

核融合研究に向けた異種金属接合法の開発とその応用展開

○村瀬尊則^{#,A)}、林祐貴^{A)}、森崎友宏^{A)}

^{A)}自然科学研究機構 核融合科学研究所

概要

将来の核融合炉では、炉壁に入る熱を如何に制御するかが核融合工学上、最も重要な課題のひとつとなっている。なかでも炉壁材料として、高融点材料のタングステンと高熱伝導材料の銅合金の接合材料が有力視されているが、熱膨張率の大きく異なる材料の接合は極めて難しい。核融合科学研究所では、技術部が中心となり、本接合技術の開発に取り組む中でプラズマ放電による接合技術を確立し、従来手法より接合強度を大幅に向上させることに成功した。その後、本技術を用いて炉壁試験体を製作、プラズマ実験に供し、核融合研究の進展に貢献することができた。

1. 開発の背景

核融合発電は、燃料となる重水素が海水から無尽蔵に得られ、原理的に暴走することがなく、さらに二酸化炭素も排出しない、といった特長から「究極のエネルギー源」として、その実現が期待されている。核融合発電の実現には一億度を超えるプラズマを長時間閉じ込める必要があり、核融合科学研究所（以下、核融合研）では、大型ヘリカル装置（以下、LHD）を用いて、超高温のプラズマを強力な超伝導磁石で閉じ込める研究を鋭意推進している。

ここでLHD内部の「ダイバータ」と呼ばれる高温のプラズマに曝される受熱機器には、高い耐熱性と除熱性能が要求される。このダイバータは、まずプラズマの熱を黒鉛板で受け、裏側の銅（Cu）製ヒートシンクを介して冷却水に伝える。しかしながら、黒鉛と銅はボルトで機械締結されており、比較的密着性の高いボルト周辺しか熱伝導が期待できない。さらに、黒鉛と銅の接触面における表面の細かい凸凹も、密着性低下を招く。現在、表側が耐熱性の高いタングステン（W）、裏側が熱伝導性の銅合金（CuCrZr）、といった異なる素材を強力に接合する技術が求められている。国際協力で建設が進む人類初の核融合炉ITERも、ダイバータにはWおよびCuCrZrを使用することが決定している。そのため、日本をはじめとする世界各国の研究機関でこのダイバータ開発が精力的に進められている[1-3]。

2. 従来手法の技術課題

一般に金属接合ではロウ付け法が広く用いられている。ロウ付け法とは、二つの金属の間に、接着材の役割をする融点の低い金属（ロウ材）を挟み込み、高温で溶かして接着させるといった手法である。ロウ付け法には、以下の3つの課題があることが知られている。一つ目は、接合面に生じる接合欠陥（すき間）の問題である。接合欠陥の割合は作業者の技量によるが、熟練技術者でもおよそ2割~3割の接合欠陥が生じるとされる。この欠陥により接合強度が低下する。二つ目は、Wの酸化物の問題である。Wは空気中の酸素と結びつきやすく、堅い酸化物を作る。このW酸化物が接合不良を引き起こす。三つ目の課

題は、接合する材料の熱膨張による問題である。金属は熱によって変形するが、その度合いは金属の種類によって異なる。Wは熱変形の度合いが小さく、一方、Cuは熱によって大きく変形する。この変形力の違いによって発生するのが熱応力であり、場合によってはこの熱応力が原因で歪みや亀裂が発生する。

3. 異種金属接合技術の開発

従来手法の課題を克服すべく、核融合研では放電プラズマ焼結法（SPS法）を応用した接合技術を開発した。SPS法は、型に充填した材料を機械的圧力とパルス通電加熱により焼結する方法である（図1）。金型と粉末（被接合材料）にパルス電流を流し、その際に発生するジュール熱によって試料を加熱する。ジュール加熱に利用するパルス電流は、数V、数kAの低電圧大電流を、数Hz~数10Hz程度の直流On/Offで印加する。これによって焼結部の温度は、数100℃~2,000℃程度まで上昇する。このためSPSは通常、真空中若しくは不活性ガス雰囲気中で実施される。また従来のロウ付けや固相拡散接合と比較して製造工程数が少なく製造時間も短いため、コストの低減が期待できる。

