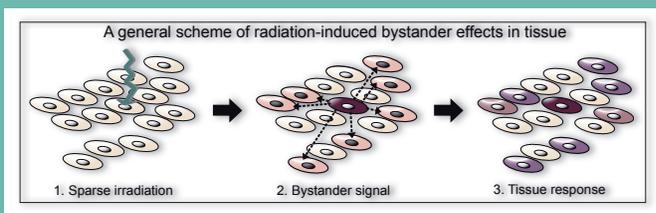


# Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiological Protection

## 放射線防護における 科学的問題と新たな課題

放射線防護科学の意味合いに関する  
専門家グループ(EGIS)報告書



Scientific Issues and Emerging Challenges for  
Radiological Protection

放射線防護における  
科学的問題と新たな課題

放射線防護科学の意味合いに関する  
専門家グループ(EGIS)報告書

©OECD 2009  
NEA No, 6876

原子力機関  
経済協力開発機構

## 経済協力開発機構

経済協力開発機構（OECD）は、民主主義を原則とする 30 カ国の政府が世界のグローバル化に伴う経済、社会、環境などの問題について協力して取り組んでいる唯一の国際機関である。OECD はまた、コーポレートガバナンス、情報経済、人口の高齢化などの新しい状況や問題について先頭に立って取り組み、各国政府の対応を支援している。OECD は、各国政府が政策経験を比較し、共通の問題に対する解決策を模索し、良い行為（グッドプラクティス）を明らかにして国内政策と国際政策とを調整できる場を提供している。

現在の OECD 加盟国は以下の通りである：オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、チェコ共和国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本、韓国、ルクセンブルグ、メキシコ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、スロバキア共和国、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国。欧州委員会（EC）は OECD の業務に参画している。

OECD 出版局は、機構が収集した統計や、経済、社会、環境の問題とともに加盟国が取り決めた協定、指針、基準などの成果の広範な普及を図っている。

\*\*\*

本文書は OECD 事務局長の責任において公表されている。本文書に示された意見や採用された議論は必ずしも当機構あるいはその加盟国政府の公式見解を反映したものではない。

## 原子力機関

OECD 原子力機関（NEA）は、1958 年 2 月 1 日に OEEC 欧州原子力機関の名称で設立された。日本が欧州以外の国として最初に正式加盟した 1972 年 4 月 20 日から現在の名称となっている。現在 NEA を構成しているのは次の 28 の OECD 加盟国である：オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、チェコ共和国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本、ルクセンブルグ、メキシコ、オランダ、ノルウェー、ポルトガル、韓国、スロバキア共和国、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国。欧州委員会も NEA の業務に参画している。

NEA の任務は次の通りである：

- 国際協力を通じて、安全で環境に優しく経済的な、原子力の平和利用に必要な科学的、技術的、法的基盤の維持と開発について加盟国を支援すること。
- エネルギーおよび持続可能な開発などの分野における重要問題について、原子力政策に関する各国政府の決定および OECD の広範な政策分析の判断材料として信頼できる評価を提供し、共通理解を形成すること。

NEA の業務範囲は、原子力活動の安全と規制、放射性廃棄物管理、放射線防護、核科学、核燃料サイクルの経済的技術的分析、原子力法規と責任、公共情報である。NEA データバンクは、核データおよびコンピュータプログラムのサービスを加盟国に提供している。

上記および関連業務において、NEA はウィーンの国際原子力機関（IAEA）を初め、原子力分野のその他の国際機関とも協力協定を締結し、緊密に協力して業務を進めている。

## ©OECD 2006

本刊行物の複製、複写、転送または翻訳は書面による許可が必要である。許可の申請は OECD 出版局：[rights@oecd.org](mailto:rights@oecd.org) またはファックス(+33-1) 45 24 13 91 に送ること。本文書の一部の複写許可は、Centre Francais d'exploitation du droit de Copie, 20 rue des Grands Augustins, 75006 Paris, France ([contact@cfcopies.com](mailto:contact@cfcopies.com))に申請するものとする。

## 序文

1993年、CRPPHは、「21世紀の幕開けにおける放射線防護」と名付けたワークショップを開催した。これは、ICRP Publication60の作成、発行に続く、その適用、実施、改正の時期の始めにおいて行われた。このようなことから、CRPPHは、どのようなタイプの問題が近い将来発生する可能性があるかを確認し、それらにどのような意味があるか検討するため、全体像を把握することが有用と考えた。この検討作業の意図は、この普及期間において、各加盟国政府の政策立案とその実施を指導する体制を整備するのを支援することにあった。このワークショップの結果を踏まえ、CRPPHは1994年に「放射線防護 その現在と未来:CRPPHの意見取りまとめ」と名付けた要約文書を公表した。この文書は、それぞれのNEA加盟国にとって有用なものであったが、それに加えて、CRPPHがさらに研究すべき問題と分野を列挙する役割も果たした。「意見取りまとめ」は、事実上、10年間のCRPPHの検討プログラムの青写真になった。その出版以来、CRPPHは、その中で明らかにされたトピックや分野に精力的に取り組み、それらすべてについて報告書や研究を公表してきた。

12年後の2006年、放射線防護は再び転機を迎えることとなった。NEAでは、全面的に見直されたプロセスが実施され、新しい長期計画が2004年に確立された。この努力の一環として、CRPPHを含むすべてのNEA常設専門委員会は、それぞれの任務を現状に合うよう改めた。放射線防護コミュニティも、全面的見直しに取り組んでおり、新しいICRPの勧告の策定作業が進められている。

この全面改定の雰囲気の中で、CRPPHは、中長期的に、放射線防護政策、規制、適用に重要な影響を及ぼすと思われるトピックと分野を明らかにする作業に着手することで合意した。この作業の究極の目的は、少なくとも今後5年から10年間にわたってCRPPHの研究を方向づける新しい総意をとりまとめることにある。この作業を遂行するためCRPPHは、2004年3月の第62回会議でトピカル・セッションを開催し、このテーマの検討の方向を予備的にまとめた。しかし、前の「意見取りまとめ」と異なり、CRPPHは、放射線防護科学の研究に対して特別な取り組みを行うべきであると感じた。こうした必要性の判断は、一部、CRPPHが以前にまとめた

「放射線健康科学の進展とその放射線防護に対する影響」(NEA, 1998)の重要性を踏まえた判断であると同時に、トピックセッションの結果を踏まえた判断でもある。このトピックセッションでの議論で明らかになったことは、遺伝的感受性、バースタンダー効果、慢性被ばくの長期的影響、がん以外の影響などの分野で放射線防護研究における新たな課題が見えてきているように思われることであった。新しい「CRPPの意見取りまとめ」の方向性をめぐる予備的議論では、放射線防護研究の進展が、放射線防護政策、規制および適用に重要な中長期的影響を及ぼす可能性があることが指摘された。最も効果的に国内外の資源に焦点を当て、方向づけるために、CRPPHは、「放射線防護科学の意味合いに関する専門家グループ」(EGIS)を設置し、中長期的政策ニーズに応える研究に取り組むことで合意した。

CRPPHは、EGISが放射線防護科学における現在進行中のプロジェクトを調査すべきであり、それらの結果が喚起すると思われる含意について議論すべきであることに合意した。具体的には、短期的、中期的、例えば今後3年から10年の間に結果を出せると見込まれるプロジェクトに焦点を当てることであった。さらにEGISは、放射線リスク評価と管理における現在の傾向、新たな傾向についての政策判断の裏付けを得るために解決する必要がある科学的問題を特定する任務も与えられた。

本報告書の構成は以下のとおりである。

- パート1: 考えられる科学的問題とそれらが持つ意味合い
  - － 非標的効果と遅発的効果に伴う課題
  - － 感受性の個体差
  - － 疫学
  - － リスクに代わる概念として線量概念を使用することに対する課題
- パート2: 放射線防護の適用において生じ得る新たな課題
  - － 医療被ばくにおける放射線防護
  - － 環境の放射線防護
  - － 放射線テロ攻撃の健康影響
- 共同研究が見込める分野
- 政策の意味合い

CRPPHは、この報告書作成にあたって土居雅広博士より多大な尽力をいただいたことをここに記し、博士を亡くされたご家族とご同僚に心よりの弔意を捧げる。

H. Métivier、  
T.Lazo

## 目次

序文.....	3
要旨.....	7
緒言.....	19
<b>パート1 科学的問題とそれらの意味合い.....</b>	<b>21</b>
<b>非標的効果と遅延影響.....</b>	<b>23</b>
1. 問題は何か.....	23
2. 科学的証拠.....	24
3. 考えられる研究結果.....	29
4. 考えられる政策上の課題.....	30
5. 状況を改善するために考えられるアプローチ.....	32
<b>感受性の個人差.....</b>	<b>37</b>
1. 問題は何か.....	37
2. 科学的証拠.....	38
3. 今後期待される研究結果.....	40
4. 考えられる政策上の課題.....	41
5. 状況を改善するために考えられるアプローチ.....	43
<b>疫学.....</b>	<b>47</b>
1. 問題は何か.....	47
2. 科学的証拠.....	47
3. 状況を改善するために考えられるアプローチ.....	50
4. 考えられる政策上の課題.....	53
<b>統一的な線量制限システムに関するその他の課題.....</b>	<b>57</b>
1. 問題は何か.....	58
2. 科学的証拠.....	59
3. 状況を改善するためにえられるアプローチ.....	67
4. 考えられる政策上の課題.....	71

パート2 放射線防護の適用において考えられる課題.....	75
医療被ばくにおける放射線防護.....	77
1. 問題は何か.....	77
2. 科学的証拠.....	79
3. 考えられる研究結果.....	80
4. 考えられる政策上の課題.....	82
5. 状況を改善するために考えられるアプローチ.....	82
環境の放射線防護:現在の理論的枠組みが直面する課題.....	87
1. 問題は何か.....	87
2. 現在の科学的知見の動向.....	89
3. 考えられる今後の研究戦略.....	91
4. 考えられる政策上の課題.....	92
5. 状況を改善するために考えられるアプローチ.....	93
事故および悪意の放射線行為による健康影響.....	97
1. 問題は何か.....	97
2. 科学的証拠.....	98
3. 予想される研究結果.....	100
4. 考えられる政策上の課題.....	101
5. 状況を改善するために考えられるアプローチ.....	102
新しい国際共同研究の対象として期待される分野.....	105
結論および考えられる政策上の課題.....	109
付録	
1. EGIS専門家グループ委員一覧.....	113
2. 用語集.....	115

## 要旨

1998年、NEA放射線防護・公衆衛生委員会(CRPPH)のワーキンググループは、放射線防護科学における最先端の研究とその研究結果が持ちうる意味合いについて調査を行った(NEA, 1998)。この報告書は、我々の理解が変わりうる可能性があることを示唆するものであったが、その当時はその可能性は現われ始めたばかりであり、研究の成果が放射線防護システムにとっての重大な意味合いを有することを明白に示すことができるようになるには10年以上の年月が必要であった。これまでの研究と現在行われている研究の結果は、放射線防護システムの受け取られ方と社会が放射線防護システムに抱く信頼に影響を及ぼすことになろう。さらに、社会の変化も放射線防護システムに対するステークホルダーの期待に影響を与え続けるであろう。

1998年以来、我々の生物学的知見は大きな進歩を遂げてきた。DNAが最大の標的であり、線量-応答関係は直線的であるとする既存の理論的枠組みに対し、非標的(間接的)効果が疑問を投げかけている。しかし、今日では非標的効果が、科学的事実として認められているが、放射線防護にとってそうした効果がどのような意味を持つかについては未解明である。非標的効果が大きな意味をもつ可能性があるという前提の下、放射線防護専門家が、すでにその意味合いの評価に取り組んでいる。

放射線被ばくによって集団全体が被る全リスクに関する我々の現在の評価は、原爆被爆者などの一般的集団に関する研究に基づいて開発されてきた。この研究は必然的に、代表的な範囲の感受性の個体差を含んでいた。しかし、1998年、NEA報告書において、電離放射線に対する感受性の個体差が、政策や規制にとって意味を持つものとして指摘された。この報告書以降、分子生物学において長足の進歩が見られ、分子生物学上の新しい知見が、放射線感受性の個体差を検討する遺伝子研究の新しい手段となってきた。

放射線防護の現在のシステムの土台となっている知識基盤において異なった見解があることが認識されている。また、その科学も複雑であり、したがって放射線防護のシステムが公衆と作業者の防護の観点から実行可能なものであるためには、少なくとも部分的には、一定の仮定と単純化に基づく必要がある。これらの単純化の中で最も重要なものの1つに、直線しきい値なし仮説(LNT)の使用がある。これは、どんな線量であってもリスクがあり、実効線量については、線量がリスクの代わりとなるものであり、線量を単純に加算すれば、照射によって引き起こされる損害

全体を表わすことができると仮定している。しかし、科学的知見は放射線防護の現在のシステムに使用されている仮定と単純化のいくつかについて否定的である。

この単純化された一般的アプローチに対して多くの科学的な問題点が提起されているが、ラドンによる公衆の被ばくに対する防護システム以外には総合的なシステムが提案されていない。ラドンの場合、防護は線量ではなく空気中のラドン濃度に基づいており、被ばくの線量換算は必要とされなかった。しかし、これは、認められた十分な科学知識が存在する時は、一般的なアプローチの代わりに既知の科学的専門知識を使用できることを示す例である。これは、科学的または便宜的に必要な場合、防護システムに例外を設けることができることを示す例でもある。地層処分におけるリスク管理も、なんらかの代替的なアプローチを使用することにより容易になる可能性がある。同様に、NEAは、環境の放射線防護アプローチについて、1つのアプローチを提案している(NEA, 2003)。その中でNEAは、地域レベル、国レベル、国際レベルのうち、取り組んでいる状況に最も適したレベルで汎用の放射線防護システムを適用することに集約することを示唆している。もしそのようなアプローチが受け入れられれば、そのアプローチは放射線防護システムに対するステークホルダーの信頼を強化することができるであろう。

放射線防護科学の現状に関するNEA報告書が初めて出版されてから8年後、科学的知見は、今も統一的な放射線防護システムに課題を提起し続けている。しかし、この防護システム(あるいはむしろその一部)を放棄する前に、変更した場合の利点と損失を詳細に分析すべきである。放射線防護システムはこれまでも、そして将来も、新しい科学的知見を踏まえたものでなければならない。これがなければ、信頼性が失われ、防護システムの評価は地に落ちるであろう。必要に応じて、一般的に適用される統一されたシステムが十分に強固でない、あるいは基礎となる科学からあまりにかけ離れている場合には、若干の逸脱も必要になるかもしれない。これは、現行の防護システムの当然の進化を示すものであり、またこの防護システムは、基本的に強固さの源泉であった従来の予防的アプローチを根底から疑問に付すことなく、さまざまな多くのニーズに応じて適応できる成熟したものであることを示しているといえる。

防護システムが難しい問題に直面し続けているにもかかわらず、線量制限のシステムはそうした問題にも対応できるよう徐々に発展してきた。防護システムは実際的な実施において強固であることは変わっておらず、公衆と作業員両方に対し高度な保護を提供している。防護システムの基本的な目標は首尾一貫性と実施の容易さであり、その結果として、狭義の科学的な文脈から見ると正確でなく、擁護可能でもない多くの単純化仮定が設定されてきた。しかし、一般に、それによって用心深いアプローチが踏襲され、厳密に言えばこれらの状況から正当化される以上に高いレベルの防護が提供されてきた。しかし、これは、簡素さと一貫性に対する圧倒的な欲求を考えれば、許容可能な妥協と判断される。とはいえ、防護に

ついでに非効率的で根拠のない資源配分を生じさせるような過度な注意を回避するため、特に新たに出現する科学的知見という文脈の中で、継続的にそのような問題をレビューする必要がある。

本報告書は、放射線防護システムの科学的基盤と適用において特に重要な問題と見なされる事項について検討した；それぞれのトピックから得られた重要な知見について述べる。

## 非標的効果

放射線生物学の現在のパラダイム(理論的枠組み)は、電離放射線エネルギーの細胞核への付与がDNAの損傷をもたらす、放射線の有害な生物学的影響の原因となるというものである。放射線によって誘発される影響に関するこの標的理論の普遍性に異を唱える、特に非標的効果に関連する一連の知見が新たに報告されている。したがって、これがLNT仮説の仮定がかならずしもすべての状況に適切でないかもしれない可能性をもたらしている。

非標的効果について理解を深めることが、健康リスク評価、ひいては放射線防護にとって重要な帰結をもたらす可能性がある。非標的効果は、職業被ばく、医療被ばく、環境被ばくによるがんその他の危険に影響を及ぼす可能性がある。特に非標的効果は、高線量、高線量率の放射線リスクデータを低線量、低線量率域に外挿する際にLNT仮説を適用することの妥当性に影響を及ぼす可能性がある。現在の理論的枠組みに関する課題としては、線量によってリスクを評価するという概念、経過した時間を通じて線量を合計するという概念、特に異なるタイプの放射線(例えばアルファ、ベータ、ガンマ...)の線量あるいは異なる線量率の線量を積算するという概念、内部と外部から受ける線量を合算するという概念の妥当性が挙げられる。新しい理論的枠組みから、低線量、低線量率での被ばく後のがん以外の疾患の発現メカニズムについて新しい説明が得られる可能性もある。これらの結果は通常培養された細胞や動物で測定されるため、それらがすべての動物、そして最終的にヒトにおいて一般に適用可能かどうか判断するにはさらに研究が必要になる。

次の10年以内に広範囲な新しいデータが報告される可能性が高い。そしてそれが、電離放射線のリスク評価にとって重要な意味合いを持つ可能性がある。それがどのように低レベルの放射能に適用できるのか、また現在のリスク評価を高くすべきか、低くすべきか、あるいは不変のままとするかは、今後決定される。これは、ヒトの放射線防護および環境の防護に関する政策、廃棄物管理、汚染されたサイトの汚染除去、ALARAのような実務概念に影響を与える可能性がある。医学分野では、この課題が、例えば、診断技術の正当化および患者にとっての受容度、さらには妊婦に対する助言などに影響を与えることとなる。

## 考えられる政策上の課題

(標的効果と非標的効果を結びつける)新しい放射線生物学のパラダイム(理論的枠組み)の進展によって、すべての分野における放射線リスク評価、線量制限のシステムおよび放射線防護の管理において起こるかもしれないという意味で、放射線防護の現在のシステムの変更が求められるであろう。

## 感受性の個体差

電離放射線被ばくに対する個人の感受性の差は、患者、作業員および一般公衆の防護において重要な考慮事項として浮上している。放射線に対する感受性の高い作業員と患者を特定し(医学的スクリーニングや疾患の診断を通じて)適切な防護を行うことは、放射線防護方針について重要な疑問を提起する。放射線感受性の高まりを示す証拠のほとんどは、がんの高線量放射線治療を受けた個人に見出され、こうした個人では、放射線治療後、異常なほど重症の正常組織反応(すなわち毛細血管拡張性運動失調症)が発現する。低線量放射線に被ばくした個人においてがんに対する放射線感受性が高まるという所見は、より限られている。しかし、最近の研究では、胸部X線に被ばくしたBRAC1/2突然変異体キャリアで(乳がんに対する)放射線感受性が高まっていることが強く示唆されている。これらの所見は再確認することが必要であるが、低線量で被ばくした放射線感受性の高い集団の存在は真剣に受け止められるべきである。

過去数年間における科学の進歩、特に分子生物学における進歩の結果、さまざまな有毒物質に対する遺伝的感受性のばらつきを特定する我々の能力は高まった。この事実を踏まえれば、それぞれの遺伝子構造に基づいて遺伝的感受性の高い集団を特定することが放射線防護にとってどのような重要性があるかを検討するのは賢明なことであろう。

さらなる研究によって、低線量に対する突然変異体キャリアの感受性が増すことが確認された場合、重大な臨床上的影響をもたらす可能性がある。さらに重要なことには、低線量での被ばくに対する個人の感受性の差は、なんらかの職業への放射線に対する感受性の高い個人の雇用についても問題を提起し、防護規範の見直しが必要になることが考えられる。我々の現在の知識の到達度からすると、起こりうる問題やアプローチ(例えば倫理上の問題や雇用、保険および社会的差別といった問題)について考察することは、今日でも有益と思われる。

## 考えられる政策上の課題

- 放射線被ばくを個人レベルにおける感受性に結びつけることができるようになれば、線量やリスクの管理をどのように設定し、適用するか、例えば感受性の違いごとに異なる制限を課すのか、それとも最も感受性の高いグループに基づいて制限を課すのかといった問題が提起されることになる。

- 遺伝子検査を通じて感受性の個人差を放射線と結びつけることに伴う、より幅広い社会的、倫理的、法的含意、例えば試験を要求する権利、試験を拒絶する権利、社会的な差別や排除のリスクの評価。
- 患者の放射線療法に対する新しいガイダンスあるいはアプローチが必要となる可能性がある。

## 疫学

これまでのところ、ヒトにおける放射線誘発がんのリスクに関する最大の情報源は、被ばくした集団に関する疫学データである。しかし、直接的な情報が得られるのは、約100 mSv以上の線量についてである。これらのデータからの線形の外挿が、より低線量でのヒトにおけるがんリスクを評価するために適用されている（線量と線量率にある程度余裕を含んでいる）。これは、一般集団や放射線従事者の被ばくに関する典型的な手法である。

100 mSv以下での低線量のがんについての線量応答曲線の形は、かねてから論争の的となってきた。その主張は、わずかな放射線量には有益な効果（ホルメシス）があるという主張から、応答にはしきい値があるという主張、しきい値のない直線—高次曲線（supra-linear）の応答を示すという主張に至るまでさまざまである。こうしたことから、この線量範囲における追加情報の取得には強い動機がある。

今日の放射線疫学の主な課題は次のとおりである。

- 100mSvより低い線量でのリスクの評価
- 線種および線質の異なる放射線の影響
- 異なる被ばくパターン（例えば慢性または急性被ばく、内部または外部被ばく）の影響
- 遺伝的修飾因子その他の修飾因子両方の放射線リスクへの影響
- 年齢および性別のリスクへの影響
- がん以外の影響（すなわち心疾患、免疫反応、白内障など）の考慮
- 研究のデザイン、解析、解釈への放射線生物学情報の統合
- 調査中の集団の現在の疫学研究の生涯全体に至るフォローアップ

最近の”現代”放射線疫学のキーとなる問題は、特に低線量におけるリスクをより正しく評価するための分子疫学の適用の拡大である。

さまざまな理由から、疫学は、現在電離放射線からのヒトに対する健康リスクの評価の最も有益なアプローチであり、非常に多くのことを学ぶことができる。しかし、古典的な疫学研究には、統計的検出力に非常に大きな制約がある。すなわち、100mSvより低い線量での影響の評価のためには大きな研究対象集団が必要である。

## 考えられる政策上の課題

長期の、おそらく共同研究となるであろう疫学研究を継続および/または展開すること。そのような研究は長期的な財源確保が必要であり、放射線による損害の解明の不可欠な部分である。

### 線量によってリスクを評価するという概念の妥当性

現在の理論的枠組みは、損害全体の指標としてすべてのタイプ、すべての被ばく形態の線量を合計できると仮定している。これは、統一的な線量制限システムにおける重要な仮定である。

しかし、放射線生物学の研究によれば、細胞と組織反応が主として被ばく状況のタイプに依存すること、特に高LET放射線に低線量、低線量率で被ばくする内部被ばくの場合、その傾向がある。観察結果は、低線量および低線量率あるいは分割線量に反応して細胞に生じる生物学的プロセスが、高線量の被ばくに起因するものとは基本的に異なる可能性があることを示唆している。

腫瘍を生じさせる放射線の能力が、照射される器官、腫瘍のタイプ、吸収線量、被ばく経路などによって変わることも、研究の結果に示されている。線量制限システムを幅広く適用することを抑制させるものではないが、これらの結果は、一般化された放射線荷重係数を使用することが、場合によっては、生じるリスクレベルについて誤った結論に結びつく可能性があることを示唆している。

基礎となる科学と、実効線量の導入・使用との間の矛盾/不適合についてEGISグループ内に幅広いコンセンサスがある一方で、長寿命核種に対する慢性の内部被ばくについての統一的な線量制限システムにとってこれらの矛盾がどのような実地的意味をもつか否かについては見解が分かれている。したがって、放射線毒性学をさまざまな適切なシナリオに合致するように改良して応用してこれらの問題のいっそうの解明を図り、放射線防護決定により適切な情報を提供するための適切な情報とツールを提供することが重要である。

リスクの評価および管理をできるかぎり健全な科学的知識に立脚させるのは賢明なことである。統一的なシステムの使用が不適當となりうる状況(すなわち十分に強固な裏付けがないという意味で)、あるいは、それを適用する場合、リスクの実際の低減度合いに比べて非常に不釣り合いなコストを必要とする状況では、それに代わるより個別的なアプローチを採用する必要があるだろう。放射線防護専門職のスキルは、そのような条件を特定し、すみやかに対応することにある。そのような状

況においては、ステークホルダーの懸念(行政、科学、影響を受ける集団など)に対しては、関連する毒性研究(すでに完了した研究、新しく提案された研究のいずれであれ)によって個々のケースの防護解決策を開発することにより対処できるであろう。そのようなアプローチは、線量制限システムの基礎となる原則と完全に一致している。

### **考えられる政策上の課題**

統一的な線量制限システムの使用が適切でないと思われる状況(すなわち根拠が十分に強固でないという意味で)、あるいはその適用がリスクの実際の低減分に比べてあまりに不釣り合いなコストを招く状況については、コンセンサスを追求すべきである。そのような場合、それに代わるより個別的なアプローチを開発、採用することが必要であろう。

### **医療被ばくにおける放射線防護**

医療被ばくは、正当化され最適化される場合、これらの被ばくが患者にとって明らかな利益となる。しかし、医療被ばくは最大の人為的線量であり、また急速に増加している。個人線量は手技によっては高くなりうる。また、確率的リスクは小児と若年層において特に問題となる可能性がある。診断と治療の正当化と最適化の参考とするため、そして患者に適切な情報を与えるため、医師は患者の(特に新しい手技の)線量を知っておく必要がある。業界は、そのために、研究者、臨床医と協力すべきである。

医療被ばくのための新しい規制と規格が公表されつつあるが、それらの規制の必要性和適用可能性の裏付けとして科学的データが必要である。新しい技術に対しては、「イメージングのための確認基準」や「電離放射線を用いた医学手技を最適化する方法」といった指針の策定が必要になる。新しい医療技術は、診断参考レベル(ある医学的手技の典型的な線量レベルを示す)の定期的再評価が必要である。

放射線量(患者とスタッフの)に関する状況は、医療被ばくの診療評価プロセスの不可欠な一部として位置付けるべきである。医療業界は、新しい放射線設備への線量評価ツールと電子的データベースの導入の必要性を勧告されることになろう。医療被ばくに関連したリスクを理解し、新しい技術の使用を最適化できるよう、医師と検査技師を支援すべきである。

医療データを疫学研究で利用できるようにするため、医療被ばくと他の放射線防護活動領域(例えば線量測定、疫学、放射線生物学、放射線病理学など)の間の学際共同研究を促進すべきである。

## 考えられる政策上の課題

- 各種研究は、患者と医療作業者の被ばくがいずれも増加傾向にあることを示唆しており、これは、被ばくの正当化、最適化を確実に実施する必要があることを意味している。そのためには、例えば、患者の線量を測定・表示する装置、あるいは新しい最適化アプローチなどの開発により、より良い線量情報を提供すべきである。
- 医療被ばくとその他のタイプの被ばく間での知識の共有を促進すべきである。そうすれば、すべての関係者は互いの経験から利益を得ることができる。

## 環境の放射線防護

これまでに述べたトピックとは対称的であるが、環境における放射線防護政策、規制、放射線防護などへの関心をけん引してきたのは科学研究の結果ではなく、むしろ、慢性被ばくに伴うヒト以外の生物種そしてそれらを取り巻く生態系に対する放射線被害について科学的な理解を深めたいという政治的、社会的ニーズであった。

環境を防護する必要があることについては国際的コンセンサスがある。しかし、状況の複雑さ(例えば自然のバックグラウンドの多様性、個人と生態系の関係など)からすれば、これらの質問に答えるのに必要な研究は、よく絞り込み、「枠組み設定に係わる疑問」(例えば汚染とは何か? 防護の目標は何か? 被害とは何か? 「ギャップ」は埋めるべきか? など)に対する社会的解決策を指針として、政策決定者、規制当局、実施担当者を支援する具体的な結果を目指さなければならない。

これまでのところ、ヒトの防護システムに適合した状況下で、放射線被ばくが原因となる生態系の健全性への悪影響が観察されたことはない。これまで公表されたデータを見る限り、1日当たり1mGyより低い放射線被ばくについては、種全体を危険にさらす、あるいは種の間で不可逆な不均衡を促進する著しい悪影響は観察されていない。しかし、さらにつぶさに検討すると、これらのデータのほとんどが外部の急性ガンマ線照射による被ばくに関係しており、観察は個人レベルでなされたものであり、これらは慢性被ばく状況の観点とは異なることが分かる。

## 考えられる政策上の課題

電離放射線の悪影響から環境を防護するために開発された(最新の)ツールと技術的アプローチが、放射線分野以外のより広範囲の環境防護の原則や概念アプローチと適切に両立していることを保証すること。

## 悪意に基づく行為の健康影響

放射線テロ攻撃が生じる可能性があることは、広く合意されている。

拡散シナリオのほとんどは、公衆の健康に深刻な影響を及ぼすことはないが、拡散行為が重要な公衆の懸念を引き起こすことになろうというのが一般的なコンセンサスである。しかし、公衆の場で高放射能の線源が密かに使用された場合、より深刻な公衆の健康への影響が生じる可能性がある。

そのような事象に対処する準備として、有効な検出システムがいつでも使用できる体制を整備し、初期対応チーム(例えば消防士、軍医、医師)に対する科学的トレーニング、犠牲者への精神的支援、妊婦に対する助言をいつでも提供できる体制を整備することが重要である。

