

京都大学エネルギー理工学研究所 教授

香山 晃

「低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料の開発」

1. 研究実施の概要

人々の生活や産業を支える電気エネルギーの供給に関わるエネルギー変換効率を改善することは、環境負荷の小さい社会を実現する上で大きな寄与が期待できる方策のひとつである。例えば、代表的な地球温暖化ガスである二酸化炭素の我が国における年間放出量は約13億トンと見積もられているが、このうち約40%は火力発電により発生しており、火力プラントにおけるエネルギー変換効率の大幅な改善は、地球温暖化の抑制に顕著な効果が期待できる。このような発電システムにおいて変換効率を制限しているのは、エネルギー変換機器に使用される耐熱金属の使用上限温度であり、セラミックスによるこれら金属材料の代替は永年の夢である。図1は発電用ガスタービンへの超耐熱機能構造材料の適用による、LNG火力プラントからの二酸化炭素排出量削減への効果を示したものであり、ガスタービンへのガスの入り口温度を上昇させることによる顕著な効果が理解できる。

この研究の狙いは、エネルギー変換システムにおける変換効率の革新的な向上とシステム構造の簡略化によるコスト低減・高信頼化を狙うことができる複合機能変換材料として、炭化珪素(SiC)基セラミックス等を取り上げ、本質的に耐熱性に優れる材料の新規開発、苛酷環境特性や信頼性の向上に代表される高性能化、及び成形・接合・気密化等の技術開発に基づくエネルギー変換システム実現のための技術基盤を形成することにある。

本研究実施は、セラミックス複合材料プロセスの開発、ナノ・マイクロ構造とマクロ特性や耐環境特性との相関の解明、環境影響損傷過程の理論的解析、機能付与の原理実証、各種評価技術の開発、実用機器における材料システムとしての共存性の評価等多岐に亘っている。

具体的には炭化珪素繊維により強化された炭化珪素基複合材料(SiC/SiC 複合材料)を中心に、タングステン合金繊維により強化されたタングステン基複合材料(W/W 複合材料)、及びそれらの複合化要素部材の開発やこれらを用いるシステム要素の設計・製作・特性評価等を行った。

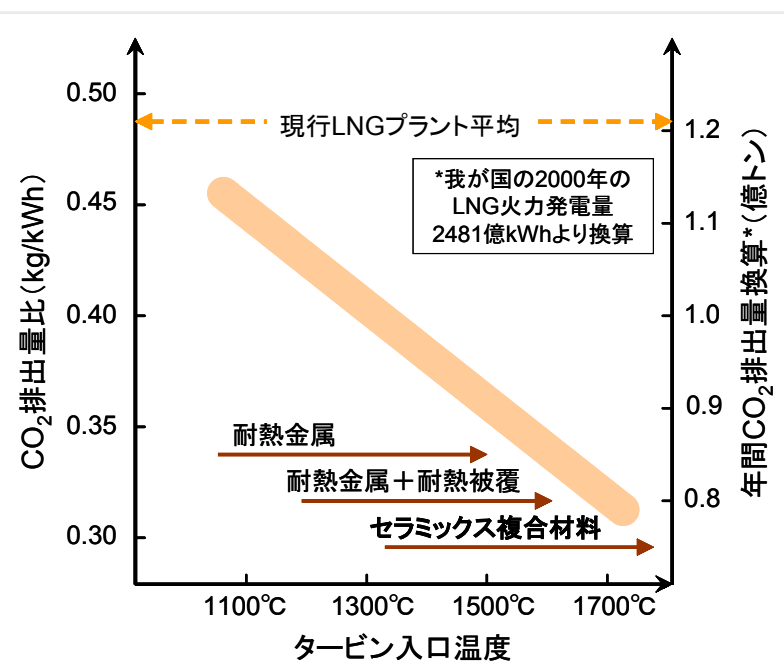


図1： 発電用ガスタービンへの超耐熱機能構造材料の適用による、LNG火力プラントからの二酸化炭素排出量削減への効果。超耐熱材料の開発は、その他のエネルギーシステム（ガス化石炭、ハイブリッド燃料電池、未利用化石燃料、第IV世代原子力、等）への適用を通じて、環境負荷低減に大きく寄与する。

SiC/SiC 複合材料は、超高温において優れた耐酸化性を有する炭化珪素を複合材料化することによりセラミックス特有の脆さの克服を試みる最先端材料であり、従来において航空宇宙分野や小規模燃焼システムの交換可能部品としての利用が試みられてきた。これらの研究を飛躍的に発展させることにより、従来困難とされてきた基盤エネルギー・システムの基幹部品に適合する信頼性、経済性と環境調和性を成立させつつ、さらに当該エネルギー・システムに特有な要求（熱伝導特性、気密性またはガス透過性、粒子・量子線耐性など）を満たす材料設計法の確立を試みるのが、本研究における材料開発の狙いであった。

さらに本研究では、開発した材料を用いてモデル・システムを構成することにより、エネルギー変換機能と構造メンバーとしての力学特性ならびに耐久性能を同時に発現する複合機能構造材料としてのパフォーマンスの実証と工学課題の明確化を試み、高品位な基盤エネルギー・システムとしての成立性の見通しを確立することを目標とし、当初の目標を十分に達成出来たと結論付けられる。以下に研究内容の構成概要を示す。

低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料

エネルギー生産における環境負荷低減を実現するための重要な要素は、エネルギー生成及びエネルギー変換における高密度化・高効率化及びエネルギー生産システムにおける材料サイクルの低環境負荷化であり、核反応を利用するシステムにおいては誘導放射化と崩壊熱発生の低減が重要課題である。

これらを達成するための鍵となる科学基盤として、超耐環境性複合機能構造材料の開発、エネルギー変換材料・システムの高性能化、などが挙げられる。

本研究は、低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料として、超耐環境性の複合材料を開発するものであり、材料設計・プロセス開発から、エネルギーシステムへの応用を経て、材料サイクルの完結に至る材料開発全般に関する、体系的な研究活動を実施した。

本目的に叶う可能性の高いセラミックス材料と高融点金属の2種類の材料カテゴリーの中から、特にセラミックス複合材料として炭化珪素(SiC)繊維強化型の炭化珪素基複合材料(SiC/SiC)及び、高融点金属複合材料としてタングステン繊維強化型のタングステン合金基複合材料(W/W)を、開発研究の対象とし、以下に示す活動を行った。

SiC/SiC 複合材料の開発研究

本来は硬くて脆い性質を有するセラミックスである SiC を高強度の SiC 繊維で強化することにより、力学特性やその他の物性値を目的に則して設計し、SiC 単体では得られない特性を得るものが SiC/SiC 複合材料である。

SiC/SiC 複合材料のエネルギー材料としての主な利点は、(1)軽量であり且つ強度特性に優れていること、(2)1000℃を優に超える高温での使用が可能であること、(3)耐熱材料にありがちな低温脆性を回避可能なこと、(4)電気伝導度が低いため誘導性のエネルギー損失

が無視できること、(5)半導体としての機能性が利用できること、(6)中性子照射環境で使用した場合の誘導放射能レベルが極めて低く、崩壊熱の発生がほとんど問題とならないこと、等が挙げられる。

このような背景から、既に各国の先進エネルギーシステムの概念設計において SiC/SiC が取り上げられている。しかしながら、本研究開始時点においては SiC/SiC 複合材料の開発は性急な目標達成を目指した大型プロジェクトと研究室レベルでの基礎研究に大別され、これらの設計で想定されている材料特性には不十分又は欠落している要素が多く、更には基本的な工学技術基盤も未整備であるなど、本格的な使用検討を進めるには極めて未成熟な状態にあった。

本研究における SiC/SiC 複合材料開発戦略は、大別して基礎製造プロセス開発、特性評価ならびに複合機能構造化よりなる。基礎製造プロセスの開発は、複合材料及びその構成要素の本質的な高性能化を意図するものであり、具体的には新しい強化繊維の開発、マトリックスの製造法や特性制御法の開発、繊維-マトリックス界面制御の高度化、積層法、3方向強化材料の製造法等の開発ならびに高度化を行った。繊維-マトリックス界面の最適化は複合材料の総合特性を設計する上での鍵となる技術要素であり、特に重点的研究項目であった。

特性評価の内容は、強度特性を中心とし、物理特性、化学特性の基礎的評価に加えて、原子レベルでのマイクロ構造解析（特に繊維-マトリックス界面を対象とする）や、中性子照射効果及びその複合場の効果などエネルギー材料に特有の環境因子に対する応答を、研究課題に含めた。複合材料の微視的レベルでの基礎特性やエネルギーシステムにおける諸環境因子の効果に関する評価法は十分に確立されていないため、斯様な評価法開発についても先行して実施し、後半での総合評価において活用した。

複合機能構造化とは、広義の機能化と構造化の任意の組合せを指す。機能性に関しては SiC 及びその化合物の熱的・電子的・光学的機能に関する基礎研究が主体となったが、特に熱的な特性や気密性に重点を置いて、システムの検討へと発展させていった。構造化の主な要素は成形技術と接合技術であり、要素技術開発を進めつつ核融合システム・高温ガス炉等を想定したエネルギー生成・変換用要素部材の試作を目指し、実物大の製造技術の実証にも成功したと結論付けられる。前述のように低放射化特性は SiC/SiC 複合材料の大きな利点のひとつであるため、放射化及びそれに対する不純物の影響に関する詳細な調査研究を実施するとともに、同位体調整により長期誘導放射化をほぼ完全に排除する技術の開発も試みたがこの部分は極めて基礎的な検討にとどまっている。

W/W 複合材料の開発研究

W/W 複合材料は、セラミクス系複合材料と同様に、常温において脆性材料である W を高強度の W 繊維で強化することを狙った金属基複合材料である。従来の金属基複合材料は Al 等の延性に富む材料をマトリックスとし高強度繊維（基本的には脆性材料）で強化する

ものであったのに対し、単体のバルク材料としては強度特性等に限界があり、基本的には脆性材料であるタングステンをマトリックスとし、高強度タングステン合金繊維（線引加工処理により、限界まで強度に関する総合特性を高めたもの）により強化する新しい概念の金属基複合材料である。

W/W 複合材料のエネルギー材料としての主な利点は、(1)1500℃以上の超高温での使用に耐え得ること、(2)複合材料化により低温脆性を回避可能なこと、(3)熱伝導性に優れること、(4)スパッタ損耗性に優れること、(5)中性子照射環境で使用した場合の長期的な誘導放射能レベルが極めて低いこと、等である。

W/W 複合材料の製造実績は皆無に等しく、研究実績も基礎研究の域に留まっており（研究開始時点）、そのエネルギーシステムへの適用性は未知数であった。しかしながら、前述のように W/W 複合材料には他の材料では代替できない極めて魅力的な性能が期待され、複合材料の設計概念はこれまでの研究実績に立脚したものであり、用いられるプロセスの要素技術は既存技術の改善の範囲にあると判断し、研究課題として選択した。

本研究における W/W 複合材料開発においては、第一段階において複合材料設計概念の実証が行われ、第二段階において複合材料製造プロセスの検討および、プロセス実証試験が行われた。

特性評価としては、物理特性、化学特性及び強度特性の基礎的特性の評価、原子レベルでのマイクロ構造解析等を実施するとともに、複合材料構成要素に対する中性子照射効果及びその複合場の効果等を原子プロセスに基づく機構論的な立場から解析し、長期的な視野での高融点金属基複合材料開発の基盤形成を行うことであったが、この課題は基礎的な検討での可能性の実証にとどまり、研究の後半での展開は十分に行っていない。これは SiC/SiC 複合材料での研究の展開に重点を移したためであった。

本研究における最も顕著な成果として、革新的な超耐熱・耐環境性セラミックス複合材料プロセス技術（ナノ・インフィルトレーション遷移共晶相〈NITE〉プロセス：特許出願中）の開発が挙げられる。本発明により、既存の工業材料では望めなかった高温強度・耐酸化性・信頼性・気密性・接合性・コスト効率等を極めて高い水準で満足する SiC 基セラミックス複合材料の製造が実証され、セラミックス構造材料の新しい概念を開拓した。本技術は、入口温度 1700℃を優に超えるガスタービン実現への展望を開くものであり、産業用エネルギー機器や大型輸送機器、その他の熱利用機器への適用により、エネルギーの生産・変換・貯蔵・輸送・利用に関わる効率や安全性を大幅に改善し環境負荷の低減に資することができる。また、開発した素晴らしい基本性能を持つセラミックス複合材料を、将来において産業用の基盤エネルギーシステムの部品として実用化するための方法を策定し、その基本的な見通しを得るに至った。

