

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「放射性廃棄物処理・処分における分離・分析に関する教育」

＜実施機関＞

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

＜連携機関＞

東北大学、九州大学、長岡技術科学大学、北海道大学、近畿大学、日立製作所

＜実施期間・交付額＞

28年度16,104千円、29年度15,852千円、30年度12,972千円

＜当初計画＞

1. 目的・背景

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。また、原子力発電が今後日本社会で受け入れられるためには、高い安全性の確保とともに、通常の原子力発電により発生する放射性廃棄物の処理・処分方法に目処を付けることが一般社会の理解を得るための緊急の課題である。本事業ではこれらに共通するキーワードの一つで有る「放射性廃棄物処理処分」に必要な人材を、本格的な放射性物質および核燃料物質の取り扱いが可能な世界でも有数の教育施設である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（以下、東北大大洗センターと略す）を舞台に育成する。

2. 実施計画

これまで核燃料サイクルで想定されていた原子力発電所や再処理施設からの放射性廃棄物に加えて、1F事故の廃止措置では核燃料デブリをはじめとする多種多様な廃棄物が発生している。これらの放射性廃棄物の安定化や処分のためには、廃棄物中の放射エネルギーや化学成分等を把握する必要があり、そのために試料を採取し実際に分離・分析する。本事業ではこの分離・分析作業について学ぶ。特に現在主要な課題の一つである難測定核種の分析手法に関して最先端の分析機器であるICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析装置）を導入しその測定手法を指導する。学生は最先端の研究に触れることによって将来の研究に展望を持つことが出来るため、廃棄物処理・処分分野への志向性の向上につながる。

本事業では、講義による知識の習得に加えて実務を体験することに重点を置く。本実習を実施する東北大大洗センターのホットラボは、日本原子力研究開発機構の敷地内に位置し本格的な放射性物質および核燃料物質の取り扱いが可能な世界でも有数の教育施設である。特に取り扱いが可能なアクチノイドの種類と量は国内の大学等の教育施設では並ぶものが無い。この施設を活用し受講生は一般の大学では体験することのない管理区域内での本格的な放射性物質の取り扱い作業を体験する。この実習を通して放射性廃棄物の取り扱いの実務に対して確かな認識を持つことが出来る。

（1）放射性廃棄物処理処分講習と実習

廃棄物処理・処分に係わる技術者・研究者に共通して必要となる知識と技能について講習及び実習を行う。

① 講義

放射性廃棄物処理・処分に関する分離・分析技術および処分方法について講義を行う。

② 基礎技能実習

化学実験操作、原子炉内での放射性物質の発生計算法、マニピュレータの操作、燃料模擬デブリの作成法を学ぶ。

③ 分離分析実習

廃棄物の安定化や処分のためには、内包する放射性物質を定量的に把握することが必要である。しかしながら、多くの廃棄物はセシウム等の比較的短半減期（30年程度）の核種を多く含み、その他の含有量の少ない核種はセシウムのバックグラウンドに隠れて分析が困難である。一方、将来の処分を考えた場合は、長半減期の核種の含有濃度が重要になってくる。このため、長半減期であるが故に放射能強度の小さな核種を正確に定量する技術が必要である。この実習では、新しい分析手法として本事業によって導入した ICP-MS を用いたこれまでの手法では分析することが出来ない難分析核種に対する新しい分析手法を学ぶ。

（2）長期指導型実習

この実習では1週間以上の長期にわたる実験が必要な場合、または拡散実験のように実験を開始してから測定までに期間をおく必要のある実験などを対象としている。実習内容は、デブリ分析・処理に係わるもの、処分におけるアクチノイドの核種移行挙動に係わるもの、汚染物の除染・分析に係わるものなど協力機関との連携及び教育研究の公募を通して実施する。東北大大洗センターのホットラボを長期間利用することにより、より実践的な分離・分析に関わる高度な技術者・研究者の育成のために実施するものである。受講生はこの実習の成果を修士および博士の学位取得に使用できる。

＜実施状況＞

「放射性廃棄物処理処分講習・実習」と「長期指導型実習」の2種類の実習を実施した。前者は、毎年1月に一週間の短期に予め決められたプログラムを実施する。これに対して、後者は、受講生がそれぞれの研究テーマを持って東北大学大洗センターのホットラボに来訪し、教官の指導を受けながら実施するものである。初年度は本実習の中心課題である微量元素分析に用いる ICP-MS を短期間でホットラボに導入整備した。

