

## 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「軽水炉プラント、炉心燃料および燃料サイクルの安全技術に関する実習」

### <実施機関>

東芝エネルギーシステムズ株式会社

### <連携機関>

なし（協力者 東京都市大学、神奈川大学、東京電機大学）

### <実施期間・交付額>

平成30年度 19,903千円、令和1年度（令和元年度） 15,920千円、  
令和2年度 12,735千円

### <当初計画>

#### 1. 目的・背景

原子力施設をより安全に維持・運転していくためには、より高度な安全設計や保全技術、安全規制を追求する必要があり、このための安全研究や教育が求められている。また、平成23年の福島第一原子力発電所の事故を受けて国から発表された、「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書（平成23年6月原子力災害対策本部）」の教訓25で示された「教育機関における原子力安全、原子力防災・危機管理、放射線医療などの分野の人材育成の強化」が示され、原子力安全をはじめとする人材育成活動が求められている状況にある。また、福島第一原子力発電所事故からの早期復興に向け、他機関の知見や技術等も融合し、有機的に連携した人材育成の着実で継続的な活動が求められている。

福島事故を鑑みると、原子力の人材育成に資する分野として、原子炉・燃料の反応・ふるまいの理解の基本となる軽水炉の燃料構造や炉心特性の理解、地震に対する設計上の安全確保の基本となる耐震安全、事故に至るプラント特性理解、さらには原子炉の廃止や燃料デブリ処理に関わる技術の理解が重要である。さらに学習の共通目標として現場を理解でき、幅広い専門的知識を有する人材の育成を目指す必要がある。

そこで本事業においては、原子力人材育成を進めるため(a) 炉物理および放射性廃棄物処理・管理技術実習、(b) 多軸加振台を用いた炉心耐震安全技術実習、(c) 軽水炉プラントと燃料サイクルの安全性に関する技術実習を実施することとした。

これら実習の効果を上げるため、原子力プラントメーカーや電力会社、行政等で活用されている大型施設を最大限活用することとした。具体的には東芝エネルギーシステムズ(株)(以下、東芝ESS)が運用する試験研究用の炉施設NCAおよびTTR-1、同・大型多軸耐震試験施設、同・非密封放射性物質取り扱い施設、同・フルスコープ運転シミュレータ、原子炉圧力容器モックアップ施設、同・PA用BWRプラント・炉心燃料モデル、同・3D CADによるプラント立体視システム、原子燃料工業(株)の燃料加工施設・東海事業所、日本原子力発電(株)総合研修センターの伝熱流動研修施設、日本核燃料開発(株)のホットラボ施設、茨城県オフサイトセンター、原子力緊急時支援・研修センター、茨城県環境放射線監視センターを実習および見学に活用することとした。

## 2. 実施計画

本事業においては、平成30年度から令和2年度までの3年間に渡りこれらの分野の原子力人材育成を進めるため、以下3テーマに分割して(1)～(3)の実習を実施することとした。

- (1) 炉物理および放射性廃棄物処理・管理技術実習
- (2) 多軸加振台を用いた燃料集合体等耐震技術実習
- (3) 電力会社、燃料加工メーカーとの連携を得て行う原子力技能訓練

### (1) 炉物理および放射性廃棄物処理・管理技術実習（「原子炉物理実習」）

#### 1) 実習項目

本実習は東芝 ESS が運用する臨界実験装置 NCA と非密封放射性物質取扱い施設において、原子炉の安全機能学習、中性子源およびウラン燃料を用いた炉物理実験、非密封線源を用いた放射性物質の抽出に関する実習を行う。また、原子炉施設の廃止時に必要となる放射性廃棄物の安全管理の学習を行う。その際、廃止中の教育訓練用原子炉 TTR-1 で炉における放射性廃棄物管理の状況を見学する。

#### 2) 利用施設

臨界実験装置 (NCA)  
非密封放射性物質取扱い施設  
東芝教育訓練用原子炉 (TTR-1)

