

# 地裁判決が認めた「内部被曝」

大瀧 慈(広島大学(名誉教授))

原爆投下から70年を経た2015年、「黒い雨」体験者84名は、被爆者援護法1条3号にいう「原子爆弾が投下された際またはその後において、身体に原子爆弾の放射能の影響を受けるような事情の下にあった者」に該当すると主張し、広島市・広島県及び国を相手に広島地方裁判所での集団訴訟を起こした。提訴以来、22回の口頭弁論を経て、2020年1月に結審した。裁判では国が定めた援護対象区域の妥当性が最大の争点となった。

この「黒い雨」訴訟に対して、2020年7月29日に広島地方裁判所は、原告84名らの主張を認め、完全勝訴を意味する判決を下した。以下、その裁判に至るまでの経緯を含めて、原告勝訴に繋がった原爆被爆者における内部被曝の健康影響について論ずる。

## 1. 「黒い雨」訴訟の裁判までの背景および経緯

### 1.1 「黒い雨」について

広島市及びその周辺地域においては、原爆投下後、性状が黒色の雨滴を含む「黒い雨」の降雨があった(以下、実際に降った雨滴の色にかかわらず、1945年8月6日の原爆投下後から夕方にかけて降った雨のことを「黒い雨」という。)

#### 1.1.1 宇田による「黒い雨」の調査

文部省は、広島、長崎に投下された原爆被害を調査研究するために、1945年9月14日、学術研究会議に、「原子爆弾災害調査研究特別委員会」を設置し、学術分野ごとに9分科会を設け、翌年3月まで現地調査を実施するなどした。気象技師の宇田道隆は、広島での原爆による気象関係の一般被害状況の調査・報告を行うことについて命じられ、広島管区気象台の気象技師・技手らと共に1945年12月までに広島市内外各所で160人を対象に聞き取り調査が行われ、資料を収集した。その資料の解析結果は「気象関係の広島原子爆弾被害調査報告」としてまとめられ、1953年5月に報告された[1]。広島原爆投下後、長径29km、短径15kmの楕円形の地域において降雨があり、さらにそのうち長径19km、短径11kmの地域において1時間以上の継続的な降雨があった旨報告した。楕円形の降雨域全体を指して「宇田雨域」、そのうち1時間以上の降雨があったとされる降雨域を「宇田強雨域(大雨域)」、宇田強雨域を除いた領域を「宇田小雨域」と名付けた。

#### 1.1.2 広島における健康診断特例区域の指定

広島市及び広島県は、国に対し、宇田強雨域に含まれる全地域を被爆地域とする裏付け資料を得るため、1973年11月20日から同年12月20日までの間、宇田雨域およびその周辺域の地域を対象に、「黒い雨」の降った状況や健康状況等についてアンケート調査(全回答者数は5106名)を行った。その結果、調査対象地域の住民のうち約4割は健康状況不良であることが分かった。降雨状況について、小雨(パラパラ)、中雨(ザーザー)、大雨(どしゃ降り)の3段階で回答が求められていたが、宇田雨域の周辺域においても相当の範囲で降雨があったことも得られている。その後、1974年6月の原爆医療法の改正に伴い、原爆医療法附則3項が設けられ、被爆地域に隣接する政令で定める区域(以下「健康診断特例区域」という。)内に所在した者について、暫定的な特例措

置として、原爆医療法 2 条の被爆者に該当しないものについても原爆医療法の健康診断の規定の適用を認めることとなった。

なお、健康診断の特例が制定された約 1 か月後に 402 号通達が発出され、健康診断特例措置の対象となった者が、健康管理手当の支給の対象となる造血機能障害、肝臓機能障害等の障害を伴う疾病を発症が診断された場合、「原子爆弾被爆者の医療等に関する法律による第 2 条第 3 号に該当する者として、被爆者健康手帳の交付を受けることが可能になった。翌 1976 年、原爆医療法施行令の改正により、宇田雨域のうち大雨地域が新たに健康診断特例区域に指定された。

### 1.1.3 宇田論文の信用性の限界

宇田は、原爆投下直後、原爆の被害を受け混乱の最中であつた広島管区气象台のわずか 6 名の気象技師・技手らによって、徒歩又は自転車により、その調査範囲は、広島を中心部から 30km 以上も遠い山間部まで及んだ。調査期間が 3 ヶ月程度のごく短期間であつたにもかかわらず、山奥まで調査範囲を広げたことにより、調査地点が疎であり、未調査地域も多々あつた。したがって、宇田論文は、宇田技師らによって時間的・物理的制約のある中で行われた調査結果に基づくものであるから、「黒い雨」降雨域の全範囲の確定や大雨域と小雨域を確定的に線引きするには、資料が不十分であることには明らかであつた。このような限界は、調査にあたつた北技手も生前認めていた。

## 1.2 「黒い雨」降雨域に関する経過、残留放射線に関する調査

原爆医療法制定後、被爆地域が拡大し、また、健康診断特例区域が設定されたことで、同法 2 条 3 号の被爆者として認められる者の範囲が拡大していったことを踏まえ、改めて、被爆地域拡大に科学的根拠があるのかを確認する必要があるとされた。そこで、1976 年、広島及び長崎の残留放射線について調査(昭和 51 年度残留放射能調査)が行われ、「広島、長崎の残留放射能調査報告書昭和 51 年度」が取りまとめられた[2]。その結論においては、原爆に起因すると思われる明らかな異常放射能は検出できず、宇田雨域と他地域との<sup>137</sup>Cs の地表面放射能密度にも有意差はなかったとされた。2 年後の 1978 年にも、補足的な調査が行われ「昭和 53 年度広島、長崎の残留放射能調査報告書」が取りまとめられたが、結論として、注目すべき高度汚染地域は検出されなかったとされた。[3]

## 1.3 増田による「黒い雨」の調査

気象研究所に勤務し数値予報の研究に携わってきた増田は、「黒い雨」に関する宇田雨域は資料の不十分さを認識し、改めて資料を 1988 年に収集・解析し、「黒い雨」の宇田雨域に替わる新たな雨域(増田雨域)として公表した[4]。その降雨域の広さは、宇田雨域と比較して約 4 倍もの範囲に及ぶ。増田が基礎としたのは、宇田論文の基礎資料や広島県の調査資料の他、72 人からの聞き取り調査結果、アンケート調査結果 1188 枚、手記集・記録集から 358 点の資料など、2000 を超えるデータである。増田は、雨の降り方について、降雨の継続時間 30 分以内を小雨、30 分以上 1 時間以内を中雨、1 時間以上を大雨とする 3 段階に分け、詳細な分析を試みている。

