

# 中国の核実験と周辺住民の被曝

— カザフスタンから垣間見られた放射能汚染 —

羽倉 洋行

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 素粒子原子核研究所・理論センター

一瀬 昌嗣

〒 651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3

神戸市立工業高等専門学校 一般科

## 概要

中国は新疆ウイグル自治区内シルクロード沿いの複数の場所 (いわゆるロプノール核実験場) において、1964 年から 1996 年まで 32 年間にわたって核実験を行った。そこで継続的に行われた 46 回の核実験を通じて大量の核の灰が広範囲に降り注ぎ、とりわけ大規模な 3 回の地表核爆発の影響による犠牲者の数は、広島や長崎を上回ると推計されている。現在入手可能な資料\*から、推計の根拠となった隣国カザフスタンでの被害を紹介し、今もなお犠牲者を出し続けていると考えられる中国の核実験の実態を考察する。そして、放射線防護学の知見と人道的な見地から今後なされるべき方策を検討する。

---

\*本稿の PDF 版には Web 上で参照可能な情報に対しハイパーリンクを埋め込んであるので、詳しくは引用元を参照されたい。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>広島・長崎での核爆発災害</b>	<b>3</b>
2.1	原爆投下直後の状況	3
2.2	黒い雨による被害	5
2.3	被曝線量とその影響	6
<b>3</b>	<b>核爆発現象の分類</b>	<b>8</b>
3.1	放射性降下物と爆発高度	8
3.2	空中核爆発の現象と災害	9
3.3	地表核爆発の現象と災害	10
<b>4</b>	<b>保有国の核実験に対する評価</b>	<b>12</b>
4.1	実験場ごとの爆発高度と威力	12
4.2	洋上での核実験	12
4.3	内陸部での核実験	14
4.4	セミパラチンスクでの核実験	14
<b>5</b>	<b>カザフスタン「第四診療所」グシェフ医師の証言</b>	<b>17</b>
5.1	中国新聞「世界のヒバクシャ」(1991)	17
5.2	広島大学調査団(1995)	18
5.3	ジャーナリスト森住卓の報告(1999)	18
5.4	NHK「セミパラチンスク 18年後の現実」(2009)	19
5.5	中国新聞「ロプノルの影」(2000)	20
<b>6</b>	<b>中国の核実験とその被害</b>	<b>22</b>
6.1	カザフスタン・マカンチでの被害	23
6.2	カザフスタン・ジャルケントでの被害	26
6.3	中国・新疆ウイグル自治区での被害	28
6.4	中国・チベット人居住地での被害	30
6.5	楼蘭周辺に入境した日本人の被害	30
<b>7</b>	<b>被害の証拠</b>	<b>31</b>
7.1	被害の補償	31
7.2	内部被曝の「証拠」と原爆症認定訴訟	32
7.3	生物学的線量評価	33
<b>8</b>	<b>まとめと課題</b>	<b>35</b>

<b>A</b>	<b>放射線防護と広島・長崎原爆線量評価</b>	<b>38</b>
A.1	放射線防護のための諸量 . . . . .	38
A.2	放射線の作用とリスク . . . . .	39
A.3	広島・長崎原子爆弾線量評価体系 . . . . .	40
<b>B</b>	<b>放射線の輸送計算について</b>	<b>45</b>
B.1	輸送計算とモンテカルロコード . . . . .	45
B.2	評価済み核データとの連携 . . . . .	48
B.3	線量評価と輸送計算 . . . . .	48
B.4	様々な応用と注意点 . . . . .	49

## 1 はじめに

米国の科学雑誌に中国の核実験についての記事 [3] が掲載されて注目を集めた。その日本語版では『過去の衝撃』と題されたこの記事 [4] によると、核実験場の新疆ウイグル自治区での放射線量のピーク値はチェルノブイリ原発事故後の値を越えていたとされる。その結果、実験場周辺での犠牲者の数が原子爆弾が実際に投下された広島や長崎を上回るという推計が報告され、世界に大きな衝撃を与えた\*。大惨禍をもたらした原爆投下を上回る程の被害を引き起こした中国の核実験とは、一体どのようなものであったのだろうか。

この中国の核実験による被害の実態を告発する番組が、1998年8月、世界で初めて英国で放映された。“Death on the Silk Road” [5] と題されたこのドキュメンタリー番組は、欧州諸国をはじめ83カ国で放送され高い評価を受けた†。そこには、核実験で生じた核の砂‡による被曝の影響で様々な障害を負ったと思われる子供達の痛々しい姿や、被曝により発病したらしい癌患者の様子などが赤裸々に映し出されている。図1には、同番組でアニ瓦尔・トフティ (Enver Tohti) 医師により秘密裏に行われた、中国における発癌率の調査結果が示してある。核実験場周辺では最大で1.35倍程度に上がっていることが読み取れる§。この番組が最初に放映された1998年から既に10年以上の歳月が流れているため、そこで紹介された被曝者の多くはもう既にこの世の人ではないかもしれない。

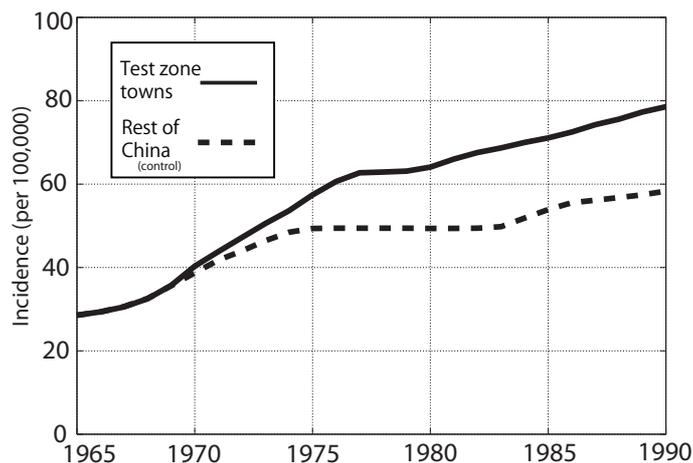


図1: 中国における癌の発生率の経年変化 [5]。核実験場周辺では発生率が有意に高くなっている。

さらに、中国の核実験の影響は遠く国境を超えた隣国カザフスタンにも及んでいる。綿密な線量評価と疫学調査に基づく報告書が2007年にカザフスタンのグループから公開された [6]。それによると、中国とカザフスタンの国境沿いの町マカンチでは、核実験場から1,000 km近くも離れているにもかかわらず、最初の被曝から20年を経て癌致死率が1.3–1.8倍にまで増加した (図12) とされる。すなわち、中国の核実験場の風下の地域では、かなり遠方でも図1に示された1998年の調査を上回る被害が示唆されている。

\*日本のマスコミにも取り上げられた：東京新聞 2008年11月21日「中国核実験の実態 隣国カザフの調査 日本人科学者が分析 住民19万人死亡推定」；産経新聞 2009年4月30日「中国核実験で19万人急死、被害は129万人に 札幌医科大教授が推計」。

†自らの生命を賭して優れたニュース映像を報道したカメラマンに贈られるRory Peck賞の、1999年度受賞作品に選ばれた。この番組は日本では全く放送されず、2008年以前は話題にもならなかった。英国での最初の放送から10年以上経た現時点では動画サイトで閲覧可能となっており、大きな反響を呼んでいる。

‡核の灰、死の灰ともいわれ、セシウム、ストロンチウムなど核分裂生成核種、未分裂のプルトニウムなどの放射性物質が多量に含まれた砂漠の砂のことである。

§日本のマスコミでも取り上げられた：産経新聞 2008年8月11日、「中国核実験46回 ウイグル人医師が惨状訴え」；東京新聞 2009年3月28日、「ウイグル「核汚染」亡命医師が暴く中国の「恥部」、実験でなく「蛮行」被爆国「日本唯一でない」」；週刊新潮 2009年4月2日、「ガン発生率が35%も高い」ウイグル人医師が語る「中国核実験」の惨状。

核兵器のもたらす惨禍というものを鑑みると、広島・長崎への原爆投下は勿論のこと、第二次世界大戦後に核兵器保有国によって繰り返されてきた2,000回以上もの核実験による災害も見逃すことはできない。それに付随して現地での科学的調査—広島・長崎での空中核爆発災害調査、旧ソ連のセミパラチンスク核実験場での地表核爆発調査、日本の漁船も被害にあったマーシャル諸島での核実験による被災の調査など—が行われて、それらの核爆発による被害の実態はかなりの部分が解明されている [8, 42, 27]。さらに、中国以外の各国においては、被曝者への補償も少しづつではあるが進んでいる。

一方、中国政府の態度を見ると、第三者調査に対し現地調査を公開しない [12] ばかりか、公式に核実験の事実および周辺地域への影響を開示せず、被曝した住民達への補償も全く行っていない。その実態調査としては極めて困難な状況にある。そうした制約のあるなか、放射線防護学の専門家である高田純により現地訪問をしない形で、中国の核爆発災害の真相に迫った報告が出された [7]。それは、中国と北西に国境を接するカザフスタンの科学報告書のデータ\*を鍵として、核爆発災害の科学的評価方法により被曝地の被害評価をするという手法である。先に紹介した記事 [3, 4] は、高田の報告を紹介する形で書かれている。

目下、日本の物理学者達はこれらの報告を受けてこれといった反応はなく、また抗議の声も特には上がっていない。もしも湯川、朝永、坂田のような先人達が存命であったならば、このような事態を看過したであろうか。生前の彼らは核兵器を廃絶しなければ人類の前途は暗黒だと警告したラッセル-アインシュタイン宣言 [1] に基づき、核抑止論の矛盾、ゲーム理論の誤用、核兵器開発競争の現状と帰趨を批判した [2]。そして、核抑止論を克服した世界のあり方を唱えるべく 1975 年に『湯川・朝永宣言 - 核抑止を超えて』を世界に向かって発信した [1]。上記の諸報告が正しいとするならば、多数の犠牲者を出している中国の核実験は、核抑止からさらに一線を踏み越えた核兵器による抑圧、いわば「核抑圧」といえるのではないか。先人達が活動の拠点としていた素粒子論グループにおいて、彼らの人命を尊重し平和を求める精神を受け継ぎ、我々に何ができるのかを考えて頂きたく、ここに中国の核実験の実態を紹介することにした。

声が上がらない要因として、中国の核実験の実態について知る機会が少なかったことが関係しているのではないかと考えている。他の核兵器保有国と比べて、中国の場合、その被害の実態が世に知られるようになったのは比較的近年のことであり、その詳細については未だに明らかにされていない部分が多い。本稿では、筆者に入手可能な資料の範囲で解説を試みる。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では広島・長崎での原爆投下による核爆発災害について科学的視点から説明する。第3章では、現在の放射線防護学の知見に基づいて核爆発現象を分類して説明する。広島と長崎への原爆投下はいずれも空中核爆発であったのに対して、中国の核実験のうち数回が大規模な地表核爆発であった事が判明している。この核爆発の種類の違いは核実験による被害を理解する上で本質的である。本稿では、この二種類の核爆発の違いを物理的に正しく理解した上で、その被害の実態を述べる。さらに、第4章では、戦後に行われてきた2,000回以上におよぶ核実験について科学的な評価を行う。第5章では、隣国カザフスタン側からの重要な目撃・証言を幾つか紹介する。第6章では、中国の核実験の実態を他国の核実験との比較をしながら解説する。それに引き続き、第7章では、核実験による被害の証拠を示して、その妥当性を論じてみる。第8章では現在までの知見をまとめ、それを受けて我々はどのような行動をとるべきかを考えてみる。また付録において、放射線防護学のごく初歩的な解説を試みる。付録Aでは、放射線科学の基礎的事項をまとめた後、広島・長崎の原爆被曝線量評価体系について紹介する。付録Bでは被曝の定量的な評価をする上で重要となる放射線輸送計算コードについて述べる。総じて、本稿を目にするすべての方々に、考える材料を提供できるものと期待している。

\*この元データは、中ソ対立のあった旧ソ連時代に秘密裏に観測されたもので、1990年に報告され、高田はこれを2001年に入手したとある [7]。文献 [6] にも収録されており、現在では容易に入手できる。

## 2 広島・長崎での核爆発災害

この章では、原爆投下時に実際に起きた現象を取り上げて、空中核爆発の災害がどのようなものであったのかを説明する。長崎での原爆の惨禍を目の当たりにした小学3年生の女の子は、「原子爆弾が落ちると、昼が夜になる。人はみな、お化けになる」と端的に表現した。太平洋戦争最末期にもたらされた、この人類史上最初の核爆発災害の科学的検証を行う。

### 2.1 原爆投下直後の状況

1945年8月6日の午前8時15分、B-29爆撃機エノラ・ゲイは広島市上空、高度9,300mから原子爆弾リトル・ボーイを投下した。それは上空600mで爆発威力16kt\*の空中核爆発を起こし、直径約200mの火の球となった。炸裂の瞬間、大量のエネルギーが狭い弾筒の中で放出され、核分裂生成物、爆弾の弾筒などの構造物は、太陽の中心に匹敵する物凄い高温（約1000万）となり、すべての物質はガス状になってしまった。このようなガス状物質は、炸裂の瞬間、狭い爆弾構造の中に閉じ込められ、凄まじい圧力（大気圧の100万倍強）に達した。0.01秒以下の炸裂時に、この極めて高温の残留物の大部分は、大気中で吸収されてしまう低エネルギーX線としてそのエネルギーを放出し、それにより火の玉（fireball）と呼ばれる高温で強い光を発する空気とガス状残留物の球状塊を形成した[43]。

太陽よりも明るい一瞬の閃光と、それに続く爆音と衝撃波はピカドンと呼ばれた。直後に広島市は半径2kmの範囲で壊滅し、1945年12月末までに広島では約14万人が、長崎では約7万人が亡くなったと推定されている。原爆投下直後の光景は、まさに地獄絵図が現実のものとなった。広島と長崎での惨禍は空中核爆発による災害がもたらしたものだが、その被害は図2に示してある以下の5種類に大別される。

#### 1. 熱線による被害

強烈な熱線を浴びた人は重い熱傷を負った。爆心地から約1.2km以内で、遮るものが無いまま熱線を浴びた人は、皮膚が焼き尽くされ、内臓などにまで障害を受け、ほとんどが即死か数日のうちに亡くなった。

#### 2. 爆風（衝撃波）による被害

爆発の瞬間、熱によって空気が急激に膨張し、数十万気圧という凄まじい圧力をもった衝撃波が発生した<sup>†</sup>。この衝撃波による爆風の強さは、爆心地から500mの場所では1m<sup>2</sup>当たり19t（普通自動車15台分）という巨大なもので、ほとんど全ての建物が押しつぶされ、人は吹き飛ばされたり建物の下敷きになって亡くなった。この強烈な爆風が吹いたあと瞬間的に気圧が下がって、人体内外の気圧のバランスが一瞬にして崩れてしまい、人の目玉や内蔵が体の外に飛び出すという現象が相次いだ。また、爆風によってガラスが碎片に砕けて人の体に突き刺さった。

#### 3. 初期放射線による被害

原子爆弾が、それまでのTNT火薬を爆発させる爆弾と違うのは、爆発した時のエネルギーが桁外れに大きいこと、そして放射線（主にγ線と中性子線）を大量に出すことである。広島には、原爆が炸裂して1分以内に「初期放射線」（initial radiation）が大量に降り注いだ。これが人体に大きな被害をもたらした事が核兵器の大きな特徴である。特に、爆心地から1km以内で直接、初期放射線を受けた人は、ほとんどが死亡した。

\*kt（キロトン）は核爆弾の威力を表す単位で、TNT火薬に換算した時に何ktに相当するかを意味する。広島型原爆は16kt、長崎型原爆は21ktであったことがDS02[40]において算出されている。1ktは $4.18 \times 10^{12}$ Jに等しい[43]。

<sup>†</sup>第3.2節に述べるMach Stemのメカニズムによって、衝撃波の圧力は倍増するように、爆発高度が計算されていた。

#### 4. 残留放射線による被害

さらに、その後には「残留放射線」(residual radiation)が残った。このため、直接被爆しなかった人でも、救援・救護活動や肉親などを探すために爆心地近くに行き被曝し、病気になったり亡くなったりする人も出た。また爆発後、巨大なキノコ雲（「原子雲」とよばれる）が広島上空に立ち昇り、20～30分後から北西部に流れていって、風下の地域に「黒い雨」を降らせた。この雨の中には、放射性物質が多量に含まれていたため、爆心地から遠く離れた地域の人の中にも放射線による障害が現れた。

#### 5. 電磁パルスによる被害

核爆発により放出された初期放射線には、大気中での強力な電離作用がある。この作用は瞬時に数千ボルトの電磁パルスを誘導し、通信、送電、コンピュータ、レーダーなどの機能を一瞬で麻痺させる。特に、高高度核爆発（高層大気圏における核爆発）が発生した場合、その影響はとても広い範囲におよぶ。ただし、広島と長崎においては、この電磁パルスによる被害は知られていない。

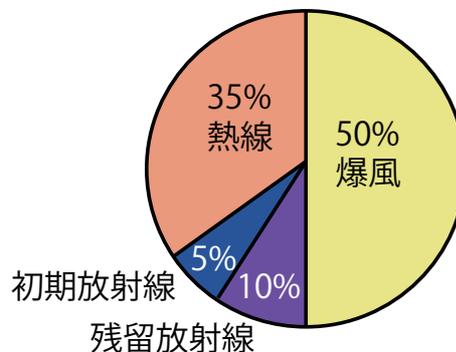


図 2: 核爆発の 5 つの特性 [44]。核爆発の全エネルギーのうち、50 %が爆風（衝撃波）、35 %が熱線、10 %が残留放射線、5 %が初期放射線として放出される。これに初期放射線が大気中に誘導する電磁パルスを加えた 5 つの特性が、核爆発災害の物理的原因となる。

後の章で論じる核実験のもたらす災害としては、上記の 4. 残留放射線による被曝が問題となる。これを少し詳しく解説しておく。残留放射線の被害は、その起源により、次の二つに大別される。

- 中性子の誘導放射能による被曝

核爆発の核分裂連鎖反応では、大量の中性子が指数関数的に発生する。一部の連鎖反応に寄与しなかった中性子は原子爆弾コアの外に飛び出し、土壌や建造物がこの中性子を吸収して放射化する。これを中性子による誘導放射能とよび、都市や周囲の環境の放射化を引き起こす。

- 放射性降下物による被曝

核分裂生成物（セシウムやストロンチウム等）や未分裂のウラン、プルトニウムといった原子爆弾の材料が大気中を拡散したり、あるいは原子雲などに含まれた状態になり、地上に降り注ぐ。これを放射性降下物とよび、核実験や全面核戦争などでは、広範囲にわたって甚大な被害をもたらす。

この後者の代表例が広島で観測された「黒い雨」として広く知られる放射性降雨である。この放射性降下物による被害は、核実験においても類似の現象\*が見受けられる重要なものであるため、次節においてさらに詳しく説明する。

\*中国の核実験では「核の砂（核の灰、死の灰）」が桜蘭からカザフスタンの国境地帯にわたる広い範囲に降り注いだ。「黒い雨」と「核の砂」には類似点が多くあり、その詳細については後述する。

## 2.2 黒い雨による被害

前節で、広島では残留放射能を含んだ「黒い雨」が降った事を述べた。この雨はいわゆる放射性降下物 (radioactive fallout) として現在ではよく知られた現象の一つで、主に広島市の北西部（図3を参照）で観測された。この黒い雨は、原子爆弾炸裂の30分後頃から降り始めたが、被爆後の調査で、爆心地から11～19 kmの範囲で大雨が、15～29 kmの範囲で小雨が降ったことが知られている [35]。

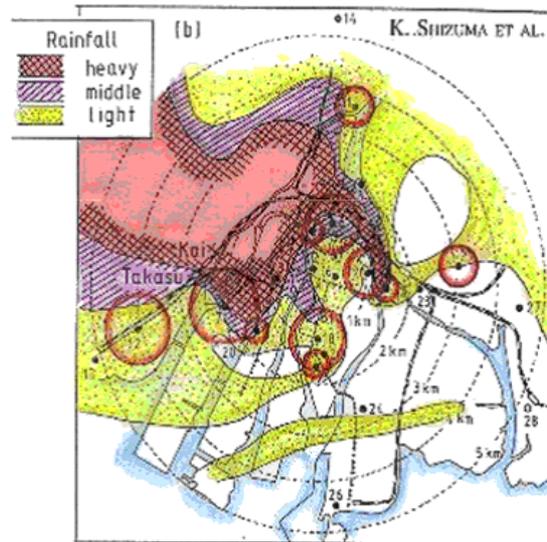


図3: 広島原爆の黒い雨の降った地域 [35] と仁科による資料測定点・測定値。

雨の間は真夏にも関わらず急に気温が低下したため、裸や薄着で逃げ回っていた人々は寒くて震えていた。降り始めの1～2時間は爆発の時の泥や埃、煤などを含んだ黒い大粒の雨で、強い放射線が含まれていた。池や川の魚がたくさん死んで浮き上がったとの目撃証言がある。雨の降った地域で水を飲んだ人の多くは下痢になったり、その後に雨に含まれていた放射能のため体調を崩したりした。

この黒い雨を現象論的に説明してみよう。原爆炸裂直後に生じた火の玉に続く激しい衝撃波によって、地上の物質は上空に巻き上げられて雲（「衝撃塵」という）を形成した。この衝撃塵の一部は中性子による誘導放射能をもって、原子雲の下側の部分を形成したと考えられる。衝撃塵は土砂や日本家屋の壁土が主体（主にケイ素）と考えられ、大気中では均質に分布したと考えられる。また、火の玉からの熱輻射は地上に大きな火災をもたらし、この火災による煙や残留灰が上空に立ち昇って、低空に黒い雲（「火災煙」という）を形成した。この火災煙にも中性子による誘導放射能が含まれていたと考えられる。

この火の玉・衝撃塵・火災煙からなる原子雲の中央部（半径約2 km）から原爆炸裂約30分後より強い放射性降雨が降り始めた。1991年の湾岸戦争の後に真っ黒な雨（主体は石油の燃焼）が観測されたが、日本でも大きな火事の後などでは黒い雨が観測されている。大火の後に黒い雨が降ること自体は不思議な現象ではない。問題となるのは、原子雲からの黒い雨に含まれる放射能とその放射能の強さである。

一般に、黒い雨のような放射性降下物の線量評価\*は容易ではない。現状では、放射性降下物中の降雨に含まれ、地表を流れ去らないで地中にしみ込んだ放射性残留物が放出する放射線の測定†に基づいているために線量が過小評価になっていると考えられている。実際、被爆者援護法の援護対象にならない1時間末

\*線量やその評価方法に馴染みのない読者は、付録Aを参照されたい。

†広島では原爆投下後に2つの大きな台風がきて、洪水となったために放射性残留物の流れ去ったものがある。

満の小雨とされた地域でも、黒い雨に由来するとみられる放射性物質が検出され<sup>‡</sup>、被爆者援護法の対象地域の拡大が検討されている。

### 2.3 被曝線量とその影響

原爆放射線被曝の影響については、放射線影響研究所\*（放影研, RERF）により半世紀以上にわたって継続的な調査が行われている。この放影研の寿命調査 (Life Span Study; LSS) の報告書によると、原爆放射線被曝が癌および癌以外の疾患による死亡率に影響を与えていることが示され (図 4 参照)、追跡調査対象の LSS 集団の半数強の人数が 1990 年代後半までに死亡している事が知られている。

