

希ガスプラズマ照射による タングステン表面損傷形成機構および ガス吸蔵特性に関する研究

名古屋大学大学院 工学研究科
エネルギー理工学専攻 大野研究室
博士課程(後期課程)1年

矢嶋 美幸

プラズマ対向壁材料(研究背景)

ダイバータとは

磁力線と交わる部分に配置されるプラズマ対向機器
プラズマ中の不純物の排除の役割
非常に高い熱負荷・粒子負荷にさらされる

《W の特性》

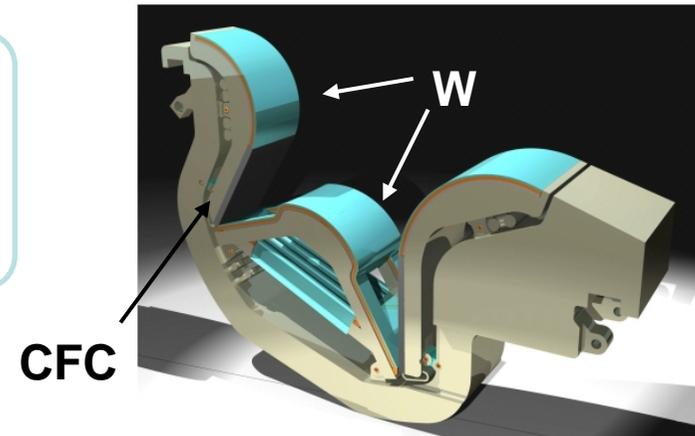
- ・融点が高い
- ・熱伝導性に優れている
- ・中性子照射による放射化断面積が比較的小さい
- ・トリチウムの保持量が小さい(炭素より優れた点)

→ **核融合炉のプラズマ対向壁材料の有力候補**

《ダイバータ領域のガス種》

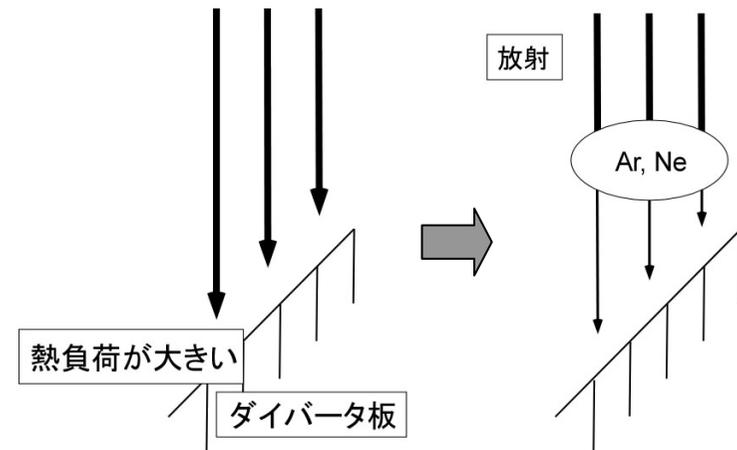
D-T 反応後の不純物	...	He
核融合燃料(放射性物質)	...	T
放射冷却用ガス	...	Ar・Ne

これらのガス種がWに及ぼす影響を調査する必要がある



ITERのダイバータ
カセット概略図

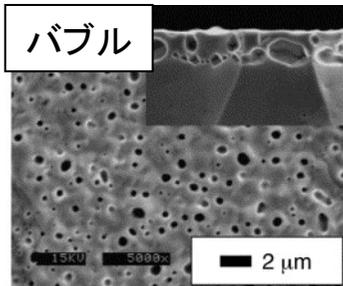
<http://www.iter.org/mach/divertor>



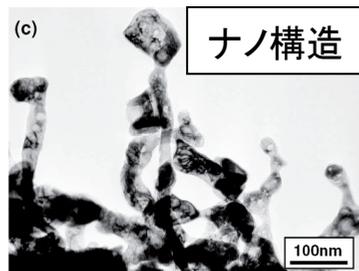
《ダイバータの熱負荷対策》

ダイバータ領域のガス種

《He・T》



N. Ohno, et al.
J. Nucl. Mater. (2007)



S. Kajita, et al.
Nucl. Fusion (2009)

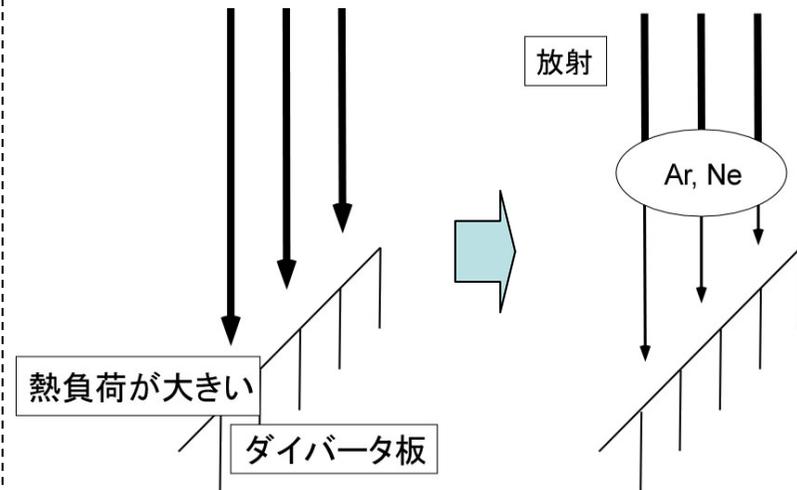
低入射イオンエネルギー
(スパッタ閾値以下)で
バブルおよびフィラメント状
ナノ構造が生成

