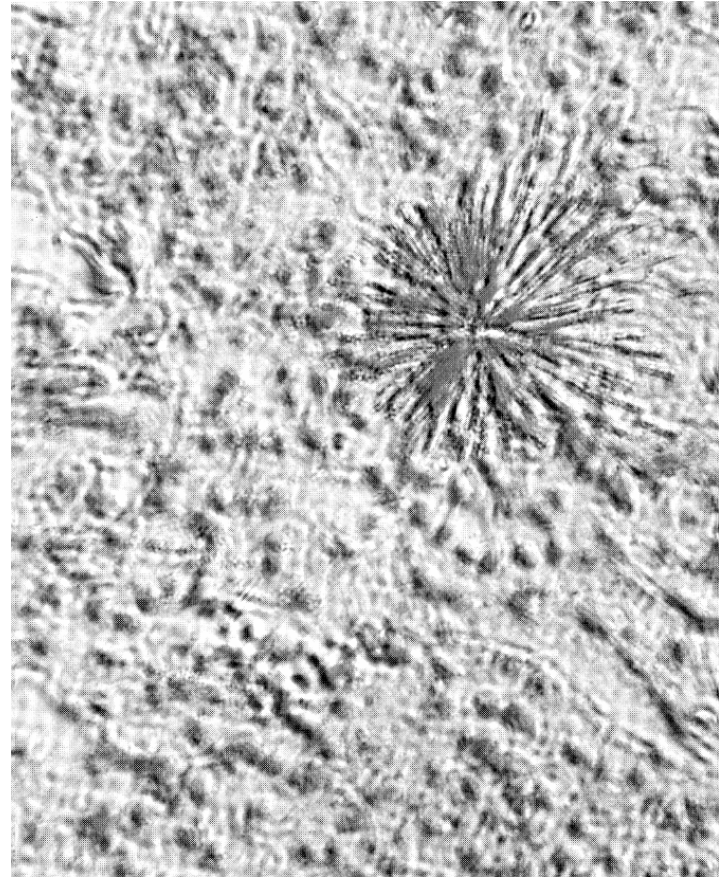


第99回原子力安全問題ゼミ
低線量被曝リスクの諸問題
2004年12月15日



ECRR2003報告における
新しい低線量被曝評価の考え方

山内知也

(ECRR2003翻訳委員会)

欧州放射線リスク委員会2003年勧告
放射線防護のための低線量電離放射線被曝の健康影響
規制当局者のために

編集: クリス・バスビー
ロザリー・バーテル、インゲ・シュミット-フォイエルハーケ、
モリー・スコット・カトー、アレクセイ、ヤーブロコフ

2003 Recommendations of the ECRR
The Health Effects of Ionising Radiation Exposure at Low
Doses for Radiation Protection Purpose
Regulators' Edition

Edited by Chris Busby
with

Rosalies Bertell, Inge Schmitze-Feuerhake, Molly Scott Cato and Alexei Yablokov
Green Audit Press, First Edition; January 2003, ISBN: 1-897761-24-4

1945年以降の原子力による死亡者数

- 国連が発表した1989年までの集団に対する被曝線量をもとにICRPモデルで計算すると、原子力のためにガンで死亡した人間は117万人になる。
- 一方、ECRRモデルで計算すると6160万人の人々がガンで死亡しており、子供160万人、胎児190万人が死亡していると予測される。
- エグゼクティブサマリー(11)

本委員会は以下を勧告する：

- 公衆の構成員の被曝限度を0.1 mSv以下に引き下げること。原子力産業労働者の被曝限度を5 mSvに引き下げること。
- 全ての人間の権利が考慮されるような新しい取り組みが正当であると認められねばならない。
- 放射線被曝線量は、最も優れた利用可能な技術を用いて合理的に達成できるレベルに低く保たねばならない。
- 放射能放出が与える環境への影響は、全ての生命システムへの直接・間接的影響も含め、全ての環境との関連性を考慮に入れて評価されるべきである。
- エグゼクティブサマリー(12)

目次

- 第1章 欧州放射線リスク委員会設立の背景
- 第2章 本報告の基礎と扱う範囲
- 第3章 科学的原理について
- 第4章 放射線リスクと倫理原理
- 第5章 リスク評価のブラックボックス：国際放射線防護委員会
- 第6章 電離放射線：ICRP線量体系における単位と定義、ECRRによるその拡張
- 第7章 低線量における健康影響の確立：リスク
- 第8章 低線量における健康影響の確立：疫学
- 第9章 低線量における健康影響の確立：メカニズムとモデル
- 第10章 被曝に伴うガンリスク、第1部：初期の証拠
- 第11章 被曝に伴うガンリスク、第2部：最近の証拠
- 第12章 被曝のリスク：ガン以外のリスク
- 第13章 応用の例
- 第14章 リスク評価方法のまとめ、原理と勧告
- 第15章 ECRRメンバーと本報告書への貢献者リスト

ECRR設立の背景(1)

- 1997年 欧州議会内の「緑グループ」が「消費材中で放射性廃棄物をリサイクルさせるための」法案について討議、ECRRの設立を議決した。「低レベル放射線がもたらす健康影響については著しい意見対立があり、この課題については公式のレベルで調査されるべきである」
- 1998年 欧州議会内の科学的選択肢評価機構STOAが「公衆と労働者に対する電離放射線被曝の基本的安全基準への批判」についての会議。報告書の準備で合意。
(本文第1章より)

さらに大きな背景：再処理工場がもたらしたプルトニウムを含む放射能汚染と小児白血病発生群

ECRR設立の背景(2)

- 1983年 「核の洗濯場」:ヨークシャーテレビがシースケールにおける小児白血病発生群を告発。
- サッチャー首相が急遽「ブラック委員会」を設立。
- 同委員会は「国民をなだめる」ことしか出来なかったが、2つの委員会を設立(1984年)。

「プルトニウム不良債権(鈴木真奈美)1993」

- 環境放射線の医学的側面に関する委員会 (COMARE) : 核施設周辺の白血病の超過の源泉を調査する。
- 小地域保健統計機構(SAHSU):小さな地域を対象にした疫学的監視の手法を開発する。

核施設周辺の小児白血病(第11章)

核施設	発見年	ICRPリスク との比	
セラフィールド	1983	100 ~ 300	COMARE
ドーンレイ	1986	100 ~ 1000	COMARE
ラアーグ・仏	1993	100 ~ 1000	
アルダーマストン	1987	200 ~ 1000	COMARE
ヒンクリーポイント	1988	200 ~ 1000	
ハーウェル	1997	200 ~ 1000	
クリュンメル・独	1992	200 ~ 1000	
ユーリッヒ・独	1996	200 ~ 1000	
バーセベック・北欧	1998	200 ~ 1000	
チェプトク	2001	200 ~ 1000	

チェルノブイリ事故の影響(第12章)

ギリシャにおける被曝線量は $200 \mu\text{Sv}$ であったが小児白血病の増加は160%であった。

ドイツでは $100 \mu\text{Sv}$ であり48%の増加が認められた。ウェールズとスコットランドでは被曝線量は $80 \mu\text{Sv}$ であったがその増加は200%以上であった。

ICRP-84では、X線による胎児期の産科での被曝によっては、約 $10000 \mu\text{Sv}$ の胎児線量で自然発生リスクを超える40%増加とされている。

ICRPモデルは何を主張するか？の一例

Variations in the concentration of plutonium, strontium-90, and total alpha-emitters in human teeth collected within the British Isles

ブリテン諸島において集められた人間の歯におけるプルトニウム、ストロンチウム90及び全アルファ放射体濃度の変動量

R.G.O'Donnell et al., The Science of the Total Environment 201 (1997)235-243.

