

日本放射線事故・災害医学会雑誌

*Journal of Japanese Association
for Radiation*

Accident/Disaster Medicine

Vol.7
No.1
2024



JJARADM 2024 vol.7(1)

目次

学会報告

- 第 12 回日本放射線事故・災害医学会年次学術集会を開催して 1 ~ 4
岡崎龍史

総説

- 原子力災害での体表面汚染から吸入による甲状腺等価線量を導き出すモデルの
不確実性 5 ~ 14
大葉隆、石川徹夫、長谷川有史、鈴木元

調査報告

- 原子力事業者による原子力災害時のオンサイト医療体制の構築について . . . 15 ~ 20
鈴木純一、三木田郁弥、後澤拓哉 他 12 名

学会報告

- EPRBioDose2024（電子スピン共鳴吸収の応用と生物学的線量評価に
関する国際学会）開催報告 21 ~ 26
藤嶋洋平、Anderson Donovan、阿部悠 他 11 名

調査報告

- 福島第一原子力発電所事故の当時とその後 一産業医の立場から一 27 ~ 36
菊地央

学会報告

第 12 回日本放射線事故・災害医学会年次学術集会を主催して

岡崎 龍史

産業医科大学 産業生態科学研究所 放射線衛生管理学

要旨

令和 6 年 9 月 27 日 - 28 日に第 12 回日本放射線事故・災害医学会年次学術集会を北九州国際会議場にて、また日本放射線影響学会第 67 回大会との合同大会として開催した。日本放射線影響学会第 67 回大会の大会会長が先に決まっておき、福島原発とチョルノビル原発事故に関連した原子力・放射線事故対応のシンポジウムを企画した。「日本放射線事故・災害医学会の会員もご参加ください」と、明石眞言理事長にお声かけしたところ、第 12 回大会を連続でするようにと大会会長を指名された。大会テーマは、合同大会ということもあり、「放射線安全と健康：知識と協力の架け橋」とした。

キーワード：原子力災害、ウクライナ、福島、放射線教育、災害関連死、学会連携

1. はじめに

参加登録者は、第 12 回日本放射線事故・災害医学会年次学術集会で 132 名、日本放射線影響学会第 67 回大会として 364 名であった。

初日には「放射線教育とリスクコミュニケーション：社会への理解と協働の促進」と「原子力災害時の避難と屋内退避災害関連死を防ぐために」、「原子力災害・放射線事故への対応 - 福島とウクライナの経験を踏まえて -」のシンポジウムを組み、2 日は、明石眞言先生による恒例の「最近の事故事例」、長谷川有史先生による「アメリカ原発の法規制と推進」、さらに東京電力ホールディングス株式会社の産業医菊地央先生に「福島原発事故の当時の対応とその後」は講演をお願いした。さらに、メインシンポジウムとして、日本産業衛生学会と日本保健物理学会を含めた 4 学会による「原子力災害・放射線事故災害対策」を企画した。産業医科大学は公的には最初に福島原発事故を支援した機関だが、その立役者となった森晃爾先生及び立石清一郎先生にシンポジストとして招いた。森先生は日本産業衛生学会の理事長で、立石先生は代議員である。また、日本放射線衛生学会理事長の田代聡先生、日本

保健物理学会会長の杉浦紳之先生、本学会から前川和彦先生にシンポジストとなっただき、それぞれの立場から今後の放射線事故歴史や対応に関して議論を深めていった。日本産業衛生学会、日本保健物理学会、福岡県医師会にも後援をいただき、様々な学会の立場から語り合えたと考える。ここでは、特別講演とシンポジウムの内容を紹介する。

2. 特別講演

1) 最近の事故事例（明石眞言先生）



演者の明石先生

近年起こった放射線事故事例は、毎年明石先生によって報告されている。大きな事故はそうそうありえないが、小さな事故でも情報共有していくことは本学会において重要なことであると考えられる。今回は、原子力規制委員会の「原子炉等規制法または放射性同位元素等規制法に基づく報告（R5 年度）」、「NEWS」、オーストラリア放射線防護・原子力安全庁（ARPANSA）

連絡先： 産業医科大学 産業生態科学研究所
放射線衛生管理学研究室
岡崎 龍史（オカザキ リュウジ）
〒 807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘 1 - 1
Email: ryuji-o@med.uoeh-u.ac.jp

の「Australian Radiation Incident Register (2020)」から情報を得て、報告された。非破壊検査における放射性同位元素の消失は、いまだによくある報告事例として挙げられている。また、日本航空機には非常表示灯に ^{85}Kr が使われており、令和 6 年 1 月 2 日の海上保安庁の飛行機との衝突で流失したことが報告された。環境影響等問題ないレベルとはいえ、あまり知られていない情報であった。

2) 米国原子力施設の規制と推進 (長谷川有史先生)



演者の長谷川先生

令和 5 年度にシカゴ、サウスカロライナ、ワシントン DC における原子力関連施設へ視察に行った。原子力施設の規制と推進に重要な役割を果たすのが、原子力規制委員会 (NRC) とエネルギー省 (DOE) であった。NRC は独立機関である一方で、行政機関である DOE と覚え書きを通して研究等で連携し、DOE が管理する研究施設機能 (Argonne など) を有効活用している。NRC は独立機関である一方で、行政機関である DOE と覚え書きを通して研究等で連携し、Argonne などを有効活用している。

原子力緊急事態への対策 (Emergency Preparedness) は NRC と国土安全保障省 (DHS) の下部組織である緊急事態管理庁 (FEMA) が連携して行う。NRC が事業者の緊急対応能力の評価向上を担当するのに対し、FEMA は州や自治体などオフサイト対応の責任を持つ。FEMA の評価を NRC が承認することで両者は連携関係を持つ。また放射線緊急時計画プログラムマニュアル (REP Program Manual) を共同策定運用することで事故前の防災、事故後の対応、事故後対策の 3 時相で DHS が示す国家防衛目標 (National Preparedness Goal) を共有する。

核原料等の放射性物質の規制は NRC が、ウラン鉱山などの自然放射性物質は独立機関である環境保護庁 (EPA) が担当している。電気事業者は原子力エネルギー協会 (NEI) を通じて NRC と議論し、同時に原

子力発電運転協会 (IMPO) を通じて自主規制と作業員への教育を行う。

3) 福島第一原子力発電所事故の当時とその後 - 産業医の立場から - (菊地央先生)



演者の菊地先生

東北地方太平洋沖地震による津波で、東京電力株式会社福島第一原子力発電所 (1F) は国際原子力・放射線事象評価尺度でレベル 7 という事故が起きた。1F 事故の災害対応者は、退避できない状況となり、放射線のほか、津波、爆発、暑熱、高所、長時間労働などの多くのハザードが存在し、レスポンスは多様な健康障害リスクに直面することとなった。さらに、事故後に現場入りした災害対応者は、電離放射線障害防止規則上の緊急作業従事者となった。安定ヨウ素剤の予防内服を含めて、さまざまな被ばく対策が講じられたが、経過中には放射性物質汚染事象も発生していた。結果的には、被ばくを完璧に免れることはできず、法定限度を超えて被ばくした作業員も発生した。廃炉作業は今日も続けられている。東電産業医の立場から作業員に対する産業保健活動の報告をしていただいた。

3. シンポジウム

1) 放射線教育とリスクコミュニケーション：社会への理解と協働の促進

放射線教育は約 30 年間義務教育から除かれ、福島原発事故の後、放射線影響の教育が始まった。事故当時、放射線影響の誤った認識や風評などが蔓延し、正しい知識を述べるのが憚られるようになった。福島原発廃炉作業員に対する不安解消のための教育はなく、医学教育では放射線基礎医学講座の減少による教育の減少し、医療現場での教育がほとんどない。これら様々な対象者に対する教育は必要性であり、さらに



シンポジストの諸先生方（左から）長谷川先生、越智先生、岡崎、松本先生、赤羽先生

コミュニケーションをうまく取っていく必要がある。今回、小中学生、福島原発作業員、医療従事者に対する教育とリスクコミュニケーションに関してそれぞれ携わる講師の講演と教育に対する議論を深めることを目的にシンポジウムを組んだ。

座長は東京工業大学松本義久先生と産業医科大学岡崎で行った。松本義久先生は「小中学校における放射線科学教育：放射線に関する正しい知識と面白さ・重要性を未来に伝える」、岡崎は「福島原発作業員に対する現場に向けた放射線教育」、量子科学技術研究開発機構の赤羽恵一先生は「医療従事者に対する放射線教育の現状と課題」、福島県立医科大学の長谷川有史先生は「福島事故から学ぶ：理解・協働のための医療者向け放射線教育とコミュニケーション」、東京慈恵会医科大学の越智小枝先生は「リスクコミュニケーションからライフコミュニケーションへ」というタイトルでそれぞれ講演していただいた。

2) 原子力災害時の避難と屋内退避 - 災害関連死を防ぐために -

福島県立医大の坪倉正治先生の企画でこのシンポジウムが組まれた。東日本大震災に伴う福島原発事故では、広範囲の放射能汚染により住民の避難が余儀なくされた。この事故では、放射線被ばくといった原子力災害による直接的な健康影響よりも、避難に伴う間接的な健康影響により、高齢者や障がい者など多くの方が亡くなった。このような災害の間接的な影響による死亡、災害関連死を防ぐため、状況によっては、避難をせずに屋内退避をすることも有効と考えられるが、能登半島地震からも明らかのように、その屋内退避の方法や手段についても課題が残った。本企画では、今後の災害対策に役立てるべく、原子力災害時の避難や屋内退避について多角的な視点から講演と議論が行わ

れた。

座長は坪倉正治先生と大阪大学の村上道夫先生。ときわ会常磐病院の澤野豊明先生が「福島第一原子力発電所事故後の福島県南相馬市における災害関連死の概要とその教訓」、東京大学の武藤香織先生が「COVID-19 対策における高齢者療養の困難」、医療法人オレンジグループの紅谷浩之先生が「避難と生活のバランスを考える～能登半島地震の経験より～」、日本原子力研究開発機構の高原省五先生が「原子力災害時の住民の被ばく線量と屋内退避の効果」というタイトルでそれぞれ講演された。



座長の坪倉先生（左）と村上先生（右）

3) 原子力災害・放射線事故への対応 - 福島とウクライナの経験を踏まえて -

Response to Nuclear Disaster and Radiation Accidents - based on the experiences of Fukushima and Ukraine -

レベル7の原発事故は、福島ならびにチェルノブイリ原発で経験してきた。日本は唯一の原爆被爆国であり、ウクライナでは原発への攻撃や核攻撃が現実味を帯びてきている。このシンポジウムでは、日本とウクライナの原発事故に対応をしてきた講師を招き、その過去の経験を享受していただき、講師を今後の日本の対応をどのようにしていくべきかを議論した。さらに原子力規制庁の立場から、行政の行ってきた改革と今後に対するあり方を議論した。英語のセッションとした。

座長は広島大学の田代聡先生と岡崎で行った。福島県立医科大学山下俊一先生に「チェルノブイリと福島原発事故からの教訓」、ウクライナの National Research Center for Radiation Medicine 所属の Viktor SUSHKO は「General summary of the Medical Consequences of the Chernobyl Catastrophe in the remote post-accident period (38 Anniversary of the

CHNPP Accident)」、原子力規制委員会の伴信彦先生には「原子力緊急事態への対策と対応：原子力災害対策指針の概要」というタイトルでそれぞれ講演していただいた。指定発言として、広島大学の廣橋伸之先生に原爆被爆との比較による核テロ想定への準備の必要性を述べてもらった。伴委員には国民保護法に基づく核テロ対策の重要性も述べてもらい、我々の能力以上のことも想定することの重要性などを共有した。

4) 4 学会放射線災害対策シンポジウム

今回、日本放射線事故・災害医学会と日本放射線影響学会の合同大会であり、日本産業衛生学会と日本保健物理学会の後援をいただいた。それぞれの学会がこれまで原子力災害や放射線事故にどのように対応してきたかを情報共有し、また今後4学会が連携をしていけるのかを議論する場を設けた。平時から原子力事業者や放射線の専門家との連携を取り、発災時には放射線の専門的知識の活用と産業保健を融合していくことの重要性についてまとめた。座長は、日本放射線事故・災害医学会理事長の明石眞言先生と岡崎が担当した。



シンポジストの諸先生方（左から）立石先生、杉浦先生、森先生、岡崎、前川先生、田代先生、明石先生

日本放射線事故・災害医学会からは、現在同学会監事である元東京大学前川和彦先生に、「放射線被ばく患者診療におけるピットホールと教訓 - 東海村 JCO 臨界事故の医療対応の経験から -」というタイトルでご講演いただいた。貴重なご経験の情報提供と高線量被ばく者の医療対応への提言を述べていただいた。

日本放射線影響学会理事長の田代聡先生には、「放射線影響研究から見た放射線災害対策」というタイトルで、放射線災害対応委員会における教育や放射線知

識の普及、また放射線リスク・防護検討委員会における情報発信や学会連携について、さらに今後は放射線影響を評価していくアカデミアとしての役割についてご講演いただいた。

日本保健物理学会会長の杉浦紳之先生には、「事故対応において保健物理が果たした役割」というタイトルで、放射線防護が福島第一原発事故でどのように役割があったか、さらにコミュニケーションの重要性についてご講演いただいた。

日本産業衛生学会理事長の森晃爾先生には、産業医科大学が一番に公的機関として福島第一原発事故の支援を行った経過を、「原子力災害に対する産業保健支援—福島第一原子力発電所事故における支援経験を通じて」というタイトルでご講演いただいた。災害産業保健という概念を構築し、産業医科大学には災害産業保健センターが開設された。初代教授となった立石清一郎先生には、「災害対応者への産業保健の重要性～原子力災害時に役立つ災害産業保健体制の構築～」というタイトルでご講演いただいた。両先生とも、放射線影響以外にも熱中症、過重労働、職務適性の評価など様々な視点から健康リスクを最小化する活動の必要性についてご講演いただいた。学会として直接事故対応に直接活動することはなくても、学会連携の重要性については良い議論ができたと考えられる。

4. 最後に

今回、日本放射線影響学会第67回大会で企画されたワークショップ「福島第一原発事故から学ぶ放射線被ばくの生体影響」や京都大学放射線研企画のシンポジウムも当学会の合同企画の位置付けとして開催した。上記2-3)の特別講演、及び3-4)のシンポジウムは日本医師会認定産業医制度生涯研修単位を取得可能した。

北九州市の共催、北九州観光コンベンション協会の協賛、他様々な企業や団体から協賛協力をいただきました。今場を借りて、感謝申し上げます。

総 説

原子力災害での体表面汚染から吸入による甲状腺等価線量を導き出すモデルの不確実性

Uncertainty in models for leading thyroid equivalent doses from body surface contamination following a nuclear disaster

大葉隆¹⁾、石川徹夫²⁾、長谷川有史³⁾、鈴木元⁴⁾

Takashi Ohba¹⁾, Tetsuo Ishikawa²⁾, Arifumi Hasegawa³⁾, Gen Suzuki⁴⁾

1) 福島県立医科大学保健科学部診療放射線科学科、

2) 福島県立医科大学医学部放射線物理化学講座

3) 福島県立医科大学医学部放射線災害医療学講座、

4) 保内郷メディカルクリニック

1) Department of Radiological Sciences, Fukushima Medical University, School of Health Sciences

2) Department of Radiation Physics and Chemistry, Fukushima Medical University, School of Medicine

3) Department of Radiation Disaster Medicine, Fukushima Medical University, School of Medicine

4) Honaigo Medical Clinic

キーワード：原子力災害、甲状腺等価線量、体表面汚染、内部被ばく、放射性ヨウ素

和文要旨

原子力災害における甲状腺線量の推計は、小児の甲状腺がんの発生予測に重要な役割を果たす。福島第一原子力発電所（福島第一原発）事故時に、多数の住民を対象に甲状腺線量を実測することは困難であった。そこで、福島第一原発事故後に、体表面汚染の計数率から吸入による甲状腺等価線量を推計する手法が報告された。しかしながら、この手法には多くの不確実性が存在した。本報告では、この手法の不確実性を検討し、これらの不確実性の因子において既知的であるか、未知的であるかを議論することが目的である。体表面汚染実測値から吸入による甲状腺等価線量を導き出すモデルでは、まず、避難経路毎に集団の体表面汚染レベルの分布より確率密度分布を求め、そして、放射性物質の体表面への沈着速度の確率密度分布を一様分布として仮定し、最終的に、甲状腺等価線量をこれらの分布から2次元モンテカルロ・シミュレーション法により求めた。このモデルの既知的な不確実性の因子としては、大気中の放射性核種割合や沈着速度補正係数にかかわる化学組成、GMサーベイメータ装置に関する不確実性、甲状腺等価線量への換算係数が挙げられた。また、未知的な不確実性の因子としては、体表面汚染状況における乾性沈着と湿性沈着の混在における沈着速度の不確実性や、体表面汚染における測定者の習熟度、自然脱落率の個人差や暴露からの汚染検査までの時間経過が該当すると考えた。これらは、研究が進んでいなかった、もしくは、福島第一原発事故後の体表面汚染の情報として残すことが難しい部分であったと考えられた。今後、未知的な不確実性の因子について、改善が進んでいけば、体表面汚染から甲状腺等価線量を導き出すモデルについて、精緻化が進んでいくと考える。

利益相反：開示すべき利益相反はない。

Corresponding author: Takashi Ohba, R.T., Ph.D., 10-6 Sakae-machi, Fukushima City, Fukushima, 960-8516, Japan, Tel +81-24-581-5568, E-mail tohba@fmu.ac.jp

Abstract

Estimation of thyroid dose in a nuclear disaster plays an important role in predicting the occurrence of thyroid cancer in children. After the Fukushima Daiichi nuclear power station (FDNPS) accident, it was difficult to directly measure thyroid doses for large numbers of evacuees. A method for estimating thyroid equivalent doses resulting from inhalation using the count rate of body surface contamination has been reported since the FDNPS accident. However, many uncertainties exist regarding this method. This report aims to examine and discuss the factors driving known or unknown uncertainty in this method. The following steps were taken to generate this model to derive thyroid equivalent doses due to inhalation from measurement by body surface contamination after the FDNPS accident: 1) probability density distributions were obtained as the distribution of body surface contamination levels in the affected population for each evacuation route; 2) a uniform probability density distribution of the deposition velocity of radioactive materials on the body surface was assumed; 3) the thyroid equivalent doses in the affected population for each evacuation route were combined and estimated by a two-dimensional Monte Carlo simulation method. Known uncertainty factors in this model included the radionuclide ratio in the air, the chemical composition involved in the deposition velocity correction factors, uncertainties related to GM survey meters, and conversion factors of thyroid equivalent doses. Unknown factors included the uncertainty of deposition velocity in the body surface contamination under the mix of dry and wet depositions, the surveyor's proficiency of the measurements of body surface contamination, individual differences in natural removal rates, and the time lapse between a contamination exposure and a body surface examination. These were areas where research had not progressed or where it was difficult to acquire information on body surface contamination examinations after the FDNPS accident. Future improvements regarding the unknown uncertainty factors may refine the model for deriving thyroid equivalent doses from body surface contamination.

