

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：
先進複合材コンパクト中間熱交換器の技術開発

(国立大学法人京都大学)

研究開発の実施者

機関名：国立大学法人京都大学

代表者氏名：小西哲之

機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構

代表者氏名：稲垣嘉之

機関名：三菱重工業株式会社

代表者氏名：樋口暢浩

研究期間及び予算額：平成17年度～平成21年度（5年計画） 644,492千円

研究開発予算

平成17年度	35,015 千円
平成18年度	170,026 千円
平成19年度	281,574 千円
平成20年度	68,039 千円
平成21年度	89,838 千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>先進複合材を用いて、高温で強度に優れ、多様な熱媒体に対応しうる革新的原子力用コンパクト熱交換器の技術基盤を確立することを目的とする。そのために、試験要素を製作し、設計に必要な基礎工学データを取得する一方、熱交換器を使用した間接サイクル発電システムとしての最適化の観点で構造設計を行い、スケールモデルにより総合性能を実証する。革新的原子力システムで想定される、熱利用効率にすぐれる高温ガス炉などでは、一次冷却ヘリウムガスを用いた直接サイクルによる発電が主に考えられてきた。900℃超域で圧力差のある条件下で使用可能な熱交換器が開発されれば、発電プラント部分を管理区域とせず、一般工業レベルの管理が可能となり、安全性と経済性が向上することが期待される。また熱交換器を用いれば二次熱媒体を原子炉冷却材と異なるものとして行うことができ、高温ヘリウムガスタービン以外の利用系の適用の可能性も開ける。高温強度に優れる SiC セラミック複合材は、特に京都大学で開発された NITE 法によれば、気密性、高温強度に優れ、また高气密性を保ちながら複雑形状の部材をニアネット成型で製作できる可能性を持つ。これを用いてコンパクト熱交換器を開発することで、高温ガス炉等の革新的原子力システムの安全性、経済性を著しく向上するほか、革新原子力の共通基盤技術として幅広い高温熱利用の可能性を創出することを目標とした。</p> <p>全体計画は、研究開発項目1：セラミック複合材を用いて微細流路をもつコンパクト熱交換器の構造と製造法の段階的な開発と、試作した要素機器を実機に近い条件で試験するシステムの整備、およびスケールモデルの性能の実験的評価。研究開発項目2：熱交換器により一次系と二次系の独立性が確保された間接サイクル高温ガス発電炉の設計検討とコスト評価、および実規模熱交換器の設計。研究開発項目3：セラミック材料の欠点を補完するための、供用中の健全性を確保する試験法、修復法の検討、の3つの項目を相互にフィードバックしながら並行して実施した。</p> <p>この目標・計画には変更なく、5カ年度で申請書に記載した所期の技術目標を達成し、また計画書に毎年度記載した計画をすべて完了した。ただし、研究開発課題1では、研究開発の過程で、使用した複合材が金属と同等の熱伝導度をもつこと、しかもそれが熱交換器の性能に支配的でないことが明らかになったので、研究開発申請書に記載した素材としての熱伝導度の向上は行っていない。また申</p>

