伊方原発広島裁判
広島市中区定期ミニ学習会

第１３回

低線量被曝影響ーそのモデル
ECRR2010年勧告第９章をもとに

日時：2017年2月16日（木曜日）19:00～21:00
場所：まちづくり市民交流プラザ 北棟5階 研修室B

報告者：哲野イサク（原告）
Webジャーナリスト

1

１．電離放射線の危険（被曝の危険）への理解が基本

電離放射線の危険（被曝の危険）への理解は

- ☆ 反核兵器運動（核のあらゆる軍事利用に反対する運動）の基本
- ☆ 反原発運動（核のあらゆる産業的・商業的利用、時には医療利用にも反対する運動）の基本

↓

- **それは本質的には、市民社会の生存権保全運動エネルギー問題ではない。**

2

2．（おさらい）被曝損傷の結果

電離放射線による被曝損傷（高線量であろうと低線量であろうと）の結果は大きく括れば次の２点になる。

1. 全ての生物に有限の寿命をもたらす。（いいかえると老化の促進）
   （ほ乳類の種の寿命が放射線への抵抗力に比例していることは1960年代からよく知られている－第9章第5節）
2. 生物種としての遺伝的突然変異を起こす確率を増加させる。

↓

いずれも健康上の決定因子

3

3．ECRR2010年勧告第９章

第９章の表題は「低線量被曝時の健康影響の検証：メカニズムとモデル」である。

1. この章は、低線量被曝（おおむね１００mSv以下の被曝を指す）で体の中で何が起こるのかを説明している。
2. ICRPの単純で機械的な被曝モデルと対比しながら進むので、逆にICRP学説の欠陥がよくみえてくる章でもある
3. これまでは、バイスタンダー効果、ゲノムの不安定性など主としてメカニズム（仕組み）を見てきたが、以降は被曝影響のモデルを見ていくことにする

4

4．２ヒット・キネティクス　①

キネティクス（Kinetics）は一般に速度論と訳される。あるいは「反応の起こる機構」と理解しても良い。２ヒットは２回被曝のこと。つまり２回被曝の時、体の中で何が起こるのかを理解する言葉が２ヒット・キネティクス。

☆中線量から高線量の外部被曝では､ヒットはおおむね１回であり、被曝と影響（応答）の関係は、図のような曲線を描くことが、培養細胞、動物、ヒトの集団に関する研究（LSS研究など）などによって知られている。

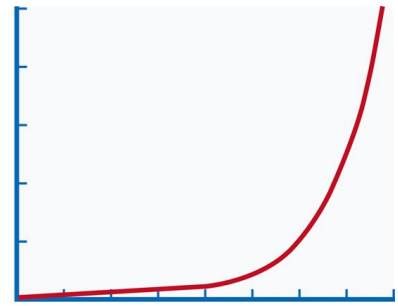


図 9.1　線形２次線量応答関係

5

5．２ヒット・キネティクス　②

☆低線量の内部被曝では、前頁図のような応答関係は生じないケースが多い。

『内部被曝に関係するいくつかの状況の下では、低線量２ヒットはまれではない。』

↓

なぜまれではないのか？

↓

体の内部で核崩壊し、２ヒット以上の被曝影響を与える核種が多いからだ。

6

6．３つのタイプの基本形①

☆このような２ヒットをもたらす高い確率をもつ内部被曝には３つのタイプの核種基本形があるという。

①ストロンチウム90（Sr-90）／イットリウム90（Y-90）、テルル132（Te-132）／ヨウ素132（I-132）のような不動の（核壊変）系列放射体。

Sr-90は、ベータ線を放出してイットリウム-90(^{90}Y、2.67日)となり、イットリウム-90もベータ崩壊してジルコニウム-90(^{90}Zr)となる。イットリウム-90は、核分裂直後はほとんど存在しないが、時間の経過とともに量が増す。１ヶ月後には放射平衡が成立して、ストロンチウム-90とイットリウム-90の放射能強度は等しくなる。イットリウム-90は、高エネルギーのベータ線(228万電子ボルト)を放出する。このベータ線は水中で10㎜まで届き、ストロンチウム-90はベータ線を放出する放射能としては健康影響が大きい。

