GEN IV International Forum[SM]
Expertise | Collaboration | Excellence

第4世代原子炉システムに用いられる原子炉材料

概要 / 目的:

第4世代原子炉システムは、発電効率、受動的安全特徴、ならびに水素製造などの非発電利用用途における熱利用など、様々な点において軽水炉より非常に優れています。第4世代原子炉システムには、ナトリウム冷却型高速炉（SFR）、鉛冷却型高速炉（LFR）、ガス冷却型高速炉（GFR）、超高温原子炉（VHTR）、超臨界圧軽水冷却炉（SCWR）、および溶融塩炉（MSR）があります。これらの原子炉内の特徴は、原子炉材料に厳しい損傷を与える高放射線量や高速中性子束（SFR, LFR, GFR, SCWR、MSR）といった炉物理環境、さらに溶融塩（MSR）または鉛冷却材（LFR）特有の材料に対する腐食性、ヘリウム冷却型原子炉概念（GFR、VHTR等）における高温環境です。本ウェビナーでは第4世代原子炉システム概念におけるこれらの特徴について紹介を行うとともに、典型的な照射条件における金属への照射の影響についても紹介します。

講演者紹介:

Stuart Maloy は、ロスアラモス国立研究所に28年間勤務しており、MST-8（放射線・動的極限環境下の材料）のチームリーダーを務める。また、原子力技術研究開発の先進燃料キャンペーンの先進炉心材料技術リーダー、およびDOE-NEのNEET炉心材料プログラムの技術リーダーを務める。ケース・ウェスタン・リザーブ大学で材料科学の学士号（89年）、修士号（91年）、博士号（94年）を取得し、冶金学の専門技術者として登録されている。

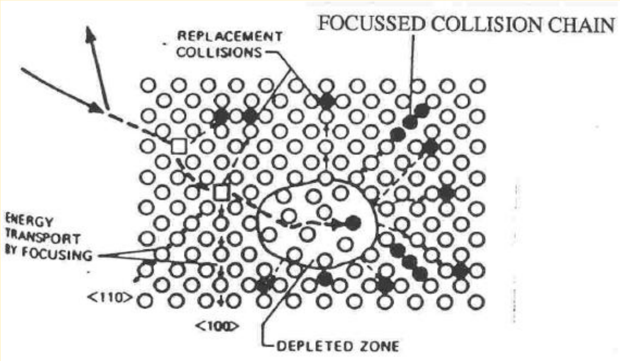
彼の専門知識は、原子炉実用温度での中性子/陽子線照射環境のような過酷な環境下における、金属およびセラミック材料の特性評価と試験に応用されている。これには、加速器や高速炉を用いた高エネルギー陽子/中性子照射後の改良9Cr-1Mo鋼, HT-9, 316L, 304L, インコネル718, Al6061-T6及びAl5052の機械的特性(破壊靭性及び引張特性)の試験が含まれる。試験後の材料の特性評価には、転位、双晶、第二相などの欠陥を分析するための透過型電子顕微鏡の使用、原子レベルでの欠陥の特性評価のための高分解能電子顕微鏡の使用、ナノスケールの機械的試験などがあります。これまでに190以上の査読付き技術論文と多数のプレゼンテーションを発表している。

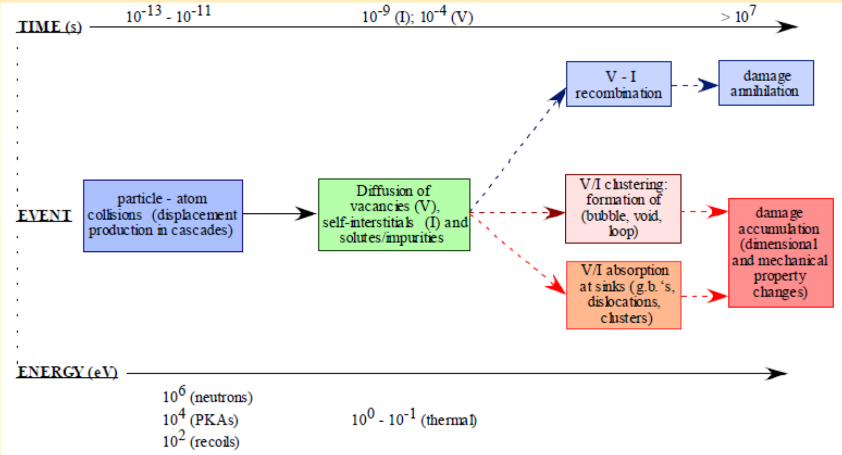
GEN IV International Forum[SM]

