

# エネルギー・粒子高流束下材料学(仮)

核融合科学研究所 長坂琢也

# ユニットテーマ提案書(1)

## ①テーマ名

### ■ エネルギー・粒子高流束下材料学

Materials technology at high flux of energy and particles

## ②核融合としての課題

### ■ 低放射化、高強度、高機能かつ長寿命の材料の創製

- 核融合炉の実現や高度化に関わる工学課題の本質は材料開発であることが多い
- ブランケット、ダイバータでそれぞれ1000トン、真空容器で10000トンの規模で使用される大量の構造材料を放射性廃棄物として排出しないことが課題
- 放射能が早く減衰する元素のみで極めて純粋に構成され、高強度かつ長寿命材料を開発する
- 燃料増殖、中性子増倍、プラズマ対向壁、絶縁、水素透過防止、防食に必要な機能材料、被覆、異材接合の開発

- 単に従来より良いというだけでなく、核融合炉の安全性、社会受容性、経済性を格段に向上させ、炉システムや運用を変革するほどの飛躍を生む材料の創製を目指す

# 低放射化元素 材料の再利用を想定した例(厳しい例)

- 将来の核融合炉では構造材料が中性子を吸収し、それ自身が放射性物質になる →材料の放射化
- 低放射化材料: 放射性物質の大部分が100年以内に自然消滅し、廃棄処分や材料リサイクルが可能
- 例えばこれまでに開発された耐熱合金にはCo, Ni, Nb, Moのいずれかが必ず入っていた
- これらの元素を使用しない新材料の開発

H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	<del>Co</del>	<del>Ni</del>	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	<del>Nb</del>	<del>Mo</del>	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	*1	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	*2																			
		*1	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
		*2	Ac	Th	Pa	U															

■ 青: 無制限に使用可能  
 ■ 黄: 0.1%以上添加可能、合金元素となりうる  
 □ 白: 使用不可、不純物として除去必要

核融合炉で125 dpa使用、100年後に、人間が防護無しで作業するため(Hands-on limit)の元素濃度上限

Butterworth et al., J. Nucl. Mater. 186 (1992) 283-287.

