



放射線

影響と線源

放射線とは何か？
放射線は私たちに何をするのか？
放射線はどこから来るのか？

>1,000ミリシーベルト

放射線治療で用いられる線量

100ミリシーベルト

宇宙飛行士が受ける線量
(4ヶ月間)

10ミリシーベルト

腹部CTスキャン

1ミリシーベルト

原子力産業の作業者が受ける線量
(1年間)

0.1ミリシーベルト

胸部X線または航空機への搭乗
(20時間)

0.01ミリシーベルト

歯科X線

0.001ミリシーベルト

ブラジルナッツ (30グラム)



放射線

影響と線源

放射線とは何か？
放射線は私たちに何をするのか？
放射線はどこから来るのか？

国連環境計画

免責事項

本書は、主に原子放射線の影響に関する国連科学委員会の成果に基づいている。本委員会は、国連総会の下部組織であり、国連環境計画が本委員会の事務局を提供している。本書は、必ずしも本科学委員会または国連環境計画としての見解を示すものではない。

本書において用いられた名称および資料の表現は、いかなる国、領土、市や地域、あるいはその主権の法的状態に関し、または国境や境界の画定に関し、国連環境計画としての何らかの意見の表明を意味するものではない。

本書は、教育または非営利目的であれば、出典を明記することを条件に、著作権所有者からの特別な許可を得ることなく、また形式を問わず、一部を複製することが出来る。本書を出典として利用する場合には、その出版物 1 部を国連環境計画までお送りいただければ幸いである。

本書は、国連環境計画からの書面による事前の許可無しに、転売またはいかなる営利目的にも使用することは出来ない。

国連環境計画は、世界的にも、また自機関の活動においても環境に配慮した取り組みを推進している。本書の印刷には、100パーセント無塩素の再生紙を使用しており、国連環境計画の流通方針は二酸化炭素排出量の削減を目指すものである。

書籍名：放射線 影響と線源

ISBN: 978-92-807-3603-8

Job No: DEW/2039/NA

Copyright © United Nations Environment Programme, 2016

電子版



放射線

影響と線源

放射線とは何か？
放射線は私たちに何をするのか？
放射線はどこから来るのか？

国連環境計画

謝辞

本書は、主に、原子放射線の影響に関する国連科学委員会の成果および国連環境計画の出版物である『放射線: その線量、影響、リスク(Radiation: doses, effects, risks)』(Geoffrey Lean編、初版1985年、第二版1991年)に基づいている。

本冊子は英語を原著として発行された。量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・放射線防護情報統合センター（日本）の好意により翻訳協力が行われた。原著との相違があった場合には、原著が優先される。

専門的編集: Malcolm Crick, Ferid Shannoun

文書編集: Susan Cohen-Unger, Ayhan Evrensel

図表およびレイアウト: Alexandra Diesner-Kuepfer

さらに、下記の方々から本冊子に対して貴重な貢献およびコメントを頂いた。

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, Maria Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda, Anthony Wrixon.

序文

広島、長崎、スリーマイル島、チェルノブイリ、そして福島第一、核兵器の使用や原子力発電所の事故により、人々の放射線に対する恐怖心はこれらの名前と強く結びつくようになった。実のところ、人々はこれら以外の多くの線源から生じている放射線に、はるかに多く日常的に曝されている。これらの線源には、医療や工業で利用されるものだけでなく、大気や地球そのものも含まれている。

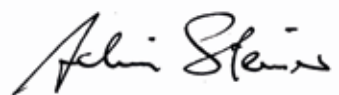


1955年の核実験をきっかけに、原子放射線の大气、水および食物への影響について社会的関心が高まった。この対応として、放射線被ばくのレベルと影響に関する情報を収集および評価するために、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)が国連総会により設置された。本委員会の最初の報告書は、大気圏核実験を禁止した1963年の「部分的核実験禁止条約」に関する交渉の科学的な根拠となった。それ以降も、本委員会は、チェルノブイリや福島第一原子力発電所での事故を含め、放射線被ばくに対する関心が高い内容について報告書を作成し続けてきた。本委員会は、科学界および政策立案者の双方に対して、非常に価値のある成果を常に提供している。

科学界では、放射線の線源と影響に関する情報が公表されてきたが、それらは専門的で、一般の人々が理解するには難しいものになりがちであった。こうした情報は、しばしば人々を混乱させることもあり、過去に生じた放射線に対する恐怖心や誤解が残っている。本書は、UNSCEARが有する最新の科学的情報 — 放射線の種類と線源、およびヒトと環境への影響 — の詳細を提供し、一般読者の理解を助けることを目指している。

現在、UNSCEAR事務局は、環境に配慮した政策と取り組みを実行する国々を支援する国連環境計画(UNEP)の下で運営されている。放射線と、それがこの地球上の生命に及ぼす影響について人々の理解を促すことは、UNEPの中核となる使命である。

本書に貢献されたすべての方々にお祝いの言葉を述べると共に、これらの重要な課題について過去60年間にわたり懸命に取り組んできたUNSCEARの全てのメンバーおよび代表団にも謝意を表したい。

A handwritten signature in black ink that reads "Achim Steiner". The signature is fluid and cursive, with the first name "Achim" and the last name "Steiner" clearly distinguishable.

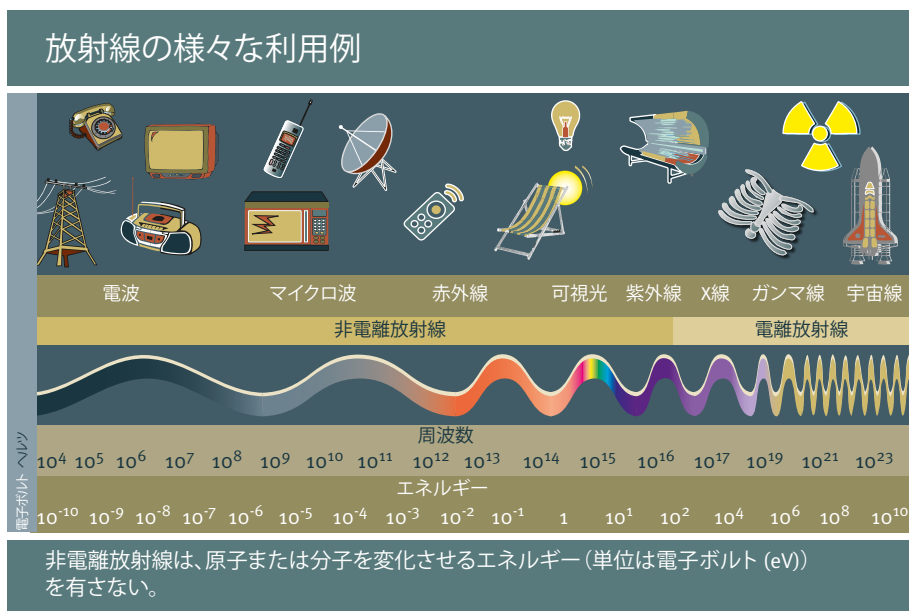
Achim Steiner
国連環境計画 事務局長
国際連合 事務次長

目次

緒言	1
1. 放射線とは何か？	3
1.1. 放射線の歴史	3
1.2. 放射線の基礎	4
放射性壊変と半減期	6
放射線の単位	7
1.3. 放射線の透過力	9
2. 放射線は私たちに何をするのか？	11
2.1. ヒトへの影響	13
早期健康影響	14
遅発性健康影響	15
子孫への影響	18
2.2. 動植物への影響	22
2.3. 放射線量と影響との関係	24
3. 放射線はどこから来るのか？	27
3.1. 自然放射線源	28
宇宙放射線源	28
大地放射線源	29
飲食物中の放射線源	32
3.2. 人工放射線源	32
医療利用	33
核兵器	37
原子炉	39
産業およびその他の利用	48
3.3. 公衆および作業者の平均的な放射線被ばく	54

緒言

本題に入る前に、電離放射線と非電離放射線を区別しておく必要がある。電離放射線には原子から電子を放出させるのに十分なエネルギーがあり、それによって原子を電荷を持つ状態にする。一方、電波、可視光線、紫外線などの非電離放射線にはそれだけのエネルギーがない。本書は、自然放射線源および人工放射線源からの放射線被ばくの影響について述べているが、本文中で用いられる放射線という言葉は電離放射線のみを指している。



今日、私たちは他の多くの有害薬品に関することよりも、放射線被ばくの線源と影響について知っており、科学界では常にその知見が更新・分析されている。多くの人々は放射線の原子力発電や医療での利用について知っているものの、産業、農業、建設、研究および他分野における放射線利用の多くについては、まだあまり知られていない。このテーマについて初めて読まれる方は、一般公衆に最大の被ばくをもたらしている放射線源が、必ずしも最も注目されているものではないことに驚かれるかもしれない。例えば、最大の被ばくは環境中に常に存在している自然放射線源によってもたらされるし、人工放射線源からの被ばくの原因は世界中の医療における放射線利用である。また、飛行機での旅行や、世界中の特定の地域において気密性の高い家に居住するような日常の生活が、放射線による被ばくを大幅に増加させる場合がある。

本書は、国連環境計画(UNEP)および原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)事務局によって、電離放射線による被ばくの線源、レベル、影響に対する人々の認識を高め、理解を深めることを目指している。UNSCEARは、27の国連加盟国から最前線の科学者を集結させ、放射線の被ばく、影響、リスクを世界規模で評価するために、1955年に国連総会によって設置された。ただし、UNSCEARは安全基準を制定したり、または勧告したりはしない。むしろ、国家機関やその他の機関が安全基準を制定したり勧告したりすることを可能とするための科学的情報を提供する。過去60年間にわたるUNSCEARの科学的評価が、本書を作成する上での主な情報源となっている。

1. 放射線とは何か？

放射線被ばくのレベル、影響、リスクについて述べるためには、最初に放射線科学の基礎について取り上げる必要がある。放射能とそれが生み出す放射線は、地球上に生命が出現するよりもはるか前から存在していた。実際、放射能と放射線は宇宙の誕生から宇宙空間に存在しており、まさに地球が形成された時点で放射性物質は地球の一部であった。しかし、人類が最初にこの基本的で普遍的な現象をようやく発見したのは、19世紀の最後の数年であり、私たちは未だに放射線を利用する新たな方法を学んでいるところである。

1.1. 放射線の歴史

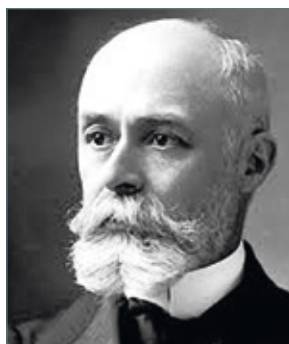
1895年、ドイツの物理学者であったヴィルヘルム・コンラート・レントゲンが、人間の身体を透視するために利用できる放射線を発見し、彼はこれをX線と呼んだ。この発見が放射線の医療利用の先駆けとなり、それ以来広がり続けている。レントゲンは、人類への並外れた貢献を認められ、1901年に物理学で最初のノーベル賞を受賞した。レントゲンによる発見から1年後、フランスの科学者であったアンリ・ベクレルは、ウランを含む鉱石のかげらとともに何枚かの感光板を引き出しにしまった。ベクレルは感光板を現像した際、驚くべきことに感光板が放射線の影響を受けていたことに気づいた。この現象は放射能と呼ばれるもので、エネルギーが原子から自然に放出される際に生じる。今日、放射能は、アンリ・ベクレルにちなんでベクレル(Bq)という単位を用いて測定されている。その後すぐに、若き化学者であったマリー・スクウォドフスカ・キュリーはさらなる研究を進め、初めて放射能という用語を作り出した。1898年、彼女とその夫であるピエール・キュリーは、ウランが放射線を放出した際、不思議なことに別の元素



ヴェルヘルム・コンラート・レントゲン
(1845～1923年)



マリー・キュリー
(1867～1934年)



アンリ・ベクレル
(1852～1908年)

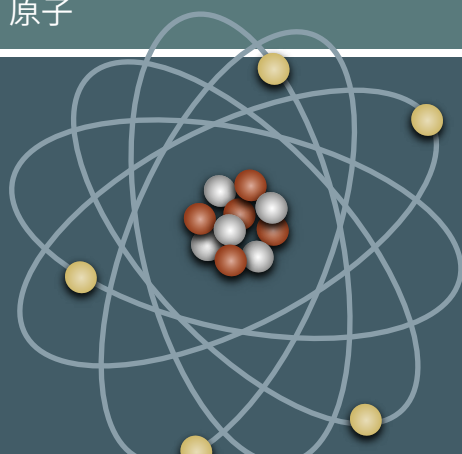
へと変化することを発見した。その元素の一つを彼女の祖国にちなんでポロニウムと呼び、もう一つの「光る」元素をラジウムと呼んだ。マリー・キュリーは、1903年にピエール・キュリー、アンリ・ベクレルと共同でノーベル物理学賞を受賞した。彼女は、1911年にも放射線化学における自身の発見によってノーベル賞を受賞し、二度のノーベル賞を受賞した最初の女性となった。

1.2. 放射線の基礎

科学者達が追い求めたものは、原子について、とりわけその構造を理解することであった。現在では、正の電荷を持つ小さな原子核の周りを、負の電荷を持つ電子の雲が囲んだものが原子であることが知られている。原子核の大きさは原子全体の10万分の1程度しかないが、密度が極めて高いため原子全体の質量の大半を占める。

原子核は、一般的に陽子および中性子という粒子が結合した集団である。陽子は正の電荷を持つが、中性子は電荷を持たない。化学元素は原子を構成する陽子の数によって決まる(例えば、ホウ素は5つの陽子を持つ原子であり、ウランは92個の陽子を持つ原子である)。陽子の数は同じで中性子の数が異なる元素のことを同位体と呼ぶ(例えば、ウラン235とウラン238では原子核内の中性子の数が3つ異なる)。通常、原子は全体として正の電荷も負の電荷も持たない。なぜなら、原子は正の電荷を持つ陽子と、負の電荷を持つ電子を、同じ個数だけ有しているからである。

原子



原子番号 5
元素記号 B
元素名 ホウ素

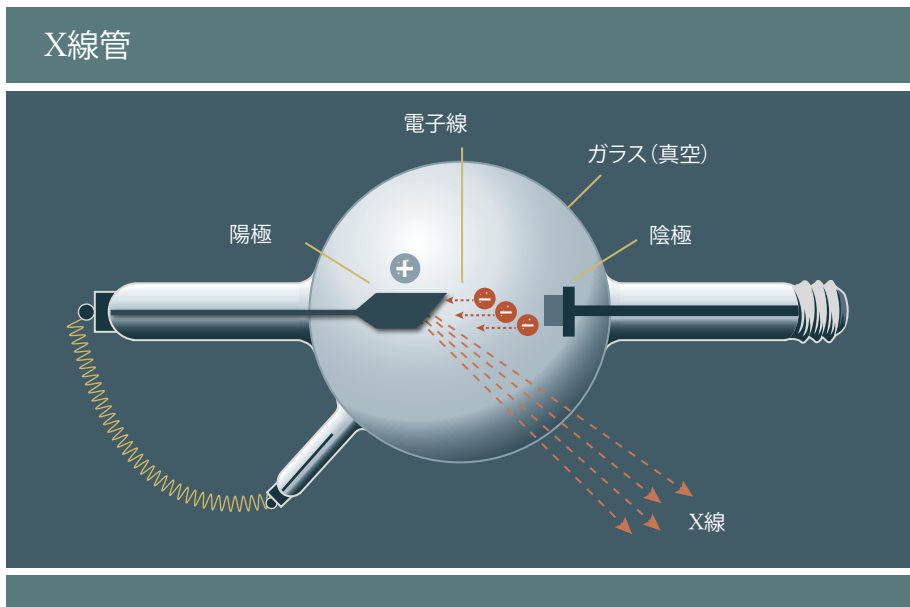
電子数
陽子数

電子 陽子 中性子

原子は、負の電荷を持つ電子雲に囲まれた非荷電の中性子の核と、正の電荷を持つ陽子から成っている。非荷電の原子では電子と陽子の数は同じで、元素の原子番号に相当する。

自然な状態で安定している原子もあれば、不安定な原子もある。それらの不安定な原子核を持つ原子は放射性核種として知られており、放射線の形でエネルギーを放出して自発的に変化する。このエネルギーは、他の原子と相互作用し、それらを電離することができる。電離とは、原子が電子を得たり失ったりすることによって、正または負の電荷を持つようになる過程のことである。電離放射線は、電子をその軌道からはじき出すのに十分なエネルギーを持っており、電子がはじき出された結果、イオンと呼ばれる帯電した原子が生じる。放射性核種から2つの陽子と2つの中性子が放出されることをアルファ壊変、電子が放出されることをベータ壊変という。多くの場合、不安定な核種は相当のエネルギーを有しており、粒子を放出するだけでは十分に安定しない。このような場合、核種から電磁波として急激にエネルギーが放出されるが、これはガンマ線と呼ばれる光子である。