Expertise | Collaboration | Excellence

照射ダメージ:

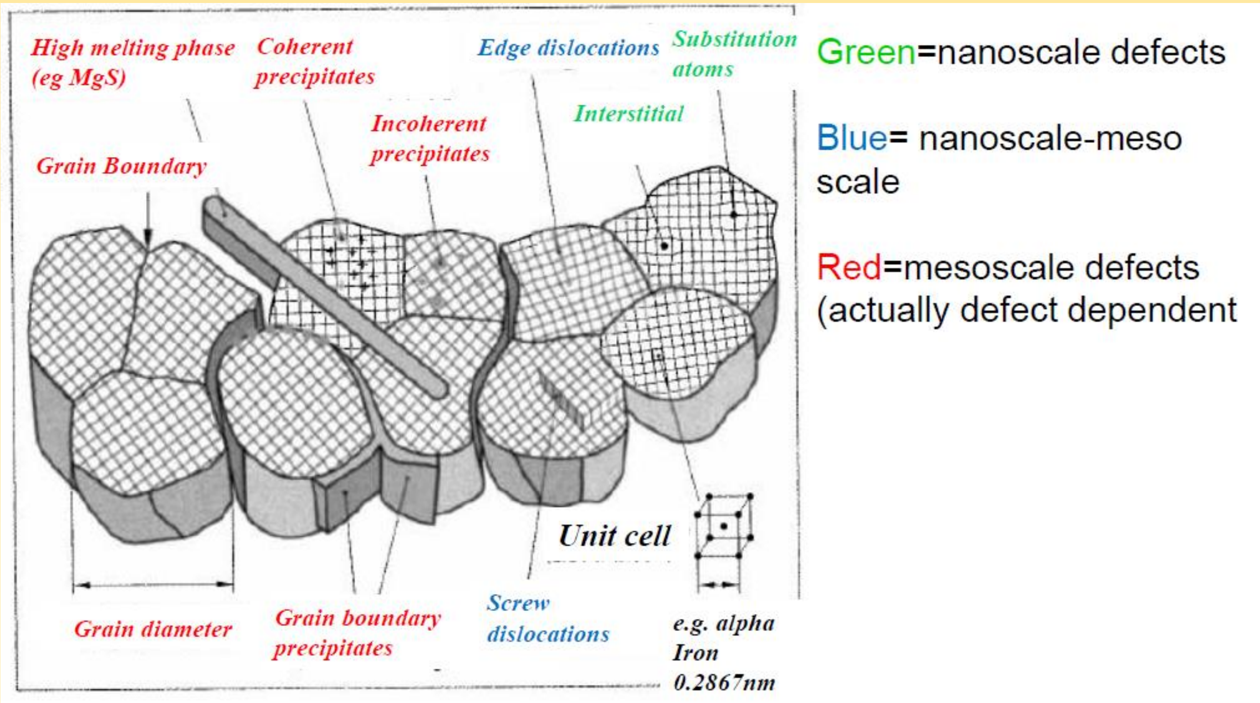
原子に十分なエネルギー（およそ25eV）がもたらされフレンケル欠陥(空隙/自己介在物)が生じるとき、転移による損傷が生じる。多くのフレンケル欠陥は短時間で消滅するが、残存しクラスターを形成するものも生じる。





