

日本放射線事故・災害医学会雑誌

*Journal of Japanese Association
for Radiation*

Accident/Disaster Medicine

Vol.4
No.1
2020

第8回日本放射線事故・災害医学会 学術集会

要旨集



巻頭言

この度、第8回日本放射線事故・災害医学会の大会長を拝命致しました、量子科学技術研究開発機構の栗原です。皆様におかれましては、平素より当学会への過分なご支援を賜り、改めて御礼申し上げます。

ご存じのとおり、今般の新型コロナウイルス感染症は全世界で猛威を振るい、未だに収束の兆しは見ておりません。当学会の皆様の中には、今まさに新型コロナウイルス感染症の対応に追われている医療従事者の先生方もおられるかと思えます。そうした状況下での学会開催に大きな戸惑いはございましたが、一方で当学会としても新たな生活様式にいち早く順応してゆくことも必要と考え、今年度の学会をウェブでの開催とさせて頂くことになりました。

さて、8回目となる今年度の学会のテーマは、「被ばく医療で目指すべき線量評価のあり方」と致しました。被ばく医療における線量評価の役割としては、患者の治療方針を決定するための判断材料を提供することと、患者の予後の放射線障害のリスクを推定することの二つがあります。多様な放射線事故に際し、患者の被ばく線量がタイムリーに得られることが理想であり、そのための技術の開発や維持が重要であることは言うまでもありません。その一方で、被ばく医療に本当に役立てられる線量評価とは何かという点について、過去の様々な放射線事故事例を俯瞰しながら、医療と放射線防護の双方の関係者が議論できる機会があれば有意義ではないかと思ひ、前述のテーマの着想に至りました。私が社会人になって間もないころ、JCO ウラン加工施設における臨界事故が発生しました。重篤な被ばくを受けた3名の作業員を初め、当該施設敷地内に滞在した従業員や防災関係者、近隣住民や通行人に対する様々な線量評価が行われ、その結果は放医研の不定期刊行物等にまとめられておりますが、あれから20年以上が経過した現在、同様な事故が発生したらどのようなアプローチが考えられるでしょうか？臨界事故以外にも、東電福島第一原発事故や原子力機構大洗研究所におけるプルトニウム内部被ばく事故など、線量評価を含む被ばく医療対応の教訓とすべき事例はあります。来年度は東電福島第一原発事故から10年の節目を迎えますが、当時何ができて何ができなかったか？できなかった理由は何で、それは現在解決されているのか？といった率直な問いに対し、当学会でも振り返る時期に来ているものと思ひます。

最後に、本学会を通じて被ばく医療の関係者の連携が一層強化され、万一の際にも「想定外」とならない、さらに骨太な被ばく医療体制の構築が実現することを願っております。本学会初の取り組みでの開催となりますが、多くの方々の参加をお待ちしております。

令和2年10月

第8回日本放射線事故・災害医学会 学術集会
大会長 栗原 治

目次

巻頭言	
大会概要	2
プログラム	2
基調講演 1	3
我が国の被ばく医療の経験	3
前川 和彦 東京大学名誉教授	
特別講演	8
放射線輸送シミュレーションに基づく線量評価	8
佐藤 達彦 日本原子力研究開発機構	
基調講演 2	9
我が国の被ばく事故における線量評価の経験と課題	9
栗原 治 量子科学技術研究開発機構	
パネルディスカッション	13
座長 明石 真言 (東京医療保健大学)	
パネリスト 鈴木 元 (国際医療福祉大学クリニック) 床次 眞司 (弘前大学) 百瀬 琢磨 (日本原子力研究開発機構) 栗原 治 (量子科学技術研究開発機構)	

第8回日本放射線事故・災害医学会 学術集会

要旨集

2020年10月3日(土)

ウェブ開催

大会概要

大会長	栗原 治 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・線量評価部長
日時	2020年10月3日(土) 13:25 - 17:00
会場・方式	ウェブ開催
理事会	学術集会終了後より開始
総会	13:00 - 13:25
参加費	会員 無料 非会員 2,000円

プログラム

13:25 - 13:00	開会挨拶
13:30 - 14:10	基調講演1 「我が国の被ばく医療の経験」 座長 栗原 治 (量子科学技術研究開発機構) 演者 前川 和彦 (社会医療法人東明会原田病院)
14:20 - 15:00	特別講演「放射線輸送シミュレーションに基づく線量評価」 座長 古渡 意彦 (量子科学技術研究開発機構) 演者 佐藤 達彦 (日本原子力研究開発機構)
15:10 - 15:50	基調講演2 「我が国の被ばく事故における線量評価の経験と課題」 座長 古渡 意彦 (量子科学技術研究開発機構) 演者 栗原 治 (量子科学技術研究開発機構)
16:00 - 16:40	パネルディスカッション 座長 明石 真言 (東京医療保健大学) パネリスト 栗原 治 (量子科学技術研究開発機構) 鈴木 元 (国際医療福祉大学クリニック) 床次 眞司 (弘前大学) 百瀬 琢磨 (日本原子力研究開発機構)
16:40 - 17:00	閉会および次期大会長挨拶