1. はじめに

原子力災害は稀な災害であるが、大規模な災害が起きれば、住民への健康影響が甚大になる。特に、チョルノービリ原子力発電所事故（1986年）において、小児の甲状腺がんの発生が原子力災害の甚大な影響として報告された¹⁾。チョルノービリ原発事故だけでなく、原爆被爆や医療被ばくの疫学調査から小児の甲状腺がんは、線量依存的に増加すると報告されている²⁾。原子力災害における甲状腺線量のモニタリングは、小児の甲状腺がんの発生予測に重要な役割を果たす。東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）事故（2011年）後、住民の直接的な甲状腺線量の測定が実施されたがその数は限定的であった^{3,4)}。その他に、ホールボディカウンターによる内部被ばくの測定結果からの甲状腺等価線量の推計やシミュレーションによる甲状腺等価線量の推計の報告も見られた⁵⁻⁷⁾。このように甲状腺等価線量の推計は、福島第一原発事故後に、様々な手法が用いられた。

福島第一原発事故の発生後に、大規模な体表面汚染検査（当時の呼び名でスクリーニング検査）が

実施された⁸⁾。当時の体表面汚染検査では、GMサーベイメータを使用して、全身の汚染検査をするとともに、測定による計数率や測定情報を記録用紙へ残していた⁹⁾。体表面汚染検査の記録情報は、住民の大気中から吸入した放射性核種濃度へ変換できると仮定して、Ohbaらは体表面汚染の計数率から吸入による甲状腺等価線量を推計する手法を開発した^{10,11)}。すなわち、避難経路毎の集団の体表面汚染密度の核種情報から体表面への沈着速度を仮定して大気中の放射性核種濃度をシミュレーションし、吸入による甲状腺等価線量の推計が可能であった。

しかし、体表面汚染の計数率から甲状腺等価線量を推計する手法は、モデルのパラメータや人的な要因など多くの不確実性を要しており、さらに改良する必要がある。

本報告は、体表面汚染の計数率から甲状腺等価線量を推計する手法について、その不確実性に関する因子を検討するとともに、これらの不確実性の因子において既知的であるか、未知的であるかを議論することが目的である。本報告により、不

確実性に対する課題が明らかになり、今後の研究発展に寄与すると考える。また、本報告は、倫理的な配慮を必要とする事項に該当せず、申告が必要な利益相反も存在しない。

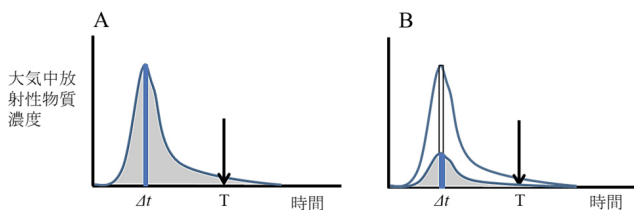
2. 方法

2-1. 体表面汚染から甲状腺等価線量を導き出すモデルの構築^{10,11)}

体表面汚染は、放射性ヨウ素を含む放射性物質による大気中からの沈着速度を仮定すると、甲状腺等価線量と相関する。図 1A のように、t 時間目の大気中の放射性核種 *i* の濃度を $y=A_i(t)$ (単位: Bq/m³) と定義すると、図 1B のように、0~T 時間に体表面上に沈着する放射性核種 *i* の表面汚染密度 $S_i(T)$ は、 $A_i(t)$ と沈着速度 v_i (単位: cm/s) の積の積分値として求められる(式 1)。

$$S_i(T) = 3.6 \times 10^{-3} \int_0^T v_i A_i(t) dt \quad (式 1)$$

図 1. 避難途上における経過時間と大気中放射性核種の濃度から見た体表面汚染の傾向



(A: 避難途上における大気中放射放射性核種の暴露時間 (Δt) と経過時間 (0 ~ T 時間) の傾向、B: 避難途上における体表面汚染に記録された大気中放射放射性核種の暴露時間 (Δt) とある時間 T の傾向)

ここで、 3.6×10^{-3} は、沈着速度 v_i に対する単位換算であり、時間の単位で sec を hour へ変換する $60 \times 60 = 3,600$ を容積の単位で cm³ から m³ へ変換する 10^6 で割った値である。つまり、 $3,600 \div 10^6 = 3.6 \times 10^{-3}$ となる。

ICRP (国際放射線防護委員会) の呼吸モデルから導き出された呼吸率 B、核種 *i* における甲状腺等価線量換算係数 f_i とすると¹²⁾、(式 1) より吸入による 0~T 時間の間の甲状腺等価線量 $ED_{thy,i}(t)$ (単位: Sv) は、以下の積分値として式 2 が表現される。

$$\begin{aligned} ED_{thy,i}(T) &= B \times T \times f_i \times \frac{\int_0^T A_i(t) dt}{T} \\ &= B \times f_i \times \frac{S_i(T)}{3.6 \times 10^{-3} v_i} \end{aligned} \quad (式 2)$$

一方、 $S_i(T)$ (単位: Bq/cm²) は、体表面上に沈着した放射性物質を GM サーベイメータで測定値から求められる。環境バックグラウンドおよび計数率をそれぞれ N_b 、 N (単位: cpm)、 $\epsilon_{e,i}$ 、 $\epsilon_{s,i}$ をそれぞれ機器効率、表面汚染の線源効率、 W (単位: cm²) を GM サーベイメータのプロブ断面積で 19.6 cm²、 ER_i を核種 *i* の β 線放出比とすると、式 3 となる。

$$\begin{aligned} S_i(T) &= \frac{(N - N_b)}{\epsilon_{e,i} \times \epsilon_{s,i} \times W \times ER_i \times 60} \\ &= \frac{(N - N_b) \times C_i}{1} \\ C_i &= \frac{1}{\epsilon_{e,i} \times \epsilon_{s,i} \times W \times ER_i \times 60} \end{aligned} \quad (式 3)$$

ここで、 $\epsilon_{e,i}$ はアロカ製 TGS-125、133、136、146 製の GM サーベイメータにおける機器効率を使用した。また、 $\epsilon_{s,i}$ は ISO (国際標準化機構) を満たした JIS (日本産業規格) の報告に準じて、0.4 MeV 以上の β 線エネルギーに対して、0.5 を用い、0.4 MeV 未満の β 線エネルギーを 0.25 とした¹³⁾。表 1 のように、 C_i として、式 3 に該当する本報告の表面汚染密度換算係数は放出比が 70% 以上の β 線エネルギーを対象に再計算した。Ohba らにおいて β 線エネルギーの放出比を 1% 以上としていたが¹⁰⁾、本報告では、GM サーベイメータの測定で寄与率の低い β 線は対象外として、再計算した。また、¹³²I は放出比が 2.7% ~ 18.9% の 9 種類の代表的な β 線エネルギーを対象としたが、放出比が低いため、これらを平均して 1 本の β 線エネルギーとみなして表面汚染密度換算係数を算出した。これにより、本報告の C_i は、表 1 のように放射性核種における GM サーベイメータの換算係数を使用した (単位: Bq·cm²/cpm)。

体表面汚染に関して、皮膚表面に沈着したサブミクロン粒子は、皮膚からの自然脱落の半減期が 14.7 時間と報告されていた¹⁴⁾。さらに、ガス状の放射性ヨウ素の自然脱落に関しては、報告がないが、解析では

表 1.GM サーベイメータの表面汚染密度換算係数 (単位: Bq・cm⁻²/cpm)

	¹³¹ I	¹³² I	¹³³ I	¹³² Te	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
本報告	0.004	0.004	0.004	0.014	0.005	0.004
Ohba.et al, 2019 ¹¹⁾ における報告	0.004	0.003	0.003	0.014	-	-

表 2. 福島第一原発事故での報告を含めた代表的な大気中の放射性核種の濃度比率と放射性核種の物理学的半減期

プルームの種類	¹³¹ I	¹³² I	¹³³ I	¹³² Te	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
プルーム A (¹³¹ I 単独の想定)	1	0	0	0	0	0
プルーム B (2011 年 3 月 12 日午後) *	1	1.5	1.1	1.5	0.1	0.1
プルーム C (2011 年 3 月 15 日午前 4 時 ～午後 8 時) *	1	0.85 [‡]	0.15 [‡]	0.85 [‡]	0.1	0.1
プルーム D (2011 年 3 月 15 日午後 8 時 ～3 月 16 日午前 6 時) *	1	0.2	0.095 [‡]	0.2	0.014 [§]	0.014 [§]
プルーム E (2011 年 3 月 12 日午後) †	1	1.9	1.4	1.9	0.1	0.1
放射性核種の物理学的半減期	8.0 日	2.3 時間	20.8 時間	3.2 日	2.1 年	30.1 年

* Katata et al. 2015¹⁵⁾, † Ohba et al. 2017¹⁰⁾.

‡ 体表面汚染濃度から大気中の放射性核種の割合を導き出すために、Katata らの報告より、核種比率は中間値を使用した。

§ ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs は Katata らの報告と同じく小数点以下 3 桁目まで採用した。

同じ半減期で脱落 (再浮遊) すると仮定した。また、プルームへの曝露時間から体表面汚染スクリーニング時期までの時間 Tscr (単位: h) とすると、表 2 の物理学的半減期 HL_i と自然脱落率 14.7 時間の補正により、プルーム曝露時の核種 i の体表面汚染密度 S_i(at plume) は、式 4 で表される。さらに、式 4 は P_i を係数とした式へと変換できる。

$$\begin{aligned}
 S_i(\text{at plume}) &= S_i(T) \times \left(0.5 \frac{T_{scr}}{HL_i} \times 0.5 \frac{T_{scr}}{14.7} \right) \\
 &= (N - N_b) \times C_i \times P_i \\
 P_i &= 0.5 \frac{T_{scr}}{HL_i} \times 0.5 \frac{T_{scr}}{14.7}
 \end{aligned}$$

(式 4)

さらに、体表面汚染核種 i が全体の放射性物質に占める割合を示せば、計数率における核種 i の甲状腺等価線量を沈着速度 v_i の関数として推計できる。最終的なモデル式は、式 1～4 より、式 5 が導ける。本手法について最も注目すべきポイントは、式 5 の最終モデルへ放射性核種を含んだプルームに晒されていた時間 (T) が吸入被ばくの経過時間 (T) となるため、時間の概念を考慮せずに済むことであった。

$$\begin{aligned}
 ED_{thy,i}(\text{at plume}) &= B \times f_i \times \frac{S_i(\text{at plume})}{3.6 \times 10^{-3} v_i} \\
 &= B \times f_i \times \frac{(N - N_b) \times C_i \times P_i}{3.6 \times 10^{-3} v_i}
 \end{aligned}$$

(式 5)

式 5 より、避難経路毎に集団の体表面汚染レベル (S_i(at plume)=(N-N_b) × C_i × P_i) の分布より体表面汚染の確率密度分布が得られれば、放射性物質の体表面への沈着速度 v_i の確率密度分布を一様分布として仮定して、2 次元モンテカルロ・シミュレーション法を用いて甲状腺等価線量をシミュレーションする事ができる。

2-2. モデルのベースとなる初期設定因子

大気中の放射性核種の濃度比率は初期設定として表 2 のように、プルーム A～E の 5 種類を用いて、本報告ではシミュレーションした。表 2 のプルーム A は放射性ヨウ素の ¹³¹I 単独のプルームであり、仮想的な単一放射性核種のプルームの想定とした。そして、プルーム B～D は、Katata らが報告したプルームの比率を用いた¹⁵⁾。この比率は、Furuta らと Ohkura らの報告より JAEA (日本原子力研究開発機構) で大

表 3. 1 歳児における放射性核種と化学形態ごとの甲状腺等価線量換算係数 (mSv/kBq)

化学形態	¹³¹ I	¹³² I	¹³³ I	¹³² Te	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
粒子	1.4	1.60×10 ⁻²	3.50×10 ⁻¹	2.90×10 ⁻¹	6.30×10 ⁻³	4.40×10 ⁻³
元素ガス	3.2	3.80×10 ⁻²	8.00×10 ⁻¹	-	-	-
メチルヨウ素ガス	2.5	-	-	-	-	-

|| ICRP publication 71¹²⁾

気中のダストサンプリング結果から特記する状態で算出された^{16, 17)}。プルーム E は、Ohba らが福島県双葉郡大熊町近辺で実施されたダストサンプリングの結果を利用した報告であった¹⁸⁾。加えて、表 2 の Katata らのプルームの比率は 0.8-0.9、0.1-0.2 など幅を持って報告されていたが¹⁵⁾、我々は体表面汚染濃度から大気中の放射性核種の割合を導き出すために、0.8-0.9 の場合 0.85 のように中間値を採用した。これは、ある一定の幅のある中で、代表的な値になりえると考えたためであった。他は、Katata らの報告と同じ値をすべて採用した¹⁵⁾。

2-3. 体表面汚染計数率の利用

Ohba らは、体表面汚染の計数率について、個人の頭頸部にある汚染レベルを用いていた^{10, 11)}。体表面汚染の計数率は、頭頸部（頭部、顔面、頸部）以外に、両手（手のひら、手の甲）、体幹部などの衣服部分（胸部、腹部、臀部、上腕、両大腿部、両下腿）、そして両足（足の甲、足裏）からなっていた。Ohba らの報告より、これらの部位の体表面汚染の計数率の傾向は、計測した時期により異なっていた⁹⁾。この報告で、2011 年 3 月 17 日～25 日に計測した 20 km 圏内の住民の幾何平均の計数率は、頭頸部を 1.0 とした場合、両手：衣服部分：両足の比率が 1.2：2.4：6.3 であった。当時の気象情報として、3 月 15 日の夜から 16 日にかけて、降雪や降水が認められた¹⁵⁾。これにより、衣服や両足には、放射性核種の湿性沈着が発生した。また、両足の靴には、土壌に取り込まれた放射性核種が付着したため、他の部位よりも突出して体表面汚染の傾向が高くなった⁹⁾。ここから、大気中の放射性核種からの吸入による甲状腺等価線量を式 5 のように評価する場合、体表面汚染の計数率は湿性沈着による部位でなく、頭頸部のように主に乾性沈着を示す部位を参照することが適切であった¹⁰⁾。

2-4. モデルに必要なその他のパラメータ

沈着速度 v_i は、¹³¹I の沈着速度について、英国のウィンズケール原子炉火災事故（1957 年）および米国の SL-1 原子炉事故（1961 年）の実測値から、0.1～0.5 cm/s の範囲であることが報告された^{19, 20)}。モンテカルロ・シミュレーションで式 5 にて沈着速度を考慮する際には、0.1～0.5 cm/s の範囲の一様分布とした¹¹⁾。