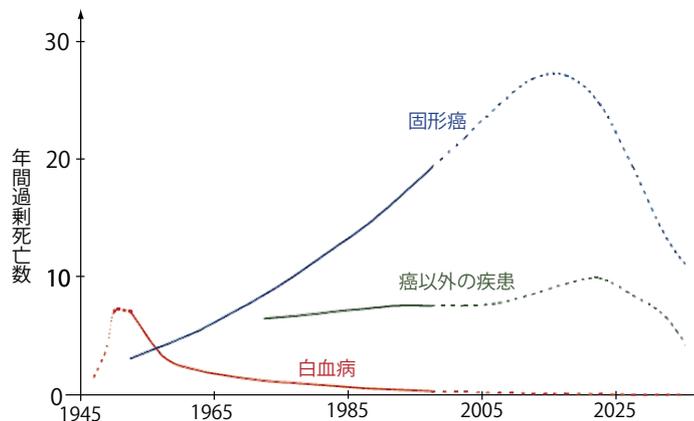


図 4: 広島・長崎被爆者の寿命調査 (LSS) の集団における晩発性障害による死亡数 [37]。被爆後数十年経過してから、癌による死亡が顕著に増加していることが判明している。過剰死亡の多くがさらにこれから発生することが予想されている。

被曝の影響を考える時、次のような三つの要素を考慮して、疾患の種別・発現期・致死率などを特徴付ける事ができる<sup>†</sup>。

- 被曝した線量
- 被曝時の年齢
- 被曝からの経年期間

LSS 集団は 86,572 名の原爆放射線被曝者から成り、その集団の構成が表 1 にまとめてある。LSS 集団の 60% が少なくとも 5 mSv の線量の被曝を受けたと評価されている。図 4 には、現在までの追跡調査と将来の予測に基づく放射線に関連した癌および癌以外の疾患による LSS の年間死亡数を示してある。

1950 年から 1997 年までの間に LSS 集団に生じた過剰死亡数は、固形癌によるものが約 450、白血病によるものが約 100、癌以外の疾患によるものが約 250 であったと推定されている [37]。まず被曝から数年以内に血液癌である白血病が急激に増加することがわかる。それに引き続いて固形癌の発症数が経年数とともに増えていき、2010 年を過ぎた頃に固形癌による死亡数がピークとなる。これらの疾患の発現期についての特徴を表 2 にまとめてある。

<sup>‡</sup> 共同通信 2010 年 2 月 1 日、「広島大、「黒い雨」の放射線検出 従来の観測エリア外で初」。

\* 原爆の放射線被曝の影響を調べるための日米共同研究機関。前身は 1947 年に米国原子力委員会の資金によって米国科学アカデミー (NAS) が設立した原爆傷害調査委員会 (ABCC)。1948 年には厚生省国立予防衛生研究所 (予研) が参加して、共同で大規模な被爆者の健康調査を開始し、その後何度かの再編を経て、現在に至っている [70]。

<sup>†</sup> 被曝線量の程度に応じてどのような症状が発現するかは、一般論として付録 A.2 にまとめてある。

図4で、固形癌による予測死亡数の増加が大きいのは、小児期や若年で被曝した人の過剰リスクが最も高くなるという観測結果に基づいているためである。LSS 集団の約半分が25歳未満で被曝しており、いわゆる「癌年齢」に到達した頃に発癌する傾向にある。将来の予測死亡数には不確実性が存在するが、将来だけでなく過去の死亡数についても不確実性は存在する。それは、過剰死亡数は直接観察できず、推定値としてしか評価できないからである。

癌以外の疾患の低線量リスクおよび年齢-時間の因果関係の特徴はよく分かっていないため、放射線に関連した癌以外の疾患による推定死亡数は、癌や白血病に比べると正確さがかなり劣るものとなる\*。

これらのLSS 集団の調査・研究の結果は、広島・長崎の原爆放射線被曝者のみならず、核実験により被曝した人たちの予測死亡数にも適用されるものである。核爆発災害の被害の大きさを評価し、被曝線量や犠牲者数を推定する上での基準となる。しかし、被曝とその被害の関係をつけるのは難しく、裁判でも論争があり、第7章で改めて論じることにする。

線量	観察人数	観察死亡数 (O)	期待死亡数 (E)	SMR (100×O/E)
5 mSv	37458	3833	3844	99.7
5-100 mSv	31650	3277	3221	101.7
100-200mSv	5732	668	622	107.4
200-500mSv	6332	763	678	112.5
0.5-1 Sv	3299	438	335	130.7
1-2 Sv	1613	274	157	174.5
2Sv 以上	488	82	38	215.8

表 1: 広島・長崎での被曝者の寿命調査集団 (LSS) における被曝線量 (DS86 による) ごとの固形癌による観察死亡数と期待死亡数 (1950-1997) [38]。標準化死亡比 (SMR) は後の中国の核実験場の被害と対照するために、筆者において算出した。

疾病の種類	発現開始	高頻度で発現開始
白血病	2-3 年	5 年
甲状腺癌	5 年	10 年
乳癌・肺癌	10 年	20 年
胃癌・結腸癌	10 年	30 年

表 2: 晩発の身体影響の発生時期 [44, 69]。被曝時の年齢によって、潜伏期間は異なり、「癌年齢」になると発現する傾向にあることが知られている。

\*低線量放射線の健康影響についてのさまざまな議論は、文献 [69] を参照されたい。

### 3 核爆発現象の分類

広島・長崎では、都市上空での核爆発であったため、熱線・爆風によって即死者が多数出た。一方、核爆発実験では爆心直下に住民はいないため、即死者は出ないが、地表に近い高度での爆発の場合に、周囲に大量の放射性降下物がもたらされ、周辺住民がある潜伏期間を経た後に多くの人が死亡する。この章ではこの様態の違い、すなわち空中および地表核爆発によって引き起こされる現象をそれぞれ解説する。

#### 3.1 放射性降下物と爆発高度

核爆発は、その爆発威力と爆発高度によって、高高度、空中、地表、地下-核爆発に分類される。実戦使用された広島・長崎では空中核爆発、ビキニやセミパラチンスクで核実験場周辺を著しく汚染したことが確認されているのは地表核爆発であることから、ここではこの両者の違いについて解説する。また、高高度核爆発は電磁パルスによる通信の途絶、電子機器の破壊、地下核爆発は地下施設の破壊、深度が浅い場合は爆心地周辺の汚染が主な効果であるが、被害の程度が空中・地表核爆発に比較して少ないため、ここでは深く立ち入らない。これら核爆発の科学的評価\*について、より詳しくは文献 [8, 44, 43] を参照されたい。

核実験では、爆心直下には人はいないため、広島・長崎への原爆投下のように、一次的な熱線や爆風によって被害を受ける人はいないと考えてよい。第 2.1 節で説明したように、原爆は全爆発エネルギーのうち、50%が衝撃波と爆風、35%が閃光と熱線、10%が残留放射線、5%が初期放射線として放出される(図2を参照)。問題となるのは、この10%の残留放射線、つまり「黒い雨」「死の灰」として知られる、放射性物質の付近への降下(fallout)である。周辺住民に被害をもたらすのは、この放射性降下物(*radioactive fallout*<sup>†</sup>)のみとあってよく、これが近隣にあるか否かが本質的に問題となる。従って、核実験による被害で問題となるのは、核爆発の規模や回数そのものだけではない。

放射性降下物が発生すれば、直後に急性放射線障害による死亡および健康被害が発生し、その後数十年にわたり、白血病、各種の癌、奇形児の出産、死産などで周辺の住民を苦しめ続けることになるのである。

放射性降下物が発生するかどうかは、爆発高度による。高度が十分に高ければ、核分裂生成物や未分裂核などの残留放射性物質は、上空に運ばれ希薄化された後、地上に満遍なく降り積もるため、近隣への被害はそれほど大きくない。しかし、高度が低ければ土壌を巻き上げて放射化し、核分裂生成物と混合し、大きい粒子に混じって再び近隣へ降下する。従って、低高度の核爆発でかつ、規模が大きいものほど、風下地域に発生する被害は大きくなる。

文献 [43] では、 $W[\text{kt}]$  を爆発威力として、空中核爆発の火球の半径  $R$  は

$$R \approx 110 \times W^{0.4}[\text{ft}],$$

そして放射性降下物が深刻な影響を与えない高度の目安が

$$H \approx 180 \times W^{0.4}[\text{ft}]$$

とされている。但し、長さの単位は  $1[\text{ft}] = 0.3048[\text{m}]$  で換算される。爆発威力が大きいほど、火球の半径が大きくなるため、それに応じて、この線の位置も高くなる。爆発威力  $W$ 、実際の爆発高度  $h$ 、放射性降下物のない高度の目安  $H$  の例を表3に表す。

\*高田は放射性物質の降下・拡散予測のモデル“RAPS”を文献 [43] に基づいて開発し、中国の核実験被害の予測に適用した。文献 [43] の方法は、米国の核実験での測定結果からモデル化されたもので、広島市の核攻撃被害想定 [44] にも用いられている。

<sup>†</sup> 文献によっては *nuclear fallout* と記される場合もある。

	$W$	$h$	$H$
広島原爆	16kt	600m	170m
長崎原爆	21kt	503m	190m
ブラボー水爆	15Mt	2m	2600m
ツァーリ・ボンバ	50Mt	4000m	4200m

表 3: 核爆発の爆発威力  $W$ 、爆発高度  $h$ 、放射性降下物のない高度の目安  $H$  の例。ブラボー水爆は、ビキニ環礁で米国により行われた地表核爆発で、日本の漁船が被災したことで有名。ツァーリ・ボンバは、北極海に浮かぶノバヤゼムリャ島で旧ソ連により行われた歴史上最大の核爆発である。

### 3.2 空中核爆発の現象と災害

爆発高度  $h$  が十分に高く ( $h > H$ ) 火球が地表から離れているときは、図 6 に示したように、放射性降下物が少なく、被害はほぼ直下のみである。

広島・長崎は空中核爆発であった。空中核爆発の場合、球面状の衝撃波が上空から順に地上に到達・反射するとき、地表からの反射波が高温高圧の空气中に生じるために、直接波よりも早く進む。このため、反射波が直接波に追いつき、干渉して地面に垂直に立って周囲に進む衝撃波を生じる(図 5)。これを Mach Stem という [43]。Mach Stem は直接波だけの場合より圧力がほぼ倍増するため、被害は大きくなる。広島・長崎への攻撃の核爆発高度(広島:600m, 長崎:503m)は、これが最大限に得られるよう企図されていた。その結果、直下の閃光・熱線による熱傷の他、衝撃波・爆風による建物の破壊によって多くの人命が失われた。

空中核爆発では放射性降下物は少ないものの、気象条件によっては上空に漂う放射性物質が「黒い雨」となって降下する。第 2.2 節で説明したように、広島では、己斐・高須地区をはじめ、広い範囲で黒い雨の降下が確認されている。この他、直接の初期放射線(中性子線、 $\gamma$ 線)と、初期中性子線によって誘導放射化した地上の物質、そして「黒い雨」による外部・内部被曝により、白血病、各種癌が晩発障害として現れる。しかしながら、爆心地で誘導放射化した物質は、1週間で1000分の1、1年で自然レベルまで回復し、また放射性降下物による被曝線量も次に述べる地表核爆発に比べれば僅かであり、残留期間も短いため、放射能汚染による被害の程度は地表核爆発よりも軽い。

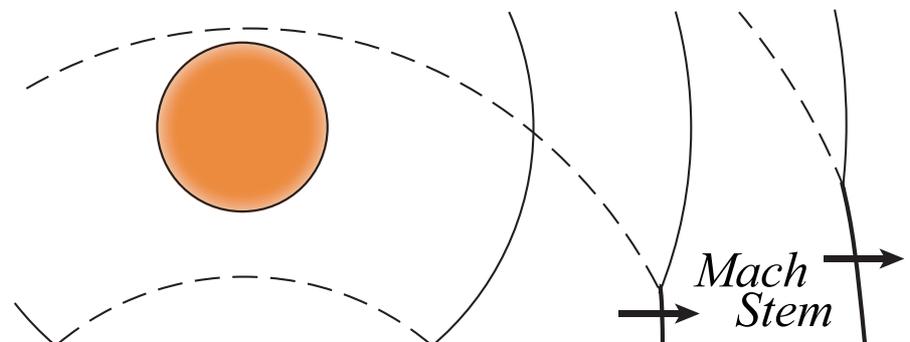


図 5: 空中核爆発によって発生した衝撃波が Mach Stem を生じる様子 [43]。実線は直接波、破線は地面からの反射波を表す。反射波の速度が若干速いため、直接波に追いつき干渉して、圧力が倍増した衝撃波を生じる。

### 3.3 地表核爆発の現象と災害

一方、爆発高度  $h$  が低く ( $h < H$ ) 火球が地表に接触するときは、図 7 に示したように、地上の土壌・砂礫を巻き上げ、核分裂生成物と混合して放射性物質を形成するため、大きい粒子のものから順次風下地域に降下する。小さな粒子は放射能を帯びた塵となり空中を浮遊し、風に流されて、降下するが、その予測は難しく、時には周囲より高線量の地点を形成することもある。過去の核実験では、地表核爆発の際の風下地域に重大な被害が出ていることがわかっている。また、放射性物質は風に流され、直下のみでなく広範囲にわたって放射能汚染をもたらす。

第 4.4 節に述べるように、延べ 459 回行われたセミパラチンスクでの核実験のうち、周囲の汚染は 11 回 (表 4 の \* 印) によるものがほとんどで、このうち 10 回が地表核爆発であった (第 4.4 節参照)。逆に爆発威力が大きい空中核爆発であっても (例えば、1955 年の 1600kt, 1550m)、高度が高ければ周囲への汚染は軽微であったといえる。

日本の漁船が被災したビキニ環礁での 1954 年の “Castel-Bravo” 実験の、いわゆる「ブラボー水爆」もまた、低い位置での地表核爆発であったために、珊瑚を放射化して巻き上げ、風に乗って予想外に広く流され降下し、起こった事件であった。

地表核爆発の場合、放射性降下物を直接浴び、もしくは呼吸や水分・食料を通して体内に取り込み、被曝することになる。この被曝線量によって、影響が異なる\*。およそ、2Sv 以上浴びた場合 5 % の人が、4Sv 以上浴びた場合 50 % の人が、急性放射線障害により数ヶ月以内に死亡する。500mSv 以上で何らかの健康影響がある。また、爆心地付近は、プルトニウムやウランなどの未分裂核と、セシウムやストロンチウムなどの長寿命の核分裂生成物が高濃度で残留するため、長期にわたって被害をもたらすことになる。これらは、空中核爆発にはない特徴である。

\*被曝線量とそのリスクについては、付録 A.2 に一般論としてまとめてある。予備知識のない読者はそちらを参照せよ。

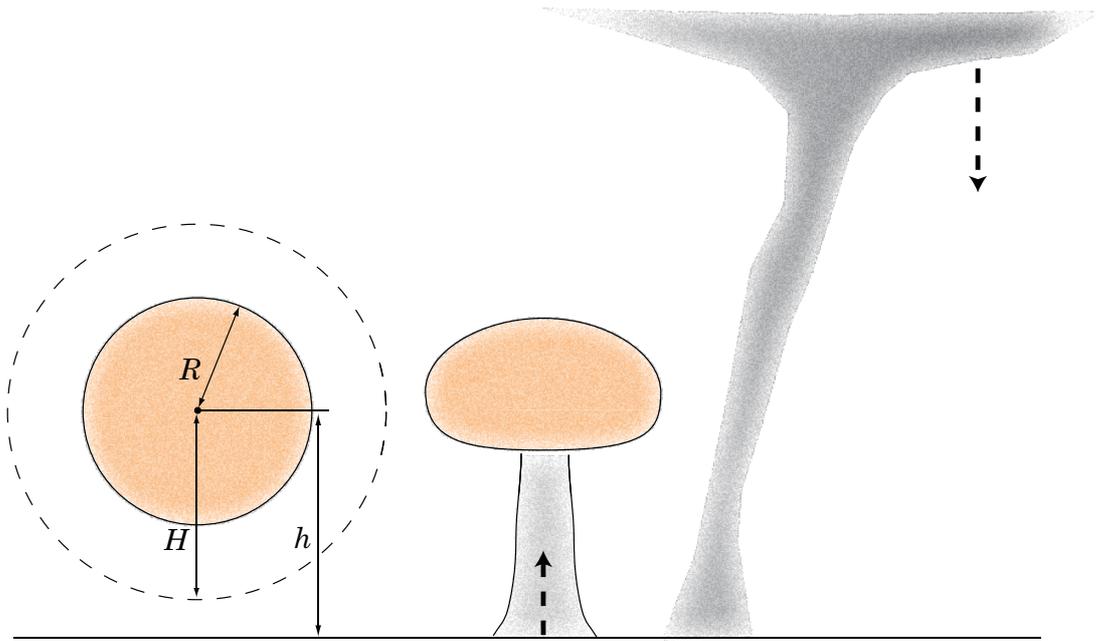


図 6: [空中核爆発] 爆発高度  $h$  が目安の高度  $H = 180W^{0.4}$  [ft] よりも高い ( $h > H$ ) とき、地表の土壌・砂礫などを巻き上げるのが少なく、放射性物質の粒子が小さいため、多くは成層圏まで昇り、希薄化されて降下する。従って、「黒い雨」を除いて、付近への降下は少なくて済む。広島・長崎への攻撃は、空中核爆発によるものであった。

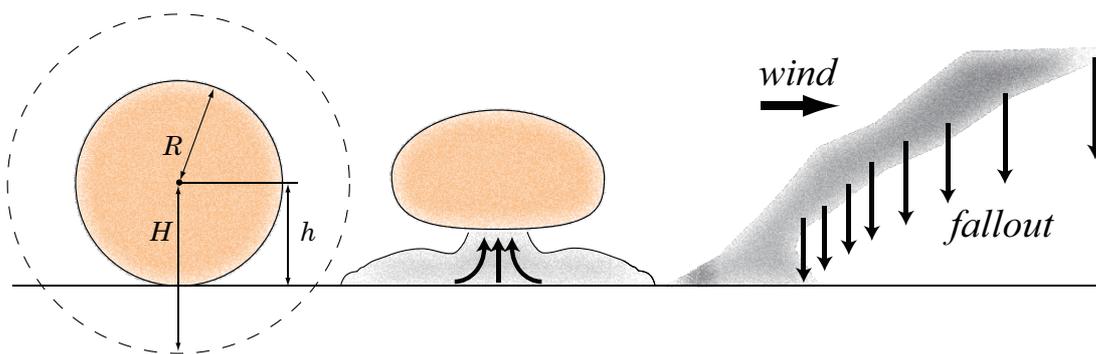


図 7: [地表核爆発] 爆発高度  $h$  が目安の高度  $H = 180W^{0.4}$  [ft] よりも低い ( $h < H$ ) とき、地表の土壌・砂礫など大きい粒子の物体を多く巻き上げるため、付近へ放射性物質が降下し、風下地域に重大な被害を及ぼす。米国は太平洋上の核実験場で、1Mt を超える地表核爆発を繰り返しており、1954 年のビキニ被災を含めて周辺の島嶼に被害が出ている。後にみるように、セミパラチンスクで周囲を汚染したのはほとんどが地表核爆発によるものであった。また、中国は 1Mt を超える大規模核爆発を、都市近郊の場所で 3 回行っている。

## 4 保有国の核実験に対する評価

核爆発現象は、ほとんど全ての場合に人体と環境に甚大な影響をおよぼす。この章では、核保有国が行ってきた核実験がどのような状況で、どのような災害を引き起こしてきたのかを検証する。

### 4.1 実験場ごとの爆発高度と威力

核保有国は、2,000 回以上もの核実験を自国や植民地の核実験場で行ってきた。図 8,9 にはそれぞれの場で行われた核爆発の高度、爆発威力が示してある。実線よりも下の核爆発が、付近へ深刻な放射性降下物による被害をもたらしたと考えられる。地表に近く、爆発威力が大きい、つまり図の右下の核爆発ほど、周囲への汚染が著しいといえる。実際、セミパラチンスク核実験場で行われた 459 回の核実験のうち、図 9 での 印の年号に † 印のついた 4 回の地表核爆発で、周辺を汚染した線量の 85% をも占めている [23]。

これらの図をみればわかるように、実戦使用された広島・長崎だけでなく、規模・回数ともに夥しい核実験が繰り返されており、中でも周辺を汚染する地表核爆発が繰り返し行われてきたことがわかる。

### 4.2 洋上での核実験

周囲に住民が少ない場所、あるいは立ち退かせた場所で、大きな爆発規模の核実験は行われた。米英仏は太平洋であり、旧ソ連は北極海であった。

図 8 にある通り、米国が太平洋(ビキニ環礁)で、旧ソ連が北極海(ノバヤゼムリヤ島)で行った核実験が爆発規模(米: ~15Mt、ソ連: ~50Mt)と回数において他を圧倒している。しかし、前章でみたように爆発規模だけでなく、爆発高度が付近への汚染の程度を決定づける要因となる。従って、これと実験場周囲の人口分布の疎密を把握することが重要である。

米国の太平洋上での核実験(合計 107Mt, 66 回)では、低高度の核爆発が繰り返しあったため、膨大な放射性降下物が発生した。特に、1954 年の“Castel-Bravo” 実験で爆発した 15Mt の熱核融合爆弾\*により、海底面の珊瑚が吹き飛ばされ、核分裂生成物と混合して放射化した「死の灰」によって、第五福龍丸の乗組員 23 名が被曝した。そのうちの一人、久保山愛吉がその年に亡くなったことはよく知られている†‡。この実験では、2 日後に島民を避難させたものの、ロンゲラップ島で 67 人、その属島であるアイリングナエ島で 19 人が被曝し、計 86 名のうち、1989 年までに 26 人が死亡、36 名が甲状腺の手術を受け、5 人が甲状腺癌であった [28]。米国は 1957 年に安全宣言を出し、島民を汚染が残された島に帰還させたが、その後継続被曝による後障害が続発し、1985 年、環境保護団体の船で再び島を離れ、現在も再定住は行われていない。また、住民以外にも実験に参加した兵士に被曝者が出ていることも知られている。

フランスのポリネシア(ムルロア環礁・ファンガタウファ環礁)での実験、米国・英国のクリスマス島での実験で、参加した軍関係者などに被曝者が出ている。しかし、これらは実験場が太平洋上にあったために、人的被害はまだその範囲でとどまったといっていよう。旧ソ連のノバヤゼムリヤ島でも、同様に放射性降下物はあったが、住民を避難させていたため、大きな人的被害は避けられている。

\*水素爆弾とも呼ばれる。核分裂 (fission) → 核融合 (fusion) → 核分裂 (fission) の爆発過程をたどるので 3F 爆弾とも呼ばれる。

† 乗組員には、急性放射線障害による白血球・血小板の減少があったため、輸血が行われたが、これが C 型肝炎ウイルスに感染していた。久保山以外の、残りの被曝者 22 人のうち、肝癌で 6 人、肝硬変で 2 人、肝繊維症で 1 人が亡くなり、他の生存者も肝機能障害があるという。一方、マーシャル諸島での被曝者にこうした肝機能障害は発生していない [8]。乗組員だった大石又七は被災時を語るインタビュー中で輸血を受けた乗組員への C 型肝炎の被害を訴えている。

