

Environmental Radioactivity Problem around the Former Soviet Union's Semipalatinsk Nuclear Test Site

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Yamamoto, Masayoshi メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00034848

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



旧ソ連核実験場セミパラチンスク周辺 の環境放射能問題

(課題番号 : 09680518)

平成9年度～平成10年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書

平成 11 年 3 月

研究代表者 山本政儀

(金沢大学・理学部・助教授)
(理学部附属低レベル放射能実験施設)

金沢大学附属図書館



8000-73490-7

はしがき

1. 研究の背景

旧ソ連には、公表されているかぎり2つの核実験場があった。カザフスタンの北東に位置するセミパラチンスクとロシア北部に広がるノバヤ・ゼムラ(Novaja-Zemla)島である。最初の核実験が1949年8月29日にセミパラチンスク核実験場(市の南西約70 kmの地点から始まる通称”ポリゴン”, 面積約 $1.85 \times 10^4 \text{ km}^2$, 日本の四国の面積に匹敵)で行われた。それ以来, この実験場で大気(87回), 地上(26回), 地下(346回)併せて計450回以上の核実験が実施されてきた(1989年10月に閉鎖)。当然ながら, 周辺住民に核実験を予告することなく情報は隔離され, 旧ソ連が崩壊した現在もなお大半の情報は秘匿されたままである。セミパラチンスク周辺には, 50万人とも言われる被爆者が存在していると伝えられているが, 学術的に住民の被曝線量を組織的に研究した例も, また汚染の実態を広範囲かつ詳細に研究した例もほとんど無い。近年, チェルノブイリ原子力発電所事故(1986年4月)とも関連して, このような核実験場(西側の核実験場も含めて)の周辺住民地域における電離放射線の人の健康に対する影響評価研究, 特に長期の低線量被曝の人体影響研究が緊急性を帯びてきた。1993年から1997年にかけて, ロシア, アメリカ, 中国, カザフスタン, フランス, イギリスが共同で国際共同研究プロジェクト”RADOTEST(Radioactivity from Nuclear Test Explosionsの略), 副題: 原爆実験による放射性降下物の移動, 沈降及び人体影響の研究”, をスタートし多くのデータを発掘してきた。

当研究代表者は, 1994年から1998年にかけて計6回セミパラチンスク核実験場(核実験場内(国際学術研究, 代表: 塚谷恒雄教授(京都大・経済), 分担で2回), 及びその周辺地域(国際学術研究, 代表: 星 正治教授(広島大・原医研), 分担で4回)の放射能汚染と疫学調査に参加し, 数多くの地点から土壌試料を採取してきた。同時に, 被曝線量を評価するためにレンガと一部の地域においては住民の血液も採取した(広島大・原医研)。本研究では, これらの土壌試料について, 半減期の長い ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17 \text{ y}$), Pu 同位体 (^{238}Pu ($T_{1/2} = 87.7 \text{ y}$), ^{239}Pu ($T_{1/2} = 2.41 \times 10^4 \text{ y}$), ^{240}Pu ($T_{1/2} = 6.55 \times 10^3 \text{ y}$), ^{241}Pu ($T_{1/2} = 14.4 \text{ y}$)), ^{241}Am ($T_{1/2} = 4.33 \times 10^2 \text{ y}$)などを測定し, レベルと分布, 汚染源の識別(主としてGlobal falloutとセミパラチンスク核実験場からのClose-in falloutの識別)について詳細な検討を行い, まず残留放射能の実態を科学的に明らかにすることを第1の目的とした。ここで得られたデータは, 国際学術研究で進めているレンガを用いた外部被曝線量評価や食物連鎖による内部被曝線量評価, さらに被曝線量評価モデル構築の基礎データに資すると考えている。

2. 研究実績の概要

旧ソ連セミパラチンスク核実験場及びその周辺地域の残留放射能の濃度レベル、分布、移行等の知見を得るために、土壤中の半減期の長い ^{137}Cs 及びPu同位体を測定した。特にPuの分析・測定では、 $^{239, 240}\text{Pu}$ 濃度測定に加えて、逐次分析法を用いての存在特性、さらに $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比測定からの汚染源の識別を検討した。結果として、核実験場内及びその周辺地域の土壤中 ^{137}Cs 濃度は、国内のGlobal fallout($3000\sim 7000\text{ Bq/m}^2$)と同等かやや低いレベルで、一方 $^{239, 240}\text{Pu}$ は国内レベル($40\sim 120\text{ Bq/m}^2$)の数～数百倍の高レベルで検出され、非常に不均一に分布していることが分かった。 ^{137}Cs や $^{239, 240}\text{Pu}$ は30 cm深さまで見い出せる地点もあるが、大部分は表層下5 cmないし10 cm深さまでに存在している。土壤中Puの大部分(60～70%)は鉍酸で抽出不可能な状態で存在していることが明らかになった。さらに $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比の測定から、この地域のほとんどのPuが未核分裂原爆級Puであることが分かった。

(1) ^{137}Cs および $^{239, 240}\text{Pu}$ 蓄積量

核実験場内およびその周辺で採取した表層(0～10cm)およびコア-試料(0～30cm)(Figs.1 and 2)についての ^{137}Cs 蓄積量(Bq/m^2)をFig.3に示す。 ^{137}Cs 蓄積量は試料採取日での値である。核実験場内の ^{137}Cs 蓄積量は、最初の核実験を行った爆心地付近のF6($10^4\sim 10^5\text{ Bq/m}^2$)やF5(10^4 Bq/m^2)で高い値を示し、Kurchatov方向への距離とともに指数関数的に漸減している。その他の地点では顕著に高い値を示す地域はないが、 $2 \times 10^3\text{ Bq/m}^2$ ～最大で 10^4 Bq/m^2 範囲であった。同一地点で採取した試料間で、たとえばF5で $2.5 \times 10^3\sim 2.1 \times 10^4\text{ Bq/m}^2$ 、A4で $5.3 \times 10^2\sim 5.6 \times 10^3\text{ Bq/m}^2$ のように ^{137}Cs 蓄積量にかなりのばらつきが見い出され、非常に不均一であることが強く示唆される。1953年の最初の水爆の影響を強く受けたSalzhal集落(図中のS点)では、平均 $5 \times 10^3\text{ Bq/m}^2$ 程度であるが、中にはS5のように $1 \times 10^4\text{ Bq/m}^2$ の高いホットスポット的な地点が点在している。このような傾向は核実験場外の ^{137}Cs 蓄積量についても同様である。核実験からの局地的Falloutを強く受けて被曝線量も高いと報告されているMostik, Dolon, Tchagan集落では、 $(1\sim 5) \times 10^3\text{ Bq/m}^2$ であった。森林のW8地点は $(5\sim 7) \times 10^3\text{ Bq/m}^2$ と高い。また、SemipalatinskからAltai地方に通じる道沿いの森や放牧地で採取した土壤の蓄積量もそのほとんどが $(1\sim 3) \times 10^3\text{ Bq/m}^2$ で、当初の予想に反してかなり低いことが分かった。日本では、降水の多い日本海側($2000\sim 2500\text{ mm/y}$)で $6000\sim 7000\text{ Bq/m}^2$ 、降水の少ない太平洋側(約 1000 mm/y)で $3000\sim 4000\text{ Bq/m}^2$ のGlobal fallout ^{137}Cs 蓄積量が報告されている。全体として、 ^{137}Cs 蓄積量は爆心地付近のF6, F5を除いて、スポット的に 10^4 Bq/m^2 の高い地点もあるが、日本のGlobal fallout ^{137}Cs 蓄積量と同等か、やや低レベルであることが分かった。

この核実験場では、種々さまざまなタイプと規模の異なる核実験が大気中と地表で実施された。さらに、地上への噴出を伴ういくつかの地下核実験も行われた。大気中での爆発では、爆発の高さと火球の大きさが初期フォールアウトの規模をほぼ決定する。火球が地表面に触れる場合には、