- 大ブリテン島とアイルランドから収集された子供の歯の中のPu-239とPu-240、ストロンチウム-90、および、全アルファ放射体の濃度を計測した。PuとSr-90の濃度は、およそ50個の歯からなるバッチサンプル毎に、低バックグラウンド放射化学法によって測定された。単一の歯の中の全アルファ放射体の濃度はアルファ線に感度を有するプラスチック飛跡検出器を用いて測定された。全アルファ放射体とSr-90の平均濃度は相当量のPu-239と-240よりも一桁から3桁も高いという結果が示された。Sr-90や全アルファ放射体についてはそうではなかったが、回帰分析によれば、Pu濃度はセラフィールド再処理工場からの距離の増大とともに減少することが明らかになった。このことはこの再処理工場こそがさらに広範なブリテン諸島の集団におけるPu汚染の被曝源であることを指し示している。しかしながら、測定されたPuの絶対量は（平均=5+-4 mBq/灰重量kg）、有意な放射線障害をもたらすと見なすには低すぎるものである

本報告書の基礎と扱う範囲

第2.2節 本報告書作成の理由

- 本報告書には、審査付き学術雑誌に掲載された論文も取り上げるが、審査付きでない論文も取り上げる。さらに、テレビのドキュメンタリー番組に始まり法廷闘争に発展したケースも取り上げる。それは彼らの足で投票を実現させた人たちや、かつて原子力施設があったが放棄された土地についても考察する。すなわち、最も貧しい人たちしか住まないような荒地に徐々にになっていった土地、砂浜が行楽客に見捨てられ、さらに魚を捕まえるにしても、またそれを売るにしても著しく困難になった地域についての考察を行う。インドにおいて、ナミビア、カザフスタン、ネバダ、オーストラリア、ベラルーシ、そして太平洋の島々において人造放射能の影響をこうむった市井の人たちの物語をとりあげる。
- 論争になっている内容(放射線リスクの権威筋からは被曝が原因ではないと言われている事件)を取り上げる。

本報告書の基礎と扱う範囲

第2.3節 本報告の扱う範囲

- 本報告書では、放射線の持つリスクを評価するために現在使われている方法論を再検討する。現行のモデルでは、組織内に付与されたエネルギーを、その内部において空間的にも時間的にも平均化してしまう。また、リスクの定量化においては外部被曝にもとづいた疫学調査に依存している。そして、そのような外部被曝の結果に基づいて内部被曝によるリスクを定量化しようとする大きな誤りをまねいてしまうことについて論じる。100 mSvよりも高い外部被曝の場合においては、現行の放射線安全モデルはおおむね正解であると言える。しかし、微視的な組織の中で非均一な被曝が起こる内部被曝における線量を評価するに際して、そのような平均化の手法を使うと大きな間違いおかしてしまう。本報告書は、これについて十分な証拠を伝えることを意図している。

科学的原理について(第3章)

- 科学あるいは演繹的方法の古典的解釈は、現在ではミルの規範とよばれる。
- **一致の規範**: あるひとつの現象に先行する諸条件の中に常に共通するものがあるとすれば、それはその現象の原因、あるいは原因に関係するものであると考えてよい。
- **相違の規範**: あるひとつの効果が生じる諸条件とそれが生じない諸条件の中に何か違いがあるとすれば、そのような違いはその効果の原因、あるいは原因に関係しているものであるはずである。
- **蓄積の原理**: 科学的知識は独立した法則の発見によって加算的に増大する。
- **実例確認の原理**: その法則が真実であることの信頼性の程度は、その法則に合致する実例の数に比例する。
- **メカニズムの妥当性**を付け加えるべきだろう。

「ホットパーティクル」の形態をもつ人造放射性核種は、核施設の地域に居住するガンや白血病の発生群、核施設や核実験場の風下住民、放射性降下物に被曝した集団に常に共通する汚染物質である(一致の規範)。風下住民よりもさらに遠く離れた参照集団は低いレベルで疾患を発生している(相違の規範)。

ICRP versus ECRR (第3章)

- ICRP: 高線量の急性外部被曝
原爆生存者
線形閾値なしモデル(低リスク:演繹的)

互いに相容れないモデル

- ECRR: 放射性同位元素による慢性的内部被曝
セラフィールド小児白血病、チェルノブイリの
子供たち、核実験降下物 etc.
2相的細胞応答モデル(高リスク:帰納的)

根本的な違い

- ICRPモデルによれば、セラフィールド核施設・再処理工場周辺における小児白血病発生群の原因は、放射能汚染ではありえない。被曝線量レベルが数百倍低いから。
- ECRRモデルでは、その数百倍を内部被曝のその形態における係数(生物学的損害荷重係数)として扱い、ICRPモデルでの線量にそれを掛け合わせた修正線量を利用する。外部被曝についてはICRPモデルを基本的に容認。細胞線量の確立の必要性を主張する。
- ICRPの立場では、白血病の子供の数が増えれば増えるほど、より強固に放射線被曝が原因ではない、と主張することになる。したがって根本的に対立する。

生物学的損害荷重係数？

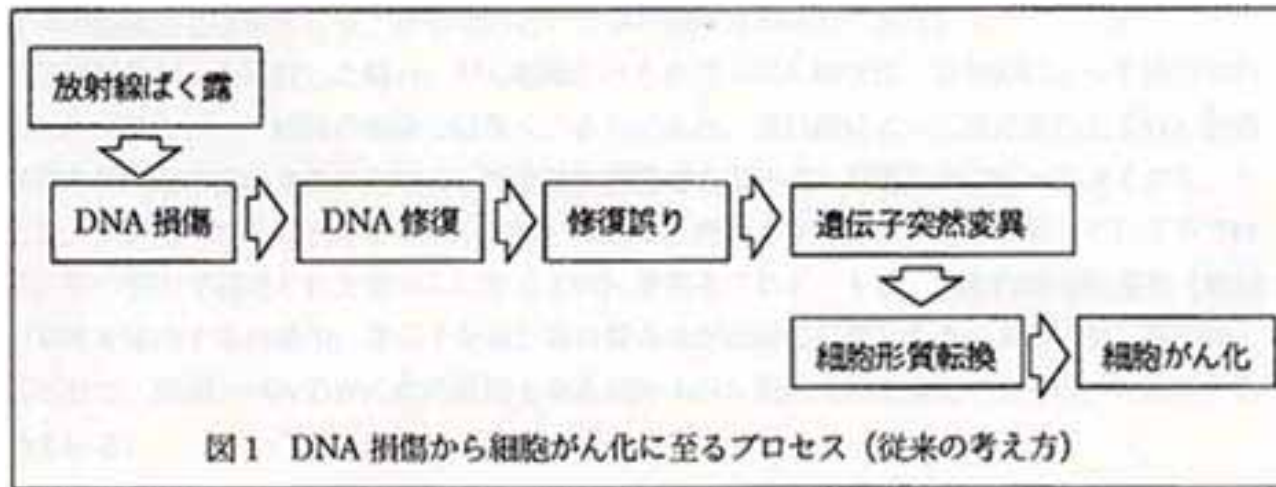
- RBE: 生物学的効果比。ある反応を起こすのに必要な標準となる放射線の吸収線量とある放射線でその反応を起こすのに必要な吸収線量との比。
- 放射線の種類(線質;ガンマー線、中性子線、アルファ線、ベータ線、X線、さらにこれらのエネルギーによる)を考慮する目的。
- これの被曝形態全般についての拡張。ホットパーティクルを伴うのか？慢性的な内部被曝なのか？観察されている疫学的研究結果を説明できるように、被曝形態ごとに荷重する。〈報告者の説明〉

生物学の背景(1)

- 1990年代における放射線生物学の進歩
 - バイスタンダー効果
 - ゲノム不安定性(遺伝的不安定性)
 - 背景としての実験技術の進歩: マイクロビーム
-
- ICRPモデル: 「冷戦の秘密主義と統制体制の時期にDNAが発見されるよりも以前に、生きた細胞の放射線に対する生物学的応答のほとんどが知られていなかった時期に、主として軍当局に支援されていた物理学者達によってつくられたものである。」(第5章)

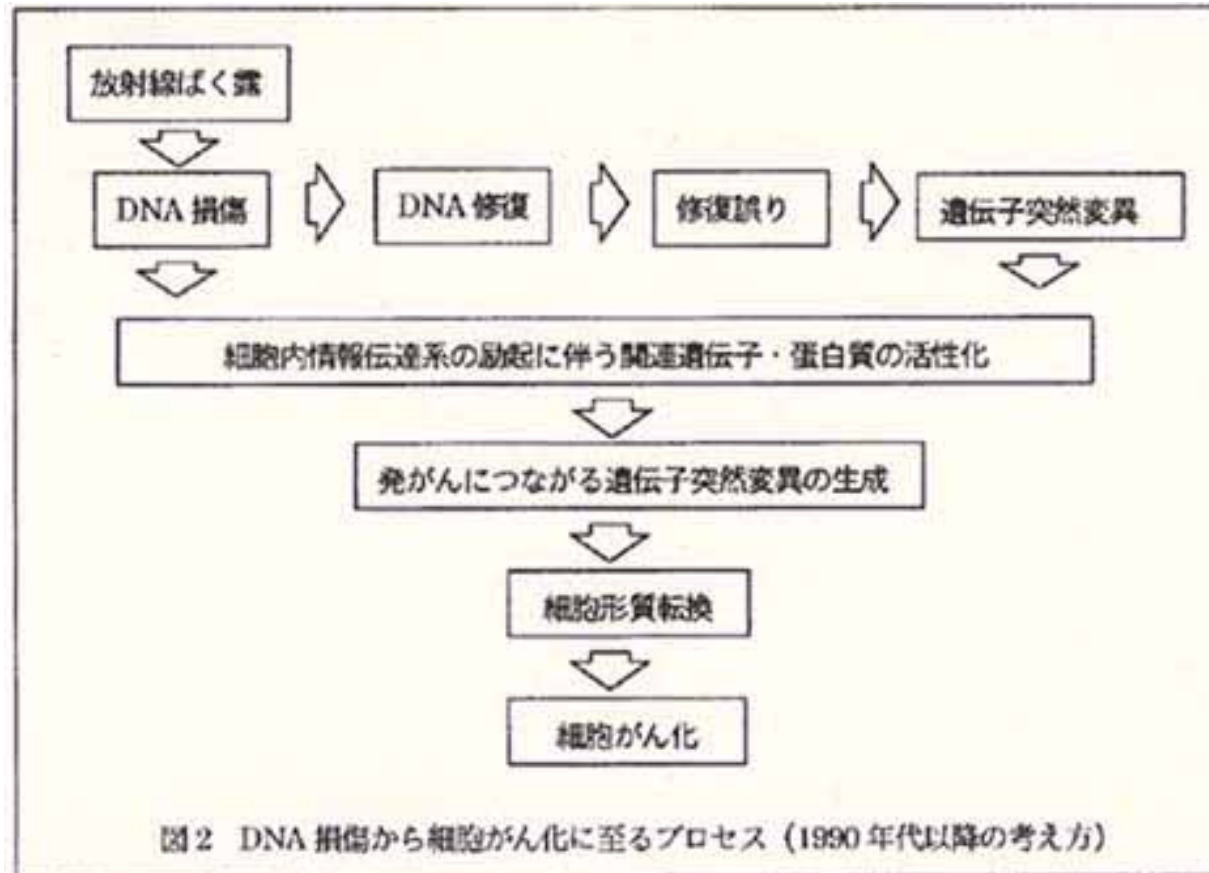
生物学の背景(2)