#### 3) 対象者

高等専門学校学生、大学学部学生、大学院生の中からの実習応募者（原子力系学科に限定しない）を実施機関が選抜する。

### (2) 多軸加振台を用いた燃料集合体等耐震技術実習（「耐震実習」）

#### 1) 実習項目

本実習では多軸加振台を活用し、原子力機器の耐震評価事例の学習解説・指導、原子力機器の耐震評価実習指導を行う。

#### 2) 利用施設

多軸加振台

#### 3) 対象者

公募による募集等により「耐震実習」の実習者を選抜する。年度毎に、希望者と連携大学（東京都市大学、神奈川大学、東京電機大学）から選抜する。

### (3) 電力会社、燃料加工メーカーとの連携を得て行う原子力技能訓練（以下、「技能訓練」）

#### 1) 実習項目

本原子力技能訓練では、数日間で効果を挙げるため、燃料・炉心の観点に関連のある原子力施設・設備・機器を連続して訪問して実習することにより、短期間で効率的に、幅広い知識を獲得して軽水炉をシステムとして理解することを目指す。実習先はプラントメーカーの他、電力会社、燃料加工メーカーの施設・設備の現場とし、以下項目について実習する。

- ・プラント事故対応ロボット技術、過酷事故緩和システム技術
- ・原子力発電プラントおよび事故処理等可視化技術
- ・過酷事故模擬を含む BWR 実機シミュレータ技術
- ・燃料集合体の加工施設における安全性確保と製造技術

- ・使用済み燃料取り扱い技術および検査技術
- ・沸騰伝熱特性と補修技術
- ・行政による緊急時対応のための組織と計画

## 2) 利用施設

- ・原子力プラントの技術と設備、事故時安全技術
  - : 首都圏地区 東芝 ESS 横浜事業所 磯子エンジニアリングセンターPA 施設
  - : 首都圏地区 東芝 ESS 横浜事業所 磯子エンジニアリングセンター3D CAD 施設
  - : 首都圏地区 東芝 ESS 横浜事業所 原子炉圧力容器モックアップ施設
  - : 首都圏地区 東芝 ESS 府中事業所 ABWR フルスコープシミュレータ施設
- ・燃料集合体の加工施設における製造プロセスと技術
  - : 東海地区 原子燃料工業（株）東海事業所
- ・使用済み燃料の取扱い技術
  - : 東海地区 日本核燃料開発（株）ホットラボ（各種ホットセル他）
- ・沸騰伝熱と保修技術
  - : 東海地区 日本原子力発電（株）東海総合研修センター 研修施設
- ・緊急時対応計画と組織
  - : 東海地区 茨城県オフサイトセンターおよび原子力緊急時支援・研修センター、茨城県環境放射線監視センター

## 3) 対象者

実習者は協力教育機関から実習者派遣を受けるとともに一部は個別希望者から東芝 ESS が募集・選抜する。

## <実施状況>

本事業3年間の実習育成の成果（実績）を表1に示す。また実績スケジュールを表2-1, 表2-2, 表2-3に示す。個別の実習状況を以下に示す。

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*（計画）		
			H30年度	R01年度	R02年度
(1) 原子炉物理実習	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉の安全機能学習</li> <li>・原子炉物理実習</li> <li>・放射性核種分離実習</li> <li>・放射性廃棄物管理の学習</li> </ul>	高専生 学部生 大学院生	15名 (40名)	30名 (40名)	11名 (40名)
(2) 耐震実習	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子力機器の耐震評価事例の学習解説・指導</li> <li>・同上、耐震裕度評価実習指導</li> <li>・データ処理及びグループ討議</li> </ul>	高専生 学部生 大学院生	24名 (24名)	32名 (24名)	22名 (24名)
(3) 技能訓練	<ul style="list-style-type: none"> <li>・メーカー研究開発設備での実習</li> <li>・燃料加工施設での実習</li> <li>・シミュレータ実習</li> </ul>	高専生 学部生 大学院生	8名 (25名)	18名 (25名)	25名 (25名)

