

1-6 乳歯を用いた福島県在住小児の被ばく線量評価事業

佐々木 啓一（東北大学副学長、東北大学大学院歯学研究科教授）

研究要旨

本研究の目的は、福島第一原発事故被災地および、その周辺地域に居住する幼小児を中心に、永久歯列への交換過程で脱落する乳歯や、歯科治療により抜去される乳歯を収集し、それら歯に蓄積した放射性物質を分析評価することにより、福島第一原子力発電所事故による放射線の人体への影響を評価するための基礎資料を得ることにある。本年度の研究においては、平成26年度以降収集した乳歯7,081本について、イメージングプレート（IP）を用いて放射線量（QL値）を測定し、その結果をマルチレベル回帰分析により疫学的に評価した。その結果、事故前に形成された福島県乳歯のQL値に性差はなく、事故時の年齢、事故後の口腔内存在期間、地域空間線量率に依存した違いも認められなかった。また、乳歯QL値には歯種による差が認められ、上顎前歯が他の歯種に比べて高値を示した。事故前に形成された福島県内の乳歯QL値についてみると、南会津地方の乳歯が他の地域に比べて有意に低値を示したが、福島県と他県からの乳歯には、差が認められなかった。

本年度の研究においては、QL値に貢献する放射性核種を特定するためにゲルマニウム半導体検出器によりガンマ線放出各種の測定を行い、さらに、放射性ストロンチウムについては、共存するCaやPbからSrを化学分離したのち、低バックグラウンドガスフローGM管によりベータ線の測定を行った。その結果、乳歯中には、ウラン系列とトリウム系列の娘各種や⁴⁰Kが存在すること、原発事故前に形成された乳歯中には福島県、他県に関わらず⁹⁰Srが存在すること、原発事故以前に脱落した福島県乳歯にも、事故後に脱落した乳歯にも¹³⁷Csが検出されること、⁹⁰Sr、¹³⁷Csとも今回の福島第一原発事故由来とは考えられず、過去の大気圏核実験等に由来すると推測できることなどが示された。

以上の結果は福島事故前に形成された歯についての検討結果であり、今後本格的に収集されてくる福島原発事故後に形成された乳歯を検討するうえで重要な基礎になると考えられる。2017年以降、原発事故以降に形成された乳歯の収集が進んでいるが、これら乳歯のQL値は、原発事故以前に形成された乳歯に比べて、現時点において特に差は認められていない。

キーワード

福島第一原子力発電所事故	乳歯	内部被ばく
⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	自然放射性核種

研究協力者

関根 勉 東北大学高度教養教育・学生支援機構・教授
木野 康志 東北大学大学院理学研究科・准教授

岡 壽崇 日本原子力研究開発機構・研究副主幹
 棚原 朗 琉球大学理学部海洋自然科学科・教授
 廣瀬 公治 奥羽大学歯学部・教授
 大野 敬 奥羽大学歯学部・教授

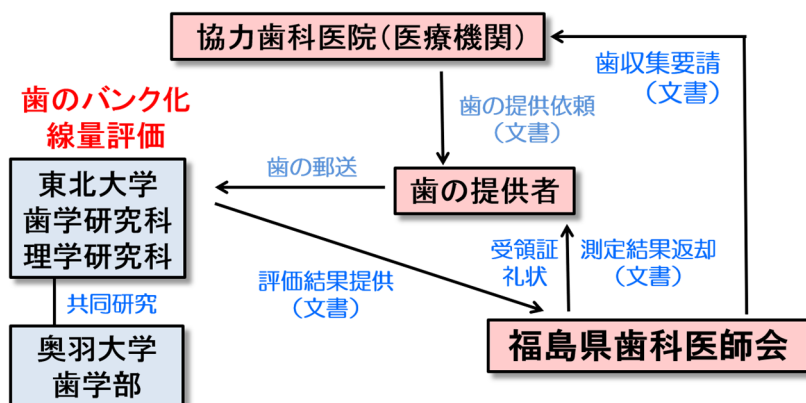
研究参加者

小坂 健 東北大学大学院歯学研究科・教授
 篠田 壽 東北大学大学院歯学研究科・名誉教授
 清水 良央 東北大学大学院歯学研究科・助教
 高橋 温 東北大学病院 障害者歯科・助教
 千葉 美麗 東北大学大学院歯学研究科・講師
 鈴木 敏彦 東北大学大学院歯学研究科・准教授
 相田 潤 東北大学大学院歯学研究科・教授

I. 研究目的

歯はその形成期に ^{90}Sr などの放射性物質を取り込み、それらは代謝されることなく歯質中に保持される。歯の中に蓄積する放射性物質の量は、体内に入った放射性物質の量に比例すると考えられるので、歯の中の放射性物質を測定することにより、その歯が形成された時期の内部被ばく状況を個体ごとに把握することが可能である。本研究の目的は、原発事故被災地およびその周辺地域に居住する幼児を中心に、永久歯列への交換過程で脱落する乳歯や、歯科治療により抜去される歯を収集し、それらの歯に蓄積した放射性物質を物理化学的・生物学的に評価することにより、歯を用いて、個体の内部被ばく状況や被ばく歴を個体ごとに推測し、今回の福島第一原子力発電所事故による放射線の人体への影響を評価するための基礎資料を提供することにある。

II. 研究方法



平成26年1月20日より歯の収集を開始

図1 ヒト乳歯の収集

1. 福島県在住小児の乳歯の収集とアーカイブ化

我々は、平成26年から福島県歯科医師会および奥羽大学と連携し福島県を中心に広く全国から乳歯の収集事業を継続している。平成28年度から平成30年度に実施された「乳歯を用いた福島県在住小児の被曝線量評価」に引き続き、本年度においても図1に示した概略図に従い歯の収集とバンク化を行った。歯の収集は福島県歯科医師会、奥羽

大学を中心に行い、収集乳歯は東北大学歯学研究科において管理・バンク化した。

2. イメージングプレート (IP) を用いた歯質中放射線量のスクリーニング

福島県内や全国各地から収集された乳歯数は 7,000 本を超えている。これらの乳歯のすべてについて、その中の放射線量を効率よくスクリーニングするための手法として、本年度においてもイメージングプレート(IP)を使用した。

