

## ユニットテーマ提案書

### 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を創製する。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。大きな課題のひとつは、炉内機器であるブランケット、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である。そのために、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、高強度かつ長寿命の材料を開発する。その他、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、異材接合の開発に取り組む。

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。

### ③ 学術的な特徴づけ（何の研究だといえるか）

核融合、原子力、宇宙、航空、化学プラント等で使用される材料は過酷環境にある。過酷環境では温度、応力、濃度場に急勾配があり、中性子照射下等では照射損傷も加わってエネルギーと物質粒子の大きな流れが駆動され、非平衡状態がもたらされる。非平衡状態では非晶質や準安定化合物（準安定相）、そして結晶格子欠陥を含む構成原子集団の自己組織化による準安定周期構造（散逸構造）が見出されている。これらの生成機構と物性への寄与を深く理解し活用すれば、材料自らが安定化して劣化が止まったり、逆にその特性が改善する、いわば適応と呼べる新しい挙動が期待できる。一方完璧な適応は困難と考えるのが現実的であり、環境の揺動や材料損傷の蓄積・質的变化に適応が追いつかなければ劣化が進むため材料には寿命がある。

本研究では、高流束のエネルギー・粒子がもたらす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し、安定な強化・機能因子を活用し増幅することで、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を図る。材料の適応と寿命を支配する根本法則を究めて体系化し、核融合をはじめとする過酷環境下工学システムを変革する高強度、高機能かつ長寿命材料の創製と寿命予測理論の確立を目指す。

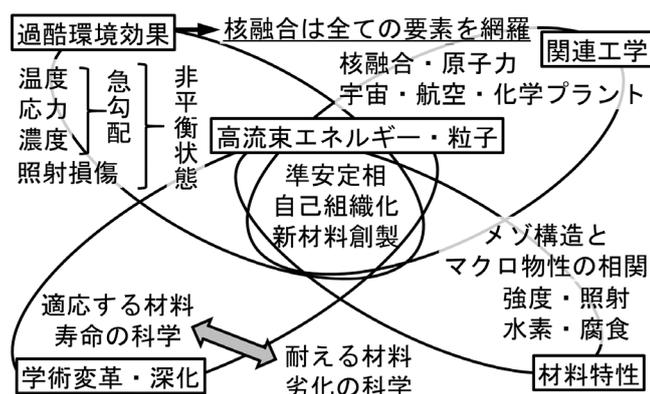


図1 ユニットテーマの焦点

#### ④ アプローチ (定式化)

高流束のエネルギー・粒子がもたらす非平衡下において、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する。注目するのは、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である。これらに及ぼす温度、応力、濃度場、そして照射の影響を、相乗効果を含めて明らかにするとともに、その機構を理解するためのモデルを構築する。

準安定相や結晶格子欠陥がナノスケールで均一に分布する場合には、材料のミクロな構造からマクロな物性を説明する理論はかなり確立されている。一方自己組織化は数 10 nm～数 $\mu$ m 周期の不均一なメソスケールの散逸構造をもたらす。このメゾ構造が材料のマクロ物性に及ぼす影響の理解は未だ乏しく、極めて興味深い課題であるため、実験的、理論的な解明に取り組む。

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を追究し、適応化を実現する。これらの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し、正確に予測する理論を確立する。

ユニット構成員のテーマには、志と適性にもとづき本心から打ち込めるものを基本としつつ、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についてよく議論したうえで設定する。あわせて、限られた研究資源を集中し成果を出すために重点化する。

#### ⑤ 学際的展開

非平衡下における準安定相形成、自己組織化、メゾマクロ相関を深く理解して、材料の適応と寿命を統一的に科学するところに学術的な意義がある。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、そして特性維持限界を正確に予測できる寿命論を確立するために、材料実験研究だけではなく計算科学やシステム工学の研究も呼び込んで推進、体系化する。そして、過酷環境要素が共通する核融合、原子力、航空宇宙、化学プラント等で一般化し、適応材料工学として発展させる。さらに構造とその多階層システムの外乱に対する応答、復元及び寿命を探究することは、生命科学における恒常性や回復力の研究にも通ずると考えられる。

#### ⑥ 独自性, 優位性など

非平衡状態における材料の自己組織化は、ナノチューブ等の大量製造への応用が期待され学术界の注目分野だが、低コスト製造に適した通常環境での研究が主である。本研究では過酷環境を対象とし、従来には無い多様な非平衡状態で新たな構造を見出すところに独自性と優位性がある。核融合環境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できる。

非平衡開放系で自己組織化により発達する散逸構造は自然界に広く観察され、それを取り扱う非平衡熱力学の過酷環境材料への拡張に寄与する。特に固体は他三態と比較して自己拡散や流動が小さく、エネルギー・粒子束が絶たれても急冷により構造が保たれるので、準安定相や自己組織化の詳細分析が可能である。核融合条件は各種急勾配と重照射の重畳が特徴だが、他分野や単純な条件と比較することで、より一般化された機構モデルの構築が可能となる。