

核融合炉でのトリチウム使用量と漏洩量

~100グラムT/日 (~10¹⁶ Bq/day)

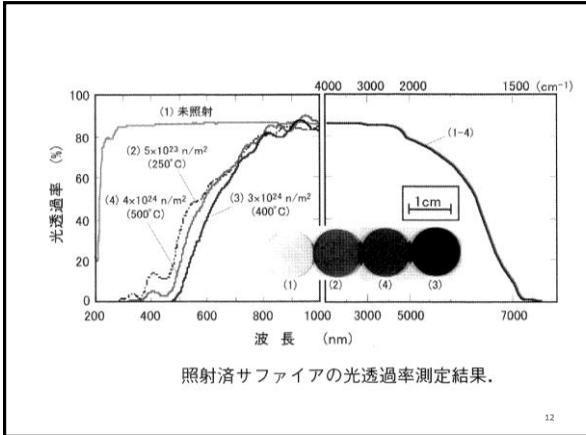
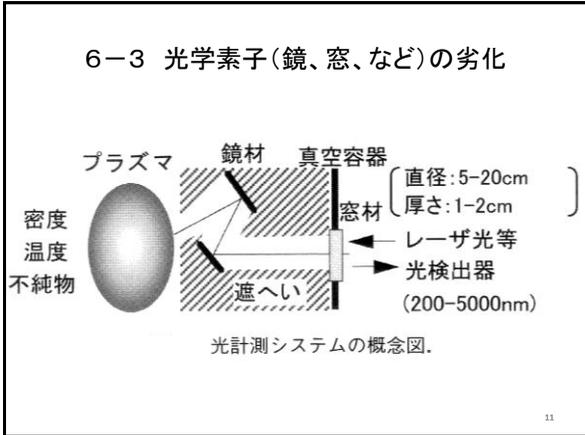
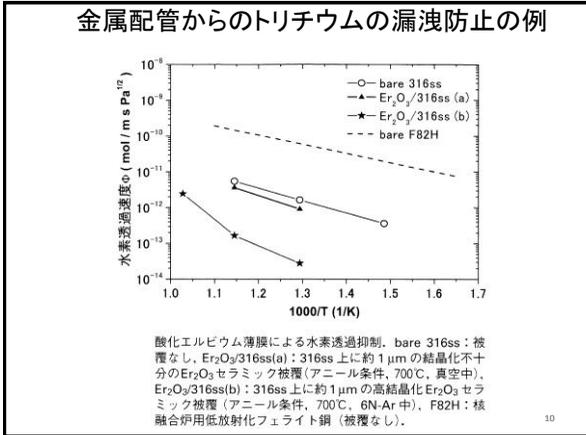
トリチウム(元素状)排気中濃度限度 7 × 10¹ Bq/cc

大気で希釈して捨てるには

10¹⁴ cc = 10⁸ m³ (東京ドーム1.24 × 10⁶ m³)

0.1%の漏洩量でも10⁵ m³ の大気が必要

加えて、金属中の水素の透過(拡散)は早い



⑦ 照射損傷

核融合炉材料の特殊性

(ほかのエネルギー関連材料では見られない項目)

- 高エネルギー粒子の入射(中性子、荷電粒子)
→ **照射損傷** → 機械的・機能的性質劣化 → 材料寿命評価
- 高温(プラズマ) → 構造材の機械的性質の劣化
- 高熱負荷、低温(超伝導) → 温度勾配 → 熱拡散
- トリチウム(放射性水素)の取り扱い
→ 金属等に溶解しやすい → リテンション(蓄積)・漏洩

13

照射による材料(金属・合金)特性の変化

材料表面近傍

スパッタリング(物理、化学)
溶融、蒸発、昇華(+加熱)
プリスター形成
フレーキング
再堆積

材料内部

機械特性変化
スウェリング
電気的特性変化
(絶縁体、半導体)

