

## 「セラミック材料の先進原子力システムへの応用」研究専門委員会 完了報告

「セラミック材料の先進原子力システムへの応用」研究専門委員会（Research Committee on Applications of Ceramic Materials for Advanced Nuclear Power Systems）は平成 20 年 12 月 1 日に発足し、22 年度からの延長期間を加え、4 年間の活動を行い、平成 24 年 11 月末日を以て活動を完了しました。

本委員会の設立趣旨では以下のように述べられています。

「わが国における安定的、且つ経済的なエネルギーを確保するための、再処理・バックエンドを含めて安全かつ高経済性を有するエネルギーシステムを構築するには、1)燃料の効率的利用、廃棄物の最小化並びに管理、核拡散抵抗性を確保したエネルギー源としての持続可能性、2)安全で信頼できる運転、敷地外緊張時対応が不要な安全性／信頼性の向上、3)他のエネルギー源とも競合できるライフサイクルコストの優位性を兼ね備えた GEN-IV・核融合並びにそれらに匹敵する先進的原子力エネルギーシステム概念への拡張性も含めた検討が必要である。また、これらの原子力システムの実現性の確認と優位性の更なる拡大が求められる。

SiC/SiC 複合材料に代表される先進的な高性能セラミック材料は多岐にわたる原子力システムにおいて実用化が期待され、最近ではこれらの材料を主要材料として多く取り入れた先進原子力システム概念も珍しくない。同時に、これまで材料開発で培われた多くの技術も共通の資産として幅広く活用が期待される。さらに広く材料開発分野に目を移すと、マイクロ、ナノテクノロジーの発達に伴い、従来不可能であった製品コントロールが可能となっており、画期的な特性を有するセラミック材料もいよいよ実用化に近づいている。

現在想定されている候補材料（金属材料を基本とする）においても解決すべき課題、或いは改善すべき課題が多く残されており、今後の課題解決へ向けての研究が強化されようとしている。いずれの場合も、製造性、基本特性、核的性能、共存性などのほか、多岐にわたる共通の材料課題が存在し、効率的且つ確実に課題を解決し、安全で経済的なシステム供給を実現するためには、材料工学・炉工学分野と設計活動とを包含する多面的見地から課題の抽出を行い、課題の解決に当たることが肝要である。そのため、これまでのような原子力システムの材料要件に強く依存した縦割り型の開発では、技術的な重複などから多くの浪費と限界があり、更なる材料開発の進展のためには、幅広い視点にたった横断的な枠組みで、よりフレキシブルな技術融合や研究開発が推進されるべきである。

一方で、限られたリソースの効率的利用の観点から、技術の選択と集中が進められる中で、周辺分野における技術進歩により可能となる代替技術に関する検討を維持することは Back-up 活動としても極めて重要と考える。

本委員会はこのような背景をもとに、セラミック材料の先進原子力システムへの現実的な応用を検討し、セラミック材料の早期実用化に向けた共通課題の抽出と技術融合・研究

開発に関する検討を実施する。特に既存の原子力システムの枠に捉われない横断的な研究活動拠点の確立を、産学密接な連携のもと目指す。

このため、上記の趣旨に基づき、研究専門委員会を設置することを提案する。」

この間、第1期では8回の委員会と2回の幹事会を開催し、セラミックス材料の先進原子力システムへの現実的な応用を検討し、セラミックス材料の早期実用化に向けた共通課題の抽出と技術融合・研究開発に関する検討を実施しました。しかし、「セラミック材料の先進原子力システムへの応用には、製造性、基本特性、核的性能、共存性などのほか、多岐にわたる共通の材料課題が存在し、効率的且つ確実に課題を解決し、安全で経済的なシステム供給を実現するためには、材料工学・炉工学分野と設計活動とを包含する多面的見地から課題の抽出を行い、課題の解決に当たることが肝要である。2年間で現状の材料開発状況に基づく共通課題の抽出、既存材料の開発を基にした導入シナリオを検討してきたが、現実的なセラミックス材料の応用に至るには、更なる検討が必要である。」とし、2年間の本研究専門委員会の延長を申請しました。

