

線量率：わかりきっているようで未解決の問題

(元) 国立がんセンター放射線研究部
放射線影響協会 田ノ岡 宏

個人被ばく線量計ガラスバッジなどの測定値は μSv と積算値で表される。一方サーベイメータなどは $\mu\text{Sv/hr}$ というように線量率が表示されている。現在の放射線防護の考え方では積算値をもとにしてリスクを推定している。しかし放射線の生物効果は積算線量だけでなく線量率にも大きく依存するので、シーベルト単位だけではリスクの大きさが比べられないことになる。原爆の 1Sv と福島環境の 1Sv では意味が全く違う。この線量率の問題は一見わかりきっているようにみえて、実はまだ科学的にも解決されていなく、それが原発事故のあとの社会不安に大きな影響を与えているようにみえる。

図1にひとが遭遇する放射線被ばくの線量率の幅を示した。放射線がんリスクの基礎データとみられている原爆の場合は、被ばく時間を $1\mu\text{sec}$ として10の6乗から10の8乗 Gy/min という超高線量率になる。原爆の被ばく時間についてはいろいろ議論のあるところで、核分裂の時間は $1\mu\text{sec}$ であるけれども、そのあとの散乱や遅れて出る中性子の寄与などを考慮すると 1msec とするのが妥当であろうという考えもある。しかし、発がんの線量率効果は 1Gy/min 以上で飽和に達しているとみられるので、がんリスクを論じるためにはこの差は殆ど問題にならない。一方自然放射線レベルははるかに低く10のマイナス9乗 Gy/min のレベルにある。自然放射線が10倍、100倍になっても、その線量率は原爆の場合とは比べものにならないくらい小さい。それなのに原爆データから得られたがんリスクのデータを殆どそのまま当てはめて、自然レベルに近い放射線の影響を評価しているのが現状である。線量率効果の指標としてICRPはDose and Dose-rate Effectiveness Factor (DDREF)を定義しこの値を2とした(1)。また国連科学委員会や米国科学アカデミーではそれ以下の値を提示している。さらに線量率の補正をしなくてよいという極論もある。しかし、これらはどうみてもおかしいことにすぐ気づく。ICRPがDDREFを求めた方法は、原爆発がんの線量効果曲線を低線量域と高線量域の二つに分け、この各々を低

線量（すなわち被ばく時間が一定であるから低線量率）高線量（高線量率）の二つの勾配の異なる直線からなるとみなし、この勾配の比をとって2としている。ここでは、ICRPは直線しきい値なし(LNT)モデルを用いない。しかもこのDDREFの値は原爆の超高線量率領域にのみあてはまるものである。それを環境レベルの線量率にまでもっていくにはどのようにするのであろうか。環境レベルは原爆線量率の下限からみてもさらに10の10乗分の一低いので、DDREFを2の10乗倍すなわち1000近い値にするのであろうか。これについてICRPは何も答えない。ICRP事務局長のクレメント氏の講演（2013年11月26日東京）でもDDREFの値は1と2の間で議論されているのが現状で、この問題をタスクグループで今後検討するということがあった。

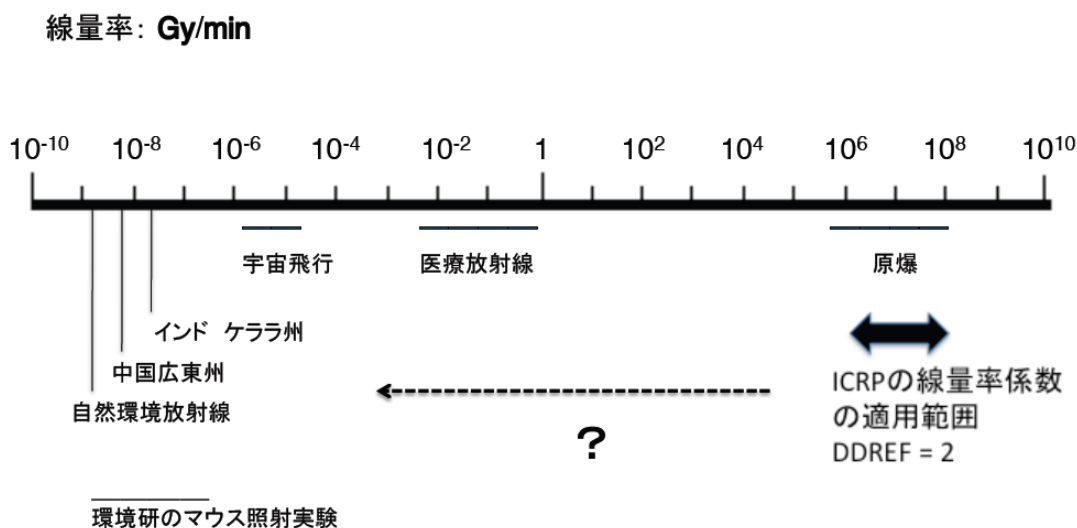
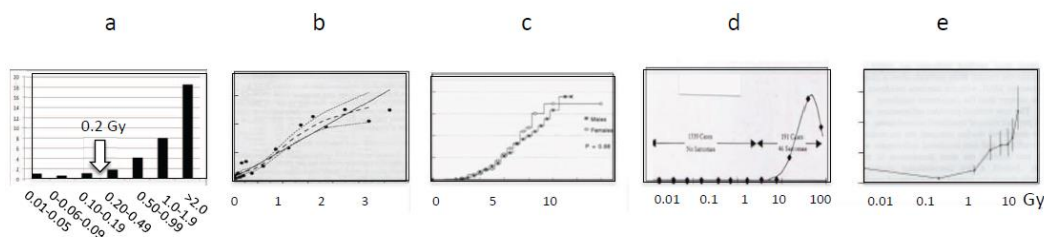