厚さ 5cm の鉛ブロックで作成した鉛箱の内部を、厚さ 1cm の鉄板で覆った遮蔽箱の中に、IP カセットに入れた IP を 1 か月にわたり静置し、環境放射線の影響を極力排除した低バックグラウンド環境下でオートラジオグラフを作成した。使用した IP は BAS-MS2040 (GE Healthcare 社製)、読み取り装置にはフロオル・イメージアナライザー FLA-7000 (富士フィルム社製) を使用した。IP の発光強度を IP 画像読み取りソフト Image Quant TL Ver.8.1 (GE Healthcare 社製) を用いて QL 値 (Quantum Level : IP 読み取り装置で読み取った発光量を 16 ビットの濃度階調 (65536 階調) に変換した値) として測定した。また、 ^{40}K を $0\sim 400\text{mBq/cm}^2$ (厚さ 3mm) 含む KCL 基準尺を作成し、 ^{40}K 濃度と得られる QL 値に、直線的な比例関係があることを確認し、この KCL 基準尺を標準試料としてどの IP にも入れて、使用 IP や測定時期の違いによる測定値の変動を補正した¹⁾。

3. 乳歯中ガンマ線放出核種の測定

福島原発事故前に形成が終了している乳歯について、well 型検出器を持つ極低バックグラウンド仕様のゲルマニウム半導体検出器 (Mirion Technologies 社製) を用い、歯質中のガンマ線放出核種について測定を行った。原発事故関連の核種として、現在も環境中に存在する可能性がある核種として ^{137}Cs や ^{134}Cs があり、これらの核種が収集乳歯中に含まれるか否かの検討を行った。併せて自然放射性核種であるウラン系列、トリウム系列に属する核種、および放射性カリウムの測定を行った。測定試料として 4 つのコントロール乳歯サンプル (1 サンプルに 5-8 本の乳歯を含む) を準備し、サンプル毎に 100 万秒 (11.6 日) の測定を行った。また、100 万秒の測定では検出されない微量放射性核種の存在を仮定し測定時間を 160 万秒 (18.5 日) から 300 万秒 (34.7 日) に設定した乳歯 9 サンプル (1 サンプル 7-24 本の乳歯を含む) について測定を実施した。具体的には福島県から 5 サンプル (事故前にすでに脱落し事故後口腔内に存在しなかった乳歯、事故後口腔内に 2 年未満存在した乳歯、口腔内に 4 年未満存在した乳歯、口腔内に 6 年未満存在した乳歯) と、福島県以外からの乳歯 4 サンプル (北海道、静岡、新潟、熊本) について測定した。

4. 乳歯中 ^{90}Sr の測定

乳歯中の ^{90}Sr の測定を行った。乳歯サンプルを灰化し、続いて発煙硝酸法により大量に共存する Ca から Sr を分離・抽出した。さらに試料中の Cs, Ra, Y, Pb などを BaCrO_4 や $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沈殿法により除去した。分離・抽出した Sr は、低バックグラウンドガスフロー $2\pi\text{GM}$ 管を用いて β 線の測定を行った²⁾。測定には事故前に形成が終了している乳歯を用い、数本を 1 サンプルとして定量した。測定を実施した乳歯の収集地は、福島県内のいわき市 3 試料、福島市 2 試料、郡山市 2 試料で、福島県外からは北海道 2 試料、新潟県 2 試料、静岡県 2 試料、熊本県 2 試料であった。

5. 倫理面への配慮

乳歯の収集に際しては、乳歯提供者の氏名、生年月日、住所等、基本的な個人情報が必要となる。また調査目的、社会的意義、調査結果の歯提供者への還元、結果の開示方法等についても、保護者からの理解が必要となる。本研究では、乳歯の収集に際して書面でインフォームドコンセントを得ることとし、インフォームドコンセントが得られた検体についてのみ測定した。

乳歯の収集方法から結果の開示に至るまでの一連の過程については、東北大学大学院歯学研究科研究倫理専門委員会による承認を得（平成 25 年 1 月 31 日、平成 28 年 12 月 16 日、および平成 31 年 4 月 22 日、承認番号 23-19）、これに基づき調査研究を実施した。また、研究グループにおける乳歯収集・被ばく線量測定に関する倫理面での共通認識ならびに地域住民への配慮を徹底させるために、福島県歯科医師会および奥羽大学においても倫理委員会での審議を経、承認を得た（福島県歯科医師会倫理委員会平成 25 年 12 月 17 日、令和 3 年 3 月 3 日承認、および奥羽大学倫理審査委員会平成 26 年 3 月 18 日承認、平成 30 年 3 月 31 日まで。引き続き平成 30 年 4 月 1 日からさらに 5 年間の延長）。

乳歯収集の過程や研究結果から得られる個人情報は匿名加工し、その匿名加工情報は主任研究者及び疫学解析責任者のみが保管した。また、得られた測定値の被験者への伝達に際しては、結果が適切に理解されるよう補助的な説明文書を添付するなど最大限の配慮をした。このため関係者の情報管理を徹底すると共に、必要により関係研究機関、福島県歯科医師会、福島県庁や自治体とも協議できる体制をとった。

III. 研究結果

1. 福島県在住小児の乳歯の収集とアーカイブ化

2020 年 10 月末現在、全国より 7,081 本の歯を収集した。原発事故発災時の住所を基準とした収集地と収集本数を図 2 に示す。福島県内からの乳歯は、6,007 本で、福島市を有する県北地方、