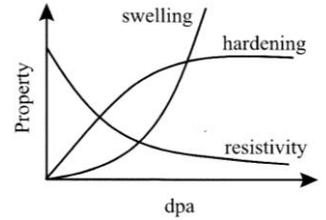


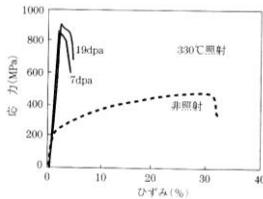
Fig. 2.22. Dose dependence of swelling, resistivity and radiation-induced segregation

14

照射による材料劣化(延性→脆化)

オーステナイト鋼の応力-歪曲線

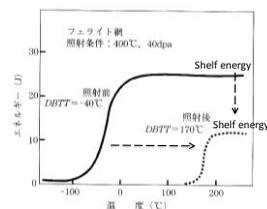
dpa: displacement per atom



オーステナイト鋼の中性子照射による引張特性の変化
(出典: J. P. Robertson, et al., 18th International Symposium: Effects of Radiation on Materials, ASTM STP 1325
(Eds.: R. K. Nanstad, M. L. Hamilton, F. A. Garner and A. S. Kumar), 1999, pp. 121.)

フェライト鋼の衝撃エネルギー吸収曲線

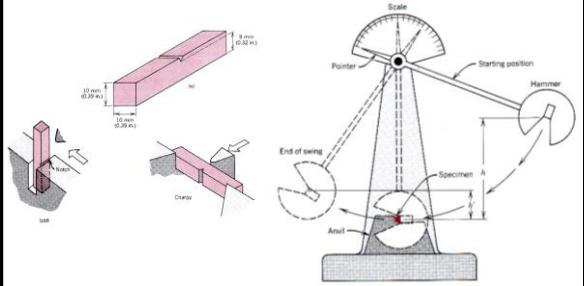
DBTT: ductile brittle transition temperature



フェライト鋼の照射によるDBTTの変化 (出典: R. L. Khoei and D. J. Alexander, J. Nucl. Mater., 187 (1992): 60.)

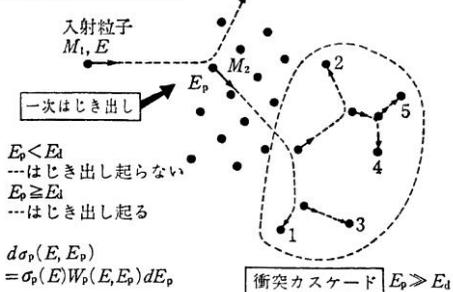
シャルピー試験 15

Charpy (Izot) Impact Test specimen and testing apparatus



16

照射損傷の素過程



照射損傷計算の基本的考え方。一次はじき出し原子の生成とカスケード過程の2つに分けて考える[1].

17

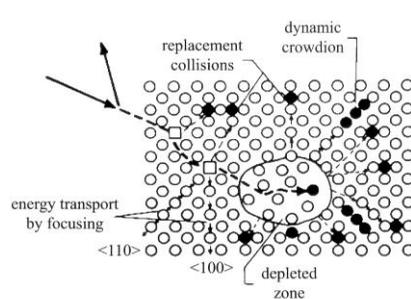
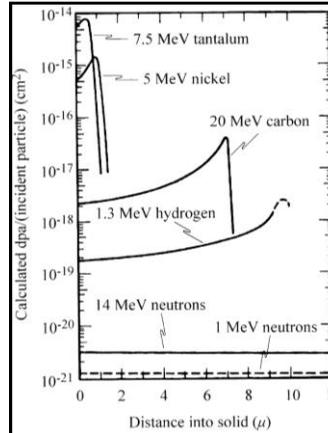
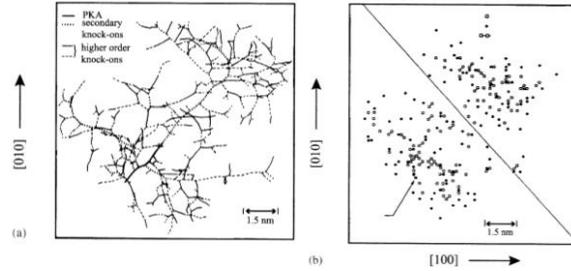


