

高強度線 Type HT-NX の開発

Development of Type HT-NX with high mechanical performance

菊地 昌志, 山崎 浩平, 中島 隆芳, 鍵山 知宏, 武田 宗一郎, 長部 吾郎, 小林 慎一, 林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工);
北口 仁(物質・材料研究機構); 長村 光造(応用科学研究所); 下山 淳一(青山学院大)

KIKUCHI Masashi, YAMAZAKI Kohei, NAKASHIMA Takayoshi, KAGIYAMA Tomohiro, TAKEDA Soichiro, OSABE Goro,
KOBAYASHI Shin-ichi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Ken-ichi (Sumitomo Electric Industries, LTD.);
KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); OSAMURA Kozo (RIAS); SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: kikuchi-masashi@sei.co.jp

1. はじめに

補強材として、Type HT-CA や Type HT-SS で用いている銅合金やステンレスと比べて飛躍的に高い降伏応力を有する Ni 合金を用いることで、3-ply 加工時の Pre-tension を高めることが可能である。このため、3-ply 加工後には Type H 線材に高い残留圧縮歪み加わり、引張応力、引張歪みに対して優れた耐性を与えることができる。当社はこの補強材料を用いた新たな Type HT の開発を進め、500 MPa を超える引張り強度が得ることに成功した[1]。また、4.2 K 中磁場中 I_c 測定や両曲げ試験の結果より、4.2 K への冷却や $\phi 40$ mm 以上の曲げ加工でも特性の劣化がないことを既に示している[2]。これらの背景より、我々は Ni 合金を用いた Type HT を「DI-BSCCO® Type HT-NX」として製造、販売を開始している。また、並行して機械強度の信頼性評価やフープストレス試験などの実環境を模擬した試験も実施したので、結果について報告する。

2. Type HT-NX 緒元と長尺特性

今春リリースした Type HT-NX の緒元を Table 1 に示す。引張強度、許容曲げ径ともに従来の Type HT をはるかに上回る性能を有する。300 m 級 Type HT-NX 線材の 77 K における I_c 分布を Fig.1 に示す。3-ply 加工後の I_c は 3-ply 加工前と同等であり、かつ全長に亘って均質な性能が得られている。このことから、既報[2]の通り 3-ply 加工による Type H 線材への残留圧縮歪みや 77 K 冷却による付加的圧縮歪みの影響はない。

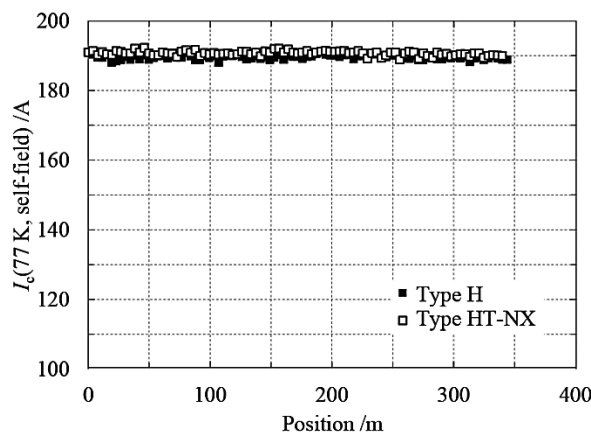
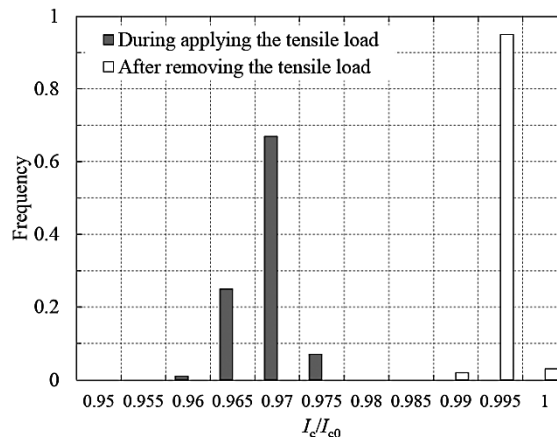
3. Type HT-NX 機械特性の信頼性評価

Type HT-NX の持つ引張強度の信頼性を評価するため、現在製造している Type HT-NX100 ロットからサンプリングした短尺線材を用いて引張試験を実施した。引張り試験は、液体窒素中で引張応力 400 MPa に相当する引張荷重を印加することにより実施した。引張荷重負荷中および除荷後の I_c を直流 4 端子法により測定し、それぞれの試験前の $I_c (=I_{c0})$ に対する比 (I_c 維持率 $(=I_c/I_{c0})$) を求めた。本質的に、引張荷重負荷中では I_c 維持率は 0.95 以上では引張歪みや引張応力に対して可逆的に、0.95 以下では超電導フィラメントの破断に伴って不可逆的に振る舞うことが知られている[3]。本試験で求めた引張荷重負荷中の I_c 維持率と除荷後の I_c 維持率の結果から、400 MPa の引張応力に対する信頼性を評価した。

Fig.2 に I_c 維持率の分布を示す。引張荷重負荷中の I_c 維持率は 0.965~0.975 に、除荷後の I_c 維持率は 0.995 を中心に分布している。この結果は、試験実施条件(引張応力 400 MPa)では I_c 維持率が可逆的に振る舞い、超電導フィラメントは破断しないことを示唆しており、Table.1 に記載した性能に対する信頼性は十分に高いことを示すことができた。当日は、Type HT-NX 線材の許容曲げ径に対する信頼性評価試験の結果や、Type HT-NX を用いて作製されたコイルに対するフープ力試験の結果についても報告する予定である。

Table 1. Specifications of Type HT-NX.

	Type HT-CA	Type HT-SS	Type HT-NX
Status	Commercial	Commercial	Released
Material	Cu-alloy	Stainless Steel	Ni-alloy
Width (± 0.2 mm)	4.5 mm	4.5 mm	4.5 mm
Thickness (± 0.03 mm)	0.36 mm	0.30 mm	0.31 mm
I_c (77 K, s.f.)	(170 A), 180 A, 190 A, 200 A		
Critical Tensile stress (77 K)	250 MPa	270 MPa	400 MPa
Critical Tensile strain (77 K)	0.30%	0.40%	0.50%
Critical Bending Dia.	60 mm	60 mm	40 mm

Fig.1 I_c distributions of the Type H and the Type HT-NX wire.Fig.2 I_c retention histogram of 100 Type HT-NX tapes after the tensile tolerance test at liquid nitrogen.

参考文献

1. Nakashima, et al.: ASC2014 preprint
2. Kikuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol 90 (2014), p56
3. Osamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 3026

Bi2223 線材作製における低酸素分圧下焼成条件の最適化

Optimization of sintering conditions under low oxygen partial pressure for Bi2223 tapes

古木昌宏(東大院工); 下山淳一(青学大); 山本明保、荻野拓、岸尾光二(東大院工); 中島隆芳、小林慎一、林和彦(住友電気)
 FURUKI Masahiro(Univ. of Tokyo); SHIMOYAMA Jun-ichi(Aoyama Gakuin Univ.); YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku,
 KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo); NAKASHIMA Takayoshi, KOBAYASHI Shin-ichi,
 HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
 E-mail: 4025066580@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

最近の我々の研究より銀シース Bi2223 多芯線材の作製において、従来の $P_{O_2} \sim 8$ kPa[1]よりやや還元側の雰囲気である $P_{O_2} \sim 3$ kPa 下での一次焼成により最短 3 h で Bi2223 相が主相となることがわかっている。この手法においては、最適焼成温度が低下し、焼成時間が短くなることにより不純物相の粗大化を抑制できるという利点がある[2]。そこで本研究では $P_{O_2} = 3$ kPa での一次焼成を行った試料に対し、二次焼成の焼成条件を系統的に変え、Bi2223 線材の高臨界電流特性化を目指した。

2. 実験方法

121 芯の銀シース Bi2223 一次圧延線材(~ 4.2 mm \times 0.25 mm)に対し一次焼成を 3% O_2 /Ar 気流中、820 $^{\circ}C$ 、12 h の条件で行い、800 $^{\circ}C$ まで 6 h かけて徐冷後、炉冷した。なお、一次焼成前の酸化層は Bi2212 が主相であり、一次焼成後にはほぼ Bi2223 単相となることを確認している。一次焼成線材をロール圧延した後、二次焼成を行った。二次焼成条件は、3% O_2 /Ar 気流中、800~830 $^{\circ}C$ で 6 h とした。得られた線材に対して、1% O_2 /Ar 気流中、720 $^{\circ}C$ で 100 h の還元ポストアニールを行った。構成相の同定は X 線回折測定、微細組織の観察は SEM、超伝導特性の評価は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により行った。また、77 K、自己磁場下の I_c は直流四端子法によって調べた。

3. 結果と考察

Fig. 1 に異なる温度で二次焼成を行った Bi2223 線材の I_c プロットを示した。比較のため、一次焼成と二次焼成を同じ温度で各 24 h 行った試料についても載せてある。以前の研究では 810 $^{\circ}C$ 以下の低温での焼成は Bi2223 相の生成に長時間を要し不純物相が偏析しやすいことから、高特性化に適した焼成条件ではないと考えられていたが、二次焼成条件に関してはより低温での焼成において短時間で良好な特性を示すことが判明した。

Fig. 2 に異なる温度で二次焼成を行った Bi2223 線材の 40 K における磁化ヒステリシスの幅 ΔM の磁場依存性を示した。なお、Fig. 2 の右側の軸は Bean モデルからフィラメント幅を ~ 200 μm として計算した J_c を目安として示したものである。77 K での I_c と同様に、低酸素分圧下での相生成に適した条件として考えられている 820 $^{\circ}C$ 前後よりも低い温度においての焼成によって高い特性を示す傾向にあることが認められた。

当日は雰囲気、時間を変えた他の試料の臨界電流特性および酸素アニールが超伝導特性に及ぼす影響についても報告する予定である。

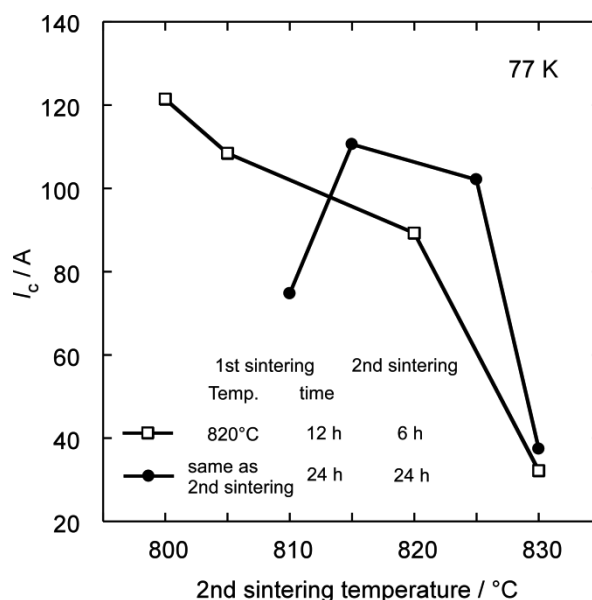


Fig. 1 Dependence of critical current on 2nd sintering temperature for Bi2223 tapes. (Open squares: 1st sintering at 820 $^{\circ}C$ for 12 h, closed circles: 1st sintering and 2nd sintering at same temperature for 24 h.)

