

JAERI-Tech
2002-044



JP0250172



ITER用炉内機器の製作技術開発と成果

2002年3月

黒田 敏公・佐藤 和義・秋場 真人・江里 幸一郎・榎枝 幹男
大崎 敏雄・古作 泰雄・佐藤 聡・佐藤 真一・鈴木 哲
谷口 正樹・大柴 正幸・秦野 歳久・古谷 一幸
山田 弘一・横山 堅二・森 清治*・毛利 憲介*
伊勢 英夫*・野本 恭信*・佐々木 徹*・千田 豊*
岩立 孝治*・宇田 実*

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。

入手の間合わせは、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、お申し越してください。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）で複写による実費頒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 用炉内機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

黒田 敏公・佐藤 和義・秋場 真人・江里 幸一郎・榎枝 幹男・大崎 敏雄
古作 泰雄・佐藤 聡・佐藤 真一¹・鈴木 哲*・谷口 正樹・大塚 正幸
秦野 歳久・古谷 一幸・山田 弘一²・横山 堅二・森 清治¹・毛利 憲介¹
伊勢 英夫¹・野本 恭信¹・佐々木 徹¹・千田 豊¹・岩立 孝治²・宇田 実²

(2002年2月14日受理)

ITER の真空容器内構造物である遮蔽ブランケット及びダイバータの製作技術開発について報告する。遮蔽ブランケットの第一壁はベリリウム (アーマー)、銅合金 (熱シンク)、ステンレス鋼 (構造材) の3種類の金属から成っており、これらを接合するために高温等方加圧 (HIP) 法を適用した異種金属大型複雑構造物の接合技術を開発した。スクリーニング試験による HIP 条件選定及び選定条件による HIP 接合材の強度データ取得を行うと共に、第一壁部分モックアップの高熱負荷試験を行い除熱性能及び耐熱疲労特性が良好であることを確認した。また電磁力低減のために必要となる第一壁及び遮蔽ブロックのスリット構造に対して、ウォータージェットと放電加工を適用した施工技術を開発した。これらの技術を用い、第一壁パネルのプロトタイプモデル及び遮蔽ブロックの 1/2 部分モデルを試作して各々の製作方法・手順を確立すると共に、第一壁の遮蔽ブロックへの組込が良好に行えることを確認して実機製作への見通しを得た。

ダイバータでは、とくに垂直ターゲットに関し、狭隘な設置スペースへの対処として先端部のヘッダ構造の削減を図った同軸二重管の製作及び銅合金と C/C コンポジットとの接合における中間応力緩和層を用いた1ステップろう付けの技術を開発した。本ろう付け条件は、冷却管として使用する銅合金の強度維持に必要な熱処理の一過程としても有効に作用することを考慮したものである。本技術を用いて製作した部分モックアップの高熱負荷試験により十分な除熱性能及び熱疲労特性を有することを確認すると共に、実規模長さのモックアップの試作により製作方法・手順の確立及び製作性の確認を行い、実機製作への見通しを得た。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

*1 ITER 開発室

*2 大洗研究所材料試験炉部

* 内閣府原子力安全委員会事務局に出向中

¹ 川崎重工業株式会社

² 日本ガイシ株式会社

Development of Fabrication Technologies for ITER In-vessel Components

Toshimasa KURODA, Kazuyoshi SATO, Masato AKIBA, Koichiro EZATO,
Mikio ENOEDA, Toshio OSAKI, Yasuo KOSAKU, Satoshi SATO, Shinichi SATO⁺¹,
Satoshi SUZUKI*, Masaki TANIGUCHI, Masayuki DAIRAKU, Toshihisa HATANO,
Kazuyuki FURUYA, Hirokazu YAMADA⁺², Kenji YOKOYAMA, Seiji MORI⁺¹,
Kensuke MOHRI⁺¹, Hideo ISE⁺¹, Yasunobu NOMOTO⁺¹, Toru SASAKI⁺¹, Yutaka CHIDA⁺¹,
Takaharu IWADACHI⁺² and Minoru UDA⁺²

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 14, 2002)

Fabrication technologies for ITER in-vessel components, especially the shielding blanket with the separable first wall panel and the divertor vertical target, have been developed. For the shielding blanket, Hot Isostatic Pressing (HIP) has been applied to the bonding of Cu-alloy/stainless steel and beryllium/Cu-alloy. First wall mock-ups fabricated by using HIP were tested under high heat fluxes and showed sufficient heat removal and thermal fatigue performance. Water jet and electrical discharge machining have been applied to manufacture slots into the first wall panel and the shield block. With these technologies, a first wall panel prototype and a shielding block 1/2 mock-up were successfully fabricated. As for divertor, a coaxial tube with annular swirl flow has been developed. This tube can provide more effective usage of the limited space assigned for the installation of the divertor vertical target. The one-step brazing method has been also developed for the joining of CFC monoblock armor and CuCrZr tube with OFCu compliant layer. With this method, more efficient heat treatment of CuCrZr can be performed for maintaining its mechanical strength. High heat flux tests showed sufficient critical heat flux of the coaxial tube and thermal fatigue performance of the brazed mono-block CFC/coaxial tube. A large scale mock-up of the target plate was also successfully fabricated.

Keywords: ITER, First Wall, Shielding Blanket, Divertor Vertical Target, Annular Swirl Flow, Hot Isostatic Pressing, Brazing, Cu-alloy, C/C Composite, Beryllium

⁺¹ Department of ITER Project

⁺² Department of JMTR, Oarai Research Establishment

* on loan to Cabinet Office

⁺¹ Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

⁺² NGK Insulators, Ltd

目次

1. はじめに	1
2. 遮蔽ブランケット	1
2.1 機能及び構造	1
2.2 製作上の技術課題	3
2.2.1 銅合金/ ステンレス鋼接合	3
2.2.2 ベリリウム/ 銅合金接合	4
2.2.3 第一壁パネルスリット加工	4
2.2.4 遮蔽ブロックスリット加工	5
2.3 製作技術の開発	6
2.3.1 銅合金/ ステンレス鋼接合	6
2.3.2 ベリリウム/ 銅合金接合	10
2.3.3 第一壁パネル製作技術	11
2.3.4 遮蔽ブロック製作技術	13
2.3.5 遮蔽ブランケットモジュール組立	14
3. ダイバータ	15
3.1 機能及び構造	15
3.2 同軸冷却管の開発	17
3.3 実規模長同軸冷却管試験体の開発	20
3.4 CFC/ CuCrZr 接合部加熱試験	22
4. まとめ	24
謝辞	25
参考文献	25

Contents

1. Introduction	1
2. Shielding Blanket	1
2.1 Function and Mechanical Configuration	1
2.2 Technological Issues for Fabrication	3
2.2.1 Bonding of Cu-alloy/Stainless Steel	3
2.2.2 Bonding of Beryllium/Cu-alloy	4
2.2.3 Slotting of First Wall Panel	4
2.2.4 Slotting of Shield Block	5
2.3 Development of Fabrication Technology	6
2.3.1 Bonding of Cu-alloy/Stainless Steel	6
2.3.2 Bonding of Beryllium/Cu-alloy	10
2.3.3 Fabrication of First Wall Panel	11
2.3.4 Fabrication of Shield Block	13
2.3.5 Assembly of Shielding Blanket Module	14
3. Divertor	15
3.1 Function and Mechanical Configuration	15
3.2 Development of Coaxial Swirl Tube	17
3.3 Development of Full Length Coaxial Swirl Tube	20
3.4 Heat Load Test of CFC/CuCrZr Joints	22
4. Conclusion	24
Acknowledgement	25
References	25

1. はじめに

炉内機器とは真空容器内に設置される機器の総称である。これらはプラズマに最も接近して設置されるため、熱、粒子、中性子、電磁力等の厳しい負荷に曝される。換言すると、これらの負荷をあえて受け持つことにより、背後にある真空容器を始めとする機器が厳しい負荷に曝されるのを防いでいる、と言える。また炉内機器は、プラズマとの相互作用にも配慮し、とくにプラズマの運転に有害となる不純物の放出を極力避ける必要がある。

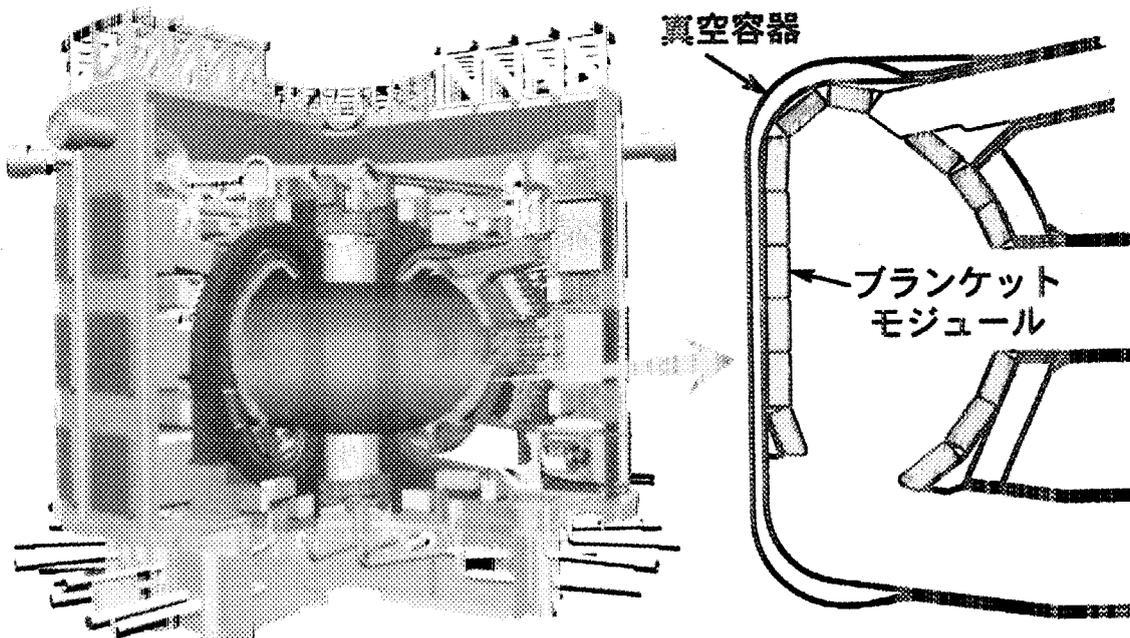
これらのことから、炉内機器の材料及び構造には厳しい仕様が課せられ、それを達成し炉内機器としての機能を果たすために種々の製作技術の開発が必要である。

ここでは、ITER の主要な炉内機器である遮蔽ブランケット及びダイバータの製作技術の開発について報告する。

2. 遮蔽ブランケット

2.1 機能及び構造

遮蔽ブランケットに求められる機能は、プラズマからの熱及び放射線から真空容器及び超伝導コイル等の機器を保護することである。このため、遮蔽ブランケットは、プラズマと真空容器の間に、プラズマを取り囲むように設置される。このとき、遠隔操作による水平ポートからの搬出入を可能とするため、第1図に示すようにポロイダル及びトロイダル方向に総計 421 個のモジュールに分割される。

