

**原子力システム研究開発事業 ー基礎研究開発分野ー**  
**若手対象型 事後評価総合所見公表用フォーマット**

研究開発課題名（研究機関名） ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発 （国立大学法人京都大学） 研究開発担当者 機関名：国立大学法人京都大学 総括代表者：檜木 達也 機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構 代表者：堂野前 貴子 研究期間及び予算額 平成17年度～平成19年度（3年計画） 84,423 千円	
項目	要 約
1. 当初の目的・目標	<p>ヘリウムガス冷却炉心において、熱効率を 40%以上とする設計とした場合、He のホットスポットは最高 1000℃程度になると予想される。被覆材料及び燃料ではさらに高温となるため、被覆材料ではセラミックス、燃料では酸化物燃料および窒化物燃料がそれぞれ候補となっている。窒化物燃料を用いて高燃焼を達成するためには、窒化物燃料を 50%程度含み、固相マトリックスに高密度の SiC で形成される概念が有力とされている。しかしながら、窒化物燃料を均一に分散させ、マトリックスとして 95%を超えるような高密度の SiC を形成させるような技術は存在しない。実用化戦略調査研究（FS）フェーズ II における、ヘリウムガス冷却炉の技術的な課題としても、燃料集合体が第一に挙がっている。京都大学で開発した SiC/SiC 複合材料の作製技術を応用することにより、高密度で高純度の SiC 固相マトリックスを持つ、窒化物燃料開発のための基本技術を得ることが目的である。新たな作製方法として、脱炭処理により穴のある SiC を形成し、その穴に棒状の窒化物燃料、バッファ相を形成する技術開発を行う。熱効率 40%以上の高い経済性を有するガス冷却高速炉実現のために不可欠な、高燃焼度燃料の作製技術開発を目的とする。</p> <p>高密度な SiC を形成する技術を基本として脱炭処理により棒状の穴をあらかじめ作製し、棒状の模擬窒化物燃料を挿入し、無加圧で燃料に損傷を与えることなく、バッファ相を形成するという全く新しい手法を導入することにより、シンプルな手法により高性能なコンポジット窒化物燃料の作製技術開発を行う。燃料要素設計、プロセス・燃料要素開発、材料特性評価、再処理技術の開発を行い、燃料密度約 50%の緻密なコンポジット燃料の基本的な作製技術を確立する。</p> <p>本研究では、FS において得られた、ガス冷却高速炉の高燃焼度窒化物燃料の作製技術開発を目的としており、本研究で開発の対象とするのは、ピン型の窒化物燃料で、窒化物燃料を高密度の SiC 固相マトリックスで充填したコンポジット燃料である。本研究では、実際の燃料の代わりとなる核物質を含まない模擬窒化物燃料を用いる。窒化物は直径 0.5-1.5mm の棒状のものを用いることとする。窒化物模擬燃料、理論密度 50%の SiC バッファ相、実際に形成される SiC の熱特性等を考慮して材料設計を行う。材料設計に基づき窒化物燃料とバッファ相に相当する炭素棒と、原料となる SiC ナノパウダーと焼結助剤を用いてプリフォームを形成する。プリフォームを約 1800～1900℃で加圧焼結し、SiC を形成し、炭素棒を含む SiC を、約 700℃、大気中で脱炭処理</p>

を行うことにより、窒化物燃料用の穴を形成する。作製した穴にバッファ相分だけ小さな径の窒化物模擬燃料を入れ、バッファ相に相当する隙間に、SiC バッファ相の原料の流動性の高いスラリーを流し込み、最終的に無加圧で焼結することにより、窒化物燃料、バッファ相、高密度 SiC で構成される直径 15mm のコンポジット燃料の作製を行う。作製した構成要素、コンポジット燃料は、組織、強度、熱特性等の評価を行い、概念設計、材料設計に反映させ、目的とする高燃焼燃料の作製技術を実証する。

本研究では、文献調査や材料特性に基づき、開発目標設定、燃料要素設計、材料設計を行い、固相SiCマトリックス、バッファ相SiCといった構成要素の開発及び評価、コンポジット燃料製造技術開発及び評価を行い、これらの成果を再び設計などに反映させ、実照射環境を考慮した熱計算、応力計算を行い、現実的な設計値を示す。平成18年度までに、構成要素の開発及び評価を完了し、平成18年度から平成19年度でコンポジット燃料製造技術統合及び評価を実施し、目的とするコンポジット燃料の製造技術を示す。