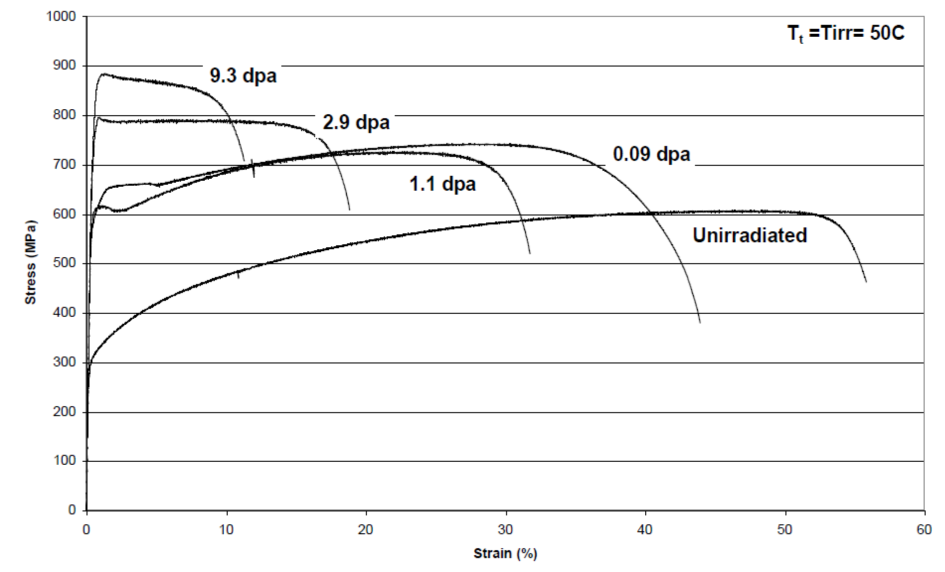
多種の材料物性がメゾスケールで決定される:

クラスター化の結果、累積した欠陥はナノスケールからメゾスケールに成長する。ナノスケールの欠陥と異なり、メゾスケールの欠陥は多様な材料物性に影響を及ぼす。これが照射による損傷のメカニズムである。



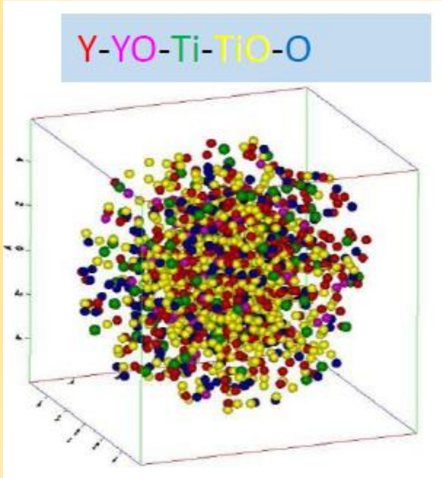
照射後の316Lステンレス鋼の応力ひずみ曲線:

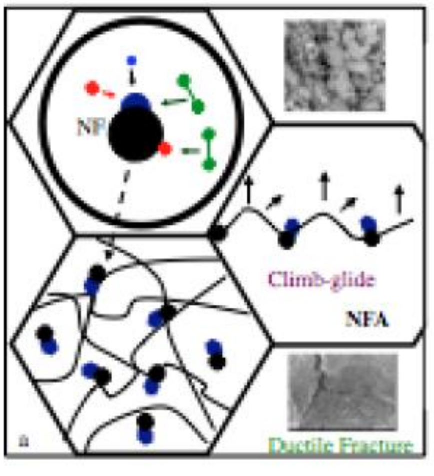
照射により、316Lステンレス鋼の降伏応力は増加し(硬化)、伸びは低下する(脆化)。

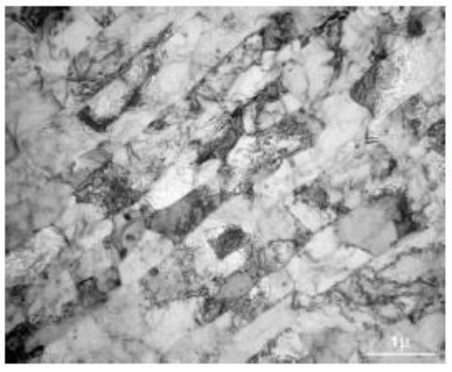


ナノ構造フェライト合金:

ナノ構造もしくは酸化物分散強化合金(ODS合金)は、機械的合金法によって作成され、ナノサイズの特徴的な酸化物粒子が材料内に良好に分布する。このナノ構造は、強度、クリープ耐性および照射耐性を向上させる。このためこれらの合金は、先進的な照射耐性材料として期待されている。







