

平成25年度安全性向上原子力人材育成委託事業 成果報告書(概要版)

国立大学法人東北大学

金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター；四竈樹男

〈提案事業概要〉

東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故の廃止措置は今後 30-40 年続くと予想されており、継続的な対応には人材育成が欠かせない。本事業では、燃料デブリ取り出しに関わる人材育成および放射性廃棄物処分に関わる人材育成を実施する。また、安全性向上に関わる人材育成を実施する。

1. 目的・背景

・原子力分野では放射線管理技術に支えられた環境での作業が不可欠である。これは、原子力を志す学生や若手研究者等の職員が最初に習得しなければならない技術である。一般的には放射線作業は体験する機会がほとんど無いため具体的なイメージを持つことが難しい。本事業では、本格的な放射線作業環境で実際に作業を体験させることにより、実務の正確なイメージを持つことが出来るように指導する。

2. 実施概要

・茨城県大洗地区で互いに隣接する3つの機関（東北大学金属材料研究所、独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）、日本核燃料開発株式会社（NFD））のホットラボを連携し、放射線管理技術に支えられた環境での実務教育を実施した。

・本事業では、「短期集中教育」と「長期滞在型教育」を実施する。「短期集中教育」では、講義を通して幅の広い知識を得るとともに、受講生が選択したテーマについて通常の大学等では設置されていない管理区域内の大型機器や最先端機器を利用して実務型教育を実施した。また、「長期滞在型教育」では、受講生は、それぞれの研究テーマについて大洗地区に滞在し、3機関の職員を指導教官として実務教育を実施した。これにより短期では実習出来ない本格的な実務を体験した。

2-1. 短期集中教育

(1) 大洗原子力夏の学校

・夏休み期間を利用して大学生、大学院生、原子力施設の初級技術者を対象としての平成25年8月5日（月）～8月9日（金）に短期集中教育を実施した。参加者の募集は、日本原子力学会ニュース、ホームページへの掲載、ポスターの配布により行った。申請時に目標とした参加者数35名を上回る16大学38名（大学院生30名、学部学生8名）が参加した（写真1）。（添付資料1）

・実習内容は、講義を中心にした「共通基礎講習」と実習を中心にした「テーマ別実務教育」の2つに分類した。

・「共通基礎講習」では、学術的及び技術的な内容を講義するとともに現在の原子力がおかれている状況についても解説した。講義のタイトルを講師名とともに下記に示す。

- 1) JMTR および常陽の見学／ 原子力機構 板垣亘
- 2) 福島第一原子力発電所事故を受けての今後のエネルギー戦略／ 原子力機構 伊藤治彦
- 3) 福島第一原子力発電所の廃止措置の現状と研究開発／ 東京電力株式会社 鈴木俊一
- 4) 放射性廃棄物の処理と処分／ 日揮株式会社 鈴木泰博
- 5) 核燃料物質取扱技術と管理技術／ NFD 水迫文樹
- 6) 原子炉内での核燃料の照射挙動／ NFD 平井睦
- 7) 材料照射損傷の基礎過程と最先端のマイクロ解析評価手法／ 京都大学 義家敏正
- 8) 原子炉による材料照射試験と照射後試験技術（照射損傷の評価）／ 東北大学 栗下裕明
- 9) アクチノイド化合物の試料育成と基礎物性／ 東北大学 本多史憲

・「テーマ別実務教育（短期）」では、放射線管理、廃止措置関連、安全性向上関連の3分野において具体的なテーマを設定した。茨城県大洗地区のホットラボを活用して実務教育を実施した。下記に実施した7テーマを示す。各テーマの概要は添付資料2を参照されたい。各テーマあたり5名程度の受講生を受け入れた。実習後、受講生がそれぞれ実習内容をレポートにまとめた。レポートは指導員によってチェックを受けコメントとともに受講生に返却した。

放射線管理関連

1) 環境中の核種分析技術と被ばく評価／ 原子力機構

廃止措置関連

2) 核燃料物質を用いた模擬炉内損傷燃料試料作成実験／ NFD (写真2)

安全性向上関連

3) 金属材料の照射脆化のマイクロ因子の観察・分析／ 東北大学 (写真3)

4) 照射試験技術および照射脆化と照射硬化の評価／ 東北大学

5) 原子力材料の強度特性と組織の相関評価／ 原子力機構

6) 核燃料・アクチノイド関連物質の合成と精密評価／ 東北大学

7) 原子炉施設の安全性に関するオンサイトトレーニング／ 原子力機構 (写真4)

