

つなごう命の会

第71回定例学習会

矢ヶ崎克馬話題提供

本日のテーマ

核融合 原理と危険性

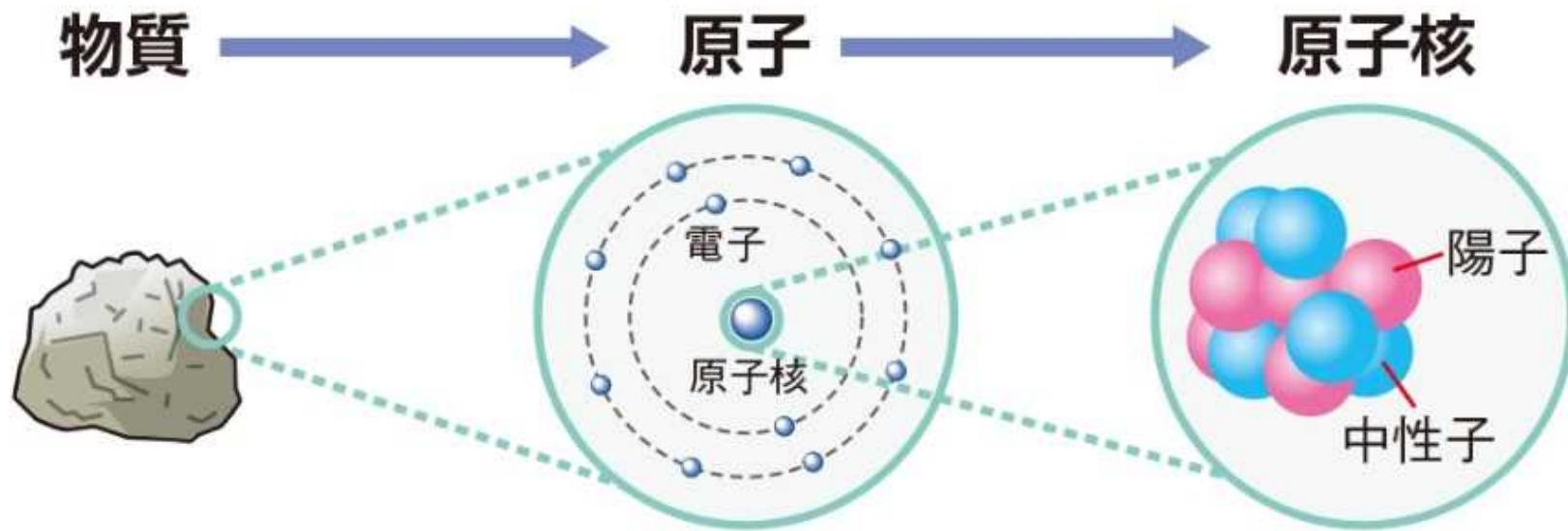
核融合の原理

原子力発電・核融合発電は、
温室効果ガスを排出せず、
地球温暖化対策の切り札になる！



本当か？

物質・原子・原子核



- ① 原子核の大きさは原子サイズの百万分の1
(野球場の大きさに対し大豆の大きさ)
↔ 束縛力が百万倍
- ② 陽子や中性子の重さは電子の約1840倍

アインシュタインの関係式

$$E = \Delta m c^2$$

①火が燃える



化合→電子の質量が減る

⇒エネルギー（熱）が出る

原子核の変化では

100万倍の質量損失

= 100万倍のエネルギー放出



②核分裂

原子核の質量が減る

広島原爆で0.7g

③核融合

原子核の質量が減る

C + O₂ → CO₂

carbon plus oxygen two right arrow carbon dioxide

カーボン + オキシゲン二分子 → ダイカーボニア

炭素の燃焼



$$E = \Delta m c^2$$

化合



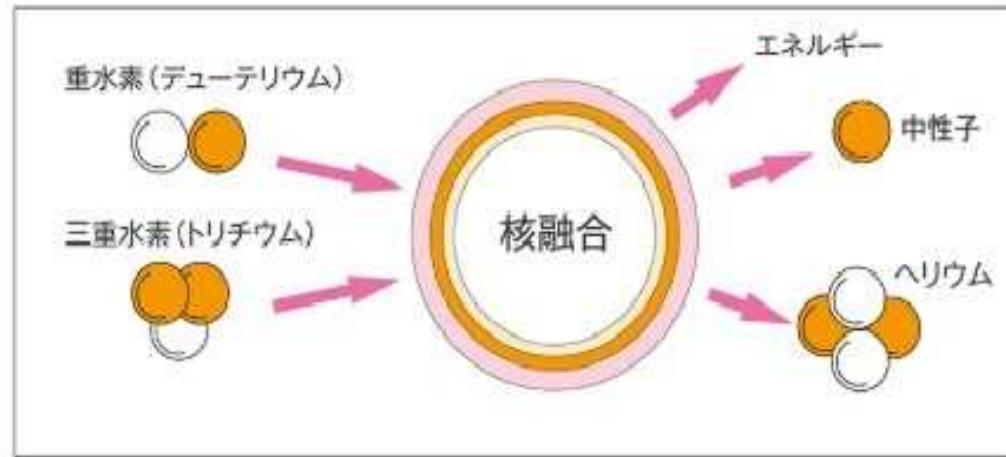
2酸化炭素

炭素 + 酸素

質量の差が
エネルギーに
この差は少なすぎて
計測不可能

核融合・核分裂

核融合の原理

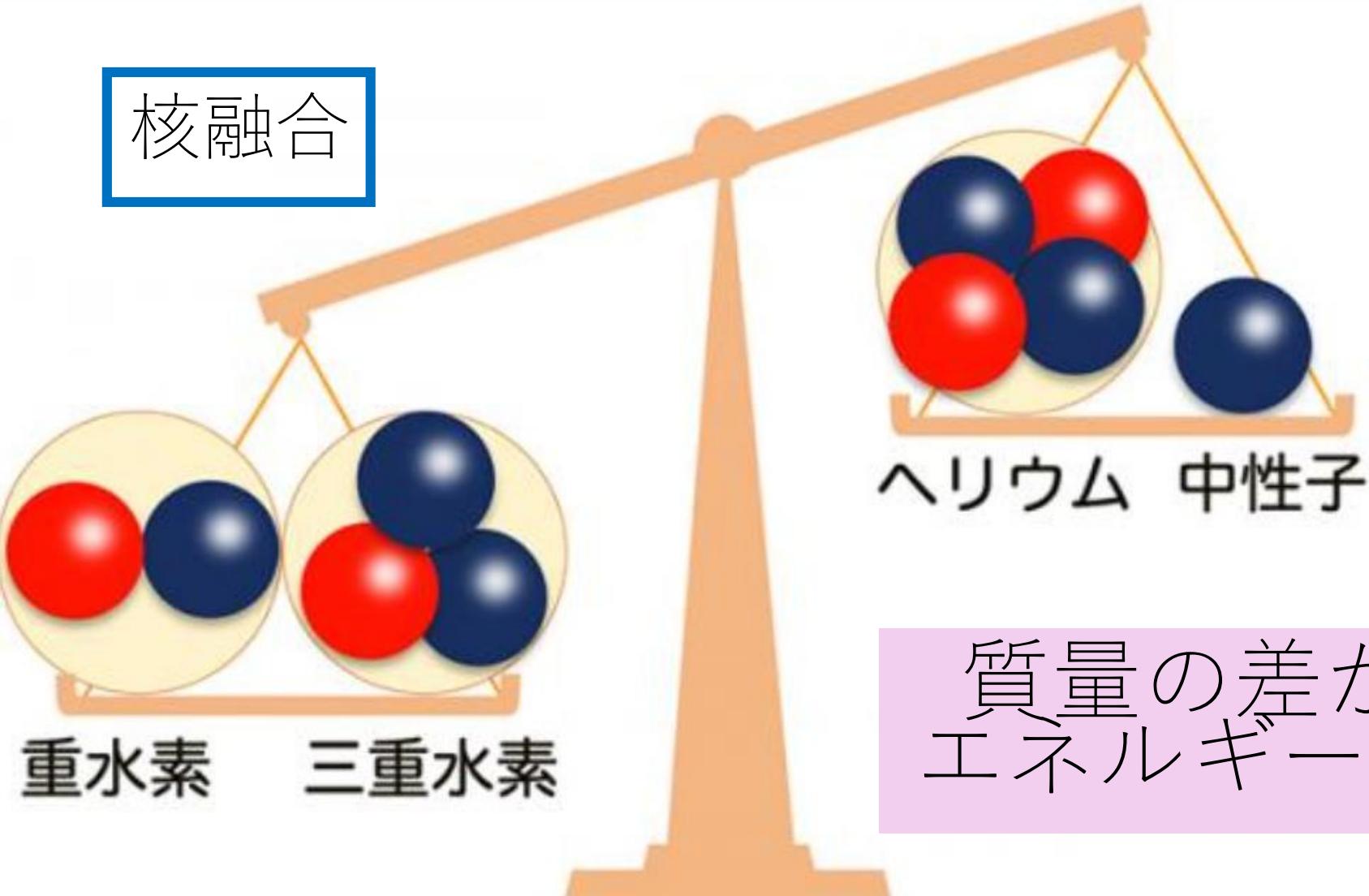


核分裂の原理



$$E = \Delta m c^2$$

核融合

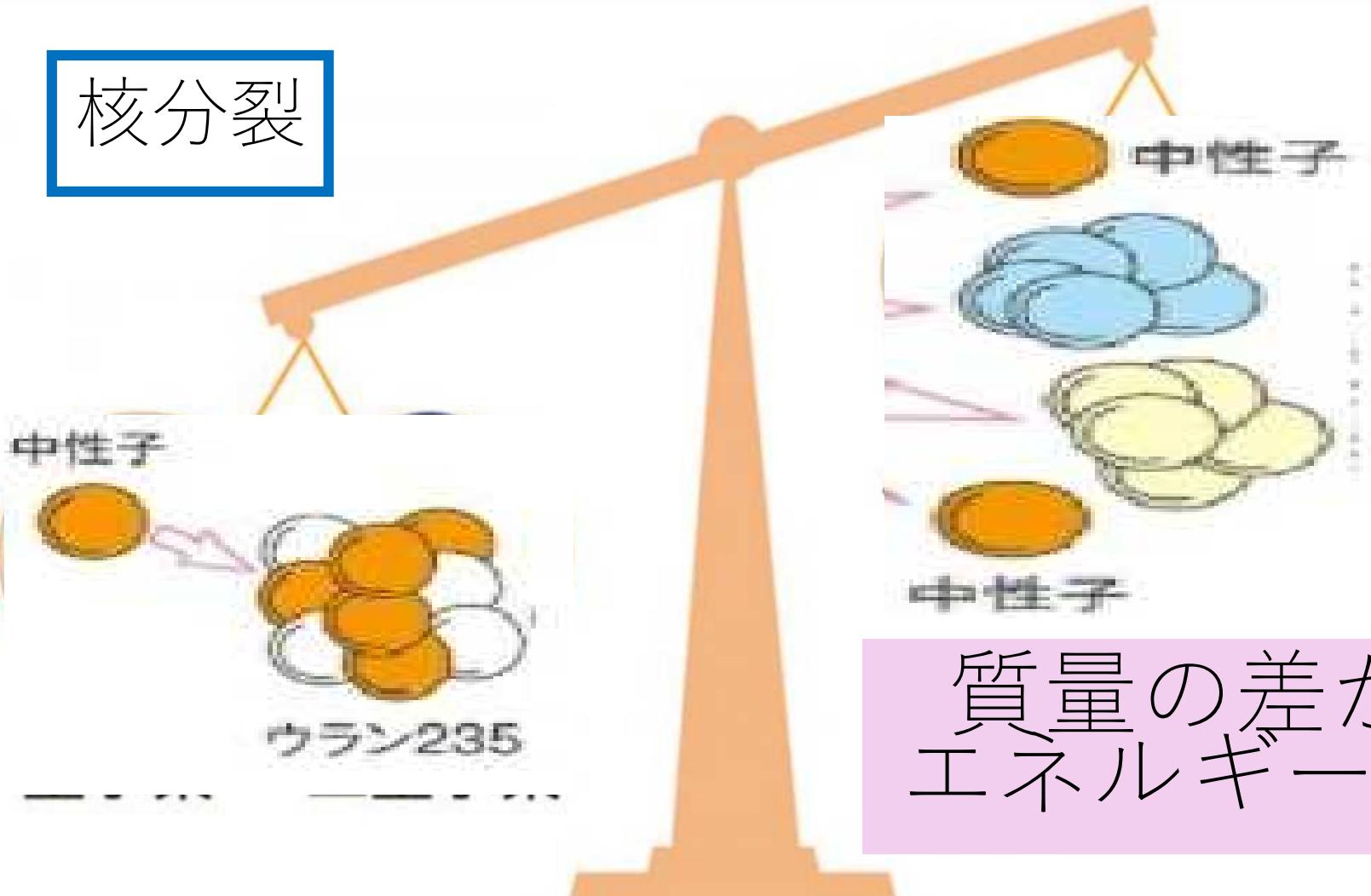


ヘリウム 中性子

質量の差が
エネルギーに

$$E = \Delta m c^2$$

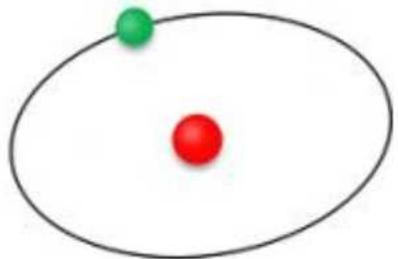
核分裂



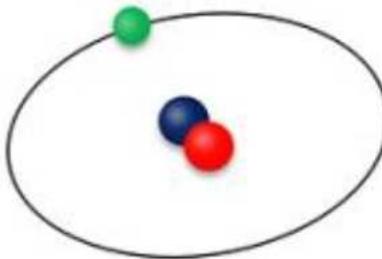
質量の差が
エネルギーに

