

## 原子炉物理・原子炉応用に関する研究

研究総括責任者 大阪大学大学院工学研究科  
教授 村田 勲

平成 31(令和元)年度に実施された物理系課題を総括する。申請された 16 課題を以下に示す。

- (1) 医療用リニアックの中性子場を模擬した水晶体サイズでの中性子束密度及び線量評価
- (2) シンチレータの自己放射化を用いた高感度中性子検出方法の研究
- (3) 熱蛍光体を利用した中性子線- $\gamma$ 線弁別測定法に関する研究
- (4) 近畿大学原子炉の炉特性実験・中性子利用実習による教育的効果に関する研究
- (5) 中性子照射高分子材料の高電界電気特性に関する研究
- (6) BNCT のための 3 次元ゲル線量計の中性子線に対する応答特性に関する研究
- (7) 自然環境と原子力施設環境の放射線分布とその科学的理解に関する研究  
—放射線レベルの計測実習、環境安全管理の最適化の検討からリテラシーの醸成へ—
- (8) UTR-KINKI 炉内  $\gamma$  線の線質の評価
- (9) 近畿大学原子炉の出力過渡特性の測定と評価
- (10) 原子炉増倍度および制御棒反応度の詳細測定
- (11) 中性子用線量計測材料の特性評価
- (12) III 族窒化物半導体を用いた中性子イメージングセンサーの開発
- (13) 任意の状態変化に対応可能な未臨界度測定手法に関する研究
- (14) BNCT 大強度中性子ビーム計測用リアルタイム中性子モニターの特性評価
- (15) 中性子源落下による未臨界体系の反応度測定
- (16) Ar-41 を用いた通気式電離箱レスポンス評価に関わる研究

研究分野で大まかに区分けすると以下のようになる。

- ① 放射線・線量計測法開発：9 件  
(1) (2) (3) (6) (8) (11) (12) (14) (16)
- ② 放射線照射効果：1 件  
(5)
- ③ 原子炉特性：3 件  
(10) (13) (15)
- ④ 放射線安全管理：1 件

(7)

⑤ 放射線教育：2件

(4)(9)

以下、それぞれの研究課題を総括する。

① 放射線・線量計測法開発[(1)(2)(3)(6)(8)(11)(12)  
(14)(16)]

(1) 医療用リニアックの中性子場を模擬した水晶体サイズでの中性子束密度  
及び線量評価

近年の ICRP118 報告に伴う眼の水晶体の等価線量に対して、「5年間の平均が 20mSv/y を越えず、いかなる 1 年間においても 50mSv を越えないようにすべきである。」という内容を受けて、人体水晶体レベルの微小空間における中性子線による影響を調べた。微小サイズ金箔を眼球に見立てた小さな空間の水中に含浸させた簡易ファントムを作製し、近大炉照射場において箔放射化法により中性子照射実験を行った。その結果、熱及び熱外中性子に起因する中性子束は、 $1.312/\text{cm}^2/\text{sec}$  の値であることが分かった。この値は、空気存在下での照射状況と異なり、微小空間内の水中で中性子運動の熱化が促進され、それが起因で熱中性子束が上昇することを示唆する。

(2) シンチレータの自己放射化を用いた高感度中性子検出方法の研究

BNCT の中性子場への適用を目指し、有機シンチレータにヨードベンゼンを添加して、中性子場で自己放射化検出器として使用する可能性について検討を行っている。令和元年度は、液体シンチレータへのヨードベンゼンの添加量を変化させ応答特性を調べた。また、 $\text{CaI}_2$  シンチレータについても原子炉で照射を行った。ヨードベンゼンの添加濃度を 5、10、15wt% と増加させたところ、クエンチングの影響により濃度が高い程、波高が低エネルギー側にシフトする様子が観測された。この為、ヨウ素の添加量が増えたにもかかわらず、I-128 からの  $\beta$  線の初期計数率は、濃度が高い程かえって減少した。また、 $\beta$  線の壊変曲線では I-128 の半減期 25 分の成分が支配的であったが、微量の半減期 900 分程度の成分が観測され、Na が混入して Na-24 が生成したものと考えられた。一方、照射後の  $\text{CaI}_2$  の壊変曲線には、半減期 25 分のみが観測され、Ca の放射化により生成する副生成物には、長半減期の放射能は含まれていないことが分かった。

(3) 熱蛍光体を利用した中性子線- $\gamma$ 線弁別測定法に関する研究

中性子線と  $\gamma$  線では生物学的効果比が異なるため、中性子線と  $\gamma$  線が混在する BNCT では、これらを分離して測定することが必要である。現在、BNCT の  $\gamma$  線量の測定には、熱中性子に感度をほとんど持たない熱蛍光線量計 BeO が使用されているが、毒性が高く使用できなくなったため、熱中性子や  $\gamma$  線を別々に測定できる技術の開発が望まれている。令和元年度は、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  等の熱蛍光体の中性子検出

