

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06997

研究課題名(和文) 先進的ろう付接合法を用いたW・ODS-Cu製核融合炉用ダイバータ受熱機器の開発

研究課題名(英文) Development of the W/ODS-Cu divertor heat removal component by using the Advanced Brazing Technique

研究代表者

時谷 政行 (Tokitani, Masayuki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：30455208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：独自に開発した「先進的ろう付接合法」を用いて、タングステン(W)をアーマー材料に、酸化物分散強化銅(ODS-Cu, 具体的にはGlidCop)をヒートシンク材料とした核融合炉用ダイバータ受熱機器の開発を行った。接合部の微細構造解析により、ろう材成分(Ni, P)がGlidCop側に拡散することで接合界面から消失すると同時に空隙や亀裂の無い接合部が得られていることがわかった。接合界面近傍のGlidCop側で極端な軟化層が確認されたことから、この層が残留応力の吸収体となっている可能性が高い。ダイバータ受熱機器試験体への熱負荷試験の結果、 $\sim 24\text{MW}/\text{m}^2$ の定常熱負荷を除熱できることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱膨張係数の異なるタングステン(W)と酸化物分散強化銅(GlidCop)を、残留応力を吸収する中間層無しで直接接合できる「先進的ろう付接合法」の接合原理はこれまで明らかになっておらず、学術的な問いであった。この問いに対して、微細構造解析を駆使することでその接合メカニズムを明らかにすることに成功した。また、この接合法はWとGlidCopの接合だけでなく、GlidCop同士やその他の金属の接合に対しても広く応用できることが明らかになった。この接合法は、核融合炉のダイバータ受熱機器開発のみならず、銅合金の接合構造が必要な様々な分野に応用できる可能性があり、産業応用や分野間連携への拡大が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Development of the divertor heat removal component in the reactor relevant conditions with tungsten (W) armour and oxide dispersion strengthened copper (ODS-Cu; GlidCop) heat sink by using the "advanced brazing technique" which was originally developed by our group was conducted. According to the microstructural analysis of the W/GlidCop joint, it was revealed that very fine joint without any cavities and cracks was formed, and the filler elements of Ni and P were almost disappeared from the joint interface due to the strong diffusion towards the GlidCop matrix. Since the very thin softening region was identified on the GlidCop matrix, vicinity of the joint interface, the softened region might act as the main role in the absorber of the residual stress. The small-scale W/GlidCop divertor mock-up fabricated by advanced brazing technique showed excellent heat removal capability under the $\sim 24\text{MW}/\text{m}^2$ steady state heat loading condition.

研究分野：核融合炉材料学

キーワード：プラズマ対向機器 ダイバータ ろう付接合 銅合金 タングステン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合炉におけるダイバータ受熱機器のパイプ材料やヒートシンク材料には、これまで中性子照射特性に優れている低放射化フェライト鋼の適用が考えられてきたが、核融合炉で想定される $\sim 10\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の熱負荷の場合、熱伝導率が低いために数 mm の板厚であっても内部温度勾配によって誘起される熱応力が降伏強度を超えてしまい、熱設計として成り立たないことが明らかである[1]。一方で、ヘリカル型核融合炉 (FFHR-d1) やトカマク DEMO 炉の設計では[2, 3]、ダイバータ中性子束を抑える工夫によって熱伝導率の高い銅合金が使用できる可能性が出てきた。考え得る銅合金には、ITER のダイバータヒートシンク (パイプ) に使用されている CuCrZr に代表される析出強化型銅合金 (PH-Cu)、GlidCop® に代表される酸化物分散強化型銅 (ODS-Cu) がある。ITER で CuCrZr が採用された経緯には、中性子照射後の ODS-Cu の低い破壊靱性値の懸念が影響している。破壊靱性が特に問題となるのは、 250°C で $\sim 2.5\text{dpa}$ 程の照射を受けた場合との報告があるが[4]、中性子負荷設計の工夫によりダイバータヒートシンク材料への適用は大いに可能であると考えられる。一方で、CuCrZr は一度 450°C の温度を経験すると急激に強度が低下し、焼きなまし \rightarrow 溶体化クエンチ \rightarrow 時効処理を施さなければ二度と元の強度に戻すことはできない。この性質は、ダイバータヒートシンク材料として用いる場合に十分な温度マージンを確保できないというデメリットとなる。銅合金はタングステン (W) アーマー材料とろう付等により接合されるが、CuCrZr の場合、ろう付熱処理の最後に必ず融点近傍からのガスによる急速冷却工程が必要となり、ダイバータ構造体 (W 母材、銅合金母材、W/銅合金の界面) に望まれない熱歪みの影響を与えかねない。これに対して、GlidCop® は、本来の強度が CuCrZr よりも高いだけでなく、たとえ融点近傍 (約 1000°C) まで温度上昇したとしても、温度が下がれば元の強度が維持される特性を有している。この特性は、ダイバータ受熱機器の安全性確保だけでなく、W とのろう付熱処理時の最終冷却速度を極限まで遅くでき、熱歪の影響を極力排除できるという利点に繋がる。

