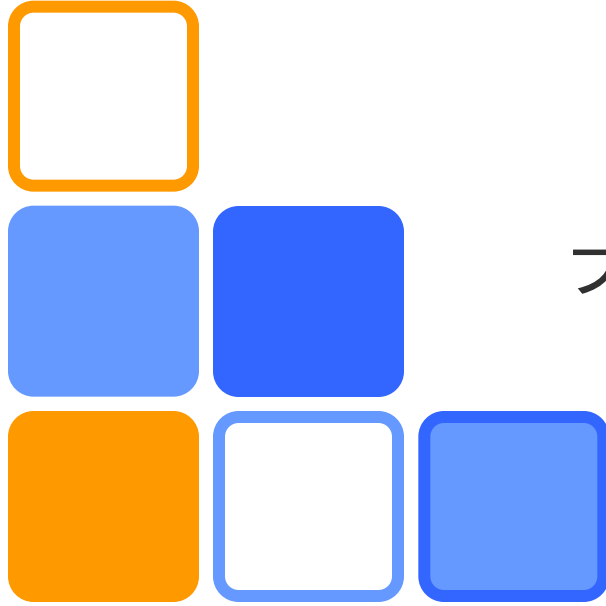


重水素・炭素同時照射下での タングステン中の重水素透過特性



大阪大学 工学研究科
電気電子情報工学専攻
プラズマ生成制御工学領域 上田研究室
PENG HAN YEE 学部4年

研究背景と研究目的

- 第一世代核融合炉：重水素(D) – トリチウム(T)反応
$${}^2\text{D} + {}^3\text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{n} \quad (14 \text{ MeV})$$
- ITERのプラズマ対向材料の候補としてタングステン(W)が検討

タングステン中における水素同位体の拡散

- 燃料供給の効率やプラズマ粒子の閉じ込めに影響する
⇒ 核融合炉の性能や運転サイクルを決定する
- 水素同位体であるトリチウムは放射性核種である
⇒ 核融合炉の放射性安全管理に影響を与える

タングステン中における水素同位体の拡散を理解することが重要

重水素透過実験



研究背景と研究目的

- ITERにおいて、炭素など他のプラズマ対向材料も使用されている
材料の損耗・輸送 → 炭素不純物の生成
- 核融合炉壁に水素同位体イオンと炭素不純物イオンが同時入射
→ 壁表面付近の組成や特性が変化する
→ 水素同位体の表面からの放出や内部への拡散に影響を及ぼす

