

# 核融合炉用カリウムドーピングタングステン厚板

Potassium-Doped Tungsten Thick Plate for Fusion Reactor

松田 直也\*  
Naoya Matsuta

三浦 径  
Kei miura

脱炭素を実現する有力候補の一つであるフュージョンエネルギーの研究活動が盛んになっている。核融合炉の構成機器のうち、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ている。発電実証に向けた原型炉では長時間の運転が想定され、核融合炉に用いるタングステン (W) 材料にはより高い機械的健全性が求められる。(株)アライドマテリアルでは大学などとの共同研究を通して種々の材料を試作評価し、カリウム (K) ドープWの有効性を見出してきた。これを実際にプラズマ対向機器に適用していくことを目標にプラズマ対向機器に適用可能な規模を有するKドーピングW厚板を開発した。本稿ではそれら材料の主な特性の評価結果について報告する。

Research on fusion energy, a key contender for achieving decarbonization, is becoming increasingly active. Tungsten (W) is used in the divertor of fusion reactors, which is exposed to extreme temperatures exceeding 2000°C. The DEMO-Reactor, designed to demonstrate power generation, is expected to operate for extended periods, requiring increased mechanical durability from W materials used in fusion reactors. In collaboration with universities and other institutions, A.L.M.T. Corp. has evaluated various materials and has found the effectiveness of potassium (K)-doped W. Aiming to apply the findings to plasma-facing components, we have developed K-doped W thick plates tailored for this specific application. This paper reports the evaluation results of the main characteristics of these materials.

キーワード：核融合炉、タングステン、カリウムドーピング、再結晶、低温脆性

## 1. 緒 言

近年、石油や石炭などの化石燃料から脱却を目的とした「脱炭素」に向けた活動が活発となっている。その中で「地上の太陽」と呼ばれるフュージョンエネルギーによる発電の研究は、実験炉を建設し科学技術的に成立するか実証する段階に入り、核融合実験炉「ITER」<sup>\*1</sup>をフランスに建設中である。ITERのダイバータには、プラズマ対向材料として純タングステン (W) が使用され、高い熱負荷に対する耐久性が必要とされる。これまで(株)アライドマテリアルでは2000℃を超える熱負荷への耐久性を高めた純Wの板材を開発し、ITER機構が実機適用の可否を判断するための熱負荷試験において優れた耐久性を示し<sup>(1)</sup>、現在供給中である。近年はITERの研究成果を基にフュージョンエネルギーによる発電を実証していくための原型炉<sup>\*2</sup>の設計活動も始まっている。原型炉以降の核融合炉ではITERを上回る長時間運転が期待されるため、プラズマ対向材料には長時間の熱負荷や中性子照射損傷の蓄積が想定される。よって、W材料の機械特性としてはより強靱で、かつ長期間の運転環境下での特性の劣化を抑えることが必要になる。

これらの課題に対し大学などと共同で材料開発に取り組み、様々な添加元素を加えた試作材を評価し有効な材料改質の方法を検討した。表1は、これまでの小型試作材での材料評価結果を簡便にまとめたものである。カリウム (K) ドープW、W-レニウム (Re) 合金といった材料を評価し純Wと比較した結果、KドーピングWの有効性が示された<sup>(2)、(3)</sup>。KドーピングWは、Kを微量添加することで材料中に微細なKバ

表1 小型試作材の純Wとの比較結果<sup>(2)、(3)</sup>

	KドーピングW	W-3%Re合金
強度	○	○
耐低温脆性	○	○
耐再結晶	○	○
熱伝導性	○	△
耐中性子脆化	○	△

ブルの列を形成させ(写真1)、再結晶組織を制御する。その結果、再結晶粒の粗大化の抑制や、粒界すべりの抑制による耐変形性の向上が知られている。これらの特徴から、白熱電球のフィラメント用や放電灯の電極用として線・棒材料が用いられている。またプラズマ対向材料はプラズマ