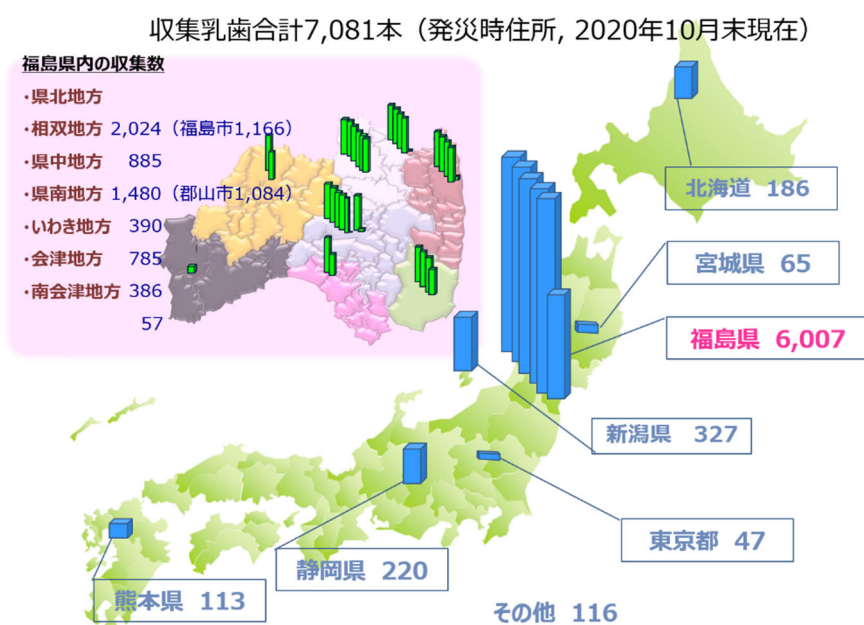
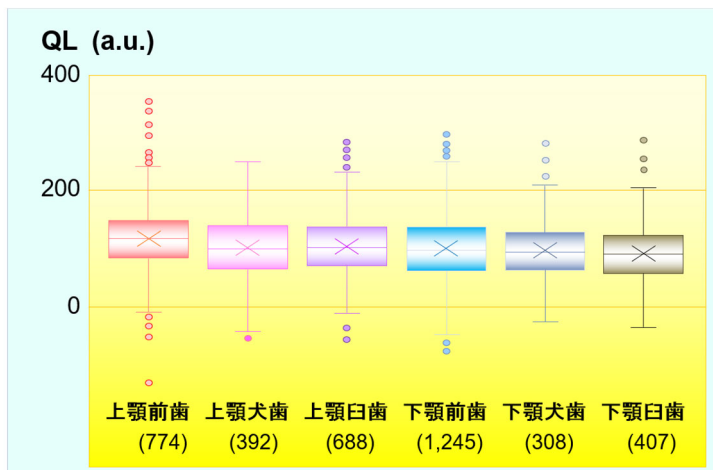


図 2 収集乳歯数

郡山市を有する県中地方、いわき市を有するいわき地方、そして福島第一原発の存在する相双地方からの比率が高い。福島県外では、北海道、新潟県、静岡県、熊本県の 4 県からの乳歯が多数を占め、収集歯の分布については前年度までとほぼ同様であった。

2. IP を用いた歯質放射線量のスクリーニング

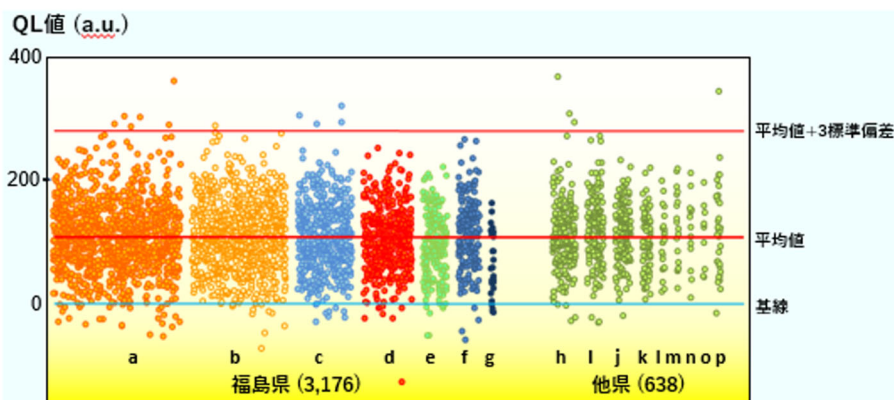
① 原発事故前に形成された乳歯 QL 値の性差、発災時年齢及び歯種との関連



上顎前歯は他の歯種に較べて高値を示した。

図3 歯種によるQL値の違い

図4に福島県内の7つの地方 (a-g) と福島県以外の8つの県 (h-o) 及びその他の県 (p) から収集した乳歯について、それらのQL値に地域差があるか否かについて検討した。福島県内についてみると、南会津地方からの収集歯は、他の地域に比較して有意に低いQL値を示した。また、



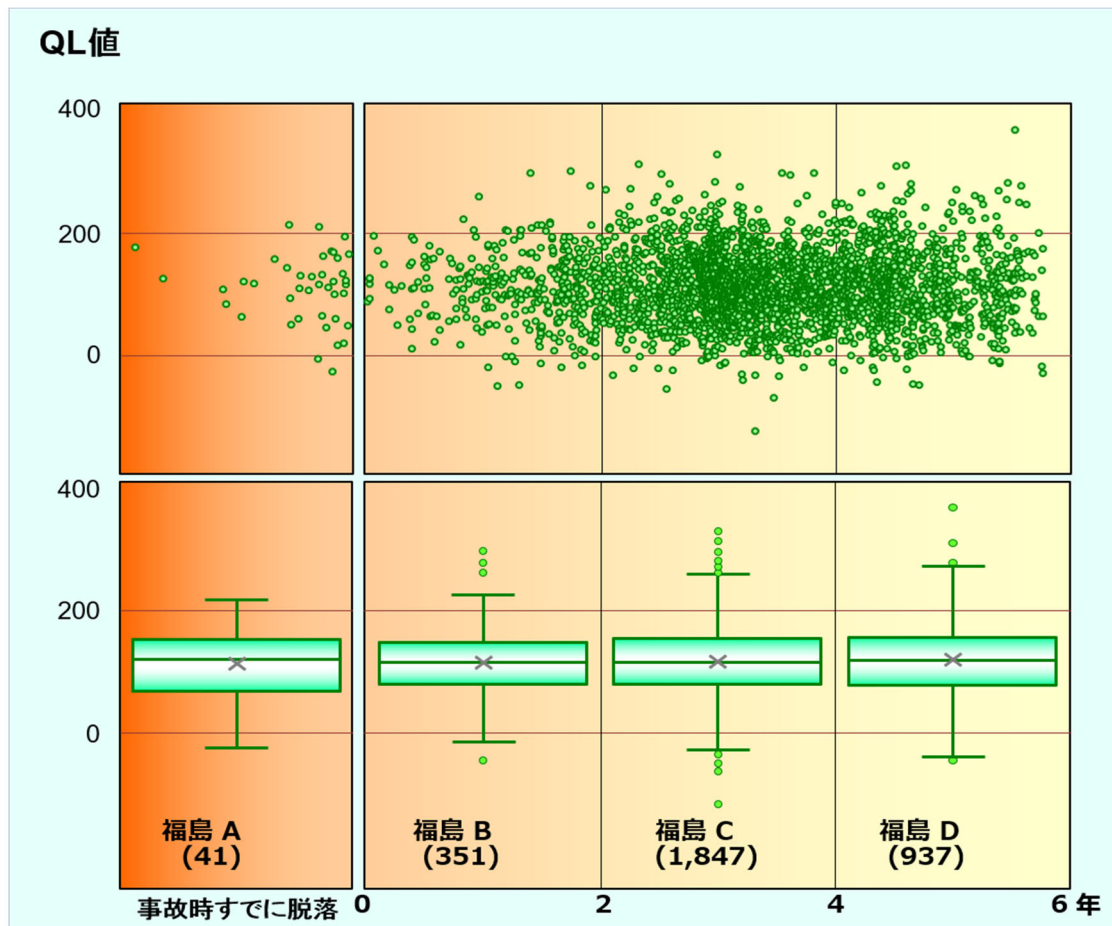
福島県(歯数)	平均値 ± 標準偏差	空間線量率 (Gy/h)	他県 (歯数)	平均値 ± 標準偏差	空間線量率 (Gy/h)
a: 県北地方 (1,088)	105.7 ± 57.2	2.52	h: 新潟県 (198)	106.2 ± 56.1	0.05
b: 県中地方 (805)	107.8 ± 55.2	1.71	i: 静岡県 (142)	116.2 ± 56.1	0.04
c: いわき地方 (465)	103.8 ± 55.5	0.86	j: 北海道 (131)	113.2 ± 46.6	0.03
d: 相双地方 (411)	102.8 ± 51.7	4.34	k: 熊本県 (68)	99.9 ± 47.7	0.03
e: 県南地方 (204)	94.6 ± 55.3	1.13	l: 宮城県 (22)	98.0 ± 49.2	0.1
f: 会津地方 (175)	109.7 ± 56.3	0.35	m: 東京都 (18)	122.0 ± 59.1	0.1
g: 南会津地方 (28)	65.8 ± 52.6	0.13	n: 沖縄県 (13)	113.7 ± 58.6	0.02
			o: 神奈川県 (10)	109.7 ± 51.0	0.07
			p: その他 (36)	113.9 ± 72.5	(-)

