

耐熱衝撃タングステン材 ～核融合炉部材への適用～

Tungsten Plate with Excellent Thermal Shock Resistance
～Application for Fusion Reactors～

角倉 孝典*
Takanori Kadokura

飯倉 武志
Takeshi Iikura

脱炭素を実現できる有力候補の一つである核融合エネルギーの科学的小および技術的実現性を実証することを目的としたITER^{*1}計画が国際的プロジェクトとして進められている。ITERの構成機器のうち、2000℃を超える超高温に晒されるダイバータにはタングステンが使用される。ITERの安定した運転を可能とするために、高温加熱および冷却のサイクルを受けるタングステンには優れた耐熱衝撃性が要求されている。そこで我々は、高温加熱による再結晶粒の成長を抑制した耐熱衝撃タングステン材を開発した。この開発材からダイバータ小型試験体およびプロトタイプ用のモノブロックを作製し、核融合炉を模擬した熱負荷試験にて性能を評価した。その結果、過酷な条件下においても開発材は割れなかった。とくに、プロトタイプの評価結果はITER要求を大きく上回り、当社の開発材が世界に先駆けて“割れないタングステン”として評価された。

The ITER project is being promoted as an international megaproject to scientifically and technically demonstrate the realization of fusion energy, which is one of the most promising candidates for achieving a decarbonized society. Among the components of the ITER, or International Thermonuclear Experimental Reactor, tungsten (W) is used for a divertor, which is exposed to ultra-high temperatures above 2000°C. For stable operation of the ITER, W is required to exhibit excellent thermal shock resistance under a high temperature heating/cooling cycle. In this study, we have newly developed a W material with an improved thermal shock resistance by suppressing the grain growth due to high temperature. Using the W material, monoblocks were fabricated for small-scale mock-ups and plasma facing unit (PFU) prototypes, and their performance was evaluated by high heat flux test (HHFT) simulating a fusion reactor. HHFT results showed that no cracks occurred even under severe conditions. In particular, the evaluation results of the prototype greatly exceeded the requirements for the ITER, and the W material was certified as "unbreakable tungsten" for the first time in the world.

キーワード：タングステン、高融点、脱炭素、核融合、ITER

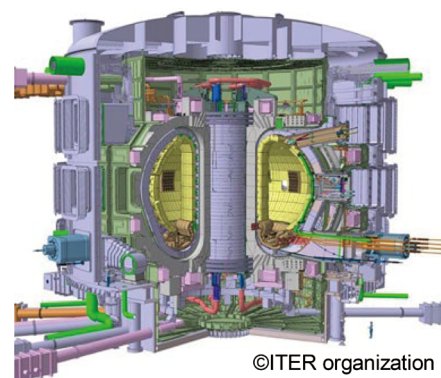
1. 緒言

近年、石油や石炭などの化石燃料から脱却することを目的とした「脱炭素」に向けた活動が活発となっている。例えば、太陽光、水力および風力など太陽由来のエネルギーが挙げられるが、これらのエネルギーは広く薄く地球全体に分布しているためエネルギーの総量は大きくても、効率的に収集することができない問題がある。その中で核融合反応を利用したエネルギーは、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を排出せず、かつその燃料は海水中に豊富に存在することから、エネルギー問題と環境問題を根本的に解決する恒久的なエネルギーとして注目されている。

「地上の太陽」と呼ばれる核融合エネルギーによる発電の研究は1940年代から開始され、実験炉を建設し科学技術的に成立することを実証する段階に入っている。この国際熱核融合実験炉は、「ITER（イーター）」と呼ばれ、我が国を含む7極（日本、欧州、米国、ロシア、中国、韓国、インド）の国際協力によって、現在、南フランスのサン・ポール・レ・デュランスに建設中である。ラテン語で「道」という意味を持つITERは、2025年頃に初プラズマを達成し、2035年頃に重水素と三重水素を用いた本格的な燃焼