Fig. 3.4. Revised version of Brinkman's displacement spike as drawn by Seger (after [4]) accounting for crystallinity in the damage cascade

18

はじき出しのシミュレーション結果例
Fe中: 5keVのPKA(primary knock-on atom)

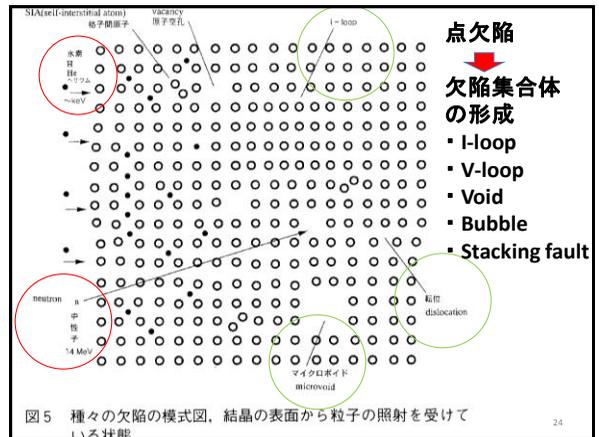
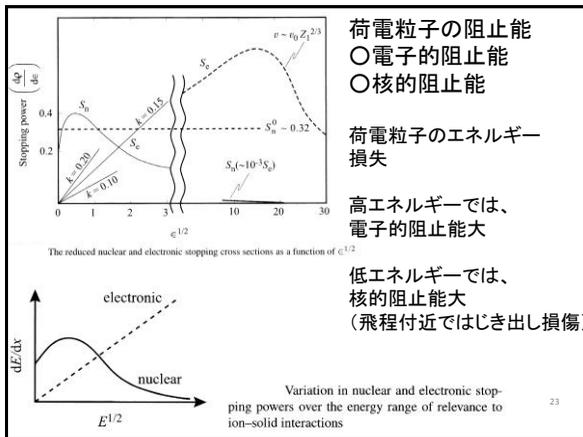
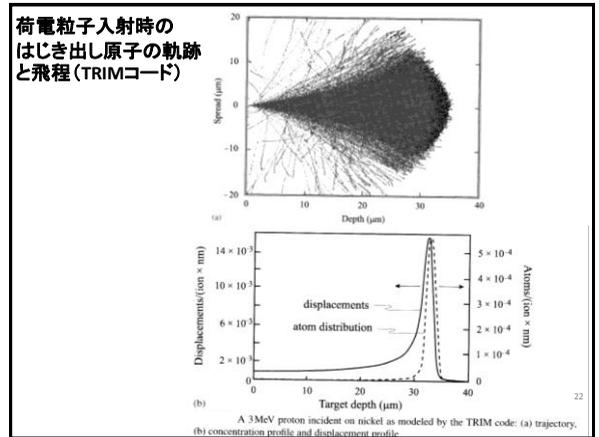
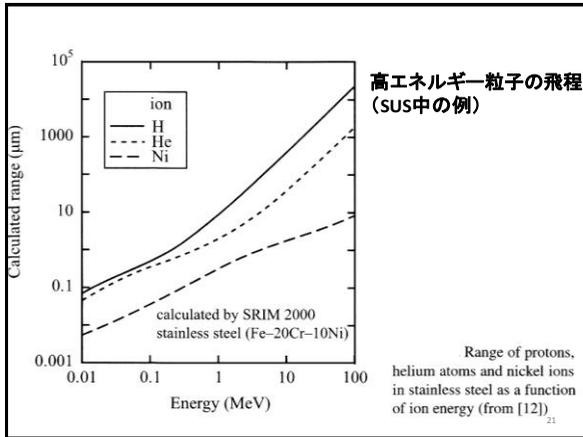
(a)粒子の軌跡、(b)空孔・格子間原子分布



荷電粒子と中性子の照射損傷の違い (Ni中)