(* 現在までの見解)

1. 高温のHe照射によって「熱空孔」形成
2. W中を拡散したHeが熱空孔に捕捉
3. 凝集し、バブルおよびナノ構造を形成

Wの表面積が大きくなり、
トリチウム保持量が増大
する可能性あり

《Ar・Ne》



ダイバータの熱負荷対策用に
導入されたArやNeも
He同様にバブル、ナノ構造を
形成する可能性がある

ArおよびNeのWへの照射効果
十分に分かっていない

本研究の位置づけ・目的

課題

ArおよびNeプラズマ

- ・ Wへの照射効果についてのデータが不足

Heプラズマ

- ・ 表面積が増大するが、その増加量を定量的に求められてはいない
- ・ 水素同位体保持に関する基礎的データが不足している

研究目的

- ① ArおよびNeプラズマがWに及ぼす影響調査すると共に、He以外の希ガスプラズマ-W相互作用との比較からHeプラズマ照射損傷因子について調査する。

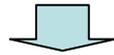
「希ガスプラズマ相互作用調査」

- ② ナノ構造が形成された試料の表面積を測定すると共に、損傷を受けた材料への水素同位体の保持特性調査を行う。

「ナノW試料のトリチウム吸蔵特性調査」

希ガスプラズマ照射実験 (Ar & Ne)

粉末焼結 W 試料(株式会社ニラコ製)
直径 5 mmで切り出した後、研磨



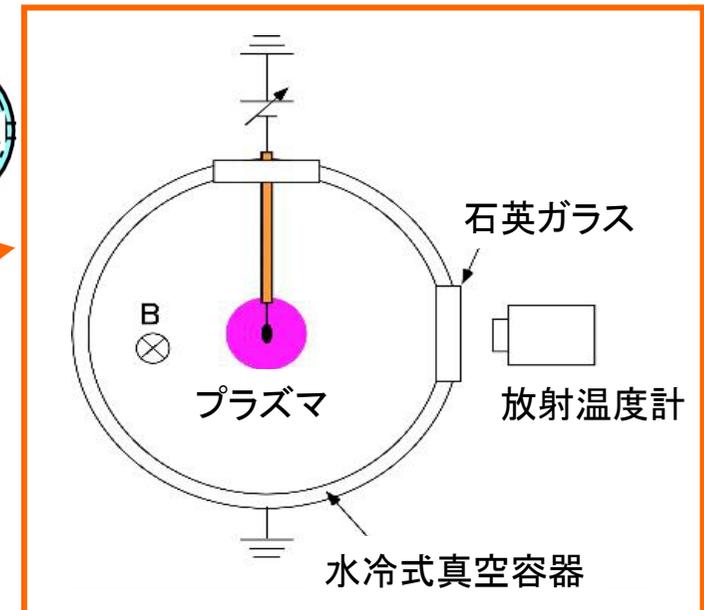
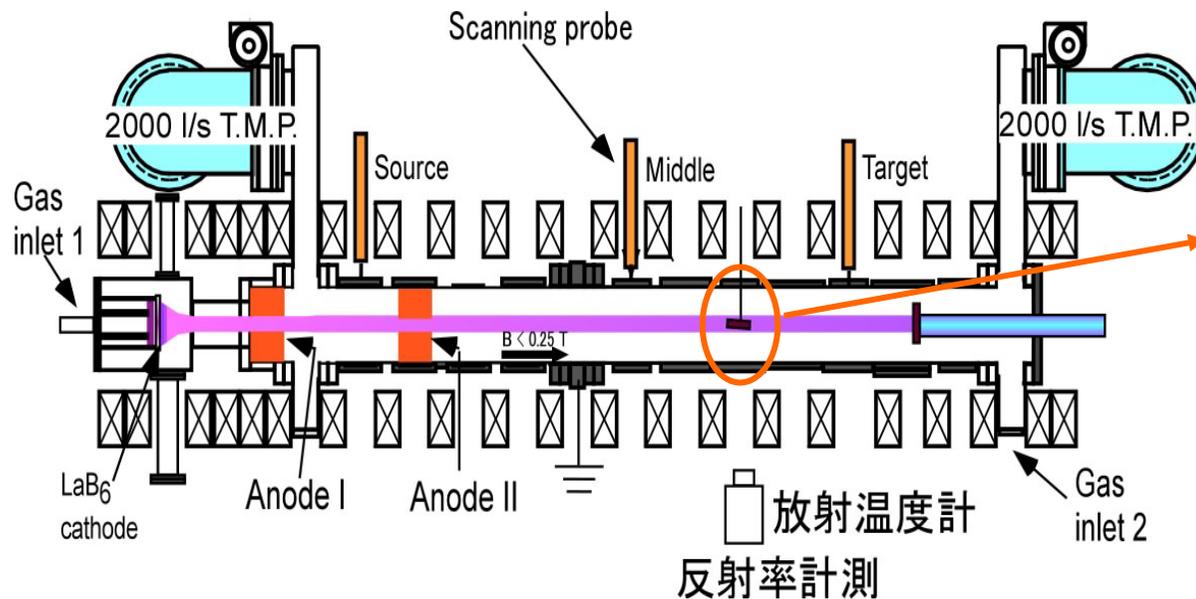
Ar およびNe 照射 (NAGDIS-II)



