

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H02768

研究課題名（和文）ポータブル 線スペクトルサーベイメータの開発

研究課題名（英文）Development of portable alpha-ray spectrum survey meter.

研究代表者

福士 政広（Fukushi, Masahiro）

東京都立大学・人間健康科学研究科・客員教授

研究者番号：70199199

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

研究成果の概要（和文）：ポータブル 線スペクトルサーベイメータの開発・改良を行った。検出器に2000mm²面積イオン注入型シリコン半導体検出器を採用し、さらにアルミ製ハニカム構造を付加した構造とした。その結果、²⁴¹Am電着線源で半値幅と10分の1幅で123 keV、247keVとなり、²²⁵Ac、²²⁶Raの線エネルギー差800 keVを識別が可能となった。また、コリメータ付加により²²⁵Acおよびその子孫核種から放出される線のテールリングによる影響を抑えることができ、²²⁵Acに混入する²²⁶Raの検出が可能であると示唆された。本器は、核種製造現場での有効性が高く、核種の同定法を簡便化するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年前立腺がん治療薬としても承認された核種を用いた核医学治療は、従来の治療に比べ治療効果を望めることから、今後さらなる核種治療薬の開発や使用量の拡大が予想される。一方で、治療薬の使用や放射線管理にあたっては、線は専用の測定器が必要で装置が大型で汎用性に欠け、真空状態での使用が必要といった課題があった。この装置は、空気中で核種の放射エネルギーと核種弁別が可能となった。さらに、コリメータ付加と筐体素材検討により、空気中でのエネルギー分解能100 keV程度で重量も軽量である。従来の線放出核種の同定法を大きく簡便化するものであり、核種製造現場での使用が期待される。

研究成果の概要（英文）：A portable alpha-ray spectrum survey meter was developed and improved. A 2000 mm ion-implanted silicon with an aluminum honeycomb structure was adopted for the detector. As a result, the full width at half maximum (FWHM) was 123 keV and the full width at tenth maximum (FWTM) was 247 keV for electrodeposited Am-241 source, so it is possible to identify the 800 keV difference in alpha-ray energy between Ac-225 and Ra-226. In addition, it was suggested that the tailing effect of alpha-rays emitted from Ac-225 and progenies could be suppressed by adding a collimator, and Ra-226 mixed with Ac-225 could be detected. This measuring instrument is highly effective for use in the field of alpha-nuclide production and simplifies the identification method of alpha-nuclides.

研究分野：ライフサイエンス

キーワード：線計測技術 線内用療法 放射エネルギー 放射線防護

1. 研究開始当初の背景

2016年より漸く我が国でも核種によるRI内用療法が開始された。従来、我が国では核種を利用したRI内用療法のみであった。核種はその特性から組織内での飛程が長く、腫瘍と隣接する正常組織へもとどき細胞毒性が大きかった。それに比べて核種の細胞内飛程は100 μ m未満と短いため、腫瘍に選択的に高線量を与えることができ、骨転移に対して強力な抗腫瘍効果を有する。しかし、核種が汚染した場合、飛程が短いため通常病院に備えられている測定器で測ることができない。線を直接測定するためには、専用の測定器が必要で、しかも高価で測定技術が煩雑なものが多く、しかも真空中で測定するのが殆どであった。そのため、空气中で簡便で精度の高い線の測定器が望まれていた。

2. 研究の目的

RI内用療法は、塩化ラジウム(Ra-223)注射液を患者へ投与するため、少なからず放射性汚染が生じる。さらに体内に投与された塩化ラジウム(Ra-223)は人体から尿や糞便を通して排泄されるため、たとえ汚染物のガイドラインに従い処理されたとしても診療施設はもとより一般環境への影響は少なからず存在する。それら汚染された核種を現場で短時間に、かつ正確に把握することが求められている。また、病院でRI内用療法に携わる医師、診療放射線技師等の作業従事者は学部等の教育において核種を用いた実験・実習を殆ど経験していないのが実情である。何故なら教育機関で核種を保有している施設が限られているからである。

