



ITER用真空容器の製作技術開発と成果

2002年3月

中平 昌隆・柴沼 清・梶浦 宗次・濱井 正直*
小泉 興一・武田 信和・角館 聰・田口 浩
岡 潔・小原 建治郎・多田 栄介・阿部 充志*
荒谷 雄*・鈴木 隆之*・大胡 泰彦*・高橋 弘行*
蛭田 竜輔*・内田 孝穂*・柳 寛*・斎藤 房男*
近藤 光昇*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

ITER 用真空容器の製作技術開発と成果

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

中平 昌隆・柴沼 清・梶浦 宗次・濱井 正直^{*1}

小泉 興一⁺¹・武田 信和・角館 聰・田口 浩・岡 潔・小原 建治郎・多田 栄介⁺²

阿部 充志^{*2}・荒谷 雄^{*3}・鈴木 隆之^{*2}・大胡 泰彦^{*2}・高橋 弘行^{*2}・蛭田 竜輔^{*2}

内田 孝穂^{*1}・柳 寛^{*1}・斎藤 房男^{*1}・近藤 光昇^{*1}

(2002年1月30日受理)

ITER 工学設計活動(EDA)において、日本、EU、ロシア、アメリカの4極による国際協力の下、真空容器製作技術の開発を実施した。開発では、実規模の真空容器セクタモデル及びポート延長部の製作・試験により、真空容器製作・組立技術に関する重要な情報として、製作時及び現地組立時の溶接変形量、寸法精度と許容公差を得た。また、遠隔溶接口ボットによる作業性の確認を行った。本報告では、厚板で変形を抑えるための溶接方法や、セクター間現地溶接部の溶接技術及び遠隔溶接技術など真空容器製作技術開発のプロジェクトを通じて得られた製作・組立技術の開発成果について報告する。

那珂研究所（東海駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+1 那珂研究所

+2 ITER 開発室

*1 (株)東芝

*2 (株)日立製作所

*3 (株)レーザックス

Development of Fabrication Technology for ITER Vacuum Vessel

Masataka NAKAHIRA, Kiyoshi SHIBANUMA, Souji KAJIURA,
Masanao SHIBUI^{*1}, Koichi KOIZUMI^{*1}, Nobukazu TAKEDA, Satoshi KAKUDATE,
Kou TAGUCHI, Kiyoshi OKA, Kenjiro OBARA, Eisuke TADA^{*2}, Mitsushi ABE^{*2},
Takeshi ARAYA^{*3}, Takayuki SUZUKI^{*2}, Yasuhiko DAIGO^{*2}, Hiroyuki TAKAHASHI^{*2},
Ryusuke HIRUTA^{*2}, Takaho UCHIDA^{*1}, Yutaka YANAGI^{*1}, Fusao SAITO^{*1}
and Mitsunori KONDOH^{*1}

Department of Fusion Engineering Research
(Tokai Site)
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 2002)

The ITER vacuum vessel (VV) R&D has progressed significantly with the international collaborative efforts by the Japan, Russia and US during the Engineering Design Activity (EDA). Fabrication and testing of a full-scale VV sector model and a port extension have yielded critical information on the fabrication and assembly technologies of the vacuum vessel, magnitude of welding distortions, dimensional accuracy and achievable tolerances during sector fabrication and field assembly. Also, the basic feasibility of the remote welding robot has been demonstrated. This report presents detailed fabrication and assembly technologies such as welding technology applicable to the thick wall without large distortion, field joint welding technology between sectors and remote welding technology through the VV R&D project.

Keywords : ITER, Fusion, Tokamak, L3 Project, Vacuum Vessel, Full-scale Sector Model, Narrow Gap Welding, Electron Beam Welding, Welding Distortion

+1 Naka Fusion Research Establishment

+2 Department of ITER Project

*1 Toshiba corporation.

*2 Hitachi, Ltd

*3 Laserx co., Ltd

目 次

1. はじめに	1
2. 真空容器の機能と構造	1
3. 真空容器の試作課題と試作規模	2
4. 実規模セクタモデルの試作	3
4.1 國際分担と基本構造	3
4.2 サブセクタAの製作	5
4.3 サブセクタBの製作	9
4.4 サブセクタの製作結果	14
5. 現地溶接接続	16
5.1 セクタモデル接続試験	16
5.2 ポート延長部接続試験	23
6. まとめ	27
謝辞	27
参考文献	27

Contents

1. Introduction	1
2. Function and Structure of Vacuum Vessel	1
3. Technical Issues of VV and Fabrication Scale	2
4. Fabrication of Full-scale Sector Model	3
4.1 International Work Sharing and Basic Structure	3
4.2 Fabrication of Sub-sector A	5
4.3 Fabrication of Sub-sector B	9
4.4 Results of Sub-sectors Fabrication	14
5. Field Welding	16
5.1 Field Welding Test of the Sector Model	16
5.2 Field Welding Test of the Port Extension	23
6. Conclusion	27
Acknowledgement	27
References	27

1. はじめに

国際熱核融合実験装置（ITER）の建設を目指し、1992年から日本、EU、ロシア、アメリカの4極により国際協力の下に工学設計活動(EDA)が実施された。この期間中、真空容器などのITERを構成する主要コンポーネントの設計と製作技術開発が行われ、ITERの建設に向けて大きな成果が得られた。以下では、日本が中心となつて進めた真空容器の製作技術開発とその成果について述べる。

2. 真空容器の機能と構造

真空容器は、内部にプラズマを閉じ込めるドーナツ状（トーラス形状という）の容器で、トカマク本体の中でも最も重要な機器の一つである。真空容器が果たすべき役割を以下に示す。

- 1) プラズマ運転に必要な高真空の維持
- 2) 燃料となるトリチウムを閉じ込める隔壁を形成
- 3) プラズマ電流立ち上げに必要なトロイダル一周電気抵抗の確保
- 4) 電磁力に耐える機械的強度の確保
- 5) 放射線を遮蔽し超伝導コイルを保護
- 6) 内壁側に設置されるブランケット等の高精度取付けを保証する形状精度

本開発の初期段階では、これらの機能を達成させるため、真空容器の構造設計が行われた。

1) と 2) の機能を果たすため、真空容器をオーステナイトステンレス鋼の溶接構造体とした。

3) と 4) のために、真空容器を内壁と外壁、及びこの間を溶接接続するリブで構成し、高い一周抵抗 ($7 \mu\Omega$) と高い剛性を両立させた。

5) のために、二重壁容器の内部にオーステナイトステンレス鋼の積層板で構成した遮蔽体を設置した。

6) に対しては、試作開発により製作方法を実証することとした。また、真空容器はトロイダル方向に複数に分割されたセクタ構造とし、順次トーラス形状に組立てる計画である。このため、現地でセクタ同士を接続する技術が必要となり、セクタ間溶接技術も試作開発で実証することとした。

3. 真空容器の試作課題と試作規模

真空容器の試作開発における主な課題は、2章の要求事項より、以下となる。

1) 大型構造物の高精度製作技術の実証

10m級の大型溶接構造物に対し、10mmレベル（工場での製作精度±10mm以内、現地溶接後±15mm以内）の高い寸法精度を満足する製作技術の開発と実証

2) 低歪み現地溶接法の開発と実証

現地でのセクタ間の低歪み溶接法の開発

3) 溶接部の高信頼性と高真空の確保

高い真空気密性 (1×10^{-8} Pa · m³/s以下) の実証

一方、真空容器はオーステナイトステンレス鋼で製作されるため、溶接ひずみが比較的大きい。また、真空容器にはポートなどの付帯機器が接続されるため形状が複雑となり、局所的な溶接変形が全体の製作精度に大きな影響を与える可能性がある。このため、上記の技術課題を解決するには、実規模スケールの真空容器セクタの試作開発が不可欠と判断された。

また、溶接方法としては、以下の2方式が候補として考えられ、これらをセクタモデルの試作開発に適用することとした。

1) 電子ビーム(EB)溶接(先進的な溶接技術)

2) 狹開先のタンゲステン・イナート・ガス(TIG)溶接(一般的溶接方法の高度化技術)

各々の溶接法を用いた真空容器セクタの試作開発のステップは以下とした。

1) セクタモデル製作法の設計

2) 要素試験による溶接技術の基礎試験

小試験体による二重壁溶接技術を確認

3) セグメントの先行製作

セクタを構成する部分構造体の典型的な1セグメントについて先行的に試作し、溶接品質、製作精度を確認

4) 実機大セクタモデルの試作

セクタを構成する全てのセグメントを製作し、寸法管理、溶接品質管理を行った上でこれらを結合し、真空容器セクタ(9°分)を組立てた後、製作精度や溶接部の健全性等を確認

以下では、日本が中心となって開発した実規模真空容器セクタモデルの試作開発を中心に説明する。

4. 実規模セクタモデルの試作

4. 1 国際分担と基本構造

実規模真空容器セクタモデル（以下「セクタモデル」と呼ぶ）の試作は、7大工学R&Dの1つとして「ITER 真空容器実規模セクタモデル計画」¹⁾と呼ばれ、1995年より開始し、第1図に示すようにセクタモデルの製作・試験²⁾を日本が、水平ポート延長部の製作・試験³⁾⁻⁴⁾をロシアが、そして遠隔溶接の開発³⁾⁻⁴⁾をアメリカが担当することとした。

