

## 原子炉物理・原子炉応用に関する研究（物理系）

総括責任者 大阪大学大学院工学研究科  
教授 村田 勲

令和3年度に実施された物理系課題を総括する。申請された13課題を以下に示す。

- (1) 医療用リニアックの中性子場を想定した水晶体サイズレベルの中性子束密度及び線量評価（統計精度の向上）
- (2) 水発光現象による硼素中性子捕獲反応分布の可視化に関する基礎研究
- (3) 板状 BeO を利用した中性子線・ $\gamma$ 線混在場での $\gamma$ 線測定に関する研究
- (4) 中性子照射高分子材料の高電界電気特性に関する研究
- (5) 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
- (6) UTR-KINKI 炉内 $\gamma$ 線の線質の評価
- (7) 中性子用線量計測材料の特性評価
- (8) 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
- (9) 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
- (10) 中性子源落下による未臨界体系の反応度測定
- (11) 核セキュリティのための中性子検出器開発・試験
- (12) 光ファイバ型中性子検出器を用いた原子炉特性の計測
- (13) 中性子束分布の解析結果に対する妥当性確認および解析モデルの確立

研究分野で大まかに分けると以下のようなになる。

- ① 放射線・線量計測法開発：9件  
(1) (2) (3) (5) (7) (8) (9) (11) (12)
- ② 放射線照射効果：1件  
(4)
- ③ 原子炉特性：3件  
(6) (10) (13)

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) (5) (7) (8) (9) (11)  
(12) ]

(1) 医療用リニアックの中性子場を想定した水晶体サイズレベルの中性子束密度及び線量評価 (統計精度の向上)

近年の ICRP-118 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 20 mSv/y を越えず、いかなる 1 年間においても 50 mSv 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、男性や女性の性差影響も含めて重要になる。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近畿大学原子炉炉心の照射場で実験を実施した。この照射実験では、極微小サイズスケールの金箔を、幾何学的な形態を正確に再現している四面体構造メッシュ化人体ファントム (MRCPs) のポリンゴンメッシュデータを用いて、3D プリンタによりファントム (一般標準成人男性と女性) の水晶体位置に配置した。そして、これら二体のファントムを炉心照射孔へ挿入配置することで、長時間の原子炉中性子照射を行った。その結果、成人男性水晶体 (MRCPs\_AM) では、その中性子束密度が  $(1.2578 \pm 0.0033) \times 10^7$  [ $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ]、そのカドミウム比は  $12.416 \pm 0.030$  であり、成人女性水晶体 (MRCPs\_AF) では、それぞれ  $(5.7752 \pm 0.0160) \times 10^6$  [ $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ] と  $6.248 \pm 0.015$  と評価した。

(2) 水発光現象による硼素中性子捕獲反応分布の可視化に関する基礎研究

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) では、中性子捕獲反応に伴い発生する  $\alpha$  粒子及び Li 粒子による線量 (ホウ素線量) の直接的測定は実現できておらず、BNCT の問題点である。この為、測定技術におけるブレイクスルーが望まれている。本研究では、ホウ酸水ファントムを用いて、ホウ素中性子捕獲反応に伴い発生する放射線の水発光現象の分布が CCD カメラによって観測できるかどうかを、 $10^4$  [ $\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$ ] 程度の中性子束の場で確認することを目的としている。近畿大学原子炉 UTR-KINKI にて、炉心上部の直径 10 cm の照射孔から中性子を取り出してファントムに照射し、冷却型 CCD カメラで撮影を行った。比較の為の水ファントムには純水を入れた。ホウ酸水ファントムには、濃度 3.8% の飽和ホウ酸水を入れた。純水ファントムで測定を行ったところ、ファントム全体が発光して見え、原子炉からの  $\gamma$  線によるチェレンコフ光の寄与が大きかった。ホウ酸水ファントムに同様の照射を行ったところ、純水ファントムとほぼ同様の輝度分布が得られた。結果として、ホウ素中性子捕獲反応に伴う水発光現象のエビデンスを得ることはできなかった。今後、鉛板で  $\gamma$  線の強度を低下させて S/N 比をあげることなどの工夫により、可視化が実現する可能性を検討する。

