

緊急作業線量の臓器線量構築
に関する検討会報告書

令和5年3月

公益財団法人 放射線影響協会

緊急作業線量の臓器線量構築に関する検討会報告書 概要

公益財団法人放射線影響協会は国の委託を受けて 1990 年から放射線業務従事者の低線量放射線に関する疫学的調査(J-EPISODE)を実施している。このたび放射線影響協会に令和 3～4 (2021～22)年度に設置された有識者で構成される「緊急作業線量の臓器線量構築に関する検討会」が、臓器線量構築に関する報告書を取りまとめた。

J-EPISODE は、2015～2019 年に同意者約 8 万人から成るコホートを再設定し、死亡及びがん罹患の追跡を行っている。線量は放射線影響協会放射線従事者中央登録センターから 1957 年以降の年度別データが提供されている。運転、検査、修理期間中に被ばくした通常作業線量は主に光子外部被ばくであり、これについては、平成 29～30 (2017～18)年度に放射線影響協会に設置された「臓器線量構築検討会」が、2019 年に通常作業線量から臓器吸収線量への換算係数を構築した。

J-EPISODE 参加者約 8 万人の内約 4,000 人は、2011 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う緊急作業に従事していた。すなわち、緊急作業従事者約 2 万人の内、J-EPISODE への参加に同意した者が約 4,000 人であった。

緊急作業中の被ばく線量については、内部被ばくを含むことの他、外部被ばくについても、通常作業とは線源の種類や放射線管理の方法が異なるため、今回、緊急作業線量から臓器吸収線量への換算係数を構築した。今後、緊急作業線量についても臓器線量に換算され、通常作業線量の臓器線量と合算した上で、がん罹患・死亡リスク解析に適用されることになる。

本検討会は原子力規制庁の委託事業の中で実施された。

Reconstruction of Organ Dose from the Fukushima Emergency Work Dose: J-EPISODE

SUMMARY

The Radiation Effects Association (REA) has been conducting the Japanese epidemiological study on low-dose radiation effects among nuclear workers (J-EPISODE) since 1990. The four-member Expert Committee, established by REA in fiscal year 2021–2022, has now prepared a report on Reconstruction of Organ Dose from the Fukushima Emergency Work Dose.

J-EPISODE has reconstructed a cohort of approximately 80,000 consenting individuals from 2015 to 2019 and is tracking deaths and cancer incidence. Dose data since 1957 are provided by the Radiation Dose Registration Center, REA. These are personal dosimeter readings, expressed in $H_p(10)$, for external exposure to photons. For normal work doses exposed during operation, inspection and repair, the Expert Committee on Organ Dose Reconstruction, established in REA in the 2017–2018 fiscal year, constructed conversion factors from dosimeter readings to organ-absorbed doses in 2019.

About 4,000 of the 80,000 J-EPISODE participants were involved in emergency work following the accident at the TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, in March 2011. In other words, out of about 20,000 emergency workers, about 4,000 agreed to participate in J-EPISODE.

Conversion factors from emergency work doses to organ-absorbed doses were developed because the types of radiation sources and radiation control methods for external exposure were different from those for normal work, and because internal exposure was included. In the future, the emergency work doses will also be converted to organ-absorbed doses, which will be added to the organ-absorbed doses of the normal work doses and used for risk analysis of cancer incidence and mortality.

This work was funded by the Nuclear Regulation Authority of the Government of Japan.

緊急作業線量の臓器線量構築に関する検討会報告書

目次

概要	i
Summary	ii
目次	iii
略称リスト	vi
はじめに	1
第1章 背景	
1.1 検討会の経緯	2
1.2 福島第一原子力発電所事故の概要	3
1.3 研究方法	4
第2章 緊急作業被ばく線量	
2.1 資料・方法	
2.1.1 放射線従事者中央登録センターの線量データベース	5
2.1.2 緊急作業者	6
2.1.3 臓器線量への換算プロセス	6
2.1.4 内部被ばくが記録された期間	7
2.1.5 指定解除者放射線管理記録	8
2.1.6 緊急作業線量の外部線量・内部線量への分割	8
2.2 結果	
2.2.1 J-EPISODE に含まれる緊急作業者	10
2.2.2 緊急作業線量分布	10
2.2.2.1 2010年度の線量分布	10
2.2.2.2 2011年度の線量分布	16
2.2.2.3 2010年度と2011年度の外部被ばく線量の関連	17
2.3 データベース間の相違	
2.3.1 東電の線量評価値との誤差	19
2.3.2 NEWSの線量分布との相違	19
2.3.3 NEWSの保有する線量情報との乖離	19

第3章 緊急作業内部被ばく線量の臓器線量推計

3.1 資料・方法

3.1.1 東電による内部被ばく線量評価方法

3.1.1.1 WBCによる測定 20

3.1.1.2 預託実効線量の評価 20

3.1.1.3 急性摂取シナリオに基づく摂取日の設定 21

3.1.2 核種別預託実効線量の推計 22

3.1.2.1 摂取日の代理指標 22

3.1.2.2 摂取核種と体内動態モデル 23

3.1.2.3 空气中濃度比を基にした核種分割方法 29

3.1.2.4 空气中濃度比データ 30

3.1.2.5 組織・臓器別預託等価線量 32

3.1.3 年度別臓器線量 32

3.2 結果

3.2.1 摂取日 35

3.2.1.1 指定年月日の考え方 35

3.2.1.2 摂取日の設定 35

3.2.1.3 2010年度預託実効線量の摂取日の分布 36

3.2.1.4 2011年度預託実効線量の摂取日の分布 36

3.2.2 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 摂取量比 38

3.2.3 実効線量係数 ICRP CD1 38

3.2.4 核種の組成に応じた核種に由来する預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量 40

3.2. 組織・臓器別預託等価線量の分布 40

3.2.5.1 2010年度の線量分布 40

3.2.5.2 2011年度の線量分布 41

3.2.6 預託等価線量から年度線量への変換方法 42

3.2.7 単位預託実効線量当たり年度別結腸吸収線量 43

3.2.7.1 与えられた摂取日の下での年度別結腸吸収線量の推計 43

3.2.7.2 核種の組成に応じた摂取比、摂取日別年度別結腸吸収線量 44

3.2.7.3 摂取日と預託実効線量から年度別組織・臓器吸収線量を推計するコード 45

3.3 内部線量推定の不確かさ

3.3.1 線量評価の不確かさに基づく臓器線量推定の不確かさ 50

3.3.1.1 摂取時期 50

3.3.1.2	空气中放射性物質濃度の測定と評価上の誤差	50
3.3.1.3	評価までの時間及び体内代謝の個体差	51
3.3.1.4	評価方法の多様性	51
3.3.2	急性摂取シナリオの不確かさ	51
3.3.3	短半減期核種 ^{132}Te の欠測による不確かさ	52
第4章 緊急作業外部被ばく線量の臓器線量推計		
4.1	資料・方法	
4.1.1	二元的個人線量計管理と外部被ばく線量の評価	55
4.1.1.1	個人線量計の種類	55
4.1.1.2	代表者運用について照会	55
4.1.1.3	二元的個人線量計管理	56
4.1.1.4	モデル線量	56
4.1.2	臓器線量への変換のプロセス	57
4.1.2.1	個人線量計レスポンス	57
4.1.2.2	光子エネルギー分布	58
4.1.2.3	ジオメトリ	59
4.2	結果	
4.2.1	個人線量計の種類	63
4.2.2	代表者運用の実態	64
4.2.3	モデル線量の実態	64
4.2.4	光子外部被ばく線量計指示値から甲状腺吸収線量への換算係数の推計	65
4.3	外部線量推定の不確かさ	
4.3.1	指定解除記録からの外部線量取得	69
4.3.2	光子エネルギー及びジオメトリ分布の仮定	69
4.3.3	外部被ばく線量分布の不自然さ	69
4.3.4	モデル線量の線量概念による過大評価の可能性	70
4.3.5	モデル線量の一律適用による過大推計の可能性	72
4.3.6	代表者運用	74
第5章 結論・提言		76
参考文献		77

略称リスト

AP	前方-後方ジオメトリ antero-posterior geometry
EPD	電子式個人線量計 electronic personal dosimeter
FB	フィルムバッジ線量計 film badge
FDNPP	福島第一原子力発電所 Fukushima Daiich Nuclear Power Plant
GB	ガラスバッジ線量計 glass badge
$H_p(10)$	個人線量当量 personal dose equivalent where $d=10$ mm
$H^*(10)$	周辺線量当量 ambient dose equivalent where $d=10$ mm
IAEA	国際原子力機関 International Atomic Energy Agency
IARC	国際がん研究機関 International Agency for Research on Cancer
ICRP	国際放射線防護委員会 International Commission on Radiological Protection
INWORKS	仏英米3カ国共同研究 International Nuclear Workers Study
ISO	等方ジオメトリ isotropic geometry
JAEA	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency
J-EPISODE	放射線影響協会が実施している放射線疫学調査 Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects
LB	ルミネスバッジ線量計 Luminess Badge (OSL線量計の商品名、2017年3月以前のルクセルバッジ線量計 Luxel Badge から変更)
LSS	原爆被爆者寿命調査 (放射線影響研究所実施) Life Span Study
MA	混合活動施設 (mixed activities facilities)、NPP以外の施設を指す
MHLW	厚生労働省 Ministry of Health, Labour and Welfare
NEWS	独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 (以前は放射線影響研究所) が実施する「放射線業務従事者の健康影響に関する疫学調査 (旧東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研究) Nuclear Emergency Workers Study」の略称
NPP	原子力発電所、nuclear power plant
OSL dosimeter	光刺激ルミネセンス線量計 optically stimulated luminescence dosimeter、技術名称
RADREC	放射線従事者中央登録センター Radiation Dose Registration Center
ROT	回転ジオメトリ rotational geometry
RCP-AM	標準成人男性ファントム (コーカソイドモデル) Reference Computational Phantom-Adult Male
SIB	免震重要棟 The seismically isolated building
TLD	熱ルミネセンス線量計 thermoluminescence dosimeter
UNSCEAR	原子放射線の影響に関する国連科学委員会 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

WBC	ホールボディカウンター whole-body counter
協力企業職員	福島第一原子力発電所の業務従事者のうち東電社員以外の者を指す。
指定解除記録	指定解除者放射線管理記録
東電	東京電力（株）
東電 HD	東京電力ホールディングス（株）。東電 HD は東電グループの持ち株会社だが、責任の明確化のために内部に福島第一廃炉推進カンパニーを設置している。
放射協	（公財）放射線影響協会

用語注

不確かさ	uncertainty の訳語として本稿で採用した。
レスポンス	response の訳語として本稿で採用した。
光子、ガンマ線、 γ 線	本稿では各々同じ意味で用いている。引用文献やコンテキストの中で使い分けている。
臓器吸収線量、臓器線量	本稿では各々同じ意味で用いている。
OSL、LB	文脈に応じて、技術名称の OSL 線量計と、商品名の LB を使い分けている。
外部線量、外部被ばく線量	本稿では各々同じ意味で用いている。
内部線量、内部被ばく線量	本稿では各々同じ意味で用いている。

はじめに

公益財団法人放射線影響協会（以下「放影協」と呼ぶ。）放射線疫学調査センターでは、国(原子力規制庁)からの受託事業として原子力発電施設等で放射線業務に従事した経験を有する人を対象に、低線量・低線量率の放射線が人体に与える健康影響についての疫学的調査（J-EPISODE）を実施している[1-3]。放射線によるがん罹患・死亡リスクの評価に国際標準となっている臓器吸収線量(Gy)を用いるため、放影協では、平成 29～30 (2017～2018)年度に、有識者からなる「臓器線量構築検討会（座長：甲斐 倫明）」を設置し、通常作業線量から臓器線量への換算係数を構築した[4-8]。

J-EPISODE 参加者約 8 万人の内約 4,000 人は、2011 年 3 月の東京電力（以下「東電」と呼ぶ。）福島第一原子力発電所(FDNPP)事故に伴う緊急作業に従事していた。通常作業線量に緊急作業線量も含めてリスク解析を行うためには、緊急作業線量も臓器線量に換算する必要があった。緊急作業中の被ばくについては、内部被ばくを含むことその他、外部被ばくについても、通常作業とは線源の種類や放射線管理の方法が異なる等の課題があるため、放影協では、令和 3～4 (2021～2022) 年度に、以下の有識者から成る「緊急作業線量の臓器線量構築に関する検討会」を設置した。

緊急作業線量の臓器線量構築に関する検討会委員

◎甲斐 倫明 日本文理大学 教授 [座長]

栗原 治 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門
放射線医学研究所 計測・線量評価部長

佐藤 薫 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
原子力基礎工学研究センター 化学・環境・放射線ディビジョン
放射線挙動解析研究グループ 研究主幹

辻村 憲雄 日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所
放射線管理部 研究主席

(五十音順、肩書は令和 5 (2023) 年 3 月現在)

第1章 背景

1.1 検討会の経緯

放影協は国の委託を受けて、1990年から放射線業務従事者を対象にして、低線量・低線量率放射線の健康影響調査 J-EPISODE を実施している[1, 2]。2015～2019年に J-EPISODE への参加に同意した約8万人から成るコホートを再設定し、死亡及びがん罹患の追跡を行っていた[3]。同意者全員について、喫煙、飲酒、食生活、学歴、職業等に関するベースライン情報を有していることは、国際的に見てもユニークであった。線量は放影協放射線従事者中央登録センター（以下「RADREC」と呼ぶ。）から1957年以降の年度別データが提供されていた[9]。これは、光子外部被ばくに関する、 $H_p(10)$ で表された評価値（ここでは「個人線量計指示値」と呼ぶ。）であった。

国際的な放射線疫学調査においては、がんによる罹患・死亡率の評価には臓器吸収線量(Gy)が使われるのが主流であった[10–15]。放影協の放射線疫学調査が、今後、国際的に比較・評価されていくためには、放射線によるがん罹患・死亡率リスクの評価に国際標準となっている臓器吸収線量(Gy)を用いることが不可欠である。この考えに基づき、2017～2018年度に、放影協に設置された「臓器線量構築検討会（座長：甲斐倫明）」は、運転、検査、修理期間中に被ばくした通常作業線量について、疫学調査に用いる臓器線量を推計するにあたり、日本人に適した求め方を検討し、2019年に線量計指示値から臓器吸収線量への換算係数を構築した[4–8]。

J-EPISODE参加者約8万人の内約4,000人は、2011年3月のFDNPP事故に伴う緊急作業に従事していた。すなわち、緊急作業従事者約2万人の内、J-EPISODEへの参加に同意した者が約4,000人であった。本疫学調査に含まれる緊急作業者及び緊急作業線量の取り扱いに関しては、2020年度に、放影協に設置された調査研究評価委員会及びあり方検討会フォローアップ委員会において、本疫学調査には緊急作業者及び緊急作業線量も含めるとの結論が示された。緊急作業中の被ばく線量については、内部被ばくを含むことその他、外部被ばくについても、通常作業とは線源の種類や放射線管理の方法が異なるため、放影協は、緊急作業線量から臓器吸収線量への換算係数を構築することを目的として、有識者から成る「緊急作業線量の臓器線量構築に関する検討会」を設置した。

検討会は、オンラインで、令和3（2021）年度に2回、令和4（2022）年度に1回開催した。各回の主な議題は、次のとおり。

回	年月日	議題
1	2022年3月2日	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急作業線量の実態 ・検討会の議題・論点 ・利用可能なデータ ・緊急作業実効線量の外部・内部線量への分割 ・核種別預託実効線量の推計及び組織・臓器、年度別臓器吸収線量の推計 ・緊急作業外部被ばく線量による組織・臓器別臓器吸収線量の推計
2	2022年3月28日	<ul style="list-style-type: none"> ・第1回検討会の議論の整理 ・残された論点についての議論 (年度分割、外部被ばくによる臓器線量、不確かさの評価) ・今後の検討会の進め方
3	2023年3月27日	<ul style="list-style-type: none"> ・前年度以降の検討状況 ・検討会報告書案について

1.2 福島第一原子力発電所事故の概要

本検討会の議論に関連するFDNPP事故の概要は次のとおり。事故の詳細は各種報告書が刊行されているため、そちらに譲る[16-22]。

- ・2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(M9.0)に伴う高さ10mを超える津波がFDNPPを襲った。これにより、原子炉冷却用の電源を喪失し、炉心溶融(メルトダウン)の原因となった。また、個人線量計が水没して大部分が使えなくなった。そのため、利用できる個人線量計が不足し、代表者運用を行った。
- ・3月12日原子炉1号機の原子炉建屋が水素爆発を起こし、放射性物質が放出された。水素爆発は3月14日3号機建屋、3月15日4号機建屋で続いて起こった他、原子炉格納容器からの放射性物質の漏出が続いた。放出量としては、後者の方が大きかった。大部分は広範囲の地域に飛散した一方で、一部は、構内の瓦礫、構造物、地面に付着して、緊急作業員の外部被ばくの線源となった。また、一部は汚染空気、粉塵として構内に滞留し、緊急作業員が吸入することによって内部被ばくの線源となった。
- ・3月14日厚生労働省(MHLW)は電離放射線障害防止規則(電離則)の特例として、緊急作業被ばく限度を従来の100 mSvから250 mSvに一時的に引き上げた[23]。
- ・FDNPP構内全体が管理区域となり、免震重要棟(SIB)(注)内も管理区域となった。個人線量計の貸出し管理は、FDNPPの南方約20 kmのJヴィレッジ及びSIBの2カ所で行われた。

- ・バックグラウンド線量率が高くなったことから FDNPP 内のホールボディカウンター (WBC)が使えなくなり、最初の WBC 測定 (車載型 WBC による測定) が小名浜の石炭貯蔵施設 (コールセンター) で行われたのは、3 月 21 日が最初であった。WBC 測定の遅れが、 ^{132}Te 等の超短半減期核種の不検出、 ^{131}I の検出限界未満等、内部被ばく評価の不確かさにつながった。
- ・4 月からは各人 1 台の個人線量計が配付された。
- ・J ヴィレッジ隣接の広野町サッカー場に WBC センターが設置され、10 月には月 1 回の WBC 測定が定着した。
- ・12 月 16 日緊急作業被ばく限度が 250 mSv から 100 mSv に戻された。
- ・緊急作業内部線量は、RADREC には 2010~2011 年度に記録されていた。
- ・緊急作業線量は、2015 年度まで RADREC に記録されていた。緊急作業被ばく限度 250 mSv 廃止後も、特定高線量作業員について 2015 年 9 月まで 100 mSv の緊急作業被ばく限度が適用されたためである。
- ・特定高線量作業員以外の廃炉作業に従事している者には、通常時の線量限度が適用され、原子力事業者から RADREC への年 1 回の定期線量登録においても通常作業線量として記録されていた。

(注) 免震重要棟 (The seismically isolated building)。2007 年柏崎刈羽原子力発電所における新潟中越沖地震の教訓から建設され、2010 年 7 月から稼働した。免震設計で、非常用電源も装備し、放射能対策として、活性炭フィルター装置が設置されていた。

1.3 研究方法

研究資料は原則として先行研究の文献調査結果に基づいた。事故の概要、被ばく線量の概要等は UNSCEAR 等関係機関の報告書、その他関連論文を参考にした。内部被ばく評価に関連する体内動態モデル等については、ICRP の各種報告書を参考にした。また、放射線管理上の実務、線量評価、線量分布等に関しては当時の東電プレスリリースを参考にした。なお、プレスリリースはその性格上、刊行日以降の改定などは反映されていないことに留意する必要があった。

緊急作業員の放射線管理上の取り扱いの詳細で、既存調査では不明な点については、2022 年 11 月、放影協から東京電力ホールディングス (以下「東電 HD」と呼ぶ。) に対して照会し、公式に文書で回答を得た。主な照会事項は、個人線量計の種類、個人線量計の代表者運用、SIB 滞在中及び移動中のモデル線量、3 月 11 日以降の従事指定日の設定等であった。回答内容は、以下該当箇所引用した。

第2章 緊急作業被ばく線量

2.1 資料・方法

2.1.1 放射線従事者中央登録センターの線量データベース

J-EPISODE は RADREC から個人・年度別通常作業線量及び緊急作業線量を提供されていた[9]。これらは雇用主が放射線防護の規制遵守の目的で評価した線量を、原子力事業者が、線量記録の管理を目的に設立された RADREC に年 1 回の定期線量登録したものであった。通常作業線量は、原子炉運転中、点検中、修理中の職業被ばく線量であり、大部分は光子外部被ばくであった。通常作業中の個人線量計指示値 $H_p(10)$ から臓器吸収線量(mGy)への換算係数を既に構築した[4-8]。

法令（電離則）上、通常作業被ばく限度は、100 mSv/5 年、かつ、50 mSv/年であり、緊急作業被ばく限度は 100 mSv であった。ところが、2011 年 3 月の FDNPP 事故に伴い、緊急作業被ばく限度は 2011 年 3 月 14 日～2011 年 12 月 16 日の間、特例的に 250 mSv に引き上げられた[23]。

緊急作業線量は FDNPP 事故の緊急作業に従事した作業者の外部被ばく線量(mSv)と内部被ばく線量(mSv)で構成され、その合計(mSv)が RADREC に定期線量登録されていた。RADREC では、FDNPP 事故後に、線量データベースに緊急線量と通常線量の区分を設けた（表 2.1.1）。緊急作業線量の FDNPP 構内については、2010～2015 年度に線量が記録され、構外については、2010～2012 年度に線量が記録されていた。

表 2.1.1 RADREC の定期線量登録の線量記録区分

線量区分		内容
通常		通常運転、検査、修理中及び廃炉作業中の被ばく線量
緊急	構内	FDNPP 事故に伴う構内における緊急作業で、緊急作業被ばく限度が適用された者の被ばく線量
	構外	FDNPP 事故に伴う構外における緊急作業で、送電線の復旧作業等に伴う被ばく線量

2011 年 12 月 16 日には、原子炉が冷温停止状態に達したとして、250 mSv の緊急作業被ばく限度は解除され、大部分の作業者は通常作業に戻った。しかし、約 50 人のみ 2012 年 4 月 30 日まで 250 mSv の緊急作業被ばく限度が延長された。また、原子炉設備、使用済み燃料貯蔵プールの冷却機能維持等の特定高線量作業従事者（東電社員のみ約 1,200 人[24]）については、12 月 16 日以降も 2015 年 9 月まで 100 mSv の緊急作業被ばく限度が適用された。なお、緊急作業で「構外」とあるのは、FDNPP への送電線の復旧作業等に伴う外部被ばく

の記録で、線量計の貸出しは J ヴィレッジで行われた。したがって、RADREC には、2015 年度まで緊急作業線量が登録されていた。

2.1.2 緊急作業者

「緊急作業従事者」(厚生労働大臣が指定した緊急作業に従事した者)は、2011 年 3 月 11 日～2011 年 12 月 15 日の期間内に FDNPP 構内にて作業に従事した実績のある者であった。その数は約 2 万人であった。独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所(2014～2018 年度の第 1 期は(公財)放射線影響研究所が研究統括組織)が MHLW の委託を受けて実施する「放射線業務従事者の健康影響に関する疫学調査(旧東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研究)」(略称 NEWS)は、MHLW を経由して、作業実態及び線量評価に関する詳細な情報の提供を受けている[25-27]。

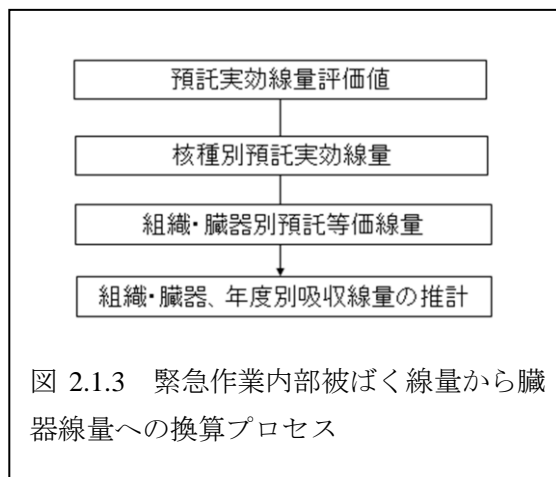
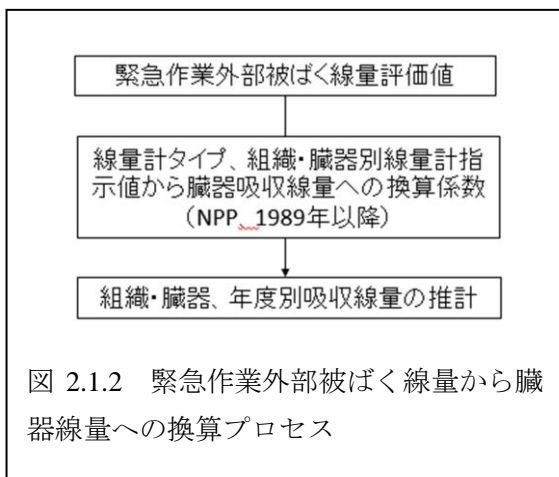
しかし、J-EPISODE は緊急作業者の名簿情報を利用できないため、本検討会では、RADREC に 2010～2015 年度のいずれかに緊急作業線量の記録がある者(線量 0 mSv または検出限界値未満を含む。) 4,075 人を、緊急作業者と定義した。基本的に、法令に基づく緊急作業従事者と同一であり、NEWS の部分集団であると考えられる。

緊急作業者の東電社員、協力企業職員(注)の区分は、ベースライン調査における雇用企業の種類の質問項目を利用した。

(注) 協力企業職員：FDNPP の業務従事者のうち東電社員以外の者で、プラントメーカーその他の事業者にも雇用される者である。ここでは「協力企業職員」と呼ぶ。

2.1.3 臓器線量への換算プロセス

臓器線量構築には緊急作業の外部被ばく線量と内部被ばく線量について、各々別のアプローチを適用した。光子外部被ばくについては、2019 年に臓器線量構築検討会で構築した、通常作業に関する線量計指示値から臓器吸収線量への換算係数をそのまま適用することとした(図 2.1.2)。詳細は臓器線量構築検討会報告書を参照されたい[4]。



内部被ばくについて、預託実効線量評価値（注）から年度別臓器吸収線量への換算は、図 2.1.3 のプロセスに基づいて行った。

（注）内部被ばくは、放射性核種が体内に残留している間続くが、実効半減期は核種によって異なる。そこで、職業被ばくの場合、摂取後 50 年間の累積被ばく線量の推計値を預託実効線量(committed effective dose)と定義した(ICRP Publ. 30, Part 1)[28]。

2.1.4 内部被ばくが記録された期間

東電 HD のプレスリリース(2018 年 7 月 31 日)[24]によると、月別内部線量分布表からは、2011 年 9 月以降は東電社員について 2 mSv を超える内部線量は確認されていない(表 2.1.4)。この 2 mSv は WBC による評価方法の記録レベルとして設定された値であった(東電プレスリリース 2013 年 7 月 5 日添付資料 3 [29]の page 4)。協力企業職員について、9 月以降も若干(9 月 3 人、10 月 2 人、2012 年 1 月 1 人) 2 mSv を超える者があるが、これについては、摂取日ではなく WBC 測定日を含む月間の被ばく線量として記録されたと述べられていた。

表 2.1.4 月別内部線量分布表（全緊急作業員）

年月	入域者（人）			うち内部被ばく線量 2mSv 超（人）		
	計	東電社員	協力企業	計	東電社員	協力企業
2011 年 3 月	3,973	1,696	2,277	2,132	1,122	1,010
4 月	5,844	1,657	4,187	246	19	227
5 月	7,286	1,477	5,809	176	4	172
6 月	7,601	1,351	6,250	135	6	129
7 月	7,746	1,351	6,395	34	3	31
8 月	7,494	1,286	6,208	8	1	7
9 月	7,190	1,207	5,983	3*	0	3*
10 月	6,797	1,179	5,618	2*	0	2*
11 月	6,758	1,180	5,578	0	0	0
12 月	6,599	1,192	5,407	0	0	0
2012 年 1 月	6,041	1,095	4,946	1*	0	1*
2 月	5,956	1,109	4,847	0	0	0
3 月	5,874	1,119	4,755	0	0	0

（注）*は摂取月ではなく、WBC 測定月に記録されている。

（資料出所）東電 HD 福島第一廃炉推進カンパニー プレスリリース 2018 年 7 月 31 日「福島第一原子力発電所作業員の被ばく線量の評価状況」添付資料表 13 を基に作成した[24]。

(<https://www.tepco.co.jp/press/release/2018/pdf/180731j0106.pdf>, 2023 年 1 月 7 日アクセス)

したがって、2011年10月頃以降の緊急作業実効線量はすべて外部被ばく線量であると考えられた。

なお、記録レベルの実務的な扱いは雇用主によって対応が異なる。(財)原子力安全技術センター「内部被ばく線量の測定・評価マニュアル」[30]においても、1 mSv から 2 mSv の間で雇用主が決めるべきものとされていた。東電は、WBC の測定精度を考慮すると、2 mSv 未満は有意な数値ではなく、「記録レベル未満」としていたため、ここでは 0 mSv とした。一方で、後ほど表 3.2.5 で示すように、1 mSv 未満の内部被ばく線量を評価値として記録した雇用主もいた。