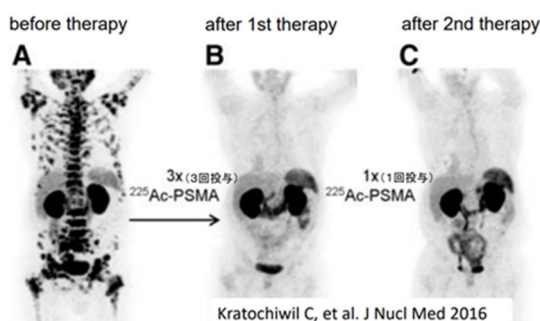


図1.アクチニウム225投与例

また、今後欧米諸国同様にRa-223以外の短寿命核種(Tb-149, Bi-212, Bi-213, At-211, Ac-225など)が臨床に供さえる状況になると核種が施設内に複数存在することになり、現状の線や線を対象とした測定方法では対応できない。そのため、直接線を測定できエネルギー弁別が可能なスペクトルサーベイメータが必要である。線を直接測定するためには専用の測定器で、かつ核種を同定するためにはエネルギー弁別が必要となる。そのためには線のエネルギースペクトルを取得する必要がある。そこで、イオン注入型シリコン検出器を使用した新たなポータブル線スペクトルサーベイメータの開発を試みた。

3. 研究方法

1) 実測による測定器の性能評価

ポータブル 線スペクトルサーベイメータの開発・改良試作・開発中のポータブル 線スペクトルサーベイメータ(図2)を示した。

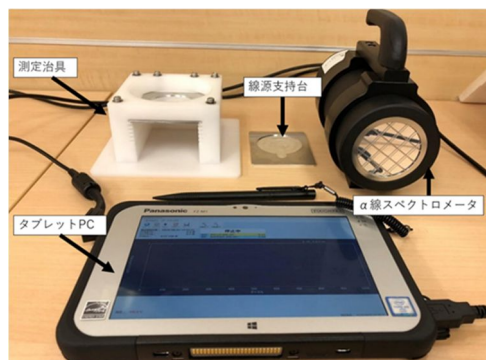


図2 ポータブル 線スペクトルサーベイメータ

検出器には、2000mm²の大面积 イオン注入型シリコン半導体検出を採用した。まずはAm-241 および3核種(²³⁷Np、²⁴¹Am、²⁴⁴Cm)混合の核種の電着線源を用いて性能を測定した。測定ジオメトリで線源検出器間距離(以下、SSD)が3.8 mm、7.8 mm、11.8 mm、15.8 mm、19.8 mm および23.8 mmの場合について、それぞれ²⁴¹Am電着線源に対して30分間、3核種混合電着線源に対して40分間測定した。その他、分解能向上を目的とした対策を検討した。

2) シミュレーションによる波高分布の再現

ポータブル 線スペクトロサーベイメータの応答として得られる波高分布を再現するために、モンテカルロ放射線輸送計算コードであるPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)を使用した。

4. 研究成果

1) 実測による測定器の性能評価

各SSDについて、²⁴¹Am電着線源に対する計数効率(cps/Bq)、エネルギー分解能(FWHM)および線の波高分布を図3に示した。また、²⁴¹Am電着線源の線の波高分布を図4に示した。3核種混合電着線源に対する線の波高分布を図5に示した。

