

「第22回日本臨床環境医学会学術集会特集」

総説 シンポジウム

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

井上一彦¹⁾ 山口一郎²⁾

1) 鶴見大学歯学部探索歯学講座

2) 国立保健医療科学院 生活環境研究部

Studies on the accumulation of radionuclides (strontium, plutonium) emitted from the Fukushima No.1 nuclear power plant accident into human milk teeth

Kazuhiko Inoue¹⁾ Ichiro Yamaguchi²⁾

1) Department of Translational Research, Tsurumi University School of Dental Medicine

2) Department of Environmental Health, National Institute of Public Health

要約

福島第一原発事故により環境に放出された放射性核種のストロンチウム⁹⁰Sr（以下⁹⁰Sr）、プルトニウム²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu（以下²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu）はヒトに摂取された場合に、その一部が歯、骨に蓄積する。抜去あるいは脱落した歯を収集し、バイオアッセイによりそれらの核種の摂取量や摂取線量を推計することが考えられる。事故で放出された⁹⁰Sr、²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Puは総量としては少ないと考えられるので、個人別での測定は実施せず、地域別、年齢群別に乳歯を収集し、乳歯中の⁹⁰Sr量、²³⁸Pu量、²³⁹⁺²⁴⁰Pu量を調査する。過去のデータと比較し、福島原発事故の影響を、乳歯の蓄積した放射線量から、人への放射性核種の移行の実態を明らかにしていくことを目的とし、研究を開始した。全国の歯科診療施設に乳歯収集を依頼し（約100施設、2000本配布）、30施設から乳歯を収集した（継続中、588本）。コントロールとして国立予防衛生研究所歯科衛生部で1970年-1985年（推定）に収集された乳歯309本の試料の⁹⁰Sr量、²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu量を従来法とSrRaddisk法（⁹⁰Srのみ）にて定量した結果、SrRaddisk法では検出限界以下（200 mBq/g 灰）であったが、従来法では17mBq/g・Caの⁹⁰Srが検出され、²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Puはいずれも検出限界（0.004mBq/g 灰）以下であった。（臨床環境 22：102-113, 2013）

《キーワード》福島第一原子力発電所事故、放射性核種（⁹⁰Sr、²³⁸Pu、²³⁹⁺²⁴⁰Pu）、バイオアッセイ、乳歯、環境放射能汚染

別刷請求先：井上一彦

〒230-5801 横浜市鶴見区鶴見2-1-3 鶴見大学歯学部探索歯学講座

Reprint Requests to Kazuhiko Inoue, Department of Translational Research, Tsurumi University School of Dental Medicine, 2-1-3 Tsurumi, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 230-5801, Japan

Abstract

Radionuclides such as strontium and plutonium, emitted into the environment by the Fukushima No.1 nuclear power plant accident, will be absorbed by humans and some of the radionuclides will accumulate in their teeth and bones. It is thought that the total amount of ^{90}Sr and ^{239}Pu emitted from the accident was minimal and thus we do not need to individualize measurements, instead we collected milk teeth by area and age group, and investigated ^{90}Sr , ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ levels in the teeth. The authors aimed to clarify the influence of the Fukushima nuclear power plant accident based on the amount of radioactivity accumulated in milk teeth, and examined actual radionuclide transition conditions to humans while comparing them with past data. Approximately 100 dental surgeries throughout Japan were asked to collect milk teeth, and the researchers also collected milk teeth from a further 30 dental offices. This process resulted in the collection of 2,588 milk teeth. The levels of ^{90}Sr , and ^{238}Pu , 239 and ^{240}Pu in a 309 milk tooth control sample from 1970 to 1985 (estimate) by the Department of Dental Research, National Institute of Health were assayed utilizing the official radioactive strontium and plutonium analysis method in environmental samples (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology), and the SrRaddisk method. In this control sample ^{90}Sr (official method, 17mBq/g·Ca) was detected, but ^{238}Pu , 239 and ^{240}Pu was not detected.

(Jpn J Clin Ecol 22 : 102 – 113, 2013)

《Key words》 Fukushima No.1 nuclear power plant accident, Radionuclide (amount of ^{90}Sr , amount of ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$), Bioassay, Milk teeth, Environmental radioactive pollution

I. はじめに

2011年3月、日本が初めて経験した最大級の福島原発事故（レベル7）により放出された放射能量は37万テラ（ 10^{12} ）ベクレル（原子力保安院算出）または、63万テラベクレル（原子力安全委員会算出、以下核種の抜粋、ヨウ素131；16万テラベクレル、セシウム137；1万5000テラベクレル、ストロンチウム90（以下 ^{90}Sr ）；140テラベクレル、プルトニウム239（以下 ^{239}Pu ）；0.0032テラベクレル）であった^{1,2)}。この事故では、広島型原子爆弾数十発分の放射性物質が放出されたと推定される^{1,2)}。気象庁気象研究所は2011年3月に茨城県つくば市でセシウム137の降下量を測定し、地上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30,000Bq/m²であったと報告した³⁾。これらのうちヨウ素は甲状腺に取り込まれ、セシウムは筋肉に分布し、 ^{90}Sr は歯、骨にたまり⁴⁻⁷⁾、 ^{239}Pu は肺に沈着するとともに、骨に蓄積する⁸⁾。 ^{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 hidroksiapatit： $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ に取り込まれると考えられる⁹⁾。 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ は肺に入るか、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¹⁰⁾。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。