延長申請の最大の理由は、本委員会の活動が完了していないことに加え、原子力分野においてセラミック材料に関する古い知識や昔の常識にとらわれていて、セラミック材料の現状に関する誤った理解があまりにも多く存在する事への危惧でした。

この為、延長後の2年間（平成22年12月1日～平成24年11月30日）では非原子力分野を含めた幅広い活動分野からの情報交換をもとに、以下の課題を実施する事としました。

- 1)核融合・先進核分裂炉への実用化を視野に入れた先進セラミック材料に関する調査・研究
- 2)核融合・先進核分裂炉への先進セラミック材料の応用に関わる課題の抽出
- 3)核融合・先進核分裂炉への先進セラミック材料を応用した新規概念に対応する概念設計および導入に関わるシナリオ検討
- 4)非原子力分野での関連材料開発活動及び市場の調査・研究

委員会での議論の詳細は委員会資料を参照していただくとして、主たる結論の概要を以下に示す。

1)核融合・先進核分裂炉への実用化に関して基礎研究は充実してきており、幾つかの注目される企業活動が認められる。特に、国内での核融合・原子力材料としての工業化の努力には国際的なリーダーシップを有する活動のあることが確認された。

2)核融合・先進核分裂炉への先進セラミック材料の応用に関しては、基本的な特性に関するデータの蓄積は進んでいるが工業材料として利用を目指すには評価手法や評価基準の不備など、問題点が多く、この面での産学官での協力体制の確立の必要性が確認された。一方、原子炉等への実用において不可欠な中性子照射研究の不足、特に原子炉での使用のための許認可に係るデータの欠落が大きな今後の課題として抽出された。

3)核融合・先進核分裂炉への先進セラミック材料を応用においては材料特性を最大限に利用するために新規概念に対応する概念設計および導入に関わるシナリオの確立が必要であるとの認識の上で検討を進めた。この中で、軽水炉への実用化の促進のためには現在の発電

炉の炉心変更を最低限に抑える形での実用化が好ましいとの結論に至った。ただし、どの程度の保守性を保つかに関しては大いに議論が分かれ、今後の個々の活動にゆだねるべきであろうとの結論に至った。

4)非原子力分野での関連材料開発活動及び市場の調査に関しては限られた範囲での活動に留まったが、原子力分野での利用がまず検討されている C/C 複合材料や SiC/SiC 複合材料に関しては航空・宇宙分野をはじめとする輸送機器分野での先導的な研究と企業活動の存在や派生した活動のあることが分かった。また、エネルギー分野に関しては用途は多岐にわたるが耐熱性や耐環境性での優位を背景にした火力発電・地熱発電等での用途開発に注目された。これらの非原子力分野での活動を最大限利用し、原子力固有の技術開発を併合する事により本委員会の目標とするセラミック材料の原子力分野への応用が促進されるとの結論に至った。

この間、セラミック材料の原子力システムへの応用については潜在的な魅力に関する理解は得られたが、原子力システムの強固に確立された安全性の前には近い将来での実用化を視野に入れる必要が無いとの誤った認識が大きな障壁として存在する事を痛感していた。

何度かの原子力委員会や安全委員会への要望についても同様の反応を得ていたところに、東日本大震災が起これ、東京電力福島原子力発電所での事故が発生し、本委員会が最も危惧していたジルカロイ燃料被覆管と水との反応による水素爆発という、全く想定されていない事故により被害が拡大した。

この事態を受けて、本委員会では原子力委員会 近藤俊介委員長あてに「セラミック材料の利用による原子力システム安全性の大幅な強化」活動の推進に関する要望書の提出を行いました。本要望書は学会 HP で公表されていますが、要望書では以下のように述べられています。

「現在、原子力委員会を中心とした我が国の原子力行政や緊急の行動方針策定において、「原子力における安全・安心の確保、特に、絶対的な安全性を目指す原子力システムの改善」が議論されていると伺っています。

