

## ◎ トリチウムの危険 その2 ◎

米・ソに代表された超大国の覇権争いの象徴である大気圏内核実験とその副産物であるフォールアウト(放射性降下物質)は、人類に被爆を強要し、計り知れない被害をもたらしました。

特にトリチウムは1960年代では核実験前(自然起源)の100倍にも増加しています。

1963年、米、英、ソの大気圏の部分的核実験禁止条約の調印を契機として、その後の降水中のトリチウム濃度は1980年代では3Bq/L、現在では0.5Bq/L程度に減少を続けていると報告されていますが、原子力プラント(原発・再処理施設等)からは毎年膨大な量のトリチウム(気体及び液体)が環境中に漏出・放出され、プラント従事者やその周辺一帯の住民の健康を著しく害しています。

放射性廃棄物の99.98%以上がトリチウム(HTO)の放出で占められている北海道電力・泊原子力プラントの半径50Km圏内・20市町村の悪性新生物(ガン)の粗死亡率を公的な資料に基づいて比較検討した結果、稼働前と稼働後とではその粗死亡率が約140%～約240%にも上昇しています。

ガンへの罹患・死亡とトリチウムに代表された放射性廃棄物を放出する原発との強い因果関係が指摘されます。

日本での本格的原発建設の初頭に当たる1974年、放射線医学研究所・遺伝研究部長らが日本放射線影響学会・第17回大会(10月7日)において、「トリチウムはごく低濃度でも人間のリンパ球に染色体異常を起こす」と発表しており、既に約40年以前からその危険性が指摘されていました。

また、1985年3月16日、「核融合の原料トリチウム・母乳通し子に残留・動物実験で判明」との見出しで、マスメディアがトリチウムの危険性を報じています。

原子力プラントが、トリチウムを含む放射性廃棄物の大量放出を可能とする最大の根拠は、国際X線ラジウム防護委員会をその前身とし、半世紀以上にもわたり放射線のリスク評価の勧告を行って来たICRP(国際放射線防護委員会)に求めることが出来ます。

日本の公的機関(省庁)は、ベータ線のRBE(生物学的効果比)や低線量放射線のリスク評価等を故意に過小評価しているICRP等の勧告を参考として、原発からの放射性廃棄物の年間管理目標値・年間基準値を設定、原子力プラント運営業者に管理させていますが、それらの数値が人体の安全性を保証するという根拠など、どこにもありません。

核戦略の一環として原子力産業推進側の立場を擁護する観点から生み出されたリスク&ベネフィット論、そして、それに続くコスト&ベネフィット論、即ち功利追及のために人命を犠牲にする、というICRPの非人道的姿勢は強く糾弾されねばなりません。

その急先鋒がICRPの内部被爆や低線量放射線のリスク評価を厳しく指摘するECRR(欧州放射線リスク委員会)や日本のACSIR(内部被爆問題研究会)、そして、分子生物学や遺伝学等の観点から放射線の研究を行う内外の物理学界、医学界のエキスパート達です。

以下にエキスパート達の研究から導き出された「トリチウムの生物学的影響」の解説及び、その研究報告の概要を紹介します。

主にウランの三体核分裂によって生成されるトリチウムが人体にとって如何に危険極まりのない存在であるかがご理解いただけるかと思えます。

◆トリチウムの解説及び研究報告◆

◎トリチウム(三重水素)

