

## ダイバータへの適用をめざすタングステン材料の照射データベースの構築 Construction of Irradiation Database of Tungsten Materials Aiming at Application to Divertor

長谷川 晃

Akira Hasegawa

東北大学金属材料研究所

Institute of Material Research, Tohoku University

### 序論

原型炉研究開発のロードマップでは「炉工学と関連基盤研究」において「設計基準を含む材料開発、計測制御装置開発及びダイバータ開発等については、原型炉への適用判断にあたって重要度の高い事項を優先して炉工学研究を推進する」と謳われ、そのための材料開発とそれらの材料の照射データベースの整備の検討が進められている。本講演ではダイバータ用の材料開発について、現在の状況を概観し、それらの材料データの研究の状況と、原型炉で想定される条件下での照射データベース構築を目指してどのような活動を進めているのか、その研究の現状と今後の進め方について述べる。

### 材料開発の現状

原型炉のダイバータ用の材料としてはITERのダイバータで使用が計画され製作にも使われているタングステン (W) が最も有力な候補と考えられている。Wはその物理特性から20世紀初頭から鉄鋼用の添加元素や化合物として工具、電球のフィラメント等に使われてきたが、室温領域での脆性から構造材料や大型機器部材への適用はほとんど無かった。W材料の素材の製造にあたっては融点が金属元素中最高の約3400°Cと高いことから、素材を得る製錬の段階から化学処理により粉末状で供給されてきた。鉄等のように熔融過程を経ずに作られているのが特徴である。大型の素材（インゴット）はこの粉末を融点よりもはるかに低い千数百°Cで焼き固める粉末焼結法が取られてきた。ITERでは、建設のために必要な大きさや総量を得るためにこの粉末焼結法が採用されている。

純物質としてのWの諸特性はすでに精度の高いものが得られているが、工業材料としてWを使用する場合には、製造法や材料特性改質のために導入される化学組成や微細組織に依存した物理および化学的な性質に関するいわゆる「材料データ」が必要である。そのため不純

物を含む添加元素による基本的な物理・化学的特性と、微細組織等に依存する「材料」の機械特性等の評価が求められる。さらに工業材料としては、それによって作られる機器の健全性・安全性確保のために使用環境下における経年変化（劣化）のデータも求められる。

核融合炉で想定される高温環境下でのW製機器の健全性確保のために要求されている素材の特性としては、(1)低温脆性の改善、具体的には延性脆性遷移温度 (DBTT) が低い（室温近傍）こと、(2)Wの脆性発現に大きく影響する再結晶が起こりにくい（再結晶温度が高い）こと、の2つが求められている。この2つの要件を満たすために現行の(a)粉末焼結法の改良（焼結材の加工条件や熱処理条件の改良）、(b)W素材の合金化、(c)新たな製造法（メカニカルアロイング(MA)、熱間等方厚加圧法 (HIP)、スパークプラズマシントラリング (SPS)、高温プレス法 (HP) 等)の開発などが進められている。ダイバータに供するための再現性やコスト、生産能力などから現在材料データベース構築の対象になっているのは「純Wの(a)の粉末冶金材」であり、ダイバータへの適用を念頭においた材料特性の取得が世界的に進められている。対象となる項目について表1に示す。疲労試験のように再現性やデータの取得のために比較的大きな試験片を要するものや温度条件等が決まらないものについてはデータ取得が遅れる傾向にある。

### 中性子照射データの取得の現状と今後

Wの中性子照射実験では、鉄 (Fe) などの従来の材料に使われる元素に比べて、中性子との相互作用で起こる反応の確率（反応断面積）の中性子エネルギー依存性が異なり、高エネルギー領域 ( $14\text{MeV} > E_n > \text{数MeV}$ ) における(n, $\alpha$ )や(n,p)などの生成反応が起こりにくく、一方で熱中性子領域 ( $E_n < 0.1\text{eV}$ ) での中性子捕獲反応 (n, $\gamma$ ) 反応が起こりやすい。そのため同じ中性