（1）放射性廃棄物処理処分講習・実習

廃棄物処理・処分に係る技術者・研究者に共通して必要となる知識と技能について講習及び実習を実施した。

① 講義

放射性廃棄物処理・処分に係る分離・分析技術および処分方法について講義を行った。

- ・ 1F での廃止措置の現状と今後の計画について
- ・ 作業従事者登録に必要な放射線取り扱い技術について

② 基礎技能実習

- ・ 化学実験操作の慣れていない受講生に対しては、実験器具の取り扱い、ドラフトでの作業方法など基礎事項の実習を行う。
- ・ 原子炉内での放射性物質の発生およびその減衰を計算する ORIGIN コードについて解説とデモンストレーションを実施した。（図2）
- ・ ホットラボの実務で必要となるマニピュレータの操作を体験した。（図3）
- ・ 1F からの廃棄物の理解を深めるため燃料模擬デブリの作成法と燃料模擬デブリの走査電子顕微鏡観察を行った。（図4）

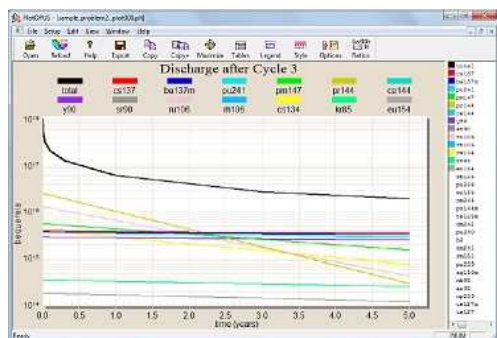


図2 放射性物質崩壊計算コード（ORIGIN）



図3 マニピュレータ体験学習

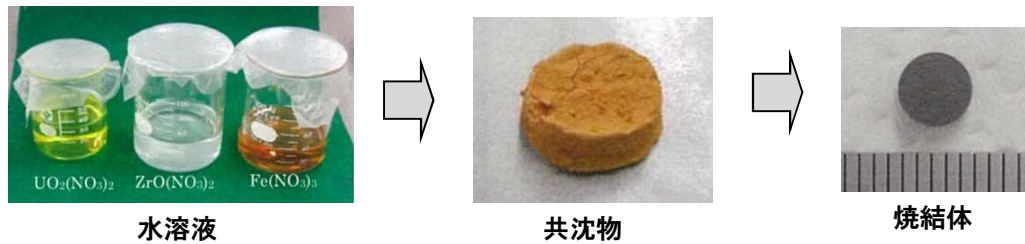


図4 燃料模擬デブリ試料の作成

③ 実習

放射能測定法よりも微量な分析が可能な ICP-MS を新たに導入して、これまでの手法では分析することが出来ない難分析核種に対する新しい分析手法を学んだ。実習のフローを図5に示す。放射性廃棄物を溶解した溶液を希釈する。その希釈溶液を用いて共沈やイオン交換を用いた放射性核種分離技術を学んだ（図6）。分離した試料は、まず α 線スペクトロメータや γ 線スペクトロメータを用いた放射性核種の同定及び放射能を評価した。放射能分析で測定の困難な ^{237}Np 等の長半減期核種は ICP-MS によって分析する必要がある（図7）。この方法は1Fからの廃棄物の分析手法としても採用が予定されており本事業に於いて分析技術者を育成する意義は大きい。図8は東北大学大洗センターの装置を用いて測定した Np の検量線である。放射能測定の検量線よりはるかに精度が高いことが分かる。

放射性廃棄物処分実習として、地層処分の安全評価のためにベントナイト中の核種の移行挙動をしらべる実験を実施した。 ^{237}Np トレーサー溶液をベントナイト試料に塗布し拡散させた後に、ナイフで試料を切断し試料に含まれる微量な ^{237}Np を ICP-MS で測定した。

