ITER モデル・コイルの実験結果 (速報)

- 13 T-640 MJ·Nb₃Sn パルス・コイル -

高橋 良和[†], 安藤 俊就, 檜山 忠雄, 中嶋 秀夫, 加藤 崇, 杉本 誠, 磯野 高明,
 押切 雅幸, 河野 勝己, 小泉 徳潔, 濱田 一弥, 布谷 嘉彦, 松井 邦浩, 榛葉 透,
 西島 元, 土屋 佳則, 塙 博美, 関 秀一, 若林 宏, 高野 克敏, 宇野 康弘,
 中村 恭悠, 今橋 浩一, 岡山 順一, 大内 猛, 田尻 二三男, 高矢 芳幸, 大都 起一,
 川崎 勉, 川辺 勝, 廣原 武臣, 堤 史明, 久保 博篤, 小峰 武司, 清水 辰也,
 倉持 勝也, 田宮 忠俊, 西井 憲治, 三浦 友史, 寺門 恒久, 辻 博史, 奥野 清^{*1},
 瀧上 浩幸^{*1}, Denis BESSETTE^{*1}, 大崎 治^{*2}, 池田 三郎^{*2}, 嶋田 守^{*2}, 稲垣 淳二^{*2},
 Nicolai MARTOVETSKY^{*3}, Makoto TAKAYASU^{*4}, Phillip MICHAEL^{*4}, Mario RICCI^{*5},
 Gernot ZAHN^{*6}, Roberto ZANINO^{*7}, Laura SAVOLDI^{*7}, Andre MARTINEZ^{*8}

日本原子力研究所 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1 (†E-mail:takahasi@naka.jaeri.go.jp)

^{*1} ITER-Naka JCT 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

^{*2} (株)東芝 横浜市鶴見区末広町 2-4

^{*3} Lawrence Livermore National Laboratory, L-641 7000 East Ave. Livermore CA 94550, USA

^{*4} MIT, 185 Albany Street, NW22-129, Cambridge, MA 02139, USA

^{*5} ENEA, V. E. Fermi 45, 00044, Frascati (RM), Italy

^{*6} Forschungszentrum, Karlsruhe GmbH, Umwelt und Technik, Hermann-Helmholtz-Platz 1, Germany

^{*7} Politecnico of Torino, 24, corso Duca degli Abruzzi, 10129 Torino Italy

^{*8} CEA Cadarache, F-91191 St-Paul-lez-Durance, France

(2000 年 6 月 20 日受理)

Test Results of ITER Model Coil - 13 T-640 MJ Nb₃Sn Pulse Coil -

Yoshikazu TAKAHASHI, Toshinari ANDO, Tadao HIYAMA, Hideo NAKAJIMA, Takashi KATO,
 Makoto SUGIMOTO, Takaaki ISONO, Masayuki OSHIKIRI, Katsumi KAWANO, Norikiyo KOIZUMI,
 Kazuya HAMADA, Yoshihiko NUNOYA, Kunihiro MATSUI, Tohru SHINBA, Gen NIHIJIMA,
 Yoshinori TSUCHIYA, Hiromi HANAWA, Shuichi SEKI, Hiroshi WAKABAYASHI, Katsutoshi TAKANO,
 Yasuhide UNO, Takahiro NAKAMURA, Kouichi IMAHASHI, Junichi OKAYAMA, Takeshi OHUCHI,
 Fujio TAJIRI, Yoshiyuki TAKAYA, Kiichi OOTSU, Tutomu KAWASAKI, Masaru KAWABE,
 Takeomi HIROHARA, Fumiaki TSUTSUMI, Hiroatsu KUBO, Takeshi OMINE, Tatsuya SHIMIZU,
 Katsuya KURAMOCHI, Tadatoshi TAMIYA, Kenji NISHII, Yuushi MIURA, Tuneaki TERAKADO,
 Hiroshi TSUJI, Kiyoshi OKUNO,^{*1} Hiroyuki TAKIGAMI,^{*1} Denis BESSETTE,^{*1} Osamu OHSAKI,^{*2}
 Saburo IKEDA,^{*2} Mamoru SHIMADA^{*2} Junji INAGAKI,^{*2} Nicolai MARTOVETSKY,^{*3}
 Makoto TAKAYASU,^{*4} Phillip MICHAEL,^{*4} Mario RICCI^{*5}, Gernot ZAHN,^{*6}
 Roberto ZANINO,^{*7} Laura SAVOLDI^{*7} and Andre MARTINEZ^{*8}

Japan Atomic Energy Research Institute, 801-1 Mukouyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki 311-0193

^{*1} ITER-Naka JCT, 801-1 Mukouyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki 311-0193