・テキスト (369 頁) を作成し配布した。

・次の各施設を見学した。

1) 材料試験炉 JMTR (原子力機構)

2) 高速実験炉「常陽」(原子力機構)

3) 東海第二発電所見学 (日本原子力発電株式会社)



写真1 「大洗原子力夏の学校」集合写真
(原子力機構 Fセルボ玄関)



写真2 模擬デブリのSEM観察 (NFD)
U-Zr-O系の模擬デブリの組織をSEMにより観察した。今後炉から取り出しの際に必要な性状を観察した。



写真3 3Dアトムプローブ実習(東北大学)
材料中の原子の3次元的な分布を調べる最新の装置の操作を体験した。



写真4 高速実験炉「常陽」オンサイト講義
(原子力機構)
実際の設備を見学しながら、原子炉施設の仕組みと安全管理に関する知識と経験を習得した。

(2) 高等専門学校学生原子力インターンシップ

・夏休み期間中(平成25年8月26日(月)～8月30日(金))に高等専門学校の学生を対象に短期集中教育を実施した。ホームページに募集案内を載せるとともに高専への直接の案内を送付した。申請時に目標とした参加者数8名を大きく上回る5高専・1大学 総数19名(高等専門学生18名、学部学生1名)が参加した。尚、学部学生は、「大洗原子力夏の学校」に参加を希望していたが本人の都合により参加できなくなった学生が参加したものである。(添付資料3)

・実習内容は、講義を中心とした「基礎講習」と「見学実習」、「成果発表」の3つに分類した。

・「基礎講習」では、学術的及び技術的な内容を講義するとともに現在の原子力がおかれている状況についても解説した。講義のタイトルを講師名とともに下記に示す。

- 1) 原子スケールの材料の乱れを直接見る／ 東北大学 永井康介
 - 2) やっかい者がおもしろい～放射性物質と超伝導のふしぎな関係～／ 東北大学 青木大
 - 3) 放射線作業教育／ 東北大学 畠山賢彦
 - 4) 金属材料の強度の基礎とその評価試験／ 東北大学 栗下裕明
- ・「見学実習」では、高専生は放射線作業従事者の指定が出来ないため、実施機関の職員が行う操作を見学した。下記に実施したテーマと機関を示す。
- 1) 材料の計装化シャルピー衝撃試験、SEMによる破面観察等（東北大学）
 - 2) 材料の陽電子消滅測定・3次元アトムプローブ測定（東北大学）
 - 3) 材料の透過電子顕微鏡（東北大学）
 - 4) アクチノイドのーク炉での合金作成と物性測定（東北大学）
 - 5) 核燃料取り扱い施設での作業の紹介（NFD）
 - 6) 模擬デブリ試料作成及び物性評価について（NFD）
- ・補助テキスト「放射線・物質・材料の基礎」（217頁）を印刷、配布した。
- ・次の原子力機構の各施設を見学した。
- 1) 高速実験炉「常陽」
 - 2) 照射燃料集合体試験施設（FMF）
 - 3) 照射材料試験施設（MMF、MMF-2）
 - 4) 材料試験炉（JMTR）
 - 5) 高温工学試験研究炉（HTTR）（写真5）
 - 6) 冷却系機器開発試験施設（AtheNa）
- ・「成果発表」では、4班に分けて、各班ごとに、受講生がテーマを決めて発表した（写真6）。各班の発表時間は30分、質疑時間は15分とした。尚、発表には次のいずれか（または両方）の項目を議論に含めてもらうよう指示した。
- 項目1：将来のエネルギーについて
- 項目2：東京電力福島第一原子力発電所事故からの復興について
- 発表資料作成時の各グループの議論には教官が入り助言した。



