

国際原子力人材育成イニシアティブ事業成果報告書

〈課題名〉

機関横断的な人材育成事業「総合的原子力人材育成カリキュラムの開発～計算機シミュレーションを活用した実践的原子力実験・演習プログラムの整備～」

〈実施機関〉

国立大学法人 九州大学

〈連携機関〉

九州大学総合理工学研究院、日本原子力研究開発機構、九州電力（株）、三菱重工業（株）、（株）東芝

〈実施期間・交付額〉

25年度7,859千円、26年度18,814千円、27年度12,615千円

〈当初計画〉

1. 目的・背景

九州大学では、人材育成プログラム（H19～21年度：中性子の減速と拡散に関する実験演習、H20～22年度：核燃料サイクル工学に関する実験演習、H22年度：チャレンジ原子力体感プログラム）により、原子力基礎・基盤に対する教育カリキュラムの充実をはかってきた。これらの人材育成プログラムの中で実施した学生による発表演習会においては、プログラムの成果について外部の原子力関係技術者・研究者から評価を受け、原子炉プラントを総合システムとして捉えるために、分野を横断した総合的で実践的な人材育成が重要であることが指摘されている。原子力分野には、各専門分野で用いられる数値シミュレーションコードが多数存在する。しかしながら、学生が自らの研究で利用する場合を除いて、このようなシミュレーションコードを操り、原子力分野に特有な物理現象と数値モデルの相互関係を経験・理解する機会は少ない。学生が、多岐にわたる原子力の専門分野で使用されるコードの概要を知り、またそれらのコードで対象とされる物理現象を学び、さらには、自らこれらのコードに触れることを通して、専門分野の境界を乗り越えて、広い視野で問題に取り組む姿勢を身に着けることができる。

本事業では、福島原子力発電所の事故や、過去の育成事業の経緯を踏まえ、より高度な安全性の追求、国際的な原子力安全に係る議論へ貢献できるような、幅広い原子力人材の育成を目標として、新たな演習・実習項目を開発し、そのための実験・数値演習環境を整備する。既存の人材育成プログラムと併せて、総合的な原子力教育カリキュラムの開発を行うことを目的とした。

2. 実施計画

原子力基礎科目で習得した知識をベースに、原子力基礎実験として実施する「中性子減速・拡散実験」、「核燃料サイクル実験」、「環境放射線フィールド計測実験」等を通して学習内容を確認する。これらの実験結果をベースに、今回提案する数値シミュレーションコードを学生自らが操って確認するための演習課題を開発する。開発した課題を学生が遂行し、実験で得られた結果と計算を比較検討することにより、学習内容の理解を深める。さらには、九州電力と連携して、同社が原子力訓練センターに所有する大規模原子炉シミュレータを利用した実践的な演習を実施し、実際の原子力プラント挙動や運転の現場を体験させる。原子力分野で国際的に活躍を行っている外部講師を招いて、海外の原子力情勢や国際舞台で研究者として活躍するための情報を提供するための講演を実施する。また、年度毎に、一連の実験、演習、実習内容に対する、外部の原子力関係技術者・研究者を交えた学生の演習発表会を実施し、学生のプレゼンテーション技術能力を養うとともに、本事業に対する外部評価を得てカリキュラムの改善につなげる。

（1）数値シミュレーション演習

中性子減速・拡散実験、核燃料サイクル実験、環境放射線フィールド計測実験等を通して得られる原子力分野に特有な物理現象と数値モデルの相互関係を理解し、また、原子炉プラントシステム

