

## 放射線加重係数について

まず、お尋ねの内容となっている「放射線加重係数について、おかしい点」の方が非常に重要と考えます。

被曝を科学する時に科学を科学たらしめる「科学の柱」があります。

- ① 因果律を貫く：刺激があつて反応がある、そして結果がもたらされる、というプロセスを貫く。
- ② そのメカニズムを具体的に把握することが科学である、
- ③ その他その他。

放射線加重係数は科学の柱を破壊しているのです。

(1) 放射線加重係数はまず①の因果律を否定する体系となっています。入力があつて、反応が生じ、そして結果（出力）が出る、ということを科学の基本法則：因果律としておりますが、放射線加重係数は被害（出力）が大きいことは吸収線量（入力）が大きいことだ、という扱いをしており、入力を放射線加重係数倍します。科学的因果律の記述を破壊しております。

(2) 放射線加重係数の設定で第2の重大な科学破壊の作用は②の課題「具体的探求」です。

出力が大きいことを入力大きいことだとする乱暴な因果律の破壊は、電離の具体的状況とかその修復の困難さがどこから来るのか？などの具体的科学プロセスを封じ込めます。具体的プロセスを機械的な数値に置き換えて、ブラックボックスに閉じ込めてしまうことです。

(3) ICRPは他の科学を破壊する因子と共に何故出力が大きいのか等々という科学の探求のプロセスをシステムの的に閉じてしまうという重大な作用をICRP利用者に押しつけていることです。吸収線量の代わりに照射線量で代用する、吸収線量の計測単位を臓器/組織毎にする、内部被曝も外部被曝もリスクは等しいとする、等々と共に内部被曝の危険性を見えなくし、メカニズムの探求プロセスを除外することです。

(4) 機械的な数値に置き換えて反応プロセスを考えないで済むことは、医療現場や作業現場には好都合かもしれませんが、「防護側に倒す」という名目で、かつ生物学的危険度を放射線加重係数倍すれば線量が求められるわけですから便利です。

しかしそれを科学に適用した途端にそのプロセスは科学ではなくなるのです。

次に「内部被曝と外分被曝について」ですが、

矢ヶ崎克馬著

(仮題) 被曝被害から市民は守られて来たか？

福島—ICRP と科学の目 (緑風出版) (予定)

で多面的な被曝問題を扱っていますが、その中の一部で外部被曝と内部被曝を取り扱っております。

ピックアップしてご紹介します。

### 内部被曝と外部被ばく

1. 外部被ばくとは身体の外から放射線が飛来して被曝することである。内部被曝とは体内に入った放射性原子から放射線が発射され、体の内部から出た放射線により被曝することである。
2. アルファ線、ベータ線は飛程が短いことにより外部被ばくはガンマ線による被曝と近似できる。内部被曝は全ての線種が被曝に関与する。
3. 空気中の飛程と体内での飛程は、それぞれ、アルファ線で 45mm、40  $\mu$ m、ベータ線 1m、5 mm である。ガンマ線の半価層 (強度が半分に落ちる距離) はそれぞれ 100m、10 cm ほどである。
4. ガンマ線の被曝は、光電効果およびコンプトン効果を生じた結果、はじき出された高速電子が電離作用を行う。ガンマ線が入射した端から電離が始まるのではなく、ある程度進んだところで光電効果あるいはコンプトン効果が生じるので、電離は全身を対象に行われる。
5. ベータ線が原子核内の中性子から発射されるとき反ニュートリノを伴う。その際エネルギーを分かち合うので、ベータ線のエネルギーは最高エネルギー以下連続スペクトルを成す。強度が最高になるエネルギーは最高エネルギーの約 3 分の 1 である。
6. アルファ線はヘリウムの原子核であり、出会う全ての原子を電離させる。
7. アルファ線とベータ線は発射されたポイントから連続的に電離する。電離密度は発射地点から高密度である。しかし飛程以上の距離にある細胞には電離を与えない。したがってこれらは臓器単位での吸収線量の計算をするならば、圧倒的に多数である被曝していない細胞を「被曝している」として計算することになるので大変な過小評価となる。これに対してガンマ線の被曝は高速電子を発射する場所自体が臓器全体あるいは全身に分散するので、臓器単位での吸収線量計算が良い推定方法となる。臓器単位はアルファ線、ベータ線に対しては極めて不良な方法とな

