平成25年度合同会合: 第1回プラズマ物理クラスター・スクレープオフ層とダイバータサブクラスター 第3回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター 第1回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター 筑波大学プラズマ研究センターシンポジューム 双方向型共同研究「磁化プラズマ中の壁不純物粒子挙動とプラズマ特性への影響」 平成25年8月29日(木)8:50~17:50 30日(金)9:00~17:10 つくばサイエンスインフォメーションセンタ-大会議室

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University

1

核融合炉におけるタングステン材料の検討

東北大学大学院 工学研究科量子エネルギー工学専攻長谷川晃

ダイバータにおけるタングステンの使用条件



タングステンの使用条件は?

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University

・使用温度範囲: 200℃~1000℃
 場合によっては溶融(>3400℃)も有り
 → 200℃~3400℃?

・材料の使い方は適材適所が基本

材料の特性は構成元素だけで決まる訳ではない。
 材料の最適化(適材適所のための努力)は、組成調整のみならず、組織調整によるところが大きい

その組織の狙った特性が、いつまで保たれるかは、環境条件、特に使用温度に大きく作用される。照射環境下は見かけ上、温度が高くなったと同じ方向の変化を起こす。

タングステンの中性子照射の影響



W合金の照射硬化予測モデルの検討

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University

●
 核変換による組成変化が少ない場合

照射硬化は照射量に依存して照射欠陥が増加 することで発現する。(JOYO, JMTR) ●JOYO 750℃/1.54dpaではボイド格子を形成 しており、準安定な損傷組織となることで照射 硬化は飽和すると考えられる。

●<u>核変換による組成変化が進行する場合</u> 損傷のみならず析出による硬化の促進 別の照射硬化予測モデルが必要。

●核融合ではボイド格子の形成を経て、核反応 生成物の生成による照射誘起析出が始まると 考えられる。

複数の因子を考慮することが必要。

組成変化による固溶硬化(特にOs) 組成変化後の照射による析出硬化 析出による固溶元素濃度の低下



TIARAにおける自己イオン(W)による 高温(>800℃)、重照射(1~5dpa)を 実施し、中性子照射データとの相関 と、重照射領域への予測を行う。

タングステンの中性子照射効果

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University

●タングステンは百年以上の使用経験のある工業用材料(機能材料) ●アメリカにおいて1960-1980年代に宇宙用原子炉の被覆管材料として 照射データが取得された。

FFTFやEBR-IIといった高速炉によるデータ取得(最大10dpa)

その後は系統的な照射実験は我々のグループ以外ではほとんどない。

照射後特性、特に構造材料の機械的性質(延性低下、 DBTT上昇)に及ぼす合金元素および組織制御の影響

●微細構造制御の特性劣化抑制への有効性は?

再結晶化、照射誘起析出への影響は?

●核変換によるReやTa,Osの影響は? (10dpa以上の領域)

●生成量が数~10ppmと言われるHeの粒界脆化への影響は?
 ●照射によりDBTTはどのように、どこまで上昇するのか?

対策の有効性、有効範囲は?

●水素のリテンションへの照射の影響は?

材料開発・評価の現状

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University

●中性子照射効果を調べるためには原子炉照射が必要 現在利用可能な照射場は米国ORNLのHFIR 日米協力事業PHENIX計画で照射を計画中

 ・

 ・
 ・
 部

 ・
 部
 第
 日

 ・
 部
 合
 金、組織
 制
 御
 材
 お
 合
 金、組織
 制
 御
 材
 书
 合
 金、組織
 制
 御
 材

 HFIR 高温重照射、熱中性子シールド用キャプセル

 服
 射
 後
 試
 験
 技
 術
 の
 開
 発

ITERダイバータ用タングステン

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University

表3 ITER ダイバータ用タングステン圧延材の要求仕様.