	・沸騰伝熱と保修技術実習			
	人数* (計画)	47名 (89名)	80名 (89名)	58名 (89名)
	確定額	19,903 千円	14,626 千円	8,118 千円
	確定額/人	423 千円/人	182 千円/人	139 千円/人

\* 延人数（実習間で重複実習者が含まれるため、延人数とした）

表 2-1. 実施スケジュール<原子炉物理実習>（結果）

項目	H30 年度 (四半期毎)			R01 年度 (四半期毎)			R02 年度 (四半期毎)		
① 実習者の募集 および選定		←→			←→			←→	
② カリキュラム 策定、準備		←→			←→			←→	
③ 事前講義、 保安教育		←→			←→			←→	
④ 実習			↔		←→			←→	

表 2-2. 実施スケジュール<耐震実習>（結果）

項目	H30 年度 (四半期毎)			R01 年度 (四半期毎)			R02 年度 (四半期毎)		
① 実習者の募集 および選定		←→			←→			←→	
② 教材試験体の 製作			↔			↔			↔
③ 試験燃料据付			↔			↔			↔
④ 実習			↔			↔			リモート ↔

表 2-3. 実施スケジュール<技能訓練>（結果）

項目	H30 年度 (四半期毎)			R01 年度 (四半期毎)			R02 年度 (四半期毎)		
① 実習者の 募集および選定		←→			←→			←→	
② 実習			↔		↔				リモート ↔

(1) 炉物理および放射性廃棄物処理・管理技術実習

1) 実習準備、解説・指導、成果まとめ

a) 実習準備（カリキュラムの作成）

テキスト等の教材を整備し、実習生の知識レベルに配慮したカリキュラムを作成した。その上で実習テキストを用いて、原子炉の安全機能、炉物理実験、非密封線源を用いた放射性物質の分離実験、放射性廃棄物管理に関する事前講義を行った。また NCA 施設保安規定の記載事項に準じて安全教育を行った。

b) 原子炉の安全機能に関する学習の解説・指導

NCA 施設における原子炉の安全性を担保する安全機能について、点検操作の体験を含めた学習を行なった。学習項目は① アラーム、スクラム点検 ② インターロック機能である。

c) ウラン燃料および中性子源を用いた原子炉物理実験の解説・指導

軽水炉燃料の形状と濃縮度を模擬しているウラン燃料と、施設で利用できる中性子源を用いて、原子炉物理実験を行わせた。実験項目は、次のとおりである。

- ① 中性子源を用いた中性子減速特性の検討（図 1 参照）
- ② ウラン燃料の  $\gamma$  線測定による濃縮度および燃焼度の推定
- ③ ウラン燃料および中性子源を用いた核分裂反応の挙動

d) 放射性廃棄物中核種分離実習の解説・指導

放射性廃棄物の核種濃度を決定するための核種分離技術に関連し、非密封線源を用いた核種分離実習を行った。分離技術の概要を解説するとともに陰イオン交換樹脂を用いてセシウム、コバルト、鉄を分離し、放射線計測結果から分離性能を評価した。（図 2 参照）

e) 廃止措置における放射性廃棄物管理に関する解説・指導

廃止中の教育訓練用原子炉 TTR-1 で廃止措置中の原子炉における放射性廃棄物管理の状況を見学した。



図 1 原子炉物理実験  
(中性子の減速特性測定)