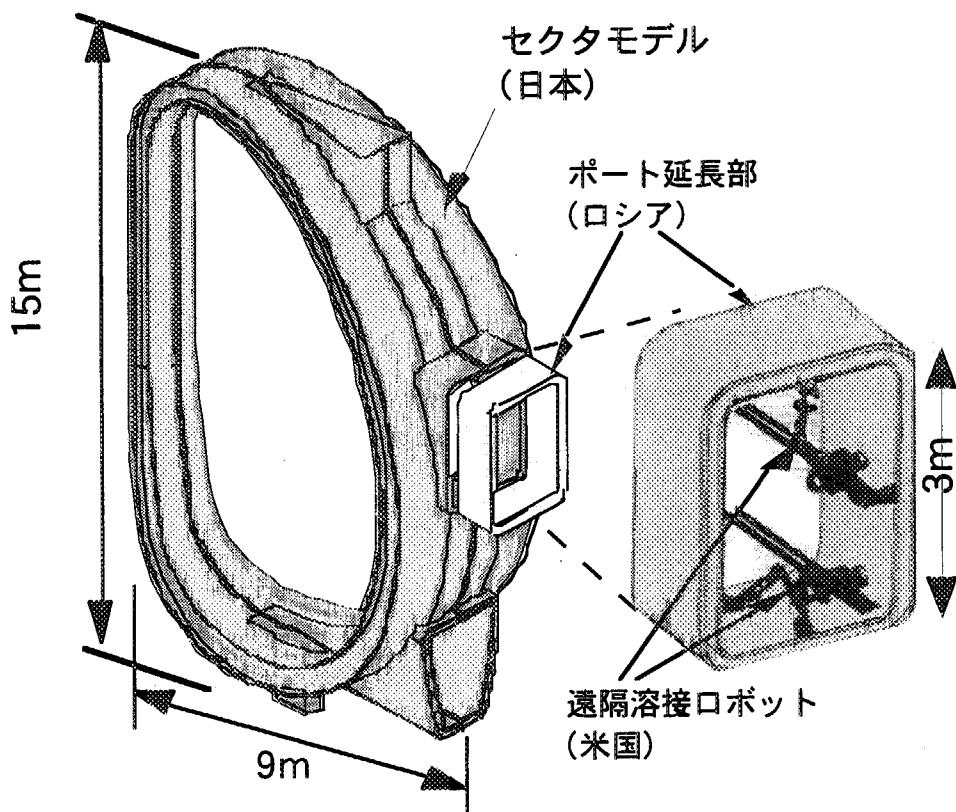
セクタモデルの基本仕様を第1表に示す。なお、試作開発のためのこの仕様は、1998年までのITERの基本仕様に基づいたもので、コンパクト化された現行のITER-FEATの寸法よりやや大きい。

日本の担当であるセクタモデルは、第1図に示すようにポートを中心に左右に分割されたサブセクタAとBから構成される。これらは工場で製作された後、現地（日本原子力研究所（以後、原研という））にて溶接接続（現地溶接接続試験）される。

第1表 セクタモデルの基本仕様

大きさ : 実規模 18° セクタ (1998 年設計仕様) (ポート中央分割 9° 半セクタ × 2) 全高さ ~ 15m, 全幅 ~ 9m
構造材料: SS316L and SS316L+N ($0.06 \leq N \leq 0.08 \text{ wt\%}$)
板厚 : 40(一般部) mm, 60(下部支持部近傍) mm
補強リブ: 6 本/インボード(トーラス中心側) : 14 本/アウトボード (トーラス外側)
目標精度: 全高、全幅に対し < ± 5 mm

注) ITER 最終設計報告書に基づく実機真空容器の構造材は、通常の SUS316L に窒素量範囲を 0.06–0.08wt%とした SUS316L-IG を採用している⁵⁾。



第1図 真空容器構造と実規模セクタモデル計画の分担

4. 2 サブセクタ A の製作

(1) サブセクタ A の製作法

3 章で述べた EB 溶接を主体とした本サブセクタ製作方法の特徴を以下に示す。

- 1) EB 溶接設備の制限から、真空容器の D 型断面を第 2 図に示すようにポロイダル方向に 9 つのセグメントに分割し、製作中の寸法管理を容易にする。また、各部分の並行製作作業が可能となり、製作期間の短縮を図ることができる。
- 2) トリチウム隔壁として高い信頼性が要求される内壁とリブ間の溶接部は、完全溶込みが必要である。このため、EB を水平方向から入射する 1 パス溶接の継手構造（水平入射 EB 法）を採用した。第 3 図 (a) に、水平入射 EB 法の概念と変形防止用の拘束治具の設置法を示す。また、第 4 図(a) に、板厚 4.0 mm のリブと内壁間を水平入射 EB 法により溶接した溶接断面の試験結果を示す。
- 3) 外壁とリブ間の溶接部は、内部に設置される遮蔽体のために外側からのみ溶接が可能である。このため、外壁とリブ間の空隙を 0.5 mm 以下に調整した後、外壁外側から EB をリブまで貫通させて外壁とリブを接続する新しい溶接法（貫通 EB 溶接法）を採用した。第 3 図 (b) に、貫通 EB 溶接法の概念図を示す。外壁は油圧ジャッキによりリブに押さえながら貫通 EB 溶接が行われる。また、第 4 図(b)には、貫通 EB 溶接法により板厚 4.0 mm の外壁からリブに「くさび」状に接合された溶接断面の試験結果を示す。

このサブセクタ A の製作手順をまとめると以下となる。

- 1) 内壁材の切断、曲げ、端面の機械加工
- 2) リブ材の切断、端面の機械加工
- 3) 内壁とリブの水平入射 EB 溶接
- 4) 外壁材の切断、曲げ、端面の機械加工
- 5) 外壁とリブとの貫通 EB 溶接
- 6) 1) から 5) の手順で、セグメント 1 から 9 の製作
- 7) セグメント 1 から 9 の組立て、溶接接続（サブセクタ A の完成）
- 8) セクタ A の端面（セクタ間接続面）の機械加工

(2) サブセクタ A 製作の技術課題

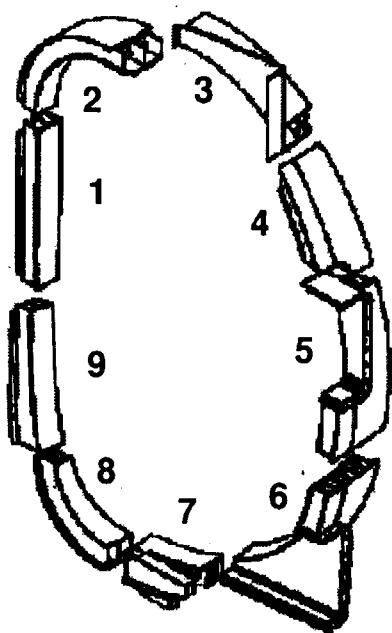
本方法での技術課題は、EB 溶接時における以下の最適化である。

- 1) 水平入射 EB 法によって完全溶込みを達成するための、EB の入射角と入射点の最適化
- 2) 貫通 EB 法における、溶接変形を細小 に押さえられる EB の入射順序と EB 溶

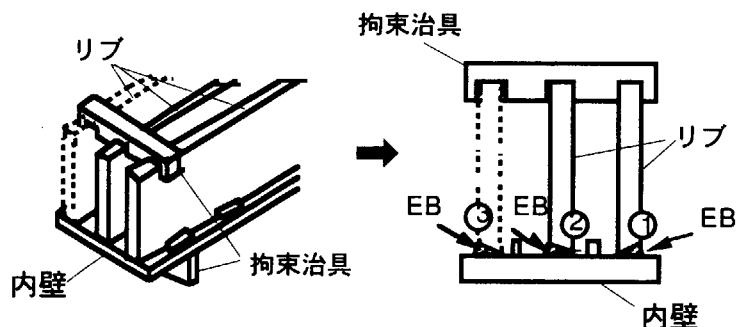
接ピッチの最適化

また、貫通 EB 溶接の機械強度に関しては、継手の引張試験、曲げ試験、引張疲労試験、曲げ疲労試験を実施し、静的強度や疲労強度が実用に耐え得ることを確認した。

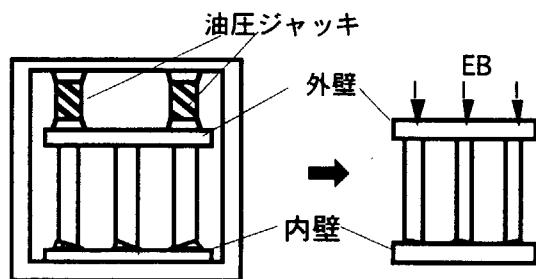
なお、セグメント間の接続には、TIG 溶接を採用したが、各セグメントの製作精度を考慮しながら、予想される溶接変形量に合わせて接続位置を調整した。これにより、サブセクタ A の D 型断面の最終寸法精度を要求値以下に押さえた。