水素の仲間（同位元素）

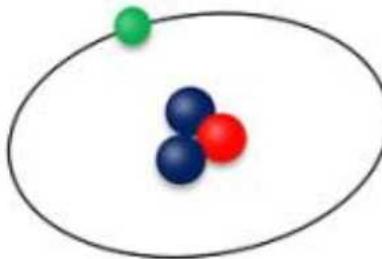
陽子が1個



水素 (H : 軽水素)



重水素 : D



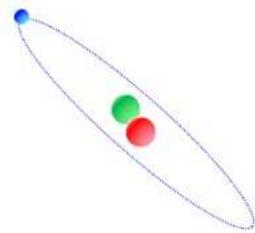
三重水素 (T : トリチウム)

● 中性子 ● 陽子 ● 電子

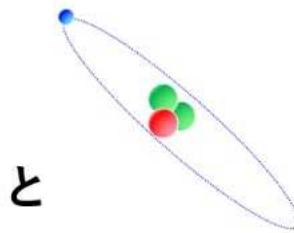
水素の仲間たち（同位元素）

（同位元素） 陽子の数が同じ

核融合



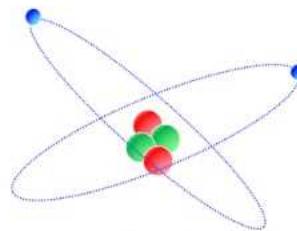
重水素



三重水素

が
核融合

で



ヘリウム
と

中性子

になる

微粒子の運動
エネルギーは
温度に比例する

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

原子を保っているエネルギー（束縛エネルギー）以上に
熱エネルギー（温度による運動エネルギー）
(バラバラになりたいエネルギー) が
大きくなる（速度が大きくなる）と
電子と原子核がバラバラになる ⇒ **プラズマ**

プラズマ

気体を構成する分子が電離し陽イオンと電子に分かれて運動している状態

原子核 (+ 電荷) 同士は強い電気的反発力
⇒ぶつけ合うには ⇒ 速度 ⇒ 温度を高くする

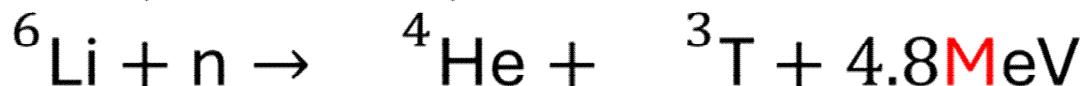
核融合 燃料とエネルギー

重水素D

海水から

重水濃度 0.015%

トリチウムT (重水素) の生成

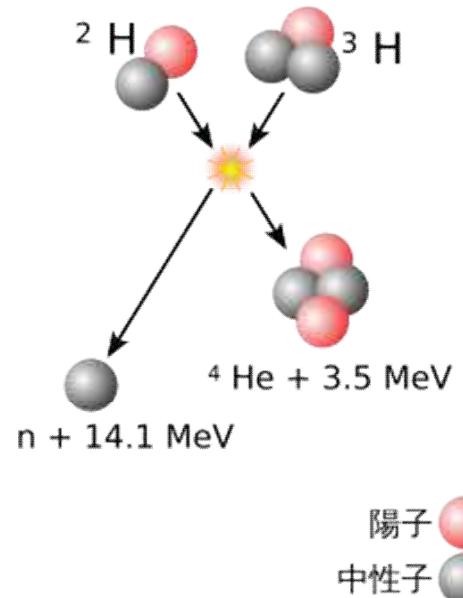


DとTをぶつけ合うのは高温による

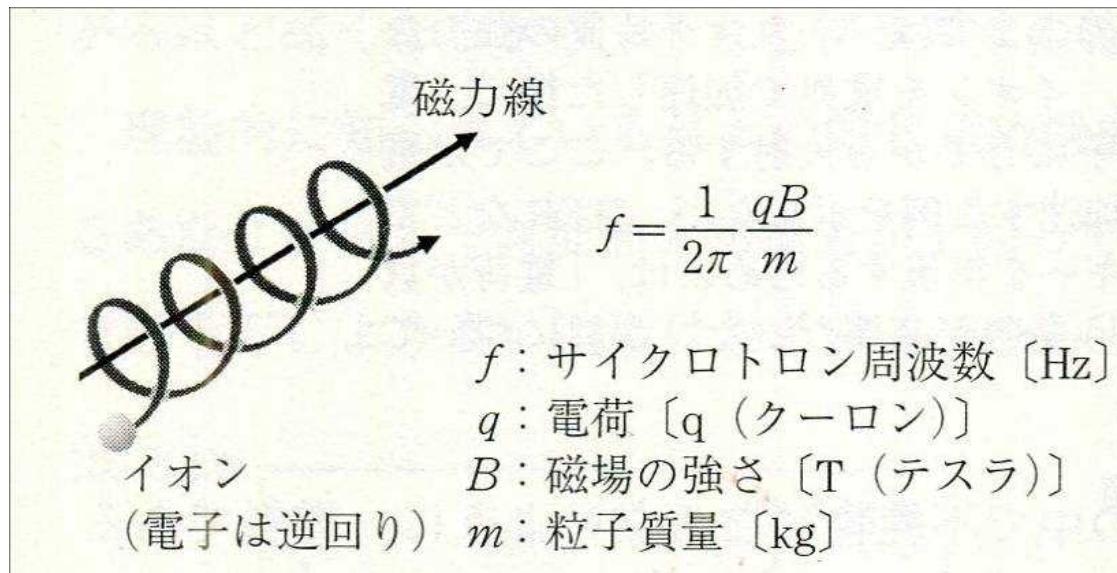
核融合 D・T反応 エネルギー
 $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He} + n + (14\text{ MeV})$



