

### 3. チェルノブイリ大災害の放射線・健康影響

#### 3.1 放射線量

1986 年 4 月 26 日に始まったチェルノブイリからの放射性物質の放出は、10 日から 15 日続いたと推定される。事故の初期には、短寿命核種（ニオブ・ジルコニウム・ヨウ素などの放射性元素）が放射線量に一定の影響を与えた。事故から時間がたつにつれて放射線量を決める役割を増していったのが、セシウム同位体（ $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ ）、さらに程度が下がってストロンチウム同位体（ $^{90}\text{Sr}$ ）であった。超ウラン元素（ $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu}$  や  $^{241}\text{Am}$ ）も放射性の放出物中に存在したものの、そそれが固着した不活性な担体の物理・化学的性質によって超ウラン元素の放射線量への影響は小さくなった。

事故直後、緊急時の放射性物質放出中には気象条件も刻々と変化し、ウクライナにおける放射性降下物は著しく不均質なものとなった。 $^{137}\text{Cs}$  の汚染密度は数  $\text{kBq}/\text{m}^2$  から数百  $\text{kBq}/\text{m}^2$  にわたった。 $^{90}\text{Sr}$  による汚染レベルはその約 10 分の 1 である。居住地域の  $^{239}\text{Pu}$  汚染密度は 0.004 から  $0.9\text{kBq}/\text{m}^2$  であった（ウクライナにおける  $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$  による平均汚染密度は  $0.037\text{kBq}/\text{m}^2$ ）。

実質すべてのウクライナ住民がチェルノブイリ事故によるなんらかの放射性物質の影響に巻き込まれたものの、事故による被曝を最も被った次の 4 種類の重要な集団が強調される。

1. 原子力発電所敷地ないしチェルノブイリ 30 km 圏内での作業に直接従事した、「リクビデーター」作業員として知られるチェルノブイリ原子力発電所の事故処理作業員。
2. プリピャチ市とチェルノブイリ市からの避難者、および 30 km 圏内の住民。
3. 1986 年 5 月から 6 月のあいだに食事ないし呼吸を通じて吸収した放射性ヨウ素によって甲状腺が内部被曝した子どもおよび青少年（当時）。
4. 汚染地域に居住する農村住民。

汚染地域の人口中では上記 4 番目のカテゴリに属する人口がもっとも大きく、その数はウクライナ全土で数百万に達する。

汚染地域住民の被曝線量は、2 種類の基本的な経路で構成された。

1. 土壤に降下した複数の  $\gamma$  放射性核種に由来する  $\gamma$  線による全身の外部被曝。
2. 放射性汚染地域で生産（栽培）された汚染食品の摂取を通じた、放射性ヨウ素による甲状腺内部被曝（1986 年）、および放射性セシウム（加えて、程度は下がるが他の放射性核種）による全身の内部被曝。

### 3.1.1 事故処理作業員の被曝線量 事故処理作業員の遡及的線量推計

チェルノブイリ原子力発電所事故の事故処理作業員（「リクビダートル」として知られる）はチェルノブイリ事故によって影響を受けた最大級かつおそらく最も被曝した集団を構成する。医学および社会的な観点から、また事故被曝の影響を調査する姿勢からみての当該集団の重要性にもかかわらず、事故処理作業員がおかれた状況における被曝の全体像は長い間よくわかっていなかった。チェルノブイリ事故被害者に関するウクライナ国家登録リスト（SRU）に記録された 1986～1990 年の事故処理作業員のうち約半分しか個人の被曝線量記録を持っていなかった。入手可能な線量測定データの質および処理作業中の放射線防護の成否は不明のままであった。

放射線量データのほぼ全面的な改ざんおよび線量限度の大規模な超過があったという見解がこれまでの定説であった。放射線感受性が最も高い器官の一つである水晶体の被曝線量、とくにチェルノブイリ事故による放射性物質の混合物からの  $\beta$  線による被曝線量についての状況もよくわかっていなかった。そのため、事故処理作業員の現実の被曝および処理作業中の被曝線量測定モニタリングの事後評価に明確さをもたらすことを目指した大規模な活動が計画され、過去 10 年間にわたってそれらが概ね実現されてきた。

事故処理作業員の被曝線量評価という複雑な問題の中で特別な位置を占めたのは、チェルノブイリ事故後の疫学研究における線量推計の保証を必要とすることであった。そのような疫学調査は対象個人の線量データを必要とし、線量推計の問題を解決するには統合的なアプローチを実施する必要がある。個人の遡及的線量測定には、近年開発され、事故処理作業員の個人線量評価でうまく使われた方法、RADRUE（現実な解析的線量評価と不確実性解析）が主に用いられた。RADRUE はロシア（生物物理学研究所）、ウクライナ（放射性医学研究センター、チェルノブイリ原子力発電所）、アメリカ（国立がん研究所）、フランス（国際がん研究局）が共同で開発した解析的計算手法である。

事故処理作業員に対する質問調査、専門家チームによるその回答の信頼性解析、処理作業の現場における被曝状況の包括的なデータベースの利用に基づくこの手法の重要な特徴は、（同僚や親族への質問調査を通じて）故人を含めたあらゆる事故処理作業員にそれが適用できることである。

ウクライナ・アメリカ合同の事故処理作業員の白血病調査における調査対象者（症例群と対照群）の全身と骨髄の線量を評価するために RADRUE が広く使われた。RADRUE で 1,010 人の事故処理作業員の個人線量が評価された。この中には 79 人の故人が含まれる（発病した同僚や親族への質問を通じて評価した）。

表 3.1 RADRUE による個人被曝線量の評価結果 (ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ)

区分	人数	量の平均値(mGy)	線量の中央値(mGy)	線量の幾何標準偏差
軍 (合計)	218	76	54	2.1
処理作業に参加した年別				
1986	99	105	82	1.89
1987	52	78	46	2.32
1988	44	29	17	2.41
1989	20	31	17	2.22
1990	3	60	24	2.89
原子力の専門家	35	381	277	1.78
内務省の職員	27	203	17	1.86
公務による立入	340	70	48	1.95
運転手	213	64	41	1.99

1986～1990年の事故処理作業員としての公的地位を持ち、SRUに登録された事故処理作業員を含むコホートの調査によると、被曝線量の範囲は0から約3.2Gyで、その算術平均(期待値)は90ミリGy、幾何平均は12ミリGyであった。これほど広い被曝線量の幅は、事故直後の数日間に多量の被曝をした人々、民生部門従業員、出張で30km圏内を訪れた人から同時に構成された事故処理作業員のコホートの極端な不均質さを示唆する。

事故処理作業員の特定の職業カテゴリにおける被曝線量はさまざまである(表3.1)。内務省職員には被曝レベルが実質上昇する機会がほとんどなかったのに対して、原子力の専門家(原発の従業員やCA(建設局)-605の作業員)は比較的高い線量を被っている。この最後のグループ(原子力の専門家)は、いわゆる初期事故処理作業員、すなわち、放射線防護や放射線管理の効果的な仕組みがまだ整っていなかった事故初期に被曝したチェルノブイリ原子力発電所の職員を含むことは指摘されるべきである。

放射線防護や被曝管理の有効な仕組みが適用されなかった処理作業参加者、すなわち、第一に初期事故処理作業員(1986年の4月～5月に処理作業に参加した人々)、そして、概ね放射線監視の枠外にあった個別の作業を実施したいくつかのカテゴリの労働者の被曝線量が明らかに最大であった。軍の事故処理作業員の被曝量の経年変化(表3.1)は、30km圏内の放射線の状況の展開および1987～1988年の線量限度の段階的な削減を適切に反映している。軍の事故処理作業員の線量は、公式に登録され、社会的に認識されている値よりも著しく低かったことは明記しておくべきだろう。この見解は、他の独立した公式線量記録の分析や処理作業における兵士の線量モニタリングの特徴に関する定性的な考察とも一致する。

ウクライナ・アメリカ合同で行われた事故処理作業員の白血病の調査のコホートはかなり代表的なものであることは明記されるべきである。なぜなら、線量レベル、作業の種類、職能分野の分布(表3.2)のデータが大変有益なものであり、ウクライナの事故処理作業員の全体像を特徴づけることが可能であるからだ。

これとは別の科学的かつ実務上の問題として、 $\beta$ 線による個々の被曝評価を含む事故処理作業員の水晶体の被曝量を決定することがある。この問題の本質は、距離が離れても実質的な被曝を生じさせる $\beta$ 照射を起こす強力な $\beta$ 線放出源 ( $^{144}\text{Cs}/\text{Pr}$ 、 $^{106}\text{Ru}/\text{Rh}$ 、 $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ ) がチェルノブイリの放射性物質の中には十分に含まれていた一方で、(兵站上の、また方法論的基盤が不足していたために) 処理作業中 $\beta$ 線による線量が管理されなかったことにある。特定の状況下では、事故処理作業員の水晶体の $\beta$ 線被曝線量は、 $\gamma$ 線被曝線量の適切な値の桁を超えていたかもしれない。

ウクライナ・アメリカ合同の眼に関するチェルノブイリ調査(UACOS)における 8,607 名の参加者について水晶体 $\beta$ 線被曝の個人線量推計を行う大規模調査は、放射線医学研究センターの専門家がウクライナ(医学アカデミー職業健康研究所(UACOS プロジェクトの主な請負体)と共同して実施した。プロジェクトで開発された線量モデルでは事故からの経過時間(その結果としてのチェルノブイリの核種構成の変化)や(事故処理作業員への質問調査から推定された)被曝の特異性、すなわち作業の性質、働く場所の特徴、目の保護具の使用などが考慮された。被曝量を適切に評価するために、(水晶体の解剖学的部位、特性の異なる水平・垂直面からの被曝などを考慮したファントム)モデルとモンテカルロ法によって $\beta$ 線による遠隔被曝を計算する手法が使われた。

最終目標は水晶体の全線量を評価することであったが、 $\gamma$ 線と $\beta$ 線の線量の相関も重要である(図 3.1)。調査対象の約 32%において、 $\beta$ 線の線量が対応する $\gamma$ 線の線量より高かった(つまり、水晶体の合計の非被曝線量が、 $\gamma$ 線のみ被曝線量の評価した値の 2 倍以上であった)。一方、調査対象の約 53%においては、 $\beta$ 線量は対応する $\gamma$ 線量の半分以下だった。

事故処理作業員の特定集団、調査対象における水晶体の全被曝線量( $\beta$ 線と $\gamma$ 線)の統計量は表 3.3 に示されている。この表は、いわゆる初期事故処理作業員、つまりチェルノブイリ原子力発電所の職員、事故直後の数日あるいは数週間に処理作業に従事した人々の被曝量が最大であったことを示す。被曝の特徴( $\gamma$ 線と $\beta$ 線による被曝、図 3.1)とコホート(1986~1987 年の事故処理作業員)の特性という点において調査対象中の最大グループである軍の事故処理作業員の線量は RADRUE による推計被曝線量(表 3.1)とよく一致する。

眼の線量推計プロジェクトのもうひとつのユニークな特徴は、ひとつの較正基準(「黄金基準」)に対して比較的一様になる線量測定が多様な手法が共有されたことである。そのため、個々人の $\gamma$ 線の線量を評価するために、高品質の個人線量モニタリングデータ(これは CA-605 の職員から)、解析的線量推定(ADR)の結果、軍の事故処理作業員の公式線量記録(ODR)が使われた。

独立した情報源からの線量推計が、遡及的線量測定のための最も正確かつ正当な手法である歯のエナメル質の EPR (電子常磁性共鳴) 線量測定結果を使って較正された。これにより初期の線量評価に対して補正や修正がもたらされた。その結果、軍の事故処理作業員の公式線量記録(ODR)は、このカテゴリに属す事故処理作業員の実際の被曝レベルの約 2 倍に過剰評価していることが明らかになった。