第2図 サブセクタAの製作時におけるポロイダル方向の分割

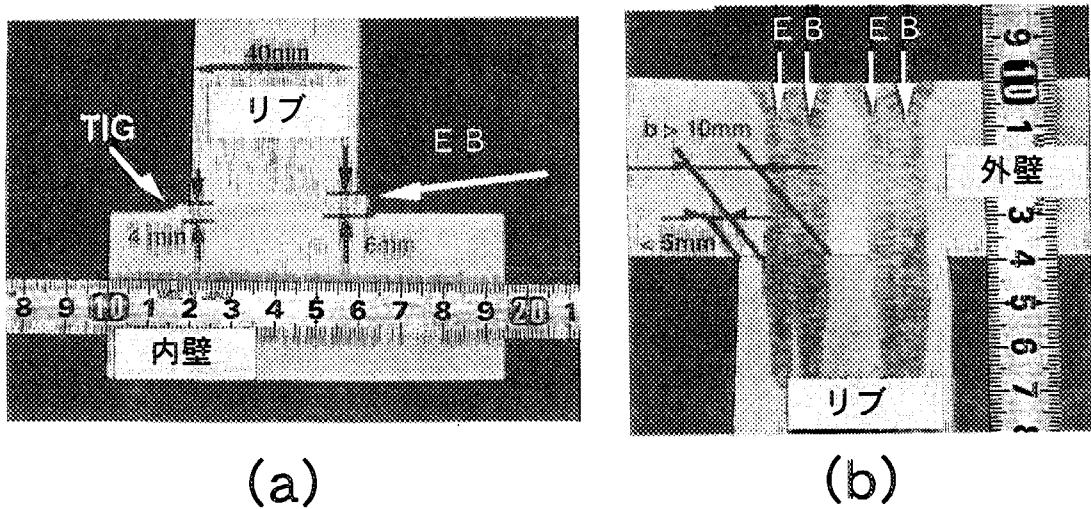


(a) 内壁と補強リブのEB溶接(水平入射EB法)



(b) 外壁とリブの溶接(貫通EB接続法)

第3図 サブセクタA の EB 溶接法



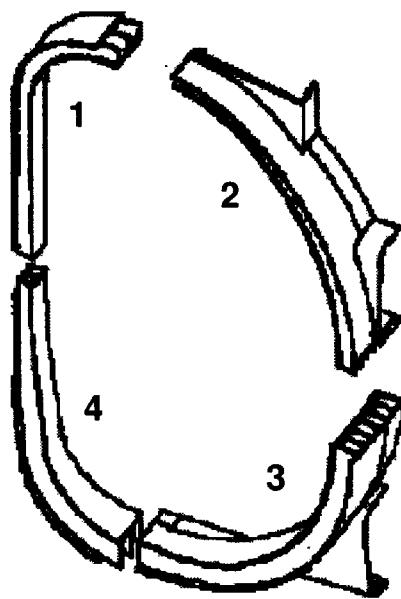
第4図 水平入射EB法(a)と貫通EB溶接法(b)の試験結果

4. 3 サブセクタ B の製作

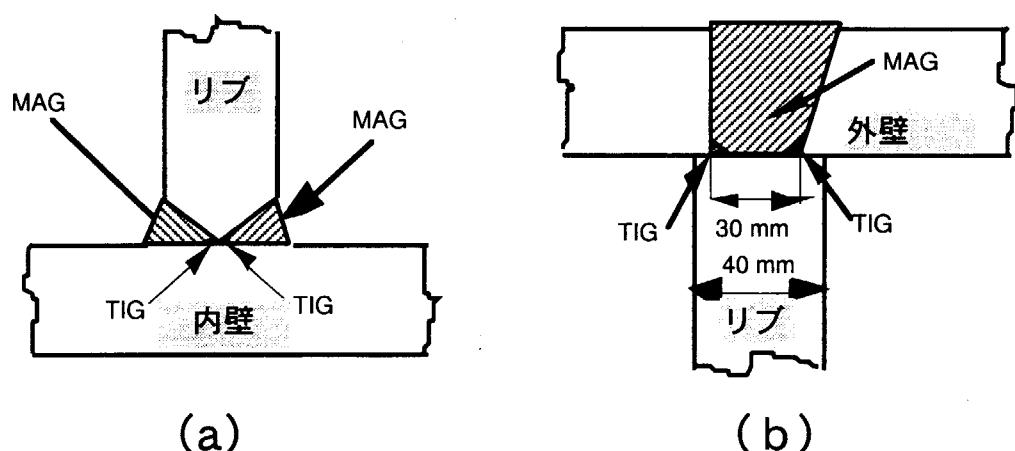
(1) サブセクタ B の製作法

設備面からの制約がない狭開先 TIG にメタル・アクティブ・ガス(MAG)溶接を併用したサブセクタ B の製作の特徴及び方法を以下に示す。

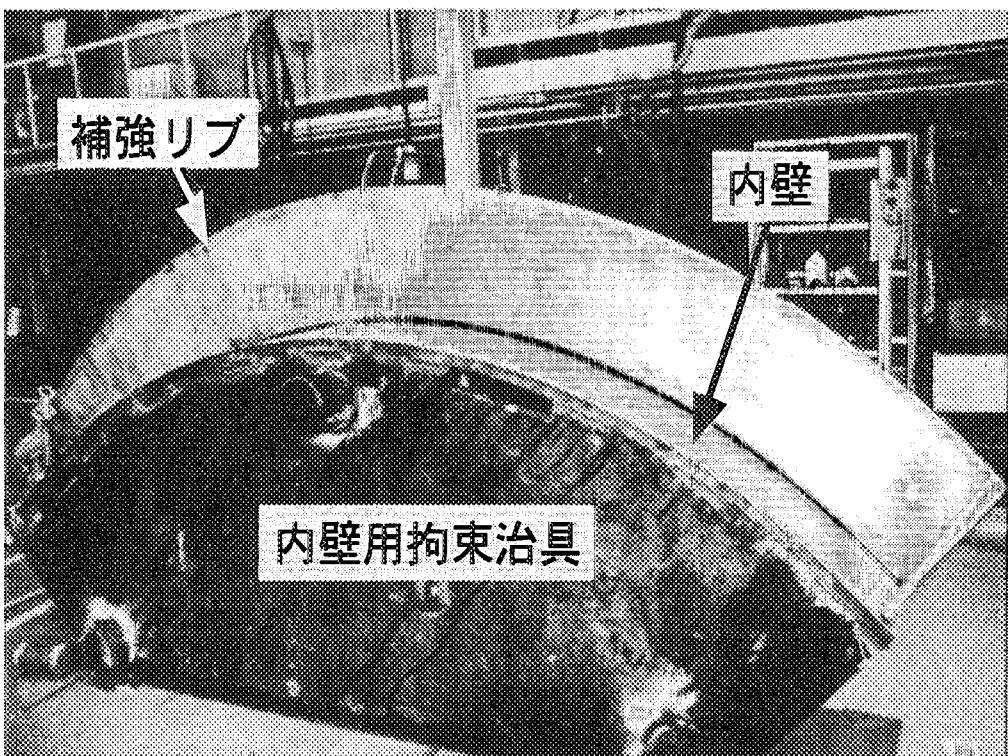
- 1) 第5図に示すように、真空容器のD型断面をポロイダル方向に4分割し、サブセクタ A と同様に作業性の向上を図ると共に、最終組立精度を向上させる。
- 2) EB 溶接に比べて総入熱量が大きい TIG 溶接と MAG 溶接を併用した。このため、第6図に示すように、初層溶接には TIG 溶接を使用し、2層目から最終層までは MAG 溶接を使用した。また、第7図に示すように、内壁側に高剛性治具を取り付けて溶接変形を抑えた。
- 3) 予備試験により溶接変形とその方向を測定し、この試験結果から溶接変形を予測した。次に、第8図 (a)、(b) のように、設置用治具を用いてリブを予測結果に基づいて傾斜させ、溶接を実施した。
- 4) 内壁とリブ間の狭隘空間内のリブの溶接には、第9図のチェーン駆動の走行型溶接ロボットを使用した（ロボットの走行空間を第8図 (b) に斜線で示す）。
- 5) 外壁とリブ間の溶接は、第6図と第8図 (c) のように、外壁とリブ間の溝を TIG/MAG 溶接によって埋める、いわばプラグ溶接（母材の一方に穴をあけて板の表面まで一杯に溶接し、もう一方の母材と接続する溶接。栓溶接ともいう。）を溝状に連続して行う方式を採用した。この場合もリブの溶接と同様に、変形量を予測して予め外壁の設置角度を調整した後に溶接を実施した。



