

高熱流束材料の限界突破

Breakthrough of the limits of high heat flux materials

野上修平
Shuhei Nogami

東北大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Tohoku University

1. 緒言

核融合、原子力、宇宙、航空、化学プラント等で使用される材料は複合的な過酷環境にある。過酷環境では、例えば温度、応力、濃度場に急勾配があり、さらに、中性子等の照射を受ける環境下では照射損傷も加わり、エネルギーと物質粒子の超高流束場が駆動され、非平衡状態がもたらされる。非平衡状態にある材料では、非晶質や準安定化合物(準安定相)、結晶格子欠陥を含む構成原子集団の自己組織化による準安定周期構造(散逸構造)が見出されている。それらの生成機構と物性への寄与を深く理解し活用すれば、過酷環境にあっても材料自らが安定化して劣化が止まり、その特性が改善する、いわば適応と呼べる新しい挙動が期待できる。よって、耐える材料から、適応する材料へのパラダイム転換を図り、革新的に高強度、高機能、長寿命の新材料創製を目指すことが重要であると考えられる。

本講演では、高熱流束に晒される環境で使用され、それに耐えることが必要とされる材料、いわゆる高熱流束材料に着目する。特に、代表的な高熱流束材料の一つであるタングステンとその複合材料について、それらの用途などを概説するとともに、代表的な用途の一つである核融合炉ダイバータ向けに開発が進められている材料に関する近年の研究開発成果を詳述し、さらに、開発における課題とそれらを克服するための取り組みについて紹介する。

2. タングステン基材料の用途

タングステンとその合金は、高融点、高密度、高強度(高硬度)、低熱膨張率、高電気伝導率、耐摩耗性、放射線遮蔽能力といった特徴を生かし、電球フィラメント、電子顕微鏡フィラメント、溶接電極、切削工具、医療用カテーテル、ヒートシンクなどに応用されている。また、中長期的に実用化が期待されている広い意味でのエネルギー機器などにおいては、使用する材料の耐熱性が重要であることから、タングステンの使用が検討されているものが少なくない。例えば、小型分散電源である熱光起電力(TPV)発電システムの熱輻射制御エミッターや、大規模発電プラントである核融合炉のダイバータ、核破砕中性子源や加速器駆動未臨界炉のターゲットなどが代

表的なものとなる。しかし、使用中の劣化が課題とされ、その主たる要因の一つは、高温に晒されることによる再結晶と、その後の粒成長、それらによる脆化(再結晶脆化)と考えられている。

3. 核融合炉ダイバータ用タングステン合金

タングステンは、融点、熱伝導率およびスパッタリング耐性などの観点から、核融合炉ダイバータへの適用が期待されている。ダイバータにおけるタングステンの使用温度域は、下限は延性脆性遷移温度(延性から脆性に変化する温度であり、DBTT(Ductile-to-brittle transition temperature)と呼ばれ、この温度以下では脆性を示す(低温脆性))、上限は再結晶温度(この温度を超えると、転位などの格子欠陥密度の小さな新しい結晶粒が形成、成長し、DBTTが上昇する(再結晶脆化))になると考えられる(図1参照)。ITERのダイバータなどに適用される粉末焼結と圧延で製作された純タングステン板は、DBTTが500°C程度、再結晶温度が1200°C程度とされる(図2^[1]参照)。この場合、DBTTは冷却媒体の温度を超え、再結晶温度は10MW/m²程度の熱負荷時におけるダイバータの再表面温度に近いと考

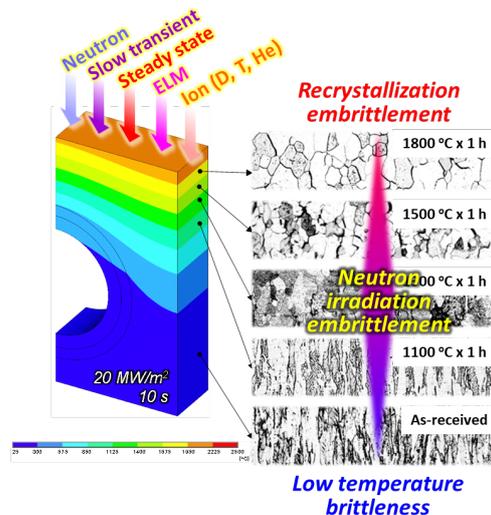


図 1. 核融合炉ダイバータで想定される負荷とタングステンの主な特性変化(低温脆性、再結晶脆化、中性子照射脆化)の模式図^[1]