線量評価に応じた迅速な患者の優先順位決定、事故後の健康、疫学調査に対する「標準」アプローチを開発することが必要である。有効なリハビリテーション戦略を開発するためには、過去の経験から適切なステークホルダー関与に関する教訓を使用することも重要であろう。

### 考えられる政策上の課題

- 事故または攻撃があった場合には、異常事象後のリハビリテーション戦略への公衆の信頼を維持すること。
- 公衆に迅速に情報を与える能力を高めること。この能力は、低被ばくまたは被ばくのない多くの人々の懸念を解消できることも必要であろう。
- 直接の医療効果を扱うだけでなく、放射線防護コミュニティとの信頼を醸成し、放射線防護コミュニティを支援できる、よく組織された有効な医療対応システムを開発する。

### 国際的な研究・協力が示唆される新しい分野

他の分野とのインターフェースが重要であること(例えば医学、環境、悪意に基づく行為などにおける)、放射線研究コミュニティが縮小していることから、研究協力は放射線防護とその裏付けとなる科学にとって重要なテーマになるであろう。場合に応じて、適切な協力組織が提案されている。しかし、これらのイニシアチブを本当に成功させるための有用な出発点は、既存の放射線防護研究資源(すなわち動物研究施設や放射線生物学/毒性実験室)の「一覧表(カタログ)」を作ることである。

この報告書の結論の観点では、提案された共同作業は、3つのタイプがある。すなわち、(1) フォーラムとディスカッション、(2) 情報と経験の交流ネットワーク、(3) 具体的な共同研究プロジェクト、である。

## 会議/フォーラム/ディスカッション

1. 「非標的効果に関する国際的ワークショップ: 統一的な対応をすべきかどうか – 現在の理論的枠組みにとつての帰結 (non-targeted effects: Unified response or not – consequences for the current paradigm)」ECおよび米国DOEの共同作業
2. 現代社会における個人の感受性とリスク: 技術的、倫理的、法的問題
  - 個人の感受性が持ちうる意味
  - 個人リスク評価
  - 放射線防護 (生物学的、化学的、医学的)
  - 遺伝子スクリーニング
3. ラドン同位体のリスクの管理に関するフォーラム
  - 国レベルでのアプローチの議論
  - どのようにラドンおよび喫煙のリスクに対処できるかについての議論
  - WHOプログラムを組み入れる
4. 放射線生態学の持続可能性と環境の放射線防護に関する (IURとの) フォーラム
  - 放射線防護と化学的側面
  - 廃棄物問題 (長期)
  - 国際的影響観測所の設立 (次のセクション参照)
5. リスク管理への放射線防護における数値の使用の制限に関するICRU、ICRPが参加するフォーラム
  - 放射線防護における数量と単位の使用
  - 内部被ばくの線量応答のばらつき

## 情報と経験の交流ネットワークの設立

1. 医療被ばく用の「ISOE (職業被ばく情報システム) に類似したシステム」WHO、UNSCEAR、EC、業界、IAEAとの共同作業
  - 開始のための定義段階
  - 患者および職業被ばく
  - データ/患者機密情報へのアクセス
2. NORM (自然放射性物質) 被ばくに適用される「ISOE類似システム」の開発? ILO、UNSCEAR、EC作業、業界、IAEAとの共同作業
3. 環境の放射線防護のための国際的データ収集評価、国際的「観測所」の設立 (IURとの共同事業)。
  - 汚染地区、高バックグラウンド地域、実験調査、その他の汚染物質からの一元的データ登録

- 実験施設のネットワーク
- 既存の研究および実験プログラムのネットワーク(生物相-地球化学的サイクルbio-geochemical cycles)
- 原子力施設周辺の環境測定データのデータベース収集および評価ネットワーク
- 現在収集されているデータの評価
- 環境防護をより適切に特徴づけるために追加実施できる新たな測定を特定する(ヒトの防護と対比して)。

#### 4. テロ攻撃の場合の生物学的線量測定 of 緊急時対応ネットワーク

#### 5. 共同動物研究設備統合ネットワーク

- 実験の倫理的側面についての承認に対する標準的アプローチ
- 設備の特定と連携

#### 6. チェルノブイリに関する疫学、環境防護プログラムと協力した健康影響、放射線生態学(また石棺の現状)についてのデータバンク構築に向けたフランス・ドイツのイニシアチブの統合

- データ収集とアクセス・ルール、アクセス・プロセスについての議論
- 組織バンク(生物学の例に従う)
- データ

### 共同研究

1. 慢性的内部被ばくまたは外部被ばくを受ける人々の疫学調査。米国および日本(およびその他の国)との協力によるECプログラムの統合。
2. 特に重要なサブケースは小児科での被ばくである。この集団が特に高いリスクにさらされるという点で、小児科での被ばく線量を登録し、疫学研究に利用できるように公表すべきである。
3. 分子の修飾あるいは細胞の修飾と病理学的所見(動物実験と疫学)とのつながり(あるいはつながりがないことについて)の研究。
4. 米国DOEによって提案された極低レベル放射線生物学研究所を、科学技術の管理、協力的な資金調達および共同研究を含む国際的な共同作業のために開放すべきである。
5. 新しい発症機序の説明によるがん以外の疾患の信頼できる科学的評価。

6. 内部被ばくに関連した放射性毒性の国際的プログラムの共通の定義:
- 慢性被ばく対急性被ばく
  - 体内動態
  - 遅発効果
  - ECデータベースの利用・探査拡大(ECと共同して行う)

## 緒言

1998年、OECD原子力機関は、「放射線健康科学の発展とその放射線防護への影響」と題する報告書を公表し、その中で、最先端の放射線防護研究を要約している。この報告書の焦点は、その時点で放射線防護科学の分野で解明されていること、そして解明されていないことに当てられた。それから9年後の今、NEA放射線防護・公衆衛生委員会は、現在の研究の性格、それが放射線防護政策、規則および適用に対してどのような意味合いを持っているかに特に注目して、この問題を再考した。

1998年の報告書以来、多くの研究が完了しているが、それらの多くは従来の研究の趨勢ないし傾向を再確認している。こうしたことから、現行の放射線防護システムの統一的性質は妥当性が問われ続けている。

この課題をより詳細に研究するため、本報告書は2つのセクションに分かれている。最初のセクションでは、非標的効果、放射線感受性の個人差、疫学研究の結果、適応応答といった学術的問題を検討する。これらは、現行の放射線制限システムがどの程度、科学的疑問を投げかけられているかを評価する根拠となる。

2つめのセクションでは、放射線防護が適用される重要分野、技術の進歩や社会・政治的变化により、防護を最適化するために新しい発想が必要と思われる分野を検討している。これらの中で最も重要なものは、医療被ばく、環境放射線防護、放射線または放射性物質の悪意に基づく使用からの防護である。



パート1  
科学的問題とそれらの意味合い

非標的効果と遅延影響

個人の感受性の個体差

疫学

統一的な線量制限システムに関するその他の課題



## 非標的效果と遅延影響

### 1. 問題は何か

放射線生物学の現在の理論的枠組みは、細胞核における電離放射線のエネルギー付与がDNAの損傷をもたらし、その損傷が放射線の有害な生物学的作用の原因となるというものである。放射線誘発性のDNAの変化は、放射線被ばくが続く最初の細胞分裂によって不可逆になりうると考えられる。また、がんリスクは、特定の遺伝子において生じた変化を内包する細胞のクローン増殖の結果であると考えられる。DNAで誘発された最初の損傷は、線量に正比例することが証明されていることから、(同じ放射線タイプの場合)リスクも線量に正比例すると考えられている。多数の被ばくからのリスクは単純加算的であると考えられている。また、高LET放射線被ばくと低LET放射線被ばくのリスクは、それぞれの放射線生物学的有效性が異なる点にはしかるべき注意を払うとしても、質的には同じであると仮定される。これらの仮定は、すべての放射線防護実務で使用されている直線しきい値なしの(LNT)仮説に取り入れられている。

放射線誘発効果に関するこの標的理論の普遍性に挑戦する幅広い証拠が今出現しつつあり、したがって、LNT仮説の仮定がすべての状況に当てはまるとは限らない可能性が浮上しつつある。これらの効果は「非(DNA)標的效果」と呼ばれ、放射線誘発性バイスタンダー効果、ゲノム不安定性、適応応答、低線量放射線過敏、未照射部位(照射域外)効果、細胞の早期分化、染色体異常誘発因子の誘発、遅延性増殖死、放射線による遺伝子活動の誘発または抑制などを含んでいる。非標的效果の重要な2つの特徴は、細胞核への直接的放射線照射が不要であること、また低線量で特に顕著であることである。この新しい所見は、放射線生物学の新しい理論的枠組みが必要であることを示唆している。新しい理論的枠組みは古典的な(標的)効果と非標的效果の両方をカバーすべきである。新しい側面としては、細胞通信の役割と組織レベルの反応などがある。

非標的效果についての解明が進めば、健康リスク評価、従って放射線防護にとっての重要な結果をもたらす可能性がある。これらの非標的效果は、職業性被ば

く、医療被ばく、環境被ばくによるがんその他のリスクに影響を及ぼす可能性がある。それらの効果は、高線量放射線リスクデータを低線量域へ外挿する際におけるLNTモデルの適用の妥当性について特に影響を及ぼす可能性がある。現在の理論的枠組みに対するこの課題には、線量によってリスクを評価できるという概念、異なるLET線量あるいは線量率を合計できるという概念、内部線量と外部線量を合計できるという概念の妥当性などがある。新しい理論的枠組みから、がん以外の疾患の発現機序について新しい説明が得られる可能性がある。これらの結果は通常培養細胞で測定されるため、これらの結果が動物全体、最終的にはヒトにおいても適用可能かどうか判断するためには、さらに研究が必要となる。

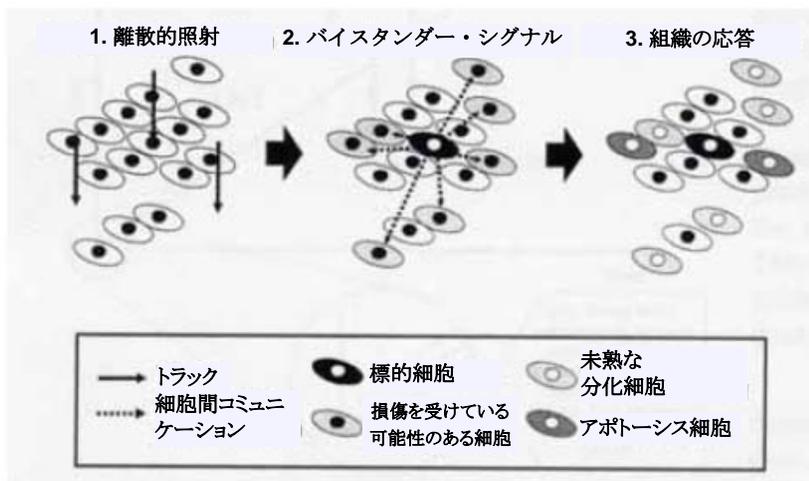
## 2. 科学的証拠

### 2.1 バイスタンダー効果

放射線誘発性のバイスタンダー効果は、照射部位の近傍にあったが放射線によって直接照射されなかった細胞において、照射後に一般に非常に急速に見られる。バイスタンダー・シグナルは、培地(「染色体異常誘発因子」)あるいは細胞間の直接のコミュニケーションによって伝えることができる(細胞コミュニケーションを阻害するとバイスタンダー効果が防止される)。バイスタンダー効果はさまざまな細胞系で報告されてきた。初期のバイスタンダー応答には、損傷誘発タンパク質やストレス関連タンパク質の増減、活性酸素種の増加または減少などがある。遅延時間が長くなると、細胞死、細胞増殖、細胞分化、突然変異の誘発、染色体不安定性、放射線適応などの効果が観察される。バイスタンダー効果は、ゲノム不安定性や適応応答のようなより遅延性の高い非標的効果の最大の駆動因である。

バイスタンダー効果は新しいものではない。1960年代から、損傷を受けなかった細胞において応答を刺激または変化させる染色体異常誘発因子その他の「化合物」について、さまざまな文献が発表されている。1つの細胞あるいは特定の細胞器官だけを荷電粒子あるいは超軟X線に被ばくさせることができる現代のマイクロ電子放射線照射装置が開発されたことで、バイスタンダー効果についての研究は進歩を遂げてきた。そのような照射装置は、1つあるいは厳密に数を特定したアルファ粒子のいずれかによって、核、細胞質、ミトコンドリアといった細胞内の構造を標的とすることが可能である。防護的バイスタンダー効果と有害なバイスタンダー効果いずれの線量・応答関係とも、常に1Gray以下で平坦域を示す。有害影響は、照射される細胞の数ではなく照射される細胞の線量によって決定されるように見える。また、高LET放射線と低LET放射線もその効果は同じように見える。

図1. 組織中の放射線誘発バースタンダー効果の一般的枠組み

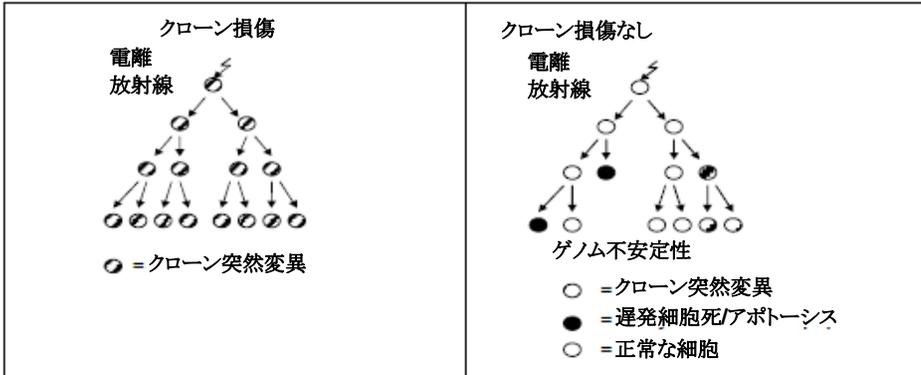


## 2.2 ゲノム不安定性

放射線誘発性のゲノム不安定性は、照射された細胞の子孫細胞が、何世代にもわたって新しい突然変異や新しい染色体異常その他のゲノム損傷の発生数の増加や蓄積を示すことを意味している。影響を受ける子孫は高レベルの致死突然変異も示し、これは遅延生殖細胞死や遅延アポトーシスとして測定される場合もある。これらの影響は、放射線に被ばくしなかった細胞にも生じる。照射された細胞の子孫細胞には、特定の遺伝子の突然変異について期待されるより数桁高い頻度でゲノム不安定性が生じる。したがって、例えば修復遺伝子における突然変異は有望な説明ではない。また、ゲノム不安定性の誘発は別の次元の事象である可能性のほうが高い。ゲノム不安定性は、高LET放射線、低LET放射線いずれによっても引き起こされるが、すべての細胞系がこの結果を示すわけではない。ゲノム不安定性の線量・効果関係は常に平坦域を示すが、効果の数を調べる時点に応じてその関係は変化する。高LETは低LETよりも実効線量が高いが、LETは発現の時間パターンにも影響を及ぼす。

動物における研究は、マウスの一部の血統はゲノム不安定性誘発に対する遺伝的感受性が他の血統と差があることを示している。マウスのその血統は、放射線誘発悪性腫瘍に対しても高い感受性を示している。感受性の個体差は、ゲノム不安定性、バースタンダー効果の両方が役割を果たしているように見える。それほど実効性のないアポトーシス反応を示す遺伝子型は、悪性腫瘍を発生させやすい素因があるように思われる。ヒトの場合も遺伝子に起因してこの違いが生じるかどうかは、さらに研究が必要である。しかし、動物では、Tp53遺伝子機能と放射線被ばくに対するその反応は、これらの影響のうちのいくつかで大きな役割を果たしていることが知られている。

図2 クローン機序と比較したゲノム不安定性の模式図



動物実験は、放射線誘発ゲノム不安定性の現象が体細胞に限定されず、生殖細胞系でも発現し、その結果被ばくした親の子孫の体細胞と生殖細胞系で突然変異率が高くなることを示している。観察されているように、がん素因と突然変異率が後の世代で増加する原因は、照射された雄から子孫への単一の精子を介して伝えられるなんらかの未知の信号によると思われる。機序はエピジェネティックなものと思われる。

### 2.3 適応応答

適応応答という用語は、低線量の放射線の被ばくが、被ばくした細胞または動物において、他の事象や物質の有害な影響から細胞や動物を保護する機序を誘発する生物学的応答を指す。他の有害な事象や物質としては、自然発生的な事象や、新たな放射線被ばくなども含まれる。低線量、典型的には10-100 mGyの線量は、細胞内DNA二重鎖切断修復能を高め、細胞死のリスクを低減し、放射線または化学物質によって誘発される染色体異常と突然変異を低減し、自然発生あるいは放射線誘発の悪性形質転換を低減することが生体外で示された。低線量被ばく後の高いDNA修復能は進化の過程全体を通じてしっかりと保存された反応であり、単細胞真核生物、単純な真核生物、昆虫、植物、両生動物、およびヒト細胞を含む哺乳動物に見られ、それが生命にとって死活的に重要な基本的反応であることを示唆している。

適応応答は、線量が低すぎるためすべての細胞を照射できず、バイスタンダー細胞における誘発によって防護効果が増幅される状況で生じる。低LET放射線については、細胞を通じた最初の電離トラック(細胞に対する線量約1mGy)がDNA修復能を最大限に高め、それ以降の電離トラックは、低線量率での被ばくの場合、その最大応答をさらに引き上げることも引き下げることもないように思われる。人間

と、げっ歯動物の細胞の悪性形質転換については、低線量の防護効果は、低い線量率での被ばくであれば、約100mGyまでのどの線量であれ線量非依存性であるように見える。約300 mGyを超えると、これらの防護効果は悪性形質転換のリスク増に取って代われ、この時点で有害なバイスタンダー効果が防護効果を上回ることを示唆している。バイスタンダー効果同様、適応を示す(未知)シグナルは、細胞を取り巻く媒体を通じて伝達されている可能性がある。ヒト細胞では、ガンマ線とトリチウム・ベータ粒子間で適応応答の誘発に差はなかった。また、低線量の低LET放射線は、高LET被ばくによる有害なバイスタンダー効果を含め、有害な影響に対して防護する。少なくとも一部のタイプの高LET放射線は、哺乳類細胞でも適応応答を引き起こす場合があるが、より低次の真核生物(イースト)では、哺乳類の細胞と異なり、誘発の桁が線量に比例するため、中性子の単位線量あたりの効率はガンマ線の効率よりも低かった。

低線量が適応応答を引き起こすためには、細胞または動物にTp53遺伝子の機能コピーが必要になる。Tp53遺伝子は、発がんや奇形発生のリスクにとって重大ないくつかのプロセスを制御する遺伝子である。Tp53機能を完全に備えた動物やTp53機能が部分的でがんにかかりやすい動物では、低線量での低LET放射線の全身の被ばく1回によってがん潜伏期間が長くなった。そして、低線量被ばくがなければ自然発生がん、放射線誘発がんのいずれによってであれ、失っていたはずの寿命が回復された。腫瘍の頻度ではなく潜伏期間が長くなることは、放射線に対する生体内での適応が、主としてゲノム不安定性のプロセスを遅くすることにより生じていることを示唆している。遺伝学的に正常な胎仔マウスでは、低線量での被ばくを先に経験することにより、その後の高線量の被ばくによる先天的欠損症の程度も低減した。遺伝的に正常な雄の成熟マウスでは、高線量での被ばくの前に低線量での被ばくを被ったことにより、高線量の被ばくによる遺伝的突然変異からマウスの子孫が保護された。妊娠早期に胎仔マウスに低線量を被ばくさせると、それがなければ放射線損傷により死んだと思われる胎仔が死から救われたことが報告されている。ただし、これらの救われたマウスは、高い頻度で精神障害を示す。

Tp53が正常なマウスでは、放射線誘発がんに対する防護効果が少なくとも100 mGyまでみられる。がんにかかりやすいマウスでは、約10から100mGyの間で、防護効果からリスク増へと効果が転じる。ただし、防護効果が有害影響に転換するしきい値は組織ごとにそれぞれ異なる。このことは、放射線感受性が一定ではなく、線量が増加するにつれて0からプラスへと変動することを示している。これは、組織荷重係数( $W_T$ )の導出と統一的な線量制限システムでの適用にも影響を及ぼす。結果は、典型的な公衆や職業性の被ばくレベルでは防護的な適応応答が支配的となるかもしれないが、100 mGy程度の線量では、有害なバイスタンダー効果が防護効果を上回る可能性があることを示唆している。低い線量率で比較的高い合計線量を照射された場合は有益かもしれないが、高線量率の高線量は防護反応を誘発しない。

## 2.4 複合的効果(放射線とその他の物質)

ゲノム不安定性またはバイスタンダー効果の誘発は、電離放射線に特有のものではなく、UVA、遺伝毒性のある化学物質、重金属に曝露した場合もそのような結果を引き起こす場合がある。したがって、非標的効果はさらに普遍的な損傷/外部ストレス応答系を表わしているかもしれない。しかし、外部照射後の細胞に余分な物質が残らないという意味で、電離放射線は遅発効果の検討にとってよいモデルである。化学物質の場合、微量の化学物質が細胞に残り、それがその後の細胞世代に影響を及ぼす可能性があるため、遅発効果の解釈がより複雑になる。

## 2.5 がん以外の影響

放射線に対する非標的細胞の反応は、さまざまな遺伝子の修飾(modulation)をもたらす細胞シグナリングの産物であり、DNA損傷を修復するためにフリーラジカル・スカベンジャや酵素を生産する反応もこれに含まれる。そのため、がんリスクと同様にがん以外の影響のリスクにも、そのような被ばくが影響を及ぼすと想像される。これまでの研究は、これらの細胞の応答がいずれも線量に対し「全か無か」式の応答を示すことを示しており、このことは、放射線の最初のトラックが最大の遺伝子応答を誘発することを示唆している。もしそうなら、効果が線量に比例するという放射線防護概念は、低線量では必ずしも正しくなくなる。またこの難問は、がん以外のアウトカムやがんのエンドポイントにも同様に当てはまる可能性がある。

最近の文献は、広島と長崎の核爆撃で放射線に被ばくした個人が、心臓血管疾患(心疾患)あるいはその他の悪性腫瘍以外の疾患にかかるリスクがより高くなる可能性があることを示している。動物における心疾患に対する放射線の影響に関する結果が公表されたことはほとんどない。また、実験動物モデルのうち、ヒトの心疾患に適したモデルはごく一部である。しかし、動物を比較的低線量の電離放射線に被ばくさせた生涯実験における心臓血管疾患の罹患率をレビューすると、そのような被ばくが心疾患のリスクを増加させなかったことが分かる。これに反し、蓄積されたデータでは、リスク低下は統計的に有意のように思われる。最近の研究では、低線量率の被ばくであれ高線量率の被ばくであれ、低線量の被ばくによって、遺伝的に冠動脈疾患にかかりやすい動物における大動脈の病変の症状は軽減したが、頻度は低下しなかった。これらの一見して反対の結果が動物において生じている理由を理解することは重要であろう。

哺乳動物における低線量の寿命への影響を検討した研究データは相当な量にのぼる。低線量の放射線に被ばくした実験哺乳動物における放射線結果をレビューすると、低線量で被ばくした場合には寿命が伸び、特に250 mGyより小さな線量ではそれが支配的となることは明らかである。動物を照射するために使用された電離放射線のタイプは、この増加に著しい影響を与えるものでなかった。

## 2.6 生物学的影響と健康影響の関係

細胞レベルの生物学的悪影響は、健康への悪影響が生じるということを必ずしも意味しない。

重要な問題は、進化の発端と非標的効果の意味である。なぜ細胞は、放射線被ばくに関するメッセージを交換するのか？組織レベルの反応によって何を獲得することができるか？非標的効果は、哺乳動物や魚のような脊椎動物だけでなく、甲殻類のような無脊椎動物でも記述されている。進化的保存性は、これらの影響が基本的に防護的であり、それらが、個体の生存を増強することを示唆するといえる。しかし、この個体の救済はそれなりの対価を伴う可能性がある。損傷を伴う生存である。バイスタンダー応答のごく最初の直接的生体内実証では、照射されていない骨髄細胞からの可溶性因子が生体内造血幹細胞を保護することにより、致命的な照射を受けたマウスを救うことができることが示されている。これは、照射された細胞から照射されていない細胞へ信号が発信されるだけでなく、信号が照射された細胞へ戻ることを意味している。

有害な影響と防護効果のバランスは、非標的効果の生体内での健康影響を理解するための鍵となるであろう。バイスタンダー応答、ゲノム不安定性、適応応答の間の相互関係を決定することが必要となる。細胞レベルでは、最初の放射線被ばくから遠く離れた時点で3つの影響がすべて観察される可能性があることが最近の研究で明らかになっている。これらの結果、適応応答の範囲は環境に直接関係する被ばく状況にまで拡大される。すなわち、最初の相当に大きな放射線量やその他のストレスがほとんど無視できる程度まで除去されていても、最初に照射されていない細胞が影響を受けている可能性がある状況があり得る。

## 3. 考えられる研究結果

現在、公衆被ばくと職業被ばくに典型的な低線量におけるがんリスクについて疫学研究を行うためには、非常に大きな集団と正確な個人線量評価が必要になると思われる。そのため、おそらく疫学研究によって低線量でのがんリスクを完全に解明することはできないであろう。現在、成人におけるがんリスクの増加を示すすぐれた疫学的証拠が存在するX線またはガンマ線の最低線量は、約50～100mSvである。ヒトのデータによると、小児のがんリスクは著しく低い被ばくでも成人の場合に比べ高まることが示唆されている。また、これは胎内での被ばくに特に当てはまるように見える。放射線発がんの生物学的モデリングは、低線量域のリスクを研究するためのツールとしての利用が期待できる。入力データは古典的な直接的放射線影響だけでなく非標的効果も含むべきである。非標的効果は低線量域でのリスクの重要な修飾因子となりうる。これがどの程度まで低レベルの放射能に当てはまるか、また、現在のリスク評価を引き上げるのかそれとも引き下げるのか、あるいは不変のままとするのかは、これから決定される。

ゲノム不安定性とバイスタンダー効果は非常に低い組織線量の被ばく後に観察される。マイクロビーム放射線被ばくシステムを使って、1つのアルファ粒子でも、培養されたヒト細胞の子孫細胞の染色体不安定性を誘発できることが示された。実際、線量応答データは、直接の照射によって引き起こされる損傷と対比されるこれらの間接的効果の相対的寄与が顕著に見られるのは低線量域であり、低線量域では超線形応答を取りうるという見解の裏付けとなることを示している。そのような超線形応答は動物研究では観察されておらず、むしろ、明白なしきい値があることを示している。

ゲノム不安定性とバイスタンダーのエンドポイントは遺伝性(突然変異)と非遺伝性(致死)の両方がある。それぞれ異なる細胞系でのこれらのバランスは、リスクを高める方向にもリスクを低減する方向にも傾く可能性がある。実際、科学者のなかには、非標的放射線効果が事実上電離放射線に対する適応応答の一部であり、したがって、防護性があると主張している者もいる。適応応答や早期核分裂のような遅発性の損傷応答システムについてはさらに多くの研究が必要である。がんリスクの増加はゲノム損傷の増幅、ゲノム不安定性、そしてさらに細胞殺滅による細胞の増殖増加などによって説明することができる。がんリスクの減少は、損傷された細胞の細胞殺滅による除去、適応応答、細胞の分化の増加によって説明することができる。これらが防護的な働きを果たす可能性がある。しかし、胚、胎仔の発達時に正常なパターンの細胞増殖、細胞分化、細胞移動を変質させる変化はどのような変化であれ、有害なものとなる可能性が高い。

がん以外の影響の問題に取り組む新しい研究が強く望まれる。分子レベルでは、将来の遺伝子活性化分析についての研究によって、高LET被ばくと低LET被ばくによって影響を受ける生物学的プロセスについての洞察が得られる可能性がある。動物全体のレベルでは、高LET放射線と低LET放射線が心血管反応に及ぼす相対的影響と複合的影響、特に感受性の高い動物における低線量での影響から、有益な情報が期待できる。

#### 4. 考えられる政策上の課題

##### 低線量のがんリスク

ヒトにおける放射線誘発がんのリスクに関する主たる情報源は、被ばくした集団に関する疫学データである。直接の情報と比較的大きな線量においてのみ得られるだけであり、一般公衆と放射線作業員の被ばくに関連のある低線量については、このデータからの線形外挿が適用される。それは、公衆と放射線作業員に対する被ばくについては当を得ている。低線量がんの線量応答曲線の形については活発な議論的となっている。わずかな放射線量は有益な効果を及ぼす(ホルミシス)という見解、しきい値のある応答であるという見解、またはしきい値なしの直線一高次曲線応答(低線量が以前の仮定よりも有害であることを意味している)で

あるといった見解など、さまざまである。しかし、低線量対高線量、低線量率対高線量率、低LET被ばく対高LET被ばくで、それぞれの生物学的応答が根本的に異なるなら、そのような線量を加算するだけでリスクを評価するのは難しいと思われる。これらのさまざまな状況の下でのリスク全体に対するゲノム不安定性、バスターンダー効果および適応応答の寄与の理解から、低線量被ばくのリスク評価に対する新しい洞察が得られる。それらの知見はまだ決定的ではないが、非標的効果についての現在の研究と今後の研究は、古典的な放射線効果(標的効果または直接的効果)と非標的(間接的)放射線効果の両方を組み合わせた新しい放射線生物学の理論的枠組みの定式化に結びつく可能性が高いと思われる。放射線防護システムは線量、線量率、LETがそれぞれ異なる状況について、個人の応答と被ばく両方に対応できるよう修正する必要があると思われる。