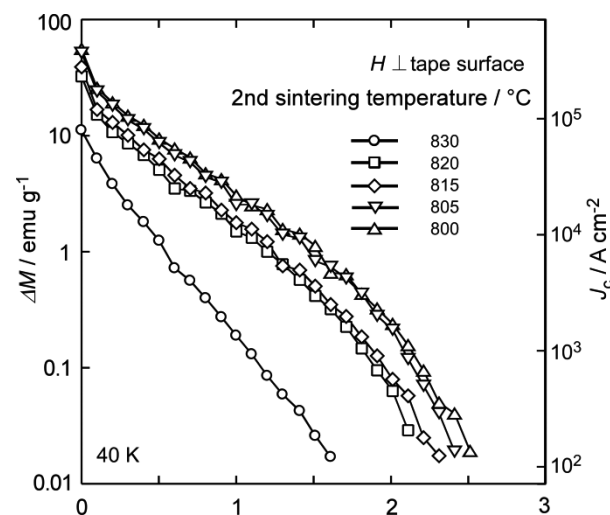


Fig. 2 ΔM vs H plot at 40 K for Bi2223 tapes re-sintered under various temperatures for 6 h. Circles, squares, diamonds, triangles and reverse triangles correspond to 830 $^{\circ}C$, 820 $^{\circ}C$, 815 $^{\circ}C$, 805 $^{\circ}C$ and 800 $^{\circ}C$.

参考文献

1. U. Endo *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 27 (1988) L1477.
2. R. Tajima *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23 (2013) 6400604

銀管内における高臨界電流特性 Bi2223 焼結体の作製

Fabrication of Bi2223 sintered bulks with high critical current properties in silver tubes

武田 泰明, 古木 昌宏, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二 (東大院工);

下山 淳一 (青学大); 中島 隆芳, 鍵山 知宏, 小林 慎一, 林 和彦 (住友電工)

TAKEDA Yasuaki, FURUKI Masahiro, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo);

SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); NAKASHIMA Takayoshi, KAGIYAMA Tomohiro,

KOBAYASHI Shin-ichi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries)

E-mail: 0591908153@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

これまでに我々は、 $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Bi2223) の焼結体における粒間 J_c の向上のために、微細組織の制御や高温ポストアニール過程の導入などが重要な因子であることを見出してきた。今回は新たな知見として、前駆体粉末をペレット成型し、粉碎過程を経ずに無配向 Bi2223 焼結体を作製することで、超伝導相が生成するときに形成される粒界の特性が維持され、粒間結合が改善することを報告した[1]。そこで本研究では、前駆体粉末を Ag 管内に充填し、板状にプレス成型した後に焼成する方法で粉碎過程を経ずに焼結体を作製した。本方法では超伝導相生成後に再度プレスを行うことができ、より緻密な焼結体が得られると考えられる。試料の微細組織と超伝導特性を調べ、粒間 J_c の向上を試みた。

2. 実験方法

空气中 780°C、6 h の仮焼により得られた Bi2212 を主相とする前駆体粉末を Ag 管に充填し、圧力 P_1 の一軸プレスによって板状に成型した後に $P_{\text{O}_2} = 3 \text{ kPa}$ (3% O_2/Ar 気流中) で 1 次焼成し Bi2223 相を生成させた。緻密化のため圧力 P_2 での一軸プレス後に 2 次焼成を行うことで Bi2223 焼結体を作製した。焼成条件を 805-830°C、3-24 h、一軸プレス圧力を 50-300 MPa の範囲で変え、焼結体の粒間結合が強くなる条件を調べた。なお、焼成においては最後に 3 h で 20°C 下げる徐冷過程を導入している。これらの焼結体の一部に対して $P_{\text{O}_2} = 1 \text{ kPa}$ 中、720-780°C で 48 h、金属組成制御と粒界特性の改善を目的とした還元ポストアニールを行った。試料の微細組織は SEM により観察し、構成相を粉末 X 線回折測定により、電気抵抗率の温度依存性を交流四端子法により、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定によって評価した。磁場はプレス面に垂直に印加し、また粒間 J_c は残留磁化法により調べた。

3. 結果と考察

805-830°C、6 h の 1 次焼成により Bi2223 相が生成した。820-830°C 焼成では Bi2223 が主相となり、特に 825°C の 2 回焼成では一軸プレス圧力 50-300 MPa、2 次焼成時間 3-24 h の広い範囲で再現性良く単相の Bi2223 焼結体を作製できた。焼成時間を 1 次、2 次とも 6 h として作製した Bi2223 単相の焼結体の密度は、 P_1, P_2 の増加とともに上昇し、 $P_1 = P_2 = 300 \text{ MPa}$ で作製した焼結体で最も高い値となったが、図 1 に示したようにマイクロクラックの発生に起因して磁化率の超伝導転移は鈍く、試料全体にわたる J_c の改善は見られなかった。一方、クラックの発生を抑制する条件として、 $P_1 = P_2 = 100 \text{ MPa}$ とすることにより、超伝導転移が鋭く、粒間結合に優れた焼結体を得ることがわかった。この焼結体の粒間 J_c は 20 K において 3.2 kA cm^{-2} であった。この焼結体に対し 720-780°C で還元ポストアニールを施したところ、いずれの温度でも粒間 J_c の向上が確認され、760°C でアニールを施した焼結体で粒間 J_c は 20 K において 5.8 kA cm^{-2} に向上した。

さらにこれまでの成果を踏まえ、Bi2223 相を低温・長時間

の焼成により生成させることで粒間 J_c の向上を試みた。815°C、18 h で 1 次焼成を行うことで、Bi2223 が主相として生成した。今回の報告とは異なり焼結体の膨張が起こったものの、この Bi2223 相は二次電子像の観察から粒径数 μm 程度の微細な結晶であることが確認できた。この条件で作製した試料を一軸プレス後、825°C、6 h の 2 次焼成により作製した焼結体と、825°C、6 h の 2 回焼成による焼結体の、粒間 J_c の温度依存性を図 2 に比較した。低温で Bi2223 相を生成させた焼結体は、60 K でも粒間 J_c は高く $\sim 3 \text{ kA cm}^{-2}$ であり、還元ポストアニールの追加によりさらなる上昇が期待できる。

参考文献

1. J. Shimoyama, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.119

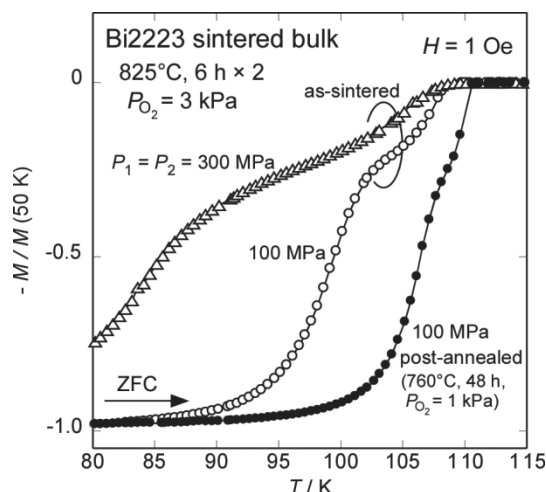


Fig. 1 Temperature dependences of ZFC magnetization for Bi2223 sintered bulks.

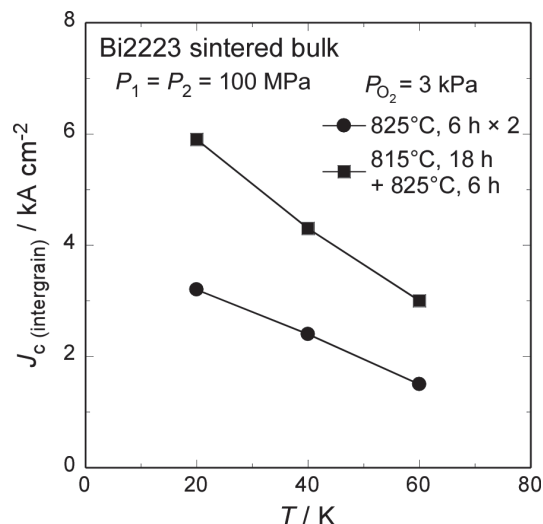


Fig. 2 Temperature dependences of J_c (intergrain) for Bi2223 sintered bulks.

66kV 級超電導ケーブルの地絡事故特性(1)ーシート基礎試験ー

Ground Fault Characteristics of 66 kV-class HTS Cables (1) –Sheet Sample Tests–

大屋 正義, 南野 忠彦, 増田 孝人(住友電工); 中野 哲太郎, 丸山 修, 三村 智男(東京電力)
 OHYA Masayoshi, MINAMINO Tadahiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries Ltd.);
 NAKANO Tetsutaro, MARUYAMA Osamu, MIMURA Tomoo (Tokyo Electric Power Company)
 E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

電力ケーブルの実系統適用に際しては地絡事故特性の評価が必須であり、当然ながら超電導ケーブルも例外ではないが、世界的にも超電導ケーブルの地絡事故に関する検討はほとんど行われていない。本報では、超電導ケーブルの地絡事故特性評価の第一歩として、ケーブル構造を模擬したシートサンプルの地絡試験を実施したので報告する。

2. 地絡事故

一般的に、275、500kV などの超高圧系統が直接接地方式なのに対して、66kV 系統では抵抗接地方式が採用されているため地絡電流は小さい。これまでの実績から地絡電流は1500A程度、故障継続時間は最大2秒と想定される[1]。超電導ケーブルで地絡事故が発生した場合、アークエネルギーに起因する衝撃波や液体窒素酸化により圧力が上昇したり、断熱管までアークが貫通したりすることが懸念される。このため、シート形状のサンプルを用いた地絡基礎試験を行い、発生するアークエネルギーを計測するとともに、断熱管への穿孔を阻止可能なケーブルコア保護層の設計について検討した。

3. シート基礎試験

(1)試験装置

試験装置と試験サンプルの概要を図1に示す。SUS製のオープン容器(500mmφ×600mmH)中に180mmφのシートサンプルをセットし、液体窒素で浸漬冷却する。導体層を模擬した銅製通電棒(35mmφ)とシールド層を模擬した銅板(1.2mm厚)の間に短絡発電機を用いて1500Aの電流を2秒通電する。絶縁層のシート(PPLP[®]、7mm厚)には小さな穴を空けて予め1mmφの糸半田を仕込むことで電極棒と銅板を導通させているが、通電を開始すると数サイクルで糸半田が蒸発してアークが発生する[2]。銅板と断熱管内管を模擬したSUS板(0.8mm厚)は短絡発電機の同一端子に接続されており、アークが保護層を貫通するとSUS板に電流が分流する。発生するアークエネルギーは、通電棒と銅板の端子間電圧を測定して通電電流との積を積分することで算出した。

(2)試験結果

保護層のシート枚数が少ない場合、数サイクルでSUS板に電流が流れ始め、SUS板にアークによる穿孔が発生する。シート枚数を増やしていくと、図2に示すように、SUS板への分流は発生しなくなり、保護層の設計次第でSUS板へのアーク貫通を防げることを検証した。このときのアーク電圧は210V/cmであり、油浸絶縁紙中で発生するアーク電圧150V/cmとほぼ同等であることが分った[3]。また、発生するアークエネルギーは300~450kJであることが分った。

4. まとめ

66kV三心一括型超電導ケーブルの地絡事故時に発生する現象を解明するため、1500A×2秒のシート基礎試験を行い、次の事項を明らかにした。(1)ケーブル保護層の設計次第で断熱管への穿孔を回避可能、(2)LN2含浸絶縁紙のアーク電圧は210V/cmであり、油浸絶縁紙とほぼ同等、(3)アークエネルギーは300~450kJ。今後、より実形態に近いサンプルの地絡試験を実施するとともに、今回測定したアークエネルギーに対する圧力上昇シミュレーションを実施していく。

