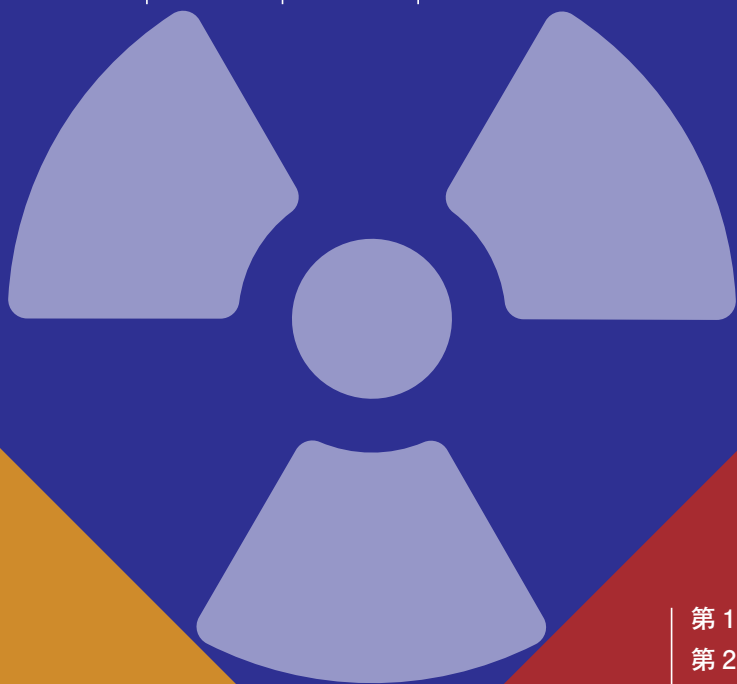


被ばく医療診療 手引き

国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構



- 第1章 被ばく医療の基本理念
- 第2章 原子力災害、放射線事故の特徴と概要
- 第3章 被ばく・汚染の種類・病態生理
- 第4章 医療機関における初期対応診療マニュアル
- 第5章 医療機関における放射線管理
- 第6章 線量評価
- 第7章 医療対応
- 第8章 メンタルヘルス
- 第9章 長期フォローアップ
- 第10章 被ばく・汚染患者の搬送
- 第11章 情報管理と発信

手引き編集にあたって

被ばく医療、つまり電離放射線による被ばく及び放射性物質による汚染に対する医療には、診断、治療、処置に放射線や放射性物質による特殊な内容も含まれる。一方、原子力発電所事故だけでなく、放射線の関わる事故事例がわが国においても少ないながらも発生していることから、統一的な診療方法を記載した文書が関係者および政府機関からも望まれてきた。これらの要望を受けて、高度被ばく医療支援センター連携会議（原子力規制庁により指定されている弘前大学、福島県立医科大学、広島大学、長崎大学の高度被ばく医療支援センターと基幹高度被ばく医療支援センターの量子科学技術研究開発機構による会議）において、被ばく医療診療に関してのマニュアル的文書作成（以降「手引き」と呼ぶ）の必要性が合意され、量研に高度被ばく医療支援センターのみならず関連学会等からの推薦を含む外部有識者も迎えて被ばく医療診療手引き編集委員会が設置された。この度、日本全国の専門家による手引きが完成し、広くノウハウを共有できることは、有事の患者・対応者の利益のために大きな一歩となると考える。

この手引きは、詳細な参考資料ではなく、現場の医療者に被ばく医療にとって必要な基本的方針、知識、手法の要点を、コンパクトに伝えることを主眼としている。高度被ばく医療支援センター職員のみならず、原子力災害拠点病院を含む全国の医療機関で放射線被ばく及び放射性物質による汚染患者を対象として診療をする医療者を主な対象として作成された。また、原子力災害にとどまらず、放射線使用施設での事故や、医療事故、放射性物質を悪用したテロ等、原因の種類によらず活用できる手引きとした。さらに、主に単独の患者の診療を扱っているが、多数傷病者についても触れている。被ばく医療に関する医師の活動の場は、病院の外でも、政府や自治体の対策本部や住民避難に伴う除染の場所など各種考えられるが、本手引きでは病院での診療を主として扱う。

医療は日進月歩である。研究段階の診断法、治療法の記述は項目紹介程度にとどめ、執筆時点で標準的な診断法、治療法に比重を置いている。また、被ばく医療は症例が極めて限られるため、Phase III臨床試験など一般的な医療では重要視されている研究は行われておらず、エビデンスとして必ずしも十分でない診療方針も多くあるが、編集委員会の総意で標準的方针を記載するように努めた。なお、複数の用語が使われる概念については、執筆開始前に編集委員会において可能な限り統一を図った。また、意味を明示する必要を認めた用語には、巻末に用語集を付属資料として添付している。

この診療手引きが、我が国の被ばく医療の更なる充実に資することを期待する。

（令和4年3月吉日 廣橋伸之、熊谷敦史、立崎英夫）

手引きに寄せて（前文）

東日本大地震直後に発災した東京電力福島第一原子力発電所事故では、チェルノブイリ原子力発電所事故を他山の石として学んでこなかったとの声をよく耳にしました。特に、未来のエネルギーで明るい社会を創り、科学技術そして原子力立国を目指した日本の経済界や産業界では、まさに晴天の霹靂であり想定外であったのでしょう。その後のエネルギー政策の転換は、気候変動対策ともリンクし利益優先、効率的・効果的な資本主義一辺倒から、社会共通資本や公益と公正を重視する安全文化の重要性を際立たせています。

一方、東京電力福島第一原子力発電所事故直後の医療現場でも混乱と混迷の極みでしたが、急性放射線障害の発生は皆無であり、明らかな放射線被ばくや環境汚染による直接的な健康影響は、幸いにして現場での作業者や救援者のみならず、福島県の被災住民にも観察されていません。しかし、環境汚染問題と避難に伴う震災関連死や、生活環境の激変による二次的な健康影響は甚大でした。今なお事故の影響は多方面で進行中であり、当時の被ばく医療の危機的対応を生かした対策づくりが継続されています。その一つが被災者の長期的な健康見守りを目指す福島県民健康調査事業です。

さて、重大事故を受けて被ばく医療の過去を振り返ると、チェルノブイリ原子力発電所事故後の緊急被ばく医療への取り組みは迅速かつ包括的であり、将来の原発事故を想定した世界規模のネットワークが構築されてきました。すなわち、国際原子力機関（IAEA）と世界保健機関（WHO）を中心とする非常事態対応の放射線防護の線量基準や介入のガイドラインづくり、そして緊急時対応の連絡網体制の整備から、被ばく医療に関する専門的な知識と技術の供与のための特別な研修訓練と国際会議などの開催です。一方、日本の緊急被ばく医療体制は、1999年のウラン加工工場臨界事故を受けて原子力安全委員会の下で、初期、二次、三次被ばく医療機関体制が整備されていました。しかし、東京電力福島第一原子力発電所事故直後の公衆被ばくへの対応の限界と反省から、新たに原子力規制委員会と規制庁が発足し、現在の高度被ばく医療支援センターと原子力災害医療・総合支援センターの両指定機関の下に、原発立地及び隣接道府県の自治体指定による原子力災害拠点病院と協力機関が整備され、種々の取り組みが開始されています。

ひとたび事が起きると、その対応に腐心する被ばく医療の専門家集団は多職種に及び、法令遵守と関係する知識と技能の効率的、効果的な実践がその責務と役割になります。チェルノブイリ原子力発電所事故も1999年のウラン加工工場臨界事故も、急性放射線障害患者への対応、すなわち高線量被ばく患者の受入れ対応、救命救急措置が最優先課題でした。正確かつ迅速な被ばく線量評価が困難な医療現場では、常に患者対応には困難を伴いますが、それでも稀な事象への準備と対応が不可欠であり、統一的標準テキストやマニュアルが必要となります。同時に、原発事故の経験と教訓から、公衆被ばくの低減と防止措置を目的に大規模な環境および健康モニタリングが必要となり、良質な放射線リスクコミュニケーションが被災住民に対して準備対応されなければなりません。であればこそ、万が一の次の事故対応に向けて、被ばく医療に関わる関係者の真摯、かつ誠実な努力の継続に資するマニュアルが求められます。

今回の手引き作成は、基幹高度被ばく医療支援センターの指定を受けた量研放射線医学研究所としての初めての試みですが、執筆頂いた関係各位、編集委員、ならびに事務局に心から感謝とお礼を申し上げます。歴史に学びつつ不易流行の精神を生かし、統一的な被ばく医療手引き作成の試みが今後も継承され、医療の現場での有効利用、そして事前準備の知識と技能の修得にご活用頂ければ幸甚です。

（令和4年1月吉日 山下俊一）

目次

項目	執筆者	
手引き編集にあたって	廣橋 伸之、熊谷 敦史、立崎 英夫	1
手引きに寄せて（前文）	山下 俊一	2
目次	事務局	3
名簿	事務局	5
第1章 被ばく医療の基本理念		7
1-1 被ばく医療の基本理念	明石 眞言	7
第2章 原子力災害、放射線事故の特徴と概要		9
2-1 原子力災害、放射線事故の特徴と概要	廣橋 伸之	9
2-2 被ばく医療の特徴	廣橋 伸之	11
2-3 放射線事故・災害のタイプ、障害のパターン	廣橋 伸之	12
（囲み記事）各職種の役割	花田 裕之、太田 勝正、吉田 篤史、東 久哉	15
第3章 被ばく・汚染の種類・病態生理		17
3-1 急性放射線症候群（ARS）の病態	佐藤 久志	17
3-2 局所被ばくの病態	西條 広人、田中 克己	21
3-3 内部被ばくの病態	宇佐 俊郎	24
3-4 体表面汚染	山本 尚幸	27
第4章 医療機関における初期対応診療マニュアル		30
4-1 初療	富永 隆子	30
4-2 多数傷病者・複合障害への対応	長谷川 有史	37
（囲み記事）アクションカードの例	橋口 尚幸、吉田 浩二、隅田 博臣	41
第5章 医療機関における放射線管理		46
5-1 放射線管理	吉田 篤史、大葉 隆、小野 欽也	46
（囲み記事）病院外のゾーニング	吉田 篤史	58
第6章 線量評価		59
6-1 前駆症状による線量評価	立崎 英夫	59
6-2 生体試料による線量評価	宮崎 泰司、数藤 由美子、栗原 治	61
6-3 放射線・放射性物質の計測による線量評価	藤淵 俊王、栗原 治	66
（囲み記事）EPR	藤淵 俊王、栗原 治	70
6-4 再構築	栗原 治	71
第7章 医療対応		74
7-1 急性放射線症候群（ARS）の治療	明石 眞言、西條 広人、田中 克己	74
7-2 局所被ばくの治療	西條 広人、田中 克己	81
7-3 内部被ばくの治療	立崎 英夫、松本 謙一郎	86
第8章 メンタルヘルス		91
8-1 メンタルヘルス	重村 淳	91

項目	執筆者	
第 9 章 長期フォローアップ		93
9 – 1 長期フォローアップ	熊谷 敦史	93
第 10 章 被ばく・汚染患者の搬送		95
10 – 1 被ばく・汚染患者の搬送	花田 裕之、立崎 英夫、隅田 博臣、吉田 浩二	95
第 11 章 情報管理と発信		99
11 – 1 情報発信とメディア対応	松井 史郎	99
11 – 2 患者説明	熊谷 敦史	101
11 – 3 リスクコミュニケーション	熊谷 敦史	103
(囲み記事) 国、地方公共団体、事業者の役割	齋藤 陽子	106
付属資料		108
用語集	小川 真澄、熊谷 敦史	108
薬剤リスト	熊谷 敦史	111
主な関係機関リスト	事務局	116
資機材リスト	事務局	117
原子力災害医療体制と具体的運用	事務局	119

名簿

執筆者一覧

執筆者名	所属
明石 眞言 *	東京医療保健大学
東 久哉	広島大学
宇佐 俊郎 *	長崎大学
太田 勝正 *	東都大学
大葉 隆	福島県立医科大学
小川 真澄	自衛隊中央病院 量子科学技術研究開発機構
小野 欽也	川崎市立川崎病院
熊谷 敦史 * 副委員長	量子科学技術研究開発機構
栗原 治	量子科学技術研究開発機構
西條 広人	量子科学技術研究開発機構 長崎大学
齋藤 陽子 *	弘前大学
佐藤 久志 *	福島県立医科大学
重村 淳 *	目白大学
数藤 由美子	量子科学技術研究開発機構
隅田 博臣 *	広島大学
立崎 英夫	量子科学技術研究開発機構

執筆者名	所属
田中 克己	長崎大学
富永 隆子 *	量子科学技術研究開発機構
橋口 尚幸 *	順天堂大学
長谷川 有史 *	福島県立医科大学
花田 裕之 *	弘前大学
廣橋 伸之 * 委員長	広島大学
藤淵 俊王 *	九州大学
松井 史郎	長崎大学
松本 謙一郎 *	量子科学技術研究開発機構
宮崎 泰司 *	長崎大学
山下 俊一	量子科学技術研究開発機構
山本 尚幸 *	原子力安全研究協会
吉田 篤史 *	日本診療放射線技師会
吉田 浩二 *	長崎大学

* 被ばく医療診療手引き編集委員
(50 音順)

被ばく医療診療手引き編集委員会事務局（量子科学技術研究開発機構）

立崎 英夫、西條 広人、小川 真澄、熊谷 敦史、小林 右承、根上 颯珠、千葉 裕子、
安藤 志穂

1-1 被ばく医療の基本理念

被ばく医療とは

フランスの被ばく医療界の長老ネノー（Jean-Claude Nénot）は、放射線事故とは、意図しない放射線被ばくもしくは放射性物質の汚染により、結果として健康影響が現れるか、もしくはその可能性があることを言う、としている¹⁾。この放射線事故に対処するのが被ばく医療である。被ばく医療の対象には、健康影響が現れる可能性までが含まれるため、時間が経過しても障害が現れないことを、状況や線量評価から確認することも被ばく医療の範疇に入るといえる。過去の経験からは、被ばくしたかどうかを、事故状況や線量評価から確認することが求められる事故がほとんどであり、治療を必要とする事故は稀である。この稀な事象についてより具体的に言えば、外部被ばくによる組織反応（確定的影響）、特に早期障害の治療がほとんどである。被ばくや汚染が起きても、治療を要する症状が直後に現れることは通常なく、線量の大きさに応じて時間の経過とともに現れる。2006年のロンドンで起きた大量のポロニウム210による内部被ばくは例外である²⁾。このため線量を正しく評価することが、早期治療の鍵となる。このように被ばく医療では、狭義の医療従事者のみならず、線量評価や放射性核種分析等の専門家との共同作業という点で特殊な領域である。

被ばく医療の基本理念

被ばく医療も医療である以上、医療法でいう「生命の尊重と個人の尊厳の保持を旨とし、医師、歯科医師、薬剤師、看護師その他の医療の担い手と医療を受ける者との信頼関

係に基づき、医療を受ける者の心身の状況に応じて行われること」を基本とすることは言うまでもない。被ばく医療の特殊性を考慮し、被ばく医療の基本理念について述べる。

まず「生命の尊重と個人の尊厳の保持」という観点から、被ばくや汚染の有無にかかわらず、個人の置かれた立場や意思を尊重しながら命に係わる治療を優先させるということである。被ばくや汚染だけであればその治療を行うが、他に直ちに生命を脅かす疾病があれば、その治療を優先して行う。命の視点に立った医療である。

被ばく医療はチーム医療の一つである。医療関係者以外に線量評価や放射性核種分析の専門家がチームの重要な構成員であり、被ばく医療の担い手である。これらの専門家は直接医療を受ける者と接することはあまりないが、被ばく医療の対象は人であり、扱う検体に対しても、受ける者に帰属することを忘れず個人情報保護に努め、医療を受ける者との信頼関係を壊さないように努める。

放射線事故は頻度が少なく、放射線や放射性物質は五感で感じるができないため、その影響はわかりにくく、正しい知識がないと不要な不安や誤解が生じる。過去の歴史を振り返ると差別すら起きていたことが分かる。このため被ばく医療にかかわる警察、消防、海上保安庁、自衛隊等の機関の関係者は、この頻度が少ない医療に関して正しい知識をもつことは必須である。また被ばく医療が「受ける者の心身の状況に応じて行われる」ためには、関係者が受ける側の立場を考慮し、科学的な事実を一方的に押し付けるのではなく、受ける者が正しく理解できるリスクコミュニケーション術を身に着けることが求められる。東日本大震災の経験から学んだことである。

参考文献

- 1) Nénot JC: Overview of the radiological accidents in the world, updated December 1989. *Int J Radiat Biol* 57: 1073-1085, 1990.
- 2) Nathwani AC, Down JF, Goldstone J, et al: Polonium-210 poisoning: a first-hand account. *Lancet* 388: 1075-1080, 2016.

2-1 原子力災害、放射線事故の特徴と概要

Key Point

- 放射線事故・災害は稀であり、予測できない。
- 放射線事故・災害は多彩である。
- 放射線事故・災害に対する我が国の医療体制を知っておく。

放射線事故・災害は、例えば自然災害や一般の事故に比して低頻度の事象であり、多くの医療従事者は一生のうちに経験することはほとんどない。日頃経験することのない事象であるため、放射線についての基本的な知識もしばしば薄らいでしまう。事故・災害のタイプ、パターンは多彩であり、それに対する医療も放射線、放射性物質を扱う事業所、研究所などで発生する数名の事故に対する「緊急被ばく医療」から、原子力発電所で発生する大規模災害に伴う周辺住民の避難までも含む「原子力災害医療」まで、それぞれの特徴を整理しておく必要がある。いずれの状況でも基本は傷病者が、外部被ばく、内部被ばく、体表面汚染のどれに相当するか、あるいは複合するのか、さらには外傷、熱傷や内因性疾患を合併しているのか、など落ち着いて判定し対応することが重要であり、さらに放射線事故・災害では、多数傷病者が発生する可能性があるため、対応する医療従事者は、被ばく医療の基本的な知識とともに救急医療、災害医療の知識・技術を得ておくことが望まれる。

一般に放射線による事故・災害において、まず患者本人が被ばくしたかどうか自覚することは難しく、対応者も検査結果が出なければ、被ばくや汚染を確信するのが難しい。また、極端な高線量被ばくでない限り、症状が出るまでに時間がかかる。患者対応においては放射線に対する基本的知識が必要であり、それがないければ患者、対応者共に不安が強くなる。一方、放射線被ばく、汚染は各種の検査によりその把握が可能であり、患者の生命危機の

観点からは化学・生物兵器に比べ時間的余裕を持って対応できる。さらに被ばくした部位及び線量が推定されれば、その患者に起こりうる症状、合併する障害臓器も推測しやすい。

我が国は1999年のウラン加工工場臨界事故の教訓から「緊急被ばく医療」体制を構築し、全国に初期、二次、三次被ばく医療施設を設定し、それ以降、各地で様々な研修、訓練が開催されてきた。それにより例えば数名の被ばく・汚染患者の受け入れについて、救命を目的とした“包括的で一元的な体制”が整えられていた。しかし、2011年の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故では、複合災害により20 km圏内の初期被ばく医療機関を含む全ての医療機関の機能不全が発生し、「災害弱者」の避難において、医療スタッフの不足により「防ぎ得た災害死」が発生した^{1, 2)}。これはそれまでの「緊急被ばく医療体制」の崩壊というより、自然災害に「放射線」という「人工災害」が付随したことで、事故発生当時20 km圏内への災害医療支援が困難になってしまったという「災害医療体制」の崩壊であったといえるかもしれない。一方で、広範囲に放射性物質がブルームとして拡散されたことによる住民避難に伴うリスクコミュニケーション、メンタルヘルス、生活習慣病への影響など、発災直後から現在まで、原子力災害、放射線事故に対応する医療従事者が関与する分野は広く、多職種、多領域の分野の関係者とスムーズに連携できる能力も求められる²⁾。

東京電力福島第一原子力発電所事故に伴

う「防ぎ得た災害弱者の死」の教訓も踏まえ、2015年に原子力規制庁により新しい原子力災害医療体制が設定された。高度被ばく医療支援センター、原子力災害医療・総合支援センターが設置され、原発立地県、隣県に原子力災害拠点病院、原子力災害協力機関が指定・登録され、原子力災害医療派遣チームおよび原子力災害医療・緊急被ばく医療の中核となる人材の養成が進んでいる。この人材養成の対象はあくまで原発立地県、隣県の医療スタッフであり、その他の地域では統一化された教育システムは存在しない。「放射線」に関連した事故・災害はどの地域でも起こりうるものであり、早急な対応が望まれる。

参考文献

- 1) Tanigawa K, Hosoi Y, Hirohashi N, et al: Loss of life following evacuation: lessons learned from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. LANCET 379: 889-891, 2012.
- 2) Hasegawa A, Tanigawa K, Ohtsuru A, et al: Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima. LANCET 386: 479-488, 2015.

2-2 被ばく医療の特徴

Key Point

- 被ばく医療の対象は「外部被ばく」「内部被ばく」そして「体表面汚染」である。
- 高線量被ばくや重度の内部被ばく、大量の体表面汚染があったとしても即死することはないため、落ち着いて対応する。
- 事故・災害に伴う外傷等による生命危機に対する蘇生を優先する。

被ばく医療の対象は「外部被ばく」、「内部被ばく」そして「体表面汚染」である。事故、災害状況によりそれらは組み合わせること、さらに外傷・熱傷や熱中症、内因性救急疾患（急性冠症候群や脳卒中など）が合併することを念頭に置き対応する。高線量被ばくや重度の内部被ばく、大量の体表面汚染があったとしても即死することはないため、落ち着いて対応する。初療時に外傷等による生命危機が判明した場合は蘇生を優先する。一方、早急な治療は必要でないが、長期的な医学的フォローアップが必要となる者や、治療は必要でないが、丁寧な説明が必要となる人々（worried well）も地域の医療機関が対応すべき対象となる。何れにせよ、日常の傷病者対応の中で、「放射線」や「放射性物質」が影響を与える病態であることから、そこに線量評価と放射線防護という2つの非日常的な行動が加わることで、「不安」を感じてしまうであろう。「見えない」「臭わない」「（極めて高線量の外部被ばくを除き）症状の発現が遅い」という特徴を持つ「放射線」や「放射性物質」を「正しく怖がる」ためには、「見える化」のための線量評価のスタッフの協力が必須であり、患者の初療においては診療放射線技師の役割が重要となる。さらに、放射線事故・災害の状況についての事前情報が乏しければ「外部被ばく」単独でない限り、施設・資機材の養生や個人防護装備などの装着が必要となるが、汚染の状況に応じた適切な防護対策となるように心がけたい。

我が国は、唯一の被爆国であるという歴史的事実に加え、第五福竜丸事故、ウラン加工工場臨界事故、そして東京電力福島第一原子力発電所事故により、依然として国民は「放射能」「放射線」「放射性物質」という言葉に対して少なからず敏感であることは否めない。勤務する医療施設に、もし突然「被ばく傷病者」が搬入されるという情報が入ってくれば、研修や訓練を受けていない職員は動揺するかもしれない。被ばく医療に携わるスタッフは、患者への説明に加え、風評から生まれる差別や偏見に対応する場面に立つ可能性もあり、基本的な放射線医学やリスクコミュニケーションの知識をスタッフ間で共有して整理しておく必要がある。

2-3 放射線事故・災害のタイプ、障害のパターン

Key Point

- 放射線事故・災害のタイプから、被ばくの形態（外部被ばく、内部被ばく、体表面汚染）および外傷・熱傷等との複合受傷かを判断する。
- 「放射線」という言葉から起こりうる患者のメンタルヘルスの変化に注意する。

放射線事故・災害のタイプ

放射線事故・災害により傷病者が発生し、搬送されることになった際、はたして外部被ばくなのか、内部被ばくなのか、それとも体表面汚染なのか、あるいは外傷や熱傷等を合併しているのか、を予想するために事故の規模（人数）、発生場所の情報は重要である。表1に代表的な放射線事故・災害のタイプを挙げる¹⁾。一方、これらすべてのタイプにおいて傷病者は、「放射線に被ばくした」「放射線物質に汚染した」「体内に放射性物質が入った」など、「放射線」による健康影響への不安や、将来出現するかもしれない放射線の影響に対する不安が長く続き、メンタルヘルスが悪化する可能性がある。さらに信頼できる情報の不足や、逆にインターネット等による（必ずしも正しくない）情報過多もその増悪因子となる。さらに、被ばくや汚染した患者に対する、社会からのいわれなきスティグマや差別が、メンタルヘルスを更に悪化させる。

1 原子炉事故

何らかの原因により、冷却水が喪失し原子燃料の破損が発生した場合に発生する。燃料格納容器の破損や、大規模にベントを行った場合、現場作業員や周辺一般住民が高線量被ばくする可能性がある。広範囲にわたり環境汚染が発生し、一般住民はブルームや地表からの外部被ばくや、内部汚染につながる可能性がある。

2 臨界事故

一定量以上の核分裂物質が不注意な作業などで核分裂を起こした場合に発生する。一般的に、臨界時には高レベルの放射線（中性子線やγ線）放出が伴い、現場に近接している人は致死的な非常に高い線量を受ける可能性がある。中性子による外部被ばくにより体内の元素が放射化し、それを検出できることがある（例：ナトリウム24）。遮蔽物などの状況によるが、周辺の一般住民も中性子線により低線量被ばくする可能性がある。

3 危険な線源の紛失・盗難

放射線治療や非破壊検査に使用される線源の紛失や盗難により、線源の性質や危険性を知らない人が、それを扱ったり壊したりするうちに、全身または局所への高線量被ばくや、内部被ばくまたは体表面汚染が生じる可能性がある。

4 工業用線源の誤用

産業用X線（エックス線）撮影手順に従わないなど、曝露管理を怠ると、直近の作業エリアにいる作業員が不用意に過剰被ばくしてしまい、全身の高線量被ばくで死に至ることがある。何らかの理由で線源に触れると、重篤な局所放射線障害を負うことがある。

5 医療施設における事故

医療における偶発的な高線量被ばくは、照射線量の計算ミス、X線装置や加速器の不適切な作動、あるいは診断や治療中に意図しない高放射線量が照射された場合などに生じる。

表 1. 放射線事故のタイプと起こりうる健康障害の特徴（文献 1 より引用・改変）

タイプ	放射線による影響					付随する影響				複合 外傷	傷病者数		症状発現	
	組織反応 (確定的影響)		確率的影响		体表面汚染 もしくは 内部被ばく	単外傷	心理的影響		限定的		多数	敷地内	敷地外	
	ARS	LRI	検出 可能性 有	検出 可能性 なし			限定的	広範囲						
原子炉事故 (原子力発電所、 研究用原子炉)	+ / -	+ / -	+ / -	+	+ / -	+ / -	-	+	+ / -	+	+ / -	+	+ / -	
臨界事故	+ / -	+ / -	-	+	+ / -	-	+	+ / -	+ / -	+	-	+	-	
線源の 紛失・盗難	+ / -	+ / -	-	+	+ / -	-	+	+ / -	-	+	+ / -	+	+ / -	
工業用線源の 誤用	+ / -	+ / -	-	+	+ / -	-	+	+ / -	-	+	+ / -	+	+ / -	
診断・治療に おける過失使用	+ / -	+ / -	-	+	+ / -	-	+	-	-	+	-	+	-	
輸送中および 実験室での事故	-	-	-	+	+ / -	+ / -	+	-	+ / -	+	-	+	-	
放射性物質の 悪用	+ / -	+ / -	-	+	+ / -	+ / -	-	+	+ / -	-	+	+	+ / -	
空気、食品、水の 放射性物質汚染	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	NA	+	

6 放射性物質輸送時の事故

原子力産業の製品、産業用および医療用の放射線源、医療用の放射性医薬品は道路、鉄道、航空、海路で輸送される。例えば医療用の放射性医薬品輸送中の事故に伴い、輸送容器が破損し、外部被ばく、内部被ばく、体表面汚染を起こす可能性がある。

7 RI 実験室・病院 RI 検査室での事故

放射性同位元素を用いた実験や検査において、液体状の放射性物質や気体、パウダー状の放射性物質を使用しており、取り扱いのミスによって内部被ばく、体表面汚染を起こす可能性がある。一方、照射装置の取り扱いミスによって外部被ばくが発生する可能性もある。

8 戦争、テロなどによる放射性物質の悪意ある使用²⁾

8.1 核兵器や簡易核装置 (improvised nuclear device: IND) の爆発

核兵器や IND の爆発により、熱、光、気圧、放射線の強烈なパルスを発生し、放射性降下物（放射性プルーム）が発生する。爆発地点の近くにいる人は、即死、重症外傷、熱傷、失明（フラッシュブラインド）とともに高線量被ばく、内部被ばく、体表面汚染の可能性がある。また放射性核分裂生成物の散布により広く周囲が汚染される。

8.2 ダーティボムまたは放射性物質散布装置 (radiological dispersal device: RDD)

ダーティボムとは、ダイナマイトなどの爆発

物に、放射性物質を含む粉末やペレットを混合させたものである。RDD としても知られている。ダーティボムは、核兵器や IND のように核爆発を発生させることはできない。ダーティボムが爆発すると、その爆風によって放射性物質が周囲に拡散する。ダーティボムの主な危険性は爆発によるものであり、重症外傷や物的損害を引き起こす。もし爆発地点に非常に近い場所にいれば、高線量被ばくの可能性もある。ダーティボム性物質を含んだ粉塵や煙は遠方まで広がり、体表面汚染や、粉塵の吸引や汚染された水・食物の摂取により内部被ばくを起こす。

8.3 放射性物質曝露装置 (radiological exposure device: RED)

RED は放射性物質を公共の場（電車やバスの座席の下、フードコート、人通りの多い通路）など人目につかないように隠して、知らないうちに人々に外部被ばくさせることができる。RED の主な危険性は放射性物質の種類と量、装置の近くにいた時間、被ばくした身体部位に依存する。高線量被ばくにより急性放射線症候群 (acute radiation syndrome: ARS) や局所放射線障害 (local radiation injury: LRI) を発症する可能性がある。

8.4 食品・飲料水への意図的な放射性物質の添加

意図的に食品や製品が汚染された場合には、摂取の際の内部被ばく、体表面汚染が予想される。一般に、多数の一般住民が重大な被ばくを受ける可能性は極めて低いが、店頭の製品の汚染などにより少数の人々が重大な被ばくをする可能性はある。

放射線事故・災害による障害のパターン

放射線事故・災害において被災者は外部被ばく（局所、全身）、内部被ばく、体表面汚染、事故・災害に付随する外傷・熱傷のうち、1つまたは複数の障害を受けている可能性がある。

放射線事故・災害による患者の受け入れにおいて、これらすべての原因を考慮して評価する¹⁾。

1 外部被ばく

外部被ばくは、個人が体外の放射線源からの放射線を受けることを言い、被ばく線量はごく低線量のこともあれば、死に至るようなごく高線量のこともある。外部被ばくには、全身、部分、局所がある。

2 内部被ばくと体表面汚染

内部被ばくと汚染は、放射性物質（固体、液体、気体）が環境に放出された場合に生じる。作業員、対応要員、または一般住民は、そのような放出に伴い内部被ばくや体表面汚染が発生する可能性がある。大量の放射性物質による内部被ばくは死に至る被ばくを臓器・組織にもたらす可能性がある。大量の放射性物質による体表面汚染は、重度の放射線皮膚障害を引き起こす可能性がある。

3 複合障害

火災や蒸気漏れ、発災時の集団パニック行為など事故・災害に伴う通常の外傷、熱傷、感染症等のあらゆる傷病に、その予後や回復機構に影響を及ぼす程の放射線障害を伴う状態を指す。「複合障害」には複数の定義があるが、本書では放射線事故・災害に伴う放射線被ばく・放射性物質汚染による組織・臓器の放射線障害と、放射線事故・災害に伴い発生した外傷・疾病の複合病態と定義する。ダーティボム・RDD などによる爆発・パニックにより多数の複合障害患者が発生する可能性がある。

参考文献

- 1) IAEA: Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency: EPR-MEDICAL, 2005. <https://www.iaea.org/publications/7213/generic-procedures-for-medical-response-during-a-nuclear-or-radiological-emergency>（アクセス日 2021-12-21）
- 2) Advanced Hazmat Life Support: AHLS for Radiological incidents & terrorism 4th edition. The American Academy of Clinical Toxicology: 2016.

各職種の役割

医師の役割

医療における医師の役割は、医療チームの中心となって診療を行うことである。被ばく医療の場合は、一般医療に加えて放射線に関する防護措置や除染、線量評価などが必要でより多くの職種が関与する。医師は診療のみならず、このチーム全体の指揮も必要となる。防護措置を行いながら養生された空間で多職種が関与して行うホットゾーン内の医療処置は、訓練していても不十分になることが多く、ホットゾーンの中だけでなく外で全体を指揮する医師がいると円滑である。現場医療だけでなく、院内対策本部や自治体対策本部での対応も必要である。院内では院内各部署との情報共有やマスコミ対応も求められる。自治体の対策本部では消防や警察、自衛隊、自治体対策本部、原子力災害医療・総合支援センターなどとの連携も求められ、一般的災害医療知識のみならず、被ばく医療に関する知識をもった医師が複数必要である。このため医師を含んだ原子力災害医療派遣チームが全国の原子力災害拠点病院に養成されている。また、慢性期には避難者の放射線に関する健康相談なども求められる。

看護師・保健師の役割

1999年のウラン加工工場臨界事故を受けて「緊急被ばく医療のあり方について」の検討が本格的にはじまった¹⁾。そこでは、様々な分野の専門家、関係者の連携の必要性が強調されていたが、その中の医療関係者について当初は医師以外の医療関係者は、明確に示されていなかった。とりわけ看護師は医療施設に搬送されてきた被災者の治療に医師とともに当たる重要な役割をもっている。一方、保健師は、被災地から避難してくる住民たちのスクリーニング(被ばくや汚染状況、健康状態など)など、

その後の措置(被ばく線量の評価、除染の必要性、そして医療処置の必要性など)に影響する大きな役割を担う。議論の中で、これら看護職とともに診療放射線技師などの医療関係者の役割がきちんと位置づけられるようになった。

もう少し具体的な役割について示す。原子力防災指針や原子力防災会議の原子力災害対策マニュアルなどには、看護師の役割についての具体的な記載がないので、上記資料に基づいて示す¹⁾。看護師には、医療機関又は要請に応じて派遣された場所において、被ばく患者等の看護を行うという一次的な役割とそれに伴う被ばく患者の搬送への随行という役割が示されている。医療機関における初動対応では、直接的な看護とは別に、不要な機器の移動又は養生、防水シートを用いた処置台の養生、治療や検体採取、除染などのデータの記録、さらには、検体の保存、放射性廃棄物の一時保管場所の確保などの役割も求められている¹⁾。一方、保健師には、周辺住民等に対する保健指導が求められている。日頃から住民と向き合っている保健師の住民との信頼関係がその基盤となる。

なおこれらの遂行には、放射線防護と放射線による健康影響についての基礎知識が不可欠であるが、看護基礎教育の現状はそれにしつかりと応えられていない。そのため、量子科学技術研究開発機構や原子力安全技術センターなどが、被ばく医療に従事する看護師等への研修を行っているが、病院等では定期的な配置転換などもあり、研修を受けた看護師の定着には課題が残されている。現在、日本放射線看護学会では、看護基礎教育および大学院課程における放射線看護教育の普及発展の活動を始めており、近い将来、放射線防護と放射線による健康影響についてしっかりとし

た知識を持った看護師、保健師が被ばく医療における重要な役割を担ってくれるようになることを期待している。

診療放射線技師の役割

原子力災害における被ばく医療では、放射線や放射性物質に関する専門的知識が必要とされる。被ばく患者の傷病の状態を勘案して、出来る限りの汚染拡大防止措置を講じることが大切である。スタッフの被ばく管理、サーベイメータを用いた傷病者の汚染検査、記録、線量評価などを行いつつ、汚染拡大防護措置を行った放射線管理区域に準じる区域の管理および診療で発生した放射性廃棄物の管理なども重要な役割である。

ロジスティック担当者の役割

原子力災害時における被ばく医療は、頻度の低い医療であることから、病院として、また医療チームとして、円滑に医療が行える体制、環境づくりがたいへん重要であり、その役割の一翼を担うのがロジスティクスである。

有事に備え平時から管理的な立場、病院組織の一員として次のことに積極的に参画する必要がある。

- 医療活動マニュアルや事業継続計画 (business continuity plan: BCP) など院内関係規程の作成と定期的な見直し
- 病院管理者を含む院内スタッフ全員への教育・研修と定期的な訓練の実施
- 恒常的な人材育成 (特に中核人材や医療チーム構成員の確保)
- 院内での被ばく傷病者の医療処置を行う場の設置と搬送の動線設定
- 特殊な医療資機材を含む必要物品の確認と備蓄
- 院内の関係部署間の認識共有や外部関係機関との連絡体制の構築
- マスコミ対応の一本化

一方、派遣時など医療チームとしてのロジスティクスは、チームリーダー(医師)の指示の下、次のことなどが求められる。

- 医療処置活動の場の養生
- 傷病者の動線の確認
- 必要な医療資機材や通信機器等の準備と確認
- 医療処置時の傷病者情報やクロノロジーの記載用務
- 派遣移動時の車両運転、活動における連絡調整

被ばく医療における医療チームでは、災害医療の知識が豊富な災害派遣医療チーム (disaster medical assistance team: DMAT) のロジスティクスが兼ねるケースが多いと思われる。DMATの知識に原子力災害、放射線に関する基礎知識などを備え、ロジスティクスは平時から被ばく医療における新たな情報にアンテナをはり、円滑な被ばく医療活動の実施に備えていただきたい。

以上、記した内容は一例であり、病院組織の事情や災害状況により足りない事象もあると思う。頻度の低い医療の備えとして、色々と考えていく過程で整理したことが、有事の際に必ず役に立つ。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会：緊急被ばく医療のあり方について、2001.

