

放射線教育フォーラム  
トリチウム学習会 2023年12月10日 (オンライン)

# トリチウム ～ その物理と化学～

放射線教育フォーラム理事長  
東北大学名誉教授  
**工藤博司**

1

## 学習内容

1. トリチウム とトリチウム水
  - ・物理学的、化学的、生物学的特性
  - ・自然界での生成と存在
  - ・原子炉での発生
  - ・利用 (核融合炉燃料、自発光塗料、電池、 $^3\text{He}$ 調製)
2. 福島第一原子力発電所処理水の海洋放出
  - ・ALPSのしくみ (62核種を除去、トリチウムは除去できない)
  - ・処理水の海洋放出 (手順と濃度監視)
  - ・海洋放出後のトリチウム水 (海水および魚介類中の濃度)

※ 社会的課題には触れない

2

## トリチウム

水素の同位体\* <陽子( $p$ )が1個で中性子( $n$ )の数が異なる>



**Hydrogen**  
水素  
 $^1\text{H}$  (H)  
存在度 99.985%



**Deuterium**  
重水素  
 $^2\text{H}$  (D)  
存在度 0.015%



**Tritium**  
三重水素  
(トリチウム)  
 $^3\text{H}$  (T)

\* いずれも元素としては水素 (原子番号 1)



**放射性 ( $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$ )**  
 $\beta^-$   
半減期 12.3 年  
存在度: Hの $10^{-18}$  (TU)

3

### 水素とトリチウムで原子の大きさに違いはあるか?

電子 ( $e^-$ )

$0.53 \times 10^{-8}$  cm (Å)

陽子 ( $p$ )  
重陽子 ( $d$ )  
トリトン ( $t$ )

53 pm

陽子半径  $r_p = 0.88$  fm ( $0.88 \times 10^{-15}$  m)

ボア半径  $a_0 = 5.2918 \times 10^{-11}$  m =  $4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e e^2$

原子核を重陽子 ( $d$ )あるいはトリトン ( $t$ )に置き換えても原子半径は変わらない。しかし・・・

$m_p = 1.007276$  u  
 $m_d = 2.013553$  u  
 $m_t = 3.015500$  u  
(u: 原子質量単位)

4

## トリチウムは放射性核種

トリチウム ( ${}^3_1\text{H}$ )      ヘリウム-3 ( ${}^3_2\text{He}$ )

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

中性子 neutron ( $n$ ) 電荷 0 ( $udd \leftarrow$ クォーク) $m_n = 1.008664 \text{ u}$ (原子質量単位)	$\rightarrow$	陽子 proton ( $p$ ) 電荷 +1 ( $uud \leftarrow$ クォーク) $m_p = 1.007276 \text{ u}$ (原子質量単位)
---	---------------	--

5

## トリチウムの放射線

$\text{T} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$  ( $\beta^-$ 線のみ放射)

平均 5.7 keV      最大 18.6 keV

ベータ線 ( $\beta^-$ ) エネルギー	最大 18.6 keV 平均 5.7 keV
物理学的半減期	12.3 年
生物学的半減期	HTO 約 10日 $\Rightarrow$ 水分摂取 2.7 L/day 約 2.5日 $\Rightarrow$ 水分摂取 12 L/day 有機分子形 (OBT) 約40日

$$E = mc^2$$

$$= 931.49432 \text{ MeV/u}$$

$$m_{\text{T}} = 3.01604927 \text{ u}$$

$$m_{{}^3\text{He}} = 3.01602931 \text{ u}$$

$$\Delta m = 0.00001996 \text{ u} = 18.59 \text{ keV}$$

u: 原子質量単位

6

## トリチウムの放射線

$\text{T} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$  ( $\beta^-$ 線のみ放射)

ベータ線 ( $\beta^-$ ) エネルギー	最大 18.6 keV 平均 5.7 keV
物理学的半減期	12.3 年
生物学的半減期	HTO 約 10日 $\Rightarrow$ 水分摂取 2.7 L/day 約 2.5日 $\Rightarrow$ 水分摂取 12 L/day 有機分子形 (OBT) 約40日

実効線量係数 $\mu\text{Sv/Bq}$	
T ( ${}^3\text{H}$ )	0.000018
${}^{40}\text{K}$	0.0062
${}^{90}\text{Sr}$	0.028
${}^{137}\text{Cs}$	0.013

