

核融合工学部会セッション「原型炉戦略における先進ブランケット開発と今後の展望」

(3) 先進ブランケット用セラミック機能構造材料の検討状況
(3) Present status of R&D on ceramic materials as functional structure
of the advanced blanket system

野澤 貴史

原子力機構

1. 背景と目的

シリコンカーバイド (SiC) 材料は優れたエンジニアセラムックスとして幅広く産業利用されているが、中性子照射を受ける過酷な環境での優れた耐性、SiC が元来有する低誘導放射能や低崩壊熱などの利得もあいまって、有力な核融合炉内機器材料として開発が進む。

SiC/SiC 複合材料の開発当初は大学を中心に進められた研究活動も、核融合原型炉の研究開発の一環として、幅広いアプローチ (BA) 活動に係る国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) 事業が 2007 年 7 月に立ち上がり、現在では JAEA が主体となり、青森県六ヶ所村を拠点に全日本的な体制で研究開発を展開している。本活動では、特に液体リチウム鉛を増殖材とした先進ブランケット環境下において、十分なブランケット機能を得るための構造材料の一つとして SiC 材料を位置付け (以後、「機能構造材料」と呼ぶ)、具体的には、SiC 材料の照射下電気特性評価、ヘリウム/水素透過挙動理解、液体金属との共存性評価などの機能評価を中心にデータ蓄積を進めると同時に、これらの機能を担保するための構造安定性の評価、複合材料の規格・基準の基盤となる考え方の整理等を進めている。10 年間に及ぶ活動もいよいよ最終局面に突入し、平成 29 年度初頭の最終報告に向けて材料特性ハンドブック・データベースの整備に着手したところである。

一方、日本の主案である固体増殖ブランケット開発では、原型炉設計活動の中で、プラズマ立ち上げ時の局所的な熱負荷や、ディスラプション時の逃走電子による炉内機器の損傷懸念等の課題が明確となっている。最近では、高熱負荷・高中性子負荷への対策としてのリミター候補材として SiC 材料の利用検討も開始したところである。

さらに、中性子照射試験は核融合炉材料の重要課題であり、日米協力を通じてデータ蓄積と挙動理解が着実に進められている。本年度、一つのマイルストーンとして 100dpa までの照射後試験が完了している。

本講演では、先進ブランケット機能構造材料として着実に開発が進む SiC 材料について、研究開発の現状と課題について概説する。

2. 研究開発の現状と課題

2-1. SiC 材料の照射下電気特性

液体増殖ブランケットにおいて、流路インサート材として SiC 材料を使用する際、SiC の電気絶縁性能の確保は MHD 圧損において重要である。特に照射下における挙動理解が重要であり、BA 活動では様々な照射場 (ガンマ線、14MeV 中性子源等) を利用して評価を進めてきた。これまでに、SiC の表面状態の変化に起因すると考えられる照射誘起伝導度 (RIC) と照射誘起絶縁劣化 (RIED) を確認し、特に前者は明瞭な線量依存性を確認している。ただし、実環境下である高温では熱的效果が支配的となり、照射影響は無視できるほど小さいことが示唆されている。弾き出し損傷効果の詳細な評価が引き続き課題として挙げられ、イオン加速器による試験を継続している。

2-2. SiC 材料の重水素透過特性

トリチウム透過性能はトリチウムの閉じ込め、回収のため、ブランケットに必要な機能となる。化学気相蒸着法で作製した高純度 SiC の重水素透過係数は、600℃では SUS316 より約 3 桁小さく、800℃では約 2 桁小さいことが明らかになっている。また、950℃においても、SUS316 の約 1/40 (SUS316 の 550℃における透過係数とほぼ同じ) であり、優れた特性が実証されつつある。異なる製法の SiC 及び SiC/SiC 複合材料の測定を継続中であり、最終的には照射効果を含めた挙動理解を進めることが課題である。

2-3. SiC 材料と液体リチウム鉛金属の共存性

増殖材である液体リチウム鉛と SiC 材料の共存性の確保は、先進液体ブランケットの成立性を左右する重要な課題である。これまでに、回転腐食試験装置を用いて、高純度 SiC と焼結助剤を含む SiC/SiC 複合材料の評価を進めてきた。その結果、高純度 SiC については、静止場では腐食が一切進行せず、流れ場においてのみ反応層の生成が生じる点、生成した反応層はある時間を越えると終息する点を明らかにした。一方、焼結助剤を含む場合は、焼結助剤の優先的な反応による反応層の生成を確認した。いずれの場合も、リチウム鉛中に存在するリチウム化合物との反応が主要メカニズムであることを明らかにした。本結果からリチウム鉛の純度管理の重要性が改めて指摘され、関連して、高純度リチウム鉛の合成技術の開発を大学と共同で開始した。

2-4. SiC/SiC 複合材料の破損挙動

ブランケットに求められる機能の多くは、SiC/SiC 複合材料の損傷によって損なわれる懸念があり、そのため、複合材料の構造安定性の確保は機能を担保するうえで極めて重要な視点である。特に、複合材料はその多様な織物構造から異方性を示すため、その理解は第一に重要である。これまで、室温から 1000℃までの多軸負荷条件での強度異方性マップの特定、寿命評価における影響評価を中心にデータ蓄積を進めてきた。引張・引張モードにおいて厳しい評価を与える、試験モードによっては比例限度以下において損傷蓄積が開始しうる、ただし表面損傷が仮にあっても破壊が加速されることはない（ノッチ鈍感性）等の知見を獲得し、複合材料の設計上の取り扱いに関する理解を深めてきた。実環境下では温度勾配に起因する残留ひずみの取り扱いが特に重要であり、データ蓄積を継続すると同時に、特性を予測する解析手法の開発・高度化を進めていく計画にあり、特に照射効果を考慮した検討に着手している。

2-5. SiC/SiC 複合材料の重照射効果

リミターでの応用では、SiC/SiC 複合材料は最も厳しい熱及び中性子負荷に曝される。日米協力における HFIR 利用において、SiC/SiC 複合材料の 100dpa までの照射効果を初めて明らかにした。具体的には、600℃以下の照射では、10dpa を超えるあたりから高結晶性・化学量論組成 SiC 繊維の照射劣化に起因する強度低下が認められ、さらに 70dpa を超える重照射領域では繊維/マトリックス界面の劣化が指摘された。しかしながら、重照射領域で材料劣化は加速することはなかった点は特筆すべき新たな知見である。一方で、800℃を超える高温照射においては、一定の強度安定性が実証された。

3. 今後の展望

複合材料の物理的・化学的特性は原型炉設計の中心となる複合材料の機能を定める貴重なデータとなることから、基盤データベースとして整備していく。その際、核融合環境を考慮した条件での整理に加え、さらに、損傷とリンクした機能の整理は重要な視点であり、引き続き検討を進める計画である。

Takashi Nozawa¹

¹JAEA