本研究で利用する“先進的”ろう付接合法の1つ目のポイントは、GlidCop® が持つこのような優位性を再び見直して利用するアイデアにある。そのために、まずは過去の研究論文を調査し (例えば[5])、耐中性子負荷特性の考え方を整理した。その結果、純銅および各種銅合金が中性子負荷に対して弱いとされている要因は、 $0.1\text{--}1\text{dpa}$ 程度で訪れる照射誘起硬化/軟化にあり、GlidCop® であれば約 300°C に維持した状態で温度変動無く使用し続けることができればある程度回避できることがわかった。さらに、GlidCop® は純銅や CuCrZr に比べると照射誘起軟化に対して僅かに有利であることもわかった。“先進的”と称するろう付接合法の2つ目のポイントは、数あるろう材の中から W と GlidCop® の直接ろう付接合に最適ろう材が BNi-6 (Ni-11%P) であることを突き止め[1]、ろう材の厚さや熱処理・冷却時間の最適化にも成功したところにある。具体的には、 960°C で 10 分間のろう付熱処理の後、8 時間以上十分に長い時間をかけて室温まで冷却する。その結果、従来のろう付接合法のように W と銅合金の熱膨張係数の差を吸収するためのクッションの役割をする中間材を介さなくても、図 1 で示すように W と銅合金 (GlidCop®) の直接接合 (W/BNi-6/GlidCop®, 以降は W/GlidCop® と表記) が可能となった。3 点曲げ試験による接合接手強度評価では、 200MPa の降伏強度で塑性変形し破断に至ることが確認され、ろう付法による接合接手としては十分な靱性を示すことも確認された。W/GlidCop® 製小型ダイバータ受熱機器試験体を製造し、予備的な除熱性能試験を実施した結果、 $15\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷においても表面直下の W 内部の温度上昇は 650°C 程度に抑えられ、高い除熱性能を有することも確認された。

従来のろう付接合法 “先進的”ろう付接合法



図1. 従来のろう付接合法と先進的ろう付接合法の比較模式図。

2. 研究の目的

先進的ろう付接合法は、これまで長期にわたって懸念されてきた核融合炉用ダイバータ受熱機器開発に大きな進展をもたらす画期的な技術であると言える。しかしながら、核融合炉への適用には、3つの必須検討事項が残されていた。1つ目は、なぜ接合継手に優れた靱性が発現したのかについて、材料学的な観点からの考察が不十分である事。2つ目は、同接合手順により製造した小型ダイバータ受熱機器試験体に対して、限界除熱性能が確認できていない事。3つ目は、長期間使用可能な大規模ダイバータ試験体の設計・製作が可能かどうかを検討する事であった。これら3つの検討事項を具体的に実行し、結果を得ることで、核融合炉における W/銅合金 (GlidCop®) 製ダイバータ受熱機器の設計・製造技術が確立できると期待された。これら3つの必須検討事項に対して、以下のような目的を立てた。

①ろう付接合部の詳細な組織観察を行い、靱性発現機構を明らかにする。

②小型ダイバータ受熱機器試験体に対して $20\text{MW}/\text{m}^2$ までの定常熱負荷試験を実施し、得られた温度分布を有限要素法による熱応力解析と比較する。

③大規模ダイバータ受熱機器試験体の設計・製作に着手し、設計・製作手法を確立させる。

大規模ダイバータ受熱機器試験体の設計・製作においては、冷却水流路設計の工夫による構造体自身の冷却性能向上も期待できる為、時間的な余裕があれば最適な冷却流路設計のための検討も行うとした。①~③の結果より、核融合炉における W/銅合金 (GlidCop®) 製ダイバータ受熱機器の設計・製作技術を確立させることを目的とした。

