

材料学

核融合科学研究所 長坂琢也

過酷環境にある核融合・原子力・宇宙・航空・化学プラント材料

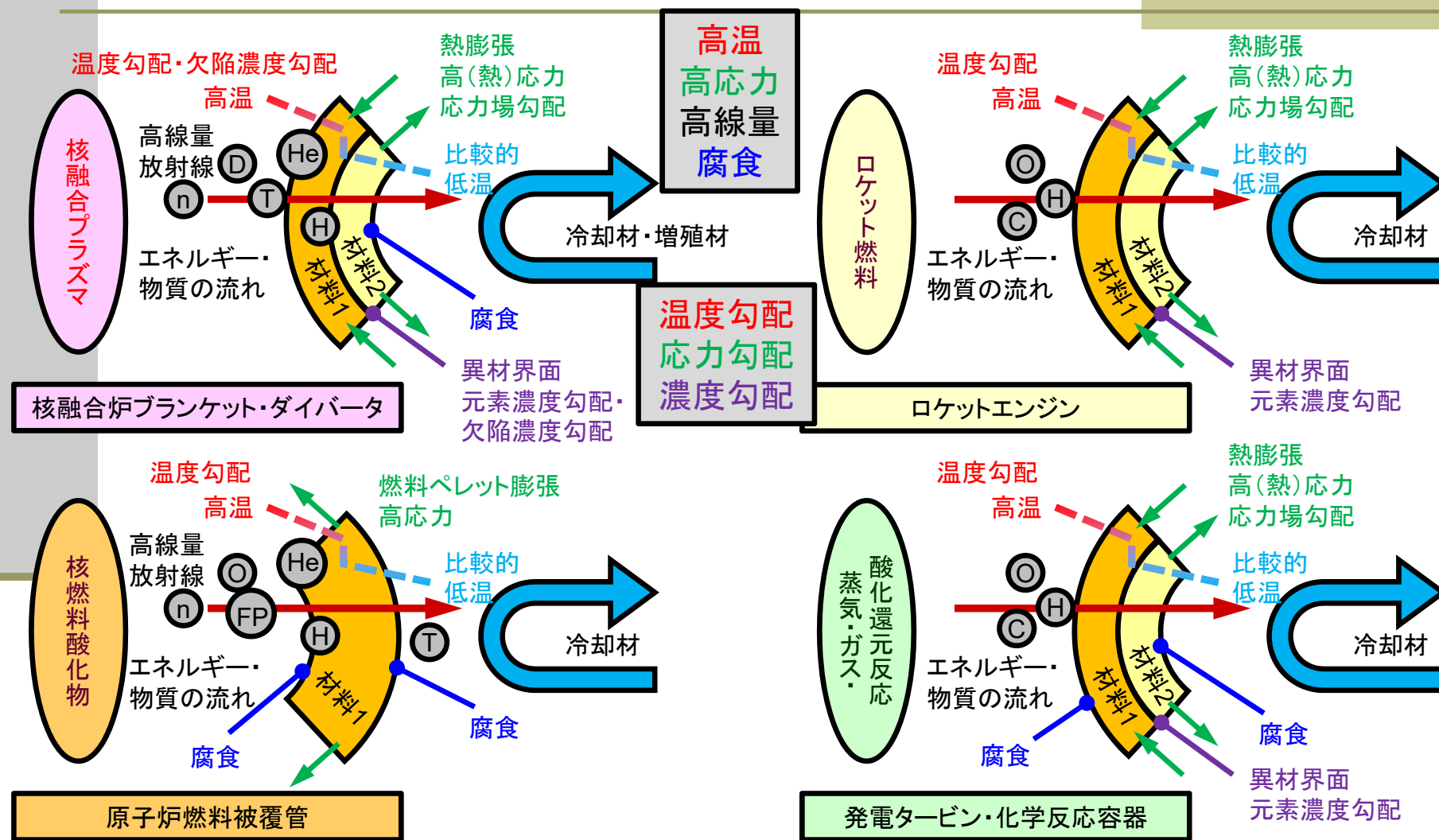


図 過酷環境にある材料と過酷環境要素

ユニットテーマ提案書(1)

①テーマ名

- 過酷環境・非平衡下における材料の適応と寿命の科学
- Science for adaptive nature and life of materials under extremely severe and non-equilibrium condition

②核融合としての課題

- 核融合炉材料の革新的な長寿命化

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
- 過酷環境に耐える、から適応する材料へのパラダイム転換
- 材料の適応と寿命を支配する根本法則を究めて体系化
- 過酷環境下工学システムを革新する長寿命・高機能材料の創製と寿命予測理論の確立