(3) 板状 BeO を利用した中性子線・ $\gamma$  線混在場での  $\gamma$  線測定に関する研究

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、腫瘍への高い線量集中性と強力な殺細胞効

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、腫瘍への高い線量集中性と強力な殺細胞効果の特徴とする。BNCT の中性子場には必ず  $\gamma$  線が混在し、これらは生物学的効果比が異なる為、腫瘍及び正常組織の吸収線量評価にはこれらを弁別して測定する必要がある。現在、中性子場での  $\gamma$  線量の唯一の測定器としてガラス管に粉末状の BeO が封入された BeO 粉体 TLD が用いられているが、破損すると毒性の高い BeO が飛散する為製造が中止されている。そこで BeO 粉体 TLD に代わる新たな TLD の開発を進めている。これまで、板状の BeO セラミックスが BeO 粉体 TLD と同様に中性子場での  $\gamma$  線量測定が可能である事及び  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  セラミックスが中性子場で  $\gamma$  線量測定が可能である事が明らかとなっている。しかし、BeO セラミックス及び  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  セラミックスの大面積化は最大でそれぞれ 10cm 角と 8cm 角である為、BNCT の 2次元 QA デバイスとして使用する為には大きさが不十分である。そこで 20 cm 角まで大面積化が可能な  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr,Si,Mg}$  セラミックスに着目した。これまで、X 線に対して優れた線量応答性を持つ事が明らかになっている。本研究では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr,Si,Mg}$  セラミックスによる近畿大学原子力研究所の原子炉 (UTR-KINKI) の中性子場での  $\gamma$  線量測定について検討した。その結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr,Si,Mg}$  セラミックスは、中性子線による放射化の影響を受けて  $\gamma$  線量を約 20% 過大評価してしまう事が明らかとなった。今後は、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr,Si,Mg}$  セラミックスの構成元素と中性子線との核反応による放射化の影響を補正する係数や補正方法を調査する。

#### (5) 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

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT: Boron-Neutron Capture Therapy) では、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、および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が必要である。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ていることに伴い、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。本年度も昨年度に続き、ゲル線量計のひとつであるラジオクロミックゲル線量計を 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ため、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) に、ジブロモメタンなどのハロメタンなどを増感剤として添加した場合の増感効果を調べた。その結果、ハロメタンによる増感効果は医療用直線加速器からの高エネルギー (6 MV) X 線においてはその効果が知られていたが、低エネルギー (150 kV) X 線や原子炉からの中性子線に対しては明らかな増感効果は確認できなかった。

#### (7) 中性子用線量計測材料の特性評価

中性子計測を可能とする熱蛍光体の開発を目的として、 $^{10}\text{B}$  および  $^{11}\text{B}$  濃縮原料から合成した  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5:\text{Dy}$  セラミックスを合成した。 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、および  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  の固相反応により Dy 添加  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  セラミックスを開発した。原料として  $^{10}\text{B}$  および  $^{11}\text{B}$  濃縮の  $\text{H}_3\text{BO}_3$  を用いることにより、 $^{10}\text{B}$  および  $^{11}\text{B}$  濃縮セラミックスを合成した。X線照射後の熱蛍光グローブカーブでは、Dy 濃度に拘らず 350 K 付近にグローブピークが観測された。4 mol% の Dy 濃度で最大の熱蛍光強度が得られたため、この試料を中性子計測に供した。近畿大学原子炉施設のラジオグラフィポートおよび原子炉ストリンガー孔において試料を照射後、熱蛍光グローブカーブを測定した。その結果、 $^{10}\text{B}$  濃縮セラミックスでは、 $^{11}\text{B}$  濃縮セラミックスの 10 倍以上の熱蛍光強度が観測された。この強度差が、中性子のみに対応する熱蛍光強度となる。この熱蛍光強度は、 $10^4 \sim 10^{10}$  neutrons/cm<sup>2</sup> の範囲で、フルエンスに対して線形に増大した。このことは、少なくとも 6 桁のダイナミックレンジを有する熱蛍光素子の開発に成功したことを示すものである。