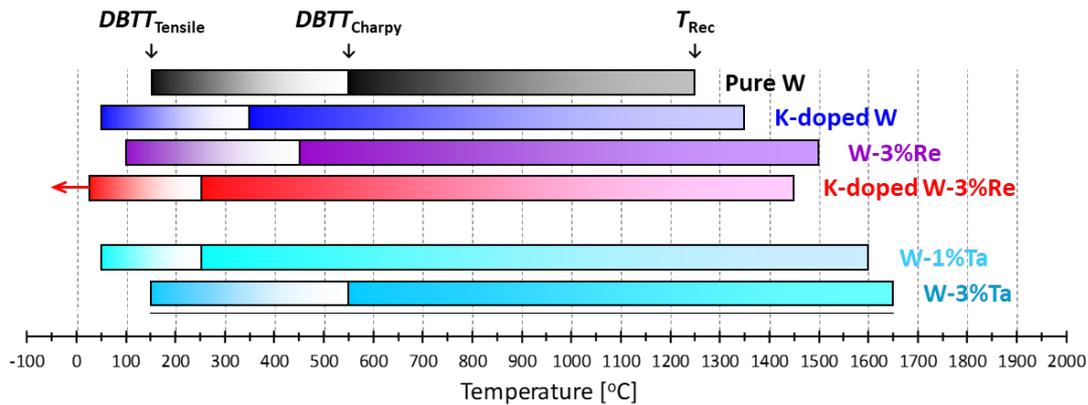


図 2. 純タングステンと各種タングステン合金の DBTT と再結晶温度 (DBTT はシャルピー衝撃試験による DBTT_{Charpy} と引張試験による DBTT_{Tensile} を示す。再結晶温度は、1 時間の熱処理によるビッカース硬さの変化から求めた温度を示す。) [1]

えられるため、長期間の運転が必要となる原型炉以降の核融合炉においては、必ずしも十分であるとは言えない。また、原型炉以降の核融合炉では、中性子照射による照射損傷の影響も無視できず、照射による DBTT の上昇なども考慮することが必要である (中性子照射脆化)。

これに対し、結晶粒の微細化、レニウムなどの元素添加による合金化、バブルや酸化物粒子などによる第二相分散などを単独ないし複合的に適用したタングステン合金が、機械特性や耐中性子照射特性の改善のため開発されてきた。図 2 は、国内で開発された各種タングステン合金の DBTT と再結晶温度である。レニウムやタンタルによる合金化、カリウムドープ (カリウム添加に起因するナノサイズのバブルの分散) と呼ばれる第二相分散を施すことにより、DBTT の低下と再結晶温度の上昇が同時に達成されることが示された [1]。図 3 に示すように、カリウムドープタングステンとカリウムドープタングステン-レニウム合金については、中性子照射試験が近年実施された [2]。カリウムドープタングステンには、中性子照射による DBTT の上昇が照射温度に関わらず純タングステンに比べ大幅に抑制され、カリウムドープの有効性が示された。一方、カリウムドープタングステン-レニウム合金については、照射温度 1100°C においてはカリウムドープタングステンと同様に良好な結果が得られたが、照射温度 600°C においては純タングステンと同様の DBTT の上昇が見られた。レニウムによる合金化については、高温照射後の水素同位体蓄積量を低減させる効果が示され [2]、近年水素挙動の分野で注目されているが、中性子照射脆化の観点では前述のような懸念も見られるため、材料開発においては様々な特性の観点からその有効性を判断することが必要であることが示されたと考

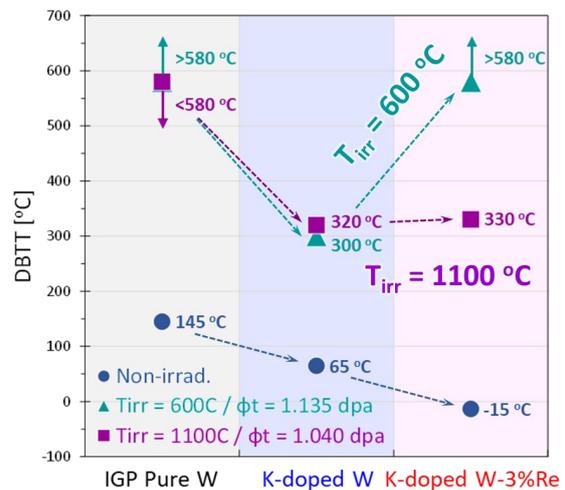


図 3. 純タングステン、カリウムドープタングステンおよびカリウムドープタングステン-レニウム合金の中性子照射前後の DBTT (照射温度は 600°C および 1100°C、照射量は約 1dpa) [2]

えられる。

参考文献

- [1] S. Nogami, A. Hasegawa, M. Fukuda, M. Rieth, J. Reiser, G. Pintsuk, J. Nucl. Mater. 543 (2021) 152506.
- [2] S. Nogami, D. Terentyev, A. Zinovev, C. Yin, M. Rieth, G. Pintsuk, A. Hasegawa, J. Nucl. Mater. 553 (2021) 153009.
- [3] Y. Hatano, K. Ami, V. Kh. Alimov, S. Kondo, T. Hinoki, T. Toyama, M. Fukuda, A. Hasegawa, K. Sugiyama, Y. Oya, M. Oyaidzu, T. Hayashi, Nucl. Mater. Energy 9 (2016) 93-97.