

# 広島・福島再訪： 低線量の放射線は無害どころか、有益らしい

Hiroshima and Fukushima revisited: low dose radiation is not hazardous,  
but seems to be even beneficial.

薬学部

須藤 鎮世

## 1. 要旨

政府は放射線防御委員会（防御委）の勧告に基づいて放射線を規制しており、一般人の限界線量を1ミリシーベルト（mSv）としている。これは自然放射能以下のレベルであり、危険性を過大評価しており、精神的、社会的、経済的に不要で過剰な負担を強いている。その勧告は「閾値なしモデル」に基づいている。これは「どんなに微量でも線量に比例して害がある」という「仮説」である。この仮説が正しければ、どんな線量でも癌死が足し算・かけ算で計算できるので、便利この上ない。しかし、低線量域や高線量域では仮説は成立しない。現実を説明できないとき、その理論なりモデルは誤っているという原理原則に照らして、「閾値なしモデル」は誤りといえる。この「閾値なしモデル」は広島・長崎の被曝者の生涯にわたる調査に基づく。結果は特定の限られた線量の範囲内で、直線性が有るとも無いとも断定できないし、閾値すら設定できる。しかし、「直線性が否定できない」ことを根拠に、直線性があると「仮定」して「閾値なしモデル」が提唱された。閾値の有る無しに係わらず、200 mSv以下の低線量領域では癌死の頻度が低く、対照群との間に差がない。そこで、行政上は200 mSv、安全性を考慮して100 mSvでもよいし、40 mSvに閾値が設定できるというのだから、40 mSvを実質的閾値とすれば問題も混乱もなかった。実際には1 mSvが限界線量である。さらに安心・安全を確保するとの名目で、飲食物の汚染のレベルを欧米の10倍以上厳しくした。安心・安全どころか、放射線の危険性をさらに煽った。放射線が怖い怖いと戦々恐々として日々を送ると心労のあまり命を縮め、本当に死者がでていくが、余り怖くないと知れば、どれ程明るく日々の生活が送れることだろう。ここでは、低線量の放射線は怖くないという論拠を示すので、恐怖から心を解放して頂きたい。さらに低線量では無害どころか、ホルミシス効果（日本風にいえば晩酌効果）といい、かえって生体には良い影響を及ぼしているという知見が多い。宇宙に長期間滞在した飛行士が帰還後直ぐには立てないように、筋肉も負荷をかけないと筋力がつかない。放射線も多少の刺激・負荷をうけた方が、我々の命は健全に働く仕組みになっているようだ。

## 2. はじめに

2011年3月11日14時46分に地震が発生し、津波で福島第一原子力発電所は全電源を失い、原子炉の冷却に失敗、1号機は18:00にはメルトダウンを開始した。20:50には半径2 km、21:23には半径3 km、翌12日未明には10 km 以内の住民に避難指示がでた。12日20:25に水素爆発がおこり、建家が損壊、5分後には10~20 km 圏内の住民に避難指示がでた。着の身着のまま避難所生活に追いやられた住民が財布、通帳、印鑑その他の重要物品を回収すべく、一時帰宅が計画された。一世帯当たり2人以内、在宅時間は最大2時間、荷物は渡された袋に一杯という制限つきであった。5月10日から予備的に開始され、本格的には6、7月に実施され、8、9月までもつれ込んだ。ここで一時帰宅者の放射能汚染が問題となった。文部科学省は全大学にボランティアの派遣を要請した。筆者は大学の同僚達とともに、学生実習用ガイガーカウンターを持参して、7月に6日間、帰宅者の放射能汚染モニタリングに従事した。この間、福島県下で適宜、放射能検査を行った。また、自宅のある茨城県守谷市もホットスポットの一部であるので、自宅近辺をモニタリングした。これをとおして、汚染の概略が把握できた。結果は就実論叢、その他に報告した<sup>[1-4]</sup>。

筆者は分子生物学関連の実験をとおして、30年以上にわたり放射制物質を扱ってきた。茨城・福島に行く途中、新幹線内、その他の場所で随時、放射線量を測定した。すべて1秒あたり100カウント (cpm) 以下であった。しかし、守谷駅前広場で測定したところ、針が振り切れた。守谷市は相当に汚染されているのであった。福島市のホテルの前で3500 cpm という数値がでた。当初、汚染の酷さに危機感を覚えた。福島での1週間弱のモニタリングの間に私が受けた蓄積線量は18 マイクロシーベルト ( $\mu\text{Sv}$ 、1 mSv の1/1000) 程度であった。一時帰宅者の蓄積線量は、私が記録した限りでは2~3  $\mu\text{Sv}$  で10  $\mu\text{Sv}$  を超えることは無かった。これらの線量はどれくらい危険なのだろうか。調べてみると、自然界には放射線が溢れているし、我々の体からは毎秒7000発の放射線がでていいる。しかし、我々は幾重もの防御機構を備えているので、危険性は低いことが判明した。

一方、国際放射線防護委員会(防御委)は福島に素早く対応し、2011年3月21日に特別な勧告を出した。一般人について年間被曝限度量は、これまでの2007年の勧告<sup>[5]</sup>を変更することなしに、参考レベル1~20 mSv/年の範囲で設定すること、また、長期間の後には放射線レベルを1 mSv/年へ低減することを目指すとした。政府は一般人の限界線量を最も厳しい1 mSv 設定し、放射線への恐怖を植え付けたまま、事故対策に望んだ。防御委の勧告の根拠となる「閾値なしモデル」は広島・長崎の被曝者の生涯にわたる癌死の調査に基づく。そこで、被曝者の生涯調査を検討してみた。すると、「閾値なしモデル」はモデルというだけあって単なる仮説にすぎず、閾値も設定できるといっている。しかし、放射線は底なし沼のように危険だというモデルは、精神的、肉体的、社会的、経済的に多大な負担を強いている。放射線による直接の死者はいないが、ストレスのあまり数百人の老人達が死んだという。長引く家族別離や避難所生活、墮胎や自殺、風評被害による生産

農家や漁民の経済的圧迫など、悪弊は枚挙に暇が無い。実際、放射線に恐れ戦きながら、戦々恐々と生活をおくと免疫力を失い、本当に命が縮む。これくらいの放射線は平気と心得れば、毎日、笑顔で生活ができる。前回、低線量「放射線をあまり恐れないで下さい！」<sup>[6]</sup>と報告したので、今回はその論拠をより深く考察する。一人でも多くの人達が不要で不当な心配、有りもしない幻想から抜け出てほしい。チェルノブイリ事故は癌よりも精神的障害が最大の被害と総括されている。放射線の影響を恐れて墮胎が1万に達したというのも、精神的圧迫の結果いえる。国連も世界保険機構も等しく、福島では癌死は増えないと予測し、精神的被害が最大の懸念としている。