1 Bq (ベクレル) 当たりの線量 ( $\mu\text{Sv}$ : マイクロシーベルト)

トリチウムの放射線が人体に与える生物学的影響の度合

カリウム-40 の	1/140
ストロンチウム-90の	1/1500
セシウム-137の	1/700

7

## トリチウム水

水分子 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 同位体 (アイソトポマー、Isotopomer)  
 分子量 ( $M$ ) などに違いがあるが化学的には同じ水

軽水	$\text{H}_2\text{O}$ ( $M=18$ )
重水	$\text{HDO}$ ( $M=19$ ), $\text{D}_2\text{O}$ ( $M=20$ )
トリチウム水	$\text{HTO}$ ( $M=20$ ), $\text{DTO}$ ( $M=21$ ), $\text{T}_2\text{O}$ ( $M=22$ )

処理水中のトリチウムの化学形

水素分子同位体	$\text{H}_2$ , $\text{HD}$ , $\text{D}_2$ , $\text{HT}$ , $\text{DT}$ , $\text{T}_2$
---------	--

8

### 水素同位体分子の熱力学的性質 (同位体効果)

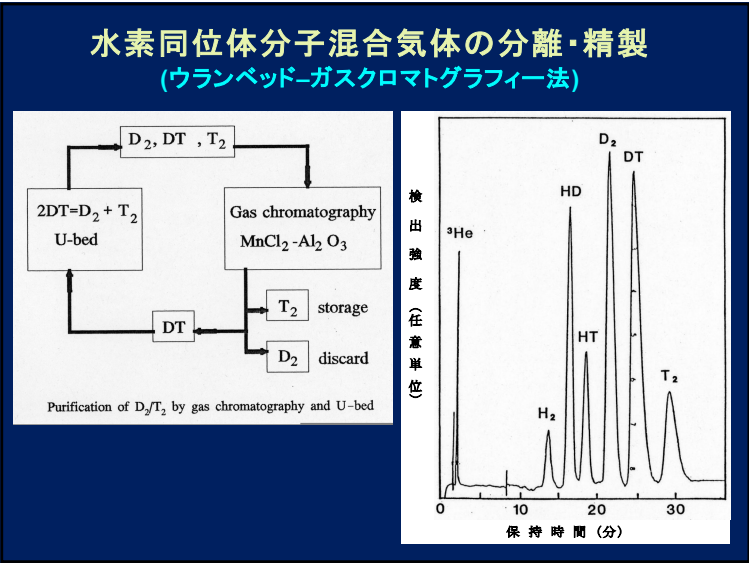
水素	H <sub>2</sub>	HD	D <sub>2</sub>	HT	DT	T <sub>2</sub>
分子量 (u)	2.016	3.022	4.028	4.024	5.030	6.032
沸点 (K)	20.39	22.13	23.67	22.92	24.38	24.91

水	H <sub>2</sub> O	HDO	D <sub>2</sub> O	HTO	DTO	T <sub>2</sub> O
分子量 (u)	18.015	19.032	20.028	20.023	21.029	22.031
密度 (g/mL)	1.000	-	1.105	(1.10)*	-	1.215
融点 (°C)	0	-	3.79	(3.7)*	-	4.49
沸点 (°C)	100	-	101.4	(101.4)*	-	101.5

\* 推定値

9



10

### 自然界のトリチウム

◇生成 ☞ 地球上空の大気と宇宙線の反応 (約7万兆ベクレル/年)

$^{14}\text{N} + n \rightarrow \text{T} + ^{12}\text{C}$   
 $^{14}\text{N} + p \rightarrow \text{T} + \text{破砕片}$   
 $^{16}\text{O} + n \rightarrow \text{T} + ^{14}\text{C}$   
 $^{16}\text{O} + p \rightarrow \text{T} + \text{破砕片}$   
 $\text{D} + d \rightarrow \text{T} + \text{H}$

$n$ : 中性子  
 $p$ : 陽子  
 $d$ : 重陽子

TBq (テラベクレル)

※ 生成した T の大半は大気中で HTO となり雨水として地表に降下

◇濃度 (降雨、河川水中)

1954年以前 0.4 Bq/L  
 1954年以降 2 ~ 250 Bq/L

大気中核実験  
総量 (1945~1963): 2 億 TBq

※ 現在の地球上の全量: 100~130万 TBq (平衡)

◇原子力施設からの放出

東北電力女川原子力発電所

11

### 原子炉でのトリチウム発生

◇軽水炉 (H<sub>2</sub>O : 冷却、中性子減速)  
核燃料中 (三体核分裂)  
 $^{235}\text{U} + n \rightarrow \text{T} + \text{FP}$  (核分裂生成物)

