et al.: Abstract of CSJ Conf. 83 (2010), 1B-p02.

## クライオモジュールの開発 (4) —ガス回収配管の変位計測—

### Development of cryomodule for IL superconducting cavities (4) — Deflection measurement of the gas return pipe —

土屋清澄、大内徳人、近藤良也、寺島昭男、早野仁司、小島裕二、  
仲井浩孝、原和文、久松広美、細山謙二、山本明

TSUCHIYA Kiyosumi, OHUCHI Norihito, KONDOU Yoshinari, TERASHIMA Akio, HAYANO Hitoshi, KOJIMA Yuuji,  
NAKAI Hirotaka, HARA Kazufumi, HISAMATSU Hiromi, HOSOYAMA Kenji, YAMAMOTO Akira  
E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

#### 1. はじめに

高エネルギー物理学の分野では、次期大型加速器として、超伝導空洞を用いた線形衝突型加速器 International Linear Collider(ILC) の設計検討が始まっている。高エネルギー加速器研究機構(KEK)においても、この ILC 用の機器開発を推進するため、超伝導加速空洞試験設備(STF)を建設し、STF クライオモジュールや欧米から持ち込んだクライオモジュールの各種性能試験(S1G 実験)を行っている。この各種試験項目の一つとして、空洞のアラインメント精度の問題が上げられる。最近の ILC ビーム光学の検討によれば、超伝導空洞は  $0.1 \sim 0.3$  mm 程度の精度でビームライン上に並んでいることが要求されている。我々は、この要求精度が現在のクライオモジュールで満たされるものかどうかを調べるために、クライオスタートの基本構造体であるヘリウムガス戻り配管(GRP)の冷却時変位測定を行ったのでその結果について報告する。

#### 2. クライオモジュールの構造と変位センサー

クライオモジュールの主要パラメータ及び断面図を表1と図1に示す。

STF クライオモジュールの主要部品は、内径 300mm のガス戻り配管(GRP)とそれからサポートされる超伝導空洞4台で、これら機器は 2K に冷却される。超伝導空洞には、室温の真空容器から RF エネルギーを送るための入力カップラーが付けられている。GRP および空洞は熱輻射を抑えるための 5K 及び 80K シールド板により囲われている。

Table 1 Main parameters of STF Cryomodule (incl. 4 cavities)

Vacuum vessel length (SS400)	5515 mm
Vac. vessel outer diameter	965.2 mm
Gas return pipe length (SUS316L)	5832 mm
Cold mass	
4 cavities	410 kg
Gas return pipe	515 kg
5 K shield (A1050)	185 kg
80 K shield (A1050)	210 kg
Helium supply pipe (SUS316L)	50 kg

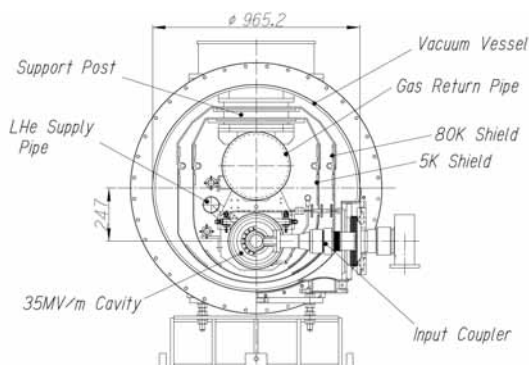


Fig. 1 Cross section of STF Cryomodule

GRP の変位測定には、非接触で真空容器上面と GRP 上面の距離が測れるレーザー距離計を4台用いた。その取り付け位置を図2中に LDS1-LDS4 で示す。

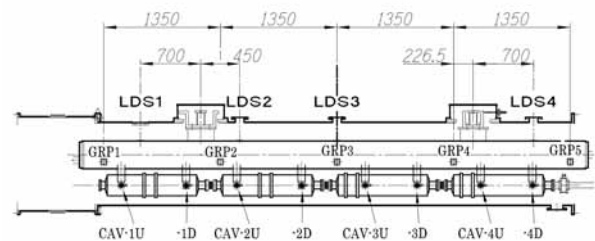


Fig. 2 Schematic showing the position of LDS.

#### 3. 測定結果

クライオモジュールの冷却から加温までの約2ヶ月間に亘る GRP 変位の様子を図3に示す。冷却初期に非常に大きな変位が、また加温時にも変位が見られる。このデータより GRP の先端、後端は下に、中央部は上に曲がること、また、同時計測した GRP の温度計測の解析からは、この曲がりには GRP の上下の温度差によるものであることが分かった。

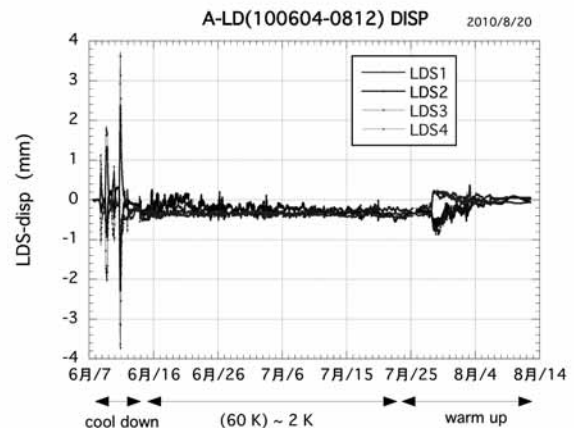


Fig. 3 GRP displacement during the cool down experiment

#### 4. まとめ

クライオモジュール内の GRP が冷却時にどのように変位するかをレーザー距離計により調べた。その結果、現在の冷却方法では冷却初期に GRP は最大 4 mm 程度変位することが、又、低温(2K)状態では、支持ポストの熱収縮により GRP は 0.3mm 程度上がることが確認された。然し乍ら、低温状態においても GRP の位置は一定せず、 $\pm 0.1$  mm 程度の変動がある可能性が出てきた。今後、長時間安定性も含めたより高精度変位センサーや測定法の開発が望まれる。



# J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム(22)

## － 磁石システムの運転状況 －

### Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiments (22)

#### - Operation status of the magnet system -

中本建志, 槇田康博, 佐々木憲一, 荒岡修, 飯田真久, 大畠洋克, 岡村崇弘, 荻津透, 木村誠宏, 鈴木祥仁 (KEK)  
 T. Nakamoto, Y. Makida, K. Sasaki, O. Araoka, M. Iida, H. Ohhata, T. Okamura, T. Ogitsu, N. Kimura, S. Suzuki (KEK)  
 E-mail: tatsushi.nakamoto@kek.jp

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC で発生させたニュートリノを約 300km 離れたスーパーカミオカンデ検出器に打ち込む、長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) が開始された。陽子ビームを約 90 度曲げてニュートリノターゲットに導く約 150m のビームラインには、超伝導磁石システムが導入されている。主磁石として、2.6 T の 2 極磁場と 19 T/m の 4 極磁場を同時に発生する複合磁場型超伝導磁石が合計 28 台設置、運転されている。磁石システムは、主磁石の他にビーム軌道補正用超伝導磁石 3 台、クライオスタット、超臨界ヘリウム冷凍機、ヘリウム輸送配管等から構成されている。

磁石システムは予定通り 2009 年 3 月までに完成し、その後のビームコミッションを経て、2010 年 1 月から物理実験運転が開始された。現時点で主磁石は順調に運転されているが、その一方で、補正用超伝導磁石が設計値以下でクエンチする問題があり、現在原因究明と今後の対策を検討している。

本件では、ニュートリノビームライン超伝導磁石システム全体について、トラブルシューティングも含めた運転状況を報告する。

#### 2. 磁石システムの運転状況

Table 1 に 2010 年夏までの磁石システムの運転状況の概要を示す。ヘリウム冷凍機に関してはこれまで通算 300 日以上の運転を行っている。発生した主なトラブルは、第 1 及び第 2 タービンの起動不良と第 2 タービンのブレード欠損で、後者は冷凍性能の劣化を招かなかつたために開放検査するまで発覚しなかった。起動不良は、起動時のみ通気する軸受ガス圧力の調整をして終息した。ブレード欠損は

材質欠陥が原因と判ったので、予備品も含めて再製作して交換した。

磁石側では、磁石保護システム (MSS) のボード不良が発生した。ドライラン中ではあったが、偽クエンチ信号を発信してしまったため、主磁石を保護ヒーターにより強制クエンチさせてしまった。しかし、ボード交換以降は、同様の事象は発生していない。