表面観察 : SEM (走査型電子顕微鏡)

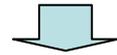
断面観察 : TEM (透過型電子顕微鏡)、九大応力研にて
(* 試料切り出し、FIB(集束イオンビーム)装置)

元素分析 : EDX (エネルギー分散形X線分光器)



希ガスプラズマ照射実験 (Ar & Ne)

粉末焼結 W 試料(株式会社ニラコ製)
直径 5 mm で切り出した後、研磨



Ar および Ne 照射 (NAGDIS-II)



表面観察 : SEM (走査型電子顕微鏡)

断面観察 : TEM (透過型電子顕微鏡)、九大応力研にて
(* 試料切り出し、FIB(集束イオンビーム)装置)

元素分析 : EDX (エネルギー分散形X線分光器)

バブル&ナノ構造形成予想因子

- ・ 熱空孔の形成
- ・ 熱空孔への捕捉
(飛程距離・拡散)



照射温度および
入射イオンエネルギーの依存性を考慮

E_{th} : スパッタリング閾値

Ar : 33 eV, Ne : 35 eV

E_{min} : 原子はじき出し
損傷閾値

Ar : 75 eV (He : 527 eV)

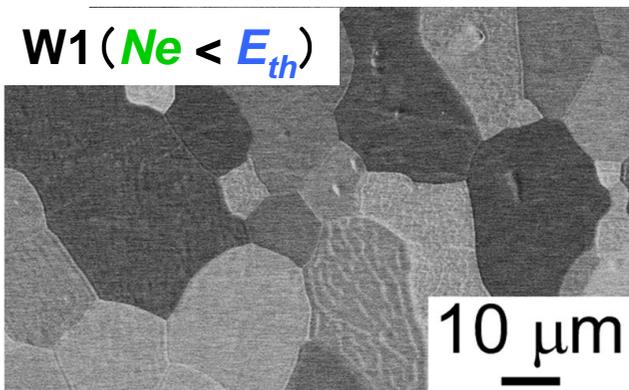
Specimen	Noble gas	Incident ion energy [eV]	Surface temperature [K]	Fluence [m ⁻²]
W1	Ne	30	2150	1.3×10^{27}
W2	Ar	30	1550	5.0×10^{26}
W3	Ar	45	1600	5.0×10^{26}
W4	Ar	100	1650	2.8×10^{25}
W5	Ar	200	1550	2.3×10^{25}

Heであればナノ構造が形成される照射条件 ($> 20\text{eV}$, $1000\text{ K} < T < 2000\text{ K}$)

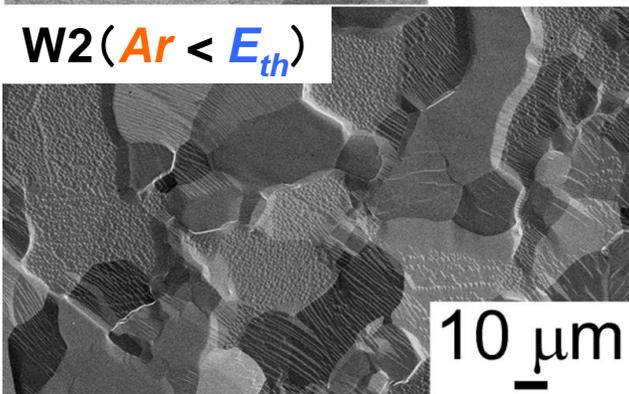
結果(照射面および断面観察結果: Low energy)

《照射面》

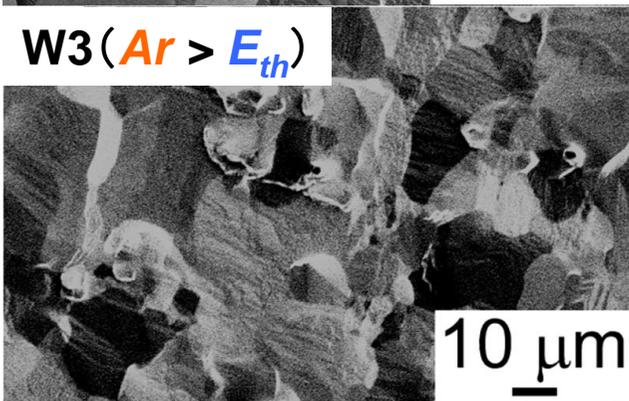
W1 (Ne < E_{th})



W2 (Ar < E_{th})