実験を実施する計画となっており、この実証データが発電実証を目的とした核融合原型炉（Demonstration Power Station, 以下DEMO炉）の建設に繋がっていく⁽¹⁾。

図1にITERトカマク本体を示す。装置の中核は、ドーナツ型の超高温プラズマとなっており、このプラズマの中で核融合反応が起こる。プラズマは高さが約7m、外径約16m、

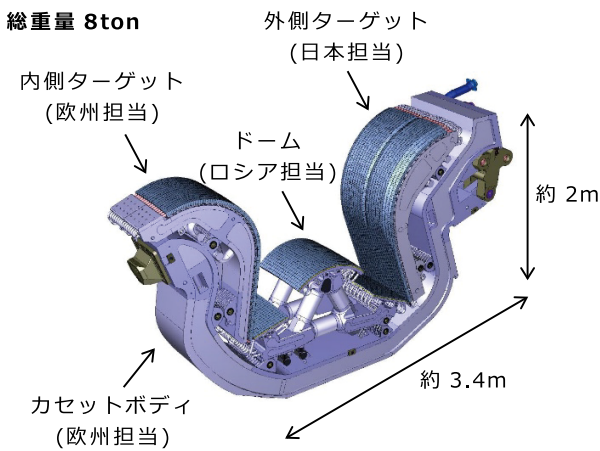


©ITER organization

図1 ITERトカマク本体

体積約800m³という大規模なものである。

そのプラズマを取り囲んで核融合出力を熱に変えて外に取り出すブランケットという厚さ約0.5mの壁があり、プラズマの下部には、プラズマからの高い熱流や粒子の流れを受けとめるダイバータという機器がある。図2にダイバータの構造図を示す。このダイバータは、プラズマを維持する上で不要な不純物を排出・除去するための機器で、日本が外側ターゲット、欧州が内側ターゲット、ロシアがドームを調達する。ダイバータ表面は、最高で2300℃に達すると言われており、いずれの箇所にもタングステン（以下、W）が採用されている。



提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図2 ダイバータカセット

高融点金属の一つであるWは、一般に粉末をプレス・焼結した後、熱間あるいは温間での塑性加工および機械加工により、様々な形状の最終製品が製造される。Wは融点が高く（3380℃）、蒸気圧が低いなどの長所を活かして、高温加熱炉用部材などの高熱負荷環境下で使用されている⁽²⁾。

ITERで安定した実証実験を行うためには、Wには耐熱衝撃性、すなわち「高温熱負荷で割れないW」が要求される。

筆者らは、ITERに加え、日本国内のみならず欧米を始めとした世界の核融合研究の促進ならびに商業発電の早期実現に貢献していくことを目的として、(株)アライドマテリアルの強みである粉末冶金法の技術を応用し、耐熱衝撃タングステン材を開発した。本稿では、その取組み内容について報告する。