3-1 急性放射線症候群 (ARS) の病態

Key Point

- ARS に対しては、線量評価の専門家のみならず、多臓器不全に対応する多職種 of 専門家による集学的対応が必要である。
- 染色体解析により詳細な線量評価が可能である。
- 原発事故等に際しては、医療者も「放射線被ばく」に意識が偏りがちであることを認識し、丁寧な問診と診察を心がける。

ARS の定義

人体の組織や臓器には特有の生体機能があり、それぞれが連携することにより生命を維持している。全身に高い放射線を被ばくすると、機能の低下・連携の破綻が生じ、生命維持に大きな影響を及ぼす。1 Sv (1,000 mSv) を超えるような被ばくを短時間で全身に受けた場合、複数の臓器に組織反応が生じ、多臓器障害を認めるようになる。このような全身への放射線被ばくによる多臓器不全をベースとする変化を急性放射線症候群 (acute radiation syndrome: ARS) と呼び、1950 年頃から広島・長崎の被爆や原子力災害の調査で報告され始め、最近では 1999 年のウラン加工工場臨界事故でも報告された。病態としては多臓器不全がベースであり、その治療に関しては血液内科・感染症内科・消化器科・皮膚科など多数の医療専門家の参加が必須である。また、治療方針決定において被ばく線量評価情報は重要となるため、保健物理士や染色体分析の専門家などの放射線に関する専門家チームの参加も必要となる。

物理的側面からみた特徴は、深部臓器に到達可能なγ線 (ガンマ線) や中性子線等による全身性かつ不均等な外部被ばくが強く影響する事である。β線 (ベータ線) は皮下数 cm で消失することから、その被ばく影響は主に皮膚に集中し、皮膚放射線障害 (cutaneous

radiation syndrome: CRS) として対応を考えていく必要がある。原子力災害や放射線テロでは、多数の患者に ARS・CRS に外傷が加わった複合障害が合併して発生する事が予想され、的確なトリアージと現場判断を行い、限られた医療資源を有効に活用することが求められる。

生体影響からみた特徴は、被ばくを受けた組織・臓器ごとに放射線感受性が異なるため、症状とその出現時期に差が生じる事である。生命維持に大きな影響を与え、かつ感受性が高い組織・臓器としては、骨髄・消化管粘膜・皮膚・血管などが挙げられる。年齢や個人差もあるが、組織障害による変化が主体となるため、各臓器の被ばく線量と体積の大小により症状は決定される。臨床症状に加え、正確な線量評価が治療方針の決定に重要な情報となる。また、精神的なストレスも大きいことも考慮に入れ、精神的影響への対応も必要となってくる。

時間経過の側面から見た特徴として、症状の有無より前駆期・潜伏期・発症期・回復期に分けられる。前駆期には、一過性に悪心・嘔吐・下痢・発熱・頭痛などの症状が認められる。浮腫や毛細血管の透過性亢進による充血・消化管ホルモンの一時的放出等による症状と考えられており、48 時間程度で改善することが多い。緊急被ばく医療において ARS を疑う場合には、前駆期の症状を把握する事で

被ばく線量の予想ができるため、丁寧な問診・症状観察が重要となる。前駆症状と被ばく線量の関係は明らかとなっており、「6-1 前駆症状による線量評価」で詳述する。被ばく後、2 時間以内に初期診察を行うと仮定すると、嘔吐・頭痛・下痢・発熱をしっかりと観察記録することにより大まかな全身被ばく線量が推定できる。また、唾液腺由来の血中のアミラーゼ値が上昇することが特異的であるが、全例に認めるわけではない。採血時にアミラーゼの分画を調べると参考となる。骨髄移植時に行われる全身照射でも同様の症状が認められる。潜伏期に入ると、組織反応（確定的影響）による細胞死が組織臓器障害を引き起こすまで一定の時間を要するため、一時的に症状は改善・無症状となる。被ばく線量が大きいほどその期間は短くなる。発症期に入ると、造血組織障害・消化管障害・神経血管障害・皮膚障害などが進行性・同時に発生してくる。その後、各臓器障害に対する医療的な対応が奏功した場合に回復期に入るが、晩発障害としての肺線維症や皮膚線維化などに対する加療継続が必要である事と確率的影響としてのがん死亡リスク上昇に対して、長期間の健康管理が必要となる。現代医学の限界として 8 Sv 以上の全身被ばくを受けると臓器機能の回復が困難となり、残念ながら患者は死亡してしまうと言われている。

造血組織系

発症期にまず認められるのが、放射線感受性の高い骨髄障害による造血機能低下である。500 mSv 以上の線量で発生し、リンパ球数の変化による線量評価がある程度可能であるため、採血を行い記録として残す必要がある。

具体的症状として白血球数低下による易感染性・血小板数低下による出血傾向等が挙げられる。その程度は、全身の骨髄の被ばく線量により変化するが、医療による全身照射とは異なり、不均等な照射となるため、被ばく線量の少ない骨髄に残った骨髄から機能回復

が認められる事が多く、最終的には回復することが多いと言われている。しかし、一定期間造血組織機能が低下するため、1-2 週の顆粒球コロニー刺激因子 (Granulocyte Colony Stimulating Factor: G-CSF) や PEG-G-CSF 等の骨髄刺激因子の投与や血小板輸血等や、感染に対する対策として抗生剤の投与などを行う必要がある。

臍帯血移植や骨髄移植の適応に関しては、骨髄抑制期間の維持管理としては有用と考えられるが、自己骨髄回復による移植片に対する宿主免疫により最終的に排除されてしまう報告が多く、治療適応に関しては慎重に判断すべきである。一般的に 4 Sv の全身被ばくを受けると 50% の確率で感染症により死亡するとされているが、適切な医療により骨髄機能の回復・感染症のコントロールができれば、回復期に入り通常生活に復帰できる可能性が高くなる。

消化器系

腹部に 10 Sv 程度の被ばくを受けると骨髄障害に続いて消化管障害が出現してくる。小腸粘膜の上皮は腸腺窩の基底部にあるクリプト細胞が分化し 3-4 日で新しい細胞に置き換わり機能を維持している。腸管に大きな被ばくが生じるとクリプト細胞は退化し、腸管粘膜の再生が障害され、高度の下痢や腸管出血を認める。感染バリアの障害による敗血症などの症状も呈してくるため、水分喪失に対する補液・貧血に対する輸血・感染に対して腸選択的消化管除菌や抗生剤投与が行われる。粘膜再生に対するサポートとして、L-グルタミン投与やケラチノサイト増殖因子の投与などが行われている。肝臓・腎臓などの臓器の放射線感受性は比較的低いと考えられているが、晩発障害として閉塞性静脈障害のために機能低下を認める事がある。

その他の臓器系と多臓器不全

皮膚障害に関しては、主にβ線（ベータ線）の線量分布による変化と考えられ、β線熱傷などと表現されているが、γ線（ガンマ線）等でも皮膚の基底層に障害が起きると、晩発障害として線維化による拘縮などが強く認められる。詳細な病態や治療に関しては「3-2 局所被ばくの病態」を参照のこと。

前駆期に神経症状を認める場合には、少なくとも 6 Sv 以上の被ばくを受けた事が示唆されるため、外傷による意識障害が否定されれば、高度被ばく支援センターへ連絡し、ARS

としての治療が可能な施設への搬送が必要となる。

ARS の本体は、造血組織・皮膚・消化管・神経血管の障害が複合した病態と考えられるようになり、それぞれの症状をスコア化しその結果により治療ステージを決定するような新しいコンセンサスができつつある¹⁾。表 1 に骨髓機能障害のスコアを示し、図 1 には、スコアリングより決定された 4 つの治療カテゴリとの関係を示したシェーマを示す。

8 Sv を超える全身被ばくを受けた場合には、現代医学で救命することが難しくなっており、身体的・精神的苦痛が強い場合には緩和的な治療も考える必要がある。

表 1. 骨髓障害強度分類表（文献 1 より引用・改変）

リンパ球や血小板数・出血の症状などにより、骨髓障害の程度を 1-4 に分類している。骨髓以外に、消化管・皮膚・神経血管障害の強度分類がある。その結果より治療カテゴリを決定するロジックとなっている。

症状の程度	1	2	3	4
リンパ球数 (/μL)	1,500 ~	1,500 ~ 1,000	1,000 ~ 500	~ 500
顆粒球数 (/μL)	2,000 ~	2,000 ~ 1,000	1,000 ~ 500	~ 500
血小板数 (/μL)	10 ~	10 ~ 5	5 ~ 2	~ 2
感染 兆候	無し	局所	全身	敗血症
抗生剤投与	不要	局所投与	経口投与	頸静脈投与
出血・出血傾向	点状出血・紫斑	軽度出血	大きな出血	持続性出血
ヘモグロビン値	正常	10% 低下	10-20% 低下	20% 以上の低下

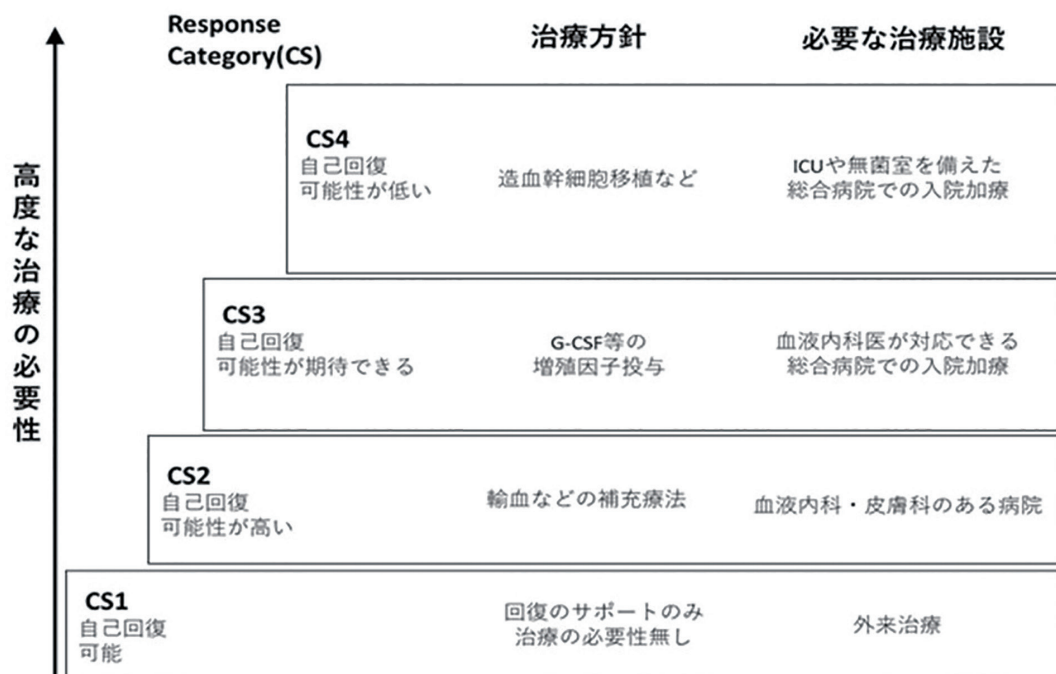


図 1. 治療カテゴリを示したシェーマ図

治療カテゴリを決定することにより、治療方針や治療に必要な病院機能を決定できる。

参考文献

- 1) Gorin NC, Fliedner TM, Gourmelon P, et al: Consensus conference on European preparedness for haematological and other medical management of mass radiation accidents. Ann Hematol 85: 671-679, 2006.
- 2) 前川 和彦, 千葉滋: 第5章 緊急放射線症候群の診断と治療. 緊急被ばく医療テキスト, 医療科学社, 東京, 2004.

3-2 局所被ばくの病態

Key Point

- 皮膚放射線障害 (CRS) は急性放射線症候群 (ARS) の一病態であり、局所放射線障害 (LRI) は局所への高線量被ばくで生じる。
- 急性の放射線皮膚障害では線量が高くなるほど壊死などの重篤な症状を示す。晩発障害としては皮膚悪性腫瘍が問題となる。
- 骨軟部組織の被ばくは放射線照射誘発肉腫を生じる可能性がある。

皮膚の被ばくに対する病態

1 皮膚放射線障害 (CRS) と局所放射線障害 (LRI)

放射線照射に伴う皮膚障害には、体幹へのおよそ 1 Gy 以上の全身放射線被ばく後、数分から数週間の比較的早期に生じる急性放射線症候群 (acute radiation syndrome: ARS) の臨床症状の一病態としての皮膚放射線障害 (cutaneous radiation syndrome: CRS) があるが、これは放射線照射に伴う皮膚および皮膚付属器の局所の病態生理学的反応である局所放射線障害 (local radiation injury: LRI) とは異なる用語である。CRS と LRI は混同されて用いられることがあるが、LRI は CRS と異なり ARS に関連して発生するものではない。β線 (ベータ線) や低エネルギー X 線による急性被ばくでは、γ線 (ガンマ線) に比べて透過性が低く、深い臓器に浸透して ARS を引き起こすには不十分となりやすく、LRI が生じやすい。LRI は放射線源に誤って接触するか、治療目的の放射線照射などによって極めて局所的に放射線障害を受けた場合や、放射線の透過力が深部臓器に ARS を引き起こすには不十分であった場合に発生し、いわゆる放射線皮膚炎 (Radiodermatitis, Radiation dermatitis) や皮膚放射線反応 (Cutaneous radiation effects) と呼ばれるものと同義である。また Cutaneous radiation injury

(CRI) と呼ばれることもあるが、これらの用語は文献によって異なり、未だ統一がなされていない。本手引では ARS に伴う一連の全身性皮膚障害を CRS、ARS を伴わない皮膚組織のみに限局した放射線照射による症状を LRI として扱う。LRI は重篤な感染や悪性腫瘍の合併がなければ生命を脅かすことはあまりないが、慢性的な痛み、萎縮や組織切断に伴う外観の劣化など、QOL (生活の質) に影響を与える障害を引き起こし、生涯にわたる医学的介入の必要性につながる可能性がある。

2 放射線皮膚障害の臨床症状および組織学的変化

放射線照射による皮膚障害は、表皮、真皮および血管系の細胞構造に対する放射線の直接的な障害と、それに続発する炎症反応が原因で発生する。放射線照射後の皮膚組織の障害は早期障害と晩発障害に区別することができる。早期障害は、放射線照射後数時間以内に、血管作動性アミンや毛細血管の拡張により初期の一過性の紅斑、熱感、かゆみを生じることがある。この段階の期間は 1-2 日である。その後、数日から数週間は障害が認められない潜伏期が存在する。体の部位にもよるが、線量が大いほどこの期間は短くなる。顔、胸、首の皮膚は、手のひらや足の裏の皮膚に比べて皮膚が薄く潜伏期が短い。照射後数日から数週間の潜伏期を経て、生存細胞の増殖により皮膚基底細胞層が再形成される。この

段階では、再度の紅斑、熱感、軽度の浮腫が始まり、後に色素沈着を伴うこともある。その後の症状は、重症度に応じて、乾性 / 湿性落屑、水疱形成や潰瘍から壊死に至るまで様々である (表 1) ¹⁾。また毛包の損傷による一時的脱毛や爪甲剥離といった症状が数週間続くことがある。血管内皮の損傷は TGF- β をアップレギュレートし組織の線維化をきたすが、この組織線維化と低酸素により生成された活性酸素が、皮膚の炎症性サイトカイン産生を促進する。比較的浅い潰瘍や極小範囲の潰瘍であれば上皮化や創部の収縮により治癒することもあるが、高線量が照射された部位や真皮層の血流障害の程度によっては、晩発障害として壊死組織を伴う潰瘍を形成する。

照射線量が一定以上の場合、照射から半年以上経過した後にもみられる晩発障害として真皮の萎縮や菲薄化、皮膚・皮下結合組織の線維化、色素沈着 / 色素脱失、小血管の閉塞とそれに伴う血液供給の障害 (毛細血管拡張)、リンパ管網の破壊、角化症や爪甲剥離を生じる。また皮膚付属器である汗腺・脂腺や毛包の損傷は、皮膚乾燥や恒久的な脱毛をきたす。これらの皮膚組織の変化は、創傷治癒の遷延を引き起こすため恒常的な難治性潰瘍の発生源となる。また慢性の癬痕性病変からは、後年皮膚悪性腫瘍を発生する可能性がある。照射後から悪性腫瘍発生までは通常およそ 10-20 年以上を要すると言われている。これは熱傷癬痕などの外傷後の癬痕組織に生じる皮膚悪性腫瘍であるいわゆる

Marjolin 潰瘍の発現までの期間に比べるとやや短い。組織学的には基底細胞癌が最も多く、ついで有棘細胞癌が続く ²⁾。基底細胞癌は障害が軽度な部位に発生し局所浸潤性の低いものが多いのに対して、有棘細胞癌は高度の放射線障害部位に発生し悪性度の高いものが多い。また照射部位の癬痕化、線維化は皮膚の硬化をきたす。関節可動部近くの病変が著しい硬化をきたした場合、可動域制限を生じる。

3 熱傷との相違点

CRS は病態や治療法において熱傷と共通する部分が多いが、異なる点もある。熱傷は熱によって皮膚組織のタンパク質変性を伴う細胞および組織の壊死が起こり、激しい炎症反応を生じ、真皮浅層までの比較的浅い熱傷 (I 度熱傷 - 浅達性 II 度熱傷) では激しい痛みを有するという特徴をもつ。一方、放射線熱傷では放射線による細胞の DNA 損傷が主体であり、非常に高線量の場合を除いて初期には疼痛を感じることはほとんどなく、また線量によって症状の発現時期が異なり、一般的には臨床的变化の発現が熱傷と比べて数日から 1 週間以上と著しく遅れるという特徴がある。また皮膚に存在する細胞の種類により放射線に対する感受性が異なり、一様にすべての細胞が影響を受ける熱傷とはこの点でも異なる。局所放射線障害 (LRI) では非特異的な臨床所見や疼痛の無自覚により、医療機関の受診の遅れや早期での診断が困難となることも予想される。

表 1. 皮膚への放射線線量と障害発症の時期 (文献 1 より引用・改変)

症状	線量 (Gy)	発症 (日)
紅斑	3-10	12-21
脱毛	>3	14-18
乾性落屑	8-12	25-30
湿性落屑	15-20	20-28
水疱	15-20	15-25
潰瘍	>20	14-21
壊死	>25	>21

軟部組織、骨等の被ばくに対する病態

1 筋肉への影響

筋組織は放射線照射の影響で変性、炎症、筋組織再生を経て線維化に至る。照射による炎症性サイトカインおよびメディエーターの放出と、TGF- β 1 経路の活性化は、筋線維芽細胞の持続的な活性化と増殖をもたらす、コラーゲン産生と細胞外マトリックスの局所沈着を促進することで筋組織の線維化を誘導する³⁾。また放射線照射は骨格筋細胞の前駆細胞である筋衛星細胞を直接損傷することで筋損傷に対する修復メカニズムを阻害する。骨格筋における放射線誘発線維症は、筋の萎縮や筋力低下、運動障害を引き起こし、頸部悪性腫瘍における放射線治療の晩発障害では臨床的に開口障害や頸部ジストニアが問題となることがある。

2 骨・軟骨への影響

骨への放射線晩発障害として、後述する肉腫以外では骨折および骨壊死が問題となる。骨の影響は骨格の成熟度合いによっても異なる。未成熟な骨格では軟骨形成と成長板での石灰化した軟骨の再吸収を妨げ、成長障害や変形をきたす。成熟した骨格では、主に骨芽細胞の障害により骨基質の減少をもたらす⁴⁾。骨芽細胞の増殖障害および血管内皮細胞の損傷による血流障害は骨折治癒を遷延させる。放射線性骨壊死は、骨の虚血性壊死の結果生じる。病理組織学的所見として初期にはうっ血や血管炎、血管内血栓が、後に細胞成分の喪失、血管新生の低下、脂肪髄の増加および線維化がみられる⁵⁾。

3 放射線誘発肉腫

肉腫の形成には、ウイルス、遺伝的素因、化学療法、慢性浮腫など、さまざまな要因が関連しているが放射線による被ばくもこの一つであり、肉腫全体の3-5%に関連するとされている。放射線照射誘発肉腫 (Radiation-induced sarcoma) の70%は軟部組織

に発生し、残りの30%は骨に発生する。そのうち最も頻度の高いものは、未分化多形肉腫 (悪性線維性組織球腫) で、血管肉腫が続く。また放射線照射により誘発される骨悪性腫瘍で最も多いのは骨肉腫である。放射線誘発肉腫は主に放射線治療に用いられるX線などの高線量照射によって四肢および体幹の深部に生じる合併症であり、低線量ではほとんどみられない。多変量解析において、放射線誘発肉腫は通常の軟部肉腫より悪性度が高く予後も悪いと考えられている⁶⁾。放射線誘発肉腫は深在性なことが多く、また周囲組織の線維化と硬化によって、診断や切除時の境界が不明瞭であることも予後を悪化させる一因と考えられる。放射線の発癌メカニズムの一つは、DNA 損傷によるゲノム不安定性である。放射線誘発肉腫では通常の肉腫と比べてp53の過剰発現が知られている。また腫瘍の組織型に特異的な変化として、放射線誘発性の血管肉腫ではcMycの増幅がみられることが明らかにされている⁷⁾。

参考文献

- 1) IAEA: Safety reports series No.2: Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries, 1998. <https://www.iaea.org/publications/5135/diagnosis-and-treatment-of-radiation-injuries> (アクセス日 2021-12-21)
- 2) Lichter MD, Karagas MR, Mott LA, et al: Therapeutic ionizing radiation and the incidence of basal cell carcinoma and squamous cell carcinoma. The New Hampshire Skin Cancer Study Group. Arch Dermatol 136: 1007-1011, 2000.
- 3) Zhou Y, Sheng X, Deng F, et al: Radiation-induced muscle fibrosis rat model: establishment and valuation. Radiat Oncol 13: 160, 2018.
- 4) Williams HJ, Davies AM. The effect of X-rays on bone: a pictorial review. Eur Radiol 16: 619-633, 2006.
- 5) Sroussi HY, Epstein JB, Bensadoun RJ, et al: Common oral complications of head and neck cancer radiation therapy: mucositis, infections, saliva change, fibrosis, sensory dysfunctions, dental caries, periodontal disease, and osteoradionecrosis. Cancer Med 6: 2918-2931, 2017.
- 6) Gladdy RA, Qin LX, Moraco N, et al: Do radiation-associated soft tissue sarcomas have the same prognosis as sporadic soft tissue sarcomas? J Clin Oncol 28: 2064-2069, 2010.
- 7) Giannini L, Incandela F, Fiore M, et al: Radiation-Induced Sarcoma of the Head and Neck: A Review of the Literature. Front Oncol 8: 449, 2018.

3-3 内部被ばくの病態

Key Point

- 内部被ばくの経路には、経口摂取、吸入摂取、経皮吸収、創傷侵入の4つの経路がある。
- 放射性物質（核種）により体内動態、蓄積する臓器・組織が異なる。
- 内部被ばく線量を表すものとして預託実効線量がある。

内部被ばく概念と放射性物質の挙動

1 内部被ばくの経路

内部被ばくとは、放射性物質が体内に入り、それが線源となり被ばくする状態である。体内に入る経路としては、以下の4つに大別される。

- ①経口摂取：放射性物質で汚染された食物や水、飲料を摂取することにより、消化管から吸収されて血液中に入り、体内循環にのる。血液中に入った放射性物質は標的臓器に集積するか、尿中に排泄されるか、または再度、腸管へ排出される。腸管に排出された放射性物質は、再度、吸収されるか、糞便として排泄される。
- ②吸入摂取：呼吸によって空気中の放射性物質が取り込まれる。粒子の大きさにより取り込まれ方は異なり、大きい粒子であれば、鼻腔、咽頭に沈着する割合が大きくなり、小さい粒子であれば、肺胞まで到達する割合が大きくなる。そこから血液に入り、体内循環にのる。また、その一部は呼気に含まれ、体外に排出されたり、痰として排出されるものもあれば、肺胞にとどまったり、それを嚥下して消化管に達することもある。
- ③経皮吸収：皮膚から放射性物質が吸収される。健常皮膚からはほとんどの放射性物質は吸収されないが、トリチウムは経皮的に吸収される。
- ④創傷侵入：創傷や熱傷があれば、放射性

物質は容易に創傷部位から吸収される（侵入する）。

2 代表的核種の体内動態

2.1 放射性ヨウ素（ヨウ素 131）

経口摂取や吸入摂取により体内に入った放射性ヨウ素は、体内循環に入り、このうち約10-30%^{1, 2)}が摂取後24時間で甲状腺に集積する。甲状腺に集積するのは、甲状腺がヨウ素を原料として甲状腺ホルモンを産生するためである。それ以外は主として腎臓より尿中に排泄される。一部は唾液腺、乳腺、胃粘膜にも移行し、唾液、乳汁、胃液などにも分泌される。また一部は肝臓から胆汁に移行し、糞便として排出される。甲状腺に集積した放射性ヨウ素 131 は、甲状腺癌のリスクとなる。

2.2 放射性セシウム（セシウム 134, セシウム 137）

体内に入ったセシウムは、カリウムと化学的性質が類似しており、全身に分布し、特異的に蓄積する臓器はないが、筋肉にやや多く蓄積する傾向がある。排泄としては主に尿に、一部が糞便に排泄される。

2.3 プルトニウム（プルトニウム 239）

ウランなど同じアクチノイドに属するα線（アルファ線）を放出する核種である。体内に入ったプルトニウムは肺に沈着し、肝臓をはじめ多くの臓器に蓄積して障害を発現するが、最終的には骨親和性を示す。肺、肝臓、骨に沈

着すると容易には体外に排泄されず、半減期が長く、比放射能も高いので重篤な障害をもたらす。

2.4 放射性ストロンチウム(ストロンチウム 90)

ストロンチウムはカルシウムに類似した挙動を示すため、骨に沈着する。骨に沈着したストロンチウムは、排泄されにくい性質があり、放射性セシウムはβ線(ベータ線)を放出し、長期にわたり内部被ばくを引き起こす。

3 半減期

内部被ばくの場合、「物理的半減期」以外に、体内に取り込まれた放射性物質が、代謝や排泄されることにより半分になるまでの時間の「生物学的半減期」があり、体内に取り込まれた放射性物質が、物理的な減衰と生物学的な排泄の両方により実際に半分になるまでの時間を「実効半減期」という。表 1 に原発事故由来の代表的放射性物質の放射線の種類、半減期、主な蓄積部位を示す³⁾。

内部被ばくの影響

放射線被ばくによる全身影響を表す線量が「実効線量」である。この「実効線量」を求めるには、まず「吸収線量」を知る必要がある(図 1)。内部被ばくの場合は、放射性物質

が蓄積する組織・臓器が放射性物質ごとに異なり、また、吸入摂取と経口摂取の場合で代謝や蓄積の挙動が異なり、さらに年齢によっても生物学的半減期が異なる。このような条件の違いごとに数理モデル計算を行い、各臓器や組織がどれくらいの吸収線量を受けるかを求める。次に放射線の種類を考慮するための放射線加重係数を乗じて、各臓器が受ける線量を求める。これを「等価線量」という。これに臓器・組織による感受性等の違いを考慮して実効線量を求める。また、放射性物質は、体内に入った後、臓器・組織に一定期間留まる。その間、人体は放射線を受け続けるが、放射性物質は時間とともに体内から減少する。そのため内部被ばく線量として、将来にわたって受ける総量を考える必要があり、それを「預託線量」といい、一生分(成人は 50 年、子供は 70 歳になるまで)を積算した線量を「預託実効線量」と呼ぶ(図 2)。実際には、摂取量に預託実効線量係数(放射性核種、摂取経路、年齢等で設定)を乗じることで、内部被ばく線量(預託実効線量)を求めることができる(図 1)⁴⁻⁶⁾。

実効線量は全身影響を表す線量であるが、内部被ばくの場合、放射性物質により特異的に蓄積する臓器があり、その場合、等価線量が重要となる。特に放射性ヨウ素は、甲状腺に特異的に蓄積するため、甲状腺吸収線量または等価線量が甲状腺癌のリスク評価に用いられる。

表 1. 原発事故由来の代表的放射性物質の放射線の種類、半減期、主な蓄積部位
(文献 3 より引用・改変)

	H-3 トリチウム	Sr-90 ストロンチウム 90	I-131 ヨウ素 131	Cs-134 セシウム 134	Cs-137 セシウム 137	Pu-239 プルトニウム 239
放射線の種類	β	β	β, γ	β, γ	β, γ	α, γ
生物学的半減期	10 日	50 年	80 日	70 日 -100 日	70 日 -100 日	肝臓: 20 年
物理学的半減期	12.3 年	29 年	8 日	2.1 年	30 年	24,000 年
実効半減期	10 日	18 年	7 日	64 日 -88 日	70 日 -99 日	20 年
蓄積する臓器・組織	全身	骨	甲状腺	全身	全身	骨・肝臓

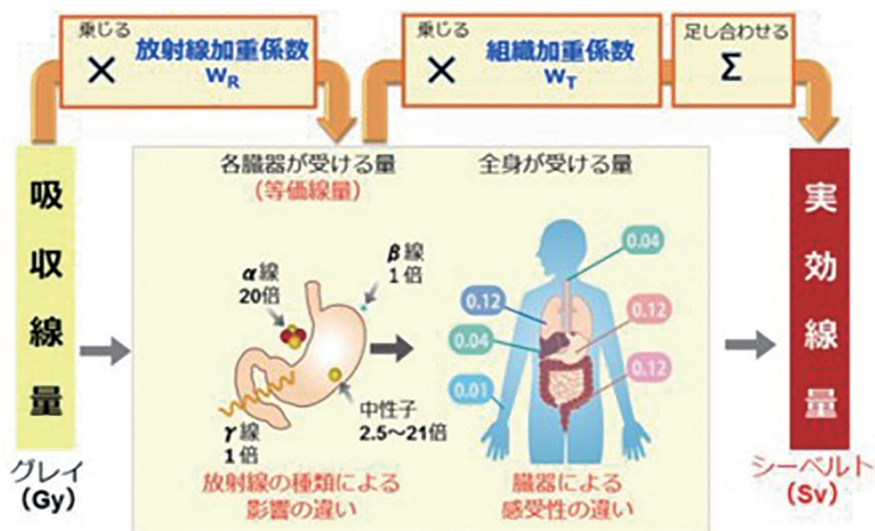


図 1. 内部被ばく線量の算出 (文献 3 より引用)

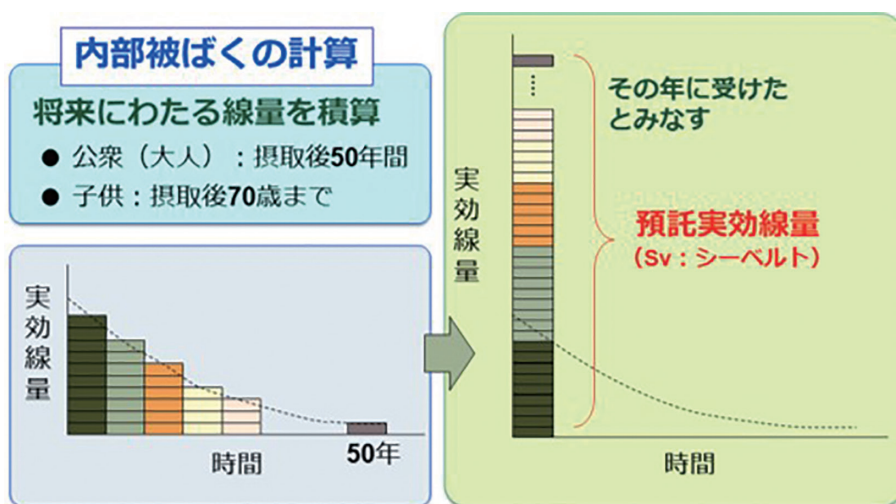


図 2. 預託実効線量 (文献 3 より引用)

参考文献

- 1) Zanzonico PB, Becker DV: Effects of time of administration and dietary iodine levels on potassium iodide (KI) blockade of thyroid irradiation by ^{131}I from radioactive fallout. Health Phys. 78: 660-667, 2000.
- 2) Becker DV: Reactor accidents. Public health strategies and their medical implications. 258: 649-654, 1987.
- 3) 環境省: 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 (令和元年度版)
<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r1kisoshiryo/r1kisoshiryohtml.html> (アクセス日 2021-12-21)
- 4) ICRP: ICRP Publication 68: Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, 1994.
<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2068> (アクセス日 2021-12-21)
- 5) ICRP: ICRP Publication 72: Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients, 1995.
<https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%2072> (アクセス日 2021-12-21)
- 6) ICRP: ICRP Publication 119: Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, 2012.
<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20119> (アクセス日 2021-12-21)

3-4 体表面汚染

Key Point

- 体表面汚染の除染の目的は、皮膚などの外部被ばく低減、内部被ばくの防止、および診療に伴う二次汚染の防止である。
- 除染の目標数値は定まったものではなく全身状態等を勘案して決定するが、皮膚・組織への固着（fixed contamination）は重要な終点となる。
- 皮膚の角質は12-15日で落屑しターンオーバーすることから、取り切れなかった汚染は局所の汚染拡大防止と経過観察で対応する。

体表面汚染とは、放射性物質が体表面（衣服も含む）に付着している状態を言う。蒸気あるいは液体の形のトリチウム、ヨウ素などを例外として、放射性物質が健常な皮膚から侵入することはないので、ここでは容易に内部被ばくの原因となり得る創傷部の汚染と区別し、健常皮膚および衣服の放射性物質による汚染とその除染について述べる¹⁾。

1 除染の目的

体表面汚染を伴う傷病者に対応する場合、通常体表面汚染が直ちに生命に影響を与えることはないので全身状態の確認と安定化が優先される。その上で、体表面汚染に対しては、①本人の皮膚障害の低減、②本人及び周囲の内部被ばくの防止、③診療に伴う医療施設・設備や医療スタッフの汚染防止等の理由から除染を行う。以下にそれぞれの目的について解説する。

1.1 本人の皮膚障害の低減

皮膚被ばくについては、付着している放射性物質の量に加えて線質を考慮する。放射線は種類によって飛程が異なり、 α 線（アルファ線）は飛程が短く角質層より深く到達しないため皮膚障害の恐れはない。一方、 β 線（ベータ線）は体内で数mmまで到達するため、0.2mm程度の深さにある基底細胞や真皮にある毛根細胞に影響を及ぼし、皮膚紅斑や脱毛の原因と

なり得るため注意を要する²⁾。1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故では、消防士が多量の放射性ヨウ素等を含んだ返り水を浴び広範な体表面汚染から重度の皮膚放射線障害（cutaneous radiation syndrome: CRS）を来した。体表面汚染による皮膚被ばくは、アイソトープ手帳に皮膚表面汚染密度から皮膚吸収線量率を求める換算表が核種ごとに示されており、それを参照して評価する。

1.2 本人及び周囲の内部被ばくの防止

内部被ばく防止については、内部被ばくの主たる経路が吸入摂取、経口摂取、創傷侵入であることから、特に手指や顔面および創傷部周囲の皮膚の汚染を適切に除染することが重要である。

1.3 診療に伴う医療施設・設備や医療スタッフの汚染防止

診療に伴う施設・設備や医療スタッフの汚染防止については、スタッフ等の健康影響を心配する必要はないが、風評被害等を考慮して慎重に対応する。また体表面汚染を伴う傷病者の診療で、施設設備等への汚染拡大を心配して本来行うべき処置や検査の実施を躊躇することがあってはならない。除染は被ばく医療を適切に行う上で重要な手段あるいは手順と認識する。

2 除染の目標

本来、除染の目標は体表面の放射能がバックグラウンドレベルとなることである。しかし、医療現場では傷病者の全身状態や傷病の程度により除染にかけられる時間は制限されるため目標値が必要となる。

放射線スクリーニングの基準値としては、13,000 cpm、40,000 cpm などの数値がある。前者は、東京電力福島第一原子力発電所事故前に汚染スクリーニングレベルとして定められていたもので、ヨウ素 131 の場合 40 Bq/cm² の表面汚染密度に相当する。この設定根拠は、放射性プルームに曝露された幼児がヨウ素 131 を吸入することで甲状腺等価線量が当時の安定ヨウ素剤予防服用の指標であった 100 mSv に達する環境下で、幼児の体表面に沈着すると想定されるヨウ素 131 の表面汚染密度から導かれた。また後者は、事故後に定められた避難退域時検査における住民の除染実施基準 (OIL4) であり、原子力災害時にバックグラウンドレベルが上昇しても実効的な基準値が必要であることから、バックグラウンドのノイズに信号が埋まらないレベルとして 3 倍程度の余裕を見込んで $13,000 \times 3 \approx 40,000$ cpm と算出している³⁾。しかし、いずれも他の目的からの流用であり、病院での患者受入では、後述する除染の注意点と限界を考慮して柔軟に対応することが現実的と考えられる。

3 除染の注意点と限界

除染の目的を考えると除染の際の注意点として以下の諸点があげられる。なお、具体的な除染手技等については次項に譲る。

3.1 除染は可及的速やかに

体表面汚染を放置するほど汚染拡大の機会が増えるので、全身状態に問題なければ可及的速やかに除染を行う。また時間が経過すると皮膚のタンパク質と化学的結合等で固着 (fixed contamination) して除染し難くなる点からも速やかな除染が望ましい。

3.2 除染の第一歩は脱衣

衣服の汚染は脱衣で除染できるため、通常は脱衣のみで体表面汚染の 80-90% が除染できる。したがって除染の第一歩は脱衣・更衣である。液状の放射性物質の場合は下着等への浸透もあるので慎重に対応する。

3.3 除染に伴う内部被ばく、汚染拡大に注意

粉末状の放射性物質による汚染の場合、脱衣等の際に放射性物質が飛散し内部被ばくの原因となるため、脱衣の前に汚染した衣服や皮膚をあらかじめウェットティッシュ等で拭き取る。衣服では脱衣の前にテープで固定しても良い。衣服の切断も積極的に考慮する。流水等を用いた除染の場合は、汚染部を通過した水は全て汚染物質と考えて容器に集め汚染拡大を防止する。頭髮をシャワー除染する場合は、流れた水を飲んだり吸ったりして内部被ばくしないよう配慮する。

3.4 除染による皮膚のダメージを避ける

皮膚の汚染に対して皮膚のバリア機能を損なうような過剰な除染は、内部被ばくの原因となるため原則的に行わない。洗浄にブラシを用いる場合は毛質の柔らかいものとする。粘着テープの使用は除染に有効であるが、粘着力の強すぎるものや皮膚刺激性のあるものの使用は避ける。

水拭きで不十分な場合、中性洗剤 (台所用洗剤)、オレンジオイル等を使用する。薬剤を使用する場合は、原液を皮膚に塗布し、水で洗い流すか濡らしたガーゼ等で拭き取る。特に肌が過敏な場合は適宜希釈して用いる。

除染の限界としては、全身状態が悪化した場合、外傷や内因性疾患の治療に猶予がない場合に加え、fixed contamination がある。数回拭き取りや洗浄を行っても汚染密度が低下しなくなった場合は、汚染部位のスミア検査で測定値がバックグラウンドレベルであれば fixed contamination と判断する。この場合、除染を終了し同部位はドレッシング材等を用いて被覆する。

4 皮膚のターンオーバー

皮膚の角質層は12-15日で落屑しターンオーバーが起きる。fixed contaminationは通常角質の上層にとどまるので、一般的には2-3日後には落屑すると考えられる。したがって、除染後も残存した汚染部位は被覆し、それに用いたドレッシング材等は交換時に放射能を測定し、バックグラウンドレベルでなければ放射性廃棄物として適切に保管処分する。ドレッシング材による被覆と定期的な交換が担保できるのであれば、通院等で経過を見ることは可能と考えられる。

参考文献

- 1) 青木芳朗、渡利一夫編：人体内放射能の除去技術 挙動と除染のメカニズム、講談社サイエンティフィク、東京、1996.
- 2) 環境省：放射線による健康影響等に関する統一的基礎資料（令和2年度版）、2021.
- 3) 一般社団法人日本保健物理学会：緊急時被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン 解説、2016. http://www.jhps.or.jp/pdf/kinkyujihibaku_commentary.pdf（アクセス日 2021-12-21）

4-1 初療

Key Point

- 診療とともに放射線管理、汚染拡大防止を行う。
- 蘇生や救命処置を優先しつつ被ばく線量評価を行う。
- 汚染検査や除染よりも全身状態の安定化が優先される。

基本的考え方

被ばく医療の初期診療では、外部被ばく、内部被ばく、体表面汚染への対応が必要となる。診療に際しては、放射線管理、汚染拡大防止、診断、被ばく線量評価、治療を行う¹⁻⁶⁾。

放射線の被ばく以外の原因により全身状態およびバイタルサインが不安定であれば、蘇生および外傷診療を優先し、状態を安定させる。放射線による影響は被ばく直後（数分以内）には発生せず、また体表面の汚染では影響が生じる可能性は極めてわずかであり、汚染検査や除染よりも全身状態の安定化が優先される。

受け入れ時には表1の情報、表2-6の資機材を確認、準備する。

表 1. 確認する情報

	確認項目
傷病者	体表面汚染の有無
	汚染の部位、程度
	脱衣の有無
	嘔吐の有無、発症時刻
現場状況	現場での放射線検知結果
	現場における内部被ばくの可能性
	現場における外部被ばくの可能性
	核種（現場での核種同定ができる場合）

フローチャート

診療全体の流れについては、フローチャートに図示する（図 1）。

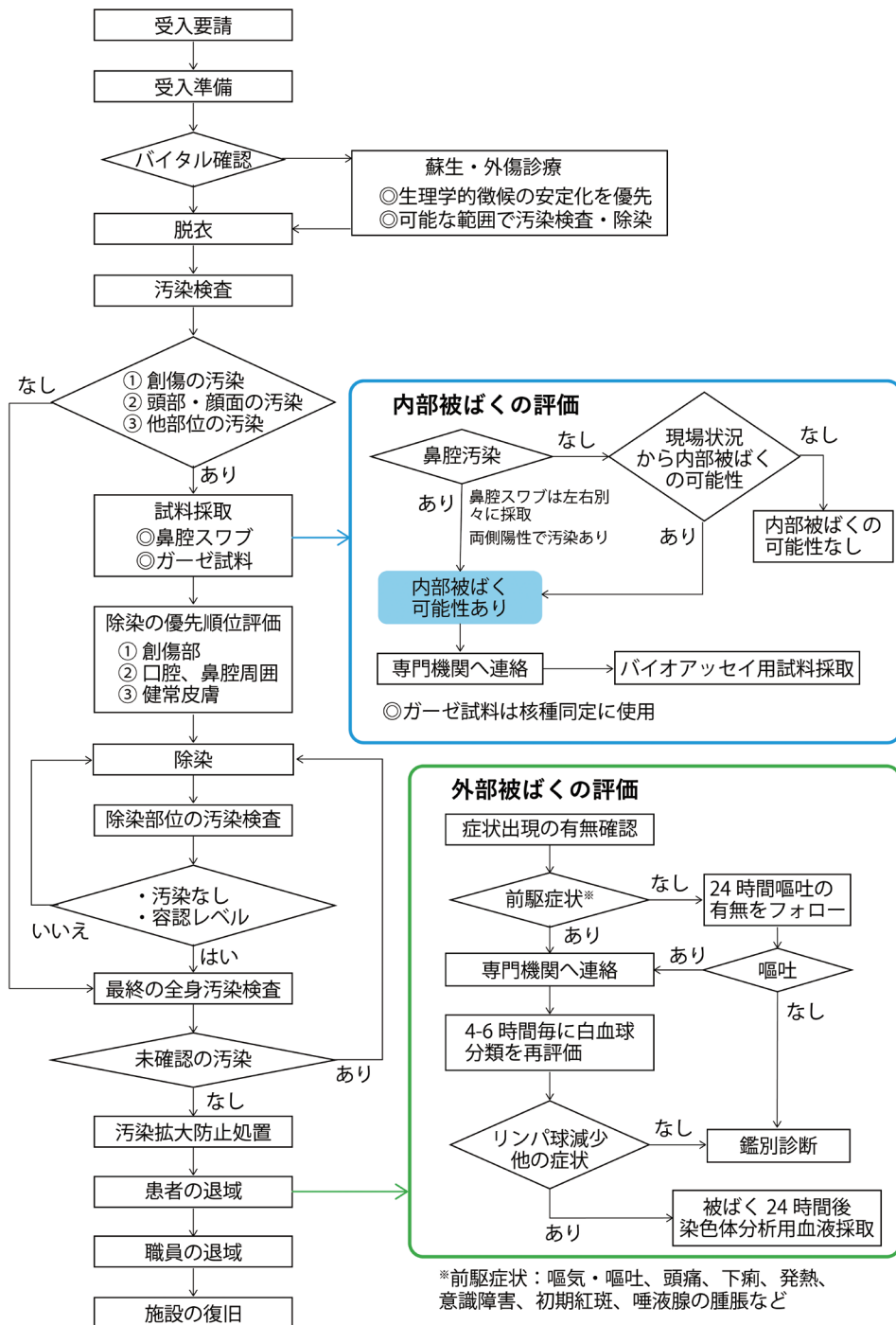


図 1. フローチャート

受け入れ準備

1 資機材

表 2. 個人防護装備 (PPE)

