

## 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 30 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) PHITS 及び DCAIN-SP, DV-X $\alpha$  を用いた原子炉中性子場の MRI 造影剤 Gd-DTPA に対する中性子放射化メカニズムの基礎検討
- (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 次元ゲル線量計の基礎特性の検討
- (7) 実験施設における安全衛生・防災等の効果的な対応と対策に関する研究
- (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) 未臨界度測定実験のための予備実験

平成 30 年度は、原子炉の不具合により年度途中からの運転を見合わせたため、実際に実施された共同研究は、(1)、(2)、(3)、(5)、(6)、(7)、(12) 及び (13) の 8 課題である。

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：6 件
- ② 放射線照射効果：1 件
- ③ 放射線安全管理：1 件
- ④ 放射線教育：0 件

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)、(12)、(13)]
  - (1) PHITS 及び DCAIN-SP, DV-X $\alpha$  を用いた原子炉中性子場の MRI 造影剤 Gd-DTPA に対する中性子放射化メカニズムの基礎検討

新たな医学応用研究として MRI 造影剤に含有するガドリニウム (Gd) に焦点をあてている。ガドリニウム試料を原子炉及び Pu-Be 中性子源で照射・放射化させ、Ge 半導体検出器で測定した結果、ガドリニウム同位体の (n,  $\gamma$ ) 反応生成核種は Gd-159 と Gd-161 であった。その妥当性は PHITS と DCHAIN-sp により確認された。

#### (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

ヨウ素等を含有したシンチレータを用い、中性子入射によるシンチレータの自己放射化を利用した中性子検出方法の研究である。有機シンチレータにヨードベンゼンを添加し中性子場で照射実験を行った。その結果、I-128の半減期25分の成分が観測された。ヨードベンゼンは強力なクエンチャーであるため、観測されたI-128の波高分布は低波高側にシフトしていることが分かったが、自己放射化法に適した安価なシンチレータとなる可能性があることが示された。

#### (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

BNCT のための中性子と  $\gamma$  線の線量計測法の開発研究である。これまで中性子と  $\gamma$  線に感度を有する  $Al_2O_3:Cr$  と  $\gamma$  線にのみ感度を有する BeO の熱蛍光特性を用いた研究を進めてきたが、中性子線と  $\gamma$  線を弁別するには、中性子に対する感度がより高いことが望ましい。そこで、 $Al_2O_3:Cr$  と Cd 板状コンバーターを併用して、中性子に対する高感度化を試みた。今回の Pu-Be 中性子源を用いた実験からは、明らかな優位性は認められなかった。

#### (6) BNCT のための 3 次元ゲル線量計の基礎特性の検討

BNCT、粒子線治療や強度変調放射線治療等の 3 次元線量分布を直接測定できる線量計の開発研究である。この研究では、ゲル線量計のひとつである色素ゲル線量計開発のため、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 ( $I_3^-$  等) の複合体による発色を用いたゲル線量計の低エネルギー X 線による応答特性を調べた。その結果、150kV の X 線に対して、高い透明性と直線的な線量応答、および十分な線量感度を持つことが示された。

#### (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のセンサーとして半導体検出器を応用する研究である。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ている。結晶成長のため、新規原料としてトリメチルボロン (TMB) を用い、約  $2\mu m$  の B GaN 結晶を実現するに至った。得られた結晶から縦型 pin ダイオードを作製し、放射線検出特性評価を実施した結果、作製した B GaN 層全てが有感層として機能していることを確認した。また、原子炉による中性子照射実験により、中性子捕獲反応由来の検出ピークを得るに至った。

