

電離放射線の線源、影響およびリスク

UNSCEAR 2013年報告書

第 I 卷

国連総会報告書

科学的附属書A:

2011年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響



UNITED NATIONS

ADVANCE COPY
May 2014

電離放射線の線源、影響およびリスク

原子放射線の影響に関する国連科学委員会

UNSCEAR 2013

国連総会報告書

第 I 卷

科学的附属書A:



UNITED NATIONS
New York, 2014

ADVANCE COPY
May 2014

NOTE

This advance copy represents a preliminary translation in the Japanese language of the main text of annex A to the report of the Committee to the General Assembly. It is intended to publish a translation in the Japanese language of the report with annex A including the associated appendices in due course.

The designations employed and the presentation of material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations concerning the legal status of any country, territory, city or area, or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The country names used in this document are, in most cases, those that were in use at the time the data were collected or the text prepared. In other cases, however, the names have been updated, where this was possible and appropriate, to reflect political changes.

Information on uniform resource locators and links to Internet sites contained in the present publication are provided for the convenience of the reader and are correct at the time of issue. The United Nations takes no responsibility for the continued accuracy of that information or for the content of any external website.

本資料は、本委員会が2013年に国連総会に提出した報告書の附属書Aのうち本文部分のみの邦訳である。附録を含む全文の邦訳については2014年末の提供を予定している。本資料は、報告書に対する日本人読者の理解を助けるために本委員会が予備的に作成した非公式な文書であり、国連ならびに本委員会はその正確性についていかなる保証を行うものではない。

附属書 A

2011 年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響

目次	頁
I. 緒言	5
II. 事故の経時的推移	7
A. 事故の進展	7
B. 環境への放出	13
C. 公衆の被ばくに関連して講じられた措置	14
D. 職業被ばくに関連して講じられた措置	16
III. 放射性核種放出、拡散および沈着	17
A. 放射性核種の放出	17
1. 大気中への放出	17
2. 海洋環境への放出	19
3. 環境放出の概要	20
B. 環境拡散と沈着	21
1. 大気と陸域環境	21
2. 海洋環境	23
IV. 公衆の被ばく線量評価	23
A. 被ばく経路	24

B. 線量評価のデータ	25
C. 公衆被ばく評価方法の概要	27
D. 線量評価の結果	28
1. 避難しなかった公衆の1年目の線量	28
2. 避難者の線量	32
3. 日本での将来的被ばく線量評価	33
4. 他の国における被ばく線量の評価	35
E. 不確かさ	35
F. 直接測定と他の評価の比較	36
1. 人々における放射性核種の直接測定	36
2. 他の評価	37
V. 作業員の線量評価	37
A. 緒言	37
B. 線量と健康に影響を与える条件	38
C. 放射線から作業員を防護するために講じられた措置	39
D. 報告された線量	40
E. モニタリングおよび線量測定の評価	42
1. 内部被ばく	43
2. 外部被ばく	43
F. 内部被ばく線量推定の評価	44
VI. 健康影響	46
A. 一般的考察	46
B. 公衆における健康影響	48
1. 観察された健康影響	48
2. 健康リスクの推定	49
3. 集団検診	50
C. 緊急時の作業に携わった作業員の健康影響	51
1. 観察された健康影響	51
2. 推定されている健康へのリスク	51
3. 集団検診	52
VII. ヒト以外の生物相の線量と影響の評価	52
A. 緒言	52
B. 被ばくと影響	53

1. 陸域生態系	53
2. 水域生態系	54
VIII. 要約および結論	55
A. 線量推定の基準	55
B. 公衆の被ばく	56
C. 作業者の被ばく	57
D. 公衆と作業者の健康影響	58
1. 公衆の健康影響	58
2. 作業者の健康影響	59
E. ヒト以外の生物相への放射線被ばくと影響	59
F. 将来の科学的研究の必要性	60
謝辞	61
参考文献	63

I. 緒言

1. 2011年3月11日14時46分(現地時刻、以下同様)、日本の本州近くにおいて、マグニチュード9.0の地震および巨大津波(「東日本大震災」)が発生し、人々の生命、財産、社会基盤、天然資源を危険にさらした。津波は500平方キロメートルの土地におよび、地震と津波とを合わせた被害は、2013年9月1日時点の情報で、死者18,703名、行方不明者2,674名、負傷者6,220名に達している[M21]。250,000棟以上の建物が全半壊し、少なくとも、さらに750,000棟が部分的に損傷した。22,000隻の漁船が破壊され、200平方キロメートル以上の農地が塩水に浸かり2年以上耕作できない状態となった。
2. この自然災害は、東京電力福島第一原子力発電所(以下「福島第一原発」または「FDNPS」という。)にも深刻な損傷をもたらした。そして、大量の放射性物質が大気中および海洋中に放出された。2013年末の時点で、100,000人以上の人々が事故のために避難生活を余儀なくされており、海洋環境への放射性核種の放出は今も継続している。発電所敷地内の作業者は、使用済燃料プールからの燃料の撤去と損傷を受けた炉心の管理に関わる複雑な問題に直面している。事故によって最も影響を受けた地域での復旧活動と土地の修復、損傷を受けた原発サイトの廃止措置についての努力が今後何十年にわたって続くことになる。また、発電所内外において被ばくレベル¹と健康影響のモニタリングを長期間にわたり実施することが求められている。
3. 2011年5月の第58回会合において、国連科学委員会(以下「本委員会」)は、2011年3月に発生した東日本大震災後の原子力発電所事故による被ばくレベルと放射線リスクの評価を、十分な情報が集まった時点で実施する旨決定した。その後国連総会は決議66/70においてこの決定を支持した。
4. 日本のすべての都道府県における放射線レベルと放射性物質の沈着密度、食品中の濃度および公衆の被ばくならびに作業者の被ばくに関する多くのデータが利用可能であった。日本の政府機関がまとめた多くのデータ、また査読のある学術誌に発表された多くの論文が提供された。影響評価の実施をサポートするデータの提供を本委員会が要請したところ、日本以外の国連加盟25カ国もその要請に応じて公式に情報を提供してくれた。包括的核実験禁止条約機関(CTBTO)、食糧農業機関(FAO)、国際原子力機関(IAEA)、世界保健機関(WHO)、世界気象機関(WMO)などを含む他の国際機関からもデータの提供があった。本委員会はまた、いくつかの非政府組織が発表したデータも検討した。すべてのデータについて当該評価に含めることが妥当かどうかを検討した。データ収集プロセス、評価方法と品質保証手順に関する情報を附録Aに記載している。評価のために使用したデータと方法は、本附属書とその補足資料に記した通りである。本委員会は、2012年9月末までに発表されたデータと文献に主として準拠することで正式に合意した。しかし、本附属書をとりまとめるにあたり、それ以降2013年末までに得られた重要な新しい情報についても、実行可能な限り適宜検討を行った。本委員会が下した結論のうち定性的記述の信頼性をより確かにすることを狙いとして、限定的ながら不確かさ/感度解析を適宜実施した。
5. 本委員会は、この評価を行うにあたって、多くの科学者や機関から多大な援助と協力を得た。世界18カ国から派遣された科学分野の専門家80人以上で構成するチームが設置され、それを補完する存在として、国から派遣されてはいないが関連する専門知識を有し、当該作業に重要と思われる経験を有している数名の個人も参加した。専門家は全員利益相反を申告することを義務づけられた。本委員会の事務局と役員は、これらの申告書を検討した上で、専門家が従事する調査作業に利益相反がないことを確認した。当該作業には5つの国際機関も関与した。専門家は、いくつかの専門グループに組織され、調整専門家グループが各グループを監督した。調整専門家グループの長はW.Weiss(ドイツ)がつとめた。各専門家グループには、リーダー1名、日本からのアドバイザー1名、書記1名、リード・ライター、執筆協力者、コメンテーターそれぞれ若干名が置かれた(構成については

¹ この報告書では、被ばくとは、放射線にさらされる行為、状態またはその程度を表すために一般的な意味で使用されており、物理的な量を意味するものではない。

本附属書の本文末尾にある謝辞を参照)。日本政府は、米倉義晴氏をこの調査作業の科学面における日本のとりまとめ役(フォーカルポイント)に指名した。専門家は、データおよび情報の収集と検討、データの質が目的に適合しているかどうかを確認する方法とプロセスの確立、発表された文献の評価、資料の原案作成、詳細な線量²の評価・検証、健康影響の評価、そしてヒト以外の生物相への影響の評価などを行った。専門家の多くは、自国の研究機関に所属する追加支援スタッフから検討作業に関するサポートを得た。日本政府から派遣された専門家がウィーンの事務局を支援した。

6. 事務局は技術的作業に関する支援を行った。具体的には、研究者を集めた全専門家会議を3回ウィーンで招集、2週ごとのオンライン会議を通しての専門家グループリーダー間の協力と共同作業の促進、専門家間でデータおよび情報を共有・管理するためのオンライン・プラットフォームの構築、各国政府やその他国際機関との連絡調整などに努めた。調査のほとんどは、電子的なコミュニケーション手段とツールを使用して実施された。専門家の多くは、国際規模のワークショップ、会議、会合に個人として参加した。これらの会合の多くは日本で開催された。事務局は、情報のとりまとめに関与した人々と直接意見を交わすことによって情報を明確化することを目的として、本委員会主導の技術的検討のための訪日を一度開催した。ドイツ、スウェーデンおよびスイスの各政府は、これらの目的に対する本委員会の活動を支援するために、一般信託基金への寄付を行った。

7. 調整専門家グループは、一連の作業を計画・調整し、2012年5月の国連科学委員会第59回会合と2013年5月の第60回会合に報告書原案を提出した。C-M. Larsson議長(オーストラリア)の下、本委員会は報告書原案を精査し、方法論、データの質、および評価の中間結果について議論した。調整専門家グループは、本委員会の指示にしたがい、作業の調整を行った。本委員会の代表団は、報告書原案についてのコメントを第59回の後に1回、第60回会合の後に2回提出し、その後、報告書案について最終的に承認した。本委員会の事務局と専門家グループはまた、追加データを得るため、日本のアドバイザーに幅広くかつ頻繁に連絡を取り、結果の解釈や評価について意見交換した。このことはプロジェクトを実施するにあたって不可欠であり、彼らのすべての貢献に対しここに感謝の意を表するものである。

8. この科学的附属書の狙いは、原子力事故がもたらした放射線被ばくのレベル、それに関連した人々に対する健康影響とリスク、ヒト以外の生物相に対する影響に関する知見を提供することで、主に2011年と2012年に得た情報を評価することにある。本附属書は、線量の推定値を提示するとともに、本委員会が収集したデータおよび情報を使用し、事故を含むすべての発生源に由来する放射線の健康と環境への影響について本委員会がこれまで行ってきた科学的評価に照らして、日本国内に加え、度合いは低くなるが近隣諸国でのさまざまな集団の健康との関連を含めて議論するものである。本附属書は、将来実施される可能性のある追跡調査や研究のために、どのような知識が不足しているかを挙げている。本附属書は、人権³、公衆の健康防護、環境保護、放射線防護、緊急時に係る準備と対応、事故の管理、原子力安全およびこれらに関連する事項についての教訓を見いだしたり政策問題を検討するものではない。また、本附属書は、地方自治体や日本政府、その他国家機関や国際機関に対する助言を意図するものではない。

9. この科学的附属書は8つの章からなる本文と6つの専門的附録で構成されている。また、28編の補足資料が電子ファイルとして添付されている。第I章では、評価の目的、背景、範囲、評価方法を紹介し、附録Aにおいては、本委員会が評価のために使用したデータの編集方法と質の保証に対するアプローチについて解説している。

² 線量とは、放射線が対象物に与えたエネルギーの尺度であり、基本的な線量測定量、すなわちグレイ (Gy: 1Gyのエネルギー吸収は1キログラムあたり1ジュールに相当) という単位で表される (通常は臓器に於ける) 吸収線量のことであり、本委員会は、吸収線量と健康影響リスクとの科学的関係を表すために、この数量単位を使用する。しかしながら、本委員会は同時に、放射線防護目的に限って考案された量であり、放射線被ばくによる潜在的な生物学的影響を表すために最も一般的に使用されている指標の量、すなわちシーベルト (Sv) という単位で表される実効線量も使用する。この量は、与えられたエネルギー量が同じであっても、放射線によりその生物学的影響が異なること、そして組織の反応もそれぞれ異なることを考慮に入れたものである。自然放射線源に由来する日本の住民一人当たりの年間平均バックグラウンド線量は約2.1mSvであることを今後の比較の参考として挙げておく。寿命を80歳とすると、これは一人あたり平均で約170mSvの線量に相当する。

³ 本委員会は、「達成可能な最も高い身体的および精神的健康の水準を享受することに対する万人の権利に関する特別報告者報告」(Anand Grover、総会公認記録、人権理事会、第23回会合)(A/HRC/23/41/Add.3)を参考にした。

10. 第II章は、福島第一原発での事故の進展、放射性物質が大気と海洋へいつどのように放出されたか、電離放射線の被ばくから作業者と住民を防護するためにどのような措置が講じられたかなど、事故の経時的推移をまとめている。

11. 第III章は、大気と太平洋への放射性核種の放出について、また地表大気、地表、海水および堆積物における放射性核種濃度の時間変化を、現地レベル、地域レベル、世界レベルでどのように推定したかを解説している。附録Bと3編の電子ファイル補足資料に、第III章に関連した技術的基礎とさらに詳細な解説を提示している。

12. 第IV章では、事故後1年間に公衆が受けた被ばく線量に関して、20歳の成人、10歳の小児、1歳の幼児を対象に本委員会が行った評価について報告している。なお、事故後10年間で年齢の異なる各人が80歳までに被ばくする線量についての予測も提示した。評価はできるかぎり測定データに基づいて行った。モデルは、現実的な想定の下において、実測値に基づいて状況を客観的に評価するために使用した。最初の1年間に講じられた防護措置に検討を加え、それによって回避された線量を推定した。第IV章に関連した技術的基礎とより多くの詳細な情報を附録Cと21編の電子ファイル補足資料に提示している。

13. 第V章では、2011年3月11日から2012年10月31日までの期間に緊急時対応と除染作業に従事した作業者の線量に関して本委員会が実施した評価について説明している。作業者の時間別、被ばく経路別線量分布に関する各種報告を検討・要約し、それぞれの信頼性について評価した。附録Dと1編の電子ファイル補足資料に第V章に関連した技術的基礎とより多くの詳細な情報を提示している。

14. 第VI章は、福島第一原発から放出された放射性核種による被ばくが健康にとってどのような意味合いを持つかを考察している。他の健康リスク評価に関する検討内容が含まれており、現在および将来の健康調査についても考察の対象とした。第VI章に関連した技術的基礎とより多くの詳細な情報を附録Eに示している。

15. 第VII章は、陸域および水域(淡水および海洋)の生態系に生息するヒト以外の生物相の線量と影響について本委員会が実施した評価結果を記載している。附録Fと3編の電子ファイル補足資料において第VII章に関連した技術的基礎とより多くの詳細な情報を提示している。

16. 第VIII章では要約と結論を述べている。本委員会では、将来再び本課題を取上げ、より明確な情報を基に放射線被ばくのレベルとそれに関連する影響とリスクについて報告することを想定している。この点に関し、第VIII章では、人々の健康と環境にとって福島第一原発事故がどのような意味合いを持つのかをさらに深く理解するために、現時点でどのような研究を行う必要があるかについても簡単に言及している。

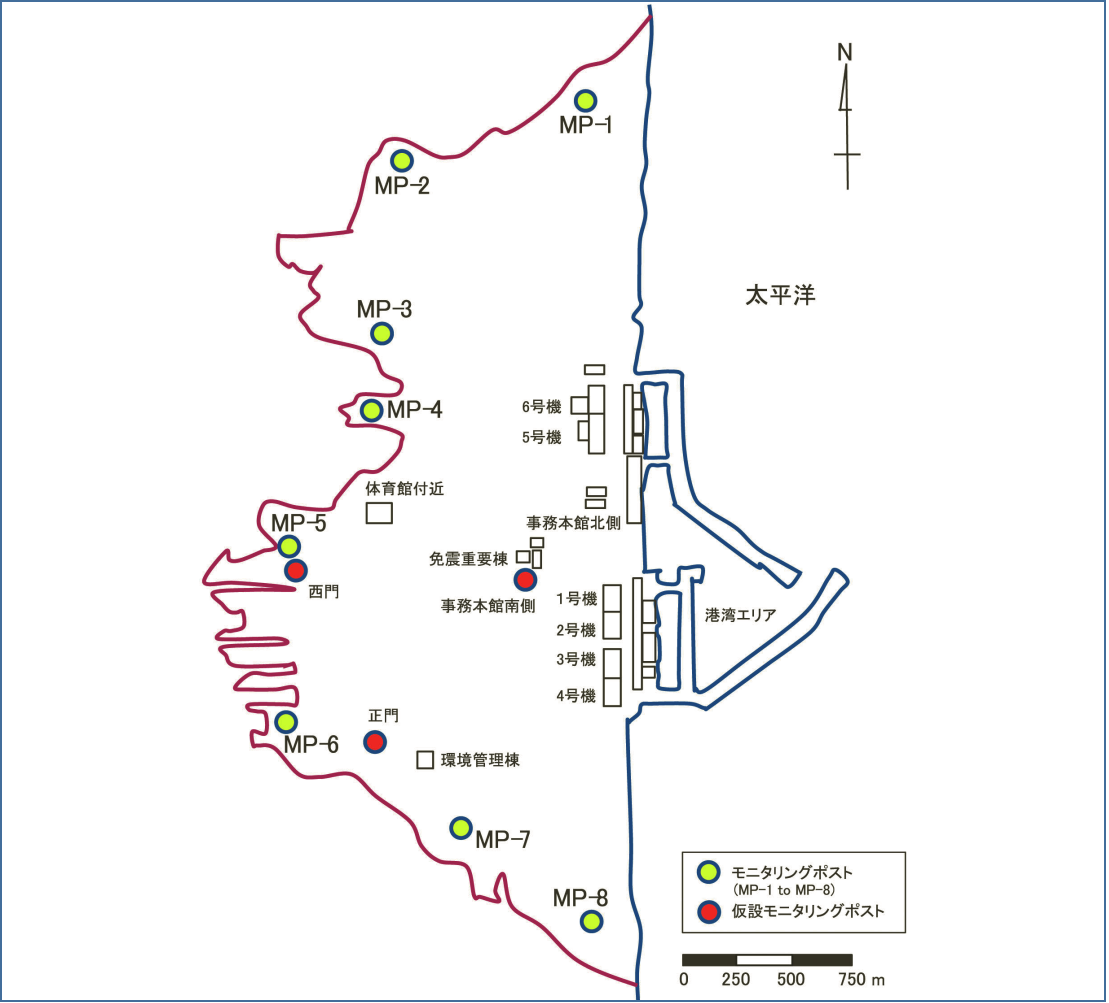
17. 本報告書で使用されている専門用語のいくつかについて、用語集を提供した。全体を通じ、推定された数値は有効数字を2桁までとしている(ただし、電子ファイルの補足資料ではそれよりも多い桁の記載がある)。これは数値間での比較を容易にするものであるが、数値自体が通常かなりの不確かさを伴っており、その桁数に応じた精度があると推断すべきでない。

II. 事故の経時的推移

A. 事故の進展

18. 東京電力(東電)の福島第一原子力発電所(福島第一原発)は日本の東北地方福島県にあって、東京から北東約230kmに位置している。福島第一原発の東側は、太平洋に面している(図I)。所内には6基の原子炉があり、それらを合わせた発電容量は4.7ギガワットであった。

図I. 福島第一原子力発電所レイアウト(自動モニタリングポストの位置を含む)[T12]



19. 2011年3月11日、14時46分(日本標準時、以下同様)に、マグニチュード9.0の地震が日本海溝に沿って発生した。その地震と続いて生じた津波により福島第一原発において過酷な原子力事故が生じた。2011年4月12日、日本の原子力安全・保安院(NISA)⁴は、国際原子力事象評価尺度(INES)でレベル7の事故(「深刻な事故」)を宣言した。地震と津波に続いて起こった事象の時系列を表1に示している。

表1. 地震と津波後に発生した事象の時系列
時刻はすべて日本標準時である。

年月日	原子炉	環境	公衆	作業者
2011-03-11	14:46, 地震			
	東電の福島第一原発において1、2、3号機スクラム ^a			
	外部電源の喪失			

⁴ 2012年9月、原子力安全・保安院と原子力安全委員会は統合し、原子力規制委員会(NRA)となった。

年月日	原子炉	環境	公衆	作業者
	15:35, 大津波			
	15:37, 全電源喪失(3号機の直流電源を除く)		16:40, 文科省 ^b が SPEEDI ^c を起動させ、大気中の濃度と、単位放出あたりの放射性物質沈着密度について日次予測を開始した。	
	20:00 頃、1号機の炉心と圧力容器の損傷が始まった可能性がある。		20:50、2km 圏内に対し避難指示。 21:23、3km 圏内に対し避難指示。 21:23(3km から10km 圏内に対し屋内退避指示。	
2011-03-12	02:45, 1号機の原子炉圧力容器が破損した可能性が高い。	福島第一原発正門近くにおける周辺線量当量率 ⁵ : 04:00, 約 0.1μSv/h 04:50, 1μSv/h 10:30, 390μSv/h 福島県と原子力機構 ^d の緊急時モニタリングチームが、半径 20km 内で周辺線量率とヨウ素を含む大気中の粉じんの測定を開始した。	05:44, 10km 圏内の避難	一部の作業者は、1号機と3号機の爆発後数日間中央制御室に留まった。防護具(たとえば顔面マスク)がなかったため、彼らは放射性物質(主に放射性ヨウ素)を吸入したと想定される。
	15:36、水素爆発により1号機の原子炉建屋が損傷。		18:25, 20km 圏内に対し避難指示。避難所において GM サーベイメーターによる住民のスクリーニングが開始された。	
2011-03-13	02:42、3号機の高圧注水系停止。 06:30 ごろから 09:10 まで、3号機の原子炉圧力容器が損傷した可能性あり。			福島第一原発で緊急時作業者に対しヨウ化カリウム錠配布
2011-03-14	11:01、水素爆発により3号機の原子炉建屋が損傷。			緊急時作業者の緊急時線量限度が 100mSv から

⁵ (表 1, 3月12日の環境欄) 場のモニタリングのための可搬型または固定型のモニタリング設備は、計測実用量である H*(10)、周辺線量当量率により測定を行った。その単位は、マイクロシーベルト毎時 (μSv/h) またはミリシーベルト毎時 (mSv/h) である。この報告書では、特に条件を付さない限り「線量率」という用語は「周辺線量当量率」を指す。

年月日	原子炉	環境	公衆	作業者
	12:30、2号機の炉心隔離時冷却系が故障。 18:22 までに、2号機の炉心が完全にむき出しになった徴候。 21:18 頃までに2号機の原子炉圧力容器が破損。			250mSv に引き上げられる ^f 。
2011-03-15	06:00 から 06:12 にかけて、3号機から排気されたガスの逆流から4号機で水素爆発が発生。 原発サイト境界ではピークの線量率 0.6mSv/h。			
	07:38 頃より、2号機から大量の放射性物質が放出。	09:00、正門近くで約 12mSv/h の最大線量率が記録される。	11:00、20km～30km 圏内に対し屋内退避指示。 福島第一原発 20km 圏内からの避難が完了。 大熊町のオフサイトセンターから避難。	
2011-03-16		食品と飲料水のモニタリング開始。	福島第一原発 20km 圏内からの避難時における安定ヨウ素剤の摂取に関する助言発表。 避難がすでに完了していたので、安定ヨウ素は摂取されず。	
2011-03-17			食品の出荷制限に関する指示が初めて出される。	
2011-03-18		空気中浮遊じん、土壌および降下物のモニタリングが開始される。		
2011-03-19			放射性ヨウ素のレベルが 300Bq/kg を越えるか、または、放射性セシウムのレベルが 200Bq/kg を越えた場合、水道水の飲用を控えるよう厚労省 ^e が勧告した。	
2011-03-23		海洋モニタリングが開始される。	食品の消費に対する制限が開始される。東京都水道局は、住民に対し、幼児の人工乳調製にボトル入り飲料水を使用するよう呼びかけた。	

年月日	原子炉	環境	公衆	作業者
2011-03-24			東京都による水道水使用禁止の解除。	3 人の作業者が浅い作業靴を履いて汚染された水たまりに足を踏み入れ、その足が汚染されたことが確認された。
2011-03-26			川俣町、飯舘村、いわき市に居住する 1,080 人の子供を対象に甲状腺の放射線測定が実施された(3 月 30 日まで継続)。	
2011-03-30			政府が「警戒区域」とその他の避難区域の見直しを決定。	
2011-04-01	高濃度の汚染水が太平洋に流出(2011-04-06 まで)。			
2011-04-04	低濃度の放射性廃液の海洋放出を開始(2011-04-10 まで)。			
2011-04-22			「計画的避難区域」と「緊急時避難準備区域」が設定される。	
2011-05-10	中レベル濃度の汚染水が太平洋に流出(2011-05-11 まで)。			
2011-06-30			「特定避難勧奨地点」が伊達市で指定された。	
2011-07-19	「事故の収束に向けた道筋」のステップ 1(「放射線量が着実に減少傾向となっていること」など)が達成された ^a 。			
2011-09-30			「緊急時避難準備区域」が終了。	
2011-12-16	「事故の収束に向けた道筋」のステップ 2(「冷温停止状態、放射性物質の放出が管理下にある」など)が達成された ^a 。			
2012-03-31				約 21,000 人の作業者について線量評価(内部被ばく、外部被ばく両方による)が完了した。

^a 東京電力福島第一原子力発電所

^b 文部科学省

^c 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム

^d 日本原子力研究開発機構

^e 厚生労働省

^f 実効線量で表される。日本の「緊急時作業に係る線量限度」は、ICRPの「参考レベル」に対応している(第V章セクションA参照)。緊急時作業に係る線量限度の引き上げは、新しい作業者については2011年11月1日に、10月31日前に登録されていた大部分の緊急時作業者については2011年12月16日に無効にされた(脚注g)。

^g 福島第一原発(東電)の事故収束に向けた道筋。ステップ2完了報告書(2011年)、原子力災害対策本部[N6]。これがきっかけとなって、緊急時線量限度(脚注f)が無効とされた。

20. 地震が発生したとき、福島第一原発の1号機から3号機は通常の運転状態にあった。4号機から6号機は定期保守・燃料交換が実施されており、4号機は完全に燃料が取り出されていた。地震発生直後に1号機から3号機では、設計どおり緊急時停止機能、すなわちスクラム⁶が作動した。地震の震動により福島第一原発のサイト内外で送受電施設が損傷し、外部電源が完全に失われた。しかし、非常用ディーゼル発電機が設計どおりに起動し、予備電源として原子炉冷却系その他の安全系統に電力を供給した。

21. 地震によって引き起こされた津波が日本の海岸線を襲った。15時35分には大きな波が福島第一原発に到達し、最大波高は推定で約15mに達した。これは、海拔6mの防波堤よりもはるかに高く、主要な建屋が建設されている海拔約10mの高さを越えるものであった。津波は、1号機、2号機、4号機の非常用ディーゼル発電器、海水冷却ポンプ、電気配線設備、直流電源を損傷または破壊し、空冷式の非常用ディーゼル発電器から電気の供給を受けた6号機を除き、すべての所内電源が失われることとなった。すなわち、1号機、2号機、4号機はすべての電源を失った。3号機はすべての交流電源を失い、その後、2011年3月13日未明に直流電源を失った。5号機は、交流電源をすべて失った。地震によって直接引き起こされた損害の程度はいまだに明らかになっておらず、その十分な定量的解析は今後の課題である。

22. 津波による被害は電力供給だけにとどまらず、車両、重機、石油タンクおよび砂礫が破壊あるいは押し流された。津波によって、概ねすべての建屋、設備、装置および他の施設が破壊された。福島第一原発のかなりの部分が、津波がもたらした海水に没し、水が退いたあと瓦礫がサイト内に散乱し、移動の障害となった。その上、作業者が断続的で大きな余震や相次ぐ津波に気を取られることによって、復旧作業は中断された。電力が失われたことで、中央制御室においてはモニタリング装置と制御機能が活動を停止した。照明と通信も影響を受けた。原発サイトの運転スタッフは、有効なツールもマニュアルも無いなか、即座の決断と事故への対応を迫られることとなった。

23. 原子炉の冷却や講じた措置の効果についての確認作業は電力に大きく依存していたが、その電力が手に入らなかった。制御室に立ち入るのは困難で、原発サイト内に散乱する瓦礫も代替電源の確保や冷却手段の実施（たとえば、消防車を使った水の注入）の妨げとなった。

24. 炉心内の放射性物質が発生させる熱を除去するための冷却が行えなかったとすれば、1号機の炉心損傷は3月11日に始まっていた可能性がある。2号機と3号機では、冷却水を原子炉に供給するのに注入ポンプ（原子炉で発生する蒸気によって駆動）が使用されたが、これらのポンプは最終的に作動しなくなり、冷却水注入復旧のために消防車が投入されるまでは、原子炉に対する冷却手段がすべて失われた。十分な冷却が得られず、原子炉容器内部の圧力は高まった。2号機と3号機については、逃し安全弁を開いて排気することによりある程度圧力は軽減された。さらに、過熱した燃料集合体と直接接触した水または蒸気が、燃料被覆管のジルコニウムと反応し、水素ガスを発生させた。さらにこの水素は原子炉建屋（第二の封じ込め容器）の上部に蓄積し発火したため、3月12日と14日にそれぞれ1号機と3号機の原子炉建屋で爆発が起きた。3号機で発生した水素は4号機の原子炉建屋に移動したと考えられる。その結果、4号機でも3月15日に爆発が起き、損傷が発生した。炉心熔融を含む過酷な損傷が3基の原子炉（1号機、2号機、3号機）の炉心で発生した。3基の原子炉すべてで、熔融した燃料が原子炉圧力容器の底に落ち、さらにこれを貫通し、圧力容器の下で熔融燃料-コンクリート相互作用を生じさせた。これがさらに格納容器内の圧力を高めた[T17]。2013年12月現在、燃料は注入された水によって覆われているが、格納容器の健全性によっては、その注入水が周辺地域に対する放射性核種の放出源となっている可能性がある。

25. 過熱による燃料集合体の熔融を含めた炉心損傷は、原子炉容器内への揮発性核分裂生成物の放出をもたらした。原子炉容器内の圧力を低減する作業により、あるいはおそらく原子炉容器からの漏えいにより、格納容器、原子炉建屋、そして外部環境へ揮発性放射性核種が放出された。これらの揮発性放射性核種はガス状（たとえば希ガスやガス状のヨウ素）だけでなく、一部はエアロゾルの形態でも放出された。ただし、エアロゾルのかなりの部分は原子炉格納容器とタービン建屋内の水によって捕捉された。損傷を受けた3基の原子炉心内にあった揮発性の比較的高い元素（すなわち水素/

⁶ スクラムとは、原子炉運転員が、通常制御棒を自動的または手動で迅速に挿入することで、原子炉を緊急停止させる安全機能である。「原子炉トリップ」とも呼ばれる。

トリチウム、ヨウ素、セシウム)のインベントリの数十パーセントが、おもにタービンおよび原子炉建屋の地階にある滞留水、さらに周辺区域の滞留水において検出された[N15]。揮発性の低い元素(たとえばストロンチウム、バリウム、ランタン)も検出されたが、それぞれのインベントリを反映して、揮発性の高い元素の約1%から10%の間のレベルであった。地下における液状放出のプロセスについては、いまだ不確かな部分があり、今後のさらなる解析により明らかにされなければならない。

26. 原子炉内の過熱した燃料と同じく、地震と津波の前に原子炉から取り外され使用済燃料プールに貯蔵されていた燃料集合体の冷却についても懸念があった。4号機に関しては3月11日は定期検査期間中であり、燃料集合体がすべて4号機原子炉から取り出され使用済燃料プールに入れられていた。電力の喪失で、これらの貯蔵プールに水を補充して温度を維持する能力も失われた。懸念の大きな部分を占めたのが4号機の貯蔵プールであった。というのも、貯蔵プールがある4号機建屋は3月15日の爆発で深刻な損傷を被り、また、その貯蔵プールには燃料を取り出した原子炉の炉心全体と過去の作業で取り出された使用済燃料が置かれていたからである。しかし、大量の水が早い段階から4号機の使用済燃料プールに供給されていたため、日本の当局関係者は、プールの水位が十分に高かったと考え、そこに貯蔵されていた燃料集合体が深刻な損傷を受けたとは考えていない[N7]。

27. 2011年12月16日現在、日本政府は、福島第一原発において冷温停止状態⁷と同等の状態が達成されたと発表している[15]。

28. チェルノブイリとスリーマイルアイランド原子力発電所の事故の経験から、今後数年の間、事故の進展の寄与要因に関する詳細な情報が得られることは明らかである。特に、炉心溶融に続いて地下で起きたと考えられる液状放出とその拡散を定量化することが重要である。

B. 環境への放出

29. 地震と津波の結果、福島第一原発(MP 1から8、図I)の境界周辺に設置された定置型自動放射線モニタリングポストは使用不能となり、3月29日に3本の可搬型自動モニタリングポストが設置され4月初めに定置型モニタリングポストが復旧するまでは、可搬型モニタリング装置でしか測定を行うことができなかった。福島第一原発周辺のいくつかの場所で測定された線量率は3月12日から3月20日以降までの期間に極めて大きく増加しており、放射性物質の環境への大量放出があったことを示している[T9](図II参照)。10Sv/hを超える線量率が一部の場所で短期間測定された[N6]。放出の性格、時間とともに放出がどのように変動したか、環境に放出された物質が結果としてどのように拡散したかについては、第III章と附録Bでさらに詳しく検討している。

30. 2011年4月2日、高レベル濃度の放射能汚染水が2号機外側のトレンチにたまっており、さらにそれがトレンチから海へ流出しているのを作業が発見した。汚染水の流出は4月6日に止まった。それ以外にも放射性物質の海洋への小規模な放出が何度かあった。トレンチの高濃度汚染水を受け入れる容量を確保するために、タンクに保存されていた低濃度の放射能汚染水を投棄したこともその1つである。これらの放出と海洋環境での拡散に関するより詳細な検討を第III章と附録Bで行っている。

⁷ 東電と原子力災害対策本部による定義で、1号機から3号機の冷却水温度が100℃未満、原子炉容器の内側の圧力が外側の気圧と同じ、かつ新たな追加の放出があっても、サイト境界での年間実効線量が1mSvを超えない状態をいう。

図II. 福島第一原子力発電所サイトにおける線量率

海側から西方向に内陸を見た図。1号機(最も右)および3号機と4号機(中央左と左端)の建屋は爆発で破壊された。2号機建屋(中央右)は無傷。2011年3月20日15:00~18:00、3月22日11:00~14:00および3月23日11:30~12:30(すべて日本標準時)に実施された調査で周辺線量当量(mSv/h)が測定された
(写真提供: 株式会社エアフォートサービス、妙高市)



C. 公衆の被ばくに関連して講じられた措置

31. 日本政府当局は、即座の避難と後発の(「計画的」)避難、自宅での屋内退避、汚染された食品(ミルク、野菜、穀物、肉、魚、その他)および水の流通・消費に対する制限、安定ヨウ素剤の投与指示⁸など、公衆を防護するためのいくつかの措置を決定した。これらの措置は、人々と場所に関する放射能汚染の実態調査をもとに実施された(表1参照)。

32. 2011年3月11日20時50分、福島県知事は、福島第一原発から2km圏内の地区(双葉町 大熊町)から避難するようにという指示を出した。その後まもなく(21時23分)、原子力災害対策本部(NERHQ)の本部長が、福島第一原発から3km圏内の住民らの避難と10km圏内の住民らの屋内退避を指示した。翌朝5時44分に、10km圏内のすべての住民らに避難指示が出された。同日(3月12日)18時25分、避難半径は20km(約600km²の区域)に拡大された。3月15日の6時頃から6時12分にかけて発生した水素爆発後、福島第一原発周囲20km~30km圏内の住民すべてに対し屋内退避の指示が出された。さらに、3月16日、福島第一原発から20km圏内にまだ残っているすべての人に対し安定ヨウ素剤を服用するよう指示が出された。この指示については、(避難指示にただちに従わなかった人の数は定かでないものの)この区域からの避難が既に完了していると考えられたため実行されなかった。地震時、約78,000人の住民が避難区域となった20km圏内に居住し、約62,000人が福島第一原発の周囲20km~30km圏内に居住していた[N8]。

