

原子力科学技術に関する
研究開発課題の中間・事後評価結果

平成27年10月

科学技術・学術審議会

研究計画・評価分科会

目次

- 原子力科学技術委員会 委員名簿 2

<中間評価>

- 核不拡散・核セキュリティ関連業務（核不拡散・核セキュリティに関する取組の強化）の概要 3
- 核不拡散・核セキュリティ関連業務（核不拡散・核セキュリティに関する取組の強化）の中間評価票 4

<事後評価>

- 溶融燃料中の核物質測定技術の開発の概要 13
- 溶融燃料中の核物質測定技術の開発の事後評価票 14

原子力科学技術委員会委員

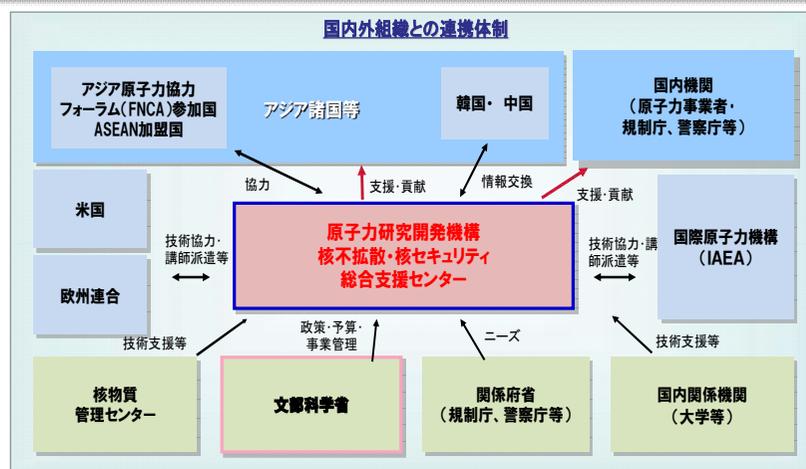
	氏名	所属・職名
主査	山口 彰	東京大学大学院工学系研究科教授
主査代理	出光 一哉	九州大学大学院工学研究院教授
	伊藤 聡子	フリーキャスター
	海老塚 清	一般社団法人日本電機工業会専務理事
	大島 まり	東京大学大学院情報学環／生産技術研究所教授
	小栗 慶之	東京工業大学原子炉工学研究所教授
	小野田 聡	電気事業連合会専務理事
	北田 孝典	大阪大学大学院工学研究科准教授
	中島 健	京都大学原子炉実験所教授
	服部 拓也	一般社団法人日本原子力産業協会特任フェロー
	八木 絵香	大阪大学コミュニケーションデザイン・センター 准教授
	結城 章夫	山形大学名誉教授（前山形大学長）
	横山 広美	東京大学大学院理学系研究科准教授
	和気 洋子	慶應義塾大学名誉教授

核不拡散・核セキュリティ関連業務(核不拡散・核セキュリティに関する取組の強化)

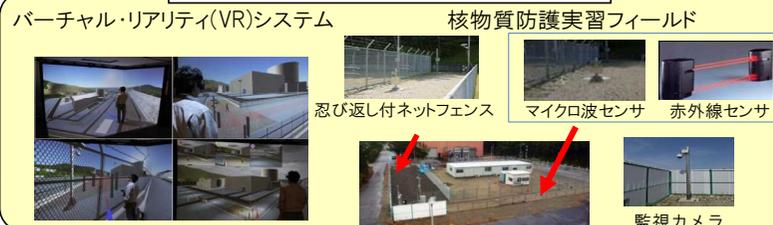
事業概要

- 2010年4月、ワシントンで行われた第1回核セキュリティ・サミットにおいて、日本原子力研究開発機構に核不拡散・核セキュリティ総合支援センター(以下「総合支援センター」という)を設置すること、より正確で厳格な核物質の検知・鑑識技術の確立・共有を表明。
- 平成23年度より、国際的な核不拡散及び核セキュリティ強化の観点から、総合支援センターにおいて、以下の事業を実施。
 - ◆人材育成
アジア初の人材育成拠点として、アジア諸国を中心に核物質防護トレーニングなどを行い、核不拡散・核セキュリティ分野の人材育成を支援。
 - ◆技術開発
我が国の研究開発機能・能力を活用した高度な核物質の測定、検知及び核鑑識の技術開発を実施。

