研究論文

ITER トロイダル磁場コイル構造物の製作技術開発

井口 将秀^{*1,†}, 千田 豊^{*1}, 中嶋 秀夫^{*1}, 小川 剛史^{*2}, 片山 義紀^{*2},
小方 大成^{*2}, 峯村 敏幸^{*2}, 宮部 圭介^{*2}, 渡海 大輔^{*3}, 新見 健一郎^{*3}

Developments in Fabricating Structures for the ITER Toroidal Field Coils

Masahide IGUCHI^{*1,†}, Yutaka CHIDA^{*1}, Hideo NAKAJIMA^{*1}, Tsuyoshi OGAWA^{*2}, Yoshinori KATAYAMA^{*2}, Hiroshige OGATA^{*2}, Toshiyuki MINEMURA^{*2}, Keisuke MIYABE^{*2}, Daisuke TOKAI^{*3} and Kenichiro NIIMI^{*3}

Synopsis: The Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has conducted activities in Japan since March 2009 in order to establish the manufacturing procedure for the ITER toroidal field (TF) coil structures. A TF coil structure consists of a TF coil case and components. The activities include ensuring that the structural materials and welding procedure comply with the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) code for fusion devices, and demonstrating the manufacturing method and procedures using full-scale segments of the TF coil structure. From the results of these activities, the JAEA confirmed that the quality control method of actual series TF coil structures complies with the JSME code. Therefore, the quality of structural materials and weld joints using gas tungsten arc welding (GTAW) satisfy the ITER requirements. In addition, the JAEA obtained knowledge regarding the welding deformation of the actual TF coil structures. This paper describes the results of these compliance and development activities for ITER TF coil structures.

Keywords: Tokamak devices, ITER, toroidal field coil structure

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、国際熱核融合実験炉¹⁾（ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor）の建設に向けて、産業界からの協力の下、機器の製作準備活動を実施している^{2,3)}。日本は19機（1機は予備）のトロイダル磁場コイル構造物（TF構造物）の製作を担当する³⁾。

TF構造物はTFコイルケース及び付属部品の総称であり、高さが約16.5 m、幅が約9 mのD型形状である。Fig. 1に示すように、TFコイルは、ベーシックセグメント（AU1-AU3,

AP1-AP3, BU1-BU4, BP1-BP3）を製作し、それらを組み合わせることにより、サブアセンブリ（AU, AP, BU, BP）と呼ばれるTFコイル巻線部を格納するコイルケースを製作する。

TF構造物に使用される構造材料はFig. 2に示すように、室温及び4 Kでの機械特性の要求値に応じて、C1, C2, C3, C3A, C4の5クラスに分類されている。原子力機構は、これらの要求に対して、“核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格（JSME S KA1-2008）”⁴⁾（JSME規格）において、規格化されている材料を使用する^{4,5,7)}。また、JSME規格では材料⁷⁾に加え、品質保証⁶⁾、設計⁸⁾、製作⁹⁾、検査⁹⁾が規格化されており、原子力機構はJSME規格を実機TF構造物製作に適用することを提案している。

Fig. 1 Fabrication process of the TF coil structure.

Received December 2, 2011

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

^{*1} 日本原子力研究開発機構

〒319-1195 茨城県那珂市向山 801-1

Japan Atomic Energy Agency, 801-1, Mukoyama, Naka, Ibaraki 319-1195, Japan

^{*2} 株式会社東芝 電力システム社

〒230-0045 神奈川県横浜市長谷区末広町 2-4

Toshiba Cooperation, Power systems company, 2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-0045 Japan

^{*3} 川崎重工業株式会社 プラント環境カンパニー

〒675-0180 兵庫県加古郡播磨町新島 8 番地

Kawasaki Heavy Industries, LTD., Plant & Infrastructure Company, Production Center, 8, Nijijima, Harima-cho, Kako-gun, Hyogo, 675-0180 Japan

† E-mail: iguchi.masahide@jaea.go.jp

[ITER requirements for TF coil materials]

Class	YS at 4K	YS at RT	K _{IC} at 4K
C1	>1000MPa	>280MPa	>180MPa√m
C2	>900MPa	>280MPa	>180MPa√m
C3	>700MPa	>245MPa	>180MPa√m
C3A	>700MPa	>260MPa	>180MPa√m
C4	>500MPa	>210MPa	>180MPa√m

Fig. 2 Classification of structural materials for the ITER TF coil structures (YS: yield strength, RT: room temperature).