^{*2} Toshiba Corporation, 2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

^{*3} Lawrence Livermore National Laboratory, L-641 7000 East Ave. Livermore CA 94550, USA

^{*4} MIT, 185 Albany Street, NW22-129, Cambridge, MA 02139, USA

^{*5} ENEA, V. E. Fermi 45, 00044, Frascati (RM), Italy

^{*6} Forschungszentrum, Karlsruhe GmbH, Umwelt und Technik, Hermann-Helmholtz-Platz 1, Germany

^{*7} Politecnico of Torino, 24, corso Duca degli Abruzzi, 10129 Torino Italy

^{*8} CEA Cadarache, F-91191 St-Paul-lez-Durance, France

(Received June 20, 2000)

Synopsis: In the project for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), a Central Solenoid (CS) model coil was developed to demonstrate the feasibility of the coil design and fabrication procedure. The model coil was installed in the test facility at JAERI, Naka, and a performance test is being carried out. The cool-down was completed without cold He leakage at the beginning of April 2000. We could charge the model coil up to the nominal current of 46 kA without quenching in the first DC charging test. The model coil could generate the maximum field of 13 T, and the stored energy was 640 MJ. A manual dump test was also performed with the time constant of 5.3 s from the nominal current. A maximum voltage of 4.8 kV appeared in the coil during the dump test, and no damage was found after the test. In the pulse operation test, the coil could be ramped up to the nominal current in 26 s, with the maximum ramping rate of 0.5 T/s. The target ramping rate of 0.4 T/s was satisfied. The test results are described in this paper.

Keywords: cable-in-conduit conductor, Nb₃Sn, central solenoid, ITER, pulse coil

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)計画¹⁾において、コイル設計の妥当性と製作方法の実証を目的とした中心ソレノイド(CS)モデル・コイル²⁾の開発がITER参加の4極(日本、米国、欧州、ロシア)共同で行われてきた。

Fig. 1に示すように、3つのモジュール(Outer, Inner, Insert)で構成される本コイルは、運転電流値46 kAにおいて13 Tの磁場と640 MJの蓄積エネルギーを26秒で上げるパルス運転の実証を目的としている。この度完成し、Fig. 2に示すように日本原子力研究所の試験装置³⁾の中に組み込まれた。コイルと支持構造物の総重量は約180トンで、耐電圧試験、ヘリウム・リーク試験等の組立後試験も終了し、初期冷凍が約500時間で行われた。初期冷凍後予定されている通電実験の目的は、各設計項目の裕度を測定し、今後の設計に反映させることである。また、素線及び導体レベル・サン

ブルのデータとコイルで得られたデータを比較検討し、今後の開発に資するためである。

本ノートにおいては、CSモデル・コイルが現在実験中であり、十分な解析を行っていないので、主な実験結果のみ速報として紹介する。

2. モデル・コイルの諸元

本コイルは、外径3.6 m、高さ2.8 mの大きさであり、ソレノイド状の1層に2本の導体を巻線し、内層と外層を合わせると18層の巻線で構成されている。自己インダクタンスは0.6 Hであるので、定格電流値46 kAの時の蓄積磁気エネルギーは640 MJである。

本コイルに用いられた超電導導体⁴⁾は、Fig. 3に示すように、直径0.81 mmの素線を、約1,100本撚り合わせて、外形が角形で円形の穴があいているインコロイ(鉄ニッケル合金)製ジャケットに入れられたケーブル・イン・コンジット(CIC)型導体である。素線は、日

Fig. 1 Central solenoid (CS) model coil.

Fig. 2 CS model coil installed in the test facility.

本, 米国及び欧州において製作され, 撚線にされたが, ジャケットの製造は米国, 撚線をジャケットに入れる作業は欧州で行われた. このように, 本超電導体は複数の国を歩き歩くという複雑な国際協力で製作された.

3. 直流通電実験

モデル・コイルの目標性能は, 定格通電電流値 46 kA において, 最大磁場 13 T の発生である. 冷媒条件は, 入口冷媒温度 4.5 K, 圧力 0.6 MPa, 冷媒流量 1 流路当り 10 g/s として通電を行った. まず, 50%(23 kA)の通電を行い, コイルの性能(発生磁場, インダクタンス, 接続部抵抗)を確認した後, 50%からの遮断試験を行いコイル保護回路が正常に動作することを確認した. 次に, 80%(36.8 kA)の通電試験と遮断試験を行った後, 定格の 100%(46 kA)の通電試験を行った. その結果, 最初の定格通電試験において, クエンチすることなく定格電流値まで通電することができた. 通電電流値の挿引速度は, 1 kA/min (16.7 A/s)に設定されたので, 13

Fig. 3 13 T-46 kA Nb₃Sn Superconductor.

