フュージョンエネルギー技術開発戦略サンプル（炉材料技術）

資料５
第１回核融合科学技術委員会
フュージョンエネルギー技術開発戦略検討タスクフォース
令和８年11月９日

（１）現状

- ブランケット構造材の低放射化フェライト鋼、ダイバータのタングステン、ヒートシンクの析出強化型銅合金などの技術成熟度の高い主要な候補材の選定と、将来の材料として期待されるODS合金（酸化物分散強化型合金）、SiC/SiC複合、やバナジウム合金などの基礎開発が進んでいる。
- 他方で、フュージョン発電実証プラントでは14MeV中性子、高熱流束、プラズマ粒子、冷却材、電磁力による疲労等が重畳するため、照射脆化・スウェリング・核変換ガス生成・疲労などによる長期的な特性劣化が最大の技術課題であるが、現状では、国際協力によるHFIR、などの核分裂炉や加速器によるイオン照射による代替試験が中心であり、フュージョンプラントと同等の中性子スペクトル・損傷量に基づく寿命予測データは十分に蓄積されていない。
- 我が国は、大学や民間企業における研究開発のほか、幅広いアプローチ（BA）活動（於：QST六ヶ所フュージョンエネルギー研究所（青森県））において関連プロジェクト（IFMIF/EVEDA及びIFERC）を実施。2030年代の発電実証への政府目標前倒しに伴い、2025年５月にDONES計画に参画。

（国内の状況）

- QST：低放射化フェライト鋼F82Hを中核に、照射影響評価、材料データベース、構造設計基準からブランケット実装までを一貫して推進。
- NIFS：バナジウム合金、機能性セラミックス材料、先進材料、プラズマ対向材料、トリチウム挙動などの中長期・萌芽的研究を推進。イノベ拠点事業にて複合イオン照射設備を整備中
- 東北大学：金属材料研究の基盤を生かし、タングステンや先進構造材料の創製、照射劣化機構の解明、微小試験による機械特性評価に強み。
- 京都大学：SiC/SiC複合材料などの耐熱・低放射化材料と、照射損傷を原子・組織レベルから予測するマルチスケール材料研究に強み。
- 大阪大学：異種材料接合、残留応力・破壊靭性評価に強み。
- 北海道大学：耐照射性HEA合金の創製や超高圧電子顕微鏡による照射損傷機構の解明に強み。
- 大学を中心にイオン照射による照射劣化機構、先進材料の照射特性の解明が行われてきたが、施設の老朽化などで研究アクティビティーが下がっている。イオン照射の有効利用に向けた施設体制整備、イオン照射データから核融合中性子照射効果を予測する手法の確立（データサイエンスの活用を含む）が必要。

（１）現状（つづき）

（海外の状況）

- 米国：オークリッジ国立研究所（ORNL）の材料・中性子科学、原子炉照射と先進製造、アイダホ国立研究所（INL）のトリチウム・安全技術を連携させ、材料単体から接合部・ブランケット機器まで段階的に検証する体制を構築。京都フュージョニアリングもORNL等の支援により増殖ブランケット試験施設UNITY-3を整備し、米国のパイロットプラント向け技術実証を担う。
- 英国：英国原子力公社（UKAEA）が中核となり、低放射化鋼、タングステン、高温材料、耐放射線材料について、照射・腐食試験、微小試験、損傷予測モデル、材料ハンドブックを整備し、STEP向けの材料選定・認証を進めている。
- 国際協力の下、DONES計画が進行中で、2033年までが建設期。2034年から材料の照射試験が開始される見込み。
- ただし世界的にも、フュージョン発電実証プラント相当の中性子環境で得た高照射量データは不足しており、材料寿命の実証、規格・標準化、大型部材の量産・認証が共通課題である。

（２）技術課題（例）

※TRLをどのように評価・設定するか？

- **核融合中性子による照射データの不足** 【TRL？】
  既存のD-T中性子源では照射体積と中性子束が限られ、フュージョンプラントに近い中性子スペクトル・温度・数十dpaの損傷条件で、材料を体系的に評価できていない。