- 例えば、「JAERI-Review2002-009 放射線誘発細胞がん化実験に関する文献データの調査」(三枝新:日本原子力研究所)



- ヒット理論:人を含む生物を「高分子材料」として扱っている。
- 2重鎖切断がガンの原因とする考え方。
<「吸収線量」や線形閾値なしモデルで記述できる>

生物学の背景(3)



- ガンの多段階的発生: 全ての段階に放射線が作用するとすれば、急性被曝と慢性被曝とを区別する必要性がある。ゲノム不安定性。

ICRPモデルとは(Publication-60)

- (17)歴史的にあって、電離放射線の”数量”の計測に用いられる量は、ある決められた状況における電離事象の総数、もしくは、普通はある決められた物質中に沈着するエネルギーで表される沈着エネルギーの総量に基づいてきた。こうしたやり方は電離過程の不連続性を考慮していないが、しかし、放射線の種類に応じて補正して、この総量は結果として生じる生物影響とかなりよく対応するという知見によって、経験的に正しいものとされている。

放射線をどのような量で計測するのがよいかについては、それが「経験的に正しいか」否かが問題である。

ICRP1990(Publication-60)

- (18) 将来の発展において、細胞核あるいはその中にあるDNA分子のような生物学的単位の寸法に相応する微小な体積の物質中における事象の統計的分布に基づいた別種の量を用いる方がよいということが示されるかもしれない。しかしながら現状では、委員会は巨視的な量の使用を今までどおり勧告する。
- (24) 放射線防護上関心があるのは、一点における吸収線量ではなくて組織・臓器にわたって平均し、線質について荷重した吸収線量である。この目的のための荷重係数は今回、放射線荷重係数 w_R とよばれ、身体に入射する放射線、あるいは体内にある線源の場合には線源から放出される放射線の、種類とエネルギーに適するように選ばれている。この荷重された吸収線量は厳密な意味で線量であり、委員会は組織・臓器の等価線量というもとの名称に戻り、記号 H_T を使うことを決定した。名称の変更は、線質係数から放射線荷重係数への変更を示すのにも役立つ。組織Tの等価線量は次式で与えられる。

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{TR}$$

でここで D_{TR} は、組織・臓器Tについて平均された。放射線Rに起因する吸収線量である。等価線量の単位はキログラムあたりのジュールであり、その特別な名称はシーベルト(Sv)である。

アルファ線に対する放射線荷重係数 w_R は20。

ICRP1990(Publication-60)

(27) 確率的影響の確率と等価線量との関係は、照射された臓器・組織にも依存することがわかっている。そのため、異なった複数の組織への異なる線量を組み合わせ、確率的影響の全体とよく相関するように示す、等価線量から導かれるもう一つの量を定義するのが適切である。組織・臓器Tの等価線量に荷重する係数を組織荷重係数 w_T といい、これは全身が均等に照射された結果生じるこれらの影響による損害の総計に対するその臓器・組織の相対的寄与を表す。

表2 組織荷重係数¹⁾

組織・臓器	組織荷重係数, w_T
生殖腺	0.20
骨髄 (赤色)	0.12
結腸	0.12*
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05
乳房	0.05
肝臓	0.05
食道	0.05
甲状腺	0.05
皮膚	0.01
骨表面	0.01
残りの組織・臓器	0.05 ²⁾³⁾

¹⁾ これらの数値は、同数の両性および広い年齢範囲をもつ基準集団について導かれたものである。実効線量の定義においては、これらの数値を作業員、全集団および両性のいずれにも使う。

ICRP1990(Publication-60)

- (28) **実効線量**は、身体のすべての組織・臓器の荷重された等価線量の和である。それは次式で与えられる。

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T$$

ここで、 H_T は組織・臓器Tの等価線量、 W_T は組織・臓器Tの荷重係数である。実効線量はまた、身体のすべての組織・臓器の二重に荷重された吸収線量の和としても表すこともできる。

- 実効線量の体系では組み込めていない被曝形態はないか？
- (30) ある吸収線量によって引き起こされる結果は、線量の大きさ、放射線の種類とエネルギー(放射線荷重係数により処理される)および身体内の線量分布(組織荷重係数によって処理される)のみならず、線量の時間分布(線量率および被ばくの遷延)にも関係する。以前の式では、放射線荷重係数および組織荷重係数にほかに考えられるいくつかの荷重係数が考慮できるようになっており、これらの特定されていない他の荷重係数の積をNと呼んでいた。線量の時間的分布のいかなる影響もある一組の値をNに割り当てることによって適応させることができたかもしれないが、実際にこれが試みられたことはなく、委員会はNの使用を廃止することを決めた。

ICRP1977(Publication-26)

- (18)組織の一点における線量当量Hは式

$$H = DQN$$

によって与えられる。ここでDは吸収線量、Qは線質係数、Nは委員会が規定したその他すべての修正係数の積である。このような係数によて、例えば吸収線量率や分割照射が考慮されるであろう。現在のところ委員会はNに1という値をあてている。

<形式上ECRRはこれを復活させた>

ICRP1990(Publication-60)

体系のほころび

- (26) ……DNAに結合している原子から放出されるオージェ電子は、現在の等価線量で定義されているようにDNAの全質量について吸収線量を平均することは現実的でないため、特別の問題を提供している。オージェ電子の効果はマイクロドシメトリーの手法によって評価しなければならない。

ECRR2003(第6.5節-1)

- 臓器Tにおける生物学的等価線量Bは、線質Rの特定の被曝Eの結果として、次のように表される。

$$B_{T,E} = \sum_E N_E \cdot H_{TR}$$

ここに H_{TR} は、放射線Rによる組織あるいは臓器Tにわたって平均した等価線量であり、 N_E は特定の被曝Eについての損害強調荷重係数である。

$$N_E = \sum_{JK} W_J \cdot W_K$$

W_J : 生物物理学的損害係数

W_K : 同位体生化学的損害係数

ECRR2003(第6.5節-2)

• W_J : 生物物理学的損害係数

被曝のタイプ	係数 W_J	備考
1. 外部急性	1.0	
2. 外部延長	1.0	線量率低減を仮定せず
3. 24時間2ヒット	10 ~ 50	修復の妨害を考慮
4. 内部原子単一壊変	1.0	K-40
5. 内部二段階原子壊変	20 ~ 50	崩壊系列と線量に依存
6. 内部オージェあるいはコ スタクローニツヒ	1 ~ 100	部位とエネルギーに依存
7. 内部不溶性粒子	20 ~ 1000	放射能と粒子サイズ、線量 に依存

ECRR2003(第6.5節-3)

- W_k : 内部同位体生化学的損害係数

同位体あるいは部類	係数 W_k	強調効果の機構
トリチウム H-3	10 ~ 30	核壊変と局所線量; 水素結合; 酵素増幅
イオン平衡性カチオン K, Cs, Ba, Sr, Zn	2 ~ 10	界面イオン吸着による局所濃縮
DNA結合物 Sr, Ba, Pu	10 ~ 50	DNAの1次、2次、3次構造の崩壊
炭素14	5 ~ 20	核壊変と酵素増幅
硫黄35、テルル132	10	元素転換と酵素増幅; 水素結合
酵素と共酵素探求物 Zn, Mn, Co, Fe	10	酵素増幅
脂肪に溶ける希ガス Ar-41, Kr-85	2 ~ 10	考慮する効果に依存
元素境界転換系列 Sr-90/Y-90	2 ~ 1000	考慮する効果に依存