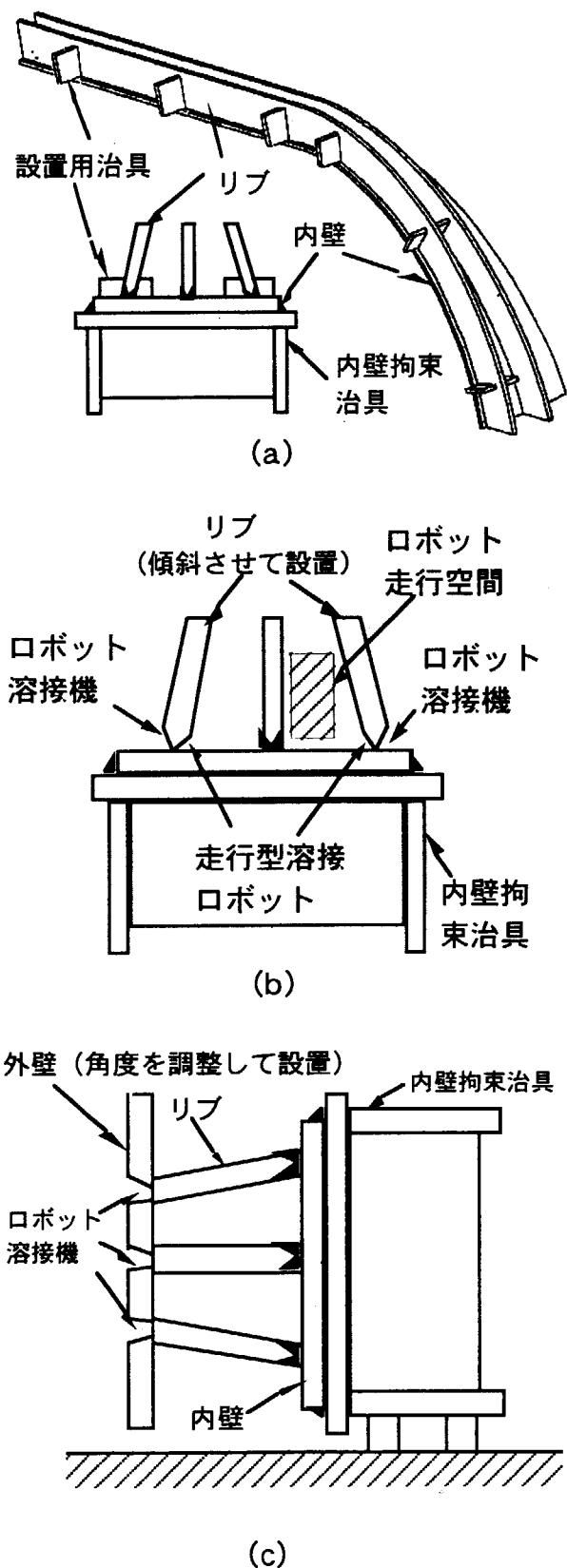
第5図 サブセクタBの製作時におけるポロイダル方向の分割



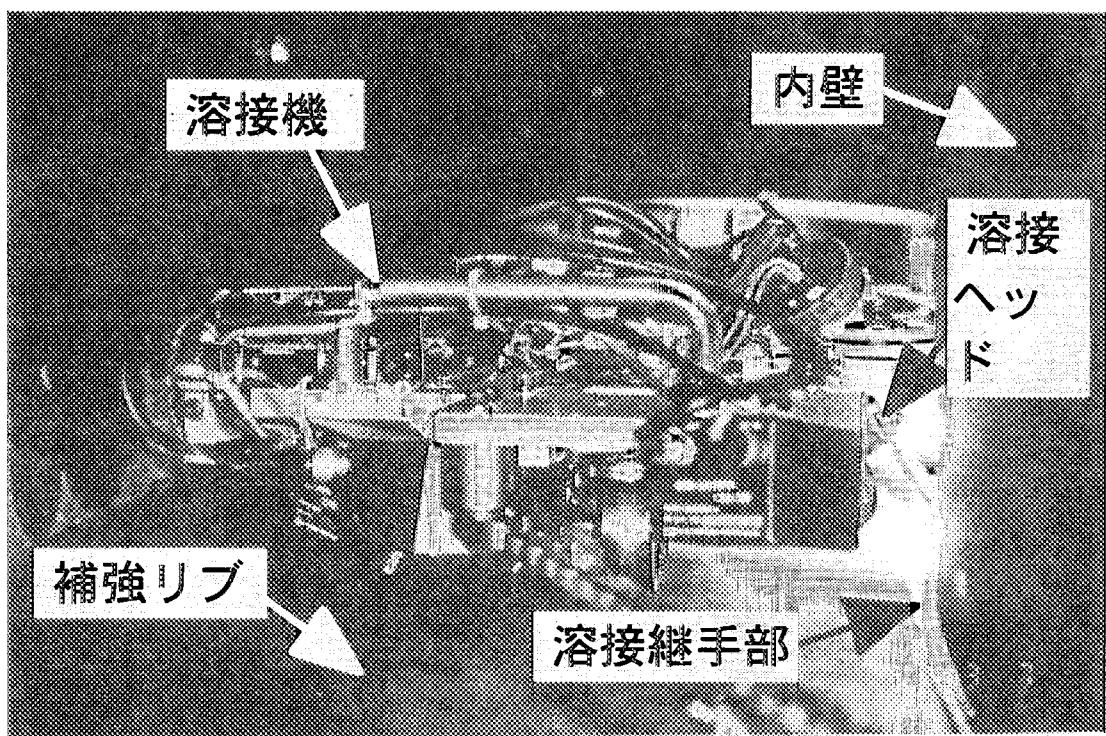
第6図 内壁と補強リブ間 (a) 及び外壁と補強リブ間 (b) の TIG/MIG 溶接



第7図 内壁と補強リブ間の溶接時における高剛性治具の設置



第8図 サブセクタBの溶接手順

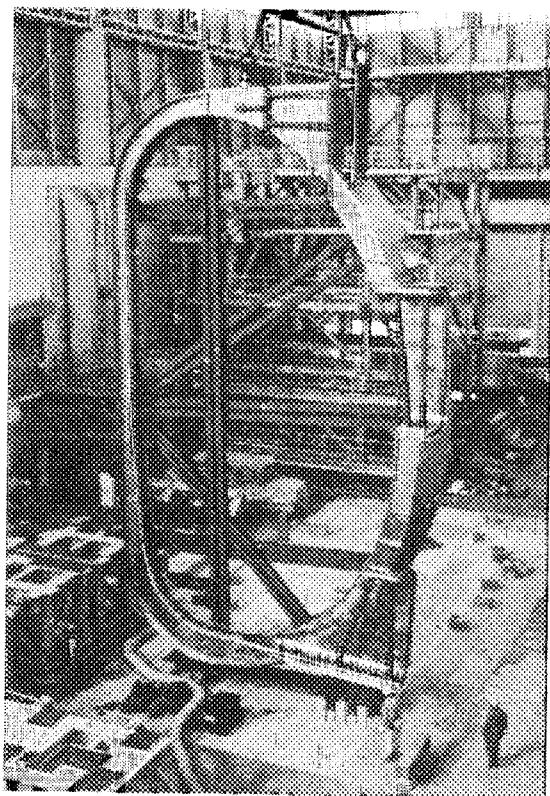


第9図 チェーン駆動の走行型溶接ロボットによる狭隘空間内の溶接

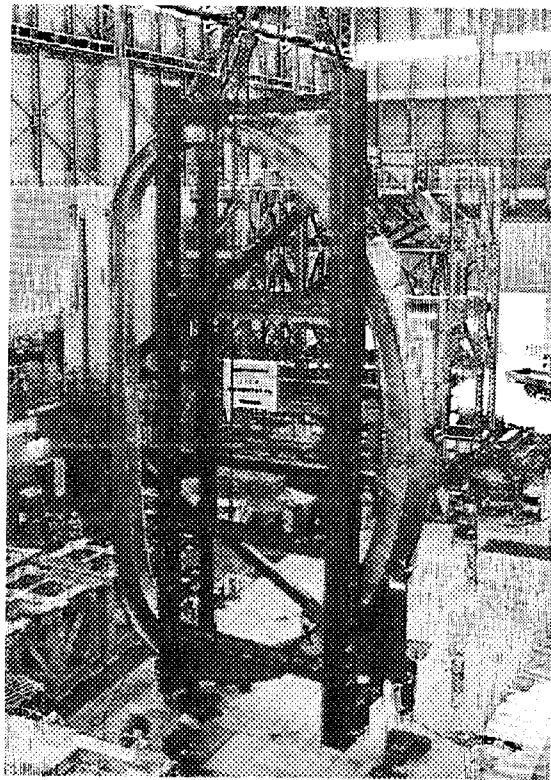
4. 4 サブセクタの製作結果

2種類の溶接・組立方式によるサブセクタAとBの試作・試験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 当初の計画通り、1997年9月までにサブセクタA、B共にポロイダル全周の製作を完了し、製作の目標値として設定された±10mmの寸法精度を上回る±3mmの寸法精度を達成した(第10図)。
- 2) 耐圧・漏洩試験および機械特性試験を実施して真空隔壁としての構造健全性を確認すると共に、有限要素法による解析結果と比較してITER設計に採用した構造解析手法の妥当性を検証した。
- 3) 試作の結果、前述のようにA、B異なる溶接・組立方法で製作したが、精度、施工性(製作期間)、性能とも有意な差は見られず、両手法とも設計条件を満たすことが明らかとなった。



