

## 付録 1

### 原子炉等利用に関する共同研究報告書

(「平成 22 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 堀池 寛

原子炉物理・原子炉応用に関する分野では、平成 22 年度は下記の研究提案が採択され、実施された。

- (1) 研究炉を用いた小型指向性中性子検出器特性評価に関する研究
- (2) 高感度中性子ラジオグラフィの実用化に関する研究(XIII)
- (3) インターネットによる原子炉遠隔実験および実習のための技術開発
- (4) 制御棒効果と中性子束分布の精密測定
- (5) 未臨界体系での中性子束分布時間変動測定実験
- (6) 原子炉中性子の精密計測システムの開発及び原子炉を用いた実験実習
- (7) マイクロドシメトリー手法を用いた UTR-KINKI 中性子場の線質の評価
- (8) 傾斜線式位置読み取り法による中性子位置検出器の開発
- (9) 宇宙線によるカルシウム化合物の熱蛍光特性の研究
- (10) IC の放射線廃棄物管理への適用に向けた光子、中性子に対する耐性評価に関する研究
- (11) 中性子線量測定器の応答特性試験
- (12) 医療用加速器からの漏洩中性子検出を目的とした中性子イメージング法の開発

この分野では、検出器の改良・開発に関する研究が 5 件、原子炉の特性評価に関する研究が 3 件、ラジオグラフィや中性子イメージング法に関する研究が 2 件、遠隔実験および実習に関する技術開発および廃棄物管理への IC の適用に関する研究が 2 件実施されている。

検出器の改良・開発に関する研究は、今後の進展が期待される中性子科学の発展の上に非常に重要な分野であり、研究課題数も最多である。これらの研究の中で、(1) では、これまで測定が困難であった中性子束の方向分布を取得できるよう小型検出器ヘッドにスリット開口部を設けることで熱中性子の方向分布情報の取得が出来た事が報告されている。また(6)では、中性子のエネルギー分布に関しては、エネルギー情報を反跳陽子の位置情報に変換することで測定する方法が考案され、簡便に中性子スペクトル情報が求められることが報告されている。さらに(8)では、検出器内のどの場所での検出であるかを評価しうる中性子位置検出器の開発が進められている。また(9)では、新たな熱蛍光線量計素子の開発として、感度の向上に関する研究開発が進められており、(11)では有機シンチレータの中性子線とガンマ線の弁別性能に関する研究開発が進められている。以上のように、検出器の改良・開発に関する研究は多岐にわたっており、今後さらに実用性を考慮した検討も進められていくことが期待される。

原子炉の特性評価に関する研究では、近畿大学原子炉の低出力炉である特徴を活用

しながら、制御棒効果の再現性確認実験を文系学生の見学・実習プログラムとして実施した研究(4)、未臨界状態における制御棒移動による添加反応度をリアルタイムで、かつ高精度で評価可能な測定手法の開発(5)および生物照射場としての特性評価のために UTR-KINKI 中性子場の線質評価(7)が実施されている。

ラジオグラフィや中性子イメージング法に関する研究では、冷却型 CCD 撮像素子の実用上の最大の課題であった白色ノイズの原因解明に関する研究(2)が行われており、その原因がシリコン照射欠陥である可能性が高いことが示されている。

また近年重視される人材育成を踏まえ、原子力に対する初学者を参加者に含め、実習・実験を兼ねて実施されている研究開発[(6), (7)]や、実験への参加を容易にし、さらに実験教育効果の向上を狙った研究開発(3)が行われており、研究開発の中でも教育用原子炉としての役割が活かされている。

以上のように、原子炉物理・原子炉応用に関する研究は 12 件あり、検出器の改良・開発、原子炉の特性評価方法、原子炉および中性子利用に関する研究について実施されている。これらは、照射場の特性を把握することが必要な他分野の研究にも密接に関連しており、今後の更なる発展を期待するものであります。

## (1) 研究炉を用いた小型指向性中性子検出器特性評価に関する研究

代表者：瓜谷 章（名古屋大学大学院工学研究科）

〔要約〕

現在、原子炉の基本設計、性能予測では計算機シミュレーションが非常に重要な役割を果たしている。しかしながら計算機シミュレーションのみでは信頼性を担保することは出来ず、実験と計算機シミュレーションの結果を比較し、その妥当性を評価する必要がある。計算では中性子スペクトルや方向分布等の各種微分量を取り扱うことも可能となってきたが、実験でこれらの微分量を実測することは容易ではない。そこで本研究では、小型指向性中性子検出器の開発を進めている。開発を進めた検出器は、Li含有シンチレータの周囲をCdあるいはGd製のスリット型熱中性子コリメータで覆った小型検出器ヘッドからのシンチレーション光をライトガイドを介して光電子増倍管で検出する構成となっている。スリット開口部の方向から入射する熱中性子にのみ有感で、検出器全体を回転させることで熱中性子の方向分布を得る。検出器ヘッド部の構造を改良し、シンチレーション光収集効率を改善することで、中性子とガンマ線の弁別性能を向上することができ、熱中性子の方向分布を取得することに成功した。

## (2) 高感度中性子ラジオグラフィの実用化に関する研究 (XIII)

代表者：谷口 良一（大阪府立大学放射線研究センター）

〔要約〕

高感度中性子画像装置に用いられる冷却型 CCD 撮像素子には、特徴的な白点ノイズがあり、これが実用上の最大の問題であった。このノイズには、画像の同じ場所に現れる固定パターンノイズ(FPN) と、ランダムに現れるランダムノイズがあった。どちらも外見は同じである。FPN は放射線損傷、ランダムノイズは放射線誘起ノイズの一種と考えられるが、その起源は不明であった。本研究では、CCD に中性子とガンマ線を照射し、ノイズとの関係を調べた。その結果、ランダムノイズは、どちらの放射線照射でも増大し、その量は線量率に比例することが明らかとなった。一方、FPN は微弱な中性子照射でも増大するのに対して、5mGy までのガンマ線照射では増加しなかった。増加した FPN の温度変化、活性化エネルギーから判断すると、これらの FPN は検出部でのシリコン照射欠陥が原因である可能性が高い。