## 1.4 黒い雨専門家会議報告書

増田雨域の公表を受け、「黒い雨」に関する専門家会会議(1988 年 8 月 25 日に設置され、医学、物理学及び気象学の研究者ら 10 人が参加し、「黒い雨」の実態とそれによる人体への影響等について検討し、黒い雨専門家会議報告書が刊行された[5]。気象シミュレーション法による降下放射線

量の推定により宇田雨域の大雨地域に近似した結果を得たが、推定の際に前提と用いる初期データの不足により高い信頼性が保証された結果にはなっていない。例えば、この気象シミュレーションでは、広島原爆のキノコ雲の雲頂に関する海拔高度の最大値を 8000m として実施していたが、2011 年に広島市立大学の馬場雅志らは、多数のキノコ雲の写真に基づく解析を行い、その結果、キノコ雲の高さは 16000m に修正されるべきことを報告している[6]。キノコ雲の高さを倍増させると、雲下周辺の放射性降下物や放射性エアロゾルによる放射能汚染域は大きく拡大する方向への修正の必要性が明白である。

## 1.5 原爆体験者等健康意識調査報告書

### 1.5.1 調査の目的および方法

広島市は、原爆被害の実態解明を進めるため、2001 年度から有識者による広島市原子爆弾被爆実態調査研究会を立ち上げていたが 2008 年度から広島市原子爆弾被爆実態調査研究会を再組織し、同年 6 月から、原爆体験者等健康意識調査を実施した。その調査結果を基に 2010 年 5 月、「原爆体験者等健康意識調査報告書」としてとりまとめ公表した[7]。調査方法は、郵送自記式質問紙調査による基本調査と、基本調査結果を検証するための個別面談調査である。調査対象は、1945 年 6 月時点において、①広島市内又は県域の一部に、原爆投下前から居住し続けている者、及び②広島市内又は県域の一部に、1950 年 1 月 1 日から 1952 年 12 月 31 日までに転入し、居住し続けていると思われる者で、かつ、原爆投下前に生まれた被爆者以外の者の合計 3 万 6614 人に対して実施した郵送によるアンケート調査により収集されたもので、そのうちの約 74 % にあたる 2 万 7147 人から得られた自書式回答である。(図1)。

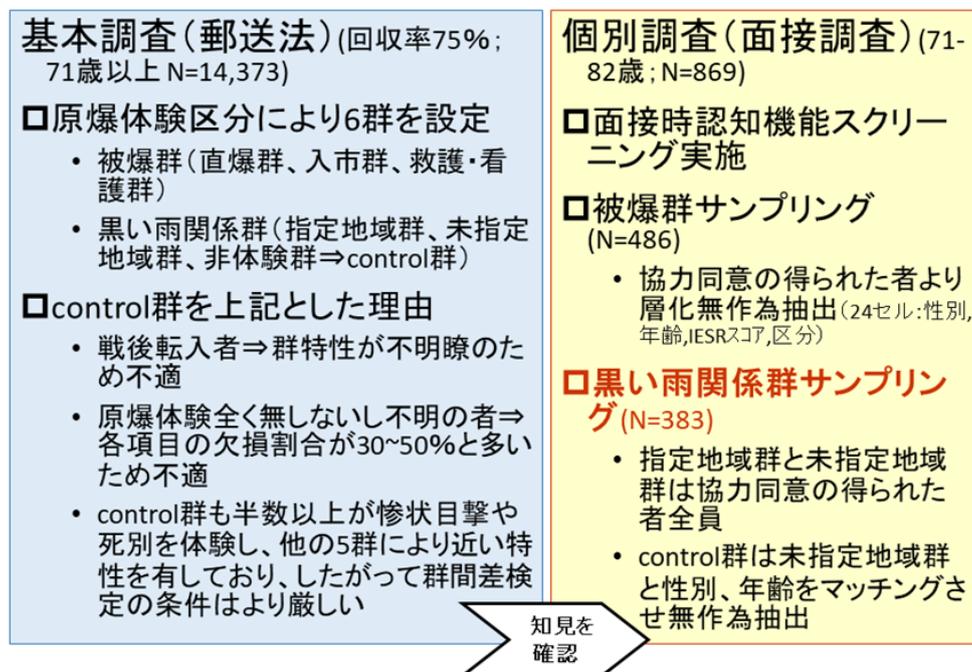


図1. 広島市原子爆弾被爆実態調査研究 原爆体験者等健康調査概要

### 1.5.2 「黒い雨」の時空間分布の解析

上記のアンケート調査で収集された項目の中に「黒い雨」の体験の有無、体験場所、雨の降り始めと降り止んだ時刻(時単位)、雨の強さなどが含まれている。表 1 に関連項目についての質問と回答様式を示す。大瀧は、「黒い雨」を体験したと回答した調査時の年齢が 71 歳以上の者を対象として限定し、「黒い雨」の時空間分布の解析を行った[8]。雨の降り始めと降り終わりの双方の時刻が回答されていた対象者は 1084 人、降り始めの時刻のみが回答されていた対象者は 481 人であった。

表 1 原爆体験者等健康調査におけるアンケート質問と回答様式(「黒い雨」関係を抜粋)

問15-1.	問15-2.	問15-3.
黒い雨体験有無	浴びたり触れたりしたか	降った時にどこにいたか
有り=1 なし=2 わからない~3 欠損は「9」	沢山浴びた=1 少し浴びた=2 降っているのを見た=3 わからない=4 欠損は「9」	欠損は「9」

問15-4.	問15-5-1.	問15-5-2.	問15-6.	問15-7.
黒い雨の強さ	何時頃から	何時頃まで	雨の色	紙くずや破片が飛ぶのは見えたか
強い、どしゃぶり=1 中くらい、ザーザー=2 弱い、パラパラ=3 わからない=4 欠損は「9」	24時間表示 欠損は「99」	24時間表示 欠損は「99」	真っ黒=1 黒っぽい=2 茶色っぽい=3 透明に近い=4 わからない=5 欠損は「9」	はい=1 いいえ=2 わからない=3 欠損は「9」

表 2. 「黒い雨」の降り始めと降り終わりの双方の時刻が回答されていた対象者における「黒い雨」の降り始めの時刻別降り止んだ時刻別回答度数

降り始めの時刻(時)	降り止んだ時刻(時)											
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	total
8	12	110	19	2	8	2	4	2	0	0	0	159
9	0	25	147	52	26	13	4	9	2	2	0	280
10	0	0	13	157	69	32	18	13	2	1	1	306
11	0	0	0	9	62	28	22	10	7	2	0	140
12	0	0	0	0	6	25	9	6	3	1	0	50
13	0	0	0	0	0	1	24	12	4	3	1	45
14	0	0	0	0	0	0	2	39	8	1	2	52
15	0	0	0	0	0	0	0	2	25	13	2	42
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	2	10
total	12	135	179	220	171	101	83	93	51	31	8	1084