- ◆トリチウムは水素の同位体で放射能を帯びている。
- ◆ベータ線を放出して陽子が2個中性子が1個のヘリウム3に変わる。
- ◆トリチウムの放射線のエネルギーは小さく、0.0186Mevのエネルギーを持つベータ線で、体内での飛程は、0.01mm。
- ◆エネルギーの低いベータ線の特徴はエネルギーの高いベータ線より相互作用が強く、分子切断を行う電離の密度が10倍程になり、トリチウム被爆が危険である要因。
- ◆被爆を考えるうえでセシウム被爆等、他の人工放射性物質との総合的被爆の考察が肝要で、他の放射線と合わさると非常に危険。
- ◆トリチウムは原爆爆発での高温・高圧を利用して水素を核融合する水素爆弾に使用され、水爆の爆弾の中でリチウムに中性子を当ててトリチウムが生成される。
- ◆原発(軽水炉)では、制御棒のホウ酸に中性子が吸収されたり、中性子の減速に重水を利用する重水炉では、重水に中性子が吸収されてトリチウムが生成される。
- ◆高速増殖炉では、冷却材として使用のナトリウム中にトリチウムが生成しそれが冷却水に移行。高速増殖炉もんじゅは多量のトリチウムを環境中に放出している。
- ◆トリチウムは通常三重水素(HTO)となって水に混じっており、科学的性質(科学反応性)物理的性質(原子の半径)が同じで、物理的性質の中の原子の重さだけが違うので、トリチウムだけを除去するフィルターは存在しない。
- ◆ただし、ウランウムを濃縮するガス拡散法やガス遠心分離法などの、何十段階ものプロセスと莫大な費用を投じれば可能となるが、莫大な費用を投じるよりも人間がコントロール出来ない致命的な危険が存在する原子力発電をやめたほうが賢い。

《出展:トリチウムの安全神話・三重水素の本当の正体? 琉球大学名誉教授 矢ヶ崎克馬》

◎トリチウムの生物学的影響研究の現状と将来

1 トリチウムβ線の生物学的効果比(RBE)

表1 トリチウムβ線のRBE(1975年以降の報告のまとめ)

指 標	RBE	文 献
致死効果		
・マウス卵胞	1.6~3	Dobson & Kwan <sup>10)</sup>
・培養細胞		
チャイニーズハムスターV79B	1.7~1.9	Bedford. Et al <sup>8)</sup>
マウス骨髄幹細胞	1.3~4.8	岡田.中村 <sup>17)</sup>
突然変異		
・マウス(特定遺伝子座)		
精原細胞	2.2	Russel. et al <sup>13)</sup>
・カイコ(特定遺伝子座)	1.3~1.6	田島.鬼丸 <sup>16)</sup>
・マウス培養細胞(6-TG <sup>r</sup> )	1.6~2.1	岡田.中村 <sup>17)</sup>
L5178Y (MTX) <sup>r</sup>	1.5~1.8	〃
・酵母(trp <sup>+</sup> )	2	Ito & Kobayashi <sup>20)</sup>
・枯草菌胞子(his <sup>+</sup> )	1.8	Tanoka & Munatake <sup>21)</sup>
〃 (his <sup>+</sup> )	約200	Sadaie. et al <sup>24)</sup>
染色体異常		
・チャイニーズハムスター培養細胞	1.2	Dewey. et al <sup>24)</sup>

※RBE(生物学的効果比:放射線に被爆した場合であっても、放射線の種類、エネルギーの違いにより生物に及

ばす効果に量的な差があるため、その違いを比で表したもの。通常、対象とする放射線と基準放射線とが生態に等しい変化を与えるときに前者の放射線量を後者の放射線量で割って得られる値であらわす。基準の放射線としてはX線または $\gamma$ 線が用いられる。線量等量(放射線の生物学的な影響を計算するための量)の算出に用いられる線質係数は、確率的影響に対するRBEにほぼ等しい。この場合のRBEはX、 $\gamma$ 、 $\beta$ 線は1 エネルギー2Mev以上の陽子は5、 $\alpha$ 線は20、中性子はエネルギーにより5~20とされている。出典:ATOMICA)

- ◆ICRPの1965年勧告(ICRP-Publication 9)では1.7の値が示されていたが69年にICRPから出された progress reportは最大エネルギーが0.03Mev の $\beta$ 線に対するQF値(線質係数)は、1.0にするのが適当と結論しており、77年のICRP勧告(ICRP publication 26)でもこの値が用いられてる。

QF値は実験により測定したRBEを根拠としているが、1975年以降に発表された研究の多くはRBEが1より大きくなることを示している。(表1)

