

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2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模擬した水晶体サイズでの中性子束密度及び線量評価（統計精度の拡充）
- (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) 板状 BeO を利用した中性子線・ γ 線混在場での γ 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 γ 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) Ar-41 及び Xe-133 を用いた通気式電離箱エネルギー特性評価に関わる研究
- (12) 核セキュリティのための中性子検出器開発
- (13) 単結晶 CVD ダイヤモンド検出器によるホウ素中性子捕捉反応の反応率定量評価

研究分野で大まかに分けると以下のようになる。

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

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) (13)]

(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 (統計精度の拡充)

^{18}F -FDG を用いた PET 検査が現在多くの病院で行われている。それに伴い院内に医療用小型サイクロトロンを設置している病院が増加している。サイクロトロンで使用されるエネルギーは主に 12 MeV から 18 MeV であり、 ^{18}F を生成する際の (p, n) 反応で発生する中性子によりコンクリート壁が放射化される。施設の解体、廃棄の際には多量の放射化物の発生が予想される。そのため放射化の程度を推定し、その精度の確認が必要であると考えた。今回はコンクリート壁の放射化量をコンクリートの組成に文献値を用いた場合と ICP-MS 装置の測定値を用いた場合を計算し、実測値との比較を目的とした。コンクリート試料は壁、天井、床から 8 箇所採取し、放射能を Ge 半導体検出器で測定した。採取したコンクリート試料はマイクロウェーブ装置で酸分解を行った後、ICP-MS 装置で測定し、その組成を求めた。その組成を基に PHITS 及び DCHAIN で計算を行った結果、ICP-MS 装置の測定から求めた組成を用いた結果の方が文献値の組成を用いた結果に比べ実測値により近い値を得られた。

(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

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、実際の BNCT 場で、中性子検出器としての応答特性を調べた。極微量のヨードベンゼンを添加した有機シンチレータを、BNCT 場 (熱中性子束 $\sim 10^9 \text{n/cm}^2/\text{s}$) で短時間照射を行ったところ、クエンチングによる波高低下の影響は限定的であった。このため、クエンチングにより計数しきい値以下に波高が下がることによる数え落としは著しく減少した。また、照射終了後の計数率の壊変曲線には、プラスチックシンチレータの場合は、 ^{128}I 以外の成分は確認されなかった。一方、液体シンチレータの場合は、 ^{24}Na の成分が観測され、 ^{23}Na の混入が示唆された。 ^{23}Na の混入は HPGe 検出器による測定でも確認された。更に新規シンチレータである CaI_2 の光中性子場での自己放射化検出器への適用可能性を調べるため、PHITS を用いて、副放射化生成物の生成量の中性子エネルギー依存性を調査した。その結果、熱外～高速中性子により生成される Ca の放射化物は全体の 17%程度であり、 CaI_2 が自己放射化検出器として好ましい特性を有することが確認された。

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

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、腫瘍内部に取り込まれたホウ素と中性子線の (n, α) 反応を利用した放射線治療法である。中性子線と γ 線では生物学的効果比

が異なるため、投与線量の決定や治療装置の品質保証(QA)、治療効果の判定に中性子線と γ 線を弁別して測定する必要がある。現在、BNCT照射場での γ 線量の測定には、石英ガラス管に封入されたBeO:Na熱蛍光線量計(UD-170LS、松下電器)が唯一の方法として使用されている。BeOは中性子捕獲断面積が小さいため、中性子線・ γ 線混在場でも簡便に γ 線量のみを測定できるが、毒性が高く現在は販売されていない。そのため代替品の開発が喫緊の課題となっている。申請者らは、これまでに粉体のBeO-TLD代替技術として、飛散しない板状のBeOセラミックス(マテリオン社製のThermalox995)のX線に対する熱蛍光特性と輝尽蛍光特性について調査し線量応答性やフェーディング特性、再現性に優れていることを明らかにしている。今回は、中性子線・ γ 線混在場で板状BeOの熱蛍光特性を利用したポイント線量および γ 線量分布測定を行い、中性子場での γ 線量測定手法としての有用性を調査した。その結果、板状BeOの熱蛍光特性を用いると、近大炉の中性子・ γ 線混在場(熱中性子束： $3.02 \times 10^6 - 8.27 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)において、中性子の影響を受けることなく、 γ 線のみを選択的に測定できることが明らかになった。

