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)~30日(金)、つくばサイエンスインフォメーションセンター大会議室

ITER grade Wの強度特性の温度依存性と 熱負荷特性

九大応力研 徳永 和俊 九大総理工 浮田 天志、尾崎 浩詔 東北大金研 栗下 裕明、松尾 悟

背景·目的

磁場閉じ込め型核融合炉では ダイバータアーマ材に高熱・高粒子が負荷される。

W材:熱・スパッタリング特性に優れる。

応力負荷:熱負荷(温度分布、異種接合材) 水素同位体、He注入(バブル形成) 変形挙動の把握:強度特性のデータが必要



非定常熱負荷(ELM、プラズマディスラプション)

|非常に大きな熱衝撃が繰り返し負荷されることで亀裂や剥離の発生

W材に関する熱特性評価を行	行い、損傷機構の解明を行う
•高温引張試験	←基本的な強度特性
・繰り返し熱負荷実験	←非定常熱負荷特性
・熱応力解析	←定量的な評価

試 料

- •粉末焼結W(ITER grade W)
- •再結晶粉末焼結W(ITER grade W, Recrystallized)
- •再結晶K doped W
- •再結晶W-1.0%La₂O₃

ITED grada WM フペック

(アライドマテリアル製)

≧19.0g/cm ³ (19.27g/cm ³)				
3 or finer*1 ≦125µm (50µm)				
≧410*2				

*1. ASTM E112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size of Metals
*2. ASTM E92 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials



・製造過程の熱処理に よりKを揮発させ、バ ブルを形成させる。

・分散したバブルが粒
 界や転位の動きを阻
 害し高温強度が向上
 する。





 La₂O₃粒子を分散さ せることで、粒界すべ りが抑制されると共 に組織が安定し、高 温強度が向上する。

引張試験



試料	ITER grade W L-R type、T-R type各温度で1本ずつ			
ひずみ速度	2 × 10 ⁻⁴ s ⁻¹			
試験温度	RT、200°C、400°C、650°C	800°C、1000°C、1300°C、1600°C		
加熱方法	赤外線	高周波誘導		
温度測定方法	K熱電対	放射温度計		
試験雰囲気	Ar + 4%H ₂	真空 (5×10⁻⁴Pa)		
表面観察方法	光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)			

応力ひずみ曲線(引張試験)

- ・試験片の最初の断面積: A₀、基準線間の距離: I₀
- ・加えた力:F、力が加わって変形した後の長さ:I
- 応力:σ=F/A₀
- ・ ひずみ:e=(I-I₀)/I₀

(1)ひずみが増加するにつれて弾性変形及び塑性変形が発生し、破断に至る。
(2)一般に金属材料では延性があり、塑性変形するが、セラミックのような脆性材料では塑性変形せず破断する。
(3)金属材料でもその種類、組織、温度等により応力ひずみ曲線は大きく異なる。





ひずみ, e →→ 図 3.1 応力-ひずみ線図



ITER grade Wの応力ひずみ曲線



室温では両type共<mark>脆性破壊</mark>を起こし、200℃ではL-R typeでは延性T-R typeでは脆性 →ひずみ速度が2×10⁻⁴s⁻¹では200℃近傍に脆性と延性の境がある

高温になるほど引張強さが小さくなっており、延性域の温度では圧延方向の違いに よる引張強さ、降伏応力、全ひずみの差はない

1600℃では1300℃までの変形機構と異なっており粒界すべりが生じた

応力ひずみ曲線の温度依存性を解析に使用する

引張応力、降伏応力及び全伸びの温度依存性

・両typeともに温度が上昇するにつれて引張応力と降伏応力は小さくなる。

・試験温度がRT、200℃の時、引張応力に差が生じた。400℃以上では引張応力、降伏応力共に両typeの間で差はない。

・破断までの全伸びでは1300℃までL-R type がT-R typeよりも、わずかに大きいひずみ量 を示す。両typeも400℃で延性を示してから 1300℃までは全伸び量は大きく変動せず、 1600℃になると全ひずみ量は急激に増大。





L-R typeとT-R typeの引張強さ



L-R typeとT-R typeの降伏応力

破面の組織観察(SEM像)