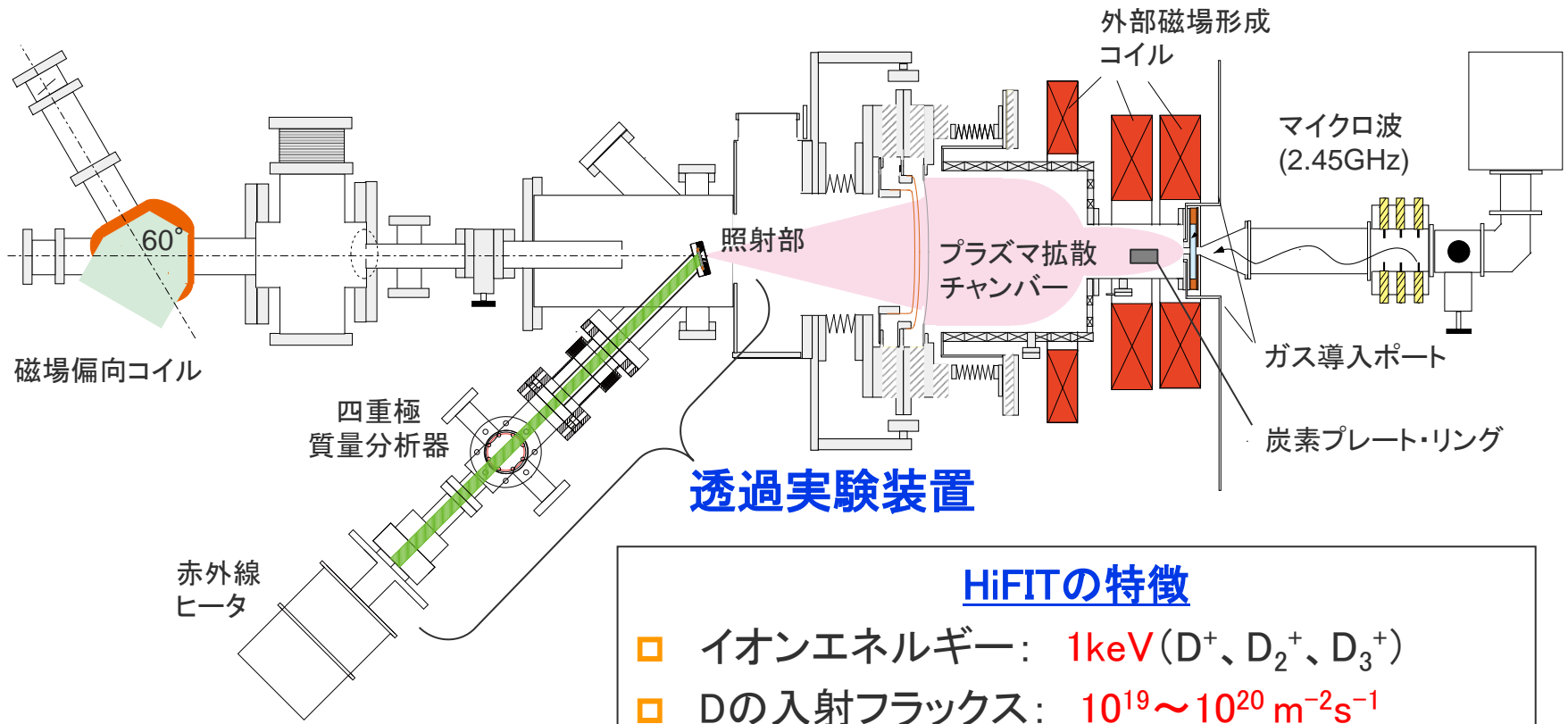
重水素・炭素同時照射に対する重水素の透過
はまだ研究されていない



重水素・炭素混合イオンの照射下での重水素透過を
実験的に求めて、重水素・炭素同時照射環境における
タングステン中の重水素透過挙動を解明

実験装置

大阪大学 定常高粒子束イオンビーム照射装置 (HiFIT)