図4 原発事故以前に形成された乳歯QL値の地域差

福島県内から収集した乳歯のQL値は、他県から収集した乳歯と比較して高値を示すことはなく、むしろ低い傾向を示した。この傾向は平成31年度における本研究調査事業の結果と変わることはなかった。さらに、各地域の乳歯QL値と空間線量率(2011年4月時点において各地域内の小学校で測定した値の平均値。他県の測定値は、各県の県庁所在地での2011年4月時点での測定

値)の間にも相関は見いだせなかった。

③ 福島県内から収集した乳歯が原発事故後、口腔内にあった期間と QL 値との関係



2014年から2016年に収集された歯のうち震災前に形成が終了している乳歯 () は歯数
 福島A: 事故時既に脱落していた乳歯 福島B: 事故後0-2年口腔内に存在した乳歯
 福島C: 事故後2-4年口腔内に存在した乳歯 福島D: 事故後4-6年口腔内に存在した乳歯

図5 福島県から収集した乳歯が原発事故後、口腔内にあった期と QL 値との関係

原発事故時に既に形成を完了している歯であっても、事故後の環境下において、歯の表面に放射性物質が吸着される、あるいは、歯髄側からの血流を介して、歯の中に放射性核種が取り込まれることがあり得る。本研究では、このような2次的な汚染が事故後の乳歯に起こっていたかについて検討した(図5)。その結果、事故後の乳歯 QL 値と、事故後に乳歯が口の中に存在していた期間との間に有意の相関は認められなかった。

④ 震災前と震災後に形成された乳歯の QL 値

2016年以降、震災後に形成された乳歯の自然脱落が始まっており、歯の形成時に、原発事故由来の放射性物質の歯質内への取り込みがあったか否かについて検証する目的で、形成時期の違いによる QL 値の違いを検討した。乳歯はこれまでの検討と同様に IP 面が健全である乳歯で、福島

県からの収集歯とした。その結果を図6に示す。事故後に形成された乳歯のQL値は事故以前に形成された乳歯に比べ、現時点において有意な差を認めなかった。

3. 乳歯中のガンマ線放出核種

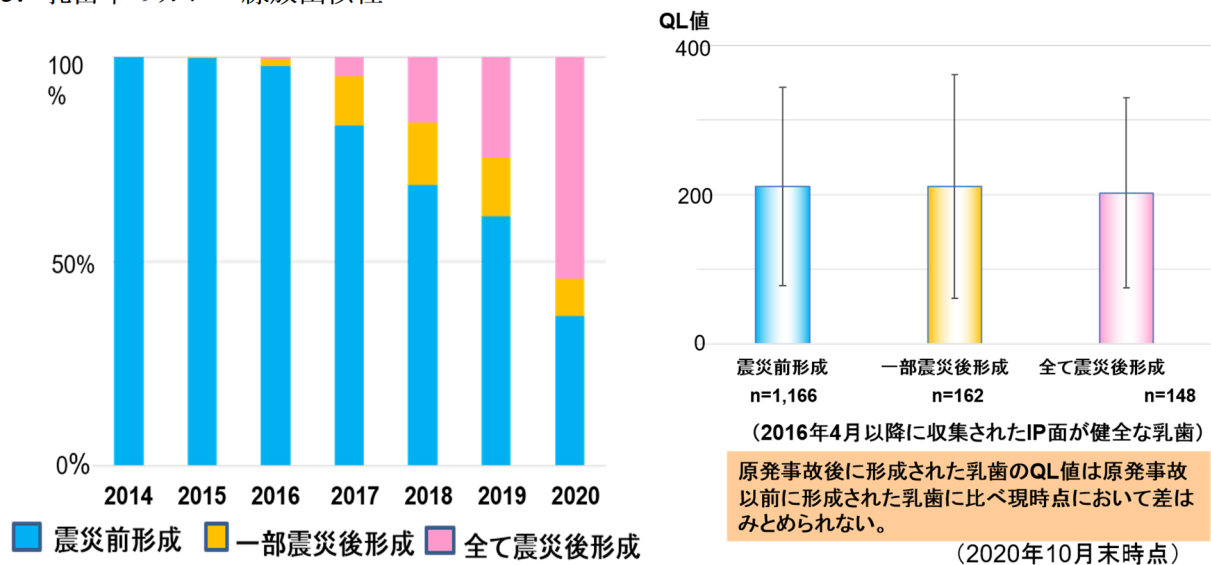


図 6-1 収集乳歯の形成時期ごとの割合

図 6-2 福島乳歯の形成時期別の QL 値

IPに見られるQL値の発生にどのような放射性核種が寄与しているかについて調べる目的で、福島県以外の県から採取した乳歯について、極低バックグラウンドのゲルマニウム半導体検出機を用いてγ線放出核種の長時間測定(100万秒/11.6日)を行った。表1にその結果を示す。測定した4サンプルのうち、ウラン系列に属する²¹⁴Pbはすべてのサンプルに認められ、トリウム系列に属する²¹²Pbは2つのサンプルに認められた。また、⁴⁰Kは測定したどのサンプルにも認め