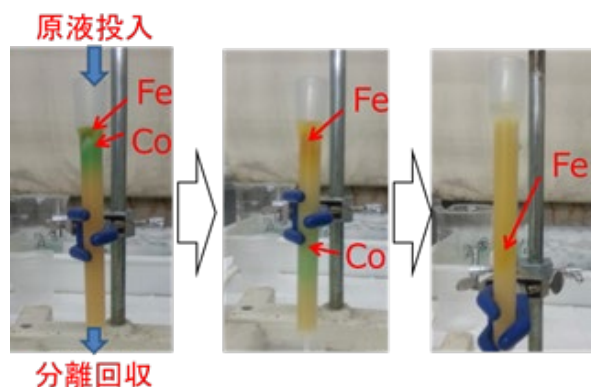


図 2 核種分離実習

(2) 多軸加振台を用いた燃料集合体等耐震技術実習

1) 実習準備（教材試験体の製作、試験体の据付）

応答スペクトルは耐震評価上重要な概念であるが、初学者に理解されにくい。応答スペクトルの

理解のため、固有周期の異なる片持梁を並列した教材試験体を製作した（図3参照）。

また、燃料集合体のように水中で振動する構造物には流体構造連成効果が作用する。この流体構造連成の効果を視覚的に確認する教材試験体を製作した。水中条件を構成する試験容器と、内部に燃料集合体を模擬した試験体（4体の角管）を設置した。加振台上への容器の据付状況を示す（図4、図5参照）。

## 2) 実習の実施、成果の確認

### a) 原子力機器の耐震設計の学習

原子力プラントの耐震設計の考え方や耐震解析法について座学にて解説した。

### b) 大型多軸加振台施設を利用した原子力機器の耐震評価実習

実験では、加振台の運転からデータの収録、分析まで、一般的な耐震試験の一連の流れを体験してもらった。応答スペクトル学習用の試験では、個々の振動体の特性の違いにより、地震波に対する応答が異なることを学習した。

流体構造連成学習用の試験では、気中条件と水中条件で振動体の応答が変わることを、視覚的かつデータにより学習した。また、データ分析についてはグループワークの形式で理解を深める狙いとした。

なお、2020年度は緊急事態宣言下であったため、リモート形式で実習を実施。試験データ取得までを東芝側で行い、試験映像の視聴やデータの分析作業をリモート形式で実施した。

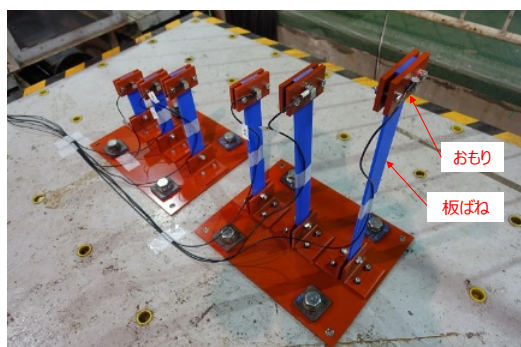


図3 耐震実習  
(教材試験体：応答スペクトル学習用)

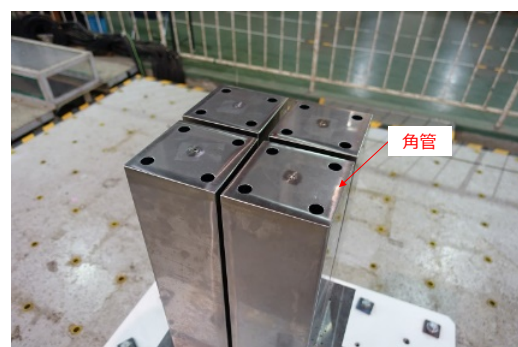


図4 耐震実習  
(教材試験体：流体構造連成学習用)

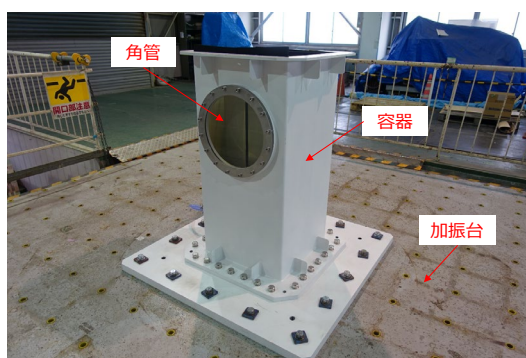


図5 耐震実習  
(教材試験体の振動台への据付状況)