Fig. 4 Inlet and outlet temperature profiles with coil current pattern in the first 100% charging test.

Tまで約 46 分間で励磁された. その時の電流波形と冷媒温度の変化を Fig. 4 に示す. 挿引中に発生するコイル両端電圧から求めた自己インダクタンスは, 設計どおり 0.6 H であった. モデル・コイルは 2 本の導体を 1 つの層にソレノイド巻いているので, 電氣的クエンチ検出は, 2 層の中で同一形状の 2 本の導体同士でバランスを取る方式を採用した. 挿引中, このバランス電圧には, ノーマルを示す電圧は発生しなかったが, 巻線の動きを示すと思われるスパイク状の電圧が発生した. 発生した 0.5 mV 以上のスパイク電圧の数を Table 1 に示す. 最初の定格通電試験の場合, 既に 80% (36.8 kA) の通電を行っているのので, 80%まではスパイクがないが, 100%に近づくにつれてスパイクの数が増加し, 電流がホールド状態に入る時その発生が激しくなった. しかし, 2 回目の通電試験の場合は, 殆どスパイクは発生しなかった. このことから, 巻線部に最初の電磁力が加わった時導体間のエポキシ樹脂等に小さなクラックやずれが生じたが, 2 回目以降はこのような現象は発生していないことから, ITER 超電導コイルの巻線設計の妥当性と製作技術の高さが実証された.

挿引中の温度上昇は, 超電導体及び導体接続部の交流損失と導体接続部のジュール発熱によるものであ

Table 1 Number of spikes in balance voltage, observed DC charging test (100% = 46 kA).

Range of current (%)	Number of spike voltages (>0.5 mV)	
	1st charge	2nd charge
0 – 80	0	0
80 – 91	18	0
91 – 100	37	3

Fig. 5 Measured voltages of inner and outer modules during exponential manual dump test from 46 kA.

る。また、通電電流値が一定の場合の温度上昇は、導体接続部のジュール発熱によるものである。Fig. 4 から、導体両端の導体接続部のジュール発熱による温度上昇は 0.14 K であり、この部分の電圧測定結果から冷媒入口部にある導体接続部における温度上昇はその半分の 0.07 K と推定できるので、コイル運転においては十分低い温度上昇であると言える。この温度上昇から接続部の抵抗値を算出することができる。

4. マニュアル遮断試験

モデル・コイルの電気絶縁性能を確認するために、46 kA (100%) から時定数 5.3 秒で遮断試験を行った。この時の電流と電圧の波形を Fig. 5 に示す。この図から、コイル両端に発生した最大電圧は、内層モジュールが 2.2 kV、外層モジュールが 2.6 kV で、合計 4.8 kV であり、時定数は、設定値どおり 5.3 秒であり、遮断試験は設計どおり正常に行われた。遮断後の通電試験においても、コイルに異常は見つからなかった。なお、電気絶縁の設計電圧は、15 kV である。

また、時定数を 27 秒から 5.3 秒まで変化させて遮断試験を行い、コイルのパルス磁場損失を測定した。このパルス磁場損失測定の注目事項は、これまでに他の CIC 導体において見つけられている非常に長い時定数⁵⁾を持つ結合電流がこの導体にも流れているかという点と、クロム・メッキを施した Nb₃Sn 素線を用いた導体において通電することによりパルス磁場損失量が減少するかどうかという点⁶⁾である。後者は、Nb₃Sn 生成熱処理により素線間の抵抗が低下し、結合損失が大きくなるが、クロム・メッキにより素線間の結合は

強固でないで、通電による電磁力によりその結合が切れると考えられている。測定された遮断中における最内層の出口冷媒温度及び圧力の時間変化を Fig. 6 に示す。この図からエンタルピーを求めて損失量を算出するが、現在の所、導体損失と導体接続部の分離等を検討中である。そこで、損失量と密接な関係を持つ温度上昇と遮断時定数の関係を Fig. 7 に示す。この図は、遮断中における最内層の出口冷媒温度の最大値である。指数関数型遮断の場合、結合損失 Q_c は、

$$Q_c \propto B_{\max}^2 \times \tau_c / (\tau_p + \tau_c) \quad (1)$$

$B_{\max}$: 最大磁場 (T)

τ_c : 導体の結合電流の時定数 (s)

τ_p : 遮断の時定数 (s)

であるので、横軸を $1/\tau_p$ とした。温度及び圧力上昇は、 $1/\tau_p$ に対してほぼ線形の依存性を示しているので、結合電流の時定数 τ_c は、遮断時定数 τ_p と比較して十分短いと言える。結合電流の時定数 τ_c は、今後詳細な解析を行って、求められる。

実験においては、毎朝保護回路のチェックのために定格電流値の 20% (9.2 kA) からの遮断試験を行っている。この時の温度上昇と試験回数 (Run Number) の関係を Fig. 8 に示す。図より、定格電流値の 80% (36.8 kA) 以上の通電を行うと、温度上昇が小さくなることが分かる。すなわち、定格 (13 T × 46 kA) の 64% 以上の電磁力が加わった後、損失量が小さくなると言える。これは、上記の後者の注目事項において、通電することによるパルス磁場損失が減少していることを示

Fig. 6 Outlet temperature and pressure profiles during exponential dump test from 100% (46 kA) with a time constant of 17.3 s.