2.1.5 指定解除者放射線管理記録

臓器線量構築のためには、定期線量登録で提供された 2010～2011 年度の構内緊急作業線量を外部線量と内部線量に分割する必要があった。これには、RADREC にマイクロフィルムとして保管されている指定解除者放射線管理記録（以下「指定解除記録」と呼ぶ。）を利用した。原子力事業者が RADREC に提出する線量データには 2 種類あった。1 つは、2.1.1 で述べた毎年度の個人別実効線量に関する定期線量登録データであり、これには外部・内部被ばく線量の内訳はなかった。

もう 1 つは、当該原子力事業者における指定解除記録であった。放射線業務従事者登録制度の下では、作業者が原子力施設で業務に従事する際には、雇用主が放射線業務従事者としての指定登録を原子炉設置者に申請し、原子炉設置者は当該施設での従事者指定登録を RADREC に申請した。当該作業者が業務を終了し、当該原子力施設を離れる際には、雇用主は当該施設での従事者指定解除を原子炉設置者に申請し、原子炉設置者は従事者指定解除登録を RADREC に申請した。指定解除登録の際には合わせて指定解除記録を RADREC に引き渡す仕組みとなっていた。指定解除記録には、当該個人の指定年度前歴線量、当該原子力事業者における指定期間（指定年月日から指定解除年月日まで）中の年度別、種類（外部、内部、皮膚、水晶体等）別線量等が記録されており、RADREC ではマイクロフィルムの形式で保管されていた。また、当該記録には、緊急作業線量についても、外部被ばく・内部被ばく別の線量が含まれていた。なお、内部被ばく線量について、雇用主が行った核種別預託実効線量の評価値については、指定解除記録に記載されていなかった。

（注）指定解除記録は指定期間ごとに作成されている。したがって、緊急作業期間内に、同一人について異なる期間の指定解除記録が保管されているケースがあった。

2.1.6 緊急作業線量の外部線量・内部線量への分割

緊急作業線量を外部線量・内部線量に分割するために、内部被ばくの可能性がある緊急作業業者、すなわち、2010～2011 年度緊急作業線量評価値が正（ここでは、0 を除き、0.01 mSv

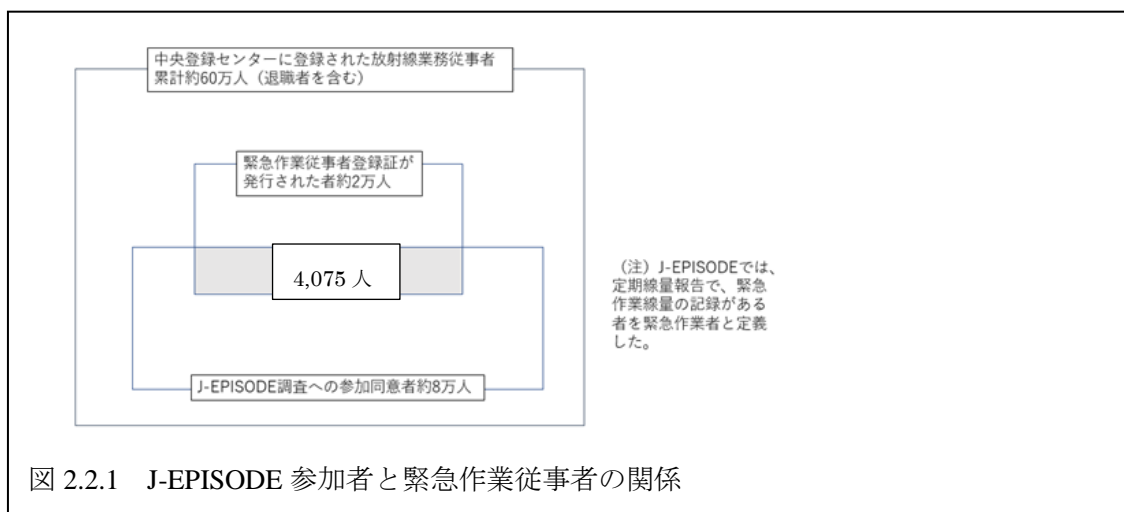
以上の positive の意味で「正」を用いる。) の者、3,688 人について RADREC から指定解除記録の写しを取得し、ID、指定年月日、2010/2011 年度別外部・内部記録線量等の必要なデータを入力した。ここで、指定年月日は、内部線量が正の者について、核種別摂取量を推計するために取得した。

なお、福島第一原子力発電所の緊急作業に従事してから 2022 年 3 月末までに従事者指定解除を行っていない者（従事者指定が継続している者）209 人については、RADREC を通じて東電 HD から、緊急作業線量データを取得した。

2.2 結果

2.2.1 J-EPISODE に含まれる緊急作業者

J-EPISODE が提供された 2010～2015 年度の定期線量登録のうち、緊急作業区分の線量記録（0 mSv 及び検出限界未満を含む。）がある者は 4,075 人であった（図 2.2.1）。すなわち、FDNPP の緊急作業従事者は MHLW によると約 2 万人であったが[25-27]、その内、J-EPISODE 調査への参加に同意している者は 4,075 人と推定された。



また、各年度に緊急作業線量記録がある人数は表 2.2.2 のとおりであった。このうち、2010～2011 年度に線量記録がある者は、2.1.4 で述べたように、内部被ばくをした可能性があった。

表 2.2.2 年度、構内・構外別定期線量登録に記録がある人数（人）

線量区分		2010 年度	2011	2012	2013	2014	2015
緊急	構内	1,328*	3,497*	397	411	400	381
	構外	18	249	132	0	0	0

（注）*は内部被ばくを含む可能性があった。

2.2.2 緊急作業線量分布

2.2.2.1 2010 年度の線量分布

2010 年度（2011 年 3 月）の構内緊急作業の線量記録がある者は 1,328 人であった。そのうち、線量が 0 mSv の者は 36 人で、線量が正の者は 1,286 人であった。2011 年 3 月の実効線量及び外部・内部別被ばく線量分布は表 2.2.3 のとおりであった。なお、線量 0 mSv は、検出限界未満の者を含んでいた。内部被ばく線量が正の者は 825 人であった。

2011年3月の平均外部被ばく線量は17.6 mSv（東電社員 21.4 mSv、協力企業職員 12.0 mSv）、また、平均内部被ばく線量は9.9 mSv（東電社員 13.4 mSv、協力 4.8 mSv）であった。東電社員・協力企業職員別には、外部線量、内部線量ともに東電社員の方が高かった。

図2.2.4は、東電社員・協力企業職員別に2011年3月の外部被ばく線量及び内部被ばく線量の分布を対数目盛で、線量0を除いて示している。東電社員の外部被ばく線量の分布図が、他の分布図とは異なり、8～10 mSv周辺に集中し、それより低い線量の者は少なかった。これについては第4章で論じる。

表 2.2.3 2010年度の外部・内部被ばく線量分布

(2010年度の緊急被ばく線量記録がある者 1,328人、単位：人、mSv)

線量 (mSv)	実効線量			外部被ばく線量			内部被ばく線量		
	計	東電	協力	計	東電	協力	計	東電	協力
0	36	9	27	38	9	29	503	219	284
0超～2	111	24	87	153	30	123	22	2	20
2超～5	103	8	95	138	17	121	163	86	77
5超～10	167	86	81	302	210	92	207	133	74
10超～20	336	220	116	373	283	90	275	214	61
20超～50	377	286	91	221	160	61	132	107	25
50超～75	94	65	29	57	41	16	12	10	2
75超～100	48	38	10	24	17	7	8	7	1
100超～150	45	38	7	18	14	4	3	3	0
150超～200	8	8	0	4	3	1	1	1	0
200超～250	1	0	1	0	0	0	0	0	0
250超	2	2	0	0	0	0	2	2	0
人数	1,328	784	544	1,328	784	544	1,328	784	544
第1四分位	8.6	13.3	2.4	5.2	9.0	1.8	0.0	0.0	0.0
中位数	17.1	22.8	9.0	10.5	13.0	4.9	4.6	8.2	0.0
平均	27.5	34.9	16.8	17.6	21.4	12.0	9.9	13.4	4.8
第3四分位	33.5	41.8	20.3	19.5	23.8	12.7	13.5	17.2	6.4
最高	639.7	639.7	226.9	191.9	160.7	191.9	540.0	540.0	78.7

(注) 東電社員、協力企業職員の区分は、ベースライン調査における雇用企業の種類の質問項目を利用した。

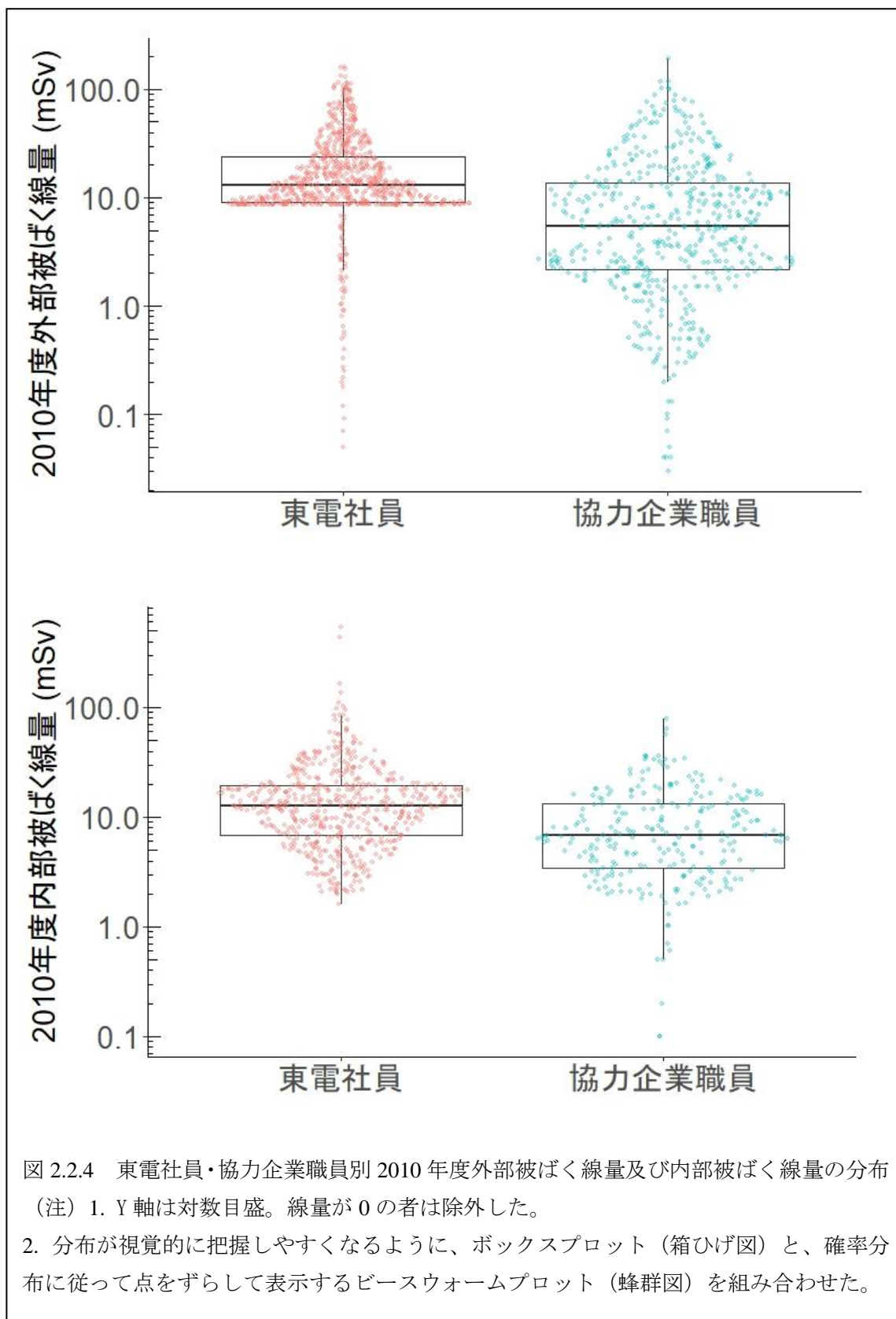


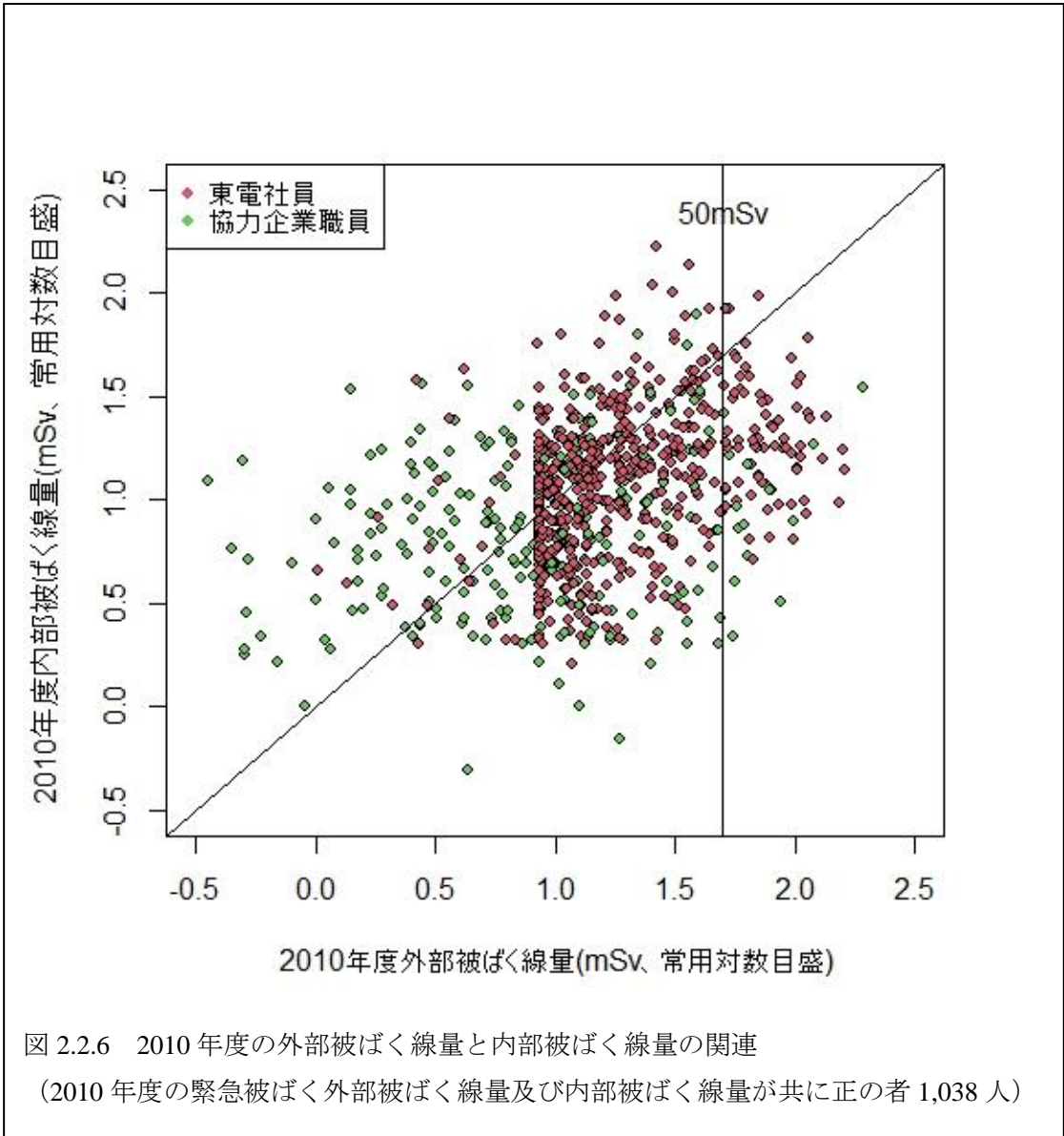
図 2.2.4 東電社員・協力企業職員別 2010 年度外部被ばく線量及び内部被ばく線量の分布
 (注) 1. Y 軸は対数目盛。線量が 0 の者は除外した。
 2. 分布が視覚的に把握しやすくなるように、ボックスプロット (箱ひげ図) と、確率分布に従って点をずらして表示するビースウォームプロット (蜂群図) を組み合わせた。

2011年3月の外部線量と内部線量の関連について、東電社員は外部被ばく線量が多いほど、内部被ばく線量が多い傾向が見られたが、協力企業職員では、外部線量 50 mSv までしか、内部線量が増加する傾向は見えなかった（表 2.2.5、図 2.2.6）。

表 2.2.5 2010 年度の外部・内部被ばく線量の比率
(2010 年度の緊急被ばく線量記録がある者 1,328 人)

外部線量 区分	計(1,328 人)			東電社員(784 人)			協力企業職員(544 人)		
	平均外 部線量	平均内 部線量	比率	平均外 部線量	平均内 部線量	比率	平均外 部線量	平均内 部線量	比率
mSv	mSv	mSv		mSv	mSv		mSv	mSv	
0	0.0	0.2	-	0.0	0.0	-	0.0	0.2	-
0 超～2	0.9	1.9	2.11	0.8	1.0	1.25	1.0	2.1	2.10
2 超～5	3.1	4.0	1.29	3.2	8.8	2.75	3.1	3.4	1.10
5 超～10	8.4	6.3	0.75	8.9	6.9	0.78	7.3	4.7	0.64
10 超～20	13.9	9.2	0.66	13.9	10.2	0.73	13.8	6.1	0.44
20 超～50	31.0	19.8	0.64	30.8	22.7	0.74	31.4	11.9	0.38
50 超～75	61.3	21.8	0.36	61.5	27.6	0.45	60.7	6.9	0.11
75 超～100	86.0	37.1	0.43	86.8	49.3	0.57	83.9	7.4	0.09
100 超	120.7	19.6	0.16	119.0	22.2	0.19	126.6	0.7	0.08
計	17.6	9.9	0.56	21.4	13.4	0.62	12.0	4.8	0.40

(注) 東電社員、協力企業職員の区分は、ベースライン調査における雇用企業の種類の質問項目を利用した。



参考までに、東電 HD プレスリリース（2018 年 7 月 31 日）[24]による 2011 年 3 月の FDNPP 入域者全員の線量分布を表 2.2.7 に示す。

表 2.2.7 参考：2011年3月外部・内部被ばく線量、東電社員・協力企業職員別線量分布
(2011年3月入域者全員)

線量 (mSv)	外部線量分布 (人)			構成比 (%)		
	東電	協力	合計	東電	協力	合計
1 以下	60	547	607	3.5	24.0	15.3
1 超～5	88	763	851	5.2	33.5	21.4
5 超～10	522	385	907	30.8	16.9	22.8
10 超～20	604	331	935	35.6	14.5	23.5
20 超～50	287	182	469	16.9	8.0	11.8
50 超～75	67	36	103	4.0	1.6	2.6
75 超～100	41	22	63	2.4	1.0	1.6
100 超～150	21	8	29	1.2	0.4	0.7
150 超～200	6	3	9	0.4	0.1	0.2
人数	1,696	2,277	3,973	100.0	100.0	100.0
最大線量 (mSv)	182.33	199.42	199.42			
平均線量 (mSv)	19.52	9.08	13.54			
線量 (mSv)	内部線量分布 (人)			構成比 (%)		
	東電	協力	合計	東電	協力	合計
2 以下	574	1267	1841	33.8	55.6	46.3
2 超～5	207	342	549	12.2	15.0	13.8
5 超～10	275	291	566	16.2	12.8	14.2
10 超～20	399	253	652	23.5	11.1	16.4
20 超～50	189	103	292	11.1	4.5	7.3
50 超～75	27	11	38	1.6	0.5	1.0
75 超～100	11	10	21	0.6	0.4	0.5
100 超～150	7	0	7	0.4	0.0	0.2
150 超～200	1	0	1	0.1	0.0	0.0
200 超～250	1	0	1	0.1	0.0	0.0
250 超	5	0	5	0.3	0.0	0.1
人数	1,696	2,277	3,973	100.0	100.0	100.0
最大線量 (mSv)	590	98.53	590			
平均線量 (mSv)	12.01	5.1	8.05			

(資料出所) 東電 HD 福島第一廃炉推進カンパニープレスリリース 2018年7月31日[24]

「福島第一原子力発電所作業員の被ばく線量の評価状況」添付資料表 12、13 を基に作成した。

2.2.2.2 2011年度の線量分布

2011年度（2011年4月～2012年3月）の構内緊急作業の線量記録がある者は3,497人であった。そのうち、線量が0 mSvの者は53人で、線量が正の者は3,444人であった。2011年度の実効線量及び外部、内部別被ばく線量分布は表2.2.8のとおりであった。なお、線量0 mSvは、検出限界未満の者を含んでいた。内部被ばく線量が正の者は352人であった。

2011年度の平均外部被ばく線量は11.0 mSv（東電社員 15.0 mSv、協力企業職員 9.0 mSv）であった。一方、平均内部被ばく線量は0.3 mSvと低い水準であった。このため、外部線量と内部線量との関連は見られなかった（表2.2.9）。

表2.2.8 2011年度の外部・内部被ばく線量分布

（2011年度の緊急被ばく線量記録がある者3,497人、単位：人、mSv）

線量 (mSv)	実効線量			外部被ばく線量			内部被ばく線量		
	計	東電	協力	計	東電	協力	計	東電	協力
0	53	5	48	65	6	59	3,145	1,126	2,019
0超～2	935	280	655	956	286	670	180	11	169
2超～5	478	89	389	470	87	383	117	28	89
5超～10	548	157	391	555	157	398	37	5	32
10超～20	822	314	508	824	312	512	14	2	12
20超～50	609	283	326	576	280	296	4	4	0
50超～75	41	33	8	40	33	7	0	0	0
75超～100	10	10	0	10	10	0	0	0	0
100超	1	1	0	1	1	0	0	0	0
人数	3,497	1,172	2,325	3,497	1,172	2,325	3,497	1,172	2,325
第1四分位	1.5	2.2	1.4	1.5	2.1	1.3	0.0	0.0	0.0
中位数	7.6	11.5	6.0	7.4	11.5	5.7	0.0	0.0	0.0
平均	11.3	15.1	9.4	11.0	15.0	9.0	0.3	0.1	0.4
第3四分位	16.7	21.5	14.7	16.1	21.4	14.0	0.0	0.0	0.0
最高	107.6	107.6	74.9	104.8	104.8	74.9	38.4	12.5	38.4

（注）東電社員、協力企業職員の区分は、ベースライン調査における雇用企業の種類の質問項目を利用した。

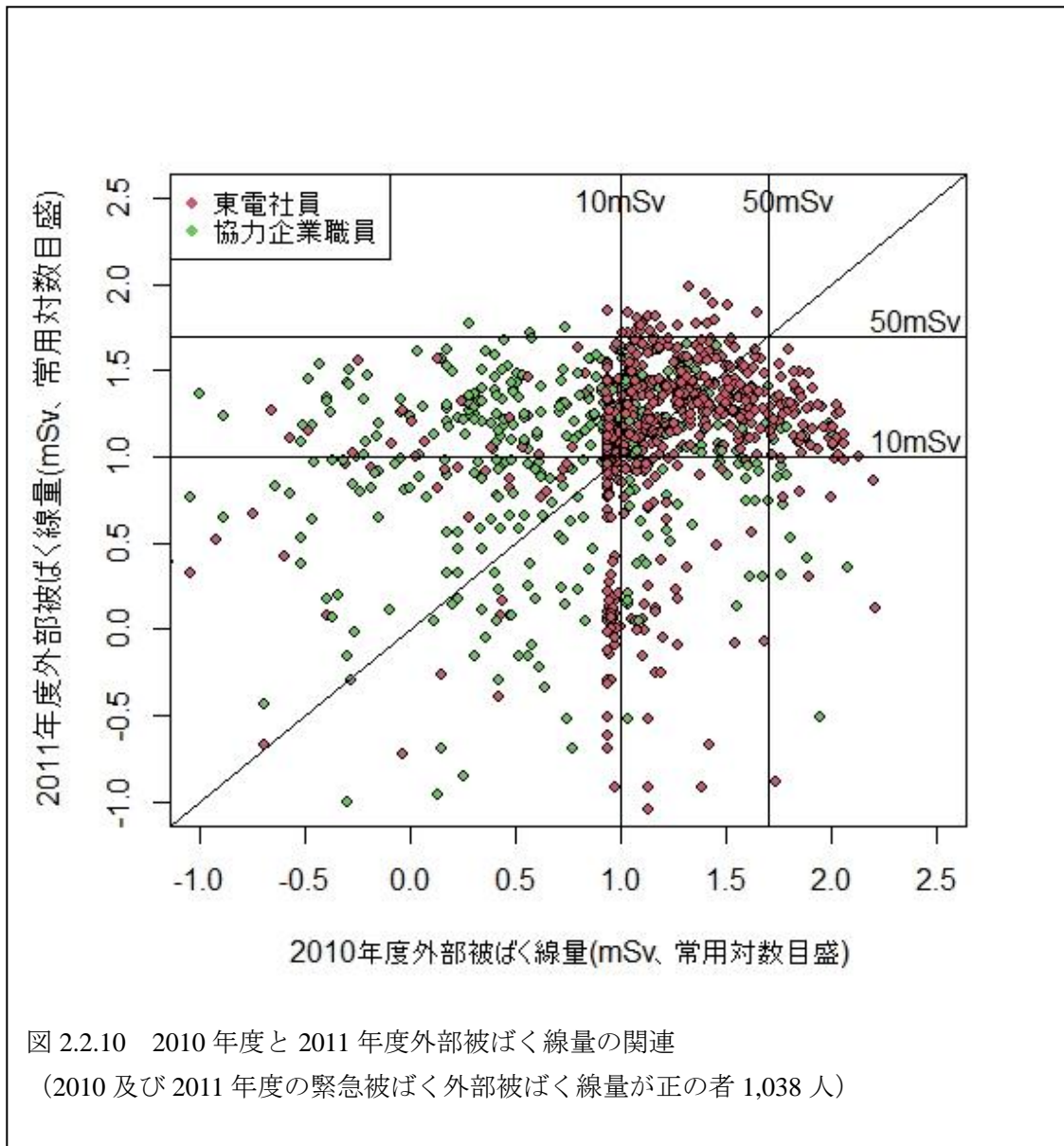
表 2.2.9 2011 年度の外部・内部被ばく線量の比率
(2011 年度の緊急被ばく線量記録がある者 3,497 人)

外部線量 区分	計(3,497 人)			東電社員(1,172 人)			協力企業職員(2,325 人)		
	平均外 部線量	平均内 部線量	比率	平均外 部線量	平均内 部線量	比率	平均外 部線量	平均内 部線量	比率
mSv	mSv	mSv		mSv	mSv		mSv	mSv	
0	0.0	1.1	-	0.0	0.9	-	0.0	1.1	-
0 超～2	0.8	0.1	0.12	0.8	0.1	0.12	0.8	0.1	0.12
2 超～5	3.4	0.2	0.06	3.4	0.2	0.06	3.3	0.1	0.03
5 超～10	7.6	0.3	0.04	7.7	0.1	0.01	7.5	0.4	0.05
10 超～20	14.4	0.4	0.03	14.3	0.1	0.01	14.4	0.6	0.04
20 超～50	29.2	0.4	0.01	30.2	0.1	0.00	28.3	0.7	0.02
50 超	65.0	0.5	0.01	66.1	0.1	0.00	57.9	2.7	0.05
計	11.0	0.3	0.03	15.0	0.1	0.01	9.0	0.4	0.04

(注) 東電社員、協力企業職員の区分は、ベースライン調査における雇用企業の種類の質問項目を利用した。

2.2.2.3 2010 年度と 2011 年度の外部被ばく線量の関連

図 2.2.10 は、2010 年度の緊急被ばく線量記録がある者 1,328 人について、X 軸に 2010 年度外部被ばく線量、Y 軸に 2011 年度外部被ばく線量をとってプロットした。2010 年度線量が 50 mSv を超える者は、2011 年度は 50 mSv を下回っていた。一方、2010 年度外部線量が 50 mSv 未満の者のうち多くは、対角線より上に位置した、すなわち、2011 年度外部線量が 2010 年度外部線量より増加した。



2.3 データベース間の相違

2.3.1 東電の線量評価値との誤差

J-EPISODE が取得した線量評価値に関して、外部線量及び内部線量の評価値への分割プロセスで示されたとおり、東電の保有する線量評価値との誤差はなく、この点で不確かさがなかったことは明白であった。

2.3.2 NEWS の線量分布との相違

2011年3月の外部・内部線量分布について、本検討会が対象とした J-EPISODE への参加者 1,328 人の線量分布(表 2.2.3)と、東電が調べた緊急作業入域者全員の線量分布(表 2.2.7)を比較しても、特段の分布の偏りはみられない。NEWS の線量分布と J-EPISODE の緊急作業者の線量分布に違いはないと考えられた。

2.3.3 NEWS の保有する線量情報との乖離

放影協は NEWS の保有する線量情報にアクセスすることはできないため、J-EPISODE が取得した線量と NEWS が保有する線量データの相違は明らかではない。しかし、NEWS が保有する線量データは、東電の線量評価データが MHLW を通して提供されているため、原則として、同じデータを保有していると考えられる。一方で、線量データの評価値はしばしば訂正されたため、東電から MHLW へ提供されたタイミングや、MHLW のデータベースの更新のタイミングによっては、齟齬のあるケースもあり得るが、その影響は無視できる程度と考えられた。