‡ 久保山は、「原水爆の被害者はわたしを最後にしてほしい」と遺言したが、この遺言が守られなかったのはもはや明白である。

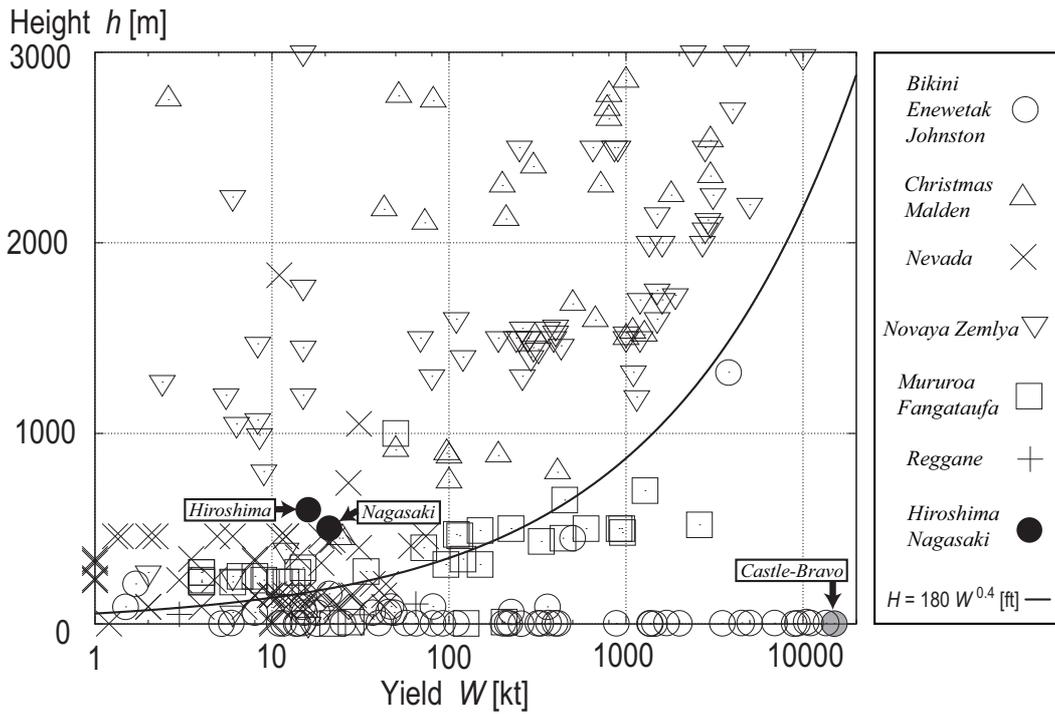


図 8: 核実験別の核爆発の高度 (縦軸) と爆発威力 (横軸)。出典は Johnston[41]。実線は、付近への放射性物質の降下が認められる高度の目安 [43]。図の右下にいくほど周辺への汚染は激しく、危険な核爆発といえる。日本人が被爆/被曝した核爆発を明示してある。

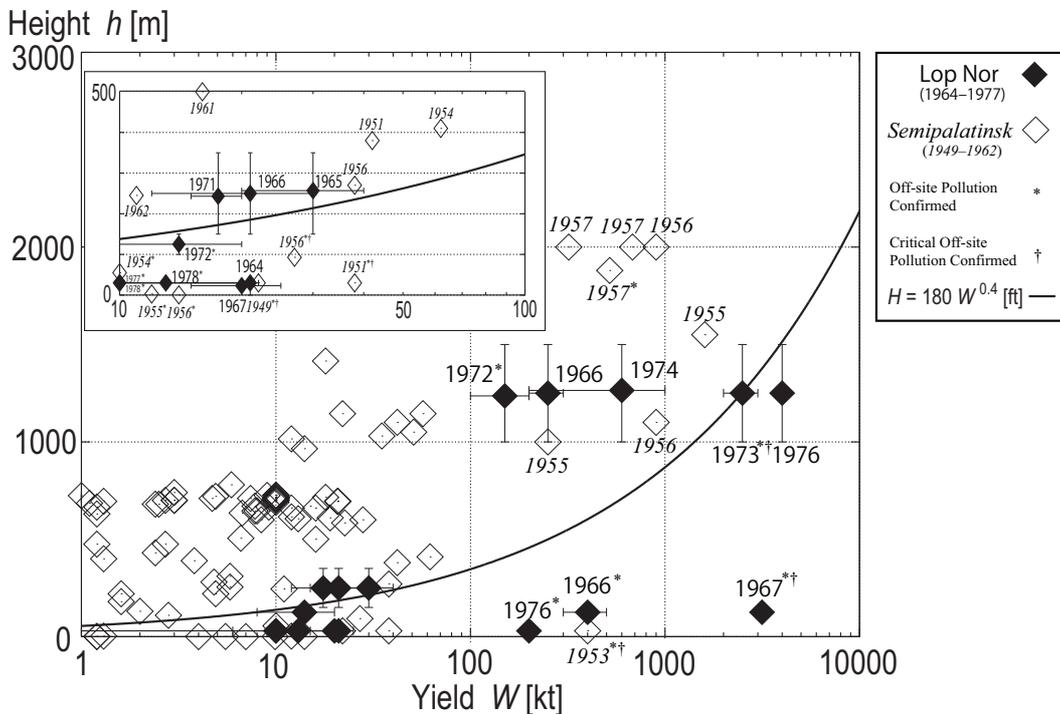


図 9: 前図と同様、セミパラチンスク ( , 年号は斜体) と、ロプノール ( , 年号は太字)。セミパラチンスクのデータは Johnston[41] による。ロプノールのデータは正確には判明していないが、爆発威力は Johnston[41]、高度は Gusev[6] の値をグラフに表示している。この二箇所の実験場の周辺には住民が多数居住しており、前図の実験よりも人的被害が大きかったと考えられる。年号の肩の \*, †印は、表 4.6 のものに対応し、無視できない線量の汚染が確認されている。特に †印はそれが著しい。

### 4.3 内陸部での核実験

被害が大きいのは、周囲に多く人が住んでいる内陸部での核実験である。

米国がネバダ砂漠で行った実験は、一般市民にも被害が出たことが知られている。これは高度が地表付近のものが多数あったため、風下地域で放射性降下物により1万人以上が被曝したとされる。そして、降下した放射性物質は砂漠に滞留し、その地域に入域した人までを、癌など後障害に至らしめた。砂漠の周辺地域で映画の口役をした西部劇俳優が、3~30年経った後、癌で次々と亡くなっている [45]。その原因は、砂嵐とともに皮膚や衣服に放射性物質が付着して近距離からの外部被曝を受け、あるいは残留放射性物質を吸い込み継続的な内部被曝を受けたことによる。しかし、ネバダ核実験場では、地表核爆発が多かったため放射能を大量に砂漠に残したが、爆発規模が小さかったため (~74kt)、次に述べるセミパラチンスクと比べれば被害の規模は小さいといえる。旧ソ連では、この他カプスチンヤール核実験場\*や、プルトニウム製造工場「マヤーク」のあったチェリャピンスク† [42, 27] で被害者が出ていることが知られている。

サハラ砂漠のレグナヌおよびイネケールでは、フランスによる核実験が行われ、参加した兵士と周辺住民に被害が出た。ただし、レグナヌでは (~65kt)、イネケールでは地下実験のみであったため、相対的には被害の規模は小さかったといえる。

なお、核実験被害者への補償は各国で不十分ながら実施され、もしくは裁判において係争中である (第7.1節参照)。

### 4.4 セミパラチンスクでの核実験

周辺へ被害が大きかった核実験として知られているのが、旧ソ連、現在のカザフスタンにあるセミパラチンスク核実験場で行われたものである。ここでは、北極海でよりも爆発規模が小さい実験が行われたが (図9の 印)、主に低高度でおこなわれた核爆発から、核実験場の外に放射性降下物がもたらされたために、奇形児や死産、癌などの健康被害が発生したことが知られている。

Gusev らの推定では、セミパラチンスク州の住民34万4000人が被曝し、そのうち22万人が7~350mSv、3万7200人が350~990mSv、2万8000人が1Sv以上の(外部・内部あわせ)線量を受けている [22]。これらは広島・長崎でLSS集団に設定された生存被爆者の数(表1)を優に上回る。被曝した住民全体の患者数は、広島と長崎の被曝患者の2倍になると推定されている(第5.4節参照)。1960年代にこの地域での癌致死率が非被曝地域との比率で1.7~2.0倍に跳ね上がっている [22] (図12の 印)。また、癌の発生率も2~3倍に跳ね上がっており、食道・胃・肝臓・肺など各部位の癌の発生率も、すべて上昇していることが詳細に明らかにされている [20]。

カザフスタンが旧ソ連から独立後に調査が進んでおり、核実験場の跡地も外国の科学者に公開された。日本からも広島大学のグループが調査に入り、文献 [42, 25, 26, 27] などが出版されている。また、テレビ放映 [31, 32] でも紹介され、広く知られるようになってきた。ジャーナリストの森住卓によって伝えられた、顔に変形を持って生まれた子や、死産となった奇形児の写真などは、被害の深刻さを存分に伝えている [29]。

表4には、セミパラチンスクで行われた地表26回、空中87回、地下346回の核爆発(合計18Mt, 459回)のうち、100kt以上の空中核爆発および、10kt以上の地表核爆発を抜き出している [41]。

文献 [24] によれば、核実験場外の周辺地域を強く汚染したのは11回(図9の の\*印)、そのうち10回が地表核爆発である。また、その中の大きい方から4回(図9の の†印)が、全線量の85%を占め [23]、

\*中国新聞 2001年11月25日、「21世紀核時代 負の遺産 カプスチンヤール核実験場」。

†中国新聞 2001年9月16,23,30日、「21世紀核時代 負の遺産 マヤーク核施設<上,中,下>」。

地表核爆発の危険性が実証されているといえる。また、Gordeev らは、表 4 のように、それぞれの実験ごとに外部線量を推定している [24]。

例えば、カイナール村 (Kainar) に著しい放射性降下があったのは 1951 年の 1 回のみであるが、ここの住民に“不安定型”の染色体異常までが観察されている [32]。これは、体内に取り込んだ放射性物質による継続的な内部被曝を意味している。第 7.3 節でみるように、長年経った後に残るのは、通常は“安定型”の染色体異常のみであるので、たった 1 回であっても、地表核爆発によってもたらされた放射性降下物による内部被曝の被害は、深刻であったといえるだろう。当時、現地の人々が患った原因不明のだるさ・疲れやすさは、“カイナール症候群”と呼ばれ、後に癌となって多くの人の命を奪った [32]。

表 5 では、各文献で推定された累積被曝線量を紹介している。カザフスタン側の Gusev(1998)[22] が報告した線量は高く、ロシア側の Gordeev(2002)[24] が報告した線量は低く見積もられる傾向にある。放送 [32] ではドロン村 (Dolon) での線量は 350mGy と、低めの値を紹介している。2006 年に報告された、生存しているドロン村の住民の染色体異常から求めた被曝線量は約 180mSv であった [33]。従って、推定方法や元データによって不定性が大きいことに注意が必要である。

セミパラチンスク	爆発威力, kt	爆発高度,m	分類	外部線量, mGy[24]		
				Dolon	Kainar	Sarzhai
1949年8月29日 <sup>*†</sup>	22	30	地表	1240	—	—
1951年9月24日 <sup>*†</sup>	38	30	地表	—	120	—
1953年8月12日 <sup>*†</sup>	400	30	地表	—	—	1300
1954年10月5日 <sup>*</sup>	4	0	地表	—	1.7	—
1954年10月30日 <sup>*</sup>	10	55	地表	—	—	—
1955年7月29日 <sup>*</sup>	1.3	2.5	地表	0.7	—	—
1955年8月2日 <sup>*</sup>	12	2.5	地表	—	—	—
1955年11月6日	250	1000	空中	—	—	—
1955年11月22日	1600	1550	空中	—	—	—
1956年3月16日 <sup>*</sup>	14	0.4	地表	—	—	—
1956年8月24日 <sup>*†</sup>	27	93	地表	—	—	—
1956年8月30日	900	1100	空中	—	—	—
1956年11月17日	900	2000	空中	—	—	—
1957年4月10日	680	2000	空中	—	—	—
1957年4月16日	320	2000	空中	—	—	—
1957年8月22日 <sup>*</sup>	520	1880	空中	—	—	—
1962年8月7日 <sup>*</sup>	9.9	0	地表	1.1	—	—

表 4: セミパラチンスク核実験場での 10kt 以上の地表核爆発と、100kt 以上の空中核爆発。文献 [24] において核実験場外の周辺地域を強く汚染した ‘11 most significant event’ は \* で示した。爆発威力に関わらず地表に近い核爆発が周囲を汚染していることがわかる。文献 [23] によれば、† で示した 4 つの核爆発が、“most critical dose contributions” をしていて、周辺の全線量の 85% がこの核爆発に由来する。

文献	Dolon	Kainar	Sarzhai	
外部線量	106km	112 km	139 km	単位
Tsyb 1989 in [21]	1070	—	—	mSv
Turapin 1989 in [20]	1600	415	557	mGy
Gusev 1993 in [21]	2170	—	—	mSv
Takada 1999[21]	990	—	—	mGy
Gordeev 2002[24]	1240	1310	690	mSv
Balmukhanov 2006[20]	—	1462	1775	mGy
全実効線量				
Gusev 1998[22]	4470	2680	2460	mSv
Gordeev 2002[24]	1300	1300	720	mSv

表 5: セミパラチンスク核実験場周辺での累積被曝線量。地名の下の数字は、セミパラチンスク核実験場のゼロ地点からの距離を表す。

## 5 カザフスタン「第四診療所」グシェフ医師の証言

セミパラチンスクでの核実験の被害、そして中国の核実験の被害を明らかにするのに重要な役割を果たしたのが、旧ソ連時代に暗躍した「第四診療所」\*の記録である。ソ連から独立後、カザフ放射線医学環境研究所と名前を変えている。この研究所の医師ボリス・グシェフ (Boris I. Gusev) は、カザフスタンでの核実験の被害を最もよく知るキーパーソンであり、日本語の文献・番組にも度々登場して、被害の様子を証言している。ここでは、彼の証言を紹介する。なお、グシェフの発言は太字で示してある。

### 5.1 中国新聞「世界のヒバクシャ」(1991)

中国新聞による文献「世界のヒバクシャ」(1991)[28]には、次のようなインタビューがある。

「第四部」の秘密研究は、初めての核実験から12年後の61年に始まった。研究は、「セミパラチンスク40」の暗号名を持つ核実験基地の町クルチャトフの司令官や、モスクワの保健省第三局と連携をとって進められた。研究スタッフはで医師25人を含む125人だった。

「第四部」の研究結果が、実験場周辺の被曝住民の健康維持のために活用されたことは、過去一度もなかったし、看板をかけ替えた今もまだない。長年研究に携わり、秘密のかぎを握ると目されるボリス・グシェフ医師(56歳)にインタビューを試みた。

—なぜ偽りの看板を掲げて住民を欺く必要があるのですか？

命令に従っただけだ。

—何を調べたのですか。

放射線レベルの変化と周辺住民1万人の健康状態を定期的にチェックした。

—住民は検査の目的を知っていたのですか。

軍は「核実験の影響はない」と説明していたから、住民に被曝の影響調査だとは言えなかった。

—調査で分かったことは何ですか？

がんや白血病がやや多い。でも放射線の影響がどうか断定できない。初期の段階では検査技術のレベルが低かったので、数値の比較が難しい。

—遺伝的な影響はないのですか？

何とも言えない。

—調査結果をもう少し具体的に話してもらえませんか。

私には権限がない。今は発表できない。

—地下実験に移行して、放射能の影響は減りましたか。

状態はよくなった。しかし軍の情報によると、89年2月もそうだったが、他にも地上への放射能噴出事故があったと聞いている。

—住民の不安を考えると、一刻も早く資料を公表すべきではないですか。

指示がない以上、研究結果は公表できない。

時折、長い沈黙が続くもどかしいインタビューだった。同席した州保健部長は、終始無言のままだった。かたわらの次長がたまりかねたように「州内の人目は84万人だから『第四部』の調査対象1万人は少な過ぎる、せめて10万人に拡大して、共同研究をする必要がある」と口をはさんだ。

だが、それに対する返答は得られず、会見はこれで終わった。

\*ロシア語では“” No.4”, 英語では“Dispensary No.4”と表記される。

## 5.2 広島大学調査団(1995)

広島大学原爆放射線医科学研究所を中心とする調査団(代表：星正治)の一員として、1995年に初めてセミパラチンスクに訪問した高田は、文献 [42](2002)において次のように経緯を記している。

10月3日晴れ。朝9時にカザフスタン放射線医学環境研究所へ行く。ひっそりとした雰囲気でも人も少ない様子。後で聞いた話だが、カザフスタンの独立の際にロシアが器材を持って行ってしまったとのことである。しかし被曝者に関するデータは隠したため、そのほとんどは、今研究所に残っている。

研究所でグジェフ所長と我々とで今回の調査について討議する。グジェフ所長は原爆フォールアウトによる線量分布地図を示しながら、詳細な説明をしてくれた。最初の原爆や最初の水爆など、4回の核爆発で発生した放射性雲による被曝の線量等高線が描かれていた。その中で、ドロン村は、1949年8月の放射性雲の軌跡の中心にあった。

こちらは、まず高線量被曝地域と報告されている村の被曝量の評価を行い、これまでの報告を検証することの目的を話した。そしてドロン村を中心とした調査を考えている旨を強調した。グジェフ所長は広く各地を案内するつもりでいらしい。しかし私たちとしては、数カ所に集中して、確実なデータを得ることが大事であることを重ねて説明し、ドロンへ初日に行くことを了承してもらった。

なお、この調査の後に、報告 [25, 26] や、共同研究論文 [21] がまとめられている。また高田は、この後2000年8月にグジェフらの要請により中国の核実験の調査を開始し、2008年に報告 [7] を出版するに至った。

## 5.3 ジャーナリスト森住卓の報告(1999)

ジャーナリストの森住卓の写真集 [29](1999)には、次のような報告がある。

セミパラチンスク放射能医学・環境研究所は、市内のガガーリン通りにある。レンガ作りの3階建ての建物の入り口は意外に狭く薄暗い。中に入ると、警備員のおじさんが私たちをなめるように見つめていた。

旧ソ連時代、ここは正式名称「ソビエト連邦保健省付属第四診療所」、通称「第四診療所」と呼ばれ、1961年から活動を始めた。

核実験場周辺の放射能汚染状況と住民たちの健康調査が、ここで極秘の内にすすめられた。限られた人しか出入りすることは出来ず、表向きは風土病の一種「ブルセラ病」の研究機関だと言われていたが、診療活動をしなかったため住民からは不気味がられた。

1990年代に入って、少しずつその資料がメディアに公開されるようになってきた。ここには、4万333人のカルテがあり、一人一人の放射能の影響が記録されている。さらに被曝地域の汚染データや、ガンなどによる死亡診断書や染色体のサンプルも保管されている。前に述べた初めての水爆実験の時、カイナール村に残された42人の男たちのその後の健康追跡調査をつづけていたのもここだ。

カザフ独立後、ここは「カザフ放射線医学・環境研究所」となった。旧ソ連時代からここで中心的な仕事をしてきたボリス・グシェフ博士は、「当時は秘密を守ることを誓約させられていました。今は被曝者救済のためにこのデータを役立てています」と膨大な資料を管理して

きた苦勞を語る。そして、「ソ連の継承国はロシアである。ロシアが核実験被害の責任をとるべきだ」と強調していた。

セミパラチンスク州のガンの死亡率は他の地域と比べ3倍から4倍高く、とくに食道ガンは18倍以上\*と高い。被曝による死産や流産の多発、そして先天異常の子どもの出産など、次世代への遺伝的影響が深刻な問題だという。「染色体は核実験による放射能のために傷つけられたものと思われる。母親の染色体異常はロシアの他の他域と比べ3倍も高く、将来に深刻な問題を残している」とグシェフ博士は語った。とくに遺伝的影響は第三世代の被曝者の問題として深刻だ。

グシェフ博士は折り目のすり切れた地図を広げた。左上には「極秘」のスタンプが押されている。この地図は3枚作製されて1枚はモスクワに送られ、1枚はクルチャトフ市、そして1枚はここに置かれていたという。撮影をしたいので壁に張ってもいいかと聞くと、「パジャールスタ」(どうぞ)と気軽に答えてくれた。これが40年近く機密にされていたのかと思うと、地図を持ち上げる手が震えてしまう。

地図には核実験用を中心に幾筋もの等高線のような線が引かれている。いわゆる被曝地図。等高線のように見えるのは被曝量を表した線だ。グシェフ博士は、とくに汚染のひどい地域としてドロノ村とその周辺を、毛むくじゃらのずんぐりした指で指し示した。

なお、ここに紹介されていた線量等高線の地図のオリジナルは[25]に、グシェフらにより再描されたものは[23]に掲載されている。放射性降下物による汚染地域は、実験場の東側と南側に集中しており、モスクワの方面(西向き)に風が吹いているときには実験が行われなかったことが示されている<sup>†</sup>。

#### 5.4 NHK「セミパラチンスク 18年後の現実」(2009)

2009年に日本で放送されたドキュメンタリー[31, 32]により、セミパラチンスクの深刻な放射能汚染とその被害が広く知られるようになった。ここでは放送[31]で、グシェフの証言している部分を紹介する<sup>‡</sup>。

1950年代、セミパラチンスクに医療専門の研究所が設立されました。核汚染による被曝の影響を調べるためです。

「ここはブルセラ症第4診療所、もちろんそんなのはウソで、ソ連国家保安委員会(KGB)の施設です。この施設のことは最高機密で、当時雇われた者は全員、宣誓書に署名させられました。“どんな情報も漏らさない”と。これはとても厳しい措置で、もし違反すれば、長期間の刑務所暮らしは確実でした。」

当時この研究所の職員だったボリス・グシェフは、医療チームを率いて実験場近郊の村々を訪れました。核実験前にはほとんど見られなかった、肺癌と乳癌の患者が目立って増えていました<sup>§</sup>。

\* 文献[20]によれば、食道癌の死亡率は1949年から1-27年後で1.78倍、28-36年後で2.44倍であるため、ここでの18倍という記述は誤りか。但し、1980年におけるセミパラチンスク州での全癌の発生うち、食道癌の占める率が17.9%でトップである。

<sup>†</sup> 同様に、中国の核実験では北京の方面(東向き)に風が吹いているときは行われなかったようである。

<sup>‡</sup> 地上波のNHKスペシャルで放送された番組[32]も、セミパラチンスクの核被害を紹介する番組であるが、広島核被害と比較するような構成となっている。具体的には、医師・被曝者による証言、第四診療所の紹介、星正治によるセミパラチンスクと広島の実地調査、グロッシュェによる疫学調査、田中公夫による染色体異常の分析、広島での黒い雨の実際の被曝者の証言などである。

<sup>§</sup> 中国・カザフスタン国境のマカンチにおいても同様に、中国の核実験によって肺癌と乳癌の死亡が増えている(図13)。

「あるグループの腫瘍疾患の患者数と死者数から、被曝した住民全体の患者数を推定すると、その数はなんと広島と長崎の被曝患者の、2倍にもなります。」

医療チームは、放射能汚染によって引き起こされた疾患の詳細な記録を採り、そのデータをソビエト政府に送りました。しかしこれは、あくまでも調査でしかありませんでした。

「調査の目的は治療ではなかった。私はそのことを認識していました。入院患者を調査しただけで、治療しなかったのです。核戦争を想定する上で重要な要素のひとつが、住民の存在です。住民の行動や被害状況を観察することも、実験のひとつの目的だったと思われます。彼らはまさにモルモットにされたのです。」

