

## 放射線診療の国際基準とのハーモナイゼーションに関する研究

### 令和4年度:防護線量の取り扱いと考え方

分担研究者 奥山 智緒 滋賀県立総合病院研究所 画像研究部門 上席専門研究員

研究協力者 岩佐 瞳 高知大学医学部 放射線診断・IVR 学講座 助教

對間 博之 神戸常盤大学 保健科学部 診療放射線学科 教授

市川 尚 神戸常盤大学 保健科学部 診療放射線学科 助教

### 研究の背景

原子放射線の影響に関する国連科学委員会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR)2020/2021年報告<sup>1)</sup>によると、放射線被ばくの人為的要因として圧倒的に多いのが、医療放射線被ばくである。放射線治療を除く一人当たりの医療被ばくによる実効線量は0.57mSvと、2008年報告(0.65mSv)と比べると微減しているが、医療技術の進歩と発展途上国における放射線診断機器の普及により今後さらに医療放射線被ばくは増加することが予想される。

我が国は、先進諸国の中でも群を抜いて多い人口100万人当たりのCT台数を備え(表1)、各種放射線診断による被ばく量が多いことが知られている<sup>2)</sup>。

診療用放射線の使用における正当化は医師の判断に基づくも

のであり、防護の最適化は現場の放射線診療従事者の裁量による。患者は医療従事者からの十分な説明のもとで、被ばくを伴う放射線診療を受けるが、医療従事者と患者の間には、診療内容や放射線に関する知識量に大きな乖離があるのみならず、治療を行う側—治療を受け

表1. 放射線診断機器の装置台数(OECD health statistics 2020<sup>2)</sup>)

	CT台数 /100万人	PET台数 /100万人	マンモグラフィ /100万人
1 日本	116	デンマーク 8.4	ギリシャ 68.8
2 オーストラリア	68	米国 5.8	米国 67.2
3 アイスランド <sup>*</sup>	46	オランダ <sup>*</sup> 4.8	韓国 65.1
4 ギリシャ	44	日本 4.7	ベルギー 36.4
5 米国	43	スイス 3.9	イタリア 35.3
6 デンマーク	41	オーストラリア 3.9	日本 33.8
7 韓国	41	イタリア 3.6	フィンランド <sup>*</sup> 30.9
8 スイス	40	韓国 3.6	スイス 29.6

る側 という両者の非対等な関係性から、現実的には必ずしも診療の正当性や放射線被ばくが患者の身体に与える影響について患者側が十分理解できないまま行われている医療被ばくが存在すると思われる。

国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) は、放射線防護の基礎となりうる基本原則に関するガイダンスを提供する助言組織であり、1928年のICRPの前身である国際X線ラジウム防護委員会 (IXRP) の設立以来、定期的に電離放射線の危険に対する防護に関する国際基準となる勧告を発行してきた。ICRPのPublication 1 (Publ.1) においては、①ICRP勧告は放射線防護の基本原則を取り上げることにとどめること、②各国の必要に適した詳細な技術的規則、勧告、実施規則を採用する権利と責任は各国の防護委員会にゆだねること、③勧告は、潜在的な放射線の危険の数と範囲の増大に対処するため、また電離放射線の影響に関する新しい知識に応じて安全係数を変えるため絶えず再検討されることを委員会の方針として記している<sup>3)</sup>。

この勧告に基づき、放射線防護に責任のある国際組織や各国当局は、ICRPが公表する各種勧告と原則を防護対策の重要な基礎としている。我が国の放射線防護に関する法令などは、「放射線障害防止の技術的基準に関する法律」に基づき、原子力規制委員会内に設置された放射線審議会を中心に、ICRPの勧告、および国際原子力機関 (International Atomic

Energy Agency: IAEA) が提案する防護・管理基準を尊重する形で制定、改正されている (図1)。

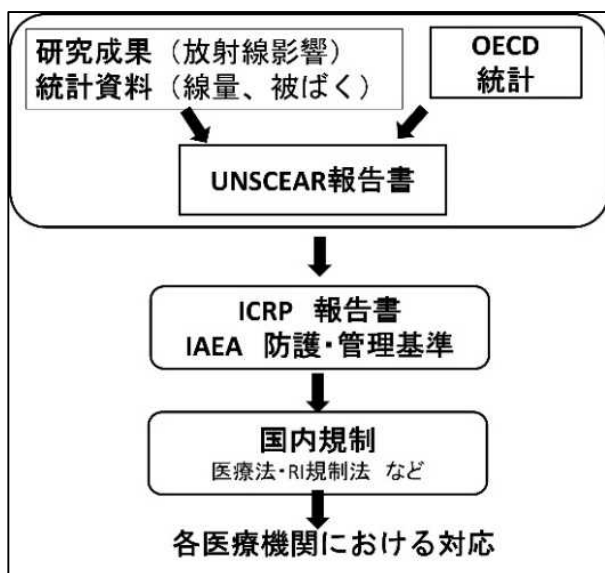


図1. 放射線防護規制作成の国際的枠組み  
 OECD: 経済協力開発機構  
 UNSCEAR: 原子放射線の影響に関する国連科学委員会  
 ICRP: 国際放射線防護委員会  
 IAEA: 国際原子力機関

医療における放射線被ばくは、唯一人に対して故意に放射線を照射するものである。被ばくする個人に直接の健康上の便益をもたらすことを意図しているという特殊性を有するため、ICRPでは患者に対する医療放射線被ばくには線量限度を適応すべきではないと定めてき

た。一方で、原爆被爆生存者や実験動物をもとにしたデータにより低線量被ばくにおける発がんの寄与にかかわる生物学的メカニズムの評価が進み、UNSCEAR 2020/2021 年報告書 C<sup>4)</sup>では、確率的影響に関連するリスク推定には直線閾値なしモデル (linear non-threshold = LNT モデル) を使用することが現時点でもなお適切であるとされて、医療技術が目覚ましく発展する近年、ICRP や IAEA では、医療者における放射線診療の正当性と防護の最適化を判断する責任の重さを強調している。

これらの状況を受け、日本国内では平成 31 年 3 月に公布された医療法施行規則の一部を改正する省令 (厚生労働省令第 21 号)<sup>5)</sup>により、医療機関における診療用放射線に係る安全管理体制の整備が定められた。本省令の施行により、正確な知識に基づいて放射線診療の正当化と防護の最適化を施し、患者への十分な説明をする体制の確保が求められるようになった。患者に対して放射線診療を用いるすべての医療従事者は、医療技術の進歩に合わせて被ばく量の評価や防護の最適化についての知識を国際基準と合わせアップデートしなければならない。

## 令和 4 年度 課題:防護線量の取り扱いと考え方

### 目的

本分担研究では、医療被ばくに関する近年の ICRP や IAEA による国際基準や指針の動向を整理し、国内の法令、規則、ガイドラインと照合し課題を抽出することを目的とする。

令和 4 年度は、医療放射線と被ばく防護、防護線量についての関する定義の変遷を ICRP 刊行物から紐解き、整理する。

現在の防護線量の基準である ICRP 2007 年勧告 (Publ.103) における防護線量についての課題と、Publ.147<sup>6)</sup>で明確にされた線量の考え方や使い方を整理する。

最後に、現在の日本の国内における防護線量や被ばく低減に関連した様々の取り組み状況をまとめるとともに、医療法施行規則の一部を改正する省令 (厚生労働省令第 21 号)<sup>5)</sup>に基づく“診療用放射線の安全利用のための指針”に関する各種参考資料を洗い出し、被ばく防護に関する事項、防護線量の取り扱いについての記述を洗い出し、国際基準との照合を行う。

## 医療放射線と被ばく防護や防護線量についての関する定義の変遷

1895年11月8日にドイツのビュルツブルグ大学の物理学研究室で、ヴィルヘルム・レントゲンがX線を発見した。12月28日に物理医学雑誌に投稿されるやいなや、陰極線管を用いた比較的簡単な仕組みであるX線発生装置は欧米各地で追試された。可視光線を通さない紙や木は透過するが、ヒトの骨や金属に対しては不透過であるこのX線の発見の翌1896年の1年間内には、Edwinらが骨折の診断、Jonesらが体内異物の描出、Macintyreらが腎結石の撮影に成功し、さらに、Straussは消化管造影検査を始めるなど医療領域での利用が急速に広まった<sup>7)</sup>。これら医療への放射線利用の始まりは、放射線障害の始まりともいえる。

### A) 放射線障害の分類の変遷とICRP勧告に見る放射線防護の目的の変遷 (表2)

#### 1. 放射線診療黎明期から ICRP 1958年勧告まで

医療への放射線利用が始まった翌年には、X線による急性皮膚障害や脱毛などが報告され、さらに白血球の減少や貧血などの造血臓器障害も認識されるようになった。このころに認識された障害は、現在の急性の組織反応に相当するが、中等量の線量の暴露による影響は、数か月以内で回復し、長期の影響に対する潜伏期は線量が少ないほど長くなるなどの放射線医学利用による経験に基づき『一定期間中の平均線量率が低ければ身体障害が現れない』とする仮説が立てられた。一定期間中の平均線量率を制限することで身体障害(組織反応)の発生を防ぐことを目的として紅斑線量と呼ばれる許容被ばくレベル(0.3 rem (=3 mSv) /week)が初めて設定された<sup>8)</sup>。

#### 2. ICRP 1958年勧告(Publ.1)<sup>3)</sup>

0.3rem / weekの許容線量においては職業にて放射線を扱う者の終生線量がかかなり大きなものになること、当時の放射線医療従事者の中で白血病の発生頻度が高く、寿命も有意に短いことが明らかとなってきたことなどをもとに、ICRPが放射線防護に関する勧告を発刊する運びとなった。Publ.1は電離放射線による被ばくによる障害を防止することを目的に初めて出された国際的な勧告である。Publ.1においては、①電離放射線による被ばくの障害の分類、②許容線量、③被ばくのカテゴリーが設定された。

### ①電離放射線による被ばくの障害の分類

電離放射線による被ばくによる障害は、被ばくした個人の障害である身体的影響と、被ばくした個人の子孫にもたらされる障害である遺伝的影響に大別された。身体的影響についてはさらに、急性影響と、晩発性影響に分類され、後者には白血病そのほかの悪性疾患、挙児能力の低下、白内障、寿命の短縮などの障害が含まれた。

### ②許容線量の設定

臓器や組織による放射線感受性の違いが認識されてきて、照射された状況に依存して重要性の高い臓器や組織が“決定臓器・決定組織 (Critical organ/tissue)”とされた。Critical organ の概念自体は Publ.1 以前の 1950 年勧告<sup>8)</sup>においても認められ、被ばくの影響として、貧血や白血病、固形がん、白内障、遺伝的影響をあげ、定量的なリスク評価はないものの、放射線防護の基本スタンスとして「可能な最低レベルまで (to the lowest level) 被ばくを引き下げるあらゆる努力を払うべきである」とされた。全身照射の場合には造血器、生殖器、水晶体を、部分的被ばくの場合には、感受性と限局した線量のために永久的な障害を最も受けやすいと考える組織を Critical organs とした。個人に対しては、遺伝的影響や、著しい身体的影響(白血病など)を防ぎ、集団に対しては遺伝的影響を防ぐことを目的として、電離放射線によって連続的に被ばくする線量に対し、個人、および集団全般に許容可能な範囲内に制限する、最大許容線量が設定された。

### ③被ばくのカテゴリー

放射線被ばくのカテゴリーは、放射線の発生元により、自然放射線と、医療放射線とそのほかの電離放射線に分類された。被ばくについては、医療行為を受けることに関連する被ばくである医療被ばく、放射線を扱うことを職業とするものの職業被ばく、それ以外の被ばくに分類され、許容線量は特に職業被ばくをする個人に対して適用し、自然放射線については許容線量の範囲外とするとともに、医療上、被ばくにより利益を得うる個人の線量については勧告を与えないこととされた。