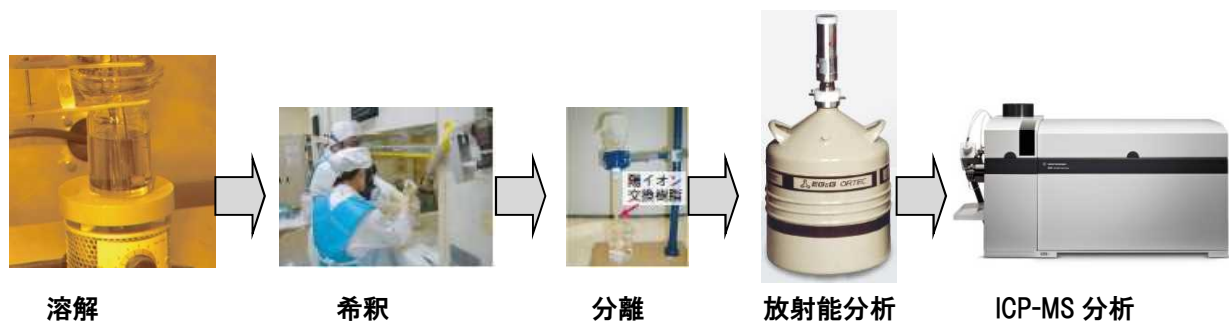


図5 放射性廃棄物の分離分析操作



図6 分離・分析実習



図7 ICP-MS 実習実習

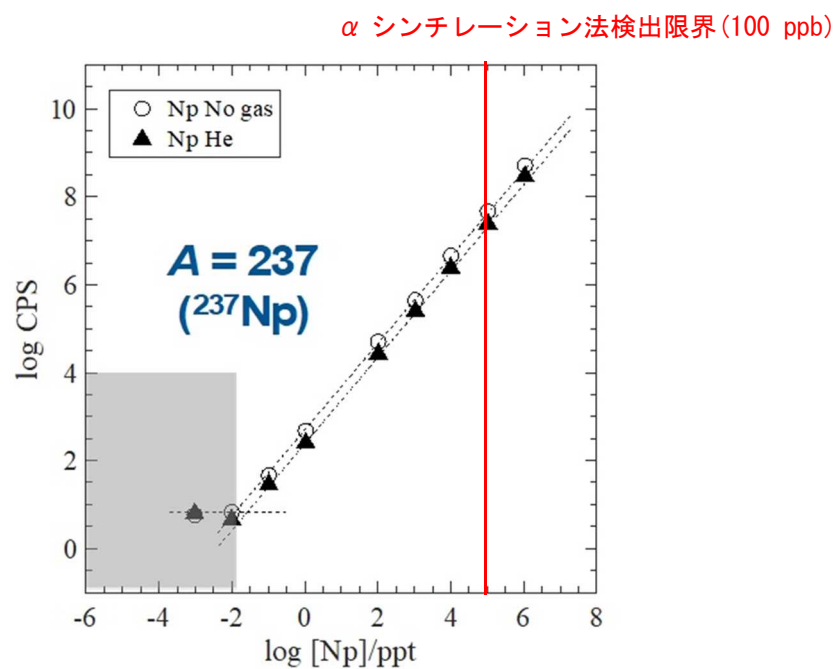


図8 ICP-MS で測定した ^{237}Np の検量線

(2) 長期指導型実習

実習生が所属する研究室の研究テーマを持って東北大大洗センターのホットラボを利用して研究を実施した。テーマ及び年度毎の参加人数を下記に示す。研究環境の充実に伴い参加人数の増加が見られた。

H28 年度 4 名

1) 九州大学大学院工学部エネルギー量子修士 2 名、学部 2 名
 テーマ：緩衝材中のアクチノイド元素の長期移動に関する研究

H29 年度 9 名

1) 長岡技術科学大学 修士 1 名
 テーマ：使用済み燃料及びデブリからのアクチノイドの分離

2) 近畿大学 修士2名、学部2名

テーマ：使用済み燃料及びデブリからのアクチノイドの分離

3) 九州大学 修士2名、学部1名

テーマ：緩衝材中のアクチノイド元素の長期移動に関する研究

4) 原子力機構 研究員 1名

テーマ：ICP-MS を用いた長半減期放射性核種の分析合理化に関わる研究

H30 年度 11名

1) 長岡技術科学大学 修士2名

テーマ：使用済み燃料及びデブリからのアクチノイドの分離

2) 近畿大学 修士2名、学部2名

テーマ：使用済み燃料及びデブリからのアクチノイドの分離

3) 九州大学 修士2名、学部1名

テーマ：緩衝材中のアクチノイド元素の長期移動に関する研究

4) 原子力機構 研究員 2名

テーマ：ICP-MS を用いた長半減期放射性核種の分析合理化に関わる研究

5) 大阪大学 博士1名

テーマ：アクチノイド化合物における新奇量子相の研究

6) 東北大学 修士1名

テーマ：希土類／アクチノイド化合物の超高压下物性研究

長期指導型実習成果の例として長岡技術科学大学の研究グループの研究成果を図9に示す。
この研究成果は、既に下記の学術誌で公開済みである。

T. Suzuki, Y. Yamamura, C. Abe, K. Konashi, Y. Shikamori, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2018) 318:221-225)

