I. 汚染の発生概要とコホート設定の経緯

テチャ川流域で発生した放射能汚染の発生概要と、一定期間にわたって実施された住民への調査(コホート調査)の概要を紹介する。

KEYWORDS: *Techa River, Mayak Production Association, Lake Karachay, Kyshtym Accident, EURT, Liquid Radioactive Waste, Techa River model, TRC, TROC*

I. 南ウラル地方の汚染の概要

1. テチャ川流域汚染の発生

マヤック生産施設(Mayak Production Association, MPA)は、旧ソ連のプルトニウム核兵器生産の最初のサイトとして1948年に最初の原子炉が建設され、1949年に再処理施設が稼働した。稼働初期段階(1949~1956年)、液体放射性廃棄物(Liquid Radioactive Waste, LRW)定常的なテチャ川(Techa River)への放出に加え、技術的不備と、1951年4月の雪解け水による春季異常洪水で、高レベル液体放射性廃棄物貯蔵タンク群の状態が悪化して、腐食による穴から高レベル液体放射性廃棄物が運河へ漏洩し、その後テチャ川に流出し始めた。流出量は時間的に変動したが、1951年10月8日~12日に最大となったため、1951年10月28日に液体放射性廃棄物の主要放出先をマヤック生産施設南のサイト内にある閉鎖型湖であるカラチャイ湖(Lake Karachay)に一時的に変更した。

プルトニウム抽出・製造後のウラン核分裂生成物ⁱのテチャ川への流出量推定値は、約 1.14×10^{17} Bq¹⁾であり、98%は1950~1951年の2年間で放出された。川水、川底堆積物および氾濫原は、 γ および β 放射性核種で汚染²⁾され、テチャ川(全長約240 km)流域にある41村落の住民約30,000人に慢性的な外部被ばくと内部被ばくが生じた。

2. キシュチム事故とカラチャイ湖の干ばつ

1957年9月27日に大量発生の放射性廃棄物処理・保管技術の不備により冷却系統が故障して、高レベル廃棄物貯蔵タンクの過熱による爆発事故であるキシュチム事故(Kyshtym Accident)が発生した。事故により放出された放射エネルギーの90%は施設とその周囲を汚染したが、発生した放射性プルームⁱⁱによって、マヤック生産施設から北東方向に約120kmに渡って細長く土壌汚染ⁱⁱⁱが発

生した。この汚染地帯は東ウラル放射性プルーム跡(East Ural Radioactive Trace, EURT)と呼ばれており、放出された放射エネルギー推定値は約 7.4×10^{16} Bqであり、チェリャビンスク州、スヴェルドロフスク州などの町を北東方向に約300kmにわたり汚染し、テチャ川上流の村落(大半は1956年までに避難)も汚染した。このため約3万人を超える住民が被ばくしたといわれる。これ以外に1967年4月10日~5月15日に放射性廃液放流先となったカラチャイ湖の春における異常干ばつによって湖岸の沈泥中の放射性物質^{iv}が東から北の方向に飛散し、約 2.2×10^{13} Bqの放射エネルギーが約2700km²の土地を汚染した。

3. 再処理気体廃棄物放出

MPA稼働開始1年間はホールドアップ施設もなかったため、再処理施設から希ガスや¹³¹I等が直接大気放出された。ここで、オジョルスクとキシュチムの小児にとって被ばく上問題となる核種は希ガスではなく、¹³¹Iであり、最大放出推定量は 3.7×10^{16} Bqであった。

テチャ川水系の全容を昌頭の図1に示し、MPAによるテチャ川流域汚染を含む南ウラル地区のイメージ図2を図に示す。

4. 政府の対応

放射能汚染調査(川水・底堆積物)は1950年6月に行われ、1951年夏にはソ連当局による体系的な環境測定(テチャ川流域の川水・堆積物放射能、被ばくレベル)が開始された。当局がテチャ川汚染状況を把握した後、対策措置が取られ、1951年、川水飲用が禁止され、一部の地域で避難が行われた。1951~1957年、MPA放出地点から川下距離78km(Muslyumovo村落)より上流区間の全村落である14の村落はすべて避難させられ、避難者合計は約4,100人であった。下流の村落における川水飲料禁止は1956年から行われたが、対応したのはごく一