効率の向上および、その中性子線- $\gamma$ 線弁別測定法に関する研究と、熱中性子と $\gamma$ 線に起因する熱蛍光を分離できる新たな熱蛍光材料の開発と測定手法に関して研究を行った。その結果、熱中性子を高効率で検出する手法として、独自に提案した $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ とCdコンバータの併用法では、Cdコンバータを設置したことで熱蛍光量が増加し、高効率で熱中性子を検出できることが明らかとなった。今後は大面積の $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ とCdコンバータを使用した熱中性子の二次元分布測定を試みる。

#### (6) BNCTのための3次元ゲル線量計の中性子線に対する応答特性に関する研究

BNCTの非ホウ素線量分布計測や粒子線治療や強度変調放射線治療等の3次元線量分布測定のため、3次元ゲル線量計を検討している。令和元年度は、ゲル線量計のひとつである色素ゲル線量計として、新たに開発された部分ケン化型ポリビニルアルコール(PVA)とポリヨウ素イオン( $\text{I}_3^-$ 等)の複合体による発色を用いたゲル線量計(PVA-GTA-Iゲル線量計)の原子炉照射に対する応答特性、および熱中性子増感剤として $^6\text{Li}$ を添加した場合の増感効果を調べた。その結果、 $^6\text{Li}$ がPVA-GTA-Iゲル線量計の熱中性子増感に有効であることが示された。また、水和電子捕捉剤(増感剤)としての $\text{KNO}_3$ の添加も今後の感度改良に有効であることが示唆された。

#### (8) UTR-KINKI炉内 $\gamma$ 線の線質の評価

$^3\text{He}$ 比例計数管の代替品として開発された $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{L}:\text{Ce}$ (CLYC)シンチレータを用いて近畿大学原子炉UTR-KINKIにて中性子・ガンマ線弁別測定への有効性を調べた。CLYCシンチレータは、Liを含むことから中性子をピークとして検出できる。さらに、シンチレータの出力波形の減衰時間の違いを利用して、中性子・ガンマ線弁別測定が可能である。本研究では、近畿大学原子炉から発生する中性子と同時に発生するガンマ線を測定し、PSDスペクトルから中性子、ガンマ線を粒子弁別し、ガンマ線測定への妥当性を評価した。

#### (11) 中性子用線量計測材料の特性評価

中性子測定において、BやLiを多量に含有する固体素子を開発するため、ガラスを母材とし、適切な発光中心を添加することによる熱蛍光特性を利用した中性子計測素子開発を検討した。独自に開発したガラス熱蛍光体、Ce添加 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ について、熱中性子に対する応答を含む放射線応答を調べた。熱中性子とガンマ線の寄与を区別するため、 $^{10}\text{B}$ および $^{11}\text{B}$ 濃縮原料を用いたガラス材料を開発し、双方のガラスの熱蛍光強度の差を、放射線医学総合研究所NASBEEおよび近畿大学の原子炉を用い調べた結果、 $10^7\sim 10^{12}$  neutrons/cm<sup>2</sup>の幅広いフルエンス範囲での計測が可能な素子であることが明らかとなった。

#### (12) III族窒化物半導体を用いた中性子イメージングセンサーの開発

中性子イメージング技術の実現に向けて、新規中性子イメージングセンサーと

して半導体検出器の実現を目指し、中性子捕獲断面積が大きな B 原子を含む III 族窒化物半導体である B GaN を半導体材料として、結晶成長技術の開発及びデバイス作製を行った。トリメチルボロン(TMB)を用いた新規結晶成長技術の開発を行い、成長温度の最適化による拡散律速条件下での成長温度領域を明らかにした。各成長温度領域における B GaN 結晶成長を実施し、作製した B GaN 結晶を用いたダイオードを作製することで、結晶成長温度とデバイス特性に関する依存性を評価した。拡散律速領域中の高温領域で作製したデバイスが、 $\alpha$ 線照射実験において最も移動度寿命積が高くデバイス特性が良い結果となった他、中性子照射実験においても中性捕獲率およびエネルギースペクトルについて良好な計測結果を得ることができた。

#### (14) BNCT 大強度中性子ビーム計測用リアルタイム中性子モニターの特性評価

BNCT に必要不可欠な大強度中性子ビームをリアルタイムに計測できる中性子モニターを現在開発している。まずは、原子炉熱中性子場を用いてこのリアルタイム中性子モニターの特性評価を行い、検出効率の熱中性子フラックスや中性子コンバーター(LiF)の蒸着量との相関関係の取得、熱外中性子と速中性子計測手法の確立を目指した。今回の実験結果から、炉心内部の中性子ビームをガンマ線事象から識別して計測できることが分かった。また、中性子コンバーターの厚みを変えることで中性子センサーの検出感度を制御できる可能性を見出せた。更に、インジウムを用いた熱外中性子検出手法についてはガンマ線との識別が課題となった。速中性子ビーム計測では、速中性子と推測される事象を取得できた。今後、計測結果の妥当性をモンテカルロシミュレーションや追加実験を行い調べていく。