- ◆注目すべき点は、RBEが線量率の減少とともに増大することで、同様の結果は哺乳類培養細胞の致死効果について岡田、中村<sup>17)</sup>が報告している。
- ◆Dobsonはマウスのほか、リスザル(squirrel monkey)についても同様の実験をおこなっている。妊娠期間を通じてトリチウム水を飲ませて体液中の濃度を0.05~3.1  $\mu$  ci/mlに保ち、生まれた仔の卵細胞に対する致死効果を調べたが、LD<sub>50</sub>がマウスよりも低く、0.5  $\mu$  ci/ml(0.1 rad/day)であることが明らかにされた。

ICRP勧告によれば、HTOの水中許容濃度(全身)は0.05  $\mu$  ci/mlであり、その10倍の濃度のトリチウムが卵細胞に対して致死効果をもつことはトリチウムの危険性について、再検討の必要があることを示唆している。

※線質係数(放射線荷重係数:放射線の種類やエネルギーの違いによって、同じ吸収線量でも生物学的な影響は異なる。線質係数は、異なる線質の放射線でも同一な生物的影響を、評価できるように導出された係数であり、生物的影響≪確率的影響または確定的影響≫は吸収線量に線質係数を乗じて計算される。実際には、人の様々な線質に対する生物学的効果比(RBE)のデータは少ないため水中での阻止能(LET)からの関数として求められる。出典:緊急被爆研修)

※線量率(dose rate:単位時間当たりの線量で、単位としてはSv/h, mSv/hなどが用いられる。

出典:ATOMICA)

※ $\mu$  ci(マイクロキュリー:3万7千ベクレル) rad(ラド:1rad=10mSv) HTO(トリチウム水)

※LD<sub>50</sub>(Lethal dose.50%:半致死量 物質の急性毒性の指標。致死量の一つとしてしばしば使われる数値。

投与した動物の半数が死亡する用量。出典:ウイキペディア)

## 2 突然変異・染色体異常の誘発

- ◆堀・中井は人の培養白血球について<sup>3</sup>H-TDR,HTOによる染色体異常の誘発を調べ、染色体切断の頻度とトリチウム濃度との関係を報告している。

注目すべき点は、低濃度域における異常頻度が高濃度域からの外挿値よりも大きくなること、また、トリチウム水の最大許容濃度0.05  $\mu$  Ci/mlにおいても異常が有意に増加していることである。

動物にトリチウム水を飲ませて染色体異常の誘発を研究したのはBrooksらである。

彼らはトリチウム水(3  $\mu$  ci)を与えて飼育したマウスの肝臓を部分切除し、手術後54時間の

再生肝で染色体異常を調べ、異常頻度が水道水を与えて飼育した対象の約3倍になる事を示した。

※<sup>3</sup>H-TDR (3H-Thymidine:トリチウムチミジン 水素の放射性同位体で3Hで放射線標識したチミジン。DNAの標識に使われる。 出典:生物学用語辞典)