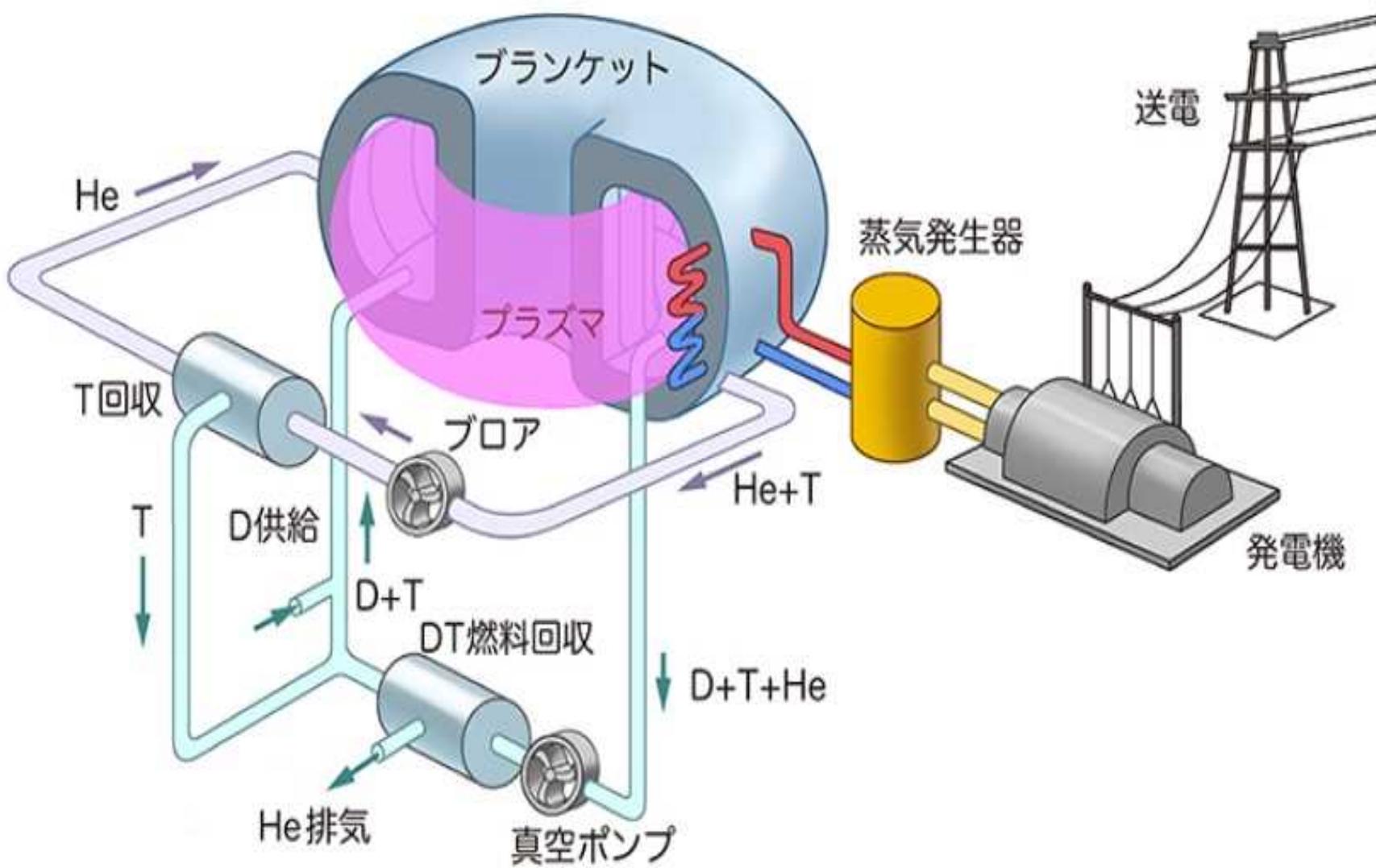
この中性子でT生成



磁場の中にプラズマを閉じ込める



- ① 磁場は超電導コイルで発生
- ② 磁場の中でプラズマが回転する
- ③ 磁場が強いほど、温度が高いほど
プラズマの広がりは小さくなる \Rightarrow 閉じ込められる



■トカマク (Tokamak)

1950年代に旧ソビエト連邦で開発された、トランスの原理でプラズマに電流を流すことでプラズマを閉じ込めておく装置です。TFコイル、CSコイル、PFコイルの三種類の電磁石を組み合わせてプラズマを閉じ込める磁場を作ります。

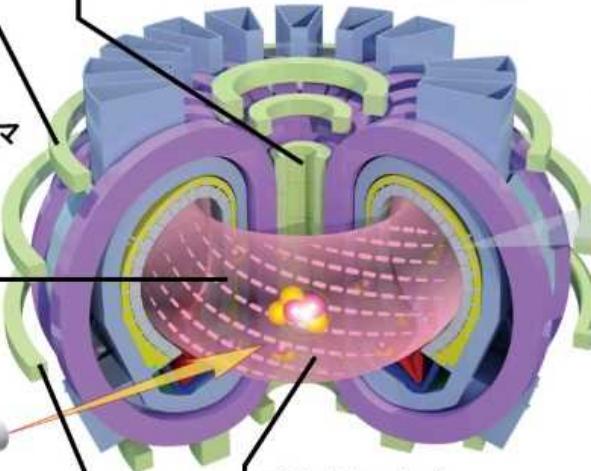
■ポロイダル磁場コイル(PFコイル)

プラズマの位置や形を制御します。

■中心ソレノイドコイル(CSコイル)

プラズマ自体に電流を流して磁力線をらせん状にします。

■プラズマ



■磁力線のカゴ

らせん状の磁力線にイオンと電子が巻き付いて、プラズマを閉じ込めます。

■トロイダル磁場コイル(TFコイル)

ドーナツ型の磁力線を作ります。

■プラズマ加熱装置

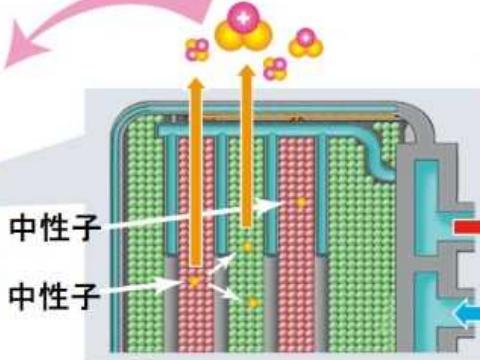
ビームや電磁場を使ってプラズマを1億度以上に加熱します。

■三重水素の生産 ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{T} + 4.78\text{MeV}$