このような核種を体内に取り込むと確実に２ヒット被曝を受ける

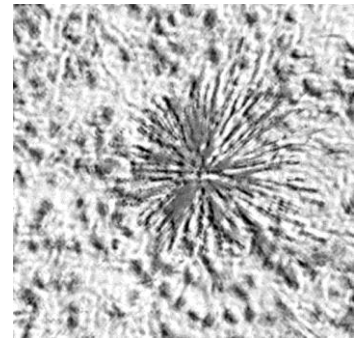
7

6．３つのタイプの基本形②

②不動の、非溶解性（水に溶けない）「ホットパーティクル」。すなわちウランやプルトニウムの酸化物。およびSPE（二次光電効果）をもつDNAと結びついた重元素。

これは多くの説明を要しないだろう。わずかなホットパーティクルが体内に入り、臓器や器官（すなわち細胞に）付着すると、なかなか体外に排出されない。２ヒットどころか、寿命が終わるまでほぼ無限にヒットされる。

　そればかりではない。こうした重元素がもつ二次光電子効果によって外部からの自然の放射線の吸収力は格段にあがる。（またはZ4効果）

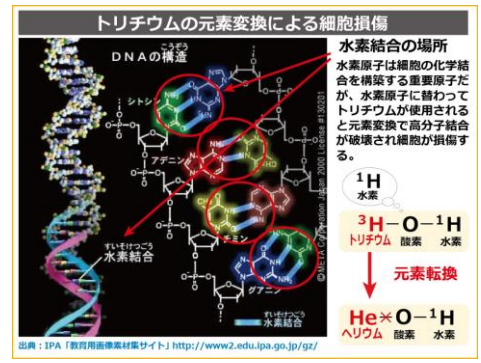


8

6．３つのタイプの基本形③

③極めて低いエネルギーのベータ線放射体。たとえばトリチウム（三重水素）は単位線量あたり多くの放射線飛跡を生ずる。従って２ヒット以上の可能性が大きい。

トリチウムについては、単位線量あたり多くの放射線飛跡を生ずる（２ヒット被曝）可能性が大きいという問題以外に、水素の同位体であるという性質のため、細胞内の重要小器官（たとえば、DNAやミトコンドリアなど）を構成する原子となった場合、細胞が内部から傷つけられることになる問題（内部被曝中の内部被曝）、さらにはトリチウムが分子結合を担った場合、トリチウムが核壊変しヘリウムの同位体になった場合、細胞を構成する分子結合が壊れ、細胞が破壊される問題、などがある。



9

6．３つのタイプの基本形　まとめ

外部被曝と内部被曝が決定的に違うところは、放射性物質を体の中に抱え込んでしまうところにある。つまり放射性物質から逃げられない、という点にある。このことから、例えば、体の中で核崩壊が２回も３回も発生したり（二次イベント効果）や自然の放射線から出てくるガンマ線の吸収率があがったり（二次光電効果）、極めて危険な状況になる。

『ICRP2007年勧告の基準では、なんの調査研究の裏付けもなく、二次イベントの効果を軽視している。』（同88頁）

10

7．ペトカウ効果①

“ペトカウ効果は放射線被曝に関する「線形効果」（線形しきい値なし理論のこと）推定に対する早い時期における一つの反証である。カナダのマニトバにあるカナダ原子力公社のホワイトシェル核研究機構（Whiteshell Nuclear Research Establishment－日本ではホワイトシェル研究所と呼ばれている）でアブラハム・ペトカウ博士（Dr. Abram Petkau）が発見し、１９７２年３月号の「保健物理学」（Health Physics）で発表した。“

“ペトカウは通常の方法で、ある特定の細胞膜が破裂する被曝線量を計測していた。（ペトカウは２時間３０分で３５００ラドの放射線を与えると細胞膜が破裂することを発見していた。換算する１時間あたり15.5シーベルトという線量率になる。）それでほとんど偶然に、大幅に低い線量の放射線を与えるやりかたでもう一度試してみた。そして１１時間３０分にわたって0.7ラドを与え続けると細胞膜が破壊されることを発見したのである。“（英語ウィキペディアの記述）

