

# トリチウムの生体影響について： 科学的な視点から

田内 広  
Hiroshi Tauchi

茨城大学大学院理工学研究科  
量子線科学専攻  
環境放射線科学プログラム  
(茨城大学理学部 生物科学)  
<http://tauchilab.sci.ibaraki.ac.jp>



本資料の無断転載等をご遠慮ください。© Tauchi Lab. Ibaraki Univ.

## この講演で扱う情報と説明について

- ・ 科学的な情報に基づく説明とする
- ・ あくまで合理的(かつ客観的な)解釈に基づく説明に徹する
- ・ ただし、専門用語を極力避けるために上記2項に反しない「翻訳」を行います

### ここでの科学的な情報とは？

- ・ 再現性のあるデータに基づいた研究論文  
(恣意的な操作がない実験結果である。他者による追試が可能 or 実施済)
- ・ 適正な査読システムを有する学術論文誌に発表されている情報  
同じ分野の研究者により、純粹に科学的観点からの査読を受けている

情報の「科学的な」扱いとして・・・

- ・ 著者の結論に反した引用はしない (いわゆる「切り抜き引用」はしない)
- ・ 同一学術誌上で論争として扱われている反論は公平に扱う  
(科学的な公平性・公正性の確保)
- ・ 未解明の事項は未解明として扱うが、合理性を持って説明できる点は取り上げる

なお、上記要件を満たす学術的なレビュー(まとめ)としては

「原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)報告2016」があります

UNSCEAR Report 2016

Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. ANNEX C : Biological Effects of Selected Internal Emitters—Tritium

放射線の生体影響の概要 (はじめに:単位について)

放射線被ばくの単位:シーベルトとグレイについて

「シーベルト(Sv)」という単位は物理的な放射線の量ではありません。

物理的な放射線量(実験的に用いる量:吸収線量)の単位は、エネルギーに基づく

グレイ(Gy): 1 Gy = 1 J/kg (ジュール/キログラム)

ところが、同じ吸収線量でも、放射線の身体への影響は、放射線の種類や対象となる影響などによって変わる。 → グレイだけではどのくらい影響があるのか評価できない。

そこで、リスク評価のために、ヒトの身体への影響(対象はヒトのみ)を考えて、

「同じ影響は同じ数字になる」ように換算した数値がシーベルトです。

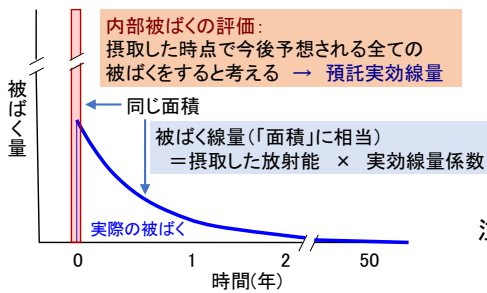
なお、シーベルトにはいくつか種類があり、主に使われているのは組織等価線量と実効線量、  
 預託実効線量です。なお、大雑把に言えば、実効線量は「致死がんリスクの目安」です。

外部被ばくの場合 等価線量: (組織の)吸収線量 × 放射線加重係数\*1 で算出

実効線量: [組織の等価線量 × 組織加重係数\*2]の総和 で算出

内部被ばくの場合 預託実効線量: 摂取時にほぼ生涯分(子供70歳まで、大人50年)の

被ばくを受けると仮定し、核種や化学形ごとの体内分布、生体半減期、出てくる放射線、  
 組織の感受性、年齢差などを元に算出



\*1: X線やガンマ線の影響を1とした影響度合いの概算比

\*2: 組織ごとの「命に関わるがん」の感受性に基づいて、  
 総和が1になるように割り振られた値。

注: 放射性ヨウ素のように特定臓器に集まる場合は、内部被ばくでも組織の(預託)等価線量を使うことがあります。

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 3

トリチウムとは?

プロチウム (軽水素)  
 いわゆる「水素」

デュテリウム (重水素)  
 自然界に水素の  
 約0.015%存在

トリチウム (三重水素)  
 自然界に水素の  
 (0.1~10) × 10<sup>-18</sup> 程度存在

半減期12.3年  
 (356 TBq/g)

天然水中のトリチウム  
 … 1Bq/ℓ程度  
 人体中のトリチウム  
 … 数十Bq/人

トリチウムの出すβ線:  
 最大エネルギー18.6keV  
 最大飛程 5mm 空气中  
 6μm 水中

経産省「第1回トリチウム水タスクフォース」JAEA 山西敏彦氏の資料より

トリチウムからの放射線は、体内で6マイクロメートル(0.006mm)までしか届かない。  
 (ちなみに、細胞の大きさは30~100 μm、細胞核の直径は約10 μm)

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 4

## トリチウムは何処にどういう分子形態である？

Tritium ( $^3\text{H}$ )の自然界平衡量: 1000~1500 ペタベクレル ( $1.5 \times 10^{18}$  Bq)