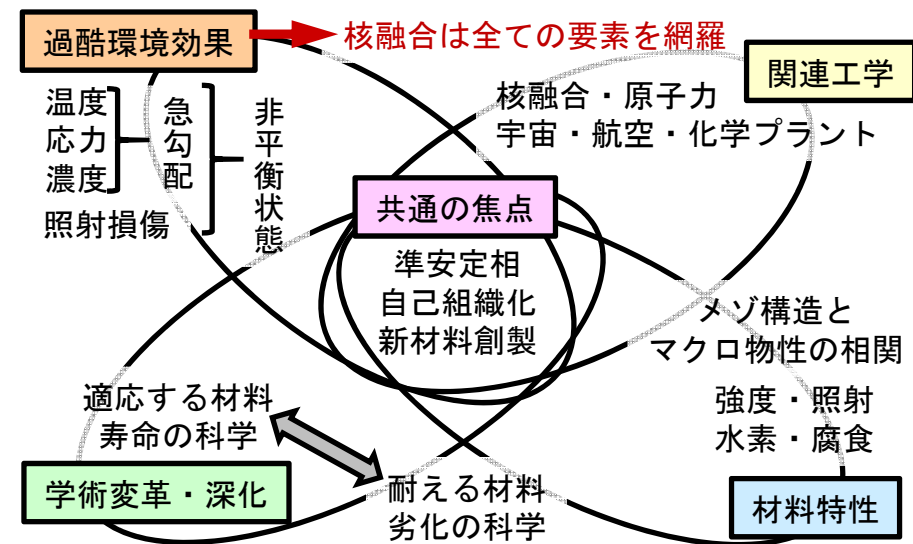


図 ユニットテーマの焦点

過酷環境・非平衡下での自己組織化(1)

高応力(高歪)環境における散逸構造

- 非平衡開放系(散逸系)ではエネルギーと物質が耐えず流れている状態での自己組織化により散逸構造(周期構造)が現れる
 - 疲労[1]、強加工[2]、メカニカルアロイング後の転位セル構造