人材育成



総合支援センター内の設備



技術開発

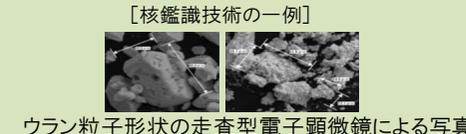
核物質の測定・検知に係る技術開発(例)

従来の技術では困難とされてきたコンテナ等に隠匿された厚い遮へい体中にある核物質の検知や、使用済燃料の定量測定を非破壊で行うため、大強度単色ガンマ線(レーザー・コンプトン散乱ガンマ線)発生技術開発を実施。



核鑑識

核物質の不法取引等により警察当局に押収される核物質について、核鑑識(精密な測定により当該物質のウラン・プルトニウムの同位体比の違いや精製年代の同定により、その核物質の由来を特定する)技術開発を実施。



[核鑑識技術の一例]

<予算額の変遷等>

	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
予算額(人材育成)	704百万円	430百万円	316百万円	288百万円
予算額(研究開発)	521百万円	698百万円	255百万円	253百万円
研修実績数	419名	613名	509名	676名
技術開発数	4課題	4課題	4課題	3課題

中間評価票

(平成27年8月現在)

1. 課題名 核不拡散・核セキュリティ関連業務（核不拡散・核セキュリティに関する取組の強化）

2. 評価結果

(1) 課題の進捗状況

事業全体の状況

平成22年(2010年)4月の第1回核セキュリティ・サミットにおけるナショナル・ステートメントを踏まえ、日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)に設置した核不拡散・核セキュリティ総合支援センター(以下「支援センター」という。)を活用し、平成23年度から核不拡散・核セキュリティに関する人材育成、核検知・核測定、核鑑識に関する技術開発を実施。

●人材育成

近年原子力発電の新規導入の機運が高まっているアジア諸国を主な対象として、国際原子力機関(IAEA)、米国エネルギー省(DOE)等との協力の下、原子力機構の人材・設備等を活用しつつ、以下のとおり人材育成を実施。

<実施内容>

➤ 核セキュリティコース

支援センターは、アジアにおいて、核物質防護実習フィールド^{※1}とバーチャル・リアリティ(VR)システム^{※2}の2つの設備を有する唯一のセンターであり、実際の設備及び仮想的な空間の両方を活用し、核物質防護の考え方やIAEA勧告文書の概要、防護システムの性能試験などに関する実地演習を含む実践的なトレーニングを実施。

※1 実際の核物質防護設備(防護フェンス、センサー、カメラ等)に触れ、その特性などを体験できる施設

※2 3Dに再現された仮想の原子力施設や核物質防護設備を用いて視覚的な体験学習ができる設備

➤ 保障措置・計量管理制度コース

原子力機構の施設を活用し、IAEA保障措置制度(追加議定書を含む)、核物質の計量管理手法・技術などに関する実地演習を含む実践的なトレーニングを実施。

➤ 国際枠組みコース(二国間協力)

対象国の核不拡散に関するニーズを調査し、そのニーズに合わせたトレーニング等

を実施。

平成 23 年度から 26 年度の各コースの実施回数・参加者数は以下のとおり。

コース名	実施回数(回)	参加者数(名) (延べ人数) ※3
核セキュリティコース	49	1,248
保障措置・計量管理制度コース	16	320
国際枠組みコース	14	649
合計	79	2,217

※3 他のコースと重複して出席した者については、それぞれカウント。

支援センターは、上記のとおり、過去 4 年間で、核セキュリティ及び核不拡散分野の 3 つのトレーニングコースを実施し、2,217 名(49 ヶ国、3 国際機関)がこれらのコースに参加するなど、アジア初の核不拡散・核セキュリティ分野の人材育成拠点として、重要な役割を果たしている。

<対象国>

- 現地に赴いて研修を行う国については、ニーズ調査や外務省等の関係省庁の意向も踏まえ選定。
- 我が国で行う研修については、アジア原子力協力フォーラム(FNCA) ※4 等を通じて構築してきたネットワークを活用しつつ、アジア諸国(ベトナム、マレーシア、インドネシア等)を中心に選定。