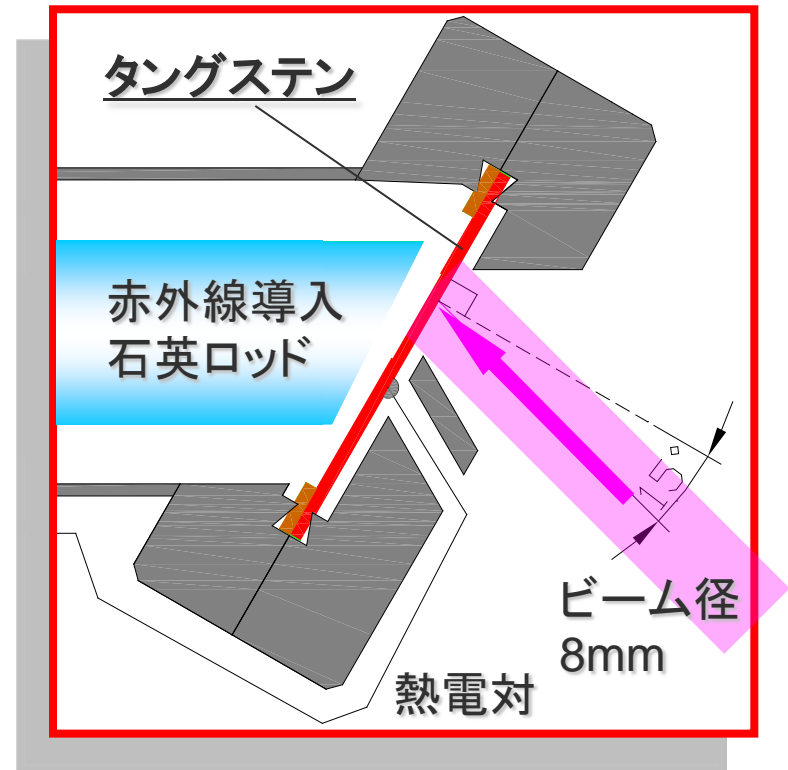
重水素と炭素の混合プラズマ ⇒ 低エネルギー高粒子束の混合イオンビーム

実験条件

タングステン試料

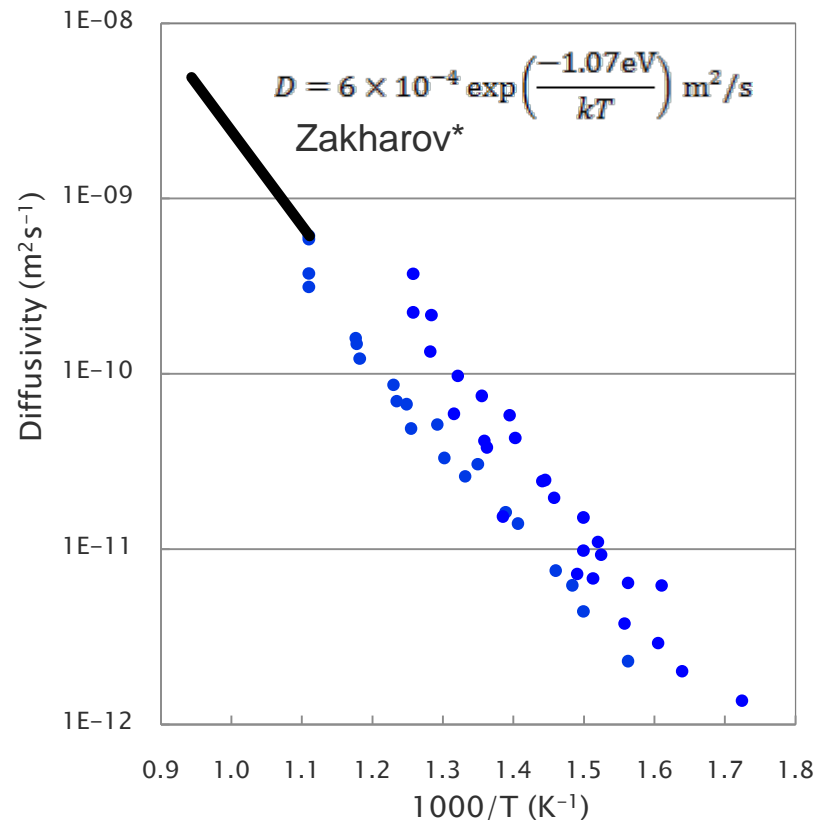
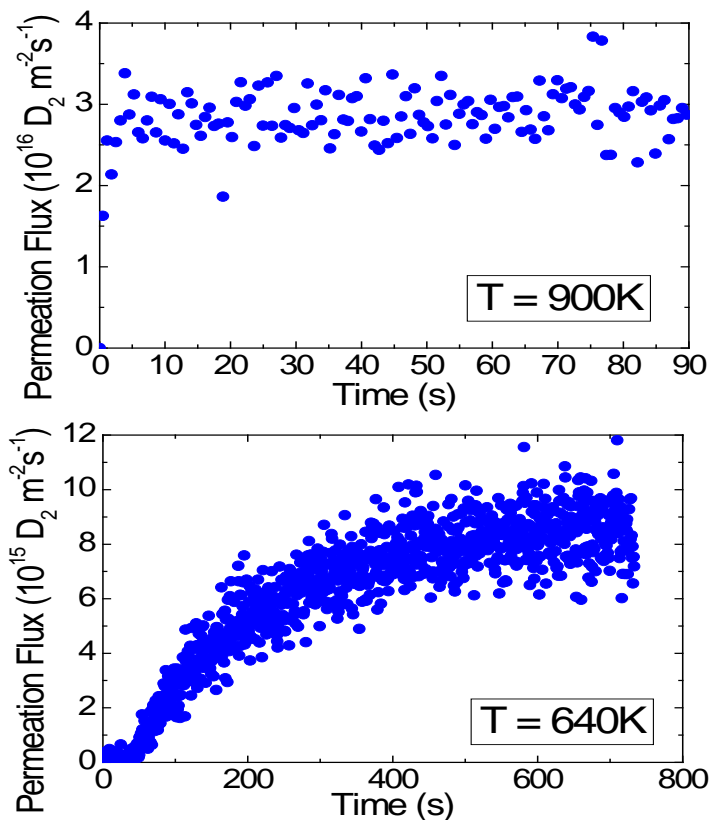
- 再結晶材(1573K 1h アニール)
- 純度 99.99 at. %
- 鏡面研磨(両面) Ra=0.01 μ m以下
- 厚さ 30 μ m
- 直径 34.8mm
- アライドマテリアル社製

入射側の真空室と透過側の真空室が
タングステン試料によって**隔離**されている



- 透過ガス測定環境: 到達圧力 $\sim 10^{-7}$ Pa (400K 12h ベーキング)
- 重水素の分圧測定: 四重極型質量分析器 (MKS Microvision Plus)
⇒ D₂標準リークにより検出イオン電流をD₂流量に換算

重水素透過挙動(重水素のみの照射)