我々は、核実験による大気中の放射能降下物（フォールアウト）や食物摂取に由来した内部被曝による日本人への影響を調査するために1972年から1995年まで日本全国の歯科診療所から歯を収集し（1,022本）、 ^{90}Sr の抜去第三大臼歯への蓄積について生年別に調査し、1953年生まれの人々の第三大臼歯が最大値を示すことを報告した⁴⁻⁷⁾（図1）。これは、1953年生まれのグループでの第三大臼歯の形成期（生後約10年後）の1963～1964年に世界中で最も核実験が行われ、そのフォールアウトが最も高かった時期に一致していると考えられる所見であった（図1）。永井と石井はこれより以前に地上核実験が行われている時期に全国より乳歯を収集し、前述の第三大臼歯と同様に乳歯においても生年別に一致して放射能が高いことを示した（生年1963-1964；図1）¹⁰⁾。これらは歯の形成期に一致して ^{90}Sr が取り込まれていることを示唆しているため、生年別に分類することは重要である。他方、核実験の影響で日本人の骨からも ^{239}Pu が検出され¹¹⁾、スイスで生まれた小児の乳歯

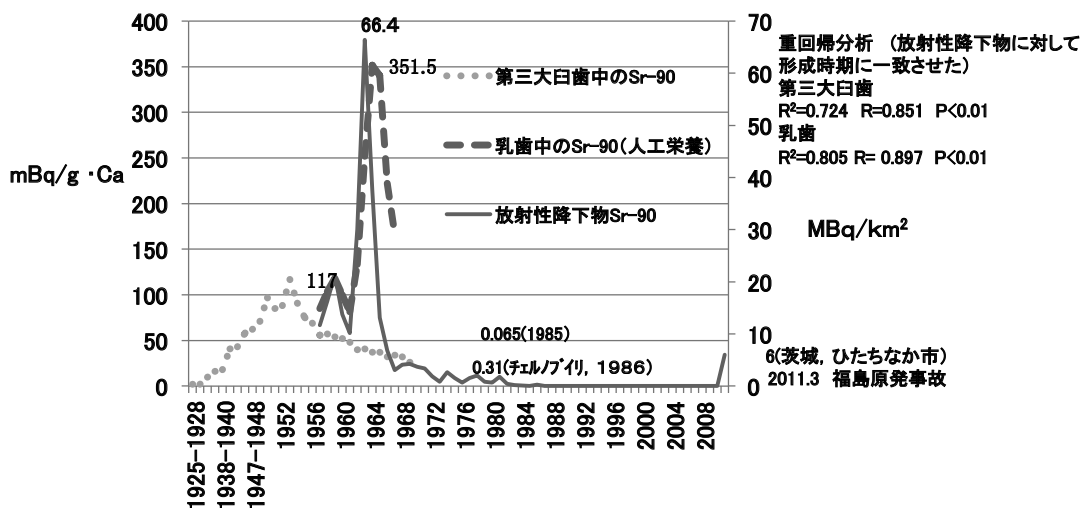


図1 日本における放射性降下物 ^{90}Sr の年間降下量(1958-2011年)と日本人第三大臼歯中($N=849$)と乳歯($N=114,725$)の ^{90}Sr 量⁷⁾

西暦 放射性降下物(降下年:月別平均) 第三大臼歯、乳歯はドナーの生年

Moriyo Hinoide, Makoto Yamamoto, Kazuhiko Inoue, Hideo Nakamura, Susumu Imai: RADIOACTIVITY SURVEY DATA in Japan⁶⁾, と環境放射能データベース²⁵⁾、放射能調査研究成果発表会抄録集¹⁰⁾より改変

への ^{239}Pu の取り込みの報告が認められているが¹²⁾、近年、日本ではこれらの研究は行われていない。乳歯は永久歯に比べ短期間で多くの歯を収集することが可能であるため、バイオアッセイとして、環境中の放出された放射性核種が人体に移行しているかどうかをグループ別に検証することに適している。これらの背景のもとに、乳歯中の ^{90}Sr 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ の原発事故前後の推移を明らかにすることで、福島第一原発事故によって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研究プロジェクトを遂行中であり、本総説では、そのプロジェクトの概要と現況を紹介したいと思う。日本全国より乳歯を集め、乳歯中での放射性核種の濃度を地域別、生年別に調査する。この研究をおこなうにあたり、今回の原発事故では放射性核種の大気への放出量が総量としては少ないと考えられるため^{1,2)}、個々の乳歯あるいは個人単位での比較検討ではなく、地域単位での比較を行う。また、核実験の影響があると思われる時期に収集されていた(1970~1985年頃)乳歯のグループ(生年詳細不詳、約308本)と比較すること

も予定されている。本プロジェクトによって、日本で初めての ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ の乳歯への蓄積の実情が明らかにされるとともに、福島原発事故の飛散の状況の地域的広がりや、過去の核実験頻発時期との比較によって、事故の規模や被曝の可能性のある地域住民への今後の対応について基盤となるデータが蓄積されるものと期待している。なお、本プロジェクトは鶴見大学歯学部倫理診査委員会及び東京歯科大学倫理委員会において承認されている。

II. プロジェクト概要

東日本大震災や福島原発事故により、周辺地域住民は震災や放射能に関して、予想以上に心身両面でのダメージを受けている¹²⁾。心のケアのために被災地域住民を中心に東北地方、関東地方においてボランティアにより「家族のリスクマネジメント勉強会」(<http://k-rm.net/index.html>)が実施されている。今回の研究は、非常に繊細な対応と方法が不可欠であると考慮されるために、東日本大震災や福島第一原子力発電所事故で支援活動を