治療を目的としない調査は、広島・長崎での米国 ABCC を髣髴とさせる。第 5.1 節のインタビューでは、体制側の頑固な医師という印象を抱かせるが、その後の第 5.2-5.4 節では、調査に協力し、被害の実態をよく説明している。当時のデータをまとめ、次々と論文に公表し [6, 20, 21, 22, 23]、インタビューに答えてきた姿勢は高く評価されてよい。

## 5.5 中国新聞「ロプノルの影」(2000)

カザフスタンでの被害は、セミパラチンスク核実験場からだけではなかった。カザフスタン・中国の国境地域で、遠く離れた中国のロプノール核実験場（図 10 参照）からの被害が出ている。このことを、日本で初めて大きく取り扱ったのが、中国新聞による 2000 年の記事「ロプノルの影」[13]であった\*。ここでも、グシェフが重要な証言をしている。この記事に紹介された元データは、文献 [6] に詳細に分析され、疫学調査の結果とともにまとめられている。また、高田の中国の核実験についての報告 [7] の鍵ともなっている。ここでは、記事の一部を紹介し、次章からその内容の議論に移る。

中国との国境の町バフティー郊外の平原。ひざ丈ほどの草が伸びる。「この土は『死の灰』に汚染されている」。カザフスタン放射線医学・環境研究所の女性研究員クラキナ・ナターリアさん(52)は、そう言って中国・ロプノール核実験場がある東の方向を指さした。

彼女は、環境中の放射線を測定する物理学者。旧ソ連時代、470 回近く核実験が繰り返されたセミパラチンスク核実験場（ポリゴン）周辺で、極秘に被曝（ばく）調査に当たってきた人物だ。

「実は中国の核実験の影響についても、秘密裏に追っていた」と、ナターリアさんは打ち明ける。「ソ連時代はポリゴン同様、軍事機密としてその事実を漏らすことはできなかった」。セミパラチンスクにある研究所は旧ソ連時代、ポリゴンの被ばく者を調査してきた「ソ連保健省付属第四診療所」だった。

研究所のボリス・グシェフ副所長(62)が手にした古ぼけたノートの表紙には、「極秘」のスタンプが押されていた。

「73 年に、見つかるはずがない新鮮な放射性物質が検出され、驚いて調査を始めた<sup>†</sup>。ポリゴンの大気圏内実験は 62 年までで、その放射能は国境付近に達していない。ロプノルからと考えると当然だろう」

\* 広島大学調査団の星による 2001 年の報告 [25] にも、カザフスタン・中国国境地域での中国核実験の影響について言及がある。

<sup>†</sup> 文献 [6] には、<sup>89</sup>Sr, <sup>95</sup>Zr, <sup>140</sup>Ba, <sup>131</sup>I, <sup>133</sup>I, <sup>135</sup>I を観測したことが記されている。半減期はそれぞれ、50.5 日、64.0 日、12.8 日、8.02 日、20.8 時間、6.57 時間で、核実験の行われていない時期には観測されるはずのない短寿命核種である。

グシェフ副所長は「確信」の根拠をそう説明し、パフティー、マカンチ、ウルジャルなど国境から百数十キロまでの地区が汚染された、と指摘する。その一帯は診療所が70年代、ポリゴンの影響がないとして、健康被害を比較するための対象地区だった。

「84年から、一帯でがん患者が急増した。中国の核実験によるとみられる放射能が見つかって10年後で、被ばく後にがんが多発し始める時期と一致する」\*。もう一つの根拠を挙げた。

示されたデータでは、大気圏内で核実験があった66-81年の間、マカンチの土壤の被ばく線量は約0.6シーベルト、ウルジャルで約0.5シーベルトと推計。さらに、人体には食べ物などを介してばく大な内部被ばくが加わる。

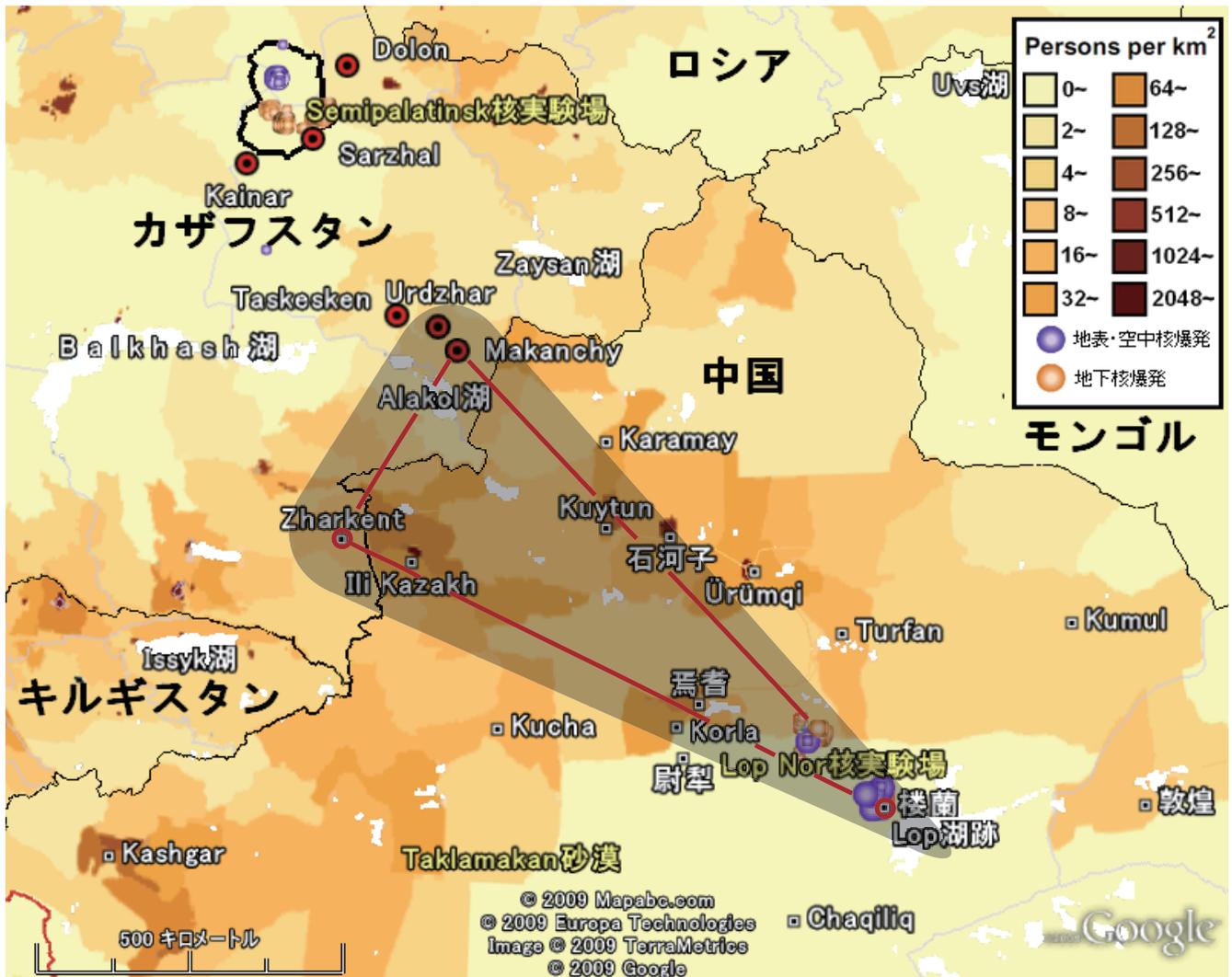


図 10: 核実験場周辺の主要都市、核爆発の場所と2000年の人口密度分布を [46] の方法で表示した。後に述べるように Makanchy で重大な放射線降下が2度確認されており [6]、Zharkent でも被害がほぼ確認されている [14]。このことから、爆心地の楼蘭と、被害地域の Makanchy および Zharkent を結ぶ北西方面の一帯には、放射性降下物による被害が広がっていることが予想される（おおまかな予測を網で示した）。なお、[5] には Korla での被害者が紹介されている。この他、楼蘭から真北のロシア・アルタイ地方での中国の核実験影響の指摘があり、また、最大の1976年の4Mtの核爆発の放射性降下物が Makanchy では観測されておらず、他の方向に流れたと考えられるため、被害地域はより広範囲にわたっている可能性がある。

\*図 11-13 に明確に示されている

## 6 中国の核実験とその被害

この章では本題となる中国の核実験の実態について論じる。前章までに説明した米ソ仏英のものとは異なった性格を有する。端的にいえば、都市近郊で行われたこと、大規模な地表核爆発であったことが大きな被害の原因となったと考えられる。前者の条件はセミパラチンスクやネバダが、後者の条件はビキニ・エニウェトクやムルロアが満たしているが、両者を同時に満たすのは中国の核実験のみであるといつてよい。

ロプノール	爆発威力,kt			爆発高度,m [6]	分類	外部線量,mGy Makanchy[6]
	Johnston[41]	Gusev[6]	Takada[7]			
1964年10月16日	22	<5	20	30	地表	—
1966年5月9日	200–300	~100	300	1000–1500	空中	—
1966年12月28日*	300–500	[~100] 300	300	100–150	地表	4.07
1967年6月17日*†	3000–3300	[~2000] 400	2000	100–150	地表	143
1967年12月24日	20	<5	20	30	地表	—
1968年12月27日	3000	2000–3000	3000	6000–8000	空中	—
1969年9月29日	3000	2000–3000	3000	6000–8000	空中	—
1970年10月14日	3000–3400	2000–3000	3000	6000–8000	空中	—
1972年1月7日*	8–20	20	20	100–150	空中	0.575
1972年3月18日*	100–200	20–200	20–200	1000–1500	空中	0.581
1973年6月27日*†	2000–3000	2000–3000	2500	1000–1500	地表	224
1974年6月17日	200–1000	[200–1000] 3000	200–1000	1000–1500	空中	—
1976年1月23日*	0–20	10	10	—	地下	0.208
1976年9月26日*	200	20	20–200	30	地表	0.525
1976年11月17日	4000	2000	4000	1000–1500	地表	—
1977年9月17日*	0–20	[20–200] 20	<20	30	地表	0.454
1978年3月15日*	6–20	20	<20	30	地表	0.525
1978年12月14日*	0–20	20	20	30	地表	0.608
1980年10月16日	200–1000	[250–1000] 1000	200–1000	8000	空中	—
1981年11月12日*	—	20	20	30	地表	0.594

表 6: ロプノール核実験場での 10kt 以上の地表核爆発と、100kt 以上の空中核爆発、および Makanchy での汚染が確認された全核爆発。爆発高度は文献 [6] のものを記している。図 9 において、高度の中心値が  $H = 180W^{0.4}$  [ft] より上か下かで空中と地表の区別をしている。中国-カザフスタン国境で放射性降下物が確認されている 11 回の核爆発は \* で示した。このうち、† で示した 2 回が、Makanchy での汚染のほぼすべてを占める。爆発威力や高度、放射性降下物の分布を公表した米ソと異なり、中国政府はこれらの実験のデータを公表していないため、上記の数値は推定されたものである。

## 6.1 カザフスタン・マカンチでの被害

中国は1964年から1996年にかけて、いわゆるロプノール核実験場\*において地表11回(6.5Mt)、空中11回(13.2Mt)、地下24回(1.9Mt)、の核実験(合計22Mt, 46回)を行った[7, 41]。表6に主要な地表・空中核爆発を示した。

中国の核実験については、核爆発の高度や、周囲の汚染状況が長らく不明であった。特に、高度のデータは、周囲への影響を推定するのに重要であるものの、各国の核実験のデータをさまざまな文献から集めたサイト[41]では、米ソ仏英のデータは高度についても揃っているのに対し、中国のデータは高度について数回分<sup>†</sup>を除いて空欄になったままである。

これが明らかになったのは、前章で紹介したカザフスタン「第四診療所」に保管されたデータからであった。旧ソ連は、当時敵対していた中国への軍事上の関心から、中国の核実験を監視し、極秘裏にデータを収集していた[13, 7]。セミパラチンスク核実験場からの放射能汚染の影響の対照地区として、約500km離れたマカンチ地区の線量をモニタリングしていた折、既にセミパラチンスクの大気圏内核実験が停止されていた1966年の12月28日、そこに降ってくるはずのない短寿命の放射性核種をはじめ検出した(第5.5節参照)。この観測された地点が、爆心地から1,000km近く離れた場所での中国による核爆発を示すものであった(図10)。爆発地点は正確には明らかでないが、図10にJohnston[41]によってまとめられた推測地点とともに、[46]の方法で表示した<sup>‡</sup>。

マカンチ(Makanchy)には1966–1981年の計11回(図9の の\*印)、放射性降下物が観測されている。中でも、1967年6月17日に高度100–150mで行われた2Mtの核爆発と、1973年6月27日に高度1–1.5kmで行われた2–3Mtの核爆発(図9, 表6の の†印)による影響が著しく、外部被曝だけで合計375mGyの吸収線量の放射性降下物をもたらしたことが記録されている。この11回のうち1回が空中、1回が地下、そして9回が地表核爆発であった。地表核爆発は、セミパラチンスクの事例でその危険性が実証されている(第4.4節参照)。カザフスタン-中国国境の各地での、累積被曝線量は表7のようにになっている。

また、これにより癌致死率が他地域に比べて1.3–1.8倍に跳ねあがっていることも、Gusevら[6]の疫学調査により明らかになっている(図11,12の印)。これは、1949–1996年の1813件の死亡例を解析したものである。また、セミパラチンスクでは、文献[20]によれば1473件の調査から、7–13年後に癌致死率が極大になり一旦落ちた後、再び20年後から増加していつている(図12の印)。癌による死亡率が上がり始めているのは1985年からで、特に肺癌と乳癌の高頻度で出現するまでの潜伏期間は表2によれば20年であり、最初の汚染(1967年)からちょうど一致している(図13)。肺癌と乳癌はセミパラチンスクでも増加している[20, 22]。

単純な比較はできないが、参考として広島・長崎の事例と対照させておく。マカンチで観測された2回の線量は、図14によればどちらも、DS02で推定した広島原爆の爆心から1.7–1.9km程度に相当する場所での線量に相当する。これは、日本の厳しい旧認定基準によってさえ、被爆者に認定される線量であった。癌致死率の増加を示す図11で、マカンチでは1986–1990年に標準化死亡比(SMR)がほぼ200に届いているが、これは表1によれば、1–2Svの被曝線量を超える値である。NHKによる放送[32]では、ドイツのベルンド・グロッツェによるセミパラチンスクでの疫学調査の分析結果として、放射性降下物による被曝の方が、広島・長崎での外部被曝よりも癌致死率が大きくなることが紹介されている。

\*ロプノール(ロプ湖跡)と呼ばれる地域から北に離れた楼蘭遺跡周辺の砂漠地帯や、北西に離れた山岳地帯にある施設で核爆発が行われたため、「ロプノール核実験場」という名称は厳密には適切ではない。

<sup>†</sup>この数回分の高度のデータも、カザフスタンのデータ[6]と相違している。

<sup>‡</sup>文献[7]で採用されているHillによる表示位置とわずかに異同があるが、楼蘭近郊の大規模核爆発はすべて一致している。

なお、被害の訴えは日本へ早くから届いており、1997年の原水爆禁止世界大会にカザフスタンから参加した代表は、「ここ2年では、実験が行われている中国との国境に接するウルジャル地区とマカンチン地区で、妊婦の貧血が90~95%になりました」と証言している。

文献:	Makanchy	Urdzhar	Taskesken	
Gusev 2007[6]	960km	1000km	1066km	単位
外部線量	375.1	338.2	287	mGy
全実効線量	466.7	426	376.2	mGy

表 7: カザフスタン-中国国境付近の居住地域での累積被曝線量。地名の下の数字は、ロプノール核実験場のゼロ地点からの距離を表す。

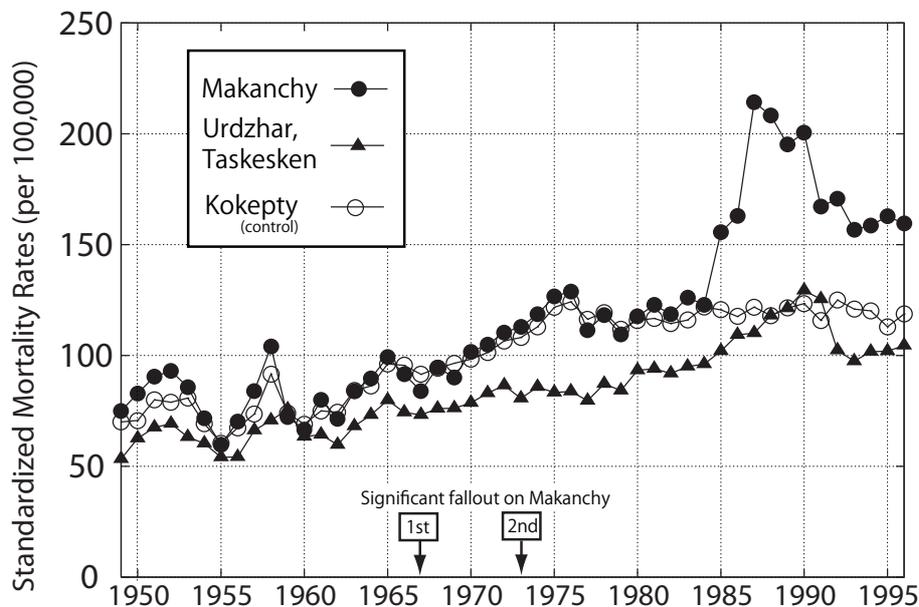


図 11: 文献 [6] に示されている、カザフスタン-中国国境地域 (Makanchy, Urdzhar, Taskesken) および、非被曝地域 (Kokepty) の癌致死率の標準化死亡比 (SMR) の年次経過。1985 年以降 Makanchy において重大な増加が認められる。1985 年以前の致死率の平均が 99.25 人であるのに対し、1985-1996 年の平均は 175.6 人まで上昇している (1.77 倍)。

\* アシルジャン・ハビジャンノバ, 原水爆禁止 1997 年世界大会・国際会議

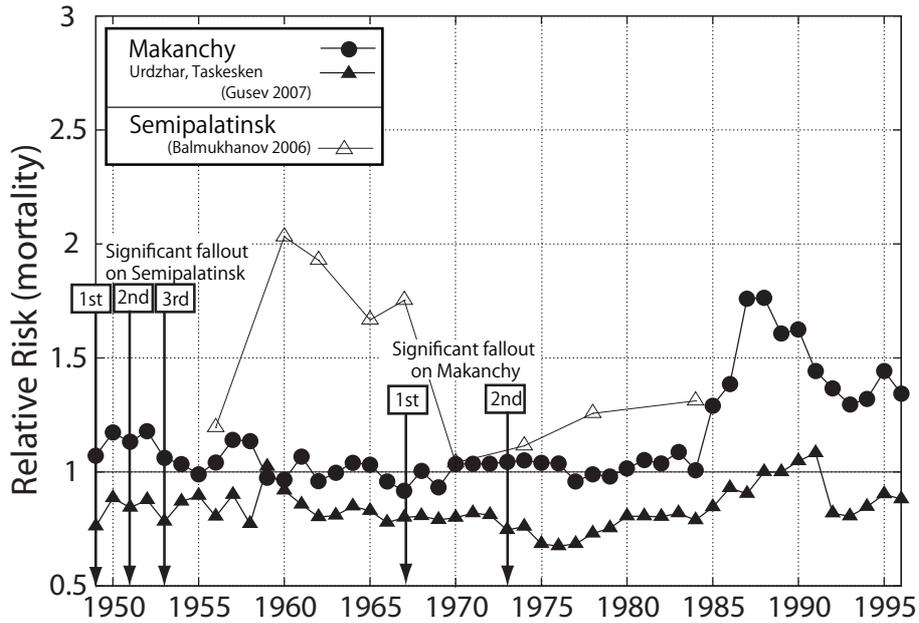


図 12: カザフスタン-中国国境地域 (Makanchy, Urdzhar, Taskesken) [6] および、セミパラチンスク核実験場周辺地域 [20] での、癌致死率の非被曝地域 (Kokpecty) に対する相対リスク。文献 [20] で示された致死率は、年齢の標準化がされていないので、ここで相対リスクとして比較した。双方とも、放射性降下を受けてから 10–20 年の潜伏期間を経て癌致死率の増加を記録していることがわかる。

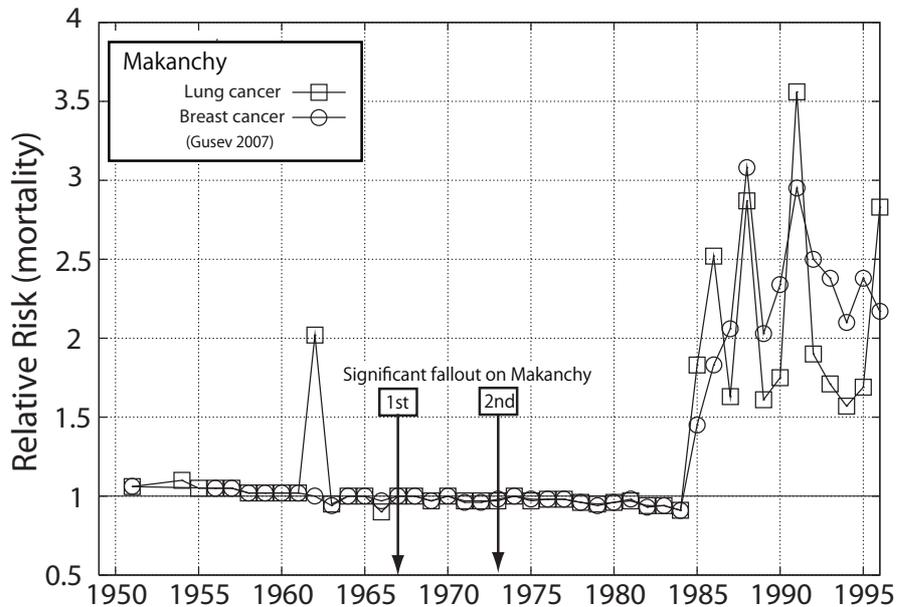


図 13: Makanchy での肺癌 (lung cancer) と乳癌 (breast cancer) 致死率の非被曝地域 (Kokpecty) に対する相対リスク [6]。最初の汚染 (1967 年) から、多発時期 (1985 年～) は、表 2 の高頻度で出現するまでの潜伏期間 (20 年) とも一致している。また、肺癌と乳癌はセミパラチンスクでも増加している [20, 22]。

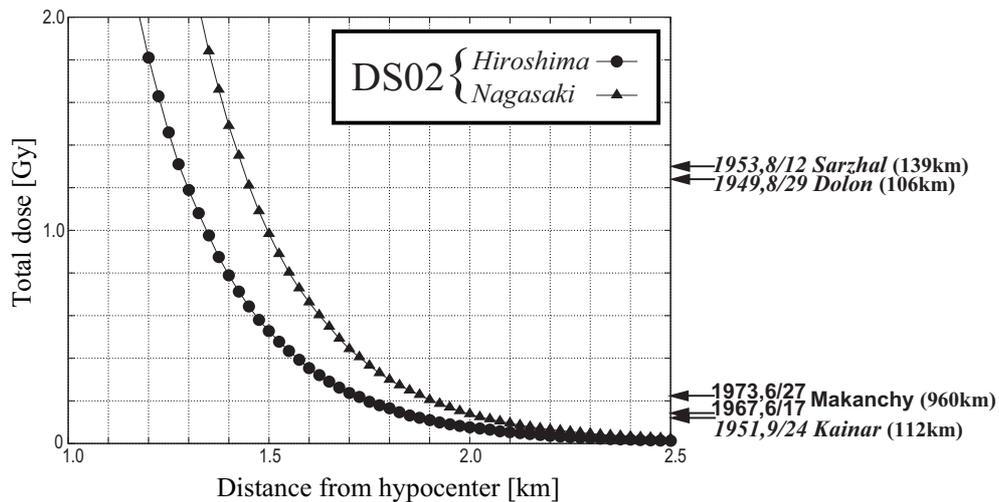


図 14: DS02 で計算された初期放射線量と、爆心地からの距離。右端に示したのは、各地であった放射性降下物の外部線量。DS02 に残留放射線の影響は含まれていないため実際の広島・長崎での被曝線量はこれを上回るものの、爆心地からかなり離れたカザフスタンの各地において、広島・長崎の爆心地付近の被曝線量に匹敵する、放射線を住民が受けていることが読み取れる。括弧内は爆心地からの距離である。