### (3) インターネットによる原子炉遠隔実験および実習のための技術開発

代表者：山本 淳治（摂南大学理工学部）

〔要約〕

大学生を対象にして近畿大学炉で実施されている原子炉実習をインターネットを介して遠隔で実施するために必要なしくみと機器を開発してきた。目的は、原子炉施設における実習では限られた実習時間で学習するために選択的にならざるを得ない学習内容を遠隔実習で補完することである。今年度は東海大学工学部原子力工学科において実施した遠隔実習について報告した。近畿大学本部キャンパス（大阪府東大阪市）にある原子炉棟の制御室と東海大学湘南キャンパス（神奈川県平塚市）に設けた教室との間で遠隔実習を実施した。原子炉出力，ペリオド，制御棒位置，運転操作中の映像などのデータをほぼリアルタイムで遠隔の教室に送信して，授業時間2コマを使った授業で原子炉の臨界と制御棒校正実験を行った。

授業後に行った学生アンケートでは，原子炉実習をすでに経験した学生の評価は高く，実習で学んだ内容の定着化には効果的であったと言える。また，このような学習方法によって，近畿大学炉の実習テキストに記載された実験課題のいくつかを学生が時間を掛けて系統的に学習できる機会を与えることができる。

### (4) 制御棒効果と中性子束分布の精密測定

代表者：北村 晃（神戸大学大学院海事科学研究科）

〔要約〕

制御棒効果の一側面として臨界時制御棒位置の再現性と、金箔放射化反応率分布の精密測定を行った。別途、文系学生 67 名が参加した見学・実習プログラム、経済産業省 2010 年度プログラム「原子力総合技術プログラム」における運転時に得た臨界時制御棒位置のデータを加えた上、過去のものと比較して再現性を検討した。2010 年度のデータは、04 年度を除く 06 年度以前の平均値から大きくかけ離れた 04・07・08 年度に近い値を示した。

放射化反応率分布測定においては、過年度の一時期顕著であった特定の位置における“くぼみ”や昨年度みられた NW-MS における異常に大きな放射化反応率と特異な分布形状も見られず、統計誤差の範囲内で上下対称性が実現されていることと南北非対称性の傾向が確認された。

## (5) 未臨界体系での中性子束分布時間変動測定実験

代表者：北田 孝典（大阪大学大学院工学研究科）

〔要約〕

臨界体系における反応度添加量をリアルタイムで評価する方法をもとに、未臨界体系での手法を開発し、開発した手法の妥当性検証を実施した。

基準となる未臨界度を評価するために、臨界体系での測定を実施し、約 $-0.5\% \Delta k/k$ を得た後、未臨界体系における幾つかの反応度添加方法に対する反応度評価結果について検討した。その結果、開発した手法はほぼ妥当な結果を与えることが確認でき、手法の有効性および妥当性が確認できた。しかしながら、Shim Rodを80%位置から落下させるような反応度添加率が大きい場合には、開発した手法でも精度よく反応度評価出来ているとは言い難い結果となっている。これは、反応度評価に用いている式の導出にあたり、大きな反応度添加率の場合に現れると考えられる高次モードが考慮していない一点炉近似を用いていることが原因ではないかと考えている。

今後、高次モードの影響も加味するため、中性子検出器位置の違いによる反応度評価結果への影響の測定なども通じて、一点炉近似あるいは基本モードのみを扱うことによる影響について、さらに検討行う予定である。

## (6) 原子炉中性子の精密計測システムの開発及び原子炉を用いた実験実習

代表者：池田 伸夫（九州大学大学院工学研究院）

〔要約〕

近年、医学・工学分野において中性子の利用が拡大しており、中性子の被ばくによる生物学的効果を精度よく評価することが求められている。中性子被ばくによる生物学的効果は中性子のエネルギーに大きく依存するため、評価にあたっては対象となる中性子場のエネルギースペクトルを測定することが必要となるが、一般に中性子のエネルギースペクトル測定は簡単でない。そこで本研究では、三角柱形のアクリルコンバータを用いて、反跳陽子の位置分布をイメージングプレートで測定することにより中性子のエネルギー情報を位置情報に変換し、入射中性子のエネルギースペクトルを簡便に測定する方法を考案した。原子炉からの中性子を照射した実験の結果、アンフォールディング法を応用することにより、イメージングプレートで測定された反跳陽子の位置分布情報から入射中性子のエネルギースペクトルを簡便に求めることが分かった。また、九州大学、徳島大学の学生を対象に原子炉運転実習を行なった。平成22年度は17年目にあたり、原子炉運転の実習、放射化法による炉内中性子の絶対測定、漏洩 $\gamma$ 線の測定、中性子ラジオグラフィ等の内容で実習を行なった。

## (7) マイクロドシメトリー手法を用いた UTR-KINK I 中性子場の線質の評価

代表者：遠藤 暁（広島大学大学院工学研究科）

〔要約〕

LET カウンターは組織等価な器壁をもつガス比例計数管に組織等価ガスを封じ込めた検出器である。ガス圧を変化させることで生体組織中に付与されるエネルギーを模擬的に測定する。このマイクロドシメトリーで得られる  $y$  分布は、ごく小さい (1 ~ 数  $\mu\text{m}$ ) 生体組織に付与されるエネルギー分布を通して、生物効果比見積もることも可能である。本研究を行うことで UTR-KINK I の生物照射場としての特性を明らかにすることができる。組織等価型ガス比例計数管 (TEPC) を用いて UTR-KINK I のマイクロドシメトリースペクトルの測定を行うことが目的である。