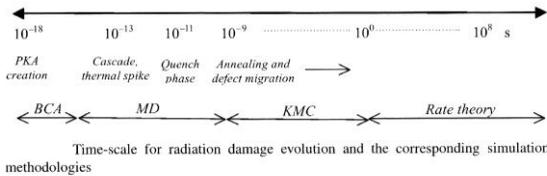
- 飛程と損傷量
- ブラッグ曲線 (荷電粒子の場合の、損傷量の深さ分布)

Fig. 2.25. Displacement-damage effectiveness for various energetic particles in nickel (after [25])



欠陥の生成、集合、消滅

理論計算、シミュレーション、速度論と時間スケールの関係



BCA: Binary Collision Approximation
MD: Molecular Dynamics
KMD: Kinetic Molecular Dynamics

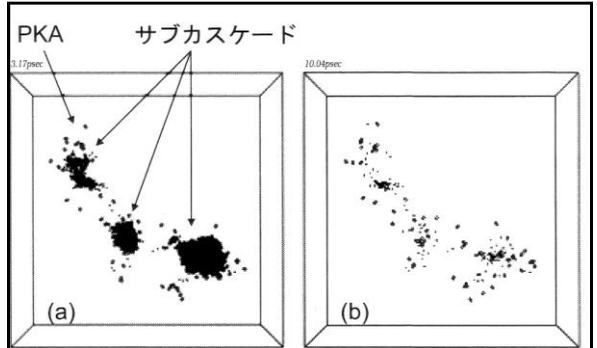
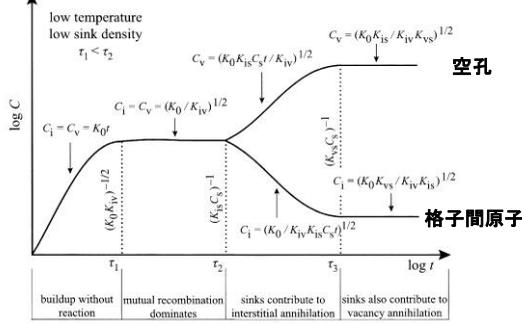


図3 鉄中の 50 keV の PKA エネルギーによる変位カスケードの計算結果。互いに孤立したサブカスケードの形成例。

照射時の欠陥の生成、成長、消滅の描像は、温度をはじめとした各種の条件によって異なる

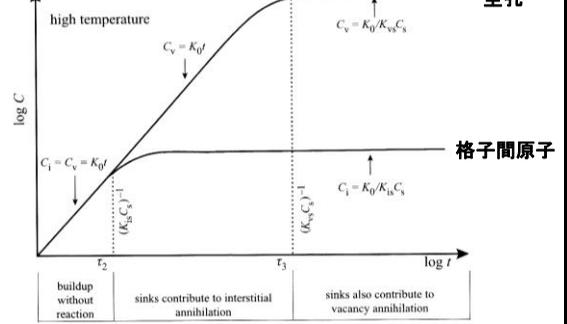
低温、低シンク密度時の空孔と格子間原子の密度の時間変化



Log-log plot of vacancy and interstitial concentration vs. time for case (1) low temperature and low sink density (after [2]).

高温の場合の空孔、格子間原子の数密度変化

空孔、格子間原子の集合 → クラスター、積層欠陥形成

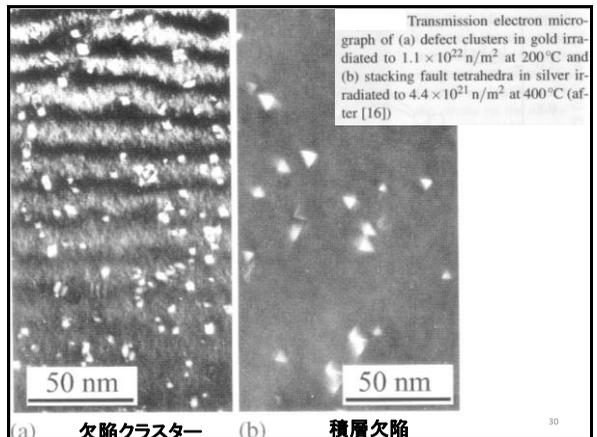


Log-log plot of vacancy and interstitial concentration vs. time for case (4) high temperature (after [2]).