また、過去の報告では、福島第一原発事故時の大気中と体表面汚染のある衣服の ¹³²Te/¹³¹I、および ¹³⁷Cs/¹³¹I 比がほぼ同じであったことから、粒子状のテルルと粒子状・ガス状の混合である放射性ヨウ素の沈着速度は同一とした¹⁰⁾。ここで、大気中の放射性ヨウ素 ¹³¹I における化学形態の比率は、Katata らの報告より、粒子：ガス：メチル = 2:2:1 とした¹⁵⁾。また、¹³²I と ¹³³I の化学形態は粒子：ガス = 1:1 と設定した。

ただし、メチル化ヨウ素は、化学的性質により、体表面への沈着が乏しいため^{19, 20)}、メチル化ヨウ素の組成比、放射性ヨウ素の沈着速度を補正した。Katata らの報告より、メチル化ヨウ素は 20% を占めており¹⁵⁾、Ohba らは体表面への ¹³¹I による沈着は、 $1 \div (1-0.2)$ から沈着速度補正係数を 1.25 倍とした¹⁰⁾。また、Ohba らは、大気中の ¹³²Te/¹³¹I の比率と体表面汚染のある衣服の ¹³²Te/¹³¹I の比率の比からも 1.25 倍であり¹⁰⁾、福島第一原発周辺の自治体から避難した人々の沈着速度補正係数も同様にした。

さらに、本報告では、体表面汚染から甲状腺等価線量を導き出すモデルのベースとして、1 歳児の呼吸率 B は、0.35 m³/h とした。甲状腺等価線量換算係数 f_1 は表 3 のように ICRP 報告書から抜粋した¹²⁾。ここで、放射性ヨウ素の粒子の化学形態における設定は、保守的に線量を算出するために、Type F ($f_1=1.0$) として、AMAD (Activity median aerodynamic diameter) が 1 μm の設定を用いた。

表 4. 体表面汚染の計数率に対する 1 歳児の甲状腺等価線量の各プルームにおける比率

	プルーム A	プルーム B	プルーム C	プルーム D	プルーム E
比率	1	1.15	0.9	0.84	1.24

3. 不確実性に関する課題

3-1. 体表面汚染から甲状腺等価線量を導き出すモデルのパラメータに関する不確実性

3-1-1. 大気中の放射性核種の濃度比率に関する不確実性

原子力災害において放出される放射性核種は複数存在する。そのため、体表面汚染から甲状腺等価線量を導き出すモデルを用いる際に、大気中に複数の放射性核種が存在することを仮定することとなる。表 2 のように、 ^{131}I 単独の大気中放射性核種を想定することができるが、実際に福島第一原発事故において、Katata らや Ohba らによる放射性核種の比率を示した^{14, 15)}。さらに、沈着速度 v_i を 0.3 cm/s として固定した場合に、式 5 から特定の体表面汚染の計数率に対する 1 歳児の甲状腺等価線量が算出できる。そして、表 2 のプルーム A ~ E について、プルーム A を 1.00 としたときの 1 歳児の甲状腺等価線量の比率は、表 4 のように、0.84 ~ 1.24 となった。つまり、 ^{131}I 単独のプルームと比較して、福島第一原発事故時のプルームは表 2 の大気中の放射性核種の濃度比率が影響して、幅を持った甲状腺等価線量となることを示していた。さらに、表 2 のプルーム B や E のように短半減期核種である $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$ 、 ^{133}I がプルームに高い割合で混合していると、甲状腺等価線量は ^{131}I 単独のプルームと比較して、高くなることが示された。このように、大気中の放射性核種の濃度比率は体表面汚染から甲状腺等価線量を導き出すうえで、重要な不確実性の因子となりえる。

3-1-2. 沈着速度に関する不確実性

過去の Ohba らの報告では、体表面汚染の計数率から大気中の放射性核種濃度を算出する際の沈着速度を 0.1~0.5 cm/sec の範囲で一様分布と仮定していた¹¹⁾。これは、過去の放射性核種が放出された際の記録をベースに決めた沈着速度の範囲であった。体表面汚染をきたす要因として、天候により乾性沈着と湿性沈着による違いが発生するため、この沈着の性状が不確実

性となる。乾性沈着の不確実性について、我々は過去の報告より、0.1 ~ 0.5 cm/sec とした幅を用いた。一方で、福島第一原発事故時で、2011 年 3 月 15 日 ~ 16 日にかけて、降雨や降雪による湿性沈着の影響を受けた地域があった¹⁵⁾。大気汚染の研究において、PM2.5 (空力サイズが 2.5 μm 未満の粒子) に関する湿性沈着は、乾性沈着に比べて約 60 倍となることが報告された²¹⁾。我々は、乾性沈着の体表面汚染による単独影響と考えてきたが、今後は、体表面汚染から吸入による甲状腺等価線量を推計する際に、湿性沈着の影響を組み合わせたモデルを構築する必要性が考えられた。

合わせて、体表面汚染から甲状腺等価線量を推計するモデルで、 ^{131}I の化学組成が変化することによる不確実性も存在する。 ^{131}I の化学形態について、Ohba らの報告は、Katata らより報告があった粒子：ガス：メチル = 2:2:1 の割合を使用していた¹⁵⁾。ここから、沈着速度補正係数を 1.25 倍と仮定していた。英国のウィンズケール原子炉火災事故および米国の SL-1 原子炉事故の傾向から、同一の放出源からの ^{131}I を含んだプルームは飛行距離によって、 ^{131}I の沈着速度が遅くなる傾向が見られた^{19, 20)}。この理由として、 ^{131}I の化学形態の粒子型ヨウ素やガス状の元素ヨウ素が飛行途中で沈着していき、最終的にプルーム内にメチル化ヨウ素が残るため、その影響により、沈着速度が遅くなるためであることが考えられた。表 5 は、プルーム A-E について原子炉から環境中に飛散した時点でのメチル化ヨウ素の割合を変化させた場合、沈着速度を 0.3 cm/s と固定して式 5 から特定の体表面汚染の計数率に対する 1 歳児の甲状腺等価線量の違いを評価した。表 5 ように、沈着速度補正係数を 1.25 倍、1.5 倍、2 倍とした場合、甲状腺等価線量への影響は、プルーム A のように ^{131}I 単独の想定で、メチル化ヨウ素の割合が増えるにつれて、線量への影響が 1.21 倍、1.64 倍と大きくなった。しかし、プルーム B-E のように多核種が混合している状況下では、メチル化ヨウ素の割合の変化があっても、 $\pm 3\%$ 以内であった。つまり、 ^{131}I 単独プルームの場合、甲状腺等価線量は、メチル化ヨウ素の割合に影響を受けるが、短半減期核

表5. メチル化ヨウ素の割合変化による体表面汚染の計数率に対する1歳児の甲状腺等価線量の各プルームにおける比率

比率	沈着速度	プルーム	プルーム	プルーム	プルーム	プルーム
	補正係数	A	B	C	D	E
粒子：ガス：メチル＝2:2:1	1.25	1	1	1	1	1
粒子：ガス：メチル＝1:1:1	1.5	1.21	0.99	1	1.01	0.99
粒子：ガス：メチル＝1:1:2	2	1.64	0.98	0.99	1.02	0.97

種である $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$, ^{133}I がプルームに含まれる場合、 ^{131}I のメチル化ヨウ素の影響が最小限になることが分かった。ここから、メチル化ヨウ素の割合は、甲状腺等価線量を推計する上で、プルーム内の放射性核種の構成により、不確実性を与えることが考えられた。

3-2. 体表面汚染密度における不確実性

3-2-1. GM サーベイメータ装置と体表面汚染の測定手法に関する不確実性

GM サーベイメータ側の個体差や測定時の手技による体表面と距離の不確実性が存在する。本報告では、以下の3点が挙げられた。

A) GM サーベイメータ測定器の機種による違いが存在する。体表面汚染測定に関して、計数率を cpm で結果を表示するが、この cpm は GM サーベイメータの窓面積に依存している。表1では、窓面積を 19.6 cm^2 として計算していた^{10, 11)}。窓面積が異なる表面汚染検出器により、計数率の違いが報告されており²²⁾、式3を導き出す際に注意が必要となる。

B) 体表面汚染の測定に関して、測定時の手技による体表面と測定器の距離が不果実性の要素として挙げられた。過去の報告で、体表面と測定器の距離は、 5 cm 固定で検討していた^{10, 11)}。この体表面と測定器の距離が $1\sim 2\text{ cm}$ ずれるだけで計数率が変動する事が報告されている²²⁾。そのため、測定手技は、体表面汚染の計数率へ大きな不確実性の影響を与えることが考えられる。

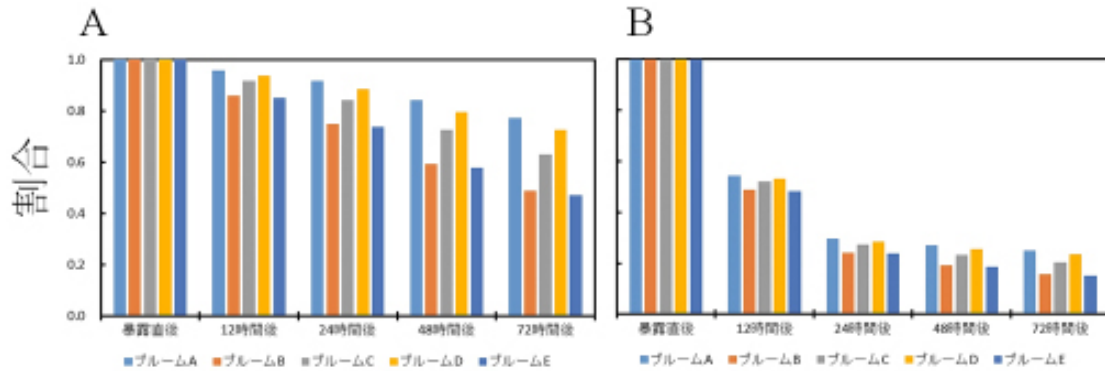
C) GM サーベイメータに関する個体差は、複数の要因が存在する。まず、これは機器効率の違いであった。機器効率の違いは、福島県立医科大学で所有している GM サーベイメータ ($n=26$) を調査した時、そ

の平均±標準偏差は 0.51 ± 0.03 であった。この時の変動係数 (CV) は約7%となった。このように GM サーベイメータごとに、固有の機器効率が与えられており、個体差が存在する。そして、GM 管の劣化による分解時間の延長が挙げられる。GM 管はアルゴンに微量の有機多原子ガスを封入したものが多い。特徴としては、有機多原子ガスには、 10^{10} カウント程度と寿命が存在する。有機多原子ガスは放電消滅 (β 線検出による電子なだれを抑制する効果) と関連するため、その寿命による劣化が進むと、分解時間の延長につながる。分解時間の延長は、計数率の数え落としに影響する。最後に、GM サーベイメータ測定器の機種によっては、体表面と測定器の距離が変われば、検出効率も変化することも報告されていた²²⁾。このような点を改善するためには、GM サーベイメータ装置毎に、固有の補正係数を事前に準備しておくことで、真の計数率を短時間で求められる。

3-2-2. 放射性核種特有の時間的な影響

体表面汚染に関連する放射性核種は物理学的半減期と自然脱落率の両方の影響を受ける。物理学的半減期は放射性核種特有であり、表2のように時間が特定されている。また、Hession らの報告より、ヒト皮膚からの粒子の自然脱落は指数関数的で、その半減期は $0.5\ \mu\text{m}$ の粒子で 14.7 時間であると実験的に求められた¹⁴⁾。この実験的観察結果から、Ohba らは、 24 時間程度は半減期 14.7 時間で自然脱落が続き、サブミクロンの粒子についてそれ以降自然脱落は止まると暴露から 24 時間後には大幅な減少を示し、 72 時間後でプルーム E が 0.15 まで減少を示した。このように、体表面汚染の計数率には、物理学的半減期と自然脱落率の両方のファクターが関連しており、式4で不確

図 2. 大気中の放射性核種の暴露直後から時間経過における体表面汚染減衰割合



大気中の放射性核種の濃度比率（プルーム A～E）は表 2 を参照。（A: 物理学的半減期のみを考慮した場合の体表面汚染減衰割合、B: 物理学的半減期と自然脱落率の両方を合わせた体表面汚染減衰割合）

実性として補正をすることが求められた。

3-2-3. 体表面汚染の計数率へ影響する行動記録の重要性

上記の、物理学的半減期と自然脱落率の両方は、補正するために、経過時間の情報が必要となる。この経過時間とは、放射性核種を含むプルームを暴露した時刻を基準点として、体表面汚染の測定を受けた時刻が終点となる。この基準点と終点の日時が記録として残っていることで、本研究手法が成立する。実際に、行動記録のような情報があれば、本手法の基準点と終点の日時が明確である。しかし、行動記録が無い場合、経過時間の情報を得られず、計数率の補正に対して不確実性は増加する。図 2B のように、プルーム A～E に関わらず、計数率は 12 時間後で約半分、24 時間後で約 0.25 まで減少する。物理学的半減期と自然脱落率の組み合わせによる補正は、24 時間以内の経過時間の影響が大きいため、正確な時刻の記録が重要と考える。

3-3. 甲状腺等価線量換算係数に関する不確実性

我々の過去の検討は、表 3 のように ICRP 報告書の甲状腺等価線量換算係数を用いた¹²⁾。この係数は、ICRP 報告書の甲状腺モデル（年齢別甲状腺体積、年齢別呼吸換気量、各放射性核種の体内動態）に基づいて求められた。特に、¹³¹I のような放射性ヨウ素について、年齢別甲状腺体積およびその体内動態のパラメータは日常生活で安定ヨウ素の摂取量が多い日本人が世界的な平均と異なっていると指摘されていた²³⁾。Kudo らは、事故死者剖検の情報から年齢別甲状腺体積に関しては ICRP 報告書と齟齬はないものの、体内

動態に関して、放射性ヨウ素の甲状腺取り込み率が $18.6 \pm 6.0\%$ と ICRP が報告しているモデルの 30% より小さいことを報告した²³⁾。ここから、Ohba らの報告では、福島県「県民健康調査」の基本調査をベースに行動パターンからシミュレーションで推計した甲状腺等価線量について、放射性ヨウ素の甲状腺等価線量換算係数の補正係数として $(0.186 \pm 0.06) \div 0.3 = (0.62 \pm 0.2)$ の確率密度分布を使用して、算出していた²⁴⁾。体表面汚染から甲状腺等価線量を導き出すモデルについて、甲状腺等価線量換算係数に対する日本人特有の補正係数が必要であり、世界的に用いられている甲状腺甲状腺取り込み率との差が不確実性として存在した。

4. 考察

体表面汚染は、避難途上に暴露したプルームの組成や量を反映しており、貴重なデータソースである。事故直後の大気拡散シミュレーションではプルームが飛んでいないと評価された地域からの避難者に Ohba らは比較的高い体表面汚染があることを報告した¹⁰⁾。さらに、避難住民の衣服の核種組成が明らかにできたことより、GM サーベイメータの測定値を使って体表面汚染から吸入による甲状腺等価線量を導き出すモデルを開発する事ができた¹¹⁾。しかし式 5 を用いた本手法により、甲状腺等価線量の算出は可能であるが、多くの既知および未知の不確実性がある。

沈着速度に関しては、過去の文献情報に基づき $0.1 \sim 0.5 \text{ cm/s}$ による一様分布を仮定していた¹¹⁾。2011 年 3 月 12 日のプルームに関しては、乾性沈着と仮定して問題ないが、3 月 15 日から 16 日のプルームに関しては、地域と時間帯によっては湿性沈着が加味さ

れており、0.1～0.5 cm/s の一様分布を仮定すると過大評価になる。避難者のプルーム暴露状況の情報(今回は未知)を取得することにより不確実性を減ずる事が可能となる。また、今後の研究で湿性沈着の影響を受けにくい身体部位が特定されるなら、その身体部位の汚染密度を利用することにより過大評価を避けることができるであろう。

大気中放射性核種の組成は既知の不確実性因子である。体表面汚染のβ線測定値から甲状腺等価線量を推計する本手法では、¹³¹I のみのプルームと3月12日のプルームのように¹³²Te/¹³²I/¹³³Iなどの短半減期核種が混在しているプルームの場合、前者で仮定すると過小評価になる。さらにメチル化ヨウ素の割合情報が沈着速度補正係数に関係しており、プルームの核種組成や化学組成の情報の有無が既知的な不確実性の因子となる。放出源の核種組成情報だけでは炉心から大気中に漏洩する過程での修飾があるため、不確実性がある。大気中の核種分析、化学組成分析と避難者の衣服に付着した汚染の核種分析を組み合わせることができるなら、不確実性は低減されるだろう。