（線量率に換算すると0.61ミリシーベルトになる）

（15.5シーベルトで２時間半被曝させると合計線量は38.75シーベルトになる。一方0.61シーベルトで１１時間半被曝させると合計線量は7.015シーベルトになる。ここからペトカウは、一度の高い被曝量より長時間のより低い被曝量の方が、細胞膜に対する損傷は大きいと云う結論を導き出した。）

11

7．ペトカウ効果②

『彼（ペトカウ博士）はこれらの体系（線量－応答関係の体系）の「線量応答曲線」が、現在では超線形（supra-linier）と呼ばれる形であることを実証した。』（同88-89頁）

- この図は、中・高線量の外部被曝による曲線（前出：図９．１）と対照的な形をなしている。すなわち比較的低線量の内部被曝では、被曝線量が小さくなるに従って応答は大きくなり、より高線量になるに従って、影響は逓減している。

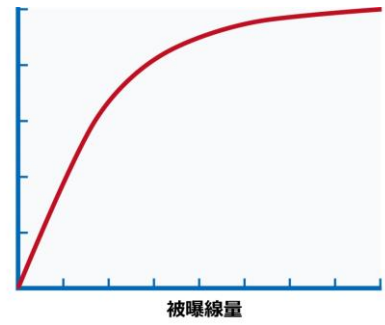


図 9.2 ペトカウの超線形線量応答
（ゲノム不安定性のバイスタンダー効果による染色体の損傷率はこのタイプの応答に従う）

12

7．ペトカウ効果③

この現象にはどのような説明があたえられるのであろうか？

『高濃度のラジカル種（ペトカウの実験の場合は過酸化水素種）が再結合する結果である。そのような系に対するレート方程式を積分すると、次のような形の線量応答が得られる。　（応答）^{2}＝（線量）』

つまり応答の２乗に線量は等しいことになる。逆に言うと線量は応答の平方根に等しいことになる。線量が下がれば下がるほど応答は大きくなるということでもある。**ICRPのいうLNT仮説は低線量に行けば行くほどあてはまらなくなる**、ということでもある。

13

8．ペトカウ効果の重要性

☆ICRPは「ペトカウ効果」は生じない、としている。ペトカウ応答に従えば、「低線量で長時間（長期間）被曝する方が、短時間で高線量被曝するよりも細胞の損傷は大きい」ということになるのだが、**ICRPの議論は全く逆で、「同じ線量ならば、短時間で被曝する方が、長時間（長期間）で被曝するよりも人体に対する健康影響は大きい」**としている。これを「線量・線量率効果」（DDRE）と呼んでいる。さらに、議論は進んで、「それでは短時間に被曝するのと長時間で被曝するのとではどのくらい損傷の差があるだろうか」という話になり、その差を係数で表現している。これを「線量・線量率係数」（DDREF）とICRPは呼んでいる。ICRPは２００７年勧告でDDREFを「２」とした。**ところが、線量・線量率効果そのものは仮説に過ぎない。**

14

9．ブルラコバ応答（２相応答）

『ブルラコバは、数多くの異なる培養細胞実験系が、低レベルの放射線照射に対して、２相的（biphasic）応答を示すことを多くの研究において示している。その効果は線量ゼロの点からある最大値まで増加するが、さらに線量が増加すると今度はある最小値まで低下する。この点からさらに線量を増加させると、２度目の効果の上昇が引き起こされる。

☆この現象について、ブルラコバは「ペトカウ効果」と「誘導細胞修復」の２つの現象が合わさったものだと考えた。基本的には、ペトカウ効果が働いているが、初期の被曝後には細胞修復機能が働いて、応答（損傷）が低下する、しかし細胞修復を上回る線量を被曝するにつれ、ペトカウ効果が優勢になるとした。