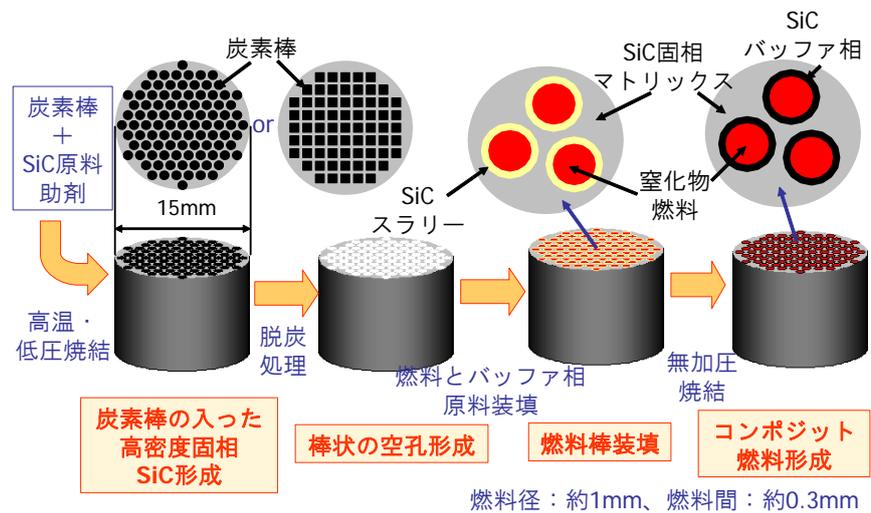


図 1 本研究で開発しようとしているコンポジット燃料作製方法

## 2. 研究成果

- ・当初予定の成果
- ・特筆すべき成果
- ・副次的な成果
- ・論文、特許等

### 【事業項目 1】 開発目標設定および燃料要素設計

#### ① 開発目標設定

本研究においては窒化物燃料要素、低密度 SiC バッファ相、高密度 SiC 固相マトリックスで形成される燃料概念を対象としている。しかしながら、窒化物燃料を均一に分散させ、マトリックスとして 95%を超えるような高密度の SiC を形成させるような技術は存在しない。高密度で高純度の SiC 固相マトリックスを持つ、複合型窒化物燃料（コンポジット燃料）開発のための基本技術を得ることが目的である。材料開発の目標となる固相マトリックス、バッファ相の密度、燃料間距離、バッファ相厚さ等を、17 年度は FS を基に、18 年度は事業項目 3 の特性評価で得られた物性値を考慮した設計に基づき、19 年度は実環境を考慮した要素設計を用いて、設定した。本研究で提案している棒状の燃料を用いた場合の燃料間距離、バッファ相厚さの合理的な設計値を示した。最終的なと

りまとめとして、本研究で開発した作製技術と得られる材料特性の検証を行い、将来の実用化までの指針を示した。

19年度は、照射下での燃料スウェリング、核分裂生成(FP)ガスを考慮した燃料要素設計により、燃料間距離、バッファ相厚さに関して検討し、合理的な設計値の評価は行ったが、平成17年度に設定した各構成要素の基本的な目標値は変更していない。固相SiCマトリックス、バッファ相SiCの密度の目標値は、それぞれ、95%、50%である。しかしながら、バッファ相に関しては、燃料のスウェリングを十分に吸収できるだけ、十分に低い強度が求められ、FPガス圧を下げるためには、より低密度が求められるため、密度は50%以下とした。

固相マトリックスに関しては、18年度までにSiCとしては十分に高い強度(圧縮強度及び引張強度は、それぞれ最大で1.1GPa及び400MPa程度)を持ち、炭素棒との反応の抑制、目標とする緻密性を達成する材料開発が終了した。19年度はこれらの強度特性及び18年度までに得られた熱特性をもとに、燃料要素設計を行い、燃料要素設計により得られた要件を満たした上で、作製技術開発で明らかになった材料の製作性を考慮した尤度を検討し、燃料間距離0.23mm程度以下、バッファ相厚さ0.15mm程度以上での窒化物燃料要素の分散制御技術を開発し、燃料製造の成立性を実証することを目標とした。実環境下での強度特性としては、主にクリープ特性が重要と考えられるが、同様に燃料要素設計から、1200℃以下で有意な変化が生じないことを目標とした。