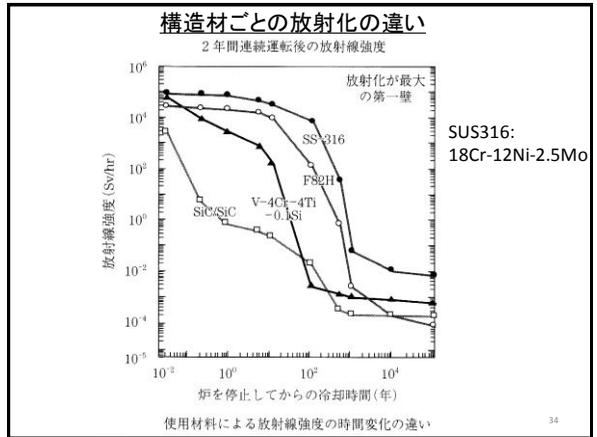
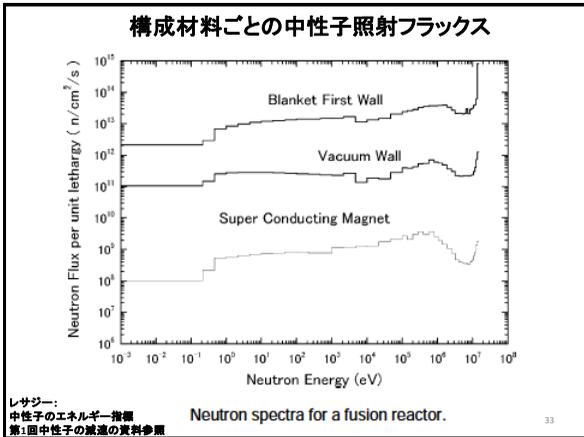
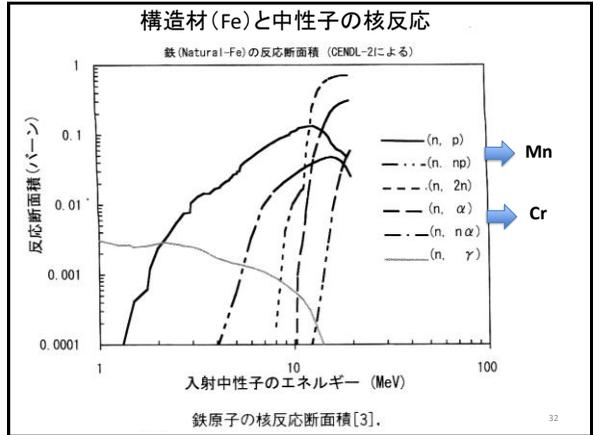
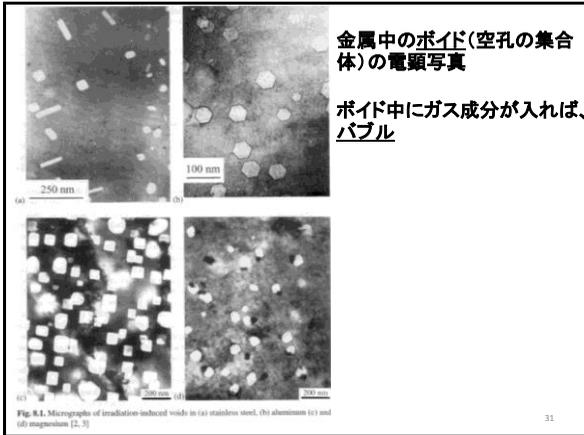
金属中の各種の欠陥生成エネルギー

Numerical values, compiled from different sources for some quantities characterizing properties of radiation-induced point defects in metals (from [1])