品名	備考
防護衣	タイベックスーツや術衣、アイソレーションガウンなど
帽子	頭髮、耳介の防護
ゴーグル	マスクと一体型のものでよい
マスク	医療機関での対応ではサージカルマスク、または使い捨て防塵マスク (DS2、N95 等のレベル)
ゴム手袋	二重に装着、内側の手袋は防護衣の袖にテープで目張り 外側の手袋は、処置中に汚染したら交換
シューズカバー	防護衣にテープで目張り
個人線量計	防護衣の中に装着

表 3. 養生用資機材

品名	使用方法
ビニールシート	床に敷く。 周辺とシートの重なる部分は養生テープで隙間なく目張りする。 水がかかると滑りやすくなるため注意が必要。
ろ紙シート	ビニールシートの上に敷く。 周辺とシートの重なる部分は養生テープで隙間なく目張りする。 破れやすいため、ろ紙シート単独では使用しない。
養生テープ	シート等の目張り。 粘着力は強くなく、剥がした時に貼った箇所の材質が剥がれない。
ビニール袋	モニター類をカバーする。
テープ付きシート	一辺が養生テープとなっており、壁等の養生に使用する。
ラップ	聴診器等の小さな機材の養生に使用する。
ハサミ	

表 4. 放射線測定器

種類	測定する放射線	数量
空間線量計	γ 線	2台+予備1台
表面汚染計	$\beta(\gamma)$ 線 α 線	汚染検査担当者の人数分+予備1台 可能であれば1台
個人線量計	γ 線	対応する職員の人数分

表 5. 除染用資機材

品名
滅菌ドレープ
鑷子
綿球
ガーゼ
歯ブラシ
サージカルテープ
トランスポア サージカルテープ
吸水シート(大人用紙おむつなど)
膿盆
シャンプーベイスン
ポリ袋 (各種サイズ)

表 6. 試料採取用資機材

品名	用途
綿棒	鼻腔スミア採取用
ガーゼ	汚染部位の拭い取り、核種同定用
ヘパリン採血管	染色体分析用 (10 ml)
尿容器	バイオアッセイ用、スポット尿、24 時間尿
ラベル	患者氏名、ID、採取日時 (時刻も正確に記載)、採取部位、試料の種類、表面汚染の有無を記入

2 診療エリア設定と養生

事前に診療エリアを決め、搬入口から診療エリアまでの養生の範囲を計画する。診療エリアは、コールドゾーン、ウォームゾーン、ホットゾーンの区別を明確にして (ゾーニング)、患者の動線が一方通行となるように配置する。受入エリアは臨時の管理区域として設定する。**コールドゾーン**: 放射性物質の汚染が全くない区域。診療に必要な医療資機材を配置。

ウォームゾーン: 放射性物質による汚染が拡大する可能性がある区域。ホットゾーンからの試料等の汚染検査を実施。コールドゾーンからの資材、ホットゾーンからの試料の中継。この区域からコールドゾーンへ退域する人、物品は全て汚染検査を実施する。放射線管理の分野ではここはホットゾーンである。

ホットゾーン: 放射性物質による汚染がある

区域。基本的に汚染がある物品はこの区域内に止める。

養生とは、施設および資機材をビニールシート等で被覆し、放射性物質が付着するのを防止することである。養生は、時間を要するため、受け入れまでに養生が完了しなかった場合は、ホットゾーンとウォームゾーンからの人、物品の移動については、汚染検査を徹底し、コールドゾーンへ汚染を拡大しないようにする。ホットゾーンで使用する機材はビニール袋やラップ等を使用して養生する。養生後に機材が正常に動作することを確認する。

診療後に診療エリアの汚染検査と除染を行う。汚染検査、除染が終了するまで、一定期間使用できなくなる。

医療関係者の役割

院内の対応体制を立ち上げ、職員を参集し、状況をブリーフィングする。対応者の役割を表7に示す。ただし、人員配置の人数は、医療機関の実状に合わせる。

外来診療

全身状態およびバイタルサインが不安定であれば、蘇生および外傷診療を優先し、状態を安定させる。放射線による影響は被ばく直後には発生せず、また体表面の汚染では影響が生じる可能性は極めてわずかであり、汚染検査や除染よりも全身状態の安定化が優先される。

現場で脱衣しないまま搬送された場合は、外側の衣類を脱衣させる。脱衣により露出部以外の脱衣した衣類に付着した汚染は除去できる。なお脱衣時に、衣類に付着している放射性物質が浮遊する可能性がある場合は、患者にマスク等を着用させ吸入による内部被ばくを防護する。脱衣後の衣類は、ビニール袋等に入れて、放射性物質が拡散しないようにする。汚染箇所を特定するために汚染検査を行う。

1 汚染検査の順番

次の順序で体表面の汚染検査を実施する。汚染が確認された場合は、記録用紙に記載する。

- ①ルート確保や聴診、触診をする部位
- ②創傷部
- ③顔面、口腔周囲
- ④頭部から足先まで
- ⑤背面も頭部から足先まで

表 7. 人員配置と役割

	担当	役割
コールドゾーン	統括・リーダー	・診療方針の決定、指示
		・臨時の放射線管理区域の設定、解除の宣言
	看護師	・コールドゾーンとウォームゾーン間の資材の受け渡し
		・看護記録、試料情報の記録
	診療放射線技師	・対応者の被ばく線量管理・記録
		・対応エリアの放射線管理
ウォームゾーン	事務職員	・情報伝達
		・資機材等の管理
	看護師	・ウォームゾーンとホットゾーン間の資材、試料の受け渡し
		・ホットゾーンから出てくる職員、試料の汚染検査
	診療放射線技師	・傷病者の汚染検査の記録
		・診療後のウォームゾーンの汚染検査
ホットゾーン	医師	・診療
		・除染
	看護師	・診療の支援
		・試料をウォームゾーンの担当者へ渡す
		・看護
	診療放射線技師	・傷病者の汚染検査
		・診療後のホットゾーンの汚染検査

2 汚染検査の方法

測定器の検出部（プローブの先端）を体表面から 1-2 cm 離し、その距離を保ちながら毎秒 5 cm 程度の速度で動かす。プローブの窓の部分でしか放射線を検知できないため、検知していない部分がないようにプローブを左右もしくは上下に動かす。

汚染を検知したら、汚染の中心部分の位置で測定器を保持し、針あるいは数値が安定するまで待ち、正確な汚染の程度を測定する。

3 除染

汚染箇所が複数ある場合は、1) 創傷、2) 開口部（顔面）、3) 健常皮膚の順番で除染の優先順位を評価する。汚染がある創傷が複数箇所ある場合は、汚染の程度が高い方から除染する。

除染する場合は、周囲に汚染拡大防止の措置を講じて、次の要領で除染する。

創傷部の汚染

- ①汚染がない部分をラミシート等で被覆する。
- ②水をかけながら創傷部を洗い流す。水は全て吸水シート等で吸水する。
- ③ラミシートや吸水シートを取り除く。
- ④除染を繰り返す場合は、①-③を繰り返す。

開口部（顔面）の汚染

- ①口腔内の汚染はうがいで除染する。
- ②鼻腔内の汚染は鼻をかんで除染する。
- ③耳介、外耳道はガーゼ、綿棒等で拭き取り、除染する。

健常皮膚の汚染

- ①濡れたガーゼやタオルで汚染箇所の外側から内側に向かって拭き取る。
- ②ガーゼやタオルは一度の拭き取りで交換する。
- ③除染できない場合は、石鹸、ボディソープなどを使用して除染する。

除染後には周囲の汚染したシート等を取り除き、除染した部位の汚染検査を実施する。除染前と除染後で測定器の検知部までの距離が

変わらないように注意する（距離を一定にする）。汚染検査の結果、汚染が残存している場合は、除染を繰り返す。ただし、除染を 2-3 回繰り返して、除染前後で数値に変化がない場合は、除染を終了する。除染後の数値を記録用紙に記載する。炎症を起こすような除染は行わない。

全ての除染が終了したら、全身の汚染検査（頭部から足部まで、前面と背面）を実施し、汚染の見逃しを防ぐ。未確認であった汚染箇所があれば、除染する。

処置および除染が終了したら、患者をホットゾーンから退域させ、病室等へ移動する。その後対応者はホットゾーンから退域し、個人防護装備（PPE）の脱衣、汚染検査、個人線量計の確認を行い、施設の汚染検査を実施して、臨時の管理区域を解除する。

検査検体の採取、取り扱いと運搬

1 内部被ばくの被ばく線量評価のための試料採取

鼻腔に汚染が認められた場合は、内部被ばくの可能性が高い。鼻腔に汚染がなくても現場の状況から内部被ばくが疑われる場合もある。内部被ばくが疑われたら、内部被ばくの被ばく線量評価（診断）を行う。

内部被ばくの被ばく線量評価の方法は、体外計測法とバイオアッセイ法がある。体外計測法は、ホールボディカウンタなどの測定機器が必要であり、医療機関にない場合はバイオアッセイ法の試料を採取する。バイオアッセイ法の試料は、24 時間尿（事故発生時から）、全量の便であり、基本的には 5 日間採取する。採取した試料は測定できる専門機関へ常温で輸送する。

2 外部被ばくの被ばく線量評価のための試料採取

現場の状況より外部被ばくが疑われる場合は、外部被ばく線量評価を実施する。なお、外部被ばくが疑われなくても、前駆症状の有無などの所見は確認する。

外部被ばく線量評価の方法は、臨床症状、臨床検査からの推定、染色体異常の分析がある。前駆症状がある場合は、4-6 時間毎に末梢血の白血球分画を評価し、リンパ球数の減少の有無、程度を確認する。

染色体異常分析は、被ばく 24 時間後に採血（ヘパリン採血管 10 ml）を実施し、専門機関へ輸送する（常温）。採血管は凍結しないこと。

参考文献

- 1) Radiation Emergency Assistance Center/Training Site: The Medical Aspects of Radiation Incidents 4th Edition: Oak Ridge, US, 2017.
- 2) USG DHHS, Radiation Event Medical Management - REMM - <http://www.remm.nlm.gov/>
- 3) NCRP: NCRP Report 161: Management of Persons Contaminated with Radionuclides, 2008.
- 4) NCRP: NCRP Report 165: Responding to a Radiological or Nuclear Terrorism Incident: A Guide for Decision Makers, 2010.
- 5) IAEA: Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency, 2005. <https://www.iaea.org/publications/7213/generic-procedures-for-medical-response-during-a-nuclear-or-radiological-emergency>（アクセス日 2021-12-24）
- 6) Carlos RP, Astrid L, Ane NJ, et al: Third European IRPA Congress, TMT handbook: Triage, monitoring and treatment of people exposed to ionising radiation following a malevolent act. Osterås; Norway, 2009.

4-2 多数傷病者・複合障害への対応

Key Point

- 多数傷病者発生時は、最大多数の救命を目標とする。
- 複合障害により、傷病者の死亡率・罹患率は上昇する。
- 汚染が理由での医療の質の低下は、厳に戒められるべきである。

多数傷病者

地域・施設の対応能力を超える数の被ばく・汚染傷病者が同時発生した状況では限られた医療資源で可能な最大多数の救命を目標として以下を考慮する。

1 災害医療体制への転換

医療機関に災害対策本部を設置し、診療体制を「災害モード」に切り替え、CSCATTTに基づく災害初動の原則に従い医療体制を整備する¹⁾。

2 トリアージ

START 法、SALT 法などの方法を、状況を加味して選択して、傷病者を分別・順位付けし、高緊急度・高重症度の者から治療する。繰り返し行い、評価は変更可能である^{2), 3)}。

3 分散搬送、域内・広域搬送、医療搬送

特定の施設への負担集中を防ぐため分散搬送を行う。分散搬送は域内搬送（被災地域内での医療機関搬送、自治体・消防・地域メディカルコントロール（MC）等が搬送調整担当）と広域搬送（被災地内対応が困難な場合の被災地域外への傷病者搬送、国が搬送調整担当）に分類される。広域搬送では、広域搬送拠点（staging care unit: SCU, バイタルサインが安定化した傷病者を集めて域外搬送する臨時医療施設）を空港などに設置し、医療者が同伴する医療搬送を行う。原子力災害における

広域医療搬送体制は確立されていない。広域搬送は、傷病者数の増加時、医療資器材の枯渇時、治療中の高緊急度・重症症患者、もその対象となる。

4 5 部門のサーージ（5S）：人材・資器材支援要請と自施設対応能力強化

放射線線量管理部門を含む人材・医療資器材支援を、危機対応機関（消防・警察・自衛隊ほか）、原子力災害医療・総合支援センター（原子力災害医療派遣チーム）、急性期医療班（DMAT、JAMT ほか）、関係学術団体（日本放射線事故・災害医学会、日本救急医学会、日本放射線影響学会ほか）に依頼して医療資源の強化を図る。自施設の以下の5部門を特に機能強化する（5-Surge capacities; System: 災害医療体制への転換, Staff: 対応者の増員, Space: 対応場所の拡充, Supply: 資器材の確保 and Security: 対応者の安全確保）。

5 放射線管理基準の見直し

放射線事故発生後（「平時の線量限度」から、「緊急時被ばく状況の参考レベル」に管理基準概念が変換される。ALARA の概念に基づき包括的に健康影響を低減するため、災害の規模や時相に応じた管理基準の事前検討が今後は望まれる。

6 時間管理

危機時は時間が管理の対象となる。トリアージ・搬送・支援調整のために根本治療を遅らせてはならない。

複合障害

複合障害については複数の定義があるが^{2, 4)}、本書では放射線事故・災害に伴う放射線被ばく・放射性物質汚染による組織・臓器の放射線障害と、放射線事故・災害に伴い発生した外傷・疾病の、複合病態と定義する。

1 複合障害患者の緊急度・重症度の変化

複合障害時の死亡率・罹患率は劇的に上昇する^{2, 4)}。放射線の骨髄抑制による出血傾向・感染リスクの増大、並びに血管障害による血液分布異常性ショックを来しうる^{2, 4)}。放射線事故現場遭遇例、事故初日の屋外・風下フォールアウト暴露例では高線量被ばくの可能性を疑う⁴⁾。線量評価の際はリンパ球

数変化による被ばく線量評価が放射線以外の侵襲により修飾を受ける事に留意する³⁾。

2 複合障害患者の診療優先順位の変化

被ばくが、治療優先順位に与える影響に関する国外の一例を以下に示す(図1)。被ばく線量により優先順位が影響を受け、①外傷・疾病のみの患者の治療優先順位、と比較して複合障害で②放射線被ばくが加わった場合の治療優先順位は、概ね2 Gy以上で変更を考慮することが推奨されている⁵⁾。具体的には治療可能な被ばく線量は概ね2-6 Gyと考えられている(図1)。また、治療優先順位は医療資源の充足度、災害による医療提供能力などの因子によりさらなる修飾をうける⁶⁾。なお、放射性物質による汚染時には化学的毒性への対処が放射線毒性への対処より優先される⁷⁾。

従来の トリアージ カテゴリー	2009年勧告		
	<2 Gy (嘔吐>4h)	2-6 Gy (嘔吐 1->4h)	> 6 Gy (嘔吐<1h)
最優先治療群 (赤)	(赤)	(赤) (黒)	(黒)
非緊急治療群 (黄)	(黄)	(赤) (黄)	(黒)
軽処置群 (緑)	(緑)	(黄)	(黄) (黒)
不処置群 (黒)	(黒)	(黒)	(黒)

数値は全身急性被ばく時の線量

非緊急治療群(黄)かつ1.5-4.5 Gyの全身急性被ばくが予想される傷病者は外傷の重症度・緊急度、既存医療資源の状況等をバランス良く鑑みてトリアージカテゴリーを調整する。最優先治療群(赤)かつ> 4.5-6Gyの全身被ばくが予想される傷病者は、最優先治療群(赤)かつ被ばく線量が< 4.5-6Gyの傷病者への対応が終了するまで診療・搬送の順が後回しにされる。

高線量被ばくのみで多発外傷を伴わない傷病者は、別途医療機関で精査を行う(他項参照)

©2021 Arifumi HASEGAWA FMU

図 1. 複合障害における治療優先順位の変化

3 複合障害患者の初期診療手順

放射線被ばく単独の患者は即時介入を要しない。被ばく患者の死亡リスク上昇時期は被ばく数週間後と考えられるからである。一方、放射線以外の原因で生命を脅かす病態の患者は未治療では数時間以内に死亡する可能性がある。したがって、複合障害患者の初期診療においては、被ばく線量に因らず外傷や疾病の受傷度・緊急度が優先される。複合障害患者の初期診療手順の例を示す(図2)⁸⁾。生理学的安定化が最優先され、放射線被ばく・汚染に対する評価と対応は、上記を妨げぬように行われる。

4 複合障害患者への外科的介入

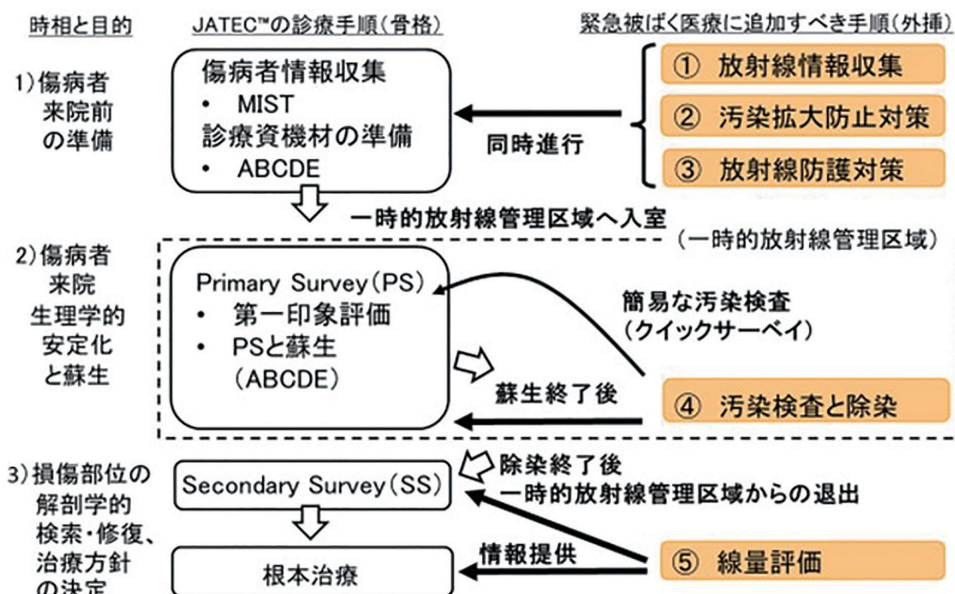
外科的救命処置の遅れは死に直結する²⁾。受傷後72時間は外力による外傷・熱傷の治療に重点を置く⁹⁾。高線量被ばくによる組織障害が予想される場合の外科的介入は、組織修復可能な比較的早期(被ばく後48時間以内の血球数低下前)、あるいは造血器症候群離脱後の受傷後60日以降が望ましい^{2, 9, 10)}。

5 汚染管理のために生じる不適切な搬送・診療遅延の戒め

上述の如く複合障害により患者の死亡率・罹患率が上昇する。そのため、医療の質を維持することなしに複合障害時の良好な予後は期待できない。東京電力福島第一原子力発電所事故では、複数の医療機関・搬送機関が汚染を理由にその対応を躊躇した^{11, 12)}。上記は厳に戒められるべきであり、平時からの知識・技術の習得と準備が期待される。

参考文献

- 1) Advanced Life Support G, Carley S, Mackway-Jones K: Major incident medical management and support: the practical approach in the hospital: Blackwell Pub, 2005.
- 2) Anthony BM, The Borden Institute, U.S. Army: Medical Department Medical Consequences of Radiological and Nuclear Weapons. Army Surgeon General Office, The Borden Institute, US, 2013.
- 3) Flynn DF, Goans RE. Nuclear terrorism: triage and medical management of radiation and combined-injury casualties. Surg Clin North Am 86: 601-636, 2006.
- 4) Wolbarst AB, Wiley AL, Jr., Nemhauser JB, et al. Medical response to a major radiologic emergency: a primer for medical and public health practice.



複合障害時の医療は、生理学的徴候の安定化が優先される。放射線被ばく・汚染に関する検索・処置を各施設における日常診療手順に外挿して、日常診療の質を担保する。

© 2015 Arifumi HASEGAWA FMU

図 2. 複合障害時の診療手順の例 (多発外傷の場合)

- tioners. Radiology 254: 660-677, 2010.
- 5) US Department of Homeland Security: Working Group on Radiological Dispersal Devices (RDD) and Preparedness, 2010.
<https://www.hsdl.org/?abstract&did=437718> (アクセス日 2021-12-22)
 - 6) Coleman CN, Weinstock DM, Casagrande R, et al: Triage and treatment tools for use in a scarce resources-crisis standards of care setting after a nuclear detonation. Disaster Med Public Health Prep 5: S111-121, 2011.
 - 7) IAEA: Generic procedures for medical response during a nuclear or radiological emergency, 2005.
<https://www.iaea.org/publications/7213/generic-procedures-for-medical-response-during-a-nuclear-or-radiological-emergency> (アクセス日 2021-12-22)
 - 8) 日本外傷学会外傷初期診療ガイドライン改訂第5版編集委員会：外傷初期診療ガイドライン JATEC™，第5版，へるす出版，東京，2016.
 - 9) Waselenko JK, MacVittie TJ, Blakely WF, et al: Medical management of the acute radiation syndrome: recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group. Ann Intern Med 140: 1037-1051, 2004.
 - 10) Colonel RZ ed: Medical Consequences of Nuclear Warfare. Office of the Surgeon General: 1989.
 - 11) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会：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.
https://www.mhmjapan.com/content/files/00001736/naic_honpen2_0.pdf (アクセス日 2021-12-22)
 - 12) Tominaga T, Hachiya M, Tatsuzaki H, et al: The accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2011. Health Phys 106: 630-637, 2014.

「アクションカードの例」

アクションカードは、有事の際に参集されたスタッフの行動指標となるものであり、限られた人材や資機材でできるだけ効率よく緊急時の初動対応を行うことを目的として作られるものである。すなわち、状況や場面に応じてスタッフの役割や行動についての具体的な指示が書き込まれており、アクションカードを読めば、必要な行動がわかるようになっているというものである。本稿では、原子力災害時に汚染患者の診療を行う病院を想定し、その施設における本部立ち上げおよびチーム参集を実践する上でのアクションカードを作成した(図1-5)。病院長の号令の下、本部が立ち上がり、チームが参集すること、チーム参集の方法などに留意し、その手順を明記した。また、それに加え、チーム参集後の各職種(医師用、看護師用、診療放射線技師用、事務系職員用)の役割に応じた行動指標となるようなアクションカードを作成した。職種別アクションカードは、ゾーン別ではなく、各

ゾーンの同職種者の動きが分かるようにまとめて作成した。その他、医師用と看護師用は、汚染拡大防止や二次被ばくの低減を考慮したあくまで診療優先のものを、診療放射線技師用は、原子力災害発生時、緊急時活動レベル(emergency action level:EAL)の警戒事態発令時からの動きと通常診療に配慮した汚染拡大防止や二次被ばくの低減を兼ねた点に留意し、事務系職員用は現場統括者のサポートと患者情報の収集・整理・発信を考慮して作成した。

なお、紹介したアクションカードは一例に過ぎず、自施設や災害の状況に応じて利用されること、マスコミなどへの対応に関しては記していないが各施設にて情報を一元管理し一箇所で発信すること、をお勧めする。

時 系 列	
本部 立ち上げ	<input type="checkbox"/> 原子力災害発生と汚染患者搬送の連絡を受けた際は、収集した情報を整理し、受け入れの回答は保留。連絡者と連絡先を確認
	<input type="checkbox"/> 情報を救急担当医へ報告する。救急担当医は病院長へ報告し、受け入れの判断を仰ぐ。
	<input type="checkbox"/> 病院長判断のもと、連絡者に対し受け入れ可能の旨を伝言(随時、詳細情報を収集)
チームの参集	<input type="checkbox"/> 各職種責任者へ連絡し、原子力災害の状況を元に各職種必要人数を召集
	<input type="checkbox"/> チームリスト(指定の用紙に各自で氏名と所属を記載)を作成
	<input type="checkbox"/> チーム参集後、現場統括者(医師)の決定と各職種の役割分担を行いホワイトボードへ記載
	<input type="checkbox"/> 役割分担後、各担当分の対応チェックリストを受け取り、内容を確認

図1. 原子力災害医療 アクションカード 初動対応用

キーポイント: 病院長の判断の下での、本部の立ち上げとチームの参集

時 系 列	
患者受け入れ要請 ～ 診 療 終 了	<input type="checkbox"/> 現場の統括者(医師)の確認 <input type="checkbox"/> 統括者(医師)からの指示受け <input type="checkbox"/> 人員・役割分担の把握調整(全職種) <input type="checkbox"/> 患者情報の把握(人数、被ばく・汚染状況、重症度など)と整理 <input type="checkbox"/> 電子カルテの立ち上げ、患者登録 <input type="checkbox"/> 院内外からの連絡対応・整理 <input type="checkbox"/> 院内関係者への情報伝達
診 療 終 了 後	<input type="checkbox"/> 院内関係者への情報伝達 <input type="checkbox"/> 院内外からの連絡対応・整理 <input type="checkbox"/> 情報整理・記録 <input type="checkbox"/> 統括者(医師)と記録の確認

図 2. 原子力災害医療 アクションカード 事務系職員用

キーポイント: 現場の統括者(医師)のサポート、院内外の連絡網を調整する

時系列	ホットゾーン	コールド(ウォーム含む)ゾーン
患者受け入れ要請	<input type="checkbox"/> 現場の統括者(医師)並びに各担当者(医師、看護師、診療放射線技師、事務系職員)を指名、確認 <input type="checkbox"/> 役割分担の確認(医師:ホットゾーン2名、コールドゾーン1名) <input type="checkbox"/> 手の空いているもの全員で診療室の養生・ゾーニングの確認を行う <input type="checkbox"/> 診療放射線技師からポケット線量計を受け取り、胸部(男性)・腹部(女性)に装着する <input type="checkbox"/> ベアで確認しながら个人防护装備を着用する <input type="checkbox"/> 患者情報をホワイトボードに記入、読み上げ、全員で情報共有し、診療手順を確認する <input type="checkbox"/> ホットゾーンの資機材及び人員の配置再確認 <input type="checkbox"/> 患者および各職種、使用した資機材等の動線の確認	<input type="checkbox"/> コールドゾーンの資機材及び人員の配置再確認 <input type="checkbox"/> 患者および各職種、使用した資機材等の動線の確認
患者受け入れ	<input type="checkbox"/> 可能な限り診療放射線技師の汚染検査を優先(バイタル不安定の場合を除く) <input type="checkbox"/> モニター装着およびバイタルサイン測定を看護師へ指示し、確認する <input type="checkbox"/> 点滴内容や採血量を看護師へ伝え、点滴ライン確保と採血実施を指示する <input type="checkbox"/> 診療(全身状態安定の確認) <input type="checkbox"/> 可能な衣類を裁断し、ログロールにて患者の脱衣を行う	<input type="checkbox"/> 診療資材供給準備 <input type="checkbox"/> 医療情報を時系列に沿って、ホワイトボードに記録できているか確認する <input type="checkbox"/> 点滴ライン確保と採血の実施への助言 <input type="checkbox"/> 診療への助言 <input type="checkbox"/> ホットゾーン医師と診療手順の確認 <input type="checkbox"/> 統括者(医師)と情報を共有する
除染処置開始	<input type="checkbox"/> コールドゾーン医師と除染方法の確認 <input type="checkbox"/> 詳細汚染検査(創部、鼻腔のスミアなど) <input type="checkbox"/> 除染(ふき取り、水洗い等) <input type="checkbox"/> 創部治療 <input type="checkbox"/> 患者の心理状態への配慮・声かけ	<input type="checkbox"/> 除染への助言 <input type="checkbox"/> 詳細汚染検査(創部、鼻腔のスミア)への助言 <input type="checkbox"/> 採血・スワブ・ガーゼ検体等の受け取りや保管ができていないか確認する
除染処置終了	<input type="checkbox"/> 退出前、患者のバイタルサインチェック <input type="checkbox"/> 診療放射線技師の全身詳細汚染検査の補助	<input type="checkbox"/> 汚染拡大の可能性箇所指摘
患者退室	<input type="checkbox"/> 患者退出時、患者の心理状態への配慮・声かけ	
職員退室	<input type="checkbox"/> 診療放射線技師の汚染検査下でホットゾーン内の物品片付け <input type="checkbox"/> 个人防护装備の脱衣 <input type="checkbox"/> 退室後、ポケット線量計の数値確認と報告し、全身汚染検査を受ける <input type="checkbox"/> コールドゾーン医師との記録の確認	<input type="checkbox"/> コールドゾーンの物品後片付け <input type="checkbox"/> 个人防护装備の脱衣 <input type="checkbox"/> ポケット線量計の数値確認と報告 <input type="checkbox"/> 全身汚染検査を受ける <input type="checkbox"/> ホットゾーン医師と記録の確認 <input type="checkbox"/> 患者情報、診療内容、被ばく・汚染状況等を他部署への引き継ぎ

図3. 原子力災害医療 アクションカード 医師用

キーポイント: 汚染拡大防止やスタッフの二次被ばくの低減を考慮しつつ、診療を優先する。各職種間の密なコミュニケーションは重要

時系列	ホットゾーン	コールド(ウォーム含む)ゾーン
患者受け入れ要請	<input type="checkbox"/> 現場の統括者(医師)から役割の指示を受ける <input type="checkbox"/> 役割分担の確認(看護師:ホットゾーン2名、コールドゾーン2名) <input type="checkbox"/> 手の空いているもの全員で診療室の養生・ゾーニングの確認 <input type="checkbox"/> 診療放射線技師からポケット線量計を受け取り、胸部(男性)・腹部(女性)に装着する <input type="checkbox"/> ヘアで確認しながら个人防护装備を着用する <input type="checkbox"/> 患者情報をホワイトボードに記入、読み上げ、全員で情報共有し、診療手順を確認する	<input type="checkbox"/> コールドゾーンの資機材及び人員の配置再確認 <input type="checkbox"/> 患者および各職種、使用した資機材等の動線の確認
患者受け入れ	<input type="checkbox"/> 医師の第一印象評価および指示が出るまで患者に触れない <input type="checkbox"/> モニターの装着とバイタルサイン測定、測定結果の読み上げ <input type="checkbox"/> 点滴内容や採血量を医師に確認し、点滴ライン確保と採血を実施する <input type="checkbox"/> 診療の補助 <input type="checkbox"/> 可能なら衣類を裁断し、ログロールにて患者の脱衣を行う	<input type="checkbox"/> 診療資材供給準備 <input type="checkbox"/> 点滴ライン確保と採血、診療補助への助言 <input type="checkbox"/> 医療情報をホワイトボードに記録 <input type="checkbox"/> 採血スピッツや脱衣した衣服等を受け取り、患者氏名や採取時間を記入し、コールドゾーンの診療放射線技師に保管場所を確認する <input type="checkbox"/> 脱衣後、毛布類の保温資材の供給
除染処置開始	<input type="checkbox"/> 詳細汚染検査の補助(スミア等) <input type="checkbox"/> 洗浄水や汚染・非汚染資機材を管理し、除染の補助を行う <input type="checkbox"/> ガーゼ検体等のホットゾーンからの搬出	<input type="checkbox"/> スミア等への助言 <input type="checkbox"/> スワブ・ガーゼ検体等の受け取り、患者氏名や採取部位を記入し、保管する
除染処置終了	<input type="checkbox"/> 退出前、患者の全身詳細検査の補助	<input type="checkbox"/> 使用した洗浄水や使用資機材を念頭に、汚染拡大の可能性箇所指摘する
患者退室	<input type="checkbox"/> 退出患者の動線の確認 <input type="checkbox"/> 使用した資機材が患者と一緒に搬出されないように数量を確認する	
職員退室	<input type="checkbox"/> 診療放射線技師の汚染検査下でホットゾーン内の物品片付け <input type="checkbox"/> 个人防护装備の脱衣 <input type="checkbox"/> 退室後、ポケット線量計の数値確認と報告し、全身汚染検査を受ける <input type="checkbox"/> コールドゾーン看護師との記録の確認	<input type="checkbox"/> コールドゾーンの物品後片付け <input type="checkbox"/> 个人防护装備の脱衣 <input type="checkbox"/> ポケット線量計の数値確認と報告 <input type="checkbox"/> 全身汚染検査を受ける <input type="checkbox"/> 医師やホットゾーン看護師と記録を確認する

図 4. 原子力災害医療 アクションカード 看護師用

キーポイント: 受け入れから退出まで、患者の心理状態への配慮・声かけを意識する。汚染拡大防止やスタッフの二次被ばくの低減を考慮しつつ、診療補助を優先する。各職種間の密なコミュニケーションは重要

時系列	ホットゾーン	コールド(ウォーム含む)ゾーン
災害発生「EALの警戒事態発令時」	<input type="checkbox"/> 測定器の確保と正常動作確認(GM・NaIシンチレーションサーベイメーター及びポケット線量計) <input type="checkbox"/> バックグラウンド測定(GM・NaIシンチレーションサーベイメーター) <input type="checkbox"/> 個人線量記録用紙の準備 <input type="checkbox"/> 施設や資機材の準備と養生(他職員と共に)	
患者受け入れ要	<input type="checkbox"/> 役割分担の確認(ホットゾーン1名以上、コールドゾーン2名以上) <input type="checkbox"/> ポケット線量計の配布と記録(0CLR確認と線量計番号・氏名を記録し、胸部(男性)・腹部(女性)に装着) <input type="checkbox"/> 患者受け入れ前のバックグラウンドの共有(ホワイトボードへ記録) <input type="checkbox"/> 個人防護装備の着用(ベアで確認) <input type="checkbox"/> ホットゾーン内の資機材及び人員の配置再確認 <input type="checkbox"/> 動線の確認(各職種の動きを確認)	<input type="checkbox"/> 体表面モニター(ゲートモニター)準備 <input type="checkbox"/> トリアージでの汚染確認準備
患者受け入れ	<input type="checkbox"/> 汚染箇所の同定(GMサーベイメーターにてクイックサーベイ、生体モニター装着部優先) <input type="checkbox"/> 汚染箇所の線量率測定(線量率の高い箇所を同定し詳細測定) <input type="checkbox"/> ログロール時、背面の汚染検査(汚染拡大に注意し測定)	<input type="checkbox"/> 患者受け渡し後、救急隊や救急車などの汚染検査(応援要請も可) <input type="checkbox"/> 患者搬入時のバックグラウンド測定(NaIシンチレーションサーベイメーター) <input type="checkbox"/> 空間線量率の情報共有(ホワイトボードへ記録) <input type="checkbox"/> 手袋交換など適宜指示 <input type="checkbox"/> ログロール時、汚染拡大の注意指示
除染処置開始	<input type="checkbox"/> 開口部付近・生体モニター装着部付近の汚染検査(レートを確保する場合、穿刺部) <input type="checkbox"/> 全身の汚染検査(処置に配慮し検査) <input type="checkbox"/> 汚染箇所の同定と詳細な線量率測定 <input type="checkbox"/> 除染部位の同定(傷を優先) <input type="checkbox"/> 除染後、線量率測定(繰り返し) <input type="checkbox"/> 他の部位の汚染検査(詳細測定)	<input type="checkbox"/> ホットゾーン内の汚染拡大監視と防止指示(手袋交換含め声掛け) <input type="checkbox"/> 採取検体の核種同定(測定室へ) <input type="checkbox"/> スメア後のスワブの線量率測定(内部汚染有無報告と核種同定のため測定室へ)
除染処置終了	<input type="checkbox"/> 退出前、患者全身を再度汚染検査(検査漏れをなくす)	<input type="checkbox"/> 患者の汚染検査漏れなど指摘 <input type="checkbox"/> 汚染拡大の可能性箇所の指摘
患者退室	<input type="checkbox"/> 患者退出時、汚染拡大防止のための監視と指摘(必要に応じ汚染検査も行う)	
職員退室	<input type="checkbox"/> 個人防護装備の脱衣の援助(適宜、手袋の交換指示や汚染検査を行う)	<input type="checkbox"/> 退出時、靴底の汚染検査 <input type="checkbox"/> 退出後、全身汚染検査(特に露出部と手袋に注意) <input type="checkbox"/> ポケット線量計回収・確認と記録
職員退出後	<input type="checkbox"/> 資機材の汚染検査・養生解除とコールドゾーンへの引き渡し <input type="checkbox"/> 全ての資機材を引き渡した後、個人防護装備の脱衣・退出 <input type="checkbox"/> 数名の放射線技師はコールドゾーンから手袋と足袋装着しホットゾーンに入室 <input type="checkbox"/> GMサーベイメーターにてホットゾーン床の汚染検査と汚染箇所の範囲の同定 <input type="checkbox"/> 床養生の撤去後、床の汚染検査(汚染有りと同定の箇所) <input type="checkbox"/> 安全宣言(第三者機関にお申しすることも可)	<input type="checkbox"/> 資機材をホットゾーンから受け取り <input type="checkbox"/> 資機材の汚染再検査(詳細測定) <input type="checkbox"/> 退出後の汚染検査(詳細測定)

図5. 原子力災害医療 アクションカード 診療放射線技師用

キーポイント: 平時よりの準備と除染作業中の汚染拡大監視及び声掛け

5-1 放射線管理

Key Point

- 測定を行う目的に応じてサーベイメータの種類を選定する事が大切である。表面汚染検査は熟練を要するが注意点を把握し測定を行う事が大切である。
- 病院施設の汚染拡大防止措置は、病院施設内の医療関係者や患者のみならず周辺住民に対して、放射性物質による汚染の不安を与えないことを主な目的とする。
- 医療従事者への汚染拡大および内部被ばくの防止のためには、適切な个人防护装備が重要である。
- 汚染傷病者の体表面汚染検査結果の記録と医療従事者の被ばく管理は放射線災害・被ばく事故対応の記録を残さなければならない。
- 汚染傷病者の搬送は汚染の封じ込めや搬送ルート的重要性、手術室での汚染傷病者の受け入れについて注意しなければならない。
- 汚染傷病者を病棟に入院させる場合には医療従事者の被ばくや病棟における汚染拡大防止措置を重視すべきである。

サーベイメータの種類と取扱いについて

1 サーベイメータの種類

放射線の量や放射性物質による汚染の状況は、サーベイメータ等の放射線測定器によって知ることができる。サーベイメータには、主に空間線量率の測定に用いられる NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータ、電離箱式サーベ

イメータなどがあり、主に表面汚染の測定に用いられるものには β (γ) 線 (ベータ (ガンマ) 線) を測定できる GM 計数管式サーベイメータ、 α 線 (アルファ線) も測定できる ZnS (Ag) シンチレーション式サーベイメータがある¹⁾。

1.1 準備する放射線測定器

放射線測定器は、空間線量計、表面汚染線量計、個人線量計の3種類を準備する(図1)。

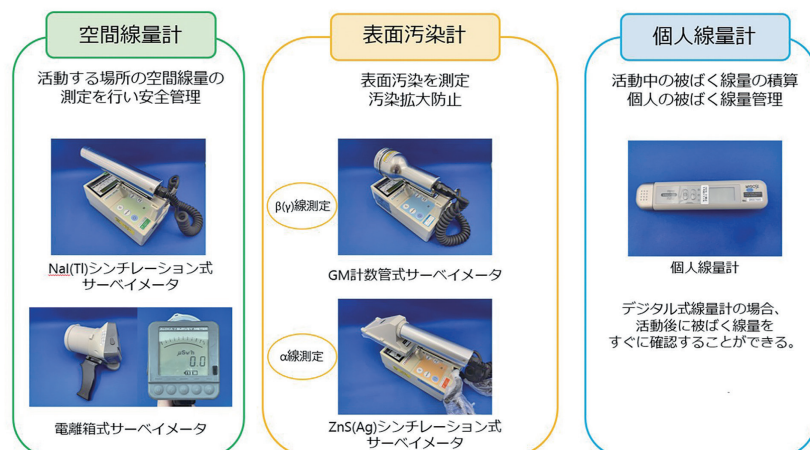


図1. 準備する放射線測定器

サーバイメータの取り扱いとして、ここでは例としてGMサーバイメータの取り扱いについて記述する。

①電源を入れる。

- サーバイメータは電池を使用するため電池の残量を確認する。

②バックグラウンドレベル (B.G.) を測定する。

- 必ず時定数を「30」にセットし90秒以上放置したうえで数値を読み取り、記録を行う。
- 汚染検査で測定された計数値からこのB.G.の値を差し引くことで正味の計数値が得られる。