以上のように磁石システムのトラブルは、後述する補正磁石の問題を除き、総じて速やかに解決した。T2K 実験における超伝導磁石システムの故障率は 0.3% だった。

#### 3. 補正磁石のクエンチ

前回 [1] 報告した様に、2009 年始めの試運転で補正磁石が系統的にクエンチすることが判った。このため 2009 年夏期保守整備中に伝導冷却経路の改善を図った。その後、励磁試験を行ったが結果は芳しくなく、依然として 13 A 程度で全ての補正磁石が系統的にクエンチしてしまった。電圧タップ信号から超伝導リード接続付近が熱暴走の発生領域であることが判ったが、正確な原因までは理解できていない。原因究明のため、2010 年夏期保守整備中に、補正磁石 1 カ所に集中的に電圧タップ並びに温度計を追加改造した。再冷却後の 11 月初旬に励磁試験を予定している。

#### 4. まとめ及び今後の予定

現在、2010 年 11 月から再開される T2K 実験に備えて、磁石システムを冷却中である。何回かの短期停電を挟みつつ、2011 年 6 月まで継続的に運転を行う予定である。

#### 参考文献

[1] 佐々木憲一他：2009 年度秋季低温工学・超伝導学会講演概要集 1C-a02

Table 1 Summary of operation of the superconducting magnet system for J-PARC neutrino beam line

期間	運転モード	運転時間		トラブル及び対応		実験への影響 (時間)
		冷凍機 (日)	磁石* (時間)	冷凍機	磁石*	
2008 年 12 月	冷凍機 試運転	12	-	-	-	-
2009 年 1-3 月	システム 総合試運転	61	NA	-	全ての補正磁石クエンチ	-
2009 年 4-6 月	ビーム調整試運転	63	172	T1 タービンの交換	MSS 接続ボード不良 2 MSS ロジックボード不良 3	No
2009 年 7-9 月	保守整備	-	-	-	補正磁石冷却改善	-
2009 年 10-12 月	補正磁石試験、 ビーム調整試運転	85	169	-	全ての補正磁石クエンチ (リード接続部)	No
2010 年 1-6 月	T2K 物理実験	159	1716	T2 タービン交換 温度計接点不良 2 回	電源動作不良 (DCCT スイッチ 入れ忘れ)	5
2010 年 7-9 月	保守整備	-	-	-	補正磁石計装強化	-

\* ここでは、以下をまとめたものを表す：主磁石、ビーム軌道補正磁石、電源、クエンチ検出器を含む磁石保護システム (MSS)、クエンチ保護ヒーター用電源。

# J-PARCニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム(23) —超臨界圧ヘリウム輸送システムの建設—

## Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiments (23) —Design and Construction of Supercritical Helium Transfer System —

木村 誠宏, 岡村 崇弘, 寺島 昭男, 荻津 透, 佐々木 憲一, 大島 洋克, 榎田 康博, 中本 建志 (高エネ研)  
 KIMURA Nobuhiro, OKAMURA Takahiro, TERASHIMA Akio, OGITSU Toru, SASAKI Ken-ich,  
 OHHATA Hirokatsu, MAKIDA Yasuhiro, NAKAMOTO Tatsushi (KEK)  
 E-mail: nobuhiro.kimura@kek.jp

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、大強度陽子加速器 J-PARC の陽子ビームを利用したニュートリノ振動実験のため、陽子ビームをスーパーカミオカンデ方向に向ける超伝導ビームラインを建設した<sup>1,2)</sup>。2009年4月に行われた超伝導磁石システムの総合試験後、ビームラインに陽子ビームを入射して運転を行っている。このビームラインには、地下12mのトンネル内に複合磁場型超伝導磁石28台から構成された磁石列が設置されている。今回、この磁石列に冷媒である超臨界圧ヘリウム(SHe)を地上部の冷凍機室から供給するため、超臨界圧ヘリウム輸送システムを建設した。

本報はこの輸送システムの設計・製作並びに性能試験結果を報告する。

### 2. 超臨界圧ヘリウム輸送システムの設計・製作

超臨界圧ヘリウム輸送システム(TRT)はニュートリノビームライントンネル並びにトンネルと地上部の冷凍機室を連絡するサブトンネル内に設置され、TRT で供給される SHe の輸送距離は、地上部とトンネルとの高低差 12m 及びトンネルのクランク 13 箇所への構造的な対応を含めて供給配管及び戻り配管各 90m の計 180m として計画された。設計段階で TRT に求められた基本性能は、TRT の入口温度  $T=4.4$  K、TRT と磁石列の供給接続点での寒冷温度が  $T=4.5$  K 以下、磁石列を含めた TRT 全圧力損失が流量  $m=300$  g/s において 100 kPa 以下であった。加えて SHe 供給配管内は超伝導磁石列に励磁電流を供給する超伝導ブスバー並びに電圧タップ等の信号線群を挿入することが求められた。Fig.1 に TRT の基本縦断面図に示す。TRT は、SHe 供給及び戻り配管、放射シールド冷却用冷媒(ヘリウムガス)の供給及び戻り配管の計 4 本の配管を内包する 4 重真空断熱配管として設計を行った。各配管の支持は、伝熱経路を考慮した W スパイダー支持構造とし、支持点の位相を変えることにより伝熱経路長を確保している。80K ガス戻り配管に熱接触機構を介して組み付けられた放射シールド板が 4 本の配管を覆う構造とした。

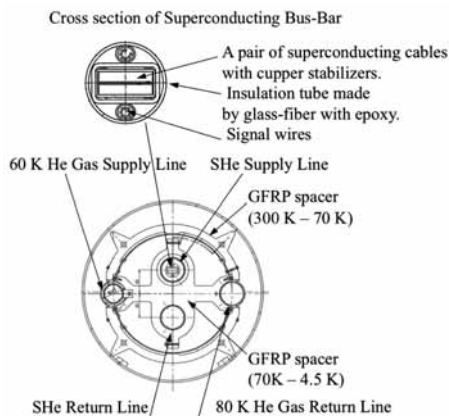


Fig.1 Cross sectional view of Supercritical Helium

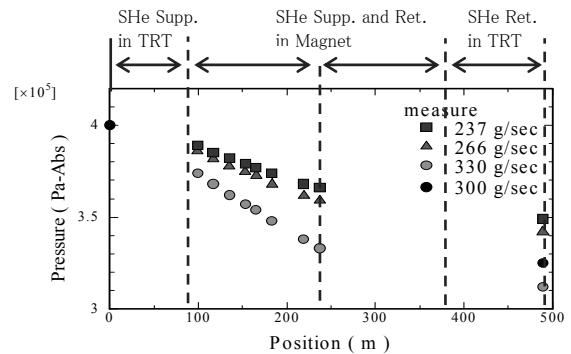


Fig.2 Results of the pressure drop measurement across the Transfer System varying with SHe mass flow rate.

SHe 供給配管には Fig.1 に示す超伝導線と計測信号線を組み合わせた超伝導ブスバーが挿入されている。TRT 冷却時の 30cm の熱収縮は、配管上に分散配置された 10 箇所のフレキ管により吸収する構造とした。

TRT は、10 台の真空断熱配管部と磁石列との接続用クライオスタット (Feed Box) と冷凍機との接続用クライオスタット (Current Lead Box) の各 1 台の計 12 台に分割して製作された後、トンネル内に搬入され、配管と超伝導ブスバーの接続を行った。

### 3. 性能評価

超伝導磁石列の冷却完了後、磁石列や TRT の配管表面に設置した温度計を使用して熱侵入量の測定を行った。測定された TRT の熱負荷は  $Q_{TRT}=63$  W であった。

Fig.2 に定常冷却運転時の TRT と磁石列の全圧力損失測定 (流量=237 g/sec, 266 g/sec, 330 g/sec) の結果を示す。図の縦軸は圧力損失、横軸は TRT と磁石列の SHe 輸送距離である。図から圧力損失の大部分が TRT と磁石列の SHe 供給配管で占められていることが理解できる。これは供給配管内部に前述の超伝導ブスバーが挿入されていることに起因している。定常冷却流量 300 g/s における TRT と磁石列の全圧力損失は 80 kPa であった。また、超伝導磁石列内の圧力勾配はほぼ一様で冷却流路に異常が無いことも確認された。