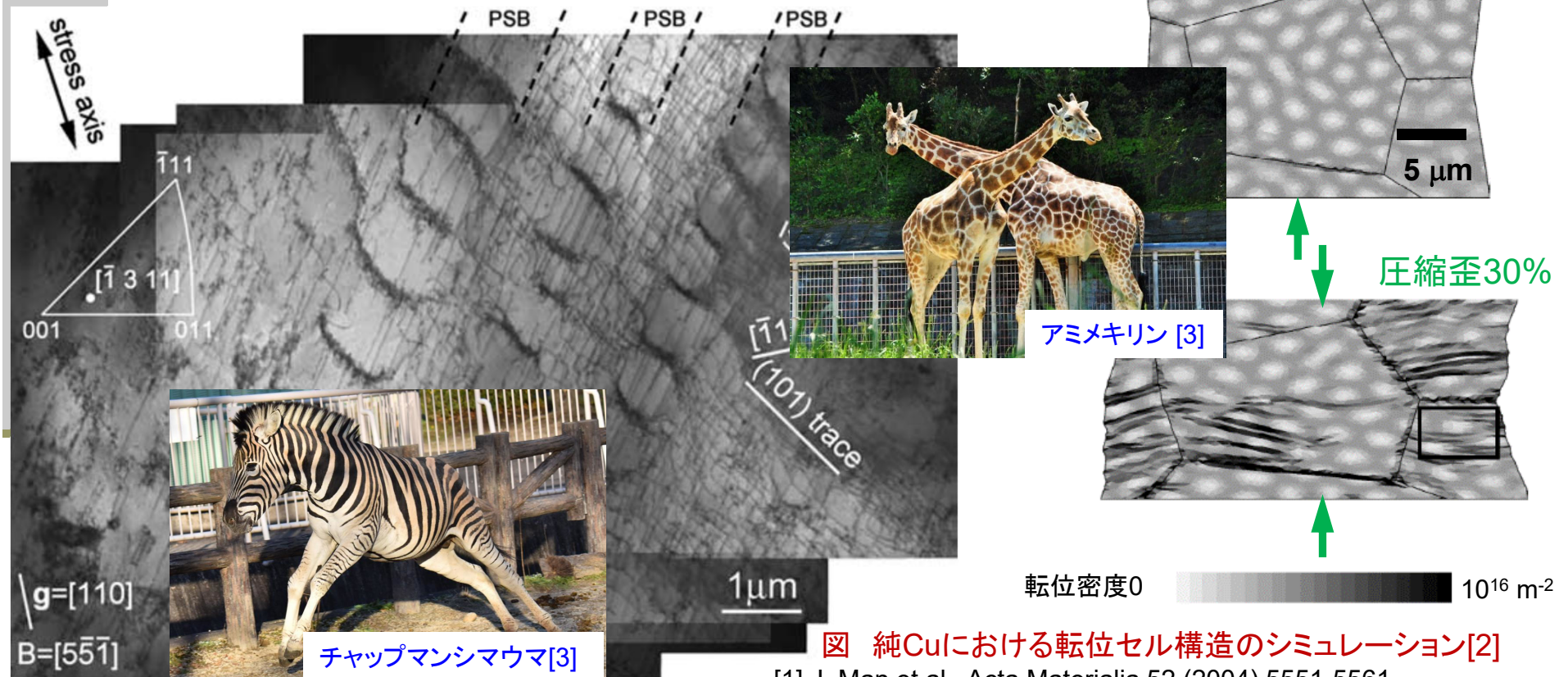


図 X10CrAl24フェライト鋼における転位セル組織[1]
室温、疲労試験後、塑性歪振幅0.2%×9000回

図 純Cuにおける転位セル構造のシミュレーション[2]

- [1] J. Man et al., Acta Materialia 52 (2004) 5551-5561.
- [2] 青柳吉輝ら, 日本機械学会論文集(A編) 77 (2011) 448-461.
- [3] 東山動物園ホームページ <http://www.higashiyama.city.nagoya.jp/>

過酷環境・非平衡下での自己組織化(2) 高線量環境における散逸構造

- 古くは1971年に870°C、2 MeV-Nイオン、100 dpa照射したMoで発見されたボイド超格子[1]
- 最近では12Crフェライト鋼の欠陥クラスターによる散逸構造形成過程のその場TEM観察[2]

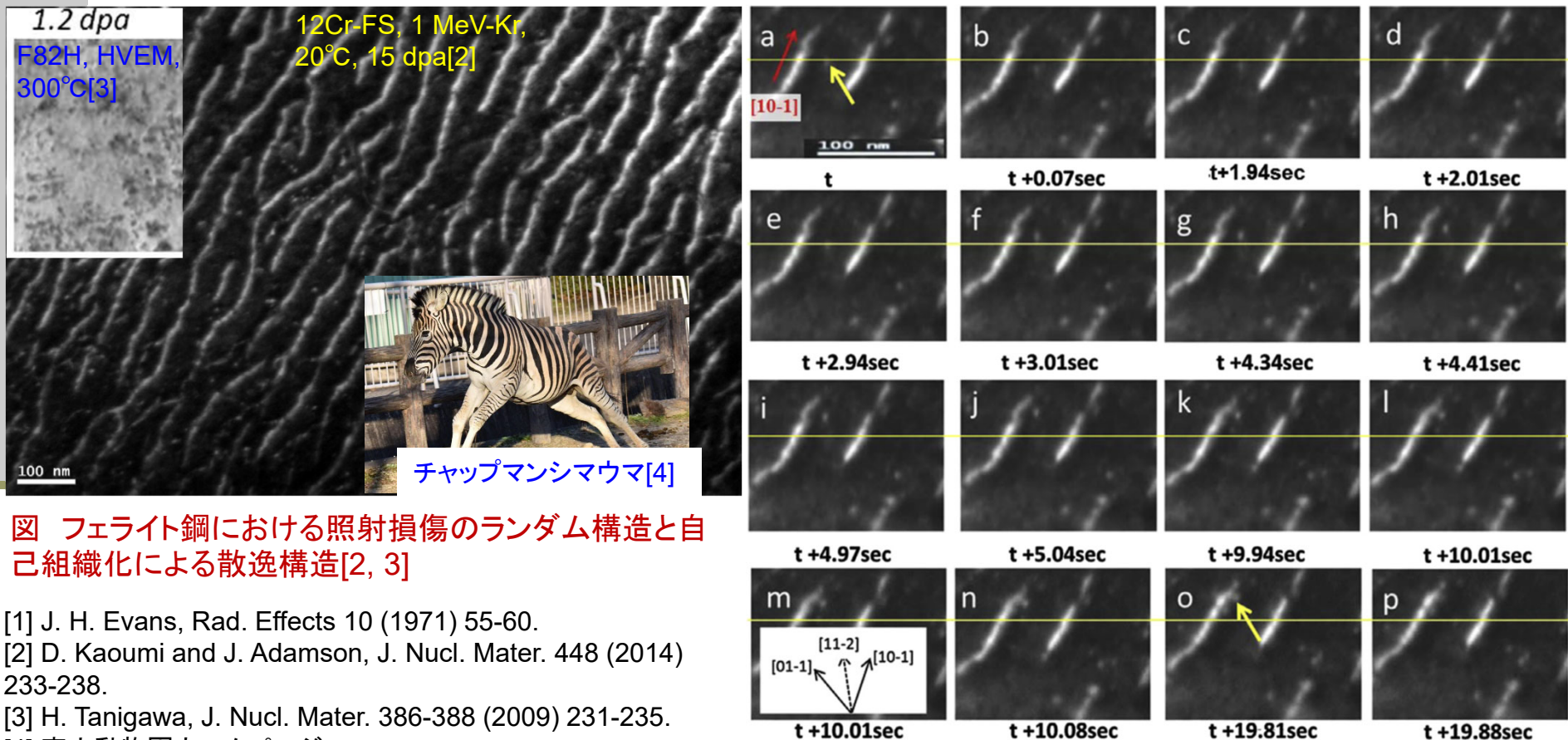


図 フェライト鋼における照射損傷のランダム構造と自己組織化による散逸構造[2, 3]