Radiation dosimetry and epidemiological research of the exposed population living along the Techa River; Review of Techa River contamination sources and sequential refinement of cohort definition: Satoshi Iwai, Shigeru Kumazawa, Tsuyoshi Semba, Kenji Ishida, Syunji Takagi.

(2016年8月25日 受理)

i ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr, ⁹⁰Y, ⁹¹Y, ¹³⁷Cs, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴¹Ce, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴³Pr, ¹⁴⁷Pr

ii ⁹⁰Sr, ⁹⁰Y, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁰⁶Ru, ¹⁰⁶Rh, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Pr

iii 74Bq/m²以上の汚染地帯は約120kmであるが、それより低い汚染地帯がより幅広く北東方向に300km以上広がった。

iv ⁹⁰Sr, ⁹⁰Y, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁴Pr

図2 テチャ川流域等の南ウラル地区汚染発生のイメージ図

部であった。下流村落の幾つかでは、2000年時点でも避難しない状況であった。

Ⅱ. テチャ川汚染モデルの構築

1. テチャ川水系

テチャ川(長さ240km, 最大深さ2m, 流れ口の平均年流量率 $7\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)は、イセト川の右支流を成し、その後いくつかの川と合流してオビ川に入り、最後は北極海のカラ海に注ぐ。図1に示すように、そのテチャ川はイルチャッシュ湖(Lake Irtysh)に発し、キュスユルタッシュ湖(Lake Kyzyl-Tash)を通り、キュスユルタッシュ湖出口から約300m下流にMPAからの廃液放出地点がある。放出地点から下流7~237kmには、41村落(1950年人口は村落ごと75~4,102人)が存在した。放出地点下流約5~7kmにメトリンスキ池(250万 m^3)があり、1951年、放出地点から下流約3kmにコクシャロフ池(40万 m^3)が建設された。これらの2つの池(川上池)はMPA放出の液体放射性廃棄物のための停留貯水池の役割を果たし、出口のダムによって流量がほぼ一定に調整された。川上池の出口ダムより下流78km(Muslyumovo村落)までは川が蛇行し、周囲300~2,000m幅の湿地帯が形成されている。それ以降の下流は川床周辺の氾濫土壌源は芝牧草地帯であり、乳牛などの家畜が放牧されていた。

2. テチャ川放射性核種移行モデル

テチャ川は、MPAからの液体放射性廃棄物放流の結果、1949~1956年に汚染が発生したが、約98%が放出された初期汚染期間(1949~1951年)は、環境測定データが少ないため、線量再構築上、放射性核種放出データに基づくテチャ川汚染モデルの開発が不可欠であった。このため、放射性核種の平均年間放出量に関する専門家推定^{3,4)}と固体微粒子付着の放射性物質を考慮しないテ

図3 MPAからテチャ川への日平均放出放射能量
(出典：文献1を一部改訂)

チャ川放射性物質の単純輸送モデル⁵⁾が川の汚染推定に用いられた。このモデルは時間と放出点からの距離に依存した川水中の放射性核種濃度を与えるものであり、距離依存の出力は初期の頃の川岸の空間線量率の再構築に役立つものであった。

しかし、2002年に米露共同プロジェクトによるモスクワで開催された国際会議で指摘された重要な諸課題の一つに、「1949~1951年の住民線量推定を改善する」という課題があり、この課題要請を受けた検討を行って、1949~1951年のテチャ川汚染状況の再構築に関する次の改善成果が得られた。