### 4. まとめ

本超臨界圧ヘリウム輸送システムを経由して冷凍機から供給される寒冷により 28 台の超伝導磁石列が冷却され、定常状態では磁石列が 4.8 K 以下に保持できることが確認された。測定された熱負荷及び圧力損失から、磁石列を含めた要求性能を満足した。

### 参考文献

1. Y. Makida, et al.: CSJ. Vol. 45 (2010) p. 155
2. K. Sasaki, et al.: CSJ. Vol. 45 (2010) p. 166

J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム (24)  
 – マグネットクエンチ時の超臨ヘリウムの圧力上昇試験と計算 –

Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiments (24)  
 – Pressure rise analysis of supercritical helium during quench –

岡村崇弘, 佐々木憲一, 木村誠宏, 荻津透, 楨田康博, 中本建志, 大畠洋克, 飯田真久, 荒岡修, 鈴木祥仁, (KEK)  
 OKAMURA Takahiro, SASAKI Ken-ichi, KIMURA, Nobuhiro, OGITSU Toru, MAKIDA Yasuhiro,  
 NAKAMOTO Tatsushi, OHHATA Hirokatsu, IIDA Masahisa, ARAOKA Osamu, SUZUKI Shoji, (KEK)  
 E-mail: takahiro.okamura@kek.jp

1. 緒言

KEKでは、大強度陽子加速器 J-PARCの陽子ビームを利用した次期ニュートリノ振動実験計画において、岐阜県神岡にあるスーパーカミオカンデへ向けて陽子ビームを約 90 度曲げるための超伝導電磁石ビームラインの建設を行い、超伝導磁石システムに問題が無いことをコミショニングで確認後、2009 年度から実際の運転を行ってきている。このビームラインでは 2 極磁場と 4 極磁場を同時に発生するコンバインドファンクション型超伝導電磁石が 28 台直列に接続されており、それを入口温度  $T_{in} \sim 4.5\text{K}$ , 入口圧力  $p_{in} \sim 400\text{ kPa-abs}$ , 質量流量  $\dot{m} \sim 300\text{ g/sec}$  の超臨界ヘリウム (SHe) で強制対流冷却される。本報ではコミショニングで超伝導磁石システムのクエンチ時の安全性を確認する目的で行った、28 台の超伝導磁石全てがクエンチしたときの SHe の圧力上昇に関する試験結果並びに計算結果について報告する。

2. クエンチ回収系並びにクエンチ試験内容

Fig.1 に超伝導磁石システムの概略を示す。クエンチ回収系は、50 GeV 運転に相当する 7345 A 通電時において全磁石が一斉クエンチした際の最大圧力がクライオスタット設計圧力 (2.0 MPa) 以下に収まるよう設計されている。SHe 冷却系のインベントリは約 3500 L であり、マグネット 1 台あたりの蓄積エネルギーは 30 GeV, 40 GeV, 50 GeV 運転時でそれぞれ 59 kJ, 155 kJ, 304 kJ である。4 台のクエンチリリーフ弁 (QRV1~4) が超伝導システムのアーク部に設置されており、膨張した He は緊急放出配管 (125A@地下, 200A@地上) を通り地上部に設置されている 3 台の中圧タンク (100 m<sup>3</sup> × 3) に回収される。緊急放出配管は QRV1, 2 用と QRV3, 4 用との 2 系統から構成されており、中圧タンクまでの距離は最長部で約 200 m となっており途中凡そ 10 m 間隔で熱収縮吸収用のベローが設置されている。

コミショニングではクエンチ回収システムの安全性を検証するために、当面の運転モードでもあるビーム強度 30 GeV に相当する 4400 A 通電時に 28 台の全磁石を一斉クエンチさせた際の He 圧力の時間発展を測定した。

3. 解析体系並びに手法

28 台の超伝導磁石システムに 4 台の QRV が設置されているので、モデルでは計算負荷低減のため 7 台の超伝導磁

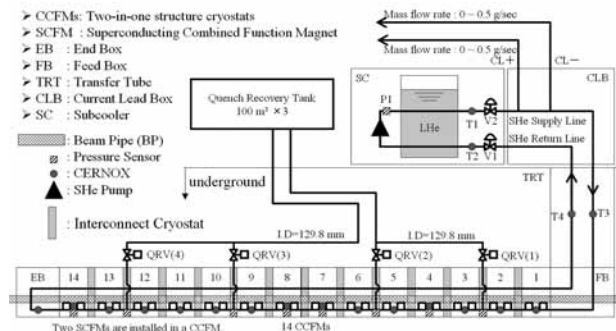


Fig. 1 Conceptual quench recovery system.

石、1 台の QRV 並びに長さ 200 m の緊急放出配管を考慮した。計算体系は 4.5 K から 300 K における密度が約 800 倍違う領域から構成され、尚且つバルブ近傍での臨界流を考慮した高速流領域からマグネット内部の比較的低速領域に至るまでを同時に計算する必要がある。そのためここでは流体力学的厳密性にかけるが、非圧縮から圧縮性流体までを統一して取り扱える PBA (Pressure Based Algorithm) を用いて計算を行った。基礎方程式は圧縮性を考慮した連続式、運動量式、エネルギー式及び熱的状态方程式  $p = p(\rho, e)$  を用いた。PBA による圧力計算は半陰的に記述された 4 つの基礎式を連立して得られる以下の Poisson 式を SOR (Successive Over Relaxation) 法で計算した。

$$a \nabla^2 \delta p^{(n+1)} + b \nabla \cdot (e^{(n)} \nabla \delta p^{(n+1)}) + c \delta p^{(n+1)} = d \quad (1)$$

$$a = \left\{ \rho^{(n)} \left( \frac{\partial e}{\partial \rho} \right)_p^{(n)} + e^{(n)} \right\} \Delta t^2, \quad b = -\Delta t^2$$

$$c = \left\{ \rho^{(n)} \left( \frac{\partial e}{\partial p} \right)_\rho^{(n)} + \nabla \cdot \mathbf{u}^{(n)} \Delta t \right\}$$

$$d = \left\{ \rho^{(n)} \left( \frac{\partial e}{\partial \rho} \right)_p^{(n)} + e^{(n)} \right\} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u})^* \Delta t - \nabla \cdot (\rho^* \mathbf{u}^* e^{(n)}) \Delta t - \rho^{(n)} \nabla \cdot \mathbf{u}^{(n)} \Delta t - \nabla \cdot \mathbf{q}^{(n)} \Delta t - \tau^{(n)} : \nabla \mathbf{u}^{(n)} \Delta t$$

\* は (n) ステップと (n+1) ステップの中間段における物理量を意味し、また物性値、状態方程式及び上式の状態変数の偏微分項の計算には HEPAK (ver3-1) を用いている。マグネットと SHe の熱伝達等のモデリングは当日の講演で述べる予定である。

4. 結果と考察

コミショニングで得られた 4400 A で 28 台の全電磁石がクエンチした際の圧力の時間発展の様子を示す。また比較のために同条件下で行ったシミュレーション結果の圧力上昇の時間発展を示す。図示するように 8 番目の電磁石近傍が一番圧力が高くなっており、バルブ近傍が最も圧力が低い。圧力の最大値はマグネットがクエンチしてから凡そ 2.3 sec 後に約 0.6 MPa-abs となっている。対応する計算結果も試験結果と比較的よい一致を示している。シミュレーションでは 40 GeV 時, 50 GeV 運転においても最大圧力は 0.7 MPa, 0.9 MPa となりクエンチ回収システムは安全であることが確認された。

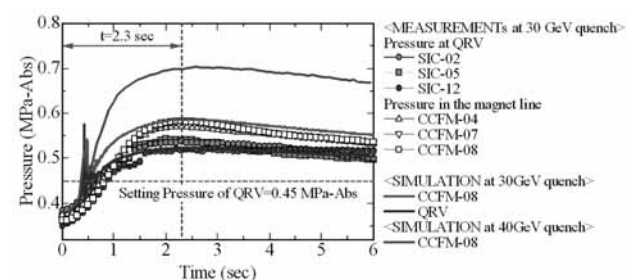


Fig. 2 Local Nusselt number vs local Rayleigh number.