③汚染と判断する基準値あるいは警報値の設定を確認する。

- 同じ表面密度でも測定器ごとに測定値が異なる。
- 測定器によっては警報値を設定することが出来る機種もある。

④表面汚染測定時の注意点 (図2)²⁾

- プローブ (検出部) を汚染しないようにビニール袋、ラップ等で覆い測定を行い、作業中に汚染をしたらこのビニール袋等を交換する。
- 時定数の設定はクイックサーベイでは基本「3」に設定する。ただし、測定対象が除染後など低計数率の場合は時定数を「10」に設定する。

- 放射線被ばくに対する不安を考慮してサーバイメータのスピーカーはオフにする。ただし、イヤホン付属の機器などを使用するか、サーベイ開始時に検出音について説明して理解が得られれば必ずしも消音する必要はない。
- 測定時は、測定の対象から「一定の距離を保つこと」、「角度を一定に保つこと」、「速度を一定に保つこと」に注意する。計測する表面からの距離が離れると計数値は小さくなる。また、距離が異なると正確な評価ができない。GM計数管式サーバイメータは、検出部の窓以外からはβ線 (ベータ線) が入射しない。表面と検出部の角度が異なると検出部との距離も異なる。そのため、表面と検出部の角度を一定に保つ。表面汚染検査では、検出部は1秒間に5-6 cmの距離を動かす。速度が速すぎると、指示値が表示される前に汚染のない箇所に移動してしまい、汚染を見逃してしまう。

2 汚染傷病者搬送時の身体汚染検査

身体汚染検査は、放射線物質が身体表面に存在するか否かを確認することを目的としており、身体の除染や専門医師による医療処置の

- プローブ (検出部) を汚染しないようにビニール袋、ラップ等で覆う。
- 消音とする。

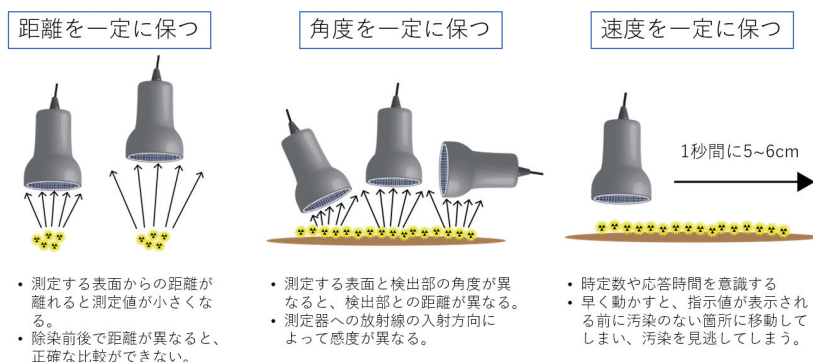


図2. 表面汚染測定時の注意点 (文献2より引用)

判断に必要な身体汚染の情報を提供する³⁾。

- 最初の汚染検査はクイックサーベイとしてポイントを絞って迅速に行う。ポイントとなる部位は心電図モニターや血圧計、SpO₂モニターを装着する部位、末梢静脈路を確保する部位を対象とし、汚染がないことを確認してから血管確保等を行う。
- 汚染傷病者の状態が落ち着いたあと、まずは傷口の汚染検査、次に口、鼻、耳等の開口部の汚染検査を行う。その後、頭部から足底、背側全体の健常皮膚を測定する。
- 汚染が検出された部位については、プローブ（検出部）を時定数の3倍以上の時間保持し、計数値を読み取る。

医療機関の養生について

1 基本的事項

放射性物質による汚染傷病者や汚染の可能性がある患者の場合は、医療関係者の汚染防護措置と病院施設の汚染拡大防止措置が必要となる。なお、過去の事例では、汚染傷病者の診療において医療関係者が二次被ばくや汚染によって、放射線影響を受けたことはない。

そのため、病院施設の汚染拡大防止措置は、病院施設内の医療関係者や患者のみならず周辺住民に対して、放射性物質による汚染の不安を与えないために適切な対応が必要である。また、医療機関が風評被害対策を実施するためにも重要となる¹⁾。

2 汚染拡大防止のための養生

汚染傷病者を診療する処置室や救急室入口から処置室までの通路、および搬送するストレッチャー等を汚染させないために、汚染しても除染しやすく廃棄処分できる酢酸ビニールシートや汚染水等を吸収するろ紙シートを用いて事前に養生することで、汚染拡大の防止を行う。養生は処置室の床全体に対して、汚染が床材や壁に直接付着しないために、滑り止め加工を施した強度のある酢酸ビニールシート等で覆い、壁面は約 50 cm 以上シートを立ち上げ、その周

辺をテープで固定する(図 3,4)。さらに、図 3 に示す通り、汚染傷病者の処置台やストレッチャー周辺の床には、ろ紙シートをストレッチャー約 3 台分の広さで敷きその周辺をテープで固定し、除染水等が床に落ちて吸収されるように養生する(図 5)。また、ストレッチャーには滅菌用デイスポシートを適宜取り替えられるように複数枚を事前に敷いておく(図 6)。

なお、処置室のインターホンや電話受信機、診療に使用する様々な機器はビニール袋等で覆い養生するが、その機器の機能や操作の妨げにならない程度にする(図 7)。汚染拡大防止措置を施している処置室および医療スタッフの例を図に示す(図 8)。



図 3. 養生手順①

酢酸ビニールシート等を使用して、壁面は約 50 cm 以上シートを立ち上げ、その周縁をテープで固定する。

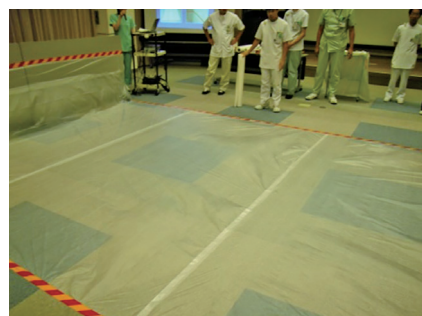


図 4. 養生手順②

隙間の無いように、シートとシートは少し重ね合わせテープで固定し床面全体を覆う。

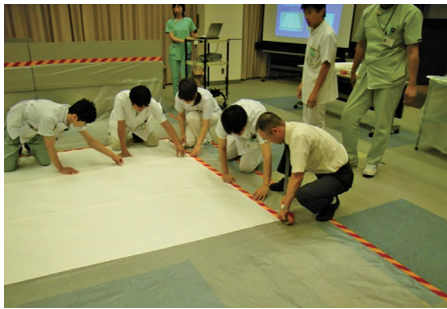


図 5. 養生手順③

処置台やストレッチャー周辺の床には、ろ紙シートをストレッチャー約3台分の広さで敷く。ろ紙シートの周縁もテープで固定する。



図 6. 養生手順④

ストレッチャーもビニールで覆い、その上にろ紙シートを敷く。

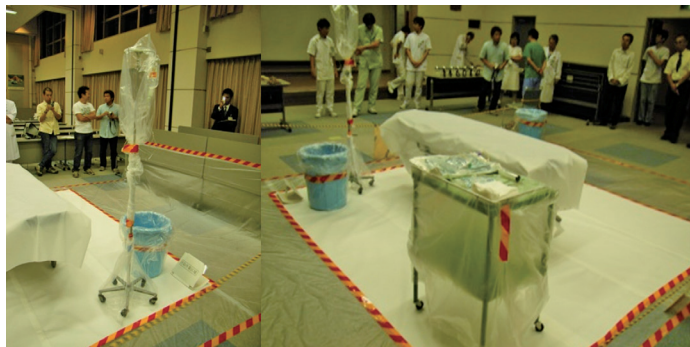


図 7. 養生手順⑤

管理区域内で使用する点滴棒・ワゴンもビニールで養生する。



図 8. 汚染拡大防止措置を施している処置室および医療スタッフの例 (文献 1 より改変)

【汚染作業区域】

A: 医師 (処置担当)、B: 看護師 (直接介助)、C: 診療放射線技師 (汚染検査)

【一時的管理区域】

D: 看護師 (記録)、E: 看護師 (器材だし)、F: 診療放射線技師 (場の管理)

【管理区域外】

G: 医師 (リーダー)

医療従事者の防護について

放射線災害・原子力災害における医療従事者の放射線防護の目的は、外部被ばく・汚染防護と内部被ばく防護により無用な被ばくを避けることである。そのため、本項目では、医療従事者の被ばく線量を低減するための放射線防護手法を具体的に提示する。

まず、外部被ばく防護は3原則の、「時間」、「距離」、「遮蔽」を実施することとなる。ただし、放射線災害・原子力災害で発生するような放射性核種の場合、 γ 線（ガンマ線）のエネルギーにより遮蔽が困難な場合がある。例えば、放射性セシウムの「遮蔽」は放射線量率を半分にするのにコンクリートで4.9 cm、鉄で1.5 cm、鉛で0.7 cmの厚さが必要になるため⁴⁾、被ばく低減には相当な重量の遮蔽物が必要となる。そのため、放射線災害・原子力災害時の外部被ばく防護は、放射性核種の種類により「遮蔽」に重きを置くのではなく、「時間」と「距離」を徹底したほうが、効率よく被ばく線量を低減することが可能である。医療従事者の外部被ばくは、図9に示す空間放射線量率を測定可能な線量計で測定を行う。これらの利用は汚染傷病者の入室前の環境バックグラウンドから空間放射線量率を測定しておき、汚染傷病者入室後の空間放射線量率と比較することで、放射線災害・原子力災害対応時の医療従事者の被ばく線量を知ることが可能である。

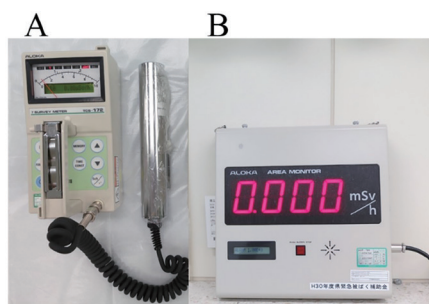


図9. 空間放射線量率測定に使用する測定機器 (A: NaI(Tl) シンチレーションサーバイメータ、B: ポータブルエリアモニタ)

そして、個人の外部被ばく線量は、図10のような個人線量計にて、計測が可能である。図10Aは電子式個人線量計である。この線量計はアラーム無し(図10A上段)とアラーム有り(図10A下段)があり、アラーム有りの場合、設定した被ばく線量に到達した時点で、音と振動にて使用者へ通知をする。表1のように、電子式線量計はPHS、携帯電話、トランシーバーなどの電磁波を発する電子機器と一緒に保有していた場合、電磁波による誤作動を起こす可能性があるため、注意しなければならない。また、図10Bのように積算型個人線量計も利用可能である。

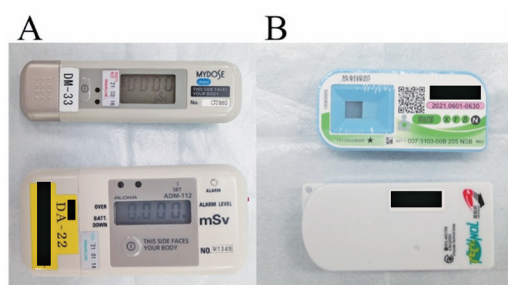


図10. 外部被ばく線量を測定するための個人線量計 (A: 電子式個人線量計、B: 積算型線量計)

図10B上段は積算型線量計でも1か月ごとの積算により被ばく線量を把握することができる。図10B下段はD-シャトル[®]と呼ばれる1時間当たりの積算型線量計となる(表1)。D-シャトル[®]は放射性核種の γ 線（ガンマ線）エネルギーの違いにより検出感度が異なる可能性があるが⁵⁾、放射性セシウムなどの放射線災害・原子力災害で放出されるような放射性物質であれば、被ばく線量の測定はD-シャトル[®]でも十分測定可能である。ただし、積算式個人線量計は被ばく線量を直読できないのが欠点となる。また、電子式個人線量計は優先的に外部被ばく線量評価へ使用することが望ましい。一方、積算型線量計は電子式個人線量計が人数分準備できなかった場合の代替的な外部被ばく線量評価の手段であると認識すべきである。

また、医療従事者は体表面汚染による放射

表 1. 個人線量計の種類と特徴

個人線量計	被ばく線量確認	アラーム機能	誤作動	線量の読み取り
電子式個人線量計 (図 10A)	作業期間の線量	一部の機種であり	電磁波の影響あり	使用者
積算型線量計 (図 10B 上段)	1 か月ごとの積算	なし	なし	業者に依頼し、後日結果が届く
D-シャトル® (図 10B 下段)	1 時間ごとの積算	なし	強い衝撃	PC 接続の読み取り機を使用



図 11. 個人防護装備の種類とその使用レベル

線防護も必要となる。この放射線防護は、個人防護装備 (personal protective equipment: PPE) となる。個人防護装備は、放射性物質、化学物質、ウイルス、細菌等が身体への付着や体内に侵入することを防ぐために着用するための帽子、目の保護具 (ゴーグル、フェイスシールド)、各種マスク、手袋、防護服、シューズカバーなどを指す。

特に、図 11 のように、防護服、ゴーグル/シールド、呼吸防護具は体表面汚染状況及び放射性物質の種類に合わせて装備レベルを変える必要がある。例えば、個人防護装備は、想定として放射性物質が不明な場合、アクチニドの表面汚染がある場合、などにおいて、

図 11 にある高いレベルの装備が求められる。一方で、汚染傷病者の除染が終了している場合など、状況に応じて個人防護装備は図 11 に示す低いレベルの装備でも構わない。個人防護装備に放射性物質が付着したとしても、その場で脱衣をするため、医療従事者は体表面汚染を広げることがない。これは、汚染拡大防止につながる。最後に、内部被ばく防護は、図 11 のゴーグル/シールド、呼吸防護具が重要となる。これらを状況に応じて選択し、適切に装着することが求められる。特に呼吸防護具の装着方法は多くの注意点が存在するため、専門書に従い的確に装着することをお勧めする⁶⁾。

汚染傷病者の汚染検査・記録、医療従事者の被ばく管理、放射線管理区域に準じた管理について

本項目では汚染傷病者の体表面汚染検査結果の記録と医療従事者の被ばく管理について、放射線災害・原子力災害対応の医療施設における記録について述べる。また、医療従事者が汚染傷病者を受け入れる場合の放射線管理区域について、その区分に関して、例を用いて解説する。

汚染傷病者の体表面汚染検査の結果は、図12A（福島県立医科大学で使用）のように、具体的に記録を残しておくべきである。特に、どここの部位がどの程度のレベルの体表面汚染をきたしており、除染後にどの程度の体表面汚染レベルとなったのかを記録する。放射性物質の種類や複数の核種が検出された際のその割合が既知の場合、この記録は、汚染傷病者の皮膚線量を計算する上で、重要な役割を果たし、皮膚障害のリスクを予想することが可能である。また、図12Bにあるように、汚染傷病者からの採取試料（スメアなど）は測定結果の記録も具体的に残すべきである。これは、汚染傷病者の内部被ばくの可能性を判断する

だけでなく、他の内部被ばく検査を選択するための重要な判断材料となりえる。

また、医療従事者の被ばく管理は個人線量計記録用紙を用いて、着用者、着用期間、計測線量の記載が必要となる。例を図13（福島県立医科大学で使用）に示すが、こちらは、電子式線量計を用いた場合の記録用紙となる。積算線量計でもD-シャトル[®]を使用した場合も同様に、着用者と着用期間の記録が必要となるが、被ばく線量の読み出しは別途対応が必要となる。図14に放射線災害・原子力災害対応時のD-シャトル[®]使用方法の例を示す。医療従事者は図14Aの写真のようにストラップにD-シャトル[®]を封入した状態で、直ちに使えるような状態で、準備しておくことが可能である。そしてD-シャトル[®]の結果は図14Bのように、時系列に沿って1時間ごとに表示が可能であり、環境バックグラウンドを除く着用者の被ばく線量の傾向を示すことができる。表2のように、D-シャトル[®]は電子式個人線量計と異なり、電池装填や電源オンの作業が不要なため、放射線災害・原子力災害対応で簡易的な使用を可能としている。そのため、個人線量計は表2のような管理の特徴を理解したうえで、配備することが望ましい。

A


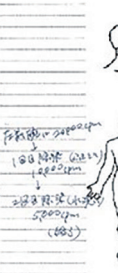
氏名 田中 太郎		年齢 35	性別 男
----------	--	-------	------

1	頭部汚染検査
顔	なし
髪	なし
耳	なし
手	なし

2	手足汚染検査
手	なし
足	なし

3 詳細汚染検査

※線量目標：1万cpm

B

採取試料 集計表

採取日: 2021年3月12日

患者ID: 100325747

患者氏名: 田中 太郎

年齢: 35

試料番号	採取試料名(部位)	採取時刻	測定時刻	測定値	備考
1	口内(唾液)	14:45	14:50	0.02	検出
2	鼻	14:50	14:55	0.02	
3	鼻	14:55	15:00	0.02	
4	鼻	15:00	15:05	0.02	
5	鼻	15:05	15:10	0.02	
6					
7					
8					
9					
10					

図12．汚染傷病者の体表面汚染検査記録用紙(A)と採取試料（スメアなど）の測定記録用紙(B)

表 2. 個人線量計の管理における特徴

個人線量計	使用時の電源投入	バッテリー源	定期点検
電子式個人線量計	必要	使用時に電池を挿入	1～2年に1回
積算型線量計	不要	不要	不要
D-シャトル®	不要	年1回、企業が電池を交換	年1回

個人線量計記録用紙

日付	線量計No	名前	貸出時間	線量(μSv)	備考
3/12	DM-07	福島 次郎	13:30~15:30	3	
3/12	DM-11	日本 洋子	13:30~15:30	2	
3/12	DM-16	本宮 三郎	13:30~15:30	2	
3/12	DM-03	環境ビギンナー	13:30~15:30	1	
/			: ~ :		
/			: ~ :		
/			: ~ :		
/			: ~ :		
/			: ~ :		
/			: ~ :		
/			: ~ :		
/			: ~ :		
/			: ~ :		

図 13. 医療従事者用の個人線量計に関する使用記録用紙

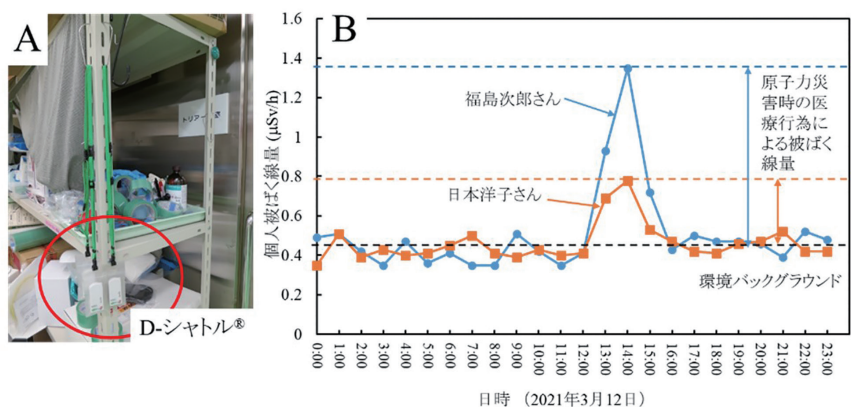


図 14. D-シャトル®の使用に関する保管場所 (A) と結果 (B) の例

D-シャトル®の保管場所は個人防護装備を実施する場所に設置することで、即座にD-シャトル®を身につけることができる

さらに、汚染傷病者と医療従事者の動線を管理するためには、放射線管理区域に準じた区域分け (ゾーニング) が必要となる (ここでは1例を示す)。放射線管理区域は図 15A の

ように赤枠で囲まれた区域であり、ゾーニングを実施する。この放射線管理区域の内側には、汚染作業区域 (ホットゾーン)、緩衝区域 (ウォームゾーン)、汚染を極力回避する区域

(コールドゾーン)が存在する。これらの区域の外側には立ち入り制限区域が存在する。ホットゾーンは、図 15B のように、酢酸ビニールシートや紙が敷かれるとともに、ウォームゾーンとパーテーションなどで区切られ、汚染拡大防止措置が取られる。ここでの注意点として、ホットゾーンからウォームゾーンやコールドゾーンへ試料を出す場合や、医療従事者が移動する場合、すべてに対して、表面汚染の測定を実施しなければならない。加えて、放射線災害・原子力災害時の汚染傷病者対応において、放射線管理区域を含む立ち入り制限区域で医療従事者は絶対に飲食をしてはならない。これは、医療従事者の内部被ばく防護のための鉄則となる。

除染より医療対応を優先する場合の注意すべきポイント

汚染傷病者に生命を脅かすような病態が存在する場合には、輸液や侵襲的な蘇生手技を施行の後、除染をスキップして、院内の X 線 CT 検査室や手術室、血管造影室などへ汚染傷病者を搬送することとなる。そのため、本項目では汚染傷病者の搬送に関して汚染の封じ込めや搬送ルートの重要性、手術室での汚染傷病者の受け入れについて解説する。

まず、汚染傷病者の移動は汚染傷病者自体の汚染拡大防止措置を必要とする。例えば、

汚染部位が限局している場合、テガダーム™や大きめの医療用ドレープなどを用いて、汚染部位をカバーする。一方で、汚染部位が全身に渡る場合には、図 16 のような「汚染傷病者搬送用シート®」を用いて放射性物質を封じ込めた状態で、院内の搬送を実施する。このシートは特殊素材のシートと樹脂製のファスナー、ファスナーの金属留め具からできている。このシートのファスナーや留め具は X 線透過性があるため、緊急であれば X 線 CT 検査はシートで汚染傷病者を包んだまま撮影することが可能である。

また、院内で汚染傷病者を迅速に搬送するためには、事前に搬送ルートを決めておくことが望ましい(図 17)。図 17 は汚染傷病者の病院敷地内で屋外を通る搬送例である。屋外の搬送ルートは緊急車両や大型バスが通行できることを事前に調査して決定することとなる。また、室内の搬送ルートは汚染傷病者の処置室から X 線 CT 検査室や手術室、血管造影室などへ、そして、病室まで事前決めておくことが重要となる。汚染傷病者の搬送動線を明確にしておくことは、来院者や一般入院患者と区別して汚染傷病者の搬送も計画できるため、院内における汚染傷病者対応に関して他者へ余計な被ばくの不安を与えないためとも考える。

さらに、汚染傷病者の緊急手術に備える上で、手術室の受け入れ態勢を構築する必要がある。

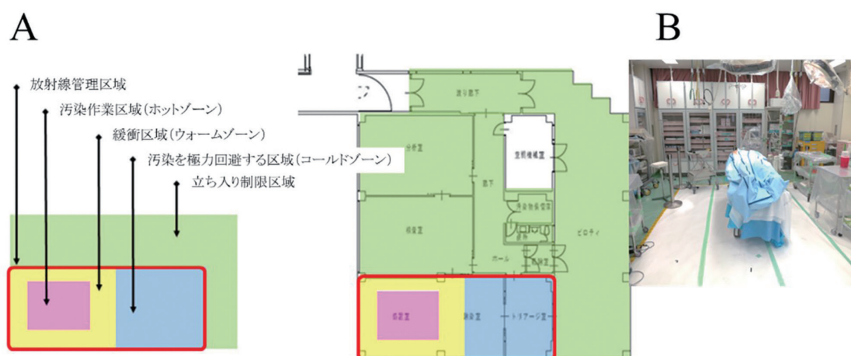


図 15. 放射線管理区域に関連する区分 (A) と具体例 (B)

(福島県立医科大学附属病院 放射線災害医療センターの「福島医大放射線事故・災害医療対応マニュアル_外来編」より)

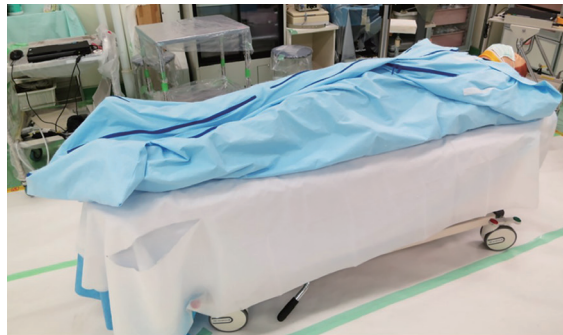


図 16. 汚染傷病者搬送用シート®の外観

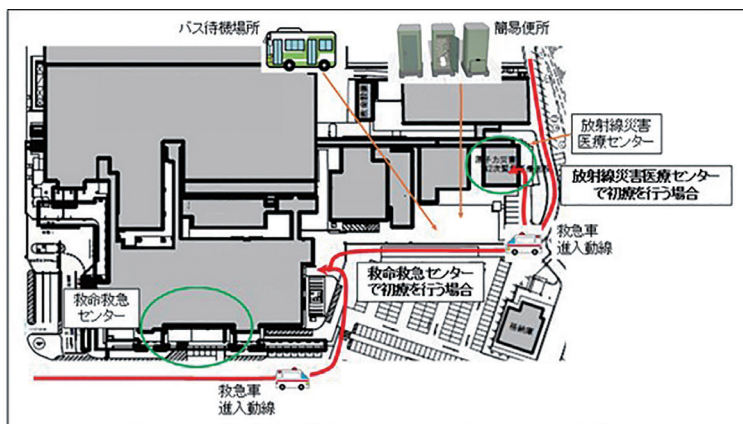


図 17. 汚染傷病者の病院敷地内屋外における搬送ルート例

(福島県立医科大学附属病院 放射線災害医療センターの「福島医大放射線事故・災害医療対応マニュアル_外来編」より)

そのテクニックはすでに報告されており⁷⁾、そのうち最も重要な部分は、床、資材の養生などの手術室内における汚染拡大防止の準備を緊急手術に合わせて迅速に展開できるかになる。そのためには、図 18A のように、あらかじめ酢酸ビニールシートやろ紙を切っておき、図 18C のように手術室のどの場所に何番のシートを敷くか図面を作成しておくことが望ましい。この手術室内のゾーニングは、図 15A と同様に、放射線管理区域、ホットゾーン、ウォームゾーン、コールドゾーンを設定することで、汚染拡大防止を目指す。加えて、図 18B のように、医療従事者同士で、あらかじめ準備した養生資材を張り合わせる訓練をすることにより、汚染傷病者の緊急手術に備えることが可能となる。

病棟での管理（入院対応）

本項目では汚染傷病者が病棟で入院する場合の医療従事者の被ばくや病棟における汚染拡大防止措置に関する 2 点を具体的に述べる。

体表面の放射性物質は脱衣により 90% 程度が除染されるため、病棟へ移動する汚染傷病者は多少なりとも除染を受けていること、もしくは、汚染の封じ込め処置を受けていることが考えられる。また、皮膚の拭き取り除染などで拭き取られた後の体表面汚染は皮膚へ固着しており、容易に脱落しない。よって、医療従事者は病棟での汚染傷病者からの内部被ばくは考慮に入れなくてよい。さらに、内部被ばくの汚染傷病者に関する入院の場合、医

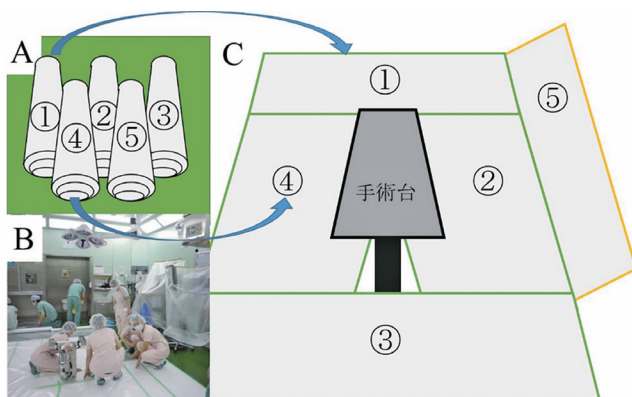


図 18 手術室内の汚染傷病者受け入れのための養生に関する例

(A : 事前に切り分けた養生資材、B: 手術室の養生作業、C: 養生資材の貼付け図面)

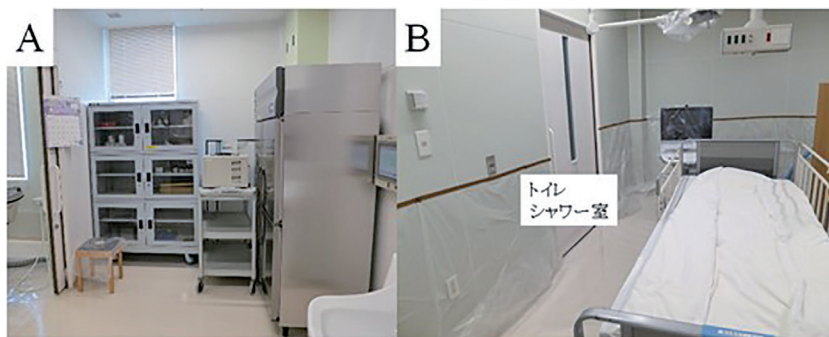


図 19. 汚染傷病者の入院施設及び、設備 (A: 前室、B: 病室)

療従事者は汚染傷病者の生体試料（血液、吐しゃ物や排泄物など）に含まれる放射性物質からの2次的な被ばくを想定する可能性がある。しかし、生体試料に含まれる放射性物質の量は微量であることが考えられ、放射性物質による特殊な対応は不要である。よって、汚染傷病者の生体試料は通常病棟で実施されている感染対応で十分である。

加えて、ウラン加工工場臨界事故のような中性子線被ばくの場合、被ばく傷病者の体内ナトリウムが放射化してナトリウム 24 になる可能性があり、その場合、医療従事者は外部被ばくに関する放射線防護を考慮する可能性が考えられる。しかし、ウラン加工工場臨界事故の被ばく傷病者から医療従事者が受けた外部被ばく線量は 0-4 μSv （個人線量計を装着していた期

間単位）とかなり低い線量で推移していた⁸⁾。また、ウラン加工工場臨界事故の入院患者周辺の空間放射線量率も最大 1.50 $\mu\text{Sv/h}$ であり、十分に低い線量率であった⁷⁾。医療従事者は、このような被ばく傷病者への医療行為も、放射線災害・原子力災害対応と同様に、外部被ばく防護 3 原則の「距離」や「時間」を中心に医療行為を実施することで、外部被ばくを低減することが可能であると考え。

また、図 19 のように汚染傷病者が入院する病室は、前室（図 19A）のように病室以外に、医療従事者が防護衣の脱着などに使用できる部屋を確保できると汚染拡大防止となる。また、病室（図 19B）は床や壁の養生による汚染拡大防護措置を取り、汚染傷病者を入室させる。その際に、トイレやシャワー室が病室に隣接

していると、汚染傷病者の動線が少なく、汚染拡大防止につながる。内部汚染した汚染傷病者が入院した場合、病室から出る排水はタンクに溜めるなどして管理することとなる。タンクの排水の処理に関して、内部汚染した汚染傷病者の発生が特定の事業所に起因していた場合、その事業所に依頼して回収してもらうことを想定する。そのため、原子力災害拠点病院などの医療従事者は、汚染傷病者の発生が予想される事業所の担当者や放射線管理要員が所属する担当部局を事前に把握しておくことが望ましい。

放射性廃棄物の管理

放射線管理区域内の廃棄物は、全て汚染がある廃棄物として取り扱う。そのため、廃棄物をまとめる作業は、個人防護装備を着用したスタッフが、放射線管理区域内でビニール袋にまとめるなどの方法で行う。この時、このビニール袋の表面にも汚染が疑われるため、管理区域外に出す際には、管理区域内で封をした上で、非汚染エリアのスタッフが持つビニール袋に入れることで受け渡すか、非汚染エリアに置いたビニール袋を入れたゴミ箱に入れるなどの方法で行う。検体の残りなど、再検査などで使用する可能性がある場合は、表面が汚染していないことが確認できている容器に移し、ラベルを添付した上で保管する。非汚染エリアで廃棄物を受け取ったビニール袋は、埃がたないように静かに封をし、NaI (TI) シンチレーションサーベイメータまたは電離箱サーベイメータで表面から 10 cm の位置と 1 m の位置の空間線量率測定を行う。測定結果は測定日時と共に紙に記載し、表面の見やすい位置に貼り付けておく。廃棄物の保管は、壁で区画された人の立ち入りが少ない場所や、十分な距離を保つことが可能な場所で行い、放射性の廃棄物を保管していることを示す標識を掲げておく。最終的な処理については、汚染を生じさせた事業所との協議により決定する。

養生の解除と安全宣言

全ての汚染傷病者の対応が終了したら、養生の解除を行い、処置室に汚染がないことを確認した上で安全宣言を行う。

養生の解除は、放射線管理区域内の廃棄物の処理、使用した資機材の養生解除、個人防護装備を着用したスタッフ全員の脱衣が完了し、放射線管理区域内に物がなくなった状態で行う。放射線管理区域外のスタッフが手袋をした上で、放射線管理区域外から、養生の表面を内側に織り込むように丸めながら養生を解除していく。この時、汚染の可能性がある養生の表面を触らないように注意する必要がある。また、埃がたないように静かに行う。解除した養生はビニール袋に入れ、他の廃棄物と同様に管理する。

最後に、解除した場所の汚染測定を GM サーベイメータで行う。汚染が確認された場合は、除染を行なった上で再度測定を行う。汚染測定と除染は資機材に関しても同様に行うこと。また、汚染がないことが確認できたら安全宣言を行う。この汚染測定と安全宣言は、保健所などの第三者機関が行うことが望ましいため、事前に自治体等と調整を行っておく必要がある。

参考文献

- 1) 原子力安全研究協会：緊急被ばく医療ポケットブック、2015。
- 2) 量子科学技術研究開発機構：原子力災害医療研修標準テキスト 基礎研修 5. 汚染検査・除染
- 3) 廣橋伸之：外部汚染傷病者への対応。救急医学 43: 761-767, 2019。
- 4) 日本アイソトープ協会：アイソトープ手帳。12 版。日本アイソトープ協会、東京、2020。
- 5) 赤平秀昭，佐々木泰輔，松尾国弘，et al: D- シャトルを用いた 18F-FDG/PET 検査における従事者の被ばく要因分析の試み；トレンド機能による検討。FBNews 482:6-10, 2017。
- 6) 小井土 雄一，作田 英成，鈴木 澄男，et al: 化学剤，生物剤，放射線・核，爆弾 CBRNE テロ・災害対処ポケットブック，診断と治療社，東京，2020。
- 7) 佐々木重徳，長谷川有史，貝沼純，et al: 手術室での被ばく汚染傷病者対応。OPE nursing 28: 95-102, 2013。
- 8) 放射線医学総合研究所：東海村ウラン加工工場臨界事故に関する放医研報告書，NIRS-M-143。放射線医学総合研究所，千葉，2001。

病院外のゾーニング

CBRNE（化学 chemical、生物 biological、放射性物質 radiological、核 nuclear、爆発物 explosive）災害では、その危険度によって防護レベルを切り分けるためにエリアを分離する「ゾーニング」を設定する¹⁻³⁾。化学剤や生物剤による災害では「ホット」「ウォーム」「コールド」の3エリアに分けることが多い。その名称や分類基準は様々で明確な定義がなされているわけではないが、図1に示すように使い分けられることが多い。

放射線災害の場合、適切な放射線測定器によって詳細な定量測定が可能であるため、ゾーニングに関してもより細かい分類をして、活動時間の規定を設けることが可能である。

線量率に応じてゾーニングと外部被ばく管理を行う。外部被ばく対策のためのゾーニングは、危険区域を100 $\mu\text{Sv/h}$ 以上の区域で設定する。また、危険区域に進入する場合は、放射線測定器の持参と個人線量計の装着は必須である。また、活動現場の空間線量率に応じて、個人が被ばく線量の限度を超えないように活動内容、活動時間を管理する必要がある。

Hotゾーンを設定した100 $\mu\text{Sv/h}$ の1000倍である100 mSv/h 以上の空間線量率の場所では、人命救助などの緊急作業のみ立ち入るようにし、その活動時間は30分以内とすることが望ましい。

区域	状況		基準		
Hotゾーン	● 汚染の可能性が高い区域	● 高濃度暴露	● 100 $\mu\text{Sv/h}$ 以上	危険区域	警戒区域
Warmゾーン	● 汚染の可能性があるが、除染などの作業が可能な区域	● 傷病者の評価 ● 傷病者の汚染あり ● 除染の際は、汚染、負傷の程度等を勘案しトリアージを実施	● 関係者の情報を得て協議の上設定 ● 100 $\mu\text{Sv/h}$ 以下 ● Coldゾーンに準じるくらい低い線量率が望ましい	準危険区域	警戒区域
Coldゾーン	● 汚染の可能性は低い区域	● 安全区域内 ● 標準防護策で対応	● 放射線のレベル、放射性物質の汚染に関する施設関係者又は専門家の意見を考慮し設定 ● 0.3 $\mu\text{Sv/h}$ 以下		警戒区域

図1. ゾーニングについて

参考文献

- 1) 阿南 英明：CBRNE災害における緊急被ばく医療．救急医学 43: 789-793, 2019.
- 2) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構：令和2年度放射線対策委託費 放射線安全規制研究推進事業 包括的被ばく医療の体制構築に関する調査研究 成果報告書 <https://www.nsr.go.jp/data/000362327.pdf>（アクセス日 2022-01-27）
- 3) 消防庁：原子力施設等における消防活動対策マニュアル（平成26年3月）
https://www.fdma.go.jp/mission/prevention/nuclear/items/gennshiryokuenosona_01.pdf（アクセス日 2022-02-14）

6-1 前駆症状による線量評価

Key Point

- 前駆症状の時期と程度が線量推定に役立つ。
- 嘔吐の開始時期は、全身の急性被ばくの線量推定の目安として有用である。

本章では、全身急性被ばくの線量評価を主に扱い、局所被ばくの記載も含める。被ばくの診断の中で、どの部分にどの位の量の放射線が当たったかを推定することは、予後を予測し治療法を決めるためにも極めて重要である。全身外部被ばくの線量評価法には、生物学的線量評価として、臨床症状、リンパ球数、染色体分析、EPR（電子スピン共鳴）が代表的である。また、物理学的線量評価として、線量再構築、作業環境評価、個人線量計の緊急読み取りが代表的である。本章では、これらを症状による方法、生体試料による方法、計測による方法に分けて解説していく。

1 前駆症状

全身急性被ばく線量が約1 Gy以上になると、

初期の2-3日間に、悪心、嘔吐、下痢、頭痛、体温上昇、意識障害といった前駆症状が現れる。これらはいずれも非特異的症状で、心理的影響を含む他の要因でも生じるため、鑑別が重要である。前駆症状は、線量が多いほど早期に重篤な症状が生じ、しきい線量が存在するため、症状の出現時期と有無をもとに線量評価を行うことができる。

2 嘔吐

臨床症状の中でも、嘔吐は有無の判定が容易であり、本人の記憶も確かであることが多いため、その発現時間が有用な線量推定方法として推奨されている（表1）。ただし、嘔吐は心理的要因でも生じ、誤差もかなりあるので、あくまで目安の1つとして利用する。

表1. 全身被ばく時の嘔吐と局所被ばく時の紅斑等による線量推定（文献1より引用・改変）

全身被ばく		局所被ばく	
臨床症状	推定線量 (Gy)	臨床症状	推定線量 (Gy)
嘔吐なし	<1	初期紅斑なし	<10
被ばく後 2-3 時間で嘔吐	1-2	初期紅斑または異常知覚：12-24 時間後	8-15
被ばく後 1-2 時間で嘔吐	2-4	初期紅斑または異常知覚：8-15 時間後	15-30
被ばく後1時間以内で嘔吐、あるいは血圧低下などその他の重篤な症状	>4	皮膚または粘膜の浮腫を伴う初期紅斑：最初の3-6時間以内	>30

表 2. 全身被ばく時の前駆症状と線量（文献 1 より引用・改変）

症状		およその被ばく線量 (Sv)				
		1-2 Sv	2-4 Sv	4-6 Sv	6-8 Sv	> 8 Sv
嘔吐	時期	2 時間以降	1-2 時間以内	1 時間以内	30 分以内	10 分以内
	発現率 (%)	10-50	70-90	100	100	100
下痢	程度			中等度	重度	重度
	時期	—	—	3-8 時間	1-3 時間	1 時間以内
	発現率 (%)	—	—	< 10	> 10	ほぼ 100
頭痛	程度	非常に軽い	軽い	中等度	重度	重度
	時期	—	—	4-24 時間	3-4 時間	1-2 時間
	発現率 (%)	—	—	50	80	80-90
意識	程度	影響なし	影響なし	影響なし	影響あり	意識喪失あり
	発現率 (%)	—	—	—	—	100 (50 Gy 以上)
体温	程度	正常	微熱	発熱	高熱	高熱
	時期	—	1-3 時間	1-2 時間	< 1 時間	< 1 時間
	発現率 (%)	—	10-80	80-100	100	100

3 局所被ばく

局所被ばくの場合でも、その部分の初期紅斑などからある程度線量評価が行われるが、誤差は非常に大きい。その目安を表 1 に示す。不確実性が大きいため、線量再構築による物理学的線量評価が重視される。

4 前駆症状と線量

その他の臨床症状の発現時期、発現割合と線量には表 2 のような関係が知られている。これも外部被ばくの線量評価に利用できる。唾液腺腫脹は前駆症状の 1 つであるが、線量評価にはあまり利用されない。

参考文献

- 1) IAEA: Safety Report Series No. 2: Diagnosis and treatment of radiation injuries, 1998. <https://www.iaea.org/publications/5135/diagnosis-and-treatment-of-radiation-injuries>（アクセス日 2021-12-21）