(a) サブセクタA



(b) サブセクタB

第10図 ITER実規模真空容器セクタモデル

5. 現地溶接接続

完成した2体のサブセクタを真空容器の統合試験サイトである原研東海研究所内に搬入し、2体のサブセクタのポート中央面での現地溶接・組立試験を1997年11月から1998年6月まで実施した。

5. 1 セクタモデル接続試験

実機の現地組立では、空間的制約から内壁内側、即ちプラズマ側からのみ溶接機のアクセスが可能である。このため、試験では実機の条件を模擬し、外壁外側へのシールドガスの供給を除く全ての作業を内壁内側から実施した。

(1) 溶接法の選定

真空容器は現地でセクタ間を溶接し、トーラスを形成する。従って、現地溶接の溶接変形が大きい場合、最終的なセクタ間の製作誤差が大きく、トーラスを形成できない可能性がある。このため、高い溶接の信頼性を備えるとともに、最も溶接変形が少なく、高い溶接速度が得られる溶接方法を調査検討した。

この結果、1) EB溶接の場合、設備や真空領域を形成する必要がある。また、2) レーザ溶接の場合、内外壁の板厚(板厚40mm、60mm)が現状の技術を越えている。このため、両者とも採用は困難であると判断し、狭開先TIG溶接を採用することとした。

しかし、真空容器のような大型構造物に対して、セクタ間溶接に必要な全姿勢溶接ができる狭開先TIG溶接技術は、開発当時にはなかった。このため、先ず基礎的な溶接技術の開発から始めた。

(2) 狹開先TIG溶接機の試作試験

検討した狭開先TIG溶接法の中で、要求仕様を満足する可能性が高い溶接法は以下の2方式である。

- 1) 電極揺動による狭開先TIG溶接法 (第11図に概念を示す)
- 2) ダブルシールドワイヤによる狭開先TIG溶接法 (第12図に概念を示す)

1) は先端を曲げた電極を狭開先内で揺動させることにより、狭開先でも開先壁に溶融金属を保持することが容易であると共に高い溶着量が得られることが特徴である。また、2) は電極の前方と後方の2方向から溶接ワイヤを供給し、溶接速度を向上させることを特徴とする。

両者は甲乙付けがたい特長を備えているため、前者を内壁の溶接に、後者を外壁の

溶接に適用することとし、両者の全姿勢溶接法の開発を実施した。

テストピースを使用した溶接試験器の試作開発には約1年間を要したが、両者とも当初の目標を達成した。即ち、下向きの溶接量では50g/min以上、最も困難な上向きの溶接量では約30g/minを可能にした。

これは、各溶接機の溶接条件の最適化、例えば揺動TIG溶接機では、溶接電流、溶接速度、トーチの揺動周期などの最適化によって達成されたものである。

(3) セクタモデルの現地溶接試験

1) 溶接法

基礎溶接試験の結果から、第13図に示すように、サブセクタの外壁間の溶接部は、ダブルシールドワイヤ狭開先TIG溶接機による開先角8度の突き合わせ溶接、内壁間の溶接部は内壁間に開けた隙間(180mm)に細分した板(スプライスプレート)を挿入し、その両側を揺動狭開先TIG溶接機による開先角8度の突き合わせ溶接とした。なお、溶接部の信頼性を確保するため、開先間の隙間と目違ひ量は両者とも0.8mm以下とした。また、目視検査が可能な部位については可能な限り裏波の状況を確認すると共に、超音波探傷法と浸透探傷法により溶接部の健全性を確認することとした。

D型断面の真空容器の現地溶接には、全溶接姿勢(下向き、水平および上向き)での作業が必要であり、組立治具等により溶接作業時のアクセス空間が制限される。このため、内壁に設置したガイドレールを走行する2種類の自走式自動溶接機(外壁用及び内壁用)を作成し、初層から最終層まで全て自動により溶接を行った。外壁間用溶接機を第14図に、外壁の溶接時の状況を第15図にそれぞれ示す。

真空容器のD型断面の変形を最小に抑えるため、外壁間、内壁間の溶接には、ガイドレール上に複数の自動溶接機を配置し、各層毎にD型断面の対称な位置を交互に溶接する「対称溶接法」を採用した。また、各ステップで現地溶接部の収縮量と角変形量、並びにD型断面の寸法変化を測定し、収縮量の平均値からのバラツキを1.0mm以下に抑えるように各部分の溶接速度と溶着量を調整した。

2) 外壁間溶接の結果

外壁間溶接時に測定した外壁溶接部の平均収縮量と内壁間開口部の寸法変化を第16図に示す。図より外壁溶接部の平均収縮量は3.2mm、内壁間開口部の平均収縮量は外壁溶接に伴う角変形分を含め、4.6mmである。外壁溶接部の収縮量変化が5～6層目でほぼ終了するのに対して、内壁間開口部は角変形の影響で6層目以降も変形が進行することが分かる。

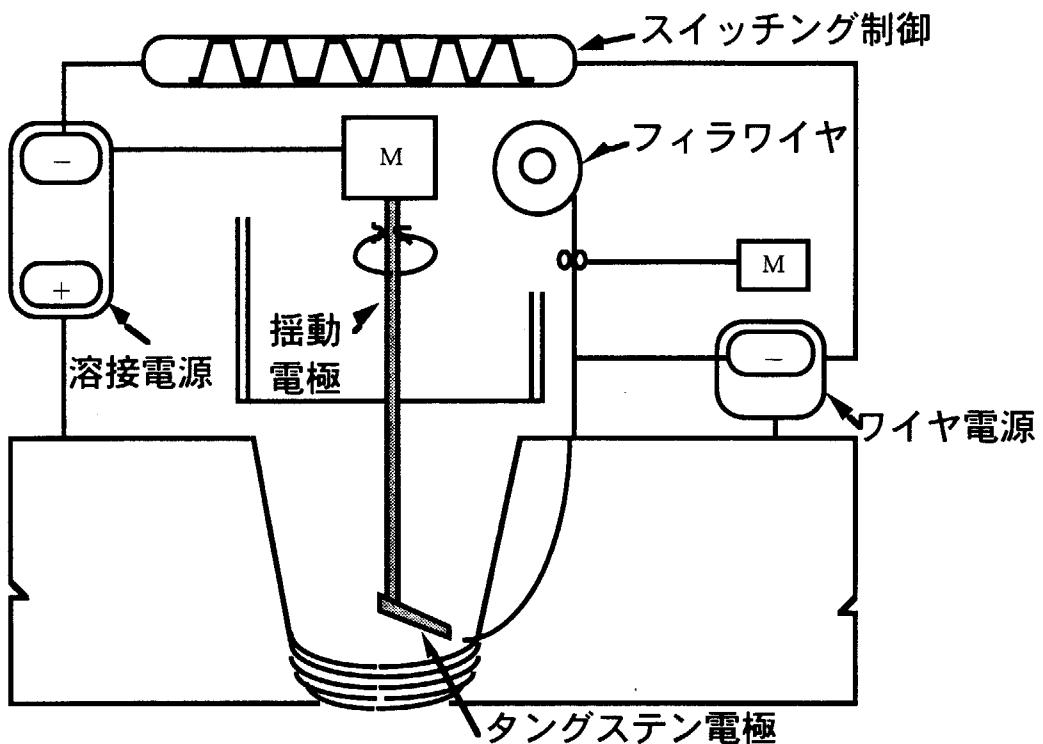
3) 内壁間溶接の結果

スライスプレートを用いた内壁間現地溶接時の内壁接続部のトロイダル方向の変形量を第17図に示す。剛性の小さいD型断面の直線部で収縮が大きく、剛性の高い外周側の変形が小さいことが分かる。溶接部の平均収縮量は、4.6mmである。

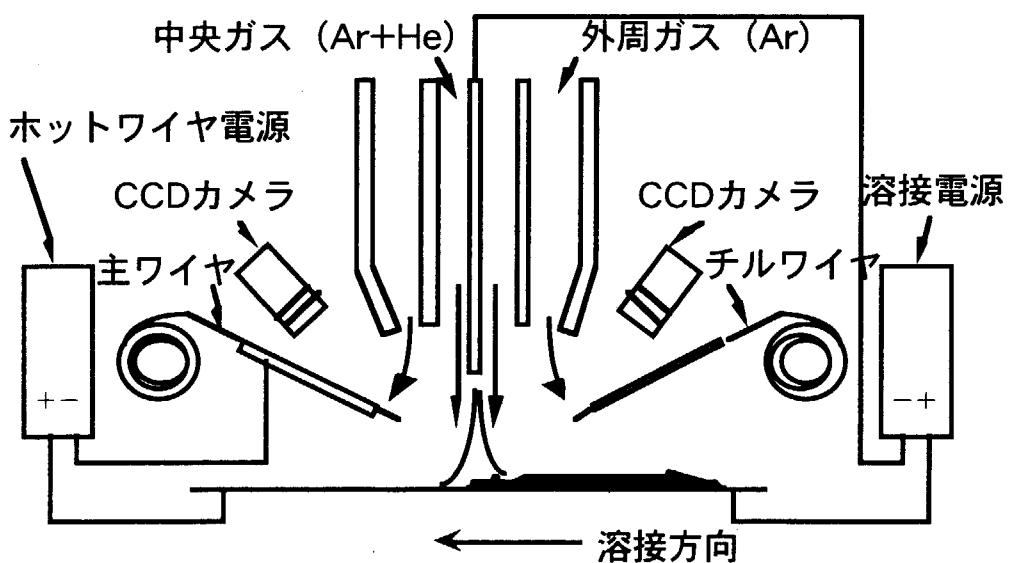
サブセクタBのD型断面寸法について、内壁溶接時と変形拘束治具の取り外し後の寸法変化をまとめ、第18図に示す。外壁の接続により剛性が大幅に増加した結果、内壁溶接時の寸法変化は、水平方向で最大+2.5mm、垂直方向で-0.5mmであり、拘束治具取り外し後の寸法変化も最大で+2mm程度である。これらの測定の結果、現地溶接によって発生するD型断面の変形は、水平方向で最大+3.5mm、垂直方向で-1.0mm程度に抑えられることが明らかとなった。