を、炉心物理、伝熱・熱流動、材料物性、放射線漏えい等の幅広い視点から定性的・定量的に考えるための、汎用コードあるいはプラントシミュレータを利用した演習課題を開発する。演習課題については、例えば、(1)PHITS、MVP等のシミュレーションコードを用いて中性子減速・拡散実験で使った体系中の中性子束（空間分布、エネルギースペクトル）を実験との比較を想定して予測する。(2)核燃料サイクル実験で測定される値との比較を行うことを想定して、MXDORTOコードを用いて、酸化燃料の格子定数、比熱、熱伝導率、融点等を解析する。(3)シミュレーションコードを用いてKUCA（京都大学未臨界集合体）の対象架台での臨界質量、制御棒価値、中性子束の空間分布等を解析し、これらを臨界近接実験、制御棒落下法、ペリオド法による制御棒校正実験、放射化箔法による反応率測定実験で得られた結果と相互に比較する。

(2) 原子力基礎実験

(a) 中性子減速・拡散実験

中性子源を用いた、中性子の減速・拡散体系をつくり、物質中の中性子の挙動を把握するための実験を実施する。シミュレーションコードとの対応を考え、本事業においては、減速材の変更・非対称的な配置、或いは中性子吸収体などを部分的に装荷する、等により、非均質体系を構築する。

(b) 核燃料サイクル実験

核燃料サイクルの全体を俯瞰し、その主要なプロセスを理解することを目的として、燃焼ペレットを想定した焼結操作によるセラミックス作製及び作製試料の分析実験、使用済燃料の再処理に関わる溶媒抽出法の実験、材料の腐食挙動を理解するための材料腐食実験、燃料・構造材の伝熱特性を知るための多孔質体伝熱実験等を行う。

(c) 環境放射線フィールド計測実験

GPSセンサーが装備されたポータブルガンマ線スペクトロメータ(NaIシンチレータ検出器使用)を用いて、空間線量率及びガンマ線スペクトルを測定する。GPS機能を活用して、自動車による走行サーベイを行い、大学キャンパス周辺を含む広範囲の線量率マッピング地図を作成する。

(3) 九州電力原子力訓練センター実習

九州電力原子力訓練センターで原子炉運転教育のインストラクターの指導の下、実機に即した原子炉シミュレータを利用して、より実践的な実習を行う。実習と併せて、実際に原子炉プラントの運用にかかわっている外部講師による、原子炉の運転や安全管理の実情に対する講義をおこなう。本実習により、上述の数値シミュレーション演習、原子力基礎実験を踏まえた上で、平常時の原子炉運転に加えて、異常時の過渡変化や事故時のプラント挙動と運転操作の実際について学ぶことができる。

(4) 海外原子力研究者による講義

海外在住の講師による、海外の原子力に関する情勢や研究の状況、また、国際舞台で研究者として活躍するための方法等に関する講演を実施する。

(5) 発表演習

幅広い原子力専門分野の教員、外部の原子力関係技術者・研究者を交えた場で、上記演習課題に関する学生による発表演習を行う。それぞれのシミュレーションコードを用いた、演習課題を学生各々が発表し、演習内容について相互に幅広い視点から討論をおこなうことで、シミュレーションコードや対象とした物理現象に対する理解を深める。原子炉シミュレータを用いた実習についても発表を行う。同時に、一連のカリキュラムに対する外部の原子力関係技術者・研究者との意見交換を行い、今後のカリキュラムの改善につなげる。