元素周期表

# 過酷なエネルギー・粒子高流束下にある 核融合・原子力・宇宙・航空・化学プラント材料

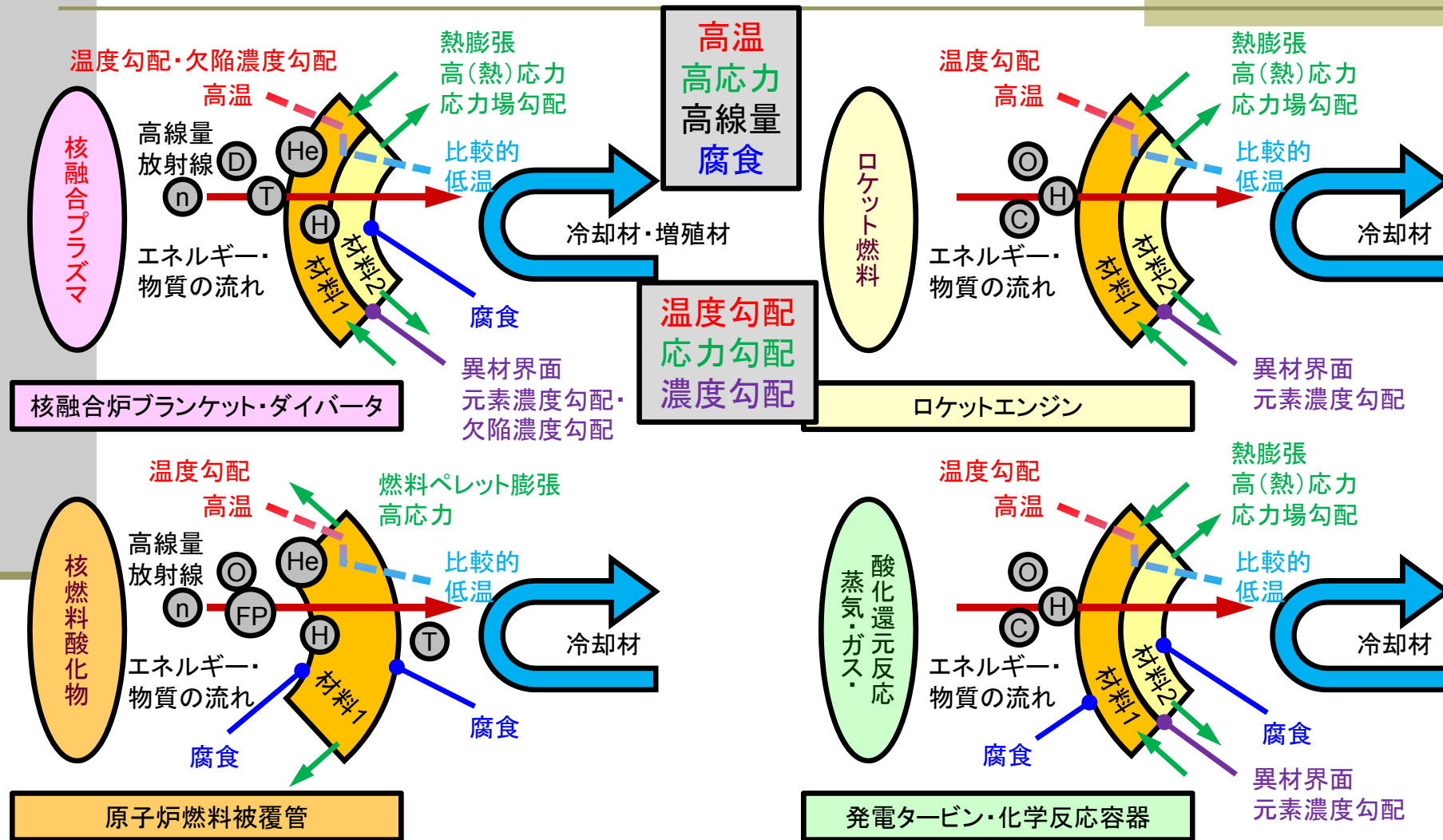


図 過酷なエネルギー・粒子流束下にある材料と過酷環境要素

# ユニットテーマ提案書(2)

## ③学術的な特徴づけ(何の研究だといえるか)

- 過酷環境・非平衡下で生じる**準安定相**と**自己組織化構造**の形成、発達と、**物性との相関**を深く理解
- 過酷環境・非平衡下で**安定な強化・機能因子**を活用し増幅する
- 材料の**適応と寿命**を支配する**根本法則**を究めて体系化

## ④アプローチ(定式化)

- 高流束、非平衡下において、材料の**ミクロな構造**と、それによって発現する**マクロな物性の動態(ダイナミクス)**を、原子の集団現象から**理解し制御**
- 温度、応力、濃度場と**勾配**、そして**照射の影響**を、**相乗効果**を含めて明らかにし、**機構モデル**を構築
- 準安定相と自己組織化構造が数10 nm～数μm周期の**不均一メゾスケール構造**となる場合には、**マクロ物性との相関**は極めて興味深い新しい課題

