

トリチウム水の生体影響について(基礎実験データから)

茨城大学理学部 田内 広

<http://tauchilab.sci.ibaraki.ac.jp>

放射線の線質と生体影響の大きさについて

ガンマ線、X線(光子)

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(荷重)係数は 1

粒子線(α 線や中性子、重粒子線)

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) → 線エネルギー付与(LET)が100keV/ μ m付近でピークとなる

ICRPによる線質(荷重)係数は粒子エネルギーに応じて 5、10、20

電子線(ここでは β 線)

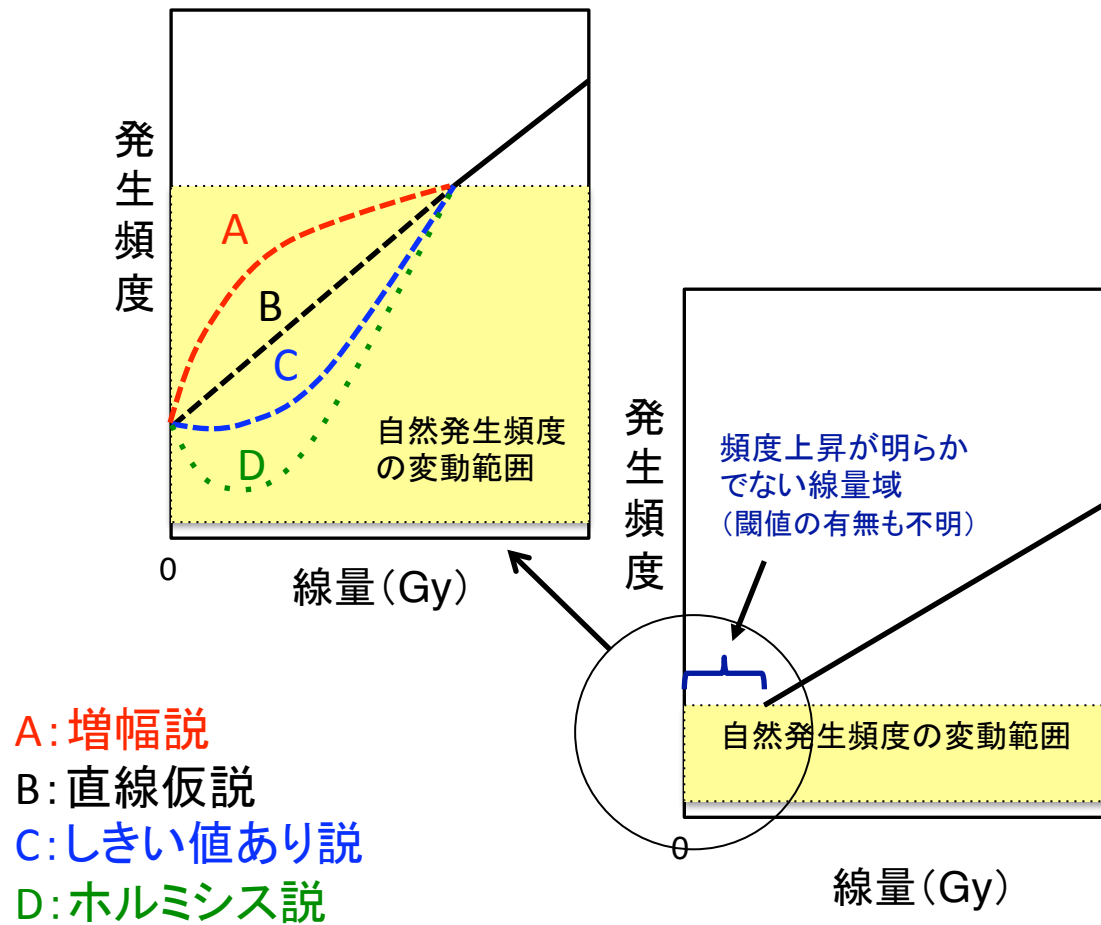
エネルギーが高い方が影響がやや大きい傾向はあるが、大幅には変化しない。

急性の被ばくの場合、トリチウム β 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は電子線の線質(荷重)係数を全て1としている

