

# 高度の安全性を有する炉心用シリコンカーバイト燃料被覆管等の製造基盤技術に関する研究開発

研究代表者 香山 晃 国立大学法人室蘭工業大学環境・エネルギーシステム材料研究機構  
参画機関 国立大学法人室蘭工業大学、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、  
国立大学法人大阪大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構  
研究開発期間 平成24年度～28年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

本事業は東電・福島原子力発電所での事故以来、より一層の安全性が求められている軽水炉の炉心部からのジルカロイ等の排除と高性能のセラミック複合材料の利用により軽水炉の安全性を画期的に向上させようとするものです。

本事業では将来の画期的な選択肢とされてきたセラミック燃料被覆管開発の加速により、我が国独自の安全性付与技術としてのセラミック燃料被覆管製造およびセラミック燃料ピンの製造の実用化へ向けた基盤技術を確立させ、早期実用化可能なオプションとする事を目指します。

具体的には現行の軽水炉燃料被覆管と同様の寸法で、要求される仕様を満たす ①SiC/SiC 複合材料製燃料被覆管を提案代表者らの国際特許であるナノ含浸遷移共晶相法（以下NITE法）により製造する事 ②模擬燃料ピン要素を作成する技術を統合し、照射実験用の模擬燃料ピンを製作する事 ③SiC/SiC 複合材料素材、燃料被覆管、模擬燃料ピンの基礎特性・軽水炉環境下特性・耐中性子照射特性等を評価する事を実施します。この事により、本研究期間内に SiC/SiC 複合材料製燃料被覆管を用いる燃料ピンが軽水炉炉心への高度な安全性付与に貢献できることを実証することを目的としています。

## 2. 事業計画の変更

本事業では SiC/SiC 燃料被覆管の中性子照射試験に材料試験炉（JMTR）を用いる計画でしたが、本事業開始早々の議論の中から事業期間内の JMTR の運転再開の見通しが立たないことが明らかとなったため、より確実な成果が得られるとして海外炉であるハルデン炉と BR2 炉への移行が決められました。これに伴う 4 年間（実質 3 年強）での計画完了の困難さをご理解頂け、5 年計画への変更を基本的に認めて頂きました。

## 3. 研究開発成果

### 3. 1 サブテーマ 1: SiC/SiC 燃料被覆管の製造と性能評価

#### (1) SiC/SiC 管製造

特性評価、照射研究及びアッセンブリ技術研究で必要とされる SiC/SiC 管を製造しました。研究用の長さ 50mm、外径 10mmφ、肉厚 1mm の SiC/SiC 管は内面、外面をモノリシック SiC 層で被覆しており、耐環境性を考慮した 3 層構造の SiC/SiC 管

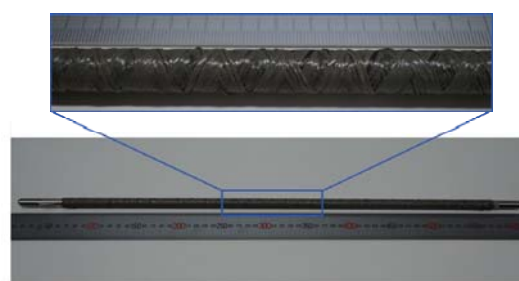


図1 長さ 500mm 長尺 SiC/SiC プリフォーム 外観

となっています。プリコンポジットリボン巻取装置、及びホットローラープレスフォーム装置を用いて長さ 500mm の長尺管プリフォームの作製を行いました。図 1 に長さ 500mm の長尺管プリフォームの外観を示します。プリフォームは所定の繊維配向を有しており、プリコンポジットリボン間には目立った隙間は認められません。

## (2) SiC/SiC 管性能評価

ジルカロイの挙動及び既に知られている SiC の基本的な特性を基に、SiC 燃料棒での各運転状態での振る舞いと健全性評価の流れを確認しました。

ホットセル内強度特性評価装置の内圧負荷システムを作製して、本事業への適用検討を行いました。SiC 管試験片の予備試験を開始するに際して内圧発生装置にセットし、内圧は正常に負荷されることを確認しました。また現行の軽水炉燃料集合体のうち代表的な材料を選定して、SiC 燃料集合体取扱い時の垂直落下および水平落下を模擬してその挙動を解析しました。FEM 解析結果の妥当性の検討なども行い、動的な挙動に追従できるように設定しました。