第3章 緊急作業内部被ばく線量の臓器線量推計

(注) 本章において、緊急作業は構内緊急作業を指す。

3.1 資料・方法

3.1.1 東電による内部被ばく線量評価方法

3.1.1.1 WBCによる測定

FDNPPにおけるWBC測定について、事故前には内部被ばくは稀であったため、3カ月に1回(女性は1カ月に1回)椅子型WBC(PL)(プラスチックシンチレーター、核種弁別は不可)を用いて内部被ばく線量の定期測定を行い、異常があれば核種分析可能なWBC(Ge)(半導体検出器)で定量測定する体制で運用していた。

事故後初期にはWBCの不足から内部被ばくの測定が遅れた。FDNPPに設置されていたWBCは電源喪失と周辺環境のバックグラウンド線量率が高かったことから使用できなかった。2011年3月21日、FDNPPから南約55kmに位置する小名浜の石炭貯蔵施設(コールセンター)に日本原子力研究開発機構(JAEA)所有の移動式WBC(NaI)(ヨウ化ナトリウム検出器、核種ごとの定量が可能)を配備し、女性や外部被ばくで100mSvを超えた者を優先的に測定開始した。加えて、放射線医学総合研究所(千葉県千葉市)、JAEA(茨城県東海村)及び日本原子力発電(茨城県東海村)の各施設において、WBC測定の協力を得た。その後順次使用できる東電所有のWBCを配備し、2011年10月3日には、Jヴィレッジ隣接の広野町サッカー場で12台のWBC(PL)で構成されるWBCセンターの運用を開始し、月1回のWBC測定が定着した。

3.1.1.2 預託実効線量の評価

預託実効線量の評価は雇用主が行った。預託実効線量から臓器線量への変換にあたっては、まず、提供された預託実効線量が、WBC測定値からどのようなプロセスで評価されたものか明らかにする必要があった。東電プレスリリース(2013年7月5日)添付資料3「福島第一原子力発電所における内部被ばく線量の評価方法について」によると概要は次のとおりであった[29]。

WBC(NaI)あるいはWBC(Ge)による核種別評価が可能な場合は、

- ①WBCの測定結果から、WBC測定日の核種別全身残留量(体内量)(Bq)を算出した。
- ②体内量を、測定日の単位摂取量当たりの残留量(Bq/Bq)(注1)で除すことによって、摂取日の核種別摂取量(Bq)を算出した。
- ③摂取量に実効線量係数(mSv/Bq)(注2)を乗じて預託実効線量(mSv)を算出した。

WBC 測定時期の遅れにより ^{131}I が検出されなかった場合は、摂取時期により評価方法が異なる。摂取時期が 3～6 月の場合は、次の(A)、(B)の補正值の低い方を ^{131}I 摂取量とした。

(A) 1) ^{137}Cs 測定量 (体内量) を ^{137}Cs の単位摂取量当たりの残留量(Bq/Bq)で除して、摂取日の ^{137}Cs 摂取量(Bq)とした。

2) ^{137}Cs 摂取量に、摂取日のダスト核種分析結果による空气中濃度 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比を乗じて、 ^{131}I 摂取量(Bq)とした。

(B) 摂取日の ^{131}I 検出限界値を ^{131}I の単位摂取量当たりの残留量(Bq/Bq)で除し、 ^{131}I 摂取量(Bq)とした。

また、摂取時期が 7 月以降の場合は、 ^{131}I の線量寄与は十分低いため無視した。

(注 1) 残留率は、ICRP Publ. 78 の付属書 (図 A.6.11、図 A.7.1、図 A.7.4) で核種別に図示されていた[31]。また、本プレスリリース添付資料 3 の別表 2 に数表が示されていた。

(注 2) 実効線量係数は、ICRP CD1 [32]の成人の職業被ばくの吸入(adult worker, inhalation)の場合の係数が適用された (表 3.1.1)。

表 3.1.1 成人職業被ばくで吸入の場合の実効線量係数

核種	条件	実効線量係数
^{131}I	蒸気	2.0×10^{-8} Sv/Bq
^{134}Cs	粒径(AMAD) 5μ のエアロゾル、タイプ F	9.6×10^{-9} Sv/Bq
^{137}Cs	粒径(AMAD) 5μ のエアロゾル、タイプ F	6.7×10^{-9} Sv/Bq

*AMAD (activity median aerodynamic diameter) 空気力学的放射能中央径

ICRP は公衆に対しては AMAD=1 μ 、職業被ばくには AMAD=5 μ の適用を推奨していた。実効線量係数は 5 μ の場合に最大となる。咽頭部への沈着は、呼吸気道の形態と粒子サイズに依存し、1 μ より 5 μ の方が大きかった(ICRP Publ. 30, Part 1, 5.2, page 23[28])。

3.1.1.3 急性摂取シナリオに基づく摂取日の設定

ICRP の考え方によると (ICRP Publ. 78, 8.1, para 106) [31]、定常状態ではモニタリングの中間日を摂取日として評価したときに、十分な評価となるようにモニタリングの頻度を定めることを推奨していた。これに対し、2013 年 7 月、MHLW は線量限度を遵守するという放射線防護の観点から、3 月及び 4 月の内部被ばくは、最初の水素爆発が起きた 3 月 12 日または作業開始日を摂取日とする保守的な評価方法とするように雇用主に対し指導を行い、雇用主はこれに従って内部被ばくの評価値を修正した (東電プレスリリース 2013 年 7 月 5 日) [29]。放影協が提供された緊急作業線量は、この急性被ばくシナリオに基づく評価値で

あった。

なお、5月以降の内部被ばくについては、作業期間の中間日を摂取日とする評価を MHLW は認めていた。

3.1.2 核種別預託実効線量の推計

東電による預託実効線量評価値から臓器線量への換算のフレームワークは図 3.1.2 のとおりであった。

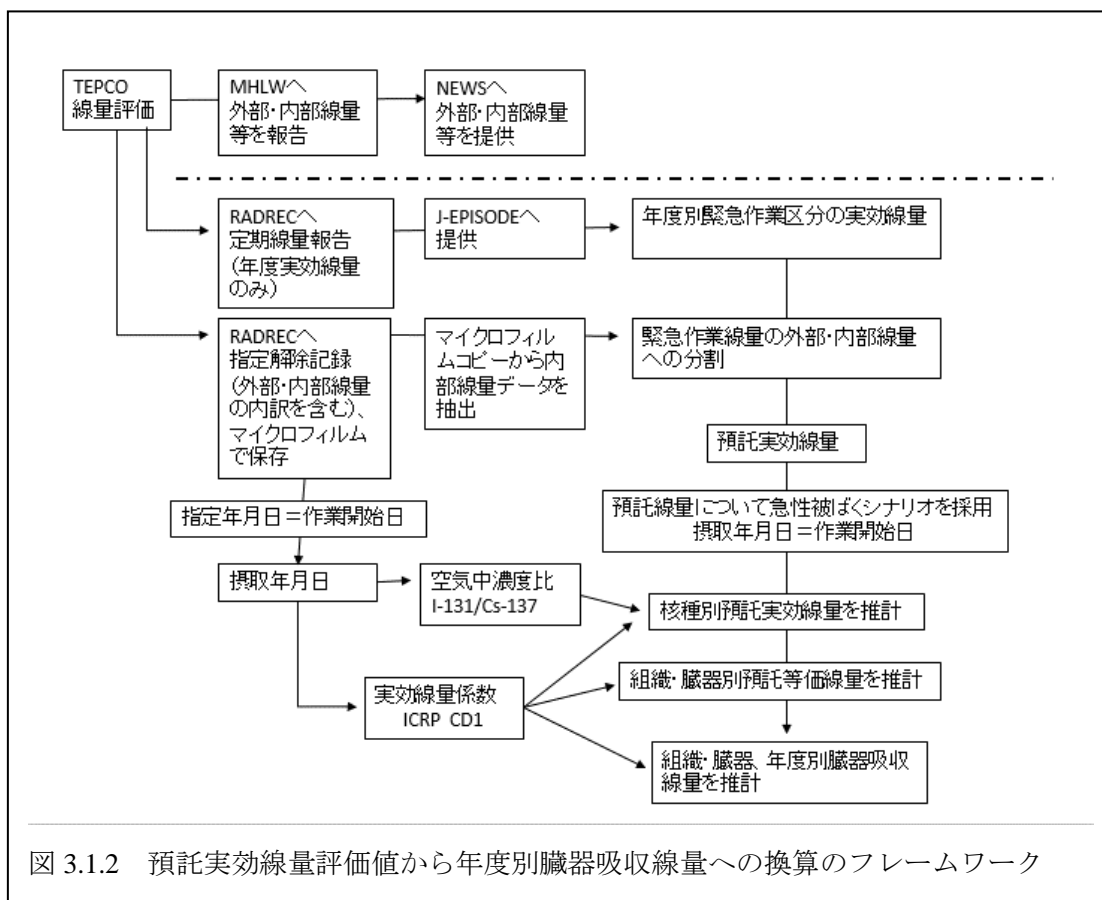


図 3.1.2 預託実効線量評価値から年度別臓器吸収線量への換算のフレームワーク

3.1.2.1 摂取日の代理指標

放影協は、各内部被ばく者について雇用主が設定した摂取日データ、あるいは、緊急作業期間中の個人の行動記録データを利用することはできなかった。2.1.5 の指定解除記録に記載した指定開始年月日が摂取年月日の代理指標として利用できる可能性を探るため、指定年月日の運用ルールについて、東電 HD に文書で照会した (図 3.1.3)。

放射性核種の摂取経路は、SIB 内での飲食時の経口摂取もあり得るが、それは十分に無視

できる程度で、原則的に吸入摂取と考えた。

緊急作業者の指定日の設定の考え方を、次のケースについて、ご教示願いたい。

- ①事故以前から福島第一原子力発電所で働いており、事故後も引き続き仕事をしたケース。
- ②事故以前から福島第一原子力発電所で働いていたが、事故後間をおいてから仕事に復帰したケース。
- ③事故後間をおいてから新規に仕事をはじめたケース。

図 3.1.3 緊急作業者の指定年月日に関する照会内容

問題意識は次のとおりであった。事故時の放射線管理上の実務的な取り扱いとして、FDNPP で事故前から従事者指定され、事故後も勤務が継続していた者について、事故前日の3月10日に全員一旦従事者指定解除を行い、事故後の作業開始日に再度従事者指定を行っていたと仮定すると、指定年月日を摂取日の代理指標として利用できる可能性があったため、それを東電に確認することであった。

3.1.2.2 摂取核種と体内動態モデル

雇用主による核種別摂取量の評価は、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs を対象としていたため[29]、本検討会でも同様とした。事故の発生から最初の WBC 測定が遅れたことから、 ^{132}Te など、存在していた可能性の高い短半減期核種の測定漏れの可能性が、UNSCEAR(2013)報告書[17, 18]等でも次のように指摘されていた。『3月12日～19日に作業していた福島第一原発の作業者においては、短半減期放射性核種の摂取による実効線量への追加的寄与度は、 ^{131}I の摂取による実効線量の20%程度であったと示唆される。…3月19日より後に作業を開始した作業者においては、短半減期放射性核種の寄与は有意ではないと考えられる』(パラグラフ D65)[18]。

これについて厚生労働省職員であった安井(2015)[33]は、以下のように、MHLW の判断に基づいて、 ^{132}Te の影響は急性被ばくの保守的シナリオを採用したことによる保守的マージンの中に含まれており、改めて評価に加える必要はない旨述べていた。

“1. Given the uncertainty of the chemical form of ^{132}Te , the CED (committed effective dose) contribution from ^{132}Te may be approximately 10% of the contribution from ^{131}I . However, given the standard methodology, including the assumption of the intake date as the first work day and the use of the acute intake scenario, the estimated CED from ^{131}I was thought to be sufficiently conservative.

2. Thus, given the assumptions of the standard methodology, the CED contribution by ^{132}Te was assumed to be within the margin of safety.” (ページ D67)[33]

その後には発表された UNSCEAR(2020)報告書[20, 21]も、以下のように、安井(2015)を引用して、この見解を支持していた。

『(c) 短半減期放射性核種による線量の評価

199. 福島第一原発の作業者の体外計測は 2011 年 3 月 22 日に開始され、結果は内部被ばくによる線量評価に用いられた。しかしながら、計測の開始が事故の発生から遅れたことは、 ^{132}Te 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{136}Cs など、存在していた可能性の高い、比較的短半減期の放射性同位体が、既に検出可能ではなくなっていたであろうことを意味した。UNSCEAR2013 年報告書[U10]において、本委員会は、このような比較的短半減期の放射性核種の寄与が ^{131}I の寄与に比して 20%程度であると推定していた。日本で用いられた方法のレビューにおいて、MHLW は、その後には指示した標準的な方法が、短半減期放射性核種 ^{132}I と ^{132}Te の寄与を適切に説明するのに十分であると考えた[Y16 (注：安井(2015)を指す。)]。MHLW は ^{132}Te による預託実効線量への寄与は ^{131}I の寄与の約 10%であると推定したが、これは、双方における不確かさを考慮に入れると、本委員会の推定とほぼ一致している。』 [21]

これら先行研究の結果は、内部被ばくの評価において、 ^{132}Te を直接測定してはいないが、短半減期核種の影響をあらためて考慮しなくてもよいという判断の根拠を与えるものであり、本検討会もこれに従って、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs を対象とした。

摂取した核種の体内動態について、ICRP Publ. 30, Part 1 [28]によると、ヨウ素 (Iodine) は、呼吸器から血液に吸収され、あるいは、鼻道に沈着した後、消化器に移行して小腸から血液に吸収される。通過コンパートメントに入ったヨウ素の 3 割は甲状腺 (Thyroid gland) に沈着し、残りは直接排泄される。セシウム (Cesium) も同様に呼吸器あるいは消化器から血液に吸収される。体内に取り込まれたセシウムは、人体内に均等に分布する。本検討会で対象とするセシウムはタイプ F の粒子であり、喉、気管、肺に沈着した後、速やかに血液に吸収され、消化管への移行はほぼないと考えられた。

放射性核種の崩壊による放射線の放出については、ICRP Publ. 38[34]及びその改訂版である ICRP Publ. 107[35]に記述されている。 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs に関しては β 崩壊または γ 崩壊が起こるが、 α 崩壊はない。 β 崩壊により放出される β 線は、0 から最高エネルギーまで連続的な分布を取る一方で (注 1)、 γ 崩壊により放出される γ 線は離散的な値を示す。甲状腺に集積した ^{131}I は大部分が β 崩壊または γ 崩壊により安定的な ^{131}Xe (キセノン) に移行する。 β 崩壊で生じるエネルギーは最大 807 keV (最大エネルギー 606 keV の成分が 89%) で、甲状腺内での ^{131}I 崩壊による β 線のエネルギーは質量 30 g の甲状腺内で完全に吸収されるため、単位 J/kg で表される吸収線量の評価値は大きくなる。一方、甲状腺内での ^{131}I 崩壊によるエネルギー 364 keV の γ 線は、甲状腺を線源器官として他の標的器官にエネルギーを付与した。

また、セシウムについては、 ^{134}Cs の β 崩壊による β 線の最大エネルギーは 658 keV であ

り、 ^{137}Cs の β 崩壊による β 線は最大エネルギー514 keV が約 95%、最大エネルギー1,176 keV が約 5%、また、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の内部転換電子が 624 keV (約 8%) であった。これらの β 線エネルギーは線源器官内で吸収された。一方、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の γ 崩壊による γ 線 (^{134}Cs : 605 keV (97.6%)、796 keV(85.5%)、 ^{137}Cs : 662 keV (85.1%)) のエネルギーは、一部線源器官内で吸収されると共に、他の標的器官にもエネルギーが付与された (注2)。

(注1) β^- 崩壊では、中性子が陽子に変化し、その過程で、1個の陰電子 (β^-) と1個の反電子ニュートリノを放出する。 β 崩壊の前後における原子核のエネルギーの差は、電子と反電子ニュートリノとの間に分けられているため、 β 線のエネルギーは0から最高エネルギーまで連続的な分布をとる。

(注2) γ 線エネルギーの()内の数値は、原子核の崩壊1回当たりの当該 γ 線の放出割合を表す。 ^{134}Cs の γ 崩壊では、605 keVと796 keVの光子がそれぞれ97.6%と85.5%の割合で放出される。

核種別に摂取日から経過期間別の単位摂取量当たりの累積等価線量(Sv/Bq)は ICRP CD1[32]に掲載されている (表 3.1.4~3.1.6)。

表 3.1.4 経過期間別の単位摂取量当たりの累積等価線量(Sv/Bq)
I-131, adult worker, Inhalation of elemental iodine vapour, f1 = 1.0

Time after intake		1 day	7 days	30 days	1 year	...	50 years
Adrenals	副腎	2.30E-11	3.00E-11	4.20E-11	4.40E-11		4.40E-11
Bladder Wall	膀胱壁	6.10E-10	6.70E-10	6.80E-10	6.90E-10		6.90E-10
Bone Surface	骨表面	2.90E-11	6.40E-11	1.10E-10	1.20E-10		1.20E-10
Brain	脳	2.60E-11	7.10E-11	1.30E-10	1.30E-10		1.30E-10
Breast	乳房	2.00E-11	3.30E-11	5.20E-11	5.50E-11		5.50E-11
GI-Tract	消化管						
Oesophagus	食道	2.90E-11	7.60E-11	1.30E-10	1.40E-10		1.40E-10
St Wall	胃壁	7.60E-11	8.20E-11	9.20E-11	9.40E-11		9.40E-11
SI Wall	小腸壁	2.60E-11	3.00E-11	3.90E-11	4.10E-11		4.10E-11
ULI Wall	上部大腸壁	2.90E-11	3.60E-11	5.00E-11	5.30E-11		5.30E-11
LLI Wall	下部大腸壁	3.50E-11	5.40E-11	7.50E-11	8.00E-11		8.00E-11
Colon*	結腸*	3.20E-11	4.40E-11	6.10E-11	6.50E-11		6.50E-11
Kidneys	腎臓	2.20E-11	2.80E-11	3.80E-11	4.00E-11		4.00E-11
Liver	肝臓	2.20E-11	2.90E-11	4.10E-11	4.40E-11		4.40E-11
Muscle	筋肉	2.80E-11	6.40E-11	1.10E-10	1.20E-10		1.20E-10
Ovaries	卵巣	2.80E-11	3.30E-11	4.20E-11	4.40E-11		4.40E-11
Pancreas	膵臓	2.60E-11	3.30E-11	4.50E-11	4.70E-11		4.70E-11
Red Marrow	赤色骨髄	2.60E-11	5.30E-11	8.80E-11	9.30E-11		9.30E-11
Respiratory Tract	呼吸器						
ET Airways*	胸郭外気道*	1.20E-09	1.70E-09	1.80E-09	1.80E-09		1.80E-09
Lungs*	肺*	6.20E-10	6.50E-10	6.80E-10	6.90E-10		6.90E-10
Skin	皮膚	2.00E-11	3.70E-11	6.00E-11	6.40E-11		6.40E-11
Spleen	脾臓	2.30E-11	3.00E-11	4.20E-11	4.40E-11		4.40E-11
Testes	精巣	2.30E-11	2.70E-11	3.50E-11	3.60E-11		3.60E-11
Thymus**	胸腺**	2.90E-11	7.60E-11	1.30E-10	1.40E-10		1.40E-10
Thyroid	甲状腺	2.30E-08	1.80E-07	3.70E-07	3.90E-07		3.90E-07
Uterus	子宮	3.50E-11	4.10E-11	5.00E-11	5.20E-11		5.20E-11
Remainder*	残りの組織*	2.80E-11	6.40E-11	1.10E-10	1.20E-10		1.20E-10
Effective dose	実効線量	1.30E-09	9.20E-09	1.90E-08	2.00E-08		2.00E-08
(資料出所) ICRP CD1 [32]							
(注) 5 years~45 years の表示は省略した。*: 大腸、肺、胸郭外気道、残部の複合組織に対する線量係数が示されている。							
**: 胸腺線量は、実効線量の計算において食道線量の代用として使用されている。(以下表 3.1.5 と表 3.1.6 も同様)							

表 3.1.5 経過期間別の単位摂取量当たりの累積等価線量(Sv/Bq)

Cs-134, adult worker, Inhalation of particulate aerosol:
AMAD = 5.0 micron, absorption Type F, f1 = 1.0

Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	...	50 years
Adrenals	8.30E-11	5.20E-10	2.00E-09	9.30E-09	1.00E-08		1.00E-08
Bladder Wall	8.30E-11	5.40E-10	2.00E-09	9.00E-09	9.70E-09		9.70E-09
Bone Surface	9.60E-11	5.30E-10	1.90E-09	8.90E-09	9.60E-09		9.60E-09
Brain	8.80E-11	4.30E-10	1.50E-09	6.90E-09	7.40E-09		7.40E-09
Breast	6.20E-11	3.60E-10	1.40E-09	6.30E-09	6.80E-09		6.80E-09
GI-Tract							
Oesophagus	1.00E-10	5.10E-10	1.80E-09	8.40E-09	9.00E-09		9.00E-09
St Wall	1.40E-10	5.30E-10	1.80E-09	8.30E-09	9.00E-09		9.00E-09
SI Wall	8.20E-11	5.30E-10	2.00E-09	9.30E-09	1.00E-08		1.00E-08
ULI Wall	8.70E-11	5.40E-10	2.00E-09	9.00E-09	9.70E-09		9.70E-09
LLI Wall	8.80E-11	6.50E-10	2.20E-09	1.00E-08	1.10E-08		1.10E-08
Colon	8.80E-11	5.90E-10	2.10E-09	9.40E-09	1.00E-08		1.00E-08
Kidneys	7.70E-11	4.90E-10	1.90E-09	8.70E-09	9.40E-09		9.40E-09
Liver	7.80E-11	4.90E-10	1.90E-09	8.80E-09	9.50E-09		9.50E-09
Muscle	9.00E-11	4.70E-10	1.70E-09	7.80E-09	8.40E-09		8.40E-09
Ovaries	8.20E-11	5.50E-10	2.00E-09	9.60E-09	1.00E-08		1.00E-08
Pancreas	9.20E-11	5.50E-10	2.10E-09	9.70E-09	1.00E-08		1.00E-08
Red Marrow	8.70E-11	4.90E-10	1.80E-09	8.30E-09	9.00E-09		9.00E-09
Respiratory Tract							
ET Airways	8.80E-09	1.40E-08	1.50E-08	2.20E-08	2.30E-08		2.30E-08
Lungs	1.00E-10	4.80E-10	1.70E-09	7.90E-09	8.50E-09		8.50E-09
Skin	6.00E-11	3.40E-10	1.20E-09	5.80E-09	6.30E-09		6.30E-09
Spleen	8.10E-11	4.90E-10	1.90E-09	8.70E-09	9.40E-09		9.40E-09
Testes	6.50E-11	4.30E-10	1.60E-09	7.80E-09	8.40E-09		8.40E-09
Thymus	1.00E-10	5.10E-10	1.80E-09	8.40E-09	9.00E-09		9.00E-09
Thyroid	1.00E-10	5.10E-10	1.80E-09	8.30E-09	9.00E-09		9.00E-09
Uterus	8.30E-11	5.50E-10	2.10E-09	9.70E-09	1.00E-08		1.00E-08
Remainder	4.50E-09	7.30E-09	8.60E-09	1.50E-08	1.50E-08		1.50E-08
Effective dose	3.10E-10	8.50E-10	2.20E-09	8.90E-09	9.60E-09		9.60E-09

表 3.1.6 経過期間別の単位摂取量当たりの累積等価線量(Sv/Bq)

Cs-137, adult worker, Inhalation of particulate aerosol:

AMAD = 5.0 micron, absorption Type F, f1 = 1.0

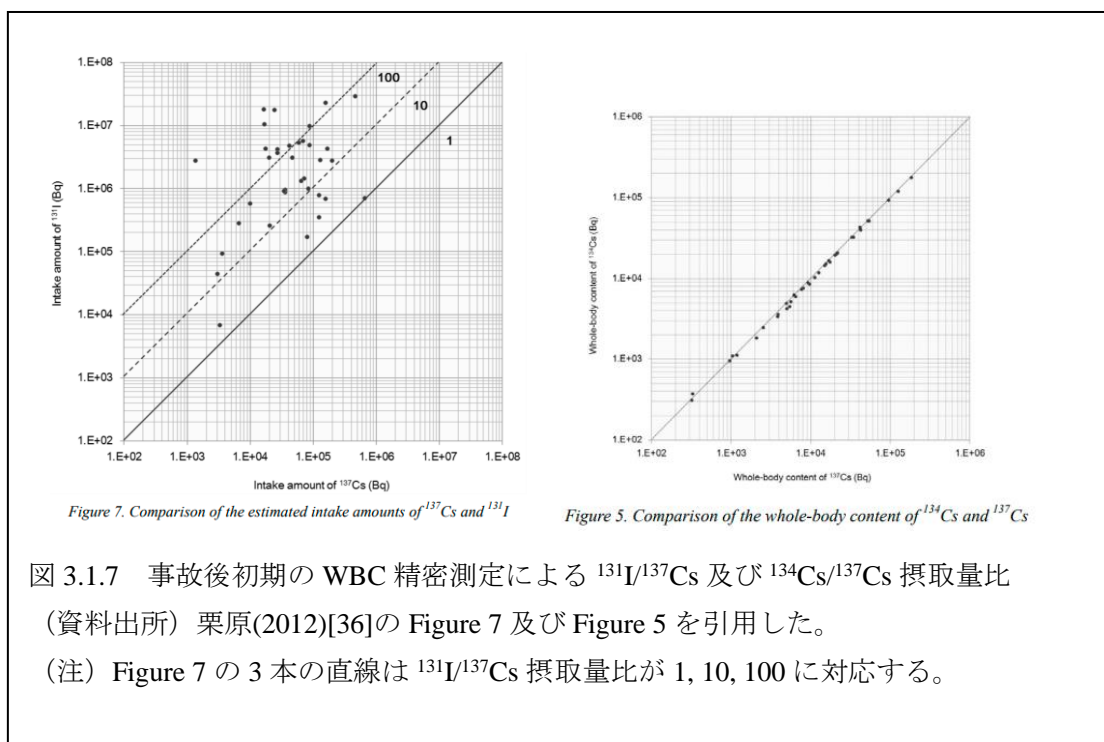
Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	...	50 years
Adrenals	4.80E-11	3.10E-10	1.20E-09	6.10E-09	6.70E-09		6.70E-09
Bladder Wall	5.50E-11	3.60E-10	1.30E-09	6.30E-09	6.90E-09		6.90E-09
Bone Surface	5.30E-11	3.10E-10	1.20E-09	6.00E-09	6.60E-09		6.60E-09
Brain	5.00E-11	2.70E-10	1.00E-09	5.10E-09	5.70E-09		5.70E-09
Breast	4.00E-11	2.50E-10	9.50E-10	4.90E-09	5.40E-09		5.40E-09
GI-Tract							
Oesophagus	5.50E-11	3.10E-10	1.10E-09	5.70E-09	6.30E-09		6.30E-09
St Wall	1.10E-10	3.50E-10	1.20E-09	5.70E-09	6.30E-09		6.30E-09
SI Wall	4.90E-11	3.10E-10	1.20E-09	6.10E-09	6.70E-09		6.70E-09
ULI Wall	5.80E-11	3.60E-10	1.30E-09	6.20E-09	6.90E-09		6.90E-09
LLI Wall	5.90E-11	4.80E-10	1.50E-09	7.20E-09	8.00E-09		8.00E-09
Colon	5.90E-11	4.10E-10	1.40E-09	6.70E-09	7.40E-09		7.40E-09
Kidneys	4.60E-11	3.00E-10	1.10E-09	5.80E-09	6.50E-09		6.50E-09
Liver	4.60E-11	3.00E-10	1.10E-09	5.90E-09	6.50E-09		6.50E-09
Muscle	5.00E-11	2.90E-10	1.10E-09	5.50E-09	6.00E-09		6.00E-09
Ovaries	4.80E-11	3.20E-10	1.20E-09	6.20E-09	6.90E-09		6.90E-09
Pancreas	5.10E-11	3.20E-10	1.20E-09	6.20E-09	6.90E-09		6.90E-09
Red Marrow	4.90E-11	3.00E-10	1.10E-09	5.70E-09	6.30E-09		6.30E-09
Respiratory Tract							
ET Airways	4.40E-09	7.00E-09	7.80E-09	1.20E-08	1.30E-08		1.30E-08
Lungs	7.40E-11	3.10E-10	1.10E-09	5.50E-09	6.10E-09		6.10E-09
Skin	3.90E-11	2.40E-10	9.10E-10	4.70E-09	5.20E-09		5.20E-09
Spleen	4.70E-11	3.00E-10	1.10E-09	5.80E-09	6.50E-09		6.50E-09
Testes	4.10E-11	2.80E-10	1.10E-09	5.40E-09	6.00E-09		6.00E-09
Thymus	5.50E-11	3.10E-10	1.10E-09	5.70E-09	6.30E-09		6.30E-09
Thyroid	5.40E-11	3.00E-10	1.10E-09	5.70E-09	6.30E-09		6.30E-09
Uterus	4.80E-11	3.20E-10	1.20E-09	6.20E-09	6.90E-09		6.90E-09
Remainder	2.20E-09	3.60E-09	4.40E-09	8.90E-09	9.50E-09		9.50E-09
Effective dose	1.70E-10	4.90E-10	1.30E-09	6.00E-09	6.70E-09		6.70E-09