体表面汚染に関する自然脱落率は、実測値の未だ少ない未知的な不確実性因子である。今回我々は半減期を14.7時間として、24時間程度で脱落が終了すると仮定していた¹¹⁾。これは、サブミクロン粒子のように粒子径が小さいほど、皮膚の毛包内に取り込まれる性質が示されており¹⁴⁾、ある一定量の放射性物質は皮膚に固着して、脱落は起こらなくなることを我々は想定していた。ただし、自然脱落率の検討は、このように皮膚の状態に依存するため、年齢や性別で個人差がどの程度あるかわかっていない。様々な粒子径で24時間を越えた自然脱落率の知見を増やす必要がある。加えて、図2Bのように体表面汚染の計数率の補正について、時間経過の不確実性が自然脱落率で影響が大きかった。基準点と終点の時刻が不明な場合、自然脱落率の不確実性が大きくなる。体表面汚染検査時の聞き取りで、場所と滞在時間、その時の天候等の情報を取得することにより、不確実性を減ずることができる。

GMサーベイメータ装置に関する不確実性や甲状腺等価線量換算係数について、知見が集約してきており、これらは既知的な不確実性として考えることができる。しかし、体表面汚染密度における測定手法は、多くの測定者が絡んだ測定となる^{8, 25)}。特に、測定者は体表面と測定器を一定の距離で表面汚染測定をすることに苦慮するため、これらは測定者の習熟度に依存し、

診療放射線技師への調査より習熟の必要性が指摘されていた²⁶⁾。一方、福島第一原発事故のように、1か月程度で毎日120名以上の測定者が対応していた場合⁸⁾、体表面汚染測定時の体表面と測定器距離は、ランダムエラーにより、一定の値に収束すると考える。例えば、原子力災害の際には、様々な習熟度合いの測定者が集合する。従って、このような測定者のGMサーベイメータ装置のプロープと体表面の距離の平均と分散が分かれば、体表面汚染の測定手技を数値化できるが、現在は未知的な不確実性因子として残っている。また、甲状腺等価線量換算係数の日本人向け補正係数も既知的の不確実性因子である。我々は、Kudoらのグループが報告した甲状腺取り込み率の確率密度分布を使って^{23, 24)}、その不確実性を評価できた。

報告の限界点として、我々の提示した不確実性の因子以外にも、明らかになっていない不確実性が存在するかもしれない。本報告は、影響を与えやすい不確実性の因子を議論してきた。そのため、未知的な不確実性の因子へ研究を遂行することで、本モデルの新たな道が開けると考える。

5. 結語

結論として、本報告は、体表面汚染から吸入による甲状腺等価線量を導き出すモデルについて、不確実性の因子に関して述べてきた。未知的な不確実性については、研究を通じて改善することにより、その範囲が明らかになると考える。このように、不確実性の因子に関する改善が進んでいけば、体表面汚染から吸入による甲状腺等価線量を導き出すモデルについて、精緻化が進んでいくと考える。

謝辞

この総説のベースとなる研究は、環境省委託事業「平成26年度～令和3年度放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）」において実施された。また、本報告の一部は、第12回日本放射線事故・災害医学会 年次学術集会（北九州市）でポスターにより発表した。最後に、本報告の投稿に必要な支援として、JSPS 科研費 24K15826 の助成を活用した。

引用文献

- 1) Brenner AV, Tronko MD, Hatch M, et al. I-131 dose response for incident thyroid cancers in Ukraine related to the Chernobyl accident. *Environ Health Perspect.* 2011. 119(7). 933-939.
- 2) Lubin JH, Adams MJ, Shore R, et al. Thyroid cancer following childhood low-dose radiation exposure: A pooled analysis of nine cohorts. *J Clin Endocrinol Metab.* 2017. 102(7). 2575-2583.
- 3) Kim E, Yajima K, Hashimoto S, et al. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys.* 2019. 118(1). 36-52.
- 4) Tokonami S, Hosoda M, Akiba S, et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Sci Rep.* 2012. 2. 507.
- 5) Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, et al. Estimation of the thyroid equivalent doses to residents in areas affected by the 2011 Fukushima nuclear disaster due to inhalation of ¹³¹I based on their behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulation. *Health Phys.* 2022. 122(2). 313-325.
- 6) Ishikawa T, Ohba T, Hasegawa A, et al. Comparison between external and internal doses to the thyroid after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J Radiat Res.* 2023.64(2):387-398.
- 7) Suzuki G, Ishikawa T, Ohba T, et al. Estimation of children's thyroid equivalent doses in 16 municipalities after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *J Radiat Res.* 2022. 63(6). 796-804.
- 8) Kondo H, Shimada J, Tase C, et al. Screening of residents following the Tokyo electric Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health Phys.* 2013. 105(1). 11-20.
- 9) Ohba T, Miyazaki M, Sato H, et al. A strategy for a rapid radiological screening survey in large scale radiation accidents: a lesson from an individual survey after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accidents. *Health Phys.* 2014. 107(1). 10-17.
- 10) Ohba T, Hasegawa A, Kohayagawa Y, et al. Body surface contamination levels of residents under different evacuation scenarios after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health Phys.* 2017. 113(3). 175-182.
- 11) Ohba T, Hasegawa A, Suzuki G. Estimated thyroid inhalation doses based on body surface contamination levels of evacuees after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health Phys.* 2019. 117(1). 1-12.
- 12) ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - Part 4 inhalation dose coefficients. *Ann ICRP.* 1995. 25. 1-405.
- 13) JIS(日本産業規格). Z4504 放射性表面汚染の測定方法 - β線放出核種(最大エネルギー0.15MeV以上)及びα線放出核種. JIS(日本産業規格). 東京. 2008, p1-9.
- 14) Hession H, Byrne M, Cleary S, et al. Measurement of contaminant removal from skin using a portable fluorescence scanning system. *J Environ Radioact.* 2006. 85(2-3). 196-204.
- 15) Katata G, Chino M, Kobayashi T, et al. Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model. *Atmos. Chem. Phys.* 2015. 15(2). 1029-1070.
- 16) Furuta S, Sumiya S, Watanabe H, et al. Results of the environmental radiation monitoring following the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant -Interim report (ambient radiation dose rate, radioactivity concentration in the air and radioactivity concentration in the fallout)-. *JAEA-Review.* 2011. 1-87.
- 7) Ohkura T, Oishi T, Taki M, et al. Emergency monitoring of environmental radiation and atmospheric radionuclides at nuclear science research institute, JAEA following the accident of Fukushima Daiichi nuclear power plant. *JAEA-Data/Code.* 2012. 1-37.
- 18) 福島県放射線監視室. 緊急時モニタリングにおける大気浮遊じんのγ線核種分析結果について. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/194216.pdf> (検索日2024年7月5日).
- 19) Shemel GA. Particle and gas dry deposition: A review. *Atmos. Environ.* 1980. 14. 983-1011.
- 20) Chamberlain AC. Deposition of iodine-131 in Northern England in October 1957. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1959. 85(366). 362-370.
- 21) Wu Y, Liu J, Zhai J, et al. Comparison of dry and wet deposition of particulate matter in near-surface waters during summer. *PLoS One.* 2018. 13(6). e0199241.
- 22) 中西 千, 平山 悠, 秋山 聖. GM管式サーベイメータの計数値とOIL4の初期設定値との対応関係. *保健物理.* 2014. 49(3). 139-144.
- 23) Kudo T, Inano A, Midorikawa S, et al. Determination of the kinetic parameters for ¹²³I uptake by the thyroid, thyroid weights, and thyroid volumes in present-day healthy Japanese volunteers. *Health Phys.* 2020. 118(4). 417-426.
- 24) Ohba T, Ishikawa T, Nagai H, et al. Reconstruction of residents' thyroid equivalent doses from internal radionuclides after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Sci Rep.* 2020. 10(1). 3639.
- 25) 大葉 隆, 真船 浩一, 菅野 修一, et al. 原子力災害に対応できる診療放射線技師の人材育成の要点 - 福島第一原子力発電所事故の経験と教訓から. *日本診療放射線技師会誌.* 2023. 70(844). 131-140.
- 26) 大葉 隆, 真船浩一, 菅野修一, et al. 診療放射線技師の個人的背景に基づいた原子力災害への人材育成研修プログラム最適化の提案—福島第一原子力発電所事故の経験を生かして— *日本放射線技術学会雑誌.* 2022. 78(11). 1282-1294.

調査報告

原子力事業者による原子力災害時のオンサイト医療体制の構築について

鈴木純一^{1*}、三木田郁弥²、後澤琢哉³、鈴木麻純⁴、山口綱基⁵、宇野敏樹⁶、南智浩⁷、三島清太郎⁸、舘林竜樹⁹、尾崎将之¹⁰、成田隆二¹¹、横濱和泰¹²、栗原渉¹³、廣橋伸之¹⁴、山本尚幸¹⁵

¹ 東京電力ホールディングス株式会社、² 北海道電力株式会社、³ 東北電力株式会社

⁴ 中部電力株式会社、⁵ 北陸電力株式会社、⁶ 関西電力株式会社、⁷ 中国電力株式会社

⁸ 四国電力株式会社、⁹ 九州電力株式会社、¹⁰ 日本原子力発電株式会社、¹¹ 電源開発株式会社

¹² 日本原燃株式会社、¹³ 電気事業連合会、¹⁴ 広島大学原爆放射線医学研究所

¹⁵ 公益財団法人原子力安全研究協会

キーワード：原子力災害、オンサイト医療、全サイト ER ネットワーク、医療スタッフの確保、医療研修

要旨

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故を契機として、厚生労働省は、原子力災害時に原子力施設内での緊急作業中に被災した労働者に対応するために、医療従事者等を迅速に派遣するための体制の整備の検討を進め、「原子力災害時における原子力施設内の医療体制モデルに関する提言」を取りまとめた。

原子力事業者は、本提言に基づいて原子力災害時の施設内におけるオンサイト医療体制の構築と実効性の向上に向けて、段階的な目標を定めて体制整備の検討を進めてきた。

本検討にあたっては、原子力災害医療等を専門とする医療関係者で構成される専門委員会を設置し、専門的知見や幅広い意見をもとに、原子力事業者に対して指導・助言を仰ぎながら取り組みを進めている。

背景

原子力災害対策特別措置法第3条（原子力事業者の責務）では、「原子力事業者は、この法律又は関係法律の規定に基づき、原子力災害の発生の防止に関し万全の措置を講ずるとともに、原子力災害（原子力災害が生ずる蓋然性を含む。）の拡大の防止及び原子力災害の復旧に関し、誠意をもって必要な措置を講ずる責務を有する。」と規定している。また、防災基本計画においては、「原子力事業所における応急対策は原子力事業者の責任において実施すべきものであり、原子力事業者は応急対策に必要な資機材や実施手順等を予め整備する。」とある。これらを踏まえると、原子力施設内（以下、「オンサイト」）での緊急作業中に被災した労働者に対応するための医療体制は、原子力

事業者の責任において整備すべきものとなる¹⁾。

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故では、東京電力では当初、構内で外傷や傷病を生じた作業員のために、常駐する医師、看護師、診療放射線技師等の医療従事者等を独力で確保できなかった。事故発生から数ヶ月後に、発電所構内に緊急医療室（ER）を設置するとともに、厚生労働省の支援のもと、日本救急医学会等の協力により医療従事者等の派遣を受け、発電所構内に医師が常駐する体制が構築された¹⁾。

厚生労働省においては、2014年から2015年にかけて、福島第一原子力発電所を含めた原子力施設における緊急作業従事者の保健、医療全般について検討することとなり、その中で、緊急作業中の医療体制等に

利益相反：開示すべき利益相反はない。

* 連絡先： 〒 100-8560 東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 3 号
東京電力ホールディングス株式会社 原子力安全・統括部 原子力保健安全センター
電話番号：03-6373-1111（代表）メールアドレス：szk.junichi@tepcoco.jp

ついて、専門家による検討が行われた。このうち「緊急作業中の原子力施設内の医療体制の確保」については、原子力事業者や医療関係者から詳細なヒアリングが行われ、全国の原子力施設の事故に即応する、「緊急時の医療に精通した医師等のネットワーク」を新たな形で構築する必要があることが提言された²⁾。また、厚生労働省は、2015年度から2016年度にかけて、「原子力施設内の緊急作業時の被災労働者対応ネットワーク構築事業」と「原子力施設内の緊急作業時の被災労働者対応のための専門人材育成等事業」を実施し、オンサイトに医療従事者等を迅速に派遣するための体制の整備の検討を進め、「原子力災害時における原子力施設内の医療体制モデルに関する提言」を取りまとめた（2017年3月、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構、厚生労働省委託）。今後、原子力施設で万が一事故が発生した場合に備え、オンサイトでの緊急作業中に被災した労働者に対応するために原子力事業者が構築すべき医療体制のモデルと、その実現のために想定される課題を示し、原子力事業者ならびにその他関係者に対する提言として位置づけられている¹⁾。

これを受け、原子力事業者で構成される「電気事業連合会緊急作業中労災対応ワーキンググループ」にお

いて、原子力事業者全体で、本提言に基づいて原子力災害時の施設内におけるオンサイト医療体制の構築と実効性の向上に向けて、段階的な目標を定めて整備に取り組んでおり、検討すべき課題事項について、図1に示すロードマップを定めて検討を進めてきた³⁾。

本検討にあたっては、原子力災害医療等を専門とする医療関係者で構成される専門委員会（オンサイト医療体制構築委員会、委員長：広島大学原爆放射線医科学研究所 廣橋 伸之教授）を設置し、専門的知見や幅広いご意見をもとに、原子力事業者の取り組みに対して指導・助言を仰ぎながら、検討を進めている。

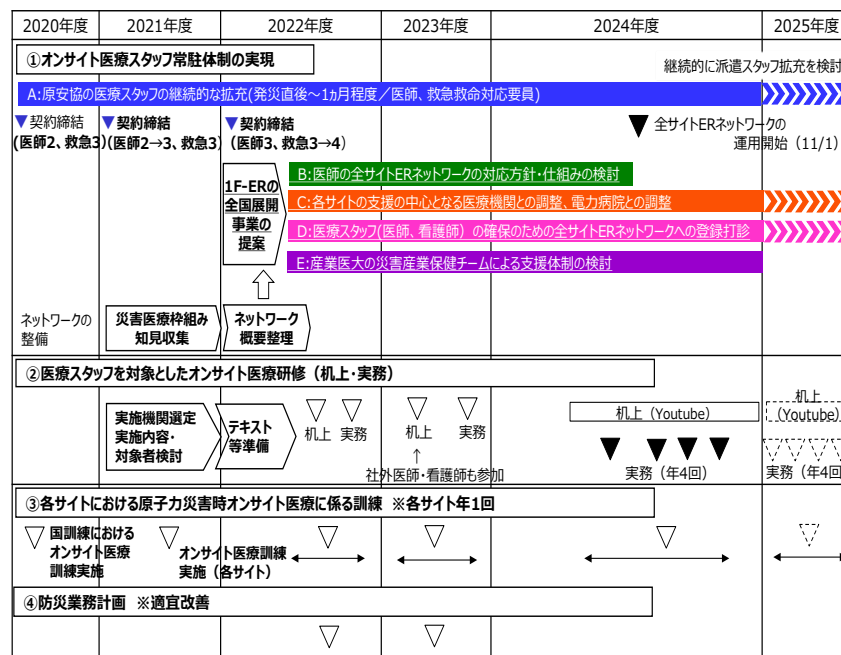
取り組み状況

(1) 医療スタッフ（医師）の確保

2020年に、北海道電力、東北電力、東京電力ホールディングス、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電、日本原燃、電源開発と、原子力安全研究協会において、原子力災害時のオンサイト医療に係る契約を締結した。

オンサイト医療に参加する医療スタッフとして、2024年12月現在、原子力安全研究協会の医師4名、救急対応可能要員4名を確保し、発災初期段階に対応することを想定している。

図1. オンサイト医療体制検討ロードマップ



他方、慢性期の状態にある福島第一原子力発電所では、医師、看護師、救急救命士が交代でシフトに入り、サイト内の ER に常駐している。医師（救急医が中心）については、全国各地の医師が、福島第一原子力発電所に来所して医療支援（救急処置、合併疾病・損傷の初期診療等）にあたっていただけるよう、「東電福島第一原発救急医療体制ネットワーク」（以下、「1F-ER ネットワーク」）にご登録頂いている。

福島第一原子力発電所以外のサイトでは、1F-ER ネットワークのような医師のネットワークがないため、発災後中長期に亘って、サイト内に医師が常駐する医療体制を確保し、医師を拡充することが課題である。この課題への打開策の一つとして、「1F-ER ネットワークを福島第一原子力発電所だけではなく全国の原子力施設に展開し、国内の施設で発災した際の ER ネットワーク（以下、「全サイト ER ネットワーク」）とすること」を目指し、福島第一原子力発電所の ER のシフトに入っている医師（67 名）全員に対して、本打開策の内容を説明したところ、81%の 1F-ER ネットワーク登録医師から、実現可能な提案であるとの回答を得ることができた。

全サイト ER ネットワークへの登録医師を確保するため、原子力事業者は救急医に限定せず※医師への登録打診を進めており、2024 年 12 月 5 日現在、登録者数は 87 名となっている。最終的には 120 名の登録を目指す。