第1は、MPA初期運転資料(液体放射性廃棄物の生成、貯蔵および処理)の多数が情報開示された結果、1949~1951年の放射性核種流出量の時間変化の推定が大幅に改良された¹⁾。このため、初期汚染期間のテチャ川流域村落の被ばく状況を一層正確に再構築する確かな基礎が得られた。テチャ川への日常放出と漏洩放出による全放出放射能量の日変化を図3に示す。1951年後半のピークは高レベル液体性廃棄物タンク群からの漏洩によるものである。

図4 テチャ川放射性核種移行モデル(文献2を一部改訂)

第2は、水理パラメータ、過去の地図情報と1949～1951年のテチャ川の川底堆積物粒径成分に関するアーカイブのデータ解析^{6,7)}から、川底堆積物沈澱微粒子の流量率による攪乱懸濁・凝集沈澱過程が解明された。この結果、放出時点の懸濁微粒子成分と汚染底堆積物由来の攪乱懸濁微粒子成分による放射性核種輸送が、テチャ川に関する線量レベルに影響を与えると結論された。これにより、以前の単純輸送モデルにはない固体微粒子付着による放射性核種輸送がテチャ川放射性核種移行モデルに導入された。その改良されたモデルを図4に示す。

第3は、新逆問題解法⁸⁾を用いて、歯中や人体中⁹⁰Srの測定値に基づき、Muslyumovo村落住民の川水飲用による⁹⁰Sr摂取量が推定された⁹⁾。この方法を適用し、新たに入手された飲料水消費データを用いて、MPAからの放出されたソースタームとは独立に、1950～1951年の川水中の⁹⁰Sr濃度を逆推定することができた。このような遡及的線量推定結果により改良された川モデルによる推定結果の検証が行われた。

第4は、1950年前半に使用されたGMβ線カウンタの仕様情報をMPAアーカイブから得て、β線とγ線のエネルギー依存性による系統誤差解析¹⁰⁾が、線源-検出器間放射線輸送モンテカルロシミュレーションで実施された。この結果、1950～1951年使用のGMカウンタは、校正定数の不確かさが±30%以内にあることが確認された。また、MPAアーカイブ情報に基づき、当時使われたガンマ線計数率単位(mg-e Ra)^vで表された放射能量を、対象放射性核種ごとにBq単位に直す換算係数が評価されたため、空間線量率のテチャ川放射性核種移行モデルによる計算結果と実測結果の適正な比較が可能となった。

Ⅲ. テチャ川疫学コホート

1. コホートの設定

「コホート」とは、疫学調査の対象として一定期間にわたって追跡調査される人の集団のことである。そして放射線の被ばくを受けた集団(暴露群)と、原則として暴露群と出生年、性別、年齢構成、その他の修飾因子が同等で被ばくを受けていない集団(非暴露群または対照群)^{vi}を追跡調査し、疾病罹患率または死亡率を比較する観察疫学研究をコホート研究と言う。

テチャ川流域では1951年から医学調査計画が始められ、1956年にテチャ川村落と近隣非汚染村落の出生・死亡記録データの収集が開始された。そして1968年には、テチャ川コホート(Techa River Cohort, TRC)を定め、疫学調査計画が始められた。当初の主データベースは、南ウラル地方のチェリヤビンスク州の3郡とクルガン州の2郡および汚染した地区から移住したチェリヤビンスク州の2郡を加えた7郡の住民約9万人がテチャ川集団(62,300人:内1,700人はEURT被ばく者)とEURT集団(26,000人)で登録された。前者は「テチャ川コホートTRC」(1949～1952年に居住していた住民26,500人、1960年までの入植者約5,000人)と「テチャ川子孫コホート(Techa River Offspring Cohort, TROC)」(胎内被ばく者および被ばく者の子孫29,700人)、後者は「EURTコホート」(事故前出生15,200人、事故後出生10,800人)と