表1 研究グループ

研究班	分担テーマ	責任者氏名（所属・職）	構成員数
鶴見大学探索歯学講座	研究計画立案 歯の収集 リスクマネジメント	井上一彦（鶴見大学探索歯学講座・非常勤講師） 花田信弘（鶴見大学探索歯学講座・教授）他	7名
国立保健医療科学院	研究計画立案 リスクマネジメント	山口一郎（国立保健医療科学院生活環境研究部・ 上席主任研究官）	1名
東京歯科大学社会歯科学 教室 小児歯科学講座	研究計画立案 歯の収集 リスクマネジメント	石井拓男教授 新谷誠康教授 今井裕樹助教	3名
家族のリスクマネジメント 勉強会	研究計画立案 歯の収集 リスクマネジメント	半谷輝巳（FSAC 福島ステークホルダー調整協議 会 事務局長） 宮井崇宏（医療法人崇尚会・理事長）	2名
高輪クリニック	研究計画立案 歯の収集 リスクマネジメント	陰山康成（医療法人癒合会 高輪クリニック理事 長・医師・歯科医師）他	4名
日本分析センター	放射性核種 分析測定	担当者（財団法人日本分析センター放射能分析 業務部 総括グループ）	1名

表2 乳歯収集予定地域 {福島県、関東、東北地方中心に20グループ (20試料)}

茨城県	○□	神奈川県	○	宮城県	○	京都府	○□
栃木県		千葉県	○□	岩手県		静岡県	
群馬県		福島県 津会		山形県		山梨県	
埼玉県	○□	福島県 中通り	□	青森県		長野県	
東京都	○□	福島県 浜通り	○□	北海道	○	生年1970～ 1985乳歯群	△

△：1970-1985年日本全国から収集した乳歯（約309本）

○：収集することができる歯科診療施設がある都道府県および地域

□：「家族のリスクマネジメント勉強会」を開催している都道府県

実施している関連グループとも連携し、研究を実施することとした（表1）。

Ⅲ. 方法

1. 乳歯収集方法：本研究に賛同し、協力を得られる全国の歯科診療所（東北、関東地方を中心）や「家族のリスクマネジメント勉強会」を通じて乳歯を提供して頂ける協力者、および本研究の意義を理解し、賛同して頂ける方から歯を収集する。協力を得られる乳歯の提供者とおよび歯科診療所の院長に同意書を頂く。事前の具体的な乳歯

収集地域20地域を予定したが（表2）、現段階で乳歯収集を許諾して頂いた歯科診療所と施設は、東京都；30、埼玉県；3、神奈川県；5、茨城県；2、千葉県5、北海道；1、秋田県；1、宮城県；1、山形県；1、福島県；1、京都府；1、大阪府；1、愛媛県；20、熊本県；3、鹿児島県；3、沖縄県；1、合計18地域、74施設である（表3、平成25年10月15日現在）。徐々に協力歯科診療所および協力者を増やすための活動は継続していく。1年間で乳歯400本、5年間で累計20地域、乳歯2,000本が目標である。収集される乳歯は基本情

表3 全国における乳歯収集状況（平成25年10月15日現在、東日本259本、西日本329本、総計588本）

地域	東京				神奈川				千葉				埼玉				大阪				愛媛				熊本				鹿児島				沖縄				計	生年
	AB	C	D	E	AB	C	D	E	AB	C	D	E	AB	C	D	E	AB	C	D	E	AB	C	D	E	AB	C	D	E	AB	C	D	E						
1986																															1	1986						
1987																																0	1987					
1988																																0	1988					
1989				4								8	4	4																		20	1989					
1990																																0	1990					
1991																																0	1991					
1992																							1		1							2	1992					
1993																																0	1993					
1994	8	5	4	4										1																		22	1994					
1995																																0	1995					
1996																																0	1996					
1997																														1		1	1997					
1998								1																								1	1998					
1999	8	7	6	9			1						1										1	4								37	1999					
2000		2	2	11					1		1			4							2	4	12		1							41	2000					
2001		2	3	6			1							5							2	5	8	21	1	1	1			3		59	2001					
2002	1	6	8	6			1	1	1	1	3	4		4		1	1	2	2	7	12	22		1	3		1	1	3		93	2002						
2003	1	3	4	5			1	1					9	4	1	5		1	1		12	15	13	1	1	3	1		2	2	89	2003						
2004	2	1	1		1	1	1			2	5		1	4	2		1		5	16	12	8		2	2	3		2	1		1	75	2004					
2005	4	1			1					1			13	2					7	6	5	1	4		1	1		3			1	51	2005					
2006	6				6						1	9	1						28	7			3				4				1	66	2006					
2007	2				2							2			1				12	2			1				2					24	2007					
2008	4																										1					5	2008					
2009																			1													1	2009					
2010																																	0	2010				
2011																																	0	2011				
2012																																	0	2012				
2013																																	0	2013				
計	36	27	28	45	10	1	3	5	1	5	8	6	42	12	10	20	1	2	2	5	55	57	57	82	9	6	8	10	7	2	6	8	0	5	5	2	588	
地域別計			136				19				20			84			10				251			33			23				12					588		