基調講演 1

我が国の被ばく医療の経験

前川 和彦

東京大学名誉教授

(特非) 災害人道医療支援会 理事長

社会医療法人東明会原田病院 理事長補佐

はじめに

わが国は唯一の原爆被災国である。加えて幾多の放射線事故や原子力発電所の事故をも経験している。しかし、幸いにも平時における事故・災害での被災者が医療を必要としたものは多くはない。わが国における epoch-making な被ばく（被爆）医療の経験を俯瞰して、今後の被ばく医療のあり様の検討に資するものとした。

1. 広島、長崎の原子爆弾被ばく者における被爆医療

わが国の被ばく医療は、広島、長崎で自らも被爆しながら、献身的に診療に当たった医師達によって、被爆者を対象に行われた“原爆医療”を嚆矢とする。当時の医療者には全く未知の身体障害や病態に対する治療法そのものは、時の医療レベルや戦時下の医療材料の不足等から自ずから限界があった。「治療の手だてを使えない医師の惨めさは言葉に表せない。」「原子爆弾という未知の巨大な悪魔に対して、何の知識も手だてもなく、徒手空拳で立ち向かうほかなかった」などの証言は、この辺の事情を如実に物語っている。「原子爆弾症」に対する医療は、爆発直後の混乱期には外傷、熱傷の簡単な処置のみで、熱傷創に対しては赤チン、亜鉛華油、オリーブ油、落花生油、な種油の塗布、リバノールガーゼ等、外傷に対しては副木固定、赤チン、ヨードチンキ等程度であった。診療体制が少しずつ整備されてからは、本症に対して様々な治療が試みられた。輸血、自家輸血、ブドウ糖液、リンゲル氏液、生肝、肝臓製剤、豚胃製剤、骨髓刺激剤として還元鉄、ヌクレイン酸 Na 等、体内放射性物質の排泄促進剤として副甲状腺製剤、炭酸 Ca、燐含有製剤、出血性素因にはビタミン C, K, P、ホルモン剤として副腎皮質ホルモン、脳下垂体ホルモン、チフスワクチン、淋菌ワクチン等。特に安静が強調され栄養源として生野菜が賞用された。直後から、被災地の広島、長崎医師会の会員や長崎医科大学医学部の教官、医学生ら献身的に医療を実践した人達及びその年の 10 月に学術研究会議（当時）で組織され現地入って調査に当たった東大、京大を中心とした医師らによる「原子爆弾症」に関する優れた実証的、科学的観察記録は今日、われわれが今日知る「急性放射線症候群（以下 ARS）」の基礎となっている。とりわけ長崎医科大学助教授永井隆博士の報告書は自らの救護活動の詳細な記録のみでなく自省と社会医学的考察を含み、わが国の被ばく医療を考察する時の原資料である。1947 年、原爆傷害調査委員会（ABCC）が米国学士院によって設立され、その後、厚生省国立予防衛生研究所（予研）が参加。1950 年の国勢調査時に附帯調査として行われた原爆生存者の調査の結果を使用して、原爆被爆者の死亡追跡集団である LSS 集団が設定され、この調査は今日まで続けられている。これは世界的にも極めて貴重な放射線の生物影響に関する疫学調査であり、とりわけ被爆線量と発癌リスクの関係に関する知見は世界の放