## 日本における ITER 超電導コイルの製作状況 Status of Manufacturing of ITER Superconducting Coil in Japan

小泉 徳潔, 高橋 良和, 布谷 義彦, 濱田 一弥, 磯野 高明, 名原 啓博,  
吉川 正敏, 松井 邦浩, 辺見 努, 千田 豊, 井口 将秀, 中嶋 秀夫 (原子力機構)

KOIZUMI Norikiyo, TAKAHASHI Yoshikazu, NUNOYA Yoshihiko, HAMADA Kazuya, ISONO Takaaki, NABARA Yoshihiro,  
YOSHIKAWA Masatoshi, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, CHIDA Yutaka, IGUCHI Masahide, NAKAJIMA Hideo (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、25%のトロイダル磁場 (TF)コイル用超電導導体(導体 33 本、Nb<sub>3</sub>Sn 線約 110 トン) [1]、TF コイル 9 個(予備を含め全体で 19 個)[2]、TF コイル 19 個分の構造物[3]、及び中心ソレノイド (CS)コイル用超電導導体の 100%(導体 42 本、Nb<sub>3</sub>Sn 線約 120 トン)の調達を担当する。これらの製作状況について報告する。

### 2. TF 導体の製作

2010 年 10 月までに 56 トンの Nb<sub>3</sub>Sn 線の製作を完了し、8 本の TF 導体の製作が完了した。今後、約 1 カ月の間隔で導体を製作する計画であり、2012 年に全ての導体の製作を完了する予定である。

### 3. TF コイル及び構造物の製作

TF コイルの製作は、Fig.1 に示すように、以下の手順で実施する。1) TF 導体を巻線し、熱処理する；2) 並行してラジアル・プレート(RP)及びカバー・プレート(CP)を製作する；3) 熱処理後の導体に絶縁を施しながら導体を RP の U 字形の溝に納め、開口部に CP を被せて RP に溶接し、ダブル・パンケーキ (DP)を製作する；4) DP の外周に絶縁を施し、導体絶縁と一括で真空含浸する；5) 7 個の DP を積層し、その外周に対地絶縁を施して巻線部を構成する；6) 並行して構造物を製作する；7) 巻線部を構造物に挿入し、構造物を封止溶接し、巻線部と構造物の隙間を含浸する。

TF コイル及び構造物の調達は、3 段階に分けて、段階的に行われる[2,3]。2009 年 3 月より、メーカーと協力して、第一段階として、中、実規模試作を開始した[4-8]。

### 4. CS 導体の開発

CSコイルは、Fig.2に示すように、6個のヘキサ・パンケーキと1個のクアドロ・パンケーキで構成されるCSモジュールを6個重ね合わせた超電導コイルである。

原子力機構は、2009年12月15日にCSコイル用超電導導体 [9]の調達取決めに調印し、その調達準備を開始した。始めに、CS導体の性能検証試験を実施し、併せて、導体製作技術の検証試験も行い[9]、2011年よりCS導体の調達を開始する計画である。

### 5. まとめ

原子力機構は、国内メーカー(日立電線、JASTEC、古河電工、新日鉄エンジニアリング、東芝、KHI、IHI、他)の協力のもと、TF導体の製作、TFコイル及び構造物の実規模試作を着実に進展させ、かつ、CS導体の調達準備にも着手した。

### 参考文献

1. Y. Takahashi, et al., *IEEE ASC*, vol.18, p.471, 2008.
2. 小泉徳潔, 他, 2009年度春季低温工学講演集, p.121.
3. 中嶋秀夫, 他, 2009年度春季低温工学講演集, p.123.
4. 松井邦浩, 他, 2010年度春秋低温工学講演, 1B-p09.
5. 高野克敏, 他, 2010年度秋季低温工学講演, 1B-p10.
6. 辺見努, 他, 2010年度秋季低温工学講演, 1B-p11.
7. 千田豊, 他, 2010年度秋季低温工学講演, 1B-p12.
8. 井口将秀, 他, 2010年度秋季低温工学講演, 1B-p13.
9. 濱田一弥, 他, 2010年度秋季低温工学講演, 1B-p14.

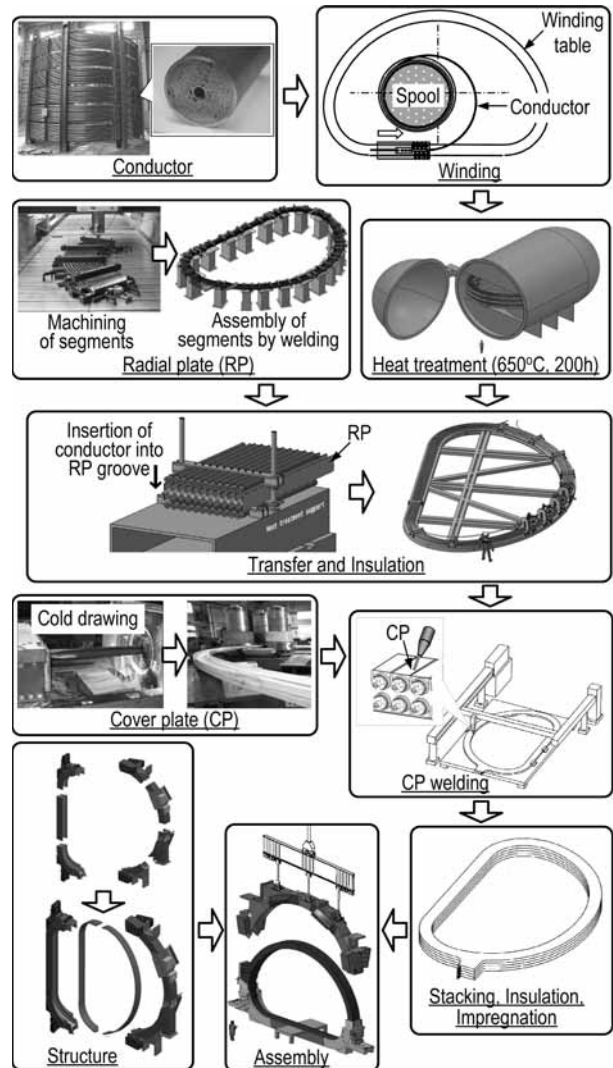


Fig. 1 Manufacturing procedure of ITER TF coil.

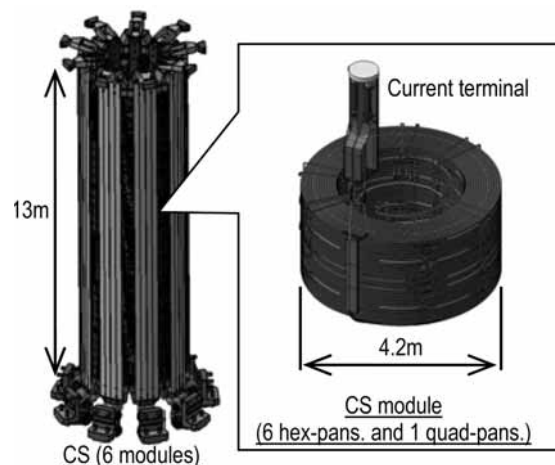


Fig. 2 ITER Central Solenoid (CS).

# ITER TF コイル 1/3 規模巻線による製作技術開発

## Development of the winding technology of 1/3 scale winding for ITER TF coil

松井 邦浩, 小泉 徳潔, 辺見 努, 高野 克敏, 清水 辰也, 中嶋 秀夫(原子力機構)

MATSUI Kunihiko, KOIZUMI Norikiyo, HEMMI Tsutomu, TAKANO Katsutoshi, SHIMIZU Tatsuya, NAKAJIMA Hideo (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、中規模及び実規模の試作をメーカーと協力して段階的に実施している[1]。この試作のうち巻線技術に関して、TF 導体の機械特性を把握するための機械試験を実施した 2010 年春以降、巻線精度の検証、1/3 規模巻線用の巻線システムの動作確認、1/3 規模巻線の製作に向けた巻線試作を実施した。これらの試作の結果について報告する。

### 2. 巻線精度の検証

これまでに開発した巻線ヘッドは、導体を直線化するレベラー、導体の長さを測定する測長システム、及び導体を目標の曲率に曲げる 3 点曲げローラーで構成される[1]。この巻線ヘッドの曲げ精度の検証試験を、模擬導体を用い実施した。

3 点曲げローラーの押し込み量は、引張試験[2]から得た導体の応力-歪み (SS) 曲線を基に決定し、模擬導体の曲げ試験で本予測の妥当性を検証した。その結果、曲げた導体の曲率は目標値に比べ約 5~10%小さくなったため、試験結果をもとに補正し、再試験を実施した結果、曲げた導体の曲率は Fig. 1 に示すように目標値とほぼ一致した。これにより、高精度の巻線を達成できることを実証できた。