図1. ひとが受ける放射線の線量率の範囲を Gy/min 単位で示した
原爆の線量率は、ここでは被ばく時間を 1 μ sec として計算した

ヒトについてデータを比べてみよう。図2aは原爆白血病で、200mSvを越えてはじめて増加が認められる。白血病は被ばく後もっとも早く高頻度で出現するので一番心配されるが、それでも200mSvまでは増加しない。むしろ低い線量では有意に低くなっている。このもっとも重要なデータがあまりとりあげられない。図2bはICRPが好んで引用する原爆固形がんのデータである。固形がんというと種々のがんを集めたもので、増えているものもあり増えていないものもあり、起源細胞もいろいろである。この図から放射線発がんの線量—効果曲線は直線で、100mSv以下ではがんリスクの存在が検出限界以下であると

説明され、報道関係にもそのような解説がよくみられる。図 2c はアルファ放射性トリウムを含むトロトラスト注入患者の肝がん発生の例で、2Gy を越えてがんが増加しはじめる。図 2d はラジウム塗布作業者の骨肉腫の例で、10Gy という高い線量を越えてはじめて発がんがみられる。最後の図 2e は放射線がん治療の際に患部の周辺の漏洩線量を測定しておき、後に周辺の組織に発生した新しいがん（肉腫）について求めた線量—効果関係で、この場合は 2.5Gy を越えてはじめて発がんが認められる。この調査は昨年亡くなられたフランス医学アカデミーの Tubiana 博士が最後まで執念をこめられたもので 5 千例をさらに 2 万例まで増やす予定であった。これらの図は一見まとめようがないようにみえるが、あとで整理するように、がんリスクは全身被ばくと部分被ばくでは 10 倍、高 LET と低 LET では 10 倍の差があり、リスクは線量率の逆関数として表されることで理解される。



		線量率 (Gy/min)	非発がん線量, D_{nt} (Gy)	
a. 原爆白血病	全身 Low LET	av. 10^8	0.2	Shimizu et al. 1990
b. 原爆固形がん	全身 Low LET	av. 10^8	0.1	Preston et al. 2003
c. トロトラスト肝がん	部分 High LET	1.1×10^{-7}	2	Anderson & Storm 1992
d. ラジウム骨肉腫	部分 High LET	4.9×10^{-7}	10	Rowland et al. 1978
e. 放射線治療後の二次がん	部分 Low LET	0.1 - 1	2.5	Tubiana et al. 2011

図 2. ひとについて得られている放射線全身被ばく、部分被ばく発がんの線量—効果関係。

a. 原爆白血病 (3)。b. 原爆固形がん (4)。c. トロトラスト注入による肝がん (5)。d. ラジウムペインターの骨肉腫 (6)。e. 放射線がん治療後に発生した二次がん (7)。d と e は横軸 log スケール。

実験動物について、白血病誘発率が線量率を下げると激減するのをマウスについて最初に発見したのは Upton ら(1964)であった。この時中性子線では線量率がみられなかったため、高 LET では線量率効果はないものとされてきた。しかし、極低線量率ではラドンアルファ線によるラット肺癌誘発率に線量率効果のあることが Monchaux ら(1994)によって発見された。一般に発がんの線量—効果関係は線量率によって直線に近くなったり、大きく曲がった曲線になったりするので発がん効率は直線の勾配からは決められない。そのかわり、目安として有意な発がんが認められない最高線量を非発がん線量 (Non Tumor Dose, D_{nt}) と定義する(2)。ヒト、実験動物 (マウス、ラット、イヌ) について文献で得られたデータを全身照射、部分照射、さらに低 LET、高 LET に分類し、各々について D_{nt} 値を読み取る。この数値は文献 2 にあるので参照されたい。