2. W材の製造方法と開発W材の特性

図3にW材の製造工程を示す。W粉末を静水圧プレス(CIP)^{*2}によりプレス体を作製した後、水素焼結を行った。

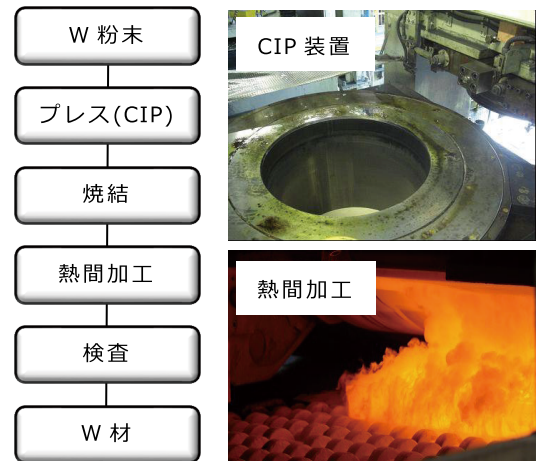


図3 W材の製造方法

得られた焼結体を熱間で塑性加工を行い、W材を得た。一般的に塑性加工直後のW材は繊維状の加工組織を呈しているが、1200℃を超える温度で再結晶^{*3}を開始する。熱負荷による耐熱衝撃を向上させるためには、2000℃を超える温度に晒された時の再結晶粒成長を可能な限り抑制することが有効であると考えられる。図4に、2300℃で熱処理した後の開発W材の組織を示す。比較材として、従来の製造方法で準備したW材を用いた。開発W材は、超高温熱処理後でも従来W材に比べて微細な再結晶粒を維持していた。この開発W材を用いて、核融合炉の環境を模擬した条件で熱負荷試験を実施した。

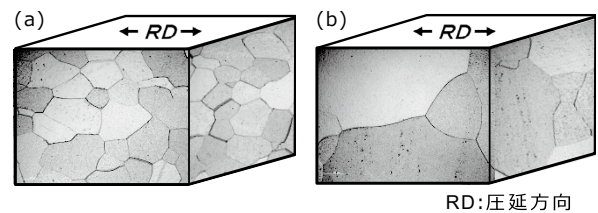


図4 2300℃熱処理後の組織
(a) 開発W材 (b) 従来W材

3. 核融合炉を模擬した評価

3-1 小型熱負荷試験体の作製と熱負荷試験結果

熱負荷試験には、ITERのダイバータに用いられるWモノブロック（写真1）と類似形状の試験体を使用される。開発W材をブロック形状に切り出し、機械加工により穴を開けた後、特殊接合法によりWと無酸素銅（以下、OFCu）を接合した。その後、WおよびOFCuを機械加工することにより熱負荷試験に用いるWモノブロックを作製した。WとOFCuの接合状態の健全性は、超音波探傷を用いた非破

壊試験により、ITERに要求される仕様を満足していることを確認した。比較として、従来W材を用いたモノブロックを準備した。これらのWモノブロックにCu-Cr-Zr系合金の冷却管をロウ付けすることにより、**写真2**に示す熱負荷試験体を作製した⁽³⁾。

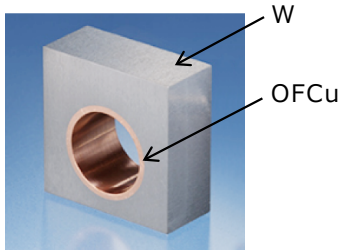
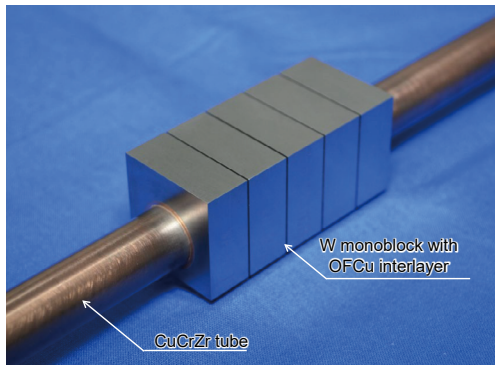