	²¹⁴ Pb (U series)	²¹² Pb (Th series)	⁴⁰ K
北海道 (8)	1.8±0.6	0.82±0.24	6.1±3.5
熊本県 (6)	2.6±0.9	1.50±0.25	10.3±5.6
静岡県 (6)	2.3±1.1	LTD	7.5±2.8
神奈川県 (5)	3.3±0.9	LTD	7.7±3.7

極低バックグラウンドゲルマニウム半導体検出器による100万秒/11.6日測定
 ()内は歯数、U series: ウラン系列、Th series:トリウム系列

乳歯中にはウラン系列・トリウム系列の娘核種、および⁴⁰Kが存在する。

表 1 乳歯中の自然放射性核種 (mBq/g)

られた。一方、放射性核種である ^{137}Cs など、上記 100 万秒の測定においては検出できていない核種の存在も考えられたため、本研究では、測定時間を、1 サンプル 100 万秒から 160-300 万秒 (18.5-

	^{137}Cs	^{214}Pb (^{226}Ra)	^{212}Pb (^{228}Th)	^{40}K
福島 A (12)	0.21±0.07	0.91±0.31	0.39±0.15	7.9±1.5
福島 B (23)	0.39±0.03	0.61±0.16	LTD	14.0±0.9
福島 C (8)	LTD	LTD	LTD	12.6±3.8
福島 D (8)	0.79±0.09	LTD	0.39±0.15	10.9±2.8
北海道 (21)	0.14±0.04	0.57±0.14	0.27±0.07	10.2±1.1
静岡県 (24)	0.07±0.02	0.65±0.16	0.24±0.03	5.4±1.0
新潟県 (8)	0.60±0.16	0.65±0.38	LTD	7.9±2.2
熊本県 (14)	0.25±0.06	0.41±0.18	LTD	8.5±1.0

極低バックグラウンドゲルマニウム半導体検出器による160-300万秒/18.5-34.7日測定 ()内は歯数

原発事故以後に脱落した乳歯に ^{137}Cs が検出されたが、事故前に脱落していた乳歯においても ^{137}Cs が検出された。

表 2 乳歯中の ^{137}Cs と自然放射性核種 (mBq/g)

^{214}Pb は多くのサンプル (7/9) に認められたのに対し、トリウム系列に属する ^{212}Pb が認められたサンプルは少なかった (3/9)。また、 ^{40}K は一定の範囲内 (5-14mBq/g) ですべてのサンプルに認められ、これについても、表 1 の結果と同様であった。一方、測定時間を延長した結果、8 例中 7 例に新たに ^{137}Cs が検出された。この ^{137}Cs は、今回の原発事故に影響されていないと考えられた福島県以外の県からの乳歯にも認められた。また、それらの値は、福島県からの乳歯の値と特に違いがある傾向は認められなかった。さらに、福島県内からの乳歯についてみると、原発事故以前に形成され、事故以前に脱落した乳歯 (福島 A) にも検出された一方で、原発事故後、口腔内に 2-4 年存在した乳歯 (福島 C) には検出されないという結果も得られた。

34.7 日) にまで伸ばし、ゲルマニウム半導体検出機による測定を行った。福島県内からのサンプルについては、事故後、口腔内に存在した期間の違いにより 4 つのグループ (福島 A-D : 図 5 参照) に分けて測定し、また、福島県以外の 4 つの県 (北海道、静岡、新潟、熊本県) からのサンプルについても測定した。表 2 にそれら乳歯の測定

結果を示す。表 1 の結果と同様、ウラン系列に属する

福島県		他県	
いわき市 -1	1.45±0.16 (6)	北海道 -1	1.63±0.13 (9)
-2	1.28±0.15 (8)	-2	<1.61 (14)
-3	2.05±0.67 (16)	新潟県 -1	2.01±0.09 (6)
福島市 -1	1.61±0.12 (14)	-2	<1.37 (14)
-2	<1.53 (16)	静岡県 -1	1.95±0.11 (6)
郡山市 -1	1.57±0.12 (13)	-2	<1.45 (17)
-2	1.77±0.70 (16)	熊本県 -1	1.45±0.08 (6)
		-2	1.88±0.73 (16)

平均値 ± 計数誤差 (mBq/gCa) ()内は歯数

乳歯中には福島県、他県に関わらず ^{90}Sr が存在する。

表 3 乳歯中の ^{90}Sr

本研究では、2014 年 1 月から 2020 年 10 月までに収集した 7,081 本の乳歯について IP による放射線量 (QL 値) の測定を行った。これらの乳歯の多くは、原発事故以前に形成された乳歯であり、この研究の本来の目的である、原発事故後に形成

4. 乳歯中の ^{90}Sr

表 3 に事故以前に形成された乳歯に含まれる ^{90}Sr 濃度を示す。 ^{90}Sr は福島県からの乳歯にも福島県外からの乳歯にも同程度検出された。

IV. 考察

された乳歯で放射性物質の量が増加するか否かについて検討するための、コントロール乳歯に相当している。図6に示すように、歯質のすべてが原発事故後に形成された乳歯の脱落が始まったのは2017年以降であり、収集歯の中に占めるそのような乳歯の比率は、2020年10月末時点においても、なお、50%程度であり、現時点においては、信頼性の高い疫学的なデータを得るための十分な数を確保できていない。また、乳歯の自然脱落は、前歯部（切歯）から始まることから、これまでに集まっている歯種も前歯部が多く、乳犬歯や乳臼歯が含まれていないなど、収集できた乳歯の歯種にも偏りがある。原発事故後に形成された歯の全歯種が収集可能になるのには、なお、数年が必要である。