4) 現地溶接試験の総合評価

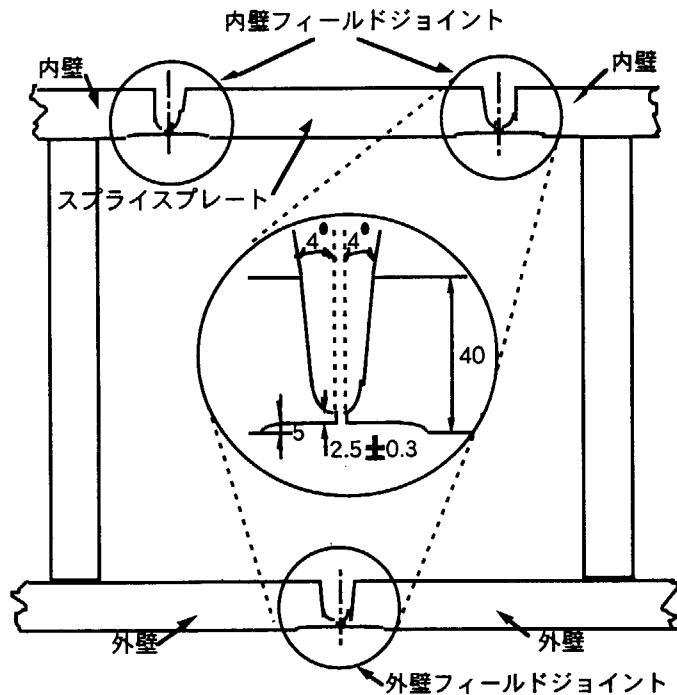
サブセクタA及びB製作時の寸法精度($\pm 3\text{mm}$)を含めた最終組立精度は、スケールによる測定誤差等の不確定要因を考慮した場合でも、ITER仕様である $\pm 15\text{ mm}$ に対して、全高、全幅とも、 $\pm 10\text{mm}$ 以内の精度を達成し、採用した現地組立・溶接方式の妥当性が実証された。



