様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月 ３０ 日現在

機関番号：７４３２９
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2024
課題番号：２１Ｋ１０２４３

研究課題名（和文）福島原発事故により放出された放射性核種のヒト永久歯の蓄積に関する研究

研究課題名（英文）Study on the accumulation of human permanent teeth released radioactive nuclides by the Fukushima nuclear power plant accident

研究代表者

井上　一彦（INOUE, KAZUHIKO）

公益財団法人ルイ・パストゥール医学研究センター・環境感染制御研究室・研究員（移行）

研究者番号：３０６４９５７０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,200,000円

研究成果の概要（和文）：我々は，福島原発事故の汚染の影響を調べるためにバイオアッセイである日本人ヒト第三大臼歯を収集し、生年別，地域別の成人永久歯への放射性核種の蓄積の調査研究を実施している(第三大臼歯,約500本，2025年3月31日現在).Sr-90が生年1981年第三大臼歯群から(17本)6.7mBq/g・Ca、生年1989年第三大臼歯群で8.4mBq/g・Ca検出された．2011.3.11時点)．　これは核実験時の影響であると思われる．さらに，原発事故の影響があるとされている生年1982～1990年のヒト第三大臼歯群のストロンチウム90の定量を実施し，4.2-11mBq/g・CaのSr-90が検出された.

研究成果の学術的意義や社会的意義
　日本において福島原発事故前後の放射能汚染の人体の影響を，バイオアッセイである乳歯，第三大臼歯を用いて比較検討している．生年2000年～2016年のヒト乳歯群でSr-90 が各々3.6～7.7mBq/g・Ca検出され，生年1980～1990年のヒト第三大臼歯群からは4.2-11mBq/g・CaのSr-90が検出された(2011.3.11時点)．生年別に事故前後のデータとして比較検討を行うことにより，事故後の影響を詳細に調査している点で独自性と創造性がある．被災牛の歯牙，骨で90Sr ,134Cs,137Csの汚染が認められていたが，放射性セシウムのヒト硬組織への蓄積は認められなかった.

研究成果の概要（英文）：　We are collecting Japanese human third molars, which are bioassays, to investigate the effects of contamination from the Fukushima nuclear accident, and are conducting research on the accumulation of radionuclides in adult permanent teeth by birth year and region. (Third molars, approximately 500 teeth, as of March 31, 2025). Sr-90 was detected at 6.7 mBq/g・Ca in the 1981 birth group (17 teeth) and 8.4 mBq/g・Ca in the 1989 birth group (As of March 11, 2011). This is thought to be the result of nuclear testing. Furthermore, we conducted quantitative analysis of strontium-90 in human third molars groups born between 1982 and 1990, who are believed to have been affected by the nuclear accident, and detected 4.2-11 mBq/g・Ca of Sr-90.

研究分野：口腔衛生学，放射線衛生学，放射線生物学

キーワード：福島第一原発事故　放射性核種　ストロンチウム９０　永久歯（第三大臼歯）　乳歯　被災牛　チェルノブイリ原発事故　セシウム137

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　C－１９,F－１９－１,Z－１９,CK－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

(1)2011年3月,日本が初めて経験した国際原子力事象評価尺度で最も深刻な事故(レベル７)とされた東電福島第一原発事故により多量の放射性物質が放出された．気象庁気象研究所が茨城県つくば市で観測した^{137}Csの2011年3月における降下量は,大気圏内核実験が行われた頃の値よりも遙かに高く,過去最高1963年6月の50倍以上の23±0.9 kBq/㎡であり,^{90}Sr量は4.1±0.1 Bq/㎡で事故前の2-3桁であったと報告した(図１)[1]．大気中に放出された放射能量はXe-133が11 EBq（10^{18}）（原子力保安院算出）,ヨウ素131；0.16 EBq,セシウム137;,15 PBq(10^{15}),^{90}Sr ;140 TBq(10^{12}), ^{239}Pu;　3.2GBq(10^{9})であると推定されている[2,3]．これらのうちヨウ素は甲状腺に取り込まれ,セシウムは筋肉などに分布し,^{90}Srは歯,骨にたまり,^{239}Puは吸入されると肺に沈着するとともに,骨に蓄積する．