射線防護基準の基礎となっている。

II. ビキニ水爆実験被災者における被爆医療

1954年3月1日、静岡県焼津漁協所属の遠洋マグロ漁船第五福竜丸は南太平洋マーシャル諸島近海のビキニ環礁において操業中、米軍により行われた水爆実験に遭遇し、船体、船員、捕獲した魚類が放射性降下物 (fallout) により被ばくした。爆発後、漁具の収容に時間がかかり約4～5時間にわたって放射性降下物の灰に暴露され続けることになり、18～39歳の船員23名全員が被爆した。船体や人体の十分な除染が行なわれないうまま、焼津港に帰港するまでの2週間、放射性物質で汚染された船上での生活を強いられることになる。同年3月14日、焼津港に帰港後、全員が「放射線障害」と診断され、同年3月28日までに東京大学医学部附属病院に7名、国立東京第一病院（現、国立国際医療研究センター病院）に16名が入院し、個人被爆線量の評価と治療を受けることになった。乗組員の持ち帰った灰や船体に付着した灰の放射化学分析は日本各地の研究室で行われた。東大理学部の木村研究室での分析では、灰中に約30種（7元素、27核種）の放射性核種が確認され、臨床医学的見地からは50%の希土類元素、20%ウラン、微量のストロンチウムが注目された。彼らの被爆の特徴は2週間と言う長期にわたる低線量率被爆であった。被爆の様式と影響は、身体表面に付着した fallout のβ線による皮膚障害、甲板や船室に溜まった fallout からのγ線による外部被ばくとその主な結果としての骨髄障害、fallout の吸入や汚染飲食物による内部汚染などであった。β線による皮膚障害は主に身体の露出部分に出現し、紅斑、浮腫、脱毛、水疱、びらん、潰瘍、壊死などの経時的变化を呈した。200kVp の X線照射による脱毛の閾値を4 Gy とすると、γ線による局所の被ばく線量は7 Gy を越えないと判断された。外部被ばく線量は、模擬実験から推定された甲板上への fallout の量、甲板、船室各部で測定された空間線量率の減衰曲線、被爆から帰港までの船員の船内での詳細の行動調査などから約1.7~6.6 Gy と推定された。内部汚染については、被爆後約4週間は尿中の放射性物質の排出が認められたこと、被爆後25日に行われた甲状腺部の体外測定の count 数はバックグラウンドの約8倍であったこと、剖検例における臓器の放射化学分析で希土類元素、ストロンチウムが対照例に比して著明に増加していたことなどから内部汚染があったことには疑う余地はないが、当時は内部被ばく線量の評価法が未確立であった。除染方法については、体表面の汚染には流水による洗浄が繰り返し替えられ、EDTA液も使用された。また2例でEDTANaが静脈投与されたが、投与時期が被爆後2カ月、7カ月と遅かったせいもあり、放射性物質の尿中排泄の増加を認めなかった。治療法は、「心身の安静、栄養維持のほか当初より肝庇護のため食餌薬剤療法に留意した」とあり、全血輸血、血漿輸血、リン酸Caの経口投与、止血剤、Vit.B12や葉酸の投与、PC、SM、TCなどの抗生物質の投与等が適宜行われた。1名が被爆6カ月と20日後に死亡。死因は肝不全であるが、その原因に関しては血清肝炎説、放射性物質による内部汚染による肝障害説がある。直接の死因として「肺アスペルギルス症」を忘れてはならないと思われる。なお、この事件に際しては、多くの大学研究室（静岡大学、大阪市立大、東大、東京女子医大など）によって漁船や船員の放射線サーベイ、放射性落下物の放射化学分析、船員の医療、内部照射線量の推定の為の動物実験等が行われ、all Japan の学際的取り組みが展開されたことは注目に値する。またこの事件を契機に1957年、科学技術庁の国立試験研究機関として放射線医学総合研究所（以下、放医研）が開設され、更に1959年には日本放射線影響学会が設立された。

III. 東海村 JCO 臨界事故被災者における被ばく医療

1999年9月30日、茨城県東海村にある(株)JCO東海事業所の核燃料加工施設内において、旧動燃の高速増殖炉「常陽」の核燃料を非認可の工程で加工中に、ウラン溶液が臨界に達し核分裂連鎖反応が発生、約20時間持続した。至近距離で作業をしていたJCOの作業員3名が高線量被ばくを受け、救助に向かった救急隊員や施設外の住民にも被害が発生した。3名の作業員は第二次緊急時医療施設の国立水戸病院に救急搬送され、放射線サーベイを受けた。しかし事故の状況も知らされないまま、体表面サーベイで $30\mu\text{Sv/hr}$ を振り切る程の核種不明の体内汚染が疑われること等から放医研と協議の上、千葉県の放医研へヘリコプター搬送された。放医研では直ちに初期治療、検体の採取と放射線サーベイが行われた。事故の正確な情報は放医研にも伝わっていない、為に「六フッ化ウランの吸入事故」を疑って、ウランの腎毒性の軽減を目的に炭酸水素ナトリウムが投与された。物理的・生物学的線量評価が開始され、その日の夕方には事故は臨界事故であり、被ばくの形式は中性子線、 γ 線による外部被ばくであることが明らかとなった。1980年に原子力安全委員会が策定した「原子力発電所等周辺における防災対策について」の中で放医研は放射線障害専門病院と位置付けられていた。阪神・淡路大震災の2年後の1997年の防災基本計画の一部修正に際し、原子力災害対策編が新たに追加され、その中で「放医研は、外部医療機関との緊急時被ばく医療に関するネットワークを構築し・・・平常時から緊急時被ばく医療体制を構築する」ものとされた。これに呼応して1998年7月、それまでの放医研の緊急被ばく医療会議が、放医研の被ばく医療活動をall Japanのネットワークで助言、支援、評価する「緊急時被ばく医療ネットワーク会議」へと組織替えになった。この会議は事故の翌日、緊急に招集され「JCO作業員被ばく事故対応臨時拡大会議」と位置付けられ、この日を皮切りに翌年の3月迄11回開催され、3名の作業員の医療対応において極めて重要な役割を果たした。最初の会議では放医研が提示した被ばく線量の評価に基づき推測される医療ニーズに応じて3名の作業員のトリアージを行った。放医研が手配した家族のHLAタイピングの結果を参考に、最も被ばく線量が高いと予想されたA氏は末梢血造血幹細胞移植を行うべく東大病院へ、ついで被ばく線量が高いとされたB氏は臍帯血移植を行うべく東大医科学研究所病院へ、C氏の被ばく線量は比較的lowくサイトカイン療法を継続するべく引き続き放医研に留まることになった。後日、放医研で行われた3名の被ばく線量は、前駆症状の発現時期、末梢血リンパ球数の推移、染色体異常分析、血液中の ^{24}Na の分析等に基づき評価され、 γ 線に換算しての総被ばく線量はA氏：16~25 GyEq, B氏：6~9 GyEq, C氏：2~3 GyEqとされた。その後、「緊急被ばく医療ネットワーク会議」は3名の臨床経過を概観し、必要に応じて医学的助言、治療方針の決定や専門家の派遣などを行った。また、被ばく患者の生体試料が無断で使用されたこともあって、生体試料の管理と臨床データの取り扱い、学会発表などに関する倫理綱領を定めた。われわれが3名の被ばく患者で診たものはARSであり、A氏、B氏に対して行ったのは近代的な意味での集学的critical careであった。しかし原子力災害は稀な事象であり、ARSの治療に関する情報は少なく、ましてや科学的根拠に裏付けされた治療法は皆無に等しかった。先行する1987年のブラジル、ゴイアニアでの ^{137}Cs による被ばく事故、1990年のイスラエル、ソレクの工業用照射装置内での ^{60}Co による外部被ばく事故、1991年のベラルーシ、ニヤスヴィシュの同様の外部被ばく事故などでの確定的影響に対する急性期医療では、他の領域でその有効性が示されている新規の治療法を積極的に取り入れ