2. 研究構想

本研究の基本構想は環境低負荷型のエネルギー生産システムを成立させる鍵となる高性能・高品位なエネルギー材料の開発基礎研究として、耐熱性やその他の厳しい環境に対して優れた耐性を有する複合機能構造材料・システムを構築することであり、具体的にはセラミックス基及び高融点金属基複合材料の核融合炉、高温ガス炉、超高温燃焼システム等による電気エネルギー生成への応用を目的とし、炭化珪素繊維により強化された炭化珪素基複合材料 (SiC/SiC) やタングステン合金繊維により強化されたタングステン基複合材料 (W/W)、及びそれらの複合化要素部材の開発やこれらを用いるシステム要素の設計・製作・特性評価等を行うことであった。

耐熱システムとしての達成目標は発電用ガスタービンにおけるガス入り口温度を1300℃以上に出ることとし、熱エネルギーの変換システムや熱利用システムの作動環境として1000℃以上を実現する事とした。

5年間の研究計画の概要を図2(当初計画)に示すが、内容的には新しい技術開発の成功もあり、変更された部分があるものの大筋での計画変更は無く、当初計画通りに順調に実施された。

上記の研究計画を実施するために研究実施体制としては図3の構成とした。京都大学の研究代表者を中心とするグループは全体をまとめ、総合的な開発統括と評価を分担し、この活動を支援するものとして、3つのグループを設置した。以下にそれぞれのグループの役割を示す。

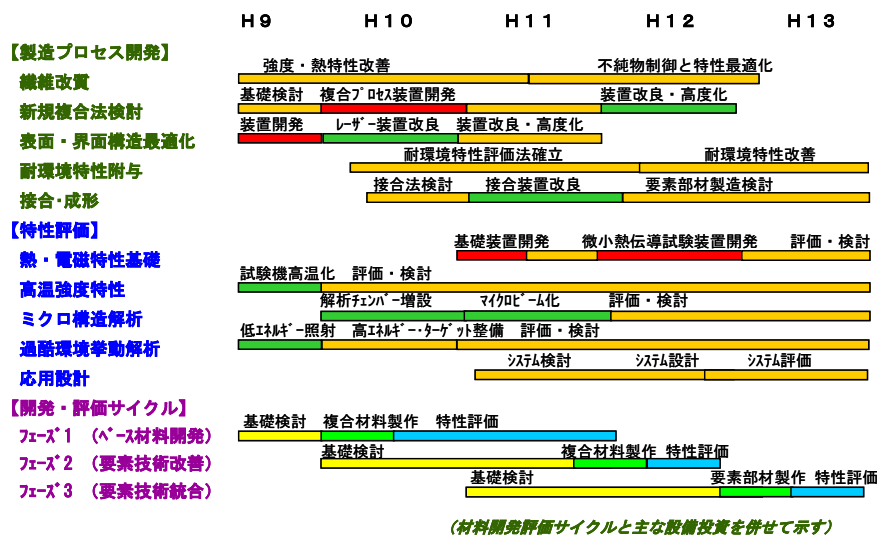


図2：研究計画概要

+ 材料システム総合開発評価グループ

セラミックス及び高融点金属複合材料に関わる応用設計、製造プロセス開発・統合、力学物性評価、熱・電磁特性評価、耐環境性付与及び評価、理論・モデリング、材料サイクル設計等を行い、低環境負荷エネルギー材料システムの提案と基礎的実証を試みた。

＋ CVI グループ

気相反応浸透法(CVI)法による高温、耐照射性に優れたセラミックス繊維/SiC 複合材料の開発を目指し、組成及び組織を制御した C,SiC 等による繊維/SiC 界面構造の最適化を図ることを目的とする。さらに、均一でかつ高密度・高強度の SiC/SiC 複合材料の研究開発を行った。

＋ 表面改質・接合グループ

SiC/SiC 複合材料の耐環境特性の向上および接合技術の開発を目的として、SiC/SiC 複合材料への W 被覆製造法（電子ビーム PVD 法）の開発を行った。また、被覆の接着強度も含め、SiC/SiC 複合材料および接合体の強度特性評価のための、新たな解析法の開発も行った。

＋ プリカーサー開発グループ

有機ケイ素ポリマーは SiC 繊維の製造や複合材料製造の際の繊維表面被覆、マトリックス形成等における重要な素材であり、各種のポリマーを混合して用いるブレンド法、および熱処理などによるハイブリッド化に重点を置き、熱分解後の収率、組成、空隙率や形態、強化材-マトリックスの密着性制御を目的として研究開発を行った。

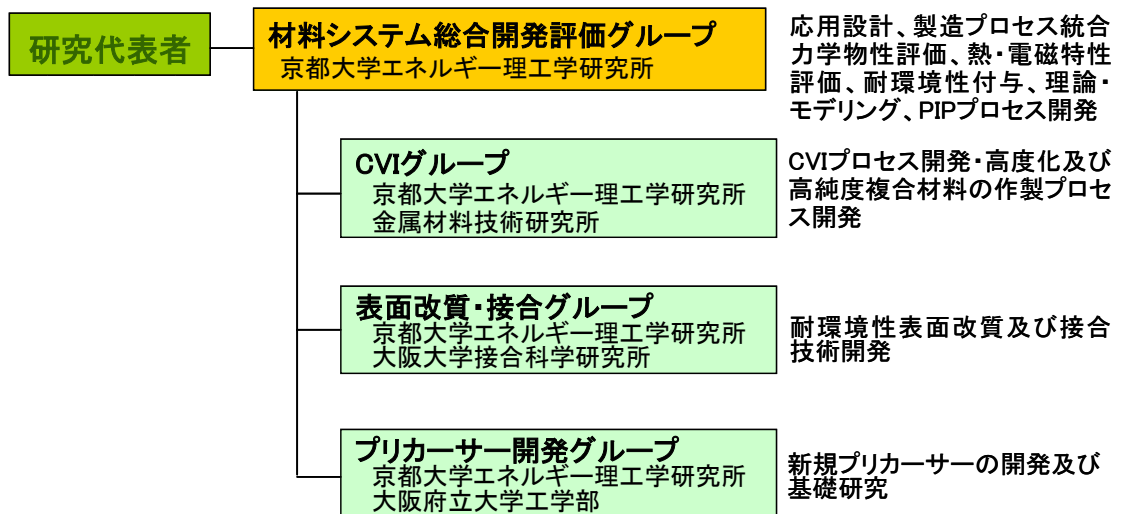


図 3： 研究実施体制

該当年次における研究内容を以下に示すが、活動内容によっては複数のグループの共同実施もあり、大規模でない研究組織が有機的に連携し、効率よい活動が出来たことは特筆される。

【平成 9 年】

- CVI 法と PIP 法による第一世代 SiC/SiC 複合材料の製作を進める。そのための設備整備を行い、プロセスパラメーターの抽出と最適化への指針について検討する。

- SiC ファイバーの高度化への基礎的検討を行う。検討方針は、高純度化とプリカーサーへの金属元素添加の2つとする。
- 繊維表面改質基礎としての CVI 法の最適化検討を進め、複合化プロセスとの適合化検討も行う。
- 高温強度特性評価手法の検討を行い、疲労強度評価を重点とした装置製作を行う。
- 耐環境性付与評価法の基礎検討として、加速粒子照射研究の設計・製作を行う。
- W/SiC 接合法の基礎的な検討を行い、界面構造設計のモデリングを進める。

【平成 10 年】

- 組織・強度相関の解明のために、破壊モードの実験および計算機科学手法での検討を行う。耐環境性の評価については原研の JEIBIS、東大の HIT での実験を行う。併せて、京大二重ビーム同時照射装置の整備を進める。
- CVI 装置にガス供給制御システムを装着し、C-SiC 多層被覆法の検討や新規繊維の検討により nD-SiC/SiC の高温強度の改善を進める。
- 粉末法及び CVI 法による SiC/SiC の複合化及び形状付与の検討を行い、2D-管材、3D-板材の製造の検討を行う。
- PCS+M 前駆体による繊維特性の改善や PVS+SiC ブレンドによる PIP 法の改善を進める。
- 反応焼結法プロセスの最適化や反応焼結法による複合化検討を行う。
- 複合ビームによる SiC への W 被覆の検討や W/W 複合材料製造の基礎的な検討を進める。
- CA ガラス等による接合法の検討を進める。
- エネルギー変換機器製造モデル要素部材の仕様検討を進める。

【平成 11 年】

- SiC/SiC 複合材料等の高性能化

本計画開始時より展開してきた3種類の SiC/SiC 複合材料作製プロセス（PIP 法、CVI 法及び RS 法）の高度化を軸として、SiC/SiC 複合材料の高性能化を進める。PIP 法による SiC/SiC 複合材料に関しては、2種類の新規ポリマー・プリカーサーであるポリビニルシラン（PVS）及びポリメチルシラン（PMS）を用いて、平成 10 年度までにそれぞれ従来法による複合材料を大きく上回る性能を達成しており、本年度においては工業プロセスの基盤となる製造法を確立し先進標準材料として多様なキャラクター化を進める。CVI 法では 10 年度までの金属材料技術研究所及びオークリッジ国立研究所での開発基盤技術に立脚し、安価で再現性の高い SiC 繊維強化 C/SiC 積層マトリクス複合材料の開発に主眼を移す。また、平成 12 年度までに現在の要素技術レベルにおける最高性能の材料開発を達成するため、CVI 法と RS 法の複合プロセスにてその原理実証を行う。以上の代表的な高性能複合材料開発に加えて、長期的視野での基盤技術や周辺技術の開発を平行して継続的に進める。

- SiC/SiC 複合材料等への超耐環境性付与とその評価

本計画にて想定している過酷環境要素である超高温冷媒ガス雰囲気、粒子・量子線場ならびに液体金属・熔融塩共存等の環境における、材料及び材料システムの挙動を評価し、その健全性を維持するための技術開発を行う。超耐環境性の評価には京都大学エネルギー理工学研究所設置の高度エネルギー機能変換実験装置及び本計画にて平成9、10年度に調達したシングルエンド加速器システム、高精度制御照射計測システム及び高温ガス雰囲気材料試験装置などを利用する。SiC/SiC 複合材料への超耐環境性付与の手段として、SiC 繊維、界面及びマトリクスの各構成要素の組成・組織・構造制御による超耐環境化、セラミクス・ガラスセラミクス・高融点金属による表面被覆、加速器を用いた表面改質などを試みる。これらの研究の一部は既に十分に有効性や実現性を検討し試験を開始しているが、本年度においては本項目をより重点的かつ総合的に推進する。

- 要素技術統合と先進エネルギー変換システムの検討

SiC/SiC 複合材料等の高性能化ならびに超耐環境化の要素技術を統合することによりエネルギー変換機器要素システムを試作・実証し、環境低負荷型の先進エネルギー変換システムの提案と基盤技術を確立することが、本研究計画後半部分における主要な課題である。本年度は本計画の中盤に相当するため、要素システムの製作に必要な SiC/SiC 複合材料等の成形技術、接合技術、要素部品としての被覆技術の研究開発、脆性材料の組合せによる擬延性を有する構造材料を用いた新しい構造設計のための基礎工学（重要な強度特性要素の特定と工学設計への考え方）の推進、エネルギー変換機器要素システムの仕様策定などを実施する。

【平成12年】

- SiC/SiC 複合材料等のプロセス高度化

本計画開始時より展開してきた SiC/SiC 複合材料作製プロセスについて、高性能先進 SiC 繊維の特性を活かし製造コストが低く再現性の高い手法に対象を絞り込みプロセスの完成度を高める。代表的な高性能複合材料プロセス高度化に加えて、長期的視野での基盤技術や周辺技術の開発を平行して継続的に進める。