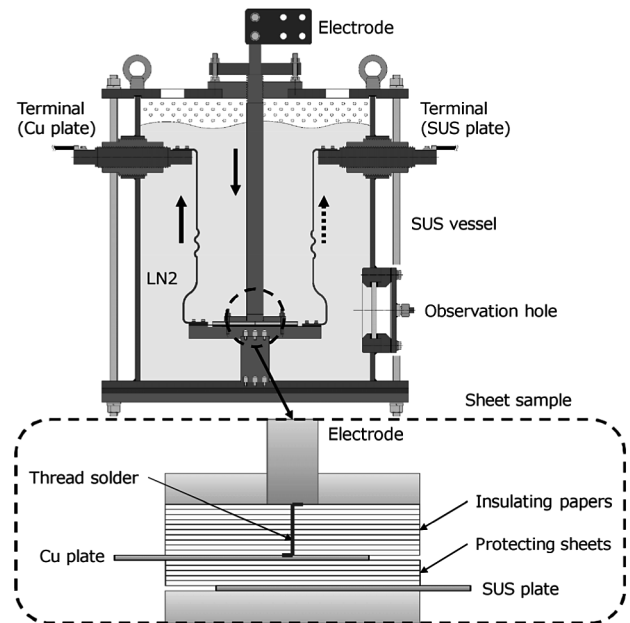


Fig.1 Schematic view of the test apparatus

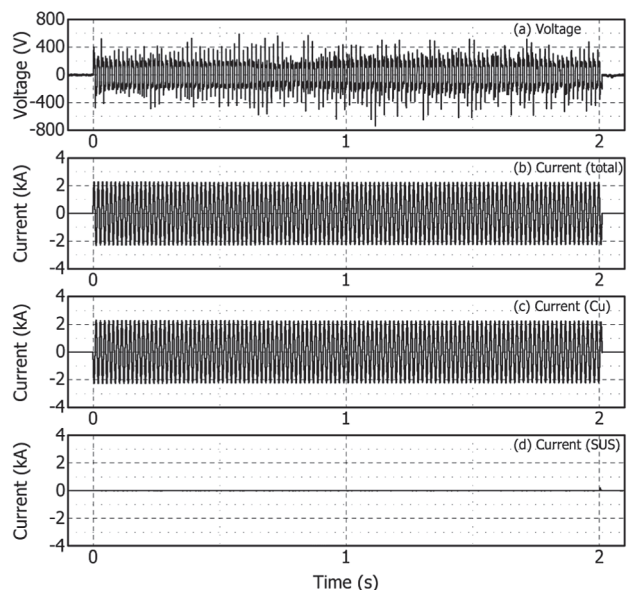


Fig.2 Waveforms of the voltage and current

謝辞

本研究の一部はNEDOの助成により実施したものである。

参考文献

- 電気共同研究第53巻第3号「地中送電線の送電容量設計」平成10年1月
- S. Tanaka, et al.: IEEJ Electric Power and Energy Convention (2006) No. 403
- Y. Murakoshi, et al.: The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 91 (1971) p.1261

3km 実規模級 HTS ケーブルの短絡電流通過時における冷媒温度・圧力解析 Temperature and Pressure Simulation on 3km HTS Power Cable with Fault Current

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

YASUI Tetsuo, SATO Yusuke, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

WANG Xudong (Waseda University/KEK); OHYA Masayoshi, MASUDA Takato(SEI); HONJO Shoichi(TEPCO)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

高温超電導電力ケーブルは電力輸送の高密度化と低損失化という特性を兼ね備えていることから、将来の電力輸送システムの増強という課題に対する解決策として期待されている。ただし、実用化に向けては、km 級長尺ケーブルの短絡電流通過時における安全性評価が必要不可欠である。本研究では、3km 超電導ケーブルコア内各部の温度及び冷媒の温度・圧力を計算する数値解析プログラムを開発し、66kV 系統において想定される最大の短絡電流 31.5kA-2.0s が流れた場合の冷媒の温度・圧力解析を行ったので報告する。

2. 3km モデルケーブルの解析条件

本研究では、三心一括型構造の 3km 超電導ケーブルコア内各部の温度分布を数値計算し、コルゲート管内部を流れる冷媒の温度・圧力の解析・評価を行った。ケーブルコア内各部の温度分布は以下に示す非線形熱伝導方程式を基礎方程式として求めた。

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

Q_{in} : 流入熱量 Q_{out} : 流出熱量

計算を簡単にするため(a)~(e)を仮定した。

- (a). 銅フォーマ/HTS 導体, 及び HTS シールド/銅シールドをそれぞれ銅層一層の導体層, シールド層とみなし, 各層内温度は径方向で一様とする。(発熱量は超電導特性まで考慮した別のプログラムで算出した値を代入した。)
- (b). ケーブルコア内部の冷媒は無視する。
- (c). 絶縁層(PPLP 層)の長手方向の熱伝導は無視する。
- (d). 境界条件として入口の冷媒の温度と圧力を与える。
- (e). 冷媒の質量流量は一定とする。

以上の仮定を考慮した場合におけるケーブル長手方向断面の模式図及び各層における熱の出入りを Fig. 1 に示す。冷媒の特性は、流体の特性を算出するコンピュータプログラムである GASPAC を用いて計算した。モデルケーブルの各パラメータは Table 1 に示すとおりである。

3. 解析結果

Fig. 2 は 31.5kA-2.0s の短絡電流通過時における出口部の冷媒の温度・圧力解析結果である。短絡発生後約 100s で下流部出口付近の冷媒の温度が飽和温度まで上昇していることが分かる。この結果は冷媒の一部が気化したことを示している。次に冷媒の入口圧力 P_{in}^0 を Table 1 に示す 500kPa から上昇させて解析を行ったところ, Fig. 3 に示す様に 2500kPa 以上であれば下流部出口付近の冷媒の温度が飽和温度に達しないことが確認された。

4. まとめ

本研究では、ケーブル内の冷媒の温度・圧力分布を求めるプログラムを開発した。このプログラムにより想定最大短絡電流 31.5kA-2.0s が流れた場合における冷媒の温度・圧力解析を行った。冷媒の入口圧力が 500kPa の場合, 約 100s で下流部出口付近の冷媒の温度が飽和温度に達した。そこで、冷媒の入口圧力を 2500kPa まで上昇させ再度解析を行った結果、

下流部出口付近の冷媒の温度が飽和温度に達する前に温度が低下していくことが確認できた。今後は飽和温度到達後の冷媒の振る舞いを推定するために下流部出口付近の気液二相流を含めた解析を行う予定である。

Table 1 Specifications of the Model Cable

Symbol	Quantity	Value
r_0	Outer radius of Conductor Layer	12.38 mm
r_1	Outer radius of Dielectric Layer	20.02 mm
r_2	Outer radius of Shield Layer	21.97 mm
r_3	Outer radius of Protection Layer	22.98 mm
r_4	Average inner radius of Corrugated pipe	53.09 mm
S_{co}	Volume of Former Layer	282.82 mm ²
S_{sh}	Volume of Shield Layer	166.69 mm ²
$T_{c l}^0$	Inlet Temperature of LN2	68.0 K
P_{l}^0	Inlet Pressure of LN2	500 kPa
V_{l}^0	Inlet Flow rate of LN2	50 L/min

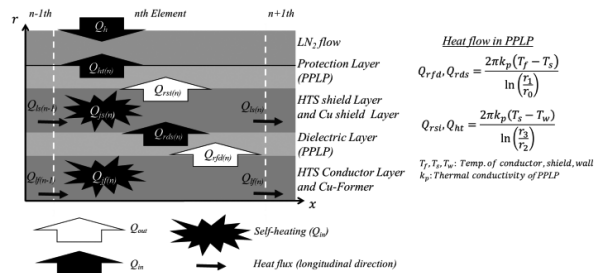


Fig. 1 Model Cable Structure and Heat flow (Longitudinal cross sectional view)

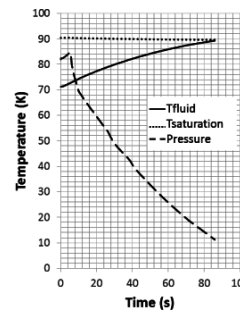


Fig. 2 Calculation Result of Temperature and Pressure at outlet(500kPa)

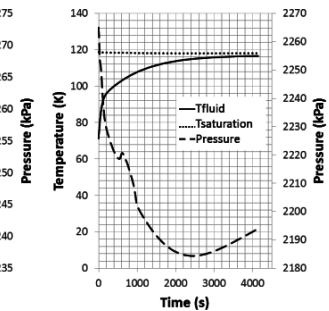


Fig. 3 Calculation Result of Temperature and Pressure at outlet(2500kPa)

謝辞

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

参考文献

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

ポインティングベクトル法を応用した三相同軸高温超伝導ケーブルの交流損失測定 ～銅パイプ製三相同軸模擬ケーブルを用いた測定法の検証～

Measurements of ac losses in HTS tri-axial cables applying Poynting's vector method
-Study of measuring method by using a tri-axial mock cable composed of copper pipes-

五橋 佑斗, 假重 太智, 川越 明史(鹿児島大)

足立 和久, 三堂 信博, 小泉 勉, 長谷川 隆代(昭和電線), 岩熊 成卓(九大)

ISHIBASHI Yuto, KARISHIGE Taichi, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University), ADACHI Kazuhisa, MIDO Nobuhiro, KOIZUMI Tsutomu, HASEGAWA Takayo (SWCC), IWAKUMA Masataka (Kyusyu University)

E-mail:k4116483@kadai.jp

1. はじめに

超伝導ケーブルの実用化のためには、交流損失を定量的に評価することが重要である。低コスト・低損失な三相同軸高温超伝導ケーブルは、各相間が磁氣的に結合しているため、一般的な電氣的測定法で交流損失を測定することが難しいとされている。我々は、三相同軸構造の電力ケーブルの交流損失測定法を、標準化法案としてまとめることを検討している^[1]。まず、ポインティングベクトル法を応用することによって、この三相同軸構造において交流損失測定が可能であることを示す。次に実際のケーブルでも測定可能な手法を検討する計画である。今回は、測定試料として銅パイプ製三相同軸模擬ケーブルを用い、ポインティングベクトル法を応用することによって三相同軸構造ケーブルの交流損失測定を行ったので、その結果について報告する。

2. 測定原理

ポインティングベクトル法では、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルの測定素子対を用いて局所的な電界・磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求め、交流損失を求める^[2]。銅パイプは軸対称な構造となっているため、測定領域で電流が均一であれば、ケーブル周囲の電磁界はケーブル軸に対して対称である。したがって、円周上の1か所のポインティングベクトルを測定すればよい。

3. 銅パイプ製三相同軸模擬ケーブルの損失測定

Fig. 1 に電界用ポテンシャルリードと磁界用ピックアップコイルの配置を示す。測定素子は各相間の中心に配置し、銅パイプに入り込む計4つのポインティングベクトルを測定する。Fig. 1(b)の断面図に示すように、ケーブル軸方向電界と周方向磁界を測定した。軸対象であることから、今回は、電界の測定と磁界の測定場所を周方向にシフトさせている。また径方向座標が同じ場所で電界を測定することによって、ピックアップコイルの個数を減らしている。

測定は、抵抗性のジュール損失と同程度の大きさの渦電流損失を観測するために、5~200Hz の広い周波数範囲で行った。この理由は、超伝導ケーブルの損失が測定可能なことを示すためには、外部磁界による遮蔽電流に起因する損失が発生している条件でも正確に測定できることを示す必要があるからである。通電電流は、対称三相交流電流 10Arms とした。測定はすべて液体窒素中で行った。

Fig. 2 に測定結果を示す。横軸は三相交流電流の周波数を示し、縦軸は電流値の二乗で規格化した損失を示している。図中のプロットは各相の損失値とそれらを足し合わせたケーブル全体の損失値を表しており、有限要素法を用いた数値解析の解析結果を実線で表している。高周波領域で渦電流損失が大きくなっていることがわかる。また、U相の渦電流損失に対して、V相・W相の渦電流損失は大きい。これは、磁界の大きさと体積で決まっている。またV相は、内側と外側の両側から磁界が侵入するために、最も大きな渦電流損失となっている。これらの測定結果は、解析結果とよく一致していることから、三相同軸構造において、ポインティングベクトル法を応用し

た本測定法を用いることで、交流損失測定が可能であることが示された。

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

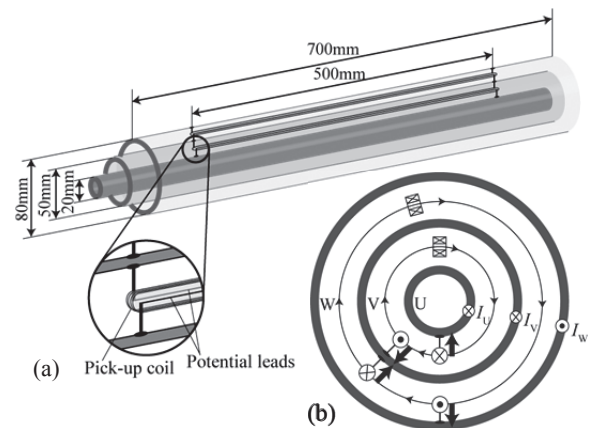


Fig. 1 Measuring system of ac losses in tri-axial mock cable composed of copper pipes. (a) Overview of the system, (b) arrangement of pick-up coils and potential leads.

