

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＞

京都大学原子炉実験所における原子炉実験教育の高度化のための基盤整備

＜実施機関＞

国立大学法人 京都大学

＜実施期間・交付額＞

27 年度 15,595 千円、28 年度 17,818 千円、29 年度 6,013 千円

＜当初計画＞

1. 目的・背景

共同利用・共同研究拠点である京都大学原子炉実験所（以下、実験所）（2018 年 4 月に京都大学複合原子力科学研究所と改名したが、本報告書では 2017 年度までの実施報告書であるため改名前の名称を使用する）は、京都大学研究用原子炉（以下、KUR）や京都大学臨界集合体実験装置（以下、KUCA）等を用いた全国共同利用の研究を支えると共に、学際的な原子力・放射線利用の新展開を目指す研究を進めている。実験所の全ての教員は京都大学大学院の理学・工学・エネルギー科学・農学・医学の 5 研究科の協力講座を担当しているため学生の教育にも大きく貢献してきた。中でも、KUCA、KUR 等の実験施設を使った学生実験は、我が国で数少ない“実際の原子炉施設を使用する実験教育”として多大の実績を挙げて来た。1975 年以来、今までに延べ約 4,200 人を超える学生を教育してきた KUCA を用いた全国大学の学生のための原子炉物理・放射線実験、KUR を用いた京都大学の大学院生向けの原子力工学応用実験や他大学の学部学生を対象とした原子炉物理実験等、実験所は原子力・放射線利用の将来を担う人材の育成に大きく貢献してきた。これらの、実際の原子炉や放射線施設、核燃料物質使用施設を使った実験教育は、他では成しえない「原子力の基礎に関わる実学教育」として我が国において極めて貴重な教育となっている。

我が国においては東電福島第一原子力発電所の事故以降、原子力に関わる専門性の高い人材の育成と、廃炉を含む社会での原子力技術に対する理解度の向上が強く望まれており、正確な知識と経験に基づいて技術的な課題や社会的な課題に対処することができ、海外でも活躍することが出来る若者の育成が極めて重要となっている。原子炉の臨界や運転を体験し、核燃料物質、放射性物質を自らの手で扱う場に身を置いて、安全文化を体得した研究者・技術者を輩出することが今後益々重要になると考えられ、実験所において取り組んできたこれらの学生実験教育は、今後も我が国における貴重な原子力に関する実学教育として継続的に進めていく必要がある。

本事業の目標は、実験所が進めて来たこれらの原子力基礎実験教育を今後も更に発展的に進めるために必要な原子炉の関連実験施設の整備と、原子力を専攻する学部学生・大学院生の教育、原子力に関わる若手教員を育成することにあり、我が国における原子力実験教育の基盤を盤石なものにすることを目指すものである。

2. 実施計画

主な実施教育内容としては、KUCA を用いた京都大学学部学生を対象とした「原子炉基礎実験」と全国大学の大学院生を対象とした「全国大学院生実験」、及び KUR を用いた京都大学大学院生を対象とした「原子炉工学実験」と京都大学以外の大学の学部学生・大学院生を対象とした「原子炉体験実験」である。また、初年度である平成 27 年度は KUCA を用いた炉物理実験教育を高度化するための実験環境の整備を行う。

（1）KUCA 原子炉実験教育

KUCA を用いた炉物理実験教育として、京都大学学部学生を対象とした「原子炉基礎実験」と全国大学の大学院生（主として修士課程 M1）を対象とした「全国大学院生実験」を実施する。実験内容についてはこれまでの実験内容に加えてウラン濃縮度測定、使用済燃料からのガンマ線測定実験、炉雑音解析実験を新たな項目を追加する。実験は 1 回 1 週間とし、年に 7 回実施する。

なお「全国大学院生実験」への参加予定大学は以前より KUCA での院生実験に参加していた北大、

東北大、東工大、東京都市大、東海大、名大、福井大、阪大、近大、九大、京大の合計 11 大学であるが、本事業の中で新たに原子力専攻を持つ神戸大学、長岡科学技術大学にも参加の呼びかけを行う予定である。対象となる学生は平成 27 年度が 40 名、平成 28 年度と 29 年度が各 150 名で、各大学の引率教員のうち若手教員に対する原子炉実験に関する教育も含めて実施し、対象となる若手教員は各年度 3 名とする。