**天然:** 宇宙線による大気中生成: 72 ペタベクレル/年

**人工:** 原子力施設など: 28 ペタベクレル/年

地上核実験での総生成量:  $2 \times 10^{20}$  Bq (1945~1963)

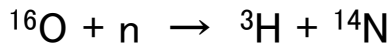
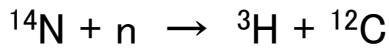
(環境中の残存総量:  $2 \times 10^{19}$  ベクレル) 百島 2000ほか

**環境中では大半がトリチウム水(HTO)として存在**

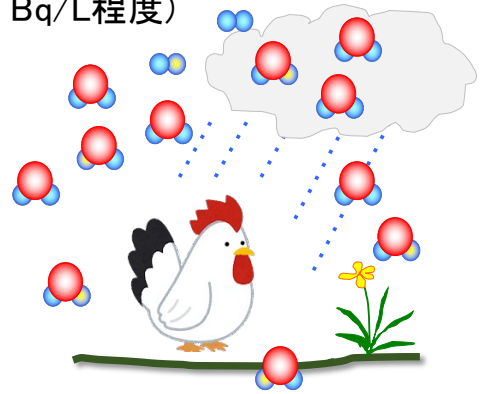
…トリチウムガス(HT)は容易に酸化されてHTOとなる

(現在の日本の降水中濃度: 0.5~1.0 Bq/L程度)

### 大気上層での主なトリチウム生成反応



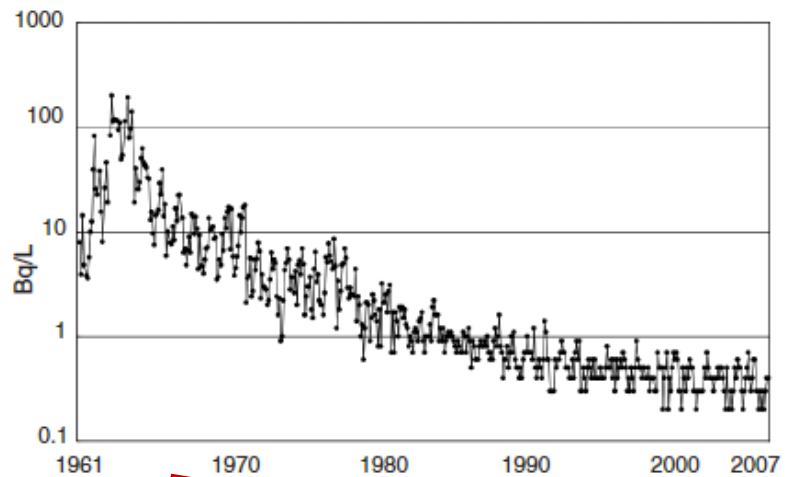
※ n は宇宙線(宇宙放射線)に由来



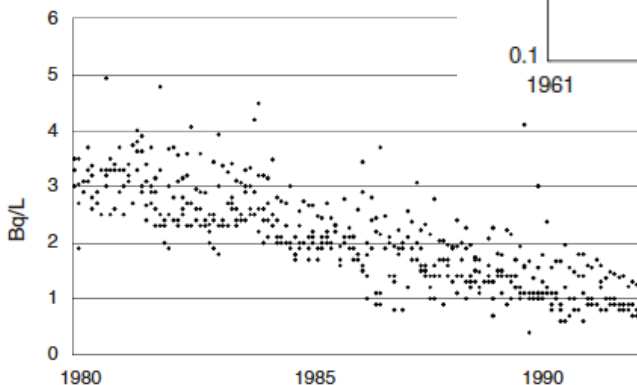
© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 5

## 過去の環境中トリチウム濃度の測定データ

### 降水中トリチウム濃度の推移(東京、千葉)



### 河川・湖水中トリチウム濃度の推移(茨城)



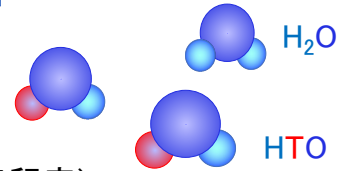
部分的核実験禁止条約の発効: 1963年10月

出典: 宮本霧子, 海生研ニュース 99, 2008

## トリチウムを含む化合物と生体内での挙動

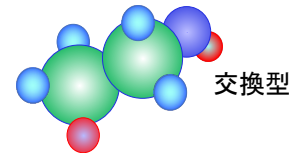
### トリチウム水 (HTO)

- ・ 生体内での生物学的半減期は7日～18日 (平均10日程度)
- ・ 身体に取り込まれると約3～6%がOBTに移行する。
- ・ 実効線量係数 (成人、ICRP改訂) 0.00000019 ミリシーベルト/ベクレル  
(現行は 0.00000018 ミリシーベルト/ベクレル)