	化学組成(ASTM B760 -86(1999)規格に基づく圧延材)							
成分	W	С	0	Ν	Fe	Ni	Si	
組成(重量%)	balance	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1	
許容範囲 (重量%)	±0.002	+10% relative	+0.0005	+0.001	+0.001	+0.001	+0.001	

密度 (g/cm ³)	結晶粒径	ビッカース硬さ(Hv30)
19.0	3以上の細粒	410以上

鈴木 J. Plasma Fusion Res. 87(2011) 607

炭素、酸素、窒素は侵入型不純物元素で粒界の脆化の誘引因子 100ppmとなっているが、「出来るだけ少ない方がよい」 10wtppm 以下? 結晶粒度3というのは 断面積1mm2あたりの結晶粒の数(n)で 64 に相当 この時の結晶粒の平均断面積 0.0156mm2 (正方形で一辺0.125mmに相当) 粒度4はn=128で、一辺が0.088mmに相当する

$$\mathbf{n} = 0.8 \times m^2 \times \left(\frac{i_1 \times i_2}{L_1 \times L_2}\right)$$

純タングステン材料の板材の工業規格として ASTM B760-07 (2012年12月版) がある。 粉末焼結およびアーク溶解材を圧延して作る場合の基準。 板材とは厚さ4.75mm以上、熱間圧延材、熱間圧延+応力除去処理

重照射した構造用合金で観察される破壊モード

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University



Α





.) .







破壊 (B)転位チャンネルやスエリングが大きな場合 の破壊 (C)延性の低い粒界での破壊 (D)粒界に沿った析出などの界面起因の破壊

(A)塑性変形によって生ずるボイドによる延性

(E)析出物などと母相との界面破壊による粒内 破壊

(F)へき開破壊

●純タングステンは粒内に比べ粒界 が弱く、粒界脆化をおこしやすい。

・粒界を微細化し、最小き裂サイズを 小さくする。

加工により粒界の配向を行い、き裂が発生しても破壊が起こりにくくする。
 ・粒界そのものを強くする

延性脆性遷移温度(DBTT)への照射の影響



脆化抑制のために組織制御したW合金の概略図





柱状晶 数十nmx1µm

超微細結晶粒 (<100nm) と粒界に炭化物を析出

La酸化物相が粒界に析出

Processing of MA-HIP-GSMM



粉末焼結法によるタングステン材料の製造工程と条件 ¹³



焼結タングステンの組織異方性



純Wの引張り挙動



純wの引張り変形後の組織

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University



As-received: 900°Cx20min 900°Cx1h 保持後引張り試験 1300°Cx1h 保持後引張り試験

純タングステンの1dpa領域での損傷組織

Dept. Quantum Science & Energy Engineering, Tohoku University



Mean Size 2.1nm Number Density 4.9x10²²/m³ Mean Size 4.7nm Number Density 1.2x10²²/m³ T.Tanno, A.Hasegawa et.al., Mater. Trans. 52(2011) 1447

核変換の少ない高速炉照射では、約1dpaの照射でボイドの規則配列(ボイド格子)が観察される。ボイド格子は安定な損傷組織であるが、この構造が壊れる上限の照射量は不明である。一方、照射欠陥の再結合を促進し、ボイドの形成を抑制するReが増えてくると、ボイド格子の安定化構造がくずれ、新たな損傷組織が形成される可能性がある。

材料の照射研究からみた課題(ITER, DEMO)

- ●中性子照射研究: 基本的には定常照射によるデータ取得 ・一定温度の長時間照射 (定常運転温度の設定) ・温度変動照射はあり得るがパラメータが多すぎる。 ・1dpa、<800℃の照射組織変化のデータは取得できている。 → 重照射環境での挙動予測が課題 データに基づくシミュレーション ●非定常熱負荷環境における挙動をどのように評価するか ・高温になることで再結晶とともに損傷組織は回復して消滅する。 ・照射誘起偏析も固溶限範囲内なら再固溶し、消滅する。 ・ヘリウムはバブルとして成長するか、溶融によって脱気する。 ・溶融・凝固した材料の照射挙動は、溶解材の挙動と同じ(?)。 合金化による粒界強化のデータが活かせる? 溶融・凝固に伴うき裂発生は照射材・非照射材の違いは? 周辺部の硬化領域、脆化領域での熱ひずみによるき裂発生の促進
- ●機器の特徴
 - ・大きな温度勾配のある機器でのき裂進展と破壊(DBTTとの関係)
 - ・熱的な勾配とは逆の脆化の勾配(熱的に厳しい方が脆化しにくいか?)