

(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レベルでの中性子束密度及び線量評価（統計精度の向上）

徳島大学大学院医歯薬学研究部 大谷怜（現, JAEA），浅山瑞喜，阪間稔

核融合科学研究所 佐瀬卓也

近畿大学原子力研究所 若林源一郎，稲垣昌代

1 緒言

2011 年，ICRP の提言では，確定的影響における組織反応の声明で，計画被ばく状況下にある職業被ばくのうち，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。」⁽¹⁾ ことが報告されている。この科学的な根拠は，最近の疫学調査等の結果を考慮し，従前の白内障のしきい線量，8 Gy がより低い，0.5 Gy であることによるものである。この事項は，ICRP Publication 118⁽¹⁾ に詳細に解説されている。この事由には，疫学的知見の不確定性があり，しきい線量に対して慢性被ばく（医療用リニアックでの分割照射と関連する分割・蔓延被ばくに相当）と急性被ばくを同じような仮定で評価しているなど，多くの問題点を抱えている。さらに加えて，ICRU が定義する「実用量」では，水晶体（3 mm）の深さにおける吸収線量に線質係数 $Q(L)$ を乗ずることにより算出しているが，特に中性子の場合，白内障に対して同様な考え方による過程が適切であるかなどの検討要素を含んでいる。

今年度の共同利用実験では，近畿大学原子力研究所の原子炉中性子場を用いて，漢陽大学の C.H. Kim and C. Choi らが開発した四面体構造メッシュ化人体ファントム⁽²⁾の一般標準成人男性・女性ファントムデータ（MRCPS_AM.obj と MRCPS_AF.obj）を，UV レジン造形方式の 3D プリンタに読み込んで造形後，原子炉照射孔に配置できるよう独自スケール製作のファントムとし，そのファントム体型上にある水晶体へ極微小スケール（数 mm オーダー）の金箔を配置させることで，原子炉中性子照射実験に供することにした。この中性子照射実験で放射化した極微小スケールの金箔を回収後，ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリ解析を行い， $^{197}\text{Au}(\text{n}, \gamma)$ 反応の生成核種である ^{198}Au の生成量評価から，その各々のファントム上における水晶体位置での中性子束密度を導出し評価する。

2 実験

2.1 使用機器等

- 漢陽大学の C.H. Kim, C. Choi らが開発した四面体構造メッシュ化人体ファントム Adult Mesh-type Reference Computational Phantoms (Adult-MRCPs)^(2, 3) であり，C. Choi との Private communication で，このファントム群で最も一般的な直立姿勢の成人男性・女性のファントムデータ：MRCPS_AM.obj (98.7 MB) と MRCPS_AF.obj (103.4 MB)（図 1 を参照。）の CG アニメーション系ジオメトリファイルデータの提供が許諾された。このデータを 3D-CAD ソフトウェアの Rhinoceros 3D（Robert McNeel & Associates 社）を使用して，3D プリンタでの一般的なポリゴンメッシュファイル形式 (.stl) にデータ変換した後，上述の 3D プリンタで出力した。

- UV レジン造形方式の 3D プリンタ：ELEGOO 社製 Mars 3 Pro, 6.66 インチ ウルトラ 4K モノクロ LCD スクリーン・印刷サイズ 143×89.6×175 mm (図 2 を参照).
- UV レジン：ANYCUBIC 社製 透明緑 適応波長 約 405 nm, 1 kg ボトル. 使用時は約 200 mL をスクリーンレイへ供給した.
- 金 (Au) 箔 約 1.5 ×1.5 cm² 直方形角 複数枚, 100 μm 厚さ (ニラコ製, AU-173328, 純度 99.5%).
- 従前の徳島大学医学部保健学科設置の高純度ゲルマニウム半導体 (HPGe) 検出器：(旧 キャンベラ社製 端窓同軸型 GC-1018, 相対効率 10% Ge 結晶サイズが直径 48.0 mm, 長さ 29.0 mm, 検出面材質 5 mm 厚さのアルミニウム), Special u-style cryostat per attached sketch .
- HPGe 検出器のデータ取得・解析の全てを統括したエミュレーションガンマ線スペクトロメトリソフトウェア Gamma Explorer ver.1.6.5 (ミリオンキャンベラ社製).
- マルチチャンネルアナライザー APTEC Gamma-Fast 4k チャンネルでデータ取得した.