#### (16) Ar-41 を用いた通気式電離箱レスポンス評価に関わる研究

原子力発電所や再処理施設等で用いられる放射性ガスモニターのレスポンス試験のため、近畿大学原子力研究所に複数の通気式比例計数管によって構成される放射能の絶対測定システムを設置し、放射性ガスの放射能測定と、通気式電離箱のレスポンス試験ができる体制を整えた。京都大学複合原子力科学研究所の試験炉 KUR で安定同位元素の Ar-40 に熱中性子を照射して Ar-41 を 300 kBq を生成し、近畿大学原子力研究所に持ち込んで、放射能絶対測定装置による単位体積当たりの放射能測定と、通気式電離箱(大倉 I-4096 01/06)のレスポンス試験を実施した。結果については現在、ガンマ線の影響などの補正の検討を進めている。また、Xe-133 を用いた試験の準備を進めている。

### ② 放射線照射効果[(5)]

#### (5) 中性子照射高分子材料の高電界電気特性に関する研究

原子力発電所や宇宙において使用される制御系電気ケーブルに、ポリエチレン材料が使用される場合、放射線照射とポリエチレンの電気特性の関係について調べることは重要である。本研究では、中性子線照射によるポリエチレンの電気特性、

特に空間電荷特性について調べた。これまでの研究において、中性子線フルエンス  $1.6 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 、ガンマ線照射線量  $9.0 \times 10^{-2} \text{ Gy}$  照射後において、10-120 kV/mm の印加電界時に、未照射試料よりも照射試料の電流値が大きくなる傾向があることがわかった。

### ③原子炉特性[ (10) (13) (15) ]

#### (10) 原子炉増倍度および制御棒反応度の詳細測定

原子炉の特性測定における不確かさを定量化するために、近畿大学原子炉の臨界近接実験における複数の未臨界度点に対する増倍度状態および制御棒校正実験における粗調整棒および微調整棒の臨界時の位置データを複数取得し、原子炉の未臨界状態および臨界状態に対する特性の再現性から、不確かさを定量化する事を試みた。臨界近接実験では、BF<sub>3</sub>中性子計数管を黒鉛反射体北東端に配置した1系統、常設の補償型電離箱および核分裂計数管の計3系統の検出器を用いて計測を実施し、燃料体数の異なる複数の運転状態でさらに制御棒配置を変更した異なる未臨界状態についての計数値を得た。あわせて臨界体系における制御棒位置の確認を行った。

#### (13) 任意の状態変化に対応可能な未臨界度測定手法に関する研究

体系の詳細情報が不明あるいは不確かさが大きい場合、および反応度だけでなく外部中性子源強度や一点炉動特性パラメータも同時に変化する場合でも適用可能な未臨界度測定手法として、時間領域分割積分法(Time-Domain Decomposition-based Integral method, TDDI 法)を提案している。また、詳細情報が不明な体系において、中性子検出数の時系列データのみから未臨界度絶対値を概算する手法として、炉雑音解析に基づく三次中性子相関法に注目し、その実証試験に取り組んでいる。令和元年度は、近大原子炉において、Pu-Be 中性子線源と制御棒を同時に操作することにより、実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  と外部中性子源強度  $S$  が同時に変化するような未臨界過渡変化実験を実施し、TDDI 法による未臨界度測定法の有効性を実証した。加えて、Pu-Be 中性子線源の無い原子炉停止中の状態において、中性子検出数の時系列データを測定し続けることにより、停止時 UTR-KINKI における三次中性子相関法実験を初めて実施することができた。

#### (15) 中性子源落下による未臨界体系の反応度測定

外部に漏れ出て来る中性子計数率の測定データだけで、反応度の急な変化に応じて、できるだけ速やかに評価ができる新しい反応度評価手法を検討している。この手法を検証するためのデータを取得する目的で、未臨界の準定常状態において変動する中性子計数率を測定した。-0.04 から -0.6  $\Delta k/k$  の範囲の数点の未臨界状態で、中性子源を炉心内に落下させる方法(中性子源挿入法)及び中性子源を急速に引き抜く方法(ソースジャーク法)を行い、中性子計数率の時系列データを取得した。比較のために安定状態での中性子計数の測定も行った。試解析の結果、SSR 位置から推定した概略値と、Feynman- $\alpha$  法による反応度の評価値は一致していないが、準定常状態における出力の方程式に基づいている新しい手法による評価値