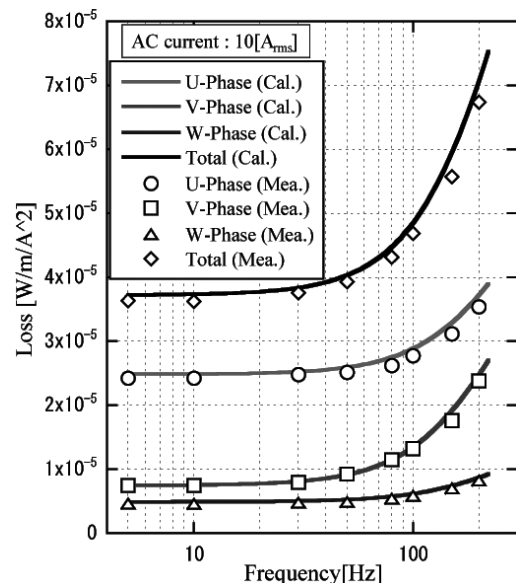


Fig.2 Loss properties of the tri-axial mock cable composed of copper pipes.

参考文献

[1] T. Karishige, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p. 20
[2] F. Sumiyoshi, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.), 35 (2000) p. 575

ITER TF コイル構造物の製作に関する進捗状況 Progress of procurement of ITER TF Coil Structure in Japan

井口 将秀, 櫻井 武尊, 森本 将明, Hong YunSeok, 稲垣 隆, 田中 信彦, 中平 昌隆, 辺見 努,
松井 邦浩, 小泉 徳潔(原子力機構)

IGUCHI Masahide, SAKURAI Takeru, MORIMOTO Masaaki, HONG YunSeok, INAGAKI Takashi, TANAKA Nobuhiko,
NAKAHIRA Masataka, HEMMI Tsutomu, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)
E-mail: iguchi.masahide@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は、ITER 機構との調達取り決めに基づき、ITER TF コイル構造物 19 個(予備 1 機を含む)全ての調達を担当している。TF 構造物の調達は、3 段階に分けて段階的に行われており、これまでに、第 1 段階として、TF コイル構造物の製作技術を検証する中規模及び実規模の試作を実施し、これらの結果を受けて、2012 年 8 月に TF コイル構造物の第 1 号機を製作する第 2 段階の活動を開始した。2014 年 11 月からは、第 2 段階の製造結果を受けて、第 3 段階である第 2 号機以降の製作を部分的に開始した。本稿では、第 2 段階の 1 号機製作結果と第 3 段階の第 2 号機製作着手に至った成果に焦点を当て、TF コイル構造物の調達活動の進捗を報告する。

2. ITER TF コイル構造物製作及び調達計画

ITER TF コイル構造物は高さ 16.5m、幅 9m の大きさで、D 型形状の超伝導巻線部を格納する高窒素添加型オーステナイトステンレス鋼製の主要機器であるサブアセンブリ等で構成される(Fig.1)。サブアセンブリは Fig.1 に示すようにベーシックセグメントを溶接で接合することで製作される。

ベーシックセグメントの製作手順を含めた、アウトボード側サブアセンブリ製作手順の詳細を Fig.2 に示す。サブアセンブリは大きく分けて 5 ステップで製作される。ベーシックセグメントを製作する 3 ステップと、ベーシックセグメント同士を溶接するステップ 4 及び他の機器との取り付け部の寸法精度を達成するために実施される最終機械加工のステップ 5 である。

原子力機構では、溶接変形量を含めた溶接品質を確認するために小規模・実規模試作を実施し、各社の製作方法に合わせて各製作ステップの終了時における寸法管理値を決定した。この製作方法を適用し、製作の第 2 段階である TF コイル構造物第 1 号機の製作を開始した。第 2 号機以降の製作リスクを低減するためには、この 1 号機の製作結果を確認し、適切に製作方法に反映する必要がある。そのため、第 3 段階は第 2 段階の各製作ステップの終了時に、溶接変形を寸法管理値内に制御し、かつ溶接品質に問題がないことを確認した後に開始する事としている。これらの段階を経ることで、製作方法の技術的妥当性を確認する。

3. 実機 B1 ベーシックセグメント溶接変形結果

Figure 3 に実機第 1 号機の B1 ベーシックセグメントの製作ステップ 1 後の溶接変形量と管理値との比較を示す。製作ステップ 1 終了時に許容される溶接変形は、片側の側板上・下端部(Fig. 3 中 A および B)それぞれにおいて、 $\pm 10\text{mm}$ である。Fig.3 から分かるように、B1 ベーシックセグメント実機第 1 号機の製作ステップ 1 終了時の溶接変形量は、許容値内であることから、製作ステップ1までの TF コイル構造物製作方法が妥当であることが確認できた。この結果を以て、第 2 号機以降の B1 ベーシックセグメントの製作を開始した。インボード側のベーシックセグメントも、試作の結果から設定した寸法管理値内であることを確認した後に、第 2 号機以降の製作に着手している。以後、製作ステップ 2 以降も同様に溶接変形に着

目し、管理値内であることを第 1 号機製作で確認した後に、第 2 号機以降の製作を開始していく計画である。

4. まとめ

原子力機構では、試作試験結果から決定した TF コイル構造物の製作方法の技術的妥当性を第 1 号機で最終確認した後に、第 2 号機以降の製作を開始し、着実に実機 TF コイル構造物の製作を進めている。

謝辞

TF コイル構造物の調達活動にご協力頂いている現代重工(株)、イーエナジー(株)、三菱重工(株)、(株)東芝、並びに関連会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

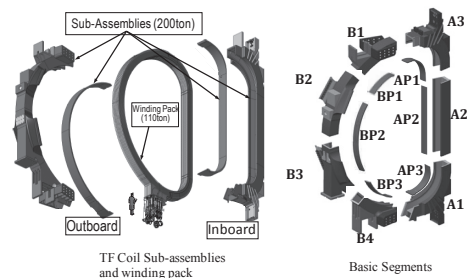


Fig. 1 Configuration of ITER TF Coil Structure

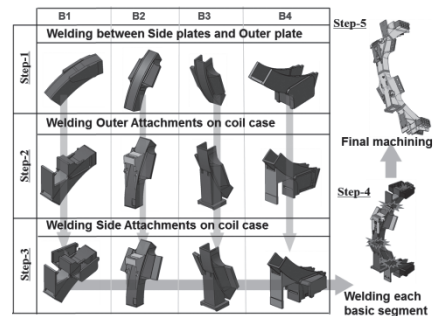


Fig. 2 Manufacturing Steps of Sub-Assembly of TFC Structure

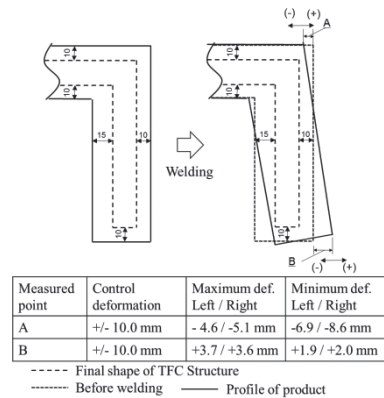


Fig. 3 Welding deformation of 1st actual B1 basic segment (after Step-1 in Fig. 2)

ITER TF コイル構造物 実機材料の極低温引張特性評価

Cryogenic tensile properties assessment of actual materials for ITER TF Coil Structure

櫻井 武尊, 井口 将秀, 齋藤 徹, 中平 昌隆 (原子力機構)

SAKURAI Takeru, IGUCHI Masahide, SAITO Toru, NAKAHIRA Masataka (JAEA)

E-mail: sakurai.takeru@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コイル (TF コイル) と 19 個の TF コイル構造物の調達を担当している (予備 1 個を含む)。TF コイル構造物は、D 型形状の超伝導巻線を格納する高さ 16.5m、幅 9m の超大型で複雑な構造物本体と、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。Figure.1(a) に示すように TF コイル構造物は、サブアセンブリと呼ばれる AU、AP、BU 及び BP に分けられる。これらは、Fig.1(b) に示すベーシック・セグメントと呼ばれる単位で各材料を溶接・機械加工することによって製作される。

TF コイル構造物の各材料には、ITER 運転時の TF コイル構造物に発生する応力分布に応じ、液体ヘリウム温度 (-296 °C: 4K) における要求降伏応力 (YS) が設定されている。これらは C1:YS \geq 1000MPa, C2:YS \geq 900MPa, C3:YS \geq 700MPa, C4:YS \geq 500MPa の 4 つのクラスに分類され、各部位に割り当てられており、原子力機構が品質検証試験を実施した、オーステナイト系ステンレス鋼が使用される。原子力機構では、4K におけるオーステナイト系ステンレス鋼の引張特性を予測する関係式を開発し [1]、この考え方を基にした品質保証を実施しているが、これに加えて、実機 TF コイル構造物材料の品質確認と極低温における引張特性把握のため、実機鍛造材及び熱間圧延材に 4K 引張試験を実施した。

2. 供試材及び試験条件

原子力機構では、製造が完了した全ての鍛造材及び熱間圧延材の Top 側、幅方向中心、板厚方向 1/2t 及び 1/4t から引張試験片を採取し、必要に応じ 4K における引張試験を実施できるように管理している。TF コイル構造物の代表的かつ重要な材料の引張特性を把握するため、Table.1 に示す材料を供試材とした。なお、圧延材料は製品板厚による引張特性への影響を把握するため、板厚が 25mm から 100mm までのものを供試材とした。

試験片は、全長 105mm、平行部 42mm、直径 7mm の丸棒試験片とし、引張試験は JIS Z 2277 に従い実施した。ひずみが 0.2% までは試験速度を 0.2mm/min とし、以降は試験速度を 2mm/min とし試験片を最終破断させた。