6-2 生体試料による線量評価

Key Point

- 生体試料による線量評価の方法には、血球数等の検査、染色体分析、バイオアッセイ、放射化された放射性核種の検出があり、利用可能な手法を組み合わせることが有効である。
- 血球数等の検査は多くの施設で実施可能であり、そこから得られる好中球数、リンパ球数等の変化から線量が評価される。
- 染色体分析では、末梢血リンパ球の染色体異常生成頻度に基づいた生物学的線量評価が可能である。
- バイオアッセイは、便や尿などの生体試料を分析して、それらに含まれている放射性核種を同定・定量する方法である。
- 中性子による被ばくでは放射化された放射性核種を検出できる可能性があり、特に体内のナトリウム 23 から、 γ 線を放出するナトリウム 24 が生成される場合がある。

血球数等の検査

血球測定は多くの医療施設で簡便、迅速かつ繰り返し実施可能であり、被験者への苦痛が少ない。そのため末梢血を用いた血球数の変化に基づく被ばく線量評価は広く利用されている。測定時には血球数と同時に白血球分画算出も必ず行い、被ばく後しばらくは連日計測する。特に高線量被ばく（下記の 500 mGy 以上が目安）が疑われる場合には被ばく後 48 時間は 6 時間毎の計測も考慮する必要がある¹⁾。その後も回復状況が確認できるまで、定期的に計測が必要である。

血液細胞の中でリンパ球は放射線に対する感受性が最も高く、500 mGy 以上で減少がみられるとされる²⁾。被ばく後の早期に（高線量の場合は数時間で）アポトーシスを介した細胞死による減少を示す。放射線による骨髄での造血抑制は血小板、好中球の減少をもたらす、リンパ球産生も抑制される。それぞれの成熟血球は体内に一定の蓄積があり放射線被ばくへの反応としての放出、血球の生理的半減期の違いを含めて被ばく後の血球数変化が生ずると考えられる。線量に応じて血球数は

系統ごとに異なる変化を示すが、全体として高線量ほど血球減少の程度は強くなる。代表的なパターンは文献 3 に示されている³⁾。

リンパ球数の変動は線量評価に用いられおり、例えば表 1 の値を用いて **線量 = $a - b \log(\text{リンパ球数} (\times 10^9 / \text{L}))$** の計算式から被ばく γ 線（ガンマ線）量を 2-10 Gy の範囲で推定できる³⁾。また好中球数も被ばく線量に応じて変化を示す³⁾。リンパ球より変化が遅いため線量推定に用いるには時間が必要となるが、変化のパターンや好中球数 500 / μL ($0.5 \times 10^9 / \text{L}$) となる日数を目安に線量を推定されることが多い。5-6 Gy 以上では好中球回復が得られない場合も考えられる。

こうした血球を用いる線量推定では、生理的な数値のばらつき（年齢、性別、個人差など）や計測毎の変動幅が大きいこと、血球数は様々な生体ストレス（疾患、薬剤など）によって変化することを考慮しておくことが重要である。健診など被ばく以前の血液データがあれば比較に用いる、あるいは他の線量推定方法と合わせて用いる必要がある。

表 1. 被ばく後リンパ球数の変化から線量を推定

被ばく当日をDay 0として、被ばく後日数に応じた係数 (a, b) を用いて

線量 = $a - b \log (\text{リンパ球数} (\times 10^9 / \text{L}))$ から推定被ばく線量が求められる

被ばく日数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	5.65	2.44	1.39	1.04	0.88	0.83	0.81	0.83	0.95	0.98
b	34.37	17.45	9.97	7.26	5.66	4.81	4.41	4.42	4.08	4.05

染色体分析

生物学的線量評価法では、主として患者の末梢血を試料とする。放射線により誘発された細胞核での DNA 損傷は、細胞分裂時に染色体構造異常として検出される。被ばくした線量と生成された染色体異常の頻度との間に一定の線量効果関係があることから、実験的に得た線量効果曲線に患者の染色体異常頻度を当てはめて線量を推定する。これを細胞遺伝学的な生物学的線量評価法という^{4, 5)}。指標となる主な染色体異常は二動原体染色体異常、染色体転座、小核であり、国際標準化機構により標準化された手順書が用いられる⁶⁻⁹⁾。DNA 修復に関わる酵素の変化や遺伝子発現変動を指標とする手法も開発されつつあるが、標準化には至っていない。本項では、放射線被ばく事故対応で実際に用いられている二動原体染色体と転座染色体の分析について概説する。

1 放射線被ばく事故発生後 初期段階における染色体分析

緊急被ばく医療において、被ばく線量情報は医学的処置の方針決定に必須である。末梢血リンパ球の二動原体染色体頻度に基づき線量評価を行う二動原体分析法が、国際的に標準化され、信頼性の高い至適基準として用いられている^{6, 7)}。二動原体染色体は二つの染色体間で切断端の誤った修復・融合が起こって生じた、動原体を 2 個もつ染色体で、ギムザ染色により形態的に容易に検出されるものの¹²⁾、細胞分裂ごとに 1/2 の確率で失われるので、正確な線量評価のためには被ばく後 4 週間以内の採血が推奨されている。東京電力福島第

一原子力発電所事故に対する被ばくの診断として、現在では分子細胞遺伝学的手法 (fluorescence in situ hybridization: FISH) を応用した二動原体検出も可能となっている^{11, 12)}。

2 過去の放射線被ばく事故に関する染色体分析

転座染色体は、二つの染色体間で切断端の誤った修復・融合が起こって生じるが、動原体が 1 個であるため細胞分裂で消失せず、長期的に保持される。2-4 種類の染色体を蛍光標識する FISH 法により、生存者の採血時の転座の頻度から、遡及的に線量を推定することができる^{8, 12-14)}。

ヒト 24 種類の染色体を異なる色で検出する M-FISH 法¹²⁾による核型分析も可能であるが、転座染色体から 20 年以上遡る事故当時の線量推定が可能かどうかについては検証を要するところである。

3 大規模放射線事故への備え

被ばく線量が低いほど染色体異常の頻度が減少するため、1 検体につき最大 5,000 細胞の検査が必要になる。大規模な放射線被ばく事故に対して、複数の機関による協働によって線量が評価できるよう、国内外のネットワークの連携と、技術水準の均質化・高度化が重要である。国内機関では、細胞の検出と画像撮影が自動化された顕微鏡装置による分析の高速化に関する研究が進められている。

バイオアッセイ

バイオアッセイとは、広義な意味では内部被ばく線量評価のために行われる体外計測及び排

排泄物試料等の放射化学分析の両方を指すが¹⁶⁾、後者の意味で認識されている場合が多い。バイオアッセイに供する生体試料は便や尿の排泄物が一般的であり、便試料を分析するのは、不溶性化合物を吸入摂取した際に、その大半が呼吸器官から食道に嚥下され、胃腸管吸収されずに直接排泄される性質を利用したものであり、他方、尿試料は放射性核種の体内への侵入部位（鼻や口、創傷部位など）から血液循環を介して排泄されるため、全身への内部被ばくが生じたことの裏付けとなる。バイオアッセイの一般的手順は図1に示すとおりであり、対象核種の放射線の種類や放出率等を考慮して最適な分析方法が選定される。バイオアッセイが有効なのは、体外計測が困難な γ (X) 線放出率の著しく低い核種である。特にプルトニウムを初めとしたアクチニド核種は、大半が α 核種で人体内での実効半減期も著しく長いために、吸入摂取の際の線量係数（単位摂取量当たりの預託実効線量：単位は Sv Bq⁻¹）が他の核種に比べて高いものの¹⁷⁾、肺モニタを用いた体外計測の検出感度が低いために、便試料を対象としたバイオアッセイが内部被ばく線量評価の主たる方法となる場合が多い。アクチニド核種を対象としたバイオアッセイの場合、日々の便中排泄の個人差が大きいため、摂取時刻を起点として24時間毎に数日間から1週間程度の便試料を採取する。同様な頻度で尿試料も採取し、肺モニタの結果や内部被ばくが発生した現場の状況等と併せて線量評価を行う。吸入摂取の場合、尿中排泄率は便中排泄率に比べて相当低い¹⁸⁾、キレート剤投与により尿中排泄量が促進されるために、その効果を評価するには尿試料の長期的な分析が必要となる場合もある。なお24時間毎に排泄試料を採取するのは、内部被ばく線量評価に用いる排泄率が1日単位で与えられるためである¹⁸⁾、尿試料について24時間尿が採取できない場合は、標準人の1日尿量（男性1.6リットル、女性1.2リットル、平均1.4リットル）または尿中クレアチニン量を考慮して補正する場合がある。なお、排泄試料の採取においては、密封性の高い容器に封入するとともに速やかに冷蔵保管するとともに、

被検者の薬の服用状況等の情報を併せて取得する。

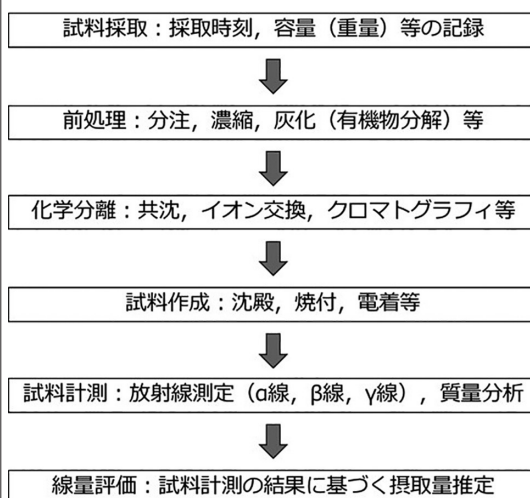


図1. バイオアッセイの一般的手順

放射化された放射性核種の検出

被ばく医療の観点からは、原子炉内の核分裂反応で生じる中性子により放射化されるコバルト60やマンガン54などの放射化物による被ばくが重要であるが、臨界事故では体内に存在する様々な安定元素が同様に放射化されることがある。その代表的なものとして、安定ナトリウム（ナトリウム23）から生成されるナトリウム24がある。ナトリウム24は物理半減期が約15時間であり、 β 壊変に伴い1.369 MeV (100%) と2.754 MeV (99.9%) の γ 線（ガンマ線）を放出するため、ナトリウム24を測定することで中性子による外部被ばくの有無を確認することができる。過去に発生した臨界事故例から、全身に生成するナトリウム24の1 Bq 当たりの中性子線及び γ 線（ガンマ線）による外部被ばく線量は0.5-3 μ Gyである¹⁹⁾。外部被ばく線量に比較的大きな推定幅を生じるのは、臨界事故の体系（金属系・水溶液系や周囲の構造物など）により、中性子スペクトルの形状が変化することや中性子と γ 線（ガンマ線）の線量割合が異なるためである。1999年のウラン加工工場臨界事故

では、臨界反応を生じた沈殿槽の近傍で高線量被ばくを受けた3名及び従業員等に対して、ナトリウム24放射能に基づく線量評価が行われた^{20, 21)}。図2には、3名に対する中性子による外部被ばく線量評価の手順を示した。同図中のaは全身中の安定Na 1 g当たりのナトリウム24生成量であり、血液試料の分析から評価された（一番線量の高い被検者の事故発生直後の数値は 8.24×10^4 Bq $^{24}\text{Na/g}^{23}\text{Na}$ ）。一方、 γ 線（ガンマ線）の外部被ばく線量は、事故現場周辺の中性子と γ 線（ガンマ線）の空間線量率（1 cm 線量当量率）の比を用いて、中性子による外部被ばく線量から推定された。ナトリウム24以外の生体中（尿や毛髪）の放射化物としてはカリウム42、臭素82、リン32なども検出されたが、ナトリウム24と同等の線量評価を得ることは困難であった。なお、従業員等の体内ナトリウム24の測定には、ゲルマニウム半導体検出器を有するホールボディカウンタ（whole body counter: WBC）が用いられたが、これは全身均等に分布するナトリウム24に対し、WBCが測定に適していたためである。

参考文献

- 1) IAEA: Safety Reports Series No. 101: Medical Management of Radiation Injuries, 2020. <https://www.iaea.org/publications/12370/medical-management-of-radiation-injuries> (アクセス日 2021-12-22)
- 2) HÜBNER KF, FRY SA (Eds): The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness, Elsevier, London and New York 1980.
- 3) UNSCEAR: UNSCEAR 1988 Report: Sources, effects and risks of ionizing radiation, 1988. <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1988.html> (アクセス日 2021-12-21)
- 4) IAEA: Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies, 2011. <https://www.iaea.org/publications/8735/cytogenetic-dosimetry-applications-in-preparedness-for-and-response-to-radiation-emergencies> (アクセス日 2021-12-21)
- 5) 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 生物線量評価グループ: 放射線誘発染色体異常を指標とした生物線量評価: 生物線量評価に関する実験・解析画像集. 2021.
- 6) International Organization for Standardization: Radiation protection - Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics, 2014.
- 7) International Organization for Standardization: Radiation protection - Performance criteria for laboratories performing cytogenetic triage for assessment of mass casualties in radiological or nuclear emergencies -General principles and application to dicentric assay, 2008.
- 8) International Organization for Standardization: Radiological protection - Performance criteria for laboratories using fluorescence in situ hybridization (FISH) translocation assay for assessment of overexposure to ionizing radiation, 2019.

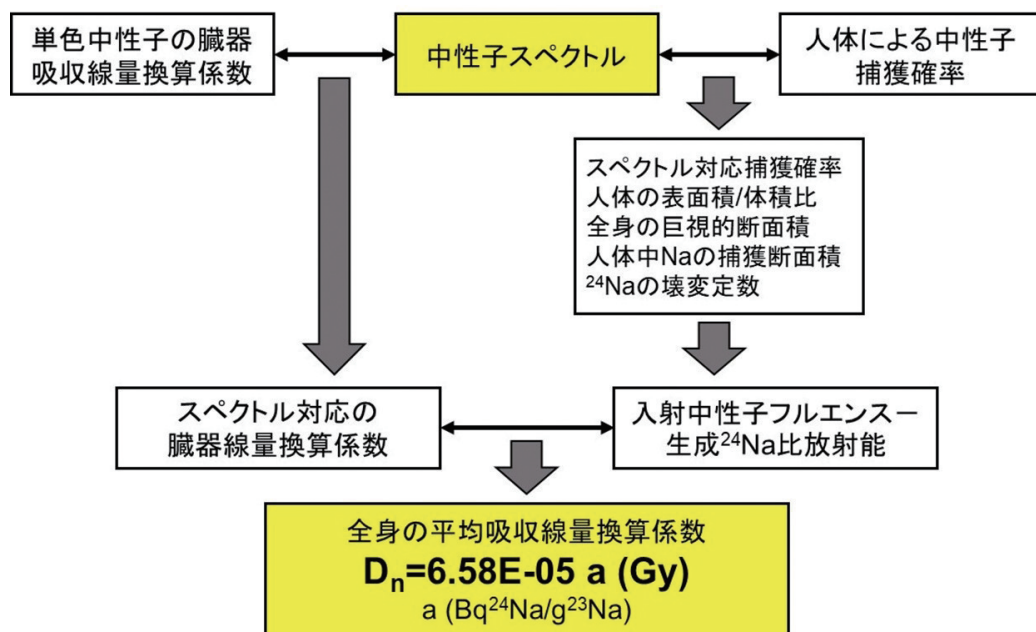


図2. ウラン加工工場臨界事故における中性子による外部被ばく線量評価のフロー

- 9) International Organization for Standardization: Radiological protection – Performance criteria for laboratories using the cytokinesis block micronucleus (CBMN) assay in peripheral blood lymphocytes for biological dosimetry, 2014.
- 10) Suto Y, Hirai M, Akiyama M, et al: Biodosimetry of restoration workers for Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Health Physics* 105: 366-373, 2013.
- 11) Suto Y, Hirai M, Akiyama M, et al: Sensitive and Rapid Detection of Centromeric Alphoid DNA in Human Metaphase Chromosomes by PNA Fluorescence In Situ Hybridization and Its Application to Biological Radiation Dosimetry. *Cytologia* 77: 261-267, 2012.
- 12) 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 生物線量評価グループ: Radiation Cytogenetic Gallery, 2018.
<https://www.qst.go.jp/site/nirs-english/1369.html> (アクセス日 2021-12-22)
- 13) Suto Y, Akiyama M, Noda T, et al: Construction of a cytogenetic dose-response curve for low-dose range gamma-irradiation in human peripheral blood lymphocytes using three-color FISH. *Mutat Res - Genet Toxicol Environ Mutagen* 794: 32-38, 2015.
- 14) Suto Y, Tominaga T, Akiyama M, et al: Revisiting Microscopic Observation of Chromosomal Aberrations in Cultured Human Peripheral Blood Lymphocytes at the Second Mitotic Division after Gamma Irradiation In Vitro. *Cytologia* 86: 67-77, 2021.
- 15) 厚生労働省: 放射線業務従事者の健康調査に関する疫学研究, 2021.
<https://www.news.johas.go.jp/hp/top.html> (アクセス日 2021-12-22)
- 16) IAEA: Safety Report Series No. 37: Methods for assessing occupational radiation doses due to intakes of radionuclides, 2004.
<https://www.iaea.org/publications/6979/methods-for-assessing-occupational-radiation-doses-due-to-intakes-of-radionuclides> (アクセス日 2021-12-22)
- 17) ICRP: ICRP Publication 68: Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, 1994.
<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2068> (アクセス日 2021-12-22)
- 18) ICRP: ICRP Publication 78: Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers (preface and glossary missing), 1997.
<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2078> (アクセス日 2021-12-22)
- 19) IAEA: Technical Reports Series No. 211: Dosimetry for criticality accident, 1982.
- 20) Fujimoto K: Final report on dose estimation for three victims of JCO accident (NIRS-R-47). *Journal of Radiological Protection* 22: 194, 2002.
- 21) Momose T, Tsujimura N, Tasaki T, et al: dose evaluation based on ²⁴Na activity in the human body at the JCO criticality accident in Tokai-mura. *J. Radiat. Res.* 42: S95-S105, 2001.

6-3 放射線・放射性物質の計測による線量評価

Key Point

- 外部被ばくの量や状況の把握のために、患者が個人線量計を装着している場合には、その線量を取得する。
- 体外計測法にもホールボディカウンタ、甲状腺モニタ、肺モニタ等いくつかの種類の放射線測定器があり、状況や摂取した放射性同位元素の種類等によって使い分ける。

患者の個人線量計の読み取り

被ばく医療の対象となる患者は、放射線を取り扱う放射線作業従事者であることも多い。この場合、従事者の外部被ばくの量や状況の把握のために、個人線量計を装着することが求められている。

個人線量計として、放射線診療従事者はガラスバッジやルミネスバッジといった受動型の線量計を使用し月毎の外部被ばく量を測定していることが多いが、値の読み取りは現場で

きず、被ばく量の把握に時間がかかるという問題がある。これらの受動型の線量計の場合は、事故の際には線量計供給業者に緊急読み取りを依頼し、早急に線量を把握する。比較的多くの被ばくをする可能性のある場合やすぐに被ばく量を把握したい作業現場では、現在ではシリコン半導体式の個人線量計を使用することが多い(図1)。これらの線量計は前述の受動型線量計より高感度であり、1 μSv 以下からの1 cm 個人線量当量を、デジタル表示により、容易に読み取ることができる。一定の線量を超えると警報を発する設定や線量率表示など装



図1. 半導体式の個人線量計

積算線量がリアルタイムに表示され、種類によってはアラーム機能を搭載したものもある。検出面を体の外側に向けるよう装着すること、電池切れの内容に残量をチェックしておくことが重要である

置により特徴を持つ製品もある。これらの線量計には方向依存性があることから、センサ部分の位置を把握したうえで、線源と患者の位置関係に注意する必要がある。電子機器であることから、落下などの事故の際には、機器の故障がないかも注意を要する。

体幹部の被ばくの測定には防護具の内側の胸部の位置に、妊娠可能な女性の場合は腹部の位置に装着している。

内部被ばくに対する体外計測

非密封の放射性同位元素が漂うような状況で作業する場合、作業者は空気中に拡散した放射性同位元素を呼吸等により鼻や口から取り込む可能性（吸入摂取、経口摂取）、皮膚から吸収する可能性（経皮吸収）、傷口から体内に取り込む可能性（創傷侵入）がある。一旦放射性物質が体内に入ると、排泄物と一緒に体外に排泄され、時間の経過と共に放射能が弱まるまで、人体は放射線を受けることになる。

体内に取り込まれた放射性同位体（Radioisotope: RI）から出る γ 線を直接測定する体外計測法と排泄物の分析によるバイオアッセイ法とがある。体外計測法にもホールボディカウンタ（whole body counter: WBC）、甲状腺モニタ、肺モニタ等いくつかの種類の放射線測定器があり、状況や摂取した放射性同位元素の種類等によって使い分ける。いずれの計測にしても、微弱な放射線を検出するためにはバックグラウンドの低い環境で測定を行うことが求められる。また体表面や衣類等に付着している放射性同位元素を検出しないよう測定前に準備・対策をすることも、結果の精度に影響する。

1 ホールボディカウンタ

WBC は、人体内に取り込まれた放射性同位体（ γ 線放出核種）から放出される γ 線を体外に設置した検出器で測定する。 α 線や β 線は透過力が弱く体内で吸収されてしまうので WBC では測定できない。例えばストロンチ

ウム 90 などの β 線のみ放出する核種による WBC での内部被ばく測定は不可能である（セシウム 137 など β 線のほかに γ 線も放出する放射性同位体の内部被ばくは、 γ 線を測定することで WBC による評価が可能である）。

WBC の γ 線検出器は、NaI (TI) 等のシンチレーション検出器を用いたものと高純度ゲルマニウム (HP-Ge) 半導体検出器を用いたものがある。シンチレーション検出器を用いた WBC は、高感度で測定時間は短いが高エネルギー分解能が悪い。逆に HP-Ge 半導体検出器を用いた WBC はエネルギー分解能については優れているが、低感度で検査時間が長くなる。さらに HP-Ge 検出器は検出される信号の熱雑音低減のため、使用時は液体窒素や電気冷却による対策が必要である。

WBC は標準線源とファントムを用いてあらかじめ校正する必要がある。WBC は臥位型、立位型、座位型があり、また室内設置のほかにも車載型もある（図 2）。測定時は人体表面や着衣などに放射性同位体が付着していないことを確認する。また特に微量の内部被ばく評価時は、宇宙線などの自然放射線（バックグラウンド）の影響を小さくするために、WBC（または建屋）周囲を鉛や鉄で覆い遮蔽する必要がある。

なお WBC による測定は、あくまでもその測定時に体内にある放射性同位元素からの γ 線測定であるため、線量評価のためには半減期などを勘案して摂取時に遡って放射エネルギーを算出する必要がある。そのために被験者への聞き取り調査などを実施して、いつ摂取したのか確認する必要がある¹⁾。

2 甲状腺モニタ

原子力災害で放出される放射性同位元素の一つであるヨウ素（ヨウ素 131 等）は、体内に取り込まれると、甲状腺に沈着する性質を持つ。このことから、甲状腺近傍に放射線検出器を当ててヨウ素から放出される γ 線を検出するのが甲状腺モニタである。検出器として甲状腺を覆うような大きさの比例計数管、シンチレータ、半導体検出器が使われるが、 γ 線の線量だけでなく放射性同位元素の種類や放

射能まで正確に評価するには、半導体検出器が良い特性を示す。

仰臥位または座位で甲状腺付近の位置に検出器を配置し、他の部位からの放射線を検出しないよう指向性を高め遮蔽をした環境で測定を行う。検出器の校正は、甲状腺の形状を模擬したファントムに組成の明確なヨウ素の線源を挿入して実施される。

3 肺モニタ

肺モニタは肺に沈着している放射性同位元

素（主に吸入摂取されたプルトニウムなどが対象）の放射能を体外から測定するものである（図3）。プルトニウム（プルトニウム239）はα線放出核種でありα線そのものは体外計測できないが、その壊変過程でL特性X線を放出する。肺モニタは体外（胸部表面）に設置した検出器で、そのL特性X線を測定することで検出感度は低いがプルトニウムによる内部被ばくを算定することが可能である。これらの特性X線は低エネルギーであることから、薄層窓のシンチレータ型もしくは半導体検出

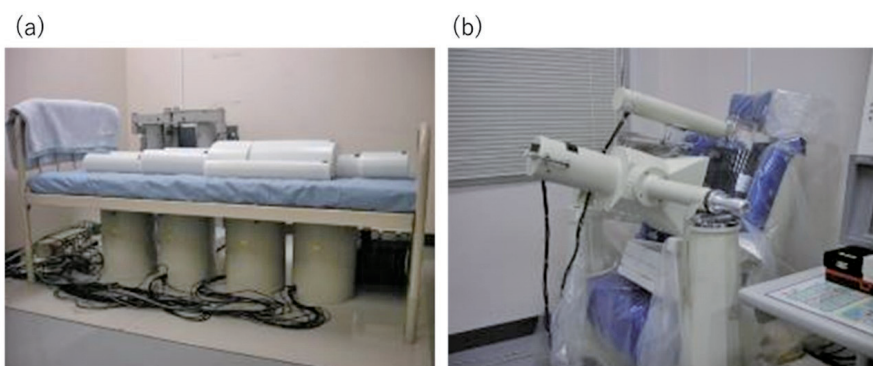


図2. ホールボディカウンタ（WBC）の例

(a)ベッド式WBC。既知量の放射性核種を封入したファントムにより、校正する必要がある

(b)椅子式WBC。甲状腺部および体幹部の検出器が備え付けられている。椅子への汚染を防ぐため、ビニールで覆っている

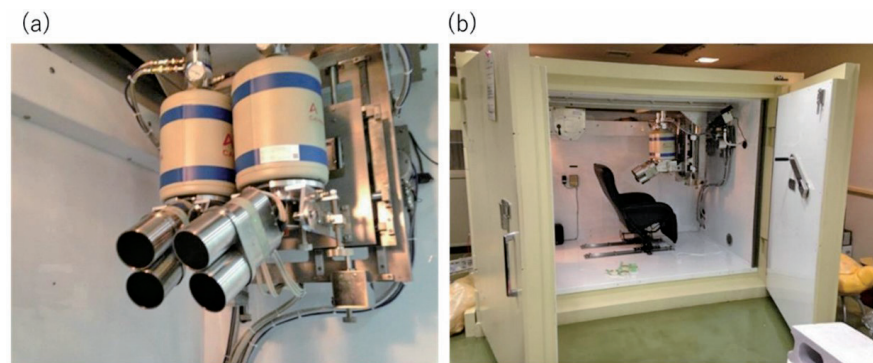


図3. 肺モニタの例

(a)高純度ゲルマニウム検出器4式（片側2式×左右）を肺に近接し測定する

(b)低バックグラウンドとするため、鉄遮蔽室とし、被験者は椅子に座る方式となっている

器が用いられる。測定時は仰臥位で被験者の胸部に密着させる。なお、プルトニウム 239 は中性子を 2 回吸収した後、ベータ壊変を起こしてアメリシウム 241 を生成するため、プルトニウム 239 とアメリシウム 241 は一定の割合で共存する可能性がある。

参考文献

- 1) 千田浩一：内部被ばくの測定と評価（測定器と測定方法、評価方法）、藤淵俊王 編：放射線・医療安全管理学，南山堂，東京，2020.

EPR

電子スピン共鳴法 *electron paramagnetic resonance: EPR*

放射線が物質に衝突すると、電離作用により電子が弾き飛ばされ、不対電子が生じる。不対電子は、物質中で安定なラジカルや捕獲電子として蓄積される。この不対電子の量を電子スピン共鳴により検出して、放射線量に換算する方法をEPR（別名 electron spin resonance: ESR）法と呼ぶ。

そのため、出来るだけ事故後に正確に被ばく量を評価する必要がある。通常、公衆は線量計を所持していることはないが、生体物質である骨や歯のエナメル質をEPR法により測定することで、過去の被ばく評価の一つとして活用できる。

歯の測定においては抜歯しないで被ばく線を評価できる装置が求められ、そのような装置も開発されているが、高感度化が課題となっている。毛髪や爪といった切り取ることのできる試料による評価も試みられているが、採取する際の影響等による値の安定性が課題となっている。

その他、最近では被ばく時に身に付けていた腕時計やモバイル端末のディスプレイといった持ち物のガラス部分が、線量測定の候補として挙げられる。

これらの技術が確立することで、多数の被災者や現場で作業する第一対応者の被ばく線を事後的にスクリーニングすることが望まれる。

6-4 再構築

Key Point

- 線量再構築は、過去に発生した被ばく事故において個人線量計等の測定値が得られなかった場合や不十分な場合に実施される遡及的な線量評価である。
- 歯のエナメル質のEPR（電子スピン磁気共鳴）、染色体異常、セラミックス等のルミネッセンス等から、長期的に保持されている蓄積放射線量に関する情報を入手できる可能性がある。
- 線量再構築にあたっては、利用可能な複数の手法によって評価した臓器・組織の線量を比較するなど、多角的なアプローチが重要である。

線量再構築は、過去に発生した被ばく事故において個人線量計等の測定値が得られなかった場合や不十分な場合に、疫学研究や放射線被ばくによる発がんリスクの評価などを目的として行われる。遡及的線量評価と同義である。線量再構築のための主な測定（検出）対象としては、①歯のエナメル質のEPR（電子スピン磁気共鳴）、②染色体異常、③小核または変異、④セラミックス等のルミネッセンス、⑤体内の放射性核種、⑥環境中の放射性核種などがあり、調査目的や状況に応じて有効な

手法を選定する（表1）¹⁾。

歯のエナメル質のEPRを用いる手法は、γ線（ガンマ線）による外部放射線に対して有効であり、100 mGy 程度までの線量を推定可能であるが、抜歯した歯のサンプルが必要となる欠点がある。


ヒトリンパ球中の染色体異常を用いる代表的な手法は、分裂中期に出現する二動原体の出現頻度を観察するものであり、急性の全身均等γ線（ガンマ線）照射の場合は150 mGy 程度までの線量推定が可能である。線量推定

表 1. 線量再構築に用いる手法とその適用性（文献 1 より引用・改変）

測定の種類	被ばくの種類			
	γ線(外部)	α線(内部)	β線(内部)	γ線(内部)
歯のエナメル質のEPR		—		
染色体異常		—	—	
小核または変異		—	—	
セラミックスのルミネッセンス		—	—	—
体内の放射性核種	—			
環境中の放射性核種				

 : 100 mGy 程度までの過去の被ばく線量の推計が可能な場合がある

 : 過去の被ばく線量の推計を行える可能性があるが、検出できる線量が高く、不確かさが大きい

 : 集団に対する代表的な線量を推定できる可能性がある

には他手法と同様、予め検量線を取得する必要があるが、 γ 線（ガンマ線）以外にも中性子線やX線に対する検量線を得ることができる。二動原体を利用する手法が可能な期間は被ばく時から1カ月程度以内であるが、FISHにより標識された安定型染色体転座は被ばく時から数十年観察できる。安定型染色体転座により推定可能な線量域は観察する分裂中期の細胞数に依存するが、例えば2,500-3,000の細胞を観察することにより200 mGy以上の γ 線（ガンマ線）による被ばく線量を評価できる。

小核または体細胞変異を用いる手法は解析が容易である反面、バックグラウンドが高く、また放射線以外の交絡因子による影響を受けやすいため、検出下限線量も高い。また個人差が大きく、特定個人の線量推定よりも集団の平均線量の推定に適している。

セラミックス等のルミネッセンスを用いる手法では、照射された放射線のエネルギーによって、鉱物やセラミックスの内部で生じた電子が不純物や格子欠陥に捕獲される性質を利用する。この捕獲電子に光や熱が加えられると、電子

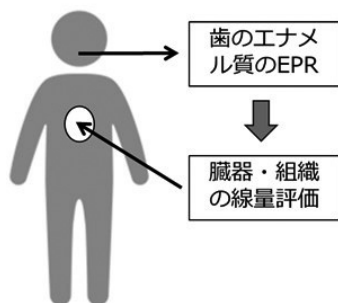
が正孔と再結合してルミネッセンスと呼ばれる蛍光が発せられる。このルミネッセンスの強度から、過去にその物質が照射された蓄積放射線量を推定することができるが、線量再構築の対象とする人の被ばく線量を直接的に評価するわけではないため、後述する環境中の放射性核種の測定に基づく手法と同様に多くの不確実要因が生じる。

体内の放射性核種を測定する手法は、放射性核種の摂取に伴う内部被ばく線量を推定する場合に有効である。 γ 線（ガンマ線）放出核種の場合は、現行のホールボディカウンタ（whole body counter: WBC）を用いれば年間1 mGy程度までの内部被ばく線量を評価できる。その一方で、摂取から測定までの期間が長くなるほど、線量推定の不確実性が大きくなる。

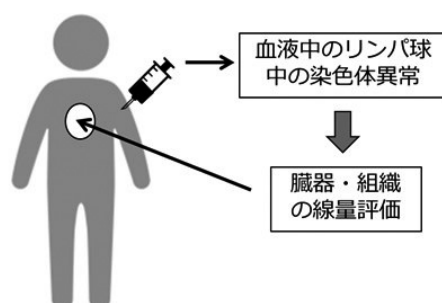
環境中の放射性核種の測定に基づく手法は、評価対象となる個人や集団の生活様式を仮定する必要があり、その点が線量推定の大きな不確実要因となる。

実際の事故に対しては、図1に示すように、

例1：歯のエナメル質のEPR



例2：染色体異常



例3：セラミックス等のルミネッセンス

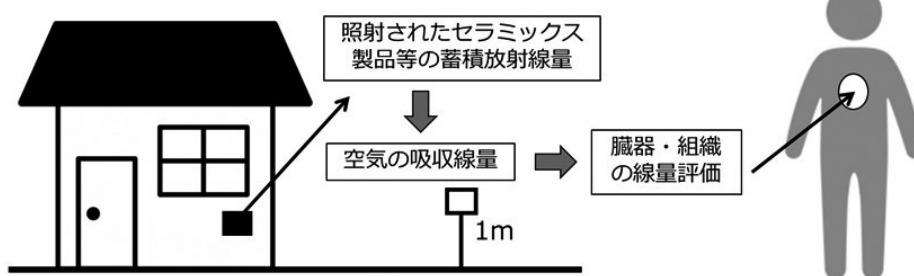


図1. 利用可能な手法による多角的な線量再構築（文献1より引用改変）

その時々で利用可能な複数の手法によって評価した臓器・組織の線量を比較するなど、多角的に線量再構築するアプローチが重要である(図1)¹⁾。

参考文献

- 1) ICRU: ICRU Report 68: Retrospective Assessment of Exposure to Ionising Radiation, 2002.

7-1 急性放射線症候群 (ARS) の治療

Key Point

- 急性放射線症候群 (ARS) は骨髄等の一つの臓器のみならず多臓器にわたる障害であり、放射線への感受性が高い臓器から症状があらわれる。事故による ARS は不均等被ばくと考えるべきであり、過去の症例と同じ全身被ばく線量であっても、症状の現れ方や経過は事故ごとに異なる。
- ARS の治療は全身を対象とし、特に高線量被ばくの場合、造血組織以外の臓器の治療が不可欠となり、予後を左右する。造血幹細胞移植の適応範囲はかなり限られる。
- ARS の放射線皮膚障害 (CRS) の急性期治療は熱傷治療に準じる。真皮深層より下層に至る損傷に対してはデブリードマンや植皮術などの外科的処置が考慮される。

ARS 治療概論

急性放射線症候群 (Acute radiation syndrome: ARS) の治療で重要なことは、造血組織、皮膚、消化管、神経血管の4つの臓器システムのみならず全身臓器を念頭にいた治療であるということである。また事故被ばくは、不均等被ばくであり過去の症例と同じ全身被ばく線量であっても、症状の現れ方や経過は事故ごとに異なる。全身被ばく線量は治療方針の決定や予後の予測の一つの指標に過ぎない。1999年に起きたウラン加工工場臨界事故の例では、局所の最大被ばく線量は全身被ばく線量の2-5倍にも及んでいる。症状をよく観察するという医療の原点に立ち、治療に臨むべきである。

ARSでは、詳細な全身被ばく線量の評価には時間を有する。ウラン加工工場臨界事故では数か月を要している。前駆症状、リンパ球数の減少速度、染色体分析等により治療方針を決定するための線量を推定することになり、前駆症状に関する情報は重要な役割を果たす。前駆症状は被ばく線量 (線量率) と強く相関し、高いほど早期に現れ、程度は強く頻回に起きる。放射線の他に原因が考えられない事故で、早期に現れる悪心・嘔吐、頭痛、下痢、急速なリ

ンパ球の減少、全身皮膚の初期紅斑などがあれば、高線量被ばくを想定する。過去の経験からは、悪心・嘔吐はセロトニンによる嘔吐機構を抑制する5-hydroxytryptamine (5-HT₃) 受容体拮抗薬 (わが国ではグラニセロン等) により抑えられることが多い。

ここではARSの治療を概論的に述べる。線量によって治療は大きく異なるが、血液・輸血、消化器、呼吸器、熱傷、麻酔 (疼痛)、口腔外科、人工呼吸器などの専門家の他、不安に対する精神科のサポートも必要になることがある。ARSで入院が必要となるのは、顆粒球や血小板数の減少がみられる全身の被ばく線量約1.5 Gy以上であり、線量に応じた治療と管理が行われる。推定線量が3-4 Gyまでの場合、骨髄障害の治療が主であり、無菌室で治療を行う。皮膚障害は、脱毛と口腔粘膜の炎症くらいであることが多い。3-4 Gyを超えると、感染症の機会が増え、皮膚さらに消化管障害に対する治療が必要となり、より広い病室での全身管理による治療が必要となる。消化管障害の水様性並びに血性的下痢等、消化管粘膜の脱落に対する治療法は確立されておらず、対症療法となる。線量が7-8 Gyを超えると多臓器に障害が生じ、集中治療が必要となるが予後は悪い。

全身被ばくに対して治療を行わない場合、放射線被ばく後60日で50%が死に至る

(LD 50/60) と考えられるのが 3.25-4 Gy、治療を行なった場合 6-7 Gy と推定されており^{1, 2)}、推定線量が 3-4 Gy を超える場合、全身管理が必要と考えるべきである。詳細は別途述べるが、10-12 Gy を超える被ばくでは、積極的な治療は行わず、緩和療法という考え方が欧米では一般的である³⁾。

造血組織障害の治療

被ばく事故で初めての造血幹細胞移植が行われたのは、1950 年代後半のフランスである⁴⁾。その後の経験では、移植された幹細胞の一過性の生着は観察されているが、多くの症例では皮膚や他の臓器の障害もあり功を奏していない。日本でのウラン加工工場臨界事故の経験も同様であり、さらに自己回復した骨髓に免疫不全が生じていたことが報告されている⁵⁾。これらの経験から、造血幹細胞移植適用の見直しがされるようになってきた。

“Medical treatment protocols for radiation accident victims as a basis for a computerized guidance system (METREPOL)” は放射線事故による被ばくは、医療等の計画被ばくとは異なり均一な被ばくではなく、「物理学ならびに生物学的線量は当てにならず、観察される臨床症状が障害の程度を反映している。」としている⁶⁾。つまり同じ全身被ばく線量であっても、被ばくの様式は異なり、症状の現れ方や予後は事故ごとに異なるため、線量評価を重要視しない、という考え方で、症状をよく観察し予後を推定せよ、という視点に立っている。線量評価をどう見るかに関しては、賛否両論があると思われるがヨーロッパ間であまり議論の対象とはなっていない。不均等被ばくである以上、全身被ばくと言っても被ばくがないか線量が小さい骨髓の部分が必ずあり、患者自身の幹細胞が残存し、骨髓が自己回復する可能性があると考えている。この考えに基づき、European group for blood and marrow transplantation (EBMT) consensus conference: conference on Euro-

pean preparedness for haematological and other medical management of mass radiation accidents は、自己回復の可能性がある以上造血幹細胞移植は放射線事故では行うべきではなく、また行うかどうかは緊急に検討する必要はなく、まず生じるリスクを考えるべきとした⁷⁾。多臓器障害のある患者は移植片対宿主病 (graft versus host disease: GVHD) のため、早期の移植に耐えられず、移植を行うにしても 14-21 日はサイトカインによる保存的治療を行う、という合意に達した。この会合は多くの患者が出たときの対応としているが、数名の事故であっても考え方は同じであるとされていた。ARS は多臓器障害であること、骨髓以外の多臓器の障害が起きたウラン加工工場臨界事故の経験をかなり反映し、骨髓の治療はもはや制限因子ではない、としている。

米国の戦略的全国備蓄ワーキンググループ (US Strategic National Stockpile Working Group) も、ウラン加工工場臨界事故例も含めて過去の事例の分析から造血幹細胞移植はかなり限定的としている⁸⁾。一時的な幹細胞の生着は観察されているが、回復後の免疫不全や多くの症例で皮膚、消化管障害など他の臓器の障害などがあるため、移植が生存に影響を与えうかどうか不明としている。一方 7-9 Gy までの全身被ばく線量で、皮膚や他の主要な臓器に重篤な障害がなければ、造血幹細胞移植の可能性もあるとしているが、これはかなり不均等被ばくの例に限られる。2006 年の米国骨髓移植学会 (American society for blood and marrow transplantation: ASBMT) の機関誌は、造血幹細胞移植の限界はあるが、6-10 Gy の被ばくでは骨髓抑制がある期間を、移植された細胞がカバーする“自己回復への架け橋”という考え方から幹細胞移植の意義を認め、準備をするべきとしている⁹⁾。つまり末梢血や臍帯血からの幹細胞移植による治療の可能性を示している。またこのグループは、自己ではなくドナーからの幹細胞移植で十分であるとしている。一方 12 Gy を超えるような例では、消化管障害による死亡率が、