放射線防護の目的は、身体的障害を防止、または最小にとどめること、および、その集団の遺伝的素質の劣化を最小にとどめることであると示し、被ばく線量を、個人、および集団全体に許容可能な程度に制限する線量として許容線量が設定された。

### 3. ICRP 1977年勧告(Publ.26)<sup>9)</sup>

作業者の被ばく線量が管理されるようになり比較的強く保たれるようになると、日常的にがん以外の身体的影響は生じにくくなり、がんの抑制が放射線防護の最大の関心事となった。1977年勧告では、被ばくの影響を非確率的影響と確率的影響に分け、それまでは、被ばくの主たる目的として職業人や一般公衆の個別の臓器、組織に対する線量制限に目を向けられていたが、新たに、個人の被ばくによるがん抑制に目を向けられた転換期となった。

#### <被ばくの影響の分類> (図2)

被ばくした個人が受ける身体的影響(急性影響と晩発性影響)と被ばくした個人の子孫にもたらされる障害である遺伝的影響に分類されていた被ばくによる影響については、その線量と頻度、重篤度の関係から 非確率的影響(non-stochastic effects)と、確率的影響(stochastic effects)に大別された(図2)。

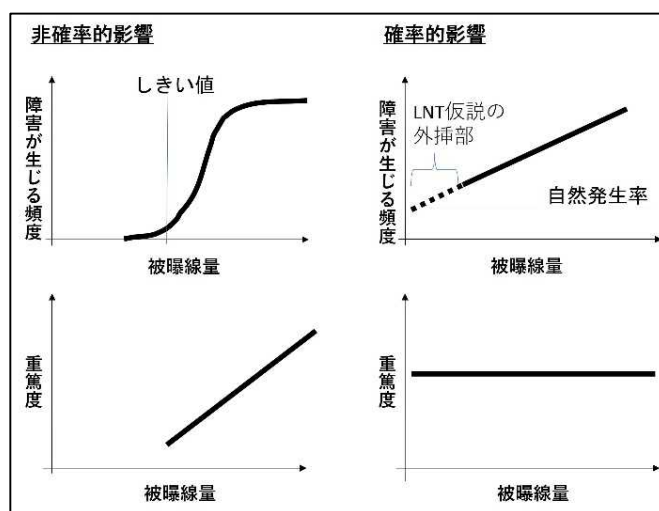


図2. 非確率的影響と確率的影響

#### i. 非確率的影響

放射線の生体影響のうち、これ以下では影響がないと考えられるしきい線量(明らかな異常が1~5%の個人に現れる線量)が存在すると考えられている影響である。しきい線量を超えると影響が現れ始めるが、しきい値以下に線量を抑えることで避けることができると考えられる。放射線感受性の高い人と低い人により影響の生じ始める線量や重篤度に違いはあるが、線量の増加とともに影響の発生確率が急速に増加するのみならず、影響の重篤度も増加する。がん化と遺伝的影響以外のすべての影響がこれに分類される。

(非確率的影響は ICRP 1990年勧告(Publ.60)<sup>10)</sup>では確定的影響、2007年勧告(Publ.103)<sup>11)</sup>では組織反応とも表現されるようになった。また、現在のしきい値は Publ.118<sup>12)</sup>に基づいている。)

## ii. 確率的影響

放射線の生体影響のうち、一定量の放射線を受けたとしても必ずしも影響が現れるわけではないが、量が多くなるほど影響が現れる確率が高くなる影響。白血病やそのほかのがん、および遺伝的影響がこれに含まれる。放射線の量が多くなると、発生確率は高くなるが、影響の重篤度は一定である。

### LNT モデル (Linear non-threshold model)

放射線被ばくによる影響については、動物実験の他、ヒトに関する広島・長崎の原爆被爆者のその後の疫学調査の結果に基づいて解析が行われてきた。

がん化を引き起こす要因には放射線被ばく以外にも多様なものが存在している。被ばくすることにより増加するリスク(放射線の過剰相対リスク)については、100mSv 以上の被ばくについては統計的に確認されているが、それ以下の低線量被ばくによる確率的影響の推定においては、科学的に定量化が困難である。健康影響が生じる可能性が小さいのみならず、発がんに対する放射線以外の寄与分が大きく、自然発生レベルとの統計的に明らかな有意差を示すデータが少ないからである。そのため、一定の線量以下では実際よりも過大評価していると考えられる説もあるが、現在、ICRP では、放射線防護の目的上、単純で合理的な仮定として、低線量域においても LNT モデルを外挿して被ばく低減を図るべきとしている<sup>13-15)</sup>。

#### <防護の目的>

Publ.26 においては、個人の被ばくによる確率的影響を抑えることが、防護の大きな目的とされ、放射線防護の三原則として、行為の正当化、防護の最適化、個人の線量限度が示された。

#### 4. ICRP 1990 年勧告 (Publ.60)<sup>10)</sup>、ICRP 2007 年勧告 (Publ.103)<sup>11)</sup>

防護の目的などについては 1977 年勧告の考え方を引き継ぎながら、新たなデータをもとに、リスク評価の具体的な計算式や線量概念がアップデートされている(後述)。放射線障害の分類の非確率的影響という用語は ICRP 1990 年勧告 (Publ.60)<sup>10)</sup>では確定的影響 (deterministic effects)と、さらに、ICRP 2007 年勧告 (Publ.103)<sup>11)</sup>では“組織反応 (tissue reaction)” という表現が用いられるようになった。

表 2. 放射線の影響と防護の対象・目的の考え方の変遷

	放射線障害	防護の対象	防護の目的
Publ.1 以前	急性皮膚障害 脱毛 造血器障害など	放射線従事者	急性障害を防ぐ
Publ.1 <sup>3)</sup> (1958年勧告)	Critical organs の急性障害 白血病	職業被ばく 集団の被ばく	著しい身体影響(身体的影響:白血病など)の防止と遺伝的障害を防ぐ
Publ.9 <sup>16)</sup> (1966年)	Critical organs の急性障害 白血病などのがん	職業被ばく 集団の被ばく	急性効果を防止することと、晩発性効果の危険を容認できるレベルまで制限する
Publ.26 <sup>9)</sup> (1977年勧告)	非確率的影響と 確率的影響(がん化と遺伝的影響)	職業人 公衆	・高線量被ばく→非確率的影響の防止(個別の臓器の線量制限) ・低線量被ばく→確率的影響の防止 <→実効線量当量概念(後述)や、防護の三原則の出現>
Publ.60 <sup>10)</sup> (1990年勧告)	確定的影響(非確率的影響から改め)と確率的影響	職業人 公衆	個別の臓器の確定的影響の防止と、確率的影響を防ぐ
Publ.103 <sup>11)</sup> (2007年勧告) Publ.105 <sup>17)</sup> (2007)	組織反応(確定的影響)と 確率的影響	職業人 公衆 医療被ばく (患者・介助者・介護者・研究志願者)	・個別の臓器の組織反応(確定的影響)の防止と、確率的影響を防ぐ ・新しいデータや医療放射線技術の進歩に合わせた防護基準へ

### B) 医療放射線被ばくに関する考え方の変遷 (表 3)

医療放射線被ばくは、唯一人に対して故意に放射線を照射するものである。被ばくする個人に直接の健康上の便益をもたらすことを意図しているという特殊性を有し、放射線従事者の職業上の職業被ばくに対する防護とは異なった評価をされてきた。ICRP の刊行物にみられる医療放射線被ばくに対する考え方の変遷を表 3 にまとめる。



表 3. 医療被ばくの対象と考え方の変遷

	医療被ばくの対象	医療被ばく考え方
Publ.1 <sup>3)</sup> (1958年勧告) 以前	医療を受ける個人	医療行為により個人が健康上の益を受けることを目的としているため何の勧告も与えない
Publ.26 <sup>9)</sup> (1977年勧告)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・医療のための被ばく</li> <li>・定期検査や検診</li> <li>・法医学や保険のため</li> <li>・医学上の研究で被ばくを受ける個人</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・不要な被ばくを避け、利益からみて正当とされるべき被ばくを医療者が行う</li> <li>・医療上の益を得るため、線量限度を当てはめることは不適切</li> </ul>
Publ.60 <sup>10)</sup> (1990年勧告)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・医療を受ける個人</li> <li>・患者を介護・介助する個人(職業被ばく以外)</li> <li>・生物医学研究志願者</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・診断・治療のために意図的に医療者から与えられる被ばくであり、直接の利益を受けるので線量限度は適応すべきでない</li> <li>・正当化と防護の最適化の範囲内で行われるべきである</li> </ul>
Publ.103 <sup>11)</sup> (2007年勧告) Publ.105 <sup>17)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・診断、検査、IVR、放射線治療を受ける個人(妊娠、授乳中の患者の被ばくの際に被ばくを受ける胚・胎児、乳児の被ばくも含む)</li> <li>・患者を介護・介助する個人(職業被ばく以外)</li> <li>・生物医学研究志願者</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・診断・治療のために意図的に医療者から与えられる被ばくであり、直接の利益を受けるので線量限度は適応すべきでない</li> <li>・正当化と防護の最適化の範囲内で行われることが重要である</li> <li>・妊娠している患者の被ばくには特別な配慮が必要</li> <li>・診断・IVR:不要な被ばくを避けること</li> <li>・治療: 健常組織への不要な被ばくを避けること</li> </ul>
<b>Publ.103<sup>11)</sup>、105<sup>17)</sup>で示されている医療被ばくについての現在の考え方</b>		
	正当化	医療放射線被ばくの3つの正当化レベル 第1: 医学における放射線の適切な利用 第2: 特定の目的に対する特定の手法 第3: 個々の患者ごとに対するその手法の適用
	医療被ばくの特異性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・意図的被ばく</li> <li>・自由意思の被ばく</li> <li>・無症状者に対するスクリーニング</li> <li>・放射線治療(組織反応を目的とする)</li> <li>・患者の線量管理の必要性</li> <li>・患者集団の特異性</li> </ul>
	防護の最適化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・診断参考レベル(DRLs)の活用</li> <li>・介助者・介護者、生物医学研究志願者に対する線量拘束値の設定</li> <li>・医療現場における患者の線量管理</li> <li>・個々の患者の被ばくには線量限度適用せず</li> </ul>

### 1. ICRP 1958年勧告 (Publ.1)<sup>3)</sup>

医療上の被ばくからくる個人の線量については、その医療行為により個人が健康上の益を受けることを目的としているため何の勧告も与えられていない。

### 2. ICRP 1977年勧告 (Publ.26)<sup>9)</sup>

医療被ばくは、①病気に直接関連する検査や治療のための被ばく、②定期検査や検診などの系統的検査による被ばく、③法医学上や保険のための被ばく、④医学上の研究のために被ばくを受ける個人の被ばくに分類される。診断および治療のために医療職員によって意図的に与えられる被ばくである医療被ばくについては、線量制限体系に従って不必要な被ばくを避け、利益から見て正当とされるべきである。一方で線量限度を定めることによって適切な医療を受ける機会を失うことを避けるため、医療行為の直接の利益を受ける医療被ばくについては勧告による線量限度の値を当てはめることは適切ではなく、他の線源からの人の被ばくに適用されるいかなる線量制限のやり方にも影響を受けるべきではないとされている。

### 3. ICRP 1990年勧告 (Publ.60)<sup>10)</sup>

医療被ばくは、その人自身の診断または治療の一部として受ける被ばくと、診断または治療中の患者の付き添いと介護をする個人が、承知の上で自発的に受ける(職業被ばく以外の)被ばくとし、生物医学研究プログラムの一部として志願者が受ける被ばくもこれに含む。すなわち、『診断、治療のために意図的に医療者から与えられる被ばくであり、直接の利益を受けるので、正当化、防護の最適化に従う範囲内において、勧告による線量限度の値を適応すべきではない』とされている。

患者の医療上の被ばくについてはそれまでの勧告と同様に、個人が医療行為の直接の便益を受ける当人であるので線量限度の値を当てはめるのは適切ではなく、医療上の利益を勘案すれば限度をはるかに超える場合も正当とみなされることがある、と記されている。