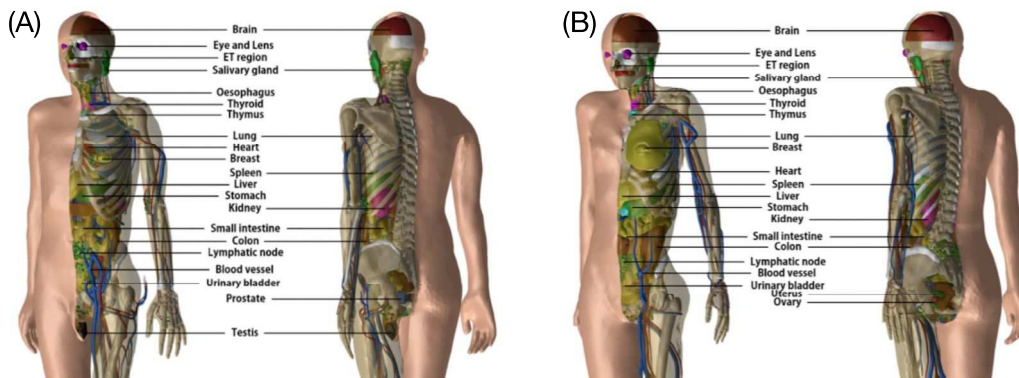


図 1 漢陽大学の C.H. Kim, C. Choi らが開発した四面体構造メッシュ化人体ファントム Adult Mesh-type Reference Computational Phantoms (Adult-MRCPs) ; (A) 一般標準の成人男性, (B) 一般標準の成人女性.

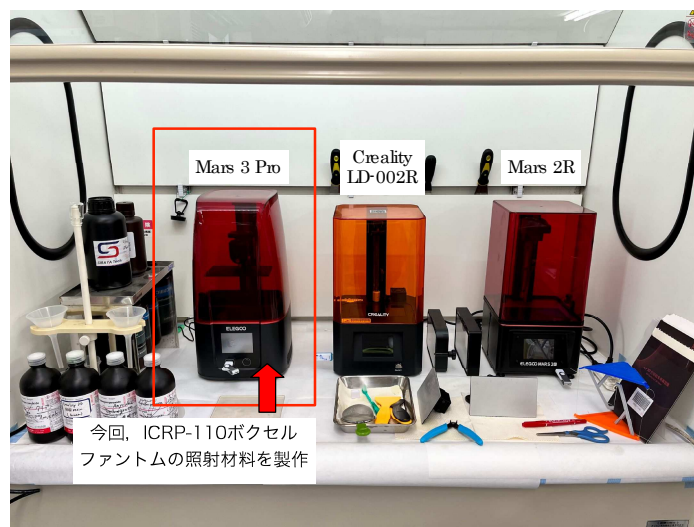


図 2 本実験で初めて導入した UV レジン造形方式の 3D プリンタ Mars 3 Pro (左端). 本研究室には, 他に同造形方式による 3D プリンタが常設している. 中間のプリンタは, Creality 社製 LD-002R, 右端には, ELEGOO 社製 Mars 2R である.

2.2 原子炉照射の状況

今回の原子炉利用共同実験における中性子照射実験は、2021年12月21日に実施した。図3は、原子炉照射ための照射孔（10×10 cm 四方の中央照射孔）へ挿入する前の、アルミアングルステイ（炉心照射用支持台：材質 アルミニウム）下側ステージ（炉心センターから下方向へ 33 cm）に、3D プリンタで製作した MRCPs ファントム 2 体とそのファントムの水晶体に極微小スケールの金箔を張り付けた状況が確認できる写真を示している。右側の成人男性 MRCPs-AM ファントムの大きさは、高さ 147.54 mm、縦幅 20.88 mm、横幅 45.71 mm であり、左側の成人女性 MRCPs-AF ファントムのそれは、高さ 143.91 mm、縦幅 18.01 mm、横幅 40.63 mm である。この大きさは、このアルミアングルステイに設置可能であることを考慮して、3D CAD ソフトウェアでのスケール調整を行っている。