(2)^{90}Srなどの放射性核種が歯に沈着する機序は,CaとSrは同族であり,Caと置換することにより^{90}Srが歯の主成分であるハイドロキシアパタイト：$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$に取り込まれると考えられる．^{238}Pu,$^{239+240}$Puは吸入され肺に入るか,食物や飲料水を通して,乳歯にとりこまれると考えられている.内部被曝による線量を推計するためのバイオアッセイのサンプリング材料として,骨採取は困難であるのに対して,歯は抜去され収集することが可能である,乳歯は永久歯に較べ短期間で多くの歯を収集することが可能であるため,原発事故前後の環境に放出された放射性核種（^{90}Sr,^{238}Pu,$^{239+240}$Pu,^{134}Cs, ^{137}Cs）の人体への移行を調べている．

２．研究の目的

東京電力福島第一原発事故で環境に放出された放射性核種の人体への移行を調べるために,日本全国より乳歯,永久歯（第三大臼歯）を集め,歯牙中での放射性核種（^{90}Sr, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu, ^{134}Cs, ^{137}Cs）の蓄積を調査している[4]（表 1，日本全国歯科診療所；2524 本，第三大臼歯；約 500 本，2025 年 3 月 31 日現在）．ヒト歯牙に自然界には存在しない放射性核種の蓄積量を既存の報告や被災牛のデータ（歯，骨）と比較検討する（15K11435,18K09896,21K10243）．

３．研究の方法

2012 年 12 月（原発事故後）より，全国歯科診療所施設に資料を配布し，インフォームドコンセントを得て乳歯，永久歯を生年別，地域別に収集継続中である．^{90}Sr,^{238}Pu,$^{239+240}$Pu 計測は文部科学省放射能測定法シリーズにより実施している[5,6]．^{134}Cs, ^{137}Cs の分析：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(同)に準じて実施した．

４．研究成果:乳歯

(1) 乳歯：^{238}Pu,$^{239+240}$Pu；前報告では日本人ヒト乳歯には ^{238}Pu,$^{239+240}$Pu が蓄積されていないことが改めて確認された．スイスの報告では,1950～1986 年の生年の試料では 1953～1954 年の 0.0498 mBq/g・Ca をピークに 0．5～7.7 μBq/g・Ca の ^{239}Pu が検出されている[7]．また,チェルノブイリ原発事故の影響で 1986 年頃に生まれた人の乳歯から,^{239}Pu が認められている[7]．日本においては．日本人人骨からは ^{239}Pu が検出されていることから[9],1964 年頃に形成期を迎えた乳歯はプルトニウム汚染が見られた可能性は否定できないが,欧州よりも日本は汚染が低いことが示唆された(図２)[7,8]．

^{90}Sr；前報告で地域別のデータにおいて ^{90}Sr は被災地である東北地方(宮城,山形,秋田,福島)では検出されず,東京都,関東地方,熊本県でやや高い傾向が認められたが,試料群の大きさやバイアスがかかった結果が反映されたもので,地域性を表現しているものでないことが考察される．それゆえ，今回は全国レベルの試料として 2000 年から 2016 年生まれのヒト乳歯群で^{90}Sr が各々3.6～7.7mBq/g・Ca 検出された(1979 本)．東日本，西日本で差は認められなかった．Fall out が非常に高かった時期(1953～1967 年)のデータは，今回の 100 倍であった（日本：351 mBq/g・Ca[10],スイス：421 mBq/g・Ca，図 2)．

