

付録 1

原子炉等利用に関する共同研究報告書

(「平成 27 年度 近畿大学原子炉等利用共同研究経過報告書、
大阪大学大学院工学研究科編集・発行」より一部転載)

近畿大学原子炉は、昭和 55 年度より大阪大学を窓口とし、国公立大学の共同研究施設として全国の大学研究者の利用に提供されており、これまで研究・教育に大きな成果を挙げてきましたが、これらの成果は大阪大学大学院工学研究科により「近畿大学原子炉等利用共同研究経過報告書」として毎年発行されています。近大原研の Activity を更に広く知って頂くため、ここに付録として上記経過報告書の一部を転載します。

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 西嶋 茂宏

平成 27 年度に実施された物理系課題を総括いたします。実施された課題は 8 課題であり、汚染土壌の除染の検討から核燃料物質管理の問題まで幅広い研究がなされました。依然として 27 年度も原子炉が動いていないため、基本的には原子炉を使った研究は実施できませんでした。しかし先生方の努力により、原子炉を使用しなくても実施できる、あるいは原子炉を使用することを想定した予備実験との位置づけで研究を実施頂きました。早急な原子炉の再稼働を希望して止みません。

さて、27 年度の実施課題です。具体的には以下の課題が遂行されました。

- 1-1 山本淳治 ほか 2 名 凍結融解法による洗浄土壌の放射線測定
- 1-2 阪間 稔 ほか 6 名 粒子・重イオン輸送計算コード PHITS による小規模医療用加速器施設での漏洩中性子線・発生二次粒子イメージング評価を目的とした原子炉及び X 線照射装置における中性子線及び二次粒子のモンテカルロ・シミュレーション解析
- 1-3 納富昭弘 ほか 6 名 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
- 1-4 眞正浄光 ほか 10 名 熱蛍光体を利用した中性子イメージングデバイスの開発
- 1-5 吉田茂生 ほか 3 名 近畿大学原子炉起動用中性子源利用による炉室内空間線量率分布測定に基づく放射線教育に関する研究
- 1-6 光本真一 ほか 3 名 中性子照射高分子材料の高電界電気特性に関する研究
- 1-7 林慎一郎 ほか 2 名 BNCT のための 3 次元ゲル線量計の基礎特性の検討
- 1-8 飯本武志 ほか 13 名 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

詳細は報告書をご覧ください。こととして、研究分野を大きく分けると、①検出法・機器の開発、②管理とそれに伴う測定、③土壌除染、④照射効果となります。最も多い分野は①でした。

①検出法・機器の開発 (1-2、1-3、1-4、1-7)

(1-2) は前立腺がんの治療に用いられる I-125 シード永久挿入密封小線源の放射能強度自動測定のための装置の開発の一環で、放射能強度をシングルスリットコリメータ方式で測定する技術である。この最適化のための光子輸送シミュレーションを実施した。

(1-3) は X 線治療装置周辺の光核反応による中性子の評価の研究である。CsI シンチレータを測定空間に配置し放射化させる。照射後の発光は I-128 および Cs-134m からの発光の 2 成分であり、CCD で読み出す。それぞれの断面積のエネルギー依存性が異なることから、少ないフィルター条件で中性子線量当量を評価できる可能性があることを見出している。

(1-4) は、中性子用イメージングデバイスとしての熱蛍光 (TL) 線量計の開発である。Al₂O₃:Cr と BeO:Na の TL を比較することにより、前者からの TL の 48% が中性子由来であることが明らかになり、中性子検出への可能性を見出した。

(1-7) は、ゲル線量計の X 線を使用した特性評価である。照射された部分が照射方向に依存せず、線量に応じて反応する。今回は色素ゲルで発色させ、線量は吸光度で求める。良い吸収線量との直線性が得られ、線量率依存性も小さいことが明らかになった。今後は中性子への応用を検討していく。

②管理とそれに伴う測定 (1-5、1-8)

(1-5) は東海大学工学部原子力工学科の教育の一環としての炉心本体周辺のガンマ線スペクトルの測定を実施した。

(1-8) は少量核燃料物質の使用と管理に関する現状調査である。染色用の少量核燃料物質使用と、分析・研究・教育目的に使用されている現状が明らかにされた。また、教育訓練の重要性も明らかになり、教材開発等が求められている。

③土壌除染 (1-1)