図 欠陥クラスターの運動と自己組織化構造への吸収[2]

[1] J. H. Evans, Rad. Effects 10 (1971) 55-60.
 [2] D. Kaoumi and J. Adamson, J. Nucl. Mater. 448 (2014) 233-238.
 [3] H. Tanigawa, J. Nucl. Mater. 386-388 (2009) 231-235.
 [4] 東山動物園ホームページ
<http://www.higashiyama.city.nagoya.jp>

過酷環境・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

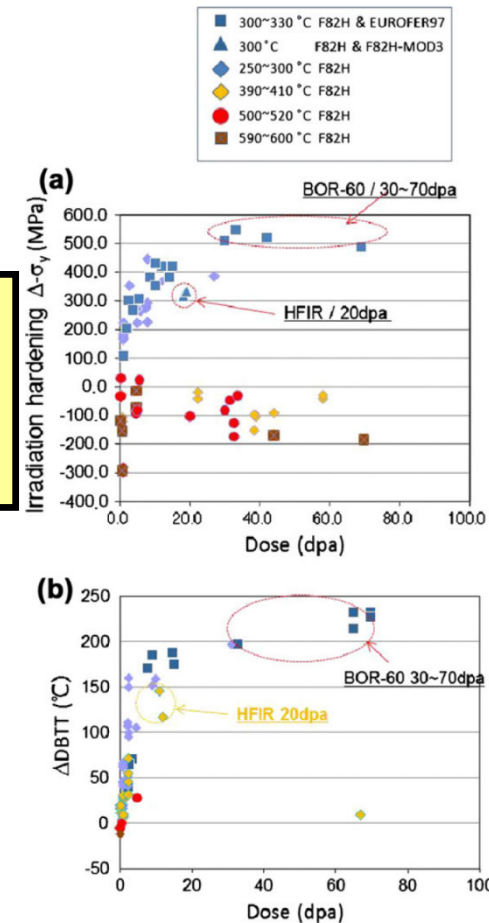
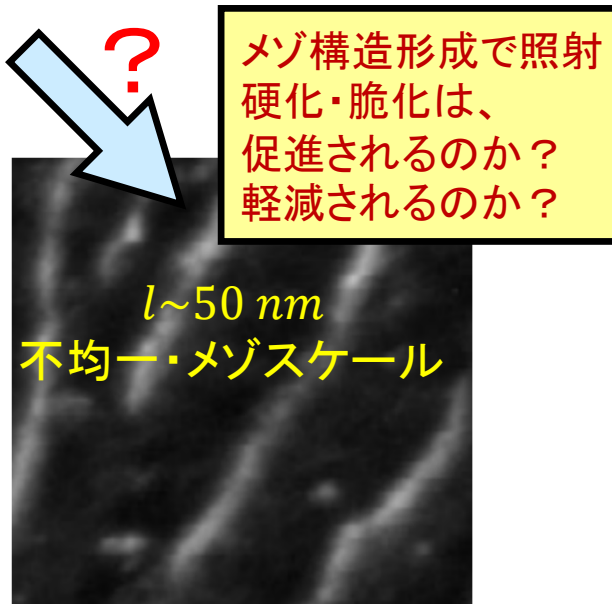
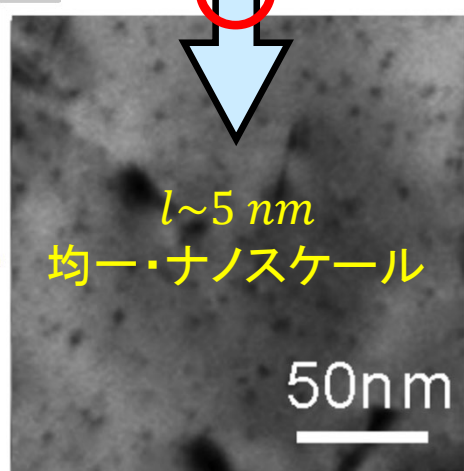
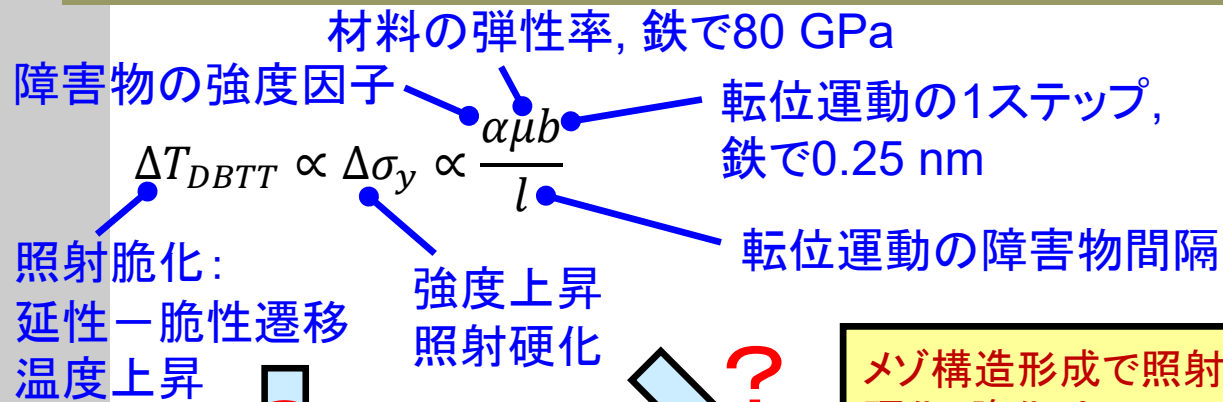