初期の公式線量記録(ODR)を修正し、線量の不確実性を考慮することは、以下の統計量の対数正規分布

の調整値（幾何平均 0.5、幾何標準偏差 2.2）を用いて初期の公式線量記録に乗じることである。この修正分布の選択は、登録線量の系統的なシフトとともに軍の事故処理作業員の被曝監視データの相当な不確実性を反映する。事故処理作業員の水晶体の個人線量に関するユニークなデータによって、眼に関する調査は成功することができ、また電離放射線の影響下における白内障のリスク分析もできるようになった。

**表 3.2 ウクライナ・アメリカ合同白血病調査の対象である事故処理作業員の構成**

区分	すべて		キエフ市とキエフ州		その他の州		前ウクライナ事故処理作業員についての推定値
	数 (%)	作業期間の中央値(最小,最大)	数 (%)	作業期間の中央値(最小,最大)	数 (%)	作業期間の中央値(最小,最大)	
事故の目撃者	3 (0.5)	7 (1.11)	2 (0.7)	6 (1.11)	1 (0.4)	7 (7.7)	<1
直接被害にあった人	2 (0.3)	2 (1.2)	2 (0.7)	2 (1.2)	0 (0.0)	- (-.)	<1
初期事故処理作業員	66 (11.5)	7 (1.185)	50 (17.1)	7 (1.185)	16 (5.7)	7 (3.16)	~10
チェルノブイリ原子力発電所の職員	9 (1.6)	317 (36.1420)	8 (2.7)	379 (36.1420)	1 (0.4)	225 (225.225)	~1
チェルノブイリ原子力発電所に一時的派遣された人	1 (0.2)	31 (31.31)	1 (0.3)	31 (31.31)	0 (0.0)	- (-.)	<1
CA-605 の従業員	5 (0.9)	31 (19.63)	1 (0.3)	24 (24.24)	4 (1.4)	46 (19.63)	~1
クルチャトフ原子力エネルギー研究所の職員	2 (0.3)	157 (138.175)	0 (0.0)	- (-.)	2 (0.7)	157 (138.175)	<1
軍の事故処理作業員	220 (38.5)	67 (6.833)	33 (11.3)	65 (7.366)	187 (66.8)	69 (6.833)	48
30k 圏内に派遣された民間の事故処理作業員	181 (31.6)	19 (1.1710)	121 (41.4)	18 (1.1710)	60 (21.5)	21 (2.103)	28
合弁事業帯「Combinat」産業協会のスタッフ	4 (0.7)	458 (164.1450)	4 (1.4)	458 (164.1450)	0 (0.0)	- (-.)	<1
その他	79 (13.8)	250 (4.1710)	70 (24.0)	258 (4.1710)	9 (3.2)	111 (9.1710)	10
合計	<b>572</b>		<b>292</b>		<b>280</b>		

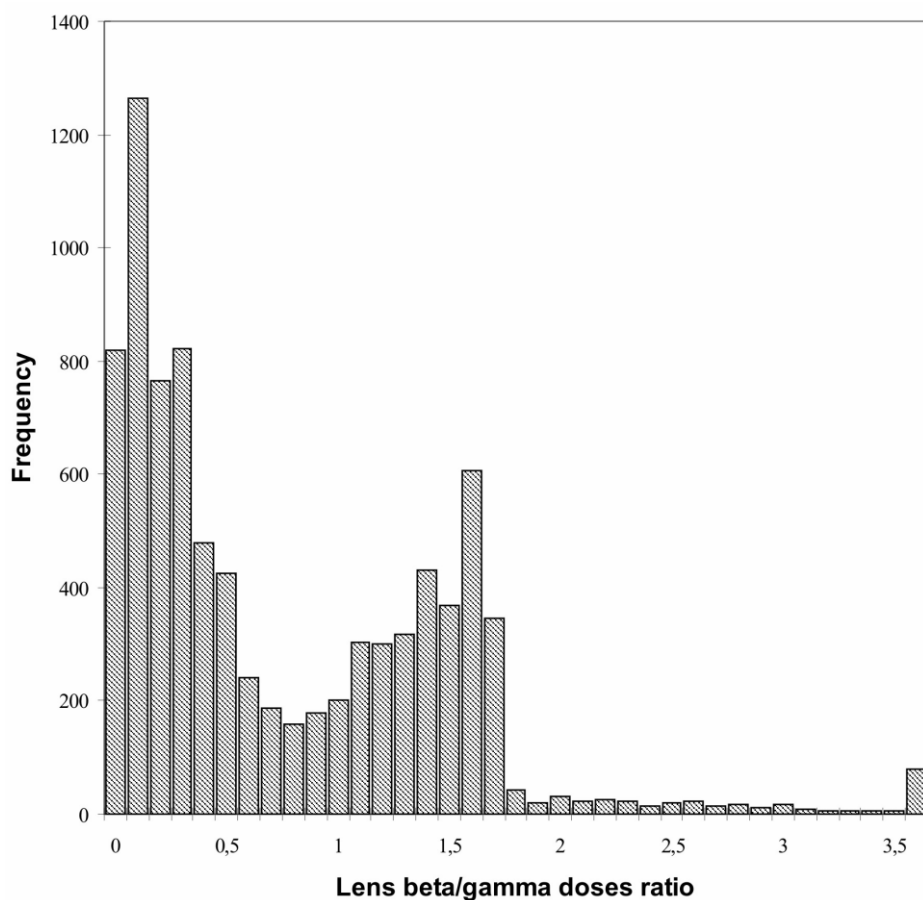


図 3.1 ウクライナ・アメリカ合同の眼に関するチェルノブイリ調査（UACOS）の対象となった 8607 人の  $\beta$  線と  $\gamma$  線の被曝線量比の分布

横軸：水晶体の  $\beta$  線・ $\gamma$  線被曝線量（ $\beta$  線/ $\gamma$  線）の比率 縦軸：人数

細心の注意を払って、すでに存在する事故処理作業員の被曝線量記録の質と信頼性が評価された。それは以下の項目について行われた：

- ・既存の個人線量データベースと対応する論文アーカイブの収集と統合。
- ・事故処理作業員の様々な集団における放射線防護と放射線管理の実態の調査。これには制度や規制の観点が含まれる。
- ・統計的な手法による登録された線量測定値の精度の調査
- ・EPR による線量測定の結果と公式記録を比較した SRU データにおける線量測定の不確実性に関する遡及的評価。

**表 3.3 ウクライナ・アメリカ合同の眼に関するチェルノブイリ調査 (UACOS) の対象となった事故処理作業員の各集団における水晶体被曝線量の特徴**

事故処理作業員グループ／線量測定法	人数	水晶体の線量分布統計量 ( $\beta$ 線 + $\gamma$ 線) mGy: 中央値(5%・95%パーセンタイル)
CA-605 の従業員／TLD 線量測定器による個人線量監視	410	16(2, 235)
さまざまなグループからのサンプル／歯のエナメル質による線量測定 (EPR)	104	94(19, 426)
初期事故処理作業員／解析的線量評価 (ADR)	712	502(142, 1143)
30km 圏内に派遣された者／ADR	126	16(1, 242)
軍の事故処理作業員／公式線量記録 (ODR)、集団線量と集団計算法	7,255	121(30, 287)
合計	8,607	123(15, 480)

**表 3.4 事故処理作業の線量測定管理の期間区分**

期間区分	期間	内容
事故前	1978 年 ～1986 年 4 月 26 日	放射線基準 (Radiation Standard) 76 に従ってチェルノブイリ原子力発電所の線量測定が通常通り機能した。
初期	1986 年 4 月 26 日 ～1986 年 5 月 10 日頃	チェルノブイリ原子力発電所の線量測定が機能せず、戦時における軍の線量管理が適用された。
暫定期	1986 年 5 月 10 日頃 ～1986 年 6 月 1 日	チェルノブイリ原子力発電所と軍の線量測定機能が併存し、単一の線量限度(250mGy)が適用された。CA (建設局)-605 も独自の線量測定を行った。
主要期	1986 年 6 月～10 月	チェルノブイリ原子力発電所・CA-605・MOD (防衛省) がそれぞれ異なる方法で線量測定を行った。
通常期	1986 年 11 月以降	チェルノブイリ原子力発電所・CA-605・合弁事業体「コンビナート」・MOD が並行して線量測定を実施。通常の線量測定に徐々に移行するとともに、線量限度を引き下げる(1987～1988 年)。

国立がん研究所(アメリカ)の資金援助により入手可能な被曝線量測定情報の収集が進み、処理作業中の放射線管理に関するすべての電子データベースが得られた。残念ながら、生物物理学研究所(モスクワ)から来たロシアの同僚たちの努力により集められたこれらの情報は、SRUデータの線量データと関連づけるための信頼性のある識別子がなかったため、実際には使えなかった。

ウクライナ防衛省の被曝線量データのアーカイブを電子データに移し替えられたのは特筆すべき成果であった。この成果は、軍事アーカイブの専門家、軍の医学アカデミー、放射線医学研究センターによるもので、45,000以上のウクライナ兵(正規兵と予備役)の記録、部隊番号、処理作業参加期間とそのときの個人線量データを含む。防衛省(MOD)のアーカイブからのデータとSRUの公式線量記録(ODR)との比較はとても有益であることが示された。SRUに登録されている軍の事故処理作業員の被曝線量は軍のアーカイブのデータにも含まれていることが明らかになった。さらにSRUと軍のアーカイブのデータセット間の重複度はとても高く、軍のアーカイブに含まれているほとんどすべての記録がSRUに反映される。この結論は、SRUデータが軍の事故処理作業員(SRUに被曝線量が登録された人々の約90%を占める)の被曝線量の情報源として重要であることを確認するものである。

フランス・ドイツ共同イニシアチブ「チェルノブイリ」の枠組みにおいて、処理作業中の放射線防護と放射線管理の規則と実践についての調査が行われ、事故処理作業員の線量データの質・信頼性・完備性のより良い評価が可能となった。放射線管理による集団のカバー率の質とレベルの観点から、5つの期間が選び出された(表3.4)。

仮に事故前の時点で線量測定と放射線安全業務が十分に機能しても、突然の事故は、作業員の個人線量を効果的に測定し、緊急事態における必要なレベルの職員の放射線防護を提供することが全く失敗に終わることを明らかにした。混乱はすぐに収まり、1986年5月の中旬には、緊急事態作業員を支援する線量測定的システムが徐々に形作られ、6月初旬(事故から約1カ月後)には、この惨事を克服する活動に関わる主力に対する効果的な放射線防護と放射線管理の基盤が構築された。

表3.5 事故処理作業員の線量管理を実施した基本的な線量測定事業

	実施主体	管理機関	実施期間	事故処理作業員の範囲	データの質
1	チェルノブイリ原子力発電所放射線モニタリングサービス	ソ連エネルギー・電化省、ソ連原子力エネルギー省(1986年7月から)	1986年5月～現在	原発職員および原発に一時的に派遣された人員	十分～高(事故後の経過年による)
2	防衛省	ソ連防衛省	1986年5月～1990年末	軍の事故処理作業員	低
3	CA-605放射線管理部門	ソ連中規模機械製作省	1986年6月～1987年	CA-605における民間および軍の建設作業員	高
4	合弁事業体「Combinat」放射線管理部門および後継組織	ソ連原子力エネルギー省	1986年11月～現在	チェルノブイリ原発の建物外、30km圏内で働いた民間人	十分