### 3. 1/3 規模巻線用の巻線システム動作確認

1/3 規模巻線は、巻線技術を検証することを目的とした 6 ターンのダブル・パンケーキ巻線で、その大きさは実機 TF コイルの約 1/3 である。この 1/3 規模巻線用として製作した巻線システムを Fig. 2 に示す。巻線システムは、導体を供給するマンドレル、半径 4.5m に伸ばされた導体を直線化するベンダー、巻線ヘッド、及びラジアル・プレートで模擬し巻かれた導体を受ける巻線テーブルで構成される。これらの機器の単体動作試験、及びシステムとしての動作試験を実施し、正常に動作することを確認した。一方、口出し部、及びパンケーキ間の渡り部については、巻線ヘッドによる導体曲げが不可能なため、専用の装置を開発した。それらの装置を用いて導体曲げ試験を実施した結果、所定の曲率に導体を曲げられることを確認した。これらの動作確認をもって、1/3 規模巻線の試作を開始することとした。

### 4. 1/3 規模巻線の試作

1/3 規模巻線の製作に向けて、まず、約半ターンの巻線を試巻きした。試巻きした導体及び導体を挿入した巻線テーブルを Fig. 3 に示す。試巻きした導体の曲率は目標の曲率よりもやや大きめとなって、そのままの形状で巻線テーブルの溝に導体を挿入することはできないが、僅かな力によって導体の曲率を補正することで、導体を溝に挿入することができた。その後、1 パンケーキに相当する 3 ターンの試巻き線も実施し、これも若干の補正により導体を巻線テーブルの溝に挿入できた。1/3 規模巻線は、実機 TF コイルよりも曲率が小さく巻線の精度を確保することが難しいことから、今回の試作結果から、実機 TF コイルの巻線製作で十分に巻線精度を確保できることが実証できた。本年中に、1/3 規模巻線の製作を実施して、実機 TF コイルの製作に向けたより詳細なデータを収集する計画である。

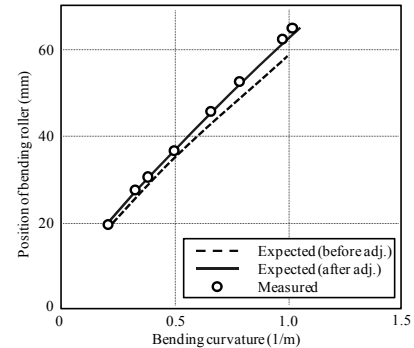


Fig. 1 Measured and expected curvature of wound dummy conductor.

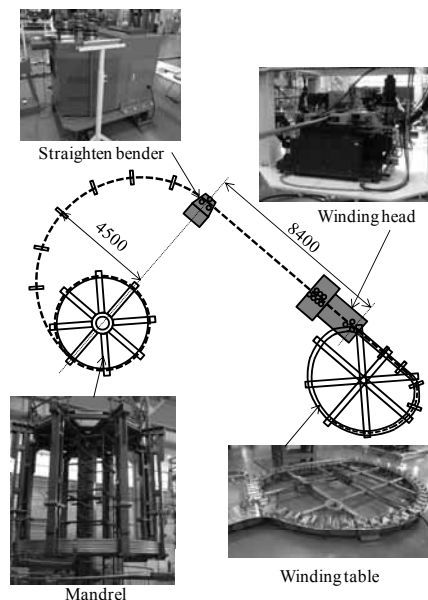


Fig. 2 Winding system for 1/3 scale winding.

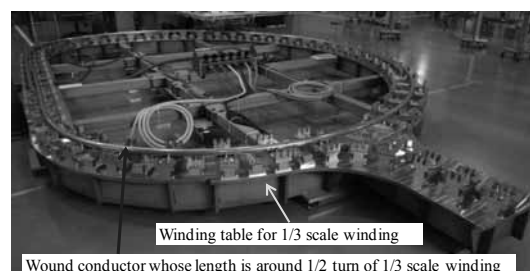


Fig. 3 Wound dummy conductor and winding table for 1/3 scale winding.

### 謝辞

TF コイルの調達活動にご協力頂いている(株)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. N. Koizumi, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 84 (2009) p.210
2. K. Matsui, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.189

# ITER・TFコイル ラジアル・プレートの製作技術開発

## Development of manufacturing technology of radial plate for ITER TF coil

高野 克敏, 小泉 徳潔, 松井邦浩, 辺見努, 中嶋 秀夫 (原子力機構)

TAKANO Katsutoshi, KOIZUMI Norikiyo, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, NAKAJIMA Hideo (JAEA)

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

### 1. はじめに

原子力機構は、9個のITERトロイダル磁場(TF)コイルの製作を担当する[1]。TFコイルの巻線部で使用するラジアル・プレート(RP)[1]は、高さ13m、幅9m、厚さ10cmの大型構造物であるが、1mmの平面度で製作することが要求されている。また、RP溝に挿入した導体を固定するためのカバー・プレート(CP)[1]の合理化方法の開発も必要である。このため、原子力機構は、実機RP製作に先駆けて小規模試作、及び実規模試作を国内メーカーと協力して進めている。また、RPの試作をより効率的に進めるために、日本と欧州は試作を分担実施している。

### 2. 日本と欧州のRP試作協力

日本と欧州は、RPの製作方法として適用可能な複数の製作技術を分担して開発し、効率的に試作を進めるとともに、複数技術を試験することで、開発に伴うリスク低減を図っている。また、TFコイルでは、断面が対称な5枚の標準RP(rRP)と非対称な2枚の側面RP(sRP)があり、一部で個別の技術課題を有している。本試作では、日欧でこれらのRPの製作技術も分担して開発することとした。Table.1に適用可能な製作技術のマトリクスを示す。

### 3. 日本における試作の進展

日本では、Table.1に示すように、RPを10分割したセグメントを最終の断面形状まで機械加工し、これらのセグメントをD型に配置して、レーザー溶接で組み立てる方法を主案として試作を進めている。実規模試作に先立って、1)セグメントの機械加工技術、2)セグメント間のレーザー溶接技術、及び3)CPの合理的製作技術の開発を進めている。

セグメントの機械加工技術では、1)長さ1.5mのターミナル部セグメント、2)長さ2mの直線部セグメントの試作を実施した。試作では、高送り(日本のみ採用)で機械加工を実施した。加工工具、加工手順及び拘束治具などを最適化した結果、前者のセグメントについては、目標値である平面度1mm以下を達成することができた。一方、後者のセグメントでは、同一の加工条件を採用したにも関わらず、約2mmの面外変形が発生した。本変形については、プレス等によって矯正する計画であり、実機RPの製作で適用できる矯正技術の開発を目指す。

現在、上記の小規模試作で得られた知見を基に、より適した加工条件を探求しながら、実規模rRPのセグメント製作を進めており(Fig.1)、2010年11月に全セグメントの加工を完了する計画である。

また、レーザー溶接(Fig.2)、CP製作(Fig.3)の小規模試作も並行して進めている。

### 4. 欧州における試作の進展

欧州では、Table 1に示すように、2通りの製作技術の開発が進められている。

一方は、ステンレス鋼の粉末をHIP処理(熱間等方圧加圧法)することでRPセグメントの最終形状に近いプリフォーム・セグメントを製作し、TIG溶接で組み立てる方法である。本方法では、TIG溶接による変形が大きいので、組立前には約5mmの予肉を残し、組立後のRPを大型のNCで最終加工する。モックアップの機械加工試験、TIG溶接の検証試験を実施中である。

他方は、鍛造で製作したRPセグメントを機械加工後、EB(電子ビーム)溶接で組み立てる方法である。EB溶接するために、セグメント端部は矩形断面(溝加工無)となっており、RP組立後

に本部分の溝加工を行う。モックアップの機械加工試験、EB溶接検証試験を完了した。

### 5. まとめ

原子力機構では、実規模RPの試作を実施しており、2011年3月までに完了する計画である。試作で得られた技術開発成果を基に、最も合理的な製作手法で実機RPを製作する計画である。

### 謝辞

TFコイルの試作では、株式会社 東芝殿の多大な御協力をいただいております。ここに厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

[1]小泉徳潔, 他, 2010 秋季低温工学会講演会, 2B-p08.

[2]高野克敏, 他, 2009 春季低温工学会講演概要集, p.122.

Table.1 Manufacturing procedure matrix of RP in JA and EU.