- SiC/SiC 複合材料への超耐環境性付与とその評価

SiC/SiC 複合材料への超耐環境性付与として、化学量論組成化、マトリクス組織均一化、界面の耐環境性化、マトリクスへの酸化物添加、表面被覆及びイオン注入に手法を絞り、研究の進捗状況に応じてプロセスの確立若しくは原理実証を試みる。過酷環境因子として粒子線場（弾き出し、スパッタ等）、不活性ガス及び酸化高温雰囲気及びこれらと繰り返し応力場等の複合環境を取り上げ評価項目とする。

- SiC/SiC 複合材料等の接合プロセス開発

SiC/SiC 複合材料の接合プロセスとしてプリセラミック・ポリマー法、反応焼結法及びガラス・セラミクス法を取り上げ、プロセス開発・高度化、接合強度及び安定性の評価な

どを実施する。併せて接合特性評価法の標準化を試みる。さらにプロセス基礎開発をもとに大気中接合プロセスを検討する。

- 要素技術統合と先進エネルギー変換システムの設計

SiC/SiC 複合材料等の高性能化ならびに超耐環境化の要素技術を統合することによりエネルギー変換機器要素システムを試作・実証し、環境低負荷型の先進エネルギー変換システムの提案と基盤技術を確立することが、本研究計画後半部分における主要な課題である。本年度は、SiC/SiC 複合材料等の成形技術、接合技術、要素部品としての被覆技術の研究開発をさらに進展させ、熱交換器及び核融合 SiC/SiC ブランケットの基礎設計を実施し、可能であれば要素システムの試作を開始する。

- SiC/SiC 複合材料のリサイクルプロセスの基礎研究

SiC/SiC 複合材料の再生・再利用の方法とプロセス技術について検討する。プロセスとしては粉碎によるパウダー化を出発点として、モノリシック及びポーラス SiC の生成、燃焼システム用ホットガスフィルター等の成形、SiC/SiC 複合材料のマトリクス骨材への適用等を予備検討対象とする。

【平成 13 年】

- 本研究開発プロセスに基づく SiC/SiC モデル構造部品の製造

本計画開始時より展開してきた SiC/SiC 複合材料作製プロセスの中から、特に本計画にて開発した化学量論組成 SiC ポリマー・プリカーサーを用いたポリマー含浸焼成法ならびに遷移液相焼結法によって、モデル・システム評価のための部品を製造する。またこれらのプロセス及び CVI 法、反応焼結法についても、これまでの研究実施により一層の高性能化への展望が開けつつある要素技術に特に注目し、プロセス高度化に加えて、長期的視野での基盤技術や周辺技術の開発を、規模を限定しつつ平行して進める。

- モデル部品を用いたシステム要素性能の評価

製作したモデル部品を対象として、(1) 基礎力学・機械特性評価及び気密性評価等によるシステム成立性の評価、(2) 熱伝導度及び耐熱性の評価に基づくエネルギー変換システムまたは熱交換器システム性能の見積り、及び(3) 疲労寿命、熱負荷サイクル試験等による寿命評価、を実施する。これらの結果に基づいて 2002 年度までに開発材料を用いたエネルギー変換システム実証への道筋を明確化するとともに、今後における材料開発やシステム構成に関わる工学課題や改良の方向性を明らかにする。

- 高熱伝導度 SiC/SiC の開発と熱特性随意設計法の確立

エネルギー変換・交換装置において熱伝達を担う要素部品の熱伝導特性は、システム性能の最適化に特に重要となる。ここでは、複合材料を構成する SiC 繊維の熱伝導度制御と 3 次元強化アーキテクチャのテイラリングならびにマトリクス熱特性の制御により、従来のセラミックス系複合材料では実現できなかった高い熱伝導度を有する SiC/SiC 複合材料を開発するとともに、熱伝導特性を異方的に随意に制御する材料設計法の確立を試みる。

- SiC/SiC 複合材料への超耐環境性付与とその評価

SiC/SiC 複合材料への超耐環境性付与として、化学量論組成化、マトリクス組織均一化、界面の耐環境性化、マトリクスへの酸化物添加、表面被覆及びイオン注入の手法に関連して研究開発を実施してきた。これらにおいて一定の成果を挙げてきたことは報告しているとおりであるが、特に表面被覆やイオン注入、イオンビーム・ミキシング法等のプロセスを開発・実証を試みる。過酷環境特性の因子として粒子線場（弾き出し、スパッタ等）、活性酸化及び受動酸化雰囲気及びこれらと繰り返し応力場等の複合環境を取り上げ評価項目とする。

- SiC/SiC 複合材料等の接合プロセス開発

2000 年度に引き続き、SiC/SiC 複合材料の接合プロセスとしてプリセラミック・ポリマー法、反応焼結法及びガラス・セラミクス法を取り上げ、プロセス開発・高度化、接合強度及び安定性の評価などを実施する。併せて接合特性評価法の標準化を試みる。さらにプロセス基礎開発をもとに大気中接合プロセスを検討する。

- SiC/SiC 複合材料のリサイクルプロセスの基礎研究

SiC/SiC 複合材料の再生・再利用の方法とプロセス技術について検討する。プロセスとしては粉碎によるパウダー化を出発点として、モノリシック及びポーラス SiC の生成、燃焼システム用ホットガスフィルター等の成形、SiC/SiC 複合材料のマトリクス骨材への適用等を予備検討対象とする。

【平成 14 年】

本計画における 14 年度の研究開発は原則としてすべて材料システム総合開発評価グループの主導のもとに実施する。このため、13 年度以降の追加となる評価研究実施機関はすべて同グループの傘下とし経理も同グループとして一括して管理する。計画発足当初から研究開発に携わってきたその他のグループは、当初の開発目標をほぼ達成しているが、構成は特に変更せず各グループとしてサブタスク完結のための最終的なまとめの作業を実施する。

- 本研究開発プロセスに基づく SiC/SiC 部品実用化・製品化の推進

本研究計画により開発し極めて優れた基礎特性及びシステム性能要件が実証されつつあるナノ・インフィルトレーション遷移液相焼結法による SiC/SiC 複合材料について、素材メーカーへの製造委託による準市販グレード標準材料を製造し、総合的な評価を実施する。これまでに試作したラボグレード試作品との比較から量産プロセスとしての検討を推進する。また素材メーカーの知見に基づいて市販グレード材のコスト評価を実施し、さらなる低コスト化へ向けた研究指針を明らかにする。また産業用ガスタービンの大型動的部品製造を最終目標に据えた製品開発戦略の道筋を示し、その初期段階として中・小型静的部品の試作と実環境評価を合理的な範囲で進める。

- モデル部品を用いたシステム要素性能の評価と実証

平成 13 年度に委託製造しガスタービン燃焼ガス実環境負荷サイクル試験を実施したナノ・インフィルトレーション遷移液相焼結法による SiC/SiC 円筒型燃焼器ライナーサブサイズ・モデル部品について、残留強度や機械的損傷、化学損耗などの詳細な評価を実施し、燃焼器部品材料としての総合的な評価を完結する。また高効率先進推進システムや産業用エネルギーシステム材料として重要な要件である寿命決定特性について、特に高温でのクリープ変形・クリープ破断・応力緩和挙動などの評価を実施する。これらを通じて、同材料の環境低負荷型工業材料としての実用性の基礎実証を行う。

- SiC/SiC 複合材料における熱機能性随意設計法の確立

エネルギー変換・交換装置において熱伝達を担う要素部品の熱伝導特性は、システム性能の最適化に特に重要となる。平成 13 年度より開発を進めている、複合材料を構成する SiC 繊維の熱伝導度制御と 3 次元強化アーキテクチャのテイラリングならびにマトリックス熱特性の制御により従来のセラミックス系複合材料では実現できなかった高い熱伝導度を有す SiC/SiC 複合材料の評価を完結し、熱機能性を異方的に随意に制御する材料設計法の確立を試みる。

- SiC/SiC 複合材料の利用技術開発の推進

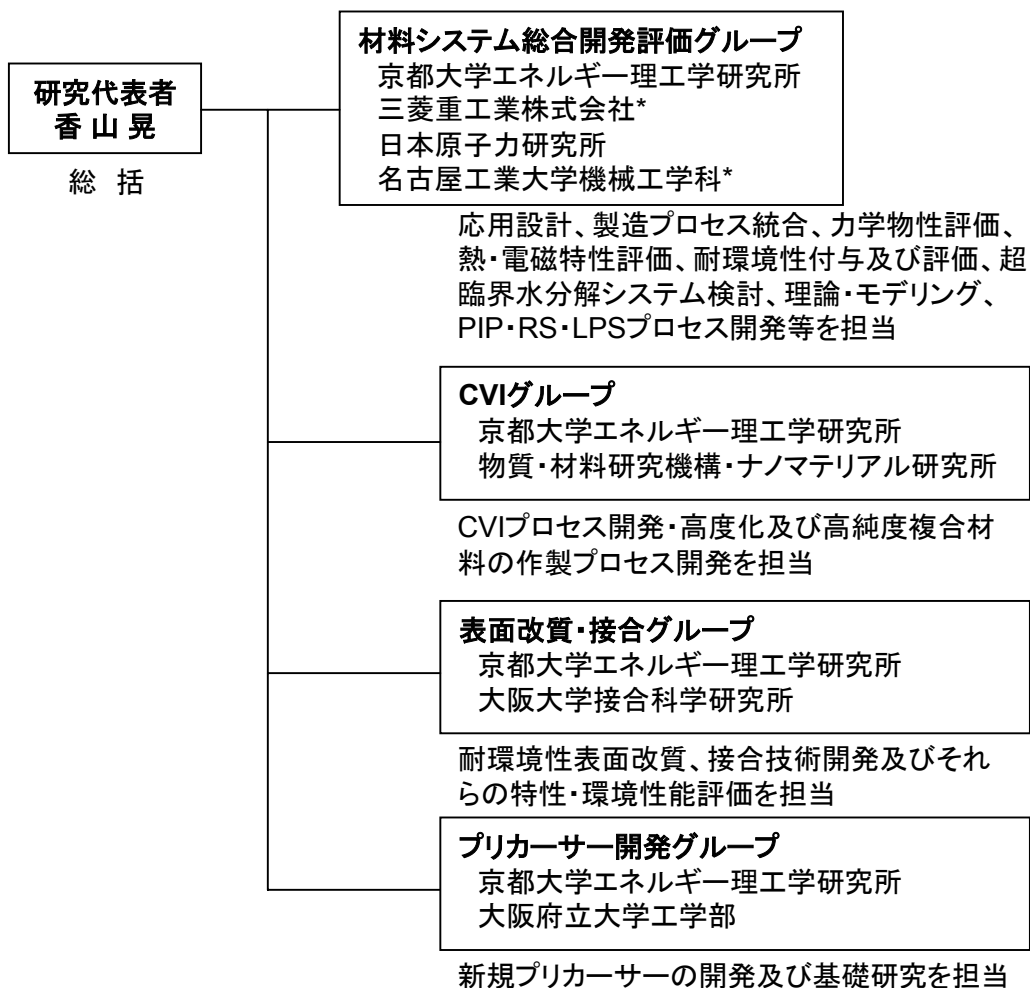
平成 13 年度まで実施してきた SiC/SiC への高融点金属被覆技術及び SiC/SiC と高融点金属との接合技術の基礎的な評価を実施し原理実証を完結する。またプリセラミック・ポリマー法、焼結法及びガラス・セラミックス法等による SiC セラミックスどうしの、高温強度などの構造性能と熱伝導・気密性などの機能性を高いレベルで同時に実現する構造化接合のプロセス開発・高度化、接合強度及び安定性の評価などを実施する。

- SiC/SiC 複合材料プロセスの高度化の推進

ナノ・インフィルトレーション遷移液相焼結法による SiC/SiC 複合材料について、さらなる高性能化、低価格化、成形技術開発等を志向した基礎研究を推進する。また気相浸透反応法、ポリマー含浸焼成法、反応焼結法、ミリ波焼成法およびこれらの複合プロセスについて材料の高性能化とプロセスの高度化を目指した基礎的な研究を合理的な水準で維持し実施する。