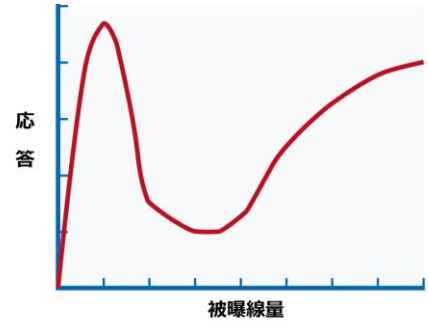


図 9.3 ブルラコバとバスビーの２相的線量応答
（両者の理由は異なる）

15

＜参考＞エレーナ・ブルラコバ

エレーナ・ブルラコバ（Elena Borisovna Burlakova）は、１９３４年生まれのロシアの化学物理および生化学物理学の学者・研究者である。ロシア科学アカデミー、放射線生物学科学審議会の有力会員でもある。もともとフリーラジカルやキネティクスの研究をしていたが、１９８６年のチェルノブイリ原発事故後は、低線量電離放射線の人体や自然界への影響研究に入っていく。

こうした中で低線量被曝の生物への影響についてそれまで知られていなかった事実を発見していく。

（以上「CHEMISTRY & CHEMICAL TECHNOLOGY」誌　２０１０年第４号第２報「PROFESSOR ELENA BURLAKOVA.MORE THAN HALF A CENTURY IN SCIENCE」<http://lp.edu.ua/fileadmin/ICCT/journal/Vol.4/Num.2/14.pdf>による）

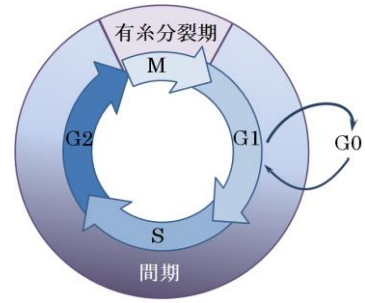
写真は、ロシアの生化学物理学者、エレーナ・ブルラコバ（Elena Borisovna Burlakova）。「CHEMISTRY & CHEMICAL TECHNOLOGY」誌　２０１０年第４号第２報「PROFESSOR ELENA BURLAKOVA.MORE THAN HALF A CENTURY IN SCIENCE」の記事より引用。

16

１０．細胞集団感受性の差異

『（昔からよく知られていたことであるが）急速に複製している細胞は放射線損傷に対してより感受性が高い』（同90頁）

☆この原理は放射線や化学療法によるがん治療に使われている。がん細胞が激しく複製しているところへ放射線あるいはがん治療剤を投入すると、複製中で感受性の高いがん細胞が優先的に破壊される。優先的にというのは、正常な細胞組織はほとんどの場合非複製モードにあり、複製中のがん細胞の破壊が優先されるという意味。



図は「細胞周期」。「M」の段階で細胞は分裂する。「G」の段階では分裂も複製もおこなわれない。「S」の段階が「複製」。この時細胞は放射線感受性が高くなる。（日本語ウィキペディア「細胞周期」から引用）

17

１１．集団内部と個体の感受性

第９章の後半は、直線的ですべての要素を物理量に還元し、内部被曝による放射線損傷と外部被曝のそれとを質的に同じものと見なし、細胞レベルで発生していることをほぼ無視し、高線量外部被曝で当てはまる線量応答関係をそのまま機械的に低線量内部被曝に外挿し、「低線量被曝は健康に害があるという科学的根拠はない」と宣言するICRPの学説に対して、主として低線量内部被曝の健康損傷の要因を具体的に見てきた。