そのうえで、被ばく防護の三原則が示された本勧告においては、さらに、使用する設備と技術を最適化しつつ、被ばくにより得られうる情報量と被ばく量を勘案し、また胚や胎児への被ばくを最小化すべく、被ばくを最適化することの必要性が述べられた。

#### 4. ICRP 2007年勧告(Publ.103<sup>11)</sup>)、Publ.105<sup>17)</sup>

2007年勧告(Publ.103)<sup>11)</sup>のChapter 7『患者、介助者と介護者、生物医学研究志願者の医療被ばく』、や Publ.105<sup>17)</sup>『医学における放射線防護』の中で整理された医療放射線についての具体的な考え方は現在の医療被ばく防護の基本となっている<sup>18,19)</sup>。

##### a. 医療被ばくの対象

医療被ばくの対象となるのは下記のものである。

- i. 診断、検査、IVR、放射線治療を受ける個人であり、妊娠あるいは授乳中の患者が被ばくする際に受ける胚・胎児、乳児の被ばくも含む
- ii. 患者を介護・介助する個人
- iii. 生物医学研究志願者

##### b. 医療被ばくの見方

医療被ばくは患者の便益のための意図的な被ばくであり、線量を制限することは患者の診断や治療の有効性を減じることにつながり有害無益かもしれないため勧められない、としたうえで、放射線を用いた行為を医学的手法として正当化すること、防護を最適化することが重要とし、妊娠している患者の被ばくについては特別な配慮が必要であることも記された。

また、診断や IVR においては、不要な被ばくを避けること、放射線治療においては、必要な線量を目的部位に与えることを目的とし、健常組織への不要な被ばくを避けることの必要性も明記されている。

##### c. 医療被ばくの正当化

医療放射線被ばくについては3つのレベルがある。

第1レベル: 医学における放射線の適切な利用

第2レベル: 特定の目的に対する特定の手法

第3レベル: 個々の患者ごとに対するその手法の適用

第1レベルである医療・医学において放射線を適切に利用すること自体については論ずる余地もなく正当化されているが、第2レベルや第3レベルについては適宜、正当化を行うことが必要である。

d. 医学における患者の被ばくの防護における特殊性

医療被ばくにおいては、患者防護を考えるうえで、医療被ばく以外の被ばくとは明らかに異なる特殊な点がある。

- i. 医療被ばくの特殊性: 受ける人の健康につながる便益のための意図的被ばくである。
- ii. 自由意思の被ばく: 被ばくを受ける個人にとって自由意思の被ばくとなる。そのため、被ばくをする行為を受ける際には十分な **Informed consent** が行われるべきである。特に患者に対する便益が主要な目的でない研究や調査のための被ばくの正当化には特別な考慮が必要である。
- iii. 無症状者に対するスクリーニング検査: 無症状者においても医学・医療を目的として被ばくすることがある。そのため、特に複雑な診断や高線量の検査に対しては、被ばくによる不利益が検査による利益を上回ることがないよう、医師の個別の正当化が特に重要である。
- iv. 放射線治療の特殊性: 放射線治療は、意図的被ばくの中でも、放射線の組織反応によって治療をすることを目的とするものである。したがって、それに伴う一定の障害が生じうることも考慮する必要がある。
- v. 線量管理の必要性: 患者の医療被ばくについての線量限度は設定されないが、放射線診断の行為については診断参考レベル (DRLs) が活用される。
- vi. 患者集団の特殊性: ICRP によるリスク推計に用いられた集団は、実際の患者集団とは異なるため、同一の実効線量の概念は通用しないし、適用することは望ましくない。

e. 患者防護の最適化についての考え方

上記のような、医療被ばくの特殊性を考慮したうえで、医療被ばくにおいては、以下に示すように目的にふさわしい患者線量管理を行うことで、個々の患者の防護を最適化することが必要である。

- i. 临床上必要性のある患者に対して行われる診療に対しては、診断参考レベル (DRLs) を活用する。
- ii. 介助者や介護者 (職業被ばくを除く)、並びに本人に便益のない生物医学研究志願者に対しては、線量拘束値を適用することができる。

- iii. 医療被ばくには患者線量の管理を行う。
- iv. 個々の患者の医療被ばくには線量限度を適用しない。

## C) 放射線防護に係る線量概念と用語の変遷

防護を考えるための線量や単位などの用語は、防護の考え方の移り変わりや、経験に基づく被ばくの影響や被ばく後調査により明らかになるデータに基づき、変遷を遂げてきた。

### 1. ICRP 1958年勧告(Publ.1)以前

#### a. 放射線の単位としての rad (ラド) と rem (レム)

**rad:** 放射線の単位として 1918 年に S.Russ が定義した放射線の吸収線量が rad である。『電離放射線の照射により物質 1kg につき 100erg (=0.01J) の仕事に相当するエネルギーが与えられるときの吸収線量』に相当し “radiation absorbed dose” が語源と思われる。現在の SI 単位系に直すと **1 rad = 0.01 Gy** に相当する。

**rem:** roentgen equivalent in man and mammal を語源とする単位であり、1rad の X 線吸収に等しい生物体における放射性粒子の吸収線量の単位とされる。現在の SI 単位系に直すと、**1 rem = 0.01 Sv (10mSv)** に相当する。

#### b. 最初の許容線量(紅斑線量)<sup>8)</sup>

中等度の治療線量を受けたあとには紅斑や白血球減少などの影響が生じるが数か月以内で障害が回復すること、長期の影響に対する潜伏期は線量が少ないほど長くなるという放射線医学的経験から、身体障害が現れないようにするために一定期間中の平均線量率を減らすことを目的として、初めての許容被ばくレベル(0.3rem / 週)が定められた。

### 2. ICRP 1958年勧告(Publ.1)<sup>3)</sup>

**最大許容線量**の設定: 上述の紅斑線量として定められた許容被ばくレベル(0.3rem/週)をもとに職業被ばくが続いた場合に、終生線量が大きなものになることや、放射線専門医の寿命が有意に短いことを受け、Publ.1 では様々の最大許容線量が設定された(表 4)。

表 4. Publ.1 で示された最大許容線量(職業被ばく:個人)<sup>3)</sup>

決定組織(Critical organs)の線量	D=5 (N-18) D=線量 (rem), N = 年齢
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・任意の引き続いた 13 週間の蓄積線量 &lt; 3rem</li> <li>これを超えない場合は 1 回で 3rem の被ばくも可</li> <li>・18 歳以降、一定の被ばくをする場合 0.1rem / 週</li> <li>・<u>過去の被ばく歴</u></li> <li>不明の場合: 限度量を被ばくしていると計算</li> <li>0.3rem / 週で被ばくしていた場合: いずれの 1 年においても 5rem を超えてはならない</li> <li>・<u>18 歳未満の就業の場合</u></li> <li>5rem / 年を超えてはならない</li> <li>30 歳までの蓄積線量 &lt; 60rem</li> </ul>
皮膚線量	8rem / 13 週 (平均 0.6rem/週、年線量 30rem)
四肢末梢線量	20rem / 13 週 (平均 1.5rem/週、年線量 75rem)
決定臓器以外の内臓線量	4rem / 13 週 (平均 0.3rem/週、年線量 15rem)

### 3. ICRP Publ.6(1962)<sup>21)</sup>

#### a. Relative biological effectiveness (RBE), Quality factor (QF)

当初、X 線において 1rad の吸収線量が生物体に与える影響を 1rem と定められていたが、放射線の種類の違いによる影響の程度が異なることが明らかになり、1950 年勧告ではその程度を比較する生物学的相対指数として RBE (生物学的効果比) が定められた<sup>8)</sup>。

当初はラジウム線源を基準放射線として、それと同等な生物学的効果を起こす吸収線量の逆比が RBE と定義された。

1954 年には、放射線生物学的な効果の比を示す RBE と、放射線防護的な観点から、線質の異なる放射線の吸収線量に掛けて影響の程度を示す QF (線質係数) の 2 つとが記されていた<sup>20)</sup>。

#### b. 線量当量 (DE: Dose equivalent)

Publ.6<sup>21)</sup>においてはじめて防護線量としての線量当量が定義された。

種類の異なる放射線の影響を加味する係数 QF と 体内における不均等な線量

分布による効果を補正する線量分布係数  $DF$  (distribution factor) およびその他の必要な修正係数を吸収線量 ( $D$ ) に乗じて

$DE = D \times QF \times DF \times \dots$  と定義され、決定臓器の身体的障害の防止のために用いられた。

#### 4. ICRP 1977 年勧告 (Publ.26)<sup>9)</sup>

個人の低線量被ばくによる確率的影響を抑制することを防護の目的としてとらえた Publ.26 においては、そのリスクを抑制するための防護量として実効線量当量の概念が取り入れられた。

##### a. 実効線量当量 ( $H_E$ )

臓器ごとの線量当量から、全身の確率的影響の発生を抑えるための防護量。

$H_E = \sum_T (W_T \times H_T)$  で示される。

$H_T$ : 組織の平均線量当量、 $W_T$ : 荷重係数

##### b. 荷重係数

全身が均等に照射された場合における、臓器・組織 ( $T$ ) の確率的影響のリスクの、リスク全体に対する割合を示す係数であり、臓器、組織ごとのリスクを評価した係数であり、デトリメントを考慮して定められている。

##### c. Detriment (デトリメント=損害) (後述)<sup>22)</sup>

低線量・低線量率の被ばくによる害 (harm  $\equiv$  確率的影響) を、数学的な期待値で定量化したものであり、荷重係数の決定にかかわるものである。この値の計算には、原爆被爆生存者の疫学調査による放射線誘発がんのリスク評価が用いられている。

#### 5. ICRP 1990 年勧告 (Publ.60)<sup>10)</sup>、2007 年勧告 (Publ.103)<sup>11)</sup>

ICRP 1990 年勧告である Publ.60<sup>10)</sup> では、Publ.26<sup>9)</sup> における基本概念を維持したうえで防護体系に拡張し、線量当量は等価線量 ( $H$ ) という名称に戻され、実効線量当量の概念は実効線量に引き継がれた。さらに、新たな科学的データや医療放射線の進歩に合わせて、各種係数が更新された 2007 年勧告<sup>11)</sup> が、現在の国際的な防護基準とされている。

a. 等価線量( $H_T$ )

等価線量は放射線の種類を考慮し、放射線  $R$  による 組織  $T$  への影響を示した線量である。

$$H_T = \sum_R (w_R \times D_{T,R})$$

$D_{T,R}$ : 臓器・組織の平均の吸収線量

$w_R$ : 放射線加重係数

$D_{T,R}$ については、Publ.26 においては 組織の一点における吸収線量を示していたが、Publ.60 においては、組織の平均の吸収線量とされた<sup>10)</sup>。

b. 実効線量( $E$ )

実効線量は Publ.26 で実効当量線量とされた概念を引き継いでいる。

$$E = \sum_T (w_T \times H_T)$$

$w_T$ : 組織加重係数

c. 放射線加重係数( $w_R$ )

放射線の種類による影響の度合いを重みづけする係数であり、線質係数と同様のものである。X線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線においては1、陽子線は2、 $\alpha$ 線は20である。中性子線においてはエネルギーにより加重係数が異なり2.5~21の値を呈する。

d. 組織加重係数( $w_T$ )

Publ.26<sup>9)</sup>における荷重係数は、組織加重係数と名前を変え、Detriment の評価に考慮すべき因子の変化に従い、Detriment の値、 $w_T$ は変遷してきた。

6. Detriment(デトリメント)のリスク評価と組織加重係数の変化

Detriment は組織加重係数の決定にかかわる数値であり、あるグループが低線量・低線量率の被ばくをした結果、そのグループとその子孫が受ける健康上の害(≒確率的影響)を数学的な期待値で定量化したものである。原爆被爆者の疫学調査をもとにリスク評価が行われてきたが、生存者の追跡期間が長くなるに従い、考慮すべき因子が改訂され Detriment として考慮すべきリスク評価が変化し、組織加重係数は更新を続けている。