土やその他の物質が蒸発し、大量の土や破片が吸い上げられる。これらの物質が放射能を浴びた核分裂片や爆弾の破片と混ざりあい、種々の粒子を作り、上昇と横方向に広がる。やがて重力によって地表に落下し始めるが、その早さや距離は、粒子の大きさと風速によって変わる。さらに降雨の有無によっても大きく変化し、これが局地的フォールアウト (Close-in fallout) をつくる。一方、火球が地表に達しないような高さで爆発した場合には、局地的フォールアウトははるかに少ないか、まったく生じないと言われている。このようなことを考慮すると、実験場やその周辺の ^{137}Cs 蓄積量の分布は不均一であることが当然であり、レベルが予想に反して低いのは、 $^{137}\text{Te} \rightarrow ^{137}\text{I} \rightarrow ^{137}\text{Xe} (T_{1/2} = 3.84 \text{ m}) \rightarrow ^{137}\text{Cs}$ の一連の decay-chain を経て生成する ^{137}Cs が、局地的フォールアウトを形成して降下する前に ^{137}Cs の先行核、揮発性の Te や I、さらに希ガスの Xe の大部分が成層圏に散逸したためではないかと考えられる。

次に各地点で ^{137}Cs 濃度 (Bq/kg) の最も高い値を示した試料について Pu を測定した結果をそれぞれ Tables 1.2 に示す。表には $^{239, 240}\text{Pu}$ 濃度、蓄積量以外に $^{238}\text{Pu}/^{239, 240}\text{Pu}$ 及び $^{239, 240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比、さらに $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比 (atomic ratio) も併せて示してある。また Fig. 4 には、コア-試料から求めた蓄積量も含めて、日本での Global fallout $^{239, 240}\text{Pu}$ 蓄積量との比較を示した。Fig. 4 から分かるように、核実験場内や Salzhai 集落の $^{239, 240}\text{Pu}$ 蓄積量は ^{137}Cs 蓄積量と大きく異なって、ほとんどの地点で日本で見い出せる $40 \sim 120 \text{ Bq/m}^2$ 範囲の蓄積量を数～数100倍上回っている。爆心地付近の F6 ($3.3 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$)、さらにその遠方の F5, F4, F3 ($(1 \sim 4) \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$) が極めて高い。Salzhai 集落は 10^3 Bq/m^2 の $^{239, 240}\text{Pu}$ 蓄積量がある。近郊の集落 Dolon や Semipalatinsk 市に至る道沿いでの森林 (W 地点) で数 $100 \sim 1000 \text{ Bq/m}^2$ の蓄積量が見られるが、Semipalatinsk 市や Altai 方面ではやや低い傾向にある。これらの地点の $^{238}\text{Pu}/^{239, 240}\text{Pu}$ 放射能比は実験場内外で $0.02 \sim 0.04$ であり、Global fallout Pu で見い出せる比と大差ない。水爆の影響を強く受けた Salzhai 集落でこの比の低い値が多く見られる。一方、 $^{239, 240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は、ほとんどの地点で現在見い出される Global fallout 値 0.02 より高く、 ^{137}Cs に比べて $^{239, 240}\text{Pu}$ が過剰に降下していることが分かる。

(2) ^{137}Cs 及び $^{239, 240}\text{Pu}$ 濃度の深度分布

土壌は一般に、森林の場合には砂地であったが、一部の牧草地を除く他のほとんどの地点はステンレスパイプでさえ打ち込むことが困難な硬い裸地であった。実験場内では ^{137}Cs 、 $^{239, 240}\text{Pu}$ とともに 20 cm 深さで見い出される地点もあるが、表層下 5 cm までに大部分が蓄積している。一方、実験場外の居住地域等においては測定した 30 cm 深さまで見い出される地点もあり、 ^{137}Cs や $^{239, 240}\text{Pu}$ 濃度は必ずしも指数関数的に減少していない。Tsyb らが Dolon で採取した土壌コア-試料において、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239, 240}\text{Pu}$ 濃度が $10 \sim 15 \text{ cm}$ 深さにピークを示す深度分を報告している。居住地域周辺では表層の高い局地的フォールアウト核種濃度を低減させるために、深部土壌との混合を実施した地域もあると聞いており、深部まで ^{137}Cs や $^{239, 240}\text{Pu}$ が見い出されたのはおそらくこの人為的攪拌に起因するものと考えられる。そのような地点においては、さらに深い層まで ^{137}Cs や $^{239, 240}\text{Pu}$ が見い出せる可能性がある。

(3) Pu の存在特性

核実験場内外の土壤中 Pu の存在特性についての知見を得るために Pu の逐次分析を表層下 10 cm 深さまでの試料を用いて実施した。その結果を Fig.5 に示す。すべての地点の土壤中 Pu は通常の H₂O₂ を含む HNO₃ 加熱リーチング法では完全に抽出されない。10M HNO₃ + 0.1M HF 抽出フラクションの Pu は、爆心地から Kurchatov へ通じる道沿いで採取した土壤中で相対的に多く存在しているが、他の地点(W1を除いて)では少ない。最後の残渣中に残る Pu は、核実験場内では 60～80% と非常に多い。実験場外の残渣中 Pu は、場所によってかなりばらつき、W5 地点で 97%、W2、W8 地点で 80～85%、遠方の N1～N5 地点で 20～40% であった。Global fallout Pu による汚染土壌については、HNO₃ + H₂O₂ リーチング法でほぼ定量的に Pu が抽出されることを考え併せると、今回のこの HNO₃ + H₂O₂ 抽出 Pu 成分はおそらく Global fallout Pu + 核実験由来の局地的フォールアウト Pu の微粒子成分ではないかと考えられる。10M HNO₃ + 0.1M HF リーチング法は一般に難溶性 Pu 酸化物を含むおそれのある試料によく適用されてきた方法である。この成分が相対的に多く見い出せる F5～F1 地点は 1949 年 8 月の旧ソ連の第 1 回の核実験からの局地的フォールアウトの影響を強く受けた地域である。残渣中の Pu は、蒸発した土壌や原爆構成物などの様々な大きさの凝集粒子に取り込まれた Pu であると考えられる。このような知見は、この地域の土壤中 Pu の長期動態を予測・評価する上で特に重要であると考ええる。なお、¹³⁷Cs については現在検討中である。

(4) Pu 汚染源の識別

核実験場内外の土壤中には、上記してきたように核実験からの局地的 fallout と Global fallout 由来の ¹³⁷Cs や ^{239, 240}Pu が混在して存在している。Global fallout 由来の成分を識別し、局地的 fallout 由来の ¹³⁷Cs や ^{239, 240}Pu 濃度、あるいは蓄積量を正確に把握することは、特に住民の被曝線量を再構築する上で極めて重要である。また、それぞれの汚染源からの Pu の土壤中での移行挙動を評価する上でも必要である。この識別の 1 つの方法として Pu 同位体の ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比を用いる方法がある^{12, 13, 15}。この²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比は汚染源によって、Table 3 に示すように変化する⁶。試料及びセミパラチンスク核実験の原爆級 Pu の代表的な²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比が分かれば、Global fallout 値 0.18 を使用して、下記の式より Pu を識別することが可能である。

$$\frac{(Pu)_w}{(Pu)_g} = Y = \frac{(R_g - R_s)(1 + 3.73 R_w)}{(R_s - R_w)(1 + 3.73 R_g)}$$

$$(Pu)_g + (Pu)_w = (Pu)_s$$

$$(Pu)_g = \frac{1}{1 + Y} (Pu)_s$$

(Pu)_s : 試料中の^{239, 240}Pu 蓄積量(Bq/m²)

(Pu)_g : 試料中の Global fallout 由来の^{239, 240}Pu 蓄積量(Bq/m²)

(Pu)_w : 試料中のセミパラチンスク核実験からの局地的 fallout 由来の^{239, 240}Pu 蓄積量 (Bq/m²)