【具体的な取り組み】

- ・ 1F-ER ネットワークの登録医師への働きかけ。
- ・ 電力病院（関西電力病院、中電病院）の医師への打診。
- ・ 各サイト立地県の原子力災害拠点病院や高度被ばく医療支援センターの医師への打診。
- ・ 全サイト ER ネットワークに登録した医師へ新規医師の紹介を依頼する。
- ・ 机上研修（YouTube 動画）やサイトで行う実務演習に参加した医師への打診。
- ・ 2024 年 10 月の日本救急医学会、2025 年 3 月の日本災害医学会等において、福島第一原子力発電所の ER の対応実績やオンサイト医療対応に関する情報発信を継続する。

※全サイト ER ネットワークに登録する医師は、救急科専門医を主とするが、救急科専門医に限定せず、基本的な救急医療の知識と技術を有する医師とする。

(2) 運用方法の整備

発災時はもとより平常時の対応について、オンサイト医療の全般的な運用を整理した「原子力災害オンサイト医療ネットワーク活動要領」を原子力事業者にて作成し、2024 年 3 月 29 日に制定した。

【平常時の対応】

- ・ 全サイト ER ネットワークへの登録医師の確保のための活動
- ・ 医療資機材の配備
- ・ オンサイト医療研修の開催 等

【発災時の対応】

- ・ 全サイト ER ネットワーク登録医師への支援要請
- ・ 全サイト ER ネットワーク登録医師との契約の締結
- ・ 全サイト ER ネットワーク登録医師のシフト調整等

3) 急性期の支援

発災サイトへの医療支援要請は、他の支援組織との重複や対立がないように十分配慮する必要がある。

原子力災害拠点病院、原子力災害医療協力機関として被災地対応がある場合、発災後当面の間は発災サイトへの医療支援の依頼は行わないこととする。そのため、急性期は発災サイトの遠方地域（原子力災害拠点病院、原子力災害医療協力機関として被災地対応がない地域）の医師や DMAT 出動要請等がない医師を対象とする。

発災事業者は、全サイト ER ネットワーク登録医師に対して医療支援要請を一斉メールにより送付する際、支援可否をご判断頂くために、プラント状況やサイト周辺の空間線量率、アクセス方法、傷病者の発生状況等について、適宜情報を発信する。

発災サイトにおける医療対応は、発災事業者が指定した医務室で行う（安全が確保された場所であることを必須とする）。サイト内のプラントの状況や放射線環境の悪化等により安全が確保できない場合においては、発災事業者からの指示に基づき、代替施設である災害対策支援拠点に医務室を移設する。福島第一原子力発電所事故では、事故直後より、J ヴィレッジ（発電所から南へ約 20km）において医務室を設けた実績がある。

発災時にご支援が頂ける場合には、発災事業者と医師の方々との間で個別に契約（補償、報酬等）を締結

し、活動に入って頂く。

(4) 国や周辺病院との連携

関係省庁から各病院への派遣要請を円滑に進めるために、平常時および発災時には厚生労働省より全サイト ER ネットワーク座長宛に協力要請を发出頂く。

【平常時】

- ・全サイト ER ネットワークへの登録について、厚生労働省から全サイト ER ネットワーク宛に協力要請文書を发出頂いており、原子力事業者から協力頂く医師の所属医療機関に送付する。

【発災時】

- ・発災サイトへの支援要請について、厚生労働省から全サイト ER ネットワーク宛に協力要請文書を发出頂き、発災事業者から全サイト ER ネットワーク登録医師の所属医療機関に送付する。

なお、DMAT や原子力災害医療派遣チームとは、発災サイトの傷病者を原子力災害拠点病院等に搬送が完了したところから連携することとなる。その根拠を以下に示す。

- ・厚生労働省の DMAT は、放射線災害への対応が活動内容には含まれておらず、発災サイトでの対応が出来ない。
- ・原子力規制庁の原子力災害医療派遣チームは、原子力災害拠点病院等での活動を基本としており、オフサイトの医療対応を行う。

また、国や道県の訓練、覚書に基づく周辺病院との個別訓練を通じて、行政や周辺病院と連携していく。

(5) オンサイト医療研修

原子力事業者は、緊急時におけるオンサイト医療対応の理解促進や全サイト ER ネットワーク登録医師等との平常時における連携を目的として、オンサイト医療に係る教育研修（机上研修および実務演習・サイト見学）を実施している。

机上研修では、原子力安全研究協会が講師となり、被ばく医療等に関する基礎的知識（緊急被ばく医療の特徴、放射線防護、線量評価、メンタルヘルスケア等）を YouTube の動画配信により提供している。

実務演習では、原子力安全研究協会が講師となり、

医務室のゾーニング、防護具の着脱、除染処置、傷病者搬送（トリアージを含む）等の実務をサイトにおいて実施している。

サイト見学では、サイトの緊急時体制、覚書締結病院や消防との訓練状況のご紹介、現場の作業環境、医療室・医療資機材の配備状況等の現場視察を実施している。

実務演習・サイト見学は1年間で4箇所（1箇所ですべて最大15名受け入れ）において開催しており、2024年度は、泊発電所（北海道）、福島第二発電所、大飯発電所（福井県）、伊方発電所（愛媛県）において実施した。（2025年度は、東通、柏崎刈羽、敦賀、玄海の4箇所を予定）

本研修を通じて、登録医師等と発電所医療スタッフとの顔の見える関係性を構築する。

なお、発災時の支援に際し、本研修の受講は必須ではない。

(6) 情報共有・交流

メーリングリストを活用して、全サイト ER ネットワーク登録医師と原子力事業者間における情報共有、オンサイト医療に係る教育研修の開催案内等を発信している。

(7) 設備・環境整備

- ・原子力事業者は、応急手当、初期診療に必要な薬剤、診療資機材、心電図計、ポータブルエコー、パルスオキシメータ、汚染拡大防止資機材等の配備を目指す。
- ・原子力安全研究協会が講師となって各サイトで実施している講義・実務演習では、上記の資機材確保状況や患者の動線、事業者（事業所）職員による傷病者発生時の初動対応等について、同協会の講師によるチェック、指導を受けて改善を図る。

また、発災サイトで退避指示が出た際は、災害対策支援拠点に ER が設置されるが、必要な医療資機材を災害対策支援拠点に持ち込む運用を実施する。

(8) 医師以外の医療スタッフの確保

○看護師

2023年9月・2024年9月の日本放射線看護学会では、福島第一原子力発電所の ER の対応実績やオンサイト医療対応に関する情報を発信するとともに、オンサイト医療研修への案内を行った。

学会やオンサイト医療研修等を通じて、アンケートに回答頂いた看護師が所属する医療機関施設長（病院長や看護部長等）に全サイト ER ネットワークの概要とご支援について説明し、看護師の全サイト ER ネットワークの登録打診を行い、看護師の確保を進めていく。

○産業医

2024年5月の日本産業衛生学会では、産業医科大学と連名で、福島第一原子力事故当時の対応や全国の原子力施設を対象とした原子力災害時の産業衛生の支援体制の構築に向けた取り組みを発信した。産業医科大学と協働して原子力災害時にご支援頂ける産業医の確保を進めていく。

また、産業医に支援頂く際の手続きや運用を定めた活動要領の“産業医版”を制定する。

結言

原子力災害時のオンサイト医療対応の全体像を図2に示す³⁾。

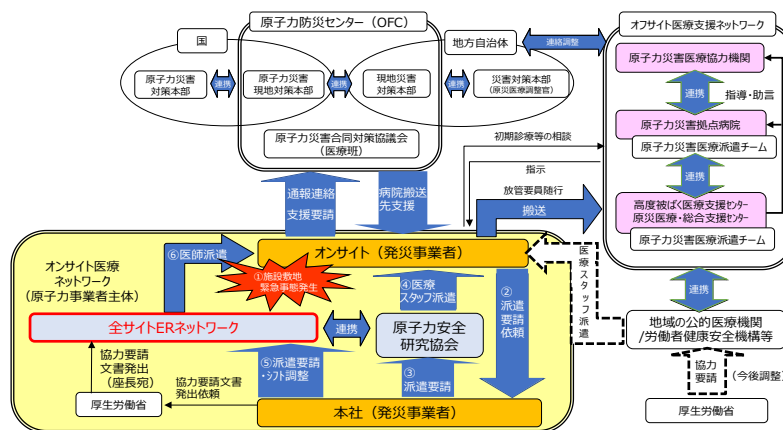
原子力災害発生直後には原子力安全研究協会の協力を得て、オンサイトでの初期医療対応が出来る体制を構築するとともに、ご支援いただける医師の確保を進めてきた。

全国の原子力施設を対象として、原子力災害発生以降も中長期に亘り、サイト内に医師が常駐する医療体制（全サイト ER ネットワーク）を構築し、2024年11月1日より運用を開始した4)。今後も引き続き医師、看護師、産業医の確保を進め、オンサイト医療体制の強化に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構, 厚生労働省委託原子力災害時における原子力施設内の医療体制モデルに関する提言, 2017年3月
- 2) 前田光哉, 原子力施設内の医療システムの構築に向けて, 保健医療科学, Vol.65, No.2, p166-174, 2016
- 3) 東京電力ホールディングス株式会社他原子力事業者12社, 原子力災害時オンサイト医療に係る取り組み状況について, 第13回原子力災害対策中央連絡会議, 2024年1月17日
- 4) 東京電力ホールディングス株式会社他原子力事業者12社, 原子力施設における原子力災害オンサイト医療ネットワークの運用開始について, 2024年11月1日公表

図2. オンサイト医療対応の全体像（原子力災害発生時）



学会報告

EPRBioDose2024（電子スピン共鳴吸収の応用と生物学的線量評価に関する国際学会）開催報告

藤嶋洋平¹、Anderson Donovan¹、阿部悠²、Alkebsi Lobna³
岡壽崇⁴、谷篤史⁵、Kranrod Chutima¹、豊田新⁶、濱崎幹也⁷
廣田誠子⁸、保田浩志⁸、山口一郎⁹、山中千博¹⁰、三浦富智^{1*}

¹ 弘前大学 被ばく医療総合研究所、² 長崎大学 原爆後障害医療研究所

³ 量子科学技術研究開発機構 放射線医学研究所、⁴ 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター

⁵ 神戸大学大学院 人間発達環境学研究科、⁶ 岡山理科大学 古生物学・年代学研究センター

⁷ 放射線影響研究所 分子生物科学部、⁸ 広島大学 原爆放射線医科学研究所

⁹ 国立保健医療科学院 生活環境研究部、¹⁰ 大阪大学大学院 理学研究科

Meeting report on the EPRBioDose2024, Hirosaki

Yohei Fujishima¹, Donovan Anderson¹, Yu Abe², Lobna Alkebsi³, Toshitaka Oka⁴, Atsushi Tani⁵,
Chutima Kranrod¹, Shin Toyoda⁶, Kanya Hamasaki⁷, Seiko Hirota⁸, Hiroshi Yasuda⁸, Ichiro Yamaguchi⁹,
Chihiro Yamanaka¹⁰, Tomisato Miura^{1*}

1 Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University

2 Atomic Bomb Disease Institute, Nagasaki University

3 Institute for Radiological Science, National Institutes for Quantum Science and Technology

4 Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

5 Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University

6 Institute of Paleontology and Geochronology, Okayama University of Science

7 Department of Molecular Biosciences, Radiation Effects Research Foundation

8 Research Institute for Radiation Biology and Medicine, Hiroshima University

9 Department of Environmental Health, National Institute of Public Health

10 Graduate School of Science, Osaka University

キーワード：EPRBioDose2024、放射線、電子スピン共鳴線量評価、電子スピン共鳴年代測定、
細胞遺伝学的線量評価

和文要旨：令和6年9月25～28日の4日間、弘前大学創立50周年記念会館(青森県弘前市)において、放射線の線量評価に関する国際学会 EPRBioDose2024 が開催された。本大会は弘前大学被ばく医療総合研究所三浦富智教授を大会長とした国際学会であり、「Dosimetry Harmony: Orchestrating Unity in Techniques（線量測定のハーモニー：技術の調和に向けて）」をテーマとし、研究発表や意見交換が行われた。本稿では、EPRBioDose2024の様子を若干の所感を交えて紹介したい。

*連絡先：三浦 富智 国立大学法人 弘前大学被ばく医療総合研究所

〒036-8564 青森県弘前市本町66-1

TEL: 0172-39-5966 FAX: 0172-39-5966

E-mail: tomisato@hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

国際生物線量評価学会 (International Association of Biological and EPR Radiation Dosimetry, IABERD) が開催する EPRBioDose は、電子スピン共鳴 (Electron Paramagnetic Resonance, EPR) および細胞遺伝学的手法を用いた放射線の生物学的線量評価に携わる世界

各国の研究者が一堂に会する、本分野の中心的な国際会議として位置づけられてきた。本会の目的は、EPRを用いた放射線の生物学的線量評価や年代測定、細胞遺伝学的線量評価領域における国内外の一線級の研究者を交え、大規模な放射線被ばく事故等の緊急時対応や、迅速なトリアージのためのバイオマーカー探索に関する最新の知見、医療における放射線の生物学的線量評価の役割、線量評価における精度管理や国際的な施設間のネットワーク形成に関して議論・情報交換することにより、放射線生物学的線量評価の進歩と発展を図ることにある。

この度、令和6年9月25日（水）～28日（土）の期間、弘前大学創立50周年記念会館（青森県弘前市）を会場とし、IABERDと弘前大学が共催でEPRBioDose2024を開催した¹⁾。英国、米国、ドイツ、フランスなどを含む20カ国より、91名（オンライン2名含む）の参加を得ることができた（図1）。



図1. 参加者の集合写真

2. 会議1日目（令和6年9月25日）

会議1日目は、量子科学技術研究開発機構 量子医学・医療部門高度被ばく医療センター計測・線量評価部 栗原治部長より、“Reconstruction of the Radiation Emergency Medical System in Japan after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident”として、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえた、日本における緊急被ばく医療体制がどのように見直されてきたかの招待講演があった（図2A）。

その後、“New methods and new uses for biodosimetry (生物学的線量評価の新たな方法・用途)”と題した口頭発表セッションにおいて、4題の口頭発表がなされた。放射線被ばくを推定する方法として用いられる二動原体染色体をより簡便に検出する方法や、超高線量の被ばくをした際に生物学的線量評価を

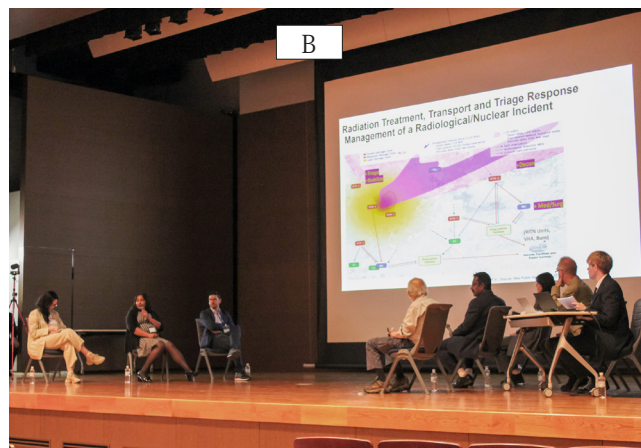


図2. 学会の様子

(A) 招待講演の栗原治先生、(B) Round table sessionの様子

応用するための手法に関する発表などがなされた。

この日の目玉は Round table session と呼ばれるパネルディスカッション式のセッションであり、“When and how should we use biodosimetry for an unplanned radiation exposure in the short and long term? (短期的または長期的に、計画外の放射線被ばくに対して生物学的線量評価をいつ、どのように使用すべきか)”の内容で専門家4名および若手研究者の2名で議論を行った。討論においては、線量測定技術の進歩やハーモナイズ、運用の規模拡大を見据えた際の課題、緊急時対応における生物学的線量評価の将来などが議論された。また、フロアの参加者には、匿名で意見の投稿が可能なオンラインフォームも準備し、より活発な質疑応答を行うことができた（図2B）。

3. 会議2日目（令和6年9月26日）

会議2日目は、University of Palermo（イタリア）の Maurizio Marrale 博士より、“Review of application of EPR alanine dosimetry in medical field (アラニンを用いたEPRの医療分野への応用)”と題した基調講

演からスタートした。近年、有効性が見込まれている粒子線治療やFLASH治療において精確な線量を担保する必要性について講演された。

続いて、“Innovations in EPR Dosimetry and Dating (EPRによる線量測定・年代測定における技術革新)”と題して8題の口頭発表がなされた。ガンマ線と電子ビームに適応可能な新たなEPR測定のための線量計材料を開発した報告や、歯を用いたEPR線量計測ではLバンド生体線量測定の精度を向上させる手法、Xバンドを用いた応用的研究、また、EPR年代測定が適用できる新しい物質についての線量応答の基礎研究などについての講演があった。