- a. Publ.26において detriment の計算において考慮されたのは、各臓器のがんによる“がん死亡率”と、生殖腺については重篤な遺伝的疾患の発生率である<sup>9)</sup>。単位 Sv 当たりの確率がリスク係数として示された。この勧告においては、死亡年齢の違いや、障害の重篤度、非致死がんについては考慮されていなかった<sup>22)</sup>。
- b. Publ.60 で定められた detriment においては、がん死亡率と、重篤な遺伝的疾患の発生率に加えて、非致死がんによる“harm”についても考慮し、致死がんの発生確率、致死割合、致死がんの余命損失年数、すべての致死がんに対する余命損失年数(15年)なども考慮に入れて、detriment の値が更新された<sup>10)</sup>。
- c. Publ.103 では、放射線影響研究所による原爆被爆生存者の 1958-1998 年のがん罹患患者数を対象とする Preston ら(2007)<sup>23)</sup>による原爆被爆者の最新疫学データを利用したリスク評価に基づいた係数が定められた。図 3 に現在の detriment の計算を示す<sup>11)</sup>。

表 5 は Publ.60 と 103 における被ばく集団の、確率的影響に対する名目リスク係数(Gy あたりの 10,000 人当たりの発生数)を示す。放射線被ばくによる影響に関する新たな知見が得られれば係数は見直しが繰り返される。Detriment は仮想集団における、臓器・組織の相対的なリスクを示す指標に過ぎない。

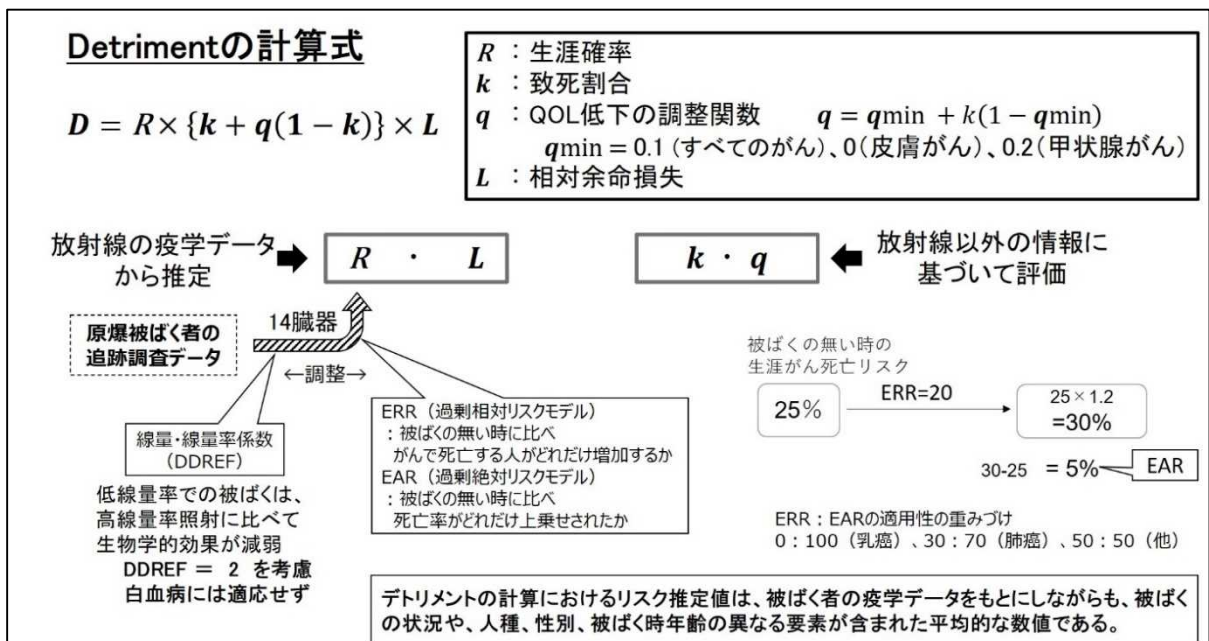


図 3. detriment の考え方 (ICRP Publ.103<sup>11)</sup>、Publ.147<sup>6)</sup>)をもとに作成

表 5. Publ.60<sup>10)</sup>と Publ.103<sup>11)</sup>に示される名目リスク係数(10<sup>-2</sup>Sv<sup>-1</sup>) (Publ.103より抜粋)

被ばく集団	がん		遺伝的影響		合計	
	Pub.	Pub.	Pub.	Pub.	Pub.	Pub.
	60	103	60	103	60	103
全集団	6.0	5.5	1.3	0.2	7.3	5.7
成人	4.8	4.1	0.8	0.1	5.6	4.2

表 6. WT(組織加重係数)の変化

組織・臓器	Publ.26	Publ.60	Publ.103
	(1977年)	(1990年)	(2007年)
生殖腺	0.25	0.20	0.08
赤色骨髄	0.12	0.12	0.12
肺	0.12	0.12	0.12
結腸	—	0.12	0.12
胃	—	0.12	0.12
乳房	0.15	0.05	0.12
甲状腺	0.03	0.05	0.04
肝臓	—	0.05	0.04
食道	—	0.05	0.04
膀胱	—	0.05	0.04
骨表面	0.03	0.01	0.01
皮膚	—	0.01	0.01
唾液腺	—	—	0.01
脳	—	—	0.01
残りの組織・臓器	0.30	0.05	0.12
係数の合計	1.00	1.00	1.00

このように、継続的な疫学データ解析に基づき、組織加重係数は更新が繰り返されている(表 6)。2007 年勧告において、従来と比べ特に生殖腺の組織加重係数値は低値に、一方、乳腺は高値に修正されている<sup>11, 24-25)</sup>。

## 7. 実効線量の持つ不確実性

実効線量は確率的影響を制限するための防護量として定められており、個人の線量管理やリスク管理に用いられているが、個人の被ばくにおける実効線量は直接測定し得ない値である。測定可能な物理量に 2 つの加重係数を乗じて求められる計算量である。実際には、実用量として体表に装着した個人線量計などの測定値をもとに、等価線量を計算し、組織加重係数をかけて計算される<sup>26)</sup>。防護量、物理量、実用量の関係を図 4 に示す。

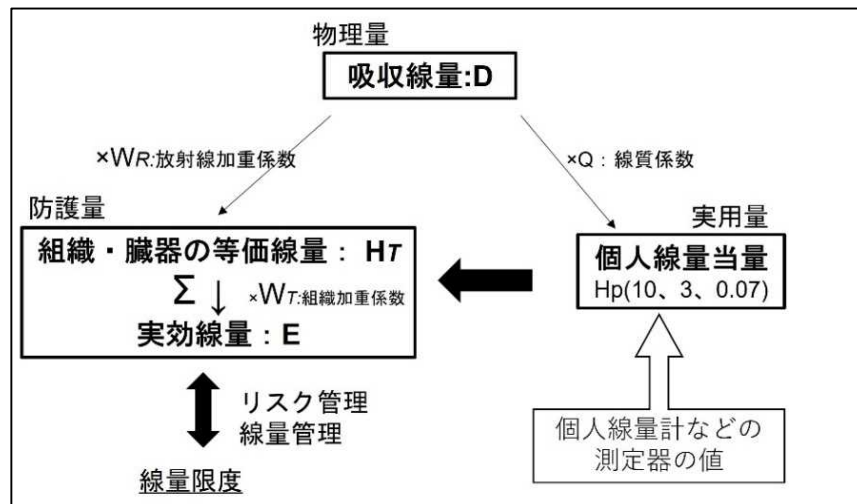


図 4. 職業被ばくの線量管理における物理量・実用量・防護量の関係

職業被ばくの線量管理においては、従事者が個人線量計などを装着することで実用量としての個人線量当量を計測する。10mm 線量当量(Hp(10))、3mm 線量当量(Hp(3))、70 $\mu$ m 線量当量(Hp(0.07))を測定し、臓器の線量当量と実効線量の計算に用いる。

組織吸収線量を求めるにあたっては、Geometry に対して、放射性同位元素の場合には、その摂取後の体内動態に対して人体モデルを用いて計算される。用いるモデルについては複数の人種が考慮されているものの、体型や男女差、年齢差を含む値であり、その組織吸収線量には不確実性が多く含まれる<sup>15)</sup>。

また、前述のように、組織加重係数の計算に用いられる **detriment** は、その基本となる疫学データが医療被ばくとはその性質も、形式も、線量率も異なる広島・長崎の原爆被爆者の生存者のデータをもとにしており、疫学データが更新されると数値も更新されているものであり、絶対的な値ではない。性別、年齢、人種、そのほか数多くの背景因子によるがん発生のリスクの違いが十分に考慮されていない。

つまり、実効線量は極めて不確実性を多く含む値である(図5)。さらに、実効線量から確率的影響の推測をするために LNT モデルを低線量域にも外挿している点において、さらに多くの不確実性を含んでいる<sup>13)</sup>。実効線量を用いて放射線診療を受ける個体における被ばくによる影響の大きさを評価することはできない。

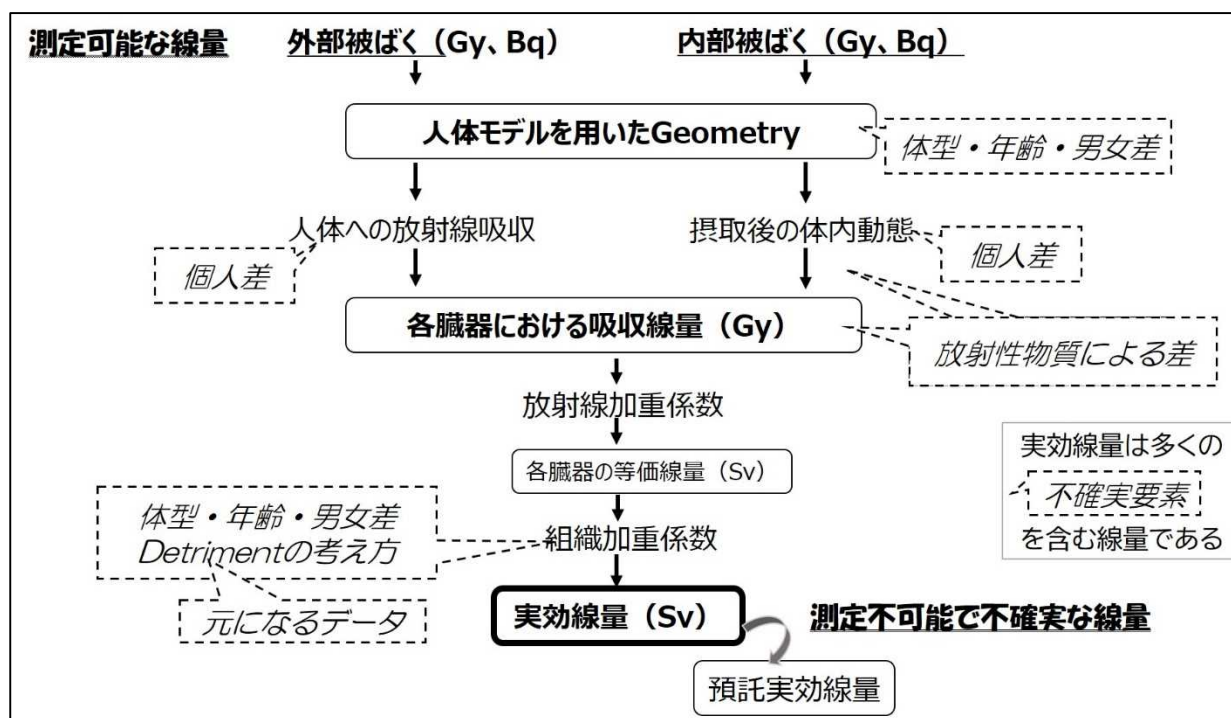


図5. 実効線量に含まれる不確実性

## ICRP Publ.147 で明らかにされた実効線量の使い方

我が国の放射線審議会では、ICRP 2007 年勧告の国内制度への取入れ状況を確認し、各種項目について今後の取り組みの方向付けを示してきた<sup>27)</sup>。その中において、Publ.103 で更新された組織加重係数、放射線加重係数や、課題の残された実効線量・等価線量の使い方については、即座に国内制度に取り入れることはされず、国際的な動向を確認することとしてきた。