^v $1\text{mg-e Ra} = 0.5\text{nGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。放射平衡状態ラジウム1gと等電離量を示すガンマ放射線放出核種量

^{vi} 1つの集団を観察する中で暴露の程度が極めて低い群を対照群とする場合もある。

^{vii} 人種としてロシア人(スラブ系)とタタール・バシキール人(チュルク系)を含むため、人種の違いによるリスク係数の違いを調査できる可能性があるコホートと考えられている。

^{viii} 1953～1960年までの入植者約5000人を加えたコホートを「拡張テチャ川コホート」(Extended Techa River Cohort, ETRC)、「テチャ川子孫コホート」を「拡張テチャ川子孫コホート」(Extended Techa River Offspring Cohort, ETROC)と表記する場合もある。

定義された^{vii}。ただし、2009年には、TRC コホートが少し変更されている(EURT 被ばく者はETRCで約4,700人、ETROCで約5,000人^{viii}であり、EURTによる高被ばく者は除外された)。これらのコホートは実測データの利用可能性等に依存して、TRC 構成員の個人線量推定が優先され、それに基づく疫学調査が実施されている。これに遅れて、TROC 疫学調査が進められ、その次として、EURT コホートの疫学調査が行われている。本疫学調査の限界の摘出と改善を重ねながら、1950年以降のがんに関する死亡率および1956年以降の罹患率に関する疫学調査が継続されている。TRCには全年齢層の男女ならびに2種類の人種としてロシア人(スラブ系)とタタール・バシキール人(チュルク系)が異なった村落に存在し、人種構成はロシア人が80%とタタール・バシキール人が20%であった。

2. テチャ川コホートの特徴

疫学上は「原爆被爆者寿命調査」(Life Span Study, LSS)コホートのように、同じコホート内部の極めて被ばく線量の低い集団を対照群として設定する方が、様々な交絡因子^{ix}による影響の相殺が可能となるため、がん等のベースライン評価の信頼性が高くなる。TRC 調査においても追跡調査の質を高めるため、コホート内部に対照群設定の検討が行われた。LSSに合わせた内部固定対照群(積算線量0~5mSv)の人年の値(人数×観察期間年)がテチャ川線量評価システム TRDS-2000 以前はゼロであったが、1950年代からウラル放射線医学センターの健康診断記録があり、対象村落の近くの非汚染域に居住し、1950年前に生まれ、性別・年齢構成が類似した内部固定対照群コホートを構築する方針が示され、TRDS-2000以降これがゼロ線量群として導入された。

TRC 調査と原爆被ばくコホートのLSS調査との比較として、類似点には、疫学調査集団が様々な年齢構成の男女からなる集団であり、統計的に健康影響の発生が検出可能な線量域に積算線量の分布があることが挙げられている。一方、相違点としては、「中性子を含む光子による急性被ばく」と「β線と光子による慢性被ばく」、「外部被ばくのみ」と「内部被ばくと外部被ばくの混合」、「単一人種」と「2種類の人種」、そして、対照群の設定として、LSSが「内部固定対照群」であるのに対して、TRCの「外部非固定型対照群」からTRDS-2000以降「内部固定対照群」の導入が挙げられる。TRC調査では、このほか、人口動態データの不足、汚染調査区域からの移住による追跡損失などの疫学上の限界が指摘され、その解決に向けた努力が行われている。

IV. まとめ

米国のマンハッタン計画に相当する旧ソ連の核兵器開発計画で、南ウラルにあるマヤック生産施設からテチャ

川に流出した放射性廃棄物、ならびに高レベル廃棄物貯蔵施設過熱事故によるプルーム発生、ならびに放射性廃棄物を放出した閉鎖型湖であるカラチャイ湖の干ばつによる放射性核種の飛散等によって、テチャ川流域周辺の住民約30,000人に慢性的な外部被ばくと内部被ばくが発生した。ソ連当局は体系的な環境測定を行い、川水飲用禁止や上流地域の避難等の対策を実施するとともに、住民に対する医学調査計画を開始し、テチャ川コホート(TRC)を定めた。TRCの個人の被ばく線量を精度良く求めるため、様々な改良を重ねてテチャ川放射性核種移行モデルが開発されるとともに、TRCのがん死亡率、罹患率の研究が開始された。TRCは低線量、中線量の慢性被ばくを多く含み、外部被ばくだけでなく、⁹⁰Sr等による内部被ばくを受けた点、および2種類の人種が含まれている点で特徴的なコホートと考えられ、現在でも調査が継続されている。