	<p>請時計画では単純形状部材からスケールモデル試験への移行は当初20年度以降と計画したが、開発の進展と予算計画の要請に従い、19年度に前倒した。それ以外の、若干の進み、遅れは年度内で吸収した。</p> <p>研究開発課題3の計画においては、供用中検査手法の開発を当初三菱重工業に再委託していたが、平成20年度から京都大学が実施することに変更した。これは、研究の進展に伴い、開発目標をPO中間フォローの際に相談した結果、表面欠陥の超音波スキャンによる検出に特化して京大が実施したほうが、より確実な成果を得られるとPO、関係者が合意したことによるものである。</p>
<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 	<p>【研究開発項目（1）要素部材試作試験】 [得られた成果]</p> <p>京大既設の液体金属ループを拡張し、高温化、各種試験用テストセクションの整備を行うと共に、高温ヘリウムループを新設し、900℃超で一次媒体のリチウム鉛合金から二次媒体のヘリウムへの熱交換実験体系を整備した。セラミック複合材で10cm角のプレートフィン型熱交換器スケールモデルを製作し、熱交換試験を行って900℃超で最大1.6kWの熱交換量を実測し、コンパクト熱交換器のフィージビリティを実証した。熱交換器の伝熱性能は600℃までの金属（オーステナイト）製と同等以上である。数値モデルによる解析とも良い一致を示し、SiC/SiC複合材の熱伝導度は十分に高く、複合材表面と流通ガスとの間の熱伝達が支配的であることを示し、実機に適用可能な設計モデルを確立した。得られた熱交換器の伝熱面密度は400以上、熱通過率は厳密な評価は難しいものの300W/m²Kであり、高性能なコンパクト熱交換器として所期の性能要求を満たすものである。</p> <p>水素透過特性は予想よりはるかに低く測定が困難であったが、別途製作した水素透過試験装置による測定により複雑な透過経路を解明し、SiC繊維やマトリックスではなく、粒界と界面が支配的であることを見出し、水素透過量削減法を開発するとともに、トリチウムガスによって実測した。この結果得られた水素透過性は、FPとして想定されるトリチウムの透過を、研究項目2で設計する間接サイクルで十分防止できる。一方、学術的にも、セラミック複合材における水素溶解拡散挙動を、複合材構成要素ごとに圧力依存性、温度依存性を測定し、そのメカニズムを詳細に分析した例はなく、新たな知見を含む重要な成果である。また、SiCの腐食挙動については酸化性、還元性不純物を含む高温ヘリウムに十分耐えるだけでなく、リチウム鉛合金、超臨界炭酸ガス、液体ナトリウムへの耐久性を示唆する結果を得て、この熱交換器の他の媒体への適用可能性を見出した。これらの成果は、高温ガス炉間接サイクル発電以外に、液体金属冷却炉などの異なる炉型の革新的原子炉への応用、また超臨界炭酸ガスタービンや他の熱利用系への原子力エネルギー利用の可能性を開くものである。さらに、リチウム鉛合金とSiC複合材の共存性測定において、従来知られていなかった複合酸化物形成現象を見出した。</p> <p>供試体材料の試作では、熱交換に適した素材の開発、積層接合によるプレートフィン構造の製作法を確立した。素材として用いたNITE-SiC材は熱伝導度は室温で平均25W/mK、1000℃でも23W/mK程度でオーステナイト鋼を凌駕しており、熱交換器素材としては十分である。また、高温における引張強度250MPa、接合強度は母材より大きく、設計要求を十分満足する。特にスケールアップの過程で、作業性・均一性の確保、熱応力の影響などの課題を克服した新たな接合法を開発して、スケールモデルの製造法を確立した。さらに、フランジ継手の開発は、当初計画にはないが、実用上重要な成果である。</p> <p>以上、セラミック複合材製コンパクト熱交換器を開発し、高温での熱的な性能、水素透過性、熱媒体共存性の、当初期待した性能を、実条件を模擬した条件で運転実証した。また、積層プレートフィン型のスケールモデルの製造技術を開発し、当初目標を達成した上、想定を上回る学術的技術的知見を得た。</p>

【研究開発項目（2）システム設計・スケールモデル試験】

[得られた成果]

実規模の高温ガス炉用の熱交換器とそのシステム、それを用いた間接発電サイクルのプラント全体と各コンポーネントの設計を行い、プラント配置、コスト、メリットとデメリットの分析を行った。熱出力 600MWt の実用炉を想定して、機器校正、熱媒体の温度、流量、圧力損失を検討し、物質収支等を評価し、発電効率 50.7%を得た。間接サイクルは、特に2次系となる発電システムの安全性、タービンなどの保守性で有利であり、許認可にかかる困難も軽減できる。一方、コンポーネントの増加によるコスト上昇、設置面積、発電効率では不利である。そこでさらに設計を合理化して、発電コストとして直接サイクル GTHTTR300（高温ガス炉を用いた電気出力約 300MW のガスタービン発電システム）の 4.14 円/kWh に対して間接サイクルで 4.55 円/kWh と、コスト自体は直接サイクルと比較して大きく異なることはなく、大型軽水炉の 5.3 円/kWh と比べて有利であることを明らかにした。ただし、資本費に占める中間熱交換器の比率が大きく、このコストによって発電コストが影響を受ける。一方、本業務により開発されるセラミック製の機器技術が、他の一次系構成機器に利用できる場合、原子炉運転温度を 1100℃まで上昇することが可能であり、この場合発電効率 53.9%が可能となる。

中間熱交換器実機の設計を行い、積層プレートフィン型の概念を構築して現実的な設計が可能であることを示すと同時にスケールモデル設計に反映した。実機設計は、高さ約 24m、内径 7.8m の圧力容器内で周方向に 6 個の熱交換器ユニットに分割して配置する構造とし、1 ユニット当たり 100MW となった。応力解析を行った結果、熱応力 77MPa、8MPa の冷却材圧力での減圧事象で 65MPa で、比例限界応力に対して十分小さく、全圧設計可能である。