今後10年以内に恐らく詳細な新しいデータが得られる可能性が高く、そうなれば、そうしたデータは、電離放射線リスク評価にとって深い意味合いを持つこととなる。これがどの程度低レベルの放射能に当てはまるか、それがどの程度まで現在のリスク評価を引き上げるのか、あるいは引き下げるのか、あるいはそのまま不変のままとするのかはこれからの課題である。これは、ヒトの放射線防護と環境保護に関する政策、廃棄物管理政策、汚染されたサイトの汚染除去、ALARAなどの実務上の概念に影響を与えると思われる。医学の分野では、この変化は、診断手技が患者にとって妥当かどうかの判断や妊婦への助言に影響を及ぼすであろう。

### がん以外の影響

非標的効果は、がん以外の疾患の発現の機序としてどのような機序がありうるか説明できる可能性を秘めている。酸化的ストレスの増加は、照射された細胞の子孫細胞の長期的特徴と思われる。動物研究は、炎症タイプの対応が関与していることを示唆している。日本の原爆被ばく者において悪性腫瘍が増加していることは詳細に記録されているが、最近になってそれを補完する、心血管、消化器、呼吸器疾患の増加に関する報告が発表されている。そのような影響は、従来の標的理論に基づいて説明することが非常に困難であり、酸化的ストレスと炎症性タイプの反応に連動している可能性がうかがわれる。

実験動物で観察された放射線の防護効果と、核爆撃からの放射線に被ばくした人におけるがん以外の悪影響を対照すると、他に重要な変数が存在する可能性が示唆される。日本の原爆被ばく者のデータを使って放射線によるがん以外のリスクを評価する基礎データをまとめようとするなら、そのデータが現在の公衆の被ばくと職業性被ばくのリスクを実際に反映していると断言できることが重要である。原爆被ばく者におけるがん以外の放射線誘発疾患の発生率は、がんの発生率よ

りも低い。しかし、これらの疾患、特に心疾患は上記集団において非常にありふれた疾患であるため、わずかな過剰リスクさえ公衆の健康に大きな影響があることを意味するといえる。症例の数は、白血病(電離放射線に被ばくしたことを示す代表的疾患)の症例数をはるかに上回る。

**考えられる含意には次のようなものが挙げられる。**

- 現在のシステムの概念の根拠が失われるおそれがある。
- 実効線量とそれを導出するための裏付けとなる加重係数を修正することが必要となる可能性がある。
- 現在のシステムの一見した統一性と導入しやすさ(線量の単純加算性にもとづく)が失われるおそれがある。
- 線量限度と制約(そして規格あるいはより一般には標準レベル)を、リスクを考慮に入れている度合いに応じて改訂する必要性が生じる可能性がある。
- 線量と、リスクにさらされる標的の妥当性を再検討する必要があるかもしれない。
- LNT仮説が慎重な仮説であり、「予防原則」を具体化しているという信頼が根拠のないものであることが判明し、現在のシステムがロバストであるという主張の根拠が揺らぐ可能性がある。あるいは、この仮定が、過度に慎重であり、産業と医学での放射線の使用を過度に制限し、稀少な資源を防護に対して無駄に割り付けていることが証明される可能性もある。

産業と医学での放射線の使用が正当化され最適化されていると考えられていた線量レベルが変わる可能性がある。

現在の知見は、現行の線量制限システムの根本的な改革を正当化するのには十分ではない。しかし、今、政策コミュニティがこの新しい研究成果が意味する含意についての検討に着手することは賢明なことといえる。

現行システムに異議を唱える科学的証拠が蓄積されているが、それが政策の空白のために見過ごされるなら、それは怠慢といえる。少なくとも、線量制限システムを1つにした場合、そして非線形の線量リスク関係をより忠実に反映することのできる複数の線量制限システムを採用した場合のそれぞれの基礎と実際の含意を検討し、不測の事態への対応を整備すべきである。

## **5. 状況を改善するために考えられるアプローチ**

一般的に、非標的効果と、がん、遺伝的影響、生殖/発達への影響、がん以外の疾患などのさまざまな放射線誘発健康影響の間のつながりを調査する必要がある。さらに、電離放射線の非標的効果に関与する機序を探り、空間と時間におけ

る非標的効果の線量・効果関係を決定し、個人の感受性問題に取り組み、非標的効果が放射線レベルに応じて防護的效果となるか有害影響となるかを評価することが重要である。バイスタンダー応答、適応応答、ゲノム不安定性の間のつながりを研究する必要がある。より長期的には、新しい放射線生物学の理論的枠組みを導き出すための概念的枠組み、すなわち電離放射線の標的(直接)効果と非標的(間接)効果の両方をカバーする枠組みを確立すべきである。

一部の疑問については、広範囲の低線量を広い照射範囲に適用すること、およびマイクロビーム照射アプローチを使って高LET応答と低LET応答の両方を調査し、さらにヒト細胞培養、3D人工組織系、生体外の組織外植片などの特性が明確に定義された生物系を使用することによって解決することができる。細胞レベル、分子レベルでは、特に非標的効果のシグナルとシグナル受容体を特定することに重点を置いた新しい研究に取り組むべきである。そのような信号は、すべてのタイプの細胞によって発信されるかどうか、受容と応答は細胞のタイプや器官にかかわらず一般的存在するか、それとも細胞のタイプや器官によって制限されるのかを解明することが重要になる。多くの知見が、隔離した細胞を組織培養して観察される細胞シグナリング・プロセスとアウトカムは、他のタイプの細胞と一緒に含まれると大きく変化することを示している。他のタイプの細胞が含まれるのはシグナルの起源器官にとっては通常の状態である。これらのデータは、機序についての結論を組織全体で試すことが極めて重要であることを示唆している。シグナリング・プロセスの作用を特定、理解することが、個人における被ばくの結果を予測する手段に結びつくと考えられる。

細胞レベル、分子レベル、生体外での組織レベルの研究は、これらのプロセスの機序の理解に不可欠であるが、リスクに対するそれらの影響もより直接的に決定しなければならない。標的放射線効果と非標的放射線効果の正味の影響を適切に評価するために、新しい研究は、特に動物モデル全体を使用し、遺伝学的に正常な株と、放射線に対する感受性が高い、あるいはがんにかかりやすいことが疑われる株の両方を使用すべきである。リスクの全般的尺度には、組織特異的な尺度も付随しているべきである。さらに、これらの組織は、細胞の変化と分子の変化について評価すべきである。これらの結果は、線量の低下に伴う線量と組織荷重係数( $W_T$ )の関係の変化を理解するうえで重要になる。さらに、動物モデルは、生体内の条件下での放射線誘発ストレスに対して起こりうる炎症性反応の一部として非標的効果間の相互関係について明らかにすることができた。非標的応答の長期的なクローン変化と細胞のタイプ差についても研究する必要がある。LETの影響、異なるLETの放射線に同時に被ばくした場合についても、より多くの情報が必要である。これらの応答を誘発する線量率と線量の関係についても、さらに多くの情報が必要になる。各器官の生物学的視点および数学的モデリングは、異なる病態の発現において非標的効果がどのような役割を果たすかについて理解を深めるのに役立つと思われる。

胎仔および未成熟動物における催奇性、発がん性のエンドポイントには特に注意を払うべきである。がん以外のエンドポイントの測定を、遺伝的影響に関する研究を含むすべての研究に組み入れるべきである。特に心疾患の遺伝的素因を調べるために選ばれた動物を用いた研究では、このがん以外のエンドポイントの測定は特に重要である。環境中における有機体の放射線に対する適応応答の影響、それらの有機体が他のストレスにもばく露された場合、適応応答がどのような影響を受けるかという問題の研究も将来の環境アセスメントにおいて重要である。

放射線生物学により、これまでに古典的な「単一標的に関する理論的枠組み」に合致しない重要な細胞応答機序がいくつか発見されており、現在もそれらについて研究が続けられている。放射線誘発ゲノム不安定性、適応応答、バイスタンダー効果などの非標的効果は現在ではしっかりと確立され、論争の余地がない。**DNA**損傷が原因となって結果が生じるという決定論的な説明をすべての場合に当てはめるやり方は今では不適當な印象があり、誤解を招くおそれもある。実際には、古典的な理論的枠組みは研究とヒトの健康の防護の両方にとって根拠として不十分となる可能性があるかと推定される。

非標的効果についての我々の理解はまだ発展途上であり、これまでのデータの多くは、*生体外*での研究から得られたものである。*生体外*と*生体内*の実験の間で不一致が観察されており、ヒトの健康に対するこれらの間接的影響の重要性の解明はこれからの課題である。*生体外*と*生体内*の非標的効果についての最近の研究と新しいデータは、直接的影響と間接的影響の両方を組込もうとする場合、放射線量がリスクの代わりとして使用できるという概念を再検討しなければならない時期が来ることを示唆している。そのような研究の結果は、高線量から低線量へ放射線リスクを単純に直線的に外挿するという一般的なやり方に対して深刻な疑問を投げかけることになる可能性がある。

したがって、今の時点では、方針を決めるコミュニティは、新たに登場しつつある科学の意味合いの可能性に対処していくのが賢明であろう。

## 関連文献

Little, J.B. and Morgan, W.F. (2003), (Guest editors), *Radiation and chromosomal instability*, Oncogene, Reviews, Vol. 22, Number 45, 6977-7094.

Schwartz, J.L. (ed.) (2004), *Adaptation, Instability, and Bystander effects Following Low Level Radiation Exposure. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, Vol. 568, Issue 1, pages 1-143.

Baverstock, K. and Belyakov, O.V. (2005), *Classical Radiation Biology, The Bystander Effect And Paradigms: a Reply, Human and Environmental Toxicology*, 24: 537-542.

Belyakov, O.V., Folkard, M., Mothersill, C., Prise, K.M., Michael, M.D. (2002), *Non-targeted effects of radiation: application for radiation protection and contribution to LNT discussion*, Proceedings of the European IRPA Congress on Towards harmonisation of radiation protection in Europe, Florence, Italy, 8-11 October 2002.

Little, J.B. (Métivier H., Arranz L., Gallego E., Sugier A. (eds)) (2004), “Non-Targeted effects of ionizing radiation: implications for radiation protection”, *In Current Trends in Radiation Protection*, EDP Sciences, 1-12.

Brenner D.J and Sachs R.K. (2003), “Domestic radon risks may be dominated by bystander effects – but the risks are unlikely to be greater than we thought”, *Health Physics*, 85(1):103-108, July 2003.

Hall, E.J. (2003), *The Bystander Effect*, *Health Physics*, 85(1):31-35, July 2003.

Masoomi J.R., Mohammadi Sh., Amini M. Gjiassi-nejad (2006), *High Background Radiation Areas in Ramsar in Iran: Evaluation of DNA Damage by Alkaline Single Cell Gel Electrophoresis (SCGE)*, *Journal of Environmental Radioactivity*, 86, N°2,176-186.

Morgan, W.F. (2003), *Non-targeted and delayed effects of exposure to ionizing radiation: I. Radiation-induced Genomic Instability and Bystander effects in vitro*, *Radiation Research*. 159, 567-580.

Morgan, W.F. (2003), *Non-targeted and delayed effects of exposure to ionizing radiation: II. Radiation-induced Genomic Instability and Bystander effects in vivo, Clastogenic factors and transgenerational effects*, *Radiation Research*, 159, 581-596.

Tubiana, M. (2005), "Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: the joint report of the Académie des sciences (Paris) and of the Académie nationale de médecine", *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, Elsevier Science, Volume 63, Issue 2, pp. 317-319.

## 感受性の個人差

### 1. 問題は何か

個人の電離放射線に対する感受性は、作業者と公衆構成員の防護における考慮事項としての重要性が高まっている。放射線に対する感受性の高い作業員や患者を(医学的スクリーニングや疾患の診断を通じて)特定し、適切な防護を行うことは、方針上の重要な問題を提起している。がんの高線量放射線治療を受け、その後、異常なほど重症な正常組織応答(例えば毛細血管拡張性運動失調症(AT))を発現した個人において、放射線感受性が強められていることが判明している。今ではいくつものがん遺伝子(ATの遺伝子など)が特定されており、それによって、ある種のがんに対する個人のかかりやすさが高まるおそれがある。それに比べて低線量の放射線に被ばくした個人においてがんに対する放射線感受性が高まることを示す知見は少ない。しかし、胸部X線に被ばくしたBRAC1/2突然変異キャリアの間で(乳がんに対する)放射線感受性が増加することを示す研究結果が最近報告されている。さらなる研究によって、これらの知見が事実であることを確認する必要があるが、低線量で被ばくした放射線感受性の高い人々の集団が存在することは真剣に考えなければならない問題である。

作業員と公衆の線量限度を、感受性の高い個人に配慮してより厳しくすべきかどうか。放射線感受性が高いことを理由に作業員の扱いに差を設けるべきか。放射線感受性の高い個人を特定し、追加の防護対策を提供することに伴う社会的コスト、経済的コストはどのようなものか。臨床医は、放射線感受性が高いことが知られている患者をどのように管理すべきか。放射線感受性が高められていることを考慮して線量処方下方に修正すべきかどうか。高線量の介入治療は、患者の線量を制限するために修正すべきかどうか。

歴史的に放射線防護の枠組みは、被ばくした集団の平均的人物の放射線応答に基づいてきた。今、平均的な反応から個々の応答へと重心を移すことに大きな関心が寄せられている。医学と放射線生物学の最近の知見によれば、一部の遺伝子突然変異と疾患には、電離放射線被ばくに対する感受性が高まるという点に特徴がある。近い将来、簡単な血液検査によってこれらの突然変異の多くを検出できる方法が開発されると思われる(新しいDNA技術など)。

がんに対する遺伝的感受性が高いために放射線誘発がんのリスクが他に比べて高い作業員、公衆の比率は知られていないが、1%から10%の範囲と推測されている。この評価は、限られた疫学的、科学的データに基づいており、非常に不確実である。さらに、放射線防護の観点からの放射線感受性の定義は明確には確立されていない。集団における放射線感受性の高い個人の数、放射線感受性がどのように定義されるかによって変わるであろう。現時点で公表されている研究成果はほとんどないが、もしも放射線と化学物質への感受性が共通の損傷経路によって決定されるとしたら、放射線に対する感受性は、ある一定の発がん性化学物質に対しても感受性が高いことを含意している可能性がある。

個人による放射線感受性の違い(放射線感受性の個人差)は、放射線防護と医学に対し、挑戦的な問題を提起している。作業員の場合、我々は、放射線感受性の高い個人をすべて同じやり方で扱うのか。それとも健康影響によって深刻度に違いがあることを受け入れるのか。非黒色腫皮膚がんのリスクが高い個人と、結腸がんまたは肺がんのリスクが高い個人とでは、異なるリスク管理戦略が必要と考えられる。

がんの放射線治療や、一部の介入的治療(例えば血管造影、血管形成術など)などでは、患者が被る線量が70Gy(身体の特定期間が被ばくする線量)にも達するため、放射線感受性が高いことが確認されている患者の医療的管理は、特に困難である<sup>1</sup>。がん治療による効果が期待できる放射線感受性の高い個人を特定することには大きな利益がある。放射線(または化学療法)感受性の点からがん患者をスクリーニングすることは、最適な治療を特定するのに役立つと思われる。例えば、前立腺がんの患者に手術を受けるか放射線療法を受けるかの選択肢がある場合、放射線感受性に関する情報は治療方法の決定において重要な意味を持つ。放射線感受性の状態は、放射線による管理を必要とする疾患の診断と治療において臨床医が注意深く考慮すべきである。

## 2. 科学的証拠

放射線感受性が増強されることを示す証拠は、主として高線量の医療被ばくから得られている。放射線感受性が高まることによってかかるヒトの疾患の種類は、毛細血管拡張性運動失調(AT)など、わずかである。ATの患者は、一般集団では放射線療法時に観察されない重症の正常組織応答を発現する。放射線生物学の研究によれば、AT患者の細胞にはDNA修復能力が欠損しているために、放射線の細胞毒性作用に対する感受性が高い。しかし、増強された放射線感受性が、がんに対する感受性の増加も伴うものかどうかは不明である。細胞毒性の感受性が増強されていることががん感受性も増強されることを意味するとは必ずしも限らない。

---

<sup>1</sup> 医療被ばくの単位はグレイ(Gy)である。x線とガンマ線の場合、1Gy=1Svである。本文書の目的により、Svは職業の場面で遭遇する線量を比較するために使用される。

低放射線照射量での被ばく後に、放射線感受性が増強されることを示す科学的証拠は少ない。これは、低線量に被ばくした集団に関する疫学研究では、リスクのわずかな差を検出するのが難しいことも原因の1つである。また、そのような集団においてサブグループ間の違いを特定することが困難であることはいうまでもない。しかし、**BRCA1/2**突然変異キャリアにおける乳がんリスクに対する胸部X線の影響について研究した最近の研究は、そのような女性において放射線感受性が増強されることを強く示唆している。これらの知見は、さらなる研究(特により優れた線量測定)によって確認する必要があるが、それらの知見は低線量での感受性の個人差についてのさらなる研究の重要性を示している。

放射線感受性の高まりが重要な考慮事項であるとしても、それは少なくとも、放射線防護で現在使用されているリスク評価で、部分的には考慮されている。評価は、主に日本の原爆被ばく者に関する疫学研究に基づいている。この日本の集団の規模は大きく、不均質であった。集団全体を通じてリスクを評価する際には、集団固有のベースラインがんデータを利用することにより、遺伝子に違いがあったとしても、その相違は考慮されていると想定される。しかし、自然発生的なリスクに影響を及ぼす遺伝子上の違いを管理することは、放射線リスクを支配する遺伝子の違い(例えば異なる集団における)を管理することは別のことである。

年齢、性別、喫煙、食事などの多くの宿主因子と環境因子によって個々のがんリスクが決定されることはよく知られている。しかし、遺伝子的差異が放射線応答の個人差をもたらすことを示す知見が蓄積されつつある。がんリスクの増加に起因することが確認された疾患は数多い。これらの疾患と関連するがんに対する遺伝的なかかりやすさの原因は、1つないし複数のがん遺伝子における特異な構造遺伝子変異にある。これらの変異は、DNAに対する損傷を修復する能力に影響を及ぼす、あるいは細胞増殖や分裂に影響を及ぼすため、放射線感受性の増加を招く可能性がある。放射線感受性の増加を特徴とする遺伝病の例には、家族性乳がん、毛細血管拡張性運動失調症、ブルーム症候群などがある。

がん遺伝子(すなわちがん遺伝子および腫瘍抑制遺伝子)における変異の蓄積は、がんを促進する。DNA損傷の発がん性の影響を打ち消すクリティカルな細胞の反応はDNA修復である。DNA修復にはいくつかの経路があることが知られており、それによって遺伝子の健全性が回復される。それらはすべて、DNAの病変を取り除き、変異を防ぐよう作用する。DNA修復経路の重要性は、多くの遺伝病によって実証されており、DNA修復遺伝子に欠陥のある個人はがんに非常にかかりやすい。例えば、さまざまなDNA修復機序の活動が低下すると、肺がんにかかりやすくなる。DNA修復活動が低下した喫煙者は、正常なDNA修復能力の非喫煙者と比べて、肺がんのリスクは100倍以上高い。しかし、特定のDNA修復システム

が欠けているために特定の化学物質によってがんに対しておかたりやすいとしても、放射線誘発がんにおかたりやすくなることもあれば、必ずしもおかたりやすくない場合もある。すなわち、がんのおかたりやすさは必ずしも放射線感受性と一致しない。

放射線感受性が高い個人は同じがんにおかたりやすいとは限らない。遺伝子突然変異の違いによって、被ばくした個人が肺がんのリスクが高くなる可能性もあれば、乳がんのリスクが高くなる場合、結腸直腸がんのリスクが高くなる場合、甲状腺がんのリスクが高くなる場合、その他のがんのリスクが高くなる場合がある。これらの腫瘍は発生率も死亡率も異なり、臨床管理上克服しなければならない課題もそれぞれ異なるため、高められた放射線感受性は、ある人によっては他の人より深刻となる可能性がある。例えば、肺がんは非常に高い死亡率を持っている。しかし、基底細胞皮膚がんは容易に治療され、死に至ることは非常にまれである。

### 3. 今後期待される研究結果

この10年で分子生物学と細胞生物学は急速な発展を遂げた。ヒトゲノムは配列が決定され、また、個々の遺伝的変異に関する新たなデータが相次いで得られているが、これらの結果は重要である。なぜなら、外部と内部両方の因子と刺激に対するヒトの応答の違いは、大半が、一塩基変異多型(SNP)による個々の遺伝子変異に起因するからである。この特異な遺伝子コドンの変化が、遺伝子のタンパク質生成物のある特定の部位に挿入されている単一のアミノ酸に変化をもたらす。新しい生体医学アプローチは、遺伝子産物へのSNPの影響、遺伝子産物がどのように細胞と組織機能に影響を及ぼすかについての我々の認識を明確化するのに役立っている。研究結果は、今後この分野で進歩し続け、将来、個人の放射線感受性と放射線耐性の遺伝的な根拠を検討する新しい可能性を提供するであろう。ヒトの個体差、特に放射線応答の点での個体差を理解するうえで重要な一例は、Tp53遺伝子の産生物であるp53タンパク質において正常なアルギニンがプロリンに入れ替わるという最近報告されている事象である。この変化により、アポトーシスを開始するp53タンパク質の能力が損なわれ、この変化が発生した人はがんにおかたりやすくなり、自然発生がんによる死亡確率は2.5倍高くなる。逆説的なことであるが、この変異のあるがんにおかたりやすい人が85歳まで生き残る場合、彼らは、正常なp53タンパク質を有する人より長生きする可能性が40%高い。このヒトの状況は、Tp53における機能的変異のあるマウスにおける観察結果と完全に合致しており、したがって動物の結果はヒトの応答とリスクを予測する可能性が高い。

いくつもの疫学研究から、末梢血リンパ球中の染色体異常の割合ががんのリスクを予測する指標となることがこれまでに明らかになっている。この関連性は、電離放射線のような遺伝子毒性のある因子によって誘発される染色体異常に当てはまるだけでなく、被ばくしていない人にもこのような関連性が見られる。このことは、固有の(すなわち遺伝的)因子だけでは、すべてのリスクを説明しきれないことを示

唆している。将来の研究では、この個人差の一部を修復遺伝子変異体、その他の遺伝子多型あるいは食事因子によって説明できるかどうかを取り上げられるであろう。集団レベルでの電離放射線(そして発がん化学物質)とDNA修復遺伝子変異体の相互作用についての情報はほとんどなく、ましてやDNA修復遺伝子変異体のさまざまな組み合わせの影響についての情報は極めて限られている。

#### 4. 考えられる政策上の課題

年齢、性別、喫煙、食事ががんリスクの主たる決定因子であるが、状況によっては個人の放射線感受性が重要な場合もありうる。放射線環境で働く放射線感受性の高い個人は、がんのリスクが高くなる可能性がある。できる限りそのような個人を特定し、追加の防護対策を提供することが賢明である。

放射線感受性の高い個人については防護を強化すべきであると判断された場合、どのようなリスク管理戦略を採用すべきであろうか。放射線感受性の高い個人を防護する際に平等主義的アプローチをとるべきか、それとも、放射線感受性の高いグループはがん素因の重大度に従って階層化すべきか。感受性の高い作業者を防護するという観点から現在の線量限度を低減すべきであろうか、それとも、放射線感受性の高いグループについて別個の限度を設定すべきか。現在の放射線防護の枠組みは、妊娠している作業者に特別な配慮を行っている。胚/胎児の放射線感受性は高いため、これらの作業者は厳格な線量制限のもとに置かれる。

遺伝子試験は、自主的なものであれ非自主的なものであれ、放射線防護政策にとって多くの倫理問題を提起するとともに、放射線防護政策の意味に関する問題も提起する。DNA技術の急速な発達により、個人についての実に詳細な遺伝子情報を得ることがまもなく可能になるであろう。一部には、遺伝子情報はパンドラの箱のようなものだと考えられている。「開くな！さもないと、たいへんなことになるぞ」というわけである。個人レベルでは、知る権利と知らない権利のどちらを取るかが問題だ、という意見もある。自分がなんらかの疾患にかかりやすい遺伝子のキャリアかどうか知りたくない人もいれば、それに関して何らかの行動(例えば、禁煙や健全な食事を摂るなどのリスク回避行動を取る)をとるために知りたいと考える人もいる。

従業員の遺伝子検査も微妙な問題であり、作業員差別とも解釈できるし、個人の最大の利益を図るための思慮深い手続きとも解釈できる。スクリーニング試験で陽性であった個人(偽陽性であれ真陽性であれ)は、雇用差別、保険上の差別、社会的差別を受けるおそれがある。放射線感受性の試験は、正当な雇用前条件として必要であると考えられるべきであろうか。放射線感受性の遺伝子検査は個人のみに任せられるべきであろうか。それとも、そのような個人情報に雇用者が要求するのが正当なある種の雇用状況が存在するのであるか。従業員が、妊娠を申告するのと同じように放射線感受性が高いことを「申告する」できるようにすべきであろうか。妊娠している作業者を防護する現在の方針は、作業員の放射線感受性に対処する場合に有用なモデルといえるであろうか。

放射線感受性の高い個人に対する防護政策を策定する際、いくつかのカギとなる問題に取り組まなければならない。作業者の感受性の問題は、放射線防護の範囲を越えていることが強調されなければならない。高い放射線感受性を有する個人は、他の発がん物質に対する感受性も高い可能性がある。特に細胞の損傷経路が共通の場合、その可能性が高い。したがって、ここで提起されている問題の多くは、より一般的な労働衛生全般の一環として取り組む必要がある。また、放射線防護方針はより広い枠組みの中で策定することが必要であろう。以下に、具体的な3つの問題に焦点を当てて取り上げる。

### 放射線感受性の定義

- 実施が可能な基準と規格の点から、放射線感受性はどのように定義すべきか。
- 放射線感受性の知見は、大部分が高線量での医療被ばくに由来する。低線量でも放射線感受性は同じように重要な問題であろうか。
- 放射線感受性は基本的に線量の問題か。
- 放射線感受性の高い個人は全員、特別の防護が必要か。

### スクリーニングのガイドライン

放射線感受性の高い個人を特定するスクリーニングテストのガイドラインを開発すべきであろうか。スクリーニングテストの結果は、感受性、特異性および予測値に関する、ある基準を満たすべきか。スクリーニングテストでの結果が陽性である、あるいは陰性であることの含意はどのようなものか。倫理的問題、および雇用、保険、社会差別に関する問題は、スクリーニングと遺伝子検査にとって重要な問題である。理想的には、スクリーニングテストの偽陰性率は低くすべきである。試験結果が偽陽性である、あるいは偽陰性である、という主張に対処するために、補償政策を制定すべきであろうか<sup>2</sup>。試験が自主的か非自主的かが重要かどうか。雇用者が業務上の必要のためにテストを要求する状況が存在するであろうか。

### 線量限度の設定

スクリーニングテストその他の個人情報容易に入手できるとしても、線量限度を設定する際に各個人のリスクを考慮に入れるべきか。

---

<sup>2</sup> スクリーニングテストで誤って陰性の結果が出たため放射線感受性の高い従業員が高リスクの放射線環境に配置される可能性がある。スクリーニングテストで誤って陽性の結果が出た場合は、平均的な感受性を有する作業者が不当な作業環境に置かれる可能性がある。

## 5. 状況を改善するために考えられるアプローチ

### 集団の感受性における変動についての理解を深める

基礎的分子生物学は、電離放射線に対する細胞の反応と放射線作用の機序に関する我々の理解を深めてきた。しかし、ヒトと動物の実験モデルからいかに洗練された全体像が得られるかにかかわらず、現実的な設定における影響を確認し、公衆の健康にとっての含意に定量的に対処するには、ヒトの集団を対象とした大規模な研究が要求される。そのような研究の実現の可能性は、DNAチップとプロテオミクスのようなハイスループット・スクリーニング技術の発展により、急速に高まっている。放射線応答を修正することができる遺伝子としては、DNA修復と細胞周期制御に関与する遺伝子などが考えられる。放射線に被ばくした集団と対照集団において関係する遺伝的変異とがん、染色体異常、突然変異などとの関連付けを行い、個人の放射線感受性においてそれらがどのような役割を果たしているか評価すべきである。遺伝子型分析と平行して機能表現型アッセイの開発に取り組むべきである。これらの研究を行うには、放射線に被ばくした集団のバイオサンプル・バンクが必要である。

Tp53のような、放射線応答に特に関連のある遺伝子におけるSNPの違いを評価することができれば、放射線リスクの個体差の評価において極めて有用である。この例では、高線量被ばく後のTp53と低線量被ばく後のTp53とでは影響が異なっており、治療状況での患者防護の場合と、公衆の被ばくや職業被ばく、診断目的の放射線被ばく状況などにおける放射線防護の場合とで、この知見の意味合いは異なると思われる。(ヒトにおける多くの既知の遺伝疾患の場合と同じように) SNP差が、ヒトの集団全体を通じて正規分布しているとは考え難く、地域や民族によってバイアスがあると思われる。そのため、SNP分布での民族や地域による違いを研究計画で考慮に入れないと、幅広い集団に基づく疫学研究の有効性が低減するおそれがある。民族や地域による違いは、政策的含意を持った倫理問題、特に差別の問題を生じさせる可能性がある。将来的には、分子疫学を古典的疫学と統合することが望ましい。

### スクリーニングテストの開発

放射線被ばくを遺伝的感受性や遺伝子影響と結びつける分子疫学は、集団における放射線感受性差を評価するのに役立つと期待される。そのような研究により、放射線誘発がんの本質的に高い感受性の個人を特定するための単純なスクリーニングテストが開発される可能性がある。しかし、そのようなテストによっても、誰が実際にがんにかかるかという不確実性は除去できない。しかし感受性の個人差は、放射線防護、医療における放射線の使用(診断、インターベンショナル・ラジオロジー、放射線療法)のあり方にも影響を及ぼす可能性がある。スクリーニング

テストの開発、実施、スクリーニングの結果の解釈は、深刻な社会的、倫理的、経済的帰結につながる可能性があり、注意深く実施する必要がある。実際には健康で、がんリスクが高いわけではないにもかかわらず、偽陽性の結果が出たことにより、雇用や健康保険で差別を受けたり、放射線感受性が高くないことを確認するため高価なフォローアップ試験を受けなければならない場合も想定される。検査結果が真陽性（すなわち、検査で放射線感受性が本当に高いことを検出）であっても、放射線に被ばくしたからといって放射線感受性の高い個人ががんにかかることを必ずしも意味するわけではない。それは単に、リスクが高くなることを意味するに過ぎない。

細胞生物学、分子生物学は長足の進歩をとげており、集団内の放射線感受性の差についてのより完全な理解を確かにするための根拠となっている。高線量の被ばく後放射線感受性が高まることは確認されている。低線量での被ばく後については直接的証拠は比較的少ないが、最近の研究は、特殊な遺伝子突然変異のキャリアの間では感受性が高くなることが強く示唆されている。今後、放射線誘発がんのリスクが高い個人が単純な遺伝子スクリーニングによって特定されるようになる可能性は高い。これらの知見の発展は、現行の線量制限・放射線防護システム、特に作業者と患者に対する線量制限・放射線防護システムにとって重要な意味合いを持つと考えられる。

これらの研究成果は次のことを示している。

- 集団における放射線感受性の変動をよく理解する必要があること。
- 誰が放射線感受性が高いかを特定する必要があること。
- よりよい防護を達成するうえで、単一の線量限度を設定するのがよいのか、それとも放射線感受性が異なるグループに応じて複数の線量限度を設定するのがよいのかを研究する必要があること。
- 遺伝子スクリーニングが提起する倫理的問題を探求する必要があること。

これらの発展のペースに照らすと、政策コミュニティが近いうちにこれらの含意を検討し始めることは賢明であり、また時宜に適うことと思われる。この問題は、特に形成段階で幅広いステークホルダーが関与して取り組むのに適している。これにより、これらの新たな知見によって最も影響を受ける人々（特に、雇用主、従業員、規制当局）の懸念を完全に特定し、新しい政策枠組み内で対処することが可能になるであろう。扱われる問題の多くは、一般的な遺伝子スクリーニングと共通である（例えば、他の職業では、保険、賠償責任、雇用目的など）。また、新たな知見による便益は他の分野にもあるはずである。

## 関連文献

ICRP (International Commission on Radiological Protection) (1991), *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford.