図1に、既存の原子力人材育成カリキュラムと本事業との関係を示す。

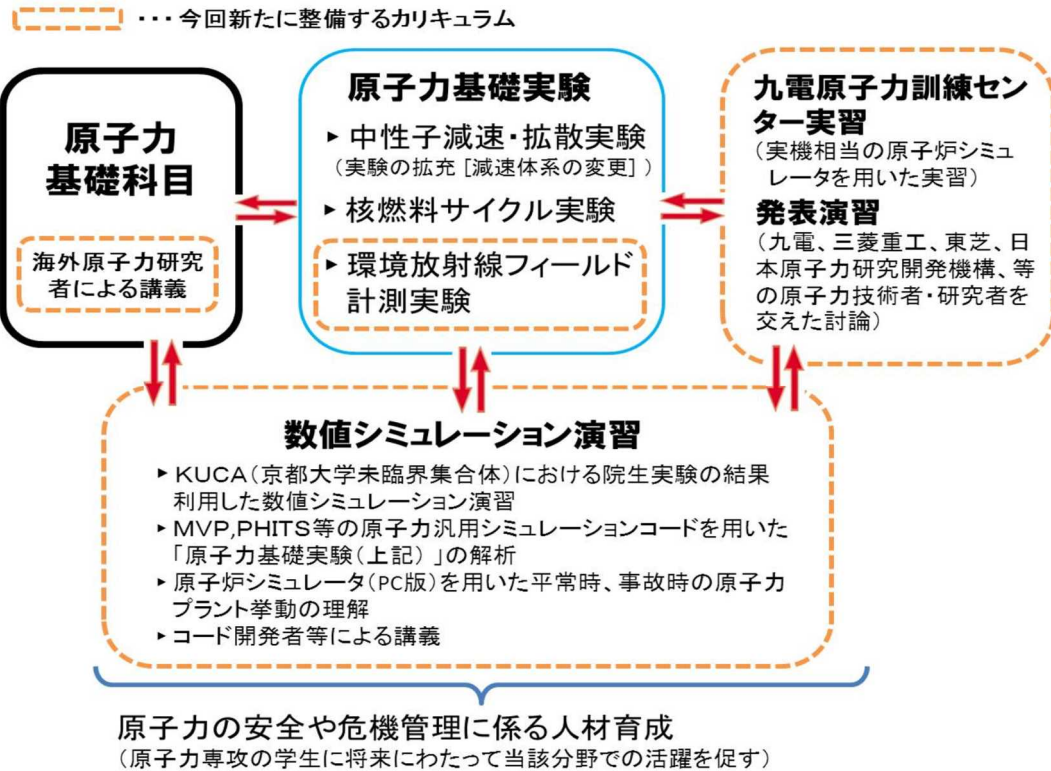


図 1. 本事業の実施概要

＜実施状況＞

上記の計画を達成するため、平成 25 年度 12 月から本事業を開始し、初年度は (1) 数値シミュレーション演習課題の開発・実施、(5) 発表演習会を、平成 26 年度からはこれらに加えて、(2) 原子力基礎実験の開発・実施、(3) 九電原子力訓練センターを用いた実習の開発・実施、(4) 海外原子力研究者による講義・講演 を行った。実施状況の詳細を下記に示す。

(1) 数値シミュレーション演習課題の開発・実施

原子力分野で用いられる汎用コードをベースにして、下記に示す数値シミュレーション演習課題を開発、実施した。演習を実施するに当たり、課題を開発・実施する上で必要となる数値シミュレーション環境 (受講者用端末としてのノート PC、大型液晶モニター、数値演算サーバー、PC 版原子力プラントシミュレータ) を購入、整備した。

- 連続エネルギーモンテカルロコード MVP 及び粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を用い、中性子減速・拡散実験で得られた結果を計算結果と比較検討する演習
- 分子動力学計算コード MXDORTO を用い、核燃料サイクル実験で測定した模擬酸化燃料 (固溶体) の格子定数を計算結果と比較検討する演習
- 流動・伝熱解析コード OpenFOAM を用い、核燃料サイクル実験で得られた多孔質媒体内外の熱伝達特性を計算結果と比較検討する演習
- 連続エネルギーモンテカルロコード MVP を用い、KUCA 炉物理実験 (臨界質量、制御棒価値、中性子束の空間分布) の結果を解析する演習課題
- PC 版原子力プラントシミュレータ PCTAN を用い、過渡・事故時のプラント挙動のケーススタディーを行う演習
- 粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を用い、環境放射線フィールド測定実験用に使用する NaI 検出器のガンマ線応答関数及び環境中の空間線量率を計算し実測値との比較検討を行う演習