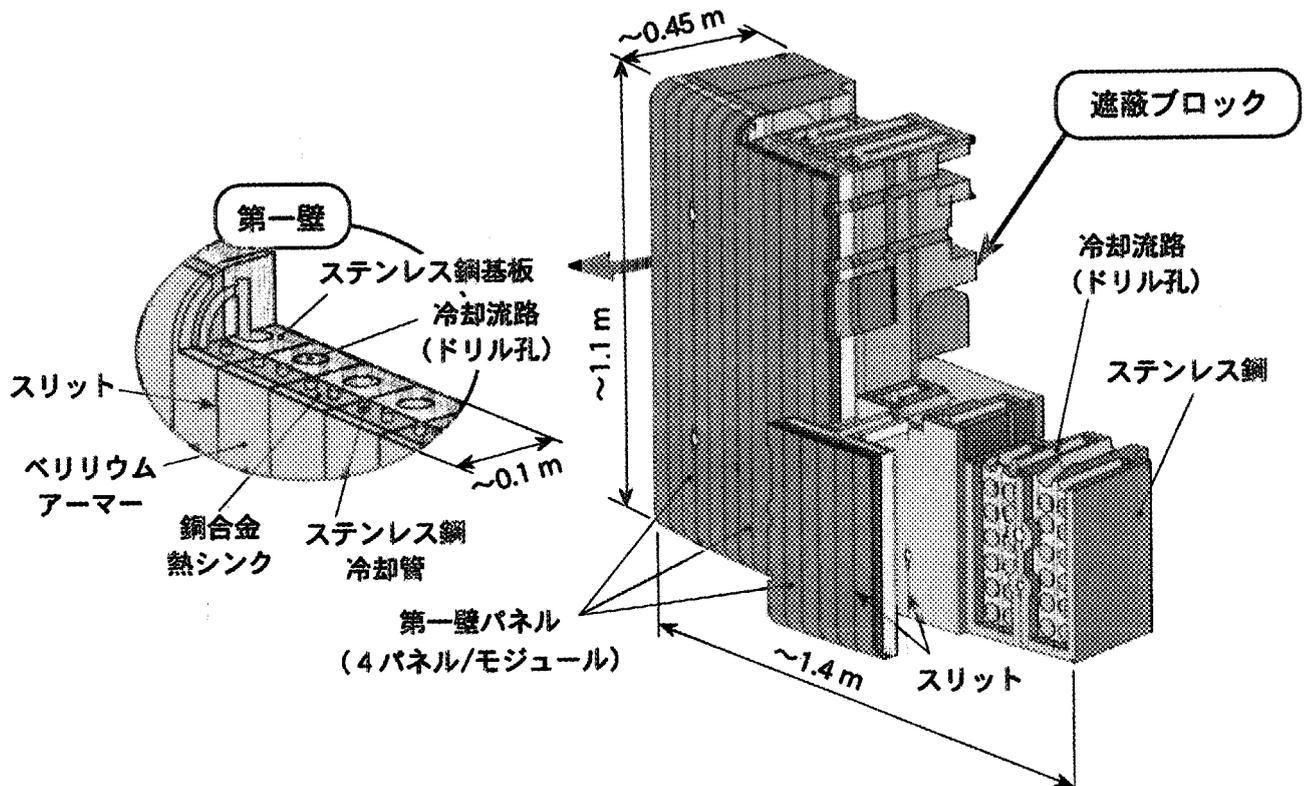


第1図 遮蔽ブランケット・モジュール分割

遮蔽ブランケットモジュールの構造概念を第2図に示す。1モジュール当たりの寸法は、概ね幅1.4 m、高さ1.1 m、厚さ0.45 mで重さは約4トンである。プラズマに面する部分（厚さ約0.1 m）は第一壁パネルとしてその背後の遮蔽ブロック（厚さ約0.35 m）から取り外し可能な構造となっている。（ただし、取り外し作業はモジュール全体をホットセルに移送して行われる。）第一壁パネルは、概略幅0.35 m、高さ1.1 mで1モジュール当たり4パネルが取り付けられる。

第一壁パネルは、表面保護材のベリリウム（S-65C）及び熱シンクの銅合金（アルミナ分散強化銅 DSCu AL-25）、その中に埋め込まれるステンレス鋼冷却管（SUS316L）、ステンレス鋼基板（SUS316L）から成り、プラズマからの高熱を効率よく除去するためこれらが冶金的に接合される。構造的な特徴として、とくにプラズマディスラプション時に作用する電磁力の低減を図るため、多くのスリットを有しており、冷却ヘッドが配置される中央部を除いて、ほぼ短冊状に細断された構造となっている。

遮蔽ブロックは、ステンレス鋼（SUS316L）のブロックにドリル孔等による冷却流路を設けた構造である。ここでも、電磁力低減用のスリットが施される。

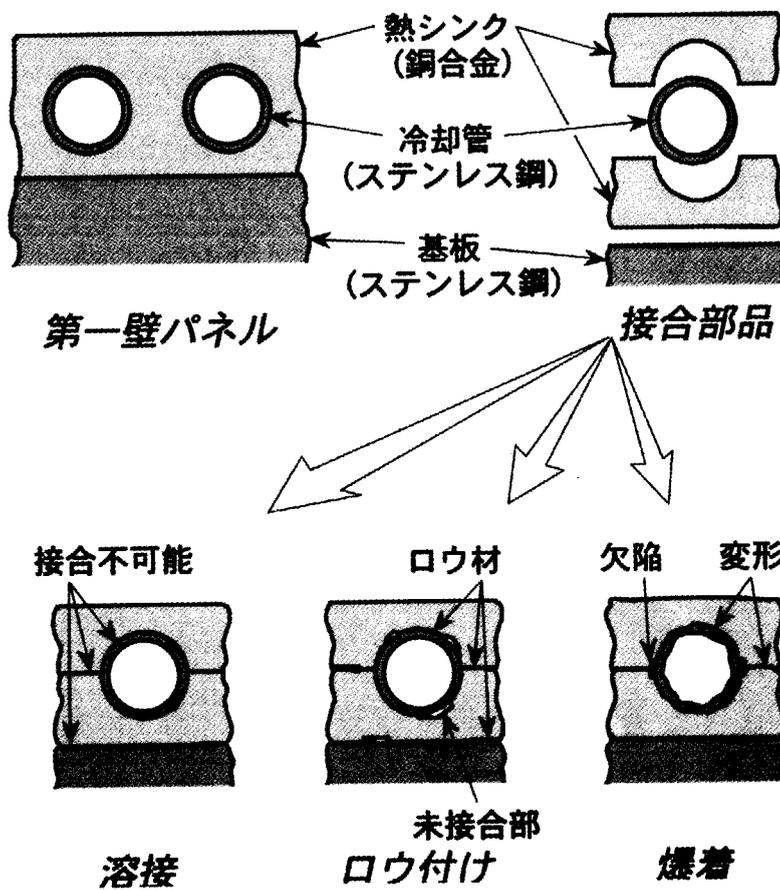


第2図 遮蔽ブランケットモジュール構造概念

2.2 製作上の技術課題

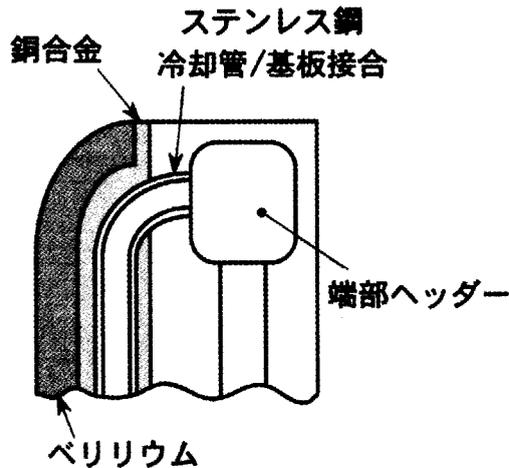
2.2.1 銅合金/ステンレス鋼接合

第一壁では、熱シンクである銅合金の中にステンレス鋼製の冷却管を埋め込むと同時に銅合金熱シンクを強度部材としてのステンレス鋼基板に接合する必要がある。第3図に示すように、これらの部材の接合は面と面との接合であり TIG 等の熔融溶接は適用できない。また、第一壁1パネル当たりの冷却管数 12 本、銅合金/ステンレス鋼及び銅合金/銅合金を合わせた接合面積約 1.1 m²、さらに冷却管が第一壁上下端においてヘッダーに接続するための曲がり部を有する形状であること等から、ろう付けあるいは爆着では十分な接合を得ることは困難である。過度な未接合部や変形を無くし、プラズマからの高い熱流束 (最大 0.5 MW/m²) 及び核発熱 (最大約 10 MW/m³) を速やかに冷却水に伝えると共に、熱応力や電磁力に耐える強度を併せ持つ接合技術の開発が課題である。



第3図 第一壁部品構成と従来接合方法

また、冷却管が第一壁上下端においてヘッダーに接続する際、第4図に示すように、冷却管と基板すなわちステンレス鋼同士の接合も必要であり、これらの接合の相互影響にも注意しなければならない。



第4図 第一壁上(下)端部構造

2.2.2 ベリリウム/銅合金接合

ベリリウムは、表面保護材として第一壁の銅合金熱シンク上に接合される。この接合も面接合であり、第一壁1パネル当たり約0.35 m x 1.1 mのプラズマ対向面全面に接合される。ここでも銅合金/ステンレス鋼の接合と同様に、プラズマから受けた熱の熱シンク内冷却管への流れを妨げないように、過度な未接合部の無い冶金学的接合技術の開発が必要である。

従来、ベリリウムの接合にはロウ付け(700~850℃)が多く用いられていたが、ベリリウムと銅材との接合は例が無かった。とくに、ベリリウムと銅合金との接合においてはベリリウムが銅側に拡散して脆いBe-Cu化合物を生成すること及び両者の剛性の高さと線膨張率の違いにより接合部に高い残留応力が発生することから、これらを防止あるいは緩和する方策が必要である。