33. 日本政府と都道府県による食品と飲料水のモニタリングが2011年3月16日に開始された。厚生労働省(厚労省)が行った2011年3月17日の勧告にしたがい、暫定規制値を上回る放射性物質を含有する特定の食品(ミルク、野菜、穀物、肉、魚、その他)の流通が2011年3月21日に禁止され、同年3月23日にはその消費が禁止された。

⁸ 安定ヨウ素(ヨウ化カリウムまたはヨウ素酸塩。通常は錠剤の剤形をしている)を適切な用量で、かつ適切な期間内に服用すれば、原子力事故から放出される放射性ヨウ素の甲状腺への取り込みを防止するのに役立つ(「甲状腺ブロッキング」)。

34. 3月25日、日本政府は3月15日から屋内退避していた、原発サイトから半径20kmから30km圏内に住む住民に対し、自主避難を開始するよう勧告を出し、福島第一原発の今後の状況変化によっては避難できるよう準備するように指示を出した。この指示は、9月30日に打ち切られている[N8]。さらに、環境モニタリングにより、避難区域20km圏の外でさえ放射性物質が高水準で沈着した区域があることが判明した。IAEAのチームが2011年3月18日から26日の間に福島第一原発の北方向から北西方向にかけて32kmから58kmまでの地点において土壌試料を収集し、その試料から ^{131}I と ^{137}Cs の沈着密度が推定された。 ^{131}I の沈着密度の平均値は、0.2から25MBq/m²、 ^{137}Cs は0.02～3.7MBq/m²であり、最高値は飯舘村近くで測定された。これらの測定値に基づいて、IAEAは日本政府に対し、その地域の状況を注意深く評価するよう助言した[I3]。4月22日、20km以遠にあって年間の実効線量が20mSvを上回る可能性のある特定の区域が「計画的避難区域」に指定された[N8]。その後、これらの区域のほとんどの住民は4月から6月の間に避難した。図IIIは、2011年8月3日時点における、これらの区域全体の様子を表している[N7]。

35. 2011年6月16日、政府は、福島第一原発から20km以上離れた計画的避難区域外の特定の区域を「特定避難勧奨地点」に指定する意向を発表した。これらは、地表に沈着した放射性物質により推定実効線量が事故から最初の1年間で20mSvを上回る可能性のある区域が対象となっている。これらの地点を規定する線引きは、文部科学省(文科省)が実施する環境モニタリングに基づいて行われた。地方自治体は、特定避難勧奨地点の指定によって影響を受ける可能性のある住民に対し、移転することを選択した場合、残ることを選択した場合のそれぞれについての情報、将来における放射線被ばくを軽減する方法についての情報を提供した。「特定避難勧奨地点」の指定が2011年6月30日に伊達市に対して、南相馬市については7月21日と8月3日に、川内村については8月3日に発表された。11月25日、伊達市と南相馬市のいくつかの地点が特定避難勧奨地点に追加指定されている[N7]。

36. 2011年3月12日、福島県に設置された原子力災害現地対策本部のスタッフは、避難した人々を含む住民を対象にGMサーベイメーターを使って、皮膚と衣類の汚染に関する調査を開始した。拭き取りによる除染が必要かどうかについてのスクリーニング基準値は、ベータ/ガンマ線汚染について40Bq/cm²(13,000cpmに対応)であり、体表面の除染についての基準値は100,000cpmである。3月12日から5月31日までに受検した195,354人のうちの大半の人々については、除染の必要がなかった[N8]。3月26日から30日にかけて、原子力災害現地対策本部のスタッフは、川俣町、飯舘村といわき市に居住する0歳から15歳の子供1,080人を対象に、可搬型のヨウ化ナトリウム(NaI)モニターを使用して甲状腺の放射線被ばく実態調査を実施した。受検者のなかで、1歳児における ^{131}I の内部被ばくによる甲状腺吸収線量100mGyに相当するスクリーニングレベルを上回るケースは見られなかった[N8]。

始された。その後、さまざまな区域間に物理的な障壁が設置され、特定区域での労働時間に制限が加わり、調整センターが設置された。作業者には、密着型のフルフェースマスク（放射性粒子やガスの吸入を最小限に抑えるためのもの）とオーバーオール防護服、手袋、安全靴、綿の帽子とヘルメット（体表面の汚染を最小限に抑えるためのもの）が支給された。

III. 放射性核種放出、拡散および沈着

39. 上記第II章にまとめた福島第一原発事故の進展で生じた事象により、環境中へ放射性物質が放出された。大気および海洋環境への放出量と経時的放出パターンに関する推定については附録Bにその詳細を記述し、本章ではそれを要約している。これらの推定は、以下に述べる2つの事柄を目的として行った。

(a) 環境に放出された放射性物質の量を示すため。

(b) 環境中でデータが存在しない、あるいはもはや測定が行なえない地点における放射性核種の拡散と沈着を、モデル（たとえば大気中および海洋中での拡散モデル）と組み合わせて推定するため。

40. 環境中に放出された放射性物質の空間的・時間的分布（たとえば、大気中の放射性核種濃度、地表面における放射性核種の沈着密度、海水と海底堆積物中における放射性核種の濃度）を知ることが、公衆の放射線被ばくに関する推定（第IV章参照）および環境中での被ばくと影響の評価（第VII章参照）を実施するための必要条件である。環境中の放射線レベルまたは放射性物質に関する測定値は、一般に、線量を推定するための信頼できる基礎データとなる。発表されている測定値と発表元を附録Aにまとめている。一方、測定値が入手できない場合、本委員会では推定値を拠り所にした。この章では線量評価を目的とした推定値の特性を記述している。

A. 放射性核種の放出

1. 大気中への放出

41. 福島第一原発からの放射性物質の放出は長期にわたった。放出パターンは時間的にも空間的にも複雑なものであった。3月12日から大量の放出が始まり、放出率はそれから1週間にわたって大きく変動し、それぞれの原子炉における個々の事象（たとえば、水素爆発、ベント、原子炉とその封じ込めシステムからの漏えいなど）に関連して著しい増加が見られた。最初の1週間が過ぎると、より限られた期間に若干の変動が見られたものの、放出率は徐々に低下した。4月初めの時点で放出率は事故後の最初の週に発生した放出率の1000分の1以下に低下したが、これらの非常に低い放出率は何週間にもわたって持続した。放出はさまざまな場所で発生し、高さや特性もそれぞれ異なるものであった。これらのすべては放出後の大気拡散と大気からの沈着に影響を及ぼした。

42. 福島第一原発からの放射性核種の放出の規模、時間プロファイル、特性（一般に「ソースターム」と呼ばれる）については数多くの推定値が発表されている。一般的に、時間の経過とともに詳細な情報が得られるにつれ、推定値の質は向上した。その推定値を導き出すために、次の2つの異なったアプローチが採用されている。

(a) 福島第一原発事故の進展に関する詳細なシミュレーション；

(b) 環境中における放射線レベルまたは放射性核種の濃度の測定値を使った「インバース」法または「リバース」法のモデル計算。

どちらのアプローチにも限界があり、多くの不確かさを伴っている。

43. 発表されている「総」放出量の推定値はおおむね合致するものであったが、それらが本質的に不確かさを含むという点に注意が必要であり、厳密にはその多くが直接的な比較のできないものであった。すなわち、総放出量を推定した推定値もあれば、限られた期間内の放出を対象としたもの、あるいは放出の中で日本の陸域に対し部分的または完全に拡散した部分だけを対象としたものも含まれていた。¹³¹Iの「総」放出量の推定値は、約100PBqから約500PBq¹¹の範囲にあり、¹³⁷Csは総じて6-20PBq¹²の範囲にあった。(ただし、より限られた情報に基づく一部の推定値では、拡がりをも最大40PBqまでとするものもあった)。これらの範囲は、事故時に稼働中だった3基の原子炉(1号機から3号機)における¹³¹Iの総インベントリのおよそ2-8%、¹³⁷Csについては総インベントリのおよそ1-3%を含むものである。ちなみに、福島第一原発から放出されたこれらの放射性核種、すなわち¹³¹Iと¹³⁷Csの推定放出量(発表された推定値の平均に基づく)は、それぞれチェルノブイリ事故における推定放出量のおよそ10%と20%であった。附録Bに詳細を記す。

44. 放出された物質、特に¹³¹Iと¹³⁷Csの放出率の時間的パターンについての推定値も数多く発表されている。放射性物質の放出総量については、発表された多くの推定値が概ね一致するにもかかわらず、放出率の時間的パターンや、それらが原発サイト内で発生した事象と関連する度合いには大きな違いがあった。

45. 本委員会は、発表されたソースターム推定値を、放出率の時間的パターンを含め、数多くかつ注意深く評価した。測定値がまだ存在しない陸上環境での放射性物質のレベルを推定するための合理的な基礎データを確保する必要があり、そのために本委員会は1つのソースタームを特定しなければならなかった。これらのレベルは、後に公衆の線量を推定する際に重要な参考データとなるものであった(下記の第IV章参照)。この意味合いにおいて、インバース法またはリバース法のモデル計算に基づく推定値のほうが、事故進展のシミュレーションに基づくものより明らかに望ましいものであった。何故ならば前者の方は環境中の放射性物質の測定値から導き出されたものであり、モデルがそれに合うようにすでに最適化されているためである。多くのオプションを検討した上で、本委員会はインバース法またはリバース法のモデル計算に基づいて導き出されたソースタームの中からTerada et al.が推定したソースターム[T19]を使用することを選択した¹³。Terada et al.によって推定された¹³¹Iと¹³⁷Csの総放出量はそれぞれ、120PBqと8.8PBqであり、いずれも発表された値の範囲の中では下限に近いものであった(上記参照)。Terada et al.の推定値は、海上に拡散した放出についての仮定に依り、これらの放射性核種の総放出量を恐らく最大で2分の1程度に過小評価している可能性があることが示唆されている。しかし、上記のように、また附録Bでも詳述しているように、Terada et al.の推定値は、測定値がまだ存在しない陸域環境での放射性物質の濃度を推定する上で合理的な基礎を提供するものであった。

46. Terada et al.は、時間の関数として、¹³¹Iと¹³⁷Csの放出率を推定した。この2つの放射性核種は、¹³⁴Csとならび、公衆被ばくに最も大きく寄与するものであった。ソースタームは、放出に大きく寄与した可能性のある他の放射性核種も含んでおり、他のヨウ素およびセシウムの放射性同位元素、¹³²Teと¹³³Xeなどから構成されている。これらの放射性核種の放出率パターンは、基本的に、3基の原子炉の推定インベントリにおける¹³¹Iまたは¹³⁷Csに対するこれらの放射性核種の相対量と、環境測定におけるそれらの相対的レベルを考慮することによって導き出された。他の元素についても数多くの放射性同位元素が放出され、それらの相対量はそれぞれの揮発性に依存して決まったと考えられる。たとえば、ストロンチウム、バリウム、プルトニウムの揮発性は、ヨウ素およびセシウムの揮発性よりずっと低い。従って、こうした放射性同位元素の放出は相対的にはるかに低いものであった。このことは、それらの

¹¹ あるサンプル内で放出または測定される放射能は単位時間あたりの放射性壊変の回数を意味し、その単位はベクレル(Bq)である。1ベクレルは、1秒当たり1回の崩壊と定義される。1ギガベクレル(GBq)は、10⁹ベクレルに等しく、1テラベクレル(TBq)は10¹²ベクレル、1ペタベクレル(PBq)は10¹⁵ベクレルにそれぞれ等しい。

¹² ¹³⁴Csの放出量は、¹³⁷Csの放出量とほぼ同等であった。

¹³ Kobayashi et al.[K18]は、後に日本の陸域での放射性物質の測定値に加えて太平洋の放射性物質の測定値も検討しているが、本委員会はそれよりもこちらを選択した。本委員会がKobayashi et al.のソースタームを採用していれば、陸域環境の放射性物質濃度を過大に評価していたと思われる。また、それにより、放射線被ばくの現実的評価を行なうという本委員会の意図と矛盾する結果になっていた可能性がある。

物質の環境におけるレベルの測定値によって確認されている¹⁴。これはチェルノブイリ事故の場合と大きく異なる点であり、チェルノブイリ事故では、揮発性の低い元素（たとえばストロンチウムやプルトニウム）が大量に直接大気中へ放出された。ソースタームに含まれる放射性核種それぞれについて本委員会が想定した総放出量を表2に示す。これら放射性核種の放出の時間的パターンについては、附録Bの表B5、図B-Iおよび図B-XVIに示している。

表2. 環境中で測定値が存在していない、あるいは測定がもはや行えない地点における放射性核種のレベルを推定するために本委員会が想定した大気中への放射性核種の総放出量

数値はそれぞれ、(時期にかかわらず)大気中へ放出された放射能の合計を表示

放射性核種	総放出量(PBq)	放射性核種	総放出量(PBq)
¹³² Te	29	¹³³ Xe	7,300
¹³¹ I	120	¹³⁴ Cs	9.0
¹³² I	29	¹³⁶ Cs	1.8
¹³³ I	9.6	¹³⁷ Cs	8.8

2. 海洋環境への放出

47. 放射性物質は、福島第一原発から直接的、間接的に海洋環境に放出された。海への直接放出については、2号機の外にあるトレンチからの高濃度汚染水の漏えい(2011年4月2日に発見)と貯蔵タンクからの低濃度汚染水の投棄から生じたことが少なくとも知られている。後者の投棄が実施されたのは、トレンチに残った高濃度汚染水を収容する容量を確保すべく貯蔵タンクを空にするためであった(第II章参照)。その後さらに直接放出が発生した(たとえば、2011年5月と12月)が、総じてこれらは事故直後の1ヶ月における放出量に比べればわずかなものであった。放射性物質の間接的な海への放出経路は、以下に示す2種類があった。ひとつは、(a)最も重大な経路であるが、大気中に放出され海洋上に拡散した物質の海洋表面への沈着であり、もう1つは(b)陸域に広く降下沈着した物質が河川へ流れこみ、下流に輸送され海洋に流入する経路である。

48. 2013年末、放射性核種の海洋環境放出が続いていることが報告された[T18]。これは、主として福島第一原発サイト内の汚染地下水に由来していると思われる。第II章で記したように、主にタービン建屋と原子炉建屋の地階における滞留水は程度の違いはあれそれぞれの建屋内に封じ込められていたが[N15]、これらが地下水への放射性核種の継続的放出の主な要因の1つと考えられる。原子力規制委員会[N21]が報告したモニタリング結果によれば、放出は2013年においても継続しているが、放出率は事故直後の大量放出に比べ非常に低いレベルにとどまっている。さらに、そうした放出の低減を試みるための措置が講じられた(福島第一原発サイトと海洋間に遮断壁を建設するなど)。本委員会が公衆の被ばく線量を評価する際には、これらの放出が大きな影響を及ぼす可能性は低いと考えられた。しかし、放出の実態に関するモニタリングと評価を継続することが必要である。

49. 放射線影響の点でより重要な放射性核種について、海洋に到達した経路別の総量と放出パターンの時間変化に関するさまざまな推定値が発表されている。海洋への直接放出量は、海水における放射性核種の測定レベルを基に推定された。発表された推定値を検討した上で本委員会は、海洋への¹³⁷Csの総直接放出量が恐らく約3PBqから6PBqの間であり、¹³¹Iの総直接放出量はその約3倍に達した可能性があると考えている。海への直接放出の経時的パターンについては、Kawamura et al.[K3]、Tsumune et al.[T24]、Estournel et al.[E4]が推定しており、最大の放出は3月の最終週と4月の第1週の間に発生し、直接放出はその後何週間も続いたが、そのレベルははるかに低く、またゆっくりと低下したと推定されている。

¹⁴ 3つの放射性核種(²³⁸Pu、²³⁹Pu、²⁴⁰Pu)それぞれの放出量は、約1GBqと推定された[Z5]。公衆の被ばくに対するこれらの放射性核種の寄与度は取るに足らないものであった。

50. 間接的放出量(大気中に放出された放射性核種の海上での沈着が主たる寄与要因)の推定は、大気中に放出された物質の拡散と海洋上での沈着のモデル計算で行われた。大気中への放出量が最も多かった期間中(すなわち2011年3月12日から同4月の初めまで)のかなりの部分において、風は海の方に吹いていた。Kobayashi et al.[K18]は、 ^{131}I と ^{137}Cs の大気中への総放出量について、それぞれ約50%と60%が海洋上に沈着したと推定している。さまざまな研究者の推定によると、大気からの沈着によって北太平洋に入った ^{137}Cs と ^{131}I の総量は、それぞれ約5～8PBqと60～100PBqである。しかし、福島第一原発サイトから半径80km内に沈着したと推定されるのは、これらの量のごく一部(約5%)に過ぎない。

51. ^{131}I と ^{137}Cs に加えて、他の放射性核種も直接的、間接的に海洋に放出されている。ストロンチウム、プルトニウムおよびその他の元素の放射性同位元素が、海水中および／または海底堆積物中で測定された。Povinec et al.[P12]は、 ^{90}Sr の海洋への直接放出量が約0.04から1PBqの範囲であったと推定している。プルトニウムの放射性同位元素の海水中濃度は、全般的に検出限界未満であった。

3. 環境放出の概要

52. 表3は、放射線影響がより重大な放射性核種の福島第一原発からの環境放出量について発表された推定値をまとめたものである(詳細は附録B参照)。検討対象は、(a)大気と(b)太平洋への放出(液状での直接放出と大気中に放出された放射性核種の降下物としての間接的放出の両方を含む)である。基本的に、表に挙げた値は発表された推定値の全範囲を網羅しているが、場合によっては、信頼性に劣ると本委員会が判断した推定値は除外されており、表の値の範囲はより狭いものとなっている。放出に関する推定はすべて、多くの不確かさをともなっている。原子炉3基の停止時における各放射性核種の総インベントリも参考のために示している。

表3. 福島第一原発から放出された重要な放射性核種の推定環境放出量

数値の不確かさを考え、値は有効数字1桁として表示

放射性核種	1号機から3号機の 停止時における インベントリ ^a (PBq)	大気中への放出 (PBq)	海洋への放出 (PBq)	
			直接的	間接的 ^b
^{131}I	6 000	100～500 ^c	約 10～20 ^e	60～100 ^g
^{137}Cs	700	6～20 ^d	3～6 ^f	5～8 ^g

^a 値は有効数字2桁まで評価した。

^b 間接的放出は、最初は大気中に放出され、その後海洋表面に沈着した放射性核種によるもの。

^c 本委員会が検討の対象とした推定値の全範囲を包含している(表B2参照)。

^d 本委員会が検討の対象とした推定値のうち2つを除く全範囲を包含している(これら2つは約40PBqまでと大きく推定しているが、限られた情報に基づくため信頼性に劣るものであった)(表B2参照)。

^e ^{131}I の直接放出が ^{137}Cs の直接放出の約3倍であったとする極めて限られた情報に基づくもの(表B6参照)。

^f 推定範囲は、より信頼性の高い3次元モデル計算から得られたもの。他の推定値はそれより大きく、最大約30PBqに及ぶものもあったが、信頼性に欠ける(表B6参照)。

^g 本委員会が検討した(わずかの)推定値の全範囲を包含している(表B6参照)。

53. 大気と海洋の両方への放出量に関する推定については、事故の進展についてより多くの情報が得られ、環境中の測定値がより広く使用できるようになり、評価方法が進歩するにつれ、今後その質が向上すると期待できる。これは現在も研究が進行中の分野である。こうした向上が期待される一方で、特に放出の経時的パターンに関しては、依然としてかなりの不確かさが残る可能性がある。

B. 環境拡散と沈着

1. 大気と陸域環境

54. 福島第一原発事故時に大気中に放出された放射性物質の挙動は、その時点における気象条件と、放出の高さ、気体か粒子かといった物理的特徴に依存して決まる。これらの条件は放出期間において相当程度変動しており、それによって放射性物質がどの地域に拡散し、大気中でどの程度の速度で希釈され、沈着するかが決まった。日本の陸域での放射性核種のレベルとパターンをおおむね決定した放出は、3月12日、14日から16日、20日から23日に発生しており、放射性物質の挙動を決定した気象条件は以下の通りであった。

(a) 3月12日に最初に放出された物質は太平洋に向かったが、1号機での水素爆発から生じた3月12日午後の放出は、最初に本州の東海岸に沿って北方に広がり、大量の乾性沈着（粒子状物質の地表への沈着）をもたらした。その後、北北東の方向に向きを変え宮城県沿岸地域に広がった。

(b) 3月14日夜遅くから放出された放射性物質は南方向へ移動し、3月15日の朝には福島県の南東部沿岸地域と茨城県北東部地域に沿って沈着した（図IV参照）。これらの放射性物質はさらに東京都、埼玉県、神奈川県へと拡散し、レベルは低下したものの乾性沈着をもたらした。3月15日午後までに、拡散した放射性物質は雨に遭遇し、その結果、群馬県、栃木県、福島県の各地域で高い濃度の湿性沈着（雨や雪とともに放射性物質が地表に降下する現象）が発生した。更に大量の放出が3月15日の朝に生じた。この放出による放射性物質は南に向かい、徐々に北西の方角に進路を変え、福島第一原発の北西地域において相当量の放射性物質の乾性沈着と湿性沈着を生じさせている。

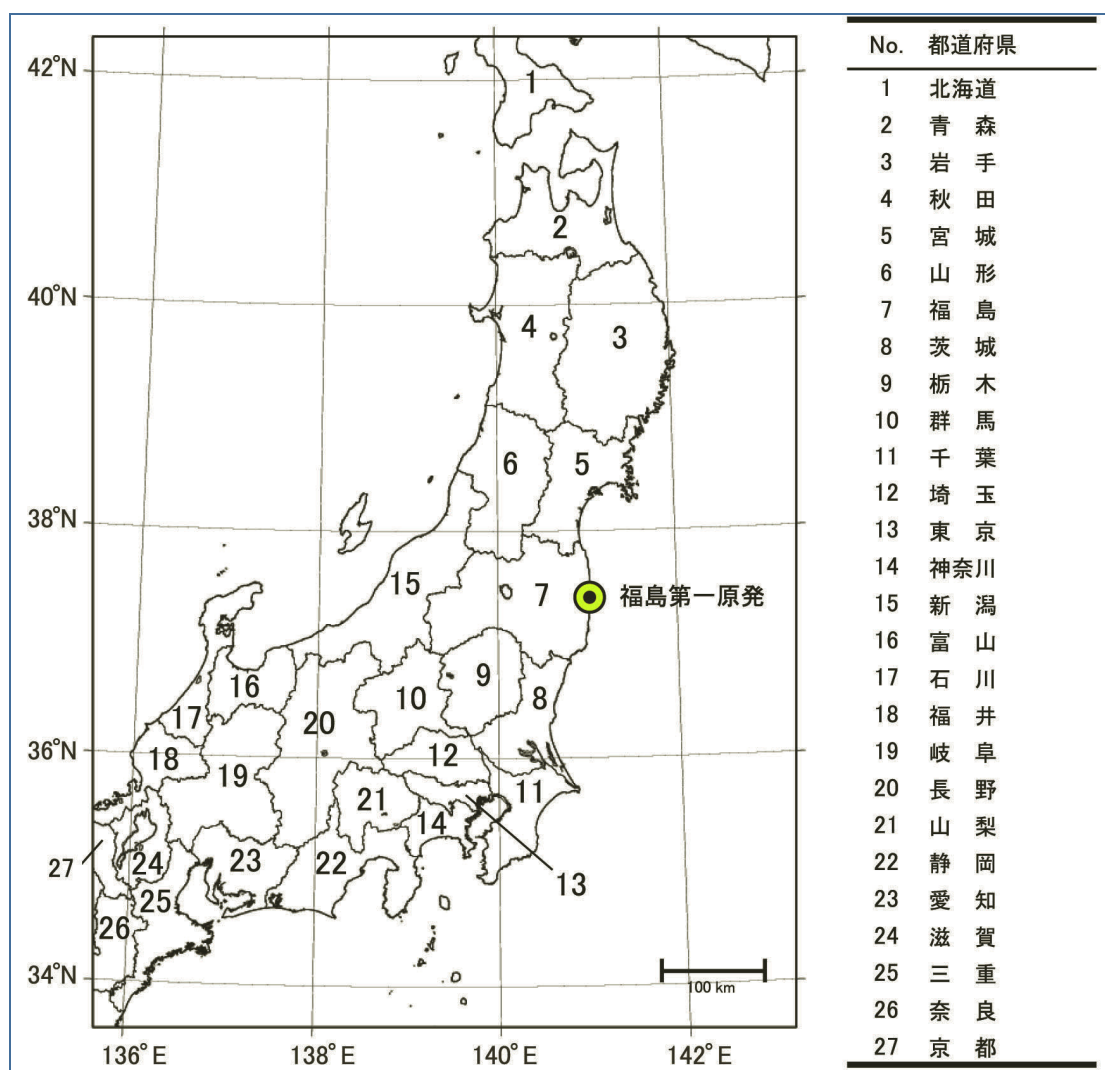
(c) 3月20日から23日にかけて放出された放射性物質は、日本各地に拡散し、ときに降雨に遭遇しながら岩手県、宮城県、茨城県、千葉県の各地域で湿性沈着を生じさせた。

55. 放出が長期にわたると同時にその程度も変動し、また遭遇した気象条件も一定ではなかったことから、細かい放出は除くとしても放出それぞれに固有の拡散パターンが生じることとなった（附録Bの図B-VIIIから図B-XIII参照）。

56. 日本国内の自動観測所から得られた線量率測定値は、事故進展中に報告されているデータのなかで最も量の多いものであったが、福島県では自動モニタリングポストの多くが作動せず、そのため、福島県における測定値のほとんどは可搬型線量率モニターを使用して得られたものであった。さらに、事故後の地表と土壌中における放射性核種の沈着、およびその降下物による線量率についても広範な調査が実施された。中でも注目になる調査は、文部科学省（文科省）と農林水産省（農水省）が実施した地上と航空機による調査と米国エネルギー省が行った航空機による調査であった（附録A参照）。放出期間中に日本国内で放射性核種の大気中濃度を測定した値は非常に少なく、特に、事故の初期や津波の被害を受けた地域ではごく限られたものしかない。

57. 日本における放射性核種の測定値は、おおむね ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs を対象とするものであった。 ^{132}Te 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 ^{132}I 、 ^{133}I など他の放射性核種についても限定的なものではあるが、大気中の濃度測定値と地表における沈着密度の測定値の両方が収集されている。基本的にはすべて福島県内の、それもごく一部（5%足らず）のサンプリングポイントからではあるが、 ^{89}Sr 、 ^{90}Sr 、 ^{238}Pu 、 $^{239+240}\text{Pu}$ の測定値も得られている。地表に沈着した ^{238}Pu と $^{239+240}\text{Pu}$ のレベルは非常に低く、ほとんどが検出限界以下であった。地表に沈着した ^{89}Sr と ^{90}Sr のレベルは、 ^{137}Cs のそれより大幅に低いため、これらの放射性核種は、公衆の被ばく線量に関する本委員会の評価に含めなかった。発表されている測定値については、附録BとCでもさらに報告している。CTBTOのネットワークは、 ^{133}Xe を含めさまざまな放射性核種を測定しているが、その多くは放射線影響の点では無視できる寄与であった。

図IV. 福島第一原子力発電所(福島第一原発)および都道府県の位置



58. 放出された放射性物質の拡散と沈着のモデル計算は、特に環境中の測定レベルをどれくらい正確に再現できるかを明らかにすることを目的に、Terada et al.[T19]、WMO[W18]、フランス放射線防護・原子力安全研究所[I33]など多くのグループにより実施されてきた。これらはすべて、日本の陸域における ^{137}Cs の沈着密度の幅広いパターンを再現できている。対象とする地域では、モデル推定値は総じて測定レベルの10倍または10分の1の範囲にあり(附録B参照)、より良く一致する場合もあった。このように限界があるにしても、これらのモデル計算は、測定値が存在しない、あるいはもはや測定できない環境における放射性核種のレベルを推定する手段としては、唯一の手段である。

59. WMO作業チームのメンバーは、本委員会が採用したソースタームに基づき、大気中での放射性物質の拡散をモデル計算することによって、環境中の放射性核種レベルを推定した(上の第III章セクションA参照)。使用したアプローチとその結果である推定値について、測定レベルとの比較を含め附録Bにまとめている。本委員会は、環境の測定レベルがどこからも報告されていない場合、モデル計算にもとづく推定値を使って公衆員の被ばく線量を評価した(附録BとC参照)。このようにして推定された線量は、環境中の測定値から直接推定する値よりも必然的に不確かさが大きい。環境における放射性核種の推定レベルの確度や不確かさの特徴について見極めるため、異なったソースタームと気象および拡散モデルで得られた推定値の比較を行った。

2. 海洋環境

60. 海水と海底堆積物、魚類その他の海洋生物相における ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs その他の放射性核種濃度について広範囲にわたる測定が行なわれた。東電は3月21日以降毎日、福島第一原発サイトの南北に位置する排出口近く、海岸に沿った南北の地点、沖合3km、8km、15kmのところからそれぞれサンプルを採取し測定した。文科省は沖合30kmの線に沿って測定を行い、これと独立して研究者達が日本沖合の水域で測定を行った(たとえば[B25, H7])。

61. これらの測定結果を附録Bと附録Fにまとめている。3月末に福島第一原発周辺における海水中の濃度がピークに達し、4月の初めには、さらに沖合で濃度がピークに達したことを測定結果は示している。海水の測定濃度はその後着実に低下し、2011年8月時点では、放射性ヨウ素は検出不可能となり、放射性セシウム濃度は原発サイトの放出口でさえ検出限界近傍または検出限界を下回るものであった。 ^{89}Sr と ^{90}Sr など海水中の他の放射性核種に関する濃度測定回数はより限られていたが、総じて同じようなパターンを示した。ただしそれらの濃度は ^{137}Cs の1-10%未満であった。例外は、放射性セシウムを除去した処理水の偶発的漏えい後の2011年12月に測定された ^{89}Sr と ^{90}Sr の濃度である。ストロンチウムの放射性同位元素の濃度の上昇をみたのは一時的であり、2012年1月までに再び ^{137}Cs の濃度以下に下降した。

62. 福島県沖と北太平洋全域で採取された海水のサンプルから放射性セシウムが低濃度で検出されたことから、放出された放射性物質が80mm/sに近い速度で東のほうに移動したものと考えられる[A12]。海底堆積物の放射性核種濃度も測定された。これらの測定においてはやはり ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs に重点が置かれたが、ストロンチウム、プルトニウム、アメリシウムの放射性同位元素の測定も若干行なわれた。東電による測定では、福島第一原発の港内における海底堆積物中の ^{137}Cs の濃度は乾燥重量1kgあたり最大で100,000Bq/kgというものであったが、全体的に測定レベルはそれよりも何桁も低いものであった。海底堆積物中の濃度も、時間の経過にともなって低下はしたものの、その速度は海水の測定濃度ほどではなかった。詳細を附録Bに示している。

63. 複数の研究者がこれらの測定値を使用して、海への直接の総放出量および/またはその後の太平洋における放射性核種の拡散に関する推定を行っている(たとえば[E4, K3, P3, T13, T24]。これらのモデルによる推定値は、総じてよく測定データを再現することができている。大気中から降下した放射性物質は、海洋表面の広いエリアにわたって拡散・沈着した。他方、直接放出された放射性物質についてのモデル計算では、放出された放射性核種はまず、北からの風を受けて比較的限られたブルームとして約200km海岸に沿って南方に移動し、次に黒潮に乗り海岸から東の方向へ向かい、さらに拡散、希釈されたことが示唆される(附録Bの図B-XXIおよびB-XXII参照)。モデル計算の結果は、一般的な傾向として、最も影響を受けた海域では3月26日頃まで大気から沈着した物質による海水中レベルへの影響が大きかったが、それ以降は海洋への直接放出の寄与率が上回るようになったことを示唆している。

IV. 公衆の被ばく線量評価

64. この章では、第III章で述べた環境中における放射性物質の分布についての知見が、日本の公衆の被ばく線量を推定するにあたりどのように使用されたかを述べると同時に推定された線量の要約を示す。本委員会の狙いは、線量の現実的推定値を示すことであり、そのために日本の住民の異なるサブセットを代表すると考えられる、範囲を限定した個人グループを対象として線量を推定することに重点を置くこととし、20歳の成人、10歳の小児、1歳の幼児について被ばく線量が推定された。線量に関する主な評価項目は、特定の重要な器官、すなわち、最も重要な臓器として甲状腺、さらには赤色骨髄および女性の乳房における吸収線量(単位:グレイ、Gy)と実効線量¹⁵(単位:シーベルト、Sv)

¹⁵ 推定された実効線量は、評価対象期間中の外部被ばくによる実効線量と、同期間中に経口摂取と吸入を通じた放射性核種摂取による預託実効線量の合計である。実効線量には、甲状腺の加重された吸収線量の寄与分も含まれる。

であった。また、事故後最初の10年間で年齢の異なる各人が80歳に達するまでの期間における実効線量と甲状腺の吸収線量、集団実効線量を予測した。

A. 被ばく経路

65. 放射性物質の大気放出により人々が被ばくする経路は何通りか存在する(図V)。第一に、放出された物質は、放射性プルームとして大気中を移動した後、人々が居住する地域に到達し、(a)人々は通過するプルーム中の放射性物質からの外部被ばくを受け、(b)プルームから放射性物質を吸い込むことによる内部被ばくを受けることになる。放出された物質が大気中を通り過ぎても、住民は地表に沈着した放射性物質に被ばくし続ける。人々は、この降下物質からの外部被ばくと、飲食物に移行した放射性物質を摂取することからさらなる内部被ばくを受ける。降下物質が大気中に再度浮遊し、それを吸入することもあり得るが、福島第一原発から放出された重要な放射性核種(すなわち ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs)の場合、この被ばく経路の寄与は小さい[11, J7]。吸入または摂取により体内に取り込まれた放射性核種が体内に留まる長さは、放射性核種の物理的半減期と生物学的半減期に応じて異なる。

図V. 放射性物質の環境放出に伴う被ばくの経路



66. 放射性物質の海洋への直接放出または間接放出については、海水中または海底堆積物中の放射性核種に人々が外部的に被ばくすることもあり得る。しかし、これらの経路を通じて被ばくする線量が被ばく全体に占める寄与率はあまり大きくないと予測される。放射性物質が海産物に移行し、その海産物を摂取することで人々が内部被ばくを受けることも考えられる。この経路は、本委員会による内部被ばくの評価において検討の対象となっている。

B. 線量評価のデータ

67. 人々における放射性核種の実測値は、内部被ばくに関する直接の情報源である。そのようなデータセット2つが本委員会に提供された。1つは甲状腺、特に小児の甲状腺における ^{131}I のデータセットであり、もう1つは ^{134}Cs と ^{137}Cs についての全身モニタリングから得られたデータセットである。これらの測定値が示すのは、モニタリング時において被検者の体内に存在する放射性核種からの内部被ばくのみである。限られた数の人々と場所でしか測定されておらず、福島県の住民あるいはその他の都道府県住民の内部被ばくを直接推定するには不十分であった。したがって、本委員会は、放射性物質の環境測定値と、その放射性物質に人々がどのように被ばくしたかを表したモデルとを組み合わせることによって内部被ばくを推定した。

68. 附録Aは、本委員会が、自らの評価に対する情報源と見なした広範なデータ群を列挙すると同時に、データの質が評価にとって十分なものであることを確認するプロセスの概要を説明したものである。被ばくに最も大きく寄与するのは、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs であり、測定対象としては基本的にこれらの放射性核種に重点が置かれた。甲状腺の吸収線量を決定する上で中心となるのは、放射性核種 ^{131}I であった。この吸収線量は、事故後比較的短い期間に（主に放射性ヨウ素、特に ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I の吸入と摂取を通じて）もたらされた。放射性核種 ^{137}Cs と程度は劣るが ^{134}Cs も、住民の継続的長期被ばく、特に地表に沈着した放射性物質による被ばくの原因となる。主なデータ源は日本の政府機関から提供された公式の情報であったが、他の加盟国から提供されたデータ（たとえば日本で米国職員が得たデータなど）あるいはIAEAのフィールドチームが収集した情報などその他の公表された情報といった、他の情報源からのデータも使用した。本委員会は広範なチェックを通じて、品質の保証につながる適切かつ確立された方法で測定が実施されているかどうかを確認した。測定値は、(a)線量評価への直接の入力情報として、あるいは(b)評価の有効性をチェックするために使用した。