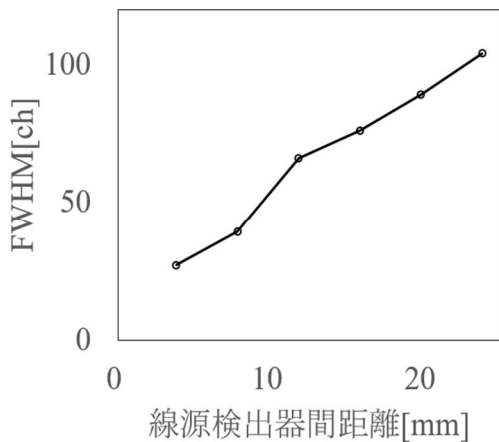


図3 ^{241}Am の波高分布における FWHM

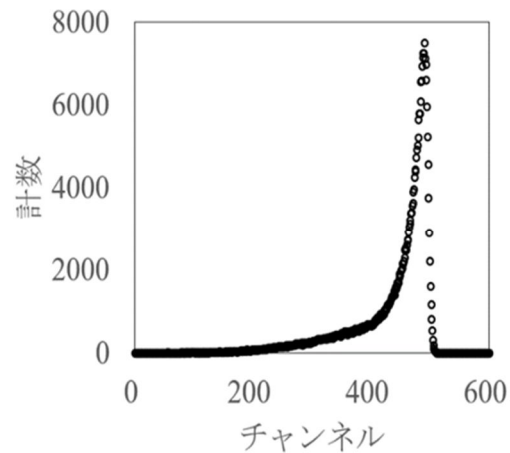


図4 ^{241}Am 電着線源の 線波高分布

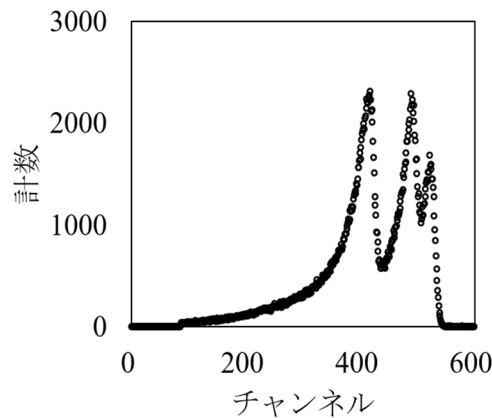


図5 3核種電着線源の 線波高分布

この結果を受けて、アルミ製ハニカム構造（箔厚 $25\ \mu\text{m}$ 厚さ $5\ \text{mm}$ ）を付加した。SD が $8.8\ \text{mm}$ のとき、 ^{241}Am 電着線源で半値幅（FWHM）と10分の1幅（TWHM）で $123\ \text{keV}$ 、 $247\ \text{keV}$ となり、 ^{225}Ac ($5.8\ \text{MeV}$)、 ^{226}Ra ($4.7\ \text{MeV}$) の線エネルギー差 $800\ \text{keV}$ を識別が可能であることが判明した。コリメータ付加により ^{225}Ac およびその子孫核種から放出される線のテーリングによる影響を抑えることができ、 ^{225}Ac に混入する ^{226}Ra の検出が可能であることが示された。

2) シミュレーションによる波高分布の再現

不感層が $600\ \text{nm}$ のとき、実測の計数効率と計算により求めた計数効率が一致した。次に PHITS 上で検出器固有のエネルギー分解能（FWHM）を $50\ \text{keV}$ 、 $100\ \text{keV}$ 、 $150\ \text{keV}$ と変化させて、 ^{241}Am 電着線源に対する SSD $3.8\ \text{mm}$ の実測の波高分布と比較した。その結果、固有分解能が $100\ \text{keV}$ のとき、実測の波高分布と計算値が一致した。したがって、シミュレーションにおける実効的な不感層の厚さおよびエネルギー分解能は $600\ \text{nm}$ と $100\ \text{keV}$ に設定した。図6に不感層の厚さを $600\ \text{nm}$ 、固有分解能を $100\ \text{keV}$ に最適化した結果

を示した。

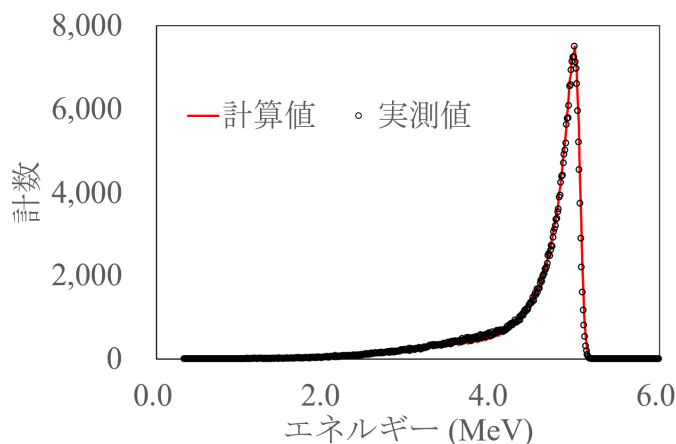


図6 不感層の厚さと検出器固有のエネルギー分解能の最適化

ポータブル 線スペクトロメータによる測定ジオメトリーを放射線輸送計算コードである PHITS によって再現できた。また、固有の不感層の厚さおよびエネルギー分解能に関する計算条件を最適化できた。SSD が 3.8 mm から 23.8 mm までの範囲において、 ^{241}Am 電着線源および 3 核種混合電着線源のいずれに対しても、計算によって実測の波高分布を概ね再現できることが確認できた。