燃料設計においては、FSフェーズIIの結果を参照し、9mmφのコンポジット燃料を基準に要素設計を行ったが、本業務が開始された段階においては、10～15mmφ程度が想定されていた。燃料間距離、バッファ相厚さは要素設計からの値を目標としたものの、作製技術開発においては、要素設計で要求される燃料間距離で、より多くの構成要素を含み、技術的にも困難な15mmφを開発目標とした。9mmφを15mmφにした場合、FSで想定された炉心性能を得るためには、燃料間距離を広げる方向に向かうため、技術的には、より容易になることが想定される。実際の設計ではガスプレナムにおけるFPガスの吸収等により要求される作製条件は緩和されることが想定されることを考慮すると、本業務において、設定した燃料間距離、コンポジット燃料径は、実際に要求される技術よりも尤度を持った技術開発目標である。

上記に示した目標は、技術項目2以降に示した作製技術、評価結果により達成されていることが示されており、高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究において、最も大きな技術開発課題に挙げられた高燃焼度燃料の必要要件を満たす基本技術が本業務により得られた。今後、実用化に向けては、実コンポジット燃料を含む耐照射特性試験と評価、固相SiCマトリックスと液体金属ボンドとの共存性評価、燃料の製造性も考慮した燃料被覆管を含む燃料体の開発、燃料および燃料体の遠隔製造技術の開発が必須となる。

## ② 燃料要素設計

17年度はFSから得られた、高燃焼窒化物燃料の概念と、文献調査から得られる燃料特性、単純形状の基本的な特性から、コンポジット燃料全体の熱計算、応力計算を行い、要素設計を行った。文献調査から、模擬窒化物燃料の候補材の選定を行い、候補材の実際の特性評価結果か

ら、本研究で最終的に用いる模擬燃料の検討を行った。18年度では事業項目3の特性評価で得られた物性値を取り入れて、設計を行った。19年度は実環境を考慮し、高燃焼度においても健全なコンポジット燃料の作製方針を検討するために、FPガスに起因した内圧に対する固相マトリックスの健全性を本公募研究で得られた材料物性を用いて評価し、設計が成立する基本的な燃料仕様として、燃料核径、バッファ相厚さおよび燃料間寸法の関係性を把握した。

解析は、燃料核を19個有するコンポジット燃料を対象として、FPガスによる固相マトリックス内の応力分布、さらにはSiC/SiC複合材料被覆管や液体金属ボンドも含めた熱計算によりコンポジット燃料内の温度分布を求めた。これより本業務で開発した固相マトリックスの強度評価結果を取り入れた燃料要素設計を実施し、要求される燃料核径、燃料間寸法及びバッファ相厚さを示した。本公募で取得した強度、熱等の材料特性、非常に薄い燃料間距離を達成する作製技術を取り入れた燃料要素設計により、燃料温度は当初設定していた1600℃(高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究における設計制限温度)よりも低くなることが分かり、これによりバッファ相厚さを低減し、燃料体積密度を高く設定することが可能となった。以上の結果を基に、表1に燃料仕様の最適化を行った結果を示すが、当初設定した燃料密度を達成し、尚且つ高燃焼度においても健全な燃料形態を得た。

表1 コンポジット燃料のリファレンス仕様プロセス・燃料要素開発

		仕様	
燃料形態	燃料核	形態	MN( <sup>15</sup> N100%濃縮)
		組成	高速炉多重リサイクル組成: <sup>238</sup> Pu/ <sup>239</sup> Pu/ <sup>240</sup> Pu/ <sup>241</sup> Pu/ <sup>242</sup> Pu/ <sup>237</sup> Np/ <sup>241</sup> Am/ <sup>243</sup> Am/ <sup>244</sup> Cm/ <sup>245</sup> Cm=1.1/54.1/32.1/ 4.3/ 3.9/ 0.5/ 2.0/ 1.0/ 1.0/ 0.0
	バッファ相	形態	低密度SiC
	固相マトリックス	形態	高密度SiC
	ボンド材	形態	鉛ビスマス
	被覆管	形態	NITE-SiC/SiC複合材料
燃料形状		外径	9.00 mmφ
		燃料核数	19
		穴径	1.50 mmφ
		燃料核径	1.20 mm
		バッファ相厚さ	0.150 mm
		燃料間寸法	0.232 mm
		ボンド幅	0.150 mm
		被覆管厚さ	1.00 mm
		燃料核密度	95 %TD
		バッファ相密度	20 %TD
		固相マトリックス密度	100 %TD
		燃料密度	
		(燃料核+バッファ相)	52.8 vol.%
	燃料密度(燃料核のみ)	33.8 vol.%	
炉心基本性能		取出平均燃焼度/ ピーク燃焼度	141 / 240 GWd/t
		平均燃料ペレット線出力	371 W/cm
		燃料最高温度	1150℃
		SiC 固相マトリックス最 高温	1092℃
		高温度	