R_s : 試料中 Pu の ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比

R_G : Global fallout Pu の ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比 = 0.18

R_w : セミパラチンスク核実験からの局地的 fallout Pu の ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比

Y : Global fallout に対しての局地的 fallout ^{239, 240}Pu の寄与比

上記パラメーターの中で、R_s は試料の測定を通じて得ることができる。また、R_G は Global fallout Pu のみで汚染されている土壤中 Pu の測定から得ることができ、ほぼ 0.18 で一定であることが知られている。最も評価の困難なパラメーターは R_w である。タイプの異なる種々の規模の核実験が数多く実施されているので、核実験毎に Pu 同位体比が異なり、試料採取地点では種々の放射線雲の流跡線が混在していると考えられる。それ故、セミパラチンスク全域でこの比を一定と考えることはできないであろう。R_w 値は試料採取地点(地域)毎に決定する必要があると考えられる。上記の式によって (Pu)_G が評価できると、さらに下記式によって ¹³⁷Cs を識別することも可能となる。

$$(^{137}\text{Cs})_w = (^{137}\text{Cs})_s - (^{137}\text{Cs}/\text{Pu})_G \cdot (\text{Pu})_G$$

(¹³⁷Cs)_s : 試料中の ¹³⁷Cs 蓄積量 (Bq/m²)

(¹³⁷Cs)_w : 局地的 fallout 由来の ¹³⁷Cs 蓄積量 (Bq/m²)

(¹³⁷Cs/Pu)_G : Global fallout 由来の現在の土壤中の ¹³⁷Cs/^{239, 240}Pu 放射能比

(¹³⁷Cs/Pu)_G 値は、地域や土壌特性によって多少変化すると考えられるが、30 cm 程度までの深さの両核種の蓄積量の比で見ると、現在 50 前後である。

^{239, 240}Pu 濃度を測定した試料について ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比 (atomic ratio) を測定した結果 (Tables 1, 2) を 1 つにまとめて Fig.6 に示す。図から分かるように、Kurchatov や Salzhai を含む実験場内では、Global fallout 値 0.18 に比べて 0.025~0.072 のかなり低い値を示す。また、実験場外においても、W1 地点で 0.100、SP1 地点で 0.125 のやや高い値を示す地点もあるが、他の地点は 0.024~0.083 の低い値を示す。このような低い比が得られることは、原爆材料そのものの Pu が飛散していることを強く示唆する。今回の値は Table 3 に示すアメリカのネバダ核実験場やロッキー・フラットでの原爆級 Pu、さらに長崎や Thule 試料についての Pu 同位体比とよく似ている。表中に示す 1st Exp Site 及び Balapan は最初の原爆実験 (1949 年 8 月) が行われた場所、及び平和利用の目的で行った地下核実験 (1965 年 1 月) で作られた大きな湖 (atomic lake) の堤防頂上付近で採取した土壌についての我々の測定結果である。この試料について、他の Pu 同位体も測定した結果をまとめて Table 4 に示す。セミパラチンスク核実験場内外で見い出される低い ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 同位体比の Pu が未核分裂の原爆級 Pu であるかどうかについては、中性子を吸収して組成変化 (フラクショネーション) した Pu、さらに ²³⁸U の中性子捕獲で生成した Pu 同位体の寄与もあると考えられるが、今のところその大部分は、原爆級 Pu

そのものではないかと考えている。ちなみにここで見いだされた $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の最も低い値 0.025 がセミパラチンスク核実験の代表的な値と仮定すると、試料で 0.03~0.05 範囲を示す地点では 95~77 % が局地的 fallout Pu に由来することになる。この値を用いて、局地的 fallout ^{137}Cs の寄与を見積もるとかなりの地点で負の ^{137}Cs (局地的 fallout ^{137}Cs 寄与なし) 値が得られ、前述したように R_w 値についてはそれぞれの地点で、より正確に評価する必要があることが分かった。現在表層及び深度別試料を用いて、鉍酸で抽出可能と不可能な Pu 成分について $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比を測定しており、鉍酸で抽出不可能な Pu の同位体比がそれぞれの地点の R_w を反映しているのではないかと考えている。

おわりに

現在測定が継続中であるが、限られた試料分析から主な結果として以下のことが明らかになった。(1)全体として、核実験場内及びその周辺の土壌試料の ^{137}Cs レベルは国内の Global fallout ($3000\text{--}7000\text{ Bq/m}^2$) と同等かやや低いレベルで、一方 $^{239,240}\text{Pu}$ は国内レベル ($40\text{--}120\text{ Bq/m}^2$) の数倍から数 100 倍の高いレベルで検出された。(2)実験場内 ^{137}Cs 及び $^{239,240}\text{Pu}$ は殆どが表層下 5 cm までに存在し、非常に不均一 (hot particle の存在) であり、Pu については大部分が鉍酸で抽出不可能な形態で存在している。実験場の外側では、場所によりかなり異なるが、測定した 30 cm 深さまで検出される地点があった。(3)Pu 汚染源の由来を検討するために $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比を測定した結果、実験場内のその比は 0.025~0.072、実験場外では 0.024~0.125 で、Global fallout のみで汚染された地域の 0.18 よりもかなり低く、原爆材料そのものの未核分裂原爆級 Pu で汚染されていることが明らかになった。今後、この局地的 fallout に由来する Pu の識別をできるだけ正確に評価し、 ^{137}Cs の評価も実施して、それぞれの汚染源からの両核種の土壌中での挙動、さらにこの地域の残留放射能からの線量再構築を試みる予定である。

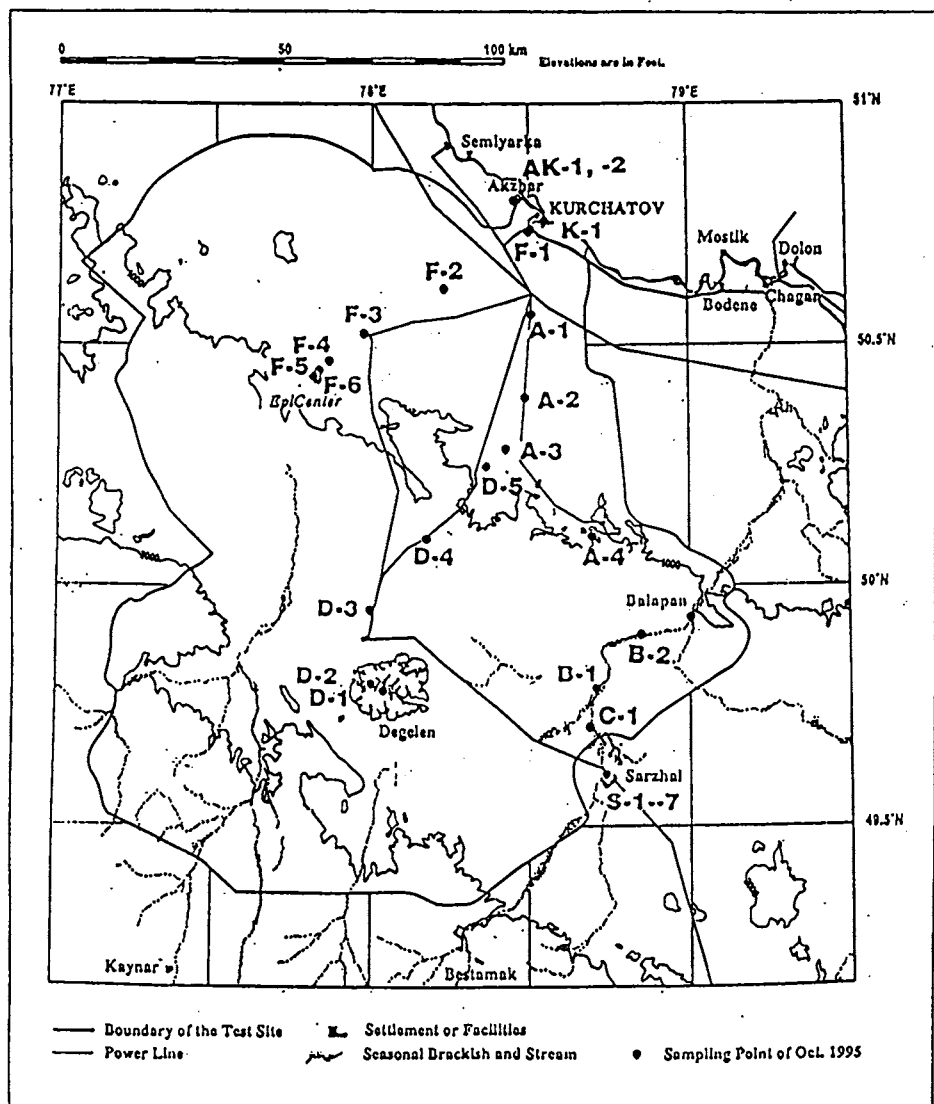


Fig. 1. Location map of the former Soviet Union's Semipalatinsk nuclear test site, with sampling site of soil.

