

トリチウムによる健康影響



一般社団法人 日本放射線影響学会
放射線災害対応委員会編

トリチウムによる健康影響

(一社) 日本放射線影響学会
放射線災害対応委員会

- 「トリチウムによる健康影響」に関する科学的根拠に基づく資料（解説書）の編纂を行う。
- 具体的には信憑性・信頼性の高い論文・報告書等を集めて、それらに記載されている「トリチウムによる健康影響」に関する内容を分かりやすい文章でまとめる。
- この資料は専門家のみならず、福島県民の方々も記載内容が把握できるように分かりやすい文章で作成する。

概 要

- I. トリチウムとは何か？（化学物質としての観点から）
- II. トリチウムとは何か？（放射性物質^{*1}としての観点から）
- III. トリチウムの被ばく経路（吸入・吸収・摂取）と生体内での代謝
- IV. トリチウムによる健康影響
（トリチウムによる健康影響にはどのようなものがあるのか？具体的にトリチウムによる健康影響を解析した研究にはどのようなものがあるか？）
- V. 放射線に被ばくしたら何が起これるか？

^{*1}放射性物質：放射能（壊変して放射線を放出する性質）をもつ物質の総称で、放射性同位元素あるいは放射性同位体ともいう。壊変とは不安定な原子核が放射線を出すことにより他の安定な原子核に変化する現象のこと。

はじめに

平成 23 年（2011 年）3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所事故以降、原子力発電所から生成されるトリチウム水についての関心が高まっており、特にその健康影響についての情報が求められている。

これまでにいくつかの統合的なトリチウムに関する総説・記録などが報告されているが、専門的な情報が多く、またその情報源が古く現在でも有効な情報であるかが不明であり、外国語による報告書の日本語翻訳版がないなど、広く一般市民のもとに届いていないのが現状である。

本解説書では今までに報告されている信頼性の高い科学的な事実を包括的に一般市民でも理解できるように極力分かりやすく解説する。記載されていることはあくまでも科学的な実験結果に基づいた事実であるが、当然その事実のみでトリチウムの健康影響がすべて理解できるわけではないことにご注意いただきたい。

I. トリチウムとは何か？（化学物質としての観点から）

<キーポイント>

1. トリチウム（トリチウム原子、 ^3H ）とは水素（水素原子、 ^1H ）の1種である。
2. トリチウムは宇宙放射線によって自然に生成されている。
3. トリチウムは人工的にも作られている。
4. トリチウムは水を構成する水素と置換してトリチウム水として存在する。

トリチウムは三重水素とも呼ばれる水素の1種でオーストラリアの物理学者 Oliphant らによって 1934 年に発見された [1]。天然に存在する水素原子のほとんど(99.9%以上)は陽子 1 個のみを原子核に持つ(^1H)。水素原子のうち約 0.015%は原子核に陽子 1 個の他に中性子 1 個を持ち、重水素（デュテリウム、 ^2H ）と呼ばれる。トリチウム (^3H) は陽子 1 個の他に、中性子 2 個を原子核に有している（図 1）。

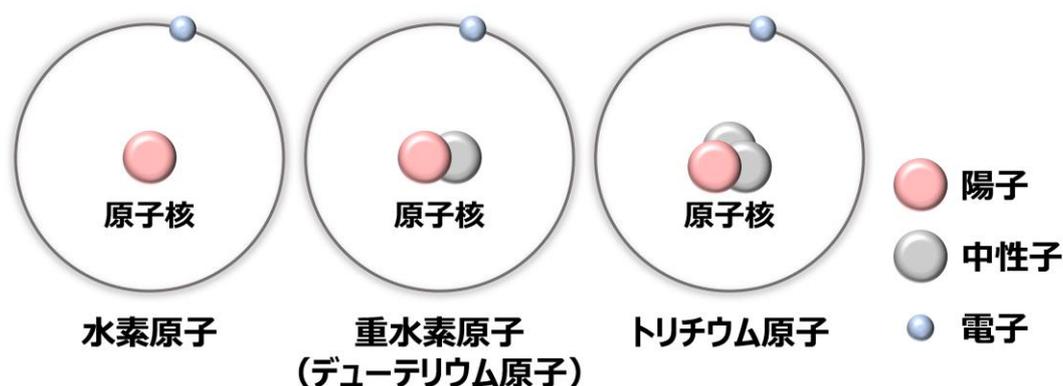


図 1. 水素原子・重水素原子・トリチウム原子との違い。

水素 (^1H)、重水素 (^2H) の原子核は安定であるが、トリチウム (^3H) の原子核は不安定であり、安定な状態になろうとしてβ線^{*2}と呼ばれる放射線を放出する。β線のエネルギー 18.6 ルギーなどについては後述するが、トリチウムは自然界に常に存在し、例えば、宇宙からの放射線（中性子または陽子）が大気中の酸素や窒素と反応して自然に生成されている。自然生成されるトリチウム数は、1 cm²（平方センチメートル）の地球表面積あたり1秒間に0.2～1個と計算されている [2]。地球全体の表面積が約 5×10^{14} m²（平方メートル）であるから、単純計算すると1秒間あたりに地球上に発生するトリチウムの数は $1 \times 10^{18} \sim 5 \times 10^{18}$ 個となる。これを1年間に換算すると $3.2 \times 10^{25} \sim 1.6 \times 10^{26}$ 個 ($5.7 \times 10^{16} \sim 2.86 \times 10^{17}$ ベクレル (Bq)) になる。このようにトリチウムは自