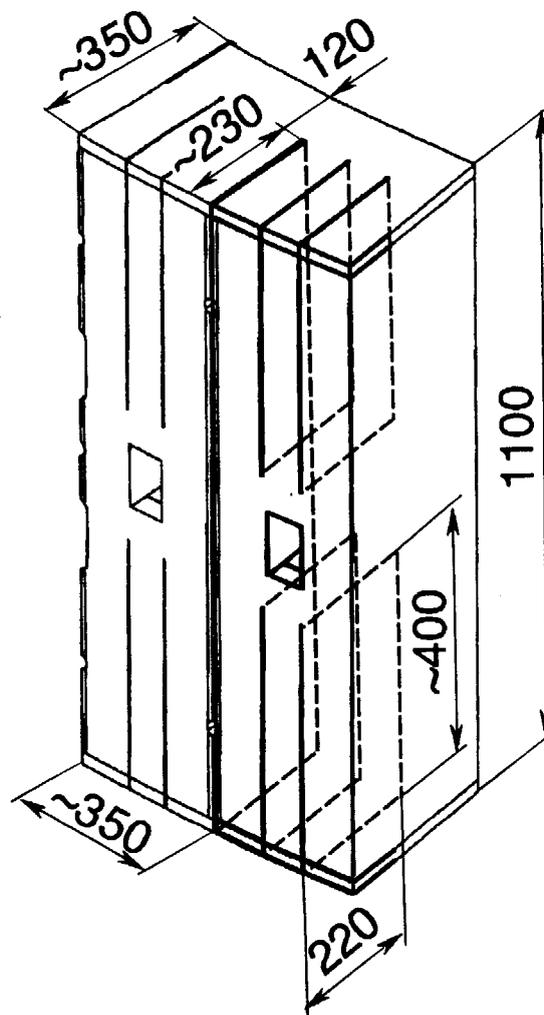
また、ベリリウムの接合は第一壁製作においてほぼ最終の工程である。すなわち、ベリリウムの接合が既に施工されている銅合金/ステンレス鋼の接合に悪影響を及ぼさないよう注意しなければならない。

2.2.3 第一壁パネルスリット加工

第一壁パネルは電磁力低減用に多数のスリットを設けるため、冷却水ヘッダーを配置する中央部を除いて細い短冊状の構造となる。スリットを設けるための切断加工等を施す際、上記異種金属の接合に基づく残留応力の影響等による変形が懸念され、変形量の確認と共に変形を増幅しない加工法の開発が必要である。

2.2.4 遮蔽ブロックスリット加工

遮蔽ブロックにも電磁力低減用のスリットが設けられる。第5図に示すように、スリットには ~ 220 mm x 400 mm (深さ方向及び高さ方向に未貫通) および ~ 230 mm x 1100 mm (深さ方向に未貫通、高さ方向に貫通) の2種類があり、放射線ストリーミング低減の観点等からいずれもスリット幅を10 mm 以下とすることが要求されている。とくに、前者のスリットは深く狭い上に2方向未貫通である。切削加工によるこのようなスリットの施工は例がない。放電加工によれば可能と考えられるが、加工量が多く経済的でないことから、より簡便な加工方法の開発が必要である。



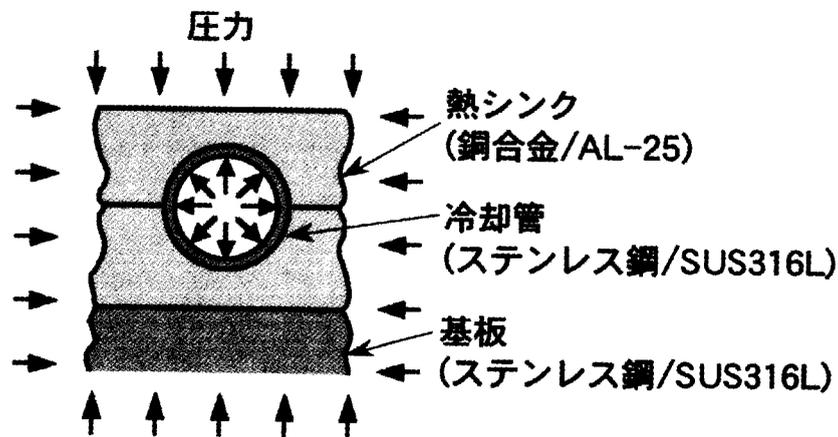
第5図 遮蔽ブロックとスリット
(モジュールのトロイダル方向1/2を示す)

2.3 製作技術の開発

2.3.1 銅合金/ステンレス鋼接合

2.3.1.1 高温等方圧加圧 (HIP) 法の適用

第一壁の銅合金/ステンレス鋼接合で要求される複雑形状を有する比較的大きな面積の面接合に対し、高温等方加圧 (HIP: Hot Isostatic Pressing) 法による接合技術の開発を進めた。HIP 法は固相拡散接合の一種で、高温高圧下で押し付け面間に生じる原子の相互拡散を利用して接合するものである。非熔融接合であることから変形や残留歪を小さく抑えることができ、また方向性の無い均一な圧力を加えることから複雑な3次元形状への適用も可能である。第一壁製作への HIP 適用概念を第6図に示す。



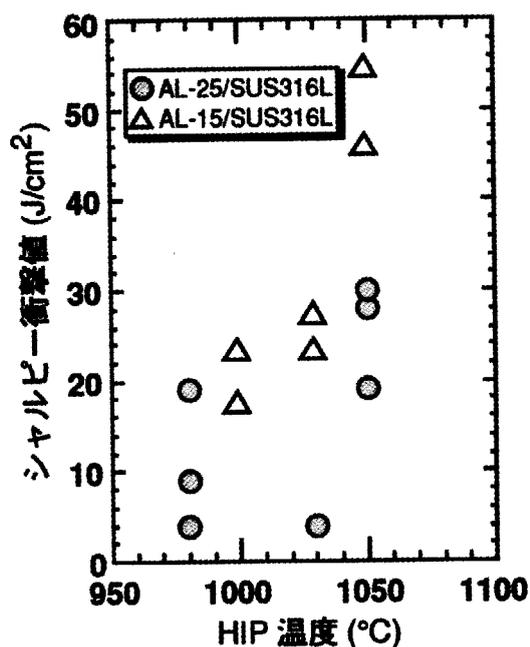
第6図 熱シンク/冷却管/基板のHIP 接合概念

2.3.1.2 HIP 条件の選定

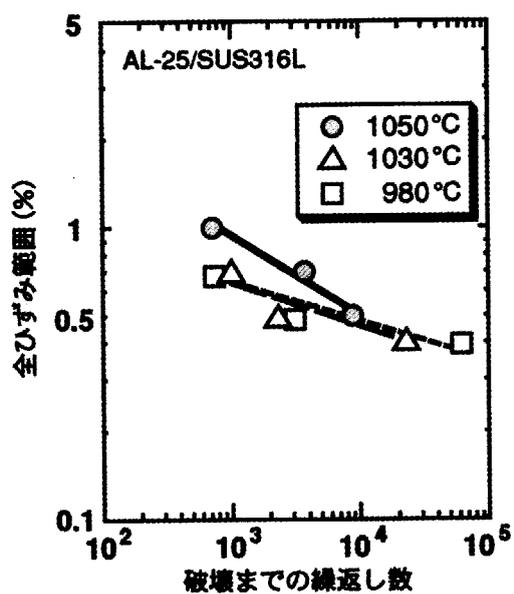
従来より、ステンレス鋼に対する HIP 温度は 1050~1100℃が適しているといわれている²⁾。一方、銅合金の融点が 1083℃であり、これに対する余裕を取りつつステンレス鋼同士の接合をも視野に入れるという観点から、1050℃を上限とする銅合金/ステンレス鋼 HIP 接合のパラメーターサーベイを実施した。尚、HIP 圧力は使用した HIP 装置の最高可能圧力である 150 MPa、また HIP 時間は従来のステンレス鋼の HIP 経験より 2 時間と設定した。

接合材の引張強さ及び降伏強さは、HIP 温度 (今回試験範囲: 980~1050℃) による差はあまり無く、いずれも銅合金母材相当の値を示した。一方、第7、8図に示すように、衝撃値及び疲労特性では 1050℃での HIP 材が優位な値を示した^{3A)}。また、HIP 温度を 1050℃とすることにより、銅

合金/ステンレス鋼と銅合金/銅合金のみでなくステンレス鋼/ステンレス鋼の同時接合も可能となり、製作工程を短縮することができる。これらのことより、HIP 温度を 1050℃として基本的機械特性値を取得^{3,5)}すると共に以後のモックアップ製作・試験を行った。



第7図 銅合金/ステンレス鋼 HIP 接合材の衝撃値

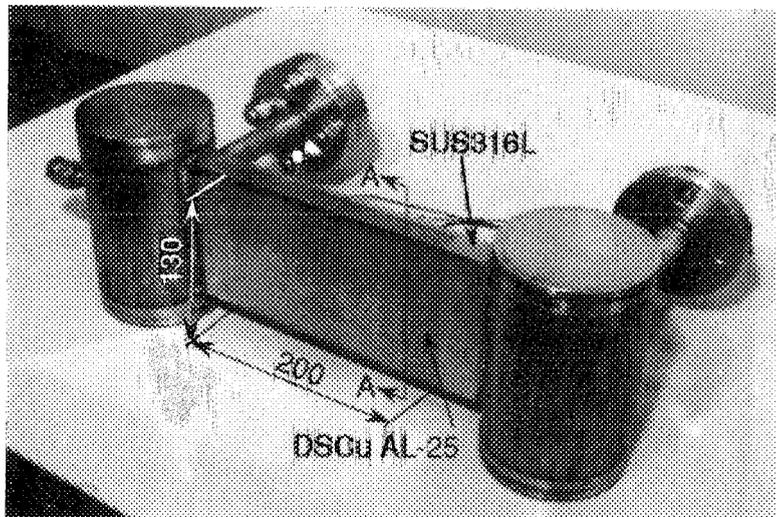
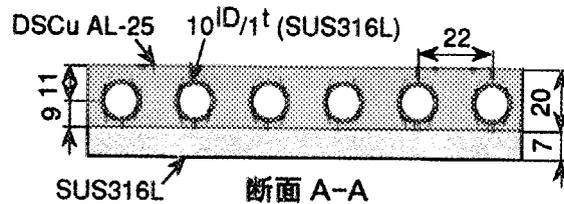