骨髄障害による率を超えるため幹細胞移植の適応はなく、皮膚、消化管、肺、肝臓等の多臓器障害が進行するため、これらの臓器の治療が生存を左右し、このワーキンググループは生存の可能性はないとした。米国でもヨーロッパ同様に、不均等被ばくの特異性はかなり考慮している。

以上から ARS の造血組織障害の治療の考え方をまとめる。

- ①顆粒球と血小板数に減少が予想される、被ばく線量が1 Gyを超えることが予想される時には、入院の上経過観察を考慮する
- ②サイトカインを中心とした治療を第一選択とする
- ③幹細胞移植はかなり限定した症例にのみに適応されるべきである
 - 自己回復の傾向がない場合
 - 6-10 Gyでは、自己回復までの架け橋として適用も考慮
 - ドナーによる移植を基本
- ④10-12 Gyを超える場合、他の臓器の障害のため、造血幹細胞移植は適応外となる

ARS の全身管理

1 全身管理の必要性

ARS の障害の程度に関して、ドイツのグループは世界中の放射線事故を集めデータベースを作り、骨髄障害と多臓器障害・不全との関係を分類した¹⁰⁾。この分類と、過去の例から推定した全身被ばく線量¹¹⁾、管理をまとめたのが表1である。線量が3.5-7 Gyでは、被ばく後24-48時間以内に顆粒球増多が見られており、顆粒球は20-30日後に消失、血小板数は15-25日後にゼロとなっている。リンパ球数の定量はできないがゼロにはならず回復している。骨髄障害は全例、皮膚及び消化管障害は90%以上、肝障害は約30%、腎と肺障害は10%前後と多臓器障害は起きるが多臓器不全にはならず、全て100日以上生存している。線量が7-8 Gyを超える群では、被

ばく後24-48時間以内に顕著な顆粒球増多が見られ、リンパ球は3日、顆粒球は4-6日後に消失、血小板数は10日以内に10,000 / mm²未満となっている。45名中43名がARSの4つの臓器システム全て、腎臓(約70%)、肝臓(約55%)、呼吸器(約70%)に障害を起こし多臓器障害及び不全となり結局、60日以内に全員が死亡(最短2日 - 最長55日、平均で22日)している。これらの結果から線量が3-4 Gyを超える場合、多臓器に障害が現れ、全身管理が必要となり、それ以上では集中管理が必要となることが分かる。

2 ARS の全身管理

ARS の全身管理には、感染症対策、電解質と水のバランス管理、出血の防止、疼痛の緩和、精神医学的サポートなどが含まれる。感染はリンパ組織の破壊、顆粒球の減少ばかりではなく消化管粘膜の脱落(粘膜バリアーの破壊)からも生じ、感染症対策は生命予後を大きく左右する。抗菌、抗真菌、抗ウイルス、抗寄生虫剤の投与は不可欠となり、特に非吸収性抗菌薬を消化管内に投与、好気性グラム陰性桿菌および真菌の増殖を選択的に抑制し、腸内細菌叢の変化による感染を予防する方法である選択的消化管除菌(selective digestive decontamination)は消化管障害には重要である。嫌気性腸内細菌叢に変化が起きると、治療は複雑化する。

全身の皮膚障害や消化管障害は、出血と水、電解質の喪失を起こし循環血液量減少、血圧低下につながるため、きめ細かい電解質と水のバランス管理が求められる。ARS の治療で透析の報告は見当たらないが、溶血性尿毒症症候群や筋肉の挫滅の際に導入される可能性はあるかもしれない。消化管障害に関しては血管障害の関与も示唆されているが、ウラン加工工場臨界事故以外に治療の詳細が報告された事故例はなく、提案された治療法は見当たらない¹²⁾。この事故では、腸上皮の再生にLグルタミン、消化管出血を止めるためにバソプレシン、肺障害の予防にペントキシフィリンとビタミンEが投与されている。内

視鏡検査は脆弱な粘膜に機械的な損傷を与えないように慎重に行なうが、生検は困難なこともある。意外に知られていないのが、疼痛対策と精神医学的サポートである。ウラン加工工場臨界事故では、1名の患者の皮膚障害による疼痛に対して、麻薬も含めて意識レベルが下がる程の薬剤が使用されている。最近の医療では、痛みや苦しみからの解放は重要であり、疼痛対策は必須である。米国の戦略的全国備蓄ワーキンググループ (US Strategic National Stockpile Working

Group) は、10-12 Gy を超える全身被ばくでは生存の可能性が乏しく、積極的な治療ではなく、対症的な治療と心理的療法を推奨している⁸⁾。またこれほど線量が高くない場合でも、不安に対する精神的な支援は必要となる。

重篤な皮膚、消化管障害を生じたARSの治療の報告は、ウラン加工工場臨界事故以外は骨髄の治療を除きあまりない。どこまで治療を行うかは、個人と社会的状況、治療の対象となる人数等を考慮したうえで決めることになる。

表 1. ARS の全身管理

文献1の分類を基礎に、過去の事例から作成した。全身被ばく線量は治療方針の決定と予後の予測のための指標の一つである。全身被ばく線量は指標の一つである。

Flidner ら	推定線量	病態	管理	予後
H1	1-1.5 Gy	無症状	経過観察	良好
H2	1.5-3.5 Gy	骨髄障害	入院治療	良
H3	3.5-7 Gy	多臓器障害	全身管理	回復可
H4	7-8 Gy <	多臓器障害 多臓器不全	集中管理	不良

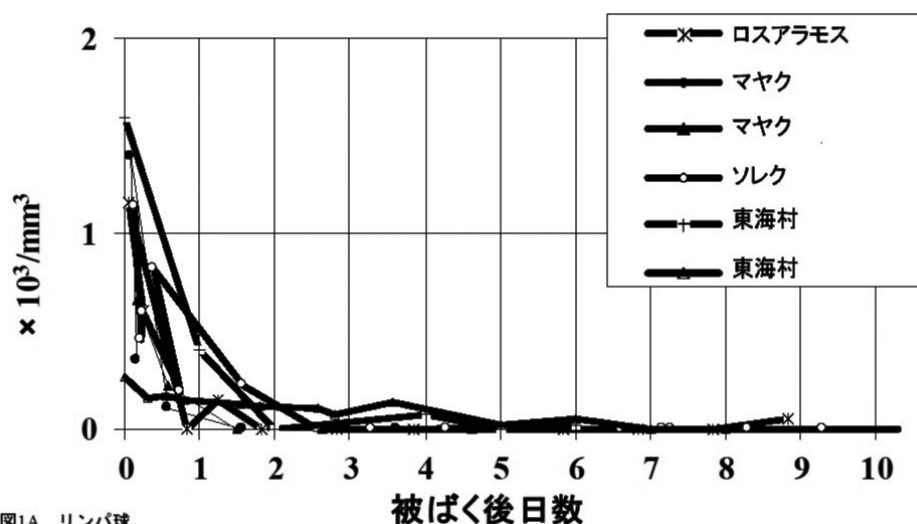


図1A リンパ球

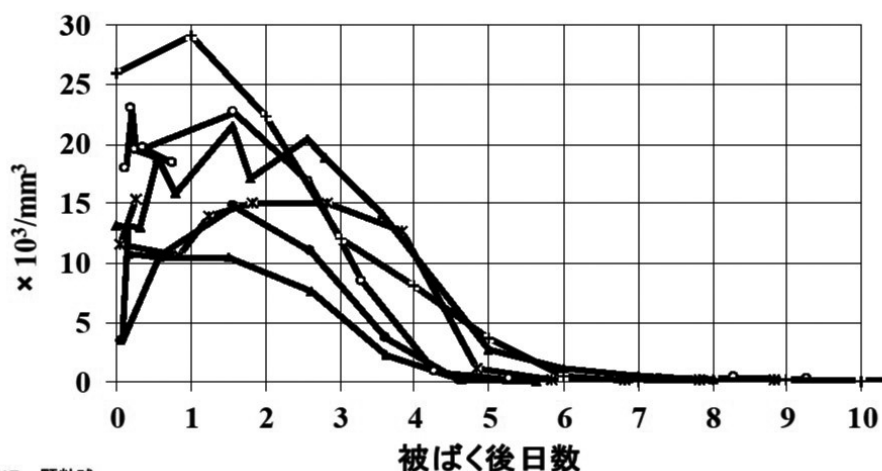


図1B 顆粒球

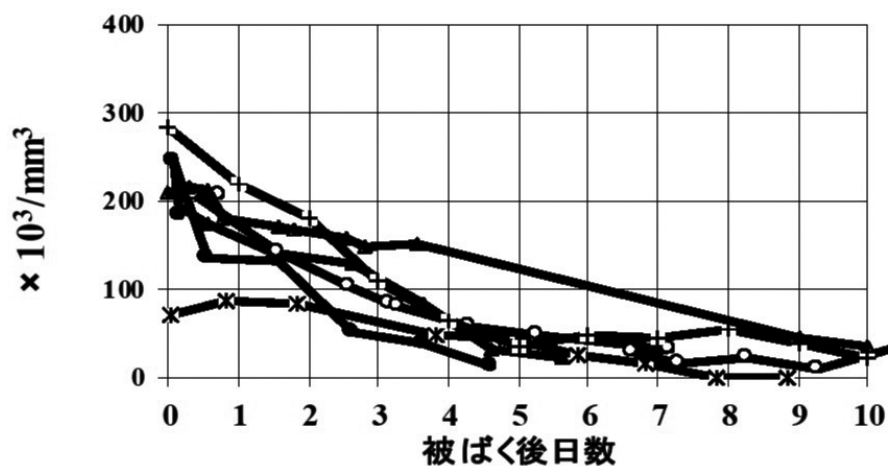


図1C 血小板

図 1. 集中管理が必要となる ARS の骨髄障害

示されたパターンの骨髄障害を示す症例は、多臓器障害・不全を示し、集中管理が不可欠となる（A:リンパ球、B:顆粒球、C:血小板）（文献1より引用・改変）

全身被ばくにおける皮膚放射線障害（CRS）の治療

1 CRS の治療の目的

皮膚放射線障害（Cutaneous Radiation Syndrome: CRS）は高線量の全身

被ばくや長期に及ぶ体表面汚染により生じる、ARS の一病態である。CRS による体表面バリアの喪失は、循環血漿量の減少や感染症、代謝異常などにより、ARS の多臓器不全進展に関して予後指標となりうる¹³⁾。CRS の治療は基本的には熱傷の全身管理に準じて行う。治療において重要なのは

清潔で適切な創傷管理、感染症の予防と治療、疼痛管理、心理的サポートである¹⁴⁾。

2 急性期の皮膚障害への対応

皮膚障害への対応は通常の熱傷治療で各深度に対する治療に準じて行われる。紅斑や浮腫などのⅠ度熱傷に相当するものに対しては保湿を目的としたワセリン基剤などの外用剤や抗炎症作用を有するステロイド軟膏、または抗ヒスタミン剤などが用いられる。水疱・落屑などを生じているが、損傷深度が真皮浅層までのいわゆる浅達性Ⅱ度熱傷 (superficial dermal burn: SDB) 相当の創に対してはステロイド軟膏や抗生物質含有軟膏、または創傷被覆材が用いられる。疼痛コントロールにモルヒネやフェンタニルなどの麻薬系鎮痛剤が必要となることもある。深達性Ⅱ度熱傷 (deep dermal burn: DDB)、Ⅲ度熱傷 (deep burn: DB) より深い創では、壊死潰瘍を伴い高率に感染をきたす。感染はより深部の組織損傷を引き起こし、全身状態の増悪にもつながるため感染予防・管理が重要となる。創部の洗浄などの清潔管理を行い、感染予防のために銀含有の軟膏・創傷被覆材なども有効である。創部の感染を起こした場合は、抗菌薬の全身投与を行う。一般的に DDB および DB に相当する皮膚障害に対しては、外科的デブリードマンによる損傷組織の除去と植皮術による創閉鎖が適応となるが、CRS では創傷治癒遷延やデブリードマンや採皮により創部の増悪リスクがあり、判断には慎重を期す必要がある。植皮には通常自家移植片を用いるが、範囲が広く自家移植片の供給が十分でない場合には、コラーゲンスポンジを主体とした人工真皮を一時的な被覆材として使用できる。また通常は永久生着せず脱落するために一時的な創の被覆にしか用いられない同種移植片 (同種死体皮膚) が、CRS においては骨髓機能抑制による免疫不全状態により長期に生着する場合がある¹⁵⁾。自身の皮膚組織を小範囲に採取し、表皮細胞を単離・培養し大量のシート状に加工する自家培養表皮も、採皮創の創傷治癒遷延が懸念される CRS にお

いては皮膚採取の犠牲が少なく有用である。

3 サイトカイン製剤など

通常の熱傷治療とは異なる点として、骨髓の造血幹細胞や造血前駆細胞の障害による血球減少に対して顆粒球系の分化・増殖を促進し、好中球に対する抗アポトーシス作用などを有する顆粒球コロニー刺激因子 (G-CSF) 製剤、顆粒球マクロファージコロニー刺激因子 (GM-CSF) 製剤の使用が考慮される。また TNF- α 産生を抑制することで抗線維化作用・血液供給促進作用をもつペントキシフィリンや抗酸化作用を有するビタミン E も使用を考慮する¹⁶⁾。海外ではタンパク質分解阻害剤であるゴルドックス、DNA 修復促進目的のリオキサゾールやアクトベジン・ソルコセリルなどの生物学的製剤を使用することもある¹⁴⁾。

参考文献

- 1) Hall EJ. Acute effects of total-body irradiation. Hall EJ, ed: Radiobiology for the Radiologist. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2000.
- 2) Anno GH, Young RW, Bloom RM, et al: Dose response relationships for acute ionizing-radiation lethality. Health Phys 84: 565-575, 2003
- 3) Waselenko J, MacVittie T, Blakely W, et al: Medical management of the acute radiation syndrome: recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group. Ann Intern Med. 140:1037-1051, 2004
- 4) Jammet H, Mathe G, Pendic B, et al: Study of six cases of accidental acute total irradiation [フランス語]. Rev Fr Etud Clin Biol 4: 210-225, 1959
- 5) Nagayama H, Ooi J, Tomonari A, et al: Severe immune dysfunction after lethal neutron irradiation in a JCO nuclear facility accident victim. Int J Hematol 76: 157-164, 2002
- 6) Friessecke I, Beyrer K, Fliedner TM: METREPOL team. Medical treatment protocols for radiation accident victims as a basis for a computerized guidance system. How to cope with radiation accidents: the medical management. Br J Radiol. 74: 121-122, 2001.
- 7) Gorin NC, Fliedner TM, Gourmelon P, et al: Consensus conference on European preparedness for haematological and other medical management of mass radiation accidents. Ann Hematol 85: 671-679, 2006.
- 8) Waselenko J, MacVittie T, Blakely W, et al: Medical management of the acute radiation syndrome: recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group. Ann Intern Med 140: 1037-1051, 2004.
- 9) Weisdorf D, Chao N, Waselenko JK, et al: Acute Radiation Injury: Contingency Planning for Triage, Supportive Care, and Transplantation. Biol. Blood Marrow Transplant 12: 672-682, 2006.
- 10) Fliedner T M, Dörr H D. Meineke V. Multi-organ

involvement as a pathogenetic principle of the radiation syndromes: a study involving 110 case histories documented in SEARCH and classified as the bases of haematopoietic indicators of effect. Br J Radiol 78 (Supplement 27) : 1-8, 2005.

- 11) US Department of human health & human services: Radiation Effects on Blood Counts (1), 2021. <https://remm.hhs.gov/radeffectblood.htm> (アクセス日 2021-12-22)
- 12) Akashi M, Maekawa K: Medical management of heavily exposed victims: an experience at the Tokaimura criticality accident. J Radiol Prot 10: S391, 2021.
- 13) Flynn D: Advances in the Diagnosis and Management of Acute Radiation Syndrome, Cutaneous Radiation Syndrome, and Acute Local Radiation Injuries. Doran M, Christensen SLS, Frederick M, et al. ed: The Medical Basis for Radiation-Accident Preparedness: Medical Management: Oak Ridge Associated Universities: 2013.
- 14) CDC: Cutaneous Radiation Injury (CRI) : A Fact Sheet for Clinicians, 2018. <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/crphysicianfactsheet.htm> (アクセス日 2021-12-22)
- 15) IAEA: LESSONS LEARNED FROM THE JCO NUCLEAR CRITICALITY ACCIDENT IN JAPAN IN 1999, 2008. <http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/tokaimura-report.pdf> (アクセス日 2021-12-22)
- 16) Chiao TB, Lee AJ: Role of pentoxifylline and vitamin E in attenuation of radiation-induced fibrosis. Ann Pharmacother 39: 516-22, 2005.

7-2 局所被ばくの治療

Key Point

- 局所放射線障害（LRI）では症状が軽い場合は軟膏による局所治療を行うが、症状が重篤になれば、創部のデブリードマンおよび組織再建術を考慮する必要がある。
- デブリードマン後の組織再建術には主に植皮と皮弁があり、それぞれメリットとデメリットがある。四肢の壊死では切断術が考慮されることもある。
- 国内外で LRI に対して形成外科の手術と幹細胞を用いた複合的治療の報告がある。

基本的な考え方

1 LRI 治療の基本的な考え方

局所放射線障害（local radiation injury: LRI）は悪性腫瘍に対する放射線治療や虚血性心疾患に対する IVR（Interventional Radiology）のように医学的な放射線治療の副作用として生じる場合や、原子力事故・災害や放射線事故などによって生じる。医療被ばくの場合、障害は頭頸部や体幹に生じることが多い。事故や災害では四肢が障害されるケースが多いが、放射性物質の盗難や線源と認識せずに持ち帰ってしまうなどのケースではポケットに線源を入れたため臀部に障害を生じることもある¹⁾。

LRI の管理で重要なのは、感染症対策、創傷治療、および適切な疼痛管理である。臨床経過の早い段階で、形成外科・皮膚科などの皮膚・皮下組織の難治性潰瘍を専門とする医師への紹介が望ましい。特に重篤な障害では組織のデブリードマンとその後の再建計画を念頭におく必要があるが、高度な皮膚・皮下組織の再建術は国内では形成外科が担当することが多い。LRI では障害範囲が通常の外傷や潰瘍に比べて、極めて深部にまでおよぶことがあり、周辺臓器の障害の程度によって様々な専門科による集学的治療を要する。

2 LRI 初期対応における除染

医療被ばく以外の放射線事故や災害による LRI では、体表面汚染を伴う場合や体表面汚染に加えて外傷が複合するケースも想定される。初期対応において、事故の状況などから体表汚染の可能性がある場合は適切に線量評価を行い、必要に応じて皮膚や創部の除染を行う。皮膚や創部の除染は基本的に汚染が検出されなくなるか、除染の効果がなくなるまで行う。ただし、重度の四肢開放骨折などの生命に関わる負傷が存在する場合は、被ばくや汚染への対策より負傷の治療を優先すべきである²⁾。被ばく医療の特殊性に気を取られるあまり、本来可能なはずの救命や救肢ができないということは決してあってはならない。

3 保存的治療

潰瘍に至っていない紅斑や落屑に対しては、対症療法による保存的治療を行う。放射線照射部位では創傷治癒が遷延しており、生じた創が難治化する恐れがあるため創は十分愛護的に扱う。保存的治療にはごく軽度の紅斑などに対しては保湿剤を、落屑を伴うような病変にはステロイド外用剤を用いる。また抗生物質含有軟膏や局所抗ヒスタミン剤を用いることもある。明らかな壊死の徴候がない、損傷が真皮浅層までの比較的浅い皮膚潰瘍では、一般的な創傷治療に従い創傷被覆材による湿潤療法も有効である。創部の感染は、全身性の感染リスクや炎症の波及により創部の深度

をより進行させる可能性があるため、湿性落屑や潰瘍を生じた場合は創部の洗浄や入浴により、創部を清潔に保ち感染を予防することが重要である。やや深い潰瘍や軽度の壊死組織を伴う場合、スルファジアジンクリームなどの銀含有外用剤を使用することもある。創部の炎症反応や膿性浸出液の増加などの徴候があれば局所感染の疑いがある。局所感染および続発する全身性の感染を認めた場合は抗生剤の局所または全身投与を考慮する。疼痛コントロールにおいては、著しい疼痛に対してオピオイドの投与が必要となることもある。また特殊な治療法として、高圧酸素療法 (Hyperbaric oxygen therapy: HBO) が障害組織の血管新生を促し創傷治癒を促進する目的で補助療法として用いられる³⁾。

4 外科的治療の適応

皮下組織以下の潰瘍に進展した LRI で、保存的治療に抵抗性であり2、3ヶ月以上治癒傾向が見られない場合、もしくは壊死組織や切断を必要とする不可逆的な変化が現れた場合、手術が考慮される。手術は壊死組織および周囲の放射線照射組織を含めた完全切除(外科的デブリードマン) およびデブリードマン後の組織欠損に対する再建術(植皮や皮弁など)を組み合わせで行う。手術の範囲、時期、適応する手技については、症例ごとに判断されるが、局所線量が20-25 Gyを超える高線量の γ 線によるLRIでは、ほとんどの症例で自然治癒は困難であり二次的に潰瘍を発症するため、不可逆的な変化が生じることが予め予想される際にはなるべく早期に手術を行う必要がある。高線量の被ばくにより四肢の主要血管の不可逆的な障害や難治性の疼痛、潰瘍部の感染コントロール不良例では四肢の切断術も考慮される。

形成外科的処置(植皮・皮弁)

1 外科的デブリードマン

障害が高度で壊死組織を伴うLRIでは、外

科的デブリードマンが考慮される。壊死組織のデブリードマンは周囲組織への壊死や感染の波及の防止、疼痛コントロールのために必要である。デブリードマンを計画するにあたっては放射線照射の影響範囲が臨床症状や徴候を示す領域よりも大きいことを念頭に置くべきであり、不十分なデブリードマンは治療の失敗につながる。一般に、放射線障害の重症度は累積被ばく線量に応じて増加する。被ばく線量がしきい線量以下であれば、放射線皮膚炎や放射線潰瘍は通常、臨床的に検出できないとされる。しかし臨床症状や徴候を示さない隣接する組織にも放射線照射の影響は少なからず認められる。通常の創傷治癒過程においては周囲組織からの線維芽細胞の遊走・増殖に伴う肉芽組織の形成や血管新生が必要であるが、放射線障害組織では細胞のDNA損傷により、これらの創傷治癒過程は阻害される。その結果、これらの組織は病変部の回復を促進する能力がないだけでなく、治癒過程にさらなるストレスを与えることになる。したがって、これらの重度の損傷を受けた組織を完全に除去することが、後の再建術の成否にも多大な影響を与えLRIの外科的管理の基礎となる。

デブリードマンの水平方向の切除範囲については、潰瘍周囲の皮膚付属器の消失を伴う硬化部位や色素沈着部位を完全に切除する必要がある。垂直方向の切除範囲については健常組織が確認できるまで切除することが原則であるが、通常深くなりやすく筋膜上もしくは高線量の場合はさらに深部のデブリードマンを要することもある。水平方向・垂直方向ともに肉眼的所見だけでは切除範囲の評価は難しいため、超音波検査、X線、CTやMRIの画像検査やサーモグラフィー、場合によっては骨シンチグラフィーなども併用し皮膚軟部組織の壊死および炎症の波及する範囲や骨髓炎の有無を精査した上で切除範囲を決定する必要がある。また海外では患者の人体の構造を直方体要素により詳細にモデル化したVoxelファントムを作成し、各組織の推定被ばく線量を評価した上で切除範囲を決定するという方法も行われている^{4, 5)}。デブリードマ

ンは完全切除が理想であるが、頭頸部などの特殊な部位や四肢でもその障害の深度によっては重要な血管・神経や内臓器などへの障害も予想される。そのため切除に際して、高度の機能障害や生命的な危険性が予測される場合には、切除範囲への考慮が必要となる。

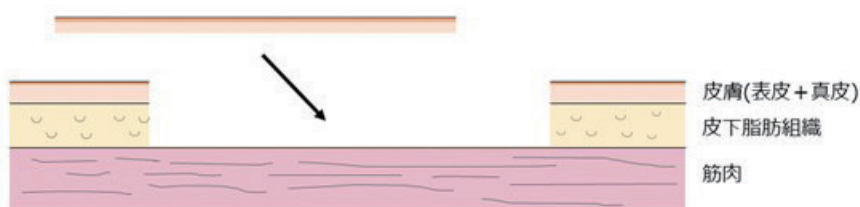
2 形成外科的再建術（植皮と皮弁）

LRIにおけるデブリードマンの範囲は通常の外傷や難治性潰瘍より大きくなりやすい。そのためデブリードマン後の組織欠損創に対して、通常は単純な縫合術による創閉鎖は難しい場合が多く、そのような場合には外科的手段による皮膚・皮下組織の再建が必要である。皮膚・皮下組織の再建には主に皮膚移植（植皮）と皮弁移植を用いる。これらの形成外科的処置は混同されやすいが、それぞれ一長一短があり、症例に応じて適切な再建法を選択する必要がある（図1）。

植皮は生体より皮膚片を採取し創部に移植する方法であるが、植皮片の厚さにより分層植皮

と全層植皮に分けられる。分層植皮では、表皮に加えて一部の深さまでの真皮が植皮片に含まれるのに対して、全層植皮では真皮全層が含まれる。採取した皮膚片は生体から完全に切り離されているため血行は完全に絶たれた状態であり、新たな血行は移植床より得ることになるため、移植床の状態と採取した植皮片の厚さが生着率に影響する。一般的に植皮片は厚いほど整容性が高いが、生着させるのも難しくなる。また植皮においては、少ない皮膚片で広範囲の創を覆うため、または皮膚片の間隙からのドレナージ効果により浸出液の多い創や感染創での生着率を向上させるために、皮膚片をメッシュ状やパッチ状に加工して移植する網状植皮（メッシュ植皮）やパッチ植皮などの手技があるが、分層植皮片の方がこのような加工は行いやすい。以上のような理由により、LRIを植皮で再建する場合には、整容性よりも創治癒の成功率を上げるために分層植皮で再建する方が一般的である。しかし移植床の状態が良好でないと、植皮片は生着が難

植皮：組織欠損部に皮膚組織のみを移植



皮弁：組織欠損部に血管茎を含む組織を移植

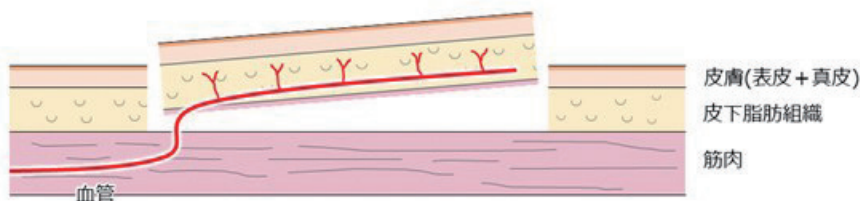


図1. 植皮と皮弁の違い

植皮では組織欠損部に皮膚組織のみを移植するが、皮弁では血管網・血管茎を含む血流を有した組織を移植可能である

しい。移植床の状態が良好かどうかはデブリードマンの際の組織からの良好な出血や、デブリードマンと同時の一次的再建を行わない場合に創面に良好な肉芽組織が形成されるかどうかである程度臨床的に判断することができるが、放射線潰瘍では潰瘍周囲組織において細胞のDNA損傷、炎症性サイトカインの放出や慢性的な酸化ストレスなどにより、局所の創傷治癒機転が遷延し移植床の状態も不良であることが多く、デブリードマンが完全に行われなければ遊離植皮術の成績は不良であることが多い。

一方で、皮膚・皮下組織やさらに深部の組織を血流のある状態で移植する皮弁は、方法によっては放射線照射の影響を受けていない遠隔からの組織を用いて再建することができる。皮弁にはいくつかの種類があるが、血管の支配領域を考慮せずに再建部位に隣接する皮膚・皮下組織を移動する局所皮弁では、皮弁が放射線照射の影響を受けている可能性があるため、一般的にLRIの再建に用いることは難しい。LRIにおいては、組織に流入する血管茎を含めて移植組織を挙上する動脈皮弁や、筋体自体を挙上（場合によっては直上の皮膚・皮下組織を含めて）し移植する筋（皮）弁の方がより移植組織の血流が安定し成績が良い⁶⁾。さらに移植組織の血管茎を完全に切離し、別の血管茎と顕微鏡による血管吻合術（マイクロサージャリー）を用いて移植を実現する遊離皮弁での被覆も有用であるが、吻合血管は放射線非照射部位の血管を用いる必要がある。また皮弁と植皮を併用することもある。植皮による再建は簡便ではあるが、皮膚で創を覆うのみであり立体的な組織を再建することはできない。より整容的・機能的に優れた再建を行うためには皮弁による再建が必要である。特に頭頸部などの他部位より整容的・機能的側面を考慮する必要がある部位に生じた潰瘍や、血管・神経・内臓などの重要臓器が露出するような深い潰瘍では皮弁による再建を積極的に考慮しなければならない。実際の再建計画は症例ごとに慎重に計画する必要がある。

3 その他の形成外科的治療

壊死潰瘍のデブリードマン後の創部に血管や神経などの重要臓器の露出がなく欠損組織の一次的再建を行わない場合、人工材料や成長因子製剤を用いて、二次的再建の前に良好な肉芽組織の増生を図ることがある。人工真皮は、コラーゲンスポンジとシリコンフィルムの二層構造からなり、コラーゲンスポンジを足場として線維芽細胞や毛細血管の侵入増殖を促し、真皮様組織を早期に構築することができる。また塩基性線維芽細胞成長因子（basic fibroblast growth factor: bFGF）製剤は、細胞増殖作用により創傷治癒を促し、すでに熱傷や褥瘡、糖尿病性潰瘍の難治性潰瘍で広く臨床応用されている。これらの治療法を場合によっては組み合わせて用いることもある。また局所陰圧閉鎖療法（negative pressure wound therapy: NPWT）も陰圧による創収縮や創表面の細胞への微小変形による効果、過剰な浸出液の除去などの効果で創傷治癒促進が期待でき、デブリードマン後の創にも用いられることが多いが、虚血組織においてはかえって壊死組織を増大するリスクが有るため、LRIのデブリードマン後に用いる場合は照射の影響範囲が完全にデブリードマンされているかを十分に検討する必要がある。

間葉系幹細胞移植

間葉系幹細胞（mesenchymal stem cell: MSC）は体性幹細胞の一種で、中胚葉由来の骨や軟骨、脂肪組織などへの多分化能および自己複製能力を有する。MSCは骨髄、脂肪組織や胎盤・臍帯組織などから単離することができる。再生医療においては成長因子放出による細胞増殖・血管新生促進作用、抗炎症作用や免疫調節能を有し、ES細胞やiPS細胞などの多能性幹細胞と比較して悪性化のリスクが低いことが特徴とされる。すでに承認済み再生医療等製品として、ヒトMSCは骨や脊髄の損傷、心筋梗塞、移植片対宿主病（graft versus host disease: GVHD）などに臨床応

用されているが、局所被ばくによる難治性潰瘍に対しても MSC の投与の有効性が報告されている。国内では基礎疾患を有する高齢者の仙骨部 LRI に対して、脂肪組織由来間葉系幹細胞 (adipose-derived stem cell: ADSC) の局所投与を行い、投与後 81 日で潰瘍が完治したという報告がある⁷⁾。海外ではフランスの放射線防護・原子力安全研究所 (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire: IRSN) を中心に LRI の治療に MSC が積極的に用いられている。3 名の LRI 患者に対して、デブリードマンや植皮などの外科手術に骨髄由来間葉系幹細胞 (bone-marrow mesenchymal stem cell: BMMSC) の局所投与を併用した報告では、全例で創傷の治癒ならびに疼痛の減弱に成功している^{8, 9)}。また動物実験ではミニブタの放射線潰瘍モデルに対して皮弁を用いた再建術に骨髄由来 MSC 局所投与を併用した結果、MSC からの成長因子放出作用が皮弁内の血管新生および筋組織の再生を促進したことが報告されており、形成外科的手術と MSC を用いた再生医療の併用療法も期待されている¹⁰⁾。

参考文献

- 1) Flynn D. Advances in the Diagnosis and Management of Acute Radiation Syndrome, Cutaneous Radiation Syndrome, and Acute Local Radiation Injuries. In: Doran M. Christensen SLS, and Frederick M. O' Hara, Jr., editor. The Medical Basis for Radiation-Accident Preparedness: Medical Management: Oak Ridge Associated Universities: 109-112, 2013.
- 2) NCRP: NCRP REPORT No.138: Management of Terrorist Events Involving Radioactive Material, 2001.
- 3) Borab Z, Mirmanesh MD, Gantz M, et al: Systematic review of hyperbaric oxygen therapy for the treatment of radiation-induced skin necrosis. J Plast Reconstr Aesthet Surg 70: 529-538, 2017.
- 4) Eric B: France / IAEA Cooperation Medical management of radiological accident [Conference presentation]. International Conference on Global Emergency Preparedness and Response: Vienna, Austria, 2015.
- 5) Lima CM, Lima AR, Degenhardt AL, et al: Reconstructive dosimetry for cutaneous radiation syndrome. Braz J Med Biol Res 48: 895-901, 2015.
- 6) Fujioka M: Surgical Reconstruction of Radiation Injuries. Adv Wound Care (New Rochelle) 3: 25-37, 2014.
- 7) Akita S, Akino K, Hirano A, et al: Mesenchymal stem cell therapy for cutaneous radiation syndrome. Health Phys 98: 858-862, 2010.
- 8) Benderitter M, Gourmelon P, Bey E, et al: New

emerging concepts in the medical management of local radiation injury. Health Phys 98: 851-857, 2010.

- 9) DiCarlo AL, Bandremer AC, Hollingsworth BA, et al: Cutaneous Radiation Injuries: Models, Assessment and Treatments. Radiat Res 194: 315-344, 2020.
- 10) Linard C, Brachet M, L' Homme B, et al: Long-term effectiveness of local BM-MSCs for skeletal muscle regeneration: a proof of concept obtained on a pig model of severe radiation burn. Stem Cell Res Ther 9: 299, 2018.

7-3 内部被ばくの治療

Key Point

- 核種によっては、放射性物質の体外への排出・排泄を促進させる除去剤があり、使用することで被ばく線量を下げることができる。
- 体内の放射性物質を早く減らすことで被ばく線量を減らすことが可能であり、体腔内から体内に吸収される前、あるいは臓器に沈着する前が除去剤の効果が高い。

内部被ばくの治療目標と一般的治療

1 内部被ばくの治療の目標

内部被ばくとは、体内に放射性物質が入ってそこから被ばくを続ける状態である。内部被ばくの治療の目的は、他の形態の被ばくと同様、確率的影響と組織反応（確定的影響）をできるだけ低く抑え、出現した症状に対応することである。

主な摂取経路は経口、吸入、創傷部からであるが、それぞれの経路で薬剤によらない一般的な治療もある。生体外と通じた消化管内や気道に入り込んでいるが吸収に至っていない段階での治療も有用である。特殊な経路として、注射などによる注入もあり、外部からの洗浄等が有効で無い点が創傷部汚染と異なる。外部被ばくの場合被ばく線量とは、既に人体組織に与えられた線量であり、既に生体組織に障害を起こした状態となっている。一方、内部被ばくの場合、放射性物質が体内に存在し、そこから放射線を出し続けている状態なので、その時までを受けた線量（障害）に加えて、これから将来にわたって被ばくする線量（障害）を預託線量として表す。このため、体内の放射性物質を自然経過より早く減らすことで被ばく線量自体を減らすことが可能であり、そのための方法が治療として有効である。治療の開始時期は、放射性物質が生体外と通じた部位にあり体内に吸収される前に除去する方が効果は高い。また臓器に集積するような核種では、まだ血中にありその臓

器に沈着する前に実施される方が効果は高い。

治療を行い、放射性物質を体外に出した場合、尿や便も含めてそれらは汚染物であるので、適切な管理が必要となる。また、特に後述の薬剤による治療の場合、単回でなく継続した治療が必要になることが多く、この点からも入院管理が必要となることが多い。

2 治療の適応

治療を行うかどうかは、その効果と副作用の他、患者の希望を含めた各種要因を勘案し決定される。

治療の効果判定と継続、中止の決定は、内部被ばくの診断法と同じ方法で取得したデータに基づいて、治療前の放射能量、治療により除去された放射能量、残存する放射能量を評価して、その治療の有効性を確認し、その治療を継続することで介入によりどのくらい線量が下げられるか（回避線量）を推定して決定する。除去剤による治療に関しては、一つの目安として、預託実効線量で 20 mSv 以下は治療不要、20-200 mSv は状況により判断、200 mSv 以上は治療考慮されるべき、と推奨されている（表 1）。放射性物質を除去する治療法には、核種によらず他の有害物質とも共通して用いられる一般的な治療法と、核種によって特異的な薬剤を用いて除去する治療法がある。前者を以下に解説し、薬剤は次項で解説する。

3 一般的治療

一般的治療としては、未だ体内に吸収され

表1. 内部被ばくに対する除去剤による推奨治療方針目安(文献1より引用・改変)

評価された 預託実効線量	推奨される治療方針
< 1 mSv	線量から健康影響のリスクは極めて小さいことを患者に安心してもらうため説明する。 治療不要。
1-20 mSv	線量評価に幅があればより正確な線量評価が必要。治療は考慮されるべきでない。
20-200 mSv	線量評価に幅があればより正確な線量評価が必要。医療者が医学的判断で治療適応を判断。健康影響は起こりにくいが、持続して治療した場合の効果の可能性が考慮されるべきである。
> 200 mSv	治療が考慮されるべきである。しかし、心理学的因子と持続して治療した場合の効果の可能性が考慮されるべきである。

てないものに対する治療として、経口摂取の場合には、うがい、胃洗浄、催吐剤、下剤が用いられる。吸入摂取の場合には、鼻をかむ、鼻咽頭洗浄、気管支・肺洗浄が考慮される。その他、眼の洗浄なども挙げられる。気管支・肺洗浄は、不溶性の物質の吸入の際に考慮されるが、リスクもある手技であり治療に伴う有害事象との兼ね合いで適応を決める。例えば肺の30日間推定預託臓器吸収線量が6 Gy相当以上で、組織反応を避ける場合に適応となる。それ以下の推定線量では、確率的影響との兼ね合いで慎重な検討が必要である²⁾。

もう1つの侵入経路として創傷汚染がある。創傷部は正常皮膚によるバリアが消失しているため吸収されやすいと考えられる。そのためできるだけ洗浄等によりその部分の放射性物質を少なくすることが内部被ばくの低減に役立つ。創傷汚染の量から内部被ばく量を推定することも治療方針の決定に役立つが、この推定は誤差も大きい。換算係数はIAEAなどの文献を参照されたい³⁾。創傷部の除染方法に関しては、「4-1 初療」の項を参照されたい。正常皮膚からの吸収はほとんどの核種で極めて少ないが、正常皮膚に付着していたものが手などを介して経口摂取されることもあるため、できる限り除染を行う。針刺し等に伴い汚染した場合は、その部分のパンチバイオプシーを除染に利用することもある。

線源としての放射性物質を除去する事以外

に、内部被ばくで障害が起こっている場合、それに対する治療も必要である。内部被ばくにより出現する症状は、取り込まれた核種の量と体内分布による。放射性物質が多く集積し高い線量を被ばくした臓器が主に障害を受け症状を呈する。この様に既に障害を受けた臓器ごとの治療は外部被ばくの場合と基本的に同じである。ただし、内部被ばくは低線量率被ばくまたは慢性被ばくに該当し、線量が預託線量で表されるため、同じ被ばく線量であっても、急性の外部被ばくより症状が弱く出ることを念頭に置いて治療方針を決定する。

除去剤

1 概観

内部被ばくの場合、体内に入ってしまった放射性物質の体外への排出・排泄を促進させることによって、その後の被ばく線量を下げることが有効である。一部の核種に対してはその用途の薬剤である除去剤がある。これらの薬剤は、組織への取り込みあるいは沈着の阻害、希釈、置換（異なった原子番号の安定同位体により取り込みやレセプター結合を競合させる）、結合（イオン交換とキレート）、細胞外分泌および輸送の促進（特定組織に取り込まれたものを血中に移行）といった各種機序によって、体外への排泄を促進することができる。

核種ごとの推奨される日本で使用可能な薬剤を表 2 に挙げる。また、その中の主な薬剤の使用法は、付属資料「薬剤リスト」を参照されたい。

ただし、下記「2 代表的薬剤」に解説する 2 剤を除いては、大部分の薬剤が、院内製剤の

承認効能外使用または、院内製剤の試薬使用の扱いとなる²⁾。この場合には、倫理性を審査する委員会での承認と文書による患者への説明と同意といった院内手続きが必要となる。これらに対応するため、今後の制度整備が望まれる。