※4 近隣アジア諸国との原子力分野の協力を効率的かつ効果的に推進する目的で我が国が主導する原子力平和利用協力の枠組み。

<国際協力>

- 国際機関や他の国の政府機関、NGO の特徴や知見を踏まえた国際協力を積極的に活用
- 核セキュリティ、核不拡散分野の人材育成支援やガイドライン策定に実績を有する IAEA との間では、協力取決めに基づき、テキスト作成、共催トレーニング等を実施。また、IAEA の NSSC(International Network of Nuclear Security Training and Support Centres) を通じて、他の国の同様のセンターとの間でベストプラクティスの共有、共同での普及啓発活動、テキスト作成等を実施。
- 核セキュリティ分野の人材育成の実績において先行する DOE が提供する研修を活用することで、支援センター自身の本分野の人材育成支援能力を向上
- DOE や欧州委員会共同研究センター(JRC) との協力取決めに基づき、トレーニングコースの共同開発、講師相互派遣等を実施
- 核セキュリティ文化の醸成や核セキュリティに関するベストプラクティスの共有を

目的として設立された世界核セキュリティ協会（WINS）との共催ワークショップを毎年開催。

<成果>

当初の計画どおり、単に核セキュリティ及び核不拡散分野の3つのトレーニングコースを開催するだけでなく、特に国際枠組みコースと核セキュリティコースを連携させ、各国に対する支援計画を戦略的に策定、段階的に履行した。個々の研修修了後に実施している関係者へのアンケートの結果から、支援センターの行っている人材育成活動が受益国のニーズを満たす内容になっているという点において、高く評価されていることが窺われる。また、アンケートの結果を分析することにより、今後の研修の内容や構成の検討に生かしている。こうした支援センターの活動や他の国が提供する支援活動は、ベトナムによるIAEAとの追加議定書及び改正核物質防護条約、インドネシアによる核テロ防止条約の批准に貢献するなどの具体的な成果が得られており、国際的な核不拡散・核セキュリティの強化に貢献している。

なお、これらの成果については、過去の核セキュリティ・サミットにおいて、総理より、我が国の国際貢献として報告されている。

<改善すべき事項>

アンケートの結果を取り入れることにより研修内容や構成の改善を図っているものの、他分野における研修活動の事例も参考にしつつ、支援センターが行った研修の受講者の当該国における活動をきめ細かくフォローしていくことにより、当該国が自力で研修を行える能力を身につけるよう留意することが重要。

韓国、中国等、アジアの他の国においても本分野の人材育成のためのセンターの運用が開始されているため、効率的な事業の実施の観点から、今後、現在の協力関係をさらに強化し、核物質防護実習フィールドやVRシステムを利用した実践的なトレーニングの実施といった我が国の支援センターの強みを生かしつつ、これらのセンターとの連携、役割分担を検討していくことが重要。

●技術開発

核不拡散・核セキュリティの確保、強化には、制度的措置や人材育成のみでなく、核不拡散・核セキュリティに資する技術を開発する取組みが重要であるという認識の下、原子力に関する先進的な技術を有する我が国に対し、これら技術開発への貢献が求められている。本事業の中で技術開発を行う課題については、国際的なニーズ及び本分野での技術開発状況を俯瞰した上で技術開発課題を同定し、その内、原子力機構が有するリソースや国際協力を有効活用することで国際的に貢献できる可能性があるものを選定。本評価の対象である技術開発項目のうち、核不拡散に関しては、使用済燃料中のPuの量を測定する技術がないため、計算値に依存せざるを得ない状況（使用済燃料中プルトニウムの非破壊測定

(NDA)実証試験)、核物質の計量のための中性子検出器に用いられてきたヘリウム3の供給不足(ヘリウム3代替中性子検出技術開発)、核セキュリティに関しては、コンテナに隠匿された核物質の検知の必要性(レーザー・コンプトン散乱ガンマ線非破壊測定技術基礎開発)、核物質の不法移転や核テロの発生時に核物質の起源等の同定を容易にする技術の必要性(核鑑識)が背景として挙げられる。