3. 研究の方法

平成 29 年度～令和 1 年度までの 3 年間の研究計画(方法)を以下のように設定した。

(1)平成 29 年度 ⇒ 「①ろう付接合部(接合継手)の詳細な組織観察」

W/GlidCop®ろう付接合試験体の表面を集束イオンビーム加工観察装置(FIB)を利用してナノレベルで鏡面研磨状態とし、走査電子顕微鏡(SEM)、エネルギー分散型 X 線分析装置(EDS)を用いて分析した。結果より、微細組織および元素組成の分布状態を確認した。当初予定していなかったが、接合部の硬さ試験により、硬さ分布も評価した。また、曲げ試験により破壊させたろう付接合接手部を SEM で観察し、接合接手の破壊がどのように進展しているのかを調べた。

(2)平成 30 年度 ⇒ 「②20MW/m²までの定常熱負荷試験を実施」

核融合科学研究所既設の電子ビーム超高熱負荷試験装置(ACT2)を用いて、図 2 に示す小型ダイバータ受熱機器試験体に対して 20MW/m² 以上の定常熱負荷試験を実施した。熱入力は 3 枚の W 平板に対して均等になるように調節した。冷却水条件は～0.3MPa 室温とし、流速は～50L/min 以上とした。試験体には CH1～CH8 に示す位置に熱電対を設置し、各部の温度をモニターした。実験で得られる温度分布の妥当性を評価するために、有限要素法解析プログラム(ANSYS)による熱解析を実施した。解析では、冷却水パイプと冷却水との間に熱伝達係数を設定した。

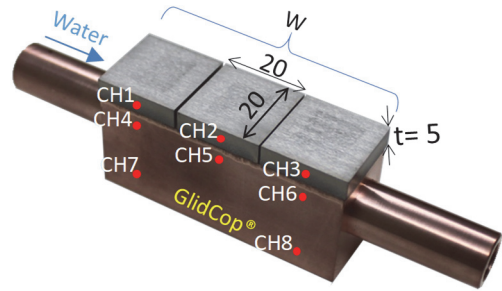


図2. 小型ダイバータ受熱機器試験体。

(3)令和 1 年度 ⇒ 「③大型ダイバータ受熱機器試験体の設計・製作」

上記①および②の結果に基づき、W/GlidCop®大型ダイバータ受熱機器試験体の製造試験を実施した。具体的な形状は GlidCop®製ヒートシンクに、図 2 と同じサイズの W 平板 28 枚を、同時に先進的ろう付接合法により接合させた。また、当初は時間があれば実施する予定であった、20MW/m² 以上の熱負荷を定常的に安定して除熱するための流路設計のための基礎試験を実施した。具体的には、GlidCop®製ヒートシンクに冷却効率に優れた冷却流路を切削加工し、その流路を完全にクタイトな状態で封止するための接合技術開発である。これには、GlidCop®同士、あるいは GlidCop®と他の金属材料の間で十分な強度と接合面積率を確保する接合技術を開発する必要がある。本研究ではその基礎試験として GlidCop®同士(GlidCop®/GlidCop®)、ステンレス鋼と GlidCop®(SUS/GlidCop®)の接合試験を先進的ろう付接合法の応用により実施した。

4. 研究成果

(1)W/GlidCop®ろう付接合部の微細構造と変形・破断挙動

先進的ろう付接合法で製造された W/GlidCop®接合部を FIB で加工した後に SEM で観察した断面像を図 3 に示す。マイクロレベルにおいて亀裂や空隙の無い緻密な接合界面であることがわかる。また、驚くべきことに、W と GlidCop®の結晶粒が互いに入り組んでおり、高いアンカー効果を有していることが示唆される。ここで生じる疑問点は、W と GlidCop®の間に挿入していた BNi-6 (Ni-11%P) ろう材はどこに行ったのか？、そして、なぜ W と GlidCop®の界面が結晶粒レベルで緻密に入り組んだ接合構造となれたのか？、という点である。それを確かめるために、FIB 加工領域に対して EDS マッピング機能により組成分析を実施した。その結果が図 4 である。見てわかるように、W 中には目立った元素侵入は認められないが、GlidCop®側には W に加えてろう材成分の Ni, P が侵入・分布している。

