

放射線の健康影響と労働衛生

小橋 元

放射線医学総合研究所企画部研究倫理企画支援室

(平成 26 年 5 月 16 日受付)

要旨：社会の放射線被ばくの健康不安解消と適切な放射線被ばく管理・労働衛生管理の遂行には、放射線の健康リスクと防護対策に関する正しい理解が必要である。自然放射線も、医療で必要な放射線も、事故で発生した放射線も、人体への影響という点においては同じであり、積算して評価、防護することが必要である。放射線の生物作用の主な標的は DNA である。DNA は、1 日 1 細胞あたり 1 万から 100 万カ所が損傷を受けているが、その原因は、放射線以外にも、活性酸素、植物毒素、紫外線、たばこの煙中の炭化水素などの人造の変異原物質など様々である。放射線の主要な健康影響の一つである発がんリスクで言えば、100mSv の放射線が受動喫煙とほぼ同じであり、100～200mSv の放射線は野菜不足に相当する。そして、やせすぎ、肥満、運動不足は 100mSv の放射線被ばくの 3～5 倍、喫煙、大量飲酒習慣は 8～10 倍にあたる。このことは、生活習慣の改善が放射線防護と同様に、がん予防には非常に有効であることを示唆している。労働者の無用な放射線被ばくを防ぐには、作業環境管理、作業管理はもちろん、うがい、手洗い、シャワー、衣類の洗濯などの保清習慣の徹底、労働衛生教育を含めた労働衛生の 5 管理が重要である。これらは、まさしく基本的な生活習慣病対策、労働衛生対策に他ならない。今後の公衆衛生対策の更なる充実を願うとともに、震災・事故からの一刻も早い復興を祈ってやまない。

(日職災医誌, 62:277—282, 2014)

—キーワード—

放射線, 健康リスク, 放射線防護

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故から 3 年以上が経過した。社会の放射線被ばくの健康不安解消と適切な放射線被ばく管理・労働衛生管理には、放射線の健康リスクと防護対策に関する正しい理解が必要である。

2. 放射能と放射線の単位

放射能は、放射線を出す能力である。放射性物質で 1 秒間に 1 つの原子核が崩壊して放射線を出す場合、その放射能は 1 ベクレル (Bq) である。放射線が当たった物質がその放射線から吸収するエネルギーを吸収線量という。質量 1kg あたり 1 ジュール (J) のエネルギーを吸収する場合が 1 グレイ (Gy) である。放射線には、ヘリウム原子核の α 線、電子の β 線、電磁波の γ 線、中性子線など様々な種類がある。同じ 1Gy の放射線が当たっても、放射線の種類によって人体への影響が異なるため、吸収線量に放射線の種類ごとに定められた放射線加重係数を

かけて等価線量を算出する。さらに、放射線の感受性は臓器・組織ごとで異なるため、等価線量に臓器・組織ごとに定められた組織加重係数をかけて実効線量を算出する。等価線量、実効線量の単位にはともにシーベルト (Sv) が用いられる。実効線量は、放射線の人体への影響の比較や、がんや遺伝性影響などのリスク評価に用いられる。

3. 外部被ばく、内部被ばくと半減期

体外から放射線を受けることを外部被ばく、体内の放射線物質から被ばくすることを内部被ばくという。外部被ばく線量は、放射線に被ばくしたときのみの線量を表すが、内部被ばく線量は、その放射性物質が体内に入ってから、成人では 50 年間、小児では 70 歳までの年数に被ばくする積算線量で表し、これを預託線量という。すなわち、もしも大人の内部被ばく線量が 5mSv であれば、今後 50 年間で合計 5mSv を体内から受けることを推定している。

内部被ばくは、体内に取り込まれた放射性物質の種類

表1 原子力災害により環境中に放出される主な放射性物質の半減期と親和性臓器

	ヨウ素 131	セシウム 137	ストロンチウム 90	プルトニウム 239
放射線の種類	β, γ	β, γ	β	α, γ
物理学的半減期	8日	30年	29年	2万4千年
実効半減期	約7日	約100日	約20年	約50年
蓄積する器官・組織	甲状腺	全身・筋肉	骨	骨, 肝

半減期は成人の値で概数を表す

で、その半減期と臓器親和性が異なるために、人体への影響と対策が異なる。原子力災害により環境中に放出された主な放射性物質とその半減期、親和性臓器を表1に示した¹⁾²⁾。半減期には、放射性物質の放射能が半分になる時間を表す物理学的半減期と、排泄により体内に存在する放射線物質の量が半分になる時間を表す生物学的半減期があり、これらを統合した実効半減期が、実際の内部被ばく期間の指標となる(1/物理学的半減期+1/生物学的半減期=1/実効半減期)。臓器親和性とは、放射性物質の種類により蓄積する臓器や器官が異なることである。