これまで行ってきた TEPC の測定では、エネルギー測定下限が、数  $\text{keV}/\mu\text{m}$  程度と高かったため、外挿して議論してきた。これを克服するため、本年度は、低  $y$  領域に重点を置いた測定を試験した。2 インチ TEPC を用いて中性子線及び  $\gamma$  線のマイクロドシメトリースペクトルを炉外で測定した。これまで、低  $y$  側の測定限界が数  $\text{keV}/\mu\text{m}$  であったが、 $0.2\text{keV}/\mu\text{m}$  まで下げることが出来た。今後、更にノイズの低減を行い、 $\gamma$  線領域のマイクロドシメトリースペクトルを測定する。

## (8) 傾斜線式位置読み取り法による中性子位置検出器の開発

代表者：前多 信博（福井工業高等専門学校電気電子工学科）

〔要約〕

平成 15 年度の「近畿大学原子炉等利用共同研究」で、陽極芯線に沿って 2 本の位置読取線を張った比例計数管 (TSW-PSPC) が、中性子位置検出器として作動する事が分った（前多, 伊藤, 堀口, 「傾斜線式位置読取法による中性子位置検出の可能性」 RADIO-ISOTOPES, Vol.53, 611-615 (2004)）。その後、平成 21 年度までの共同研究でも検出器の有効性を明らかにできた。（前多, 伊藤, 堀口, 「傾斜線式読取法による中性子位置検出器の位置分解能」 *ibid.* Vol.54, 359-363 (2005)）。（前多, 伊藤, 堀口, 芳原, 「傾斜線式位置読取法による熱中性子の空間分布測定」 *ibid.* Vol.56, 431-435 (2007)）。

平成 22 年度には、実験データを解析するためのソフトを新開発し、平成 20~22 年度の炉内計測データを再検討した。これにより、TSW-PSPC の幾つかの特性が明らかになった（伊藤, 安岡, 堀口, 芳原, 前多, 「近大原子炉内に設置した中性子用傾斜線式位置感応型比例計数管の性能調査」日本物理学会「2010 年秋季大会」講演番号 23pRH-7）。

また、中性子ラジオグラフィ装置内での設置も可能な中性子測定用比例計数管を試作し、動作試験を終えた。中性子ラジオグラフィ装置内では比例計数管の設置や構造変更が容易で、今後、実験の進展が期待できる。

## (9) 宇宙線によるカルシウム化合物の熱蛍光特性の研究

代表者：福田 和悟（大阪産業大学人間環境学部）

〔要約〕

宇宙線に対応する TLD(熱蛍光線量計)素子として  $Tb_4O_7$ 、 $Gd_2O_3$ 、 $Pr_2O_3$ 、 $Ce_2O_3$  等を活性体として添加した  $CaF_2:Tb,Ce$  焼結体、 $CaF_2:Tb,Gd,Bi$  焼結体、 $CaF_2:Tb,Gd,Sm$  焼結体、 $CaF_2:Pr,Mn$  単結晶を作成し、原子炉内放射線および  $^{60}Co$  の  $\gamma$  線照射に対する熱蛍光(TL)特性をそれぞれ調べ報告している。今回、前回の測定に引き続き  $CaF_2:Tb,Ce$  焼結体、 $CaF_2:Tb,Gd,Bi$  焼結体の TLD 特性を調べると共に、 $CaF_2:Pr,Mn$  単結晶についても原子炉内放射線（熱中性子 +  $\gamma$  線）照射と  $^{60}Co$  の  $\gamma$  線照射に対する熱蛍光特性をそれぞれ調べた結果、 $Tb_4O_7$ 、 $Gd_2O_3$ 、 $Ce_2O_3$  等の活性体を混合攪拌する時間を従来よりも長くして作成した  $CaF_2:Tb,Ce$  焼結体、 $CaF_2:Tb,Gd,Bi$  焼結体については、感度において改善が見られる一方、ばらつきが見られることから、今後さらに作成方法を修正する必要がある。 $CaF_2:Pr,Mn$  単結晶は  $\gamma$  線対応の TLD として実際に使用できるものと思われる。

## (10) IC の放射性廃棄物管理への適用に向けた光子、中性子に対する耐性評価に関する研究

代表者：小佐古 敏荘（東京大学大学院工学系研究科）

〔要約〕

IC タグを用いた情報整理は、情報を非接触で瞬時に読み取ることができる、従来のバーコード管理より多くの情報を記憶・管理することができる等の利点がある。したがって、放射性廃棄物を効率よく、的確に管理するのに有効であることが期待される。しかしながら、IC タグは複数の素子からなる超小型の電子回路であるため、放射性廃棄物に使用するには、放射線に対してどの部分が、どの程度影響を受けるかといった耐放射線性を把握する必要がある。これまでの研究において、IC タグに放射線が照射されることによって、IC 内のデータに影響が生じないまでも、IC 読み取り時の感度に影響が生じていることが経験的にわかっていた。実際に IC を放射性廃棄物の管理に使用している間に読み取り感度が変化すると、管理業務に支障をきたすことが考えられる。そこで、本研究では放射線を照射した前後において IC タグとリーダー/ライタ間の読み取り距離にどのような影響が生じるか詳細を把握したいと考えた。

近畿大学原子炉での照射実験により、IC タグの光子・中性子照射に読み取り可能距離の変化はまだ明確に判断できないが、数 Gy の照射線量を超えると変化し始めることが分かった。今後は引き続き照射を継続し、読み取り可能距離の変化を観察して行く。