(2)永久歯（第三大臼歯）

Sr-90 が生年 1981 年第三大臼歯群から(17 本)6.7mBq/g・Ca、生年 1989 年第三大臼歯で 8.4mBq/g・Ca 検出された(2011.3.11 時点)．さらに,原発事故の影響があるとされている 1982～1990 年生まれヒト第三大臼歯群のストロンチウム 90 の定量を実施し，4.2-11mBq/g・Ca の Sr-90 が検出された(表３，図２;◆)．また,土壌中に ^{90}Sr が核実験の影響で蓄積されていることから(図 2),乳歯形成時期や ^{90}Sr の土壌分布や食事のデータから鑑みて,検出された ^{90}Sr は東電福島第一原発事故由来でなく,核実験や核施設の事故等により環境放出されたものが,食生活等を通じて蓄積した可能性が高いことが推察される．成人第三大臼歯の ^{90}Sr の蓄積の比較では生年 1955 年の最大値 117 mBq/g・Ca[11]から 4.2-11m Bq/g・Ca（生年 1980－1990 年）へ減衰していた(図２，表３)．今回の結果は,物理的半減期よりも早く減衰しており環境中の挙動も反映していることが示唆された．欧州のデータ等と比較しつつ,生年別,地域別に継続して調査していることは,基礎データとして今後の汚染の指標となり得る．経口も含む内部被ばくの評価では,行動調査が重要であるが,当時の複雑な事情もあり福島県民健康調査でも比較的線量が高い人々からの回収が低くその知見はいまだに十分には得られていない．

(3)チェルノブイリとの比較：チェルノブイリ事故の後,南ウクライナにおいて 1,000 本の歯牙が収集され年齢性別別に 18 群の ^{90}Sr 量の比較検討が行われ,各群は地上核実験が行われた時期のデータよりも少ないが,原発事故処理に従事したと思われる 25～45 歳の男性のグループに ^{90}Sr の歯牙への蓄積が多く認められたとの報告がある[12]．**生年 1980 年，1986 年の 11m Bq/g・Ca の値は，前者は中国核実験，後者はチェルノブイリ原発事故の影響が示唆される（表 3，図 2）．**

(4)乳歯の形成は胎生期から出生時にかけて行われるので,東京電力福島第一原発事故による影響があると思われる生年が 2011 年以降の乳歯群の試料から微量の Sr-90 が検出されたが、2009 年以前の乳歯群との差は認められなかった(表２).
(5)**被災牛**(福島原発事故周辺の被災した牛，研究に使用するプロジェクト進行中)
臼歯：小丸牧場（帰還困難地域）:**Cs-137: 855　Cs-134: 791 (Bq / Kg)**
Sr-90 ; 1000 m Bq / g・Ca)
大熊牧場(非帰還困難地域): Cs-137 ; 60.6, Cs-134: 60.7 (Bq / Kg)
Sr-90 ; 170 mBq / g・Ca Control: 群馬,北海道, 鹿児島, 乳牛 ; 前歯　Cs-137 ; 未検出　Sr-90 ; 9-11 mBq / g・Ca **コントロールとの比較で汚染が強い.**
(6)^{134}Cs, ^{137}Cs:ヒト歯牙での汚染は認められなかったが，被災牛歯の汚染が認められた
(7)**結論**
2000 年から 2016 年生まれのヒト乳歯群で ^{90}Sr が 3.6～7.7mBq/g・Ca 検出された. ^{90}Sr 量は東日本，西日本で差は認められなかった.生年 1980～1990 年ヒト第三大臼歯群のストロンチウム 90 の定量を実施し，約 4.2-11mBq/g・Ca の Sr-90 が検出された．現時点では事故後の人体への影響は少ないことが明らかにされつつあるが，核実験等の影響でヒト乳歯，永久歯が，年齢を問わず，現在も汚染され続けていることが確認された．ヒト歯牙の ^{134}Cs, ^{137}Cs の汚染は認められなかった. 被災牛の歯, 骨は福島原発事故の影響で汚染され続けていることが確認された.