プランケットの中で中性子と反応したリチウムは、燃料となる三重水素とヘリウムに分裂します。三重水素は燃料として回収し、ヘリウムは放出されます。

■発電タービン

核融合反応のエネルギーで温められた高温高圧の水蒸気で発電タービンを回し、電力を取り出します。

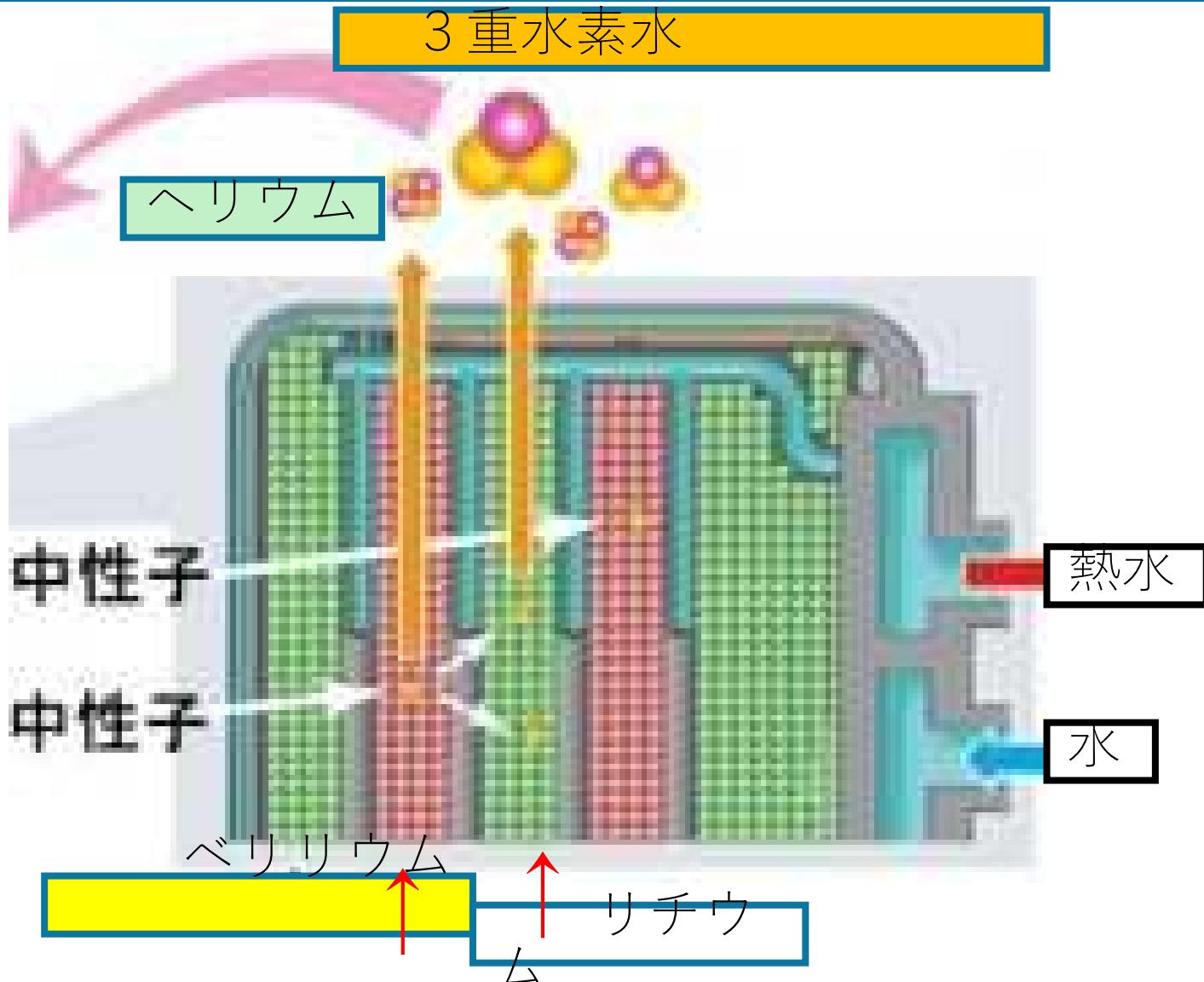


■プランケット

核融合炉で発生したエネルギーは、プランケットの中を流れる冷却水を数百度まで温めます。同時に、リチウム(${}^6\text{Li}$) (緑)に中性子を当てて、核融合の燃料である三重水素を作ります。ベリリウム(${}^9\text{Be}$) (赤)には、リチウムに当てるための中性子を増やす効果があります。また、中性子遮蔽の役割も担います。



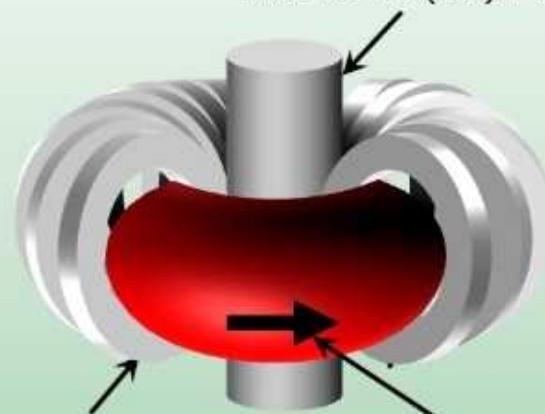
ブランケットの仕組み



核融合の諸方式

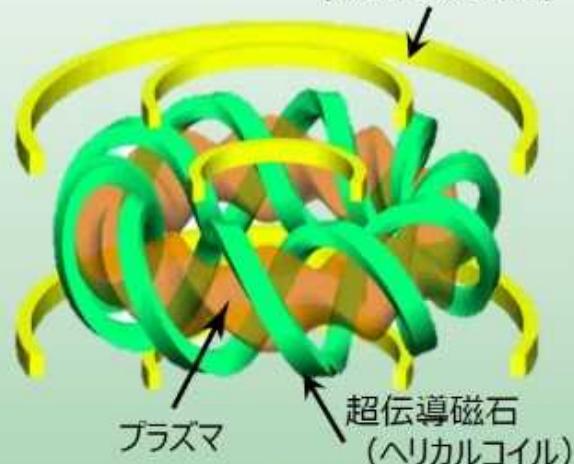
●トカマク型（磁場閉じ込め）

中心ソレノイド(CS)コイル



●ヘリカル型（磁場閉じ込め）

超伝導磁石
(ポロイダルコイル)



●レーザー方式（慣性閉じ込め）

加熱レーザー

爆縮レーザー

核融合の主な閉じ込め方式について

トロイダル磁場
(TF)コイル

プラズマ電流

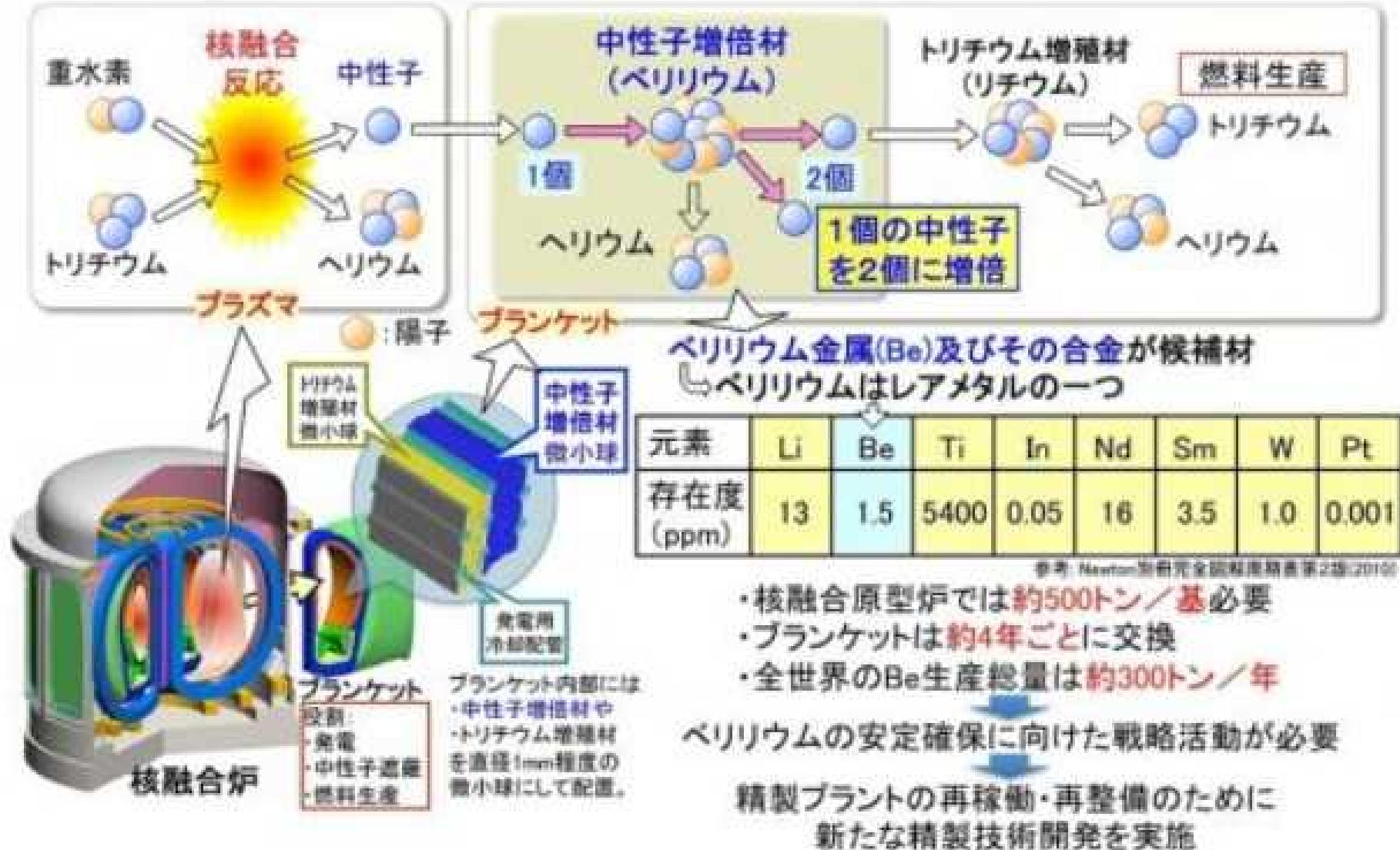


図1 中性子増倍材の役割とベリリウムの安定確保の必要性

核融合は安全か

①中性子⇒核分裂の約10倍のエネルギー⇒非常に危険

核分裂 2 MeV

核融合 1~4 MeV

遮蔽材料 コンクリート、ホウ素カーバイト、タングステン、水素多含有物質

②トリチウム

生成するヘリウムを排気⇒一緒に廃棄される

有機（特にDNA水素結合）が危険

ICRP等は無害を主張

③中性子誘導放射化・高濃度廃棄物

地震列島で管理のしようがない

核分裂 10 万年

核融合 100 年

④事故時

核分裂（冷却水循環停止）⇒メルトダウン

核融合 高温停止で核反応はすべてストップ

今回は特にトリチウムの危険性

トリチウムの物性を
ICRPの

- ①具体性の捨象（実効線量）
- ②臓器毎（計測単位を限定過小評価）
- ③因果律の破壊（刺激に応じて生じる内部応答の無視）

に従わずに
具体的に見てみよう

危険性が見えてきます

ICRP電離対象から除外している諸要素

- ①内部被曝に関する因子：
不溶性微粒子、可溶性微粒子、 α 線、 β 線
- ②水の電離に伴う活性酸素に関する因子：
酸化ストレス症候群、ペトカウ効果
- ③電離対象に関する因子：
DNA, ミトコンドリア、ミトコンドリアDNA, 細胞膜、心臓/脳組織、あらゆる組織
- ④被曝に伴うリスク因子：
バイスタンダー効果、ペトカウ効果、ゲノム不安定性
- ⑤体力・免疫力に関する因子：
修復力、免疫力、年令、病弱、老齢、ホルミシス効果