	Symbol	Unit	Al	Cu	Pt	Mo	W
Interstitials							
Relaxation volume	V_{relax}^i	Atomic vol.	1.9	1.4	2.0	1.1	
Formation energy	E_f^i	eV	3.2	2.2	3.5		
Equilibrium concentration at T_m	$C_i(T_m)$	-	10^{-18}	10^{-7}	10^{-6}		
Migration energy	E_m^i	eV	0.12	0.12	0.06	0.054	
Vacancies							
Relaxation volume	V_{relax}^v	Atomic vol.	0.05	-0.2	-0.4		
Formation energy	E_f^v	eV	0.66	1.27	1.51	3.2	3.8
Formation entropy	S_f^v	k	0.7	2.4		2	
Equilibrium concentration at T_m	$C_v(T_m)$	-	9×10^{-6}	2×10^{-6}			4×10^{-5}
Migration energy	E_m^v	eV	0.62	0.8	1.43	1.3	1.8
Activation energy for self-diffusion	Q_{SD}	eV	1.28	2.07	2.9	4.5	5.7
Frenkel pairs							
Formation energy	E_f^{FP}	eV	3.9	3.5	5		



(a) 欠陥クラスター (b) 積層欠陥



F82H鋼

表1 耐熱鋼および日欧米で開発された代表的な低放射化フェライト鋼の化学組成 (wt%)

	Cr	W (Mo)	V	Ta (Nb)	C	Si	Mn	B	N	Ti	Ni
Mod.9Cr-1Mo (T91)	8.75	(0.95)	0.21	(0.08)	0.1						0.05
NF616 (P92)	9	1.8 + (0.3)	0.2	(0.07)	0.1	0.5	0.5				0.05
JLF-1 (Original)	9.04	1.97	0.19	0.07	0.097	<0.1	0.46				0.05
F82H (Original)	7.85	2	0.18	0.038	0.093	0.09	0.49	0.003	0.002		0.01
TEA	7.66	2	0.16	0.02	0.09	0.11	0.16	2E-04	0.005	0.01	0.02
ORNL9Cr	8.9	2.01	0.23	0.06	0.11	0.21	0.44	<0.001	0.022		0.01
LA12TaC	8.8	0.73	0.30	0.10	0.165	0.02	0.84				0.0190
OPTIFER IV	8.5	1.16	0.23	0.15	0.11		0.57	0.004	0.06		
EUROFER97	9	1.1	0.2	0.13	0.11	0.05	0.4	0.001	0.03	0.01	0.005

高温特性改善の合金元素 Nb, Moの代わりにTa, Wを添加

$^{93}\text{Nb}(100\%): \quad ^{93}\text{Nb}(n, \gamma)^{94}\text{Nb} \quad S = 1.1 b \text{ (Thermal)}$

$^{94}\text{Nb}: \quad T_{1/2} = 2.03 \cdot 10^4 \text{ y}, \quad b^+ (100\%, E = 0.471 \text{ keV})$

$^{92}\text{Mo}(15.86\%): \quad ^{92}\text{Mo}(n, \gamma)^{93}\text{Mo} \quad S = 0.045 b \text{ (Thermal)}$

$^{93}\text{Mo}: \quad T_{1/2} = 3.5 \cdot 10^3 \text{ y}, \quad \text{EC}(100\% \rightarrow ^{93m}\text{Nb})$

$^{93m}\text{Nb}: \quad T_{1/2} = 13.6 \text{ y}, \quad \text{IT} (100\%, E_{\gamma} = 0.0304 \text{ keV})$

課題-14

- PKAについて説明せよ。
- dpaについて説明せよ。
- 照射損傷におけるカスケードを説明せよ。
- 荷電粒子と中性子の材料照射で異なる点について説明せよ。

解答には、氏名、今日の日付を記入のこと。
 締切: 7/31(月) 専攻事務室
 本レポート以外のレポートについても上記が最終の締切り。

アンケート
 (課題とは別用紙に 無記名で可)

- 興味を覚えた点。さらに詳しく知りたかった内容。
- 別の講義等でも繰り返し聞いた事柄。
- その他 感想、意見など 何でも。