これまで実効線量と等価線量が同一の単位である Sv を用いて表現されることで、概念の理解に混乱を生じることが指摘されてきた。我が国は、原爆被爆生存者の白血病などの発症者を多く抱えたこともあり、以前より放射線被ばくの健康被害については関心が高かったが、2011 年の東日本大震災の際の福島第一原子力発電所の事故により、実効線量という用語やその単位であるシーベルト(Sv)については急速に一般国民にも広く知られることになった。“線量限度 1mSv” や、“(実効線量)100mSv でリスク増加<sup>28)</sup>”、“甲状腺の被ばく線量が何 mSv” などの数字が、ネット上やマスコミで広がり、実効線量と組織の等価線量とを区別しない誤用の広がり、しばしば放射線診療の現場における患者・家族の不安の原因となってきた。一方で、100mSv が強調されすぎることにより、100mSv 以下の被ばくは安全であるかのような誤解も生じるようになってきた。

2021 年に発刊された ICRP Publ.147 “Use of dose quantities in radiological protection (放射線防護における線量の使用)” では、この 2007 年勧告 (Publ.103)<sup>11)</sup> で示された実効線量や等価線量についての説明が強化、拡張され、健康リスクに関連した線量の使用法が明確化された<sup>9)</sup>。ICRP の防護量の目的と使用方法について詳細に説明がなされており、これまでに認識、指摘されてきた実効線量の課題、限界を踏まえたうえで、現実的な実効線量の使用方法を示している<sup>29)</sup>。

### A) 等価線量と実効線量の単位の扱い

#### 従来の考え方

等価線量は均等被ばく、不均等被ばくに関わらず、組織・臓器が吸収した線量に対し、組織・臓器の組織反応(確定的影響)の大きさに応じて重みづけした線量であり、一方、実効線量は全身への確率的影響への大きさを示すものである。これらは異なる概念の線量を示すが、従来どちらも Sv が単位として用いられてきた。

我が国においては特に 2011 年の福島原発の事故後には、高線量地域の避難指示や帰還

困難区域などの設定もあり、公衆の実効線量限度 1mSv/年は強く国民の心に刻まれる数量となった。また、同時に、放射線被ばくによるがん化リスクの上昇し始める値として 100mSv という数値も大きく印象付けられ、Sv に対する断片的な情報の氾濫により様々な混乱をきたすことになった。

- 1) ヨードを摂取すると、体重の 2000 分の 1 にも満たない程度の重量しかない甲状腺に、その 20%近くが分布する。原発事故後には、特にこのような特定の臓器に集中する内部被ばく線量を考慮する場合に、実効線量が 5mSv 程度の被ばくの場合、甲状腺の等価線量にして 120mSv 程度にも相当するため、数字が独り歩きし、即座にがんが発生するかのような誤解から、騒ぎとなった。
- 2) このような Sv の単位による表現は、誤解を助長し、放射線診療現場における必要以上の警戒心を生み、患者の診療における被ばく線量に Sv での説明を求める要求や、ときには診療辞退などの好ましくない事態をも引き起こす原因となった。

⇒ Publ.147 では、**Sv の単位の使い方**については以下のように明確化された<sup>6)</sup>。

- Sv(シーベルト)は実効線量の単位とし、確率的影響の発生を制限する防護量とする。
- 等価線量(Sv)は実効線量の計算過程の中間的な量として用いる。

これまで、各組織・臓器の組織反応を防止するための防護量が等価線量を兼ねていたために混乱していた Sv の扱いが明確になり、Sv は確率的影響に対する防護量として用いることが明確化された。

- 組織反応を防止するための制限に使用する最適な線量は吸収線量である。

臓器や組織の急性障害(組織反応)を防ぐための限度値を設定するためには等価線量ではなく、実効線量を用いることとすることとされた。

これにより、吸収線量(Gy) → 組織反応に対する制限

実効線量(Sv) → 確率的影響に対する制限

とすることで、両者が明確に区別される。

次期主勧告までは等価線量を、組織反応を防止するための線量としても使用可能であり、組織反応に対する放射線の重みづけについてはさらなる検討を要する。

## B) 実効線量について

### 実効線量の特徴

- 1) 放射線管理規制に利用する。
- 2) 外部被ばくにおいては、測定可能な実用量を用い、内部被ばくの場合、体内動態モデルを用いて預託線量を計算するために提供される線量係数を用いて評価される。
- 3) 不確実性を多く含む線量(前述)であるが、2つの加重係数を用いて評価され、放射線の種類や、外部・内部被ばくに関係なく適用可能な線量である。
- 4) 内部被ばくについては、大人と小児の臓器等価線量、実効線量の年齢ごとの線量係数を用いる。
- 5) 外部被ばくについても、年齢を考慮した計算が行われる。
- 6) 組織加重係数は、性別、年齢、および集団別の値の平均値として計算される。

- **実効線量は detriment に関連付けられた防護量であり、潜在的なリスクの近似指標になるが、標準人をモデルにしたパラメータを用いたものであり、個人のリスクを表現する代替には決してならない。**
- **正当化や最適化のための日常的な決定のためには、健康リスクに関連する推定値が必要であり、実効線量はその簡易なツールとして機能する。**

### 仮想集団に対する名目リスク係数と現実の生涯リスクとの乖離について

実効線量の計算に用いる組織加重係数のもとになる detriment は、前述のように仮想の集団に対する名目リスク係数を評価することで組み立てられている。

しかし、性別、並びに被ばく時の年齢は、その後の確率的影響を起こすリスクに大きな影響を与えるものであり、低線量被ばくにおけるリスク予測については、この点でもまた、大きな不確実性をはらんでいる。

図 6 には Publ.147 の Table2.5 をもとに作成したアジア混合集団における  $\gamma$  線の一様外部被ばく(1Gy) 当たりの被ばく時年齢ごとのがん罹患生涯寄与リスク(%)を示す。

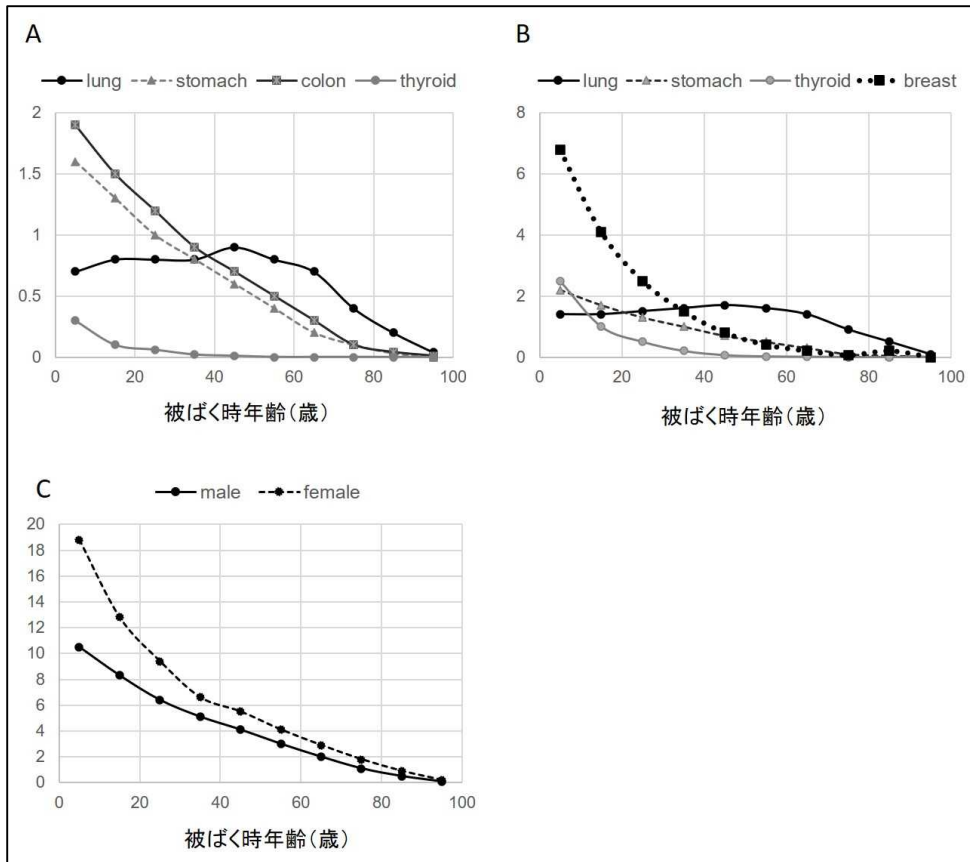


図 6. Publ.147<sup>6)</sup> Table 2.5 をもとに作成したアジア混合集団の  $\gamma$  線 1Gy の一様外部被ばく時年齢ごとのがん罹患生涯リスク(%)

(A: 男性の臓器別リスク、B: 女性の臓器別リスク、C: 男女別の全がんリスク)

これらのデータによると、一様外部被ばくによるがん生涯リスクは、胃がんのリスクについてはおおむね男女差はないが他の多くのがんにおいては男性に比べて女性でリスクが高い。肺がんの罹患リスクは男女ともに 40-50 歳付近での被ばくの影響が最も高くなるが、甲状腺がんや胃がんは若年での被ばくの影響が大きいことがわかる。また、女性においては特に若年の被ばくにおける乳がんの罹患リスクが極めて高くなっている。被ばくによる確率的影響への配慮をする場合には、特に性別や被ばく時年齢を考慮することが重要であることがわかる。



Publ.147<sup>6)</sup>の Table 5.3、5.4 には、2011年に Wallらが報告したデータ<sup>30)</sup>に基づいて、欧米人集団とアジア人集団に対して各種放射線医療処置 1Sv の実効線量あたりの被ばく時年齢および性別によるがん罹患生涯リスクの値が示されている。図 7 には Table 5.4 をもとにアジア人集団における医療処置ごとの実効線量 1Sv あたりの被ばく時検査別がん罹患生涯リスクを男女別に示す。

これによると、女性若年者における検査種別の違いが目立つ。上部消化管造影(バリウム検査)と胸部CTでのリスクが特に高い。これは、若年女性においては、特に乳腺被ばくが高くなるこれらの検査による被ばく線量が多い場合がん罹患生涯リスクが上がりやすいことを示していると推察される。

実効線量には不確実要素が多いうえに、少ない回数での放射線照射による実効線量は1Sv には程遠いものであるが、実効線量が示すがんリスクにおいても、性差や年齢差により大きくその程度が異なっており一様ではないことも理解しておくべきである。