ICRP 如何いでたらめな体系か！

トリチウムの危険 3つのポイント

(1) 低エネルギーβ線

トリチウムの線エネルギー付与はCs137の20倍 \Rightarrow 修復確率が激減 \rightarrow 「低エネルギーだから大したことはない」は全くの虚偽

(2) 有機トリチウム
①生物学的半減期が極増
②体内重要組織(DNA等)に結合
③崩壊で3重の危険(T特有の危険)
-細胞核内での電離(高度密集電離)
・発生した活性酸素で電離
・発生したベータ線で王密度電離
④動植物の摂取対象 \Rightarrow 食物連鎖で濃縮

(3) 通常水素の質量の3倍重い \Rightarrow 結合水への落ち込み確率より自由水への脱出確率が少 \Rightarrow 濃縮が起こる
①結合水增加
②蒸発・凝縮の際液相で增加
③光合成で生成物に濃縮
④生物体で結合水に増加(自由水は外部濃度と同じ)
⑤その他あらゆる平衡状態で「結合相」に濃縮

トリチウムの危険を認めたらすべての核産業はやっていけない。

ICRPモデルは自由水だけで論じ
通常水と同様に100%血液に入る、
10日半減期で体外へ \Leftrightarrow 全く危険ではない

トリチウムの危険

(1) 低エネルギーだから大丈夫 トンデモナイ

(1) トリチウムの線エネルギー付与はCs137の20倍

⇒電離密度が20倍 ⇒修復確率が激減

→「低エネルギーだから大したことはない」は
全くの虚偽

核種	最大エネルギー	飛程	線エネルギー付与
Cs-137	152 keV	2mm	0.25 keV / μ m
T-3	18, 6 keV	5 μ m	5.5 keV / μ m

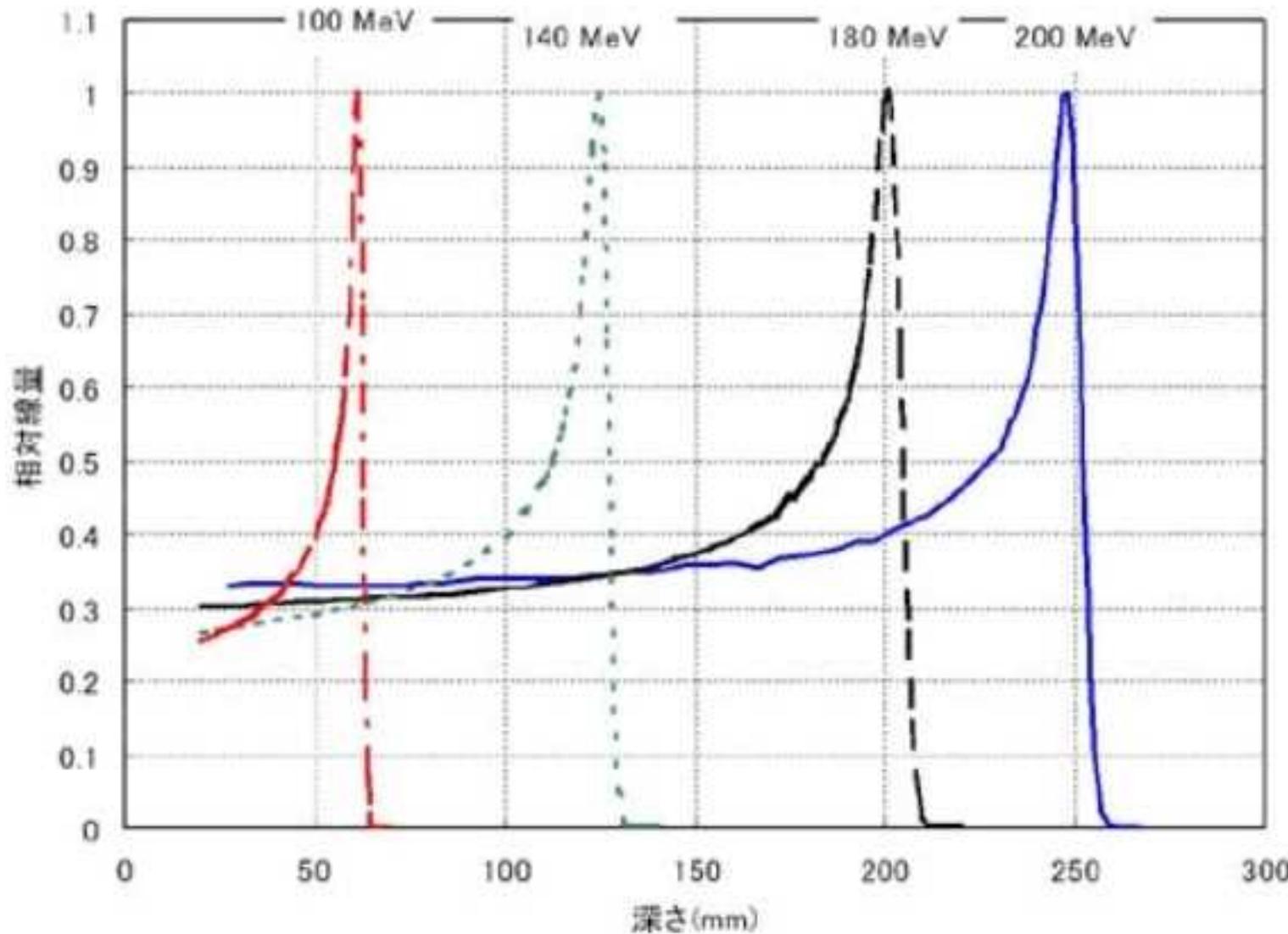
有機化 ⇒ 細胞核内からのβ線発射は被害極大

放射線
の
線工ネ
ルギー
付与

放射線	LET : L_z (keV/ μm)
^{60}Co γ 線	0.3
250 kV _P X 線	2.5
170~200 kV _P X 線	3.3~3.8
^3H β^- 線 トリチウム飛程 $5 \mu\text{m}$ 水中	5.5
14MeV 中性子 (7MeV 陽子)	12
4 MeV 中性子 (2 MeV 陽子)	17
核分裂中性子 (0.95 MeV 陽子)	45
8.3 MeV α 線	61
3.4 MeV α 線	86
U238 4.2MeV	
5.2 MeV α 線	140
^{10}B (n, α) α 線	200

Table 3 「放射線医学大系34 放射線物理学」中山書店 1984から引用

ブラングピーク α 線空中



相互作用の大きさは接触時間で決まる

エネルギーが低いと速度が遅い ⇒ 接触時間が長くなる
⇒ 線エネルギー付与が大きくなる
不確定性関係

⇒ γ 腺光子線も同様

↔ 光電効果・コンプトン効果 2タイプ有るから複雑
粒子線 α 線 β 線

電離を繰り返す ⇒ エネルギーが小さくなる

⇒ 速度が遅くなる ⇒ 衝突した原子に接する時間が長い
⇒ 相互作用の機会が高くなる ⇒ 相互作用が大きくなる

⇒ **単位飛程当たりの電離が多くなる**

⇒ **ブレッゲピーカ** ↔ 線エネルギー付与LET大

B線 Cs-137 512keV LET 0.25keV/ μ m

T-3 18.6keV 5.5 keV/ μ m

Csの20倍

トリチウムの危険

(2) 有機トリチウム

自由水⇒結合水

体内組織内で + 微生物相手に

ICRP通常水同様自由水で100%血液に入る・
10日半減期で体外へ ⇔ 全く危険ではない

① 結合水 生物学的半減期が激増

② 体内重要組織 (DNA) に結合

③ 細胞核内での崩壊で重大危険

発生したベータ線で多数電離

<ヘリウム転化で塩基対が切れる>は嘘

④ 発生した活性酸素で電離

⑤ 動植物の摂取対象 ⇒ 食物連鎖で濃縮

⑥ 魚類等内で自由水は外部濃度と同じ ⇔ 結合水は濃縮

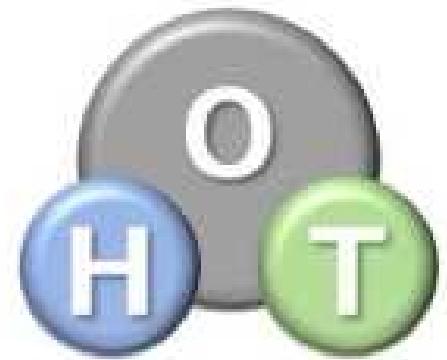
OBT (有機トリチウム) 生物学的半減期

Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities
By Dr. Ian Fairlie June 2007