図 12Cr-ODSフェライト鋼 [1]
照射前の酸化物ナノ粒子

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(2)

④アプローチ(定式化)

- 核融合炉材料に加え、一般法則を見出すため他分野材料も比較参照
- 材料の製造工程で導入した強化・機能因子の安定性、準安定相の形成、自己組織化構造の発達
- 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 μ m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
- 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

ユニットテーマ提案書(3)

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
- 特性維持限界を正確に予測できる寿命論
- 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

材料の適応化の可能性(1) 酸化物分散強化(ODS)鋼

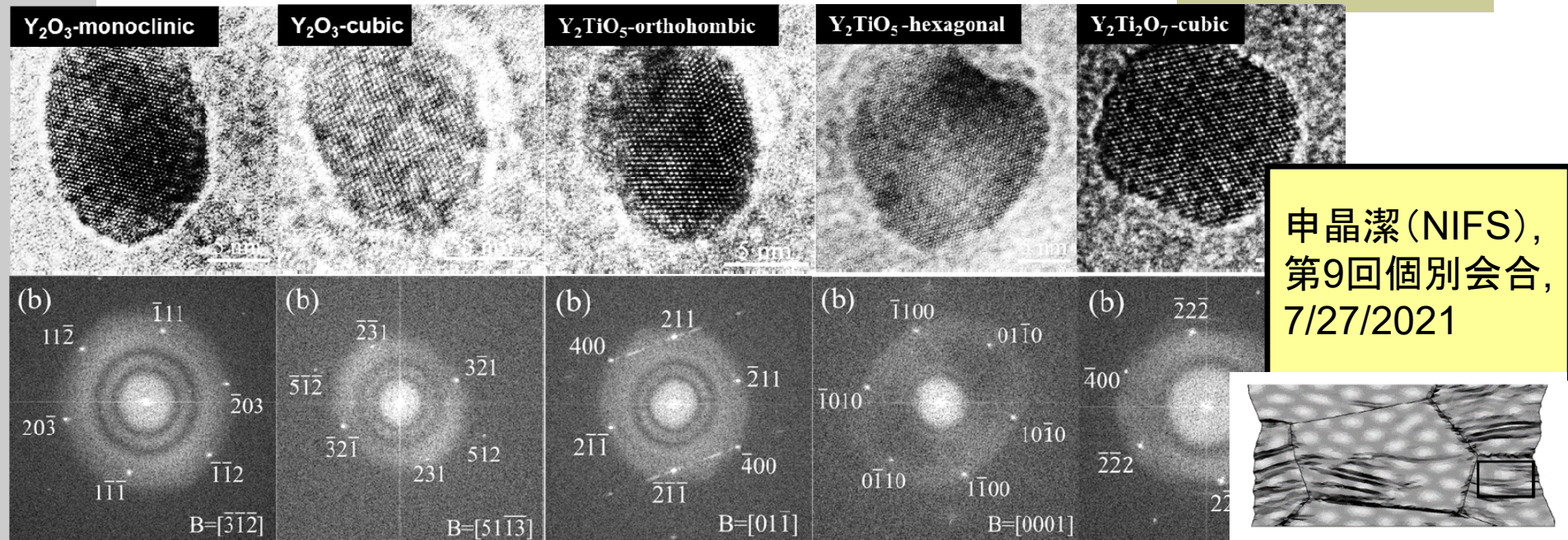


図 12Cr-ODS鋼で同定された5種類の酸化物ナノ粒子の電子顕微鏡像(上図)と構造(下表)[1]