69. 日本で、放射性核種がどの程度地表に沈着したかについて広範な測定が行なわれている。これには、地上での測定および影響を受けた地域上空に飛行機を飛ばし搭載した計器を使用する調査などが含まれる。本委員会は、これらの測定値を、沈着した物質から公衆が被った外部被ばくを推定するための望ましい基礎として使用した。地表に沈着した放射性核種のレベルについての情報が得られなかった地域（一般的に事故後数週間における避難区域内のみ）については、本委員会は、ソースタームに加えて「大気輸送・拡散・沈着モデル」(ATDM)による大気中の放射性物質輸送シミュレーションから導き出した推定値に依拠することとした。ATDMについては、第III章で述べ、附録Bでさらに詳しく説明している。

70. 評価の目的に照らして放射性核種の大気中濃度を測定したデータが少な過ぎたため、本委員会はその濃度を推定しなければならなかった。その推定は、ソースタームから、またはATDMを使い大気中の放射性物質の輸送をシミュレーションすることによって得ることができた。しかしながら、放出された放射性核種の量と、それらが時間と場所に応じてどのように変動したかについての知識が不完全であることに加え、放出された物質がその後大気中でどのように拡散するかをシミュレーションするモデルに不確かさがあったことにより、個々の時間と場所に対するこれらの推定値には大きな不確かさが含まれている。これらの不確かさを考慮して、本委員会は、地表沈着密度の測定値を用いてATDM解析から得られた大気中濃度の推定値を調整する方法を選んだ。

71. ソースタームとATDM解析によって得られた特定の場所での大気中の放射性核種濃度と地表に沈着した放射性核種の推定値は不確かであるが、これら2つの推定値の比に関してはそれほどでもない。特に、この比はソースタームの不確かさにあまり影響されない。これらの比の不確かさに影響を及ぼす最大の要因は、乾性沈着と湿性沈着について仮定されたパラメータの不確かさであった。本委員会は、ATDM解析から導き出された場所依存性の比を使用して、地表における放射性核種の沈着密度測定値から大気中の放射性核種濃度の時間積分値を推測した。本委員会はこのようにして得た濃度を使って、避難地域を除く日本のすべての地域における大気中の放射性核種による被ばくを評価した。

72. 事故の初期段階（数日から2、3週間）に住民が避難した地域の場合、避難時における大気中の放射性核種濃度と地表に沈着した放射性核種の濃度の測定は限られた回数しか実施されていない。したがって、本委員会は、ソースタームとATDM解析から推定されたこれらの量を、予防的避難およ

び計画的避難をした人々の線量を推定するための基礎として、避難期間全体にわたって利用した。この方法は、地表に沈着しなかった¹³³Xeを含む放射性核種の大気中濃度の推定にも使用された。

73. 海産物を含む広範囲な食品および飲料水中の放射性核種レベルについては相当量の情報が発表されている(附録A参照)。放射性核種の濃度が所定の限度を上回る食品の供給に対しては制限が加えられたが、本委員会は、市場に流通した食品のデータを使用することで、明示的ではないもののこの制限を考慮に入れている(附録Cの表C4参照)。本委員会は、これらのデータ(「FAO/IAEA食品データベース」から得た)を、最初の1年間に飲食物を経由して摂取した放射性核種による被ばくを評価する際の主要な根拠として使用した。評価を行うに当たり、(a)福島県、(b)5つの近隣県を1つのグループとしたもの、(c)その他の都道府県のそれぞれで測定された食品群における放射性核種の平均濃度をベースとした。事故直後数カ月間のデータは、本委員会がより精緻な空間的分解能を採用するには不十分であった。さらに、日本では、ほとんどの人々が食品をスーパーマーケットで購入しており、食品は全国から供給されている。したがって、広範な地域での平均濃度を使用することは本委員会の目的に合致すると考えられた。日本ではまた、食品によっては世界の他の地域からの輸入が大半を占めているものがあり、評価に際してはこの点も考慮に入れた。

74. 日本政府から飲料水における放射性核種の測定結果が本委員会に提供された。飲料水中の放射性核種レベルに上昇が見られたのは限られた期間であった。本委員会は、導入されたさまざまな制限を考慮した上で、これらの測定値に基づいて被ばく線量を推定した。

75. 本委員会は、飲食物中の放射性物質の濃度に関する情報にもとづいて、事故直後の1年間ににおける飲食物の摂取による被ばく量を推定した。飲食物の摂取による被ばくの将来的レベルを推定するため、地表における放射性核種の沈着密度の測定値からモデルを使って食品中の放射性核種の濃度が評価された。本委員会は、さまざまな作物の植え付け時期や収穫時期、収穫量、放射性核種の個々の食品への移行に関する日本固有のデータなど日本における農業慣行に関する情報を入手した。次にこれらのデータを使ってFARMLANDモデル[B21]のあるバージョンを修正し、陸圏の食物連鎖を通じた放射性核種の移動を推定した。また、福島県沖の海域での放射性核種拡散についてNakanoとPovinecが実施したモデル計算の結果[N3]を使って、海産物の摂取による1年目以降に起こりうる被ばくを推定した(附録C参照)。

76. 第II章で述べたように、日本政府は、公衆を防護するためにいくつかの緊急措置を実施した。福島第一原発サイトから半径20km圏内の避難地域およびその周辺地域の住民約85,000人が、3月11日から15日にかけて予防措置として避難し、その結果、大規模な放射性核種の地表沈着が発生した時点では、ほとんどの人はそれらの地域には居住していなかった。20km圏以遠のいくつかの地区の住民約10,000人の「計画的避難」(環境測定に基づく)が3月から6月にかけて実施された。これらの地区は、福島第一原発サイトから北西の方向に位置し、主要な放出後、放射性核種の相当な沈着がこのエリアで発生している。避難者の総数は118,000人程度であった。これには、30km圏外に暮らす避難者や原子力緊急事態以外の理由から避難した人々も含まれている。さらに、食品に対する制限も導入された。指定の濃度以上の放射性物質を含む飲食物は販売を禁じられた。本委員会では、評価の際にこれらの防護措置を考慮に入れている。

77. 日本政府は、避難と食品に関する制限以外の防護措置も指示した。具体的には、福島第一原発サイトから20-30km圏内の人々に対して発令された主要な放出時における自宅での屋内退避勧告や、安定ヨウ素剤を服用するよう一部の公衆に求めた指示などである。しかしながら、どのように、いつ、どの地区に対してこれらの措置が実施されたかについての正確な情報は限られている。したがって、本委員会は公衆の被ばく線量評価において、これらのその他防護措置を考慮に入れることができなかった。

78. 福島県の中でも特に影響を受けた地域(たとえば予測年間量が20mSvを上回る避難地域など)では、大規模な土地改良プログラムが実施され、それらのプログラムにより、影響を受けた地域に居住する公衆の将来の被ばくが低減される可能性がある。居住地域の除染技術や農業対策、林業対策の実験的研究と試験が2011年中頃に開始された。実施された土地改良対策の規模と効率に関する詳細な情報は、本評価を実施する時点では公表されていなかった。したがって、本委員会は、そうした修復措置による被ばくレベルの低減の可能性は考慮していない。

C. 公衆被ばく評価方法の概要

79. 日本の公衆の線量を推定するために、本委員会は、地域を4つのグループに区分した(表4)。

表4. 地域区分の定義と各地域で採用した空間解像度

グループ	地域	公衆の線量評価における空間解像度
1	人々が事故後、数日から数か月の単位で避難した福島県 ^b の地区 ^a	18の避難シナリオで特定された各地区における典型的な場所を使用した。
2	避難が行なわれなかった福島県の行政区画 ^c	外部経路および吸入経路については行政区画レベル(各1km格子点での推定値に基づき行政区画レベルでの平均値を算出した) 経口摂取経路については県レベル
3	日本東部諸県のうちから選択した県: 福島県に隣接する県(宮城県、栃木県、群馬県、茨城県)または福島県に近い県(岩手県と千葉県)	外部経路および吸入経路については行政区画レベル(各1km格子点での推定値に基づき行政区画レベルでの平均値を算出した) 岩手県における経口摂取による推定被ばく線量はグループ4と同じ、他の5つの県については、5つの県の平均に基づいた。
4	その他の都道府県すべて	外部経路および吸入経路は県レベル 摂取経路についてはその他すべての都道府県平均

^a 地区: 本報告書において、この語は避難シナリオを表すために使用されている。福島県の12の行政区画をカバーした避難シナリオが18あった。これら12行政区画の一部は、同時に複数の避難シナリオに関係しているため、ある1つの行政区画内で避難シナリオに応じて考慮の対象となった特定の区域を代表するものとして「地区」という語を選択した。

^b 県: 日本には、47都道府県がある。日本語では、「prefecture」という語が、行政区画を指す言葉(県)を翻訳するために使用されている。図IV、VIおよびVIIは、福島県に近い県、さらに離れた県を示している。

^c 行政区画: 日本のそれぞれの都道府県は、行政区画(日本語では市または郡)に分けられている。これは、地方の行政単位である。基本的に、行政区画は日本の住所表示システムにおいて、関連する地理的なまとまり、あるいは近くの町や村のまとまりを指すために使用されている。

80. 同じ被ばくであっても、線量は被ばく時の年齢によって変動する。したがって、本委員会は放出時における年齢をもとに3つの主要な年齢層を考慮した。すなわち、成人、小児および幼児である。線量評価の趣旨から、すべての成人の代表として20歳の成人を選び、5歳以上のすべての小児の代表として10歳の小児を、そして5歳未満のすべての幼児の代表として1歳の幼児を選んだ。胎児または乳児に関しては、外部被ばく、内部被ばくいずれの場合においても他の年齢層における被ばくと類似すると考え、本委員会はその線量を特に区別して推定していない(附録C参照)。たとえば、胎児および乳児の外部被ばくによる被ばく線量は、それぞれ、成人と1歳の幼児の被ばく線量とほぼ同じであったと考えられる。本委員会は、事故後1年間の積算被ばく量を推定することに重点を置いた(通常これらの被ばく量はそれ以降の年間被ばく線量より高いはずである)。しかし、本委員会は、事故から最初の10年間の累積被ばく量と80歳までの累積被ばく量についても、それらの期間における3つの年齢層の加齢を考慮に入れて推定している。

81. 沈着した放射性物質による外部被ばく線量を推定するためのモデルは確立されている(たとえば、本委員会はチェルノブイリ事故での放射線量を評価する際にも同じようなモデルを使用した[U12])。これらのモデルは、屋内滞在中の建物の遮へい効果はもとより、放射性壊変、風雨による地表からの放射性核種の除去、土壌中の放射性核種の移動などの過程を考慮している。本委員会は、いくつかの異なる種類の建物(したがって、遮蔽の程度における差異)と屋内で過ごす時間量の違いを考慮に入れた。福島県とグループ3の県では住居の大多数が木造建築であるため、本委員会は木造家屋に居住する人々の線量推定値を提示した。

82. 大気中の放射性核種を吸入することによる線量については、標準的かつ国際的に認められたモデルとデータを使って評価した[I12, I15, I25]。大気中の放射性核種が体内に入った量を推定する

ために、年齢別の呼吸率を使用し、各放射性核種に対する単位吸入放射能あたりの規格化線量(線量係数と呼ばれる)を導出し、それを使って被ばく線量を推定した。

83. 同様に、食料と飲料水に含まれる放射性核種の摂取による線量は、異なる種類の食品ごとの年齢別摂取率と、放射性核種ごとの単位摂取放射能あたりの線量係数[I25]を使って、食物中の放射性核種濃度から推定した。日本での最初の1年間における摂取線量を評価するために、本委員会は主にFAO/IAEA食品データベース(附録A参照)の測定データを使用した。しかし、1年目以降の摂取による線量を推定するには、本委員会はモデルを用いた解析手法を使用しなければならなかった。日本の厚生労働省(厚労省)は特定の食品に関する一人当たりの消費量調査を実施しており、本委員会は、そのデータを使用した。最も広範なデータが存在するのは成人の場合であったが、幼児と小児についてもデータは存在した。

84. 避難した住民(グループ1)の場合、本委員会は、避難前と避難中の被ばくに加えて避難先においてその年の残りの期間に被ばくした量を推定した。この推定は、住民が避難した地域における大気中の放射性核種濃度と地表での放射性核種の沈着密度(ソースタームとATDM解析から推定された値)、およびこの期間における避難者の移動についての情報(福島県内で実施された実態調査から得られた情報[A5])。この実態調査から18の避難シナリオが特定されており、それらについては附録Cで詳述している)に基づいている。地区から避難した成人住民に関して、自宅に戻り通常の生活に復帰しと仮定した場合に、2012年3月から2015年3月までの期間に受けたであろう外部被ばくについても、環境修復が行なわれなかったという前提で実効線量を推定した。これらの推定値は当該コミュニティにおける将来の実効線量の上限値を提供している。

85. 本委員会は、放射性プルームの通過中と通過後に20km圏内の避難区域に留まった、あるいはその区域に立ち入った人が存在する可能性を無視することができなかった。本委員会は、避難者の線量と、避難者が避難しなかった場合に被ばくしたはずの線量を推定した(これは、避難区域にとどまっていた可能性のある人の線量の推定値として、そして、避難区域に立ち入った可能性のある人の線量の上限値としても使用することができる)。これら2つの推定値の組み合わせから、本委員会はまた、避難によって避けることのできた線量を推定した。

86. 本委員会は、日本の住民の集団実効線量と甲状腺の集団吸収線量についても推定を行った。これらの推定値は、2010年の国勢調査(附録Aの表A1参照)から得た日本の住民の年齢と社会構成、そして行政区画別および都道府県別の人口分布に基づいている。また、福島県に居住する住民と日本の他の都道府県の住民について集団線量を推定した。

87. 本委員会は日本以外の国の公衆の線量を推定する広範な評価は実施していない。日本以外の国における線量評価については、WHOの予備的被ばく量評価[W11]の結果等、文献で発表された各種推定の検討と、それを補足するものとして国連加盟国が実施した広範な測定値および線量の評価を基にこれを行った。

D. 線量評価の結果

88. 本委員会は日本の公衆における実効線量と特定の臓器の吸収線量について広範な推定を行った。それについては附録Cでさらに詳細に報告している。

1. 避難しなかった公衆の1年目の線量

89. 表5は、日本の避難対象外地域に暮らしていた成人、10歳児および1歳児における事故から1年間の行政区画平均または県平均の実効線量と甲状腺吸収線量の推定値をまとめたものである。線量は、3つの主要な被ばく経路(外部被ばく、吸入による内部被ばくおよび経口摂取による内部被ばく)の合計を表している。

表5. 避難しなかった日本の典型的な住民における事故から1年間の行政区画平均または都道府県平均の実効線量および甲状腺吸収線量の推定値

線量は、自然放射線源によるバックグラウンド線量への上乗せ分である。表中の値は、グループ2とグループ3の県については行政区画平均線量の幅であり、グループ4については、都道府県平均線量の幅を示している。これらの推定値は、さまざまな場所に居住する人々が被ばくした平均線量を表すことを意図しており、これらの場所における集団内の個々人が被ばくした線量の範囲を表したものではない。データが不十分である場合には仮定を設けており、そのためこれらの値は平均線量を実際よりも過大評価している可能性がある(この章のセクションEとF参照)。

住宅区域	実効線量 (mSv)			甲状腺の吸収線量(mGy)		
	成人	10 歳児	1 歳児	成人	10 歳児	1 歳児
グループ 2 ^a – 福島県	1.0～4.3	1.2～5.9	2.0～7.5	7.8～17	15～31	33～52
グループ 3 の県 ^b	0.2～1.4	0.2～2.0	0.3～2.5	0.6～5.1	1.3～9.1	2.7～15
グループ 4 ^c – その他の都道府県	0.1～0.3	0.1～0.4	0.2～0.5	0.5～0.9	1.2～1.8	2.6～3.3

^a グループ2 – 福島県の避難対象外行政区画の住民

^b グループ3 – 宮城県、群馬県、栃木県、茨城県、千葉県、岩手県の住民

^c グループ4 – その他の都道府県の住民

90. 実効線量について 図VIは、福島県内避難対象外行政区画(グループ2)とグループ3の県に居住する成人における事故直後1年間の行政区画平均実効線量を示す地図である。甲状腺の吸収線量(すべての年齢)と10歳の小児と1歳の幼児の実効線量は同じような地理的パターンを示しており、それぞれの地域における放射性核種の沈着密度を反映している(附録C参照)。

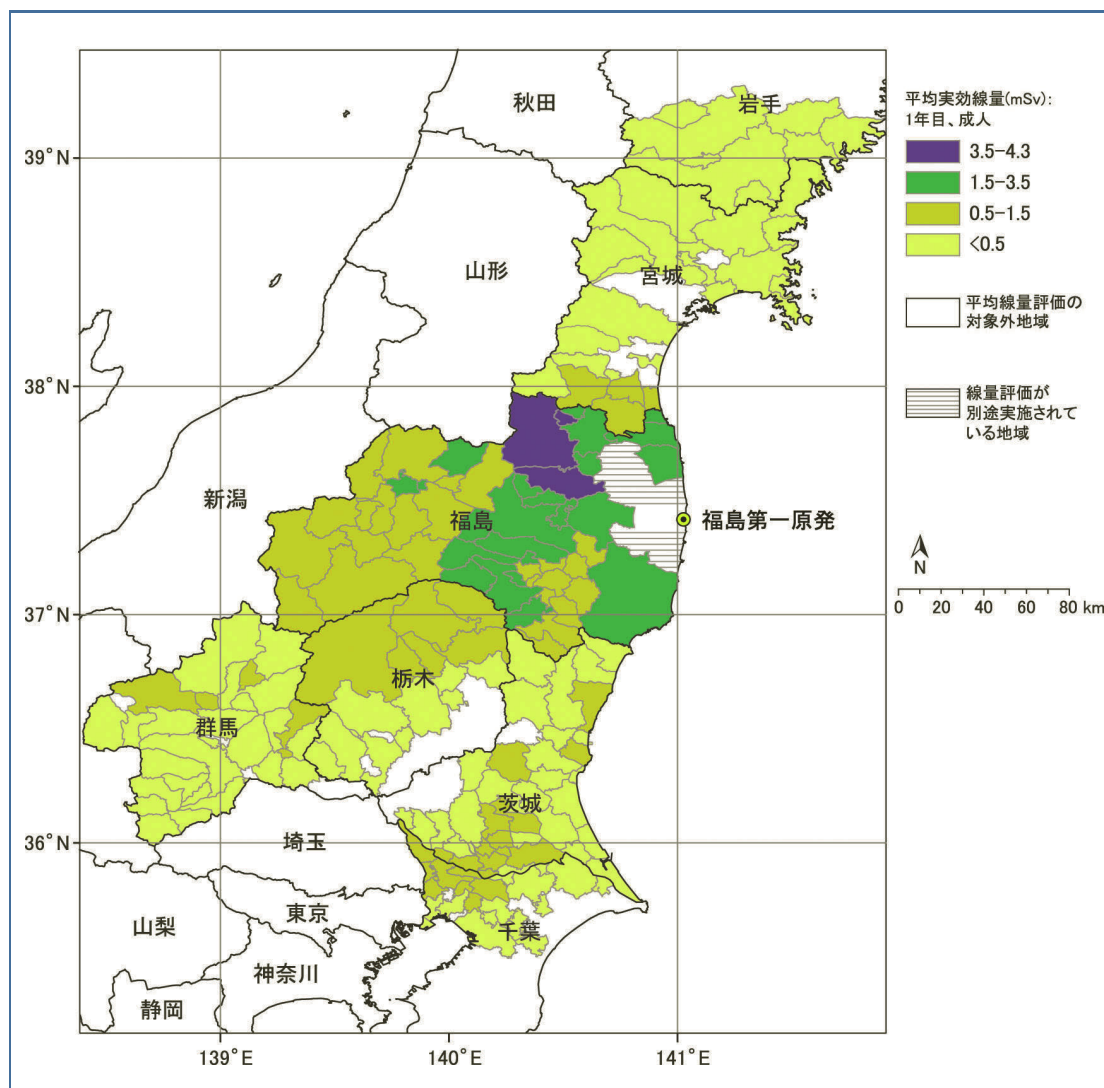
91. 各被ばく経路の寄与度は、環境中および食品中の放射性核種のレベルと組成を反映し、場所によって変動する。沈着密度が高い区域では、実効線量に占める降下物質による外部被ばくの割合が大きくなる。福島県における事故直後の1年間の実効線量に占める食物摂取の寄与度には変動が見られた。これは、経口摂取による実効線量が、他の経路による実効線量に比べはるかに広い地域について平均された放射性核種の濃度を反映した値であったからである。日本でも、福島第一原発サイトからはるかに離れた地域では、ほとんどの都道府県で経口摂取による実効線量が優位を占めている。

92. 福島県内では、20km圏内の避難区域に一部がかかる行政区画(南相馬市)と地表での沈着密度が高い行政区画(福島市、二本松市、桑折町、大玉村、郡山市、本宮市、伊達市)において、避難しなかった人としては最大の推定実効線量が得られ、事故直後1年間における成人の行政区画平均実効線量は2.5～4.3mSvの範囲であった。これらの行政区画では、実効線量に占める沈着放射性核種に起因する外部線量の寄与率が圧倒的に大きかった。1歳の幼児における事故直後1年目の平均実効線量は、成人の平均実効線量の2倍以内と推定された。

93. グループ3に属する県(千葉、群馬、茨城、岩手、宮城、栃木)の各行政区画においては、成人の行政区画平均実効線量は最初の1年間で0.2～1.4mSvであり、千葉県、群馬県、茨城県、宮城県および栃木県については食物摂取による寄与が0.2mSv含まれている。岩手県については、食物摂取による実効線量への寄与はその他の都道府県と同じ0.1mSvであった。その他の都道府県における事故直後1年間の県平均実効線量は0.1～0.3mSv であり、そのうち経口摂取によるものが0.1mSvで、総じて経口摂取が支配的な経路であった。

図VI. 福島県の避難対象外行政区画およびグループ3に含まれる県の一部行政区画に居住する成人を対象に推定された事故直後1年間の行政区画平均実効線量

実効線量には、関連するすべての経路と放射性核種からの寄与量が含まれる

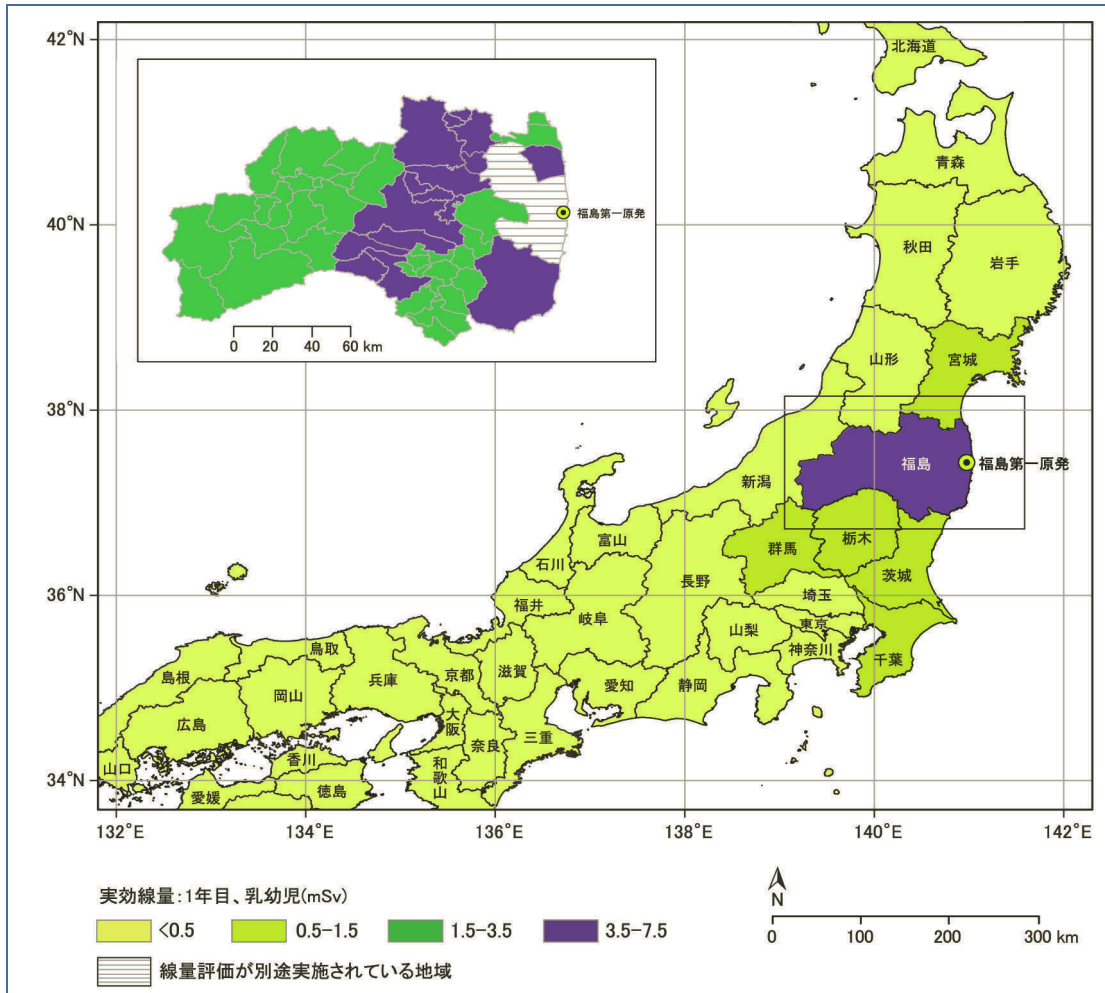


94. 図VIIは、その他の都道府県(グループ4)の1歳の幼児における事故直後1年間の県平均実効線量を表している。その他の都道府県における県平均線量は、福島県の県平均線量より低く、福島から遠い県ではかなり低く、実効線量の推定値は自然放射線源によるバックグラウンド実効線量の通常の変動範囲より低かった。

95. 臓器の吸収線量について 福島県の避難対象外行政区画(グループ2)では、事故直後1年間の推定甲状腺吸収線量が最も高かったのはいわき市と福島市の居住者であった。1歳の幼児の場合、事故直後1年間ににおける甲状腺の行政区画平均吸収線量が最も高かったのはいわき市で、約50mGyであると推定された(表5参照)。この線量の約3分の1は吸入に、3分の2は経口摂取によるものであった。成人における事故直後1年間の甲状腺の推定線量は、1歳の幼児の値の約30%であった。これらの線量のほとんどは、事故直後数週間における被ばくによるものである。福島県の避難対象外行政区画の事故直後1年間ににおける赤色骨髄と女性の乳房の平均吸収線量は、すべての年齢層で6mGy未満と推定された。

図VII. 1歳児を対象に推定された事故後1年間の都道府県平均実効線量

実効線量には、関連するすべての経路と放射性核種からの寄与量が含まれる。大きい方の地図は都道府県平均実効線量を示している。福島県の平均線量には、避難対象外行政区画の数値のみが含まれる。差込地図は、福島県における避難対象外行政区画の行政区画平均実効線量を示している



96. グループ3に属する県(千葉、群馬、茨城、岩手、宮城、栃木)の事故直後1年間における幼児の甲状腺の行政区画平均吸収線量は、3～15mGyの範囲にあると推定された。経口摂取が支配的な被ばく経路であり、吸入経路の寄与度は数%から約30%の間であった。事故直後1年間における赤色骨髄と女性の乳房の行政区画平均吸収線量は、すべての年齢層で2mGy未満と推定された。日本の残り40都道府県については、事故直後1年間における幼児の甲状腺の県平均吸収線量は約3mGyであり、経口摂取による線量が75%と100%を占めると推定された。

97. これらの推定線量値はすべて、グループ2とグループ3の県の各行政区画に住む住民と、グループ4の各都道府県に住む住民の平均線量を表している。これらの値は、本来、たとえば、どのような食品を消費したか、放出された放射性物質の拡散との関連においてどこに居たか等の要因に拠って、個人ごとに変動するものである。個人的に防護措置を講じた人も居た可能性があるが、本委員会ではその点は考慮していない。

98. 本委員会はまた、1つの行政区画内における外部被ばくによる線量と、吸入による内部被ばくによる線量のばらつきがどの程度の拡がりを持つかを把握すべく、幾つかの解析を行った。その結果、各行政区画内において放射性核種の沈着密度測定値と大気中の¹³¹I濃度の両方に著しい空間的ばらつきが存在することが明らかとなった。ばらつきの幅は、吸入による実効線量と甲状腺の吸収線量

の両方における推定値が行政区画平均線量の30～50%から最大で約2倍から3倍に達するほどであった。

99. 地表に沈着した放射性物質による外部被ばくについては、線量推定値のばらつきに影響を及ぼす更なる要素として建材の遮蔽効果が挙げられる。提示した主要な結果は、福島県で最も一般的である木造家屋に住む人々を対象としたものである。しかし、コンクリートの高層アパートまたは木造モルタルの家に住む人々の線量は、それぞれ、推定線量の約25%または50%である。

100. 食品における放射性核種レベルの測定値に関しても、その作物がどこで栽培されたか、地表に沈着した放射性物質の量、作物を植えた時期や土壌のタイプなどの要素により食品によって大きなばらつきがあった。主要な要素は、人々が食品をどこで入手したかであった。日本の大多数の人々はスーパーマーケットを利用しており、したがって事故直後1年間の線量を評価するためには、福島県、グループ3の6県のうち5県(岩手を除く)、およびその他の都道府県での食品中平均濃度を基にした解析手法を採用することが、この評価の目的から見て適切であると考えられた。

101. 食品への放射性核種の移行は、核種の放出が1年のうちの時期に発生するかによって大きく影響を受ける。福島第一原発の事故が発生した3月は、わずかな作物しか栽培されておらず、家畜は保存された餌を与えられていた。そのため、食品中の濃度は、事故が1年のうちでもっと遅くに発生していた場合(1986年のチェルノブイリ事故がそうであった)よりも低かった。本委員会は、一部の人々、特に計画的避難区域の人々が、高濃度の放射性核種に汚染された食物、すなわち地元で栽培された食物や採取したキノコや野生の植物、あるいは地元で捕獲または狩猟した魚や獲物を避難する前に口にしていた可能性を無視することができなかった。そのような食習慣により住民の経口摂取による実効線量の推定値が最大でおそらく10倍まで高くなる可能性はあるものの、公衆に対して広範囲に実施された生体全身測定の結果には、そのような高線量を示す証拠は見られなかった。また、事故発生時期が3月であったため、地元で栽培されていた食物は限られていたし、日本の多くの人々は、生鮮農産物や福島県から来た可能性のあるあらゆるものを回避することによって食物経路の放射性核種の摂取量を減らす措置を講じた。これらの人々の場合の経口摂取による線量は、本委員会が推定した値よりかなり低かったと思われる[S2]。

2. 避難者の線量

102. グループ1に属する区域(双葉町、広野町、浪江町、楡葉町、大熊町、富岡町、飯舘村、川俣町、南相馬市、田村市、川内村、葛尾村)から避難した人々の事故直後1年間の線量を、避難前と避難中に被ばくした線量と、1年のうち残りの期間中に避難先で被ばくした線量の合計として推定した。地区平均実効線量と甲状腺吸収線量の推定値を表6にまとめている。

103. 事故直後1年間の地区平均実効線量は、すべての年齢層および両方の避難シナリオを通じて、数ミリシーベルトから約10ミリシーベルト強までの範囲であった。対応する事故直後1年間の甲状腺の地区平均吸収線量は、成人の場合で最大約35mGy、1歳の幼児の場合には最大約80mGyであった。予防的避難を行った地区の場合、事故直後1年間の赤色骨髄と女性の乳房の地区平均吸収線量は、0.6から7mGyの間であると推定された。また計画的避難が実施された地区については、地区平均線量は、すべての年齢層で4mGyから10mGyの間であった。

104. 本委員会は、20km圏内における地区の避難により、成人の場合最大約50mSvの実効線量、1歳の幼児の場合には最大約750mGyの甲状腺吸収線量をそれぞれ回避することができたと推定している(附属書Cの表C11とC12参照)。

表6. 事故直後1年間における避難者の地区平均実効線量と地区平均甲状腺吸収線量の推定値

線量は自然放射線源によるバックグラウンド線量への上乗せ分である。表中の値は、各避難シナリオの地区平均線量の範囲である。これらの線量推定値は、各地区から避難した人々が被ばくした平均線量を表すことを意図しており、避難した地区の住民一人一人が被ばくした線量範囲を表したものではない。データが不十分である場合に仮定を設けており、そのためこれらの値は平均量を実際よりも過大評価している可能性がある(この章のセクションEとF参照)。

年齢層	予防的避難地区 ^a			計画的避難地区 ^b		
	避難前 および 避難中	避難先	事故直後 1 年間 合計	避難前 および 避難中	避難先	事故直後 1 年間 合計
	実効線量 (mSv)					
成人	0～2.2	0.2～4.3	1.1～5.7	2.7～8.5	0.8～3.3	4.8～9.3
小児、10 歳	0～1.8	0.3～5.9	1.3～7.3	3.4～9.1	1.1～4.5	5.4～10
幼児、1 歳	0～3.3	0.3～7.5	1.6～9.3	4.2～12	1.1～5.6	7.1～13
	甲状腺吸収線量 (mGy)					
成人	0～23	0.8～16	7.2～34	15～28	1～8	16～35
小児、10 歳	0～37	1.5～29	12～58	25～45	1.1～14	27～58
幼児、1 歳	0～46	3～49	15～82 ^c	45～63	2～27	47～83 ^c

^a 予防的避難とは、高度の被ばくを防止するための緊急時防護措置として2011年3月12日から2011年3月15日にかけて指示された地区の避難を指す。線量評価では、双葉町、大熊町、富岡町、楢葉町、広野町全体、南相馬市、浪江町、田村市の一部、川内村と葛尾村についての避難シナリオ1から12を対象とした(附属書C参照)。

^b 計画的避難は、2011年3月末から同年6月にかけて指示された地区からの避難を指す(環境測定に基づく)。線量評価では、飯館村、南相馬市の一部、浪江町、川俣町、葛尾村の避難シナリオ13から18(附属書C参照)を対象とした。

^c これらの甲状腺吸収線量は、主として、事故直後数日間の避難前と避難中の期間に被災地域を通過した大気中放射性物質を吸入することからの内部被ばくとその後の期間における経口摂取による内部被ばくによるものであった。

3. 日本での将来的被ばく線量評価

105. 本委員会は、事故後10年間にわたって累積される行政区画平均および県平均線量と、80歳までに累積される行政区画平均および県平均線量についても推定した。これらの推定値は、避難が実施されなかった行政区画の住民についてのみ表7に示している。事故時点で幼児(1歳)であった小児における実効線量が最も高いと推定され、10歳の小児がそれに次いで高く成人がそれに続いた。これらの年齢層における推定実効線量の違いは大きくなく、2倍未満であった。地区から避難した成人住民が自宅に戻り通常の生活に復帰したと仮定した場合に生じる可能性のある外部被ばくによる実効線量の推定値(環境修復は考慮に入らず)を附属書Cに示す(表C19参照)。

106. 全体として、事故後10年間に被る行政区画平均実効線量または県平均実効線量は事故直後1年間の実効線量の最大2倍、生涯実効線量は最大3倍と推定された。ともに環境修復はないものと仮定している。日本ではさまざまな環境修復措置が適用されているが、それらの有効性がまだ確証されていなかったため、本委員会は線量評価においてそれらの修復措置の有効性を考慮しなかった。しかし、避難後に環境が修復されないまま自宅に戻り通常の生活に復帰した場合に被ると思われる実効線量推定値が、将来被る可能性のある線量の上限值であると言える。沈着密度が最も高い場所から避難した人々の場合、外部被ばくによる成人の地区平均実効線量は2012年3月から2013年3月までの期間では12mSvであると推定され、2014年3月から2015年3月までにおいてはこの値が5mSvに低下するものと考えられる。甲状腺の生涯吸収線量は、事故直後1年間の甲状腺吸収線量より50%弱高いと推定された。これは、事故直後1年間の甲状腺吸収線量の大半が¹³¹I(比較的短期間でもたら