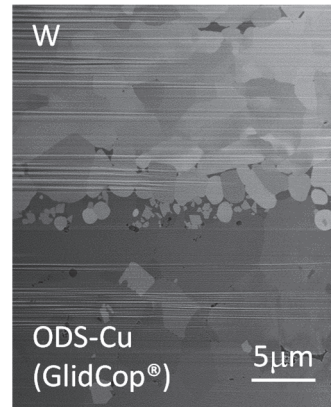


図3. W/GlidCop®接合部のSEM像。

Ni, P の主要な分布深さは～120μm、深い場所ではその数倍以上の深さまで達しており、固体中の移動としては長距離なものである。移動の詳細なメカニズムは明らかになっていないが、GlidCop®の結晶粒界に沿って粒界拡散した可能性も考えられる。接合界面近傍の硬さ試験をビッカース硬さ試験機を用いて実施した結果、W は素材の硬さを維持しており、GlidCop®側では、接合界面から約 700 μm の領域の大部分が GlidCop®素材と比較して 70%程度の硬さに減少(軟化)していることが明らかになった。この軟化領域がろう付熱処理時に生じる残留応力の吸収体として機能している可能性が考えられる。接合のメカニズムは必ずしも明らかになっていないが、以上の実験事実から P と Cu の共晶反応が影響しているのではないかと推察される。BNi-6 ろう材の融点は 875℃であため、ろう付熱処理温度 960℃において熔融し Ni, P が GlidCop®素材中に拡散を始める。この時、P と Cu との共晶反応に伴う Cu の融点降下が生じ、接合界面近傍の GlidCop®素材がわずかに熔融し、W 素材側の凹凸に馴染むことでアンカー効果に有利となる緻密

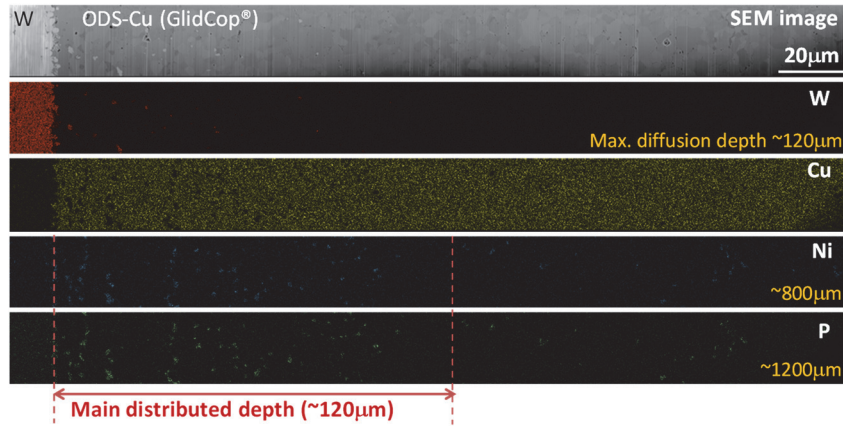


図4. FIBで加工した領域の全体SEM像と対応するEDS元素マッピング像。

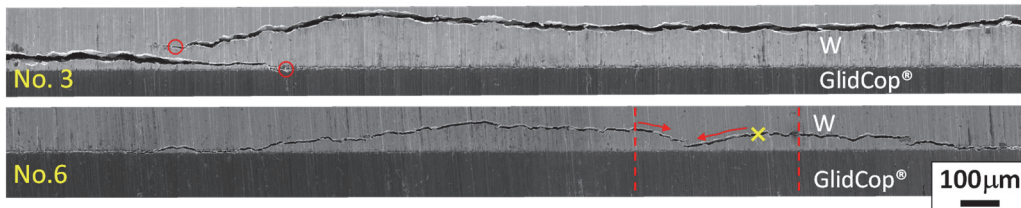


図5. 曲げ試験で破断させた後のW/GlidCop®接合部のSEM像。No. 3, 6は試料の名前。

に入り組んだ構造となったと考えられる。融点降下を引き起こした後のろう材成分は、上述した拡散等の移動機構により GlidCop®深部まで移動したため、接合界面近傍にはほとんど残留しなかったことになる。結果として、接合層がほとんど認められないWとGlidCop®の真の直接接合が得られた事になる。