(1-1) は Cs 汚染土壌から Cs を洗浄する試みである。土壌が凍結する際、土中の水分とともに汚染物質が凍結部の界面へと移動する現象を利用する。実験では Cs の代わりに K を利用した検討を行っている。

④照射効果 (1-6)

(1-6) ポリエチレンフィルムの空間電荷特性の中性子照射効果の影響に関する研究である。照射によって絶縁材料中に空間電荷がたまると、電界が歪み、絶縁強度が低下する可能性がある。このことは電力ケーブルにおいては絶縁性能を低下させる恐れがあることになり、この現象が研究の背景にある。結果、中性子照射によって正極性の空間電荷が蓄積されることが明らかになった。

(1) 凍結融解法による洗浄土壌の放射線測定

代表者：山本 淳治（摂南大学理工学部）

〔要約〕

福島第一原子力発電所では建屋解体作業など今後の場内作業で大量の放射能汚染土壌の処分が必要となる。このため、放射性物質を含んだ土壌の分離と減量化の対策が求められる。摂南大学理工学部都市環境工学科の環境地盤研究室では、凍結融解法を用いた汚染土壌の浄化と減量化を提案している。現在は放射性セシウムを含んでいない土壌を使用して基礎実験（Cold run）を行っている。この土壌にはセシウムと化学的な性質が似ているカリウムが多く含まれており、このカリウムを取り除くために洗浄液や洗浄手順の違いによる洗浄効果の変化を調べている。そこで、浄化実験に用いられた一部の試料の提供を受けて、洗浄した土壌中の放射性カリウムの定量を試みた。

洗浄していない試料に含まれる ^{40}K の放射能濃度に対して、洗浄の効果は僅かではあるが確認できた。しかし、凍結融解の効果および洗浄液の違いによる洗浄効果は、測定の誤差範囲内にあって明らかにできなかった。現在行われている「Cold run」の試料の測定では、 ^{40}K からのガンマ線測定の精度をかなり向上させる必要がある結果となった。

(2) 粒子・重イオン輸送計算コード PHITS による小規模医療用加速器施設での漏洩中性子線・発生二次粒子イメージング評価を目的とした原子炉及び X 線照射装置における中性子線及び二次粒子のモンテカルロ・シミュレーション解析

代表者：阪間 稔（徳島大学大学院医歯薬学研究部）

〔要約〕

本研究室では、これまで医用機器関連開発の研究である「ヨウ素シード品質管理測定システム」を行ってきた。従来の開発では、予算の都合上、実用化への応用が先行し、開発過程で最適化が十分に行われてきたとは言えない。そこで、この装置における重要機構・機能である高精密移動検出器型シングルスリットコリメータ方式の最適化に関する評価実験・検証のために、粒子・放射線輸送挙動解析のモンテカルロ・シミュレーションである PHITS を用いた。さらに、その実験的な検証の一つに、その機構における主要な加工技術である極小幅スリットと、そのスリット加工が施されているプレート材の種類や形状の最適化を調べるために、エックス線照射装置とイメージングプレートを組み合わせて画像化することで視覚的な側面からデータ検証を行ってきた。本実験では、シミュレーション解析と実測の両局面から同時に検証を行うことができ、その結果、一時的な考察を与えることができた。すなわち、その考察は、同一形状の極小幅スリット形状であるなら、プレート材をアルミニウム材に変更することで、ヨウ素シード I-125 の低いガンマ線エネルギー（平均エネルギー：28.4 keV）による光子のスリット濾過特性が向上していることが実測できた。現在、PHITS 計算による数値的な検証を行っている。これにより、これまで懸念されていた BS-2000 の出力データ値の統計変動に伴う不安定性を改善する可能性が示唆される。また、同じくヨウ素シード 1 個あたりの放射線強度プロ