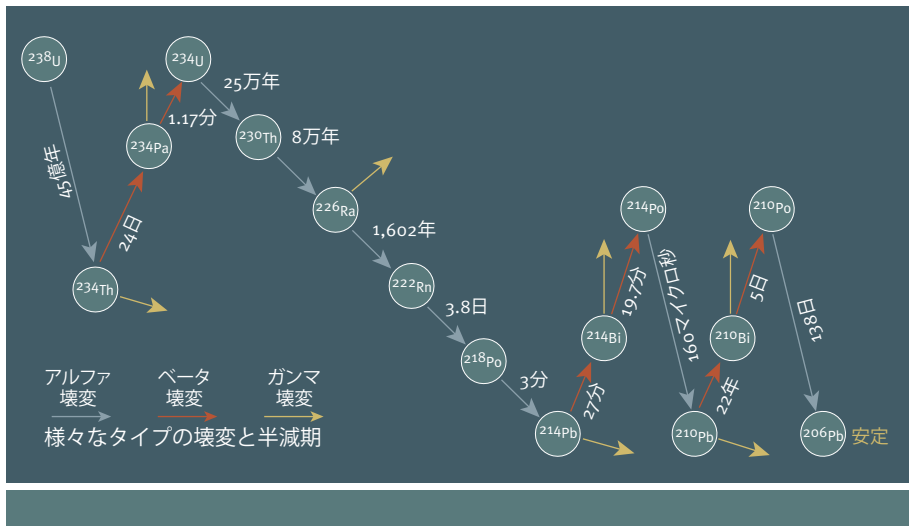
X線もガンマ線と同様に電磁放射線であるが、光子のエネルギーはガンマ線よりも低い。ガラス製の真空管内で、陰極から放出された電子ビームが陽極と呼ばれるターゲット物質に照射されると、様々なエネルギーを有するX線スペクトルが発生する。X線スペクトルは、陽極の材質と電子ビームの加速エネルギーに依存する。つまり、X線は、まさに必要な時に人工的に発生させることが可能である点で、産業および医療での利用に極めて有利である。



放射性壊変と半減期

すべての放射性核種は不安定だが、中でもより不安定なものがある。例えば、ウラン238の原子(92個の陽子と146個の中性子を持つ)の原子核の中の粒子は、かろうじて集結することが出来ている状態である。最終的には、2個の陽子と2個の中性子がアルファ粒子として原子を離れ、ウラン238はトリウム234(90個の陽子と144個の中性子を持つ)に変化する。しかし、トリウム234も不安定であり、異なる過程を経て変化する。トリウム234は、高エネルギーの電子をベータ粒子として放出するとともに中性子を陽子に変換することで、91個の陽子と143個の中性子を持つプロトアクチニウム234になる。これも同様に非常に不安定であり、すぐにウラン234に変化する。このようにして、原子は粒子を放出しながらそれ自体が変化していき、最終的には82個の陽子と124個の中性子を持つ安定した鉛206となる。このような一連の多くの変化を放射性壊変と呼ぶ。

ウラン²³⁸ — 放射性壊変系列



元素の半数が壊変するのにかかる時間は半減期として知られている。半減期が経過すると、100万個あった原子のうち平均して50万個が別の元素に壊変する。次の半減期の間には残りのうち約25万個の原子が壊変するというように、すべてが壊変するまで続く。半減期を10回繰り返した後は、最初の100万個のうち約1,000個の原子しか残らない(すなわち約0.1パーセント)。上記の例では、プロトアクチニウム234の原子の半数が壊変してウラン234になるまでに1分強しかかからない。対照的に、ウラン238の原子の半数が壊変してトリウム234になるま

では45億年かかる。とは言うものの、環境中で自然に発生する放射性核種は比較的少ない。

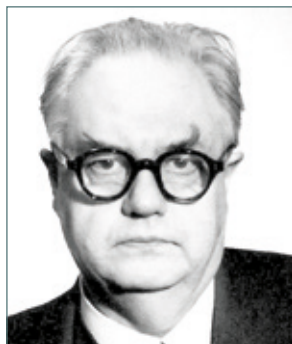
放射線の単位

今日、放射線のエネルギーは生体組織に障害を与える可能性があることが知られており、生体組織に付与されるエネルギー量は線量と呼ばれる単位を用いて表される。放射性核種が体外にとどまる場合でも、例えば放射性核種を吸入または摂取した後に体内から被ばくする場合でも、いかなる放射性核種、また複数の放射性核種からも放射線量が与えられる可能性がある。線量は、全身に対してどの程度被ばくしたのか、どの部位が被ばくしたのか、一人あるいは多数の人が被ばくしたのか、どのくらいの期間で被ばくしたのか(例えば、急性被ばく)によって、表現の仕方が異なる。

組織1キログラムあたりに吸収される放射線のエネルギー量は吸収線量と呼ばれ、



グレイ(Gy)という単位で表される。これは、英国の物理学者であり、放射線生物学の先駆者でもあった Harold Gray にちなんで名づけられたものである。しかし、この線量によって、すべてが説明されるわけではない。なぜなら、アルファ粒子は、同じ線量のベータ粒子やガンマ線よりもはるかに多くの損傷を与えることができるからである。異なる種類の放射線の吸収線量を比較するためには、生体に対してそれらが引き起こすある種の損傷について、その可能性に応じた重みづけをする必要がある。この重みづけされた線量は等価線量と呼ばれ、シーベルト(Sv)という単位で評価される。これは、スウェーデンの科学者である Rolf Sievert にちなんで名づけられた。1シーベルトは1,000ミリシーベルトであり、これは、1リットルが1,000ミリリットル、あるいは1メートルが1,000ミリメートルであるのと同様である。もうひとつ考慮すべきことは、身体には他の部位よりも傷つきやすい部位があるということである。例えば、ある等価線量の放射線によってがんが引き起こされる可能性は肝臓よりも肺が高く、また遺伝性影響のリスクのために生殖器は特に重要である。した



Harold Gray (1905~1965年)
Rolf Sievert (1896~1966年)

がって、様々な組織や臓器が被ばくした際の線量を比較するために、身体の様々な部位に対する等価線量についても重みづけされる。この結果は実効線量と呼ばれ、これもシーベルト(Sv)という単位で表される。ただし、実効線量は、低線量によるがんや遺伝的影響が生じる可能性に関する指標であり、より高い線量における影響の深刻さを示すことを意図するものではない。

放射線量に関するこの複雑な仕組みは、様々な放射線量を一貫した体系で整理するために必要であり、放射線防護の専門家が個人の線量を矛盾なく比較することができる形で記録することを可能にしている。このことは、放射線を取り扱い、職業上被ばくする人々にとって特に重要である。

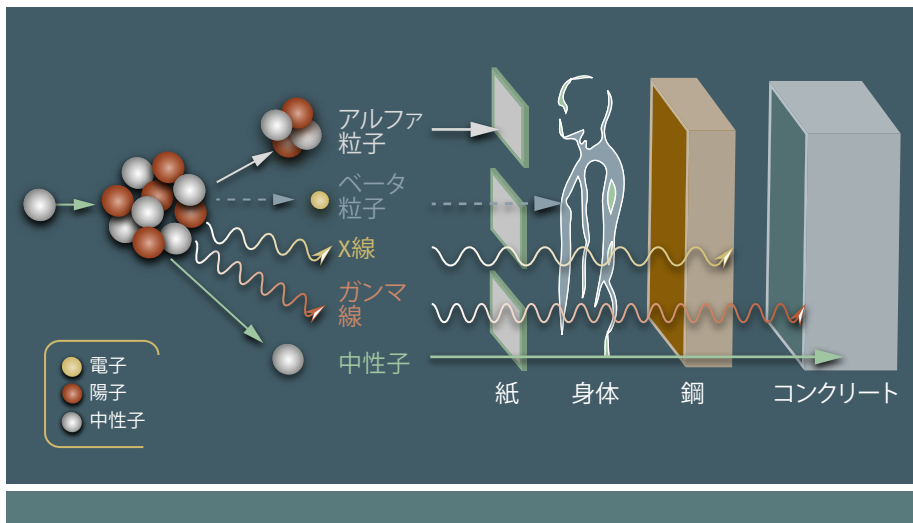
放射線の量	
物理量	
放射能	単位時間あたりの核変換数。1秒あたりの壊変数として測定される。単位はベクレル (Bq)。
吸収線量	放射線によって組織または臓器のような物質の単位質量あたりに付与されるエネルギー量。単位はグレイ (Gy)。1キログラムあたりのジュール数に相当する。
計算量	
等価線量	吸収線量に放射線加重係数 (w_R) を乗じたもの。放射線加重係数には、組織または臓器に、様々な放射線がもたらす生物学的な障害の違いが考慮されている。単位はシーベルト (Sv)。1 キログラムあたりのジュール数に相当する。
実効線量	等価線量に組織加重係数 (w_T) を乗じたもの。組織加重係数には、さまざまな組織や臓器の生物学的な害への感受性の違いが考慮されている。単位はシーベルト (Sv)。1 キログラムあたり1 ジュールに相当する。
集団実効線量	放射線に被ばくした集団の全ての実効線量の総計である。人・シーベルト (man Sv) で表される。

ところで、ここまでは個人に対する線量についてのみの記述であった。ある集団の各個人が受けたすべての実効線量を合計した結果は、**集団実効線量**または単に**集団線量**と呼ばれ、**人・シーベルト (man Sv)**として表される。例えば、世界人口に対する年間集団線量は、一人あたり3ミリシーベルトの年間平均線量に相当する1,900万人・シーベルトを上回る。

1.3. 放射線の透過力

簡単にいうと、放射線は粒子(アルファ粒子、ベータ粒子、中性子など)または電磁波(ガンマ線およびX線)の形態をとっており、すべてが異なるエネルギーを有する。放出するエネルギーや粒子の種類が異なればその透過力は異なり、生体への影響も異なる。アルファ粒子は、正の電荷を持つ2つの陽子と2つの中性子から構成されており、すべての種類の放射線の中で最も電荷を帯びている。高い電荷を帯びているということは、アルファ粒子が周囲の原子とより広い範囲で相互作用するということを意味する。この相互作用はアルファ粒子のエネルギーを急激に低下させ、そして透過力も減少させる。例えば、アルファ粒子は紙1枚で止めることができる。負の電荷を持つ電子であるベータ粒子は、帯びている電荷が小さく、アルファ粒子よりも透過力は大きい。ベータ粒子は、生体組織中を1センチメートルから2センチメートル透過する。ガンマ線とX線は極めて透過力が大きく、鋼の厚板より密度の低いものであれば透過する。

様々な放射線の透過力



人工的に発生させた中性子は、核分裂または核融合の結果として、不安定な原子核から放出される。中性子はまた、宇宙放射線の構成要素として自然にも発生する。中性子は電氣的に中性の粒子であるため、物質や組織と相互作用する際に非常に高い透過力を持つ。

2. 放射線は私たちに何をするのか？

放射線被ばくの影響についてより詳細に述べる前に、先に紹介した放射線科学の先駆者たちを振り返る必要がある。アンリ・ベクレルは放射能の発見の直後、放射線の最も大きな欠点を自ら経験することになった。それは、生体組織に及ぼされる影響である。ポケットの中に入れたラジウムの薬瓶が、彼の皮膚に損傷を与えたのである。

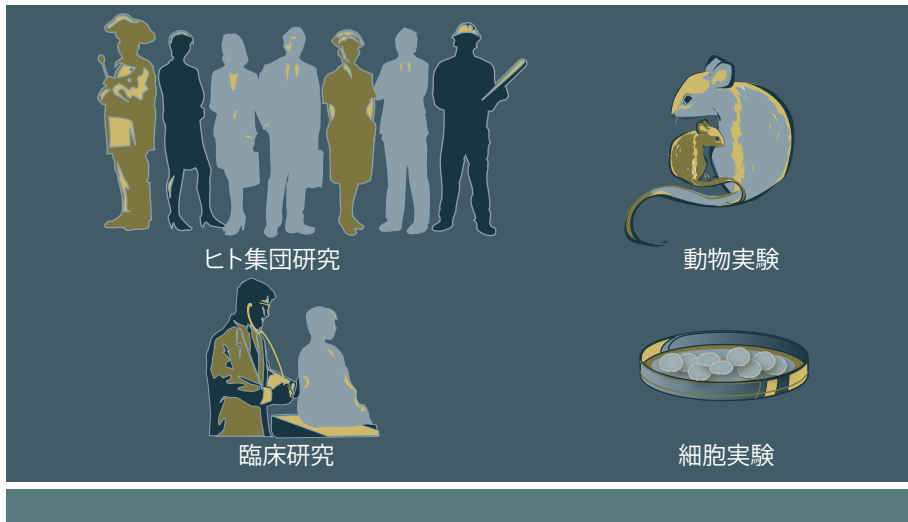
1895年にX線を発見したヴィルヘルム・コンラート・レントゲンは、1923年に腸がんにより死亡した。また、自身の研究生活を通して放射線に被ばくしていたマリー・キュリーも、1934年に血液疾患によって亡くなった。

1950年代末までに、少なくとも初期の放射線作業員359名(主に、医師やその他の科学者)が、防護の必要性を認識することなく、放射線被ばくのために亡くなったと報告されている。

こうした状況の中で、患者への放射線利用に関わった人々によって、作業員のための放射線防護に関する最初の勧告が作成された。1928年までに、ストックホルムで開催された第2回国際放射線医学会議において国際X線およびラジウム防護委員会が設置され、初代委員長としてロルフ・シーベルトが選出された。第二次世界大戦後、医療分野以外でも新たに放射線を利用していくことを考慮し、同委員会は再編され、国際放射線防護委員会と改名された。その後、核実験によるヒトの遺伝的影響が特に懸念されていた1958年から1960年の間、ロルフ・シーベルトはUNSCEARの第4代目の議長を務めた。

放射線被ばくに伴うリスクへの認識が高まるとともに、20世紀にはヒトと環境の放射線影響に関する徹底的な研究が発展を遂げた。放射線に被ばくした集団についての最も重要な評価は、1945年の第二次世界大戦末に広島と長崎に投下された原爆の生存者(以下、原爆被爆者という)である約8万6,500名を対象とした研究である。さらに、放射線治療を受けた患者や事故(例えば、チェルノブイリ原子力発電所事故)によって被ばくした作業員の経験から、また実験室における動物実験および細胞実験から、放射線影響に関する信頼できるデータが得られている。

放射線影響に関する知識の元になる情報



UNSCEARは、ヒトと環境に対する放射線被ばくの影響に関する科学的情報を評価し、異なるレベルの放射線被ばくに対して、どのような影響が関連付けられるのかということについて、可能な限り信頼性を持って解明するよう努めている。先に述べたように、放射線被ばくは、放射線の種類、曝されている時間、物質中に付与されるエネルギー量に左右される。現在のところ、UNSCEARでは、放射線被ばくの影響を評価するにあたり、平均のレベルとして10ミリグレイから100ミリグレイ未満を低線量、10ミリグレイ未満に対して非常に低い線量という表現を用いている。

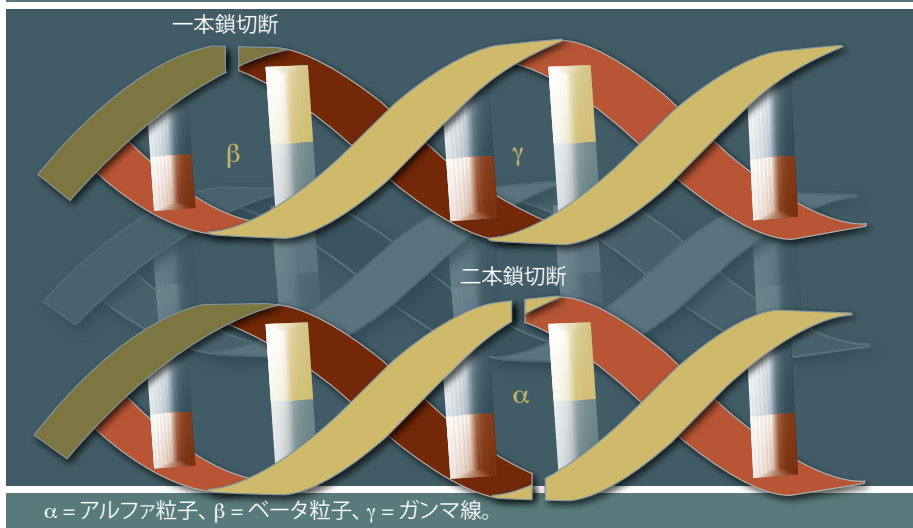
UNSCEAR で用いられている線量バンド

高線量	約1グレイを上回る	深刻な放射線事故(例えば、チェルノブイリ事故における消防士)
中線量	約100ミリグレイ～1グレイ	チェルノブイリ事故後の復旧作業者
低線量	約10～100ミリグレイ	複数回にわたるコンピュータ断層撮影 (CT) 検査
非常に低い線量	約10ミリグレイ未満	単純X線検査 (CTを伴わない)

2.1. ヒトへの影響

放射線の発見以来、1世紀以上にわたる放射線研究は、放射線が健康に影響を与える生物学的メカニズムについて膨大な情報をもたらしてきた。多くの場合、染色体のデオキシリボ核酸(DNA)鎖への直接的な損傷を原因として細胞死または変異が引き起こされることから、放射線は細胞レベルで影響を及ぼすことが知られている。仮に損傷または死滅した細胞数が多ければ、臓器不全あるいは死に至る恐れもある。また、細胞死に至らない他のDNA損傷が生じる可能性もある。通常、このような損傷は完全に修復されるが、もし修復されなかった場合には、細胞突然変異として知られる変異がその後の細胞分裂に反映され、最終的にがんを引き起こす可能性がある。もし変異した細胞がそれらの遺伝情報を子孫へ伝達すれば、遺伝的疾患が起こる恐れがある。生物学的メカニズムや遺伝性影響に関する情報は、室内での実験で得られることが多い。

DNAらせん構造の放射線障害



放射線被ばく後の健康影響については、その所見に基づいて、ここでは早期健康影響または遅発性健康影響が定義される。一般的に、早期健康影響は個人の臨床症状の診断により明らかとなり、がんのような遅発性健康影響は疫学研究によってある集団に観察される病状の発生増加により明らかとなる。とりわけ子どもや胚/胎児への影響および遺伝性影響については特別な注意が払われる。