第8図 銅合金/ステンレス鋼 HIP 接合材疲労特性

2.3.1.3 モックアップ製作と熱負荷試験

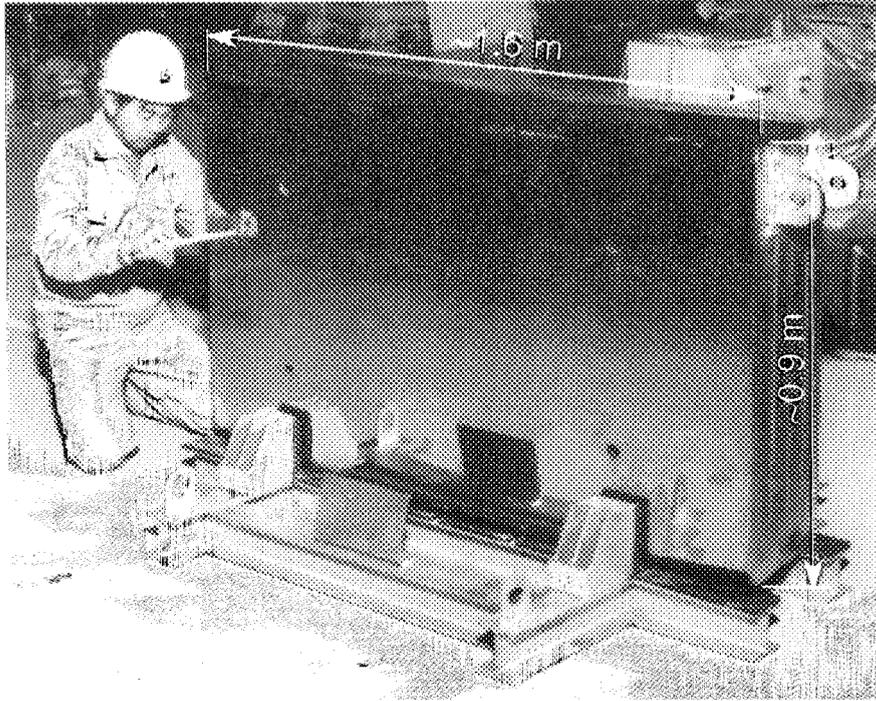
上記で選定した HIP 条件を用いて、ステンレス鋼冷却管を内蔵した銅合金熱シンク及びステンレス鋼基板からなる第一壁の平板型モックアップ (第9図) を製作した。製作においては、HIP 直後のモックアップ端部より試験片を採取し、金相観察等によって接合界面にポイド等が無く良好な接合が行われていることを確認した。

製作したモックアップを用いて原研の電子ビーム照射試験装置 JEBIS[®]による高熱負荷試験を行い、5~7 MW/m² x 2500 回の熱負荷に支障無く耐えること、HIP 接合で製作されたモックアップが母材と同程度の疲労寿命を有することを確認した⁷⁾。

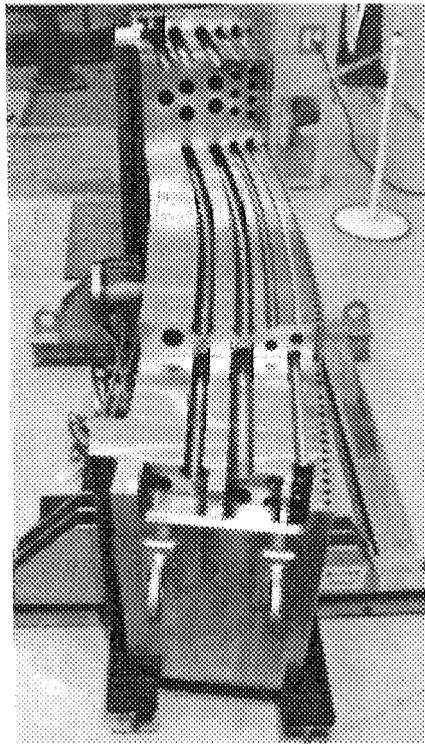


第9図 平板型第一壁モックアップ

一方、モジュール全体としての製作技術開発として、1998年7月までのITER設計に対応した第一壁/遮蔽ブロック一体型モジュールの小規模 (0.4 m x 0.5 m x 0.15 m)、中規模 (0.5 m x 0.8 m x 0.35 m)、プロトタイプ (1.6 m x 0.93 m x 0.35 m) の各モックアップを製作して、製作手順を確立すると共に各々の端材を用いた試験等により良好な接合が行われていることを確認した⁸⁻¹¹⁾。第10図に第一壁/遮蔽ブロック一体型プロトタイプの外観を示す。本プロトタイプはHIP施工時には銅合金板材32枚、ステンレス鋼冷却管67本、ステンレス鋼板材8枚、ステンレス鋼鍛造ブロック1個を使用しており、1回のHIP施工でこれら全ての部材を接合した。流動試験等による特性取得の後、プロトタイプを切断・観察し、内部の接合及び流路施工状況が良好であることを確認した。切断後のプロトタイプを第11図に示す。



第10図 第一壁/遮蔽ブロッカー一体型プロトタイプモジュール

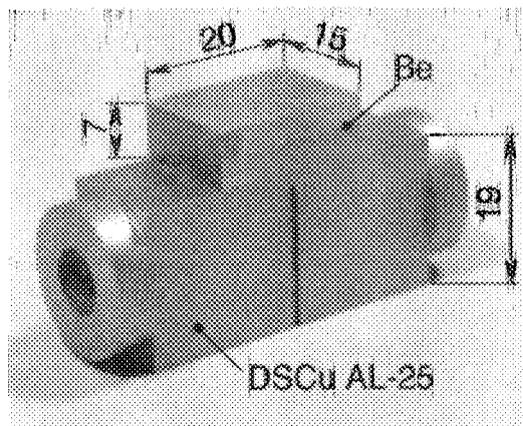


第11図 切断後のプロトタイプモジュール

2.3.2 ベリリウム/銅合金接合

ベリリウム/銅合金の接合に対しても HIP 法を適用した開発を進めた。とくに、接合部での脆い化合物生成と高い残留応力発生の抑制を目的とした種々の中間層及び HIP 施工条件のサーベイ試験を行った^{12,13}。各接合材の金相観察と4点曲げ試験等の機械試験による比較評価の結果、中間層として i) 銅合金表面に純銅/チタン/アルミニウムを PVD コーティング (各厚さ 10 μm)、ベリリウム表面にアルミニウムを溶射 (厚さ 0.7 mm)、それらの間にアルミ箔 (厚さ 0.12 mm) を挟む、ii) 銅合金表面に純銅を PVD コーティング (厚さ 20 μm)、という二つの方法が有望との結論を得た¹³。HIP 条件として、前者は HIP 温度 555 $^{\circ}\text{C}$ 、後者は HIP 温度 620 $^{\circ}\text{C}$ であり、HIP 圧力及び時間はいずれも 150 MPa 及び 2 時間である。HIP 温度を比較的 low に抑えることでステンレス鋼の鋭敏化等を含む銅合金/ステンレス鋼接合部への影響を低減すると共に接合界面での化合物の生成を抑制した。また、アルミニウム、純銅等の比較的軟らかい材料を中間層に含むことで残留応力や運転時の熱応力を緩和している。

上記2種類の接合方法について第12図に示す小規模試験体を製作し、原研大洗研究所のインセル電子ビーム加熱試験装置 OHBIS を用いた加熱試験を実施した¹⁴。

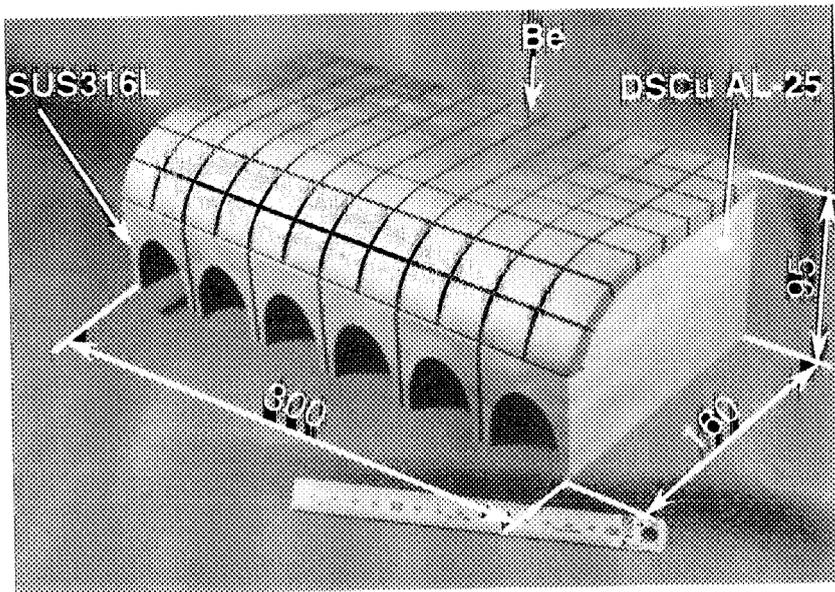


第12図 ベリリウム/銅合金接合熱負荷試験体

5 MW/m² x 1000 回の運転に対し、i)の試験体は支障無く耐えることを確認した。一方、ii)の試験体では、加熱試験後、接合界面近傍のベリリウムに微小き裂が観察された。i)の方法は、ii)に比べ、拡散バリアとしてのチタン層を配して脆い化合物の生成をより抑制していること及びアルミニウム層が約 1 mm と厚く応力緩和効果がより効いていることから接合材としての強度及び繰り返し熱応力への耐久性には優れていると判断され、i)を第一候補と位置付けた。一方、ii)の方法は処理工程が少なくコスト的に有利である。耐熱応力強度は劣るものの、第一壁への熱負荷条件が現状の ITER 標準

運転 ($0.5 \text{ MW/m}^2 \times 15000$ 回) を大きく越えない場合には適用の可能性が残されている。

ベリリウム/銅合金接合方法の第一壁パネル製作への適用性を調べるため、とくに上(下)端の曲面部を含む実規模部分モックアップ(第13図)を製作した。本モックアップは、銅合金熱シンク及びステンレス鋼冷却管、ステンレス鋼基板、ベリリウム表面保護材より成っており、銅合金とステンレス鋼をHIP接合した後、さらに銅合金上にベリリウムをHIP接合したものである。接合後、放電加工によるスリット加工を行い、スリット加工に伴う変形が微小であることを確認した。また、最終的にモックアップ端部より試験片を採取し、金相観察及び機械試験を行って曲面部及び平面部共に良好な接合が得られていることを確認した。