- **照射損傷と核変換ガスの複合影響の解明** 【TRL？】
  14 MeV級中性子による原子のはじき出しに加え、材料内部にヘリウムや水素が生成されるため、脆化、膨張、強度低下などを同時に評価する必要がある。

- **実炉寿命までの材料性能予測** 【TRL？】
  限られた短期間・微小試験片の照射データから、長期間使用される大型炉部材の強度、延性、破壊靱性、疲労寿命を予測するモデルの精度が十分でない。

- **プラズマ対向材料の損耗・脆化抑制** 【TRL？】
  タングステンなどでは、再結晶、脆化、亀裂、表面侵食、ヘリウム気泡やファズ形成が問題となり、熱・粒子負荷に耐える材料改良が必要である。ダイバータ熱負荷軽減方法（別掲？）との整合性が課題。

- **異種材料の接合技術** 【TRL？】
  タングステン、銅合金、低放射化フェライト鋼、SiC/SiC複合材料など、熱膨張率や機械特性の異なる材料を接合し、照射・熱サイクル下でも剥離や亀裂を生じさせにくい技術が必要である。

- **小型試験片照射後試験から大型・複雑形状部材の製造技術へ** 【TRL？】
  小型試験片で得られた照射特性を大型部材の照射特性評価につなげる技術の確立した上で、小型試験片で性能が確認された材料を、品質を保ったまま大型部材や冷却流路を持つ複雑形状の機器として量産する製造技術が未成熟である。

- **材料データベースと設計規格の整備** 【TRL？】
  材料ごとの照射特性、ばらつき、製造履歴、接合部特性を蓄積し、機器設計、寿命評価、安全審査に使用できる材料規格・構造設計基準へ落とし込む必要がある。

（３）炉材料技術分野の技術開発戦略が目指すべき目標

- ブランケット・第一壁用の低放射化構造材料の特定及び使用条件と寿命を含めた認証（203X年まで）

-材料組成・製造方法を確定する
-使用可能な温度、照射量、応力等の限界を明らかにする
-溶接部や接合部を含めた強度・寿命を評価する
-設計用材料データベースと設計許容値を整備する
-大量製造、品質保証、規格化・規制対応まで成立させる

※本分野の技術目標と達成時期をどのように考えていくか。

（４）取組の方向性 【P】

※今後の取組やプロジェクト組成をどのように考えていくか。

- BA（幅広いアプローチ）活動のIFMIF/EVEDAプロジェクトにおけるLIPAcのH+ビームの2027年１月開始を実現するとともに、2028年春に開始予定の9MeV運転/長パルス運転を完遂し、DONESへの円滑な技術移行を図る。また、DONESの遅延リスク等も考慮し、LIPAcも含めた中性子源技術開発の在り方についてQSTを中心に進める。

- QSTを中核として、BA（幅広いアプローチ）活動におけるIFERCプロジェクトの一環として、英国JETのDT暴露機器のトリチウム分析や原型炉容器内機器構造材料（E97、F82H、CuCrZr、タングステン）の機械特性評価、材料腐食データベースの開発等を実施中。2028までに完遂する予定。

- DONESについては、QSTを中心に建設期の貢献を進めるとともに、運用期の照射データ等の民間への共有やDONESにおけるスタートアップによる試験片の照射受け入れについて枠組みの検討を進める。

- QSTにおいて、照射後試験（PIE）施設・ホット施設の建設に2027年度より着手し、2034年度完成、翌年度からの運用を開始する。運用に当たっては、イノベーション拠点の主要な施設のひとつとして、スタートアップはもちろん、産学官の各プレイヤーが利用できるようなシステム（利用ルールや料金体系を含む）を構築する。

- NIFSを中核機関として、イオン照射データから核融合中性子照射効果を予測する手法を確立するための研究を行う。NIFSにおいて2026年度から整備されている複合イオン照射を行える先進炉材料開発設備を中核とし、大学独自の施設を合わせたグループを形成し、核融合中性子照射影響の解明／照射劣化モデルの構築／照射構造設計基準の構築を202X年までに完了する。

- （議論を踏まえて追加）

フュージョンエネルギー技術開発戦略（炉材料技術）技術開発ロードマップ（サンプル）