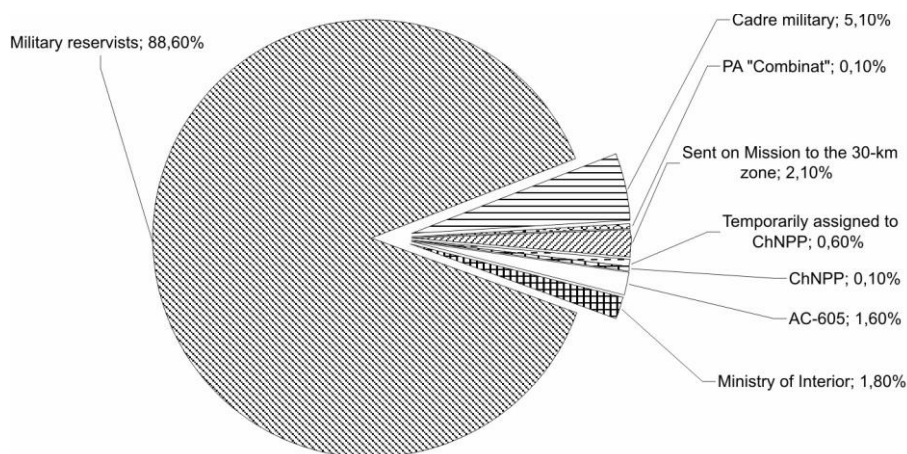


図 3.2 ウクライナ国家登録 (SRU) に含まれる事故処理作業員の所属の内訳 (調査による)

軍予備役： 88.60%

内務省： 1.80%

CA-605： 1.60%

チェルノブイリ原子力発電所職員： 0.10%

チェルノブイリ原子力発電所臨時職員： 0.60%

チェルノブイリ原子力発電所の 30km 圏内に派遣された人： 2.10%

Combinat： 0.10%

軍幹部： 5.10%

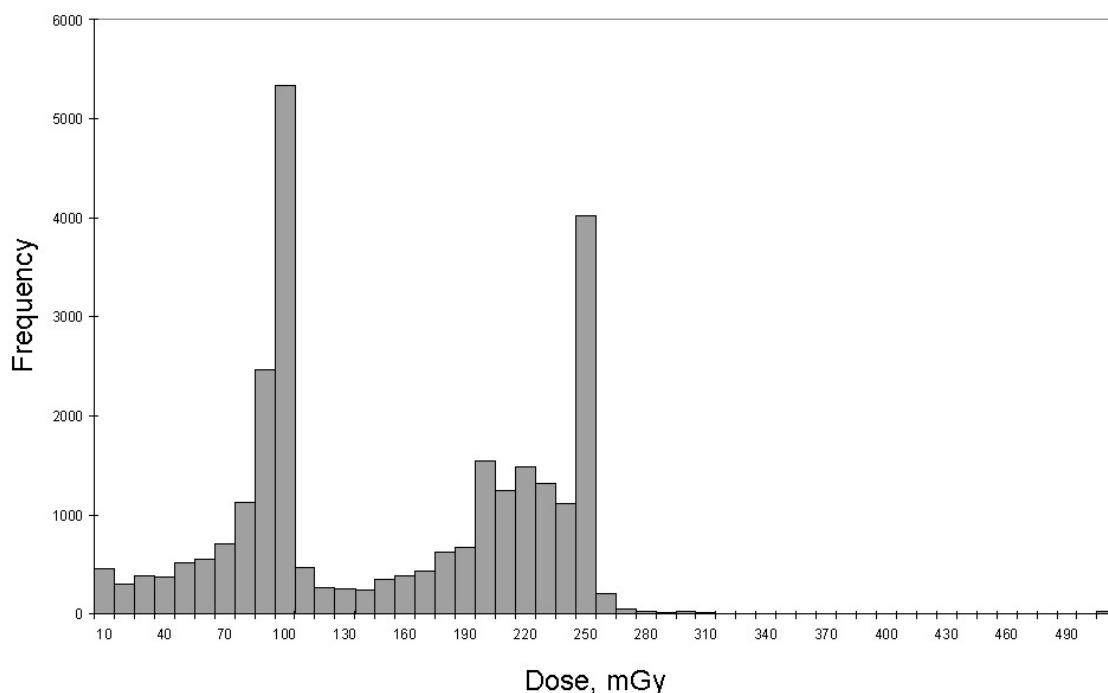


図 3.3 軍の予備役 (パルチザンと呼ばれた) の 1986 年～1987 年における個人被曝線量の分布

横軸：被曝線量[mGy] 縦軸：人

線量測定データ（線量モニタリング）の質は、どの機関が事故処理作業員の放射線防護と線量管理を実施したかに基本的に依存することが分かった。（1986～1990 年の）30km 圏内での処理作業期間中、4 つの大きな独立した線量測定事業といくつかの小規模な独立した線量測定サービス提供機関（ソ連科学アカデミー、ソ連医学アカデミー、原子力研究所統合チームなど）が活動していた。事故後に各機関が活動を開始した時期はさまざま、多様な集団をカバーし、事故処理作業員の個人線量を評価する方法もさまざまであった。そのため、線量データの完備性や質、信頼性も著しく多様であった（表 3.5）。

石棺の建設のために特別に組織された組織である、MMMB（ソ連中規模機械製作省）の CA-605 スタッフの線量管理はみごとに組織されていた。主にロシアに本拠地がある MMBB からの出張者からなる、CA-605 の 2 万人以上の従事者に対する質の高い TLD 個人線量管理を 100%カバーする素晴らしい仕事であった。

チェルノブイリ原子力発電所放射線安全事業で実施された放射線管理は、事故後の 1 週間（高い線量を測定するためには通常の線量測定法が不適切であることが明らかになった期間）の失敗と、1986 年の 6～7 月に完成した高品質の線量モニタリングへの段階的な処理によって特徴づけられる。チェルノブイリ原子力発電所の通常の線量管理のそのような失敗のネガティブな結果は、（おそらく事故処理作業員の中で最も被曝している）初期事故処理作業員の被曝線量が不明なままとなったことである。結果として、チェルノブイリ原子力発電所職員の線量データは（処理作業全期間中の事故処理作業員の個人線量データがどれくらいカバーされていたかという点での不十分さを含めて）不十分なものとなり、個人線量の再評価が必要となった。1986 年～1996 年にわたる、合計 1600 人のチェルノブイリ原子力発電所職員および一時的に派遣された作業員の個人線量が ADR 計算法によって評価された。1986 年の 7 月からは個人線量のモニタリングと記録がチェルノブイリ原子力発電所によって適切に実施されるようになり、その線量測定情報は高い質と完全度によって特徴づけられる。

30km 圏内で働く民間人（常勤および一時雇用）の線量管理は、組織上の問題のため 1986 年から 1987 年のある時期まで実質的に実施されていなかったが、この民間人の線量管理機能は IA 線量管理事務所（「Combinat」）と RIA プリピャチによって徐々に引き継がれていった。そのため、30km 圏内の民間人の、とくに 1986～1987 年の線量情報は不完全であり、かつ質は常に高いわけではない。

事故処理作業員の中での最大規模の集団は軍の事故処理作業員（職業軍人、つまり当初からの軍人と、多くの予備役から軍に召集された人たち）であった。SRU の ODR の約 95%が軍の事故処理作業員のものであるため、このカテゴリはとても重要である（図 3.2）。

このような軍の事故処理作業員の ODR の状況は、線量管理と線量証明によって SRU に提供された線量測定情報によりこの集団のカバー率が 100%になった結果によるものである。（軍人にとって軍票の補足書類である）線量証明は軍では全員に渡ったが、一方で民間の事故処理作業員にはほとんど渡っていない。しかし、軍の事故処理作業員に関する線量の模範的なカバー率の一方で、乱暴で不正確な線量測定法が理由で、軍の事故処理作業員の線量測定は個人被曝線量の最悪の測定精度によって歪められた。軍の事故処理作業員にはグループ単位（グループでひとつの）、かつグループとして計算された（線量測

定の状況や予定された作業から算出されるメンバー全員に適用される線量が一般に使われた。

軍の事故処理作業員の線量評価の精度とバイアスの遡及的評価の過程でこれらの方法で評価された平均線量は実際の被曝線量の 2 倍以上であったことがわかり、さらに幾何標準偏差（不確実性）はとても大きく、約 2.2 であったことも見出された。軍の事故処理作業員の個人線量の異常分布（図 3.3）は、軍によって定められている線量限度（250・100・50mSv）に沿って兵士の被曝レベルが報告されることをもたらした詐欺的な線量情報の証拠という解釈が広く流布していたが、確認されていないことは重要である。

統計的な手法により、誤った線量の測定結果が起こしたかもしれないことの寄与は全体の 10%を超えないこと、また、分布の異常な形状（分布の左側の激減と線量限度の上での断崖絶壁）は、許容線量を超えた兵士は除隊され、新しい予備役で置き換えられるという、線量管理の通例にはない措置にそれなりに一致することを示した。

概して、事故処理作業員のさまざまなグループに対して実施された線量管理とチェルノブイリ事故の影響を克服するための処理作業に従事した集団の放射線防護のシステムは、現在の規範と被曝限度に従うことができた。事故処理作業員の多大なる過剰被曝は事故の初期に、いわゆる初期事故処理作業員という、むしろ限られた、しかし懸念されるべき集団の特徴である。

その後（1986 年 5 月下旬から）、何千もの事故処理作業員には適切な放射線防護が施され、確立された線量限度（1986 年の 250mSv からその後は 100mSv、50mSv に徐々に引き下げられた）を超過するケースはまれとなり、放射線基準 76 が有効であった時期に記述された事態においてのみ発生した。

## 結論

1. 最大の被曝を被ったのはいわゆる初期事故処理作業員、すなわち、1986 年の 4～5 月に、放射線の状況が十分に探索されず、放射線管理のための適切な設備もないという条件下で処理作業に参加した人々である。
2. その後(1986 年 6 月以降)の事故処理作業員の被曝線量は当時の線量限度に概ね従っていた。処理作業中に導入された放射線防護のシステムはほぼ機能しており、許された線量を超えないように働いた。
3. 線量測定の質と完全度は事故処理作業員のグループによってまったく違っていた。そのため、既存の線量記録の使用には批判的に対処する必要が生じ、個人線量の遡及的評価、入手可能な線量データの補正や修正を要した。
4. 軍の事故処理作業員のデータには強力な偽造はないが、(実際の線量よりも多くなるほうに) ずれており、不正確である（不確実が高い）。
5. チェルノブイリ原発事故の事故処理作業員の健康への影響の調査のためには、個人線量の遡及的評価

をさまざまに応用して被験者の個人被曝線量を決定する必要がある。

6. 近年開発された遡及的線量評価の手法、とくに歯のエナメル質による線量評価（EPR）や解析的な計算法である RADRUE によって、チェルノブイリ後の疫学調査が効果的に支援できた。
7. 事故処理作業員の水晶体の被曝における  $\beta$  線被曝の影響は非常に大きい。事故処理作業員の白内障のリスク推定においてはこの要因を考慮する必要がある。

### 3.1.2 避難者の線量計測

プリピャチの住民 12,632 名（都市に避難した人口の約 25%をしめる A 集団）と 30 km圏内の他村落の住民 14,084 名（B 集団）について、個人の実効線量が、線量率の直接測定と個人問診にもとづく代用および確率的シミュレーションの手法を使って分析、再構成された。避難者全体はプリピャチ市とチェルノブイリ市をふくむ 30 km圏内の 104 集落を示す。ベラルーシ側の 30 km圏内 40 定住地に居住する 223 名もインタビューされ、調査対象にふくめられた。