## 【事業項目2】プロセス・燃料要素開発

### ① プロセス設計

複数の炭素棒を含む高密度 SiC を形成するための、原料粉末の選定、焼成条件、圧力のかけ方などの検討を行った。脱炭プロセスの雰囲気、温度の条件の検討を行った。低密度バッファ相形成のための、原料粉末の選定、焼成条件の検討を行った。

17年度は高密度 SiC 形成のための4種類の原料粉末分析を行うとともに、炭素棒無しで SiC を形成し特性評価を行い、それぞれの粉末に対する高密度 SiC を形成するための基礎データを得た。高温での強度及び安定性に優れた固相 SiC マトリックスを作製するために、助剤添加量の低減に重点を置いた研究を進めた。焼結温度を 1900℃まで上げることで、助剤添加量を低減しながらも、高強度・高密度の SiC の作製が可能となった。低密度バッファ相に関しては、比較的低温での作製を狙い、種々な前駆体ポリマーからの SiC 原料の選定および気孔率・気孔形状の把握を行った。有機ケイ素系ポリマーの常温及び熱分解後の様態は分子構造により異なり、特に、熱可塑性挙動を示すポリカルボシラン (PCS) に関しては噴きあがり現象は問題となることが示された。ポリマーにより、熱分解生成物の気孔サイズや分布、表面粗さ、亀裂の形状状態が顕著に異なることを見出した。熱酸化不融化处理を施すことで、PCS で問題となっていた噴きあがり現象を抑制したポーラス SiC の開発に成功した。炭素棒の脱炭処理条件の検討を行い、本研究で用いる処理条件を決定した。

18年度は複数の穴を形成しても亀裂の無い、強固な固相マトリックスを形成するために、平成17年度の結果から得られた SiO<sub>2</sub> 助剤と炭素棒との反応を抑制する方法の検討を行った。C を多く含む SiC 粉末と O を多く含む SiC 粉末の、2種類の原料粉末のブレンドをはじめとするプロセス検討を行った。脱炭プロセスにより形成された穴の表面にわずかに残った炭素は物理的に容易に取り除けることが確認された。穴の形成に用いる炭素棒の組成に関する検討を行った。バッファ相に関しては、平成17年度の結果に基づき、原料に PCS を用いることとし、SiC ナノ粉末とのブレンドによる気孔率や硬さの制御の検討を行った。

### ② 構成要素技術開発

炭素棒1本及び複数本を含む固相 SiC マトリックスを作製した。炭素棒の周りの SiC 原料に均一に圧力をかけ、焼結させる技術を確認し、高密度 SiC の形成を行った。焼結助剤と炭素の反応などを制御したプロセスの最適化を行った。無加圧で原料粉末、焼成温度、焼成時間を制御し、低密度バッファ相 SiC 作製技術の最適化を行った。

炭素棒1本を含む固相 SiC マトリックスを作製した。圧力方向に対する炭素棒方向を変え、作製した材料の助剤の偏析、特に、炭素棒界面付近の組織に及ぼす助剤量の影響を評価した。炭素棒の脱炭処理も成功し、本計画で提案したプロセスによる 1mm 程の穴を1つ持つ高密度 SiC の形成に成功した。焼結中での加圧方向に対する炭素棒の配置方向に関する検討を行い、焼結中での炭素棒の変形、焼結助剤の偏析を抑制するために、加圧方向に対して、平行に炭素棒を配置し、焼結することが有効であることを明らかにした。焼結助剤である SiO<sub>2</sub> と炭素棒の反応に

より反応層の形成が確認され、焼結添加剤である  $\text{SiO}_2$  の添加量を調整することで、反応層の制御が可能であることが分かった。酸素濃度が低く、炭素濃度の高い  $\text{SiC}$  原料粉末を用いた場合、反応層の形成をより抑制することは可能ではあったが、焼結の際の液相流動性が不十分であることと、炭素棒周りの  $\text{SiC}$  組織に多量の気孔が形成されることが確認された。