ECRR2003(第6.5節-4)

$$E = \sum_T W_T \cdot B_T$$

ここにEは厳密には**生物学的実効線量**と呼ばれるべきであるが、本委員会は実効線量の呼び名を残しても混乱はないと考えている。すなわち、放射線防護安全とその諸単位へのこの編入は、これまでの使用と継ぎ目なくつながる。

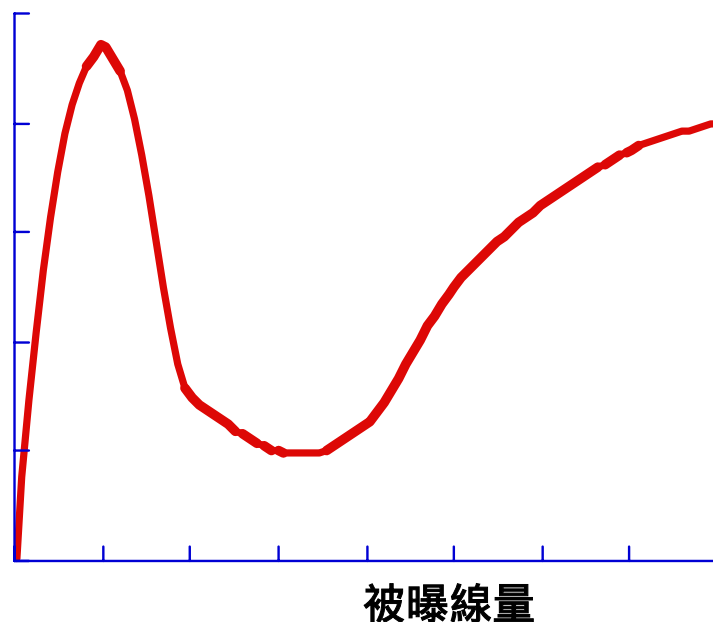
ECRR2003(第6.3節)

- 体内の放射線核種の点線源が関係する細胞レベルにおける定性的に異なった被曝を解釈するために、ICRPの教義体系を修正するのか、あるいは完全につくり直すのかという問題に直面した。本委員会は、一方では第一の原理からはじめて細胞レベルでの電離事象によるエネルギー付与を正確に記述するモデルを開発することは好ましいことであると考え、しかし、最初の例としてはICRPモデルに基づいた歴史的な被曝線量計算が健康欠損についての正確な情報を与えるように修正した単純な体系であることが必要であろう、と決定した。

内部被曝に特有のメカニズム(第9章)

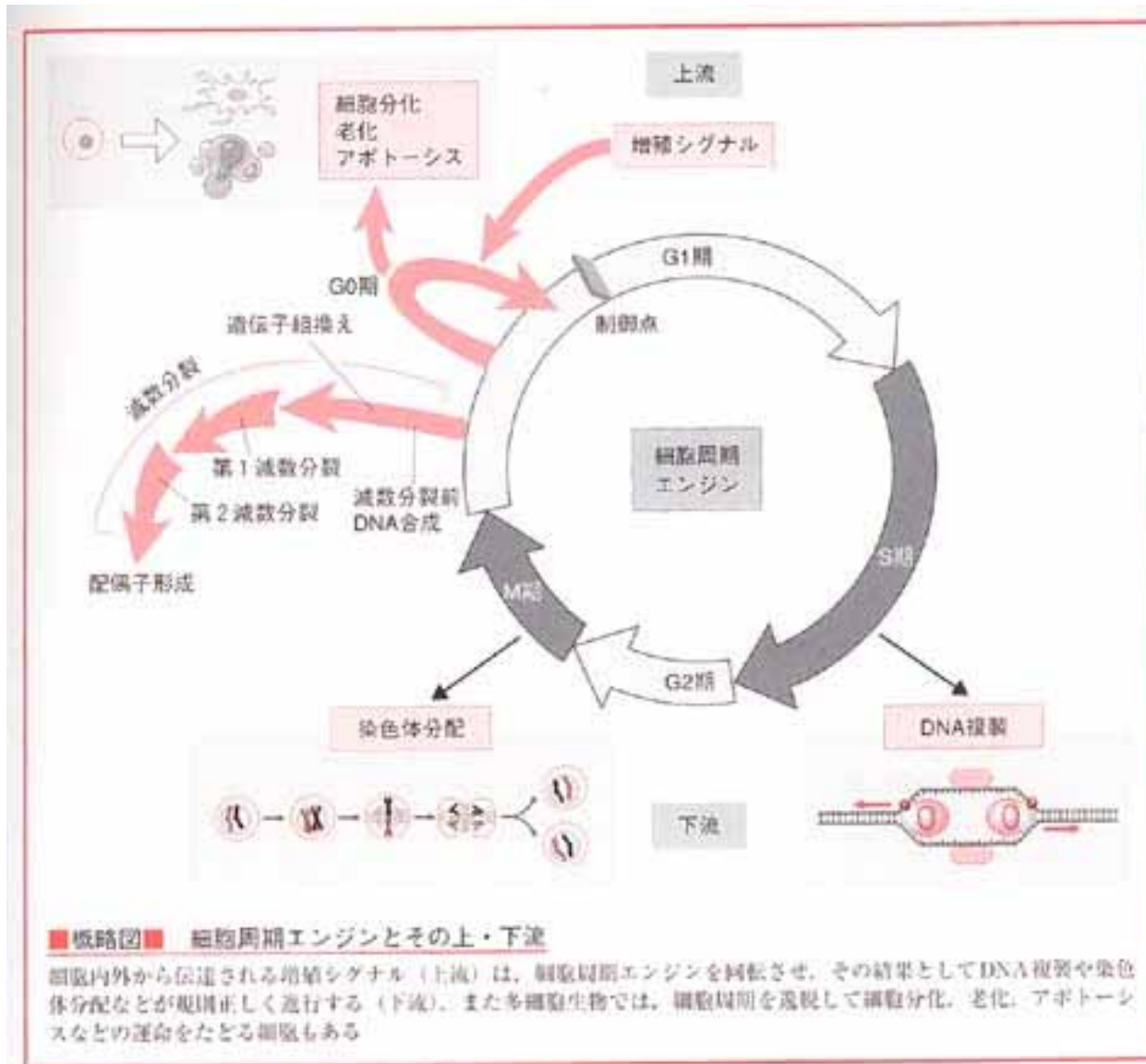
(これらが実験室レベルで確認されることの意義は、ECRRの主張にとって非常に大きい)

- 2相的線量応答
(線形閾値なしモデルよりも低線量リスクが大きくなる)
- セカンドイベント理論
(2本以上の飛跡の相関; 吸収線量では記述不可能)



- ECRR-2003 (第9.7節 バスビーのセカンド・イベント理論)・・・非常に最近になって、マイクロ技術の発達はそのセカンド・イベントという考え方を支持する幾つかの新しい証拠をもたらしている。ミラーらは最近の被曝リスクについての研究において、細胞あたり厳密に1個のアルファ線をヒットさせた場合に測定された発ガン率は、細胞あたりポワソン分布平均で1個のアルファ粒子をヒットさせた場合のそれよりも著しく小さいことを示すことができた (Miller, 1999)。その著者らは、これは2個かあるいはそれ以上の個数のアルファ線によって通過された細胞が突然変異のリスクにほとんど寄与していることを示している、すなわち、シングルヒットはガン原因ではない、と論じている。しかしながら、まだ今のところ、空間内における数分間の間隔での2ヒットと、約12時間の細胞修復サイクルにおける2ヒットとの間の効果の差については比較されてきていない。・・・