ところで、低線量の放射線は無害なだけかという、それどころか、実はホルミシス効果といい、有益であるらしい。酒の一気飲みでは中毒死もできるが、ちびりちびりの晩酌は百薬の長といい、晩酌効果とよべば理解し易い。これについても少し触れる。なお、放射線とは何か、放射能を測定する単位であるベクレル (Bq) や放射線の生体影響を測る実行線量の単位シーベルト (Sv)、生体の防御機構等については前報<sup>[6]</sup>で報告したので、宜しければ参考にされたい。また、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線主体の福島の汚染は、吸収線量グレイ (Gy) と実効線量 Sv は近く、便宜上、同一に扱った。

### 3. 原子爆弾あるいは35%の光熱、50%の爆風、15%の放射線エネルギー

#### 1) 35%の光熱エネルギー

以下、主に文献<sup>[7,8]</sup>を参照しながら、原爆の様相を見てみよう。ウラン235は約7億年の半減期をもつ放射性同位元素で、原子量が130前後と90前後の原子に自然崩壊する。このとき、2~3個の高速の中性子を放出する。これが隣の原子に衝突すると、これがまた分裂

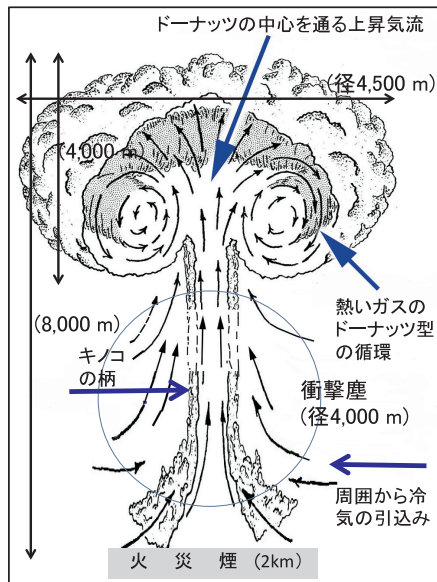


図1. キノコ雲の概略。広島・長崎の原爆は20キロトン前後で、地上600 mで炸裂し、8,000 mの高さに達した。火球はドーナツ状になり、輪の中心側は上昇気流、周辺側は冷やされて下降気流となり、激しいが循環流が生じた。火球を追うように、地表の付近の塵や埃を含む空気を吸い上げ、キノコ雲の柄を形成した。衝撃波は地表に反射し、塵や埃を巻き上げ3,800トンの衝撃塵の集合体を作った。これはキノコ雲の成分とともに、放射性降下物のもととなった。20~30分後に、キノコ雲に含まれる水分は上空で冷却され、黒い集中豪雨となった。下層の径2 kmでは $1.55 \times 10^5$  トンの材木等が灰燼に帰し、火災煙を形成した。

する。純度90%以上のウラン-235が臨界量（1 kg 程度）以上あると、連鎖反応で瞬時に爆発する。爆発後は質量が減り、その差が  $E = mc^2$  という式に則り、膨大なエネルギーとして放出される。原爆では弾筒内は温度が数千万度、圧力が大気の100万倍にも達し、核燃料、核分裂生成物、弾筒など全てが気体 / プラズマ（分子が陽イオンや電子に別れて自由に運動している状態）となり、炸裂する。気体 / プラズマがもつ X 線が周囲の空気に吸収され、光を発する火球が形成される。1メガトンの爆発では1,000分の1秒後で約150 m、10秒後で約2,000 m の大きさになり、1分後には光は消える。最初の核分裂に加えて、核分裂生成物は二次的な放射線をだすので、火球からはさらに熱がでる。1メガトンの爆発では10秒間で99%の熱エネルギーが放出される。超高温の火球は近距離の土砂や建造物などを気化させる。影のみを残して蒸発した人影の写真を、原爆記念館で見たことを思い出す。やや離れたところでは、気化されないで残った動植物や家屋を焼き尽くす。「ピカドン」の「ピカ」で表される光熱は原爆のエネルギー35%を占める。

## 2) 50%の圧力 - 衝撃波エネルギー

爆減額発直後、火球から外部に向けて衝撃波が走る。「ピカドン」の「ドン」である。1メガトンの爆発で10秒後に火球が約2,000 m の径になったとき、衝撃波の先端は約 5 km に達する（500 m/秒）。超大型台風の瞬間最大風速が50 m/秒、トルネードでは90 m/秒程度である。風圧は psi（ポンド毎平方インチ）で表すことができ、木造家屋は5 psi で、レンガあるいはコンクリートの建物は10 psi で、破壊される。気化・蒸発を免れた鉄筋の建物であっても、熱線により鉄筋が熔融した後では爆風に耐えるのは困難である。2001.9.11の世界貿易センタービルの崩壊を思い出す。原爆ドームはよくぞ形骸を保ち得た。衝撃波は5~12 psi でヒトの約半数を殺す。戦艦大和の46 cm 主砲が1.5トンの砲弾を発射すると甲板においたネズミは死ぬ。艦内に身を潜めた乗組員は、体内にえもいわれぬ不快感を感じるという。花火を近くで見物すると、打ち上げ直後にズンと腹に衝撃を感じるのは、衝撃波のさざ波とでもいおうか。爆心地に近いと熱線による蒸発、焼死の他に、爆風による圧死があったことが分かる。原爆のエネルギーのうち圧力 - 衝撃波は50%を占めるので、これは原爆の破壊力の最大のものである。衝撃波は地表で反射し、地上の塵や埃を巻き上げ、衝撃塵の雲を形成する。放射性降下物のもととなった（図1）。

## 3) 15%の放射線のエネルギー

原爆というとすぐに放射能を連想するが、そのエネルギーは15%に過ぎない。いわゆるケロイドは放射線ではなく、熱線による深い火傷である。原爆からどのような放射線がでるのかを、表1に示す<sup>9)</sup>。線量の大部分が即発2次γ線（0.1秒以内）、遅発γ線（30秒以内）、および即発γ線（100万分の1秒程度）で占められる。ここで大事なことは、1) 主体がγ線であるので、粒子線に比べ生物への影響が少ないこと、2) 30秒以内の急照射（高線量率）

であるので、生物への影響が大きいこと（一気飲みに対応）である。逆にいえば、低線量、低線量率の福島では生物への影響は小さい。それで、初期放射線（1分以内）による短期の試練を耐えてしまえば、助かる可能性が高まる。原爆の放出エネルギーに応じて犠牲者がでたと仮定すると、圧力-衝撃波50%、光熱35%、放射線15%であるから、放射能による犠牲者は比較的少ないと考えられる。残留放射能のうち中性子による誘導放射能（中性子照射により通常物質が放射化する）は時間とともに急減し、広島でも長崎でも1時間後に100分の1、1日後には1000分の1に、1週間後には100万分の1にまで減少する<sup>[9]</sup>。よって、誘導放射能による被曝が問題となるのは、初期に爆心地から1 km 以内に入った人々である。残留放射線は爆発後に火球に取り込まれた物質由来で、放射性の残渣が早期および後々の放射性降下物として降ってくる。放射性降下物の40-70%は1日以内に降下するといわれるが、地形や気象により影響されるので、予測は困難である。黒い雨には不明の点が多い。