^{*2}β線：放射線の一種で、その実体は電子または陽電子である。β⁻壊変により電子が、β⁺により陽電子が放出される。

然に生成される一方で、核融合などによって人工的に生成されてきている。人工的なトリチウムは核実験での核分裂副産物として、また原子力関連施設内で副次的に生成され、環境中に放出されている。現在、自然環境中に存在するトリチウムの大部分は、1945～1984年に行われた大気圏内核実験、特に水爆実験の結果として地球上に拡散したものである。その総量は 1.86×10^{20} Bq と推定されている [3]。

生成されたトリチウムはそのまま単体では存在することはなく、すぐに大気中の酸素と反応し、トリチウム水として自然の大気・水循環に組み込まれる（図2）。

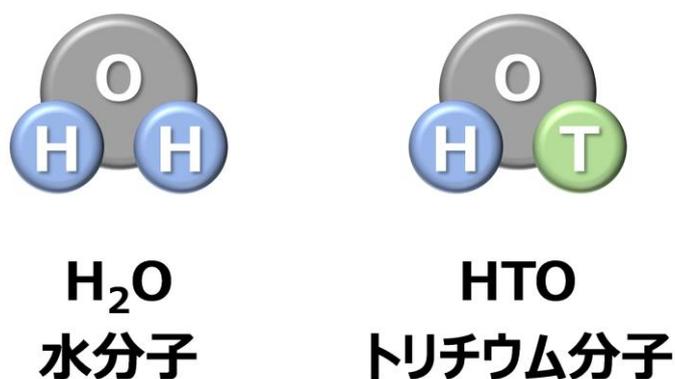


図2. 水分子とトリチウム水の違い。

1個の酸素原子（O）と2個の水素原子（H）で構成される水は H₂O と表記されるが、2個の水素のうちの一つがトリチウム（Tと表す）となっているトリチウム水は HTO と表記される。

Ⅱ. トリチウムとは何か？（放射性物質としての観点から）

<キーポイント>

1. トリチウムはβ線を放出する。
2. トリチウムの物理的半減期^{*3}は 12.3 年である。
3. トリチウムが放出するβ線のエネルギーは平均 5.7 keV である。
4. トリチウムが放出するβ線のエネルギーは非常に低く細胞を通過できない。
5. トリチウムによる放射線被ばくはトリチウム水の吸入・摂取・吸収による内部被ばく^{*4} である。

トリチウム (^3H) の物理学的半減期は 12.3 年であり、その 1g あたりの放射能は 3.56×10^{14} Bq である。トリチウムは原子核が不安定であるため、安定化するために平均で 5.7 keV、最大で 18.6 keV のβ線を放出する。

生化学領域における放射性同位元素を用いる実験でよく用いられるリン 32 (^{32}P) が放出するβ線の最大エネルギーは 1,711 keV、また動物化石や植物の年代推定に用いられる炭素 14 (^{14}C) の放出β線の最大エネルギーは 156 keV であることから、トリチウムが放出するβ線のエネルギーは非常に低いことがわかる（図 3）。そのため、トリチウムが放出するβ線が到達できる距離（飛程）は極めて短い。トリチウムはほとんどがトリチウム水として存在するので、水中での被ばくを考えると、平均でわずか 0.56 μm、最大で 6 μm しかなく、約 10 μm の直径を有する動物細胞の核を通過することはできない。したがって、トリチウムによる放射線被ばくは、外部被ばく^{*4} ではなく、トリチウム水を体内へ吸入・摂取・吸収により取り込むことによる内部被ばくである。