子照射環境であっても、Heや水素といった気体核変換元素の生成はFeに比べて1/10以下で、熱中性子捕獲による固体核変換元素のレニウム(Re)や、Reからさらに核変換で発生するオスミウム(Os)の生成量が多いのが特徴である。世界的に見て現在使用可能な材料照射試験用の原子炉は水冷却型の混合スペクトル炉がほとんどであり、このタイプの炉を使った中性子照射では核融合炉環境下での照射に比べてReやOsの生成が10~100倍程度多くなってしまふ。ReやOsは照射下で照射誘起の偏析や化合物(WRe等)の析出が起ることから、1dpa以上の照射で析出などが顕著になって照射脆化が促進されることが知られている。そのため、核融合炉環境を模擬した軽水炉での照射データの取得には、この熱中性子を吸収する熱中性子遮蔽体を用いた照射か、熱中性子が非常に少ないNa冷却型の高速中性子炉(高速炉)での照射が必要である。W材料の研究の開始がフェライト鋼等に比べて遅かったために、Wの照射研究が始まった2000年中盤以降には世界において、高速中性子束が高く、高い損傷量が得られる高速炉の多くが廃止か停止しており、最近のW材料の原子炉での重照射のデータの取得が進んでいない。現状の照射データの取得領域を照射温度と照射量でまとめたのが図1である。原型炉を目指した材料の照射データベースの構築にはまだ多くの原子での照射研究が必要である。

Wの材料開発では高温環境下での再結晶を抑制することで低温領域における脆性を抑制することが課題の一つとして上げたが、最近の材料試験炉での1000℃以上の照射試験(0.4~0.7dpa)の結果では、非照射環境下では1200~1300℃程度で再結晶するWが、1000~1100℃でも起こる可能性が報告されている。一般的に金属材料の再結晶の程度は、温度とその保持時間で決まるものであるが、照射下では(1dpa以下でも)1000℃~1100℃で再結晶化してしまう可能性が指摘されている。中性子の照射環境下では素材の製造時にW中に導入した粒径や転位組織等の種々の組織が再結晶により粗大化や消失・変化してしまいかねない。これらは中性子照射中に材料中に発生する格子原子のはじき出し損傷によって原子の拡散が促進されることによるものと考えられているが、詳細はまだ不明である。ITERの場合は、ダイバータ領域でのWの照射量は1dpa以下と推定されており、現状の照射データでもWの照射挙動はある程

度予測出来る可能性があるが、15~20dpa程度の損傷が予測される原型炉の中性子照射環境下での再結晶や核変換元素等による脆化が起こらないような材料や、温度等の使用環境を明確にすることは、核融合炉内のプラズマの制御やダイバータ領域の設計にも影響するので、早急にそれらのデータ取得にかかるべく照射計画を立てていく必要がある。そのためには現在まで得られている照射材の積極的な利活用とともに、アクションプランのC&Rに合わせるべく短期的には、原子力機構の現在停止中の高速炉の「常陽」の積極的な利用や、長期的にはA-FNS計画の促進と材料照射試験の策定、さらには国際協力による国外の原子炉や試験施設を使った照射材料研究が必要である。また照射試験片は中性子照射によって放射化するために、照射後の特性評価には放射性物質を扱えるホットラボでの研究が必須である。原子炉で重照射した試験片では放射化がきついため照射後の試験がやりにくい面はあるが、精度の高い材料データの取得には現有の国内の照射後試験施設・設備の老朽化対策や高度化も進めていかなければならない。

表1  
材料データベースに必要と想定される項目

融点	弾性率	熱伝導率
再結晶挙動	組織安定性	
破壊靱性、引張、衝撃、疲労特性		
水素吸蔵・透過・拡散	プラズマ・壁相互作用	
熱衝撃特性		

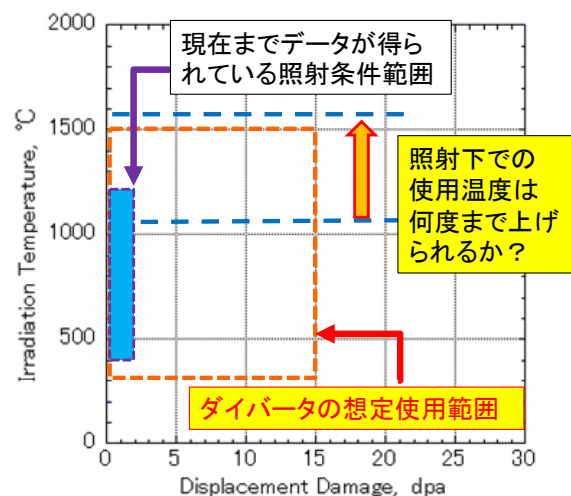


図1 ダイバータ領域のW材料に想定される照射量・照射温度範囲と現状のデータ取得範囲