Table 2 Tritium retention half-lives in humans after ingestion of HTO

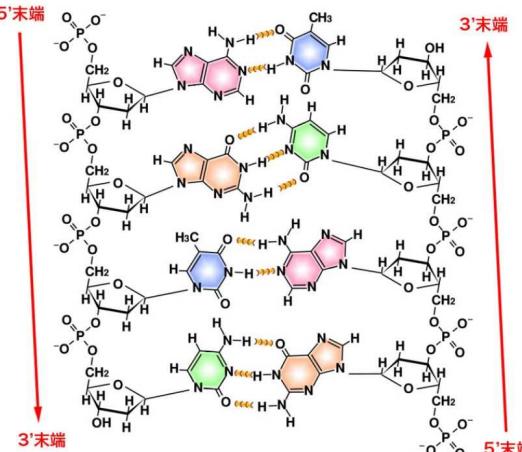
Reference	No. of cases	Biological half-life (days)		
		HTO	OBT1	OBT2
Pinson and Langham 1957	9	11.3	S,P,Nと	Cとの結合
Butler and Leroy 1965	310	9.5	-	-
Osborne 1966	30	10.5	-	-
Snyders et al 1968	1	8.7	34	-
Sanders and Reinig 1968	1	6.1	23	344
Minder 1969	1	-	1-30	139-230
Lambert et al 1971	1	9.1	36	-
Moghissi et al 1971	-	-	21-26	280-550
Moghissi et al 1972	1	9.0	30	450
Balonov et al 1974	-	12.0	39-76	-
Rudran et al 1988	8	6.0	30	226