また、場所情報については、概ね旧町村単位(市内中心部については体験者が一定数集まる範囲)で統合し、その地域の代表地点(中心地の役場や学校)の位置情報(経度と緯度)に変換を行った。

降雨時間の長さ(解析対象者数 903 人), 時刻ごとの降雨の状況(解析対象者数 1413 人), 降雨の強さ(解析対象者数 1378 人), 降雨の色(解析対象者数 1248)について, ノンパラメトリック平滑化を適用して各時空間分布を求め, 新しい「黒い雨」降雨域(大瀧雨域)を定めた(図2)。その結果, 推定された降雨域(大瀧雨域)は増田雨域とほぼ一致しており, 増田が雨域の拡大の可能性について指摘していた点を再確認するに至った(図3)。

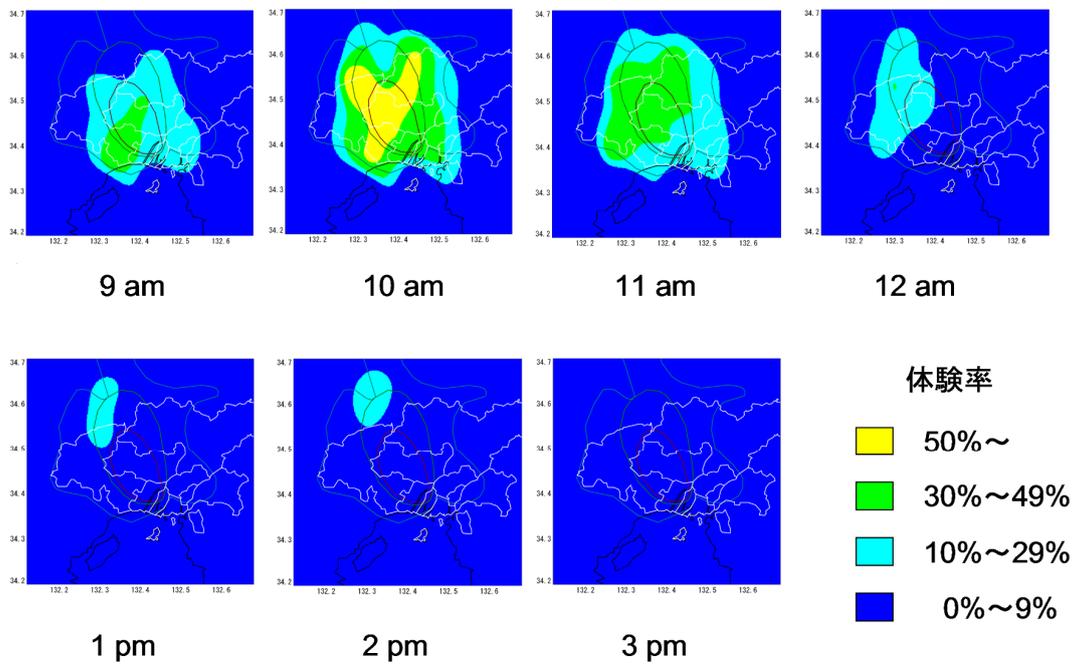


図2. 推定された広島「黒い雨」体験の時刻別地理分布

図2は推定された黒い雨の条件付体験率について、午前9時から午後3時の時刻毎の地理分布を示している。黄色の領域は、条件付体験率が50%超を、緑色の領域は30%~49%、水色の領域は10%~29%の領域を表している。この図より、黒い雨は午前9時頃に広島市西方近郊から降り始め、その後北西方向に拡がり午前10時~11時に最も広い範囲で降り、その後縮し午後3時頃加計付近で消失したことが推定された。

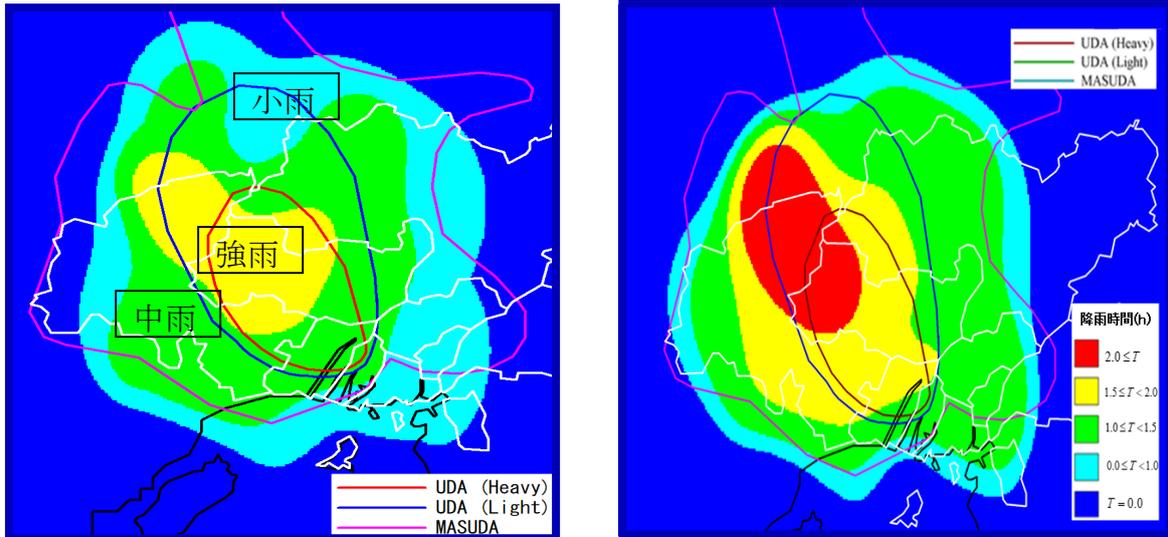


図 3. 推定された広島「黒い雨」の強度(左図)と降雨時間(右図)の地理分布

図 3 は、推定結果として得られた広島市近郊での黒い雨の降雨時間の地理分布を示す。左図は「黒い雨」の降雨強度別の地理分布を示すものであり、右図は降雨時間の地理分布を示している。これらの図より、「黒い雨」は爆心地の北西約 25km 付近を中心に現広島市の東部を除くほぼ全域で 0 時間～2 時間程度降ったことが示されている。参考のために、宇田雨域や増田雨域も併記している。