原子力機構は実機 TF 構造物製作開始に向けて、2009 年 3 月から、産業界の協力の下、実機 TF 構造物製作開始事前準備として試験・試作を実施し、TF 構造物製作に対する技術的課題を検討することで、合理的な実機 TF 構造物製作設計を実施すると共に、JSME 規格の TF 構造物製作に対する適用可能性について評価した¹⁰⁾。これらの技術的検討作業項目として主に以下の項目を実施した。

- 1) JSME 規格に基づいた TF 構造物実機大ステンレス鍛鋼品の試作及び品質確認試験を実施し、TF 構造物要求品質を満たすことができるかどうかの確認
- 2) JSME 規格によるフルオーステナイト系溶接ワイヤを使用した狭間先 TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接施工法の確立
- 3) AU1 及び BU3 ベーシックセグメントの実規模試作により、施工法及び溶接変形等を検証することによる、実機 TF 構造物製作課題の検討。ただし、本稿では溶接の際の構造物の形状変化を『溶接変形』と称することとする。

本稿ではこれらの試験・試作結果について報告する。

2. 実規模試作用構造材の品質確認

2.1 JSME 材料規格

JSME 規格では、Fig. 2 の機械特性を満足する、高 Mn ステンレス鋼 FMJJ1、及び N 添加により固溶強化させた FM316LNL、FM316LNM、FM316LNH の 4 種類のステンレス鋼が規格化されている^{5,9)}。それぞれのステンレス鋼の化学成分を Table 1 に示す。TF 構造物を製作するに当たり、C1 に対しては FMJJ1 を、C2 及び C3A に対しては FM316LNH を、C3 に対しては FM316LNM を、そして C4 には FM316LNL を使用する。

JSME 規格には室温 (296 K) から 4 K までの設計強度を定めた設計強度曲線 (JSME 設計曲線) が規定されており、材料強度の品質管理は室温の強度確認のみで実施できる合理的な規格となっている。この JSME 設計曲線は、各鋼種において、対象素材の厚さが 200 mm 未満の場合と 200 mm 以上 400 mm 未満の場合の 2 種類が規定されている。また、JSME 規格では極低温での破壊靱性試験も要求されていない点も特徴の一つである。

2.2 品質確認試験

試作した実規模試作用構造材の概略形状を Fig. 3 に示す。また、各試作材の化学成分を Table 2 に示す。原子力機構では、これまで JSME 規格整備に向けて多くの素材を試作し、品質確認試験を行ってきたが¹¹⁾、Fig. 3 に示す AU1 側板や BU3 ウィングの様な三次元複雑形状の鍛鋼品を製作し、品質確認試験を実施した経験はない。そのため、各試作材から試験片を製作し、室温、液体窒素中 (77 K)、及び液体ヘリウム中 (4 K) において引張試験を実施し、各温度での試験結果と JSME 設計曲線との比較を行うことで、

Table 1 Chemical compositions in the JSME code (mass%)

Material Name	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	C+N
FMJJ1	0.030 max.	0.75 max.	9.00- 11.00	0.035 max.	0.015 max.	11.00- 13.00	11.00- 13.00	4.00- 6.00	0.21- 0.27	-
FM316LNL	0.030 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.035 max.	0.020 max.	10.00- 14.00	16.00- 18.50	2.00- 3.00	0.05- 0.12	≥0.080
FM316LNM	0.030 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.035 max.	0.020 max.	10.00- 14.00	16.00- 18.50	2.00- 3.00	0.10- 0.17	≥0.130
FM316LNH	0.030 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.035 max.	0.020 max.	10.00- 14.00	16.00- 18.50	2.00- 3.00	0.15- 0.22	≥0.180

Table 2 Chemical compositions of materials for full scale mock-ups (mass%)