表1 原爆放射線の分類<sup>[10]</sup>

放射線	時間	線量	
初期放射線			
即発放射線	即発 $\gamma$ 線	< $\mu$ 秒	中
	即発中性子線	< m 秒	小
	即発2次 $\gamma$ 線	< 0.1 秒	大
遅発放射線	遅発 $\gamma$ 線	< 30 秒	大
	遅発中性子線	< 10 秒	微
	遅発2次 $\gamma$ 線	< 10 秒	微
残留放射線			
	誘導放射能	< 月	小
	フォールアウト（黒い雨を含む）	< 月	？

#### 4) 原爆による被害者のまとめ

原爆の放出エネルギーは光熱35%、圧力-衝撃波50%、放射線15%とされ、被害もこれに比例したと考えられている。したがって放射線による犠牲者は15%程度と見積もられる。被爆者の生涯調査の対象者の分布をみると、東西1.5 km、南北2 kmの楕円形の外側にドーナツ状に分布している（爆心地は楕円の中心よりやや西側）<sup>[11]</sup>。この楕円形の中にいた人達は蒸発・焼死させられ、あるいは爆風で圧死させられた。中心から少し離れていても熱線・爆風・放射線による複合死をとげた人達もいたろう。周辺部で熱と爆風に耐えた人達も10 Svもあびると腸死といい、腸の粘膜上皮細胞が死に、飲んでも食べても栄養が吸収されずに、10日前後で生理的に餓死する。腸死を免れても、免疫力が衰えて、1~2カ月間は感染症で亡くなる人もいた

だろう。これを生き延びた人達には癌の試練が待っている。しかし、初期の試練を生き延びた人達が癌の犠牲になる確率は比較的少ない（後述）。

#### 4. 広島・長崎における被爆者の生涯調査

##### 1) 原爆被爆者の被曝線量の計算

広島と長崎の爆弾出力はそれぞれ16および21キロトン、爆発の高さは600と503 m とされる。被爆者の線量が推定され、現在は新線量評価方式である2003年の「DS02」に基づき計算された。これには1) 線源（爆弾出力、高度、 $\gamma$ 線と中性子の線量）に関わる計算、2) 発生源から地表までの放射線の輸送・伝達に関わる計算、3) 地上構造物による遮蔽計算、4) 人体の自己遮蔽と組織線量計算がスーパーコンピュータで算定された。例えば4) 人体に関する計算では年齢（大人、子供、幼児）、体位（立位、座位、臥位）、体の向き（30度区分）が考慮され、臓器線量は15臓器に分けて算出された。

##### 2) 被爆者の生涯調査における種々のパラメーター

これは広島と長崎の10 km 圏内の被爆者80,180人と、原爆の後に入市した25,247人の計105,427人について、癌死の生涯調査（LSS: Life Span Study、現在も進行中）を行い、1958～1998年間（41年）の固形癌による死亡者の分析を行った。その結果、全癌死者数17,448人中、被爆が原因で癌死した人数は853人と見積もられた<sup>[12]</sup>。この算出は以下による。

「DS02」で計算した直腸線量を用い、線量は0.005、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.125、0.15、0.175、0.2、0.3、0.5、0.75、1.0、1.25、1.5、1.75、2.0、2.5、および3 Gy で区切り、計22の線量域に分けた。被爆時齢は0～69歳まで5年刻みと70歳以上の14分類、到達年齢は0～84歳まで5年刻みと85歳以上の17分類、年代は1958年から1998年まで5年刻みの10分類、男女の性別、広島か長崎かを区別した。爆心地からの距離は3 km 以内、3～10 km、それに爆発当時、市内におらず、後に入市した人達の3つに分類された。固形癌は19種類に分けられ、各癌について年代ごとの背景データが加わった。これらのデータをスーパーコンピュータに入力して、過剰相対リスク（ERR = excess relative risk、自然癌死亡率への上乗せ％）と過剰絶対リスク（EAR = Excess absolute rate、自然癌死人数への上乗せ人数）が計算された。

##### 3) 線量推定、癌の同定、統計などに伴う癌死予測の不確実性

現在の「DS02」による線量推定はスーパーコンピュータを用いた厳密な計測とはいえ、前提が必ず正しいとは限らないので、被曝線量に不確実性があることは否定できない。

癌の同定は組織標本によるほぼ確実な診断から、死亡診断書に基づいたやや不確実な例、固形癌の種類による判断の難易があるので、癌の分類に誤りが無いとはいきれない。

現在進行形の調査も不確実性の原因となる。1958～1998年の調査対象者のうち、1998年

末でその48%が生存中である。被爆時に40歳台では2%が残っている。被爆時20歳以下では85%以上(40,000人以上)が生存中である。既に亡くなった方々のデータは比較的明確であるが、生存中の若年層の被爆者を含めて将来の癌死を予測することになる。約半数のデータから生涯調査集団全体の生涯リスクを推定するので、不確実性が残る。

生物学的影響を考えると、 $\gamma$ 線の影響を1とし、中性子の影響は $\sim 10$ としている。また、臓器による感受性の高さの係数を導入しているが、感受性の数値は明確に設定できないので、不確実性が生じる原因となる。

被爆時の年齢を基準にして、異なった到達年齢での過剰相対リスク(ERR)と過剰絶対リスク(EAR)を推定している。例えば、30歳のときに1 Gyの被曝をすると、70歳に到達したときに、過剰相対リスクは自然癌死亡率に比べ、男では35%、女では58%上乘せされ、平均で47%の上乗せと計算される。同じ条件下、過剰絶対リスクは10,000人あたり男で43人、女で60人、平均すると52人が余計に癌死すると推定される。比較のため、自然癌死亡率を正確に知るのは困難で、過去のデータより推計する。比較の基礎となる自然癌死亡率のばらつきの大きさは、不確実性の大きな要因となる。

本章の6)で後述するが、線量率が低いと生物への影響も低くなる。国連の委員会はこの線量率効果を2 $\sim$ 10とするが、防衛委は2という最低値を採用しているので、急照射の生物影響は緩照射の半分とする。実際にはこの値は10 $\sim$ 100ではないか、すなわち、緩照射では急照射の1/10 $\sim$ 1/100ではないか。この線量率効果をどこに設定するかで、予測は大いに左右される。防衛委の2という数値は放射線の影響を相当に過大に見積っている。

このように、不確実性に基づいて算出された癌死の推定なので、結果は必ずしも正しいとは限らない。ホルミシス効果を考えると、ヒトは最初を生き延びてしまえば、癌死はごく少ないのかもしれない。線量によっては長生きという値になるかもしれない。