写真5 「高等専門学校学生原子力インターンシップ」集合写真（原子力機構 HTTR 玄関付近）



写真6 高等専門学校学生原子力インターンシップでの成果発表
最終日に班に分かれ、学習した内容をもとにテーマを決めて発表した。

2-2. 長期滞在型教育

- ・長期滞在型教育では、下記2件を受け入れた。
- (1) 緩衝材中のアクチノイド元素の移動に関する研究
 期間 平成25年7月23日～8月2日、九州大学大学院工学部エネルギー量子工学専攻博士課程3年生1名を東北大学において受け入れた。東北大学教員の指導の下、放射性廃棄物の地層処分研究の一環としてベントナイト緩衝中におけるプルトニウムの移行挙動試験を実施した。本研究の成果は博士論文の一部として利用される予定である。
 - (2) 物性測定用ウラン化合物試料の育成研究
 期間 平成25年9月9日～9月13日（2名）、平成25年11月18日～11月22日（2名）、平成26年1月14日～1月17日（1名）、新潟大学大学院自然科学研究科数理物質科学専攻修士課程1年生を東北大学において受け入れた。東北大学教員の指導の下、ウラン化合物試料の単

結晶を育成した。単結晶の育成には2～6週間ほどを要するため、試料を装置にセットし再度来訪して育成された結晶の組成分析や評価、及び物性測定を行った。この学生は短期集中教育の受講者であり、本事業の中で継続して参加する良い例となった。

2-3. 教材作成と装置整備

- ・次年度以降の「短期集中教育」と「長期滞在型教育」に用いる下記の教材を作成した。
 - (1) 廃棄物処理教育に関わる教材作成
放射性廃棄物処理や廃止措置に関する実習のプログラム検討を行い、環境整備のための機材を購入した。
 - (2) 原子炉照射における核変換計算プログラムの改良
原子炉の運転中に材料や燃料内で中性子核反応による元素の組成変化が起こる。これを計算するプログラム (ORIGEN) のユーザーインターフェースを改良し、大洗原子力夏の学校において学生が利用できるようにした。
- ・次年度以降の「短期集中教育」と「長期滞在型教育」に用いる下記の装置を整備した。
 - (1) エネルギー分散型分析装置の付加
既存の走査型電子顕微鏡に付加し、観察面に存在する元素の分析を実施可能にした。
 - (2) メスバウアー分光分析用線源の整備
アクチナイドや構造材の鉄を含む化合物の電子状態をメスバウアー分光法を用いて調べることが出来る様に実験手法を整備した。

3. 成果

3-1. 短期集中教育

- (1) 大洗原子力夏の学校
 - ・申請時に目標とした参加者数 35 名を上回る参加者数 38 名を得た。所属分野は、原子力系分野が 32 名、その他の分野（物性物理、地球物理等）の 6 名が加わり原子力の裾野を広げる意味で貢献出来たと考えられる。
 - ・申込時に、参加者に志望動機及び現在の研究課題（学部生は今後の研究課題）を記述してもらった。志望動機は「原子力関連研究施設での放射線作業を体験したい」「最先端の研究機器の操作を体験したい」等が主なものであり、これを講師に配布し講義、実習の参考とした。
 - ・「共通基礎講習」では、学術的、技術的な内容の講義に加えて現在の原子力がおかれている状況について解説した。講師は、外部講師（東京電力株式会社 1 名、日揮株式会社 1 名）を加えて、福島第一事故と廃止措置の現状について広く理解できるように考慮した。
 - ・「テーマ別実務教育」では、大洗地区のホットラボを活用してそれぞれの実務教育を実施した。特に、放射線作業従事者登録が可能な 20 名の参加者については、登録後、管理区域内で実際の RI 作業を体験した。特に、NFD の燃料研究施設でのデブリ燃料に関する実習は、これまでに例が無く特筆すべき成果である。放射線作業従事者登録が出来ない学生に対しても、職員の RI 作業を身近で見学する等により RI 作業のイメージが描けるように配慮した。
 - ・受講者全員に修了証書を授与した。東北大学、京都大学、近畿大学、福井大学、九州大学の学生 15 名においては、この実習結果によって大学院の単位が認定される。
- (2) 高等専門学校学生原子力インターンシップ
 - ・申請時に目標とした参加者数 8 名を上回る参加者数 19 名を得た。本年度は原子力の広い分野について学べる内容になっていることが原因と考えられる。
 - ・上述した 6 施設の見学を実施した。JMTR や HTTR の炉心近くまで見学できたこと及び偶然ではあるが照射材料試験施設においてホットセル内装置のメンテナンス作業を見学できたことは多くの学生にとって印象深かったようである。また、各施設に於いて、見学時間の制限があるにもかかわらず、出入管理として、毎回作業着の着替えと汚染チェックを厳密に行っている点に安心感を持ったとの感想があった。
 - ・各高专からの依頼により、実施内容についての評価を記載した実施証明書を作成し送付した。