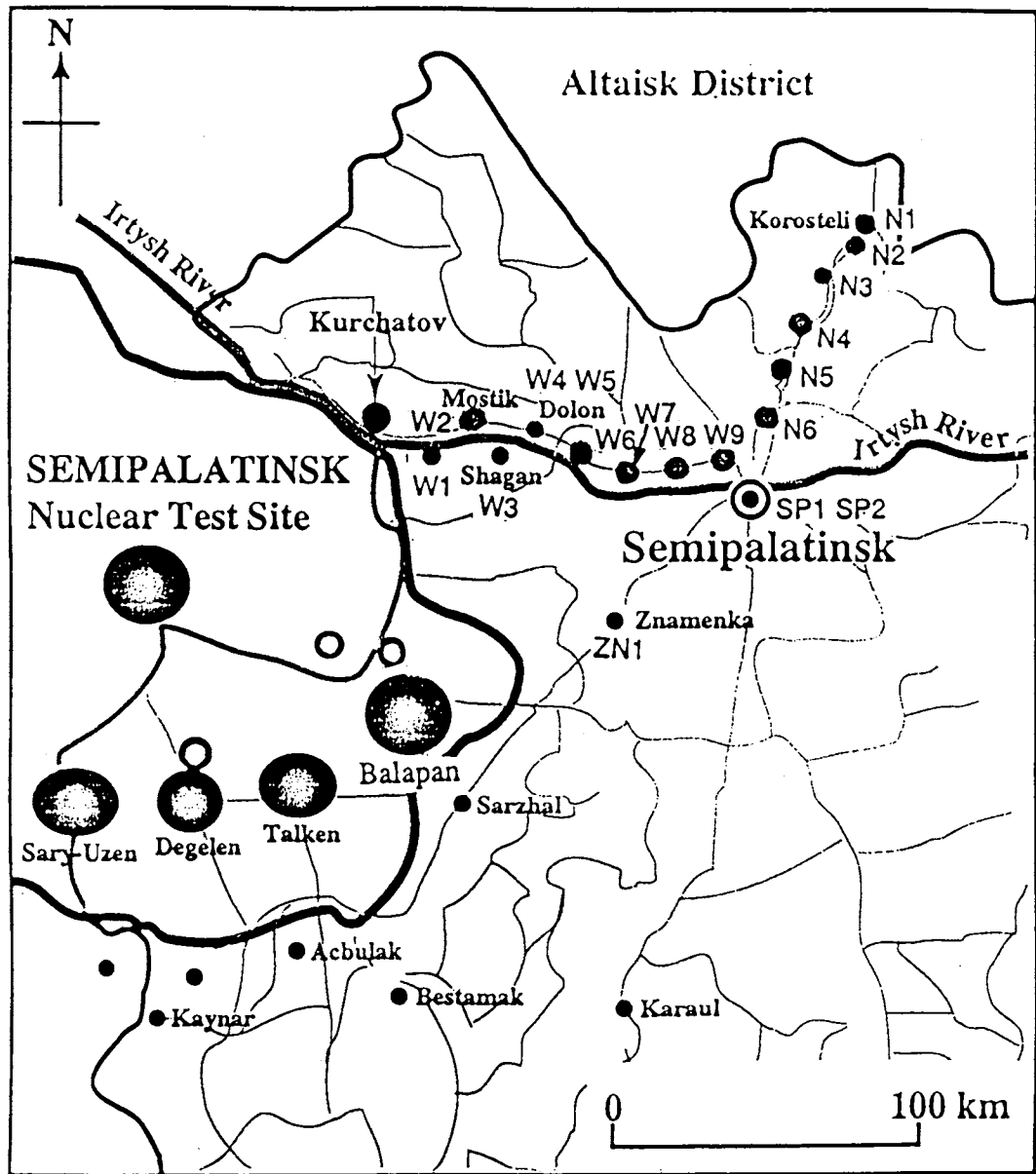


Fig. 2. Location map outside the nuclear test site, with sampling site of soil.