細胞周期とセカンドイベント理論



「細胞周期がわかる」羊
 土社2001

細胞周期と放射線感受性

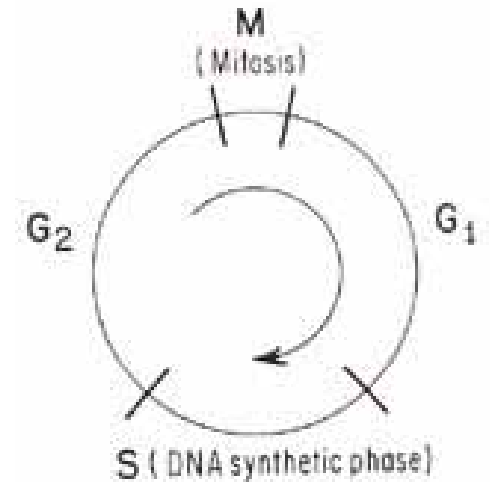
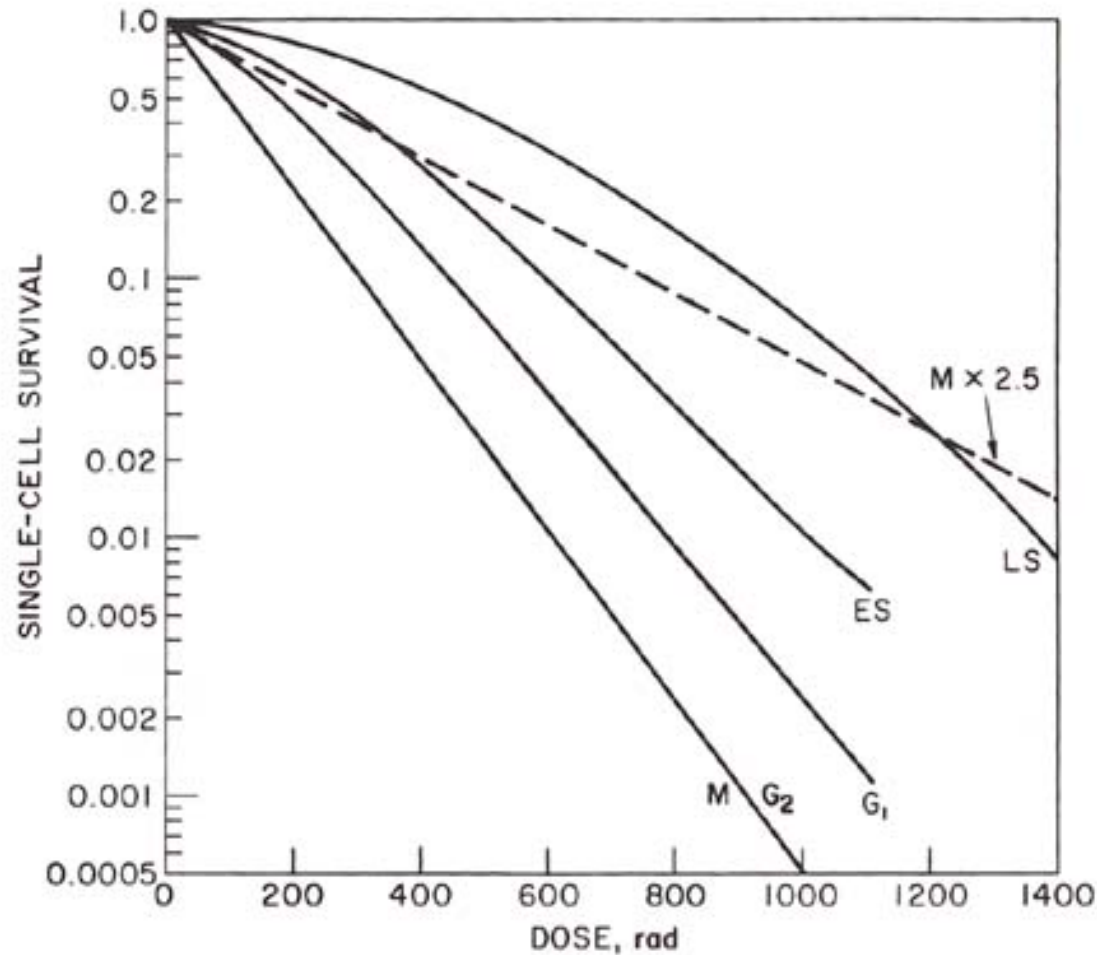


図 6-7. チャイニーズ・ハムスター細胞を細胞周期の種々の時期に照射して調べた生存曲線
 分裂期細胞では生存曲線は急峻で肩がない、S 期末期の細胞では曲線は緩やかで大きな最初の肩を持っている、G₁期およびS 期初期の細胞では中間的である、点線は酸素欠乏状態で分裂期細胞を照射したと仮定した時の生存曲線。
 (Sinclair WK : Radiat Res 33 : 620-643, 1968 より)

「放射線生物学」
 Hall, 1995

チャイニーズハムスター細胞と HeLa細胞

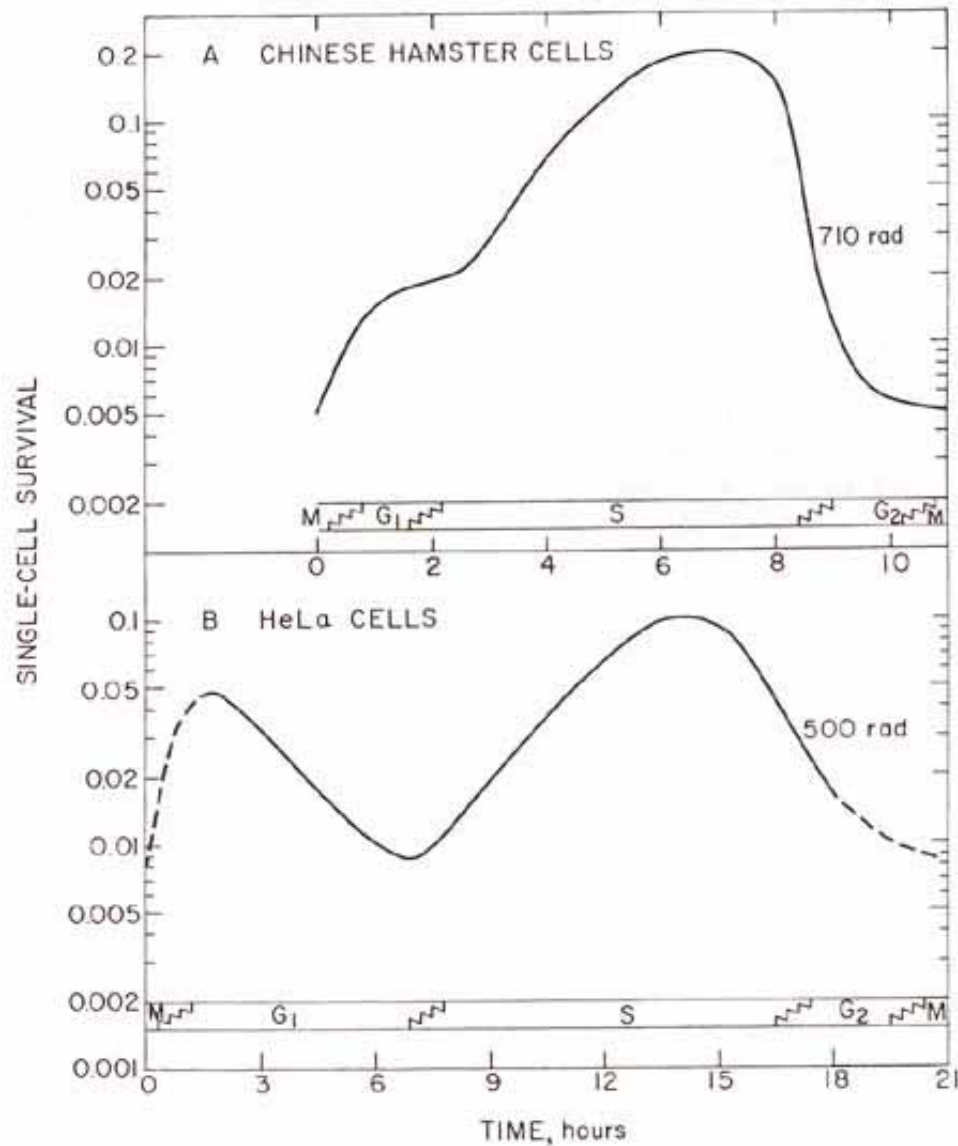


図 6-9. 細胞周期一反応の形

Aはハムスター細胞で代表されるG₁期の短い細胞、BはHeLa細胞のようにG₁期の長いもの、時間のスケールを合わせると、S期の長さは両者で変わらないことがわかる。
 (Sinclair WK: Dependence of Radiosensitivity Upon Cell Age. In Proceedings of the Carmel Conference on Time and Dose Relationships in Radiation Biology as Applied to Radiotherapy. Upton, NY, BNL Report 50203 (C-57), 1969, PP. 97-107 より)