#### 4) 原爆被爆者の固形癌と白血病による癌死

白血病は潜伏期間が3 $\sim$ 8年と短いので、1958 $\sim$ 1998年間の調査からは省かれている。そこで生涯調査では固形癌のみを扱っている(図2)。しかし、同じ広島・長崎のデータを分析したBEIR VIIの報告書[13]には、参考のため、白血病の場合が図示されている(図2の挿入図)。血液細胞の癌である白血病は、直線-二次曲線モデル(linear-quadratic model)がよく合うという。これは、最初は直線的で、線量が増すにつれ癌死が二次曲線に従い増加するというものである。当然のことながら、増加は2 Sv程度までの話で、さらに線量が増せば、白血病になる前に死亡するので、白血病死はダウナーンといい、下降線を辿る。BEIR VIIによると、固形癌も同様に、直線-二次曲線モデルの方がよく合うという(図2の破線)。しかし、直線モデル(図2の実線)も描けないわけではなく、両者の間に有意な差がない。線量がさらに増せば癌になる前に死ぬので、白血病同様に、癌死はダウナーンを辿り、下降する。どちらも特定の線量の範囲で、直線-二次曲線モデル

に従った線量-反応曲線を示し、さらに高線量になるとタウンターンする、というのが素直な解釈であろう。生物反応は一般に、最初は無反応、やがて反応が現れ始め、用量の増加とともに反応が指数関数的に増加し、やがて反応が衰え、ピークに達して頭打ちというシグモイド曲線を描く。図1の白血病死、癌死もシグモイド曲線の一部を辿っているように見える。

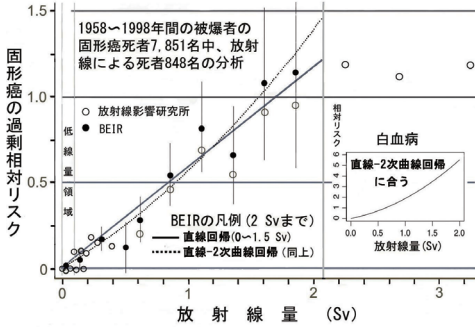


図2. 広島、長崎における癌死。被爆年齢が30歳、到達年齢が70歳のとき、癌死の過剰相対リスク (○、放射線影響研究所) を縦軸に、線量を横軸に示す。BEIRの分析は被爆年齢が30歳、到達年齢が60歳のときの値で (●)、直線回帰 (直線)、直線-2次曲線回帰 (点線) はBEIRによる。●のGy 標示は○に合わせて Sv 標示とした。

#### 5) 癌を一纏めにして閾値なしの直線反応と決めつけていいのか

上述したように、癌と一口に言っても、血液の癌である白血病では直線性は成り立たない。生涯調査<sup>[12]</sup>は19種類の癌の分析をしている。線量に相関して増加している癌は口腔、食道、胃、大腸、肝、肺、皮膚 (除くメラノーマ)、乳房、卵巣、膀胱、神経系、甲状腺の12の癌であった。脾、前立腺、腎の3つでは用量相関はみられなかった。直腸、胆嚢、子宮の3つでは有意な増加はなかった。胆嚢・胆管癌の場合は、被爆で逆に減少した。甲状腺癌では直線-二次曲線モデルの方がよく合う。線量に比例して増加するという癌の例として、胃癌、大腸癌、膀胱癌、肺癌の例を図3に示す。直線性があるとはいえ、点の

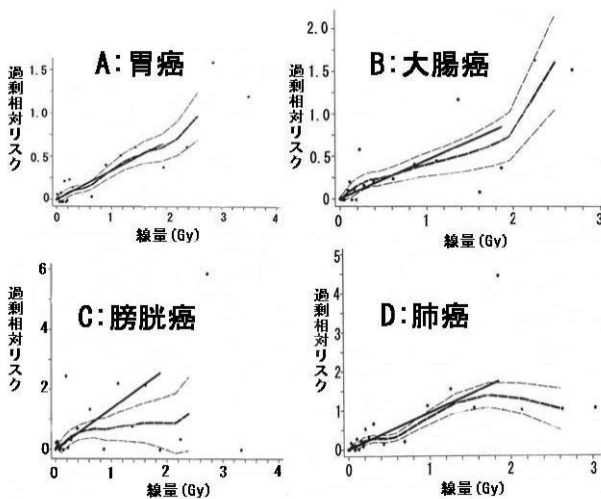


図3. 広島・長崎の生涯調査における30歳被曝時の70歳における癌死の過剰相対リスクの予測。4例を引用した<sup>[12]</sup>。実線は0~2 Gy (= Sv) における値の直線回帰、太い鎖線は散点を平滑化した場合で、薄い鎖線は±1標準偏差を示す。



ばらつきはこれ程に大きい。また、閾値が無いと称する低線量域では、0線量付近では点がばらつき、対照群と差が無いようだ。低線量域で癌死を皆まとめてしまうと、図2の0線量付近の黒丸で示されるように、あたかも直線に乗るように見え、全体として0~2 Gy (Sv) では直線性が否定できないことになる。閾値があるかどうかを調べると、0.04 Gy が閾値となるという。バラツキが極めて大きい中で、直線性が有るとも無いともいえない、閾値も設定できるデータから「閾値無しモデル」が導かれた。このモデルに基づいて「報告」がなされた。

#### 6) 線量率が低いと生物への影響も低くなる

どんな毒物でも微量ずつなら死なないが、まとめて飲むと死ぬ。酒の一気に飲みは中毒死につながり、適度な晩酌は百薬の長となる。放射線でも同じで、一気にの被曝は健康影響が強く、同じ線量をゆっくり浴びれば害は少ない。これは線量・線量率効果として知られており、防衛委はこの値を2としている。瞬時に1の線量を浴びるのと、長時間かけて2の線量を浴びるのが等価だという。50以上の実験データを分析したところ、この係数は10~100が妥当という<sup>[4]</sup>。すなわち、瞬時に1の線量を浴びたときの影響は、長時間では10~100倍の線量をあびた時に等しいことになる。表1に示すように、原爆の主たる放射線は30秒以内に照射されている。瞬時に原爆被曝では影響が強くであるが、原発事故のように、低線量で長時間被曝する場合、影響は小さい。DNAの修復機構や、傷ついた細胞を自殺させるアポトーシス機構などは、何億年もかけて生物が進化の過程で獲得して来た防御機構の一部であり、その守備範囲以内であれば閾値が存在することの生物学的理由であると思われる。福島では放射線による死者はゼロで、国連も世界保健機構も、福島で癌死は増えないと予測している。おそらく、図2の0~200 mSv (最初の1メモリ) の癌死が、対照群と差が無いこと、チェルノブイリフォーラムによる事故の20年後の総括は「白血病あるいは甲状腺癌以外の固形癌が増加したという明確な証拠はない」という報告等が根本にあるのだろう。

### 5. 低線量放射線より呼吸の方が遥かに怖い

#### 1) 放射線と呼吸は共に活性酸素を作り悪さをする

放射線は生体成分であるDNA、RNA、タンパク質、脂質などに直接作用するのは約20%で、残り80%は電子を突き飛ばしラジカルを作り、2次的に作用するとされる。ラジカルは特に二重結合をもつ分子、構造を好んで攻撃する。生体の7割くらいは水で、水から電子を1つ飛ばす(水素を取る)と水酸化ラジカルと呼ばれる、反応性に富む活性酸素になる。さらに1つ飛ばすと過酸化水素になる。過酸化水素からもう1電子を飛ばした形がスーパーオキシドとよばれる活性酸素である。さらに1電子を飛ばすと酸素分子になる(図4)。