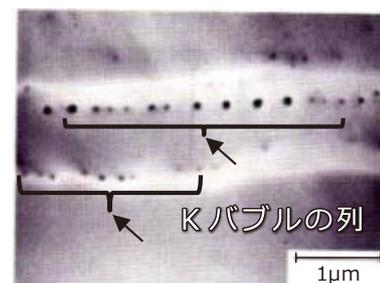


写真1 KドーピングW中のKバブル

から受ける熱を効率よく冷却部材に伝える必要があり、高い熱伝導率が求められる。K ドープ W は純 W と比較しても、熱伝導率を損なわないという特徴がある。このように、プラズマ対向材料に好ましい特徴を有しており、これまで板材の適用事例は少なかったが、我々の一連の研究では小型の板材を試作、評価し、板材においても優れた材料改質の効果を有することを明らかにしてきた。

一方で原型炉への K ドープ W の適用を具体化していくにあたり、プラズマ対向機器の製作に十分な規模を有する K ドープ W 厚板の開発が必要と考えられる。(株)アライドマテリアルでは、大型 W 厚板の製造技術を用いて、ITER ダイバータの純 W 製モノブロックの製造実績を積み上げてきた。これを K ドープ W で実現するには、過去に有効性が示された小型の板材での良特性を厚板で如何に再現するか、十分な検証を経て製作する必要があった。そこで筆者らは、(株)アライドマテリアルが有する K ドープ W 粉の製造技術、大型インゴットの焼結技術および圧延組織の制御技術を駆逐することで、K ドープ W 厚板を開発した。本稿では、その取組み内容について報告する。

## 2. K ドープ W 板材の製作と特性

図1にW材の製造工程を示す。K ドープ W 厚板は、K ドープ W 粉末をプレス成形および焼結してインゴットを作製した後、インゴットを熱間圧延することで作製した。大型化にあたっては材料内の均一性についても留意する必要がある。特に板厚が増すと板厚方向にわたる特性に差が生じる場合があり、均一性が高いことが求められる。

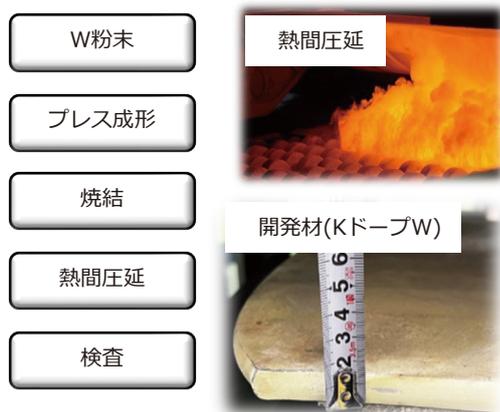


図1 W材の製造方法

板厚方向の特性を評価するため、開発材のTD断面に対し、板厚方向にわたってビッカース硬さ試験を行なった。図2に板厚中心を基準とした硬さの偏差を示す。板厚中心から表層に向かい等間隔で測定し、各測定位置で3点硬さ

を測定した。板厚中心の3点の平均値を基準として、各測定位置の偏差をプロットして均一性を評価した。厚い板材では均一性が課題となるが、開発材は圧延条件の厳密な制御により偏差±2%以内に硬さが収まっており、板厚全体にわたり均一であることがわかる。