された)によるものであるのに対し、翌年以降の線量が ^{134}Cs と ^{137}Cs によるものだからである(附属書C参照)。

表7. 成人、10歳の小児および1歳の幼児(2011年現在)の事故直後1年間、10年間および80歳になるまでの間における行政区画平均または県平均の実効線量推定値

線量は、自然放射線源によるバックグラウンド線量への上乗せ分である。表中の値は、グループ2とグループ3の県における行政区画平均線量の範囲とグループ4の県における県平均実効線量の範囲を示している。これらの実効線量推定値は、さまざまな場所に居住する人々が被る平均値を表すことを意図しており、それらの場所の住民一人一人が被ばくした実効線量の範囲を表すものではない。データが不十分である場合には仮定を設けており、そのためこれらの値は平均実効線量を実際よりも過大評価している可能性がある(この章のセクションEとF参照)。

2011年現在の年齢層	行政区画平均または県平均実効線量(mSv)		
	日本の地理的分		
	グループ2 福島県 ^a	グループ3の ^b 県	グループ4 ^c その他の都道府県
1年間の被ばく			
成人	1.0～4.3	0.2～1.4	0.1～0.3
小児、10歳	1.2～5.9	0.2～2.0	0.1～0.4
幼児、1歳	2.0～7.5	0.3～2.5	0.2～0.5
10年間の被ばく			
成人	1.1～8.3	0.2～2.8	0.1～0.5
小児、10歳	1.3～12	0.3～4.0	0.1～0.6
幼児、1歳	2.1～14	0.3～6.4	0.2～0.9
生涯被ばく			
成人	1.1～11	0.2～4.0	0.1～0.6
小児、10歳	1.4～16	0.3～5.5	0.1～0.8
幼児、1歳	2.1～18	0.4～6.4	0.2～0.9

^a グループ2—福島県の避難対象外行政区画に居住する公衆構成員

^b グループ3—宮城県、群馬県、栃木県、茨城県、千葉県、岩手県に居住する公衆構成員。千葉県、群馬県、茨城県、宮城県、栃木県をひとつのグループとし、これらの県での経口摂取による実効線量を計算した。岩手県については、経口摂取による実効線量は、その他の都道府県における実効線量と同じと仮定した。

^c グループ4—その他の都道府県に居住する公衆構成員

107. 事故にともなう日本の住民の被ばくの全体像を捉えるために、本委員会はまた日本の公衆における集団実効線量と集団甲状腺吸収線量を推定した。その結果得られた事故直後1年間、事故から10年間、そして生涯にわたる期間それぞれの集団実効線量と集団甲状腺吸収線量を表8に示している。集団実効線量に最も大きく寄与する被ばく経路は、地表に沈着した ^{134}Cs と ^{137}Cs によるの外部被ばくと、これらの放射性核種を食品から摂取する内部被ばくの2つの長期被ばく経路であった。事故直後1年間の集団甲状腺吸収線量に最も大きく寄与したのは、 ^{131}I の吸入と経口摂取による内部被ばくであった。

108. 福島第一原発事故による日本の住民のこれらの集団線量推定値を、旧ソビエト連邦で1986年に生じたチェルノブイリ事故後に放射線被ばくした欧州諸国の住民の集団線量推定値と比較することができる。環境測定値と人の測定値の結果から20年間(1986年-2005年)について本委員会が推定し

た集団実効線量と集団甲状腺吸収線量は、それぞれ約360,000¹⁶ man Svと2,300,000 man Gyであった。生涯にわたる継続的被ばくを考慮すると、それらの値はそれぞれ、約400,000 man Svと2,400,000 man Gyである。福島第一原発事故後の生涯被ばくによる日本の住民の集団実効線量は、チェルノブイリ事故後に被ばくした欧州住民の集団実効線量の約10%から15%である。同様に、集団甲状腺吸収線量はチェルノブイリ事故における集団甲状腺吸収線量の約5%であった。

表8. 日本の住民(2010年の人口は約1億2800万人)における集団実効線量と集団甲状腺吸収線量

線量カテゴリー	被ばく期間		
	最初の1年間	10年間	80歳まで
集団実効線量 (1000人・シーベルト)	18	36	48
甲状腺集団吸収線量 (1000人・グレイ)	82	100	112

4. 他の国における被ばく線量の評価

109. 日本の近隣諸国ならびに世界の他の地域における公衆の線量を評価するに当たって本委員会は、WHOの予備被ばく評価[W11]の結果を含む、文献に発表された推定値の検討を基本とし、加盟各国が行った広範囲な測定値と線量評価を補足的に使用した(附属書C参照)。この情報の解析に基づいて、本委員会は日本国外に居住する住民の事故による事故直後1年間における平均実効線量を0.01mSv未満と結論づけた。

E. 不確かさ

110. このタイプの評価は、不完全な知識と情報にもとづき一定の仮定を前提にするため、その結果には不確かさがともなうものである。不確かさの主な発生源は附属書Cで詳述しているが、重要な要素を以下に概説する。

111. 外部被ばくによる線量の推定は、基本的に地表に沈着した放射性核種の測定レベルに基づくものであった。¹³⁷Csと¹³⁴Csの個別測定値に関しては不確かさの程度が比較的小さかったが、¹³¹Iについては測定を開始する前にすでに大量の放射性壊変が発生しているため不確かさの度合いが大きかった。行政区画平均線量を推定するとき、測定値が行政区画か県ごとにどれくらい正確に放射性核種の空間分布を表したかという点も不確かさを伴うものであった。福島県については十分な空間をカバーした広範囲な測定が実施され、特定の行政区画に関する推定行政区画平均線量は2倍の範囲内で正確であると考えられた。グループ4の県の場合は測定値数が比較的少なく、県平均線量の不確かさはより大きいと考えられた。

112. 不確かさの別の原因は、時間の経過にともなう放射性核種の放出率の推移と放出時の気象状況についての知見が不完全であることである。ATDM解析の結果を特定の場所における線量の推定に使用した場合には、大きな不確かさが生じる。可能なかぎり放射性核種の環境濃度測定値を使って線量を評価しているが、一部の推定は、放射性核種の想定放出パターンとATDM解析の結果を使って行なっている。3月に避難したコミュニティの避難前と避難中の吸入と外部被ばくによる線量の推定は、放出率の推定値とATDM解析に直接基づいている。これらの住民グループの地区平均実効線量と臓器吸収線量は、特定の場所と時間に関するATDM解析の結果に不確かさがあるため、一般的に4倍から5倍過大評価若しくは過小評価される可能性がある。

¹⁶ 甲状腺線量の寄与を除外した場合、約260,000 man Sv [U12]。

113. 吸入による甲状腺吸収線量の評価に影響を及ぼしたもう1つの要素は、大気中の粒子状およびガス状 ^{131}I の比率であった。大気の測定データは限られており、ほとんどは、放出サイトから相当離れたところのデータであった。周辺地域に比べて甲状腺吸収線量が大きかったと考えられる福島県においては、大気中の粒子状およびガス状 ^{131}I の相対量に関する測定データはなく、この比の値は、粒子状およびガス状のヨウ素放出量が等しかったという仮定に基づくATDM解析の結果から得ている。この比の推定値は、主要な被ばく期間にわたって最大2倍の不確かさを有している。

114. 食品における放射性核種の測定値に基づく線量にも不確かさがあり(附属書C)、これを定量化するのは困難であった。当局は、最高レベルの濃度の食品を特定することを優先したため、食品をランダムにサンプリングしていなかった。したがって、本委員会が使用した平均濃度の値は過大評価の原因になった可能性があり、特に、測定値が比較的少なかった事故後の数カ月間はその可能性が高い。多くの測定結果は検出限界よりも低く、その場合本委員会は検出限界値を有するものと仮定した。これも、経口摂取による人々の線量が高目に評価される原因となった。食物の流通・消費パターンの変化も不確かさの別の原因であった。福島県で消費された食物の25%が県内産であったと仮定した場合、事故後1年間の経口摂取による実効線量の推定値は、本委員会の推定値の30%になると考えられる。

115. 実効線量と放射性核種の体内摂取後の関連臓器における吸収線量を確定するのに標準的なモデルが使用された。これらのモデルは、特定の代謝特性を有する標準サイズの人に基づいて作成された。日本の食事は、安定ヨウ素を比較的多く含んでいる。そのため、標準的なモデルで示されるよりも、甲状腺への放射性ヨウ素の移行が少なく、したがって、この線源からの線量がわずかながら少なかった可能性がある。しかし、それらの影響は全体として、線量評価に関連した他の不確かさと比較して小さかったと思われる(附属書C参照)。

F. 直接測定と他の評価の比較

1. 人々における放射性核種の直接測定

116. 人々における放射性核種の測定値は、公衆の被ばくに関する直接の情報源となった。主なデータセットは、(a)甲状腺、特に小児の甲状腺における ^{131}I 測定値と、(b) ^{134}Cs と ^{137}Cs の全身モニタリング結果の2つであった。これらの測定値は、本委員会が行なう線量評価の有効性をチェックする1つの手段を提供した。

117. 避難者の甲状腺吸収線量を推定するために本委員会が採用した手法によって若干の過大評価(たとえば情報不足による防護措置に関する仮定や線量測定に関する因子について)がもたらされた可能性がある。2011年3月26日から30日までの間に、いわき市、川俣町、飯舘村に居住する1歳から15歳の小児1,080人を対象に現地当局が可搬型の線量率計を使って甲状腺のモニタリングを実施した[K13]。被ばくが2011年3月12日から24日までの期間連続したと想定して、内部被ばくによる甲状腺吸収線量が計算された。10歳の小児と1歳の幼児の測定データを本委員会が解析した結果は、日本の当局による評価と一致した(本委員会は、解析において2011年3月15日に1回被ばくしたと仮定した)。本委員会が内部被ばくによる甲状腺の地区平均吸収線量を推定した結果は、このグループの直接のモニタリングから導き出された甲状腺地区平均吸収線量よりも最大で約5倍高いものであった。甲状腺のモニタリング結果は、2011年4月12から16日にかけて62人の避難者についても報告されている[T20]。本委員会が推定した内部被ばくによる甲状腺吸収線量の地区平均値は、Tokonami et al. によって推定された地区平均値より最大で4倍高かった(附属書C参照)。

118. 福島県の県民健康管理調査の一環として、福島県と近隣県の106,000人以上の住民を対象とした全身計測が2012年12月まで実施された[H5, M24]。Momose et al.[M24]は、2011年7月から2012年1月までの期間に受検した避難者10,000人のうち20%で体に ^{134}Cs と ^{137}Cs が存在することが確認できたと報告した。Hayano et al. [H5]は、2011年10月から2012年2月にかけて福島県と近隣県の住民の

33,000人を対象に実施した検査の結果、12%で ^{134}Cs と ^{137}Cs の存在が確認されたと報告している。2012年3月から11月の間で、この割合は1%に低下した。これらの大規模なモニタリング・プログラムに基づく内部被ばくによる平均実効線量の推定値については、附属書Cで詳しく報告している。これらの推定値は、本委員会が推定した ^{134}Cs と ^{137}Cs の吸入と経口摂取による平均実効線量値よりもかなり低いものであった。

2. 他の評価

119. これまでに発行されたいくつかの学術論文や報告書にも公衆構成員のさまざまな線量評価が含まれている。2011年9月までに発表されたデータに基づいて、WHOの委託を受けて予備的な線量評価[W11]と関連する健康リスク評価[W12]が実施された。本委員会の(特に避難地域について、より現実的な仮定とより包括的な最近のデータを使って行った)評価の結果とWHO研究において推定された線量は基本的に一致していた。総じて、WHOが提示した推定の範囲(附属書C参照)は、本委員会の評価の結果を包含していたが、避難地区の一部に関しては高い数値を示した。Takahara et al. [T3]は、確率論的アプローチを使って福島県における成人の線量を評価した。同じような仮定が行なわれた場合、結果は総じて本委員会が得た結果と一致していた。日本の放射線医学総合研究所(放医研)は、避難した人々の外部被ばくによる実効線量を評価している。放医研による評価の手法は、本委員会のそれと似たものであったが、大気拡散に関しては異なるモデルを使用している。放医研より推定された線量は、総じて本委員会の評価による推定値と一致していた。

V. 作業者の線量評価

A. 緒言

120. 日本の規制における作業者の実効線量限度は5年間で100mSv、いかなる1年間での限度は50mSvである。ただし、女性作業者の場合、実効線量限度は3ヶ月間で5mSvとされている。実効線量で100mSvの参考レベル(日本では「緊急時作業に係る線量限度」。以下、本書でもこの用語を使用)は、緊急時対応作業員に対して福島第一原発事故後[I9]、速やかに採用された。しかしながら、当局は、福島第一原発サイトの状況をさらに評価した後、2011年3月14日、当該事故に係る緊急時(すなわち2011年12月16日まで)に受けるあらゆる被ばくについての緊急時作業に対する線量限度を実効線量250mSvに引き上げた。この限度引き上げは、作業者を継続的に防護しつつ、重要な被害軽減作業を実施できるようにするためであった。東電は、当局の設定した基準レベルを確実に順守するため、より低い200mSv(実効線量)という緊急時作業に係る線量限度を採用した[I6]。

121. 作業者の放射線被ばくは事故後、放射性壊変と損傷した原子炉から放出される放射性物質の量の減少により、時間の経過に伴って低減した。厚生労働省は2011年12月16日、1号機、2号機、3号機の原子炉冷温停止後、緊急時作業に係る線量限度を既存の100mSv(実効線量)に戻した[T16, W1]。

122. 事故発生以前には、数千人の職業被ばく作業員が現場で雇用されていた。この数字は事故後、著しく増加し、およそ2万5000人の職業被ばく作業員が2012年10月までに復旧および関連作業に従事した。そのほとんど(約2万1000人)は東電の元請業者によって雇用されていた。東電の従業員は主に発電所の運営、データの採取、建設工事の監理に従事した。元請業者の作業員は主に設備の復旧と建設作業に従事し、なかには東電従業員のサポートを担い、原子炉の安定化と放射性物質放出の管理を行う作業員もいた。

123. さらに、数百人の緊急時対応作業従事者も福島第一原発の現場に派遣された。この中には消防士(260人)、警察官(13人)、自衛隊員(168人)が含まれていた¹⁷。このうち、84人の自衛隊員はヘリコプターから冷却用水を放出する原発サイトでの作業に従事し、残りは地上で類似作業に関わった。さらに、多数の消防士、警察官、自衛隊員がサイトの外で緊急時対応活動に参与した。

124. 2011年12月末までに約350人の福島県庁職員が警戒区域(20km圏内避難区域)内で緊急時の作業に携わった。主な活動は、環境放射線レベルのモニタリング、災害によって生じた損害の査定、電力および放射線モニターの回復、ペットの保護、家畜の捕獲と殺、福島第一原発の現場調査、関連機関との調整と協力などであった。さらに約3万4000人の自治体職員らが避難区域内で多くの多様な緊急時対応活動に従事した[Y7]。

125. 米国国防総省(DoD)および米国国家核安全保障局(DOE/NNSA)は日本政府を支援するため、地震、津波、原発事故後に約2万4000人の人員を提供した。米国の人員は通常、制限区域外にとどまり、環境放射線測定を行い、人道的な支援を行った(たとえば、仙台空港の運営能力を復旧し、食料や燃料、衣服など人道的支援物資の空輸を可能にした。)

B. 線量と健康に影響を与える条件

126. 事故後、東電と他の組織は原子炉を制御して放射性物質の放出を減少させるため、福島第一原発サイト内とその周囲で作業を行った[I29]。事故後の早い段階(数日から最初の数週間)での最優先事項は、放射線の影響と事故がこれ以上進むことを抑制し、特に電力を復旧して冷却システムを回復することだった(2011年3月26日に達成)[I6]。原子炉の安定化と水の除染が次の優先事項だった。

127. 地震と津波は福島第一原発サイトにおける多くの建物や道路、タンクその他の基幹施設に広範な被害をもたらした。事業者は壊滅的ともいえる緊急事態に直面した。電力と原子炉の制御および計測がほぼ完全かつ長期的に失われ、外部の支援を速やかに得られる望みはほとんどなかった。原発サイト内外の通信システムも深刻な影響を受けていたが、原発サイトと本社をつなぐ東電社内通信ネットワークはほぼ無傷だった[I6]。

128. 現場およびそれ以外の場所において、作業員による類を見ない献身的な対応作業が必要とされた。津波発生直後、約400人の作業員(約130人の運転員と270人のメンテナンス要員)が復旧作業に従事可能であった[I29]。彼らは6基の原子炉と6ヶ所の核燃料貯蔵プール、共通燃料貯蔵プール、乾式処分設備の安全性を確保するため、非常に困難な状況で極めて長い時間、作業しなくてはならなかった(すなわち、ほぼすべての電源の喪失、暗く湿った冷たい環境、圧縮空気などを供給する適切な装置の欠如、計器や制御設備を含むあらゆる安全システムの喪失)。作業員の中には、地震と津波のために自宅や家族を失った者もいたが、働き続けた。多くの作業員は現場で床の上に眠り、食料が不足していたため、最低限の栄養しか提供されなかった[I29]。断続的な余震や水素爆発後の原子炉損傷による個人への高いリスク(すなわち原発サイト内のさまざまな場所での非常に高い線量や汚染レベル)にも関わらず、彼らは作業を続けた[I6]。

129. 被害軽減対策が講じられるに伴い、原発サイトの危険性は変化した。作業員にとって4つの主要な危険性が確認された。放射線、高温、ストレス、そして、機械の操作と手動による対処であった。当初は、水素爆発と損傷した原子炉からの継続的な放射性物質の放出による高い放射線レベルが最も深刻な危険因子であった。2011年5月から9月にかけては、高温への暴露が極めて重大な危険因子になった。これは夏の暑い天候と、作業員が二重タイベック防護服およびフルフェースマスク(これらは蒸発による冷却を阻害する)を着用して屋外で働かなくてはならなかったことが原因であった。また、作業員は機械の操作や手作業での瓦礫の除去、冷温停止に向けた原子炉の安定化によって負傷

¹⁷ 自然災害などの災害が国内で発生した場合、自衛隊は地方政府と協力して捜索・救助活動などに従事し、治療や給水、人員・物資の輸送を行う。2011年の東日本大震災後には10万人を超える自衛隊員が救援活動全般で派遣された。

するリスクを負っていた[W1]。多くの作業者は職場とプライベートの双方で複数のストレス要因にさらされた。プライベートなストレスは主に、かつて居住していた20km圏内からの家族の避難、地震と津波による家族の死亡や自宅の消失によるものであった。東電の従業員は公的な嫌がらせや差別も経験した[I29, S8, W1]。

C. 放射線から作業者を防護するために講じられた措置

130. 原発サイト内およびサイト外で放射線の状況を効果的にモニターする機能は当初大幅に妨げられた。津波の発生後、サイト内に残っているモニタリングシステムはほとんどなかった。ほとんどの電子式個人線量計や、これらの機器を作動させて線量を記録するコンピュータシステム、多くの携帯型サーベイ計器が浸水で失われた。炉心、格納容器、使用済燃料プールの状態を監視するのに欠かせない設置型の放射線モニターも、津波によって配電装置が水浸しになった際に失われた[I29]。管理区域への入域や個人線量データに関する情報を収集することは不可能だった。個人をモニタリングする機能が失われたため、緊急時対応従事者は電子式個人線量計を共有しなくてはならず、多くの作業でチーム内の1人のみが線量計を着用し、作業者は個人の線量を手入力で記録しなくてはならなかった[I6]。

131. 福島第一原発内では重要免震棟が作業の直接の指令センターとして定められ、作業者が夜間に滞在するための部屋がいくつか確保された。この建物には、空气中放射性物質の侵入を制御するために、高性能の空気浄化換気システムが備えられていた[W1]。ただし、原発サイト周辺の表面と空間の放射性物質レベルが高いことと、指令センターの入口が損傷したことにより、同センターは事故の早い段階で汚染されるに至った。指令センター内の汚染の蓄積は、2011年3月24日に建物内で取得された空気サンプルが最初に分析されるまで認識されなかった。そのため、これより以前には、放射線の管理は適切に講じられておらず、その期間、作業者の中には、吸入によって体内に取り込まれた放射性物質で内部被ばくした者もあった[I29]。

132. 事業者は徐々に現場の放射線モニタリングを改善した。2011年4月1日からは個人線量計が作業者全員に提供された。発電所のさまざまなエリアで線量率が測定され、原発サイトの包括的な放射線地図が利用できるようになり、この地図は定期的に更新された。これらの方策は、たとえば、異なる区域間にしっかりと物理的な障壁を設置したり、リスクのより高い区域への許可無しの立ち入りを防止すること等により、作業者の防護を最適化するために利用された。指定管理区域での個人の毎日の作業時間は最長2時間に制限された。放射線レベルが最も高い区域での作業を支援するために、徐々に特殊なツール(ロボットや他の無人機器など)が導入された[I6]。

133. 福島第一原発の南20kmの場所にあるサッカー用トレーニング施設、Jヴィレッジには、警戒区域および施設に入るあらゆる人員の放射線防護を管理、監視するために調整センターが設置された。内部被ばく(すなわち、放射性粒子とガスの吸入による被ばく)から作業者を防護するため、同センターでは毎日、空中の粒子に対する捕集効率99.97%のフィルターがある密着型のフルフェースマスクを約2000人に支給した。それが無ければ、不注意で吸い込み、内部被ばくにいたる可能性のある汚染を防止し、皮膚の被ばくを最低限に抑えるため、作業者は(作業中の断裂から守るための)二重のタイベック防護服、手袋(内部は綿、外部は二重のゴム製)、ビニール製の靴カバーで覆われた安全靴、綿製の帽子を着用した。作業の性質によっては、安全ヘルメットも支給された。一度使用された個人防護具はすべて、制限区域内に保管された。Jヴィレッジの入口ではGMサーベイメーターを使って、区域から出る人が汚染されていないかを測定により確認した[W1]。

134. 医療対策には、甲状腺被ばく防止のための安定ヨウ素の使用が含まれていた。事前に決められた基準に従い、ヨウ素過敏症と甲状腺の既往症状に関して医師の問診を受けた後、作業者には2011年3月13日以降、ヨウ化カリウム錠が処方された[W1, W10]。約1万7500錠(50 mg)が、緊急時対応作業に従事した約2000人の作業者(東電従業員、元請業者の作業者、消防士、警察官、自衛隊員を含む)に配布された(詳細は附録Eを参照)。

D. 報告された線量

135. 作業者の線量解析結果を以下にまとめる。この解析の詳細は附録Dに記載されている。本委員会は、日本で報告されている個人の線量値が実際に受けた被ばくを表す指標として正確で信頼に足るものかどうか判断するため、二段階のアプローチを採った。1つ目は、日本で線量の評価に用いられた方法をレビューすること、2つ目は、特定の作業者グループについて独自の線量評価を行い、報告されている値と比較することである。ただし、被ばくが発生した時点での現場の情報を検証することは事実上不可能であるため、これらの評価はいずれも東電、元請業者および日本当局から提供された情報に基づいて行った。

136. 東電は、福島第一原発での職業被ばく作業者の線量評価状況について説明したプレスリリースを定期的に発表した。2012年10月末までに合計2万4832人の作業者が原発サイトでの被害軽減作業や、その他の活動に従事し、職業上放射線に被ばくしたと報告されている。そのうち約15%は東電の従業員で、残りは元請業者や下請業者が雇用した作業者であった。事故後から2011年10月までの毎月、特定の帯域の線量¹⁸を受けた作業者の人数を示した表が発表された[T8](附録Dの表D1、D2、D3を参照)。これらの表は、最も高いレベルの線量は主に放射性物質の吸入によるもので、毎月の吸入による実効線量¹⁹は2011年3月に100mSvを超えているのが観察されたことを示している。損傷した原子炉から放出される放射性物質の量が放射性壊変により減少したのに伴い、作業者の放射線被ばくは時間の経過とともに減少した。2011年5月以降、1ヶ月の実効線量(外部および内部被ばくの合計)が50mSvを超えた作業者はいなかった。

137. 2011年11月以降、東電は各線量帯域の作業者数の累積データを提示した。2012年11月に発表されたデータを附録Dの表D4[T16]と図VIIIaに示されている。このデータは作業者の34%が10mSvを超える積算線量を、作業者の0.7%(173人、主に東電従業員)が100mSvを超える積算線量を、それぞれ受けたことを示している。6人の東電従業員の積算線量が250mSvを超えていた。東電は実効線量に関するデータのみを発表しており、甲状腺吸収線量の結果は別に公表されている[K27]。

138. 作業者2万1776人の2012年4月までの内部および外部被ばくによる線量に関する追加情報が本委員会に提供された(附録Dを参照)。報告された中で最も高い実効線量は東電従業員の679mSvであり、この従業員は内部被ばくによる預託実効線量も最も高かった(590mSv)。報告された中で外部被ばくによる最も高い実効線量は、元請業者作業者の199mSvで、この作業者について報告された実効線量は合計238mSvであった。作業者の間での線量分布を図VIIIbに示す。分布の中央値(すなわち、作業者の半数が受けた線量がそれ以下あるいは以上)は約5mSvで、250mSvを超える極端な値は6件あった。線量分布は歪んでいるか非対称で(すなわち、より高い値の頻度が多い)、対数正規分布によってうまく表されていない。

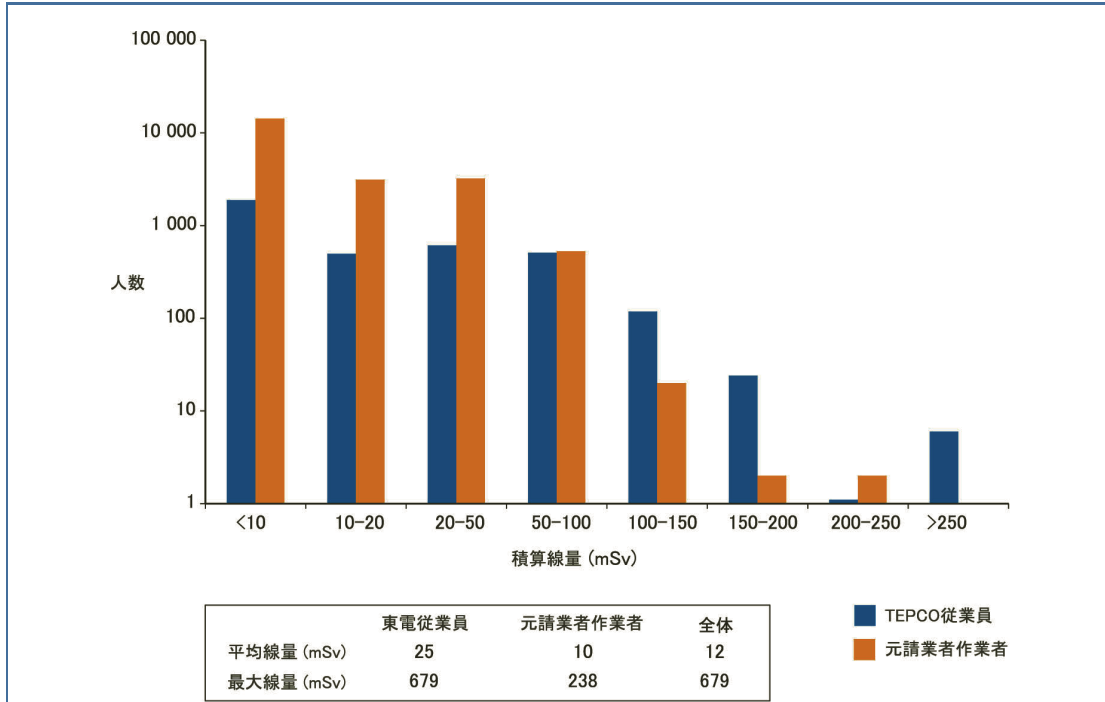
139. 女性に適用された基準がより厳格だったため、女性作業者の被ばくは特に注目を浴びた。事故前に福島第一原発に勤務していた19人の女性(そのうち5人は職業被ばくしていない)は、事故後の実効線量が1mSvを超えていた。事故の結果として線量が最も高かった2人は7mSvと18mSvであった[O3]。彼女たちの線量は1件の例外を除き、緊急作業に従事した職業被ばく作業者の平均線量を下回っていた。事故後、女性作業者が福島第一原発の発電所施設に入ることは許可されなかった[W1]。

¹⁸ 別途示されていない限り、セクションVでの「線量」は「実効線量」を意味している。

¹⁹ 作業者の内部被ばくによる実効線量は、50年間の預託実効線量として計算されている。

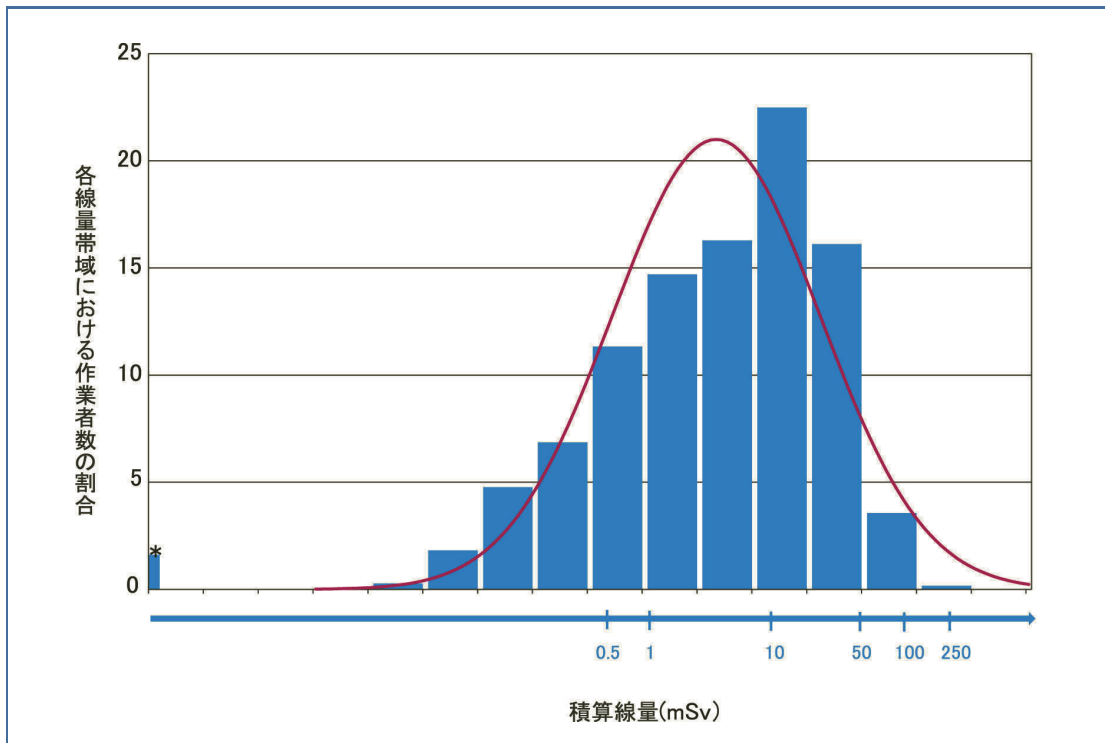
図VIIIa. 2011年3月11日から2012年10月31日までの作業期間に職業被ばくを受けた福島第一原発作業員についての実効線量の各積算線量帯域の人数

実効線量には外部および内部被ばく両方の寄与が含まれる



図VIIIb. 2011年3月11日から2012年4月30日までの作業期間に職業被ばくを受けた福島第一原発作業員についての実効線量(対数変換済み)の分布

実効線量には外部および内部被ばく両方からの寄与が含まれる。赤い曲線は正規分布の確率密度で、線量がゼロでない作業員で見積もられているパラメータは $\mu = 1.3$ および $\sigma = 1.9$ 。*は実効線量がゼロ($n=352$)として記録されている作業員を示す



140. 260人の消防士のうち、249人の内部および外部被ばくによる報告線量データも日本政府から本委員会に提供された。甲状腺の ^{131}I 体外計測が2011年9月から11月の間に行われ、全員、検出限界値の放射能 20 (38 Bqの ^{131}I)を下回っていたと報告されている。これは測定実施が遅れたことを考慮すれば予測されていたことである。放射性セシウムの全身モニタリングでは、検出限界値の放射能 (320 Bqの ^{134}Cs 、570 Bqの ^{137}Cs)を下回るか、これに近かった。彼らは全員2011年3月18日から2011年3月25日の間に勤務しており、彼らの内部被ばくによる線量評価値はすべて1mSvを下回っていたと報告されている。報告された外部被ばくによる線量で最も高かったのは29.8mSvであった。残念ながら、事故の早い段階における体外計測による甲状腺モニタリングのデータがないため、放射性ヨウ素の吸入による線量について信頼できる推定を行うことはできなかった。事故の早い段階で類似した場所で作業していた可能性のある現場作業員の内部被ばくによる線量評価から類推すると、消防士の放射性ヨウ素吸入による実効線量は、全身モニタリングで検出された半減期がより長い放射性核種(すなわち放射性セシウム)の吸入による線量よりも、はるかに高かった可能性がある。

141. 表9は、日本政府が本委員会に提供した (a) 現場で作業した168人の自衛隊員のうち147人、および (b) 8458人の原発サイト外の自衛隊員を対象とする外部被ばくによる実効線量データ報告の内容を示すものである。100mSv超の外部被ばくによる実効線量を被ばくした自衛隊員はいなかった。内部被ばくによる線量も、8人の原発サイト内および4人のサイト外の隊員について提供された。預託実効線量評価では7人の作業員で0.2mSv未満、1人のサイト内作業員で3.8mSvに相当したと報告されている。

表9. 自衛隊員に関して報告された外部被ばくによる実効線量

2011年3月11日から2011年8月31日までのデータ

場所	線量帯域内の隊員数			
	<10mSv	10～20mSv	20～50mSv	50～100mSv
原発サイト内	132	3	8	4
原発サイト外	8,453	5	—	—

142. 日本政府は、2011年3月17日にサイト内にいた13人の警察官の内部および外部被ばくによる線量データに関する報告内容を本委員会に提供した。それによると外部被ばくによる線量は10mSvで、内部被ばくによる預託実効線量評価では13人の警察官全員で0.1mSv未満であった(詳細については附録Dを参照)。多くの自治体職員らがさまざまな対応活動に携わっていたことを本委員会は認識しているが(避難支援、人と物資の汚染モニタリングなど)、彼らの被ばくに関する情報は、本委員会が線量を推定するには不十分であった。

143. 本委員会には、作業員の眼の水晶体への線量について、情報に基づく評価を行うためのベータ線被ばく照射に関する十分な情報がなかった。

144. 米国国防総省の関係者8380人の体外計測は2011年3月11日から2011年8月31日の間に行われ、内部被ばくによる線量が評価された。モニタリング対象者の約3%の体内で放射線が検出され、最大預託実効線量は0.4mSv、最大預託甲状腺吸収線量は6.5mGyであった。

E. モニタリングおよび線量測定の評価

145. 本委員会の作業では、日本で報告されている個人の線量がどの程度実際に被ばくした線量の正しいかつ信頼できる測定値となっているのか、また、報告されている線量がどの程度健康への潜在的な影響を論じる上での信頼できる評価となっているのかを判定することを目的のひとつとしていた。

²⁰ 最低検出可能放射能は、95%の信頼度で検出できる放射性核種の最小の放射能を示す。

2段階のアプローチが採用され、まず、日本で使用された線量評価方法が再検討された。この結果については附録Dで説明すると同時に、この章のセクションでも概説する。次に、内部被ばく線量についての独自の評価が特定グループの作業員に対して行われ、これらの作業員について日本で報告された線量と比較された。この結果については、以下のセクションFで概説している。