#### (8) 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

本研究では、中性子イメージングセンサーの実現に向けて、新規中性子半導体材料として提案している B Ga N を用いた検出の開発を実施した。これまで作製し検討を行ってきた B Ga N 薄膜の作製条件において、更なる高品質化を目指すために成長圧力の依存性について検証を行い、結晶の構造特性評価およびデバイスの検出特性評価を実施した。構造特性評価においては、成長圧力が従来の成長圧力 100 Torr よりも低圧化した場合に膜中にボイドが形成され、表面平坦性および結晶性が低下することが確認された。また、高圧化した場合には 300 Torr 以上において気相反応によるアダクト形成により表面平坦性が低下することが確認された。更に、pin ダイオードを作製し放射線検出特性評価を実施したところ、作製した 75、100、250 Torr の成長圧力の各検出器において中性子検出を確認した。また、検出効率は成長圧力が低圧化すると低下したことからボイド形成による非輻射再結合中心の増加などが影響している可能性が示唆された。

#### (9) 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

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ものである。本研究では、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を確立する。前回の実験結果より中性子コンバーターの厚みに依存した熱中性子に対する中性子センサーの検出効率と応答関数を実測できた。今年度、大強度中性子ビームを計測できるようにより薄い中性子コンバーターを有する中性子センサーの検出効率と応答関数を実測した。より

薄い中性子コンバーターの領域でも中性子検出効率は良い直線相関があることが分かった。この直線相関を利用して、様々な BNCT 施設の中性子強度に対応できるリアルタイム中性子センサーを提供できる。

#### (11) 核セキュリティのための中性子検出器開発・試験

核物質や放射性物質をばら撒くことを目的とした、RDD (Radiological Dispersal Device)が、大規模イベント会場などで使用されることを未然に防止するため、核・放射性物質検知技術の向上が求められている。本研究では、透過力が高く、重元素による遮蔽が困難な高速中性子に着目し、核物質や高速中性子源を検知する技術開発を進めている。高速中性子の検知には、比較的安価で、加工・取り扱いが容易なプラスチックシンチレーターが有効と考えられるが、高速中性子とガンマ線の両方に感度を有するため、少ない中性子イベントを抽出するには、ガンマ線感度を抑える必要がある。そこで、我々は、ガンマ線と中性子線を弁別できる波形弁別(PSD: Pulse Shape Discrimination)プラスチックシンチレーター(ELJEN社製のEJ-276)を用い、平板型(25×25×2.5 cm)の検出器を開発した。この検出器の四隅に光電子増倍管(PMT)を取り付け、パルス出力をデジタルで積分しイベント発生時間とともに、リストデータとして保存した。実験後、解析した結果、同時事象のみ取り扱うことで、ノイズの削減と中性子ガンマ線の弁別能力向上ができることを確認した。また、角度依存性についても実験を行い、核・放射性物質探知に有用であることを確認した。

#### (12) 光ファイバ型中性子検出器を用いた原子炉特性の計測

原子炉物理実験において、中性子計測技術は重要な役割を担っている。本研究グループでは、光ファイバと中性子シンチレータを組み合わせた中性子検出器の開発を進めており、この検出器は計数管と比してサイズが小さく、設置場所の自由度は高く、かつ周囲への影響も小さい。また、小型のシンチレータを用いているため、比較的高い中性子束の場でも利用可能である。また、小型シンチレータを用いることにより、ガンマ線起因のイベントは、ガンマ線とシンチレータの相互作用によって生成される高速電子のLETが低いため、シンチレータ内でのエネルギー付与が小さく、結果として低い波高の信号しか生成されず、単なる波高分布計測により中性子イベントとの弁別を行うことが可能となる。本研究では、開発中の光ファイバ型中性子検出器を用いて、各種原子炉特性の評価を実施している。本年度は、製作した小型Liガラスを用いた光ファイバ型中性子検出器を用いて、近畿大学原子炉UTR-KINKIの中央ストリング内の中性子束の鉛直方向分布を計測した。炉頂部より光ファイバ型中性子検出器のプロブ部をガイドチューブを介して中央ストリング内に挿入し、炉頂部に設置した光ファイバ駆動装置により、0.1 m/minの速さで光ファイバプロブ部の引き上げ・挿入を行い、cos分布の中性子束分布を得た。

#### ② 放射線照射効果〔(4)〕

#### (4) 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。このため本研究では、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きた。これまでの研究では、照射6日後の測定を行ってきた。今回は、照射1日後の測定を行い、中性子線フルエンス  $1.2 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>、ガンマ線照射線量 1.2 Gy、また、照射後において、5 kV/mm の充電電荷量の平均値が未照射試料よりも低下する傾向があることがわかった。