3. 研究実施体制

(1) 体制



4. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H9.10.23 H9.10.24	International Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Applications	仙台	54名	SiC/SiC 複合材料の開発・評価と核融合エネルギーシステムへの応用に関する最新の研究発表と情報交換を日米欧露の研究者間で行った。
H10.4.30 H10.5.1	CREST-ACE 小規模研究連絡会	金属材料研究所	8名	全体計画打ち合わせ
H10.9.16 H10.9.17	CREST-ACE全体会合	京大エネ理工研	18名	第3回 CREST-ACE 研究連絡会
H11.5.21 H11.5.22	CREST-ACE全体会合	京大エネ理工研	24名	CREST-ACE 研究連絡会
H11.9.16	CREST-ACE全体会合	核融合科学研究所	35名	CREST-ACE 研究連絡会および核融合炉用 SiCf/SiC 複合材料に関する研究開発・評価研究会
H11.12.17 H11.12.18	CREST-ACE全体会合	京大エネ理工研	22名	研究経過と成果
H12.4.17 H.12.4.18	CREST-ACE全体会合	京大エネ理工研	16名	CREST-ACE 成果概要と今後の展望
H12.12.17 H12.12.18	CREST-ACE全体会合	京大エネ理工研	22名	研究経過と成果
H13.10.10	CREST-ACE全体会合	京大エネ理工研	43名	研究経過報告
H14.5.20 H14.5.22	CREST-ACE 国際シンポジウム	京都リサーチパーク	101名	SiC/SiC 複合材料及びその先進エネルギー応用に関する国際シンポジウム
H14.10.31 H14.11.1	CREST-ACE 最終全体会合	京大エネ理工研	29名	研究経過報告

5. 主な研究成果

(1) 論文発表 (国内 28 件 海外 194 件)

1. Characterization of the Milliwave-PIP SiC/SiC Composites, S.M. Dong, W. Zhang, T. Nozawa, Y. Katoh, A. Kohyama, S.T. Schwab and L.L. Snead, *Advances in Ceramic Composites IV*, *Ceramic Transactions*, to be published
2. Specimen Size Effect on the In-Plane Shear Properties of SiC/SiC Composites, T. Nozawa, E. Lara-Curzio, Y. Katoh and A. Kohyama, *Advances in Ceramic Composites VI*, *Ceramic Transactions*, to be published
3. Evaluation of Fracture Toughness of Ceramic Matrix Composites Using Small Specimens, J.S. Park, Y. Katho, A. Kohyama, S.P. Lee and H.K. Yoon, *Fusion Engineering and Design*, in pressing
4. Performance of Tyranno-SA Fiber-Reinforced SiC/SiC Composites under Unloading-Reloading Tensile Tests, W. Yang, Akira Kohyama, Yutai Katoh, Hiroshi Araki, Jinnan Yu, and Tetsuji Noda, *Journal of America Ceramic Society*, Accepted
5. Statistic Study of a Plain-woven Tyranno-SA Fiber-Reinforced SiC Matrix Composite, W. Yang, Hiroshi Araki, Akira Kohyama, Chumphol. Busabok, Quanli Hu, Hiroshi Suzuki, and Tetsuji Noda, *Journal of European Ceramic Society*, submitted
6. Joining of Silicon Carbide Composites for Fusion Energy Applications, C.A. Lewinsohn, M. Singh, T. Shibayama, T. Hinoki, M. Ando, Y. Katoh and A. Kohyama, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
7. New Evaluation Method of Crack Growth in SiC/SiC Composites Using Interface Elements, H. Serizawa, M. Ando, C.A. Lewinsohn and H. Murakawa, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
8. High-Temperature Tensile Strength of Near-Stoichiometric SiC/SiC Composites, K. Hironaka, T. Nozawa, T. Hinoki, N. Igawa, Y. Katoh, L.L. Snead and A. Kohyama, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
9. Effect of Neutron Irradiation on Three Kinds of Fiber-Matrix Interfacial Properties of SiC/SiC Composites, L.L. Snead, T. Hinoki, Y. Katoh and A. Kohyama, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
10. The Effect of High Dose/High Temperature Irradiation on High Purity Fibers and Their Silicon Carbide Composites, T. Hinoki, L.L. Snead, Y. Katoh, T. Nozawa and A. Kohyama, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
11. Effects of Fibers and Fabrication Processes on Mechanical Properties of Neutron Irradiated SiC/SiC Composites, T. Nozawa, T. Hinoki, Y. Katoh and A. Kohyama, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
12. DuET; A New Dual-Beam Accelerator Facility at Kyoto University and its Prospective Applications to Fusion Materials Research, Y. Katoh, A. Kohyama, K. Jimbo, M. Ando and A. Kimura, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
13. Ion Irradiation Effects in Advanced SiC Fiber-Reinforced SiC Matrix Composites and Monolithic SiC, Y. Katoh, T. Hinoki, A. Kohyama, T. Shibayama, H. Takahashi, L.L. Snead and S.J. Zinkle, *Journal of Nuclear Materials*, to be published
14. Ceramization of Reflux-Treated Polymethylsilane Precursors to Silicon Carbide, M. Narisawa, T. Iseki, Y. Katase, K. Okamura. K. Oka and T. Dohmaru, *Journal of the American Ceramic Society*, to be published
15. Interfacial Shear Strength and Its Effects on the Mechanical Properties of Hi-Nicalon/CVI-SiC Matrix Composites, W. Yang, H. Araki, A. Kohyama, J-N. Yu, Q-L.Hu, H. Suzuki, and T.

- Noda, Proceeding of the 7th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, in pressing
16. Fabrication of High-Purity Silicon Carbide Composites by Forced-Flow Thermal-Gradient Chemical Vapor Infiltration, T. Hinoki, L.L. Snead, T. Taguchi, J.C. McLaughlin, N. Igawa, T. Nozawa, Y. Katoh, A. Kohyama and S. Jitsukawa, Proceedings of the 5th IEA Workshop on SiC/SiC Ceramic Matrix Composites for Fusion Structural Applications, to be published
 17. Specimen Size Effects in Tensile Properties of SiC/SiC and Recommendation for Irradiation Studies, T. Nozawa, Y. Katoh, A. Kohyama and E. Lara-Curzio, Proceedings of the 5th IEA Workshop on SiC/SiC Ceramic Matrix Composites for Fusion Structural Applications, to be published
 18. Progress in the Development of SiC/SiC Composites for Advanced Energy Systems: CREST-ACE Program, A. Kohyama, Y. Katoh, T. Hinoki, W. Zhang and M. Kotani, Proceeding of the Second IEA/Jupiter Joint International Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Applications, (1997) 25-32
 19. Self-Sealing Multilayer Coating for SiC/SiC Composites, M. Ferraris, M.A. Montorsi, M. Salvo, C. Isol and A. Kohyama, Proceeding of the Second IEA/Jupiter Joint International Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Applications, (1997) 254-257
 20. Impurities and Evaluation of Induced Activity of SiCf/SiC Composites, T. Noda, H. Araki, S. Ito, M. Fujita and K. Maki, Proceeding of the Second IEA/Jupiter Joint International Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Applications, (1997) 121-124
 21. Dynamic Fracture Behavior on 2D SiC/SiC Composites, T. Shibayama, H. Kayano and A. Kohyama, Proceeding of the Second IEA/Jupiter Joint International Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Applications, (1997) 72-75
 22. Effects of Interfacial Shear Strength on Mechanical Property of SiC/SiC, T. Hinoki, A. Kohyama, W. Zhang, H. Serizawa and S. Sato, The Science Reports of the Research Institutes Tohoku University, A45 (1997) 133-136
 23. 高融点金属の放射化基準の適合性、野田哲二、荒木 弘、楊 文、鈴木 裕、ヘリカル型核融合炉材料検討資料集、3 (1997) 28-36
 24. CVI SiCf/SiC 複合材の高温特性、野田哲二、成澤雅紀、北野修平、出崎 亮、瀬口忠男、杉本雅樹、伊藤正義、第2回核融合エネルギー連合講演会、(1997) 209
 25. High-Temperature Mechanical Properties of Advanced Nicalon Fibers and Their Relationship to Composite Failure, C.A. Lewinsohn, M.L. Hamilton, G.E. Youngblood, R.H. Jones, F.A. Garner, Advances in Ceramic Composites IV, Ceramic Transactions, Vol.96 (1998) 371-379
 26. High-Temperature Properties of Polymer-Derived SiC Fibers, K. Okamura, T. Shimoo, I. Tsukada and T. Seguchi, Ceramic Material Systems with Composite Structures, Ceramic Transactions, The American Ceramic Society, Vol.99 (1998) 101-108
 27. High Temperature Fiber Tensile Tests with A Long Gauge Length and Oxidation Tests of Hi-Nicalon Type S, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn, G.E. Youngblood, R.H. Jones, D.E. Johnston and A. Kohyama, Extended Abstracts of the First Asian-Australasian Conference on Composite Materials, Vol. II (1998) 517-1-517-4
 28. Analysis of Interfacial Shear Process of CMCs, T. Hinoki, T. Shibayama, W. Zhang, Y. Katoh and A. Kohyama, Extended Abstracts of the First Asian-Australasian Conference on Composite Materials, Vol. II (1998) 510-1-510-4
 29. Recent Advances in the Development of SiC/SiC as a Fusion Structural Material, R.H. Jones, L.L. Snead, A. Kohyama and P. Fenici, Fusion Engineering and Design, Vol.41 (1998) 15-24
 30. Methods for Joining Silicon Carbide Composites for High Temperature Structural Applications, C.A. Lewinsohn, M.L. Hamilton, G.E. Youngblood, R.H. Jones, F.A. Garner, S.L. Hecht and A. Kohyama, Fusion Materials, DOE/ER-0313/25 (1998) 87-92

31. The HFIR 14J SiC/SiC Composite and SiC Fiber Collaboration, G.E. Youngblood, H. Suzuki, W. Yang, S. Sato and T. Noda, Fusion Materials, DOE/ER-0313/24 (1998) 115-121
32. Fabrication of SiC/SiC Ceramic Composites Using Advanced Fibers, N.L. Vaughn, L.L. Snead, R.A. Lowden, A. Kohyama, Y. Katoh, J.L. Bailey, J.J. Henry and A.M. Williams, Fusion Materials, DOE/ER-0313/25 (1998) 81-86
33. Thermal Oxidation Crosslinking in the Blended Precursors of Organosilicon Polymers Containing Polyvinylsilane with Polycarbosilane, M. Narisawa, M. Narisawa, S. Kitano, A. Idesaki, K. Okamura and M. Itoh, Journal of Materials Science, 33 (1998) 2663-2666
34. Irradiation-enhanced Creep in SiC : Data Summary and Planned Experiments, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, A. Kohyama and L.L. Snead, Journal of Nuclear Materials, 253 (1998) 33-46
35. Radiation Response of SiC-Based Fibers, G.E. Youngblood, A. Kohyama, Y. Katoh, A. Hasegawa, R. Scholz and L.L. Snead, Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 1551-1556
36. Effect of High Temperature Heat Treatment in Vacuum on Microstructure and Bending Properties of SiCf/SiC Composites Prepared by CVI, H. Araki, T. Noda, W. Yang and A. Kimura, Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 1540-1545
37. Glass-ceramic Joining and Coating of SiC/SiC for Fusion Applications, M. Ferraris, M. Salvo, C. Isola, M.A. Montorsi and A. Kohyama, Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 1546-1550
38. Current Status of SiC/SiC Composites R&D, P. Fenici, A.J. Frias Rebelo, R.H. Jones, A. Kohyama and L.L. Snead, Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 215-225
39. Effect of Fiber Coating on Interfacial Shear Strength of SiC/SiC by Nano-Indentation Technique, T. Hinoki, W. Zhang, A. Kohyama, S. Sato and T. Noda, Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 1567-1571
40. Transmutation and Induced Radioactivity of W in the Armor and First Wall of Fusion Reactors, T. Noda, M. Fujita and M. Okada, Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 934-939
41. Crack Initiation and Growth Characteristics in SiC/SiC under Indentation Test, W. Zhang, T. Hinoki, Y. Katoh, A. Kohyama, T. Noda, T. Muroga and J. Yu, Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 1577-1581
42. Synthesis of Fibrous Shape Ceramics from Blended Precursors of Organosilicon Polymers Containing Polymethylsilane, M. Narisawa, S. Oda, T. Iseki, K. Okamura, K. Oka and T. Dohmaru, Journal of the Ceramic Society of Japan, 106 [2] (1998) 220-223
43. Thermal Stabilities of CVI SiCf/SiC Composites, H. Araki, K. Nakacho, N. Abe and H. Serizawa, Materials for Advance Energy Systems and Fison & Fusion Engineering, (1998) 144-147
44. Bending Properties of CVI SiCf/SiC Composites at Elevated Temprature, W. Yang, H. Araki, S. Sato, T. Noda and A. Kohyama, Materials for Advance Energy Systems and Fison & Fusion Engineering, (1998) 162-165
45. Present Status of SiCf/SiC Composites as Low-Activation Structural Materials of Fusion Reactor in Japan, A. Kohyama, H. Serizawa, D.E. Johnston, G.E. Youngblood, R.H. Jones and A. Kohyama, Proceeding of 17th IAEA Fusion Energy Conference, (1998) 297
46. Progress in the Development of SiC/SiC Composites for Advanced Energy Systems: CREST-ACE Program, A. Kohyama, Y. Katoh, T. Hinoki, W. Zhang and M. Kotani, Proceeding of Eighth European Conference on Composites Materials, Vol.4 (1998) 15-22