### 有機結合型トリチウム (Organically bound tritium: OBT)

- ・ 生体内での生物学的半減期は  
40日程度 (短半減期成分)、もしくは1年程度 (長半減期成分)  
長期残存成分の生物学的半減期が長いのは、生体内で分子がリサイクルされるため
- ・ 身体に取り込まれたOBTは、約50%が代謝でHTOになり、HTOとしての挙動をとる。残り50%は短半減期成分となり、その後一部が代謝を経て長半減期成分に移行する。
- ・ 実効線量係数 (成人) 0.00000042 ミリシーベルト/ベクレル



非交換型

実効線量係数: 預託実効線量を計算するための係数

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 7

## トリチウム水の濃度限度は何故大きいのか?

原因は (預託) 実効線量係数の違い \* 排水中濃度限度は年間1mSvを担保するための規制値

成人の実効線量係数 (経口摂取) 単位は「マイクロシーベルト/ベクレル」

トリチウム (水)	0.00000018 (有機化合物は 0.00000042)
セシウム-137	0.000013
セシウム-134	0.000019
カリウム-40	0.0000062

出典: ICRP Publ.119 (2007)

**実効線量係数の考え方:** 核種や化学形に応じた体内動態のシミュレーションモデルに基づいて組織ごとの吸収線量を出し、ほぼ生涯の実効線量をベクレルあたりで換算している。モデル計算のため、ある程度の不確かさは残るが、違ったとしても、大幅に違うことはない。

トリチウム水と類似した体内分布 (全身にほぼ均等) を示す放射性セシウムとの比較

	セシウム137	セシウム134	トリチウム水 (HTO)
物理的半減期	30年	2.1年	12.3年
生物学的半減期	70～100日	70～100日	7～18日 *
放出するβ線の最大エネルギー (β線の平均エネルギー)	主に514 keV (190 keV)	主に658 keV (160 keV)	18 keV (5.7 keV)
放出する主なガンマ線	662 keV	605、796 keV	なし

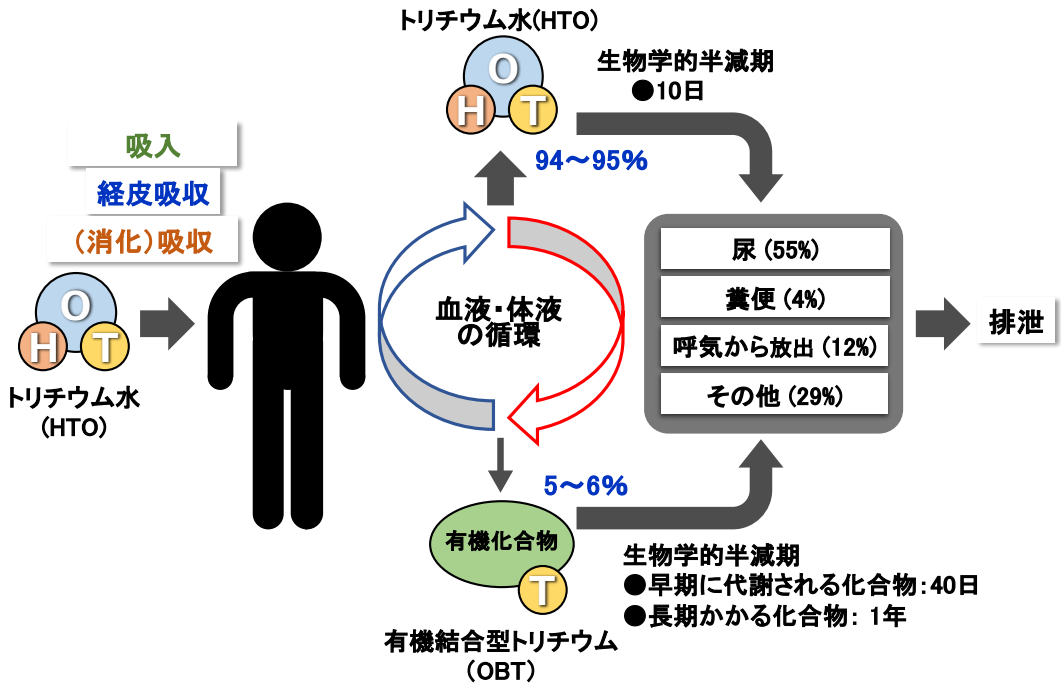
\* 有機結合型トリチウムは生物学的半減期が40日または350日

一方で、放射性セシウムは平均の体内滞留時間が長く、β線エネルギーが大きい (→ 壊変あたりの被ばく線量が多い)、ガンマ線も放出される (→ 被ばく範囲の広がり、被ばく線量の増加)。結果として、トリチウム化合物からの被ばく線量は放射性セシウムの300分の1以下になる。