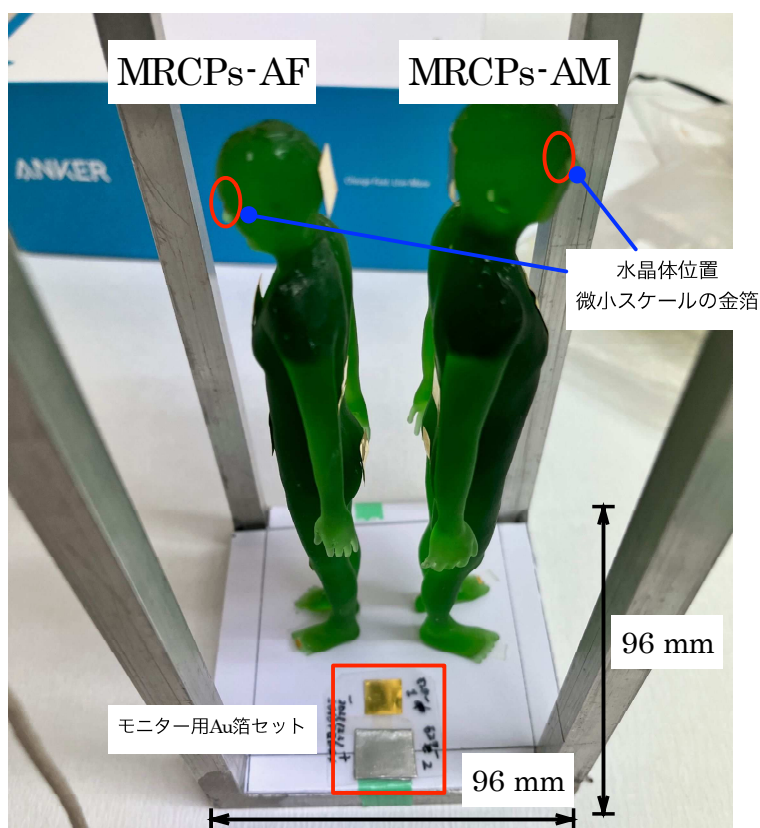


図3 UV レジン造形方式の 3D プリンタで製作した四面体構造メッシュ化人体ファントムの成人男性 MRCPs-AM（右側・炉心南側の燃料タンクサイド）と成人女性 MRCPs-AF（左側・炉心北側の燃料タンクサイド）を、炉心中心部へ充填するときの炉心照射用アルミニウム支持台への設置状況。

2021年12月21日 AM 10:20 頃に、臨界到達に向けた Pu-Be 中性子源の挿入が開始され、AM 10:37 に臨界条件の 1 W 運転に到達した。その直後に手持ちのタイマーをスタートさせ、時計を記録した。同日 PM 5:00 に臨界ストップ（照射終了）後、タイマーをストップし合計 6 時間 22 分 58 秒（22978 s）の全照射時間を確認した。この間、炉心上部（炉心上部には照射孔へのアクセスするための蓋がある。）の中心から離れた手すりに、本学の電子式ポケット線量計アロカ社製 PDM-111（高感度タイプ）を設置して、原子炉運転時の終了時（中性子照射終了時）に渡って積算線量を計測した結果、その値は 88.77 μSv （平均 $\approx 14\mu\text{Sv/h}$ 相当と推

察される。)であった。照射終了後、直ちに炉心から照射用アルミニウム支持台を取り出して、MRCPS-AMとMRCPS-AFの各ファントムの水晶体位置にある金箔をピンセットで取り出し、梱包用ビニール小袋へシール封入してから、本実験用に準備された原子炉建屋とは別棟の高純度ゲルマニウム半導体検出器及び運搬用鉛遮蔽箱へ梱包した状態で運搬後、本学のゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー解析を行った。

3 結果と考察

照射後の金箔試料である極微小スケールの水晶体位置に配置された試料は、小さめの小袋に詰めてシーラーで封をした後、専用の鉛遮蔽箱に入れた状態での表面線量を計測し法定レベル以下であることを確認した。この容器を本学まで運搬して、一定の冷却時間を設けて本学のゲルマニウム半導体検出器によってガンマ線スペクトロメトリー解析を行った。図4は、成人男性及び成人女性ファントムの水晶体（どちらも右目）の位置に設置した極微小スケールの金箔のW線スペクトルを示している。その双方のスペクトルからも確認できるように、 ^{197}Au (=W反応の生成核種である ^{198}Au の壊変にともなう主要なガンマ線、411.8, 675.9 keV (4, 5) のガンマ線ピークを十分な統計カウント数を獲得できるスペクトルデータを取得することができた。このスペクトルから、それぞれのファントムより回収した放射化した極微小スケール金箔の比放射能（放射能濃度）を解析した結果、成人男性水晶体（右目）では、 $(2.730 \pm 0.006) \times 10^5$ (Bqg $^{-1}$)、成人女性水晶体（右目）では $(1.374 \pm 0.003) \times 10^5$ (Bqg $^{-1}$)であることを定量評価した。