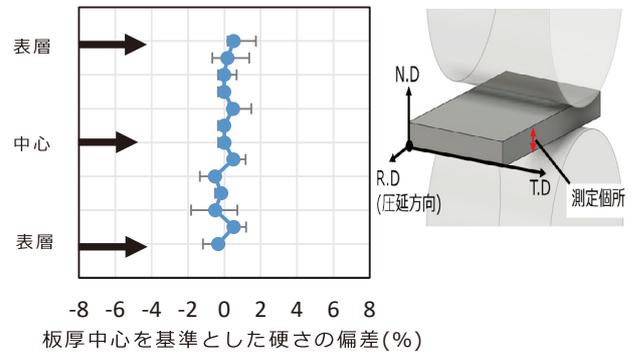


図2 開発材のTD断面における板厚方向の硬さ偏差

図3に開発材の圧延加工後の断面組織を示す。参照材として、従来の製造方法で準備した純W材を用いた。開発材は結晶粒が非常に微細であることがわかる。一般的に多結晶金属材料の降伏応力と平均結晶粒との間にはいわゆるHall-Petch関係式<sup>(4),(5)</sup>が成り立つ。開発材においては結晶粒が非常に微細であり、降伏応力などの向上が期待できる。しかしながら、一般的に製造したままの純W材は繊維状の加工組織を呈しているが、高温で再結晶<sup>\*3</sup>を開始し、粒成長による粗大化が起こる。このため実機の使用環境下での機械特性の劣化を抑えるには、想定温度における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。

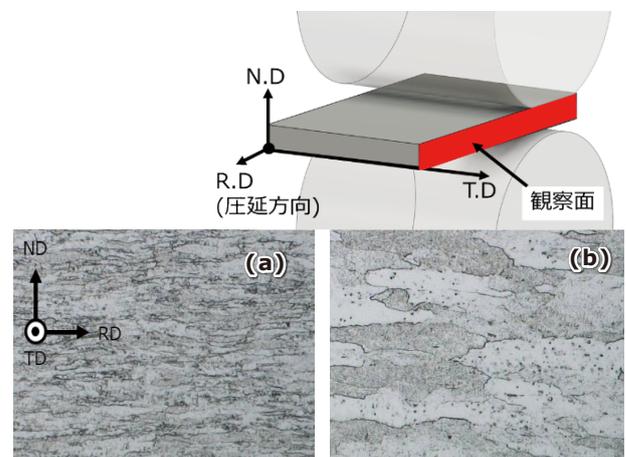


図3 圧延加工後の断面組織  
(a) 開発材 (KドープW) (b) 参照材 (純W)

図4に実機の想定温度以上の温度で熱処理した後の開発材の組織を示す。開発材は処理後も参照材に比べて微細な再結晶粒であった。

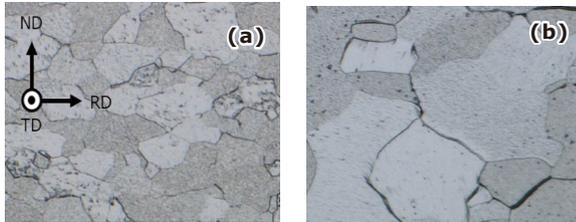


図4 熱処理後材料の断面組織  
(a) 開発材 (KドーピングW) (b) 参照材 (純W)

実機の想定温度以上の熱処理後の開発材を走査型電子顕微鏡により観察した結果を写真2に示す。材料中にはKバブルと推測される気孔が分散していることを確認され、気孔周辺部の粒界が屈曲している様子が示されている。これは分散するKバブルが分散粒子としてふるまいピン止め効果を及ぼし、再結晶後の粒成長を抑制していると推測される。

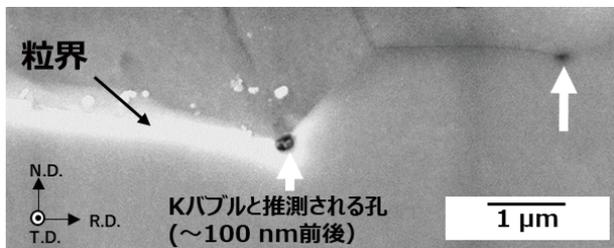


写真2 熱処理後材料の走査型電子顕微鏡写真

### 3. 開発材の機械特性評価

機械特性の評価のため、開発材に対し実機の想定熱負荷を上回る温度で熱処理を行なったのちに引張試験を行なった。図5に結果を示す。引張試験は、引張方向を板幅方向(T.D)とし、試験温度200~500℃で実施した。応力-ひずみ曲線の内面積に相当する値を靱性係数(MJ/m<sup>3</sup>)と定義して評価した。この値が高いほど、材料の靱性が高いことを示しており、また靱性が現れる温度が低いほど延性-脆性遷移温度(DBTT)<sup>\*4</sup>が低いことを示している。冷熱サイクルを受けるプラズマ対向機器向けの材料としては高靱性かつ低DBTTであることが好ましい。各試験温度での材料の靱性を評価した結果、開発材は参照純W圧延材に比べ靱性値がすべての試験温度で向上している。純W参照材