《 出典:第9回放医研環境セミナー 環境と人体におけるトリチウム研究の諸問題 報文集トリチウムの生物学的影響研究の現状と将来(含む表1) 秋田康一 》

#### ◎細胞・分子レベルでのトリチウム影響研究

- ◆核融合炉では、核融合反応の結果エネルギーのβ線を放出するトリチウムが生成される。
- ◆トリチウムが環境中に放出されると周辺の住民や環境に放射線影響を及ぼす可能性がある。
- ◆トリチウムβ線の水中での平均飛程は560nm,水中での最大飛程は約6μm。
- ◆生物を構成する細胞は直径が約20-30μmであるため、人体の外部にあるトリチウムから放出されるβ線は、皮膚の最も外側にある細胞で遮断され、それより内部には到達しない。
- ◆トリチウムβ線による生物影響を考えるとときに重要となるのは内部被ばく。
- ◆体内分布を考える上でどのような化合物の形で生物体内に存在するかが重要。
- ◆トリチウムは生物体内に最も多く存在する水分子の水素分子と置換しやすく、HTO(トリチウム水)の形で存在することが多い。
- ◆HTOが生物体内に取り込まれると全身にほぼ均一に被爆を受ける。
- ◆トリチウムが有機化合物に含まれた有機結合型トリチウム(OBT)は、生態構成分子として体内に留まるため長期にわたってβ線を放出し続ける。
- ◆細胞内には多くの細胞内小器官と呼ばれる構造体があり、細胞のほぼ中央には直径が6-10μmの核(細胞核)がある。
- ◆細胞核の内部には生物の遺伝情報を担うDNAがあり、DNAは他の物質とともに複雑に折り畳まれたクロマチンと呼ばれる構造を形成する。
- ◆クロマチンを凝縮したものが染色体でヒトには48本の染色体がある。
- ◆トリチウムβ線の飛程からHTOは、細胞核内のDNAに損傷を与える確率が低く、OBTは、細胞核内のDNAに損傷を与える確率が高い。
- ◆他の線質の電離放射線を用いた研究では、放射線に直接被ばくしていない細胞にも細胞死、突然変異が引き起こされる放射線誘発**バイスタンダー**効果が知られており、飛程の短いβ線を放出するトリチウムの生体影響においても**バイスタンダー**効果を考慮する必要がある。
- ◆非常に低エネルギーであるトリチウムβ線は、高エネルギーβ線とはその性質が異なるところがある。
- ◆電子のエネルギーが減少すると**stopping power**が上昇するため、トリチウムのβ線は飛程の終末付近で高い線量を与えることになり平均電離密度は高い。
- ◆低エネルギー電子線は高エネルギー電子線よりも電離密度が高い。
- ◆細胞核内にあるDNA分子の複合体の大きさ(数十nm~数百nm)は、トリチウムβ線の飛程とほぼ同程度のサイズで、細胞核内で放出されたトリチウムβ線の飛程の末端がDNA分子の上にあった場合には、他に比べてそのDNA分子に対して比較的大きな、線量が局所的に与えられることになる。

- ◆DNA分子上の極めて限局された個所に複数の電離が生じると、2個以上の損傷が集中して生じ「**クラスター損傷**」と呼ばれる複雑なDNA損傷が形成される。
- ◆クラスター損傷は、修復しにくい損傷であるため、生物にとっては重大な影響を及ぼしうる損傷であり、恐らく、トリチウムβ線の方がγ線やX線に比べて、**クラスター損傷**がより生じやすく、このことがトリチウムのRBE(生物学的効果比)が1ではなく、2に近い値となる原因ではないかと考えられる。
- ◆トリチウムのβ壊変により、本来水素であった原子がヘリウムに変換することからその生体構成分子の機能に何らかの変化が生じることが推測される。