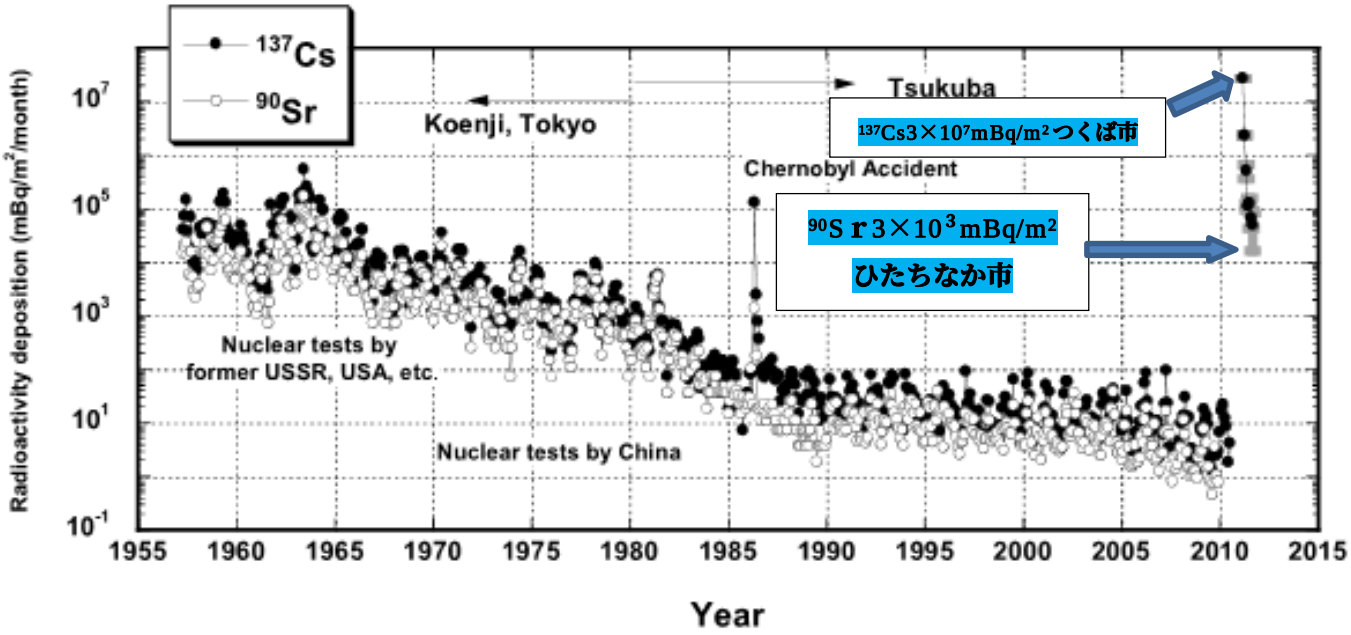


図１　福島原発事故以前と以後での人工放射性核種の月間降下量の変動 [1)]
2011 年 3 月以降の ^{137}Cs 月間降下量は暫定値

表1　日本全国からの乳歯の収集状況　　(単位本数, 2025 年 3 月 31 日現在)

秋田	25	愛知	231
宮城	47	大阪	94
山形	61	広島	10
福島	4	愛媛	422
東京	720	福岡	10
埼玉	440	熊本	166
神奈川	53	鹿児島	110
千葉	86	沖縄	13
静岡	32	総合計	2524