演習に関する説明・講義は、平成 25 年度に 6 回、平成 26 年度に 15 回、平成 27 年度に 15 回実施し、TV 会議システムを用いた外部機関との質疑等を活用するとともに、一部のコードについては外部講師によるコード使用方法、数値シミュレーションに関する説明・講義を実施した (平成 26 年度に

4回、平成27年度に5回)。また、受講生には、後述の発表演習会で数値シミュレーションと実験との比較結果を発表させるとともに、発表演習会での議論やコメントを反映した上でレポートとして演習内容を整理し提出させた。

(2) 原子力基礎実験の開発・実施

(a) 中性子減速・拡散実験

中性子減速・拡散挙動に関する以下の実験を開発、実施した。

- ・ Am-Be 中性子源から発生する中性子をポリエチレンと黒鉛で構成された減速体系で減速拡散させ、この減速体系中に設置した金箔の中性子放射化で放出されるガンマ線を Ge 検出器で計測することで減速体系中での中性子分布を測定する実験
- ・ 同減速体系に中性子吸収体を装荷して中性子束の歪みを確認する実験
- ・ 中性子計測方法の一つである計数管法の原理と中性子の減速・反射を理解する目的で ^3He 比例計数管を用いた実験

尚、本事業では、Ge 検出器の測定精度を高めるための、ガンマ線遮蔽体、黒鉛減速体、中性子吸収体（ボロン及びガドリニウム）、 ^3He 比例計数管を購入した。

(b) 核燃料サイクル実験

核燃料サイクルに関する以下の実験を実施した。

- ・ 燃焼ペレットを想定した焼結操作によるセラミックス作製及び作製試料の分析実験
- ・ 使用済燃料の再処理に関わる溶媒抽出法の実験
- ・ 材料の腐食挙動を理解するための材料腐食実験
- ・ 燃料・構造材の伝熱特性を知るための多孔質体伝熱実験

このうち、二つの実験テーマを分子動力学計算コード MXDORTO 及び流動・伝熱解析コード OpenFOAM を用いた数値シミュレーション演習課題の対象として取り上げた。

(c) 環境放射線フィールド測定実験

本事業で購入した GPS 機能付 NaI ガンマ線スペクトロメータを用いて空間線量率及びガンマ線スペクトルを測定し、大学キャンパス、建屋内及び周辺地域の線量率マッピング地図を作成する実験を開発、実施した。

(3) 九電原子力訓練センターを用いた実習の実施

九州電力原子力訓練センターの原子炉シミュレータを用いた以下のプラント操作・事象を対象とした実習を開発し、原子炉運転教育のインストラクターの指導のもとでこれを実施した。

- ・ 原子炉臨界操作
- ・ プラントトリップ事象（原子炉「自動」トリップ、「手動」トリップ）
- ・ 制御棒落下・ほう素濃度異常希釈事象
- ・ 外乱等による出力変動事象（所内単独運転）
- ・ LOCA 事象

また、全交流電源喪失時の運転員による緊急時操作訓練のデモンストレーションを見学するとともに、学習効果を高めるためインストラクター及び原子炉運転員と受講生との間の意見交換、討論を行った。実習時間は約3コマ（90分/コマ）。

(4) 海外原子力研究者による講義・講演の実施

豪州クイーンズランド大学から招聘した講師より、海外の原子力に関する情勢や研究の状況、また、国際舞台で研究者として活躍するための方法等についての講演を英語で実施した。講義時間は約6コマ（90分/コマ）。

(5) 発表演習会の実施

本事業の担当教員、受講生及び講師として外部の原子力関係技術者・研究者（日本原子力研究開発機構、九州電力（株）、三菱重工業（株）、（株）東芝から各1名）が参加する発表演習会を各年度末に実施した。各年度で実施した一連の実験、演習及び実習内容について外部講師から技術的なアドバイスを受けるとともに、本事業に対する評価を受けた。発表演習会の時間は約2コマ（90分/コマ）。以下にその主な内容を示す。