たものとなりつつあった。これらは、陽圧無菌室での患者管理、完全静脈栄養法、H2 受容体拮抗薬による急性胃粘膜病変の予防、選択的消化管除菌、PT-GVHD 予防のための照射血球成分輸血、無顆粒球状態での予防的抗菌薬の全身投与、G-CSF, GM-CSF, IL-6 などのサイトカイン療法、HLA 一致の骨髄移植、GVHD 対策など。われわれが行った3名の高線量被ばく患者への医療介入は、このような先行例の取り組みや医原性放射線障害の治療法、動物実験での効果などを参考にした。3名の患者で診られたARSの最初の臓器障害は骨髄障害であった。A氏ではHLA一致の妹から末梢血幹細胞移植が行われ、移植後9日目の骨髄穿刺で造血再生像が認められ、染色体の核型分析から移植幹細胞の生着が確認された。B氏では被ばく後9日目に日本さい帯血バンクネットワークを通して得られたHLA one locus 不一致の臍帯血移植が行われた。移植後9日目には生着を確認。その後に行われた骨髄細胞、末梢血球の性染色体のFISH分析から混合キメラ状態が確認され、これは患者由来の造血細胞に完全に置き換わるまで約3ヶ月持続した。A氏では、次いで被ばく後26日頃より消化管障害の大量の下痢が始まり、これはintractableな消化管出血となった。被ばく後56日目に突然の心停止を来し、蘇生に成功するも無尿状態となり、肝機能も急激に悪化、血球貪食症候群をも併発し、被ばく後82日、多臓器不全で鬼籍に入った。A氏、B氏とも臨界地点から直近に位置し、高線量の中性子線とγ線による全身の不均衡被ばくを受けた。皮膚障害は局所の被ばく線量依存性に、発赤・腫脹、脱毛、落屑、潰瘍、壊死と経時的に変化した。B氏では同種冷凍保存皮膚、同じドナーの培養皮膚、患者自身の自家培養皮膚の移植が行われ、被ばく後5カ月の時点での移植皮膚の生着率は約90%であった。被ばく後152日、誤嚥によるMRSA肺炎を併発、これはARDSへと進展しmPSLの投与、人工呼吸管理等にも関わらず呼吸状態は悪化。また皮膚の線維化/硬化が徐々に進行し高度となって、腹部コンパートメント症候群と腎機能障害や麻痺性イレウス、胸部のコンプライアンスの極度の低下で換気量の維持困難、全身の関節の硬直などが明らかとなり、被ばく後210日に多臓器不全で鬼籍に入った。C氏は放医研でG-CSFの投与が行われた。リンパ球は被ばく後3日目にnadir(500/μl)となり以後、ゆっくりと回復、好中球は被ばく後20日目にnadir(1,090/μl)となり、その後回復。入院後82日目に退院した。