### ③ 原子炉特性〔(6)(10)(13)〕

#### (6) UTR-KINKI 炉内 $\gamma$ 線の線質の評価

##### 一炉内 $\gamma$ 線エネルギー分布測定の試み一

本研究では、UTR-KINKI の炉内  $\gamma$  線の線質を評価することを目的とする。2017年には、炭素反射体上部に高純度ゲルマニウム半導体検出器を設置し、炭素反射体上部の  $\gamma$  線付与エネルギー分布から照射ポート中の  $\gamma$  線エネルギー分布を推定したが、照射ポート内での測定は実施できていない。2020年度は、上蓋上部に有機液体シンチレータを設置し、 $\gamma$  線エネルギー分布および中性子エネルギー分布を測定した。この結果を踏まえ、2021年度では、照射ポート中に有機シンチレータを設置して  $\gamma$  線エネルギー分布を測定した。分布は、核分裂時の即発  $\gamma$  線および散乱  $\gamma$  線による連続成分、核分裂生成物および放射化物由来の離散（ピーク）成分からなることが分かった。

#### (10) 中性子源落下による未臨界体系の反応度測定

〔未実施〕

#### (13) 中性子束分布の解析結果に対する妥当性確認および解析モデルの確立

本研究では、近畿大学原子炉の中性子束分布の解析結果に対する妥当性確認および解析モデルの確立を目指している。中性子束分布は炉心特性を決める重要なパラメータであるものの、近畿大学原子炉においては解析結果に対する妥当性確認が十分に行われていない。このため、本研究では金箔を用いる放射化法により近畿大学原子炉の炉心部における中性子束分布を推定し、これをモンテカルロ計算による解析結果を比較することで、解析で得られる中性子束分布の妥当性を確認し、解析モデルを確立することを試みた。実験においては、黒鉛反射体部分にアルミホイルで包んだ金箔を取り付け、出力 1 W、運転時間 30 分で照射を行い、その

後 Ge 半導体検出器、GM 計数管を用いて放射能測定を行った。解析で得られた中性子束及び反応率分布を実験結果と比較することで、近畿大学原子炉の中性子束分布の解析結果に対する妥当性を確認した。また、解析で得られる反応率分布については黒鉛反射体の外側（SS41 鋼、コンクリート、湿砂）の有無による感度が小さいことから、解析モデルにおいて黒鉛反射体の外側の考慮する必要性が低い可能性があることを確認した。今後、実験値と計算値の差異に関する考察を深め、解析モデルの確立を進める。

### (1)医療用リニアックの中性子場を想定した水晶体サイズレベルの中性子束密度及び線量評価(統計精度の向上)

代表者:阪間 稔 (徳島大学大学院医歯薬学研究部)

#### [要約]

本研究では、近年の ICRP-118 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 20 mSv/y を越えず、いかなる 1 年間においても 50 mSv 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、男性や女性の性差影響も含めて重要になる。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。この照射実験では、極微小サイズスケールの金箔を、幾何学的な形態を正確に再現している四面体構造メッシュ化人体ファントム (MRCPs) のポリンゴンメッシュデータを用いて、本学の 3D プリンタで自作製によるファントム (一般標準成人男性と女性) の水晶体位置に配置することにした。そして、これら二体のファントムを炉心照射孔へ挿入配置することで、長時間の原子炉中性子照射に供し実験を行った。その結果、成人男性水晶体 (MRCPs\_AM) では、その中性子束密度が  $(1.2578 \pm 0.0033) \times 10^7$  [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ]、そのカドミウム比は  $12.416 \pm 0.030$  であり、成人女性水晶体 (MRCPs\_AF) では、それぞれ  $(5.7752 \pm 0.0160) \times 10^6$  [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ] と  $6.248 \pm 0.015$  と評価した。

### (2)水発光現象による硼素中性子捕獲反応分布の可視化に関する基礎研究

代表者:納富 昭弘 (九州大学大学院医学研究部門)