表 2. 核種ごとの推奨除去剤（文献 1 より引用・改変）

核種	優先される治療薬	承認状況 (2021 年 7 月現在)
亜鉛 Zinc	DTPA	院内製剤 (△)
アメリシウム Americium	DTPA	承認あり
硫黄 Sulphur	チオ硫酸ナトリウム (デトキシソール®) を検討	院内製剤 (△)
イットリウム Yttrium	DTPA	院内製剤 (△)
イリジウム Iridium	DTPA 検討	院内製剤 (△)
ウラン Uranium	炭酸水素ナトリウム (メイロン®)、アセタゾラミド (ダイアモックス®)	院内製剤 (△)
核破砕生成物 (混合)	事故後の時間経過によってその時に優位な核種に応じて治療法を選択。	
カリウム Potassium	利尿剤	院内製剤 (△)
ガリウム Gallium	ペニシラミン (メタルカプターゼ®)	院内製剤 (△)
カリフォルニウム Californium	DTPA	院内製剤 (△)
カルシウム Calcium	ストロンチウムの項参照	
キュリウム Curium	DTPA	承認あり
金 Gold	ペニシラミン (メタルカプターゼ®)、ジメルカプロール (バル®)	院内製剤 (△)
クロム Chromium	DTPA	院内製剤 (△)
コバルト Cobalt	Ca-DTPA	院内製剤 (△)
ジルコニウム Zirconium	DTPA	院内製剤 (△)
水銀 Mercury	ジメルカプロール (バル®)、DMPS ※ a)、DMSA ※ b)	院内製剤 (△)
ストロンチウム Strontium	塩化アンモニウム (塩化アンモニウム補正液 5 mEq/ml®) の経口投与、グルコン酸カルシウム (カルチコール®) の経口投与。	院内製剤 (△)
セシウム Cesium	プルシアンブルー	承認あり
セリウム Cerium	DTPA	院内製剤 (△)
タリウム Thallium	プルシアンブルー	承認あり
炭素 Carbon	水分補給を検討、安定炭素投与	
テクネチウム Technetium	過塩素酸カリウム (パークロレイト)	院内製剤 (試薬使用)

核種	優先される治療薬	承認状況 (2021年7月現在)
鉄 Iron	デフェロキサミン DFOA (デスフェラル®)	院内製剤 (△)
ナトリウム Sodium	利尿剤と生理食塩水で希釈	院内製剤 (△)
銅 Copper	ペニシラミン (メタルカプターゼ®)	承認あり (中毒としての承認)
トリウム Thorium	DTPA	院内製剤 (△)
トリチウム Tritium	水分補給	
鉛 Lead	DMSA ※ b)	院内製剤 (試薬使用)
ニッケル Nickel	DDTC ※ c)、ジメルカプロール (バル®)、DTPA	院内製剤 (試薬使用、△)
ネプツニウム Neptunium	デフェロキサミン (DFOA) (デスフェラル®)、DTPA 併用または単独使用	院内製剤 (△)
バリウム Barium	ストロンチウムの項参照	
ビスマス Bismuth	DMPS ※ a)	院内製剤 (試薬使用)
ヒ素 Arsenic	ジメルカプロール (バル®)	院内製剤 (△)
フッ素 Fluorine	水酸化アルミニウム (マーロックス®)	院内製剤 (△)
プルトニウム Plutonium	DTPA	承認あり
プロメシウム Promethium	DTPA	院内製剤 (△)
ポロニウム Polonium	ジメルカプロール (バル®)	院内製剤 (△)
マグネシウム Magnesium	ストロンチウムの項参照	
マンガン Manganese	Ca-DTPA	院内製剤 (△)
ヨウ素 Iodine	曝露後の治療でなく、予防薬として、安定ヨウ素剤 (ヨウ 化カリウム丸 50 mg®)	承認あり
ラジウム Radium	ストロンチウム参照	
リン Phosphorus	水分補給。リン酸水素ナトリウム水和物・リン酸二 水素ナトリウム水和物 (リン酸 Na 補正液 0.5 mmol/ mL®) または、リン酸二カリウム (リン酸 2 カリウム注 20 mEq®) の経口投与	院内製剤 (△)
ルテニウム Ruthenium	DTPA	院内製剤 (△)
ルビジウム Rubidium	プルシアンブルー	院内製剤 (△)

※a) DMPS: ジメルカプトプロパンスルホン酸

※b) DMSA: ジメルカプトコハク酸

※c) DDTC: ジエチルジチオカルバミン酸

△ 承認効能外使用

DTPAでなく、Ca-DTPAのみ記されている元素に対しては、キレート安定度の点から、Zn-DTPA
が有効で無い

2 代表的薬剤

除去剤の中で代表的薬剤として、本邦で内部被ばく治療薬として薬事承認されている、プルシアンブルーとジエチレントリアミン 5 酢酸 (DTPA) について解説する。

①プルシアンブルー

プルシアンブルー (ラディオガルドーゼ カプセル 500 mg[®]) は、青色顔料の経口剤でセシウム等の体内汚染治療薬である。2010 年に日本での製造販売承認を受けている。経口投与後、腸管内でセシウムと結合し、そのまま便中に排泄される機序で除去を促進する。被ばく後 2 週間程度までに使用開始することが推奨される。

ゴイアニアセシウム被ばく事故の際、内部被ばく患者の治療に用いられた実績がある。プルシアンブルーで治療された患者の内、データのそろった 10 名について、線量低減効果は 51-84% であったとされる³⁾。

②DTPA

DTPA とは、ジエチレントリアミン 5 酢酸 (diethylenetriamine pentaacetic acid) の略語である。この薬剤は、キレート剤で経静脈投与されプルトニウム、アメリシウムなどの内部被ばく治療に使用される。創傷部の洗浄や経気道汚染に吸入でも使用されることがある。カルシウム製剤 (ジトリペンタートカル静注 1000 mg[®]) と亜鉛製剤 (アエントリペンタート静注 1055 mg[®]) があり、カルシウム製剤の方が効果は高いが副作用も大きい。血液中で、カルシウム又は亜鉛とプルトニウム等を置き換えて結合し、そのまま尿中に排泄される機序で、プルトニウム等の体外排出を促進する。プルトニウムが骨に沈着する以前に使用することが効果的であり、そのため被ばく量や診断が確定する前の投与開始も検討されるべきである。2011 年に日本での製造販売承認を受けている。カルシウム DTPA の 1 g 静脈投与で、尿中への排泄促進効果 (Excretion enhancement factor) は 1.1-396.1 倍、中央値 12.5 倍とされる⁴⁾。

上記プルシアンブルーと DTPA は他の疾病の

治療には使用しないため、量子科学技術研究開発機構をはじめとする高度被ばく医療支援センターにある程度備蓄されている。

参考文献

- 1) IAEA: Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency, 2018. <https://www.iaea.org/publications/12230/medical-management-of-persons-internally-contaminated-with-radionuclides-in-a-nuclear-or-radiological-emergency> (アクセス日 2021-12-22)
- 2) 日本病院薬剤師会：院内製剤の調整及び使用に関する指針 (Version 1.0) , 2012. <https://www.jsph.or.jp/cont/12/0731-1-1.pdf> (アクセス日 2021-12-22)
- 3) Melo DR, Lipsztein JL, de Oliveira CA, et al: 137Cs Internal Contamination Involving a Brazilian Accident, and the Efficacy of Prussian Blue Treatment. Health Phys 66: 245-252, 1994.
- 4) FDA: CENTER FOR DRUG EVALUATION AND RESEARCH, 2004. https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/nda/2004/21-749_Pentetate%20Calcium%20and%20Zinc_Approv.pdf (アクセス日 2021-12-22)

8-1 メンタルヘルス

Key Point

- 原子力災害・放射線災害は人々に大きな恐怖と不確実感を与え、衣食住など生活の根本に対する混乱をもたらす。
- 被災者は不安・不眠・イライラ等のストレス反応を示すが、多くが一時的で、うつ病や心的外傷後ストレス障害（PTSD）に発展するのは一部である。
- 被災者の不安軽減につながるのは、医療職員が提供する健康情報や生活の現実的な支援である。

原子力災害・放射線災害は、影響を受けた人々に強い心理的苦痛をもたらす。人々は被ばくの度合いを自ら感じ取ることができず、放射線に対する専門的知識もない。そのため、人々は大きな恐怖と不確実感を自覚し、自身の安全に対して自己評価できず、衣食住などの生活必需品の安全性に困惑する。専門的知識を人々が噛み砕いて理解するためには、政府当局者・科学者・メディアが大きな役割を果たす。しかし、災害時は情報が不足したり過剰となったり、錯綜や疑念が生じたりして、情報そのものの信頼性が揺らぎ、人々の恐怖はさらに増すこととなる¹⁾。

人は、ストレスを受けると心身のストレス反応が起きるが、それから回復する力（レジリエンス resilience）を有している。たとえ災害によって過酷なストレスを体験しても、大多数の人はそれから回復し、うつ病や心的外傷後ストレス障害（post-traumatic stress disorder: PTSD）などの精神疾患を新たに発症する者は少数である。この傾向は原子力災害・放射線災害でも当てはまるが、自然災害（地震・水害など）と比べると、多大・複雑な影響を与えることも事実である。東京電力福島第一原子力発電所事故後、福島県下の避難住民を対象とした大規模調査では、男性の17.8%-19.0%、女性の23.3-25.3%がPTSDのスクリーニング陽性者だった（2012-2014年度）²⁾。

原子力災害・放射線災害の影響を受けた人々

においては、メンタルヘルスのみならず、日常行動の変化（社会活動の回避、飲酒量の増加など）、健康や安全に関する助言への不信など、広範な変化が生じうる。一部の者は、身体の変調が被ばくのためだと考えたり、子孫に遺伝性影響が生じることを心配したり、医学的に説明できない身体症状を自覚したりする。また、社会不安が特定の集団（被災者など）に投影され、差別・偏見・いじめへと発展しうる¹⁾。

原子力災害・放射線災害に対して、平時からのメンタルヘルス教育は有用である。メンタルヘルスは、それ自体が抵抗・偏見の対象である。そのなかでメンタルヘルスの重要性を平時から啓発することは、いざというときのメンタルヘルスへの抵抗・偏見を和らげることにつながる。メンタルヘルス上のリスクの高い集団には、平時からの特定および連携体制の構築が望まれる（表1）。

いざ原子力災害・放射線災害が発生すると、人々は不安・落ち着かなさ・いらいら・怒り・抑うつ・不眠などの心身反応を起こしうる。しかし大多数の人々において、これらは病的なものではなく「強いストレスに対する自然な反応」である。医療職員がその旨を人々に伝えることは、それ自体が有用な教育となる。

多くの場合、人々は医療職員が提供する健康情報を拠り所とする。医療職員が安心感をもたらす情報を提供し、生活の現実的な支援

表 1. 原子力災害・放射線災害被災者へのメンタルヘルス上の助言例

- 不安や不眠が出ることは自然な反応で、ほとんどの人々にとって一時的なものです。
- 深呼吸やストレッチで心身の緊張をほぐすと良いです。
- 家族や友人と連絡を取り合しましょう。
- 信頼できる情報を入手しましょう。
- 気持ちをためこまないでください。
- もしストレスが強かったり長引いたりする場合は、専門家につながりますので教えてください。
- もしストレスでつらそうな人が周りにいたら、医療職員につなげてください。

表 2. 原子力災害・放射線災害におけるメンタルヘルス上の高リスク者

- 事故復旧作業の従事者
- ファーストレスポnder（消防官、警察官、医療職員など）
- 幼少児の母親
- 社会経済的地位が低い者
- 近親者を失った者
- 避難者
- 負傷者
- 身体・精神障害者

へと導くことが肝要である。一般的対処法として、心身の不安緊張を制御する方法の習得（深呼吸など）、家族・友人との社会的つながりの強化が重要である。人々は、メンタルヘルスを話題にすることに抵抗を感じ、自らの不調を語りたがらないかもしれない。よって、「気持ちをためこまないで、無理のない範囲で教えてください」など、医療職員から希求行動をうながすことが求められる。メンタルヘルス専門家を必要とする例（症状が強い・持続的、生活への支障が大きい）は専門家につなぐ配慮が求められる（表 2）。

不安・不眠症状を持つ者に対して一律の薬物療法は推奨されない。不眠症状に対しては、依存性のない不眠症治療薬（ラメルテオン<ロゼレム®>、スボレキサント<ベルソムラ®>など）が使用可能である。抗不安薬（エチゾラム<デパス®>、ジアゼパム<セルシン®>など）や睡眠薬（プロチゾラム<レンドルミン®>、ゾルピデム<マイスリー®>など）としてベン

ゾジアゼピン受容体に作用する薬物が汎用されているが、これらには依存性がある。そのため、災害時投与には慎重となるべきで、やむを得ず使用する場合でも、あくまでも頓用にとどめるべきである。抗うつ薬である選択的セロトニン再取り込み阻害薬（selective serotonin reuptake inhibitors: SSRI）も抗不安効果があるが、即効性はなく、短期投与には適していない。

参考文献

- 1) Shigemura J, Harada N, Tanichi M, et al: Nuclear disaster response. In: Ursano RJ, Fullerton CS, Weisaeth L, et al, ed. Textbook of Disaster Psychiatry 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge: 298-313, 2017.
- 2) Oe M, Fujii S, Maeda M, et al: Three-year trend survey of psychological distress, post-traumatic stress, and problem drinking among residents in the evacuation zone after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident [The Fukushima Health Management Survey]. Psychiatry Clin Neurosci 70:245-252, 2016.

9-1 長期フォローアップ

Key Point

- 確率的影響として悪性腫瘍のフォローアップのみならず、線量が高い場合には非悪性腫瘍のフォローアップも必要となる。内部被ばく事例では、継続的な内部被ばくのフォローアップも必要となる。
- 心理・精神的な状況、社会的な環境にも配慮する。

基本的な考え方

放射性物質による内部汚染を認めた例においては、核種に応じて継続した体内残留量評価が求められる。また、急性放射線症候群の諸症状を克服しえた際には、放射線の晩発影響に対する長期フォローアップが必要となる。

1 内部被ばく評価

放射性ヨウ素 131 のような実効半減期が短い核種を除き、長期的な放射性核種の体内残留量の評価を行う必要がある。継続的な排泄物（尿・便）の放射能測定や体外計測による体内残留量の評価によって、内部被ばくの状況をモニタリングし、予測される実効半減期に相当する減少か否かを評価する。実効半減期に合わない変動（増加等）の場合には、問診等でその原因を探る。

2 確率的影響

被ばく後生涯にわたり放射線誘発悪性腫瘍について年1回程度の経過観察を要する。特に実効線量が 100 mSv を超過する例においては、その重要性は高い。原爆被爆者で線量依存的なリスクが高かった白血病（慢性リンパ性白血病を除く）や、乳房、肺、胃、結腸、甲状腺、卵巣、膀胱の悪性腫瘍および悪性黒色腫を除く皮膚癌や、骨髄異形成症候群（MDS）等についての検査が必要となる^{1,2)}。悪性腫瘍の好発時期については、白血病は

被ばく後 2-5 年、固形癌については 10 年あるいはそれ以上であることに留意する³⁾。

3 組織反応（確定的影響）

経過観察すべき例としては、被ばく部位と線量に応じて、白内障のほか、副甲状腺機能亢進症による高カルシウム血症や甲状腺機能異常等があげられる。循環器障害としての脳梗塞や心筋梗塞等のリスクが原爆被爆者や放射線治療の患者等で高まることも報告されており、継続的なリスク評価や観察が必要となる。

4 心理・精神的な状況

被ばくによる身体的影響のみならず、心理・精神的影響についても留意する必要がある。事故を生じた作業現場の当事者であればより自責感が強いことも予想される。被ばくしたことに対する周囲からの差別、自身による諦観（セルフスティグマ）、社会支援が行き届かない場合等、種々の要因も心理・精神的な状況に影響し得る。定期的な観察に加えて、社会的環境のフォローアップと必要に応じた介入が求められる。

検査項目

以下に長期フォローアップにおける検査項目を示す（表 1）。

表 1. 長期フォローアップにおける検査項目

評価対象	検査内容
内部被ばく線量評価	1. 排泄物（尿・便）の放射能測定
	2. 体外計測（ホールボディカウンタ検査）
確率的影響評価	1. 血球計数、血液生化学検査、尿検査
	2. 便潜血反応
	3. 胸部単純 X 線検査
	4. 甲状腺超音波検査
	5. 腹部超音波検査
	6. 上部消化管内視鏡検査（あるいは上部消化管造影検査）、大腸内視鏡検査
組織反応（確定的影響）	1. 白内障検査（細隙灯検査）
	2. 副甲状腺機能（血液生化学検査《血清 Ca、血清 P》、必要に応じてインタクト PTH）
	3. 甲状腺機能（TSH、FreeT4）
	4. 循環器障害のリスク評価（心電図検査、心臓超音波検査、頸動脈超音波検査、足関節上腕血圧比検査（ABI））、必要に応じて脳 MRI
心理・精神的な状況	1. 面談による問診
	2. 状況に応じて、専門科に紹介し、質問紙調査による全般的な精神健康度やストレス状況の評価

参考文献

- 1) Thompson DE: Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumors, 1958-1987. Radiation Research 137: S17-S67, 1994.
- 2) Iwanaga M, Hsu WL, Soda M, et al: Risk of myelodysplastic syndromes in people exposed to ionizing radiation: a retrospective cohort study of Nagasaki atomic bomb survivors. J Clin Oncol 29: 428-434, 2011.
- 3) NCRP: NCRP Report No. 161: Management of Persons Contaminated with Radionuclides, 2008.

10－1 被ばく・汚染患者の搬送

Key Point

- 搬送の緊急性は放射線被ばくや汚染の程度にはよらないので、医学的緊急性により適切な搬送手段を選択する。
- 被ばく・汚染患者搬送前の汚染拡大対策が重要である。特に鞋底と手掌による汚染拡大には注意すること。
- 搬送中の看護では、患者の救命が第一優先であることを念頭に、個人防護および汚染拡大防止を考慮し、診療補助、全身観察、排泄物等（試料）の回収、汚染検査、精神面へのケアが重要点となる。

基本的な考え方

1 考慮すべき優先度

被ばく・汚染患者（患者とする）の搬送においても、その原則は医療処置と同じであり、①搬送に携わる者の安全確保、②救命救急処置¹⁾、③放射線防護の配慮、の順で優先される。患者から高い線量の外部被ばくを受けることはまれであり、内部被ばくは後述の正しい防護装備で防ぐことができる¹⁾。救助のために発災現場近傍に入る場合には、その場の空間線量やプルーム吸入による内部被ばくに注意が必要である。医療チームの活動として原子力災害現場近傍での活動は一部検討には上がっているが、本手引きの範囲を超えるので、ここでは記載しない。

2 搬送の場面

搬送には、現場から医療機関への搬送と、最初の医療施設からより専門的医療施設までの病院間転院転送がある。発災現場では医学的狀態も、汚染の状況も不明な点が多く、それらを可能な限り判断して、後述の放射線防護処置をとる必要がある。医学的に時間が許せば、現場で搬送前の脱衣を考慮する。可能であれば発災事業所の放射線管理要員に同行してもらい、協力を依頼する。

一方、転院転送の場合、最初の病院で医学的応急処置と汚染の測定や体表面除染が行われていれば、その情報に基づく対応ができる。ただし、傷病への応急処置だけで、汚染評価のない場合、発災現場からの搬送と同じく、防護処置が必要である。

搬送終了ののち、次の搬送に従事する前に、搬送車両、乗組員等の汚染測定（サーベイ）が必要である。搬送した先の医療施設で実施されるのが原則である²⁾。

3 搬送手段の選択

通常と同じく、搬送手段には、救急車、通常車両、ヘリコプター、固定翼機などが用いられる。搬送の緊急性は放射線被ばく程度や汚染にはよらないので、医学的緊急性により適切な搬送手段を選択する。ただし、大量被ばくで前駆症状があれば、その症状自体も加味して緊急性を判断する必要がある。単なる汚染だけで医学的に緊急性がなければ、救急車は必要なく、事業所の車両が使われる場合もある。

いずれの手段でも後述の防護処置が必要である。特に航空機の養生の場合、飛行自体の安全性を損なわないように細心の注意と、訓練が必要である。

救急車や、ドクターヘリ等の場合、患者の搬送を拒否されることがある。これを防止す

するためには、事故より前に、搬送実施団体（例えばドクターヘリ運航会社）と十分協議し、現場の運航担当者に放射線影響と防護について十分な教育をして理解を得ておくことが肝要である。

4 搬送にあたっての情報共有

搬送時には搬送元から搬送担当者と搬送先への情報提供が必須であるが、一般救急搬送と同様の人数、性別、年齢、バイタルサイン、意識レベル、外傷では受傷機転といった傷病者情報のほかに、放射線についても汚染や被ばくに関する情報が必要である。具体的には、汚染や被ばくの有無、部位、その程度、原因となった核種、およその被ばく線量などである。搬送元や搬送機関、搬送先で共有する情報書式（図1）などを決めておけば、情報に欠損を生じにくい。前述のように放射線管理要員に搬送に同行してもらうことにより、放射線に関する情報も確認しやすくなる。

様式3 傷病者連絡票

搬送元	搬送先	男・女	生年月日	年月日
搬送元	搬送先	発生日時	年月日	時分
搬送者の状況				
測定時刻	時 分	搬送経路概要		
意識	有・無			
呼吸	有・無			
血圧	mmHg			
脈拍	回/分			
体温	度			
外傷	有・無			
出血	有・無			
骨折の疑い	有・無			
A/PD値	mSv			
放射線物質の付着状況				
体表汚染 (有・無・不明)		α : 搬送前 Bq/cm² → 搬送後 Bq/cm²		
外部被ばく (有・無・不明)		β : 搬送前 Bq/cm² → 搬送後 Bq/cm²		
内部被ばく (有・無・不明)		搬送経路		
搬送・搬送スタッフの汚染検査 (汚染部位からの距離 30cm あたり)		α 計数値 m/n		
α : 0.1mSv/h 以下		β 計数値 m/n		
β : 0.1mSv/h 以上		搬送手続		
不明		搬送先		
<その他の所見>		出発予定時間		
日時 月 日 時 分		到着予定時間		
連絡者氏名		搬送方法		
所 属		搬送手段		
電話番号		搬送先		

図1. 傷病者連絡票の例（青森県）
（文献3より引用）

搬送に伴う汚染管理

患者搬送に伴う汚染管理は搬送前・搬送中・搬送後に大別できる。また、患者搬送には下記が予想される。

- ① オンサイトから救急車や事業所の車などによる搬送
- ② オフサイトから一般車両（救急車含む）などによる搬送
- ③ 患者本人によるウォークイン
ここでは①・②の対応をのべる。

1 搬送前の留意点

救急車などの養生や汚染拡大防止対策はマニュアルなどの注意点や手技を参考にするとよい^{4,5)}。

また、一般車両では大型ビニール袋などで座席や床の簡易養生を行うと搬送後の除染が容易である（「5-1 放射線管理」を参照）。

搬送時、救急隊など（付添や放射線管理要員を含む）は個人防護装備（personal protective equipment: PPE）もしくは雨具（レインコート）と靴袋、手袋を着用することで二次汚染を防ぐことができる（「5-1 放射線管理」を参照）。

救急隊などの二次被ばく防止と汚染拡大防止のため、大量の放射性物質（汚染物含む）の確認（空間線量率測定で予測可能、サーベイメータの操作は「5-1 放射線管理」を参照）が必要である。

原子力施設から搬送する場合、放射線管理要員が患者の汚染検査と適切な汚染拡大防止処置を行い同乗すること。

汚染を有した患者に対する汚染拡大防止の基本は脱衣であるが、汚染拡大防止を確実にを行うため患者を搬送するための袋や毛布などで患者を包むことが肝要である。代替としてPPEなどを利用する方法もある。また、汚染を伴う損傷部で簡易除染が難しい場合、ガーゼやラップなどで汚染拡大防止処置を行うことも大切である（「5-1 放射線管理」を参照）。

2 搬送中の留意点

搬送中に最も注意を要する部位として靴底（靴裏面）と手掌があげられる。靴底による汚染拡大は患者のみならず救急隊なども注意が必要である。

搬送中は車の外気取り込みは避け、内気循環にすること。感染症など外気の取り込みを必要とする患者移送では、高濃度放射性プルームの通過などにより車内が放射性物質で汚染する可能性があるため、車内の空間線量率を同時に確認すること。

車内での汚染拡大は搬送前の留意点を徹底することで概ね防ぐことは可能であるが、むやみにさまざまな箇所に触れないことにも注意が必要である。ただし、極めて容態が悪く（生体モニター装着など）汚染拡大防止が難しい患者の場合、同乗する放射線管理要員などは医師の処置を遮ることなく汚染拡散の可能性のある箇所を注視し、搬送後に車内の汚染検査・除染を行う。外部被ばくのための患者では養生は不要であるが、中性子線被ばくによる急性放射線症候群を疑う患者の場合、放射化物の嘔吐・下痢の可能性があるため、吐瀉物・排泄物に対応可能な準備が必要である。

3 搬送後の留意点

病院到着時、救急隊などから患者の情報収集及び汚染拡大防止処置を確認する。汚染拡大防止処置がされている場合でもストレッチャー及び救急隊などが汚染を持ち込む可能性に注意する。

患者からの汚染拡大を防ぐ方法として、施設外（救急外来入口など）で患者を院内ストレッチャーに移し替え、救急隊などは新たな足袋を着用するなどにより汚染の持ち込みを防ぐことは可能であるが、施設に入る前に汚染検査を行うことが望ましい。院内での汚染拡大防止は「5-1 放射線管理」を参照のこと。

患者搬送終了後、受け入れ病院の放射線防護関係者（診療放射線技師など）により救急隊などの汚染検査を行うことが望ましい。ただし、放射線防護関係者の人数に余裕がない場合、原子力災害では、避難退域時検査場で

の汚染検査・除染の依頼も一案である。その際は自治体内での調整が必要である。原子力災害医療では放射線防護関係者の人数確保が重要となる。

搬送中の看護

患者が発生した場合、原子力発電所サイト内や被災地内の救護所、被災した病院での根本的な治療は困難であるため、重症者の救命と現地の医療の負担を軽減するために災害が及んでいない医療機関への搬送が必要となる。

わが国における原子力事故の看護体験として、1999年9月のウラン加工工場臨界事故や2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故での報告がみられる^{6,7)}。前者の事故では、高線量被ばくを受けた患者の搬送中の吐物や排泄物の回収、所持品の管理がその後の線量評価及び治療方針へと繋がったことは特記するところだろう。また、後者の事故では、全身防護服および半面マスク装着下で、被ばく・汚染患者の搬送が行われ、搬送中の診療補助や全身観察、汚染検査、そして精神面へのケアと搬送先機関への情報提供が行われた。

搬送中の看護師の役割は、患者の救命が第一優先であることから、生命の維持と安定化を図るための医師の診療補助および全身観察である。それに加え、被ばく・汚染患者の看護に特有なものとしては、看護師自らの汚染・被ばくを防護し、汚染拡大防止に配慮した排泄物等（試料）の回収や汚染検査の役割を担う。さらには、患者は被ばくによる健康影響の不安も大きいと考えられるため、緊急事態の中でも本人や家族への声掛けを含む精神的なケアを忘れてはならない。その後の被ばくによる影響や治療方針などの説明の際には、チーム内での調整役として、専門家と患者とをつなぐ橋渡しの役割も担うこととなる。

搬送中の看護のポイント

患者の救命が第一優先であることを念頭に、個人防護および汚染拡大防止を考慮し、以下

の5つのポイントを押さえる。

①診療補助 ②全身観察 ③排泄物等(試料)の回収 ④汚染検査 ⑤精神面へのケア

参考文献

- 1) IAEA: AG.5. EMERGENCY MEDICAL SERVICE (EMS), in EPR-FIRST RESPONDERS 2006, Manual for first responders to a radiological emergency, IAEA, Vienna, Austria, 2006.
- 2) 消防庁予防課特殊災害室: スタート! RI 119 消防職員のための放射性物質事故対応の基礎知識, 2011.
<https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/6016120> (アクセス日 2021-12-21)
- 3) 青森県: 原子力災害時における医療対応マニュアル, 2019.
https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kenko/iryo/files/genshiryokuiryo_manual.pdf (アクセス日 2021-12-21)
- 4) 原子力安全研究協会: 原子力災害時の医療に係わる実践研修テキスト, 2015.
<https://www.nsr.go.jp/data/000186589.pdf> (アクセス日 2021-12-21)
- 5) 量子科学技術研究開発機構: 原子力災害医療研修テキスト・CBRNE 災害対処テキスト, 2021.
- 6) 徳山憲子: 臨界事故による緊急被爆患者の看護を体験して. 日本災害看護学会誌 3: 45-52, 2001.
- 7) 吉田浩二、中島香菜美、廣島陽子: 東京電力福島第1原子力発電所事故による放射能汚染等に対する緊急被ばく医療; 放射線看護の専門看護師を目指した活動の取り組みと課題. 日本放射線看護学会誌 1, 37-42, 2013.

11-1 情報発信とメディア対応

Key Point

- 必要に迫られた時点で、急遽メディア対応を行うことは難しく、平時よりシミュレーションを繰り返し、予めある程度の準備をしておくことが重要である。

メディア対応は、医療機関に限らずどのような組織でも社会とのコミュニケーションにつながる重要な要素である。しかし、メディアはそもそも自組織の広報部門ではない。自らの責任の下、記者や制作者の判断、編集・制作方針に基づいて報道するため、情報を発信する側の意図に沿った内容になるとは限らない。提供する情報をうのみにすることなく、常に批判的な視点を持って取材しているのがメディアである。

それが「被ばく医療」の情報発信となると、さらに世間の関心も高く、過去の経験からデマや風評、誹謗中傷等が生じやすいことも忘れてはならない。メディア対応方法は、現実にはケースバイケースであるが、組織としての対応方法として出来るだけ普遍的な要素を以下に列記する。

1 医療機関として発表する項目を整理する

被ばく医療を必要とするような事故や災害の情報については、警察や消防、自治体や国など、より包括的に情報が集まる組織に任せる。医療機関は、自組織の被ばく医療における役割や機能、体制や患者に関する情報など医療情報に特化して情報発信する。ただし、患者の情報に関しては、患者本人やその家族等の了解を得た範囲で公表することは言うまでもない。同時に、情報の混乱や交錯を避けるため、警察や消防、自治体や国などと公表内容について情報を共有することも重要である。

2 情報発信窓口を統一する

様々な部署から多様な情報が五月雨式に出

ると、内容に齟齬が生じ、情報の時系列が混乱するなど、誤報や誤解を招く要因となる。情報発信窓口の統一と正確性を図るため、情報を集中させ、ファクトチェックした情報を発信する部署を決め、そのことを組織内に周知徹底する。

3 出来る限り定期的に発信する

時系列に沿って定期的に情報発信をすることで現状の把握と理解がしやすくなる。前回発表との情報の変化を明確に示すことで、分かりやすい情報発信が可能になる。

4 前提となる状況の変化は、特に強調する

前提となる状況が変われば、対応方法も変わる。例えば時間の経過とともに被ばく医療体制が充実しより丁寧な対応が可能となる、空間線量の低減に伴い防護体制を緩和していくなどである。状況の変化に応じて新たな対応を発信する場合は、なぜ対応がそれまでと変わったのか、前提となる状況の変化について必ずセットで説明することが重要である。この説明が不足すると「言うことが以前と違う」「どの情報を信じればいいのか分からない」といった混乱を社会に招きやすく、組織に対する信頼にも影響することがあるため、注意が必要である。

5 5W1Hを明確に把握する

正確で誤解の少ない情報発信をするために5W1Hを明確にすることは重要である。メディアもこれらの情報が揃わないと報道できないため、繰り返し質問し確認する。不明のこと

は不明とし、憶測や見通しなど不明確なことはコメントしない。

6 災害時の安否不明者の実名公表について

2021年9月16日、内閣府が都道府県に対し、災害時の安否不明者の氏名公表を検討するよう通知した。さらに9月17日には防災担当大臣が、災害時の救助活動の効率化、円滑化に資するとして、安否不明者氏名の公表に向けた統一的なガイドラインを2022年度中に策定する方針を示した。しかし現状では都道府県によって対応が異なっているため、平時のうちに地元自治体にその方針と情報共有のルールを確認しておくことが重要になる。

被ばく医療のような実経験の少ない事柄についてメディア対応する場合の成否は平時の準備に掛かっている。プレスリリース、医療機関内の取材可能エリアの設定、会見の会場や頻度などについて、実際に被ばく医療が必要とされる状況を想定して考え、準備することが求められる。原子力防災訓練時にはメディア対応訓練を組み込むことも検討したい。実際に被ばく医療に対応する事態が起これば、医療機関の意思決定層は多忙となり、タイムリーにメディア対応の相談ができない可能性もあるため、平時に、シミュレーションを繰り返し、プレスリリースの基本的な文面などは用意しておくなどの備えが重要である。

11－2 患者説明

Key Point

- 患者・家族の不安や疑問を丁寧に聞く姿勢をもつ。
- 放射線被ばくに関する情報は難解であるため、患者・家族に伝わる表現を心がける。
- 発症時期がわからない不安や自責感等、心理的影響が大きく心理的ケアの必要性も考慮する。

放射線被ばくに関連する患者の場合、患者・家族が抱える放射線健康影響に関する不安や疑問は多種多様である（表 1）。また、時の経過によっても不安や疑問の内容や程度が変化することが多い。周囲の偏見や差別へのおそれやその実際の被害等についても受け止めてともに対応できることが望ましい。説明者には、説明一辺倒にならず、まず患者・家族の思いを丁寧に聞く姿勢が求められる。

被ばく医療に関する情報は、放射線の概念や、独自の単位、確率、統計、疫学を踏まえたリスク概念を含むため難解である。防護のために用いられる各種の基準値と、健康影響の現れかたとの違いも理解されにくい。患者・家族の理解しやすい表現を用い、必要に応じて誤りのない言い換えなどを用いて、患者・家族に伝わる説明を行う必要がある。また、1 回の説明では伝わらないことも多く、後々に不安が顕在化する場合もある。放射線の影響がいつ発症するかわからず、終わることのない不安にも患者は直面する。放射線誘発悪性腫瘍は数年後あるいは数十年後に生じる可能性があるため、より大きなリスクとして認識されやすい。

内部汚染や染色体異常の結果報告も配慮を要する。穢れや、悪性腫瘍・遺伝性影響への連想を生じやすく、細心の注意をもって説明にあたる。放射線関連の測定結果や評価は、速報値からその後に変更されることもあり得る。このような場合、対応機関・医療者との信頼関係が損なわれるおそれがあることに留意し、より丁寧な説明を行う必要がある。

放射線被ばくが関わる事例は社会的関心が

高い。患者情報、患者につながる情報の取扱いには特に注意するとともに、少なくとも診療区域には部外者（メディア含む）の立ち入りを禁じる。場合によってはメディアが患者より早く病院等に現れ得ることに留意し、立入制限やメディア対応者を設定しておく。一方で、社会に対して適切な情報提供を怠ると組織的隠蔽等のあらぬ疑念を生じかねない。患者、規制管理当局との慎重な協議を踏まえ、関係者の了解を得たうえで、必要に応じ組織としてプレスリリースや記者会見等の情報発信を行う。

また、放射線被ばくへの不安や不安に基づく行動変化や心理社会的影響は、放射線被ばくの直接の健康影響を上回る可能性がある¹⁾。そのため必要に応じてリスクを定量的に示すことも求められる。さらに、放射線関連事故や原発事故では、社会からの非難が事故を起こした事業所や患者自身に向けられることがあり、事故を発生させた管理責任や同僚を被ばくさせてしまった責任等の自責感を強く感じる場合もあり得る。放射線被ばくによる自身の健康影響への不安とも合わせて、心理的影響が極めて大きいことから、当初から心理的ケアの必要性を認識しておくことも重要である。

放射線被ばくの健康リスクは長期間に及ぶ。長期フォローアップを念頭に信頼関係を構築することが重要となる。時の経過に応じて患者を取り巻く社会環境や補償・支援等も変わることもあり、放射線被ばくのみならず、患者と社会とのかかわりや現在の支援状況等についても把握し、必要に応じて支援体制と連携することも求められる。

表 1. 患者説明における伝え方と留意点

<p>【伝え方】</p> <ul style="list-style-type: none"> • まず患者・家族の思いを丁寧に聞くこと • 説明一辺倒にならないこと • 患者・家族の理解しやすい表現を用い、必要に応じて誤りのない言い換えなどを用いて、患者・家族に伝わる説明とすること
<p>【留意点】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 不安や疑問は、人により、時の経過により、多種多様であること • 不安や疑問が変化すること • 放射線健康不安は生涯つづくこと • 防護のために用いられる各種の基準値と、健康影響の現れかたとの違いも理解されにくいこと • 内部汚染や染色体異常は、穢れや、悪性腫瘍・遺伝性影響への連想を生じやすく、細心の注意を要すること • 1回の説明では伝わらないことも多く、後に不安が顕在化する場合もあること • 検査結果・評価の訂正は、患者・家族との信頼関係を損なう可能性があるため、訂正を行う際には、より丁寧な説明が必要となること • 患者が事故発生に関する自責の念を感じている場合があること • 患者・家族の、周囲の偏見や差別へのおそれに配慮すべきこと • 患者の社会的支援状況についても把握しておくこと • 患者情報の開示については、患者の同意に基づくこと • 社会に対して適切な情報提供を怠ると組織的隠蔽等のあらぬ疑念を生じかねないこと

放射線被ばく事例については国際的にも希少で貴重な経験であり、後々のために医学論文等で知見が共有されることが望ましい。しかし、情報の取扱いに関しては、あくまでも患者の意思に基づき、対応機関の倫理委員会の承認等も含めて慎重な対応が求められる。

参考文献

- 1) WHO: A FRAMEWORK for mental health and psychosocial support in radiological and nuclear emergencies, 2020. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240015456> (アクセス日 2021-12-22)

11-3 リスクコミュニケーション

Key Point

- リスクについて個人・社会が判断する上で必要となる科学的知見等とともに、情報を過不足なく、遅滞なく、理解できる形で伝えることが求められる。
- 初期には限られた情報をもとに保守的な判断や対策をせざるを得ないが、情報が入り次第、対策を更新し周知する必要がある。
- リスクに対する個人・社会による判断を支援し尊重しつつ、状況の変化に応じて医学的に適切なアドバイスをを行う。

本章は、他の章と異なり社会対応も含めた内容を扱う。原子力災害では、被災者は具体的な健康被害を被る傷病者等に留まらず、地域住民も多く含まれる。また、原子力災害の特徴である「放射線」のリスク認知のあり方を踏まえることや社会的影響への配慮も欠かせない。

リスクコミュニケーションとは、「リスクについての、個人、機関、集団間での情報や意見のやりとりの相互作用的過程」等と定義されている¹⁾。放射線事故や原子力災害では、線量に基づく健康リスク評価は必須である。得られた情報を過不足なく、遅滞なく、理解できる形で伝えることが求められる(表1)。放射線は目に見えず、人類にとって比較的新しい技術であり、低線量であっても影響があり得るとされていること、その健康影響が長期間に及ぶこと、説明の上で独自の単位、確率、統計、疫学に基づく理解を必要とするため難解であること、等から未知性のリスクと認識されやすく、実態より大きいリスクとして認識されやすい。加えて、防護の概念と健康影響のあらわれ方との違いも理解されにくい。直接影響を受ける人々のみならず、小さな子どもを持つ親(特に母親)や妊婦、基礎疾患を持つ人、そしてもともとメンタルヘルスや心理社会的に心配を抱える人、外国人に代表されるコミュニケーション弱者等ではより大きな不安に直面しやすい²⁾。網羅的な情報提供だけ

でなく、時に応じて個人・社会が必要とする情報を伝える工夫が必要となる。個人や社会は自身を取り巻く状況を整理できずに疑問点や不安の内容も混乱している場合が少なくない。丁寧に話を聞くことにより、当事者の抱える問題点や不安をともに整理することもできる。また、対策本部や医療者としては、情報が不足する初期には、不確実性の高い予測に基づく保守的な判断や対策をも求められる。その後、情報が入り次第、対策を更新し関係者に適切に周知する必要がある。

一方、個人のリスク認知は直感的になされ、各々のリスクの許容範囲も異なる。線量測定の不確実性を認識したうえでの線量評価者と個人・社会との共通理解も必要となる。また、「科学的に正しい」測定や評価であっても丁寧に説明し共有する手続きを怠ると、誤解だけでなく、場合によっては実験材料にされたという思いが、放射線被害があるに違いないという思い込みにつながることもある。「可能性は否定できない」等の防御的な「科学的」表現は、時として説明者の意図せぬ誤解と不安を生むことがあることにも留意しておくべきである。

また、放射線リスクを低減するための対応・行動が別のリスクを高めてしまう場合もあり得る(リスクのトレードオフ)²⁾。東京電力福島第一原子力発電所事故では、放射線健康リスクを低減するための避難によって生命が危険にさらされた例や、避難生活に伴う生活環境の変