早期健康影響

早期の健康影響は、広範囲にわたる細胞死/損傷によって引き起こされる。例として、皮膚火傷、脱毛、そして生殖機能障害が挙げられる。これらの健康影響は、短期間に上回ることによって影響が現れる線量のしきい値が相対的に高いことが特徴である。影響の重篤度は、しきい値を上回った後の線量の増加にしたがって増大する。

一般的に、急性被ばく線量が50グレイを超えると、中枢神経系に大きな損傷を受け、数日以内に死亡する。8グレイ未満の線量でも、急性放射線症候群として知られる放射線疾患の症状が現れる。その症状には、吐き気、嘔吐、下痢、腸痙攣、流涎、脱水症状、疲労感、無気力、倦怠感、発汗、発熱、頭痛、そして低血圧が含まれる。この急性という用語は、被ばく後に長期間が経過してから現れる健康上の問題ではなく、被ばく後に直接的に現れる健康上の問題を指している。なお、被ばく者は当初は生存するであろうが、胃腸管障害のために1~2週間後に死亡する。より低い線量では、胃腸管障害は発症しないかもしれないが、それでも主に赤色骨髄障害のために数ヶ月後に死亡する。さらに低い線量の場合には発症が遅れ、より軽度の症状が現れる。2グレイの線量を受けた者のほぼ半数はおよそ3時間後に嘔吐に苦しむが、1グレイ未満で嘔吐する者では稀である。

医療における事故被ばく

放射線治療は、患者に対する高線量の放射線照射を伴う。その為、急性影響の防止が優先される。



幸いなことに、赤色骨髄および他の造血系の臓器が受けた線量が1グレイ未満であれば、これらの臓器の再生能力が極めて高いために、完全に回復する。ただし、後年の白血病の罹患リスクは高まる。身体の一部のみに被ばくした場合には、一般的に損傷を受けた部分を修復するのに十分な骨髄が残る。動物実験では、有効な骨髄のわずか10分の1でも被ばくが回避されれば、生存率はほぼ100パーセントとなることが示されている。

放射線が細胞のDNAに直接損傷を与えるという事実は、放射線療法として知られるがん治療において、悪性細胞を意図的に死滅させることに利用されている。放射線療法において用いられる放射線の総量は、治療の対象となるがんの種類とステージによって異なる。固形腫瘍を治療する場合の一般的な線量は、その腫瘍に対して20～80グレイの範囲であり、この線量を一回で照射すると患者を危険にさらすことになる。そこで、治療を制御するために、最大2グレイずつに分割した線量が繰り返し与えられる。このように、線量を分割することで、正常組織の細胞を回復させながら腫瘍細胞を死滅させることが出来る。なぜなら、一般的に放射線照射後の腫瘍細胞の修復率はより低いからである。

遅発性健康影響

遅発性健康影響は、被ばく後に長期間が経過してから現れる。一般的に、遅発性健康影響のほとんどが、確率的影響である。つまり、発現の可能性は受けた放射線量に左右される。このような健康影響は、放射線被ばく後に生じる細胞中の遺伝物質の変異によって引き起こされると考えられている。遅発性影響の例として、被ばく者に生じる固形腫瘍や白血病、および放射線に被ばくした人々の子孫に生じる遺伝的疾患が挙げられる。集団におけるこれらの影響の発生頻度(重篤度ではなく)は、線量の増加に伴って上昇するであろう。

放射線被ばく後の遅発性健康影響を理解する上で、疫学研究は非常に重要である。このような研究では、被ばくした集団および被ばくしていない集団における健康影響(例えば、がん)を比較するために、統計的手法が用いられる。もし被ばくした集団に著しい増加が見られた場合には、その影響はその集団全体に対する放射線被ばくに関連している可能性がある。

放射線に被ばくした集団についての最も重要で長期にわたる評価は、原爆被爆者を対象とした疫学研究である。この研究は、本質的に典型的な一般集団である多数の人々を対象とした点および幅広い線量を身体の上方からほぼ均一に被

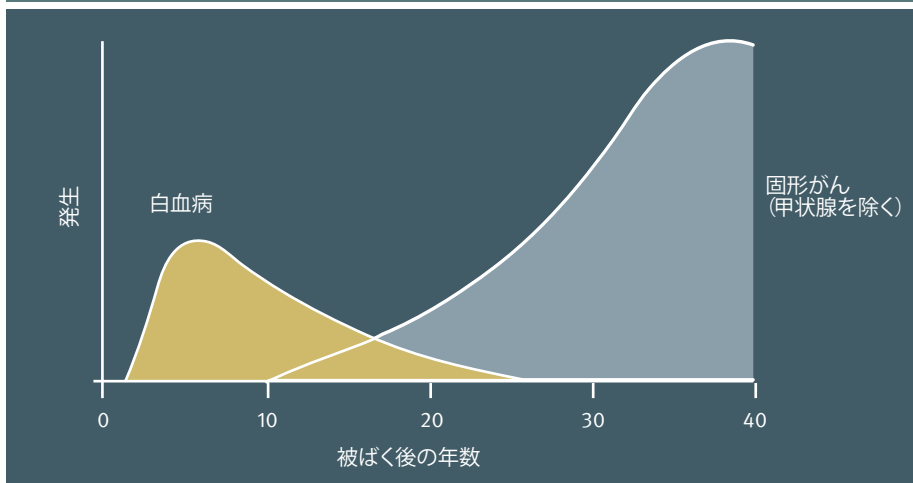
ばくした点で、これまでで最も包括的な研究であるといえる。また、この集団が受けた線量の推定値も比較的良好に知られている。現在までに、この集団が放射線に被ばくしていなかった場合に予測される数よりも数百件多いがん症例が、この研究によって明らかにされている。原爆被爆者の多くは今なお生存しており、評価が完了するまで研究は続けられる。

がん

がんは全死亡者数の約20パーセントを占めており、先進国では心血管疾患の次に多い死因である。放射線に被ばくしなくても、10人のうち約4人がその生涯においてがんを患うと推定されている。近年、男性において最も一般的ながんは、肺がん、前立腺がん、結腸直腸がん、胃がん、肝がんであり、女性においては、乳がん、結腸直腸がん、肺がん、子宮頸がん、胃がんである。

がんは複数の段階から構成される複雑な過程を経て発生する。おそらく、一つの細胞に対して作用した最初の事象が、がんに至る過程の始まりであると思われるが、この細胞が悪性となり腫瘍へと進展するまでには、その他の一連の段階を経る必要があると思われる。がんには潜伏期間があり、最初の損傷が起こってから顕在化するまでには長い時間がかかる。放射線被ばくにより引き起こされるがんの確率には大きな関心があり、統計的およびその他の不確かさを上回るがんの増加がみられる程の高いレベルの放射線に被ばくした集団については推定

放射線被ばく後のがんの発生



できるであろう。しかしながら、あるがんの原因が実際に放射線であったかについては、わからないままである。

白血病、甲状腺がんおよび骨肉腫は、放射線による被ばくから数年以内に最初に現れる可能性があるがんである。一方で、他のほとんどのがんは、被ばく後少なくとも10年が経過するまで、多くの場合は数十年が経過しても現れない。しかし、放射線による被ばくのみが引き起こす特定のがんは存在しないため、放射線誘発腫瘍と他の多くの原因から生じる腫瘍と区別することはできない。それでもなお、被ばく限度を定めるための信頼できる科学的根拠を提供するために、ある放射線量を受けた後に引き起こされるがんの確率を評価することは重要である。

放射線を利用した治療を受ける人々についての研究、職業上被ばくを受ける人々についての研究、そしてなによりも原爆被爆者についての研究が、がんと放射線被ばくとの関連性に関する知見の基盤を構築している。これらの研究は、身体多くの部位に被ばくを受け、十分に長い期間にわたり追跡調査された多数の人々を対象としている。しかし、主に対象者の年齢分布が正規母集団の年齢分布と異なることや、放射線被ばくを受けた時点で病気を患っていた患者の多くが、すでにがん治療を受けていたという事実から、重大な欠点を持つ研究もある。

さらに根本的なことは、ほぼすべてのデータが、1回または短期間で組織に1グレイ以上の相当高い放射線量を被ばくした人々を対象とした研究に基づいているということである。放射線を取り扱う作業者が普段から受けている線量の範囲での影響に関する研究は少数あるものの、長期間にわたって低い線量を受けた場合の影響に関する情報はほとんどなく、特に一般公衆が日常的に曝されている被ばくがもたらした結果に関する直接的な情報は存在しない。このような研究には長期間にわたる多数の人々の追跡調査が必要であるし、それでも最終的にがん罹患率のベースラインと比較して発がんの増加を観察するためには不十分である可能性がある。

UNSCEARは、放射線に被ばくした集団におけるがんの発生について包括的な検討を実施し、100ミリシーベルトを上回る放射線の被ばくによってがん死亡する付加的な可能性は、1シーベルトあたり100人中約3～5人と推定した。

その他の健康影響

心臓への高線量の放射線照射は、心血管疾患(例えば、心臓発作)を発症する可能性を高める。近年の放射線治療技術においては心臓への被ばく線量は低いが、このような被ばくが治療中に起こる可能性がある。ただし、低線量の放射線被ばくが心血管疾患の原因となると結論付ける科学的証拠は存在していない。

UNSCEARは、チェルノブイリでの事故に対応した緊急作業員において白内障の発生の増加があったことを確認した。これは、高線量の放射線と関連がある可能性がある。さらに、UNSCEARは、原爆被爆者、チェルノブイリ原子力発電所での緊急作業員、および放射線治療を受けている患者を対象として、ヒト免疫系に対する放射線影響についても調査してきた。免疫系に対する放射線の影響は、細胞数の変化を推定したり、様々な機能を分析したりすることで評価される。高線量の放射線は、主にリンパ球に損傷を与えることによって免疫系を抑制する。リンパ球の減少は、現在、急性被ばく後の放射線量を判定するための初期の指標として用いられている。

子孫への影響

精子や卵子の生殖細胞で放射線障害が起こった場合、子孫に遺伝性影響をもたらす可能性がある。さらに、放射線が子宮内ですでに成長しつつある胚や胎児を直接傷つける恐れもある。成人、小児、そして胚/胎児の放射線被ばくを区別することは重要である。UNSCEARでは、それぞれの集団に対して、遺伝性影響を含む健康影響の包括的な見直しを実施してきた。

小児への影響

ヒトの健康影響は多くの身体的要因に依存する。小児と成人とは解剖学的にも生理学的にも異なるため、放射線被ばくの影響も異なる。さらに、小児の身体は成人よりも小さく、臓器を覆っている組織によって遮られる放射線も少ないため、同様の外部被ばくに対する小児の内臓器官への線量は成人よりも高くなる。また、小児は成人より背が低いいため、地面に沈着した放射性核種からより高い線量を受けられる可能性がある。

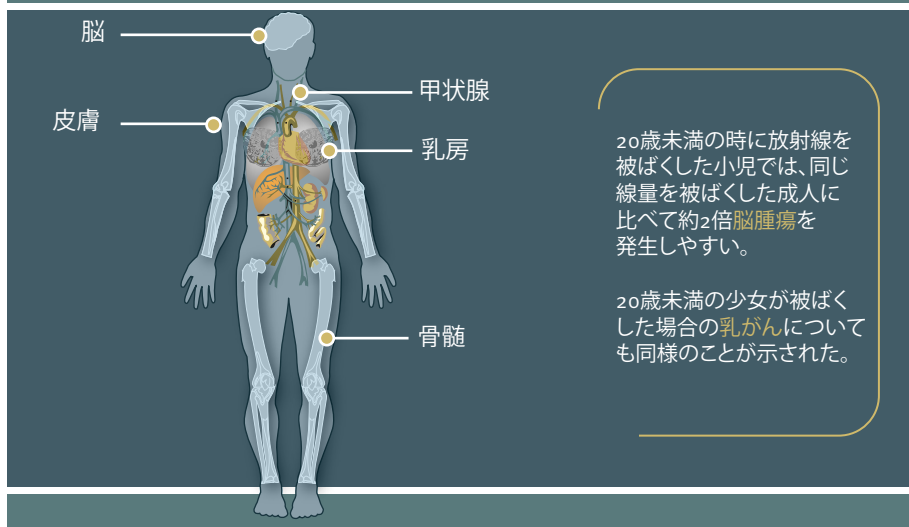
内部被ばくに関して、小児は身体が小さく、臓器間の距離も近いので、ひとつの臓器に取り込まれた放射性核種が他の臓器に与える放射線量は、成人の場合よりも大きくなるであろう。また、代謝や生理機能などを含め、年齢に関連する多

くの要因があるため、線量も年齢によって大きく異なる。いくつかの放射性核種については、小児の内部被ばくが特に懸念されている。放射性ヨウ素131の放出を伴う事故は、甲状腺被ばくの大きな原因となる可能性がある。幼児の甲状腺線量は、摂取量が同じであっても成人の場合と比べて約9倍となる。チェルノブイリ原子力発電所事故についての研究では、主に甲状腺に取り込まれたヨウ素131と甲状腺がんとの関連性が確認されている。

疫学研究により、同じ放射線被ばくであっても、20歳未満の若者が白血病になる可能性は成人の約2倍になることが示されている。さらに、10歳未満の小児は特に影響を受けやすく、白血病で死亡する可能性が成人に比べて3~4倍以上高くなるということがいくつかの研究で示唆されている。別の研究でも、20歳未満で被ばくした少女が乳がんになる可能性が、成人女性に比べて約2倍になることが示されている。小児が放射線被ばくによってがんになる可能性は成人の場合よりも高くなるようであるが、一般的にがんが顕在化してくる後年の年齢に達するまでははっきりと現れない可能性がある。

UNSCEARは、小児におけるがんの発症は成人よりも多様であり、腫瘍の種類や小児の年齢・性別に依存することを示す科学的資料について検討してきた。がんの誘発に関する放射線感受性という用語は、被ばくによって引き起こされる腫瘍の発生率を指す。小児と成人の放射線感受性の違いに関する研究により、甲状腺、脳、皮膚、乳房におけるがん、白血病の進展において、小児の感受性がより高いことが分かっている。

小児において特に放射線感受性が高い臓器



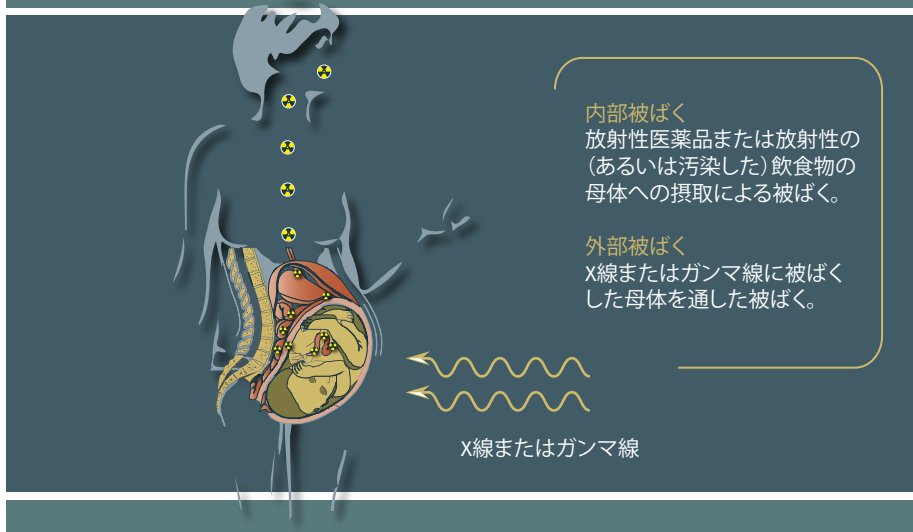
高線量(例えば、放射線治療を受けた場合)による小児の早期健康影響の違いは複雑で、様々な組織と生物学的メカニズムの相互作用によって説明される。小児期での被ばくによって成人の場合よりも現れやすくなる影響もあるが(例えば、脳障害、白内障、甲状腺結節)、小児の方が抵抗性を示す組織もある(例えば、肺や卵巣)。

出生前小児への影響

胚や胎児は、飲食物を摂取した母体から移行してきた放射性物質によって被ばく(内部被ばく)するか、直接、外部被ばくする可能性がある。胎児は子宮の中で守られているため、ほとんどの放射線被ばくの場合、その放射線量は母体を受ける線量より低くなる傾向がある。しかし、胚と胎児は特に放射線に対する感受性が高いため、被ばく直後に母体に影響を及ぼすような放射線量より低い線量を受けたとしても、それによる健康影響は重篤なものになる恐れがある。このような影響として、発育遅延、先天性異常、脳機能障害、がんが挙げられる。

子宮内での哺乳類の発育は、大きく3つの段階に分けられる。第1段階において、放射線は子宮内の胚を死に至らす可能性があることが知られている。第1段階は、受精から受精卵が子宮壁に着床するまでの期間で、ヒトにおける妊娠初期の2週間にあたる。この段階で何が起きているのかを研究することは極めて

胎児の放射線被ばく経路



難しい。しかし、主に動物実験から得られた情報は、一定のしきい値を上回る放射線量が初期の胚に対して致死的な影響を与えることを裏付けている。

ヒトにおける第2週から第8週までの期間にあたる次の段階においては、放射線は発達段階にある臓器に異常を来し、出産の時期に死を引き起こす危険がある。動物実験では、臓器(例えば、眼球、脳、骨格)が形成される期間の被ばくが、特に形成異常を引き起こしやすいことが示されている。