### 1.6 平成 24 年(2012 年)検討会

国は、被爆地域を拡大するためには、科学的、合理的な根拠が必要である旨指摘されていることを踏まえ、前記要望を受けた地域における広島原爆による健康影響について、「原爆体験者等健康意識調査報告書」等に関する検討会を設置した。平成 24 年検討会は、放射線の健康影響等に関する専門家によって構成されており、2010 年 12 月 28 日から平成 2012 年 7 月 9 日まで合計 9 回開催され、前記専門家による知見に加え、「黒い雨」降雨域の線量推計を行った物理学者からのヒアリングや、被告広島市が行った住民アンケートに関する推計を行った研究者などからのヒアリング等、多角的な検討が行われ、最終的に「原爆体験者等健康意識調査報告書」等に関する検討会報告書が提出された[9]。それによると、広島市調査について、同じ地域において「黒い雨」の体験率が 50%を超える地域が「被爆地域及び健康診断特例区域として指定されていない地域」の一部に限られていること、爆心地から 20km 以遠においてデータ数が少ないこと、調査対象者本人の 60 年以上前の記憶によっており、その正確性を十分に検証することができないという理由により、広島市調査によって「黒い雨」降雨域を推知することは困難と判断された。

## 2. 「黒い雨」訴訟の提訴

「黒い雨」体験者 84 名は、被爆者援護法 1 条 3 号にいう「原子爆弾が投下された際又はその後において、身体に原子爆弾の放射能の影響を受けるような事情の下にあった者」に該当すると主張し、広島市・県及び国を相手に 2015 年に集団訴訟を起こした。その後、22 回の口頭弁論を経て、2020 年 1 月に結審した。裁判では国が定めた援護対象区域の妥当性が最大の争点となった(図 4)。

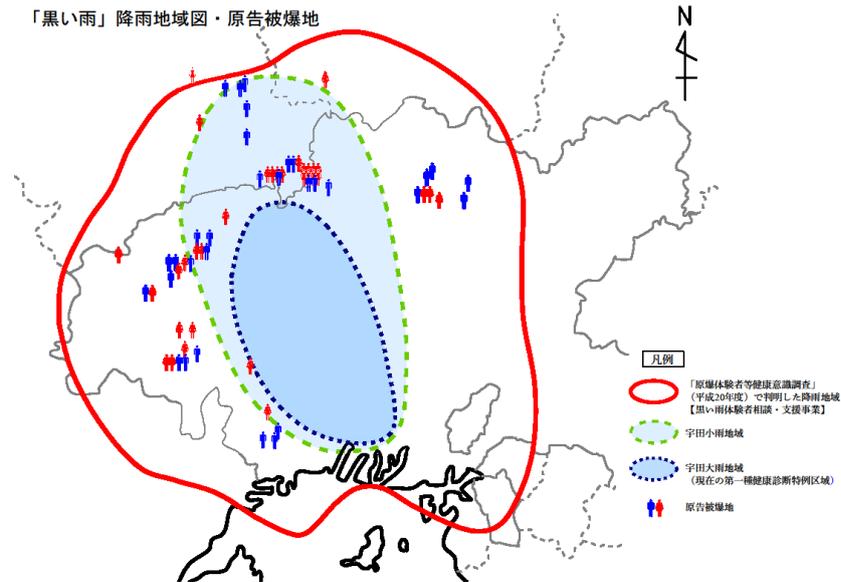


図4. 「黒い雨」降雨地域図(大瀧雨域と宇田雨域)・原告の被爆地

## 2.1 内部被曝による健康影響の傍証となった疫学的エビデンス

広島町の町医者であった於保は、1957年に残留放射能障障害の実態を知るため調査時点で生存していた直爆者3946名、入市者692名について被爆条件、急性放射線原爆症の有無およびその程度、被爆後3ヶ月間の行動等の聞き取り調査を行い、その結果を日本医事新報に掲載している[10]。同論文により、原爆投下後3か月以内に中心地(爆心地から1km以内)への立入りがない場合には、各急性症状の発症率が被爆距離の増大とともに減少していたこと、3か月以内に中心地への立入りがある場合には、立ち入らなかった場合よりも発症率が高くなったばかりか、原爆投下時に広島市内にいなかった者にまで急性症状が見られ、その有症率は必ずしも被爆距離に正相関しなかったことなどが報告され、爆心地付近への立入りに伴う残留放射線の影製を軽視できないことについて示している。その後、Sawadaは於保らの研究結果を踏まえて原爆被爆者の急性症状への残留放射線被曝の影響の機序に関する仮説を提示している[11]。

放射線影響研究所の研究グループが2001年に安定型染色体異常率と骨髓線量の関連に関する研究結果を論文で公表した[12]。同論文によると、同じ被曝線量であっても、家の中で被曝した場合の方が、家の外で被曝した場合よりも染色体異常率が高くなっていることが報告されている。

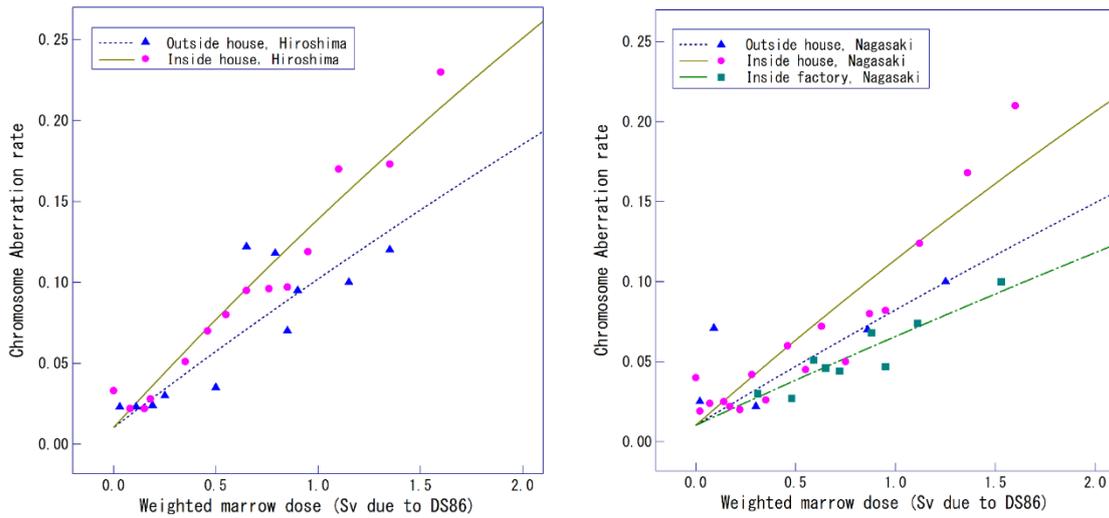
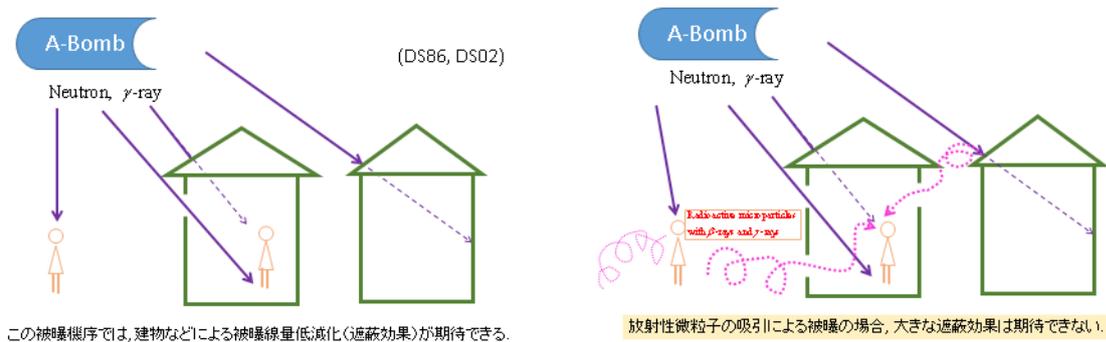