<核物質の測定・検知に係る技術の開発>

核不拡散及び核セキュリティ分野に共通する基盤技術として以下の非破壊測定技術開発を実施。

➤ レーザー・コンプトン散乱ガンマ線非破壊測定技術基礎開発(平成23~26年度)

米国デューク大学、高エネルギー加速器研究機構(KEK)との協力の下、従来の技術では困難とされてきたコンテナ等に隠匿された厚い遮へい体中にある核物質を検知するため、大強度単色ガンマ線(レーザー・コンプトン散乱ガンマ線)を用いる非破壊測定技術開発を実施。平成26年には、ガンマ線による非破壊測定技術に焦点をあてた国際シンポジウムを世界で初めて開催。また、KEKのエネルギー回収型リニアックを用いて、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線発生 of 基礎的な技術開発を行い、従来、困難であった厚い遮へい体中にある核物質の検知を可能とする世界最高強度(従来の約100倍以上)の大強度単色ガンマ線の発生に成功し、基盤技術を確立した。

➤ 使用済燃料中プルトニウムの非破壊測定(NDA)実証試験(平成23~25年度)

DOEの次世代保障措置イニシアティブ(NGSI)^{※5}の一環で、DOEとの協力の下、使用済燃料中のプルトニウム量の測定を非破壊で行うための技術開発を「ふげん」の使用済燃料を用いて実施。今後、本技術の実用化を考えた場合に課題となる、中性子量から核物質量を非破壊で測定する装置の開発に関し、更なる改良を要する点についての貴重な知見が得られた。

※5 米国において、保障措置システムを持続させるために必要な政策、概念、技術、専門的技能、インフラを確立することを目的として計画

➤ ヘリウム3代替中性子検出技術開発(平成23~26年度)

各国の原子力施設等で核物質の測定・検知のために使用されているヘリウム3の供給不足に対応するため、従来型の汎用中性子検出器に代わる高効率中性子検出器(セラミックシンチレータ中性子検出器)の開発を実施。IAEA、DOE及びJRCより、査察現場で使用可能なレベルで核物質を定量できるとの評価を得た。長時間に及ぶ環境温度変化等に対する安定性などの解決を前提に、実用化への見通しが得られている。

<核鑑識に係る技術の開発(平成23年度~)>

核物質の不法取引等により警察当局に押収された核物質について、当該物質のウラン・プルトニウムの同位体比や精製年代の同定により、その核物質の由来を特定する技術開発を DOE 及び JRC との協力の下に実施。

表面電離型質量分析計等を用いた測定技術を開発し、核鑑識分析に関する国際比較試験（G8 の WG 主催）では米国、欧州と並び世界トップレベルの精度が認められるなど、核鑑識の基盤技術の確立がなされた。

また、実際に核物質の不法移転が起きた場合に、押収等された核物質との照合を可能にする核鑑識ライブラリーのプロトタイプを整備した。

参考データ

技術開発名	論文数
レーザー・コンプトン散乱ガンマ線非破壊測定技術基礎開発	41
使用済燃料中プルトニウムの非破壊測定 (NDA) 実証試験	11
ヘリウム 3 代替中性子検出技術開発	13
核鑑識技術開発	8

<成果>

高度な核物質の測定、検知及び核鑑識に係る技術開発について、4 件の技術開発を実施し、上記のとおり基盤技術の確立が図られた。また、これらの技術開発の成果については、国際シンポジウムでの開催・発表などを通じて、国際社会と共有し、国際的な核不拡散・核セキュリティ強化に貢献している。

以上より、技術開発についても、当初の計画が達成されたと考えられる。

なお、成果の今後の活用として、例えば、平成 27 年度から日米共同で開始された「核共鳴蛍光非破壊検知技術」の開発事業において、「レーザー・コンプトン散乱ガンマ線非破壊測定技術基礎開発」の一環で開発された技術（核共鳴蛍光反応シミュレーション技術）の高度化（同位体濃度が低い試料でも測定を可能にする技術開発）が行われている。

<改善すべき事項>

今後、核不拡散・核セキュリティ分野に精通した機関のみならず、他分野との連携も視野に入れながら、より効率的な事業を進めること、さらに、実用化も念頭においた技術開発（例えば、小型装置等）の検討を進めることも重要。