トリチウム透過について、実ガス、実材料による測定を行い、研究開発項目 1 の水素挙動の知見と合わせ、トリチウム透過量が、設計したトリチウム処理系に対して十分小さく、2 次系となる発電システムを一般工業規格とできることを示した。

SiC は脆性材料であるため、微小亀裂の進展による破壊の懸念について有限要素法解析を行った。本研究による設計により、運転中発生する繰り返し応力によっては、亀裂が進展せず、したがって疲労破壊が寿命を決定することがないことを、応力の集中する場所と大きさの解析により明らかとした。

実規模の熱交換器の詳細構造に基づき、スケールモデルの設計を行い、研究開発項目 1 で開発した供試体試作手法により、約 10cm 角の NITE-SiC/SiC 複合材料によるスケールモデルを製作した。スケールモデルの製作では、当初計画の溝構造のモデルをループ試験に供すると共に、今後の大型化において、加工量が大幅に少なくなる、プレートとピンを別々に製作するはめ込み式での製作可能性を検討し、10cm 角のスケールモデルの試作に成功した。この大型モデルの製作のためのはめ込み式製作法の開発を行ったことは、今後の大型化に対して見通しを得る成果である。

【研究開発項目（3）供用中検査手法の開発】

[得られた成果]

供用中の検査手法については、当初、経年変化等による材料変化等に起因するミクロな欠陥の検出を目標に、引張又は衝撃荷重を付与した供試体に対して、マイクロフォーカス X 線法、音速測定法、共振法、非線形超音波法の 4 種類の手法の試行し、非線形超音波法により微細なき裂と思われるインジケーションを得たが、微小き裂の確認は困難であった。研究開発項目 2 では、繰り返し応力疲労破壊が寿命を決定することがわかったことから、PO と相談の結果、微小な亀裂の早期検出を目指すのではなく、SiC/SiC 材に導入した一定の大きさの人工欠陥の検出可能性の検討に重点をおいて開発を行うこととした。同時に、破壊モードの解析を行い、SiC 複合材が、繊維による補強作用により、微小亀裂が発生しても

繊維方向であれば急激に破壊が進展しないことを利用して、leak before break 概念により繊維方向には安全性を担保することができること、積層型のプレートフィン構造を持つ熱交換器においては、繊維による擬似弾性効果が望めない場所は外側接着面であることからそれに適した検査法を検討した。その結果、超音波探傷法により、2mm 深さ、170 μ m 以上の欠陥とその位置が、正確に特定できることを明らかにし、供用中に外面を超音波でスキャンすることにより、健全性を確保する方法のフィジビリティが確認された。また、耐圧試験、強度健全性試験により、SiC 複合材で製作した熱交換器の強度が十分であり、一次/二次隔壁となる部分について全圧設計となることを確認した。

修理法としては、メタンガスなどを流通し、マイクロ波を用いた局部加熱を行うことで、欠陥周辺へのCVDその場コーティング法を対象として、反応ガスと加熱条件をパラメータとして製膜速度を測定し、基本性能を検討した。その結果、微小な欠陥を充填できる可能性があることが明らかとなったが、マイクロ波による局所加熱は対象が熱容量が小さいときには有効であり、そのときのガス圧は分圧で100~300Pa であることを見出した。大きな熱容量を持つ装置の供用中の局所加熱法の開発は今後の課題に残るが、本開発項目は、セラミック機器の健全性確保が金属に比較して懸念があることに対して、新たな信頼性確保の方法についてフィジビリティを確認することが目標であり、この目標は十分達成された。

【事業全体】を通して

セラミック複合材を用いた高温用熱交換器の開発という本業務の目的は十分達成され、成果は原子力エネルギー利用に関する炉心冷却材高温ヘリウムガスの直接利用以外の道を開くものである。これは高温核熱利用技術において、革新的なブレイクスルーをもたらすものである。研究開発の過程で計画した以外に副次的・発展的に得られた結果は多い。具体的には、誘導加熱装置など900 $^{\circ}$ Cを超える液体金属熱媒体の利用取り扱い技術、セラミック複合材の加工、接着技術など多くの分野で利用可能性が大きい高温熱媒体技術、高機能セラミック複合材技術の基盤として、産業技術の競争力向上に貢献する。多くの熱利用プロセスで高温化はサイクル効率の向上に寄与し、エネルギー環境問題への貢献も期待される。また学術的には、セラミックの水素透過性、媒体との共存性に新たな知見と測定技術をもたらしており、学術的にも展開可能性がある。