一方、原発事故後に形成された乳歯中に放射性物質が増えているか否かを評価するためには、原発事故前に形成された乳歯には、どのような放射性物質が、どの程度含まれるかについてあらかじめ知っておく必要がある。しかし、歯に含まれる放射性核種やその量についての系統的なデータは報告されておらず、特に乳歯についてのデータは皆無である。本年度の研究においては、収集したすべての乳歯について、IPを用いたスクリーニングを行う一方で、原発事故前に形成された乳歯を中心に、放射線量と放射性物質についての基礎データを取りまとめ、今後本格化する、原発事故後に形成された乳歯を評価するための資料作りを行うことを目的とした。また、原発事故以前に形成された乳歯であっても、原発事故後も一定期間口腔内に存在しており、その間に、原発事故以後環境中に放出された ^{137}Cs や ^{90}Sr などによって、2次的に汚染されている可能性も考えられた。そのような二次的な汚染が原発事故以前に形成された乳歯にあったかどうかを評価することも、今年度の研究における重要な目的の一つであった。

IPを用いた原発事故以前に形成された乳歯についての放射線量のスクリーニングの結果、性差はなく、年齢にも差がないことが確認された。ただし、歯種には差があり、上顎前歯部のQL値が、他の歯種に対して高値を示した（図3）。これは、上顎切歯の表面は、他の歯種に比して、大気にさらされやすく、 ^{238}U シリーズに属する大気中の ^{222}Rn などの自然放射性核種が、歯の表面に沈着しやすいためではないかと推測できる。しかし、その詳細については不明である。また、地域間に大幅な空間線量率の違いがあるにも関わらず、乳歯のQL値に大きな地域差は認められず、福島県からの乳歯が、他県からの乳歯に比べて高い値を示すこともなかった（図4）。しかし、南会津地方が他地域に比してやや低い値を示した。この理由は不明であるが、事故前の日本の自然放射能地図から得られた地質情報³⁾によれば、南会津が位置する地域の環境自然放射線の値は比較的 low、このことが、南会津地域から収集した乳歯のQL値が低いことと関連している可能性が考えられるが、更にデータの蓄積が必要である。

我々は、well型の検出器をもつ極低バックグラウンドのゲルマニウム半導体検出機を用いた長時間測定により、乳歯中に、 ^{214}Pb と微量の ^{212}Pb を検出することができた。この事実は、乳歯中には、 ^{238}U シリーズと ^{232}Th シリーズの娘核種が普く存在することを示している（表1,2）。また、乳歯中には、これらの核種の他に ^{40}K が普遍的に存在することが確認された。これらの自然放射性核種の濃度に大きな地域差はなく、乳歯QL値の発生に一定の割合で寄与しているものと考えられる。自然放射性核種の他に、今回の原発事故で問題となるのは、原発事故により放出され、現在も環境中に存在する ^{137}Cs や ^{90}Sr が歯質中に存在するか否かである。本年度の研究において、主に検索対象としたのは、原発事故以前に形成された歯であり、歯質中には、これらの人工核種は存在しないことが予想された。しかし、測定の結果、予期に反し、測定したほぼす

すべてのサンプルにおいて、微量の ^{137}Cs や ^{90}Sr が検出された。我々は、当初、これら核種が歯の中に存在するのは、既に形成が完了した乳歯が、事故後の環境中に放出されたこれら核種により二次的に汚染された結果ではないかと推測していた。しかし、事故後の口腔内に存在した期間に依存した QL 値の上昇が見られないこと（図 5、表 2）、また、これらの核種は、今回の原発事故の影響が考えにくい他県からの乳歯にも検出されていること、さらに、原発事故前に形成され、原発事故前に自然脱落した乳歯にも検出されたことから、今回の福島第一原発事故に由来したものではないと推測している。おそらく、過去の核実験により、大量に世界の環境中に放出されたこれら核種が、現在の環境中にも存在しており、歯の形成期に、微量のそれらの核種が、歯の中に取り込まれていたものと推測できる。

本研究では、福島県と参考県から採取した数千本の歯の放射線量を系統的に測定した。我々の結果は、FNPP 事故の前に形成された歯には、もともと FNPP 事故とは関係のない天然および人工の放射性核種が含まれていたことを示している。さらに、福島県と他県から収集された歯の放射線量や放射性核種に関して、大きな地域差は認められないことも示された。また、FNPP 事故に起因する放射性核種が既存の歯を汚染したことを示唆する証拠は見いだせなかった。今回の我々の研究結果は、FNPP 事故後に形成された歯に関する将来の研究のための重要な基礎データとして役立つと考えられる。

本年度においては図 6 に示すように原発事故後に形成された歯の収集割合がようやく 50%を超えた。本年度の研究において、予備的に実施した QL 値の測定で見える限りにおいては、事故後に形成された乳歯の QL 値が上昇したという兆候は、現在のところ見られていない。原発事故に関わる意味のある内部被ばくは無かったと考えられる。しかし、事故後に形成された乳歯の収集数は限られており、またその歯種にも偏りがある。今後収集が進む原発事故後に形成された乳歯に関する QL 値や、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 等の人工放射性核種の量がどのような推移をたどるかについてはさらに注意深く見守る必要がある。

V. 結論

1. 福島県在住小児より得た震災前形成乳歯についての IP による線量評価

- (1) 乳歯の収集はコロナ禍の影響で減速したが、2020 年 10 月末現在、7,081 本を収集した。
- (2) 原発事故以前に形成された乳歯についてマルチレベル回帰分析を行った。その結果、
 - ・乳歯中放射線量（QL 値）は、福島県と他県で差を認めなかった。
 - ・上顎前歯は、他の歯種と比較して高い QL 値を示した。
 - ・乳歯中 QL 値には、性別、震災時年齢、震災後に口腔内に存在した期間、地域空間線量率との関連は認められなかった。
- (3) 原発事故後に形成された乳歯の QL 値は、原発事故以前に形成された乳歯に比べて、現時点において差は認められなかった。