Component	Material Name	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	C+N
AU1 left side plate	FM316LNH	0.019	0.26	1.80	0.017	0.002	11.27	18.20	2.49	0.209	0.228
AU1 right side plate	FM316LNH	0.019	0.26	1.84	0.016	0.001	11.05	18.05	2.51	0.210	0.229
AU1 outer plate	FM316LNH	0.020	0.34	1.78	0.019	0.002	11.21	17.85	2.60	0.190	0.210
AU1 PCR Flange	FM316LNH	0.018	0.42	1.40	0.019	0.001	11.14	16.97	2.11	0.213	0.231
AU1 PCR side rib	FM316LNH	0.022	0.44	1.39	0.011	0.001	11.23	16.99	1.64	0.198	0.220
AU1 PCR center rib	FM316LNH	0.018	0.41	1.39	0.018	0.001	11.23	16.91	2.08	0.211	0.229
BU3 left wing	FM316LNH	0.017	0.30	1.89	0.018	0.002	11.21	18.09	2.69	0.190	0.207
BU3 right wing	FM316LNH	0.020	0.35	1.85	0.018	0.001	11.18	17.88	2.65	0.195	0.215
BU3 outer plate	FM316LNM	0.015	0.47	1.44	0.022	0.001	11.39	16.75	2.16	0.138	0.152

Fig. 3 Materials manufactured for trial fabrications of full-scale basic segments.

JSME 規格の妥当性を確認し、実機 TF コイル製作への適用性について検証を行った。また、4 K での破壊靱性試験も実施し、試作材が Fig. 2 の ITER 要求値を満足しているかどうかとも合わせて確認した。

2.3 試験方法及び試験結果

室温の引張試験は JIS Z 2241, 77 K, 及び 4 K での引張試験は JIS Z 2277 に基づいて実施した。試験片は平行部直径が 7 mm の丸棒型引張試験片を使用した。試験片は各素材の Top 及び Bottom 位置において、素材幅及び板厚方向において複数箇所から採取した。4 K での破壊靱性試験は JIS Z 2284 に基づいて実施した。

各試験温度における 0.2%耐力 (YS), 引張強さ (TS) の試験結果と JSME 設計曲線との比較結果について、Fig. 4 及び Fig. 5 には FM316LNH 材の場合を、Fig. 6 には FM316LNM 材の場合を示す。

Fig. 4, 5, 6 から室温, 77 K, 4 K 全ての試験温度において、試験結果が JSME 設計曲線より上方にあることから、全ての素材が JSME 設計曲線を満足しており、三次元複雑形状の鍛鋼品に対しても JSME 設計曲線が適用できることを確認した。また、今回試作した素材について、室温強度が JSME 要求値を満足すれば、77 K 及び 4 K においても JSME 要求値を満足することが明らかになった。

Table 3 に各素材における 4 K での破壊靱性試験結果を示す。全ての素材において ITER 要求値である 180 MPa√m を満足する結果となった。

これらの結果から、三次元複雑形状の鍛鋼品を含む実機 TF 構造物用素材の製造に対し、JSME 規格を適用できることが示された。

Table 3 Results of the fracture toughness test at 4 K for all materials manufactured for a full-scale trial fabrications. The ITER requirement is 180 MPa√m

Component	Fracture toughness, $K_{IC}(J)$ [MPa√m]		
	1/2t, 1/2W	1/4t, 1/4W	Average
AU1 Side Plate, Left	234	250	242
AU1 Side Plate, Right	259	269	264
AU1 Outer Plate	280	267	273
AU1 PCR Flange	224	205	214
AU1 PCR Side Rib	219	222	220
AU1 PCR Center Rib	224	220	222
BU3 Wing, Left	256	259	257
BU3 Wing, Right	261	259	260
BU3 Outer Plate	267	242	255

Fig. 4 Results of the comparison between the JSME design curves and tensile test results for FM316LNH, which has a thickness less than 200 mm.

Fig. 5 Results of the comparison between the JSME design curves and tensile test results for FM316LNH, which has thickness greater than 200 mm.

Fig. 6 Results of the comparison between the JSME design curves and tensile test results for FM316LNM, which has a thickness less than 200 mm.

3. 溶接継手確認試験

TF 構造物製作において施工される溶接継手は、4 K での靱性を確保する必要があることから、FMJJ1 の化学成分を基に、溶接ワイヤとして設計したフルオーステナイト系溶接ワイヤ、FMYJJ1 を用いる。溶接方法として、溶接変形を抑え、溶接継手の性能及び品質を確保するために、狭開先 TIG 溶接を適用する。

200 mm を超える厚手のステンレス鋼に対し、フルオーステナイト系の溶接ワイヤを使用した狭開先 TIG 溶接の実績は少なく、実機製作に向けて JSME 規格に基づいて、Table 4 に示す溶接施工法確認試験を実施した。