(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

近年、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)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。本研究では、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)に、水和電子捕捉剤としての KNO_3 、および熱中性子増感剤として $^6\text{Li}/^{10}\text{B}$ を同時に添加した場合の増感効果を調べた。その結果、 ^6Li および ^{10}B がPVA-GTA-Iゲル線量計の熱中性子増感効果を示すことに加え、水和電子捕捉剤(増感剤)としての KNO_3 の増感作用が相加的に働くことが示された。

(7) 中性子用線量計測材料の特性評価

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、 ^6Li や ^{10}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、我々はセラミック

スを選択し、適切な発光中心の添加による熱蛍光 (TL) 特性を利用した中性子計測素子開発を着想した。本研究では、 ^{10}B および ^{11}B 濃縮原料を用いた $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5:\text{Tb}$ セラミックスを中性子計測用熱蛍光体として開発した。開発した材料の X 線、荷電粒子線、および中性子照射後の熱蛍光特性を解析した。 ^{10}B セラミックスと ^{11}B セラミックスの X 線や荷電粒子線への TL 応答は同様であった。一方で、熱中性子照射後の TL 強度は、 ^{10}B セラミックスで顕著に高かった。これは、中性子と ^{10}B との核反応により生じた核反応生成物により誘起された TL によるものである。

(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

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 GaN を用いた検出の開発を実施した。昨年度までの研究にて最適化された B GaN 結晶成長条件を用いて、異なる電極サイズの素子を作製しデバイス特性評価を実施した。B GaN-pin 構造では p 型 GaN 層が高抵抗であるため、均一な電流密度とならず一部の有効な領域のみで検出がされていることが確認された。楕型デバイスを用いて、p 型電極より $30\ \mu\text{m}$ 以内と仮定した場合に、飽和電流密度および α 線検出効率が均一化することが確認された。また、 α 壊変エネルギーの検出においてはミュレーションよりチップサイズ $0.001\ \text{mm}^2$ 以上の小型化が高エネルギー分解能を維持可能であり、イメージングデバイスとしての解像度向上に有効であることが示された。さらに、中性子検出測定では円形電極を用いた測定にて α 壊変エネルギーに相当する約 2.3MeV のエネルギーピークを観測した。

(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た。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、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することができ、中性子コンバーターの厚みと中性子検出効率に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することで、各 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作製し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) Ar-41 及び Xe-133 を用いた通気式電離箱エネルギー特性評価に関わる研究

産総研では、放射性ガスモニターのレスポンス試験に必要な、放射性ガスの放射能

標準を維持している。現在のところ比較的容易な⁸⁵Krを用いた試験のみ実施しているが、同様に代表的な放射性希ガスである、⁴¹Ar及び¹³³Xeを用いたレスポンス試験が出来るよう、標準器のエネルギー特性評価に取り組んでいる。近畿大学原子炉等利用共同研究（平成31（令和元）年度）では、⁴¹Arを用いて通気式比例計数管を用いた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。この結果を受け令和2年度は、⁴¹Arを用いたレスポンス試験の再現性の確認及び¹³³Xeを用いたレスポンス試験に取り組んだ。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。そして、京都大学複合原子力科学研究所の試験炉KURで生成した⁴¹Ar及び¹³³Xeを用い通気式電離箱（大倉 I-4096 01/06）のレスポンスを試験した。

（12）核セキュリティのための中性子検出器開発

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、透過力が高く遮蔽が難しい高速中性子に注目し、これを検出することにより、核物質や中性子源の放出源を探知する検出器開発を開始した。高速中性子検出器としては、ガンマ線と中性子との発光減衰時間が異なることを利用して、波形から放射線の種類を区別する波形弁別 PSD(Pulse Shape Discrimination)ができる、プラスチックシンチレータ(EJ-276)を導入した。中性子を選択的に計数することができるため、環境ガンマ線のバックグラウンドを抑制した信号・ノイズ比(S/N)の高い測定により、中性子に高い感度を持つ測定が期待できる。近大炉においては、原子炉起動用Pu-Be中性子線源を用いて、製作した長尺のEJ-276プラスチックシンチレータを用いた試験を行った。検出器単体による中性子・ガンマ線弁別能力試験を行った結果、EJ-276により、環境ガンマ線の影響を抑えた中性子の測定が可能であることが確認できた。開発した長尺の検出器は、角度依存性を持つため、中性子線源の探知に利用できると考えられる。そこで、検出器の角度依存性を単体、及び、検出器2台とポリエチレンブロックとを組み合わせた体系で実験を行った。中性子検出の角度依存性を評価した結果、中性子線源の探知に利用できる可能性を示すことができた。