Oxide particles	Crystal system	a (Å)	b (Å)	c (Å)	A (°)	β (°)	γ (°)
Y ₂ O ₃	Monoclinic	13.50	3.47	8.46	90	99.77	90
	Cubic	10.6	10.6	10.6	90	90	90
Y ₂ TiO ₅	Orthorhombic	10.35	3.7	11.25	90	90	90
	Hexagonal	3.61	3.61	11.84	90	90	120
Y ₂ Ti ₂ O ₇	Cubic	10.09	10.09	10.09	90	90	90

- メカニカルアロイング + 熱間・冷間加工: 散逸系(強加工、合金化)
- 最終熱処理(1100°C × 1h): 局所平衡(析出、再結晶)
- ナノ粒子は単一ではない → 散逸構造の痕跡を見ているのかも知れない
- 過酷環境で生き残るのはどの種?

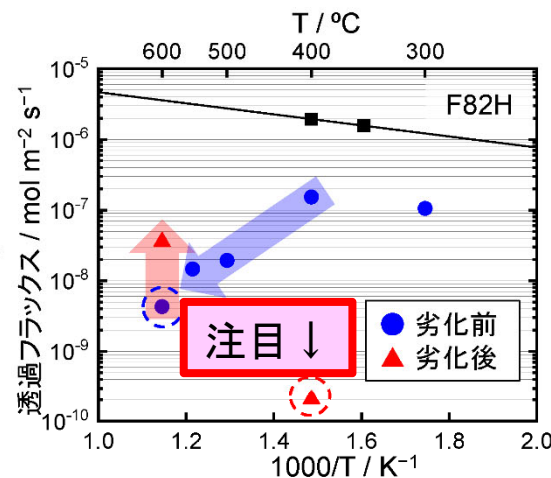
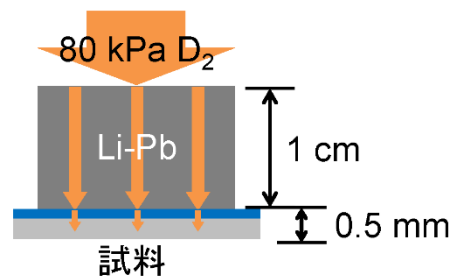
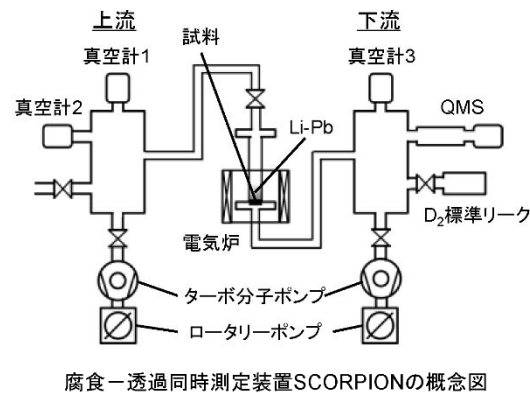
[1] J. Shen et al., Mater. Sci. Eng. A 673 (2016) 624-632.

材料の適応化の可能性(2)

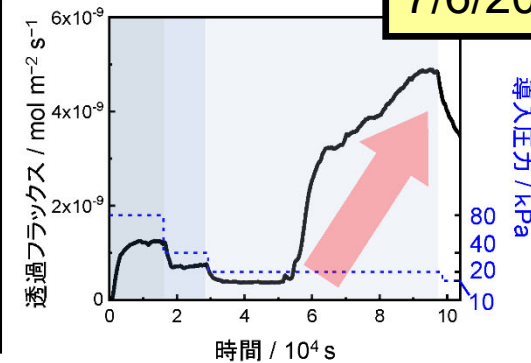
耐腐食水素透過防止膜

- 界面(被覆、腐食層、異材接合)は濃度急勾配があるので散逸系として面白く、思いがけない新材料創製の間があるかも知れない

これまでの取り組み 腐食-透過複合効果



Er₂O₃-ZrO₂-Er₂O₃-ZrO₂四層試料に対する重水素透過フラックスの温度依存性



600 °Cにおける重水素透過フラックスの経時変化

近田拓未(静大),
第6回個別会合,
7/6/2021.

- 核融合炉では、トリチウム透過、腐食、および照射が同時に起こるが、これらの複合効果については調べられていない。
- Li-Pbに曝露した状態で重水素透過試験を実施する体系を構築した。
- ✓ 腐食等による機能性被覆の変化を重水素透過で検知することが可能になった。

学術界の動向(1)

散逸系での自己組織化を応用した新材料創製の例

- 異相界面でのイオンの流れの自己組織化を応用した金ナノワイヤー、ナノチューブの製造
- ナノ構造の大量生産につながるボトムアップ製造 →わざわざ過酷環境ではやりたくない
→過酷環境を利用した材料創製が我々のテーマ