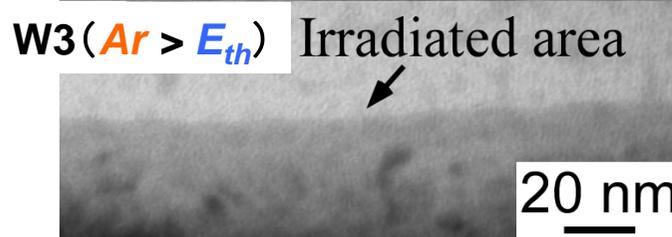
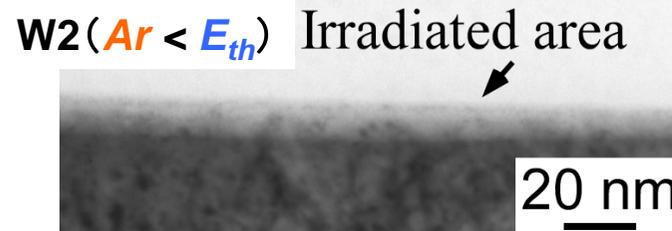
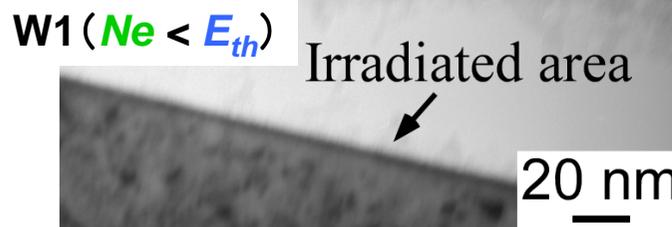


W3 (Ar > E_{th})



Specimen	Noble gas	Incident ionenergy [eV]	Surface temperature [K]	Fluence [m ⁻²]
W1	Ne	30	2150	1.3×10^{27}
W2	Ar	30	1550	5.0×10^{26}
W3	Ar	45	1600	5.0×10^{26}
W4	Ar	100	1650	2.8×10^{25}
W5	Ar	200	1550	2.3×10^{25}

《照射断面》



Eth:スパッタリング閾値

Ar : 33 eV, Ne : 35 eV

- ・結晶粒界の形成
- ・バブル等の形成なし

- ・結晶粒界の形成
- ・スパッタリングの発生
- ・バブル等の形成なし

結果(照射面および断面観察結果: High energy)

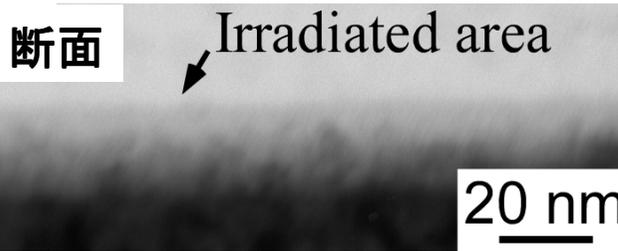
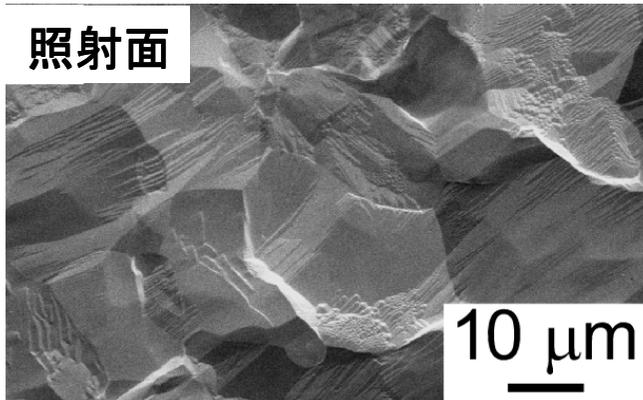
E_{min} : 原子はじき出し
損傷閾値

Ar: 75 eV

Specimen	Noble gas	Incident ionenergy [eV]	Surface temperature [K]	Fluence [m^{-2}]
W1	Ne	30	2150	1.3×10^{27}
W2	Ar	30	1550	5.0×10^{26}
W3	Ar	45	1600	5.0×10^{26}
W4	Ar	100	1650	2.8×10^{25}
W5	Ar	200	1550	2.3×10^{25}

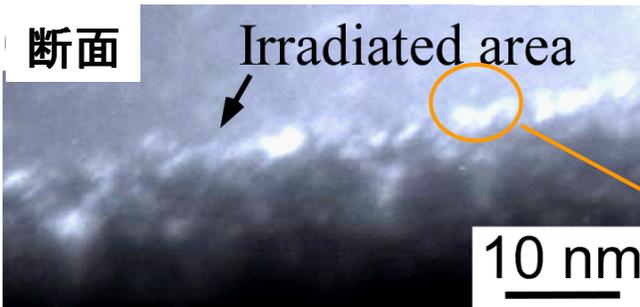
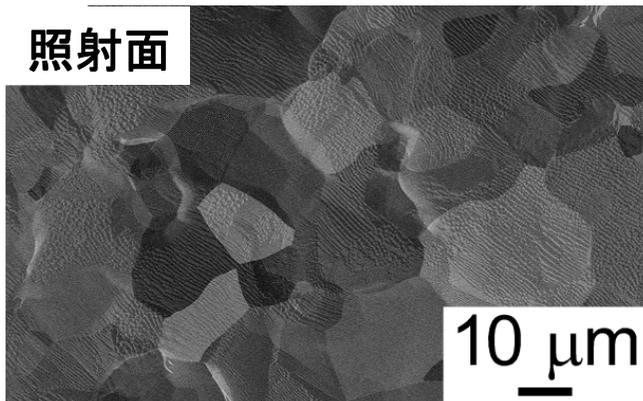
W4 (Ar (100 eV) > E_{min})