評価

●人材育成

<必要性>

新たな国による原子力発電の導入、核不拡散、核セキュリティの強化に対する認識の高まりという国際的な潮流の中で、核不拡散・核セキュリティを確保しつつ原子力平和利用を推進してきた我が国が、これまで培ってきた経験、知見を活用した実践的な人材育成支

援活動を通じてリーダーシップを発揮することは必要であり、支援センターは、国際的な核不拡散、核セキュリティ強化への我が国の貢献を目に見える形で示すという点において、その役割を十分に果たしている。

<有効性>

人材育成にあたって、DOE や IAEA との協力により効果的な研修プログラムや教材の作成を行った。対象国のニーズを踏まえた、きめ細かい人材育成・基盤整備支援の活動を行い、その取組みは相手国から高く評価されている。こうした支援センターの活動や他の国による支援活動により、ベトナムによる IAEA との追加議定書及び改正核物質防護条約の批准、インドネシアによる核テロ防止条約の批准がなされるなど、具体的な成果が得られている。

<効率性>

JAEA が保障措置受入れや核物質防護措置の適用の経験によって得た知見の活用、IAEA、DOE、JRC との間での講師の相互派遣、研修プログラムの開発等の国際協力、国内関係省庁との連携により、効率的に人材育成事業を実施した。

●技術開発

<必要性>

核拡散や核テロへの懸念が高まる中で、我が国には技術開発の面での貢献も期待されており、支援センターが行う技術開発の成果を国際会議の場等で発表するなど我が国の貢献を目に見える形で示すという点において、その役割を十分に果たしている。

<有効性>

核物質の測定、検知及び核鑑識に係る基礎技術の確立が図られ、IAEA 等より高く評価されている。また、これらの成果については、国際シンポジウム等を通じて、国際社会と共有した。

<効率性>

技術開発に必要な施設や知見を有する JRC や DOE との国際協力を活用することにより効率的に技術開発を実施した。

(2) 各観点の再評価と今後の研究開発の方向性

●人材育成

<必要性>

核拡散、核テロに関する国際的な懸念は継続している一方で、福島第一原子力発電所事故後も国際的に原子力発電の導入、拡大の潮流が続く中で、我が国が平和利用に限定して

原子力利用を実施してきたことにより蓄積された経験を生かし、原子力平和利用の大前提である核不拡散・核セキュリティ強化に人材育成の観点から貢献することは必要であり、当初設定した評価項目は妥当である。

中間評価を踏まえた評価項目は以下のとおり。

- ・ 核不拡散・核セキュリティ、原子力を取り巻く国際情勢を背景にした、我が国が核不拡散・核セキュリティ分野の人材育成で貢献することの必要性

<有効性>

支援センターが人材育成事業を行うにあたっては、対象国の原子力発電の導入に向けた進展の段階やニーズを踏まえてテイラーメイドのきめ細かな活動を実施していくことが有効である。また、DOE 等との協力により支援センター自身のキャパシティを強化、拡大していくことが、人材育成事業の有効性を更に強化することにつながるものであり、当初設定した評価項目は妥当である。

また、新たな項目として、参加者が研修で得られた成果をどれだけ生かしていくのかをフォローアップし、より効果的な研修とすることを追加する。

中間評価を踏まえた評価項目は以下のとおり。

- ・ 国際協力を活用した効果的な人材育成プログラム等の策定
- ・ 研修後のフォローアップを通じた有効性の確認、強化

<効率性>

当初設定した評価項目どおり、事業を効率的に実施するにあたって、原子力機構が有する知見を引き続き活用するとともに、講師の相互派遣、研修プログラムの開発、国際機関等との協力によってリソースを効率的に活用することが重要である。また、韓国、中国等、アジアの他の国においても本分野の人材育成のためのセンターが運用を開始しているため、効率的な事業の実施の観点から、新たな評価項目として我が国の支援センターの強みを生かしつつ、これらのセンターとの連携、役割分担を検討することを追加する。

中間評価を踏まえた評価項目は以下のとおり。

- ・ 原子力機構が有する既存のリソースの活用
- ・ 他の国の機関や国際機関との講師の相互派遣等を通じたリソースの共有（他の国の支援センターとの連携、役割分担の検討を含む）
- ・ 各省庁との連携