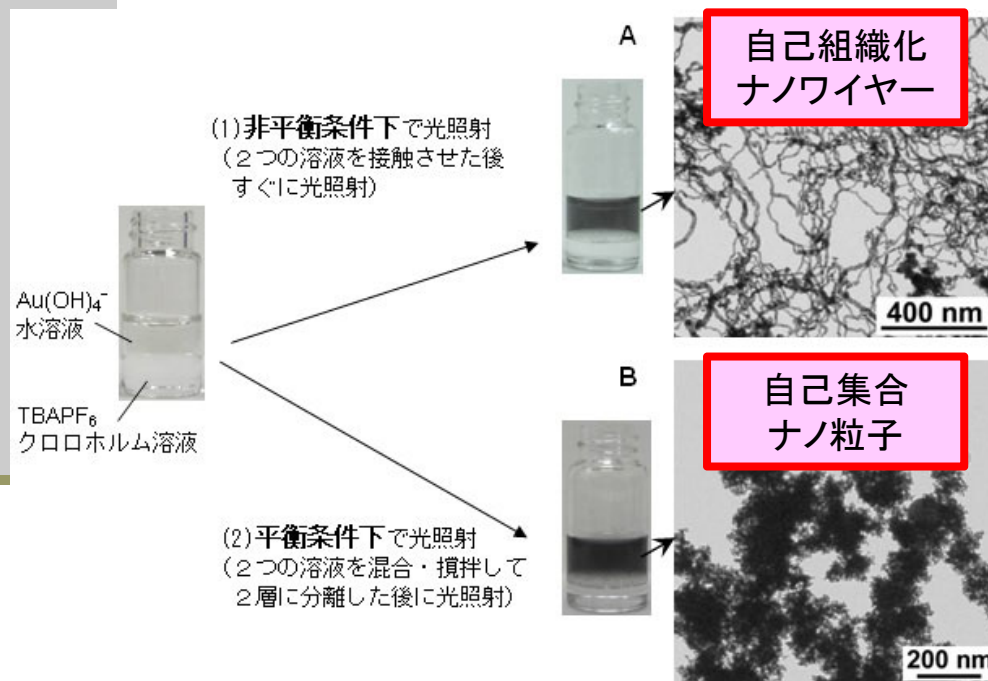


図 異相界面近傍でのイオン濃度散逸構造を利用した金ナノワイヤーの生成[1]

[1] ホームページ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20090522/index.html>
[2] T. Soejima, M. Morikawa, N. Kimizuka, Small 5, 2009, pp. 2043-2047.

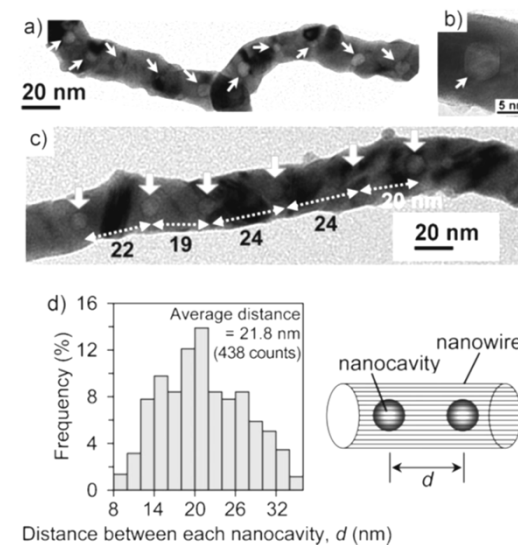


図 中空構造を有する金ナノワイヤーの透過型電子顕微鏡写真[2]

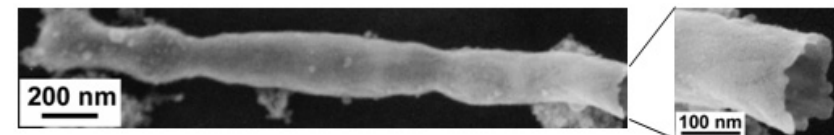


図 実験条件を変えることによって得られた金ナノチューブの電子顕微鏡写真[1]

学術界の動向(2)

例 金属学会2021秋におけるシンポジウム(抜粋)