1. 内部被ばく

146. 緊急事態に対応していた作業員の当初の体外計測は、福島第一原発の55km南にある小名浜で簡易な全身モニタリング装置を使用して行われた。この装置は甲状腺内の放射性物質を測定することはできず、その設置された場所が原因で、環境のバックグラウンドレベルが相対的に高かった。放射性核種の吸入による実効線量が20mSvを超えた作業員については、日本原子力研究開発機構（原子力機構）でさらにモニタリングが行われ、その結果は線量評価のため、東電に提供された。実効線量（外部および内部被ばくの両方を組み合わせた結果）の評価結果が緊急時被ばく線量限度（250mSv）を超えた場合、日本の放射線医学総合研究所（放医研）が作業員をさらにモニターし、吸入と内部被ばくによる関連線量をさらに評価した。これらの事例のいくつかでは、東電側が線量を再度評価した。ほとんどの作業員について、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の結果のみが報告された。実効線量が高い作業員の一部については、 ^{136}Cs と $^{129\text{m}}\text{Te}$ の結果についても報告されたが、これらの放射性核種からの実効線量への寄与は少なかった。他の短半減期放射性核種（ ^{132}Te 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{133}Xe など）の被ばくに関するデータは欠落していた。尿サンプルの限定的なin vitroモニタリングが行われたが、その結果は正式な線量報告で使用されていない。

147. 使用された体外計測システムに関する詳細な情報が本委員会に提供された。具体的には、(a) 東電が小名浜で、原子力機構と放医研がそれぞれの機関で使用した体外計測システムに関する情報、(b) 原子力機構による体外計測に使われた校正用ファントムに関する情報、(c) 原子力機構が自社の研究所で、また、原子力機構と東電が小名浜で行った体外計測の校正および品質管理に関連した包括的なデータである。この情報は、測定システム、校正用ファントムと校正方法、品質管理手順が放射線緊急時に体外計測を実施するには十分なものであると判定するに足りるものだった。さらに、東電作業員の内部被ばくによる線量評価は、東電または（線量が高いいくつかの事例では）放医研によって、それぞれMONDAL[N12]およびIMBA[B12]ソフトウェアパッケージを使用して行われた。これら2つのソフトウェアパッケージはともに品質が保証されており、本委員会はこれが体内に取り込まれた放射性核種の吸入と、これに対応する内部被ばくによる作業員の預託実効線量および吸収線量の評価に適していると判断した。この情報およびそれに関する本委員会の検討内容については、附録Dに詳しく記載している。

2. 外部被ばく

148. 本委員会は、東電と元請業者の作業員について、使用した個人線量計のタイプ、使用された技術標準および校正方法のほか、2011年3月（使用できる線量計の数が限られていた期間）に電子式個人線量計を個人に対してどのように配布したかに関する情報を受け取った。ただし、緊急時対応作業従事者（警察官、消防士、自衛隊員など）については同様の情報は受けとっていない。

149. 提供された情報と、本委員会による評価の結果は附録Dに記載している。要約すると、使用された計器、技術標準、校正方法は、一般的に受け入れられている個人モニタリング要件を満たしているように見受けられた。ただし、2011年3月には個人線量計が共有されていたため、報告された外部被ばくによる線量の信頼性に関する結論には、何らかの裏付けが必要である。東電によると、この期間中、自動個人線量計システムは作動不能で、5000台の線量計が使用できなかった。最初の数日間に利用できた線量計は320台のみであった。つまり、当初の緊急時対応者は線量計を共有しなければならず、チーム内で1人の作業員のみが多くの作業で1台の線量計を着用し、作業員は個人の線量を手入力で記録しなくてはならなかった[T11]。線量計をいつ共有すべきかについて定めた条件が作成されている（附録D）。この諸条件が確実に満たされていたのであれば、共有された線量計で行われた測定の結果は、外部被ばくによる線量評価の十分な根拠となる。

F. 内部被ばく線量推定の評価

150. 本委員会は、特定の作業員について内部被ばくによる線量を独自に評価し、その結果を当該作業員について日本で報告された線量と比較した。数名の評価担当者が評価に携わり、それぞれ独自に設定した手順を使い、専門家としてモニタリングデータの選択や体内動態モデルで使用するパラメータの値といった問題について判断した。

151. 健康への潜在的な影響の評価では、被ばく量が最も高い作業員の線量が特に注目された。このため、報告されている内部被ばく量が最も高い（預託実効線量が100mSvを超えた）12人の作業員²¹について、報告されている線量の信頼性を判定する目的で線量評価が行われた。外部被ばくの評価と記録は、電子式個人線量計による情報を直接読み取ったものだったが、内部被ばく評価は被ばく状況に関連した専門家の判断と仮定、および体内動態モデルと複雑なソフトウェアの使用に依存していた。このため、内部被ばくにおいて専門家の間で推定値が異なる可能性とその不確かさは、外部被ばくの推定の場合よりも大きかった。

152. 内部被ばくが最も高く、本委員会が評価を行った12人の作業員は全員、東電の従業員であった。測定はすべて、同じ（あるいは類似した）施設で行われ、内部被ばく評価方法も類似していた。一方、内部被ばくが低く評価されている多くの作業員の雇用形態はさまざまだった（東電、元請業者、下請業者、緊急時対応作業従事者など）。放射性核種の測定に使用された施設の種類の、内部被ばく評価に使用された方法のいずれもが、内部被ばくレベルによって異なっていた可能性がある。これらの作業員集団における内部被ばく評価の信頼性は、さまざまなグループから無作為に選ばれた作業員のサンプルを対象に内部被ばく評価を独自に行うことによって査定された。合計42人の作業員が無作為に選ばれ、このうち21人は東電の従業員、21人は元請業者の作業員だった²²。さらに、緊急時対応作業従事者13人（全員警察官と思われる）が選ばれた。この評価結果と比較については附録Dで詳述しており、以下に概説する。

153. 線量が最も高い作業員12人²¹の内部被ばくについて本委員会が独自に行った評価と、日本の当局が正式に報告した結果との比較が図IXに示されている。これらの評価はすべて、全身の放射性核種と甲状腺の¹³¹I放射能の体外計測に基づくものであった。附録Dには、¹³¹I吸入による実効線量と甲状腺吸収線量への影響など詳細な結果が含まれている（表D9、D10、D11）。これらの作業員の実効線量 – および内部・外部被ばくによる影響 – は附録Dの表D5、D6およびD7に掲載されている。

154. 本委員会が評価を行った内部被ばく量が最も高い作業員12人について、以下の結論が導き出された。

- (a) 品質保証を目的として、5人の評価担当者全員が作業員Aの内部被ばく評価を行い、良好な一致が見られた。他の11人のケースは、少なくとも2人の評価担当者が審査し、再度、良好な一致が見られた。
- (b) 12人の作業員に関する本委員会の独自の内部被ばく評価と日本で報告されている評価について、良好な一致が見られた。
- (c) 12人の作業員全員について、本委員会は測定された放射性核種からの内部被ばくによる実効線量はほぼ全てが甲状腺での¹³¹Iによるものであると結論付けた（平均99%）。

²¹ 本委員会が被ばく量の最も高い作業員12人の内部被ばくを独自に評価した後、日本の関連組織が2013年7月、内部被ばくによる線量の推定値を再審査した。これにより、預託実効線量が100mSvを超える東電作業員がさらに1人判別された（内部被ばくによる実効線量が100mSvを超えた作業員は合計13人となる）。この情報の取得が遅かったことから、本委員会はこの13人目について内部被ばくによる線量を独自に評価していない。

²² 本委員会が無作為に選ばれた元請業者の作業員21人の内部被ばくを独自に評価した後、東電は2013年7月、元請業者の提供した新しい情報に基づき、当該作業員について内部被ばくによる線量を再度評価した。本委員会は、この情報の取得が遅かった（すなわち、本委員会の評価が完了した後だった）ことから、かかる作業員の内部被ばく評価を更新できなかった。東電による内部被ばく評価の変更が意味するところについては、附属書Dで説明している。全体的に、このセクションで提示している、これまでに得られた結論全般への影響はない。

(d) 評価された最大の内部被ばくによる甲状腺預託吸収線量は、作業員 A のものだった。この作業員で測定された放射性核種の内部被ばくによる甲状腺吸収線量を本委員会が評価した結果は、 ^{131}I を主に摂取した時期などの仮定に依存して 9.7～12.6Gy の範囲で変動し、平均値は 12Gy であった。

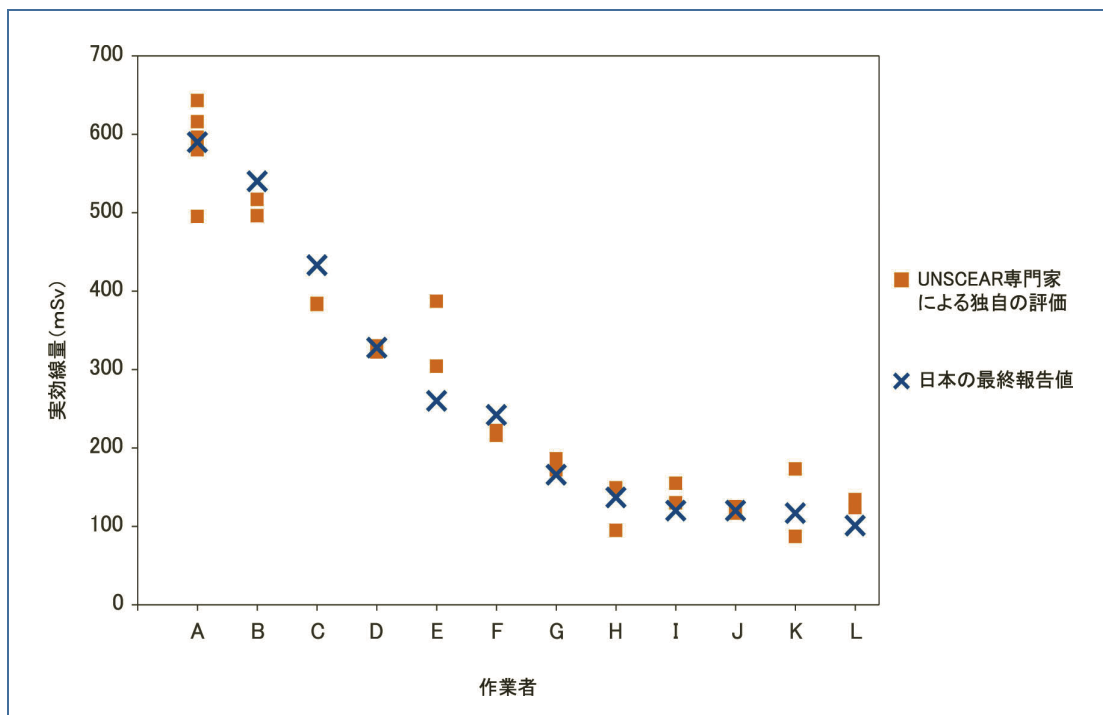
(e) ほとんどの作業員の場合、甲状腺の ^{131}I 体外計測は 5 月中旬から下旬になるまで始まらなかったが、3 人の作業員（内部被ばく量の最も高い作業員 A および B、外部被ばく量の最も高い作業員 F）については、4 月中旬に始まっている。モニタリングの開始の遅延により、線量評価の不確かさが大きくなった。

(f) 甲状腺の体外計測の開始が遅れたため、半減期のより短い放射性核種（ ^{132}Te 、 ^{133}I など）は検出されなかった。一つの目安として、事故後最初の数日間において、これら短半減期放射性核種の吸入による内部被ばくが現場作業員の実効線量に寄与した量は、 ^{131}I の寄与に対する比として 20%程度であると思われる。ただし、この寄与の程度は個人間で大きく異なっていたと考えられる。これらの要因や他の不確かさがあるため、事故後の非常に早い段階における職業被ばくの状況を把握するには、さらなる解析を必要とする。

(g) 尿のモニタリングに関する十分なデータがないため、異なるバイオアッセイ・モニタリングにより別個に取得した結果を使用して、甲状腺放射能測定による線量評価の信頼性を、確認することはできなかった。

図IX. 職業被ばくとして最も高い内部被ばくを受けた作業員の預託実効線量評価

預託実効線量は内部被ばくによるもののみで、測定したすべての放射性核種からの寄与を含む



155. 内部被ばく量の低い作業員55人について本委員会が実施した内部被ばく評価の結果と日本の当局が報告した値との比較について附録Dに提示、説明している。結論は以下の通りである。

(a) ^{131}I 体内測定結果が陽性だった作業員については、本委員会独自の内部被ばく評価と東電の報告した評価の間で妥当な一致が見られた。

(b) 内部被ばくによる預託実効線量の評価値が 0.1mSv を超える作業員全員について、 ^{131}I 吸入による甲状腺預託吸収線量が実効線量の主な寄与要因だった（平均 98%）。

(c) 全体的に、東電による従業員の内部被ばく評価は、健康影響を査定するのに適したものだった。体内の ^{131}I が測定された従業員については、東電の報告した評価の信頼性が確認された。一方、 ^{131}I が体内で検出されなかった従業員について東電が報告した評価の信頼性は確認できなかった。当該状況で ^{131}I の吸入を推定するのに利用できる方法はいずれも、実際の摂取量について信頼に足る推定結果を導き出すことができず、その結果得られる内部被ばくの推定結果には大きな不確かさが伴う。このカテゴリーの作業員は全体の約 40%であると考えられるが、一般的に、その内部被ばくによる預託実効線量は全体の平均値よりも低い可能性がある。

(d) 元請業者が自らの作業員について報告した内部被ばくによる線量の推定値については、比較の行われた 19 人のうち 8 人において、本委員会による推定値の約 50%未満であったことが本解析によって示された。他の 11 人では、本委員会の線量推定値が、東電が当初実施した別の評価（通常は非公表）による推定値とおおむね一致していた。本委員会は、実施された比較評価の結果から、元請業者が自社の作業員²³について報告した内部被ばく評価の信頼性を確認できなかった。

(e) 警察官の内部被ばくによる実効線量は非常に低く、マイクロシーベルト台だと見られている。

(f) 緊急時対応作業従事者（消防士、自衛隊員など）について報告された内部被ばくによる実効線量は 1 例（3.8mSv）を除き、すべて 1mSv 未満であった。ただし、本委員会が独自に評価を行うための詳細かつ十分な情報がなかったため、本委員会は報告された被ばく量の信頼性を確認できなかった。

VI. 健康影響

156. 本委員会は、被ばくとその影響に関する解釈に基づき、福島第一原発事故に由来する放射線被ばくの早期および長期の健康影響についての見解を提供した（附録Eを参照）。

A. 一般的考察

157. 放射線被ばくによる健康影響に関して現在理解されている事柄は、数十年にわたる臨床経験と、動物実験、研究室での実験および人々集団の疫学的研究から得られた根拠により実証されたものである。本委員会の任務の一部は、人の健康に対する電離放射線被ばくの影響を広範に精査することであり、その多くは最新の刊行物[U7, U9, U10, U12, U13, U16]で報告している。本委員会は、福島第一原発事故の健康影響の評価において、この既存の知識と理解を公衆（第IV章および附録C）と作業員（第V章および附録D）を対象とする線量推定に適用した。

158. 第IV章でも述べているように、公衆の行政区画平均実効線量には不確かさが伴う。沈着密度と被ばくした集団構成員にある地域的なばらつきが、推定実効線量の平均値付近での分布に影響を与えている（おおそ平均の30～50%から平均の2～3倍まで）。このため、一部のケースでは、相当数の集団がこの分布において最高値に近い部分に属する被ばく線量を受けた可能性がある。

²³ 本委員会がこの結論を引き出した後、元請業者作業員の内部被ばくによる線量が日本で再度評価され[M18]、本委員会は少なくともいくつかの矛盾が解決されたと考えている。元請業者による評価の信頼性を確認できるかどうかを判定するには、さらなる検討を要し、再評価の詳細な解析が必要であると思われる。

159. 一般的に、またより確実な情報が利用できない場合には、何らかの想定を行うことがあり、その結果として公衆の線量が過大に推定される傾向にあったと思われる。これは特に、放射性核種の経口摂取による線量を推定する場合や、防護措置をどの程度実施したか特定できなかった場合にあってはまるだろう。甲状腺に含まれる放射能の現地における直接測定（後の甲状腺がんのリスクが大きくなる小児期または幼児期での被ばくを受けた人には特に重要な要因）およびホールボディカウンターによる全身測定は、これらの測定で示されている線量よりも本委員会の推定線量がいくぶん高いことを示している。その一方、本委員会の推定値よりもいくらか高い線量を受けた人々がいることも否定できない。

160. 作業者の場合、不確かさの度合いが高いのは、主に事故の早期段階における被ばくである。当時は線量計が不足していたため充分なモニタリングが行えず、甲状腺のモニタリングはすぐに行われなかった。

161. 2012年、WHOは、2011年9月までに入手できた情報を使用した予備的な線量推定値について発表した[W11]。本委員会の線量推定値は、それよりもかなり広範囲なデータに基づいているが、WHOが推定した線量のほぼ範囲内であった。WHOは、2013年3月、予備的な線量推定値に基づく健康リスクの評価について発表した[W12]。健康影響の推定において根拠となる本委員会の想定は、一般的にWHOの推定とよく一致していた（附録Eを参照）。

162. 本委員会はまた、チェルノブイリ原発事故後における経験とそこでの健康影響の直接的な観察結果を参考にした。福島第一原発事故後の公衆と作業者の放射線被ばくの程度と、高線量に被ばくした人の数は、チェルノブイリ原発事故後より大幅に小さいことは明らかだった。

163. WHOの広範な定義における健康とは、身体的、精神的、社会的に良好な状態にあることを指し、病気でないということだけではない。チェルノブイリ原発事故[U12]と福島第一原発事故の両者から明らかなのは、大規模な原発事故とそれに関連した防護措置が、生活の混乱、自宅や生活手段の喪失などによる苦痛や不安を引き起こすという点である。かかる苦痛と不安は精神的および社会的な安寧に大きな影響をおよぼす可能性がある。このような影響の評価は本委員会の任務には含まれていない。しかしながら、より広範な健康影響を理解する上で重要であったため、本委員会は、放射線被ばくが直接関与する健康影響の評価を行うにあたり、適宜背景として参照している。

164. 放射線被ばくに関連する健康影響は従来、2つのカテゴリーに分類されている。

(a) **確定的影響** 通常、短期間に高い線量の放射線を被ばくした後に起き、多数の細胞が死滅して組織損傷、身体機能への重篤な影響、そして死亡までも引き起こすことがある。このような影響には、急性放射線症、皮膚のやけど、脱毛、甲状腺機能低下症、胎児の成長過程の障害などがある。ほとんどの確定的影響は、組織ごとに固有のしきい値を超えた線量に被ばくした後短い期間に発生する（ただし、後になって出現するものもある）。通常このような影響のほとんどは、症状の発現パターンが非常に特殊で、訓練を受けた医療専門家であれば放射線照射の確定的影響であると診断できる。ICRP は、この確定的影響に加えて心血管疾患や白内障を包含する「組織反応」という用語を導入している [I26]。

(b) **確率的影響** 放射線被ばくは、細胞を構成する物質に非致死性の変化を引き起こすこともある。未修復または修復過誤の異常な細胞が身体の免疫防御から逃れると、将来の子孫に遺伝的な影響が出たり、「潜伏期」と呼ばれる期間の後、がんなどに発展したりする可能性がある。現時点では、放射線被ばくがある特定の確率的影響を引き起こしたかどうかを観察または検査によって見極めることは不可能である。このため、個人が病気にかかっても、放射線が原因だと明確に結論付けることはできない。ただし、確率的影響は集団での疾患の発生率上昇という形で現れることがあり、放射線照射後の発生率は線量の増加に伴って上昇する傾向がある。これにより、被ばくした集団に対する確率的影響のリスクの上昇を推定することはできる。

165. 健康影響を考慮する場合、すでに観察されていた疾患と、将来起こりうる疾患を区別することが重要である。この意味合いにおいて、特に生涯にわたる確率的影響を考慮する際、以下を含む将来の疾患リスクを表すさまざまな方法を認識することが重要である。

(a) **生涯リスク** 疾患の生涯リスクとは、特定の時点（被ばく時など）から人生の終了までに疾患が発生する確率で、さまざまな方法で表すことができる。たとえば、10分の1の罹患リスクは10%あるいは0.1リスクとして示すことができる。「基準生涯リスク」は、放射線の自然発生源によるバックグラウンドを超える被ばくがない場合、生涯に発生する疾患の確率を指す。「被ばくによる生涯リスク」²⁴は追加の放射線被ばくによって生涯に発生する疾患の追加確率である。

(b) **相対リスク**²⁵ 相対リスクとは、2つの異なるグループの人々の疾患リスクを比較するために使われるもので、グループ間のリスクの比である。たとえば、特定の疾患について、被ばくグループで発生するリスクが、被ばくしていないグループよりも20%高ければ、相対リスクは1.2になる。被ばくしていないグループにおける特定疾患の基準生涯リスクが200人に1人で被ばくグループの生涯リスクが20%高くなるとした場合、200人で1.2人（ $=1/200 \times 1.2$ ）あるいは167人に1人になる。

166. がんに対する相対リスクが、がんの統計における通常のばらつきを超える程度に高い場合には、そのリスク値を定量化する解析が可能である（この解析力は、十分な人数のグループが十分に高い線量に被ばくしたかどうかなどにかかっている）。このような場合、本委員会は、直接的な証拠に基づくリスク評価を自信をもって行うことができる。相対リスクがそれほど高くなければ、本委員会はリスクを推論し、放射線被ばくとその健康影響の関係に関する既存の知識と理解からその値を推定する。たとえば、被ばくレベルの如何にかかわらず人々における遺伝的影響の発生率の上昇は実証されており、福島第一原発事故後の公衆または作業者についても実証できないと予想されるが、動物実験に基づいたリスクの推定が考慮されている。このような推定は、直接的な証拠よりも専門家の判断に基づいている。直接的な証拠はリスクが著しく過小評価されていないことを示すことができるが、低線量の場合のリスク推定は、その基盤をなす想定とばらつきのせいで、非常に不確実かつ的中度が低いものとなり、同時に誤解を招く可能性も生じる。

167. 本章において、本委員会はさまざまな被ばく集団の構成員について被ばくによるリスクの値を推定している。十分大きな集団において疾患の推定リスクが当該集団における疾患のバックグラウンド発生率の通常の統計的ばらつきに比べて十分に高い場合は、放射線照射による発生率の上昇を疾病統計および疫学的研究において「識別できる」可能性がある。反対に、既存の知識に基づいてリスクを推定できても、推定されるリスクのレベルが低い場合や、被ばく人数が少ない場合、本委員会は「識別可能な上昇なし」という表現を使用し、現在利用できる方法では放射線照射による将来の疾患統計での発生率上昇を実証できるとは予想されないことを示唆した。これは、リスクがないあるいは、放射線照射による疾患の症例が今後付加的に生じる可能性を排除するものではないと同時に、特定の集団においてある種のがんの生物学的な指標が見つかる可能性を否定するものではない。さらに、かかる症例の発生に伴う苦痛を無視するものでもない。

B. 公衆における健康影響

1. 観察された健康影響

168. 本委員会は、被ばくが確定的影響のしきい値を大きく下回っていると理解している。これは、放射線被ばくを原因として生じ得る急性の健康影響（すなわち急性放射線症や他の確定的影響）が報告されていないこととも一致している。

²⁴ WHOの報告書[W12]と本委員会の他の技術報告書では、より技術的な用語「生涯寄与リスク（LAR）」が使用されている。

²⁵ 別の表現では「過剰相対リスク」という。被ばくしていないグループに対する被ばくしたグループでのリスクの比例的な増加。

169. 本委員会は、さまざまな症状と重篤度の異なる、放射線とは関連のない健康影響は評価しなかった。たとえば、50人以上の入院患者が、おそらくは低体温や脱水、基礎疾患の問題の悪化により、避難中または避難直後に死亡したと報告されている[T4]。多くの人は地震、津波、原発事故を原因とする困難な状況に苦しみ、さまざまな危険に曝されることにより、疾患の身体症状が現れた可能性がある。

170. 精神的な健康の問題と平穏な生活が破壊されたことが、事故後に観察された主要な健康影響を引き起こした。これは、地震、津波、原発事故の多大な影響、および放射線被ばくに対する恐怖や屈辱感への当然の反応の結果であった。公衆においては、うつ症状や心的外傷後ストレス障害に伴う症状などの心理的な影響が観察されており[Y4, Y5]、今後健康に深刻な影響が出てくる可能性がある。

2. 健康リスクの推定

171. 日本の一般住民における固形がんの基準生涯リスク(すなわち、事故に起因する放射線被ばくがない場合の固形がんの生涯リスク)は通常、約35%だが、性別、生活習慣や他の要因によって個人ごとに異なる。事前に本委員会は、典型的な日本の住民が全身吸収線量100mGyを急性被ばくしたと仮定した場合、固形がんの生涯リスクが約1.3%高まると推定していた(すなわち $36.3/35 = 1.04$ の相対リスク)[U9]。事故による被ばくについて(第VI章および附録C参照)、本委員会は初年度に成人避難者が受けた地区平均実効線量と福島県の避難区域外で最も影響を受けた地域の行政区画平均生涯実効線量の双方が最大で約10mSvになると推定した(表6および7)。小児および乳幼児では、より高い行政区画平均実効線量(約2倍)が推定された。個人の実効線量はこの約30~50%から2~3倍の範囲で変動した可能性がある。この線量でのがんまたは遺伝的な影響のリスクは、たとえば、線量とリスクの直線的な関係を想定することによって推定できるが、基準となる率の通常の統計的ばらつきに比べると、推定された相対リスクの値は小さい(すなわち、10mSvの実効線量に被ばくした後の固形がんの推定相対リスクは約 $35.13/35 = 1.004$)。被ばく集団での健康影響の発生率における一般的な放射線被ばくに関連した上昇は、基準となるレベルに比べて識別できるようになるとは考えられない。

172. 放射線被ばくによるがんの生涯リスクは識別可能な疾患発生率の上昇につながらないかもしれないが、原則として一部のがんと年齢層のリスクが増加する可能性は残る。過去の経験に基づき、本委員会は、リスクの増加が疾患発生率の上昇として識別可能になりやすい臓器、年齢層および期間に焦点を当てた。さらに、一部の臓器については、幼児期および小児期の被ばくによる相対リスクは、成人期に比べて大幅に高いに着目した[U16]。被ばくのリスク推定は、これら特定臓器の吸収線量に関する推定に基づいている。

173. 甲状腺がんについて 最初の年における成人の平均甲状腺吸収線量は数十ミリグレイの範囲内だった(表5および6)。この場合、甲状腺がんのリスクは低いと考えられた。本委員会は成人期の当該被ばく後の甲状腺がんリスクの定量化は行わなかった。

174. 生涯の間に甲状腺がんが発現する基準リスクは通常、日本の10歳の小児と1歳の乳児で約200人に1人だが[W12]、非常に感度の高い超音波検査では発見率が数倍上昇することがある。本委員会は事前に、10歳で被ばくし、その甲状腺吸収線量が200mGyと仮定した場合、リスクはほぼ倍増すると推定した(相対リスク2で推定は1.15~4の範囲。附録Eを参照)。ただし、上昇リスクのほとんどは、被ばく後、長期間にわたるものであり、生涯リスクの約10%のみが最初の20年間に示されている。

175. 事故による被ばくについて、本委員会は附録Cで説明されている方法を使用し、避難した1歳児の地区平均甲状腺吸収線量が最大で約80mGyになると推定した(表6)。避難区域外にとどまった乳幼児については、行政区画平均線量は最大で約50mGyであった(表5)。推定された線量は、個人によって大きく異なった(平均の約30~50%から約2~3倍まで)。甲状腺における放射性ヨウ素の直接的な体外計測では、本委員会の評価で推定されたよりも低い線量を示した(段落117を参照)。附録Eで説明されているように、甲状腺吸収線量のほとんどは、疫学的な研究で甲状腺がんの過剰な発生率が観察されない範囲内だった。しかしながら、線量が範囲上限に近い場合は、十分に大きな集団では個人のリスク上昇により放射線被ばくによる甲状腺がんの発生率が識別できるほど上昇する可能

性があることが示唆される。事故からの放射線被ばくによる甲状腺がんの相対リスクに関するWHOの推定[W 12]は、本委員会の結果と一致しており、数百ミリグレイ未満の甲状腺吸収線量では線量と反応に直線的な関係があると想定している。線量分布に関する情報が不十分なので、本委員会は幼少期および小児期により高い甲状腺線量を被ばくした人について識別可能な程度に甲状腺がんの発生率が上昇する可能性があるかどうか確固たる結論を導くことはできない。線量が大幅に低い場合、チェルノブイリ原発事故後に観察されたような多数の放射線誘発性甲状腺がんの発生を考慮に入れる必要はない。

176. 白血病について 日本における白血病の生涯基準発生率は約200人に1人もしくは0.5%であり、小児白血病については約1,500人に1人もしくは0.07%である[U9]。本委員会は事前に、日本の一般公衆について放射線照射による白血病のリスクを評価した[U9]。1 Gyの赤色骨髄吸収線量を受けた0～9歳の小児の被ばくによる生涯リスクは、0.11%から0.85%の範囲になると推定した。乳幼児が被ばくした場合、白血病のリスクのほとんどは小児期に現れる。福島第一原発の事故では、本委員会は避難した乳幼児の地区平均と避難区域外の乳幼児の行政区画平均の双方で、初年度の赤色骨髄吸収線量が最大で約10mGyになると推定した。事故からの放射線被ばくによる白血病リスクに関するWHOの推定[W 12]は、本委員会による事前の評価と概ね一致している。被ばくおよびリスクや被ばくした集団の大きさを考慮すれば、小児白血病のいかなる増加も識別できるとは予想されない。

177. 乳がんについて 日本人女性における乳がんの生涯基準リスクは約5.5%である[W 12]。本委員会は事前に、一般の日本人女性が乳房に吸収線量100mGyを受けたと仮定した場合の乳がんの生涯リスクは約0.3%になると計算していた[U9]。成人の被ばくと小児期の被ばくにおけるリスクの差異に関する評価結果は、使用されるモデルによって異なる[U16]。一部の研究では、小児期に被ばくした後の乳がんのリスクは、成人として被ばくした後のリスクよりも3～5倍高くなるとされている[U16]。本委員会の推定では、避難前および避難中の女兒の地区平均乳房吸収線量は10mGy未満であった。本委員会は、放射線による乳がん発生率の上昇が識別可能なレベルになるとは予測していない。

178. 出生前被ばくについて 福島第一原発での事故による出生前被ばくが原因で、自然流産や流産、周産期死亡率、先天的な影響または認知障害の発生率が上昇するとは予測されていない。しかしながら、本委員会は事前に、約10mGyの胎内吸収線量が小児期のがん、特に白血病の発生率上昇につながる可能性があるかと推定した（相対リスクは1.4）[U7]。少数の妊婦の子宮吸収線量が約20mGyであったかも知れず、その場合胎児の白血病リスクが倍増する可能性は除外できない。ただし、関与した妊婦の人数は比較的少なく、小児がんも稀な疾患である。このため、リスクのいかなる増加も、小児白血病または他の小児がんの発生率の識別可能な上昇にはつながらないと予測されている。

3. 集団検診

179. 福島県民健康管理調査[A4, Y4, Y5]は、「県民の被ばく線量の評価を行うとともに、県民の健康状態を把握し、疾病の予防、早期発見、早期治療につなげる」ために開始された。この中には、事故発生時の福島県の住民200万人全員の外部放射線被ばくを推定するための基本調査のほか、超音波診断による小児の甲状腺検査、特定の集団では健康診査、心の健康度・生活習慣に関する調査、妊産婦に関する調査が含まれている。この調査は、30年間継続するよう計画されている。

180. 甲状腺超音波検査は、2011年3月11日に18歳以下であった福島県民全員（約36万人）について行われる予定で、3年で終了すると見られている（2014年3月）。その後、小児は20歳になるまで2年ごと、その後は5年ごとに甲状腺の検査を受ける[Y5]。2013年7月末までに福島県に居住する約17万5000人の小児が高感度の新型超音波機器を使った甲状腺検査を受けた[F3]。甲状腺結節が調査対象者の約1%、甲状腺嚢胞が調査対象者の約40%で見つかった。類似した機器を使用し、約4000人の小児および青年期の人を対象とした調査が、事故の影響をほとんど受けていない青森、山梨および長崎でも行われ[T5]、観察された甲状腺結節および嚢胞の罹患率は福島県で観察された発生率よりも高かった。これは、当該調査での結節と嚢胞の高い発見率は、検査が集中的で、使用機器の感度が高いことが原因であり、事故によって付加された放射線被ばくによるものでないことを示唆している。

181. 福島県で進行中の超音波検査では比較的多くの甲状腺異常(がんを含む)が発見されると見られているが、これらは通常、そうした集中的な検診をしなければ検出されなかったと考えられる [J8, W12]。甲状腺がんは、臨床的な疾患のない対象者でも剖検で見つかることがよくあり、当該調査でも、このようながんが見つかる可能性が高い。事故の影響を受けていない地域における集団の甲状腺がん発生率の調査は、そのような集中的な検診の影響を推定するのに有用な情報を提供するだろう。

C. 緊急時の作業に携わった作業者の健康影響

1. 観察された健康影響

182. 緊急時作業に従事していた作業者の間では、放射線被ばくが原因で生じた可能性のある急性の健康影響(すなわち急性放射線症や他の確定的影響)や死亡は確認されていない。

183. 元請業者の作業員3人が2011年3月、足と下肢の皮膚がタービン建屋の汚染水に暴露された後に入院した。本委員会は、東電の推定した線量は皮膚の損傷しきい値を大きく下回っていたことを確認しており、当該作業員は4日後に退院し、長期的に多大な危害があるとは見られていない。

184. 放射性ヨウ素の甲状腺への取り込みを阻止するため、緊急時作業に従事していた約2000人の作業員に約1万7500錠のヨウ化カリウムが投与された[K11]。約230人の作業員が、(a) 14日を超えてヨウ化カリウム錠を繰り返し摂取したか、(b) 20錠を超えて摂取したため、健康診断を受けた。作業員から副作用の報告はなかったが、甲状腺ホルモンレベルの変化が8人の作業員で観察された。3例では、変化が一時的だった。他の4例では、観察された甲状腺機能低下症の率が男性集団の基準レベルと同等だったため、変化がヨウ化カリウム錠の摂取によるものと考えすることはできなかった。

185. 当初の観察では、緊急時作業に携わった福島第一原発作業員の間で重篤な心理的影響が確認された[M8, S7, S8, W1]。このような影響は、地震、津波、非常に過酷な作業環境、家族の死亡、家族との別離、緊急時作業中の困難な住環境、将来における放射線の影響の可能性に対する懸念、放射線作業員であることに関連した差別と屈辱感の影響による苦痛と不安など、数多くの原因が考えられる。

2. 推定されている健康へのリスク

186. 将来の確定的影響のリスクについて 13人の作業員が ^{131}I の吸入により2~12Gy の範囲で甲状腺吸収線量を受けたと見られている(平均線量約5 Gy)。このような線量推定の規模と内在する不確かさを考慮すれば、本委員会はより多く被ばくした作業員での甲状腺機能低下症の可能性を排除できないが、かかる影響の可能性は低い。被ばく量の最も高い作業員の放射線被ばくによる心血管疾患のリスクは非常に低い。本委員会は、ベータ線からの作業員の眼水晶体の被ばくに関する情報が不十分だったため、白内障のリスクについて、情報に基づく判断を行うことはできなかった。

187. 一般的ながんについて ほとんどの作業員では(2012年10月31日現在、2万4832人の99.3%)、実効線量は低く(100mSv未満)、平均して約10mSvであった。推定値が伴うばらつきと不確かさを考慮に入れても、大多数の作業員の線量は、疫学的な研究でがんのリスクが上昇すると実証されている線量を下回っていた。推定によるリスクモデルは、このような線量でもリスクが上がることを示唆しているが、かかるリスクは低く、このグループの作業員で、放射線被ばくを原因とする健康影響が識別可能なほどになるとは予測されていない。

188. 本委員会は、多くの作業員が数十ミリシーベルトの実効線量を受けたことと、2012年10月31日現在、作業員の約0.7%(173人に相当)が100mSv以上の実効線量を受け、その平均線量は約140mSvであったという東電による推定を確認した。このグループでは、がんのリスクが少し高まると予