は Feynman- $\alpha$  法に近い値を示した。

#### ④ 放射線安全管理〔(7)〕

(7) 自然環境と原子力施設環境の放射線分布とその科学的理解に関する研究  
—放射線レベルの計測実習、環境安全管理の最適化の検討からリテラシーの醸成へ—

研究用原子炉や類似の施設における安全対策について、国内外の議論の動向、現在の法的要件やその改正状況等を調査し、検討することを目的に、3回の共同研究を実施した。主に5項目（(1) 環境安全管理の理念と実際、(2) 核燃料教育用資料の標準化、(3) 環境安全研究の動向調査、(4) 安全文化の醸成と人材育成、(5) 環境安全マネジメント領域人材育成プログラムの策定）につき情報交換と意見交換を実施した。東京大学、近畿大学、京都大学、大阪大学の環境安全管理担当メンバーを交え、環境安全体制、放射線安全推進活動、防災体制と情報公開に関する課題等につき情報を共有し議論を深めた。特に、核燃料安全教育用資料の標準化についての情報交換を進めた。具体的な成果のひとつとして「国際規制物資（少量核燃料物質）に係る教育のあり方 [10.3769/radioisotopes.69.55] 安田幸司，高橋賢臣，飯本武志，木村圭志，稲垣昌代，山西弘城；RADIOISOTOPES, 69, 55-65（2020）」を公表した。

#### ⑤ 放射線教育〔(4)(9)〕

(4) 近畿大学原子炉の炉特性実験・中性子利用実習による教育的効果に関する研究

本学科3年次秋学期開講科目「原子炉実験・演習」の学外実習として「近大炉実習」を実施した。2018年度は原子炉調整棒駆動機構の不調にて、実習不可能となったため、昨年度履修の現4年生（6名）と本年度履修の3年生（8名）を研修生とし、TAとして院生M1生3名、他指導教員2名の計19名にて、A班・B班の2班編成にて実施した。実習内容は1）原子炉運転実習、2）空間線量率測定（2次 $\gamma$ 線パルス波高分布測定含む）、3）制御棒校正実験、4）原子炉軸方向熱中性子束分布測定、5） $^{28}\text{Al}$ 短半減期測定、6）X線・中性子ラジオグラフィの6テーマにて、1）～4）の原子炉基礎実験と、5）・6）の原子炉応用実験として実施した。

(9) 近畿大学原子炉の出力過渡特性の測定と評価

近畿大学原子炉の各出力での臨界状態確認実験、制御棒反応度校正実験、遅発中性子先行核確認実験、および、原子炉運転中の原子炉室内空間線量率測定実験を原子力専攻学生2年生、3年生、4年生、28名とともに9月11日、9月12日、9月13日に各々実施した。炉出力0.01W、0.1W、1W各出力で臨界状態を達成するための各制御棒（安全棒SR #1、SR #2、シム安全棒SSR、調整棒RR）の位置には出力に依存しないことを確認した。調整棒(RR)を対象に正ペリオド法による制御棒反応度校正実験を実施した。

調整棒引き抜きによる出力倍加時間から、RR(0→50%)とRR(0→100%)の反応度を逆時

間方程式から求めた。結果、0.000748、0.00133 となり、近大炉公称値と比較してほぼ妥当な値を得ることが出来た。原子炉スクラム後ある程度十分な時間が経過した付近での出力変化から半減期を求めるとおおよそ 50～60 秒以内であり、遅発中性子先行核の中で特に半減期が 55.6 秒と最も長い  $^{87}\text{Br}$  の存在を実感することが出来た。炉出力約 1W 時の原子炉室内での  $\gamma$  線線量率を電離箱型サーベイメータで、中性子線量率を中性子レムカウンターで測定した。

## (1)医療用リニアックの中性子場を模擬した水晶体サイズ での中性子束密度及び線量評価

代表者：阪間 稔(徳島大学大学院医歯薬学部研究部)

### 〔要約〕

本研究では、近年のICRP118報告に伴う眼の水晶体の等価線量に対して、「5年間の平均が20mSv/yを越えず、いかなる1年間においても50mSvを越えないようにすべきである。」という内容を受けて、人体水晶体レベルの微小空間における中性子線による影響、特に医療用リニアックで患者への施術中、臥床安静している頭頸部に位置する放射線感受性の高い水晶体への放射線影響評価が重要になる。これまでの研究からこの医療用リニアック室内の中性子束密度と同レベルであることを確認し、近畿大学原子炉炉心の照射場を本実験に供することにした。微小サイズ金箔を眼球に見立てた小さな空間の水中に含浸させた簡易ファントムを作製し、これまでと同様の箔放射化法により中性子照射実験を行った。近畿大学原子力研究所に近年、新しい整備された高純度ゲルマニウム半導体検出器の性能試験と至適条件の確立検証を実施した。その結果、新しい高純度ゲルマニウム半導体検出器の性能では、特注スペンサー位置(10cm距離基準)のもと、Au-198のガンマ線エネルギーに対して、0.469%であることを正確に評価することができた。この新しいHPGe検出器を使用し、微小空間の水中含浸する金箔放射化量を正確に算出したところ、熱及び熱外中性子に起因する中性子束密度(5)は、 $1.312(8)\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の値であることを正確に評価することができた。この値は、空気存在下での照射状況と異なり、微小空間内の水中で中性子運動の熱化が促進され、それが起因で熱中性子束密度成分が上昇することが示唆される結果を導き出すことができた。