- ・ 本事業に関する説明
- ・ 受講生による原子力基礎実験の結果に関する発表
- ・ 受講生による原子力基礎実験に対する数値シミュレーション演習に関する発表
- ・ 受講生による KUCA 炉物理実験の数値シミュレーション結果に関する発表
- ・ 受講生による PC 版原子力プラントシミュレータを用いたプラント挙動解析に関する発表
- ・ 受講生による九電原子力訓練センター実習の報告
- ・ 外部講師による発表内容に関するコメント・意見、原子力分野での動向などに関する情報提供
- ・ 担当教員と外部講師による本事業に関する意見交換



九電原子力訓練センター実習
(原子炉シミュレータによる臨界操作)



数値シミュレーション演習
(PHITS コードに関する講義)



発表演習会
(受講生によるプレゼンテーションの様子)



原子力工学基礎実験
(中性子減速・拡散実験の様子)



ポリエチレン・黒鉛減速体
(中性子減速・拡散実験で使用)



Ge 検出器用 γ 線遮蔽体
(中性子減速・拡散実験で使用)

表 1. 育成対象及び人数（結果）

実施項目	実施プログラム	育成対象者	育成人数		
			25年度	26年度	27年度
1) 数値シミュレーション演習	講義：放射線/原子力数値シミュレーション	九州大学大学院工学府 エネルギー量子工学専攻 九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻	17名	19名	24名
2) 原子力基礎実験	実験科目：原子力基礎実験、核燃料サイクル実験	九州大学大学院工学府 エネルギー量子工学専攻 九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻	-	25名	23名
3) 九電原子力訓練センターを用いた実習	講義：放射線/原子力数値シミュレーション	九州大学大学院工学府 エネルギー量子工学専攻 長崎大学教育学研究院 長崎大学教育学部	-	20名	24名
4) 海外原子力研究者による講義・講演	講義：放射線/原子力数値シミュレーション	九州大学大学院工学府 エネルギー量子工学専攻	-	23名	17名
5) 発表演習会	講義：放射線/原子力数値シミュレーション	九州大学大学院工学府 エネルギー量子工学専攻修士1年生 九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻	17名*	20名*	22名*
参加人数（実績）			21名	28名	26名
（参考指標）			374	672	485
交付額/参加人数			千円/人	千円/人	千円/人

* 育成人数に聴講者数は含まない。

がかりを築くことができた。

(4) 海外原子力研究者による講義・講演

講義・講演を依頼した講師は、九州大学の出身であり、民間企業で約 10 年にわたる核燃料の開発に関する実務経験を通して博士号を取得し、10 年以上の海外における大学教育の実績を有した海外在住の研究者である。受講生には、在籍する専攻の先輩が豊富な経験に基づいて、海外事情や自らの実体験を踏まえた臨場感あふれる講義を行うことで刺激を与え、幅広い視野を持たせるとともに、原子力関係の技術者・研究者として将来国際的に活躍するためのインセンティブを与えることができた。本事業で実施した数値シミュレーションを活用した実践的な実験・演習プログラムによる人材育成という視点からも、理論と実験をつなぐ実務経験をもとにその効果を高める指導ができた。

(5) 発表演習会

受講生には、実験結果と再現計算等の結果を簡潔にまとめさせることで、物理現象と数値モデルの相互関係への理解を深め、プレゼンテーション技術能力を養うことができた。外部講師からは、原子力プラントの製造、運転、研究開発の現場での話を交えながら発表内容に対する技術的なコメントを受けた。また、本事業で整備した実験・演習プログラムについて、既存の原子力教育プログラムと連携して総合的に原子力システムを理解させる新たな教育カリキュラムとして、プラントメーカー、事業者、研究所での原子力人材育成へのニーズに合致するとの評価を得た。