る。

8. 人工の放射性物質は化学的親和性により臓器に蓄積される。自然放射能カリウム 40 などとまったく異なる性質であり、人工放射性物質による内部被曝の危険性の本質である。
9. 人工による放射性物質は多くの場合微粒子を形成する。水溶性微粒子は体内に入り、血液やリンパ液などの液体に出会うと溶けて、一つひとつのイオンに分解する。不溶性微粒子は、 $1\mu\text{m}$  以下の程度の大きさの微粒子は細胞膜を通過し、全身に運ばれる。それ以上の大きさの微粒子は体内の一定の場所に留まり、その周辺に集中的電離を与える。不溶性微粒子は内部被曝に対して大きなリスクを与える。
10. ホールボディカウンター（WBC）はガンマ線を測って内部被曝を確認する。計測するガンマ線は身体に何も作用せずに素通りしたものである。体に電離作用を及ぼしたガンマ線は WBC のバックグラウンドの連続スペクトル強度を増加するなどの現れ方であり計測できない。計測したガンマ線強度を持って内部被曝とする従来の計算方法は誤りである。
11. 放射線の健康影響のメカニズムとしてカリウムチャンネルの機能破壊を考慮する必要がある。

## § 2 内部被ばくと外部被ばくはどのように違うか？

### －分子切断の局所的集中性と時間的継続性の違い－

すでにカリウム 40 の分子切断と生命体の修復処理能力を説いた。カリウム 40 の電離・分子切断は全身に分布し薄く広く分布するので体内免疫力の働き方も対処しやすく、人工放射能による被害の現れ方はもっぱら免疫力が十分であるかあるいはそうでないかによることを物理的な側面から説いた。

ここでは人工放射線の被ばくに関して外部被ばくと内部被ばく、各線種による電離作用の空間的・時間的異同を説く。

#### (1) 内部被ばくの実態

##### (1) 不溶性微粒子

原爆で作られ出した放射性原子はセシウム 137、ストロンチウム 90、その他たくさんの原子の種類がある。原爆の材料となったウラン 235 やプルトニウム 239 で核分裂しなかった部分も放射性原子である。いったん超高温になってから冷えていく過程で、放射性原子は他の原子と混じって「放射性微粒子」となる。

放射性微粒子は水に溶ける（可溶性）微粒子と水に溶けない（不溶性）微粒子に分かれる。

不溶性微粒子は体内に入ると 1 か所に留まる。周囲の非常に狭い範囲に DN

Aを損傷するなど、多大な被害を与える。反面、一定サイズ以下の不溶性微粒子は、水溶性微粒子と同様に細胞膜を通過し、血液やリンパ液に乗って体中を循環することとなる。これが発がんその他の病の元になる。

体中の一か所に留まる例としては、長崎で亡くなった被爆者の腎臓から不溶性微粒子によるアルファ線の発射が確認された。広島では黒い雨を経験した女性の方の肺がん組織内でウランがアルファ線を放出している画像が確認された。いずれもラジオオートグラフィーという方法で、ウランあるいはプルトニウムから発射されるアルファ線を捉えている。一つの不溶性の放射性微粒子から発射されたことがよく分かる写真であった。ベータ線はアルファ線に比して半減期がずいぶん短いので撮影した時点では減衰しきっていて観察できなかった。

#### ① アルファ線

アルファ線による内臓の被ばくは外部被ばくではありえない。

不溶性微粒子の周囲、半径  $40\mu\text{m}$  程度の範囲にすべての電離が集中し、時間とともに蓄積し非常に高い電離（分子切断）密度を与える。

ICRPは吸収線量の測定単位を臓器ごととする。アルファ線の電離の実態は臓器ごとの算定では全く事実をとらえることはできない。電離作用の範囲が  $40\mu\text{m}$  に限定されるので臓器全体に分散することなく、高密度の電離が局所に集中する。この物理的実体を率直に反映する評価方法が求められるにも拘らずICRPは「臓器ごと」にこだわり、局所的危険を見ようとしない。内部被曝を評価させない評価方法なのである。

#### ② ベータ線

アルファ線同様、ベータ線も放射された瞬間から連続的に電離を行い、すべての電離が最大飛程を半径する球内に集中する。放射線数は時間とともに数が増え電離は蓄積する。すべての電離はこの球内で行われ、球内の吸収線量は時間とともに増大する。

ベータ線が発射され、毎秒1本のベータ線（1ベクレル）を出すとする。セシウム137の場合ベータ線は体内では2mm以上には飛ばない（2mmにすべてのエネルギーを注ぎ込む）。放射線はあらゆる方向に飛ぶからその微粒子中心に半径2mmの球を描けば、すべての電離はその球内で行われる。その球内には約100万個の細胞があり、細胞が傷つけられる。周囲の細胞にバイスタンダー効果が生じるが、それ以上の遠いところの細胞は傷つけない。

1年間でどれほどの吸収線量とその球に与えられるかというところ80ミリグレイ（グレイ：吸収線量の単位、ミリは1000分の1のこと）となる。たった1年でこれだけの量となる。10年、20年、70年と経過すると、とても大きな吸収線量となる。不溶性微粒子をたった1発だけでも体内に蓄えてし