- ・試験温度がRTでは両タイプとも破 面は平らであり、典型的なへき開 破壊が発生
- L-R typeと比較し、T-R typeの結晶 は細長く、圧延方向の違いが顕著 に現われている。
- ・試験温度が650℃では繊維状の 破面となっており、拡大して観察す ると直径数µmのスポンジ状の形 状(ディンプル)が見られ、塑性変 形による延性破壊による。
- ・試験温度が1600℃では滑らかで 引き延ばされたような形状をしてお らず、粒が移動したような形状をし ており、変形機構は1300℃までと は異なっている.
- ・粒界すべりによる変形は融点(K) の半分程度の温度から生じる。粒 界すべりによるもの。
- ・直径が10µmを超える孔:650℃の とき見られたディンプルが成長した ものと思われる。



繰り返し熱負荷実験

試料	・ITER grade W、再結晶材 ・再結晶 K doped-W ・再結晶 W−1.0%La₂O₃	1400					100
試料サイズ	10mm × 10mm × 1mm	1400		-	— Те — Си	mperatı rrent	ure
熱源	電子ビーム	⊖ ⊙ ¹²⁰⁰					
電子ビーム照射時間	On:2s Off:7.5s	ature 1000					ut ⁰⁰
表面温度測定方法	2色放射温度計			4			Curre
繰り返し回数 (観察した繰り返し回数)	200回(20、40、70、200回)	⊕ ⊢ 600 18	00 1810	1820	1830	. /	
繰り返し最高到達温度	約1300°C			Tim	ie (s)		
AND		-					



電子ビーム熱負荷装置(九大・応力研)

繰り返し熱負荷後の表面観察 ITER grade W

ITER grade W



再結晶ITER grade W 熱負荷前





繰り返し熱負荷後の表面観察 K doped W, W-1.0%La2O3

再結晶K doped W



再結晶W-1.0%La₂O₃

熱負荷前



20~70回負荷後



1<u>0µm</u>



熱応力解析モデル



解析結果(温度、応力、ひずみ分布)





実験結果と解析結果の比較

粉末焼結W(ITER grade W)では熱負荷を20回繰り返した後塑性変形が確認でき、その後70回繰り返しても大きな変化が見られなかった。200回繰り返すと、急激に表面の粗面化が進んだ。

20回熱負荷を繰り返す中で塑性変形を起こしたが、その後弾性域の安定した繰り返しとなった。しかし、疲労により塑性域の繰り返しに至り表面の粗面化が進んだ。



K doped Wの損傷が最も軽微

ホールペッチの関係則により降伏応力が大きいため、すべり線が生じない

	ITER Grade W	K doped W	W-1.0%La ₂ O ₃
結晶粒経	≦125	長径49.3	長径74.1
(µm)	(約50µm)	短径29	短径39

ホールペッチの関係 $\sigma = \sigma_0 + \frac{1}{\sqrt{d}}$ σ:降伏応力 σ₀:基準となる降伏応力 k:比例定数 d:結晶粒経

まとめ

・引張試験によりITER grade Wの基本的な強度特性である応力ひずみ曲線の 温度依存性を求めた。また、得られた結果を解析に使用した。

・熱負荷実験では、塑性変形によりW表面が粗面化した。さらに、繰り返し回 数を増やしていくと、疲労により表面の凹凸が大きくなり、亀裂や剥離などの 損傷に至った。

・熱応力解析により、熱負荷中には圧縮応力、熱負荷停止中には引張応力が生じることがわかった。温度が上昇することで、降伏応力が下がり塑性変形が発生し応力緩和が生じた。また、弾性域の圧縮と引張の繰り返しによる疲労が生じ、表面の粗面化が進むことがわかった。

 ・繰り返し熱負荷により、K doped Wは表面の粗面化は起こるが、 亀裂や剥離 は発生しない。また、W-1%La₂O₃ではLa₂O₃粒子が欠損し、 応力集中により亀 裂が発生する。

高い温度勾配が生じた場合、使用温度内の繰り返し熱負荷で、試料が損傷する事がわかった。高温域での損傷を抑制するためには、材料の結晶粒径を小さくし、ドープ材を使用することで強度の向上を図れると思われる。