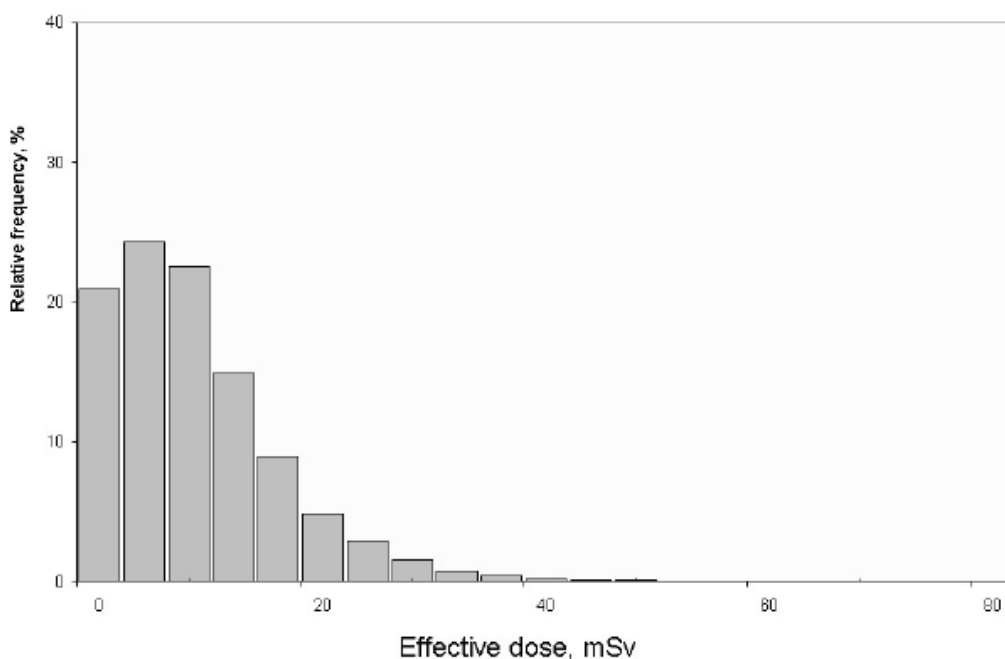


Fig. 3.4. The distribution of individual doses of irradiation for 12,632 persons evacuated from Prip'yat  
Results of deterministic calculation (data of SI «RCRM of AMS of Ukraine)

図 3.4 プリピャチ避難者 12632 名における個人被曝実効線量の分布（決定論的な計測結果）

縦軸：相対度数% 横軸：実効線量、mSV

表 3.6 プリピャチからの避難者の個人外部実効被曝線量分布の統計量（決定論的推計による）

総人数	12,632
平均屋外滞在時間の比率	0.21
$\gamma$ 線による外部被曝実効線量分布 (mSv)	
算術平均	10.1
中央値	8.93
幾何平均	6.79
幾何標準偏差	3.1
75 パーセンタイル	14
95 パーセンタイル	24
変動係数(%)	74

表 3.7 プリピャチ市からの避難者における個人外部被曝実効線量分布の年齢依存性（決定論的推計による）（ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ）

生年	1983-1986	1979-1982	1974-1978	1970-1973	1961-1969	1931-1968	1931 より前
年齢	0-3	3-7	7-12	12-16	16-25	25-55	>55
人数	1597	2104	2133	601	1159	4456	582
平均屋外滞在時間の比率	0.14	0.17	0.18	0.21	0.25	0.25	0.21
$\gamma$ 線外部被曝実効線量分布 (mSv)							
算術平均	8.32	9.09	9.0	10.5	10.8	11.5	10.2
平均誤差	0.15	0.15	0.14	0.31	0.24	0.12	0.32
中央値	7.35	7.89	7.63	9.35	9.63	10.5	8.56
幾何平均	5.50	6.15	6.32	7.16	6.77	7.85	7.07
幾何標準偏差	3.18	3.04	2.79	3.02	3.6	3.13	2.74
75 パーセンタイル	11.2	12.2	12.2	15.1	15.3	15.6	14.2
95 パーセンタイル	20.0	21.2	21.3	24.8	25.9	25.8	23.9
変動係数(%)	74	75	73	72	75	70	75

表 3.8 プリピャチ市からの避難者における個人外部実効被曝線量分布の職業依存性(決定論的推計による)(ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ)

職業集団	就学前	生徒	教師	医療従事者	接客従業員	労務者	技術者	公共企業体職員	チェルノブイリ原子力発電所従業員	主婦	年金受給者
人数	3494	2945	376	202	799	2629	670	210	452	156	375
平均屋外滞在時間比率	0.16	0.19	0.22	0.23	0.23	0.26	0.24	0.27	0.28	0.20	0.20
$\gamma$ 線外部被曝実効線量分布 (単位 mSv)											
算術平均	8.81	9.4	10.2	11.5	10.9	11.5	10.8	12.6	13.0	8.94	9.51
平均誤差	0.11	0.13	0.36	0.59	0.28	0.16	0.30	0.73	0.40	0.54	0.35
中央値	7.72	7.99	9.66	10.8	9.6	10.5	9.66	10.8	12.4	8.54	8.11
幾何平均	5.92	6.51	7.35	7.57	7.66	7.7	7.11	8.27	8.39	5.74	6.92
幾何標準偏差	3.11	2.88	2.72	3.16	2.86	3.21	3.46	3.09	3.84	3.25	2.53
75 パーセンタイル	11.89	12.8	13.7	16.5	14.5	15.9	14.9	16.7	18.0	12.8	13.4
95 パーセンタイル	20.64	22.6	22.4	27.4	25.1	26.2	24.7	29.7	28.2	20.1	20.4
変動係数(%)	74	74	68	73	72	71	72	84	66	75	70

避難前に累積した集団 A の平均実効線量は 10.1mSv であった。この集団中に被曝用量が 25mSv をこえた者は 534 名いたが、50mSv 以上を被曝した者は 18 名にすぎない。プリピャチのこの住民集団中で最高の被曝線量は 75mSv である。

個人実効線量の度数分布は図 3.4 に示し、この分布の統計量は表 3.6 に示した。

### 30 km圏内の集落からの避難者の外部被曝の計測

30 km圏内の集落から避難した 14,084 名の個人被曝用量を計測するために、農村人口のための線量測定モデルを利用した。計測期間は事故の発生から 30 km圏外に退避した瞬間にまでおよんだ。(避難者の約 25%をしめる) この集団における平均被曝実効線量は 15.9mSv であった。この集団で被曝線量が 50mSv を超過した者は 1,260 名、うち 100mSv を越えたのが 120 名であり、200mSv を越えたのは 214mSv に達した 1 名だけであった。修正を行なって計算した結果、平均被曝線量は 15.9mSv となり、先行調査時の平均 18.2mSv よりも 14%だけ低下した。この差異が生じた原因は複数ある。

チェルノブイリ原子力発電所から遠いところに住んでいて、被曝線量が相対的にかなり小さいとみられる 3119 名が、まずこの調査から除外された。その一方で、線量測定を批判的に吟味することにより、おそらく誤ったであろう測定値をいくつか除外した。さらに、より洗練された空間的補完の手法が採用されて、内挿の結果非合理に高くなる値が構成されることも避けられた。上記 2 要因のため、高被曝線量を示す人数がわずかに減少した。そのようなわけで、予備調査では被曝線量が 100mSv を超える者が 644 名とされたが、吟味の結果そのような線量の被曝者は 120 名に減少した。それだけでなく、都市部での計測の際にも問題になったことであるが、実効線量への変換における年齢依存因子を考慮することにより、吟味の結果、実効線量が一定程度減少した。

**表 3.9. 30 km圏内集落からの避難者における個人外部被曝線量分布の統計量（決定論的推計による）**（ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ）

総人数	14,084
平均屋外滞在時間の比率	0.41
γ 線外部被曝実効線量分布（単位 mSv）	
平均	15.9
中央値	7.77
幾何平均	7.13
幾何標準偏差	4.08
75 パーセンタイル	16.1
95 パーセンタイル	67.7
変動係数(%)	142

個人被曝線量の変動係数が 142%と非常に高いことは注目される。このように大きなバラツキは、30 km圏内集落ごとの被曝線量の顕著な相違、汚染地区における居住期間（すなわち避難時期）の相違、および個々人が屋外で過ごした時間の相違により説明されうる。個人被曝線量の分布（図 3.5）は、わずかに汚染された集落の住民（多数派）と高度汚染地区の住民から成る対象となった住民の異質性の証拠を示す。

屋外に滞在した時間の分布は相当に幅広い。農村住民の半数は 42%超の時間を屋外で過ごしており、屋外にいる時間が 65%をこえる住民も全体の 5%をこえることを図 3.6 は示す。都市住民が屋外活動時間 21%で代表される（表 3.7）とすれば、農村住民はより多くの時間を屋外で過ごしており、そのため被曝レベルはたしかにより高くなっている。被曝線量上昇に寄与したもうひとつの要因は、高度に汚染された地区に住民がより長期間滞在したことである。

各集落における再構成された個人被曝線量の統計量を表 3.10 に示した。被験者が 20 人未満の村については、中央値と 95%パーセンタイルは決定しなかった。B 地区をのぞくすべての地区において、各定住地における最大（95%四分位点）の被曝線量が 50mSv をこえることを、この表（表 3.7）は示す。平均的に被曝線量レベルが高かったのは C 地区のウシフ（154mSv）とマシェボ（79mSv）、および A 地区のチストガリフカ（70mSv）である。分布の統計量も表 3.11.に表示した。比較のため、（30 km圏内の人口密集地のなかでは被曝線量のレベルが低い地域である）チェルノブイリ市における統計量も表に示した。