【論文・特許等】

- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 先進複合材コンパクト中間熱交換器の技術開発
(1) 開発計画の概要 小西他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 同 (2) 高温ガス炉発電システム用中間熱交換器の概念設計 稲垣他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 同 (3) 液体金属ループを用いた複合材熱交換器要素の試験 登尾他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 同 (4) 流路試験部における基礎的伝熱特性の予備検討 竹内他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 同 (5) NITE-SiC/SiC 複合材の高温における水素透過特性 山本他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 同 (6) NITE-SiC/SiC 複合材料中間熱交換器作製技術開発 檜木他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 同 (7) 材料設計のため NITE-SiC/SiC 複合材料の強度特性評価 崔他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 同 (8) 先進複合材コンパクト中間熱交換器供用中検査技術開発 朴他
- ・日本原子力学会 07 年秋の大会 先進複合材コンパクト中間熱交換器の技術開発
(9) 開発計画の概要 2 小西他

	<ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力学会 08 年秋の大会 同 (10) 液体金属ループを用いた複合材熱交換器要素の試験 登尾他 ・日本原子力学会 08 年秋の大会 同 (11) スケールモデル作製技術開発 朴他 ・日本原子力学会 09 年秋の大会 先進複合材コンパクト中間熱交換器の技術開発 (12) 開発計画の概要 3 小西他 ・日本原子力学会 09 年秋の大会 同 (13) 複合材と熱交換器要素の特性評価 山本他 ・日本原子力学会 09 年秋の大会 同 (14) スケールモデルのための接合技術開発 檜木他 ・日本原子力学会 10 年秋の大会 先進複合材コンパクト中間熱交換器の技術開発 (15) 研究開発成果の概要 小西他 ・日本原子力学会 09 年秋の大会 同 (16) 熱交換特性の評価 登尾他 ・日本原子力学会 09 年秋の大会 同 (17) ITE-SiC/SiC 複合材の超臨界水などとの共存性試験 山本他 ・日本原子力学会 09 年秋の大会 同 (18) NITE-SiC/SiC 複合材料を用いた中間熱交換器作成技術開発 檜木他 ・Ceramatec, Inc., April 24, 2009, Salt Lake City, USA ,DEVELOPMENT OF NITE-SiC/SiC COMPOSITE COMPACT INTERMEDIATE HEAT EXCHANGER (口頭), T. Hinoki, Apr. 2009 ・IMAPS/ACerS 5th International Conference and Exhibition on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT 2009) ,Development of NITE-SiC/SiC Composite Compact Intermediate Heat Exchanger (口頭) , T. Hinoki, Apr. 2009 ・The 23rd IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, Development of high temperature SiC/SiC composite intermediate heat exchanger for He and LiPb (ポスター), K. Noborio, May 2009 ・10th International Nuclear Graphite specialist meeting, Development of Joining Technique for SiC/SiC Composite Component Utilizing NITE Process (口頭), T. Hinoki, Sep. 2009 ・The 7th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Development on Compact Intermediate Heat Exchanger Using Advanced Composite Material, Y. Yamamoto, Oct. 2010 ・34th International Conference and exhibition on Advanced ceramics and composites organized by the American Ceramic Society and the American Ceramic Society's engineering Ceramics division (34th ICCAC), Assembly Technique for SiC/SiC Composite Compact Intermediate Heat Exchanger Utilizing NITE Process (口頭), T. Hinoki, Jan 2010
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究開発の進捗 ・研究開発の成果 ・ブレイクスルー 	<p>【研究開発の進捗】</p> <p>一部で研究開発の進捗に応じた計画の変更や計画の遅れがあったものの、多面的なアプローチでNITE-SiC/SiC複合材中間熱交換器の技術開発に関わる研究開発で多くの有用な知見が得られており、当初の三つの研究開発項目における技術目標は、概ね計画通りに遂行されたと判断する。</p> <p>【研究開発の成果】</p> <p>NITE-SiC/SiC複合材を用いた高温用熱交換器の技術基盤の確立という目的に対しては、概ね想定通りの成果が得られているが、目的の一つである経済性の向上に関しては、検討した高温ガス炉間接サイクル発電において、直接サイクル発電と比べた発電コストの優位性を示せていない。</p> <p>【ブレイクスルー】</p>

	<p>本事業で開発したNITE-SiC/SiC複合材を用いた高温用熱交換器は、高温ガス炉の間接サイクル発電の実用化につながるものであり、従来システムに比して経済性を著しく損なうことなく、特に、高いプラント発電効率による資源有効利用、減圧事故時の健全性、2次系の非管理区域化等による安全性の向上に寄与する高温核熱利用技術として一定のブレイクスルーを実現している。</p>
4. その他	<p>本事業で得られた成果は、主として原子力学会、国際会議等で口頭発表されているが、今後は、積極的に学術論文を発表してもらいたい。</p>