また、原子力機構と共同で行った研究成果は、2019年度原子力学会春の年会で口頭発表した。
濱田真歩、鈴木達也、山村朝雄、小無健司、鹿籠康行、野口真一「ICP-MS/MS による Np-237 分析の基礎検討」

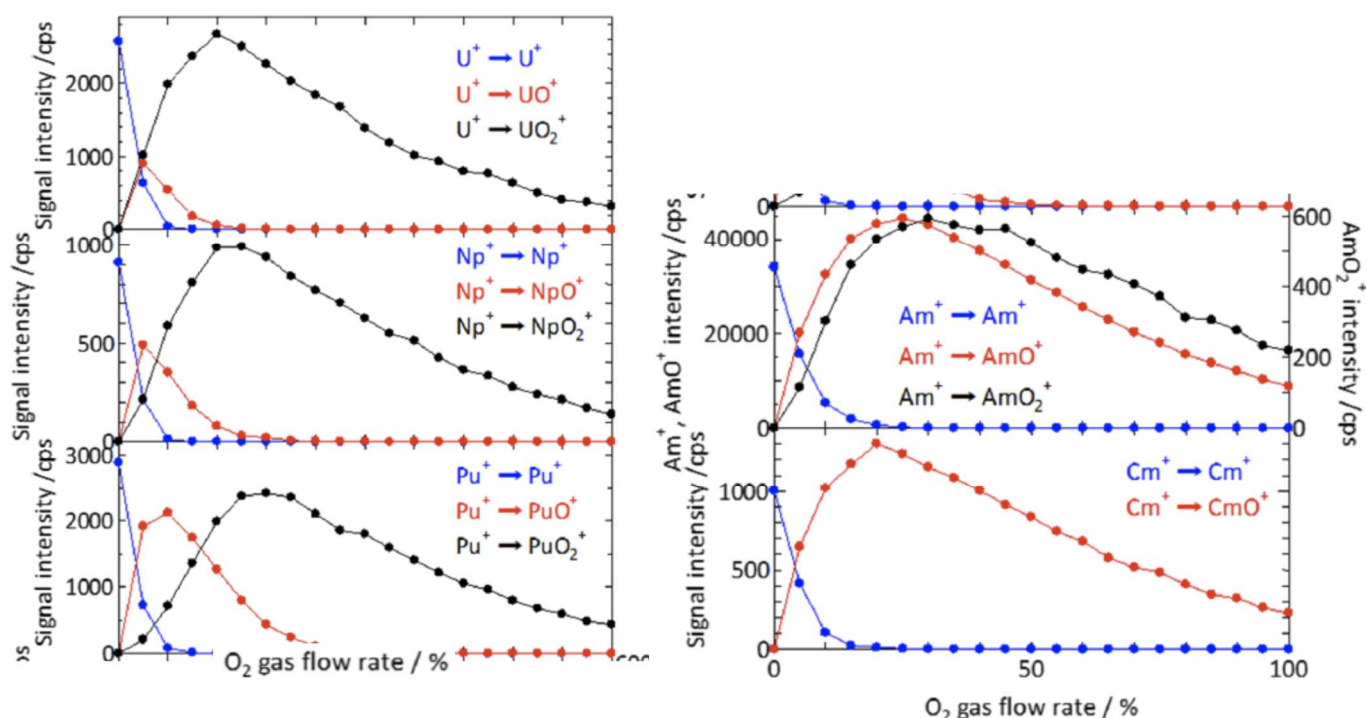


図9 アクチノイドイオン種の検出に及ぼす酸素ガスの効果

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		
			28年度	29年度	30年度
1) 放射性廃棄物処理処分講習・実習	①講義 ②基礎技能実習 ③実習	分離・分析技術ならびに原子力に興味を持っている大学生、大学院生及び若手研究者	21名	20名	24名
2) 長期指導型実習	受講者のテーマでホットラボを利用する。	分離・分析技術に専門的に興味を持っている大学院生及び若手研究者	4名	9名	13名
参加人数（実績）			25名	29名	37名
（参考指標）			644	547	351
交付額/参加人数			千円/人	千円/人	千円/人