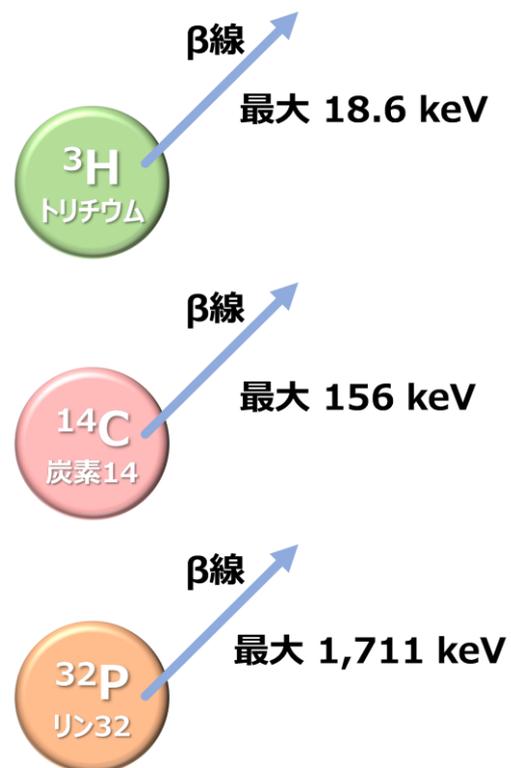


図 3. トリチウムなどが放出するβ線のエネルギー

^{*3} 物理学的半減期：放射性物質が壊変により元の半分になるまでの時間で、放射性核種にそれぞれ固有のものである。

^{*4} 外部被ばくと内部被ばく：外部被ばくとは地表にある放射性物質や空気中に浮遊する放射性物質、あるいは衣服や体表面に付いた放射性物質から放射線を受けること。内部被ばくとは体内に取り込んだ放射性物質から放射線を受けること。

Ⅲ. トリチウムの被ばく経路（吸入・吸収・摂取）と生体内での代謝

トリチウムによる健康影響を理解するには、トリチウム水を体内に取り込んだことによる内部被ばくの影響を理解しなければならない。

トリチウムが体内に取り込まれる経路としては、

- ① 空気中に含まれるトリチウム水の鼻・口からの吸入
- ② 皮膚からの吸収
- ③ 食べ物・飲み物に含まれるトリチウム水の摂取

などが挙げられる。体内に取り込まれたトリチウム水は体液循環経路に入り、最終的には尿、糞便などによって体外に排出される。トリチウムの物理的半減期は 12.3 年であるが、生体内に取り込まれたトリチウム水は比較的早く体外に排出されるため、トリチウムの生物学的半減期^{*5}は 10 日程度である。

トリチウムによる内部被ばくを理解する上で一つ注意すべきことは、トリチウムはそのほとんどが水分子の中に存在する一方で、生体内のタンパク質、糖、脂肪などの有機化合物の水素原子と置き換わることにより生体の構成分子として存在することである。このような有機化合物中のトリチウムを有機結合型トリチウム (Organically Bound Tritium, OBT) といい、生体内に取り込まれたトリチウム水のうちの約 5 ~ 6% が OBT に変わると考えられている。トリチウム水を体内に摂取した場合と異なり、特に有機化合物中の炭素と結合したトリチウムは他の原子との置換が起こりにくいので OBT は生体分子として生体内に長く留まることとなる。そのため、OBT の生物学的半減期は、短期成分で約 40 日、長期成分で約 1 年である。つまり、体内に取り込まれたトリチウム水のほとんどが比較的短時間で体外に排泄される。したがって、ヒトの体内に取り込まれたトリチウム水による内部被ばくは、少ない線量（低線量）で、時間当たりにおいても少ない線量（低線量率）による被ばくである。

実際に生物学的半減期を解析した実験として、8 週齢のマウスにトリチウム水の腹腔内投与を 1 回行い、その後約 80 日間尿中のトリチウム濃度を測定した Kunugita らの報告がある。その実験結果では、トリチウム水の半減期が 2.76 日、一方、OBT の半減期が 14.1 日であった [4]。また、Saito らは、妊娠マウスにトリチウム水の腹腔内投与を 1 回行い、生まれた新生マウスをトリチウム水投与をしていない雌マウスのミルクで育てた時の各臓器におけるトリチウム水の生物学的半減期を解析した結果、脾臓、肝臓、小腸、胃、胸腺、肺、腎臓、心臓、脳のいずれにおいても 2.5 日から 2.9 日であった [5]。ヒトとマウスでは物質代謝の速度などが異なるので生物学的半減期の数値が異なることに留意していただきたい。