●技術開発

平成 23 年度から実施してきた技術開発課題の内、核測定・核検知の 3 課題に関しては、昨年度で終了したが、今後とも本分野の技術開発に関する国際的な要請を踏まえつつ、適

切なテーマを選択し、技術開発に貢献していくことが重要。以下の評価項目については、個々の研究開発課題に特化せず、核不拡散・核セキュリティ技術開発全般について記述した。

<必要性>

核拡散や核テロへの懸念が高まる中で、先進的な原子力技術を有する我が国には制度面や人材育成の面での貢献のみならず、技術開発の面での貢献が期待されており、その趣旨はエネルギー基本計画にも記載されている。この観点から評価項目は妥当である。

中間評価を踏まえた評価項目は以下のとおり。

- ・ 核不拡散・核セキュリティ、原子力を取り巻く国際情勢を背景にした、我が国が核不拡散・核セキュリティ分野の技術開発で貢献することの必要性

<有効性>

当初設定した評価項目どおり、得られた成果を国際社会と共有することが重要である。また、新たな項目として、実用化を念頭においた技術開発（例えば、装置等の小型化）の検討を進めることを追加する。

中間評価を踏まえた評価項目は以下のとおり。

- ・ 技術開発の成果の国際社会との共有
- ・ 実用化を念頭においた技術開発の検討

<効率性>

当初設定した評価項目どおり、事業を効率的に実施するにあたって、原子力機構が有する知見を引き続き活用することは重要である。新たな項目として、核不拡散・核セキュリティ分野に精通した機関のみならず、他分野との連携も視野に入れながら、より効率的に事業を進めることを追加する。

中間評価を踏まえた評価項目は以下のとおり。

- ・ 原子力機構が有する既存のリソースの活用
- ・ 他の国の機関や国際機関との共同研究の実施を通じたリソースの共有
- ・ 他分野との連携も視野に入れること。

●総括

特に地球温暖化対応の観点からの原子力発電の導入拡大、イラン、北朝鮮の核問題、核テロへの懸念の増大等を背景に核不拡散・核セキュリティ強化の重要性に対する認識が国

際的に高まっていることを踏まえ、本事業を継続・発展させる。本事業を継続・発展させるにあたって支援センターに以下の役割を期待したい。

- 核不拡散・核セキュリティ分野におけるアジア地域のプラットフォームとして、国内外の行政官、事業者等による人材ネットワークの構築、他の国の支援センターとの連携強化
- 技術開発で得られた知見の蓄積等によるデータベース化
- 活動内容の定期的なレビュー、その結果の今後の活動への反映

(3) その他

本事業は平成 23 年 3 月 11 日に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故以前に事前評価を受けたものである。同事故により国内の原子力発電を巡る状況は大きく変化したが、中東等の政治状況が不安定化しつつあること、核テロにより同事故と同様の事態が起こり得ることが改めて認識されていることなどから、特に核セキュリティ強化に関する重要性、ひいては本事業の重要性は高まっている。

溶融燃料中の核物質測定技術の開発

背景

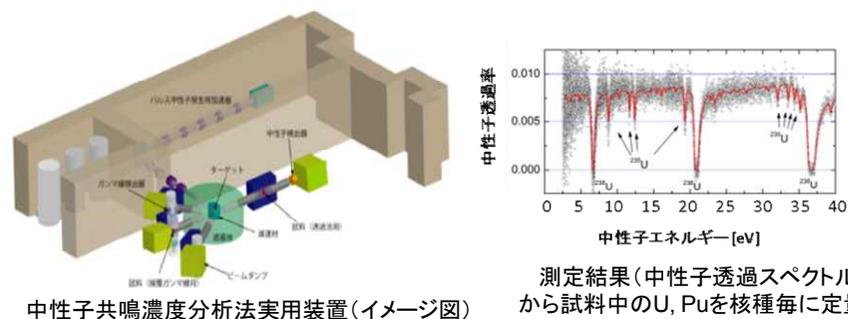
- 過酷事故が発生した原子炉内では多くの核燃料、被覆管部材、制御棒部材、圧力容器内構造物等が不均一に溶融、混合し、それらの形状も粒子状、塊状等様々な形態で存在していると考えられている。
- これらの溶融した物を炉外に取り出すなど、核物質を移動させる場合には、原則として、事業者は移動させる物に含まれる核物質の量を計量し、国及び国際原子力機関(IAEA)に報告し、その内容について国及びIAEAによる検認を受けることになるが、このような複雑な組成物の中に含まれる核物質の量を計量する技術がない。