47. Roles of Interfacial Microstructure on Interfacial Shear Strength of SiC/SiC, T. Hinoki, W. Zhang, Y. Katoh, A. Kohyama and H. Tsunakawa, Proceeding of Eighth European Conference on Composites Materials, Vol.4 (1998) 209-215
48. Effect of Fiber Coating on Crack Initiation and Growth Characteristics in SiC/SiC under Indentation Test, W. Zhang, T. Hinoki, Y. Katoh, A. Kohyama and T. Noda, Proceeding of Eighth European Conference on Composites Materials, Vol.4 (1998) 359-366
49. Microstructural Evolution of SiC/SiC Composite under Irradiation, Y. Katoh, A. Kohyama and T. Hinoki, Proceeding of Eighth European Conference on Composites Materials, Vol.4 (1998) 351-357
50. Development of High Performance Composites for Environment-Conscious Energy Applications, A. Kohyama, A. Hasegawa, R. Yamada, T. Noda and Y. Katoh, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 286-291
51. Nano-Structural Analysis of Hi-NicalonTM SiC Fiber After Annealing in Various Environments by HRTEM, G.W. He, T. Shibayama and H. Takahashi, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 413-417
52. Simulation of Fracture Process of Advanced Materials Using Interface Element, H. Murakawa, K. Nakacho, N. Abe and H. Serizawa, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 577-582
53. Strength and Oxidation Resistance of Hi-Nicalon Type S at 1373 K, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn, G.E. Youngblood, R.H. Jones, D.E. Johnston and A. Kohyama, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 583-588
54. Fabrication of High Performance SiC/SiC Composite by Polymer Infiltration and Pyrolysis Method, M. Kotani, A. Kohyama, K. Okamura, T. Inoue and Y. Katoh, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 595-598
55. Application of He-Ion Beam for Microscopic Surface Modification of Ceramics, S. Ohtsuka, A. Hasegawa, M. Satou and K. Abe, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 424-427
56. Interfacial Fracture Behavior of SiC/SiC Composites for Fusion Application, T. Hinoki, H. Serizawa, T. Shibayama, W. Zhang, Y. Katoh and A. Kohyama, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 571-576
57. Environmental Effects of Microstructural Evolution in SiC/SiC Composites, T. Shibayama, A. Kohyama and H. Takahashi, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 397-400
58. Effect of Fiber Coatings on Crack Behavior of SiC/SiC Composites, W. Zhang, T. Hinoki, Y. Katoh, A. Kohyama, T. Noda and T. Shibayama, Proceeding of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 561-564
59. Multiple Beams – Material Interaction Research Facility at Kyoto University and Prospective Application to Advanced Energy Materials Study, Y. Katoh, A. Kohyama, M. Ando, K. Jimbo, T. Sakka, A. Kimura, F. Sano, T. Mizuuchi and T. Obiki, Proceeding of International

- Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP-98), (1998) 428-433
60. A New Project on R&D of Advanced Material Systems for Conversion of Energy: CREST-ACE Program, A. Kohyama, R.H. Jones, M. Singh, T. Shibayama, T. Hinoki, M. Ando, Y. Katoh and A. Kohyama, Proceeding of the 1998 International Symposium on Advanced Energy Technology, (1998) 645-652
 61. Bending Properties of SiC/SiC Composites at Elevated Temperature, W. Yang, Shi Ying, Hiroshi Araki, Shinji Sato, Tetsuji Noda and Akira Kohyama, Proceeding of the Fifth China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, (1998) 162-165
 62. R & D of SiC/SiC Composites for Advanced Energy Systems, A. Kohyama, Y. Katoh and T. Hinoki, Proceedings of the Japan-Central Europe Joint Workshop on Modeling and Simulation of Non-Linear Engineering Systems and Related Phenomena, (1998) 76-79
 63. Crack Propagation Analysis Using Interface Element (Report I) -Theoretical Formulation and Potential Fields of Application -, H. Murakawa, H. Serizawa and Z.Q. Wu, Transactions of JWRI, Vol.27 No.2 (1998) 67-72
 64. High Temperature Strength and Oxidation Resistance of Newly Developed SiC Fibers, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn, G.E. Youngblood, R.H. Jones, D.E. Johnston, A. Kohyama, Transactions of JWRI, Vol.27 No.1 (1998) 57-60
 65. 材料の放射化解析と評価、野田哲二、プラズマ核融合学会誌、Vol. 74 第7号 (1998) 701-706
 66. 高純度 SiC 複合材の製造と同位体制御、野田哲二、原子力学会誌、Vol. 44、No. 2 (1998) 60-64
 67. 戦略的基礎研究 CREST-ACE と核融合炉材料開発戦略の概要、香山 晃、超高温材料シンポジウム 12 文集—新しいエネルギー材料—、(1998) 60-67
 68. Status Quo and Future Trend on R & D for High Temperature and High Performance Ceramic Fibers Derived from Polymers, K. Okamura, , Adv. Composite Materials, Vol.8. No.1 (1999) 107-115
 69. Methods for Joining Silicon Carbide Composites for High-Temperature Structural Applications, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, M. Singh, T. Shibayama, T. Hinoki, M. Ando and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 20 [3] (1999) 119-124
 70. Fiber Diameter Variation-Sample Preparation and Analysis, G.E. Youngblood, C.R. Eiholzer, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, A. Hasegawa and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 20 [3] (1999) 481-486
 71. Bending Properties of CVI SiCf/SiC Composites at Elevated Temperatures, H. Araki, W. Yang, Y. Shi, S. Sato, T. Noda and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 20 [4] (1999) 371-378
 72. Computational Analysis of Crack Growth in Composite Materials Using Lennard-Jones Type Potential Function, H. Murakawa, H. Serizawa and Z.Q. Wu, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 20 [3] (1999) 309-316
 73. High Temperature Properties and Creep Resistance of Near-Stoichiometric SiC Fibers, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn, G.E. Youngblood, R.H. Jones, D.E. Johnston and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 20 [4] (1999) 443-450
 74. Fabrication of High Performance SiC/SiC Composite by Polymer Impregnation and Pyrolysis Method, M. Kotani, A. Kohyama, K. Okamura and T. Inoue, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 20 [4] (1999) 309-316

75. Thermal Conductivity of CVI and PIP SiC/SiC Composites, R. Yamada, T. Taguchi, J. Nakano and T. Igawa, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20 [3] (1999) 273-280
76. Evaluation of Microstructure for SiC/SiC Composites Using Mercury Intrusion Method, S. Suyama, Y. Ito, S. Nakagawa and N. Tachikawa, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20 [3] (1999) 181-189
77. Highly Cross-Linked Precursors to Silicon Carbide, T. Iseki, M. Narisawa, K. Okamura, K. Oka and T. Dohmaru, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20 [4] (1999) 317-322
78. Recent Advancement of Tyranno/SiC Composites R & D, T. Nakayasu, M. Sato, T. Yamamura, K. Okamura, Y. Katoh and A. Kohyama, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20 [4] (1999) 301-308
79. Thermal Stabilities of CVI SiCf/SiC Composites, T. Noda, H. Araki, W. Yang and A. Kohyama, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20 [4] (1999) 387-394
80. Environmental Effects of Microstructural Stability in SiC/SiC Composites, T. Shibayama, G.W. He, H. Takahashi, Y. Katoh and A. Kohyama, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20 [4] (1999) 161-168
81. Microstructural Stability of SiC/SiC Composites Under Dual-Beam Ion Irradiation, Y. Katoh, T. Hinoki, A. Kohyama, T. Shibayama and H. Takahashi, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20 [4] (1999) 325-332
82. Ceramic Fibers from Polymer Precursors, M. Narisawa, T. Shimoo, K. Okamura, M. Sugimoto and T. Seguchi, *Fine Ceramic Fibers* edited by Anthony R. Bunsell and Marie-Helene Berger, (1999) 207-229
83. Methods for Joining Silicon Carbide Composites for High Temperature Structural Applications, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, M. Singh, T. Shibayama, T. Hinoki, M. Ando, Y. Katoh and A. Kohyama, *Fusion Materials*, DOE/ER-0313/26 (1999) 65-71
84. Reflux Heat-Treated Polymethylsilane as a Precursor to Silicon Carbide, T. Iseki, M. Narisawa, K. Okamura, K. Oka and T. Dohmaru, *Journal of Materials Science Letters*, 18 (1999) 185-187
85. Summary of Discussion Session: Design and Materials, A. Kohyama, E.E. Bloom and K. Ehrlich, *Journal of Nuclear Materials*, 271-272 (1999) 538-539
86. Use of Blended Precursors of Poly (vinylsilane) in Polycarbosilane for Silicon Carbide Fiber Synthesis with Radiation Curing, M. Narisawa, A. Idesaki, S. Kitano, K. Okamura, M. Sugimoto, T. Seguchi and M. Itoh, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 82 [4] (1999) 1045-51
87. SiC-Based Fibers Synthesized from Hybrid Polymer of Polycarbosilane and Polyvinylsilane, A. Idesaki, M. Narisawa, K. Okamura, M. Sugimoto, Y. Morita, T. Seguchi and M. Itoh, *Key Engineering Materials*, 164-165 (1999) 39-42
88. Synthesis of SiC-Based Fibers Derived from Hybrid Polymer of Polycarbosilane and Polyvinylsilane, A. Idesaki, M. Narisawa, K. Okamura, M. Sugimoto, T. Seguchi and M. Itoh, *Key Engineering Materials*, Vol.159-160 (1999) 107-112
89. Synthesis of SiC-Based Fibers Derived from Hybrid Polymer of Polycarbosilane and Polyvinylsilane, A. Idesaki, M. Narisawa, K. Okamura, M. Sugimoto, T. Seguchi and M. Itoh, *Key Engineering Materials*, Vols. 159-160 (1999) 107-112
90. High-Temperature Properties of Newly Developed Advanced SiC Fibers, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn, G.E. Youngblood, R.H. Jones, D.E. Johnston and A. Kohyama, *Key Engineering Materials*, Vols. 164-165 (1999) 287-290

