

材料照射研究の次の 10 年に向けたアクションプラン
Action plan for the next decade of material irradiation research

(1) 核融合炉材料照射研究の現状と展望

(1) Current status and prospects of irradiation study on fusion reactor materials

*橋本 直幸¹

¹北海道大学大学院工学研究院

1. 緒言

核融合炉、特に原型炉以降の段階において、耐照射特性に優れた材料の開発が最重要課題の一つであるとの認識を共有し、これまで多くの研究者の尽力によって材料照射データの評価・整備が進められてきた。しかしながら、実際の核融合炉環境が存在しない現状では、核融合条件における照射損傷及び照射脆化に関する情報は模擬照射試験結果から類推せざるを得ない。本講演では、種々の核融合炉用材料のうち、第一壁・ブランケット構造材料及びダイバータ材料に焦点を絞り、日本国内の研究所及び大学等で進めている低放射化フェライト鋼、タングステン、及び SiC/SiC 複合材料の研究開発の現状と展望をまとめる。第一壁・ブランケット構造材料及びダイバータ材料は、プラズマに直接対向する最も厳しい使用条件に晒され、材料表面では放射、荷電・中性粒子等による熱負荷、材料内部では中性子エネルギーの熱エネルギーへの変換が起こる。したがって、表面近傍では高熱伝導率及び低線膨張率を有する材料、材料内部では原子のはじき出しと核変換効果による寸法変化や強度劣化に強い材料が必要となる。このような構造体各部における中性子照射損傷を適切に評価するには、現存の照射施設を組み合わせた試験をベースに、得られた情報を相互に関係づける必要がある。

2. 核融合炉構造材料開発の考え方

核融合炉構造材料開発においては、基本的な要求事項として、低放射化性能、構成元素の核的特性、さらには耐照射性が挙げられ、これらに対する核融合中性子照射の影響を明確化して構造設計上の許容範囲を定めることになる。核融合炉内環境は厳密な意味で核融合炉でしか実現出来ない。現状最も有効な模擬照射場は核分裂中性子照射場だが、それも 14MeV の中性子照射で起きる核変換反応は模擬出来ないため、並行して強力中性子源の開発やイオン照射や電子線照射実験施設を用いた環境模擬複合照射実験に基づく現象の理解を進める必要がある。

核融合炉環境において、材料は非常に高エネルギーの中性子やプラズマから来る熱負荷等に曝され、はじき出し損傷及び核変換に起因する材料特性が変化することで設計当初の健全性を担保できなくなる。したがって、核融合炉材料開発の基本的な考え方として、核融合炉環境で生ずる照射損傷による特性変化(劣化)の科学的解明と健全性評価及び耐照射性を有する先進材料の開発を念頭にしている。

2.1 低放射化フェライト鋼の研究開発

低放射化フェライト鋼とは、Mod9Cr 耐熱鋼 (T91 : Fe-9Cr-1MoVNb) をベースに低放射化を図った鋼の総称であり、核変換で短寿命の放射性核種となる元素に置き換えることで、被照射材料の放射化を低減させたフェライト鋼である。現在ブランケット構造材料として開発が進められているのは、F82H (Fe-8Cr-2W-0.2 V-0.04 Ta-0.1 C) 等の 8~9Cr 系フェライト鋼であり、製造実績やデータベースの拡充が進んでいる。その高温強度は一般的に利用されている 9Cr 系耐熱鋼 (Grade91) レベルである。耐照射性についてもデータベースが充実しているが、物理特性は本質的に Fe のそれに準じており、熱伝導率は銅合金の

*Naoyuki Hashimoto¹

¹Hokkaido Univ.