3. 試験結果

試験結果を Table.1 に示す。A2 Outer Plate は降伏応力 (0.2% 耐力) の平均値が 1052MPa、引張強さの平均値が 1534MPa であった。また、降伏応力は 1/4t の方が 1/2t よりも 4% 程高いという結果であった。A1 Side Plate は降伏応力の平均値が 1058MPa、引張強さの平均値が 1646MPa であった。B3 Wing は降伏応力の平均値が 1064MPa、引張強さの平均値が 1629MPa であった。B4 Side Plate は降伏応力の平均値が 1069MPa、引張強さの平均値が 1653MPa であった。A2 Outer Plate 以外の鍛造材は、採取位置による引張特性の差がほとんど無かった。

熱間圧延材は降伏応力の平均値が 1100MPa、引張強さの平均値が 1595MPa であった。製品板厚 25mm から 100mm の 1/2 部における引張特性を Fig.2 に示す。また、同じ圧延板から 1/2t 部と 1/4t 部をそれぞれ採取し、引張特性を比較した。その結果、製品板厚に依らず 1/2t 部の引張特性は概ね一定であった。板厚方向の採取位置による降伏応力の変化はあま

り無かった。しかし、引張強さは 1/2t 部では変化が小さかったことに対し、1/4t 部では板厚が厚くなるほど若干減少する傾向があった。

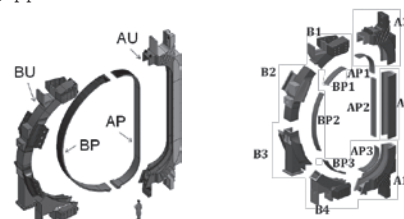
供試材全ての平均値は、降伏応力で 1072MPa、引張強さで 1604MPa であった。標準偏差は、降伏応力で 35MPa、引張強さで 49MPa であり、変動係数はそれぞれ、3.3% と 3.1% であった。要求降伏応力や板厚、製造方法が異なっているにも関わらず、ばらつきは小さいと考えられ、要求品質が着実に保たれていると言える。

4. まとめ

全ての供試材で、要求されている降伏応力を十分に満たしていた。特に C2 材は、鍛造材と熱間圧延材のいずれも、C1 材と同等の引張特性を有していた。現在、TF コイル構造物 19 機分の材料の内、9 機分が製造完了しており、残りの 10 機分の材料を製造中である。

参考文献

1. H.Nakajima et al. ASME 2009 PVP Conference, Czech, (2009) pp. 789-797



(a) Sub-assembly (b) Basic segments
Fig.1 Over view of TF coil structure

Table.1 Result of measured tensile properties of materials for TF coil structure

Material name	Number of specimens	Requirement of Yield strength [MPa]	Average of the measured value	
			Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]
A2 Outer Plate	16	1000	1052	1534
A1 Side Plate	8	900	1058	1646
B3 Wing	10	900	1064	1629
B4 Side Plate	14	900	1069	1653
Hot Rolled Plate (Thick. 25-100mm)	20	900	1100	1595

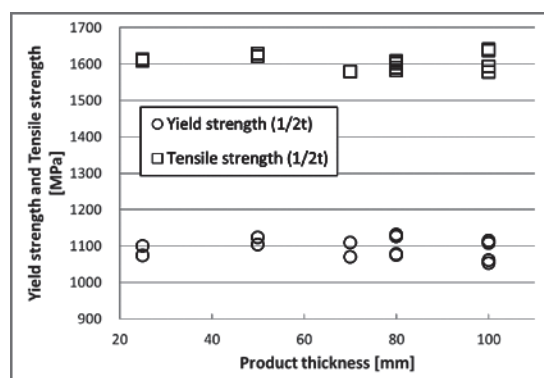


Fig.2 Relationship between product thickness and tensile properties of hot rolled plates

JT-60SA 用超伝導マグネット用極低温設備の製作と据付

Manufacturing and installation status of cryogenic system and equipments for the superconducting magnet components for the JT-60SA

吉田 清, 夏目 恭平, 木津 要, 土屋 勝彦, 村上 陽之, 小出 芳彦 (原子力機構)

YOSHIDA Kiyoshi, NATSUME Kyohei, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, MURAKAMI Haruyuki, KOIDE Yoshihiko (JAEA)
E-mail: yoshida.kiyoshi56@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER のサテライトトカマクとして、プラズマ実験装置 JT-60SA 装置の機器を日欧共同で製作している。JT-60SA のトロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイルは、全て超伝導マグネットで構成されている。超伝導マグネットを極低温に維持するためには、ヘリウム冷凍機、超伝導電流リード、サーマルシールドなどの極低温設備が必要である。それらの機器の製作状況を紹介します。

2. ヘリウム冷凍機

超伝導マグネットを極低温に維持するヘリウム冷凍機(約 9kW@4.5K)は、CEA グルノーブル研究所が設計製作を担当している。日本側は、冷凍機用に既存建家を改造し、圧縮機用に圧縮機棟を新築し、バッファータンク用に野外の基礎を製作し、その他の電気機械設備を準備した。冷凍機の配置は、Fig.1に示すように、既存設備と調和して配置するため、冷凍機を本体室の隣に配置し、圧縮機などは近接する空き地に設置し、その間を常温配管で接続した。

冷凍機機器は、フランスの工場などで部品製作と動作試験などの試験検査を実施して日本に輸出された。また、日本側の担当である圧縮機棟の新築と冷凍機室の改造、タンク基礎の建築設備工事も完了して、2015年4月から那珂研究所で据付工事を開始した。

3. 給電機器

超伝導コイルに電流を供給する給電設備は、高温超伝導電流 (HTS) リードはドイツが製作し、そのリードを収納するコイル端子箱と超伝導フィーダーは日本が製作する。日本が担当する超電導給電設備として、超伝導コイルに電流を供給するためのコイル端子箱(CTB)とクライオスタット内の超伝導フィーダー、さらに、超伝導コイルにヘリウムを分配するバルブ箱 (VB) の製作を開始した。更に、極低温温度計やオリフィス流量計と、クエンチ検出器の製作を開始した。

CTB 内に設置する 26 本の HTS 電流リード (Fig. 2) は、ドイツの KIT 研究所が設計製作および動作試験を担当した。超伝導材料は Bi2223 を採用し、50K のヘリウムで銅材の電流リードを冷却する。KIT では TF コイル用電流リードの製作が完了して、日本から送ったジャンパー導体と組み合わせて試験装置に組み込まれて、25.7kA まで通電して仕様を満足する事が確認されて、2 本の電流リードが日本に届いた。今後は、HTS 電流リードを CTB への組込を開始する。

4. サーマルシールド

室温の真空容器とクライオスタットから超伝導マグネットへの放射熱を低減するサーマルシールド (TS) は、日本が設計製作を担当する。サーマルシールド (Fig. 3) は、真空容器側はステンレス板 (放射率 0.15) を 2 枚重ねた間に冷却配管を配置した単純真空断熱構造である。クライオスタット側は、空間に余裕があるため、真空多層断熱材 (MLI) を設置して 80K の熱負荷を低減している。日本が担当する TS は、実機の下ポート側 TS から製作を開始した。現在、寸法測定や仮組立の手順を確認している。真空容器側 TS は、真空容器を覆うように組立を行う。

5. まとめ

JT-60SA 用超伝導マグネット用極低温設備の製作は順調に進捗し、ヘリウム冷凍機は据付工事が開始され、電流リードも日本に搬入されて、CTB への組込調整が開始された。サーマルシールドは秋からの真空容器への組立の工程に合わせて部品製作を進めている。

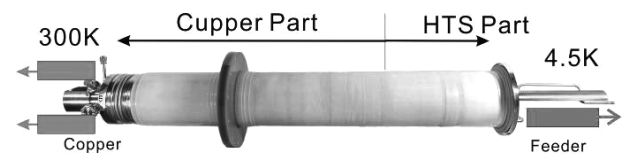


Fig. 2 High temperature superconducting current leads for JT-60SA

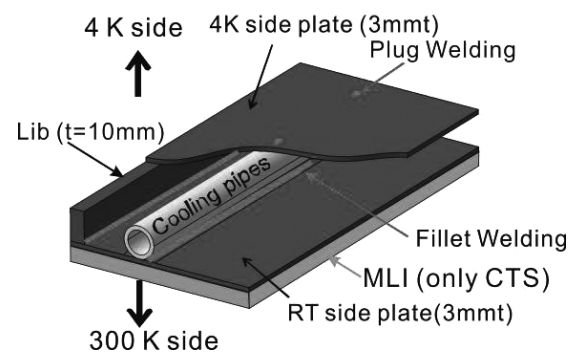


Fig. 3 Thermal Shield for JT-60SA

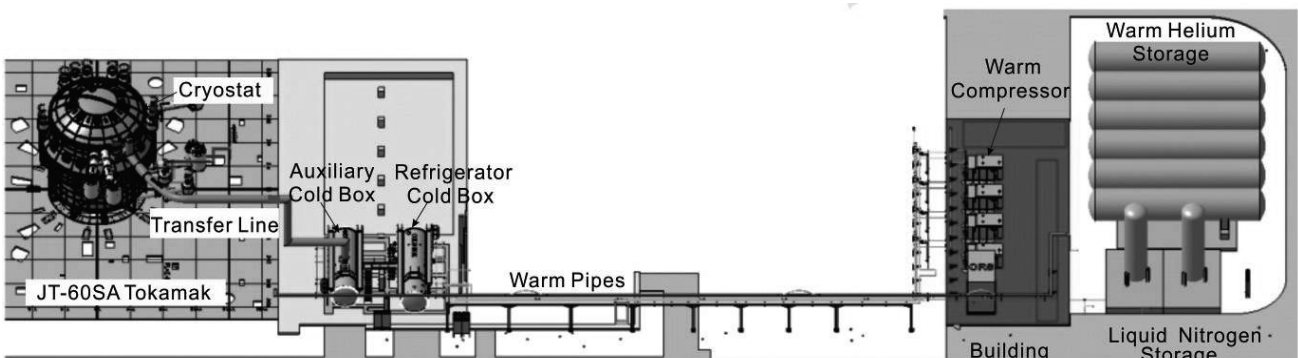


Fig. 1 Layout of Cryogenic System for JT-60SA

LHD ポロイダルコイルの長期信頼性～17年間の圧力損失の変化

Change in pressure drop characteristics of LHD poloidal coils over a seventeen-year period

高畑 一也, 森内貞智, 大場恒揮, 鷹見重幸, 三戸 利行, 今川信作 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, MORIUCHI Sadatomo, Ooba Kouki, TAKAMI Shigeyuki, MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)
E-mail: takahata@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)のポロイダルコイルは、サブチャンネルを持たないケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を使用した強制冷却型コイルである。3対、6個のコイルから構成され、径の小さなものをIV, IS, OVコイルと呼んでいる。また上下コイルは-U, -Lを付記して区別する。CIC導体を採用するに当たって懸念されたことは、外部からの異物の混入による冷媒流路の閉塞である。異物には、金属粉、圧縮機からの油分・水分、ヘリウムガス中の不純物ガスの固化体などが考えられる。運転開始から17年間の冷媒圧力損失の観測を通して、CIC導体の長期信頼性について議論する。