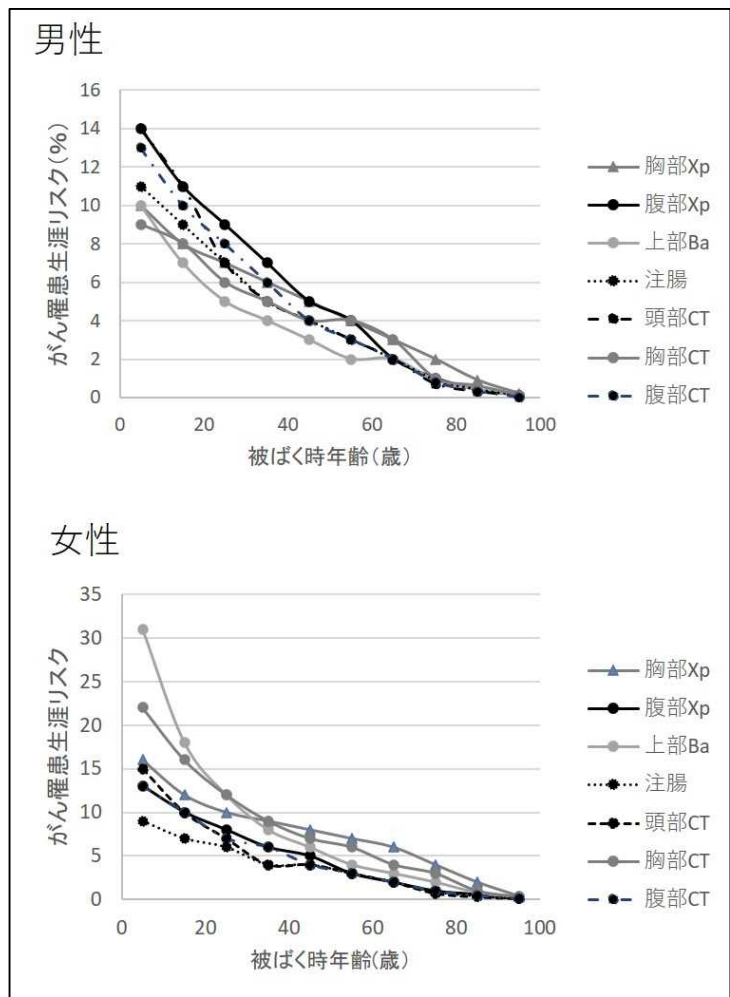


図 7. Pub.147 Table.5.4 をもとに作成したアジア人の男女別の検査種別実効線量 1Sv あたりの被ばく時年齢とがん罹患生涯リスク(%)

## 職業被ばくと公衆被ばくにおける実効線量の使用方法(Publ.147)<sup>6)</sup>

### 1. 職業被ばくの計画的被ばくの前向き評価

計画的被ばくの状況で個人、集団の実効線量を推定することで防護を最適化させる。集団実効線量は、複数の作業者がかかわる複雑な作業を計画する際の防護策を選択する際に有効なツールである。

### 2. 職業被ばくの後ろ向き評価(検証)

規制管理からの要求事項に対する適合性の証明、作業者の線量記録、および防護システムが適切に機能・実施されていることの証明に使う。実効線量の評価に使用されるパラメータは固有の標準値を持つ標準人をモデルにしており、個人の体格や年齢を用いて推定することはできないが、線量限度や線量拘束値はすべての作業者に適用されるので、これを用いた手法は公平で実行可能性のある方法であると考えられる。

### 3. 緊急時被ばく時状況

緊急被ばく時においては、作業者に組織反応が観察されるかどうか、医療的措置が必要かどうかの迅速な評価を行うために、実効線量は**初期の指標**として有用である。(時間が経過して十分な情報が収集された後は、RBE、年齢、性、体格などを考慮して適切に臓器や組織の線量評価が行われるべきである。)

### 4. 公衆被ばく

代表的個人を用いた前向き評価においては、生後3か月の乳児、1、5、10、15歳の子供、成人の線量係数が提供され、母親が放射性核種を摂取した場合の胚・胎児および母乳で育った乳児の線量も評価している。この際には、すべての年齢層において単一の組織加重係数を用いて実効線量が計算されるという問題がある。ただし、年齢や個人を区別せずにすべての人に公平で実行可能な防護システムを提供するためには、単一の組織加重係数を使用することで問題はないと考えられている。

⇒ **Publ.147** で示された医療における実効線量の活用についての勧告<sup>6)</sup>

- 実効線量は低線量被ばくでの健康リスク(確率的影響)に関連する指標であり、**100mSv 以下の状況で使用する**。緊急時被ばく状況では、例外的に 1Sv 程度まで使用が可能である。
- 実効線量は、**特定年齢の男女別標準人ファントム**で評価された男女平均で計算される。そのため、**潜在的なリスクの指標**になるが、特定の個人のリスクを表現する代替とはならない。
- 実効線量は、最適化、線量限度、線量拘束値、参考レベルなどの基準との比較、コンプライアンスの証明に使用するための防護量である。
- 異なるモダリティや撮像技術に伴う医療被ばくの比較に使用可能で、臨床家と患者とのリスクコミュニケーションの目的に使用可能で有用なツールである。

## C) 医療被ばくにおける実効線量の適用

### 従来の考え方

ICRP 2007年勧告(Publ.103)<sup>11)</sup>では、実効線量を医療被ばくに適用することは不適切としている。その理由としては、上述のように患者集団の年齢分布が作業員や一般集団とは異なること、また医療被ばくは、臓器や組織の被ばくが均等ではない不均等被ばく・部分的な被ばくであり、実効線量の計算のもととなるデータとは異なるためである。ただし、異なる診断方法についての相対的な線量の比較には有用であるとされていた。

Publ.105<sup>17)</sup>においては、集団の年齢や性別が類似している場合において、同一の目的のために行う異なる技術を利用した場合の、相対的な線量の比較のためには実用的であり、医療被ばくにおける正当化のプロセスや計画に用いることは適切であるとした。

その一方で、確率的影響のリスクは年齢や性別に依存するものであり、ドトリメントの計算の基礎になっている分布は患者集団の分布と著しく異なるため、実効線量を用いて患者のリスク推定を行うことは不適切であるとしていた。

### ⇒ Publ.147で示された医療被ばくにおける実効線量の活用<sup>6)</sup>

Publ. 147においては、実効線量の不確実性を認めたとうえで、医療被ばくにおいて個人のリスク推定に使用するものではないが、放射線診断における放射線防護、医療被ばくの低減のために使うことのできる有用なツールであり、前述の実効線量の活用に関する内容を踏まえ、医療被ばくにおいて実効線量の使用が推奨されるのは以下のような目的の場合としている。

- 1) 放射線診療の正当化
  - a. 第2レベルの正当化: 特定の目的に対して、特定の手法が診断あるいは治療を向上するとして正当化される
  - b. 第3レベルの正当化: 特定の患者に対する手法が個人の特性を考慮して正当化される
- 2) 画像診断技術の選択
- 3) 診断技術の最適化
- 4) 生物医学研究志願者の線量評価
- 5) 予期しない過剰な被ばくの報告: 数 10mSv を超える場合、詳細な情報が必要となる可能性があるとき
- 6) 健康診断あるいは、医療目的以外で適用する場合の効果の評価

7) 患者の介護者の線量

8) 臨床医やほかの医療専門家の教育訓練

患者に対し放射線診療を行うことが正当化されると、次にはどのような方法を用いるかが考慮される。その際には、検査の違いによるリスクの程度を考慮する必要がある。ICRP Publ.147では、低線量被ばくにおける様々な不確実性を含む実効線量を考慮し、日常診療において医療放射線診断を検討するうえで、正当化と、適切な防護を考えるためにリスクの指標となるカテゴリー分類を提示している(表 7)。これは、英国の成人(30-39歳)に対する診断用の放射線検査による実効線量に基づいて示している<sup>30-32)</sup>。

確率的影響としてのがんのリスクを考えるうえで、LNT 仮説を取り入れながらも、これまでは100mSv以下の被ばくではがん発生のリスクが増加したとする明らかな理由は認められないと考えられていた低線量被ばくについては、2010年以降、数万人規模以上の大規模研究によりがんの発生が増加したとする報告がみられており<sup>33-37)</sup>、放射線の正当化を行ううえで、実効線量を用いたこのようなリスク分類を適切に活用し、過剰で不要な被ばくを防ぐための配慮は今後ますます必要になってくると思われる。

表 7. 医療診断手技による線量とそのリスクの分類 (Publ.147<sup>6)</sup>、Table 5.2 をもとに作成)

実効線量 (mSv)	がんリスク*) (評価のもとになる考え)	線量レベル 表現	医療被ばくの例 <sup>6), 38)</sup>
<0.1	<10 <sup>-5</sup> (LNT モデルによる計算)	Negligible (無視できる)	レ線: 胸部、大腿骨、肩、四肢、頸部、歯科撮影  99mTc 標識センチネルリンパ節撮像
0.1-1	10 <sup>-5</sup> ~ 10 <sup>-4</sup> (LNT モデルによる計算)	Minimal (極小)	レ線: 脊椎、腹部、骨盤、頭部  99mTc 標識肺換気、腎イメージング
1-10	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-3</sup> (LNT モデルによる計算)	Very low (非常に低い)	バリウム造影(経口、注腸)  CT: 頭部、胸部、腹部、骨盤、心アングリオ  99mTc 標識心筋イメージング、骨シンチ、 18F、123I、111In 標識イメージング
10-100	10 <sup>-3</sup> ~ 10 <sup>-2</sup> (LNT モデルによる計算 と疫学からのリスク推定)	Low (低い)	CT: 単純+造影検査、IVR  67Ga シンチ、201Tl 心筋イメージング  血管内動脈瘤修復術、血管形成術など
数 100	> 10 <sup>-2</sup> (疫学からのリスク推定)	Moderate (中等度)	多重処置やフォローアップ検査

\*) 性、年齢を調整した生涯がん罹患率

施行する診療が決定したのちは、それぞれの診療において被ばく線量を最適化する工夫が必要である。最適化を行う際には、実際の線量を知り、DRLs(後述)との比較を行う評価を日常的に繰り返すことが重要である。(Annals of the ICRP Publication XXX、Optimisation of Radiological protection in digital radiology techniques for medical imaging)<sup>39)</sup>では、最適化の際に、医学物理士、放射線技師および放射線科医師のチームで、AIも活用しながら最適化を行うことが推奨されている。

研究志願者に対する被ばくに関連するリスクについては、年齢、性別や健康状態を加味したうえで、推定される被ばく線量については標準人をモデルにした実効線量を用いて考慮する。

職業被ばく以外の、介護者による被ばくについては、特に放射性同位元素を用いた内用療法を行う際に考慮される。

一方、実効線量の使用が推奨されないのは以下のような場合である。

- 機器に記録または表示されている測定可能な線量が提供されるとき
  - X線装置や透視装置：入射表面空気カーマ、カーマ面積線量
  - X線CT：CTDI<sub>vol</sub>、DLP
- 患者線量の調査や診断参考レベルの設定
- 患者の線量情報の医療記録や、患者線量情報の追跡
- 単一の臓器が被ばくした時の線量評価

患者の線量調査や記録については、測定可能な線量を用いることが適切であり、不確実性の多い実効線量を用いるべきでなく、また限られた臓器の被ばくに対する組織反応の評価には吸収線量を用いることが望ましい。

## 我が国の“診療用放射線の安全利用のための指針策定ガイドライン”における 被ばくによるリスク・被ばく線量などのコミュニケーションに関する事項

平成 31 年 3 月 11 日に公布された医療法施行規則の一部を改正する省令(平成 31 年厚生労働省令第 21 号)<sup>5)</sup>に基づき、診療用放射線に係る安全管理体制に関する規定が令和 2 年 4 月 1 日から施行されている。本省令により、エックス線装置または医療法施行規則(昭和 23 年厚生省令第 50 号)第 24 条第 1 号から第 8 号の 2 までのいずれかに掲げるものを備えている病院または診療所の管理者は医療放射線安全管理責任者を配置し、医療放射線安全管理責任者は診療用放射線の安全利用のための指針を策定することが定められた。

我が国における放射線の取り扱いについては、放射線障害防止の技術的基準に関する法律(昭和 33 年法律第 162 号)に基づき、放射性同位元素等の規制に関する法律(昭和 32 年法律第 167 号)をはじめとする関係法令間の基準の斉一を図りつつ、ICRP の内容を関係法令へ取り入れることにより国際水準に沿った管理が行われてきた。

医療被ばくに関しては、医療法(昭和 23 年法律第 205 号)体系において、ICRP 勧告に基づく構造・設備に係る基準、被ばく線量限度などが規定されてきた一方で、医療被ばくの特殊性を踏まえ、放射性同位元素などによる治療を受けている患者の支援、介助を行う当該患者の近親者における線量拘束値の設定を除き、明確な規制は導入されていなかったが、近年の国際動向および、我が国における医療放射線被ばく線量の高さを踏まえ、今回の医療法施行規則の一部を改正する省令のなかで、放射線診療を受ける者の医療被ばくの防護を目的として、安全管理体制を確保し、診療用放射線の安全利用のための指針を策定することが定められた。