* なお β 線のエネルギーは生体への吸収エネルギー(被ばく線量)に影響する

確率的影響(がん)と低線量被ばく



トリチウム生体影響の特徴(これまでの文献データの概要)

- ・ トリチウム被ばくは通常**内部被ばく**である
- ・ 生体内では、水(HTO)および有機物結合型(OBT)として存在する
- ・ 生体内での半減期は、7日～18日(HTO)および40日程度(OBT)
- ・ 生物学的効果比(RBE)は1.0～2.0程度
(これより高い、あるいは低いという報告もある)
- ・ 半致死線量は8Gy程度
(マウス腹腔内投与で0.56～0.93 GBq/g体重)

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.

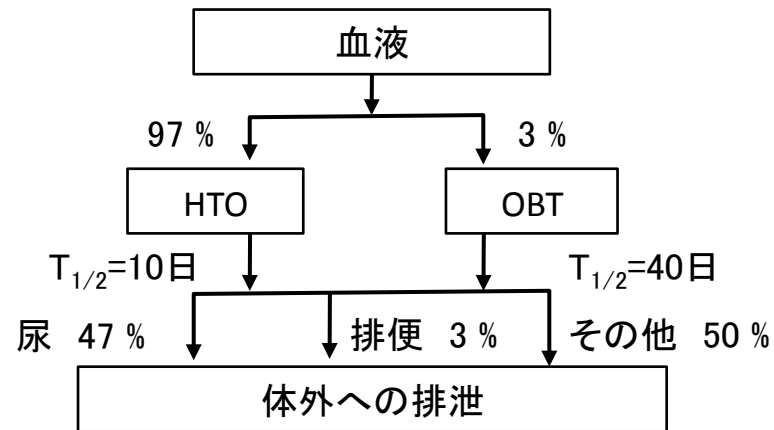
評価の方法	RBE	吸収線量 (Gy)	研究者
LD _{50/30}	1.7	4～8	J.E. Furchner (1957)
脾臓と胸腺の萎縮	1.3～1.5	1～10	J.B. Storer <i>et al.</i> (1957)
造血細胞の染色体異常	1.0～2.0	0.6	R. Kozkowski <i>et al.</i> (2001)
小腸クリプト細胞のアポトーシス	1.4～2.1	0.13～0.28	K. Ijiri (1989)
卵母細胞の生存率	1.6～3.0	0.055	R.L. Dobson <i>et al.</i> (1976)

出典:馬田ほか プラズマ核融合学会誌 2012

* RBE: ガンマ線やX線を1としたときの放射線の生体影響の大きさをあらわす

体内に取り込まれたトリチウム水の挙動

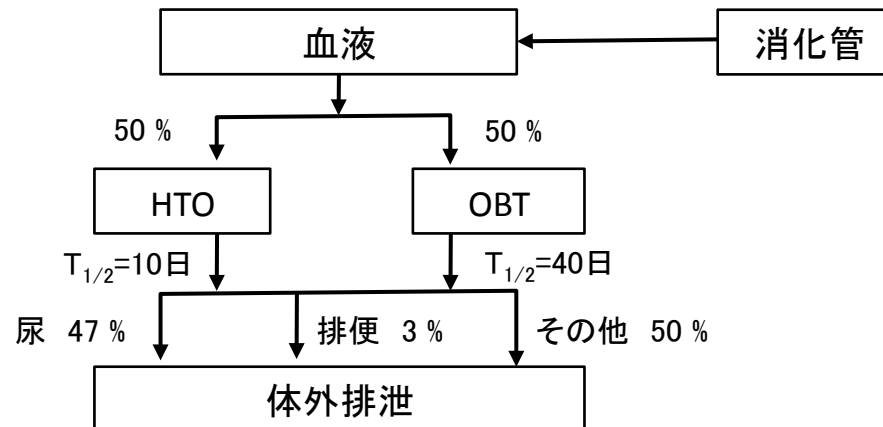
摂取したHTOに関するICRP代謝モデル（ICRP Publ.71, 1995ほか）