## (3) 軽水炉プラントと燃料サイクルの安全性に関する技術実習

BWR プラントの基本構造、燃料構造や炉心特性、燃料サイクルの理解促進の観点で効果が期待



できる原子力施設・設備・機器を順次系統的に見学ないし実習を行うことにより軽水炉および燃料サイクルの安全性をシステムとして理解できるように学習した。

1) 原子力プラントメーカー研究開発の最新技術の学習

原子力プラントメーカーの開発施設を訪問し、BWR プラントの基本構造、燃料構造を学ぶ（図6参照）とともに最新の研究開発設備を見学した。

2) 燃料集合体の加工施設における製造プロセスと検査の技術実習

燃料加工工場を訪問し、燃料粉体から、ペレット、燃料棒、さらには燃料集合体までの製造プロセスなどを見学し、さらに模擬燃料集合体製作の実習を行った。

3) ホットラボにおける使用済み燃料ハンドリング技術の学習

ホットラボを訪問し、ホットラボ施設機能の学習を行うとともに放射線レベルの高い使用済み燃料等のハンドリングを見学した。

4) 軽水炉沸騰伝熱における安全技術実習

電力会社の研修施設を訪問し、実習用軽水炉沸騰伝熱ループを用いた実習を行った。

5) 機器の保全・補修に関する安全技術実習

同上施設において、ポンプ保全実習施設を利用して保全の学習をおこなうとともにポンプ補修設備を利用して補修の実習を行った。

6) 事故時安全技術等の学習

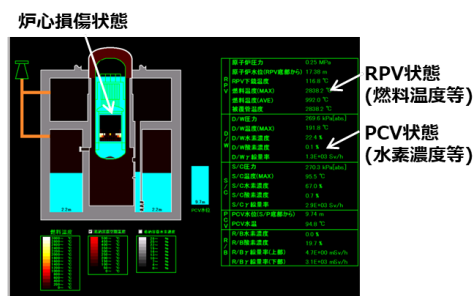
茨城県原子力オフサイトセンター、原子力緊急時支援・研修センター、茨城県環境放射線監視センターを訪問し、原子力発電プラント事故に備える各施設の機能と緊急時の活動等について学んだ。

7) シミュレータによる発電所の運転訓練及び設備・機器の保修制御の体験実習の解説・指導

原子力プラントメーカーの実機向けシミュレータ施設を訪問し、原子炉起動、運転、事故時の原理や挙動を学ぶとともに、シミュレータを実際に用いた学習を行った（図7参照）。



図6 技能訓練（BWR プラント大型模型）



圧力容器・格納容器損傷状況の表示機能

図7 技能訓練（シミュレータ）

## 〈成果と評価〉

### (1) 炉物理および放射性廃棄物処理・管理技術実習

#### 1) 実習者の募集および選定

本実習では、学校を指定する方法（2校）と炉物理系個別研究室から実習者を募集した。高専、学部、大学院とレベルの異なる実習者を受入れたことで講師側のスキル向上につながるとともに実習者の緊張感維持につながり、実習効果を向上できたと考える。

#### 2) 実習

##### a) 実習準備、事前講義、安全教育

実習内容および安全教育に係るテキストを準備した。テキストは共通のものとしたが、受入れる実習者の習熟度に応じたカリキュラムを作成した。このような対応により、効率的に実習を行うことができた。

##### b) 実習の実施

安全教育とリンクさせた解説・指導を行った。アラーム・スクラム学習では、原子炉施設の安全機能の理解を高めることができた。インターロック機能は実習者に討論を行わせ、自主的に考察することを促すことができた。

中性子の減速特性に関する検討と、核分裂反応の挙動は、実験体系を実習者に検討させてから進めることで、原子炉での核的挙動を効果的に理解させることができた。新規に導入した核分裂反応の挙動は、減速特性にも関連する項目であり、2つをリンクさせることで相互の理解を深めることができた。これは、今回の実習での大きな成果である。燃料の $\gamma$ 線測定は、濃縮度と燃焼度を推定させたが、原子炉燃料の特性に係る理解の促進に有効であった。