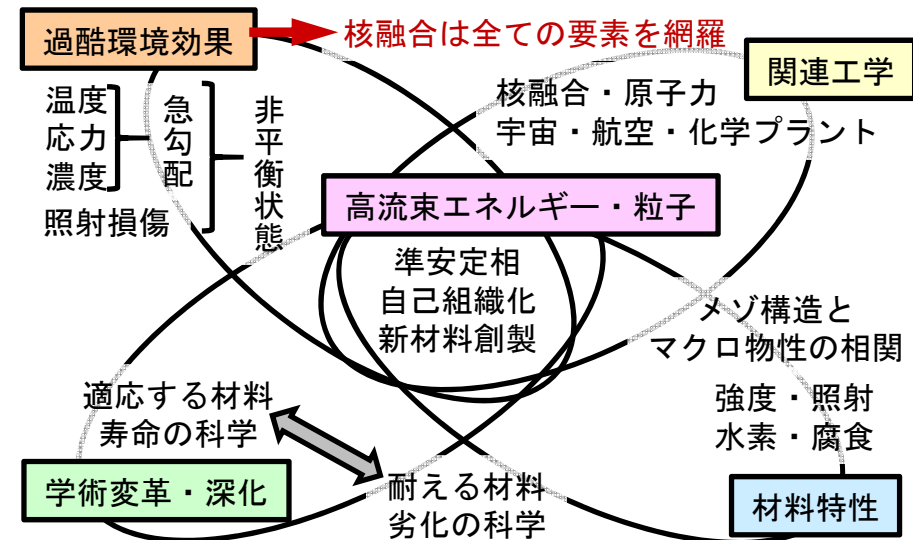


図 ユニットテーマの焦点

# エネルギー・粒子高流束・非平衡下における ナノ・メゾスケール構造とマクロ物性としての強度

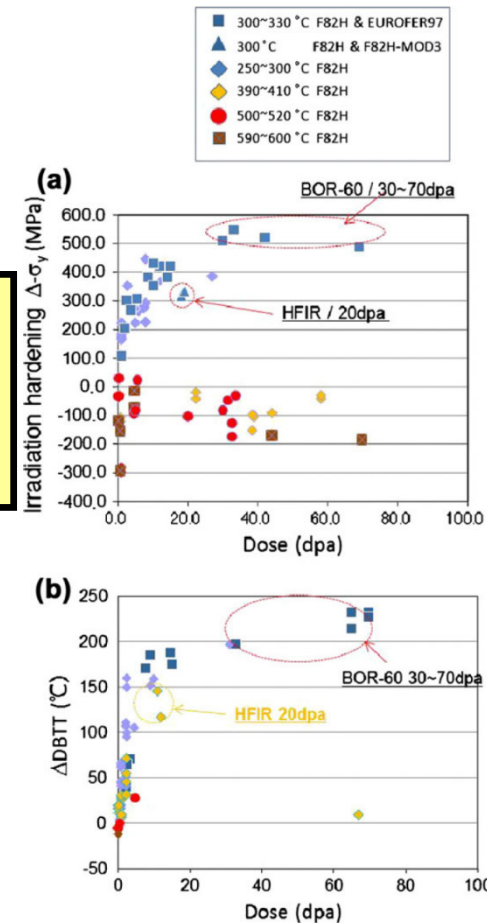
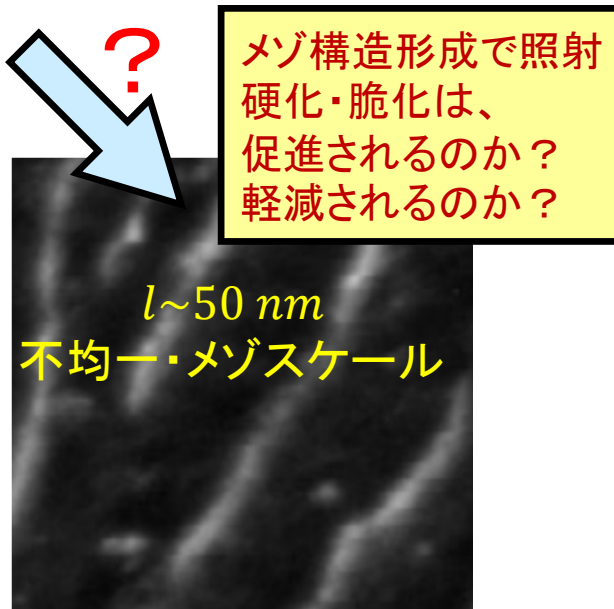
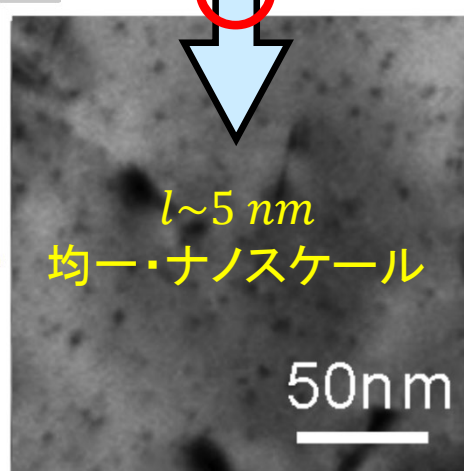
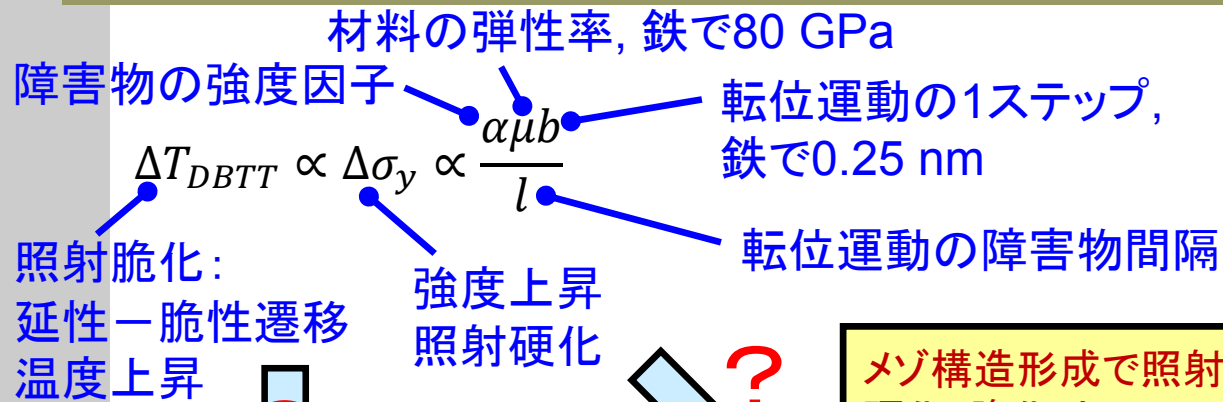