	JA	EU1	EU2
RP type	Regular	Side	Regular
Material	Hot-roll	Forging	Powder HIP
Number of segments	10	7	15
Welding	Laser	EB	TIG
Assembly procedure	Welding only	Welding→local jointed groove machining	Welding→5-mm depth full groove machining



Fig. 1 Regular Radial Plate Segment.



Fig.2 Laser Welding.



Fig.3 Manufacturing of CP.

## ITER TF コイルの絶縁技術開発

## Development of insulation technology for the ITER TF coils

辺見 努, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 高野 克敏, 中嶋 秀夫(原子力機構)

HEMMI Tsutomu, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, TAKANO Katsutoshi, NAKAJIMA Hideo(JAEA)

E-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

## 1. はじめに

原子力機構は、ITER 計画における日本の国内機関として、9 個のトロイダル磁場(TF)コイルの製作を担当している。現在、メーカーと協力してTFコイルの製作技術の実証と合理化を目的とした試作試験を実施しており、本講演では TF コイルの絶縁技術の開発状況について報告する。

TF コイルの絶縁材は 20 年間の運転で照射される  $1 \times 10^{22}$  n/m<sup>2</sup> の中性子に耐え、直流 19 kV の耐電圧性能を有することが求められる。TF コイルの絶縁は、導体絶縁、ダブル・パンケーキ (DP) 絶縁、対地絶縁の 3 層からなり、それぞれ、S ガラスとポリイミドを巻き、耐放射線性を有するシアネートエステル (CE) とエポキシを混合した樹脂で真空加圧含浸を行う。なお、導体絶縁と DP 絶縁は一括で、対地絶縁は別途単独で含浸する。一括含浸では、樹脂は DP 絶縁を通り抜けて導体絶縁に流れる必要があり、気泡の残留も起こりやすくなる。本試験では導体絶縁と DP 絶縁の一括含浸を試験の対象とした。

## 2. アクリルモデルを用いた含浸試験

実機 TF コイルの含浸条件を決定するため、目視で確認しながら試験ができる Fig. 1 に示すアクリル樹脂製モデルを用いて含浸試験を行った。含浸時間は 50~60 時間程度を目標とし、温度は含浸に適する 100 mPas に到達する時間が 100 時間以上となる 55°C とした。本試験では、CE 混合樹脂がアクリル樹脂を溶すことから、混合樹脂の 50 時間後の粘度 38 mPas と等しくなる 38°C で CE 純正樹脂を用いた。また、比較のため絶縁材はガラス(G)とポリイミド(K)を接着した GK テープまたは接着していない G と K(G+K テープ)とした。これは、絶縁施工の大部分を占めるテープ交換時間を半減させるために GK テープを採用しても含浸時間が大幅に増加しないことを確認するためである。含浸手順は実機で 50 時間に相当する 2 時間で樹脂をモデル上面まで浸し、液面を維持しながら 4 時間待ち、その後大気圧に加圧した。このとき、液面を決めるモデルの傾きは 45° とした。DP 絶縁から導体絶縁への樹脂の通路は 200 mm 間隔にあけたカバープレート(CP)の直径 6 mm の穴であり、さらに樹脂の流路を増やし気泡の残留を防ぐためラジアルプレート(RP)にも CP 穴と交互に同サイズの穴をあけた。含浸時間は模擬導体と導体絶縁の外側に配置した SUS ストリップとの間における静電容量の変化から測定した。

Fig.2 に、GK テープ及び G+K テープを適用した場合の静電容量の変化を示す。試験結果は上側導体絶縁の静電容量の変化である。この結果より、G+K テープは 2 時間で変化がフラットになり、GK テープはフラットになるまで 8 時間程度であることがわかる。これより、GK テープを適用して実機を想定すると、液送 50 時間+8 時間で済むことがわかった。

## 3. 金属モデルを用いた含浸試験

樹脂を 150°C で硬化させボイドの有無を確認し、実機形状の影響を調べるためモデルの形状を高さ 1.1 m の D 型とした SUS 製含浸モデルを用いて含浸試験を行った。また、アクリルモデル試験で待ち時間が 8 時間とそれほど長くなかったことから、1DP あたり約 1800 個にもなる RP 穴の省略の可能性を探るため RP 穴有り無し RP 溝(各上下 2 溝)を有するモデルとした。モデルの傾きは 10° とし、低くなった液面を上げるため、モデル下端から 1 m 上方に出口側バッファータンクを用意した。手順は実機 50 時間に相当する約 3 時間で液送し、液送後含浸完了を待ち、3 気圧に加圧後、硬化させた。

Fig. 3 に含浸中の RP と上側導体間の静電容量の変化を示す。この結果より、RP 穴の有無しにより 1 時間程度の違いはあるが、アクリルモデル試験と同様に液送後 8 時間程度で静電容量の変化が止まり、加圧後も静電容量の変化はほとんど観測されないことがわかった。また、硬化後のボイドも確認できず、良好な含浸特性を確認した。

## 4. まとめ

以上の含浸試験の結果から、傾き 10 度、出口側上方にバッファータンクを用意し、RP 穴無し及び接着された GK テープを使用して、液送 50 時間、待ち時間 8 時間で実機 DP を含浸できる見通しを得た。今後、実機 DP の 1/3 スケール及び実機と同サイズのダミー DP での含浸試験により、最終的な絶縁技術の実証を行う予定である。

## 謝辞

TF コイルの試作に関して、株式会社 東芝殿からの多大なる御協力を頂いております。ここに厚く御礼申し上げます。

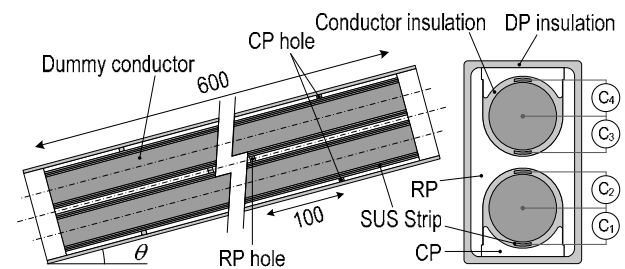


Fig. 1 Acrylic model for the impregnation tests

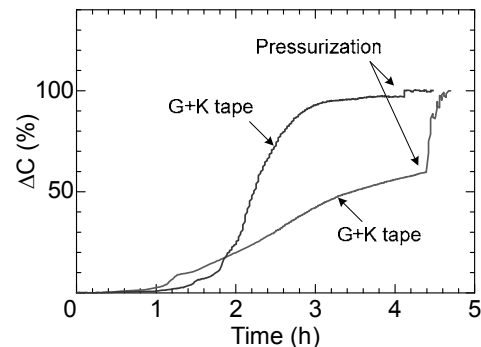


Fig. 2 Result of capacitance measurements for the impregnation tests using the acrylic model.

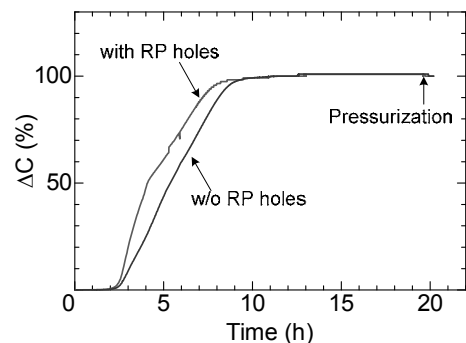


Fig. 3 Result of the capacitance measurements for the impregnation tests using the metallic model.