最も大きな障害は、妊娠第8週以降の第3段階にあたる最終段階において、中枢神経系において生じるものであろう。胎児の脳に対する放射線被ばくの影響については、かなり理解が進んでいる。例として、出生前に1グレイの線量に被ばくした約1,600人の原爆被爆者のうち、30人が重度の知的障害を患った。

胚への放射線被ばくが原因となり、後年のがんを引き起こすかどうかについては、見解が分かれてきた。これまでの動物実験では、特定の因果関係を示すことができていない。UNSCEARは、死亡、形成異常、知的障害、がんなどの数多くの放射線影響について、胎児の包括的なリスク評価を試みてきた。全体として、子宮内で100分の1グレイの線量に被ばくして産まれた子どもについて、1,000人あたり2人以下が影響を受ける可能性がある。これに対して、同様の影響が自然に発生する割合は6パーセントである。

遺伝性影響

放射線は、遺伝情報を子孫に伝達する細胞を変化させる可能性があり、それが遺伝的疾患を引き起こす恐れがある。このような疾患の研究は、放射線被ばくによってヒトがどのような遺伝的障害を患うか、ということに関する情報がほとんどないために困難である。この理由のひとつは、遺伝的影響を完全に記録するにはそれらが現れるまでの多くの世代の調査が必要であるためであり、がんに関していえば、これらの影響を他の原因から生じる影響と完全に区別することが出来ないためである。

深刻な影響を受けた胚や胎児の多くは生き延びることができない。全ての流産のうち、約半数には遺伝子の構造異常があったと推定されている。仮に生き延びて産まれたとしても、遺伝的疾患を持つ新生児が5歳未満で亡くなる可能性は、そうでない小児の約5倍である。

遺伝性影響は大きく2つに分類される。すなわち、染色体の数や構造の変化を伴う染色体異常と遺伝子自体の突然変異である。これらの影響は次世代に現れる可能性があるが、必ずしも現れるというわけではない。

原爆被爆者を親に持つ子どもたちに関する研究では、観察可能な遺伝性影響は認められなかった。これは、必ずしも何の障害も受けなかったということの意味するわけではない。単に、比較的大きな集団であったとしても、中程度の放射線被ばくに対して観察可能な程の影響はみられなかったということである。しかしながら、高線量を受けた動植物に対する実験研究では、放射線が遺伝的影響を引き起こす可能性がはっきりと示されており、ヒトが例外であるとは考えにくい。

UNSCEARは重篤な遺伝性影響のみに着目し、放射線被ばくによる第一世代に対する総合的なリスクを、1グレイあたり約0.3～0.5パーセント、すなわち致死がんの発生確率の10分の1未満と推定した。

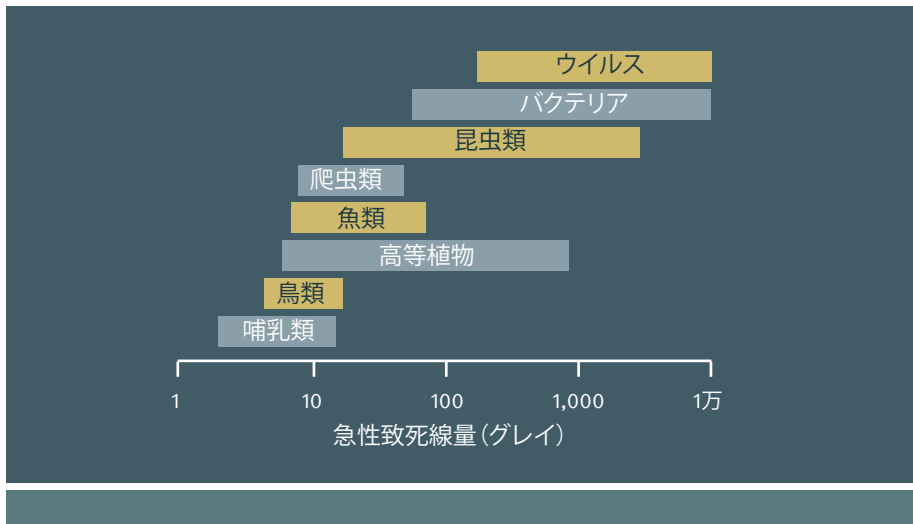
2.2. 動植物への影響

動植物に対する放射線被ばくの影響については、以前よりも注目されている。過去数十年の一般的見解は、ヒトの生命が適切に防護されるならば、動植物も同じように防護されるだろうというものであった。UNSCEARは、動植物に対する放射線被ばくの影響を評価し、理論上1～10グレイの線量の範囲において動植物の集団に影響がもたらされる結果にはなりにくいこと、また放射線被ばくに対する個体の反応が異なること(哺乳類は全ての動物の中で最も感受性が高い)が分かっている。集団レベルにおいて重要であると考えられる影響として、生殖能力、死亡率、および突然変異の誘発が懸念される。子孫の数のような生殖に関する変化は、死亡率よりも放射線影響に対してより高感度な指標である。

致死線量とは、被ばくした対象の半数が死に至る線量のことである。比較的短期間(急性)に被ばくした植物では、致死線量は10グレイ未満から約1,000グレイまでの範囲にわたることが示されてきた。一般的に、より大きい植物の方が、小さい植物よりも放射線感受性が高い。小さい哺乳動物の致死線量は6グレイから10グレイの範囲であり、より大きい哺乳動物は約2.5グレイである。昆虫、バクテリア、ウイルスのなかには、1,000グレイを上回る線量に耐えられるものもある。

主な情報源は、チェルノブイリ原子力発電所の周辺地域で放射線に被ばくした動植物から得られた観察結果である。UNSCEARは、環境が被ばくした経路を評価し、このような被ばくの潜在的な影響を評価するための新しい方法を開発した。

動植物の急性致死線量の範囲



近年、UNSCEARは、福島第一原子力発電所での事故後に選択した動植物に対する放射線被ばく線量および関連する影響について推定し、全般的に急性影響を観察できる程の被ばくではなかったと結論付けた。しかし、特定の疾患や生命体、特に哺乳動物の生理的状态の指標となるバイオマーカーの変化は無視できないものの、これらが生命体の集団の健全性に対してどの程度の意味があるかは明らかではない。

ヒトの放射線被ばくを低減するために実施される防護や修復対策が、広範囲に影響を及ぼす点に注意する必要がある。こうした対策の実施は、例えば、環境財・サービス、農業、林業、水産業および観光事業に用いられる資源、および精神的・文化的活動やレクリエーション活動に用いられる設備に影響を与えることになる。

2.3. 放射線量と影響との関係

UNSCEARは、放射線量と健康影響との関係について整理する際、被ばくした集団において存在している健康影響の観察と、将来的に起こり得る影響の理論的な推定とを区別する重要性について強調している。いずれの状況においても、放射線測定、統計的考察、その他の要因のいずれについても、あらゆる不確かさおよび不正確さを考慮に入れることが重要である。

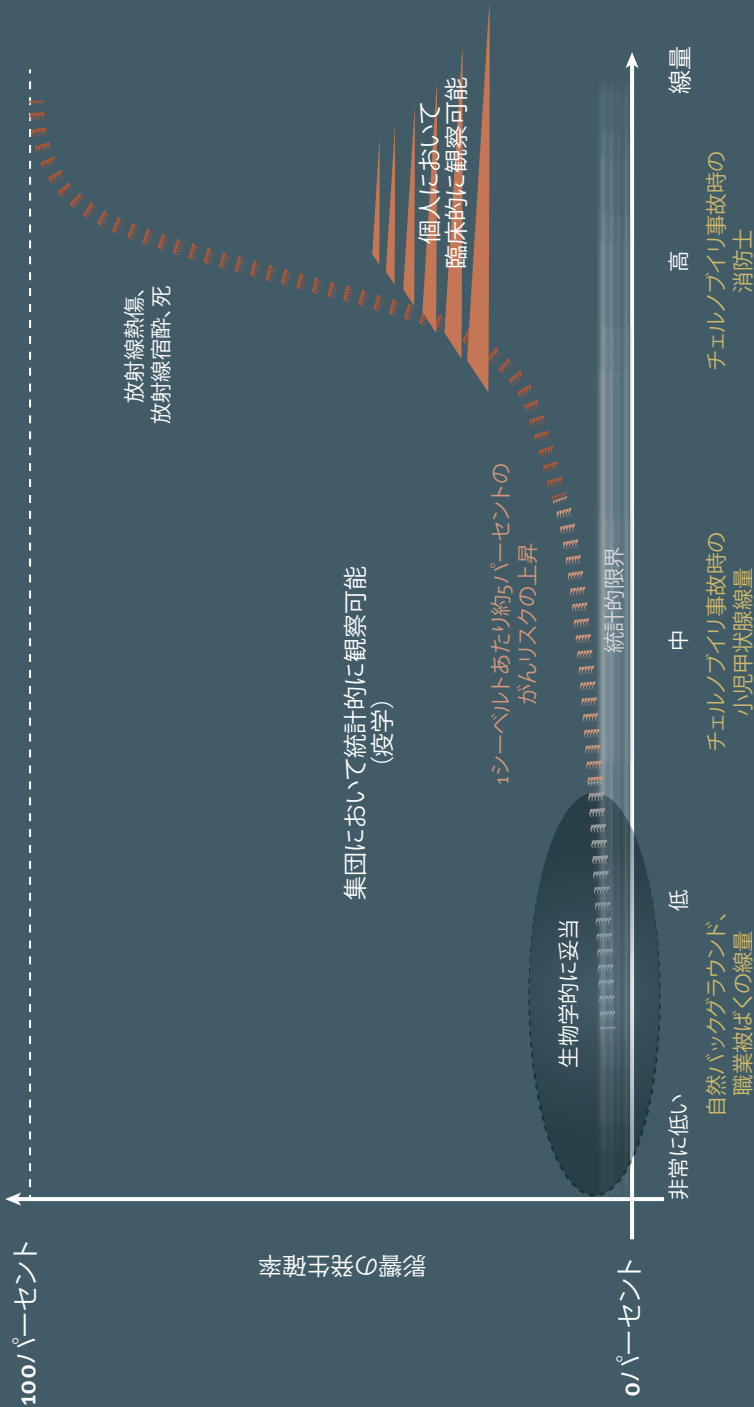
現在ある知見に基づいて言えば、1グレイを超える高い線量を受けた個人に初期の影響(例えば、皮膚火傷)が生じた場合には、観察された健康影響が放射線被ばくに起因したものであると明確にいえる。このような線量は、放射線事故において発生する可能性があり、チェルノブイリ原子力発電所事故における緊急作業員や、放射線治療中の事故で患者が受けたような線量にあたる。

中程度の放射線量に被ばくした集団における遅発性健康影響(例えば、がん)の発生率の増加について、疫学的手法を用いることによって観察された増加があらゆる不確かさを上回るほど高い場合には、その原因は放射線による被ばくであるといえる可能性がある。しかし、現時点では、がんが放射線被ばくによって引き起こされたものか否かを判別するために利用できるバイオマーカーはない。

放射線被ばくのレベルが低いまたは非常に低い場合については、環境中での放射線被ばくや職業上の放射線被ばくが典型的であるが、統計的またはその他の不確かさのために遅発性健康影響の発生率の変化は確認されていない。ただし、このような影響が否定されているわけではない。

将来的に起こり得る健康影響について、高線量および中線量に対する影響を評価する方法は理解が進んでいる。しかしながら、低線量または非常に低い線量に対しては、仮定に基づく数学的なモデルを用いる必要があり、その結果、健康影響の可能性は非常に大きな不確かさを持つ値として推定されることになる。そのため、UNSCEARは、例えばチェルノブイリや福島第一での事故後における低線量または非常に低い線量に対する健康影響や死亡数の評価にあたり、推定に伴う不確かさを容認できないことから、こうしたモデルを用いないこととした。しかしながら、不確かさが考慮され、その適用範囲が明確に説明される場合には、このような計算は公衆衛生に関する比較や放射線防護の目的のために有用であろう。

放射線量と健康影響の関係

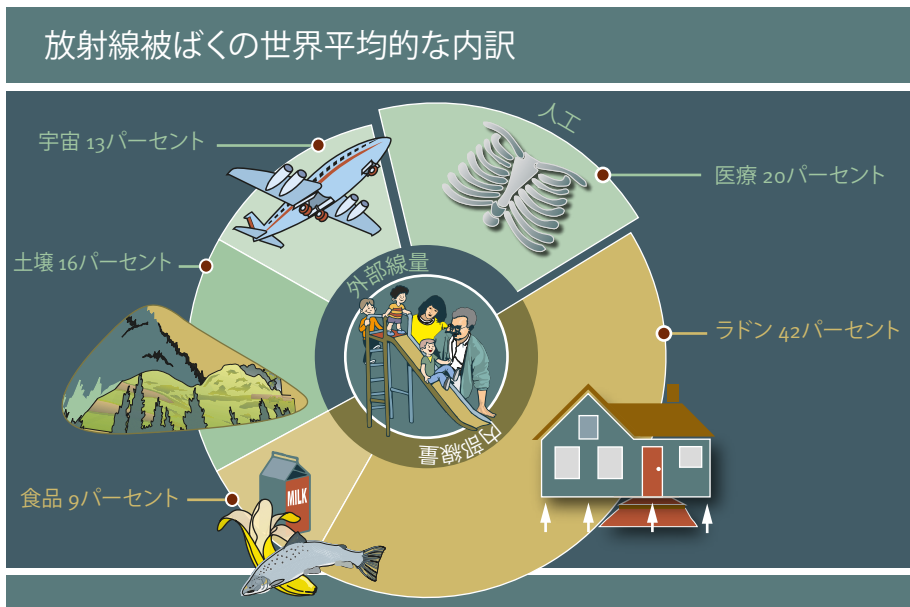


放射線は私たちに何をしてくれるのか？

3. 放射線はどこから来るのか？

私たちは、多くの線源からの放射線に絶えず被ばくしている。地球上のすべての生物は、自然バックグラウンドからの放射線に曝される環境に存在し、進化してきた。最近では、ヒトおよびその他の生命体は、過去1世紀ほどにわたって開発されてきた人工放射線源からも被ばくしている。私たちの被ばくの80パーセント以上は自然放射線源からで、20パーセントだけがヒトによって作られた人工線源 — 主に医療に利用されている放射線 — による。本書では、放射線被ばくを線源によって分類しており、一般公衆が受ける放射線に焦点を当てている。規制を目的(例えば、放射線防護を目的)とする場合、放射線被ばくは異なる集団ごとに取り扱われる。したがって、ここでは、放射線の医療利用によって被ばくする患者、および職場で被ばくする人々に関する追加情報を提供する。

放射線被ばくを分類するもうひとつの方法として、私たちがどのように放射線に曝されるかということを考える方法もある。私たちの身体は、環境中の放射性物質や放射線に体外から(外部から)曝される可能性がある。あるいは、私たちが空気中の放射性物質を吸入したり、食物や飲料水中の放射性物質を飲み込んだり、皮膚や傷口から放射性物質が吸収されたりすることで、体内から(内部から)曝される可能性もある。世界全体で考えると、内部被ばくおよび外部被ばくによる線量は、ほぼ同じである。

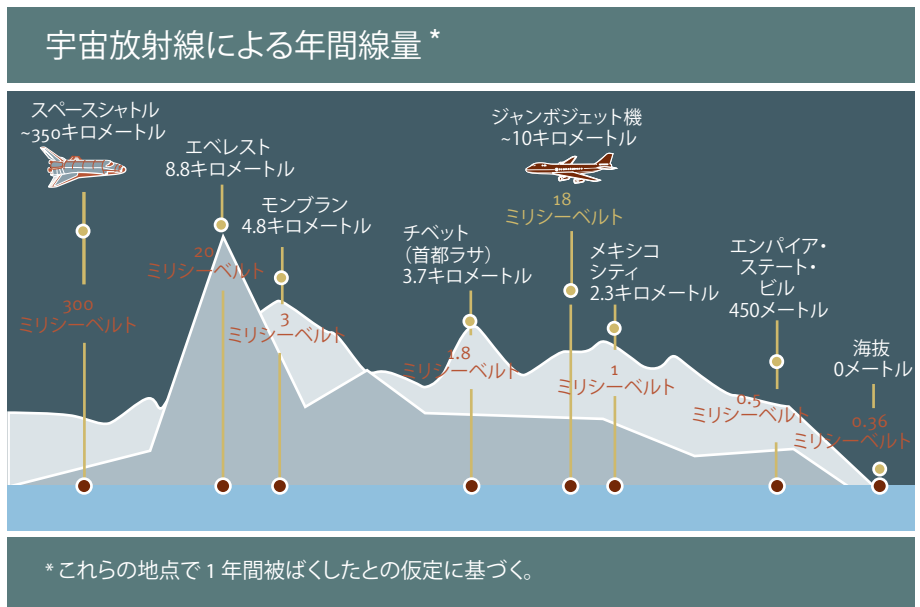


3.1. 自然放射線源

地球の誕生以来、その環境は、宇宙からの放射線と地球の地殻および地核にある放射性物質からの放射線との両方に曝されてきた。これらの自然放射線源からの被ばくを避ける方法はない。実際に、自然放射線源は世界の人口に対する放射線被ばくの原因の大部分を占めている。年間実効線量の世界平均は1人あたり約2.4ミリシーベルトであり、人々が暮らす場所によって約1ミリシーベルトから10ミリシーベルトを上回る範囲まで幅がある。建物の中では、ラドンと呼ばれる特定の放射性ガスが閉じ込められたり、建材自体に放射性核種が含まれていたりするため、放射線被ばくが増加する。自然の線源であるものの、私たちの被ばくは、どこでどのように住み、何を飲食するかによって変わる。