－ 参考資料 －

- 1) Degteva, M. O., Shagina, N. B., Vorobiova, M. I., Anspaugh, L. R., Napier, B. A., Reevaluation of waterborne releases of radioactive materials from the MAYAK Production Association into the Techa River in 1949–1951, *Health Phys.*, 102(1), 25–38, 2012.
- 2) Shagina, N. B., Vorobiova, M. I., Degteva, M. O., Peremyslova, L. M., Shishkina, E. A., Anspaugh, L. R., Napier, B. A., Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949–1951 as a result of releases from the “MAYAK” Production Association, *Radiat. Environ. Biophys.*, 51(4), 349–366, 2012.
- 3) Ilyin, D. I., Migration of radioactive material from open reservoirs. Doctoral thesis, Institute of Biophysics, Moscow, 1956. [republished in *Radiat. Safety Problems*, 4, 46–61; 1, 60–77, 2005; 2, 50–75; 4, 28–41; in Russian]
- 4) Joint Norwegian-Russian Expert Group for Investigation of Radioactive Contamination in the Northern Areas (JNREG), Sources contributing to radioactive contamination of the Techa River and areas surrounding the “Mayak” Production Association, Urals, 1997.
- 5) Vorobiova, M. I., Degteva, M. O., Burmistrov, D. S., Safronova, N. G., Kozheurov, V. P., Anspaugh, L. R., Napier, B. A., Review of historical monitoring data on Techa River contamination, *Health Phys.*, 76(6), 605–618, 1999.
- 6) Mokrov, Y. G., Shagin, D. M., Investigation of stirring up of bottom sediments and sedimentation of suspensions in the upper Techa River region in 1949–1951, *Radiat. Safety Problems*, 4, 22–34, 2002 (in Russian).
- 7) Mokrov, Y. G., Radioactive contamination in the upper part of the Techa River: stirring-up of bottom sediments and precipitation of suspended particles. Analysis of the data obtained in 1949–1951, *Radiat. Environ. Biophys.*, 42, 285–293, 2004.
- 8) Zalyapin, V. I., Krivoschapov, V. A., Degteva, M. O.,

^{ix} 暴露と疾病発生の関係に影響を与え、真の関係とは異なる観察結果をもたらす第3の因子のこと。

- Numerical analysis of an applied biophysics inverse problem, Inverse Probl. Sci. Eng., 12, 379-392, 2004.
- 9) Tolstykh, E. I., Degteva, M. O., Peremyslova, L. M., Shagina, N. B., Shishkina, E. A., Krivoschapov, V. A., Anspaugh, L. R., Napier, B. A., Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa Riverside residents: strontium-90, Health Phys., 101 (1), 28-47, 2011.

- 10) Shishkina, E. A., Degteva, M. O., Bougrov, N. G., Krivoschapov, V. A., Anspaugh, L. R., Napier, B. A., Evaluation of historical methods for measurements of gamma and beta radiation with use of Monte Carlo modeling of radiation transport, Final report for Milestone 1, Ural, 2010.