## (2)シンチレータの自己放射化を用いた高感度中性子検出方法 の研究

代表者：納富昭弘(九州大学大学院医学研究院)

### 〔要約〕

我々は、将来的にホウ素中性子捕捉療法(BNCT)場への適用を目指し、液体シンチレータやプラスチックシンチレータ等の有機シンチレータにヨードベンゼンを添加して、中性子場で自己放射化検出器として使用する可能性について検討を行っている。今年度は、液体シンチレータへのヨードベンゼンの添加量を変化させて、中性子検出器としての応答特性を調べた。また、新規無機シンチレータであるCaI<sub>2</sub>についても原子炉で照射を行い、応答をテストした。液体シンチレータに対するヨードベンゼンの添加濃度を5wt%、10wt%、15wt%と増加させたところ、クエンチングの影響により濃度が高い程、顕著に波高が低エネルギー側にシフトする様子が観測された。この為、ヨウ素の添加量が増えたにもかかわらず、I-128からのβ線の初期計数率は、濃度が高い程かえって減少した。また、β線の壊変曲線ではI-128の半減期25分の成分が支配的であった



が、微量の半減期900分程度の成分が観測され、Naが混入してNa-24が生成したものと考えられた。一方、照射後のCaI<sub>2</sub>の壊変曲線には、半減期25分のみが観測され、Caの放射化により生成する副生成物には、長半減期の放射能は含まれていないことが分かった。

### (3)熱蛍光体を利用した中性子線- $\gamma$ 線弁別測定法に関する研究

代表者:眞正 浄光(首都大学東京大学院人間科学研究科放射線科学域)

[要約]

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT:boron neutron capture therapy)は、腫瘍内部に取り込まれたホウ素と中性子線の( $n, \alpha$ )反応を利用した放射線治療法である。中性子線と $\gamma$ 線では生物学的効果比が異なるため、中性子線と $\gamma$ 線が混在するBNCTでは、これらを分離して測定することが必要である。現在、BNCTの $\gamma$ 線量の測定には、熱中性子に感度をほとんど持たない熱蛍光線量計BeOが使用されているが、毒性が高く使用できなくなったため、熱中性子のみを高効率で測定する技術や $\gamma$ 線のみを測定できる技術の開発が望まれている。

今年度は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Crをはじめとする熱蛍光体の中性子検出効率の向上および、その中性子線- $\gamma$ 線弁別測定法に関する研究と、熱中性子と $\gamma$ 線に起因する熱蛍光を分離できる新たな熱蛍光材料の開発と測定手法に関して研究を行った。熱中性子を高効率で検出する手法として、独自に提案したAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:CrとCdコンバータの併用法では、Cdコンバータを設置したことで熱蛍光量が増加し、高効率で熱中性子を検出できることが明らかとなった。今後は大面積のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:CrとCdコンバータを使用した熱中性子の二次元分布測定を試みる。

### (4)近畿大学原子炉の炉特性実験・中性子利用実習による教育的効果に関する研究

代表者:吉田 茂生(東海大学工学部)

[要約]

本学科3年次秋学期開講科目「原子炉実験・演習」の学外実習として「近大炉実習」を毎年実施している。2018年度は原子炉調整棒駆動機構の不調にて、実習不可能となり、昨年度履修の現4年生(6名)と本年度履修の3年生(8名)を研修生とし、TAとして院生M1生3名、他指導教員2名の計19名にて、A班・B班の2班編成にて実施した。

実習内容は1)原子炉運転実習、2)空間線量率測定(2次 $\gamma$ 線パルス波高分布測定含む)、3)制御棒校正実験、4)原子炉軸方向熱中性子束分布測定、5)<sup>28</sup>Al

短半減期測定、6) X線・中性子ラジオグラフィーの6テーマにて、1)～4)の原子炉基礎実験と、5)・6)の原子炉応用実験として実施した。

本炉実習は、第1日目午後から翌2日目の1日半の間、上記プログラム内容にて炉実習を行い、2日目の夕方から翌3日目の午前中を通じて実習内容・結果を総括したプレゼンテーション用資料の作成を両グループごとにまとめさせ、報告会として第3日目の午後に実施している。学生にとっては短期集中的に、これまで講義やPCシミュレーションにて学んできた内容を、実際の実習に対応させ、問題解決へと導いている。

## (5) 中性子照射高分子材料の高電界電気特性に関する研究

代表者：光本 真一（豊田工業高等専門学校）

〔要約〕

原子力発電所や宇宙において使用される制御系電気ケーブルに、ポリエチレン材料が使用される場合、放射線がポリエチレンに絶えず照射されるため、放射線照射とポリエチレンの電気特性の関係について調べることは非常に重要である。