炭素棒以外を加圧するために、炭素棒の径に相当する穴の開いた板を用いて加圧を行うが、穴の加工精度を高め、炭素棒周りの低加圧領域を削減し、より均一に  $\text{SiC}$  に圧力がかかるようにした。使用する粉末を調製することにより、炭素との反応が懸念された焼結助剤である  $\text{SiO}_2$  を用いないようなプロセスの改良を行った。同時に 3 本の炭素棒を含む固相マトリックスを作製し脱炭処理にも成功し、亀裂無く複数の穴を持つ高密度の  $\text{SiC}$  を形成できることが示された。バッファ相に関しては、原料に PCS を用いるプロセスの最適化を行った。PCS に  $\text{SiC}$  ナノ粉末を加え、数種類のポーラス  $\text{SiC}$  を作製し、本研究で最終的に用いるバッファ相の作製条件の決定を行った。

### ③ コンポジット燃料製造技術統合

18 年度までに開発を行った構成要素の作製技術を統合した。穴の開いた高密度  $\text{SiC}$  に模擬燃料及びバッファ相  $\text{SiC}$  原料を入れ、バッファ相を焼成することにより、最終的に目標としている、15mm 径のコンポジット燃料に対して燃料密度約 50% のコンポジット燃料を作製し、燃料要素設計条件を満たす技術の実証を行った。熱特性評価用に構成要素を層状にした模擬板材の作製も行った。本技術開発の応用技術として、 $\text{SiC}$  のバッファ相、 $\text{SiC}$  の固相マトリックスを用いる他の燃料概念にも適用が可能であることを示した。

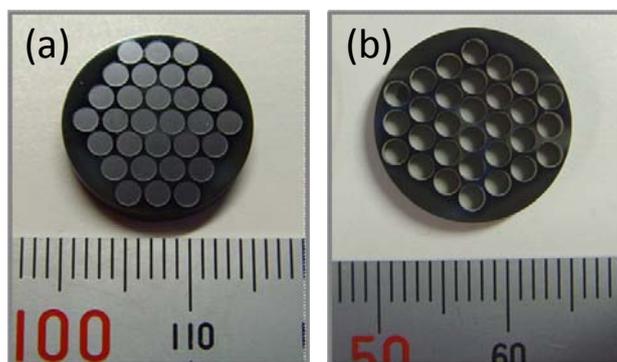


図 2 30 個の炭素棒及び円柱状貫通孔を有する  $\text{SiC}$  固相マトリックス  
((a) : 脱炭処理前、(b):脱炭処理後)

穴の開いた高密度  $\text{SiC}$  に模擬燃料及びバッファ相  $\text{SiC}$  原料を入れ、バッファ相を焼成することにより、コンポジット燃料を作製する基本技術が得られた。燃料要素設計により得られた最終的に目標としている、15mm 径のコンポジット燃料に対して燃料用の穴に相当する炭素棒を固相マトリックスの中に正確に立てるための治具の設計を行った。燃料及びバッファ相用の穴間距離約  $200\ \mu\text{m}$  で、図 2 に示すように、15mm 径の中に 30 個の穴を持つ固相マトリックスの作製に成功し、模擬燃料バッ

ファ相原料を入れ、無加圧焼結することにより、最終目的とするコンポジット燃料の作製に成功した。本技術は脆性材料のセラミックスの微細加工技術としても、汎用性の高い技術である。高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ II で最も有望な概念とされている六角ブロック型燃料集合体に関しても、本事業と同様に固相マトリックスに SiC を用いるため、本業務で開発した方法と同様に、燃料用の穴と冷却管用の穴の開いた固相マトリックスを先に形成し、燃料核、冷却管を入れることにより応用できることが示された。

#### ④ 再処理技術開発

コンポジット燃料を用いた燃料核および固相マトリックスの分離手法について検討した。熱膨張差を利用した燃料分離技術及び、既存の再処理技術の応用も含めた検討を行い、本研究で用いるコンポジット燃料に最適な再処理技術開発を行った。本研究では棒状の燃料を想定したコンポジット燃料を提案しており、球状の燃料を用いる場合と異なり、せん断することにより、容易に燃料を表面に出すことができるため、球状の燃料に比べて効率的に再処理が行えるものと考えられる。

コンポジット燃料を 1800℃までの高温で真空雰囲気により、熱処理を行うことにより、模擬窒化物燃料と固相マトリックスの分離に成功した。熱膨張係数の差により生じる応力とともに、バッファ相原料の PCS の熱酸化不融化处理による緻密化によりバッファ相の破壊が進行したものと考えられる。この結果より、再処理の観点でもバッファ相の原料を検討する必要性が示された。既存技術の応用として、湿式法で用いられる硝酸に、最終条件で作製した固相 SiC マトリックス、参照材として、焼結助剤量の多い試料について、既存の方法の条件を参考にして浸し固相 SiC マトリックスの安定性を評価した。