これらの議論・検討において本研究専門委員会が進めてきた「セラミック材料の利用による画期的な安全性をもたらす原子力システムの推進」を取り入れていただきたく、本要望を公表するものです。

米国エネルギー省は福島での事故を踏まえ、多くの対策を打ち出していますが、第 15 回原子力パワーシステムにおける材料の環境劣化に関する国際会議(2011 年 8 月 8 日、コロラドスプリングス、コロラド)では副大臣の P. B. Lyons 博士が原子力エネルギー局からの現状課題の報告(Update on Current Issues from the Office of Nuclear Energy)を行い福島事故以降の研究課題として燃料・材料関連では”Re-engineering barriers can reduce complications”とし、SiC cladding の重要性をあげ、研究開発の強化を表明しています。欧州での取り組みは米国よりも進んでおり、我が国の対応の遅れが大いに危惧されます。

野田総理とオバマ大統領は、2012 年 4 月 30 日の会談において、2011 年 3 月の原子力事故後の緊密な日米協力関係に基づき、二国間協力を一層強化するため、「民生用原

子力協力に関する日米二国間委員会」の設立を発表しました。この二国間委員会は、二国間における課題の優先順位及び両国が直面する課題、並びに、国際原子力機関（IAEA）、核セキュリティ・サミット等のような多国間政治の場で取り上げられている政策課題を含む、民生用原子力エネルギーの世界的な発展に影響する課題に関する、二国間の協議・協力のための上級レベルの常設のフォーラムとなるものです。二国間委員会は、戦略的・実地的な協調を通じ、将来的な原子力協力に関する議論を促進するとともに、原子力安全及び核セキュリティ、核不拡散、テロ対策、廃炉及び除染、緊急事態対策及び対応並びに研究開発に関する共通の利益を増進する活動を推進しています。

この活動に”The Civil Nuclear Energy Research and Development (R & D) Working Group (CNWG)を設けることに2013年1月に合意し、11月1日にワシントンで最初の会合が開催されています。2013年11月4日の第2回2国間会議においてCNWGの活動とSub-Groupの活動に関する報告がなされています。

本研究専門委員会では最終回においてパネル討論を行い、委員会終了後の活動方針について議論した。最も重要な結論としては本委員会の成果を基に、原子力システム研究開発補助金や受託研究など競争的資金の獲得を関係者が共同して行う事でした。

東日本大震災での事故をふまえ欧米ではいち早く厳しい事故に対する安全性を確保するための活動を強化しようという議論が進みました。これらは上述したCNWGの活動やOECDでの活動と密接に関連しています。

国内でも遅ればせながら原子炉での事故時の耐性を高めるための研究の必要性が認められ、平成24年度の後半に新しい概念での原子力システム関連の研究事業の公募が文部科学書・経済産業省から行われました。本委員会からの関連提案としてはセラミック材料（複合材料）の原子炉炉心への応用に関する材料・システム開発研究が出され、双方で2件ずつの計画が採択されました。1件は東芝からの提案であり、他方は室蘭工業大学からの提案です。

一方、CNWGでは米国の提案により、従来の高速炉サイクル技術に関する研究協力に加えて、軽水炉R & DのSub-Groupが設置されました。このSub-Groupの中の4つの技術協力の一つが事故耐性燃料（ATF: Accident Tolerant Fuel）のR & Dが位置づけられています。

事故耐性に優れた燃料という概念は今後の原子力の推進のための欠くべからざる重要な要素であり、本委員会で検討してきたことを最も近いところで実現させるための極めて重要な枠組みであるので以下に概要を簡単に述べます。

## 事故耐性燃料の開発

OECD/NEA (Nuclear Energy Agency)を始めとして国際協力でのATFの開発の議論は進んでおり、国内の活動としても大きく動き出そうとしています。達成目標の一例は、2022年ころまでに炉心での冷却水喪失事故時における耐性を現行の燃料よりは十分に長く維持できる燃料を開