まえば、健康被害を想定せざるを得ない。

これを臓器ごとに算定するというICRP方式をとれば、電離作用を受けない圧倒的な数の細胞と一緒にたにして平均をとることになる。上記のセシウム137の場合、実際に電離を受ける部分（半径2mm球）の質量と臓器の質量（200g程度を想定）の比率：およそ5000分の1の吸収線量の過小評価となり、数値上危険がまったく排除される。

ベータ線の電離の実態は臓器ごとの算定では全く事実をとらえることはできない。

### ③ ガンマ線

発射されてすぐ光電効果やコンプトン効果を生ずるのではなくしばらく走って作用する。光電効果では1回の原子との衝突でガンマ線は消滅し高速電子（2次電子）が生じる。コンプトン効果ではガンマ線は何回にもわたり原子と衝突し徐々にエネルギーを失う。ガンマ線自体は1本について電離を1回ないし数回行う。多くの電離は2次電子による。体には何の作用もせず体外に抜けるガンマ線もある。体の半価層が10cm程度とすれば体表面から10cm深くから発射されたガンマ線の半数は身体には何の作用もせずそのまま体外に出る。

ガンマ線が打ち出す高速電子の発射点は体中に分散し、分散状況はカリウムの被ばくと同タイプである。すなわち体中に薄く分散し、臓器ごとの吸収線量算定でほぼ近似できる唯一の放射線である。これは外部被ばく内部被ばくを問わずガンマ線には共通の特性である。

放射性微粒子からの放射線(体内)

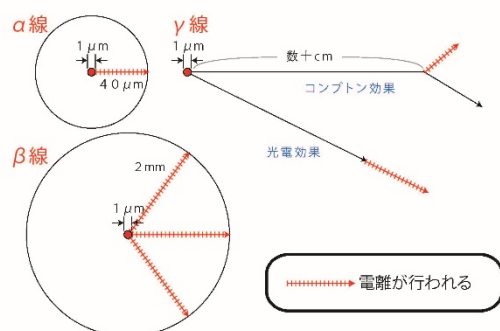


図1 不溶性微粒子から発射されるアルファ線、ベータ線、ガンマ線。ガンマ線では電磁波の飛んでいくのは黒線で表す。電磁波のままでは電離は行わない。高速電子をはじき出しその高速電子が電離を行う

### (2 水溶性)

水溶性の場合は血液やリンパ液に溶けて原子が1個1個バラバラの状態になって体中を回る。この被ばくの様子もカリウムによる電離の様子に似ており、臓器ごとの吸収線量算定で近似できる。

ただし、人工の放射性原子は人体の特定の臓器・器官に親和性があり、それらの臓器に取り込まれた場合は脱出するまでに長時間を要し、不溶性微粒子と同様

な効果を持つ。

それに対し自然の放射性物質では、膨大な量が存在する海水中のウランの場合もウラン原子が集合する状態ではなく、ウラン原子自体は単一イオンのまま孤立している。しかし、劣化ウラン弾によるエアロゾールは高温になり酸化したウランが微粒子を形成している。高温で燃焼した場合は必ず多数のウラン酸化分子を含む微粒子となる。この存在形態の違いがリスクの違いを生む。

### (3 ガンマ線とベータ線の違い)

以上、個別に放射線ごとに特性を説いてきた。ガンマ線はベータ線と全く同じであるという俗論があるが誤りである。

ガンマ線は光電効果あるいはコンプトン効果により高速電子を作り出して、電離をその場限りで行い、カリウムによる被曝同様体全体に分散する電離状態を作る。

それに対しアルファ線あるいはベータ線による内部被ばくは体内に留まり、一か所に停留するか体内を循環する。一定サイズ以上の不溶性微粒子の場合は特定の局所に被ばくを集中させる。水溶性微粒子は微粒子が分解され放射性原子(イオン)となり体内を巡り歩き、また一定サイズ以下の不溶性微粒子も体内を巡り歩き、特定の臓器に親和性を持つ場合が多い。特定の臓器に親和した場合はその臓器に集中的に電離を与え、高吸収線量を与えることとなる。

ガンマ線は唯一臓器ごとに計測するというICRP流儀によって近似できるのであるが、アルファ線、ベータ線は局所被ばくに特徴を持ち、ICRP流儀に従えばリスクに対して桁違いの過小評価をすることになる。

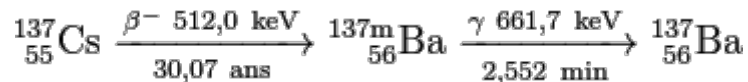
内部被ばくは、現実の被曝領域には大きな局所吸収線量を与えるが、ICRP流の臓器ごとの評価では桁違いの過小評価をすることとなる。

