

# 事故耐性燃料への適用に向けた NITE-SiC/SiC 被覆管の高温高压水環境下における 材料挙動に関する研究

中里 直史・本間 将人・柳谷 絵里・朴 峻秀・岸本 弘立・香山 晃  
室蘭工業大学

四竈 樹男・齋藤 正博  
八戸工業大学

## 1. 緒言

室蘭工業大学 環境・エネルギーシステム材料研究機構 (OASIS: Organization of Advanced Sustainability Initiative for Energy System/Materials) では軽水炉の安全性を向上させるための技術開発として、事故耐性燃料 (ATF: Accident Tolerant Fuel) の研究開発を推進しています。室蘭工業大学 OASIS では ATF の被覆管材料として有力な候補材である SiC 繊維強化 SiC 基セラミックス複合材料 (SiC/SiC 複合材料) の量産化製造プロセス開発から基本特性及び耐環境特性評価まで幅広い研究開発を行っています。この活動に関連して大型国家プロジェクトである経済産業省の革新的実用原子力技術開発費補助金補助事業の「革新的安全性向上を実現させるセラミック複合材料の燃料集合体への適用技術開発 (INSPIRE: Innovative SiC Fuel-Pin Research 計画)」を実施しています。

INSPIRE 計画の事業内容は、①これまでに室蘭工業大学 OASIS で開発してきた NITE (Nano-Infiltration and Transient Eutectic-phase) 法 SiC/SiC 燃料被覆管製造の要素技術統合、②当該技術によって製造された材料の基本特性及び耐環境特性評価、③原子炉を用いた炉内・軽水炉水環境における中性子照射下健全性評価と、多岐に渡ります。NITE 法は液相焼結法を応用した SiC/SiC 複合材料製造技術の 1 つであり、製造技術の中で唯一、原子炉内に装荷可能な高い気密性を有する SiC/SiC 被覆管の製造が可能なプロセスです。INSPIRE 計画の中でも八戸工業大学と共同で研究を行う、軽水炉水環境下における被覆管素材の材料挙動及び健全性評価は、NITE-SiC/SiC 複合材料を用いたシステムの通常運転時における安全性・信頼性を把握する上で重要な研究項目です。本研究では八戸工業大学が保有する高温高压水環境下材料試験装置を用い、非照射下における SiC/SiC 複合材料の軽水炉水環境を模擬した高温高压水環境下での浸漬試験を実施し、SiC/SiC 複合材料の健全性を確認することを目的としています。

## 2. 高温高压水環境下材料試験装置の概要

表 1 に 2015 年 12 月末、八戸工業大学から室蘭工業大学 OASIS に移設した高温高压水環境下材料試験装置の仕様を示し、図 1 に外観を示します。本装置は大きく分けて①試験装置本体、②水質調整タンク、③制御盤から構成されています。試験装置本体には多様な形状の試験片が挿入され、循環する高温高压水環境下において試験片への応力負荷や変形制御ができるようになっており、高温高压水環境下における材料の変形・破壊挙動への水化学 (環境水の組成) や応力・変位の影響を調べることができます。水質調整は水質調整タンクにて、窒素 (N<sub>2</sub>) ガスのバブリングにより溶存酸素量を制御します。溶存酸素量を制御するための水素 (H<sub>2</sub>) ガスラインは追加予定です。また試験中は 2 種類のイオン交換樹脂を用いた純化装置により環境水の純化を行います。環境水の水質管理として、オートクレープ入り口及び出口側にそれぞれ設置された溶存酸素計と電気伝導度計により管理しています。さらにサンプリングポートから試験中の環境水を採取することにより、試験中における材料からの元素の溶解挙動の評価も行えます。

本装置は軽水炉の炉心構造用金属材料や配管系材料、例えばジルコニウム合金やステンレス鋼などの研究に用いられてきました。室蘭工業大学 OASIS への移設に際し、金属材料だけではなく、セラミックス材料 (特にセラミック複合材料である SiC/SiC 複合材料) を試験するための装置の改造を行い、特色ある装置にしています。

表 1 高温高压水環境下材料試験装置の仕様

装置仕様	
温度	~300°C
圧力	~10 MPa
流量	~15 L/h
水質測定	溶存酸素、電気伝導度
負荷容量	~30 kN
制御モード	荷重制御/変位制御 (デジタルプログラムサーボ式)



図1 室蘭工業大学に移設した高温高圧水環境下材料試験装置の外観

### 3. NITE-SiC/SiC 被覆管の高温高圧水環境下における材料挙動

#### 3.1. 実験の概要

非照射下での NITE-SiC/SiC 被覆管の高温高圧水環境下における材料挙動を評価することを目的として、予備的な試験を行いました。本実験は 2015 年 10-11 月にかけて八戸工業大学に設置されていた装置を用いて実施しました。本試験後、高温高圧水環境下材料試験装置は長時間連続運転を行う事、水化学の制御の高度化、セラミック材料への応用の為の改造等を行うために、八戸工業大学から室蘭工業大学へ移設しました。