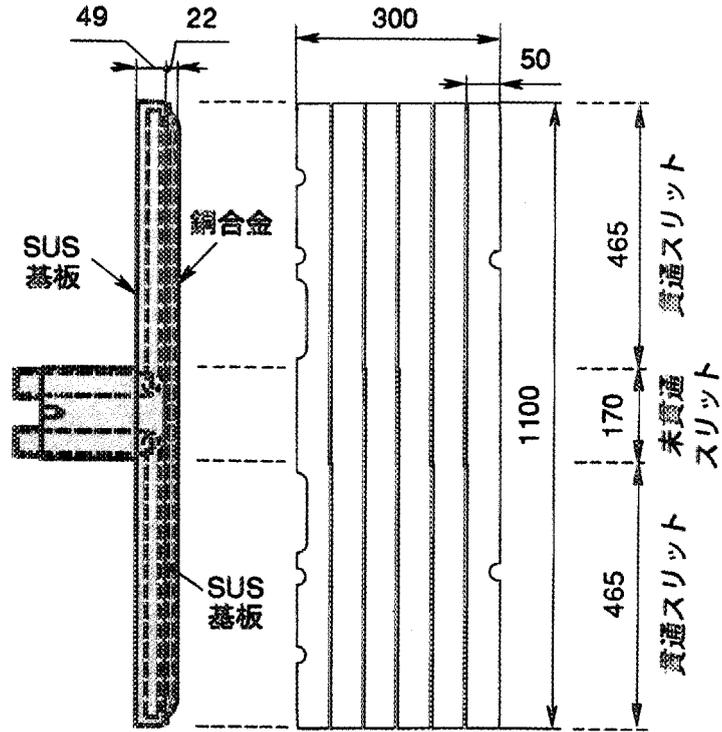


第13図 ベリリウム付第一壁部分モックアップ

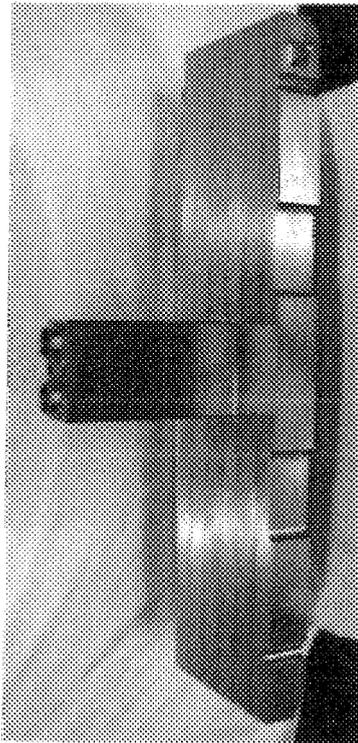
2.3.3 第一壁パネル製作技術

遮蔽ブロックから取り外し可能となった第一壁パネルの製作手順を確立すると共にとくにスリット加工によるパネル全体の変形挙動を調べることを目的として、銅合金とステンレス鋼から成る第一壁パネルの実機大モデルを製作した。モデルの幅は300 mmであり、第14図に示すように50 mm毎にスリットが入っている。モデルの高さ1100 mmのうち、上端及び下端から各465 mmの部分は銅合金熱シンクとステンレス鋼基板を共に貫通するスリットであり、中央部170 mmの部分では銅合金のみに施す未貫通スリットである。

貫通スリットを放電加工及び未貫通スリットを円板鋸盤により加工した結果、スリット幅 2 ± 0.5 mm (要求値: 2 ± 1.0 mm 以下)、パネル全体幅 300 ± 1.0 mm (要求値: 300 ± 1.5 mm 以下)、スリットに隣接する表面間の段差 0.7 mm 以下 (要求値: 2 mm 以下) となり、いずれも要求値を満足することが確認された。製作した第一壁パネル実機大モデルを第15図に示す。



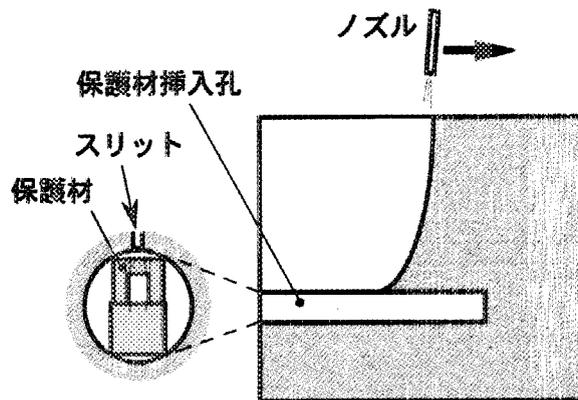
第14図 第一壁パネル実機大モデル概念



第15図 第一壁パネル実機大モデル

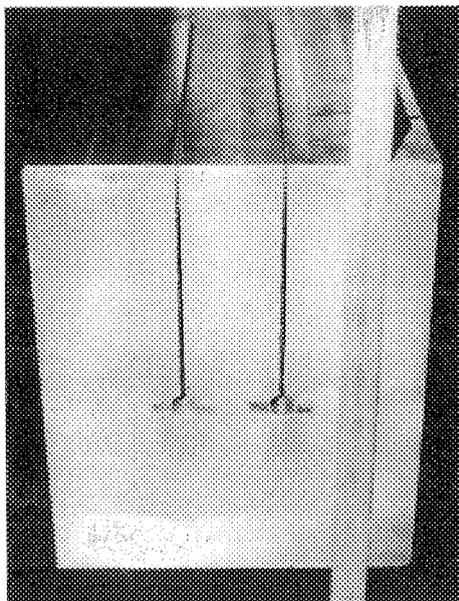
2.3.4 遮蔽ブロック製作技術

遮蔽ブロックの2方向未貫通スリット（第5図）の加工方法として、第16図に示すようなウォータージェットの適用を試みた。あらかじめスリット底部にドリル孔を開け、保護材を挿入することにより、底部周辺材料の破損を防止すると共にノズル噴出水の底部からの流出を促進した。この際、保護材として種々の材料及び形状を試作し、超硬合金を用い第16図に示す形状とすることが有効との結論を得た。



第16図 ウォータージェットでのスリット加工

第17図にスリット加工後の遮蔽ブロック（トロイダル方向1/4モデル）を示す。本施工により、スリット幅は1.5～6.0 mm となり、要求値であるスリット幅 10 mm 以下を満足する2方向未貫通スリットの加工が可能であることを確認した。



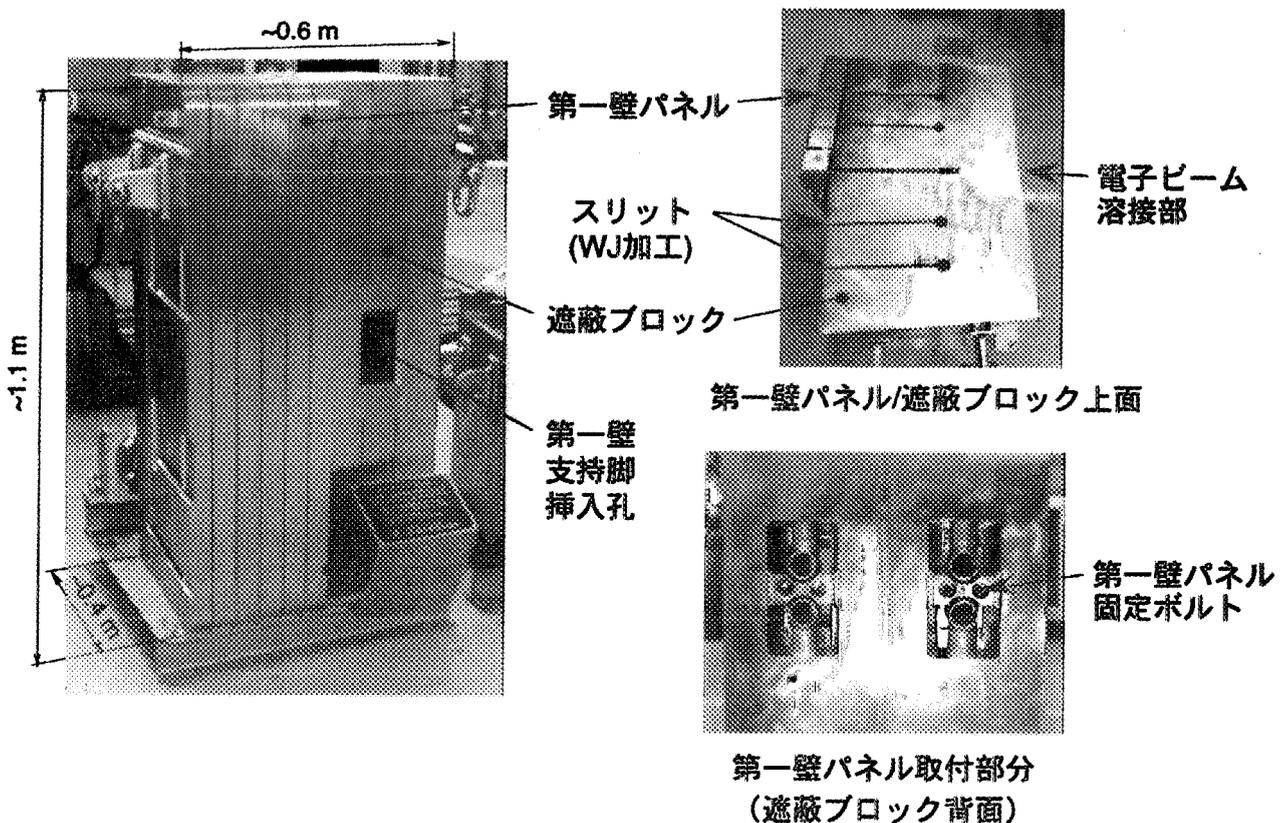
第17図 スリット加工後の遮蔽ブロック

遮蔽ブロックの製作では、まず1モジュールをトロイダル方向の 1/4 のサブブロックに分割し、各々2方向未貫通スリット及び内部流路を施工した後、サブブロックを溶接により接合する。このとき、第5図に示すように、モジュール背面から 120 mm の厚さを溶接接合し、残りの~230 mm は未接合としスリットとして用いる。

これに関する施工性と変形挙動等を調べるため第5図に示す遮蔽ブロック実機大 1/2 モデルを製作した。溶接には電子ビームを用い、溶接による角変形等を極力低減するためプラズマ側及び背面からの両面溶接とした。各々の側からの溶け込み深さ及び 230 mm 部分の初期スリット幅等の最適化を図った結果、溶接後のスリット幅は 7.5~9.5 mm となり、要求値 10 mm 以下を満足する施工が行えることを確認した。

2.3.5 遮蔽ブランケットモジュール組立

最終的に、第18図に示すように、上記で製作した第一壁パネル実機大モデルと遮蔽ブロック実機大 1/2 モデルの組立試験を行い、第一壁の遮蔽ブロックへの取り付け、取り外しが滞り無く行えることを確認した。



第18図 第一壁パネル実機大モデルの遮蔽ブロック実機大 1/2 モデルへの取り付け

3. ダイバータ

3.1 機能及び構造

ダイバータは、プラズマの燃焼によって発生したヘリウム及び不純物を除去し、プラズマの純度を保つ役割を担っている。さらに、プラズマからの輻射熱や、核融合反応に伴って生成される中性子から真空容器及び超伝導コイルを保護する機能も併せもっている。このため、ダイバータにはプラズマからの熱や粒子、中性子負荷に耐える構造が要求される。第1表に ITER のダイバータ設計パラメータを示す¹⁵⁾。