ここでは、低線量内部被曝の実態を、さまざまな「集団」や個体の間で発生している放射線感受性の「差」という観点から見ていこうとする。

年齢差で放射線感受性が大きく違うことは、よく知られているし、ICRP学説でも程度の差こそあれ、これをしぶしぶ認めている。

☆しかし集団や個人の放射線感受性の差はこればかりではない。第９章は次のカテゴリーの違いを挙げている。

・人種（これは自然人類学的に言う人種という意味）

・集団 ・年齢 ・性別 ・生理学的差異 など。

これらは全て、放射線感受性について差異があるというデータが存在しているという。

18

１１．集団内部と個体の感受性②

性別による放射線感受性の違いの例

表９．３ 性別による放射線感受性の差の例

特　徴	差　異	参考文献
胚芽及び胎児放射線に敏感	男性	Sherb et al. 2001
トータルがん死亡率	チェルノブイリ汚染地域では女性の方が高い	Antipkin, 2001
白血病死亡率	女性が２倍高い	Wing et al., 1991
全てのがん罹患率	チェルノブイリ汚染地域で５歳以上の少女に（同年齢の少年に比べて）多い チェルノブイリ汚染地域で 0-4 歳の少年に（同年齢の少女に比べて）多い	Suslin 2001
骨及び軟骨のがん	チェルノブイリ汚染地域で５歳以上の少女に（同年齢の少年に比べて）多い 少女（全平均）に比べて少年に６倍多い	Suslin 2001
リンパ肉腫	チェルノブイリ汚染地域で 10 万人当たり 男性 21、女性７（３倍男性が多い）	Health consequences, 1995
単球性白血病	チェルノブイリ汚染地域で 10 万人当たり 男性 3.47±0.74、女性 1.77±0.42（２倍男性が多い）	Health consequences, 1995
皮膚がん	旧ソ連邦の 19 の地方において、10 万人当たり男性 21.6（3.2 ～ 36.0）、女性 16.7（1.1 ～ 29.0）	Suslin 2001
セシウム 90（Cs-90）の生物学的半減期	平均 男性 110 日、女性 80 日	Mel’ nov 2001
新生児男女比	強度の X 線を受けた場合２世代目に女子の新生児が多い	Golovachev 1983

19

１１．集団内部と個体の感受性③

ほ乳類の性別による放射線感受性の違いの例

表９．４ 哺乳類のいくつかの種における
オスとメスの放射線感受性の違い

種	差　異	参考文献
ラット	セシウム 137（Cs-137）の蓄積がメスがオスに比べて３倍高い	Bandashevsky 2001
マウス	カリフォルニウム 252（Ca-252）の放射線照射の後、放射線による肝臓ガンがメスの方が 10 倍高い	Ito 1999
ツンドラハタネズミ	骨髄と上皮細胞の放射線感度はオスの方が高い	Zainullin 1998
ヤギ、キヌゲネズミ他いくつかの種	オスとメスで異なっている	Majeikite 1978
ハタネズミ キヌゲネズミ	放射能汚染地域での繁殖期メスはセシウム 137（Cs-137）を２倍蓄積する	Il’ enko and Krapivko 1989
ハタネズミ キハタネズミ	メスの骨にストロンチウム 90（Sr-90）を多く蓄積	Il’ enko and Krapivko 1989
ノウサギ ヤブノウサギ	メスの骨にヨウ素 131（I-131）を多く蓄積	Il’ enko and Krapivko 1989

『まず受胎の初期の個体の発達のそれぞれの段階で放射線感受性は異なっている。子ども、青年、成人、壮年、老人の放射線感受性もそれぞれ異なっている。成人では４５歳以上で放射線感受性が高くなることさえある。』（同93頁）

20

１１．集団内部と個体の感受性④

一般に老人は放射線感受性が低いとされる。しかし、これは放射線に対して抵抗力があるという意味ではない。老人は感受性が低いかも知れないが、放射線耐性はさらに弱い。だから「老人だから大丈夫だ」との理解は誤りであろう。（私個人は、２０１２年に入って高齢者の突然死－もともと弱い心臓が突然その機能を停止する－が全国的に拡大している現象をフクシマ放射能危機による低レベル内部被曝の影響、特にセシウム137の影響ではないか、と疑っている。）

中でも胎児はとりわけ放射線感受性が高い。レントゲン照射の胎児に対する広汎な疫学調査をしたイギリスのアリス・スチュワートらの研究によると、胎児の「がん」に対するリスクは大人の１０００倍と解釈されている。また女性の場合、内部被曝と外部被曝では、流産の危険は、内部被曝が外部被曝の４倍に上る、という研究がある。（Focic et al. 2008）

21

１２．小さなまとめ

『放射線感受性の、ある集団の差異は、実際に放射線治療の患者に見られている。…放射線被曝許容値（例えば公衆の被曝線量年間1mSv、といったような）を標準的な「ヒト」を基礎にするのではなく、放射線感受性のある人（すなわち放射線弱者）が守られるようなレベルに設定することを要求する。』

（ちなみにECRRは公衆被曝線量年間0.1mSvを提案している）

実際に公衆の被曝線量の許容値は、放射線弱者を標準に決定すべきだと考える ➡ 年間１mSvは高すぎる。

（以下次回）

22