## 6.2 カザフスタン・ジャルケントでの被害

マカンチから南南西に 500km ほどのジャルケント (Zharkent) でも被害の訴えがある [13, 14]。

1996 年と 97 年の原水爆禁止世界大会に参加した「東方の女性国際環境協会」の代表ウルクス・イリエワは、ロプノール核実験場の影響が子ども達を含む住民に出ていると訴えた。1997 年にイリエワは、「ネバダ・セミパラチンスク運動」の核物理学者 I. Y. チャスニコフと共同で監修した「ロプノールについてなにを知っているか」というパンフレットを持参した。そこには、次のような訴えが記されていた [14]。

- 1990 年代の初頭、カザフスタン厚生省の小児科学研究所のスタッフがパンフィロフ地方 (ジャルケント市と周辺の町村) の 0 歳から 16 歳まで 8115 人の子どもを対象におこなった健康調査では、同地域の学齢児童の身長はアルマティの子どもたちよりも 8 ~ 12cm 低かった。
- 75% の子どもたちがあれこれの疾患を持っていた。疾患の構成では、鉄分不足の貧血が第一位で 70%、子どもの 42% が発育不全、35% が病弱体質と診断された。これら子どもの健康状態の分析では、社会経済状態の貧困が疾患の大部分に重要な影響を与えており、乏しい物的生活条件、母親たちへの教育の不足、過酷な肉体労働などが子どもたちの死亡の主要な原因である。
- しかしながら子どもたちの間で高レベルのガンが発生していることはもう一つの憂慮すべき事柄である。1994 年から 1995 年には、子どもたちの白血病の罹患数は最高にのぼり、毎年 70 名がカザフスタン厚生省の病院に収容されている。この子ども白血病と貧血の増加傾向は 1996 年現在でも続いている。

また、同パンフレットには「ロプノール実験場での活動により引き起こされた放射能による環境汚染」と題した論文も収録され、以下のことを指摘していた。

- ロプノールで実験が開始された当初から、アルマティ市の近郊にあるカザフ国立大学の物理学者たちは気象観測気球を上空にあげ、定期的に放射能の強さを観測した。ロプノール実験場での大気圏核爆発実験の結果あらわれた放射性の雲のほとんどはアルマティ上空を通過した。
- ロプノールでの大気圏核爆発実験のたびに、アルマティ上空 12,000 ~ 16,000 m 上空には放射能を帯びた雲があらわれ、成層圏の放射線レベルは 6,7 倍に上昇した。

イリエワは、現地で強く疑われている核実験の被害を確かめるため、調査団の派遣を日本原水協に依頼した。これに応じて 1998 年 5 月に、現地ジャルケントに調査団が派遣された。調査団は現地で、奇形児出生の増加や、白血病などの血液疾患、内臓の疾患、関節の変形などさまざまな健康被害を確認し、「中国核実験被害調査報告 ジャルケントからの告発」を 1998 年 8 月に発行した [14]。表 8(左)に、調査団の医師・吉村行雄がジャルケント中央病院で閲覧したデータを再掲する。表 8(右)には、核実験の影響が疑われはじめた 1996 年から訪問時の 1998 年まで、ジャルケント中央病院の医師が分類した記録を、調査団の原水協事務局・高草木博がまとめたものを再掲する。

	出生数	奇形	病気	死亡
1998 (5月まで)	約 900	5	不明	記載なし
1997	約 2500	11	不明	20
1996	2536	16	32	記載なし
1995	2834	不明	53	記載なし

鉄欠乏性貧血	69
貧血 (2 度および 3 度)	36
溶血性血管炎	18
先天性障害 (注 ★)	44
血小板減少症	6
急性白血病	4
合計	177 人

表 8: 1998 年 5 月に派遣された調査団の報告書より再掲 [14]。(左) 調査団がジャルケント中央病院で見せてもらったデータ。(原注: 出生数は、死産をふくむ妊娠総数が否か不明。病気は、どの程度を病気と定義しているか不明)(右) 核実験の影響を疑い始めた 1996 年から 1998 年 5 月までの間、ジャルケント中央病院の医師が分類した記録。(注 ★: 先天性障害の内訳は、「脳性麻痺 24 件、水頭症 3 件、ダウン症 1 件など」とある)

現地では統計的な資料はそろっておらず、セミパラチンスクからの放射性降下物、ウラン鉱山や化学廃棄物、農薬などの可能性もわずかながら残され、この調査の時点では中国の核実験との因果関係を証明するところまでは到達しなかった。けれども、現地の人々は、中国からの放射性降下物の影響を最も強く疑っている状況であった。トルスナイという現地の方は、次のように深刻な状況を訴えている [14]。

私はこの土地で 64 年生きてきましたが、こんなこと (貧血の多発、奇形児、環境の変化など) は、30 年前にはなかったことです。昔は、誰かが亡くなると、近所中で嘆き悲しんだものです。それが今は、一つの家から 2 人、3 人と続いて亡くなったりするので、みんな前ほど死を悲しまなくなりました。

この調査団派遣の後、2000 年の世界大会にもイリエワは参加し、ロプノール核実験場の影響により「中国国境周辺の子供達の腫瘍罹病件数は、30 倍にも跳ね上がっている」\*、と継続して被害を訴えている†。

\*ウルクス・イリエワ, 原水爆禁止 2000 年世界大会・国際会議

†但し、原水協が行った中国の核実験被害に関する支援は、調査団の派遣と世界大会へのカザフスタン代表の受け入れまでで、現在のところ表立った支援活動は行われていない。

### 6.3 中国・新疆ウイグル自治区での被害

初めて世界に中国国内における核実験の被害が知らされたのは、1992年9月にベルリンで行われた核被害者世界大会においてであった。新聞記事\*では、気象異変により草が枯れるなどの被害が起きていることが伝えられ、「中国の実験は最近まで大気中で行われてきたことが問題だ。地下実験でも死の灰を含むガスは空気中に噴きあがり、風向きによっては旧ソ連地区にも降りそそいでいる」という証言が紹介されている†。この証言をしたのは、アルマトイ‡ 在住の歴史学者・活動家のユシュベク・ムフリーシで、ベルリンでの大会に先立って1992年3月に、ロプノール実験場問題に関する国際反核会議を組織していた§。そこでは「実験場近隣に居住した21万人のウイグル人が、核放射線の影響で死亡した。ほぼ同数の人々が、放射線により引き起こされた各種病気に苦しんでいる」というデータが提示されている¶。

世界に広く知られるようになったのは、第1章で紹介した英国のドキュメンタリーによってである。ウイグル人医師のアニワル・トフティ(Enver Tohti)は、英国のテレビ局チャンネル4の取材班の一員として1998年にロプノール周辺地区を訪問した||。取材では、被曝地域の住民の健康調査や、大学図書館での文献調査などが行われた。この様子を収録した映像ドキュメンタリー“Death on the Silk Road”には、核実験の影響により関節が変形したり、口唇口蓋裂や知的障害など先天性異常を持って生まれた子供や、癌にかかるなど健康に影響が出た人達の痛々しい姿が収められている。トフティの調査によれば、核実験場に近い地区で、白血病、悪性リンパ腫、肺癌が増加し、発癌率は1970年頃から増加し始め、1990年には中国本土と比べて1.35倍にまでなっている(図1)。この調査の結果、トフティは帰国がかなわなくなり—中国に戻れば「国家分裂扇動」のかどで逮捕・投獄が待っている—英国に政治亡命した。トフティはインタビューで、次のように訴えている[15]。

中国では被曝者が団体を作ることも抗議デモをすることも許されないし、国家から治療費も出ない。中国政府は『核汚染』はないと公言し、被害状況を隠蔽しているので、海外の医療支援団体は調査にも入れない。医者は病状から『放射能の影響』としか考えられなくとも、カルテに原爆症とは記載できない。学者は大気や水質の汚染調査を行うことを認めてもらえないから、何がおきているのか告発することもできない。このように新疆では、原爆症患者が30年以上放置されたままなのだ。

このように、被害の証拠が固まってきた中、2008年の8月になり、高田によって核爆発に伴う放射性物質の降下・拡散のモデル[43]を用いて中国国内の被曝者の推定が行われ、文献[7]として出版された。高田は、広島大学原爆放射線医科学研究所の助教授であった2000年に、セミパラチンスク核実験場の調査団に参加し、グシェフらの要請によりカザフスタン国内での、中国の核実験の影響の調査を開始した。

文献[7]によれば、楼蘭付近の爆心地から、北西方向に広く汚染が広がり、当時の人口密度から19万人が急性死亡、129万人が健康被害を受けたとなっている。もちろんモデルによる不定性は考慮する必要があるが、グシェフらの疫学調査のデータとも矛盾しないため、一定の信頼性をもつ値であると考えられる。正確なところは、現地での詳細な疫学調査が必要であるが、現在それができる状況ではない。

\*朝日新聞 1992年9月26日夕刊, 「中国核実験で周辺に気象異変 ウイグル自治区の元住民が実情報告」

† 気象異変などの環境の変化については、中国国内の研究機関の研究者が、衛星からのデータを用いて評価を行っている[16]。

‡ ジャルケントから西南西へ250kmほどの都市。アルマトイ、アルマトゥイ、アルマトゥ、あるいはアルマアタとも表記される。

§ この会議では、国際反核組織「ネバダ・セミパラチンスク運動」の下に、ロプノール支部が創設された。この組織は、日本の原水爆禁止世界大会に繰り返し代表を送るなど、国際的に広く活動している。

¶ モダン・ムフリソフ(「東トルケスタンの声」紙ロシア語版編集長), 「ウイグルスタン解放運動」1997年1月。

|| このときの潜入取材の様子は文献[15]に詳しく記されている。

核実験は、セミパラチンスクでモスクワ方面に風が向いているときに行われなかったのと同様、中国もまた北京方面（東向き）に風が吹いているときには行っていないことは想像に難くない。実際、被害が確認されているのは楼蘭から北西方面だけであるので、この一帯（楼蘭～マカンチ～ジャルケント、図 10 で囲った領域）に被害があることは予想できる。しかし、楼蘭からすぐ北方のロシア・アルタイ地方でも、被害が訴えられている\*\*。また、最大の 1976 年の 4Mt の核爆発の放射性降下物が、マカンチでは観測されておらず、他の方向に流れたと考えられるため、汚染地域としては、北側（ロシア・アルタイ方面）・南側（チベット方面）にも広がっている可能性がある。

確認されている北西方面だけでも、核爆発地点からカザフスタンまでの約 1,000km の間には、コルラ、焉耆、トルファン、クイトウン、石河子、ウルムチなど人口の密集した都市が点在している（図 10 参照）。この 1,000km というのは、神戸と札幌くらいの距離であることを考えれば、非常に大規模であることがわかる。また、19 万人が死亡という数字は、広島・長崎に匹敵する膨大な規模の災害である。

中国側から高田の推定に対して反論も出されていて [17]、1974–1984 年の 322 件の死亡例を分析した疫学調査から、「科学の面をつけた杜撰さ」「無責任かつ勝手な推断」と断じている。しかし、この中国側の反論については、以下のような問題点を指摘できる。

- マカンチでの 1949–1996 年の 1813 件の死亡例を解析した疫学調査 [6] では、癌による死亡率が上がりに始めているのは 1985 年からである（図 11–13）のに、1985 年以降の癌による死亡の調査が公表されていない。
- 調査地区の選択が、実際の風下地域からされたのか疑問の余地がある。米蘭、鉄千里克、塔里木河流域等、6 調査区を設定しているが、爆心地の西方と南方に位置し、風下と考えられる北西方向とは、必ずしも一致しない。
- 反論の根拠としている各種年鑑は、非被曝地域を含んでおり、死因別にもなっていない。全死亡数が減り、全人口が増えていることは、放射線起因の疾病が起きていないことを意味しない。
- トフティ医師が [5] で得たデータ（図 1）とは矛盾している。

これらの反論は、カザフスタンの被害について何の説明にもなっていないばかりか、現在も隠蔽しようとする中国政府の意図を示したとすらいえるのではないだろうか。

中国政府は現在も外国の科学者の調査が入るのを拒んでいる。ジャーナリストの藤本将太は、2006 年 7 月に核実験の被害を調査することを目的のひとつとして、ロプノール周辺地区への取材旅行に行き、そのレポートを公表している [12]。藤本は、トルファンでウイグル人から聞いた核実験に関する情報として、次のものを紹介している。

1. 長年ロプノール地域を専門にガイドをしていた男で全身の毛が抜け落ちた人がいると聞いた事がある。彼はもう死んだ。
2. トルファン南部の村でブドウの収穫量が著しく減少したために、村ごと別の地に移住した人たちがいるらしい。
3. ロプノールに近い村々では軍が駐屯しており、旅行者には解放されていない。ロプノールエリアに入るための許可証があっても村近くに設置されている検問を突破することはできない。

その上で、ウイグル人達に核実験の情報が不足しているため、藤本からの核実験の情報に接して混乱気味な様子や、核実験の影響が大きかったコルラ（Korla, 図 10 参照）で公安官らしき二人の男に夜中の 0 時をまわってからホテルの部屋で取り押さえられ、使い捨てカメラを没収された話などを、生々しく描写している。

\*\*朝日新聞 1992 年 8 月 8 日、「ロシア アルタイ 旧ソ連と中国から死の灰 子ども被害状況を報告」

## 6.4 中国・チベット人居住地域での被害

被害はロブノール核実験場の影響だけではない。核実験に使われた核弾頭は、チベットのアムド地方であった現在の青海省の海晏県、ココノール湖岸の西海鎮という場所の“221工場”で造られ\*、周囲は汚染されて癌や白血病が発生している [10]。

チベットを複数回訪れ取材しているジャーナリストの野田雅也は、西海鎮の核兵器製造工場の周辺で1980年代から羊の放牧をしていた住民の話として

- 地面から大きな煙が上がったり、きのこ雲が丘の上にわき上がったりするのを何度も見た。
- ここで育った羊は、寿命が四年ほどと短い。歯がなかったり、反対に歯が異常に長く伸びた羊もいる。生後数カ月で死んでしまうことも多い。

などの証言を伝えている [11]。

ウランの採掘が行われた甘粛省のテウオ(送部)では、人と家畜が原因不明の病気で死亡し、草木が枯れ、水の色が黒く変色し悪臭が放つようになった。チベットの各地が中国によるウランの採掘、核兵器の開発、配備、核廃棄物の投棄で汚染されている。チベット人政治犯が核施設で危険な作業に従事させられ、被曝している。というような、チベット人が置かれている過酷な状況がチベット人権擁護団体から伝えられている [10]。

## 6.5 楼蘭周辺に入境した日本人の被害

核実験の影響は中国とカザフスタンだけにとどまらない。大規模な核爆発があった楼蘭周辺は、シルクロードの「天山南路」にあたり、多くの外国人が訪れている。この一帯の砂漠は、セミパラチンスク・ピキニ・ネバダがそうであるように、現在でも高濃度に汚染されていると考えられる。ここでは、核実験が1996年まで繰り返し行われた。

そして、ここには日本のテレビ局の取材班や一般観光客も、1970年代から多く訪れている。中国は地表核爆発のあったこの場所を、観光地として外国人を旅行させていた。つまり、ネバダ砂漠で起こったこと [45] がここでも繰り返された可能性が高い。文献 [9] によれば、核実験が行われている危険な時期に、シルクロード観光に行った日本人の数は、合計27万と推定されている。日本人にも被害が出ている疑いがあることが既に報道されている<sup>†</sup>。客観的にわかっている核実験のデータと、観光客の増加の時期(1980年代~)から、その可能性は十分にあるといわざるを得ない。

\*朝日新聞 1999年6月25日、「生まれ変わる旧秘密工場」；中国通信 2007年7月6日、「中国初の核廃棄物埋設孔が有名観光地に、すでに内外観光客40万人が見学」、現在は放射性廃棄物は埋設処分され、「原子城」という名で観光用に公開されている。

<sup>†</sup>東京新聞 2009年7月11日、「新疆ウイグル自治区で核実験46回 日本人観光客も被ばくか シルクロード番組でブーム NHK、危険知らず?」；東京新聞 2010年3月25日、「渡航の7邦人 白血病などに―新疆ウイグル自治区 中国が過去に核実験― 専門家「分析のための情報提供を」」

## 7 被害の証拠

被曝による健康被害の証拠は残りにくい。日本でも、つい昨年まで、原爆症認定をめぐって訴訟が展開され、国側の連続敗訴・特別立法という結果に終わっている。この章では、各国での被曝者の補償の状況、日本での原爆症認定訴訟、被曝の証拠となる生物学的線量評価を紹介する。

### 7.1 被害の補償

核保有国はどこも、自国内の核実験被曝者を隠蔽する傾向にあったが、被曝者が声を上げて政府と闘った結果、限定的な補償は実施されてきている。

米国では、1988年に補償が法制化され、核実験に動員され被曝した退役軍人や、ウラン鉱山や核兵器製造工場での労働者に賠償がされてきている。マーシャル諸島での被曝者には、1986年から限定的な補償が行われている。しかし、核実験との因果関係は疑問と切り捨てられた被曝者がおり、その訴えが続いている。カナダは2008年、ネバダ砂漠で実施された核実験に参加したカナダ人将兵を対象に補償基金を創設した。日本からの支援、交流はさまざまな形で行われている。

カザフスタンでは、独自に「被曝者援護法」が制定され、政府から放射能汚染の被害者に最低限の一時金と年金が支給され、治療費が無料にされた。しかし、旧ソ連の宗主国ロシアは、断固として責任を認めず、ロシアからの補償は行われていない[31]。また、医療物資の不足に加え、医療補償が法律に従って行われていないという声もあり、救済は十分とはいえない。しかしカザフスタンに直接、日本から救援の手が差し伸べられている\*[30, 34]。

イギリスでは、フィジーとオーストラリアで被曝した元兵士とその家族約1,000人が補償を求めて、集団訴訟を闘っている†。2008年から第三者機関による放射線被害の研究結果の見直しが進められている。オーストラリアは2006年、イギリスの核実験で被曝した16,000人を対象に、補償法を成立させた。

フランスでは、ポリネシアとサハラ砂漠で実施した核実験で発生した、15万人とされる被曝者を放置し、頑なに認めてこなかったが、元兵士らの訴訟で被害が徐々に認められるようになってきた。2009年5月になって、ようやく政府は補償を行う方針に転換し、2009年12月に補償を定めた法案を成立させた‡。原水禁国民会議は、フランスの被曝者認定に対して支援活動を展開している§。

しかし、核保有国5ヶ国のうち中国のみが被害実態の一切を隠し続けている。被曝者は、適切な医療が受けられず放置され続けると予想される。核実験に参加した退役軍人にも、限定的な補償が伝えられているが[18]、民間人は放置されたままである。中国国内では被害者の声は抑圧され、海外に亡命したウイグル人とチベット人からの訴えが続いている[15, 10]。しかも、その被害者の数は、セミパラチンスクをも上回り、史上最大規模と予想される。

これに対し、日本からの現地への支援は行われていない。日本の反核団体(原水協・原水禁・核禁会議)でも、現在のところ対策は考えられていないようである¶。

\* 中国からの放射性降下を受けたとされるジャルケントへも、日本から支援が寄せられている[30]。

中国新聞1999年9月11日、「セミパラチンスクとヒロシマ<下>きずな 同じ被害者思い共通」。

† この集団訴訟の弁護士が2009年12月、日本での原爆症訴訟での成果を知るために来日し、裁判に携わった沢田昭二らと情報交換が行われたという。日本での成果が海外に好影響を与えている例といってよいだろう。

‡ 共同通信2009年12月23日、「仏、核実験被害補償法が成立 初めて上下両院が可決」。

§ 原水爆禁止日本国民会議、「世界のヒバクシャはいま」。

¶ 筆者は、静岡県で行われた原水協の「2010年3・1ピキニデー」に参加し、その分科会「被曝の実相普及、被曝者支援のために」において、中国の核実験被害へ目を向け、可能なら支援をされるよう発言した。

ロプノールのある新疆ウイグル自治区\* や、ウラン採掘や核兵器製造、放射性物質の投棄が行われたチベット†は、もともと独立した政権が成立していた場所で、「解放」によって漢民族が大量に流入し、支配された土地である。核実験は、マーシャルやポリネシアのように植民地支配下や、ネバダやセミパラチンスクのように支配民族以外の土地で行われてきたが、「新疆」もまた例に漏れていない。その場所で、このような被害が出て、それに適切な補償が行われていないことは、多くの日本人が知ってよいことであろう。

## 7.2 内部被曝の「証拠」と原爆症認定訴訟

現在、楼蘭周辺地域に入境した日本人旅行者にまで、被曝の可能性が指摘されている(第 6.5 節参照)。しかし、これにはまだ「証拠」が十分ではない。被曝と発病の因果関係を証明するのは容易なことではない。

原爆の放射線を爆心地付近で直接浴びただけであれば、DS02 によりほぼ正確に推定できる。しかし、実際には初期放射線によって誘導された放射性物質と、核分裂生成物、未分裂核を吸引することによる内部被曝の影響が大きなウェイトを占める。内部被曝は、吸引した放射性核種の体内での動きが関係しているため、正確に評価することは現在でも困難である。特に、線を出す未分裂核の内部被曝は、エネルギーを周囲に大きく付与するので、遺伝子を局所的に著しく傷つけ、癌や白血病などの大きな発生の原因となる。

広島・長崎の原爆被爆者の認定は、一律に DS02 およびその前身の DS86 を基準としてなされてきた。この基準には内部被曝の影響はほとんど考慮されていない。初期放射線のみの影響を考慮して、残留放射線の影響を事実上無視し、疾病ごとに設けた閾値線量に推定被曝線量が達しない場合は、認定申請は却下されてきた。その範囲は爆心地から 3.5km 以内であり、それより離れた場所において「黒い雨」を浴びたり、原爆投下後に入市して放射性物質を吸い込んだりして被曝した現実の被爆者の疾病を、国は原爆症とは認定してこなかった。この齟齬から、2003 年から集団訴訟が相継いで提起され、裁判が続いていたが、DS86/02 のみの認定基準の欠陥が相次いで認められた。判決では例えば、以下のように判断されている。

(平成 20 年 5 月 30 日、大阪高裁)