◇重水炉 (D<sub>2</sub>O : 冷却、中性子減速)  
核燃料中に加え冷却水中  
 $\text{D} + n \rightarrow \text{T} + \gamma$

◇制御棒 (B<sub>4</sub>C: 沸騰水型軽水炉など)  
 $^{10}\text{B} + n \rightarrow \text{T} + 2\alpha$

日本原燃六ヶ所再処理工場

使用済核燃料

12

# 原子力施設からのトリチウム放出

## 年間海洋放出量 (兆ベクレル)

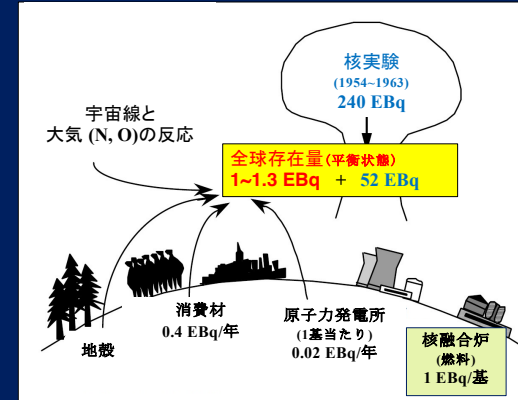
事 象	TBq	g (HTO)
日・全原子力発電所 55基 (2010年)	380	7.1
加・ダーリントン原子力発電所 4基 (2012年)	190	3.5
日・六ヶ所再処理工場試験運転 (2007年)	1,800	33.5
仏・ラアーグ再処理施設 (2015年)	13,000	242
福島第一原発処理水中の存在量 (2021年4月)	780	14.5
海洋放出量 (年間最大、2023年8月開始)	22	0.4

兆ベクレル: テラベクレル (TBq=10<sup>12</sup> Bq)

13

# 環境中のトリチウム (発生源)

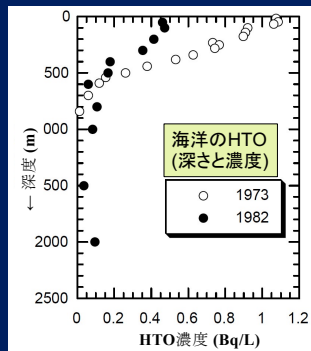
EBq = 10<sup>6</sup> TBq = 10<sup>18</sup> Bq  
 エクサベクレル = 100万兆ベクレル



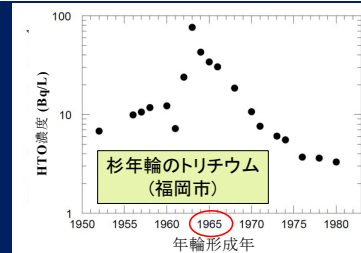
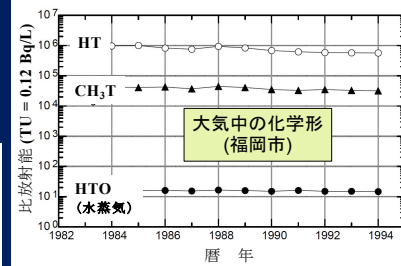
出典: 百島則幸、富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 20:1-10 (2000).

14

# 環境中のトリチウム (化学形、濃度分布)

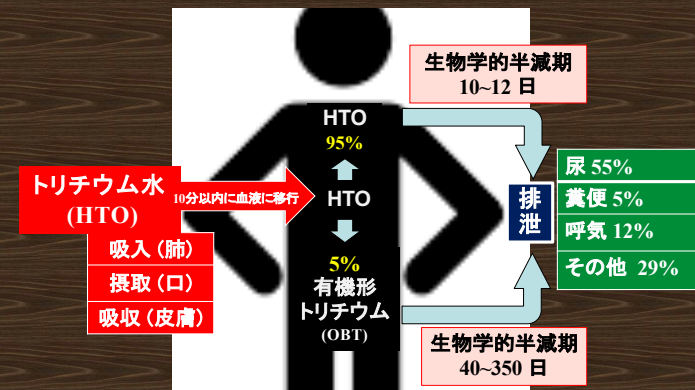


出典: 百島則幸、富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 20:1-10 (2000).