照射面



W5 (Ar (200 eV) > E_{min})

照射面



- ・結晶粒界の形成
- ・スパッタリングの発生
- ・バブル等の形成なし

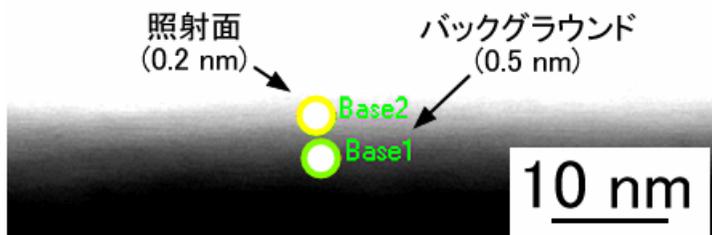
照射面から数nm程度の所に
1 ~ 5 nm程度の欠陥形成
(原子はじき出し損傷)

同いはじき出し損傷閾値エネルギー以上の照射であるが、
100 eVでは原子はじき出し損傷は形成されなかった。



TEMの解析閾値以下?

結果(元素分析結果、Ar:200 eV)

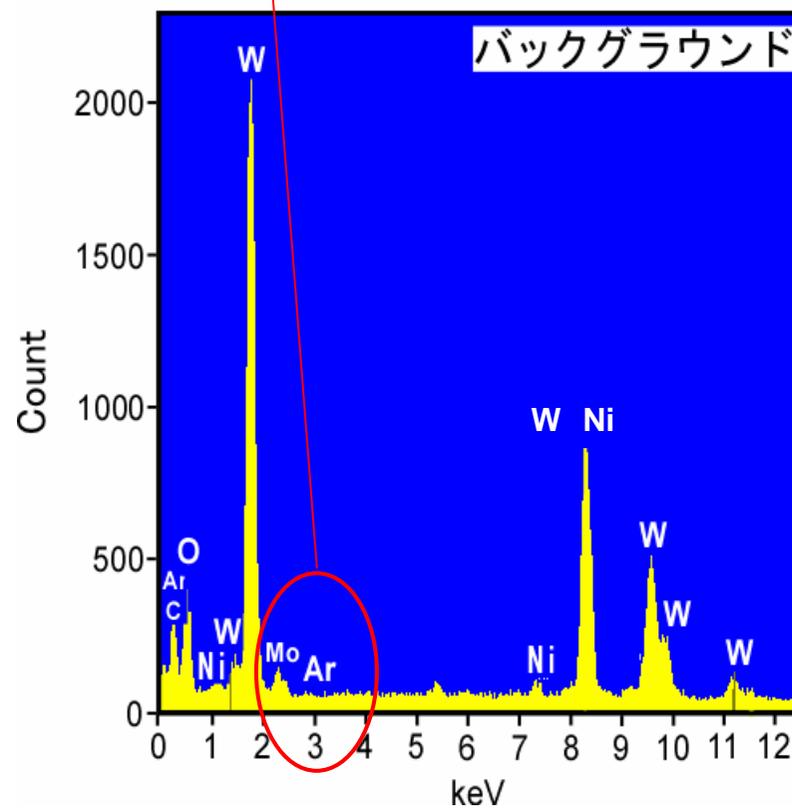
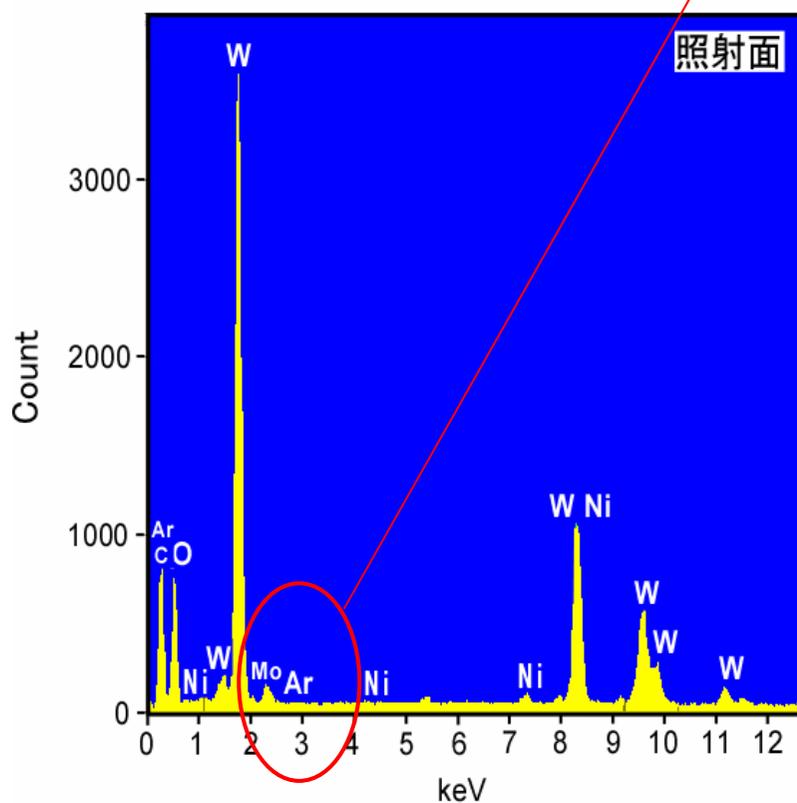