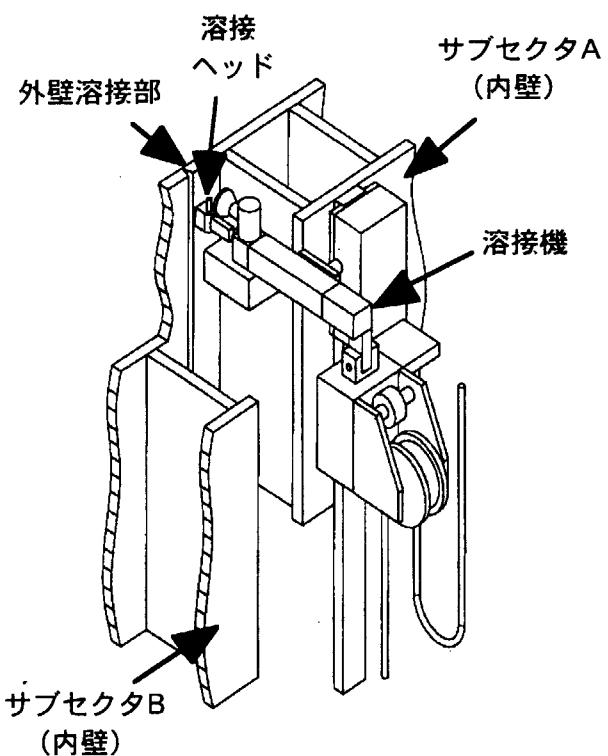
第11図 搖動式狭開先TIG溶接法



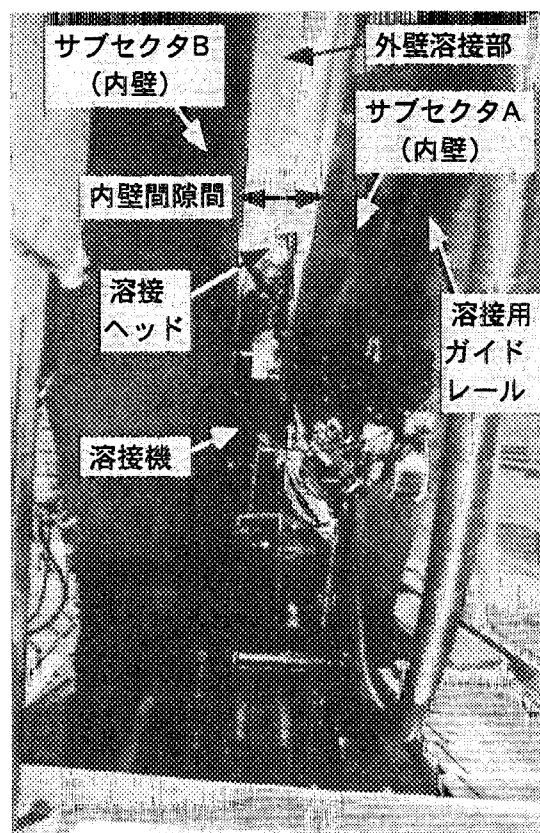
第12図 ダブルシールドワイヤ狭開先TIG溶接法



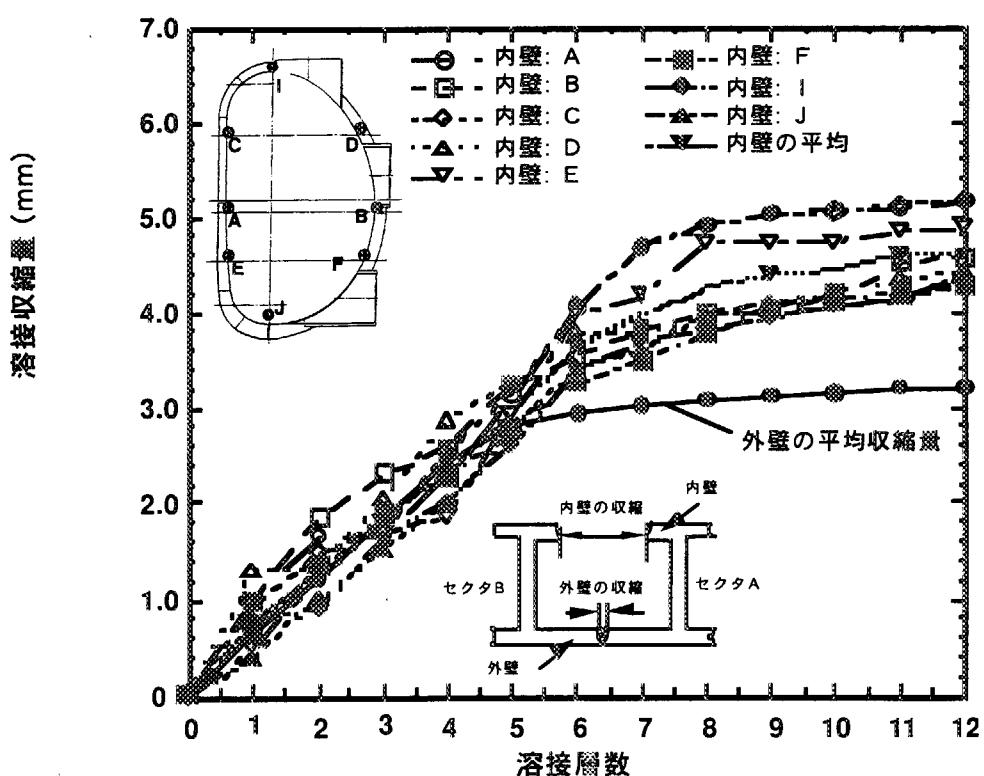
第13図 現地溶接箇所の開先形状



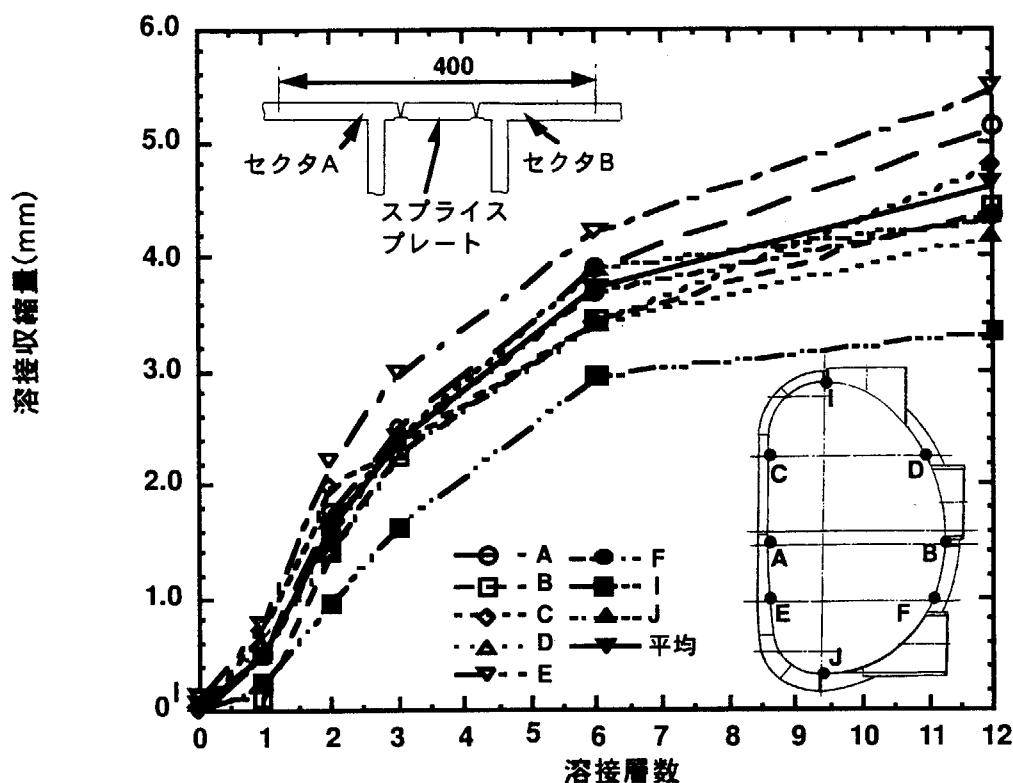
第14図 外壁用溶接機



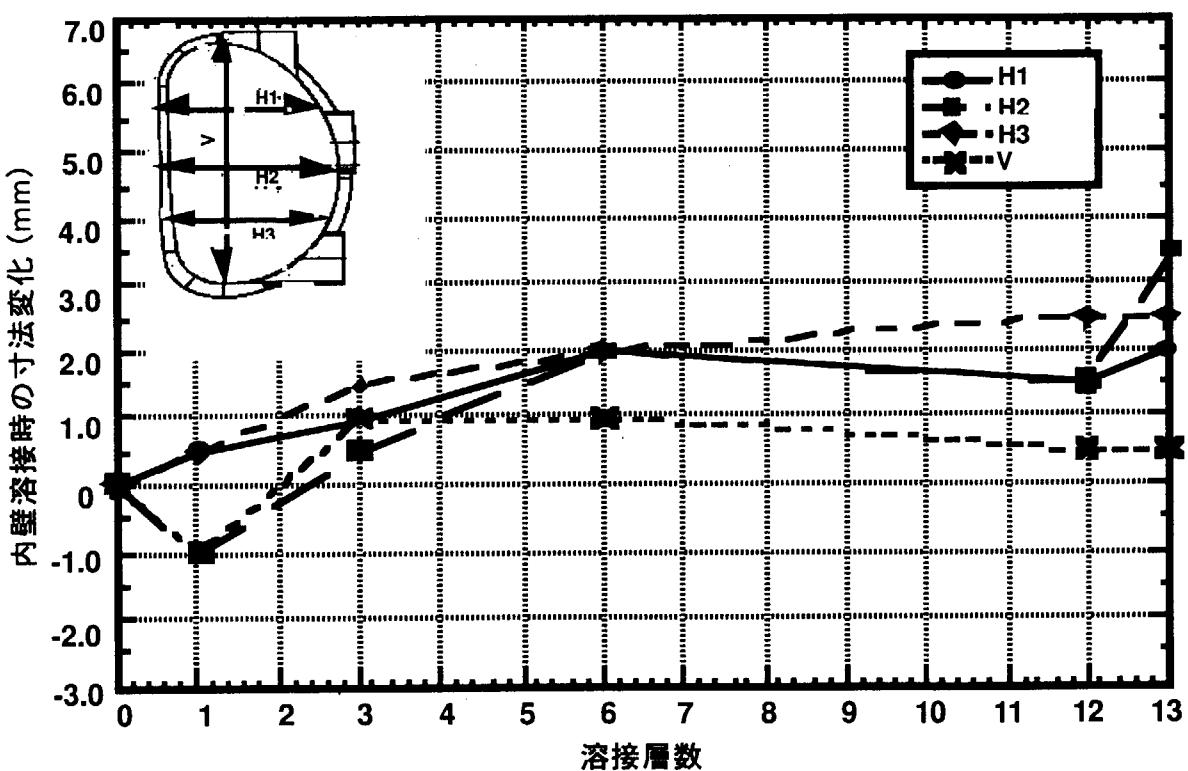
第15図 外壁の溶接



第16図 外壁現地溶接時の収縮



第17図 内壁現地溶接時の収縮



第18図 セクタ間溶接時の断面変形

5. 2 ポート延長部接続試験

(1) 開発課題

ポート延長部は、真空容器セクタ間が現地で溶接接続された後、真空容器に溶接接続される。このポート延長部の溶接は、真空容器セクタ間接続溶接と異なり、ポートの4隅で曲率が約 R 150 mm と小さく、前述した曲率の大きなセクタ間溶接機では対応できず、小曲率対応の溶接技術の開発が課題となる。

このため、小曲率に対応可能な多関節ロボットを使用した溶接口ボットを米国が開発した。

この溶接口ボットを用いた延長ポートの現地接続試験を日本が製作したセクタモデルとロシアが製作したポート延長部を使って実施した。

(2) 試験装置

ロシア製のポート延長部は、第19図のように、高さ 3 m、幅 2 m、長さ 1.5 m の長方形断面を持つ、ステンレス製の二重壁構造体である。米国製の遠隔溶接口ボットは、第20図のように、腕長さ約 1 m の 6 自由度の多関節アームに狭開先 TIG 溶接機を搭載している。ロシア及び米国での単体試験終了後、これらの機器を日本に集め、原研で組み合わせ試験を実施し、2000 年 3 月までにセクタモデルにポート延長部を接続する溶接試験を終了した。

従来の溶接では、配管の自動溶接に代表されるように走行レールを高精度で設置する必要があり、人手による微調整が必要であったが、この溶接機では、人の立ち入れない ITER 条件に対応するため、どのような姿勢にでも対応できる広い自由度を持ったロボットである。

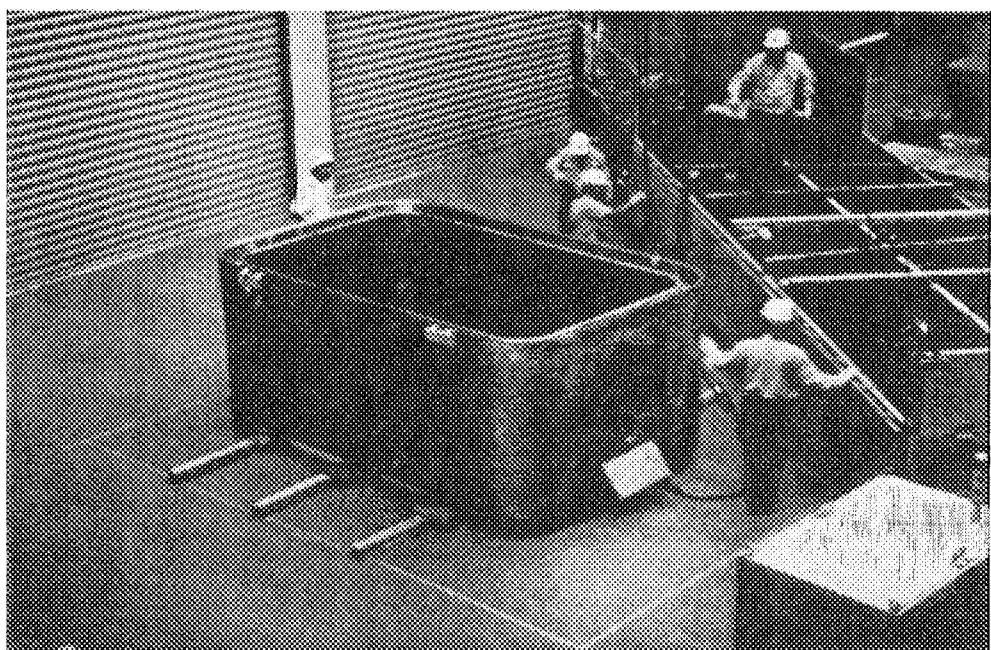
(3) 溶接手順

ポート延長部の溶接時には、セクタモデルの溶接と同様にまず外壁を突き合わせ溶接で接続し、続いて内壁をスライスプレートを用いて溶接接続した。実機ではポートのすぐ外側には熱シールドや超伝導コイルが配置され、外からのアクセスはできない。このため、セクタモデルと同様に、今回も全ての作業は内側から実施した。すなわち、外壁溶接時には内壁側をある幅で空けておき、この間隙から自動溶接機の腕を伸ばして溶接した。この後内壁の間隙を細分した板（スライスプレート）で塞ぐよう溶接した。第21図に示すように、開先形状は「J」であり、遠隔保守時の利便性を考慮して、スライスプレートに「J」開先を加工し、対面側を平坦なままの形状とした。