HTO: トリチウム水

OBT: 有機結合型トリチウム

【参考】 OBT摂取に関するICRP代謝モデル

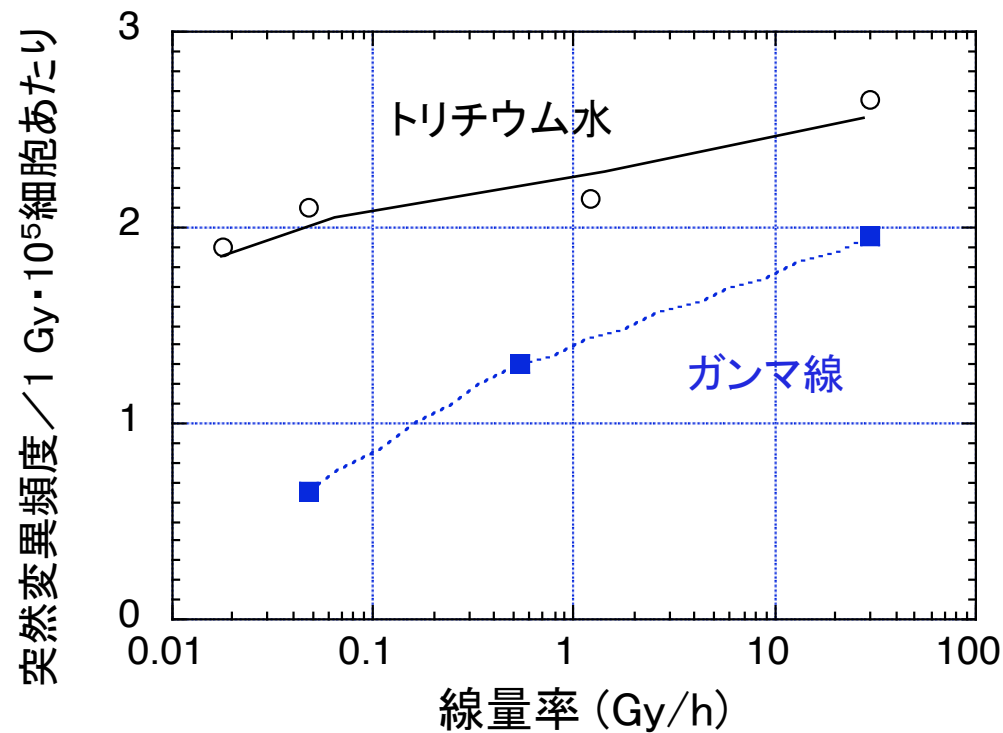


放射線影響は線量率に依存して変化する

被ばく線量が同じでも、時間あたりの被ばく量（線量率）が小さければ放射線の影響は小さくなります。

ICRPの見積：慢性（低線量率）長期被ばくの影響は、急性（高線量率）被ばくの影響の半分

トリチウム水被ばくの線量率効果：ガンマ線やX線ほど変化しない



マウス細胞の遺伝子突然変異の線量率依存性 (Okada *et al.* 1986より改変)

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”

線量率(mGy/day)		非投与	0.2	0.9	3.6	10	24	48	96	240
実験したマウスの個体数		120	55	58	120	53	60	60	38	45
平均寿命(日)		811	790	758	804	622	481	414	259	165
±標準偏差		±134				±121	±112	±68	±92	±38
発がんしたマウス:個体数(%)		59(48)	27(49)	45(78)	26(46)	4(83)	42(70)	42(70)	32(84)	34(76)
がんの内訳 (全個体に占める 割合:%)	胸腺リンパ腫	0	0	0	0	6	7	25	58	64
	非胸腺リンパ腫	25	25	29	20	21	15	20	11	11
	線維肉腫	8	9	22	9	11	7	3		
	卵巣がん	5	5	3	9	6	21	13	7	5
	肝がん	8	8	17	2	4				
	肺がん	4		7	2	15	5	2		
	その他	5	7	5	4	8	26	25	13	5