2. 圧力損失の評価

LHDは、1年のうち3～5ヶ月間を1つのプラズマ実験サイクルとして運転を行っている。運転開始から17年間で18回(初年度は2回)の実験サイクルを経験した。実験期間中は、各コイルに約60 g/sの超臨界圧ヘリウムが流れる。まず、観測された圧力損失およびコイル流量から管摩擦係数を評価した。管摩擦係数 λ は次式で定義する。

$$\Delta P = \lambda(L/D_h)(\rho V^2/2) \quad (1)$$

ここで ΔP はコイル入口・出口の圧力差(圧力損失)、 L は流路長、 D_h は水力学的直径、 ρ は冷媒の密度(圧力、温度は入口、出口の平均)、 V は平均流速である。管摩擦係数はレイノルズ数に依存するが、実際のレイノルズ数は2,000から3,000までバラツキがある。そこで、経験式を用いてレイノルズ数が3,000のときの管摩擦係数を外挿によって求め、同条件での変化を調べた。使用した経験式は、Kathederの経験式[1]を変形したものであり、次のように表される。

$$\lambda = v^{-0.72}(\alpha + 19.5/Re^\beta) \quad (2)$$

ここで v はボイド率、 Re はレイノルズ数である。 β は定数でコイル毎に一定の値を使う。 α はデータ毎の変数である。

3. 管摩擦係数の長期観測

図1に、この17年間の実験期間中の平均管摩擦係数を示す。第15サイクルを除いて、全体的に緩やかな減少傾向が観測された。また4個のコイルについては、管摩擦係数が約0.088で飽和しているように見える。この17年間で、運転に影響を及ぼすような冷媒閉塞は起こらず、CIC導体の水力学的な長期信頼性が実証された。

第15サイクルの一時的な管摩擦係数の増加は、この実験期間前に循環圧縮機の油を初めて交換したことが原因であると推測している。新品の油から発生した不純物が固化し、コイル入口の冷媒導入孔に溜まり、部分的な閉塞が生じた可能性がある。コイルへの不純物混入の指標となるのが、入口メッシュフィルターの閉塞である。実際、第15サイクルの初期冷却においてメッシュフィルターの閉塞現象が観測されていることから、循環ヘリウム中に不純物が多かったことを示唆している。冷却システム全体の不純物管理[2]の重要性が再認識された。

4. 長期的な管摩擦係数の減少傾向についての考察

図2に、実験期間中(第9サイクルまで)の管摩擦係数の変化を、IV-Uコイルについて示した。まず、期間内に緩やか

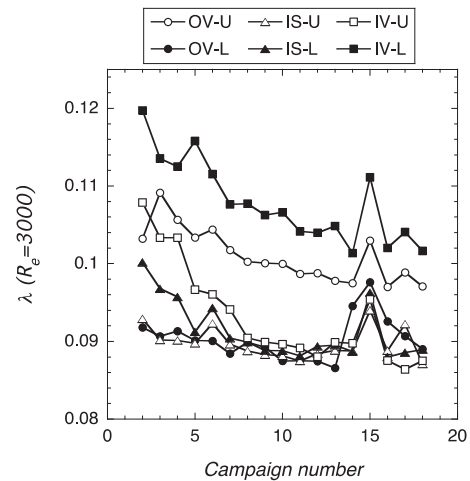


Fig. 1 Long-term changes in friction factors for six coils

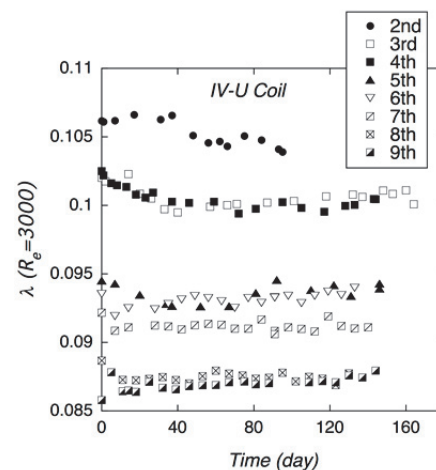


Fig. 2 Changes in friction factors during the experimental periods.

な減少傾向が見られた。これは電磁力によるコンジット内の素線の動きが関係していると推測される。一方で、例えば第4サイクル終了から第5サイクル開始の間のように、期間を跨いでの不連続的な減少も観測された。当初、ヘリウム中の不純物が減少したからと考えていたが、図1から分かるように、他の全てのコイルについて同様の変化が見られるわけではない。不純物の影響であれば、第15サイクルのように全てのコイルが同期して変化すると予想される。従って、冷却・加温といった温度変化が管摩擦係数に影響を与えるような機構を別に考える必要がある。いずれにしても、この長期的な減少傾向はコイルの特性が改善されていく方向であり、問題とはならない。今後も観測を続け、長期信頼性を確認する予定である。

参考文献

- [1] H. Katheder: Cryogenics, Vol.34 (1994) p.595
[2] 森内貞智: 冷凍, Vol.85, No.989 (2010) p.207

100 kA 級高温超伝導 STARS 導体を用いた ヘリカル型核融合炉マグネット設計の進展

Progress of Magnet Design for the Helical Fusion Reactor with 100-kA HTS STARS Conductor

柳 長門 (NIFS), 伊藤 悟 (東北大), 寺崎義朗 (総研大), 濱口真司, 田村 仁, 三戸利行,
相良明男 (NIFS), 橋爪秀利 (東北大)

YANAGI Nagato (NIFS), ITO Satoshi (Tohoku Univ.), TERAZAKI Yoshiro (Sokendai),
HAMAGUCHI Shinji, TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio (NIFS), HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所 (NIFS) で概念設計を進めているヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 の超伝導マグネットシステムは磁気エネルギーが 160 GJ に及び、3 次元形状をしたヘリカルコイル (大半径 15.6 m) には最大磁場 12 T において 100 kA 級の導体が要求される[1,2]。候補のひとつとして高温超伝導 (HTS) 導体を検討している。HTS 導体は冷却安定性が高くエンチの心配を軽減できるとともに、巨大なヘリカルコイルを短尺導体の接続によって製作できる利点がある[1-4]。コイル設計と並行して NIFS と東北大学・量子エネルギー工学専攻との共同研究により、導体サンプルの試作と試験も行っている[2, 3]。

2. FFHR-d1 ヘリカルコイルの HTS 導体オプション

Fig.1 に FFHR-d1 のヘリカルコイルに適用することを想定している HTS 導体の断面構成を示す。YBCO 線材を単純に積層した STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体であり、線材を銅ジャケットとステンレスジャケットの中に収めることで機械的に極めて強固にできることが特長である。銅ジャケットとステンレスジャケットの間に電気絶縁を設け、ステンレスジャケットの外側は隣接する導体と溶接で連結し、ガスヘリウムで冷却する[3]。この導体をヘリカル1ピッチ分 (~30 m) ずつ順次接続することで巻線を行う構想である (Fig.2)。以前の設計では、半ピッチ (~15 m) ごとの接続としていたが、今回、詳細解析によって1ピッチでも接続できることが判明した。これにより、接続部によるジュール発熱が半分になるとともに、現地製作の工期も半分に抑えられると期待できる。

3. HTS 導体サンプル試験

100 kA 級の試作導体では、フジクラ製 GdBCO 線材 (幅 10 mm、臨界電流 ~600 A@77 K, s.f.) を 54 枚積層して銅ジャケットに収め、ステンレスジャケットをボルト締めで覆い、FRP による断熱のもとヒータを用いて温度制御を行った。試験サンプルはレーストラック形状で、直線部の片側に東北大学で開発された機械的ブリッジジョイントを入れて1ターンループを形成し、外部磁場を変化させることで電流を誘起した。温度 20 K、磁場 5.3 T において電流 100 kA を達成し、温度 4.2 K では電流 100 kA を1時間保持することに成功した (Fig. 3)。また、1 kA/s の高速励磁においても早期クエンチを起こすことなく臨界電流まで到達可能であることを確かめ、数値解析により、線材各部の磁場分布 (強度と印加角度) に応じて電流分布が決まっていることを確認した[3]。

一方、接続部の機械特性を調べるため線材単線の引張試験を東北大学で行った結果、接続作業時に十分な応力をかければ FFHR-d1 のヘリカルコイルで予想されるせん断応力に耐えられることがわかった[4]。今後の課題として、10 kA 級縮小導体の接続部の機械試験を国際共同研究で実施することを計画している。また、導体の交流損失についても詳細解析を行う計画である。さらに、NIFS で現在整備中の大口径高磁場導体試験装置 (最大磁場 13 T、ボア径 700 mm、温度可変 4.2-50 K) を用いたサンプル試験を行うことも検討している。

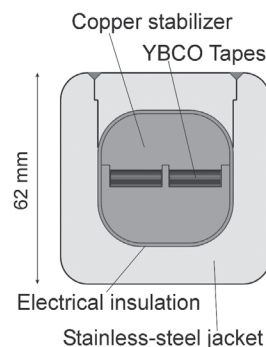


Fig. 1 Cross-sectional image of the 100kA-class HTS conductor designed for the FFHR-d1 helical coils.

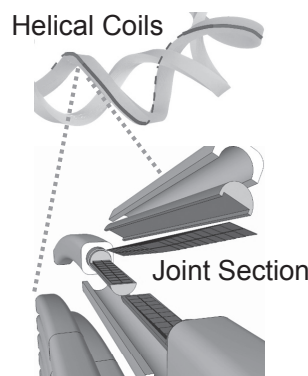


Fig. 2 Schematic illustration of "joint-winding" to be applied to the FFHR-d1 helical coils with one helical-pitch unit length.

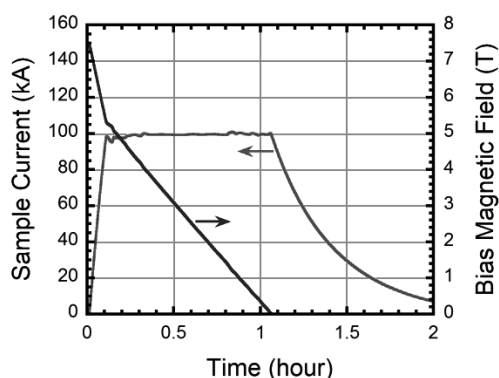


Fig. 3 Waveforms of the sample current and bias magnetic field with 100-kA current stable sustainment (temperature 4.2 K).

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **89** (2014) 2114.
- [2] N. Yanagi et al.: Nucl. Fusion **55** (2015) 053021.
- [3] Y. Terazaki et al.: IEEE Trans. Appl SC. **25** (2014) 4602905.
- [4] S. Ito et al.: IEEE Trans. Appl SC. **25** (2014) 4201205.

ヘリカル型核融合炉への適用をめざした 100 kA 級高温超伝導 STARS 導体の臨界電流解析

Critical current analysis of 100 kA-class HTS STARS conductors for the LHD-type helical fusion reactor

寺崎 義朗 (総研大); 柳 長門、濱口 真司、田村 仁、三戸 利行、相良 明男 (NIFS); 伊藤 悟、橋爪 秀利 (東北大)

TERAZAKI Yoshiro (Sokendai); YANAGI Nagato, HAMAGUCHI Shinji, TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio (NIFS); ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: terazaki@nifs.ac.jp

1. 目的

核融合科学研究所で設計活動が進められているヘリカル型核融合炉 FFHR-d1[1]のヘリカルコイルには 100 kA 級の導体が必要とされており、著者らはそれに適した高温超伝導 (HTS) 導体の開発研究を行っている。現在提案中の STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体は、HTS による高い冷却安定性を持つことに加え、HTS 線材を単純積層することによる高い機械特性と製作性を持つことが特徴である。ただしこの導体は線材間のインダクタンス差から不均一な電流分布を生じ易いと考えられるため、導体本来の臨界電流値より低い電流値でクエンチ (早期クエンチ) する Ramp Rate Limitation (RRL) の不安定性が起きる可能性が懸念される。著者らはこれまでに 30 kA 級導体[2]、100 kA 級導体[3]を試作 (全長約 3 m) して通電試験を行い、1 kA/s の高速励磁においても RRL が生じないことを確認している。今回、STARS 導体の臨界電流解析コードの構築を行うことでその検証を行った。

2. 臨界電流数値解析

以下のようなモデルを立てて臨界電流解析を行った。まず、導体の断面をいくつかの要素に分割する。その要素の電流値から計算した要素の磁場強度とその印加角度から要素の臨界電流値を評価し、要素電流がその臨界電流より小さい要素では電流値を増加させて磁場計算を再度行う。これを繰り返し行い、最終的にすべての要素で電流値が臨界電流値に到達したときの電流の総和を導体の臨界電流値とした。