（13）単結晶CVDダイヤモンド検出器によるホウ素中性子捕捉反応の反応率 定量評価

本共同研究では、単結晶CVDダイヤモンド検出器やCs₂LiYC₁₆:Ce(⁷Li濃縮-) (CLYC7)シンチレータ等の先進中性子検出器をUTR-KINKIの炉心に挿入し、ガンマ線などの放射線の存在下における熱中性子測定性能を評価した。単結晶CVDダイヤモンド検出器は弾性散乱や炭素との核反応により高速中性子の検出が可能である。さらに、本研究では、ダイヤモンド表面にリチウム箔を設置することで、箔と熱中性

子との核反応により発生する高エネルギー荷電粒子を直接測定し、熱中性子束の評価が可能である。一方、単結晶 CVD ダイヤモンド検出器はガンマ線への感度も有するため、波形弁別によりこの影響を除去することが重要である。そこで本計測では、高エネルギー荷電粒子入射では矩形のパルスが、ガンマ線入射では三角形上のパルスが得られることを利用し、ガンマ線と高エネルギー荷電粒子に起因するパルスを弁別するプログラムを作成した。炉出力 0.01, 0.1, 1W にて計測を行った際のパルスデータを波形弁別した結果、3つの出現頻度の高いパルスの領域があり、それぞれ、高エネルギー荷電粒子であるトリトン及びアルファ線と、ガンマ線に起因するパルスであると考えられた。トリトン、アルファ線に起因するパルスの計数は炉出力に比例して増加することが確認できた。また、CLYC7 シンチレータの熱中性子応答について調査を行った。CLYC7 シンチレータは特に高速中性子の計測に着目し ${}^7\text{Li}$ が 99%以上に濃縮されて製作されているが、 ${}^6\text{Li}$ も僅かながら存在するため、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応により高エネルギー荷電粒子が発生する。CLYC7 シンチレータでの計測においてもガンマ線に起因するパルスと中性子に起因するパルスを波形弁別した。その結果、ガンマ線に起因するパルスの領域とは別に、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ で発生する高エネルギー荷電粒子に起因するパルス領域が確認された。このピークの分解能は 7%であった。熱中性子の輸送及び CLYC7 シンチレータへの計数率を MCNP 6 にて計算した結果、本測定結果と中性子輸送計算の結果が一致し、本波形弁別の妥当性が示された。

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た。これまでの研究により、中性子線フルエンス $1.2 \times 10^7 \text{n/cm}^2$ 、ガンマ線照射線量 1.2Gy 照射後において、5-10kV/mm の充電電荷量の平均値は、未照射試料よりも照射試料が大きくなる傾向があることがわかった。

③原子炉特性〔(6)(10)〕

(6) UTR-KINKI 炉内 γ 線の線質の評価

近畿大学原子力研究所の Kinki University Reactor (UTR-KINKI)では、中性子と γ 線の混在場を提供することで様々な放射線生物実験が行われている。照射を定量的に行うには、混在場の特性把握が不可欠である。そこで申請者らは、放射化学による中性子エネルギースペクトル測定、マイクロドシメトリ手法を用いた中

中性子および γ 線の線量率測定を実施し、混在場特性を明らかにしてきた。2017年から、炉内 γ 線の線質評価を行うため、炭素反射体上部にHPGe検出器を設置し、炭素反射体上部の γ 線付与エネルギー分布から照射ポート中の γ 線エネルギー分布を推定している。2020年度は、UTR-KINKI炉心上部照射体型(C設備)の上蓋上部における γ 線および中性子を、直径および長さが5.08cmの有機液体シンチレータを用いて、原子炉の熱出力5mW時のスペクトルを測定した。得られたスペクトルからunfolding手法を用いて γ 線エネルギー分布を導出した。今後は、この測定結果を踏まえて検出器や手法の変更を検討し検出器設置位置を照射ポートに近づけていくことを目指す。

(10) 中性子源落下による未臨界体系の反応度測定

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。 -0.8 から -2.3% Dk/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、中性子計数率が減少するケースでは、新手法による反応度評価値はFeynman- α 法やソースジャーク法による評価値に近い結果を得たが、中性子計数率が増加するケースでは評価が合わない結果もあった。新手法の評価値は暫定値であり、中性子計数率が増加するケースでの精度向上のため、最適な平滑化等について今後検討を進めて行く。