ただし平成 27 年度については試験研究用等原子炉施設の新規制基準適合性に係る審査が行われている途中で KUCA が使用できない状況であるため、天然ウランを用いた未臨界体系での実験（逆増倍法実験、指数実験、放射化法による反応率分布測定実験）を行う予定であり、通常の実験教育は平成 28 年度以降に実施する。

（２）KUR 原子炉実験教育

KUR を用いた炉物理実験教育として、京都大学大学院生を対象とした「原子炉工学実験」、京都大学以外の大学の学部学生・大学院生を対象とした「原子炉体験実験」を実施する。この実験教育では、KUR を用いた反応度測定、運転実習、および KUCA では実験することができないキセノン反応度測定を実施する。実験は「原子炉工学実験」については年に 1 回（1 週間）とし、「原子炉体験実験」については年に 1 回（3 日間）とする。原子炉体験実験については幅広く参加者を募る予定である。また、定員に余裕があれば、社会人の参加も受け付けることとする。

ただし平成 27 年度については KUCA と同様に試験研究用等原子炉施設の新規制基準適合性に係る審査が行われている途中で KUR が使用できない状況であるため、KUR の利用実験は平成 28 年度の後半以降に実施する。

（３）KUCA 実験環境整備

KUCA を用いた炉物理実験を高度化するために以下の項目の実験環境の整備を行う。

① 核燃料計測用のゲルマニウム半導体検出器の設置

ウラン濃縮度測定、および使用済燃料からのガンマ線測定実験を行うために、新たにゲルマニウム (Ge) 検出器を設置する。

② 核計装信号系統の低ノイズ化のための更新

雑音解析実験では核計装からの信号を解析する必要があるが、現在使用している信号ケーブルでは電氣的な雑音成分が多く入ってしまい学生実験としての有効な実験データを取得することが難しいため、現在の核計装用の信号ケーブルを低ノイズ用の最新の信号ケーブルに更新する。また、電源からの雑音成分が取得データに混入することをできるだけ除去するため、測定系統にノイズカット電源装置を整備する。

③ 出力表示用の機器の設置

KUCA 制御室に大勢の学生が同時に線型出力計表示器を見るための出力表示用機器を設置する。

＜実施状況＞

KUCA と KUR は平成 26 年 9 月に原子力規制庁へ設置変更申請書を提出して試験研究用等原子炉施設の新規制基準適合性に係る審査が開始された。当初は 1～2 年程度で運転再開することができると考えていたため、本事業の当初の申請書にも平成 28 年度には通常の実験教育を実施予定と記載していた。しかし、適合性審査およびその後の設備改修の手続きと工事等に予想以上の時間が掛かってしまい、最終的に KUCA については平成 29 年 6 月に、KUR は平成 29 年 8 月になってようやく運転を再開することができた。そのため実験教育内容の一部を変更して実施した。

（１）KUCA 原子炉実験教育

平成 27 年度は本事業の開始時期には KUCA で実施予定して「原子炉基礎実験」「全国大学院生実験」（後述の主に未臨界体系実験）が終了してしまっていたため、（３）の項目で整備した装置を用いて京大の大学院生を対象として、炉雑音測定法による未臨界度測定実験を実施した。

平成 28 年度は当初予定していた KUCA の運転再開ができなかったため、新たに KUCA 本体を使用しない新しい実験項目を考案して原子炉物理実験及び放射線計測実験等を実施した。実施内容は以下の通りである。