## (11) 中性子線量測定器の応答特性試験

代表者：山西 弘城（自然科学研究機構核融合科学研究所）

〔要約〕

作業環境における中性子線量の測定器を開発中である。昨年度までは、TLD を検出素子として、減速材と吸収材を組み合わせた測定系について応答特性試験を行ってきた。今年度は、2つの異なるサイズの有機シンチレータについて、中性子線とガンマ線の弁別性能を試験した。2つのサイズは、 $\Phi 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  と、 $\Phi 3 \text{ inch} \times 3 \text{ inch}$  である。検出器からの出力パルスの立ち上がり時間が、中性子線とガンマ線とで異なることを利用して、中性子線によるパルスとガンマ線によるパルスとを弁別する。原子炉出力を 0.1 W から 1 W まで、段階的に上昇させて、データを得た結果、中性子束密度の上昇に伴って、中性子線とガンマ線の弁別性能が劣化していくこと、弁別性能はより薄型であるシンチレータの方が良好であることがわかった。

## (12) 医療用加速器からの漏洩中性子検出を目的とした中性子イメージング法の開発

代表者：佐瀬 卓也（徳島大学アイソトープ総合センター）

〔要約〕

医療用加速器に対する恒常的かつ簡便な放射線管理測定手法開発の一環として、中性子放射化イメージング法によって漏洩中性子線を計測、管理する手法を検討している。本研究の目的は、徳島大学病院の医療用サイクロトロンならびに近畿大学原子力研究所の原子炉（近大炉）の中性子場を用いて模擬漏洩中性子線場を作成し、中性子放射化イメージング法によって漏洩中性子線が正しく測定が可能であるか検討を行うことである。

自己遮蔽型 PET サイクロトロンの遮へい体内部の中性子線、および近大炉における模擬漏洩中性子線を圧延金板とイメージングプレートを用いて測定し、画像化によって定性的に評価した。サイクロトロンにおいては事故遮蔽体内部における遮蔽材ごとの中性子の遮蔽効果を視覚的に測定することに成功し、近大炉においては炉頂中央部の中性子線分布が色調情報と強度分布グラフによって画像化された。約 2mm 幅のポリエチレン空隙を通過した中性子線も本法によって明瞭に画像化することが出来た。本法は医療用加速器の遮へい体の健全性（中性子線漏洩の有無）を、視覚的に判定し得る手法として有用であると考えられる。

## 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 22 年度は下記の 4 件の研究が採択、実施された。

- (1) 食品中のナトリウムと塩素の放射化分析
- (2) 気体状放射性同位元素の測定に関する研究(3)
- (3) 古代エジプト遺物中微量元素の中性子放射化法による分析
- (4) 中性子および $\gamma$ 線照射によるセリウム含有ガラスの物性変化測定

(1)

健康に及ぼす食事の影響については、量と質の両面から重要視され、過剰のナトリウム (Na) 摂取は、血圧を上昇させる要因の一つとして健康管理上注意がはらわれている。そこで、極低出力原子炉を用いて献立および食品中の Na と塩素 (Cl) の同時測定を行い、Na から換算した食塩量と Cl から換算した食塩量を求め、各種食品中の値について比較検討している。本年度は、子供が中心に食している、また、補助食品として食されている焼き菓子のクッキー、ビスケットおよびスナック菓子中の食塩量について検討し、以下の結果を得た。

全食品ともに Na と Cl が検出されたがその量は微量であった。また、前回までの報告と同様に Na 量から算定した食塩量の方が Cl 量から算定した食塩量よりも高い値を得る傾向が認められた。このことから食品添加物 (アミノ酸等) 使用が認められる。また、これらの食品における一日に摂取すると考えられる食塩量は、微量である。

(2)

本研究では、トリチウムの化学形弁別連続モニタリングの際に誤差の要因となったラドンを利用して、原子炉建屋内の施設管理に有用な情報が得られることを期待してラドンの濃度の計測を行った。

その結果、炉室におけるラドン濃度、温度および相対湿度の測定結果は、いずれの期間においても、ラドン濃度は低く、それらの変動は温度および相対湿度との相関性も認められなかった。炉室はつねに空調制御された外気で換気されているため、炉室の壁より放出されるラドン濃度よりも外気中のラドン濃度の影響を受けたものと推定される。

他方、 $\alpha$ 線計測装置を炉室から炉室に隣接する測定室に移動し、同様な実験を行った結果、ラドン濃度は 34 日目から 39 日目の間においてが著しく増大した。また、その間に温度は低下し、相対湿度は増大した。このラドン濃度の増大は、測定室専用の空調設備を停止したことに連動しており、37 日目における諸特性の急激な変化も空調設備の稼働および停止に連動していた。しかし、ラドン濃度の増大の原因について検討を行ったが、結論には至らなかった。

39 日目には空調設備の稼働に伴ってラドン濃度は一旦バックグラウンドに低下したが、その後僅かずつではあるが再び上昇する傾向を示している。この現象についても来年度も引き続き計測を行うことにより、原因究明を試みる予定である。

(3)

近大炉のような低中性子フラックスの条件において、古代エジプト遺物（ファイアンス）や砂等（主原料）の主元素・微量元素等の構成元素の特定を行い、含有元素の分布状態からそれらの時代性・地域性の考古学的特徴を示唆できる指標を見出すことの可能性について見当することを目的としている。今回は、ナイル川流域、及びナイル川西方での出土遺物の近辺でサンプリングされた砂のサンプルについて、鉛遮蔽体付 Hp-Ge 検出器による  $\gamma$  線スペクトル分析システムを用いて、定性・定量的に分析を行った。

ナイル川流域の砂サンプルは、ナイル川西方の砂漠地帯の砂サンプルに比べて、Mn や Na を比較的多く含んだ砂が多く、放射化量（ピークカウント率）が全体的に高くなっている。また、Al の含有量についてはいずれのエリアにおいても、おおむね一定量をもった砂となっていることがわかった。