3.1.2.3 空气中濃度比を基にした核種分割方法

本検討会では、核種として ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs を対象とした。また、摂取日における核種別摂取量は空气中濃度に比例すると仮定した。

3月19日から6月末までの毎日の空气中濃度測定値は東電プレスリリース2013年7月5日の公表資料(添付資料3別紙1-2の表「1F環境データ(敷地内空气中放射性物質濃度)を用いたI-131/Cs-137比」)[29]から入手した。なおこれは、3.1.1.2で述べた、東電が預託実効線量の評価に利用したデータであった。

WBC測定では7月以降は ^{131}I がほとんど検出されていない。これは放出された ^{131}I が減衰したことによると考えられた。3.1.1.2で述べたように、東電は7月以降の摂取の場合 ^{131}I は無視していた。本検討会でも7月以降は ^{131}I の摂取は無視して、 ^{134}Cs と ^{137}Cs に分割した。 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比の測定値は誤差を含むため、平滑化処理を施した。なお、3月12日から18日までは、空气中濃度の測定値がないことから、後述のように、本検討会栗原委員が、事故後初期の内部被ばく者についてWBC測定結果から推計した $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 体内摂取量比の結果(Figure 7)を用いた(図3.1.7)[36]。



また、核分裂生成物である ^{137}Cs と放射化生成物である ^{134}Cs のソースタームにおける比率は原子炉の種類、運転期間等を反映した(注)。FDNPP事故の場合、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 空气中濃度比[29]及び栗原による $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 体内摂取量の推計結果(Figure 5)[36]は、共にほとんど1に近いので、本検討会では、便宜的に $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の比率は1と置いた。

(注) 軽水炉型 NPP では、燃料の濃縮ウラン(^{235}U : 3–5%、 ^{238}U : 95–97%)に中性子を当てると核分裂が起こり、 ^{131}I 、 ^{133}Xe 、 ^{137}Cs 等の放射性核分裂生成物が作られる。 ^{131}I や ^{133}Xe は順次 β 崩壊して安定な ^{133}Cs になるが、さらに、 ^{133}Cs が原子炉燃料内に置かれていると、減速された中性子が捕獲されて核反応が起り、放射性核種 ^{134}Cs が生成される。これを放射化生成物という。したがって、 ^{134}Cs の量は、原子炉運転期間等を反映した。

核種別預託実効線量推計式は以下のとおりであった。

預託実効線量合計 cd 、核種摂取比率 $r1=bq1/bq3$, $r2=bq2/bq3(=1)$ が与えられたとき、核種別摂取量及び預託実効線量は次式により推計した。

$$bq1=r1\times cd/D$$

$$bq2=r2\times cd/D$$

$$bq3= cd/D$$

$$cd1=cd\times r1\times edc1/D$$

$$cd2=cd\times r2\times edc2/D$$

$$cd3=cd\times edc3/D$$

ここで、

$$D=r1\times edc1+r2\times edc2+edc3,$$

$edc1, edc2, edc3$: ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs の実効線量係数(Sv/Bq),

$bq1, bq2, bq3$: ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs の摂取量(Bq),

$cd1, cd2, cd3$: ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs の預託実効線量(Sv),

$$cd1+cd2+cd3=cd$$

3.1.2.4 空気中濃度比データ

(内部被ばくの線源)

内部被ばくの線源は、1号機原子炉建屋の水素爆発(3月12日 15:36 JST)、3号機原子炉建屋の水素爆発(3月14日 11:01)、4号機原子炉建屋の水素爆発(3月15日 6:14)等による放射性物質の放出もあったが、原子炉格納容器からの漏出の方が、放出量が大きかった。東電の大気モニタリング調査[37]によると、大気中の放射能濃度は、被災原発での一連の水素爆発と換気作業により、2011年3月16日まで急激な上昇と下降を繰り返し、その後緩やかに下降した(図3.1.8) [33]。放出は3月下旬まで続いた。ソースタームの核種組成は燃料棒における核反応により生成される放射性物質の蓄積によるため、原子炉の状態、時期により異なり、放出量の累積が空気中の核種別濃度に反映した。

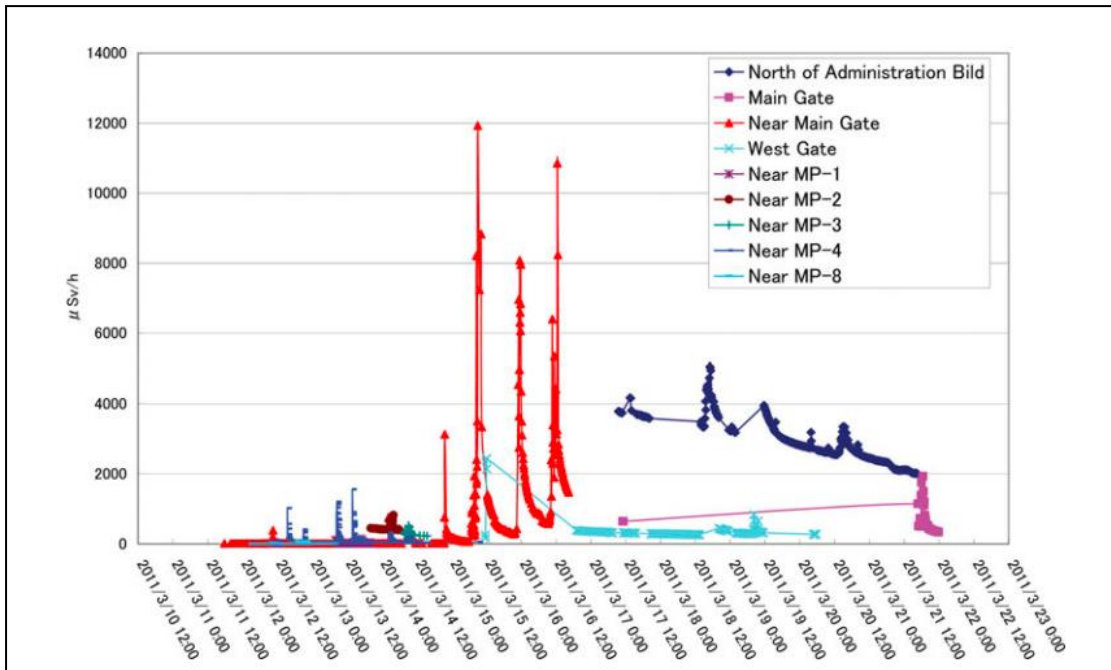


FIGURE 3. Trends in ambient dose rate in the Fukushima Daiichi APP

図 3.1.8 事故直後の FDNPP の周辺線量率の推移 (2011 年 3 月)

(資料出所) 安井(2015)[33]の Figure 3 を引用した。

(空气中濃度比)

本検討会では、摂取日における預託実効線量の値は与件とし、核種別摂取量の割合は空气中の核種別濃度に比例すると仮定し、東電が西門付近で測定したダスト濃度結果(東電プレスリリース 2013 年 7 月 5 日添付資料 3) [29]を用いた。

事故直後は資機材の不足からダスト測定情報は少なく、濃度水準の代表性に問題なしとしないが、核種組成の差は大きくないと考えた。3.1.1.2 で述べたように、このダスト濃度資料は、6 月末までの WBC 測定で ^{131}I が検出されない場合に、WBC 測定時の ^{137}Cs 測定値及び単位摂取量当たりの残留量を用いて評価した内部摂取量に、摂取日の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比を乗じて、 ^{131}I 内部摂取量の推計に用いたものであった。ソースタームの核種組成は、放出源が何号機かによって燃焼度に違いがあると同時に、気中放出かサプレッションチェンバー(注)を経由したベント放出かによっても異なる。したがって、事故直後の 3 月 12 日～18 日はダスト濃度が測定されていないが、この間を、3 月 19 日の濃度比から、 ^{131}I と ^{137}Cs の物理的半減期を利用して遡及推定するのは適切ではなかった。

本検討会では、3 月 12 日～18 日の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 摂取量比は本検討会委員の栗原(2012)の測定結果[36]を利用して、41.7 と仮定した。栗原は事故の初期の 20 mSv 以上(移動式 WBC、NaI(Tl)検出器)の内部被ばく者のうち、東電の依頼を受け、JAEA が 4 月 20 日から 6 月 17 日の間により信頼性の高い結果を得るために椅子型 WBC (HPGe 検出器) と立位型 WBC

(FastscanTM, 米国キャンベラ製) を用いて全身 WBC 測定した 39 人の結果から、体内摂取量の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比の幾何平均が 41.7 (標準偏差 5.9) であった(Figure 7)と述べていた。

(注) サプレッションチェンバー(suppression chamber, S/C) : 原子炉格納容器(PCV)の下部にあるドーナツ状の円筒構造物で、事故が起きた時に発生した蒸気を S/C 内の水で凝縮し、PCV の圧力の上昇を抑える。

3.1.2.5 組織・臓器別預託等価線量

核種別預託実効線量が得られると、組織・臓器別預託等価線量は次式により推計した。

$$cd_{\text{tissue}} = cd1 \times f1_{\text{tissue}} + cd2 \times f2_{\text{tissue}} + cd3 \times f3_{\text{tissue}} \text{ (Sv)}$$

ここで、

tissue: 表 3.1.4~3.1.6 に掲載の組織・臓器、

cd_{tissue} : 組織・臓器の預託等価線量(Sv)、

$cd1, cd2, cd3$: $^{131}\text{I}, ^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$ の預託実効線量(Sv)、

$f1_{\text{tissue}}$: 表 3.1.4 の tissue の単位預託実効線量当たり預託等価線量(Sv/Sv)、

$f2_{\text{tissue}}$: 表 3.1.5 の tissue の単位預託実効線量当たり預託等価線量(Sv/Sv)、

$f3_{\text{tissue}}$: 表 3.1.6 の tissue の単位預託実効線量当たり預託等価線量(Sv/Sv)

3.1.3 年度別臓器線量

組織・臓器別預託等価線量(Sv)は摂取日から 50 年間の累積被ばく線量として与えられた。通常線量に関する年度別臓器吸収線量と合算して、リスク分析に適用するためには、摂取日を考慮しながら、預託等価線量を年度別に分割する必要があった。

(コンパートメントモデル)

任意の期間の累積被ばく線量を求めるためには、預託実効線量の推計方法の詳細を見る必要がある。ICRP Publ. 30, Part 1 [28] のコンパートメントモデルでは、放射線を α 線、 β 線などの非透過性放射線と γ 線、核分裂中性子などの透過性放射線に区分している。3.1.2.2 で既述のとおり、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の崩壊では β 線又は γ 線が放出される。したがって、大部分の器官では、 β 線のエネルギーは線源器官内で完全に吸収されるものと仮定されている。一方、 γ 線のエネルギーは線源器官内で吸収されるほか、他の標的器官でも吸収される。なお、 β 線及び γ 線の放射線加重係数は 1 であるから、等価線量(Sv)の値は吸収線量(Gy)に等しい。預託線量は、原理的には、線源器官における単位時間当たり崩壊数関数と、線源器官から放出される放射線が標的器官で吸収される比実効エネルギー(specific effective energy, SEE)関数の組合せで表わされる被ばく線量率関数を時間 t に関して 0 から 50 年の区間を積分したものであった (注)。例えば摂取日が 3 月 12 日の場合、2010 年度分の臓器吸収線量

は、積分区間が、2011年3月12日から同年3月31日までの区間の値であった。また、2011年度分の臓器吸収線量は、2011年4月1日から2012年3月31日までの区間の積分値であった。更に2013年度分が必要であれば、2012年4月1日から2013年3月31日までの区間について積分した。

(注) 単位放射能のある放射性核種 j を $t=0$ に急性摂取したとき、標的器官 T における期間 $(0, t)$ の累積内部被ばく線量 $F_{T,j}(t)$ は次のように、積分の形で表わされる。

$$F_{T,j}(t) = \int_0^t c \sum_s \Sigma_j [u_{s,j}(t) \Sigma_i SEE_{i,j}(T \leftarrow S, t)] dt$$

ここで

T : 標的器官

S : 線源器官

i : 放射線の種類

j : 放射性核種

$u_{s,j}(t)$: 放射性核種 j を摂取した後の時間 t における単位時間内の線源器官 S の中での変換の数

$SEE_{i,j}(T \leftarrow S, t)$: 線源器官 S の中で放射性核種 j の崩壊により放出される種類 i の放射線が、標的器官 T の中で吸収される比実効エネルギー (specific effective energy)

SEE の値は、標準ファントムに基づき計算した比吸収割合 (線源臓器から放出された放射線エネルギーの内、標的臓器 1 kg 当たり吸収される割合) と放射性核種の崩壊データ (放出割合・エネルギー、崩壊形式等々) で決定される。この際、体内動態モデルが、放射性核種の崩壊データとともに、各線源臓器における累積崩壊数を計算するために利用される。なお、成人の預託線量当量の計算においては、 SEE は時間 t に依存しないと仮定される。 $q_{s,j}(t)$ を放射性核種 j を摂取後、時間 t における線源器官 S の放射能 (残留放射能) (Bq) とすると

$$q_{s,j}(t) = \exp(-\lambda_{s,j}t)$$

となる。

$$u_{s,j}(t) = -dq_{s,j}(t)/dt = \lambda_{s,j} \exp(-\lambda_{s,j}t)$$

より、累積崩壊数 $U_{s,j}(t)$ は、

$$U_{s,j}(t) = \int_0^t u_{s,j}(t) dt = \int_0^t \lambda_{s,j} \exp(-\lambda_{s,j}t) dt = 1 - \exp(-\lambda_{s,j}t)$$

したがって、 $F_{T,j}(t)$ は、異なるパラメータを持つ複数の指数関数の組合せで表わされる。

$$F_{T,j}(t) = c \sum_s \Sigma_j [\Sigma_i SEE_{i,j}(T \leftarrow S) U_{s,j}(t)] = c \sum_s \Sigma_j [\Sigma_i SEE_{i,j}(T \leftarrow S) (1 - \exp(-\lambda_{s,j}t))]$$

なお、表 3.1.4~3.1.6 によると、 ^{131}I は摂取から 1 年経過で各組織・臓器の累積預託等価線量は 50 年後の値と等しく、また、 ^{134}Cs と ^{137}Cs は、摂取から 5 年経過で 50 年後の値と等

しかつた。

(補間推計)

被ばく線量率関数の形式が複雑であり、また積分区間を自由に設定できる公開された線量コードがないため、本検討会では便宜的に ICRP CD1 [32]の摂取日からの経過期間(1 日、7 日、30 日、1 年、5 年および 50 年等)別単位摂取量当たり累積等価線量(Sv/Bq)の表 3.1.4～3.1.6 を利用した。与えられた摂取日のデータを基にして、核種ごとに、目標とする組織・臓器について 2011、2012、2013 年度末時点に相当する経過期間の単位摂取量当たり累積等価線量を補間推計した(注)。次いで、その結果を用いて、各年度の単位摂取量当たり等価線量(Sv/Bq)、すなわち、臓器吸収線量(Gy/Bq)を推計した。

(注) 表で与えられた摂取日からの経過期間 t_1 と t_2 の間の経過期間 p ($t_1 < p < t_2$) についての補間は次により、預託等価線量に漸近する指数曲線を仮定して推計した。

p : 摂取日からの経過期間 (単位は日 d または年 y)、

i : 与えられた核種 ($i=1: {}^{131}\text{I}$, $2: {}^{134}\text{Cs}$, $3: {}^{137}\text{Cs}$)、

tissue: 組織・臓器について、

$F(p) = F(p, i, \text{tissue})$: p 時点の単位摂取量当たり累積等価線量(Sv/Bq)

$G(p) = F(50y) - F(p)$

とおくと、

$\log G(p) \doteq \log G(t_1) + (p - t_1)/(t_2 - t_1) \times \log G(t_2)/G(t_1)$

$F(p) = F(50y) - G(p)$

が求められる。

ただし、 $G(t_2) = 0$ の場合は、便宜、 $G(t_2) = 1.0 \times 10^{-20}$ とおいた。

3.2 結果

3.2.1 撮取日

3.2.1.1 指定年月日の考え方

緊急作業者の指定年月日の考え方に関する東電 HD への照会に対する回答は図 3.2.1 のとおりであった。

【照会（図 3.1.3 再掲）】

緊急作業者の指定日の設定の考え方を、次のケースについて、ご教示願いたい。

- ① 事故以前から福島第一原子力発電所で働いており、事故後も引き続き仕事をしたケース。
- ② 事故以前から福島第一原子力発電所で働いていたが、事故後間をおいてから仕事に復帰したケース。
- ③ 事故後間をおいてから新規に仕事をはじめたケース。

【回答】

- ①のケース（継続して作業）は、一旦指定を解除し、3月11日を指定日とした。
- ②のケース（登録されていたが、事故後間をおいて仕事に復帰）は、一旦指定を解除し、仕事に復帰した日を指定日とした。
- ③のケース（登録が無く、事故後仕事を開始）は、新規に仕事をはじめた日を指定日とした。

図 3.2.1 緊急作業者の指定年月日の考え方に関する東電 HD の回答

東電 HD の回答によると、指定開始日は従事開始日とみなすことができた。すなわち、事故時の放射線管理上の便宜的な取り扱いとして、FDNPP で事故前から従事者指定され、事故後も勤務が継続していた者について、原則として、事故前日の3月10日に全員一旦従事者指定解除を行い、事故後の作業開始日に再度従事者指定を行ったと述べていた。

（注）ごく一部には、3月10日以前が指定年月日となっている指定解除記録があった。

3.2.1.2 撮取日の設定

したがって、指定年月日が3月11日以前の者は、撮取日を最初の水素爆発があった3月12日に設定し、指定年月日が3月12日以降の者は指定年月日を撮取日とすることは妥当であった。本検討会は、2010年度及び2011年度の内部被ばく線量（預託実効線量）を核種別

預託線量に分割するにあたって、摂取日を指定開始年月日に基づいて表 3.2.2 のように設定した。

2011 年 3 月の預託実効線量が正の者 825 人のうち、指定年月日が 2011 年 3 月 11 日以前は 734 人で、一方、3 月 12 日以降は 91 人であった。特に、東電社員については、大部分の者が摂取日を 3 月 12 日に設定されていた。

また、2011 年度に正の預託実効線量がある者は 352 人であった。しかし、2011 年度に 2 つの預託実効線量の記録（指定年月日：4 月 1 日 1.31 mSv、5 月 10 日 0.41 mSv）がある者を重複計上しているため、表 3.2.2、3.2.4 および 3.2.5 では 353 人と表記している。

表 3.2.2 指定年月日を基に摂取日を設定

預託実効線量の記録年度	指定年月日	摂取日の設定	適用した人数（人）		
			計	東電	協力
2010 年度	2011 年 3 月 11 日以前	2011 年 3 月 12 日	734	555	179
	2011 年 3 月 12 日以降	当該指定年月日	91	10	81
	計		825	565	260
2011 年度	2011 年 3 月 31 日以前	2011 年 4 月 1 日	231	35	196
	2011 年 4 月 1 日以降	当該指定年月日	122*	11	111*
	計		353*	46	307*

(注) *: 重複計上

後述するように、摂取日の核種別空气中濃度比と核種別摂取量比が等しいとの仮定の下で、核種別預託線量を推計した。

3.2.1.3 2010 年度預託実効線量の摂取日の分布

設定した摂取日について、3 月 12 日以降の日別分布は表 3.2.3 のとおりであった。3 月 12 日が摂取日の人数が 740 人と 90% を占めていた。

表 3.2.3 2011 年 3 月の預託実効線量の摂取日の分布（単位：人）

摂取日	12 日	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30	計
計	740	1	3	2	13	5	16	17	2	4	3	4	2	2	4	5	2	825
東電	555	1	0	0	1	2	1	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	565
協力	185	0	3	2	12	3	15	13	2	3	3	4	2	2	4	5	2	260

3.2.1.4 2011 年度預託実効線量の摂取日の分布

2011 年度の預託実効線量が正の者 352 人の摂取日の分布は表 3.2.4 のとおりであった。東

電社員、協力企業職員ともに、大部分の者が摂取日を4月1日に設定されていた。

表 3.2.4 2011 年度の預託実効線量の摂取日の分布

指定年月日	摂取日の設定	適用した人数（人）		
		計	東電	協力
2011年3月以前	2011年4月1日	231	35	196
2011年4月	当該指定年月日	52*	8	44*
5月	当該指定年月日	37*	0	37*
6月	当該指定年月日	14	1	13
7月	当該指定年月日	12	1	11
8月	当該指定年月日	2	0	2
9月	当該指定年月日	2	0	2
11月	当該指定年月日	3	1	2
計		353*	46	307*

(注)*: 重複計上

各月の預託実効線量の分布は表3.2.5のとおりであった。4月は283人のうち166人(58.7%)が2 mSv を超えていた。5月は2 mSv を超える記録は6人で、6月以降は皆無であった。

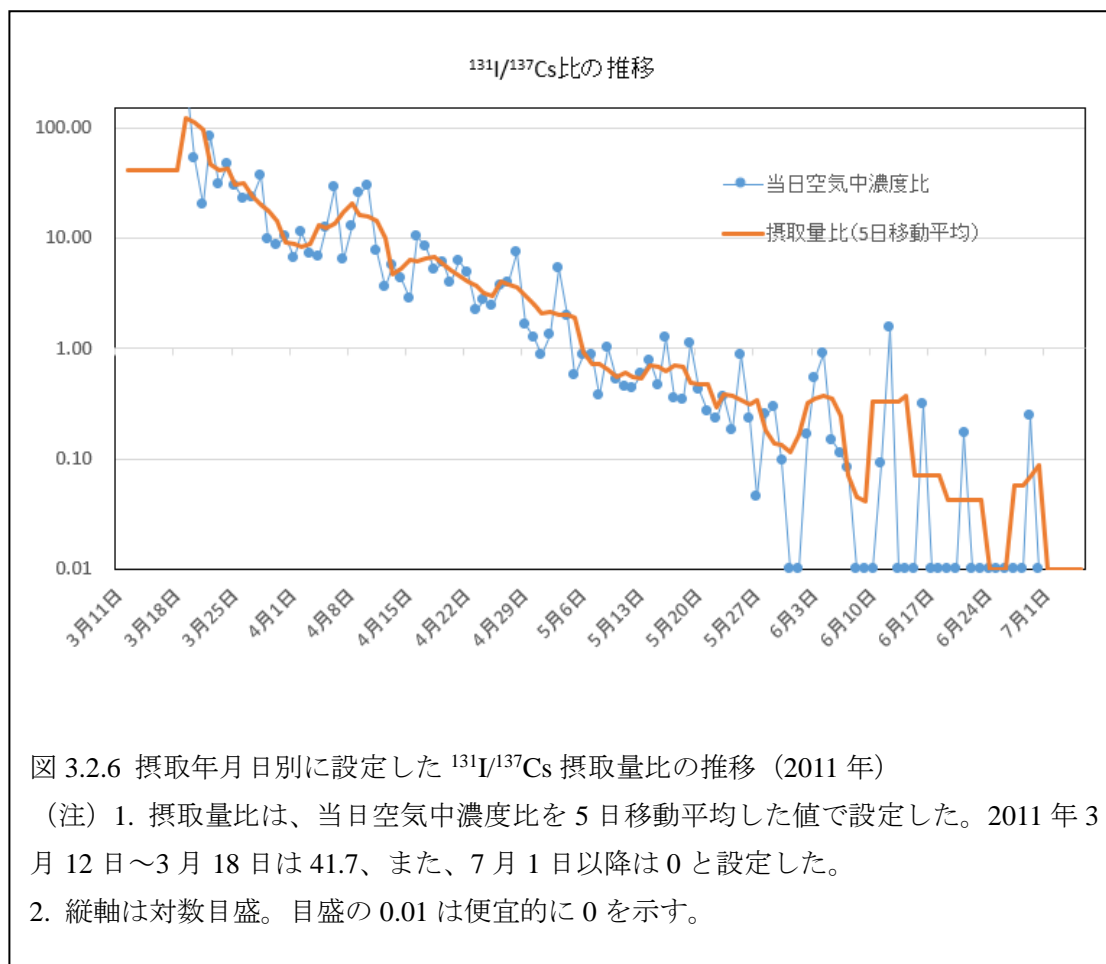
表 3.2.5 摂取月別 2011 年度預託実効線量の分布 (単位：人)

線量(mSv)	2011年4月	5月	6月	7月	8月	9月	11月	計	
0 超～0.1	26	24	10	10		2	3	75	181*
0.1 超～0.5	35	7*	4	1	2			49*	
0.5 超～1	20							20	
1 超～2	36*			1				37*	
2 超～5	112	5						117	
5 超～10	36	1						37	
10 超	18							18	
計	283*	37*	14	12	2	2	3	353*	

(注)*: 重複計上

3.2.2 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 摂取量比

核種別摂取量推計に用いた摂取日別 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 摂取量比データは図 3.2.6 のとおりであった。



3.2.3 実効線量係数 ICRP CDI

(核種の沈着と組織・臓器への影響)

表 3.2.7 は、内部被ばくに関して、核種別実効線量係数並びに単位預託実効線量当たり組織・臓器別預託等価線量を表す。吸入された ^{131}I は、甲状腺に集中的に作用し、単位摂取量当たり甲状腺等価線量は預託実効線量の係数の 20 倍の大きさであった。一方、結腸、肺、赤色骨髄など甲状腺以外の組織・臓器への影響はほとんどなかった。

吸入された ^{134}Cs 及び ^{137}Cs は全身に分布するため、組織・臓器別単位摂取量当たり預託等価線量は、すべての組織及び臓器において預託実効線量の係数とほぼ同じ大きさであった。

表 3.2.7 核種別実効線量係数並びに単位預託実効線量当たり組織・臓器別預託等価線量

核種	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
性状	蒸気	AMAD: 5 μm	AMAD: 5 μm
実効線量係数(Sv/Bq)	2.0×10^{-8}	9.6×10^{-9}	6.7×10^{-9}
単位預託実効線量当たり組織・臓器別預託等価線量(Sv/Sv)			
	$f_{1\text{tissue}}$	$f_{2\text{tissue}}$	$f_{3\text{tissue}}$
甲状腺	19.5	0.94	0.94
結腸	0.003	1.02	1.10
肺	0.035	0.89	0.91
赤色骨髄	0.005	0.94	0.94

(資料出所) ICRP CD1[32]

(注) $f_{1\text{tissue}}$, $f_{2\text{tissue}}$, $f_{3\text{tissue}}$ は 3.1.2.5 を参照。

表 3.2.8 単位預託実効線量当たり核種別預託実効線量並びに組織・臓器別預託等価線量

核種の組成	$^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比	(参考) 対応する時期	単位預託実効線量当たり預託実効線量(Sv/Sv)*			単位預託実効線量当たり組織・臓器別預託等価線量(Sv/Sv)**				
			計	^{131}I 由来	^{134}Cs 由来	^{137}Cs 由来	甲状腺	結腸	肺	赤色骨髄
ヨウ素が支配的	100	2011年 3月20-21日	1	0.99	0.01	0.00	19.4	0.01	0.04	0.01
	10	3月30-31日	1	0.93	0.04	0.03	18.1	0.08	0.10	0.08
混合	2	5月3-4日	1	0.71	0.17	0.12	14.1	0.31	0.28	0.28
	1	5月6日	1	0.55	0.26	0.19	11.2	0.48	0.44	0.42
セシウムが支配的	0.1	6月7日	1	0.11	0.53	0.37	3.0	0.94	0.80	0.84
	0	7月1日	1	0	0.59	0.41	0.93	1.05	0.90	0.94

(注) *: $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 摂取量比を基にして、3.1.2.3 で述べた方法により推計した。

**：核種別預託実効線量に、表 3.2.7 の「組織・臓器別預託等価線量の預託実効線量に対する比率」を乗じた後、合算して推計した。

3.2.4 核種の組成に応じた核種に由来する預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量

$^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 摂取量比により、ヨウ素の支配的な時期からセシウムの支配的な時期へと核種の組成の段階ごとに、単位預託実効線量当たりの核種別預託実効線量(Sv/Sv)及びそれに基づいた組織・臓器別預託等価線量(Sv/Sv)を推計した(表 3.2.8)。

ヨウ素が支配的な時期には、預託実効線量へのセシウムの寄与は 10%にも満たなかった。セシウムが支配的になるにつれて、ヨウ素の寄与は低下したが、5月時点でも半分近くを占めていた。6月になると、ヨウ素の寄与は1割程度に低下した。一方で、セシウムの寄与が段々と大きくなった。 ^{134}Cs と ^{137}Cs では、預託実効線量係数の大きい ^{134}Cs の寄与割合の方が ^{137}Cs よりも大きかった。7月以降は、ヨウ素の影響はなくなり、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の寄与割合はほぼ 6:4 であった。