ヒトがトリチウムを摂取する経路およびヒト体内での動態について、ICRP Publication

^{*5} 生物学的半減期：体内に摂取した放射性物質の放射能が放射性物質の体外への排泄により半分になる時間である。

89, 2002 [6] および UNSCEAR 2016 REPORT [7] を参考にして、図 4 にまとめた。

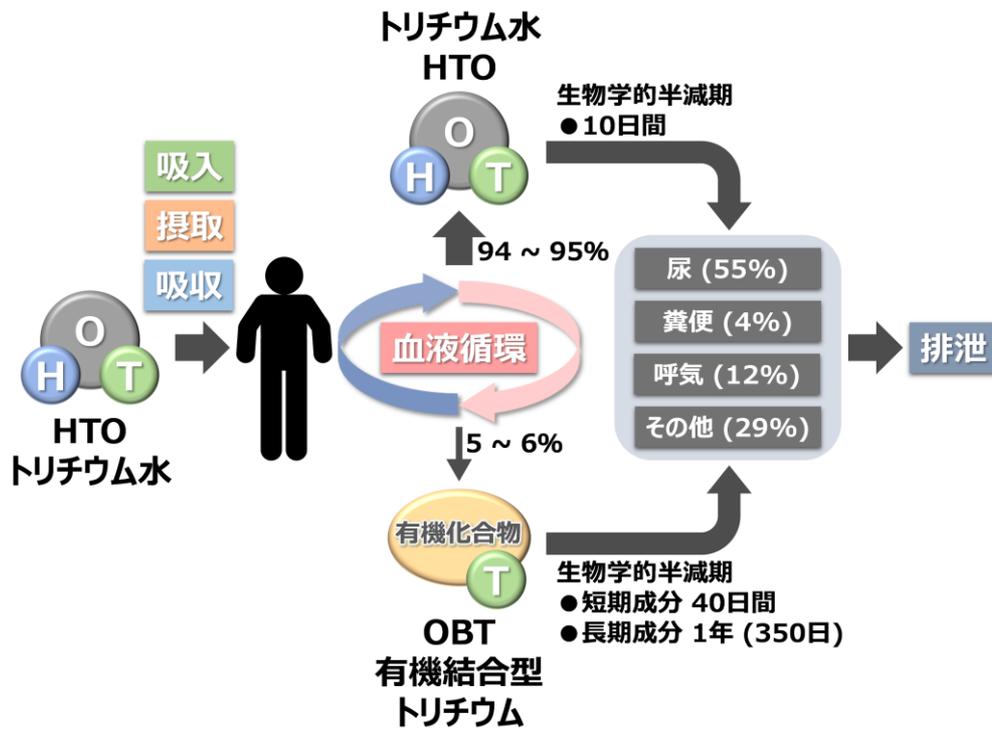


図 4. ヒトでのトリチウムの代謝 [6,7].

IV. トリチウムによる健康影響

では、トリチウムによる内部被ばくはどの程度の健康影響を及ぼすのだろうか。まず、成人が経口で取り込んだトリチウムの預託実効線量係数^{*6}は 1.8×10^{-8} mSv/Bq、影響が大きい（生物学的半減期が長い）OBTであっても 4.2×10^{-8} mSv/Bq で、この値はセシウム 137 の 1.3×10^{-5} mSv/Bq に比べて 1/300 以下であり、同じ Bq 数であればトリチウムによる健康影響がはるかに小さいことは理解しておくべき点である（表 1）。

表 1. 経口摂取の場合の預託実効線量係数 (mSv/Bq) .

	トリチウム水 	セシウム134 	セシウム137 	ヨウ素131 
3か月児	6.4×10^{-8}	2.6×10^{-5}	2.1×10^{-5}	4.8×10^{-5}
1歳児	4.8×10^{-8}	1.6×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.8×10^{-5}
5歳児	3.1×10^{-8}	1.3×10^{-5}	9.6×10^{-6}	1.0×10^{-5}
10歳児	2.3×10^{-8}	1.4×10^{-5}	1.0×10^{-5}	5.2×10^{-5}
15歳児	1.8×10^{-8}	1.9×10^{-5}	1.3×10^{-5}	3.4×10^{-5}
成人	1.8×10^{-8}	1.9×10^{-5}	1.3×10^{-5}	2.2×10^{-5}

● トリチウムによる個体死への影響

Brueらは、CF1^{*7}雌マウスに $1.26 \times 10^8 \sim 8.4 \times 10^9$ Bqのトリチウム水を1回腹腔内投与して致死線量を解析した。その結果、個体数の半分が30日で死亡する線量（LD_{50/30}、マウスの場合はGy（吸収線量）で表す）は9 Gy（マウス体重1グラムあたり 3.7×10^7 Bq相当）であった [8]。その後、CF1雌マウスにトリチウム水を腹腔内投与した実験では、LD_{50/30}は8 Gy（マウス体重1グラムあたり 3.3×10^7 Bq相当） [9]、C57BL/6N^{*7}の雌マウスでは約8 Gy（マウス体重1グラムあたり約 2.8×10^7 Bq）、(C57BL/6N × C3H/He) F1^{*8}雌マウスの場合ではLD_{50/30}は13 Gy（ 4.7×10^7 Bq）であることが示された [10]。したがって、マウスのトリチウム水の腹腔内投与による致死線量は10 Gy前後と考えられる。

^{*6} 預託実効線量係数 (mSv/Bq) : 放射性核種の摂取量 (Bq) から内部被ばく線量 (シーベルト, Sv) を換算するための係数で、1 Bq あたりの内部被ばく線量 (Sv) として表す。預託実行線量とは放射性物質を一回だけ摂取した場合に、それ以後の生涯にどれだけの放射線を被ばくすることになるかを推定した被ばく線量。