本事業で整備した数値シミュレーション演習は、平成 26 年度から大学院専攻教育科目の 2 つの演習科目「放射線数値シミュレーション」、「原子力数値シミュレーション」（各 1 単位）として新設した。これらは、表 3 に示すように、それぞれ既存の実験科目「原子力工学基礎実験」、「核燃料サイクル実験」に対応する演習科目となる。また、現在の原子力関連授業科目において、それぞれの実験・実習に関連した基礎的な理論、物理モデル、原子力分野での応用等を履修し、その内容を各実験・実習において実際の現象として確認し、さらに計算コードを用いた数値シミュレーション演習を通して、理論・物理モデルとの関連を理解するカリキュラムとすることができた。

総合工学である原子力分野の教育においては、各専門分野を横断した総合的で実践的な人材育成が重要であるが、このように、本事業では、これまで九州大学で実施されてきた原子力分野での人材育成カリキュラムを補強するとともに、数値シミュレーション演習や九州電力の原子力訓練センターでの実習を新たに組み入れ、これらを有機的に連携することにより

- ・ 総合システムとしての原子炉の振る舞いをミクロ現象とマクロ特有の現象の双方向から理解し、多角的な幅広い視点で多角的に見渡すことのできる人材
- ・ 他分野の専門家や、立場の違う人々とコミュニケーションを行いながら課題を客観的に分析し、問題解決を率先して実行できる人材
- ・ これらの視点を身に着け、巨大システムとしての原子炉の安全や危機管理に対して、分野を超えた総合的な安全思考のできる人材

を育成することを目標とした継続性のある体系的なカリキュラムとして整備することができた。

表3. 本事業で整備された原子力人材育成カリキュラム（工学府エネルギー量子工学専攻）

本事業での実施項目		演習・実験科目	原子力関連授業科目
原子力基礎実験	中性子減速・拡散実験	・原子力工学基礎実験 ・放射線数値シミュレーション（新設）	・量子線計測学 ・量子線物理計測* ・原子炉物理学*
	核燃料サイクル実験	・核燃料サイクル実験 ・原子力数値シミュレーション（新設）	・核燃料工学 ・核燃料サイクル工学 ・量子線応用物理学 ・エネルギー混相流体工学
	環境放射線フィールド測定実験		・量子線計測学 ・量子線物理計測*
		・原子炉物理学特論および実験（KUCAを用いた炉物理実験）	・量子線計測学 ・量子線物理計測* ・原子炉物理学*
九電原子力訓練センター実習			・原子力安全工学 ・原子炉システム工学 ・原子炉物理学* ・原子力工学概論*

*工学部エネルギー科学科

<今後の事業計画・展開>

本事業で整備した以下の実験・演習プログラムは、既存の実験及び授業科目と連携して総合的に原子力システムを理解させる原子力教育カリキュラムとして継続して実施する予定である。

(1) 原子力工学実験及びその数値シミュレーション

本事業では大学院専攻教育科目として2つの演習科目を新設したが、これらの科目は継続して開講する予定であり、本事業で整備した教育環境を活用しつつ、プログラムの改善を図りながら継続して実施する。

(2) 九電原子力訓練センターを用いた実習

本事業では九州電力の協力を得て、表記訓練センターを用いた実習を開発・実施した。引き続き年1回の頻度で実施するとともに、他大学との継続的な連携も進めて行く予定である。