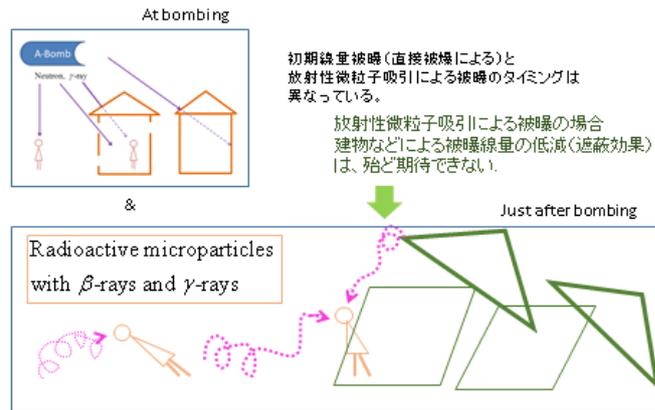
図 5. 放射研 LSS による被爆状況別染色体異常細胞頻度 (これらの図は、論文[11]の Fig.3 を対象にマークの属性を一部改変し再描画して得られた図を転写したもの)

大瀧らは、この調査結果に対して回帰分析を適用し、広島原爆被爆者における染色体異常細胞の頻度は長崎のそれに比べて DS86 調整後で 26%高いこと、屋内被爆者における染色体異常細胞の頻度は屋外被爆のそれに比べて (DS86 ベース)で 40%高いことを示した[13]。そして、染色体異常頻度における線量推定システム DS86(本質的には DS02 も同じ)による被爆線量に関する線量反応関係の被爆状況依存性の原因は DS86 線量システムの持つ構造的偏りにあり、屋内被爆の場合、29%線量が低く見積もられていることを導いた。この偏りは、DS86 システムが初期線量のみを対象としており、間接被ばくでは大きな遮蔽効果はないにもかかわらず、遮蔽効果による線量の低減調整を行ったことによるものと思われる。さらに都市間差として、広島の方が長崎に比べて線量が 21%低く評価されているが、その要因としては、爆心地の位置、爆心地付近の土壌成分や植生、爆弾投下当時の気象条件の違いで、曝露物質の生成量や飛散分布の違いにより生じたものと想像される。



古典的「原爆被爆」のイメージ

新しい「原爆被爆」のイメージ



さらに尤もらしい「原爆被曝」のイメージ

図 6. 原爆による放射線被曝の機序の概念図

チェルノブイリ原発事故をきっかけに、1986 年に、あらためて残留放射能の問題に取り組もうと NHK 広島局が中心となり、広島市中心部に早期入市した賀茂郡北部防衛隊 99 名を対象に被曝線量推定や染色体異常について調査研究が行われた[14]。しかし、その結論は歯切れの悪いものであった。調査対象者のうちはっきりとした急性症状を示したものが数名みられたが、賀北部隊が被曝した残留放射線の推定総被曝線量は高々 120mGy であり、急性症状発症の閾値とされている 1Gy の線量には達していなかった。その観点からは、広島原爆の場合、被曝距離が 1.9km 以遠の直爆者や入市者は全員が 100mGy 未満の被曝線量(初期線量と残留放射線量)であり、2 章や 3 章で紹介した多くの遠距離被曝者や入市者における高頻度での急性症状発症の事実について説明できないことになる [15], [16], [17]。

上記の疑問に対する解答を出すために、大瀧と大谷は、放射性微粒子の吸飲による内部被曝がこれらの要因であるとの仮説の下、原爆投下当日広島市外で召集され、その日の午後(正午頃から夕方 5 時頃にかけて)原爆被曝者の救護のため広島市内に入市した陸軍船舶特別幹部候補生 3 期生 142 名を対象とし、2016 年に郵送によるアンケート調査(有効回答者数は 64 名)を行った[18]。作業場所及び作業中の粉塵曝露の有無により、A 群(2 km 以遠で作業, 粉塵曝露無(22 名)), B 群(2km 以遠で作業, 粉塵曝露有(9名)), C 群(2km 以内で作業, 粉塵曝露無(12名)), D 群(2 km 以内で作業, 粉塵曝露有(21名))の 4 群に分け、急性症状の発症の有無及びがん罹患既往歴の有無について、A 群を基準とする各群のオッズ比を算出したところ、D 群において、急性症状様の症状の発症危険度やがんの既往歴危険度が 10 倍を超える高い上昇を検出し、この少年兵集団における急性症状やがん罹患の既往歴の危険度が救護活動中の放射性微粒子の吸飲による内部被曝に強く関連していることを見出した(図 7)。