ハルデン炉側との打ち合わせにより次年度から開始する 4 年計画の概要に関する基本合意が形成されました。照射試験では長さ 750mm のロッドを 3 本照射すること、それぞれは 5 本のセグメントからなり、それぞれのセグメント内部には破壊やリーク検知用の Collapsible Bellow が挿入されます。これらの内容に基づきセグメントの概念設計を行いました。

## 3. 2 サブテーマ 2 : SiC/SiC 燃料被覆管のアッセンブリ技術

### (1) アッセンブリ技術

金属材料の接合で用いられる、接合表面の機械加工による残留歪を低減させる接合強度向上処理を併用する事とし、レーザー導入装置と精密研磨装置による表面処理技術と拡散・機械的接合等の諸技術の併用を前提としホットセル内で操作可能な端栓処理技術の候補について試作を行いました。

被覆管および端栓にねじ加工を施しての機械的接合とフィラーあるいはその他の手法による材料学的接合との併用による強度特性確保と気密性確保を基本的方針としました。接合面の精密研磨とレーザー導入装置を用いて大気中および減圧下でミリ秒パルスレーザー照射により接合面の表面処理を行って試料表面の残留歪除去効果の確認を行い、タングステン端栓とガラスを用いた SiC 端栓部の封止試験を行って、SiC 管の封止が可能であることを示しました (図 3)。

### (2) アッセンブリ評価技術

アコースティックエミッション (以下 AE) 計測データ処理・解析装置を試作し、引張試験中の



図 2 内圧負荷用の両端栓に取り付けた試験片外管 (組み立て後)

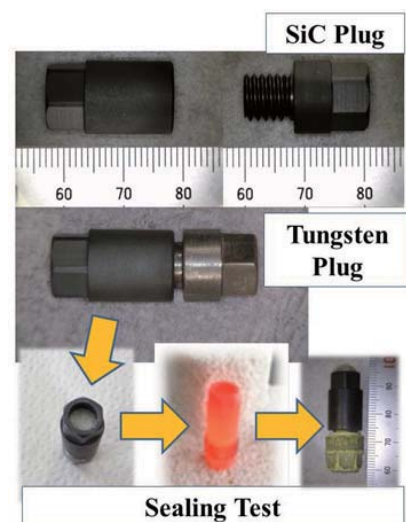


図 3 試作した帆擬端栓とガラスによる封止テスト

負荷応力と AE エネルギー蓄積の関係を特定し、破損の蓄積過程に関する基礎的知見を得ました。引張試験における AE 測定結果 (生データ) にはゲージ外で発生する AE シグナルを含むものですが、AE シグナルの検出が解析可能であることが確認出来ました。次に位置標定により、AE の発生位置と AE カウントの関係から比較的エネルギーの低い AE は負荷開始初期から、ゲージ部全体にわたって検出され、エネルギーの高い AE は最大荷重付近で局所的に発生していました。

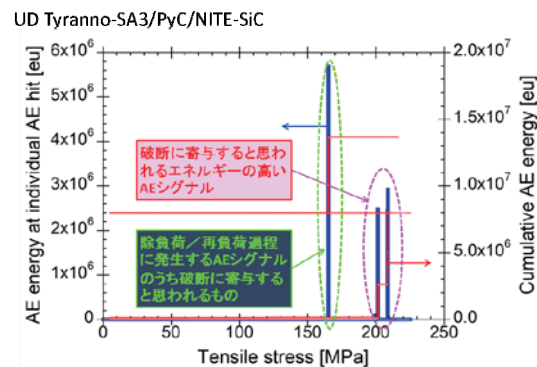


図4 負荷応力と AE エネルギー蓄積の関係

図4に示すように一つ一つのAEのエネルギーが桁違いで大きいことから、これらのAEに特徴づけられる破壊現象が複合材料の破断に強く寄与していることがわかりました。

### 3. 3 サブテーマ3: SiC/SiC 燃料被覆管の耐環境性影響評価

#### (1) 冷却材共存性評価

液体金属Naを対象とした冷却材共存性評価の基礎検討として、静的Na浸漬試験を行いました。本試験は、窒素ガスに置換したグローブボックス (以下 GB) 内で、ヒーター上に設置したるつぼで金属Na塊1gを溶解させて実施しました。GB内の酸素濃度は1~5%で、高速炉などの想定環境よりも高い環境でした。試験後試料の表面観察 (デジタルマイクロスコープ、SEM) より、以下の知見を得ることができました。①SiC表面へのNaの付着状態は、表面状態により影響されること、②付着した物質は現状において特定できていないが結晶性の物質であること、③長時間浸漬後もNaが付着しない平滑面が残ること、④長時間浸漬により、粒界部腐食の可能性が有ること。今後、より酸素濃度を制御した環境を準備し、流動状態を模擬した試験を実施し、長時間の浸漬実験や化学分析を活用して、高速炉への適用に不可欠な共存性に関する詳細な知見を得る計画です。