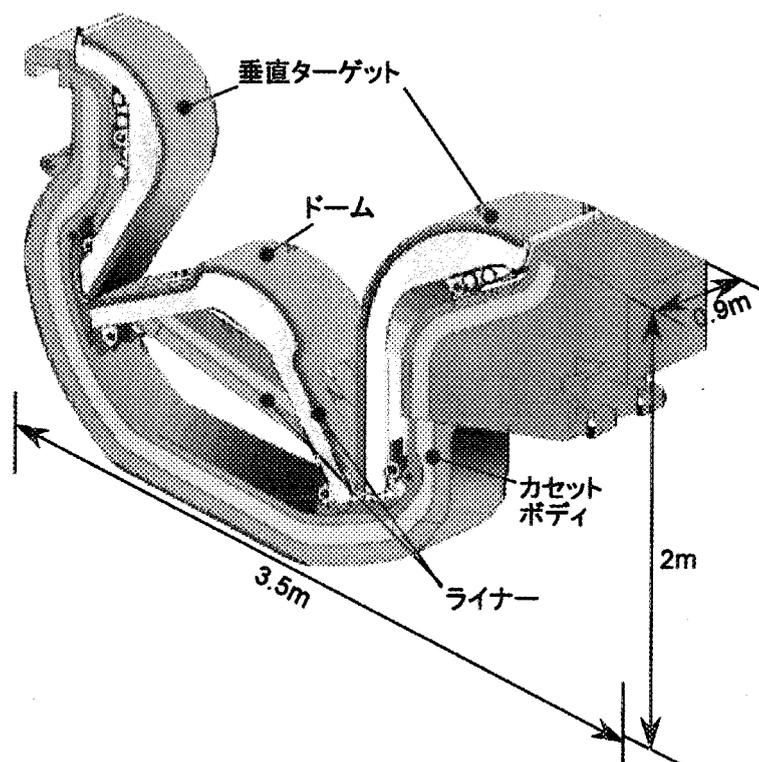
第1表 ITER ダイバータ設計パラメーター

荷重条件, - 標準熱負荷, MW/m ²	5 (W part) 10 (CFC part)
- 過渡時熱負荷, MW/m ²	~20
持続時間, sec	~10
- デイブレーションエネルギー, MJ/m ²	12
- デイブレーション持続時間, msec	~1
要求寿命	
- 定常運転	1000 回
- 過渡	100 回
- デイブレーション	100 回
材料	
- プラズマ対向材料	W, CFC
- 熱シンク材料	Cu alloy
- 支持材料	316L-IG
冷却条件	
- 冷却水	純水
- 最大設計圧力, MPa	4.2
- 入口温度, °C	100

ITER での代表的な運転モードには、プラズマが正常に放電している状態（標準状態）とプラズマの状態が時間的に変化する状態（過渡状態）がある。標準状態ではダイバータプラズマはダイバータ受熱機器に直接接触しない非接触の状態に保持されるため、その熱負荷はプラズマからの放射熱が主となりプラズマに面する受熱機器全面がほぼ一様に加熱される。このときのダイバータ最大表面熱負荷は約 10MW/m² である。一方、過渡状態とは、ダイバータ部分のプラズマが何らかの原因でダイバータに直接接触する場合を想定しており、このような状態はプラズマ制御により 10 秒以内に非接触状態に戻される。このプラズマがダイバータ受熱機器に直接接触しているときの機器表面における最大熱負荷は 20MW/m² に達するとともに、ポロイダル方向約 10cm の幅に局所的に入射する。こ

のとき、入熱時間は最大 10 秒と見積られるが、受熱機器の熱時定数は 5~10 秒であるため、除熱の観点からはほぼ定常熱負荷である。この熱負荷は軽水炉の炉心熱負荷の 10 倍以上に相当し、従来、このような高熱流束を定常的に処理する工学機器はほとんどなかったと言ってよい。さらに、トカマク型核融合炉ではプラズマエネルギーが 0.1 ms から 1 ms の短時間に壁表面に放出されるディスラプションと呼ぶ現象がある。このときのダイバータ受熱機器への熱負荷は $12\text{MJ}/\text{m}^2$ と予想され、表面材料の熔融・蒸発を生じる。このほか、イオンや中性粒子による表面材料のスパッタリングによる損耗や核融合反応で発生する高エネルギー中性子による材料特性の変化などを考慮する必要がある。このように、ダイバータ受熱機器は高熱負荷の他に、ディスラプション熱負荷などによる材料損耗や中性子による材料劣化が生じるため、2~3 年ごとに受熱機器部分のみを交換する設計となっている。

第 19 図に ITER ダイバータの構造を示す。ダイバータは、遠隔保守による交換を行うためカセットボディと呼ばれる可搬性の構造となっている。さらに、カセットボディは、垂直ターゲット、ドーム、ライナーと呼ばれる受熱機器を支持し冷却水を供給する構造となっている。ITER では、このカセットがトーラス下部全周に 54 個配置され、それぞれのカセットは炉心下部にある 3 つのポートから水平方向に取り出すことが可能なようになっている。一つのカセットは長さ約 3.5m、高さ 2m、幅 0.9m で、重量は受熱機器も含めて約 10.6 トンである。各受熱機器は、アーマ材、冷却管、熱シンク及び支持構造材料から構成される。



第 19 図 ITER ダイバータカセット構造概念

アーマ材は、粒子負荷による損耗を考慮し、スパッタリング率の低いタングステンを採用している。また、 $10\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の高い熱負荷を受ける垂直ターゲット下部には、タングステンに比べ損耗は大きいものの熱伝導率の高い炭素繊維強化複合材料 (CFC) を採用し、冷却性能を重視した設計となっている。CFC 材は、常温で無酸素銅と同等 ($300\sim 500\text{W}/\text{m}/\text{k}$) の熱伝導率を有し、アーマを厚肉化することによりスパッタリング損耗に対処している。垂直ターゲット下部には、さらに冷却性能を向上させるため、スワール管を採用している。スワール管は銅合金製で、管内部にステンレス又はインコネル製のねじりテープを冷間加工により固定している。管内部にねじりテープを挿入することにより、冷却水を旋回させ熱伝達の促進をはかり、従来の平滑円管に比べ 2 倍の冷却性能を達成した。これらのアーマ材、冷却管、銅合金製の熱シンクは、熱抵抗を可能な限り抑えるため、互いに冶金的に接合されている。これまで冶金的接合には、銀ろう付けが主として用いられてきたが、ITER では、運転中の中性子照射による銀の核変換 ($\text{Ag}\rightarrow\text{Cd}$) を避けるために、銀を成分に含まないろう材の使用が強く求められている。このため、銅-マンガン系及び銅-チタン系のろう材に着目し開発を行った。

3.2 同軸冷却管の開発

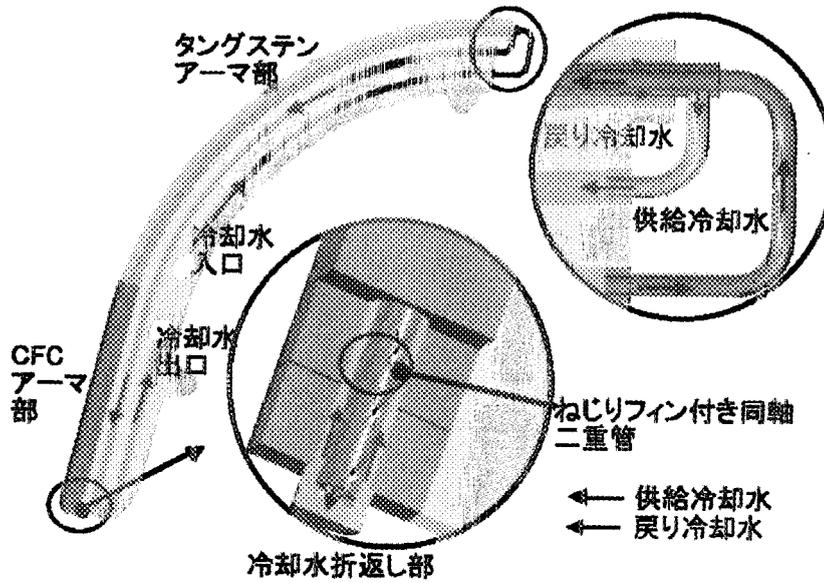
ダイバータは、先に述べた高熱負荷を除熱するため多数の冷却管が内蔵されている。これらの配管を冷却水マニフォールドへ溶接する際には、空間的に制約を受けるとともに作業量が膨大になることが予想される。このため、受熱機器内部で冷却水を折り返し、マニフォールドそのものを設けない同軸冷却管の採用について、今後の設計合理化のオプションとして、検討が行われている。

第 20 図に提案された垂直ターゲットの断面図を示す。垂直ターゲットの裏側から供給された冷却水は、最裏面の配管を通して垂直ターゲット上部へ達し、そこで二重管 (同軸冷却管) の内管へ供給される。その後、図に示すようへアピン構造部で折り返され、外管を通して垂直ターゲット背面へ抜ける構造となっている。このとき、 $20\text{MW}/\text{m}^2$ の高熱流束をアーマタイルより効率よく除去するため、内管外表面にねじりフィンを加工し、従来のねじりテープを挿入したスワール冷却管と同様、冷却水を旋回させることで伝熱性能の促進を図っている。

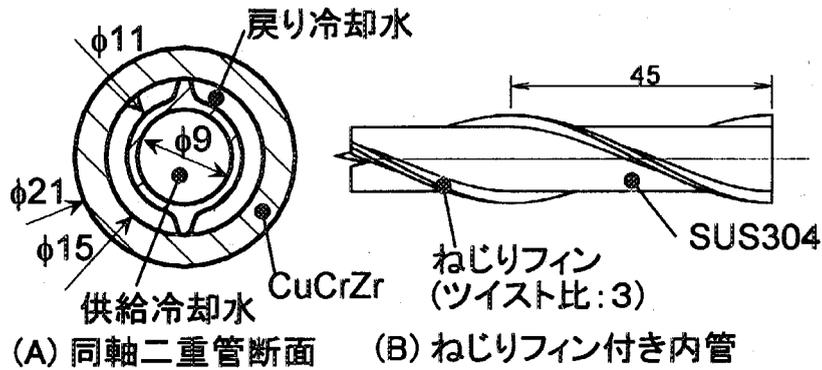
同構造の採用により、機器内部での冷却水の折り返しが可能となり、下部冷却水マニフォールドを撤去できるとともに、溶接箇所を半減させる見通しが得られた。

第 21 図に今回製作した同軸冷却管模擬試験体を示す。本試験体は二重管構造で、外管の外径/内径は、 $21\text{mm}/15\text{mm}$ 、内管の外径/内径は、 $11\text{mm}/9\text{mm}$ である。

機器の除熱を直接行う外管の冷却性能を向上させるため、スワール管を模擬したねじり状のフィンを図に示すように内管の外側に設けている。フィンのピッチは、これまでに実施したスワール管の限界熱流束実験等の結果からツイスト比 3 (180° 回転長さ/テープ幅) を採用した。管材料については、外管が第 1 候補材であるクロム・ジルコニウム銅 (CuCrZr)、内管がステンレス鋼 (SUS304) とした。