図 12Cr-ODSフェライト鋼 [1]  
照射前の酸化物ナノ粒子

図 12Crフェライト鋼中の照射欠陥[2]  
1 MeV-Krイオン、室温(20°C)、15 dpa

図 フェライト鋼F82H、Euroferの照射硬化・脆化[3]

[1] T. Muroga et al., Fusion Eng. Des. 89 (2014) 1717-1722.,

[2] D. Kaoumi and J. Adamson, J. Nucl. Mater. 448 (2014) 233-238., [3] H. Tanigawa et al., J. Nucl. Mater. 417 (2011) 9-15.

## ユニットテーマ提案書(3)

### ④アプローチ(定式化) つづき

- 過酷環境・非平衡下で生き残る、あるいは新たに生まれる強化・機能因子や、自己組織化による準安定構造を増幅するための材料設計
  - 過酷環境への材料の適応化(耐える、からパラダイム転換)
- 強化・機能因子や構造の物理的寿命を支配する基礎機構にもとづき、マクロ物性が工学的要求を下回る、材料としての寿命、そして様々な材料と異材界面で構成されるシステムの寿命を理解
  - 材料をシステムに供し得る正確な寿命予測理論の確立
- ユニット構成員のテーマ
  - 志と適性にもとづき本心から打ち込めるもの
  - ユニットテーマの焦点とリンクし個人の研究を新たな領域へ拡張するもの
  - 材料発で技術の限界突破を図るもの
  - ユニットで協働することにより相乗効果が生まれるもの
  - 限られた研究資源を集中し成果を出すために重点化もする

## ユニットテーマ提案書(4)

### ⑤学際的展開

- 狭義の現象論に留まらず、役立つ特性を得る普遍的な機構論
- 材料実験の他、計算科学やシステム工学の研究も呼び込んで推進、体系化
- 過酷環境要素共通の核融合、原子力、航空宇宙、化学プラント等で一般化  
→ 過酷環境適応材料工学として発展
- 構造とその多階層システムの外乱に対する応答、復元及び寿命の探究  
→ 生命科学における恒常性や回復力 → 自然界の耐久性

### ⑥独自性, 優位性など

- 核融合環境の特徴は各種急勾配と重照射の重畳
- 核融合は過酷環境要素全てを網羅するので、その相乗効果研究を先導
- 自然界に広く適用される非平衡熱力学の過酷環境下への拡張
- 固体では系の束縛が絶たれても急冷で構造が保たれ詳細分析実験が可能  
→ 計算科学との対応で、より一般化された機構モデルの構築