ICRP (International Commission on Radiological Protection) (1998), *Genetic Susceptibility to Cancer*, ICRP Publication 79, Pergamon Press, Oxford.

Mossman, K.L. (1997), *Radiation Protection of Radiosensitive Populations*, *Health Physics* 72, 519-523.

Sankaranarayanan, K. and Chakroborty, R. (2001), *Impact of Cancer Predisposition and Radiosensitivity on The Population Risk of Radiation-Induced Cancers*, *Radiation Research* 156, 648-656.

West, C.M.L, McKay, M.J., Hölscher, T. et al (2005), “Molecular markers predicting radiotherapy responses: report and recommendations from an international atomic energy agency technical meeting”, *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, Volume 62, Issue 5, pp. 1264-1273.



## 疫学

### 1. 問題は何か

これまでのところ、ヒトにおける放射線誘発がんのリスクに関する主な情報源は、被ばくした集団に関する疫学のデータであった。しかし、直接の情報は、主として中程度の線量から高線量で見られた結果に基づいていた。また、これらのデータからの線形の外挿（線量と線量率の補正を行ったうえではあるが）が、より低線量でのヒトがんのリスクを予測するために適用されている。これは、一般集団と放射線作業員の被ばくの場合に特にあてはまる。低線量におけるがんの線量応答曲線の形は、大きな論争的的である。主張は様々で、わずかな放射線量は有益な効果を及ぼす（ホルメシス）というものから、しきい値タイプの応答であるという主張、しきい値なしの超線形応答（低線量が以前に仮定されていたよりも有害であることを示唆している）であるといった主張にまで及んでいる。

今日の放射線疫学の主な問題には次のようなものがある。

- 比較的低線量のリスクの評価
- タイプ、性質がそれぞれ異なる放射線の研究
- さまざまな被ばくパターンに関する研究
- 放射線リスクの遺伝子修飾因子、その他の修飾因子の両方についての研究
- 研究計画、研究解析、解釈への放射線生物学情報の統合

現在のところ、電離放射線によるヒトに対する健康リスクの評価にとって、疫学は最も情報に富むアプローチであり、さらなる疫学研究から低放射線照射量の影響についてこれから学ぶべきことは大いにある。しかし、環境被ばくや職業被ばく、あるいは診断放射線医学の多くに典型的に見られるレベルの線量の影響評価についての疫学研究は非常に限られており、方法論的に複雑になる。

### 2. 科学的証拠

ヒトが低中程度の電離放射線（1Gy以下）に被ばくした場合に懸念される生物学的作用の中でも最も重要な長期的影響は、がんの誘発と、それより数は少ないも

の、血管疾患の誘発である。細胞系および動物についての研究室での実験から、がん誘発プロセスの性格について学ぶべきことは多い。がん誘発機序に対するなんらかの洞察もこのようにして得られる可能性がある。しかし、今までのところ、ヒトにおける放射線誘発がんリスクの定量化について最も情報が期待できるアプローチは、被ばくした母集団に関する疫学研究である。疫学しか、ヒトにおいて誘発されたがんのタイプ、被ばく後の線量と時間の関数として変化する誘発がんの頻度、それらの発現を修正する年齢と性別などの多くの因子を決定することができない。また、疫学しかこれらの反応を定量化し、その結果として、線量の関数としてがん誘発リスクを予測することができない。

古典的な疫学研究(分子疫学という新興分野と対比される)が放射線生物学の機序に関する知識に直接寄与するとはその性格上期待できない。というのも、古典的な疫学研究では、測定可能な現象が疾患の発症(特にがんの発生)や場合によっては損傷または影響の比較的安定した生物学的マーカーなどに限られているからである。しかし、疫学研究は、実験システムで得られたデータによって示唆される線量反応その他の情報がヒトに適用可能かどうかについて有用な情報を提供することができる。例えば、分子疫学は、ヒトの中の放射線誘発性のがんのリスクに関係するすべての放射線生物学機序(すなわちDNA損傷と修復、バイスタンダー効果、ゲノム不安定性、適応応答)の複合的作用全体の影響を試験するために使用することができる。また、例えば適応応答は、高線量率で急性に被ばくした集団の場合よりも低線量で長期にわたり被ばくした集団における線量の単位当たりのリスクの評価を低めると予想される。

さらに、疫学はこれまで、被ばく時の年齢、被ばく後の経過時間、放射線リスクを変更する可能性のあるさまざまな宿主因子、環境因子に関する重要な情報を提供してきた。また、今後も疫学は、そのような情報を提供し続けるであろう。したがって、疫学は感受性の高いグループの放射線防護にとって今後も重要である。放射線誘発がんの機序に関する理論は、これらの研究からの情報を考慮に入れる必要がある。具体的な例としては、乳がん、甲状腺がん、白血病に関する研究などがある。これらの研究は、小児と未成年者が環境上の損傷に対して特に脆弱であることを示している。原爆被ばく者、ウラン鉱山労働者に関する研究からは、喫煙と放射線の急性被ばく、長期被ばくが肺がんリスクに及ぼす複合影響に関する情報が得られる。もう1つの例として、放射性ヨード被ばく後の甲状腺がんリスクの評価において、ヨウ素欠乏、被ばくから特定の月数と年数が経過した時点における食事の補充の役割を疫学研究によって評価することができる。

疫学はこれまで、ヒトにおける放射線誘発がんとそのプロセスの定量的リスクについての幅広い理解に大いに貢献してきたが、その本質に根ざす固有の制限がいくつか存在する。線量が高い場合、疫学研究は明確な反応を特定してきた。また、多くのタイプのがんのリスク評価がそこから導き出され、他の因子への依存度が探求されてきた。しかし、線量が低く、照射された集団におけるがんの自然の発症率に比して検出される影響が非常に小さい場合、リスクの正確な定量化は困難であり、線量が非常に低い場合は不可能かもしれない。統計的有意性と検出力を維持するには、必要なサンプル・サイズが、線量の2乗の逆数にほぼ比例して増加する。例えば、リスクが線量に比例すると仮定すると、もし1000-mGyの線量の影響を定量化するために1000人のサンプルサイズが必要なら、100-mGy線量には10万人のサンプル・サイズが、10-mGy線量には約1000万人が必要とされる。低線量、低線量率のリスクの評価については、高線量、高線量率で被ばくした集団からの直接の知見と外挿の組み合わせに依存することが慣行となってきた。線量と線量率レベルについて一定の配慮はするものの、低線量への外挿は、線量と効力が線形関係にあるという仮定に基づいて行われている。

近年、疫学者は、統計の不確実性を低減するため、信頼できる個人線量評価が得られているさらに大きな集団(例えば多国籍にまたがる原子力産業作業者のコホート)について研究し、また個人線量再構築(居住地域のラドンに関するケースコントロール研究)を研究することによって、100 mGyより少ない線量の健康影響を評価する試みに取り組んでいる。線量誤差の特性分析と定量化、洗練された統計モデルによってリスク推定値評価における線量測定の不確実性を考慮に入れるという点でも進歩が見られる。

低線量被ばくに起因する健康影響について現在行われている疫学研究には、<sup>224</sup>Raによる放射線診断検査または治療を受けている人々、放射線作業員、原爆被ばく者、核施設からの偶然的排出物や日常的排出物から放射線被ばくを受け人、過去の核実験からの降下物で被ばくした人々、高バックグラウンド放射線(ラドンなど)地域に住む人々を対象とした研究がある。

現在、疫学研究で、固形がんに対するわずかに約50～100mSvという低い量ではあるが急速な混合放射線( $\gamma$ 放射線と中性子)の被ばく後、がんリスクの有意な増加が確認されている。同様に、原爆被ばく者では白血病で約200mSv、小児の外部放射線により治療した後の甲状腺がんについては約100mSv、診断X線により子宮内で被ばくした小児については、約10～20mSvでそれぞれがんリスクの有意な増加が確認されている。住民のラドンについては、100Bqm<sup>-3</sup>から200Bqm<sup>-3</sup>の範囲のラドン濃度で肺がんリスクの有意な増加が観察されている。なお、低線量で

統計的有意性がないことは、リスクの有無の証拠として解釈すべきでない。実際、ある研究で有意な増加が見つかるレベルは、統計的検出力(研究された集団のサイズ、追跡期間の長さ、線量測定の妥当性、線量の範囲など)によって変化する。

しかし、高LETのアルファ放射体被ばくした集団に関するいくつかの研究は、しきい値応答が存在することを確かに示しているように見える。例えば、被ばくした平均骨格放射線量が10Gyに満たないラジウム・ダイヤル・ペインタでは、骨肉腫の過剰リスクは見られなかった。また、推定プルトニウム体内蓄積量が7.4kBq未満(骨表面線量に換算すると数Gy)のマヤクの作業員では、骨肉腫(そして肝臓腫瘍)の同様の過剰リスクのないことが確認された。放射線量が減少するにつれて骨肉腫の潜在期間が長くなると考えられることから、考えられる1つの説明は、低線量では、腫瘍の潜在期間が残存寿命より長くなるというものである。

疫学研究に関連した他の問題には次のようなものがある。

- 線量評価に付随する不確実性。これは環境被ばくに関係するすべての研究と医療被ばくに関係する多くの研究で再構築されるかもしれない。一般に、不確実性は、外部被ばくより内部被ばくのほうが大きい。
- ほとんどの研究で引用されている信頼限界は、線量評価などにおける不確実性を考慮していないこと。
- 高LET放射線と低LET放射線とが混じり合った放射線への被ばく。
- 異なる被ばくパターン(例えば急性外部照射と長期にわたる内部照射)と、さまざまなタイプの放射線(例えば $\gamma$ 放射線対 $\alpha$ 粒子)の結果の比較。

### 3. 状況を改善するために考えられるアプローチ

低線量および(または)長期線量(<100mSv)での線量応答に関する知見を広げるため、この10年間行われてきた研究を今後も継続すべきである。特に興味深いのは、現在実施されているあるいは構想されている大規模集団を対象とした疫学研究である。しかし、周知のように、これらの研究は、多くの場合非常に長期の関与を必要とする。さらに、がんは遅発性の疾患であるため、ラジウム・ダイヤル・ペインタ研究のようなコホート研究を、すべての被験者の死の前に打ち切る傾向があるが、これは改めるべきである。実際、後代の世代への影響に対する関心が高まるにつれて、研究によっては資金拠出期間を、被ばくした被験者の寿命以降にまで延長すべきであるという議論も出てくる可能性がある。

完了したばかりの疫学研究(例えば、60万人の原子力作業者のプール解析から、長期の低線量外部放射線被ばくと関係するこれまでで最も正確な直接的リスク評価が得られている)、あるいは近い将来に完了する疫学研究(例えば子どもの頃、あるいは子宮内で被ばくした個人における甲状腺がんに関するチェルノブイリ研究)の結果、低線量・低線量率域での放射線リスクの推定値が精緻化されると期待される。長期間にわたるこれらの集団の経過観察により、より包括的な情報が得られるであろう。しかし、古典的疫学研究(分子疫学研究に対置されるものとして)の検出力は、非常に低い線量での特定の疾患のリスクを決定できるほどは大きくならない。

修正係数の影響と、さまざまな放射線タイプや被ばくパターンへの新しい洞察が期待される。小児期の放射性ヨード被ばく後の甲状腺がんリスクにおいて、ヨウ素欠乏と安定したヨウ素の長期的食事補充の重要性がすでに指摘されている。**BRCA1**と**BRCA2**の変異体のキャリアに関する研究は、そのような人において放射線誘発がんのリスクが増加する可能性があることも示している。若い女性における乳がんの病因において、低線量放射線被ばくと遺伝的感受性の共同の役割を評価する研究が始まっている。

がんについての将来の研究において特に関心が持たれる集団としては、次のような集団がある。

- 原爆被ばく者。リスクを完全に把握し定量化するには、このコホートの消滅まで、フォローアップを継続することが重要である。経過観察期間が長く、中等度から高度に被ばくした個人の数が比較的多いため、このコホートは、時間と年齢に関連した放射線誘発リスクパターンを研究するための独自のデータソースとなっている。
- 医療被ばくを受けた集団(低線量のアルファ放出体に被ばくした集団を含む)。そのような集団に関する研究は今後も、患者の放射線防護と放射線防護一般の両方にとって非常に有用である。特に患者の放射線防護については直接の情報が得られる。医療被ばくを受けた集団は、放射線感受性における個体差に関する情報を提供できるし、実際に提供している。また、分子マーカーの幅広い使用を拡大することによってさらに多くの情報を提供することができる。これらの集団からは、性別、年齢、被ばく分割など他の潜在的リスクの修飾因子と特定の腫瘍タイプのリスクについての情報が得られる。
- マヤクの作業員。この集団に関する研究の継続と内部線量の定量化の改善により、アルファ放出体からの被ばくの影響と、比較的高い線量範囲での被ばく長期化の影響についての有用な情報が得られるであろう。中性子被ばくに関係するリスクについての有用な情報も得られる可能性がある。

- 原子力作業員。原子力産業の作業員に関する研究は、長期の低レベルの電離放射線被ばくの影響の直接の評価に特によく適している。既存の原子力作業員コホートの多くはまだ若い。したがって、継続的フォローアップにより、低線量でのリスクの直接的評価の精度をさらに向上するという重要な結果に結びつくであろう。特定のタイプのがん(すなわち肺がん)に対する放射性核種の影響に関する研究を適切な原子力作業員集団内に組み入れることにより、内部放射線の影響についての情報を得ることが期待される。
- チェルノブイリ。チェルノブイリ事故の復旧作業員に関する研究から、0～500mSvの線量での被ばく、また長期の被ばくの影響に関する重要な情報が得られる可能性がある。最も汚染された地区に居住し小児期と未成年期に被ばくした被験者における甲状腺がん、そして、おそらく乳がんのリスクについても、さらなる研究から、これらの疾患のリスク、そして考えられる環境修飾因子、遺伝的修飾因子の両方について重要な情報が得られる可能性がある。
- テチャ川流域の居住者。長期被ばく(主として<sup>137</sup>Csと<sup>90</sup>Srに対する)に関する研究から、長期の内部被ばくの影響に対する貴重な洞察が得られる可能性がある。
- ラドン。住民のラドン同位体被ばく(特に欧州、北米、中国のコホートの複合解析)と鉱山労働者のさらなる研究は、低線量での長期にわたる被ばく後のリスクについての我々の評価を精緻化し、起こりうる逆線量率影響についての我々の知見を拡大し、喫煙によって起こりうる修飾影響についての重要な情報を提供すると考えられる。居住地域における被ばくのレベルからすると、居住地のラドンは、公衆衛生上、放射線防護上重要な問題であり、最近の評価は、欧州ではすべての肺がん死の9%とすべてのがん死亡の2%がラドン-222にその原因を求めることができる。
- バックグラウンド自然放射線が高い地域の居住者。ハイ・レベルの自然放射線の地域に住んでいる集団の健康に関する研究は、電離放射線による慢性の低線量率被ばくの影響について情報を提供してくれる潜在的に重要な情報源である。一般に線量が非常に低く、したがって予期されるリスクの規模が小さいことからすると、そのような集団で合理的に研究することができる健康影響を特定し、有益な研究が実現できるかどうか注意深く評価し、それらに実現性があると判断されれば、しかるべき感度の高い疫学研究計画を適用することが決定的に重要である。コホート内症例対照

研究の実施—さまざまな標的について外部放射線と内部放射線の両方に被ばくした個人の線量評価と、特定の疾患の既知の危険因子と考えられる危険因子について個人から収集した情報は、低レベルの慢性的放射線被ばくに伴う健康リスクを評価するための有用なツールになるであろう。

さらに、がん以外の影響、特に心疾患の結果に関する研究を拡大することが重要である。低線量被ばくに関する研究から情報を最大限に引き出すために、将来の研究では、次の方法上の問題に取り組むことが重要である。

- 類似した被ばくを対象とし、類似したエンドポイントを設定した研究の組み合わせ。研究の蓄積は、原則として、リスクのより正確な評価につながり、研究対象となっている集団グループ間の類似点と相違点を理解する機会を提供する。
- 線量測定の不確実性の低減。さまざまな方法によって線量を評価、確認し、さまざまな背景と経験を有する線量測定者が関与することにより、不確実性の主な発生源とそれらの大きさをより正確に決定し、どのようにすれば不確実性を低減できるかを決定するのを支援できる可能性がある。
- 解析方法の一層の改善。それによって、疫学研究に由来するリスク評価上の信頼水準を確実なものにする際、線量推定値、その他の因子の不確実性、さまざまなタイプの放射線の被ばくに起因する不確実性を完全に考慮に入れることができる。
- 研究の計画、解析、解釈における放射線生物学情報の使用。

#### 4. 考えられる政策上の課題

現在進行中の疫学研究と将来の疫学研究を、非標的効果に関する放射線生物学と組み合わせることにより、最終的に、古典的標的放射線影響と、非標的放射線影響に関する新しい知見の両方を結合した新しい放射線生物学の理論的枠組みの形成に寄与する可能性がある。これは、電離放射線のリスク評価、したがって放射線防護政策と規格にはかりしれない影響を及ぼす可能性がある。

放射線生物学、疫学と遺伝学は、放射線に対する感受性の高い集団についての我々の理解に寄与してきた。今後新たな知見が得られるにつれ、これらのグループをどのように防護すべきかが、放射線防護の問題になるであろう。例えば、子宮内被ばくは、非常に低線量でさえ、特に発がん性を有すると思われる。

今後10年間で、長期放射線の被ばくに伴うリスク、内部被ばくに伴うリスク、がん以外の疾患(特に血管疾患)のリスク、変異体キャリアのサブグループのリスク、乳児期、小児期に被ばくした人々のリスクに関する疫学研究が大幅に増加するであろう。時間が経たない限り、現在の放射線防護基準の根拠となっているリスク評価に、これらの研究がどのような影響を及ぼすかは分からない。しかし、なんらかの変化はほぼ避けられない。政策決定者は、この分野の研究の進歩に遅れることなく、新しい所見に適切に対応できる態勢を整備する必要がある。

ヒトにおける放射線誘発がんのリスクに関する我々の主な情報源は、被ばくした集団に関する疫学データである。しかし、直接の情報は、主として、成人における固形がんの場合50～100mSv程度、子宮内で被ばくした小児の場合10～20mSv程度の線量での情報である。

今日の放射線疫学の主たる問題は、比較的低い線量での(がん、その他の健康影響の)リスクの評価、さまざまなタイプの放射線(例えば $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $n$ 、X線)の影響と性質(高LETと低LET)、さまざまな被ばくパターン(例えば慢性、急性被ばく、内部、外部被ばく)の影響、被ばく年齢に応じてリスクがどのように変わるか(特に小児期と乳幼児期)、特定の遺伝子突然変異体キャリアでリスクがどのように増加するか、などである。しかし、古典的疫学研究は、環境中、職場、診断放射線医学一般で典型的に見られるレベルの線量の影響を定量化する能力が(統計学的に)限られており、このことを認識すべきである。

もう1つの研究領域は、分子疫学である。この研究は細胞レベルのリスクを特定することが期待できるが、細胞にとっての有害性が確認された場合、それをより高いレベル、器官/組織レベル、そしてそれ以上に重要なレベルとして有機体全体のレベルのリスクや有害性に結び付けることが重要となる。

また、信頼性の高い科学を基礎としてがん以外の影響に関する研究を拡大し、機序研究と疫学的所見を結びつけることが重要である。放射線被ばくに起因する心疾患という新たな問題が浮上しているが、この問題は、解決に向けてより総合的なアプローチが必要であることを示す例である。

## 関連文献

Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land, CE, Littel JB, Lubin JH, Preston DL, Preston RJ, Puskin JS, Ron E, Sachs RK, Samet JM, Setlow RB, Zaider M. *Cancer risks attributable to low doses of ionising radiation: Assessing what we really know*. PNAS 100 (2003), 13761-13766.

Cardis E., Vrijheid M., Blettner M. *et al*, Risk of cancer after low doses of ionising radiation-retrospective cohort study in 15 countries, Br. Med. J. 331(7508):77 (2005).

Darby S., Hill D., Auvinen A. *et al.*, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Br. Med. J. 330(7485):223 (2005).

IARC (International Agency of Research on Cancer) (2001), IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, Volume 78, *Ionizing Radiation*. IARC Press, Lyon.

NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) (2001), *Evaluation of the Linear Non-Threshold Dose Response Model for Ionizing Radiation*. NCRP Report No. 136. Bethesda, MD.

NRC (National Research Council) (2005), Committee on the Biological Effects of Atomic Radiations. *Health Effects on Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. BEIR VII*, National Academic Press, Washington, D.C.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (1994), Sources and Effects of Ionizing Radiation. *UNSCEAR 1994 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. United Nations, New York.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2000), Sources and Effects of Ionizing Radiation. *UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. United Nations, New York.

Wakeford, R. (2004), *The cancer epidemiology of radiation*, Oncogene 23, 6404-6428 (23 Aug 2004), Nature Publishing Group.



## 統一的な線量制限システムに関するその他の課題

線量制限システムは放射線防護研究の知見に基づいている。線量制限システムは、放射線の性格や発生源にかかわらず高水準の防護を提供することができる、実行可能でおおむね首尾一貫したアプローチを提供するために整備されてきた。実用性と首尾一貫性を達成するという観点から、必然的に、状況を単純化するための多くの仮定を設定しなければならず、それらの中には、基礎となる科学と矛盾または十分に一致しないものもある。これらの矛盾や不一致は、そのシステムの開発や適用を担う人々の間では広く認識されているが、線量制限システムが優先され、許容されてきた。残念なことに、こうした矛盾や不一致は、放射線防護実務者の間では十分に認識されていない。それにもかかわらず、線量制限システムが持続可能なものとなるには、新たな科学的証拠に敏感であり続けなければならない—さもないと、信頼を失い信用を失墜することになる。これは継続的なプロセスであり、どのように、いつ基礎科学を取り入れるかについての観点から、システムの妥当性についての見解には相違が生じるであろう。実行可能でおおむね首尾一貫し、科学と幅広く一致するシステムを確立するには価値判断を下す必要があり、その結果、見解の相違は避けられない。妥当または、より厳密には最良のバランスを見つけることは不断の挑戦である。

統一的な線量制限システムは、長期にわたり練られてきたものであり、過去30年間適用されることによって多くの経験が獲得されてきた。これは、ほとんどの適用分野で確か(ロバスト)であることが確認できる。また、それが提供する首尾一貫性(ICRP 26よりも前に実施されている線量制限システムとの)は、以前より一貫した最適な防護への資源の配分を可能にしてきた。内部被ばくでは、確かさの程度は小さくなる。しかし、この場合でも、特に、現在公衆が経験している被ばくレベルは比較的低く、また職場でも、放射線が関係するほとんどの産業で職業衛生が改善されていることを受けて比較的被ばくレベルが低いことからすると、おおむね十分である。

それにもかかわらず、科学との矛盾と不一致は残っており、そのことを認識する必要がある。さらに、科学的な解明が進むにつれて、さらなる矛盾が出現するであろう。これらが線量制限システムの妥当性を無効にするほど重大な場合(すなわち、十分に確か(ロバスト)でないこと、または適用した場合に発生するコストが、リスクの実際の低減に比べて大幅に不釣り合いな場合)、より具体的な代替りのアプロ

一ちを採用する必要が出てくる。これは、システムの基礎となる原則と完全に一致している。放射線防護を職業とする人々のスキルとは、そのような条件を特定し、すみやかに対応することであろう。

これまでの章では、放射線防護システムに異を唱える多くの新しい科学的知見を列挙してきた。特に、非標的効果、適応応答、ゲノム不安定性、感受性の個人差などに関連した新しい科学的知見を列挙してきた。この章では、放射線防護システムの発足当初から指摘されてきた、それ以外の科学的知見について検討する。より具体的な防護アプローチの開発と適用の検討が必要なほど重要なもの、あるいは現在の一般化された放射線防護システムにとってそれらが含意することをより根本から再検討する際に重要と思われるものだけを取り上げている。これらの問題のうちいくつかは、これまでの章で取り上げた問題に関係するか、それらに科学的な起源を持っている可能性がある。したがって、本章だけで基本的にまとめたものにするために、本章とこれまでの章の間には一部内容が重複している。ただし、過度な繰り返しを避けるよう留意している。

本章で取り上げる問題の多くは、線量制限システムの統一的な数量単位として実効線量を使用することの妥当性、特にリスクや危害に代わる代理として実効線量を使用することの妥当性に関係している。基礎となる科学と、この実効線量（そして場合によっては、より一般的に線量の妥当性）の開発と使用の矛盾/非両立性について、EGISグループ内には幅広いコンセンサスがあったが、この統一的システムにとって実効線量または線量が実際にどのような含意を有しているかについては意見の違いが見られた。以降のセクションは、この後者の問題について情報を提供し、さらなる議論を刺激することを意図している。

## 1. 問題は何か

予測される危害リスクは放射線量の一次関数と仮定し、線量は加算されるという概念に基づく、直線しきい値なし(LNT)仮説は、現在のリスクベースの放射線防護システムの正当化の裏付けであると同時にその裏付けの中心である。このシステムは、人が電離放射線に被ばくするほとんどの状況で防護の基礎として使用されており、実効線量の使用を通じて統一的なアプローチを具体化している。そしてここでは、加重係数を用いて、さまざまな放射線タイプのそれぞれ異なる毒性と、組織ごとに異なる反応を考慮に入れている。しかし、ほとんどの公衆の被ばくや職業被ばくに典型的な低線量、さらには非常に低い線量率では、実効線量がリスクを表す適切な代理ではないことを示唆する証拠が蓄積している。

現在のリスクベースのシステムの科学的根拠に対する重要な課題が出現する可能性が最も高い領域は次の点に関係する領域である。

- 職場と環境において経験される線量や線量率に似た低線量(100mSv未満)、低線量率での確率的影響の線量と影響の関係の形状
- 線量が加算可能であるという概念、そして線量を加算するためのツールとして実効線量が適切であるという概念
- 慢性・急性の被ばくからのリスクの違い
- 高LETと低LET放射線の内部被ばくに伴うリスクの評価
- 放射線に対する感受性の個人差
- ある種のがん(例えば骨肉腫)誘発の潜伏期間と見かけ上の線量しきい値が、線量に応じて変化すること。
- 高LET放射線と低LET放射線の複合的影響、他の発がん物質または他のストレス要因と放射線との複合影響
- がん以外の影響の新たな証拠

これらの問題を、以下のセクションで議論する。

## 2. 科学的証拠

### 2.1 低線量の確率的影響における線量と影響

外部照射によって強力ガンマ線の急性被ばくを受けた場合、その後に関する疫学的証拠は、下方およそ50～100mSvまでの線量範囲で見える限り、すべての固形がんを合わせた成人における死亡率と罹患率のリスクは、直線関係と一致しないわけではないことを示している。ただし、50～100mSvより低くなると、統計的検出力が失われ、放射線リスクに関する疫学研究の証拠は不明確である。小児から得られる知見と子宮内被ばくの研究から得られる知見は、10～20mSvのオーダーまでなら、リスクとの線形応答関係と一致しないわけではない。おおむね中高線量での観察に基づいてリスク推定値を低線量に外挿するという手法は依然として、放射線防護コミュニティが関心を寄せる低線量、低線量率での放射線関連リスクの評価の主要な根拠である。