「放射線生物学」
Hall, 1995

空腸腺窩細胞 120倍の変動

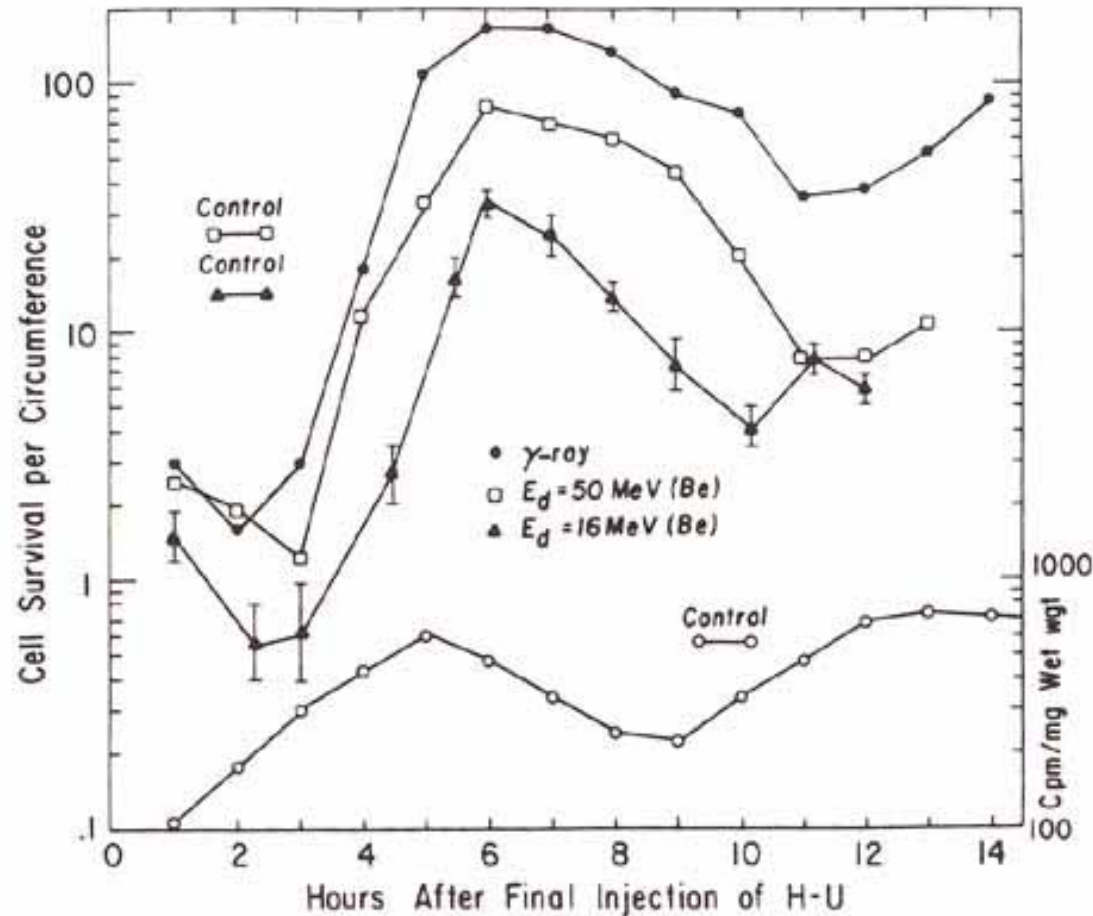


図 6-11. 空腸腺窩細胞の細胞増殖反応

上の3つの曲線は、空腸腺窩細胞を hydroxyurea (H-U) で同調後、種々の時間を置いてγ線あるいは中性子線を照射したときの生存率の変動を示す。線量はγ線で11 Gy (1,100 rads)、50 MeV $d^+ \rightarrow Be$ の中性子線で7 Gy (700 rads) または16 MeV $d^+ \rightarrow Be$ の中性子線では6 Gy (600 rads) である。下の曲線は hydroxyurea を投与し終わった時に空腸の wet weight 1 mg 毎でみたトリチウム・チミジンの取り込みを表す (1分あたりのカウント数)。最初の波はG₁/Sで hydroxyurea により同調させられていたものがS期を通過してゆくことを示している。(Withers HR, Mason K, Reid BO, Dubravsky N, Barkley HJ, Brown BW, Smathers JB: Cancer 34: 39-47, 1974 より)

「放射線生物学」
Hall, 1995

マイクロビームを使った細胞突然変異、ゲノム不安定等の研究の進展に期待する。

ECRR2003の後に明らかになった成人ガンについての疫学研究

- “チェルノブイリ原発事故による北部スウェーデンの全ガン発症増加”
Martin Tondel, Peter Hjalmarsson, Lennart Hardell, Gran Carlsson and Olav Axelson, *Journal of Epidemiology and Community Health* 2004;**58**:1011-1016 "Increase of regional total cancer incidence in north Sweden due to the Chernobyl accident?"
(abstract at <http://jech.bmjournals.com/cgi/content/abstract/58/12/1011>).
- “チェルノブイリ原発事故の傾向を示している国家がん登録”
A. E. Okeanov, E. Y. Sosnovkaya, O. P. Priatkina, *SWISS MED WKL*, 2004;**134**:645-649 ”A national cancer registry to assess trends after the Chernobyl accident”: 国際権威筋の報告が同資料を無視しつつづけていることを同時に指摘。

放射線リスクと倫理原理 (第4章)

- 原子力産業の操業の裁可は倫理的に受け入れられるのか？
- 第一に、そのような裁可は、選挙民によって承認が与えられた後につづく政策的意思決定の問題であるのか。仮にそうだととしても、その承認は、十分な討論と正確な情報を利用する完全な機会が与えられてのものであったのか。
- 第二に、その倫理的問題への解答は、その所産がより大きい利益という点で正当化できるならば少しの害は裁可されてもよいというような、受容閾値の主題であるのか。

(第4.1節)

民生原子力計画の倫理的基礎(第4.3節)

- ICRP1990(第101節):人間の活動に関係するほとんどの決定は、費用や損失に対する便益のバランスというある暗黙の形式に基づいており、ある一連の行為や活動が有益であるか、そうでないかという結論が導かれている。これほど一般的でないが、ある行為の実施は個人あるいは社会に対する正味の便益を最大にするように調整されるべきだということもまた認識されている。…便益と損害とがその集団の中で同じ分布になっていない場合には、何らかの不公平につながることになる。甚だしい不公平は個々人の防護に注意を払うことによって回避することが可能である。多くの現在の行為が、将来において、時には遠い将来において受けることになる被曝線量の上昇を生み出しているということもまた認識されなければならない。これら将来の被曝線量は集団と個人の両方の防護において考慮されるべきである。
- ICRPの倫理的基礎:功利主義
- 功利主義に対して最初になされた反論は、それが奴隷社会と全く矛盾しないものだということ。

倫理的考察(第4.4節)

- 誰がそのコストを支払うのか？
石炭火力発電所におけるエネルギー生産の全サイクルの一部として死んでしまった鉱夫の人数と、核放出の結果として生じたガンによって殺された市民の人数との比較を提案している。・・・鉱夫たちは彼らの仕事の危険な性質について十分に知らされており、直接的な金銭的利益と引きかえにそれを受入れて働いていた。・・・セラフィールドから放出された放射性微粒子を、・・・そこにおける生産から直接的に利益も得ることなく吸い込んでいる。・・・
- 放射線感受性におけるレベルの違いを考慮にいれること
平均的放射線感受性に基づくモデルにしたがうと高感受性の人が非常に高いガン発症のリスクを負う。
- 越境問題
英国の民生原子力計画で最も汚染された国は原子力を持たないアイルランドである。

10万人に一人が死亡するリスクは些細か？

- 受容論

ロンドンのあるホテルにチェックインしたある狂った男がショットガンを持っており、彼が60人を射殺するつもりだと警察に告げたとしよう(10万人に一人)、あるいは、例えそれが一人であったとしても(600万人に一人)、社会は当然のこととして彼が逮捕され、監禁されることを期待するだろう。しかしながら、核施設からの放射性物質の放出にはそのような刑罰は課せられていない。

- 自然のバックグラウンド

もしも、ある木から一本の枝が落下して、その真下を歩いていたある人を殺してしまったとするならば、これは神の仕業と見なされるだろう。一方で、誰かがその全く同じ枝を拾い上げ、別の誰かの頭を殴りつけて彼らを殺すのにそれを使ったとすれば、これは殺人になるだろう。害あるいは死さえも引き起こす能力のある放射性物質の放出は、自然界の類似物との比較に基づいて正当化することはできない。

全体の結論は: エグゼクティブサマリー参照 以上

- ECRR:放射性同位元素による慢性的内部被曝
セラフィールド小児白血病、チェルノブイリの子供たち、核実験降下物 etc.
2相的細胞応答モデル(高リスク:帰納的)

互いに相容れないモデル

- ICRP: 高線量の急性外部被曝
原爆生存者
線形閾値なしモデル(低リスク:演繹的)

補1 ECR2003の同時代(1)

- ICRPモデルは「正常な人でありさえすれば、深刻であり人の生死にかかわることだと見なすような経験を、機械的に循環的にことごとく拒絶してしまう演繹ベースの推論マシン」になっている(第3章)。
- 2001年:内部放射体の健康リスク調査委員会CERRIEを、当時の環境大臣ミハエル・ミーチャーが設立。

「意見を異にしている双方の側の科学者との予備的な議論を通じて、現行の放射線被害モデルは、原子爆弾の爆発による体外から甚大な一回だけの被曝をもたらしたガンマー線照射の結果だけにほとんど排他的に基づいているものであり、慢性的な放射能の吸引や経口摂取による累積的な効果については信頼するに足る得る指針にはなりそうにないと考えようになりました。環境大臣として、数多くの関連する分野での政策について責任ある行動をとる必要が私にはあったのです。(MM)」