(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(統計精度の拡充)

代表者: 阪間 稔 (徳島大学大学院医歯薬学研究部)

[要約]

COVID-19 の社会的な影響に伴い、全ての研究計画を進捗することができなかった。そこで「中性子放射化」を共通キーワードに、本報告では、「サイクロトロン部屋内壁のコンクリート試料実測定に基づく放射化計算と実測値の比較」の題目で卒業研究論文に取り組んだ、本研究室所属学生(浅山瑞喜)の成果発表をもとに報告する。

^{18}F -FDG を用いた PET 検査が現在多くの病院で行われている。それに伴い院内に医療用小型サイクロトロンを設置している病院が増加している。サイクロトロンで使用されるエネルギーは主に 12 MeV から 18 MeV であり、 ^{18}F を生成する際の (p, n) 反応で発生する中性子によりコンクリート壁が放射化される。施設の解体、廃棄の際には多量の放射化物の発生が予想される。そのため放射化の程度を推定し、その精度の確認が必要であると考えた。今回はコンクリート壁の放射化量をコンクリートの組成に文献値を用いた場合と ICP-MS 装置の測定値を用いた場合を計算し、実測値との比較を目的とした。コンクリート試料は壁、天井、床から 8 箇所採取し、放射能を Ge 半導体検出器で測定した。採取したコンクリート試料はマイクロウェーブ装置で酸分解を行った後、ICP-MS 装置で測定し、その組成を求めた。その組成を基に PHITS 及び DCHAIN で計算を行った結果、ICP-MS 装置の測定から求めた組成を用いた結果の方が文献値の組成を用いた結果に比べ実測値により近い値を得られた。

(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、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来ている。今年度は、実際の BNCT 場で、中性子検出器としての応答特性を調べた。極微量のヨードベンゼンを添加した有機シンチレータを、BNCT 場(熱中性子束 $\sim 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$)で短時間照射を行ったところ、クエンチングによる波高低下の影響は限定的であった。このため、クエンチングにより計数しきい値以下に波高が下がることによる数え落としは著しく減少した。また、照射終了後の計数率の壊変曲線には、プラスチックシンチレータの場合は、I-128 以外の成分は確認されなかった。一方、

液体シンチレータの場合は、Na-24 の成分が観測され、Na-23 の混入が示唆された。Na-23 の混入は HPGe 検出器による測定でも確認された。新規シンチレータである CaI_2 の光中性子場での自己放射化検出器への適用可能性を調べるため、PHITS を用いて、副放射化生成物の生成量の中性子エネルギー依存性を調査した。その結果、熱外～高速中性子により生成される Ca の放射化物は全体の 17% 程度であり、 CaI_2 が自己放射化検出器として好ましい特性を有することが確認された。

(3) 板状 BeO を利用した中性子線・ γ 線混在場での γ 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〕

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, α) 反応を利用した放射線治療法である。中性子線と γ 線では生物学的効果比が異なるため、投与線量の決定や治療装置の品質保証 (QA)、治療効果の判定に中性子線と γ 線を弁別して測定する必要がある。現在、BNCT 照射場での γ 線量の測定には、石英ガラス管に封入された $\text{BeO}:\text{Na}$ 熱蛍光線量計 (UD-170LS、松下電器) が唯一の方法として使用されている。BeO は中性子捕獲断面積が小さいため、中性子線・ γ 線混在場でも簡便に γ 線量のみを測定できるが、毒性が高く現在は販売されていない。そのため代替品の開発が喫緊の課題となっている。申請者らは、これまでに粉体の BeO-TLD 代替技術として、飛散しない板状の BeO セラミックス (マテリオン社製の Thermalox995) の X 線に対する熱蛍光特性と輝尽蛍光特性について調査し線量応答性やフェーディング特性、再現性に優れていることを明らかにしている。今回は、中性子線・ γ 線混在場で板状 BeO の熱蛍光特性を利用したポイント線量および γ 線量分布測定を行い、中性子場での γ 線量測定手法としての有用性を調査した。その結果、板状 BeO の熱蛍光特性を用いると、近大炉の中性子・ γ 線混在場 (熱中性子束: $3.02 \times 10^6 - 8.27 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) において、中性子の影響を受けることなく、 γ 線のみを選択的に測定できることが明らかになった。