これまで研究されてきた有機体では、低線量の電離放射線は、自然発生的な損傷に対してだけでなく、一層の放射線被ばくからの損傷に対しても防護作用を誘発する。哺乳類の細胞と成熟した動物における低LET放射線の低線量と低線量率を使った研究は、しきい線量(ヒト細胞、げっ歯動物細胞と正常なマウスでは約100mGy)を下回ると、放射線被ばくの有害な影響が消え、それに代わって防

護効果が現われる。防護効果は、細胞では形質転換の頻度として発現し、成熟した動物ではがん潜伏期間の延長として発現する。さらに、さまざまな組織は、それぞれ線量しきい値が異なるように見える。しかし、全体として考えると、放射線関連の適応応答、ゲノム不安定性、バイスタンダー効果に関する新しい結果は、電離放射線の低レベルの被ばくリスクが複雑で不確かであることを示唆している。したがって、中高線量での影響からの単純な外挿は正確とは考え難い。しかし、それらの現象の機序、それらが生体内で活発な程度、それらがどのように相互に関連しているかを解明しなければ、低レベルの電離放射線に被ばくした場合の潜在的リスクの評価に、これらの現象を組み入れることができない。がんリスクの直接の疫学的尺度に由来する情報には、その定義上、これらのプロセスからの潜在的な寄与も含まれることを認識すべきである。しかし低線量では統計的検出力が低く、それが制約となるため、機序についての情報もリスクに対するそれらの影響についての情報も得られない。

これらの観察のすべては、線量と線量率に反応して、あるいは分割線量に反応して細胞と組織に生じる生物学的プロセスは、中線量から高線量の被ばくに起因する生物学的プロセスとは基本的に異なるかもしれないことを示唆している。しかし、低LET放射線のがんリスクの真実の低線量しきい値が存在するかどうかの不確実性は、疫学研究によっては解決されず、細胞実験と動物実験に必ず依存しなければならない。

## 2.2 内部・外部被ばく後の線量測定と生物学的影響

放射線防護システムは、放射線被ばくによって引き起こされるリスクが放射線源の位置(身体に内部か外部か)に依存しないと仮定している。放射線防護システムでは、内部被ばく後に生じるがんのリスクは、広島と長崎の原爆被ばく者のように外部放射線発生源に被ばくした集団について計算したリスク係数から導き出してもよいと考えられている。このアプローチは、ある種の放射線とある種のがんについては有効に見える。しかし、他の照射シナリオについては、有効でない。例えば、現行システムを推定リスクに適用すると、アルファ線放出核種による骨髄放射後の白血病リスクを非常に過大に評価することになる。

標準的放射線防護モデル(統一的なシステムの適用の根拠である)とリスク評価を適用すると、<sup>226</sup>Raとプルトニウムの同位体によって骨格が照射されることによる重要な帰結として白血病が発症すると予測されるのであるが、被ばくした集団では白血病は観察されたことはない。1つの可能性は、放射性核種で汚染された骨表面の近くに存在している骨髄細胞が白血病を生じさせる能力がないということである。もう1つの可能性は、照射された骨髄細胞がアルファ線照射に対する感受性が

非常に高いため、形質転換するのではなく、殺滅される可能性である。どのような説明であれ、現在の放射線防護システムが、照射後白血病のリスクを評価する能力に欠陥のあることは明らかである。

もう1つの問題は、ヒトにおける経験やその他の実験経験が、アルファ放出体による内部汚染後のがんリスクがLNT仮説に一致することが皆無に近いことを示唆している点である。LNTからの偏差が小さければ、これは放射線防護のための線量測定にとって重要ではないであろう。しかし、女性のラジウム・ダイヤル・ペインタにおいて線量と骨肉腫の間に見られる関係、あるいはマヤク放射線作業員において、線量と骨肉腫の間、線量と肝臓腫瘍の間の両方で見られる関係、げっ歯動物における肺がんとプルトニウム被ばくの間で見られる関係などは、見たところ線量しきい値が存在し、それ以下ではがんの過剰が検出されないことを示している。<sup>90</sup>Srを給餌されたイヌでも骨肉腫について同様のしきい値が観察された。このイヌの場合、このしきい値の理由は、骨格の線量が減少するにつれて、照射と検出できる骨腫瘍発生まで間の潜在期が長くなり、ある線量になると、潜在期が犬の平均寿命を超えたためにがんが見られなかったことであつたことが示唆された。それに代わる説明、あるいは、これとおそらく関連性のある説明としては、特にアルファ照射によって、いくつかの腫瘍の誘発が、ある特定の標的細胞内のDNAへの放射線の一次影響と連動しているのではなく、むしろ線維症のような組織損傷の発症と結びついている可能性があるというものである。これは、確かに、ラジウム化学者で見られる異常な白血病に当てはまるかもしれない。ラジウム化学者の間では、非常に高い骨髄線量の場合にのみ白血病が発症し、骨髄機能不全の発症と連動していた。

ヒトの臓器と組織におけるアルファ放出体やオージェ放射体の飛程が非常に短いことと、放射線感受性が高い細胞とエミッターの位置関係が正確ではないため、これらの粒子による内部線量の評価が、場合によって特に難しいことを認識することが重要である。体内汚染後、放射性核種は濃縮されることがあるが、組織や細胞構造によってパターンはさまざまであり、そのため、エネルギー付与は不均質となり、それが、線量推定値と生物学的作用の評価をゆがめる可能性がある。さらに、放射性核種は、一般にマクロファージに集中する。マクロファージはサイトカインを分泌することにより、傷と毒素に対する組織と身体の反応を調節するという重要な働きを果たす細胞である。従って、これらの細胞に沈積する放射性核種に起因する線量が非標的効果をもたらすのではないかと考えられる。これらは、マクロファージ媒介応答を起こす際、組織全体を通じて均等に同じ線量が分布する場合とはまったく異なる実効性を有する可能性がある。ほとんどの組織内での線量の不均質な分布も非標的効果の可能性も、現在の放射線防護システムでは十分に考慮されていないと思われる。

したがって、既存の放射線防護システム(そして特に実効線量)の一律の適用は、いくつかの核種の摂取に対する過剰に限定的な制限につながるおそれがある。ただし、既存のシステムの適用が防護の点で不十分であることを示唆する証拠はない。

### 2.3 慢性・急性被ばく後の線量測定と生物学的影響

放射線の慢性被ばくによって生じる影響は、明確に設定された被ばく期間中の様々な急性被ばくによって生じると予測される影響を合計することによって予測すべきである。この意味では、急性被ばく、慢性の被ばくによる線量の違いは、線量が伝えられる速度だけである。しかし、同じ線量であっても、低線量率で与えられた放射線量が高線量率で与えられた場合よりも遅発影響が少ないことは広く認められている。これは、おそらく被ばくの延長がDNA損傷などの細胞の、より有効な修復を容易にするからである。同様に、線量が複数回に分割して与えられた場合、1回だけの急性被ばくに比べ遅発効果が少なくなる。(線量の分割とは、同じ線量が同じ線量率で与えられるが、連続した単一の期間ではなく、多数の短期間に分散した線量という形で被ばくさせることである。)やはりこれも、修復の容易性がもたらした結果であると考えられる。その後、慢性の照射は分割された照射よりも、同じ放射線量では実効性が低減されることを考慮に入れるために、ICRPは線量・線量率効果係数(DDREF)を定義している。長期にわたって分割照射される放射線については、DDREF因子は、長期にわたって分割照射される放射線については、高線量・高線量率に対応する直線しきい値なし仮説に基づく直線の勾配と、低線量・低線量率に対応する直線しきい値なし仮説に基づく直線の勾配の比を表わすと解釈される。放射線防護については、ICRPは、DDREF係数として、2を推奨している。このように1つの係数を使用することは1つの妥協であり、科学の十分な裏付けはない。いくつかの問題がまだ残っている。

DDREFの有用性は、低線量、低線量率での被ばくについては、線量応答は直線的であり、その勾配は、高線量、高線量率の被ばくの場合の勾配よりも小さいという仮定に依存している。しかし、低LET放射線での状況とは対照的に、高LETの分割された線量では、急性の高線量の場合と同等数か、あるいはそれより多くの遅発効果を生じる。この場合、線量分割は、細胞殺滅の実効性を減らすと考えられる(遅発効果は細胞殺滅によって減少する)。

これと対照的に、細胞および成熟した動物での低LET放射線を使用する低線量・低線量率に関する研究は、しきい線量(ヒト細胞、げっ歯動物細胞と正常なマウスの場合約100mGy)以下では、放射線被ばくの有害な効果が消え、それに代わって防護効果が見られること、そして、そのような効果の変化は、細胞においては形質転換頻度の低下によって、動物においてはがん潜伏期間の長期化によって発現することを示した。また、組織ごとに、線量しきい値がそれぞれ異なるように見える。また、観察結果を見る限り、高LET放射線・低線量での被ばくによって誘発されるリスクは、高線量での観察結果から導き出されたリスク係数を使用した場

合、過小に評価される可能性があることを示唆している。これは、低LET放射線であつても同じである。これらの観察結果はすべて、低線量と線量率に対する応答として、あるいは線量分割に対する応答として細胞に生じる生物学的プロセスが、高線量に対する被ばくに起因するものとは基本的に異なる可能性があることを示唆しており、DDREF概念とその普遍的な適用に疑問を投げかけている。

慢性被ばくも身体内の放射性核種の沈積と再分布に影響を及ぼす可能性があることが示されている。実験レベルでは、同じ量の放射性核種の動態を、急性摂取後と慢性摂取後と比較し、両者に差があることを確認した研究がいくつかある。例えば、ラットにおける酸化ニッケルの肺クリアランス率は被ばく継続時間の長さに反比例することが実証されている。同様に、慢性被ばく後と急性被ばく後とではラットにおけるウランの生体内動態は異なる。また、テチャ川(ロシアのマヤク核燃料施設近くにある)の近くで数十年にわたり汚染された個人からの<sup>90</sup>Srの排泄は、急性汚染を受けた人の排泄物からの測定値に基づいて予想されるよりはるかに遅く見える。線量率と対比した代謝の差は、既存の放射線防護モデルでは説明できない。そのような差が生じる場合、その差が放射線量推定値とその結果推定されるリスクの正確さに影響を及ぼすことは自明のことである。

これらのデータは、線形しきい値なしの仮説と、これに関連する、高線量の実験から求められた線量ならびに線量率の低減係数および組織荷重係数は、低線量と低線量率で普遍的に使用するには不適當である可能性があることを示唆している。

## 2.4 低LETと高LETでの生物効果:RBEと $W_R$

実効線量は、吸収線量、放射線タイプ、時には粒子エネルギーによっても変動する。放射線タイプとエネルギーを考慮に入れるためICRPは、確率的影響(がん)を誘発する放射線の相対的生物効果比(RBE)を反映する因子を用いて、吸収線量を加重することを推奨している。放射線荷重係数( $W_R$ )と呼ばれるこの係数の値は、光子、電子、中性子、陽子、アルファ粒子について指定されている。宇宙飛行中に遭遇する重イオンを含むその他の微粒子の放射線の係数は、まだ指定されていない。推奨される $W_R$ の値は、線量非依存性であり、すべての組織について同じである。しかし、これは、周知のように、単純化した仮定である。指定された値も光子、電子、陽子エネルギー、アルファ粒子エネルギーいずれにも依存しないと解釈されているが、中性子については例外が認められている。すなわち、放射線防護のための中性子の線量測定には、エネルギーに依存した $W_R$ 値を使用することが推奨されている。したがって、 $W_R$ 値は、放射線タイプにのみ依存し、中性子の場合にはそのエネルギーに依存すると解釈される。しかしこのアプローチには次のような多くの問題がある。

- 多くのデータ源から収集されたデータは、腫瘍タイプ、したがって器官または組織ごとにRBEに差があることを示している。例えば、上に述べたように、ラジウムとトリウムの同位体についてのヒトのデータは、白血病の発生において、ガンマ線よりアルファ線の生物効果が上回ることはほとんどなく、それよりむしろ劣るが、肝臓腫瘍についてはアルファ線がはるかに腫瘍を発生する能力を有することを示している。 $W_R$ 値は、これらの違いを反映していない。
- 現在容認されている $W_R$ 係数は基本的に、高線量でのRBEを比較することによって決定されてきた。高線量では、細胞がすべて放射線によって照射され、各細胞には複数の放射線トラックが生ずる。1つの高LETトラックから1つの細胞が受け取る線量は1つの低LETトラックから受け取る線量よりはるかに高いため、これらのRBE測定値(したがって $W_R$ )は、少なくとも細胞1つ当たり1つの高LETトラックの影響と同等またはそれ以上の物理的線量を与えるだけの低LETトラックが各細胞に与えられないかぎり有効でない。しかし、それより線量が低くなると、これらの概念は破たんする。高LETの線量が低くなると、ほとんどの細胞はヒットされないが、それでも照射される細胞はやはり、1つのトラックから高線量を受け取る。低LET放射線と同じ線量の場合、すべて細胞が複数の放射線トラックから線量を受ける可能性がまだある。さらに線量が低くなると、低LET放射線は、高LET放射線同様、すべての細胞をヒットするとは限らなくなる。これらのレベルでは、公衆の被ばくや職業性被ばくに典型的な値として、高線量被ばくから導き出された $W_R$ 値が基本的に使用されているが、これは、さまざまなタイプの放射線に対して観察される生物学的応答の差の原因となる生物学的機序が低線量で作用する機序と同じであることが前提となっている。これは、バイスタンダー効果、適応応答、ゲノム不安定性の誘発について高LETと低LETが及ぼす影響の違いを無視している。これについては、非標的効果と遅発効果に関する章で議論されている。これらの結果は、低線量での現在の $W_R$ 係数の普遍的適用に疑問を投げかけている。

これらの例は、放射線が腫瘍を発生させる能力は、腫瘍のタイプ、吸収線量、放射線のタイプ、放射エネルギーによって変わることを示している。このことからすると、特に低線量では、ICRPが指定した $W_R$ 値を使って行われる放射性核種毒性の現在の予測値が、核種によっては相当な誤差があることになる。さらに、生物学的個体差は不確実性全体にも寄与する可能性がある。もしそうなら、放射線防護において実効線量が統一的な数量として使用できるという概念の適用は、控えめに言っても疑わしいといわざるを得ない。しかし、放射線荷重係数を広く使用することにより、現在の放射線防護システムの適用が十分に防護を提供することができないことを示唆する証拠はほとんどない。しかし、これらの係数の適用は、リスクを定量化するためのシステムの能力を著しく損なう可能性があること、そしてより重要なことには、個々の状況の防護に過大な資源を割り当てることにつながるおそれがあることを示している。

## 2.5 がん以外の影響

慢性(おそらく急性でも)の被ばくに起因する一連の健康影響の範囲には、がん以外の余命に影響を及ぼす影響が含まれる。しかし、これらは、現行の線量制限システムにおいて明示的に考慮には入れられていない。<sup>226</sup>Raへの慢性の被ばくは、視力障害、歯の破損、未成年者における身体発育障害を誘発することが示されている。そのような放射性核種の被ばくは組織線維症も誘発し、線量測定と健康の両方に影響を及ぼす。しかし、これらの健康影響はいずれも現在のところ、モデリングされていない。ベラルーシでは、チェルノブイリ事故の結果沈積した<sup>137</sup>Csの長期被ばくが広範囲の健康影響(心血管、中枢神経系、消化器系、呼吸器系、免疫系、生殖器系の障害、甲状腺障害、腎臓障害)の原因であるという指摘がなされた。これらの主張は立証されてはいないが、もしそれらの原因が放射線に帰せられた場合、あるいは放射線に帰することが明らかに可能な場合、現行の線量制限システムは影響を受けることになる。

### 自然放射線からの被ばく

ラドン・ガス(<sup>222</sup>Rn)の被ばくは、自然界におけるヒト集団の電離放射線被ばくの最大の原因である。<sup>222</sup>Rnの短寿命崩壊生成物は、自然バックグラウンド放射線からの総平均年間線量のおよそ半分を占め、医療での使用を含めたすべての発生源からの被ばくの約40%に相当する。数十年前から、ラドン・ガスは肺がんを生じさせることが知られている。しかし一般に、重大な危険は、非常に高濃度のラドンが蓄積しうる地下の硬岩、つまり鉱山環境に限定されると考えられていた。その後、一般家庭、その他の建物でこのガスが高濃度で蓄積することが認識され、特に換気が悪い場合、その傾向が強いことは明らかになってきた。

[以下は、直接の居住の結果を引用する際に必要でない警告を含んでいるため、これを削除することを提案する。職業被ばくに基づく警告的記載をこの問題と混同している。]

住民のラドン被ばくとリスクに関する欧州、北米、中国の最近のプール解析研究は、肺がん死の最大9%がラドンによるものである可能性があることを示唆している。これらの研究では、ラドンの濃度レベルがわずか約100Bq/m<sup>3</sup>で統計的に有意なリスクが存在することが報告されている。リスク係数は、ウラン鉱山で見られるようなより高いラドン濃度でのリスクに関する研究からの線形の外挿と総じて一致している。これらのリスク評価が正しいとしたら、ラドンは、重要なヒト発がん性物質のリストのトップに近い。

肺組織におけるラドン崩壊生成物の分布は非常に不均質であるため線量推定が困難であり、それがラドンのリスク評価(線量との関連で表される場合)を不確実なものにしている(吸入されたラドンとその崩壊生成物からのアルファ放射体が肺線量の大部分を占める)。

従って、等価線量は、リスクを測るための意味はなく、有用な量でもない。また、放射線防護では被ばく制限のために使用されていない。等価線量の代わりに、空気中のラドン濃度(測定単位:  $\text{Bq/m}^3$ )が直接測定され、これが線量に代わるものとして使用されているが、空気中のラドン濃度と肺組織の吸収線量の関係は複雑であることが了解事項となっている。

## 2.6 現行のリスク評価システムの妥当性

現行のリスク評価システム(およびその適用に関する基本的ガイダンス)は放射線防護の目的にのみ使用されるべきで、リスク評価には使用すべきではないことがICRPによって明白に述べられている。それにもかかわらず、そのようなリスク評価での使用は、放射線防護専門家たちの間だけでなくそれ以外のところでも広く行われており、今後もその傾向は続きそうである。現行のリスク評価システムはヒトのリスクの評価に基づいているが、システムの使用が「実地で得られるデータ」を正確に予測できない多くの例が存在する。その例としては次のようなものがある。すなわち、(1) ロシアの原子力作業員において骨肉腫に比べ肝臓がんが過剰であることを現在のモデルが予測できないこと、(2) プルトニウムに被ばくしたロシアの作業員と $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ に被ばくした女性における白血病予測値がないこと、(3) 大量の $^{220}\text{Rn}$ をはき出しているトトロラスト患者において、予測された肺がんを確認できなかったこと、(4) 自然バックグラウンド放射線が高く、毎年の放射線量がICRP推奨の公衆の線量限度を数桁超えている可能性がある地域において、検出可能なレベルの放射線誘発疾患を確認することができないこと、などである。さらに、現行システムは、寿命にも影響を与える肝硬変や循環器への影響など、放射線の遅発性の非確率的影響は明示的には考慮していない。

この種の問題は、非常に低い被ばくについて特に関係が深い。非常に低い被ばくの場合、疫学研究からは損傷の直接的知見が得られず、不確実性が非常に高く、モデルと仮説に基づいて、リスク評価を引き出すことしかできない。この状況の難しさは、リスクを予測するために多くの集団の低線量を合計する手法の有効性や、結果として生じる予想死亡数についての議論が未だ決着していないことにもはっきりと現われている。このアプローチは、LNT仮説の単純な数学的な結果と見なすことができる。同時に、このアプローチは、LNT仮説が字義どおりに有効であると仮定するものであり、低線量、低線量率に対するリスク評価に伴う大きな不確実性を、おそらくは遠い将来にまで覆い隠すものである。

危害やリスクに代わるものとして実効線量を使用するには科学的限界が存在することについては広く合意されているが、これらの制限が実際上防護システムをどの程度まで損なうかについては意見が分かれる。これまでのところ統一的なシステムが実行可能ではないことが判明している分野において、代替アプローチが使用されていることに注目すべきである。これは、ラドンからの被ばくの防護に関するものである。これまで空気中のラドンの濃度は放射線防護の意思決定のための数量

として使用されてきた(添付したテキストボックス参照)。しかし、統一的なシステムからさらに逸脱することを今後検討する必要があるかもしれない。特に、ラドン濃度を使用することで、その適用に対し暗黙の了解となっているリスクのレベルを大きく逸脱する可能性があることが実証された場合、統一システムからの逸脱を検討する必要が出てくる可能性がある。現行システムの使用が防護の点で不十分であることを示唆する証拠はほとんどないが、それ以上に多くの証拠が、特定の状況では、不釣り合いなほど多くの資源が防護に割り付けられている可能性があることを示している。

### 3. 状況を改善するためにえられるアプローチ

#### 3.1 低線量における線量影響と確率的影響の関係の形状

ゲノム不安定性、バイスタンダー効果、適応応答の分野で現在行われている実験により、低線量での確率的影響の線量・効果関係について新たな知見が得られるであろう。新しいデータは、公衆の被ばくや職業性被ばくに典型的に見られるように、すべての細胞が必ずしもヒットされるとは限らない線量域において非標的効果の影響が最も大きくなるかもしれないことを示唆している。さらに、非標的効果は、放射線あるいは発がん性の化学物質のような他のストレス要因による損傷に対する組織の反応を変更することにより、リスクに新たな影響を及ぼす可能性もある。リスクを推定する手段としての線量概念を評価する際、そのような結果は特に重要である。なぜなら、非標的効果は防護反応と有害反応の両方を増幅するからである。この非標的効果は一見すれば、平均線量と無関係に見えるが、実際に照射される細胞が受け取る線量に対する依存の程度は大きい可能性もある。低LET線量の非標的効果は、高LET線量の非標的効果を弱めることができるとされるため、LETが異なる放射線でも線量が加算できるという現在の概念(実効線量の使用)は、修正が必要になる可能性がある。非標的効果の物理的範囲、すなわち、バイスタンダーと適応応答が同じような組織だけに広まるのか、それとも器官全体、あるいは動物全身にまで広まるのかは、まだ決定されていない。

#### 3.2 内部・外部被ばく後の線量測定と生物学的影響

状態が明確な内部汚染について、線量測定と汚染の影響について研究を実施すべきである。 $\alpha$ 放射体とオージェ放射体などのいくつかの放射性核種は線量係数の不確実性が大きく、これらの不確実性を低減するためにより多くの研究を実施すべきである。それは、いくつかの放射性核種について生体内動態と微小分布の解明が進むことを意味している。DNAに結合する放射性核種の線量とそれによる影響の両方を決定するための具体的な努力を払うべきである。さらに、内部に沈積した放射性核種からの放射線に被ばくしたグループの疫学研究を継続すべきである。

これらのグループには、原子力産業作業員だけでなく、原子力その他の施設の近くで生活している住民、放射性降下物に被ばくした集団、ラドンに被ばくした住民と鉱山労働者、自然放射線の高い地域に住んでいる集団も含めるべきである。体内汚染後の動物で現在行われている実験は、生体内動態の正確な決定、したがって取り込まれた放射性核種の線量測定を可能にする。さらに、これらの実験のほとんどは、がん以外の影響の両方を測定しており、これによって現在のデータベースを完成させている。これらのデータはすべて、体内汚染の影響を評価するための現在の放射線システムを改善するのに役立つであろう。同様に、ヒトにおける放射性核種の生体内動態に関する新しいデータの収集も取り組まれているところである。これらは現在の生体内動態モデルの予測的性格を改善するのにも役立つと期待できる。

内部被ばくに関係した健康影響に関する研究で現在進行中のものはほとんどない。しかし、現在行われている研究（例えばロシアの原子力作業員に関する研究）はリスクについての我々の理解に大きな影響を及ぼす可能性がある。進行中の研究には、チェルノブイリを取りまく汚染地区に住んでいる集団内の健康影響を把握することを目指しているものもある。また、上述したように、ロシアの原子力作業員における健康被害を検討している研究もある。これらの研究では、作業員は、西側の国々の研究と異なり、一般に著しく高いレベルの低LETと高LET両方の放射線に被ばくしている。すぐれた線量測定がなされれば、これらの研究は、ヒロシマ/ナガサキでの線量測定を補完するデータを提供し、現在の放射線防護システムを改善し、あるいは課題を浮き彫りにするのに役立つであろう。中央アジアの高い自然放射線地域での白血病のリスクを検討するための症例対照研究も現在取り組まれている。

ここでは、いくつかの重要な条件が必要である。特に、そのような研究はいずれも、公衆被ばくあるいは職業被ばくの重要な被ばく源となりうる核種あるいは構成成分に重点を置くべきである。例えば、国際第IV世代プログラムが開発に向けて研究している新しい原子炉・燃料サイクルオプションから出る新しい放射性核種については、放射性毒性データが皆無に近い。研究では、これらのタイプの状況を特に取り上げるべきである。

### 3.3 急性・慢性被ばく後の線量測定と生物学的作用

急性被ばくと慢性被ばく後の影響の比較に取り組む研究は、動物実験とヒトのデータを得る機会の両方に注目すべきである。動物実験は、全身および特定の組織のがんのリスクの実際の尺度を対象とし、それに伴って遺伝子活性化、適応応答、バイスタンダー効果、ゲノム不安定性の変化の尺度のような適切な分子データを収集しなければならない。ヒトの疫学データは、低LET放射線だけに被ばくする状況に注目すべきであり、線量率と線量の両方を考察に含めるべきである。そのようなデータを得る機会の1つとして、コンクリートを強化するために、<sup>60</sup>Coに汚染された鉄筋を使用して建設したアパートで長年暮らしている台湾のアパート住民を挙げることができる。高LET被ばくに関してこの問いを試すには、ウラン鉱山労働者データを線量率の観点から再調査することも考えられる。

### 3.4 低LETと高LETの生物学的有効性:RBEと $W_R$

典型的な公衆の線量、職業線量に適用できるよう、将来の実験は、すべての細胞が放射線トラックを受け取るとは限らない被ばくレベルを重点的な対象とする必要がある。高LET放射線に対するヒトの被ばくにはほとんどの場合、低LET放射線の被ばくが伴うため、そのような複合的な現場被ばくに対する生物学的反応を理解することも重要になる。マイクロビーム照射施設は、1つ1つの細胞のレベルでのこれらの問題に取り組み始めており、これによって、高LET被ばくと低LET被ばくの影響と、その2つを合わせた正味の影響に、さまざまな分子機序がどのように寄与しているかを解明する機会が得られる。これらの1つ1つの細胞の実験は、モデル組織システムでのさまざまな非標的効果の影響をテストするために、3次元配列の細胞に拡大する必要がある。さまざまな組織の反応の違いを評価するために動物全体レベルでの実際の組織にこれらの実験を拡大することは特に重要であろう。その結果、さまざまな被ばくシナリオについて適切な組織荷重係数を決定することができる。

その他に、特に、より適切なRBE値を導き出すことを目的として現在実施されている研究がある。最近の研究の中には、現在何の知見も得られていない陽子や重イオンのRBEを調査している研究もある。 $\alpha$ 粒子や $\beta$ 粒子の相対的毒性に関する新しい研究は、まもなく発表される段階である。

ヒトのデータは、高放射線自然バックグラウンド地域に住んでいる人から得られる可能性がある。高放射線バックグラウンドの被ばくは、高LET放射線と低LET放射線両方の被ばくを含んでいるため、これらの地域に住んでいる住民からは、分子疫学と従来の疫学両方のアプローチを使用することによって複合的影響を検討する機会が期待できる。そのような研究には高LET線量と低LET線量にさまざまな比率で被ばくした集団が含まれることが予想される。また、ウラン鉱山労働者における肺がん以外のがんを研究する機会も存在している。ウラン鉱山労働者は、通常高LET放射線に被ばくするが、また、他の発がん物質や、ウラン鉱床からの比較的大量の低LET放射線の外部線量にも毎日非常に多くの回数にわたって被ばくする。

### 3.5 がん以外の影響

がん以外の影響に関する研究を行い(あるいはチェルノブイリ事故の影響について研究者がまとめた観察結果を批判的に再検討し)、放射線防護コミュニティが関心を抱く線量レベルでの電離放射線被ばくによって引き起こされる損害全体に占めるがん以外の影響の割合を決定することが強く求められる。

### 3.6 リスクを評価する現行システムの妥当性

上で述べたように、放射線防護専門家は、ICRPのモデルと方法を使って、特定のがん部位と特定の集団グループについて低線量でのリスクを計算しているが、こうしたリスク評価はICRPからは推奨されていない。現行システムと実効線量の概念は、ヒトが放射線に被ばくするすべての状況のリスクを予測するのに必ずしも適切でない可能性がある。ラドン被ばく後のリスク評価は、現行システムが正式に適用できない場合の1つである。もう1つの例は、プルトニウムとラジウムの同位体の内部被ばくである。これらの同位体は、いくつかの重要ながんエンドポイントについて線量しきい値が存在するように見える。また、より一般的には、内部放出体による体内汚染は、外部照射後に予想される生物学的影響と線量応答とは異なる生物学的影響と線量応答を生じるように見える。放射線被ばくに対する応答も、他の発がん物質などの、他のストレス要因による共被ばくを修飾するとともに、それらによって逆に修飾される可能性もある。またストレス要因は、発がん物質とは限らない。これについて最もよく知られている例は肺腫瘍誘発に関するたばこの煙とラドンの関係である。両者の間に相乗効果が見受けられる。他にも相互作用が十分考えられる。例えば、白血病に関するベンゼンと放射線の間関係である。このことは、放射線防護と化学的防護の間のつながりを確立することを要求しており、リスクに基づくシステムを確立するために克服しなければならない具体的な課題が存在することを示している。