補1 ECRR2003の同時代(2)

- CERRIE の「失敗」:最終報告、少数者報告2004
- 「私は委員会メンバーに、彼らが出来るところでは合意し、合意できない領域についてはそれを叙述するように依頼しました。彼らへの付託は、理解の出来る言葉でもって、合意できないところを説明することであり、それらをはっきりさせることを可能ならしめる研究を提案することだったのです。残念ながら、委員会において主流を占めることになったやり方が生み出してしまった「最終報告」は、彼らは広い範囲の話題について討議することこそ受け入れたものの、あらゆる見解について完全に公正な公表を与えるものにはなりませんでした。この論争をさらに前進させるという観点からより一層深刻なのは、「最終報告」は、このような意見の不一致が継続している理由を説明することに失敗しているのです。(MM2004)」

補1 ECR2003の同時代(3)

- 英国議会(下院)緊急動議: Early Day Motion 1548 (2004.7)
- 「本院は、北ウェールズのメナイ・ストレイト (Menai Strait) の近くで最近発見された小児ガンと小児白血病の深刻な過剰発生、および、それがその地域に近い沿岸の放射能による汚染に明らかに関連していることを認識している。ひるがえって、ヨークシャーテレビが発見したセラフィールド近くのカンブリア海沿岸にすむ子供たちの間の過剰な白血病について調査し勧告を出すために故ダグラス・ブラック卿を議長とする独立諮問委員会が1983年に設立されたこと、そしてそのブラック委員会が早期の警告を出すために中央集権的な健康監視体制を1984年に勧告したことを承知している。しかし、小区域健康統計部門 (SAHSU) がロンドン帝国大学内におかれたが、独自に調査を行う権限を持たず、メナイ・ストレイトにおける過剰なガンも白血病も見いださなかったことを反省し、また、ブラック委員会の勧告で設立した環境放射線の医学的側面に関する委員会COMAREもやはりメナイ・ストレイトにおける過剰なガンも白血病も見いだすことが無く、カンブリアにおける過剰発生の原因を特定することも無く、独自調査の権限は厳しく制限されていたことを反省し、政府に対してSAHSUを解体し、COMAREは、中立的議長を持ち、フルタイムの民間サービスの秘書を雇用し、独立した調査を実施するのに十分な予算を認め、適切な科学的見解の全ての色合いを代表し、委員会における作業に対して給与を支払われる構成員からなる、「電離放射線の健康影響に関する委員会」に置き換えることを要請する。」
- Committee on the Health Effects of Ionising Radiation設立への動き

補1 ECRR2003の同時代(4)

- 英国議会(下院)緊急動議:Early Day Motion 1548
COMAREの廃止を要請する下院緊急動議EDM1548の署名数が82名に達した。最も新しい署名人はイアン・ギブソン博士であり、彼は下院科学技術委員会の議長にして英国学士院の公衆の科学理解のための委員会の副議長である。(11.5/2004)
- CERRIE報告書：プルトニウムの危険性が少なくとも10倍過少評価されている。チェルノブイリ事故による胎児期の被曝によってヨーロッパ各国で小児白血病が増えていることを確認。ギリシャにおける被曝線量は $200 \mu\text{Sv}$ であったが小児白血病の増加は160%であった。ドイツでは $100 \mu\text{Sv}$ であり48%の増加が認められた。ウェールズとスコットランドでは被曝線量は $80 \mu\text{Sv}$ であったがその増加は200%以上であった。(ICRP-84では、X線による胎児期の産科での被曝によっては、約 $10000 \mu\text{Sv}$ の胎児線量で自然発生リスクを超える40%増加とされている。)
- 事実については記載したが、考察せず。

補2 内部被曝と外部被曝とを区別する典型的問題としての”ホット・パーティクル”

- ICRP-1977 (33)組織の照射が不均等な場合、もし、個々の細胞への線量がその組織に対する線量-効果関係を直線とみなすことのできる線量の範囲以上に広範囲に異なるならば、組織全体にわたる平均線量の使用は厳密には妥当でなくなる。放射性微粒子による肺の照射はこの一例であろう。しかし、理論的な考察と利用できる疫学的な証拠に基づき、委員会は次のように信じている。すなわち、晩発性の確率的影響に対しては、一定量の放射線エネルギーの吸収は、これが均等に分布しているときよりも一連の”ホット・スポット”によるときの方が普通は小さいようである。……

- ICRP-1977 (33: つづき)なぜなら、大線量は細胞の再生能力の喪失あるいは細胞の死を引き起こす効果があるからである。したがって、ある組織中の粒子状の放射線源について、均等線量分布を仮定してリスクを算定すると、おそらく実際のリスクを過大に評価するであろう。さらに、非確率的影響に対しては、中程度の線量レベルで起こるかもしれない細胞喪失の量くらいでは器官の機能低下を起こすことはほとんどありそうにない。
- ICRP-1977 (50)プルトニウムのような粒子状放射性物質を取り扱った人々の幾人かは現在の限度以上に被曝したにもかかわらず、その人々の間には、明らかに放射線被曝に帰することのできる肺のがんは報告されていない。33項にすでに記したように、委員会は、肺の中の粒子状物質の危険性はその同じ物質が肺全体に均一に分布したときよりも少ないらしいと信じている。

補3 ICRP1990(Publication-60)

- (25つづき) 委員会は、この新しい放射線荷重係数にそのような精密さがあると思わないことを希望する。委員会は、全てのエネルギーのX線およびガンマ線を含む低LET放射線について、放射線荷重係数を1とした。他の放射線については、基準放射線がX線かガンマ線かに関係なく、生物効果比(RBE)の実測値に基づいて値を選んだ。

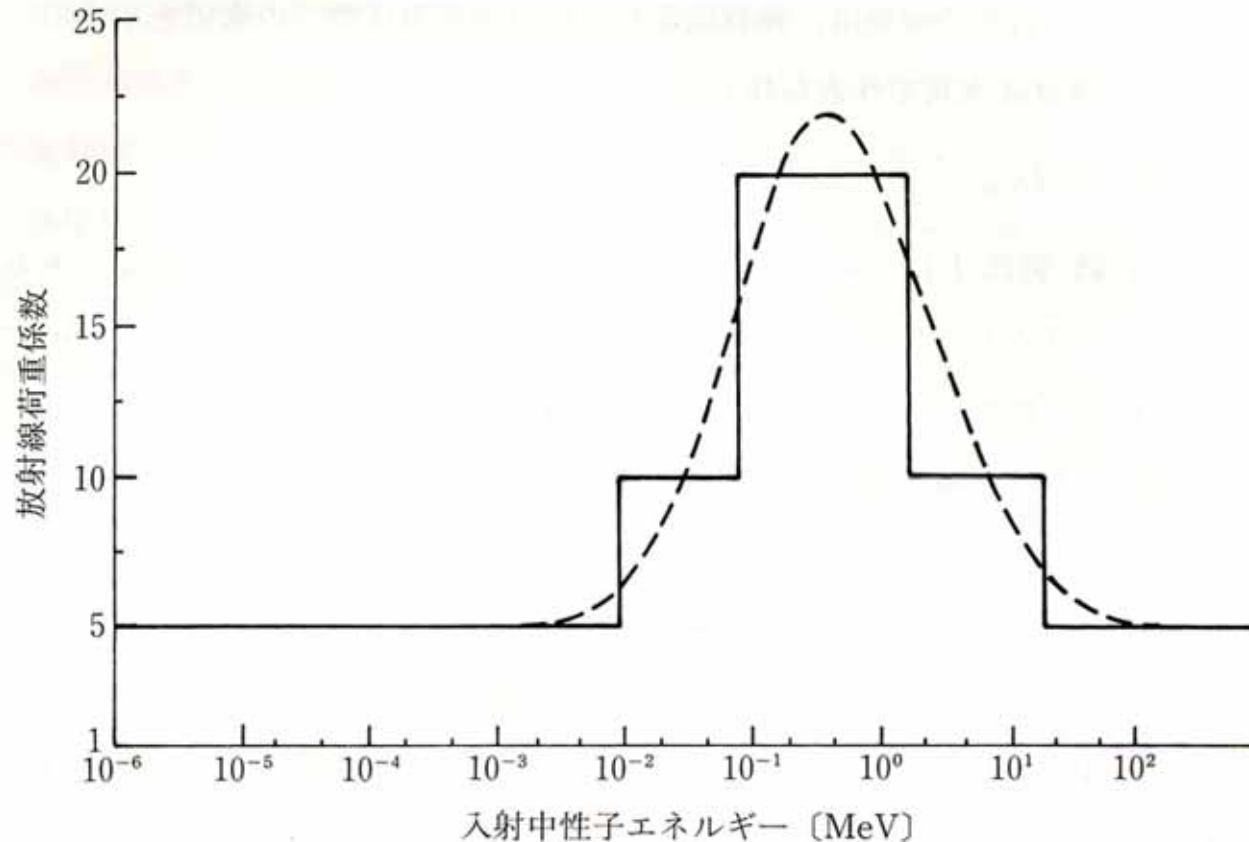


図1 中性子に対する放射線荷重係数。滑らかな曲線は近似として扱われるべきものである。

補3 ICRP1990(Publication-60)