### 【事業項目 3】 特性評価

#### ① 構成要素評価

本研究での、コンポジット燃料製造条件に資するため、模擬窒化物 (TiN、ZrN)、作製した固相 SiC マトリックス、バッファ相 SiC の熱特性評価を行った。室温から 1100℃までの熱膨張係数の評価及び室温から 1200℃までの熱伝導率特性の評価を行った。熱膨張係数は、TiN で約  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、ZrN で約  $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、SiC で約  $5.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  の値を示した。熱伝導率は、SiC が測定温度上昇に伴い低下するのに対し、TiN および ZrN は温度上昇とともに増加した。各熱伝導率は全温度範囲を平均して、TiN で 48W/m/K 程度、ZrN は 30W/m/K 程度であるが、SiC は室温の約 40W/m/K から 1200℃の約 28W/m/K まで低下した。得られた熱膨張率係数、熱拡散率は、燃料設計へ反映した。

助剤量の異なる 2 種類の固相マトリックス SiC、バッファ相 SiC の透過電子顕微鏡による観察、EDS による組成分析を行い、微細組織に対する助剤や原料組成の影響の評価を行った。固相マトリックスにおいては、助剤量に依らず、粒径サイズは全視野に渡ってほぼ均一で、そのサイズは 100~500nm であった。助剤は、特に三重点には多く集まっていることが観察された。バッファ相においては、PCS90%材と、PCS10%材を比較すると、前者の方が圧倒的に非晶質領域が多く、結晶質部分は周囲が非晶質部分で覆われており、PCS10%材で見られたような均一で細

かい多数の空孔は確認されなかった。以上の微細組織観察結果から、マクロ組織は単純に結晶質と非晶質の成分比に応じた組織となり、緩衝材としては均一で細かい空孔を多く含む PCS10%材の方が、より多くの(周)応力を吸収できる可能性が高く、バッファ相としての性能は高いと考えられる。

固相マトリックス SiC の強度特性に及ぼす助剤の影響を 1300°C までの曲げ試験による高温特性評価を行った。圧縮試験による強度評価も行い、目標とする強度の倍近い圧縮強度が得られた。固相マトリックス SiC のうち、助剤の多い材料を用いて 1000~1500°C の範囲で bend stress relaxation (BSR) クリープ試験を実施した。助剤の無い参照材に比べて、1200°C を超える温度で、助剤量に依存する特性の劣化が見られ、曲げ試験においても 1300°C での劣化が見られた。助剤量とクリープ特性、微細組織の系統的なデータの取得と整理が重要であることが明らかになった。

バッファ相 SiC の熱膨張係数測定は、非常に脆いためバルク材からの切り出し加工は著しく困難であり 17 年度は失敗に終わったが、18 年度に両端の端面処理を行うことにより 1400°C までの昇温測定を行った。その結果、組成の違いによる熱膨張係数の差は小さいことが確認された。

## ② コンポジット燃料評価

バッファ相が脆いため、模擬窒化物燃料-バッファ相 SiC-固相マトリックス SiC の 3 層では特性評価用の形状が維持できず、バッファ相 SiC 部分で剥離した、模擬窒化物燃料-バッファ相 SiC コンポジット試料および固相マトリックス SiC-バッファ相 SiC コンポジット試料の 2 種類を用いて、1000°C を超える高温までの熱拡散率を測定し、各構成要素と整合性のある結果を得られた。コンポジット燃料のビデオマイクロスコープ、走査電子顕微鏡による観察を行った。強度特性評価は炭素棒が入ったものに対して、ナノインデントによる評価を行い、模擬窒化物燃料において、固相マトリックスのバッファ相との界面から 5 μm 以上離れた領域では強度特性に有意な差が無いことを確認した。

数種類の条件で作製した固相マトリックスの、BSR 法を用いたクリープ試験を 1000~1500°C の範囲で実施し、基本的なクリープ特性が得られ、作製条件とクリープ特性劣化との関係が明らかになった。焼結助剤の影響は 1300°C 以上で顕著に表れるものの、1200°C 以下では、非常に安定であり、燃料要素設計での熱計算結果の条件下でも問題とならないことが明らかになった。バッファ相に関しては、圧縮試験により、燃料の膨張を十分に吸収できるほど弱いことを確認し、燃料要素設計の条件が成り立つことを示した。