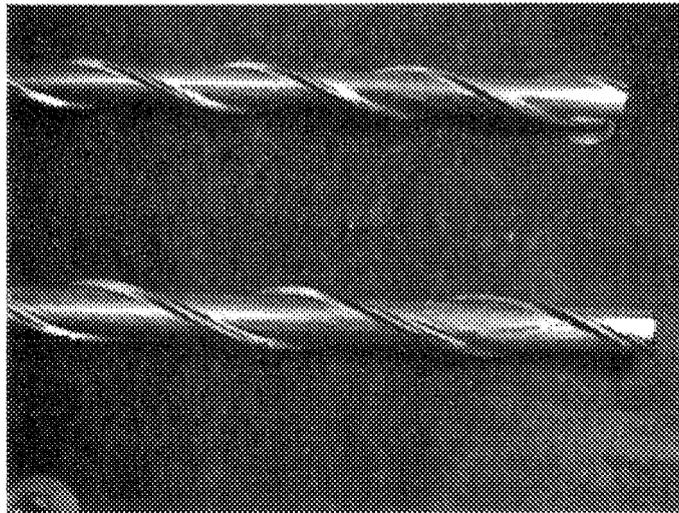
第20図 垂直ターゲット構造概念



第21図 同軸二重冷却管

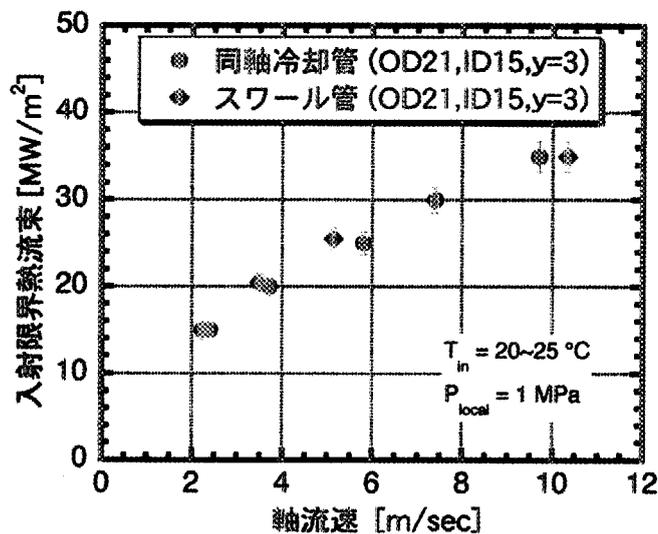
同軸冷却管の製作では、内管外側に設けた伝熱促進用ねじり状のフィンを外管内径に併せ精度良く設置することが課題となった。今回は、冷却管を板材からの削り出しにより製作したが、加工手順として、先に冷却管内径側をドリル穴施工で設け、冷却管の芯出しを実施した上で、外径側を加工した。

ねじりフィン部の加工には、コスト低減を考慮すると、旋盤加工の適用が望ましいが、今回のような、管径に比べて全長が長い管においては、旋盤加工時、管の撓みが発生する等、精度良い加工を行うことが難しい。このため、本製作においては、多軸制御を有するNCフライス加工機により、ステンレス鋼を削り出し、精度良い加工を実施した。第22図にねじりフィン付内管の外観写真を示す。



第22図 ねじりフィンを施した内管

従来採用されているスワール冷却管ではねじりテープは冷却管壁に固定されており、テープと管壁に隙間は存在しない。これに対して、本同軸冷却管では内管外壁にフィンを加工してあるため、フィンと外管内壁に隙間が生じ、伝熱性能、特に限界熱流束の低下が懸念されたため、本冷却管の限界熱流束を測定した。実験では、ITER ダイバータの加熱条件を模擬するため、冷却管は真空容器内に水平に設置し、水素イオンビームにより片面からのみ加熱した。第23図に外側流路における軸流速に対する入射限界熱流束の値を示す。比較のため、外径21mm、内径15mm、テープツイスト比:3のスワール管の結果も示している。本実験の結果、ねじりフィン付き同軸二重管の入射限界熱流束として軸流速7.1m/secの冷却条件で28MW/m² (ITER ダイバータ設計条件)が得られた。この値は同一外径のスワール管と同等である。同軸二重管にすることにより懸念された入射限界熱流束や伝熱性能の劣化が無いことを明らかにした。



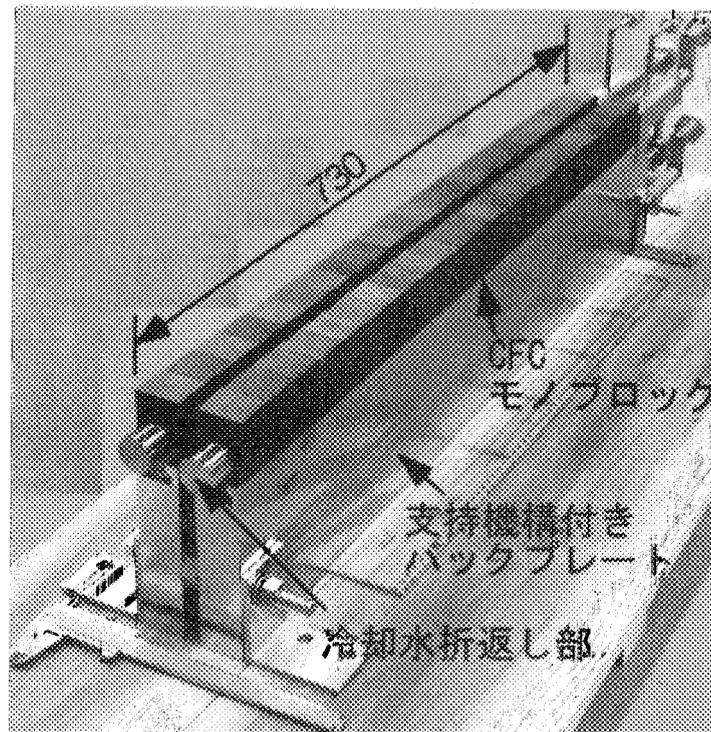
第23図 同軸二重冷却管の入射限界熱流束

3.3 実規模長同軸冷却管試験体の開発

上記同軸冷却管、並びに、アーマ材を冷却管に直接冶金的に接合したモノブロック構造を有する垂直ターゲット高熱負荷部の実規模長試験体を製作した。

第24図に今回製作した試験体を示す。本試験体は垂直ターゲットの下部、すなわち、ダイバータ受熱機器中最大熱負荷が流入する部分に相当する。各部の材料は、モノブロックアーマが2次元の高熱伝導性 CFC、受熱部を支持するバックプレートはステンレス鋼 (SUS304) とした。冷却構造については、先述の同軸冷却管と同様、外管が CuCrZr、内管がステンレス鋼とした。モノブロック部の全長は約 730mm であり、外側垂直ターゲット高熱負荷部の実機相当長さである。アーマタイルの寸法は幅 33mm、長さ 30mm、高さ 60mm であり、24 個接合されている。

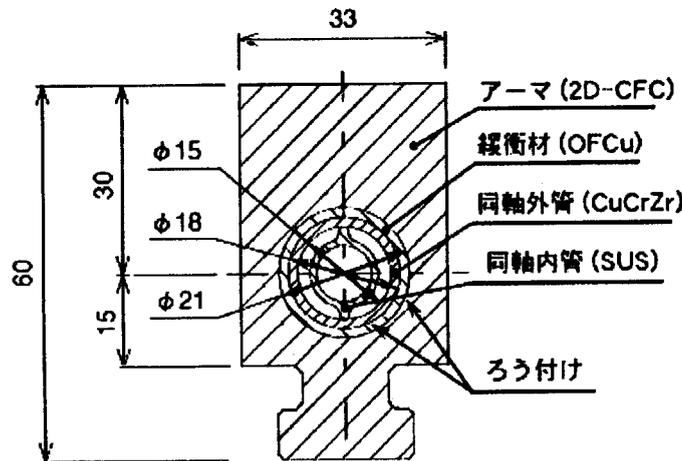
同軸冷却管の片側端部には、冷却水折り返し用ヘアピン構造を有するステンレス製エンドプラグを、また、逆側端部にはステンレス製の接続継手をモノブロック接合部と同一工程でろう付け接合し、冷却水が受熱部を流れた後、バックプレートの冷却を行う構造とした。バックプレートについては、ドリル穴加工で冷却流路を設けた。同軸二重管とモノブロックアーマから成る受熱部の支持は、加熱時の同軸二重管とバックプレートの熱膨張差の吸収を図ることを考慮して、受熱部がバックプレート上をスライド可能なレール構造とした。



第24図 実規模長同軸冷却管試験体

第25図に受熱部モノブロック構造の断面図及びろう付け接合部を示す。冷却構造は、基本的には先に述べた同軸冷却管としたが、外管外径については、アーマ材との接合を考慮し無酸素銅の緩衝材を挟み込んだ為、18mmに変更した。

本試験体の製作では、受熱部におけるモノブロックアーマと冷却管とのろう付け接合が主要な技術開発課題となった。冷却管材料である CuCrZr は析出強化型銅合金であるため、その機械強度は接合時の熱処理に大きく依存する。すなわち、CuCrZr の製造方法は、まず 950~980℃で溶体化処理を行った後、1℃/秒以上の冷却速度で室温まで急冷し、その後、475~480℃で時効処理を行う必要がある¹⁶⁾。また、高温強度に優れた CuCrZr に CFC タイルを接合する場合、CuCrZr の線膨張率が CFC より 3~6 倍大きい為、接合部に高い残留応力が発生して、アーマタイルの剥離が生じる。



第25図 同軸冷却管を用いた受熱部構造

今回の製作におけるモノブロック構造部のろう付け接合に関する製作課題を以下に示す。

- ・ 高温保持による CuCrZr の強度低下
- ・ ろう付け接合後の残留応力緩和
- ・ 銀を含まないろう材の選定
- ・ 接合界面でのギャップ管理

これら課題に対し、次節で述べる CuCrZr 熱処理試験及び小型接合試験体の試作を行い、第2表に示す接合条件を選定し、今回の試験体製作に適用した。

第2表 CuCrZr ろう付け及び熱処理条件

ろう材料	CFC/緩衝材 : 15Cu-25Ni-60Ti 緩衝材/CuCrZr : 52Cu-10Ni-38Mn
ろう付け過程	980℃、30分、Arガス冷却 (冷却速度 1℃/sec)
時効処理	480℃、2時間

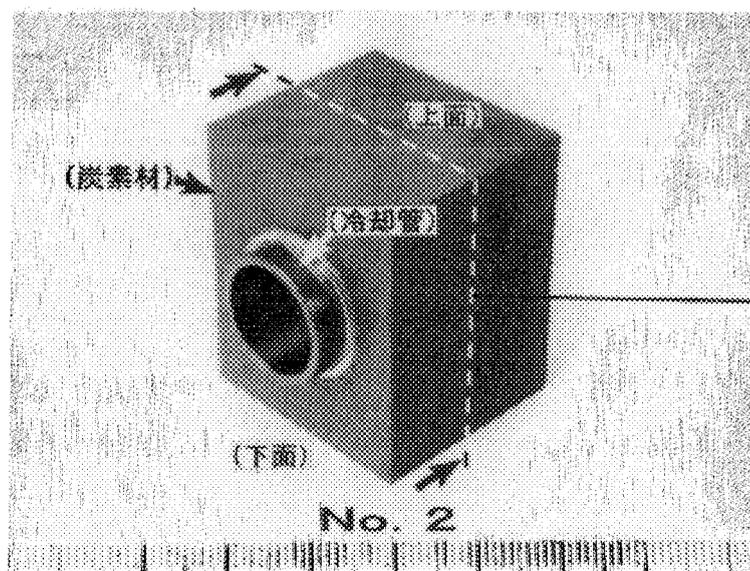
本試験体製作後の検査において、冷却水リークやろう付け接合部の明らかな剥離等は確認されず、その製作性を実証した。