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 8

## 体内に取り込まれたトリチウム水の挙動

### 摂取したトリチウム水(HTO)に関するICRPの代謝モデル(新)



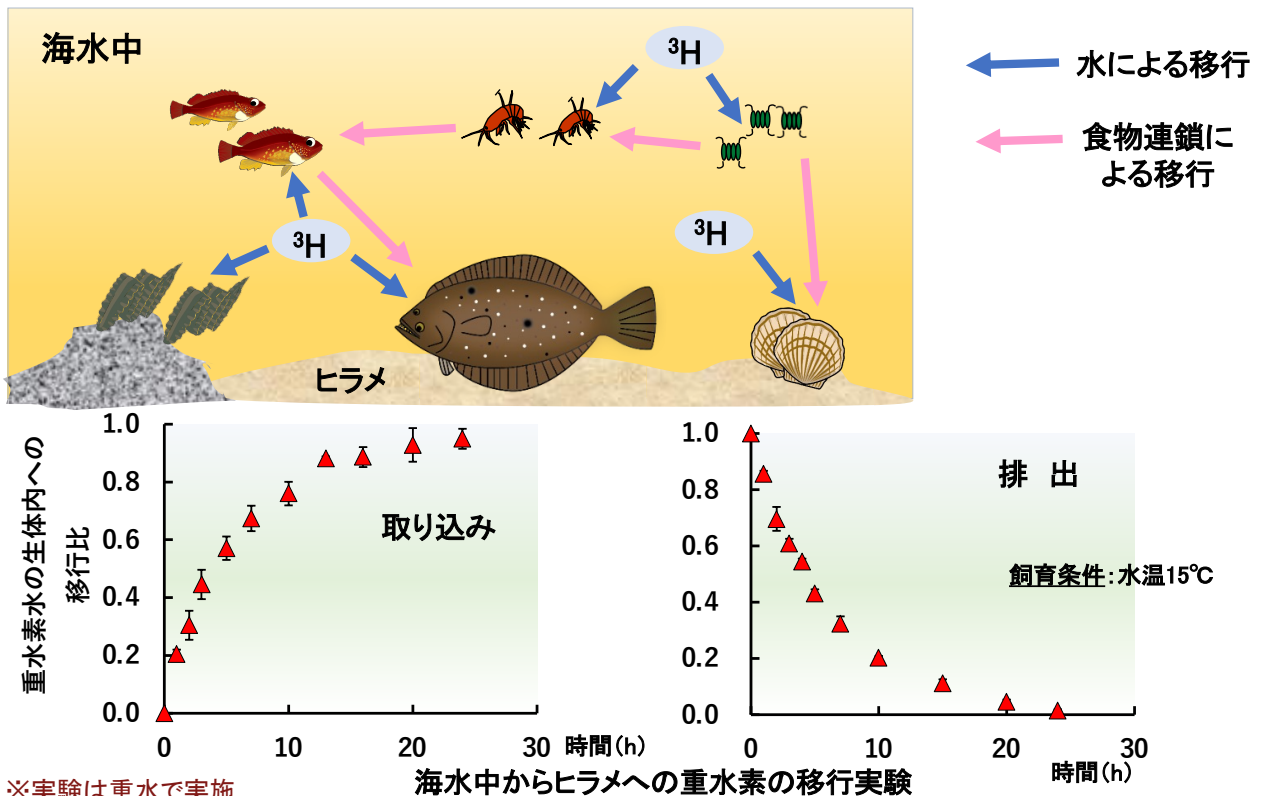
HTOは大半が水のまま排泄されるが、一部はOBTに変換されて排泄が遅くなる(最終的には排泄される)

(ICRP Publ.89 2002, UNSCEAR 2016ほか、一部改変)

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 9

## 海産生物へのトリチウムの移行実験

(公財 環境科学技術研究所のデータ)



© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 10

## 放射線の種類と生体影響の大きさについて

ガンマ線、X線(光子)  光と同じ電磁波

基本的にエネルギーが変わっても生体影響の度合いはほとんど変化しない。

ICRPによる線質係数(放射線加重係数)は 1

粒子線(α線、中性子、重粒子線)  α線は、陽子2個・中性子2個の粒子

エネルギーに依存して影響は(指標によって)数倍から10倍程度まで変化する。

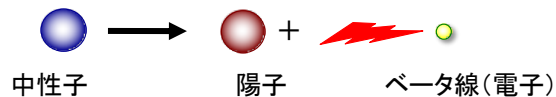
(ただし、一般的に荷電粒子では粒子ごとに影響が最大になるエネルギー範囲がある)

ICRPによる放射線加重係数は粒子エネルギーに応じて20強まで変化

電子線(ここではベータ線) ← [トリチウムが放出する放射線](#)