- S1 機能コアの材料科学 II
 - 多くの先進材料において, 材料内部に存在する点欠陥や粒界, 界面, 転位等の結晶欠陥が, 機能発現の起源となっている. したがって, **結晶欠陥を高度に制御し, その機能を最大限に引き出す**...令和元年から新学術領域「機能コアの材料科学」が立ち上がった. ...
- S2 ミルフィーユ構造の材料科学 IV
- S3 ハイエントロピー合金の材料科学 VI
 - 近年, ハイエントロピー合金(HEA)が**世界的な注目を集め**...2004年にHEAの基礎概念が考案されて以降, 関連する出版物の数は急増しており, **各国で大型プロジェクトが立ち上がっている**. 我が国でも, **新学術領域研究「ハイエントロピー合金」が継続中であり**...
- S4 材料変形素過程のマルチスケール解析 IV
 - 近年, ナノ・マイクロ機械試験法や原子分解能電子顕微鏡法をはじめとする最先端の実験手法, 第一原理計算を中心とした計算材料科学の急速な発展により, 材料の変形・破壊挙動を支配する転位や変形双晶といった塑性変形の素過程について, 実験, 理論の両面においてマルチな時間・空間スケールでの横断的な解析...
- S5 超高温材料の科学技術 II
- S6 ナノ・マイクロスペーステイリング VI
 - **高温・高圧・高エネルギー照射などの極限場下では非平衡状態となり, 熱平衡では実現できない散逸構造化が生じる**. このような現象を利用してナノ~マイクロオーダーで空間制御した材料の創成・新規物性発現の発展に向け...
- S7 水素エネルギー材料 IX
- S8 コロナ禍の記録とポストコロナの材料戦略
- S9 ワイドギャップ結晶の材料学と高温プロセッシング III
- S10 マテリアルズ・インテグレーション IV—社会実装に向けた取り組み—

過酷環境下の材料における非平衡相と散逸構造の探究と新材料創製への応用が新しい展開

[1] ホームページ
https://jim.or.jp/MEETINGS/2021_atmn/news/symposium_theme.html

まとめ

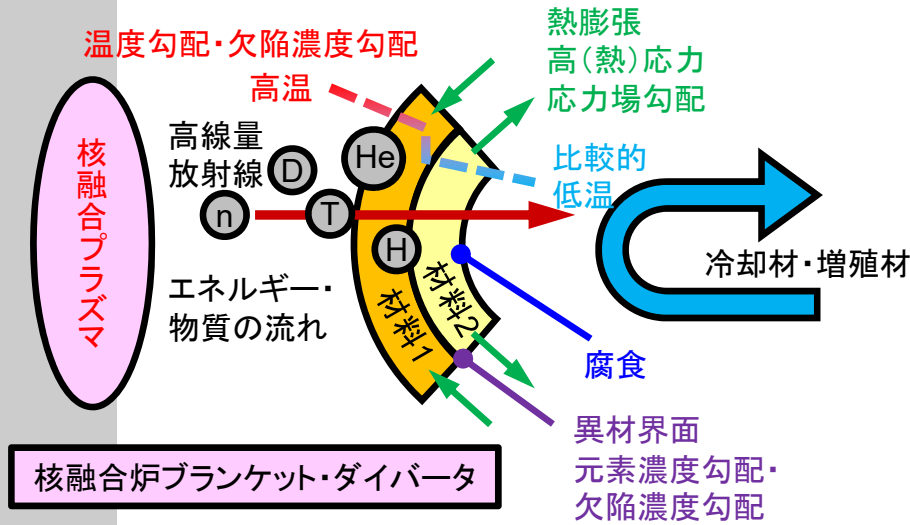


図 核融合炉材料における過酷環境要素

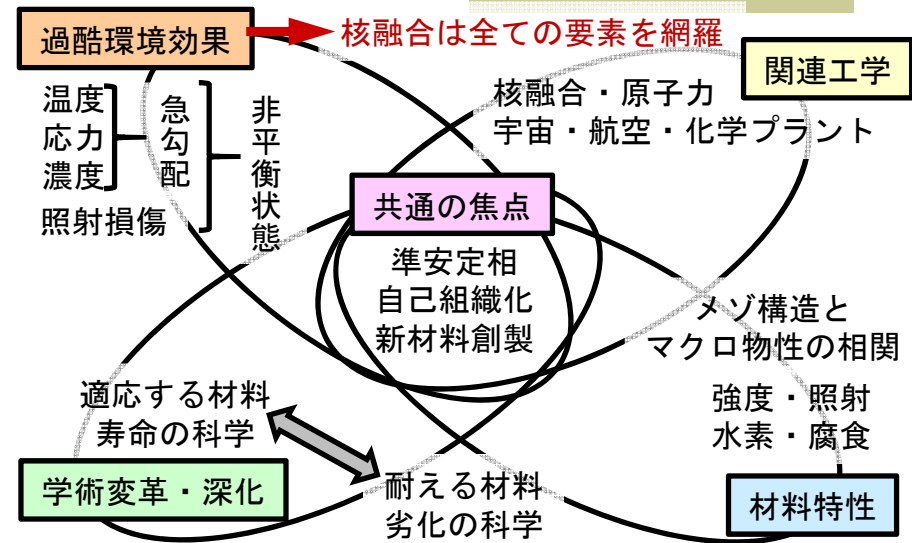


図 ユニットテーマの焦点

- 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革新と長寿命化を図る
- 核融合、原子力、航空宇宙、化学プラント材料等で一般化し、過酷環境適応材料工学として発展させる
- 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

材料を制するものは技術を制す