したがって、リスク評価の目的のためには、実効線量の使用とICRPモデルと方法の適用によって導き出された結果が適切でない場合、個々の問題にあわせて個別の解決策を探すことが推奨される。観察された結果が空気中の濃度と直接連動している場合(すなわちラドン同位体)もあり、この場合は線量概念を使用する必要はない。同様に、ウラン被ばくに由来する影響が、実効線量ではなく、質量摂取と関連する形で表現されることがある。これは、実効線量が信頼できるのはがん誘発の場合だけだからである。放射線防護は、さまざまな視点を持ったステークホルダーの利益と認識に左右される社会的政治的プロセスであり、幅広いが、同時に不確実でもある知識ベースに依存していることも認識すべきである。こうした点からも、ICRPがすでにステークホルダーの意見募集メカニズムをその提言に導入していることを改めて想起すべきである。放射線防護に政治的側面があることを受入れることは、放射線防護プロセスの関係者とステークホルダーの利益およびそれらの人々の認識について、関係するすべての当事者のコンセンサスを確立することが重要であることを含意している。コンセンサスは、リスク推定に含まれるすべての不確実性の由来源を考慮するが、完全に科学的な考察に基づかない部分もある。そのようなアプローチが当てはまるのは、廃棄物処理、サイトからの放出、廃液の放出のような状況からの長寿命放射性核種による内部被ばくの場合などである。放射性毒性学の研究は、検討している放射性核種と部位のリスクの大きさを評価するために適用できるであろう。そして許容可能なリスクレベルは、すべてのステークホルダーとの建設的なコミュニケーションへの努力によって決定される。

このことは、リスクに基づく放射線防護システムの裏付けを得るには、研究目的を絞り込んだヒトと動物の研究がさらに必要であることを含意している。例えば、生涯を通じた毒性研究を含め、さらなる動物実験が必要であることは明らかである。しかし、近年のほとんどのOECD加盟国政府の政策は、これらの分野における研究の財政的援助を縮小し、そのような研究を行うことが期待される設備を閉鎖するというものであった。これらの傾向を逆転させ、必要な研究を行なえるようにすべきである。

#### 4. 考えられる政策上の課題

放射線防護システムは、ヒト集団のリスクの実測値と推定値に基づいて開発され、政策決定者、放射線防護専門職、公衆から、リスクに基づくシステムと見られている。これらのすべてのグループによってシステムが信頼されているのは、被ばくを管理する目的でこのシステムを実際に適用するのは、既知のリスクを制限するための適切な戦略であると考えられているからである。放射線防護システムに疑義が生じるのは、リスクを予測するためにこのシステムを使用する場合、特に、低線量、あるいは内部被ばくのリスクを予測する場合である。そうしたリスク予測の妥当性は、疫学研究で確認することは不可能である。あるいは実際に、その予測が実際の結果を説明できない場合もある。公衆や規制側の関心は、通常、リスクに関する有用な情報を得ることができる被ばく線量よりもはるかに低い放射線量での被ばくにあるため、これは意外なことではない。

ここでの議論は、次のような具体的な政策上の課題を提起している。

- **実効線量の概念は、すべてに適用すると十分に厳密でない可能性があること。** 低線量、低線量率の放射線のリスクの指標としての線量の概念に異議を差しはさむ所見が相次いでおり、このことは、線量に関係なく一定のDDREFを一律に適用するのは不相当であることを示唆している。これが事実なら、これと関連している線量に依存しない放射線と組織荷重係数( $W_R$ ,  $W_T$ )という概念も、低線量、低線量率では不相当ということになる。これが事実なら、線量の単純加算性、異なるLETでも放射線の線量を正規化できる、などの仮定(実効線量の使用)、危害の線量にはしきい値がないという仮定を含め、放射線防護のほとんどの基本的仮定を再考する必要があるが出てくる。異なる被ばく(例えば内部/外部被ばく、慢性被ばく/急性被ばく、低被ばく/高被ばく、低LET被ばく/高LET被ばく)を合計して個人の総損害/リスクを評価することができない場合、あるいは、もっと単純に、いくつかの特定のタイプの被ばくを合計できない場合、放射線防護の新しいアプローチ(少なくともいくつかの特定の状況)を開発し、個々の被ばくタイプに応じて別々に防護を行うことが必要になるかもしれない。これは、引いては、性質の異なる放射線による被ばくのリスクあるいは利益を別個に理解、評価する必要があることを示唆している。

- *線量制限が、状況によっては、リスク低減と同等ではない場合があること。多くの細胞や動物に基づいた実験は、低線量の低LET放射線が、自然発生がんからのリスクとより大きな被ばくに由来するがんリスクを低減する防護効果を誘発することを示している。これもヒトにあてはまるなら、被ばく線量を可能な限り低く、あるいは完全に被ばくをなくすために努力するという放射線防護の方針も見直す必要があるかもしれない。というのも、そうした防護方針は、上述の防護的な応答の誘発を防げる可能性があるからである。職業により被ばくする可能性のある人の場合、防護応答が誘発されるのを妨げると、その人が高線量に偶発的に被ばくした場合、必要以上のリスクにさらされる可能性がある。この状況では、そのような放射線防護方針が、職業に伴うリスクを高める要因となっていると見ることができる。*
- *自然バックグラウンドの高い地域における被ばくはリスクを高めない。自然バックグラウンドの高い地域に住んでいる集団において著しい放射線誘発性の健康影響が見られないという事実は、1つの課題である。特に、被ばくが、ヒトが特に放射線に対する感受性が高いと仮定される段階である子宮内の期間全体と小児期のすべて段階を通じて被ばくした個人を対象としているため、これらの観察は、現在の放射線リスクの推定値と一致しないように見える。*

現在の放射線防護システムはリスクに基づいたシステムであるが、実際には線量制限に基づいて機能していると一般に考えられている。リスクを予測するために用いると、システムにとって困難な問題を生じさせ、失敗することが多い。

低線量では、リスクがしきい値なしで線量に正比例するという現在の仮定に異議が唱えられている。

放射線防護システムの礎となる仮定は、線量の加算性である。現在のパラダイム(理論的枠組み)は、放射線の種類と質にかかわらず物理的線量(グレイ)が放射線の種類と生物学的影響に基づいて換算でき、(シーベルト単位で)合計することで損害全体の指標とすることができると仮定している。

放射線生物学研究によるとこの仮定は正確でなく、細胞や有機体の応答は、低線量と低線量率での外部被ばくと内部被ばく、あるいは低LET放射線と高LET放射線に被ばくなど、放射線被ばくの種類や被ばく状況によって異なる場合があることが示唆されている。

これらのデータは、多くの被ばくシナリオについて、放射線防護システムの科学的根拠がリスクのためのシステムとして不確かであることを示している。核種によっては、摂取した場合の生物学的反応と線量応答は外部照射後に予想される生物学的反応や線量応答とは異なる。したがって、さらにこれらの問題を理解するために、さまざまな該当するシナリオに合うように改良した放射線毒性研究を適用することが重要である。

証拠が示す限りにおいて、リスクの評価と管理は、特定の被ばく状況に適用可能な信頼できる科学知識に最大限の根拠をおくことが賢明であろう。特定の状況とは例えば廃棄物処理、サイト・リリース、廃液の放出などのような状況に由来する長寿命放射性核種の内部被ばくである。これが適切に行われた場合、ステークホルダー(例えば政府、研究者、影響を受ける集団など)の懸念に対して適切な毒物学研究(すでに完了したものでも、新たに提案されているものでもよい)を通じて取り組み、特定のケースへの防護策を開発できる可能性がある。

ICRPはすでにそのような柔軟性を導入しており、この考え方に沿って、ステークホルダーの意見を考慮に入れつつ最適化への新しいアプローチの定義を行っている。

## 関連文献

CERRIE (Committee examining radiation risks of internal emitters) (2004), Report of the Committee examining radiation risks of internal emitters, London, page 138.

ICRP (1993), Age-dependant doses to members of the public from intakes of radionuclides, ICRP Publication 67: Part 2, Ingestion dose coefficients, Oxford Elsevier Science Ltd.

Leggett RW, Eckerman KF, Williams LR. Strontium-90 in bone: a case study in age-dependent dosimetric modelling. *Health Phys* 43: 307-22; 1982.

Métivier H, Masse R, Legendre N, Lafuma J. Pulmonary connective tissue modifications induced by internal alpha irradiation. I. Effect of time and dose on alterations following inhalation of plutonium-239 dioxide aerosol in rat. *Radiat Res* 75: 385-96; 1978.

Métivier, H., Guillaumont, R. (2007), To better know the biological behaviour of future nuclear materials: a need to maintain a good level of protection against ionising radiation, *Radioprotection*, Volume 42, No.3.

Paquet F, Houpert P, Blanchardon E, Delissen O, Maubert C, Dhieux B, Moreels AM, Frelon S, Voisin P, Gourmelon P. Accumulation and distribution of uranium in rats after chronic exposure by ingestion. *Health Phys* 90: 139-147; 2006.

Sanders CL, Lundgren DL. Pulmonary carcinogenesis in the f344 and wistar rat after inhalation of plutonium dioxide. *Radiat.Res.* 144: 206-214; 1995.

Shagina NB, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Degteva MO, Kozheurov VP, Tokareva EE, Anspaugh LR, Napier BA. Evaluation of age and gender dependences of the rate of strontium elimination 25-45 years after intake: analysis of data from residents living along the Techa River. *Radiat Res* 159: 239-46; 2003.

## パート2

### 放射線防護の適用において考えられる課題

医療被ばくにおける放射線防護

環境の放射線防護:現在の理論的枠組みについての課題

事故と悪意に基づく放射線行為の健康への影響



## 医療被ばくにおける放射線防護

医療被ばくは、正当化され最適化される場合、患者にとって利益であることは明らかである。しかし、医療被ばくは最大の人為的線量であり、急速に増加している。個人の線量は手技によっては高くなりうるが、確率的リスクは小児と未成年者に特に関連性が高い。正当化と最適化についての検討を支援し、かつ患者に適切な情報を与えるには、医師が(特に新しい手技の)患者線量を知っている必要がある。業界は、研究者、開業医と協力して患者線量の把握に努力すべきである。

医療被ばくの新しい規則と規格は公表されつつあるが、それらが必要とする、適用されるべき科学的データが用意されなければならない。新しい技術に対応する「画像診断のための他院後送基準」と、「電離放射線を用いた医学的手技を最適化する方法」のガイドの開発が今後必要になる。新しい医療技術については、診断の標準被ばくレベル(ある手技における典型的な線量)の定期的な再評価が必要である。

放射線量(患者とスタッフ両方の)に関する状況は、医療被ばくの診療評価プロセスの基本的部分とすべきである。業界に対しては、新しい放射線設備に対して線量測定ツールを装備し、データの電子的アーカイブを導入する必要があることを知らせるべきである。医師と医療従事者に対しては、医療被ばくに関連したリスクを理解できるよう、また新しい技術の使用を最適化できるよう支援すべきである。

疫学研究への医療データの利用を図るため、医療被ばくと放射線防護におけるその他の活動領域(例えば線量測定、疫学、放射線生物学、放射線病理学など)の間の学際的、水平的共同作業を促進すべきである。

### 1. 問題は何か

患者の被ばくは増加しており、診断と治療の分野では次のような理由から今後も増加が見込まれる。

- 診断

- 医療画像診断は、多くの疾患の診断において決め手となっている。

- －医療画像診断は、決定的な情報をもたらし、したがって、疾患の治療戦略、特にがん治療に効果的に寄与している。
- －画像技術が非常に容易に利用できるようになったため、医療画像が必要以上に使用され、その結果、集団が過度に被ばくするというリスクが現実的になっている。

- 治療

- －すべての死の約25～30%の原因であるがんの治療において、その約50%で放射線治療が指示されている。

- 診断と治療

- －インターベンショナルラジオロジーは診断と治療の両方に寄与し、多くの状況で外科に取って代わりつつある。

このように医療被ばくが正当と見なされる場合、医療被ばくは患者の明白な利益と緊密に結びついているように見える。

診断時の被ばくは、先進国における集団では、平均年間実効線量0.3mSvから1.5mSvとなっている。個々の患者が受ける線量はそれよりもはるかに高い。したがって、医療被ばくの線量低減に向けた努力は他のどの努力にも増して集団の被ばくを多く低減できると考えられる。しかし、集団カテゴリが異なり、器官が異なると、電離放射線の被ばくによるリスクは同じではないことに注意しなければならない。これらの努力は、主として、小児とまだ生殖能力のある若年層の防護に力点を置かなければならない。しかしそれ以上の年齢の人々の被ばくは、放射線防護の観点からは懸念がはるかに少ない。したがって、正当化された被ばくはすべて最適化しなければならないが、特に決定グループ（小児と若年層）においてはその必要性が高いことは明らかであると思われる。決定論的影響（皮膚とレンズの傷害）も、特に間接撮影で懸念される問題である。

医者、特に一般開業医は、個人への医療放射線の使用の正当化について判断を下せるだけの情報を持っていない場合があるため、検査の指示に関する実際的なガイドラインを策定する努力を行うべきである。また、新しい技術が急速に発展しているため、十分な再教育を行うべきである。当然ながらそれらのガイドラインは、医師が最も適切な検査を選択できるようさまざまな検査がもたらす線量に関する情報を含まなければならない。他方、医用画像診断専門職は放射線防護の最適化の過程で支援を受けるべきである。手技を最適化するためのガイドラインを彼らが利用できるようにすべきであり、継続的トレーニングも提供されるべきである。

患者が、医療被ばくによる線量とリスクについての情報を求める傾向はますます強まっている。医師は一般にそのような情報を提供できないように見える。前節で

示唆したガイドラインは、患者からの要請に答えるために必要な情報をまさに提供すべきである。ガイドラインと継続的なトレーニングプログラムによって、放射線リスクの問題と、それに関連する放射線生物学の成果(例えば放射線感受性の個体差や疫学研究に関する)についての医師の認識を向上させるべきである。

最適化の過程で、新しい技術(例えばデジタル放射線医学や原体照射法)の分野、あるいは放射線防護自体の領域で(例えば線量測定パラメータの表示の領域)業界が大きな進歩を遂げることが期待できる。したがって、このような進歩を実現させ、しかも合理的なコストでそれを提供できるように、業界とともに努力すべきである。

ある種の医療行為(例えばインターベンショナルラジオロジー)でのスタッフの放射線防護も、未だに課題である。スタッフに高いレベルの防護を行うことにより(例えばなんらかの防護装置の使用)、患者の線量を増加させる可能性がある。医療専門家による個人線量計の誤用や不使用のため、公表されている線量値は常に実際の線量を表わすものとは限らない。トレーニングプログラムはこの状況を改善するものでなければならない。

## 2. 科学的所見

放射線防護に取り組んでいる最も重要な国際機関は、医療被ばくにおける放射線量の最善の管理の実現のために大きな努力を払ってきた。今後数年間で、デジタル放射線医学は何百万人も患者に対する画像診断技術の主流となるであろう。その結果、臨床上の利益のない場合でも線量は増加する可能性がある。インターベンション手技はその数も複雑さも増しており、放射線傷害のリスクを評価する必要がある。いくつかの診断法(コンピューター断層撮影—CT—のような)は、大量の放射線被ばくを伴うため、新しいプロトコルはルーチンの臨床での使用の前に詳細な線量測定を実施しなければならないとしている。2000年のUNSCEAR報告書は、CTとインターベンショナルラジオロジーによる患者線量の増加に焦点を当てている。さらに、治療の分野では、新しい手技(強度変調放射線治療—IMRT)が用いられ、また腫瘍の線量を高める治療法が使用されている。照射計画立案と線量測定を改善する努力により、今後二次的誘発がんのリスクを回避できるであろう。

ICRPは、ここ数年、これらのトピックのうち次のものを取り上げている。すなわち、デジタル放射線医学とコンピューター断層撮影における患者の被ばく管理、放射性核種の摂取による胚と胎児が被る線量の評価、放射線治療を受けている患者に対する事故防止、インターベンショナルラジオロジーによる放射線傷害の回避、妊娠と医療放射線、放射性医薬品からの患者の線量などである。

ICRPは2004年の総会で、他にも以下の点に関するいくつかの報告書の準備に着手することを決定した。すなわち、X線透視誘導手技を行う心臓専門医の放射線防護、現代の放射線治療技術のRP問題、小児の防護、放射性医薬品の調製と取扱い時における手の被ばく、医療で電離放射線を使用する臨床スタッフへの放射線防護トレーニング、被ばくする個人に直接の利益のない電離放射線の使った法医学的被ばく、偶発的あるいは職場で電離放射線に被ばくする人の健康診断とフォローアップ、症候のない人の電離放射線を使った健康診断、多重検出器コンピュータ断層撮影での線量管理、などである。

Voxelモデルは現在、例えばGSF－国立環境・健康研究センター(ドイツ)で構築中であり、ICRPによる将来の使用が計画されている。これらの高度なツールによって、診断・治療用途に有用な、より正確な線量測定データの利用が容易になるであろう。

IAEAは、UNSCEAR、ICRU、ICRP、IEC、ECと共同で、主な国際医学会の参加を得て、「患者の放射線防護のための国際行動計画」(総会の第10回全体会議の2002年9月20日に採用された決議)をスタートした。

### 3. 考えられる研究結果

UNSCEARが報告する線量値は、先進国間で比較した場合でさえ、国の間で大きなばらつきがある。特に高レベルの被ばくを伴う手技(例えばインターベンショナルラジオロジー、近接照射治療など)について、測定の手順とデータ収集の精緻化に着手し、事業場での線量評価を行うべきである。実際に使用する、特に患者のために使用する線量概念(例えば吸収線量、実効線量)についてもなんらかの進歩があるべきである(実効線量は適切な量ではないが、それでもこの概念は比較目的で広く使用されている)。Voxelファントムが使用できれば、個人の線量評価を容易にするであろう。線量測定とvoxelモデリングの開発を継続することが必要である。

#### *リスクと便益の評価とバランス*

線量と画質管理戦略(個人線量の評価、医療被ばく線量を推定するICRPリスクモデルの妥当性、新しいデジタルシステムの使用。また、乳房X線造影法、小児科放射線検査などによる線量増加の総合的研究)は、コストと便益のバランスの確保にとって重要である。患者の放射線量を増加させることによって多くの診断情報(特にデジタル技術とPET-CTなどの複合技術による)を得ることができる。課題となるのは、線量測定の情報を知った上で、この決定を下せる能力を確保することであろう。新しい技術が臨床に導入される前に、医療従事者は、合理的なリスクの

レベルで患者に最良の利益が提供できるよう、放射線量と画質の管理についての訓練を受けるべきである。新しいデジタルシステムでは、常に線量値を知ることが可能とすべきであり、電子的フォーマットによったアーカイブに保管すべきである。現代の技術を使えば、これは容易なことである。

被ばく線量の結末、経験や知識に関しての学際的コミュニケーション(特に疫学研究者と放射線生物学者とのコミュニケーション)の向上も期待される。特に医療被ばく(例えば未熟児のX線撮影)の影響、医療被ばくの線量測定の正確さ、医療被ばくを受けた患者の追跡調査、医療被ばく線量や職業被ばく線量の蓄積に関する学際的コミュニケーションが望まれる。線量値の正確さは、他の職業被ばくより医療被ばくの方がおそらく上であろう。この利点は疫学研究にも役立つと期待される。高線量手技(例えばインターベンショナルラジオロジーなど)から得られるデータは、放射線生物学研究にとっても有用であり得る。

### **新たに出現した技術と慣行**

診断手技としてのCTの使用、あるいはCTとPETの併用の拡大に対しては、リスクと便益の評価を深める必要がある。そのような手技によって疾患のスクリーニングするのは有用であり得る。しかし、この線量測定手技を使用すると比較的高いリスクが生じるため、証拠に基づく医療アプローチによって高い検出力のある研究を実施し、手技が適用される範囲について、そのようなアプローチに便益があることを実証しなければならない。

可能なかぎり、電離放射線以外の画像診断手法(核磁気共鳴映像法と超音波検査)を優先すべきである。しかし、必要な時にこれらの手技が利用できない可能性があり、診断を遅らせることができない場合は、放射線検査や核医学検査は正当な検査であろう。さらに、異なる物理原理に基づく画像診断技術によって提供される情報のタイプはそれぞれ異なる可能性があり、必ずしも互いの代わりとして使用できるとは限らない点に留意すべきである。

放射線治療では、放射性核種治療、原体照射法、IMRTなどによる腫瘍でのよりよい線量測定と、正常組織のより正確な線量測定により、二次がんまたはその他の疾患(例えば心筋梗塞、脳卒中など)のリスクを減少させながら臨床結果の改善が可能である。しかし事故が起こる可能性があることも考慮に入れるべきである。

医療で使用されるすべての線源については、それらの放射能の正確な定量化がその後の線量測定の評価のカギとなる。したがって、電離放射線すべての線源の正確な校正を行う基準試験所を維持する努力をすべきである。

患者に対するリスク・コミュニケーション戦略も精査すべきである(自己判断に委ねる傾向を回避するため)。

#### 4. 考えられる政策上の課題

医療被ばくの新しい規則と規格が公表されようとしており、それらの必要性と妥当性の裏付けとなる科学的資料も公表されるはずである。新しい技術のための2つの指針、「画像診断目的での他院後送基準」と「電離放射線による医療手技の最適化基準」を今後策定する必要がある。

医療における新しい技術については、各時点における適正作業の動向を考慮に入れるために、診断基準レベルの定期的再評価が必要である。

(患者とスタッフが被る)放射線量に関連する状態は、医療被ばくの診療評価プロセスの重要な部分とすべきである。業界に対しては、新しい放射線設備に線量測定ツールとデータの電子アーカイブを装備する必要があることを助言すべきである。医療被ばくに関連したリスクと便益を確立、理解し、新しい技術の使用を最適化できるよう医師を支援すべきである。

#### 5. 状況を改善するために考えられるアプローチ

情報技術を活用することで、今後数年間のうちに、医師と患者に患者線量が提供されるようになるはずである。患者線量は、医療行為を正当化し、医療手技を最適化するうえで重要なパラメータである。

医療被ばくと他の分野における放射線防護活動(例えば線量測定、疫学、放射線生物学、放射線病理学など)の間の学際的で水平的な共同作業を推進し、疫学研究のために医療データを利用すべきである。例えば、急性被ばく、未熟児の著しい被ばく(全身)、放射線で治療された患者(特に若い患者)のフォローアップ、インターベンショナルラジオロジーや心臓病学からの被ばく(患者の被ばくと職業被ばく)、放射線治療における二次がんといった分野の疫学研究の医療データが利用できる。

業界は、患者の放射線防護に今以上に関与すべきである。また、特に医療スタッフに対する放射線防護のトレーニングも改善すべきである。

さまざまなアプローチを使用し、放射線診断に伴う患者線量を、画質を損なうことなく低減することを目指した研究が現在進行している。特に比較的高い患者線量を伴う画像診断について、線量低減を目的としたそのような研究の促進が推奨される。

医療被ばくは最大の人為的線量であり、急速に増加している。このような増加の背景には、新しく効果的な診断・治療技術の利用が拡大していることが大きく関係している。医療被ばくは、科学的問題というよりも、被ばくの正当化と最適化の問題という面が強い。

そのため、患者の被ばくを大幅に低減できる、あるいは電離放射線を使用せずに機能する技術を使用する新しい画像システムの探求を強力に促進することが重要である。

しかし、医療は、これまでの章で取り上げられた科学的論争と無縁のままではすまないであろう。乳がんや、喫煙者の肺がんの早期発見のためのスクリーニングなど、さまざまなスクリーニングプログラムを取り巻く論争は、低線量での影響についての研究結果によって今後強く影響されるであろう。

また、研究者と医療従事者の間により密接なつながりを形成すべきである。例えば、疫学研究(例えば、未熟児のX線検査の長期的な影響、CT検査の使用)における協力を、より積極的に支援すべきである。

## 関連文献

Brenner D.J., radiation risks potentially associated with Low-Dose CT screening of adult smokers for lung cancer, *Radiology*, 2004, 231/440-445.

Caon, M. (2004), *Voxel-based computational models of real human anatomy: a review*, *Radiation and Environmental Biophysics* 42: 229-235.

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, *Official Journal of the European Communities*, L 180:22-27; 9.7.97.

ICRP 73, *Radiological Protection and Safety in Medicine*. Ann ICRP 1996; 26 (2). Pergamon, U.K.

ICRP Publication 84. *Pregnancy and Medical Radiation*. Ann ICRP 2000; 30(1), Pergamon. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.

ICRP Publication 85. *Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures*, Ann ICRP 2000;30(2), Pergamon, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.

ICRP Publication 86. *Prevention of accidental exposures undergoing radiation therapy*. Ann ICRP 2000;30(3). Pergamon. Elsevier Science Ltd. Oxford. UK.

ICRP Publication 87. Managing Patient Dose in Computed Tomography. Ann ICRP, 2001; 30(4). Elsevier Science Ltd. Oxford. UK.

ICRP Publication 88. Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. Ann ICRP, 2001; 31(1-3). Elsevier Science Ltd. Oxford. UK.

ICRP Publication 93. Managing patient dose in digital radiology. Ann. ICRP, 2004;34:1–73. Elsevier Science Ltd. Oxford. UK.

International Atomic Energy Agency, General Conference. GC(46)/RES/9. September 2002, Resolution adopted on 20 September 2002 during the 10<sup>th</sup> Plenary Meeting, endorsing the Decision of the Board of Governors to approve the International Action Plan for the Radiological Protection of Patients, based on the findings, recommendations and conclusions of the 2001 Malaga Conference.

International Conference on Radiological Protection of Patients in Diagnostic and Interventional Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy, Malaga, 26-30 March 2001. IAEA-CN-85-196 and IAEA-CSP-7/CD. 2001.

Koenig, T.R., F.A. Mettler, L.K. Wagner (2001), *Skin Injuries from Fluoroscopically Guided Procedures: Part 2, Review of 73 cases and Recommendations for Minimizing Dose Delivered to Patient*, AJR Am J Roentgenol, 2001 Jul;177(1):13-20. Review.

Mettler F.A. (2004), Training users of medical radiation, In Current Trends in Radiation Protection, H.Métivier, L.Arranz, E.Gallego and A.Sugier (eds), EDP Sciences, Les Ulis 2004 , 83-94.

Petoussi-Hens, N., M. Zankl, U. Fill and D. Regulla (2002), The GSF Family of Voxel Phantoms, Physics in Medicine and Biology 47: 89-106.

Shope, T.B. (1996), *Radiation Induced Skin Injuries from Fluoroscopy*, Radiographics 1996; 16: 1195-1199.

U.S. Food and Drug Administration (FDA), Avoidance of Serious X-ray Induced Skin Injuries to Patients During Fluoroscopically Guided Procedures, Medical Bulletin, 1994; 24(2): 7-17.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Annex D: Medical radiation exposures. New York, United Nations, 2000.

Available at [http://www.unscear.org/reports/2000\\_1.html](http://www.unscear.org/reports/2000_1.html).

Vano E, L. Arranz, J.M. Sastre, C. Moro, A. Ledo, M.T. Garate and I. Minguez, *Dosimetric and Radiation Protection Considerations based on Same Cases of Patient Skin Injuries in Interventional Cardiology*, Br.J. Radiol 1998; 71:510-516.

Vano E, L. Gonzalez, F. Beneytez, F. Moreno (1998), *Lens Injuries Induced by Occupational Exposure to Non Optimized Interventional Radiology Laboratories*, Br.J. Radiol 1998; 71:728-733.

Zankl, M. and A. Wittmann (2001). *The Adult Male Voxel Model "Golem" Segmented from Whole Body CT Patient Data*, Radiation and Environmental Biophysics 40: 153-162.