ファイル形状を、より精密な体系記述した PHITS 計算により、正確に再現していることを確認することができた。

(3) 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 X 線治療装置周りの微弱な光中性子の評価を目的として、シンチレータの自己放射化による測定法を開発している。昨年までに、CsI を放射化法のターゲットと同時に放射線の検出器として用いることにより、高感度で中性子を測定する手法を確立した。H27 年度は、それをもとに中性子線量を算出する方法を検討した。異なるフィルター条件を組み合わせ、治療用 10MV ライナックの光中性子場の線量当量評価を行った。アイソセンターから 30cm の位置で中性子線量当量は 0.14~0.19 mSv/Gy と評価された。また、板状シンチレータからの発光を CCD カメラで読み出すことにより、中性子強度分布測定に応用する試みを開始した。平均輝度値の時間変化を調べたところ半減期が 25 分および 174 分で減衰する 2 成分でフィッティングができた。これらはそれぞれ、中性子により CsI 中に生じた I-128 からの β 線と、Cs-134m の核異性体転移に伴う 139keV の γ 線および内部転換電子に対応していた。つまり、得られた画像の輝度値の時間変化をフィッティングすることにより、半減期の情報をもとにして、I-128 および Cs-134m の成分を分離して抽出可能であることが見出された。

(4) 熱蛍光体を利用した中性子イメージングデバイスの開発

代表者：眞正 浄光（首都大学東京大学院人間健康科学研究科放射線科学域）

〔要約〕

画像上で確認できない微小ながん病巣も周囲の正常細胞を損傷せずに破壊できるホウ素中性子補足療法 (BNCT) は、生活の質 (QOL) の高いがん治療法として大いに期待されている。BNCT が次世代治療法として発展するためには、がん細胞を選択的に効率よく標的化できるホウ素薬剤の開発と同時に、薬剤効果や線量分布の検証法の開発が不可欠である。

我々は、様々な形状に成形が可能で、かつ目的の元素を比較的自由に添加できる板状型の熱蛍光 (TL スラブ) 線量計の開発に取り組んでいる。本研究は、TL 特性の優れた Al_2O_3 板を利用し、BNCT の中性子束分布を簡易的に取得できる TL スラブ線量計を開発することを目的としている。

平成 27 年度の実験では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ アルミナセラミックス TL スラブ及び $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr},\text{B}$ アルミナセラミックス TL スラブに Pu-Be 中性子源を照射し、TL 特性を調査した。また、 $\text{BeO}:\text{Na}$ 石英ガラス管封入 TLD を用いて $n-\gamma$ 混在場での γ 線の線量測定を行い、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ アルミナセラミックス TL スラブの中性子源照射に対する TL 成分を解析した。その結果、全 TL に対して約 42 %が γ 線に、残る 48 %の TL は中性子に起因する成分であることがわかった。

(5) 近畿大学原子炉起動用中性子源利用による炉室内空間線量率分布測定に基づく放射線教育に関する研究

代表者: 吉田 茂生 (東海大学工学部)

〔要約〕

毎年継続的な原子炉運転を長期にわたって実施の後、2年以上も停止の現状において、継続的運転時と完全停止時との γ 線スペクトル分析において、どのような変化を生じているのか無いのかを確認した。

高純度 Ge 半導体検出器 (近大炉所有) を用いた γ 線波高分布の測定は、原子炉本体周辺における定期的に放射線管理のために空間線量率を測定する炉心本体周辺の3方向 (起動用中性子源の貯蔵された南側を除く、西・北・東側) の本体表面より約 30cm 離れた各測定点にて 3,600 秒ずつの測定を行い、波高分析を行った。

原子炉稼働時から2年以上が経過した現在、原子炉本体周辺の起動用中性子源 (保管容器) からの影響のない北・西側の波高分布から検出された γ 線ピークのすべては、自然放射線由来によるものであり、また、稼働時停止後 (2010 年度) と長期原子炉停止時 (2015 年度) の波高分布を比較しても、 γ 線ピークには全く相違なく、特に核分裂性生成物等による放射性核種からの γ 線も検出されなかった。

(6) 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。今年度の研究において、次の結果が得られた。15kV 印加後に Pu-Be を用いた中性子照射試料に形成されている正極性の空間電荷分布の大きさは、未照射試料に形成される正極性の空間電荷分布よりも大きくなる傾向が確認された。

(7) 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、色素として Leuco Malachite Green (LMG) および Leuco Crystal Violet (LCV) を用いたゲル線量計の低エネルギーX線に対する応答特性と線量率依存性、および増感剤の種類による影響を調べた。今回の結果から、100kV 前後の X 線に対して、線量率依存性は小さいことが示された。またその感度は色素や増感剤の種類によって大きく変化することが確認された。