今回、ポータブル 線スペクトルサーベイメータの改良を実施し、試作・開発中のポータブル 線スペクトルサーベイメータは、検出器に 2000mm^2 面積イオン注入型シリコン半導体検出を採用した。本測定器に関して、放射線輸送計算コード PHITS を用いて最適化を図るとともにコリメータ付加の検討をした。さらに、核種製造現場での使用に関する応用を検討した。その結果、PHITS を用いた最適化では、Si 半導体検出器の不感層の厚さとエネルギー分解能を 600 nm および 100 keV に最適化することにより、線源-検出器間距離 (SSD) 3.8 mm から 23.8 mm の距離において ^{241}Am 電着線源および 3 核種 (^{237}Np 、 ^{241}Am および ^{244}Cm) 混合電着線源 (以下、3 核種混合電着線源) の実測の スペクトルを再現できた。このことにより、実測によらない条件下の性能評価が可能となった。また、コリメータ付加に関しては、アルミ製ハニカム構造 (箔厚 $25\ \mu\text{m}$ 厚さ 5 mm) を付加した結果、SSD が 8.8 mm のとき、 ^{241}Am 電着線源で半値幅 (FWHM) と 10 分の 1 幅 (TWHM) で 123 keV、247 keV となり、 ^{225}Ac (5.8 MeV)、 ^{226}Ra (4.7 MeV) の 線エネルギー差 800 keV を識別が可能であることが判明した。コリメータ付加により ^{225}Ac およびその子孫核種から放出される 線のテーリングによる影響を抑えることができ、 ^{225}Ac に混入する ^{226}Ra の検出が可能であることが示された。本測定器は、 ^{225}Ac 製造現場での使用に際し有効性が高いことが示唆された。本来、線は真空中で測定する必要のある従来の 線放出核種の同定法を大きく簡便化するものであり、実際に ^{225}Ac など 核種製造現場での使用が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yokomizo Shinya, Katagiri Wataru, Maki Yohei, Sano Tomoya, Inoue Kazumasa, Fukushi Masahiro, Atochin Dmitriy N., Kushibiki Toshihiro, Kawana Akihiko, Kimizuka Yoshifumi, Kashiwagi Satoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Brief exposure of skin to near-infrared laser augments early vaccine responses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 3187 ~ 3197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimura Mayumi, Daino Kazuhiro, Fukuda Maki, Tanaka Ikuya, Moriyama Hitomi, Showler Kaye, Nishimura Yukiko, Takabatake Masaru, Kokubo Toshiaki, Ishikawa Atsuko, Inoue Kazumasa, Fukushi Masahiro, Kakinuma Shizuko, Imaoka Tatsuhiko, Shimada Yoshiya	4. 巻 16
2. 論文標題 Development of mammary cancer in -irradiated F1 hybrids of susceptible Sprague-Dawley and resistant Copenhagen rats, with copy-number losses that pinpoint potential tumor suppressors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 5968 ~ 5968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0255968	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Veerasamy Nimelan, Sahoo Sarata Kumar, Murugan Rajamanickam, Kasar Sharayu, Inoue Kazumasa, Fukushi Masahiro, Natarajan Thennaarassan	4. 巻 26
2. 論文標題 ICP-MS Measurement of Trace and Rare Earth Elements in Beach Placer-Deposit Soils of Odisha, East Coast of India, to Estimate Natural Enhancement of Elements in the Environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 7510 ~ 7510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules26247510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 工藤 伸一、井上 一雅、福士 政広	4. 巻 41
2. 論文標題 放射線業務従事者を対象としたコホート研究の総説 [第2部]	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 医学物理	6. 最初と最後の頁 180 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11323/jjmp.41.4_180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高島 賢、井上 一雅、福士 政広	4. 巻 41
2. 論文標題 動物モデルを用いた放射線発がん研究 [第1部]	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 医学物理	6. 最初と最後の頁 143 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11323/jjimp.41.3_143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue K, Fukushi M, Furukawa A, Sahoo SK, Veerasamy N, Ichimura K, Kasahara S, Ichihara M, Tsukada M, Torii M, Mizoguchi M, Taguchi Y, Nakazawa S.	4. 巻 154
2. 論文標題 Impact on gadolinium anomaly in river waters in Tokyo related to the increased number of MRI devices in use.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Pollution Bulletin,	6. 最初と最後の頁 111148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue K, Fukushi M, Kurokawa M, Kondo H, Shimizu H, Tsuruoka H, Ichimura K, Tanifuji H, Veerasamy N, Nakazawa S, Taguchi Y	4. 巻 324(1)
2. 論文標題 Ecological half-lives of absorbed dose rate in air and activity concentrations of radiocesium in soil on Izu-Oshima Island related with the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,	6. 最初と最後の頁 291-300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue K, Tsuruoka H, Shimizu H, Arai M, Verrasamy N, Tsukada M, Ichimura K, Nakazawa S, Taguchi Y, Fukushi M.	4. 巻 14(10)
2. 論文標題 Changes of absorbed dose rate in air in metropolitan Tokyo relating to radiocesium released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: Results of a five-year study.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0224449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitsumoto T, Minamimoto R, Sunaoka F, Kishimoto S, Inoue K, Fukushi M.	4. 巻 92
2. 論文標題 The clinical utility of phase-based respiratory gated PET imaging based on visual feedback with a head-mounted display system.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 British Journal of Radiology	6. 最初と最後の頁 20180233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue K, Arai M, Tsuruoka H, Saito K, Fujisawa M, Nakazawa S, Veerasamy N, Fukushi M.	4. 巻 184(3-4)