単位預託実効線量当たり組織・臓器別預託等価線量(Sv/Sv)で見ると、甲状腺線量はヨウ素が支配的な時期(3月)には 18-19 Sv/Sv と大きな値を示したが、徐々に値が小さくなった。一方で、結腸、肺、赤色骨髄線量は、3月には無視できる程度であったが、セシウムが支配的になるに従い、大きな値となった。特に、6月の単位預託実効線量当たりの結腸線量は 0.94 Sv/Sv、また、7月以降は 1.05 Sv/Sv と、外部被ばくの線量計指示値から結腸線量への換算係数(GB: 0.823 Gy/Sv、EPD: 0.840 Gy/Sv、表 4.2.7 参照) [4]を上回ったことは注目された。

3.2.5 組織・臓器別預託等価線量の分布

個人別に核種別預託実効線量から組織・臓器別預託等価線量を推計し、年度別、組織・臓器別預託等価線量分布を比較した。

3.2.5.1 2010年度の線量分布

2010年度の預託実効線量が正の者 825人について、預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量の分布は表 3.2.9 及び図 3.2.10 のとおりであった。2011年3月の預託実効線量の平均 15.9 mSv に対して、甲状腺預託等価線量の平均は約 20 倍の 304.4 mSv であった。一方、結腸、肺、赤色骨髄の預託等価線量の平均は各々 0.4 mSv、0.8 mSv、0.4 mSv と、1 mSv を下回る低い値であった。

摂取された ^{131}I は質量約 30g の甲状腺に集積し、吸収線量は単位 J/Kg で定義されているため、甲状腺預託等価線量の分布を見ると、250~500 mSv の範囲に 231人、また、500 mSv 超に 113人含まれていた。UNSCEAR 2020 の表 15[20, 21]は、甲状腺線量が最も高い 6 人の作業員の甲状腺線量推定値を 4.6-12 Sv (平均 7.7 Sv) としており、本検討会の推計値の最高 10.3 Sv はこの範囲に含まれていた。

図 3.2.10 の示すように、2011年3月の内部被ばく線量に関して、甲状腺と結腸では平均預託等価線量のオーダーが 3桁も違うため、議論している線量の組織・臓器を明確にする必要がある。

表 3.2.9 預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量の分布特性値
(2010年度の預託実効線量が正の者 825人)

特性値	預託 実効線量	甲状腺預託 等価線量	結腸預託 等価線量	肺預託 等価線量	赤色骨髄預託 等価線量
	(単位：mSv)				
最低	0.1	1.9	0.0	0.0	0.0
第1四分位	5.5	105.3	0.1	0.3	0.1
中位数	11.0	210.2	0.3	0.6	0.2
平均	15.9	304.4	0.4	0.8	0.4
第3四分位	18.1	346.5	0.4	0.9	0.4
最高	540.0	10.3 Sv	12.6	27.8	12.4

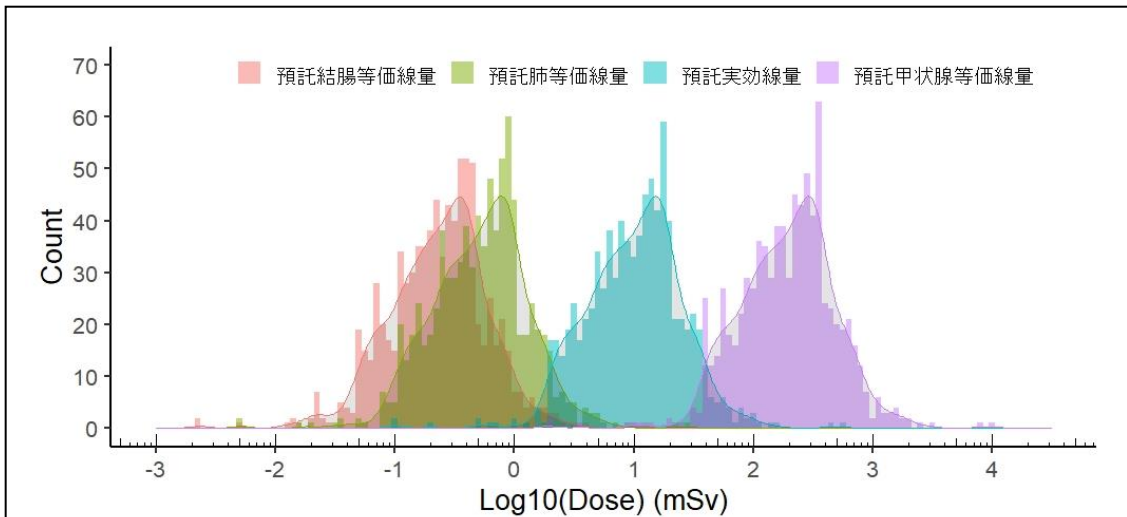


図 3.2.10 2010年度の預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量の分布
(2010年度の預託実効線量が正の者 825人)

- (注) 1) X軸は対数目盛、曲線はカーネル密度推計結果。
2) 赤色骨髄線量の分布はほとんど結腸線量と重なるので省略した。

3.2.5.2 2011年度の線量分布

2011年度の預託実効線量が正の者 352人について、預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量の分布は表 3.2.11 及び図 3.2.12 のとおりであった。2011年度の平均預託実効線量

3.0 mSv に対して、甲状腺の平均預託等価線量は 52.1 mSv と前年度の約 1/6 に減少した。一方、結腸（平均 0.3 mSv）、肺（0.4 mSv）、赤色骨髄（0.3 mSv）は 0.5 mSv を下回る水準で、前年度からの減少幅は小さかった。2011 年度の甲状腺と結腸の平均預託等価線量は 2桁オーダーの差であった。

表 3.2.11 預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量の分布特性値
(2011 年度の預託実効線量が正の者 352 人)

特性値	預託実効線量	甲状腺預託等価線量	結腸預託等価線量	肺預託等価線量	赤色骨髄預託等価線量
	(単位：mSv)				
最低	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
第1四分位	0.2	2.0	0.0	0.0	0.0
中位数	2.0	30.2	0.2	0.2	0.2
平均	3.0	52.1	0.3	0.4	0.3
第3四分位	3.5	61.9	0.4	0.4	0.3
最高	38.4	668	4.8	5.1	4.3

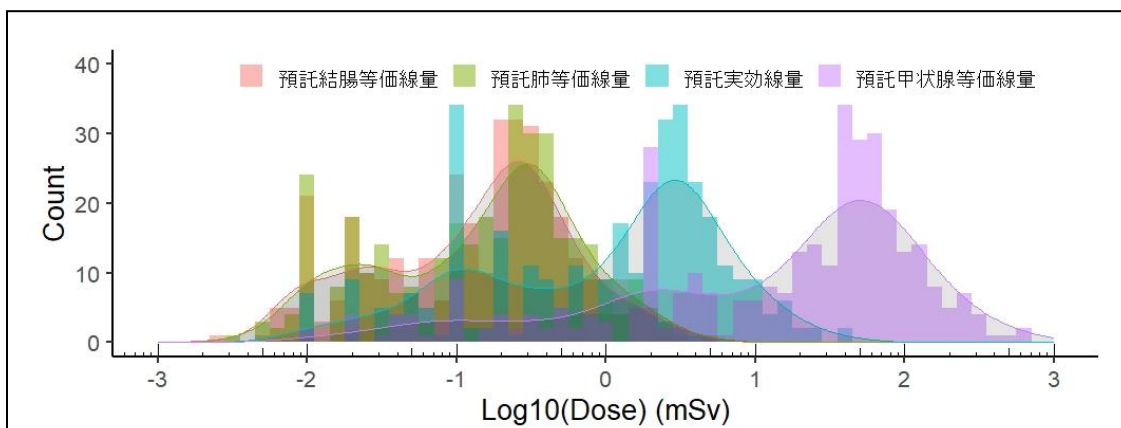


図 3.2.12 2011 年度の預託実効線量及び組織・臓器別預託等価線量の分布
(2011 年度の預託実効線量が正の者 352 人)

(注) 1) X 軸は対数目盛、曲線はカーネル密度推計結果。
2) 赤色骨髄線量の分布はほとんど結腸線量と重なるので省略した。

3.2.6 預託等価線量から年度線量への変換方法

通常作業及び緊急作業を合わせた職業被ばくに対する死亡及び罹患リスクを計算するた

めには、50年間の被ばく量を積算した預託等価線量から年度の内部被ばく線量への変換が必要であった。これには、ICRP CD1[32]を利用した。このCD1には、表3.1.4～3.1.6のように、摂取日から1日、7日、30日、1年、5年および50年など特定の時点の単位摂取量当たり累積等価線量(Sv/Bq)が表示されていた。それ以外の時点の値は補間推計した。

なお、3.2.1.4のように、設定された摂取日の最後は2011年11月であった。¹³¹I（実効半減期 成人 7 d）の場合、1年経過後の累積等価線量は預託等価線量に等しい（表3.1.4）ため、2012年度末までの積分期間で預託等価線量と等しくなった。¹³⁴Cs（実効半減期 64–88 d）及び¹³⁷Cs（実効半減期 70–99 d）の場合は、2年経過後の補間推計値は、預託等価線量とほぼ等しい（表3.1.5及び表3.1.6）ため、2013年度末までの積分期間で預託等価線量と等しくなった。したがって、緊急作業による内部被ばくの影響があるのは、2010～2013年度であった。

(注) 具体的に、預託等価線量から年度線量への変換方法は以下のとおり。

(1) 摂取日(intake.date)の単位預託実効線量(Sv)について、目標とする組織・臓器(tissue)の年度末(year.end)の単位預託実効線量当たり累積等価線量 $H(\text{intake.date, tissue, year.end})(\text{Sv})$ は、次により推計した。

$$H(\text{intake.date, tissue, year.end}) = \sum_i F(i, \text{tissue, p}) \times \text{bqi}$$

ここで、

p: 摂取日 intake.date から指定年度末日 year.end までの経過期間(単位は日 d または年 y)。
ただし、 $p < 0$ の場合は $H=0$ とする。

$F(i, \text{tissue, p})$: 3.1.3 で定義した関数で、与えられた核種 i ($i=1$: ¹³¹I, 2 : ¹³⁴Cs, 3 : ¹³⁷Cs)、組織・臓器 tissue について、摂取日からの経過期間 p 時点の単位摂取量当たり累積等価線量 (Sv/Bq)。

bqi ($i=1, 2, 3$): 3.1.2.3 で定義した核種 i の摂取量(Bq)。

(2) 摂取日 intake.date の預託実効線量 cd(Sv)について、目標とする組織・臓器 tissue の year 年度の臓器吸収線量 $O(\text{intake.date, tissue, year.end})(\text{Gy})$ は、次のとおり。

$$O = \text{cd} \times [H(\text{intake.date, tissue, year.end}) - H(\text{intake.date, tissue, previous.year.end})]$$

ここで、

previous.year.end: 指定年度の前年度末日

なお、2010年度に関しては、 $H(\dots, \dots, \text{previous.year.end}) = 0$

3.2.7 単位預託実効線量当たり年度別結腸吸収線量

3.2.7.1 与えられた摂取日の下での年度別結腸吸収線量の推計

人体の代表的臓器線量である結腸吸収線量を取り上げて、年度別結腸吸収線量を推計するプロセスを示した。例えば、摂取比=100に相当する摂取日3月20日を仮定すると、2010

年度末(2011年3月31日)までは11日、2011年度末までは377日、2012年度末までは742日であった。各年度末の核種別累積結腸等価線量を推計した。次いで、各年度の増分により、年度の結腸吸収線量を推計した(表3.2.13)。その結果、単位預託実効線量当たり2010年度末の累積結腸等価線量は0.003(Sv/Sv)、また、2011年度末0.010、2012年度末0.011であった。このケースでは、内部摂取の影響は2012年度末まで継続した。2013年度は累積結腸等価線量の増分は0であったため、内部摂取の影響は2013年度以降は消失した。したがって、単位預託実効線量当たりの2010年度結腸吸収線量は0.003(Gy/Sv)、2011年度0.007、2012年度0.001であった。

表 3.2.13 摂取日 3 月 20 日の場合の単位預託実効線量当たり年度末累積結腸等価線量及び年度結腸吸収線量

核種	単位預託実効線量当たり 年度末累積結腸等価線量(Sv/Sv)				単位預託実効線量当たり 年度結腸吸収線量(Gy/Sv)		
	2010 年度	2011	2012	2013	2010 年度	2011	2012
年度末までの 経過日数	11 日	377	742	1107			
¹³¹ I	0.0024	0.0032	0.0032	0.0032	0.0024	0.0008	0.0000
¹³⁴ Cs	0.0004	0.0042	0.0044	0.0044	0.0004	0.0038	0.0002
¹³⁷ Cs	0.0003	0.0030	0.0033	0.0033	0.0003	0.0027	0.0003
計	0.0031	0.0104	0.0109	0.0109	0.0031	0.0074	0.0005

(注) 本表では、計算過程を明らかにするため、小数点以下4桁まで表示した。

3.2.7.2 核種の組成に応じた摂取日別年度別結腸吸収線量

核種の組成に応じた摂取比に対応する摂取日を仮定すると、摂取日から各年度末日までの経過日数は表3.2.14となった。これを基に、補間推計を行い、次いで、¹³¹I/¹³⁷Cs摂取比に対応する摂取日別各年度の単位預託実効線量当たり累積結腸等価線量及び年度結腸吸収線量を推計した(表3.2.15)。

この結果、以下のことがわかった。

- ・ヨウ素が支配的な時期の摂取に関して、¹³¹Iは実効半減期が短いため、3月20日摂取の場合、¹³¹Iに由来する結腸預託等価線量の約2/3が2010年度に割り当てられ、約1/3が2011年度に割り当てられた。2012年度には影響は皆無であった。
- ・ヨウ素とセシウムの混合またはセシウムが支配的な時期の摂取に関して、セシウムは実効半減期が長いため、3月20日に摂取した場合でも、セシウムに由来する結腸預託等価線量の2010年度への影響は小さく、大部分は2011年度、また1割程度は2012年度に振り分けられた。
- ・摂取日が遅くなるほど、単位預託実効線量当たり2011年度結腸吸収線量は大きくなった。しかし、預託実効線量の値そのものは摂取日が遅くなるほど減少したことに留意する必要

があった。

- ^{131}I の摂取による影響は数カ月間続き、セシウムの摂取による影響は2年以内に消失することがわかった。

表 3.2.14 摂取日別各年度末日までの経過日数

核種の組成	(参考) 対応する $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比	摂取日	摂取日から年度末日までの経過日数 (日)			
			2010 年度	2011	2012	2013
ヨウ素が 支配的	100	2011 年 3 月 20 日	11	377	742	1107
	10	3 月 30 日	1	367	732	1097
混合	2	5 月 3 日	—	333*	698	1063
	1	5 月 6 日	—	330*	695	1060
セシウムが 支配的	0.1	6 月 7 日	—	298*	663	1028
	0	7 月 1 日	—	274*	639	1004

(注) 経過日数 11 日時点の値は、1 日～7 日の間で補間、365 日までの時点(*)は 30 日～1 年の間で補間、367 日以上の時点は 1 年～5 年の間で補間した。

表 3.2.15 摂取日別各年度の累積結腸等価線量及び年度結腸吸収線量

(単位預託実効線量当たり)

(参考) 対応する $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比	摂取日	預託結腸等価線量 (Sv/Sv)	年度結腸吸収線量(Gy/Sv)			
			2010 年度	2011	2012	2013
100	2011 年 3 月 20 日	0.0109	0.0031	0.0074	0.0005	0.0000
10	3 月 30 日	0.0604	0.0020	0.0543	0.0041	0.0000
2	5 月 3 日	0.3114	—	0.2825	0.0288	0.0001
1	5 月 6 日	0.5003	—	0.4527	0.0475	0.0001
0.1	6 月 7 日	0.9833	—	0.8658	0.1171	0.0005
0	7 月 1 日	1.0675	—	0.9164	0.1504	0.0007

3.2.7.3 摂取日と預託実効線量から年度別組織・臓器吸収線量を推計するコード

各個人の摂取日 intake.date 及び預託実効線量 cd (mSv)のデータから目標とする組織・臓器 tissue の年度別臓器吸収線量 (mGy) を推計する R スクリプトを実装した。

```
#####
# 摂取日、預託実効線量から 2010-2013 年度の累積等価線量、年度臓器吸収線量を求める関数
#####
# ratio.tab: I-131/Cs-137 ratio by intake date from 19 March to 30 June
dim(ratio.tab)
[1] 104  2
head(ratio.tab)
  intake.date ratio
8  2011/03/19 121.67
9  2011/03/20 112.11
10 2011/03/21  95.80
11 2011/03/22  46.77
12 2011/03/23  42.18
13 2011/03/24  42.62

# tab: list of ICRP CD1
# tab[[i]], i=1: I-131 (vapour), 2: Cs-134 (AMAD 5μ), 3: Cs-137 (AMAD 5μ)
dim(tab[[1]])
[1] 27 11
head(tab[[1]])
  tissue X1.day X7.days X30.days X1.year X5.years X10.years X20.years
1  Adrenals 2.3E-11 3.0E-11 4.2E-11 4.4E-11 4.4E-11 4.4E-11 4.4E-11
2 Bladder Wall 6.1E-10 6.7E-10 6.8E-10 6.9E-10 6.9E-10 6.9E-10 6.9E-10
3 Bone Surface 2.9E-11 6.4E-11 1.1E-10 1.2E-10 1.2E-10 1.2E-10 1.2E-10
4  Brain 2.6E-11 7.1E-11 1.3E-10 1.3E-10 1.3E-10 1.3E-10 1.3E-10
5  Breast 2.0E-11 3.3E-11 5.2E-11 5.5E-11 5.5E-11 5.5E-11 5.5E-11
6  Oesophagus 2.9E-11 7.6E-11 1.3E-10 1.4E-10 1.4E-10 1.4E-10 1.4E-10
  X30.years X45.years X50.years
1 4.4E-11 4.4E-11 4.4E-11
2 6.9E-10 6.9E-10 6.9E-10
3 1.2E-10 1.2E-10 1.2E-10
4 1.3E-10 1.3E-10 1.3E-10
5 5.5E-11 5.5E-11 5.5E-11
6 1.4E-10 1.4E-10 1.4E-10

tab[[1]][["tissue"]] # names of tissue in tab
  tissue
1  Adrenals
2  Bladder Wall
3  Bone Surface
4  Brain
5  Breast
6  Oesophagus
7  St Wall # Stomach
8  SI Wall # Small Intestine
9  ULI Wall # Upper Large Intestine
10 LLI Wall # Lower Large Intestine
11 Colon
12 Kidneys
13 Liver
14 Muscle
15 Ovaries
16 Pancreas
17 Red Marrow
18 ET Airways # Extrathoracic
19 Lungs
```

```

20      Skin
21      Spleen
22      Testes
23      Thymus
24      Thyroid
25      Uterus
26      Remainder
27 Effective dose

```

```

#####
# 摂取日、預託実効線量から 2010-2013 年度の累積等価線量、年度臓器吸収線量を求める関数
# intake.date: 摂取日 yyyy/mm/dd
# cd: 預託実効線量
# tissue: tab[[i]]の行番号で指定。 11: colon, 19: lungs, 17: red marrow, 24: thyroid
annual.organ.d<-function(intake.date, cd, tissue) {
r1<-ratio(intake.date) # I-131/Cs-137
r2<-1 # Cs-134/Cs-137
edc1<-2.0E-08 # 実効線量係数 I-131
edc2<-9.6E-09 # 実効線量係数 Cs-134
edc3<-6.7E-09 # 実効線量係数 Cs-137
D<-r1*edc1+r2*edc2+edc3
bq1<-r1*cd/D # 摂取量 I-131
bq2<-r2*cd/D # 摂取量 Cs-134
bq3<-cd/D # 摂取量 Cs-137
year.end<-c("2011/03/31", "2012/03/31", "2013/03/31", "2014/03/31") # 2010-2013 年度末日
# 摂取日から年度末日 year.end までの経過日数(vector)
p<-as.integer(difftime(year.end, intake.date))
days.passed<-c(1, 7, 30, 365*c(1, 5, 10, 20, 30, 45, 50)) # tab の表頭の経過日数
# interval: p が含まれる tab の区間番号(vector)
# p<0 なら interval=0 を返す
interval<-integer(length=4)
for(k in 1:4) {
for(j in 1:4) {
if(p[k]>=days.passed[j] & p[k]<days.passed[j+1]) {interval[k]<-j}
}}
# H: 2010-2013 年度末の累積等価線量(vector)
H<-numeric(length=4)
for(t in 1:4) {
H[t]<-F(p[t], 1, interval[t], tissue)*bq1 +
F(p[t], 2, interval[t], tissue)*bq2 +
F(p[t], 3, interval[t], tissue)*bq3
}
if(H[1]<0) {H[1]<-0}
# 2010-2013 年度の臓器吸収線量
d2010<-H[1]
d2011<-H[2]-H[1]
d2012<-H[3]-H[2]
d2013<-H[4]-H[3]
organ.dose<-c(H, d2010, d2011, d2012, d2013)
names(organ.dose)<-c("c2010", "c2011", "c2012", "c2013", "d2010", "d2011", "d2012", "d2013")
return(organ.dose)
} # end of function annual.organ.d
#####

# 摂取日 intake.date の I-131/Cs-137 を求める関数 ratio
# 3月18日以前は 41.7、7月1日以降は 0 を返し、

```

```

# 3月19日～6月30日はテーブルを検索する
ratio<-function(intake.date){
n<-difftime(intake.date,"2011/03/18") # 3月18日との差
r1<-ifelse(n<=0, 41.7, ifelse(n>104, 0, ratio.tab[n, "ratio"]))
return(r1)
} # end of function ratio
#####

# 摂取日からの経過期間 p 時点の単位摂取量当たり累積等価線量 (Sv/Bq) を返す関数 F
# 核種 i の tab[[i]] の区間 interval について補間推計する
# p<0 なら F=-1 を返す
F<-function(p, i, interval, tissue){
If( p<0 ) { return(-1) }
G1<-tab[[i]][tissue,11]-tab[[i]][tissue,interval+1]
G2<-tab[[i]][tissue,11]-tab[[i]][tissue,interval+2]
G1<-ifelse(G1<=0, 1.0E-20, G1)
G2<-ifelse(G2<=0, 1.0E-20, G2)
logGp<-log(G1)+(p-days.passed[interval]) /
      (days.passed[interval+1] - days.passed[interval]) * log(G2/G1)
F<-tab[[i]][tissue,11]-exp(as.numeric(logGp))
return(F)
} # end of function F
#####

# Example
# 摂取日 3月12日、預託実効線量 10 mSv、結腸
round(annual.organ.d("2011/3/12", 10, 11), 2)
c2010 c2011 c2012 c2013 d2010 d2011 d2012 d2013
0.06 0.23 0.24 0.24 0.06 0.17 0.01 0.00
# 注：ラベルの c201x: 累積等価線量 (mSv)、d201x: 臓器吸収線量 (mGy)

# 摂取日 3月20日、預託実効線量 50 mSv、甲状腺
round(annual.organ.d("2011/3/20", 50, 24), 0)
c2010 c2011 c2012 c2013 d2010 d2011 d2012 d2013
622 968 968 968 622 347 0 0

# 摂取日 3月20日、預託実効線量 50 mSv、結腸
round(annual.organ.d("2011/3/20", 50, 11), 2)
c2010 c2011 c2012 c2013 d2010 d2011 d2012 d2013
0.15 0.52 0.55 0.55 0.15 0.37 0.02 0.00

# 摂取日 4月1日、預託実効線量 10 mSv、結腸
round(annual.organ.d("2011/4/1", 10, 11), 2)
c2010 c2011 c2012 c2013 d2010 d2011 d2012 d2013
0.00 0.87 0.94 0.94 0.00 0.86 0.07 0.00

# 摂取日 6月7日、預託実効線量 20 mSv、甲状腺
round(annual.organ.d("2011/6/7", 20, 24), 0)
c2010 c2011 c2012 c2013 d2010 d2011 d2012 d2013
0 46 48 48 0 46 2 0

# 摂取日 6月7日、預託実効線量 20 mSv、結腸
round(annual.organ.d("2011/6/7", 20, 11), 2)
c2010 c2011 c2012 c2013 d2010 d2011 d2012 d2013
0.00 17.32 19.66 19.67 0.00 17.32 2.34 0.01
#####

```


スクリプトの実行例として、2010年度の外部被ばく線量が50 mSv、内部被ばく線量が50 mSv ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比=100 相当の3月20日摂取)、2011年度の外部被ばく線量が30 mSv、内部被ばく線量が20 mSv ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比=0.1 相当の6月7日摂取)と仮定する。各年度の甲状腺吸収線量と結腸吸収線量を推計すると表3.2.16となった。2010年度の甲状腺吸収線量は669 mGy (内部被ばく662 mGy、外部被ばく47 mGy)で、内部被ばく線量50 mSvに由来する甲状腺吸収線量が大きな値になった。結腸吸収線量は42.2 mGy (内部被ばく0.15 mGy、外部被ばく42.0 mGy)であったが、これはほとんど外部被ばく線量に由来するものであった。2010年度結腸摂取等価線量のうち、2010年度結腸吸収線量への影響は0.15 mGyと小さく、2011年度に0.37 mGyが寄与した。

2011年度は $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比が低下したことから、20 mSvの内部被ばく線量に由来する2011年度甲状腺吸収線量は46 mGyと、2010年度から大きく減少した一方、外部被ばく線量30 mSvに由来する甲状腺吸収線量が28 mGyであった。その結果、2011年度被ばくに由来する2011年度甲状腺吸収線量は74 mGyであった。また、20 mSvの内部被ばく線量は、2011年度結腸吸収線量に17.3 mGy、2012年度に2.3 mGyそれぞれ寄与した。

表 3.2.16 年度別臓器吸収線量のケーススタディ

2010年度被ばく線量に由来	臓器吸収線量 (mGy)	2010年度	2011	2012	係数(Gy/Sv)
内部 50 mSv, $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比=100 相当の 3月20日摂取	甲状腺	622	347	0	12.4(FY2010) 6.9(FY2011)
	結腸	0.15	0.37	0.02	0.003(FY2010) 0.007(FY2011)
外部 50 mSv	甲状腺	47.0			0.94
	結腸	42.0			0.84
2011年度被ばく線量に由来	臓器吸収線量 (mGy)	2010年度	2011	2012	係数(Gy/Sv)
内部 20 mSv, $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比=0.1 相当の 6月7日摂取	甲状腺	-	46	2	2.3(FY2011) 0.11(FY2012)
	結腸	-	17.32	2.34	0.87(FY2011), 0.12(FY2012)
外部 30 mSv	甲状腺	-	28.2		0.94
	結腸	-	25.2		0.84

(注) 内部被ばくに由来する年度別臓器吸収線量は、摂取日を基準として、本節の関数を適用して推計した。外部被ばくに由来する臓器吸収線量は、表4.2.7の甲状腺0.94、結腸0.84を適用した(1989年以降、NPP、EPD)。

このケースでは、2011年度外部・内部線量共に、2010年度から減少しており、甲状腺吸収線量は2010年度669 mGyから2011年度421 mGy(2010年度被ばくに由来する347 mGyと2011年度被ばくに由来する74 mGyの合計)へと減少した。これに対して、結腸吸収線量で見ると、2010年度は42.2 mGyであり、一方、2011年度結腸吸収線量も、2010年度内

部被ばくに由来する 0.37 mGy と 2011 年度外部・内部被ばくに由来する 42.5 mGy を合算すると 42.9 mGy となった。2010 年度から 2011 年度にかけて結腸吸収線量はほとんど減少しなかった。

3.3 内部線量推定の不確かさ

3.3.1 線量評価の不確かさに基づく臓器線量推定の不確かさ

組織・臓器の吸収線量推定の不確かさには、東電による線量評価の不確かさ、及び、そこからの臓器線量推計の不確かさがある。摂取時期、空气中放射性物質濃度、評価までの時間の要因に分けて検討する。

3.3.1.1 摂取時期

内部被ばくの支配的な核種は ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs であるが、 ^{131}I の実効半減期が約7日（成人）と短いことから、臓器線量推計に用いた摂取日情報が不確かさに影響する。東電の内部被ばく評価は、3月11日以降の最初の従事指定日（3月11日が従事指定日の場合は3月12日）に全量摂取したと仮定した。放影協は、内部被ばく者全員の指定年月日情報を取得しているため、摂取時期に関しては、東電と本検討会の利用したデータとの間には齟齬がない。しかしながら、個々の作業員が実際に摂取した時期やシナリオを把握することが困難であったため、事故時の放射線管理上の取り扱いとして3月12日に全量摂取したと仮定したこと起因する誤差が含まれている。