II. 個人被ばく線量の再構築

テチャ川流域住民の放射線被ばくは上流地域では内部被ばくよりも外部被ばくが多く、中流および下流地域では内部被ばくが多い。本稿では、テチャ川流域住民疫学コホート構成員の外部被ばく線量と内部被ばく線量を含めた個人被ばく線量の再構築方法とその改良の経緯について解説する。

KEYWORDS: *SICH-9.1, TBC, EPR, FISH, TL, ⁹⁰Sr, Techa River Dosimetry System, TRDS-2000, TRDS-2009*

I. 被ばく線量測定

1. 体内汚染の測定

テチャ川コホート (TRC) には川水飲用者のみならず、テチャ川氾濫原の牧草地帯に放牧した牛のミルクの飲用者、川魚を食していた住民が多く含まれており、⁹⁰Sr や ¹³⁷Cs 等の放射性核種が体内に摂取されてきた。TRC において特徴的であることは、コホート構成員の多数に体内汚染追跡の標識で、体内に長く残留する ⁹⁰Sr が存在することであった。Sr は Ca と同じアルカリ土類元素であり、体内では骨に移行し沈着する。6 歳未満の小児では歯のエナメル質の石灰化に伴ってエナメル質に沈着し、排泄されることなく完全に残留する。⁹⁰Sr の骨中負荷量を測定する目的で、1974 年以来 NaI (TI) と CsI (TI) を用いたホスウィッチ型シンチレーション検出器 4 個を備えた全身カウンター (SICH-9.1) が使用されてきた。これは ⁹⁰Sr-⁹⁰Y の β 線から生じる制動放射線を測定するⁱのものであり、TRC の約 15,000 人について 32,000 件以上の測定が行われた。歯のエナメル質中の ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 測定は歯のエナメル質 β 線カウンター (TBC) を用いて 30,000 件以上測定された。死亡者については約 1500 の検体骨中 ⁹⁰Sr 試料の化学処理後の測定が実施され、Sr 体内残留モデルを用いて、⁹⁰Sr の身体負荷量が推定された。

2. 外部被ばくの測定

空間線量測定には、テチャ川岸に近い建物の赤レンガの石英試料を用いた熱蛍光測定法 (TL 法) が行われた。この測定データはテチャ川放射性核種移行モデルから計算された空間線量の検証に使用された。空間線量から求められる空間線量率と個人行動データから外部被ばく線量を推定するには限界があった。そのため、線量の高いマヤック生産施設 (MPA) 稼働初期のテチャ川上流住民の外部被ばく線量推定には、住民の歯エナメル質の核磁気共鳴法である EPR (Electron Paramagnetic Resonance) および、染色体の特定遺伝子を検出する FISH (Fluorescence in Situ Hybridization) を用いた末梢血リンパ球の染色体安定型転座頻度分析が行われた。EPR は ⁹⁰Sr を大量に摂取し始めた年齢が歯のエナメル質石灰化以降の年齢である 6 歳以上で、100mGy 以上の被ばくを受けた住民に対して有効であり、試料提供者は 79 人であった。FISH では自然転座と骨中の ⁸⁹Sr、⁹⁰Sr からの放射線による赤色骨髓局所被ばくで誘発された転座成分を差し引いて、外部被ばく線量を評価している。末梢血リンパ球試料提供者は 71 人であり、FISH は 300mGy 以上の被ばくを受けた住民に有効である。EPR と FISH による線量はモデル計算による外部被ばく線量値の検証として使用された。

II. テチャ川線量評価システム

Radiation dosimetry and epidemiological research of the exposed population living along the Techa River; Reconstruction of individual dose: Satoshi Iwai, Shigeru Kumazawa, Tsuyoshi Semba, Kenji Ishida, Syunji Takagi.

(2016 年 8 月 25 日 受理)

ⁱ NaI (TI) と CsI (TI) の 2 種類の異なるシンチレータを用いたホスウィッチ型検出器 (phoswich detector) は β 線と光子が混在する場で放射線弁別に有効に使用される。SICH-9.1 では ⁴⁰K と ¹³⁷Cs からの γ 線のコンプトン散乱寄与は、測定値から差し引かれて評価された。