これまでにBq、Gy、およびSvという3種類の放射線の単位が出てきているので、これらについて概説する。Bq（ベクレル）とは、放射性物質（放射性同位元素）が1秒間に壊変する原子の個数（放射能）を表す単位である。1秒間に1原子が壊変する放射能を1 Bqと定義する。Gy（グレイ）とは、物質に吸収された放射線のエネルギー（吸収線量）を表す単位である。物質1 kgあたり1 J（ジュール）の仕事に相当するエネルギーが与えられる時の吸収線量を1 Gyと定義する。Sv（シーベルト）とは、ヒトの被ばくによる生物学的影響（健康影響）の大きさ（等価線量・実効線量）を表す単位である。等価線量とは、放射線の種類によるヒトへの影響の違いを規定した放射線加重係数（表2）と被ばくした吸収線量の積である。実効線量とは、ヒトの組織・器官の放射線感受性の違いを規定した組織加重係数（表3）と等価線量の積である。

表 2. 放射線加重係数.

放射線の種類とエネルギーの範囲	放射線加重係数
光子・全てのエネルギー	1
電子・μ粒子、全てのエネルギー	1
中性子、エネルギーが < 10 keV] 連続関数変化
中性子、エネルギーが10 keV < 100 keV	
中性子、エネルギーが100 keV < 2 MeV	
中性子、エネルギーが2 MeV < 20 MeV	
中性子、エネルギーが20 MeV <	
反跳陽子以外の陽子、エネルギーが2 MeV <	2
α線、核分裂片、重原子核	20

表 3. 組織加重係数.

組織・臓器	組織加重係数	組織・臓器	組織加重係数
生殖腺	0.08	肝臓	0.04
赤色骨髄	0.12	食道	0.04
腸管	0.12	甲状腺	0.04
肺	0.12	皮膚	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
膀胱	0.04	脳	0.01
乳房	0.12	他の組織・臓器	0.12

ヒトがトリチウムを長期間摂取したことによる放射線被ばく事故例が1960年代にヨーロッパで起きている。当時、トリチウムを含む夜光塗料が時計の文字盤に使用され、時計を製造する2つの施設で事故が発生した。1つは、7.4年にわたってトリチウムを経口摂取し、尿

中のトリチウム量から被ばく線量は7.4年で3 ~ 6 Svと推定された。赤血球中のヘモグロビンの量は正常であるが、赤血球数が少なくなる正色素性貧血を発症し、その後、白血球や血小板の減少が起こり、汎血球減少症^{*9}が原因で死亡している。もう1つの事例は、トリチウムの経口摂取により3年で10 ~ 20 Svの被ばくと推定され、似たような症状の経過をたどり汎血球減少症が原因で死亡している [11]。

● トリチウムの発がんへの影響

トリチウムなどの放射性物質による発がん実験をヒトで実施することはできない。その代替えとして利用されるマウスを用いた実験により得られた解析結果を概説する。トリチウムが発がんへの影響を解析するために、トリチウム水を約 550 匹の (C57BL/6N × C3H/He) F1 雌マウスに生涯、飲ませ続けた実験がある。普通の水を飲ませて育てた非摂取群および種々の濃度のトリチウム水を飲ませた摂取群において、それぞれのマウスの平均寿命、がんの発症率、またそのがんの種類について解析した [12, 13]。

トリチウム水を摂取したマウスは 7 日間で体内のトリチウム濃度が平衡に達することから、マウスが実際にどの程度トリチウムにより被ばくしているのかを示す線量率 (1 日あたりの被ばく線量) は、トリチウム水の濃度が平衡に達したマウスから摘出した臓器のトリチウム濃度を測定することにより算定している。実験の結果、図 5 に示すように、マウスの平均寿命は 1 日あたり 3.6 mGy の被ばく (1 リットルあたり 1.4×10^8 Bq のトリチウム水を生涯飲み続ける) までは非摂取群と変わらなかった。また、非摂取群マウスにおいても約半数 (48%) にがんを発症するが、非摂取群よりも顕著に発がん個体数が増加したのは、1 日あたり 10 mGy 以上の被ばくからであり、平均寿命同様に 1 日あたり 3.6 mGy 以下では影響が見られないことが分かる (図 5)。

また、生じたがんの種類を詳細に分類してみると、1 日あたり 3.6 mGy 以下では、非摂取群とがんの種類および頻度が非常に似ていることが分かる (図 6)。

以上の実験結果を総合すると、マウスにおいてはトリチウムによる平均寿命短縮およびがん発症にしきい線量が存在し、その値は 1 日あたり 3.6 ~ 10 mGy の間にあることが分かった。これは、1 リットルあたり 1.4×10^8 Bq 程度のトリチウム水を生涯飲み続けても、がんの発症率は自然発症率の範囲内であるということになる。しかし、これはあくまでもマウスの結果であり、ヒトでの数値は明らかではないことに注意していただきたい。