供試材は、外径 12 mm/ 内径 10mm 長さ 200 mm の NITE 法により作製した SiC/SiC 被覆管です。試験条件は温度:288℃、圧力:8.8 MPa、流量:15 L/h、試験時間:24 h で実施しました。試験後の評価として、重量変化測定、SEM による微細組織観察、ICP 発光分析による試験中にサンプリングした環境水の水化学評価を行いました。

#### 3.2. 結果

試験前後の NITE-SiC/SiC 被覆管の外観を図 2 に示します。試験後において目視で認められる腐食層やクラックの形成は観察されず、被覆管形状への影響も認められませんでした。図 3 に試験時間に伴う高温高圧水中の Si 濃度の変化を示します。試験開始から 12 h において Si 濃度は多少変動があるものの、ほぼ一定で推移しています。試験時間 12 h から 24 h においては急激な Si 濃度の増加が認められました。このような短時間での大きな変動は予想されたものとは大きく異なっており、今後の装置特性の検定も含めた再度の試験が必要と考えられます。いずれにしても、現在の装置条件で SiC/SiC 複合材料からの Si 溶出挙動が測定できる事は確認できました。一方、金属材料において溶存酸素量との比例関係が認め

られる Conductivity 値の結果からは、Si 濃度変化との対応は現状のところ明確ではなく、両者の相関も含め、定量的な評価のための基礎的な検討が必要です。また本試験の終了後、複数の試料において亀裂の発生や部分的な破損が認められました。この亀裂発生や破損は高温高圧水環境下において応力負荷や中性子照射等の照射損傷などが無い状態において起こっている事から、残留応力等の内部応力と高温高圧水環境との相互作用による応力腐食割れが起こったことが推測されます。SiC/SiC 複合材料における応力腐食割れの報告例は無く、昨年度実施したハルデン原子炉における軽水炉水環境下での中性子照射試験において認められた SiC/SiC 被覆管の破損事例との関連も含めた系統的な比較・検討により、中性子照射・軽水炉水環境下における SiC/SiC 複合材料の応力腐食割れの可能性を含む材料挙動への中性子照射や水化学条件の影響を明らかにすることを目指しています。

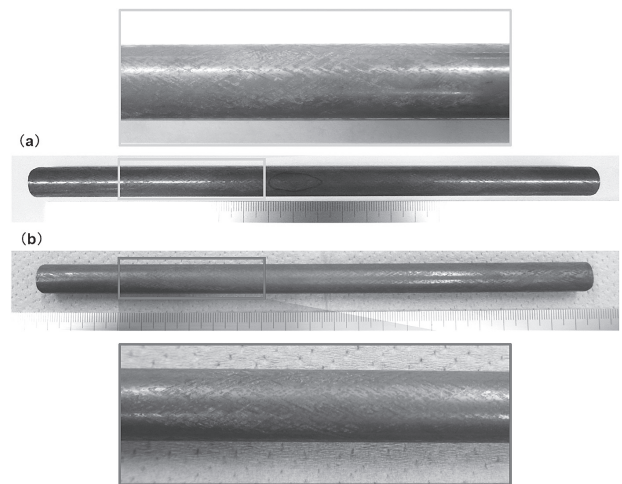


図2 試験前後の SiC/SiC 被覆管の外観：(a) 試験前、(b) 試験後

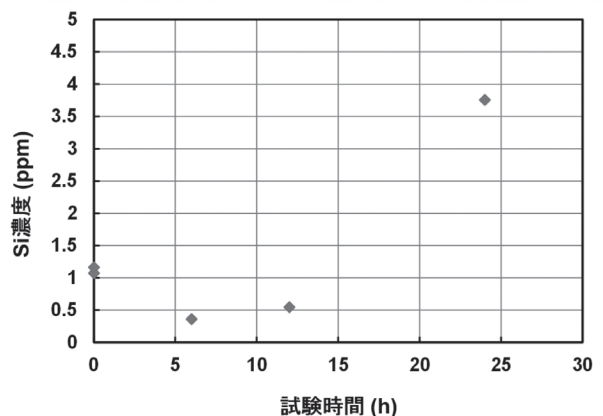


図3 試験時間に伴う Si 濃度の変化

### 4. 結言

室蘭工業大学 OASIS と八戸工業大学は共同で、軽水炉の更なる安全性の向上を目指した事故耐性燃料の研究開発を推進しています。中でも SiC/SiC 被覆管の非照射

下・軽水炉水環境における健全性評価の系統的な検討は重要な研究開発項目です。さらに SiC/SiC 被覆管の中性子照射下・軽水炉水環境における健全性評価結果との比較により軽水炉環境下における SiC/SiC 複合材料の健全

性評価を基礎的な理解に基づき行う事が出来るようにすることは重要であり、SiC/SiC 複合材料における応力腐食割れの発生を示唆する結果も含め、新たな学問分野を創出する可能性が見出されています。