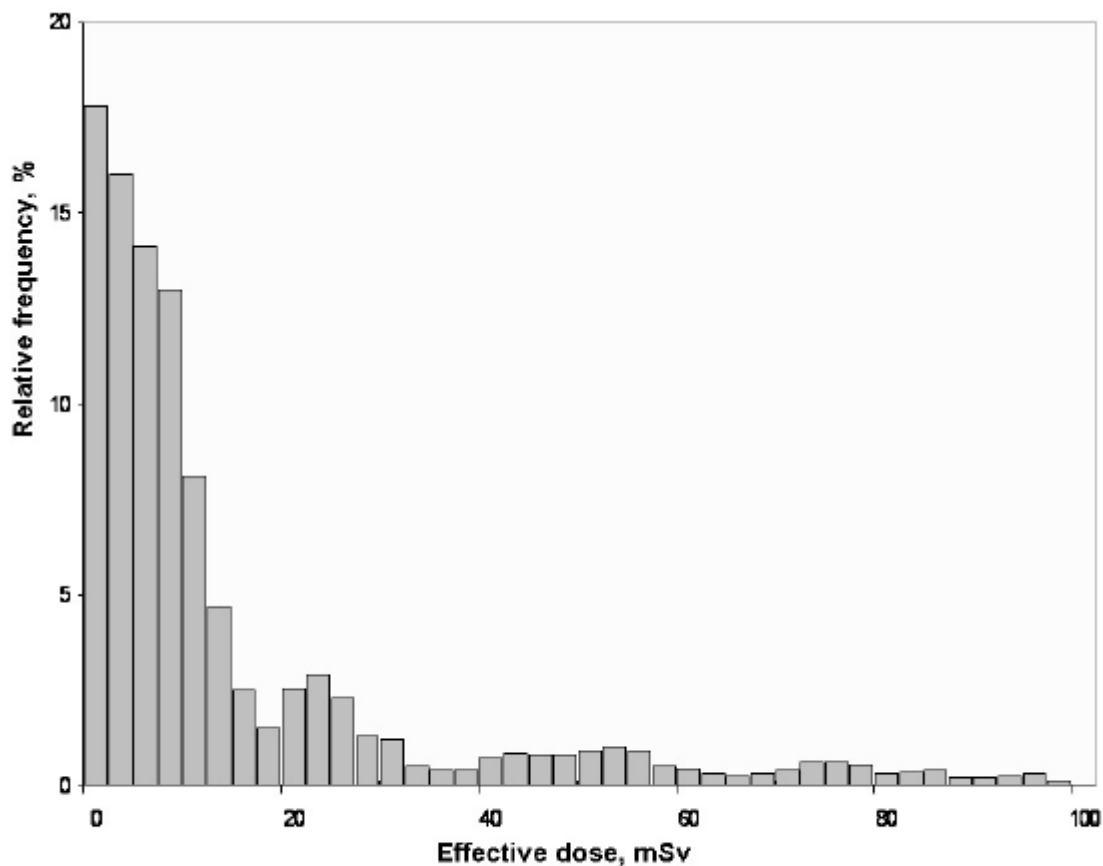
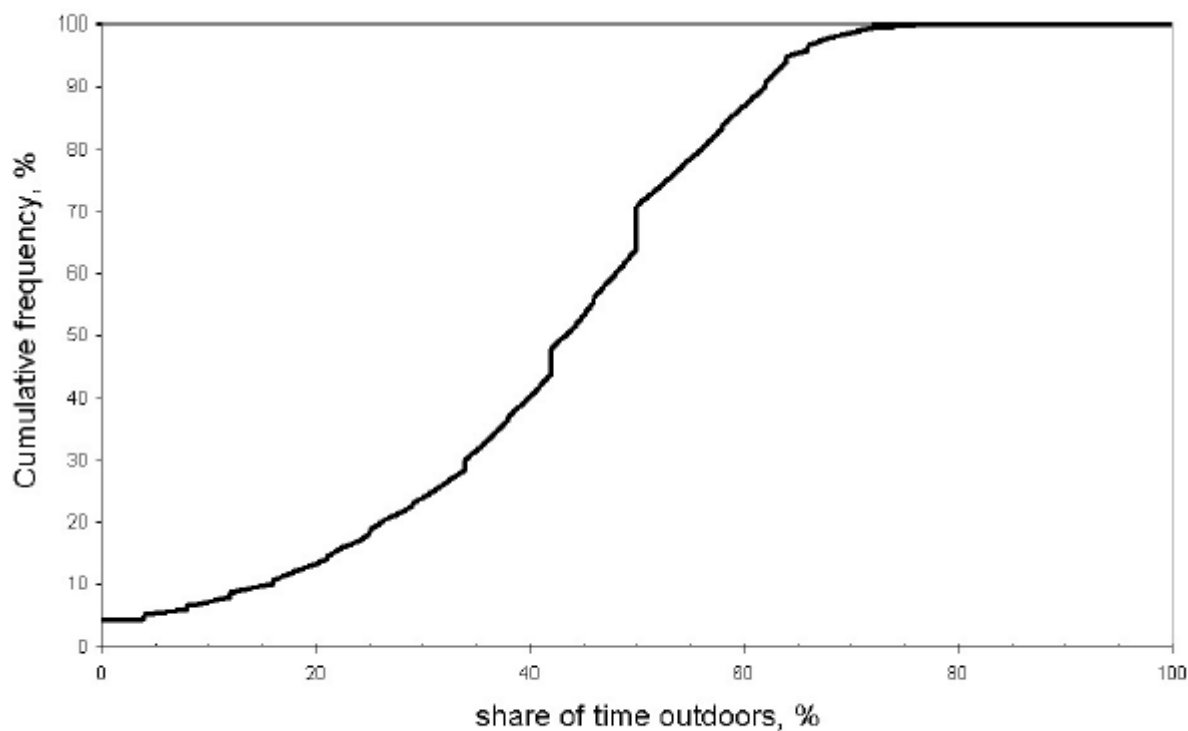


Fig. 3.5. The distribution of individual doses of irradiation 14,084 persons evacuated from settlements in the 30-km zone. Results of deterministic calculation (data of SI «RCRM of AMS of Ukraine).

図 3.5 30 km圏内定住地から避難した 14,084 名における個人放射線被曝線量の分布（決定論的推計の結果）（ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ）

縦軸：相対度数（％） 横軸：実効線量（mSv）





*Fig. 3.6. Cumulative distribution of shares of time outdoors for people who were evacuated from villages of 30 km zone (data of SI «RCRM of AMS of Ukraine).*

**図 3.6 30 km圏内集落からの避難者における屋外滞在時間の比率の累積分布（決定論的推計による）（ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ）**

縦軸：累積相対度数(%)      横軸：屋外滞在時間の比率(%)

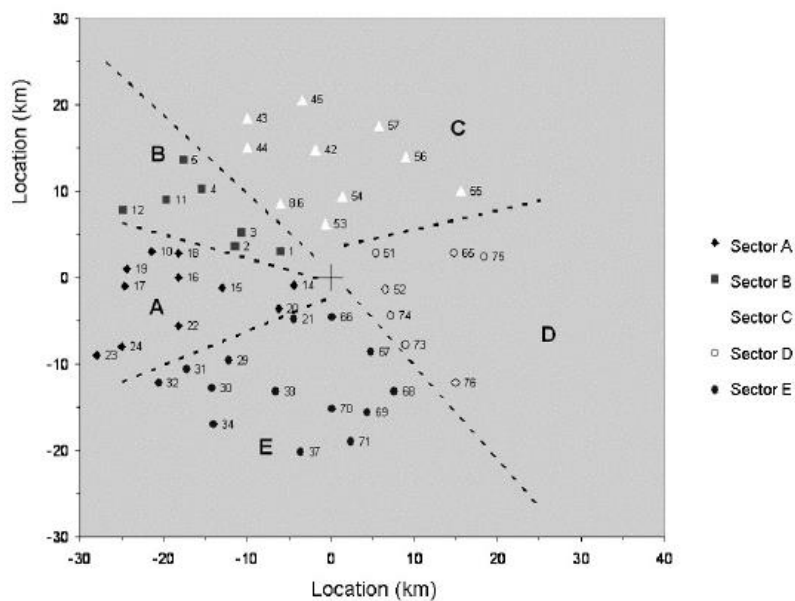


Fig. 3.7. Location of 30-km zone settlements and distribution per sectors. Line numbers of settlements and their names see in Tables 3.10, 3.11 (data of SI «RCRM of AMS of Ukraine).

図 3.7 30 km圏内定住地の位置と地区別分布 定住地の番号と名称については表 3.10, 3.11. 参照  
(ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ)

表 3.10 30 km圏内の特定定住地における個人被曝容量の決定論的推計による結果 定住地の位置について

は図 3.7.参照 (ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ)

番号	集落名	人数	避難日	屋外滞在時間 (%)	平均	中央値	95%パーセンタ イル
<b>A セクター</b>							
14	ヤニフ	63	3	34	22	9.5	84
20	チストガリフカ	331	7	44	61	70	98
15	ブリアキフカ	56	8	45	29	24	81
16	ノバクランスニチア	89	8	48	23	23	29
18	レチツィア	382	7	50	24	26	33
17	トフスティリス	408	8	51	52	60	81
19	クラスネ	297	8	49	34	15	97
10	ルドキー	43	7	32	10	12	19
22	スタラクランスニチ	20	7	36	9.2	8.4	17
23	ビルシャンカ	24	10	34	10	11	13
24	ルビアンカ	304	10	46	12	12	16
<b>B セクター</b>							
1	ノボシェペリチ	815	6	37	15	13	31
2	スタロシェペリチ	209	7	50	21	22	31
3	ベニオフカ	101	8	48	18	18	26
4	ピラソボカ	7	6	41	16	-	-
5	ドブリアディ	10	5	36	12	10	23
12	ハトキー	19	9	44	10	9	12
<b>C セクター</b>							
54	マシェボ	162	8	54	75	79	96
41	ウシフ	89	8	48	150	154	165
43	モロチキー	2	7	34	31	-	-
55	ザリツィア	2	6	36	12	-	-
56	クリウキー	14	7	44	66	-	-
57	クラジン	2	8	12	28	-	-
<b>D セクター</b>							
51	ジモビシチェ	431	7	37	37	42	56
52	クリバゴラ	146	8	40	47	51	67
74	スタロシルリア	100	8	40	3	3	4
73	コショフカ	126	8	45	9	8	12
76	パリシフ	286	8	46	4	4	5
65	チャパイフカ	211	8	39	6	7	8
75	チカロピチ	3	8	50	8	-	-
<b>E セクター</b>							
66	コパチ	432	8	40	45	53	66
67	レリオフ	604	8	42	22	23	30
68	チェルノバイリ	4558	7	32	6	6	14
69	ザリツィア	1611	8	52	7	8	10
70	ザビルリア	69	9	48	6	7	8
71	チェレバチ	263	9	47	5	5	8
37	ノボシルキー	202	9	48	6	6	8
33	コロゴド	601	8	52	4	5	6
29	ステチャンカ	333	8	43	4	4	5
30	ロズイズチェ	49	8	37	3	3	4
31	イリンツィー	366	8	45	3	3	4

32	ルドニアイリネツカ	15	11	36	4	4	5
34	グリーンカ	227	7	34	2	2	2

表 3.11 30 km圏内の特定地点における個人外部被曝線量分布の統計量（決定論的推計による）

集落 人数	ウシフ	マシェボ	チトガリフカ	チェルノブイリ
	89	165	331	4558
γ線外部被曝実効線量の分布 (mSv)				
平均	150	74.8	60.8	6.38
中央値	154	78.7	69.7	5.84
幾何平均	146	69.2	44.7	3.4
幾何標準偏差	1.28	1.66	2.77	4.14
95 パーセンタイル	165	95.7	98.1	14.4
変動係数(%)	15	27	52	85

同一地区内では個人被曝線量のバラツキは小さいことがわかる。小規模集落での幾何標準偏差が 1.4 から 2.8 であることは、被曝に関して、特に行動様式において、住民のあいだに相当な同質性がみられることを意味する。この点で例外となるのがチェルノブイリのような大きな定住地であり、その住民は多様な行動様式で特徴づけられる。さらに、チェルノブイリ住民の市外への移住や自主避難が、被曝線量の著しい幅をもたらした。かくしてチェルノブイリからの避難者における被曝線量分布の幾何標準偏差は非常に大きく 4.14 にも達するが、これは 30 km圏内の避難者全体に対して計算された値にきわめて近い（表 3.9）。

上記の典型的な例にもみられるように、総じて個人被曝線量の推計における不確実性は、農村部において都市部よりもわずかに高いが、しかし不確実性（変動係数）のレベルが 60%から 80%に達していても、事故により避難した住民の個人被曝線量を遡及的に評価するという目的のためには、その精度は適切であるといえることができる。

### 避難経路による被曝線量

プリピャチ住民が避難中に被曝した線量も本調査で推計された。1988-89 年の大規模避難者調査の際に作成された避難情報（公式フォーム）の分析により、プリピャチ住民の避難先への移動には、4 つの主要な経路があることがわかっている（表 3.12.）。

最も顕著なのは西へむかうポリスケへの経路である。この経路を採用した避難者は多い。それよりやや重要性が下がるのが、「赤い森」からコパチ・チェルノブイリ・チェレバチをへてキエフへといったキエフ経路である。重要性がより低いもう 2 つの経路は、チェルニギフへの鉄道、およびベラルーシ（ピラソロカ方面）への向かう自家用車等による避難経路（ピラソロカへの道路）である。

表 3.12 プリピャチからの避難経路の特徴 (調査による)

経路番号	避難先	経路コード	人数	比率(%)
1	ポリスケ	1	6831	42
2	キエフ	2	4478	27
3	チェルニギフ	3	938	6
4	ベラルーシ	4	612	4
5	不明	5	2271	14
6	30キロ圏内の集落	6	1063	7
		合計:	16193	100