3.4 CFC/CuCrZr 接合部加熱試験

ダイバータ受熱機器の主要な製作課題は、受熱機器を構成するアーマ材、冷却構造及び熱シンク間の冶金的な接合技術開発である。実規模長同軸冷却管試験体の開発においても、先に述べた製作課題が存在し、その解決に向け熱処理試験及び接合試験を実施した。

析出強化型銅合金である CuCrZr を通常のろう付け条件で熱処理した場合、高温保持後の冷却速度が遅い為、極端な強度低下が生ずる。そこで、冷却速度や時効処理条件をパラメータとした CuCrZr 熱処理試験を実施し、熱処理後の機械強度を測定した。その結果、ガス急冷及び時効処理により非熱処理材とほぼ同程度まで機械強度が回復することを確認し、先に述べたろう付け条件及び時効処理条件を選定した。

第 26 図に接合条件確認用に試作した小型試験体を示す。試験体形状は、CFC のモノブロックアーマが 33mm×40mm×30mm、CuCrZr 冷却管が外径 18mm、内径 15mm である。



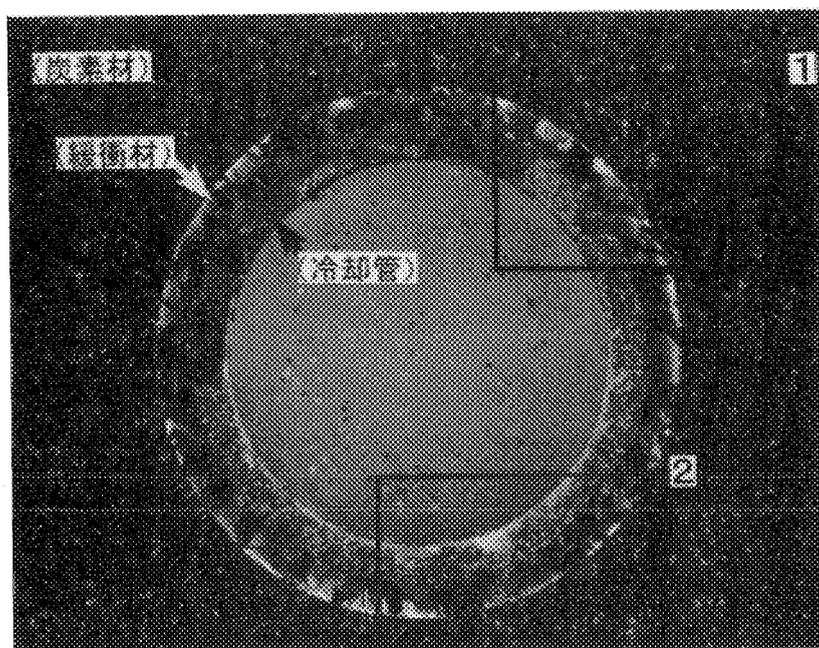
第 26 図 ろう付け条件確認用試験体

CFC と CuCrZr とを直接ろう付け接合した場合、材料間の線膨張率差及び CuCrZr の剛性により接合部に高い熱応力が発生し接合部剥離の原因となる。その為、間に緩衝材として厚さ 1mm の無酸素銅を挟み込み、ろう付け後の冷却時、CFC とともに無酸素銅が塑性変形する性質を利用し、応力の緩和を図った。

ろう材選定に関しては、銀を含まない条件に加え、各接合母材及びろう付け条件等を考慮し、CuCrZr

と無酸素銅の接合については、銅-マンガン系のろう材、CFC と無酸素銅の接合については CFC への濡れ性を考慮し、銅-チタン系のろう材とした。

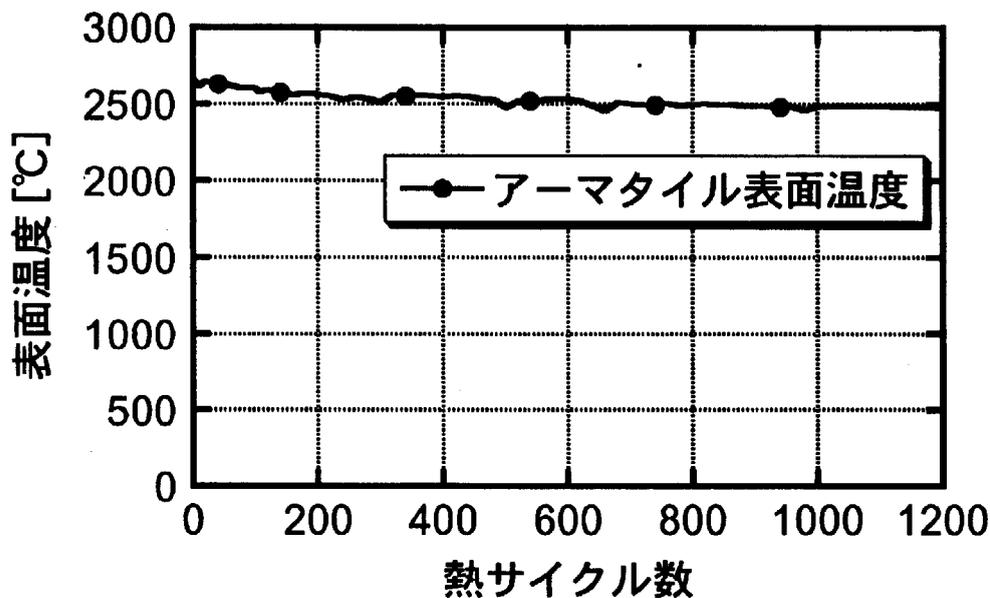
本試験体の接合部は、モノブロック構造であり、かつ、アーマ材と冷却管との間に緩衝材を挟み込むため接合界面が2箇所存在する。この為、接合母材間のギャップが広すぎると接合不良や剥離を、また逆に狭すぎるとアーマの割れを引き起こす。従って、今回の製作では厳しいギャップ管理を行い、接合界面部に対し、0.01mm 以下の精度で部品加工を実施した。



第27図 ろう付け界面のマクロ観察

第27図に接合試験体のマクロ組織観察写真を示す。その結果、接合面での剥離及びアーマ材の割れ等は観察されず、良好な接合状態であることを確認した。

本試験体の高熱負荷サイクルに対する耐久性を実証するため、原研の水素イオンビーム照射装置を用いて加熱実験を行った。加熱条件は ITER 非定常熱負荷条件に相当する $20\text{MW}/\text{m}^2$ 、15 秒の加熱で 1000 サイクル以上行った。第28図に熱サイクル試験中の赤外カメラで測定した最大表面温度の変化を示す。このように 1200 サイクルまで最大表面温度はほぼ一定値を示しており、熱サイクルによる除熱性能の劣化やタイルの剥離などは観察されなかった。本試験体を用いた試験の結果、同軸冷却管を用いた CFC モノブロック構造の垂直ターゲットの製作性を実証するとともに、同構造が ITER 熱負荷条件に耐えることを確認した。



第28図 加熱試験時の試験体表面温度変化

4. まとめ

ITER の主要炉内機器である遮蔽ブランケットモジュールとダイバータに対し、それらが厳しい負荷に耐えつつ要求された機能を満たすために必要となる製作技術の開発を行った。遮蔽ブランケットモジュールでは、HIP 法を適用した異材接合技術及びウォータージェットを適用したスリット加工技術を開発すると共に放電加工のスリット加工への適用性を確認した。これらを用いて、第一壁パネル及び遮蔽ブロックの実規模モデルを製作し、組み合わせ試験を行って所定の取り付け・取り外しが支障無く行えることを確認した。これにより基本的製作手順を確立すると共に実機 ITER 遮蔽ブランケットモジュールの製作に対する見通しを得た。

ダイバータでは、とくに垂直ターゲットを対象として、狭隘な設置スペースにも対応できる同軸冷却管を提案し、内管外面にねじりフィンを加工した二重管を製作すると共に CFC モノブロックアーマ/無酸素銅緩衝材/CuCrZr 冷却管を1ステップで接合するろう付け方法を開発した。これにより、製作時の熱処理が重要である CuCrZr の機械特性維持がより有効に行えるようになった。同軸冷却管及びそれを用いた CFC モノブロックアーマ受熱構造については、それぞれ限界熱流束試験及び熱サイクル試験を行って性能を確認した。また実規模長試験体の製作により基本的製作手順を確立し、ITER ダイバータの実機製作の見通しを得た。

謝辞

本技術開発は ITER 工学 R&D の一環として行われたものである。設計側からの要求、指標及び多くの有意義な議論と助言をいただいた A. Cardella, R. Tivey の両氏を始めとする ITER 中央設計チームの方々に感謝致します。本技術開発の実行にあ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、関省吾研究主幹、常松俊秀 ITER 開発室長、また貴重な助言と時としての確かなご指示までをいただきました高津英幸次長、小原祥裕放射線高度利用センター次長に深い謝意を表するものです。

参考文献

- 1) ITER Plant Description Document (2001)
- 2) K. Mohri, et al., Fusion Eng. Des., 9, 159-165 (1989)
- 3) S. Sato, et al., J. Nucl. Mater., 233-237, 940-944 (1996)
- 4) S. Sato, et al., J. Nucl. Mater., 258-263, 265-270 (1998)
- 5) T. Hatano, et al., J. Nucl. Mater., 258-263, 950-954 (1998)
- 6) M. Akiba, et al., Plasma Dev. Oper. 1, 205 (1991)
- 7) T. Hatano, et al., Fusion Eng. Des., 39-40, 363-370 (1998)
- 8) K. Furuya, et al., Proc. 19th Symp. Fusion Technol., Lisbon, Portugal, Sept. 1996, pp. 1343-1346
- 9) S. Sato, et al., Fusion Eng. Des., 39-40, 765-773 (1998)
- 10) S. Sato, et al., Fusion Eng. Des., 39-40, 609-614 (1998)
- 11) S. Sato, et al., FUSION TECHNOL., 34, 892-897 (1998)
- 12) T. Kuroda, et al., J. Nucl. Mater., 258-263, 258-264 (1998)
- 13) T. Hatano, et al., Proc. Int. Conf. Fusion React. Mater., Baden-Baden, Germany, Oct. 2001
- 14) M. Uchida, et al., *ibid.*
- 15) R. Tivey, et al., Fusion Eng. Des., 55, 219-229 (2001)
- 16) G. Kalinin, et al., Fusion Eng. Des., 55, 231-246 (2001)

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	モル	mol
光度	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
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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, 1 eV および 1 u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。
- EC閣僚理事会指令では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

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	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 = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (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	= 4.1868 J (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	= 735.499 W
	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
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	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