^{*7} CF1、C57B/6N : 実験によく用いられているマウスの系統名。

^{*8} (C57BL/6N × C3H/He) F1 : C57BL/6N マウスと C3H/He マウスとを掛け合わせて生まれた子孫第 1 代のこと。

^{*9} 汎血球減少症 : 血液中のすべての血球 (赤血球、白血球、血小板) が減少した病態のこと。

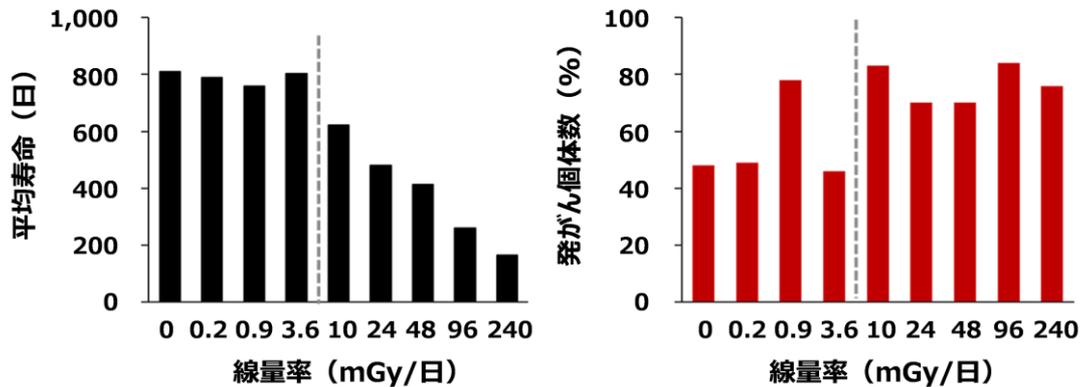


図5. トリチウム水を摂取したマウスの平均寿命と発がん個体数割合のグラフ。
(文献[12]のデータをもとに作成)

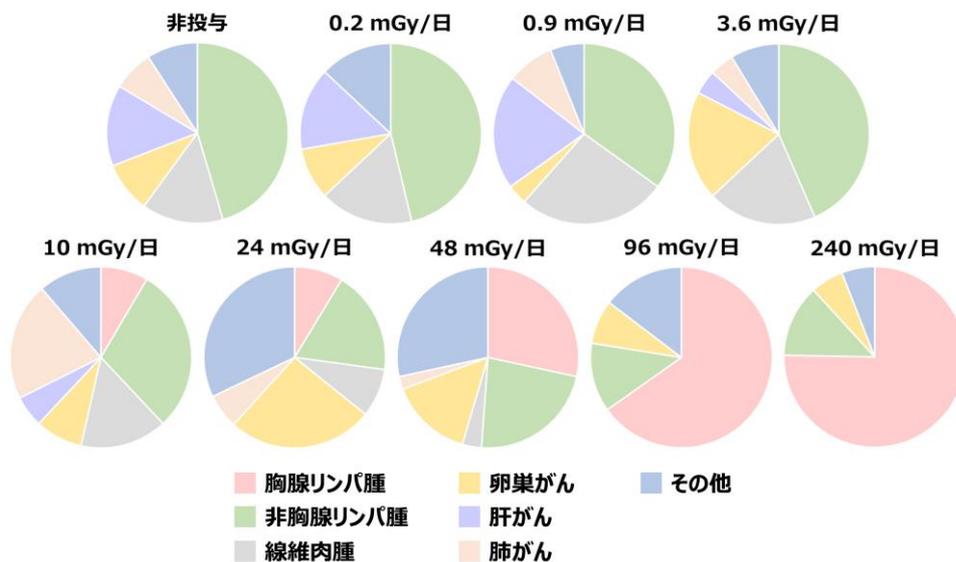


図6. トリチウム水を摂取したマウスに発症したがんの種類。
(文献[13]のデータをもとに作成)

● トリチウムの脳・神経系への影響

Gaoらは最も放射線の影響を受けやすい妊娠13日目のWistar雌ラットにトリチウム水を飲水させ、胎児期に46、92あるいは273 mGy相当の被ばくを受け生まれた仔ラットの反射神経等について解析した [14]。その結果、273 mGyの被ばくで有意に脳重量が減少し、また脳の海馬^{*10}という部位においては92 mGyで有意な紡錘神経細胞^{*11}の密度低下が認められ、学習と記憶に障害が生じていた。また、妊娠12.5日目のC57BL/6J雌マウスにトリチウム水を腹腔内投与した実験では、子宮内で100あるいは300 mGyを被ばくした仔マウスで認知機能の低下が報告されている [15]。