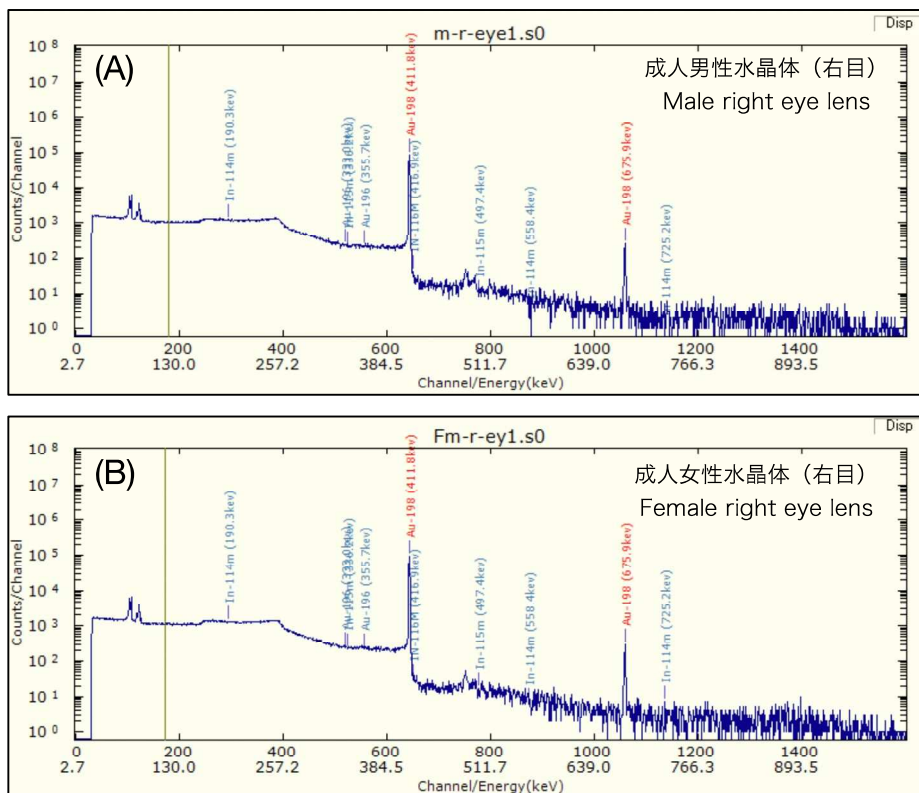


図4 四面体構造メッシュ化人体ファントム，成人男性 (A) と成人女性 (B)，の水晶体位置（右目・右眼球）に設置した極微小スケールの金箔のガンマ線スペクトル。

これら成人男女 MRCPs ファントムにおける水晶体位置での比放射能値と、さらに、モニター用でファントムが配置されたアルミアングルステイの下部に配置していたカドミウム板で覆われた金箔（図3を参照.）の放射化量を使って、これら双方のファントムにおける水晶体位置での中性子束密度を評価した。表1にその結果をまとめる。

表1 原子炉中性子照射実験で得られた四面体構造メッシュ化人体ファントム MRCPs の成人男性 (AM) 及び成人女性 (AF) の水晶体（右目）位置での中性子束密度とカドミウム比.

MRCPs ファントム性別	中性子束密度 [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$]	カドミウム比
成人男性水晶体 (MRCPs_AM)	$(1.2578 \pm 0.0033) \times 10^7$	12.416 ± 0.030
成人女性水晶体 (MRCPs_AF)	$(5.7752 \pm 0.0160) \times 10^6$	6.248 ± 0.015

成人男性水晶体の中性子束密度が、成人女性水晶体での値よりも、約2倍の高値を与える結果となっていた。また、当然のことながらカドミウム比についても同様な傾向を示している。この結果について考察すると、まず炉心中心と成人男性ファントムの水晶体位置と成人女性水晶体のそれぞれの距離・位置関係について調べると、それぞれの身長差から水晶体の高さについては、アルミアングルステイの底面（炉心から離れている方向になる。）基準として、男性のファントムの方が、炉心に対して3.63 mm (= 成人男性ファントムの身長147.54 mm - 成人女性ファントムの身長143.91 mm) だけ、近接していることがわかる。そのため、成人男性水晶体での中性子束密度が高い値となった要因といえるが、この近畿大学原子炉を用いた1×1 cm²角の基準となるこれまでの金箔の箔放射化実験の結果では、このような数ミリオーダーだけの高さ方向違いが要因で中性子束密度が、今回のような約2倍も超えるような結果が得られていない。そこで、このような大きな差の要因について、図3で示した成人男性及び成人女性ファントムの幾何学的な形態構造について再検討する。特に、頭部形態やその顔表面の向きについて調べた。両ファントムともに、直立姿勢であることには変わらないが、成人男性の顔表面が真正面を向いているにもかかわらず、女性の顔表面がやや下側に向いていることが確認できた。つまり、炉心中心に対して顔表面にある女性水晶体に設置した極微小スケールの金箔が、やや下側に傾いていることで、女性の頭部が中性子束密度分布の高い炉心中心方向に対して、その頭部による中性子の陰を生み出しているが推察される。この陰が、中性子線に対する遮蔽効果を引き起こし、前述の炉心中心からの男性・女性との身長差に伴う距離の差と、この陰効果（中性子線の陰）によって、約2倍の中性子束密度の差を引き起こしたのではないかと示唆される。