<整備した設備・機器>

(1) 数値演算サーバー一式（平成25及び27年度整備、約10.6百万円）

数値シミュレーション演習における計算機として使用した。

(2) ノートPC一式（平成25～27年度整備、約3百万円）

数値シミュレーション演習において、学生が計算機サーバーへアクセスするための端末として、又PC版原子力プラントシミュレータを稼働させる端末として使用した。

(3) PC版原子力プラントシミュレータ（平成26年度整備、約4.3百万円）

原子力プラントの仕組みや様々な事象を理解するための原子力プラントシミュレーション用ソフトウェアとして使用した。

- (4) TV会議システム一式（平成25～26年度整備、約2.2百万円）
数値シミュレーション演習に関連した専門家への質疑をおこなうために使用した。
- (5) Ge 検出器用ガンマ線遮蔽体（平成26年度整備、約4.3百万円）
原子力基礎実験（中性子減速・拡散実験）において、中性子束分布を測定する際し、Ge 検出器のガンマ線ノイズを除去し測定誤差を低下させるために使用した。
- (6) 黒鉛減速体（平成26年度整備、約5.2百万円）
原子力基礎実験（中性子減速・拡散実験）において、ポリエチレン減速体と比較した黒鉛減速体の特徴を実験するために使用した。
- (7) 中性子吸収体一式（平成27年度整備、約1.5百万円）
原子力基礎実験（中性子減速・拡散実験）において使用。減速体系に中性子吸収体を装荷することで、その周辺の中性子束の空間分布の歪みを確認することを目的とした。
- (8) ガンマ線スペクトロメータ（平成26年度整備、約2.1百万円）
原子力基礎実験（環境放射線測定実験）において、GPS機能付きガンマ線スペクトロメータを用いて、環境放射線の線量マップを作成するために使用した。
- (9) ^3He 検出器（平成27年度整備、約2.4百万円）
原子力基礎実験（中性子減速・拡散実験）において、中性子計測方法の一つである計数管法の原理と中性子の減速・反射を理解するための実験に使用した。

〈その他特記すべき事項〉

特になし。

〈参考資料〉

(1) 添付資料

- 1) 数値シミュレーション演習に使用した資料（抜粋）
- 2) 原子力工学実験に使用した資料（抜粋）

評価項目に係る事項について

①課題の達成度（採択時の審査評価委員会所見への対応を含む。）	<p>既存の原子力教育プログラムと連携して総合的に原子力システムを理解させる新たな実践的実験・演習プログラムを予定通り整備し、実施状況に示すように当初予定した70名を超える人材を育成することができた。</p> <p>審査評価委員会所見として、学習効果を高めるよう工夫することとのコメントがあったが、本事業では大学院専攻教育科目として2つの演習科目（各1単位）を新設し、既存の実験科目と連携して受講させることで、カリキュラムの全体像及びその目的を具体的に意識して受講できるように配慮した。</p>
②特記すべき成果	<p>本事業では、当初、実施期間中において他大学との連携は予定していなかったが、H27年度は長崎大学の学生（3名）がプログラムの一部（九州電力原子力訓練センター実習）に参画し、地域の原子力教育に貢献するとともに、今後の連携活動に足がかりを築くことができた。</p>
③事業の継続状況・定着状況	<p>本事業で新設した2つの演習科目と既設の原子力関連実験・授業科目と連携した原子力人材育成プログラムとして、今後も継続して実施する。</p>
④成果の公開・共有の状況	<p>本事業で整備・実施した人材育成プログラムの内容について、専攻ウェブサイト等での公開の検討を進めている。</p>
⑤参加した学生数、原子力関係機関への就職状況、公的資格取得者数	<p>本事業には3年間で75名が参加したが、ここに示す就職状況は平成25、26年度に受講した49名（九州大学）の実績となる。進学・未就職等7名を除く42名の内訳は、電力10名、原子力関係メーカー18名、原子力関係公的機関3名、その他11名であり、原子力関係機関への就職割合は7割強であった。平成25、26年度のエネルギー量子工学専攻修士課程修了者のうち、本事業に参加しなかった学生の原子力関係機関への就職割合は3割以下にとどまる。また、平成24年度の原子力関係機関への就職割合は6割程度であり、本事業の実施により原子力関係機関への就職に一定の貢献があったと考えられる。</p>