3-2. 長期滞在型教育

- ・博士課程の学生の一ヶ月を超える長期滞在型研究を期待したが該当者が無かった。そのため一ヶ月以下の博士課程の学生の滞在も認めた。また、大洗原子力夏の学校に参加した修士課程の学生が、さらに学習を続けるために所属の指導教官とともに滞在することも認めた。

3-3. 教材作成と装置整備

- ・計画通り作業を完了した。この成果は次年度の教育に反映する。

4. 取組の評価と今後の展開

4-1. 短期長期滞在型教育について

- ・予想以上の参加人数が集まり、他分野の学生を吸収できたことは期待を上回る成果であった。その原因としては、福島第一原子力発電所事故以降原子力への関心が高いことにあると考えられる。
- ・社会人の参加については、2社から問い合わせがあったが最終的には不参加となった。原因の一つは、初年度であるため教育の内容の確定に時間が取られ十分な周知が出来なかったことにある。次年度は今年度の実績をもとに早期に内容の周知を行う。

4-2. 長期長期滞在型教育について

- ・長期長期滞在型教育は管理区域作業が伴うため作業を習熟した博士課程学生に限定している。しかし、近年、博士課程に進学する学生数が減少しており安定的に参加者を確保することが困難な状況にあるため、一ヶ月以下の博士課程の学生の滞在や、修士課程の学生が、さらに学習を続けるために所属の指導教官とともに滞在することを認めた。次年度もこのような方向で学習効果を上げる方法を模索する。

4-3. 教材作成と装置整備

- ・本事業は、5年間の実施を計画している。教材や実施環境整備が整うにつれて、教育内容の充実とテーマ数の増加する計画である。

4-4. アンケート結果について

- ・「理解できたかどうか」と「興味が持てたかどうか」について尋ねた結果、「良く理解できた」と「まあ理解できた」の合計と「大変興味を持てた」と「まあ興味を持てた」の合計の平均は、講義、実習とも「大洗原子力夏の学校アンケート」では約80%となり、「高等専門学校学生原子力インターンシップ」では約70%となった。

- ・「大洗原子力夏の学校アンケート」の個別の意見の中には、次のようなものがあった。

「原子炉を見る事が出来る良い機会であった。」

「原子力の今後の状況についてもっと踏み込んだ話が聴きたい。」

「普段使ったことの無い機器を使えて良い経験になった。」

また、学生の専攻によっては講義内容の難易度を高く感じる場合があったので次年度の検討課題とする。

- ・「高等専門学校学生原子力インターンシップ」アンケートの個別の意見の中には、次のようなものがあった。

「福島第1原子力発電所の事故の概要を、もう少し詳しく取り上げて欲しい。」

「見やすく分かりやすい資料が多く素晴らしいと感じた。」

また、「どの研究が、どの分野のどの様な役割を果たしているのか、等の説明が欲しいと感じました。」との意見もあり次年度の検討課題とする。

本年度は、第一回のため手探り状態であったが、このアンケート等をもとにして、次年度はより理解のし易い教育内容に改良する。

5. 添付資料

- 1) 「大洗原子力夏の学校」参加者所属
- 2) 「大洗原子力夏の学校」実務教育テーマ
- 3) 「高等専門学校学生原子力インターンシップ」参加者所属

6. 文献

- 1) 四竈樹男、「大洗原子力夏の学校」IMR NEWS KINKEN, 72(2013)11.

「大洗原子力夏の学校」 参加者所属

1. 室蘭工業大学機械航空創造系学科材料工学コース 3人
2. 室蘭工業大学院機械創造工学系専攻 2人
3. 岩手大学工学研究科フロンティア材料機能工学専攻 1人
4. 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 9人
5. 東北大学理学部地球惑星物質科学科 1人
6. 新潟大学大学院自然科学研究科数理物質科学専攻 3人
7. 芝浦工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻 3人
8. 東京都市大学工学部原子力安全工学科 1人
9. 東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻 1人
10. 東海大学原子力工学科 1人
11. 信州大学理学部物理科学科 1人
12. 名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻 1人
13. 福井大学大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻 3人
14. 京都大学エネルギー科学研究科変換科学専攻 2人
15. 奈良女子大学理学部物理科学科 1人
16. 近畿大学理工学部電気電子工学科エネルギー・環境コース 1人
17. 近畿大学大学院総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻 1人
18. 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 3人