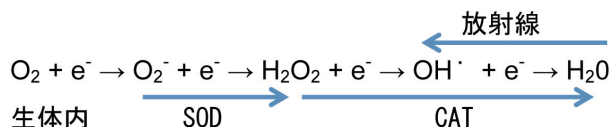


図4. O<sub>2</sub>は酸素、e<sup>-</sup>は電子、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>は過酸化水素、OH<sup>·</sup>はヒドロキシルラジカル、H<sub>2</sub>Oは水、SODはスーパーオキシドデスムターゼ、CATはカタラーゼを示す。

一方、私達は絶えず酸素を吸入し、ブドウ糖のような炭水化物 C<sub>m</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> を酸化して炭酸ガスと水に戻し、生体のガソリンともいべき ATP を作る。炭水化物の元はといえば、植物達が炭酸ガスと水と太陽光のエネルギーを用いて合成したものである。結局、我々は光エネルギーを ATP という化学エネルギーに変換して利用している。この反応は生体のミトコンドリアで行われ、炭水化物からはぎ取った水素 H を陽子 H<sup>+</sup> と電子 e<sup>-</sup> に分け、e<sup>-</sup> は電子伝達系をとおして酸素に渡して水を作り、膜内に押し込んだ H<sup>+</sup> は膜外にでる時、ATP 合成酵素を回転させ ATP を作る。ところが、反応は100% 完全でなく、活性酸素が漏れだしてしまう。そこで、ミトコンドリア内や、細胞外にはラジカル・活性酸素に対応して、スーパーオキシドデスムターゼという酸素群があり、効率良くスーパーオキシドを過酸化水素に変える。過酸化水素はカタラーゼで効率良く水酸化ラジカル、さらに水と酸素に分解される（図4）。日本薬局方のオキシドールには過酸化水素が3% 含まれており、傷口にぬると、瞬時に酸素の白い泡がでるので、なる程、活性が強いと納得できる。

## 2) 放射線による DNA 傷害は酸素呼吸によるものより圧倒的に小さい

定性的には放射線も酸素呼吸も DNA、RNA、タンパク質、脂質などに傷をつける。このうち、DNA 傷害が癌との関連でリスクが高い。そこで、定量的に両者を比較してみよう。呼吸をすると1日に細胞あたり10億個の活性酸素を発生する。これは DNA に100万個の傷をつけるが、大部分は修復され易い塩基損傷・1本鎖切断である。修復され難い2本鎖切断は100個程度である (1/10<sup>4</sup>)。一方、放射線による DNA 損傷は活性酸素に比べ、修復がやや難しい2本鎖切断の割合が多いとされる (10%)。しかし、限界線量である1 mSv を照射されたときの DNA 障害は2個程度で、そのうち2本鎖切断は細胞あたり0.0001個程度にすぎない (表2)。1 mSv 程度の放射線の危険性は呼吸の1/1000である (表2)。逆に言えば、1000倍くらいの放射線をあびて、やっと呼吸をするのと程度のリスクとなる。これが低線量の放射線をそれほど恐れる必要はないという、1つの根拠である。

表2. 呼吸と放射線による DNA 損傷の定量的比較

	日常の活性酸素	日常の放射線	活性酸素 / 放射線
塩基損傷・ 1 本鎖切断 (修復し易い)	10 <sup>6</sup> 障害/細胞/日 (10 <sup>9</sup> 活性酸素/細胞/日)	0.005 障害/細胞/日 (2,000 障害/細胞/Sv、2 障害/細胞/mSv、400 日/年として計算)	2 x 10 <sup>8</sup>
(非修復は 1/10 <sup>4</sup> )	非修復 100 障害/細胞/日	非修復 0.0000005 障害/細胞/日	2 x 10 <sup>8</sup>
2 本鎖切断 (修復し難い)	0.1/細胞/日 (塩基損傷・1 本鎖切断の 1/10 <sup>7</sup> 個発生)	0.0001 障害/細胞/日 (塩基損傷・1 本鎖切断の 2/100 障害/細胞/日)	1 x 10 <sup>3</sup>
(非修復は 1/10)	非修復 0.01 障害/細胞/日	非修復 0.00001 障害/細胞/日	1 x 10 <sup>3</sup>

(舘野之男、放射線と健康、岩波新書、2001<sup>[15]</sup>、その他を元に作成)

### 3) 進化の過程で鍛えられてきた私達

36億年前頃の生命誕生時、放射線は今よりも強かった。今でも体内に存在するカリウムや炭素から、「毎秒7,000発」の内部放射をあびているが、平気である。

生命誕生のころ大気中に酸素が無かった。だからオゾン層もなく、紫外線はモロに地表に届いたから、生物は水中で生活していた。光合成をする藍藻類のような生物が徐々に大気中に酸素を放出した。25億年前当時、酸素は毒であった(実は今でも毒である)。今でも、酸素があると死んでしまう細菌がいる(絶対嫌気性細菌)。この毒を使って有機物をゆっくりと燃やしてエネルギーを獲得できる細菌が現れた。これはアメーバ様の生物と合体融合してミトコンドリアの元となり、動物の祖先となった。さらに、光合成をする細菌が共生して植物の祖先となった。絶えず陽光に曝される植物が上陸するには、紫外線による DNA 傷害を修復する機構が必用であった。今から約4億年前に上陸できた。我々は紫外線をあびれば日に焼け、メラニン色素を増やして、DNA 傷害を防ごうと反応する。無論、紫外線による DNA 傷害を修復する機構を備えている。修復できない遺伝病の色素性乾皮症やコケイン症候群では直ぐに癌になりやすい。逆にいえば、修復系は癌を抑制している。

福島では水素が瞬時に酸素と反応を起こして爆発し、水ができた。我々の体内ではミトコンドリアがゆっくりと水素と酸素を反応させ、水を作っている。そうやって日々のエネルギーを得ているが、長い目でみると、我々の体は酸素という毒素に触まれている。コラーゲンは酸化され、架橋され、弾力を失う。花の色は移りにけりないたずらに、シミが増え、皺が増え、白髪が増える。我々の体は徐々に酸化されてゆき、最後は焼却炉で酸化されることになる。

我々が受け身で生活しているのかということ、生体は酸素分子から酵素系を用いてスーパーオキシドや過酸化水素を作り（図4）、白血球が取り込んだ細菌を殺すのに利用している。それに、何億年の進化の過程で完璧とはいえずとも、活性酸素を制御する経路も発達させてきた。径30 kmのチェルノブイリの森は強い放射線を浴びながら動物の楽園と化し、今や315種の鳥獣が棲む。地表を這い回るネズミを調べてみると、活性酸素等を消去する物質が増えており、放射線による活性酸素がDNAに傷害を与える前に、未然に消去していることがわかる。