1/10 程度しかない。このため、ダイバータをモノブロックと想定した場合、定常熱負荷が厳しい部位では肉厚 1mm 以下の円管しか成立せず、耐蝕性が極めて大きな問題となる。

2.2 タングステン材料の研究開発

タングステン(W)は金属元素中最高の融点を有するため、溶融法で比較的容易に高純度材を作製可能だが、高密度で重く加工性が乏しいため、核融合炉の安全性を担保する圧力境界の構造体以外で、高熱伝導性が望まれる部位に対してのみ利用価値がある。ITER用機器・材料の基準の一つであるITER Gradeは、粉末焼結と熱間圧延で製造された工業用W材料の厚板材と同レベルの性能を有するが、さらなる健全性の担保には再結晶温度、DBTT及び高温強度の上昇が必要であり、これにはき裂進展を抑制する効果の有る結晶粒微細化が有効である。実用的には、数十～百トンレベルでの素材が必要となることから、製造性、組織的均一性、再現性、大量生産性、加工性、製造コストなども材料選択の重要な因子である。中性子照射効果の精査には、先ず、再現性および均一性が担保できる製法を確立し、原子炉やイオン照射施設を用いた照射実験を行うことが必要である。

2.3 SiC/SiC 複合材料の研究開発

SiC/SiC 複合材料開発における最大の成果は、セラミックス繊維で複合材内部を強化することで、セラミックス独特の軽量性、高硬度及び高温安定性などの性能を有したまま擬延性を備えたことにある。特に、高結晶性の SiC は優れた耐照射性能を有することがこれまでに実証されている。SiC/SiC 複合材料の利用により、核融合炉の発電効率の飛躍的な向上が期待されるだけでなく、SiC がもつ低誘導放射能・低崩壊熱特性による放射性廃棄物の低減が期待される。このように SiC/SiC 複合材料は、将来有望な核融合炉用先進材料として、商用炉まで見据えた核融合炉先進ブランケットへの適用を目指して研究開発が進められている。実用化に向けては、金属ともセラミックスとも異なる新しい概念で設計された複合材料を適切かつ安全に効率よく使っていくための指標が重要であり、その基本理念を確立するために、複合材料の挙動理解、特性評価に関する基礎研究が必要となる。また、このような発想で作られた SiC/SiC 複合材料は、核融合のみならず、軽水炉の事故耐性燃料、航空機のロケットエンジン部材など、幅広い産業での実用化も視野に入り、核融合炉材料研究で蓄積する多くの共通基盤技術の波及効果が期待される。

3. 今後の展望

核融合炉照射研究には、常時利用可能な核分裂中性子照射場が必要不可欠であり、日本のみならず海外に現存する研究用試験炉を適切に利用することが求められる。日本の材料試験炉である JMTR は、発電用原子炉よりも中性子生成量を高めた設計で、中性子束は発電用原子炉のそれより約 10 倍高い短時間で照射試験が終了可能であったが、現在は稼働していない。一方、世界に目を向けると、米国の高中性子束同位体炉 HFIR など比較的短期間で高い照射量まで達することができる研究用原子炉があり、高線量の中性子照射が不可欠である核融合炉材料及び核融合エネルギーの開発において重要な研究炉と言える。これらの研究炉で照射された種々の試験片は、放射性物質管理区域である照射後試験専用のホットラボラトリー棟において照射後試験に供することが可能である。特に、東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターは、様々な材料の機械的特性試験からナノスケールの微細組織解析が一貫して行うことができる世界有数の共同利用施設である。

加えて、荷電粒子照射場を利用した材料照射研究については、核分裂炉での中性子照射試験で評価が難しい研究課題への取り組み、微小体積で照射特性を評価する技術の発展、さらに超高压電子顕微鏡による照射下における微細組織変化素過程の精査などが、今後の材料照射研究開発の主流と言える。しかしながら、これらの模擬照射試験から得られる照射データは、実際の核融合中性子照射効果を完全に模擬するにはさらなる工夫が必要であるため、最終的には 14MeV 中性子照射場による実証試験を候補材料にて行う必要がある。これについては、現在、量子科学技術研究開発機構の BA 活動にて実施している IFMIF/EVEDA 活動後の展開として、先進核融合中性子源計画が検討されている。