エネルギーが高い方が影響がやや大きい傾向はあるが、大幅には変化しない。  
急性被ばくの場合、ベータ線はガンマ線の1.0~2.0倍程度の影響とされる。

ただし、ICRPは電子線の放射線加重係数を全て1としている



© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 11

## トリチウム内部被ばくの生体影響

ヒトに関して想定されるトリチウム被ばくは・・・  
**低線量・低線量率放射線被ばくの生体影響**

その前に・・・

- ・(低線量)放射線被ばくによる発がん影響について

その上で・・・

- ・ 高濃度トリチウムでの実験報告の概要
- ・ ヒトに関する疫学研究の現状
- ・ 低濃度トリチウム影響に関する実験データ概要

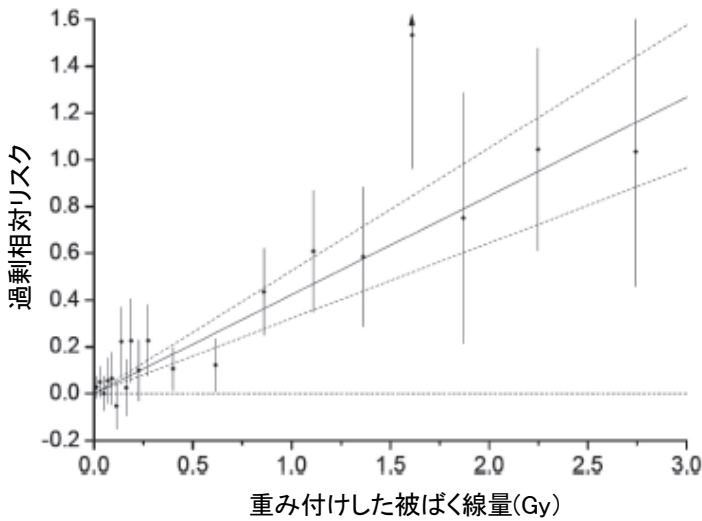
を概説します。

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 12

予備知識として：放射線の生体影響と線量 確率的影響である「がん」と被ばく量の関係

放射線発がん影響の疫学データ

原爆被爆者における被ばく線量と発がん



固形腫瘍（上）  
 150mGy (150mSv相当) 以上:  
 直線的に有意な増加  
 150mGy (150mSv相当) 未満:  
 統計的に有意な増加は確認できない

Ozasa et al. J. Epidemiol. 28, 162-169 (2017)

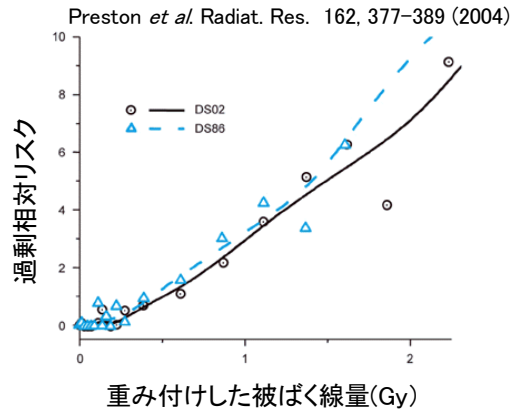
過剰相対リスクとは:

自然発生頻度の何倍分増えるか

白血病（下）

200mGy (200mSv相当) 以上:  
 二次曲線的に増加

200mGy (200mSv相当) 未満:  
 統計的に有意な増加は  
 確認できない

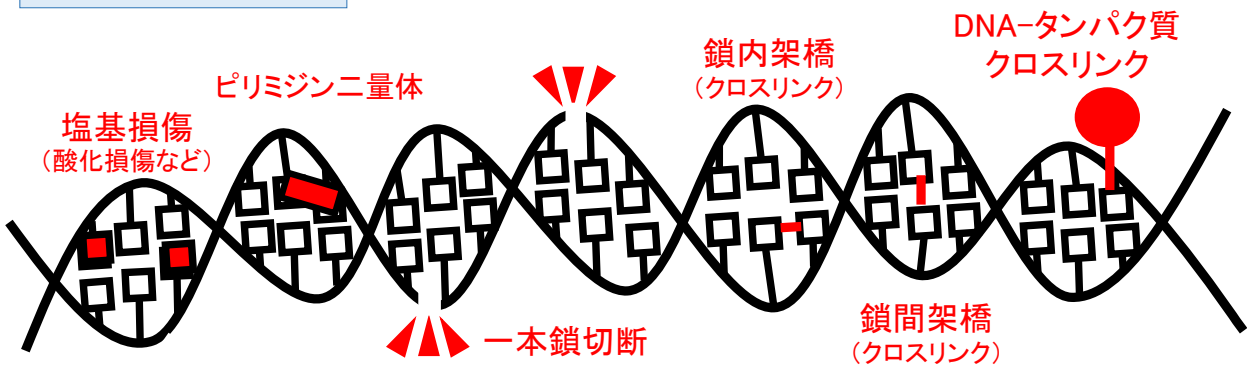


© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 13

予備知識として：放射線の生体影響 なぜ確率的影響は低線量で差がわからないのか？

DNA損傷とは？

... DNA分子に起きた化学変化や切断のことです



DNA二本鎖切断



放射線(γ線)被ばく (1Gy・細胞あたり) の主なDNA損傷

- 酸化損傷: 約700
- クロスリンク損傷: 約150
- DNA一本鎖切断: 約850
- DNA二重鎖切断: 約40

(Nikjoo & O' Neill, 1999)