図3のような緻密な接合界面を有する直接接合によって優れた機械的強度が得られた可能性が高いが、次に学術的に興味深い事は、変形・破断に至るメカニズムの解明である。変形・破断挙動を詳しく調べるために、曲げ試験で破断させたW/GlidCop®接合部の詳細なSEM観察を実施した。曲げ試験機は亀裂等の発生により一定の応力減少が生じた瞬間に停止する仕組みになっている。図5は、曲げ試験機が止まった後で接合部近傍を観察したSEM像である。見て明らかのように、亀裂は接合界面およびGlidCop®素材では生じておらず、全てW素材内で発生している。No. 3試料の赤丸印は亀裂進展の先端部に対応する。また、No. 6試料の赤破線で囲んだ領域では、別途、完全破断させた後に破断面観察を行い、亀裂の進展方向と発生場所を同定した。その結果を基に、進展方向と発生場所をそれぞれ赤矢印と黄色の×印で明記している。結果より、亀裂はW素材の接合界面近傍で発生し、その発生箇所は1ヶ所ではなく複数個所存在していることがわかった。また、亀裂の一部は接合界面近傍に到達する傾向があるが、界面に到達した後で進展が止まっていることも示された。この事実は、接合界面はW素材と比較し得るほど高い接合強度を持っていることを示唆しており、良好な接合界面であること証明するものである。

(2) 小型ダイバータ受熱機器試験体の除熱性能評価

図6(a)に定常熱負荷中のW/GlidCop®小型ダイバータ受熱機器試験体の温度分布を示す。~24MW/m²の熱負荷においても除熱能力は劣化することなく連続性を維持しており、接合部の健全性は保たれていることがわかる。図6(b)は24MW/m²熱負荷時のANSYSによる小型ダイバータ受熱機器試験体温度分布シミュレーション結果である。24MW/m²においても除熱能力が保たれている一方で、Wの表面が再結晶温度以上まで上昇している事と、GlidCop®の接合界面近傍が500°C程度まで上昇している事から、核融合炉において同様の熱負荷条件下で使用するには、冷却効率を高める冷却回路設計の工夫が必要であると考えられる。

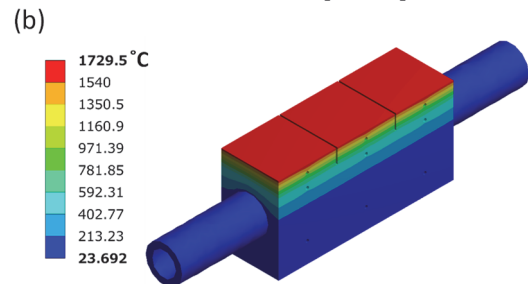
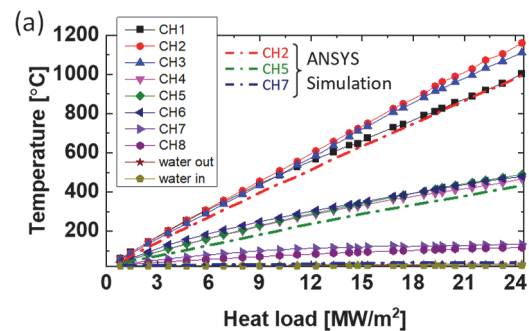


図6. (a) 定常熱負荷中のW/GlidCop®小型ダイバータ受熱機器試験体(図2)の温度分布(シンボルは熱電対計測結果, 破線はANSYSシミュレーション結果). (b) 図2の有限要素モデルと24MW/m²定常熱負荷中のANSYS温度分布シミュレーション結果。

(3) 大型ダイバータ受熱機器試験体の製作と先進的ろう付接合法の応用

上述した(1)および(2)の結果により、まだ不明な点は残っている一方で、先進的ろう付接合法による W/GlidCop®接合特性の大部分が理解された。この理解を基に、W/GlidCop®大型ダイバータ受熱機器試験体の製造に着手した。図7は、28枚のW平板を GlidCop®ヒートシンクに同時に接合させることに成功した大型ダイバータ受熱機器試験体の写真である。超音波探傷試験(UT 検査)による接合面積率評価の結果、良好な接合状態であることが確認できている。各W平板の間隔は0.5mmに隙間管理された。本大型試験体の熱負荷試験は今後実施していく予定である。