事業概要・目的

- 原子炉過酷事故で発生した溶融燃料(粒子状のもの:核燃料と構造材の溶融混合物)等複雑な組成物の中に含まれる核物質量を測定することができる基礎的な技術確立する。

成果

- 高放射線量下で組成の不明な核物質混合物中の核物質量を測定するため、核燃料核種を特定する方法(中性子共鳴透過分析法)と、混合核種を同定・定量する方法(中性子共鳴捕獲分析法)を組み合わせた中性子共鳴濃度分析法という測定技術を開発。
- 欧州委員会の共同研究センター(JRC)/標準物質計測研究所(IRMM)の中性子発生施設(GELINA)を用いた実証試験を実施し、一定条件下において、元素組成が不明な粒子状溶融燃料中の核物質を同位体別に、3-4%程度の誤差で非破壊で定量測定する基礎技術を実証。



実証実験施設(GELINA (ベルギーJRC内))

<予算額の変遷>

	H24年度	H25年度	H26年度	総額
予算額	105百万円	38百万円	50百万円	192百万円

事後評価票

(平成27年8月現在)

2. 課題名 溶融燃料中の核物質測定技術の開発

3. 評価結果

(1) 課題の達成状況

粒子状の溶融燃料デブリのように高放射線線量下で組成の不明な混合物中の核物質量を測定するため、核燃料核種を定量する方法(パルス中性子源による透過中性子共鳴解析(中性子共鳴透過分析法(NRTA)))と、混合核種を同定・定量する方法(中性子共鳴捕獲分析法/即発ガンマ線分析法(NRCA/PGA))を組み合わせた中性子共鳴濃度分析法という測定技術を開発した。

本技術開発は、日本原子力研究開発機構(JAEA)が、概念提案を行うとともに実施主体となり、欧州委員会(EC)の共同研究センター(JRC)の傘下にある標準物質計測研究所(IRMM)と共同で実施した。NRTAについてはIRMMが主担当、NRCA/PGAについてはJAEAが主担当となって開発を行うとともに、JAEAが全体のとりまとめ等の業務を実施した。実証試験については、IRMM側と共同で計画を策定し、IRMMの中性子発生施設(GELINA)において実施した。

なお、(3)で述べるように、本研究の成果については、潜在的なユーザーである原子力事業者や次世代原子力システムの研究開発機関等に積極的に共有、周知していくことが重要である。

[必要性]

我が国の核物質が平和利用以外の目的に転用されていないことを国際社会に対して示すため、原子炉過酷事故で発生した溶融燃料デブリ等の複雑な組成物に含まれる核物質を計量する技術を開発する必要がある、本研究の成果はそうした技術の開発に資するものである。

[有効性]

当該測定技術の有効性(測定精度等)を確認・実証するため、本年3月に、IRMMのGELINAを用いた公開実証実験を行い、元素組成が不明な複数の元素の種類及びその量を同位体別に正しく同定出来ることが検証され、本手法は、原理的に有効であることが立証できており、所期の目的が達成できている。

[効率性]

本技術の開発にあたっては、欧州における核不拡散・核セキュリティ分野の研究開発において豊富な実績を有するJRC/IRMMとの連携により、効率的に研究開発がなされた。

また、事前評価時には、総額 6 億円の予算を用いて、基礎技術の実証の成果を基にプロトタイプ装置の製作及び実用装置の概念設計まで行う予定であったが、東京電力福島第一原子力発電所事故から発生した溶融燃料デブリ取り出し時の計量管理等の在り方の検討状況を踏まえ、本事業では、基礎技術の実証に焦点を絞る方向での事業の見直しを行った。状況の変化に応じて事業の柔軟な見直しを行うことで、リソースの効率的な利用が図られている。さらに、本事業とは別に、本事業の技術では定量が難しい一定の厚みを有する塊状の複雑な組成の混合物（溶融燃料デブリ等）の中に含まれる核物質の量を測定する技術開発が並行して行われており、重複せずに効率的に実施されている。