拡散係数 $D = \frac{d^2}{6\tau}$

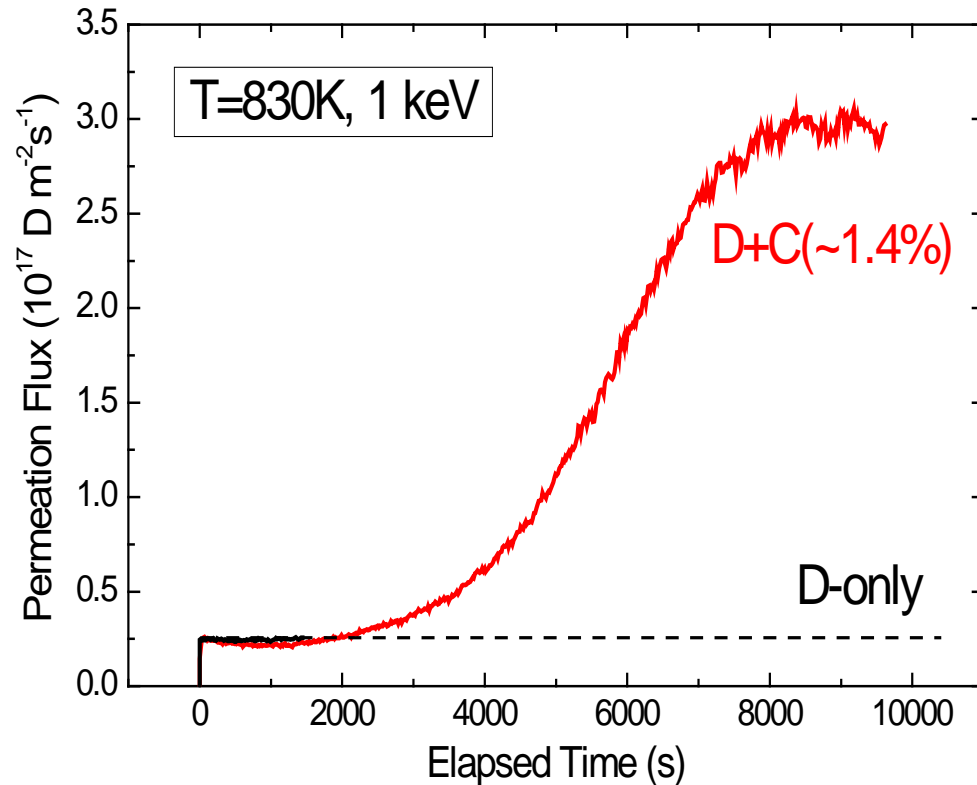
τ : 透過時間
 d : 拡散距離

* A.P. Zakharov, V.M. Sharapov, E.I. Evko. Fiz. Khim. Mekh Mater. 233-237 (1996) 880.

- 試料温度が低いほど、透過時間 τ が長くなる
- Zakharov氏の結果の延長線にほぼ一致する
→ 重水素透過として妥当な結果

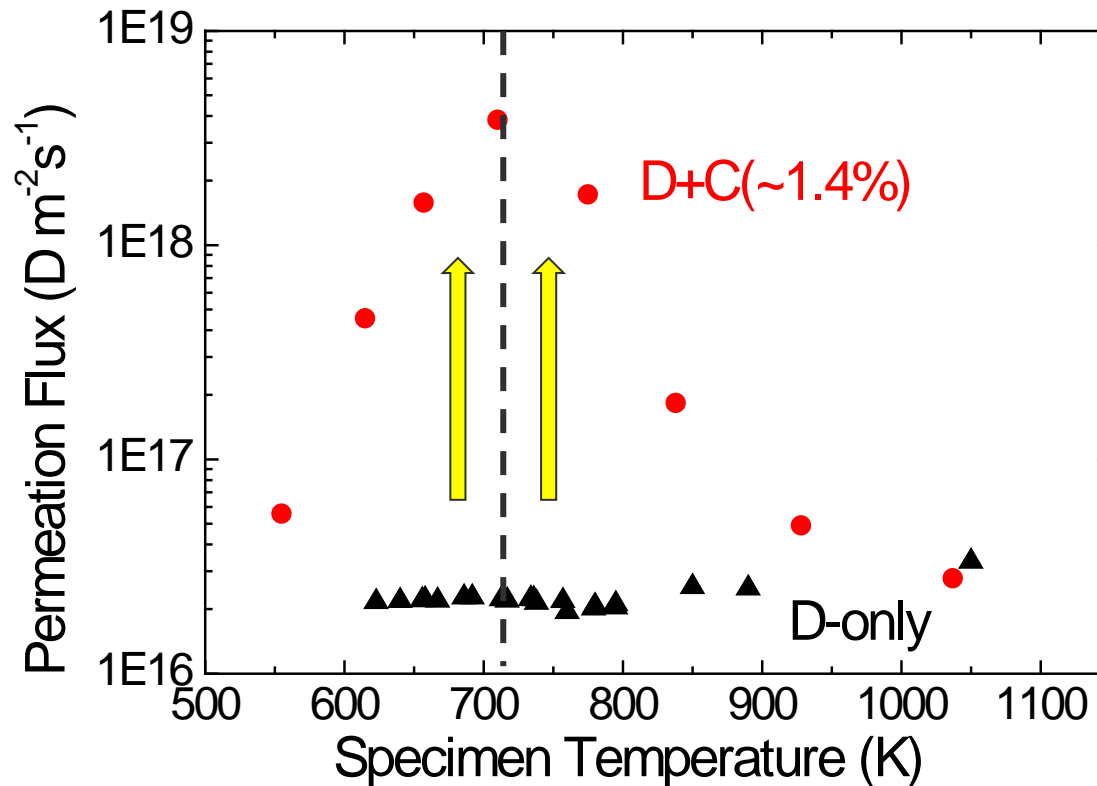
炭素による重水素透過の促進効果

タングステン試料 (30 μ m)