1) 天然ウランの未臨界体系を用いた指数実験

当初予定していた臨界近接実験と同様の実験として、未臨界体系で燃料数を変化させて

核燃料による中性子増倍を理解するための中性子増倍測定実験を実施した。さらに中性子束分布の形状から体系の臨界量を推定する指数実験を実施した。

2) 放射化法による中性子束分布測定実験

当初予定していた臨界体系での金線を用いた放射化法による中性子束実験の代わりに、未臨界体系でインジウム線を用いた中性子束測定実験を実施した。

3) ウランの放射線測定実験、および濃縮度測定実験

当初予定していたウランの放射線測定実験、および濃縮度測定実験を実施した。

4) 制御棒反応度測定実験

実験は実施することができなかったため、以前測定した実験の生データと制御棒操作による出力変化のビデオ映像を用いて実験データ解析を実施した。

これらの実験については全て新たに実験テキストを作成し（添付 1）、7 大学（北大、東北大、東工大、東京都市大、名大、福井大、京大）から合計 96 名の学部学生・大学院生が参加し、また若手教員は 4 名が参加した。しかし、実験内容が原子炉の運転を伴わないため、当初の予定（150 名）より参加希望者が少なくなってしまった。

平成 29 年度は KUCA の運転再開の後に当初の予定通り実施し、臨界近接実験、制御棒校正実験、中性子束測定、運転実習、スクラム実験、温度係数測定、炉雑音実験等を 7 週間行った（Basic コースとして 4 日間、Advanced コースとして 5 日間）。この実験には当初予定していた 11 大学に加えて、新たに長岡科学技術大学が加わり、12 大学から合計 131 名の学部学生・大学院生、および 5 名の若手教員（平成 28 年度の参加教員を含む）が参加した。

実験参加者は各大学において予め実験に関する事前講義を受け、さらに実験所において原子炉の安全管理に関する保安教育、および京都大学の教員または各大学の引率教員が行う実験講義を受講してから実験に取り組んだ。実験終了後には実験結果について参加者全員で議論を行う報告会を実施し、最後にそれらを取りまとめた実験レポートを提出させた。

（2）KUR 原子炉実験教育

KUR は運転再開が平成 29 年 8 月と当初の予定より遅くなってしまい、平成 27、28 年度の実験を実施することはできなかった。さらに平成 29 年の運転再開後に装置のトラブルのため運転することができない期間があり学生実験のための運転週を確保することができなかったため、新たに参加者を募集して行う「原子力体験実験」を実施することができなかった。

このため、KUR 停止中でも実施することができる高出力炉の新規制基準適合状況の確認実習（新たに実習項目として立ち上げ）、および KUR のチェレンコフ光観察実習（8 月と 9 月の KUR 運転週に実施）の研修を、(2) の KUCA 原子炉実験教育の参加者全員に対して実施した。

（3）KUCA 実験環境整備

KUCA を用いた炉物理実験を高度化するために以下の項目の実験環境の整備を当初の予定通り実施した。

① ゲルマニウム半導体検出器の設置

ウラン濃縮度測定、およびウランから放出されるガンマ線の測定を行うために、新たにゲルマニウム (Ge) 検出器とその測定系システムを設置した。今回導入した検出器については相対効率 50% 以上の検出効率の性能を考えていたが、設置後に測定したところ相対効率 53% という性能であり当初の計画以上の高性能の測定装置であることを確認した。

② 核計装信号系統の低ノイズ化のための更新

核計装からの信号に混入していた電氣的な雑音成分を低減させるため、核計装用の信号ケーブル（非補償型電離箱 3 系統、核分裂計数管 3 系統）を低ノイズ用の最新の信号ケーブルに更新することができ、その結果、以前より信号に含まれる電氣的な雑音成分を低減させることができた。

③ 測定系のノイズカット電源装置の設置

電源からの雑音成分を除去するための電源装置を購入し、炉室内に設置して炉心に挿入した検出器に影響を及ぼす雑音成分の除去、および制御室での増幅器やデータ収集装置に影響を及ぼす電氣的な雑音成分の除去することに用いることができた。

④ 出力表示用の機器の設置

新たに学生実験用の出力表示用機器として、新規の液晶プロジェクタおよび表示のための接続装置を制御室に設置した。このプロジェクタの新規設置により制御卓から離れたところであ