(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、次の結果が得られた。中性子線フルエンス 1.2×10^7 n/cm²、ガンマ線照射線量 1.2 Gy 照射後において、5-10 kV/mm の充電電荷量の平均値は、未照射試料よりも照射試料が大きくな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。

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(I₃⁻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、水和電子捕捉剤としてのKNO₃、および熱中性子増感剤として⁶Li/¹⁰Bを同時に添加した場合の増感効果を調べた。今回の結果から、⁶Li および¹⁰BがPVA-GTA-I ゲル線量計の熱中性子増感効果を示すことに加え、水和電子捕捉剤(増感剤)としてのKNO₃の増感作用が相加的に働くことが示された。

(6) UTR-KINKI 炉内 γ 線の線質の評価

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]

近畿大学原子力研究所の Kinki University Reactor (UTR-KINKI)では、中性子と γ 線の混在場を提供することで様々な放射線生物実験が行われている。照射を定量的に行うには、混在場の特性把握が不可欠である。そこで申請者らは、放射化法による中性子エネルギースペクトル測定、マイクロシメトリ手法を用いた中性子および γ 線の線量率測定を実施し、混在場特性を明らかにしてきた。2017年から、炉内 γ 線の線質評価を行うため、炭素反射体上部にHPGe検出器を設置し、炭素反射体上部の γ 線付与エネルギー分布から照射ポート中の γ 線エネルギー分布を推定している。2020年度は、UTR-KINKI炉心上部照射体型(C設備)の上蓋上部における γ 線および中性子を、直径および長さが5.08 cmの有機液体シンチレータを用いて、原子炉の熱出力5 mW時のスペクトルを測定した。得られたスペクトルから、unfolding手法を用いて γ 線エネルギー分布を導出した。この測定結果を踏まえて検出器や手法の変更を検討し検出器設置位置を照射ポートに近づけていくことを目指す。

(7) 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、 ${}^6\text{Li}$ や ${}^{10}\text{B}$ 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、我々はセラミックスを選択し、適切な発光中心の添加による熱蛍光(TL)特性を利用した中性子計測素子開発を着想した。本研究では、 ${}^{10}\text{B}$ および ${}^{11}\text{B}$ 濃縮原料を用いた $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5:\text{Tb}$ セラミックスを中性子計測用熱蛍光体として開発した。開発した材料のX線、荷電粒子線、および中性子照射後の熱蛍光特性を解析した。 ${}^{10}\text{B}$ セラミックスと ${}^{11}\text{B}$ セラミックスのX線や荷電粒子線へのTL応答は同様であった。一方で、熱中性子照射後のTL強度は、 ${}^{10}\text{B}$ セラミックスで顕著に高かった。これは、中性子と ${}^{10}\text{B}$ との核反応により生じた核反応生成物により誘起されたTLによるものである。

(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（静岡大学大学院工学領域）

〔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。昨年度までの研究にて最適化されたBGaN結晶成長条件を用いて、異なる電極サイズの素子を作製しデバイス特性評価を実施した。BGaN-pin構造ではp型GaN層が高抵抗であるため、均一な電流密度とならず一部の有効な領域のみで検出がされていることが確認された。櫛型デバイスを用いて、p型電極より30 μm 以内と仮定した場合に、飽和電流密度および α 線検出効率が均一化することが確認された。

また、 α 壊変エネルギーの検出においてはミュレーションよりチップサイズ0.001 mm^2 以上の小型化が高エネルギー分解能を維持可能であり、イメージングデバイスとしての解像度向上に有効であることが示された。さらに、中性子検出測定では円形電極を用いた測定にて α 壊変エネルギーに相当する約2.3MeVのエネルギーピークを観測した。

(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開発した。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、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することができ、中性子コンバーターの厚みと中性子検出効率に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することで、各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作製し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。

(10)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。

-0.8から-2.3%Dk/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、中性子計数率が減少するケースでは、新手法による反応度評価値はFeynman- α 法やソースジャーク法による評価値に近い結果を得たが、中性子計数率が増加するケースでは評価が合わない結果もあった。新手法の評価値は暫定値であり、中性子計数率が増加するケースでの精度向上のため、最適な平滑化等について今後検討を進めて行く。

(11)Ar-41 及び Xe-133 を用いた通気式電離箱エネルギー特性評価に関わる研究

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〕

産総研では、放射性ガスモニタのレスポンス試験に必要な、放射性ガスの放射能標準を維持している。現在のところ比較的容易な ^{85}Kr を用いた試験のみ実施しているが、同様に代表的な放射性希ガスである、 ^{41}Ar 及び ^{133}Xe を用いたレスポンス試験が出来るよう、標準器のエネルギー特性評価に取り組んでいる。