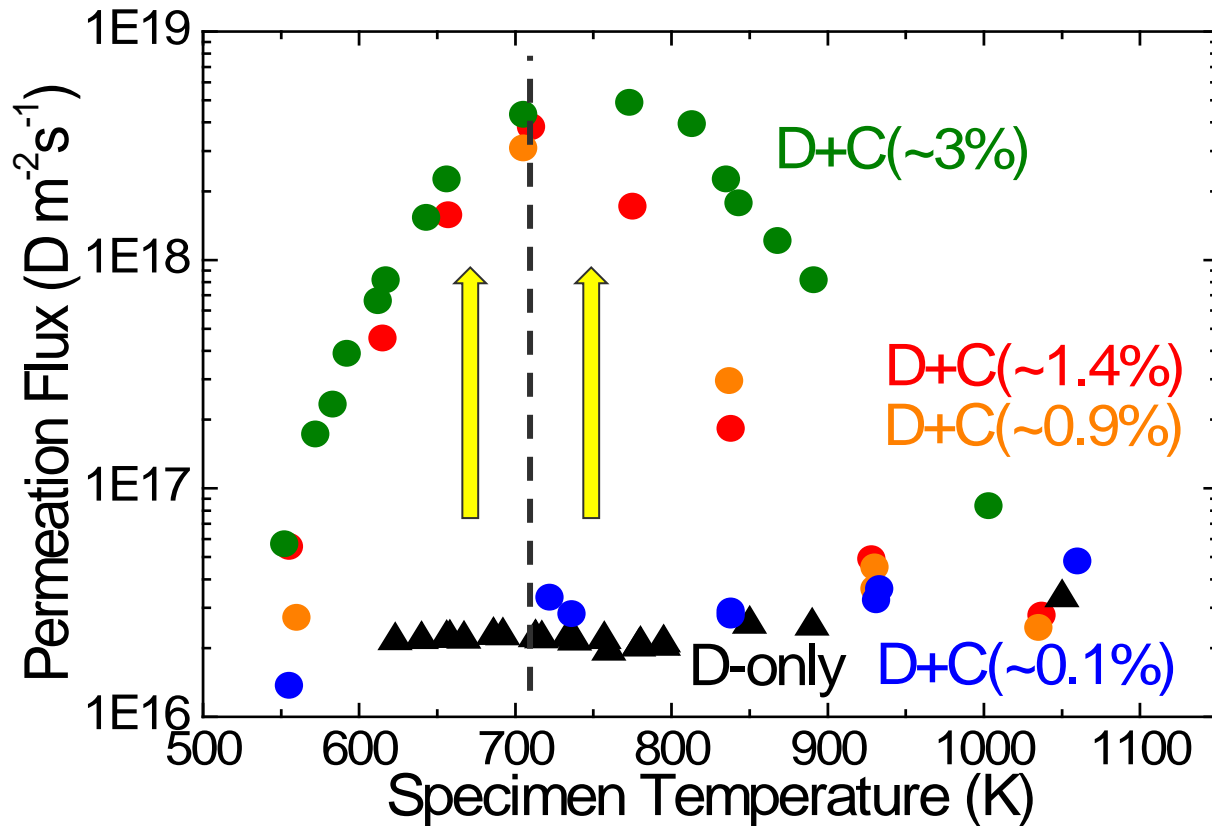
- 入射するイオンビームに炭素を加えることによって、定常状態における重水素透過フラックスが増加した

温度依存性 & 炭素比率依存性



- 異なる試料温度で、重水素透過フラックスの増加量が異なった(2倍~2桁)