DS86 及びその後再評価が行われた DS02 は、相応の合理性を有する優れたシステムであるということが出来るものの、シミュレーション計算を主体として構築されたシステムにより広島原爆及び長崎原爆の爆発による初期放射線の放出等の現象を近似的に再現することを基本的性格とするものであって、広島・長崎でみられた強烈な爆風や苛烈な熱線が引き起こした大気の変化などが十分に反映されたとはみられないこと、残留放射線の評価についても、原爆投下後かなりたってからの一定地域での測定を基礎として行われているものであって、原爆投下直後の放射線を大量に浴びた多数の死者や重傷者を含む膨大な被爆者の存在、遺体の収容や負傷者の看護等の実態がシミュレーション上考慮された形跡がないなど、それ自体に内在する限界が存することに加えて、残留放射線の測定結果や遠距離被爆者にみられた急性症状などからして、その計算値が少なくとも爆心地から 1300 m 以遠において過小評価となっている疑いがある。また、放射性降下物による被曝や内部被曝の可能性も考慮されなければならない。

\* トルコ系民族が住むこの地は、清朝末期に侵略され、新疆省と呼ばれるようになった。“新疆”は新たな征服地の意味。ソ連と中国国民政府からの干渉と混乱の中、東トルキスタン共和国(1933-34年, 1944-49年)として、一部の地域に政権が樹立されたこともあったが、失敗に終わっている。中華民国新疆省を経て、1946年に中国国民政府と東トルキスタン共和国政府合同の新疆省連合政府が樹立されたが、首脳の暗殺など混乱を経て、1949年に人民解放軍の侵攻を受け中華人民共和国に併合された。

† 現在のチベット自治区および青海省・甘粛省・四川省・雲南省の一部が元来のチベットで、ガンデン・ポタン政府による統治が行われていたが、1950年に人民解放軍が侵攻、武力による圧力の下に1951年に中国の統治を認める17ヶ条協定の締結を余儀なくされ、併合された。1959年のラサでの騒乱を期に、ガンデン・ポタン政府はインドに移り、チベット亡命政府を樹立した。

このような裁判で国が19連敗したことから、2009年8月に麻生首相と被爆者の全国組織である被団協との間で、一審で敗訴したら国は控訴しない、控訴はすべて取り下げるという確認書が調印されるに至った。2009年12月には「原爆症認定集団訴訟の原告に係る問題の解決のための基金に対する補助に関する法律」が、衆参両院で全会一致で成立した。国を相手取った裁判で、このようなことは異例である。これは今年の画期的なニュースのひとつであった。この裁判を通じて明らかになった残留放射線による被曝の軽視については、沢田昭二により詳しく報告されている [36]。

このように、内部被曝の影響は日本でもそうであったように、他の国も見て見ぬ振りを通してきた。特に中国は頑なに否定している。このような隠蔽がまかり通ってきたのは、内部被曝自体の確認が困難であること、その影響は数十年経ってから現れることに一因がある\*。しかし、年月が経ち被曝線量推定の技術が進歩した現在、次節に述べる方法により「証拠」を得ることが期待できる。

### 7.3 生物学的線量評価

放射線とその健康影響には、原子力発電に推進の立場に立つ側と、反対の立場に立つ側、あるいは原爆の被害を強調する側と、補償を突きつけられる側で学説が対立することが多く、初学者はどの文献を信じてよいか迷うことが多い\*†。

被曝線量の評価においても、表5で見たように、方法や立場で値も異なってくる。しかし、生物学的線量評価 (*biodosimetry*) を用いれば、より客観的な被曝線量の評価が可能であろう。生物学的線量評価とは、染色体異常の数を調べることや、体内の骨や歯に沈着した放射性物質から出る放射線を調べることで、排泄物の中の放射能を測定することなど、生体試料によって被曝した放射線量を推定する方法のことである。

全身に被曝をすると、人間の血液中のリンパ球に、染色体異常が起こる。通常私たちの遺伝子は、二本鎖で互いに対を成していて、放射線を浴びて一本が切れても修復する作用がある。しかし、二本とも一気に切れてしまうと、修復の際に誤って別のところにくっついてしまうことがあり、それが染色体の異常として残され、癌などの原因となる。異常が生じたリンパ球は、アポトーシス（細胞の自発死）で消えてゆくの、被曝直後ではリンパ球の数の減少がひとつの指標になるが、異常染色体は年月が経てば再生産されず消えるものもあり、体内放射性物質の排出も進むので、正確な被曝線量を推定することは難しかった。

一方で、異常染色体のうち“安定型”に分類される“転座”は、年月が経っても細胞分裂によって消失しないため、末梢血中の頻度を数えることで、被曝線量を推定することが出来るようになってきた。染色体異常を用いた線量評価の第一人者である鎌田七男は、次のように解説している‡。

次に染色体異常ですが、染色体は被曝した人の末梢血リンパ球から容易に検出可能です。健全な原爆被爆者にみられる染色体異常の特異性として、

1. 被曝線量とよく相関していること
2. 安定型異常として長期間持続していること
3. 被曝した全組織で観察されること
4. 幹細胞（骨髄、腸、乳腺など）レベルでも異常を保持していること

\*文献 [68] が内部被曝、特に 放出核の危険性を強調する立場で詳述されている。

†文献 [69] が筆者がみた中では比較的公平な立場から論点を明確にして記述されている。

‡鎌田七男, ヒロシマ・ピースフォーラム講演「放射線が人体に及ぼす影響と被爆者の現状」(2008)。

が挙げられます。基になる細胞は体の中にいろいろありますが、そういうところにも異常があるわけですから、いつまでたっても同じ異常を持つことになります。従って、染色体異常というのは、昭和 20 年の出来事を今も教えてくれる貴重な証拠となります。また、染色体異常は被曝線量と相関していますので、1.5km 以内の被曝であれば、染色体の異常率から、どのあたりでの被曝者であるかを証明することができます。

1986 年には FISH 法\* という染色体着色法が開発された。この方法の発達により現在では、数 10mGy の精度まで推定できるようになっているという [67]。実際に、セミパラチンスク核実験場近郊のドロン村 (Dolon) の被曝者の染色体異常の頻度を測定した報告が 2006 年にあり、FISH 法による分析の結果 15 人の対象者の被曝線量が、約 180mSv と推定されている [33]。

生物学的線量評価の特長は、内部被曝も含めて評価できることである。NHK の放送 [32] では、カイナール (Kainar) 村の住民に継続的な内部被曝によるとみられる、“不安定型” の染色体異常である“二動原体異常” や“環状染色体” が観察されることが紹介されている。通常、“不安定型” の染色体異常は、正常に細胞分裂できないため 3 年ほどで淘汰され、何十年も残ることはない。しかし、放射性物質を体内に取り込んでいる場合は、常に体内で被曝し続けるために、このようなことが起こる。広島市の被曝者においても、DS02 で低線量とされた地域でも、黒い雨を浴び、あるいは飲料としたことによって、内部被曝により高線量を受け、癌を発症したと考えられる例も報告されている†。

こうした生物学的線量評価は、近年になってようやく実用に耐え得るようになってきた、放射線影響による被害の強力な証拠を示せる方法である。もっとも、検出限界があり万能ではないが、少なくとも体内残留放射線の直接検出と併せることにより、これまで因果関係を否定し続けている核保有国の政府に突きつける有力な方法となると考える。

\* fluorescence *in situ* hybridization; 蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション法

† 共同通信 2008 年 6 月 8 日、「「黒い雨」で複数がんが 広島市の被曝者で確認」.

## 8 まとめと課題

中国の核実験について、入手可能な資料の範囲でその被害状況を紹介してきた。中国の核実験は1964年から1996年までに46回行われ、「核の砂」が大量に発生し、風下に流れた。そのうちの11回で、核の砂は遠く離れた中国-カザフスタン国境にまで運ばれて降下し、2回が無視できない線量であった。その影響により、潜伏期間を経て癌致死率が1.3-1.8倍に増加した [6]。

特に爆発威力が大きかった楼蘭遺跡周辺で実施された3回の地表核爆発から、爆発威力や放射線量、気象データ、人口密度などを元に、その被害が推定されている [7]。それによれば、東京都の136倍に相当する広範囲に核の砂が降り注いだ結果、周辺に居住するウイグル人らの急性死亡は19万人、放射線障害により現在も苦しんでいる周辺住民は129万人にもものぼるとされる。甚大な健康被害を伴う急性症に加えて、死産や奇形などの胎児への影響が3万5000人以上、白血病が3700人以上、甲状腺癌は1万3000人以上に達するという。中国の核実験は核防護策が杜撰だとされ、被災したウイグル人に対する十分な医療的ケアも施されておらず、この129万人のうちの多くが長い年月を経て既に死亡したとみられる\*。これは広島と長崎に投下された原爆被害を超える規模である。これだけ多くの犠牲者を出した核爆発災害の例は他に類をみない。

中国政府は、「核実験の放射能による影響はない」と説明しつつ、一方では退役軍人への補償を行っている [18]。同政府は兵士以外の被曝者への影響を認めることなく、現在でもウイグルやチベットの被曝者達は見捨てられたままである。「過去からの衝撃」であるが、被曝者の立場にたてば、これらの被害はすべて「未来にも続く衝撃」であって現在進行形の惨禍である。米ソ英仏での核実験でも放射性降下物による被害が出たが、少なくとも、爆発威力・高度・位置など主要な実験条件のデータや、爆発後の降灰パターンは公開されており†、不十分ながら補償がなされ、もしくは裁判で係争中である。一方、中国はこれら実験の被害推定の基礎となるデータをことごとく非公開とし、周辺住民への被害はないと強弁し続け、被害を訴える声を抑圧している。

さらに被害はシルクロード周辺を訪れた日本人観光客27万人にも及んでいる恐れがある。高田によると、1964年から1996年までの間に、シルクロードを訪問した日本人27万人の中には核爆発地点のごく近くや「核の砂」の汚染地域に足を踏み入れた可能性のある者もいる。こうした日本人への影響調査が必要と指摘されており [9]、日本人の被害の可能性も具体例が挙がっている‡。日本政府は、中国政府に対して、放射線防護学の専門家による現地調査の受け入れを要求し、責任をもって、生物学的線量評価による日本人現地渡航者の被曝線量調査を行うべきではないだろうか。

1975年の湯川・朝永宣言は、核抑止を超えた人類のあり方を提唱し、核兵器廃絶の必要性を訴え、各国政府に対して核兵器の使用・威嚇を放棄することを要求した歴史的なものだ。その根底には、生命の尊厳に重きをおく真摯な態度があることはいまでもない§。一方、当時の認識としては、核兵器開発に伴って

\*未確認情報だが、亡命ウイグル人が組織する世界ウイグル会議が入手した中国共産党の機密資料では、既に75万人が死亡したといわれる。

†米国の核実験の実験条件と降灰パターンは、米大陸と太平洋上に分けて Web 上に公開されている。旧ソ連の核実験では降灰パターンは [25] と [23] に、実験条件は [19] で公開されている。その他、核実験に関係するデータは、公開されている範囲で [41] のサイトに集められている。

‡東京新聞 2010年3月25日、「渡航の7邦人 白血病などに—新疆ウイグル自治区 中国が過去に核実験—専門家「分析のための情報提供を」」。この記事は、1980-1990年代にシルクロード観光に渡航した者が、帰国後に発病（白血病2人、悪性リンパ腫3人、肺がん1人、骨腫瘍1人）したという内容。被曝との因果関係は未確認だが、調査の必要性が指摘されている。

§湯川は次のように述べている：「どこが変わったかという、物理学とヒューマニズムとが切りはなされた別々のものではなくてきた点である。……物理学の成果が人間社会で利用あるいは悪用されるという道筋を通じて、ヒューマニズムとより密接につながらざるを得なくなったのである。このつながりが実際あるのに、目をつぶって知らん顔はできなくなってきた。」 [1]。

核実験場周辺の住民に、これ程までに甚大な被害が出るとは想像できていなかったであろう。セミパラチンスク核実験場周辺の住民のケースで明らかなように、住民が住んでいる内陸部での核実験は、熱線・爆風の被害がないだけで、放射線による後障害の面では広島・長崎への原爆投下に匹敵し、もしくは上回る重大な被害をもたらしたといえる。また、中国による核実験では、その被害の規模はセミパラチンスクを遥かに上回ると予想されている。従って、中国が行った核実験そのもの、そしてその後の隠蔽・被害者の放置は、生命の尊厳を蹂躪するものであるといわざるをえない。

湯川と朝永が核抑止論を批判し、核廃絶を主張したのは、核兵器の存在そのものが、実際に使用され、新たな犠牲者を出す可能性を残しているからに他ならない。それは、未来に対しての責任の自覚といえるだろう。二度と再び核兵器が使用されることなく、廃絶にまで押し進める努力が必要である。一方、核実験による被害者の救済は、過去に対しての責任の持ち方と違ってよいだろう。既に被害を受けている被曝者には、出来得る限りの補償がなされることが必要である。現在苦しんでいる人々に救済の手を差し伸べるのが、優先すべき課題なのではないだろうか。

筆者はこの問題を知ってから短い期間であるが、原水禁運動に取り組んでいる人達に接してきたが、そこで感じたことは、残念ながら、時計が広島・長崎・ビキニで止まっているということ、つまり米国の非人道的行為にしか目が向いていない人が多いということであった。すでに情報が容易に得られるはずのセミパラチンスクの核災害ですら、被害者の数はビキニを大幅に上回るにも拘らず、知っていた人は少数であった。過去の日本人の被害は米国によってなされたもののため、仕方ないことでもあるのだが、やはり残念な状況である。

トフティ医師は、次のように日本人に向けて語っている [15]。

被爆国日本の皆さんに、特に、この悲惨な新疆の現実を知ってほしい。核実験のたび、日本政府は公式に非難声明を出してくれた。それは新疆の民にとって、本当に頼もしかった。日本から智恵を頂き、ヒロシマの経験を新疆で活かすことができればといつも私は考えているけれど、共産党政権という厚い壁がある。

今回、筆者はトフティや高田らの訴えをメディアを通じて知り、まず何よりもその訴える被害の深刻さに驚いた。それは直ちには信じることができない程の甚大なものであったため、本稿で行ったように様々な情報を独自に手繰り寄せ、妥当性を検討した。その結果、中国側の主張するような「無責任かつ勝手な推断」[17]ではなく、やはり一定の信頼性を有すると結論するに至ったため、本稿をまとめることにした。

中国の核災害は放射線による後障害が主であり、熱線・爆風による一次被害が主の広島・長崎とは形態が大きく異なる。しかし、被害予測の不定性を考慮するとしても、少なくとも、セミパラチンスクでなされたような現地での調査が必要なことには変わりはないだろう。そして、日本人の被害の疑いがある以上、日本での調査もまた必要だろう。

核兵器の使用による非戦闘員の殺傷は戦争犯罪である。それが、広島・長崎にとどまらず、核実験によって繰り返されてきたこと—しかも放射線障害という陰惨な形によって—は残念でならない。

素粒子論グループは、核兵器の廃絶を志した湯川・朝永の流れを汲んでいる。湯川・朝永が1975年の宣言で謳った「人類の経済的福祉と社会正義が実現され、さらに、自然環境との調和を保ち、人間が人間らしく生きることのできるような新しい世界秩序を創造する」という目標 [1] のために、広島・長崎において原爆を経験した日本人として私たち一人ひとりが何ができるのか、考えるための材料に本稿がなれば幸いである。

## 謝辞

本稿の執筆にあたり、多くの方々に資料の提供、内容へのご意見を賜りました。個々に記して謝意を表したいところですが、予期せぬ迷惑がかかることを避けるため、氏名を記しての謝辞は控えることにします。筆者が立ち上げた、核兵器問題を論じるメーリングリスト ytm-ml の参加者の皆様に心より感謝致します。多くの有用な議論や資料は大いに勉強となりました。また、地図を作成するにあたり、[46]の方法を用いました。著作権者の Google 社、Johnston's Archive、および CIESIN, Columbia University, CIAT に感謝致します。さらに、本文では多くの著作からの引用を行いました。これら著作者の方々に謝意を表します。

筆者はもとより、放射線防護学の専門家ではありませんが、その私たちが浅学を顧みず今回このようなレビューを寄稿したのは、この問題への認知を広げ、適切な専門家、機関の取り組みを促したいという一心からです。このような社会問題を論じるため、発表の場を与えて下さった素粒子論研究編集部に感謝致します。

## 追記 (8月30日)

初版を6月23日に発行以来、様々な方が本稿を読んでくださり、誤植・誤情報の指摘をお寄せ頂きました。そのため6月28日に続き、今回また、訂正した版に差し替えました。記して謝意を表します。

## 付録

### A 放射線防護と広島・長崎原爆線量評価

素粒子物理学者には加速器は馴染み深い装置であるが、放射線という観点で考えると核兵器との共通点が多く見られる。特に、中性子と光子が大量に発生する点が顕著である [56]。また、加速器以外の放射線施設—アイソトープ施設、原子炉施設、核燃料施設、核融合実験施設など—においても事情は同様である。この付録では放射線計測学・防護学の初歩的解説をした後、国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection; ICRP) という組織の 1990 年勧告に従った単位の変更や規制に基いて、線量当量の基本的事項を解説する。これらの概念を理解した後に、広島・長崎の原子爆弾被爆線量評価体系が策定されるに至った経緯を紹介し、本稿を理解する上で必要となる範囲の内容についてまとめてみる。

#### A.1 放射線防護のための諸量

放射線による被曝を論じる時、まず基本となるのは線量評価であり、その単位は Sv (シーベルト) である。ここでは、ICRP が放射線防護・管理のために設けた様々な線量の定義と、それを受けて定められた測定可能線量の定義について述べる。

放射線のエネルギーの単位は、素粒子・原子核の分野と同じく eV が基本的に使われるが、J (ジュール) もしばしば使用される。放射線計測においては何を測ろうとするか—放射線のエネルギー、放射線の量、放射線の電離能力、放射線の危険の度合いなど—によって、測定方法と単位が変わる。その基本的概念に基づき、放射線を測る単位を分類すると、次のようになる。

- 放射能 (radioactivity, Bq)

放射線を出す線源からの単位時間当たりの壊変数を放射能 (または放射強度、或は壊変率) といい、SI 単位系では、その発見者であるベクレルにちなんで Bq (ベクレル) で表す。すなわち、

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegration/sec, dps}$$

歴史的には Ci (キュリー) が使われてきたが、これはラジウムの放射能を発見したキュリー夫人に因んだもので  $^{226}\text{Ra}$  の放射能にほぼ相当する。すなわち、

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq} .$$

- 照射線量 (exposure, C/kg)

これは X 線や  $\gamma$  線が空気中を通過する時に、気体分子を電離する度合いを示す単位。1 C/kg は、放射線で 1 kg の空気を照射したとき、放射線の電離作用で 1 C の電荷を生じる場合の強さを表す\*。10 MBq の強さの  $^{60}\text{Co}$  の線源から 1 m の地点での 1 時間あたりの照射線量は  $0.091 \mu\text{C/kg}$  となる。

- 吸収線量 (absorbed dose, Gy)

物質を放射線で照射して、その物質が 1 kg 当たり 1 J のエネルギーを吸収したとき、放射線の吸収線

\*以前は照射線量の単位には R (レントゲン) が使われていた。R と C/kg は、次元の異なる単位なので、単純な換算はできないが、標準状態の空気では  $1\text{R} = 2.58 \times 10^4 \text{C/kg}$  としてよい。また、線では  $1\text{R} = 10\text{mSv}$  が目安になる。

量を 1 Gy (グレイ) という\*。放射線を照射される物質が空気の場合には照射線量と関係付けることができ、

$$1 \text{ Gy} = 30 \text{ mC/kg} ,$$

となることが知られている。10 MBq の強さの  $^{60}\text{Co}$  の線源から 1 m の地点での 1 時間あたりの空気に対する吸収線量は  $3.1 \mu\text{Gy}$  となる†。

- 線量当量 (dose equivalent, Sv)

同じ吸収線量を受けても放射線の種類やエネルギーによって生物学的効果が変わる。このような生物学的効果の違いを線質係数で表し、吸収線量に補正を加えたものが線量当量といわれ、その単位は Sv (シーベルト) で表す‡。すなわち、

$$\text{線量当量 (Sv)} = \text{線質係数} \times \text{吸収線量 (Gy)} ,$$

として得られるものである。線質係数は X 線と  $\gamma$  線に対して 1、中性子線に対して 10、 $\alpha$  線に対して 20 を用いる。

線量は英語の *dose* の和訳であり、もともと *dose* は薬の服用量という意味であるが、この線量には物理的な定義ばかりでなく、それらをこれまでに観測された様々な生物的 (特に人体への) 影響に結び付け、防護管理のために割り切りを行って求めた人為的な意味合いも含まれていることに留意する必要がある。

## A.2 放射線の作用とリスク

ここで、放射線防護学の長年の研究成果に基づき、放射線の生体内での作用と線量リスクについてまとめておく。前節 A.1 で述べたように、身体への影響を考えると線量を Sv (シーベルト) という単位によって測る。線量の大きさに応じて、放射線障害の有無、種類、そして重篤度に差が生じることが長年の研究でわかっていて、その研究成果に基づき被曝の影響を線量により分類したものが表 9 に示してある。放射線障害が発生するかも知れない事態になったとしたら、この線量の理解が大切である。

この表 9 をもう少し粗くして、緊急時に即座に判断できる線量概念として線量を 6 段階で区分したものが表 10 に示したもので、高田により 2002 年に発表されたものである [8]。これは、生命の危険度という尺度で考えた時、何 Sv の線量の被曝を受けたかによって、どのような症状が現れるのかを線量レベル A から F に区分して考えたものとなっている。

この表 10 の区切りの線量値 (閾値) は、様々な放射線事故や災害での放射線障害に関する研究成果から見出されたものである。このうち上位三種の区切りは、致死、急性放射線障害、胎児影響に関して特徴的な線量値となっている。それに次ぐレベル C とレベル D の間には、線量間隙が存在していて、その範囲は 10 – 100 mSv である。危険とも安全とも言い切れない線量範囲である。1990 年の ICRP 勧告では、放射線作業に従事する者に対し、年間線量限度として、50 mSv/yr とし、5 年間の平均としては 20 mSv/yr としている§。この線量限度は、日本の法令としても採用されている¶。

\*以前は吸収線量の単位には rad (ラド) が使われていた。単位の換算は  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$  である。

†照射されるのが人体の場合には空気と組成が異なるので 1 時間あたり  $3.5 \mu\text{Gy}$  となる。

‡以前は線量当量の単位には rem (レム; röntgen equivalent man) が使われていた。単位の換算は  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$  である。

§参考までに KEK では、放射線作業従事者の年間線量限度として、男性に対しては 20 mSv/yr、女性に対しては 7 mSv/yr という基準を設定している。これは女性が妊娠した場合、胎児は一般人扱いになるので、本人が気付かずに妊娠してもリスクを小さくするため。(女性本人が妊娠しないことを宣言すると、限度が上がって男性と同じ基準になる。)

¶一方、一般人の年間線量限度としては、1 mSv/yr が ICRP により勧告されている。

線量	症状
7 Sv	100% の人が死亡
4 Sv	30 日間で 50% が死亡（半致死線量）
3 Sv	脱毛の閾線量
2.5 Sv	不妊の下限閾線量
2 Sv	5% の人が死亡
1 Sv	吐き気、嘔吐、白内障
0.5 Sv	白血球（リンパ球）一時減少
0.25 Sv	身体症状のない閾線量
0.1 Sv	胎児奇形発生の下限閾線量
50 mSv	法定職業被曝線量の 1 年あたりの上限
2.3mSv	日本人が 1 年間に受ける医療被曝放射線量
1.5mSv	日本人が 1 年間に受ける自然からの放射線量
0.6mSv	1 回の胃の X 線診断で受ける量

表 9: 全身被曝線量と急性期の身体影響 [44, 69].