表 2. 実施スケジュール（結果）

項目	28年度 (四半期毎)				29年度 (四半期毎)				30年度 (四半期毎)			
① 放射性廃棄物処理処分講習・実習				□				□				□
② 長期指導型実習				↔			↔				↔	

＜成果と評価＞

1F の廃止措置に必要な化学分析分野の人材育成は我が国の喫緊の課題である。本事業はこの課題の解決を目指して始められた。東北大学大洗センターの本格的ホットラボを利用して、受講者の放射線従事者登録をした上で、実際の RI を用いた作業を指導した。また、最先端の分析機器である ICP-MS を初年度から導入・整備し、2 年度、3 年度と教育プログラムを改良した。

（１）放射性廃棄物処理処分講習・実習

①講義については、初年度の実施結果をみると受講生の中に理解が不十分な学生が含まれていたため 2 年目からは、実施前に予め、テキスト等を配布し予習を促すこととした。そのため、2 年目からは理解度の向上が見られた。

②基礎技能実習については、受講生は放射線従事者登録を行った上で、大型ホットラボにおいて模擬燃料デブリ（ウランペレット）を取り扱うなど他では経験できない実務教育を受けることが出来た。参加した学生にアンケートを採ったところ、ほとんどの項目で内容に興味を示し高い理解度が得られたことがわかった。特に最新の ICP-MS への興味が強く実際の研

究に使用したいとの受講者が多く見られた。ICP-MS を用いた微量分析技術について、初級、中級、上級と一貫した講義と実習を受けることが出来るのは受講生にとって大きな魅力である。また、初年度のアンケート結果より、2 年目からは初心者を対象とした「溶液基礎操作」を取り入れるなどプログラムを工夫した。

③実習については、「処分実習コース」と「分離・分析実習コース」の二つに分けて実施した。いずれのコースも ICP-MS 分析作業が含まれており、②の講義と実習で学んだことを実践できる。実習後、成果報告会を開催し実験結果を報告し、受講生相互間で質疑応答を行うことにより理解を深めた。これは、指導教官にとっても受講生の理解度を把握する良い機会となった。

(2) 長期指導型実習

本事業で使用した最新の ICP-MS は、国内では唯一の RI が使用できる機器である。学生にとって廃止措置分野への就職を志す大きな動機付けになったと考えられる。初年度は、4 名であった受講生数が 2 年目（9 名）、3 年目（13 名）と増えて行ったことは、口コミにより学生間の評価が上がっていったためである。波及効果としては、ICP-MS は、原子力機構によって実際の 1F の廃棄物の分析に利用されようとしており、この実習の成果は大いに利用されることが期待される。

(3) その他（評価項目に係る事項に対する考察 等）

放射線管理区域内に設置された ICP-MS を利用して RI を含んだ試料を用いた実習であるため、受講生の数を制限せざるを得ないが、専門分野における最先端の技術を身につける貴重な教育である。原子力機構からも 1F の分析を担当する若手研究者が受講している。その中には「(1) 放射性廃棄物処理処分講習・実習」を初年度受講した後にさらに「(2) 長期指導型実習」を受講したものも含まれ短期間に教育効果が見られた良好事例である。

＜今後の事業計画・展開＞

本事業を継続・発展させる。少ない予算でも、これまでに得られたノウハウをもとに事業を効率的に進め、絶やすことなく継続させる。

公的機関が公募する補助事業・委託事業などに積極的に応募し、予算確保を図る。本事業における最も大きな経費項目である ICP-MS の導入は 3 年間賃借によって行うが、補助期間終了後も東北大大洗センターの運営費等によって賃借等を継続し、教育及び研究に使用する。