合計 38 人 (学部学生 9 人、大学院生 29 人、社会人 0 人)

「大洗原子力夏の学校」 実務教育テーマ

1. 放射線管理

1-1. 環境中の核種分析技術と被ばく評価

種類 / コールド作業 機関・施設 / JAEA・照射後試験施設、放射線管理施設

ゲルマニウム半導体検出器を用いた環境試料の放射能分析、ホールボディカウンタを用いた内部被ばく測定の実習を通じ、放射線の環境・人体への影響への理解を深めるとともに、放射線管理や環境監視に係る放射線測定・分析技術を習得する。

2. 廃止措置関連

2-1. 核燃料物質を用いた模擬炉内損傷燃料試料作製実験

種類 / 核燃料取り扱い作業 機関・施設 / NFD ウラン・燃料研究棟

福島第一原子力発電所事故に係る中長期措置の研究開発項目にあげられている「模擬炉内損傷燃料を用いた特性試験」に関連して、実際に核燃料物質を用いた実験を経験し、核燃料物質や放射線に対する安全取扱・管理能力を養う。

3. 安全性向上関連

3-1. 金属材料の照射脆化のマイクロ因子の観察・分析

種類 / RI 作業 機関・施設 / 東北大・研究棟

最先端機器を用いた材料解析手法の講義と実習。透過電子顕微鏡 (TEM) による組織観察や微細な空孔型欠陥を解析できる陽電子消滅法について講義と実習を行う。また、原子レベルの位置分解能で3次元元素分布を得る3次元アトムプローブについて学ぶ。3次元アトムプローブ法は、材料中のナノ析出物の組織解析が可能である。

3-2. 照射試験技術および照射脆化と照射硬化の評価

種類 / RI 作業 機関・施設 / 東北大・研究棟、ホットラボ棟

材料の照射健全性を評価するために不可欠な照射試験技術を学ぶ。照射用試料作製とキャプセルへの装荷、材料開発と照射用試料の作製、試験片打抜、レーザーマーキング実習、計装化シャルピー衝撃試験、SEMによる破面観察を実習する。

3-3. 原子力材料の強度特性と組織の相関評価

種類 / コールド及びRI 作業 機関・施設 / JAEA・照射後試験施設 (MMS, AGF 等)

試料作製 (セラミックスバルク焼結体等) や組織観察 (光学顕微鏡、電子顕微鏡観察)、及び物性・強度特性の測定 (熱分析、熱伝導率測定、硬さ測定、引張強度測定) 等を通じ、一連の基礎的ホット実験実習を行う。同時に、ホットラボでの放射線作業体験、遠隔操作体験を体感することにより、放射線管理・安全管理の基礎能力を習得する。

3-4. 核燃料・アクチノイド関連物質の合成と精密評価

種類 / 核燃料取り扱い作業・RI 作業 機関・施設 / 東北大・アクチノイド棟

ウランなどのアクチノイド、およびランタノイドを安全に取り扱いながら、アーク溶解炉を用いて化合物を合成し、合成された試料について構成元素の組成分析や X 線回折法により結晶構造などを調べ相を同定し、電気抵抗や磁化といった基本的な物理量測定を通して物質の電子状態を知るための一連の手法を学ぶ。

3-5. 原子炉施設の安全に関するオンサイトトレーニング

種類 / コールド作業 機関・施設 / JAEA・常陽、JMTR、HTTR 等

原子炉運転シミュレータを用いて、原子炉固有の安全性を各自で運転操作して体験することにより理解度を深める。また、実際の設備を見学しながらのオンサイト講義により原子炉施設を細部まで解説し、原子炉施設の安全管理に関する知識と経験を習得する。

「高等専門学校学生原子カインターンシップ」 参加者所属

1. 沼津工業高等専門学校電子制御工学科 2人
2. 仙台工業高等専門学校マテリアル環境工学科 6人
3. 茨城工業高等専門学校機械システム工学科 4人
4. 茨城工業高等専門学校電気電子システム工学科 1人
5. 福島工業高等専門学校機械工学科 3人
6. 福島工業高等専門学校電気工学科 1人
7. 一関工業高等専門学校制御情報工学科 1人
8. 室蘭工業大学機械航空創造系学科材料工学コース 1人

合計 19人 (高等専門学校学生 18人、学部学生 1人)