発し、現存する軽水炉において試験を行う事です。この為の大きな目標として、(1) 水素の発生を無くすか大幅に抑制する、(2) 燃焼度を上げることにより使用済燃料の発生を抑える、(3) 燃料被覆管の破損を抑え信頼性を大幅に向上させる、(4) 経済性を向上させ、出力向上を許容する、事などが挙げられています。関連する材料技術分野などにおいて先行している我が国の優位性を活かし、今後の原子力産業を我が国が牽引するためにもこれからの活動は重要です。

### 1 ATF 開発ロードマップの作成

ATF の要素技術には事故耐性の向上度や技術の成熟度に大きな広がりがあり、国内外の開発動向調査、国際協力も含む開発計画の検討が必要です。しかし、喫緊の課題としては正確な情報に基づく ATF 要素技術の技術成熟度評価を行い、我が国独自の ATF 開発ロードマップを作製する事です。材料的な観点から言えば、検討の主要燃料要素は；

(1) 燃料被覆管、(2) 燃料、(3) 制御棒、です。

### 2 燃料被覆管

ジルカロイ管からの変更には多くの概念があり、ジルカロイ管の内側、外側への事故耐性向上層の付加、耐熱金属への変更（酸化物分散強化鋼、金属間化合物、高融点金属合金等）に加え、SiC を用いる被覆管概念も多数出ています。SiC/SiC 複合材料を用いるホルミック型の燃料被覆管は我が国がいち早く原子炉照射実験の水準に到達しています。

### 3 TRISO 型燃料

UO<sub>2</sub> 燃料核にセラミックの多重被覆を施し事故耐性を高める TRISO (TRi-ISotropic coating)型燃料の燃料核の高度化や被覆層の高度化、更には TRISO 型燃料を更にセラミックやセラミック複合材料に埋め込み耐性を高める工夫なども検討されています。事故耐性の開発目標設定と経済性とのバランスが技術課題となります。

### 4 制御棒

通常運転時や事故時等の多様な状況下での要求仕様を評価し、より優れた制御棒機能を発現できる候補材を多様な選択肢より選び、核的特性、製造性、調達性等を検討し、特に事故時での安定性を評価する事が重要です。事故時における再臨界を防止しうる構造の提案などもあり、技術評価には原子炉照射実験や新しい施設も必要とされています。

セラミックス材料の原子炉への応用に関する多様な研究は本委員会の終了後も順調に成果を積み重ねており、本会の年会においても成果の発表が行われているほか、主要な原子力関連の国際会議においても成果の発表が行われています。

これからは全日本の開かれた組織の下で議論を続け、開発努力が無駄のない形で迅速に実用化に向けて進化するように関係者が協力して推進する事が重要であると考えます。

以下に、最終年度での委員会構成を示し、関係者への謝意を表明します。

主査 香山 晃（室蘭工業大学）

幹事 岸本 弘立（室蘭工業大学）、 沢 和弘（日本原子力研究開発機構）、  
鹿野 文寿（東芝）

委員 阿部 勝憲、 伊藤 邦博、大矢 恭久、木曾原 直之、車田 亮、  
古澤 孝弘、小西 哲之、佐藤 彰洋、澤田 隆、四竈 樹男、  
柴山 環樹、鈴木 晶大、芹澤 久、高木 俊、田川 精一、田中 照也、  
谷川 博康、辻 延昌、寺井 隆幸、西谷 健夫、野上 修平、野澤 貴史、

野田 哲二、長谷川 晃、波多野 雄治、林 君夫、樋口 真一、  
日野 友明、福岡 聖一、星野 毅、堀池 寛、松井 秀樹、村井 純一、  
室賀 健夫、森下 和功、安田 和弘、矢野 豊彦、山中 伸介、  
丸山 忠司、堂野前 貴子、三輪 周平、馬嶋 一隆、田中 秀樹、  
檜木 達也

常時参加者 幸野 豊、手塚 英志、新原 皓一 (以上 51 名：順不同、一部所属省略)

(文責：香山 晃)