宇宙放射線源

宇宙線は、外部被ばくにおける主な自然放射線源である。これらの宇宙線の大部分は遠く離れた恒星間空間に起源をもつが、太陽フレアの発生中に太陽から放出されるものもある。宇宙線は直接地球に降り注ぎ、大気と相互作用して様々な種類の放射線と放射性物質を生み出す。宇宙線は、宇宙空間における主要な放射線源である。地球の大気と磁場によって宇宙放射線はかなり減少するものの、地球には他の部分よりもより多くの放射線に曝される地域がある。宇宙放射線は磁場によって北極と南極に偏向されるため、北極および南極は赤道地域よりも多くの宇宙放射線を受ける。



さらに、被ばくレベルは高度とともに上昇する。なぜなら、遮蔽体の役割をする上空の大気が少なくなるからである。したがって、海拔ゼロメートル地帯に住む人々は、宇宙の放射線源から平均して年間約0.3ミリシーベルトの実効線量、すなわち自然放射線源からの総線量のおよそ10～15パーセントを受けるとなるが、標高2,000メートルを超える場所に住む人々の線量はこの数倍となる。航空機の乗客はさらに高い線量を受けるとであろうが、その線量は航空機の高度だけでなく飛行時間にも左右される。例えば、巡航高度で10時間飛行する場合の平均実効線量は0.03～0.08ミリシーベルトである。つまり、ニューヨークーパリ間を航空機で往復した場合、一人あたり約0.05ミリシーベルトの被ばくを受けるとなる。これは、通常の胸部X線検査によって患者が受ける実効線量にほぼ等しい。飛行中に個々の乗客が受ける推定実効線量は低いが、世界中の膨大な乗客数および運行数を考えると、集団線量は非常に高くなるであろう。

職場での被ばく

宇宙放射線源からの線量は、パイロットや客室乗務員のように頻繁に飛行し、年間で平均して約2～3ミリシーベルトを受けるとする人々にとっては特に重要である。また、線量は数多くの宇宙飛行についても測定されている。短期間の宇宙飛行において報告されている線量は、太陽活動にも依存するが、2～27ミリシーベルトの範囲である。しかしながら、地球から350キロメートル離れた軌道を回る国際宇宙ステーションへ4ヶ月任務にあたる宇宙飛行士は、約100ミリシーベルトの実効線量を受けると見られている。

大地放射線源

土壌

地球内部および地球上のあらゆるものには原始放射性核種が含まれている。カリウム40、ウラン238、そしてトリウム232のような、地中で発見された非常に長寿命の放射性核種は、それらが壊変してできたラジウム226やラドン222などの放射性核種とともに、地球が現在の形になる以前から放射線を放出し続けてきた。UNSCEARは、大地放射線源からの外部被ばくとして、全世界の人々が平均して年間約0.48ミリシーベルトの実効線量を受けると見積っている。

外部被ばくは地域によって大幅に異なる。例えば、フランス、ドイツ、イタリア、日本および米国の研究では、それらの国の人口の約95パーセントは、屋外での年間平均線量が0.3ミリシーベルトから0.6ミリシーベルトの地域に住んでいることを示している。しかし、これらの国々には、年間1ミリシーベルトよりも高い線量を受ける可能性のある地域もいくつかある。また、世界には、大地放射線源からの被ばくがさらに高い地域も存在する。例えば、インドのケララ州南西部の海岸に位置する人口の密集した55キロメートルの細長い土地にはトリウムの豊富な砂が含まれており、人々は平均して年間3.8ミリシーベルトの線量を受けている。自然大地放射線源のレベルが高いその他の地域として、ブラジル、中国、イラン、マダガスカル、ナイジェリアが知られている。

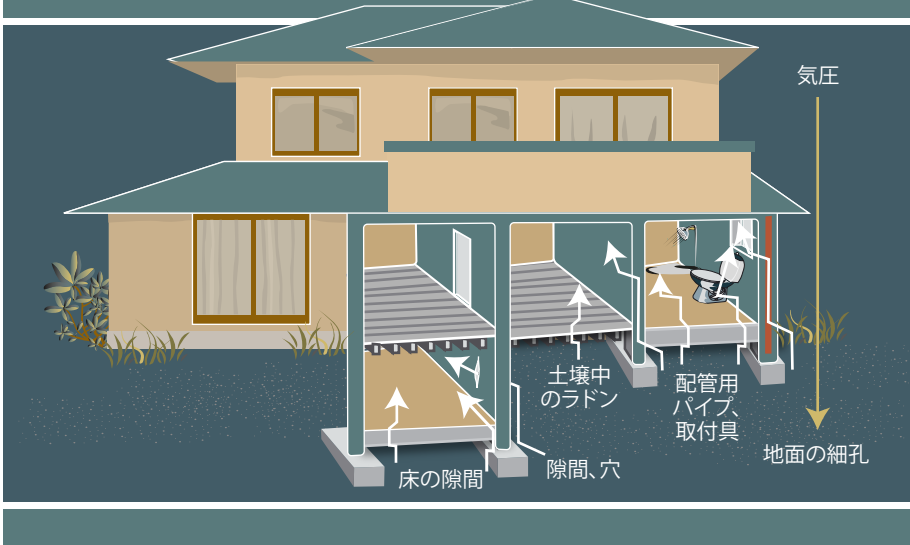
ラドンガス

ラドン222は、一般的に土壌から発生する気体状の放射性核種である。ラドン222は、地球の岩石や土壌に存在するウラン238の壊変系列から発生する。ラドンを吸入すると、ラドンの短寿命壊変生成物のいくつか（主にポロニウム218および214）が肺にとどまり、呼吸気道の細胞がアルファ粒子に曝される。そのため、ラドンは喫煙者および非喫煙者の両方について肺がんの主要な原因である。しかしながら、喫煙とラドンによる被ばくとの強い相互作用のために、喫煙の方がはるかに障害を受けやすい。

ラドンは大気中のいたるところに存在しており、地下や床面を通して建物に直接入り込み、建物内のラドン濃度（単位体積の空気における、単位時間あたりの壊変数で表した放射エネルギー）を高めることがある。主に家屋が暖められた際に、暖められた空気が上昇して窓や隙間を通して家屋の上部から外へ逃げていくため、1階や地下は陰圧となる。これにより、家屋の底の割れ目や隙間（例えば、引込管の入口周辺）を通して、底土からのラドンが住宅の中に活発に取り込まれる。

屋内ラドンの世界平均濃度は、一平方メートルあたり約50ベクレルである。しかし、この平均値には場所による大きなばらつきが含まれている。一般的に、各国間の平均濃度のばらつきは大きく、キプロス、エジプト、キューバにおける一平方メートルあたり10ベクレル未満から、チェコ、フィンランド、ルクセンブルグにおける一平方メートルあたり100ベクレルを上回る範囲に及ぶ。カナダ、スウェーデン、スイスのような国々には、一平方メートルあたり1,000ベクレルから1万ベクレルのラドン濃度の家屋もある。とはいえ、このような高レベルの濃度の家屋の割合はごくわずかである。この違いをもたらす要因として、大地の局所的な地質、土壌の透過性、建造物の建材、建物の換気がある。

建物へのラドンの流入



特に、気候に左右される換気は重要な要因である。熱帯気候のように、建物がよく換気されていれば、ラドンの蓄積が著しいものになる可能性は低い。しかしながら、換気がより少ない傾向にある温帯や寒冷気候では、ラドン濃度はかなり高まる可能性がある。そのため、エネルギー効率の良い建物が設計される際には、換気が制約されることによる影響が重要となる。多くの国々で大規模な測定プログラムが実施されており、屋内ラドン濃度を低減する方策を実行するための基盤が形成されている。

通常、水中のラドンレベルは非常に低いですが、例えばフィンランドのヘルシンキにある深井戸や米国アーカンソー州のホットスプリングズなど、いくつかの水源には極めて高濃度なところもある。特にシャワー中の浴室のように、水中のラドンが大気中のラドン濃度の上昇に寄与することがある。しかし、UNSCEARは、飲料水のラドン摂取からの線量への寄与は、吸入されるラドンに比べて小さいと結論付けている。UNSCEARは、ラドンからの年間平均実効線量は1.3ミリシーベルトであり、公衆が自然放射線源から受けるすべての被ばくの約半分に相当すると推定している。

職場での被ばく

特定の職場では、ラドンガスの吸入が作業員における放射線被ばくの大半を占めている。ラドンは、あらゆる種類の地下鉱山における放射線被ばくの主要な線源である。炭鉱作業員の年間平均実効線量は約2.4ミリシーベルトであり、その他の鉱山作業員は約3ミリシーベルトである。原子力産業では、作業員の年間平均実効線量は約1ミリシーベルトであり、主にウラン鉱山におけるラドン被ばくによるものである。

飲食物中の放射線源

飲食物には、主に自然起源の原始放射性核種やその他の放射性核種が含まれていることがある。放射性核種は、岩や土壌中および水中にある鉱物から植物に移行し、それが動物へと移行する可能性がある。したがって、飲食物の摂取による被ばく線量は、飲食物中の放射性核種の濃度や、地域ごとの食習慣によって異なる。

例えば、魚介類は相対的に高いレベルの鉛210とポロニウム210を含むため、海産物を多く食べる人々は一般集団に比べてやや高い線量を受ける可能性がある。トナカイの肉を多く食べる北極地方の人々も、比較的高い線量を受けている。北極地方のトナカイが食べるコケ類には、蓄積された比較的高濃度のポロニウム210が含まれている。UNSCEARは、飲食物に含まれる自然放射線源からの平均実効線量を0.3ミリシーベルトと推定している。これは、主にカリウム40と、ウラン238およびトリウム232系列の放射性核種によるものである。

自然起源の放射性核種に加えて、食物には人工起源の放射性核種が含まれている可能性がある。しかし、環境への放出が認められている人工起源の放射性核種による線量への寄与は、一般的に非常に小さい。

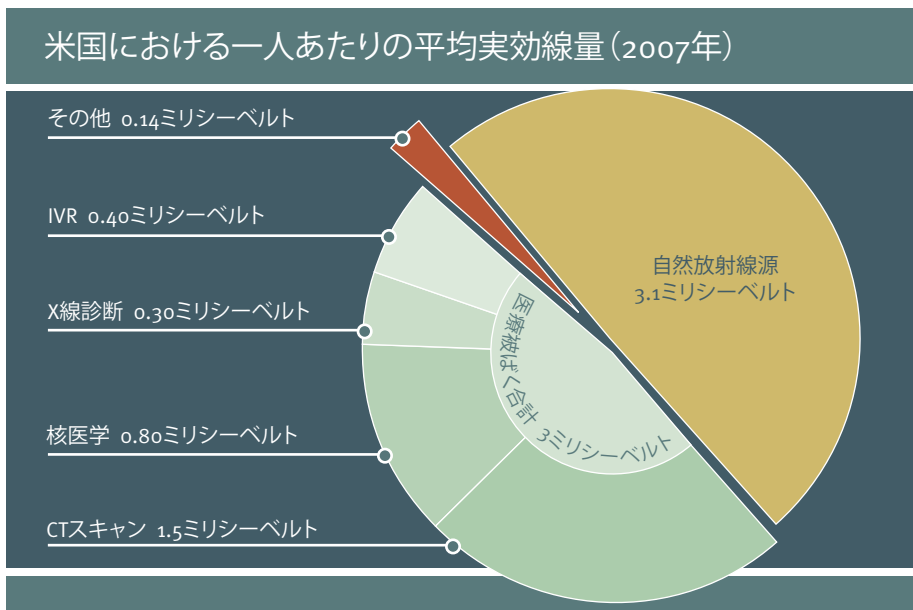
3.2. 人工放射線源

科学者たちが、軍事利用から医療利用（例えば、がん治療）まで、また電力生産から家庭での利用（例えば、煙感知器）まで、幅広い目的のための原子エネルギーの使い方を学ぶにつれて、放射線の利用はこの数十年の間に著しく増加してきた。こうした人工放射線源による放射線量が、自然放射線源による個人および世界人口の線量に加算される。

人工放射線源からの放射線による個人線量には、大きなばらつきがある。大部分の人々はこのような線源からは比較的低い線量しか受けないが、平均値の何倍も受ける人も少数いる。人工放射線源は、一般的に放射線防護の対策によって十分管理されている。

医療利用

特定の病気を診断し治療するための医療における放射線利用は、今日、世界中で際立って主要な人工放射線源として、重要な役割を果たしている。平均すると、放射線の医療利用による被ばくは、全人工放射線源からの被ばくの98パーセントを占めている。また、世界の人口に対する被ばくにおいて、自然放射線源に次ぐ2番目に大きな要因であり、全体の約20パーセントを占めている。この被ばくのほとんどは、医療に多くの資源を投入でき、そのために放射線機器が広く普及している先進国で生じている。医療利用による年間平均実効線量が、自然放射線源による線量と同程度である国さえある。



医療被ばくと、他の多くの種類の被ばくには、実質的に明確な違いがある。医療被ばくでは一般的に身体の一部のみが被ばくするのに対して、その他の被ばくでは全身に及ぶことが多い。また、患者の年齢分布は通常的一般集団の年齢分布よりも高い年齢層に偏っている。さらに、医療被ばくに起因する線量は、患者が被ばくから得る直接的な便益を考慮して、他の線源からの線量と注意深く比較されるべきである。

生活水準の緩やかな向上を伴う都市化の進行は、必然的により多くの人々が医療サービスを受けられるようになることを意味する。結果として、医療被ばくによる集団の線量は世界全体で増加し続けている。UNSCEARは、診断と治療手段に関する情報を定期的に収集してきた。1997～2007年までの期間を対象としたUNSCEARの調査によると、世界全体で年間に約36億件の医療放射線の手技が実施されており、1991～1996年を対象とした前回の調査期間の25億件に比べて、ほぼ50パーセントの増加がみられた。

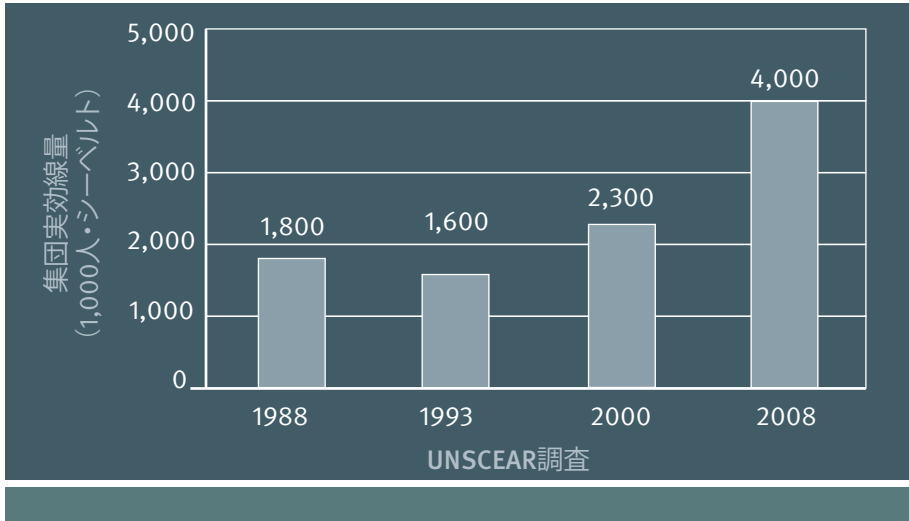
放射線を伴う医療行為の一般的な分類は、放射線医学（インターベンション手技を含む）、核医学、そして放射線治療である。UNSCEARの定期的な評価の対象外である他の利用法には、人間ドックプログラムや医療、生物医学、診断または治療に関する研究プログラムへの自主的な参加などがある。

診断放射線医学とは、単純X線撮影（例えば、胸部X線や歯科X線）、透視（例えば、バリウムによる嚥下造影や注腸造影を伴うもの）、コンピューター断層撮影（CT）のように、X線を使用して得られた画像を分析するものである。超音波検査や磁気共鳴断層撮影のような非電離放射線を用いた画像診断法については、UNSCEARでは取り扱っていない。**インターベンショナル・ラジオロジー**（IVR）とは、疾患を診断・治療するための、侵襲性の低い画像誘導下での手技（例えば、血管内でのカテーテル誘導）である。

CTの普及や1回あたりの検査での著しく高い線量により、診断放射線手技による世界の平均実効線量は、1988年の0.35ミリシーベルトから2007年の0.62ミリシーベルトへとほぼ2倍となった。UNSCEARによる最新の調査によれば、現在、CTスキャンは放射線医学における集団線量の全体に対して43パーセントを占めている。これらの数値は、地域によって異なる。全ての放射線治療の約3分の2は、先進国に住む世界人口の25パーセントが受けている。残りの75パーセントについては、単純な歯科X線検査でさえ年間の治療回数は、ほぼ一定のままで推移している。