測されている。被ばく作業員で構成されるこの小集団の場合、基準リスクが約40%であることから、自然発症的に生じるがんが約70症例あることになり、それに対してリスク推定によりがんの発症が約2～3症例増すことになる。ただし、このような予測には大きな不確かさが含まれている。当該作業員の間でのがんのリスクは日本の保健当局にとってもっともな懸念事項ではあるが(段落191を参照)、がん発生率や他のリスク要因における通常の統計的ばらつきを考慮すれば、放射線被ばくによるがんの発生率上昇が識別できるようになるとは予想されない。ただし、高い線量に被ばくした作業員の小集団と特定のがんについては特に注意を払う必要がある。かかる結論は、次に示すように甲状腺がんと白血病に関するものである。

189. 甲状腺がんおよび白血病について 本委員会は、約2000人の作業員が100mGyを超える甲状腺吸収線量を受けたという東電の推定を確認した。100～1000mGyの範囲で成人期に被ばくした後の甲状腺がんのリスク上昇の証拠は、かなり不確かである(附録Eを参照)。しかしながら、推定されるリスクの規模では、この作業員グループ内での甲状腺がんの発生率上昇を識別できる可能性は低い(すなわち、放射線被ばくによる発生率の上昇は、バックグラウンド発生率での統計的ばらつきに比べて低い)。

190. 甲状腺がんのリスクは、2～12Gyの範囲で甲状腺吸収線量を受けた13人の作業員グループでは特に高いが、かかる線量で被ばくした作業員の人数が少なすぎるため、甲状腺がんの発生率上昇を識別できない。本委員会は、白血病リスクに関わる赤色骨髄吸収線量が、これらの作業員で最大100mGyになると推定した。このグループの作業員が少ないため、がんの発生率上昇を識別できるとは予測されていない。

3. 集団検診

191. 厚生労働省は2011年8月、「東電福島第一原発作業員の長期健康管理に関するグランドデザイン」を発表した[M14]。福島第一原発サイトでの緊急時および復旧時の管理に従事した作業員の被ばく・健康記録を含むデータベースが構築された。被ばくレベルが最も高い作業員に対しては、年一度の眼(水晶体混濁)の検査ならびに甲状腺、胃、大腸そして肺におけるがんに関するモニタリングを含む特別な健康診断が実施される。これらの作業員の超音波検査によって必然的に甲状腺がんの発見率が上昇するが、検出された症例のほとんどは、放射線被ばくとは関係なく生じたものと予測される。

VII. ヒト以外の生物相の線量と影響の評価

A. 緒言

192. 人間と同様に、自然環境のあらゆる生物が生息地の放射性物質で内部および外部被ばくする可能性がある。本委員会は1996年[U6]および2008年[U12]の報告書の科学的附属書で、かかる被ばくの結果を評価した。本委員会は、被ばくの最も高い個体生物に対して100μGy/h未満の慢性的な線量率は、ほとんどの陸生生物群集の個体群に重大な影響をおよぼす可能性は低く、水生生物群集のいずれの個体に対して400μGy/hの最大線量率は個体群レベルでは有害な影響をおよぼす可能性も低いとの結論に達した[U12]。その他の基準線量率は、主に環境防護の目安として導き出されてきたものであり[A10, G2, I22]、本委員会の提供した線量率と概ね一致している。

193. 本委員会は、陸域、淡水、海洋生態系に生息するヒト以外の生物相への福島第一原発事故の影響も調査した。その評価は主に、本委員会に提供された計測データ、その他の関連報告書、発表済みの学術論文に基づいて実施された。放射線被ばくは、事故後の中期(最初の約2ヶ月)と後期(数ヶ月から数年)について検討した。詳細な検討の対象となった地域は、福島県と福島第一原発サ

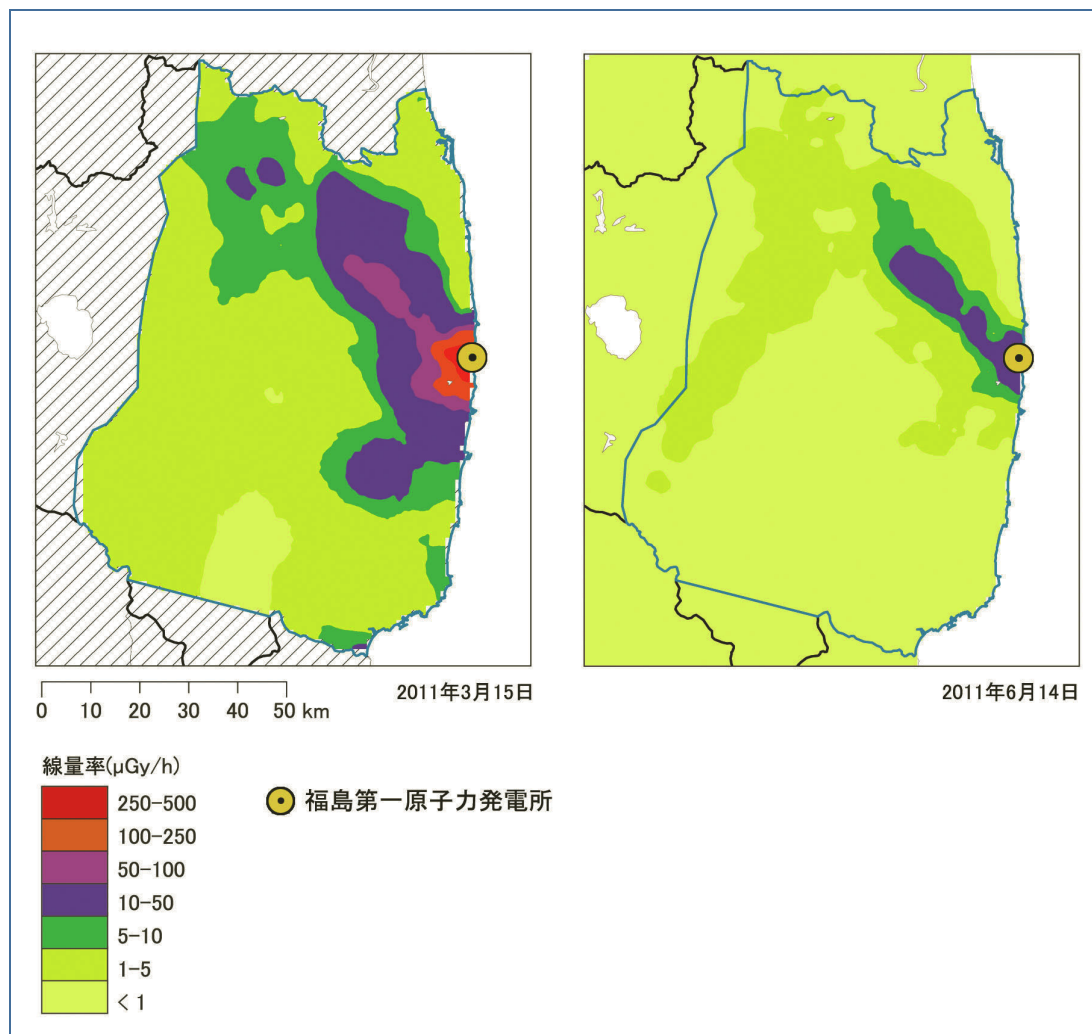
イトから約100km内にある隣県の最も影響を受けた地域で、7,000km²の陸地と海岸から沖合30kmの圏内が含まれる。被ばく線量の推定に用いた方法、関連する不確かさおよび結果の詳細については附録Fに記載されている。

B. 被ばくと影響

1. 陸域生態系

194. 大型哺乳類の内部および外部被ばくから推定した加重吸収線量²⁶を挿入した地理的分布を図Xに示す。

図X. 大型哺乳類における加重吸収線量率の補間推定値の地理的分布



195. 事故の後期（2011年6月）に測定された動物体内の放射性核種濃度から、陸生哺乳類と鳥類は¹³⁷Cs沈着密度のほとんどの範囲を含む地域で1.2~2.2μGy/hの線量率に被ばくしたと推定された。この線量は、環境内で自然に存在する放射性核種からの線量率に比べて約1桁大き

²⁶ 放射線の質を考慮に入れるために加重された（UNSCEAR 2008 年報告書[U12]附属書 E の段落 122~129 を参照）。

いものである[B5]。中間期の早い段階には大熊町など沈着密度の高い地域の土壌生物で $300\mu\text{Gy/h}$ の線量率が推定された。極めて短い半減期の放射性核種 ^{132}Te および ^{132}I が含まれているため、短期間（数時間から数日）に一部の生物で線量率が最大で 1mGy/h （ $1,000\mu\text{Gy/h}$ ）に達したことを示唆している。これらの線量は、 $100\mu\text{Gy/h}$ の基準レベルより高いものの、観察できるほどの影響を集団におよぼす可能性は低く、いかなる影響も一過性であったと思われる[U12]。

196. 事故後の後期には、沈着密度の比較的高い地域で特定の種（特に哺乳類）の個体への潜在的な影響のリスクがあった可能性があるが、陸生生物相の個体群集団への観察可能な影響が出た可能性は低いと考えられている。しかしながら、さまざまなタイプの生物学的指標の変化（特に哺乳類）[G5]を無視することはできない。かかる影響は沈着密度が最も高い地域の後期にまで残存する可能性がある。

197. いくつかの現地調査では、福島第一原発からの放出の影響を受けた地域での影響が報告されている。鳥類や昆虫の個体数減少[M22, M23]、チョウの形態学的や遺伝的障害[H6]などである。被ばくと影響の関係は、これらの研究では明確になっていない。さらに、この観察内容は本委員会の評価と一致しておらず、観察された環境への影響の原因として、津波自体の影響などとともに放射線被ばくが重要な要因のひとつかどうかを立証するには、さらなる解析が必要であることを示唆している。

2. 水域生態系

198. 淡水生態系について 淡水魚で計算された線量率は、自然のバックグラウンドレベルを1桁以上回ることもあるが（[H13]を参照）、慢性的な被ばくに関するしきい値レベル（これを上回ると淡水生物への影響が予測されるレベル）には達しなかった。

199. 海洋生態系について 生物試料を入手できる海岸地域では、2011年5月10日から2012年8月12日までの期間の線量率は基準レベルに比べて低かった。あらゆる生物群に対してまとめられた線量率の算術平均で最も高い線量率は、 $0.10\sim 0.25\mu\text{Gy/h}$ の範囲にあった。かかるレベルは海洋環境のバックグラウンド線量率と同程度である[H13]。

200. 最も高い線量率は、福島第一原発サイトに近い北側排水路の動的モデルを用いて、事故の中間期（2011年5月10日より前で、生物試料は取得できていない）における海水中の推定濃度から計算された。魚類では、最大推定線量率（約 $140\mu\text{Gy/h}$ ）が1ヶ月目に生じ、1年間にわたる積算線量は約 0.32Gy であった。主要な構成核種が ^{131}I であったため、同じ場所の大型藻類で計算された最大被ばく（ 20mGy/h 超）は事故後23日で生じたが、急速に減少した。1年間にわたる大型藻類の積算線量は約 7Gy であった。報告された基準レベル[G2, I22, U6]と比較すると、計算された線量は、放出地点に非常に近い場所における大型藻類の一過性の被ばくは除き、個体群への観察可能な影響が予測されるレベルを大きく下回っていたことを示唆している。

201. 2012年8月現在、海水魚では、販売と消費にかかる日本の基準値（ 100Bq/kg 、新鮮重量）を上回る放射性核種濃度レベルの海水魚がまだ見つかっている[B24]。このようなレベルは公衆の放射線防護には関わる可能性があるが、ヒト以外の生物にとっては、これに対応する線量率は重要ではなく、適切な基準レベルを大きく下回っている。

202. 本委員会は、陸域および水域（海洋および淡水）環境の双方について、ヒト以外の生物相への影響の可能性は地理的に限られており、当該評価で考慮された地域以外では、生物への影響の可能性はごくわずかであるとの結論に達した。本委員会は、海洋環境への放出が2013年12月末の時点で継続している点にも留意した。これは、今後、被ばくと傾向のさらなる追跡調査が必要であることを示唆している。

VIII. 要約および結論

203. 2011年3月11日の午後、マグニチュード9.0の地震が日本を襲い、1時間以内に最初の津波が本州北部、東北地方の海岸に到達した。「東日本大震災」と呼ばれるこの自然災害は甚大な被害をもたらした。2万人の生命が失われたほか、基幹施設や経済、社会に打撃を与えた。また、福島第一原子力発電所（「福島第一原発」または「FDNPS」）が深刻な被害を受け、当時運転中だった3基の原子炉で炉心が溶融し、多量の放射性物質が大気中と太平洋に放出された。福島第一原発での事故は急速に進展したため、発電所の近隣住民（主に20km圏内）による「予防的避難」が（数日以内に）行われた。その後、さらに遠いながらも放射性物質の沈着密度が高い地域に対して「計画的避難」が（数週間から数ヶ月内に）行われた。

204. 本委員会が国連総会へ提出した報告書の科学的附属書である本書は、福島第一原発での事故による放射線被ばくのレベルに関する本委員会の評価結果を記すとともに、人々の健康への影響とヒト以外の生物相への影響について評釈したものである。本委員会は、環境への放射性核種の拡散と沈着、公衆と作業員の被ばく、健康上のリスクと影響、ヒト以外の生物相での被ばくと影響について考察した。また、将来の研究と調査を必要とする数多くの問題を明示した。

205. 本委員会は、公式的には、2012年9月（事故から18か月後）までに入手できた、日本政府に要請し提供を受けたデータ、公表データおよびその他の有用なデータセットを使用した。一部のさらに新しい情報についても、特にそれが適切であった場合、考慮に入れることとした。本委員会は使用済燃料および損傷した燃料の除去と施設の閉鎖、福島第一原発サイト内外での修復作業に関して多大な問題が残っている点を認識している。太平洋への放射性物質の放出は本書の発行時点でまだ継続している。公衆と作業員の大規模な健康調査も行われており、今後も長年にわたって続けられる予定である。本委員会では、福島第一原発での事故後の被ばくと影響を適切な時期に再評価することが妥当であると考えている。このアプローチは、チェルノブイリ原発事故後、20年以上にわたり本委員会が複数回行ってきた再評価とも合致するものである[U4, U7, U8, U12]。

A. 線量推定の基準

206. 本委員会は、 ^{131}I および ^{137}Cs （人間と環境の被ばくという観点で最も重要な2つの放射性核種）の大気中への放出に関する既存の推定の再検討を行った。これらの放射性核種の範囲は概ね、それぞれ100～500ペタベクレル（PBq）と6～20PBqである。公表された推定値の平均はそれぞれ、チェルノブイリ原発事故で推定された大気中への放出の約10%と20%である。多くの場合、大気中に放出された放射性物質は気象条件によって本州の上で拡散し、(a) 乾性沈着と (b) 雨および雪に伴う湿性沈着によって地表に沈着した。主な沈着は福島第一原発サイトの北西で生じたが、同サイトの北、南、および西でも多大な沈着が発生した。

207. 本委員会は通常、外部被ばくによる線量と吸入による線量を推定する基準として沈着の測定値を使用した。経口摂取による線量は主に、食品と飲料での放射性核種の濃度に関する利用可能な情報に基づいて推定された。本委員会は、被ばく当時の測定データを利用できない場合（主に20km圏内から予防的避難をした個人など）や測定データを取得できなくなっている場合において線量を推定するため、ソースタームの推定、大気輸送・拡散・沈着モデル計算（ATDM）解析からの結果、事故の進展に関する知見を使用した。この目的のために、本委員会は公表されているソースタームに依拠し、放射線影響学的に主要な放射性核種 ^{131}I および ^{137}Cs の放出量をそれぞれ120 PBqと8.8 PBqとした。これらは公表されている推定値の範囲では下限に近い位置にあり、総放出量を過小評価している可能性もあるが、本委員会はこのソースタームを日本の陸域での拡散の結果として発生した線量の推定には適切である、すなわち日本の公衆が受けた線量を推定するのに適したものであると評価した。

208. 本委員会は、公衆に対する線量評価では多くの独立した情報源（たとえば、環境中の放射性核種濃度のデータ）を使用できたが、作業員の線量評価においては、東電、元請業者、下請業者および日本の当局から提供されたデータに頼らねばならなかった。本委員会は、福島第一原発の2万人

を超える作業員（東電作業員、元請業者、下請業者）の外部および内部被ばくによる線量に関する情報を使用することができた。さらに、原子炉を安定化させて放出を防止する作業中、および原発サイト内外でのより一般的な作業中に被ばくした他の作業員カテゴリーへの線量についても入手できた。この中には、地震と津波で損傷した重要な基幹施設を復旧するための活動などに従事していた、日本人以外の人を受けた線量が含まれていた。線量推定方法についての詳細な情報が本委員会に提供され、これによって本委員会は、かかる方法が目的に適しているかどうかを評価することができた。

B. 公衆の被ばく

209. 本委員会は、ミリシーベルト (mSv) で示される数量「実効線量」を使用して、一般公衆の電離放射線に対する被ばくを推定した。また、いくつかの臓器について、ミリグレイ (mGy) で示される臓器ごとの吸収線量も推定した。この推定は、20歳の成人（あらゆる成人の代表）、10歳の小児（5歳を超える小児すべてを代表）、1歳の幼児（0～5歳の乳幼児すべてを代表）について行われた。避難者以外の線量を計算するために使われた区域内の異なる場所での沈着密度の測定値は、行政区画平均の30～50%から2～3倍までと多様だった。線量推定がATDM解析の結果に基づいて行われた避難者の場合、ソースタームとATDMの選択によって値が約4分の1から約4倍に過小評価または過大評価されている可能性がある。また、本委員会が使用した方法（防護対策の想定など）では、ある程度の過大評価が生じている可能性がある。本委員会が行った内部被ばくによる線量推定の結果と、限定的ながら事故後すぐに行われた全身および甲状腺の体外計測に基づく推定結果との比較が、これらの見方を支持している。

210. 本委員会は、典型的な避難地区の住民および県内の避難区域以外の行政区画および他都道府県での、事故から最初の1年間における実効線量を推定した（表10を参照）。福島第一原発からの放出による福島県の避難区域および避難区域外における成人の平均実効線量は、数ミリシーベルトから約10ミリシーベルトの範囲である。10歳児および1歳児の実効線量は、約2倍高いと推定された。隣県および日本の他の地域では、線量はより低かった。参考情報として、日本で自然のバックグラウンド放射線から年間に受ける平均実効線量は約2.1mSvである。

211. 被ばく量が最も多い人々の平均甲状腺吸収線量は成人で最大約35mGy、1歳児で最大約80mGyであった（表10）。これは、自然のバックグラウンド放射線からの甲状腺吸収線量よりもかなり高い。自然に発生する放射線源からの年間平均甲状腺吸収線量は通常1mGy程度である。事故の影響がより軽微な日本の他の地域では、甲状腺吸収線量ははるかに低かった。

212. 本委員会は、避難した1歳児の赤色骨髄に対する地区平均吸収線量を最大で約10mGyと推定するとともに、避難区域外では行政区画平均線量を最大で約6mGyと推定した。避難した女児および成人女性についての地区平均乳房吸収線量は、すべての年齢層で最大で約10mGyと推定した。胎児および乳児の線量の推定値は明示しなかったが、それぞれ成人および1歳児と同程度であったと考えられる。

213. 本委員会はまた、3つの年齢層について、事故後最初の10年と80歳までの行政区画平均および県平均線量を予測した。一般的に、最初の10年における行政区画平均または県平均の実効線量は、事故後1年目の線量の最大2倍になり、80歳までの線量は、環境修復策が講じられなければ最大で3倍高くなると推定された（長期的に見て、環境修復策が講じられれば、被ばくが低減される）。参考情報として、日本で自然放射線源からのバックグラウンド被ばくによる80歳での積算線量は、平均で約170mSvである。

214. 20km圏内の住民の避難によって、避難者の線量は大幅に低減した。本委員会は、これによって回避された実効線量が成人では最大50mSv、避難によって回避された1歳児の甲状腺吸収線量は最大で約750 mGyになると推定している。

表10. 日本の避難地区および避難区域外の典型的な住民における事故後1年間の行政区画または県平均実効線量および甲状腺吸収線量推定

線量は、放射線の自然源によるバックグラウンド線量に追加したものである。推定は異なる場所の住民が受けた平均線量の特徴を説明するよう意図されており、これらの場所の集団内の個人が受けた線量範囲を反映するものではない。データが不十分な場合には仮定を行っており、そのため実際の平均線量を過大評価している可能性がある(第IV章のセクションEおよびFを参照)。

居住地	実効線量 (mSv)		甲状腺吸収線量 (mGy)	
	成人	1 歳児	成人	1 歳児
避難をした地区				
予防的避難区域の地区(双葉町、大熊町、富岡町、楢葉町、広野町、および南相馬市、浪江町、田村市の一部、川内村、葛尾村の一部)	1.1～5.7	1.6～9.3	7.2～34	15～82
計画的避難区域の地区(飯館村、および南相馬市、浪江町、川俣町、葛尾村の一部)	4.8～9.3	7.1～13	16～35	47～83
避難をしていない地域				
福島県の避難区域外	1.0～4.3	2.0～7.5	7.8～17	33～52
宮城県、群馬県、栃木県、茨城県、千葉県、岩手県	0.2～1.4	0.3～2.5	0.6～5.1	2.7～15
日本のその他の県	0.1～0.3	0.2～0.5	0.5～0.9	2.6～3.3

C. 作業者の被ばく

215. 2012年10月末までに約2万5000人の作業者が福島第一原発サイトで緊急時対応作業や他の活動に従事した。事故後19か月間の当該作業者の平均実効線量は約10mSvであった。この期間に10mSvを超える実効線量を受けた作業者は約34%で、100mSvを超える実効線量を受けた作業者は0.7% (173人に相当)、報告された最大実効線量は679mSvであった。

216. 本委員会では、内部被ばくによる預託実効線量が100mSvを超えていた12人の作業者(合計13人²⁷のうち)について、内部被ばくによる線量を評価した。その目的は、当該作業者に関して報告された線量の信頼性を判断することである。本委員会は、当該作業者が¹³¹Iの吸入による甲状腺吸収線量を2～12 Gyの範囲で受けたことを確認した。

217. 全体として、東電が行った従業員の線量評価は、健康影響を査定するのに適したものであった。しかし、特に個人放射線モニターを十分活用できなかった事故後早期(数日から数週間)の線量の推定には不確かさが伴っていた。さらに、短半減期放射性核種(¹³²Te、¹³³Iなど)の影響について信頼に足る推定を行うには、体外計測の開始が総じて遅すぎた。事故の非常に早い段階での職業的被ばくを詳しく特徴付けるには、さらなる作業が必要である。

²⁷ 本委員会が被ばく量の最も高い作業者12人の線量を独自に評価した後、日本の関係機関が2013年7月、内部被ばくによる線量の推定値を再評価した。これにより、預託実効線量が100 mSvを超える東電作業者がさらに1人同定された(内部被ばくによる実効線量が100 mSvを超えた作業者は合計13人)。本委員会は、この13人目の個人について内部被ばくによる線量について、情報を取得した時期が遅かったため独自の評価を行っていない。

D. 公衆と作業者の健康影響

218. 作業者と一般市民において、事故による放射線被ばくに起因する可能性がある急性の健康影響(すなわち急性放射線症や他の確定的影響)は観察されていない。公衆と作業者でこれまでに観察された最も重要な健康影響は、精神衛生と社会福祉に関するものと考えられており、地震と津波の甚大な影響で家族や友人を失い、生活手段も失って避難を余儀なくされたこと、および原発事故の影響(避難の長期化や生活手段の喪失だけでなく、電離放射線が健康にもたらす実際のリスクと認知されたリスクに関わる恐怖や苦悩を含む)が関係している。かかる健康影響の発生と重篤度の推定は本委員会の権限の範囲外であるが、福島第一原発での事故の総合的な健康影響を考慮する際、精神衛生および社会福祉に関わる情報を得ることは重要である。

219. 確率的な健康影響(がんなど)のリスクは、福島第一原発事故により被ばくした人々(公衆と作業者)の大半で推定された線量よりもはるかに高い水準の線量の場合において、かなり合理的に定量化されている。被ばく集団が十分に大きく、その疾患リスクの推定が、同集団における当該疾患の基準発生率の通常の統計的ばらつきに比べて十分に高ければ、放射線照射による発生率上昇を疾病統計情報で識別できる可能性がある。反対に、リスクが小さいか、既存の知識とリスクモデルに基づいて推定することのみが可能な場合、および/または被ばくした人数が少ない場合、本委員会は「識別可能な上昇なし」という言葉を用いて、現在利用可能な方法では、疾患統計において放射線被ばくによる疾患発生率の上昇を実証できるとは予想されないことを示唆した。これは、放射線照射による疾患症例が将来過剰に発生する可能性を排除するものではないと同時に、かかる症例が発生した際に伴う苦痛を無視するものでもない。

1. 公衆の健康影響

220. 避難者および避難区域以外で事故の影響を最も受けた地域の集団の最初の1年間における平均実効線量は、成人で約1~10mSv、1歳児ではその約2倍になると推定された。リスクモデルを使用して推論した場合、この程度の線量でもがんのリスクがわずかに上昇することが示唆されるが、一般的な集団における事故の放射線被ばくによる疾患発生率の全体的な上昇は、日本人の基準生涯リスク(あらゆる固形がんにおいて平均35%であるが、性別、生活習慣や他の要因によって個人差がある)に対して検出するには小さ過ぎる。

221. 上記のとおりであるにしても、これまでの経験では、特定の集団(特に胎児としての被ばく後、あるいは乳幼児期・小児期の被ばく後)における特定のがんの相対リスクは集団の平均よりも高くなる。

222. 甲状腺がんについて 幼少期・小児期において放射性ヨウ素に線被ばくした後、人生の後年に生じる甲状腺がんは、前述の点でおおに関係がある。予防的避難を行った集団の地区平均甲状腺吸収線量は、1歳児の場合最大で約80mGyになると推定された。ATDM解析の結果に基づいた平均の推定には不確かさが伴っており、線量がさらに高かった可能性もあるが、体外計測による甲状腺モニタリングのデータは、平均甲状腺吸収線量が最大で5倍程度高く推定されている可能性があることを示唆している。線量のほとんどは放射線被ばくによる甲状腺がんの過剰発生率を確認できないレベルであった。しかし、そのなかで上限に近い甲状腺吸収線量では、十分に大きな集団において識別可能な甲状腺がんの発生率上昇をもたらす可能性がある。幼少期および小児期により高い甲状腺線量に被ばくした人々の間で甲状腺がん発生率が上昇するかどうかを見極めるという点に関して本委員会が確固たる結論を導くには、線量分布に関する情報が充分ではなかった。福島第一原発事故後の甲状腺吸収線量がチェルノブイリ事故後の線量よりも大幅に低いため、福島県でチェルノブイリ原発事故の時のように多数の放射線誘発性甲状腺がんが発生するようには考える必要はない。

223. 白血病について 本委員会は胎児および幼少期・小児期に被ばくした人の白血病のリスクを検討した。また、特に若年時に被ばくした人の乳がんのリスクも検討した。評価された線量と利用可能なリスク推定に基づき、本委員会は、当該集団でのかかる疾患の発生率が識別可能なレベルで上昇するとは予測していない。

224. 本委員会は妊娠中の被ばくによる自然流産、流産、周産期死亡率、先天的な影響、または認知障害が増加するとは予測していない。さらに、本委員会は福島第一原発事故で被ばくした人の子孫に遺伝的な疾患が増加するとも予測していない。

225. 福島県民の長期的な健康状態を確認し(妊娠や出産に関する調査を含む)、今後の健康で安心な生活を促進すると同時に、長期的な低線量放射線被ばくが予測できない健康影響をもたらすことがないかを調べるため、約200万人の住民を対象とした福島県民健康管理調査が開始された。2011年3月11日に18歳以下だった福島県の子供全員(約36万人)に対して甲状腺超音波検査が行われ、3年以内に完了する予定である(2014年3月まで)。福島県での継続的な超音波検査により、比較的多数の甲状腺異常が見つかったが、これは福島第一原発事故の影響を受けていない地域での類似した調査に一致している。福島県での継続的な超音波検査では、このような集中的検診がなければ通常は検出されなかったであろう甲状腺異常(多数のがん症例を含む)が比較的多数見つかる予測されている。事故の影響を受けていない地域における集団の甲状腺がん発生率の調査は、そのような集中的な検診の影響を推定するのに有用な情報を提供するだろう。

2. 作業者の健康影響

226. 緊急時対応作業や他の活動に従事した約2万5000人の大半(2012年10月31日の時点で99.3%)において、報告された実効線量は100mSv未満で、平均は約10mSvであった。リスクモデルは、かかる線量での放射線被ばくによる疾患リスクが低いことを示唆している(ただし、線量の増加とともにリスクは上昇する)。主に外部被ばくにより100mSvを超える実効線量を受けたと見られる173人の作業員(平均は約140mSv)については、約40%の固形がんの基準生涯リスクに基づき自然に発生するがん約70症例に加えて、2~3症例のがんが過剰に発生することがリスク推定で示されている。しかしながら、このような予測には大きな不確かさが伴っており、この小規模なグループでのがん発生率の上昇を、がん発生率のばらつきに対して識別することはできない。この作業員グループで他の疾患の増加は予測されていない。ただし、本委員会は、眼の水晶体のベータ線被ばくによる白内障のリスクは推定できていない。

227. ^{131}I の甲状腺吸収線量が2~12Gyの範囲だったと推定される13人の作業員²⁷については、甲状腺がんの発現リスクの上昇を推定することができる。しかし、被ばくした人数は非常に少なく、甲状腺がんの発生率上昇を識別できるほどではない。推定された線量値には不確かさが伴うので、最も被ばくした作業員における甲状腺障害(甲状腺機能低下症など)の発現の可能性を完全に排除することはできないが、このような障害が発生する可能性は低い。

228. 100mSvを超える実効線量を受けた作業員は特に入念に検査されており、放射線関連の健康影響が後日発生する可能性を考慮して、甲状腺、胃、大腸、肺の検診を毎年受けている。これらの作業員の超音波検査と注意深い医学的モニタリングにより、甲状腺がん(および他のがん症例)の発見率は上昇するだろうが、検出された症例の大多数は、放射線被ばくとは関係なく発現したものであると予測される。

E. ヒト以外の生物相への放射線被ばくと影響

229. 本委員会は、事故後のヒト以外の生物相に対する線量とそれに関連する影響の評価を、本委員会が事故発生前に実施した同様の影響に関する一般的な評価と比較しながら行った。事故後のヒト以外の海洋と陸生の生物相における被ばくの程度は、地域的なばらつきによりいくつか例外があった可能性はあるが、全体として、急性的な影響を観察できないほどに低いレベルであった。一般的に、

(a) 海洋環境におけるヒト以外の生物相への影響は、放射能濃度の高い水が海に放出された場所の近傍域に限られている。

(b) 特定の陸生生物（特に哺乳類）における生物学的指標の継続的な変化を無視することはできないが、集団個体群保全での重要性は不明である。いかなる放射線の影響も、放射性物質の沈着密度が最も高い地域に限定されている。この地域以外では、生物相への影響の可能性は無視できる。

F. 将来の科学的研究の必要性

230. チェルノブイリおよびスリーマイル島における原発事故の場合と同様、今後数年から数十年にわたり、事故の進展に寄与する要因や環境への放出、その結果生じた公衆、作業員、環境の被ばく、関連のある健康上のリスクについてさらなる情報が継続的に提供されることになる。本委員会は、事故後3年近く経つ現在、原発サイト内の作業員の集団実効線量が必然的に上昇していること、放射能汚染水が原発サイト内で漏れいしていること、地下水が放射性核種を水域環境に運んでいる（ただし制御対策も採られている）ことを認識している。本委員会による評価の信頼性を上げ、確認し、向上させるための科学的な研究を行うことが望まれる。科学的研究に関する主な優先事項を以下に記す。

(a) 事故の進展や放出中の気象条件に関するより良い理解と、大気輸送、拡散および沈着のパターンを再構築するためのモデル予測の利用に基づき、放射性核種の大気中への放出量とその特性の時間的変化に関する推定をより確かなものにする。

(b) 放射能汚染水の漏れいと時間の経過に伴う水域環境（地下水および最終的には太平洋を含む）への放出に関し、測定を継続して特性評価を改善する。放出された放射性核種の長期的な輸送と混合、水圏の経路からもたらされる被ばくを予測して定量化する。

(c) 降下物からの外部被ばくによる線量を継続的な測定を継続し、時間の経過に伴う変化を予測して追跡して、環境修復プログラムの影響を定量化する。

(d) 確率的なアプローチ、利用可能なあらゆるデータ、適切なモデルを使用し、公衆が受けた線量の分布の特徴を個人間のばらつきを示す形でよりよく把握する（これには個人の行動、検出限界、サンプル抽出手順、測定結果の分布についてのさらなる検討が含まれる）と同時に、線量推定における不確かさをより高度に定量化する。

(e) 人々の体内の放射性核種の測定をさらに行い、線量の推定値と分布の精度を向上させ、現在および将来の被ばくレベルを推定する。

(f) 現在のプロトコルに基づき、福島県での健康調査および小児の継続的な超音波検査を続ける。福島県で検出された甲状腺がんの発生率について当該検査の影響を解析して定量化する（この点に関しては、事故の影響を受けていない地域での甲状腺がん発生率の調査が有用である）。個人線量が適切に評価できている集団から成る、疫学的な研究のためのコホートを確立することを検討する。

(g) 事故早期の各作業員の作業履歴、放射性核種の時間変動レベル（短半減期放射性核種を含む）、作業・休憩場所での周辺線量当量、個人線量計の共有に基づく線量推定の信頼性、各作業員による防護対策を考慮に入れながら、報告された作業員の線量における不確かさを定量化する。原発サイト内の被害軽減活動に従事した作業員の水晶体吸収線量（および関連する不確かさ）を推定し、白内障のリスクを評価する。元請業者が報告した実効線量の推定値の質を確認するためにさらなる解析を行う。

(h) 将来の解析に備え、(a) 被ばくしていない作業員と (b) 実効線量が 100mSv を超え、その後手術を行った作業員についての組織バンクの設立を検討する。

(i) ヒト以外の生物相において特定の種に典型的な環境からの被ばくを測定評価する。現地調査で報告されているが本委員会の評価と一致しない環境影響について、放射線被ばくがそれを引き起こす重要な要因であったか否かに関し、さらなる解析を行う。

謝辞

本委員会は、本報告書を承認するにあたり、評価の実施に直接関与した専門家およびその所属機関で当該専門家を援助したすべてのスタッフからの支援、また、包括的核実験禁止条約機関（CTBTO）、国連食糧農業機関（FAO）、国際原子力機関（IAEA）、世界保健機構（WHO）および世界気象機関（WMO）から提供されたデータや専門的知見に対し、ここに感謝の意を表す。また、各国、国際機関、研究組織、科学者間の惜しみない協力とデータおよびアイデアの交換が本解析の成果を大きく向上させたことを特記し称賛する。なお、本書に記された見解は本委員会が保持するものであり、協力した専門家、国連およびその加盟国あるいは国際機関の考えを代表するものではない。

調整コーディネーション専門家グループ

議長：W. Weiss (ドイツ); シニアアドバイザー: Y. Yonekura (日本)

専門家グループ A (データおよび品質保証)

グループリーダー：E.V. Holahan Jr. (米国); リードライター：A. Rannou (フランス), D. de Souza Santos (ブラジル); 執筆協力者：J. Johansson Barck-Holst (スウェーデン), M. Zähringer (ドイツ); テクニカルアドバイザー：M. Nakano (日本); コメンテーター：P. Bérard (フランス), S.H. Na (韓国), T. Takahashi (日本)

専門家グループ B (放射性核種の放出と拡散)

グループリーダー：G. Kirchner²⁸ (ドイツ); リードライター：R. Draxler (米国); 執筆協力者：P. Chen (WMO), D. da Costa Lauria (ブラジル), C. Estoumel (フランス), O. Isnard (フランス), R. Periañez (スペイン), K.S. Suh (韓国); テクニカルアドバイザー：J. Sugimoto (日本); コメンテーター：M. Chino (日本), F. Gering (ドイツ), M.C. Hort (英国), G.-B. Lee (韓国), M. Monfort (フランス), M. Nikkinen (CTBTO), M. Zähringer (ドイツ)

専門家グループ C (経路および被ばく評価: 公衆および環境)