3.3.1.2 空气中放射性物質濃度の測定と評価上の誤差

臓器線量推定には、摂取日における核種別預託実効線量の評価データが必要である。東電の内部被ばく調査では、3.1.1.2で述べた方法により核種別預託実効線量を評価した。この際、WBC測定で ^{131}I が測定されなかった場合、(A)2)で、 ^{137}Cs 摂取量及び空气中放射性物質濃度比から ^{131}I 摂取量(Bq)を評価した。一方で放影協は、核種別預託実効線量のデータを取得できなかったため、本検討会は指定日における空气中放射性物質濃度比データを用いて核種別預託実効線量を推計した。したがって、空气中放射性物質濃度比データの測定誤差は、東電からRADRECを通じて提供された預託実効線量評価値に基づいて核種別預託実効線量を推定する際の不確かさの要因であった。

また、空气中放射性物質濃度比データは測定場所に関する誤差も含んでいた。評価に用いた空气中放射性物質濃度を測定したFDNPP西門付近と、実際の緊急作業場所は異なっていた。また、中央操作室やSIB内など屋内作業場所の濃度比の実測データはなかった。本検討会は、作業場所によって濃度のレベルは異なるものの、濃度比は変わらないとの仮定の下に、空气中放射性物質濃度比データを利用したため、ここにも不確かさを含んでいた。

空气中放射性物質濃度比データの測定誤差は、同じく、東電が ^{137}Cs 摂取量及び空气中放射性物質濃度比から ^{131}I 摂取量(Bq)を評価した場合の、預託実効線量評価値の不確かさでもあった。

なお、岡崎(2023)は、2011年3月に20 mSv以上内部被ばくした東電社員で、JAEAまたは放射線医学総合研究所でWBC(Ge)を用いて再評価した22人について、核種別預託実効線

量を報告している(Table 7)[38]。実測値に基づく¹³¹Iの割合は93.1–99.9%の範囲にあり、本検討会が推計した表3.2.8のヨウ素が支配的な時期の組成と一致することを示していた。

3.3.1.3 評価までの時間及び体内代謝の個体差

事故直後はWBCが十分に配備できなかったため、作業員全員の内部被ばく評価が完了するまでに1カ月以上の期間を要した。WBC測定日までの間に¹³¹Iが減衰して、測定下限となった作業員について、東電は、¹³⁷Cs残留量の測定値から¹³¹I摂取量を推定する方法を採用した。この場合に限らず、放射性核種の体内代謝の個体差は、内部被ばく評価のすべてに共通する不確かさであった。

3.3.1.4 評価方法の多様性

内部被ばく線量評価は雇用主の責任で行われる。緊急作業員の多くの部分を占める東電社員に関する評価方法についての情報は得られるが、その他の雇用主における評価方法の詳細については、放影協はその情報を持っていない。したがって、預託実効線量の記録レベル等の実務的な取扱いに伴う不確かさがある。表3.2.5における預託実効線量分布の2 mSv以下の線量区分の数字の意味と解釈には注意を要する。また、これと関連して、電子式個人線量計では0.01 mSvの位まで測定している。記録レベル2mSvの内部線量と、それより2桁精度が高い電子式個人線量計で測定した外部線量を合算して放射線リスク推定に用いる際には、慎重に考慮する必要がある。

3.3.2 急性摂取シナリオの不確かさ

本検討会において、¹³¹IのWBC測定値が同じであっても、採用するシナリオによって摂取量及び実効線量の評価値がどの程度違うかシミュレーションを行った。量子科学技術研究開発機構が提供するMONDAL3 [39]（体外計測などの個人モニタリングの測定結果から放射性核種の摂取量と預託実効線量を計算・評価するPC用ソフトウェア、内部被ばく線量評価支援システム）は、摂取パターンを特定し、摂取から測定日までの経過日数及びWBC測定値を入力すると、摂取量及び預託実効線量推計値を求めることができる。

¹³¹Iは物理的半減期（8日）が短いため、作業期間9日中に、各日の摂取量が半減期に従って減少するように、相対作業時間を1日目から順に、100, 92, 84, 77, 71, 65, 59, 55, 50と設定した不均等慢性摂取シナリオを採用した。作業開始日から10日、20日、30日後にWBC測定したケースについて、WBC測定値が1Bqのときの摂取量と実効線量を試算した。同様に、¹³¹Iを作業開始日に急性摂取したシナリオの場合に、作業開始日から10日、20日、30日後にWBC測定したケースについて、WBC測定値が1Bqのときの摂取量と実効線量を試算した。両者の結果を用いて急性摂取シナリオと慢性摂取シナリオによる預託実効線量評価値を比較した(表3.3.1)。その結果、慢性被ばくシナリオに基づく預託実効線量推計値は、急性被ばくシナリオに基づく推計値の0.61–0.66倍であった。

次いで、 ^{137}Cs は半減期が長いため、作業期間 9 日、19 日、29 日の期間中に慢性摂取した後、作業開始日から 30 日後に WBC 測定した場合を、作業開始日に急性摂取したシナリオ（WBC 測定日、測定値は同じ）と比べると、摂取量推定値は各々 0.96, 0.93, 0.86 倍、また実効線量推定値は各々 0.95, 0.95, 0.84 倍であった。作業期間が長いほど、急性摂取の摂取日と慢性被ばくの摂取日である作業中間日の間隔が開くため、両者のシナリオに基づく推計値が乖離すると考えられた。

表 3.3.1 急性摂取シナリオと慢性摂取シナリオによる評価のシミュレーション
 (^{131}I 、作業員、蒸気吸入摂取、WBC 測定値=1Bq を仮定)

急性摂取シナリオ	急性摂取後 WBC 測定までの日数					
	10 日		20 日		30 日	
	摂取量 (Bq)	実効線量 (Sv)	摂取量 (Bq)	実効線量 (Sv)	摂取量 (Bq)	実効線量 (Sv)
	8.9	1.8×10^{-7}	22	4.4×10^{-7}	54	1.1×10^{-6}
慢性摂取シナリオ： 摂取期間 9 日で、各日の 摂取量が半減期 8 日で減 少するように相対作業時 間を設定した。	摂取開始日から WBC 測定までの日数（注）					
	10 日		20 日		30 日	
	摂取量 (Bq)	実効線量 (Sv)	摂取量 (Bq)	実効線量 (Sv)	摂取量 (Bq)	実効線量 (Sv)
	5.6	1.1×10^{-7}	14	2.9×10^{-7}	36	7.1×10^{-7}
急性・慢性推計値の比	0.63	0.61	0.64	0.66	0.67	0.65

（資料出所）MONDAL3[39]を用いて試算した。

（注）摂取期間 9 日 + 摂取終了後測定までの日数（各々 1 日、11 日、21 日）。

3.3.3 短半減期核種 ^{132}Te の欠測による不確かさ

本検討会において、 ^{132}Te の欠測による影響をシミュレーションした。すなわち、 ^{131}I に追加して ^{132}Te が摂取、測定されていたと仮定した。 ^{132}Te （物理的半減期 3.2 日）は摂取後、セシウムと同様に、無機質骨と全身に均等に分布するが、人体内で崩壊によって生じた ^{132}I （物理的半減期 2.3 時間）はヨウ素の代謝モデルに従う、すなわち、甲状腺に集積すると仮定されていた(ICRP Publ. 30 Part 1) [28]。 $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 体内摂取量比は、UNSCEAR (2013) の表 2[17, 18]によるソースタームの総放出量の推計値(^{132}Te , 29 PBq; ^{131}I , 120 PBq)の比 0.24 と同じと仮定した。ICRP Publ. 68 [40]によると、 ^{132}Te の実効線量係数は化学性状により異なるが、実効線量係数の値が最大である蒸気の場合の係数 5.1×10^{-9} Sv/Bq (ICRP CD1[32]) を適用した。 ^{132}Te が追加摂取された場合の預託実効線量と ^{131}I のみに基づく預託実効線量を比較した。その結果、 $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 体内摂取量比 0.24 及び ^{132}Te の実効線量係数 5.1×10^{-9} Sv/Bq を

仮定すると、 ^{132}Te に基づく預託実効線量の増加分の、 ^{131}I に基づく預託実効線量に対する比率は0.061であった(表3.3.2)。 ^{132}Te を摂取していたと仮定した場合の預託実効線量の増加は高々10%であった。これは、3.1.2.2で引用した安井(2015)[33]の記述に符合した。

ところで本検討会の関心は、リスク推定に用いられる臓器吸収線量に対する影響であった。J-EPISODEでは、白血病を除く全がんのリスク解析には、原爆被爆者寿命調査(Life Span Study, LSS) [41]に倣い、全身線量の代表として結腸吸収線量を用いる。 ^{131}I は甲状腺に集積するため、単位摂取量当たり甲状腺預託等価線量は $3.9 \times 10^{-7} \text{ Sv/Bq}$ と大きな値であるが、一方、単位摂取量当たり結腸預託等価線量は $6.5 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$ とオーダーが4桁小さかった。 ^{131}I の結腸吸収線量への影響は、甲状腺に比べ4桁小さかった。しかし、 ^{132}Te は摂取後全身に分布することから、 ^{132}Te の単位摂取量当たり結腸預託等価線量は $3.0 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ と ^{131}I より2桁オーダーが高かった。したがって、 ^{132}Te の欠測による影響、すなわち、 ^{132}Te を評価対象に含めた場合の預託実効線量への影響は高々10%増($2.0 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ から $2.12 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ へ)と小さいが、リスク推定に用いる結腸預託等価線量への影響は約12倍($6.5 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$ から $7.85 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$ へ)と大きい可能性があることが確認された。しかし、 ^{132}Te を評価対象に含めた単位預託実効線量当たりの結腸預託等価線量($0.037 \text{ Sv/Sv} = 7.85 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq} / 2.12 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$)は依然小さかった。

表 3.3.2 ^{131}I に追加して ^{132}Te の摂取があった場合のシミュレーション

項目	^{131}I 摂取	^{132}Te 追加摂取	計
摂取量(Bq)	1	0.24*	
実効線量係数(Sv/Bq)	2.00×10^{-8}	5.10×10^{-9}	
預託実効線量(Sv)	2.00×10^{-8}	1.22×10^{-9}	2.12×10^{-8}
比率(^{131}I のみ摂取を基準)	1	0.061	1.061
単位摂取量当たり 甲状腺預託等価線量(Sv/Bq)	3.90×10^{-7}	7.60×10^{-8}	
甲状腺預託等価線量(Sv)	3.90×10^{-7}	1.82×10^{-8}	4.08×10^{-7}
比率(^{131}I のみ摂取を基準)	1	0.045	1.045
単位摂取量当たり 結腸預託等価線量(Sv/Bq)	6.50×10^{-11}	3.00×10^{-9}	
結腸預託等価線量(Sv)	6.50×10^{-11}	7.20×10^{-10}	7.85×10^{-10}
比率(^{131}I のみ摂取を基準)	1	11.08	12.08

(資料出所) ICRP CD1[32]を基に試算した。

(注) *は UNSCEAR 2013 によるソースタームでの $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 総放出量比を仮定した。

第4章 緊急作業外部被ばく線量の臓器線量推計

(注) 本章において、緊急作業は構内緊急作業を指す。

4.1 資料・方法

4.1.1 二元的個人線量計管理と外部被ばく線量の評価

緊急作業時の外部被ばくの線源及び放射線の種類は、放射性物質が浮遊する汚染空気から放出される γ 線もあるが、大部分は水素爆発により、散乱した瓦礫や構造物に付着した放射性物質からの直接あるいは散乱 γ 線であった。

各人の外部被ばく線量評価は、胸に装着した個人線量計指示値を用いるのが原則であるが、例外が2つ—代表者運用とモデル線量—あった。J-EPISODE に提供された外部線量記録は、これらの代表者運用による線量及びモデル線量を含んだ値であった。

4.1.1.1 個人線量計の種類

臓器線量換算に適用する線量計レスポンスデータを決定する必要があったため、事故当時、FDNPP で使用されていて個人線量計について、放影協は東電 HD に照会をした。

4.1.1.2 代表者運用について照会

特に代表者運用については、線量評価の不確かさの要因として、UNSCEAR 2013 報告書等において次のように指摘されていた[17, 18]。

“The major factor potentially affecting the reliability of the monitoring performed was the use of shared personal dosimeters between 12 March and 1 April 2011.” (UNSCEAR 2013, Scientific Annex A, Appendix D, D29, page 235)

これについて東電は「福島原子力事故調査報告書」(2012年6月20日) 298–309 ページ [16]で、電離則第8条第3項但し書きに基づく措置であり、具体的な運用は、①1作業あたりの線量が大きくない、②作業場所の線量率が既知、③環境の線量勾配が大きくない、④作業グループの全員が同一行動を取ること、を基本的な判断基準として作業内容を確認した上で、APD (注) を代表者に貸し出しており、この運用により過剰被ばくした作業員はいなかったと述べていた。

(注) FDNPP では、東電社員に関しては、2011年3月事故当時 EPD (パナソニック社製) を使用していた。警報機能付きの EPD で、東電では APD (alarming personal dosimeter) と呼ば

れていたが、本報告書では EPD と呼ぶ。

3 月 11 日の津波で個人線量計(EPD)の大部分 (約 5,000 台) が使用不能となったため、1 人 1 台の運用ができなくなったが、その運用実態はこれまで各種報告書等では必ずしも明らかにされていない。そこで東電 HD に文書で照会した。

4.1.1.3 二元的個人線量計管理

FDNPP の事故前の管理区域は原子炉建屋及びタービン建屋等に限られており、線量管理は建屋入口で行われていた。しかし、3 月 12 日の 1 号機原子炉建屋の水素爆発以降は FDNPP 構内の周辺線量率が高くなったため、構内全域が管理区域に指定された (東電プレスリリース 2011 年 5 月 2 日 : 原子力安全・保安院 (注) への報告) [42]。したがって、事故後 FDNPP 構内で働いていた者はすべてが緊急作業者に指定され、放射線管理の対象者となった。事後的に緊急作業者の範囲を確定することとなったため、実務的に混乱を招いた。

事故後、FDNPP の個人線量計の貸出し等の管理は、表 4.1.1 のように、FDNPP の南方 20 km に位置し、避難区域外にある J ヴィレッジ (3 月 17 日運用開始) と、免震重要棟(SIB)の 2 カ所で行われた[16,43]。前者は、毎日 J ヴィレッジで入退域手続きを行った作業者に対して、J ヴィレッジで個人線量計の貸出しが行われた後、FDNPP へ移動したため、FDNPP 構内における被ばく線量は、移動中の線量を含めてすべて線量計指示値として記録された。一方、後者は、SIB で寝泊まりした者に対して、SIB から外に出て作業を行う場合に線量計が貸与され、SIB 外での活動について線量計指示値を記録した。SIB 内は放射線防護対策を施した設計となっていたが、水素爆発により SIB 内も汚染されたため、SIB 内も管理区域に指定された (東電プレスリリース 2011 年 5 月 2 日 : 原子力安全・保安院への報告) [42]。

(注) 経済産業省原子力安全・保安院は、原子力その他のエネルギーに係る安全及び産業保安の確保を図るための機関であったが、2012 年 9 月 19 日に廃止され、環境省の外局である原子力規制委員会へ移行した。

表 4.1.1 線量計の二元管理

個人線量計の管理場所	個人線量計による実測	モデル線量の適用
J ヴィレッジ (FDNPP 南方 20km)	構内の移動及び現場作業のすべてを測定	なし
免震重要棟(SIB)	SIB から作業現場への移動及び現場作業は測定	・J ヴィレッジ、SIB 間の移動中線量 ・SIB 滞在中の線量

4.1.1.4 モデル線量

前述のとおり SIB 内も管理区域となった。したがって、ガラスバッジなど積算線量計ではなく電子式個人線量計の場合、SIB で貸与した個人線量計による線量管理では、SIB 内に滞在しているときの被ばく線量と J ヴィレッジから SIB への往復移動中の被ばく線量が欠けていたため、これをモデル線量として設定し、個人線量計指示値に加算した[42, 44]。

東電によると、3月と4月のモデル線量は保守的に推計し、SIB 滞在中のモデル線量は SIB 内の周辺線量当量率を基にして、また、移動中のモデル線量は SIB 近辺の周辺線量当量率を基にして推計され、SIB 線量管理対象者に一律に、次のモデル線量を加算したと述べていた(東電プレスリリース 2011年8月12日:原子力安全・保安院への報告 添付資料 page 32) [45]。

滞在中モデル線量 : 3月 3.56 mSv, 4月 2.06 mSv

移動中モデル線量 : 3月 5.00 mSv, 4月 3.75 mSv

5月以降のモデル線量の値、及び、いつまでモデル線量が適用されたかは、東電から公表されていないため、放影協から東電 HD に文書で照会した。

4.1.2 臓器線量への変換のプロセス

IARC15 カ国共同研究で用いられた標準的なアプローチ[46]に基づいて線量計指示値から臓器吸収線量換算係数の再構築を行った(図 4.1.2)。すなわち、先行研究において作成した通常作業線量の線量計指示値から臓器線量への換算係数をそのまま用いることとした[4]。以下、個人線量計レスポンス、光子エネルギー分布、ジオメトリ分布について述べる。

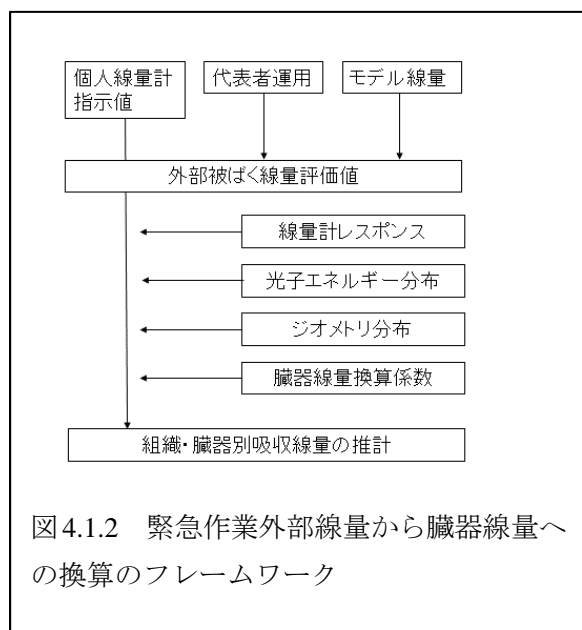


図 4.1.2 緊急作業外部線量から臓器線量への換算のフレームワーク

4.1.2.1 個人線量計レスポンス

光子外部被ばくに関する線量計指示値 ($H_p(10)$ in Sv) から臓器線量への換算には、エネルギー、ジオメトリ別線量反応、すなわち、 $H_p(10)$ 1 Sv 当たり空気カーマ(Gy)、のデータが必要であり、この値は線量計の種類によって異なる。以前の研究で、1989 年以降使用された FB, EPD, GB, LB についてデータを取得していたため、これを利用した[4, 5]。

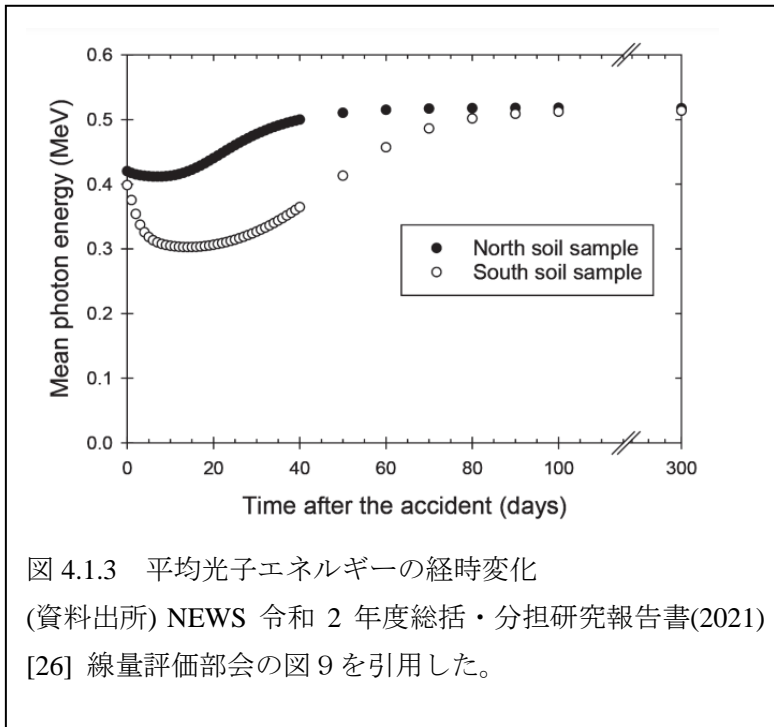
(注) FB: film badge フィルムバッジ線量計, EPD: electronic personal dosimeter 電子式個人線量計、GB: glass badge ガラスバッジ線量計、LB: Luminess Badge ルミネス線量計 (OSL 線量計の商品名、2017 年 3 月以前の Luxel Badge ルクセルバッジ線量計から変更)。

4.1.2.2 光子エネルギー分布

IARC15 カ国共同研究の仮定 (光子エネルギー100–300 keV : 300–3,000 keV = 10 : 90) を利用した[46]。2011 年 3 月は、放射性物質の漏出により、汚染された空気の濃度が高かったものの、外部被ばく光子線の主要線源は、水素爆発により土壌や瓦礫に付着した放射性物質 (^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs など)からの直接または散乱 γ 線によると考えられた。4 月以降は、 ^{131}I が減衰しているため、 ^{134}Cs , ^{137}Cs が主要な線源となった。

3.1.2.2 で既述のように、ICRP Publ. 107[35]によると、 ^{137}Cs の光子エネルギーは 662 keV (85.1%)、 ^{134}Cs の光子エネルギーは 605 keV (97.6%)と 796 keV (85.5%)であり、 ^{131}I は主に 364 keV (81.7%) であった。被ばく光子エネルギーは、これら光子線の散乱もあるため、NPP における通常作業線量の光子エネルギー仮定をそのまま適用した。

NEWS 令和 2 年度総括・分担研究報告書(2021) 線量評価部会(page 257)[26]は、事故後 40 日間の屋外高さ 1 m での平均光子エネルギーは 0.3–0.5 MeV の範囲であったと述べていた。この研究は、本検討会社村委員等が、2011 年 3 月 22 日に 1 号機及び 2 号機周辺で採取した土壌試料の核種分析結果に基づき、当時の屋外作業現場における線量当量率の高さ勾配等をモンテカルロ粒子輸送計算コード MCNP で計算した結果[47]を再解析し、平均光子エネルギーを、事故発生時からの経過日数の関数として評価した (図 4.1.3)。この結果も、IARC15 カ国共同研究の仮定を適用することを支持していた。



4.1.2.3 ジオメトリ

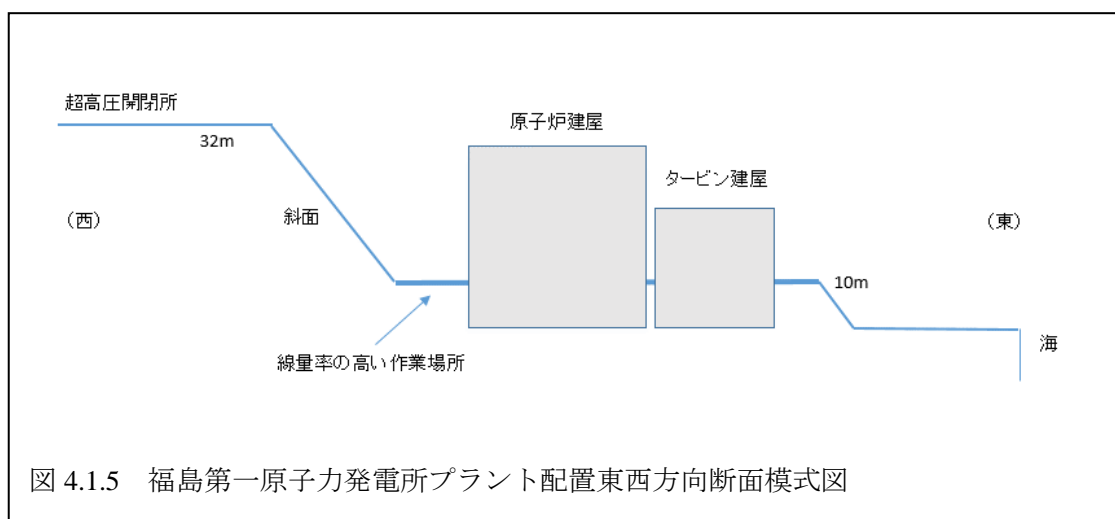
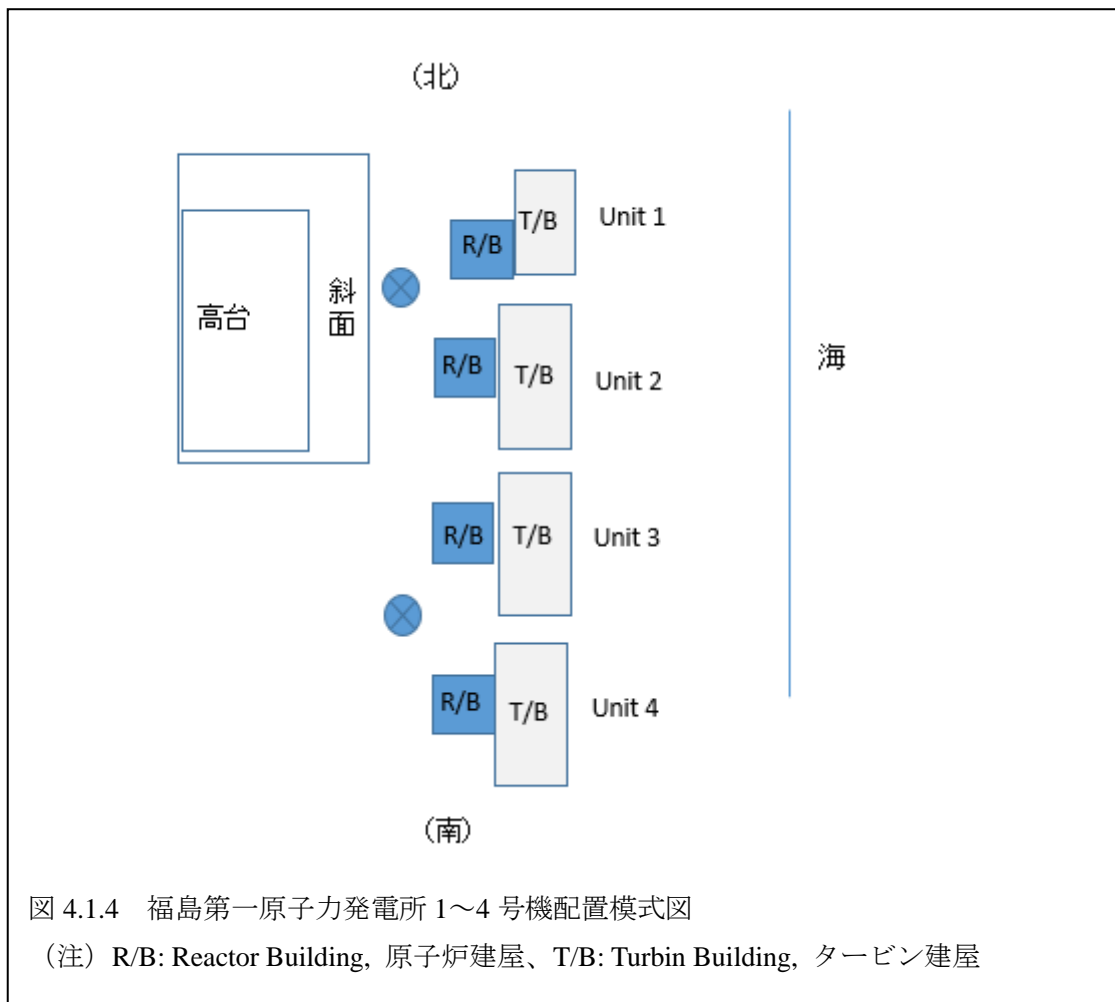
IARC15 カ国共同研究の仮定（被ばくジオメトリ AP: ISO = 50 : 50）を利用した[46]。同研究では、ISO の範囲について 20~90%と広く想定しており(Thierry-Chef 2007, Table 4 [46])、AP: ISO = 50 : 50 の仮定を採用することに問題はなかった。

事故直後の屋外作業は、瓦礫の撤去、電源ケーブルの敷設、消防隊の原子炉冷却放水作業の支援など、原子炉建屋周辺での作業が多かった。個人別の被ばくジオメトリに関する観測データはなかった。

図 4.1.4 は、1~4 号機の配置を示している。1 号機から 4 号機は北から南へと配置されており、東側は海、西側は高台となっていた。図 4.1.5 は、1~2 号機あたりの東西方向の断面を示している。海側から見ると、タービン建屋と原子炉建屋の周囲は海面上 10m にあり、ここが事故直後に線量率の高い作業場所であった。原子炉建屋の西側には、一段高い海面上 32m の高さの斜面があった。すなわち、事故直後の作業現場は、南北に並ぶ 1 号機から 4 号機の原子炉建屋と、東側高台の法面に挟まれた谷底状の場所であった。図 4.1.6 は、事故直後の 1~4 号機建屋周辺の線量率を示す[48]。

周辺線量率の高い原子炉建屋周辺では、線源に対面するような作業は、できるだけ短時間で切り上げるようにしていたため、AP だけでなく ROT 要素が加わっていたと考えられた。また、線源は建屋壁面や地上に散乱した構造物だけでなく、高台斜面にも構造物が散乱したため、全方向から光子線を被ばくしたと想定された。

