

材料照射研究の現状と今後の課題 – 今後の照射研究の進め方(A-FNSも含む)  
**Instructions for Preparing Manuscripts for JSPF Annual Meeting**

濱口大、谷川博康  
 Hamaguchi, Dai Tanigawa, Hiroyasu

量子科学研究開発機構  
 QST

核融合原型炉実現に要求される構造材料開発のゴールは、照射特性に優れた材料の開発およびその材料を用いた信頼性の高い構造体の製作見通しである。核融合原型炉用の材料として開発が進められているものとして、ブランケット構造材料としての低放射化フェライト鋼やダイバータープラズマ対向材料としてのタングステン、冷却管用の銅合金等が挙げられる。材料開発の基本方針は、核融合中性子による照射影響を含めた材料特性劣化の予測式を構築し、各コンポーネントにおける想定負荷に対して健全性を担保できる範囲での設計および寿命策定を行う事にある。しかし、現状では核融合炉環境に相当する照射場が存在しないため、既存の原子炉を用いた照射実験により中性子照射データを蓄積し、原子炉照射データが核融合中性子照射データと同等とみなす事が可能な照射量上限、具体的には、核融合中性子照射で顕著となる核変換生成ヘリウムの影響がほぼ無視できる「臨界条件 (Critical condition)」を設定し、イオン照射実験や計算機シミュレーション等を駆使して、核融合中性子による特性劣化に対する機構論的解釈による予測式構築が必要である。また、最終的に現在計画中の A-FNS 等の核融合中性子に近いスペクトルを持った高エネルギー中性子源を用いた実証試験が必要となる。そのため、高エネルギー中性子照射施設が実現するまでに、原子炉における 80dpa 程度の重照射データの取得が必要である、との目標が設定されている。以下に今後の照射研究に対する課題と基本方針を記述する。

**【課題と基本方針】**

核融合炉内構造材料開発の課題は以下の3点にある。

- ① 想定される核融合炉内重照射環境での使用にむけて、ITER 等で利用される既存設計規格 (RCC-MRx等) が前提とする「規格上影響の無い程度の材料」を開発することは極めて困難(開発目標として非現実的)である。
- ② 脆化・硬化・延性喪失に代表される照射誘起材料特性変化によって、延性に富む金属では本来無

視し得た傷や欠陥の影響が顕著となり、結果としてデータのバラツキが大きく、かつ極端に低い特性値が出現する傾向が強くなる。

- ③ 炉内環境(高エネルギー中性子照射・強磁場・熱負荷)での実証試験は、炉内実環境下で実施することが本来的に期待されるが、これは原型炉が稼働するまで実現しえない。

よって原型炉建設判断時には、原子炉照射実験および(限定的な)早期核融合中性子源照射実験により、材料開発、照射効果評価、および照射効果を考慮した炉内構造物設計基準開発を進め、炉内構造物健全性の見通しを提示することになる。

炉内構造材料照射データベース整備においては、これまで獲得した原子炉照射データによってブランケット構造材料について一定の耐照射性が確認できつつある。しかしデータ規模は定性的な照射特性変化傾向を評価出来る規模にとどまる。そこで以下を原型炉建設判断時期までの基本方針とする。

- 照射体積が比較的に大きい原子炉を利用して、工学設計利用に耐える統計的信頼性を確保した核分裂中性子照射データを基盤データベースとする。
- 臨界条件までのデータ取得を主目的とし、核融合中性子照射データが原子炉照射データのばらつきから大きく逸脱しないことを確認する。
- 核融合炉内環境下材料特性変化予測は、核分裂中性子照射データから、イオン照射実験や計算機シミュレーション等の照射効果予測技術による補間によって、核融合中性子照射データを検証点として行なう。

**【照射データ取得方針】**

- ① 日欧の共同事業である BA 活動等で得られた成果および議論から、核融合炉内構造物設計技術開発においては、確率論ベース設計法(信頼性工学、リスクベース工学)の適用を検討する。これは次期 BA 活動(Phase2)における構造材料 R&D 課題の一つでもある。
- ② 炉内で使われる構造材料(低放射化フェライト鋼、W、CuCrZr 等)の開発においては、確率論ベース

設計において炉内構造物健全性判断に必要な確率分布関数で定義し得るだけの照射データを提供することを目標とする。必要となる1照射条件あたりのデータ点数は、その特性の統計的性質と要求精度および許容破損確率で決定される。

- ③ アクションプランの議論においては、2027年頃までに原子炉による80dpaまでの照射データ取得を完了することをマイルストーンとして設定されている。よって、80dpaまでの主たる特性について照射量・温度依存性データを、実用炉での利用の見通しの判断基準となる指標（ベンチマークデータ）として取得する。
- ④ 初期原型炉設計における炉内構造物の暫定目標照射量は、鉄鋼材料で20dpa、WおよびCuは5dpa程度が想定される。この照射量までの統計的信頼性の高い照射後特性データベースの整備を行なう。
- ⑤ キャビティ形成による体積膨張については原子炉を利用した照射実験では評価が困難なため、複合イオン照射実験による内部組織データを取得し、計算機シミュレーションによる理論的補間によりその傾向を予測する。
- ⑥ 確率論ベース設計を含む炉内構造物設計技術の検証は、簡易構造体の照射および照射後負荷実験により実施する。

【必要なデータ取得量】

- データの統計的性質の予測には、 $n=7$  (1条件・1材料)が最低限必要である。
- 最終的な必要データ点数については、統計的性質と設計要求から算出して決定する。
- データ分布が極値分布を示す場合は、 $n=20$  (1条件・1材料)が最低限必要となる。

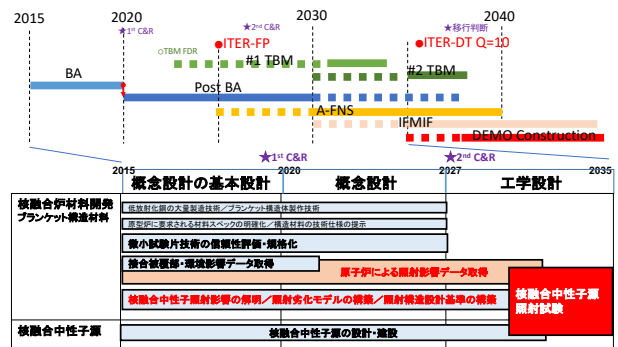


図1. 核融合原型炉実現に向けた開発スケジュール。

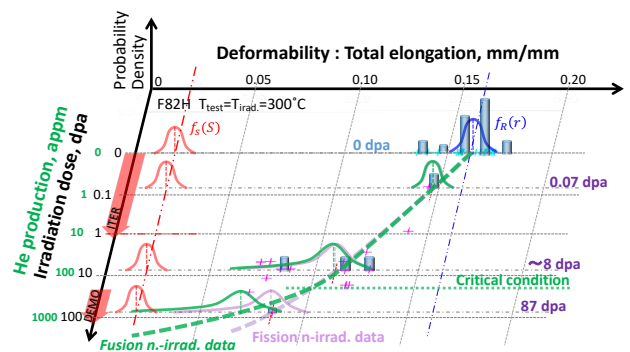


図2. 核融合原型炉に向けた材料開発の基本的考え方。原子炉照射データが核融合中性子照射データと同等とみなす事が可能な照射量上限「臨界条件 (Critical condition)」の設定と、イオン照射実験や計算機シミュレーション等の補間による予測式構築が必要。