《Ar-200 eV 照射試料断面》

* 唯一、はじき出し損傷が形成された試料

Arピーク、ノイズ程度

EDX結果、
明確なArのピークは
200 eV照射試料からも
検出されなかった。



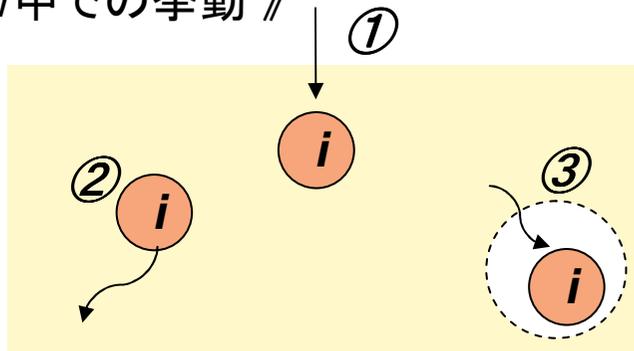
《EDX分析結果》

考察(シミュレーションより)

《 Ar・Neプラズマ照射結果 》

He照射とは異なりバブルおよびナノ構造は形成されず

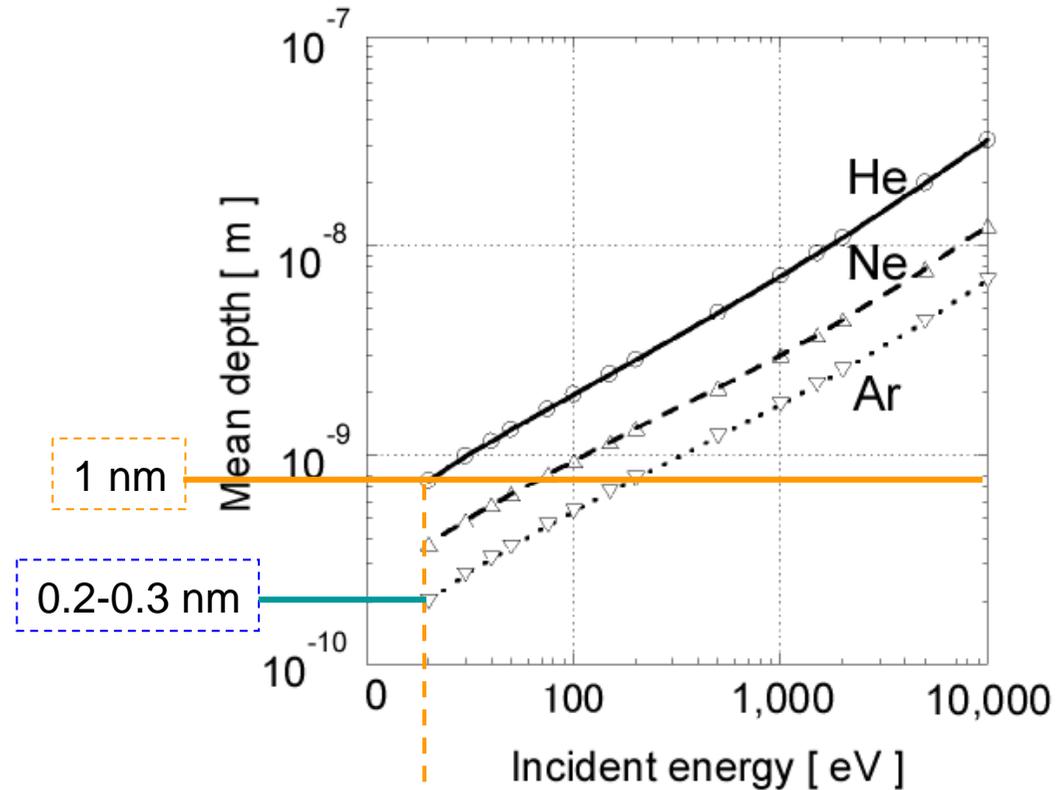
《 W中での挙動 》



- ① He・Ar・NeがW中に入る位置『**飛程**』
- ② 熱空孔にトラップされる位置まで十分に拡散すること『**拡散**』
- ③ 熱空孔にトラップされること『**トラップ**』

プロセス① 『**飛程**』

"1 nm" バブル及びナノ構造形成の為に必要となる実効的な**飛程値**。
(* アモルファス構造の場合。bccではこの数倍。)