これらの間が有意な関係にあるのかについて、さらに多くの砂サンプルの分析を通じ、統計的に実証していく必要がある。

(4)

遷移金属元素や希土類元素を含有された酸化物セラミックスやガラス、フッ化物およびフッ化物ガラスは、アップコンバージョン、非線形光学効果、蛍光発光をはじめとする光学特性や、磁氣的性質のため多くの研究が進んでいる。セリウムは 3 価と 4 価の 2 種類の価数を取り、3 価のセリウムを含有させたガラスは  $\alpha$  線、紫外線を吸収するガラスもしくは中性子ディレクターとして利用されるなど広く用いられている。Ce<sup>3+</sup>イオンは無色、Ce<sup>4+</sup>イオンは一般に橙赤色あるいは黄色である。2 種の価数が混在したガラスでは、異なるエネルギー準位をもつセリウムイオン同士でエネルギー遷移が起き、茶色を示す。平成 21 年度研究において、セリウムを含む酸化フッ化ガラスの合成とその物性と価数制御の可能性について検討したところ、中性子線照射による価数の変化はほとんど観測できなかった。

そこで、本年度は X 線照射による色変化を確認している表面フッ素化二酸化チタンを用い、中性子線照射による色変化を確認し、中性子照射後の経過時間と色との間に相関性があることを示した。しかし、より正確な相関性の検討にはより顕著な色変化を誘導する必要があり、表面状態解析を含めた発色・消色機構の解明が必用であることがわかった。

以上のように、原子炉化学・放射化学に関する研究は 4 件あるが、研究（1）は放射化分析法の食品科学への応用と正確なデータの蓄積という観点から、研究（2）はラドンによる環境影響を正確に評価するために動態を把握しようとする点、研究（3）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、研究（4）は、新規の光学材料であるガラスとして期待されている点から、すべて重要な研究である。これらの今後のさらなる発展を期待する。

## (1) 食品中のナトリウムと塩素の放射化分析

代表者：山本 忠志（兵庫教育大学大学院学校教育研究科）

〔要約〕

健康に及ぼす食事の影響については量と質の両面から重要視され、過剰のナトリウム（Na）摂取は血圧を上昇させる因子の一つとして健康管理上注意が払われている。そこで、我々は極低出力原子炉を用いて食品中の Na と塩素（Cl）の同時測定を行い、Na から換算した食塩量と Cl から換算した食塩量を求め、各種食品中の値について比較検討している。今回は子供が中心に食している、また、補助食品として食されている焼き菓子類のクッキー、ビスケットおよびスナック菓子中の食塩量について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 全食品ともに Na と Cl が検出されたが、その量は微量であった。
- 2) これまでの報告と同様に、Na 量から算定した食塩量の方が Cl 量から算定した食塩量よりも高い値を得る傾向が認められたが、その数値は小さいものであった。このことから食品添加物（アミノ酸等）使用が認められるもののわずかな量であることが推測される。
- 3) これらの食品における一日に摂取すると考えられる食塩量は、微量である。

## (2) 気体状放射性同位元素の測定に関する研究 (3)

代表者：太田 雅壽（新潟大学工学部）

〔要約〕

本研究では、トリチウムの化学形弁別連続モニタリングの際に誤差の要因となったラドンを利用して、原子炉建屋内の施設管理に有用な情報が得られることを期待してラドン濃度の計測を行った。

その結果、炉室におけるラドン濃度、温度および相対湿度の測定結果は、いずれの期間においても、ラドン濃度は低く、それらの変動は温度および相対湿度との相関性も認められなかった。炉室はつねに空調制御された外気で換気されているため、炉室の壁より放出されるラドン濃度よりも外気中のラドン濃度の影響を受けたものと推定される。

他方、 $\alpha$ 線計測装置を炉室から炉室に隣接する測定室に移動し、同様な実験を行った結果、ラドン濃度は34日目から39日目の間においてが著しく増大した。また、その間に温度は低下し、相対湿度は増大した。さらに、37日目には短時間において、ラドン濃度は減少し、温度は増大し、相対湿度は減少した。このラドン濃度の増大は、測定室専用の空調設備を停止したことに連動しており、37日目における諸特性の急激な変化も空調設備の稼働および停止に連動していた。しかし、ラドン濃度の増大の原因について、検討を行ったが、結論には至らなかった。

39日目には空調設備の稼働に伴ってラドン濃度は一旦バックグラウンドに低下したが、その後僅かづつではあるが再び上昇する傾向を示している。この現象についても来年度も引き続き計測を行うことにより原因究明を試みる予定である。

### (3) 古代エジプト遺物中微量元素の中性子放射化法による分析

代表者：吉田 茂生（東海大学工学部）

〔要約〕

本研究は近大炉のような低中性子フラックスの条件において、古代エジプト遺物（ファイアンス）や砂等（主原料）の主元素・微量元素等の構成元素の特定を行い、含有元素の分布状態からそれらの時代性・地域性の考古学的特徴を示唆できる指標を見出すことの可能性について検討することを目的としている。今回分析した砂サンプルにおいて、大きく分けて採取場所の異なる2地域となるナイル川流域とその西方の砂漠地帯との砂成分について、Mn, Na, Al の含有率に地域的存在の傾向性を確認した。今後サンプル数を増加しつつ、その傾向の確認を行っていく。