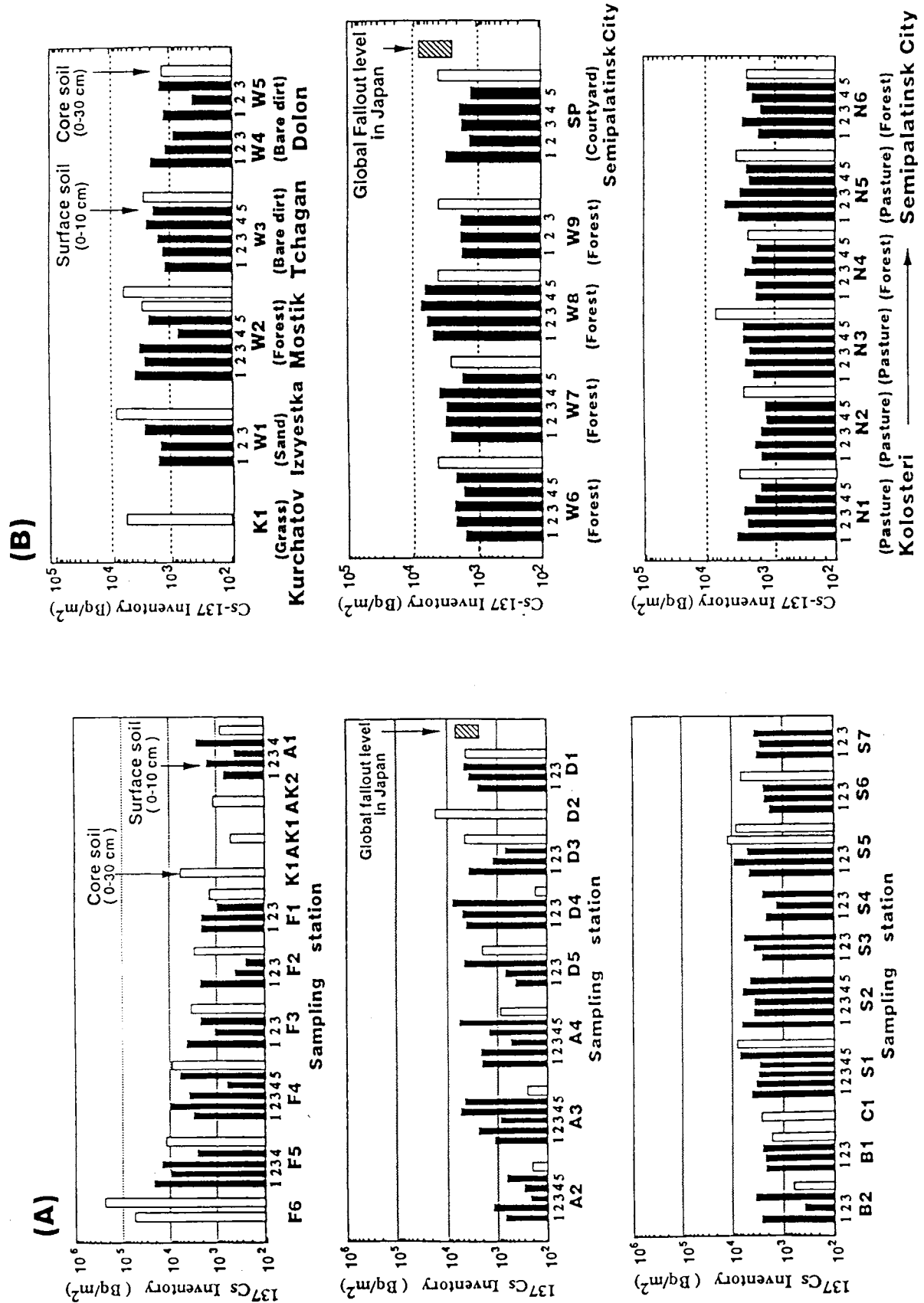


Fig. 3. Accumulated levels (Bq/m²) of ¹³⁷Cs for surface soil (0-10 cm depth) and core soil (0-30 cm depth) from several sites in (A) and around (B) the territory of the Semipalatinsk nuclear test site.

Table 1. Concentrations and inventories of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$, activity ratios of $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ and $^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$, and atomic ratios of $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ in soil within the territory of the test site

Sample No.	Activity (Bq/kg dry)		Inventory (Bq/m ²)		Activity ratio		Atomic ratio	
	$^{239,240}\text{Pu}$	^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}$	^{137}Cs	$^{238}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$	$^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	
F5-1 ^a	826 ± 21 ^b	226 ± 2 ^b	7.75x10 ⁴	2.12x10 ⁴	3.65 ± 0.10 ^b	0.024 ± 0.002 ^b	0.031 ± 0.002 ^c	
F4-2	465 ± 17	102 ± 1	4.13x10 ⁴	9.08x10 ³	4.55 ± 0.17	0.023 ± 0.001	0.025 ± 0.002	
F3-1	79.0 ± 1.8	29.2 ± 0.6	1.04x10 ⁴	3.97x10 ³	2.71 ± 0.08	0.027 ± 0.001	0.056 ± 0.004	
F2-1	19.2 ± 0.6	23.6 ± 0.4	1.64x10 ³	2.02x10 ³	0.81 ± 0.03	0.023 ± 0.002	0.057 ± 0.004	
F1-1	4.86 ± 0.18	25.3 ± 1.6	3.86x10 ²	2.01x10 ³	0.19 ± 0.01	0.025 ± 0.002	0.051 ± 0.006	
A1-4	12.4 ± 0.7	17.0 ± 0.3	1.69x10 ³	2.31x10 ³	0.73 ± 0.04	0.013 ± 0.002	0.051 ± 0.004	
A2-2	6.07 ± 0.20	10.4 ± 0.3	7.06x10 ²	1.21x10 ³	0.58 ± 0.03	0.012 ± 0.002	0.039 ± 0.005	
A3-4	61.0 ± 2.2	47.5 ± 0.5	6.13x10 ³	4.77x10 ³	1.28 ± 0.05	0.012 ± 0.002	0.051 ± 0.004	
A4-5	62.3 ± 2.1	43.7 ± 0.7	8.04x10 ³	5.64x10 ³	1.43 ± 0.05	0.014 ± 0.002	0.049 ± 0.004	
D5-3	25.4 ± 0.6	53.6 ± 0.9	2.02x10 ³	4.26x10 ³	0.47 ± 0.01	0.023 ± 0.002	0.032 ± 0.004	
D4-3	20.1 ± 0.7	78.2 ± 3.0	1.90x10 ³	7.40x10 ³	0.26 ± 0.01	0.030 ± 0.001	0.054 ± 0.007	
D3-1	10.9 ± 0.3	31.3 ± 0.6	1.20x10 ³	3.42x10 ³	0.35 ± 0.01	0.016 ± 0.002	0.046 ± 0.005	
D1-3	6.51 ± 0.22	85.3 ± 1.5	3.54x10 ²	4.64x10 ³	0.08 ± 0.01	0.037 ± 0.002	0.072 ± 0.009	
B2-3	8.35 ± 0.22	34.1 ± 0.6	8.49x10 ²	3.47x10 ³	0.24 ± 0.01	0.025 ± 0.003	0.047 ± 0.005	
B1-2	5.16 ± 0.20	24.5 ± 0.4	5.01x10 ²	2.37x10 ³	0.21 ± 0.01	0.016 ± 0.002	0.057 ± 0.004	
S1-5	10.8 ± 0.4	52.1 ± 0.6	1.51x10 ³	7.31x10 ³	0.21 ± 0.01	0.005 ± 0.001	0.040 ± 0.005	
S2-1	6.76 ± 0.37	53.0 ± 0.8	7.53x10 ²	5.91x10 ³	0.13 ± 0.01	0.009 ± 0.001	0.047 ± 0.006	
S3-3	18.1 ± 0.7	70.7 ± 0.8	1.75x10 ³	6.86x10 ³	0.26 ± 0.01	0.013 ± 0.001	0.046 ± 0.004	
S4-1	4.29 ± 0.20	28.6 ± 0.7	3.23x10 ²	2.16x10 ³	0.15 ± 0.01	0.008 ± 0.001	0.043 ± 0.008	
S5-1	11.0 ± 0.4	36.5 ± 0.8	1.42x10 ³	4.71x10 ³	0.30 ± 0.01	0.007 ± 0.001	0.043 ± 0.009	
S6-1	2.30 ± 0.09	22.9 ± 0.6	2.63x10 ²	2.62x10 ³	0.10 ± 0.01	0.011 ± 0.001	0.043 ± 0.005	
S7-3	6.46 ± 0.22	29.3 ± 0.5	7.39x10 ²	3.35x10 ³	0.22 ± 0.01	0.011 ± 0.001	0.044 ± 0.007	

^a Sample number of one surface sample (0-10 cm depth) at each site which showed the highest concentration of (as Bq/kg) of ^{137}Cs .

^b One sigma standard deviation from counting statistics

^c One standard deviation of replicate measurements (n=6) in the final solution taken from one sample.

Table 2. Concentrations and inventories of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$, activity ratios of $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ and $^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$, and atomic ratios of $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ in soil around the territory of the test site