ヨウ素 131 は、物理学的半減期が約8日で、体内に入ったうちの70%はすぐに尿から排泄されるが、残りの30%は甲状腺に取り込まれて約80日の生物学的半減期で残留するため、実効半減期は約7日となる。セシウム 137 は、物理学的半減期が30年であるが、全身の筋肉に分布し、生物学的半減期と実効半減期ともに約100日である¹⁾。一方、ストロンチウム 90 は約70%が全身に広がり約100日で排泄されるが、約30%は骨に移行して生物学的半減期は非常に長くなる。これらの生物学的半減期は成人の値であり、乳児や小児は代謝が早いため成人の値よりも短い²⁾。ストロンチウム 90 は、海水中に放出され、食物連鎖により濃縮される可能性がある。現在は規制値を超えた食品が出回る可能性は低いですが、引き続き海洋汚染のデータに注意し、集積の可能性がある大型魚の骨を摂らないことが重要である。プルトニウム 239 は肺、骨、肝臓に集積し、半減期が非常に長いために、白血病や骨腫瘍との関係が懸念される。しかし消化管で吸収されにくいいため、呼吸からの吸入を防ぐことが重要であるが、今回の放出量は微量であり、今のところは主要な防護対象物質とは考えづらい。

4. 日常生活で受ける放射線と ALARA の原則

私たちは日常、世界平均で年間約2.4mSvの放射線を受けます。その内訳は、宇宙から年間0.4mSv、大地から年間0.5mSv、ラドンから年間1.2mSv、食物から年間0.3mSv程度です。土壌に含まれる自然性の放射性物質の量の違いにより、自然放射線量には地域差があります。日本における自然放射線量は世界平均よりも低く、平均で年間約2.2mSvですが、世界には最大で年間260mSvのイランのラムサルのように、日本の10倍以

上の自然放射線レベルの地域が実在する。また、カリウム 40 や炭素 14 などの放射性同位元素は天然に一定の割合で存在し、食物にも含まれる。そのため、体重60kgの人体には、常に約4,000Bqのカリウム 40、約2,500Bqの炭素 14 が存在することになり、それによる内部被ばくは避けられない。しかし、それらを合わせても、実効線量は年間0.3mSv程度である。

医療における放射線検査の被ばく線量は、胸部撮影で約0.06mSv、上部消化管撮影で約3mSv、CT撮影で約5~30mSvと考えられている³⁾。医療放射線は、被ばくを上回るメリットを条件に用いられるが、線量を低減する努力も進められている。自然放射線も、医療に必要な放射線も、事故で発生した放射線も、人体への影響という点においては同じであるため、積算して評価、防護することが必要である。

「人が受ける放射線量は、合理的に達成できる限り減らさねばならない(As Low As Reasonably Achievable: ALARA)」という考え方は、国際放射線防護委員会(ICRP)を中心に世界的に確立されている。特に子供の場合、避けられる放射線は出来るだけ避けることが望ましい。線量限度は安全と危険の境界線ではなく、影響が心配されるレベルよりもはるかに低い値に設定されている。公衆の線量限度は年間1mSvと定められている。ICRPは今回の災害時に、緊急事態期には年間20~100mSv、災害収束後の復旧期には年間1~20mSvと、それぞれ別の放射線防護の指標を設定し、段階的に年間1mSvまで引き下げるための対策を講じるように勧告した⁴⁾。一方、緊急措置および人命救助に従事する者については、状況により年間500~1,000mSvを制限の目安とする場合もある⁵⁾。放射線業務従事者の線量限度は、放射線障害防止法、医療法施行規則等により規定されているが(表2)、2011年3月15日から12月16日まで(一部は2012年4月30日まで)の間、福島第一原子力発電所での作業員に限定して実効線量が250mSvまで引き上げられた。また、今回の事故で放出された放射性物質汚染廃棄物等の処分などに従事する労働者のために、電離則が改正されて規制内容が拡大された⁶⁾。基本はあくまでも労働衛生の5管理(作業環境管理、作業管理、健康管理、労働衛生教育、総括管理)である⁷⁾。