【参考】

飲水のHTO濃度: 3.6 mGy/day → 1.39×10^8 Bq/L

0.2 mGy/day → 8.69×10^6 Bq/L

線量率は、50, 100, 200日後の組織中(主に脳、肝臓、筋肉)のトリチウム濃度を元に算定

排水中濃度限度(体内での分布がトリチウムと類似する放射性セシウムと比較する)

トリチウム水 60 Bq/ml (有機化合物は20)
Cs-137 0.09 Bq/ml

排水中濃度限度は1mSv／年を担保する値
→ 違いの理由はBqあたりの実効線量

Dose coefficient(実効線量係数)

核種の体内動態のシミュレーションモデルに基づいて組織等価線量を算出し、組織荷重係数をかけて実効線量をBqあたりに換算している。もちろん、モデル計算なので不確かさは残るが、違ったとしても、大幅に違うことはない。

成人の場合 (経口摂取、単位は μ Sv/Bq)

トリチウム(水) 0.000018(有機化合物は0.000042)
セシウム-137 0.013
セシウム-134 0.019
カリウム-40 0.0062

出典:ICRP Publ.119 (2007)

実効線量係数が違う理由は？

	セシウム 137	セシウム 134	トリチウム(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 線最大エネルギー	主に 514keV	主に 658keV	18keV
主なガンマ線	662keV	605、796keV	なし

* 有機結合型トリチウムは生物学的半減期が40日程度

放射性セシウムは体内滞留期間が長い(約10倍)、 β 線エネルギーが大きい(壊変あたりの被ばくが多い)、ガンマ線も放出される(被ばく範囲の広がり、被ばく量の増加)。結果として、トリチウムの場合は放射性セシウムの300分の1以下になる

【参考】

トリチウム水の内部被ばくで

体内濃度が平衡状態の時に生体組織(の細胞)が受ける線量率の算出式

NCRP 1979, Yamaguchi 1987

$$D \text{ (mGy/h)} = C \text{ (MBq/ml)} \times 3.29 \times W \text{ (ml/g)}$$

3.29は定数

$$1 \times 10^6 \text{ 壊変/s} \cdot \text{MBq} \times 3600 \text{ s/h} \times \underline{5.7 \times 10^3 \text{ eV壊変}} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J/eV} \times 10^6 \text{ mGy} \cdot \text{g/J}$$

Wは含水率:細胞や組織、生物種により0.7~0.9(平均0.8程度)

注:Gyは吸収線量(物理量)。放射線防護ではこの値を元にSvを算出する。

同様の式を他の核種にも適用し、放射線エネルギーの大半が生体で吸収されるとすれば(特に β 線は体内でほぼ吸収される)、アンダーラインを引いた平均(付与)エネルギーの違いが線量の違いになる。

H-3: β 線平均エネルギー $5.7 \times 10^3 \text{ eV}$ 、ガンマ線 なし

Cs-137: β 線平均エネルギー $1.9 \times 10^5 \text{ eV}$ 、ガンマ線 $6.6 \times 10^5 \text{ eV}$

Cs-134: β 線平均エネルギー $1.6 \times 10^5 \text{ eV}$ 、ガンマ線 $(6.0+7.9) \times 10^5 \text{ eV}$

注:ガンマ線は身体を透過する成分があるため、全てが吸収されるわけではない

放射性セシウム、放射性カリウム、トリチウムの比較

	半減期	β線の最大エネルギー	ガンマ線
放射性セシウム			
Cs-137	30 年	0.514 MeV (1.176 MeVが6%)	662 keVほか
Cs-134	2.1年	0.658 MeV ほか	605 keV、796keV ほか
放射性カリウム			
K-40	12億5千万年	1.311 MeV ほか (軌道電子捕獲11%)	1,481 keV (11%)
トリチウム			
H-3	12.33年	0.0186 MeV	なし