Fig. 7 Maximum temperature rise of 1st layer vs reverse of dump time constant τ_p during the manual dump test.

している。

5. パルス通電実験

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) 用パルス電源を用いて、モデル・コイルのパルス通電実験を行った。パルス通電の励磁速度は、 0.045 T/s より順次速度を上げ、まず ITER 計画での開発目標であった 0.4 T/s で 13 T まで連続的に急速励磁し、クエンチ発生のないことを確認した。本実験では、さらに励磁速度を上げ、 0.5 T/s で 13 T まで 26 秒間 で励磁するパルス通電実験にも成功した。この通電パターンと最内層の入口・出口冷媒の温度を **Fig. 9** に示す。この時の入口冷媒温度の初期値は、 4.5 K である。この運転中に測定された電圧波形や出口冷媒の温度及び圧力から常伝導転移が発生していないことを確認した。この時の蓄積エネルギーは、 640 MJ である。

拡張試験として、入口冷媒温度 6.5 K に上昇させて、挿引速度 0.4 及び 0.6 T/s の場合の通電試験を行った。その結果を **Fig. 10** に示す。図中の白丸は常伝導転移が発生することなく通電できた最大電流値を示し、黒丸は抵抗性の電圧が約 2 mV 発生し時の電流値である。挿引速度 0.6 T/s でクエンチした場合、出口温度は 24 K まで、出口圧力は 0.6 MPa から 2.2 MPa まで上昇した。クエンチしていない場合の温度上昇は導体と接続部のパルス磁場損失と接続部のジュール発熱によると考えられる。今後、パルス磁場損失による温度上昇と分流開始温度を測定値から算出し、挿引速度とクエンチ電流値の関係を調査する予定である。

Fig. 8 Dependence of maximum outlet temperature rise in 1st layer on run number during manual dump test from 20% current (9.2 kA) with a time constant of 20 s . The percentage current level and numbers of intervening tests are indicated in the figure.

6. まとめ

これまでに得られた成果を下記にまとめる。

(1) 直流定格通電試験において、最初の通電で、クエンチすることなく、定格電流値の 46 kA まで通電でき、最大磁場 13 T を発生することができた。この時の磁気蓄積エネルギーは、 640 MJ である。

(2) 定格電流値からの遮断試験において、遮断時定数 5.3 秒 にて遮断を行い、モデル・コイルに最大電圧 4.8 kV が発生したが、モデル・コイルの電気絶縁性能に異常はなかった。

(3) パルス通電実験において、 13 T - 640 MJ まで 26 秒 でクエンチすることなく上げることができた。最大変化磁場は 0.5 T/s であり、ITER 計画における開発目標であった 0.4 T/s のパルス励磁性能を満足した。

今後、詳細にデータを解析することにより、パルス磁場損失、分流開始温度、臨界電流値等の超電導特性、導体の熱・流体特性、コイルの機械的特性を調査する

Fig. 9 Inlet and outlet temperature profiles during pulse operation up to 100% (46 kA) with a ramping rate of 0.5 T/s .

Fig. 10 Ramp rate limitation at an inlet temperature of 6.5 K .

予定である.

おわりに, 超電導素線と燃線の開発と製作において超伝導線材製造各社, コイルの製作について日米の重電機各社と航空機製造会社, また CS モデル・コイル試験装置の製作などにおいて重工業各社など幅広い企業から多大な御支援を賜り感謝致します.

原研の村上理事長をはじめとする各部署の方々に感謝致します.

参 考 文 献

- 1) R.J. Thome: Proc. of MT-15, (1998) 6-11
- 2) 安藤俊就ら: プラズマ核融合学会誌 **75 Suppl.** (1999) 7
- 3) S. Shimamoto, et al.: IEEE Trans. Magn. **32** (1996) 3049
- 4) 磯野高明ら: 電気学会論文誌B **119-B** (1999) 1263
- 5) T. Hamajima, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **10** (1999) 812
- 6) E.P. Balsamo, et al.: Physica C **310** (1998) 258