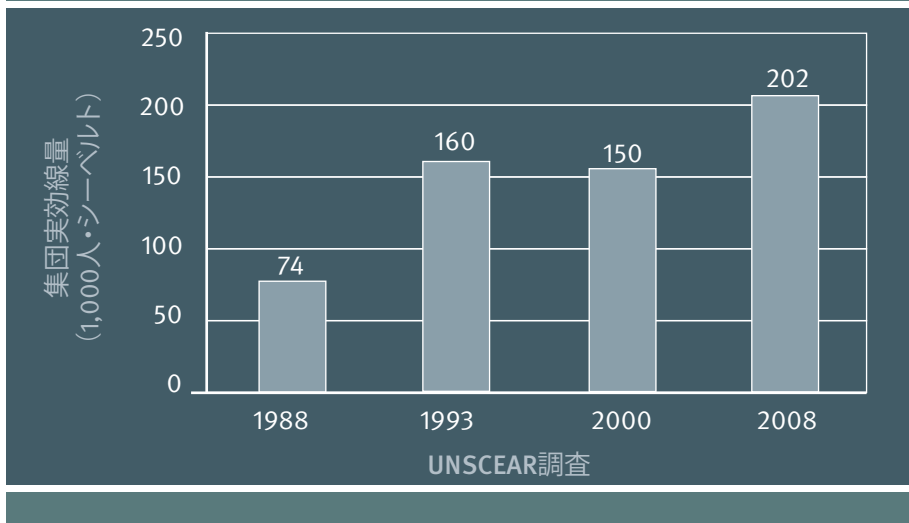
核医学とは、非密封（すなわち、可溶性でカプセル化されていない）の放射性物質を体内に投与するもので、主として構造または臓器機能に関する情報を提供する画像を得るためのものである。また、あまり一般的ではないが、甲状腺機能亢進症や甲状腺がんのような特定の疾病を治療するためのものもある。ほとんど

放射線医療による世界全体の被ばく(1988～2008年)



の場合、放射性核種は、一般的に静脈内投与または経口投与される放射性医薬品に加工される。投与された放射性医薬品は、物理的・化学的特性にしたがって体内に分布し、撮影が可能となる。このようにして、体内の放射性核種から放出された放射線は、診断画像を作成するために分析され、または病気を治療するために使用される。

核医学による世界全体の被ばく(1988～2008年)



核医学診断の手技数は、世界全体で1988年の約2,400万件から2007年の約3,300万件に増加した。その結果、年間集団実効線量は、7万4,000人・シーベルトから20万2,000人・シーベルトへと大幅に増加した。最新の核医学の治療利用も増えつつあり、世界全体で年間の患者数はおよそ90万人に達している。繰り返しになるが、核医学の利用は検査の90パーセントが先進国で実施されており、極めて偏っている。

放射線治療(放射線療法とも呼ばれる)では、様々な病気を治療するために放射線が使用される。一般的に、がんが対象であるが、良性腫瘍も対象となる。外部放射線療法とは、患者の体外にある放射線源を使用する治療のことで、遠隔放射線療法と呼ばれる。この療法では、高レベルの放射線源(一般的にはコバルト60)を含む機器や、放射線を発生させる高電圧機器(例えば、線形加速器)が使用される。また、患者の体内に金属製もしくは密封した放射線源を、一時的または恒久的に置く治療も実施されており、これは密封小線源治療と呼ばれる。

世界全体で、推定510万人の患者が1997～2007年の期間中に放射線療法を受けており、1988年の推定430万人から増加している。約470万人が遠隔放射線療法によって治療され、40万人が密封小線源治療によって治療されている。先進国に住む人口の25パーセントが、世界全体の放射線療法の70パーセントと密封小線源治療の40パーセントを受けている。

職場での被ばく

医療放射線手技の総数がこの数十年で著しく増加してきたため、1人あたりの年間平均実効線量が約0.5ミリシーベルトの医療従事者も700万人を超えた。インターベンショナル・ラジオロジーおよび核医学に携わる医療従事者は、平均よりも高い線量を受ける可能性がある。

医療利用における事故

放射線の医療利用(例えば、放射線療法、インターベンショナル・ラジオロジー、核医学)には、患者への高線量照射を伴うものもある。これらが誤って使用された場合、深刻な障害または死に至る恐れさえある。患者だけでなく、その近くにいる医師や他の従事者もリスクを有している。人為的ミスは、これらの事故の最も一般的な原因である。例として、治療計画の誤りによる不適切な線量の照射や、機器の不適切な使用、誤った臓器や時には誤った患者への照射もある。

放射線療法に関する深刻な事故は稀であるが、100件を超える事故が記録されている。UNSCEARは、1967年以降、45名の死亡と613名の負傷を含む29件の報告された事故について見直してきた。もっとも、いくつかの死亡や多くの負傷について、報告されていないものもあるであろう。

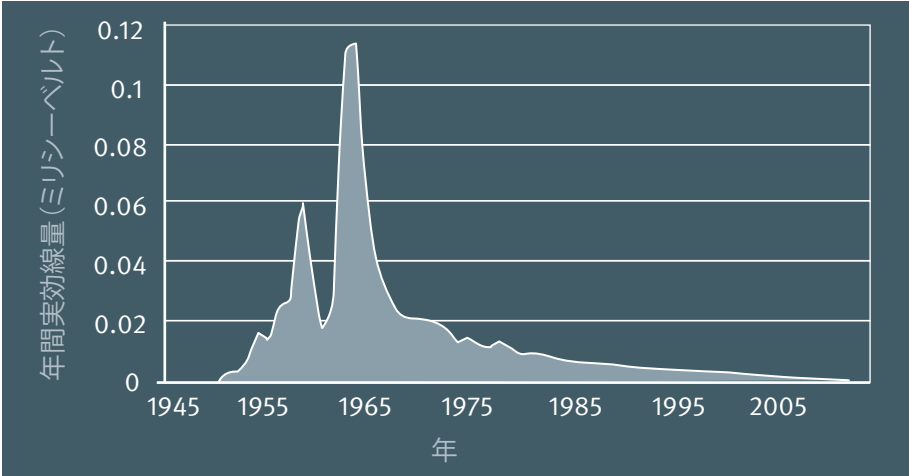
生命に関わる病気を治療するために患者が受けた放射線量が不十分であるような過少照射も、過剰照射と同様に深刻な結果をもたらす場合がある。品質保証プログラムは、このような事故のリスクを最小化するために、高水準かつ一貫した実施基準を維持する上で有用である。

核兵器

1945年、第二次世界大戦の終盤に、2つの原子爆弾が日本の都市に投下された。すなわち、8月6日の広島と8月9日の長崎である。2つの原爆の爆発は、13万人近くの命を奪った。これらは、歴史上唯一、戦争において核兵器が使用された出来事である。しかし、1945年以降、主に北半球で多くの核実験が大気圏内で実施された。最も活発に実験が行われた時期は1952年から1962年である。合計500回を超える実験が実施され、核威力の合計はTNT(トリニトロトルエン)換算で430メガトンであった。最後に実施されたのは1980年である。世界中の人々が、これらの核実験からのフォールアウトによる放射線に被ばくした。こうした中で、ヒトと環境への放射線被ばくの懸念に応えるべく、1955年にUNSCEARが設置された。

大気圏核実験からの地球規模のフォールアウトによる推定年間平均実効線量は、1963年の0.11ミリシーベルトが最も高く、その後は現在の約0.005ミリシーベルトにまで下がってきた。現在の被ばくのほとんどが、長寿命の放射性核種である炭素14によるものであることから、今後は極めて緩やかに減少していくものと考えられる。

核実験のフォールアウトによる一人あたりの世界平均線量



地表における核実験によって生じたフォールアウト全体の50パーセントが、実験地点の約100キロメートル以内に局地的に沈着した。そのため、実験地点の近くの住民は、主に局地的なフォールアウトによって被ばくした。しかし、実験は比較的人里離れた地域で実施されたため、被ばくした地元住民は少なく、世界全体の集団線量に対しては大きく影響しなかった。しかし、実験地点の風下の住民は、平均よりもかなり高い線量を受けた。

1958年のUNSCEARの最初の報告書を科学的根拠として、**大気圏内、宇宙空間および水中における核兵器実験を禁止する条約**が協議された。1963年に、この部分的核実験禁止条約が署名された後も、1990年代までに約50回の核実験が毎年地下で実施され、その後も少数の核実験が続けられてきた。これらの核実験の多くは核爆発力が大気圏核実験よりもかなり低く、ガスを大気中に放出または漏出しない限りは、いかなる放射能を有する残骸もほとんどは閉じ込められた。核実験は極めて大量の放射性残渣を生み出すものの、これらが公衆を被ばくさせるとは考えにくい。なぜなら、放射性残渣は地中深くに位置しており、基本的には岩盤と融合しているためである。

核実験地域が再び利用されているところもあるが、これらの地域の再利用（例えば、動物の放牧や農作物の栽培など）については危惧する向きもある。例として、今日のカザフスタンにあるセミパラチンスク核実験場の限られた地域な

ど、いくつかの核実験場では、放射性残渣による線量が相当な量である可能性がある。一方、フランス領ポリネシアのムルロア環礁やファンガタウファ環礁などにおいて、最終的に核実験場を使用している住民の線量が、通常のバックグラウンド放射線の範囲を上回ることはなかった。マーシャル諸島やマラリングのような、米国や英国がそれぞれ自国の核実験の一部を実施した別の実験場などでは、そこに住む住民の被ばくは食生活や生活様式に依存するであろう。

原子炉

ウランやプルトニウムの特定の同位体に中性子が衝突すると、核分裂と呼ばれる過程により、エネルギーと2つ以上の中性子を放出しながら、原子核はより小さな2つの原子核に分裂する。放出された中性子はまた別のウランやプルトニウムの原子核に衝突し、再び中性子を放出させながらそれらを分裂させ、次にこれらの中性子がさらに多くの原子核を分裂させることができる。この過程は、連鎖反応と呼ばれる。これらの同位体は、連鎖反応が速く進み過ぎないように制御されながら、通常原子炉内で燃料として使用される。

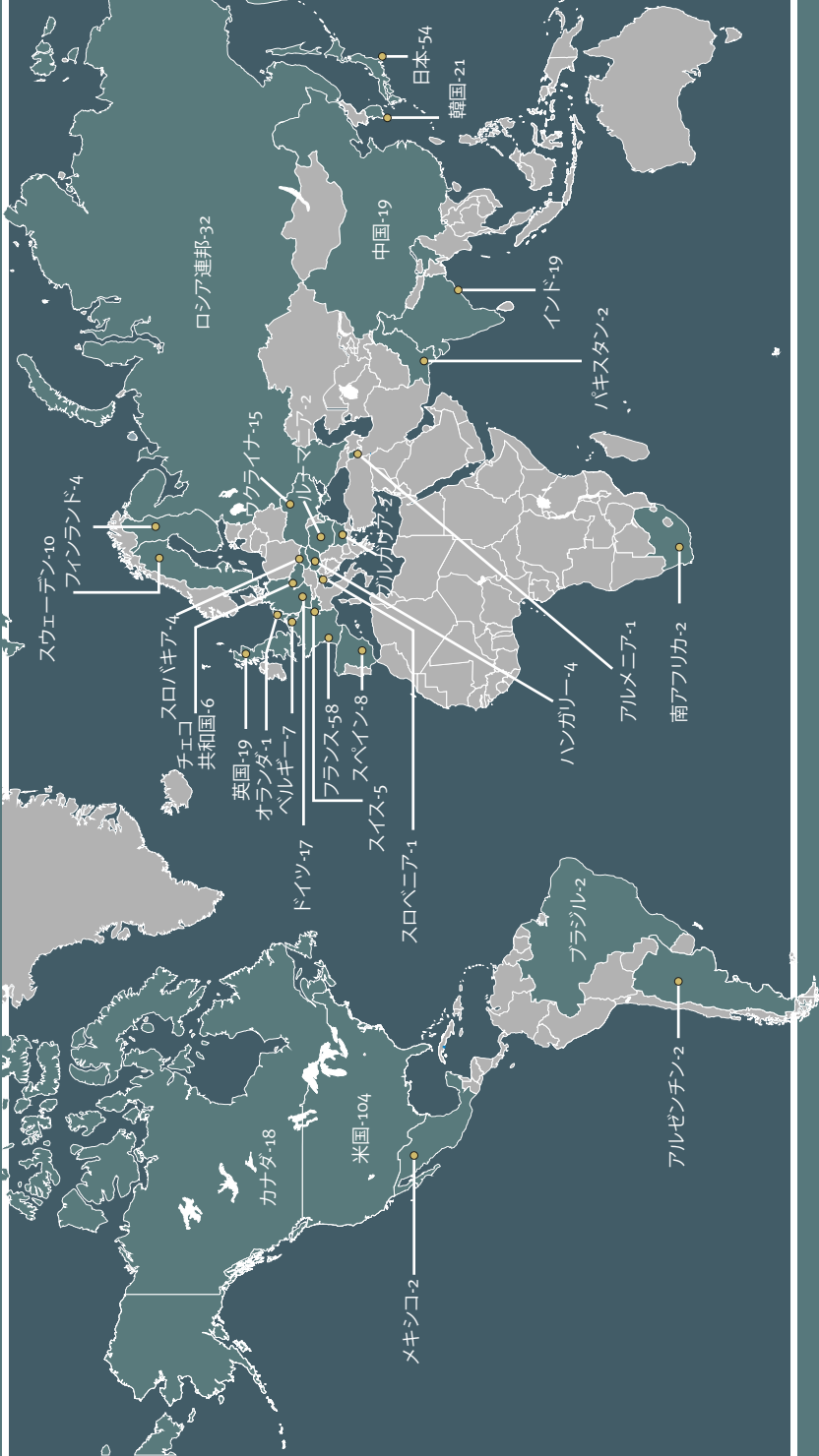
原子炉における核分裂から放出されたエネルギーは、原子力発電所の電力生産に使用することができる。また一方で、核燃料や様々な種類の物質の試験、核物理学や生物学の研究、医療や産業で使用される放射性核種の生産のための研究用原子炉もある。2つの種類の原子炉には違いがあるものの、ウラン採鉱や放射性廃棄物処理といった産業工程は双方ともに必要であり、この工程が職業被ばくや公衆被ばくを引き起こすことがある。

原子力発電所

世界初の産業規模の商業用原子力発電所であるコールダーホール発電所は、1956年に英国で建設された。それ以来、原子力発電所による電力発電は著しく成長してきた。より古い原子炉の廃炉が増加しているにもかかわらず、核原料からの発電は伸び続けている。2010年末までに、約440基の発電用原子炉が29ヶ国で稼働し、地球全体の発電の約10パーセントを供給しており、また240基の研究用原子炉が世界全体の56ヶ国に普及している。

原子力の使用による電力生産は論議を呼ぶことが多いが、通常運転における世界全体の放射線被ばくに対する寄与は極めて小さい。さらに、放射線被ばくのレベルは、施設の種類、場所、そして経年数の違いによって大きく異なる。

世界の原子力発電所 (2010年)



原子炉からの平常時の放出による全体の被ばくレベルは、発電所の電気出力の増加にもかかわらず減少傾向にある。これは、技術の進歩や放射線防護対策の強化によるものである。一般的に、原子力施設からの放出による放射線量の上昇は極めて小さい。原子力発電所の周辺住民の年間集団線量は75人・シーベルトと推定されている。これは、発電所の周辺に暮らす人が約0.0001ミリシーベルトの年間平均実効線量を被ばくしていることを意味する。

原子力エネルギーの利用にあたって放射線被ばくを伴う主要な工程は採掘である。ウランの採掘と粗精練は、自然放射性核種のレベルが高められた相当な量の残渣を尾鉱として残す。2003年までに、世界全体のウラン生産量は約200万トンに達したが、その結果として生じた尾鉱は20億トンを超えた。新たな尾鉱パイルはよく管理されているが、古いものは放棄されているものも多く存在しており、改善されたものはごくわずかである。UNSCEARは、現在の鉱山、精錬場、尾鉱パイルの周辺の人口集団における年間集団線量は、約50～60人・シーベルトと推定している。

原子炉からの使用済燃料については、ウランとプルトニウムを回収して再利用するための再処理が可能である。今日、大部分の使用済燃料は中間貯蔵施設に保管されているが、現在までに生産された燃料の約3分の1が再処理されている。再処理に伴う年間集団線量は20～30人・シーベルトの範囲にあると推定されている。

低レベルおよび一部の中レベル廃棄物は、過去に海洋投棄されたこともあったが、現在では地表近くの施設で処分されている。再処理からの高レベル廃棄物と使用済燃料(再処理されない場合)は保管されているが、最終的には処分される必要がある。適切な廃棄物処分とは、遠い未来であっても人々の被ばくを上昇させることのないものであろう。

職場での被ばく

原子力産業では、地下のウラン鉱山におけるラドンの放出が職業被ばくに大きく寄与している。高レベルの放射性核種が含まれる可能性がある放射性鉱石の採掘と処理は、広く行われている作業である。原子力産業における作業員1人あたりの年間平均実効線量は、1970年代の4.4ミリシーベルトから、現在では1ミリシーベルトにまで徐々に減少している。これは主に、採鉱技術の進歩および換気によるウラン鉱業での著しい減少によるものである。

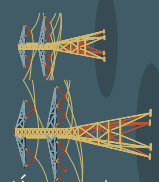
原子力産業の主な工程

転換、濃縮、精錬は、ウランを燃料として使用するための処理である。



燃料製造の過程では、燃料棒を製造する。これは、通常セラミックのペレットに入ったウランを金属チューブに閉じ込めたものである。

研究用原子炉および発電用原子炉では、ウラン原子の原子核が分裂(核分裂)し、放出したエネルギーを使って水を加熱する。



使用済み燃料からの再処理により、回収されたウランとプルトニウムは、転換、濃縮後、燃料として再利用される。

粗精錬によって、鉱石からウランを抽出する。残渣は、尾鉱となり、これには低濃度の長寿命放射性核種が含まれている。



放射性副産物は、燃料効率を落とす。12~24ヶ月後に使用済み燃料は原子炉から回収される。

原子炉で生成される放射性同位体は医療や産業で利用するために取り出すことが出来る。

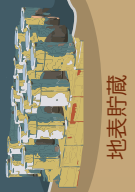


使用済み燃料を含む高レベル廃棄物は、深地層処分場で最終処分されるまでの間、通常、中間貯蔵施設で保管される。



深地層処分場

低~中レベルの廃棄物は、その大部分が浅地中に埋設処分される。



浅層および中間深度



原子力施設における事故

原子力産業に関する民間施設の通常運転時において、被ばくのレベルは非常に低い。しかし、これまでにいくつかの深刻な事故が起こっており、これらは広く世間の関心を集め、その影響はUNSCEARによって検討されてきた。その例として、1958年の旧ユーゴスラビアにおけるビンカ研究施設、1979年の米国におけるスリーマイル島原子力発電所、そして1999年の日本の東海村における燃料転換施設が挙げられる。