確認試験として、JSME 規格に規定されている非破壊検査（浸透探傷試験（PT）、放射線透過試験（RT））、側曲げ試験、及び室温での継手引張試験を実施した。試験結果として、全ての継手において、規格を満足する結果となった。

また、追加の確認試験として、溶接継手の断面を切り取り、目視検査（VT）及び断面マクロ試験を実施するとともに、4 K での引張試験及び 77 K でのシャルピー衝撃試験（JIS Z 2242）を実施し、継手の品質及び機械特性を確認した。これらの試験結果を Table 4 に合わせて示す。

Table 4 の試験結果から、本試験で実施した溶接施工は実機 TF コイル製作に適用可能な性能及び品質を有しており、実機製作に向けて溶接施工法を確立することができた。

4. 実機大ベーシックセグメント試作

複雑な形状のベーシックセグメントの製作方法を実機製作前に確立するためには、実機大ベーシックセグメント試作が有効である。また、TF 構造物の製作合理化が求めら

れており、これを達成するためには、溶接変形を制御し、溶接後の機械加工作業量を減らすことが必要である。今回の試作では、コイル巻線部を格納するコイルケース内面側の機械加工については部材段階で仕上げ、コの字型に組立て、溶接した後は機械加工を行わない前提で試作を実施した。そのため、変形防止用の拘束治具はコイルケース内面側には溶接で取り付けない施工法を採用した。また、溶接については主要な継手に対して片面からの狭開先自動 TIG 溶接を採用した。

本試作ではベーシックセグメントの中でも特に複雑な形状を呈しており、複雑な溶接変形を示すと考えられること、さらには AU1 ベーシックセグメントには溶接深さが 260 mm（TF 構造物で最大溶接深さ）の継手があり、溶接施工性を検証しておく必要があることから、AU1 及び BU3 ベーシックセグメントを試作対象とした。以下では、試作結果について説明する。

4.1 AU1 ベーシックセグメント試作

AU1 ベーシックセグメントの施工手順を Fig. 7 に示す。PCR フランジ部とコイルケース部を製作した後、PCR フランジ部とコイルケース部との溶接を実施した。溶接変形制御方法として、コイルケース部を製作する際には、拘束治具をコイルケース部の外面に溶接で取り付け、拘束を行った。PCR フランジ部とコイルケース部を溶接する際は溶接変形を抑えるための拘束治具を設けず、試作体自身の剛性により溶接変形を抑える方法を採用した。AU1 側板と AU1 外板との溶接はコイルケース外側からのみの溶接を行う片側開先を適用しているため、コイルケースはコの字が開く方向に変形すると予想される。そのため、AU1 左右側板が設計位置からコイルケース内側に入り込むように逆ひずみ

Table 4 Welding conditions and results of NDE and mechanical tests for welding qualification

Base Metal (Thickness)	Filler Metal	Welding Process (Position)	Groove	NDE PT/RT	Cross section Macro VT	Side bend	YS (MPa) TS (MPa) at RT	YS (MPa) TS (MPa) at 4 K	Charpy impact at 77 K (J)
JJ1 x 316LNH (200mmt)	JJ1 wire	Machine GTAW (V-up)	U (One side)	ND/ND	ND	Acceptable	456-460 683-686	1025-1110 1417-1469	D:136-144 H:126-190
316LNH x 316LNH (200mmt)	JJ1 wire	Machine GTAW (V-up) Repair	U (One side)	ND/ND	ND	Acceptable	411-415 657-659	1037-1139 1320-1511	D:126-142 H:155-193
316LNH x 316LNH (200mmt)	JJ1 wire	Machine GTAW (V-up)	U (One side)	ND/ND	ND	Acceptable	480-482 676-679	1075-1095 1350-1423	D:97-140
316LNH x 316LNH (100mmt)	JJ1 rod	Manual GTAW (V-up)	X (Both side)	ND/ND	ND	Acceptable	487-518 668-680	1075-1112 1318-1444	D:108-122 H:174-178
316LNH x 316LNH (40mmt)	JJ1 wire	Machine GTAW (V-up)	U (One side)	ND/ND	ND	Acceptable	440-444 658-660	1075,1090 1405,1410	D:135-140 H:198-219
316LNH x 316LNM (40mmt)	JJ1 wire	Machine GTAW (V-up)	U (One side)	ND/ND	ND	Acceptable	403-420 613-624	996,1062 1418,1429	D:124-125 H:157-224
316LNM x 316LNM (40mmt)	JJ1 wire	Machine GTAW (V-up)	U (One side)	ND/ND	ND	Acceptable	394-398 604-604	938,966 1378,1396	D:124-137 H:244-269
316LNL x 316LNL (40mmt)	JJ1 wire	Machine GTAW (V-up)	U (One side)	ND/ND	ND	Acceptable	397-402 601-603	906,948 1356,1393	D:139-142 H:109-151

Note: ND: No detected, PT: Liquid penetrant testing, RT: radiographic testing, VT: Visual test, D: Notch in center of welding line, H: Notch in Heat Affected Zone.