## ITER TF コイル構造物の実規模試作 Trial fabrication of basic segments of ITER TF coil structures

千田豊、井口将秀、中嶋秀夫(原子力機構)

CHIDA Yutaka, IGUCHI Masahide, NAKAJIMA Hideo (JAEA);

E-Mail: chida.yutaka@jaea.go.jp

### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、国際熱核融合実験炉(ITER)の建設においてトロイダル磁場(TF)コイルの製作を分担する。TFコイルはコイルに発生する電磁力に極低温の環境下で対抗するために、極厚の高強度・高靱性ステンレス鋼製容器を有している。コイル容器とその支持構造物は大型溶接構造物となり、高品質・高精度かつ経済的に製作する必要があるために、溶接変形を抑えるとともに、極低温での強度・靱性を確保できる溶接技術の開発が不可欠である。

原子力機構はTFコイル構造物の詳細製作設計と実規模試作(Phase II)を開始し、狭開先 TIG 溶接部の4Kでの引張特性と小規模試作結果を2009年秋の講演(1C-p03)で報告し[1]、溶接性確認試験結果及び実機大セグメント試作前に実施した要素試験結果を2010年春の講演(3B-a05)で報告したが[2]、本講演では溶接施工法確認試験結果及び実機大セグメント試作状況について報告する。

### 2. 溶接施工法確認試験結果

TFコイル構造物の構造材には高マンガン・ステンレス鋼(JSME規格FMJJ1)及び窒素強化型ステンレス鋼(JSME規格FM316LN)が使用され、溶接材料にはTIG溶接ワイヤ(JSME規格FMYJJ1)が使用される予定である。

通常のオーステナイト鋼の溶接では溶接割れ防止のために多少のフェライトが溶接金属中に生成される成分設計がなされるが、極低温での靱性を確保するために完全オーステナイト系の溶接材料で計画されている。

溶接継手の引張強度についてFM316LN(N:0.15-0.22)の母材を使用して4Kまでの試験を実施し、母材規格値を満足すると同時にJSME規格で提案されている強度推定式が適用できることを確認した。

JSME規格で規定されている溶接施工試験の各項目の試験結果は合格であったものの、側曲げ試験片に再熱割れと考えられる微小な割れが観察され、より品質を向上させるために溶接材料の耐割れ性の向上が今後の技術課題となっている。

### 3. 実機大セグメント試作状況

複雑な形状のTFコイル構造物を確実に製作するためには実機大のセグメント試作が有効であり、インボード側曲線部セグメント及びアウトボード側の接続金物と取り合うWINGと呼ばれる部材で構成されるセグメントの試作を実施している。

各セグメントは複雑な形状の部材で構成されるため、極厚の鍛造品が使用される。インボード側曲線部セグメントの試作においてPCRフランジ部の一体化を完了し、側板と外板との溶接を施工中であるが、現段階において施工上の問題はない。

これらの鍛造品の品質確認及び試作は2011年3月までに完了する予定である。

### 4. まとめ

JSME規格に基づく溶接施工法確認試験(ASME規格と同等)において合格基準を満足した。実機大セグメントの試作を実施しており、試作で得られた知見を実機製作要領および製造計画に反映させていく予定である。

### 謝辞

本試験及び試作を実施いただいた(株)東芝殿並びに川崎重工業(株)殿に謝意を表します。

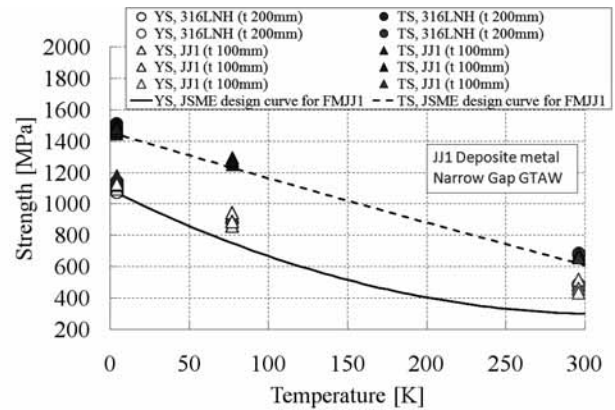


Fig.1 Strength of Weld joints compared with JSME design curve

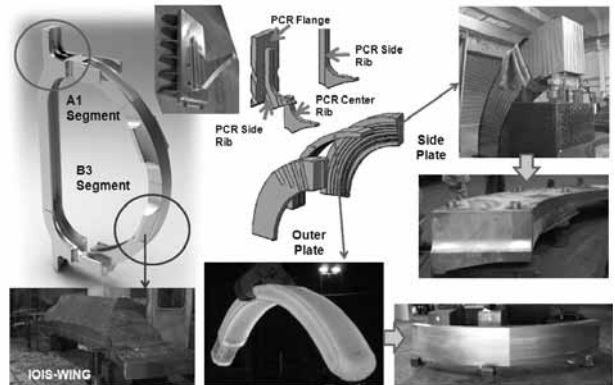


Fig.2 Trial fabrication of forged parts

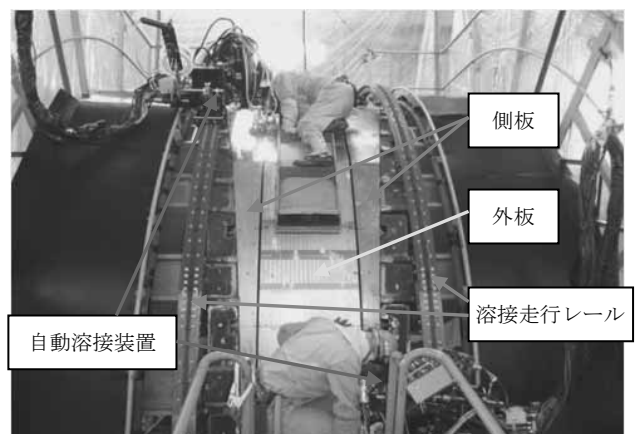


Fig.3 Trial Fabrication of A1 Segment

### 参考文献

- [1] 中嶋,他:低温工学・超伝導学会 2009 秋季講演概要集 1C-p03  
[2] 千田,他:低温工学・超伝導学会 2010 春季講演概要集 3B-a05



# ITER TF コイル構造材料の品質確認試験

## Qualification test results of the stainless steel for ITER TF Coil Structures

井口 将秀、齊藤 徹、河野 勝己、堤 史明、高野克敏、千田 豊、中嶋 秀夫(原子力機構)  
IGUCHI Masahide, SAITO Toru, KAWANO Katsumi, TSUTSUMI Fumiaki, TAKANO Katsutoshi,  
 CHIDA Yutaka, NAKAJIMA Hideo (JAEA)  
 E-mail : iguchi.masahide@jaea.go.jp

### 1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)のトロイダル磁場(TF)コイルは極低温(4.5K)で運転され、かつ巨大な電磁力が作用する。このことから、TFコイル製造のためには極低温で高強度かつ高靱性な材料の使用が必要不可欠である。また、TFコイルは200mmを超える厚さの部材を使用することから、構造材料の多くが鍛造によって製造される。

現在、日本原子力研究開発機構(原子力機構)はTFコイルの実規模試作を進めているが、TFコイルの品質を確保するためにも、使用される構造材料の極低温での品質確認試験は必須である。本報告ではこれまで実施した機械試験結果を報告する。

### 2. 供試材

図1にTFコイル構造物A1セグメントの形状を示す。A1セグメントは5種類の部分から構成されており、実規模試作では6種類の素材が製造された。原子力機構ではこれらの素材に対して品質確認試験を実施した。供試材は全てJSME S KA1-2008(JSME規格)に規定されているFM316LNH鍛造材である。表1に各素材が使用される部分の名称、板厚、板幅、最終形状を示す。図1から分かるように、PCRフランジ部用鍛鋼品は全て極厚平板形状であるが、A1セグメントコイルケース用鍛鋼品はTFコイル構造物特有な形状である。それぞれ異なる2社のメーカーによって製造された。

品質確認試験として液体ヘリウム温度(4K)での引張試験、破壊靱性試験、及び疲労き裂進展試験を実施した。引張試験及び破壊靱性試験はJIS規格に準拠して実施した。疲労き裂進展試験は応力比0.1、周波数10Hzの条件にて実施した。また、引張強度の温度特性を確認するために室温と77Kでの引張試験も合わせて実施した。

### 3. 試験結果

図2に室温、77K、及び4Kでの引張試験結果とJSME規格のFM316LNH用設計強度曲線を示す。ITERに必要な0.2%耐力(YS)設計値は、室温で280MPa、4Kで900MPaであり、図2から試験結果はこれらを満足していることが分かる。また、図2において、各試験温度におけるYS及び引張強さ(TS)の試験結果はJSME設計強度曲線よりも高く、本実規模試作用鍛造材はJSME設計値を満足していることが分かる。

表1に破壊靱性試験結果を示す。破壊靱性試験では全ての素材の試験結果はITERで要求される4Kでの $K_{IC}$ 値である $180\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を満足する結果となった。しかし、 $K_{IC}$ 値はコイルケース用素材のほうがPCRフランジ部用素材よりも高い値を示す傾向があり、これはメーカーの違いが原因であると考えられる。原因を特定するためには詳細な調査が今後必要である。

4Kでの疲労き裂進展試験結果を図3に示す。 $K_{IC}$ 値の試験結果と同じようにPCRフランジ部用素材のほうが、き裂が進展しやすい結果となった。しかし、過去に実施された400mm厚316LN鍛造材き裂進展試験結果と大きな違いはなく、ばらつきの範囲であると考えられる。