このデータは総じて、プリピャチの住民の避難の組織と実態に関する情報と矛盾するものではない。

被曝状況を分析したところ、避難経路は本質的に異なる2つの部分（フェーズ）にわかれることがわかった。フェーズ1、すなわちチェルノブイリ原子力発電所から5km圏内を抜ける部分と、それを抜けてから避難先までの残りの経路（フェーズ2）である。

フェーズ1の重要な特徴は、避難路が数か所の非常に強力な放射能痕跡を通過していることであるが、その規模（特徴的なサイズ）はときにたった数十から数百メートルである。それ以外の避難経路（フェーズ2）は、線量率のずっと低い、低汚染地域を通るものである。

したがって、避難経路における被曝線量の評価は、フェーズ1とフェーズ2に対して別々に実施された。フェーズ1での被曝線量再構築は、チェルノブイリ原子力発電所から提供された放射線環境地図を使用して手作業で実施された。フェーズ2においては、線量率プロファイルを経路にそって積分することにより、被曝線量が推計された。

避難時の被曝線量の推計によると、市民防護計画で想定したポリスケ方面への職員の避難経路は、ベラルーシ方面への経路にくらべて本当により危険とはいえないことが判明した。一方、鉄道高架橋付近の汚染地区をプリピャチ・チェルノブイリ原子力発電所とヤニフ駅南の小住宅を横切って通過するかわりに、「ジュピター（Jupiter）プラント」付近で鉄道を越えてプリピャチをはなれるという経路の小さな変更により、避難時の被曝線量を相当にへらすことができた。

キエフへの経路もまた、チェルノブイリ・プリピャチ・原子力発電所を横切る高汚染地域を通過することによる、著しい高線量被曝がみられる。残りのその南の経路では汚染度が低いが、最初の局面で形成される被曝線量が高すぎる。

チェルニギフ方面への経路で被曝線量は最大になる。調査対象となった避難者の6%がこの経路を採用していた。この方面への避難は鉄道によりおこなわれるが、そのとき列車は相対的に汚染されたヤニフ駅から出発し、線量率がかなり高くなる敷地の柵にそって北にむかう。列車はさらに時刻表にしたがってセミホディ駅（チェルノブイリ原子力発電所の北東周辺）に停車するが、そこでまた高い線量の被曝が蓄積される。その結果、鉄道によるチェルニギフへの避難は、可能な避難路のなかで最大の汚染をもたらすものとなった。

結果として、大部分のプリピャチ住民が避難中に被曝した線量は11から19mSv以内であり、それを

避難前の放射線と比較することもできる。

避難中に通常の行動様式をとり、避難先を明確に表示した住民（合計 6,908 人がこの基準を満たした）の避難前と避難中の被曝線量を比較するために、その避難経路における個人被曝線量が割り当てられた。そして、避難中の被曝線量の被曝全体への寄与率の分布が決定された。表 3.8 に表示された避難中の被曝の寄与率にはかなりの幅があるものの、最頻値がおおよそ 0.5 である。平均で避難者の被曝線量の  $52 \pm 19\%$  が、避難中によるものであった。

よって、避難中の被曝線量を正確に推定すれば、プリピャチからの避難者の被曝様態が相当に変化することは明白である。プリピャチからビラソロカ（ベラルーシルート）に避難した人では、避難中の被曝が全体の 6%であることを、比較のために強調しておこう。

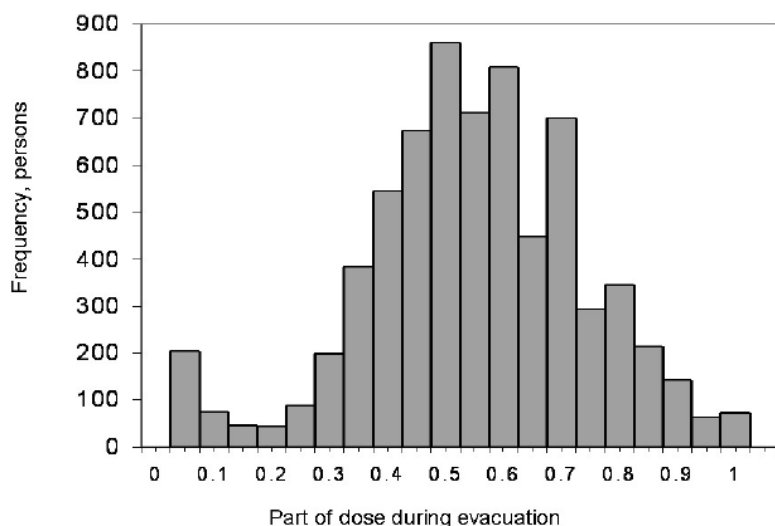


Fig. 3.8. Fractional contribution of dose received during the evacuation to the total dose of evacuees (data of SI «RCRM of AMS of Ukraine)

### 図 3.8 避難者の全被曝線量に対する避難中の被曝分の寄与率

（ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ）

縦軸：頻度（人） 横軸：避難中の被曝の寄与率

このような努力の結果、4つの経路それぞれについて全体的な被曝線量が推計された。避難中の被曝線量を考慮するならば、市民防護計画であるポリスケ方面への人員調整避難経路は、最適ではなかった。ベラルーシ方面への避難は、他のどの経路での避難よりも被曝線量が桁違いで少ないという結果となった。他方、チェルノブイリ・キエフ方面への自動車での避難や、チェルニギフへの鉄道での避難は、より高い線量の被曝へとつながった。

避難中とプリピャチに留まっていた期間中の推定個人被曝線量を比較すると、避難中の被曝線量は避

難前の被曝線量と同等か、あるいはそれを上回ってさえいることが示された。避難者の被曝線量における避難中の被曝の寄与率は、平均すると約 **50%**であった。したがって、避難中の被曝線量を考慮すると、避難者の被曝の全体像は大きく変わる。

### 3.1.3 住民の被曝線量

#### 1986 年の放射線モニタリング

ウクライナにおける 1986 年の放射線緊急モニタリングは、文字通り最初の数時間、数日で組織され、地表の放射性降下物からの空気中へのガンマ線フィールド比の質量測定が実施され、その後、最も放射能に汚染された地域を中心に放射性核種の降下物に関するガンマ分光測定調査のための土壌試料採取が実施された。

住民の住む汚染された地域の放射線被曝の管理に関して、甲状腺に蓄積するヨウ素放射性同位体が内部放射線の主な原因であった（5～6 月）事故の最初（急性）期、および軟部組織の中に比較的均等に蓄積されるセシウムの放射性同位体が基本的な役割を果たしていた中間期の始まり（1986 年 8 月～12 月）にみられたように、線量測定モニタリングは広く十分に良い質で行なわれた。

1986 年 5 月～6 月のウクライナのキエフ州とジトーミル州とチェルニーギフ州の北部地区の、合計 15 万（うち 13 万が子供とティーンエイジャー）を超える住民の甲状腺中の放射性ヨウ素由来の放射能の直接測定がなされた。さらに、1986 年 7 月から、キエフ州とジトーミル州の住民のおよそ 2 万 3000 人に対する、ホールボディカウンタ(WBC)を使用した身体中のセシウム同位体(セシウム 137 とセシウム 134)の被曝線量の測定がなされた。



## 1986 年の被曝線量 全身被曝線量（内部被曝線量）

表 3.13 は、1986 年の夏と秋に行なわれたホールボディカウンタ(WBC)の測定の結果によって評価されたキエフ州とジトーミル州の地区の住民のセシウム由来の内部放射線の平均量の値を示す。

**表 3.13 1986 年のキエフ州とジトーミル州の地区の子供と大人の放射性セシウムからの内部被曝量の平均**（土壤に降下したセシウム 137 の密度が 37kBq/m<sup>2</sup> を超える地域の WBC の測定の結果； ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ）

	10 歳未満			10 歳以上			成人		
	WBC 測定数	線量、mSv		WBC 測定数	線量、mSv		WBC 測定数	線量 (mSv)	
		GM	GSD		GM	GSD		GM	GSD
Zhytomyr region									
Korostens'kyi	-	-		-			34	0.13	2.9
Lugyns'kyi	-	-		-			12	0.32	4.8
Narodytskyi	1995	1.8	3.9	1120	1.8	3.9	2753	1.56	4.3
Ovruchskiyi	134	1.1	2.8	28	0.43	2.5	18	0.19	3.5
Kyiv region									
Bilotserkivskiyi	30	0.44	2.3	26	0.89	1.8			
Boguslavskiyi	28	0.28	2.4	17	0.3	3	-		
Ivankivskiyi	208	0.61	3.3	261	0.42	3	652	0.29	3.6
Kagarlitskiyi	12	0.71	3.2	78	0.39	2.6	-		
Poliskiyi	1323	1.2	3.5	1061	0.86	3.3	1872	0.81	3.5
Stavyschenskyyi				31	0.11	3.6	527	0.09	2.8
Chernobylskiyi	1195	1.3	5.6	518	0.58	3.3	304	0.61	5.5

注 GM – 幾何（相乗）平均、GSD – 幾何標準偏差

WBC によるモニタリングが放射能に汚染された地域の住民全体を全くと言って良いほどカバーできていないため、チェルノブイリから放出された放射性核種の移動シミュレーションが、事後評価で通常使われる非定常モデルが示すウクライナの気象条件における食物連鎖のリンク、環境中の物質（とくに食物）の放射能汚染の予測動態とそのレベル、およびこれら汚染された物質を摂取した人々の被曝線量を使って実施された。

予想通り、1986 年の内部被曝線量の主な原因は食事の二つの構成要素の汚染であった。葉菜と牛乳（及び乳製品）である。

このモデルによって得られた、緊急事態により放出された基本的な放射性核種からの内部被曝実効線量の評価（土壤の <sup>137</sup>Cs、1kBq/m<sup>2</sup> 当たり）は、表 3.14 に示されている。

緊急事態の最初の年の放射線量と後年に蓄積される放射線量との比率の予測結果によると、西ヨーロッパ諸国においては、最初の年の被曝線量は後の 10 倍またはそれ以上に達するかもしれない。同時に、放射性核種が土から草木、さらに牛乳へ移動する際の（ヨーロッパ諸国に特徴的でない）高い移行係数をもたらすウクライナとロシアの様々な土壤の性質が、ウクライナの民間部門の酪農生産の極めて旧式

な技術と相まって、最初の年と後の年の内部被曝線量の比の多様性をもたらした。

**表 3.14 牛乳と葉菜の摂取によって引き起こされたウクライナの成人の農村住民の（土壌の 1kBq/m<sup>2</sup> あたりの <sup>137</sup>Cs に標準化された）チェルノブイリから放出された主な放射性核種からの 1986 年の内部被曝の実効線量（ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターのデータ）**