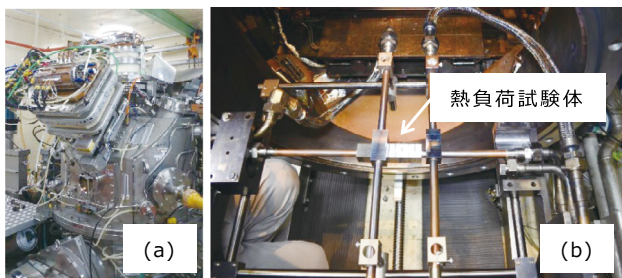
写真1 Wモノブロック



提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

写真2 小型熱負荷試験体

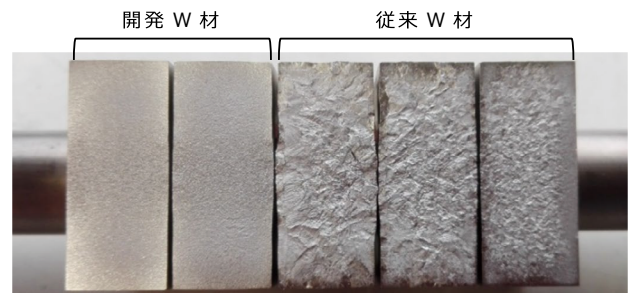
熱負荷試験は、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構が保有する高熱負荷試験装置（以下、JEBIS）にて実施した。**写真3**にJEBIS外観および装置内部の写真を示す。約2300℃に相当する20MW/m²の電子ビームをWモノブ



提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

写真3 熱負荷試験装置 (JEBIS)
(a) 装置外観 (b) 装置内部

ロックに10s照射し、30s冷却後に再度電子ビーム照射するサイクルを1000回（ITER設計要求数の3倍以上のサイクル数）繰り返し、熱負荷試験後のWモノブロック熱負荷面の状態を確認した。**写真4**に示すように、従来W材から作製したWモノブロックは再結晶粒の粗大化により熱負荷面が隆起していたのに対し、開発W材は割れが観察されず優れた耐熱衝撃性を示しただけでなく、微細な再結晶粒を維持したことにより、変形による熱負荷面の隆起もなく、ダイバータに適した性能を示した。



提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

写真4 熱負荷試験後のWモノブロック

3-2 プロトタイプ評価

熱負荷試験により優れた耐熱衝撃性を示した開発W材を用いて実機同様のダイバータのプラズマ対向ユニット（Plasma Facing Unit, 以下PFU）を製作し、プロトタイプ評価を実施した。プロトタイプ評価のためには**写真1**のWモノブロックの他に、PFUとそれを支持する鋼製支持構造材との高い位置精度を保つために、Wモノブロックに特殊ステンレスであるXM-19を接合した支持脚付Wモノブロックを準備する必要がある。そのため、WモノブロックとXM-19とをロウ付けにより接合する技術を開発した。接合状態の健全性は、超音波探傷を用いた非破壊試験により、ITER要求仕様を満足していることを確認した。加えて接合部の強度と疲労特性を評価した結果、ITER要求特性を

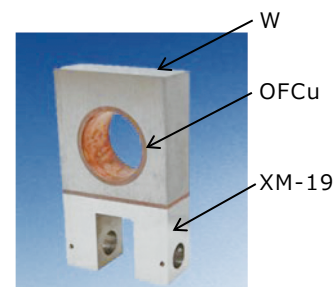
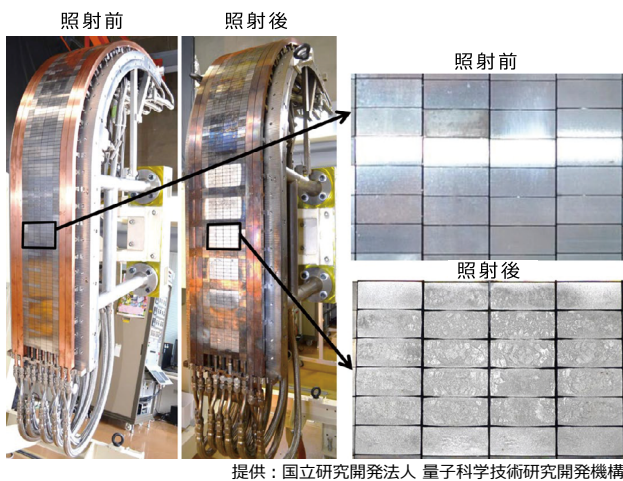