91. Tensile Creep Properties of Si-M-C-O (M=Ti or Zr) Fibers in Air Derived from Polymer Precursors, M. Narisawa, K. Sogame, K. Okamura, M. Sato and T. Yamamura, *Key Engineering Materials*, 164-165 (1999) 303-308
92. New Computer Simulation Method for Evaluation of Crack Growth Using Lennard-Jones Type Potential Function, Z.Q. Wu, H. Serizawa and H. Murakawa, *Key Engineering Materials*, Vol.166 (1999) 25-32
93. Evaluation of Advanced SiC Fibers for Reinforcement of CMC, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn, G.E. Youngblood, R.H. Jones, D.E. Johnston and A. Kohyama, *Proceeding of 12th International Conference on Composite Materials (ICCM-12)*, CD-ROM (1999)
94. New FEM Analysis of Crack Growth Behavior in Composite Materials, M. Ando, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn and H. Murakawa, *Proceeding of 12th International Conference on Composite Materials (ICCM-12)*, CD-ROM (1999)
95. A New Project on R & D of Advanced Material Systems for Conversion of Energy: CREST-ACE Program, A. Kohyama, Y. Katoh, T. Hinoki and M. Kotani, *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999) 1-6
96. Low Activation Joining of SiC/SiC Composites, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, M. Singh, T. Shibayama, T. Hinoki, M. Ando, Y. Katoh and A. Kohyama, *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999) 126-131
97. Computational Analysis of Crack Growth in Composite Materials Using Lennard-Jones Type Potential Function, H. Murakawa, H. Serizawa and Z.Q. Wu, *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999) 94-101
98. Fabrication and Characterization of SiC/SiC Composites Made Using "Advanced" Fibers, N.L. Vaughn, L.L. Snead, A. Kohyama, Y. Katoh, J.L. Bailey, J.J. Henry, A.M. Williams and R.A. Lowden, *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999) 44-48
99. An Overview of JAERI's SiC/SiC Development Program, R. Yamada, , *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999)17-21
100. Effect of Residual Silicon Phase on Reaction-Sintered Silicon Carbide, S. Suyama, Y. Ito, S. Nakagawa, N. Tachikawa, A. Kohyama and Y. Katoh, *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999) 108-112
101. Recent Advancement of Tyranno/SiC Composites R & D, T. Nakayasu, M. Sato, T. Yamamura, K. Okamura, Y. Katoh and A. Kohyama, *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999) 71-75
102. Environmental Effects of Microstructural Stability in SiC/SiC Composites, T. Shibayama, G.W. He, H. Takahashi and A. Kohyama, *Proceeding of the Third IEA International Energy Agency Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, (1999) 167-173
103. Computational Method for Static and Dynamic Crack Growth Using Interface Potential Energy, H. Serizawa, H. Murakawa and Z.Q. Wu, *Proceedings of the Eighth International Conference on Mechanical Behaviour of Materials (ICM8)*, *Progress in Mechanical Behaviour of Materials*, Vol. I.6 (1999) 261-266

104. Computational Approach to the Fusion Reactor Materials, T. Noda, J. Nagakawa, Springer Series in Materials Science, Ed. By T. Saito, Vol.34 (1999) 163-193
105. Development of Computational Evaluation Methods for Creep Deformation of SiC/SiC Composites, H. Serizawa, M. Ando, C.A. Lewinsohn, H. Murakawa, Transactions of JWRI, Vol.28 No.2 (1999) 45-50
106. Finite Element Method for Hot Cracking Using Interface Element, M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa, Transactions of JWRI, Vol.28 No.1 (1999) 47-53
107. Simulation of Dynamic Crack Propagation in Elastic Plates Using an Interface Element (Report II), Z.Q. Wu, A. Emoto, H. Serizawa and H. Murakawa, Transactions of JWRI, Vol.28 No.2 (1999) 51-56
108. 最近の無機繊維の動向と将来、岡村清人、ハイテクインフォメーション（財）中国技術振興センター編、No. 105 (1999) 2-7
109. 表面エネルギーに基づいたき裂進展のモデル化と複合材料の界面剥離への応用（第2報）—動的き裂進展解析への適用—、呉 政奇、芹澤 久、村川英一、関西造船協会誌、第 232 号 (1999) 145-153
110. 界面要素を用いた FEM による溶接高温割れに関する理論的研究（第一報）—温度依存型界面要素の開発—、柴原正和、芹澤 久、村川英一、関西造船協会誌、第 232 号 (1999) 135-144
111. 界面要素を用いた FEM による溶接高温割れに関する理論的研究（第二報）—温度依存型界面要素の定量的モデル化—、柴原正和、芹澤 久、村川英一、呉 政奇、関西造船協会誌、第 233 号 (1999) 149-155
112. CVI 法による SiC/SiC 複合材料の開発と強度特性、佐東信司、荒木 弘、野田哲二、香山 晃、第 12 回計算力学講演会講演論文集、No. 99-5 (1999) 603-604
113. セラミックス系複合材料への応用における前駆体ポリマーの最近の話題、岡村清人、名古屋工業大学共同研究センターニュース、No. 14 (1999) 26-33
114. SiC/SiC 複合材料の Slow Crack Growth に関する解析、安藤東宙、芹澤 久、村川英一、溶接構造シンポジウム'99 講演論文集、(1999) 209-215
115. New FEM Analysis of Time-Dependent Crack Growth in SiC/SiC Composites, M. Ando, H. Serizawa and H. Murakawa, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 21 [3] (2000) 195-202
116. Microstructure and Bending Properties of SiC/SiC Composites Fabricated by Reaction Sintering Process, S.P. Lee, Y. Katoh, T. Hinoki, M. Kotani, A. Kohyama, S. Suyama and Y. Ito, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 21 [3] (2000) 339-346
117. Effect of Multiple Coating Interfacial Structures on Bending Property of FCVI SiCf/SiC Composites, W. Yang, H. Araki, J.Y. Park, T. Noda, A. Kohyama and J. Yu, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 21 [4] (2000) 259-266
118. Mechanical Properties of Advanced SiC Fiber-Reinforced CVI-SiC Composites, Y. Katoh, A. Kohyama, T. Hinoki, W. Yang and W. Zhang, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 21 [3] (2000) 399-406
119. γ -Ray Curing for Polymethylsilane and Poly(methylsilane-dimethylsilane) for the Improved Ceramic Yields, M. Narisawa, T. Yoshida, T. Iseki, Y. Katase, K. Okamura, K. Oka and T. Dohmaru, Chemistry of Materials, Vol.12 No.9 (2000) 2686-2692
120. A New Multiple Beams – Material Interaction Research Facility for Radiation Damage Studies in Fusion Materials, A. Kohyama, Y. Katoh, M. Ando and K. Jimbo, Fusion Engineering and Design, 51-52 (2000) 789-795

121. Polymer Derived SiC Materials for Joining Silicon Carbide Composites for Fusion Energy, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, T. Nozawa, M. Kotani, Y. Katoh and A. Kohyama, Fusion Materials, DOE/ER-0313/28 (2000) 89-95
122. Effect of Heat Treatment on Silicon Carbide Based Joining Materials for Fusion Energy, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, T. Nozawa, M. Kotani, H. Kishimoto, Y. Katoh and A. Kohyama, Fusion Materials, DOE/ER-0313/29 (2000) 63-68
123. Tensile Strength and Fracture Surface Characterization of Hi-Nicalon™ SiC Fibers, G.E. Youngblood, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones and A. Kohyama, Fusion Materials, DOE/ER-0313/28 (2000) 96-101
124. The KFiB Experiment, G.E. Youngblood, D.J. Senor, R.H. Jones, W. Kowbel and A. Kohyama, Fusion Materials, DOE/ER-0313/28 (2000) 102-108
125. High Performance SiC/SiC Composites for Fusion by New Precursor Polymers and Improved PIP Process, A. Kohyama, M. Kotani, Y. Katoh, T. Nakayasu, M. Sato, T. Yamamura and K. Okamura, Journal of Nuclear Materials, 283-287 (2000) 565-569
126. Interaction Between Fusion Materials R&D and Other Technologies, A. Kohyama, M. Seki, K. Abe, T. Muroga, H. Matsui, S. Jitsukawa and S. Matsuda, Journal of Nuclear Materials, 283-287 (2000) 20-27
127. Joining of Silicon Carbide Composites for Fusion Energy Applications, C.A. Lewinsohn, M. Singh, T. Shibayama, T. Hinoki, M. Ando, Y. Katoh and A. Kohyama, Journal of Nuclear Materials, 283-287 (2000) 1258-1261
128. The Effect of Neutron-Irradiation on the Shear Properties of SiC/SiC Composites with Varied Interphase, T. Hinoki, L.L. Snead, Y. Katoh, A. Kohyama and R. Shnavski, Journal of Nuclear Materials, 283-287 (2000) 376-379
129. Microstructure and Mechanical Properties of Low-Activation Glass-Ceramic Joining and Coating for SiC/SiC Composites, Y. Katoh, M. Kotani, A. Kohyama, M.A. Montorsi, M. Salvo and M. Ferraris, Journal of Nuclear Materials, 283-287 (2000) 1262-1266
130. Simulating the Influence of Radiation Temperature Variations on Microstructural Evolution, Y. Katoh, R.E. Stoller, A. Kohyama and T. Muroga, Journal of Nuclear Materials, 283-287 (2000) 313-318
131. Finite Element Method for Hot Cracking Analysis under Welding Using Temperature Dependent Interface Element, M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes IX, (2000) 844-851
132. CVI Hi-Nicalon/SiC Composites with Various PyC-SiC Interlayers, W. Yang, H. Araki, T. Noda, T. X. Liang, Y. Katoh, T. Hinoki, J. Yu, and A. Kohyama, Proceedings of the Sixth Japan-China Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, (2000) 56-61
133. New Creep Fracture Analysis of SiC/SiC Composites Using Interface Element, H. Serizawa, M. Ando, C.A. Lewinsohn and H. Murakawa, Proceedings of the 10th Iketani Conference on Materials Research toward the 21st Century, (2000) 389-390
134. Conversion of Organosilicon Polymers into Advanced Ceramics, K. Okamura, , Proceedings of the 10th Iketani Conference on Materials Research toward the 21st century, (2000) 169-170
135. Synthesis of SiC Ceramics from Polymethylsilane Precursors, T. Iseki, M. Narisawa, Y. Katase, K. Oka, T. Dohmaru and K. Okamura, Proceedings of the 10th Iketani Conference on Materials Research toward the 21st century, (2000) 171-172
136. Size Effects on the Tensile Properties for S/W and 3-D SiC/SiC Composites, T. Nozawa, Y. Katoh, A. Kohyama, E. Lara-Curzio, Proceedings of the 4th IEA Workshop on SiC/SiC Ceramic Matrix Composites for Fusion Structural Applications, -(2000) 143-149

137. Date-Free-Way -Attempt at Developing Distributed Database for Nuclear Materials-, J. Kinugawa, M. Fujita, T. Noda, H. Tsuji, Y. Kaji, T. Sakino, Y. Tachi, K. Kaneda, S. Mashiko, K. Shimura, R. Nakajima and S. Iwata, Proceedings of the 9th German-Japanese workshop on chemical information, (2000) 134-135
138. SiCf/SiC composites material database, K. Miyamoto, M. Fujita and T. Noda, Proceedings of the 9th German-Japanese workshop on chemical information, (2000) 136-137
139. Remote Optical Microscope System in the Internet, M. Fujita, K. Miyamoto, Y. Matsuzaki and T. Noda, Proceedings of the 9th German-Japanese workshop on chemical information, (2000) 141-142
140. Nuclear reaction database for materials on transmutation under neutron irradiation, T. Noda, M. Fujita, Proceedings of the 9th German-Japanese workshop on chemical information, (2000) 138-140
141. The Influence of Dual-ion Irradiation and High Temperature Annealing in SiC/SiC Composites, H. Kishimoto, Y. Katoh, A. Kohyama and M. Ando, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. II (2000) 733-738
142. Computational Analysis of Crack Growth in SiC/SiC Composite Caused by Creep of Bridging Fibers, H. Serizawa, M. Ando, C.A. Lewinsohn and H. Murakawa, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. I (2000) 571-576
143. Effect of Circular Hole Notch on Notched Strength Characteristics of Al7075/CFRP Layered Composites, J.S. Park, H.K. Yoon, S.P. Lee and A. Kohyama, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. I (2000) 605-610
144. PIP Process Optimization and Mechanical Properties of SiCf/SiC Composites, M. Kotani, A. Kohyama, Y. Katoh and K. Okamura, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. II (2000) 689-694
145. Characterization of the Milliwave-PIP SiC/SiC Composites, S.M. Dong, W. Zhang, T. Nozawa, Y. Katoh, A. Kohyama, S.T. Schwab and L.L. Snead, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. II (2000) 747-752
146. Microstructures and Fracture Characteristics of Reaction Sintered SiC/SiC Composites, S.P. Lee, Y. Katoh, W. Zhang, M. Kotani, A. Kohyama and S. Suyama, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. I (2000) 651-656
147. Controlling Fiber-Matrix Interfacial Properties of SiC/SiC Composites by Simple Fiber Pre-Treatment, T. Hinoki, W. Yang, T. Nozawa, Y. Katoh and A. Kohyama, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. II (2000) 739-744
148. Effect of Specimen Geometry on Tensile Properties of SiC/SiC Composites, T. Nozawa, T. Hinoki, Y. Katoh, A. Kohyama, E.L. Curzio and S.P. Lee, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. II (2000) 721-726
149. The Evaluation of the Interfacial Properties in SiCf/SiC Composites by PIP, W. Zhang, M. Kotani, Y. Katoh and A. Kohyama, Proceedings of the Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000), Vol. II (2000) 759-764
150. Effects of Interfacial Structure on Bending Properties of SiC(f)/SiC Composites, Y. Shi, H. Araki, W. Yang, S. Sato, T. Noda and A. Kohyama, The Relationship on Properties, Processing and Microstructure of Advanced Ceramics, Ed. By Jingkun Guo, Xi Yao, (2000) 155-162