一方、図6の考察において述べたように、単純な貫通穴方式の GlidCop®製ヒートシンクにW平板を接合させる現状の設計では、 $20\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の熱負荷を定常的に安定して除熱するにおいて、Wや接合界面近傍の GlidCop®の温度上昇が問題となる。この問題を解決するためには、GlidCop®の冷却流路設計を抜本的に見直す必要がある。除熱に対して最も理想的な構造は、GlidCop®ヒートシンクの背面から矩形の冷却流路を切削加工し、流路そのものを完全リークタイトな蓋構造で封止する方式である。しかしながら、GlidCop®は溶接性が悪く、従来の溶接等の方式ではそのような蓋構造の施工は不可能である。これに対して、Wと GlidCop®の接合で開発した先進的ろう付接合法を GlidCop®同士(GlidCop®/GlidCop®)、ステンレス鋼と GlidCop®(SUS/GlidCop®)に適用することで、完全リークタイトな封止構造ができないかどうか検証試験を行った。図8に、先進的ろう付接合法で製作した(a) GlidCop®/GlidCop®, (b) SUS/GlidCop®接合部の光学顕微鏡像を示す。BNi-6 ろう材の厚さは $38\mu\text{m}$ であるため、この厚さよりも厚い接合変質層を「拡散層」、この厚さと同等以下の接合変質層を「接合層」と表現する。(a)では拡散層が $\sim 180\mu\text{m}$ 、(b)では接合層が $\sim 20\mu\text{m}$ 形成され、双方共接合部近傍には空隙等が無い極めて連続性の高い微細組織を有している。曲げ試験により求めた接合強度は GlidCop®母材とほぼ同等あるいは少し低い程度であり、強度と共に十分な延性を有していることが明らかになった。接合部が流体漏れを生じないかどうかを試験する目的で、数十平方センチメートル程度の接合面積を有する流体漏れ試験用の接合試験体を別途製作し、ヘリウムリーク試験を実施した結果、(a)、(b)共にヘリウムリークディテクターの検出下限値($\sim 10^{-11}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)以下の範囲で流体漏れの無い接合であることを確認した。この結果を踏まえると、GlidCop®ヒートシンクの背面から矩形の冷却流路を切削加工し、(a) GlidCop®/GlidCop®, (b) SUS/GlidCop®どちらかの先進的ろう付接合法により、完全リークタイトな蓋構造を形成させられる可能性がある。

(1)、(2)、(3)に述べた研究成果により、先進的ろう付接合法を用いて製造された W/GlidCop®製ダイバータ受熱機器の基本的性能の確認とその製造技術の基礎が確立された。同手法を GlidCop®/GlidCop®, SUS/GlidCop®等の接合へ応用させることで、GlidCop®ヒートシンクに切削加工した冷却流路を完全リークタイト条件で封止できる可能性が見出された。これにより、試験体の除熱性能をさらに高度化させられる可能性がある。

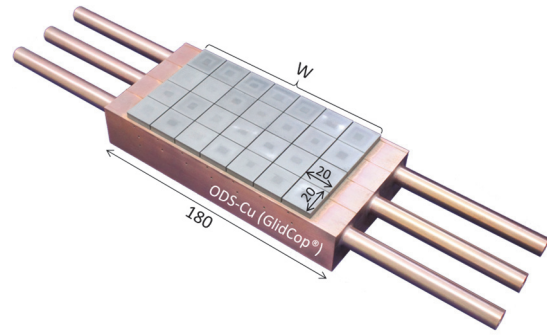


図7. 先進的ろう付接合法で製作した W/GlidCop®大型ダイバータ受熱機器試験体の写真。20×20×5mm³のW平板28枚を同時に接合している、各W平板の間隔は0.5mmに隙間管理している。