以前に作成したコードを用いて評価した 30 kA 級導体の臨界電流値は低磁場領域では実験値と比較的よく一致したものの、高磁場領域では実験値よりかなり小さくなるという結果が得られていた。これは解析で用いた線材の臨界電流特性が文献から引用したものであったために、実験で用いた線材の特性と大きく異なっていたためであると考えられた。そこで今回、実際の線材データを基に評価する新たな臨界電流特性評価方法を導入した。この方法は F. Grilli らによって提案されたもので、以下がその評価式である[4]。

$$J_C(B_{\parallel}, B_{\perp}) = \frac{J_{C0}}{\left(1 + \sqrt{(kB_{\parallel})^2 + B_{\perp}^2}/B_C}\right)^b}$$

ここで、 B_{\parallel} 、 B_{\perp} はそれぞれ線材面に平行な磁場成分と垂直な磁場成分、 J_{C0} 、 B_C 、 b 、 k はパラメータである。このモデルを導入して解析を行った結果、30 kA 級導体では解析値と実験値が 5~15%以内で一致した (Fig. 1)。

Fig. 2 (a) に 100 kA 級導体の断面図を示す。積層した GdBCO 線材 54 枚を銅ジャケット、ステンレスジャケット、FRP ジャケットで囲った構造をしている。また、温

度計やヒータはステンレスジャケット上に取り付けている。Fig. 2 (b) に示すように、測定された温度 45 K における臨界電流値は 30 K と 40 K の解析結果の間にあることがわかった。これは導体の温度を調節する際、ヒータの不具合により導体の片側からしか加熱できなかったため、線材部の実際の温度が温度計の示す温度より小さかったためと考えられる。ANSYS を用いて温度解析を行ったところ、温度計が示した温度 45 K に対し、線材の温度は約 38 K と評価できた。これにより、臨界電流解析コードの妥当性を示すと同時に、30 kA 級導体、100 kA 級導体が早期クエンチを起こしていないことを示すことができた。

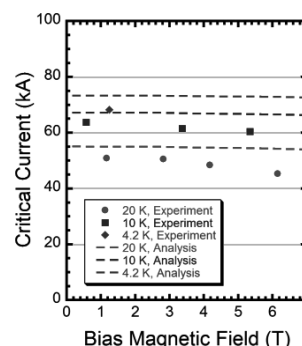


Fig. 1 Critical current of a 30 kA-class HTS STARS conductor sample as a function of the bias magnetic field.

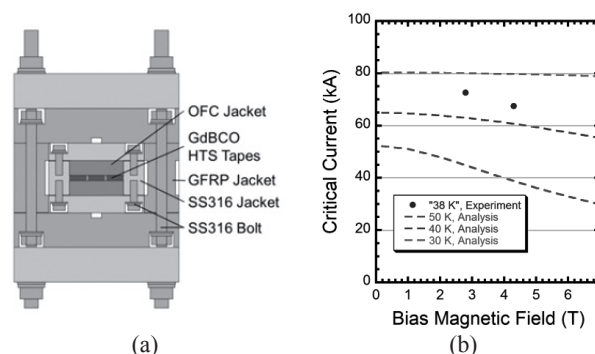


Fig. 2 (a) Cross-sectional illustration and (b) critical current of a 100 kA-class HTS STARS conductor.

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fus. Eng. Des., **89** (2014) 2114
- [2] Y. Terazaki et al., IEEE Trans. Appl. SC., **24** (2013) 4801305
- [3] Y. Terazaki et al., IEEE Trans. Appl. SC., **25** (2014) 4602905
- [4] F. Grilli et al., IEEE Trans. Appl. SC., **24** (2014) 8000508

超伝導重イオン加速器 (FRIB) 超伝導収束ソレノイドの開発 Superconducting Solenoid Magnets for FRIB SRF Linac

細山謙二、小島裕二、原和文、赤井和憲 (高エネ研); 高橋猛、堀田一磨 (堀田電機); 斎藤健治、山崎良成、E. Burkhart (FRIB)
 HOSOYAM Kenji, KOJIMA Yuuji, HARA Kazufumi, AKAI Kazunori(KEK); TAKAHASHI Takeshi, HOTTA Kazuma(Hotta Denki);
 SAITO Kenji, YAMAZAKI Yoshishige, BURKHART Earle(MSU, FRIB)
 E-mail: kenji hosoyama@kek.jp

1. はじめに

米国ミシガン大学、Facility for Rare Isotope Beam (FRIB)で建設計画が進められている超伝導重イオン線型加速器 FRIB では、大電流イオンビームの収束と補正用に、NbTi 製の8Tの高磁場ソレノイドコイルと、X,Y 方向の軌道補正用の2対のダイポールコイルをコンパクトに組み込んだ “Solenoid Package” が加速器全体で約 70 台が必要となる。その製作技術の確立をするために、KEK はミシガン大学と共同で Solenoid Package 試作機的设计・製作及び冷却・励磁試験を KEK で実施して、所定の性能が得られることを確認した。

2. 超伝導ソレノイドコイル

FRIB 超伝導ソレノイドコイルの主要な性能仕様は、有効内径 4cm、中心磁場 8T、コイル長 250mm、励磁電流 100A 以下である。このソレノイドコイルは、我々が KEK で開発し、これまで13年間、冷凍部会が主催する夏合宿実習で数多く製作した「7T のソレノイドコイル」とほぼ同じ断面寸法をしており、これを通じて蓄積された設計・巻線技術や既設の冷却・励磁の設備などが有効に活用できることから共同研究が始められ、コイルの巻線、組立、冷却試験は KEK で実施された。

コイル構造は 7T ソレノイドと全く同じ内径 54mm、外径は 22mm 大きい 130mm、長さは約 2.5 倍の 250mm で、磁場強度を 8T 以上にするために、内コイルと外コイル、2層構造で、高磁場 (8T) を受ける内コイルには、高い I_c 値の銅比が 1.3、直径 0.75mm (古河)、低磁場 (5.5T) の外コイルは、巻線の密度を上げるため銅比 2.4、直径 0.65mm (日立) の NbTi 線材が使用される。(図1参照) コイルの巻線は接着材を使用しない、所謂 “Dry Winding” が採用され、内コイルは SUS316 製のポピンに、外コイルは内コイルの上に、それぞれ 4kg、3kg の張力で、6793、12069 ターン巻かれている。製作されたコイルの自己インダクタンスは 8H である。

3. 補正用超伝導ダイポールコイル

補正ダイポールコイルの仕様は中心磁場 0.12T、励磁電流 50A で、141mm 間隔で平行に配置された上下2つのレーストラック形状 (内径 96mm x 250mm) の断面形状 (12.1mm x 13.2mm) のコイルから構成され、各コイルは SUS316 製の巻枠に、銅比が 2.0、直径 0.5mm (古河) の線材が 559 ターン “Dry Winding” により密巻されている。

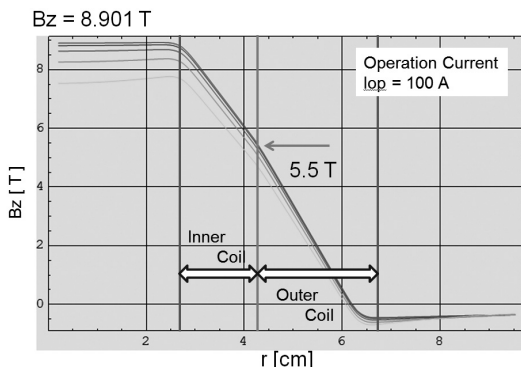


Fig. 1 Magnetic Field Bz Profiles

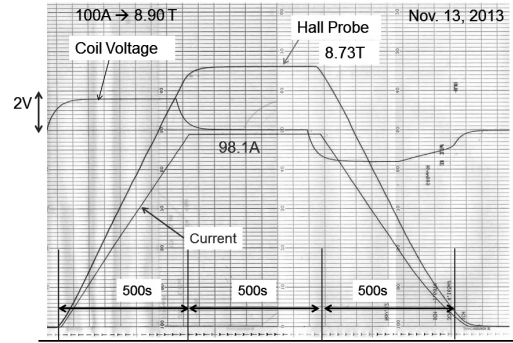


Fig. 2 Pattern Operation 8T 25cm Solenoid Coil

4. 超伝導ソレノイドコイルの冷却・励磁試験

ソレノイドの中心には磁場測定用の Hall 素子が取り付けられ、クエンチの保護用に内、外各コイルには並列に 0.16W (at 4.2K) の保護抵抗が取り付けられた。液体窒素による予冷後、内径 200mm の縦型クライオスタットに取り付けられ、液体ヘリウムで冷却され、励磁試験が行われた。

コイルの励磁はインバータ制御の直流電源 (160A x 6V) が使用され、励磁電流、コイル両端電圧、ホール電圧をペンレコーダーで測定、記録した。

最初の励磁試験は手動でのゆっくりした電流増加中に、99.5A (中心磁場 8.9T) で最初のクエンチが起こった。この値は内コイルに使用された超伝導線材の臨界電流 I_c に対応する。その後、図2で示す、パターン電流による励磁試験を2回行い、クエンチが起こらないことを確認した。

熱サイクルによる健全性の評価のため、液体窒素での12回の冷却、昇温試験を行い、その後、励磁試験で図2のパターン電流試験でクエンチしないことが確認された。

5. 超伝導ソレノイドコイル+補正コイルの総合冷却励磁試験

X,Y 補正コイルは図3で示すようにソレノイドコイルの外側に精度良く取り付けられ、内径 400mm の縦型クライオスタットで冷却・励磁試験が行われた。各補正コイルは単独及び、同時励磁試験で定格の約2倍の中心磁場 0.24T までクエンチなしで励磁可能であることが確認された。また、3コイル同時運転である総合励磁試験では、ソレノイドを 95A に励磁した状態で補正コイル2台同時に 0.22T まで励磁することが確認された。

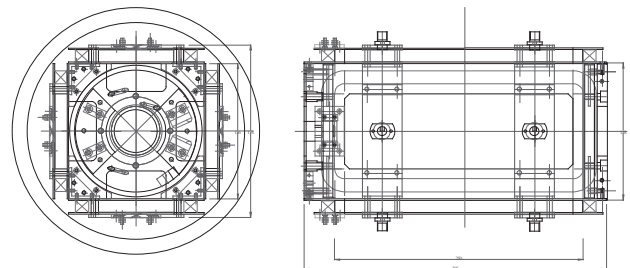


Figure 3 Solenoid Package (Solenoid Coil + X,Y Dipole Coils)

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(5)-200mm ショートモデルの開発

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (5) – Development of 200 mm long mechanical short model

榎本瞬, 中本建志, 菅野未知央, 川又弘史, 岡田竜太郎, 岡田尚起, 東憲男, 荻津透, 佐々木憲一, 木村誠宏, 池本由希子 (KEK), MussoAndrea(CERN), 徐慶金(IHEP), EzioTodesco(CERN)

ENOMOTO Shun, NAKAMOTO Tatsushi, SUGANO Michinaka, KAWAMATA Hiroshi, OKADA Ryutaro, OKADA Naoki, HIGASHI Norio, OGITSU Toru, SASAKI Kenichi, KIMURA Nobuhiro, IKEMOTO Yukiko(KEK), MUSSO Andrea(CERN), XU Qing jin (IHEP) and Ezio Todesco(CERN)
E-mail : enoshun@post.kek.jp