#### (13) 未臨界度測定実験のための予備実験

福島第一原子力発電所における燃料デブリや、原子炉の燃料シャッフリング時

に適用可能な未臨界度測定手法の開発研究である。

平成 30 年度共同利用研究では、近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) において提案手法による未臨界度測定を実施する予定であったが、原子炉運転を伴う実験を実施することができなかった。今回は、Pu-Be 中性子線源を用い、未臨界度測定実験の予備実験を実施した。①過渡変化状態を模擬した中性子計数率時系列データの測定、及び、②カリフォルニウム自発核分裂中性子源に由来した炉雑音測定を実施することで、未臨界度測定で必要となる測定データの取得が可能であることを確認した。

## 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

原子力発電所等で使用される制御系電気ケーブルポリエチレン材料の中性子照射損傷の研究である。中性子線が照射されたポリエチレンを中性子照射し、空間電荷測定を行った結果、10、30、50 kV/mm の印加電界においては、未照射試料および照射試料における蓄積電荷  $Q$  の違いは認められないことが分かった。

## ③ 放射線安全管理[ ( 7 ) ]

### ( 7 ) 実験施設における安全衛生・防災等の効果的な対応と対策に関する研究

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・検討する研究である。このため、以下の 4 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、につき情報交換と意見交換を実施した。近畿大学の他、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議論を行った。また、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、資料の一般公開に向けたプロセスを検討した。

## (1) PHITS 及び DCHAIN-SP, DV-X $\alpha$ を用いた原子炉中性子場の MRI 造影剤 Gd-DTPA に対する中性子放射化メカニズムの基礎検討

代表者：阪間 稔（徳島大学大学院医歯薬学研究部）

### [要約]

これまで、原子炉内部の中性子場を仮想空間に再現できる数値実験的な環境を整え、かつ本共同研究利用における中性子照射実験環境も整備されていることから、新たな医学応用研究への段階として MRI 造影剤に含有するガドリニウム(Gd)に焦点をあてた。本研究では、ガドリニウム試料に対する放射化特性を、箔放射化法による実測と、モンテカルロシミュレーション計算 (PHITS) による放射線輸送計算及び放射化量評価 (DCHAIN-sp) から系統的に調べた。今回の原子炉及び Pu-Be 中性子源の照射実験の結果、ガドリニウム同位体の (n,  $\gamma$ ) 反応によって生成される核種のうち、ゲルマニウム半導体検出器のガンマ線スペクトロメトリー解析で検出できたのは、Gd-159 と Gd-161 であり、その妥当性を粒子・放射線挙動解析モンテカルロシミュレーション計算の PHITS とその接続計算による DCHAIN-sp の放射化量評価計算によりそれらの存在を確認することができた。

## (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]

代表者の研究グループでは、ヨウ素等を含有したシンチレータに中性子が入射することによりシンチレータ自身が放射化して内部放射能により発光することに着目した中性子検出方法の研究を行っている。本年度は、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通常より多いヨードベンゼンを添加して、通常よりは弱い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い、基礎特性の調査を行った。液体シンチレータをガラスバイアルに封入した場合、ガラスに Na が含まれている為に壊変曲線に半減期15時間の成分が見られたが、それ以外は I-128 の半減期25分の成分のみが観測された。ヨードベンゼンは強力なクエンチャーであるため、液体シンチレータで観測された I-128 の波高分布は低波高側にかなりシフトしていた。一方、プラスチックシンチレータの場合には若干の波高の低下が見られた。今後、ヨードベンゼンの添加量を加減して感度を調整することにより、BNCT 場での自己放射化法に適した安価なシンチレータとなる可能性があることが示された。

### (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放射線科学域）

#### [要約]

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、がん細胞を選択的に標的化したホウ素薬剤と中性子との反応を利用した新たな放射線治療の一つである。患者の QOL を向上させる次世代がん治療法として大きな期待が寄せられている。特に、中性子と  $\gamma$  線を弁別して線量分布を得ることは、BNCT の投与線量の決定や有効性を評価するために不可欠で、治療装置の品質保証にも欠かすことができない。