#### 4) 低線量放射線が怖くないことのまとめ

- (1) 細胞にヒットしたとき、主成分であるタンパク質、脂質、炭水化物、RNA、DNA等を損傷する。DNA以外は数十個、数百個破壊されても、多数あり、代替えが効き、新品が補給される。DNAの損傷が問題となるが、全損傷のごく一部である。
- (2) 細胞には父親由来と母親由来のDNAが2本あるので、1本が壊れても代替えが効く。同じ位置（座位）の同一の遺伝子を同時に壊す確率は極めて小さい（2万の遺伝子があれば、 $2万 \times 2万 = 40,000,000$ ヒットに1回の確率となる）。そのうち、癌に直接関係する遺伝子である癌原遺伝子、癌抑制遺伝子のごく一部（100~200）である。
- (3) 放射線は主として活性酸素種を形成して害悪を及ぼすが、呼吸に比べ、活性酸素の産生は圧倒的に少ない。形成されても大部分は消去される。消去されなかった残存の活性酸素や直接作用でDNAを損傷しても、1000個中999個は修復される。地面からの放射線の世界平均は0.48 mSv/年で、イランのラムサルでは263 mSy/年というが、住民に健康被害はない。
- (4) DNAに損傷が残った場合、細胞はDNA修復が終了するまで分裂を停止する（チェックポイント）。それでも直しきれないとき、細胞は自殺装置を作動させる（アポトーシス）。
- (5) 細胞が死ぬと、恒常性が維持できる程度に、隣の細胞が増えて穴埋めをする（再生）。例えば、肝臓を半分切除すると1週間で元の大きさに戻り（再生肝）、片方の腎臓を取り除くと他方の腎臓が大きくなり、2個分の働きをする（代償肥大）。
- (6) 修復機構や自殺装置をかいぐって癌細胞が生じてても、免疫系が監視をしているので、癌に発展するのは一部に限られる。免疫系が低下すると癌になり易い。よって老人は癌になり易い。
- (7) マラソン選手が高地で訓練すると、赤血球が増え、酸素供給力が増す。恒常性の維持は生命の真骨頂である。筋に負荷をかけて鍛えると芸術品のようなスポーツ選手の体ができる。適度な運動という負荷は老人の転倒を予防し、寝たきりを防ぐ。強い放射線の中で進化して来た我々には、ある程度放射線の負荷をかけた方が、体に健全に働краしい。これはホルミシス効果と呼ばれる<sup>[16]</sup>。

## 6. ホルミシス効果あるいは晩酌効果

酒に飲まれると命を縮めるが、適度に飲めば延命に有効らしい。低線量の放射線も発癌の危険が増すどころか、抵抗力を与えるらしい。ホルミシス効果という。これを裏付ける科学的なデータが蓄積されつつある。微生物では実験がし易く、30年程前から原生動物におけるホルミシス効果が観察されていた。分厚い鉛で囲ったり、地下深くで実験をしたりして、外界からの放射線を遮断すると、テトラヒメナという単細胞の繊毛虫の増殖率が低下する。より強い線量をあびせると増殖率が上がる。ゾウリムシやシアノバクテリアでも

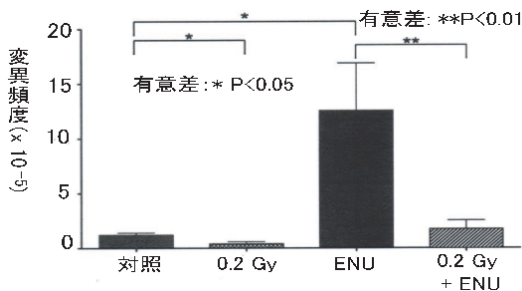


図5. 交差適応。X線の前照射は後処理によるENUによる変異原性活性を激減させる。GyはSvとほぼ同等。

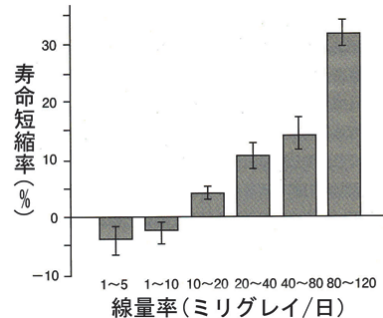


図6. 放射線照射とマウスの寿命。自然量の100~1000倍程度の低線量では長生きし、高線量では寿命は縮む。

同様に増殖効果がみられた。ことによって、しぶとくも、放射線のエネルギーを利用してATP生産に利用しているのだろうか。

哺乳動物ではどうか。生後4~8週の間(4週間)、マウスに0.2 GyのX線を照射し、その後4週間にわたり、スーパー変異原と呼ばれる強い遺伝毒性物質ENUを飲料水に混ぜてのませた。DNAを抽出して調べてみると、遺伝子の変異頻度は数分の1に激減した(図5)<sup>[17]</sup>。これは交差適応といい、放射線の前処理により、次の化学物質の効果が激減した。生体が種々のストレスに対して総合的に対応していることを示す。単純明快なのは図6で、生涯にわたりマウスに放射線を多量に浴びせると寿命が短縮するが、低線量の1~10 mGy/日(自然暴露の約150~1,500倍)では却って長生きするという<sup>[18]</sup>。

微生物やマウスでなく、ヒトではどうか。ラドン温泉やラジウム温泉などでは、様々な生体活性効果があるとされてきた。日ごろ比較的高い放射線に曝されている鳥取県の三朝温泉の住民は、他の人々に比べて自然発癌が低いという結果がある(図7)<sup>[19]</sup>。

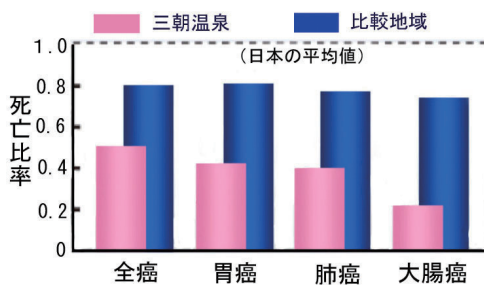


図7. 三朝温泉の住民の癌死亡率

低線量の放射線照射は癌死を低下させる可能性がある。図5に示したように、交差適応が働いて、諸々の発癌作用を抑えたと考えれば説明がつく。

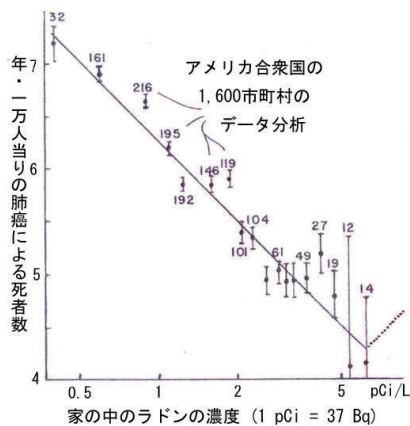


図8. 米国の各地域の放射性ラドンの濃度と住民の肺癌による死亡率

米国ではラドンの濃度は一般に日本よりも高く、さらに地域により差がある。各地域での放射性ラドンの強さと肺癌発生率を調べた研究がある (図8) [20]。20万の家庭のラドンを測定し、アメリカ国民の住む地域の90%をカバーしているという。その結果、ラドン放射線量が高いほど肺がんの発生率が低くなり、それは直線的な相関関係にあった。