予備知識として：放射線の生体影響 **なぜ確率的影響は低線量で差がわからないのか？**

**実は・・・ 遺伝子は、いつも損傷を受けている**

普段に細胞が受けるおもな遺伝子損傷の原因とその頻度

要因	損傷とその頻度(個/細胞・1時間あたり)
活性酸素	酸化損傷 1,000
紫外線	チミン二量体 10,000
放射線(年間約2mSv)	DNA切断ほか 0.0002

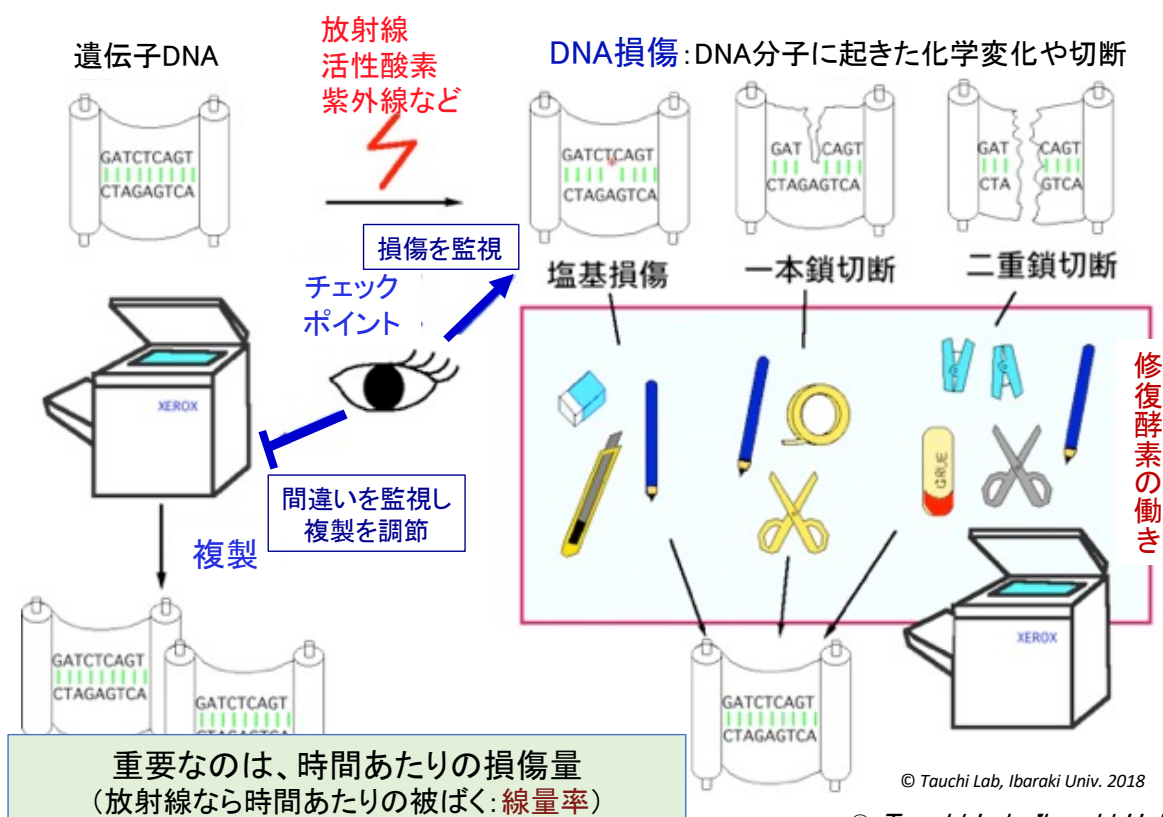
参考文献: Loft & Poulsen, Acta Biochim. Polonica, 1998、小林, 薬学雑誌. 2006  
Nikjoo & O' Neill, Radiat. Environ. Biophys. 1999 ほか

それでも私たちが地球上で普通に暮らしているということは・・・

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 15

放射線の生体影響： **なぜ確率的影響は低線量で差がわからないのか？**

**DNA損傷の大半は修復される**      **遺伝子DNAの損傷と細胞内での修復の流れ**



© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 16



トリチウムの生体影響の概要: 高濃度トリチウムを用いた実験的解析結果を中心に

トリチウム生体影響の特徴(これまでの実験報告文献データの概要)

- ・ 生物効果比(生物学的効果比、RBE\*)は1.1~2.5程度という研究結果が大半  
(これより高い、あるいは低いという報告もあり)
- ・ 半致死線量は 8 Gy 程度 (マウスの腹腔内投与で0.56~0.93 GBq/g体重)
- ・ OBTはHTOよりも生体影響が大きい  
(化学形により2~10倍程度:100倍という論文もあるが、矛盾を指摘されている)

表3 マウスを使った研究から得られたトリチウムβ線のRBE.