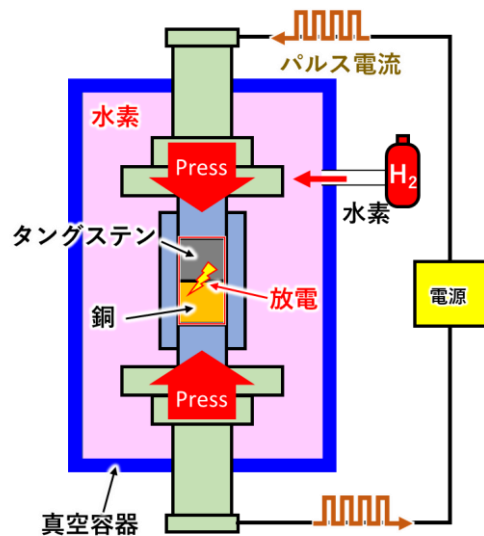


図1 SPS装置の模式図

開発当初、SPS は当初真空中で行ったが、残留酸素（水、酸素分子）によるタングステンの酸化で接合性能が著しく劣化することが、せん断強度試験と SEM-EDS 元素マッピングにて明らかになった。この問題を解決するために、SPS は積極的な還元作用を促す水素雰囲気で行った。またタングステンと銅は互いに固溶し難く、さらに融点や熱膨張係数が大きく異なり、そのまま接合すると両金属間に大きな熱応力が生じることから、インサート材を用いて、応力緩和層とすることにした（図2）。インサート材は試行錯誤の後、純銅とタングステンを適当な割合で混合した粉末を、焼結後の厚さが約1mmになるように調整し、両金属の間に挟み試験片を製作した。作製した試験片のせん断強度を測定したところ、タングステンの酸化が抑制され、また一般的なロウ付の1.7倍以上の接合強度が得られることがわかった。

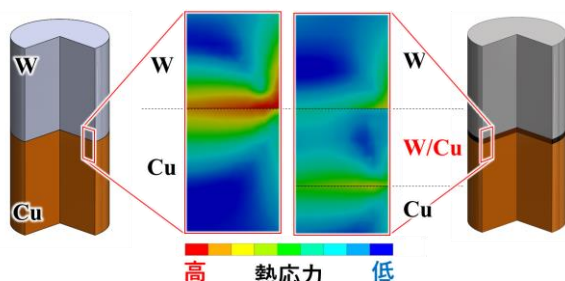


図2 熱シミュレーションを用いた異種金属接合における応力緩和層の評価

さらに接合断面における2次元 SEM-EDS 元素マッピングから、接合界面にタングステン酸化物や不純物の存在は確認されず、高品質な接合を実現した。現在、この SPS 法を応用した上記接合技術を粉末固相接合 (PSB) 法と名付け、特許取得 (特許第 6563581 号) と共に他分野への社会実装を目指している。

4. ダイバータテストモジュールの開発

PSB 接合技術の確立を受け、本技術を用いた実機サイズのダイバータを作製し、熱除去性能を確かめることとなった。熱除去性能は、電子ビームによる熱負荷試験で検証した。図3は、熱負荷試験用に製作したダイバータテストモジュール (DTM) の写真である。20 mm × 26 mm × 150 mm の CuCrZr 製ヒートシンクは、内部にスワールリボン等の熱拡散用冷却水流路が彫られている。ヒートシンク上には厚さ5 mm のタングステン製ターゲット板が PSB 法で接合されている。底部には、ステンレス製のマニホールドがヒートシンクに対し、同じく PSB 法で接合されている。

熱負荷試験の結果、ITER ダイバータの仕様である、定常状態で 10 MW/m² を上回る、最大 20 MW/m² までの熱負荷に対して良好な熱除去性能を示した (図4)。受熱面である W 部とヒートシンクの温度差は最大 1,000 °C を超えたが、試験後の検査ではダイバータ表面の溶損や亀裂、あるいは接合界面の剥離等の損

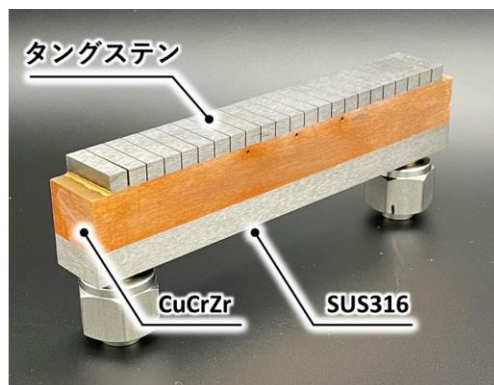


図3 ダイバータテストモジュール

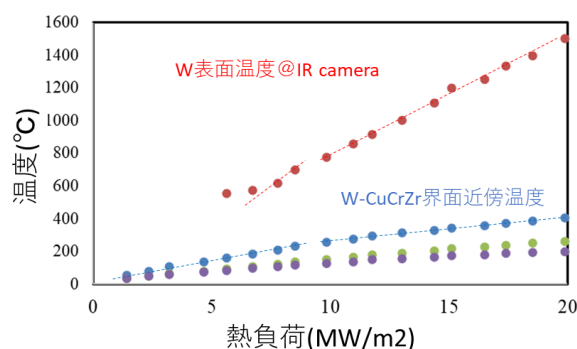


図4 熱負荷試験におけるダイバータテストモジュール各部温度

傷は確認されず高い堅牢性を実証した。

さらに、熱負荷試験の結果を受け、本 DTM を LHD 内部に実装した (図5)。第24サイクルのプラズマ実験期間中、約820ショットのプラズマに曝露し、W表面温度や接合界面付近温度をモニターした (図6)。