（２）成果

○成果

本技術の技術実証試験により、一定条件下（厚さ 2cm 程度の薄い円盤状容器（直径約 30cm）内に収めることができる粒子径 1cm 程度以下の大きさの物質で、水分が完全に除去されている場合）において、元素組成が不明な粒子状溶融燃料デブリ中の核物質を同位体別に、国際的にみても遜色がないと考えられる 3-4% 程度の誤差で非破壊で定量測定する基礎技術の実証がなされた。また、この測定は、上記円盤状容器（直径約 30cm、厚さ約 2cm）内に充填された粒子状溶融燃料デブリを 40 分で測定可能であり、他の核物質測定手法と遜色のないスピードである。

また、本技術の開発を通じて、32 本の論文が公表されるとともに、核物質管理学会（INMM）の年次大会、欧州保障措置技術開発学会（ESARDA）シンポジウムや原子力学会の年会等の国内外の専門家が集まる場において、成果の発表が行われた。

○波及効果

国内の原子力施設に適用される計量管理技術の開発に長年に渡り取り組んできた我が国に対しては、核不拡散・核セキュリティ技術開発への貢献への期待が大きい。本分野における個々の技術開発課題の間には関連性が見られ、一つの技術開発の成果を次の技術開発への展開につなげて行くことが比較的容易であると考えられる。日欧共同研究として平成 27 年度から開始された高線量の低濃度核燃料物質を非破壊で定量的に測定する基礎技術開発は本技術の一環で研究開発を行った中性子共鳴透過分析法（核燃料核種を特定する方法）と新たな技術開発を組み合わせることにより、新たな成果を創出しようとする取組みであり、個々の技術開発項目を有機的に連携させ、戦略的に技術開発に取り組む観点から有意義である。

（３）今後の展望

東京電力福島第一原子力発電所事故から発生した溶融燃料デブリ取り出しの際の計量管理、保障措置の在り方については結論が得られていないが、本技術開発の成果は、我が国として、溶融燃料デブリの計量管理の技術的選択肢を有しておくという点において、その基盤になり得るものである。そのため、本基礎技術開発で得られた知見を事業者等の関係

機関に共有していくことが必要であるとともに、福島第一原子力発電所の廃止措置のスケジュールや IAEA 等の動向を踏まえながら、選択肢の一つとして検討されるよう取り組んでいくべきである。

なお、実際の現場への適用にあたっては、小型中性子発生装置の開発、粒子状溶融燃料デブリからの水分の除去方法の検討、測定時の温度の影響の検証などの技術課題があると考えられ、溶融燃料デブリ取り出しの際の計量管理、保障措置の在り方の検討状況を踏まえて、当該課題に対する研究開発を行うべきである。

また、本技術は、溶融デブリのキャニスターへの収納にあたっての当該デブリに核物質が含まれるか否かの分別作業や事故解析コードの検証など、当初目的以外の観点で活用できる可能性もあるため、事業者等の関係機関に知見を共有する際は、幅広い観点で本技術の活用の可能性について検討することが重要である。

平成 27 年度から日欧共同研究で開始された「アクティブ中性子非破壊測定技術」の開発事業において、本技術の一環で開発された技術が活用される予定であり、本技術の知見を生かして、現在定量測定が難しい高線量の低濃度核燃料物質の非破壊定量測定の基礎技術を確立し、我が国の原子力利用の更なる透明性向上に資することを期待する。

また、次世代核燃料サイクル施設で取り扱われる高線量核物質の定量測定への適用の可能性については、次世代核燃料サイクル技術そのものの研究開発段階から、関係者に本技術の有効性を周知していくことが技術移転に向けて効果的であると考えられる。そのため、核物質管理学会 (INMM) の年次大会等において計量管理の専門家に対して、第 4 世代原子力システムに関する国際フォーラム (GIF) 等において新しい原子力システム的设计者等に対して、積極的な周知を実施すべきである。