線量レベル	リスク	線量	医療対応
A	致死	4Sv 以上	専門病院での処置が必要
B	急性放射線障害 後障害	1 – 3 Sv	一般病院での観察 あるいは専門病院での処置
C	胎児影響 後障害	0.1 – 0.9 Sv	妊婦は専門病院と相談 その他の人は医療対応不要
D	やや安全	2 – 10 mSv	医療対応不要
E	安全	0.02 – 1 mSv	医療対応不要
F	顕著な残留核汚染無し	0.01mSv 以下	医療対応不要

表 10: 線量 6 段階区分と人体影響のリスク [8].

4 番目（レベル D）以下の線量範囲を区切ることは、困難な面がある。その最大の理由は、線量が低いため、顕著な放射線障害が確認されていないことにある。

これまでに様々な線量の値が現れてきて、放射線防護学に不慣れな読者はやや混乱したかも知れない。緊急時にごく大雑把な目安として、被曝線量の基準を 1 Sv とすると、事故的な被曝や核兵器テロなどの被曝のリスクが理解し易くなる。それは、このレベル B 以上となる 1 Sv 以上で全身被曝をすると急性放射線障害が発生するからである。将来、何らかの形で重大な被曝に遭遇した場合、この線量の区分が頭に入っていると、冷静な対処ができると期待される。

### A.3 広島・長崎原子爆弾線量評価体系

ここでは広島・長崎原子爆弾線量評価体系について紹介する。戦後、広島市の被曝者に白内障と白血病が多発することが判明したが、放射線による発癌などは被曝者でなくても発生する。検出された健康影響が原爆放射線の被曝によって引き起こされたものかどうかは、健康調査とは別に、被曝者一人一人の被曝線量を知る必要がある。線量評価体系は、このような被曝線量の情報を提供するもので、前節で説明したような放射線防護基準はこのリスク推定値が根拠となっている。

この被曝線量の推定法は、広島への原爆投下直後からの現地調査に始まり、長期にわたる疫学調査、検

証実験や被爆地での測定、大型計算機を用いた高精度の輸送計算などの総合的な調査・研究を通じて、段階的に、その精度を向上させてきた。以下で、原爆線量評価問題への取り組みを時系列で駆け足で見ながら、この線量評価体系が策定されるまでの経緯を紹介する。

### (1) 原爆投下直後の調査

米国側は原爆投下前から測定の準備を行い、当日からデータを集めた。一方、日本側では新型爆弾投下の報を受けて、日本の科学者ら数グループが8月9日から被爆地での調査を開始した。

- 8月6日に米軍は、広島原爆投下直前に測定器を搭載したパラシュートを投下し、それから得た圧力情報から爆弾の出力を16.5ktと推定した。
- 陸軍の依頼で理研の仁科らが8月9日に広島を訪れ、砂や骨から放射能を測定し、新型爆弾が原子爆弾であると確認した。
- 海軍の依頼で8月10日に阪大の浅田らが誘導放射能を予測し、箔検電気、GM計数管や写真乾板を持参し、広島市内の放射能を測定した。
- 京大の荒勝、木村らは、自主的に調査隊を編成し8月10日に第一次調査隊を、13日には第二次調査隊を派遣し、市内約100箇所から資料を採取し、中性子による誘導放射能を確認した\*。
- さらに8月から9月にかけて理研の山崎らが、広島での犠牲者の人骨を持ち帰って放射線の人体への影響を調べた†。また広島西方で放射能の異常に高い場所を発見した‡。
- 長崎では9月10日に九州大学の篠原らが爆心地付近の放射能を測定し、検電気で自然係数の8倍の量があると報告した。10月1日には西山地区で自然係数の200倍を観測した。
- 日本学術会議では、1945年9月初めに日本の科学者らを広島と長崎に多数動員し、被爆の状況を広く調査させた。
- さらに9月下旬には米国の陸軍・海軍・マンハッタン計画の専門家チームが来日し、日本側の科学者と共同で調査を行った[48]。

これらの調査が1945年当時には既になされていたが、日本学術会議によりその調査結果が原子爆弾災害調査報告書として出版されるのは、連合軍の占領統治が終わった後の1953年であった[49]。

### (2) T57D と T65D

放射線の影響を評価するためには、被爆者の浴びた放射線量の定量的理解が不可欠である。1946年11月米国大統領 Harry S. Truman は専門家達の勧告を受け、広島、長崎の生存者らを長期にわたり調査するよう米国科学アカデミー (NAS) に命じた。NAS は直ちに原爆傷害調査委員会 (Atomic Bomb Causality Commission; ABCC) を設け、広島と長崎に研究所を設置した。

一方、国内では1956年、広島・長崎原爆被爆者の線量を推定するため、オークリッジ国立研究所 (ORNL) を中心に極秘プロジェクト "ICHIBAN" が開始された[47]。この期間の研究は次のものに大別される。

- ABCC は1975年にRERFという日米共同組織へと改組し、被爆者の健康と福祉の維持、および放射線の生物学的影響の研究を通じ全人類の健康に貢献することを目的とし、広島で約8万人、長崎で約4万人に調査を行った。この後も追跡調査が引き続き行われ、現在に至っている。

\*馬の骨から  $^{31}\text{P}(n, \gamma)^{32}\text{P}$ ,  $^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S} + \beta$  という中性子捕獲反応と  $\beta$  崩壊の過程を測定し、爆心地の速中性子 (fast neutron) の数を  $10^{10} \sim 10^{13}/\text{cm}^2$  と推定した。

†人骨中の  $^{32}\text{P}$  から熱中性子 (thermal neutron) の数を捕獲断面積  $0.2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$  と仮定し、 $9 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  と推定、さらに硫黄中の  $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$  反応から速中性子数を散乱断面積  $3.7 \times 10^{-27} \text{cm}^2$  と仮定し  $1.2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  と推定した。

‡これは第2.2節で述べた黒い雨などの放射性降下物の影響により広島西方での放射能が高くなったと考えられる。

- ICHIBAN プロジェクトでは、ネバダ核実験場に日本家屋を建て、原爆実験により線量と遮蔽効果<sup>§</sup>の測定を行い、暫定 1957 線量 (Tentative 1965 Doses; T57D) を発表した。これが個人の被曝線量を推定する評価システムとして最初のものである。
- さらに 1960 年から、ネバダ核実験場において地上 500 m のタワー実験を開始し、裸の原子炉で中性子を 1200 Ci の強度の <sup>60</sup>Co を用いて  $\gamma$  線量の測定を行った。
- 日本では、これらと独立に放射線医学総合研究所 (NIRS) の橋詰らが残留放射能測定を行い、誘導放射能 <sup>60</sup>Co から中性子線量を、熱蛍光法 (TLD) から  $\gamma$  線量の推定を行った。

これらの研究結果がほぼ一致し、日米の共同研究として 1965 年に ABCC, ORNL から暫定 1965 線量 (Tentative 1965 Doses; T65D) が発表された [50]。原爆の爆発威力は広島で  $12 \pm 2$  kt、長崎で  $22 \pm 2$  kt と推定された。

### (3) DS86

1970 年代後半から T65D にも問題があることが分かってきて、特にスーパーコンピュータでの計算結果と測定値との間に矛盾があることが判明した。1981 年に米国エネルギー省 (DOE) は作業グループを組織し、原子爆弾出力、ソースターム、空中輸送、家屋遮蔽、臓器線量などの要因すべてを再評価することになった。また、日本では文部省の援助の下、いくつかの研究グループが発足し、原子爆弾線量再評価が日米の共同研究として開始された。この再評価の作業の流れは以下のようなものであった。

- 日本側は、主に花崗岩、コンクリートなどの被曝資料を収集し、中性子の誘導放射能 (<sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu) を測定し [51]、また  $\gamma$  線に対しては屋根瓦やレンガ、タイルを収集し TLD 法で発光量を測定した [52]。これらの測定から中性子と  $\gamma$  の線量を評価した。
- しかし、中性子誘導放射能から求めた中性子フラックスは熱中性子\*の評価である。一方、被曝者の中性子被曝は主に速中性子によるので、上記の測定により熱中性子を見積もっただけでは、被曝線量の直接的評価にはならない。
- 米国側は、主にスーパーコンピュータを用いた計算を行い [39]、まず原爆放射線のスペクトル (ソースターム) を求めた。この計算結果を基に中性子と  $\gamma$  線の輸送計算を行い、家屋での透過線量、被曝者の計算モデルを利用した臓器別被曝線量などを求めた。
- この DS86 の輸送計算で求めた中性子のエネルギー分布を仮定することにより、測定値である中性子の誘導放射能と計算値を比較する事が可能となった。

これらの研究成果を持ち寄って、原爆線量再評価の日米共同ワークショップが 1983 年から 1986 年までに 4 回開かれた。最終報告として第 4 回ワークショップにおいて RERF で用いる線量推定方式として DS86 [39] が承認された<sup>†</sup>。この DS86 では、広島での中性子線量が 1/5 から 1/9 に減少し、ほぼ無視できるほど小さなものとなった。

### (4) DS02

DS86 発表後に、広島において遠方 (1.5 km 以遠) での中性子による誘導放射能 <sup>60</sup>Co の測定値と計算値とが合わないという中性子不一致問題 (neutron discrepancy problem) が提起された。この問題はとても根が深いもので、解決に向けて日米および独の WG で色々な研究活動が開始された。

<sup>§</sup>遮蔽物の有無により線量の値は大幅に変わる。これはコンピュータ・シミュレーションにより輸送計算を行う際も大変重要な因子である。

\*原爆中での核分裂から生じた中性子は約 2 MeV の速中性子であり、この速中性子は空気中や物質中での散乱によりエネルギーを失って熱中性子となる。

<sup>†</sup>この DS86 においては、未解決の問題がありながらも、残留放射線の被曝による線量評価を一応行っている。

- 日本側は当初、この不一致はデータ数が少ないため、積極的に資料を集めデータを増やせば解決すると思った。広島グループは当初、爆心地から 130 m の元安橋橋柱での  $^{152}\text{Eu}$  の深度分布を測定した。
- その後、文部省からの援助を受け、静間らは被爆建造物のサンプルを採取し、サンプルに含まれる花崗岩中の  $^{152}\text{Eu}$  や被爆鉄材中の  $^{60}\text{Co}$  の測定を行った。そして、広島では DS86 の計算値に比べ測定値が近距離で小さく、遠距離では大きくなり、DS86 の計算値と測定値の間で顕著な系統的違いが認められた [51]。
- 米国側は当時、世界最速の 10 Tflops クラスのスーパーコンピュータを用いてソースタームの再計算を行った。より新しい評価済み核データ\*を使い、中性子と  $\gamma$  線のエネルギー分布のビン数を増やし放出角も細かくして、より高精度の計算結果を得た [40]。
- また、米国側は、広島の被爆建造物コンクリート中に含まれる  $^{36}\text{Cl}$  を加速器質量分析法 (AMS) を用いて測定し、日本側による  $^{152}\text{Eu}$  や  $^{60}\text{Co}$  の測定結果と同じ傾向を報告した [53, 54]。
- さらに、米独のグループは、熱中性子だけでなく速中性子を直接見積もれる  $^{63}\text{Cu}(n, p)^{63}\text{Ni}$  反応を見るため、日本で収集された銅の試料を AMS 法で測定した [55]。
- これらの一連の研究を通じて、中性子の誘導放射能に関する測定値と計算値の不一致の問題を解決すべく、計算の前提となった爆発高度や爆発過程を再検討してみたものの、日本側のグループだけでは解決に至らなかった。

これらの成果を受けて、日米 WG は 2001 年に三度の会議を開き、次のような検討課題について合意を得た。

- 1) 検出限界やバックグラウンド効果のため、遠距離での誘導放射能測定データを基に計算との不一致について細かい議論を行うのは困難である。今後の方向性としては、爆心地から 1200 m 以内のデータに重点を置いて再検討する。
- 2) 静間らが測定している花崗岩などの広島サンプルなどを用いて、小村による  $^{152}\text{Eu}$  の低レベル  $\gamma$  線測定、長島らによる  $^{36}\text{Cl}$  の AMS 測定を行い、相互比較を実施する。

	広島			長崎		
	DS02	DS86	DS02/DS86	DS02	DS86	DS02/DS86
全中性子 (mol/kt)	$1.768 \times 10^{-1}$	$1.773 \times 10^{-1}$	0.9972	$2.64 \times 10^{-1}$	$2.73 \times 10^{-1}$	0.9660
中性子エネルギー (MeV)	0.3106	0.2976	1.0437	0.0126	0.0150	0.8401
全 $\gamma$ 線 (mol/kt)	$6.665 \times 10^{-3}$	$5.043 \times 10^{-3}$	1.3261	$9.022 \times 10^{-2}$	$6.296 \times 10^{-2}$	1.43
$\gamma$ 線エネルギー (MeV)	1.3979	1.392	1.00	1.2667	1.335	0.949
爆発威力	16.1 kt			21.4 kt		

表 11: ソースターム (線源項) のパラメータ。中性子と  $\gamma$  線のエネルギーはいずれもスペクトルから平均値を求めた値。

その後、各 WG で研究が進められ、2003 年 1 月までの間に 8 回、日米合同の WG 会議を重ねて、以下のような議論と結論が徐々に得られた。

- 米国側は、広島原爆について爆発高度を 20 m 引き上げ、爆発出力は 15 kt に据え置く、という計算の想定を若干修正した形で新たな線量評価方式 DS02 をまとめたいと提案した。

\*評価済み核データについては付録 B.2 を参照せよ。

- 日本側は、誘導放射能に関する計算と測定の不一致問題を解消するためには、原爆放出スペクトルを含むソースタームを見直す必要がある、として計算の大幅な修正を主張した。
- その後、LANL の原爆放射線スペクトルは変更しないが、DS86 より詳細な計算を行った結果、測定値との比較は直線距離にして 1 km 以内はほぼ一致するに至った。
- 三者の  $^{152}\text{Eu}$  や  $^{60}\text{Co}$  の測定データは相互によく一致し、DS02 による計算結果とも 1.2 km の距離までは一致していた。
- 細かい遮蔽計算など、若干の課題は残っているものの、日米(独)合同 WG として新線量評価方式 DS02 に合意し、上級諮問委員会へ報告する運びとなった。
- この年の暮れ米国側 WG から、広島原爆の出力を 16 kt に修正するとの報告がされた。これは、建造物の遮蔽効果を細かくして誘導放射能を計算し直して測定値と再比較した結果、16 kt とした方がよいという理由であった。
- さらに、2004 年 6 月に米国側 WG 代表の Young 氏が来広し、長崎原爆の遅発  $\gamma$  線について米国側 WG で再計算を行ったが、結果を変更する必要はないとのコンセンサスが得られたと報告された。

以上の経過を経て、2003 年 3 月に東京で開催された日米合同上級委員会 (JSRG) \* に答申され、最終的に DS86 に代わる新しい原爆線量評価体系として DS02 が策定<sup>†</sup>された [40]。DS02 と DS86 の主な違いを広島と長崎それぞれに比較したものが表 11 と表 12 に掲載してある。表 11 には米国側の研究者が計算したソースタームの物理量が、また表 12 では爆発に関するパラメータなども含めた比較がしてある。

	DS86	DS02
<広島>		
爆発威力	15 kt	16 kt
爆発高度	580 m	600 m
爆心の位置		15 m 西へ移動
放射線量		
$\gamma$ 線量		2 km 以内で約 7% 増加
中性子線量		1 km で 10% 増加, 1 km より遠距離で減少, 1.8 km で DS86 と一致
<長崎>		
爆発威力	21 kt	変化なし
爆発高度	503 m	変化なし
爆心の位置		5 m 西へ移動
放射線量		
$\gamma$ 線量		約 10% 増加 (1~2 km)
中性子線量		10~30% 減少 (1~2 km)

表 12: DS86 と DS02 の主な相違点。

さらに、DS02 の被曝線量評価では、各被爆者の臓器の線量評価まで詳細に行われているが、その詳細は DS02 の報告書に譲ることとする。ここでは、広島と長崎での地表面から 1 m の高さでの  $\gamma$  線量と中性子線量の代表的な距離での値を表 13 に掲載することにとどめる。

\*この JSRG のメンバーは、米国側 4 名 ( Warren K. Sinclair, Harold L. Beck, Richard E. Faw, Nolan E. Hertel ) と日本側 4 名 ( 森 亘、濱田達二、丹羽太貫、葉佐井博己 ) の計 8 名だった。

<sup>†</sup>DS86 からの大きな変更点の一つとして、DS86 で行われた残留放射線の被曝による線量評価の章は削除された。

線量	距離 (km)	広島 (mGy)	長崎 (mGy)
γ 線	0.5	35700	83000
	1.0	4220	8620
	1.5	549	983
	2.0	81	138
中性子線	0.5	6480	2970
	1.0	260	125
	1.5	9	5
	2.0	0.4	0.2

表 13: DS02 で評価された線量 (地表面から 1 m の高さ)

## B 放射線の輸送計算について

線量評価を行う上で基本となる放射線の汎用輸送計算コードについて簡単に紹介する。我々の身の周りには、 $\alpha$  線、 $\beta$  線、 $\gamma$  線、中性子線等をはじめ、非常に高エネルギーの粒子群に至るまで多種多様の放射線が存在する。放射線の輸送とは、考えている体系とその周辺での放射線を構成する粒子 (群) の運動、即ち体系内での多数の粒子の散乱と吸収、体系外への漏れ等をまとめていう。放射線は物質中での輸送過程を通じて、その大部分が中性子となるのが通常であり、中性子の輸送計算を基本とした主に 5 種類のモンテカルロ計算コードを中心に解説する。また、高精度の輸送計算に必要とされる評価済み核データ (Evaluated Nuclear Data) が世界各国で開発され公開されているが、これについても言及し、最後にこれらの輸送計算コードと核データの応用例についてもごく簡単に紹介する。

### B.1 輸送計算とモンテカルロコード

我々の周囲には自然界に元々ある放射線以外にも、放射線施設 (加速器施設、病院、原子炉等) が数多くある。一般に、これらの放射線は人体に有害な存在となり得るため、放射線を計測し管理する技術が重要となる。このような施設を設計する段階において、そこからどの程度の放射線が放出されるかを定量的に予測し、人体や環境への影響が出ないようにする必要がある。また、航空機の乗務員や宇宙飛行士などは、日常の業務の中で宇宙線により被曝することになるが、これらの被曝線量の正確な測定は一般に難しい。放射線の輸送計算コードの主たる役割は、そのような装置、施設、環境下で放出される放射線の性質や線量をコンピュータ上で可能な限り正確に評価し、適切な安全管理とリスクの抑制を行うことである。

放射線の輸送計算において特に重要になるのが中性子である。中性子は原子核反応の過程で核内に入るときも、核外へ出るときにもクーロン障壁を感じずに容易に出入り出来る。この性質のため終状態に中性子を放出する核反応のチャンネルの数は非常に多く\*、輸送過程で起こる核反応を通じて中性子は多量に放出され、さらに次の核反応を引き起こす連鎖過程を繰り返す。輸送過程の大部分は中性子輸送が占めること

\* 「アイソトープ便覧」[71]を見たことがない読者は、一度は眺めてみることをお勧めする。終状態に中性子を放出する核反応のチャンネルがどれ位あるか数えてみるとよいであろう。

コード名	主な開発機関	主たる特徴	上限エネルギー
MCNPX[57]	LANL	遮蔽設計・線量評価の実績多数	5GeV
FLUKA[60]	CERN, INFN	加速器遮蔽設計の実績有	20TeV
MARS[61]	FNAL	短計算時間、遮蔽設計実績有	100TeV
PHITS[62]	JAEA, RIST, GSI	重イオン輸送可、改良モデル	200GeV
GEANT4[64]	CERN, INFN, KEK, SLAC	ツールキット、オブジェクト指向	特になし

表 14: 主な放射線の汎用輸送計算コードの一覧。これらは5大コードと呼ばれていて、知名度が高くユーザ数も多いものである。それぞれのコードの開発・改良に伴い、輸送の上限エネルギーは高くなる傾向にある。

になり、体系内での中性子の増減のバランスを表す中性子輸送方程式 (neutron-transport equation) を適切な条件下で解くことが輸送計算コードの基本となる。この輸送方程式の数値解法は、微分積分方程式を直に解く型 (決定論型) と乱数を使い確率論的に解く型 (モンテカルロ型) の二種類に大別できる。

代表的な輸送計算コードを表 14 にまとめてあるが、どれも遮蔽設計や線量評価などで実績があり、現在も開発が進められている。これらはいずれもモンテカルロ型で、中性子のみならず他のハドロンや光子・電子・ミュオンなどの輸送も同時に行う汎用の輸送計算コードである\*。このうち MARS 以外の4つのコードは、制限付きながらもオープンソースで、5大コードの共通した性質は次のようなものである。

1. 低エネルギー領域 (20MeV 以下) での中性子の輸送には、評価済み核データ (次節参照) を併用することで高精度の計算ができる。核データとは、種々の核反応の起こる確率 (断面積) を実験値に基づいて表にしたもので、理論計算では合わなくなる領域を精度良く再現できる。
2. 中高エネルギー領域 (20MeV から数 GeV) においては、前平衡過程や蒸発過程などの原子核反応過程を考慮した核内カスケード (Intra-Nuclear Cascade; INC) モデルに基づく計算を行う。このようなモデル計算の場合、任意の物理量が (原理的に) 計算可能である
3. また、この中高エネルギー領域では核データを使った計算も可能であり、一般に核反応モデルの計算よりも精度が良くなる。しかし、核データを使った計算では各々の事象でエネルギー・運動量は保存しないため、物理量によっては正しい計算が出来なくなる。
4. 高エネルギー領域 (数 GeV 以上) では、二種類のモデルを使っている。ハード散乱の領域はパートンモデル、ソフト散乱の領域は Dual-Parton Model 或いは Quark-Gluon String Model に基づいてハドロンの輸送計算を行っている。
5. 重イオン (原子核) の輸送においては量子分子動力学 (Quantum Molecular Dynamics; QMD) により計算が可能であり、目下 (2010年4月時点) PHITS が最も優れている。
6. 5大コードのうち GEANT4 だけは C++ 言語で書かれているが、他の4つは FORTRAN 77/90/95 をベースにして書かれたコードである。いずれも無償の GNU コンパイラ (g++, gcc, g77, g95 等) でコンパイル可能であり、必要なソフトウェアのコストはほぼ無料である†。

以下、これら5大コードの特徴を順次、簡潔に述べることにする。

MCNPX は重イオン以外のほとんどすべての粒子に対する輸送を行う汎用輸送計算コードである [57]。この前身である MCNP は米国で 1940 年代より開発されてきた中性子輸送計算のモンテカルロコードの先駆

\*これら5つ、すなわち、MCNPX, FLUKA, MARS, PHITS, GEANT4 のことを5大コード (Five Major Codes) と呼ぶのが 2006 年頃から慣例になってきている。

†但し、このような無料コンパイラは動作が保証されていないので、各自の責任においてチェックする必要がある。

であるが、20MeV 以下の中性子しか扱えないものであった [58]。これをより高いエネルギーまで適応できる形に拡張したものが MCNPX であり、150MeV 以上の輸送には INC モデルに基づいたモデルを採用している。150MeV 以下に対しては評価済み核データファイル LA150 [59] を使用した計算が可能で、このエネルギー領域に対する計算精度が良いが、扱えるエネルギーの上限が数 GeV であるため、高エネルギー加速器の遮蔽計算には不向きである。