報として被験者の名前、住所、抜歯部位、年齢、抜歯年月日、歯科診療施設名が記載され、これらは個人情報として暗号化され、個人が特定できないような形で鶴見大学探索歯学講座で厳重に保管されている。

2. ^{90}Sr 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ の分析方法

1) 試料の作成：地域別、生年別に乳歯60～80本収集後、乳歯の歯石や軟組織をマイクロモーターやスケラ等を使って可及的に除去した後、乾燥させ8時間電気炉 (TMF500, MORITA[®]) でアルミナ入りのつぼに入れ、焼結させ灰化し、深型メノウ乳鉢 (東京硝子器械) を使って粉末にして、53meshの篩を通過したものを試料としている (図3)。

2) ^{90}Sr の分析：検出下限値は 4 mBq/g・Ca から

算出して分析に必要な量は10～20gである。計測は放射性ストロンチウム分析法 (図2、文部科学省 科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室)¹³⁾ により行っている。

(1) 化学分離

^{90}Sr 分析試料 (プルトニウム分析の陰イオン交換樹脂カラムの通過液および洗浄液) をイオン交換法により分離・精製したストロンチウムからイットリウム90 (以下 ^{90}Y) を除去 (スカベンジング) し、2週間放置して新たに生成した ^{90}Y を水酸化鉄 (Ⅲ) 沈殿に共沈させ (ミルキング)、測定試料とした。

(2) 測定

低バックグランドベータ線測定装置 (日立アロカメディカル社製 LBC-471Q) を用いて、測定試

料を原則として3,600秒間測定し、⁹⁰Sr 放射能強度を算出した。

3) ^{238,239+240}Pu の分析：検出下限値は0.02mBq/g・Ca から算出して分析必要試料量は10~20g である。計測は環境試料中プルトニウム迅速分析法 (図3、文部科学省 科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室)¹⁴⁾ により実施する。

(1) 化学分離

分析試料に²⁴²Pu 回収率補正用トレーサ及びストロンチウム担体を添加し、硝酸を加えて加熱抽出した。陰イオン交換樹脂カラムに通して通過液と洗浄液は⁹⁰Sr 分析試料とし、樹脂カラムはプルトニウム分析に用いた。樹脂カラムから分離・精製したプルトニウムをステンレス鋼板上に電着し、測定試料とした。

(2) 測定

シリコン半導体検出器 (ORTEC 社製) を用いて、測定試料を原則として80,000秒間以上測定し、²³⁸Pu 及び²³⁹⁺²⁴⁰Pu 放射能強度を算出した。

乳歯の放射エネルギーから、これらの核種による被曝線量を推定し、環境への放射能汚染の実態を明らかにしていくべく、鋭意、乳歯を収集中である。

IV. 現状

1. 乳歯収集状況：本研究に賛同が得られた全国歯科診療所施設 (北海道、東北5、関東5、関西1、四国1、九州3、19都道府県) に資料 (研究計画説明書、同意書) と収集ビンの配布を実施した (2,000本、平成24年12月~)。被災地 (福島、茨城、宮城) および周辺地域において、本研究に協力が得られるように「家族のリスクマネジメント勉強会」や講演会を開催し、被災地域や避難地域の市町村の保健師にもお子さんを持つ保護者に乳歯収集を依頼しているが、被災地および周辺地域での収集状況は良くない。現在の乳歯収集数を都道府県別に表3に示した。内訳は東京都：136、神奈川県：19、千葉県：20、埼玉県：84、東日本計259本、大阪府：10、愛媛県：250、熊本県：33、鹿児島県：23、沖縄県：12、西日本計318本、総計588本 (男児由来：335本、女児由来：224本) であった (平成25年10月15日現在)。

2. コントロール試料の作製：1970年~1985年頃まで、国立予防衛生研究所 歯科衛生部で収集されていた乳歯の歯種 (A：乳中切歯、B：乳側切歯、

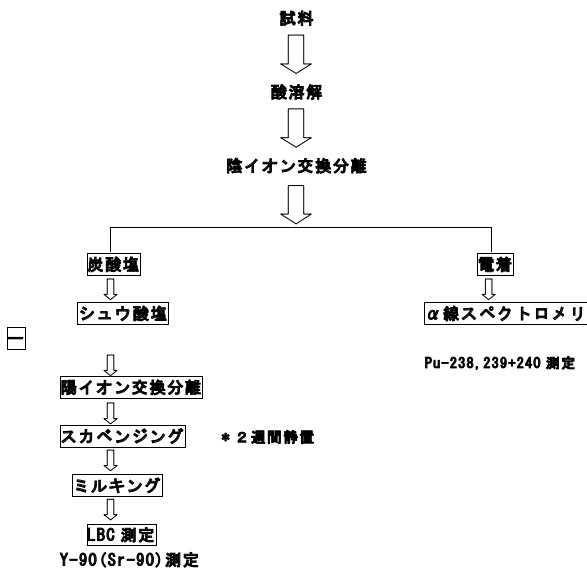


図2 プルトニウム、ストロンチウム90逐次分析法

放射性ストロンチウム分析法¹³⁾、環境試料中プルトニウム迅速分析法¹⁴⁾ (文部科学省 科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室)



図3 乳歯 乾燥後 (左) 灰化後 (中) 粉末試料 (右)

C：乳犬歯、D：第一乳臼歯、E：第二乳臼歯）別の乾燥重量と本数を表4に示す。

本数の推定：20年以上室温で乾燥状態で密封して保管しているが、乾燥による破折がみられる。原形をとどめていないものは視診で識別し（特にD, E）、歯種を判別した（図3）。本数の推定は形をとどめている歯種の総重量を測定し、一本あたりの重量を算出し、全体の本数を推定値として算出した（表4）。