代表者のグループは、これまでに中性子と  $\gamma$  線に感度を有する  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  と  $\gamma$  線にのみ感度を有する  $\text{BeO}$  の熱蛍光特性を用いた中性子・ $\gamma$  線弁別測定を行ってきた。 $^{27}\text{Al}$  の ( $n, \gamma$ ) で生成された  $^{28}\text{Al}$  が  $\beta^-$  壊変を伴うため、その  $\beta^-$  線のエネルギーのほぼ全てを  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  が吸収していることが示唆された。しかし、中性子線と  $\gamma$  線を弁別する際には、中性子に対する感度がより高いことが望ましく、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  を母材料とした熱蛍光体の中性子感度を向上させる課題が残された。

そこで、本申請では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  と Cd 板状コンバーターを併用して、中性子に対する高感度化を試みた。その結果、Pu-Be 中性子源では、Cd によって変換された中性子由来の  $\gamma$  線や  $\beta$  線に起因した熱蛍光量と、中性子場に混在していた  $\gamma$  線に起因した熱蛍光量との差が小さく、明らかな優位性は認められなかった。

### (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た。これまでの研究において、10、30、50 kV/mm の印加電界においては、未照射試料および照射試料における蓄積電荷  $Q$  の違いは認められないことが分かった。

## (6) BNCT のための 3 次元ゲル線量計の基礎特性の検討

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の低エネルギー X 線による応答特性に対するその組成の変化による影響を調べた。今回の結果から、架橋剤(グルタルアルデヒド, GTA)と架橋促進剤(グルコノデルタラクトン, GDL)を用いてゲル化(固化)した PVA-GTA-I ゲル線量計において  $[GTA] = 7 \text{ mM}$ 、 $[GDL] = 100 \text{ mM}$  において、150kV の X 線に対して、高い透明性と直線的な線量応答、および十分な線量感度を持つことが示された。

## (7) 実験施設における安全衛生・防災等の効果的な対応と対策に関する研究

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 30 年度は 4 回の共同研究の機会を通じ、主に 4 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、につき情報交換と意見交換を実施した。特に、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。また、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。

## (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BGaN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。基盤技術となる結晶成長においては、B有機金属原料であるトリエチルボロン(TEB)がアンモニアと気相反応を起こし結晶品質の劣化を起こすため、新規原料としてトリメチルボロン(TMB)を用いて結晶成長を試みた。TMBを用いた結晶成長では、気相反応が抑制されたことで高品質な結晶の作製を実現し、約 $2\mu\text{m}$ のBGaN結晶を実現するに至った。更に、得られた結晶を用いて縦型pinダイオードの作製を実現した。作製したpinダイオードを用いて放射線検出特性評価を実施した結果、 $\alpha$ 線エネルギースペクトル測定結果とシミュレーションによる解析により、作製した $2\mu\text{m}$ のBGaN層が全て有感層として機能していることを確認した。また、原子炉による中性子照射実験により、中性子捕獲反応由来の検出ピークを得るに至った。

## (13) 未臨界度測定実験のための予備実験

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。研究代表者は、東京電力 福島第一原子力発電所における燃料デブリ取出し作業時や、停止中原子炉の燃料シャッフリング時などの状況を想定し、①体系の詳細情報が不明あるいは不確かさが大きい場合や、②反応度だけでなく一点炉動特性パラメータや外部中性子源強度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ついて、研究開発に取り組んでいる。

平成30年度共同利用研究では、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)において提案手法による未臨界度測定を実施する予定であったが、原子炉運転を伴う実験を実施することができ

なかった。そこで、本施設で利用可能な中性子線源を有効活用することで、実際の未臨界度測定実験に向けた予備実験を実施した。①過渡変化状態を模擬した中性子計数率時系列データの測定、および②カリフォルニウム自発核分裂中性子源に由来した炉雑音測定を実施することで、未臨界度測定で必要となる測定データの取得が可能であることを確認することができた。今後の計画として、UTR-KINKI を活用した未臨界過渡変化実験および停止状態の炉雑音測定を実施する予定である。