それまでのARSは線量依存性に個別の臓器が障害される亜症候群の集合体と理解されていた。われわれの診療経験から、高線量被ばくによるARSは臓器の被ばく線量と放射線感受性に依存し連鎖的に多臓器を侵し、多臓器機能障害症候群から多臓器不全に至ることが明らかになった。また、重症ARS患者の診療体制は重症患者管理の専門家をリーダーとした学際的チーム医療であるべきことも示した。同時にARSの診療には膨大な量の物的、人的資源を必要とすることも判明した。この事故が及ぼした社会的影響は大きかった。原子力安全神話は根底から覆り、原子力の安全管理体制が見直されることになり、その年のうちに「原子炉等規制法」の一部が改正され、「原子力災害特別措置法」が急遽、制定された。また2001年には原子力安全委員会より「緊急被ばく医療のあり方」が世に出た。

IV. 福島原発事故被災者における被ばく医療

まだわれわれの記憶に新しい2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震後の福島原発事故での被ばく医療については、上記3件の災害、事故被災者に対する急性期医療と共通のcontextでは多くを語れない。福島原発事故は国際原子力事象評価尺度(INES)で最悪のレベル7とされるが、同じレベル7の1986年のチェルノブイリ原発事故で大気中に放出された放射性核種

の量は放射性ヨウ素換算で520京ベクレル、福島第一原発事故では90京ベクレルとされている。また、前者ではARS患者の発生はないが、後者では作業員、消防、救急関係者を中心にARS患者は203名、これによる死亡者は31名である。福島原発事故の災害対応で、広義の被ばく医療の観点から医療者が関わったことには、被災した福島医大病院へ他の被ばく医療機関からの医師の派遣、避難住民に対する緊急被ばくスクリーニング、サイト内での緊急事態対応チームへの医師の帯同、地域住民、医療機関の入院患者、介護福祉施設の入所者の避難支援活動、避難住民の一時帰宅に際しての放射線防護支援、医療支援、放射線スクリーニング、避難地域外の医療機関での汚染を伴う緊急事態対応者やサイト内作業員に対する医療対応、サイト内の救急の体制の整備と医療支援、J-ビレッジ、オフサイトセンター、福島県庁での救急医療、災害医療の調整など極めて多岐に及んだ。これらの医療支援活動には先のJCO臨界事故後に全国展開されていた緊急被ばく医療研修を通しての人的ネットワークが大いに貢献した。福島原発事故では、幸い重篤な確定的影響に対する急性期医療を必要とする傷病者は発生しなかったが、on-siteで事故直後に被ばくした作業員のフォロー、福島県民の確率的影響の長期的調査、廃炉作業に長期的医療体制の維持等残された課題は重要である。

おわりに

わが国の epoch-making な原子力災害、放射線事故での先人たちの歩みを俯瞰した。彼らが持てる力を最大限に発揮して取り組んだ被ばく医療も時代と共に変遷してきた。原子力災害や放射線事故は地震、台風などの自然災害と比して遥かに低頻度の事象である。それが故に被ばく医療に携わるわれわれには、不断の研修により対応能力の維持が求められる。また強いリーダーシップと人的ネットワークの構築は必須である。同時に、全てにおいて「ガラパゴス化」を避けるべく、様々な角度から現行の被ばく医療体制の sustainability をも検討するべきと思われる。

特別講演

放射線輸送シミュレーションに基づく線量評価

佐藤 達彦

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター

放射線防護や医学物理研究においては、人体の被ばく線量を評価することが極めて重要となる。近年の計算科学技術の進展により、その線量評価には、ボクセルファントムやメッシュファントムとモンテカルロ法に基づく放射線挙動解析コードを組み合わせる方法が一般的となっている。本発表では、原子力機構が中心となって開発している放射線挙動解析コード PHITS の概要を紹介するとともに、PHITS を放射線防護や医学物理分野における線量評価に活用した例を紹介する。具体的には、原爆被爆者の線量再評価、外部被ばくや環境放射能による線量係数の計算 (ICRP への貢献)、除染効果評価システム CDE、メッシュファントムに基づく内部被ばく線量評価システム PARADIM、粒子線治療や BNCT における治療効果推定モデルなどについて解説する。



PHITS の概要。発表では赤枠の部分について詳しく紹介します。

基調講演 2

我が国の被ばく事故における線量評価の経験と課題

栗原 治

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

放射線被ばく事故は多様であるため、患者あるいは被災者に適用する線量評価の方法も多岐に及ぶ。その線量評価の目的は、高線量被ばくが疑われる場合には治療方針の判断材料や予後の推定、そうでない場合には確率的影響を説明する根拠を与えることである。線量評価の方法には物理学的線量評価と生物学的線量評価があるが、前者は放射線と物質との相互作用の結果生じる物理現象に着目した評価であり、後者は生体反応に着目した評価である。本稿では、我が国で発生した直近の被ばく事故事例を取り上げ、当時行われた線量経験の経験を俯瞰するとともに、発表者が感じた課題について触れておきたい。