ポリエチレンの電気特性に対するガンマ線照射の影響や電子線照射の影響に関する研究は多く存在するが、原子力発電所や宇宙空間で発生する中性子線照射とポリエチレンの電気特性、特に空間電荷特性の関連について調べた報告例は、見当たらないため、本研究では、中性子線が照射されたポリエチレンの空間電荷測定を行っている。これまでの研究において、次の結果が得られた。中性子線フルエンス  $1.6 \times 10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>、ガンマ線照射線量  $9.0 \times 10^{-2}$  Gy 照射後において、10-120 kV/mm の印加電界時に、未照射試料よりも照射試料の電流値が大きくなる傾向があることがわかった。

## (6) BNCTのための3次元ゲル線量計の中性子線に対する応答特性に関する研究

代表者：林 慎一郎（広島国際大学保健医療学部）

〔要約〕

近年、ホウ素-中性子捕捉療法(BNCT: Boron-Neutron Capture Therapy)が臨床利用へ大きく前進してきている。しかし、BNCTにおいて与えられる線量はホウ素線量以外に、原子炉や加速器ターゲットからのガンマ線や生体内の様々な元素と中性子との反応に起因する反跳核や即発ガンマ線などの非ホウ素線量も含んでおり、これらの分布を正しく評価することは未だ容易ではない。一方で、粒子線治療や強度変調放射線治療等、目的の病巣に線量を集中させる高精度放射線治療が可

能となってきたことに伴い、治療計画や線量評価においてその3次元線量分布を直接測定できる線量計の開発が求められており、その候補の一つとして3次元ゲル線量計が注目を集めている。今回、ゲル線量計のひとつである色素ゲル線量計をBNCTにおける3次元吸収線量分布評価のためのツールとして適用を試みるにあたり、新たに開発された部分ケン化型ポリビニルアルコール(PVA)とポリヨウ素イオン( $I_3^-$ 等)の複合体による発色を用いたゲル線量計(PVA-GTA-I ゲル線量計)の原子炉照射に対する応答特性、および熱中性子増感剤として $^6Li$ を添加した場合の増感効果を調べた。今回の結果から、 $^6Li$ がPVA-GTA-I ゲル線量計の熱中性子増感に有効であることが示された。また、水和電子捕捉剤(増感剤)としての $KNO_3$ の添加も今後の感度改良に有効であることが示唆された。

## (7) 自然環境と原子力施設環境の放射線分布とその科学的理解に関する研究 —放射線レベルの計測実習、環境安全管理の最適化の検討からリテラシーの醸成へ—

代表者: 飯本武志 (東京大学環境安全本部)

### [要約]

研究用原子炉や類似の施設における安全対策について、他の分野の施設や規模の異なる施設における対応を比較しつつ、国内外の議論の動向、現在の法的要件やその改正状況等を調査し、検討することを本研究の目的とした。

平成31(令和元年)度は3回の共同研究の機会を通じ、主に5項目、即ち(1)環境安全管理の理念と実際、(2)核燃料教育用資料の標準化、(3)環境安全研究の動向調査、(4)安全文化の醸成と人材育成、(5)環境安全マネジメント領域人材育成プログラムの策定につき情報交換と意見交換を実施した。東京大学、近畿大学のみならず、京都大学、大阪大学の環境安全管理担当メンバーを交え、各大学における環境安全体制、放射線安全推進活動、防災体制と情報公開に関する課題等につき情報を共有し、関連の議論を深めた。特に、核燃料安全教育用資料の標準化についての情報交換を進め、標準化された資料の一般公開に向けたプロセスを検討した。具体的な成果のひとつとして「国際規制物資(少量核燃料物質)に係る教育のあり方 [10.3769/radioisotopes.69.55] 安田幸司, 高橋賢臣, 飯本武志, 木村圭志, 稲垣昌代, 山西弘城; RADIOISOTOPES, 69, 55-65 (2020)」を公表した。

## (8) UTR-KINKI 炉内 $\gamma$ 線の線質の評価

代表者：遠藤 暁(広島大学大学院工学研究院)

### [要約]

本研究では、 $^3\text{He}$  比例計数管の代替品として開発された  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{L}:\text{Ce}$  (CYLC) シンチレータを用いて近畿大学原子炉 UTR-KINKI にて中性子・ガンマ線弁別測定への有効性を示すことを目的とする。CYLC シンチレータは、中性子をピークとして検出できることが特長である。さらに、シンチレータの出力波形の減衰時間の違いを利用して、中性子・ガンマ線弁別測定が可能である。本研究では、近畿大学原子炉 UTR-KINKI から発生する中性子と同時に発生するガンマ線を測定し線量評価につなげることを目的とし、PSD スペクトルから中性子、ガンマ線を粒子弁別し、ガンマ線測定への妥当性を評価した。

## (9) 近畿大学原子炉の出力過渡特性の測定と評価

代表者：尾崎 禎彦(福井工業大学工学部)

### [要約]

原子炉各出力での臨界状態確認実験、制御棒反応度校正実験、遅発中性子先行核確認実験、および、原子炉運転中の原子炉室内空間線量率測定実験を原子力専攻学生 2 年生、3 年生、4 年生、28 名とともに 9 月 11 日、9 月 12 日、9 月 13 日に各々実施した。