- (25) ある特定の種類のエネルギーの放射線に対する放射線荷重係数の値は、委員会によって、低線量における確率的影響の生物効果比の値を代表するよう選ばれた。他の放射線と比べたある放射線の生物効果比(RBE)とは、ある特定の生物学的エンドポイントについて同じ程度の結果を生ずる2つの放射線の吸収線量の逆比である。 w_R の値は、電離性粒子の飛跡に沿う電離密度の尺度である線エネルギー付与(LET)の量に関係づけられたQの値と、おおよそ合っている。QとLETのこのような関係は元来、放射線の違いによるQの値の変化を大まかに示すにすぎないものとして考えられたものであったにもかかわらず、見かけ上精密なものとししばしば解釈された。

表1 放射線荷重係数¹⁾

放射線の種類とエネルギーの範囲 ²⁾	放射線荷重係数, w_R
光子, すべてのエネルギー	1
電子およびミュオン粒子, すべてのエネルギー ³⁾	1
中性子, エネルギーが 10 keV 未満のもの	5
" 10 keV 以上 100 keV まで	10
" 100 keV を超え 2 MeV まで	20
" 2 MeV を超え 20 MeV まで	10
" 20 MeV を超えるもの	5
(図1も参照)	
反跳陽子以外の陽子, エネルギーが 2 MeV を超えるもの	5
アルファ粒子, 核分裂片, 重原子核	20

¹⁾ すべての数値は、身体に入射する放射線、あるいは体内線源についてはその線源から放出される放射線に関するものである。

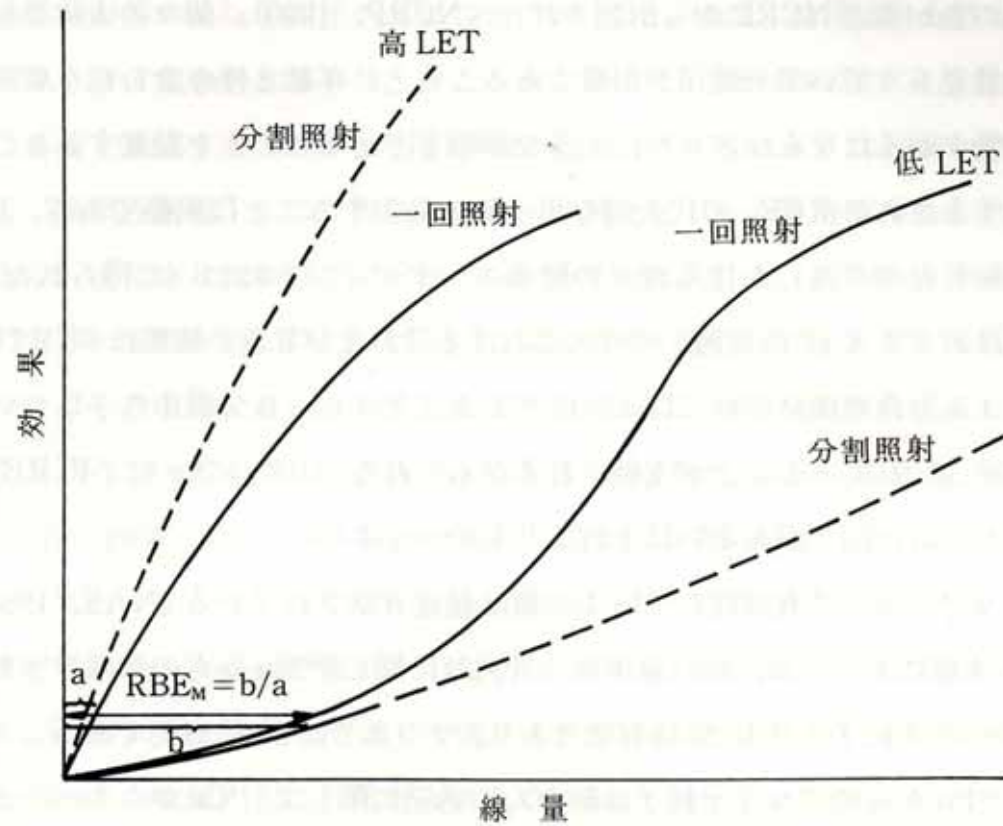
²⁾ 他の放射線に対する数値の選択については、付属書Aの中で論じられている。

³⁾ DNAに結合した原子から放出されるオージェ電子を除く(26項参照)。

補3 ICRP1990(Publication-60)

- (B63) 中性子線のような透過性高LET放射線とアルファ粒子のような組織内の短飛程高LET放射線は、低LET放射線よりも一般に単位吸収あたりの損傷が大きい。…確率的影響については、高LET放射線のRBEはやはり線量反応関係の形によって決定される線量レベルの関数である。これらの反応曲線は直線座標にプロットした図B-6に示すように、低LET放射線の一回線量については典型的には上向きに凹であり、高LET放射線の一回線量については下向きに凹である(Sinclair, 1982)。対照的に、低LET放射線において効果が低くなることがよく知られている分割照射(あるいは低線量率の線量)は、高LET放射線についてはしばしば一回線量と同等あるいはそれ以上に有効である。明らかにRBE(図B-6では b/a)は線量が低下すると増大し、低LET放射線でも高LET放射線でも線量反応曲線がともに直線になる低線量においては RBE_M (ICRR-ICRU, 1963)という一定値に達する。
- (B64) ある場合には、高LET放射線(とくに核分裂中性子)は低線量率および/あるいは分割によって、最初から有効性が増大することが示されている。すなわち、高線量率よりも低線量率で最初の勾配がもっと急である。これは”逆線量率効果”と名付けられた。有効性の増加は通常は小さい(1.5-2.5倍)が、インビトロのいくつかの例ではきわめて大きくなりうる。…

補3 ICRP1990(Publication-60)



図B-6 直線座標にプロットした、低LET放射線ならびに高LET放射線に対する線量反応の形 (Sinclair, 1982)

補3 ICRP1990(Publication-60)

- (B65) RBE_M の値は異なる確率的影響のエンドポイントごとに変わるので、非常に低い線量での実験的情報から決定されなければならない。例として、核分裂中性子体低線量率ガンマ線の RBE_M の値が表B-3に示されている。…個々の実験腫瘍モデルはそれ自体の特殊性をもって一般化が困難であること、年齢と性とを含む宿主要因が放射線に被ばくした動物ががんになるかどうか大きな影響を与えることを勘案すると、線質係数を導くのに利用するための RBE_M の代表的な単一値を勧告することは困難である。しかし、核分裂中性子を照射したマウスにおける種々の腫瘍エンドポイントについて得られた ^{60}Co ガンマ線に対する値はおよそ8-50の範囲、マウスにおける肺および乳腺の腫瘍については19-70、主として腫瘍による寿命短縮については15-45であることから、核分裂中性子についての RBE_M の範囲はおよそ30-50であることが支持されるかもしれない。アルファ粒子の RBE_M 値は核分裂中性子のそれとほぼ同じかあるいはそれよりもやや小さい。

表B-3 確率的エンドポイントについての核分裂（あるいは最適エネルギーの¹⁾）
中性子のガンマ線に対する RBE_M (ICRU, 1986; Sinclair, 1985)

腫瘍誘発	約3 - 約200 ²⁾
寿命短縮（腫瘍による）	15 - 45
形質転換	35 - 70
細胞遺伝学的研究	40 - 50
哺乳動物における遺伝学的エンドポイント	10 - 45

¹⁾ “最適エネルギー”とは生物学的に最も有効なエネルギーのことである。

²⁾ これらの値はのちに15-約60に変えられた (NCRP, 1990)。

補3 2つの荷重係数のよりどころは何か？

- **放射線荷重係数 w_R** のよりどころ：疫学データなし

「広島原爆の障害のほうが長崎の障害よりもひどい。この相違の主因は、広島原爆放射線は速中性子と γ 線をほぼ1:1 (組織線量単位で) 含んでいたが、長崎原爆放射線は γ 線が主であったためである (『分子放射線生物学』近藤宗平、1972)。

しかし線量の見直しがあり (T45DからDS86) 広島原爆の速中性子線線量は10分の1に下がった。

アルファについてもICRP1990は動物・細胞実験のみを引用(?!).

- **組織荷重係数 w_T** のよりどころ：広島と長崎のデータ：低LET放射線による1回の外部被曝についてのデータ(?!).