＜成果と評価＞

KUCA 及び KUR の新規制基準対応のため、実験の実施時期や実施内容を大幅に変更せざるを得なかった。特に KUR を用いた教育については一部取り止めとなった。KUCA の運転が実施できなかった間の教育については可能な限り原子炉（核燃料等）を使った実験を実施するために当初予定していなかった未臨界実験等の代替実験を実施した。

（１）KUCA 原子炉実験教育

平成 27、28 年度は KUCA の運転が実施できなかったため、代わりに指数実験等の未臨界体系実験と核セキュリティや保障措置に関連するウラン濃縮度測定実験、ウランからの放射線測定実験を実施した。これらの実験は代替実験ではあったが、特にウランを用いた実験については興味を持った学生が多くいるなど、これらの実験項目は予想外に好評であり教育効果も認められたと考えている。

（参考文献 1）

なお、この新規制基準対応中であっても KUCA において未臨界体系等の学生実験を継続して実施したことに対して、平成 30 年 9 月に「第 12 回日本原子力学会炉物理部会賞 貢献賞（新規制基準対応再稼働による炉物理実験研究及び教育への多大な貢献）」が KUCA を管理している臨界装置部に対して授与された。（参考文献 2）

平成 29 年度は当初の予定通り KUCA の運転が実施することができたため、当初の予定通りの実験を実施することができた。新たに長岡技術科学大学の大学院生が参加するようになったことは良好事例であったと考えるが、運転再開がやや遅くなったため、参加者数は当初の計画（年間 150 名）より若干の少なくなったが、若手教員の参加者は当初の計画（3 名）より増やすことができた。

参加した学生全員にアンケートを採ったところ、最初の未臨界実験に対しても核燃料による中性子増倍に関する理解が深まった、実際の原子炉施設で実験を行うことができて良かった、などの意見が多くあった。平成 29 年度の KUCA の運転を伴う実験では、原子炉についての理解が深まったという意見と並び、非常に多くの参加者が運転実習を行うことができたことが良かったと回答しており、やはり原子炉の運転を伴う実験教育が必要であることを実感した。（添付 2）

（２）KUR 原子炉実験教育

本教育は KUR の運転再開が遅れたため当初の予定通り実施することができず、KUCA 実験参加者への教育（新規制基準適合状況の確認実習等）のみとなってしまった。新規制基準対応や装置のトラブルなどのやむを得ない理由とはいえ、当初予定していたような十分な教育を行うことができなかったことは反省したい。

（３）KUCA 実験環境整備

KUCA の実験環境の整備については、当初の予定通り実施することができた。ここで整備した機器等については、本事業終了後であっても KUCA 実験教育のために有効に活用していく予定である。

（４）その他（評価項目に係る事項に対する考察 等）

KUCA 原子炉実験の受講者の 2000 年以降の原子炉主任技術者筆記試験合格者は 87 名、原子炉主任技術者口頭試問合格者は 75 名、核燃料取扱主任者の合格者は 34 名であった。（添付 3）

今後、KUCA 原子炉実験教育を受講した学生がこの原子炉実習の経験を生かして、原子力界の様々な分野で活躍することが期待される。

＜今後の事業計画・展開＞

（１）KUCA 原子炉実験教育

本教育は学生の参加希望者が多く、各大学にて単位の付与対象となっていることから、本事業での経験を元に実験内容をさらに充実させて今後も継続する。参加学生の旅費等の経費については、外部資金等の獲得を目指す。

（２）KUR 原子炉実験教育

本事業では当初の予定通りの教育を行うことができなかったが、「原子炉体験実験」のような入門コースの実験、または KUCA では実験することができない高出力炉特有の原子炉の特性を学ぶことができる実験について、今後実施していきたいと考えている。

＜整備した設備・機器＞

（１）Ge 半導体検出器一式（平成 27 年度整備、約 13.5 百万円）

ウランからのガンマ線を精密に測定することによりウラン濃縮度測定実験やウラン照射後特性を学習するために使用した。本事業終了後も引き続き KUCA 原子炉実験において使用する。