2. 乳歯中放射性同位元素の測定

- (1) 乳歯中には、普遍的にウラン系列・トリウム系列の娘核種と ^{40}K が存在する。
- (2) 原発事故前に形成された乳歯中には福島県、他県に関わらず ^{90}Sr が存在する。
- (3) 原発事故以前に脱落した福島県乳歯にも、事故後に脱落した乳歯にも ^{137}Cs が検出された。
- (4) ^{90}Sr 、 ^{137}Cs とともに今回の福島第一原発事故由来とは考えられなかった。

VI. 次年度の計画

1. 3.11 後に形成された福島乳歯 QL 値の今後の時間的推移の観察

今後次第に増加することが予測される 3.11 以降に形成された乳歯について、その QL 値に上昇がみられるか否かについて 3.11 以前に作られた歯との比較検討を行う。また、他県からも福島県乳歯と同時期に形成された乳歯を収集し、これらについても、3.11 以後に形成された福島県乳歯との比較検討を行う。

2. 歯質中に同定された各種放射性核種が、QL 値発生に及ぼす寄与率についての基礎的検討

3.11 以降に作られた歯のスクリーニングにおいて高い QL 値（平均値+3 標準偏差以上）を示す個体が出てくる可能性がある。このような QL 値の上昇が原発事故に関連した ^{137}Cs 、 ^{90}Sr に基づくものであるかについて明らかにする必要がある。

そのためにはまず、どのような放射性核種がどのような規模で QL 値に貢献しているのかを明らかにしておく必要がある。これまでの本研究において、原発事故前に形成された乳歯中には、自然放射性核種として ^{40}K 、それに加えて、ウラン壊変系列やトリウム壊変系列の娘核種が存在することを明らかにしている。また、それらに加え、過去の核実験に由来すると考えられ、現在も環境中に存在することが知られている ^{137}Cs や ^{90}Sr の人工放射性核種が、歯の中にも存在することを明らかにしている。これらの核種はそれぞれ崩壊エネルギーが異なるため、崩壊系列ごとに基礎的な検討を行い、得られた歯の QL 値にどのように貢献しているのかを明らかにする。

具体的な検討には、崩壊系列ごとの標準試料を準備し、歯を想定したヒドロキシアパタイト (HA) との混合物を試料として作成する。これらについて、試料の厚みを変えながら GM 検出器および IP を用いて β 線の自己吸収曲線を作成する。この自己吸収曲線の計数率が飽和に達する試料の厚み（密度）から、試料表面からどの程度の深さに存在する当該核種からの β 線を検出しているかを推定することが可能である。また、同じ試料を用いて基準尺を作成し、これを IP に露曝させ、その QL 値を測定することにより、核種ごとに 1 ベクレルあたりの QL 値（IP の各核種に対する感度）を算出することができる。

一方、歯の中の自然放射性核種 (^{40}K 、 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra) の濃度は既知であり、どの歯についてもほぼ一定の範囲内にあることを我々は確認しているため、歯全体の QL 値に占める自然放射性核種の寄与率を推定することができる。今後、原発事故以降に形成された歯の放射線量の測定が増えてくる可能性があるが、仮に平均値+3 標準偏差以上といった高い QL 値が検出された場合、これらは、自然放射性核種の変動によるものとは考えにくく、原発事故に由来する ^{137}Cs ないし ^{90}Sr によるものと推定することができる。この場合、 ^{137}Cs と ^{90}Sr の最大エネルギーの違いを利用し適切な遮蔽板を用いることにより、IP を用いて、QL 値の増加が ^{137}Cs と ^{90}Sr のどちらの増加に依るかについて推定することが可能となる。また、近年、0.1g 程度の硬組織サンプルから微量の ^{90}Sr を迅速に定量できる ICP 質量分析法が開発されており、本研究においても、その技術を導入し、IP によるスクリーニング結果を、化学定量に依り裏付けることを試みる。

3. 結果の社会への還元とリスクマネジメント

今回の原発事故においては、地域住民が比較的速やかに被災地から避難しており、高度に汚染された地域に長期間留まり、問題となるような高度な内部被ばくを経験した例は稀と考えられる。その状況を考えた場合、乳歯中に高い放射能値が検出される可能性は低く、その点で、本研究で

得られる結果の大部分は安心材料の提供となる可能性が高い。これを実測値として証明することができれば、その社会的な意義は大きい。しかし、高い値が測定されるリスクが皆無とは言えず、測定結果の公表に際しては、十分な社会的配慮が必要と考えられる。結果の公表に際しては歯科医師会、関係自治体、環境省等とも十分な事前協議を行い、予測されるリスク（社会的不安、風評など）にも対応できる体制を採る。

Ⅶ. この研究に関する現在までの研究状況、業績

A. 論文：査読あり

1) Toshitaka Oka, Atsushi Takahashi, Kazuma Koarai, Yusuke Mitsuyasu, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Yoshinaka Shimizu, Mirei Chiba, Toshihiko Suzuki, Ken Osaka, Keiichi Sasaki, Yusuke Urushihara, Satoru Endoh, Masatoshi Suzuki, Hisashi Shinoda and Manabu Fukumoto.

External exposure dose estimation by electron spin resonance technique for wild Japanese macaque captured in Fukushima Prefecture.

Radiation Measurements 134 (2020) 106315. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2020.106315>

2) Kentaro Ariyoshi, Tomisato Miura, Kosuke Kasai, Valerie Swee Ting Goh, Yohei Fujishima, Akifumi Nakata, Atsushi Takahashi, Yoshinaka Shimizu, Hisashi Shinoda, Hideaki Yamashiro, Colin Seymour, Carmel Mothersill & Mitsuaki Yoshida

.Environmental radiation on large Japanese field mice in Fukushima reduced colony forming potential in hematopoietic progenitor cells without inducing genomic instability.