炉出力 0.01W、0.1W、1W 各出力で臨界状態を達成するための各制御棒(安全棒 SR #1、SR #2、シム安全棒 SSR、調整棒 RR)の位置には出力に依存しないことを確認した。

調整棒(RR)を対象に正ペリオド法による制御棒反応度校正実験を実施した。調整棒引き抜きによる出力倍加時間から、RR(0→50%)と RR(0→100%)の反応度を逆時間方程式から求めた。結果、0.000748、0.00133 となり、近大炉公称値と比較してほぼ妥当な値を得ることが出来た。

原子炉スクラム後ある程度十分な時間が経過した付近での出力変化から半減期を求めるとおおよそ 50～60 秒以内であり、遅発中性子先行核の中で特に半減期が 55.6 秒と最も長い  $^{87}\text{Br}$  の存在を実感することが出来た。

炉出力約 1W 時の原子炉室内での  $\gamma$  線線量率を電離箱型サーベイメータで、中性子線量率を中性子レムカウンターで測定した。炉心直上部付近などで高線量率を示す場所もあったが、安全管理の上で特に問題となる点は見られないことを確認した。

## (10) 原子炉増倍度および制御棒反応度の詳細測定

代表者: 北田 孝典(大阪大学大学院工学研究科)

### [要約]

原子炉の特性測定における不確かさを定量化するために、原子炉の臨界近接実験における複数の未臨界度点に対する増倍度状態および制御棒校正実験における粗調整棒および微調整棒の臨界時の位置データを複数取得し、原子炉の未臨界状態および臨界状態に対する特性の再現性から、不確かさを定量化する事を試みた。

臨界近接実験では、BF<sub>3</sub>中性子計数管を黒鉛反射体北東端に配置した1系統、常設の補償型電離箱および核分裂計数管の計3系統の検出器を用いて計測を実施し、燃料体数の異なる複数の運転状態でさらに制御棒配置を変更した異なる未臨界状態についての計数値を得た。あわせて臨界体系における制御棒位置の確認を行った。

未臨界状態および臨界状態の再現性および不確かさに関して、検出器による計数の不確かさや検出器の配置再現性、また制御棒位置の再現性について次年度以降も継続して実施し、未臨界状態および臨界状態における不確かさについて評価する。

## (11) 中性子用線量計測材料の特性評価

代表者: 越水 正典(東北大学大学院工学研究科)

### [要約]

中性子の測定においては、中性子そのものからの電離や電子励起が生じないため、いくつかの核種との核反応を通じた計測が一般的である。それらのうち、固体素子での利用となると、<sup>6</sup>Liや<sup>10</sup>Bが広く用いられる。中性子測定においては、BやLiを多量に含有する素子を開発する必要があり、材料開発(あるいは選択)上の自由度は狭い。これらの元素を多量に含有可能なホストとして、我々はガラスを選択し、適切な発光中心の添加による熱蛍光特性を利用した中性子計測素子開発を着想した。本研究で、我々は、独自に開発したガラス熱蛍光体である、Ce添加CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ガラスについて、熱中性子に対する応答を含む放射線応答を調査した。熱中性子とガンマ線の寄与を区別するため、<sup>10</sup>Bおよび<sup>11</sup>B濃縮原料を用いたガラス材料を開発した。これら双方のガラスの熱蛍光強度の差は、<sup>10</sup>Bとの核反応を通じた熱中性子の寄与となる。放射線医学総合研究所NASBEEおよび近畿大学の原子炉を用い、異なるフルエンスでの中性子照射後の熱蛍光挙動を調査したところ、 $10^7 \sim 10^{12}$  neutrons/cm<sup>2</sup>の幅広いフルエンス範囲での計測が可能な素子であることが明らかとなった。

## (12) III 族窒化物半導体を用いた中性子イメージングセンサーの開発

代表者：中野 貴之（静岡大学大学院工学領域）

### 〔要約〕

中性子イメージング技術の実現に向けて、新規中性子イメージングセンサーとして半導体検出器の実現を目指し研究開発を実施した。中性子捕獲断面積が大きな B 原子を含む III 族窒化物半導体である B GaN を半導体材料として使用した検出器作製に向けて、結晶成長技術の開発からデバイス作製を行った。トリメチルボロン (TMB) を用いた新規結晶成長技術の開発を行っており、成長温度の最適化により拡散律速条件下での成長温度領域を明らかにした。そこで、各成長温度領域における B GaN 結晶成長を実施し、作製した B GaN 結晶を用いたダイオードを作製することで、結晶成長温度とデバイス特性に関する依存性を評価した。拡散律速領域中の高温領域で作製したデバイスが  $\alpha$  線照射実験において最も移動度寿命積が高くデバイス特性が良い結果となり、中性子照射実験においても中性捕獲率およびエネルギースペクトルが良好な結果を得ることができた。