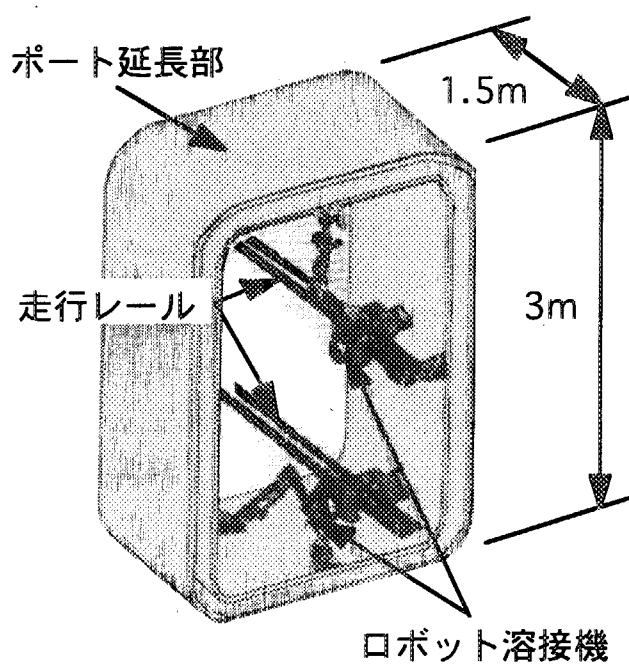
(4) 試験結果

多関節型遠隔溶接ロボットを使用したポート延長部の溶接試験を行い、以下の結果を得た。

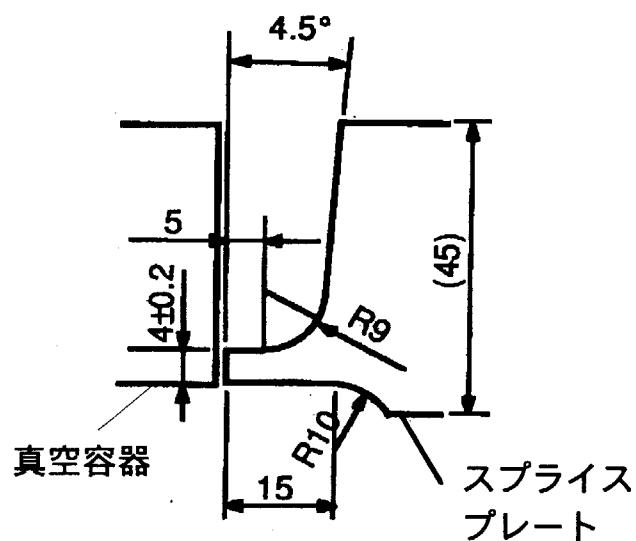
- 1) ポート延長部の外壁溶接時における内壁断面の溶接変形を計測した結果、第22図に示すように変形量は±1mm以下であり、断面変形量はほぼ計測誤差範囲であった⁶⁾。これらの結果は、別途進めている溶接変形解析⁷⁾の検証データとして用いられた。
- 2) また、開先合わせの精度として±3mmという結果を得た。これは、ポートと本体の接続部の開先形状を「J」字型の開先としたため、寸法管理がより難くなつたものと思われる。この結果より、ポート延長部の溶接には両側機械加工による精度管理が容易な「U」字型の開先を採用することが望ましい。
- 3) 遠隔溶接を内壁のスプライスプレート溶接に適用した結果、溶接作業が問題なく遂行できることが確認でき、真空容器の構造設計上問題のないことを実証した。また、通常のレール走行タイプの自動溶接機に比べ、ロボットタイプの溶接機がポートのような曲げ半径の小さい箇所を含む溶接作業には有効であることを示した。



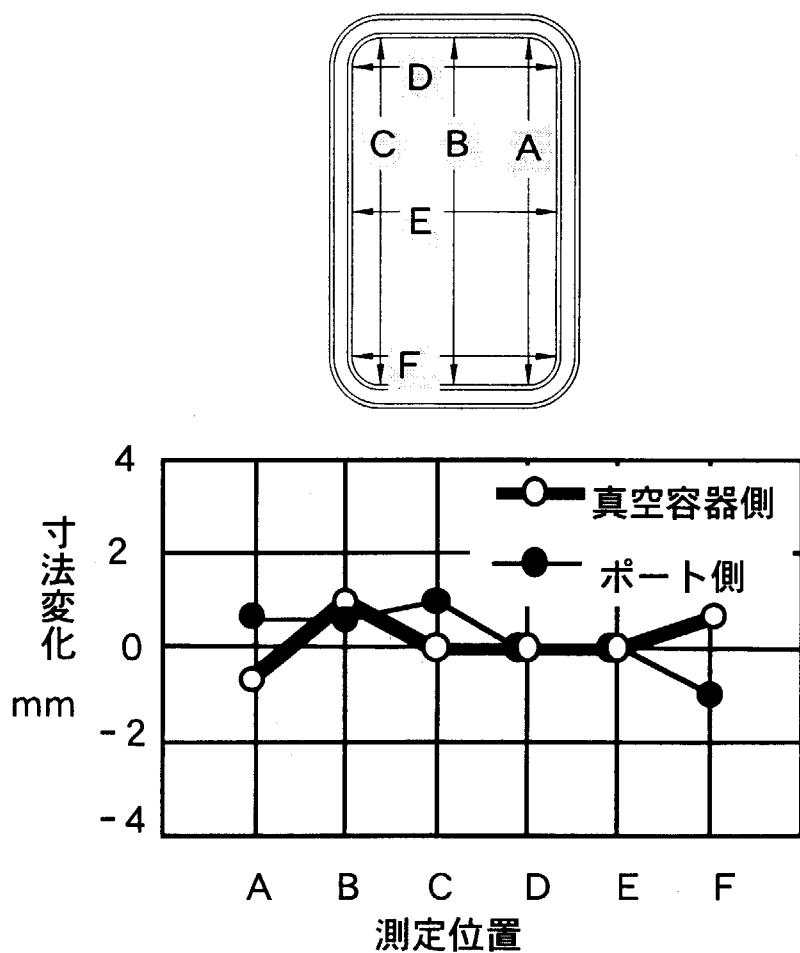
第19図 ロシア製作のポート延長部



第20図 米国が開発した遠隔溶接ロボット



第21図 ポート延長部溶接時の開先形状



第21図 ポート延長部の外壁溶接時における断面の変形

6. まとめ

実寸大の真空容器セクタモデルとポート延長部を用いた試作試験を通じて、高い製作技術の実証を行い、実機製作の見通しを得た。また、現地溶接試験及び遠隔溶接口ボットによるポート延長部の溶接試験を実施し、溶接変形データを取得すると共に遠隔溶接作業の実証を行った。今後は、現在検討が進められている構造基準案に沿って設計の詳細化を行い、実機製作に向けての準備を進める予定である。

謝辞

本試作開発を推進するに当たり、ご支援をいただいた松田慎三郎那珂研究所長、関昌弘核融合工学部長に感謝いたします。また、国内外の各関係者から多大なご支援とご協力を頂きました。本試作開発が成功裏に終了しましたことは、各関係者の努力の賜であり、本報をお借りして深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. Koizumi, et al., Proc. of 16th IAEA Intl. Conf. on Fusion Energy, 3, .845-852 (1996).
- 2) K. Koizumi, et al., Proc. of 13th Tpcl. Mtg. on the Tech. of Fusion Energy, , .586-590 (1998)
- 3) M. Nakahira, et al., Proc. of 17th IAEA Intl. Conf. on Fusion Energy, IAEA-CN-69/ITERP1/24 (1998).
- 4) プラズマ核融合学会誌, 75 Supplement, 20-25 (1999).
- 5) "ITER Final Design Report, Design Description Document 1.5 Vacuum Vessel", to be published by IAEA in the ITER EDA Documentation Series.
- 6) M. Nakahira, et al., Nucl. Fusion, Vol.41 No.4, 375-380 (2001).
- 7) M. Nakahira, et al., Proc. of 18th Fusion Eng., 245-248 (2000).
- 8) "ITER Final Design Report, Design Requirements and Guidelines Level1 (DRG1)", to be published in the ITER EDA Documentation Series by IAEA.

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
工率、放射束	ジユール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クーロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	アラド	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束密度	ジーメンス	S	A/V
インダクタンス	ウェーバ	Wb	V·s
セルシウス温度	テスラ	T	Wb/m ²
光強度	ヘンリー	H	Wb/A
放熱能	セルシウス度	°C	
吸収線量	ルーメン	lm	cd·sr
線量等量	ルクス	lx	lm/m ²
	ベクレル	Bq	s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184J (熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855J (15°C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868J (国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	1	0.01	100	
3.7 × 10 ¹⁰	1		1		

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

R100
古紙配合率100%再生紙を使用しています