写真5 支持脚付Wモノブロック

大きく上回る支持脚付Wモノブロックを開発することができた（写真5）。

このWモノブロックを使用して製作されたPFUを、ITER機構および国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構の立会いのもと、ロシアのエフレモフ研究所にあるIDTF (ITER Divertor Test Facility) にて熱負荷試験を実施した⁽⁴⁾。試験は、10MW/m²を5000サイクル (ITER設計要求1000サイクル)、20MW/m²を1000サイクル (ITER設計要求300サイクル) とITER要求を大きく上回るサイクル数で実施した結果、写真6に示す通り、当社の開発W材を使用した全てのモノブロックに割れがみられず、非常に優れた耐熱衝撃性を示した。本結果によって、開発W材を使用したモノブロックは、ITER要求を大きく上回り、世界に先駆けて「割れないタングステン」として高い評価を得るとともに、ITER機構および国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構からITERダイバータ用W材として認証を受けた。



提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

写真6 外側ターゲットプロトタイプ評価結果

5. 結 言

夢のエネルギーと言われ、脱炭素が実現可能な核融合エネルギーの実験炉として建設中のITERのダイバータに使用され、耐熱衝撃性が要求されるタングステン材を開発した。本材料は、小型試験体およびプロトタイプにおける熱負荷試験において、唯一の割れないタングステンとして世界に先駆けて高い評価を得た。

(株)アライドマテリアルでは、この開発タングステン材を使用したモノブロックを日本が担当する外側ターゲット用に供給している。現在は、写真7に示すように無酸素銅部が突き出たConvex-typeや熱負荷面が平面ではないChamfer-typeなどを含めて、日本だけでなく欧州の内側ターゲット、さらにはDEMO炉に向けて研究を進めている日本・

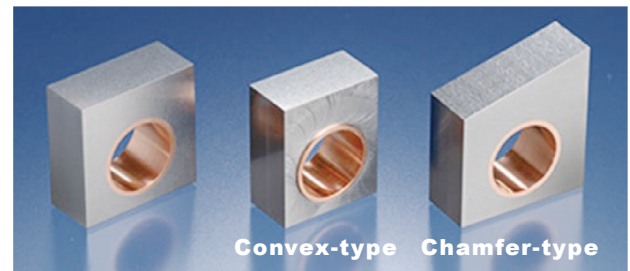


写真7 Wモノブロックラインナップ

欧米を始めとした研究機関等へ展開し、核融合炉の実用化に向けて貢献していく。

6. 謝 辞

本論文の執筆にあたり、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構の核融合エネルギー部門 那珂核融合研究所 ITERプロジェクト部 プラズマ対向機器開発グループの江里グループリーダーならびに福田主任研究員には、熱負荷試験に係るデータの使用を快諾頂くだけでなく、温かいご指導ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

用語集

※1 ITER

International Thermonuclear Experimental Reactorの略称でITERの語源となっているが、現在は「ITER」が正式名称となっている。

※2 静水圧プレス (CIP)

粉末に圧力をかけて固形状態にする工程 (圧粉化)。粉末を入れた容器に水等の液体を圧力媒体として、等方的な圧力を加える方法。

※3 再結晶

塑性加工を施した金属材料を高温で保持すると、材料内部に蓄積されたエネルギーを駆動力とした新しい結晶粒 (著しく低い転位密度を持つ) が生成・成長する現象。

参 考 文 献

- (1) 文科省核融合科学技術委員会報告書、「原型炉研究開発ロードマップについて（一次まとめ）」(2018)
- (2) タングステン・モリブデン工業会、「タングステン・モリブデン技術資料（改訂第3版）」(2009)
- (3) M. Fukuda, Y. Seki, K. Ezato, K. Yokoyama, H. Nishi, S. Suzuki, J. Nucl. Mater., 542 (2020), 152509
- (4) K. Ezato, S. Suzuki, Y. Seki, K. Mohri, K. Yokoyama, F. Escourbiac, T. Hirai, V. Kuznetcov, Fusion Eng. Des., 98-99 (2015), 1281

執 筆 者

角倉 孝典* : (株)アライドマテリアル マネージャー
博士 (理学)



飯倉 武志 : (株)アライドマテリアル 主事



*主執筆者