放射線防護の観点から、原子炉施設としてのNCAでのモニタ機能を学習させた。この学習により、原子炉施設が備えるべき要点を理解させることができた。また、放射線測定機器を用いて、作業環境測定を行わせ、自然環境を含めた放射線の知識を実感させることができた。

##### c) 実習成果の確認

実習項目ごとにレポートを課した。合わせて、アンケートも提出させた。レポートとアンケートの分析により、実習カリキュラムと指導方法にフィードバックを行った。レポート分析では、理解度が想定したものとなっていた。また、アンケート分析から、実習の満足度が高いことが確認された。これらの分析より、実習の効果が十分に得られたといえる。

NCAは定期検査中で、本実習はNCAを運転せず実施した。この条件で実習項目を策定しつつカリキュラムを構築した。現状の条件でも、有効な実習ができることを確認した。

### (2) 多軸加振台を用いた燃料集合体等耐震技術実習

#### 1) 実習者の募集および選定

連携している3大学（神奈川大学、東京都市大学、東京電機大学）の学生を受入れた。大部分が学部3～4年の学生である。

#### 2) 実習の実施

原子炉プラントにおける耐震設計の考え方や、耐震設計の基本から発展的な内容である動的解析法、流体構造連成、確率論的リスク評価について講義形式で解説した。

原子力の耐震評価において重要な水中での構造物の振動（流体構造連成）の学習を目的に、燃料集合体を模擬した試験体を用いた加振試験を行った。試験体容器には上面や側面にアクリル窓を設け、試験体の挙動を視覚的に理解できるよう工夫した。また、学生には加振台の運転からデータの収録、分析まで一連の流れを体験できる構成とした。

また、2020年度はリモート形式の実施となったが、学生には試験映像の視聴やデータ分析作業を通して上記の流れを体験できる構成とした。

#### 3) 実習成果の確認

レポートやアンケートの回答から、講義においては難解と感じる部分が多少あったものの、試験を通して実際に手を動かすことで、理解が深まったことが確認できた。

参加者からは、大学では経験できない大規模な設備での試験を実施でき貴重な体験となったとの意見や、耐震工学の考え方や、応答スペクトル法による設計評価の考え方、流体中におかれた構造物の地震時の挙動について理解が深まったとの意見があった。

### (3) 軽水炉プラントと燃料サイクルの安全性に関する技術実習



### 1) 実習者の募集および選定

補助事業者が東京都市大学内の希望者と公募（原子力人材育成ネットや国立高専ネットなどを案内元とした）により「電気事業者、燃料加工メーカーとの連携を得て行う原子力技能訓練」の実習者を選抜した。

### 2) 実習の実施

東芝エネルギーシステムズ的设计開発拠点である横浜事業所を訪問し、BWR 型商用原子力発電プラントで実際に使用している再循環ポンプ等の個別機器、軽水冷却材の熱流動や受動的な安全系等の実規模スケールの研究開発設備、PAコーナ、3D CADを見学するとともに現役研究者から説明を受け議論できており、理解を深めるが効果があった。

実機の原子燃料を製造する基礎的工程を見学し、専門の技術者から丁寧な技術的説明を受けることができ、燃料フロントエンドに関わる技術の理解が深めることができた。

燃料製造実習に引き続いて大規模なホットラボを訪問して実機原搬出された使用済み燃料のハンドリングを見学できたことで燃料バックエンドに関わる技術の理解が深めることができた。

発電事業者の運営する研修施設で沸騰伝熱と機器の保全・補修の実習を行い、現場の技術者の指導を受けることができプラント設備の現場技術の理解が深めることができた。

原子力プラント事故後の対応を行う茨城県原子力オフサイトセンター、原子力緊急時支援・研修センター、茨城県環境放射線監視センターを訪問して指導を受けることで、原子力発電プラント事故の影響対応について理解を深めることができた。