# まとめ

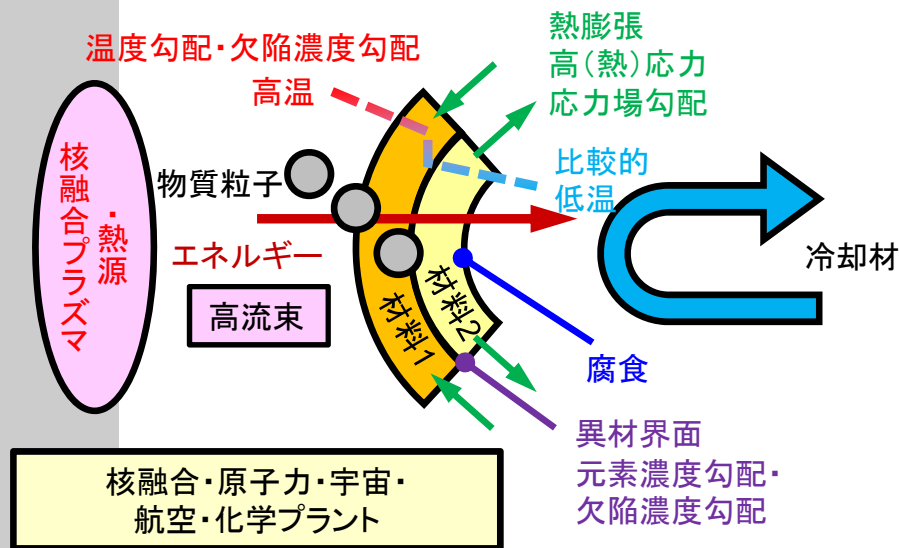


図 エネルギー・粒子高流束環境

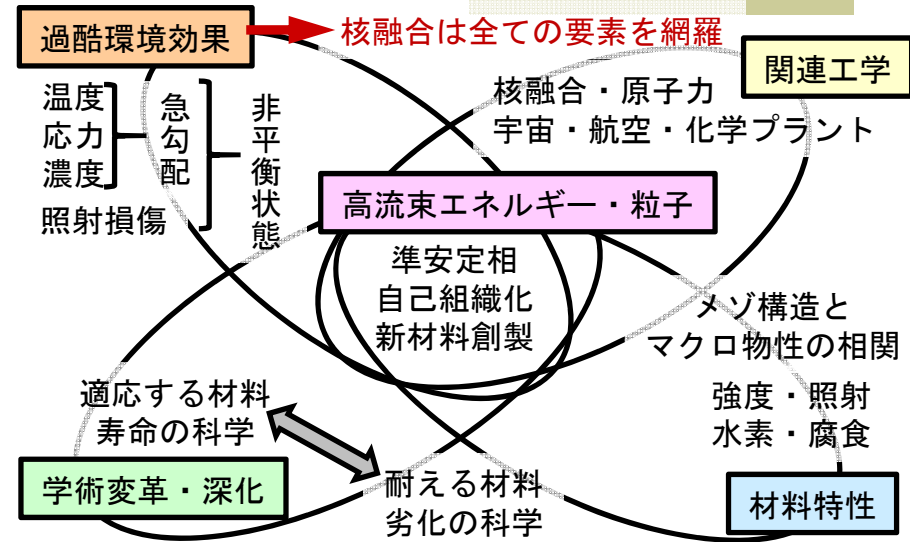


図 ユニットテーマの焦点

- 準安定相の生成と自己組織化を深く理解し活用することで、過酷環境に適応化する材料の創製を目指す
- 適応化の限界としての材料寿命を科学し、過酷環境下で動作するシステムの変革と長寿命化を図る
- 材料に限らず、ご参画いただきたい分野
  - 計算科学 → 固体での自己組織化 → スケール小だがフリーズ可能 → 機構論 → データ駆動新材料創製
  - 水素科学 → 最小原子 → 高拡散・高密度流・最も顕著な同位体効果
  - 応用化学 → 準安定化合物・新物質探索・高効率反応サイクル
  - システム工学 → 従来より良い材料というだけでなく、システムを変革をするほどの飛躍

材料発で技術の限界突破：材料を制するものは技術を制す[1]

[1] 関本忠弘, 資源・素材学会誌 105 (1989) 8-12.