通常水とトリチウム水



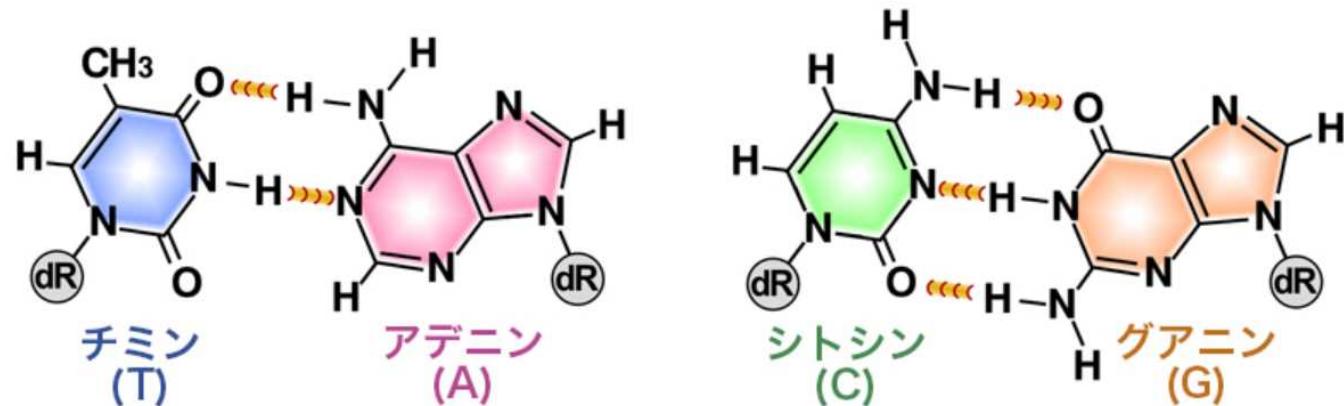
H_2O
水分子

HTO
トリチウム分子

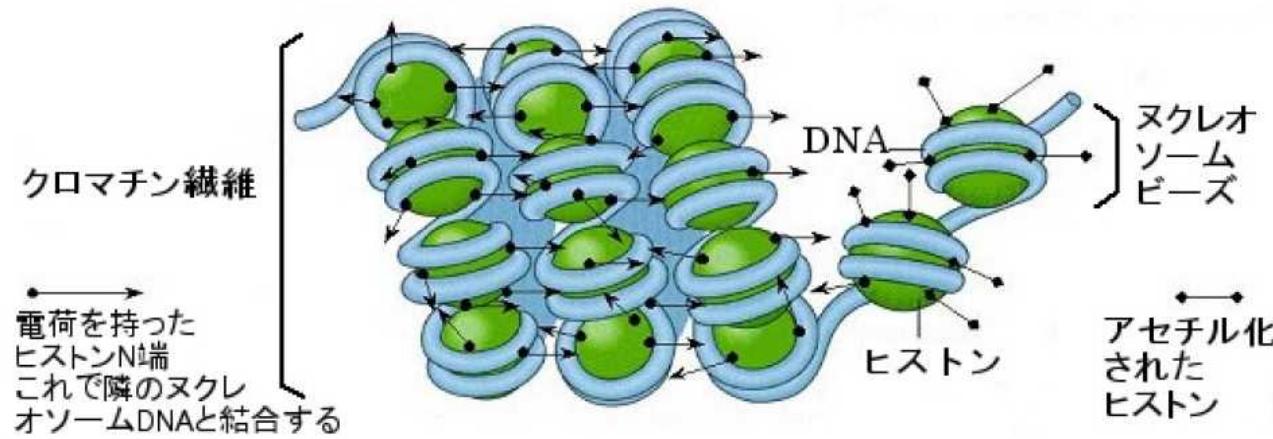


NS遺伝子研究室

TがDNA架橋間水素結合に入る

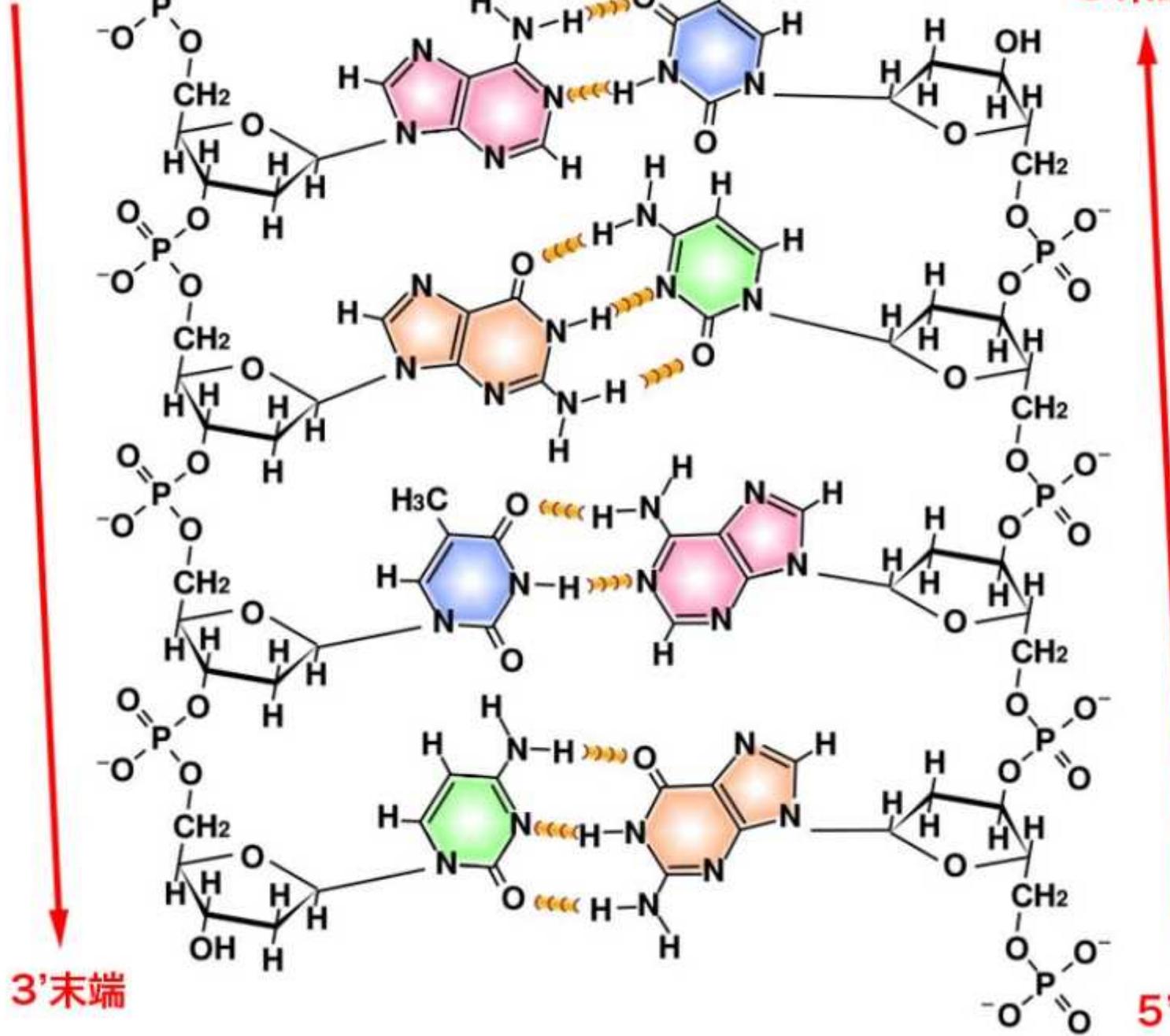


細胞核当たり 250 個の電離



5'末端

3'末端

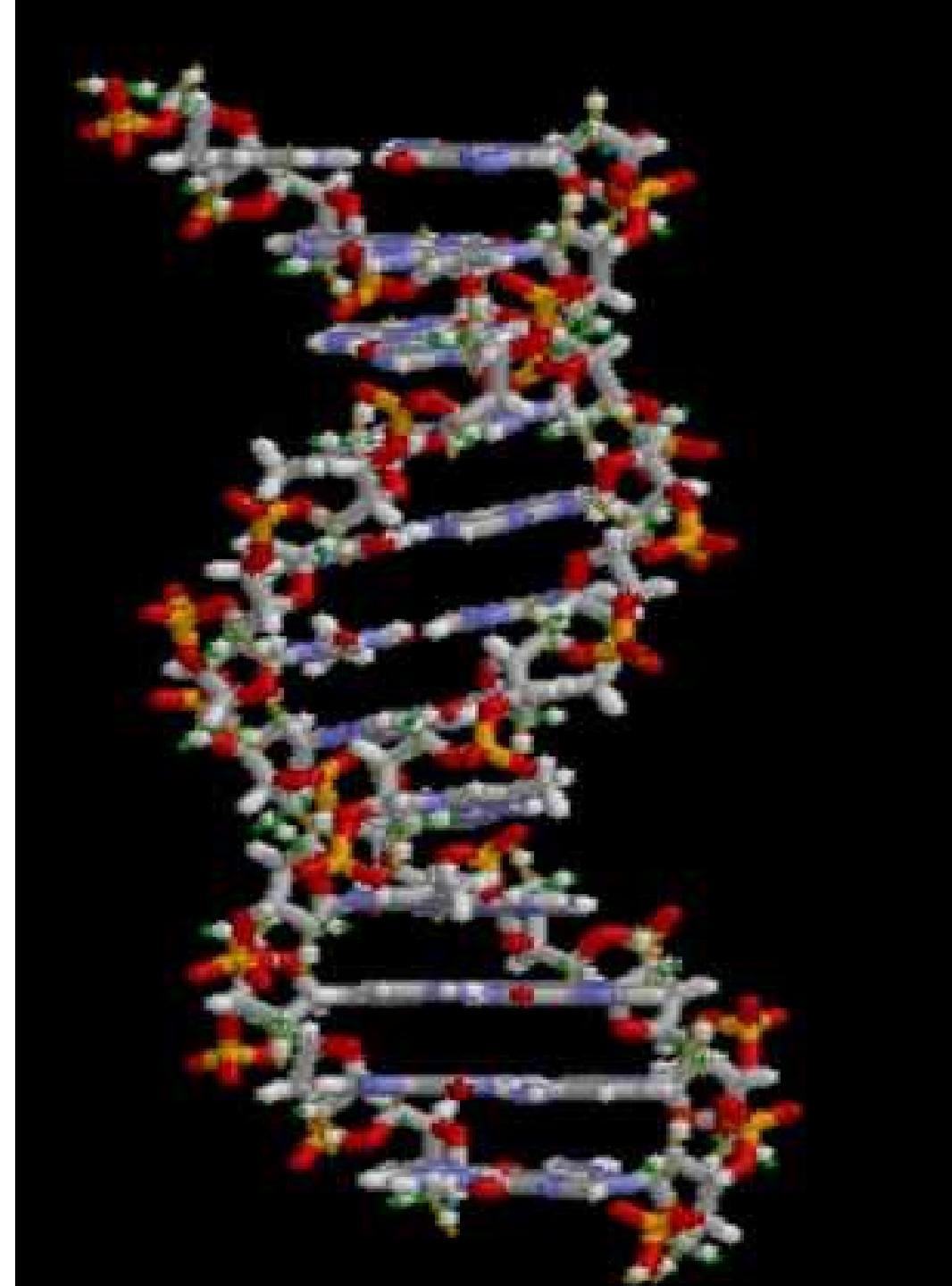


3'末端

5'末端

DNA 約2m
20 Å Φ (2nmΦ)
360度回転30 Å
10塩基対
25水素結合

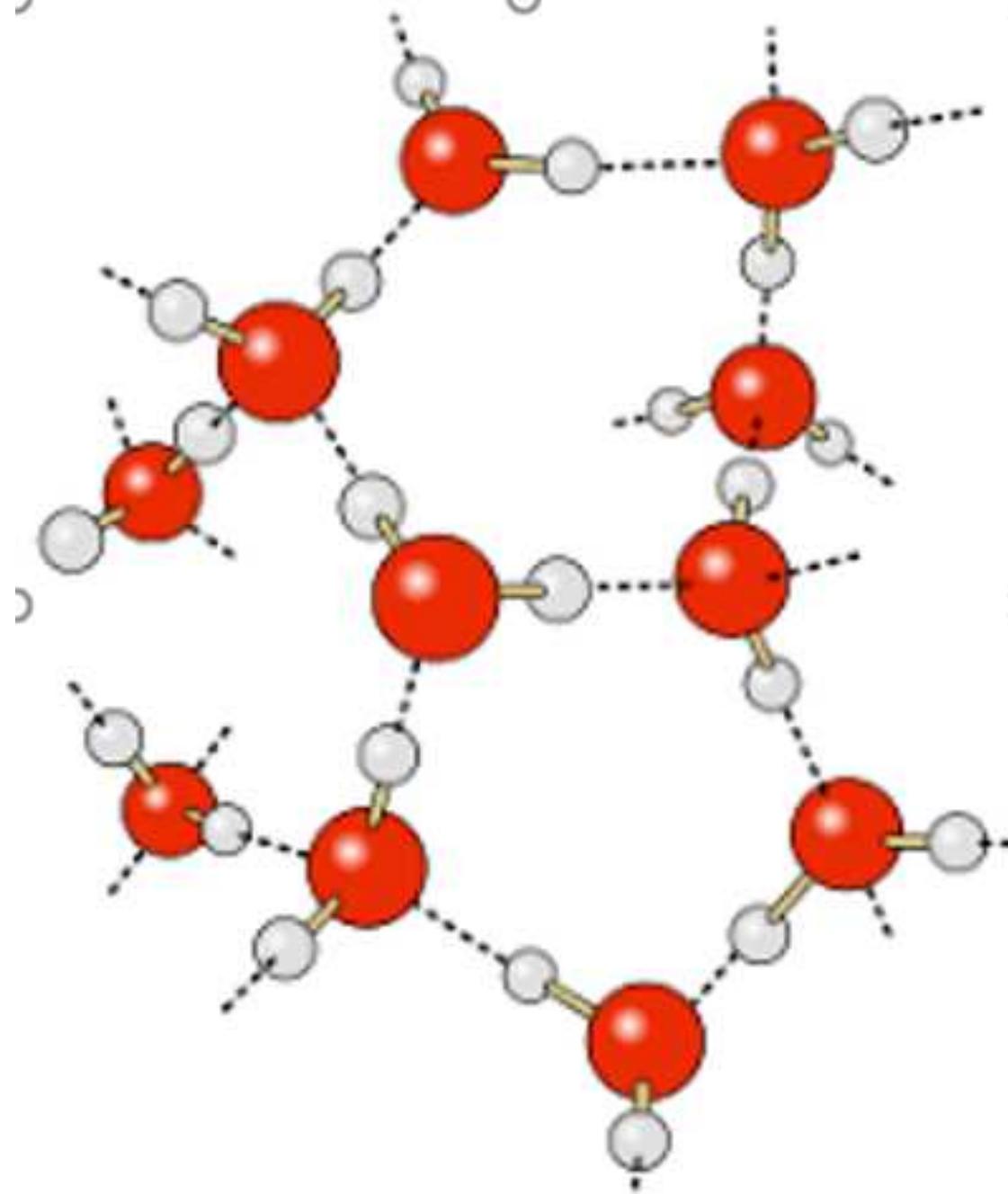
1対のDNAで
250億個の水素
結合



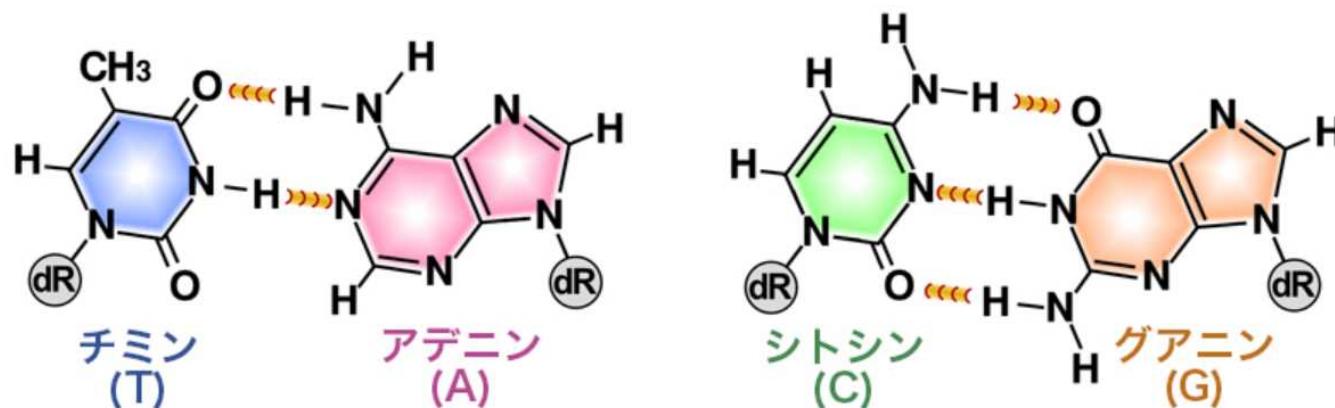
水素結合

水素同士の角
度が
92度
↓

酸素の負電荷
が打ち消され
ずに別の水素
を呼び寄せる



水素結合にHTOが有機結合して崩壊 DNA水素結合膨大な数⇒極めて現実的



- ① $T \Rightarrow He$ なので その水素結合は切斷する
- ② その修復には自由水を取りこまなければならぬので修復は困難
- ③ 塩基の結合は2重及び3重なので直ぐ塩基同士の結合は切斷されない
- ④ よってこれ自体でDNAに対し大した損傷は与えない