放射線を只ひたすら悪をなすと考えると、ホルミシス効果は理解できない。図5に示したように、放射線照射が化学物質による遺伝子の変異を抑制することは、生体内で相関関係があることを示す。例えば、ラットの大脳皮質に少量の放射線を照射すると、活性酸素の除去する働きのあるSODの活性が増強され、500 mSvで最高に達したという。図4に示したように、放射線により活性酸素が増えるが、生体がそれに反応してSODを合成・増幅し、活性酸素を消去すると考えれば理解できる。実際、酸化ストレスがくると、細胞膜のすぐ下に係留されていたNrf2という転写因子が解放され、核内に移行し、支配下の200以上の関連遺伝子を同時に発現させる。放射線によるDNA障害の80%は、放射線により生成される活性酸素であることを思えば、何億年もかけて構築してきた酸化ストレス応答系を初め、生体防御系が発動することは、極めて自然である。Nrf2はホルミシス応答を司る司令塔である可能性がある。ここにあげた以外にもホルミシスを示すデータが多くある。

## 7. 福島市における放射線汚染の減衰

2011年3月24日から週日には、日本各地における放射線モニタリングの結果が日経新聞に掲載され始めたが、福島市のデータは約2週間遅れて、4月7日になってモニタリングの値 (図9、青棒、地上1.8~34 m) が現れた。地上1 mの値 (図8、赤棒) が掲載され始めたのは約5ヶ月遅れて、8月23日以降である。2013年8月14日以降は週一回掲載されている。

現在、福島における汚染源の主体はセシウム-134およびセシウム-137であり、これらのβ線は地上約1.8 mまでしか届かない。γ線は100 m くらい届く。よって、図9の赤棒はβ線とγ線との合計の値、青棒はγ線の値である

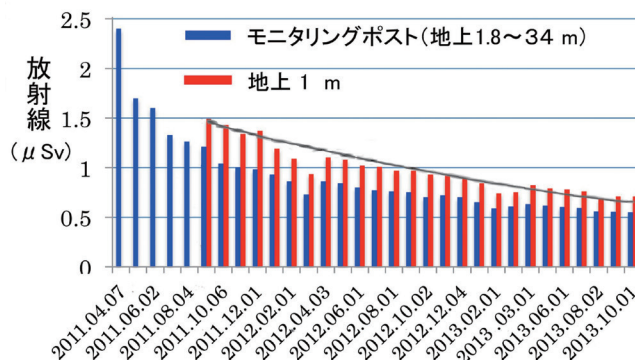


図9. 福島市における放射線汚染の減衰（2011.4.7～2013.10.1）

セシウム-134とセシウム-137の量比はほぼ1:1で、エネルギーの強さは2.7:1なので、放射線量は次の式で算定される。

$$P(t) = 1/3.7 \times P(0)2^{-t/30} + 2.7/3.7 \times P(0)2^{-t/2}$$

ここで、P(t) はt年後における全線量、P(0) は初期の線量である。P(t) はグレーの線で示す（著者原図）。

2011年4月頃の高い放射線はヨード-131（半減期8日）によるものであり、時間経過とともに、急減した。1～2ヶ月もするとヨード-131の影響はほぼ消え、残りはセシウム-134（半減期2年）とセシウム-137（半減期30年）である。図9における減衰をみると、ほぼ理論どおりに、減衰していることが分かる。

2013年10月2日の地上1 mにおける値は0.549 μSv/時間なので、1年間は8760時間だから、4.8 mSv/年となる。除染がなされていないモニタリングポストのある所に1年間立ち尽くすと、CTスキャン1回分くらいの線量をあびることになる。現代人は1日8～9割は室内で過ごすといわれるので、実際の被曝はその1/5程度と見積もられ、被曝量は1 mSv/年となる。これは自然放射能以下であり、健康被害は心配するに及ばない。

## 8. 放射線防御委員会の3つの罪

### 1) X線で奇形は生まれにくいのに誇大に危険性を煽った

これは「放射線と健康」<sup>[15]</sup>の著者である館野博士が図らずも当初それに加担したことを悔いておられる。分裂細胞は放射線に弱い、妊娠初期や胎児の細胞は盛んに分裂している、妊娠は月経開始後10日である、よって、女性の下腹部検査は月経開始後10日以内に、という「10日ルール」を1962年に採用し、大々的に宣伝した。しかし、国連科学委員会に

よれば、受胎1日後は奇形無し、14～18日では250 mSv（実際には mGy）、50日では500 mSv という。通常の検診では多くても10 mSv 程度だから、余程の事故でも無い限り、放射線により奇形児が生まれることは無いと判明した。「10日ルール」は撤回されたが、女性に不要で不当な心配をかけさせ、今なお、放射線により奇形児が生まれると信じている女性がいるとすれば、罪な話である。

## 2) 標的を遺伝線量（遺伝的傷害の惹起）から確率的影響（発癌）へのすり替え

核実験に伴う放射線による地球汚染をうけて1958年、国連科学委員会は「どんなに微量な放射線であれ、遺伝的に、ことによったら体細胞にも障害を及ぼしうる」と決議した。放射線の影響として当時は遺伝的障害が主眼であった。これはショウジョウバエの精子にX線を照射したデータに基づき、突然変異の発生率は1) 総線量に比例する、2) 線量率に依らないとした。しかし、ハエの精子のデータは、哺乳類にはあてはまらない。700万匹ものマウスを使った実験で、同じ線量を与えてから受精するまでの時間を長くすると変異頻度は低下したので、総線量に比例しない。また、ゆっくり照射すると変異頻度は低下するので、線量率には大いに依存する。ヒトではどうか。広島・長崎での被爆者は唯一無二のデータ提供した。その結果、平均して400 mSv くらいの被曝を受けた被爆者の子孫を何万人も調べても、性比、染色体異常、生化学的タンパク質調査、死亡率調査、臨床健康調査等で、対照群に比べ、何ら差がなかった。現在に至るも異常は検出されない。国連科学委員会の報告書ではヒトで自然発生頻度を倍にする倍加線量は少なくとも4,000 mSv と試算している。この線量を受けたヒトの半数は死ぬし、生殖細胞そのものが死ぬので、遺伝子は子孫に伝わらない。事実上、遺伝的障害は無視してよい。防衛委は遺伝的傷害は主眼でないことを認め、「遺伝線量」から「確率的影響」と改名し、主標的を癌にすり替えた。とはいえ「閾値無しモデル」であるから、低頻度ながら線量に比例して遺伝的障害が発生するとの主張は変わっていない。