温度依存性 & 炭素比率依存性

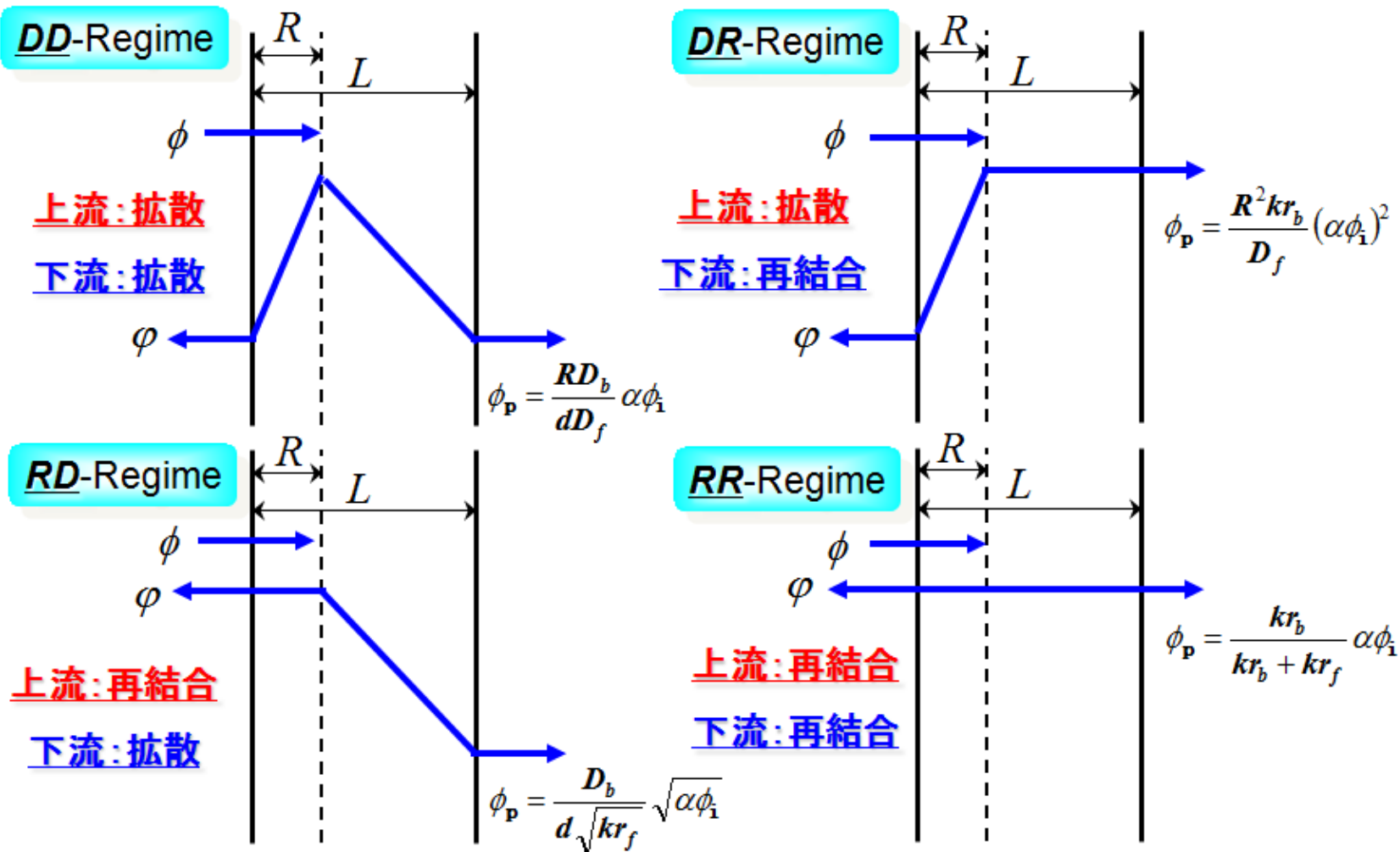


- 炭素比率 $\sim 0.9\%$ 以上：炭素による重水素透過の促進効果が観察された
- 炭素比率を $\sim 3\%$ に増やすと、高温領域での重水素透過フラックスが増加し、透過フラックスが最大となる温度が大きくなった

