

## ユニット成果報告会2023 議事メモ

日時：2024年5月8－9日

場所：管理・福利棟4階 第1会議室＋オンライン

### 5. 超高流束協奏材料（長坂琢也，小林真，申晶潔）

【C：佐藤委員】ユニット長（長坂）から紹介されたユニットの分節化が分かりやすかった。超高流束の境界条件を受けた中での材料の長寿命化等、分かりやすい。それを受けて、2件目（小林真）の定式化に向けての説明、3件目（申）の具体的な例、と続き、良いユニット構成という印象を受けた。

【Q：佐藤委員】材料の寿命については、人間でいうと、老衰していく自然死、と突然死がある。人間の寿命と同様に、ミクロで誘発された要因がマクロにどのように進み、突然死に至るのかが分かると、長寿命化に向かうのであろう。一方で、いろんなところでほころび、欠陥が出てきて、それらが重なると自然死に至る。材料の研究ターゲットもそのように分けているのか？やはり、突然死を避けることによって、長寿命化をめざしているのか？自然死的なところまでも含めているのか？

- 突然死である材料の破壊は、破壊の原因が材料中に散らばっていて、その近くでたまたま応力が大きくなって、臨界点に達するとそこから破壊につながってしまう。一つはこれの原因を取り除くというのが考えられる。しかし、材料の場合は、この要因は強度を上げる機能を担っていることが多く、トレードオフで解決するということになる。これらは比較的サイズの大きなもので、1箇所の割れが周りに伝播する。その他に原子レベルでの欠陥もある。照射下では、ミクロな転移が蓄積して自己組織化し、様々な構造を取り、原子レベルでの応力集中を生み、破壊が始まる。これについては、熱処理である程度元に戻せる。これは突然死への対処法となる。一方で、自然死への対応として、なるべくそういう状態にならないように材料への負荷を減らすという方向もある。不可逆的欠陥がたまっていくのを制御しながら、システムからの負荷を下げることで、システム効率の観点からはデメリットだが、材料を長寿命化させることによりトータルで見るとシステムの魅力を出せるのではないか。原子のレベルでの可逆、不可逆を研究する必要がある。【長坂】

【Q：高部委員】非平衡・準安定構造形成について、熱に関しては分かるが、粒子もどんどん蓄積して設計限界を超える。できるだけ寿命を長くするといっても、入射する粒子のスラックス次第ではないか。実際に核融合で長い時間、粒子が蓄積しながら性能維持していくことは本当にできるのか？頻繁に取り換えるとなるとコストがとて高くなる。どの位の寿命を考えているのか？非平衡な状態の粒子を材料中に蓄えるときに、材料としての限界があると思うが、この観点からこういった材料を見つけたい、といったガイドラインを教えてください。

- システム全体を止めて、一番寿命の短い機器を取り替えないといけない。原型炉の場合、ダイバーターが2年といわれており、他の機器も最低2年でよいことにはなるが、経済的で魅力的な核融合炉のためには寿命を長くする必要がある。原子炉などでは30－40年なので、十年程度持つものなどが目標となる。材料中に入射する粒子の蓄積については、水素は小さい原子であるため外部に流れることから、その流速と

共存して成り立つ材料を開発することになる。入射するそれより大きな原子は蓄積するが、蓄積の仕方が大きな塊で少しできるのと、小さな塊で多くできるのでは影響が違っているので、影響の少ない蓄積の仕方をさせる。さらに欠陥が規則正しく集まってできた自己組織化構造であるボイド超格子は非常に安定で、粒子が蓄積することによる材料の膨れ（スウェリング）を抑制するといわれている。蓄積の仕方をコントロールし長寿命化を目指す。【長坂】

【Q：高部委員】水素エネルギーで水素を金属に吸蔵させる研究があり、いろんな材料が開発されてきた。同じような発想か？

- 水素については、流れるという観点と、貯めるという観点がある。超高流束にすると、純金属や純合金の状態に対する限界の水素蓄積量を超えるような構造状態に相転移する報告があり、そういったところにも挑戦する。寿命の観点と、新たな機能という観点、両方で進めていきたい。水素の過飽和状態を生み出せる材料の研究も行う。

【小林真】

【Q：高部委員】プラズマ・複相間輸送ユニットの研究と、このユニットの研究とどのように連携していくのか？複相間系の中に材料が入るとエネルギーの流れがどう変わるかといった検討をしているということか？