15

# トリチウム水を体内に取り込むと



海洋生物にトリチウム水が取り込まれても大半が短時間で排出される

食物連鎖によりトリチウムが生物体内に濃縮されることはない

16

## 核変換効果 (Transmutation effect)

トリチウム標識DNA分子の化学形変化

シトシン-5-T  
 $C_4H_4TN_3O$

ウラシル  
 $C_4H_4N_2O_2$

17

## トリチウムの利用

- ・核融合炉 (DT反応)  
1基当たりのT<sub>2</sub>燃料 (1 EBq: 3 kg)  
100万兆ベクレル
- ・自発光塗料  
時計文字盤 (0.9 TBq: 5 mg)
- ・トリチウム電池 (宇宙 -40°C ~ +80°C)  
NASA仕様 (30 TBq: 0.11 g)
- ・液体<sup>3</sup>He ⇄ MRI冷却、量子計算機

ITER (国際熱核融合実験炉)

夜光時計

トリチウム電池

MRI

18

### 福島第一原子力発電所の ALPS処理水と海洋放出

- 1 大半の放射性物質を除去
- 2 トリチウム以外の放射性物質の濃度が基準未満と確認
- 3 大量の海水で薄める
- 4 トリチウムの濃度が基準値未満と確認
- 5 放出

処理水の海洋放出が始まった東京電力福島第一原子力発電所—2023年8月24日  
出典：朝日新聞 2023年9月22日

19

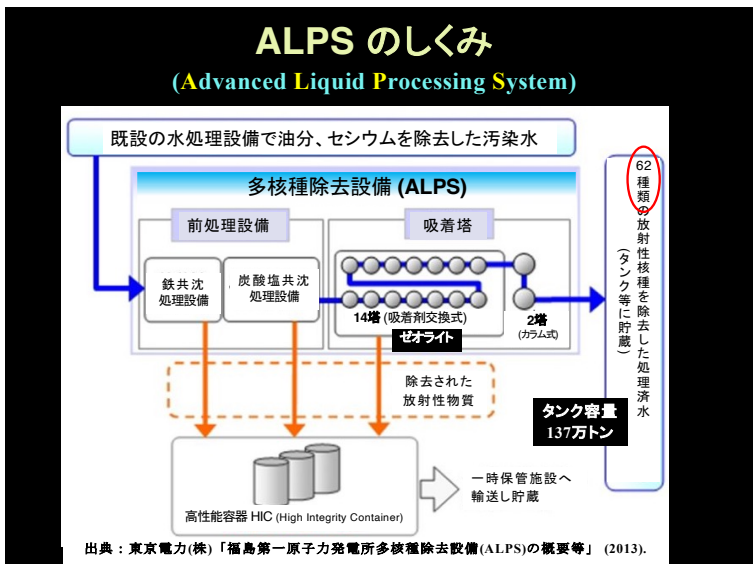
### ALPS (Advanced Liquid Processing System) 多核種除去設備