（２）核計装ケーブル一式（平成 28 年度整備、約 13.6 百万円）

炉雑音実験で支障となる核計装の信号に混入していた電氣的な雑音成分を低減させるため、核計装用の信号ケーブルを低ノイズ用の最新の信号ケーブルに更新した。本事業終了後も引き続き KUCA 原子炉実験において使用する。

＜その他特記すべき事項＞

特に無し。

＜参考資料＞

（１）添付資料

- 1) 代替実験で使用したテキスト（未臨界実験、反応率分布実験、濃縮度測定実験）
- 2) 学生アンケート集計結果
- 3) 原子炉主任技術者試験、核燃料取扱主任者試験の合格者数の集計結果

（２）事業成果の公開事例、関連する文献

- 1) 三澤毅、「天然ウランを用いた未臨界体系での学生実験」、2017 年日本原子力学会「秋の大会」（2017 年 9 月 13 日～15 日、北海道大学）、3G10.
- 2) 第 12 回日本原子力学会 炉物理部会 炉物理部会賞（2018 年 9 月）
(<https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/award/index.html>)
- 3) 京都大学臨界集合体実験装置ホームページ、
(<http://www.rrr.kyoto-u.ac.jp/CAD/experiment.html>)
- 4) H.Unesaki, T.Misawa, C.H.Pyeon, J.Hori and K.Nakajima," On the Utilization of Research Reactors at Kyoto University and Kindai University, Japan", International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR), Nov. 4-7, 2018, Edinburgh, Scotland.

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。）	研究用原子炉の新規制基準対応のために、KUR 及び KUCA の運転再開が遅れたため、当初計画していた原子炉実験教育を実施することができなかった期間（平成 28 年度）については未臨界実験等の代替実験による教育を実施した。このため原子炉の運転や臨界状態の確認などを体験させることはできなかったが、代替実験の内容を工夫することにより、本事業の目的である「原子力の基礎に関わる実学教育」を実施することができたと考える。しかし原子炉の運転を伴わない実験であったため参加者は当初の予定より少なくなりました。平成 29 年度の運転再開後は KUCA において当初の予定通りの実験教育を実施することができた。参加人数については運転再開がやや遅れたため（平成 29 年 6 月下旬再開）、当初予定に比べて 1 割ほど減少したがこれまでの参加者数の変動の範囲内であると考え KUR を用いた原子炉実験について運転再開の遅れや装置のトラブル等のため予定通りの教育を行うことができなかったことは残念であった。
②特記すべき成果	・ KUCA が新規規制基準対応のため使用できない中で実施した代替の未臨界実験等は参加者から予想以上に好評で、さらにこの未臨界実験の実施に対して 2018 年日本原子力学会炉物理部会の貢献賞を受賞した。 ・ 本事業で新たに長岡技術科学大学が KUCA 実験に参加するようになり、KUCA 大学院生実験の参加者ネットワークをさらに広げることができた。 ・ KUCA 実験環境の整備により設置された機器等については、事業終了後も KUCA での原子炉教育実験で活用していくことができる。
③事業の継続状況・定着状況	KUCA の炉物理実験に参加希望者が多く各大学にて単位の付与対象となっていることから、本事業での経験を元に実験内容をさらに充実させて今後も継続する。参加学生の旅費等の経費については、外部資金等の獲得を目指す。 実験実施後に関係した大学の教員が集まり、内容について検討する会議を行って今後の実施方針について議論している。
④成果の公開・共有の状況	KUCA の炉物理実験には他大学教員も参加して、教育内容についての共有が図られている。また本実験についてホームページ、日本原子力学会、国際会議等で成果を発表している。
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	学生の参加者数は以下のとおり。 ・ KUCA 原子炉実験教育： 230 名（学部学生、大学院生） 6 名（若手教員） 本事業の実施期間中に受講した学生で原子炉主任技術者、核燃料取扱主任者の資格を取得したものはいないが、これまでの KUCA 原子炉実験の受講者のうち、2000 年以降の原子炉主任技術者筆記試験合格者は 87 名、原子炉主任技術者口頭試験合格者は 75 名、核燃料取扱主任者の合格者は 34 名であった。