Location		Activity (Bq/kg dry)		Inventory (Bq/m ²)		Activity ratio		Atomic ratio	
Site No.	Lab. ID	$^{239,240}\text{Pu}$	^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}$	^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$	$^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	
W1-3 ^a	SP04	2.02 ± 0.05 ^b	21.8 ± 0.9 ^b	2.69x10 ²	2.91x10 ³	0.092 ± 0.004 ^b	0.019 ± 0.004 ^b	0.100 ± 0.016 ^c	
W2-1	SP01	7.03 ± 0.20	35.1 ± 0.7	9.30x10 ²	4.64x10 ³	0.200 ± 0.007	0.029 ± 0.003	0.054 ± 0.004	
W3-4	SP05	0.41 ± 0.02	17.0 ± 0.5	6.66x10 ¹	2.76x10 ³	0.024 ± 0.001	0.025 ± 0.003	0.083 ± 0.006	
W5-3	SP03	26.0 ± 0.9	19.7 ± 0.5	2.13x10 ³	1.61x10 ³	1.323 ± 0.058	0.034 ± 0.004	0.024 ± 0.002	
W6-5	SP10	3.85 ± 0.10	20.9 ± 0.4	4.17x10 ²	2.26x10 ³	0.184 ± 0.006	0.021 ± 0.003	0.050 ± 0.004	
W7-4	SP11	1.43 ± 0.06	25.3 ± 1.3	2.22x10 ²	3.93x10 ³	0.056 ± 0.004	0.033 ± 0.003		
W8-2	SP12	27.3 ± 1.0	41.6 ± 1.2	3.90x10 ³	5.93x10 ³	0.657 ± 0.030	0.036 ± 0.002	0.024 ± 0.002	
W9-5	SP13	2.42 ± 1.70	15.6 ± 0.5	2.80x10 ²	1.80x10 ³	0.156 ± 0.110	0.037 ± 0.005		
ZN1	SP07	0.23 ± 0.01	3.41 ± 0.02	3.08x10 ¹	4.57x10 ²	0.067 ± 0.003	0.022 ± 0.004	0.034 ± 0.005	
SP1-1	SP08	0.25 ± 0.02	13.2 ± 0.5	5.63x10 ¹	2.97x10 ³	0.019 ± 0.002	0.025 ± 0.004	0.125 ± 0.012	
SP2-4	SP19	0.42 ± 0.02	15.2 ± 0.4	4.94x10 ¹	1.77x10 ³	0.028 ± 0.001	0.047 ± 0.006		
N1-1	SP20	1.38 ± 1.76	23.4 ± 0.4	2.00x10 ²	3.38x10 ³	0.059 ± 0.075	0.030 ± 0.005	0.070 ± 0.008	
N2-2	SP21	0.54 ± 0.03	12.0 ± 0.5	7.22x10 ¹	1.62x10 ³	0.045 ± 0.003	0.024 ± 0.002		
N3-2	SP22	0.22 ± 0.01	16.4 ± 0.4	3.12x10 ¹	2.32x10 ³	0.013 ± 0.001	0.040 ± 0.013		
N4-3	SP24	1.18 ± 0.05	22.2 ± 0.8	1.38x10 ²	2.60x10 ³	0.053 ± 0.003	0.024 ± 0.005		
N5-2	SP25	2.15 ± 0.05	41.6 ± 1.0	2.94x10 ²	5.67x10 ³	0.052 ± 0.002	0.035 ± 0.004	0.077 ± 0.007	
N6-1	SP26	1.02 ± 0.04	15.4 ± 0.4	1.04x10 ²	1.57x10 ³	0.066 ± 0.003	0.043 ± 0.007		

^a Sample number of one surface sample (0-10 cm in depth) at each site which showed the highest concentration of (as Bq/kg) of ^{137}Cs .

^b One sigma standard deviation from counting statistics.

^c One standard deviation of replicate measurements (n=6) in final solution taken from one sample.

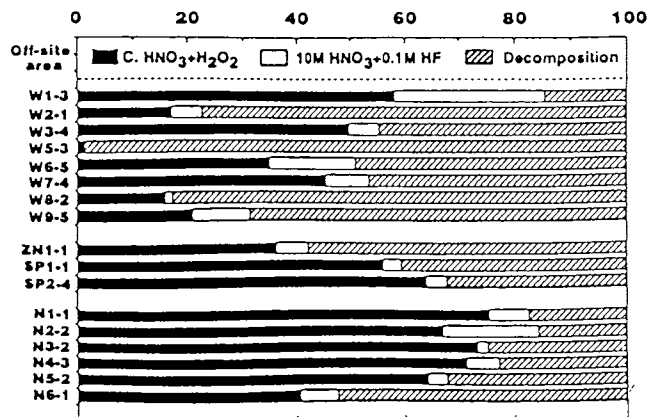
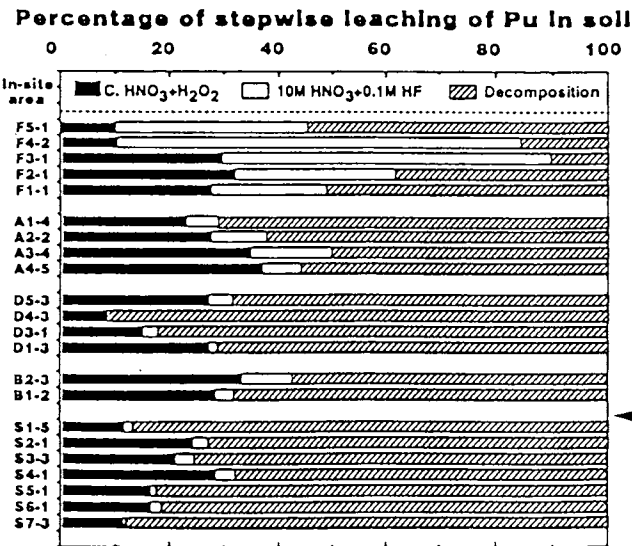
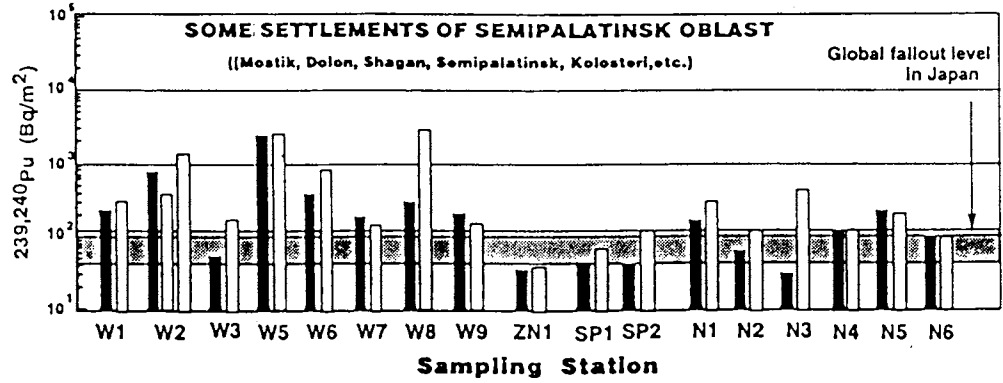
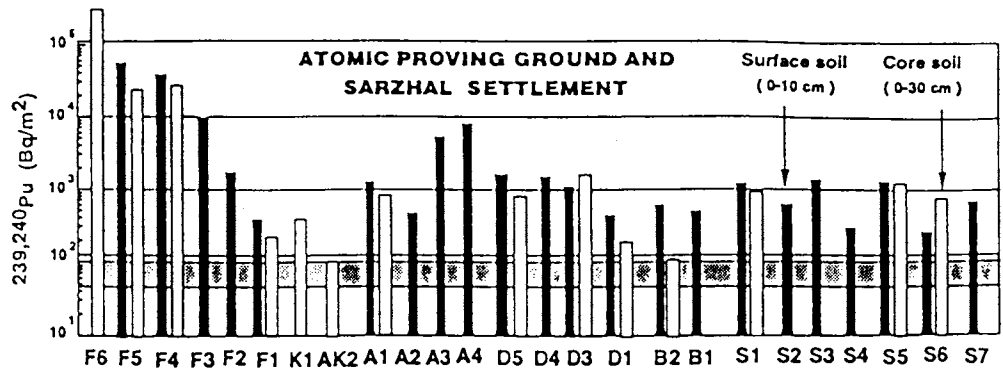


Fig. 4.
Accumulated levels (Bq/m²)
of ^{239,240}Pu in soil.

Fig. 5.
Stepwise leaching of
^{239,240}Pu in soil.