(8) 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〕

平成27年度は、少量核燃料物質の使用と管理に関する現状を、核燃料物質管理者の視点で情報共有し、精査し、今後の現場管理のあり方について大学管理関係者で議論した。

調査対象33事業者のうち17事業者が電子顕微鏡用試料の染色に少量核燃料物質を使用しており、7事業者が分析・研究・教育目的に使用していた。一般作業区域で少量核燃料物質を取り扱っている事業者は24事業者のうち16事業者、また、約半数の事業者が少量核燃料物質の使用場所において特別な安全対策や表示を行っている。24事業者のうち18事業者が施設内で保管廃棄を行っている。少量核燃料物質の使用と管理に関する教育訓練が重要で、共通教材の開発、教育モジュールの開発が求められている。

原子炉化学・放射化学に関する研究

研究総括責任者 大阪大学大学院工学研究科
教授 山中 伸介

原子炉化学・放射化学に関する研究では、平成27年度は下記の1件の研究が採択、実施された。

(1) 原子炉起動用中性子源を活用した中性子放射化分析手法の開発

一般に壊変 γ 線のエネルギーは4MeV以下が主であるのに対し、即発 γ 線のエネルギーは4~10MeV程度のより高エネルギーな γ 線を放出することが明らかとなっている。また、自然放射線（主にウラン・トリウム系列核種から放出される γ 線）の γ 線エネルギーは3MeV以下であり、壊変 γ 線の影響も少なく、高い反応断面積を有する核種（元素）の特定には有効であると考えられる。この手法を原子炉に比べて格段に低い熱中性子フラックスとなるRI中性子減（Pu+Be）を用い、その分析の可能性並びに有効性について検討を行った。

今回の実験の結果、即発 γ 線放出反応断面積の高い、塩化物や鉄等において分析の可能性が示唆された。ただし、今回は検出器周辺の遮蔽を全く行わずに測定を行ったため、自然放射線及び周辺物質からの即発 γ 線寄与が高く、バックグラウンドとして対象 γ 線ピークの検出を妨害している可能性もあり、検出器周辺の遮蔽を行うことで、十分に減衰させた条件での測定が必要と考えている。

以上のように、原子炉化学・放射化学に関する研究は、中性子放射化法による非破壊分析の考古学分野への応用という点から、重要な研究であり、今後のさらなる発展を期待する。

(1) 原子炉起動用中性子源を活用した中性子放射化分析手法の開発

代表者：吉田 茂生（東海大学工学部）

〔要約〕

一般に壊変 γ 線のエネルギーは 4MeV 以下が主であるのに対し、即発 γ 線のエネルギーは 4~10MeV 程度のより高エネルギーな γ 線を放出することが明らかとなっている。また、自然放射線（主にウラン・トリウム系列核種から放出される γ 線）の γ 線エネルギーは 3MeV 以下であり、壊変 γ 線よりも高いエネルギーを放出する即発 γ 線の分析では、妨害核種からの放出 γ 線の影響も少なく、高い反応断面積を有する核種（元素）の特定には有効であると考ええる。この手法を原子炉に比べて格段に低い熱中性子フラックスとなる RI 中性子源（Pu+Be）を用い、その分析の可能性並びに有効性について検討を行った。

今回の実験の結果、即発 γ 線放出反応断面積の高い、塩化物や鉄等において分析の可能性が示唆された。ただし、今回は検出部周辺の遮蔽を全く行わずに測定を行ったため、自然放射線及び周辺物質からの即発 γ 線寄与が高く、バックグラウンドとして対象 γ 線ピークの検出を妨害している可能性もあり、検出器周辺の遮蔽を行うことで、十分に減衰させた条件での測定が必要と考えている。

生物の放射線影響に関する研究

研究総括責任者 大阪大学大学院工学研究科
教授 山中 伸介

生物の放射線影響に関する研究では、平成 27 年度は下記の 2 件の研究が採択、実施された。

- (1) ショウジョウバエおよびマウスを用いた放射線誘発傷害ならびに傷害を修飾する因子に関する研究
- (2) 中性子線による DNA 損傷とその修復の分子機構

(1)