実験プロトコルに従い、歯種別、削片別に灰化した（図3）、灰化後重量を表4に示す。

試料の秤量：AB群、C群、D群、E群、歯種不明歯牙削片群から2gずつ合計10g（約50本）を簡便で早期に測定結果がわかるSrRaddisk法¹⁵⁾の⁹⁰Sr測定用試料とした。そして、さらに各4gずつ合計20gを従来法であるプルトニウム、ストロンチウム逐次分析法（図2）の試料とした。

3. コントロールサンプルの結果

灰化乳歯試料20グラムから放射性ストロンチウムが $17 \pm 1.8 \text{ mBq/g} \cdot \text{Ca}$ （基準日2013年10月21日、不確かさは計数誤差のみを示す）が検出されたが、プルトニウムに関しては検出限界以下であった（表5）。SrRaddisk法¹⁵⁾を用いた⁹⁰Srの測定は検出限界以下（200mBq/g 灰）であった。

V. 考察

1. コントロールサンプルの結果について（表5）

コントロールサンプルは1970-1985年頃まで国立予防衛生研究所 歯科衛生部で収集され、乾燥状態の室内に室温保存されていた乳歯（約309本、表4）の灰化試料20グラムであり、実際の収集年月日は不詳であるため推定で基準日を設定し、定量値： $17 \text{ mBq/g} \cdot \text{Ca}$ を求めた。⁹⁰Srの半減期は28.79年（JCAC）使用値であり指数関数的に減衰

表4 1970～1985年までに予研で収集された歯種別乳歯数および重量

	AB	C	D	E	ABCDE 平均重量	歯種不明 歯牙削片	総合計本数 および重量
本数	96	61	16	10		29	
重量 (g)	14.7	13.3	5.75	6.68		10.2	
一本当り重量 (g)	0.153	0.218	0.359	0.668	0.350	0.399	
削片重量 (g)			10.35	14.15			
推定本数	96	61	29	21		26	308
総重量 (g)	14.7	13.3	16.1	20.83		10.2	75.13
灰化後重量 (g)	10.85	9.98	12.48	16.78		7.93	58.02

表5 1970年-1985年まで収集された乳歯の分析結果

	基準日	測定日	⁹⁰ Sr	単位
乳歯	1983年1月1日	2013年12月11日	35 ± 3.7	mBq/g · Ca
	1993年1月1日		28 ± 2.9	
	2013年10月21日		17 ± 1.8	
	測定日	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	mBq/g 灰
	2013年12月2日	* (0.004)	* (0.004)	

*：検出限界以下 ()：検出下限値

不確かさは計数誤差のみを示す基準日からの測定値： $A_t = A_0 / (1/2)^{t/T}$ より算出

A：時間 t における放射能 A₀：最初の時間における放射能 t：経過時間

T：半減期 {29.12年 (JCAC)：日数換算}²⁶⁾

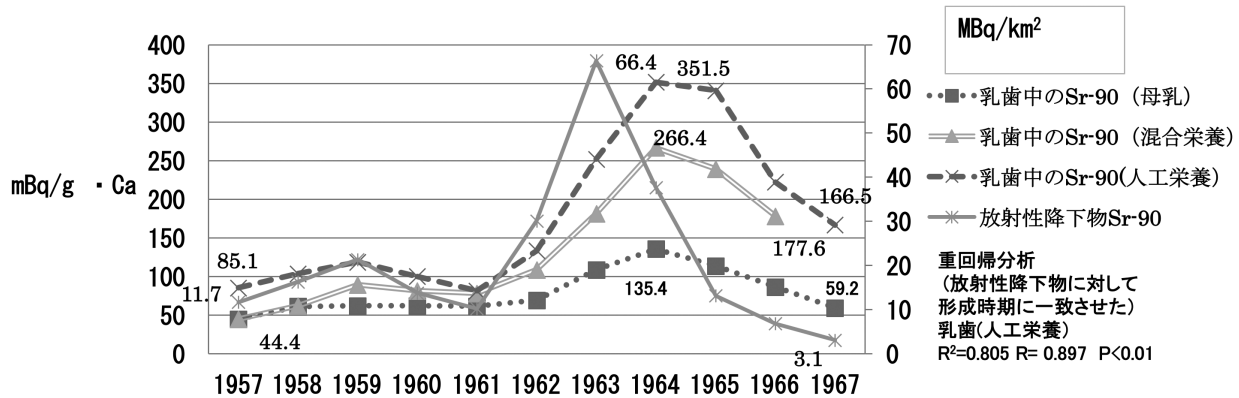


図4 日本における放射性降下物⁹⁰Sr量と日本人乳歯の⁹⁰Sr量 (1957-1967年)

西暦 放射性降下物 (降下年: 月別平均) 乳歯: 生年

第19回放射能調査研究抄録集 (文部科学省)¹⁰⁾ 環境放射能データベース²⁵⁾ から改編

される²⁶⁾。公式の最後の乳歯中の⁹⁰Sr定量値は59.2mBq/gCa (生年1967年、図4)であったことから、生年が1970年頃のものであることが示唆される (表5)。このコントロールデータは福島原発事故以降の収集された乳歯のデータを分析比較する上で非常に貴重なものである。SrRaddisk法¹⁵⁾は乳歯中⁹⁰Srの測定では用いることができないことが確認された。