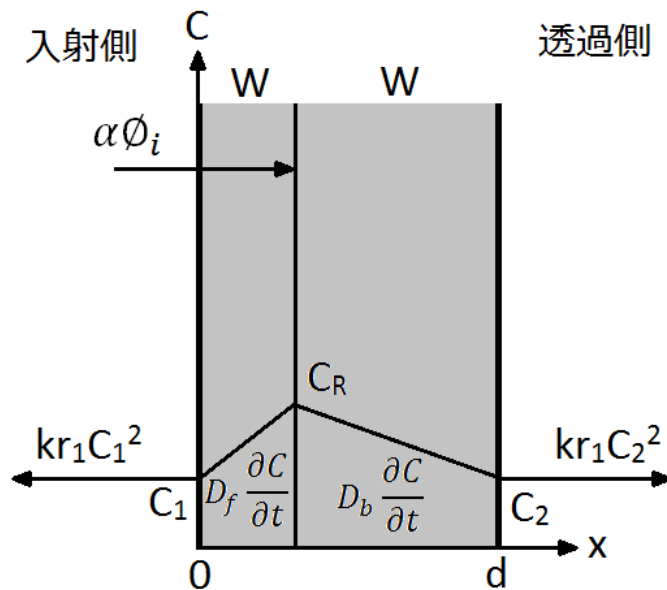
イオン駆動透過の律速過程

Doyle & Brice モデル*

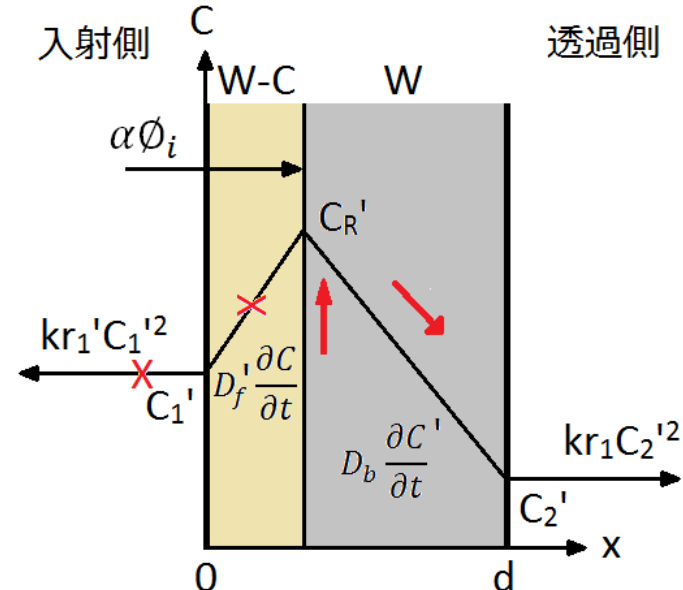
* B.L. Doyle, B.K. Brice. Radiat Eff. 89 (1985) 21.



同時照射下の透過挙動の予測モデル



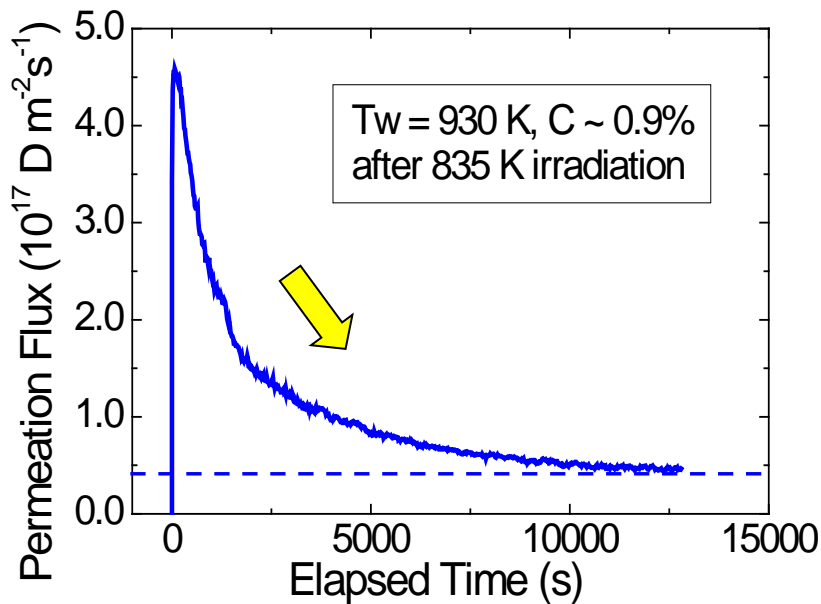
(a) 重水素のみの照射



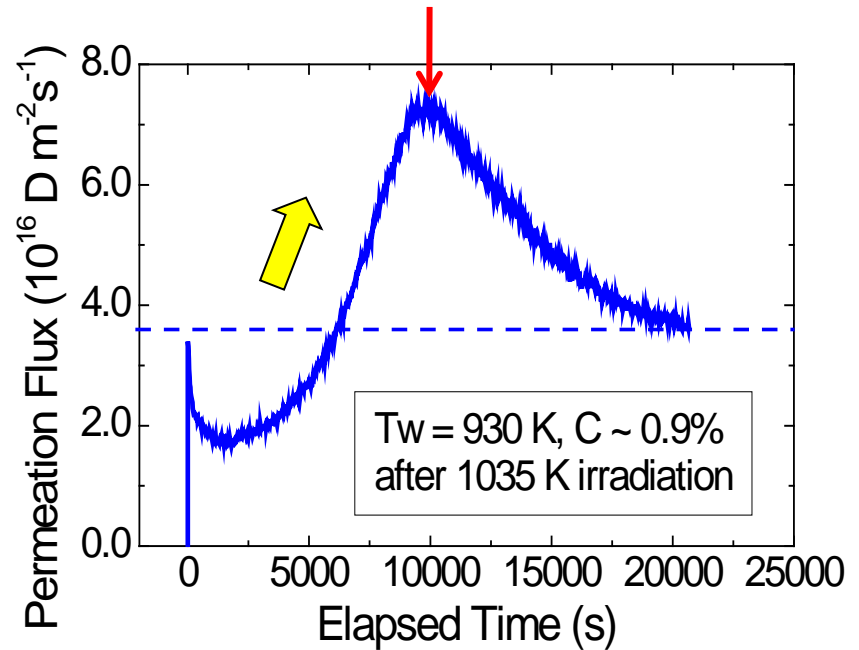
(b) 重水素・炭素同時照射

- タングステン表面にW-C混合層が形成され、入射側表面への拡散係数と表面再結合係数に影響を与えて、重水素の透過を促進させる
- 炭素の損耗・堆積のバランスによって、表面における炭素の量が決定され、重水素透過量に影響を与える
- 温度や炭素比率が変化すると炭素の損耗・堆積のバランスに変動を与える
 - 重水素透過量は温度と炭素比率に依存する