(1) 放射性廃棄物処理処分講習・実習

新たな公募事業の予算を確保し継続して実施する。

(2) 長期指導型実習

本事業の課題は、1F の廃止措置に密接した課題で有り、原子力機構と協力して極微量分析技術の開発を進める。また、この最新技術を担う若手研究者の育成にも注力する。

＜整備した設備・機器＞

(1) ICP-MS 1 台（平成 28 年度整備、賃借）

1F からの微量放射性廃棄物の検出に利用が予定されている最新分析機器である。本事業の中心機器であり、RI を用いた実習に利用した。

(2) 超純水製造装置 1 台（平成 28 年度整備、約 3 百万円）

(1) の ICP-MS で用いる試料調整に利用する。微量放射性廃棄物の検出には、これで作成した不純物を含まない超純水の使用が不可欠である。

＜その他特記すべき事項＞

令和元年より、本事業を実施したホットラボが、文科省の令和元年「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 研究人材育成型廃炉研究プログラム」の連携ラボとして取り上げられ、1F 廃止措置のより密接な、高度技術者育成プログラムに発展していることは、外部評価も高いことの証拠で有り成功事例として特筆すべきことである。

<参考資料>

(1) 添付資料

1) テキスト抜粋 (添付資料 1)

(2) 事業成果の公開事例、関連する文献

1) T. Suzuki, et al., Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2018) 318:221 – 225)

2) K. idemitsu, ‘Ultra-trace level measurement of neptunium in bentonite by using ICP-QQQ’, ‘CMCEE2018:12th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications’, (2018/7/26), Singapore.

3) 有光玄 出光一哉 柊優樹 平川真之 山田良太 稲垣八穂広 有馬立身、「ベントナイト中を拡散する Np の超微量分析」、原子力学会 九州支部 第 37 回研究発表講演会 (2018/12/1) 0-11 (「学生・若手研究者奨励賞」最優秀賞受賞)

4) 濱田真歩 鈴木達也 山村朝雄 小無健司 鹿籠康行 野口真
「ICP-MS/MS による Np-237 分析の基礎検討」原子力学会 2019 春の年会

5) 堀田拓摩

福島第一原子力発電所事故における ICP-MS による多核種同時分析手法の開発
～ 238U の 02 ガスに対する挙動と検出下限値の確認～
大洗研究会 2019

6) 茨城新聞 (1 月 28 日付けの) に「放射性廃棄物処理処分講習・実習」の紹介記事が掲載された (添付資料 2)。

7) 茨城県大洗町広報誌に紹介記事が掲載された (添付資料 3)。

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。）	1F の廃止措置に必要な化学分析分野の人材育成は我が国の喫緊の課題である。本事業はこの課題の解決を目指して始められた。採択時の審査委員会所見においても「本課題は、高い専門性が必要とされるため、教育プログラムの内容や研修の期間については、他大学の要望等を踏まえながらより良い教育プログラムが整備され多くの学生に学びの場が提供できるように検討・改善を進めていただきたい」と指摘されている。最先端の分析機器である ICP-MS を初年度から導入・整備し、2 年度、3 年度と教育プログラムを改良した。
②特記すべき成果	最新かつ RI が取り扱える ICP-MS は、国内には 1 台しか無くここでの教育プログラムはこれからの 1F の分析化学を担当する研究者には、良い指標となった。この成果は原子力機構の大熊分析・研究センターに受け継がれる予定である。
③事業の継続状況・定着状況	本事業を継続・発展させる。少ない予算でも、これまでに得られたノウハウをもとに事業を効率的に進め、絶やすことなく継続させる。 公的機関が公募する補助事業・委託事業などに積極的に応募し、予算確保を図る。本事業における最も大きな経費項目である ICP-MS の導入は 3 年間賃借によって行うが、補助期間終了後も東北大大洗センターの運営費等によって賃借等を継続し、教育及び研究に使用する。
④成果の公開・共有の状況	受講者による 3 件の、学会や研究会での発表があり、その内一件では、「学生・若手研究者奨励賞」最優秀賞を受賞している。また、教員とともに連名で 1 件の論文と一件の国際会の発表の実績がある。また、茨城新聞および大洗町広報誌で本事業の教育内容が紹介された。詳しくは、本文の参考資料を参照されたい。
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	参加した学生数は、表 1 に示すとおりである。特に「長期指導型実習」は受講者の増加が顕著であった。「放射性廃棄物処理処分講習・実習」は、ICP-MS の利用人数に制限があるため受講者が増加していないが、3 年度は募集開始をすると早期に定員に達する状況となったため、定員を越えて受講生を受け入れた。就職状況は、現在調査中である。本事業は資格取得を目指したものではないため公的資格取得者はいない。