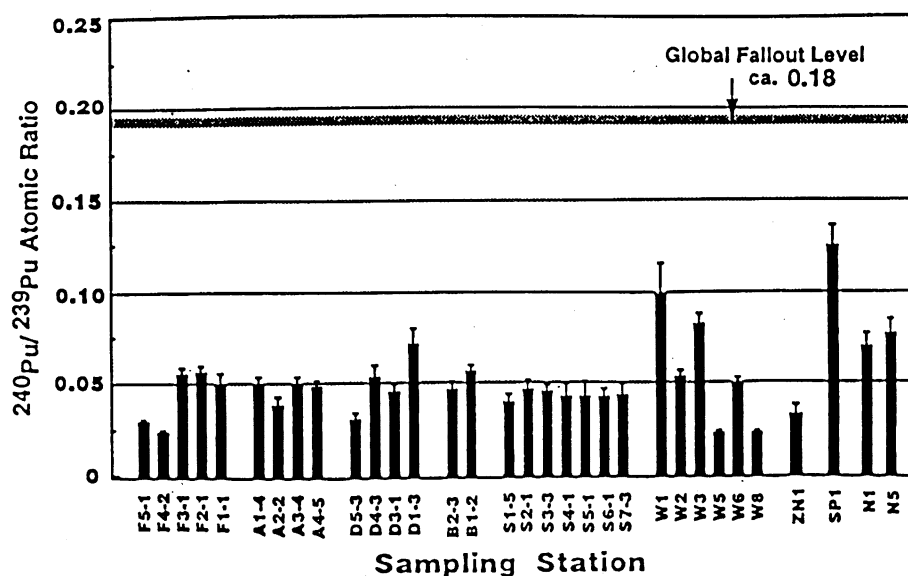


Fig. 6. Atomic ratio of $^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ in soil around the test site

Table 3. Comparison of $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atomic ratios in samples from various Pu sources

Sample	Atom ratio $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	Remarks
Ist Exp Site (This work)	0.036 ± 0.001	Surface soil sampled near the hypocenter of the first Soviet nuclear explosion on August 29, 1949
Bolapan (This work)	0.067 ± 0.001	Surface soil sampled around the top of the bank of crater (Shagan River Site) which was formed by the underground nuclear explosion on January 15, 1965
Nevada Test Site soil	0.054–0.063 (Ave. 0.05)	USA: Nuclear Test Site [12]
Rocky Flat Plant	0.051	Weapons-grade Pu fabricated at the Rocky Flat Plant [13]
Bikini soil	0.338 ± 0.051	Bikini Atoll: Thermonuclear atomic bomb (Bravo: March 1, 1954) [11]
Bontenchiku	0.318 ± 0.023	Hemp-palm leaves: Fishing gear used by the Fifth Fukuryo-Maru (Lucky Dragon: March 1, 1954) [11]
Nagasaki soil	0.042 ± 0.014	Nishiyama area in Nagasaki: Pu atomic bomb (August 9, 1945) [11]
Thule sediment	0.058 ± 0.008	Greenland: Weapons-grade Pu due to accidental crash (January 1968) of a B-52 bomber [11]
Irish Sea sediment	0.19–0.22 (Ave. 0.20)	Surface sediment from 24 intertidal sites around Irish Sea: Release of Pu into the Irish Sea from Sellafield Nuclear Fuel Reprocessing Plant, UK [14]
M. Kanmuri soil	0.18 ± 0.03	Surface soil (May 1978); Global fallout Pu [11]

Table 4. Pu isotopic composition in soil from the Ist Exp Site (ground zero) and Balapan

Isotope	Activity (Bq/g)	Activity relative to $^{239,240}\text{Pu}$	Atom relative to ^{239}Pu
Ist Exp Site			
^{238}Pu	0.404 ± 0.028	0.0145 ± 0.001	$(5.91 \pm 0.44) \times 10^{-5}$
^{239}Pu	24.6 ± 0.8	0.88 ± 0.03	1.0
^{240}Pu	3.35 ± 0.27	0.12 ± 0.01	0.036 ± 0.001
$^{239,240}\text{Pu}$	27.9 ± 0.4	1.0	
^{241}Pu	4.83 ± 0.14	0.173 ± 0.005	$(1.16 \pm 0.05) \times 10^{-4}$
^{242}Pu	$(7.5 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	$(2.7 \pm 0.2) \times 10^{-6}$	$(4.8 \pm 0.4) \times 10^{-5}$
Botapan			
^{238}Pu	3.96 ± 0.08	0.447 ± 0.006	$(2.01 \pm 0.04) \times 10^{-3}$
^{239}Pu	7.08 ± 0.13	0.80 ± 0.01	1.0
^{240}Pu	1.77 ± 0.05	0.20 ± 0.01	0.067 ± 0.001
$^{239,240}\text{Pu}$	8.85 ± 0.12	1.0	
^{241}Pu	10.8 ± 0.3	1.22 ± 0.03	$(8.99 \pm 0.26) \times 10^{-4}$
^{242}Pu	$(1.3 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^{-5}$	$(2.9 \pm 0.5) \times 10^{-4}$

All are as of the date of sampling (October 7, 1994 for the Ist Exp Site soil and October 8, 1994 for the Bolapan soil).

3. 謝辞

本研究課題は、国際学術研究、(1)代表：塚谷恒雄教授及び(2)代表：星正治教授の共同研究者(分担)として参加することになったきっかけで考え始めたテーマである。研究自体は、時間のかかる地味な根気の必要な仕事であるが、広島、長崎、ビキニ被災事件そして原発問題につながる日本の一連の環境放射能研究をさらに発展させていくために、SCIENCEで真の国際貢献が出来る好運を与えてくれた多くの方々のご好意に感謝せざるを得ない。改めて感謝申し上げます。

カザフスタンへの調査旅行

(1) 第1回 1994年10月2日～10月11日

国際学術研究：中央アジア・カザフスタンの環境と経済の再生計画

代表：京都大学経済研究所，教授 塚谷 恒雄

参加者：塚谷恒雄(京都大)，片山幸士(京都大)，山崎啓三(京都大)
青木 達(京都大)，山本政儀(金沢大)

(2) 第2回 1995年9月28日～10月10日

国際学術研究：セミパラチンスク核実験場近郊住民の被曝線量評価と疾病調査

代表：広島大学原爆放射能医学研究所，教授 星 正治

参加者：星 正治(広島大・原医研)，高田 純(広島大・原医研)
長友恒人(奈良教育大)，山本政儀(金沢大)
山下俊一(長崎大・医)，難波裕幸(長崎大・医)

(3) 第3回 1995年10月16日～10月31日

国際学術研究：中央アジア・カザフスタンの環境と経済の再生計画

代表：京都大学経済研究所，教授 塚谷 恒雄

参加者：塚谷恒雄(京都大)，青木 達(京都大)，山本政儀(金沢大)
小藤久毅(金沢大・学生D)，山崎誠二(金沢大・学生M)

(4) 第4回 1996年9月20日～10月1日

国際学術研究：セミパラチンスク核実験場近郊住民の被曝線量評価と疾病調査

代表：広島大学原爆放射能医学研究所，教授 星 正治

参加者：星 正治(広島大・原医研)，高田 純(広島大・原医研)
山本政儀(金沢大)，武市宣雄(甲状腺の病院長，広島)，他4名

(5) 第5回 1997年9月28日～10月11日

国際学術研究：旧ソ連核実験場セミパラチンスク近郊の被曝線量再構築と
健康影響調査

代表：広島大学原爆放射能医学研究所，教授 星 正治

参加者：星 正治(広島大・原医研)，高田 純(広島大・原医研)
岩谷和夫(広島大・工)，吉川 勲(長崎大・環)
高辻俊宏(長崎大・環)，山本政儀(金沢大)，他5名

(6) 第6回 1998年9月12日～9月26日

国際学術研究：旧ソ連核実験場セミパラチンスク近郊の被曝線量再構築と
健康影響調査

代表：広島大学原爆放射能医学研究所，教授 星 正治

参加者：星 正治(広島大・原医研)，高田 純(広島大・原医研)
吉川 勲(長崎大・環)，高辻俊宏(長崎大・環)，
山本政儀(金沢大)
鎌田七男(広島大・原医研)，田中公夫(広島大・原医研)
浅倉 晃(HI-CARE 幹事)，山田英雄(ロシア語通訳)

(The 2nd International Conference on "Ecology-Radiation-Health", SSMA, Semipalatinsk
Kazakhstan, 16-19 September 1998 に参加発表)