4 結論

今回の共同利用研究では、医療用リニアック施設と同レベルの中性子束密度環境下である近畿大学原子炉での中性子照射実験では、今回、四面体構造メッシュ化人体ファントム MRCPs のポリゴンメッシュデータの提供許諾によって、それらのデータから本学の3Dプリンタ（UVレジン造形方式）で独自のファントムを製作することができ、このファントムに極微小スケールの金箔を水晶体位置へ配置することで、当該施設の炉心の照射孔で行うことができた。その結果、成人男性及び成人女性の水晶体位置での中性子束密度を評価すること

ができ、さらに得られた値からそれぞれの性差に伴う形態（身体の特徴）差が、水晶体位置での中性子束密度値に影響を与えていることが確認できた。

謝辞

本共同研究利用研究におかれまして、長時間の原子炉運転や高確度な核種同定が可能な高純度ゲルマニウム半導体検出器の整備など、多大なるご協力における近畿大学原子力研究所のスタッフの皆様に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

1. ICRP Publication 118 ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs —Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, Publication 118. *Annals of the ICRP*, Vol. 41, Nos.1 – 2 (2012).
2. ICRP Publication 145 Adult mesh-type reference computational phantoms. ICRP Publication 145. *Ann. ICRP* 49(3) (2020).
3. Chansoo Choi, et al., Mesh-type reference Korean phantoms (MRKPs) for adult male and female for use in radiation protection dosimetry, *Phys. Med. Biol.* 64, 085020 (20pp) (2019).
4. M.B. Chadwick, M. Herman, *et al.*, ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, *NUCLEAR DATA SHEETS*, 112(12) 2887-2996 (2011).
5. R. B. Firestone and V. S. Shirley, *Table of Isotopes*, 8th ed. (John Wiley & Sons, New York, 1996).

【業績一覧及び論文要旨】

(業績一覧)

- Erika Matsumoto-Kawaguchi, Minoru Sakama, Ken'ichi Fujimoto, and Hitoshi Ikushima, “Dose Assessment on the Mean Absorbed Estimates Derived from the Simple Approach Method Applying Marinelli-Quimby’s Formula for Ambient Risk Organs to Thyroid Uptake in the Administered ^{131}I Radiopharmaceutical of Graves’ Disease Using PHITS and ICRP Reference Computational Voxel Phantom”, *Radiation Environment and Medicine* 10(2) 87-95 (2021).
- 日本放射化学討論会第 66 回討論会 (2022) 2022 年 9 月 15～17 日 東京大学本郷キャンパス, 川口 (松本) 絵里佳, 阪間稔, 藤本憲市, 生島仁史, 佐瀬卓也, 「 ^{131}I 内用療法の PHITS による甲状腺と周辺リスク臓器の平均吸収線量評価」, 1P04.
- 第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会 2022 年 11 月 24～26 日 九州大学伊都キャンパス, 阪間稔, 古渡意彦, 飯本武志, 矢野隼輝, 浅山瑞喜, 佐瀬卓也, 吉田みどり, 藤本憲市, 井上一雅, 福土政広, 「工業用エックス線厚さ計の点検作業で想定される作業姿勢や装置構造体環境を再現させたエックス線被ばく事故での線量評価」 1B2-1.
- 川口 (松本絵里佳), 「 ^{131}I 内用療法/グレーブス病の甲状腺吸収線量評価における Marinelli-Quimby の式と PHITS 及び ICRP ボクセルファントムを融合させた簡便法から導出される周辺リスク臓器の平均吸収線量評価」, 徳島大学大学院保健科学教育部保健学専攻・博士課程・博士 (保健学) 甲保第 47 号・学位取得, 令和 3 年 10 月 21 日.

(論文要旨)

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) のポリゴンメッシュデータを用いて, 本学の 3D プリンタで独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 ± 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 ± 0.015 と評価した.

【学生等氏名リスト】

大谷怜 (徳島大学大学院保健科学教育部)
浅山瑞喜 (徳島大学大学院保健学研究科)