### (4) 中性子および $\gamma$ 線照射によるセリウム含有ガラスの物性変化測定

代表者：米沢 晋（福井大学大学院工学研究科）

〔要約〕

遷移金属元素や希土類元素を含有させた酸化物セラミックスやガラス、フッ化物およびフッ化物ガラスは、アップコンバージョン、非線形光学効果、蛍光発光をはじめとする光学特性や、磁氣的性質のため多くの研究が進んでいる。セリウムは3価と4価の2種類の価数を取り、3価のセリウムを含有させたガラスは $\alpha$ 線、紫外線を吸収するガラスもしくは中性子ディレクターとして利用されるなど広く用いられている。Ce<sup>3+</sup>イオンは無色、Ce<sup>4+</sup>イオンは一般に橙赤色あるいは黄色である。2種の価数が混在したガラスでは、異なるエネルギー準位をもつセリウムイオン同士でエネルギー遷移が起き、茶色を示す。平成21年度研究において、セリウムを含む酸化フッ化物ガラスの合成とその物性と価数制御の可能性について検討したところ、中性子線照射による価数の変化はほとんど観測できなかった。

そこで本年度は、X線照射による色変化を確認している表面フッ素化二酸化チタンを用い、中性子線照射に伴う色変化を確認し、中性子照射後の経過時間と色との間に相関性があることを示した。しかし、より正確な相関性の検討にはより顕著な色変化を誘導する必要があるとあり、表面状態解析を含めた発色・消色機構の解明が必要であることがわかった。

## 生物の放射線影響に関する研究

研究総括責任者 広島大学大学院理学研究科

准教授 谷口研至

平成 22 年度の生物の放射線に関する研究は、昨年度と同様計 8 件の課題で実施された。生物系の課題は次のとおりである。

- 3-1 米澤義彦ほか 3 名 速中性子による植物の染色体突然変異の研究
- 3-2 谷口研至ほか 3 名 速中性子による植物培養細胞の突然変異研究
- 3-3 吉田茂生ほか 3 名 低線量放射線照射による細胞損傷・修復機構と刺激効果に関する基礎研究
- 3-4 高井明德ほか 2 名 中性子線による魚類細胞における小核誘発に関する研究
- 3-5 根岸友恵ほか 2 名 ショウジョウバエ体細胞の放射線誘発傷害における酸化傷害に関する研究
- 3-6 河井一明ほか 4 名 放射線被曝による生体過酸化物質生成とその防除
- 3-7 野村大成ほか 7 名 核分裂放射能によるマウス、ヒトの臓器・組織障害の発生機構
- 3-8 松本義久ほか 2 名 中性子線による DNA 損傷とその修復の分子機構

これらの生物系の研究課題は、(1) 放射線の生物作用の解明、および (2) 放射線の生物モニター系の開発に大別されるが、以下に平成 22 年度の研究成果の概要を示す。

### (1) 放射線の生物作用の解明

谷口ら(研究計画 3-2)は、今年度からキク属植物は同質四倍数体の分配機構を解明するために、二倍体キクタニギクに放射線を照射して突然変異を誘導し、Aa 遺伝子型を作製し、それを人為的に四倍体化し AAaa 遺伝子型の作製を開始した。今回、手始めとして実生苗に予備的に X 線を照射し、突然変異誘導条件の検討を行った。その結果、「斑入り」と「非対称性本葉第一葉」のキメラ変異が高頻度に生じたことから、ヘテロ接合体の優性遺伝子に突然変異を生じ、劣性遺伝子のみの発現が起こり、キメラを生じた可能性が示唆された。

吉田ら(研究計画 3-3)は、低線量照射による有益な効果もしくは刺激的な効果をもたらすとした「放射線ホルミシス効果」の存在が問われている。今回、これまでに生長促進効果の見られた中性子照射実験での照射条件で、熱中性子と  $\gamma$  線混合場である原子炉内での照射実験を行い、高速中性子照射と同様の促進効果が見られるかどうかを確認したが、放射線ホルミシス効果の指標となる「効果比」には有意な差は見出すことができなかった。しかし、今回の実験で高速・高エネルギー中性子等によるし

きい値反応がその効果に影響しているのではないかとする仮説の立証を高めるものとなった。

根岸ら（研究計画 3-5）は、X線の生物影響について、尿酸欠損株 *y v ma-1* が、X線照射に対して野生株より致死感受性が高いことを確かめ、放射線傷害には尿酸により消去される活性酸素種の関与が示唆された。そこで変異検出マーカを持つ尿酸欠損株を作成し、X線感受性が親株 *y v ma-1* と同等であることを確認している。今年度は変異原性検出感度について調べた。その結果、同線量の X 線照射において、尿酸欠損株では野生株に比べて約 3 倍高い変異が観察され、尿酸欠損は X 線傷害を促進することが示された。さらにミスマッチ修復欠損株を用いた変異原性試験において、X線誘発変異は野生株より低くなることを支持する結果を得、ショウジョウバエにおいて X 線傷害はミスマッチ修復の対象となる傷害であることが示唆された。

河井ら（研究計画 3-6）は、生体の酸化ストレスの指標として広く用いられている DNA 中の 8-ヒドロキシデオキシグアノシン (8-OH-dG) は、近年、しばしば用いられている ELISA 法では 8-OH-dG 以外の成分が交叉反応し、正しい値が得られないことが明らかとなってきたことから、精度の高い分析方法の確立を試みた。本研究では、精度の高い分析法として HPLC-ECD 法を用い、低線量 X 線照射マウスの尿中 8-OH-dG を測定し、照射線量依存的であることを確かめた。

野村ら（研究計画 3-7）は、ヒト臓器・組織の形態と機能を継代維持できる超重度複合免疫不全マウス (super-SCID マウス) を用い、ヒト甲状腺組織への原子炉放射線および  $^{137}\text{Cs}$  ガンマ線による形態、機能および遺伝子発現変化への影響を調べた。中性子線の RBE 値は、機能は $\sim 6.5$ 、遺伝子発現は 4.5 であった。ヨウ素 131、トリチウム水の内部被ばくについても取りまとめを始めた。N5 雄親マウスへ原子炉放射線の精原細胞期照射を行い、F<sub>1</sub> マウスのマイクロサテライト突然変異が対照群に比べほぼ直線的に増加し、変異はメンデル遺伝し、白血病も有意に増加することを確かめた。宇宙実験にいつでも対応できる体制を整えた。