151. Finite Element Method for Hot Cracking Using Temperature Dependent Interface Element (Report II) - Mechanical Study of Houldcroft Test -, M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa, Transactions of JWRI, Vol.29, No.1 (2000) 59-64
152. Formation of W Layers on SiC Ceramics - Study on EB-PVD (report 1) -, N. Abe, R. Matsuda, J. Morimoto, M. Tomie and S. Noguchi, Transactions of JWRI, Vol.29, No.1 (2000) 107-108
153. 耐照射新材料、野田哲二、山本徳和、化学工業、51、No. 8 (2000) 585-592
154. 表面エネルギーに基づいたき裂伝播のモデル化と複合材料の界面剥離への応用 (第3報) - き裂の伝播速度に及ぼす諸因子の影響 -、呉 政奇、江本篤史、芹澤 久、村川英一、関西造船協会誌、第 233 号 (2000) 141-148
155. 宇宙用構造材料としての無機高分子の重要性、成澤雅紀、岡村清人、高分子、49 巻 2 月号 (2000) 65-69
156. 耐熱性繊維、K. Okamura、繊維学会誌、第 56 巻 2 号 (2000) 52-55
157. 耐熱性含ケイ素高分子を前駆体に用いたアモルファス炭素-シリカ複合体の合成、成澤雅紀、山根健太郎、岡村清人、伊藤正義、炭素、195 (2000) 383-387
158. An Efficient Process of Cross-linking Poly(methylsilane) for SiC Ceramics, T. Iseki, M. Narisawa, Y. Katase, K. Oka, T. Dohmaru and K. Okamura, Chemistry Materials, Vol.13 (2001) 4163-69
159. Influence of Specimen Geometry on Tensile Properties of 3D SiC/SiC Composites, T. Nozawa, T. Hinoki, Y. Katoh, A. Kohyama, E. Lara-Curzio and M. Sato, Advances in Ceramic Composites VI, Ceramic Transactions, 124 (2001) 351-362
160. Silicon Carbide Based Joining Materials for Fusion Energy and Other High-Temperature, Structural Applications, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones, M. Singh, T. Nozawa, M. Kotani, Y. Katoh and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 22 [4] (2001) 621-626
161. FEM Analysis of Experimental Measurement Technique for Mechanical Strength of Ceramic Joints, H. Serizawa, C.A. Lewinsohn and H. Murakawa, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 22 [4] (2001) 635-642
162. Fabrication of SiC/SiC Composites by Modified Reaction Sintering Process, S.P. Lee, Y. Katoh, J.S. Park, S.M. Dong and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 22 [3] (2001) 455-462
163. CVI Tyranno-SA/SiC Composites with Various PyCand SiC Interlayers, W. Yang, Y. Katoh, A. Kohyama, H. Araki, T. Noda and J. Yu, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 22 [3] (2001) 481-488
164. Microstructural Stability of SiC/SiC Composites Under Dual-Beam Ion Irradiation, Y. Katoh, H. Kishimoto, M. Ando, A. Kohyama, T. Shibayama and H. Takahashi, Effect of Radiation on Materials: 20th International Symposium, STP1405 (2001) 786-798
165. Low activation materials for fusion reactors, T. Noda, , Encyclopedea of Materials Science and Engineering, 4 (2001) 3418-3422
166. Design and Material Issues for High Performance SiC/SiC-based Fusion Power Cores, A.R. Raffray, R.H. Jones, G. Aiello, M. Billone, L. Giancarli, A. Hasegawa, Y. Katoh, A. Kohyama, S. Nishio, B. Riccardi and M.S. Tillack, Fusion Engineering and Design, 55 (2001) 55-95
167. The Influence of Temperature, Fluence, Dose Rate, and Helium Production on Defect Accumulation and Swelling in Silicon Carbide, H. Kishimoto, Y. Katoh, A. Kohyama and M. Ando, Fusion Engineering and Design, 55 (2001) 775-785
168. The Effect of High Dose/High Temperature Irradiation on High Purity Fibers and Their Silicon Carbide Composites, T. Hinoki, L.L. Snead, Y. Katoh, T. Nozawa, A Kohyama and A. Hasegawa, Fusion Materials, DOE/ER-0313/31 (2001) 74-83

169. Tensile Properties of Stoichiometric Silicon Carbide Fiber Reinforced F-CVI Derived Silicon Carbide Matrix Composites, T. Nozawa, K. Hironaka, T. Taguchi, N. Igawa, L.L. Snead, Y. Katoh, S. Jitsukawa and A. Kohyama, Fusion Materials, DOE/ER-0313/31 (2001) 40-46
170. Specimen Size Effect on the In-Plane Shear Properties of Silicon Carbide/Silicon Carbide Composites, T. Nozawa, E. Lara-Curzio, Y. Katoh, L.L. Snead and A. Kohyama, Fusion Materials, DOE/ER-0313/31 (2001) 35-39
171. Optimizing the Fabrication Process for Superior Mechanical Properties in the Stoichiometric SiC Fiber Reinforced FCVI SiC Matrix Composite System, T. Taguchi, N. Igawa, T. Nozawa, K. Hironaka, L.L. Snead, T. Hinoki, Y. Katoh, S. Jitsukawa, A. Kohyama and J.C. McLaughlin, Fusion Materials, DOE/ER-0313/31 (2001) 47-56
172. Analysis of Asymmetrical Four-Point Bending Test of Ceramic Composite Joints by Using Finite Element Method, H. Serizawa, C. A. Lewinsohn and H. Murakawa, High Temperature Ceramic Matrix Composites, (2001) 251-256
173. Subcritical Crack Growth Mechanisms in Ceramic Matrix Composites: Experimental Observations and Modeling, C.A. Lewinsohn, C.H. Henager, Jr., C.F. Windisch, E.P. Simonen, R.H. Jones, R.G. Hoagland and A. Kohyama, International Journal of Materials and Product Technology, Vol.16, Nos.1/2/3 (2001) 132-138
174. Fine Silicon Carbide Fibers Synthesized from Polycarbosilane - Polyvinylsilane Polymer Blend Using Electron Beam Curing, A. Idesaki, M. Narisawa, K. Okamura, M. Sugimoto, Y. Morita, T. Seguchi and M. Itoh, Journal of Materials Science, Vol.36 (2001) 357-362
175. Tensile Strength and Fracture Surface Characterization of Hi-NicalonTM SiC Fibers, G.E. Youngblood, C.A. Lewinsohn, R.H. Jones and A. Kohyama, Journal of Nuclear Materials, 289 (2001) 1-9
176. Microstructural and Mechanical Characteristics of SiC/SiC Composites with Modified-RS Process, S.P. Lee, Y. Katoh, J.S. Park, S.M. Dong, A. Kohyama and S. Suyama, Journal of Nuclear Materials, 289 (2001) 30-36
177. Improvement of Mechanical Properties of SiC/SiC Composites by Various Surface Treatments of Fibers, T. Hinoki, W. Yang, T. Nozawa, T. Shibayama, Y. Katoh and A. Kohyama, Journal of Nuclear Materials, 289 (2001) 23-29
178. 高強度反応焼結炭化ケイ素の開発、須山章子、伊藤義康、香山 晃、加藤雄大, Journal of the Ceramic Society of Japan, 109 [4] (2001) 315-321
179. Recent Progress of SiC-Fibers and SiC/SiC-Composites for Fusion Applications, T. Noda, A. Kohyama and Y. Katoh, Physica Scripta, T91 (2001) 124-129
180. FEM Analysis of Asymmetrical Four-Point Bending Test for Shear Strength of Smart Materials Joints, H. Serizawa, C. A. Lewinsohn and H. Murakawa, Proceedings of the Fourth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, (2001) 1931-1934
181. Application of Electron Beam Curing for Silicon Carbide Fiber Synthesis from Blend Polymer of Polycarbosilane and Polyvinylsilane, A. Idesaki, M. Narisawa, K. Okamura, M. Sugimoto, Y. Morita, T. Seguchi and M. Itoh, Radiation Physics and Chemistry, Vol.60 (2001) 483-487
182. Microstructure Analysis and Strength Evaluation of Reaction Sintered SiC/SiC Composites, S.P. Lee, Y. Katoh and A. Kohyama, Scripta Materialia, 44 (2001) 153-157
183. FEM Evaluation of Asymmetrical Four-Point Bending Test on SiC/SiC Composite Joints, H. Serizawa, C. A. Lewinsohn and H. Murakawa, Transactions of JWRI, Vol.30 No.1 (2001) 119-125
184. 気相浸透反応法による高強度 SiC/SiC 複合材料の開発、香山 晃、加藤雄大、野田哲二、荒木 弘、まてりあ、第 40 巻 第 3 号 (2001) 298-300

185. エネルギー材料としての SiC/SiC 複合材料の開発、香山 晃、まてりあ、第 40 巻 第 2 号 (2001) 140-145
186. Development of SiC/SiC Composites by Nano-Infiltration and Transient Eutectoid(NITE) Process, A. Kohyama, S.M. Dong and Y. Katoh, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 311-318
187. Effects of Scarf Angle on Stress Singularity and Strength of Ceramic Joints, H. Serizawa, H. Murakawa, C.A. Lewinsohn, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 825-832
188. Preliminary Study of Influence of Test Specimen Size on the Fracture Behavior of 2D Woven Ceramic Matrix Composites, J.S. Park, Y. Katoh and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 469-476
189. High-Temperature Tensile Properties of Near-Stoichiometric SiC Fiber-Reinforced SiC Matrix Composites, K. Hironaka, T. Nozawa, T. Hinoki, T. Taguchi, N. Igawa, Y. Katoh, L.L. Snead and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 403-410
190. PREPARATION AND PROPERTIES OF SiC/SiC COMPOSITES WITH VARIOUS MATRICES, M. Sato, M. Suzuki, Y. Tanaka, Y. Inoue, N. Miyamoto, T. Ishikawa, Y. Katoh and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 519-526
191. Effect of Fiber Properties on Mechanical Properties of Crystalline Silicon Carbide Composites, T. Hinoki, L.L. Snead, E.Lara-Curzio, J. Park and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 511-518
192. Stress-Rupture and Stress-Relaxation Behavior of PIP-SiC/SiC Composites, T. Nozawa, E. Lara-Curzio and A. Kohyama, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 371-378
193. Microstructure and Properties of Liquid Phase Sintered SiC/SiC Composites, Y. Katoh, A. Kohyama, S.M. Dong, T. Hinoki, J.J. Kai, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 23 [3] (2002) 363-370
194. Overview of CREST-ACE Program for SiC/SiC Ceramic Composites and Their Energy System Applications, A. Kohyama, Y. Katoh, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 3-18
195. FLEXURAL PROPERTIES AND WEIBULL MODULUS OF SEVERAL SiC/SiC COMPOSITES PREPARED BY CVI METHOD, H. Araki, T. Noda, W. Yang, Q. Hu, H. Suzuki and A. Kohyama, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 281-288
196. Dual-beam Irradiation Effects in Silicon Carbide, H. Kishimoto, Y. Katoh, K.H. Park, S. Kondo, and A. Kohyama, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 343-352
197. Modeling of Fracture Strength of SiC/SiC Composite Joint by Using Interface Elements, H. Serizawa, H. Murakawa, and C.A. Lewinsohn, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 335-342
198. Fracture Resistance Evaluation of Ceramic Matrix Composites, J.S. Park, Y. Katho, A. Kohyama and H.K. Yoon, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 263-272
199. Process Design for SiC/SiC Composite with Polymeric Precursor, M. Kotani, Y. Katoh and A. Kohyama, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 97-104
200. Polysilane-Based Precursors for SiC/SiC Composites, M. Narisawa, K. Okamura, T. Iseki, K. Oka, and T. Dohmaru, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 141-152
201. SiC Ceramic Fibers Synthesized from Polycarbosilane-Polymethylsilane Polymer Blends, M. Narisawa, M. Nishioka, K. Nishioka, K. Oka, and T. Dohmaru, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 173-180
202. Effect of Residual Silicon Phase on Reaction-Sintered Silicon Carbide, S. Suyama, Y. Itoh, A. Kohyama, and Y. Katoh, Ceramic Transaction, Vol.144 (2002) 181-188