2. 個人レベルでなく地域レベルでの放射性核種の比較

対象とする放射性核種の大気への放出量が、福島第一原発事故ではチェルノブイリ事故に比較すると総量としては少ないことが示唆されている^{1,2)}。フォールアウト中の⁹⁰Srは事故前で最大0.3 mBq/m²/monthであったものが、茨城県でも最大値6 Bq/m²/month (2011年3月)となり4桁桁数の上昇にとどまっている³⁾。ただし、海洋への流失が、食物連鎖により人への移行に寄与することが考えられる。生物濃縮におけるヒト生体内にこれらの核種が蓄積する可能性は、大型魚の骨を食する文化を有する地域では否定できない。一方、原発事故後の放射性核種の降下量については、関東、東北地方で降下量にも差があったことも示されている。青山らは、事故後に大気中で検出された放射性核種は、事故現場での放出物の違いを反映して関東、東北地方における放射性降下量の違

いを生み出した可能性を指摘し、様々な放射性核種が放出され地域によって差がみられることを報告した³⁾。検出限界値は、今回のコントロールの結果からおおよそ2 mBq/g · Caであったことが確認された。個々の乳歯や数本単位では、検出可能な量が蓄積しているとは考えられないので、測定は、地域単位で収集した乳歯を混合させて実施することとした。測定のための1試料必要量は約20gである。一試料を作製するために乳歯 (平均0.36g) で約60~80本必要となる¹⁰⁾。また、測定方法は現状で非常に煩雑でかつ時間を要する (約2~3ヶ月) こともあり、収集とともに、測定方法の改善や新測定方法、測定装置の開発や歯種選別に関しても、本プロジェクトの中で検討を進めている。

3. 胎生期 (乳歯形成期) での取り込み: 石井らは、最大値の放射能降下物 (フォールアウト、1963年) に一致して、その時期に形成されていた乳歯 (石灰化開始; 胎生4~6月、歯冠完成; 生後1.5~11月) には放射エネルギーが高いことを示した (生年1964年、図1、4)¹⁰⁾。⁹⁰Srが胎盤を移行することも踏まえて、生体は胎生期から取り込みを始めると想定されるので、生年が2012年の乳歯の取り込みが、最大であると予想される。プルトニウムも⁹⁰Sr同様に、胎生期からの取り込みがあることが報告されている⁸⁾。これらより、事故が起

きた時(2011年)に乳歯の形成時期に一致した乳幼児、すなわち生年が2011年以降の乳歯には、事故によって放出された放射性核種の環境への影響が多であった地域(原発近隣地域や東北、関東)では、 ^{90}Sr や ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ が多く取り込まれることが予想される。特に乳歯は ^{90}Sr に感受性が高い(第三大臼歯の3倍;図1、人工栄養;1.3~2.59倍の ^{90}Sr 量、図4)ため、飲食物を介してこれらの核種が多く取り込まれる可能性が高いと考えられる。今回の1970-1985年まで収集された乳歯の ^{90}Sr の結果(核実験由来)と福島原発事故以後に収集された乳歯(地域別生年別)の定量値の差を比較することにより、人体への放射性物質の取り込みの実態を検証する。

4. 乳歯中の ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 量の比による原発事故由来の判定

原発事故周辺地域土壌中から ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ が検出されている。原発事故では、 ^{238}Pu が特異的に検出され、その比が0.053を超えると福島原発由来のものであると断定される¹⁶⁾。今回、コントロールサンプルからは ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかったことは試料量が少ないか1970-1985年に収集さ

れた乳歯の ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ の汚染が日本では少ないことが示唆されるが、今後サンプル量を増やしたり、検出方法を改善する予定である。

5. 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¹⁷⁾。乳歯の検討である本プロジェクトとは若干異なるが、結果が得られた後には、詳細な検討を予定している。

6. 骨内への影響予測

Reissは死産児(43体)の全骨格と乳歯の ^{90}Sr 量の分析を行い、骨と乳歯に蓄積する割合はおおむね同じであることを、示している¹⁸⁾。つまり、同一環境で発育する骨や歯の硬組織に含まれる ^{90}Sr 量はほぼ同じであること示唆している。但し、経年的に骨の ^{90}Sr は環境中に ^{90}Sr 量が少なくなれば、代謝され減少するのに対して、代謝のない歯では減少率が少なく、 ^{90}Sr は残存していた(表5)。こ