以上名前を上げた方々はもちろん，カザフスタンのNNC (National Nuclear Center) 及び
カザフスタンのセミパラチンスク市にあるカザフスタン 放射線医学環境研究所の研究
スタッフ，通訳のリハチョフ夫妻，さらに放射能測定等でお世話に農業環境技術研究
所津村昭人博士，日本分析センター 樋口英雄博士，及川真司氏，原稿取りまとめ
に協力いただいた当実験施設の中本美智代氏に感謝します。

研究組織

研究代表者： 山本 政儀

金沢大学理学部・助教授
附属低レベル放射能実験施設

研究分担者： 星 正治

広島大学原爆放射能医学研究所・教授
国際放射線情報センター

研究経費

平成9年度 2,500 千円

平成10年度 700 千円

計

 3,200 千円

研究発表

(1) 学会誌等

1. M. Yamamoto, A. Tsumura, Y. Katayama and T. Tsukatani : Plutonium Isotopic Composition in Soil from the Former Semipalatinsk Nuclear Test Site, *Radiochim. Acta*, 72, 209-215 (1996).
2. M. Yamamoto, T. Tsukatani and Y. Katayama : Residual Radioactivity in the Soil of the Semipalatinsk Nuclear Test Site in the Former USSR, *Health Phys.*, 71, 142-148 (1996).
3. J. Takada, M. Hoshi, S. Endo, M. Yamamoto, T. Nagatomo, B. I. Gusev, T. I. Rozenson, K. N. Apsalikov and N. J. Tchajjunusova : Dosimetry Study of Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Site: High Levels of Natural Radiation 1996, *Radiation Dose and Health Effects*, 1997 Elsevier Science B. V. (Eds. T. Sugawara and Z. Tao), pp. 191-195.
4. J. Takada, M. Hoshi, S. Endo, M. Yamamoto, T. Nagatomo, B. I. Gusev, T. I. Rozenson, K. N. Apsalikov and N. J. Tchajjunusova : Thermoluminescence Dosimetry of Gamma-rays from the Fallout of the Semipalatinsk Nuclear Tests, in: *The 2nd International Symposium on Effects of Low-level Radiation for Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Site*, Proceedings of the Second Hiroshima International Symposium, Hiroshima, July 23-25, 1996, pp. 195-199.
5. M. Yamamoto and T. Tsukatani : Preliminary Results of Current Levels of Radioactive Fallout in Soil at the Former Semipalatinsk Nuclear Test Site, in: *The 2nd International Symposium on Effects of Low-level Radiation for Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Site*, Proceedings of the Second Hiroshima International Symposium, Hiroshima, July 23-25, 1996, pp. 201-224.
6. M. Yamamoto : Measurements of Long-lived Artificial Radionuclides in the Environment - Transuranium Elements, in: *Proceedings of 1997 International Symposium on Environmental radiation*, Tsuruga, Fukui, Japan, Oct. 20, 1997 (Eds. T. Tsujimoto & Y. Ogawa), printed in March 1998 (Kansai Kosaido Co., Ltd, Osaka, Japan), pp. 119-134.
7. J. Takada, M. Hoshi, S. Endo, T. I. Rozenson, M. Yamamoto, T. Nagatomo, T. Imanaka, B. I. Gusev, K. N. Apsalikov and N.J. Tchajjunusova : Environmental Radiation Dose in Semipalatinsk Area near Nuclear Test Site, *Health Phys.*, 73, 524-527 (1997).
8. M. Yamamoto, A. Tsumura and T. Tsukatani : Current Levels of Pu Isotopes and ^{137}Cs at the Former Soviet Union's Semipalatinsk Nuclear Test Site, *Radiochim. Acta*, 81, 21-28 (1998).

9. M. Yamamoto, M. Hoshi, J. Takada, A. Kh. Sekerbaev and B. I. Gusev : Pu Isotopes and ^{137}Cs in the Surrounding Areas of the Former Soviet Union's Semipalatinsk Nuclear Test Site, J. Radional. Nucl. Chem., Articles, (accepted), 1999.
10. 山本政儀, 星 正治, 高田 純, 塚谷恒雄, A. Kh. Sekerbaev, B. I. Gusev : 旧ソ連セミパラチンスク核実験場及びその周辺地域におけるプルトニウム (Pu) 同位体とセシウム (^{137}Cs) の分布, "放射性物質の環境移行研究の新たな展開" のクロスオーバー研究 (核種移行) シンポジウム", Nov. 26-27, 1998, 理化学研究所, 後日プロシーディングを刊行.

(2) 口頭発表

1. J. Takada, M. Hoshi, S. Endo, M. Yamamoto, T. Nagatomo, B. I. Gusev, T. I. Rozenon, K. N. Apsalikov and N. J. Tchajjunusova : Thermoluminescence Dosimetry of Gamma-rays from the Fallout of the Semipalatinsk Nuclear Tests, in: The 2nd International Symposium on Effects of Low-level Radiation for Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Site, Hiroshima, July 23-25, 1996.
2. M. Yamamoto and T. Tsukatani: Preliminary Results of Current Levels of Radioactive Fallout in Soil at the Former Semipalatinsk Nuclear Test Site, in: The 2nd International Symposium on Effects of Low-level Radiation for Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Site, Hiroshima, July 23-25, 1996
3. 山本政儀 : 環境放射能の測定結果, "旧ソ連核実験場 (セミパラチンスク) とその周辺の研究調査" のシンポジウム, 1996年度度日本放射線影響学会第39回大会, 大阪, 平成8年11月18-20日.
4. 高田 純, 星 正治, 遠藤 暁, 山本政儀, 長友恒人, B. I. Gusev, T. I. Rozenon, K. N. Apsalikov and N. J. Tchajjunusova: 熱蛍光法によるセミパラチンスク核実験場周辺の放射性フォールアウトからの外部被曝線量評価, 1996年度度日本放射線影響学会第39回大会, 大阪, 平成8年11月18-20日.
5. 山本政儀, 星 正治, 高田 純, 山本政儀, 長友恒人, 津村昭人, B. I. Gusev, K. N. Apsalikov and N. J. Tchajjunusova : セミパラチンスク核実験場周辺の残留放射能 (1), 1997年度度日本放射線影響学会第40回大会, 京都, 平成9年11月5-7日.
6. 高田 純, 星 正治, 遠藤 暁, 山本政儀, 高辻俊宏, 吉川 勲, B. I. Gusev, T. I. Rozenon, K. N. Apsalikov, N. J. Tchajjunusova: セミパラチンスク市の外部被曝線量, 1997年度度日本放射線影響学会第40回大会, 京都, 平成9年11月5-7日.

7. J. Takada, M. Hoshi, T. Nagatomo, M. Yamamoto, T. Takatsuji, I. Yoshikawa, K. Iwatani, S. Endo, B. I. Gusev, A. Kh. Sakerbaev, K. N. Apsalikov and N. J. Tchajjunusova : Thermoluminescence Dosimetry Study in Semipalatinsk, in: The 2nd International Conference on Ecology-Radiation-Health , SSMA, Semipalatinsk , 16-19 September 1998.
8. 高田 純, 星 正治, 遠藤 暁, 山本政儀, 高辻俊宏, 吉川 勲, B. I. Gusev, A. Kh. Sakerbaev, N. J. Tchajjunusova : セミパラチンスク核実験場周辺都市の外部被曝線量, 1998年度日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 平成10年12月2-4日.
9. 山本政儀, 星 正治, 高田 純, 山本政儀, 高辻俊宏, 吉川 勲, 及川真司, B. I. Gusev, A. Kh. Sakerbaev : セミパラチンスク核実験場周辺の残留放射能 (2), 1998年度日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 平成10年12月2-4日.
10. 山本政儀, 星 正治, 高田 純, 塚谷恒雄, A. Kh. Sekerbaev , B. I. Gusev : 旧ソ連セミパラチンスク核実験場及びその周辺地域におけるプルトニウム (Pu) 同位体とセシウム(¹³⁷Cs)の分布, "放射性物質の環境移行研究の新たな展開" のクロスオーバー研究(核種移行)シンポジウム", 1998年11月26-27日, 理化学研究所.