1. JCO 臨界事故

1999年9月30日、JCO 東海村ウラン加工工場において、臨界形状となっていない沈殿槽に臨界量を超えるウランが投入された結果、臨界に達し、この状態が約20時間継続した。沈殿槽の近傍で被ばくを受けた3名の線量評価は放医研が中心となって行われたが、その方法は前駆症状（嘔吐の時期など）、血球数の減少、染色体解析、血液中 ^{24}Na 量、人体数学ファントムを用いた放射線輸送シミュレーションなどであり、また、複数の方法による線量推定値が相互に比較された。同事故は中性子線と γ 線の混在場による外部被ばくであり、3名の線量評価では、特に中性子線のRBEについて議論があった。すなわち、血球数の減少や染色体解析からの線量推定において、中性子照射による検量線が無かったために γ 線線量換算で行われた。中性子及び γ 線それぞれの吸収線量は放射線輸送シミュレーションでしか評価できず、その結果は γ 線による吸収線量の方が大きかったが、染色体解析等からの線量推定値と比較を容易にするため、13 MeVの中性子を用いたマウスの腸管死 $\text{LD}_{50/7}$ を見た実験結果を参考にして、中性子のRBEとして1.7が適用された。ただし、中性子のRBEは、中性子が体内を進につれてエネルギーが変化し、相互作用で生じる荷電粒子や γ 線による線量付与の割合が変化するために、人体では一義に決まるものではない。

その他の従業員や防災従事者等の線量評価は、主に工場敷地周辺のサーベイ結果を用いて行われた。臨界出力が安定した時間帯の中性子及び γ 線の場の1cm線量当量率の比は約10:1であり、前述の吸収線量とは異なり、中性子線量が卓越していた。臨界反応が比較的安定した時間帯、いわゆるプラト一期に取得されたサーベイ結果を基に、沈殿槽からの距離を変数とする中性子及び γ 線の線量当量率関数が導出され、行動調査と併せて事故期間中の被ばく線量が推定された。その際に問題となったのは、バースト期と呼ばれる臨界事故直後の急激な反応が生じた30分程度の期間の線量評価であった。沈殿槽内に残された溶液中の核分裂生成物の分析から、臨界事故の総核分裂数は 2.5×10^{18} Fissionという見積もりが得られたため、放射線輸送シミュレーションによってプラト一期のサーベイ結果を再現する核分裂数率が評価できれば、バースト期の線量が評価できるものと当初考えられた。しかしながら、この方法では信頼

性のある結果を得ることは当時困難であった。その後、工場から約 2 km 離れた場所に設置された原研（那珂研）の中性子モニタがバーストを捉えていることが確認されたため、同モニタの観測値のトレンドからバースト期とプラトー期の線量配分が決定された。この結果、バースト期の線量が後に大幅に下方修正されたが、その前から行動調査に基づく線量推定からはバースト期の過大評価が予想されていた。その他の線量評価法として、臨界終息作業に従事した者を含む JCO 従業員については、ホールボディカウンタ（WBC）を用いて体内に生成した ^{24}Na 量を評価することにより、中性子外部被ばく線量が推定された。WBC は、JCO 臨界事故を契機として、全国の二次被ばく医療機関にも導入されることになった。

II. 東電福島第一原発事故

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震及びそれに伴う大津波の襲来により、当時稼働中の東電福島第一原発 1~3 号機は炉心の冷却機能を喪失し、炉心溶融から放射性物質の環境放出を伴う大事故に進展した。 ^{131}I と ^{137}Cs の推定放出量は 160 PBq と 15 PBq であり、国際原子力事象尺度（INES）はチェルノブイリ原発事故と同じく最大となるスケール 7 と評価された。原発作業員の線量測定は、津波による個人線量計の喪失やバックグラウンドレベルの上昇などにより困難を極めた。福島県外からの応援者を含む原発作業員の個人被ばく管理は、原発構内の免振重要棟に加えて 20 km 圏境界に位置する J ヴィレッジでも行われた。幸いにも原発事故収束に携わった緊急作業員に急性症状を発症した者は皆無であり、実効線量の最大値は約 680 mSv であり、その大部分は ^{131}I による内部被ばくの寄与からであった。同様な傾向が、事故直後の緊急作業に従事した、比較的高い線量を受けた群に認められた。緊急作業員の内部被ばくが問題となることは早い段階から認識されたために、原発から約 60 km 南に離れた小名浜において、車載型 WBC を用いた内部被ばく線量測定が原子力機構によって開始された。この測定によって内部被ばくの（預託）実効線量が 20 mSv を超過した者については、茨城県にある同機構・核燃料サイクル工学研究所において甲状腺中 ^{131}I の詳細測定が行われた。さらに外部被ばく線量と併せて実効線量が 250 mSv を超過したおそれのあった 7 名については、放医研でも同様な測定が行われた。事故発生から約半年以降は、J ヴィレッジに多数の WBC が設置されたこともあり、緊急作業員の個人被ばく管理は平常に行われるようになった。