試料表面における過渡現象



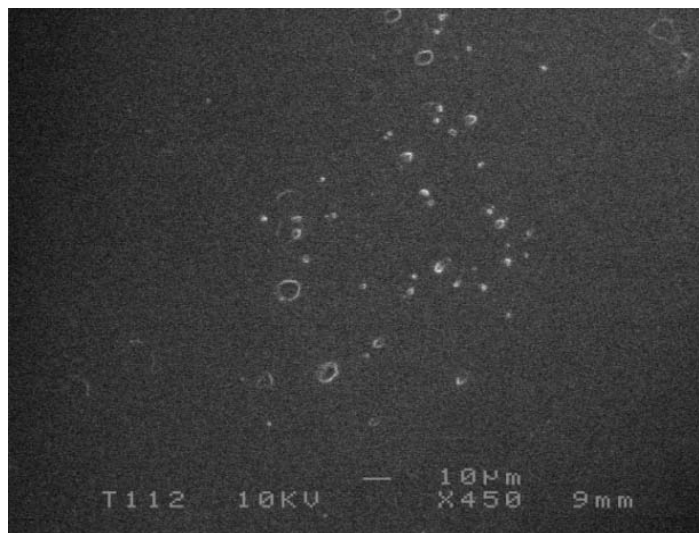
(a) 835Kで照射した後



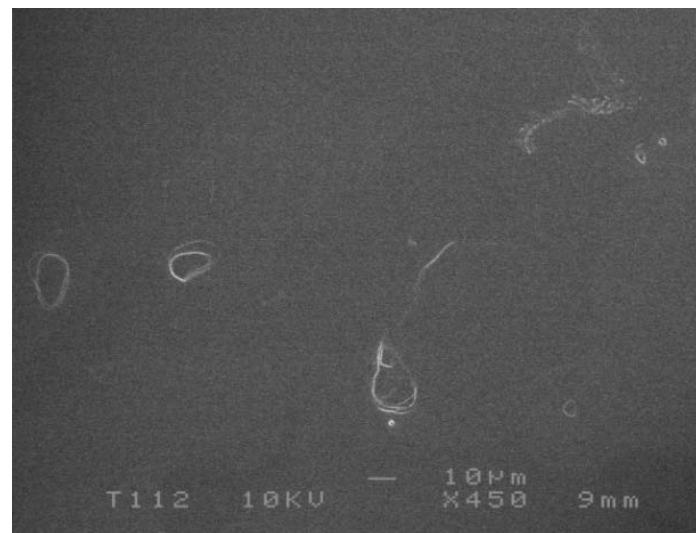
(b) 1035Kで照射した後

- ❑ 試料温度930Kおよび炭素比率 $\sim 0.9\%$ の同じ条件で照射実験を行ったが、観察された重水素透過挙動が**異なった**。
- ❑ **100K程度の温度変化**でも、表面の混合層の特性が変化し、それとともなって大きく透過フラックスが変わる。
- ❑ ある程度時間が経つと**定常状態**となる。この状態は**温度**のみに依存し、**再現性**がある。

タングステン試料の表面変化



$T_w = 560 \text{ K}$ 、 $f_c = 1.4\%$



$T_w = 560 \text{ K}$ 、 $f_c = 1.4\%$

- 試料温度 $\sim 560 \text{ K}$ と $\sim 710 \text{ K}$ では、**ブリスタの形成**が観察された
- 過去の研究では、ブリスタの形成は、材料中における**水素の蓄積**に関連すると報告された
- 炭素による重水素の促進効果で、材料中に大量の重水素が蓄積され、重水素の内部圧力により**粒界に沿って亀裂**が生じた



総括

- 炭素を加えることによって、重水素のみの場合と比べて、タングステン中における重水素透過量が促進された。
- タングステン表面にW-C混合層ができ、入射側表面の重水素拡散と表面再結合に影響を与えられられる。
- 炭素による透過の促進効果は試料温度と炭素比率に依存する。
- 表面における炭素の量は、炭素の堆積・損耗のバランスによって決定される。温度と炭素比率が変化すると、炭素の堆積・損耗のバランスも変化すると考えられる。
- タングステン表面にブリスタの形成が観察された。このブリスタの形成は炭素による重水素の促進効果に関連すると考えられる。



今後の課題

- ITERのダイバータで**炭素とタングステン**を使用する場合、炭素によってタングステン中の**水素同位体の拡散**が**促進**されると考えられる。
- 炭素による重水素透過の促進効果を左右する**メカニズム**に関して更に詳しく調べる必要があると思われる。
- 同時照射中の**炭素の損耗・堆積過程**、およびタングステン試料中の**重水素・炭素深さ分布**について考察する必要があると考えられる。
- **W-C混合材**における水素同位体の拡散係数と表面再結合係数について調べる必要がある。