放射線核種	内部被曝線量構成要素別にみた相対寄与率					
	牛乳		葉菜		合計	
	土壌の 1kBq/m <sup>2</sup> あたりの <sup>137</sup> Cs に標 準化された 実効線量 ( $\mu$ Sv)	寄与率	土壌の 1kBq/m <sup>2</sup> あ たりの <sup>137</sup> Cs に標 準化された 実効線量( $\mu$ Sv)	寄与率	土壌の 1kBq/m <sup>2</sup> あたりの <sup>137</sup> Cs に標 準化された 実効線量 ( $\mu$ Sv)	寄与率
<sup>89</sup> Sr	0.1	0.16	0.064	1.6	0.16	0.26
<sup>90</sup> Sr	0.39	0.7	0.094	2.4	0.48	0.8
<sup>95</sup> Nb	9.8E-07	1.7E-06	0.021	0.5	0.021	0.03
<sup>95</sup> Zr	4.8E-06	8.2E-06	0.042	1.1	0.042	0.07
<sup>103</sup> Ru	0.002	0.003	0.11	2.8	0.11	0.18
<sup>106</sup> Ru	0.015	0.026	0.37	9.5	0.39	0.6
<sup>125</sup> Sb	0.39	0.7	0.015	0.38	0.41	0.7
<sup>134</sup> Cs	6.8	12	0.26	6.6	7.1	11
<sup>137</sup> Cs	10	17	0.36	9.2	10	17
<sup>136</sup> Cs	0.08	0.1	0.014	0.35	0.10	0.16
<sup>131</sup> I	41	70	2.3	57	43.3	69
<sup>141</sup> Ce	1.0E-07	1.7E-07	0.038	1.0	0.038	0.06
<sup>144</sup> Ce	2.5E-06	4.3E-06	0.21	5.3	0.21	0.34
<sup>140</sup> Ba	0.001	0.002	0.099	2.5	0.10	0.16
全放射線核種で	59	100	4.0	100	63	100

ウクライナでは（表 3.15）、最初の年（256 日）の内部被曝の実効線量と後の約 20 年（1987 年～2005 年）の適切に推計された実効被曝線量との比率は、当該居住地における「土壌・牛乳」と名付けられた移行係数（TF-92）の集計値に基本的に依存する。TF-92 の値が 1kBq/m<sup>2</sup> あたり 0.5Bq/l を超過しない地域では、最初と以後 19 年の被曝線量の比率では最初の年が 8～50 倍となる。1kBq/m<sup>2</sup> あたり 0.5～2Bq/l の範囲に TF-92 がある地域では、この比率が 1～2 倍となるが、まだ最初の年が大きい。さらに、TF-92 の値が 1kBq/m<sup>2</sup> あたり 2～20Bq/l である居住地においては、事故後の中・後期の被曝線量が最初の年の被曝線量を超え、最初の年の被曝線量はその後の被曝線量の 13～50%となる。TF-92 の値が非常に高く 1kBq/m<sup>2</sup> あたり 20Bq/l を超過するある地域では、最初の年の被曝線量は後年の累積被曝線量の 9%を超えない。

**表 3.15 「土壌-牛乳」の移行係数 (TF-92) の集計値の区分毎の、1986 年の内部被曝量の 1987 年～2005 年の適切に予測された被曝線量に対する比率 (放射線量はメソッド-97 によって推定された (ウクライナの合計 4270 の居住地))**

TF-92 土壌 1 m <sup>2</sup> 1kBq あたりの Cs に標準化した 牛乳 1 リットルあたりの Bq 数	D-86/D87-05 線量比率	居住者数
<0,05	49	269
0,05-0,1	48	261
0,1-0,2	15	1106
0,2-0,5	8,0	1097
0,5-1	2,6	478
1-2	1,1	354
2-5	0,51	404
5-10	0,25	146
10-20	0,13	115
20-100	0,09	40

\*TF-92 の値は一定期間 (1991 年～1993 年) の全ての居住地の土壌と牛乳の放射能汚染モニタリングの結果にのみ基づいて決定された。

したがって、いくつかの農業生態学的条件 (牧草地の泥炭湿地性の酸性土) では、緊急事態の最初の年の被曝線量と比べて、事故後の期間に住民が著しく多い内部被曝を被ることがある (例えば、リヴネ州ロキトネ地区とヴォルィーニ州カーミニ・カシールスキー地区の多くの居住地)。他方、黒土が広がっている地域では、後年に生じた内部放射線量は最初の年の量のごく一部分かもしれない (例えば、チェルカースィ州の多くの居住地)。

## 甲状腺の被曝

チェルノブイリ事故後の放射線被曝と予測される放射線による影響という点で最も重要なのが、主に 1986 年 5 月～6 月の汚染された牛乳・乳製品と葉菜から摂られた放射性ヨウ素による子供の甲状腺の被曝であった。直接測定の結果に基づき構築され、確認された甲状腺被曝線量の再構築のための 3 水準システムは、ウクライナの全ての居住地に対する、年齢性別ごとの居住地に固有の甲状腺被曝線量の平均を計算することを可能にした。(表 3.16)

表 3.16 年齢区分ごとのウクライナ住民の各地域平均の甲状腺被曝線量 (mGy)

地域	年齢区分ごとの甲状腺被曝線量 (mGy)				
	< 7 歳	7-14 歳	15-18 歳	>18 歳	全年齢で
Vinnitsa	37	13	9.8	9.2	12
Volyn	87	33	25	21	31
Lugansk	12	4.0	3.1	3.1	4.1
Dnipropetrovsk	13	4.4	3.4	3.4	4.5
Donetsk	24	8.0	6.0	6.1	8.1
Zhytomyr	231	87	67	60	81
Transcarpathian	7.6	2.8	2.1	1.8	2.7
Zaporizhzhia	26	8.8	6.2	6.5	8.8
Ivano-Frankivsk	19	7.1	5.3	4.6	6.7
Kyiv	202	75	58	53	71
Kirovograd	89	31	23	23	30
AR Crimea	34	12	8.8	8.4	12
Lviv	14	4.9	3.8	3.5	4.8
Mykolaiv	20	7.1	5.4	5.0	7.0
Odessa	15	5.2	3.8	3.7	5.1
Poltava	54	19	15	13	18
Rivne	17	64	49	42	62
Sumy	71	25	19	19	24
Ternopil	18	6.4	4.8	4.5	6.2
Kharkiv	26	8.7	6.5	6.6	8.6
Kherson	30	11	7.8	7.3	10
Khmelnysky	39	15	11	10	14
Chercassy	14	52	39	37	49
Chernivtsi	40	14	10	9.3	13
Chernigiv	15	55	43	37	50
Kyiv city	94	30	23	24	32
Sevastopol city	56	18	14	14	19
All Ukraine	55	20	15	14	19

表 3.17 子供、思春期および成人の住民の甲状腺平均吸収線量の相対分布

線量 (階級値) Gy	各年齢層における人口の分布				
	7 歳未満	7~14 歳	15~18 歳	18 歳以上	全年齢で
< 0.05	72	93	95	95	92
0.05-0.1	15	4.4	3.5	3.7	5.0
0.1-0.2	8.2	2.2	1.3	1.1	2.0
0.2-0.5	3.7	0.76	0.40	0.21	0.65
0.5-1.0	0.77	0.08	0.05	0.04	0.12
1.0-2.0	0.15	0.03	0.02	0.01	0.03
2.0-5.0	0.04	0.007	0.005	0.004	0.008
5.0	0.01	0.0005	-	-	0.001

## 大惨事以降の中期・後期における放射線量測定の認定（訳注：ウクライナではパスポートイゼイションと呼ばれる）と放射線モニタリング

1991年に採用された「年間総実効被曝線量のコンセプト」は、放射線の住民に対する影響を減少させる手段を計画し、実行することによって重要であった。ウクライナ法 No.791a-XII 「チェルノブイリ大惨事の結果として放射能汚染を経験した土地の法的制度」（1991年）と、ウクライナ法 No.796-XII 「チェルノブイリ大惨事によって影響を受けた市民の地位および社会的保護」（1991年）で、このコンセプトの規則が法制化された。このコンセプトの基本原則は、危機的な状況におかれる集団（1986年の出生児）に対して、チェルノブイリ大惨事に関連した付加的な放射線の推計実効線量は、（事故前から住民が被曝している自然放射線量を超過する線量として）年 1.0mSv(0.1rem)、そして生涯累積で 70.0mSv(7.0rem)を超過してはならないとしたことにある。

放射性核種による土壤汚染の密度が暫定基準として得られた。これらの法律は、放射能汚染の4つの地域区分（ゾーン）を定めている（表 3.18）。

1991年7月23日のウクライナ閣議法令 No.106 の付録1に、2172の居住地のリストが挙げられている。これらはウクライナ法 No.791a-XII による放射能汚染の4つのゾーンのうちの1つに公式に割り当てられた。

年間放射線量測定の認定はウクライナでは1991年から2008年まで実施された。被曝線量の計算は全て、ウクライナ閣議法令 No.106 によって決定された地域においてそこで生産された牛乳とじゃがいもの放射性セシウム汚染の年間測定の結果に基づいた。さらに、被災地域の住民の放射線モニタリングのために、ウクライナの総合WBCネットワークが1995年～1997年の間に組織され、被災地域の住民の体内放射性セシウムレベルの効果的な管理を提供している（図 3.9）。

表 3.18 ウクライナ法 No. 791a-XII (1991 年) によって定められた年間放射線量と放射性核種の降下物の基準に基づく汚染地域の区分 (a)

汚染地域の区分け		区分けの基準			
		土壤の放射性降下物, 1 m <sup>2</sup> あたりの kBq 数 (※)			年間の線量 (mSv)
		セシウム	ストロンチウム	プルトニウム	
1	立ち入り禁止ゾーン	-	-	-	-
2	強制的移住ゾーン	>555	>111	>3.7	>5
3	自発的移住補償ゾーン	185-555	5.5-111	0.37-3.7	>1
4	放射線高度監視ゾーン	37-185	0.74-5.5	0.18-0.37	>0.5

※法文中では降下物の密度が Ci/km<sup>2</sup> の単位で与えられる

ウクライナで最も影響を受けた 12 の州のほとんどの医療機関に、ウクライナ医学アカデミー放射線医学研究センターの放射線量測定管理部門によって開発されたプログラム（手法と計量を担うソフトウェア）を使う人間生態学研究所（キエフ）で生産された 57 ユニット（40 の設置型と 17 の可搬型）の WBC（Skrynner-3M）が提供された。1995～2008 年のおよそ 80 万の WBC の測定が WBC のネットワークによって実施された。表 3.19 は、2001 年～2008 年の被曝線量認定の結果として確立している地域による全ての認定された居住地の被曝線量の相対分布を示している。

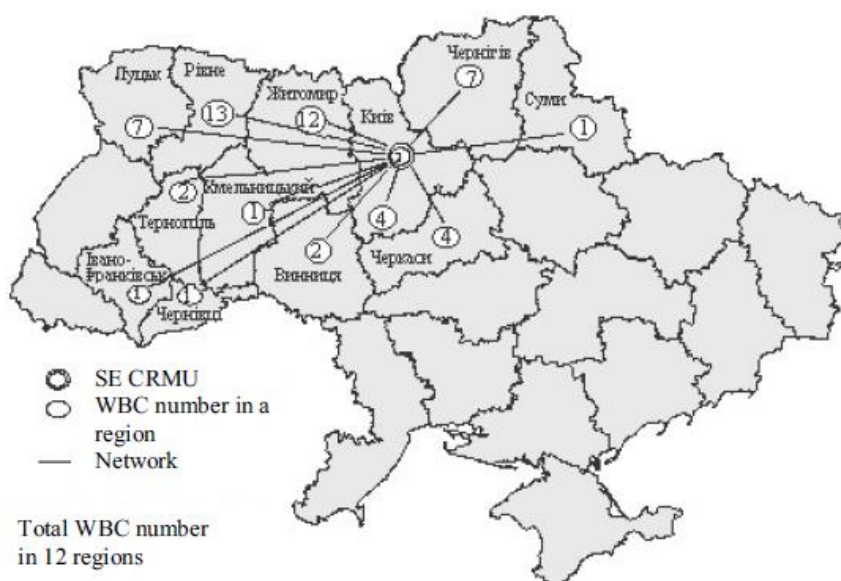


Fig. 3.9. WBC Unified Network of Ukraine, established under the dosimetric certification.