表２　日本におけるヒト乳歯への放射性核種の蓄積データまとめ

生年	地域	灰化前重量	Cs-134,137	灰化後重量	灰化率(%)	本数	Sr-90（mBq/gCa）
2000	全国	23.2	＊	18.3	78.8	42	6.6±0.9
		16.0	＊	13.0	81	28	
2001	東日本	30.1	＊	24.0	79.7	61	5.8±0.8
2001	西日本	35.0	＊	27.8	79.3	68	4.3±0.7
2002	全国	37.6	＊	29.7	79.0	78	5.4±0.9
2002	東京都	36.8	未測定	29.3	79.6	80	4.9±1.5
2002-2004	関東	47.1	未測定	37.5	79.6	113	6.9±1.7
2002-2004	熊本	24.5	未測定	19.5	79.6	83	5.1±1.6
2005	東日本	58	＊	45.1	77.7	185	5.2±0.6
2005	西日本	38.3	＊	29.2	76.1	121	6.7±0.1
2006	東日本	43.8	＊	33.8	77.1	199	6.4±0.9
2006	西日本	28.0	＊	21.0	76.0	123	7.7±0.9
2007	東日本	28.8	＊	22.5	78.1	123	5.0±0.9
2007	西日本	19.6	＊	14.9	76	81	5.5±1.0
2008	全国	17.5	＊	13.4	76.3	64	5.7±0.8
2008		12.5	＊	9.2	73.5	65	
2009	全国	8.4	＊	6.2	73.7	51	5.0±0.8
2009		17.4	＊	13.8	79.0	69	
2010	全国	39.5	＊	31.9	80.7	132	4.3±0.9
2011,12	全国	37.3	＊	30.2	80.９	116	5.1±1.0
2013-2016	全国	23.9	＊	18.9	79.1	97	3.6±0.9