## §3 電離を被る局所評価と臓器ごと評価の差

内部被曝の場合は、ガンマ線主役の外部被曝と大きく違って、ベータ線、アルファ線が被害に大きく影響する。特に不溶性微粒子の周囲の被曝は高線量になる。ICRPは吸収線量の測定単位を臓器とし、外部被曝と同等としているが危険を表面に表さない数値か方法である。

そこで臓器毎で平均化単純化をし、臓器ごと線量計算するやり方と現実の被曝線量との差を数量的に具体的に検証する。

セシウム137の場合ベータ線のエネルギーは主たる崩壊で0.512 MeVである。崩壊系列式は



ICRP 1990年勧告に「吸収線量はある一点で規定できる言い方で定義されている」に従って、吸収線量を細胞レベル1点で評価するのと臓器ごとにする評価の違いを、「オーダーエスティメーション」という方法で、近似して、検証する。(注：オーダーエスティメーションは大きさの程度を問題としている。計算の結果やむを得なく出てくる数値にはこだわらない評価方法である。)

セシウムベータ線の飛程(最大飛程)は2mmとし、細胞の直径を10 $\mu$ mとし、1電離のエネルギーを40eVとする。空気の平均電離エネルギー35eVより少し大きくとっている。

標準的計算で、Cs 1本の0.5MeVベータ線はおよそ12、500個の電離を行うことが知られている。2mmの飛程には200個の細胞が関与する。200個の細胞のそれぞれ1個当たりの電離数は、62.5個：約60個になる。電離全てが分子切断を引き起こすと仮定すると、細胞1個当たり60個ほどの分子切断が行われることになる。細胞あたり60個の分子切断は異常DNAを生み出す非常に大きな脅威となる。ICRPも認めるようにがんは単一細胞のDNA異常から出発する。従って、内部被曝では、ベータ線一本の飛程が脅威の基礎単位である。

DNAの2重鎖が切断される確率はベータ線1本でも可能性があるが、同じ細胞に短時間内にベータ放射線が2本通過すると、もっと確率が高くなる。バイスタンダー効果を考慮するとその細胞の近傍を通過するだけで大きな危険性の増大になりうる。内部被曝で不溶性の放射線微粒子が体内に存在する場所ではこの条件が容易に満たされる。

この部分の危険はどう評価したら良いであろうか？

これを評価するには、「電離を受ける部分」での吸収線量を視点を置く必要がある。ICRPの吸収線量定義は臓器単位で行われるから、臓器を腎臓とすると、1本のセシウムのベータ線の吸収線量(Sv)計算は、1本のベータ線のエネルギーを腎臓の質量(0.15kg)で割ることになる。実効線量、全身被曝量で計算するならば、全身質量~60kgで割ることになる。

ところがベータ線は飛程2mmしか被曝に関与せず、あとの全身の細胞は被曝を受けず全く電離の被害を受けない。

単純なモデル計算を試行する。まず電離を受ける細胞が直線的に整列しているとして、被曝を受ける細胞部分の質量はいくらかを計算する。

関与する細胞の質量を、 $\pi(5)^2(\mu\text{m}^2) \times 2(\text{mm}) \times 1.1(\text{g}/\text{cm}^3)$

(断面積×飛程×密度) (身体の密度を $1.1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ とする) の直円柱で近似すると、この電離に関与する細胞の質量は  $0.9 \times 10^{-12} \text{ kg}$ となる。

この質量と臓器質量 ( $0.15 \text{ kg}$ ) の逆比がマイクロな単位の評価と臓器単位の評価の比率である。

ミクロ的に評価した吸収線量は臓器単位での評価より  $10^{12}$ 倍 (1兆倍) 高いものとなる。バイスタンダー効果で被曝の影響が  $50 \mu\text{m}$ ほどに拡大するとしても  $10^{10}$ 倍 (100億倍) となる。

この評価方法はICRP 1990勧告に示された1点で規定できるとされた方法と臓器単位での方法との違いを示したものである。マイクロサイズの評価は被曝した局部を取り出して「吸収線量」という指標で示したものであるが、生命体に備わっている修復能力やアポトーシス (管理・調節された細胞自殺) などとの関わりでリスクを評価しなければならないので、この差のとおり健康被害が現れるわけではない。しかし基礎となる細胞単位でのこの危険度は、臓器単位の評価方法には決して正当に反映されることがない。

人間の身体には自然放射能としてカリウム40の4000ベクレルほどの被曝が常時あり、その電離作用・分子切断作用を修復する能力が人体に備わっている。しかし、この修復能力は年齢、体調など生体条件の具体に大きく影響されるのである。異常部分が一定の量に達するとがんなどの傷害、修復されずに残存したDNA変異が生ずることが知られている。このことは臓器単位で計測したのでは計量に表れない。微小部分の吸収線量評価を行うことによって、修復ミスの高い危険部分が分かるのである