## (13) 任意の状態変化に対応可能な未臨界度測定手法に関する研究

代表者：遠藤 知弘（名古屋大学大学院工学研究科）

### 〔要約〕

未臨界度とは、核燃料を含んだ体系がどれだけ臨界未満の裕度があるか定量的に示した指標である。体系の詳細情報が不明あるいは不確かさが大きい場合、および反応度だけでなく外部中性子源強度や一点炉動特性パラメータも同時に変化する場合でも適用可能な未臨界度測定手法に関する研究開発として、我々の研究グループでは時間領域分割積分法 (Time-Domain Decomposition-based Integral method, TDDI法) を新たに考案した。また、詳細情報が不明な体系において、中性子検出数の時系列データのみから未臨界度絶対値を概算する手法として、炉雑音解析に基づく三次中性子相関法に注目し、その実証試験に取り組んでいる。

2019年度共同利用実験では、近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) の未臨界炉心において、Pu-Be 中性子線源と制御棒を同時に操作することにより、実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  と外部中性子源強度  $S$  が同時に変化するような未臨界過渡変化実験を実施し、TDDI法による未臨界度測定法の有効性を実証することができた。加えて、Pu-Be 中性子線源の無い原子炉停止中の状態において、中性子検出数の時系列データを測定し続けることにより、停止時 UTR-KINKI における三次中性子相関法実験を初めて実施することができた。

## (14) BNCT大強度中性子ビーム計測用リアルタイム中性子モニター の特性評価

代表者：高田 真志（防衛大学校応用物理学科）

### 〔要約〕

放射線がん治療法の一つであるホウ素中性子捕捉療法に必要な大強度中性子ビームを直接、リアルタイムに計測できる中性子モニターを現在開発している。これは、従来の金放射化法によるパッシブ型検出法に代わる画期的なものである。本研究課題は、実際のBNCT治療場での実用化に備え、原子炉熱中性子場を用いてこのリアルタイム中性子モニターの特性評価を行い、検出効率の熱中性子フラックスや中性子コンバーター(LiF)の蒸着量との相関関係の取得、熱外中性子と速中性子計測手法を確立することである。今回の実験結果から、炉心内部の中性子ビームをガンマ線事象から識別して計測できることが分かった。中性子コンバーターの厚みを変えることで中性子センサーの検出感度を制御できる可能性を見出せた。インジウムを用いた熱外中性子検出手法はガンマ線との識別が課題となった。速中性子ビーム計測では、速中性子と推測される事象を取得できた。今後、計測結果の妥当性をモンテカルロシミュレーションや追加実験を行い、計測結果の妥当性を調べていく。

## (15) 中性子源落下による未臨界体系の反応度測定

代表者：山根 祐一（日本原子力研究開発機構安全研究センター）

### 〔要約〕

原子力機構・安全研究センターでは、外部に漏れ出て来る中性子計数率の測定データだけで、反応度の急な変化に応じて、できるだけ速やかに評価ができることを目標として新しい反応度評価手法を開発している。この手法を検証するためのデータを取得する目的で、未臨界の準定常状態において変動する中性子計数率を測定した。

-0.04から-0.6 $\Delta k/k$ の範囲の数点の未臨界状態で、中性子源を炉心内に落下させる方法（中性子源挿入法）及び中性子源を急速に引き抜く方法（ソースジャーク法）を行い、中性子計数率の時系列データを取得した。比較のために安定状態での中性子計数の測定も行った。

試解析の結果、SSR位置から推定した概略値と、比較のために用いたFeynman- $\alpha$ 法による反応度の評価値はあまりよく一致していないが、準定常状態における出力の方程式に基づいている新しい手法による評価値はFeynman- $\alpha$ 法に近い値を示した。新手法の評価値は暫定値であり、適用範囲や精度を確認しながら、今後検討を進めて行く。

## (16) Ar-41を用いた通気式電離箱レスポンス評価に関わる研究

代表者：柚木 彰（(国研)産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門）

### 〔要約〕

原子力発電所や再処理施設等で用いられる放射性ガスモニタのレスポンス試験が出来るよう、産総研では放射性ガスの放射能標準を維持している。現在のところレスポンス試験が出来るのは入手が比較的容易なKr-85だけであるが、同様に代表的な放射性希ガスであるAr-41及びXe-133についても試験出来るよう、標準器の校正に取り組んでいる。

今回、近畿大学原子力研究所に、複数の通気式比例計数管によって構成される放射能の絶対測定システムを一時的に設置し、放射性ガスの放射能測定と、通気式電離箱のレスポンス試験ができる体制を整えた。その後、京都大学複合原子力科学研究所の試験炉KURで安定同位元素のAr-40に熱中性子を照射してAr-41を300 kBqを生成し、近畿大学原子力研究所に持ち込んで、放射能絶対測定装置による単位体積当たりの放射能測定と、通気式電離箱（大倉 I-4096 01/06）のレスポンス試験を実施した。

今回の測定で得られた結果について、ガンマ線の影響などの補正の検討を続けると共に、Xe-133を用いた試験の準備を進めている。