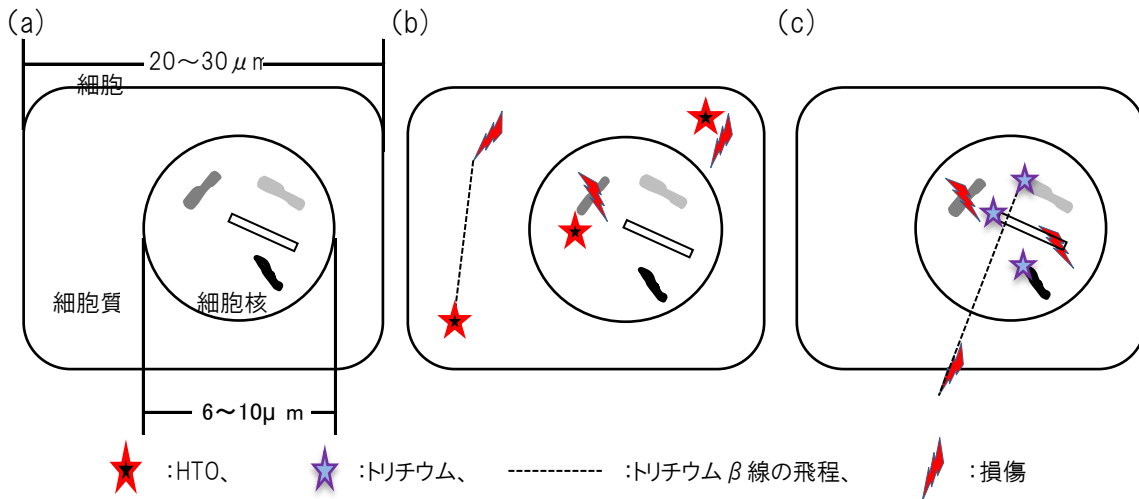


図1 細胞の大きさと、トリチウム化合物の細胞内分布の概念図

- (a) 細胞と細胞核の大きさの概略を示す。細胞内部は細胞核と細胞質に大別される。
- (b) トリチウムがHTOの形であるときには、細胞内に均一に分布するため、細胞核内にβ線が届く場合が少なく、DNAが損傷を受ける確率も低くなる。
- (c) トリチウムがOBTとなり、DNAに取り込まれた場合にβ線の届く範囲は細胞核内にほぼ限られるためDNAが損傷を受ける確率は高くなる。

※stopping power(ストップングパワー:阻止能 荷電粒子が物質を通過するときの単位距離あたりの平均のエネルギー損失量。 出展:weblio辞書)

※イオン化:(原子に他の粒子[放射線等]が衝突して、原子の持っている電子が弾き飛ばされて軌道電子を奪われた状態。 出展:原子の基礎知識)

※DNAのクラスター損傷(nm程度の狭い領域に複数個の損傷を同時に受けた空間的に密集したDNAの損傷を指し、局所的に生じた複数の損傷はDNAの立体構造をゆがめてしまうため修復が困難になることが予測でき細胞死などの原因になっていると考えられている。クラスターDNA損傷は、放射線の中でも局所的にエネルギーを付与する清質を持つ粒子線〔アルファ線やベータ線〕で最も頻繁に起こる。 出展:日本原子力開発機構)

《出展:プラズマ・核融合学会誌 2012. NO3. VOL88 講座 トリチウム生物影響研究の動向(含む図1)

茨城大学理学部・立花章 田内広 京都大学放射線生物研究センター・小林順也》

©トリチウム生物効果(発がん)

- ◆トリチウムは他の放射線と同様に動物発がん、及び高感受性発がん系としての細胞トランスフォーメーションでの発がん誘発が報告されている。
  - ◆トリチウム線量依存症に関してSprague-Dawleyラット乳がんを用いたCahill(1970.1975<sub>a,b</sub>)およびBalb/3T3細胞トランスフォーメーションを用いたLittle(1986)らの実験は線量と共に増加する直接的な発がん率を報告している。
  - ◆横路(1990)らは、C57BLマウスにトリチウム水1回投与(7.4GY)と同量のトリチウム水を4週間に亘っての分割投与条件での発癌率の比較を行った。  
結果は1回投与のリンパ腫発生が約20%なのに対して分割投与では予想に反して約4倍に増加した。
  - ◆最近、Kadhim(1992)らは、in vitro実験系での $\alpha$ 線誘発のマウス子骨髄細胞の染色体異常が子孫細胞にも高頻度で維持されることを報告した。
- ◀ 出展：高山大学水素同位体機能研究センター研究報告17:13-25.1987 トリチウムの生物効果と今後の研究展望 広島大学原爆放射能医学研究所 小松賢志 ▶

※トランスフォーメーション(形質転換:培養細胞が性質を変えて、腫瘍細胞に類似の性質をもつこと。出展:Weblio辞書)

※Sprague-Dawleyラット(スプラーグドーリーラット:代表的なクローズドコロニー実験動物ラット種 出展:ライフサイエンス辞書)

※Balb/3T3細胞(バルブ/3T3細胞:マウス胎仔由来細胞株 出展:ライフサイエンス辞書)

※C57BLマウス(遺伝子改変によく用いられる系統のマウス 出展:ライフサイエンス辞書)

※in vitro jixtukenn (イン・ビトロ実験:試験管や培養器などの中でヒトや動物の組織を用いて、体内と同様の環境を人工的に作り、薬物の反応を検出する試験。 出展:研究用語辞典)