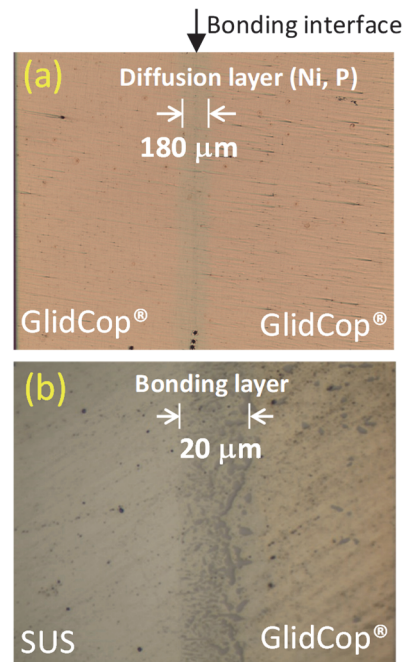


図8. 先進的ろう付接合法で製作した(a) GlidCop®/GlidCop®, (b) SUS/GlidCop®接合部の光学顕微鏡像。

- [1] M. Tokitani et al., Plasma Fusion Res. Vol.10 (2015) 3405035.
- [2] N. Asakura et al., Nucl. Fusion 57 (2017) 126050.
- [3] J.H. You et al., Nucl. Mater. Energy 9 (2016) 171.
- [4] G. Kalinin, R. Matera, J. Nucl. Mater. 258-263 (1998) 345.
- [5] S.J. Zinkle et al., Fusion Materials (1994) DOE/ER-0313/16.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, FFHR Design Group	4. 巻 57
2. 論文標題 Fabrication of divertor mock-up with ODS-Cu and W by the improved brazing technique	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 76009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6bb3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Tokitani, S. Masuzaki, H. Kasahara, Y. Yoshimura, R. Sakamoto, N. Yoshida, Y. Ueda, T. Mutoh, LHD Experiment Group, S. Nagata	4. 巻 12
2. 論文標題 Initial growth phase of W-fuzz formation in ultra-long pulse helium discharge in LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 1358 ~ 1362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M. Tokitani, M. Miyamoto, S. Masuzaki, Y. Fujii, R. Sakamoto, Y. Oya, Y. Hatano, T. Otsuka, M. Oyaizu, H. Kurotaki, T. Suzuki, D. Hamaguchi, K. Isobe, N. Asakura, A. Widdowson, M. Rubel, JET Contributors	4. 巻 116
2. 論文標題 Micro-/nano-characterization of the surface structures on the divertor tiles from JET ITER-like wall	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Tokitani, M. Miyamoto, S. Masuzaki, R. Sakamoto, Y. Oya, Y. Hatano, T. Otsuka, M. Oyaizu, H. Kurotaki, T. Suzuki, D. Hamaguchi, K. Isobe, N. Asakura, A. Widdowson, K. Heinola, M. Rubel, JET Contributors	4. 巻 136
2. 論文標題 Plasma-wall interaction on the divertor tiles of JET ITER-like wall from the viewpoint of micro/nanoscale observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 199 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.01.051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 時谷政行	4. 巻 Vol.94, No.8
2. 論文標題 先進的ろう付接合法を用いたタングステン / 銅合金ダイバータ受熱機器の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 385 ~ 393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2018_08/jspf2018_08-385.pdf	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Tokitani, S. Masuzaki, T. Murase, the LHD Experiment Group	4. 巻 18
2. 論文標題 Demonstration of suppression of dust generation and partial reduction of the hydrogen retention by tungsten coated graphite divertor tiles in LHD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 23 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.11.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, the FFHR Design Group	4. 巻 146
2. 論文標題 Deformation and fracture behavior of the W/ODS-Cu joint fabricated by the advanced brazing technique	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 1733 ~ 1736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, the FFHR Design Group	4. 巻 148
2. 論文標題 Leak tight joint procedures for ODS-Cu/ODS-Cu by the advanced brazing technique	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Tokitani, M. Miyamoto, S. Masuzaki, Y. Hatano, S.E. Lee, Y. Oya, T. Otsuka, M. Oyaidzu, H. Kurotaki, T. Suzuki, D. Hamaguchi, T. Hayashi, N. Asakura, A. Widdowson, S. Jachmich, M. Rubel, JET Contributors	4. 巻 T171
2. 論文標題 Surface morphology of the bulk tungsten divertor tiles from JET ITER-like wall	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 014010 ~ 014010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab3d09	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, FFHR Design Group
2. 発表標題 Development of the high heat flux component for a fusion reactor