近畿大学原子炉等利用共同研究（平成31（令和元）年度）では、 ^{41}Ar を用いて通気式比例計数管を用いた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。この結果を受け令和2年度は、 ^{41}Ar を用いたレスポンス試験の再現性の確認及び ^{133}Xe を用いたレスポンス試験に取り組んだ。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。そして、京都大学複合原子力科学研究所の試験炉KURで生成したAr-41及びXe-133を用い通気式電離箱（大倉 I-4096 01/06）のレスポンスを試験した。

(12)核セキュリティのための中性子検出器開発

代表者:小泉 光生 (日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター)

[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、透過力が高く遮蔽が難しい高速中性子に注目し、これを検出することにより、核物質や中性子源の放出源を探知する検出器開発を開始した。高速中性子検出器としては、ガンマ線と中性子との発光減衰時間が異なることを利用して、波形から放射線の種類を区別する波形弁別 PSD(Pulse Shape Discrimination)ができる、プラスチックシンチレータ(EJ-276)を導入した。中性子を選択的に計数することができるため、環境ガンマ線のバックグラウンドを抑制した信号・ノイズ比(S/N)の高い測定により、中性子に高い感度のある測定が期待できる。近大炉においては、原子炉起動用 Pu-Be 中性子線源を用いて、製作した長尺の EJ-276 プラスチックシンチレータを用いた試験を行なった。検出器単体による中性子・ガンマ線弁別能力試験を行なった結果、EJ-276 により、環境ガンマ線の影響を抑えた中性子の測定が可能であることが確認できた。開発した長尺の検出器は、角度依存性を持つため、中性子線源の探知に利用できると考えられる。そこで、検出器の角度依存性を単体、及び、検出器 2 台とポリエチレンブロックとを組み合わせた体系で実験を行なった。中性子検出の角度依存性を評価した結果、中性子線源の探知に利用できる可能性を示すことができた。

(13)単結晶CVDダイヤモンド検出器によるホウ素中性子捕捉反応の反応率定量評価

代表者:小林 真 (核融合科学研究所)

[要約]

本共同研究では、単結晶 CVD ダイヤモンド検出器や Cs₂LiYCl₆:Ce with 7Li-enrichment (CLYC7)シンチレータ等の先進中性子検出器を UTR-KINKI の炉心に挿入し、ガンマ線などの放射線の存在下における熱中性子測定性能を評価した。

単結晶 CVD ダイヤモンド検出器は弾性散乱や炭素との核反応により高速中性子の検出が可能である。さらに、本研究では、ダイヤモンド表面にリチウム箔を設置することで、箔と熱中性子との核反応により発生する高エネルギー荷電粒子を直接測定し、熱中性子束の評価が可能である。一方、単結晶 CVD ダイヤモンド検出器はガンマ線への感度も有するため、波形弁別によりこの影響を除去することが重要である。そこで本計測では、高エネルギー荷電粒子入射では矩形のパルスが、ガンマ線入射では三

角形上のパルスが得られることを利用し、ガンマ線と高エネルギー荷電粒子に起因するパルスを弁別するプログラムを作成した。

炉出力 0.01, 0.1, 1W にて計測を行った際のパルスデータを波形弁別した結果、3つの出現頻度の高いパルスの領域があり、それぞれ、高エネルギー荷電粒子であるトリトン及びアルファ線と、ガンマ線に起因するパルスであると考えられた。トリトン、アルファ線に起因するパルスの計数は炉出力に比例して増加することが確認できた。

CLYC7 シンチレータの熱中性子応答について調査を行った。CLYC7 シンチレータは特に高速中性子の計測に着目し Li-7 が 99% 以上に濃縮されて製作されているが、Li-6 も僅かながら存在するため、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応により高エネルギー荷電粒子が発生する。CLYC7 シンチレータでの計測においてもガンマ線に起因するパルスと中性子に起因するパルスを波形弁別した。

ガンマ線に起因するパルスの領域とは別に、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ で発生する高エネルギー荷電粒子に起因するパルス領域が確認された。このピークの分解能は 7% であった。熱中性子の輸送及び CLYC7 シンチレータへの計数率を MCNP6 にて計算した結果、本測定結果と中性子輸送計算の結果が一致し、本波形弁別の妥当性が示された。