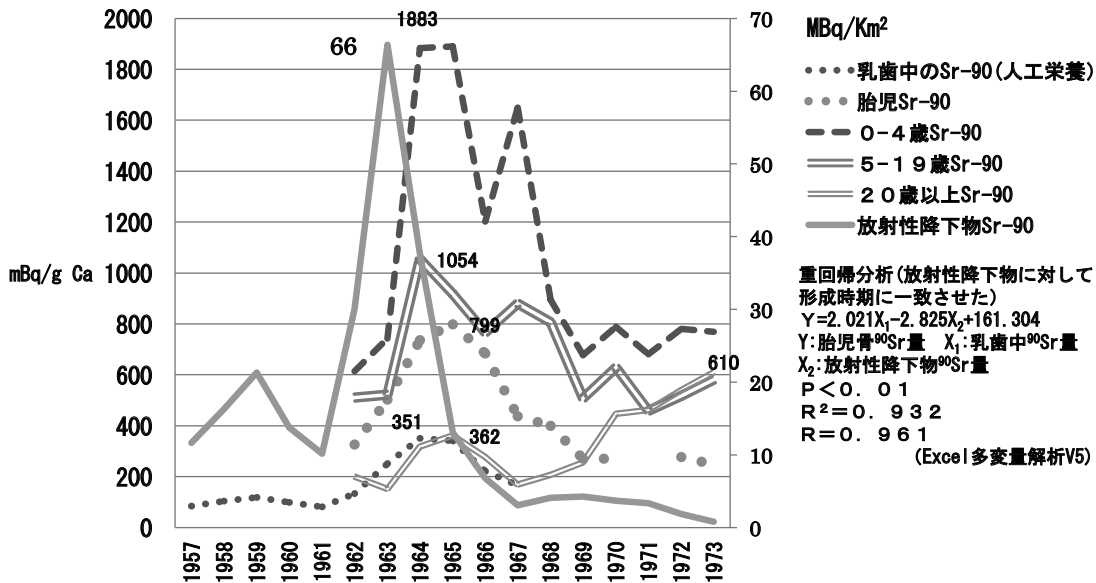


図5 乳歯と骨に蓄積された ^{90}Sr 量と放射性降下物 ^{90}Sr 量

西暦 乳歯：生年 骨：採取時(死亡)

放射能調査研究抄録集¹⁰⁾(文部科学省)環境放射能データベース²⁵⁾から改編

のことは抜歯される乳歯を用いて、 ^{90}Sr 量を測定することにより、骨への蓄積量を推定できることが示唆されている(図5)^{7,10,18)}。さらに、核実験由来のPuは日本人骨から検出されている¹¹⁾ので、乳歯や歯との関連性を調査する。

7. 乳幼児の放射能汚染について

尿や母乳中に放射性ヨウ素や放射性セシウムが検出されている¹⁹⁻²²⁾ことから、代謝されない乳歯の形成期(胎生1.5ヶ月～生後3ヶ月)に ^{90}Sr や ^{238}Pu や $^{239+240}\text{Pu}$ が蓄積される可能性が示唆される。また、その汚染は被災地にとどまらず、東北、関東地域に及んでいることが示されている¹⁹⁻²²⁾。

8. 水道水関連の ^{90}Sr

福島県は水道原水、上水、地下水にふくまれる ^{90}Sr のモニタリング調査の結果を公表し(県内29地点)、22点で2.1～2.8mBq/ℓ検出され、核実験由来の可能性が高いとしているが、断定するものではないとしている。²³⁾

VI. まとめ

20-30年前の乳歯から ^{90}Sr が検出(核実験由来)されたことは、バイオアッセイとして非常に重要であることが再確認され、原発事故以降の人体への汚染の指標になることが考えられる。プルトニウムは検出限界以下であったが、日本人骨から $^{239+240}\text{Pu}$ が検出され¹¹⁾スイスの報告では微量に検出されていること⁸⁾から検出方法改良や歯種選別も視野に入れ、研究課題とする。

1年で約600本の乳歯が収集できたが、都道府県別や生年別では1試料として定量可能なレベルはわずかである(愛媛県;5群、表3)。被災地ではこの研究の意義を理解して頂くために勉強会を実施し、乳歯収集を依頼しているが、事故の影響が最大限存在すると見られる福島からは乳歯はほとんど収集されていない。事故後2年半が経過し、実態を多角的に把握する試みの一つとしての本研究の意義の理解を求めるのが課題となっている。

福島第一原発では未だに汚染水や廃炉に向かったの諸問題を抱え、周辺地域でも継続して空間線量が高く、土壌や河川も汚染されているので¹⁶⁾、放

出された放射性核種の環境への影響や人体への放射能汚染を継続して長期にわたり調査していくこと(考察参照)は、世界に対する日本の責務と考える。母乳や乳幼児での調査結果が報告され¹⁹⁻²²⁾、線量が一定程度にとどまることが確認されつつある。今回、コントロール乳歯に取り込まれた放射性物質は代謝がないために長期保存後も残存することが再確認された。今回の研究方法は地域別、生年別の比較であるが、将来的には個人別の乳歯をすべて集め、個人レベルの放射性核種の蓄積量算出を試みることも有意義な検討になろうと思われる。一方、今回の結果から乳歯に蓄積した ^{90}Sr やプルトニウムは微量であり、内部被曝線量は小さいと考えられるが、放射線防護では、直線閾値なしモデルが用いられており(ICRP)²⁴⁾、バイオアッセイとしての乳歯中の放射性核種の測定は、過去の曝露の推計が可能であることから、より小さいリスクを取り扱う場合の実態の把握に役立てることができると考えられる。今回の結果は乳歯灰化試料20グラム(約60-80本)の必要量が確認された。このデータを踏襲し、研究方法を再確認することが基本になるが、理論上第三大臼歯では4本で検出可能である報告がされているし、今回の結果より10グラム(30-40本)でも ^{90}Sr は検出される可能性は高いので、可及的に少量で測定する方法を見いだしていく予定である。プルトニウムに関してはさらに微量であるので試料を増量したり、測定法の改良や歯種選定を考慮に入れる必要があることが示唆される。現在、収集されている乳歯は、原発事故以後収集されたものであるが、2011年時点で乳歯の形成期に合致しているものではない。本稿で紹介してきたように、自然にあるいは歯科診療の中で抜去される乳歯(生年;2011年以降)は ^{90}Sr や ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ の原発事故以後の体内摂取量推定に役立つと考えられる(図1、5)。それゆえ、乳歯収集本数を増やし、被災地やその周辺地域での実態を把握することを目指したい。特に福島の方々および関東、東北、全国の方々(特に歯科医療関係者)にご協力をお願いし、稿を閉じる。