表2 放射線業務従事者の線量限度

	通常作業		緊急作業	
	実効線量	等価線量	実効線量	等価線量
男性・妊娠する可能性がないと診断された女性	100mSv/5年間 かつ50mSv/1年間	150mSv/1年間 (眼の水晶体) 500mSv/1年間 (皮膚)	100mSv/1年間	300mSv/1年間 (眼の水晶体) 1,000mSv/1年間 (皮膚)
女性(妊娠する可能性がないと診断された場合を除く)	5mSv/3カ月		—	—
妊娠中の女性	内部被ばく1mSv/妊娠中	2mSv/妊娠中 (腹部表面)	—	—

表3 全身被ばく後の臓器・組織障害の推定しきい線量

影響	臓器/組織	影響発現時間	しきい値 (Gy)
罹病			1% 発生率
一時的不妊	精巣	3～9週間	～0.1
永久不妊	精巣	3週間	～6
	卵巣	<1週間	～3
造血機能低下	骨髄	3～7日	～0.5
皮膚の発赤	皮膚 (広い部位)	1～4週間	3～6
皮膚の火傷	皮膚 (広い部位)	2～3週間	5～10
一時的脱毛	皮膚	2～3週間	～4
死亡			
白内障(視力障害)	眼	数年	～15
骨髄症候群	骨髄 (治療しない場合)	30～60日	～1
	(手厚い治療をした場合)	30～60日	2～3
胃腸管症候群	小腸 (治療しない場合)	6～9日	～6
	(手厚い治療をした場合)	6～9日	>6
間質性肺炎	肺	1～7か月	6

国際放射線防護委員会 2007年勧告⁹⁾を引用改変

5. 放射線の人体への影響

放射線の生物作用の主な標的はDNAである。DNAは、1日1細胞あたり1万から100万カ所が損傷を受けている⁸⁾。その原因は、放射線以外にも、活性酸素、植物毒素、紫外線、たばこの煙中の炭化水素などの人造の変異原物質など様々である。DNA損傷の大部分は修復酵素により短時間で修復されるが、修復されずに固定したり、修復エラーが起こることもある。

放射線によるDNA損傷が致死的な場合は細胞死を起こす。この場合、ある線量(しきい線量)を超えるまでは、臓器や組織としての機能が保たれて検査異常や身体症状が現れない。これを確定的影響という。

一方、DNA損傷が非致死的な場合は、DNA情報の変化が突然変異として残り、その細胞が分裂して増殖する。それが体細胞の場合は、長い潜伏期の後にがんが発生する可能性があり、生殖細胞の場合は、遺伝性影響として子孫に伝わる可能性がある。がんや遺伝性影響は、しきい線量を持たず、放射線の線量増加とともに発生頻度が増加すると仮定されており、これを確率的影響という。

確定的影響には、脱毛、血球減少、不妊、胎児影響などが含まれる。確定的影響の臓器・組織障害の推定しき

い線量を表3⁹⁾に示した。吸収線量100mGy以下の放射線による影響は、放射線への感受性が最も高い胎児においても観察されていない。一方、急性被ばくで一度に2Gy相当以上の放射線を受けた場合は、治療を必要とする急性障害が発生する可能性がある。

確率的影響にはがんと遺伝性影響がある。原爆による放射線誘発がんの発生をみると、白血病は被ばく後2年から始まり、5～6年後にピークを迎える。一方、その他のがんは10年後から始まり、時間の経過とともに罹患率が増加する¹⁰⁾。ICRPでは、放射線の実効線量が100mSvを超えると、生涯がん死亡リスクが100mSvあたり0.5%増加するとして被ばく管理することを勧告している。すなわち、新生児から高齢者まで1,000人が100mSvに被ばくし、その後の一生涯でのがんによる死亡が、被ばくしない場合に比べて5人増加すると仮定している。

被ばく時の年齢が10歳未満の小児においては、固形がんの相対リスクは0.5～1Gyで男性1.10、女性2.87、1～4Gyで男性3.80、女性4.46であった¹⁰⁾。ICRPでは、胎児期と小児初期における放射線の発がんリスクは、多めに見積もって、大人の3倍程度と考えている¹¹⁾。