以上の結果から、A1セグメント実規模試作用素材の4K機械特性は、ばらつきはあるがTFコイル製造に対するITER要求値を満足しており、実機適用も可能である十分な品質を有していることが分かった。

Table 1 Material properties and fracture toughness test results

Name of part	Maximum Thickness	Maximum Width	Final Product Shape	Fabricator	Average of $K_{IC}$ [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]
PCR Center Rib	190mm	1270mm	Block	Company A	223
PCR Side Rib	165mm	1570mm	Block		220
PCR Flange	220mm	1030mm	Block		215
Outer Plate	166mm	650mm	Bended plate	Company B	274
Side Plate, Left	600mm	270mm	Unique shape		242
Side Plate, Right	600mm	270mm	Unique shape		264

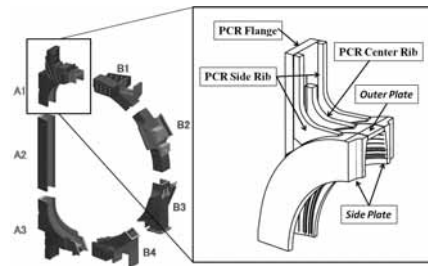


Fig. 1 Illustration of A1 segment of ITER TF Coil Structures

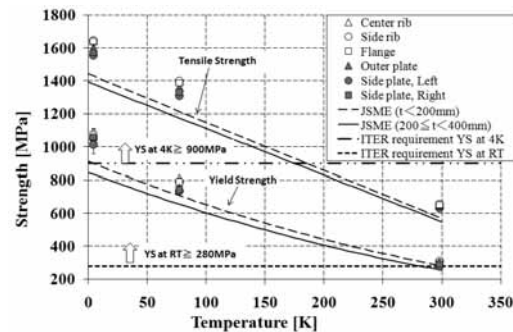


Fig.2 Comparison of mechanical strengths with JSME design curves and IO requirements

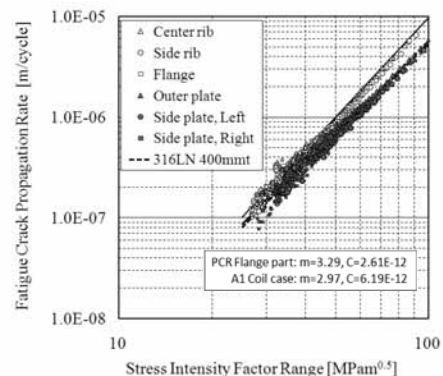


Fig.3 Crack propagation test results at 4K

## ITER 中心ソレノイド(CS)コイル用導体の調達準備状況

### Status of conductor preproduction for ITER Central Solenoid (CS) coil

濱田 一弥, 布谷 嘉彦, 高橋 良和, 磯野 高明, 辺見 努, 松井 邦浩, 名原 啓博, 河野 勝己, 押切 雅幸,  
吉川 正敏, 堤 史明, 宇野 康弘, 斎藤 徹, 小泉 徳潔, 中嶋 秀夫, 奥野 清(原子力機構)

HAMADA Kazuya, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki, HEMMI Tsutomu, MATSUI Kunihiko, KAWANO Katsumi,  
NABARA Yoshihiro, OSHIKIRI Masayuki, YOSHIKAWA Masatoshi, TSUTSUMI Fumiaki, UNO Yasuhiro, SAITO Toru,  
KOIZUMI Norikiyo, NAKAJIMA Hideo, OKUNO Kiyoshi(JAEA)

E-mail: hamada.kazuya@jaea.go.jp

#### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、ITER 計画における日本の極内機関として、中心ソレノイド(CS)コイル用導体の調達を担当し、製作した CS 導体をコイル製作担当の米国に送付する。現在、導体製作のための準備作業として実規模導体を用いた性能検証試験、溶接試験及びコンジット加工試験を実施しており、これらの結果を報告する。

#### 2. CS 導体

CSコイルは直径4.2m、内径2.7m、高さ13mの円筒形であり、6個のモジュールを積み重ねた構造である[1]。CS導体(Fig.1)は、外形49mm角で中心穴径32.6mmの矩形のコンジット内に直径0.83mmの超伝導素線576本と銅素線288本を束ねた撚線を収めた構造である。導体長さは最大900mであり、合計約44km製作する。Table 1に素線及び導体の要求特性を示す。コンジット材料には、日本が開発した低熱収縮特性と低疲労亀裂進展特性を有する高マンガン鋼(JK2LB 鋼)[2]を使用する計画である。

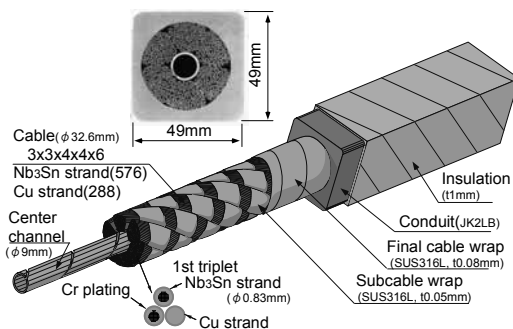


Fig.1 CS coil conductor

#### 3. CS 導体性能試験

実機 CS 導体用素線の調達に先立って、超伝導素線を3社で試作し、3社とも表1に示した要求特性を満足した。これらのうち、特性の優れた上位2社の素線(臨界電流値が12.7T, 4.2K, -0.74%で80.5Aと78.4A)を用いて、2本の導体サンプルを製作し、スイス ローザンヌ連邦工科大学プラズマ物理研究センター(CRPP)の超伝導試験装置(SULTAN)[3]を用いて性能検証試験を行った。導体には通電中、電磁力が作用し撚線が断面内で圧縮され、素線が曲げ変形して特性が劣化することが知られている[4]。SULTANにおける最大磁場は10.85Tであり、CS導体運転条件と同じ磁場環境は得られないため、CSコイルの運転条件(12.7T, 40kA)における電磁力

Table 1 Major parameters of CS conductor and strand

Conductor operation condition	40 kA at 13.0 T, 45 kA at 12.7 T
Strand performance	$\geq 70A$ at 12.7T, strain -0.74%
	$T_{cs} \geq 5.20K$ , Cu/non Cu ratio: 1
	$RRR < 100$ , Hysteresis loss $\leq 500mJ/cc$ +/-3T

と等価となる45.11kA, 11.15T(自己磁場含む)の条件で試験を実施した。その結果、CSコイルの運転を模擬した繰返し通電試験前の分流開始温度( $T_{cs}$ )は、それぞれ6.05Kと5.96K(暫定値)と測定され、素線の特性から得られる予想値(6.02Kと5.85K)と良く一致した。これにより、CS導体の製作方法が妥当であることが確認できた。

#### 4. 溶接試験及びコンジット加工試験

CS導体の製作方法は、既に製作中のTFコイル用導体と同様である[5]。溶接に関しては、厚肉コンジットを使用するため、溶接変形による曲がりや溶接部内面への収縮変形が大きくなる懸念され、溶接サンプルの試作を実施した。その結果、開先形状の最適化、溶接手順及び冷却方法の工夫により変形を最小限に低減できる見通しを得た。また、コンジット加工試験では、28mのコンジットのコンパクション及び巻取り試験を行い(Fig.2)、要求寸法特性(巻取り後の導体の倒れ:  $\leq 0.4mm$ 、導体断面寸法  $49.0+/-0.4mm$ )を達成できる見通しを得た。



Fig. 2 Spooled 28-m long jacket for CS conductor

#### 5. まとめ

CS導体の製作に向けて、導体性能試験、溶接試験、コンジット加工試験を進めている。導体性能試験が完了し、ITER機構の承認が得られ次第、調達を開始する予定である。

#### 謝辞

日頃より、CS導体の製作準備に関して、(株)JASTEC殿、日立電線(株)殿、古河電工(株)殿、新日鉄エンジニアリング(株)殿、神鋼特殊鋼管(株)殿からの多大なる御協力を頂いております。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

1. P. Libeyre et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond. Vol.20, No.3(2010) pp.398-401
2. K. Hamada et al., TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn) Vol.43, No.6 (2008) pp.244-251
3. <http://crppsc.web.psi.ch/Facilities/sultan.html>
4. Y. Nunoya et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.14, No. 2(2004)pp.1468-1472
5. K. Hamada et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol 82(2010)p.187