## 環境の放射線防護:現在の理論的枠組みが直面する課題

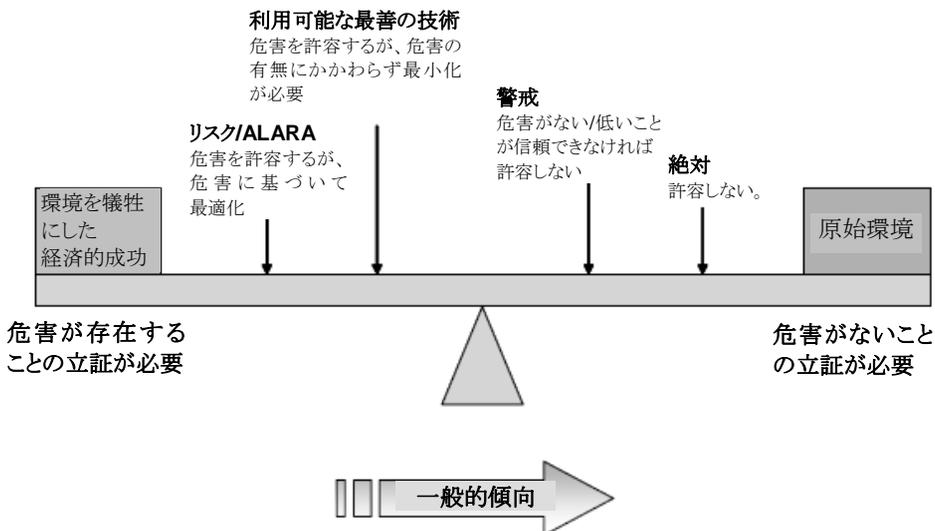
社会からの圧力により、十分に環境を防護する要求が高まっている。しかし、環境保護が意味しているものの正確な性格は、この時点ではまだいくぶん不明瞭である。そのため、何をすべきか、環境の放射線防護を環境保護の他の分野とどのように結びつけるかは、この重要な分野で依然として重要な疑問のまま、答えが得られずにいる。しかし、環境の放射線防護は政府と社会全般でますます議論が高まっている。

### 1. 問題は何か

現行の放射線防護システムは、この目的のために設計されておらず、環境に対して実行される放射線防護レベルを実証するには不十分なツールである。社会の懸念の高まり具合は測定が困難であり、そのため疑問の余地はあるが、確実にいえることは、環境の全体的保護に関連した国際協定が増加しているということである。これらの協定は一般に電離放射線を除外していない。実際、少なくともその1つは、明示的に、この協定に包含された基準(本質的な)としてこの物理的特性(すなわち電離放射線)を位置づけている。

時間の経過とともに、放射性核種の拡散に対して行使すべき管理レベルを決定する根拠として多くの原則が適用されてきた状況が見られる。これは、放射能を制限するには有害であることを実証しなければならないという考え方から、ある活動を実行するには、有害でないことを実証しなければならないという考え方へ立証責任が転換することにつながったとも考えることができる。図1は、これを簡単に例示したものである。この図は、環境への放射能の放出は、放出が継続して行えるように影響を制限していることを実証する必要があることを表している。この一般的傾向に関連した考え方として、人間が依存している生態系は複雑で非常に非直線的な系であり、総じて解明が進んでいないため、ヒトによる生態系への干渉は慎重に行うべきであるという見解がある。

図1 環境保護におけるトレードオフの関係  
 環境保護の根拠として使用されるさまざまな法則と根本的な立証責任を示す



放射線によって環境が被害を受けるおそれのある状況を示唆する知見はいくつかあるが、原子力産業の放射線防護と規制に関係するほとんどの人は、現行システムで十分な環境保護レベルが得られていると考えている。しかし、これは問題ではない。むしろ、問題は、環境保護の十分なレベルが確保されていることを実証することである。以下のセクションでは、この分野での一層の対策の適切なオプションを選択できるよう、簡潔に、関係する状況としてどのような状況が考えられるか議論している。

この報告書の関心は、規制当局（およびその他の利害関係者）が、現状の保護レベルを評価し、適宜、管理レベルを微調整することを可能にする科学的知見を、社会からの要請に対応して集積することにある。この任務の重要な部分には、データを照合したり、実験を実施したりするだけでなく、この科学的知見を適用する手段を開発すること、すなわち、おそらく非常に初期段階ではあるが、ロバストなモデル、測定データを環境保護にリンクさせることができるモデルを考案することである。

政策目標の観点から「環境保護」が何を意味しているかが実際には明確でないため、データと環境保護のつながりの問題を過小評価すべきでない。このリンクの問題が適用される範囲は放射線防護の分野に留まらないのは確実である。さらに生態系は複雑であり、他の環境因子と放射線の相乗効果（あるいは、まさに相反する効果）が大きな影響を及ぼす可能性がある。これらのポイントはいずれも、環

境を保護する放射線防護システムを将来開発する際、他の汚染物質やストレス要因の取り扱いに対するアプローチと一貫したやり方で開発すべきであることを示唆している。

以上のことから、取り組むべき問題には、次のような重要な側面がある。

- 適切なエンドポイントの特定
- 測定データとエンドポイントをリンクさせるロバストな、ただしおそらく非常に単純なモデルの構築。これには、適宜、そのモデルに必要なパラメータを生成することも含まれる。
- 対策を取る必要があるかどうか特定する
- 多くの問題が注意深い取扱いを必要とするにしても、現行システムがすでにおおむね有効であるという幅広い信頼があることが前提となっていること。
- 当初は、目的に適合したアプローチを採用し、資源集約的な活動とならないよう留意する必要がある。

最初の3つの中黒点を次のセクションで取り上げる。具体的には、公表されている科学的証拠を調べ、環境の放射線防護に対して考えられるアプローチ案を検討する。最後の点は、本章全体で検討すべき一般的な論点である。

## 2. 現在の科学的知見の動向

### 2.1 科学的証拠

今日、管理された方法による設備の通常運転では、放射線が原因と思われる生態系の健全な営為に重大かつ明らかな悪影響があるとは考えられない。公表されているデータに基づく一番新しい国際的レビューでは、種全体をリスクにさらす、あるいは異なる種間に不可逆な不均衡を促進する放射線被ばく $1\text{mGy}\cdot\text{d}^{-1}$  ( $40\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ )よりも放射線被ばくが下回る場所では、動植物に深刻な悪影響は観察されていないという結論に至っている。しかし、さらに注意深く検討してみると、これらのデータのほとんどが外部からのガンマ線照射による急性被ばくに関するデータであり、観察は個人レベルで行われていることが分かる。データベース構造を改善し関連性を高め、最近の10年間の科学的知見を組込むために、この初期の成果の改訂版の作成が現在進行中である。実際には低線量率で著しい効果が観察されており、その結果、すべての生態系について影響がない線量率として $10\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $0.24\text{mGy}\cdot\text{d}^{-1}$ )を推奨している。これと対照的に、施設の通常の運転に伴う放出は $100\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下に維持されると考えられるが、この値を大きく超える例も報告されており、特に鉱山地域では自然放射線レベルが高められている。

さらに、長期被ばくによる生態系影響が存在するのではないかとの重要な懸念も残っている。大気中へのCFCの放出で経験されたように、生態系の複雑さと非線形性が、見たところでは無害な活動から予期しない帰結がもたらされる可能性がある。さらに、影響が発現するまでの時間の長さは、複数の世代にまたがる場合もある。そのため、放出から半世紀経った今になってようやく、我々は、影響が生じているかどうか調べるために適切な時間スケールに至りつつある。さらに、連続的な低レベルの照射影響を最近整理したところ、多くの野生生物グループに関するデータがないことが明らかになった。

全体として、生物学的影響を理解するうえで知識が不足しているのは、1) 低放射線照射量に対する長期の慢性被ばく、2) 生体蓄積された $\alpha$ と $\beta$ を放射する放射性核種の長期内部被ばく、3) 他の有毒物質あるいはストレス要因と複合した放射線ストレス、4) 生物種間の生態的相互作用によって促進された間接的影響、5) 集団、コミュニティ、生態系などの高次の生物学的組織に対する放射線の影響についてである。これらの知識不足が集積した結果、評価方法がさまざまな外挿法に依存しているのであるが、そのロバストさは今後実証しなければならない。

## 2.2 科学の適用の現在の動向:「標準生物」アプローチ

放射線防護の分野での現在の科学研究は、第一歩として、通常「標準生物」アプローチと呼ばれるボトム・アップ式の個体ベースのアプローチに基づく評価方法を設計することに重点が置かれている。このアプローチは、小規模の1セットの代表的な生物群を選択することにより、生態系の高度な複雑さを反映させようとする。これらの標準生物群を構成する個体の放射線量を計算し、求められた個々のレベルから外挿することにより、より高いレベルの組織(例えば集団、生態系)に対する影響を推定する。このアプローチは、一定範囲の環境を考慮に入れるように選択されたわずかな数の代表的な種を考察することにより生態系の複雑さを低減し、適切な科学的データがどの程度まで公表され利用できるかを考慮に入れている点で、実際的なアプローチといえる。この選択の基準はいくつかあるが、種の放射線感受性に過度の重要性は与えられていない。これは、最も放射線感受性が高い種が、必ずしも適切な生態系のバランスを保持するうえで重要とは限らないからである。しかしながら、知識はまだ不十分であり、現在の研究の中には、この不足を埋めることを目指しているものもある。このアプローチは、ヒトの放射線防護システムと類似しているという長所もあり、したがって、(ヒトの)放射線防護専門家にとっては分かりやすい側面が多くある。例えば、標準生物は、標準人に対応すると見ることができる。

このアプローチは上記の利点があるが、いくつかの限界もある。主として、これは、生態系の複雑さを単純化している点に起因しており、これにはいくつかの重要な側面がある。第1に、1つの全体としての環境がどのように防護されるか理解するには、個体に対する影響をより高次の組織に外挿しなければならないが、これを行うための正確かつロバストであることが実証された一般的に適用可能な方法が存在しない。第2に、線量応答曲線が生物相のライフ・サイクルで最も感受性の高い段階を反映するかどうかは明らかでない。第3に、標準生物が、環境の現状の「指標」として適切かどうかははっきりしない。最後に—そして上に述べた点を考慮に入れると—これは、環境一般を防護するという観点からの評価のエンドポイントを提案したものではなく、個々の植物や動物のエンドポイントに焦点を当てたものである。しかしながら、このアプローチには優れた長所もあり、他のアプローチよりも進んでいる。また、より発展したシステムへの第一歩として提案されているにすぎないことにも留意すべきである。

### 3. 考えられる今後の研究戦略

上で述べた知識の不足からも示されるように、環境にとっての放射線リスクを効率的に評価できるようにするために、支援を必要とする基本的研究分野は、ヒト以外の生物相の新たなデータ収集と、特に低レベルの慢性被ばくの影響に注目した生態系モデルである。しかし、一方で、この新しい知見が獲得でき、以下に述べるように、さらにいくつかの補足的な視点からそれらを深めることができれば、妥当性と一貫性を高めることができるであろう。

#### 3.1 「生態系の健全性」アプローチの開発

環境防護を扱った国際協定はしばしば、一般的、全体論的な表現で環境防護について述べている。全体論的アプローチは、生態系の構造と機能を考慮するアプローチを示唆している。ここから「生態系の健全性」という概念が発生している。この概念は、どのような環境影響をもたらすか決定する際の参考情報を得るための最終の評価結果として使用することができる。この視点に基づくアプローチは、自然の実際の複雑さをより忠実に反映する総合的な方法で環境を考慮することに重点を置いている。したがって、そのようなトップダウン式のアプローチは、「標準生物」アプローチの成果を統合しながらその「標準生物」アプローチの限界を克服するという点で、より好ましい方法といえる。

ここで科学研究面で克服しなければならない課題は、個体からより高次の生物学的組織への伝播を幅広く表現できることが実証可能な評価方法を考案することである。これには、生態系に合致した適切なエンドポイントの設定と統合も必要となる。微小生態学、メゾコスム研究、長期ケーススタディのような、生態系プロセス

を検討できる実験デザインも、生態学のエンドポイントの設定、生物学的マーカーの意義の明確化、生物種の設定などに役立つことから、支援が必要である。生物種が設定できれば、その生物種を放射線ストレスの効率的な指標として使用することが期待できる。そのような研究は、潜在的な長期的影響を評価できる生態学モデルを開発する作業を並行して行うことによって補完できる。

### 3.2 化学物質と放射性物質の相乗作用

課題となるもう1つの分野は、他の環境ストレス要因、特に化学物質をどのように考慮するかである。というのも、単独で支配的なストレス要因—効果関係が存在するのは、(事故のような)ごく限られたケースだけだからである。多数のストレス要因は相乗的(あるいは相反する)効果を有すると考えられるが、放射能と化学物質のようないくつかのストレス要因が複合した影響をどのように考慮するかは、ほとんど解明されていない分野である。さらに現在、放射性物質は、それがもたらす線量の観点から考慮されるのが通例であるのに対し、化学物質は通常、それらの量または濃度に基づいて考慮されるため、コミュニケーションに困難が生じる可能性がある。

### 3.3 国際的ネットワークあるいは「観測所」の整備

今の段階では、これまで述べてきた分野での成果は総じて断片的であり、また、放射線生物学、放射線生態学、環境毒性学、生態毒性学、生態学などの幅広い研究分野にまたがっている。さらに、原子力業界は過去半世紀にわたって環境データを収集してきたが、それはあくまで監視目的で収集されたものであり、効率的かつ総合的な方法では利用されていない。こうしたことから、有益な展開として、関係する分野における研究を研究者が調整、理解することを可能にする国際ネットワークが提案されている。この「観測所」は、実際の環境中での過去の観察結果、そして現在進行中の観察を基盤としており、その観察結果を研究室とリンクさせ、また理論的な発展と連動させることができる。

## 4. 考えられる政策上の課題

問題は、達成された環境防護レベルを規制当局その他の機関が実証できるように理解を深める—アプローチや実験データの意味について—ことである。このセクションでは、この分野での一層の発展を実現するうえで克服しなければならない具体的な課題を検討する。

第1に、放射線は、環境保護に対する社会の懸念に寄与している多くの環境因子のうちの1つにすぎないという点である。したがって、政策担当者は、なんらかの防護システムを採用する際、いくつかの因子の影響の評価の裏付けを得るため、他のところで使用されている(特に化学物質のための)アプローチならびに方法と整合性があることを確認することは最低限必要である。このことは、システムと規格

の間の同等性を確保すること、さらに、多重ストレス要因の影響を考慮する能力があること、の両方に必要である。

第2に、環境保護に対する最も精緻なアプローチは全体論的な生態系アプローチから得られると期待されるのに対し、ICRPその他の現在の多くの研究は、これまでのところ「標準生物」アプローチに重点を置いている。これら2つのアプローチを調整し、証明し、最終的に統合する必要がある。

政策担当者は、評価に適したエンドポイントを設定することが困難な事情を考慮する必要があり、万一その環境防護システムの開発にとって必要な場合には、ICRPの勧告があれば、それを検討する用意をしておく必要がある。

さらに、政策担当者はヒトの防護が環境防護につながってきたことを実証するという考えに引きずられることが多いが、政策担当者が採用するアプローチは環境それ自身を保護するべきであるというより広い社会からの要求に耐えることができなければならないということを政策担当者は考慮しなければならない。

最後に政策担当者は、このトピックについての研究が外部からの要求を受けて行われていることを認識すべきであり、また何が必要であるかについて科学界に指針を提供すべきである。なぜなら、政策担当者は研究者よりもよくこの分野での社会的・政治的要求を理解できる立場にあると考えられるからである。

## 5. 状況を改善するために考えられるアプローチ

取り組むべき問題の大きさ(その困難さと、地理的に広い自然という意味では)、その全体論的な性格とともに、関係するすべての分野にわたってよりいっそう研究の統合を図る必要があることを示唆している。そのような統合は、問題に対するより効率的なアプローチにつながるはずである。いくつかのイニシアチブがすでに進行中であり、例えば、放射線生態学研究機関世界ネットワーク(Worldwide Network of Radioecology Experimental Laboratories)や、環境に関するIAEA行動計画などがある。IAEA行動計画には、いくつかの組織、例えばIUR、NEA、WNAとSETACなどが、有用な「シンクタンク」の役割を果たされている。

統合と調整の分野では今までなお改善の余地があることを踏まえ、状況を改善する重要な対策は、国際的「観測所」の設立によって実行することができることが示唆されているのは上述のとおりである。「観測所」の整備は、強力で目に見える国際的な研究プログラムにつながるはずである。それが実現すれば、米国や欧州のようにこの10年間で放射線生態学研究グループと専門知識が著しく失われた地域で、この分野で蓄積された専門知識を育成できる可能性がうまれる。

さらに、真に全体論的なアプローチは、幅広い科学的分野の統合が必要であるが、多くの国や国際レベルの組織で優勢なプログラムの構成はこれを促進するものではない。これらは歴史的、政治的理由から原子力分野と非原子力分野を分離してきた。これらのプログラムの再編を行うことにより、これらの障壁を撤廃、あるいは低減できる可能性がある。

環境を保護する必要があることについては国際的コンセンサスがある。非標的効果と遅発効果に関する章で提起している問題とは逆に、このコンセンサスは、放射線防護政策、規則、適用に影響を及ぼす科学研究の結果ではなく、放射線が環境にとって危険があるかを研究することを放射線防護科学に求める社会要求である。

今日、施設の管理された慣行に従った通常運転で、放射線が原因と思われる生態系の健全な営為に重大かつ明らかな悪影響は生じないように思われる。しかし状況の複雑さ(例えば自然バックグラウンド、個人と生態系の関係、多くのストレスが同時に存在すること)を考えると、生態系の健全さについての問いに科学的に答えるのに必要な研究は、よ局的を絞る必要があり、また考慮している状況に応じて国際レベル、国レベル、地方レベルでの社会的選択に基づかなければならない。

これらの問いがどのように取り組まれるか、そしてどのような道筋が提案されているかによって、部分的にはあるが、放射線防護システムの成熟度が判断される。

## 関連文献

Bréchnignac F. (2003), *Protection of the Environment: How to Position Radioprotection in an Ecological Risk Assessment Perspective*, The Science of the Total Environment, 307;37-54.

Costanza R. (1992), *Ecosystem Health – New Goals for Environmental Management*, Social Science, Island Press, 279 pages.

Doi M., I. Kawaguchi, N. Tanaka, S. Fuma, N. Ishii, K. Miyamoto, H. Takeda and Z. Kawabata (2005), *Model ecosystem approach to estimate community level effects of radiation*, Ecorad 2004: The scientific basis for environmental protection against radioactivity, J.C. Baerescut, J.C. Gariel & J.M. Peres, eds., Radioprotection 40(1); S913-S920.

- Garnier-Laplace J., Gilek M., Sundell-Bergman S., Larsson C-M. (2004) Assessing ecological effects of radionuclides: data gaps and extrapolation issues. *Journal of Radiological Protection* 24; A139-A155.
- Hinton T.G., J.S. Bedford, J.C. Congdon, F.W. Whicker (2004), *Effects of Radiation on the Environment: a Need to Question Old Paradigms and Enhance Collaboration Among Biologists and Radiation Ecologists*, *Radiation Research* 163; 332-338.
- Hinton T.G., Bréchnignac F. (2005), *A Case Against Biomarkers as They are Currently Used in Radioecological Risk Analyses: a Problem of Linkage*, *Scientific Trends in Radiological Protection of the Environment – Ecorad 2004*, F. Bréchnignac & B.J. Howard (Eds.), IRSN Colloque Series, Lavoisier, Paris, pp. 123-135.
- Holm L.E. (2004), *ICRP and Radiation Protection of Non-Human Species*, from *Current trends in Radiation Protection*, H.Métivier, L.Arranz, E.Gallego and A.Sugier (Eds), EDP Sciences, Les Ulis 2004, 37-44.
- ICRP (2003), *Protection of Non-Human Species from Ionising Radiation. Proposal for a Framework for the Assessment of Ionising Radiation in the Environment*, *Annals of the ICRP* 91, Pergamon Press, Oxford.
- International Union of Radioecology (IUR) (2006), *Radiological Protection of the Environment*, IUR web based questionnaire results on research, facilities and scientific priorities, IUR Report No. 5, in press ([www.iur-uir.org](http://www.iur-uir.org)).
- Larsson C-M. (2004), *The FASSET Framework for Assessment of Environmental Impact of Ionising Radiation in European Ecosystems – An Overview*, *Journal of Radiological Protection*, 34; A1-A12.
- Mothersill C. and C. Seymour (2005), *Radiation-Induced Bystander Effects: Are They Relevant for Radiation Protection of Non-Human Biota?* *Scientific Trends in Radiological Protection of the Environment – Ecorad 2004*, F. Bréchnignac & B. Howard (Eds.), IRSN Colloques series, Lavoisier, Paris, pp. 25-39.
- Nuclear Energy Agency (2003), *Radiological Protection of the Environment, Summary - Report of the Issues*, OECD, Paris.
- Nuclear Energy Agency (2006), *Environmental Radiological Protection in the Law: A Baseline Survey for Policy-Makers and Regulators*, OECD, Paris.

Pentreath R.J. (2002), *Radiation Protection of People and the Environment: Developing a Common Approach*, Journal of Radiological Protection, 22(1);45-56.

Real A., S. Sybndell-Bergman., J.F. Knowles, D.S. Woodhead, I. Zinger (2004) *Effects of Ionising Radiation Exposure on Plants, Fish and Mammals: Relevant Data For Environmental Radiation Protection*, Journal of Radiological Protection, 24; A123-A137.

Sazykina T.G., A.I. Kryshev (2003), *EPIC Database on the Effect of Chronic Radiation in Fish: Russian/FSU Data*, Journal of Environmental Radioactivity, 68; 65-87.

Strand, P., M. Balonov, A. Aarkrog, M. Bewers, B. Howard, A. Salo and Y. Tsaturov (1998), *AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues – Chapter 8: Radioactivity*

UNCED (1992), *Agenda 21. United Nations Conference on Environment and Development*, UNCED, June 3-14, 1992, Rio de Janeiro, Brazil.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (1996), *Effects of radiation on the environment*, Report to the General Assembly, Annex 1, United Nations, New York, 86 pp.

## 事故および悪意の放射線行為による健康影響

### 1. 問題は何か

過去の多くの状況が実証しているように、原子力事故または放射線事故後には、実際にどれだけの線量を被ったか、汚染が引き続き存在するかどうか、重要な継続的問題となる。これは、集団構成員の汚染が先験的には不明の状況、例えば、放射能発生源の紛失や悪意に基づく使用後に特に重要である。考えられるさまざまなシナリオの結果として、内部被ばく、外部被ばくの両方を考慮しなければならない。一般的コンセンサスは、ほとんどの拡散シナリオは公衆の健康に重要な影響を及ぼさず、高レベルの照射が重要な健康上の懸念となるのは恐らく少数の個人のみにとどまるというものである。

この種の状況では、放射線学的影響に対し公衆の間に高い懸念が生まれる可能性が高い。もし適切に扱われなければ、これは急速に、社会的・経済的状況の混乱をもたらす可能性がある。

### 線量推定

当局は、調査と線量推定を求める要求が高まることを想定すべきである。これには、大量の被ばくは被っていないと思われるが、自分たちの健康状態についてなんらかの確認あるいは証明を求める人々が多数含まれていると考えられる。線量推定の観点から、直接測定可能な量で表現される運用介入レベル(OIL)を、計画段階で明確にすべきである。

OILは防護オプションと処理オプションの選択について有用な指針を提供することができるが、その後のトリアージ、モニタリングあるいは処理に関する決定はOILだけにに基づくべきではない。それらは、可能な限り最良の方法で医学的専門知識を反映させるべきである。

## トリアージとその後の治療

現在の状況の改善で重要なことは、現地の医療サービス・スタッフが過度に被ばくしたために直後の医学的監視あるいは治療が必要な患者を特定できるようにすることである(トリアージ)。たとえ、現地の医療サービス・スタッフが長期的な医療に対処できなくても、これは必要である。現地での医療トリアージの観点からすれば、預託線量よりもはるかに低い数百ミリグレイ(即座の治療や医療監視は必要ない)レベルの被ばくと、1 グレイ(Gy)またはそれ以上の預託線量(医療が緊急に必要とされる)とを区別することは死活に係わる問題である。一般に、傷口が開いている場合を除き、無菌作業で通常使用される予防措置と大きく異ならない単純な予防措置で汚染の広がりを抑える対策がとられているかぎり、汚染の危険性があるとの理由で患者の治療が妨げられることはない。

治療計画の立案に影響を及ぼす特性の1つは、影響を受けている可能性のある犠牲者の数が不明であるという事実である。放射線テロ攻撃はどこでも発生する可能性があるため、治療計画立案は、国レベルのガイドラインと規格の一部であるべきであり、それらには救急医療および比較的小さな一般治療施設を含めた病院の体制について規定すべきである。過度に被ばくされかつ/または過度に汚染された死傷者の緊急のケアに対処するのに必要な基本的措置について、使い勝手のいい理解しやすい手引書を全国の医療関係者に配布することをガイドラインで規定しなければならない。これらのガイドラインは、有用な設備(線量計)と実際の助言に関する情報を含み、救急隊のメンバーに対し最低水準の放射線防護を保証すべきである。そのような事象の初期の段階で救急医療による支援を受けなかった、あるいは受けることを望まなかった潜在的な犠牲者を支援するための体制を全国的に整備すべきである。

## 2. 科学的証拠

過度に被ばくした人の線量の推定と医療の分野において莫大な量の科学的証拠が公表されている。これらの情報は、放射能攻撃での関係者の治療計画を事実に基づいて立案するのに役立つことができる。これらの問題は最近、国レベル、国際レベルの治安機関の主たる関心事となっており、具体的な解決策を目指して多くの研究が開始されている。しかし、これらの研究の結果の多くは、一般に公開されている文献には発表されていない。

すべての患者は外傷性負傷を被っているはずであり、いわゆる「複合的負傷」もこれに含まれる。これは、放射線傷害の考慮に先だって、医療的安定が図られる。その後、患者は、外部放射線被ばくと放射能汚染の両方について評価すべきで

ある。最新の設備が一般に購入可能になっている。線量値の推定は、さまざまな位置と環境測定、モデル評価、物理的線量測定、利用できる方法での生物学的線量測定などに基づいて行われる。運用上の介入レベル(OIL)についての勧告も公表されている。OILは、照射線量率あるいは汚染レベルが緊急の防護対策を取ることが必要になる時点を決定するための直接測定可能な量で表現される。未決着の課題は、意思決定(トリアージ)に必要な結果が得られるまでの迅速さと潜在的に被ばくした可能性のある人の多さである。現地での医学的トリアージの観点からすれば、数百ミリグレイよりも相当低い被ばく(即座の治療や医療監視は必要ない)と、1グレイ(Gy)または1グレイ以上の被ばく(医療が緊急に必要とされる)を区別することが死活的に重要である。生物学的線量測定に適した方法はすでに存在するが、それらの適用は単調で長い時間を要し、処理能力が限定的である。

前駆症状は強い放射線過剰被ばくの指標となりうる。数時間以内の吐き気、嘔吐、下痢、皮膚紅斑は、非常に高線量であるが治療可能な外部放射線被ばくの結果生じる可能性がある。そのような患者は8~24時間以内に顕著なリンパ球減少症を呈する。症状の見られる患者の評価としては、6時間から12時間ごとに2日から3日、全血球数検査を行う。影響を受ける主な臓器は皮膚、腸、骨髄である。難しさの一部は、重度の放射線過剰被ばくの多くの前駆症状が通常の病気(例えば吐き気、下痢)の症状と同じであるという事実由来している。

強い放射線過剰被ばく後の治療は、体液、抗生物質と因子を刺激する輸液が有効なはずである。初期のCNSの所見あるいは説明できない低血圧がある場合、生存は難しい。

放射性物質がヒトの体表、体内に沈積している可能性がある。体表の放射能汚染の90%以上は、衣類を除去することによって除去ができる。皮膚上の汚染は、石鹼、暖かい水と手ぬぐいで効果的に除去できる。こすったために皮膚を損傷しないよう注意する必要がある。汚染レベルが、放射線測定器のバックグラウンド計数の2倍に低減した場合、あるいは汚染除去作業を繰り返しても効果がない場合、通常は汚染除去を中止することができる。許容残存汚染レベルについては、計画段階で放射線防護専門家と共に適切な値を決定する必要がある。最先端の測定システムは市販されている。多くの汚染シナリオでは、内部汚染は、開いた傷口から取り込まれる場合を除き、重要な健康問題ではない。傷口からの汚染の場合は、体内除染を含む特別の治療が必要となる場合がある。この種の治療には専門の治療センターの専門技能が必要である。

被ばくの有害な生物医学的影響を予防、治療するための薬剤を開発するためにこれまで膨大な研究が行われてきたが、新しい放射線防護剤、治療薬が近い将来実用化されることを示す証拠はない。

治療の基本的要件と治療機関に関する国際的ガイドラインは整備されている。それらは、必要な医療体制の必要性について、また実際の状況に際して国際的組織から受けられる支援の両方について助言している。

### 3. 予想される研究結果

この分野における研究は、膨大な科学的知識と経験を踏まえて行うことができる。また、多くの非常に専門的な装置や検出方法を利用することができる。

このセクションで取り上げている主要な問題は、緊急に解決しなければならない差し迫ったものであり、将来の研究活動は次の優先事項に集中すべきである。すなわち、リアル・タイムの条件下での高速で信頼できる線量推定の戦略、ならびに被ばくしている可能性のある多数の人々を対象とするための戦略の開発に重点を置くべきであり、これらの戦略は利用可能なさまざまなオプションと技術に基づくことができる。初期の線量評価に対する戦略は、医療的トリアージの具体的なニーズに応えるものとすべきである。すなわち、数百ミリグレイよりもはるかに低い被ばく（即座治療や医療監視は必要ない）と、1グレイ(Gy)または1グレイ以上の被ばく（医療が緊急に必要とされる）を区別すべきである。また、内部被ばく、外部被ばくの両方を考慮すべきである。その後のステップでは、初期の線量評価の精緻化を達成すべきである。

外部被ばくと内部被ばくの治療にどのようなオプションと資源が利用できるか、また、与えられた状況下でそれらのうちどれが適しているかを、医療緊急時対応計画に含めるべきである。考慮しているシナリオに適した医薬品とバイオアッセイの情報集積センターを発足させることは、医療緊急時管理の不可欠な要素である。

過度に被ばくした個人を特定して必要な措置を施すことができる、さまざまな能力を持った組織の全国ネットワークの最低基準を定めたガイドラインを制定すべきである。汚染されている可能性のある多数の人々の汚染モニタリング体制の整備、過度に被ばくしている可能性のある人々の集団トリアージ手法の確立、影響を受けた地域での汚染拡大の防止には、緊急時対応組織と放射線専門家の間の緊密な協力が不可欠である。原発事故と放射線テロ攻撃に医療面で対応できる既存の国レベル医療インフラ、ならびに対応できる国際ネットワークを事前に把握し、利用することは、医療の緊急時管理の遂行に役立つであろう。これらのガイドライ

ンの適用は緊急時対応組織の必須要件でなければならない。放射線科学者、医師、応急処置担当者、緊急時対応スタッフに対するトレーニング・プログラムを整備し、定期的に緊急時対応組織の緊急準備体制を試験しなければならない。緊急体制において重要な問題は、公衆に対する情報と助言を提供するとともに、放射線リスクと利用可能な対抗策の両方について合理的で理解しやすい方法で説明するための用意である。公衆へのリスク・コミュニケーションにおいては、例えば小児、妊婦などの特殊な集団のリスクには、特別に取り組まなければならない。

起こりうる健康影響についてすべての医療専門家が一致した意見を述べられるよう支援し、また、メディア組織と協力して人々に何を行うべきか、医療インフラを適切に利用できるようどこに行くべきかについての情報提供を支援するための戦略と実際の指針を制定すべきである。これは、緊急時対応組織の活動に対する公衆の信頼を維持し、回復するのにも役立つであろう。

#### 4. 考えられる政策上の課題

原子力事故あるいは放射線テロ攻撃の事態に対処する際、公衆の信頼を維持できるかどうかが決定的に重要である。そのような事象のごく初期段階では、これが際立って重要な問題であることは一般に認識されている。悪意に基づく行為は、悲嘆、怒り、恐れ、不眠、集中力の低下、不信などの厳しい心理的反応を公衆の間に生む可能性がある。