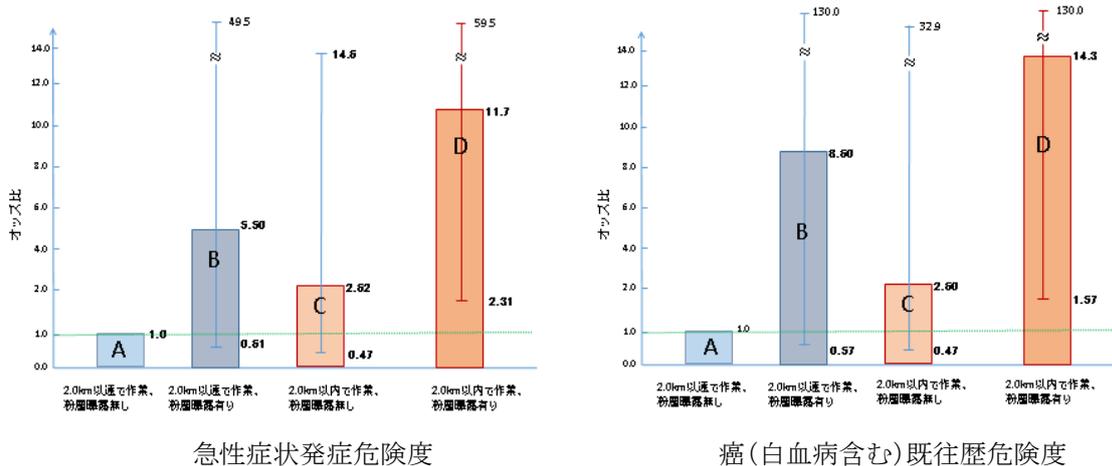


図 7. 広島早期入市少年兵における健康影響の作業場所・粉塵曝露状況別オッズ比

広島大学では広島原爆被爆者コホートデータベース(ABS)に基づいた被爆者研究が実施されているが、被爆者の健康が非初期線量で説明出来ない(必然的に内部被曝によるものと解釈せざるを得ない)研究結果が論文として複数報告されている。Tonda らは被爆者における固形がん死亡危険度についてセミパラメトリック手法による解析を行い、爆心地の西側で死亡危険度が高くなっていること(非円型対称性を)を視覚化した[19] (このような非円型対称性に関しては、1984年にPetersonらは放影研のLSSデータに基づいたCox回帰分析による解析結果が報告されている[20])。大谷らは、初期放射線(ピカ)の影響が全く考えられない広島原爆の入市被爆者を対象とした1970年～2010年の期間での入市日が8月9日以降の場合に比べて8月6日および8月7日の固形がん死亡危険度が、それぞれ18%および7%超過していたことを報告している[21]。また、鎌田らは1970年～1990年の期間での被爆者の白血病罹患危険度は、男女とも入市日が8月6日である場合に同期間の全国日本人に比べて3.7倍高く( $p < 0.05$ )なっていたことを報告している[22]。大瀧と大谷は、ABSの被爆者のうち、60歳未満のときに爆心地から2000m以内で被曝し、1970年1月1日の時点で広島県内に居住(生存)していた1万8154人(男性6815人、女性1万1339人)を解析対象として、1970年から2010年までの41年間における全日本を基準集団とした期待死亡数と観察死亡数の比(SMR)を男女別年齢階級別、被爆地点方向別に求め、公表している[18]。同論文では、SMRの値は被曝時年齢が10歳代の男性の場合には、爆心地近傍を含めて爆心地から西側では被曝距離が遠くなるとともに増大し、2.0km付近に限ってみると、西側の方が東側よりも高い傾向が認められるなど、被曝後の固形がん死亡の超過危険度の被曝地点依存性の特徴が初期線量だけでは説明できないことについて論じられおり、原爆被爆者においては、放射性微粒子の吸入により大きな内部被曝があったにもかかわらず、これが正當に評価されていないと結論付けている。さらに、研究結果のまとめとして、被爆者における内部被曝の主因は放射性微粒子曝露によるものと考えられること、ただし、その放射線の線量を測る方法については現時点で十分な知見は得られていないことについて言及している。

## 2.2 その他の内部被曝の健康影響に関連する知見

### 2.2.1 原告らへの曝露に関して想定される放射性微粒子の動態

原爆爆発後、地上においては、熱線によって起こる直接発火に加え、爆風で建物が破壊され、それに伴って発生する間接発火が生じ、火災によって生じた煤が上昇気流に吹き上げられ、中性子によって放射化された爆心地付近の家屋や土壌等に含まれる核種 ( $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$  等) が粉塵に付着し、核分裂生成物 ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  等) や未分裂原爆材料と共に雨滴への混入やエアロゾルとして上空に巻き上げられ、風に流されながら大気中に拡散して次第に地表に降下したものと想われる。半減期が 2.2 分の  $^{28}\text{Al}$  を含む放射性微粒子の吸飲は、爆心地近傍の人々にとって不可避であったはずであり、一方、 $^{56}\text{Mn}$ (半減期 2.6 時間) や  $^{24}\text{Na}$ (同 15 時間) を含む放射性微粒子は、広範囲に飛散し、遠距離被爆者や入市者までも曝露の対象となったと考えられる (図 8)。地表で活動していた人々が呼吸や汚染された井戸水、川(沢)の水、さらには野菜等の体内摂取により内部被曝を起こしたものと想定される (図 9)。なお、「黒い雨」降雨地域とされている己斐・高須地区の土壌等から高濃度の放射能が検出されたという複数の報告があったことで裏付けられている [23], [24], [25]。