評価の方法	RBE	吸収線量 (Gy)	研究者
LD <sub>50/30</sub>	1.7	4~8	J.E. Furchner (1957)
脾臓と胸腺の萎縮	1.3-1.5	1~10	J.B. Storer <i>et al.</i> (1957)
造血細胞の染色体異常	1.0-2.0	0.6	R. Kozkowski <i>et al.</i> (2001)
小腸クリプト細胞のアポトーシス	1.4-2.1	0.13~0.28	K. Ijiri (1989)
卵母細胞の生存率	1.6-3.0	0.055	R.L. Dobson <i>et al.</i> (1976)

出典:馬田ほか プラズマ核融合学会誌 2012

\*【参考】 RBE:Relative biological effectiveness 生物学的効果比  
ガンマ線やX線の影響を1としたときの放射線の生体影響の大きさの比較指標

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 17

トリチウムの生体影響の概要: ヒトに関する調査研究

トリチウム被ばくによるヒトの死亡事例

いずれもトリチウムを使った夜光塗料の製造作業(1960年代)

症例(性別)	取り扱ったトリチウム量	被ばく線量 (被ばく期間)	臨床症状	尿中 トリチウム量	備考
1 (男性)	約 $2.8 \times 10^{14}$ ベクレル	3~6 Sv (7.4年)	正色素性貧血 (赤血球減少) →汎血球減少症	1.9~41 kBq/mL	トリチウムの前に、 ストロンチウムやラ ジウムを使った作 業に約18年間従事
2 (不明)	数 TBq? (数千 キュリー)	10~20 Sv (3年)	高色素性貧血 (赤血球減少) →難治性汎血球減少症	2~4.3 kBq/mL	トリチウムの前に、 ストロンチウムやラ ジウムを使った作 業に約4年間従事

出典: 澤田 昭三、岡田 重文 編 「核融合研究者のためのトリチウムの安全取扱いの目安-1990」  
平成元年度文部省科学研究費補助金報告書(1990)

(根拠文献: Seelentag, W. "Two Cases of Tritium Fatality." In Tritium, eds. A. A. Moghissi & M. W. Carter,  
Messenger Graphics Publishers, Phoenix, Arizona, 1973)

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 18

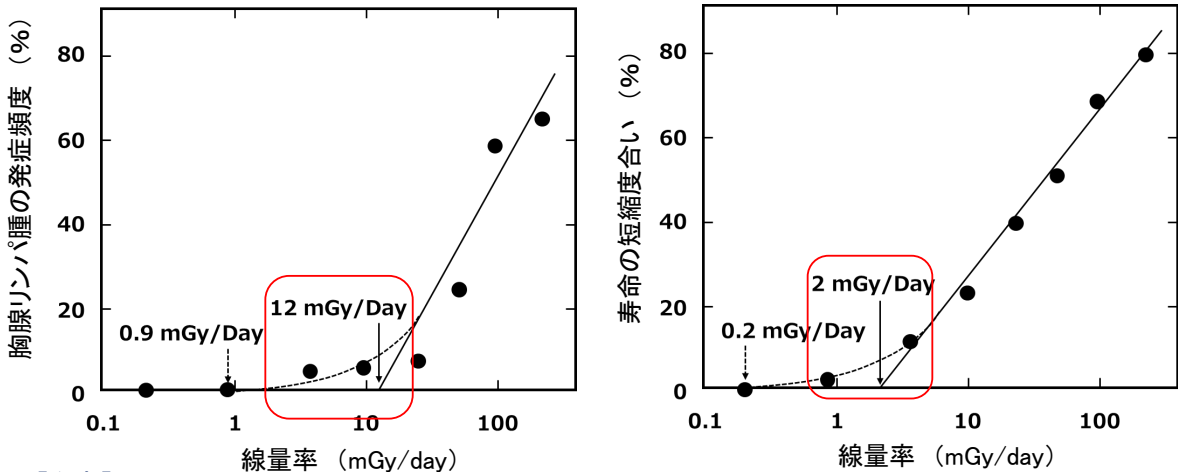
トリチウム生体影響の濃度依存性：線量と線量率（動物個体レベルの実験）

マウスにトリチウム水を生涯にわたって飲水投与し続けた実験例

Yamamoto, O.ほか *International Journal of Radiation Biology* 68: 47- 54 (1995)  
 “Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. II: Tumour development”

Yamamoto, O. ほか *International Journal of Radiation Biology* 73: 535-541 (1998)  
 “Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. III: Low dose-rate irradiation and threshold dose-rate for radiation risk”

発がんでは12 mGy/day、寿命短縮では数mGy/dayを下回ると、自然発生事象・レベルと差が無くなる



【参考】

飲水のHTO濃度：0.9 mGy/日 → 34,800,000 Bq/L  
 0.2 mGy/日 → 8,690,000 Bq/L ※排水基準は60,000 Bq/L  
 線量率は、50, 100, 200日後の組織中(主に脳、肝臓、筋肉)のトリチウム濃度の実測値を元に算定