診療用放射線の安全利用のための指針は、各医療機関において、当該機関の医療放射線安全管理責任者が策定するものである。本指針には、「放射線診療に従事する者、放射線検査を依頼する医師・歯科医師および診療を受ける者への説明などを実施する看護師などへの研修」、並びに「医療従事者と放射線診療を受ける者との間の情報の共有に関する基本方針」の中に、各種放射線診療における被ばく線量とその影響に関する項目が含まれる。指針を策定するためのガイドラインが各種機関、学会などにより示されており、各医療機関はこれらのガイドラインを参考に指針を策定していると考えられる。各種ガイドラインにおける医療被ばく線量の記載や防護線量についての説明や情報共有に関する記載を抽出する。



## A) 医療法施行規則の一部を改正する省令(平成31年厚生労働省令第21号)<sup>5)</sup>

医療法施行規則の一部を改正する省令(平成31年厚生労働省令第21号)により定められた“診療用放射線に係る安全管理体制に関する規定”では、各医療機関において、診療用放射線に係る安全管理の体制の確保に係る措置として、診療用放射線の利用に係る安全な管理のための責任者を配置し、①診療用放射線の安全利用のための指針を策定すること、②放射線診療に従事する者に対する診療用放射線の安全利用に対する研修を実施すること、③放射線診療を受ける者の当該放射線による被ばく線量の管理及び記録そのほかの診療用放射線の安全利用を目的とした改善のための方策の実施を行うこと、と定めている。具体的な指針策定は各医療機関における医療放射線安全管理責任者の責任となっているが、各種機関や関連学会などよりガイドラインや参考資料が示されている。

## B) 診療用放射線の安全利用のための指針策定ガイドラインにおけるリスクコミュニケーションについて

指針策定に対する各種ガイドラインや参考資料に明示された医療従事者と患者間の情報共有に関する記載を表8にまとめる。

いずれの団体から提示されたガイドラインにおいても、想定される被ばく線量とその影響についての説明を求めている。日本医学放射線学会から提示されたガイドラインにおいては、被ばく線量の大小についてほかの診療やほかの線源からの被ばくと比較すること、並びに個々の患者における確率的影響のリスクを評価するものではないことに留意する、との記載があり、ICRP Publ.147で示される内容に近いものであるが、他の団体の指針では具体的な内容が示されていない。指針を作成するそれぞれの医療機関は多岐にわたるため、各々の施設において国際基準に沿った説明が可能なガイドラインや参考資料があるのが望ましいと思われる。

表 8. 各種ガイドラインに示された医療従事者と患者間の情報共有に関する指針

	被ばく線量とその影響	正当化に関する事項	最適化に関する事項
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>●想定される被ばく線量の大小について、他の放射線診療による被ばくやその他の線源からの被ばくと比較する</li> <li>●線量指標の数值は、個々の患者における確率的影響のリスクを評価するものではないことに留意する</li> </ul>	期待される診療上の利益と放射線被ばくに伴うリスクを比較し、当該放射線診療の必要性を説明する	<ul style="list-style-type: none"> <li>●放射線診療を依頼する医師等による依頼内容の最適化</li> <li>●放射線科医師による当該診療の実施前の最適化</li> <li>●医療放射線安全責任者による線量管理</li> </ul>
B	当該検査・治療により想定される被ばく線量とその影響（組織反応及び確率的影響）	リスク・ベネフィットを考慮した検査・治療の必要性	当該病院で実施している医療被ばく低減に関する取組
C	当該検査・治療により想定される被ばく線量とその影響（組織反応及び確率的影響）	ベネフィット及びリスクを考慮した検査・治療の必要性	当該病院で実施している医療被ばくの低減に関する取り組み
D	当該検査・治療により想定される被ばく線量とその影響（組織反応及び確率的影響）	リスク・ベネフィットを考慮した検査・治療の必要性	<ul style="list-style-type: none"> <li>●当院で実施している医療被ばくの低減に関する取り組み</li> <li>●第三者機関の評価</li> </ul>
E	Bに準拠する	Bに準拠する	Bに準拠する

A: 日本医学放射線学会<sup>40)</sup>、B: 厚生労働省地域医療計画課<sup>41)</sup>、C: 日本医師会<sup>42)</sup>、D: 日本診療放射線技師会<sup>43)</sup>、E: 日本核医学会<sup>44)</sup>より提示されたガイドライン・指針モデル

### C) 医療被ばく低減やリスクコミュニケーションに対する我が国の取り組み

#### DRLの策定

ICRPの諸勧告やIAEAの国際基本安全基準など国際的な指針において、診断領域の医療放射線の防護における最適化のツールであるとされているのが診断参考レベル (Diagnostic Reference Level; DRL) である。2020年4月より施行されている医療法施行規則の一部改正は、我が国でもDRLを活用した各施設における最適化を推進させることになった。

DRLは国または地域ごと、またはローカルに設定される。これは、疾患分布や機器および検

査手技が国や地域の施設ごとによって異なる可能性があるためである。海外での DRL の取入れの状況として、欧州では EU (European Union) の欧州指令 Council Directive 97/43/Euratom (1997 年 6 月)<sup>46)</sup>によって定められた医療放射線防護の枠組みの中で診断領域に関して DRL を確立することが EU 加盟国に求められ、各国で DRL を取り入れている。米国では ACR (American College of Radiology)、AAPM (American Association of Physicists in Medicine)、NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) などが DRL を示している。

我が国では、医療被ばく研究情報を共有して連携するための組織として設立された J-RIME (Japan Network for Research and Information on Medical Exposure) が、2014 年 8 月に各構成団体から委員の派遣を受けて DRL ワーキンググループを立ち上げ、2015 年に日本における初の DRL<sup>47)</sup>が設定された。DRL 値は線量調査結果の 75 パーセンタイルなどを参考に設定され、高い線量を使用している検査や装置、施設を特定する指標となる。我が国初の DRL (DRLs 2015) は、国内の放射線防護における最適化推進の標準ツールとして広く認められることとなった<sup>48,49)</sup>。

DRL は線量限度ではないため納得できる臨床的な必要性があればその線量を超過してもよい。患者群または検査群に対して用いるものであり、体格により標準的患者よりも高い線量が必要とされる場合があるため、個々の患者についての検査の線量が高過ぎるか否かを判断するために用いるものではない。自施設の線量値を、DRL 値と比較することによって、自施設の画質や診断能と線量の両者の面から、線量を最適化するプロセスに用いるとともに、装置の調整や手法の品質保証にも活用する。ICRP Publ.135<sup>45)</sup>では、検査装置により適切に定期的な線量調査を行うこと、新しい装置に関するプロトコールは、患者の検査に使用される前に評価し、導入 1 年以内かつ検査方法が確立された時点で再評価することを定めている。求めるのは最高の画質ではなく各々の診断に必要な十分な画質であり、DRL を活用する目的は、単なる線量低減ではなく最適化である。必要な診断情報が得られなければ、かえって無駄な被ばくとなるため撮影条件を変更した際には、線量の変化だけでなく、画質や診断能が担保されていることの確認が肝要である。

ICRP Publ.135<sup>45)</sup>では、技術的進歩や臨床的要求の変化に対応するため DRL を用いた最適化を推進するためには少なくとも 3~5 年ごとの DRL 改定を推奨している。J-RIME の DRL ワーキンググループは初めての DRL 公表から 5 年を経た 2020 年に、DRLs 2020 を制定して

いる<sup>49,50)</sup>。

DRL の評価において用いられている線量は装置により容易に測定可能な線量であり、実効線量や吸収線量、等価線量などは用いられていない。

### 医療被ばく低減施設認定

公益社団法人日本診療放射線技師会は、平成 30 年 10 月に、国民に安全で安心できる放射線診療を提供するために医療被ばく低減施設の認定に関する規定を制定した。認定施設とは診療放射線技師の責務として安全で安心できる放射線診療を提供するために、放射線量管理と防護の最適化を実践し、書面審査と訪問審査により審査基準を満たした施設をいい、2020 年 6 月までに 128 施設が認定されている。

### 公益社団法人日本診療放射線技師会検査説明分科会の取り組み

平成 22 年 4 月 30 日の厚生労働省医政局長通知『医療スタッフの協働・連携によるチーム医療の推進について』（医政発 0430 第 1 号）<sup>51)</sup>を受け発足した公益社団法人日本診療放射線技師会検査説明分科会は、放射線検査の医療被ばくの説明をするための『放射線検査説明に関するガイドライン』<sup>52)</sup>を独自にまとめ、想定されるパターンから被ばく説明のフローチャートを作成し、検査説明において必要なスキル、および検査説明シミュレーションの行い方を示しているほか、被ばく相談に特化した放射線被ばく相談員の認定資格を定めている。

### **D) コミュニケーションツールとしての実効線量の活用の推奨**

正当化された放射線診療が防護の最適化を施した状況下において行われる際、医療被ばくを提供する者と受ける患者との間の情報共有において、被ばく線量と被ばくの影響についての説明が必要である。医療放射線の被ばく線量についてのリスクコミュニケーションに際しては、個々の患者の検査に対する被ばく線量を説明するものではなく、身の回りの放射線の被ばくとともに ICRP Publ.147 で示された医療診断手技における被ばくのリスク<sup>6)</sup>（表 7: 前述）を示し、当該放射線診療を選択する理由を明示することが望ましいと思われる。このような説明時、あるいは、状況に応じて詳細な説明をすることが求められる被ばくについて、防護線量の

活用を含めた推奨される項目と説明を前述表 8 の内容も含めて具体的に提案する。下記のすべてを説明する必要はないが、被ばくに対する不安や懸念を訴える患者への説明や、小児の検査に際しては各項目の深層まで順を追った説明が求められる。

### <患者と医療者の間のリスクコミュニケーションに必要となる事項>

#### 1. 放射線影響について

##### a. 組織反応

- i. 特定の組織や臓器に高線量の照射がある場合に生じる影響
- ii. しきい値以下では生じない。しきい値を超えると線量に応じて重篤化
- iii. 放射線治療においては不可避であるが、放射線診断においては、心臓カテーテル検査や IVR 検査における紅斑などが生じる可能性がある以外は通常危惧されるものではない

##### b. 確率的影響

- i. しきい値のない影響で、被ばく線量が多いと影響が現れる確率が上がる
- ii. 被ばくした本人のがんの発生と、子孫における遺伝的影響がある
- iii. がんの発症の原因はがん以外にも多数存在し、被ばくの影響か否かについては判断できない
- iv. 原爆被爆生存者のデータにより、被ばく線量が 100mSv 以下の場合には、がん発症の確率を上げると判断できる証拠がない
- v. 放射線診療で用いるような低線量域においては、iv で示したように、がん発症への寄与については明らかではないが、放射線防護の目的上、単純で合理的な仮定として LNT モデルを採用する

#### 2. 実効線量について

##### a. 実効線量

- i. 確率的影響を制限するための防護量として定められている
- ii. 検査毎の線量、個人の被ばく線量として、測定できる値ではない
- iii. 個人のリスクを示す値ではない
- iv. 患者に対する検査の正当化、診断技術の選択、防護の最適化に用いる
- v. 放射性同位元素内用療法の際の介護者の防護のために用いる