ナノ構造形成
最低閾値エネルギー

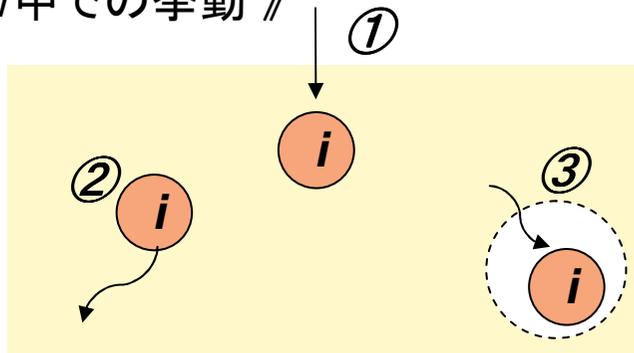
同じ入射イオンエネルギーでArおよびNeの飛程がHeのそれより短くなる

考察(シミュレーションより)

《 Ar・Neプラズマ照射結果 》

He照射とは異なりバブルおよびナノ構造は形成されず

《 W中での挙動 》

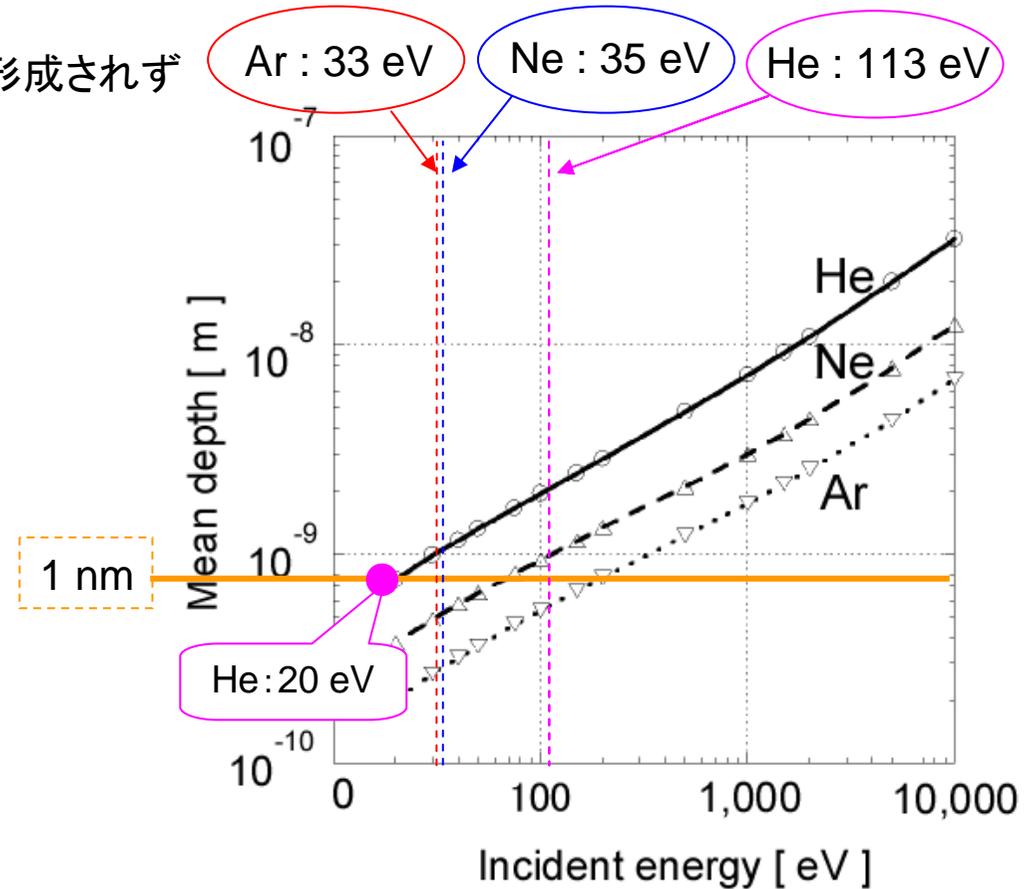


- ① He・Ar・NeがW中に入る位置『飛程』
- ② 熱空孔にトラップされる位置まで十分に拡散すること『拡散』
- ③ 熱空孔にトラップされること『トラップ』

プロセス① 『飛程』

"1 nm" バブル及びナノ構造形成の為に必要となる実効的な飛程値。
 (* アモルファス構造の場合。bccではこの数倍。)

E_{th} : スパッタリング閾値



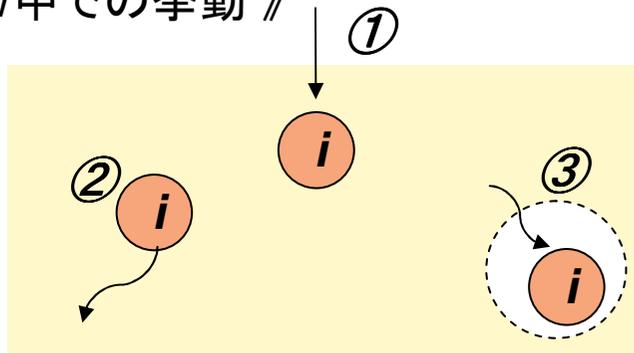
Heの場合、スパッタリング閾値以下

考察(シミュレーションより)