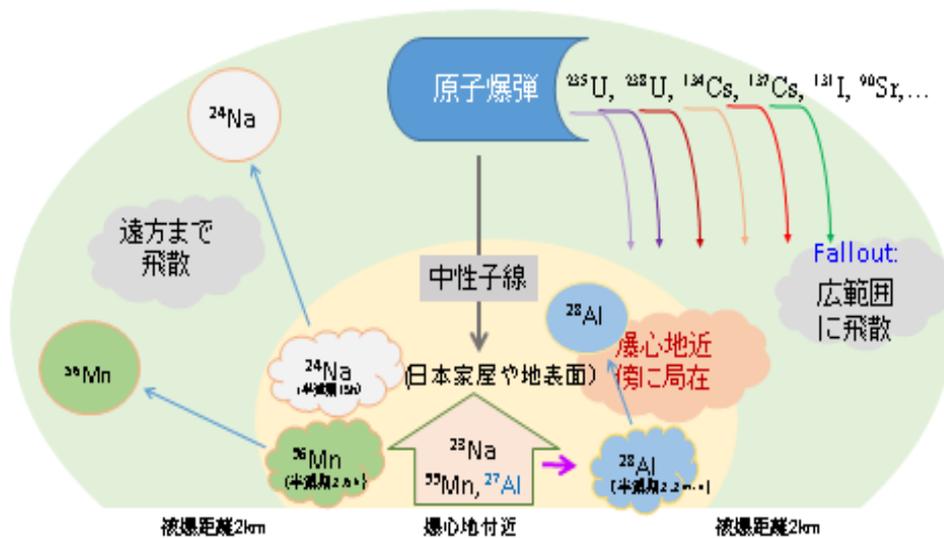


図 8. 想定される広島原爆被爆者における放射性微粒子被曝の機序

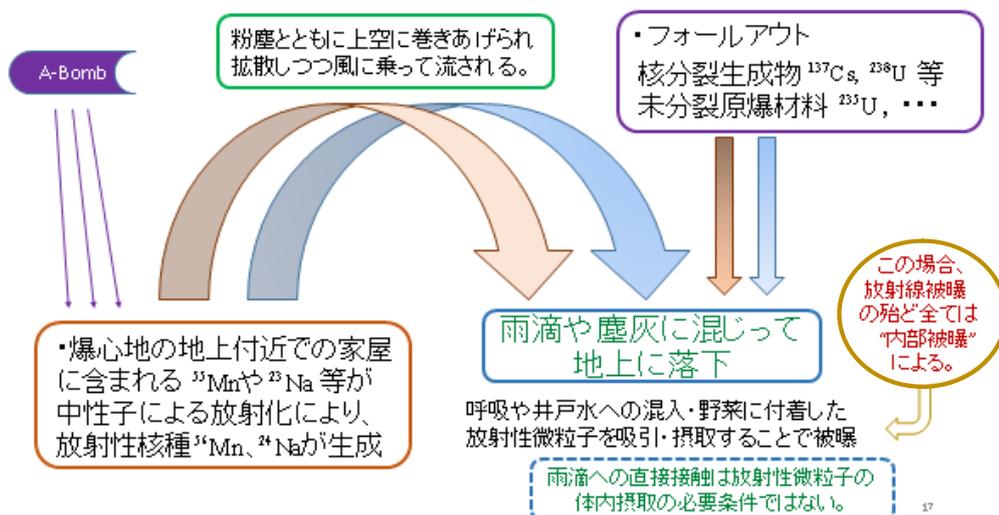


図 9. 原告らにおける放射性微粒子曝露の想定機序

### 2.2.2 不溶性放射性微粒子による内部被曝

不溶性の放射性微粒子の中には、1 か所にとどまり永久被曝を与えるようなこともあり、その例が、原爆投下後 60 年以上も経って、被爆者や黒い雨地域に居た人の臓器標本からウラニウムやプルトニウムの微粒子を発生源とするアルファ線が観測されている[26]。放射性微粒子 1 個で内部被曝するだけで、「身体に原子爆弾の放射能の影響を受けるような事情」が出現している証拠と見なされている (図 10)。不溶性放射性微粒子の周囲にホットスポットと呼ばれる集中被曝が生じる極端に不均一な被曝は通常の外部被曝での均一被曝の場合よりも危険が大きいと指摘する意見 ([27], [28]) や、放射線を照射された細胞の隣の細胞も損傷されるといふバイスタンダー効果、細胞の慢性被曝の場合、大量の急性被曝よりも大きな障害が起こり得るといふペトカウ効果や逆線量率効果が生じるなどの研究報告がある [29], [30]。

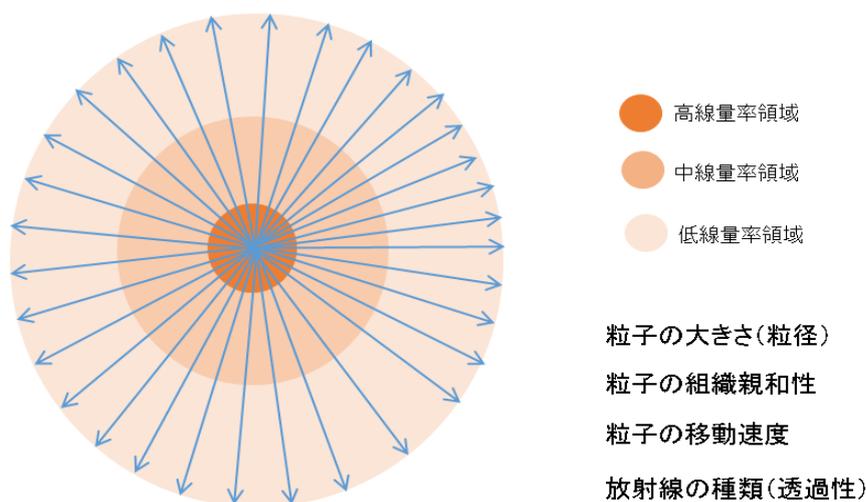


図 10. 放射性微粒子による被曝のイメージ

Geiser らは、放射性微粒子の体内への取り込みが主に呼吸によるものであり、粒径などの属性により吸収過程や体内での循環状況が大きく変化することを報告している [30]。それによると、鼻呼吸の場合、粒径が  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  の粒子では約 50% が気管気管支領域に滞留し、残りの 50% は肺胞領域に到達する。 $5 \sim 6 \mu\text{m}$  より大きな粒子は 90% が鼻腔内に捕捉され、 $10 \sim 20 \mu\text{m}$  の粒子が気管・気管支まで達することは少なく、 $10 \mu\text{m}$  以上の粒子は肺胞レベルには沈着しない。一方、口呼吸においては粒径が  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  の粒子の 40-60% は肺胞レベルに沈着し、 $1 \sim 10 \mu\text{m}$  の粒子の約 60-80% は細気管支レベルに沈着し、 $10 \sim 20 \mu\text{m}$  の大きな粒子の 95% 以上が気管・気管支に沈着すること。なお、健常成人では、鼻呼吸の頻度が高く呼吸の割合は約 13% と少ないが、下気道に達する粒子数は口呼吸の場合に増加する。

外部被曝の場合、被曝に関する事前情報が把握できていれば、遮蔽や曝露回避が容易であり、被曝線量評価も易い。一方、内部被曝の場合は遮蔽や回避が困難であり、外部線量計測システム

を使用して、内部被曝線量を形式的に行ってしまうと桁違いに線量(率)を過小評価してしまうことになる。一般に、内部被曝は低線量被曝と思われているが、放射性微粒子の体内臓器への吸着が絡んでいる場合には、局所的に超高線量率被曝の状態になっている。ただし、その生物学的影響については現在未解明であり、動物実験による検討が始められたばかりである[32], [33], [34]。

## 参考文献

1. 宇田道隆、菅原芳生、北 勲：気象関係の広島原子爆弾調査報告，日本学術会議原子爆弾災害調査報告書刊行委員会編「原子爆弾災害報告集」第1分冊，98-135，1953.
2. 日本公衆衛生協会：広島，長崎の残留放射能調査報告書，昭和51年度(厚生省調査研究委託費による)，1976.
3. 日本公衆衛生協会：広島，長崎の残留放射能調査報告書，昭和53年度(厚生省調査研究委託費による)，1978.
4. 増田善信：広島原爆後の“黒い雨”はどこまで降ったか，*天気*，**36**巻，13-23，1989.
5. 日本公衆衛生協会：黒い雨に関する専門家会議報告書，平成3年，黒い雨に関する専門家会議，1991.
6. Baba M, Ogawa F, Hiura S, Asada N: Height Estimation of Hiroshima A-bomb Mushroom Cloud from Photos, Revisit the Hiroshima A-bomb with a Database -Latest Scientific View on Local Fallout and Black Rain-, Hiroshima City, 55-68, 2011.
7. 広島市：原爆体験者等健康意識調査報告書，平成22年5月，2010.
8. Ohtaki M: Re-construction of spatial-time distribution of black rain in Hiroshima based on statistical analysis of witness of survivors from atomic bomb, Revisit the Hiroshima A-bomb with a Database -Latest Scientific View on Local Fallout and Black Rain-, Hiroshima City, 131-144, 2011.
9. 厚生労働省：原爆体験者等健康意識調査報告書等に関する検討会報告書，平成24年，2012.
10. 於保源作：原爆残留放射能障碍の統計的観察．*日本医事新報*，**1746**，21-25，1957.
11. Sawada S: Estimation of residual nuclear radiation effects on survivors of Hiroshima atomic bombing from incidence of acute radiation disease. *Study of Social Medicine*，**29**，47-62，2011.
12. Kodama Y, Pawel D, Nakamura N et al.: Stable chromosome aberrations in Atomic bomb survivors, Results from 25 years of investigation, *Radiation Research*，**156**，337-346，2001.
13. 大瀧 慈，保田浩志，大谷敬子，星 正治：原爆被爆者(LSS)の安定型染色体異常細胞の頻