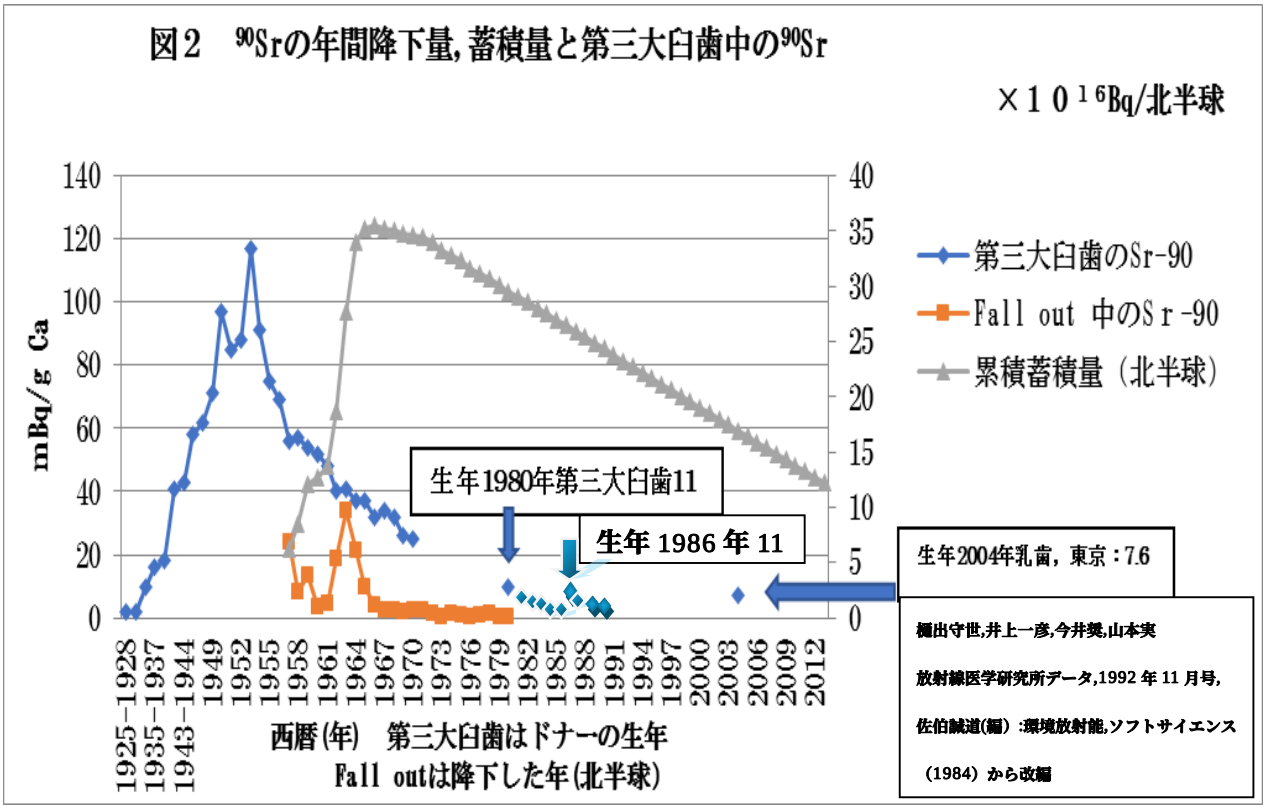
表３　日本におけるヒト永久歯（第三大臼歯）への放射性核種の蓄積データまとめ

生年	地域	灰化前重量	Cs-134,137	灰化後重量	灰化率(%)	本数	Sr-90（mBq/gCa）
1980	首都圏	19.6	＊	14.9	76	13	11±2.5
1981	首都圏	24.4	＊	13.3	75.2	17	6.7±1.6
1982	首都圏	27.6	＊	21	76	19	4.2±1.1
1983	首都圏	24.3	＊	18.6	76	15	7.2±1.4
1984	首都圏	40.7	＊	31.3	76	23	5.9±1.2
1985	首都圏	25.9	＊	20.1	77	18	5.3±1.2
1986	首都圏	28.7	＊	22.4	78	17	11±1.4
1987	首都圏	30.7	＊	24	78	18	6.7±1.1
1988	首都圏	24.8	＊	18.9	76	16	7.0±1.2
1989	首都圏	23.9	＊	18.1	75.7	17	8.4±1.7
1990	首都圏	24.6	＊	19.2	78	17	7.5±1,3

西暦：生年＊:未検出測定値：2011.3.11 時点に換算　乳歯：1979 本 第三大臼歯；190 本　Sr-90;mBq/gCa

東日本：東京，神奈川，千葉，埼玉，秋田，宮城、福島　関東：東京，神奈川，千葉，埼玉

西日本：愛知，大阪，愛媛，熊本，鹿児島，沖縄 全国：東日本＋西日本　首都圏：東京，埼玉



＜引用文献＞

①青山道夫,五十嵐康人:福島第一原子力発電所事故に伴う大気･海洋の人工放射能の変動,気象研究所. http://mri-3.mri-jma.go.jp/Topics/H23/Happyoukai2011/2011Happyou05.pdf

②原子力安全･保安院,「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る１号機,２号機及び３号機の炉心の状態に関する評価について, http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/6017222
放射性物質放出量データの一部誤りについて,
http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9395049/www.meti.go.jp/press/2011/10/20111020001/20111020001.pdf

③原子力安全委員会,福島第一原子力発電所から大気中への放射性核種（ヨウ素 131,セシウム 137）の放出総量の推定的試算値について,
https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001eap9-att/2r9852000001eawy.pdf

④井上一彦,山口一郎：福島第一原発事故により放出された放射性核種
(ストロンチウム,プルトニウム）のヒト乳歯への蓄積に関する研究,日本環境臨床医学
(Jpn J Clin Ecol),Vol.22,No.2,2013.

⑤環境試料中プルトニウム迅速分析法,文部科学省,平成 14 年,
https://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No28.pdf

⑥放射性ストロンチウム分析法, 文部科学省,平成 15 年改訂,
https://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No2.pdf

⑦Froidevaux P：Plutonium from above-ground nuclear tests in milk teeth: investigation of placental transfer in children born between 1951 and 1995 in Switzerland.,Environ Health Perspect.,116(12):1731-4, 2008.