松本ら（研究計画 3-8）は、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を目的に、近大原子炉放射線照射によって生じた DNA 損傷の修復について調べてきた。XRCC4 の調節に DNA-PK と ATM の両方が相補的に関わっており、X 線に比べて修復が難しいか、修復しても間違いを起こしやすいことが示唆されている。本年は、突然変異検出系（内在性の XRCC4 を欠損するマウス白血病由来 M10 細胞）を用いて、XRCC4 遺伝子あるいはコントロールベクターを導入した細胞を用い、6-thioguanine 耐性を指標として HPRT 遺伝子における原子炉照射による突然変異を検出した。その結果、M10-XRCC4 細胞では照射後に突然変異頻度の上昇が認められ、M10-CMV 細胞では認められなかったことから、突然変異の上昇は XRCC4 遺伝子が関与する NHEJ による DNA 二重鎖切断修復の誤りによって生じることが示唆された。

## (2) 放射線の生物モニター系の開発

米澤ら（研究計画 3-1）は、これまで染色体突然変異又は遺伝子突然変異を可視的に測定するための研究を行ってきた。本年度は単子葉植物のツユクサ科ヌママムラサキツユクサの挿し穂に、原子炉放射線を照射して、その生存率及び花器の形態異常について調べた。その結果、原子炉放射線照射線量の増加に対応して、生存率の低下が認められたが、これが有意であるかについては検討が必要である。しかし、草丈については、1.2 Gy 以上の照射によって、ヌママムラサキツユクサにおいては、放射線による影響が現れると推察された。また、0.4 Gy 照射群では生存した 27 個体中 10 個体において開花が観察されたが、花器異常は認められなかった。

高井ら（研究計画 3-4）は、メダカの腎臓細胞の小核出現に対する特性を明らかにするために、X 線の全身照射を行った個体について、線量及び時間依存特性を分析した。X 線照射後の経過時間と誘発された小核頻度の関係は線量に関わらず 24 時間にピークをもつ二相性を示し、小核の頻度と線量の関係は直線的であることを確かめた。



## (1) 速中性子による植物の染色体突然変異の研究

代表者：米澤 義彦（鳴門教育大学大学院学校教育研究科）

〔要約〕

平成 22 年度は、前年度に引き続いて、染色体突然変異又は遺伝子突然変異を可視的に測定するための研究が行われた。

単子葉植物のツユクサ科ヌママムラサキツユクサ *Tradescantia paludosa* の挿し穂に、原子炉放射線 (0.4~2.0 Gy) を照射して、4 ヶ月後にその生存率及び花器の形態異常について調べた。その結果、照射線量の増加に対応して補正生存率（照射群の生存率を対照群の生存率で補正したもの）の低下が認められたが、これが有意であるかについては検討が必要である。しかし、今年度新たに測定した草丈（植物体の高さ）については、0.4 Gy 照射群では対照群とほとんど差が認められなかったが、1.2 及び 2.0Gy 照射群では、対照群に比べて、有意に成長が遅れていた。したがって、原子炉放射線 1.2 Gy 以上の照射によって、ヌママムラサキツユクサにおいては、放射線による影響が現れると推察される。また、0.4 Gy 照射群では生存した 27 個体中 10 個体において開花が観察されたが、花器異常が認められた個体は確認できなかった。

## (2) 速中性子による植物培養細胞の突然変異研究

代表者：谷口 研至（広島大学大学院理学研究科）

〔要約〕

キク属植物は同質倍数体のゲノム分化を明らかにしていく上で重要なモデルとなる可能性をもっている。そのために、我々はまず二倍体レベルでキクタニギクを用いたモデル実験植物の作製を進めている。しかし現在まで、分子レベルでの種間のゲノム比較や遺伝学的研究についてはほとんどなされておらず、連鎖群も全く作成されていない。そこで形態および DNA レベルで交配による新規形質の分離を収集している。特に、播種後数週間以内に解析できる形質についても多くの変異が分離している。実際には劣性条件で発現せずヘテロ接合体として存在している変異はさらに多くあると考えられる。以上の点から、ヘテロ接合体への放射線照射により、1 ポイントの突然変異を起こし、キメラ状態で劣性形質を発現させ、このキメラ突然変異体の子孫をとることにより、劣性ホモの変異個体を分離できるのではないかと考えた。そこで、その手始めとして野生種子（瘦果）より選抜された劣性変異形質（アルビノと第一本葉の針状葉）の子孫分離解析を行い、さらに予備的に突然変異誘導条件の検討を行った。

この予備的な実験を通して、三つの重要な結果が得られた。

1. キク属植物は自家不和合性の高い植物であるが、キクタニギクの AEV2 の系統において自殖系統が得られた。今後のキク研究の重要な系統となるものである。
2. 「アルビノ」と「針状本葉第一葉」の 2 形質がそれぞれ核ゲノム上の 1 遺伝子座の劣性形質であることが確かめられた。
3. X 線照射により「斑入り」と「非対称性本葉第一葉」のキメラ変異が高頻度に生じたことから、ヘテロ接合体の優性遺伝子に突然変異を生じ、劣性遺伝子のみの発現が起り、キメラを生じた可能性が示唆された。次に、今回得られたキメラ変異体の子孫から劣性ホモ個体を得ることができかどうかを確かめる必要がある。