Fig. 7 Manufacturing process for a full-scale AU1 basic segment.

を与えて組立てを行った。

Fig. 8 に示す K1 から K2 までの点で、AU1 ベーシックセグメント製作過程におけるコイルケース端部の開口量の計測を実施した。コイルケース組立時における各測定点の値を 0 mm とし、製作過程の開口量を **Fig. 9** に示している。縦軸の正方向はコイルケース端部が開く方向の変形であり、負方向はコイルケース端部が閉じる方向の変形が生じていることを示す。

コイルケース部の溶接（AU1 左右側板と AU1 外板との溶接）では、拘束治具解放後に最大で点 K1 において約 15 mm の開口が測定された。その後の PCR フランジ部とコイルケース部との溶接では、拘束治具を設置していないが、溶接前後でコイルケース開口量に大きな変化は生じない結果となった。また、PCR フランジ部の溶接によってコイルケースの長手方向の形状が変化することが懸念されたが、変形は局部的で、PCR フランジ部溶接直下のコイルケース外板が約 1 mm 落ち込む程度であった。

AU1 ベーシックセグメント製作後の各測定点における開口量は、K1 (15.3 mm), A (13.3 mm), B (11.2 mm), C (9.8 mm), D (8.8 mm), E (8.1 mm), F (7.7 mm), G (8.7 mm), K2 (9.2 mm) である。開口量は、点 F を最小開口量として、端部に近づくにつれて大きくなることが分かった。これは、AU1 コイルケースが曲線形状を呈していること、及び AU1 側板の厚みが点 K1 から点 G にかけて次第に大きくなっていることが原因と考えられる。

Fig. 9 のコイルケース端部の開口量は左右側板の倒れ量の和であるため、左右側板に同じ溶接変形が生じたと仮定すると、その値を半分にしたものが片側側板の倒れ量となる。今回の試作で生じた片側側板の倒れ量の最大の点 K1 と最小の点 F とで差は約 3.8 mm（開口量の差の 1/2）であり、コイルケースと巻線部との隙間 7 mm（設計値）と比較し、7 mm の半分以上を AU1 側板の溶接変形のばらつきで使用してしまうことが分かった。しかし、**Fig. 9** から分かるように、大きな開口変形は AU1 側板の板厚が薄い AU1 ベーシックセグメント端部付近で生じていることから、変形のばらつきに対する対策として、溶接前組立時に側板に

Fig. 8 Measured points of the opening distance during manufacturing AU1 basic segment.

Fig. 9 Opening distance during manufacturing of an AU1 basic segment.

対して、溶接変形を予測したさらなる逆ひずみを与えること、及び今回開口量が大きかった部位の内面側に余肉を設け、溶接後この部分については内面の機械加工を実施すること等が考えられる。

各溶接部に対して、PT 及び RT による非破壊検査を実施した。検査の結果、ブローホール等の溶接欠陥は検出されず、溶接品質に問題がないことが示された。

4.2 BU3 ベーシックセグメント試作

Fig. 10 に BU3 ベーシックセグメントの製作手順を示す。BU3 外板と左右 BU3 ウィングとの溶接における変形の制御手法として、溶接初期（溶接開始から 12 層）までは、**Fig. 11** 中の点 A 及び C 近傍をコイルケース外側から油圧ジャッキによって加圧し、溶接変形量を一定の目標値に制御する手法を適用した。油圧ジャッキによる制御を用いる利点として、変形制御目標値によって拘束治具解放時のコイルケースの開き量をコントロールすることができる点が挙げられる。この変形制御目標値は解析や事前の小規模試作等で取得する必要があるが、今回の試作においても目標値を得るために要素試験及び 1 m 長さの実規模断面のコイルケースを試作した¹⁰⁾。油圧ジャッキによる加圧終了後、拘束治具をコイルケース外面に溶接にて取り付け、溶接完了まで拘束を続けた。BU3 ウィングと BU 外板との溶接は片側開先を採用しており、コイルケース外側から溶接を行うた

Fig. 10 Manufacturing process for a full-scale BU3 basic segment.