表 1. リスクコミュニケーションにおける留意点

<p>【伝えかた】</p> <ul style="list-style-type: none"> 得られた情報を過不足なく、遅滞なく、理解できる形で伝える 網羅的な情報提供だけでなく、時に応じて個人・社会が必要とする情報を伝える 丁寧に話を聞くことにより、当事者の抱える問題点や不安をともに整理し、ともに確認する 初期の不確実性の高い情報に基づく保守的な判断・対策を、情報が入り次第、対策を更新するとともに関係者に適切に周知する
<p>【ふまえておくこと】</p> <ul style="list-style-type: none"> 子どもをもつ親（特に母親）、妊婦、基礎疾患をもつ人、心理社会的に不安をもつ人、外国人などでは、より大きな不安を抱えやすいこと リスクのトレードオフ 「科学的に正しい」評価や表現であっても、説明者の意図せぬ誤解と不安を生むことがあること 身近な医療者が住民の信頼する情報源となること

化に起因する肥満や糖尿病の増加や心理的影響が知られている。このように、放射線事故とりわけ原発事故の場合には、放射線健康リスクに高い関心が集まり、線量低減のための対応が二次的に別のリスクを高めることがあることを認識したうえで、俯瞰的に健康リスクを評価し対応策を検討する必要がある。

コミュニケーションの基礎となる「信頼」のためには、有能さや公正さ等に増して、価値の共有が不可欠であるとされる（主要価値類似性モデル）³⁾。医療者は原発事故あるいは放射線関連事故において、個人・社会の健康リスク低減、幸福感を追求できる存在であり、原子力災害では身近な医療者が住民の信頼する情報源となる可能性が高い⁴⁾。医療者は本人の意図にかかわらずその言動が患者や社会に大きな影響を与えうることも認識しておくべきである。個人へのコミュニケーションのみならず、属性による共通の背景を生かした地域単位、子育て教室等の小さなコミュニティを通じた働きかけも有効である。なお、被ばく患者とのコミュニケーションについては、次項「患者説明」で述べる。

原子力災害の時期（フェイズ）にあわせて情報発信やコミュニケーションの手段を変え

ていく必要がある（図 1）。原発事故発生直後の災害急性期には、事故の状況や放射線量のデータなど、一度に多くの人々に情報を伝えることが求められる。講演会やメディアの協力による情報発信なども有効である。予備知識のない社会に対し理解を促すための放射線そのものや健康リスクの考え方などの基礎的な解説も併せて伝えられるべきである。この時期には、先を見通せない状況で、不確実な状況での予測として出される情報とそれらに基づく警報が発信される。医療者を含む科学者は、不明確な状況での判断を求められる。数ヶ月から1年以降の慢性期になると、各種のモニタリングデータを得られるようになる。信頼できる情報をもとに、誤った情報・認識を更新するとともに、状況に応じて警報を解除する必要がある。また、この時期には、被災者のニーズは個別化することが多く、必要に応じて座談会や個人面談など小グループや個人単位のそれぞれのニーズにあわせた有効な情報提供の方法に転換することも欠かせない。原子力災害では、避難指示に基づく経済的補償が行われることがあり、条件の差や有無に基づく個人・地域間の軋轢があり得ることに留意する。差別や軋轢を恐れて放射線不安を表出

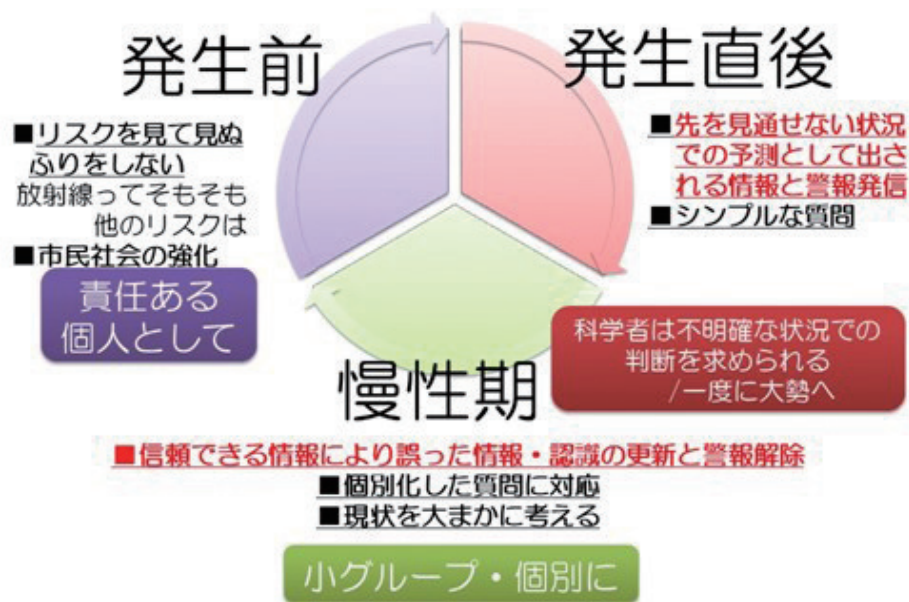


図 1. 原子力災害の時期とコミュニケーションのあり方

できずに悩む人が多いことに配慮し、相談しやすい場を工夫することも重要である。地域によって避難解除への道のりが異なり、放射線リスク認識にも地域差が生じることも認識しておくべきである。多くの人々が放射線不安を表出しない時期になってもなお放射線不安を訴える場合、不安の根底に個人や家庭の不安定さがある可能性があることにも留意しておく。災害が終息した場合、あるいは非被災地では、また次の災害に備えた取り組みも必要となる。一般社会における放射線を含めた多くのリスク要因やリスク概念の理解を促すことは、しなやかな社会を構築するために今後求められる。

リスクコミュニケーションとしては、前掲の定義のごとく、情報を共有し、ともに考えることとされている。個人・社会が置かれた複雑な状況を理解したうえで、正確な情報とともに科学的な見解・意見を提供し、個人・社会がリスクの程度を理解し、それぞれが判断できることを下支えすることが求められる。放射線関連事故・原発事故で生じる複雑なリスクの相関関係や時相によって現れる新たなリスク要

因に目配りし、専門的知識をもとに、同じ目標に向かってこれから何ができるかをともに考えることが欠かせない。

参考文献

- 1) National Research Council: Improving Risk Communication, 1989.
- 2) WHO: A FRAMEWORK for mental health and psychosocial support in radiological and nuclear emergencies, 2020.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240015456>
(アクセス日 2021-12-22)
- 3) Nakayachi, K. and Cvetkovich, G: Public trust in government concerning tobacco control in Japan. Risk Anal 30: 143-152, 2010.
- 4) Kohzaki M, Ootsuyama A, Moritake T, et al: What have we learned from a questionnaire survey of citizens and doctors both inside and outside Fukushima?: survey comparison between 2011 and 2013. J Radiol Prot 35: N1-17, 2015.

「国、地方公共団体、事業者の役割」

国や地方公共団体、原子力事業者が原子力災害対策を円滑に実施するための指針として「原子力災害対策指針」が制定されている。原子力災害対策指針は東京電力福島第一原子力発電所事故後に設置された原子力規制委員会により平成 24 年 10 月 31 日に制定されており、本稿作成時点では令和 2 年 10 月 28 日に直近の改正が行われた¹⁾。指針によって定められている現行体制において、原子力災害時医療の中核を担うのは関連道府県に指定されている「原子力災害拠点病院」となっている。原子力災害拠点病院は、汚染の有無にかかわらず傷病者を受け入れ、適切な被ばく医療の提供を実施する役割を担うと共に、他の拠点病院を支援する「原子力災害医療派遣チーム」を平時から整備することに取り組んでいる。また、各自治体や原子力災害拠点病院が実施する原子力災害対策に協力する「原子力災害医療協力機関」、重度の被ばく／汚染傷病者に対する高度専門的な医療の提供や平時の人材育成およびネットワーク構築を支援する「高度被ばく医療支援センター」と「原子力災害医療・総合支援センター」が全国に指定されている。なお、高度被ばく医療支援センターに指定されていた量子科学技術研究開発機構が平成 31 年 4 月 1 日より「基幹高度被ばく医療支援センター」として新たに指定を受け、線量評価に関する専門的な研修を関係者に実施する体制が整えられた。

指針には、上記原子力災害医療体制の概略と共に平時における地域住民への情報発信の重要性も記載されている。具体的に原子力災害の特殊性を鑑み、発災時に住民が混乱なく行動できるよう、以下の項目を住民に情報提供が必要であると述べられている。

①それぞれの原子力施設において取り扱う放射性物質及び放射線に関する基礎知識（低

線量被ばくの健康影響、避難退域時検査等の目的や一般的な放射線防護方法に関する知識を含む）

②原子力施設の事故防止の仕組みの概要、平常時及び緊急時の環境放射線モニタリングの仕組み（平常時のモニタリング結果を含む）の概要

③放射性物質又は放射線による被ばくの形態、放射線の影響及び被ばくを避ける方法

④緊急時の通報連絡体制、緊急時モニタリング等の結果の解釈の方法、住民等の避難経路・場所及び医療機関の場所等、除染・汚染防止や安定ヨウ素剤服用の留意点並びに防災活動の手順

なお、情報提供の在り方については、今後も原子力規制委員会を中心に議論がなされ、指針に追記されていくこととなっている。平常時から地域住民への情報発信等を通じ、地域住民の信頼を得ておくことが非常に重要であると考えられる。

指針に記載されている原子力防災体制に加え、原子力事業者は施設内（オンサイト）で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の整備にも取り組んでいる。労働者への安全配慮は事業者の義務であり、労働契約法第 5 条において、「使用者は、労働契約に伴い、労働者がその生命、身体等の安全を確保しつつ労働することができるよう、必要な配慮をする」こととされている。オンサイトの医療体制のモデルに関して厚生労働省は平成 29 年 3 月に提言書を公開している²⁾。提言書には、事業者は負傷事故や疾病への応急処置に加え、汚染に対する処置も可能な設備を備えた医療室の設置や、地域の関係機関との協議に基づく傷病者搬送体制の構築等の準備を、産業医の意見も活用しながら進めていくことが重要であると述べられている。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会．原子力災害対策指針（平成 24 年 10 月 31 日制定）（令和 2 年 10 月 28 日一部改訂），2012.
<https://www.nsr.go.jp/data/000332851.pdf>（アクセス日 2021-07-05）
- 2) 厚生労働省．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，2011.
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujo-uhou-11200000-Roudoukijunkyoku/20180110a.pdf>（アクセス日 2021-07-05）

用語集

表 1. 用語集

用語	解説
汚染	放射性物質の広がりを指す。人体については放射性物質が体表面や衣類等に付着したあるいは体内に入った状態を表す。 体表面に汚染がある場合を体表面汚染という。
外部被ばく	放射性物質（線源）から放出される放射線を体の外から受けることを指す。 透過力の弱い放射線（エネルギーの低いβ線等）では、体表面付近の被ばくが中心となる。
内部汚染 内部被ばく	身体に放射性物質を取り込むことを内部汚染、身体に取り込んだ放射性物質から体内で放射線を受けることを内部被ばくという。身体に放射性物質を取り込む主要な経路は、吸入、経口、創傷からの吸収である。
急性被ばく	一瞬、または短時間で被ばくすることを称する。 例）原爆の直達線による被ばく
慢性被ばく	長い期間にわたり被ばくすることを称する。 例）長期にわたる職業被ばく
複合障害	複数の定義があるが、本書では放射線事故・災害に伴う放射線被ばく・放射性物質汚染による組織・臓器の放射線障害と、放射線事故・災害に伴い発生した外傷・疾病の複合病態と定義する。
線量評価 生物学的線量評価 物理学的線量評価	被ばく事故などで、傷病者が受けた放射線の個人被ばく線量とその分布を様々な手段を用いて評価することを線量評価と総称する。 放射線による生体反応を利用した評価を生物学的線量評価、放射性物質の測定または計算による方法に基づく評価を物理学的線量評価と称する。
バイオアッセイ	生体の応答を利用して薬物などを評価する方法の総称である。 被ばく医療において使用する際は、内部被ばく線量の評価法の一手法として、被ばく患者から採取した生体試料（主に尿や便）中に含まれる放射性核種を定量する方法を示す。 なお、海外の文献では、体外計測法も含めてバイオアッセイと称する場合がある。
染色体検査 染色体分析	生物学的線量評価の一手法で、放射線によって生じた染色体異常の出現頻度から放射線量を推定する方法である。標準的には二動原体染色体等を指標とする。
個人防護装備 (Personal Protective Equipment: PPE)	放射性物質、化学物質、ウイルス、細菌等が身体へ付着することや、体内に侵入することを防ぐために着用する用具の総称である。 帽子、目の保護具（ゴーグル、フェイスシールド）、呼吸器保護具（サージカルマスク、全面マスク等）、手袋、防護服、シューズカバーなど一式を指す。被ばく医療においては、個人防護装備に個人線量計を含む場合がある。 個人防護装備の着用により体表面汚染や内部被ばくを防ぐことはできるが、通常の不織布素材の防護衣で外部被ばくを防ぐことはできない。

用語	解説
養生	放射性物質汚染がある傷病者を医療施設や避難所で受け入れる場合や、救急車などで搬送する際に、施設・設備の二次汚染を避けるために行う汚染拡大防止措置である。 具体的には、救急室の床や壁をビニールシートや吸水性のある紙で覆うことや、傷病者に使用する医療機器やストレッチャーをビニール等で保護することである。
ゾーン ゾーニング ホットゾーン ウォームゾーン コールドゾーン	医療活動における安全性・効率性などの確保のために、活動現場をその特性に応じて区域分けすることをゾーニングという。 被ばく医療においては、施設・設備・スタッフの放射性物質への二次汚染や汚染拡大を防止し、汚染傷病者と医療従事者の導線を管理するために、放射線管理区域に準じたゾーニングが必要となる。 一般に以下の3つに区分される（「5－1 放射線管理」図 15 参照）。 ①ホットゾーン（汚染作業区域）：放射性物質により汚染する区域であり、例えば被ばく患者への処置を行う処置台やその周囲で直接被ばく患者に処置を行う医療従事者が活動するために必要な範囲として設定する。基本的に汚染がある物品はこのゾーン内にとどめる。 ②ウォームゾーン（緩衝区域）：ウォームゾーンは、ホットゾーンとコールドゾーンの間に設けられ、コールドゾーンへの汚染拡大を防ぐための緩衝区域として設定する。ホットゾーンからの試料等の汚染検査の実施などを行う。 ③コールドゾーン（汚染を極力回避する区域）：コールドゾーンは、放射性物質による汚染がない区域として設定する。 なお、ゾーニングを行う際の境界線はテープや仕切りなどで明示されることが望ましく、施設毎の特性に合わせて設定する必要がある。 （「4－1 初療」「5－1 放射線管理」を参照）
緊急時活動レベル （Emergency Action Level: EAL）	原子力施設において異常事象が発生した際、緊急事態を判断する基準で、施設の情報、放射線量等に基づき「警戒事態」、「施設敷地緊急事態」「全面緊急事態」の3つに区分される。
放射線管理要員	放射性物質や放射線を取り扱う事業所内において、放射線による人への影響を考慮し、安全かつ合理的な管理を行う専門家であり、関連法令、放射線生物学、物理学、化学、実務的管理技術の知識を有している。 被ばく医療においては、傷病者の体表面汚染検査、除染及び被ばく線量の測定を担当し、医療施設、搬送車両、医療資機材への汚染拡大防止及び汚染検査などを担う。
除染	身体・人工物・自然物の表面に付着、あるいは内部に入った放射性物質を除去、低下させること。 除去された放射性物質の管理も必要である。
確率的影響	放射線防護の観点から、放射線による健康影響は「確率的影響」と「組織反応(確定的影響)」に大別される。確率的影響には、発がんや遺伝性影響がある。確率的影響にはしきい線量が存在しないものと考え、被ばく線量の増加に従って、影響の発生頻度が上昇する。
組織反応 （確定的影響）	放射線防護の観点から、放射線による健康影響は「確率的影響」と「組織反応(確定的影響)」に大別される。組織反応(確定的影響)は、発症にしきい線量を有する。近年、ICRPにより「組織反応」という名称が推奨されるようになった。 造血機能障害、消化管障害、中枢神経障害、放射性肺臓炎や肺線維症、皮膚・軟部組織障害などの、急性期から晩期にわたる多彩な障害を含む。組織反応では、被ばく線量が高いほど臨床症状は重篤になる。

用語	解説
しきい線量	<p>組織反応（確定的影響）に対して用いられ、その組織反応が起こらない線量をしきい線量といい、組織反応毎にしきい線量がある。ICRP は発症頻度が1% となる線量で値を示している。</p> <p>放射線の影響には個体差があり、しきい線量以上で必ずその組織反応が起こるわけではない。また、しきい線量以下であっても、臨床的に検出できないあるいは問題とならない放射線の影響が生じている可能性があることに注意が必要である。</p>
放射線感受性 (放射線抵抗性)	<p>放射線による影響の受けやすさを放射線感受性という。細胞、組織、人体等それぞれの対象について使用される。</p> <p>放射線は細胞内の DNA を損傷し、損傷が修復されない際に細胞死に至る場合がある。影響を受けやすい場合は放射線感受性が高く、影響を受けにくい場合は放射線感受性が低いと表現する。細胞レベルでは、細胞分裂の頻度が高い細胞、将来に長期にわたって細胞分裂を行う細胞、形態や機能が未分化な細胞は放射線感受性が高いことが知られている（ベルゴニー・トリボンドーの法則）。</p> <p>反対の意味の用語で放射線抵抗性があるが、がん細胞、がん組織等に対して使用することが多い。</p>
早期影響、障害	放射線被ばくした個人に現れる放射線の身体的影響のうち、被ばく後数週間以内に現れる障害や症状を指す。
前駆症状	急性放射線症候群の臨床経過は、前駆期、潜伏期、発症期、回復期（または死亡）の順に進行する。このうち、前駆期に生じる臨床症状を前駆症状と称する。嘔吐、下痢、頭痛、意識消失、発熱等の非特異的症状であるが、それらの発症時期や重症度から、被ばく線量の推定を行うことができる。
急性放射線症候群 (Acute Radiation Syndrome: ARS)	全身に 1 Gy を超す高線量の急性被ばくを受けた際に、造血器系、消化器系、中枢神経系、血管系、皮膚などの多臓器障害によって生じる多様な臨床症状の総称である。
局所放射線障害 (Local Radiation Injury: LRI)	身体の限局した部位が外部被ばくを受けることによって、その部位の臓器（皮膚・軟部組織を含む）に生じる障害のことである。
晩発影響、障害	放射線被ばくした個人に現れる放射線の身体的影響のうち、被ばく後数ヶ月以降に現れる障害や症状を指す。
遺伝性影響	生殖細胞の放射線被ばくにより、被ばくした個人の子孫に現れる可能性がある影響のことで、確率的影響に含まれる。ICRP Pub.96 以降は、アイソトープ協会では hereditary effect は「遺伝性影響」と訳されている。

薬剤リスト

表 1. 薬剤リスト

本邦では承認されていない薬剤も含む。用法用量について、特記ないものは本邦の用法用量。
NCRP Report 161は文献1、IAEA 2018は文献2にそれぞれ基づくものである^{1, 2)}

薬剤名	対象核種	作用機序	用法用量	備考
アセタゾラミド (ダイアモックス®)	ウラン	利尿剤	1日 125-1,000 mg 分服 【NCRP Report 161】 1回 500 mg を 1日 2回 3日間内服 【IAEA 2018】 1回 250 mg を 1日 3-4回内服、筋注あるいは静注で 1 アンプル/日	本邦ではウランに対する適応なし。
アルギン酸ナトリウム (アルロイド G®)	ストロンチウム ラジウム	吸収抑制 (イオン交換樹脂)	本邦での胃十二指腸潰瘍、びらん性胃炎の止血・自覚症状改善、逆流性食道炎の自覚症状改善のための用法用量：1回 20-60 mL (顆粒は 1回 1-3 g (アルロイド G®1.5-4.5 g) を 20-60 mL の水で溶解) 1日 3-4回 空腹時、経口不可能の時はゾンデで経鼻的投与 【NCRP Report 161】 5 g を 1日 2回内服、その後 1 g を 1日 4回水とともに内服	消化管内でストロンチウムや他の放射性核種と結合。
塩化アンモニウム (塩化アンモニウム補正液 5 mEq/mL®)	ストロンチウム	キレート (腎排泄促進)	【IAEA 2018】 錠剤あるいはカプセル (0.5 g) を 1回 4錠、可能ならば食事と同時に、8時間毎内服。汚染度に応じて 3-6 g/日で数日間継続することも可。	放射性ストロンチウムの体内蓄積を認めたら直ちに開始。経口投与すると体内蓄積された放射性ストロンチウムに対して効果的な可溶化剤となる。
グルコン酸カルシウム水和物 (カルチコール®)	ストロンチウム カルシウム	希釈と拮抗	1-5 g/日を数回分服 4.7-23.5 mLを 1.7-3.5 mL/分で緩徐に静注 (※添付文書：1日 1回 0.4-2 g (Caとして 1.83-9.17 mEq) を 0.68-1.36 mEq/分で静注) 【NCRP Report 161】 グルコン酸カルシウムとして 1 g を 5-15 分かけて緩徐に静注 カルシウムとして 2,500 mg を 5% ブドウ糖液 500 mL に混注し 4 時間以上かけて静注 2 g を 500 mL に混注し、4-6 時間で静注 (ストロンチウム吸入例に有効)	経口・静注投与で放射性ストロンチウムと放射性カルシウム尿中排泄促進。
ジエチレントリアミン 5 酢酸 (DTPA)				Ca-DTPA、Zn-DTPA を参照。

薬剤名	対象核種	作用機序	用法用量	備考
ジメルカプトコハク酸 (テクネ DMSA キット®、1.4 mg/バイアル)	鉛 水銀 (ヒ素、ビスマス、カドミウム、コバルト、ポロニウム)	キレート	【NCRP Report 161】 10 mg/kg あるいは 350 mg/m ² を 8 時間毎に 5 日間内服。その後、漸減 (12 時間毎の 10 mg/kg あるいは 12 時間毎の 350 mg/m ² を 2 週間継続し、19 日目で終了)。	【NCRP Report 161】 一般的な鉛のキレート剤。尿中排泄促進。十分量の水分摂取と、感染症の兆候があればすぐ知らせるよう指示しておく。
ジメルカプロール (パル®)	ヒ素 金 水銀 ニッケル ポロニウム	キレート	ジメルカプロールとして通常成人 1 回 2.5 mg/kg を第 1 日目は 6 時間間隔で 4 回筋注し、第 2 日目以降 6 日間毎日 1 回 2.5 mg/kg を筋注。重症緊急を要する中毒症状の場合は、1 回 2.5 mg/kg を最初の 2 日間は 4 時間ごとに 1 日 6 回、3 日目には 1 日 4 回、以降 10 日間あるいは回復するまで毎日 2 回筋注。 【NCRP Report 161】 深い筋注のみ。2.5 mg/kg を 1 日 4 回、2 日間。3 日目には 1 日 2 回筋注。その後 5-10 日間 1 日 1 回。 【IAEA 2018】 4 時間毎に 3 mg/kg を筋注。3 日間を超えて投与してはならない。	【IAEA 2018】 初回投与前に 1/4 アンブルで過敏性のテストを行う。
ジメルカプトプロパンスルフォネート (DMPS)	水銀 ビスマス	キレート	【IAEA 2018】 初日 3-6 時間毎に 3 カプセル (300 mg) 内服。翌日 8-12 時間毎に 3 カプセル内服。 非経口投与は経口経路が不可能な場合に適用。 初日 : 3-4 時間毎に 250 mg を緩徐に静注 (1-1.5 g/日)。 2 日目 : 4-6 時間毎に 250 mg を緩徐に静注。 3 日目 : 6-8 時間毎に 250 mg を緩徐に静注あるいは筋注。 4 日目以降 : 状態に応じ、250 mg を 1-3 回、非経口経路あるいは経口 (カプセル) 投与。	
水酸化アルミニウムゲル (アルミゲル®)	ストロンチウム フッ素 ラジウム	吸収抑制	1-3 g/ 回数分服	アルミニウムを含む制酸剤は放射性ストロンチウムの腸吸収を抑制する効果あり。被ばく直後に 60-100 mL を単独投与すると、吸収量を約 50% 低下させる。
水酸化アルミニウムゲル・水酸化マグネシウム (マーロックス®)	ストロンチウム フッ素	吸収抑制	1.6-4.8 g/ 回数分服	

薬剤名	対象核種	作用機序	用法用量	備考
炭酸水素ナトリウム(メイコン®、炭酸水素ナトリウム®)	ウラン	尿のアルカリ化	1回 12-60 mEq (1-5 g) 静注 (薬物中毒の際の排泄促進のための用量) 1日 3-5 g、数回分服 (薬物中毒の際の排泄促進のための用量) 【NCRP Report 161】 1-2 mEq/kg の 250 mL を緩徐に静注 2錠を4時間毎に服用 (尿 pH が 8-9 になるまで、3日間)	
炭素 (クレメジン®)	炭素	吸着による吸収抑制	1回 2 g、1日 3回内服	
チオ硫酸ナトリウム水和物 (デトキソール®)	硫黄 (本邦の適応はシアン及びシアン化合物、ヒ素剤による中毒)		1日 1-2 g 静注 (※シアン化合物中毒に対する用量: 1回 12.5-25 g 静注)	
Ca-DTPA (ペンテト酸カルシウム三ナトリウム、ジトリベントートカル®)	亜鉛 アメリカシウム イットリウム (イリジウム) カリフォルニウム キュリウム クロム コバルト ジルコニウム セリウム トリウム マンガン ネプツニウム ニッケル プルトニウム プロメシウム ルテニウム	キレート剤 (腎排泄促進)	静注: Ca-DTPA として 1,000 mg を 1日 1回点滴静注、または緩徐に静脈内投与 (100-250 mL の 5% ブドウ糖液又は生理食塩水で希釈し約 15 ~ 60 分かけて点滴静注、又は 3-4 分間かけて緩徐に静注) 吸入投与: 1 g (5 mL) を同容量の注射用水又は生理食塩水で薄めて (1:1 希釈) ネブライザーにセットして吸入。吸入時には痰を飲み込まないように、吐き出させる。吸入投与した際には、吸入 1 回の投与量が静脈内投与の 1 日投与量 (上限) になるため、同日に静脈内投与は不可。静脈内投与ができる状況にあれば静脈内投与 【IAEA 2018】 体重 70 kg 成人に対し、0.5 g を 250 mL の生理食塩水あるいは 5% ブドウ糖液に希釈して緩徐に静注あるいは点滴静注。 重症例では、事故後の初回に 1 g 投与。Ca-DTPA で治療開始するのがより効果的。治療が第 1 週を超えて治療せざるを得ない場合は、毒性の低い Zn-DTPA で継続。長期治療の場合、投与量は 0.5 g / 日を超えてはならない。これは、長期治療における Zn-DTPA の投与量にも適用される。Ca-DTPA は 1 日 1 度の投与。初回投与が最も重要で効果が高い。分割や長期投与はしてはならない。長期投与により亜鉛欠乏が生じる。 【NCRP Report 161】 初日 Ca-DTPA 投与し、以降は Zn-DTPA を維持投与 1 g を 3-4 分以上かけて緩徐に静注、あるいは、1 g を 100-250 mL の 5% ブドウ糖液あるいは乳酸リンゲル液、あるいは生理食塩水に溶いて 30 分以上かけて静注。 Ca-DTPA、Zn-DTPA とともに、1 g の DTPA を蒸留水あるいは生理食塩水で 1:1 に希釈し、ネブライザー吸入も可能。	

薬剤名	対象核種	作用機序	用法用量	備考
Zn-DTPA (ベンテ酸亜鉛三ナトリウム、アエントリペンター®)	亜鉛 アメリカシウム イットリウム (イリジウム) カリフォルニウム キュリウム クロム ジルコニウム セリウム トリウム ネプツニウム ニッケル プルトニウム プロメシウム ルテニウム	キレート剤 (腎排泄促進)	静注: Zn-DTPA として 1,055 mg を 1 日 1 回点滴静注、または緩徐に静注 (100-250 mL の 5% ブドウ糖液又は生理食塩水で希釈して約 15-60 分かけて点滴静注。又は 3-4 分間かけて緩徐に静注) 吸入投与: 1 g (5 mL) を同容量の注射用水又は生理食塩水で薄めて (1:1 希釈) ネブライザーにセットして吸入	吸入時には痰を飲み込まないように、吐き出させる。吸入投与した際には、吸入 1 回の投与量が静脈内投与の 1 日投与量 (上限) になるため、同日に静脈内投与は不可。静脈内投与ができる状況にあれば、静脈内投与。
デフェロキサミンメシル酸塩 (DFOA) (デスフェラル® 注射用 500 mg)	鉄 ネプツニウム	キレート剤 (腎排泄促進)、吸入および摂取後の吸収抑制。	1 日 1 g、1-2 回分割筋注。 維持量: 1 日 500 mg 最大: 1 日 80 mg/kg 点滴静注 (毎時 15 mg/kg) も可。 【NCRP Report 161】 筋注推奨。1 g 筋注あるいは緩徐に静注 (15 mg/kg/h)。その後、500 mg 筋注あるいは静注を 4 時間間隔で 2 回行った後、500 mg 筋注あるいは静注を 12 時間間隔で 3 日間継続。 【IAEA 2018】 初日: 1 g / 日、翌日 500 mg。生理食塩水 250 mL で、非常に緩徐に静注。5% ブドウ糖溶液 250 mL で、非常に緩徐に静注。 経鼻胃管、最大 8 g (16 アンプル)。59Fe 吸入および摂取後の吸収抑制。	プルトニウム複合体排泄促進効果は Ca-DTPA と同等以上。Ca-DTPA との組合せはプルトニウム中毒に対して各単剤より効果高い。ネプツニウムに対しては、DTPA 単独か DFOA と DTPA 併用も考慮。
ブルシアンブルー (フェロシアン化第二鉄) (ラディオガルダーゼ®)	セシウム タリウム ルビジウム	イオン交換、吸収抑制	1 回 1 g、1 日 3 回経口投与。 【NCRP Report 161】 最低 30 日間使用。	初期吸収抑制と腸肝循環の腸における再吸収抑制。摂取後速やかに開始。
ペニシラミン (メタルカプターゼ®)	銅 鉛 水銀 ガリウム 金 ビスマス ポロニウム	キレート作用	1,000 mg/ 日食前空腹時 1- 数回分服 (600-1,400 mg で症例毎に調整) (鉛・水銀・銅の中毒に対する用量) 【NCRP Report 161】 0.75-1.5 g/ 日 1 日 1 回内服	
ヨウ化カリウム (ヨウ化カリウム丸 (50 mg)、ヨウ化カリウム内服ゼリー (16.3 mg)、ヨウ化カリウム内服ゼリー (32.5 mg))	ヨウ素	臓器・細胞取込阻害	被ばく直前あるいは直後速やかに内服。ヨウ化カリウムとして通常 13 歳以上には 1 回 100 mg、3 歳以上 13 歳未満には 1 回 50 mg、生後 1 ヶ月以上 3 歳未満には 1 回 32.5 mg、新生児には 1 回 16.3 mg。	

薬剤名	対象核種	作用機序	用法用量	備考
硫酸バリウム (バリトゲン® 等)	ストロンチウム ラジウム	吸収抑制	【NCRP Report 161】 100-300 g を 250 mL の水とともに 1 回で内服。 300 g を事故後可及的速やかに内服 (ストロンチウム吸入例に有効) 【IAEA 2018】 300 g 単回投与	吸収したストロンチウムやラジウムと不溶性硫酸塩を形成し、腸吸収を大幅に減少。事故後できるだけ早く 300 mg 服用することで、腸吸収を阻害できる。
リン酸二カリウム (リン酸 2 カリウム注 20 mEq®)	リン ストロンチウム	希釈等による臓器・細胞取込阻害	【NCRP Report 161】 600-1,200 mg を数回分服。放射性ストロンチウムの腸吸収を低下。	
リン酸水素ナトリウム水和物・リン酸二水素ナトリウム水和物 (リン酸 Na 補正液 0.5 mmol/mL®)	リン ストロンチウム	希釈等による臓器・細胞取込阻害	【NCRP Report 161】 600-1,200 mg を数回分服。	

参考文献

- 1) NCRP: NCRP Report No. 161: Management of Persons Contaminated with Radionuclides, 2008.
- 2) IAEA: Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency, 2018. <https://www.iaea.org/publications/12230/medical-management-of-persons-internally-contaminated-with-radionuclides-in-a-nuclear-or-radiological-emergency> (アクセス日 2021-12-22)

主な関係機関リスト

【基幹高度被ばく医療支援センター】

量子科学技術研究開発機構

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

放射線医学研究所 基幹高度被ばく医療支援センター

【高度被ばく医療支援センター】

弘前大学

〒036-8564 青森県弘前市本町66-1

高度被ばく医療支援センター

福島県立医科大学

〒960-1295 福島県福島市光が丘1番地

高度被ばく医療支援センター

広島大学

〒734-8553 広島県広島市南区霞1-2-3

高度被ばく医療支援センター

長崎大学

〒852-8501 長崎県長崎市坂本1-7-1

高度被ばく医療支援センター

資機材リスト

表 1. 資機材リスト

各種病院で必要と考えられる備品、資機材を掲載する

備品・資機材（文献1より）	原子力災害拠点病院	一般病院
放射線測定器		
個人線量計	◎	◎
GM サーベイメーター	◎	○
NaI シンチレーションサーベイメーター	◎	○
電離箱式サーベイメーター	◎	◎
ZnS サーベイメーター	△	△
ホールボディカウンター	○	△
甲状腺モニター	△	△
Ge 半導体検出器	△	△
αスペクトロメーター	△	△
個人防護装備		
防護服（タイベック® スーツ、ディスポーザブル手術衣など）	◎	○
手袋	◎	○
アイガード（ゴーグル、フェイスシールドなど）	◎	○
シューズカバー	◎	○
サージカルマスク	◎	○
N95 マスク	○	○
全面マスク	△	△
半面マスク	△	△
ディスポーザブル帽子	◎	○
除染用資器材		
滅菌ドレープ（複数のサイズ）	◎	○
ガーゼ	◎	○
洗浄用ボトル	◎	○
ディスポーザブル撮子	◎	○
撥水覆布（複数のサイズ）	◎	○
膿盆	◎	○
石けん、ボディソープ	◎	○

備品・資機材（文献1より）	原子力災害拠点病院	一般病院
シャンプー	◎	△
中性洗剤	◎	△
汚染拡大防止用資器材		
ビニール袋（複数のサイズ）	◎	◎
ビニールシート	◎	○
養生用テープ	◎	○
ろ紙シート	◎	○
通信回線		
衛星回線	◎	△
専用回線 FAX	○	△
専用回線有線電話	○	△

◎：必ず保持しておく必要がある。

○：保持が望ましい。

△：必ずしも必要ではない。

参考文献

- 1) 原子力規制庁：原子力災害拠点病院等の施設要件, 2018.
https://www.mext.go.jp/content/20200128-mxt_kibanken02-000004456_4.pdf（アクセス日 2021-12-22）

原子力災害医療体制と具体的運用（令和4年3月現在）

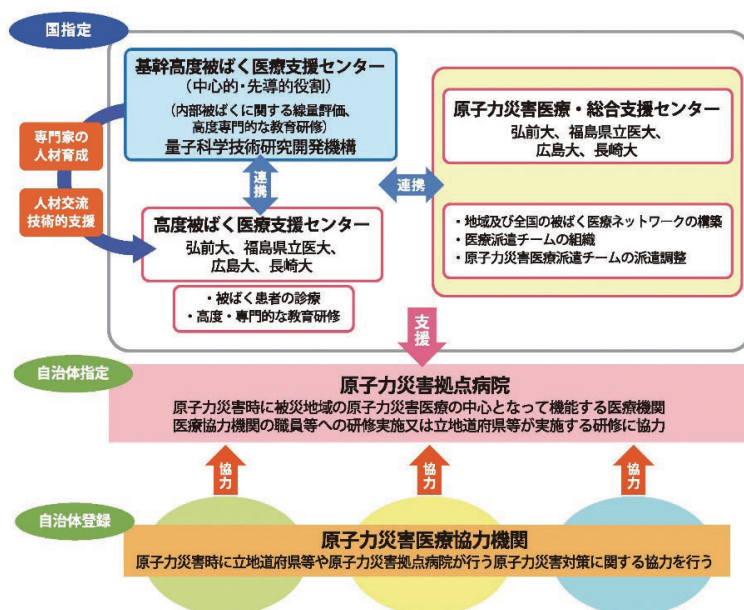


図1. 原子力災害時における医療体制（文献1より引用）

平成27年以降、本邦では原子力規制委員会により改訂された新しい原子力災害対策指針に基づき、高度被ばく医療支援センター及び原子力災害医療・総合支援センター、原子力災害拠点病院がそれぞれ指定されるとともに、原子力災害医療協力機関が登録されている（図1）。

原子力災害拠点病院は、原子力災害時に被災地域の原子力災害医療の中心となつて機能する医療機関であり、2021年7月現在、各道府県によって全国で約50機関が指定されている。原子力災害拠点病院は原子力災害医療派遣チームを有しており、原子力災害が発生またはその恐れがある場合には、傷病者等を受け入れるとともに、派遣要請に基づき派遣チームを出动させ、診療等を行う。

原子力災害医療協力機関は、原子力災害時に立地道府県や原子力災害拠点病院が行う汚染測定や安定ヨウ素剤の配布を始めとした、

原子力災害対策に関する協力をを行う。

高度被ばく医療支援センターは、平時には原子力災害医療に係る高度専門教育研修等を実施し、原子力災害時には原子力災害拠点病院では対応できない、より専門的な診療や原子力災害拠点病院等への技術的支援を行う。また、高度被ばく医療支援センターのなかでもそれらの中心的・先導的な役割を担う基幹高度被ばく医療支援センターとして量子科学技術研究開発機構が指定されており、高度被ばく医療支援センターの役割に加え、α線放出核種を含む内部被ばくの個人線量評価を行うとともに、高度被ばく医療支援センター及び原子力災害医療・総合支援センターに所属する医療従事者や技術者の教育・養成を担う。また、原子力災害医療に係る研修情報等を一元管理する。

原子力災害医療・総合支援センターは、平

時には主に原子力災害拠点病院に対する支援や関連医療機関とのネットワーク構築を行うとともに、原子力災害時には原子力災害医療派遣チームの派遣調整を行う。

原子力災害時には、国や自治体とこれらの機関が協力して原子力災害に対処する。

高度被ばく医療支援センター連携会議

上記のように、2021年7月現在、高度被ばく医療支援センターとして5機関、これと重複して原子力災害医療・総合支援センターとして4機関が指定されている。これら5機関の間で、「高度被ばく医療支援センター間の連携協力に関する協定書」が締結されており、相互に協力して活動しているが、具体的連携協力事項の実施について協議するため、高度被ばく医療支援センター連携会議が設置されている。各センターからそれぞれ3名の会議メンバーが指定されており、全体での共通事項はここで討議されている。

医療部会及び線量評価部会

上記連携会議の下には2つの部会、医療関係の具体的方針を討議するため医療部会と、線量評価関係の討議のため線量評価部会が設けられている。それぞれ各高度被ばく医療支援センターから2名ずつのメンバーで構成されている。

参考文献

- 1) 量子科学技術研究開発機構：基幹高度被ばく医療支援センターと原子力災害時における医療体制，2019。
<https://www.qst.go.jp/site/qms/24101.html>（アクセス日 2021-12-21）

執筆者

明石 眞言、東 久哉、宇佐 俊郎、太田 勝正、大葉 隆、小川 眞澄、小野 欽也、熊谷 敦史、栗原 治、西條 広人、齋藤 陽子、佐藤 久志、重村 淳、數藤 由美子、隅田 博臣、立崎 英夫、田中 克己、富永 隆子、橋口 尚幸、長谷川 有史、花田 裕之、廣橋 伸之、藤淵 俊王、松井 史郎、松本 謙一郎、宮崎 泰司、山下 俊一、山本 尚幸、吉田 篤史、吉田 浩二

被ばく医療診療手引き編集委員会

廣橋 伸之（委員長）、明石 眞言、宇佐 俊郎、太田 勝正、熊谷 敦史（副委員長）、齋藤 陽子、佐藤 久志、重村 淳、隅田 博臣、富永 隆子、橋口 尚幸、長谷川 有史、花田 裕之、藤淵 俊王、松本 謙一郎、宮崎 泰司、山本 尚幸、吉田 篤史、吉田 浩二

被ばく医療診療手引き編集委員会事務局

立崎 英夫、西條 広人、小川 眞澄、熊谷 敦史、小林 右承、根上 颯珠、千葉 裕子、安藤 志穂

謝辞 本手引きは、原子力規制庁の「原子力災害等医療実効性確保事業」の支援を受けて作成した。

被ばく医療診療手引き

発行年月 : 2022年3月
編集発行 : 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
連絡先 : 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1
量子生命・医学部門 放射線医学研究所 被ばく医療部
TEL : 043-206-3134
FAX : 043-206-4095
Email : tebiki-member@qst.go.jp
印刷、組版 : 株式会社集賢舎

©2022 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

Printed in Japan

QST-M-34

ISBN: 978-4-907894-16-0 (PDF版)

The background is an abstract composition of large, solid-colored triangles in blue, red, and yellow. The triangles are arranged in a way that creates a sense of depth and movement, with some triangles pointing towards the center and others pointing towards the edges. The colors are vibrant and the lines are sharp, creating a modern and dynamic visual effect.

<https://www.qst.go.jp/>