事故直後の1～4号機の全景俯瞰写真が東電HDホームページに掲載されているため、参考までに図4.1.7に転載した。



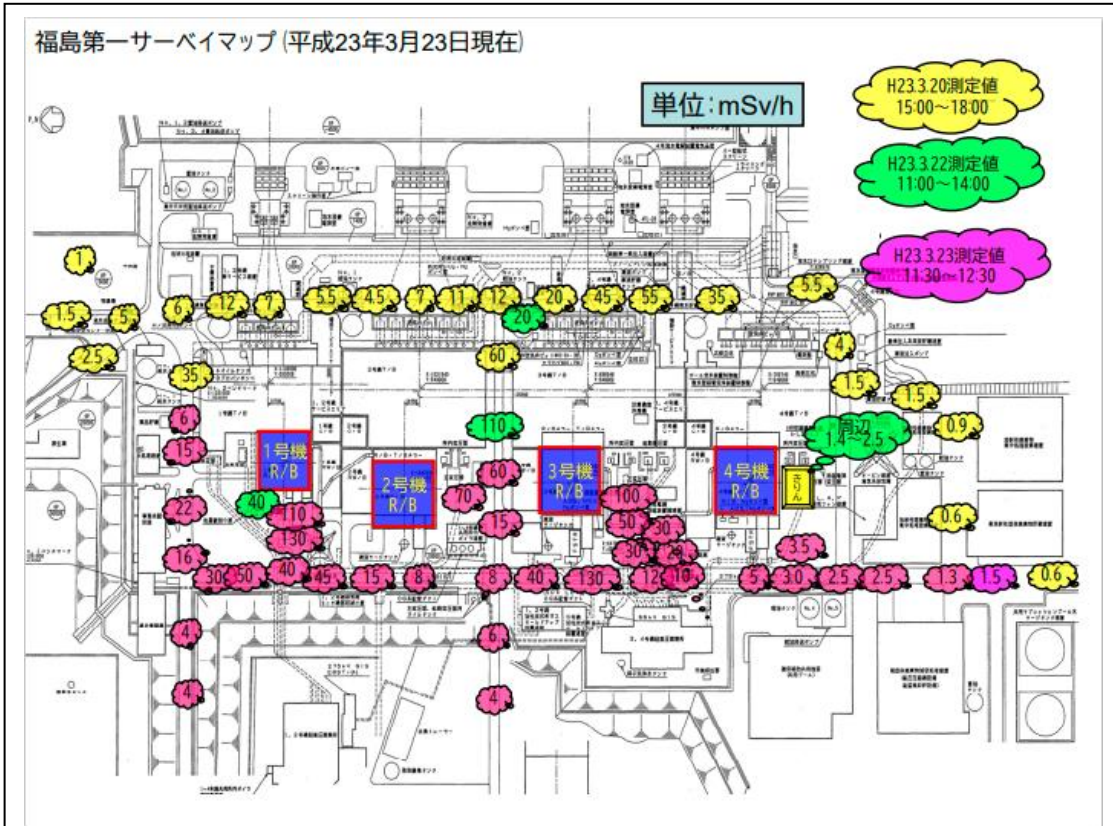


図 4.1.6 事故直後の1~4号機建屋周辺の線量率

(資料出所) 東電HDホームページ「サーベイマップ 建屋周辺アーカイブ」[48]より引用した。



図 4.1.7 事故後の1～4号機の俯瞰撮影(2011年3月20日)

(資料出所) 東電 HD ホームページ写真集「福島第一原子力発電所事故の状況に係る写真」より転載した。

(注) 東電 HD は、写真の転載について書面などによる利用申請を不要としている。

4.2 結果

4.2.1 個人線量計の種類

東電 HD によると、FDNPP 緊急作業期間中に使用していた主線量計は表 4.2.1 のとおりであった。

表 4.2.1 個人線量計の種類に関する東電 HD 回答

時期	主線量計
2011 年 3 月～10 月	東電社員、協力企業共にパナソニック社製電子式個人線量計 (γ : ZP-1460, $\gamma + \beta$: ZP-1461)。
2011 年 11 月以降	東電社員は千代田テクノル製積算線量計 (ガラスバッジ、G I 又は G III) を電子式個人線量計と合わせて装着。 協力企業は千代田テクノル製積算線量計 (ガラスバッジ) 又は長瀬ランダウア製積算線量計 (ルクセルバッジ) と電子式個人線量計を合わせて装着。ただし、一部 11 月以前から積算線量計を使用していたプラントメーカーもあった。

FDNPP では、東電社員に関しては、2011 年 3 月事故当時 EPD (パナソニック製) を使用し、その測定結果を正の記録としていた。4 月頃から EPD と GB (千代田テクノル製) の併用を始め、11 月から GB の測定結果を放射線管理上の正の記録とした。線量の測定は雇用主の責任であるため、正の記録に用いた個人線量計は協力企業により異なった。例えば、プラントメーカーである東芝は長瀬ランダウア製 LB を使用していた。

先行研究で、通常作業線量から臓器線量への換算に際して、年度別個人別線量記録は、被ばくした発電所の情報を持っているが、雇用事業所の情報を持っていないため、便宜的に、電力社員の使用個人線量計の種類を基にした換算係数を適用した[4]。

本検討会においても、2010 年度及び 2011 年度の緊急作業外部線量には、EPD の係数、2012 年度以降には GB の係数を適用した (表 4.2.2)。

表 4.2.2 緊急作業外部線量に適用する年度別線量計レスポンス

年度	線量計タイプ	線量計レスポンス(B_2 , Sv/Gy)	不確かさ(K_2)
2010～2011 年度	EPD	1.00	1.011
2012 年度以降	GB	1.02	1.004

資料出所：臓器線量構築検討会報告書[4]の表 3.3.8 の NPP の値を引用した。

4.2.2 代表者運用の実態

代表者運用に関する東電 HD からの回答結果は表 4.2.3 のとおりであった。

表 4.2.3 代表者運用に関する東電 HD 回答

時期	備考
3月15日頃まで	1人1台運用
3月16日～3月31日	一部作業で代表者運用を実施。 具体的な運用は、 ・作業環境が安定していること ・作業グループの全員が同一の行動をとること 具体的な数等未詳
4月1日以降	1人1台運用
代表者運用の個人線量計貸し出しは SIB でも、J ヴィレッジでも行われた	

回答により、代表者運用が実施された時期が3月16日から3月31日と特定された。3月15日までは、確保できた約320台で1人1台の運用が実施された。しかし、十分な量の個人線量計が確保できるまでの間（3月16日～3月31日）は、SIBでも、J ヴィレッジでも、一部の作業で代表者運用が実施され、代表者の持つ個人線量計指示値を、グループの作業員の線量とみなした[16]。4月1日以降は、十分な量の個人線量計が確保できたため、1人1台の運用に戻った。

なお、代表者運用を行った作業グループの数、その際の線量等の具体的情報は明らかではなかった。

東電 HD は 4.1.1.2 で述べたように、4条件を満たす場合に実施したとしているが、事後的に代表者運用で得られた線量計指示値の代表性について検証を行っていないため、運用面で不確かさが残った。

4.2.3 モデル線量の実態

SIB で線量管理を行った者について、モデル線量に関する東電 HD からの回答結果は表 4.2.4 のとおりで、モデル線量は積算線量計を用いることになる 2011 年 10 月まで設定されていたこと、及び、各月に設定したモデル線量の実態が明らかになった。

3月、4月は基本的に当該月の実効線量に J ヴィレッジ・SIB 間の移動モデル線量及び SIB 滞在モデル線量を一律に加算した（移動毎に個別に評価した場合はその限りではない）。

- ・積算線量計を装着して測定を始めるまでの5月～10月の移動・滞在線量は表のとおり。

表 4.2.4 モデル線量に関する東電 HD 回答（免震重要棟で線量管理を行った者）

年月	滞在線量(mSv)	移動線量(mSv)
2011年3月	3.56	5.00
4月	2.06	3.75
5月	0.33	1.1
6月	0.30	1.0
7月	0.29	0.92
8月	0.28	0.87
9月	0.24	0.84
10月	0.24	0.81

・基本的には、SIB に滞在・移動した場合の線量は、上記の、滞在・移動回数による補正のない滞在・移動線量とする。ただし、個別に、滞在・移動回数が明確な場合は、滞在・移動回数により補正した滞在・移動線量を付加している。

しかしながら、各月のモデル線量が加算された者の数及びその者の個人線量計による外部線量評価値は明らかではなかった。

4.2.4 光子外部被ばく線量計指示値から甲状腺吸収線量への換算係数の推計

臓器別に見ると ^{131}I による内部被ばくの影響が大きい甲状腺吸収線量と合算するために、光子外部被ばく線量計指示値から甲状腺吸収線量への換算係数を推計した。推計方法は、以下のとおり、臓器線量構築検討会報告書[4]と同じであった。

（注）観察期間 1991-2010 年の第V期解析[1]では、甲状腺がん(ICD-10 コード：C73)による死亡は 10 件しかなかったため、2019 年の臓器線量構築検討会報告書では、リスク解析に用いるための甲状腺吸収線量の推計は行われなかった[4]。

(1) JAEA によって開発された平均日本人体型の成人男性ボクセルファントム JM-103 の空気カーマ当たり甲状腺吸収線量(Gy/Gy)を得るために、本検討会佐藤委員が推計したジオメトリ(AP、ISO)、光子エネルギー(0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.6, 0.8 MeV)別空気カーマ当たり吸収線量の JM-103/RCP-AM 比から、JM-103 の空気カーマ当たり吸収線量(Gy/Gy)を推計し、さらに内挿により、0.119 MeV, 0.207 MeV 及び 0.662 MeV のエネルギー点の値を推計した(表 4.2.5)。ここで、RCP-AM は、ICRP Publ. 110[49]で定義された Reference Computational Phantom-Adult Male (成人男性標準ファントム)であった。

表 4.2.5 日本人男性ファントム JM-103 の空気カーマ当たり甲状腺吸収線量(Gy/Gy)

ジオメトリ	光子エネルギー (MeV)								
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.6	0.8	0.119	0.207	0.662
①JM-103/RCP-AM 比									
AP	0.995	1.021	0.993	0.986	0.995	1.005	1.005	0.993	0.998
ISO	0.966	1.027	1.001	0.987	0.987	0.978	0.989	1.000	0.985
②RCP-AM from ICRP Publ. 116 [50]									
AP	1.860	1.590	1.490	1.360	1.230	1.190	1.757	1.481	1.210
ISO	0.851	0.749	0.732	0.713	0.719	0.736	0.812	0.731	0.727
③JM-103									
AP	1.851	1.623	1.480	1.341	1.224	1.196	1.765	1.470	1.215
ISO	0.822	0.769	0.733	0.704	0.710	0.720	0.802	0.731	0.713

(注) AP: 前方-後方ジオメトリ。ISO: 等方ジオメトリ。

(2) 施設タイプ(NPP/MA)別光子エネルギー分布及びジオメトリ分布を用いて空気カーマ当たり甲状腺吸収線量 B_1 (Gy/Gy)並びに不確かさ K_1 を推計した (表 4.2.6)。

表 4.2.6 施設タイプ別甲状腺吸収線量の B_1 及び K_1 (JM-103)

施設タイプ	$1/B_1$	K_1
NPP	0.94	1.032
MA	0.96	1.029

(注) 1. NPP: nuclear power plant 原子力発電所、MA: mixed activities facilities 混合活動施設、NPP 以外の施設を指す。

2. 計算プロセスの詳細は臓器線量構築検討会報告書[4]p.84 を参照。

(3) 線量計タイプ別空気カーマ当たり線量計レスポンス B_2 (Sv/Gy)及びその不確かさ K_2 、並びに、年代別線量計指示値と $H_p(10)$ との換算係数 B_3 及びその不確かさ K_3 と組み合わせて、時期、施設タイプ、線量計タイプ別換算係数を推計した (表 4.2.7)。

甲状腺の位置が皮膚表面に近いため、換算係数の逆数($1/c$) (Gy/Sv)は、例えば、NPP の 1989 年以降で、結腸よりも甲状腺の方が約 12%大きかった。

表 4.2.7 時期、施設タイプ、線量計タイプ別線量計指示値から臓器線量への換算係数
(甲状腺、結腸、肺、赤色骨髄)

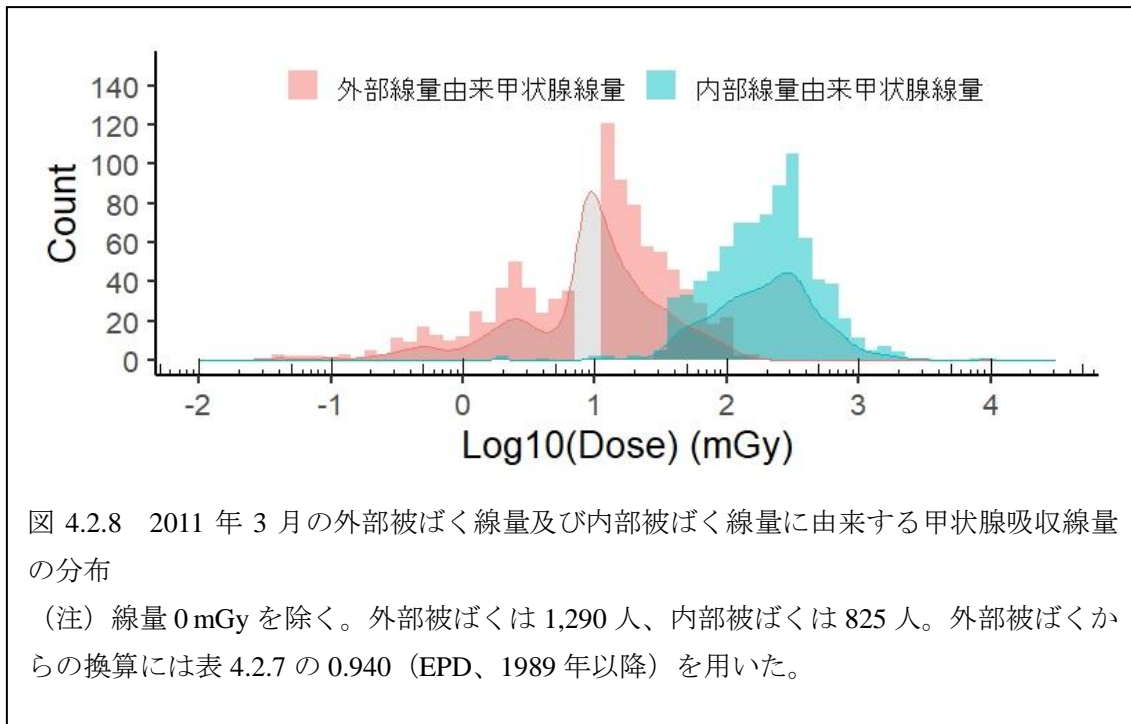
1989年以降の換算係数の逆数 1/c (Gy/Sv)								
線量計 タイプ	NPP				MA			
	甲状腺	結腸	肺	赤色骨髄	甲状腺	結腸	肺	赤色骨髄
FB2	0.886	0.792	0.830	0.726	0.897	0.794	0.822	0.729
TLD	0.921	0.823	0.862	0.755	0.923	0.817	0.846	0.750
GB	0.922	0.823	0.863	0.755	0.942	0.833	0.863	0.765
EPD	0.940	0.840	0.880	0.770	0.950	0.841	0.871	0.772
LB	0.886	0.792	0.830	0.726	0.889	0.787	0.815	0.722
1988年以前の換算係数の逆数 1/c (Gy/Sv)								
線量計 タイプ	NPP				MA			
	甲状腺	結腸	肺	赤色骨髄	甲状腺	結腸	肺	赤色骨髄
FB1	0.842	0.752	0.788	0.690	0.836	0.740	0.767	0.679
FB2	0.850	0.760	0.796	0.696	0.860	0.761	0.788	0.699
TLD	0.883	0.789	0.827	0.723	0.884	0.783	0.811	0.719

(注) FB1: 旧式フィルムバッジ線量計、FB2: 多素子フィルムバッジ線量計、TLD: 熱ルミネセンス線量計、GB: ガラスバッジ線量計、EPD: 電子式個人線量計、LB: ルミネスバッジ線量計 (OSL 線量計の商品名、2017年3月以前のルクセルバッジ線量計から変更)

(4) ^{131}I が支配的な時期の内部被ばく線量及び外部被ばく線量が及ぼす甲状腺吸収線量への影響

2011年3月の平均外部被ばく線量(個人線量計 EPD) 17.6 mSv、平均内部被ばく線量 9.9 mSv (3月20日摂取日設定) を基に、甲状腺吸収線量を推定した。内部被ばくによる甲状腺吸収線量は、3.2.7.3の Example より、2010年度 122.8 mGy、2011年度 68.3 mGy、計 191.1 mGy であった。一方で、外部被ばくによる甲状腺吸収線量は、表 4.2.7 より、16.5 mGy であった。全体の甲状腺吸収線量 207.6 mGy に占める外部被ばくの寄与は約 8%と小さかった。

図 4.2.8 は、2011年3月の外部被ばくに由来する甲状腺吸収線量(1,290人)と内部被ばくに由来する甲状腺吸収線量(825人)の分布を比較したものである。外部被ばくによる甲状腺吸収線量は、内部被ばくに比べ1桁以上のオーダーで小さく、甲状腺吸収線量は主に内部被ばくによって決まった。



4.3 外部線量推定の不確かさ

4.3.1 指定解除記録からの外部線量取得

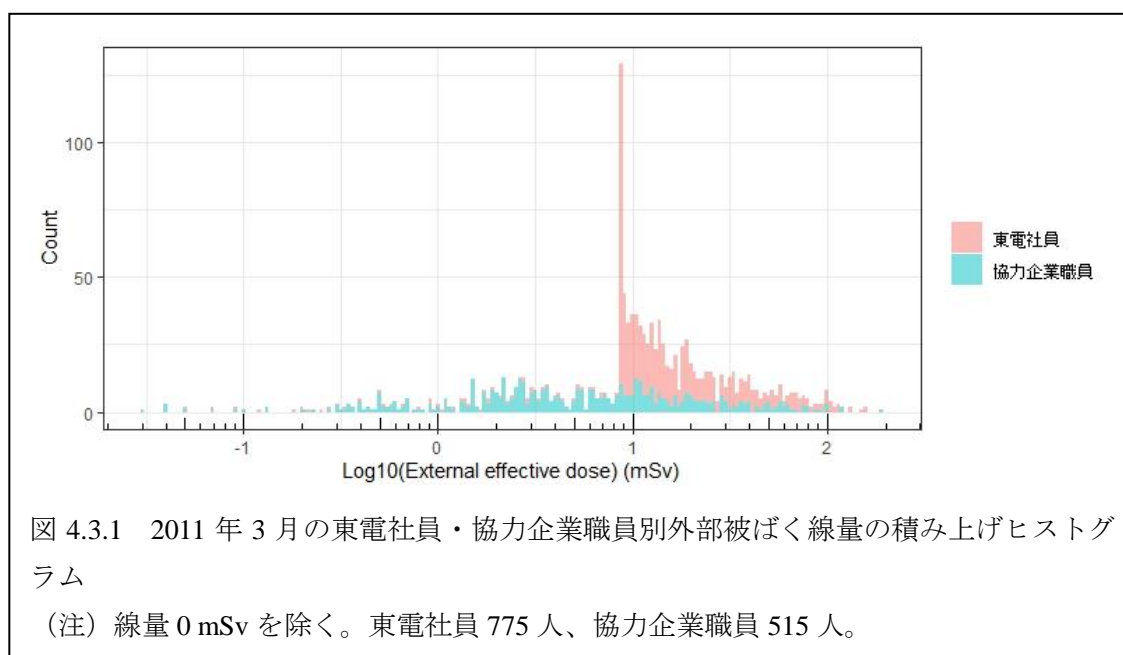
放影協が取得した外部被ばく線量評価値は、2.1.6 で述べたように、雇用主による評価値と齟齬がないことは明白であった。

4.3.2 光子エネルギー及びジオメトリ分布の仮定

線量計指示値から臓器線量への換算は、考え方や手法は確立している。光子エネルギー割合 100–300 keV : 300–3,000 keV = 10 : 90 の場合、空気カーマ当たり甲状腺吸収線量の逆数 $1/B_1$ は 0.94 Gy/Gy (表 4.2.6 の NPP) であるが、この割合を 20 : 80 に変更した場合、0.96 (同 MA) と約 2% 増加した。また、ジオメトリ割合について、表 4.2.6 は AP : ISO = 50 : 50 の仮定であるが、これを 40 : 60 と変更した場合、 $1/B_1$ は NPP 0.89、MA 0.90 と約 5% 減少した。分布割合の 10% の変化に対して、換算係数に与える影響は、光子エネルギー分布よりジオメトリ分布の方が大きかった。この観点では、推計された臓器線量の比較可能性を考慮すると、特定のジオメトリを考慮すべき明白なエビデンスがない現状では、従前と同じ仮定を適用するのが適切であると考えた。

4.3.3 外部被ばく線量分布の不自然さ

2011 年 3 月の外部被ばく線量を東電社員・協力企業職員別積み上げヒストグラムで見ると (図 4.3.1)、いかにも不自然な形をしていると言わざるを得ない。特に、線量評価値が 8.5 ~ 9.5 mSv の狭い範囲に、775 人の東電社員のうち 172 人が分布していた。未測定 of 移動線量・滞在線量をモデル線量として加算したことは理解できるものの、このモデル線量の加算



が線量分布の不自然な形に影響したと考えられた。

前述のように、放影協が利用した外部被ばく線量データは、雇用主による評価値と齟齬はないため、雇用主の評価値自体に目を向けざるを得ない。雇用主による評価は次式で行われた。

$$\text{外部被ばく線量} = \text{線量計指示値 (一部は代表者線量)} + \text{モデル線量}$$

モデル線量の妥当性を評価するためには、次のような個人別の行動記録と周辺線量率の情報が不可欠であるが、放影協はそれに関してデータ利用上の制約があった。

モデル線量の種類	評価に必要な情報
移動線量	個人別加算移動線量 個人別移動回数・移動日 移動日の構内の周辺線量率の分布 (サーベイマップ)
滞在線量	個人別加算滞在線量 個人別滞在日・滞在時間 滞在日の SIB 内の周辺線量率の測定方法及び線量率の範囲

4.3.4 モデル線量の線量概念による過大評価の可能性

個人線量計は、ファントムに装着した状態で AP 照射のとき、指示値が 10 mm 線量当量を表示するように校正されていた。したがって、この指示値に対して、既に構築した通常作業線量に関する臓器線量換算係数を適用することができた。しかし、滞在線量及び移動線量のモデル線量については、算定のベースになった線量概念が周辺線量当量であったと考えられる。

東電プレスリリース 2011 年 8 月 12 日 (添付資料ページ 32) [45]は、滞在線量については、「免震重要棟内においてはコントロール用の積算線量計 (バックグラウンド線量把握のために設置している線量計) から滞在中の線量を求め、1 カ月分の値として加算した」と述べていた。人体に装着することなく、建物内に放置していたため、これは周辺線量当量に近い値と考えられる。また、移動線量は「発電所の入口拠点となっている J-Village から発電所免震重要棟までの移動線量については重要免震棟 (原文ママ) 付近で測定された放射線量の月平均値 (mSv/hr) に正門から免震重要棟までを往復するのに要する時間 (30 分) をかけた値を充て、1 カ月分の値として加算した」と記述していたため、これは周辺線量当量概念である。

光子について空気カーマから周辺線量当量 $H^*(10)$ への換算係数(Sv/Gy)は、光子エネルギーに依存するが、方向依存性はない。一方、空気カーマから個人線量当量 $H_p(10)$ への換算係数(Sv/Gy)は、光子エネルギー及び入射角度 α に依存する。ICRP Publ. 74 (Table A.21 及び Table A.24) [51]によると、0.3–0.5 MeV の範囲で AP 照射 ($\alpha=0^\circ$) のときは、 $H^*(10)/H_p(10, \alpha)$ の

値は 0.96–0.98 であるが、入射角度 α が大きくなるに従って大きくなり、 $\alpha=75^\circ$ のときには、1.16–1.24 となる。すなわち、 $H^*(10)$ 概念を基にしたモデル線量は過大推計の可能性がある。

表 4.3.2 周辺線量当量と個人線量当量の方向依存性の比較

光子エネルギー	$H^*(10)/K_a$	$H_p(10,0^\circ)/K_a$	$H^*(10)/H_p(10)$	$H^*(10)/H_p(10, 45^\circ)$	$H^*(10)/H_p(10, 60^\circ)$	$H^*(10)/H_p(10, 75^\circ)$
MeV	Sv/Gy	Sv/Gy	Sv/Sv	Sv/Sv	Sv/Sv	Sv/Sv
0.2	1.4	1.492	0.938	0.978	1.042	1.296
0.3	1.31	1.369	0.957	0.972	1.028	1.241
0.4	1.26	1.300	0.969	0.975	1.015	1.190
0.5	1.23	1.256	0.979	0.978	1.011	1.157
0.6	1.21	1.226	0.987	0.984	1.012	1.137

(資料出所) ICRP Publ. 74 [51] の Table A.21 及び A.24 より作成した。

前回の臓器線量構築検討会では、エネルギーレベル 119 keV、207 keV、662 keV について、照射ジオメトリ AP 及び ISO の線量計レスポンス試験を行った[4]。その結果、表 4.3.3 のように、平均的な光子エネルギー、ジオメトリ分布の条件の下で、個人線量計 GB の単位空気カーマ当たり $H_p(10)$ は 1.04 Sv/Gy であった。一方、同じ光子エネルギー分布の条件下で、単位空気カーマ当たり $H^*(10)$ は 1.23 Sv/Gy であった。したがって、モデル線量は $H^*(10)$ 概念を線量推計の基礎としたため、仮に、 $H_p(10)$ 概念に相当する人体に装着した GB の線量計指示値を基に推計していた場合に比べ、約 20% 程度過大推計した可能性があった。

表 4.3.3 光子エネルギー、ジオメトリ別 GB 線量計レスポンス(Sv/Gy)

光子エネルギー	119 keV	207 keV	662 keV	平均*
ウェイト	0.025	0.075	0.9	1
単位空気カーマ当たり $H_p(10)$ (実験結果)				
AP	1.47	1.30	1.21	1.22
ISO	0.79	0.88	0.86	0.86
平均**	1.13	1.09	1.035	1.04
単位空気カーマ当たり $H^*(10)$ (ICRP Publ. 74 より補間推計)				
	1.59	1.39	1.20	1.23
平均光子エネルギー・ジオメトリの下での比較				
$H^*(10)/H_p(10)$				1.18

(資料出所) 放影協「臓器線量構築検討会報告書」[4]の表 3.3.3 及び ICRP Publ.74, Table A.21 [51]を基に作成した。

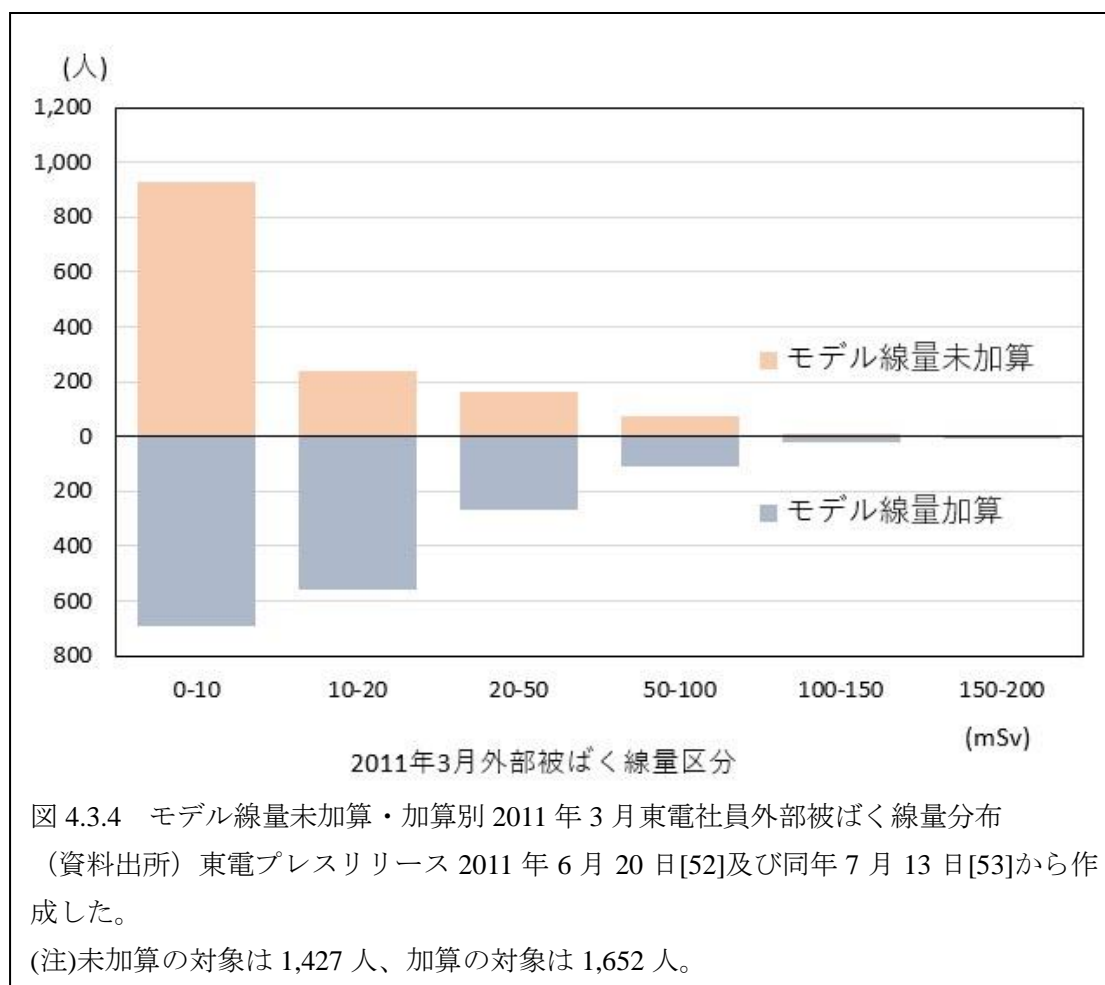
(注) *は、119 keV : 207 keV : 662 keV = 0.025 : 0.075 : 0.9 のウェイトで加重平均した。