出典: Matsumoto H *et al.* (J Radiat Res 2021)

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 19

トリチウムの生体影響の概要：ヒトに関する調査研究

トリチウムに関する疫学研究の現状

出典：UNSCEAR 2016

寿命短縮、がん(白血病や固形腫瘍など)による死亡リスクに関する研究報告がある  
 ただし、基本的には全ての環境要因との複合影響の評価になっている  
 (トリチウムの被ばく線量と影響との因果関係に基づいてリスク推定が  
 できている研究はほぼ無い)

原子力関連施設の作業従事者

被ばく線量評価はそれなりに可能であることから、研究報告は結構ある。  
 一方で、トリチウムによる内部被ばく線量の評価ができていない研究例も多い。  
 また、トリチウム以外の被ばくが含まれる例がほとんどなので、不確かさは大きい。

がん致死に関する過剰相対リスク(ERR)からの推定 (論文値の最大と最小)

100 mSvあたり：自然のレベル × 1.1 倍 ~ 1.47 倍

この値は誤差範囲も大きいが、原爆被爆者からの評価値とほとんど変わらない。

つまり、「トリチウムは他の放射線や核種に比べて健康影響が大きい」という事実は認められない

原子力施設周辺住民

- ・ 被ばく線量評価が難しく、因果関係を結論づけることは困難
- ・ 生活習慣の違いなどの「交絡因子」の影響の方が大きい。
- ・ トリチウムを排出している施設の周辺住民に共通してみられる(= トリチウムが原因と考えられる共通の)影響の例は見つかっていない。

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 20

## リスクをどう考えるか？

### 日本での1年間の平均放射線被ばく線量 (医療被ばくを除く)

線源	被ばく線量(ミリシーベルト)
宇宙線	0.30
自然ガンマ線	0.33 (地域によって0.29~0.56)
自然放射性物質から内部被ばく	0.98
ラドンおよび娘核種	0.476
フォールアウト(核実験など)	0.0025

合計 2.09

世界平均は 2.40 ミリシーベルト(UNSCEAR 2008)

出典:原子力安全研究協会編 「新版 生活放射線」 2011(一部改変)

飛行機に乗ると・・・高度12,000mで2.5マイクロシーベルト/時(地上の約50倍)

宇宙旅行に行くと・・・宇宙ステーション軌道: 平均は0.5mSv/日(地上400km)

仮に 処理水の放出口濃度

1,500 Bq/L の水を1年間摂取したとすると ... 0.025 ミリシーベルト/年

海水なので飲めませんが・・・

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 21

### トリチウム生体影響の概要まとめ

- 1) 放射線はDNAに損傷を与えるが、細胞にはDNA損傷を修復する仕組みがある。また、DNAには普段からさまざまな原因で損傷が入っていて、修復されている。  
→ 線量だけでなく、**線量率が重要(トリチウムなら濃度が重要)**
- 2) トリチウムは弱いベータ線だけを出すので、**影響する被ばく形態は「内部被ばく」**
- 3) トリチウム水(HTO)は生体半減期約10日であり、有機トリチウム化合物(OBT)の生体半減期は、約40日もしくは1年程度の2タイプがあると推定される。
- 4) ヒトの体内に取り込まれたHTOのうち、約5~6%がOBTに移行すると推定される。
- 5) 天然化合物の化学形であれば、トリチウムの生体濃縮はない(環境中濃度と連動)。
- 6) 多くの実験研究で、HTOの生物影響は、X線やガンマ線の影響と比較して1.1倍~2.5倍程度となっている。(同じ被ばく線量で何十倍と言うことはない)
- 7) これまでの動物実験や疫学研究から、「トリチウムが他の放射線や放射性物質と比べて群を抜いて生体影響が大きい」という科学的事実認められていない。
  - ・ マウス発がん実験では、線量率が3.6mGy/日(飲水のHTO濃度: 約1億4千万Bq/L)以下で頻度、質ともに自然発生と同程度となっている。
  - ・ 原子力関連施設の作業従事者におけるがん致死は、原爆被爆者からの評価値と同程度。
  - ・ トリチウムを排出している原子力周辺で、共通にみられる(トリチウムが原因と考えられる)影響の例は見つかっていない。

© Tauchi Lab. Ibaraki Univ. 22

*Thank you for your kind attention.*

Acknowledgements:

Member of the Commission for Corresponding to Radiation Disaster,  
Japanese Radiation Research Society (JRRS)



参考資料として



(一社) 日本放射線影響学会

「トリチウムによる健康影響」

[https://www.jrrs.org/assets/file/tritium\\_20191111.pdf](https://www.jrrs.org/assets/file/tritium_20191111.pdf)



(公財) 環境科学技術研究所

UNSCEAR 2016「トリチウム」日本語版

[https://www.ies.or.jp/publicity\\_j/data/unscear\\_2016annex\\_v2.pdf](https://www.ies.or.jp/publicity_j/data/unscear_2016annex_v2.pdf)