午後のセッションは、IRSN（放射線防護・原子力安全研究所、フランス）のMorgane Dos Santos博士より放射線生物研究における「線量」の重要性についての基調講演があった。これまで文献で報告されてきた照射条件と線量測定プロトコルは、研究間の比較やデータのさらなる分析を行うには詳細が不十分である現状があり、その点を改善するための取組について議論された。

この日最後の口頭発表セッションは“Radiation Exposure Assessment and Retrospective Dosimetry (被ばく線量評価と遡及的な線量評価)”と題して4件の講演があった。イメージングフローサイトメータを用いた微小核法による線量評価についての講演や、東京電力福島第一原子力発電所事故によって被災したニホンザルより得られた歯のエナメル質を用いてEPRによって遡及的な線量評価を行った例など幅広い話題が発表された。

4. 会議3日目（令和6年9月27日）

会議3日目は、国立アレルギー・感染症研究所（アメリカ）のMerriline Vedamony博士の基調講演“An Overview of Radiation Biodosimetry Approaches: Current Perspectives and Future Applications（放射線生物線量評価法の概要：現在の展望と将来の応用）”から始まり、アメリカ政府における多数傷病者の発生するような事故への体制整備や、研究の進歩に関して概説した。

“Radiation Emergency Triage and Response（放射線緊急時のトリアージや対応）”をテーマとした口頭発表セッションでは、多数傷病者が発生した際を想定した際のトリアージ体制の構築した事例や、簡易に線量評価が可能なPoint-of-Careデバイスを開発した事例など4題の報告がなされた。

続く“Artificial Intelligence and Automation in Dosimetry（線量評価における人工知能や自動化）”の口頭発表セッションでは、4題の口頭発表がなされ、人工知能を用いて、二動原体染色体法やFISH（Fluorescence *in situ* hybridization）法を用いた染色体転座解析法の自動解析技術を開発した事例などが報告された。

この日の午後はエクスカージョンとして、①弘前公園、②津軽藩ねぶた村、③弘前市りんご公園を観光した。それぞれの施設のスタッフの方々のお気遣いのおかげもあり、参加者間の懇親をより深めることができた。さらに夜のバンケットでは弘前大学津軽三味線サークルによる演奏を楽しんだ（図3）。

5. 会議4日目（令和6年9月28日）

最終日は、Williams College（アメリカ）のAnne Skinner博士より“The Place of Electron Spin Resonance (ESR) Dating among Modern Dating Methods（現代の年代測定法における電子スピン共鳴(ESR)年代測定の位置づけ）”の基調講演の後、本学会を主催するIABERD（国際生物線量評価学会）の総会が行われた。また、最後の口頭発表セッション“New Techniques in EPR and Biodosimetry (EPRおよび生物学的線量評価の新たな手法)”において、セルフリーDNAを用いた新たな線量評価手法に関する報告など、4題の口頭発表がなされた。



図3. Social programの様子

(A)「津軽藩ねぶた村」での太鼓の演奏体験、(B)「弘前公園」園内にて弘前城および岩木山を望む参加者、(C)「弘前市りんご公園」にて旬のりんごの収穫体験、(D)弘前大学津軽三味線サークルによる演奏

6. ポスター発表

ポスター発表は、会議2日目と3日目に渡って実施され、56題のポスターが掲示された(図4 A)。若手研究者のポスター発表よりポスター賞を選出し、弘前大学被ばく医療総合研究所のAnderson Donovan 博士と Seoul University の Koo Chang Uk さんが IABERD Poster Award に(図4 B)、UK Health Security Agency の Lourdes Cruz-Garcia 博士が RENE B Poster Award に選出された(図4 C)。

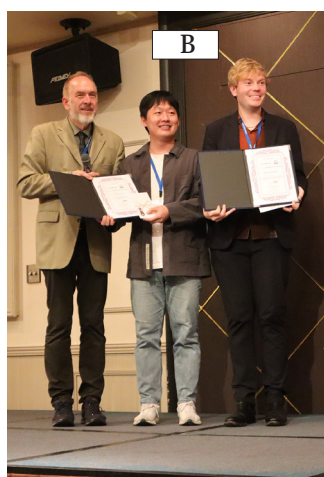
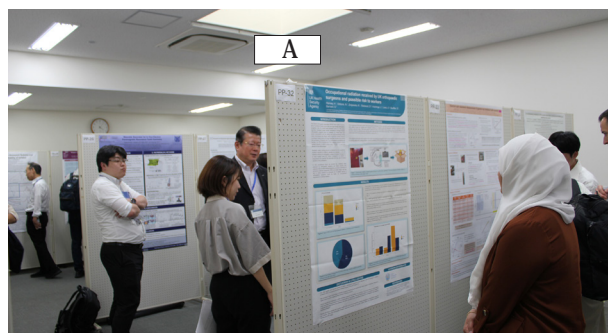


図4. (A) ポスターセッションの様子、(B) IABERD Poster Award を受賞した Anderson Donovan 博士と Koo Chang Uk さん、(C) RENE B Poster Award を受賞した Lourdes Cruz-Garcia 博士

7. 特徴的な取組

1) トレーニングコース

本大会では、EPRBioDose 初の取組として、大会開催前(令和6年9月23日(月))にEPRによる線量評価と細胞遺伝学的線量評価に関するトレーニングコースが開催された。

EPR トレーニングコースでは、第一線の研究者によ

る講義、EPR スペクトルシミュレーションソフトウェアを用いたハンズオン講義、および実機を用いた口腔内の歯を用いたEPRによる線量評価の実際について、12名の若手研究者が学んだ(図5 A, B)。

細胞遺伝学的線量評価トレーニングコースにおいては、遡及的な線量評価が可能なFISH法を用いた染色体転座解析法や、高線量被ばくの線量評価が可能なPCC(Premature chromosome condensation)法(特に化学誘導PCC法)などについて実習形式で5名の若手研究者が参加した(図5 C, D)。

2) Fukushima post-conference tour

会期終了後の令和6年9月29日(日)~30日(月)の2日間にかけて、海外研究者の要望に応じ、福島県浜通り地区へのエクスカージョンを、観光庁「国際会議の開催効果拡大実証事業」の支援を受け実施した。「被災地の未来志向を理解する」をテーマに、複合災害に理解を深めるとともに、被災地復興・再生への取組や、処理水の海洋放出、メルトダウンした炉心の廃炉に向け英知を結集した挑戦について理解するために、①東日本大震災・原子力災害伝承館の見学(図6 A, B)、②福島イノベーション・コースト構想の紹介(図6 C)、③浪江町の教育再生に関する講話(図6 D)、④東京電力福島第一原発の視察(図6 E, F)、⑤福島県産食品の理解の5つのプログラムからなるツアーを企画した。

被災地を訪問し、記録や実物を見学するだけではなく、被災地の街並み、被災地で生活する住民を直接目にする効果は絶大であったと思われる。これらは、アーカイブや電子媒体では感じることができない体験であり、地震、津波、原子力災害という世界に類を見ない複合災害を学び、被災地の現状と未来に向けた取り組みを深く理解する貴重な機会となった。また、参加者は、自然豊かな福島県産の食品を楽しみ、食の安全性についても再確認した。

参加者からは、これらのプログラムに対して素晴らしいプログラムであったとの評価を多くいただいた。以下にツアー参加者からのコメントを抜粋して紹介する。

- ・ 事故後、福島で起こった出来事について知ることがなかったので、近隣の町の復興が進んでいるのを見て感動した。
- ・ テレビ中継やソーシャル・メディアで見ると、実際に見るとでは全然違う。個人的には多くのことを学んだ。



図5. トレーニングコースの様子

(A) EPR トレーニングコースでの講義の様子、(B) 各自のパーソナルコンピュータを用いたハンズオン講義、
(C) 細胞遺伝学的線量評価トレーニングコースにおける実習 (D) FISH 解析。

- ・ このツアーは、東京電力福島第一原子力発電所事故の被災地に対する私の認識を一変させた。
- ・ 当初は災害と喪失に焦点を当てていたが、今では地域社会の回復力と現在進行中の復興努力を認識している。このツアーは、課題だけでなく、福島への復興に向けた希望と進歩も浮き彫りにしてくれた。
- ・ 福島の現状をもっと知ってもらうために、このツアーを他の人にも紹介したい。
- ・ この地方を発展させようとする当局の努力に感銘を受けた。

震災から14年もの月日が経過したが、放射線の遺伝性影響や福島県産食材に対する誤解を払拭することは難しく、国内においても未だ風評被害が継続している^{2,3)}。さらに外国人は、福島県の現状についてマスメディアやSNSを介して情報を入手する機会のほうが多いと思われ、より多くの方々に対して、自らの体験を通して学ぶ機会を提供することが重要であると考えている。福島復興は道半ばであり、多くの人々の関心が継続される必要があり、それを支援する国家的取

り組みを国内外に認知していただくことが重要であろう。今回の福島県浜通り地区へのエクスカージョンがその一助となることを願う。

8. 謝辞

本学会の開催にあたり、弘前大学の共催による会場費の免除、および観光庁「国際会議の開催効果拡大実証事業」、(公財)セコム科学技術振興財団「令和5年度国際学会開催助成」、(公財)青森県国際観光交流機構「令和6年度大規模MICE開催事業」からの助成を受けた。

Clin-EPR, LLC (米国)、(株)エーディーエステック、カールツァイス(株)、日本電子(株)には会場にて機器展示を、(株)千代田テクノ、(株)シバタ医理科からは広告協賛をいただいた。また、JAつがる弘前、JAアオレンからは、開催地である弘前市を代表するりんごやりんごジュースをたくさん提供していただき、参加者が会期中にそれらを楽しむことができた。

福島県浜通り地区へのエクスカージョンでの福島イノベーション・コースト構想の紹介や浪江町の教育再生に関する講話においては、貝沼実千代様に講演および

び質疑応答に関する通訳を担当いただき、大塚淳子様にも様々な面でサポートをいただいた。

弘前大学被ばく医療総合研究所リスク解析・生物線量評価部門に所属する佐藤佑樹さん、佐々木直美さん、弘前大学医学部保健学科検査技術科学専攻4年の沖本彩華さん、門脇由依さん、鈴木日向さん、同3年の鎌倉沙藍さん、齋藤蓮弥さん、對馬結生さんには、事務局として本会の開催を支えていただいた。

これらの支援なくして、本会の盛会は成し得ず、この場を借りて厚くお礼申し上げるしだいである。

広島および長崎の放射線影響研究所（放影研）は、日本の厚生労働省ならびに米国のエネルギー省により資金提供を受けている公益財団法人であり、平和目的の下に、放射線の人に及ぼす医学的影響及びこれによ

る疾病を調査研究し、原爆被爆者及び人類の健康と福祉に貢献することを目的とする。表明された見解は著者の見解であり、必ずしも両国政府の見解を反映するものではない。

9. 参考文献

1. IABERD, EPRBioDose2024 | Hirosaki, Japan, <https://eprbi dose2024.org/> (2025-02-01 閲覧)
2. 三菱総合研究所, 震災・復興についての東京都民と福島県民の意識の比較 第6回調査結果の報告 (2023年実施), <https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20240306.html>, (2025-02-01 閲覧)
3. 環境省, つむぐ、つなぐ、つたわる。ぐるぐるプロジェクト, <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/portal/communicate/> (2025-02-01 閲覧)



図6. Fukushima post-conference tourの様子。

(A) 東日本大震災・原子力災害伝承館にて、参加者全員で撮影した集合写真。(B) 津波および震災関連死に関する情報を学ぶ参加者の様子、(C) 福島イノベーション・コースト構想を学ぶ参加者の様子。(D) 福島県浪江町における教育の再生過程を学ぶ参加者の様子。(E) 東京電力廃炉資料館で福島第一原子力発電所構内で作業する際に着用する防護服の推移について説明を受ける参加者。(F) 東京電力福島第一原子力発電所の処理水海洋放出地を眺める参加者。

調査報告

福島第一原子力発電所事故の当時とその後 - 産業医の立場から -

菊地 央 (東京電力ホールディングス株式会社 産業医)

The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident and Its Aftermath - From the Perspective of an Occupational Physician -

KIKUCHI Hiroshi

Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. Occupational physician

要旨

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震による津波が襲来し、東京電力株式会社（現、東京電力ホールディングス株式会社、以下、東京電力）福島第一原子力発電所（以下、1F）の1-4号機は全電源を喪失し、一部原子炉の炉心が損傷した。この事故は、1986年のチェルノブイリ事故以来2件目となる、国際原子力・放射線事象評価尺度「レベル7」の原子力災害となった。

事故現場には、津波、爆発、放射線、暑熱、高所、感染症、長時間労働などの多くのハザードが存在した。労働安全衛生法は、「事業者は、労働災害発生の急迫した危険があるときは、直ちに作業を中止し、労働者を作業場から退避させる等必要な措置を講じなければならない」と規定している。しかし、退避せずに発電所にとどまった労働者、危険を承知で現場に向かった作業員がいた。

現場の労働者は電離放射線障害防止規則上の緊急作業従事者となった。緊急作業による線量限度は、通常時より引き上げられることが同規則で規定されていた。今回の事故では、特例省令で、さらに上限が100mSvから250mSvに引き上げられた。また、安定ヨウ素剤の予防内服を含めて、さまざまな被ばく対策が講じられた。しかし、経過中には放射性物質の内部取り込み事象等も発生し、被ばくを免れることはできなかった。結果的に線量限度を超えて被ばくした作業員も発生した。

通常の放射線業務従事者を対象とする健康診断は、労働安全衛生法に基づいて、一般健康診断と特殊健康診断が実施されていた。一方、緊急作業従事者を対象とする健康診断は、同法や特別規則に規定がなかった。1F事故発生を受けて、指定の健康診断を行うよう当局から事業者に対して指導がなされ、事業者によって実施された。緊急作業に従事した労働者を対象とする健康診断は、指針に基づき実施中である。一方、現に緊急作業に従事している労働者を対象とする健康診断は、新たに法制化された。

廃炉作業は継続中である一方、脱炭素社会実現と電気の安定供給両立等のため、原子力発電への期待が再び高まっている。原子力災害は、未然防止が最重要であるが、万一への備え、知見の蓄積や共有も欠かせない。

これまで、放射線事故・災害医学や放射線影響の専門家の皆さまから多大なご支援、ご指導をいただいた。本学会では、外部関係者への感謝とともに、1F事故後に協力企業や東京電力等が協力して取り組んできた産業保健活動等を紹介した。

連絡先：〒100-0011 千代田区内幸町1-1-3
東京電力ホールディングス株式会社本社健康管理室
TEL 050-3152-9827
E-mail kikuchi.hiroshi@tepcoco.jp

キーワード：

福島第一原子力発電所事故、産業保健活動
放射線被ばく、緊急作業従事者、安定ヨウ素剤
健康診断

Abstract

On March 11, 2011, a tsunami hit the area due to the Tohoku Pacific Ocean Earthquake. Units 1-4 of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (hereafter referred to as 1F) of Tokyo Electric Power Company lost all power and some of the reactor cores were damaged. This was the second nuclear disaster of level 7 on the International Nuclear and Radiological Event Scale since the Chernobyl accident in 1986.

The accident site was plagued by many hazards, including tsunamis, explosions, radiation, heat, high place work, infectious diseases, and overwork. The Industrial Safety and Health Act stipulates that “when there is an imminent danger of an industrial accident occurring, the employer must immediately stop work and take necessary measures, such as evacuating workers from the workplace.” However, some workers did not evacuate and remained at the power plant, and some responders headed to the site despite the danger.

The on-site workers at 1F were considered emergency workers under the Ordinance for the Prevention of Ionizing Radiation Hazards. The regulations stipulated that the radiation exposure dose limit during emergency work was more relaxed than that during normal work. In the case of this accident, the upper limit was further raised by the ministerial ordinance on special cases. In addition, various exposure prevention measures were taken, including the preventive administration of stable iodine tablets for iodine thyroid blocking. However, during the process, there were also incidents of internal intake of radioactive materials, and exposure could not be avoided. As a result, some workers were exposed to more than the legal limit.

General and special health examinations were continuously conducted for normal radiation workers based on the Industrial Safety and Health Act. On the other hand, health examinations for emergency workers were not stipulated in the Act or special regulations. Following the Fukushima Daiichi accident, the government instructed employers to conduct designated health examinations, and they conducted them for their employees. Some health examinations are still being conducted, and some have been legalized.

Decommissioning work is still ongoing. In this social situation, expectations are rising again for nuclear power generation to achieve both a carbon-free society and a stable supply of electricity. Regarding nuclear disasters, the most important thing is to prevent them from occurring, but it is also very important to prepare for the unlikely event, accumulate knowledge, and share them.

We have received a great deal of support and guidance from experts in radiation accidents and disaster medicine and the effects of radiation. At this conference, we expressed our gratitude to the external parties involved and introduced the industrial health activities that have been carried out in cooperation with partner conductors and Tokyo Electric Power Company since the Fukushima Daiichi accident.