コンポジット燃料評価のため、試料の採取方法、採取位置について検討を進めた。さらに、固相マトリックスとバッファ相界面のナノオーダーでの電子顕微鏡等による評価に資するために、試験片の試料調製を行い、観察を進めた。その結果、コンポジット燃料の固相マトリックスとバッファ相の界面のうち、固相マトリックス側を観察したところ、界面近傍において、析出物の分布状況に差があることを確認した。また、BSR クリープ試験後の固相マトリックス評価を行うため、試料採取方法および採取位置について検討し、観察を進めた。クリープ変形した試料では、

無負荷領域、引張応力領域、圧縮応力領域で、それぞれ結晶粒径サイズの変化が確認され、クリープメカニズムとクリープ特性向上のための作製条件に関する知見が得られた。本事業で用いた温度条件、焼結助剤の条件の範囲では、いずれの条件においても当初目標とした高密度な SiC の形成は可能であるが、バッファ相近傍の固相マトリックスの組織、クリープ特性を考慮し、最終的な作製条件を決定した。

### ③ 再処理材評価

再処理試験後の試料に対する構造、組織の光学顕微鏡、走査電子顕微鏡等による観察を行い、本研究で提案している棒状燃料の再処理性の評価を行った。固相マトリックスの再利用を念頭に、特に分離界面の微細組織観察や表面形状、状態の分析を行い、固相マトリックス再利用の可能性と課題を明らかにした。

熱膨張差を利用した分離技術で得られた試料に関しては、分離後表面の組織観察、表面粗さ等の基本情報は得られた。この方法ではバッファ相がほとんど取り除かれたことが確認され、表面状態からはそのまま再利用できるといえる。熱履歴だけでは固相マトリックスに対して組織的な変化が起こらないことが明らかになった。既存の湿式法を参照し、熱濃硝酸による固相 SiC マトリックスの浸漬試験を行い、重量変化、表面、断面の組織変化の評価を行った。試料表面にほんのわずかな空孔が形成されたが、断面組織観察から表面 1  $\mu\text{m}$  程度の範囲であり、界面における組織観察結果からも SiC 自身が溶けだしたわけではなく、粒界に存在する助剤が抜けた出たことが明らかになり、内部に関しては、組織の変化は無かった。粒界の助材の喪失に伴い分離した SiC の量も 1 $\text{cm}^2$  あたり、0.3mg 程度であった。既存の再処理技術においても、再処理材利用のための燃料設計に依存した、接合プロセスが必要になるかもしれないが、固相マトリックスの健全性の観点では脱炭処理後の固相マトリックスとして十分再利用は可能であることが示された。

### 【事業全体】を通して

本事業では、従来の被覆粒子燃料の作製方法では、非常に困難であると考えられる燃料同士を接触させることなく、高密度に充填させる方法として、あらかじめ高密度で制御し配置された穴を持つ固相 SiC マトリックスを形成し、そこに棒状の燃料を充填しバッファ相を形成する方法で高密度なコンジット燃料を作製することを新たに考案した。機械加工ではなく脱炭処理を行うことにより、材料に損傷を与えることなく燃料用の穴を形成する。高圧を要する固相 SiC マトリックスを形成した後で、燃料を入れ、バッファ相 SiC を無加圧で形成するため、従来の被覆粒子燃料の作製方法のように燃料やバッファ相に高い圧力が掛かり、損傷を与えることは無く、高燃焼タイプでありながら、非常に健全なコンジット燃料が作製できるものと期待される。再処理の際、粒子型と異なり、棒状の燃料を用いるため、切断により、比較的容易に燃料を分離できると考えられる。本技術開発の達成により、「高速炉実用化調査研究」において得られた、高燃焼度窒化物燃料の概念が現実的なものとなり、高い経済性を有するガス冷却高速炉実現のための、重要な基本技術の一つが得られるものと期待される。再処理技術も同時に開発することによる低環境負荷特性、燃料の健全性による高い安全性も期待される。