確率的影響にはしきい線量はないと仮定されているが、従来の疫学調査では、全身100mSvの被ばくでは有

表4 全身の固形がんの罹患における放射線と生活習慣の相対リスク

相対リスク	被ばく放射線量	生活習慣
1.50 ~ 2.49	1000-2000mSv (1.8)	喫煙者 (1.6) 大量飲酒 (450g 以上*/週) (1.6)
1.30 ~ 1.49	500-1000mSv (1.4)	大量飲酒 (300-449g*/週) (1.4)
1.10 ~ 1.29	200-500mSv (1.19)	やせ (BMI<19) (1.29) 肥満 (BMI≥30) (1.22) 運動不足 (1.15-1.19) 高塩分食品の摂取 (1.11-1.15)
1.01 ~ 1.09	100-200mSv (1.08)	野菜不足 (1.06) 受動喫煙〈非喫煙女性〉(1.02-1.03)
検出不可能	100mSv 未満	

文献 17) より引用改変

相対リスク：要因を持つ群の罹患率を、要因を持たない群の罹患率で割ることにより求める。要因を持つことにより何倍疾病に罹患しやすいかを表す。

*エタノール換算量

意な発がんリスクの増加は認められていない。世界の自然放射線レベルが高い地域でも、今のところ、がんの死亡率や発生率の有意な増加は報告されていない。被ばく線量の合計が同じでも、高線量の1回被ばくに比べて、低線量を複数回に分割し、時間をかけて被ばくした方が影響は小さい¹²⁾ということも関係する可能性がある。一方、全身100mSvの被ばくで発がんリスクの増加がないとも完全には言い切れないため、放射線防護の観点から、直線しきい値なしモデル(LNTモデル)を仮定している。これは、あくまでも安全の側に立った仮定のモデルであるために、100mSv以下の低線量被ばくにおけるリスク計算に、数値をそのまま使用することは適切ではない。

遺伝的影響のリスク(第2世代まで)は、動物実験の結果から、1Gyあたり約0.2%といわれる¹³⁾が、人では観察されていない。原爆被爆者2世の追跡調査でも認められていない¹⁰⁾。

6. 被ばく線量の評価

原子力災害の後、2年以上が経過した現在は、地表に堆積した放射性物質からの外部被ばくを防ぐことが重要である。災害現場から距離が離れていても、地形と風向きにより、線量の高い地域(ホットスポット)が存在するため、空間線量率モニタリングの値に注意する必要がある。セシウム137の約80~90%は地表から深さ1cm未満に存在するため、表土と下層土を入れ替えるだけでも放射線量を約85%低減することができる¹⁴⁾。

福島県住民の外部被ばく線量に関しては、福島県県民健康管理調査において、対象者の行動調査により震災後7月11日までの4カ月間の居場所情報を収集し、文部科学省緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information: SPEEDI)で公表された各地域の空間線量率に基づいて構築した「外部被ばく線量評価システ

ム」に当てはめて推定した。その結果、2013年12月31日現在、放射線業務従事経験者を除く460,409人においては、県北・県中・相双地区(外部被ばく線量が高いと考えられる浪江町、飯館村、川俣町山木屋地区を含む)の90%以上が2mSv未満であり、「これにより放射線による健康被害は考えにくい」状況と考えられている¹⁵⁾。

飲料水や食品からの内部被ばく線量は、放射能濃度(Bq/kg)×摂取量(kg)×実効線量係数で計算される。厚生労働省の薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会放射性物質対策部会が、実測値に基づいて推計を行った結果、一年間に摂取する食品からの預託実効線量は、全年齢平均0.111mSv、最も値が大きい小児において0.118mSvであった¹⁶⁾。食品による内部被ばくの影響は、外部被ばくの影響に比べて小さいと推定される。

7. 放射線防護と発がん予防

放射線の生物作用には、放射線がDNAを直接損傷させる直接作用と、放射線により水分子にフリーラジカル(活性酸素)が形成され、そのフリーラジカルがDNA損傷を引き起こす間接作用がある。γ線やβ線においては間接作用が主である。したがって、ビタミンCをはじめとする抗酸化物質などの摂取は、放射線障害を軽減させることに役立つ可能性がある。

国立がん研究センターのまとめによると、発がんリスクは100mSvの放射線が受動喫煙とほぼ同じであり、100~200mSvの放射線は野菜不足に相当する。そして、やせすぎ、肥満、運動不足は100mSvの放射線被ばくの3~5倍、喫煙、大量飲酒習慣は8~10倍にあたる(表4)¹⁷⁾。この結果は、放射線防護と同様に、生活習慣の改善が発がん予防には非常に有効であることを示している。