Fig. 11 Measured points of the opening distance during manufacturing of a BU3 basic segment.

Fig. 12 Opening distance during manufacturing of a BU3 basic segment.

め、コイルケースはコの字が開く方向に変形すると予想されるが、AU1 ベーシックセグメント製作とは異なり、BU3 ウィングに対して逆ひずみは与えていない。コイルケース内面と巻線部との隙間は 10 mm が設計されている。

Fig. 11 中の点 A, B 及び C における BU3 製作過程における BU3 ウィングの開口量を測定した。その変形挙動の計測結果を Fig. 12 に示す。油圧ジャッキ加圧終了直前の開口量は、加圧していない点 B では、加圧している点 A, C よりも 5 mm ほど大きく、あまり閉口していないことが分かる。油圧ジャッキ加圧終了後のコイルケース開口量は、点 A で

は-12.4 mm, 点 B では-10.9 mm, 点 C では-12.1 mm であり、最終的には 3 点ともほぼ同じ開口量となった。その後、拘束治具を設置し、溶接を継続した。拘束治具解放後のコイルケース開口量は、点 A で 9.1 mm, 点 B で 7.1 mm, 点 C で 9.8 mm と、概ね 10 mm 程度の開口量となった。点 B の開口量が点 A, C よりも小さいのは、BU3 ベーシックセグメントが曲線形状であること、及びウィングがあるために板厚が大きくなっている点 B は、容器断面の剛性が大きく、溶接変形が生じにくかったためだと考えられる。今回の試作では溶接部の横収縮量が 6 mm 程度あり、横収縮に対する部材の伸び代を考慮していない開口量である。そのため、横収縮を考慮した場合の開口量は 16 mm 程度と評価される。

BU3 ベーシックセグメント製作後の BU3 ウィング片側の開口量は、各測定点において、A (4.5 mm), B (3.6 mm), C (4.9 mm) となり、片側 BU3 ウィング開口量最大の点 C と最小の点 B とで差が約 2.7 mm である結果となった。コイルケースと巻線部との隙間は 10 mm 設計されていることから、BU3 ウィングの溶接変形のばらつきによって、その 30% 近くを使用することが分かった。Fig. 12 から分かるように、大きな開口変形は AU1 ベーシックセグメント同様、BU3 側板板厚の薄い、BU3 ベーシックセグメント端部付近で生じていることから、変形のばらつきに対する対策として、溶接前組立時に BU3 ウィングに対して、AU1 ベーシックセグメントと同様に、溶接変形を予測した逆ひずみを与えること、及び開口量の大きい部位に対して余肉を設け、溶接後にコイルケースの内面の機械加工を実施すること等が考えられる。また、BU3 側板の変形を抑えるために、片側からの溶接施工法を両側からの溶接施工法に変更し、バランス溶接を適用する等が考えられる。

各溶接部に対して、PT 及び RT による非破壊検査を実施したが、ブローホール等の溶接欠陥は検出されず、溶接品質は問題ないことが示された。

5. まとめ

TF コイル構造物実機製作に向けて、JSME 規格に基づいて、実機適用可能な形状の構造材料及び溶接施工法の品質及び性能確認試験を実施し、JSME 規格の実機 TF 構造物製作への適用性について確認を行い、その妥当性を示した。また、AU1 及び BU3 ベーシックセグメントの実規模試作を実施し、溶接変形挙動を把握し施工法の確認を実施した。実機製作時にはさらなる溶接変形の制御方法として、溶接変形を予測した逆ひずみを与えること、片側溶接を両側溶接へ変更すること、溶接後にコイルケースの内面の機械加工を実施することが考えられる。今後、これらの結果を踏まえて、製作手法合理化を進めた後、実機 TF 構造物製作に移る予定である。