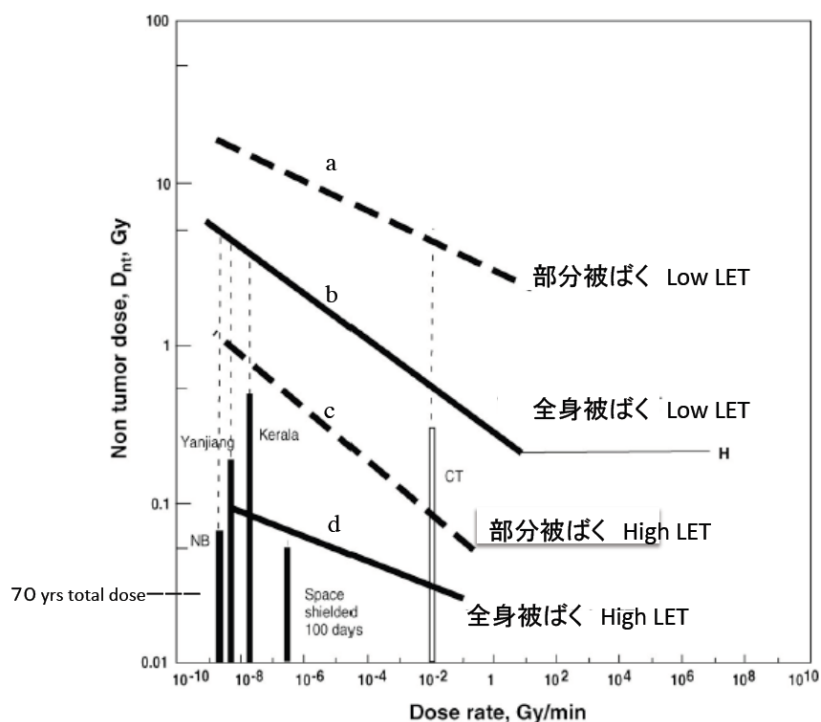


図 3. 線量率と非発がん線量との逆比例関係。

文献 2 で調査した D_{nt} 値の解析から得た回帰直線を示した。

これから求めた近似式は、

- a. $D_{nt} = 2.69Dr^{-0.0857}$
- b. $D_{nt} = 0.258 Dr^{-0.141}$
- c. $D_{nt} = 0.0439Dr^{-0.167}$
- d. $D_{nt} = 0.0207Dr^{-0.0733}$

D_{nt} は非発がん線量 (Gy)、 Dr は線量率 (Gy/min)、適用線量率範囲: $10^{-9} \sim 1$ Gy/min.

各グループについて近似直線を図3に示した。これをみると、まず線量率が1Gy以下では線量率が低くなると、 D_{nt} 値が高くなる。この関係を環境レベルに延長すると低LET全身被ばくでは D_{nt} は5Gyという高い値になる。この値を原爆の D_{nt} 値0.2Gyと比べると25倍の差となる。DDREF=2としても12.5倍になる。これで、原爆データの直訳は、環境レベルの放射線リスクについて過剰見積もりをすることがわかる。

さらに、図3で得られた近似式を実際例に応用してみる。環境科学技術研究所では自然放射線レベルの数十倍、数百倍、さらに数千倍程度（1日、0.05, 1, 20 mGy）の線量率でマウスを連続照射して長期間の観察を続けた。正確には1日22時間、400日全身照射なので、それぞれの線量率は 3.8×10^{-8} , 7.7×10^{-7} , 1.5×10^{-5} Gy/minとなる。それぞれの場合に相当する非発がん線量を、低LET全身被ばくの近似式bから計算すると、約4, 3, 2 Gyが得られ、それぞれの総線量0.02, 0.4, 8 Gyと比べると、はじめの2群では総線量は非発がん線量以下なので発がんなしと予想され、1日20 mGyになってはじめて非発がん線量を越えることになる。これに対して、LNTモデルでは原爆データの100mSvで0.5%がんリスク増加という値をあてはめると1日20 mGy群では約半数のマウスにがんがみられると予測される。実際には、がんで死亡するマウスの数の増加はこの最高線量群においても認められていない⁽⁸⁾。このことから原爆データをLNTモデルで環境レベルに直訳すると過剰見積もりになることがわかる。

最後に、シーベルトという単位は生物学的効果まで考えられた単位だが、もう一度反省する。この単位にはX線と重粒子線の電離密度の差などの差による生物効果の変動が考慮されているが、線量率依存性が考慮されていない。原爆の1 mSvも福島環境の1 mSvも同じようにみられるのはどうしてもおかしい。さらに確率的影響、確定的影響という言葉もおかしい。何故なら、線量率によって生物効果は確率的影響として現れたり、確定的影響として現れたりするからである。線量率を考慮した放射線防護の便利な単位が必要となろう。

結論。放射線はそのリスクをきちんと把握すれば決して危ないものではない。現在の放射線に対する社会不安は、線量率問題を未解決にしたまま行われたリスクの過剰見積もりから生じている。それに基づいて原子力問題、さらに文明論まで論じるのは大きな誤りで将来に禍根を残すことになる。

文献

1. ICRP Publication 60 (1991)
2. Tanooka H. *Int. J. Rad. Biol.* 87, 645, 2011. *Health Phys.* 100, 304, 2011.
3. Shimizu Y. et al. *Radiat. Res.* 121, 120, 1990.
4. Preston DL. et al. *Radiat. Res.* 160, 381, 2003.
5. Anderson M. and Storm HH. *J. Natl. Cancer Inst.* 84, 1318, 1992.
6. Rowland RE. *Radiat. Res.* 76, 368, 1978.
7. Tubiana M. et al. *Health Phys.* 100, 296, 2011.
8. Tanaka IB. et al. *Radiat. Res.* 167, 417, 2007.