- 度に観られる被爆ばく状況依存性—DS86 被爆ばく線量の持つ大きな偏りの存在が示唆されている—, 広島医学 (第 58 回原子爆弾後障害研究会特集号), **71**(4), 310-313, 2018.
14. NHK 広島局・原爆プロジェクト・チーム: ヒロシマ残留放射能の 42 年, 日本放送協会, 1988.
  15. Imanaka T, Endo S, Tanaka K, Shizuma K: Gamma-ray exposure from neutron-induced radionuclides in soil in Hiroshima and Nagasaki based on DS02 calculations, *Radiation and Environmental Biophysics*, **47**, 331-336, 2008.
  16. Kerr G, Egbert S, Al-Nabulsi I, Bailiff I, et al. : Workshop report on Atomic bomb dosimetry - Review of dose related factors for the evaluation of exposures to residual radiation at Hiroshima and Nagasaki, *Health Physics*, **109**, 582-600; 2015. doi:10.1097/HP.0000000000000395
  17. 大瀧 慈, 富田哲治, 大谷敬子, 佐藤裕也, 原 憲行, 川上秀史, 田代 聡, 星 正治, 合原一幸, 佐藤健一: 広島大学原爆被爆者コホートデータにおける固形がん死亡危険度の初期放射線量依存性および特異的な被爆時年齢依存性・被爆距離依存性について—放射性 PM2.5 の影響か?—, 広島医学, **67**, 311-315, 2014.
  18. 大瀧 慈, 大谷敬子: 広島原爆被爆者における健康障害の主要因は放射性微粒子被曝である, 科学, **86** 巻, 819-830, 2016.
  19. Tonda T, Satoh K, Otani K, Sato Y, Maruyama H, Kawakami H, Tashiro S, Hoshi M, Ohtaki M: Investigation on circular asymmetry of geographical distribution in cancer mortality of Hiroshima atomic bomb survivors based on risk maps: analysis of spatial survival data, *Radiation and Environmental Biophysics*, **51**, 133-141, 2012. doi: 10.1007/s00411-012-0402-4
  20. Peterson A, Prentice R, Ishimaru T, Kato H, Mason M: Investigation of circular asymmetry in cancer mortality of Hiroshima and Nagasaki A-bomb survivors, *Radiation Research*, **93**, 184-199, 1983.
  21. 大谷敬子, 富田哲治, 佐藤健一, 佐藤裕也, 原 憲行, 丸山博文, 川上秀史, 田代 聡, 星 正治, 大瀧 慈: 広島入市被爆者の死亡リスクに関する統計的解析, 長崎医学雑誌, **87**, 261-264, 2012.
  22. 鎌田七男, 大北 威, 蔵本 淳, 川上秀史, 島本武嗣, 富田哲治, 大瀧 慈: 8 月 6 日入市被爆者白血病の発生増加について, 長崎医学会雑誌 **81**, 特集号, 245-249, 2006.
  23. Arakawa ET: Residual Radiation in Hiroshima and Nagasaki, Hiroshima, RERF; ABCC TR 2-26, 1962.
  24. 庄野直美: 残留放射能について, 広島医学 **20**, 75-91, 1967.
  25. Shizuma K, Iwatani K, Hasai H, Hoshi M, Oka T, Okano M: <sup>137</sup>Cs Concentration in soil samples from an early survey of Hiroshima Atomic bomb and cumulative dose estimation from the fall out, *Health Physics*, **71**(3), 340-346, 1996.

26. Shichijo K, Fujimoto N, Uzbekov D et al.: Internal exposure to neutron-activated  $^{56}\text{Mn}$  dioxide powder in Wistar rats—Part 2: pathological effects, *Radiation and Environmental Biophysics*, **56**, 55-61, 2017. doi: 10.1007/s00411-016-0676-z
27. Tamplin A, Cochran T: Radiation standard for hot particle, *Natural Resources Defense Council*, 1974.
28. 松岡 理: 放射線量の不均等分布とその生物効果—Tamplin のホットパーティクル提案をめぐって, *Radioisotopes*, **25**, 659-669, 1976.
29. Petkau A: "Effect of  $^{22}\text{Na}^+$  on a phospholipid membrane", *Health Physics*, **22**(3), 239-244, 1972. doi: 10.1097/00004032-197203000-00004
30. 肥田舜太郎, 鎌仲ひとみ: 内部被曝の脅威 原爆から劣化ウラン弾まで, 筑摩書房, pp.90-91, 2005.
31. Geiser M, ImHof V, Schurch S, et al.: Structure and interfacial aspects of particle retention. In Gehr P, and Heyder J, eds. Particle-lung interactions. Marcel Dekker, New York, 291-322, 2000.
32. Stepanenko V, Rakhybekov T, Otani K, Endo S et al.: Internal exposure to neutron-activated  $^{56}\text{Mn}$  dioxide powder in Wistar rats: part 1: dosimetry, *Radiation and Environmental Biophysics*, **56**, 47-54, 2017. doi: 10.1007/s00411-016-0678-x
33. Shichijo K, Fujimoto N, Uzbekov D et al.: Internal exposure to neutron-activated  $^{56}\text{Mn}$  dioxide powder in Wistar rats—Part 2: pathological effects, *Radiation and Environmental Biophysics*, **56**, 55-61, 2017. doi: 10.1007/s00411-016-0676-z
34. Fujimoto N, Amantayeva G, Chaizhunossova N et al.: Low-Dose radiation exposure with  $^{56}\text{MnO}_2$  powder changes gene expressions in the testes and the prostate in rats, *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, **21**, 4989. doi: 10.3390/ijms21144989