福島県住民に対する線量測定・評価について、事故初期を対象としたものに限れば、外部被ばくについては福島県民健康調査の基本調査として行われており、内部被ばくについては国が行った小児甲状腺被ばくスクリーニング検査、福島県からの要請により原子力機構や放医研が行った WBC 測定等がある。事故発生から 4 ヶ月間の外部被ばく線量の推計は、緊急時環境モニタリング等から作られた場の線量率マップと行動データに基づいて行われ、県民の 99% 以上が実効線量で 3 mSv 未満に留まった。一方、内部被ばくについては、2012 年 1 月末までに行われた約 1 万人を対象とした WBC 測定において預託実効線量で 1 mSv を超過したのは僅か 26 名であったが、この評価は ^{134}Cs 及び ^{137}Cs のみを対象としており ^{131}I は含まれていない。これは住民を対象とした WBC 測定が事故発生から数ヵ月以降に開始されたためである。甲状腺に集積する ^{131}I を対象と直接測定については、国が 2011 年 3 月下旬に行った小児甲状腺被ばくスクリーニング検査（1,080 件）の他には、弘前大学と長崎大学が行ったもの以外には殆どなく、住民及び初動対応者（緊急作業員を除く）全体では 1,300 件程度にしか満たなかった。緊急作業員と異なり、若年層を含む公衆については甲状腺内部被ばく線量も注視する必要がある。

る。放射性ヨウ素は他の核種と比べて特殊であり、平均して成人で僅か約 20 g、小児は約数 g である甲状腺に線量が集中することになり、実質的には甲状腺等価線量が内部被ばくによる実効線量を押し上げる形になる。すなわち、 ^{131}I による吸入摂取の場合、甲状腺等価線量は 20 mSv、これに甲状腺の組織加重係数 (0.05) を乗じた数値がほぼ実効線量 (約 1 mSv) に等しくなる。住民の甲状腺線量の推計は、今も一部の研究者により続けられている。

III. 原子力機構大洗研究所におけるプルトニウム内部被ばく事故

2017 年 6 月 6 日、原子力機構大洗研究所 (当時、大洗研究開発センター) 燃料研究棟分析室において、核燃料物質を収納したプルトニウム・濃縮ウラン貯蔵容器の内容物をフード内で点検中、容器内にあるビニールバックが破裂し、同室内にいた作業員 5 名が内部被ばくした。この事故は、プルトニウム内部汚染治療のためのキレート剤 (Ca-DTPA/Zn-DTPA) 投与が行われた国内初の事例となった。作業員 5 名の被ばく線量の最大値は 100 ~ 200 mSv であり、その後も量研により詳細な解析が続けられている。

プルトニウム吸入摂取に伴う内部被ばく線量評価は、排泄率の高い初期便試料を用いて行うことが基本である。ここで初期便とは摂取後 3~5 日間に回収される全便であり、これは初期沈着部位となる呼吸気道から胃に嚥下され、消化管吸収を経ずに便中に排泄されるフラクションである。ただし、初期便中への排泄率は吸入したエアロゾルの粒径に大きく依存するため、その評価が重要となるものの、実際には難しい場合が殆どであり、ICRP 刊行物に与えられる線量係数の計算条件としているデフォルト値 (1 μm 、5 μm) を仮定する 경우가多い。本事例では、プルトニウムとともに ^{241}Am から放出される約 60 keV の γ 線を肺モニタで検出できたことから、 ^{241}Am の肺沈着量と初期便中排泄量の関係から粒径を推定した。また、同様に線量評価に影響する吸入エアロゾルの吸収タイプについては、キレート剤が投与される前に回収された唯一の尿試料の分析結果から決定した。

キレート剤 (Ca-DTPA/Zn-DTPA) による治療は、1 日 1 回、推奨投与量である 1 g を 100 ml の生理食塩水で希釈して点滴投与、これを 5 日間繰り返して 1 クールとし、尿バイオアッセイの結果から治療効果が得られたと判断される場合には、休薬期間を挟んで治療が継続された。治療による線量低減効果の評価は重要であるが、キレート剤を投与しなかった場合の尿中排泄量が分からないため実は難しい。また、キレート剤投与翌日に観測される一過性の尿中排泄量の増加は、体内動態モデルに適切なアレンジを加えることである程度再現できるものの、モデル上は摂取から数日以降はプルトニウムの血中量は相当少なくなることから、元から治療効果は期待できない結果となる。本事例の尿バイオアッセイの結果から治療効果は徐々に減少してゆく傾向は認められるものの、休薬後の各クール初日の尿排泄量にはしばらく増加が認められており、モデルでは考慮しきれきれていない機序があるように思われる。