1945年から2007年に原子力施設で起こった深刻な放射線事故は35名の従業者の死者および負傷者を出し、7件の事故は施設外への放射性物質の放出と検出可能な公衆への被ばくをもたらした。核兵器の計画に関連する施設でも深刻な事故があった。1986年のチェルノブイリと2011年の福島第一での事故を除いて(これらについては以下で述べる)、32名の死者および61件の治療を必要とする放射線関連障害が確認されている。

チェルノブイリでの事故の前で最も深刻であった民間施設での事故は、1979年3月28日のスリーマイル島原子力発電所での事故であった。一連の事象は、炉心の部分的なメルトダウンをもたらした。この事故では、破損した炉心から原子炉建屋内に大量の核分裂生成物と放射性核種が放出されたが、環境中への放出は比較的少なく、結果として公衆の被ばくは非常に低かった。

チェルノブイリ原子力発電所事故

1986年4月26日のチェルノブイリ原子力発電所での事故は、民間の原子力発電の歴史において最も重大であるだけでなく、一般公衆に対する放射線被ばくの観点からも最も深刻なものであった。この事故による集団線量は、他の全ての放射線事故で生じた総集団線量の何倍も大きかった。

事故直後、作業員2人が外傷のために亡くなり、134人が急性放射線症候群を患い、うち28人が死亡した。生存者の主な障害は、皮膚損傷および放射線誘発白内障であった。緊急作業員の他に、数十万人の人々がその後の復旧作業に携わった。1986年および1987年に高線量を受けた人々における白血病および白内障の発症の明らかな増加を除いて、この集団に対する他の放射線に関連した健康影響に関する一貫性のある証拠はこれまでに見つかってない。

この事故は、民間事業について記録されている中で最も多くの制御不能な放射能を環境中へ放出した。約10日にわたり、大量の放射性物質が大気中に放出された。事故によって生じた放射能雲は北半球全体に拡散し、旧ソ連およびヨーロッパ各地の広い範囲に大量の放射性物質が沈着した。大地および水が汚染され、特に、現在のベラルーシ、ロシア連邦、ウクライナでは多くの人々に深刻な社会的・経済的混乱を与えた。

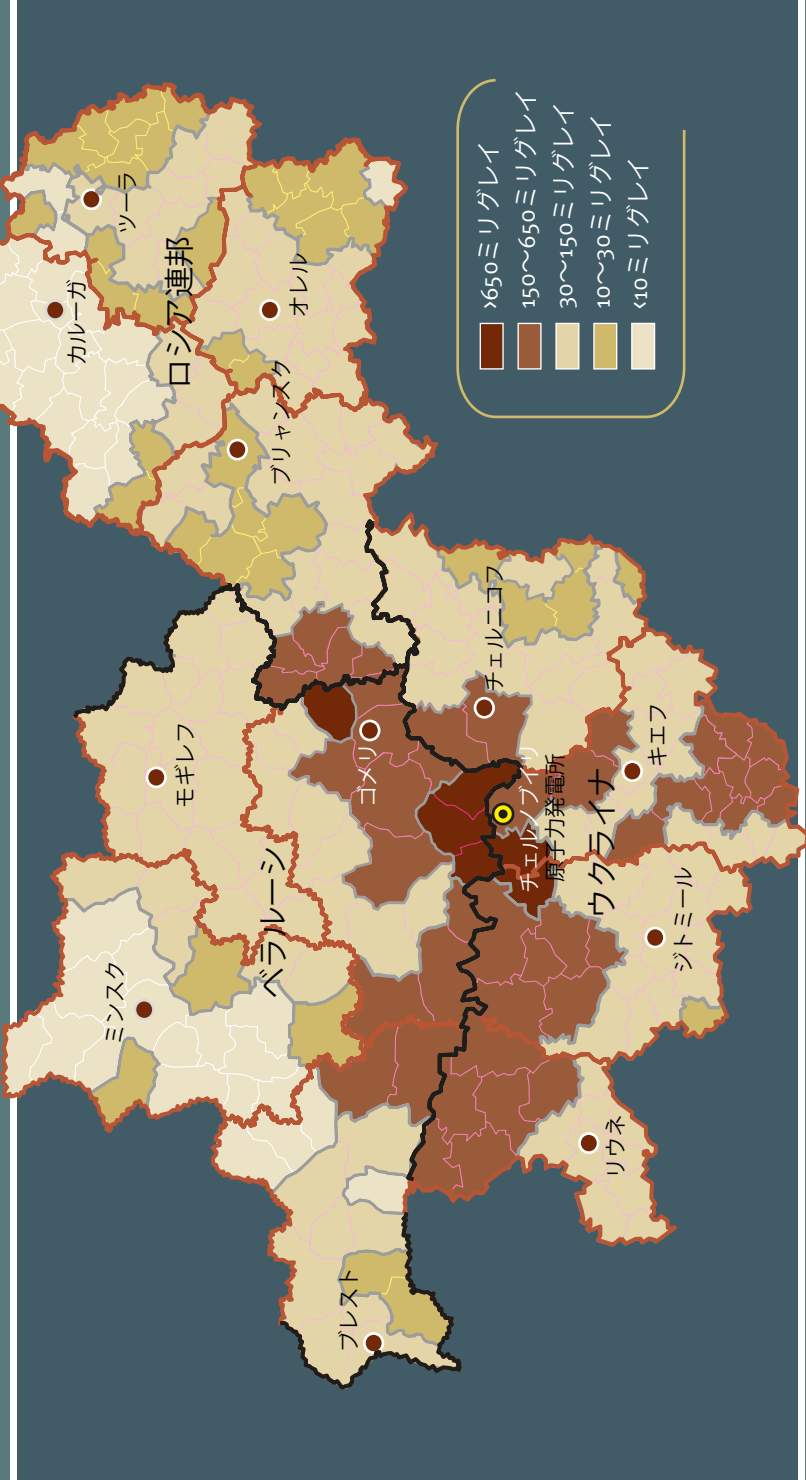
短寿命放射性核種であるヨウ素131(半減期8日)による生乳の汚染と、迅速な対策の欠如が、旧ソ連のいくつかの地域において、特に小児の甲状腺に対する極めて高い線量の被ばくをもたらした。1990年代初頭以降は、1986年に小児あるいは青年であった被ばく者における甲状腺がんの発生が、ベラルーシ、ウクライナ、そしてロシア連邦の中でより大きく被災した4つの地域において増加した。1991～2005年の期間に、6,000件を上回る症例が報告されており、そのうち15件で死亡が確認された。

一般集団も、放射性沈着物による外部被ばく、および汚染された食品の摂取による内部被ばくによって、主にセシウム137(半減期30年)による長期的な放射線被ばくを受けた。しかし、結果として長期的な被ばくによる放射線量は比較的 low、ベラルーシ、ロシア連邦、そしてウクライナの汚染地域における1986～2005年の期間の個人の平均実効線量は9ミリシーベルトであった。これは、一般集団に大きな健康影響を及ぼすとは考えにくい数値である。しかし、事故による深刻な混乱は、大規模な社会的・経済的影響をもたらした。被災した人々に大きな苦痛をもたらした。

UNSCEARは、この事故の放射線影響について複数の報告書で詳細に検討した。国際社会は、この事故による放射線およびその他の影響に対する理解を深め、それらの低減を支援するために、包括的な視点かつ様々な重要分野ごとの視点から、事故の影響の大きさと特徴を評価するためのこれまでにない努力を続けてきた。

基本的に1986年以降の研究は、ヨウ素131による被ばく時に小児であった人々と、高い放射線量を受けた緊急作業員および復旧作業員について、放射線による影響のリスクが増加することを示している。しかし、大部分の地域住民は、年間の自然バックグラウンド放射線レベルに相当するか、もしくはその数倍高い程度の低いレベルの放射線に被ばくした。

チェルノブイリ原子力発電所事故後の平均甲状腺線量



放射線はどこから来るのか？

福島第一原子力発電所事故

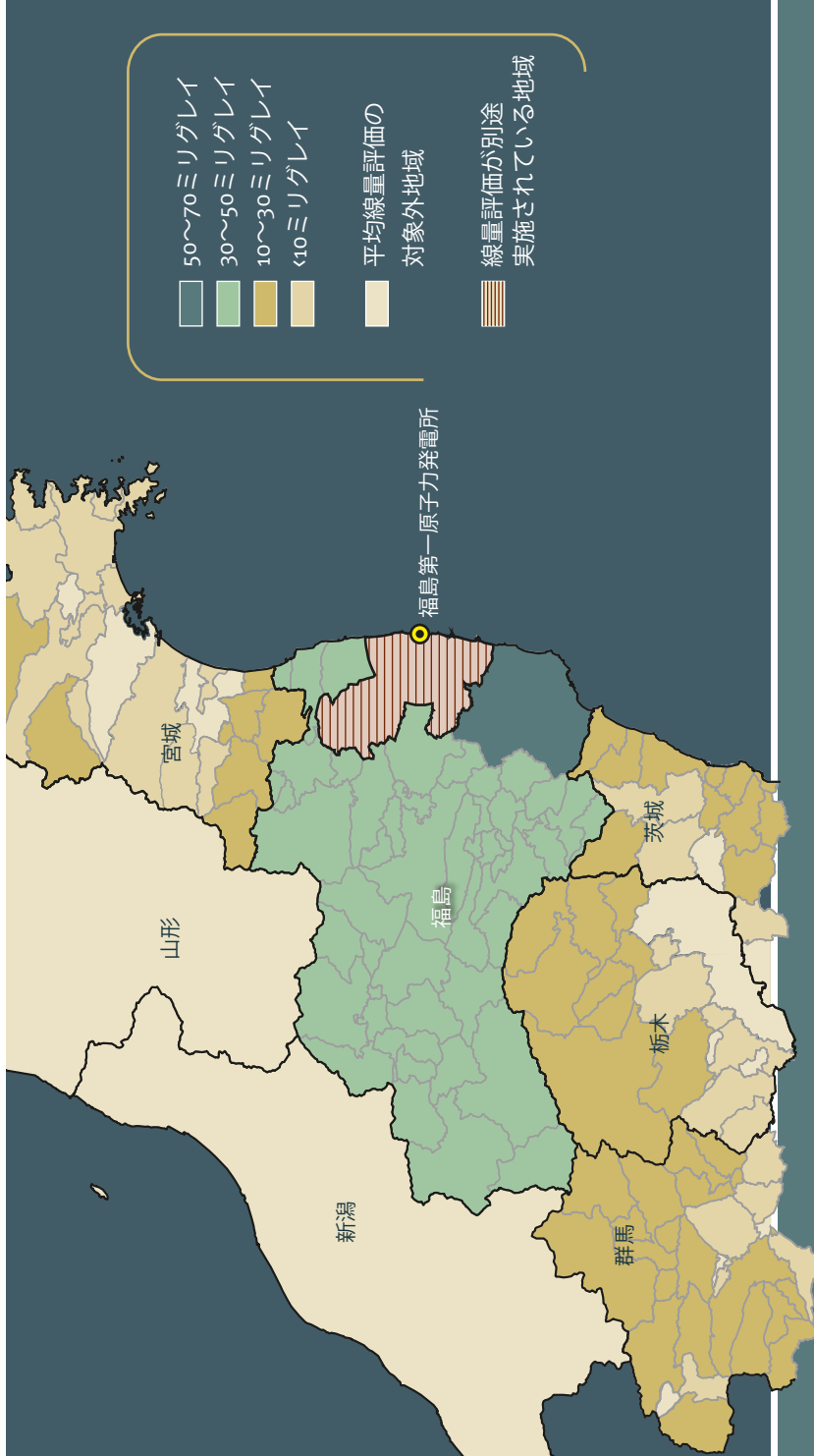
2011年3月11日、マグニチュード9.0の東日本大震災と北日本東海岸における津波の後、福島第一原子力発電所は深刻な被害を受け、放射性物質が環境中に放出された。原子力発電所の敷地から20キロメートル圏内およびいくつかの周辺地域の約8万5,000人の住民が、3月11日から15日の間、予防措置として避難した。一方で、発電所から20～30キロメートル圏内に住む住民は自宅避難した。その後、2011年4月には、地表の放射性核種のレベルの上昇に伴い、発電所のさらに北西に住む1万人の人々の避難が勧告された。これらの避難によって、被災による被ばくのレベルは大幅に減少した。公衆への放射線被ばくを制限するために、水と特定の食品の摂取が一時的に規制された。また、原子力発電所の緊急事態への対処にあたり、数名の作業員および緊急対応要員が被ばくした。

UNSCEARは、放射線量および健康と環境への関連影響についての評価を実施した。事故後の最初の1年半の間に、約2万5,000人の作業員が福島第一原子力発電所の敷地内で事故の緩和やその他の作業に従事した。当時のこれらの作業員の平均実効線量は約12ミリシーベルトであった。しかし、6名の作業員が250ミリシーベルトを超える累計線量を受け、主に内部被ばく(約90パーセント)を受けた1人の作業員の680ミリシーベルトが、報告された最も高い総線量であった。12名の作業員が、2～12グレイの範囲の線量を甲状腺に受けたと推定された。この事故で被ばくした作業員に、放射線による死亡や急性疾患は見られなかった。

福島県の避難区域における成人の平均実効線量は、事故後の最初の年には1ミリシーベルトから最大約10ミリシーベルトの範囲に及んだ。1歳児の実効線量は、成人の約2倍であると推定された。また、避難区域外の福島県内の地域や周辺の県では、より低い線量であった。

甲状腺への平均線量の推定値は主にヨウ素131によるものであり、最も被ばくした成人で最大35ミリグレイ、1歳児で最大80ミリグレイの範囲であった。主に外部の自然放射線源からの甲状腺への年間線量は、一般的に1ミリグレイ程度である。UNSCEARは、放射線に最も被ばくした小児の集団において甲状腺がんのリスクが理論上は上昇するであろうと結論付けた。しかしながら、甲状腺がんは小児には稀にしか発生しない疾患であり、この集団における統計的に観察可能な影響はみられないものと考えられている。

福島第一原子力発電所事故後の小児の平均甲状腺線量



放射線はどこから来るのか？

チェルノブイリでの惨事と比較されるが、福島第一原子力発電所での事故は、原子炉の種類、事故の経緯、放射性核種の放出とその拡散の特徴、そして講じられた防護対策の観点において明らかに異なる。いずれの事例でも、多量のヨウ素131およびセシウム137(原子力事故後の被ばくにおいて、いずれも最も重要な放射性核種である)が環境中に放出された。福島第一原子力発電所での事故からのヨウ素131およびセシウム137の放出は、チェルノブイリでの事故と比較してそれぞれ約10パーセントと約20パーセントであった。

産業およびその他の利用

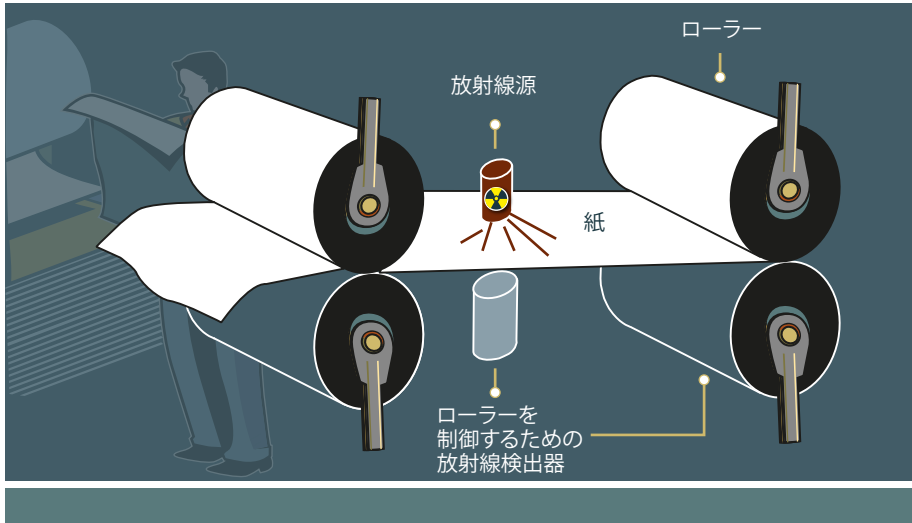
放射線源は幅広い分野の産業利用に用いられている。これらには、医療および医薬品の殺菌、食品の保存や害虫駆除に用いられる工業用照射、溶接された金属の接合部の欠陥を検査するために使用される工業用ラジオグラフィ、照準器内の発光物質や出口標識や地図を照らすための低光量の光源として用いられるアルファ放射体やベータ放射体、鉱石・石油・ガス探査のための掘削孔において地質の特徴を測定する検層に使用される放射線源または小型X線機器、物質の厚み、湿度、密度のレベルを計測する機器に用いられる放射線源、そして研究に用いられるその他の密封放射線源がある。

広く普及しているものの、産業や医療行為に用いられる放射性核種の生産に伴う一般公衆の被ばくのレベルは非常に低い。しかし、事故の際にはより局所的な地域が汚染され、高レベルの被ばくが生じる恐れがある。