#### (2) 中性子照射影響評価

燃料照射用サブキャプセルの構造検討については、予定された寸法形状内に安全に装荷できることを確認しました。また試作試験として、内部部品機械加工確認用 (図5)、外筒と上下端栓はめ合い確認用及び外筒と上下端栓 EB 溶接の確認用の3種類のサブキャプセルを試作しました。端栓封し用の接合法として採用している電子ビーム溶接でいずれも安定した溶け込みは形成されており、問題となるキャビティー形成や割れの発生は認められませんでした。



図5 内部部品機械加工確認用サブキャプセル

### 3. 4 サブテーマ4: 工学・安全設計

#### (1) 適用性評価

SiC/SiC 複合材料を燃料被覆管として使用する際の基本的照射条件を設定し、中性子照射試験の核計算を行いました。以下、成果の一部である外筒の応力評価の結果を抜粋して示します。

JMTR キャプセル等設計基準では外筒に加わる応力は、圧力による応力（1次応力）と熱応力（2次応力）の総和が、許容応力（107MPa at 200℃）の3倍未満であることが要求されます。1次応力を強度設計で得られた結果から引用し、これに2次応力を加えた値を判定基準値の許容応力の3倍値と比較して表わしたものを求めました。なお、照射位置は、燃料領域の中心近くのJ-9と燃料領域の外側のG-6位置を想定したため、それぞれについて評価を行っています。

BWR条件では、外径40mmと60mmの各々について評価した結果、1次応力と熱応力の和は、いずれも許容値を下回っており、照射が可能であることが明らかとなりました。

一方、PWR条件では、外径40mmの場合、1次応力と熱応力の和は、許容値を下回っていますが、外径60mmでは、1次応力と熱応力の和が、許容値を超えています。PWRキャプセルの解析結果の例を図6に示します。

このため燃料領域で照射を行う場合、PWR条件を模擬する飽和温度キャプセルについては、外径40mmに制限されることが明らかになりました。これらの検討結果は来年度以降のBR2炉およびハルデン炉での照射実験にも適用可能であり、本年度の成果を基礎として核熱設計を実施していく予定です。

#### (2) JMTR 水環境下安定性評価

JMTR照射に向けた照射キャプセルの詳細設計を行いました。以下、成果の一部である飽和温度キャプセルの強度計算の結果を抜粋して示します。飽和温度キャプセルは、中性子照射試験中に外筒等の主要な部品が外圧及び内圧により生じる応力（1次応力）、並びに熱応力に対し健全性を維持し、原子炉の運転に影響を及ぼさないことが求められます。当該キャプセルの強度設計として、圧力及び熱応力に対する健全性について評価を行い、飽和温度キャプセルは照射試験時に加わる圧力によって生ずる応力に対し、健全性が十分確保できることを確認しました。本年度の成果はハルデン炉、BR2炉における照射試験に適用可能であると同時に、原子力機構で実施する加圧水環境下試験の基礎データとなります。

#### 4. 今後の展望

事業計画変更に伴う、可能な範囲での新たな作業も含め当初予定されていた業務項目をすべて実施し、所期の目標を達成しており、2年目の計画を計画通り実施中です。平成25年度は、特性評価用の燃料被覆管作製及び燃料被覆管の長尺化製造技術開発を行うとともに、アッセンブリ技術及び評価技術開発を推し進めます。また来年度から実施予定であるハルデン炉での照射実験のための準備として、照射キャプセルの設計、中性子束計算、照射試料の寸法決定等を行います。さらに耐環境試験用の試験装置（Na浸漬流動試験装置、水蒸気加熱装置）の試作及び予備試験を実施し、SiC/SiC燃料被覆管の材料特性データの拡充を図ります。

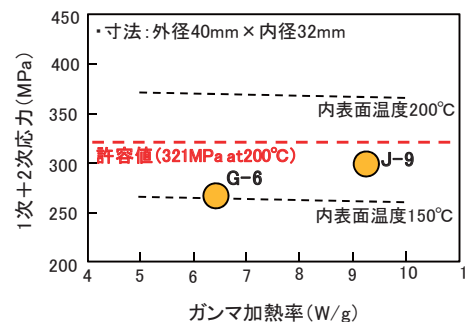


図6 外径40mmのPWRキャプセルの応力評価