### (3) 低線量放射線照射による細胞損傷・修復機構と刺激効果に関する基礎研究

代表者：吉田 茂生（東海大学工学部）

〔要約〕

低線量照射による有益な効果もしくは刺激的な効果をもたらすとした「放射線ホルミシス効果」の存在が問われ、数多くの実証研究、発現メカニズムの解明に関する研究が行われているが、再現性等にて十分な結果を示すことができていない。今回、これまでに生長促進効果の見られた 14MeV 中性子照射実験での照射条件（線量・線量率）にて、原子炉内での照射実験（熱中性子・ $\gamma$ 線混合場）を行い、高速中性子照射と同様の促進効果が見られるかどうかを確認した。残念ながら、放射線ホルミシス効果の指標となる「効果比」には有意な差は見出すことができなかった。しかしながら、これによって高速・高エネルギー中性子等によるしきい値反応がその効果に影響しているのではないかとする仮説の立証を高めるものとなった。

### (4) 中性子線による魚類細胞における小核誘発に関する研究

代表者：高井 明德（大阪信愛女学院短期大学）

〔要約〕

本研究は、さらに腎臓細胞の小核出現に対する特性を明らかにするために、X 線の全身照射を行った個体について、線量及び時間依存特性を分析した。X 線照射後の経過時間と誘発された小核頻度の関係は線量に関わらず 24 h にピークがある二相性であった。線量と誘発された小核頻度の関係は直線的で、MNCs の頻度 ( $F$ ) と線量 ( $D$ ) の関係は次の式で示された。 $F=0.2+0.78D$  (0.2 は対照群の小核出現頻度 (%))

## (5) ショウジョウバエ体細胞の放射線誘発傷害における酸化傷害に関する研究

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線の生物影響についての昨年度までの実験において、尿酸欠損株 *y v ma-1* が、X線照射に対して野生株より致死感受性が高いことが確かめられ、放射線傷害には尿酸により消去される活性酸素種の関与が示唆された。昨年度は変異検出マーカータを持つ尿酸欠損株を作成し、そのX線感受性が親株 *y v ma-1* と同等であることを確認したので、今年度は変異原性検出感度について調べた。その結果、同線量のX線照射において、尿酸欠損株では野生株に比べて約3倍高い変異が観察された。したがって、尿酸欠損はX線傷害を促進することが示された。さらに昨年度得られたミスマッチ修復欠損株を用いた変異原性試験において、X線誘発変異は野生株より低くなること結果を支持する結果を得、ショウジョウバエにおいてX線傷害はミスマッチ修復の対象となる傷害であることが示唆された。

## (6) 放射線被曝による生体過酸化物質生成とその防除

代表者：河井 一明（産業医科大学産業生態科学研究所）

〔要約〕

DNA 中 8-ヒドロキシデオキシグアノシン(8-OH-dG)は、生体の酸化ストレスの指標として広く用いられている。しかし、不正確な測定結果をもたらす測定法が混在することによって、結果の判断・評価を複雑にしている。近年、しばしば用いられている ELISA 法において、目的の 8-OH-dG 以外の成分が交叉反応し、正しい値が得られないことが明らかとなってきた。酸化ストレスは、放射線被曝影響の一つとして重視されており、精度の高い分析方法の確立が被曝影響の評価・応用に不可欠といえる。本研究では、精度の高い分析法として HPLC-ECD 法を用い、低線量X線照射マウスの尿中 8-OH-dG を、照射線量依存的に検出した。

## (7) 核分裂放射能によるマウス、ヒトの臓器・組織障害の発生機構

代表者：野村 大成（大阪大学大学院医学系研究科、医薬基盤研究所）

〔要約〕

ヒト臓器・組織の形態と機能を数年にわたる継代維持を可能にした超重度複合免疫不全マウス（super-SCID マウス）を用い、ヒト甲状腺組織への原子炉放射線および  $^{137}\text{Cs}$  ガンマ線による形態、機能および遺伝子発現変化への影響をまとめた。中性子線の RBE 値は、機能は  $\sim 6.5$ 、遺伝子発現は  $4.5$  であった。ヨウ素 131、トリチウム水の内部被ばくについても取りまとめを始めた。

N5 雄親マウスへの原子炉放射線（中性子  $0.2\text{Gy} + \gamma$  線  $0.2\text{Gy}/\text{時間}$ ）、 $0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.8$ 、 $1.2$  Gy 精原細胞期照射により、 $F_1$  マウスのマイクロサテライト突然変異が対照群に比べほぼ直線的に増加し、突然変異率は、 $3.3 \times 10^{-2}/\text{Gy}$  であり、 $^{60}\text{Co}$  ガンマ線と比較し、原子炉中性子線の RBE は約  $16$  になった。変異はメンデル遺伝し、白血病も有意に増加した。遺伝子発現の異常も子孫マウスに見られた。

いずれの課題でも、宇宙実験にいつでも対応できる体制を整えた。

（文科省基盤研究 A、厚労省科研費、基盤研野村プロジェクトによる。）

## (8) 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、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。これまでの結果から、近大原子炉照射場で生じた DNA 損傷の修復における XRCC4 の調節に DNA-PK と ATM の両方が相補的に関わっていること、更に、原子炉でできた DNA 損傷は X 線でできたものに比べて DNA-PK、ATM、XRCC4 の連携による修復が難しい、あるいは修復しても間違いを起こしやすいことが示唆された。本年は、突然変異検出系を用いて、この可能性について検討した。方法として、内在性の XRCC4 を欠損するマウス白血病由来 M10 細胞に、XRCC4 遺伝子あるいはコントロールベクターを導入した細胞 (M10-XRCC4 および M10-CMV) 細胞を用い、6-thioguanine 耐性を指標として HPRT 遺伝子における突然変異を検出した。その結果、M10-XRCC4 細胞では照射後に突然変異頻度の上昇が認められたが、M10-CMV 細胞では認められなかった。この結果から、原子炉照射による突然変異の上昇は XRCC4 遺伝子が関与する NHEJ による DNA 二重鎖切断修復の誤りによって生じることが示唆された。