#### [要約]

現在のホウ素中性子捕捉療法(BNCT)では、中性子捕獲反応に伴い発生する  $\alpha$  粒子、Li 粒子による線量(ホウ素線量)の直接的測定は実現できておらず、BNCT の問題点であると言える。この為、測定技術におけるブレークスルーが望まれている。本研究では、ホウ酸水ファントムを用いて、ホウ素中性子捕獲反応に伴い発生する放射線の水発光現象の分布が CCD カメラによって観測できるかどうかを、 $10^4$  [ $\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$ ] 程度の中性子束の場で確認することを目的とした。近畿大学原子炉 UTR-KINKI にて、炉心上部の直径 10 cm の照射孔から中性子を取り出してファントムに照射し、冷却型 CCD カメラで撮影を行った。比較の為の水ファントムには純水を入れた。ホウ酸水ファントムには、濃度 3.8% の飽和ホウ酸水を入れた。純水ファントムで測定を行ったところ、ファントム全体が発光して見え、原子炉からの  $\gamma$  線によるチェレンコフ光の寄与が大きかった。ホウ酸水ファントムに同様の照射を行ったところ、純水ファントムとほぼ同様の輝度分布が得られた。結果として、ホウ素中性子捕獲反応に伴う水発光現象のエビデンスを得ることはできなかった。今後、鉛板で  $\gamma$  線の強度を低下させて S/N 比をあげることなどの工夫により、可視化が実現する可能性はあると考えている。

### (3)板状 BeO を利用した中性子線・ $\gamma$ 線混在場での $\gamma$ 線測定に関する研究

代表者:眞正 浄光 (東京都立大学大学院人間健康科学研究科)

#### [要約]

近年注目されているホウ素中性子捕捉療法(BNCT)は腫瘍内部に取り込ませた  $^{10}\text{B}$  と中性子との



相互作用を利用した放射線治療であり、腫瘍への高い線量集中性と強力な殺細胞効果を特徴とする。BNCT の中性子場には必ず  $\gamma$  線が混在し、これらは生物学的効果比が異なる為、腫瘍及び正常組織の吸収線量評価にはこれらを弁別して測定する必要がある。現在、中性子場での  $\gamma$  線量の唯一の測定器としてガラス管に粉末状の BeO が封入された BeO 粉体 TLD が用いられているが、破損すると毒性の高い BeO が飛散する為製造が中止されている。そこで我々は、BeO 粉体 TLD に代わる新たな TLD の開発を進めている。

これまでに、板状の BeO セラミックスが BeO 粉体 TLD と同様に中性子場での  $\gamma$  線量測定が可能である事と  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  セラミックスが中性子場で  $\gamma$  線量測定が可能である事が明らかとなっている。しかし、BeO セラミックス及び  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  セラミックスの面積化は最大でそれぞれ 10cm 角と 8cm 角である為、BNCT の 2 次元 QA デバイスとして使用する為には大きさが不十分である。そこで 20 cm 角まで面積化が可能な  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr},\text{Si},\text{Mg}$  セラミックスに着目した。X 線に対して優れた線量応答性を持つ事が明らかになっている。本研究では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr},\text{Si},\text{Mg}$  セラミックスによる近畿大学原子力研究所の原子炉 (UTR-KINKI) の中性子場での  $\gamma$  線量測定について検討したので報告する。その結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr},\text{Si},\text{Mg}$  セラミックスは、中性子線による放射化の影響を受けて  $\gamma$  線量を約 20% 過大評価してしまう事が明らかとなった。今後は、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr},\text{Si},\text{Mg}$  セラミックスの構成元素と中性子線との核反応による放射化の影響を補正する係数や補正方法を調査する。

#### (4)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照射 6 日後の測定を行ってきた。今回は、照射 1 日後の測定によって、次の結果が得られた。中性子線フルエンス  $1.2 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>、ガンマ線照射線量 1.2 Gy 照射後において、5 kV/mm の充電電荷量の平均値は、未照射試料よりも低下する傾向があることがわかった。

#### (5)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。

本年度も昨年度に続き、ゲル線量計のひとつであるラジオクロミックゲル線量計を 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)に、ジブロモメタンなどのハロメタンなどを増感剤として添加した場合の増感効果を調べた。

ハロメタンによる増感効果は医療用直線加速器からの高エネルギー(6 MV)X 線においてはその効果が知られていたが、低エネルギー(150 kV)X 線や原子炉からの中性子線に対しては明らかな増感効果は確認できなかった。

## (6)UTR-KINKI 炉内 $\gamma$ 線の線質の評価

### ー炉内 $\gamma$ 線エネルギー分布測定を試みー

代表者:遠藤 暁 (広島大学大学院先進理工系科学研究科)