職場での被ばく

放射線の産業利用に携わる作業員数は、2000年代初頭で約100万人おり、作業員1人あたりの年間平均実効線量は0.3ミリシーベルトであった。

放射線を利用した厚さ計



自然起源放射性物質

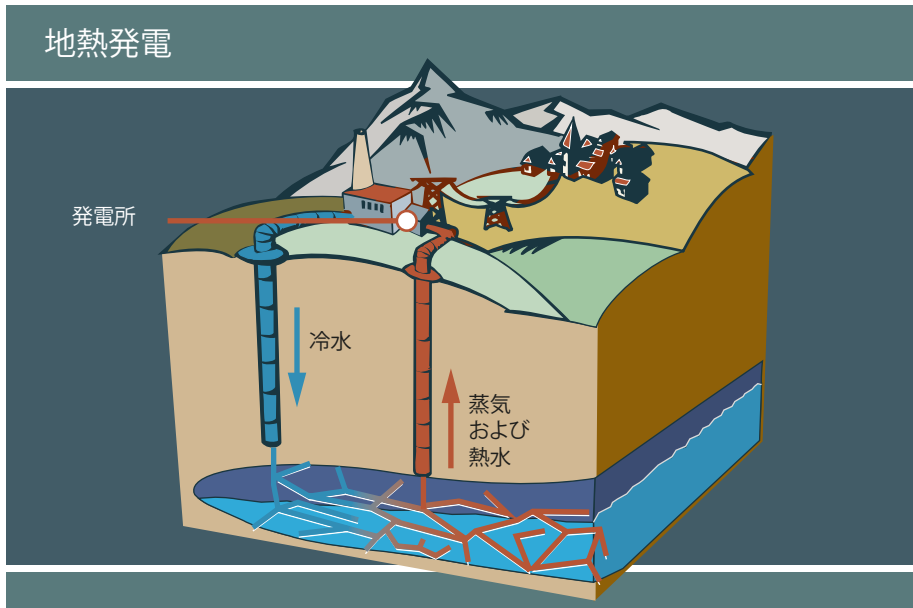
原子力エネルギーの利用とは関係がないものの、自然起源放射性物質 (NORM) の濃度が高まった工業製品、副産物、廃棄物によって公衆に被ばくをもたらし恐れのあるいくつかの種類施設が世界各地にある。このような施設の中で最も重要なものは、採鉱および選鉱に関わる施設である。

鉱石の抽出と処理に関連する作業も、NORMのレベルを高める原因になる可能性がある。これらの活動には、金属鉱業と精錬、リン酸塩の生産、石炭採鉱と石炭火力発電、石油とガスの掘削、レアアースおよび酸化チタン産業、ジルコニウムおよびセラミック産業および自然起源放射性核種(一般的には、ラジウムとトリウムの同位体)の応用がある。

例えば、石炭は微量の原始放射性核種を含んでいる。石炭の燃焼によって、これらの放射性核種は環境中へと放出され、人々を被ばくさせる恐れがある。つまり、世界中の石炭火力発電所によって生産される年間電力量が1ギガワット増えるごとに、世界人口に対する集団線量が年間約20人・シーベルト増加すると推定されている。さらに、埋め立てや道路建設にフライアッシュ(燃焼で生じる残渣)が使用されてきたが、建物に使用された場合には、そこから直接受ける放射線被ばくとラドンの吸入による放射線被ばくとの両方を受けることになる。なお、フライアッシュの廃棄は、廃棄場周辺での放射線被ばくのレベルを高める可能性がある。

放射線はどこから来るのか？

地熱エネルギー発電は、一般公衆に対するもう一つの放射線被ばく線源である。地下貯水池の蒸気や温水が、発電や建物を暖めることに利用される。イタリアと米国におけるこの技術の利用に伴う放出量の推定は、石炭火力発電所で年間電力量1ギガワットを生産した場合の集団線量の約10パーセントに相当することを示唆している。現在、世界のエネルギー生産に対する地熱エネルギーの寄与は比較的小さく、それに伴う放射線被ばくもわずかである。



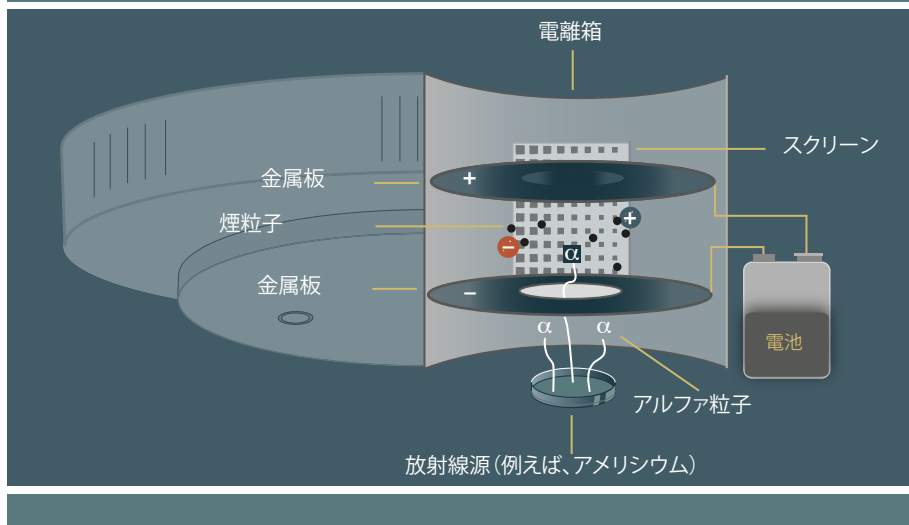
農業で使用される水処理から生じる汚泥など、他の様々な人間の活動が人々をNORMによって被ばくさせる恐れがある。しかし、公衆の被ばくのレベルは極めて低く、年間千分の数ミリシーベルト未満である。

ウラン濃縮の副生成物は劣化ウランであり、天然ウランより放射能が低い。劣化ウランは長年にわたり民需および軍事目的の両方で使用されてきた。高密度であることから、劣化ウランは放射線の遮蔽や、航空機の釣合いおもりとして使用される。劣化ウランの軍事利用(特に、徹甲弾への使用)は、残留汚染に対する懸念をもたらしてきた。長期間にわたって手で触れるなどの特別な状況を除いて、劣化ウランによる放射線被ばくは極めて低い。実際のところ、劣化ウランの最も有害な性質は化学毒性である。

消費財

日常で使用するために購入される数多くの製品には、その化学的性質や放射能特性を利用するために、意図的に付加される少量の放射性核種が含まれている。かつて、発光する消費財に利用された最も重要な放射性核種はラジウム226である。ラジウム226は数十年前から使われなくなり、放射能毒性のより低いプロメチウム147と水素3(トリチウム)が取って代わった。そうは言っても、トリチウムは流動性が非常に高く、時計や腕時計からその化合物の漏出が起こることがある。ただし、トリチウムは皮膚を通過しない非常に弱いベータ粒子を放出するだけであり、体内に入った場合にのみ人々に被ばくをもたらす。

放射線を利用した煙感知器



最新の煙感知器の中には、アメリシウム241の小さな金属の薄片を使った電離箱を使用しているものがある。アメリシウム241はアルファ粒子を放出し、継続的にイオン電流を生み出す。周囲の空気は自由に感知機内に入ることができるようになっており、感知器内に煙が入ると、この電流を遮断し警報が作動する。

煙感知器内のアメリシウム線源の放射能は非常に低く、約432年の半減期で非常に緩やかに壊変する。つまり感知器の10年間の使用が終わった時にも、放射能は基本的には全て残っていることになる。アメリシウム線源が感知器内にあ

る限り、被ばくは無視できる程度である。感度の高い機器であれば検知できるが、このような製品からの被ばくのレベルは非常に低い。感知器から2メートル離れたところに1日8時間立っている人が、年間で0.0001ミリシーベルト未満の線量を受けると推定される。

産業における事故

産業用放射線源に関わる事故は、原子力発電所での事故よりも頻繁に起こっている。しかし、たとえ作業員や一般の人々に広範囲にわたる放射線被ばくを引き起こす恐れがあるとしても、これらの事故が一般的にそれほど注目されることはない。

1945年から2007年の間に、放射線源、加速器、X線機器を使用する産業施設において約80件の事故が報告された。これらの事故で9名の死亡が報告され、120名の作業員が負傷した。負傷した作業員の中には急性放射線症候群を患った者もいた。負傷が多い部位は手であり、切断が必要な場合も多い。UNSCEARは、死亡および傷害を伴う産業施設での事故について、報告されていないものもある可能性が高いと考えている。

このような事故の原因と影響は多岐にわたっている。ここでは2つの事例のみを挙げる。1978年に米国ルイジアナ州において、孵(はしけ)で働いていた工業用のX線技師が3.7テラベクレルのイリジウム192線源によって、左手に放射線障害を負った。おそらく、線量計の誤動作のせいである。約3週間後には手が赤く腫れ上がり、5～8週間で回復したものの、次いで皮膚疱疹が現れ、6ヶ月後に人差し指の一部を切断しなければならなかった。また、1990年には、中国の上海市で、不適切な安全対策のために、産業施設で7名の作業員がコバルト60線源からの放射線によって被ばくした。推定12グレイの線量を受けた1名の作業員は、被ばくから25日後に死亡した。二人目の線量は11グレイと推定され、被ばくから90日後に死亡した。他の5名の作業員は2グレイから5グレイと推定される線量を受けたものの、治療後に回復した。

身元不明線源

1966年から2007年までの間に、放射線源の紛失や盗難、または投棄による31件の事故が認められた。これらは、身元不明線源としても知られている。これらの事故により、子供を含む公衆の42名が死亡しており、さらに急性放射線症候群、深刻な局所傷害、体内汚染、または精神的な問題により、数百人が治療を必要とした。6件の事故は放置された放射線治療装置に関連するものであった。

正確にどのくらいの身元不明線源が世界中にあるのかは分らないが、その数は数千と考えられている。米国原子力規制委員会は、1996年から2008年までの期間に米国内の企業において1,500近くの放射線源が行方不明となり、そのうち半数以上は回収されていないままであると報告している。欧州連合による調査では、その領域内で年間に最大70の線源が規制管理下から紛失していると推定された。これらの線源の多くは重大な放射線障害をもたらすことはないだろうが、事故は身元不明線源の重大な懸念である。

深刻な放射線事故に関する世界の推定件数 *

事故の種類	1945～1965年	1966～1986年	1987～2007年
原子力施設での事故	19	12	4
産業利用による事故	2	50	28
身元不明線源による事故	3	15	16
学問 / 研究における事故	2	16	4
医療利用による事故	不明	18	14

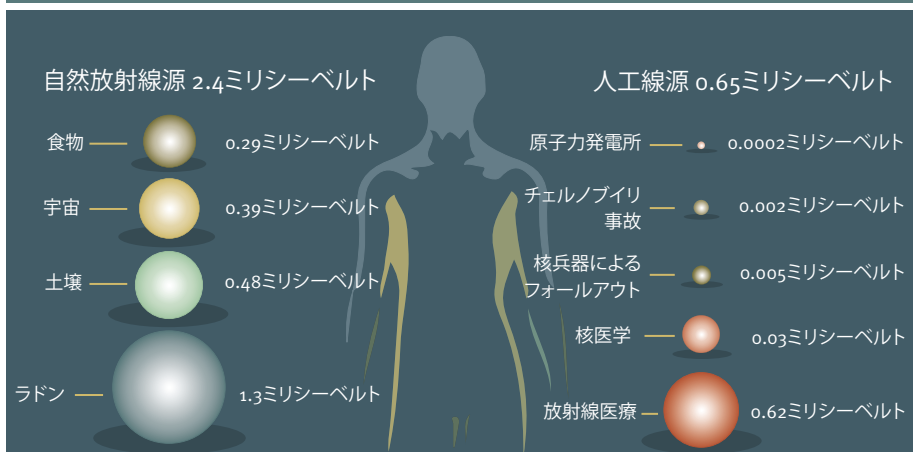
* 公式に報告もしくは公表された事故に基づく。特に医療においては、報告されていない事故の件数は、はるかに多いと考えられる。

密閉線源やそれらの容器は、金属スクラップの売買のためにごみをあさる人々の目を引く可能性がある。なぜなら、これらは高価な金属でできているように見え、放射能の警告ラベルの表示がない場合があるからである。1987年のブラジル、ゴイアニア市の事例もそうであったが、何も知らない作業員や一般公衆もが、線源に触れたことにより重篤な傷害や死に至った。投棄されていた高放射能(50.9テラベクレル)のセシウム137を搭載する遠隔照射治療装置が盗まれ、線源カプセルが割れた。その後の2週間にわたり、可溶性の塩化セシウムの粉末がスクラップ置き場や周辺の住宅に拡散した。多くの人々が体調不良や、皮膚症状を起こし、11万人の人々が放射能汚染の検査を受けなければならなかった。多くの人々が、セシウム137によって体内汚染されていた。この事故により、子供1人を含む4人が死亡した。

3.3. 公衆および作業者の平均的な放射線被ばく

一般的に、公衆への自然放射線源からの被ばくは、全体の被ばくの大半を占めている。UNSCEARは、個人の年間平均実効線量を約3ミリシーベルトと推定している。平均すると自然放射線源による年間線量は2.4ミリシーベルトであり、その3分の2が私たちが呼吸する空気、私たちが食べる食物、そして私たちが飲む水に含まれる放射性物質によってもたらされている。人工放射線源による主な被ばくは、医療で用いられる放射線によってもたらされ、個人の年間平均実効線量は0.62ミリシーベルトである。医療放射線被ばくは、地域、国、そして医療制度によって異なる。UNSCEARは、放射線の医療利用による年間平均実効線量は、工業国において1.9ミリシーベルト、非工業国において0.32ミリシーベルトと推定している。しかし、これらの数値は実際とはかなり異なる場合もある(例えば、米国では3ミリシーベルト、ケニアではわずか0.05ミリシーベルト)。

放射線源による平均公衆被ばく*



*一人あたりの年間実効線量のおおよその推定値 (世界平均)。

1990年代まで、作業者の被ばくについての関心は人工放射線源に集中していた。しかし現在では、主に鉱業において非常に多くの作業者が自然放射線源に被ばくしていることが認識されており、特定の職業ではラドンガスの吸入が職業上の放射線被ばくの大半を占めている。地下ウラン鉱山におけるラドンの放出は、一部の原子力産業における職業被ばくに大きく寄与しているが、原子力産業全体での作業者の年間平均実効線量は、1970年代の4.4ミリシーベルトから現

在の約1ミリシーベルトへと減少している。しかしながら、炭鉱作業者の年間平均実効線量は依然として約2.4ミリシーベルトであり、その他の鉱山作業者については約3ミリシーベルトである。

今日、モニタリングを受けている作業者の総数の推定値は、世界全体で約2,300万人である。そのうち約1,000万人は人工線源に被ばくしている。医療分野では、4人のうち3人の作業者が人工線源に被ばくしており、作業者1人あたりの年間実効線量は0.5ミリシーベルトである。作業者1人あたりの年間平均実効線量の動向評価について、主に採鉱による自然放射線源による被ばくは増加しているが、主として放射線防護対策の適切な実施により人工放射線源による被ばくは減少している。

作業者に対する放射線被ばくの世界的動向（ミリシーベルト）*				
年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
自然放射線源				
航空機乗務員	—	3.0	3.0	3.0
石炭鉱業	—	0.9	0.7	2.4
石炭以外の鉱業**	—	1.0	2.7	3.0
その他	—	6.0	4.8	4.8
合計	—	1.7	1.8	2.9
人工放射線源				
医療利用	0.8	0.6	0.3	0.5
原子力産業	4.4	3.7	1.8	1.0
その他の産業	1.6	1.4	0.5	0.3
その他	1.1	0.6	0.2	0.1
合計	1.7	1.4	0.6	0.5

* 作業者一人あたりの年間平均実効線量推定値。
** ウラン鉱業は、原子力産業に含まれる。

UNSCEARの出版物

発足以来、原子放射線の影響に関する国連科学委員会は、100を超える科学的附属書を含む、25を超える重要な報告書を発行してきた。これらの報告書は、核実験、原子力発電、放射線の医療利用、職業上の放射線源や、自然放射線源からの放射線被ばくについて検討された権威ある評価に関する主要な情報源として、高く位置づけられている。また、本委員会は、放射線によって誘発されるがんおよび遺伝性疾患に関する詳細な研究について検討し、健康と環境に対する事故の放射線影響について評価している。UNSCEARの報告書および科学的附属書は、国連加盟国、科学界および公衆の便益のためにその知見を普及させる目的で、国連が販売する出版物(unp.un.org)および無償でダウンロードできる電子版(unscear.org)として発行されている。

本書に関するご意見ならびにコメントについては、以下にご連絡ください。

UNSCEAR secretariat
Vienna International Centre
P.O. Box 500
1400 Vienna, Austria
E-mail: unscear@unscear.org

1955年、国連総会は、電離放射線の影響とレベルに関する情報の収集と評価のために、原子放射線の影響に関する科学委員会（UNSCEAR）を設置しました。

これは、核実験からのフォールアウトが、大気、水、食物を通して人々のもとに到達しつつあった当時の、ヒトの健康および環境に対する電離放射線の影響に関する懸念に応えるためのものでした。UNSCEARの最初の報告書は、1963年の部分的核実験禁止条約の交渉における科学的根拠となりました。

本書は、一般読者に理解しやすい方法で、放射線のレベルとその影響に関する最新の知見を客観的に示そうと試みたものです。UNSCEARの科学的報告書が、主要な情報源として使用されています。



UNEP