謝辞

この研究を実施するにあたり、ご指導ご鞭撻を頂いた元国立予防衛生研究所歯科衛生部室長 樋出守世先生に心より感謝を申し上げます。又、乳歯協力にご尽力頂いた松本健二先生、弘中美貴子先生をはじめ全国の歯科診療所施設の先生方の多大なる御貢献に感謝を申し上げます。この研究は平成24年度日本歯科医学会総合的研究推進費で実施されている。

文献

- 1) 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://www.meti.go.jp/press/2011/06/20110606008/20110606008.html> (2014.1.15). 放射性物質放出量データの一部誤りについて
<http://www.meti.go.jp/press/2011/10/20111020001/20111020001.pdf> (2014.1.15)
- 2) 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
<http://www.nsc.go.jp/info/20110412.pdf> (2014.1.15)
- 3) 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://www.mri-jma.go.jp/Topics/Happyoukai2011/2011Happyou05.pdf> (2014.1.15)
- 4) 樋出守世、中村秀男、他. 日本人第三大臼歯に蓄積された放射性核種および微量元素に関する研究 I. 口腔衛生 40 : 243-250, 1989
- 5) 樋出守世、井上一彦、他. 日本人第三大臼歯に蓄積された放射性核種および微量元素に関する研究. 口腔衛生 41 : 206-213, 1991
- 6) Hinoide M, Yamamoto M, et al. Annual changes in the level of ⁹⁰Sr in Japanese third molar. Radioactivity Survey in Japan 99: 42-49, 1992
(http://www.kankyo-hoshano.go.jp/07/rsd_lib/1992_no_99.pdf) (2014.1.15.)
- 7) 井上一彦、村田貴俊、他. 日本における放射性降下物ストロンチウム90 (1958-2011年) と日本人第三大臼歯と乳歯へのストロンチウム90の蓄積量の比較と相関性について. 口腔衛生 63 : 159, 2013
- 8) Froidevaux P, Haldimann M. Plutonium from above-ground nuclear tests in milk teeth: Investigation of placental transfer in children born between 1951 and 1995 in Switzerland. Environ Health Perspec 116: 1731-1734, 2008
- 9) 須賀昭一. エナメル質形成の観点から見たエナメル質表層の構造と組成. *In*. 須賀昭一、石井俊文 (編). 齲蝕感受性 エナメル質表層の構造と組成. 口腔保健協会、東京. 1976
- 10) 永井充、石井俊文. 乳歯中の⁹⁰Srについて. *In*. 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) 湯川雅枝、前田智子、他. 人体臓器中の²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度. *In*. 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. 1986. pp139-141.
- 12) 山口一郎. 原子力災害後の現存被曝状況でのリスク・コミュニケーション. 医学のあゆみ 239 : 1050-1055, 2011
- 13) 放射性ストロンチウム分析法. 文部科学省、平成15年改訂
www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No2.pdf (2014.1.15)
- 14) 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
<http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No28-1.pdf> (2014.1.15)
- 15) 亀尾裕、島田亜佐子、他. 研究施設等廃棄物に含まれる放射性核種の簡易・迅速分析法 (分析指針). *In*. JAEA-Technology 2009-051. 独立行政法人日本原子力研究開発機構、東海村、茨木. 2009
- 16) (独) 日本原子力研究開発機構 福島技術本部. 「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」の告書の概略版について.
<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf05/summary.pdf> (2014.1.15.)
- 17) Kulev YD, Polikarpov GG, et al. Strontium-90 concentrations in human teeth in south Ukraine, 5 years after the Chernobyl accident. Sci Total Environ 155: 215-219, 1994
- 18) Reiss LZ. Strontium-90 absorption by deciduous teeth. Science 134: 1669-1673, 1961
- 19) bonyuutyousa.net/blog/wp-content/uploads/2012/07/20110927
母乳放射能検査結果 (居住県別) 5.pdf (2014.1.15)
母乳調査・母子支援ネットワーク WEB
(<http://bonyuutyousa.net/>) 内
- 20) bonyuutyousa.net/blog/wp-content/uploads/2012/07/20120720 乳幼児の尿の放射能検査 3.pdf (2014.1.15)
母乳調査・母子支援ネットワーク WEB
(<http://bonyuutyousa.net/>) 内
- 21) bonyuutyousa.net/blog/wp-content/uploads/2012/07/20120720 母乳&乳幼児の尿県別集計表 2.pdf (2014.1.15)
母乳調査・母子支援ネットワーク WEB
(<http://bonyuutyousa.net/>) 内
- 22) Unno N, Minakami H, et al. Effect of the Fukushima

- nuclear power plant accident on radioiodine (^{131}I) content in human breast milk. *J Obstet Gynaecol Res* 38: 772-779, 2012
- 23) http://www.minpo.jp/pub/topics/jishin2011/2013/03/post_6783.html (2014.1.15) 福島民報 (2013.3.30. 記事)
- 24) International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103). Ann. ICRP 37, 2007
- 25) 環境放射能データベース
<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top?pageSID=23321471> (2014.1.15)
- 26) 日本アイソトープ協会、『アイソトープ手帳』、p.31. (1)