#### [要約]

本研究では、UTR-KINKI の炉内  $\gamma$  線の線質を評価することを目的としている。2017 年には、炭素反射体上部に高純度ゲルマニウム半導体検出器を設置し、炭素反射体上部の  $\gamma$  線付与エネルギー分布から照射ポート中の  $\gamma$  線エネルギー分布を推定しているが、照射ポート内での測定は実施できていない。2020 年度は、上蓋上部に有機液体シンチレータを設置し、 $\gamma$  線エネルギー分布および中性子エネルギー分布を測定した。この結果を踏まえ、2021 年度では、照射ポート中に有機シンチレータを設置して  $\gamma$  線エネルギー分布を測定した。分布は、核分裂時の即発  $\gamma$  線および散乱  $\gamma$  線による連続成分、核分裂生成物および放射化物由来の離散 (ピーク) 成分からなる。

## (7) 中性子用線量計測材料の特性評価

代表者:越水 正典 (静岡大学電子工学研究所)

#### [要約]

中性子計測を可能とする熱蛍光体の開発を目的として、 $^{10}\text{B}$  および  $^{11}\text{B}$  濃縮原料から合成した  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5:\text{Dy}$  セラミックスを合成した。 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、および  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  の固相反応により Dy 添加  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  セラミックスを開発した。原料として  $^{10}\text{B}$  および  $^{11}\text{B}$  濃縮の  $\text{H}_3\text{BO}_3$  を用いることにより、 $^{10}\text{B}$  および  $^{11}\text{B}$  濃縮セラミックスを合成した。X線照射後の熱蛍光グローカーブでは、Dy 濃度に拘らず 350 K 付近にグローピークが観測された。4 mol% の Dy 濃度で最大の熱蛍光強度が得られたため、この試料を中性子計測に供した。近畿大学原子炉施設のラジオグラフィポートおよび原子炉ストリンガー孔において試料を照射後、熱蛍光グローカーブを測定した。その結果、 $^{10}\text{B}$  濃縮セラミックスでは、 $^{11}\text{B}$  濃縮セラミックスの 10 倍以上の熱蛍光強度が観測された。この強度差が、中性子のみに対応する熱蛍光強度となる。この熱蛍光強度は、 $10^4 \sim 10^{10}$  neutrons/cm<sup>2</sup> の範囲で、フルエンスに対して線形に増大した。このことは、本研究において、少なくとも 6 桁のダイナミックレンジを有する熱蛍光素子の開発に成功したこ

とを示すものである。

### (8)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 (静岡大学電子工学研究所)

#### [要約]

本研究では、中性子イメージングセンサーの実現に向けて、新規中性子半導体材料として提案しているBGaNを用いた検出の開発を実施した。これまで作製し検討を行ってきたBGaN薄膜の作製条件において、更なる高品質化を目指すために成長圧力の依存性について検証を行い、結晶の構造特性評価およびデバイスの検出特性評価を実施した。

構造特性評価においては、成長圧力が従来の成長圧力 100 Torr よりも低圧化した場合に膜中にボイドが形成され表面平坦性および結晶性が低下することが確認された。また、高圧化した場合には 300 Torr 以上において気相反応によるアダクト形成により表面平坦性が低下することが確認された。

更に、pin ダイオードを作製し放射線検出特性評価を実施したところ、作製した 75、100、250 Torr の成長圧力の各検出器において中性子検出を確認した。また、検出効率は成長圧力が低圧化すると低下したことからボイド形成による非輻射再結合中心の増加などが影響している可能性が示唆された。

### (9)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。前回の実験結果より中性子コンバーター(フッ化リチウム)の厚みに依存した熱中性子に対する中性子センサーの検出効率と応答関数を実測できたことが分かった。今年度、大強度な中性子ビームも計測できるように薄い中性子コンバーターを有する中性子センサーの検出効率と応答関数を実測できた。より薄い中性子コンバーターの領域でも中性子検出効率は良い直線相関があることが分かった。この直線相関を利用して、様々な BNCT 施設の中性子強度に対応できるリアルタイム中性子センサーを提供できるようになる。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で検証していく。

### (11)核セキュリティのための中性子検出器開発・試験

代表者:小泉 光生 (日本原子力研究開発機構)