はじめに

2024年9月、北九州国際会議場において第12回日本放射線事故・災害医学会年次学術集会（日本放射線影響学会第67回大会 合同大会）が開催された。筆者は、「福島第一原子力発電所事故の当時とその後 - 産業医の立場から -」の演題を与えられ、9月28日特別講演3を担当させていただいた。被ばく医療、放射線影響を専門とする先生方に加えて、産業医として活躍されている先生方もご参加予定とのことで、労働安全衛生法に基づく各種健康診断に関する経験も取り上げた。

本稿は、講演終了後、学会誌編集委員長の細井義夫先生（東北大学大学院医学系研究科）より、講演内容を論文としてまとめるようにとのご依頼を頂戴し、投稿したものである。

I. 産業保健体制

I-1. 事故当時の産業保健体制

東京電力は、関東地方とその周辺を中心に電力を供

給していた。東京電力病院¹⁾（当時、東京都新宿区、9科、113床。以下、東電病院）、福島第一原子力発電所（福島県双葉郡大熊町、以下1F）は、それぞれ本店（東京都千代田区、現本社）から直線距離で約4Km、約230Kmあった。

産業保健活動は、労働安全衛生法により事業場単位で行うが、大企業では法人単位で活動内容の標準化が促されることが多い。東京電力は、本店原子力部門内に原子力保健安全センターを設置し、1F産業医でもあった被ばく医療専門医の指導の下、原子力発電所の産業保健活動を統括していたが、1996年6月同センターは廃止された（図1）。

100人超の産業医等のうち、専属産業医は、本店、1F、福島第二原子力発電所（以下2F）および柏崎刈羽原子力発電所（KK）の各原子力発電所の4人のみだった。東電病院では、各科医師が診療に従事し、同院の産業医として同院内科医師を選任していた。産業医等や病院医師は、社員の健康管理等を通じて、適宜、連携していたが、産業医間の組織的指揮命令系統はな

東京電力株式会社の産業保健組織(1F事故当時)

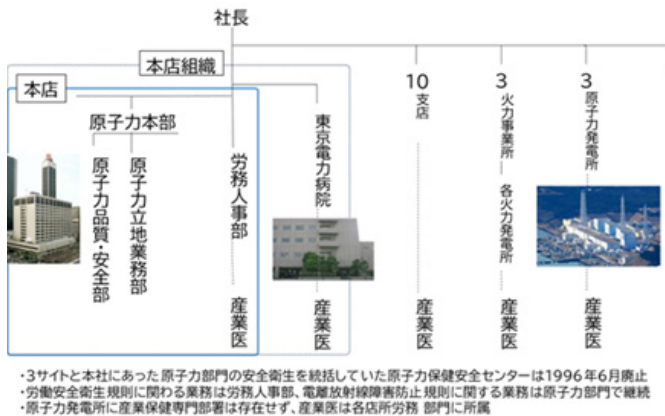


図1.

かった。

筆者は、1996年本店専属産業医として選任されて間もなく、放射線医学総合研究所主催の医療者向け研修(第1回)に参加するなどして、被ばく医療の基礎を学んでいた。その後は、自社内使用および外販を目的とした健康管理システムの開発、店所からの相談対応等の全社にかかわる産業保健活動業務も担当していた。

I-2 1F事故

震度6強の揺れにより発電所全体が外部電源を喪失、事務本館も損壊し、隣接の免震重要棟が1F構内の災害対応拠点となった。

地震から約40分後から複数の津波が来襲し、各号機のタービン建屋地下が浸水した。そのため、6号機を除き非常用ディーゼル発電機が稼働不能となった。1～3号機では、直流電源喪失により交流電源を用い

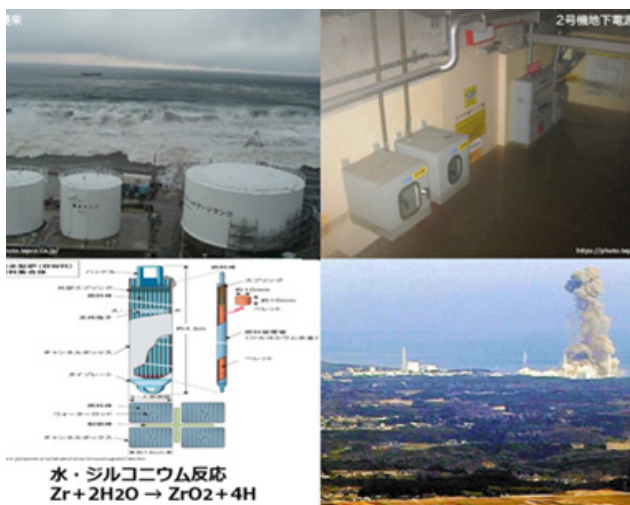


図2.

ない炉心冷却機能までも順次停止した。結果的に、翌3月12日以降、1～4号機では、水素爆発や火災等が断続的に発生し²⁾、放射性物質が大気中に飛散、構内外が広範に汚染された(図2)。

放射性物質内部取込防止のため、屋外では着用が義務付けられたフェイスマスクは、作業ごとに回収し、エタノールで清拭後に再利用された。

本店の原子力災害対策本部では、1F応援部隊派遣が検討され、配電部門からの応援により外部電源からの電力供給が復旧した。これが6号機の非常用ディーゼル発電機からの電力供給により大きな事故を免れていた5,6号機の安定状態維持や1～4号機の事故収束作業に大きく貢献した。一方、医療関係では、東電病院内科医師、看護師、本店産業医他も現地入りし、診療や産業保健活動にあたった(図3)。



図3.

免震重要棟での飲食は、レトルト食品とペットボトル飲料が中心だったが、トイレは洗面台を除き流水を使用できた。作業員は、所属ごとに割り当てられた狭い部屋で休息をとった。東京電力社員は、後にJ-VILLAGE(株式会社Jヴィレッジ(J-VILLAGE Inc.))1996年5月21日設立、福島県双葉郡楢葉町構内に設けられた、プレハブ住宅から専用バスで通勤した。事故原因企業として東京電力は世間から厳しい批判を受けた一方で、現場の緊急作業従事者に対しては、温かい声も寄せられていた(図4)。

I-3 1F事故後の医療・産業保健体制

1Fでの事業は、事故前から複数の企業間で受発注が反復され、元方事業者及び請負人(以下、関係請負人)の協力のもと運営されていた。100社を超える関係



図 4.

請負人に雇用された合計労働者数は、発注者である東京電力の社員約 1000 人の数倍に及んだ。関係請負人のうち、産業医選任義務のない 50 人未満の事業者は、産業医を選任しておらず、1F の特殊な現場での産業保健は容易ではないと思われた。

1F では、傷病者の発生や不安緩和を目的として、診療担当医師の派遣やオンサイト医療体制整備への期待が高まり、労務人事部門社員や医療スタッフを現地に派遣し、雇用事業者を問わず全作業員の支援を試みた。しかし、電力安定供給もままならず、計画停電さえせざるを得ない東京電力全体の余力は限られていた³⁾。また、現場の実情把握さえ困難なかで、現地派遣に応ずる者ばかりではなかった。そのような段階で支援の申出をくださったのは、事故前から学会、研究会等で関係を有していた専門医の先生方だった。実際に現地入りした専門医から報告された情報等で、次第に 1F 周辺の様子が明らかとなり、一定程度の安心感が醸成されていった。当初は個人頼みだった医療スタッフ派遣は、やがて組織間契約となった。各種会議体の意見は、それを構成する社外各界専門家のコンセンサスと受け止められ、社内からの提案よりも受け入れられやすい印象があった。2012 年 2 月には前出の原子力保健安全センターが原子力部門内に復活し、社内窓口が一本化されて現場への反映が促された。

原子力発電所構外（オフサイト）の緊急被ばく医療機関は、初期、二次、地域三次、三次から構成されていた⁴⁾。1F では、初期被ばく医療機関として 6 ケ所が指定されていた。しかし、1F 事故に伴う避難等により

1F の初期被ばく医療機関



図 5.

診療が制限され、実際に機能したのは、いわき市内の 2 ケ所のみだった⁵⁾（図 5）。

一方、事故前には想定されていなかったが、J-VILLAGE 構内にあるメディカルセンターが医療拠点として活用された。加えて、1F 構内に救急医療施設（以下、1FER）が新設されると、傷病の程度、除染の要否、健康診断の要否などから、搬送方法や受入拠点がより円滑に選定され、オンサイトとオフサイトの医療機関が役割分担、連携するようになった（図 6）。1FER は、2013 年 6 月に入退域管理施設に移転した⁶⁾。東京電力は、現在 1FER で診療にあたる医師の登録制度「1F-ER ネットワーク」を運営しているが、厚生労働省や日本救急医学会等の協力を得て、原則として救命救急を専門とする医師による 24 時間診療体制を維持している。

1F 医療体制 2011.7～

○福島第一の 5/6 号サービス建屋に救急医療施設を開設
 ○緊急被ばく医療に詳しい救急科専門医等が 24 時間常駐
 ○免責重要棟と役割分担し専門性を強化（緊急時には柔軟に相互応援）
 条件：7 月からの変更箇所

拠点	医師		看護師		施設	役割	搬送
	人数	駐在時間	人数	駐在時間			
福島第一	1名	24時間	—	—	免責重要棟	風邪・腰痛等の軽微な体調不良 健康管理	搬送車 2 台
	1名	24時間	—	—	5/6号サービス建屋	医療知識が必要な体調不良（胸痛等）・怪我（骨折等）	
福島第二	1名	24時間	2名	24時間	健康管理室 ビッチェス 4-6	初期診療 健康管理	搬送車 1 台
J-Village (JVMC)	1名	24時間	2名	24時間	J-Village ビッチェス	搬送されてきた患者の傷病程度から J-Village を実施し、後方医療機関へ搬送	陸送または空輸による後方医療機関への搬送をサポート
	1名	昼間					

（むつむつへ医療班）
 J-Village からの情報に基づき、受入医療機関や搬送方法を判断し、調整・要請を実施
 図 6.

II 1F 事故後の放射線管理

II-1 放射性物質汚染拡大防止策

事故発生後 1F 構内では、速やかにゾーニングが行われた。当初は、免震重要棟内も「管理区域と同等の管理を要する」と評価されたこともあり、休憩室に放射線モニターが設置され、作業員の安心が促された。2F は、津波に襲われたものの運転中であった 1～3 号機は、安定な原子炉冷温停止状態となり、原子炉からの放射性物質の飛散を免れたが、1F からの人や物の往来による放射性物質による汚染が懸念されたため、屋内でもゾーニングが行われた。

平常時は、1F 構内の事務本館等は、非管理区域だった。そのため、本店等からの出張者はもちろんのこと、1F 勤務者の一部も放射線業務従事者指定を受けていなかった。しかし、事故後は構内全域が管理区域となったため、東京電力は、原則として 1F 立入者全員を放射線業務従事者に指定し、放射線防護教育を受けさせた。

また、平常時は定期点検期間中でも限られていた放射性物質の内部取込リスクのあるエリアは、事故後には構内全域に拡大し、免震重要棟外では呼吸用保護具着用が必須となった。そのため適切な使用を促すためのフィットテスト等の指導が行われた（図 7）。



図 7.

II-2 被ばく線量の測定

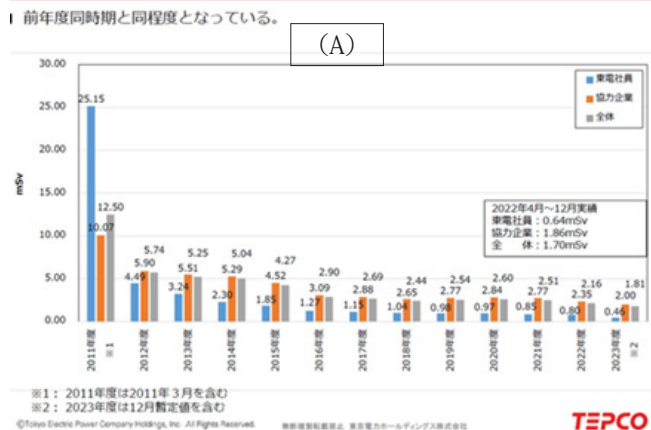
個人の実効線量は、警報付き個人線量計（Alarm Pocket Dosimeter：APD）または受動型個人線量計による外部被ばく線量とホールボディカウンタ（Whole Body Counter：WBC）による内部被ばく線量の合計で行われた。事故発生当初は、使用可能な APD や WBC の不足、周辺環境のバックグラウンドの上昇等

により線量評価が困難だったが、放射性物質ばく露シナリオ検討等により、慎重な評価が行われた。

事故後も放射線管理を適切に行うためさまざまな対策が講じられたが、想定外の事象も経験した。例えば、線量計の表面を鉛板で覆うことで、見かけ上の被ばく線量を過小評価させた作業員がいたことが 2012 年 7 月に判明し⁷⁾、2012 年 10 月に厚生労働省から指導が行われた⁸⁾。その他、放射性物質による作業員の身体汚染も複数発生した。2023 年 10 月には、管理区域からの退出基準（4Bq/cm²）までの除染を達成できなかった作業員は、構外の医療機関へ搬送され、入院となった⁹⁾。

1F 事故以降、平均線量と最大線量いずれの推移をみても、総じて作業員の被ばく線量低減が実現されている¹⁰⁾（図 8 A,B）。2024 年夏には、2 号機原子炉格納容器内燃料デブリの試験的取出しが始まったが、装置据付作業に従事した作業員の被ばく線量は計画線量内で収まった¹¹⁾。

② 発災以降の年度別外部被ばく線量の低減状況（平均線量）



③ 発災以降の年度別外部被ばく線量の低減状況（最大線量）

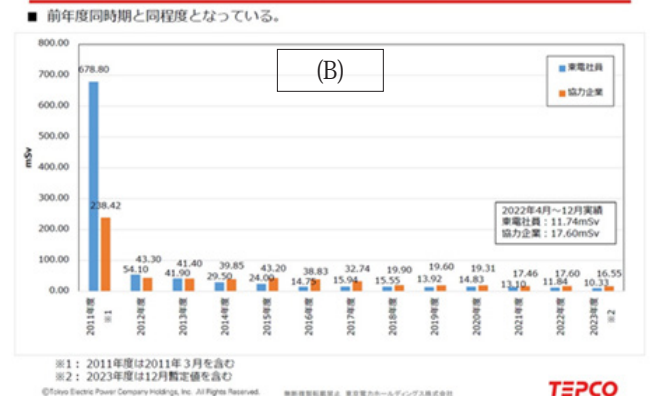


図 8. 発災以降の年度別外部被ばく線量の低減状況。(A) 平均線量、(B) 最大線量

II-3 被ばくによる健康影響

原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR：United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation）は、1F 事故の緊急作業従事者にひとりも急性放射線症候群が発生していないと報告している¹²⁾。また、がん発生率上昇は、白血病、全固形がん等で認められそうもないとしているが、白内障のリスクを判断するには十分な情報を入手できていないとしている¹²⁾。

なお、電離放射線障害の労災認定数は、2024年3月時点で14例ある¹³⁾。緊急作業従事者は、1F事故から14年以上が経過し、がん発症率は加齢により相対的に高まっている。労災認定基準を満たしうる線量を被ばくした作業員は相当数おり、今後は電離放射線障害の労働災害の申請や認定件数が増加する可能性がある。ただし、業務上電離放射線障害認定は、補償の基準を満たしたことを示すのであって、放射線被ばくとの因果関係が認められたわけではないことを認識する必要がある。

III. 緊急作業従事者を対象とする健康診断

III-1 放射線業務従事者指定

労働衛生関係特別規則では、放射線業務に常時従事する労働者を対象とした雇い入時や配置前等の健康診断、あるいは、事故時の医師の診察等が規定されている。1F勤務労働者の多くは、平常時から放射線業務従事者に指定され、労働安全衛生規則と電離放射線障害防止規則に基づく健康診断を受診していた。他方、例えば東京電力でいえば、平常時はオフィス職場の本店等に勤務していた社員は、定期健康診断しか受けていなかった。そのため、急ぎ1Fに応援に行こうとしても、現地入り前に放射線業務従事者指定を受けるための配置前健康診断を受ける必要があった。

III-2 健康診断実施体制整備

労働安全衛生法は、臨時の健康診断の実施等を指示する権限を都道府県労働局長に与えている。1F事故後、福島労働局長は、この規定に基づき、数回にわたり、被ばく実効線量や従事期間に応じて緊急作業従事者に健康診断を行うよう事業者に指示した。その健康診断の実施頻度は、経過中に変更されたが、数日～1ヵ月ごとと平常時より頻回だった。

さらに、原子力安全委員会からは、安定ヨウ素剤を連続内服した作業員を対象に医師による健康状態の確認を行うようにとの助言をいただいた。そのため、甲

状腺機能検査等を実施する必要性も高まった。

社内外の非放射線業務従事者が速やかに現場応援に加わり、放射線業務従事者が現場にとどまって緊急作業に継続従事するためには、受診者の利便性を考慮した健康診断実施体制整備が必要となり、産業保健を専門とする医師への期待が高まった。

その結果、健康診断の実施拠点として選ばれたのがJ-VILLAGE構内のメディカルセンターだった。ローテーションで派遣された医師が同センターで健康診断を実施、外部検査機関からの検査結果報告を受領した東京電力本店で産業医が判定と意見を付与、受診者と事業者提供するスキームが構築された。東京電力内外関係者の協力によって、所属する事業所や企業を問わず、緊急作業に向かう労働者を健康管理面からサポートする体制が整った（図9）。

健康診断と結果に基づく事後措置の実施体制

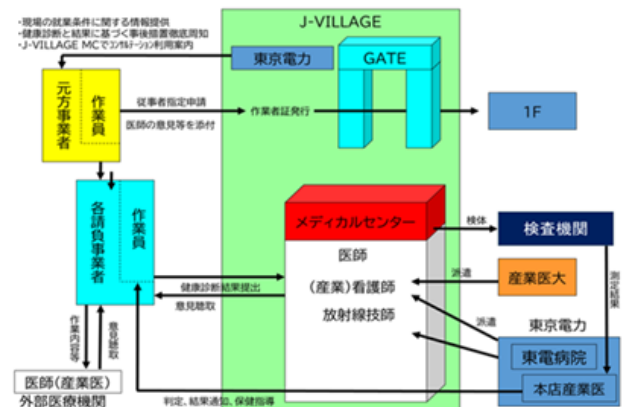


図9.