- プロジェクトとして提案しているSPICES計画は、プラズマ・複相間輸送ユニットとの連携で、我々は材料に特化しているが、プラズマと連成した水素輸送現象、プラズマの非平衡変化といった全体を統合したようなコード開発も一つのターゲットとして展開していけるのではないかと考えている。【小林真】

【Q：永岡】“思うようにいかない点”で、これまでの共同研究課題でユニットテーマと方向性の異なる研究の整理が難しいと書かれていたが、これまでの継続研究課題でもユニットテーマとの関連の中で、うまく発展させていくのが基本的な考え方と思う。整理、というのがどういう考え方なのか、問題意識を持っているのか？

- 位置づけに明確にすることが重要と考えている。超高流束、自己組織化のキーワードが入らないものもあり、そこをどうするかを課題と考えている。【小林真】

【Q：永岡】全部無理やりこじつける必要はないのではないか。研究が発展する環境を作ることが一番大事となる。

- 無理にやめるといったことは行っていない。【小林真】

【Q：山田委員長】ユニット戦略の方向性、グループ内の制度設計的な点等、ユニットとしてのマネジメントはうまくされているのではないか。一番の狙いが時空間にスケラビリティを持つような包括的理解を目指すとなっているが、その中身は、写真のミクロな分析や微小試験片での試験からマクロな物性、最終的には実機構造物にもっていかないといけない。勾配が非常に大きいところに注目すること等は重要であるが、プラズマなどではよく無次元化をしてスケラビリティを担保したりする。一方でプラズマの周辺部に行くと分子原子過程など無次元化できないところがあり、そこの接続をどうするかといった課題がある。無次元化は使えないかもしれないが、包括的な理解としてどのような科学的アプローチがあるのか？

- 強度や機械特性を対象としたときに、欠陥の理論では弾性定数で規格化し、横軸を弾性定数の何倍か、縦軸を温度とする空間の中で様々な材料が一つの線に乗るという整理方法がある。アシュリーダイヤグラムといった例等がある。同様に、核融合を含む過酷環境材料版を作るのが一つの目標である。個々の要因の線形結合ではなくて、何らかの相互作用が表れるものを新しい現象として見つけるのも目標となる。温度勾配があるところに照射欠陥が導入するとどのように分布するかというところでは、温度勾配の式と照射欠陥の式が分けられずに一つの式にする必要があるといった、ソレー効果といわれる例がすでにある。同様に過酷環境における温度、欠陥、粒子輸送等について結合するような式を作るのが目標となる。【長坂】

【C：山田委員長】新しいものの見方を見せるという点で、今までにない相図のようなものを見せてもらえると嬉しい。

【C：笠田】核融合炉材料、炉自体の寿命を決める要素が定式化されていない。炉形式や運転モードも定まらず、最近の小型化への要求も出てきている中で寿命を決める要素が決まっていない。核融合材料研究者は伝統的に軽水炉を参照し、プラント全体の寿命を決めるものとして圧力容器の照射脆化であるとされていることから、材料が照射によって脆くなっていくという現象を正しく理解するアプローチが中心であった。核融合炉でもダイバータやブランケットなど照射脆化の考え方が中心になっているが、核融合炉では壊れるメカニズムがたくさんあり、荷電粒子が飛んでくるところではエロージョンが寿命を決める。エロージョンは単純なスパッタリングの物理なので、材料ではなくてシステムが頑張る必要がある。設計やプラズマ研究者と協奏していく必要がある。高フラックスで寿命がどう決まるかについては、核融合で生じる欠陥のでき方が、軽水炉の圧力容器で対象とする脆化要因と全く異なる領域に入ってくる。高フラックスで粒子が入ってくる際の脆化や照射欠陥のでき方は低フラックスとは大きく異なるであろうし、照射欠陥の空間的分布もメソスケールの組織の制御によって変わってくると考えられる。外場のコントロールによって欠陥のでき方が変わり、寿命も変わるかもしれない。

一番重要なのは、高フラックスの照射環境がないとこの研究はできないことである。これまで京大エネ研の複合イオンビーム照射装置、DuETがあり、年間数十件の共同研究で貢献してきたが、現在停止してしまっている。我々コミュニティはNIFSに高フラックス照射装置を設置して、プラズマ分野とも連携しつつ可用性の高い共用プラットフォームとして貢献してほしいという願いがある。そのためにこれだけの外部の研究者も超高流束協奏材料ユニットに参加して面白いことをやりたいと考えている。