8. おわりに

労働者の無用な放射線被ばくを防ぐには、作業環境管

理、作業管理はもちろん、うがい、手洗い、シャワー、衣類の洗濯などの保清習慣の徹底、労働衛生教育を含めた労働衛生の5管理が重要である。また、放射線による発がんを予防するためには、ビタミン、ミネラルに配慮したバランスのよい食生活、禁煙、適度な運動、ストレス軽減対策などが重要である。これらは、まさしく基本的な生活習慣病対策、労働衛生対策に他ならない。今後の公衆衛生対策の更なる充実を願うとともに、震災・事故からの一刻も早い復興を祈ってやまない。

文 献

- 1) ICRP Publication 67. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 1993, pp 39—43, pp 96—120.
- 2) ICRP Publication 78. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 1997, pp 74—91.
- 3) 赤羽恵一：医療被ばくの現状. INNERVISION 25 : 6—9, 2010.
- 4) Fukushima Nuclear Power Plant Accident, [online] 21 March, 2011, ICRP ref: 4847-5603-4313, [retrieved on 2011-10-01], Received from the Internet: <URL: <http://www.scj.go.jp/ja/info/jishin/pdf/t-110405-3e.pdf>>.
- 5) 放射線から人を守る国際基準～国際放射線委員会 (ICRP)の防護体系～. 東日本大震災への対応～首相官邸災害対策ページ～. [平成 23 年 10 月 1 日検索], インターネット<URL : <http://www.kantei.go.jp/saigai/>>.
- 6) 事故由来廃棄物等処分業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン. [平成 26 年 4 月 5 日検索], インターネット<URL : http://www.rinsaibou.or.jp/cont04/items138/pdf/houshasen_guideline.pdf>.
- 7) 小橋 元：労働衛生管理の基本, 図説 国民衛生の動向 2013/2014. 大井田隆編. 厚生統計協会, 2013, pp 112.
- 8) Lodish H, Berk A, Matsudaira P, et al: Molecular Cell Biology. 5th ed. New York, W. H. Freeman, 2004, pp 963.
- 9) ICRP Publication 103. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 2008, pp 168.
- 10) Preston DL, Ron E, Tokuoka S, et al: Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. Radiat Res 168: 1—64, 2007.
- 11) ICRP Publication 103. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 2008, pp 23.
- 12) 島田義也：低線量被ばくの影響に関する知見. INNERVISION 25 : 10—13, 2010.
- 13) ICRP Publication 103. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 2008, pp 74—79.
- 14) 保高徹生, 三浦俊彦, 大山 将, 他：【速報】放射性物質の土壌中の深度方向の分布および土壌洗浄法の適用性試験結果について. [平成 26 年 7 月 5 日検索], インターネット<<https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/Aist-Risk/110927.html>>.
- 15) 第 14 回福島県「県民健康管理調査」検討委員会 資料 1. [平成 26 年 5 月 12 日検索], インターネット<<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/50301.pdf>>.
- 16) 作業グループ (線量計算等)における検討経過について—食品由来の暫定的な線量推計(概要)—. 厚生労働省薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会放射性物質対策部会資料. [平成 23 年 10 月 1 日検索], インターネット<URL : <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001ip01-att/2r9852000001ipae.pdf>>.
- 17) がんのリスク—放射線, ダイオキシンと生活習慣 (JPHC Study)—. 国立がん研究センターホームページ [平成 23 年 10 月 1 日検索], インターネット<URL : http://www.ncc.go.jp/jp/shinsai/pdf/cancer_risk.pdf>.

別刷請求先 〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4—9—1
独立行政法人放射線医学総合研究所企画部研究
倫理企画支援室
小橋 元

Reprint request:

Gen Kobashi
Head, Research Governance and Human Research Protection
Office, Department of Planning and Management, National
Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Anagawa, Inage-ku,
Chiba, 263-8555, Japan

Health Effects of Radiation Exposure and Protection from Radiation through an Industrial Health Management Angle

Gen Kobashi

Research Governance and Human Research Protection Office, Department of Planning and Management,
National Institute of Radiological Sciences

This paper outlines fundamental knowledge, health risks, and protection related to radiation in order to carry out appropriate industrial health management to reduce great public anxiety caused by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident developed by the Tohoku earthquake and tsunami of March 11, 2011. Radiation generally causes damages to DNA such as generation of reactive oxygen species in cells, which are also created by exposures of various kinds of physical and chemical factors. This suggests that as well as applying 5 basic measures for industrial health management in the work place, common public health measures and disease prevention, such as keeping good sanitary conditions, healthy lifestyles, home discipline, social supports, efficient health education, etc. are important for us to prevent radiation-related cancer manifestation. Improvement of early detection and treatment for cancer is also important to eliminate the public anxiety.

(JJOMT, 62: 277—282, 2014)