3. 学会等名 4th meeting of the Radiation Damage In Accelerator Target Environments (4th RaDIATE) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Tokitani, M. Miyamoto, S. Masuzaki, R. Sakamoto, Y. Oya, Y. Hatano, T. Otsuka, M. Oyaidzu, H. Kurotaki, T. Suzuki, D. Hamaguchi, K. Isobe, N. Asakura, A. Widdowson, K. Heinola, M. Rubel, JET Contributors
2. 発表標題 Plasma-wall interaction on the divertor tiles of JET ITER-like wall from the viewpoint of micro/nanosopic observations
3. 学会等名 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 時谷政行, 宮本光貴, 増崎貴, 坂本隆一, 大矢恭久, 波多野雄治, 大塚哲平, 濱口大, 黒滝宏紀, 小柳津誠, 鈴木卓美, 鈴木達也, 磯部兼嗣, 朝倉伸幸, Anna Widdowson, Kalle Heinola, Marek Rubel
2. 発表標題 JET ILW対向材タイル表面の微細構造分析(II)
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Tokitani, S. Masuzaki, T. Murase, the LHD Experiment Group
2. 発表標題 Demonstration of suppression of the dust generation and partly reduction of the hydrogen retention by tungsten coated graphite divertor tiles in LHD
3. 学会等名 23rd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (PSI-23) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 時谷政行, 増崎 貴, 村瀬尊則, LHD実験グループ, 永田晋二
2. 発表標題 タングステンダイバータタイルの LHDにおけるプラズマ壁相互作用 (II)
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, the FFHR Design Group
2. 発表標題 Deformation and fracture behavior of the ODS-Cu/W joint fabricated by the improved brazing technique
3. 学会等名 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, the FFHR Design Group
2. 発表標題 Novel fabrication method of the W/ODS-Cu divertor by the advanced brazing technique
3. 学会等名 The 6th Korea-Japan Joint Workshop on Nuclear Materials - Materials Development for Advanced Nuclear Systems - (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 時谷政行, 浜地志憲, 平岡 裕, 増崎 貴, 田村 仁, 能登裕之, 田中照也, 室賀健夫, 相良明男, FFHR設計グループ
2. 発表標題 先進的ろう付接合法によるW/ODS-Cuダイバータ受熱機器の開発 ~ 接合部の変形・破断挙動および大型ダイバータ受熱機器の製造 ~
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tokitani, M. Miyamoto, S. Masuzaki, Y. Hatano, S.E. Lee, Y. Oya, T. Otsuka, M. Oyaidzu, H. Kurotaki, T. Suzuki, D. Hamaguchi, T. Hayashi, N. Asakura, A. Widdowson, S. Jachmich, M. Rubel, JET Contributors
2. 発表標題 Microscopic analysis of surface morphologies on the tungsten bulk divertor from JET ITER-like wall
3. 学会等名 17th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications (PFMC-17) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, the FFHR Design Group
2. 発表標題 Leak Tight Joint Method for ODS-Cu/ODS-Cu by Application of the Advanced Brazing Technique
3. 学会等名 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technologies (ISFNT-14) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tokitani, H. Noto, T. Muroga, T. Hirai
2. 発表標題 Manufacturing Technologies for advanced PFMs relevant for DEMO
3. 学会等名 6th IAEA DEMO Programme Workshop (IAEA DPWS-6) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tokitani, Y. Hamaji, Y. Hiraoka, S. Masuzaki, H. Tamura, H. Noto, T. Tanaka, T. Muroga, A. Sagara, the FFHR Design Group
2. 発表標題 Novel Fabrication Method for High Heat Flux Component by the Multi-Step Brazing Technique
3. 学会等名 The 19th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tokitani, M. Miyamoto, S. Masuzaki, Y. Hatano, Y. Oya, T. Otsuka, D. Hamaguchi, H. Kurotaki, M. Oyaidzu, T. Suzuki, T. Suzuki, T. Hayashi, N. Asakura, A. Widdowson, S. Jachmich, M. Rubel, JET Contributors
2. 発表標題 JET-ILW実験で使用されたWダイバータタイルおよびBeリミタタイルの微細構造
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 銅および銅合金のろう付接合方法	発明者 時谷政行	権利者 自然科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-68891	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 アルミナ分散強化銅のろう付接合方法	発明者 時谷政行	権利者 自然科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6528257号	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 アルミナ分散強化銅のろう付接合方法	発明者 時谷政行	権利者 自然科学研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6606661号	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	浜地 志憲 (Hamaji Yukinori) (60761070)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	