- b. 実効線量の不確実性
  - i. 測定できる値ではない
  - ii. 体内の各臓器や組織の線量の計算には人体モデルを用いているので、被ばくした本人の値ではない
  - iii. 組織ごとの線量と、確率的影響のリスクの大きさはデトリメントと呼ばれる健康上の害の期待値を数字として定量化したもので評価しているが、デトリメントの値は、疫学的なデータを用いており、新たな知見に基づき更新が加えられる
  - iv. がん発症のリスクには他の背景因子も影響するため、放射線被ばくに伴うリスクの大きさは、性別や年齢、被ばく時の年齢、人種などにより異なるが、異なる複数要素を含んだ平均的な値でリスクが推定されている
- c. Sv(シーベルト)
  - i. 実効線量と等価線量はいずれも Sv で表されているが、全く異なる概念である
  - ii. 実効線量は、全身の確率的影響の発生を制限するための防護線量である
  - iii. 臓器の等価線量(Sv)は実効線量の計算の過程の中間的な量として用いるが、組織反応を防止するための制限に使うのは吸収線量(Gy)である

### 3. 放射線検査による被ばく線量の目安

- a. 放射線診療による被ばくとそれ以外の原因による被ばく線量の目安  
表 9 に主たる自然放射線被ばく線量と放射線診療による被ばく線量を示す
- b. 放射線検査毎のリスク分類(表 7: 前述)  
個々の個人の検査についての正確な実効線量は測定し得ず、直接的なリスクを算出することはできないが、それぞれの医療被ばくの線量の程度に基づき、リスクのレベルを分類し、被ばくの正当化の判断に用いる

### 4. 医療被ばくの線量制限について

- a. 医療被ばくは受ける人の健康につながる便益のための意図的被ばくである
- b. 被ばくを制限することによって医療を受けるに際しての不利益が生じることは避けなければならないため、線量限度は設定されない
- c. 放射線診断の診断行為に関しては DRL が設定されており、それぞれの医療機関において、被ばく低減に努めながら、診断のために必要な情報量を低下させない画像を提供できるよう、放射線の線量を最適化する管理を行っている
- d. 公平で実行可能な防護システムを確立するためには、不確実要素を多く含む組織加重係数を用いた実効線量を考慮することは適切であると ICRP は考えている

- e. 小児においては特に被ばくにおける確率的影響のリスクが成人と比べて大きいため、被ばくの正当化、最適化は特に慎重に考えるべきである

表 9. 線量レベル表現を当てはめた医療被ばくと自然放射線被ばく・制限線量の比較

実効線量 (mSv)	線量レベル表現とその根拠	医療被ばくの例	自然放射線被ばくの例
<0.1	Negligible (無視できる) by LNT モデル	レ線: 胸部、大腿骨、肩、四肢、頸部、歯科撮影 <sup>99m</sup> Tc 標識センチネルリンパ節撮像	
0.1-1	Minimal (極小) by LNT モデル	レ線: 脊椎、腹部、骨盤、頭部 <sup>99m</sup> Tc 標識肺換気、腎イメージング	年間の宇宙線被ばく 0.3mSv 年間の大地放射線 0.33mSv 年間の空気中のラドン・トロン 0.47mSv
1-10	Very low (非常に低い) by LNT モデル	バリウム造影(経口、注腸) CT: 頭部、胸部、腹部、骨盤、心アングイオ <sup>99m</sup> Tc 標識心筋イメージング、骨シンチ、 <sup>18</sup> F、 <sup>123</sup> I、 <sup>111</sup> In 標識イメージング	東京-ニューヨーク間航空機旅行往復 0.08~0.11mSv (1 往復) 国際宇宙ステーション内 0.5-1mSv/日 程度 食物からの年間被ばく 0.99mSv 1 人当たりの年間自然放射線平均 日本(2.1mSv) 世界(2.4mSv)
10-100	Low (低い) by LNT モデル・疫学データ	CT: 単純+造影検査、IVR <sup>67</sup> Ga シンチ、 <sup>201</sup> Tl 心筋イメージング 血管内動脈瘤修復術、血管形成術など	高自然放射線地域の大地からの年間線量: ガラパリ(ブラジル)、ラムサール(イラン)、ケララ(インド)等
数 100	Moderate (中等度) by 疫学データ	多重処置やフォローアップ検査	

出典: ICRP Publ.147<sup>6)</sup>、環境省ホームページ: 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 3 年度版)<sup>53)</sup>、(公財)原子力安全研究協会『生活環境放射線』<sup>54)</sup>などを参考に作成

## 参考資料

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Vol. I: Sources, effects, and risks of ionizing radiation. Annex A: evaluation of medical exposure to ionizing radiation. 2022
2. OECD health statistics 2020. <https://www.oecd.org/health/> (Accessed Feb 1, 2023)
3. 国際放射線防護委員会勧告(1958年9月採択(日本語訳) 社団法人日本放射性同位元素協会. 1960
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Vol.III scientific annex C: Biological mechanisms relevant for the inference of cancer risks from low-dose and low-dose-rate radiation.
5. 医療法施行規則の一部を改正する省令 厚生労働省令第二十一号 (平成31年3月11日)
6. ICRP; Use of dose quantities in radiological protection, ICRP publication 147, Ann. ICRP, 50 (1), 2021
7. 放射線医学の歴史>放射線障害・防護>初期の放射線障害:慶應義塾大学医学部放射線科学教室 ホームページ <http://radiology-history.online/history-protection1.html> (2023年1月10日 access)
8. ICRP; 1950 International Recommendations on Radiological Protection at the Sixth International Congress of Radiology, London, 1950. Br. J. Radiol. 24, 46-53.1950.
9. ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, Ann. ICRP,1 (3), 1977
10. ICRP; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP,21 (1-3), 1991
11. ICRP; The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP,37 (2-4), 2007
12. ICRP; ICRP statement on tissue reactions/ early and late effects of radiation in normal tissues and organs-Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118, Ann ICRP 41 (1/2), 2012
13. ICRP; Low-dose extrapolation of radiation related cancer risk, ICRP Publication 99, Ann ICRP 35(4), 2005.
14. NCRP; Evaluation of the linear-nonthreshold dose-response model for ionizing radiation. NCRP Report No. 136, 2001



15. 浜田信行、他.NCRP Commentary No27.『最近の疫学研究の直線しきい線量なしモデルと放射線防護への示唆』の概要. Jpn J.Health Phys. 53(2):47-64、2018
16. ICRP; Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 9, Pergamon Press, Oxford1966
17. ICRP; Radiological Protection in medicine, ICRP Publication 105, Ann. ICRP,37 (6), 2007
18. ICRP; Radiological protection and safety in medicine. ICRP publication 73, Ann. ICRP 26(2),1996
19. ICRP supporting guidance 2; Radiation and your patient: A guide for medical practitioners. Ann. ICRP 31 (4), 2001
20. ICRP; 1954 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Br. J. Radiol. Suppl. 6.1955
21. ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 6, Pergamon Press, Oxford, 1964
22. ICRP; Problems involved in developing an index of harm, ICRP publication 27, Ann ICRP 1 (4), 1977
23. Preston, DL, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors. Radiat Res. 168: 1-64, 2007.
24. Brenner AV, et al. Incidence of breast cancer in the life span study of atomic bomb survivors: 1958-2009, Radiat Res., 190, 433-444, 2018
25. Sugiyama H, et al. Mortality among individuals exposed to atomic bomb radiation in utero: 1950-2012, Eur J Epidemiol., 36 (4), 415-428, 2021
26. 第2章 放射線による被ばく 2.3 放射線の単位, 環境省ホームページ  
<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h30kisoshiryo/h30kiso-02-03-07.html> (2023年1月10日 access)
27. ICRP2007 勧告の国内制度等への取入れの進め方について(案) 平成30年3月2日 第140回放射線審議会総会(140-2号)
28. 今中哲二. 年1ミリシーベルト基準の由来と低線量放射被曝のリスク.学術の動向.25(3):52-59,2020 doi:org/10.5363/tits.25.3\_52
29. 甲斐倫明. 実効線量に関する最新の ICRP 勧告:ICRP Publication 147 の解説. Jpn. J health Phys 56: 133-144, 2021. Doi:10.5453/jhps.56.133
30. Wall, B.F., et al. 2011. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a function of the age and sex of patient. HPA Report HPA-CRCE-028.Health Protection Agency,

- Chiltern.2011
31. Martin CJ. Effective dose: how should it be applied to medical exposures? *Br J Radiol.* 2007 Aug;80(956):639-47. doi: 10.1259/bjr/25922439.
  32. Martin CJ, Sutton DG. *Practical radiation protection in healthcare*, second ed. Oxford University Press, Oxford. 2014.
  33. Eisenberg MJ, et al. Cancer risk related to low-dose ionizing radiation from cardiac imaging in patients after acute myocardial infarction. *Can Med Ass J* 183(4) 430-436, 2011
  34. Pearce MS, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet.* 380(9840):499-505, 2012. doi: 10.1016/S0140-6736(12)60815-0. Epub 2012 Jun 7.
  35. Richardson DB, et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ* 2015; 351 doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
  36. Leuraud K, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *Lancet Haematol.* 2015 Jul;2(7):e276-81. doi: 10.1016/S2352-3026(15)00094-0.
  37. Nikkilä A, et al. Radiation exposure from computerized tomography and risk of childhood leukemia: Finnish register-based case-control study of childhood leukemia (FRECCLE). *Haematologica.* 103(11):1873-1880.2018. doi: 10.3324/haematol.2018.187716.
  38. ICRP; Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures outside the Imaging Department. ICRP publication 117, *Ann ICRP* 40(6), 2010
  39. ICRP; Optimisation of radiological protection in digital radiology techniques for medical imaging. ICRP publication XXX
  40. 診療用放射線の安全利用のための指針に関する参考資料. 日本医学放射線学会. 2019年11月改訂
  41. 厚生労働省医政局地域医療計画課長. 診療用放射線の安全利用のための指針策定に関するガイドラインについて〔別添〕診療用放射線の安全利用のための指針策定に関するガイドライン(医政地発 1003 第5号). 令和元年10月3日, 2019
  42. 診療用放射線の安全利用のための指針モデル ver 2.0. 日本医師会.
  43. ○○病院における診療用放射線の安全利用のための指針(案). 公益社団法人日本診療放射線技師会. 2020年11月22日版

44. 核医学分野における診療用放射線の安全利用のための指針策定のガイドライン(第一版). 一般社団法人 日本核医学会, 特定非営利活動法人 日本核医学技術学会, 公益社団法人 日本放射線技術学会. 2020年3月
45. ICRP, Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. ICRP Publication 135. Ann. ICRP 46 (1), 2017.
46. Council Directive 97/43/Euratom of 30 June 1997 on health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure, and repealing Directive 84/466/Euratom
47. 医療被ばく研究情報ネットワーク. 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定. <http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLhoukokusyo.pdf> (2023年1月10日 access)
48. 診断参考レベル運用マニュアル(2016年10月1日). [http://www.jsrtrps.umin.jp/pdf/drl\\_manual\\_20161001\\_ver3.pdf](http://www.jsrtrps.umin.jp/pdf/drl_manual_20161001_ver3.pdf) (2023年1月10日 access)
49. 日本の診断参考レベル(2020年版) National diagnostic reference levels in Japan (2020) - Japan DRLs 2020-. [http://www.radher.jp/J-RIME/report/JapanDRL2020\\_jp.pdf](http://www.radher.jp/J-RIME/report/JapanDRL2020_jp.pdf) (2023年1月10日 access)
50. 補遺:DRLの設定に用いたDRL量および関連用語. [http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRL2020\\_Addendum.pdf](http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRL2020_Addendum.pdf) (2023年1月10日 access)
51. 厚生労働省医政局長. 医療スタッフの協働・連携によるチーム医療の推進について(医政発0430第1号). 平成22年4月30日
52. 放射線検査説明に関するガイドライン(令和元年8月版). 公益社団法人日本診療放射線技師会 検査説明分科会. [https://www.jart.jp/docs/kensasetumei\\_R1\\_8.pdf](https://www.jart.jp/docs/kensasetumei_R1_8.pdf)
53. 環境省ホームページ. 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3年度版). <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r3kisoshiryo.html> (2023年1月10日 access)
54. (公財)原子力安全研究協会 『生活環境放射線』. <https://www.nsra.or.jp/> (2023年1月10日 access)