FLUKA は下限は熱中性子のエネルギーから上限は 20TeV のハドロン、光子、電子、ミューオン、ニュートリノ、さらに重イオンに至るまで多種類の粒子の輸送を行える汎用輸送計算コードである [60]。1960 年代から欧州原子核研究所 (CERN) を中心に開発が続けられてきた。FLUKA での中性子輸送は、エネルギー領域に応じて三つのモデルに分かれている; 20MeV 以下では多群断面データを用いる MORSE コードを使い、20MeV から 3GeV までは INC モデル、さらに 3GeV 以上では Dual-Parton Model を採用している。CERN で 2008 年より稼働している大型陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) は、FLUKA により主な遮蔽設計がなされている。

MARS は 1970 年代に旧ソ連で開発され、現在は米国の国立フェルミ加速器研究所 (FNAL) で改良が続けられている汎用輸送計算コードである [61]。エネルギーの上限は 100TeV とされ、重イオンを含むほとんど全ての粒子を幅広いエネルギー領域にわたり輸送できる。MARS は基本的に 20MeV 以上の粒子の輸送を行い、INC モデルと Quark-Gluon String Model に立脚したモデルを採用している。一方、20MeV 以下の中性子輸送に対しては、上述の MCNP を使用しており、独自のコードはもっていない。また MARS の長所として、計算時間が短く、大きな体系の計算に有利な点が挙げられる。これは、統計的に不十分な事象であっても重要な二次粒子であれば優先的にサンプリングする方法を MARS が採用しているからである。短所としては、MARS はソース・コードを公開していないため、異なる OS 間での移植は困難である。

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) は日本原子力研究所 (現 JAEA) で開発された NMTC/JAM を基に、東北大学と高度情報科学技術研究機構 (RIST) 及びドイツ重イオン科学研究所 (GSI) で開発・改良がなされてきた [62]。その名前からわかるように PHITS は、重イオンを含むほとんどすべての粒子に対する輸送を行うことができ、極めて洗練された重イオン核反応モデルが組み込まれている。また、PHITS は ANGEL というグラフィックソフトと一体になっているため計算結果を図表にする操作が 5 大コードの中で最も簡単で、輸送計算の初心者に対して敷居の低いコード体系である。目下、輸送できる粒子のエネルギーの上限は 200GeV であるが、さらなる高エネルギーへの拡張が進められている。なお、NMTC/JAM の高エネルギー部分の基になったハドロン輸送モデル JAM は、相対論的な量子分子動力学の枠組み RQMD/S と組み合わせることにより、核子あたり 2~158GeV の重イオン衝突での集団フローの実験値を系統的に説明することに成功している [63]。

GEANT4 は既述のコードとは異なり、種々のフリーウェアの輸送計算、核反応モデル計算、素粒子事象生成のコードを寄せ集めて、諸々の物理モデルやアルゴリズムを繋げたツールキットである [64]。既述のコードが FORTRAN で書かれているのに対し、GEANT4 は集めたコードを C++ 言語に変換してオブジェクト指向の形にまとめた体系となっている。その開発は 1990 年代に CERN と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開始されたが、現在は世界各国の研究機関で同時に改良がなされておりユーザ数も多い。GEANT4 の長所として、CAD で作成した幾何形状をそのまま計算体系として取り込むことができ、複雑な体系中における粒子群の振る舞いを容易に解析できる点が挙げられる。短所としては、GEANT4 は確定した物理モデルをもたず、必要に応じて各ユーザがウェブ上の公開情報をもとに修正・追加のパッチを当てなければならない。このことは様々な状況に対応できる柔軟さをもつ長所であるが、同時に、核反応や素粒子のモデルに詳しくないユーザにはやや敷居が高いと感じられるであろう。

## B.2 評価済み核データとの連携

これらのコードにより輸送計算を行う際、核反応の理論計算だけでは定量的に満足いく結果は得られず、実験値を基に核反応の断面積を表した核データが必要となる。しかし、実験値には誤差が含まれ、また、全てのエネルギーや反応過程についてデータが存在するわけではない。核データファイルに格納されている断面積は、標的となるそれぞれの核種に対して、実験データとそれに基づく経験式、原子核反応モデルを用いて総合的に評価され、その時点で最も良いと思われる値が使われる。この核データを求める研究を核データ評価といい、得られたデータが評価済み核データ (*Evaluated Nuclear Data*) である。

特に、中性子の輸送計算においてはこの評価済み核データが重要であり、世界各国でその開発が進められている。米国の ENDF/B、欧州の JEF、日本の JENDL が世界の 3 大評価済み核データとして輸送計算において広く利用されており、これら評価済み核データの大部分は IAEA の核データセンターのサイト [65] から入手できる。一般に、よく使われている核データファイルとして上述の LA150 [59] があるが、これは米国のロスアラモス国立研究所で開発された 150MeV までの中性子の輸送に用いるものである。また、日本では JAEA を中心としたシグマ委員会高エネルギー核データワーキンググループが、3GeV までの核データファイル JENDL/HE を作成し、一般に公開している。

注意点として、これらの核データを使った場合、何でも計算できる訳ではなく、例えば、個々の事象でエネルギーや運動量の保存則は満たされなくなり、物理量によっては全く計算ができなくなるのが弱点である。

## B.3 線量評価と輸送計算

A.3 節で紹介した DS86 [39] および DS02 [40] で共通している手法は、広島と長崎での原爆投下時における外部被曝線量をコンピュータ・シミュレーションにより科学的に評価している点である。ここでは、前節で言及した MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport code) [58] という米ロス・アラモス研究所が開発・管理・配布している輸送計算コードを使い、原爆から放出される放射線 (主に中性子・光子・(陽)電子) を輸送して線量評価を行っている。その流れは、大体以下のようなものである。

1. 放射線中の各粒子 (主に中性子と光子と (陽)電子) が (非)弾性散乱と核反応を繰り返しながら、輸送されていく過程を一つ一つのヒストリーを詳細に追い掛けて、線量当量 (或はエネルギー付与) や発熱量を計算する。そして、最後に放射線中の全粒子の計算結果を集計する。
2. 放射線が通過していく物質体系中で、上記の核反応の終状態に生成された放射性核種がどの程度の残留放射線量 (residual dose) を生じるかを計算する。しかし、核反応モデルと評価済み核データとして、どれを使ったかによって結果が変わるといった不定性が一般に残る。
3. さらに、爆発のように扱っている物質体系の幾何形状が変化してしまう過程を扱うことは全く出来ない。あまりにも問題が複雑になり過ぎるからで、幾何形状は完全に一定であると仮定する。
4. また、輸送過程で生じた熱の伝熱計算も出来ないため、爆風や熱風がどのように伝播していった、どのような被害を及ぼすかも輸送計算コードだけでは評価できない。これには、全く別のシミュレーション・コードを使って、異なるシミュレーションを実行する必要がある。
5. これらの特性の結果、核爆発のシミュレーションとして実際に計算出来るのは、A.3 節で説明したソースターム (source term; 線源項) と呼ばれる原爆から放出された中性子や光子の総数・方向・スペク

トルを初期条件に与えて、それらを 1. と 2. で説明したやり方で輸送し、線量や発熱などを評価するという事になる。

線量評価で使われるモンテカルロ計算コードは、B.1 で紹介したどれをとっても、必ず適用限界\*がある。しかし、外部被曝の線量評価については信頼できるものといえる。

#### B.4 様々な応用と注意点

今まで述べてきた汎用輸送計算コードの主たる応用は、放射線施設（加速器施設、病院、原子炉等）における遮蔽設計と安全管理、或は、前節で説明した広島・長崎の原子爆弾線量評価 [39, 40] 等である。さらに積極的な応用としては、例えば、BNCT (Boron Neutron Capture Therapy; ホウ素中性子捕捉療法) があるが、これは原子炉から取り出した熱中性子 ( $\sim 25$  meV) を癌組織に照射し、予め点滴により癌組織に取り込ませたホウ素 ( $^{10}\text{B}$ ) 化合物との核反応によって生成する  $\alpha$  線とリチウム核 ( $^7\text{Li}$ ) によって、選択的にガン細胞を殺す放射線治療である。また産業界への応用は、半導体製造（材料への中性子転換ドーピング、表面加工、ソフトエラー評価等）、イオンビームによるエッチング、植物・生物照射、食品産業など多岐にわたる。現在でもその応用の裾野は広がっている。

また、心得ておくべき注意点として、モンテカルロ法による輸送計算での適用限界についてごく簡単に触れておく。例えば、超臨界の核分裂連鎖反応では中性子数が指数関数的に増大するため、すぐにメモリが一杯になってしまい計算が続行できなくなる。一般に、使用している輸送計算コードが調べたい現象をサポートしていなければ正しい計算結果は得られず、極端な場合、何も出力が得られない状況も起こり得る。ユーザは輸送計算コードのマニュアルをよく読んで理解し、そのコードの適用限界を正しく把握しておかなければならない。

放射線輸送の汎用計算の 5 大コード以外にも、非常に多くの（必ずしも汎用ではない）輸送計算コードが存在する。例えば、EGS5 [66] は電子と光子の輸送計算を行うコードであり、放射線治療において優れた実績を上げている。さらに、これらの輸送計算コードの新しい分野への応用が急激に拡大している。今後の傾向として、すべてのコードがより高エネルギーの物理的過程を取り入れた体系へ拡張されつつある。今後も様々なレベルのユーザの要請・目的に応じて、放射線の輸送計算コードはさらなる進化を遂げると期待される。

\*例えば、全ての核反応過程を精度良く取り入れている訳ではない。あるいは、あまり長距離の輸送計算を行うと、計算値と測定値とが大きくずれてしまう現象が知られていて、輸送計算における深層透過問題として知られている。

## 参考文献

- [1] 飯島 宗一, 豊田 利幸, 牧 二郎 編著, 「核廃絶は可能か」(岩波新書 267), 岩波書店, (1984); 巻末に、ラッセル-アインシュタイン宣言、科学者京都会議声明、湯川・朝永宣言 が収録されている。また、日本パグウォッシュ会議のサイトにも掲載されている。
- [2] 湯川 秀樹, 朝永 振一郎, 坂田 昌一 編著, 「核時代を超える—平和の創造を目指して—」(岩波新書 687), 岩波書店, (1968).
- [3] Zeeya Merali, “*Did China’s Nuclear Tests Kill Thousands and Doom Future Generations?—Radioactive clouds hung over villagers as China detonated nuclear bombs in the air for four decades*”, Scientific American Magazine, July 2009.
- [4] ゼーヤ・マラリ, 「過去からの衝撃—中国が過去に行った核実験の影響で多数の市民が死亡した可能性がある」, 日経サイエンス 2009 年 9 月号.
- [5] Channel 4 (英国) 制作ドキュメンタリー, “*Death on the Silk Road*”, Filmmaker Library, (2001).
- [6] B. I. Gusev, N. N. Kurakina, A. Kh. Sekerbaev, “*Cancer Mortality in Populations in Kazakhstan Subjected to Irradiation from Nuclear Weapons Testing in China*”, Technical Report DTRA-TR-07-44, ADA485952. Fort Belvoir, VA: Defense Threat Reduction Agency, (2007).
- [7] 高田 純, 「中国の核実験」, 医療科学社, (2008);  
J. Takada, “Chinese Nuclear Tests (English and Uighur Edition)”, Iryokagakusha, (2009).
- [8] 高田 純, 「核爆発災害 そのとき何が起こるのか」(中公新書 1895), 中央公論新社, (2007).
- [9] 高田 純, 「核の砂漠とシルクロード観光のリスク」, 医療科学社, (2009).
- [10] 「チベットの核汚染」HP.
- [11] 野田 雅也, 「チベット人々の祈り 第4回 放射能知らされぬ住民」, 信濃毎日新聞 2008 年 12 月 5 日.
- [12] 藤本 将太, 「藤本将太の呐喊日記 原爆ボーイの呐喊」, (2006, 2007).
- [13] 城戸 収, 「ロプノルの影 カザフ国境の町」, 中国新聞 2000 年 8 月 28,29,30,31 日, 9 月 2,7 日.
- [14] 日本原水協・カザフスタン核実験被害調査団ジャルケント班 (斉藤 重一 (団長), 大場 悦子 (副団長), 三輪 博志, 吉村 行雄, 中島 弘樹, 橋本 和正, 森住 卓, 高草木 博, 佐藤 ゆき), 「中国核実験被害調査報告 ジャルケントからの告発」, (1998); 「カザフ 草原に放置された核被害」原水協通信 1998 年 7 月 6 日.
- [15] 水谷 尚子, 「中国を追われたウイグル人 亡命者が語る政治弾圧」(文春新書 599), 文藝春秋, (2007).
- [16] Hu Dongshen, *et al.*, “*The dynamic analysis of natural environment change of nuclear test field in Lop Nur region of China*”, 中国工程科学 英文版 (Engineering Sciences), **6**, 37-44, (2008).
- [17] 邱 天易, 「「ロプノール・プロジェクト」科学の面をつけた杜撰さ」, 北京週報日本語版 2009 年 12 月 17 日; 鄒文良, 張聚敬, 「新疆核試験場周囲環境輻射対居民健康影響的調査研究」, 環境科学研究 第 2 卷第 1 期, (1989).
- [18] David Lague, “*China Now Pays Troops Involved in Nuclear Tests*”, The New York Times, 2008 年 1 月 28 日.
- [19] V. N. Mikhailov, “*Nuclear weapons tests and peaceful nuclear explosions in the USSR 1949–1990*”, Ministry of the Russian Federation on Atomic Energy and Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, (1996); Web 上では R. S. Norris, T. B. Cochran による要約が入手可能.

- [20] S.B. Balmukhanov, J. N. Abdrakhmanov, T. S. Balmukhanov, B. I. Gusev, N. N. Kurakina, T. G. Raisov, "Medical Effects and Dosimetric Data from Nuclear Tests at the Semipalatinsk Test Site", Technical Report DTRA-TR-06-23, ADA470000. Fort Belvoir, VA: Defense Threat Reduction Agency, (2006).
- [21] J. Takada, M. Hoshi, T. Nagatomo, M. Yamato, S. Endo, T. Takatsuji, I. Yoshikawa, B. I. Gusev, A. K. Sakerbaev, N. J. Tchajjunusova, "External Doses of Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Site", J. Radiat. Res. **40**, 337, (1999).
- [22] B. I. Gusev, R.I. Rosenson, Zh. N. Abylkassimova, "The Semipalatinsk nuclear test site: a first analysis of solid cancer incidence (selected sites) due to test-related radiation", Radiat. Environ. Biophys. **37**, 209, (1998).
- [23] B. I. Gusev, Zh.N. Abylkassimova, K.N. Apsalikov, "The Semipalatinsk nuclear test site: a first assessment of the radiological situation and the test-related radiation doses in the surrounding territories", Radiat. Environ. Biophys. **36**, 201,(1997).
- [24] K. Gordeev, I. Vasilenko, A. Lebedev, A. Bouville, N. Luckyanov, S. L. Simon, Y. Stepanov, S. Shinkarev, L. Anspaugh, "Fallout from nuclear tests: dosimetry in Kazakhstan", Radiat. Environ. Biophys. **41**, 61,(2002).
- [25] 星 正治, 「旧ソ連や中国の核実験による放射線の被曝と健康影響調査」, 広島市立大学広島平和研究所, HIROSHIMA RESEARCH NEWS, 第3巻 第3号, (2001); 英語版の線量等高線図が鮮明である。
- [26] 星 正治, 平成 11 ~ 12 年度科学研究費補助金研究成果報告書「セミパラチンスク核実験場近郊住民の被曝線量推定方法の確立と健康影響研究」, 平成 13 ~ 14 年度科学研究費補助金研究成果報告書「セミパラチンスク核実験場近郊の放射線汚染と被曝線量推定および住民の健康影響研究」.
- [27] 高田 純, 「ソ連の核兵器開発に学ぶ放射線防護」, 医療科学社, (2010).
- [28] 中国新聞「ヒバクシャ」取材班, 「世界のヒバクシャ」, 講談社,(1991).
- [29] 森住 卓, 「セミパラチンスク 草原の民・核汚染の 50 年」, 高文研,(1999); 森住 卓 HP.
- [30] 「ヒロシマ・セミパラチンスク・プロジェクト」HP.
- [31] NHK/ 4 Square Productions(カナダ) 国際共同制作ドキュメンタリー, 「セミパラチンスク 18 年後の現実 ~カザフスタン核実験場跡~」, NHK 衛星第一放送, 2009 年 6 月 22 日放送.
- [32] NHK, 「核は大地に刻まれていた~“死の灰” 消えぬ脅威~」, NHK 総合テレビ, 2009 年 8 月 6 日放送.
- [33] N. Chaizhunusova, T. C. Yang, C. Land, N. Luckyanov, H. Wu, K. N. Apsalikov, M. Madieva, "Biodosimetry Study in Dolon and Chekoman Villages in the Vicinity of Semipalatinsk Nuclear Test Site", J. Radiat. Res. **47**, A165, (2006).
- [34] M. K. Teleuov, "Fallout exposure and health condition of the population in the Semipalatinsk region of Kazakhstan Purchase the full-text article", International Congress Series **1258**, 123, (2003).
- [35] K. Shizuma, et al., "<sup>137</sup>Cs Concentration in Soil Samples from an Early Survey of Hiroshima Atomic Bomb and Cumulative Dose Estimation from the Fallout", Health Physics **71**(3), 340-346, (1996).
- [36] 沢田 昭二, 「被爆実態から学んで原爆の残留放射線を解明する」, 前衛 2009 年 3 月号 177-192; 「核兵器はいらない」, 新日本出版社, (2005).

- [37] 放射線影響研究所 統計部, 「調査結果—LSS における放射線に関連した死亡率予測」, RERF Update 第 14 巻 1 号, 2003 年春号.
- [38] D. L. Preston, Y. Shimizu, D. A. Pierce, A. Suyama, K. Mabuchi, “*Studies of Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 13: Solid Cancer and Noncancer Disease Mortality: 1950–1997*”, Radiat. Res. **160**, 381,(2003).
- [39] William C. Roesch, editor, “*US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki – Dosimetry System 1986 (DS86) – Final Report*”, Vols. 1 & 2, published by Radiation Effects Research Foundation, (1986).
- [40] Robert W. Young and George D. Kerr, editors, “*Reassessment of the Atomic Bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki – Dosimetry System 2002 (DS02) – Report of the Joint US-Japan Working Group*”, Vols. 1 & 2, published by Radiation Effects Research Foundation, (2005).
- [41] W. R. Johnston, Database of nuclear tests in Johnston’s Archive, (2005–2009).
- [42] 高田 純, 「世界の放射線被曝地調査」(ブルーバックス), 講談社, (2002).
- [43] S. Glasstone and P. J. Dolan, ed., “*The Effects of Nuclear Weapons (3rd ed.)*”, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, (1977).
- [44] 葉佐井 博巳, 安斎 育郎, 梅林 宏道, 片岡 勝子, 鎌田 七男, 坪井 直, 最上 敏樹, 吉岡 斉, 「核兵器攻撃被害想定専門部会報告書」, 広島市, (2007).
- [45] 広瀬 隆, 「ジョン・ウェインはなぜ死んだか」(文春文庫), 文藝春秋, (1986).
- [46] “Google Earth” を導入し、Johnston’s Archive の世界の核実験データ version 2.8, (2009) および、人口密度地図: CIESIN, Columbia University, and CIAT, “*Gridded Population of the World, Version 3.0 beta*”, (2004) を表示した。異なるソースの核実験データと、人口密度地図も利用可能。
- [47] J. A. Auxier, “*ICHIBAN: Radiation Dosimetry for the Survivors of the Bombing of Hiroshima and Nagasaki*”, TID-27080, (1977).
- [48] R. H. Ritiche and G. S. Hurst, 「核兵器放射線の透過性: 広島・長崎への応用」, ABCC TR 26-59, (1959).
- [49] 日本学術会議原子爆弾災害調査報告書刊行委員会編, 「原子爆弾災害調査報告書集」, 日本学術振興会, (1953).
- [50] T. Hashizume *et al.*, “*Estimation of the air dose from the atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki*”, Health Phys. **13(2)**, 149-161, (1967) .
- [51] K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, *et al.*, “*Residual  $^{152}\text{Eu}$  and  $^{60}\text{Co}$  activities induced by neutrons from the Hiroshima atomic bomb*”, Health Phys. **65(3)**, 272-282, (1993).
- [52] T. Nagatomo, Y. Ichikawa, H. Ishii, *et al.*, “*Thermoluminescence dosimetry of  $\gamma$  rays from the atomic bomb at Hiroshima using the predose technique*”, Radiat. Res. **113(2)**, 227-234, (1988).
- [53] T. Straume, R. C. Finkel, D. Eddy *et al.*, “*Use of accelerator mass spectrometry in the dosimetry of Hiroshima neutrons*”, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **B52**, 552-556, (1990).
- [54] T. Straume, L. J. Harris, A. A. Marchetti *et al.*, “*Neutrons confirmed in Nagasaki and the Army Pulsed Radiation Facility: Implications for Hiroshima*”, Radiat. Res. **138(2)**, 193-200, (1994).

- [55] T Straume, G. Rugel, A. A. Marchetti *et al.*, “*Measuring fast neutrons in Hiroshima at distances relevant to atomic-bomb survivors*”, Nature **424 (6948)**, 539-542, (2003); Nature **430 (6998)**, 483, (2004).
- [56] 中村 尚司, 「放射線物理と加速器安全の工学 第2版」地人書館, (2001).
- [57] J. S. Hendricks *et al.*, “*MCNPX EXTENSIONS VERSION 2.5.0*”, LANL, LA-UR-05-2675, (2005).
- [58] X-5 Monte Carlo Team, “*MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*”, LANL, LA-UR-03-1987, (2003).
- [59] M. B. Chadwick *et al.*, “*LA150 Documentation of Cross Sections, Heating, and Damage*”, LANL, LA-UR-99-1222, (1999).
- [60] A. Fassò *et al.*, “*The FLUKA code: present applications and future developments*”, CERN, Proc. of CHEP03, La Jolla, Ca, USA, (2003).
- [61] N. V. Mokhov and O. E. Krivosheev, “*MARS Code Status*”, FNAL, FERMILAB-Conf-00/181, (2000).
- [62] H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura, “*Development of general-purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code*”, J. Nucl. Sci. Technol. **39**, 1142-1151, (2002); “PHITS” HP.
- [63] M. Isse, A. Ohnishi, N. Otuka, P. K. Sahu, Y. Nara, “*Mean-field effects on collective flows in high-energy heavy-ion collisions at 2–158A GeV energies*”, Phys. Rev. C **72**, 064908, (2005).
- [64] S. Agostinelli *et al.*, *GEANT4 - A simulation toolkit*, KEK, CERN, Nucl. Instr. Meth. **A506**, 250, (2003).
- [65] Nuclear Data Services, IAEA Nuclear Data Centre, IAEA.
- [66] H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, “*The EGS5 Code System*”, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8, (2005).
- [67] 小木曾 洋一, 田中 公夫, 「低線量放射線の生物への影響について」, 排出放射性物質影響調査 平成 20 年度調査研究活動報告会 (青森県) 資料; ATOMICA — 放射線と染色体異常.
- [68] 肥田 舜太郎, 鎌仲ひとみ, 「内部被曝の脅威」(ちくま新書 541), 筑摩書房, (2005).
- [69] 放射線医学総合研究所, 「虎の巻 低線量放射線と健康影響」, 医療科学社, (2007).
- [70] 放射線影響研究所, ABCC-放影研の歴史, 放射線影響研究所 年表, (2010).
- [71] 日本アイソトープ協会, 「改訂 3 版 アイソトープ便覧」, (1984).