汚染水 → タンク → 沈殿タンク → ろ過フィルター → 放射性物質吸着塔 → トリチウムを含んだ処理水 → タンク

泥など 廃液

貯蔵タンクに約133万トン (総量 780 TBq、濃度 14 kBq/L) 2023年10月現在

20



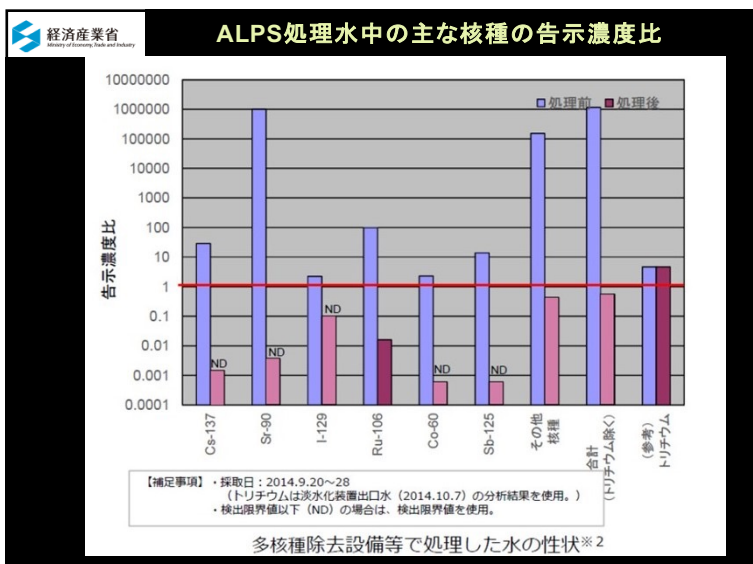
21

## ALPSで処理する 62核種 (東京電力発表)

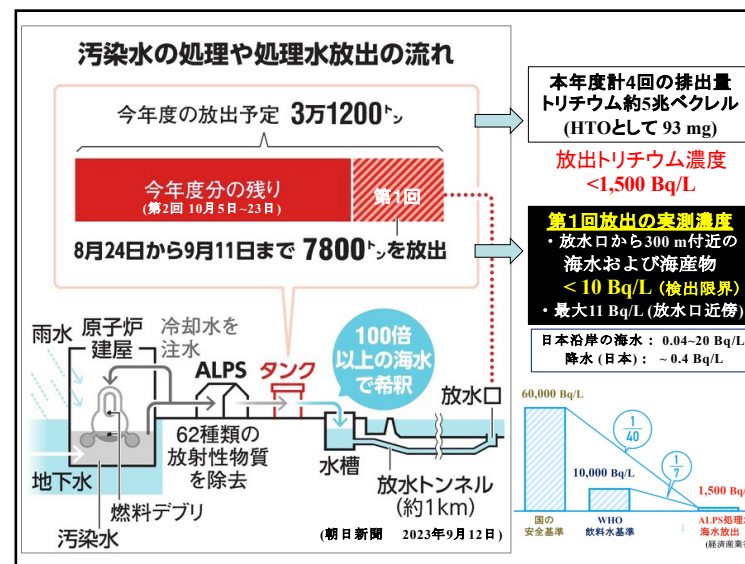
核種	半減期	核種	半減期
1 ルビジウム (Rb)-86	約18日	32 バリウム (Ba)-140	約18日
2 ストロンチウム (Sr)-89	約56日	33 セリウム (Ce)-141	約32日
3 ストロンチウム (Sr)-90	約28年	34 セリウム (Ce)-144	約280日
4 イットリウム (Y)-90	約64時間	35 プラセオジム (Pr)-144	約17分
5 イットリウム (Y)-91	約59日	36 プラセオジム (Pr)-144m	約7分
6 ニオブ (Nb)-85	約35日	37 プロメチウム (Pm)-146	約5年
7 テクネチウム (Tc)-99	約210,000年	38 プロメチウム (Pm)-147	約5年
8 ルテチウム (Lu)-103	約40日	39 プロメチウム (Pm)-148	約5日
9 ルテチウム (Lu)-106	約70日	40 プロメチウム (Pm)-148m	約41日
10 ロジウム (Rh)-103m	約68分	41 サマリウム (Sm)-151	約7年
11 ロジウム (Rh)-106	約20秒	42 コロビウム (Eu)-152	約13年
12 銀 (Ag)-110m	約250日	43 コロビウム (Eu)-154	約5年
13 カドミウム (Cd)-113m	約15年	44 コロビウム (Eu)-155	約5年
14 カドミウム (Cd)-115m	約45日	45 ガドリニウム (Gd)-153	約240日
15 スズ (Sn)-119m	約290日	46 テルビウム (Tb)-160	約72日
16 スズ (Sn)-123	約130日	47 プルトニウム (Pu)-238	約38年
17 スズ (Sn)-128	約100,000年	48 プルトニウム (Pu)-239	約24,000年
18 アンチモン (Sb)-124	約60日	49 プルトニウム (Pu)-240	約5,800年
19 アンチモン (Sb)-125	約3年	50 プルトニウム (Pu)-241	約14年
20 テルル (Te)-123m	約120日	51 アメリシウム (Am)-241	約430年
21 テルル (Te)-125m	約58日	52 アメリシウム (Am)-242m	約150年
22 テルル (Te)-127	約7時間	53 アメリシウム (Am)-243	約7,400年
23 テルル (Te)-127m	約110日	54 キュリウム (Cm)-242	約180日
24 テルル (Te)-129	約70分	55 キュリウム (Cm)-243	約23年
25 テルル (Te)-129m	約34日	56 キュリウム (Cm)-244	約18年
26 钨素 (W)-129	約16,000,000年	57 マンガン (Mn)-54	約810日
27 セシウム (Cs)-134	約2年	58 鉄 (Fe)-59	約45日
28 セシウム (Cs)-135	約3,000,000年	59 コバルト (Co)-58	約71日
29 セシウム (Cs)-136	約18日	60 コバルト (Co)-60	約5年
30 セシウム (Cs)-137	約30年	61 ニッケル (Ni)-63	約100年
31 バリウム (Ba)-137m	約3分	62 亜鉛 (Zn)-65	約240日

福島第一原子力発電所多核種除去設備(ALPS)の概要等  
平成25(2013)年3月29日  
東京電力株式会社

22



23



24