**は、AP : ISO = 0.5 : 0.5 のウェイトで加重平均した。

4.3.5 モデル線量の一律適用による過大推計の可能性

放影協は、個人別に SIB 滞在日数及び移動回数、並びに、個人線量計実測値と加算されたモデル線量のデータを保有していなかった。したがって、個人別に評価の妥当性を議論することはできない。しかし、モデル線量は、緊急作業被ばく限度の管理のために保守的に設定され、また、滞在日数及び移動回数が明確でない者には一律に加算されたとすると、モデル線量による線量評価は過大推計の可能性があった。

また、不確かさの大きいモデル線量を加算したことによって、外部被ばく線量にバイアスを与えていないか懸念された。事故当時の東電プレスリリースによる外部被ばく線量分布は速報値の性格が強いが、これを利用してモデル線量加算の有無による分布の違いを比較した。2011年6月20日付プレスリリース[52]による3月分の外部被ばく線量分布には、「重要免震棟（原文ママ）滞在時の線量及び移動中の線量を加算していない（ただし、ガラスバჯ等によるデータなどこれに含まれているケースもある）」と注記していた一方、同年7月13日付プレスリリース[53]による3～4月分の外部被ばく線量分布には、「4月分は当該外部被ばく線量は免震重要棟滞在時の線量及び移動中の線量を加算していない」と注記していた。つまり、前者はモデル線量未加算の3月分線量（対象1,427人）、後者はモデル線



量加算の3月分線量（対象1,652人）と解されたため、EPDを着用していた東電社員に関して、両者の分布を比較した（図4.3.4）。モデル線量を加算した後の方が、0～10 mSvの割合が減少し、10～20 mSvの割合が増えていた。しかし、線量区分が粗いため、それ以上のことはわからなかった。

第2章の図2.2.4は、2011年3月の東電社員の外部被ばく線量評価値（モデル線量加算済み）の分布状況をより詳細に示す。東電社員の多くは、3月のモデル線量設定値8.56 mSv（滞在3.56 mSv、移動5.00 mSv）を一律に加算されたと考え、図の8～10 mSvに分布が集中していることと辻褃が合った。試みに、3月の外部被ばく線量評価値がモデル線量設定値を超える者について、8.56 mSvを控除して、モデル線量加算前の線量分布を、蜂群図で表した（図4.3.5）。もちろん、外部被ばく線量評価値がモデル線量設定値を超えていても、すべてがモデル線量を加算されているとは限らないが、東電社員のモデル線量加算前の線量（試算値）も対数正規分布に似た形を示すようになり、個人線量計による測定・評価は適正であったと判断できる材料の1つであった。一方、これに加算したモデル線量に関して、

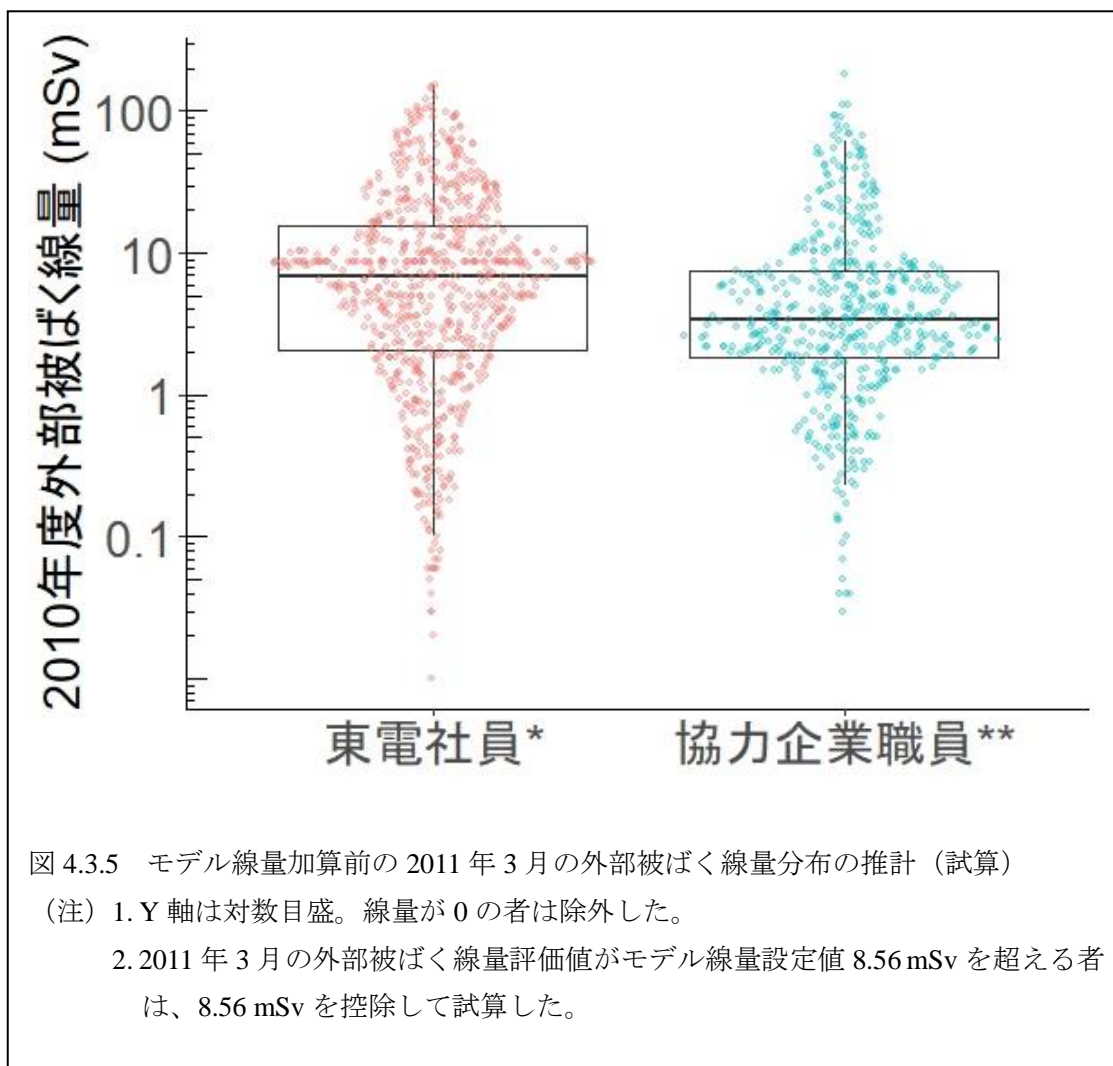


図4.3.5 モデル線量加算前の2011年3月の外部被ばく線量分布の推計（試算）

- (注) 1. Y軸は対数目盛。線量が0の者は除外した。
- 2. 2011年3月の外部被ばく線量評価値がモデル線量設定値8.56 mSvを超える者は、8.56 mSvを控除して試算した。

本検討会は、実務的な線量限度管理の観点で、保守的に一律に加算した点は理解できるものの、放影協は加算した者の行動記録等にアクセスできなかったため、未測定の新在・移動線量のモデル線量設定値の妥当性について判断する材料を持っていなかった。

本検討会の目的は、雇用主により評価された緊急作業線量から臓器吸収線量への換算係数を構築することであり、リスク推定方法は所掌外である。しかし、推計した臓器吸収線量を放射線リスク推定に適用する際、FDNPP 事故に伴う緊急作業の集団線量は、1957 年以來の通常作業の集団線量に比べ小さく、リスク推定への影響は小さいと考えられるものの、緊急作業外部被ばく線量評価値自体の不確かさ、特に過大推計のバイアスを持つ可能性について留意する必要があることを指摘しておく。

4.3.6 代表者運用

放影協は、代表者運用が行われたのが 3 月 16 日から 3 月 31 日であったこと以外には、運用実態について議論するに足るデータを持ち合わせていない。3 月 11 日から 3 月 15 日まででは個人線量計が足りた点に関しては、NEWS 令和 2 年度総括・分担研究報告書 (2021) 線量評価分科会 (page 249) [26]が、「事故発生から数日間の緊急作業従事者数は東電及びその他企業を合計して 100 名程度であった」と述べていることと符合する。これによって、4.2.2 の東電回答にあるように、「確保できた約 320 台で 1 人 1 台の運用が実施」できた。

しかし、3 月 16 日～31 日は、図 4.3.6 のように、東電社員が毎日ほぼ 300 人近く、また、協力企業職員が 100 人前後から 500 人近くまで増加したことから、線量計が不足することになったと考えられた。しかし、日々の線量計不足数の状況に関する情報は得られなかった。

なお、図 4.3.6 は、本検討会栗原委員が、NEWS 線量評価分科会において、労働安全衛生総合研究所から提供された線量データファイル (F71、F72、F73) (厚生労働省が整備した緊急作業従事者の長期的健康管理システムに格納されたデータの一部) を解析し、個人線量計の測定値が測定期間と共に登録されている線量データ F73 から日別緊急作業従事者を推計したものであった。

総論的に、代表者の線量計指示値が大きいほど、グループ内の線量の誤差が、外部被ばく線量評価値の不確かさに大きく寄与すると考えられた。

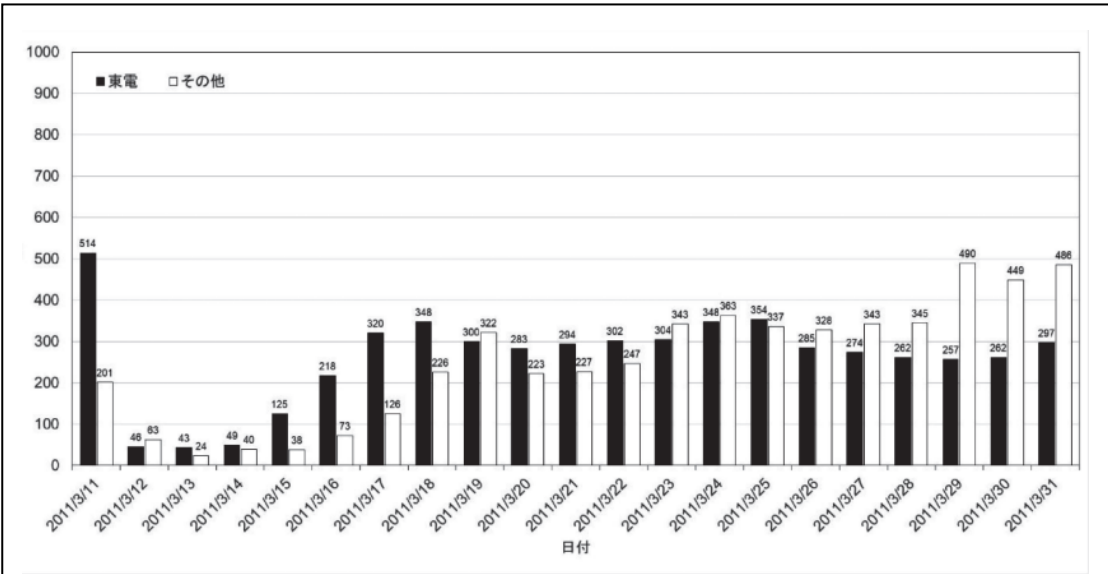


図 4.3.6 NEWS 推計の事故当初の日別緊急作業従事者数の推移

(3月11日～3月31日)

(資料出所) NEWS 令和2年度総括・分担研究報告書[26]線量評価分科会の図6を引用した。

第5章 結論・提言

J-EPISODE のリスク解析に臓器線量を用いることによって、解析結果の国際比較可能性を高めることを目的に、臓器線量の構築が進められてきた。2019年には通常作業線量から臓器線量への換算方法が構築された。今回は、J-EPISODE の緊急作業線量から臓器線量への換算方法を検討した。指定解除者放射線管理記録を利用することによって、緊急作業実効線量を外部被ばく線量と内部被ばくによる預託実効線量に分割でき、また、指定年月日のデータを取得することができた。預託実効線量についても、利用できるデータの制約はあったが、摂取日や核種別摂取比に関する適切な仮定を設けることで、組織・臓器別、年度別臓器線量を推計する方法を確立した。

緊急作業線量の臓器線量構築に関する検討会は、次のとおり提言する。

- (1) 放影協は、本検討会で得られた緊急作業線量の内部線量及び外部線量から臓器線量への換算係数を用いて臓器線量を構築し、通常作業線量の臓器線量と合わせて、今後 J-EPISODE の死亡・がん罹患解析に適用すること。
- (2) 本換算係数は、多くのパラメータと仮定に基づいて構成されている。したがって、放影協は、換算係数に影響を及ぼす可能性のある体内動態モデルの進展、使用線量計の動向、作業環境の変化、線量概念の変更等に注意を払うこと。
- (3) 放影協は、緊急作業外部・内部線量について、東電による評価プロセスに関する詳細な情報を共有できなかったため、本検討会でも、線量評価値を与件として利用せざるを得ず、東電の線量評価に伴う不確かさを十分に議論することができなかった。放影協は、MHLW から線量評価に関する詳細な情報の提供を受けている NEWS との連携を図り、NEWS の今後の研究成果を活用して、線量評価の不確かさの議論を深めることを、本検討会として期待する。
- (4) FDNPP における緊急作業後の廃炉作業は、従前の通常作業とは業務形態・作業内容が異なるものの、光子エネルギー分布、ジオメトリ分布には臓器線量構築検討会報告書で採用した仮定が適用できることから、通常作業線量から臓器線量に対して、これまで評価を行ってきた換算係数をそのまま適用することが妥当である。
- (5) 緊急作業線量の評価、臓器線量の構築、リスク評価のためには作業者の被ばく状況、作業実態の詳細な情報が不可欠である。本検討会は、これらデータの長期保存・保管が、より正確な線量評価のために極めて重要であることを再認識した。
- (6) 内部被ばく線量評価の不確かさは、外部被ばく線量評価の不確かさに比べて格段に大きい。この不確かさの違いは、臓器吸収線量への換算にも付随するものである。リスク解析に臓器吸収線量を適用する際には、線量の不確かさに十分配慮する必要がある。

以上

参考文献

- 1: 放射線影響協会「低線量放射線による人体への影響に関する疫学的調査（第V期調査平成22年度～平成26年度）」平成27年3月
(<https://www.rea.or.jp/ire/pdf/report5.pdf>, 2023年4月1日アクセス)
- 2: Kudo S, Ishida J, Yoshimoto K, Mizuno S, Ohshima S, Furuta H, Kasagi F. Direct adjustment for confounding by smoking reduces radiation-related cancer risk estimates of mortality among male nuclear workers in Japan, 1999–2010. *J Radiol Prot* 38:357–371; 2018.
- 3: 放射線影響協会「低線量放射線による人体への影響に関する疫学的調査（第VI期調査（平成27年度～平成31年度（令和元年度））」令和2年3月
(<https://www.rea.or.jp/ire/pdf/report6.pdf>, 2023年4月1日アクセス)
- 4: 放射線影響協会「臓器線量構築検討会報告書」平成31年3月
(<https://www.rea.or.jp/ire/pdf/zouki.pdf>, 2023年4月1日アクセス)
- 5: Furuta H, Tsujimura N, Nishide A, Kudo S, Shin Saigusa S. Conversion factor from dosimeter reading to air kerma for nuclear worker using anthropomorphic phantom for further conversion from air kerma to organ-absorbed dose. *Radiat Prot Dosim* 189: 371–383; 2020.
- 6: Furuta H, Nishide A, Kudo S, Saigusa S. Estimation of photon energy and direction distributions at Japanese nuclear power plants based on literature survey for J-EPISODE study. *Radiat Prot Dosim* 190:372–391; 2020.
- 7: Furuta H, Sato K, Nishide A, Kudo S, Saigusa S. Organ dose reconstruction applicable for a Japanese nuclear worker cohort: J-EPISODE. *Health Phys* 121:471–483; 2021.
- 8: Furuta H, Kudo S, Ishizawa N, Saigusa S. Reanalysis of cancer mortality using reconstructed organ-absorbed dose: J-EPISODE 1991–2010. *J Radiol Prot* 42:011509; 2022.
- 9: Asano T, Ito A. Experience and perspective on radiation dose registry in Japan. *Jpn J Health Phys* 54:135–136; 2019.
- 10: Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, Gilbert E, Hakama M, Hill C, Howe G, Kaldor J, Muirhead CR, Schubauer-Berigan M, Yoshimura T, Bermann F, Cowper G, Fix JJ, Hacker C, Heinmiller B, Marshall

M, Thierry-Chef I, Utterback D, Ahn Y-O, Amoros E, Ashmore P, Auvinen A, Bae J-M, Bernar J, Biau A, Combalot E, Deboodt P, Diez Sacristan A, Eklof M, Engels H, Engholm G, Gulis G, Habib RR, Holan K, Hyvonen H, Kerekes A, Kurtinaitis J, Malker H, Martuzzi M, Mastauskas A, Monnet A, Moser M, Pearce MS, Richardson DB, Rodriguez-Artalejo F, Rogel A, Tardy H, Telle-Lamberton M, Turai I, Usel M, Veress K. The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation-related cancer risks. *Radiat Res* 167:396–416; 2007.

11: Gilbert ES, Sokolnikov ME, Preston DL, Schonfeld SJ, Schadilov AE, Vasilenko EK, Koshurnikova NA. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort. *Radiat Res* 179:332–342; 2013.

12: Bouville A, Toohey RE, Boice JD Jr, Beck HL, Dauer LT, Eckerman KF, Hagemeyer D, Leggett RW, Mumma MT, Napier B, Pryor KH, Rosenstein M, Schauer DA, Sherbini S, Stram DO, Thompson JL, Till JE, Yoder C, Zeitlin C. Dose reconstruction for the million worker study: status and guidelines. *Health Phys* 108:206–220; 2015.

13: Hamra GB, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, Haylock R, Laurier D, Leuraud K, Moissonnier M, Schubauer-Berigan M, Thierry-Chef I, Kesminiene A. Cohort profile: the international nuclear workers study (INWORKS). *Int J Epidemiol* 45:693–699; 2016.

14: Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, Cahoon EK, Milder CM, Soda M, Cullings HM, Preston DL, Mabuchi K, Ozasa K. Solid cancer incidence among the Life Span Study of atomic bomb survivors: 1958–2009. *Radiat Res* 187:513–537; 2017.

15: Laurent O, Samson E, Caër-Lorho S, Fournier L, Laurier D, Leuraud K. Updated mortality analysis of SELTINE, the French cohort of nuclear workers, 1968–2014. *Cancers* 15:79; 2023.

16: 東京電力「福島原子力事故調査報告書」2012年6月20日
(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0303.pdf, 2023年7月23日アクセス)

17: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2013 Report: Sources, effects and risks of ionizing radiation. Scientific annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami.

(https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2013_Annex-A-CORR.pdf, 2023年7月23日アクセス)

- 18: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).
「UNSCEAR 2013 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」(日本語訳)
(https://www.unscear.org/docs/publications/2013/UNSCEAR_2013_Annex_A_JAPANESE.pdf,
2023 年 7 月 23 日アクセス)
- 19: International Atomic Energy Agency (IAEA). The Fukushima Daiichi accident: Technical volume 1, Description and context of the accident. 2015.
(<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV1-Web.pdf>, 2023 年 7 月 23 日アクセス)
- 20: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).
UNSCEAR 2020 Report: Sources, effects and risks of ionizing radiation. Scientific annex B: Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: implications of information published since the UNSCEAR 2013 Report.
(https://www.unscear.org/docs/publications/2020/UNSCEAR_2020_AnnexB_AdvanceCopy.pdf,
2023 年 7 月 23 日アクセス)
- 21: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).
「UNSCEAR 2020 年/2021 年報告書 第 II 卷科学的附属書 B : 福島第一原子力発電所における事故による放射線被ばくのレベルと影響: UNSCEAR2013 年報告書刊行後に発表された情報の影響」(日本語版)
(https://www.unscear.org/docs/publications/2020/UNSCEAR_2020_21_Report_Vol.II_JP.pdf,
2023 年 7 月 23 日アクセス)
- 22: 国会事故調 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会「報告書」(2012 年)
(<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naic.go.jp/>, 2023 年 1 月 20 日アクセス)
- 23: 都道府県労働局長あて厚生労働省労働基準局長通知(基発 0 3 1 5 第 7 号)「平成二十三年東北地方太平洋沖地震に起因して生じた事態に対応するための電離放射線障害防止規則の特例に関する省令の施行について」平成 23 年 3 月 15 日
(<https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001gkcc-att/2r9852000001gkf6.pdf>, 2023 年 1 月 7 日アクセス)
- 24: 東京電力ホールディングス 福島第一廃炉推進カンパニー 「福島第一原子力発電所作

業者の被ばく線量の評価状況」(2018年7月31日プレスリリース) 添付資料表「被ばく線量の分布等について」

(https://www.tepco.co.jp/press/release/2018/1502475_8707.html, 2023年7月23日アクセス)

25: 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 「厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金 放射線業務従事者の健康影響に関する疫学研究(旧東電福島第一原発緊急作業に関する疫学研究) 令和元年度 総括・分担研究報告書(研究代表者 大久保 利晃)」2020年3月

(https://www.news.johas.go.jp/hp/pdf/report_r01.pdf, 2023年1月7日アクセス)

26: 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 「厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金 放射線業務従事者の健康影響に関する疫学研究(旧東電福島第一原発緊急作業に関する疫学研究) 令和2年度 総括・分担研究報告書(研究代表者 大久保 利晃)」2021年3月

(https://www.news.johas.go.jp/hp/pdf/report_r02.pdf, 2023年1月7日アクセス)

27: 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 「厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金 放射線業務従事者の健康影響に関する疫学研究(旧東電福島第一原発緊急作業に関する疫学研究) 令和3年度 総括・分担研究報告書(研究代表者 大久保 利晃)」2022年3月

(https://www.news.johas.go.jp/hp/pdf/report_r03.pdf, 2023年1月7日アクセス)

28: International Commission on Radiological Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30 (Part 1). Ann. ICRP 2; 1979.

29: 東京電力「福島第一原子力発電所 内部被ばく線量再確認作業にともなう『被ばく線量の分布等』の修正について」(プレスリリース 2013年7月5日)

(https://www.tepco.co.jp/cc/press/2013/1228741_5117.html, 2023年7月23日アクセス)

添付資料3 「福島第一原子力発電所における内部被ばく線量の評価方法について」

(http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu13_j/images/130705j0103.pdf, 2023年7月23日アクセス)

30: (財)原子力安全技術センター「内部被ばく線量の測定・評価マニュアル」(2000年度版)

31: International Commission on Radiological Protection. Individual monitoring for internal exposure of workers (preface and glossary missing). ICRP Publication 78. Ann. ICRP 27; 1997.

- 32: International Commission on Radiological Protection. ICRP CD1. Database of dose coefficients: workers and members of the public. Ann. ICRP 26; 1996.
- 33: Yasui S. Governmental re-evaluation of the committed effective dose received by emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi NPP accident. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. D66–D67; 2015.
- 34: International Commission on Radiological Protection. Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. Ann. ICRP 11–13: 1983
- 35: International Commission on Radiological Protection. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38; 2008.
- 36: Kurihara O. Direct measurements of employees involved in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident for internal dose estimates: JAEA's experiences. NIRS Symposium 2012 Proceedings. (<https://repo.qst.go.jp/records/73765>, 2023 年 7 月 19 日アクセス)
- 37: 東京電力ホールディングス「福島第一原子力発電所構内での計測データ 2011 年アーカイブ：福島第一原子力発電所のモニタリング状況（3 月 11～21 日）」
(<https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/data/2011/index-j.html#header>, 2023 年 7 月 23 日アクセス) (https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110528d.pdf, 2023 年 7 月 23 日アクセス)
- 38: Okazaki R, Kohzaki M, Kai M, Jiang Y, Kubo T, Ootsuyama A, Sado T, Suzuki K, Tateishi S and Mori K. Relationship between haematological data and radiation doses of TEPCO workers before and after the FDNNP accident. Radiat Res 64:261–272;2023.
- 39: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学研究所 計測・線量評価部 MONDAL3, Support system for internal dosimetry.
(<https://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/RPD/mondal3j.php>, 2023 年 1 月 8 日アクセス)
- 40: International Commission on Radiological Protection. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24; 1994.
- 41: Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant E J, Sakata R, Sugiyama H and Kodama

K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors: report 14, 1950–2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res* 177:229–243; 2012.

42: 東京電力 「当社福島第一原子力発電所の放射線業務従事者の線量限度を超える被ばくに係る原因究明及び再発防止対策の策定に関する経済産業省原子力安全・保安院への報告について」(プレスリリース 2011年5月2日)(<https://www.tepco.co.jp/cc/press/11050207-j.html>, 2023年7月23日アクセス)

添付資料1～4: 「福島第一原子力発電所の放射線業務従事者の線量限度を超える被ばくに係る原因究明及び再発防止対策の策定等について」(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/1105021.pdf, 2023年7月23日アクセス)

43: 菅井研自「緊急時作業に対する線量限度～基準の運用実態と今後の課題～」保健物理 47巻1号, 2012
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhps/47/1/47_25/_pdf/-char/ja, 2023年1月7日アクセス)

44: 東京電力「福島第一原子力発電所緊急時作業に係る被ばく線量の測定結果について」(プレスリリース 2011年4月30日)(<https://www.tepco.co.jp/cc/press/11043002-j.html>, 2023年7月23日アクセス)

45: 東京電力「当社福島第一原子力発電所の緊急作業における放射線業務従事者の線量限度を超える被ばくに係る改善に関する経済産業省原子力安全・保安院への報告等について」(プレスリリース 2011年8月12日)(<https://www.tepco.co.jp/cc/press/11081205-j.html>, 2023年7月23日アクセス) 添付資料「福島第一原子力発電所における緊急時作業に従事した放射線業務従事者の線量限度を超える被ばくに係る改善について」(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110812d.pdf, 2023年7月23日アクセス)

46: Thierry-Chef I, Marshall M, Fix JJ, Bermann F, Gilbert ES, Hacker C, Heinmiller B, Murray W, Pearce MS, Utterback D, Bernar K, Deboodt P, Eklof M, Grieciene B, Holan K, Hyvonen H, Kerekes A, Lee M-C, Moser M, Pernicka F, Cardis E. The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: study of errors in dosimetry. *Radiat Res* 167:380–395; 2007.

47: Tsujimura N and Yoshida T. Beta dose rate measurements with an end-window GM survey meter in environments contaminated by the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Progress in Nuclear Science and Technology*. 4:85–89; 2014.

48: 東電 HD ホームページ「サーバイマップ 建屋周辺アーカイブ」

(<https://www.tepco.co.jp/decommission/data/surveymap/archive/entirebuilding-j.html>, 2023年7月23日アクセス)

建屋周辺サーベイマップ (2011年3月23日現在)

(<https://www.tepco.co.jp/decommission/data/surveymap/pdf/2017/f1-sv-20110323-j.pdf>, 2023年7月23日アクセス)

49: International Commission on Radiological Protection. Adult reference computational phantoms. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 110; Ann. ICRP 39; 2009.

50: International Commission of Radiological Protection. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 116; Ann. ICRP 40; 2010.

51: International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 74; Ann. ICRP 26; 1996.

52: 東京電力「福島第一原子力発電所緊急時作業に伴う作業者の被ばく線量の評価状況について (続報2)」(プレスリリース 2011年6月20日)

(<https://www.tepco.co.jp/cc/press/11062008-j.html>, 2023年7月23日アクセス)

添付資料「外部被ばく線量・内部被ばく線量(一次評価)の分布等」

(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110620k.pdf, 2023年7月23日アクセス)

53: 東京電力「福島第一原子力発電所緊急時作業に伴う作業者の被ばく線量の評価状況について (続報4)」(プレスリリース 2011年7月13日)

(<https://www.tepco.co.jp/cc/press/11071311-j.html>, 2023年7月23日アクセス)

別紙「福島第一原子力発電所の緊急作業に従事した作業者の線量評価状況について」

(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110713y.pdf, 2023年7月23日アクセス)