グループリーダー：S. Solomon (オーストラリア); リードライター：M. Balonov (ロシア), J. Simmonds (英国), P. Strand (ノルウェー); 執筆協力者：P. Bedwell (英国), J. Brown (ノルウェー), G. Dercon (FAO), F. Gering (ドイツ), V. Golikov (ロシア), G. Hirth (オーストラリア), P. Verger (WHO); テクニカルアドバイザー：N. Ban (日本); コメンテーター：M. Aerts (ベルギー), T. Aono (日本), M. Chartier (フランス), M. Dinovi (米国), S. Fesenko (IAEA), J. Garnier-Laplace (フランス), S. Haywood (英国), T. Homma (日本), A. Hosseini (ノルウェー), D.-K. Keum (韓国), V. Kliaus (ベラルーシ), C.-M. Larsson (オーストラリア), I. Naletoski (FAO), J.M. de Oliveira Godoy (ブラジル), G. Proehl (IAEA), C. Rääf (スウェーデン), K. Sakai (日本), T. Sazykina (ロシア), J. Sherwood (英国), S. Shinkarev (ロシア), J. Vives i Batlle (ベルギー)

専門家グループ D (作業者の被ばくと健康影響)

グループリーダー：J.-R. Jourdain (フランス); リードライター：G. Etherington (英国), R. Lane (カナダ), A. Wiley (米国); 執筆協力者：E. Salminen (フィンランド); テクニカルアドバイザー：M. Akashi (日本); コメンテーター：D. Bazyka (ウクライナ), E. Blanchardon (フランス), J. Harrison (英国), L. Lebaron-Jacobs (フランス), J.K. Lee (韓国), Z. Luo (中国), D. Rabelo de Melo (ブラジル), M. Rickard (カナダ), S. Romanov (ロシア), S. Saigusa (日本), B. Thériault (カナダ)

²⁸ 2013 年中頃における所属機関の変更まで。

健康影響タスクグループ(健康影響評価)

グループリーダー: P. Jacob (ドイツ); リードライター: J. Harrison (英国), L. Hubbard (スウェーデン), J. Kenigsberg (ベラルーシ), R. Lane (カナダ), W.-U. Mueller (ドイツ); テクニカルアドバイザー: K. Kodama (日本); 執筆協力者: L. Holanda Sadler Veiga (ブラジル), V. Ivanov (ロシア), V. Krasnyuk (ロシア), Y.-K. Lim (韓国), F. Ménétrier (フランス)

クリティカルレビュー担当者

L. Anspaugh (米国), P. Jacob (ドイツ)

最終品質保証チーム

チームリーダー: C.-M. Larsson (オーストラリア); 執筆協力者: M. Balonov (ロシア), M. Chino (日本), R. Draxler (米国), G. Etherington (英国), F. Gering (ドイツ), O. Isnard (フランス), P. Jacob (ドイツ), J.-R. Jourdain (フランス), G.N. Kelly (英国), S. Solomon (オーストラリア), W. Weiss (ドイツ), M. Zähringer (ドイツ)

貢献のあった他の専門家

C. Blackburn (FAO/IAEA), J.D. Boice Jr. (米国), L. Brookmire (米国), D.H. Byron (FAO/IAEA), J. Carpenter (オーストラリア), T. Charnock (英国), S. Field (英国), H. Ishida (日本), V. Kryuchkov (ロシア), K. Leuraud (フランス), Q. Liang (FAO/IAEA), K. Mortimer (英国), M.-L. Nguyen (FAO/IAEA), S. Nielen (FAO/IAEA), B. Orr (オーストラリア), M. del Rosario Perez (WHO), K. Sakamoto (日本), J. Smith (英国), A. Thomassin (フランス), R. Tinker (オーストラリア), A. Ulses (IAEA), D. Urban (オーストラリア), S. Watson (英国), J. Wellings (英国), Y. Yamada (日本), I. Zvonova (ロシア)

参考文献

- A1 ABC. Japan investigates Fukushima lie claims. Australian Broadcasting Corporation. [Internet] Available from (<http://www.abc.net.au/news/2012-07-25/japan-investigates-fukushima-lie-claims/> 4152468) on 28 January 2013.
- A2 Achim, P., M. Monfort, G. Petit et al. Analysis of radionuclide releases from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident Part II. *Pure Appl Geophys*: 1-23 (2012).
- A3 ACRO. Results of ACRO's monitoring in Japan. Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest. [Internet] Available from (http://www.acro.eu.org/OCJ_en.html) on 25 January 2013.
- A4 Akahane, K., S. Yonai, S. Fukuda et al. The Fukushima Nuclear Power Plant accident and exposures in the environment. *The Environmentalist* 32(2): 136-143 (2012).
- A5 Akahane, K., S. Yonai, S. Fukuda et al. NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident. *Sci Rep* 3: 1670 (2013).
- A6 Akashi, M. Fukushima Daiichi nuclear accident and radiation exposure. *Japan Medical Association Journal* 55(5): 393-399 (2012).
- A7 Akiba, S. and S. Mizuno. The third analysis of cancer mortality among Japanese nuclear workers, 1991-2002: estimation of excess relative risk per radiation dose. *J Radiol Prot* 32(1): 73-83 (2012).
- A8 Alonso-Hernandez, C.M., A. Guillen-Arruebarrena, H. Cartas-Aguila et al. Observations of fallout from the Fukushima reactor accident in Cienfuegos, Cuba. *Bull Environ Contam Toxicol* 88(5): 752-754 (2012).
- A9 Amano, H., M. Akiyama, B. Chunlei et al. Radiation measurements in the Chiba Metropolitan Area and radiological aspects of fallout from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants accident. *J Environ Radioact* 111: 42-52 (2012).
- A10 Andersson, P., J. Garnier-Laplace, N.A. Beresford et al. Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context (protect): proposed numerical benchmark values. *J Environ Radioact* 100(12): 1100-1108 (2009).
- A11 Ansoborlo, E., P. Berard, K. Eckerman et al. Review of methods and computer codes for interpretation of bioassay data. *Radiat Prot Dosim* 105(1-4): 341-346 (2003).
- A12 Aoyama, M., M. Uematsu, D. Tsumune et al. Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs. *Biogeosciences Discussions* 10(1): 265-283 (2013).
- A13 Avila, R., N.A. Beresford, A. Aguero et al. Study of the uncertainty in estimation of the exposure of non-human biota to ionising radiation. *J Radiol Prot* 24(4A): A105-122 (2004).
- B1 Baeza, A., J.A. Corbacho, A. Rodriguez et al. Influence of the Fukushima Dai-ichi nuclear accident on Spanish environmental radioactivity levels. *J Environ Radioact* 114(0): 138-145 (2012).
- B2 Bailly du Bois, P., P. Laguionie, D. Boust et al. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. *J Environ Radioact* 114: 2-9 (2012).
- B3 Barsanti, M., F. Conte, I. Delbono et al. Environmental radioactivity analyses in Italy following the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *J Environ Radioact* 114: 126-130 (2012).

- B4 Beresford, N.A., C.L. Barnett, B.J. Howard et al. Derivation of transfer parameters for use within the ERICA Tool and the default concentration ratios for terrestrial biota. *J Environ Radioact* 99(9): 1393-1407 (2008).
- B5 Beresford, N.A., C.L. Barnett, D.G. Jones et al. Background exposure rates of terrestrial wildlife in England and Wales. *J Environ Radioact* 99(9): 1430-1439 (2008).
- B6 Beresford, N.A., C.L. Barnett, J.E. Brown et al. Predicting the radiation exposure of terrestrial wildlife in the Chernobyl exclusion zone: an international comparison of approaches. *J Radiol Prot* 30(2): 341-373 (2010).
- B7 Beresford, N.A., C.L. Barnett, B.J. Howard et al. Observations of Fukushima fallout in Great Britain. *J Environ Radioact* 114: 48-53 (2012).
- B8 Bertelli, L. AIDE – Activity and Internal Dose Estimates. [Internet] Available from (<http://www.aidesoftware.com>) on 18 January 2013.
- B9 BfS. Dosisabschätzung für Deutschland nach Fukushima-Unfall. Officially submitted to the UNSCEAR secretariat. Bundesamt für Strahlenschutz, 2013. (German).
- B10 Biegalski, S.R., T.W. Bowyer, P.W. Eslinger et al. Analysis of data from sensitive U.S. monitoring stations for the Fukushima Dai-ichi nuclear reactor accident. *J Environ Radioact* 114: 15-21 (2012).
- B11 Bikit, I., D. Mrda, N. Todorovic et al. Airborne radioiodine in northern Serbia from Fukushima. *J Environ Radioact* 114: 89-93 (2012).
- B12 Birchall, A., M. Puncher, J.W. Marsh et al. IMBA Professional Plus: a flexible approach to internal dosimetry. *Radiat Prot Dosim* 125(1-4): 194-197 (2007).
- B13 Boice Jr., J.D. Radiation epidemiology: a perspective on Fukushima. *J Radiol Prot* 32(1): N33-40 (2012).
- B14 Bolsunovsky, A. and D. Dementyev. Evidence of the radioactive fallout in the center of Asia (Russia) following the Fukushima Nuclear Accident. *J Environ Radioact* 102(11): 1062-1064 (2011).
- B15 Bowyer, T.W., S.R. Biegalski, M. Cooper et al. Elevated radionuclides detected remotely following the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 102(7): 681-687 (2011).
- B16 Brenner, A.V., M.D. Tronko, M. Hatch et al. I-131 dose response for incident thyroid cancers in Ukraine related to the Chernobyl accident. *Environ Health Perspect* 119(7): 933-939 (2011).
- B17 Bromet, E.J., S.F. Gluzman, V.I. Paniotto et al. Epidemiology of psychiatric and alcohol disorders in Ukraine: findings from the Ukraine World Mental Health survey. *Soc Psychiatry Psychiatr Epidemiol* 40(9): 681-690 (2005).
- B18 Bromet, E.J. and J.M. Havenaar. Psychological and perceived health effects of the Chernobyl disaster: a 20-year review. *Health Phys* 93(5): 516-521 (2007).
- B19 Bromet, E.J., J.M. Havenaar and L.T. Guey. A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident. *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 23(4): 297-305 (2011).
- B20 Bromet, E.J. Mental health consequences of the Chernobyl disaster. *J Radiol Prot* 32(1): N71-75 (2012).
- B21 Brown, J. and J.R. Simmonds. FARMLAND a dynamic model for the transfer of radionuclides through terrestrial foodchains. NRPB-R273. National Radiological Protection Board, Chilton, 1995.

- B22 Brown, J.E., B. Alfonso, R. Avila et al. The ERICA Tool. *J Environ Radioact* 99(9): 1371-1383 (2008).
- B23 Buesseler, K. and M. Aoyama. Fukushima results. Presented at the Fukushima Ocean Impacts Symposium: Exploring the Impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean, University of Tokyo, 12-13 November 2012. Woods Hole Oceanographic Institution. [Internet] Available from (<http://www.whoi.edu/files/server.do?id=138584&pt=2&p=141569>) on 25 November 2012.
- B24 Buesseler, K.O. Fishing for answers off Fukushima. *Science* 338(6106): 480-482 (2012).
- B25 Buesseler, K.O., S.R. Jayne, N.S. Fisher et al. Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *Proc Natl Acad Sci U S A* 109(16): 5984-5988 (2012).
- C1 Carvalho, F.P., M.C. Reis, J.M. Oliveira et al. Radioactivity from Fukushima nuclear accident detected in Lisbon, Portugal. *J Environ Radioact* 114: 152-156 (2012).
- C2 Casacuberta, N., P. Masqué, J. Garcia-Orellana et al. ⁹⁰Sr and ⁸⁹Sr in seawater off Japan as a consequence of the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Biogeosciences* 10: 2039-2067 (2013).
- C3 Center for Cancer Control and Information Services. Cancer incidence from cancer registries in Japan (1975-2007). National Cancer Center. [Internet] Available from (http://ganjoho.jp/pro/statistics/en/table_download.html) on 19 December 2012.
- C4 Charette, M.A., C.F. Breier, P.B. Henderson et al. Radium-based estimates of cesium isotope transport and total direct ocean discharges from the Fukushima Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences* 10(3): 2159-2167 (2013).
- C5 Chatelard, P. and N. Reinke. Overview of the integral code ASTEC V2.0. Rapport Technique DPAM/SEMCA-2009-149, Technische Notiz GRS ASTEC 09/02. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire and Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. [Internet] Available from (http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/Overview_ASTEC.pdf) on 16 April 2013.
- C6 Chino, M., H. Nakayama, H. Nagai et al. Preliminary estimation of release amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *J Nucl Sci Technol* 48(7): 1129-1134 (2011).
- C7 Clemenza, M., E. Fiorini, E. Previtali et al. Measurement of airborne ¹³¹I, ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs due to the Fukushima reactor incident in Milan (Italy). *J Environ Radioact* 114: 113-118 (2012).
- C8 Cosma, C., A.R. Iurian, D.C. Nita et al. Indicators of the Fukushima radioactive release in NW Romania. *J Environ Radioact* 114: 94-99 (2012).
- C9 CRIIRAD. Dossier spécial - catastrophe de Fukushima. Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité. [Internet] Available from (http://www.criirad.org/actualites/dossier2011/japon_bis/sommaire.html) on 26 January 2013. (French).
- C10 Cronkite, E.P., R.A. Conard and V.P. Bond. Historical events associated with fallout from Bravo Shot - Operation Castle and 25 Y of medical findings. *Health Phys* 73(1): 176-186 (1997).
- D1 Diaz Leon, J., D.A. Jaffe, J. Kaspar et al. Arrival time and magnitude of airborne fission products from the Fukushima, Japan, reactor incident as measured in Seattle, WA, USA. *J Environ Radioact* 102(11): 1032-1038 (2011).
- D2 Dickman, P.W., L.E. Holm, G. Lundell et al. Thyroid cancer risk after thyroid examination with ¹³¹I: a population-based cohort study in Sweden. *Int J Cancer* 106(4): 580-587 (2003).

- D3 Dietze, H. and I. Kriest. Cs-137 off Fukushima Dai-ichi, Japan – model based estimates of dilution and fate. *Ocean Scie* 8(3): 319-332 (2012).
- D4 Draxler, R., D. Arnold, M. Chino et al. World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J Environ Radioact*: online (2013).
- D5 Draxler, R.R. and G.D. Hess. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Aust Meteor Mag* 47: 295-308 (1998).
- D6 Draxler, R.R. and G.D. Rolph. Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima. *J Geophys Res* 117: D05107 (2012).
- E1 Endo, S., S. Kimura, T. Takatsuji et al. Measurement of soil contamination by radionuclides due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident and associated estimated cumulative external dose estimation. *J Environ Radioact* 111: 18-27 (2012).
- E2 EPA. EPA radiogenic cancer risk models and projections for the U.S. population. Report EPA 402-R-11-001. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., 2011.
- E3 EPRI. MAAP4 Applications Guidance. Technical Report. Electrical Power Research Institute, Palo Alto, California, 2006.
- E4 Estournel, C., E. Bosc, M. Bocquet et al. Assessment of the amount of cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. *J Geophys Res* 117: C11014 (2012).
- E5 Evrard, O., P. Van Beek, D. Gateuille et al. Evidence of the radioactive fallout in France due to the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 114: 54-60 (2012).
- F1 FASSET. Handbook for Assessment of the Exposure of Biota to Ionising Radiation from Radionuclides in the Environment. (J. Brown et al., eds.). Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003.
- F2 Ferlay, J., H.R. Shin, F. Bray et al. GLOBOCAN 2008 v2.0, Cancer Incidence and Mortality Worldwide: IARC CancerBase No. 10. International Agency for Research on Cancer. [Internet] Available from (<http://globocan.iarc.fr>) on 12 May 2012.
- F3 Fukushima Medical University. Results of thyroid ultrasound examination (as of March 2013). Proceedings of the 11th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey. Department of International Cooperation, Radiation Medical Science Center. [Internet] Available from (http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/11-2_Thyroid.pdf) on 4 June 2013.
- F4 Fukushima Prefecture. Results of environmental radiation monitoring at 7 districts in the prefecture (11 to 31 March 2011). [Internet] Available from (<http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/Thoubu0311-0331.pdf>) on 3 February 2013. (Japanese).
- F5 Fukushima Prefecture. Map of Fukushima Prefecture radioactivity measurements. [Internet] Available from (http://wwwcms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet) on 4 February 2013. (Japanese).
- F6 Furukawa, K., D. Preston, S. Funamoto et al. Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure. *Int J Cancer* 132(5): 1222-1226 (2013).
- F7 Furuta, S., S. Sumiya, H. Watanabe et al. Results of the environmental radiation monitoring following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant - Interim report (Ambient radiation dose rate, radioactivity concentration in the air and radioactivity

- concentration in the fallout). JAEA-Review 2011-035. Japan Atomic Energy Agency, Tokaimura, 2011. (Japanese).
- G1 Gamache, G.L., D.M. Levinson, D.L. Reeves et al. Longitudinal neurocognitive assessments of Ukrainians exposed to ionizing radiation after the Chernobyl nuclear accident. *Arch Clin Neuropsychol* 20(1): 81-93 (2005).
- G2 Garnier-Laplace, J., D. Copplestone, R. Gilbin et al. Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA Integrated Approach. *J Environ Radioact* 99(9): 1474-1483 (2008).
- G3 Garnier-Laplace, J., K. Beaugelin-Seiller and T.G. Hinton. Fukushima wildlife dose reconstruction signals ecological consequences. *Environ Sci Technol* 45(12): 5077-5078 (2011).
- G4 Gauntt, R.O., R.K. Cole, C.M. Erickson et al. MELCOR computer code manuals: Reference manuals version 1.8.5 (Volume 2). NUREG/CR-6119. United States Nuclear Regulatory Commission, 2001.
- G5 Geras'kin, S.A., S.V. Fesenko and R.M. Alexakhin. Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. *Environ Int* 34(6): 880-897 (2008).
- G6 Golikov, V., M. Balonov, V. Erkin et al. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident. *Health Phys* 77(6): 654-661 (1999).
- G7 Golikov, V., E. Wallstrom, T. Wohni et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiat Environ Biophys* 46(4): 375-382 (2007).
- G8 Golikov, V.Y., M.I. Balonov and A.V. Ponomarev. Estimation of external gamma radiation doses to the population after the Chernobyl accident. pp. 247-288 in: *The Chernobyl Papers. Vol. I. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies.* (S.E. Merwin and M.I. Balonov, eds.). Research Enterprises, Richland, Washington, 1993.
- G9 Golikov, V.Y., M.I. Balonov and P. Jacob. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys* 41(3): 185-193 (2002).
- G10 Gomez-Ros, J.M., G. Prohl, A. Ulanovsky et al. Uncertainties of internal dose assessment for animals and plants due to non-homogeneously distributed radionuclides. *J Environ Radioact* 99(9): 1449-1455 (2008).
- G11 Greenpeace. Fukushima Radiation Survey (Lab 1). Greenpeace International. [Internet] Available from (<http://www.greenpeace.org/international/en/campaigns/nuclear/safety/accidents/Fukushima-nuclear-disaster/Radiation-field-team/>) on 4 August 2011.
- G12 Gribov, A. and K. Krivoruchko. New flexible non-parametric data transformation for trans-Gaussian Kriging. pp.51-65 in: *Geostatistics Oslo 2012.* (P. Abrahamsen et al., eds.). Springer, Dordrecht, 2012.
- H1 Hall, P., C.J. Furst, A. Mattsson et al. Thyroid nodularity after diagnostic administration of iodine-131. *Radiat Res* 146(6): 673-682 (1996).
- H2 Hancock, S.L., R.S. Cox and I.R. McDougall. Thyroid diseases after treatment of Hodgkin's disease. *N Engl J Med* 325(9): 599-605 (1991).
- H3 Havenaar, J.M., G.M. Rumyantzeva, W. van den Brink et al. Long-term mental health effects of the Chernobyl disaster: an epidemiologic survey in two former Soviet regions. *Am J Psychiatry* 154(11): 1605-1607 (1997).

- H4 Havenaar, J.M., J.G. Cwikel and E.J. Bromet, eds. *Toxic Turmoil: Psychological and Societal Consequences of Ecological Disasters*. Kluwer Academic and Plenum Publishers, New York, 2002.
- H5 Hayano, R.S., M. Tsubokura, M. Miyazaki et al. Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body-countersurveys. *Proc Jpn Acad Ser B* 89(4): 157-163 (2013).
- H6 Hiyama, A., C. Nohara, S. Kinjo et al. The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Sci Rep* 2: 570 (2012).
- H7 Honda, M.C., T. Aono, M. Aoyama et al. Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the western North Pacific one month after the Fukushima accident. *Geochem J* 46: e1-e9 (2012).
- H8 Honda, S., Y. Shibata, M. Mine et al. Mental health conditions among atomic bomb survivors in Nagasaki. *Psychiatry Clin Neurosci* 56(5): 575-583 (2002).
- H9 Hoshi, H. and M. Hirano. Severe accident analyses of Fukushima-Daiichi Units 1 to 3. Side event by Government of Japan at 56th IAEA General Conference, Vienna, 17 September 2012. Nuclear Regulation Authority. [Internet] Available from (<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/files/P-4.pdf>) on 6 October 2012.
- H10 Hoshi, H., M. Ogino, R. Kawabe et al. Computational analysis on accident progression of Fukushima Dai-ichi NPS. PSAM Topical Conference: In Light of the Fukushima Dai-ichi Accident, Tokyo, 14-18 April 2013. Osaka University. [Internet] Available from (<http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeqe/seeqe/PSAM2013/OHP-PSAM2013-1061.pdf>) on 12 May 2013.
- H11 Hosoda, Y., M. Kuba, T. Miyake et al. First analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan, 1986-1992. *Jpn J Health Phys* 32(2): 173-184 (1997).
- H12 Hosseini, A., H. Thorring, J.E. Brown et al. Transfer of radionuclides in aquatic ecosystems - default concentration ratios for aquatic biota in the ERICA tool. *J Environ Radioact* 99(9): 1408-1429 (2008).
- H13 Hosseini, A., N.A. Beresford, J.E. Brown et al. Background dose-rates to reference animals and plants arising from exposure to naturally occurring radionuclides in aquatic environments. *J Radiol Prot* 30(2): 235-264 (2010).
- H14 Hundahl, S.A., I.D. Fleming, A.M. Fremgen et al. A National Cancer Data Base report on 53,856 cases of thyroid carcinoma treated in the U.S., 1985-1995. *Cancer* 83(12): 2638-2648 (1998).
- H15 Huysmans, D.A., A.R. Hermus, F.H. Corstens et al. Long-term results of two schedules of radioiodine treatment for toxic multinodular goitre. *Eur J Nucl Med* 20(11): 1056-1062 (1993).
- I1 IAEA. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group "Environment". International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
- I2 IAEA. The Chernobyl Forum: 2003-2005. Chernobyl's legacy: health, environmental and socio-economic impacts. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
- I3 IAEA. IAEA Briefing on Fukushima Nuclear Accident (30 March 2011, 16.30 UTC). International Atomic Energy Agency. [Internet] Available from (<http://www.iaea.org/newscenter/news/2011/fukushima300311.html>) on 14 April 2013.
- I4 IAEA. Fukushima Daiichi status report, 2 November 2011. International Atomic Energy Agency. [Internet] Available from (<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima>) on 10 November 2011.

- I5 IAEA. Cold shutdown conditions declared at Fukushima. International Atomic Energy Agency. [Internet] Available from (<http://www.iaea.org/newscenter/news/2011/coldshutdown.html>) on 24 December 2013.
- I6 IAEA. IAEA International fact finding expert mission of the Fukushima Dai-ichi NPP accident following the Great East Japan earthquake and tsunami. Tokyo, Fukushima Dai-ichi NPP, Fukushima Dai-ni NPP and Tokai Dai-ni NPP, Japan, 24 May–2 June 2011. International Atomic Energy Agency. [Internet] Available from (http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf) on 11 September 2011.
- I7 IARC. Cancer incidence in five continents, Vol. X. IARC Scientific Publications No. 164. (D. Forman et al., eds.). International Agency for Research on Cancer, Lyon, 2013.
- I8 Ibaraki Prefecture. Radiation information in the prefecture (March 2011). [Internet] Available from (<http://www.pref.ibaraki.jp/20110311eq/radiation.html>) on 3 February 2013. (Japanese).
- I9 ICAFNPS. Final report and attachments. Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html>) on 28 November 2012.
- I10 ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30 (Part 1). Annals of the ICRP 2. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1979.
- I11 ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Annals of the ICRP 20. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1989.
- I12 ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of the ICRP 21. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1991.
- I13 ICRP. The biological basis for dose limitation in the skin. ICRP Publication 59. Annals of the ICRP 22. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1992.
- I14 ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Annals of the ICRP 23. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1993.
- I15 ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Annals of the ICRP 24. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1994.
- I16 ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Annals of the ICRP 25. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1995.
- I17 ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 3. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 69. Annals of the ICRP 25. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1995.
- I18 ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Annals of the ICRP 26. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 1996.

- I19 ICRP. Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. Annals of the ICRP 31. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, 2001.
- I20 ICRP. Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk. ICRP Publication 95. Annals of the ICRP 34. International Commission on Radiological Protection, Elsevier Ltd., 2004.
- I21 ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP 37. International Commission on Radiological Protection, Elsevier Ltd., 2007.
- I22 ICRP. Environmental protection: The concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. Annals of the ICRP 38. International Commission on Radiological Protection, Elsevier Ltd., 2008.
- I23 ICRP. Environmental protection: Transfer parameters for reference animals and plants. ICRP Publication 114. Annals of the ICRP 39. International Commission on Radiological Protection, Elsevier Ltd., 2009.
- I24 ICRP. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116. Annals of the ICRP 40. International Commission on Radiological Protection, Elsevier Ltd., 2010.
- I25 ICRP. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Annals of the ICRP 41. International Commission on Radiological Protection, Elsevier Ltd., 2012.
- I26 ICRP. ICRP statement on tissue reactions / Early and late effects of radiation in normal tissues and organs – Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Annals of the ICRP 41. International Commission on Radiological Protection, Elsevier Ltd., 2012.
- I27 IEC. Radiation protection instrumentation - x, gamma, high energy beta and neutron radiations - direct reading personal dose equivalent and/or dose equivalent rate monitors. IEC 61525-1996. International Electrotechnical Commission, 1996.
- I28 IEC. Radiation protection instrumentation - measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for x, gamma, neutron and beta radiations - direct reading personal dose equivalent meters. IEC 61526-2010. International Electrotechnical Commission, 2010.
- I29 INPO. Special report on the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station. Institute of Nuclear Power Operations. [Internet] Available from (http://www.nei.org/corporatesite/media/filefolder/11_005_Special_Report_on_Fukushima_Daiichi_MASTER_11_08_11_1.pdf) on 12 January 2012.
- I30 Ioannidou, A., S. Manenti, L. Gini et al. Fukushima fallout at Milano, Italy. J Environ Radioact 114: 119-125 (2012).
- I31 IRSN. L'IRSN publie une évaluation de la radioactivité rejetée par la centrale de Fukushima Daiichi (Fukushima I) jusqu'au 22 mars 2011. Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire. [Internet] Available from (http://www.irsn.fr/fr/actualites_presse/actualites/pages/20110322_evaluation-radioactivite-rejets-fukushima-terme-source.aspx) on 4 December 2013. (French).
- I32 IRSN. Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France (métropole et DROM-COM) à partir des résultats de la surveillance renforcée de la radioactivité de l'environnement. Rapport DEI/2011-01. Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, 2011. (French).

- I33 IRSN. Fukushima, one year later. Initial analyses of the accident and its consequences. Report IRSN/DG/2012-003. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, 2012.
- I34 ISO. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1:1996. International Organization for Standardization, 1996.
- I35 ISO. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. ISO 4037-3:1999. International Organization for Standardization, 1999.
- I36 Ivanov, V.K., S.Y. Chekin, V.V. Kashcheev et al. Risk of thyroid cancer among Chernobyl emergency workers of Russia. *Radiat Environ Biophys* 47(4): 463-467 (2008).
- I37 Ivanov, V.K., A.I. Gorsky, V.V. Kashcheev et al. Latent period in induction of radiogenic solid tumors in the cohort of emergency workers. *Radiat Environ Biophys* 48(3): 247-252 (2009).
- I38 Ivanov, V.K., A.F. Tsyb, S.E. Khait et al. Leukemia incidence in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers. *Radiat Environ Biophys* 51(2): 143-149 (2012).
- I39 Iwasaki, T., M. Murata, S. Ohshima et al. Second analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan, 1986-1997. *Radiat Res* 159(2): 228-238 (2003).
- J1 Jacob, P., T.I. Bogdanova, E. Buglova et al. Thyroid cancer among Ukrainians and Belarusians who were children or adolescents at the time of the Chernobyl accident. *J Radiol Prot* 26(1): 51-67 (2006).
- J2 Jacob, P., W. Ruhm, L. Walsh et al. Is cancer risk of radiation workers larger than expected? *Occup Environ Med* 66(12): 789-796 (2009).
- J3 Jacob, P., G. Pröhl, I. Likhtarev et al. Pathway analysis and dose distributions. EUR 16541 EN. European Commission, Brussels, 1996.
- J4 Japanese Standards Association. Direct reading personal dose equivalent (rate) meters and monitors for X, gamma, beta and neutron radiations. JIS Z 4312:2002. Japanese Industrial Standard, 2002.
- J5 Japanese Standards Association. Methods of calibration for exposure meters, air kerma meters, air absorbed dose meters and dose-equivalent meters. JIS Z 4511:2005. Japanese Industrial Standard, 2005.
- J6 JNRS. Emergency monitoring data of environmental radioactivity. Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences [Internet] Available from (<http://www.radiochem.org/kinkyu/index.html>) on 17 December 2013. (Japanese).
- J7 Jones, K.A., C. Walsh, A. Bexon et al. Guidance on the assessment of radiation doses to members of the public due to the operation of nuclear installations under normal conditions. HPA-RPD-019. Health Protection Agency, Chilton, 2006.
- J8 Jung, K.W., Y.J. Won, H.J. Kong et al. Cancer statistics in Korea: incidence, mortality, survival and prevalence in 2010. *Cancer Res Treat* 45(1): 1-14 (2013).
- K1 Katata, G., M. Ota, H. Terada et al. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. *J Environ Radioact* 109: 103-113 (2012).

- K2 Kaufman, L. and P.J. Rousseeuw. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley-Interscience, 2005.
- K3 Kawamura, H., T. Kobayashi, A. Furuno et al. Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ¹³¹I and ¹³⁷Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster. *J Nucl Sci Technol* 48(11): 1349-1356 (2011).
- K4 Kazakov, V.S., E.P. Demidchik and L.N. Astakhova. Thyroid cancer after Chernobyl. *Nature* 359(6390): 21 (1992).
- K5 KEK. Results of environmental radiation measurements. High Energy Accelerator Research Organization (KEK). [Internet] Available from (<http://www.kek.jp/ja/Research/ARL/RSC/Radmonitor>) on 17 December 2013. (Japanese).
- K6 Kenigsberg, J. and K. Kouts. Thyroid doses received by the public of Belarus due to the Fukushima-Daiichi nuclear accident. pp.16-20 in: Transactions - Life Sciences and Non-power Applications. European Nuclear Conference, 9-12 December 2012, Manchester. European Nuclear Society, Brussels, 2012.
- K7 Kesminiene, A., A.S. Evrard, V.K. Ivanov et al. Risk of hematological malignancies among Chernobyl liquidators. *Radiat Res* 170(6): 721-735 (2008).
- K8 Kesminiene, A., A.S. Evrard, V.K. Ivanov et al. Risk of thyroid cancer among Chernobyl liquidators. *Radiat Res* 178(5): 425-436 (2012).
- K9 Kessler, R.C., P.R. Barker, L.J. Colpe et al. Screening for serious mental illness in the general population. *Arch Gen Psychiatry* 60(2): 184-189 (2003).
- K10 Keum, D.K., I. Jun, K.M. Lim et al. Radiation dose to human and non-human biota in the Republic of Korea resulting from the Fukushima nuclear accident. *Nucl Eng Technol* 45(1): 1-12 (2013).
- K11 Kikuchi, H. Iodine prophylaxis for emergency workers in Fukushima Daiichi NPS of TEPCO. Officially submitted to the UNSCEAR secretariat. Tokyo Electric Power Company, 2013.
- K12 Kim, C.K., J.I. Byun, J.S. Chae et al. Radiological impact in Korea following the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 111: 70-82 (2012).
- K13 Kim, E., O. Kurihara, T. Suzuki et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. The 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. pp.59-66. (O. Kurihara et al., eds.). National Institute of Radiological Sciences, Chiba, 2012.
- K14 Kim, Y., A. Tsutsumi, T. Izutsu et al. Persistent distress after psychological exposure to the Nagasaki atomic bomb explosion. *Br J Psychiatry* 199(5): 411-416 (2011).
- K15 Kinoshita, N., K. Sueki, K. Sasa et al. Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan. *Proc Natl Acad Sci U S A* 108(49): 19526-19529 (2011).
- K16 Kirchner, G., P. Bossew and M. De Cort. Radioactivity from Fukushima Dai-ichi in air over Europe; part 2: what can it tell us about the accident? *J Environ Radioact* 114: 35-40 (2012).
- K17 Knetsch, G.J., ed. Environmental radioactivity in the Netherlands - Results in 2011. RIVM Report 610891004. National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, 2013.
- K18 Kobayashi, T., H. Nagai, M. Chino et al. Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations. *J Nucl Sci Technol* 50(3): 255-264 (2013).

- K19 Koizumi, A., K.H. Harada, T. Niisoe et al. Preliminary assessment of ecological exposure of adult residents in Fukushima Prefecture to radioactive cesium through ingestion and inhalation. *Environ Health Prev Med* 17(4): 292-298 (2012).
- K20 Korsakissok, I., D. Didier, A. Mathieu et al. Evaluation of the atmospheric releases of the Fukushima accident and their consequences. Rapport IRSN/PRP-CRI/SESUC/2012-35. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, 2011.
- K21 Kritidis, P., H. Florou, K. Eleftheriadis et al. Radioactive pollution in Athens, Greece due to the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 114: 100-104 (2012).
- K22 Krivoruchko, K. *Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users*. Esri Press, Redlands, CA, 2011.
- K23 Kryshev, A.I. and I.N. Ryabov. A dynamic model of ¹³⁷Cs accumulation by fish of different age classes. *J Environ Radioact* 50(3): 221-233 (2000).
- K24 Kryshev, I.I. and T.G. Sazykina. *Mathematical Modeling of Radionuclide Migration in Aquatic Ecosystems*. Energoatomizdat, Moscow, 1986. (Russian).
- K25 Kryshev, I.I. and T.G. Sazykina. Evaluation of the irradiation dose rate for marine biota in the region of the destroyed Fukushima reactor (Japan) in March–May 2011. *Atomic Energy* 111(1): 55-60 (2011).
- K26 Kubzansky, L.D., K.C. Koenen, A. Spiro 3rd et al. Prospective study of posttraumatic stress disorder symptoms and coronary heart disease in the Normative Aging Study. *Arch Gen Psychiatry* 64(1): 109-116 (2007).
- K27 Kurihara, O., K. Kanai, T. Nakagawa et al. Measurements of ¹³¹I in the thyroids of employees involved in the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J Nucl Sci Technol* 50(2): 122-129 (2013).
- L1 Land, C.E., Z. Zhumadilov, B.I. Gusev et al. Ultrasound-detected thyroid nodule prevalence and radiation dose from fallout. *Radiat Res* 169(4): 373-383 (2008).
- L2 Larsen, P.R., R.A. Conard, K.D. Knudsen et al. Thyroid hypofunction after exposure to fallout from a hydrogen bomb explosion. *JAMA* 247(11): 1571-1575 (1982).
- L3 Larsson, C.M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants. *J Environ Radioact* 99(9): 1364-1370 (2008).
- L4 Le Petit, G., G. Douysset, G. Ducros et al. Analysis of radionuclide releases from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident Part I. *Pure Appl Geophys*: 1-16 (2012).
- L5 Leggett, R.W. A physiological systems model for iodine for use in radiation protection. *Radiat Res* 174(4): 496-516 (2010).
- L6 Lifton, R.J. *Death in Life: Survivors of Hiroshima*. Random House Inc, New York, 1967.
- L7 Linkov, I. and D. Burmistrov. Model uncertainty and choices made by modelers: lessons learned from the International Atomic Energy Agency model intercomparisons. *Risk Anal* 23(6): 1297-1308 (2003).
- L8 Little, M.P. A review of non-cancer effects, especially circulatory and ocular diseases. *Radiat Environ Biophys* 52(4): 435-449 (2013).
- L9 Loaiza, P., V. Brudanin, F. Piquemal et al. Air radioactivity levels following the Fukushima reactor accident measured at the Laboratoire Souterrain de Modane, France. *J Environ Radioact* 114: 66-70 (2012).