人々は医療従事者に情報と指針を求める可能性が高く、悪意に基づく放射線事象に対しどのように応答するか公衆が決める際に、おそらく最も重要な役割を果たすと思われる。これらの組織によって提供される情報は、高い被ばくの影響だけを取り上げるのではなく、低被ばくあるいは被ばくがない大多数の人々の状況にも対処すべきである。よくまとまって効果的な医療の対応システムは、人々に希望と信頼を抱かせ、恐れと心配を軽減し、コミュニティの基本的機能の維持を助けるであろう。

幸いに、原子力事故と放射線テロ攻撃はまれな事象である。したがって、そのような事象に対応するために割り当てられる資源は限られている。緊急時への準備の計画段階で取り組むべき主要問題は次のとおりである。

- 救急隊メンバーと医療従事者への情報提供、トレーニング、防護
- 線量推定と外部被ばく・内部被ばくの治療への資源配分

- 検討しているシナリオに関連する医薬品とバイオアッセイの情報集積センターの設置
- 集団(妊娠している女性を含む)に起こりうる健康影響について、すべての医療専門家が一致した意見を述べるための戦略と実際的な指針の整備
- 犠牲者に対する精神的支援を行うための基準と手順、組織体制の整備

国レベル、国際レベルのすべての資源(例えばWHO、IAEA)を把握し、そのような事象の影響を制限することを目指した国レベルの戦略的計画に、それらの資源を組み入れるべきである。既存の戦略的計画については、定期的に最新の情報により更新すべきである。核保有国と非核保有国の間で経験と資源を共有することは、資源配分を最適化する方法となるであろう。関係するすべての組織に対する定期的、現実的なトレーニングは、この分野での医療準備体制の決定的な要素である。

この性格の脅威に対処するための共通のアプローチを、共通の国際的枠組みで策定することは、有用かつ効率的であろう。政府は、そのようなアプローチが国レベルのニーズを満たすかどうかを判断し、NEAのような適格な国際機関に対する問い合わせを系統化して連携する必要がある。

## 5. 状況を改善するために考えられるアプローチ

研究と計画立案は、国レベルと国際レベルの両方で透明な方法で組織すべきである。国際的組織は、要請に応じて、ガイダンスと技術支援を提供し、国レベルの努力を支援すべきである。REMPANネットワークによって医療支援を組織するWHOとIAEAの努力を支援、強化すべきである。核保有国と非核保有国の間で経験と資源を共有することは、資源配分を最適化する1つの方法であろう。

緊急時への準備の計画段階で取り組むべき主たる問題は、応急処置担当者および医師に対するトレーニングと保護である。緊急準備体制には、公衆の信頼を維持し、迅速に回復するために、公衆ならびにマスコミとのリスク・コミュニケーション技術のトレーニングを組み入れるべきである。

事故あるいは放射線テロ攻撃の初期段階では、犠牲者を精神的に支えることが、影響を受けた集団における深刻な心的外傷後ストレス障害を最小限に抑えることにつながる。組織間のネットワーキングが整備されている国であれば、そのネットワークを通じてこれを達成することが期待されるが、そうした組織では、通常は放射線事象に対処するトレーニングを受けていない。

影響を受ける集団における健康影響の医療フォローアップの事前立案は、国境を越えた状況を含めて国レベル・国際レベルであらかじめ考慮すべきである。政治的圧力が加わると予想されることから、これに対処するため、電離放射線による長期的な健康影響、特にがんに関する科学的証拠を得るため、そのような事象後ただちに疫学研究を始めるべきである。緊急時計画は、遡及的線量測定戦略の開発とその確立についても規定すべきである。高被ばくの場合、個人の線量測定が必要になるが、低レベルの被ばくの場合、グループ線量の推定で十分ある。

そのような状況の長期的な課題は、汚染地区の復旧であろう。この復旧の内容には、当然、影響を受けた集団の懸念のすべてが含まれる。この課題に対処するには、特別な概念と手順が必要になるが、これはこの文書の任務をはるかに越えている。

放射線事象が発生する可能性があることは広く合意されている。

ほとんどの拡散シナリオは公衆の健康に重要な影響を及ぼさないが、広範囲の汚染を招くおそれがあり、公衆の間に高い懸念が生まれる可能性が高いというのが一般的なコンセンサスである。しかし、大きな線源を公共の場所で隠しておく場合のほうが、深刻な公衆への健康影響が発生する可能性がある。

そのような事象に取り組む準備として、有効な検出システムと初期対応チームを対象とした幅広く適用できるトレーニングを整備することが重要である。迅速なトリージング手技と線量を推定するための迅速かつ大規模な生物学的線量測定技術を開発することも非常に有用と思われる。

また、事故後の健康と疫学研究に対する国際的「標準」アプローチを深めることが重要である。

最後に、科学的な問題、放射線専門家の役割、放射線専門家と影響を受けた公衆構成員との関係などについて過去の事故から得た教訓をもとに、有効なリハビリテーション戦略を整備すべきである。公衆の信頼と有効な情報提供は、事故対応の重要な側面である。

## 関連文献

IAEA (International Atomic Energy Agency) (1998), The Radiological Accident in Goiania, STI/PUB/815, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency) (2002), Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency, Safety Standard Series No. GS-R-2, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency) (2004), Joint Radiation Emergency Management Plan of the International Organizations , EPR-JPLAN.

Generic procedures for medical response during a nuclear or radiological emergency. Co-sponsored by IAEA and WHO. Emergency Preparedness and Response. EPR – Medical. April 2005. Document of 296 pages, available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/EPR-MEDICAL-2005\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/EPR-MEDICAL-2005_web.pdf).

IAEA (International Atomic Energy Agency) (2005), Development of an extended framework for emergency response criteria, IAEA-TECDOC-1432, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency) (To be published), Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, Draft Safety Guide, DS 105 (Version 10.0), Vienna.

ICRP “Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack” ICRP Publication 96, Annals of the ICRP, 2005, Vol. 35 N°1.

NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) (2001), Management of terrorist events involving radioactive material, NCRP Report No. 138, Bethesda, Maryland.

## 新しい国際共同研究の対象として期待される分野

他の学問分野との連携が重要であり(例えば医学、環境と悪意に基づく行為において)、放射線研究に携わる人々が少なくなっている現状からすれば、共同研究は放射線防護とその裏付けとなる科学の重要なテーマになるであろう。適宜、適切な協力組織が提案されている。しかし、これらのイニシアチブが本当に成功するためには、既存の放射線防護研究資源(主として動物研究施設、放射線生物学/毒性研究所)の「目録」を作成するのが有用な出発点といえる。

この報告書の結論の観点から、次の3つの形式での共同研究が示唆される。1つめは会議、フォーラム、議論など、2つめは情報と経験の交換し合うネットワークの整備、3つめは個々の共同研究プロジェクトである。

### 会議、フォーラム、議論

1. 非標的効果に関する国際的ワークショップ: 統一的対応を取るべきかどうか—現在の理論的枠組みへの影響。ECと米国DOEと共同で。
2. 感受性の個体差と現代社会のリスク: 技術的、倫理的、法的問題
  - 感受性の個体差で考えられる意味
  - 個人のリスク評価
  - 放射線防護、化学、生物学、医学
  - 遺伝子スクリーニング
3. ラドン同位体からのリスク管理に関するフォーラム
  - 国レベルのアプローチに関する議論
  - ラドンと喫煙のリスクをどのように扱うかについての議論
  - WHOのプログラムを含めること
4. 放射線生態学と環境の放射線防護の持続可能性に関する(IURとの)フォーラム
  - RPと化学的側面
  - 廃棄物問題(長期的)
  - 影響を調査する国際的観測所の設置

5. リスク管理のための放射線防護の防護量の使用の制限に関するICRU、ICRPとのフォーラム(この議論を提唱する書簡、協力の申出)。
  - 放射線防護における量と単位の使用
  - 内部被ばくの線量応答の変動

## 情報と経験を交換するネットワークの設立

1. 医療被ばくのための「ISOEシステムに似た」システム。WHO、UNSCEAR、EC実務部門、業界、IAEAとの共同作業
  - 定義の段階の開始
  - 患者と職業被ばく
  - データ/患者機密情報へのアクセス
2. NORM被ばくに対する「ISOEシステムに似た」システム？ ILO、UNSCEAR、EC実務部門、業界、IAEAとの共同作業
3. 環境放射線防護の国際的データ登録・評価、国際的「観測所」(IURとの)
  - 汚染地域、高バックグラウンド地域、実験調査、他の汚染物質からのデータの一元的データ登録
  - 実験施設のネットワーク
  - 既存の研究・実験プログラムのネットワーク(生物相－地球化学的サイクル)
  - 原子力施設周辺の環境測定データのデータベース収集と評価ネットワーク
  - 現在データ収集を評価する
  - (ヒトの防護と対比する形で)より適切に環境防護を特徴づけるための付加的測定を特定する
4. テロ攻撃の場合に生物学的線量測定を行うための緊急時対応ネットワーク
5. 協同の動物研究を行える研究体制を統合するネットワーク
  - 実験の倫理的承認の標準的アプローチ
  - 研究体制の特定と調整
6. フランス・ドイツが提唱した健康影響、放射線生態学(そして石棺の状況)の観点からのチェルノブイリに関するデータバンクの統合とそれへの疫学プログラム、環境防護プログラムの協力
  - データ収集、アクセス・ルール、アクセス・プロセスの議論
  - 組織バンク(生物学の前例に従う)

## 共同研究

1. 慢性的に内部被ばくや外部被ばくを受けた人々の疫学。米国と日本(また他の国)との協力によるECの研究プログラムの統合
2. 特に重要な個別ケースは、小児の被ばくケースである。この集団が特に高いリスクに直面するという点から、これらケースの線量は、登録され疫学研究に利用できるようにすべきである。
3. 分子や細胞の修飾と観察された病態との間に関連が存在するかどうかの研究(動物実験と疫学)
4. 米国DOEによって提案されている超低レベル放射線生物学研究所を、科学技術の監督、協同の資金調達、共同研究など、国際的な共同作業のために開放すべきである。
5. 新しい機序の説明によるがん以外の疾患の正確な科学的評価
6. 内部被ばくに関連した国際的放射線毒性研究プログラムの共通の定義
  - 慢性被ばくと急性被ばくの対比
  - 生体内動態
  - 遅発効果
  - ECデータバンクの幅広い活用と研究(ECとの共同による)

## 関連文献

Brooks A.L. (2003), Developing a Scientific Basis for Radiation Risk Estimates:  
Goal of the DOE Low Dose Research Program. Health Physics, 85(1), 85-93.

Pellmar T.C., S. Rockwell (2005), Meeting Report: Priority List of Research Areas for Radiological Nuclear Threat Countermeasures. Radiation Research, 163,115-123.

EUR 19959 – Understanding the Effects of Radiation on Health (2002), Editors Dr. E.H. Schulte, Dr. G.N. Kelly, Ms. K. Coiffard, Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities.

EUR 19958 – Radioepidemiology. Also available on Cordis [www.cordis.lu/fp5-auratom/src/epidemio/index.htm](http://www.cordis.lu/fp5-auratom/src/epidemio/index.htm), Editors Dr. E.H. Schulte, Dr. G.N. Kelly, Ms. K. Coiffard, Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities.

Euratom Research Projects and Training Activities, Nuclear Fission and Radiation Protection, Volume I (EUR 21228) and Volume II (EUR 21229). Office for Official Publications of the European Commission, Luxembourg. [ec.europa.eu/research/energy/pdf/nuclear\\_fission\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/nuclear_fission_en.pdf) and [ec.europa.eu/research/energy/pdf/nuclear\\_fission\\_2\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/nuclear_fission_2_en.pdf)

## 結論および考えられる政策上の課題

放射線防護科学は、その誕生以来、電離放射線リスクを定量化し、生物学的損傷をもたらす機序を特定することを目的としてきた。およそ100年にわたる放射線科学の歴史を通じて、この分野での研究活動は、新しいリスク分野(例えば限度が決定論的影響に基づいていた時代に確率的リスクの初期研究が開始された、など)に取り組む先取的な特徴と、新たに出現した問題に取り組む反応的な特徴(例えばラドン研究)の両面を兼ね備えている。

この10年から15年間の研究は、低線量、低線量率のリスクの解明と定量化、損傷の機序の探求に重点を置いてきた。これらの研究の道筋は完成からほど遠いが、これらの経路は、我々の現在の損傷モデルが正しくないかもしれない、あるいは少なくとも、我々が現在信じるほど一般的には適用できないことを示唆している。さらに、この研究は、我々が放射線リスクを管理するために現在使用しているツールであるシーベルトとLNTが、さらに最先端の科学では裏付けられておらず、やはりこの場合も、少なくとも現在ほど一般的には適用できないかもしれないことも示唆している。

放射線リスク評価と管理に対する現在のアプローチが公衆、作業員あるいは環境に提供している防護に不足はないという感がある一方で、なんらかのレベルの修正が必要になるという見方が高まっている。そのため、ここで概説しているように、重要な課題に対し今後も引き続き科学の見地から取り組むべきであることが提案されている。また、将来起こり得る変化に適切に対処できるよう、放射線防護政策、規則と適用にとってそれがどのような含意を持つか、今から研究に着手すべきである。

一般に、科学的証拠は、1つのリスク評価アプローチ(現在はLNTの使用)をすべてに当てはめる手法に疑問を投げかけている。本報告書は、適切な場合には、最先端の科学データと知識を使用することを強く支持している。固有のリスクデータがある場合、特定の放射性核種(ラジウムやプルトニウムなどの)が存在する、ある特定の状況(サイト・クリーンアップや長期的廃棄物管理などのような)では、これが特に重要な意義を持つ可能性がある。

## 非標的効果、線量の概念の妥当性

証拠はまだ決定的ではないが、現在そして将来の放射線生物学研究は、非標的効果、適応応答、線量応答関係のような分野で古典的な放射線影響(標的効果または直接的効果)と非標的(間接)放射線影響の両方を組み合わせた新しい放射線生物学の理論的枠組みの公式化に恐らく至るように思われる。これは放射線リスクがどのように評価されるかの点で非常に大きな意味合いを持つ可能性がある。新しい科学的アプローチ(すなわち現在のアプローチに対する重要な修正)、あるいは、現在のアプローチ、首尾一貫した全体論的リスク評価(例えばすべてのタイプの放射線とすべてのタイプの放射線被ばく状況に適用される)に対する大きな変更を考慮する必要があるかもしれない。そうなった場合、リスク管理に対する現在のアプローチにも重大な影響が及ぶ可能性がある。

## 放射線感受性

細胞分子生物学の長足の進歩により、集団内の放射線感受性の差についてこれまで以上に完全に理解するための根拠が得られている。現在のところ、電離放射線被ばくに対する放射線感受性が高いことが把握できるのは、高レベルの被ばくの場合だけである。将来は、簡単な遺伝子スクリーニングだけで、放射線に起因するがんのリスクが高い個人を特定できるようになると思われる。これらの開発は、特に作業者と患者に対する現行の線量制限・放射線防護システムにとって重要な意味合いを持つ可能性がある。

これらの所見は次のことを示唆している。

- 誰が放射線感受性が高いかを明らかにする必要があること。
- 1つの線量限界と、放射線感受性が異なるグループごとに合わせた複数の線量限度のどちらのほうか優れた防護を実現できかを調べる必要があること。
- 遺伝子スクリーニングが提起する倫理的問題を探求する必要があること。

これらの検討の進捗具合からすると、政策コミュニティが、近いうちにこれらの検討の動向がもつ意味合いの検討に着手することが賢明であり、時宜に適しているといえる。この問題は、特に枠組みを作る段階で、幅広いステークホルダーが関与して取り組むのに適している。これにより、これらの知見の獲得によって最も影響を受ける人々の懸念(特に雇用主、従業員、規制当局)を完全に把握し、新しい政策枠組みの中に取り入れることが可能になる。取り組むべき問題の多くは、遺伝子スクリーニングに共通した問題であるといえる(例えば他の職業では、保険や雇用の目的で行われる)。また、すべての分野の知見の獲得による便益も利用すべきである。

## 疫学

放射線は弱い発がん性をもつにすぎず、そのため、リスク評価では大規模かつ長期的な疫学研究が重要な要素となる。そのような研究(例えば日本人の原爆被爆者を対象とした寿命研究、原子力従事者の研究、ラドン研究あるいは慢性的に被ばくした集団に関する研究)の資金は、関連するデータの正確かつ完全な収集を可能にするだけの期間確保しなければならない。古典的疫学が低線量リスクの問題を解決できないことは明らかである。この問題を解決するには分子疫学が必要になる。

## 医療被ばく

患者と医療作業者の医療被ばくに関する研究は、線量が着実に増加していることを示している。これらの増加は、より適切な線量情報(例えば患者被ばく量を測定、表示するより優れた装置を装備した機械)が必要であることの根拠となっている。これには、被ばくの最適化に向けた新しいアプローチ、恐らくは規制的アプローチを導入することが必要となる可能性がある。利用可能な知識とデータを最大限に利用するため、医療とその他の分野との交流を奨励すべきである。

## 環境の放射線防護

環境に適用される放射線防護原則の策定は新たな課題であり、すでに存在するもの、また現在策定中のものを含め、他の対象範囲がより広い原則や関連する概念アプローチと無関係に策定すべきではない。

## 事故あるいは放射線テロ攻撃の健康影響

原子力事故あるいは放射線テロ攻撃の影響に対処する際、公衆の信頼を維持することが決定的に重要である。人々は、医療従事者に情報と指針を求める可能性が高い。したがって、彼ら公衆が悪意に基づく放射線事象に対してどのように対応すべきか決める際、重要な役割を果たすのはほぼ確実である。これらの組織によって提供される情報は高い被ばくの影響を取り上げるだけでなく、低被ばくあるいは被ばくがない大多数の人々の状況も取り上げるべきである。希望と信頼を注入し、恐れと心配を低減し、基本的なコミュニティ機能が維持されるよう援助するには、よくまとまった有効な医療対応システムを整備、維持する必要がある。



## 付録1

### EGIS専門家グループ委員一覧

#### カナダ

R. Mitchel, AECL

#### 欧州委員会

G.N. Kelly

#### フィンランド

S. Salomaa, STUK

#### OECD/NEA事務局

B. Ahier

G. Brownless

T. Lazo

#### フランス

M. Bourguignon, DGSNR

F. Bréchnignac, IRSN

A. Flury-Hérard, CEA

H. Métivier, IRSN (議長)

F. Paquet, IRSN

M. Vrijheid, IARC

#### ドイツ

W. Weiss, BfS

M. Zankl, GSF

#### 日本

† 土居雅広, NIRS

#### スペイン

E. Vano, マドリッド大学

#### 英国

N. Priest, ミドルセックス大学

#### 米国

A. Bouville, NRC

K. Mossman, アリゾナ州立大学



## 付録2

### 用語集

**AT:** 毛細血管拡張性運動失調; 毛細血管拡張性運動失調の患者は、リンパ細胞と繊維芽細胞に染色体切断の増加が見られる。がんで死亡するリスクの増加幅は、正常な個人における増加幅より大きい。

**BCRA1, BCRA2:**

**CFC**(クロロフルオロカーボン): エアゾール用高圧ガス、冷媒液として長年使用されてきた化学物質の1グループ。これらの化合物は、本質的に無害であり、おおむね不活発で、ヒト、動物、植物いずれに対しても(直接の)毒性はないと見なされた。しかし、それらは、成層圏のオゾン層との化学的相互作用を通じて、オゾン層を破壊し、その結果、地球表面と低い大気層をUV放射線から守るシールドとしての機能を失わせ、すべての生物体に対し間接的に害をもたらしていることが判明し、世界的に禁止された。

**原体照射法:** 隣接する正常な組織を避けながら、患者の腫瘍の形にぴったりと一致する容積分の線量を送達する放射線療法。これを行うには、腫瘍の形と位置の両方を正確に特定し、かつ標的にできるだけ近くで線量を与えることが必要になる。

**CT:** コンピュータ断層撮影。X線を使って身体の横断面の画像を撮影する非侵襲的画像診断法。3次元の画像を再構成することができる。

**DDREF:** 線量・線量率効果係数。生物学的効果のオリジナル・データを得た線量、線量率とは異なる線量、線量率で低LET放射線に被ばくした場合の生物学的効果を導き出すために調整する係数。

**EC:** 欧州委員会は、欧州連合のすべての加盟国に共通の欧州の利益を代表するために設立された。したがって、それは、条約の守護者、全体の利益の擁護者として役割を果たすことができるよう、委員会は立法プロセスで発議権を与えられており、欧州委員会が法案を提出し、欧州議会と委員会がそれについて決定を下す ([ec.europa.eu/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/index_en.htm))。

**ICRP:** 国際放射線防護委員会は、独立した公認慈善事業組織であり、特に電離放射線からの防護のすべての面について勧告と指針を提供することにより、公益のために放射線防護の科学を進歩させるために設立された ([www.icrp.org/](http://www.icrp.org/))。

**ICRU:** 国際放射線単位・測定委員会 (ICRU) は国際放射線学会によって1925年に設立された。発足当初からICRUは、(1) 放射線と放射能に関する量と単位、(2) 放射線診断学、放射線治療、放射線生物学、工業活動でのこれらの量の測定と利用に適した手順、(3) これらの手順の適用で必要となる物理的データ(これを使用することは報告の均質性の確保につながる)、の3つの点に関する国際的に受け入れられる勧告をまとめることを主たる目的としている。ICRUは、放射線測定と線量測定の問題に関係する最新データと情報を収集、評価し、その刊行物において現在の使用について最も妥当な値と手技を推奨するよう努めている ([www.icru.org/](http://www.icru.org/))。

**IEC:** 国際電気標準会議は1906年に設立され、すべての電気、エレクトロニクス、それらに関連する技術の国際規格を作成、公表する最も重要なグローバル組織である。これらは、国レベルの規格制定の根拠として、あるいは国際入札と契約を起案する際の基準として役立っている。IECは、会員を通じて、電気、エレクトロニクス、その他関連技術の分野で、規格に適合しているかどうかの評価など、電気工学分野の標準化とその関連事項のすべての問題についての国際協力を促進している。IEC憲章は、電子工学、磁気学、電磁気学を含む電気工学、電気音響学、マルチメディア、テレコミュニケーション、エネルギー生産と分配など、電気工学の全分野、さらには、用語、記号、電磁環境適合性、測定と性能、信頼性、設計と開発、安全性と環境など、関連する一般的研究分野を包含している。 [www.iec.ch/](http://www.iec.ch/)

**ILO:** 国際労働機関。国際労働機関は、社会正義と国際的に認められた人権と労働権の普及を目指す国連の専門機関である。これは1919年に設立され、国際連盟設立を規定したヴェルサイユ条約によって創設された組織の中で唯一国際連盟廃止後も残存している組織であり、1946年に国連の最初の専門機関になった。ILOは、条約と勧告の形で国際労働規格を制定し、基本的な労働権の最低基準を設定している。すなわち、結社の自由、作業者を組織する権利、団体交渉、強制労働の廃止、機会と待遇の均等、その他労働に関連する事柄全般にわたる条件を規制する規格などである。 [www.ilo.org/](http://www.ilo.org/)

**IMRT:** 強度変調放射線治療。放射線治療法の一つ。治療対象範囲ごとにビーム強度を変化させ、腫瘍にはより高い放射線量を送り届け、近くの健康な組織が浴びる線量を少なくするために、コンピュータで作った映像を使って放射線を腫瘍のサイズと形に一致させる。

**ISOE:** 職業被ばく情報システム。NEAとIAEAが共同で運営する、原子力発電所と各国の規制当局の放射線防護専門家のネットワークである。これは、職業被ばくデータの収集と評価、および職業放射線防護に関係する経験と情報の交換に重点を置いている。 [www.isoe-network.net/](http://www.isoe-network.net/)

**IUR:** 国際放射生態学連合。放射能と環境にかかわる分野での学際的な情報交換と研究の進歩を促進することを目指す放射線生態学の専門家の非政治的、非営利的学術機関。リスク評価に貢献している。 [www.iur-uir.org/](http://www.iur-uir.org/)

**LET:** 媒質における荷電粒子の線エネルギー付与。dEをdlで割って得られる値。ここに、dEは、距離dlを通過する際に荷電粒子によって失われるエネルギーである(あるいは、物質との相互作用により電離放射線が失ったエネルギー量。吸収材を通過する経路の単位長さあたりの量で表される。X線、 $\gamma$ 放射線は低LET放射線、 $\alpha$ 粒子は高LET放射線と呼ばれる。

**LNT:** 直線しきい値なし;放射線防護システムを構築するためだけに設けた仮定。これによれば、いかなる放射線量も生物学的作用を引き起こし、その頻度は放射線量に依存する。

マヤク作業者:生産合同マヤク(MPA)は、軍事目的でプルトニウムを生産するためロシアに建設された最初の原子力施設である。このプラントは現在、研究炉と輸送施設の照射済み燃料の再処理を行っている。ここで**1957年9月29日**に放射能事故が発生し、事故は、国際原子力事象評価尺度で**6**または**7**と評価された。

**NORM**:自然起源放射性物質。これは一般に、自然界で見られるウラン系列、トリウム系列の放射性核種(例えば土中のラドン)を指し、また、素材に含まれる放射能と無関係の用途のために加工された材料で見られるウラン系列、トリウム系列の放射性核種(例えばウラン以外の採鉱廃石、トリウムとその崩壊生成物を含む石膏など)を指す。これらの加工された材料は、**TENORM**(技術的に濃度が高められた**NORM**)とも呼ばれることがある。

**PET**:陽電子放射断層撮影。身体の3次元画像または断面図を作り出す画像診断技術。事前に患者に投与された陽電子放射放射性物質から放射された放射線を使って画像が再構成される。

**RBE**:生物学的効果比。標準放射線の吸収線量が生じさせる生物学的作用と同じ生物学的作用を得るのに必要な、研究対象放射線の吸収線量の比率。標準放射線は、一般的には<sup>60</sup>Coまたは高エネルギー(> 1 MeV)X線が使用される。

**REMPAN**:国連世界保健機関の放射線緊急時医療準備・支援ネットワーク。このネットワークは全世界の**27**研究機関によって構成され、放射能事故と放射線・原子力の脅威に対し、医療体制の整備を世界的に進めている。そのような事象が発生した場合、このネットワークは、援助と助言を行い、追跡調査とリハビリテーションを支援することができる。

**SETAC**:環境毒性学・化学学会。環境中の汚染物質、その他のストレス要因に関する科学研究の推進と応用を進め、また、環境科学教育、環境政策と意思決定での科学の応用を進める非営利の世界規模の専門家の学会。

**SNP**:一塩基変異多型

テチャ川流域:マヤク核物質製造施設の試運転時に行われたテチャ川への液体放射性廃棄物の処分は、**1948年**にソ連初のプルトニウム・プラントをできる

だけ早く始動させたいという圧力に迫られて取られた措置であった。放射能は1948年6月テチャ川に辿り着き始めた。湖からの水の流出がコントロールされたため、放射能を含んだ水は周期的にテチャ川に流れ込んだ。1949年から1956年にかけて、 $\alpha$ 放射体 $2.10^3$ PBqと $\beta$ 放射体110PBq がテチャ川に放出されたと推測される。

**UNSCEAR**: 原子放射線の影響に関する国連科学委員会。1955年、国連総会によって設立された。国連の組織における任務は、電離放射線に対する被ばくのレベルと影響を評価し報告することである。全世界の政府、組織は、放射線リスクを評価し、防護対策を確立するための科学的根拠をこの委員会の評価に依存している。 [www.unscear.org/unscear/index.html](http://www.unscear.org/unscear/index.html)

**WIPP**: 米国ニューメキシコ州カールスバードにある核廃棄物隔離パイロットプラント; 核兵器の研究と生産から発生した超ウラン元素(長寿命アルファ線放射元素)放射性廃棄物を処分するための深地層処分場。米国南西部の辺境の砂漠に位置するこのプロジェクト設備は、厚さ2000フィート(610メートル)の安定した岩塩累層の中に処分室があり、その深さは地下2150フィート(655メートル)である。WIPPは1999年3月から操業を開始した。

**WNA**: 世界原子力協会。世界原子力協会は、今後数世紀にわたる持続可能なエネルギー資源である原子力の世界中での平和利用を促進することを目指す世界規模の組織である。WNAは、原子力発電と核燃料サイクル(採鉱、転換、濃縮、燃料成型加工、プラント製造、輸送、使用済燃料の安全な処分など核燃料サイクルのすべての面)に特に関係している。 [www.world-nuclear.org/](http://www.world-nuclear.org/)

OECD PUBLICATIONS, 2 rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
Printed in France.



## 放射線防護における 科学的問題と新たな課題

科学的知見は、更に進化したテクノロジーが利用可能になるよう常に発展しており、より綿密な研究が実施されている。政策を決定し得る新たな研究成果である将来的な意味合い内容が提示され、1998年、NEAの放射線防護公共保健委員会(CRPPH)では放射線防護科学分野において最先端の研究調査を実施した。この調査は、放射線防護の現システムが科学的理解に支えられていることを示唆しており、様々な分野における知見の増大は、政策、規制に多大なインパクトを与える。10年後においても、CRPPHは再度、最先端の研究調査を繰り返し行い続け、先の結論を明確にする。

このレポートは放射線防護科学の最新のCRPPHアセスメントの結論を要約している。特に、個別機微な、標的とされていない知見、遅れた影響が、過去10年間に多大な改善をされ続けてきたことを説明している。それらは、まだこれらの分野である種非科学的であるにも関わらず、多くの最近の研究や調査を基に、レポートでは政策決定者や規制権者はこれから数年の研究から得られるであろう可能なインパクトを考えるべきだと堅調に示している。更に、レポートは政策選択においてより直接的インパクトを持つ科学的疑問に対し、より決定的な回答をするためにサポートされるべき研究分野を扱っている。