International Journal of radiation biology 96 (2020)

<https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1807643>

Accepted 29 Jul 2020, Accepted author version posted online: 13 Aug 2020, Published online: 20 Aug 2020

3) 光安優典, 岡壽崇, 高橋温, 小荒井一真, 木野康志, 奥津賢一, 関根勉, 山下琢磨, 清水良央, 千葉美麗, 鈴木敏彦, 小坂健, 佐々木啓一, 藤嶋洋平, Valerie SweeTing Goh, 有吉健太郎, 中田章史, 山城秀昭, 篠田壽, 三浦富智

帰還困難区域に生息するアライグマに対する個体毎の外部被ばく線量評価法の適用の検討

KEK Proceedings of the 21st Workshop on Environmental Radioactivity, (2020) 144-149

4) Atsushi Takahashi, Mirei Chiba, Akira Tanahara, Jun Aida, Yoshinaka Shimizu, Toshihiko Suzuki, Shinobu Murakam, Kazuma Koarai, Takumi Ono, Toshitaka Oka, Joji Ikeyama, Osamu Kaneko, Makoto Unno, Kimiharu Hirose, Takashi Ohno, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Ken Osaka, Keiichi Sasaki & Hisashi Shinoda

Radioactivity and radionuclides in deciduous teeth formed before the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant accident

Scientific Reports 11, May 14, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-89910-0

B. 論文：査読なし

なし

C. 国内学会発表

1) 小荒井 一真, 松枝 誠, 青木 譲, 柳澤 華代, 藤原 健壮, 寺島 元基, 木野 康志, 岡 壽崇, 奥津 賢一, 山下 琢磨, 高橋 温, 鈴木 敏彦, 清水 良央, 千葉 美麗, 小坂 健, 佐々木 啓一, 関根 勉, 福本 学, 篠田 壽, 北村 哲浩, 阿部 寛信

硬組織内部の ^{90}Sr の分布測定のための少量試料中 ^{90}Sr の測定,

日本放射化学会第 64 回討論会 2020/09 豊中(online)

2) 高橋温、小野巧実、小荒井一真、岡壽崇、清水良央、千葉美麗、鈴木俊彦、有吉健太郎、葛西宏介、中田章史、藤嶋洋平、山城秀昭、関根勉、佐々木啓一、木野康志、三浦富智、篠田壽

歯は個体被ばく量を評価するうえで有用である

日本放射線影響学会第 63 回大会 WS, オンライン開催, 2020/10/15-10/16.

3) 小野拓実、木野康志、高橋温、鈴木敏彦、清水良央、千葉美麗、藤嶋洋平、Valerie GOH、有吉健太郎、中田章史、鈴木正敏、山城秀昭、関根勉、篠田壽、三浦富智

福島県浪江町に生息する野生動物の臓器の放射性セシウム濃度測定と内部被ばく線量推定

日本放射線影響学会第 63 回大会 WS, オンライン開催, 2020/10/15-10/16.

4) 小野拓実、木野康志、高橋温、鈴木敏彦、清水良央、千葉美麗、藤嶋洋平、Valerie GOH、有吉健太郎、中田章史、鈴木正敏、山城秀昭、関根勉、篠田壽、三浦富智

福島県浪江町に生息する野生動物の臓器の放射性セシウム濃度測定と内部被ばく線量推定

日本放射線影響学会第 63 回大会, オンライン開催, 2020/10/15-10/16.

5) 小野拓実、木野康志、清水良央、高橋温、藤嶋洋平、Valerie Swee Ting Goh、有吉健太郎、中田章史、鈴木正敏、中川貴美子、高橋常男、山田良広、遠藤暁、山城秀昭、関根勉、篠田壽、三浦富智

福島原発事故後の放射線生物影響調査のための野生アライグマの被ばく線量評価

第 22 回「環境放射能」研究会, オンライン開催, 2021/3/10-3/12

6) 光安優典、岡壽崇、高橋温、小荒井一真、木野康志、奥津賢一、関根勉、山下琢磨、清水良央、千葉美麗、鈴木敏彦、小坂健、佐々木啓一、漆原佑介、鈴木正敏、福本学、篠田壽

野生動物の歯を用いた低線量被ばく評価法の開発

第 22 回「環境放射能」研究会, オンライン開催, 2021/3/10-3/12

KEK Proceedings of the 21st Workshop on Environmental Radioactivity, (2020) 144-149

D. 国際学会発表

なし

E. 著書

なし

- F. 講演
なし
- G. 主催した研究集会
なし
- H. 特許出願・取得
なし
- I. その他
なし

VIII. 参考文献

- 1) Takahashi A, et al.: Radioactivity and radionuclides in deciduous teeth formed before the Fukushima-Daiichi nuclear power plant accident. Scientific Reports 11, May 14, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-89910-0
- 2) Koarai K., et al.: ^{90}Sr in teeth of cattle abandoned in evacuation zone: Record of pollution from the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant accident: Scientific Reports 6:24077 DOI: 10.1038/srep24077 (2016)
- 3) <http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation-m2.gif>

Radiation dose assessment using deciduous teeth collected from children in Fukushima

Keiichi Sasaki

(Vice president of Tohoku University, Professor of Tohoku University Graduate School of Dentistry)

By the end of October 2020, we had collected 7,081 exfoliated deciduous teeth from children living in Fukushima and reference prefectures. We used an imaging plate to measure the teeth for radioactivity (expressed in terms of quantum level; QL) and epidemiologically assessed the data using multivariate regression analysis. For some of the teeth, a germanium detector and a lowbackground gas-flow counter were utilized to measure the activity concentration of radionuclides that emit gamma rays (^{40}K , ^{137}Cs , ^{134}Cs , and natural radionuclides in the uranium and thorium series) and beta rays (^{90}Sr), respectively. Deciduous teeth formed prior the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FNPP) accident showed no regional differences in radiation dose (QL value) between the Fukushima and reference prefectures. The maxillary anterior teeth had higher QL values than did other types of teeth. QL values did not vary by gender and neither did they correlate with age at the time of the FNPP accident, length of time teeth were in the oral

cavity after the FNPP accident, and air dose rate in the areas where the children lived. We found that artificial radionuclides (i.e., ^{90}Sr and ^{137}Cs), as well as natural radionuclides (e.g., ^{40}K and daughter nuclides in the ^{238}U and ^{232}Th series), contributed to the generation of radioactivity in teeth. Among artificial radionuclides, ^{137}Cs was detected in 7 of 9 samples and ^{90}Sr was detected in all samples examined. The artificial radionuclides observed might not have originated from the FNPP accident but from past nuclear weapon tests, because they were detected even in teeth that had formed and exfoliated prior to the FNPP accident. Furthermore, the artificial radionuclides were detected even in the teeth from reference prefectures, where effects of the FNPP accident were considered negligible. The present findings will be indispensable for future studies on the teeth formed after the FNPP accident; those teeth are expected to exfoliate over the next several years and may be more contaminated with radionuclides than the teeth collected for this study. The percentage of teeth formed after the FNPP accident has been rising since 2016; however, the QL values of those teeth had not shown any signs of an increasing till now. Further studies are required to confirm this.