X 線の生物影響とその防御について、今年度は主にマウスを用いた研究を継続した。X 線曝露による末梢血小核誘導を抑制する天然成分の検索を行っている。先の研究において、サルナシ果汁にその効果を見出していたが、曝露後の投与によっても効果があるかどうかを調べた。その結果、サルナシ果汁ばかりでなく、メタノール 50%抽出画分にも同様の効果があり、さらに、ポリフェノール成分を効率よく吸着する H-20 樹脂吸着画分に強い小核抑制効果が見られた。この効果は、曝露後持続的に投与する必要はなく、1 時間後に単回投与するだけで 24、48 時間後にも効果が見られた。したがって、サルナシ果汁中には X 線曝露により誘導される小核を曝露後投与によって抑制できる成分が含まれていることが明らかになった。今後、この成分の同定と抑制機構について検討する予定である。

(2)

本研究の目的は、DNA 修復遺伝子欠損細胞、DNA 修復酵素阻害剤等を用いて、中性子線の DNA 損傷の特徴とその DNA 修復機構を明らかにすることである。DNA 損傷の中で最も重篤とされる DNA 二重鎖切断(DSB)は、主として非相同末端結合(NHEJ)と相同組換えによって修復される。これまでの研究では、DNA ligase IV とともに NHEJ の最終段階での DNA 末端同士の結合反応に関わる XRCC4、および DSB のセンサーである DNA-PK による XRCC4 のリン酸化を介した制御に注目し、生存率、突然変異率に注目した解析を行ってきた。本年度は、これらの検討に加え、タンパク質の発現量や翻訳後修飾(リン酸化)状態を検討するために、X 線照射による予備的検討を行った。また、NHEJ における最初の因子である Ku の役割を探るため、新たに Ku70 欠損マウス由来の胎児線維芽細胞を用いた検討を行った。現在のところ、X 線照射後の XRCC4 Ser320 のリン酸化の検出には至っていないが、細胞の運搬、培養やウェスタン・ブロッティングの条件の至適化を行いたいと考えている。

以上のように、生物の放射線影響に関する研究は、放射線をはじめ種々の環境中の細胞傷害因子が生物に及ぼす影響とそれら細胞傷害作用に対する予防・防護作用を明らかにするため、また、中性子線による DNA 損傷の特徴とその DNA 修復機構を明らかにするために重要な研究であり、今後のさらなる発展を期待する。

(1) ショウジョウバエおよびマウスを用いた放射線誘発傷害 ならびに傷害を修飾する因子に関する研究

代表者：根岸 友恵（岡山大学大学院医歯薬学総合研究科）

〔要約〕

X線の影響とその防御について、今年度は主にマウスを用いた研究を継続した。X線曝露による末梢血小核誘導を抑制する天然成分の検索を行っている。先の研究において、サルナシ果汁にその効果を見出していたが、曝露後の投与によっても効果があるかどうかを調べた。その結果、サルナシ果汁ばかりでなく、メタノール50%抽出画分にも同様の効果があり、さらに、ポリフェノール成分を効率よく吸着するH-20樹脂吸着画分に強い小核抑制効果が見られた。この効果は、曝露後持続的に投与する必要は無く、1時間後に単回投与するだけで24、48時間後にも効果が見られた。したがって、サルナシ果汁中にはX線曝露により誘導される小核を曝露後投与によって抑制できる成分が含まれていることが明らかになった。今後、この成分の同定と抑制機構について検討する予定である。

(2) 中性子線によるDNA損傷とその修復の分子機構

代表者：松本 義久（東京工業大学原子炉工学研究所）

〔要約〕

本研究の目的は、DNA修復遺伝子欠損細胞、DNA修復酵素阻害剤等を用いて、中性子線のDNA損傷の特徴とそのDNA修復機構を明らかにすることである。DNA損傷の中で最も重篤とされるDNA二重鎖切断(DSB)は、主として非相同末端結合(NHEJ)と相同組換えによって修復される。これまでの研究では、DNA ligase IVとともにNHEJの最終段階でのDNA末端同士の結合反応に関わるXRCC4、およびDSBのセンサーであるDNA-PKによるXRCC4のリン酸化を介した制御に注目し、生存率、突然変異率に注目した解析を行ってきた。本年度は、これらの検討に加え、タンパク質の発現量や翻訳後修飾(リン酸化)状態を検討するために、X線照射による予備的検討を行った。また、NHEJにおける最初の因子であるKuの役割を探るため、新たにKu70欠損マウス由来の胎児線維芽細胞を用いた検討を行った。現在のところ、X線照射後のXRCC4 Ser320のリン酸化の検出には至っていないが、細胞の運搬、培養やウェスタン・ブロッティングの条件の至適化を行いたいと考えている。