本格的BWRシミュレータを使用し、起動時や事故時プラントのふるまいや原理を視覚的、体感的に理解してもらうことができた。

### 3) 実習成果の確認

実習レポートは数ページとなる感想文記載をメインとした。これによって個々の参加者の実習に関する様々な意見が確認でき、実習者の興味を引いた実習内容や実習待機時間などへの不満な点も明確になった。実習先にもフィードバックすることで次回実習のブラッシュアップに役立てることができた。

### (4) その他（評価項目に係る事項に対する考察等）

本事業実施後に当社に就職した学生を含め、原子力分野へ進学・就職した学生がおり、原子力分野における人材育成の観点から有効な成果が見られた。

## <今後の事業計画・展開>

本実習は実習施設の閉鎖予定などが重なることから、同内容での実習実施は計画していない。ただし本事業の経験は指導スキルの向上に役立っており、実習教材も充実したものになっていることから今後はこれらの経験、教材をインターンシップ等に生かしていくこととしている。

## <整備した設備・機器>

なし。

## <その他特記すべき事項>

原子炉物理実習で活用してきたNCAについては廃止措置中となっており、実習の実施はできない。

実習者全体の就職状況の追跡は困難であるものの、当社に限定すれば公募、固定枠合わせて累計数人が東芝エネルギーシステムズに入社し原子力事業に従事している。

## <参考資料>

### (1) 添付資料

1. 臨界実験装置を用いた原子炉運転実習テキスト（非公開のため表紙、目次のみ）
2. 多軸加振台を用いた燃料集合体等耐震技術実習テキスト（一部非公開部分は含まず）

評価項目に係る事項について

<p>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>	<p>① 委員会所見：NCA 廃止により計画に変更が生じない。 対応状況：生じない。3 年間とも実習を行うことができた</p> <p>② 委員会所見：「燃料サイクルの理解」が実習に含まれていることは非常に良いことと思うが、バックエンドの重要性など、難しい内容が含まれると思う。学生にどのように教えるのか。 対応状況： フロントエンド（プラントモデル見学、燃料工場実習）とホットラボの使用済み燃料学習など、知識がうまくつながるように指導を行った</p> <p>③ 委員会所見：大学の授業として実施する前提で開始するとやり易いのではないか。 対応状況：実習は大学・高専の実習カリキュラムとして認められる時間数を確保して実施した</p> <p>④ 委員会所見：年度ごとの減額はできないのか 対応状況：年度ごとに 20%の減額を実施した。</p> <p>⑤ 目標（1）大学や高等専門学校の主に理工系学科・専攻における原子力関連教育のカリキュラムや講義・実習等の充実化・高度化・国際化 対応状況：実習は大学・高専の実習カリキュラムに組み入れられている</p> <p>⑥ 目標（2）原子力施設や大型実験装置などを有する機関における高度原子力教育 対応状況：臨界集合体 NCA、実機燃料開発用耐震試験装置、シビアアクシデント模擬可能な実機シミュレータを活用した</p> <p>⑦ 目標（3）事故の教訓をふまえた世界の原子力安全向上への積極的貢献 対応状況：茨城県原子力オフサイトセンター、原子力緊急時支援・研修センター、茨城県環境放射線監視センターで一連の設備見学と講義を行って、事故対応の統合的理解を深め、就職先としての興味も喚起できた</p>
<p>③ 特記すべき成果</p>	<p>10 年以上の実習継続により、実習内容がブラシアップされてきており理解しやすく改良されてきている。教育スタッフも教育スキルが向上し、受講者レベルに柔軟に対応できるようになった。</p>
<p>④ 事業の継続状況・定着状況</p>	<p>本事業は平成 18 年から METI 補助事業として開始して以来 10 年以上継続して実施してきた。</p>
<p>⑤ 成果の公開・共有の状況</p>	<p>過去には原子力人材育成ネットワーク報告会、複数の国際会議 (PHYSOR, ICONNE) で成果を発表している。</p>
<p>⑥ 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>	<p>参加した学生数：185 名 原子力関係機関への就職状況：原子力プラントメーカー就職者数名（東芝エネルギーシステムズへの就職者以外は把握できていない） 公的資格取得者数：把握できていない</p>