*10 海馬：大脳の側頭葉内部に位置する特徴的な層構造を示すように細胞が配列している部分で、記憶や学習能力に関与している。

*11 紡錘神経細胞：神経細胞の一種で紡錘形をしている。大脳皮質の一番内側に多く、海馬にも分布している。

V. 放射線に被ばくしたら何が起こるのか？

上述のように、トリチウムによる生物影響として様々な現象・症状が報告されているが、トリチウムなどの放射性物質により放射線を被ばくすると生体内では何が起きているのだろうか？

ヒトでの放射線による健康影響は、確定的影響と確率的影響に大別される。確定的影響とは、ある一定の線量（しきい線量）の放射線を被ばくした場合にほとんど個人差なく症状が現れる影響で、被ばくした組織の幹細胞の死滅により発症する。被ばく後数週間で症状が現れる早期影響として脱毛・永久不妊、長い潜伏期後に症状が現れる晩発影響として白内障がある。それぞれのしきい線量は、脱毛が 3 Sv、永久不妊が 2.5 ~ 6 Sv、白内障が 0.5 Sv とされている。また妊婦が被ばくした場合には胎児に確定的影響が現れ、胎児の発育時期に応じて、胚死亡（流産）・奇形を発症し、いずれのしきい線量も 0.1 Sv とされ、この線量がしきい線量の最低線量とされている。一方、確率的影響は被ばくした線量に応じて確率的に症状が現れる影響で、被ばくした組織を構成している細胞の DNA 上に突然変異が蓄積することにより発症する。被ばくにより発症するがん・白血病がこれに相当する。したがって、0.1 Sv 以下の低線量被ばくにより発症する健康影響は確率的影響のみと考えられ、低線量被ばくによりがん・白血病が発症するか否かが問題となる。しかしながら、0.1 Sv 以下の被ばくによる確率的影響の科学的根拠は現在のところ得られていない。

放射線は DNA やタンパク質、さらには脂質など細胞・組織・臓器・生体を構成している物質と相互作用し、その機能を変化させる。特に、生物にとって遺伝情報が書き込まれている DNA の化学変化は生物影響を考える上で最も重要である。

放射線は DNA を切断し、その化学構造を変化させることにより、いわゆる DNA 損傷を誘発する。DNA 損傷はそのまま放置すると遺伝子の突然変異やゲノム不安定性を誘発し、発がんの原因となることがあるが、細胞には DNA 損傷を修復するしくみが存在し、放射線によって誘発された DNA 損傷を修復している。例えば、放射線によって誘発される DNA 損傷の中で最も重篤な損傷、つまり細胞死を誘発する DNA 二本鎖切断（double-strand break, DSB）の修復には、切断された末端同士をそのまま結合する非相同末端結合（non-homologous end joining, NHEJ）経路と、無傷の DNA を鋳型にして DNA を再合成することにより修復する相同組換え（homologous recombination, HR）経路の 2 つが主に機能している。

NHEJ 経路が機能した場合、切断された DNA 末端同士を連結する時に遺伝子情報の一部が失われる危険性を伴う。しかしながら、ヒトの場合、DNA の中でタンパク質に翻訳される部分はわずか 2 %程度に過ぎず、分化した細胞であれば、そのまま再結合を行っても

ほとんど生体影響は生じないと考えられている。

HR 経路が機能した場合、無傷の DNA をコピーすることにより修復するため、遺伝情報の一部を失うことなく DSB を修復することができる。しかし、HR 経路を用いた修復を行うには、失われた部分と同じ遺伝情報を持つ無傷の DNA が存在することが前提となるため、この修復経路が機能する細胞周期^{*12}は DNA 複製が行われている S 期と DNA 複製が完了している G₂ 期に限定される。すなわち、HR 経路は、細胞分裂が盛んな組織でのみ活用されていると考えられている [16]。

これらの修復機構に関わる多数のタンパク質分子は、損傷の認識、他のタンパク質分子への情報伝達、そして修復の実働といった分業体制で機能し、小さな細胞の中で、その局在や量を変化させていくことが解明されてきている [17]。

^{*12}細胞周期：1つの細胞が2つの娘細胞を生み出す過程のことで、間期と分裂期（M期）に分けられ、間期はさらに G₁ 期、S 期、G₂ 期に分けられる。G₁ 期は S 期で行われる DNA 複製の準備期間であり、G₂ 期は分裂期（M 期）で行われる染色体分配の準備期間である。

おわりに

私たちがトリチウムの生物影響を正しく理解するためには、その線量とリスクの関係を科学的根拠に基づいて理解することが求められる。

特にトリチウム水による被ばくの影響は、低線量・低線量率の放射線被ばくの影響なので、トリチウムの被ばく影響を評価するための高感度な実験システムが必要である。しかし、これまでの放射線影響研究は比較的高線量の被ばく影響を解析するものが多く、現時点で低線量・低線量率被ばくの影響を明確に評価できる実験システムは少ない。