⑧Froidevaux P et al: 90Sr in deciduous teeth from 1950 to 2002: the Swiss experience. Sci Total Environ. 31;367(2-3):596-605, 2006.

⑨湯川雅枝,前田智子,滝沢行雄：人体臓器中の$^{239+240}$Pu濃度,第28回環境放射能調査研究成果論文抄録集,科学技術庁,東京,139−141,1986.

⑩永井　充,石井俊文：乳歯中の^{90}Srについて,第19回環境放射能調査研究成果論文抄録集,科学技術庁,東京,1977,p155.

⑪ Moriyo Hinoide, Makoto,Yamamoto, Kazuhiko Inoue, Hideo Nakamura, Susumu Imai: RADIOACTIVITY SURVEY DATA in Japan, Number99, November1992.

⑫ Kulev YD, Polikarpov GG, Prigodey EV, Assimakopoulos PA. Strontium-90 concentrations in human teeth in south Ukraine, 5 years after the Chernobyl accident. Sci Total Environ. 1994 Oct 28;155(3):215-9.

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1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 Ichiro Yamaguchi , Kazuhiko Inoue , Masahiro Natsuhori , Chryzel Angelica B. Gonzales , Hiroshi Yasuda , Yasuhiro Nakai , Minoru Miyake , Harold M. Swartz	４．巻 11
２．論文標題 L-Band Electron Paramagnetic Resonance Tooth Dosimetry Applied to Affected Cattle Teeth in Fukushima	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Applied Sciences	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app11031187	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 該当する

〔学会発表〕　計4件（うち招待講演　0件／うち国際学会　2件）

１．発表者名 井上一彦 ,山口一郎 , 寺田　宙, 佐藤　勉,　夏堀雅宏
２．発表標題 福島原発事故により放出された 放射性核種の ヒト乳歯への蓄積に関する研究（被災牛との比較）
３．学会等名 第８回福島第一原発事故による周辺生物への影響に関する勉強会
４．発表年 2023年

１．発表者名 井上一彦 ,山口一郎 , 寺田　宙, 佐藤　勉,　野村義明 , 花田信弘
２．発表標題 福島原発事故により放出された 放射性核種の ヒト乳歯への蓄積に関する研究（被災牛との比較）
３．学会等名 第７３回日本口腔衛生学会・総会
４．発表年 2024年

１．発表者名 Preliminary study on electron spin resonance (ESR) dosimetry using the teeth of cattle affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) accident
２．発表標題 Kazuhiko INOUE, Ichiro YAMAGUCHI, Tsutomu SATO, Masahiro NATSUHORI
３．学会等名 The 3rd International Congress of Environment（国際学会）
４．発表年 2023年

１．発表者名
Toyoda, S., Inoue, K., Yamaguchi, I., Hoshi, M., Hirota, S., Oka, T., Shimazaki, T., Mizuno, H., Tani, A., Yasuda, H., Gonzales, C., Okutsu, K., Takahashi, A., Tanaka, N., Todaka, A.

２．発表標題
Interlaboratory comparison of EPR tooth enamel dosimetry with investigations of the dose responses of the standard samples

３．学会等名
EPRBioDose2022（国際学会）

４．発表年
2022年

〔図書〕　計0件

〔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	山口　一郎 (YAMAGUCHI ICHIRO) (50311395)	国立保健医療科学院・生活環境研究部・上席主任研究官 (82602)	
研究分担者	佐藤　勉 (SATO TSUTOMU) (60130671)	公益財団法人ルイ・パストゥール医学研究センター・環境感染制御研究部・研究員（移行） (74329)	
研究分担者	野村　義明 (NOMURA YOSHIAKI) (90350587)	鶴見大学・歯学部・学内教授 (32710)	
研究分担者	寺田　宙 (TERADA HIROSHI) (10260267)	国立保健医療科学院・生活環境研究部・研究員 (82602)	

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			