GEN IV International Forum[SM]
Expertise | Collaboration | Excellence

原子炉運転条件:

GIFシステムは、それぞれ固有の運転条件の特徴を持つ。

- 冷却材
- 運転温度
- 照射量

Reactor Type	Fuel Materials	Fuel Temperature	Pellet to Clad bond	Coolant Type	Structural Materials for Core Internals	Lifetime Dose (dpa)	Structural Temperatures
Gen IV/ Lead Fast Reactor LFR	U/PuN; TRUN (enriched to N^{15})	500-600C	Lead	Pb or LBE	Ferritic/Martensitic Steel alloys	150-200	400-600C
Gen IV/ Sodium Fast Reactor SFR	Metal(U-TRU-10%Zr Alloy), MOX(TRU bearing)	600-800C (metal fuel) 800-2000C (Oxide fuel)	Sodium	Sodium	Ferritic/Martensitic Steel alloys	150-200	400-550C
Gen IV/ Gas cooled Fast Reactor GFR	UPuC/SiC (50/50%) with 20% Pu content ; Solid Solution fuel with SiC/SiC cladding	2000 +	Helium	Helium	Nickel Superalloys /Ceramic Composites	80	500-1200C
Fusion Energy	N/A	N/A	N/A	Pb-Li	F/M steels; Vanadium alloys; Ceramics	150	300-1000C
LWR – PWR, BWR	UO2	800-1600C	Helium	Water	316L.ferritic pressure vessel, Zircalloy cladding	Cladding ~10 dpa, Internals up to 80 dpa	200-300C
Very High Temperature Reactor (VHTR, NGNP)	TRISO	800-2000C	Intimate contact	Helium	Ni-based alloys, ceramics and graphite	~10 dpa	700-1000C
Supercritical Water Reactor (SCWR)	UO2	800-2000C	Helium	Water	F/M steels, austenitic steels	10-30 thermal 100-150 Fast	300-600C
Molten Salt Reactor (MSR)	Na, Zr, U, Pu fluorides	700-800C	N/A	N/A	Ni-based alloys, graphite	100-150 dpa	600-800C

材料特性上の課題:

それぞれの運転条件の差異から、GIFシステムはそれぞれ固有の材料特性上の課題を持つ。

Reactor type	Primary Materials	Performance Issues
Light Water Reactors (PWR/BWR)	Ferritic pressure vessel steels, Fe-based austenitic stainless steels, zirconium alloys	IGSCC, IASCC, Fuel clad mechanical interaction, hydriding, Radiation embrittlement (DBTT), hydrogen embrittlement
Very High Temperature Reactor (VHTR)	Ni-based superalloys, Graphite, ferritic/martensitic steels, W/Mo Alloys, SiC/SiC composites	Helium embrittlement, creep strength, swelling, RIS, transmutation, toughness, oxidation
Sodium Fast Reactor (SFR)	Fe-based austenitic SS, Ferritic/martensitic steels,	Radiation Embrittlement (DBTT), toughness, helium embrittlement, swelling, RIS, corrosion, FCCI
Lead Fast Reactor (LFR)	Fe-based austenitic SS, Ferritic/martensitic steels,	Radiation Embrittlement (DBTT), toughness, helium embrittlement, swelling, RIS, corrosion, FCCI, liquid metal embrittlement
Supercritical Water Reactor (SCWR)	Ferritic pressure vessel steels, Fe-based austenitic stainless steels, zirconium alloys, ferritic/martensitic steels	IGSCC, IASCC, Fuel clad mechanical interaction, hydriding, Radiation/helium embrittlement (DBTT), swelling, RIS, corrosion, toughness
Gas Fast Reactor	Ceramics (carbides, nitrides), ceramic composites, nickel superalloys	Helium embrittlement, creep strength, swelling, RIS, transmutation, toughness, oxidation
Molten Salt Reactor	Ni-based alloys, graphite, coatings	Corrosion, Helium embrittlement, creep strength, swelling, RIS, transmutation, toughness, oxidation