図5 LHD にインストールされたダイバータテストモジュール

実験中、異常な温度上昇等は無く、実験後に目視による確認では熱負荷試験と同じくWの溶損や亀裂、または接合界面の剥離等の損傷は確認されなかった。現在、SEM等を用いて微細な損傷等を詳細に観察している。

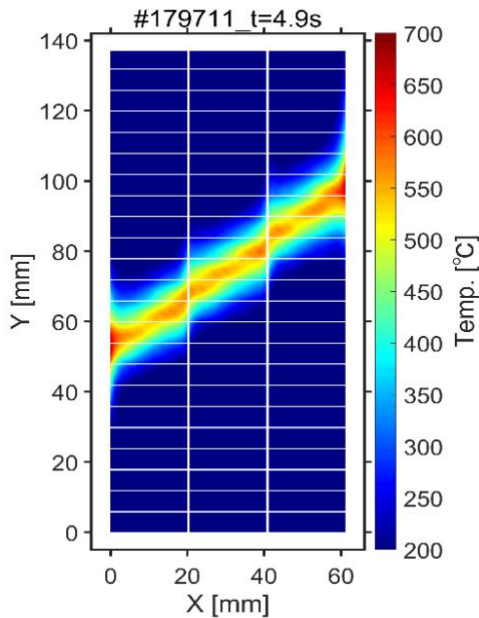


図6 赤外線カメラで計測したダイバータテストモジュール表面温度の一例

それらは真空蒸着や大気プラズマ溶射によるコーティングが主である。しかし、コーティング膜の厚さは数 $10\mu\text{m}$ から数 $100\mu\text{m}$ 程度で、プラズマによるスパッタリングで容易に剥がれるという欠点を持っている。そこで我々は、図7のように既存のLHDの黒鉛製ダイバータ表面へのWプレート(厚さ1mm)の接合を試みた[4]。

また本手法は、LHDのみならず国内外の核融合装置装置への展開が期待できる。たとえば、現在フランスで建設中のITERである。ITERではWブロックにCuパイプがロウ付けで接合された受熱装置が検討されている。この受熱装置にPSB法を用いることで、費用が高く、重いWの使用量を低減することが可能である。今後、研究会や国際学会などの発表機会を通じて、国際共同研究へと展開していきたいと考えている。

参考文献

- [1] R. Parker, et al., Plasma-wall interactions in ITER, J. Nucl. Mater. 241 (1997) 1–26.
- [2] G. Janeschitz, et al., Divertor design and its integration into ITER, Nucl. Fusion 42 (2002) 14.
- [3] R. A. Pitts, et al., Status and physics basis of the ITER divertor, Phys. Scr. T138 (2009) 014001.
- [4] T. Murase, et al., Bonding of Tungsten and Graphite Using Spark Plasma Sintering for Divertor Component in LHD, Plasma Fusion Res., 18 (2023) 1205003.

5. PSB技術の応用展開

将来使用されることが確実なWの研究を、最小の装置改造とコストで行うために、既存の黒鉛表面のW化が試みられている。

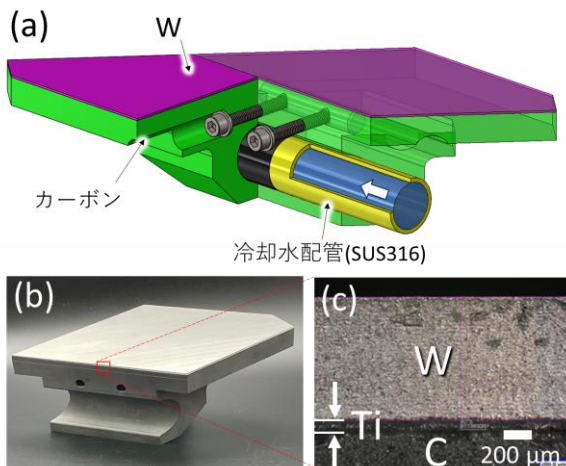


図7 カーボン基材にWプレートを接合したダイバータ受熱板[4]