は200℃の低い温度においても靱性値が低く、低いエネルギーで破壊に至ることを示しているが、開発材は200℃においても高い靱性を示した。このことから、想定熱負荷を受けた後も開発材は強靱性を保ち、プラズマ対向機器の信頼性を高めることができると考えられる。

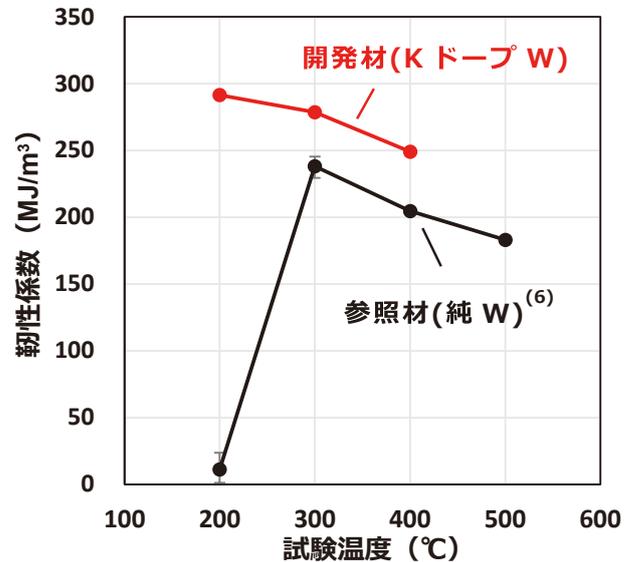


図5 熱処理後材料の靱性係数と試験温度の関係

## 5. 結 言

本稿ではKドーピングW厚板の特性について報告した。本材料はKドーピングによる再結晶粒径の微細化により靱性を高めることに成功した。今後、実際のプラズマ対向機器が置かれる環境を模擬した熱負荷試験などを行ない、耐熱衝撃性を実証していく。さらには、国内外の研究機関等へ展開し、原型炉の実用化に向けて貢献していく所存である。

## 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 原型炉

ITER の成果に基づいて発電を実証する目的の核融合炉。現在概念設計が行われている。

## ※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。

## ※4 延性－脆性遷移温度 (DBTT)

材料が延性から脆性に変わる温度。延性－脆性遷移温度以下の脆性を示す温度域では材料に外力が加わると、比較的小さい力で破壊が生じる。このため延性－脆性遷移温度は低いほうが好ましい。

## 参考文献

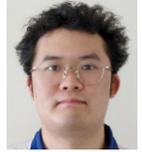
- (1) K. Ezato, S. Suzuki, Y. Seki, K. Mohri, K. Yokoyama, F. Escourbiac, T. Hirai, V. Kuznetsov, Fusion Eng. Des., 98-99 (2015), 1281
- (2) S. Nogami, A. Hasegawa, M. Fukuda, M. Rieth, J. Reiser, G. Pintsuk, J. Nucl. Mater. 543 (2021) 152506
- (3) S. Nogami, D. Terentyev, A. Zinovev, C. Yin, M. Rieth, G. Pintsuk, A. Hasegawa, J. Nucl. Mater. 553 (2021) 153009
- (4) E. O. Hall, Proceedings of the Physical Society of London, Vol.64B, pp.747-753 (1951)
- (5) N. J. Petch, Journal of the Iron and Steel Institute, Vol.174, pp.25-28 (1953)
- (6) M. Fukuda, Y. Seki, K. Ezato, K. Yokoyama, H. Nishi, S. Suzuki, J. Nucl. Mater., 542 (2020), 152509

## 執筆者

松田 直也\* : (株)アライドマテリアル 主務



三浦 径 : (株)アライドマテリアル



\*主執筆者