- L10 Loganovsky, K., J.M. Havenaar, N.L. Tintle et al. The mental health of clean-up workers 18 years after the Chernobyl accident. *PsycholMed* 38(4): 481-488 (2008).
- L11 Loganovsky, K.N. and T.K. Loganovskaja. Schizophrenia spectrum disorders in persons exposed to ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident. *Schizophr Bull* 26(4): 751-773 (2000).
- L12 Loganovsky, K.N. and K.L. Yuryev. EEG patterns in persons exposed to ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident. Part 2: quantitative EEG analysis in patients who had acute radiation sickness. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci* 16(1): 70-82 (2004).
- L13 Long, N.Q., Y. Truong, P.D. Hien et al. Atmospheric radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear reactor accident observed in Vietnam. *J Environ Radioact* 111(0): 53-58 (2012).
- L14 Lujanienė, G., S. Bycenkienė, P.P. Povinec et al. Radionuclides from the Fukushima accident in the air over Lithuania: measurement and modelling approaches. *J Environ Radioact* 114: 71-80 (2012).
- M1 Mabuchi, K., M. Hatch, M.P. Little et al. Risk of thyroid cancer after adult radiation exposure: time to re-assess? *Radiat Res* 179(2): 254-256 (2013).
- M2 MacMullin, S., G.K. Giovanetti, M.P. Green et al. Measurement of airborne fission products in Chapel Hill, NC, USA from the Fukushima Dai-ichi reactor accident. *J Environ Radioact* 112: 165-170 (2012).
- M3 Manolopoulou, M., E. Vagena, S. Stoulos et al. Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 102(8): 796-797 (2011).
- M4 Masson, O., A. Baeza, J. Bieringer et al. Tracking of airborne radionuclides from the damaged Fukushima Dai-ichi nuclear reactors by European networks. *Environ Sci Technol* 45(18): 7670-7677 (2011).
- M5 Masumoto, Y., Y. Miyazawa, D. Tsumune et al. Oceanic dispersion simulations of ¹³⁷Cs released from the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Elements* 8(3): 207-212 (2012).
- M6 Mathieu, A., I. Korsakissok, D. Quélo et al. Atmospheric dispersion and deposition of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Elements* 8(3): 195-200 (2012).
- M7 Matsuishi, T., M. Nagano, Y. Araki et al. Scale properties of the Japanese version of the Strengths and Difficulties Questionnaire (SDQ): a study of infant and school children in community samples. *Brain Dev* 30(6): 410-415 (2008).
- M8 Matsuoka, Y., D. Nishi, N. Nakaya et al. Concern over radiation exposure and psychological distress among rescue workers following the Great East Japan Earthquake. *BMC Public Health* 12: 249 (2012).
- M9 Metso, S., P. Jaatinen, H. Huhtala et al. Long-term follow-up study of radioiodine treatment of hyperthyroidism. *Clin Endocrinol (Oxf)* 61(5): 641-648 (2004).
- M10 Mettler Jr., F.A. and A.C. Upton. Cancer induction and dose-response models. pp.73-112 in: *Medical Effects of Ionizing Radiation*, Second edition. (F.A. Mettler Jr. and A.C. Upton, eds.). Philadelphia, Saunders, 1995.
- M11 MEXT. Result of waters monitoring by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. [Internet] Available from (<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/238/list-1.html>) on 19 February 2013. (Japanese).

- M12 MEXT. Radiation dose distribution. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. [Internet] Available from (<http://ramap.jmc.or.jp/map>) on 6 December 2013. (Japanese).
- M13 MEXT. Results of analyses of radionuclides (Cs-134 and Cs-137) in soil. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. [Internet] Available from (http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/017/shiryo/___icsFiles/afiedfile/2011/09/02/1310688_1.pdf) on 12 January 2013. (Japanese).
- M14 MHLW. Review meeting on the long-term health management of emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, 26 September 2011. (Grand design of the long term health management system). Ministry of Health, Labour and Welfare. [Internet] Available from (<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001plbx.html>) on 1 October 2011. (Japanese).
- M15 MHLW. Provisional regulation values of radioactive materials in food in accordance with Food Sanitation Act. Ministry of Health, Labour and Welfare. [Internet] Available from (<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/foodsafety/dl/110318-1.pdf>) on 4 December 2012.
- M16 MHLW. Press release (July 5, 2013): Results of re-evaluation of internal radiation exposure dose to emergency workers in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Ministry of Health, Labour and Welfare. [Internet] Available from (http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/internal_re-evaluation_OV.pdf) on 22 December 2013.
- M17 MHLW. Press release (5 July 2013): Results of re-evaluation of committed dose of emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Ministry of Health, Labour and Welfare. [Internet] Available from (http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcu/rp/pr_130705.html) on 6 July 2013.
- M18 MHLW. Re-evaluation results of committed doses for emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Ministry of Health, Labour and Welfare. [Internet] Available from (http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcu/rp/pr_130705_a02.pdf) on 5 July 2013.
- M19 MIC. The basic information about the population census for 2010 in Japan. Ministry of Internal Affairs and Communications. [Internet] Available from (<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/special/english/index.htm>) on 6 December 2012.
- M20 MIC. 2011 Survey on time use and leisure activities. Table no. 2: Average time spent on activities for all persons, for participants and participation rate by day of the week, sex, usual economic activity and life stage. Ministry of Internal Affairs and Communications. [Internet] Available from (<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/ListE.do?bid=000001040667&cycode=0>) on 6 December 2012.
- M21 MIC. Situation report on the 2011 Great East-Japan Earthquake (1 September 2013). Ministry of Internal Affairs and Communication. [Internet] Available from (http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h25/2509/250909_1houdou/01_houdoushiryu.pdf) on 17 October 2013. (Japanese).
- M22 Møller, A.P., A. Hagiwara, S. Matsui et al. Abundance of birds in Fukushima as judged from Chernobyl. *Environ Pollut* 164: 36-39 (2012).
- M23 Møller, A.P., I. Nishiumi, H. Suzuki et al. Differences in effects of radiation on abundance of animals in Fukushima and Chernobyl. *Ecol Indicators* 24(0): 75-81 (2013).
- M24 Momose, T., C. Takada, T. Nakagawa et al. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. The 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. pp.67-82. (O. Kurihara et al., eds.). National Institute of Radiological Sciences, Chiba, 2012.

- M25 Morino, Y., T. Ohara and M. Nishizawa. Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011. *Geophys Res Lett* 38(7): L00G11 (2011).
- M26 Murakami, M. and T. Oki. Estimation of thyroid doses and health risks resulting from the intake of radioactive iodine in foods and drinking water by the citizens of Tokyo after the Fukushima nuclear accident. *Chemosphere* 87(11): 1355-1360 (2012).
- N1 Nagataki, S. Thyroid consequences of the Fukushima nuclear reactor accident. *Eur Thyroid J* 1(3): 148-158 (2012).
- N2 NAIIC. The official report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. The National Diet of Japan, Tokyo, 2012.
- N3 Nakano, M. and P.P. Povinec. Long-term simulations of the ¹³⁷Cs dispersion from the Fukushima accident in the world ocean. *J Environ Radioact* 111: 109-115 (2012).
- N4 NCRP. Risk to the thyroid from ionizing radiation. NCRP Report No. 159. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 2008.
- N5 NCRP. Preconception and prenatal radiation exposure: Health effects and protective guidance. NCRP Report No. 174. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 2013.
- N6 NERHQ. Roadmap towards settlement of the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, TEPCO. Step 2 completion report. Nuclear Emergency Response Headquarters, Government-TEPCO Integrated Response Office. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/111216e4.pdf) on 15 December 2012.
- N7 NERHQ. Additional report of the Japanese Government to the IAEA - The accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report). Nuclear Emergency Response Headquarters. [Internet] Available from (<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report2/japan-report120911.pdf>) on 31 January 2012.
- N8 NERHQ. Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety. The accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. Nuclear Emergency Response Headquarters. [Internet] Available from (<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report>) on 6 October 2011.
- N9 Neria, Y., A. Nandi and S. Galea. Post-traumatic stress disorder following disasters: a systematic review. *PsycholMed* 38(4): 467-480 (2008).
- N10 NIRS. External dose estimation. National Institute of Radiological Sciences. [Internet] Available from (<http://www.nirs.go.jp/data/pdf/nirsdose.pdf>) on 31 July 2013. (Japanese).
- N11 NIRS. The 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. (O. Kurihara et al., eds.). National Institute of Radiological Sciences, Chiba, 2012.
- N12 NIRS. MONDAL3 – Support system for internal dosimetry. National Institute of Radiological Sciences. [Internet] Available from (<http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/RPD/mondal3.php>) on 18 January 2013.
- N13 NISA. INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) rating on the events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku district - off the Pacific Ocean earthquake, April 12, 2011. Nuclear and Industrial Safety Agency, Ministry of Economy, Trade and Industry. [Internet] Available from (http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/files/en2011_0412-4.pdf) on 6 December 2013.

- N14 NISA. Regarding the evaluation of the conditions on reactor cores of Unit 1, 2 and 3 related to the accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Co. Inc. Nuclear and Industrial Safety Agency, Ministry of Economy, Trade and Industry. [Internet] Available from (<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/press/2011/06/en20110615-5.pdf>) on 17 February 2012.
- N15 Nishihara, K., I. Yamagishi, K. Yasuda et al. Radionuclide release to stagnant water in Fukushima-1 Nuclear Power Plant. Transactions of the Atomic Energy Society of Japan 11(1): 13-19 (2012). (Japanese).
- N16 Nishihara, K., H. Iwamoto and K. Suyama. Estimation of fuel compositions in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant. JAEA-Data/Code 2012-018. Japan Atomic Energy Agency, Tokaimura, 2012.
- N17 NOAA. World Meteorological Organization (WMO) Atmospheric Dispersion Model Simulations of Fukushima Daiichi Accident. U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration. [Internet] Available from (http://ready.arl.noaa.gov/READY_fdnpwmo.php) on 18 June 2013.
- N18 NRA. Monitoring information of environmental radioactivity level. Nuclear Regulation Authority. [Internet] Available from (<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/>) on 4 February 2013.
- N19 NRA. Readings of sea area monitoring. Nuclear Regulation Authority. [Internet] Available from (<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/205/list-1.html>) on 31 December 2013.
- N20 NRA. Sea area monitoring. Nuclear Regulation Authority. [Internet] Available from (<http://www.iaea.org/newscenter/news/2013/seamonitoring031213.pdf>) on 4 December 2013.
- N21 NRA. Monitoring information of environmental radioactivity level. Sea area monitoring (weekly report). Nuclear Regulation Authority. [Internet] Available from (<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/295/list-1.html>) on 2 December 2013.
- N22 NRC. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII - Phase 2. National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., 2006.
- N23 NSRA. Radiation in living environment - National dose in Japan. Nuclear Safety Research Association, Tokyo, 2012. (Japanese).
- O1 Oatway, W.B., J.R. Simmonds and J.D. Harrison. Guidance on the application of dose coefficients for the embryo, fetus and breastfed infant in dose assessments for members of the public. RCE-5. Health Protection Agency, Chilton, 2008.
- O2 Ohkura, T., T. Oishi, M. Taki et al. Emergency monitoring of environmental radiation and atmospheric radionuclides at Nuclear Science Research Institute, JAEA following the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. JAEA-Data/Code 2012-010. Japan Atomic Energy Agency, Tokaimura, 2012.
- O3 Ohnishi, T. The disaster at Japan's Fukushima-Daiichi nuclear power plant after the March 11, 2011 earthquake and tsunami, and the resulting spread of radioisotope contamination. Radiat Res 177(1): 1-14 (2012).
- O4 Ohta, Y., M. Mine, M. Wakasugi et al. Psychological effect of the Nagasaki atomic bombing on survivors after half a century. Psychiatry Clin Neurosci 54(1): 97-103 (2000).
- O5 Olsen, Y.S. and J. Vives i Batlle. A model for the bioaccumulation of (99)Tc in lobsters (Homarus gammarus) from the West Cumbrian coast. J Environ Radioact 67(3): 219-233 (2003).

- O6 Ostroumova, E., A. Brenner, V. Oliynyk et al. Subclinical hypothyroidism after radioiodine exposure: Ukrainian-American cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the Chernobyl accident (1998-2000). *Environ Health Perspect* 117(5): 745-750 (2009).
- O7 Otosaka, S. and T. Kobayashi. Sedimentation and remobilization of radiocesium in the coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Environ Monit Assess* 185(7): 5419-5433 (2013).
- O8 Ozasa, K., Y. Shimizu, A. Suyama et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res* 177(3): 229-243 (2012).
- P1 Paatero, J., J. Vira, M. Siitari-Kauppi et al. Airborne fission products in the High Arctic after the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 114: 41-47 (2012).
- P2 Pentreath, R.J. A system for radiological protection of the environment: some initial thoughts and ideas. *J Radiol Prot* 19(2): 117-128 (1999).
- P3 Periañez, R., K.S. Suh and B.I. Min. Local scale marine modelling of Fukushima releases. Assessment of water and sediment contamination and sensitivity to water circulation description. *Mar Pollut Bull* 64(11): 2333-2339 (2012).
- P4 Perrot, F., P. Hubert, C. Marquet et al. Evidence of ^{131}I and $(^{134}, ^{137})\text{Cs}$ activities in Bordeaux, France due to the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 114: 61-65 (2012).
- P5 Peters, H., C. Fischer, U. Bogner et al. Radioiodine therapy of Graves' hyperthyroidism: standard vs. calculated ^{131}I activity. Results from a prospective, randomized, multicentre study. *Eur J Clin Invest* 25(3): 186-193 (1995).
- P6 Petoussi-Henss, N., H. Schlattl, M. Zankl et al. Organ doses from environmental exposures calculated using voxel phantoms of adults and children. *Phys Med Biol* 57(18): 5679-5713 (2012).
- P7 Pham, M.K., M. Eriksson, I. Levy et al. Detection of Fukushima Daiichi nuclear power plant accident radioactive traces in Monaco. *J Environ Radioact* 114: 131-137 (2012).
- P8 Pilz, J., H. Kazianka and G. Spöck. Some advances in Bayesian spatial prediction and sampling design. *Spatial Statistics* 1: 65-81 (2012).
- P9 Pinero Garcia, F. and M.A. Ferro Garcia. Traces of fission products in southeast Spain after the Fukushima nuclear accident. *J Environ Radioact* 114: 146-151 (2012).
- P10 Pittauerova, D., B. Hettwig and H.W. Fischer. Fukushima fallout in Northwest German environmental media. *J Environ Radioact* 102(9): 877-880 (2011).
- P11 Polyukhov, A.M., I.V. Kobsar, V.I. Grebelsnik et al. The accelerated occurrence of age-related changes of organism in Chernobyl workers: a radiation-induced progeroid syndrome? *Exp Gerontol* 35(1): 105-115 (2000).
- P12 Povinec, P.P., K. Hirose and M. Aoyama. Radiostromium in the western North Pacific: characteristics, behavior, and the Fukushima impact. *Environ Sci Technol* 46(18): 10356-10363 (2012).
- P13 Povinec, P.P., I. Sykora, K. Holy et al. Aerosol radioactivity record in Bratislava/Slovakia following the Fukushima accident - a comparison with global fallout and the Chernobyl accident. *J Environ Radioact* 114: 81-88 (2012).
- P14 Preston, D.L., A. Mattsson, E. Holmberg et al. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts. *Radiat Res* 158(2): 220-235 (2002).

- P15 Preston, D.L., E. Ron, S. Tokuoka et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat Res* 168(1): 1-64 (2007).
- P16 Preston, D.L., H. Cullings, A. Suyama et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors exposed in utero or as young children. *J Natl Cancer Inst* 100(6): 428-436 (2008).
- R1 Rahu, K., M. Rahu, M. Tekkel et al. Suicide risk among Chernobyl cleanup workers in Estonia still increased: an updated cohort study. *Ann Epidemiol* 16(12): 917-919 (2006).
- R2 Rahu, K., A. Auvinen, T. Hakulinen et al. Chernobyl cleanup workers from Estonia: follow-up for cancer incidence and mortality. *J Radiol Prot* 33(2): 395-411 (2013).
- R3 Rahu, M., M. Tekkel, T. Veidebaum et al. The Estonian study of Chernobyl cleanup workers: II. Incidence of cancer and mortality. *Radiat Res* 147(5): 653-657 (1997).
- R4 Reiniers, C. Thyroid cancer in 2013: Advances in our understanding of differentiated thyroid cancer. *Nat Rev Endocrinol* 10(2): 69-70 (2013).
- R5 Richardson, D.B. Exposure to ionizing radiation in adulthood and thyroid cancer incidence. *Epidemiology* 20(2): 181-187 (2009).
- R6 Romanenko, A.Y., S.C. Finch, M. Hatch et al. The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: III. Radiation risks. *Radiat Res* 170(6): 711-720 (2008).
- R7 Ron, E. and A. Brenner. Non-malignant thyroid diseases after a wide range of radiation exposures. *Radiat Res* 174(6): 877-888 (2010).
- S1 Safecast. SAFECAST MAP. [Internet] Available from (<http://blog.safecast.org/maps/>) on 12 January 2013.
- S2 Sato, O., S. Nonaka and J.I. Tada. Intake of radioactive materials as assessed by the duplicate diet method in Fukushima. *J Radiol Prot* 33(4): 823-838 (2013).
- S3 Saunier, O., A. Mathieu, D. Didier et al. An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima Nuclear Power Plant accident using gamma dose rate observations. *Atmos. Chem. Phys.* 13(22): 11403-11421 (2013).
- S4 Sazykina, T.G. ECOMOD — An ecological approach to radioecological modelling. *J Environ Radioact* 50(3): 207-220 (2000).
- S5 Schollnberger, H., J.C. Kaiser, P. Jacob et al. Dose-responses from multi-model inference for the non-cancer disease mortality of atomic bomb survivors. *Radiat Environ Biophys* 51(2): 165-178 (2012).
- S6 Sekiya, T. Progress on offsite cleanup efforts in Japan. Side event by Government of Japan at 56th IAEA General Conference, Vienna, 17 September 2012. Nuclear Regulation Authority. [Internet] Available from (<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/files/P-2-1.pdf>) on 6 May 2013.
- S7 Shigemura, J., T. Tanigawa, I. Saito et al. Psychological distress in workers at the Fukushima nuclear power plants. *JAMA* 308(7): 667-669 (2012).
- S8 Shigemura, J., T. Tanigawa, S.Y. Sano et al. Psychological trauma risks among disaster workers: perspectives on their mental health following the Great East Japan Earthquake. *Seishin Shinkeigaku Zasshi* 114(11): 1267-1273 (2012). (Japanese).
- S9 Shimizu, Y., K. Kodama, N. Nishi et al. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. *Br Med J* 340: b5349 (2010).

- S10 Sinclair, L.E., H.C. Seywerd, R. Fortin et al. Aerial measurement of radionuclide concentration off the west coast of Vancouver Island following the Fukushima reactor accident. *J Environ Radioact* 102(11): 1018-1023 (2011).
- S11 Stohl, A., P. Seibert, G. Wotawa et al. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos Chem Phys* 12(5): 2313-2343 (2012).
- S12 Sugiyama, G., J. Nasstrom, B. Pobanz et al. Atmospheric dispersion modeling: challenges of the Fukushima Daiichi response. *Health Phys* 102(5): 493-508 (2012).
- S13 Suzuki, T., T. Nakano and E. Kim. Development of integrated whole body counter. *Radiat Prot Dosim* 127(1-4): 297-302 (2007).
- S14 Swift, D.J. The accumulation of plutonium by the European lobster (*Homarus gammarus* L.). *J Environ Radioact* 16(1): 1-24 (1992).
- T1 Tagami, K., S. Uchida, Y. Uchihori et al. Specific activity and activity ratios of radionuclides in soil collected about 20 km from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Radionuclide release to the south and southwest. *Sci Total Environ* 409(22): 4885-4888 (2011).
- T2 Tagami, K., S. Uchida, N. Ishii et al. Estimation of Te-132 distribution in Fukushima Prefecture at the early stage of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant reactor failures. *Environ Sci Technol* 47(10): 5007-5012 (2013).
- T3 Takahara, S., M. Iijima, K. Shimada et al. Assessment of radiation doses to the public in areas contaminated by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. pp.212-220 in: *Proceedings of International Symposium on Environmental Monitoring and Dose Estimation of Residents after Accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*, Shiran Hall, Kyoto, 14 December 2012. Japan Atomic Energy Agency, Tokaimura, 2012.
- T4 Tanigawa, K., Y. Hosoi, N. Hirohashi et al. Loss of life after evacuation: lessons learned from the Fukushima accident. *Lancet* 379(9819): 889-891 (2012).
- T5 Taniguchi, N., N. Hayashida, H. Shimura et al. Ultrasonographic thyroid nodular findings in Japanese children. *J Med Ultrasonics* 40(3): 219-224 (2013).
- T6 TEPCO. Results of monitoring at Fukushima-Daiichi nuclear power station. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110528e14.pdf) on 14 December 2012.
- T7 TEPCO. Press releases (several): The results of nuclide analyses of radioactive materials in the air at the site of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/index1103-e.html>) on 17 December 2013.
- T8 TEPCO. Press release (Nov 30, 2011): Evaluation status of internal exposure dose of emergency workers. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11113013-e.html>) on 11 April 2013.
- T9 TEPCO. Press release (June 10, 2011): Status of improvement on working environment of workers in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Attachment 2: About cool vest). Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061013-e.html>) on 11 June 2011.
- T10 TEPCO. Dose estimation for three workers whose feet were exposed from contaminated water. Officially submitted to the UNSCEAR secretariat. Tokyo Electric Power Company, 2012.

- T11 TEPCO. Fukushima nuclear accident analysis report. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu12_e/images/120620e010_4.pdf) on 20 June 2012.
- T12 TEPCO. Radiation dose measured at monitoring post of Fukushima Daiichi nuclear power station. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/fl/index-e.html>) on 31 December 2013.
- T13 TEPCO. Press release (May 24, 2012): Attachment: Estimation of the released amount of radioactive materials into the atmosphere as a result of the accident in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Estimation made as of May 2012). Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu12_e/images/120524e0201.pdf) on 6 December 2013.
- T14 TEPCO. Press release (August 13, 2012): Report on the APD misuse by TEPCO subcontractor at Fukushima Daiichi nuclear power station to the Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) of the Ministry of Economy, Trade and Industry. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2012/1211803_1870.html) on 4 December 2012.
- T15 TEPCO. Press release (May 24, 2012): Attachment: Result of estimation of the released amount of radioactive materials into the ocean (in the vicinity of a port) as a result of the accident in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Estimation made as of May 2012). Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu12_e/images/120524e0202.pdf) on 6 October 2013.
- T16 TEPCO. Press release (Nov 30, 2012): Exposure dose evaluation of the workers at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2012/1223443_1870.html) on 4 May 2013.
- T17 TEPCO. Press release (December 13, 2013): First progress report: The results of the investigation and examining on the unidentified and unsolved matters of the Fukushima nuclear accident. Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2013/1233101_5130.html) on 14 December 2013.
- T18 TEPCO. Nuclide analysis results of fish and shellfish (The ocean area within 20 km radius of Fukushima Daiichi NPS). Tokyo Electric Power Company. [Internet] Available from (http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/fl/smp/2013/images/fish_130315-e.pdf) on 4 July 2013.
- T19 Terada, H., G. Katata, M. Chino et al. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. J Environ Radioact 112: 141-154 (2012).
- T20 Tokonami, S., M. Hosoda, S. Akiba et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. Scientific Reports 2(507): 1-4 (2012).
- T21 Tokyo Metropolitan Government. Radionuclides in air dust samples. [Internet] Available from (<http://www.metro.tokyo.jp/INET/CHOUSA/2011/12/DATA/60lcq101.pdf>) on 24 December 2012. (Japanese).
- T22 Tositti, L., E. Brattich, G. Cinelli et al. Comparison of radioactivity data measured in PM10 aerosol samples at two elevated stations in northern Italy during the Fukushima event. J Environ Radioact 114: 105-112 (2012).
- T23 Tronko, M.D., G.R. Howe, T.I. Bogdanova et al. A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the Chornobyl accident: thyroid cancer in Ukraine detected during first screening. J Natl Cancer Inst 98(13): 897-903 (2006).

- T24 Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama et al. Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *J Environ Radioact* 111: 100-108 (2012).
- U1 Ulanovsky, A. and G. Prohl. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. *Radiat Environ Biophys* 45(3): 203-214 (2006).
- U2 Ulanovsky, A., G. Prohl and J.M. Gomez-Ros. Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota. *J Environ Radioact* 99(9): 1440-1448 (2008).
- U3 Ulanovsky, A., P. Jacob, S. Fesenko et al. ReSCA: decision support tool for remediation planning after the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys* 50(1): 67-83 (2011).
- U4 UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1988 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations sales publication E.88.IX.7. United Nations, New York, 1988.
- U5 UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.94.IX.2. United Nations, New York, 1993.
- U6 UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1996 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1996 Report to the General Assembly, with scientific annex. United Nations sales publication E.96.IX.3. United Nations, New York, 1996.
- U7 UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Effects. UNSCEAR 2000 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.00.IX.4. United Nations, New York, 2000.
- U8 UNSCEAR. Hereditary Effects of Radiation. UNSCEAR 2001 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2001 Report to the General Assembly, with scientific annex. United Nations sales publication E.01.IX.2. United Nations, New York, 2001.
- U9 UNSCEAR. Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2006 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.08.IX.6. United Nations, New York, 2008.
- U10 UNSCEAR. Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. UNSCEAR 2006 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.09.IX.5. United Nations, New York, 2009.
- U11 UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources. Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.10.XI.3. United Nations, New York, 2010.
- U12 UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Effects. Scientific Annexes C, D and E. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.11.IX.3. United Nations, New York, 2011.
- U13 UNSCEAR. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010. UNSCEAR 2010 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects

- of Atomic Radiation. United Nations sales publication M.II.IX.4. United Nations, New York, 2011.
- U14 UNSCEAR. Uncertainties in risk estimates for cancer due to exposure to ionizing radiation (A/AC.82/R.687). Document for the UNSCEAR 59th Session, Vienna, 21-25 May 2012. Distr. Restricted. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2012.
- U15 UNSCEAR. Biological Mechanisms of Radiation Actions at Low Doses. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. [Internet] Available from (http://www.unscear.org/docs/reports/Biological_mechanisms_WP_12-57831.pdf) on 1 June 2013.
- U16 UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume II: Scientific Annex B. UNSCEAR 2013 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.14.IX.2. United Nations, New York, 2013.
- U17 USDOE. US DOE/NNSA Response to 2011 Fukushima Incident - raw aerial data and extracted ground exposure. US Department of Energy. [Internet] Available from (<https://explore.data.gov/d/prm-6s35>) on 21 March 2013.
- V1 Viel, J.F., E. Curbakova, B. Dzerve et al. Risk factors for long-term mental and psychosomatic distress in Latvian Chernobyl liquidators. *Environ Health Perspect* 105(Suppl 6): 1539-1544 (1997).
- V2 Viinamäki, H., E. Kumpusalo, M. Myllykangas et al. The Chernobyl accident and mental wellbeing - a population study. *Acta Psychiatr Scand* 91(6): 396-401 (1995).
- V3 Vives i Batlle, J., R.C. Wilson, P. McDonald et al. A biokinetic model for the uptake and depuration of radioiodine by the edible periwinkle *Littorina littorea*. pp. 449-462 in: *Radioactivity in the Environment*. (P. Povinec and J.A. Sanchez-Cabeza, eds.). Elsevier Ltd, 2006.
- V4 Vives i Batlle, J., R.C. Wilson, S.J. Watts et al. Dynamic model for the assessment of radiological exposure to marine biota. *J Environ Radioact* 99(11): 1711-1730 (2008).
- V5 Von Korff, M.R., K.M. Scott and O. Gureje, eds. *Global Perspectives on Mental-Physical Comorbidity in the WHO World Mental Health Surveys*. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- W1 Wada, K., T. Yoshikawa, T. Hayashi et al. Emergency response technical work at Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: occupational health challenges posed by the nuclear disaster. *Occup Environ Med* 69(8): 599-602 (2012).
- W2 Wakeford, R. Childhood leukaemia following medical diagnostic exposure to ionizing radiation in utero or after birth. *Radiat Prot Dosim* 132(2): 166-174 (2008).
- W3 Wakeford, R. The silver anniversary of the Chernobyl accident. Where are we now? *J Radiol Prot* 31(1): 1-7 (2011).
- W4 Wakeford, R. And now, Fukushima. *J Radiol Prot* 31(2): 167-176 (2011).
- W5 Wakeford, R. The risk of childhood leukaemia following exposure to ionising radiation - a review. *J Radiol Prot* 33(1): 1-25 (2013).
- W6 Weathers, F.W., B.T. Litz, J.A. Huska et al. *PTSD Checklist - Civilian version (PCL-C)*. National Center for PTSD, Behavioral Science Division, Boston, 1994.
- W7 Webb, C.P., E.J. Bromet, N.L. Tintle et al. Smoking initiation and nicotine dependence symptoms in Ukraine: findings from the Ukraine World Mental Health survey. *Public Health* 121(9): 663-672 (2007).

- W8 Wetherbee, G.A., D.A. Gay, T.M. Debey et al. Wet deposition of fission-product isotopes to North America from the Fukushima Dai-ichi incident, March 2011. *Environ Sci Technol* 46(5): 2574-2582 (2012).
- W9 WHO. Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group “Health”. (B. Bennett et al., eds.). World Health Organization, Geneva, 2006.
- W10 WHO. Use of potassium iodide for thyroid protection during nuclear or radiological emergencies. World Health Organization. [Internet] Available from (http://www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/tech_briefings/potassium_iodide/en/index.html) on 8 May 2012.
- W11 WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, 2012.
- W12 WHO. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation. World Health Organization, Geneva, 2013.
- W13 Wilson, R.C., J. Vives i Batlle, P. McDonald et al. Uptake and depuration of ¹³¹I by the edible periwinkle *Littorina littorea*: uptake from labelled seaweed (*Chondrus crispus*). *J Environ Radioact* 80(3): 259-271 (2005).
- W14 Wilson, R.C., J. Vives i Batlle, S.J. Watts et al. Uptake and depuration of ¹³¹I from labelled diatoms (*Skeletonema costatum*) to the edible periwinkle (*Littorina littorea*). *J Environ Radioact* 96(1-3): 75-84 (2007).
- W15 Winiarek, V., M. Bocquet, O. Saunier et al. Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant. *J Geophys Res* 117(D5): 1-16 (2012).
- W16 WMO. Meeting of the WMO Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Geneva, 30 November–2 December 2011. Final report. World Meteorological Organization. [Internet] Available from (http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FinalRep_TT_FDnpp_v6.pdf) on 4 August 2013.
- W17 WMO. Meeting of the WMO Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, London, 1-3 May 2012. Final report. World Meteorological Organization. [Internet] Available from (www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FinalReport_TTMetAnalyFDnpp.pdf) on 20 June 2012.
- W18 WMO. Third meeting of WMO Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Vienna, 3-5 December 2012. Final Report. World Meteorological Organization. [Internet] Available from (<http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/FINAL-REPORT-Vienna-Dec2012.pdf>) on 31 May 2013.
- Y1 Yamada, M. and S. Izumi. Psychiatric sequelae in atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki two decades after the explosions. *Soc Psychiatry Psychiatr Epidemiol* 37(9): 409-415 (2002).
- Y2 Yamaguchi, I. Radioactive concentration of food caused by Fukushima nuclear power plant disaster and new radiological standards for foodstuffs in the existing exposure situation in Japan after a severe nuclear accident. *Jpn J Health Phys* 47(2): 144-147 (2012).
- Y3 Yang, W. and L. Guo. Depositional fluxes and residence time of atmospheric radioiodine (¹³¹I) from the Fukushima accident. *J Environ Radioact* 113: 32-36 (2012).
- Y4 Yasumura, S. Newsmaker interview: Seiji Yasumura. Fukushima begins 30-year odyssey in radiation health. Interview by Dennis Normile. *Science* 333(6043): 684-685 (2011).

- Y5 Yasumura, S., M. Hosoya, S. Yamashita et al. Study protocol for the Fukushima Health Management Survey. *J Epidemiol* 22(5): 375-383 (2012).
- Y6 Yasumura, S., A. Goto, S. Yamazaki et al. Excess mortality among relocated institutionalized elderly after the Fukushima nuclear disaster. *Public Health* 127(2): 186-188 (2013).
- Y7 Yokogawa, T., K. Takahashi, T. Nagata et al. Suboptimal radiation protection for municipal employees operating in the Fukushima designated zone. *Occup Environ Med* 69(6): 453-454 (2012).
- Y8 Yoshizawa, Y. and T. Kusama. Weight, iodine content and iodine uptake of the thyroid gland of normal Japanese. *Jpn J Health Phys* 11(2): 123-128 (1976). (Japanese).
- Z1 Zablotska, L.B., T.I. Bogdanova, E. Ron et al. A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the Chernobyl accident: dose-response analysis of thyroid follicular adenomas detected during first screening in Ukraine (1998-2000). *Am J Epidemiol* 167(3): 305-312 (2008).
- Z2 Zablotska, L.B., D. Bazyka, J.H. Lubin et al. Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among chernobyl cleanup workers. *Environ Health Perspect* 121(1): 59-65 (2013).
- Z3 ZAMG. Accident in the Japanese NPP Fukushima: Spread of radioactivity/first source estimates from CTBTO data show large source terms at the beginning of the accident/weather currently not favourable/low level radioactivity meanwhile observed over U.S. East Coast and Hawaii (Update: 22 March 2011 15:00). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. [Internet] Available from (http://www.zamg.ac.at/docs/aktuell/Japan2011-03-22_1500_E.pdf) on 11 April 2013.
- Z4 Zava, T.T. and D.T. Zava. Assessment of Japanese iodine intake based on seaweed consumption in Japan: A literature-based analysis. *Thyroid Res* 4(14): 1-7 (2011).
- Z5 Zheng, J., T. Aono, S. Uchida et al. Distribution of Pu isotopes in marine sediments in the Pacific 30 km off Fukushima after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Geochem J* 46(4): 361-369 (2012).
- Z6 Zvonova, I.A. Dietary intake of stable I and some aspects of radioiodine dosimetry. *Health Phys* 57(3): 471-475 (1989)

この刊行物の内容

第 I 巻

原子放射線の影響に関する国連科学委員会による国連総会報告書

附属書A:

2011年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響

(以下の英文資料はwww.unscear.orgにて公表)

附録 A: データ集

附録 B: 放射性核種の放出、拡散および沈着

附録 C: 公衆の被ばく線量評価

附録 D: 作業者の被ばく線量評価

附録 E: 作業者と公衆の健康影響

附録 F: ヒト以外の生物相での線量と影響の評価

補足資料



情報にもとづく意思決定のための、放射線に関する科学的情報の評価

1955年、国連総会は、電離放射線の人体と環境への影響に対する懸念に応えるため、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)を設置した。当時、大気圏内核兵器実験によって発生した放射性降下物が、大気、水および食物を通じて人々のもとに到達しつつあった。UNSCEARは、電離放射線のレベルと影響に関する情報の収集及び評価のために設けられた。最初の一連の報告書が科学的根拠となり、大気圏核実験を禁止する部分的核実験禁止条約が1963年に調印されている。

以降、数十年を経てUNSCEARは地球規模の原子放射線レベルとその影響に関する世界的権威となるまで発展を遂げた。UNSCEARは科学的情報を独自にかつ客観的に評価するが、その目的は、放射線リスクと防護についての政策決定と意思決定に取り組むことなく、それら決定のための情報を提供することである。