III-3 安定ヨウ素剤による甲状腺ブロック

緊急作業従事者を対象とする甲状腺ブロックを目的とした安定ヨウ素剤の提供や健康診断の実績は、2012年の被ばく医療分科会で報告した¹⁴⁾（図10, 11）。一過性甲状腺機能低下症を呈したケースのうち1例は、20歳代男性だった。内服開始後初回健康診断では、FT₄低値のみだったが、内服継続のうえ受診した2回目健康診断ではTSH高値も伴ったため、安定ヨウ素剤内服中止を指導した。紹介受診した専門医のもとで血液検査が行われ、甲状腺自己抗体陰性が確認された。甲状腺機能評価も約2ヵ月空けて2回施行され、いずれも基準範囲内と診断されて終診となった。一連の一過性甲状腺機能低下症の経過は、ウォルフチャイコフ効果による甲状腺機能低下とその後のエスケープ現象、あるいは内服中止の効果による正常化だった可能性がある。

1Fにおける安定ヨウ素剤提供回数

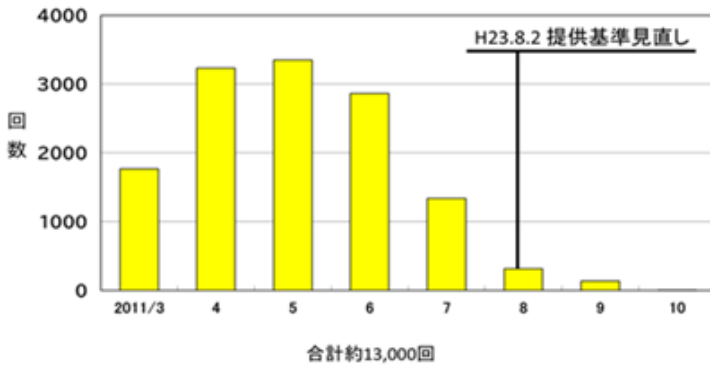


図10.

安定ヨウ素剤内服者の健康状態

内服時症状

- ・ヨウ素過敏症によるショックを認めず

健康診断実績

- ・229人に対し、約300回実施
- ・受診者:男性のみ、約2割は40歳以上

甲状腺機能検査

- ①甲状腺機能低下症疑い:TSH高値かつFT₄低値
3人:20歳代2人、30歳代1人
内服中止後再検査で全員TSHとFT₄の値が基準範囲内
- ②潜在性甲状腺機能低下症疑い
:TSH>5.0かつFT₄基準範囲内
4人(いずれも10.0>TSH、受診者の1.8%)
※潜在性甲状腺機能低下症は、1~3.5%程度の報告

図11.

III-4 1Fを対象とするガイドライン

発災直後の2011年度上半期(事故発生から9月末まで)は、医療体制整備が十分でなかったこともあり、構内医療拠点での診療だけでは終診とならず、外部機関へ搬送を要したほどの重症傷病者数が多かった。その後は、重症傷病者数は抑制されていたが、2014年度上半期に増加、労働災害、死亡災害の発生状況等を踏まえ、厚生労働省は、2015年8月「東京電力福島第一原子力発電所における安全衛生管理体制のためのガイドライン」が示された¹⁵⁾。

ガイドラインでは、一義的な責任を有する東京電力に対して、関係請負人の産業保健活動に対する支援を求めている。自社社員のみならず、全作業員を対象とする健康管理に関する具体策の検討にあたり、東京電力が産業医科大学に助言を依頼した。それに基づく指導を受けて、「定期的な健康診断」の受診と結果に基づく事後措置の徹底、評価等が対策の基本軸となった。ここでいう「定期的な健康診断」とは、労働安全衛生規則第44条に基づく1回/年の定期健康診断だけでなく、特別規則に基づく1回/6月ごとの定期の健康診断も含む。元請各社は、自社および請負各社の健康診断の実施と結果に基づく事後措置の実績を集約して東京電力に報告し、東京電力が自社分と合わせて評価する仕組みが構築され、現在も継続している¹⁶⁾。その結果、重症傷病者数は従来の頻度まで低減された。

IV 1F事故と災害産業保健

IV-1 健康診断結果に基づく事故措置

そもそも産業保健が目指すべきは、作業を人に、人を作業に適合させることとされる¹⁷⁾。しかし、災害

現場では、排除できない複数のハザードが併存し、作業の人への適合にはさまざまな制約が生じやすい。従って、人を作業に適合させる、つまり、保護具の使用や労働者の適正配置を適切に行う重要性が高まる。例えば保護具使用が前提となる場合は、それによる病状悪化リスクを評価したうえでの適性評価も必要となる(図12)。暑熱環境においては、コントロール不良の持病を有すれば、熱中症のリスクも高くなる。健康診断は、健康状態や通院治療状況の把握には有用であり、その実施頻度を高めて事後措置までを適切に行うことで、持病のコントロール徹底を促す効果があるかもしれない。

特殊健康診断は、有害物質へのばく露の程度に関する情報の収集、健康障害リスクの未然発見や有害作業因子による健康障害の早期発見などを目的とする。労

通常業務と災害復旧業務

	通常業務	災害復旧業務
有害因子やストレス要因	少ない ←	→ 多い
要求される職務適性	緩い ←	→ 厳しい*

- *原子力事故の災害復旧業務従事者
回避しがたい仕事上要因として
- ・フルフェイスマスク装着
 - ・放射線被ばく
 - ・安定ヨウ素剤内服
 - ・長時間労働
- などが存在することを前提とした職務適性評価が期待される
→発災前から従事していた労働者の一部を避難させる判断も必要

図12.

働安全衛生規則第 45 条で規定されている特定業務従事者健康診断は、6 月以内ごとに一回、定期の実施が義務付けられており、内容は原則として定期健康診断と同じで、一般健康診断に該当する。特定業務従事者健康診断は、有害業務従事者を対象とする健康診断として設けられたが、特殊健康診断の法制化により、役割の明確化が必要となっている¹⁸⁾。災害復旧作業が長期化した 1F の現場においては、基礎疾患の管理状態の定期的評価頻度が高まるという意味で、平常時よりも特定業務従事者健康診断の有用性が高まった可能性がある。

IV-2 緊急作業従事者の健康診断

1F 事故後の緊急作業に従事した労働者は、労働安全衛生法第 70 条の 2 第 1 項に基づき示された「健康の保持増進のための健康診断」¹⁹⁾と「放射線被ばくによる健康影響を調査するための疫学研究としての健康診断」²⁰⁾の対象となる。前者は、被ばく実効線量に応じて(図 13)、がん検診や細隙灯顕微鏡による白内障に関する眼の検査の適応とされる。法令に基づき事業者を実施義務が課せられ、受診は対象者の自由意思に委ねられている。一方で後者は、被ばく線量を問わず、定期的に指定医療機関で受けられる機会が提供されていて、NEWS 健診便り等を通じた健康管理に有

用な情報提供など、対象者の利便性に配慮がなされている。

電離放射線障害防止規則では、緊急作業従事者の線量限度を 100mSv としていたが、1F 事故においては、省令により一時的に線量限度が 250mSv に引き上げられた。2011 年 12 月に冷温停止状態が宣言されたことで 1F の緊急作業は限定的となり、緊急作業による被ばく線量はほぼ確定、結果的に大半の緊急作業従事者の線量は線量限度内に収まった。しかし、東京電力社員 6 人は、引き上げられた線量限度 250mSv さえも超えた。東京電力は、当該社員を対象として独自に専門医による健康診断を設け、2011 年から受診機会の提供を継続している²¹⁾。

1F 事故の経験を踏まえ、2016 年 4 月、万一の事故再発に備えて、緊急作業従事者を対象とする健康診断が電離放射線障害防止規則に新設された。緊急作業従事者を対象とする健康診断は、いわゆる当該業務への常時性や配置前の健康診断について触れておらず、加えて、甲状腺に放射性ヨウ素による高い線量の被ばくが多く見られたことを踏まえ、甲状腺機能検査が設定されているという特徴がある。

区分(mSv)	H23.3~H.24.2月			H23.3~H24.3月			増減		
	東電社員	協力企業	計	東電社員	協力企業	計	東電社員	協力企業	計
250超え	6	0	6	6	0	6	0	0	0
200超え~250以下	1	2	3	1	2	3	0	0	0
150超え~200以下	22	2	24	22	2	24	0	0	0
100超え~150以下	117	17	134	117	17	134	0	0	0
50超え~100以下	423	357	780	437	364	801	14	7	21
20超え~50以下	638	2,222	2,860	638	2,357	2,989	-6	135	129
10超え~20以下	496	2,743	3,239	501	2,811	3,312	5	68	73
10以下	1,680	11,813	13,493	1,706	12,047	13,753	26	234	260
計	3,383	17,156	20,539	3,422	17,600	21,022	39	444	483
最大(mSv)	678.8	238.42	678.8	678.8	238.42	678.8	-	-	-
平均(mSv)	24.75	9.51	12.02	24.68	9.59	12.05	-	-	-

外部被ばく線量と内部被ばく線量の合算値

(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120427j0101.pdf)

図 13. 1F 冷温停止状態宣言当時の被ばく線量

緊急作業従事者の健康診断適応判断は、概ね上表の線量が参考となる

おわりに

東京電力は、多重防護の考え方に立って適切な原子力発電所の設計、建設、運転および保守の全般を含めた安全対策に努めていた。さらに、万一の原子力発電所事故に備えて復旧に必要な体制の検討、訓練を行っていた。

しかし、自然災害の規模、それによる事故の程度とも事前想定を超え、既存体制では対処しきれない事態となった。現場の医療体制、産業保健活動を維持することができているのは、社内の努力のみならず、社外専門家の協力、支援があつてこそである。

1Fでの廃炉作業は、燃料デブリ試験的採取が成功した段階であり、長期化が見込まれる。一方で脱炭素社会実現と電気の安定供給両立のため、他の原子力発電所による発電に期待が高まっている。

事業者は、当事者意識をもって災害時の医療・産業保健活動を整備しておく責任がある。一方で、今回の1F事故のような事態への対処を事業者単体で整備、維持しておくことは、極めて困難であり、非効率적とも思われる。

そこで東京電力は、自らの1Fでの経験が、万一の原子力発電所事故再発時の備えの一助となるよう、貢献を試みている。例えば、「1FERネットワーク」を電気事業連合会大で全国版に発展させた「全サイトERネットワーク」の導入を検討し²²⁾、2024年11月(学会発表後)に公表された²³⁾。また、産業医科大学災害産業保健センターの協力を得て産業保健活動との連携を促している²⁴⁾。

放射線影響学、放射線事故災害医学、災害産業保健のご発展を祈念、期待するとともに、引き続きのご支援と見守りをお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 東京電力病院の概要
URL: https://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1221307_1834.html
- 2) 福島原子力事故調査報告書 平成24年6月20日 東京電力株式会社
- 3) 3月15日(火)の計画停電の実施予定等について 東京電力株式会社 平成23年3月14日
URL: <https://www.tepco.co.jp/cc/press/11031414-j.html>
- 4) 緊急被ばく医療のあり方について 原子力安全委員会報告書 2001年6月、2008年10月改定
- 5) 福島原発事故対応から見えてきたキーワード MOOK 医療科学 No.6 放射線災害と医療II 浅利 靖 P77-84
- 6) 福島第一原子力発電所における医療体制整備の経緯、2019年8月、東京電力ホールディングス株式会社
- 7) 福島第一原子力発電所の復旧工事において個人線量計を鉛で覆い作業した件について 平成24年7月23日 東京電力株式会社 <https://www.tepco.co.jp/cc/>
- 8) 東京電力福島第一原子力発電所における被ばく管理の徹底について 基安発1030第2号 H24.10.30
- 9) 福島第一原子力発電所 協力企業作業員における放射性物質の付着について 2023年10月25日 東京電力ホールディングス株式会社 URL: https://www.tepco.co.jp/press/mail/2023/1666372_9008.html
- 10) 福島第一原子力発電所従事者の被ばく線量全体概況について 労働者安全衛生対策部会【資料4-1】 2024年2月26日 東京電力ホールディングス株式会社
URL: <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/618296.pdf>
- 11) 福島第一原子力発電所高線量作業における被ばく低減対策について 労働者安全衛生対策部会【資料4-2】 2024年10月7日 東京電力ホールディングス株式会社
URL: <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/654466.pdf>
- 12) 原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)2020年/2021年報告書 第II巻 科学的付属書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 UNITED NATIONS New York 2022
- 13) 「電離放射線障害の業務上外に関する検討会」の検討結果及び労災認定について 令和6年3月27日
URL: <https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/001233934.pdf>
- 14) 福島第一原子力発電所での緊急作業に従事した作業員の安定ヨウ素剤内服等について 原子力安全委員会 原子力施設等防災専門部会被ばく医療分科会第30回会合 医分第30-4-3号
- 15) 「東京電力福島第一原子力発電所における安全衛生管理対策のためのガイドライン」の策定について 基発0826第1号 平成27年8月26日 厚生労働省労働基準局長
- 16) 福島第一における作業員の健康管理について(厚労省ガイドラインへの対応状況) 2024年1月25日 東京電力ホールディングス株式会社 URL: <https://www.mmet.go.jp/earthquake/nuclear/decommisdecommi/committee/osensuitaisakuteam/2024/01/01/3-7-2.pdf>

- 17) Good Practice in Occupational Health Services: A Contribution to Workplace Health WHO Regional Office for Europe 2002
- 18) 特定業務従事者健康診断の実施対象となる業務とその基準に関する歴史の変遷, 産業衛生学雑誌 2020; 62 (1) : 1 - 12 伊藤 直人ほか
- 19) 原子力施設等における緊急作業従事者等の健康の保持増進のための指針 平成 27 年 8 月 31 日 厚生労働省
- 20) 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」(190702-01) 指針に基づく情報公開
URL: https://www.news.johas.go.jp/wp-content/uploads/2024/08/disclosure_of_admi_info.pdf
- 21) 福島第一原子力発電所の事故に係る緊急作業に従事した個人線量管理状況 平成 23 年 9 月 東京電力株式会社
URL: https://www.pref.fukushima.lg.jp/download/1/230914_roudousha_kaigi_02.pdf
- 22) 原子力災害時オンサイト医療に係わる取り組み状況について 原子力災害対策中央連絡会議 2024 年 1 月 17 日
- 23) 原子力施設における原子力災害オンサイト医療ネットワークの運用開始について 2024 年 11 月 1 日 東京電力ホールディングス株式会社 <https://www.tepco.co.jp/press/news/2024/pdf/241101j0101.pdf>
- 24) 第 7 回災害産業保健研究会 (第 97 回日本産業衛生学会 (開催地: 広島)) のご案内 URL: <https://www.dohcuoeh.com/kenkyukai/7th-meeting/>

日本放射線事故・災害医学会 編集委員会

編集委員長 細井義夫
編集委員 鈴木 元
富永 隆子
百瀬 琢磨
吉田 光明

日本放射線事故・災害医学会雑誌

2024年12月20日 Vol. 7 No.1

発行者 日本放射線事故・災害医学会

〒113-0033 東京都文京区本郷3-11-9

ビクセルお茶の水 医療科学社 内

TEL 03-3818-9821

FAX 03-3818-9371

編集人 日本放射線事故・災害医学会編集委員会

編集委員長 細井義夫

〒113-0033 東京都文京区本郷3-11-9

ビクセルお茶の水 医療科学社 内

TEL 03-3818-9821

FAX 03-3818-9371