本研究を遂行するにあたり、ご指導、ご支援を頂いた原子力機構核融合研究開発部門二宮博正部門長、同 ITER プロジェクトユニット多田栄介ユニット長に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) ITER, Project report (On line). Available: <http://www.iter.org/reports.htm>
- 2) K. Okuno, et al.: "Technology development for the construction of ITER superconducting magnet system", Nucl. Fus. **47** (2007) 456-462
- 3) K. Okuno, et al.: "Progress in ITER project and its superconducting magnet system in Japan", ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009), July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- 4) JSME (The Japan Society of Mechanical Engineers), "Codes of Fusion Facilities -Rules on Superconducting Magnet Structure -, JSME S KA 1-2008", Maruzen (2008)
- 5) Y. Nakasone, et al.: "JSME construction standard for superconducting magnet of fusion facility "GENERAL VIEW OF THE CODE"", ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009), July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- 6) T. Suzuki, et al.: "JSME construction standard for superconducting magnet of fusion facility: "QUALITY ASSURANCE"", ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009), July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- 7) A. Nishimura, et al.: "JSME construction standard for superconducting magnet of fusion facility "MATERIAL"", ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009), July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- 8) Y. Takahashi, et al.: "JSME construction standard for superconducting magnet of fusion facility "PROCEDURE FOR STRUCTURAL DESIGN"", ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009), July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- 9) M. Nakahira, et al.: "JSME construction standard for superconducting magnet of fusion facility "FABRICATION, INSTALLATION, NDE AND TESTING"", ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009), July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- 10) Y. Chida, et al.: "Validation of fabricability for ITER TF coil structures", Proc. of ASME 2011 PVP Conference, to be published.
- 11) H. Nakajima, et al.: "Qualification of cryogenic structural materials for the ITER Toroidal Field coils", ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009), July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic

井 口 将 秀 1982 年 5 月生。2005 年筑波大学第三学群卒業。2007 年同大学院構造エネルギー工学専攻修了。2010 年日本原子力研究開発機構勤務。主に極低温用構造材料の研究開発に従事。低温工学・超電導学会、日本機械学会会員。

千 田 豊 1953 年 1 月生。1976 年大阪大学工学部溶接工学科卒業。1978 年同大学院溶接工学専攻修了。同年川崎重工業(株)勤務。2009 年より日本原子力研究開発機構勤務。主に、溶接技術に関する開発業務及び超電導コイル構造物の研究開発に従事。技術士(建設部門及び金属部門)。溶接学会、低温工学・超電導学会会員。

中 嶋 秀 夫 1956 年 1 月生。1981 年より日本原子力研究所に入所。現在、日本原子力研究開発機構 ITER 超伝導磁石開発グループリーダー。主に、大型超伝導コイル及び極低温用構造材料の研究開発に従事。低温工学・超電導学会、日本機械学会、日本鉄鋼協会、日本保全学会会員。

小 川 剛 史 1970 年 10 月 1 日生。1994 年大阪大学工学部生産加工工学科卒業。同年東芝勤務。主に溶接自動化の研究開発に従事。溶接学会会員。

片 山 義 紀 1967 年 7 月 25 日生。1991 年北海道大学工学部金属工学科卒業。1993 年同大学院金属工学専攻終了。同年東芝勤務。主に軽水炉材料の研究開発に従事。腐食防食協会、溶接学会会員。

小 方 大 成 1964 年 8 月生。1989 年日本工業大学工学部電気電子工学科卒業。1991 年同大学院電気工学専攻修了。同年東芝アイテック(株)勤務。2011 年多摩大学大学院経営情報学修了(MBA)。主に超伝導応用機器の開発設計に従事。

峯 村 敏 幸 1969 年 11 月 1 日生。1993 年大阪大学工学部生産加工工学科卒業。同年東芝勤務。主に炉内構造物など大型製缶溶接管理業務に従事。溶接学会会員。

宮 部 圭 介 1958 年 7 月 31 日生。1981 年九州工業大学工学部機械工学科卒業。1983 年九州大学大学院機械工学専攻修了。同年東芝勤務。主に原子力・火力発電プラント診断システムの開発・設計に従事。機械学会会員。

渡 海 大 輔 1975 年 11 月生。1998 年大阪大学工学部土木工学科卒業。2000 年同大学院工学研究科修了。同年川崎重工業(株)勤務。大型鋼構造物・輸送機器の製造、システム技術および溶接技術に関する開発業務に従事。

新 見 健一郎 1965 年 9 月生。1988 年大阪府立大学工学部金属工学科卒業。1990 年同大学院工学研究科修了。同年川崎重工業(株)勤務。低温貯槽・圧力容器の製造、構造材料及び溶接技術に関する開発業務に従事。