1. はじめに

欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器では高輝度化アップグレードを計画している。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では粒子衝突点近くの超伝導双極磁石 (D1) の開発を行っている。磁石は口径 150 mm, 全長 7 m となり、超伝導コイルには NbTi 超伝導線を用い、磁場は 12 kA, 1.9 K で 5.6 T, 積分磁場長 35 Tm を公称値としている。

現在 KEK では、磁石の機械構造設計の検証や製造工程の確認のために磁石の直線部断面形状を模擬する 200 mm 長のショートモデル磁石の開発を行っている。大まかな工程について以下に示す。

- (1) コイル巻線
- (2) キュアリング
- (3) コイルサイズ測定
- (4) コイル直線部の切り出し
- (5) カラーリングプレス
- (6) ヨーキングプレス
- (7) シェルの組立て

このうち、(1)-(3)の結果については「2m 長テストコイル開発」として報告[1]を確認されたい。今回は(4)-(6)について主に報告を行う。

2. D1 磁石の機械構造

D1 磁石の断面について図 1 に示す。内側から超伝導コイル、非磁性鋼カラー、鉄ヨークの順に配置されている。超伝導コイルは鉄ヨークを基準にしてカラーによって精密に位置決めされる。電磁力を含む機械構造的な指示は鉄ヨークが担う設計になっている。

超伝導双極磁石では一般的に上下ペアのカラーを用いるが、D1 磁石ではカラー周長に対して幅が細いため、精密打ち抜き時の反り等が懸念された。このため、図 1 に示すように円周を 4 つのカラーで分割することになった。それぞれのカラーは油圧プレスで押され、先端の長孔にロックピンを挿入する事でコイルとの仮組立が行われる。

カラー仮組後のコイルは最終寸法よりも大きい状態だが、上下ペアのヨークが油圧プレスで押されることで、カラーコイルもヨーク内周に押し込まれ、コイルに必要な周方向予備応力 (約 90 MPa) が与えられる。ヨークの左右に挿入されるロックキーにより、プレス後も圧縮応力が保たれる設計になっている。なお、ヨークカラー間の三角ノッチ形状とカラーコイル間のキーストーン形状により、コイルは厳密に位置決めされる。

カラーリング、ヨーキングではビーム軸に対して垂直方向のふるまい、特に構造上弱い直線部を確認することが重要である。ショートモデルを制作することはこれらの工程を検証するための重要な役割を担う。

3. 200 mm ショートモデルの製作

ショートモデル用のコイルには、2m 長テストコイルの直線部から 250 mm を 2 か所切り出して上下に重ねたものを用い、双極磁石と同様のコイル断面を形成する。コイルの切り出す箇所は事前に行われたコイルサイズ測定の結果から判断をした。コイルの重ね方は組立時の周方向コイル面圧が最も高くなる場合を模擬して、コイルの大きい部分が重なるように設置した。

コイルとカラーの間には、対地およびコイル間絶縁用ポリイミドシート、コイル保護用黄銅製シューを挟んでいる。絶縁シートはピンホールの可能性を考慮して 4 層構造となっており、また十分な沿面距離を保ちつつ、シートの端が重ならない設計になっている。黄銅製シューは、コイルや絶縁シートを積層された金属製カラーから保護するために用いられる。絶縁シートやシューは組立時に相応の荷重を受けるため、損傷や、変形が生じやすい部分であるが、組立分解後の目視検査により、問題ないことを確認した。

今回のショートモデルには、経済性や迅速性を優先されるため、レーザーカッティングで製作したカラーとヨークを用いた。実際の磁石で使用される精密金型打ち抜きで製作されたカラー、ヨークと比較して、寸法精度では劣るものの、ショートモデル開発の目的には影響しないと判断した。カラー用素材は、実際の磁石と同様に、非磁性ステンレス鋼 (NSSC130S) を使用した。カラースタックは 2 種類のカラーを交互に積層した構造になっており、200 mm ショートモデルでは各 74 枚用いている。カラーリング後の外径寸法は想定値に対して 0.1 mm 以下で一致していることが確認できた。

ヨーク用素材は、純鉄を用いる実際の磁石とは異なり、入手性から SS400 を用いた。2 種類のヨークを各 40 枚用いる。1 回目のヨーキング試験では、想定と異なり、載荷中にカラーコイルが回転し、三角ノッチがヨーク側のテーパ面に引っかかかってしまうことが判明した。改善案として、図 1 に示すように、長方形のノッチを追加し、載荷初期段階からガイドできるよう工夫した。改良後の 2 回目のヨーキングでは、カラーを正確に位置決めできた。ロックキーを問題なく挿入し、除荷後も問題ないことが確認できた。

なお、測定結果を含むショートモデル開発の詳細については、発表時に報告する。

4. まとめ

LHC 加速器の高輝度化アップグレードの一環として、D1 磁石の 200 mm ショートモデルの製作を行った。カラーリング、ヨーキングプレスまでを完了し、磁石製作上の技術的課題の確認を行った。今後は、ヘリウム容器としての役割を果たすシェルの溶接組立確認後、D1 モデル磁石として 2m 長の超伝導双極磁石の製作を行う予定である。

5. 参考文献

1. M. Sugano et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p201

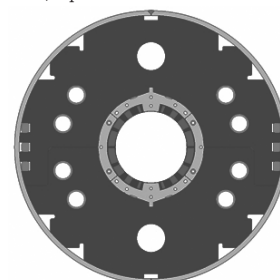


Fig.1 Cross-sectional view of the D1 magnet.

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システム(7) -超伝導ソレノイドの励磁試験と磁場評価-

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (7) - Excitation Test and Field Evaluation of Superconducting Solenoid -

王 旭東, 有本 靖, 山岡 広, 川井正徳, 近藤良也, 宗 占国, 東 憲男, 土屋清澄, 大内徳人(KEK); 村井 隆(三菱電機)
WANG Xudong, ARIMOTO Yasushi, YAMAOKA Hiroshi, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo,
HIGASHI Norio, TSUCHIYA Kiyosumi, OHUCHI Norihito (KEK); MURAI Takashi (Mitsubishi Electric Corp.)
E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

KEKは、小林・益川理論を実証したKEKB加速器のアップグレード(SuperKEKB)を行っている。SuperKEKBは、KEKB加速器が到達した世界最高の衝突効率を更に40倍高めて物理実験の精度を向上するものである。SuperKEKBのビーム衝突領域におけるBelle-II測定器と超伝導電磁石システムの概略図を図1に示す[1]。SuperKEKB加速器のビーム衝突領域に設置されるBelle-II測定器のソレノイド磁石は、ビームライン上に1.5Tを発生させ、交差角を持つビームの衝突性能を著しく劣化させる。このため、ビームライン上のソレノイド磁場の積分値をゼロとするように、Belle-IIソレノイド磁場と逆方向の磁場を発生する超伝導ソレノイド(ESL, ESR)が必要となる。前回にはESLの設計とクエンチ解析評価について報告した[2]。本発表は、製作したESLの励磁試験、またソレノイド中心軸上の磁場測定と解析結果を報告する。

2. 励磁試験および磁場測定と解析

ESLと実験装置の写真を図2に示す。ESLの各コイル寸法を表1に示す。ESLは12個のソレノイドコイルから構成されており、コイル#1を下部にして縦型クライオスタット内に設置した。ESLには電圧端子を5箇所設け、クライオスタット内に温度センサー11個とヘリウム用液面計を設置した。また、ホールプローブ(測定器はLakeshore Model 460)が走査する二重管はESLの軸中心を通るように配置した。ESLの励磁試験は、安定化電源(30V-1000A)を用いて、段階的に設計電流404Aまで通電を行い、トレーニングなく励磁できることを確認した。その後、強制遮断試験を行い、磁石内での異常な電圧発生なく遮断できることを確認した。磁場測定は、まずESL励磁前にOFFSET磁場を測定し、その後295A通電状態(ホールプローブの最大測定レンジ3Tであるため)でESL中心軸上を5mm間隔でホールプローブを走査して測定を行った。また、磁場測定の再現性確認のため、20mm間隔で2回測定を行った。3回の磁場測定の相対誤差は0.1%未満であった。磁場解析は、ESLの設計寸法および実機のデータをもとに軸対称2次元モデルを構築し、ESL中心軸上の磁場分布を評価した。測定結果と解析結果を図3に示す。図3の横軸はESLのコイル#1端部を原点として、コイル#12の端部は0.878mの位置にある。実験結果はプロット、解析結果は実線である。また、各位置における実験と解析の差分を右縦軸に示す。図3より、実験と解析の磁場プロファイルはよく一致しており、最大誤差は2mT未満(0.1%未満)であることから、実機のESLはほぼ設計通りであることが本測定により確認できた。

3. まとめ

製作したESLの励磁試験、ソレノイド中心軸上の磁場測定と解析評価を行い、設計に対して磁場の誤差が0.1%以内であることを確認した。今後は、Belle-IIソレノイド磁場を含めた磁場解析を行い、ビームライン上のソレノイド磁場の詳細評価を行っていく予定である。

参考文献

1. N. Ohuchi, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 21 (2011) pp.1829-1832

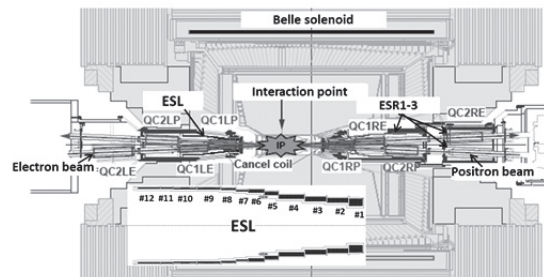


Fig. 1 Superconducting magnet system and Belle detector

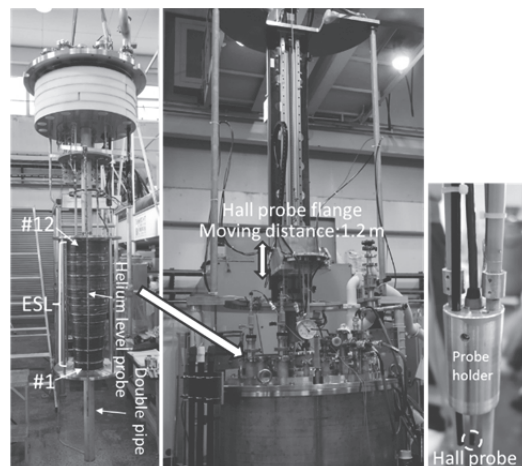


Fig. 2 ESL and experimental setup

Table 1 Specifications of ESL

Coil number	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Inner radius (mm)	77.9	90.7	95.9	105.6	120.3	130.1
Outer radius (mm)	109.0	108.0	114.4	120.6	133.0	141.7
Height (mm)	43.45	76	76	93.05	46.55	51.2
Coil number	#7	#8	#9	#10	#11	#12
Inner radius (mm)	135.7	140.6	143.1	144.8	145.2	145.3
Outer radius (mm)	140.4	145.2	150.0	150.6	149.8	148.8
Height (mm)	40.35	49.65	83.75	83.75	40.35	80.65

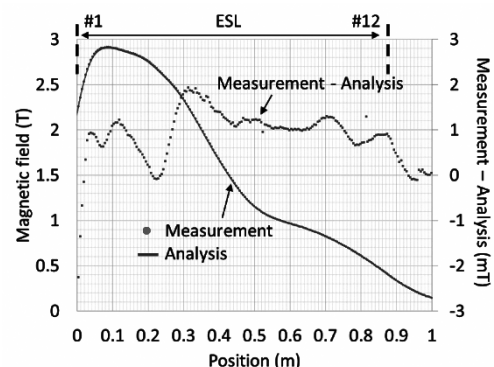


Fig. 3 Magnetic field on the central axis of ESL at 295 A