2. 論文標題 Changes of absorbed dose rate in air in Kanto District after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiation Protection Dosimetry	6. 最初と最後の頁 500-503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 10.Owaki Y, Nakahara T, Shimizu T, Smith AM, Luk PW, Inoue K, Fukushi M, Nakajima K.	4. 巻 39
2. 論文標題 Effects of breathing motion on positron emission tomography acquisitions: step & shoot vs. continuous bed motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Medicine Communications	6. 最初と最後の頁 665-671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1097/MNM.0000000000000852	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Tsuruoka H, Inoue K, Takabatake M, Shimizu H, Veerasamy N, Fukushi M.
2. 発表標題 New portable γ -ray spectrum survey meter with an ion-implanted silicon detector development.
3. 学会等名 International Symposium 2021 in Aomori. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Saito K, Ishita Y, Inoue K, Fukushi M
2 . 発表標題 Distribution of gamma radiation dose rate and activity concentration in soil related with natural radionuclides in Taiwan.
3 . 学会等名 International Symposium 2021 in Aomori. (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Ichihara M, Inoue K, Shimizu H, Tsuruoka H, Tsukada M, Veerasamy N, Fukushi M.
2 . 発表標題 Distribution of absorbed dose rate in air in urban areas after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.
3 . 学会等名 International Symposium 2021 in Aomori. (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Shimizu H, Inoue K, Tsuruoka H, Fukushi M.
2 . 発表標題 Distribution in soil radioactive concentrations in the eight Izu-Islands after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.
3 . 学会等名 International Symposium 2021 in Aomori. (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 29.Imaoka T, Daino K, Nishimura M, Arai M, Saito M, Shimada Y, Kahimura S, Kubota J, Nishimura Y, Inoue K, Fukushi M, Miyasaka Y, Mashimo T.
2 . 発表標題 Brca1L63X/+ rats exhibit radiation-associated increase in mammary carcinogenesis retaining Brca1 heterozygosity.
3 . 学会等名 第80回日本癌学会学術総会
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Fukushi M, Inoue K, Tsuruoka H, Narita H.
2. 発表標題 Development of portable alpha-ray spectrum survey meter.
3. 学会等名 24th International Conference on Medical Physics. 2019.09. (Santiago, Chile). (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuruoka H, Inoue K, Fukushi M.
2. 発表標題 Development of Portable Radiation Depth Distribution Spectrometer.
3. 学会等名 24th International Conference on Medical Physics. 2019.09. (Santiago, Chile). (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Inoue K, Tsuruoka H, Fukushi M.
2. 発表標題 Current status of absorbed dose rate in air in Kanto district after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.
3. 学会等名 24th International Conference on Medical Physics. 2019.09. (Santiago, Chile). (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 32.Verrasamy N, Sahoo SK, Inoue K, Fukushi M.
2. 発表標題 Geochemical behaviour of Uranium and Thorium in soils and sands from a natural high background radiation area of Odisha coast,
3. 学会等名 India. 5th International Conference on Environmental Radioactivity. 2019.09. (Prague, Czech Republic) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 43.Narita M, Tani K, Kurihara O, Inoue K, Fukushi M.
2. 発表標題 MCNP simulation of Ra-223 and At-211 alpha spectrum for radiation control in nuclear medicine.
3. 学会等名 JHPS-SRP-KARP Workshop of Young Generation Network, 2019.12. (Miyagi) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成田真人、谷幸太郎、栗原治、井上一雅、福土政広
2. 発表標題 線スペクトルサーベイメータの研究概要
3. 学会等名 第12回日本診療放射線学教育学会総会・学術集会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計6件

1. 著者名 福土 政広	4. 発行年 2021年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 164
3. 書名 放射線生物学	

1. 著者名 福土政広(監修)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 404
3. 書名 実践・医用画像情報学 基礎から実験・演習まで	

1. 著者名 福土政広 (編集)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 診療放射線技師スリムベーシック核医学	5. 総ページ数 312
3. 書名 メジカルビュー社	

1. 著者名 福土政広 (分担)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 アドスリー	5. 総ページ数 140
3. 書名 医療関係者のための放射線安全利用マニュアル	

1. 著者名 福土政広 編集	4. 発行年 2018年
2. 出版社 メジカルビュー	5. 総ページ数 192
3. 書名 放射化学	

1. 著者名 福土 政広 編集	4. 発行年 2018年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 272
3. 書名 放射線計測学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	井上 一雅 (INIUE KAZUMZSA) (20508105)	東京都立大学・人間健康科学研究科・教授 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関