#### [要約]

核物質や放射性物質をばら撒くことを目的とした、RDD (Radiological Dispersal Device)が、大規模イベント会場などで使用されることを未然に防止するための核・放射性物質検知技術の向上が求められている。本研究では、透過力が高く、重元素による遮蔽が困難な高速中性子に着目し、核物質や高速中性子源を探知する技術開発を進めている。高速中性子の検知には、比較的安価で、加工・取り扱いが容易なプラスチックシンチレーターが有効と考えられるが、高速中性子とガンマ線の両方に感度を有するため、少ない中性子イベントを抽出するには、ガンマ線感度を抑える必要がある。そこで、

我々は、ガンマ線と中性子線を弁別できる波形弁別(PSD: Pulse Shape Discrimination)プラスチックシンチレータ(ELJEN 社製の EJ-276)を用い、平板型(25×25×2.5 cm)の検出器を開発した。この検出器の 4 隅の光電子増倍管(PMT)から出力を取り出すことができ、測定においては、パルス出力をデジタルタイザで積分しイベント発生時間とともに、リストデータとして保存した。実験後、解析した結果、同時事象のみ取り扱うことで、ノイズの削減と中性子ガンマ線の弁別能力向上ができることを確認した。また、角度依存性についても実験を行い、核・放射性物質探知に有用であることを確認した。

## (12)光ファイバ型中性子検出器を用いた原子炉特性の計測

代表者:渡辺 賢一 (九州大学大学院工学研究院)

### 〔要約〕

原子炉物理実験において、中性子計測技術は重要な役割を担っている。我々の研究グループでは、光ファイバと中性子シンチレータを組み合わせた中性子検出器の開発を進めており、計数管と比してサイズが小さく、設置場所の自由度は高く、かつ周囲への影響も小さい。また、小型のシンチレータを用いているため、比較的高い中性子束の場合でも利用可能である。また、小型シンチレータを用いることにより、ガンマ線起因のイベントは、ガンマ線とシンチレータの相互作用によって生成される高速電子の LET が低いため、シンチレータ内でのエネルギー付与が小さく、結果として低い波高の信号しか生成されず、単なる波高分布計測により中性子イベントとの弁別を行うことが可能となる。本研究では、開発中の光ファイバ型中性子検出器を用いて、各種原子炉特性の評価を実施している。

本年度は、製作した小型 Li ガラスを用いた光ファイバ型中性子検出器を用いて、近畿大学原子炉 UTR-KINKI の中央ストリング内の中性子束の鉛直方向分布を計測した。炉頂部より光ファイバ型中性子検出器のプローブ部をガイドチューブを介して中央ストリング内に挿入し、炉頂部に設置した光ファイバ駆動装置により、0.1 m/min の速さで光ファイバプローブ部の引き上げ・挿入を行い、 $\cos$  分布の中性子束分布を得た。

## (13)中性子束分布の解析結果に対する妥当性確認および解析モデルの確立

代表者:北田 孝典 (大阪大学大学院工学研究科)

### 〔要約〕

本研究の目的は、近畿大学原子炉の中性子束分布の解析結果に対する妥当性確認および解析モデルの確立である。中性子束分布は炉心特性を決める重要なパラメータであるものの、近畿大学原子炉においては解析結果に対する妥当性確認が十分に行われていない。このため、本研究では金箔を用いる放射化法により近畿大学原子炉の炉心部における中性子束分布を推定し、これをモンテカルロ計算による解析結果と比較することで、解析で得られる中性子束分布の妥当性を確認し、解析モデルを確立することを試みた。実験においては、黒鉛反射体部分にアルミホイルで包んだ金箔を取り付け、出力 1 W、運転時間 30 分で照射を行い、その後 Ge 半導体検出器、GM 計数管を用いて放射能測定を行った。解析で得られた中性子束及び反応率分布を実験結果と比較することで、近畿大学原子炉の中性子束分布の解析結果に対する妥当性を確認した。また、解析で得られる反応率分布については黒鉛反射体の外側(SS41 鋼、コンクリート、湿砂)の有無による感度が小さいことから、解析モデルにおいて黒鉛反射体の外側の考慮する必要性が低い可能性があることを確認した。今後、実験値と計算値の差異に関する考察を深め、解析モデルの確立を進める。