## 3) 「閾値無しモデル」の頑なな維持

防衛委は放射線には安全量は存在しない」という「閾値無しモデル」に基づいて一般人の線量限度は1～20 mSv と勧告し、政府は1 mSv/年と定め規制している。勧告自体が述べているように、これは仮説であり、広範な低線量の被曝による癌死の予測のためのモデルではないから、その目的には使うなという。要するに、低線量では直線性は成立しないことを告白しているといえる。そうであれば、不要で不当な精神的圧迫・苦痛を課して、時に老人達の命を奪っている事実を注視し、多くの生物学的データを加味し、「閾値無しモデル」が仮説であって、生物学的・科学的真実ではないことを明確にしてほしい。下記、1 mSv は達成する必要がないとする国際原子力機関の報告書を真摯にうけとめ、後世、1 mSv スキャンダルとして歴史に名を止めないよう願う。



## 9. おわりに

2013年10月21日の日経によると、国際原子力機関が報告書を纏め、年間追加被曝線量を1 mSv とする政府の長期目標について、除染目標達成は「必ずしも達成する必要はない。環境回復に伴う利益と負担のバランスを考慮して最適化する必要がある」と報告した。チェルノブイリの事故における固形癌死の少なさ、広島長崎の被爆者のデータ（図2の0～200 mSv）、図2、自然放射能の高い地域での人々の健康な生活、その他の種々のデータなどから、1～20 mSv 程度では癌死は増加しないとの確信があるのだろう。国連や世界保健機構が福島で癌は増加しないと予測しているのは当然といえる。

マスコミは放射線が危険だと言わないと注目されない。それに一部の学者が加担する。政府は安全・安心のためと称し、飲食品の規制値を欧米の1/10に下げた。飲食品1 kgあたりの規制値 (Bq) は、食品一般100 (EU: 1,250; 米国:1,200)、牛乳・飲料水50 (EU: 1,000; 米国: 1,200) とした。実際には米や食パン30、ハウレンソウ200、干しシイタケ700、生ワカメ200、サカナ100、ポテトチップス400、干昆布2000、牛肉・魚は100が含まれている。ヒトの体重を70 kg とし、体内から7000発の放射線が出るので、食品一般の100 Bq/kg と計算があう。危険だから、食わずに餓死せよとでもいうのであろうか。

1 mSv に苦しめられているのは福島の人々のみならず、東京電力の人々も被害者である。2013年7月9日に東電の吉田昌男所長が58歳で、食道癌で死去したとの記事が掲載された日に、吉田を初め東京電力の人々の決死の努力を描いた本<sup>[21]</sup>を入手した。吉田は2011年11月16日に癌を告知されたという。この癌が福島原発事故で引き起こされたものでないことは明らかだが、想像を絶するような過酷な精神的、また、不眠など肉体的なストレスが免疫力を奪い、死期を早めた可能性は大いにあり得る。東京電力を加害者として糾弾するのは容易い。しかし、彼らも被害者である。それに、不要な税金を不要な汚染除去に使われている我々納税者もまた被害者である。怒ってよい。

## 文献

- [1] 須藤鎮世, 江川, 森宏樹, 阿藪寛明. 一時帰宅者に対する放射能スクリーニングのボランティア活動と一部汚染地域の実態調査. 就実論, 41, 221-236, 2012.  
(<http://repository.shujitsu.ac.jp/detail/4320120330063513>)
- [2] Shizuyo Sutou. Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant disaster: generally applicable implications from sporadic and arbitrary measurements of radioactive contaminations in some areas of Ibaraki and Fukushima. Genes Environ., 35, 1-4, 2013.
- [3] Shizuyo Sutou, Takashi Egawa, Hiroki Mori, and Hiroaki Aso. The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant disaster: a report on volunteer activity for radioactivity screening of temporary returnees to the evacuation zone. Genes Environ., 35, 73-79, 2013.
- [4] 須藤鎮世. 警戒区域への一時帰宅者に対する放射線モニタリング および一部汚染地域

の実態調査. 日本環境変異原学会, 平成24年度公開シンポジウム「放射線のリスクを科学的に考える」2012. 05. 26.

[http://www.j-ems.org/ray/symposium/new/5\\_sutou/Player.html](http://www.j-ems.org/ray/symposium/new/5_sutou/Player.html)

- [5] 日本アイソトープ協会, ICRP Publ. 103 国際放射線防護委員会の2007年勧告, 丸善, 2009.
- [6] 須藤鎮世. 低線量の放射線をあまりないで! 就実論叢, 42, 195-212, 2013.  
(<http://repository.shujitsu.ac.jp/detail/5920130315015429>)
- [7] A. Glaser. Effects of nuclear weapons, Princeton Univ., Feb. 12, 2007.  
([http://www.princeton.edu/~aglaser/lecture2007\\_weaponeffects.pdf](http://www.princeton.edu/~aglaser/lecture2007_weaponeffects.pdf))
- [8] 葉佐井博巳ら編. 「広島・長崎原爆放射線量新評価システム DS02に関する専門研究会」報告書, 京都大学原子炉実験所, 2004.  
(<http://hlweb.rri.kyoto-u.ac.jp/shibata-lab/DS02/KURRIKR114.pdf>)
- [9] 今中哲二. DS02 に基づく誘導放射線量の評価, 葉佐井博巳ら編, 「広島・長崎原爆放射線量新評価システム DS02に関する専門研究会」報告書, 京都大学原子炉実験所, pp150-154, 2004.
- [10] 今中哲二. DS02 原爆線量計算システムの概要とその検証計算, 葉佐井博巳ら編, 「広島・長崎原爆放射線量新評価システム DS02 に関する専門研究会」報告書, 京都大学原子炉実験所, pp124-133, 2004.
- [11] 藤田正一郎, H Cullings, D Preston, 船本幸代, 寺西幸子, E Grant, 渡辺忠章. 放影研における被爆者の DS02 線量計算, 葉佐井博巳ら編, 「広島・長崎原爆放射線量新評価システム DS02 に関する専門研究会」報告書, 京都大学原子炉実験所, pp142-149, 2004.
- [12] Preston DL et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. Radiat Res. 168, 1-64, 2007.
- [13] Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Free executive summary. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII – Phase 2., p16, 2006.
- [14] Tanooka H. Meta-analysis of non-tumour doses for radiation-induced cancer on the basis of dose-rate. Int. J. Radiat. Biol., 87, 645-52, 2011.
- [15] 館野之男, 放射線と健康, 岩波新書 745, 岩波書店, 2001.
- [16] Luckey TD, Lawrence KS. Radiation hormesis: the good, the bad, and the ugly. Dose Response, 4, 169-190, 2006.
- [17] Kakinuma S et al. Low-dose radiation attenuates chemical mutagenesis in vivo – cross adaptation –. Radiat. Res., 50, 401-405, 2009.
- [18] 佐渡敏彦. 放射線は本当に微量でも危険なのか. 医療科学社, 2012.
- [19] 太田成男. 放射線ホルミシス. (<http://shigeo-hta.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/08/111207放射線ホルミシス太田成男.pdf>).

[20] Cohen BL. Test of the linear no-threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. *Health Phys.*, 68, 157-174, 1995.

[21] 門田隆将. 死の淵を見た男. PHP 研究所, 2012.