論文、特許等については、以下のとおりである。

1. 口頭発表

- ・ 檜木達也、朴峻秀、朴二玄、堂野前貴子、三輪周平、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（1）開発計画の概要」、日本原子力学会、2008年春の年会、2008年3月、大阪大学
- ・ 三輪周平、堂野前貴子、檜木達也、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（2）燃料要素設計」、日本原子力学会、2008年春の年会、2008年3月、大阪大学
- ・ 朴二玄、檜木達也、朴峻秀、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（3）構成要素の技術開発」、日本原子力学会、2008年春の年会、2008年3月、大阪大学
- ・ 朴峻秀、朴二玄、檜木達也、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（4）コンポジット燃料製造技術統合」、日本原子力学会、2008年春の年会、2008年3月、大阪大学
- ・ 堂野前貴子、三輪周平、朴峻秀、檜木達也、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（5）構成要素の熱特性および微細組織観察」、日本原子力学会、2008年春の年会、2008年3月、大阪大学
- ・ Tatsuya Hinoki, Yi-Hyun Park, Joon-Soo Park, Shuhei Miwa and Takako Donomae, “Development of High Burn-Up Fuel with SiC Matrix for Gas-Cooled Fast Reactor,” Nuclear Fuels and Structural Materials for the Next Generation Nuclear Reactors (NFSM), June 2008, Anaheim, USA.
- ・ 檜木達也、朴二玄、朴峻秀、堂野前貴子、三輪周平、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（II）（1）開発成果の概要」、日本原子力学会、2008年秋の年会、2008年9月、高知工科大学
- ・ 三輪周平、堂野前貴子、檜木達也、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（II）（2）燃料要素設計（II）」、日本原子力学会、2008年秋の年会、2008年9月、高知工科大学
- ・ 朴二玄、檜木達也、三輪周平、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（II）（3）コンポジット燃料作製技術開発」、日本原子力学会、2008年秋の年会、2008年9月、高知工科大学
- ・ 堂野前貴子、三輪周平、朴峻秀、檜木達也、「ガス冷却高速炉用高燃焼度燃料の開発（II）（4）コンポジット模擬燃料の微細組織評価」、日本原子力学会、2008年秋の年会、2008年9月、高知工科大学

<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的・目標の設定の妥当性</li> <li>・研究計画設定の妥当性</li> <li>・研究費用の妥当性</li> <li>・研究の進捗状況</li> <li>・研究交流</li> <li>・研究者の研究能力</li> </ul>	<p><b>【目的・目標の設定の妥当性】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・窒化物燃料（MN）の新規作製法の基礎技術検証を目指し、類似の研究がなされていない状況で、本研究にチャレンジしており、妥当な設定であった。</li> <li>・従来のペレット方式でMNをつくるのではなく、わざわざSiC固相マトリックスに複数の細い燃料棒を通すというコンポジット形式にした目的のポイントであるバッファー相でのFPガス保持、軸方向への抜け等に対する検討がやや不十分であった。</li> </ul> <p><b>【研究計画設定の妥当性、研究の進捗】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・SiCの素材と窒化物についてチャレンジし、新たな燃料の作製技術という難題への取組にもかかわらず、計画通りに遂行されている。</li> </ul> <p><b>【研究交流、人材育成、研究者の研究能力、成果】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・研究室が有するSiC作製技術を有効に生かしてコンポジット燃料の作製に成功するとともに、その特性評価、設計検討もあわせて実施しており、期待通りの成果が得られている。</li> <li>・実際には困難が伴ったと思われるが、比較的大きなプロジェクトを良く纏めて、十分な成果を得ており、研究者としての成長に寄与したことが推定される。</li> <li>・大学（研究）、製造、設計の各部門の研究・技術者間の交流がはかられた。</li> </ul>
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・得られた成果は、論文として公表することに努めてもらいたい。</li> <li>・新しい概念の燃料形態に対して、製造技術開発とそれに関連させて強度、物性、マイクロ組織等を多角的な角度から総合的にとらえたアプローチに努力が認められる。</li> </ul>

<p>5. 総合評価</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• チャレンジングなテーマであるが、当初の想定通りの成果が得られている。</li><li>• 当初想定したコンポジット燃料をかなり高い精度で実際に作製してみせたことの意義は大きい。新しい形態の燃料が製造可能であることを示した価値のある成果が得られた。</li><li>• 今後、実燃料材を用いた実証および、燃焼や照射効果の影響が明確になれば、現在想定しているヘリウムガス冷却高速炉以外にも、展開が可能であろう。</li><li>• 窒化物燃料細径棒材の製作性・製作効率、コスト等を考慮すると、独創性・革新性はあるものの、実用化の可能性については乗り越えるべき課題が多い。</li><li>• 燃料ピンも含めた燃料トータルでの量産時製造性については、今後の検討を期待したい。</li><li>• 今後、炉心概念の発展に向けて、高温ガス炉用被覆燃料に関する本製造法の位置づけを明確にしておくことが不可欠である。</li></ul>
	<p>A) 想定以上の成果が得られ、今後に期待できる。</p> <p><input checked="" type="radio"/> B) 想定通りの成果が得られ、今後に期待できる。</p> <p>C) 想定通りの成果が一部得られなかった。</p> <p>D) 想定通りの成果が全く得られなかった。</p>