### 図 3.9 放射線量測定の認定の下で確立されたウクライナ WBC 統一ネットワーク

最大数の居住地の被曝線量が認定された地域を選んだ上でのウクライナ各州における、2001 年、2005 年と 2008 年の各ゾーンの動態が表 3.19 に示されている。表データから見てとれるように、2001 年以来、全ての認定された居住地の 15～19%は「強化放射線モニタリング」という 4 番目のゾーンにあり、概ね 70～80%は放射能汚染が確立している土地のゾーンの外にあった。

2001 年～2008 年にキエフ州とジトミル州では、ウクライナ閣議法令 No.106 による公式分布と比べると、2～4 番目のゾーンとされる居住地の数が継続的に減少したことが注目されるべきである。（表 3.20）

これらの地域のほとんどの居住地は認定年間被曝線量が 0.5mSv を超過しなかった安全圏へ移された。

リヴネ州では、ウクライナ閣議法令 No.106 によれば、大多数の居住地(~76%)は、3 番目のゾーンの自

発的移住ゾーンに帰属された（認定された被曝線量は 1~5mSv の間にあるはずである）。しかし、2001 年には既に居住地の 30%が、2008 年には居住地の 7%だけがこの区分に留まっていた。ほとんどの居住地は、4 番目のゾーン（認定被曝線量 0.5~1mSv）、あるいは「安全」地域（認定被曝線量 <0.5mSv）へと「移行」した。

表 3.19 認定被曝線量の値に基づく居住地の分布の時系列変化（2001 年~2008 年）

年	認定された居住地の数	各居住地での認定被曝線量の分布割合 (年間の mSv 数)			
		< 0.5	0.5-1	1-5	>5
		安全	ゾーン 4	ゾーン 3	ゾーン 2
2001	2163	67	15	18	0,23
2002	2163	68	15	17	0,14
2003	2163	71	16	13	0,09
2004	2163	72	19	9	< 0,01
2005	1831	66	14	5	< 0,01
2006	1967	82	14	3,5	0,05
2007	1596	81	15	3,6	< 0,01
2008	1925	86	12	0,02	-

表 3.20 2001 年、2005 年と 2008 年のウクライナの居住地の認定被曝線量の比較分析

居住地域	居住地 総数	居住地域での被曝線量の分布（年間の mSv 数）											
		2001				2005				2008			
		< 0.5	0.5-1	1-5	>5	0.5	0.5-1	1-5	>5	0.5	0.5-1	1-5	>5
Vinnitsa	89	89	-	-	-	88*	-	-	-	87	-	-	-
Volyn	166	-	3	163	-	107	55	3	-	121	40	3	-
Zhytomyr	698	472	135	93	-	524	96	43	-	569	74	14	-
Kyiv	469	441	23	5	-	428	13	3	-	383	9	-	-
Rivne	339	99	109	126	5	151	122	59	-	150	99	25	-
Cherkassy	103	101	2	-	-	100*	2*	-	-	100	2	-	-
Chernigiv	248	205	41	2	-	216	11	-	-	205	11	-	-

注: \* - 2006 年のデータ（2005 年には被曝線量の認定が実施されなかった）

2008 年には、ウクライナ閣議法令 No.106 によって 2~4 番目のゾーンとされたキエフ州とジトームル州の居住地の約 82%の認定された線量が実際には年 0.5mSv 未満であった。すなわち、これらの居住地の土地の被曝線量基準は、既に「被災者」の状況を失っていた。リヴネ州では、居住地の 44%が年 0.5mSv 未満の認定された被曝線量を保持していた。

放射線量基準によって 3 番目のゾーン（年 1~5mSv）に帰属される居住地は年々減少してきた。2 番目のゾーン（放射線量 >5mSv）については、2000 年以来、キエフ州とジトームル州で当該ゾーンに属する居住地は実際にはなく、また、リヴネ州でも 2001 年にこの区分に帰属される居住地はわずか 5 つであった。

チェルノブイリ事故後の 25 年間にわたって累積されたウクライナ住民の被曝線量

表 3.21 1986 年の土壤に降下したセシウム 137 の濃度に基づくウクライナの各地域における外部、内部および合計の実効被曝線量 (mSv)

地域	降下したセシウム 137 の濃度 k Bq/m <sup>2</sup>	人口割合	下記年数における実効線量(mSv)				
			外部被曝		内部被曝		合計
			1986	1987-2011	1986	1987-2011	1986-2011
Vinnitsa	<37	94	0.24	0.47	0.51	0.25	1.5
	37-185	6.3	1.7	3.4	3.40	0.31	8.8
Volyn	<37	97	0.19	0.38	0.43	2.4	3.4
	37-185	2.6	1.4	2.9	3.0	13	20.3
Lugansk	<37	99	0.34	0.68	0.48	0.22	1.7
	37-185	0.69	1.0	2.1	1.7	0.33	5.2
Dnipropetrovsk	<37	100	0.1	0.19	0.18	0.19	0.65
	37-185	0.02	1.29	2.6	2.8	0.40	7.1
Donetsk	<37	94	0.2	0.39	0.29	0.21	1.1
	37-185	5.6	1.1	2.2	1.4	0.27	5.0
Zhytomyr	<37	75	0.2	0.4	0.37	0.58	1.5
	37-185	17	2.5	5.1	1.4	5.9	14.9
	185-555	7.2	6.8	14	1.9	3.4	25.8
	555-1440	0.69	20	39	8.2	12	79
	>1440	0.06	52	103	22	32	208
Transcarpathian	<37	100	0.12	0.25	0.24	0.19	0.80
Zaporizhzhia	<37	100	0.07	0.15	0.15	0.16	0.52
Ivano-Frankivsk	<37	95	0.26	0.52	0.55	0.36	1.7
	37-185	4.6	1.7	3.4	3.5	0.5	9.0
Kyiv	<37	76	0.45	0.89	0.5	0.42	2.3
	37-185	22	1.9	3.8	1.5	1.0	8.2
	185-555	1.1	8.2	16	6.5	2.7	34
	555-1440	0.66	26	52	8.2	1.5	88
	>1440	0.08	92	184	41	57	375
Kirovograd	<37	99	0.20	0.40	0.37	0.15	1.1
	37-185	0.68	1.6	3.2	3.5	0.29	8.7
AR Crimea	<37	100	0.12	0.23	0.20	0.17	0.72
Lviv	<37	100	0.09	0.17	0.17	0.16	0.58
	37-185	0.008	1.2	2.4	2.6	1.5	7.7
Mykolaiv	<37	100	0.12	0.24	0.22	0.15	0.73
	37-185	0.06	2.4	4.8	5.3	0.50	13
Odessa	<37	100	0.19	0.38	0.34	0.15	1.1
	37-185	0.19	1.3	2.7	2.9	1.5	8.5
Poltava	<37	100	0.17	0.33	0.31	0.22	1.0
Rivne	<37	78	0.28	0.56	0.45	1.1	2.4
	37-185	21	2.2	4.3	1.9	14	22
	185-555	0.39	7.2	14	5.9	14	42
Sumy	<37	99	0.21	0.42	0.41	0.32	1.4
	37-185	0.98	1.91	3.8	4.1	1.2	11
Ternopil	<37	97	0.15	0.30	0.35	0.37	1.2
	37-185	3.0	1.6	3.1	3.3	0.77	8.7
Kharkiv	<37	100	0.18	0.36	0.32	0.17	1.0
	37-185	0.01	1.12	2.2	2.4	0.54	6.3
Kherson	<37	100	0.07	0.14	0.14	0.13	0.49



Khmelnysky	<37	98	0.16	0.33	0.35	0.26	1.1
	37-185	1.7	1.6	3.3	3.6	0.29	8.7
	185-555	0.003	6.7	13	15	0.15	35

Chercassy	<37	84	0.30	0.59	0.59	0.27	1.7
	37-185	15	1.9	3.7	3.3	0.54	9.5
	185-555	0.37	7.3	15	15.8	0.12	38
Chernivtsi	<37	92	0.36	0.72	0.74	0.35	2.2
	37-185	7.6	1.7	3.4	3.2	0.34	8.6
	185-555	0.31	5.9	12	13	0.25	31
Chernigiv	<37	97	0.23	0.45	0.41	0.50	1.6
	37-185	3.2	1.8	3.6	2.3	2.2	9.8
	185-555	0.08	7.4	15	8.1	4.0	34
	555-1440	0.01	18	35	35	12	100
Kyiv city	<37	100	0.48	0.96	0.28	0.13	1.9
Sevastopol city	<37	100	0.2	0.40	0.34	0.14	1.1

表 3.22 土壌に降下したセシウム 137 の密度に基づくウクライナ全域の住民の人口で重み付けした実効被曝線量の分布

土壌中のセシウム 137 の濃度(kBq/m <sup>2</sup> )	人口割合	被曝量 (mSv)				
		外部被曝		内部被曝		合計
		1986	1987- 2011	1986	1987-2011	1986-2011
<37	96	0.20	0.41	0.33	0.29	1,2
37-185	3.7	1.8	3.7	2.1	3.3	11
185-555	0.29	7.0	14	3.5	3.4	28
555-1440	0.04	23	46	8.4	6.4	84
>1440	0.005	77	154	34	47	313

表 3.23 ウクライナ各地方の住民の人口で重み付けした全身実効被曝線量 (mSv)

地域	人口で重み付けした各時期別の全身実効被曝線量 (mSv)			
	1986	1987-1996	1997-2011	1986-2011
Vinnitsa	1.02	0.61	0.30	1.93
Volyn	0.72	2.34	0.81	3.86
Lugansk	0.84	0.60	0.31	1.75
Dnipropetrovsk	0.27	0.25	0.13	0.65
Donetsk	0.60	0.47	0.25	1.32
Zhytomyr	1.96	2.91	1.32	6.19
Transcarpathian	0.37	0.30	0.13	0.80
Zaporizhzhia	0.22	0.20	0.10	0.52
Ivano-Frankivsk	1.01	0.70	0.31	2.03
Kyiv	1.96	1.86	0.94	4.76
Kirovograd	0.61	0.38	0.19	1.18
AR Crimea	0.32	0.27	0.13	0.72
Lviv	0.25	0.22	0.11	0.58
Mykolaiv	0.35	0.26	0.13	0.74
Odessa	0.54	0.35	0.18	1.07
Poltava	0.48	0.38	0.17	1.04
Rivne	1.48	3.77	1.47	6.72
Sumy	0.67	0.53	0.25	1.45
Ternopil	0.63	0.54	0.23	1.40
Kharkiv	0.50	0.36	0.17	1.03
Kherson	0.22	0.19	0.09	0.49
Khmelnysky	0.59	0.43	0.20	1.22
Chercassy	1.63	0.95	0.49	3.07
Chernivtsi	1.45	0.88	0.43	2.75
Chernigiv	0.77	0.79	0.34	1.90
Kyiv city	0.76	0.71	0.39	1.86
Sevastopol city	0.54	0.35	0.19	1.08
All Ukraine	0.71	0.69	0.32	1.72

**表 3.24 1986 年に  $^{137}\text{Cs}$  の降下レベルが  $37\text{kBq}/\text{m}^2$  を超えるの農村地帯に住むウクライナの国民の相対分布 (%)** 事故後の様々な機会に蓄積された全身の被曝線量データを、時期の区分けに応じてまとめて

線量の階級 (mSv)	年代区分			
	1986	1987-1996	1997-2011	1986-2011
全人口に対する割合 (%)				
<1	-	-	21	-
1-2	6.2	22	34	-
2-5	60	40	31	9.4
5-10	26	19	11	40
10-20	6.9	15	2.7	31
20-50	0.78	4.2	0.21	18
50-100	0.01	0.14	-	1.5
>100	-	-	-	0.08