《 Ar・Neプラズマ照射結果 》

He照射とは異なりバブルおよびナノ構造は形成されず

《 W中での挙動 》

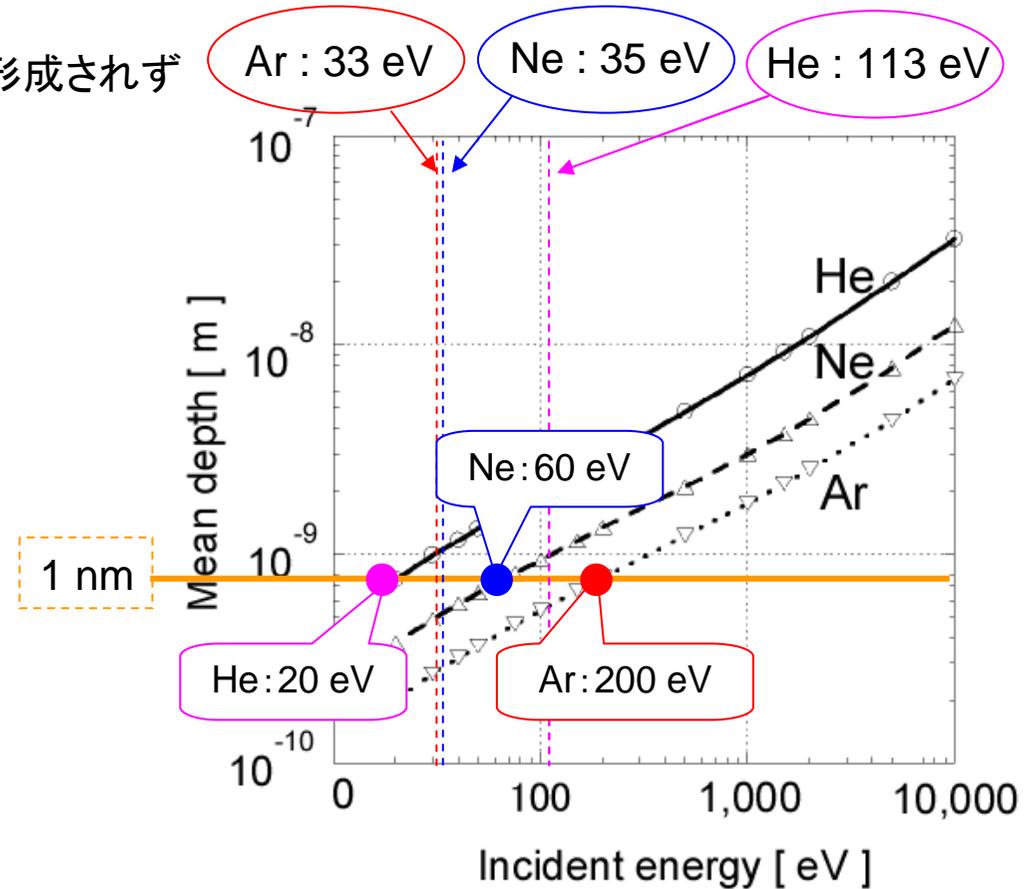


- ① He・Ar・NeがW中に入る位置『飛程』
- ② 熱空孔にトラップされる位置まで十分に拡散すること『拡散』
- ③ 熱空孔にトラップされること『トラップ』

プロセス① 『飛程』

"1 nm" バブル及びナノ構造形成の為に必要となる実効的な飛程値。
 (* アモルファス構造の場合。bccではこの数倍。)

E_{th} : スパッタリング閾値



Ar/Neの場合、同時にスパッタリングが発生。バブル・ホールやナノ構造の形成とスパッタリングとの競争が起きていると考えられる。

まとめ&今後の展望(希ガスプラズマ相互作用調査)

まとめ

- ◆ Heであればナノ構造が形成される照射条件で照射したところ、
($>20\text{eV}$, $1000\text{ K} < T < 2000\text{ K}$)
ArおよびNeの**バブル・ホールおよびナノ構造は形成されなかった。**
- ◆ 希ガスプラズマ照射がWに対して異なる挙動を示したのは
同じ入射イオンエネルギーでArおよびNeの飛程が
Heのそれより短くなるためであると考えられる。
- ◆ バブル及びナノ構造形成の為の実効的飛程形成エネルギーは、
ArおよびNeの照射ではスパッタリング閾値以上となるため、
実際にはスパッタリングによる影響との競争が起こっていると考察される。

今後の展望

- ① 水冷台を用いて、 1000 K 以下で照射実験。
SEM、TEM、TDS分析を行い、低温プラズマ照射による影響を調査。
- ② NIFSとの共同研究により、算出されたシミュレーション結果と実験結果とを比較
 - (i) 希ガス原子の表面侵入過程
 - (ii) 希ガスおよび空孔の拡散過程および熱空孔発生過程
 - (iii) 希ガスの空孔への捕獲過程(エネルギー的な安定性)
 - (IV) Heバブル形成・成長過程