以上、本稿で紹介した 3 件の被ばく事故事例における線量評価の経験なども踏まえて、発表者が感じた幾つかの課題について触れておきたい。

一点目はグレイとシーベルトの適用範囲の整理である。JCO 臨界事故で重篤な被ばくを受けた 3 名については、これまでに得られた放射線障害の知見に照らして治療方針の決定や予後の推定を行うために、グレイ (もしくは中性子の現実的な RBE を考慮したグレイ・イクイバレント: GyEq) を単位とした線量推定が行われた。推定された中性子と γ 線の各々の吸収線量

を比較すると γ 線の方が大きく、中性子のRBEを1.7とした結果、両者の線量は近い数値になった。他方、その他の者に対して行われた線量推定の多くは、1 cm線量当量で値付けされたサーベイメータで測定された場の線量率（毎時マイクロシーベルト： $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ）に基づいて行われており、中性子と γ 線の線量の比は約10:1であった。この結果は、防護量であるシーベルトに加味される放射線加重係数（当時は放射線荷重係数）に大いに関係していると考えられるが、周知のとおり、同係数は放射線防護の見地から設定されている。中性子の放射線加重係数はそのエネルギーを変数とする関数であり、最大値は100 keVから2 MeVのエネルギー範囲で20(ICRP Publ.60 1990年勧告)である。JCO臨界事故で発生した中性子の平均エネルギーも、このエネルギー範囲内であったと推定される。前述のRBEとは大きくかけ離れた数値であり、グレイとシーベルトが異質のものであることが改めて実感できよう。 α 線についても、細胞不活性作用に関するRBEは3.8であるとの報告がある一方、放射線加重係数はエネルギーに依らず20とされている。

グレイとシーベルトの適用範囲について、前者は確定的影響が問題となる高線量域で、後者は確率的影響が議論となる低線量域で用いるというのが常識的な考えであると思われる。また、高線量と低線量の境界としては、100~200 mGyとするのが大方の見方である。すなわち、この線量域以下では、原爆被爆者のリスクの統計的優位性は検出できないほど小さい。JCO臨界事故の場合は、3名を除けば被ばく線量は100 mSv以下であり、グレイとシーベルトは自然に使い分けることができたが、前述の境界付近の被ばく線量を対象とする場合や α 核種による内部被ばくの場合なども含めて考えると、グレイとシーベルトの適用範囲について、例えば、IAEAの原子力安全文書にある、確定的影響と確率的影響に関する包括的判断基準（GC）を参考にした整理が必要かもしれない。GCの確定的影響に関する基準では、現実的なRBEの数値と取り入れた主要器官のRBE加重吸収線量が示されている。被ばく事故の種類や状況を鑑み、GCの中で着目すべき健康リスクに該当する基準に照らして、グレイとシーベルトの使い分けをすることが考えられる。

二点目は線量評価の運用面や技術面での課題である。本稿で紹介した3件の被ばく事故事例だけを見ても、用いられた線量評価の手法は様々である。被ばく医療における線量評価の目的は冒頭で述べたとおりであるが、その時点で最善と考えらえる線量の推定値をタイムリーに発信することが求められる。これまでに経験した様々な被ばく事故において、何かできて、何ができなかったのか、またそれらの理由は何かを分析し、認識された課題に着実に取り組むことが将来の備えとなる。大規模な放射線災害が発生した場合、先ず優先すべきは高被ばく者をトリアージすることであり、次いで被ばくの可能性がある不特定多数の被災者に対する個人被ばくモニタリングを、混乱を与えることなく、効率よく進めることが重要である。高被ばく者については、さらに詳細な線量評価が必要とされる場合を想定し、準備をしておく必要がある。現在では、人体を精緻に再現した数値ファントムを用いた計算シミュレーションも高速に行えるようになっており、東電福島第一原発の経験を通して広域の環境放射線モニタリング技術もかなり向上した。最新の技術を取り入れつつ、関連分野の人材のコミュニティ構築も図りながら、被ばく事故に対する入念な準備をしておきたい。

パネルディスカッション

座長

明石 真言（東京医療保健大学）

パネリスト

鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック）

床次 真司（弘前大学）

百瀬 琢磨（日本原子力研究開発機構）

栗原 治（量子科学技術研究開発機構）

多様な被ばく事故に対峙する被ばく医療の立場から必要とされる線量評価の質や精度、また今後取り組むべき技術開発等について議論する。

日本放射線事故・災害医学会 編集委員会

編集委員長 明石真言
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

2020年10月1日 Vol. 4 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 明石真言

〒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