203. Development of SiCf/SiC Composites by Melt Infiltration Process, S.P. Lee, Y. Katoh and A. Kohyama, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 115-122
204. Silicon Carbide as Plasma Facing or Blanket Material, T. Hino, T.Jinushi, Y.Yamauchi, M.Hashiba, Y.Hirohata, Y.Katoh, and A.Kohyama, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 353-362
205. Optimization and Characterization of Chemical Vapor Infiltrated SiC/SiC Composites, T. Hinoki, L.L. Snead, T. Taguchi, N. Igawa, W. Yang, T. Nozawa, Y. Katoh, and A. Kohyama, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 55-68
206. Evaluation of Induced Activity of SiC Composites in Fusion Neutron Irradiation Environment, T. Noda, M. Fujita, H. Araki, W. Yang, H.Suzuki, Q. Hu, and A. Kohyama, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 363-373
207. Tensile Strength of Chemical Vapor Infiltrated Advanced SiC Fiber Composites at Elevated Temperatures, T. Nozawa, K. Hironaka, Y. Katoh, A. Kohyama, T. Taguchi, S. Jitsukawa, and L.L. Snead, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 245-252
208. Optimizing the Fabrication Process for Excellent Mechanical Properties in Stoichiometric SiC Fiber / FCVI SiC Matrix Composites, T. Taguchi, N. Igawa, S. Jitsukawa, T. Nozawa, Y. Katoh, A. Kohyama, L.L. Snead, and J.C. McLaughlin, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 69-76
209. Effects of Interlayers on Interfacial Shear Strength and Flexural Properties of Tyranno-SA Fiber-reinforced CVI-SiC/SiC Composites, W. Yang, H. Araki, T. Noda, Q. Hu, H. Suzuki, Y. Katoh, and A. Kohyama, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 273-280
210. A Novel Processing Technique of Silicon Carbide-based Ceramic Composites for High Temperature Applications, Y. Katoh, S.M. Dong, and A. Kohyama, *Ceramic Transaction*, Vol.144 (2002) 77-86
211. New Tyranno-SA Fiber Reinforced CVI-SiC/SiC Composite, W. Yang, Hiroshi Araki, Akira Kohyama, Jinnan Yu, and Tetsuji Noda, *Journal of Materials Science Letter*, Vol.21 (2002) 1411-1413
212. Interfacial Characterization of CVI-SiC/SiC Composites, W. Yang, A. Kohyama, T. Noda, Y. Katoh, T. Hinoki, H. Araki, and J. Yu, *Journal of Nuclear Materials*, (2002) in pressing
213. Synthesis of Silicon Carbide Films from Partially Oxidized Polyvinylsilane by Carbon Tetrachloride Solution Casting, M. Narisawa, T. Hasegawa, K. Okamura, M. Itoh, T. Apple, K. V. Moraes and L. V. Interrante, *Journal of the Materials Research*, Vol.17, pp.214-223, Vol.17 (2002) 214-223
214. Mechanical Properties of Several Advanced Tyranno-SA Fiber-Reinforced CVI-SiC Matrix Composites, W. Yang, Tetsuji Noda, Hiroshi Araki, Jinnan Yu, and Akira Kohyama, *Materials Science and Engineering A*, (2002) in pressing
215. Hi-NicalonTM Fiber-Reinforced CVI-SiC Matrix Composites: I Effects of PyC and PyC-SiC multilayers on the Fracture Behaviors and Flexural Properties, W. Yang, Hiroshi Araki, Tetsuji Noda, Ji Yeon Park, Yutai Katoh, Tatsuya Hinoki, Jinnan Yu, and Akira Kohyama, *Materials Transaction*, Vol.43 [10] (2002) 2568-73
216. Hi-NicalonTM Fiber-Reinforced CVI-SiC Matrix Composites: II Interfacial Shear Strength and Its Effects on the Flexural Properties, W. Yang, Hiroshi Araki, Akira Kohyama, Yutai Katoh, Quanli Hu, Hiroshi Suzuki, and Tetsuji Noda, *Materials Transaction*, Vol.43 [10] (2002) 2574-77
217. FEM Analysis of Asymmetrical Bending Test for Smart Materials Joints, H. Serizawa, C. A. Lewinsohn and H. Murakawa, *Materials Transactions*, (2002) 994-1000
218. Effect of Fiber Properties on Neutron Irradiated SiC/SiC Composites, T. Hinoki, Y. Katoh and A. Kohyama, *Materials Transactions*, Vol.43 No.4 (2002) 617-621

219. Low Temperature Swelling in Beta-SiC Associated with Point Defect Accumulation, Y. Katoh, H. Kishimoto and A. Kohyama, Materials Transactions, Vol.43 No.4 (2002) 612-616
220. Computational Analysis of Measurement Technique for Shear Strength of Ceramic Composite Joints, H. Serizawa, C. A. Lewinsohn and H. Murakawa, Proceedings of the third Asian-Australasian Conference on Composite Materials 2002 (ACCM-3), (2002) 59-68
221. Specimen Size Effects on Tensile Properties of 2-D/3-D SiC/SiC Composites, T. Nozawa, T. Hinoki, Y. Katoh, A. Kohyama and E. Lara-Curzio, Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume, STP1418 (2002) 294-305
222. ポリシラン系前駆体の反応性を利用した炭化物系セラミックスの微細構造制御、M. Narisawa, 、セラミックス、Vol. 37 (2002) 598-601

(2) 特許出願 (国内 14 件 海外 9 件)

①国内

1. 「高強度炭化ケイ素複合材料及び製造方法」香山 晃、野田哲二、荒木 弘 (特願平 10-143044、1998/05/25)
2. 「セラミックス繊維/SiC 複合材料の製造方法」香山 晃、野田哲二、荒木 弘 (特願平 10-143045、1998/05/25)
3. 「セラミックス複合材料製造用有機金属橋掛け重合体及びその製造方法」香山 晃、加藤雄大、山村武民、佐藤光彦、田中善積 (特願平 11-258688、1999/09/13)
4. 「セラミックス複合材料製造用有機金属橋掛け重合体及びその製造方法」香山 晃、加藤雄大、山村武民、佐藤光彦、田中善積 (特願平 11-258689、1999/09/13)
5. 「SiC 又は C 繊維/SiC 複合材料の製造方法」香山 晃、加藤雄大、野田哲二、荒木 弘 (特願 2001-7140、2001/01/16)
6. 「SiC 又は C 繊維の C 又は SiC 被覆方法」香山 晃、加藤雄大、野田哲二、荒木 弘 (特願 2001-7141、2001/01/16)
7. 「SiC 又は C 繊維/SiC 複合材料及びその製造方法」香山 晃、加藤雄大、野田哲二、荒木 弘 (特願 2001-7142、2001/01/16)
8. 「高強度 SiC 繊維/SiC 複合材料の製造方法」香山 晃、加藤雄大、小谷政規 (特願 2001-52147、2001/02/27)
9. 「高密度 SiC 繊維強化型 SiC 複合材料の製造方法」香山 晃、加藤雄大、小谷政規 (特願 2001-52148、2001/02/27)
10. 「高破壊靱性 SiC 繊維強化型 SiC 複合材料の製造方法」香山 晃、加藤雄大、小谷政規 (特願 2001-52149、2001/02/27)
11. 「高強度 SiC 繊維/SiC 複合材料の製造方法」香山 晃、加藤雄大、檜木達也 (特願 2001-64852、2001/03/08)
12. 「SiC 繊維強化型 SiC 複合材料のホットプレス製造方法」香山 晃、加藤雄大 (特願 2001-104186、2001/04/03)

13. 「SiC 繊維強化型 SiC 複合材料の製造方法」 香山 晃、加藤雄大（特願 2001-164996、2001/05/31）
14. 「SiC 系複合材料用 SiC 強化繊維の製造」 岡村清人、成澤雅紀、西岡昌紀、堂丸隆祥、岡 邦雄、香山 晃、加藤雄大（特願 2001-284704、2001/09/19）

②海外

1. 「セラミックス複合材料製造用有機金属橋掛け重合体及びその製造方法」 香山 晃、加藤雄大、山村武民、佐藤光彦、田中善積（PCT/JP00/06145、2000/09/08）
2. 「粒子加速器の高電圧電源部の除熱方法及びその装置」 香山 晃、加藤雄大、神保光一（PCT/JP01/02395、2001/03/26）
3. 「高強度 SiC 繊維/SiC 複合材料の製造方法」 香山 晃、加藤雄大、小谷政規（PCT/JP01/09360、2001/10/25）
4. 「高密度 SiC 繊維強化型 SiC 複合材料の製造方法」 香山 晃、加藤雄大、小谷政規（PCT/JP01/09361、2001/10/25）
5. 「耐破壊靱性に優れた SiC 繊維強化型 SiC 複合材料の製造方法」 香山 晃、加藤雄大、小谷政規（PCT/JP01/09362、2001/10/25）
6. 「SiC 繊維強化型 SiC 複合材料のホットプレス製造方法」 香山 晃、加藤雄大（PCT/JP01/09363、2001/10/25）
7. 「高強度 SiC 繊維/SiC 複合材料の製造方法」 香山 晃、加藤雄大、檜木達也（PCT/JP01/09364、2001/10/25）
8. 「SiC 繊維強化型 SiC 複合材料の製造方法」 香山 晃、加藤雄大（PCT/JP01/09365、2001/10/25）
9. 「ケイ素ポリマーの自己組織化による複合材料用強化繊維の製造」 岡村清人、成澤雅紀、西岡昌紀、堂丸隆祥、岡 邦雄、香山 晃、加藤雄大（PCT/JP01/09914、2001/11/01）

(3) 新聞報道等

1. 強度 2.5 倍の炭化ケイ素セラミックス（産経新聞 1999 年 9 月 4 日）
2. ロケット、原子炉材料に用途（京都新聞 1999 年 9 月 4 日）
3. 新素材で広がる夢（産経新聞 1999 年 9 月 11 日）
4. ロケットエンジン、大型燃料電池・・・実用化へ期待（京都新聞 2002 年 5 月 21 日）

(4) その他特記事項

本研究で開発された高性能 SiC/SiC 複合材料に関しては海外の多数の企業や国立研究所からの引き合いが来ており、化学計測器・超臨界水システム・ガスタービン機器・防護機材・原子炉用構造部材等での具体的な検討を始めつつある。具体的な契約としては平成 14

年度（最終年度）において三菱重工業との間で NITE 法に関する優先実施件の付与を行った。平成 14 年の 12 月からは文部科学省の革新的原子炉システム研究予算が認められ、NITE 法を中心とする技術のガス冷却型高速炉への応用に関する開発研究が開始されている。ガス冷却型高速炉への応用に関してはフランス原子力公社が注目しており、副大臣と原子炉開発部長からの面会依頼があり、直接の協力要請（できれば正式な共同研究への意向である）も受けている。この研究以外にも、日本原子力研究所との共同研究で超高温ガス炉への利用に関する共同研究が間もなく開始される予定であり、先進的な原子力システムへの応用が進みつつある。核融合炉開発計画における本研究成果の移転も具体的な計画立案へと進んでおり、平成 15 年度からの新研究の開始が予定されている。一方、マイクロタービン開発への応用としては米国オークリッジ国立研究所との共同研究もまもなく開始される予定であるし、本年の優先実施件を与えた三菱重工業とさらに内容を具体化したガスタービンへの利用のための共同研究が開催される予定である。

本研究での成果は多様な応用を可能にするものであり、今後急速に多方面での実用化の試みがなされるものと期待される。