また、科学的根拠となるこれまでのトリチウムの生物影響に関する研究は、そのほとんどがモデル動物を用いて行われてきたものであり、私たちはこれらの科学的根拠がそのままヒトに当てはめられないことにも留意しなければならない。今後、ヒトでのトリチウムを含めた低線量・低線量率放射線による健康影響を解明するための科学的根拠の解明が継続して行われることを期待する。

なお、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）の2016年報告書[7]には、トリチウムの生物影響に関する情報が非常に丁寧かつ豊富にまとめられており、ウェブ上でも公開されている [18] ので一読をおすすめする。

引用文献

- [1] Oliphant, M., Harteck, P., Rutherford, L. Transmutation effects observed with heavy hydrogen. Proc R Soc London Ser A: 692-703 (1934).
- [2] Jacobs, D.G. Sources of tritium and its behavior upon release to the environment. U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, Tennessee, (1968).
- [3] United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR 2000 report); Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol. 1, New York, (2000).
- [4] Kunugita, N., Dohi, S., Yamamoto, H., Norimura, T., Tsuchiya, T. Biological assessment of the enhancement of tritium excretion by administration of diuretics and excessive water in mice. J Radiat Res, 31: 361-374 (1990).
- [5] Saito, M., Streffer, C., Molls, M. Tritium distribution in newborn mice after providing mother mice with drinking water containing tritiated thymidine. Radiat Res, 95: 273-297 (1983)
- [6] ICRP Publication 89, (2002).
- [7] UNSCEAR 2016 REPORT, Sources, effects and risks of ionizing radiation, Annex C – Biological effects of selected internal emitters – Tritium, (2016).
- [8] Brues, A.M., Stroud, A.N., Rietz, L. Toxicity of tritium oxide to mice. Proc Soc Exp Biol Med, 79: 174-176 (1952).
- [9] Furchner, J.E. Relative biological effectiveness of tritium beta-particles and Co60 gamma-rays measured by lethality in CF1 mice. Radiat Res, 6: 483-490 (1957).
- [10] Yamamoto, O., Yokoro, K., Seyama, T., Kinomura, A., Nomura, T.

HTO oral administration in mice. I: Threshold dose rate for hematopoietic death. *Int J Radiat Biol*, 57: 543-549 (1990).

- [11] 澤田 昭三、岡田 重文：核融合研究者のためのトリチウムの安全取扱いの目安、8 章 ヒトのトリチウム摂取による障害、平成元年度文部省科学研究費補助金報告書 (1990)
- [12] Yamamoto, O., Seyama, T. Jo, T., Terato, H., Saito, T., Kinomura, A. Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. II. Tumour development. *Int J Radiat Biol*, 68: 47-54 (1995)
- [13] Yamamoto, O., Seyama, T., Itoh, H., Fujimoto, N. Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. III: Low dose-rate irradiation and threshold dose-rate for radiation risk. *Int J Radiat Biol*, 73: 535-541 (1998).
- [14] Gao, W.M., Wang, B., Zhou, X.Y. Effects of prenatal low-dose beta radiation from tritiated water on learning and memory in rats and their possible mechanisms. *Radiat Res*, 152: 265- 272 (1999).
- [15] Wang, B., Zhou, X.Y. Effects of prenatal exposure to low-dose beta radiation from tritiated water on the neurobehavior of mice. *J Radiat Res*, 36: 103-111 (1995).
- [16] Iijima, K., Ohara, M., Seki, R., Tauchi, H. Dancing on damaged chromatin: functions of ATM and the RAD50/MRE11/NBS1 complex in cellular responses to DNA damage. *J Radiat Res*, 49:451-64 (2008).
- [17] 田内広, DNA 損傷に対応する修復シグナルの概要 キーワードで理解する「細胞周期イラストマップ」. (2005).
- [18] <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2016.html>

令和元年 11 月 11 日

一般社団法人 日本放射線影響学 理事長
島田 義也 (環境科学技術研究所)

一般社団法人 日本放射線影響学 副理事長
放射線災害対応委員会 委員長
松本 英樹 (福井大学)

放射線災害対応委員会 委員 (五十音順)
宇佐美 徳子 (高エネルギー加速器研究機構)
小嶋 光明 (大分県立看護科学大学)
柿沼 志津子 (量子科学技術研究開発機構)
島田 幹男 (東京工業大学)
砂押 正章 (量子科学技術研究開発機構)
田内 広 (茨城大学)
中村 麻子 (茨城大学)
平山 亮一 (量子科学技術研究開発機構)

一般社団法人

日本放射線影響学会

THE JAPANESE RADIATION RESEARCH SOCIETY