有機トリチ
ウムの
最大危険性

崩壊 ⇒
細胞核内で
発生

高密度の
DNA切断

細胞核
当たり250
個の電離

トリチウムの危険

(3) 通常水素の質量の3倍重い
あらゆる相で「結合」側に濃縮

通常水素の質量の3倍重い ⇒ 結合相に濃縮

⇒ 自由水から結合水への落ち込み確率より

自由水への脱出確率が少 (量子力学 : 不確定性関係)

⇒ 濃縮が必然的に起こる

① 結合水で半減期増大・濃度増加 (Dr. Ian Fairlie June 2007)

② 蒸発・凝縮・湿性沈着・乾性沈着の際凝集相で濃縮

③ 光合成で生成物に濃縮

④ 泥中の微粒子内で濃縮

⑤ 生物体で結合水に濃縮 (自由水は外部濃度と同じ)

⑥ あらゆる平衡状態で「結合相」に濃縮

有機Tの濃縮 (Saito & Komatsu 1986年) マウス

①肝臓の細胞のDNAに取り込まれた

トリチウムからの被曝は、

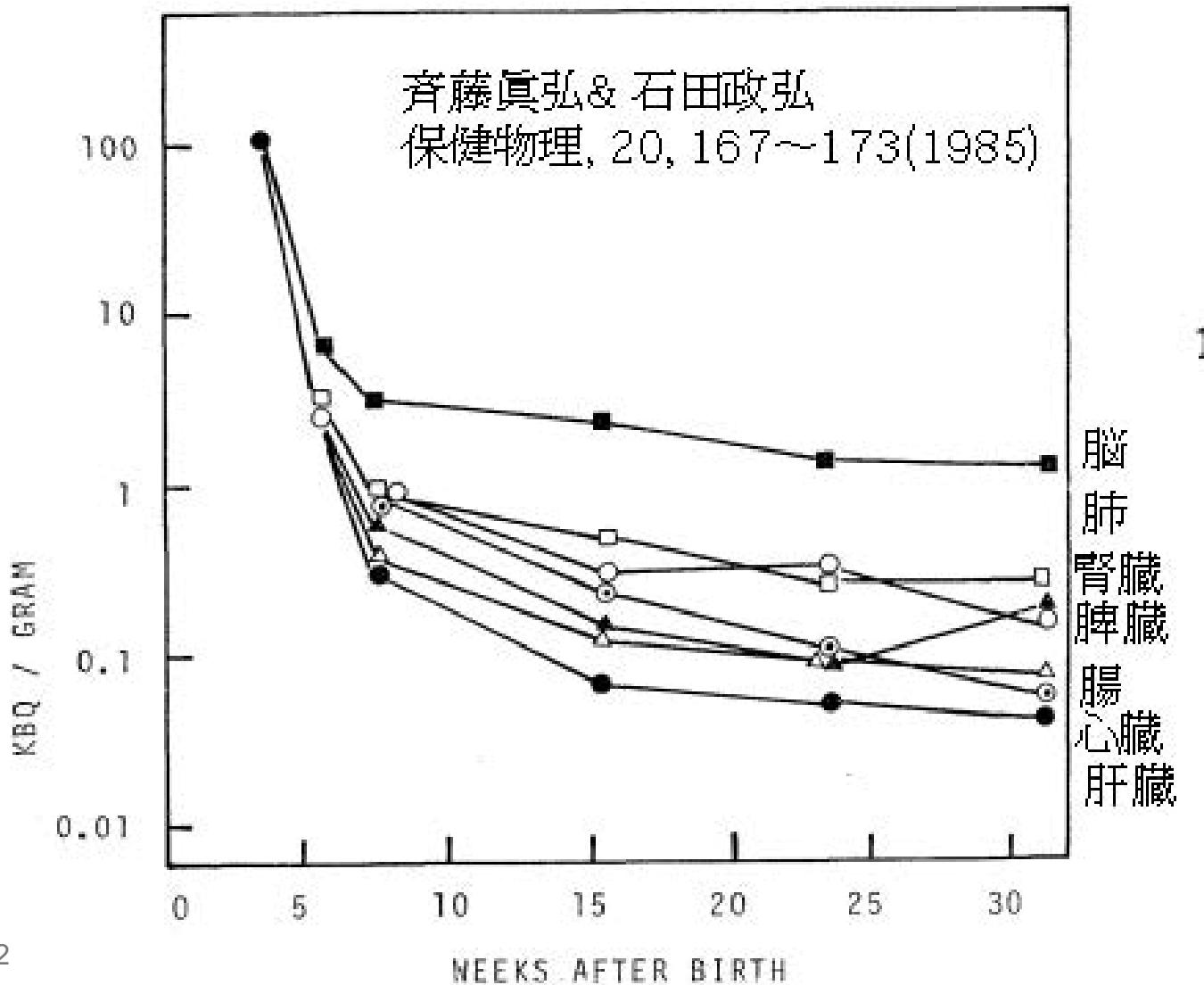
- 初期の頃は総トリチウム被曝線量の
1 %から3%程度、
- 14週間後には10%に上昇、
- 41週間後には52%と劇的に上昇

②Benedict C. Jaeschkeら (2013) ムール貝給餌回数と捕食者内のOBT濃度が線形関係にあることは、OBTが生物濃縮する可能性を示唆する。

③ ⇔ 福島大高田兵衛ら トリチウムは魚に蓄積しない

「自由水に濃縮無し」 当たり前では無いか
計測単位の「質量の測り方に疑義あり

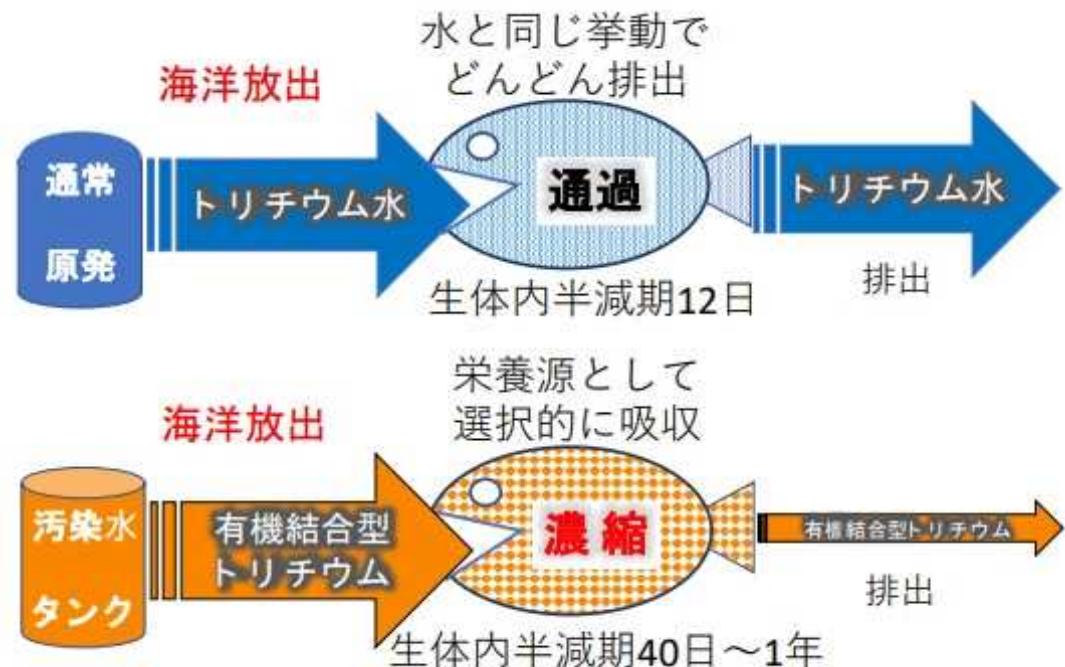
トリチウム投与母乳による 生後被曝の蓄積



タンク内の有機トリチウム

岩倉政城氏図

東電福島第一原発汚染水タンク内で
起こっていること(新医協 岩倉 2020/6/14)



線量係数の不当な過小評価

セシウム137と比較 <26倍の過小評価> 実際はもっと

エネルギー

線量係数

$$18.6 / 512 = 0.0363$$

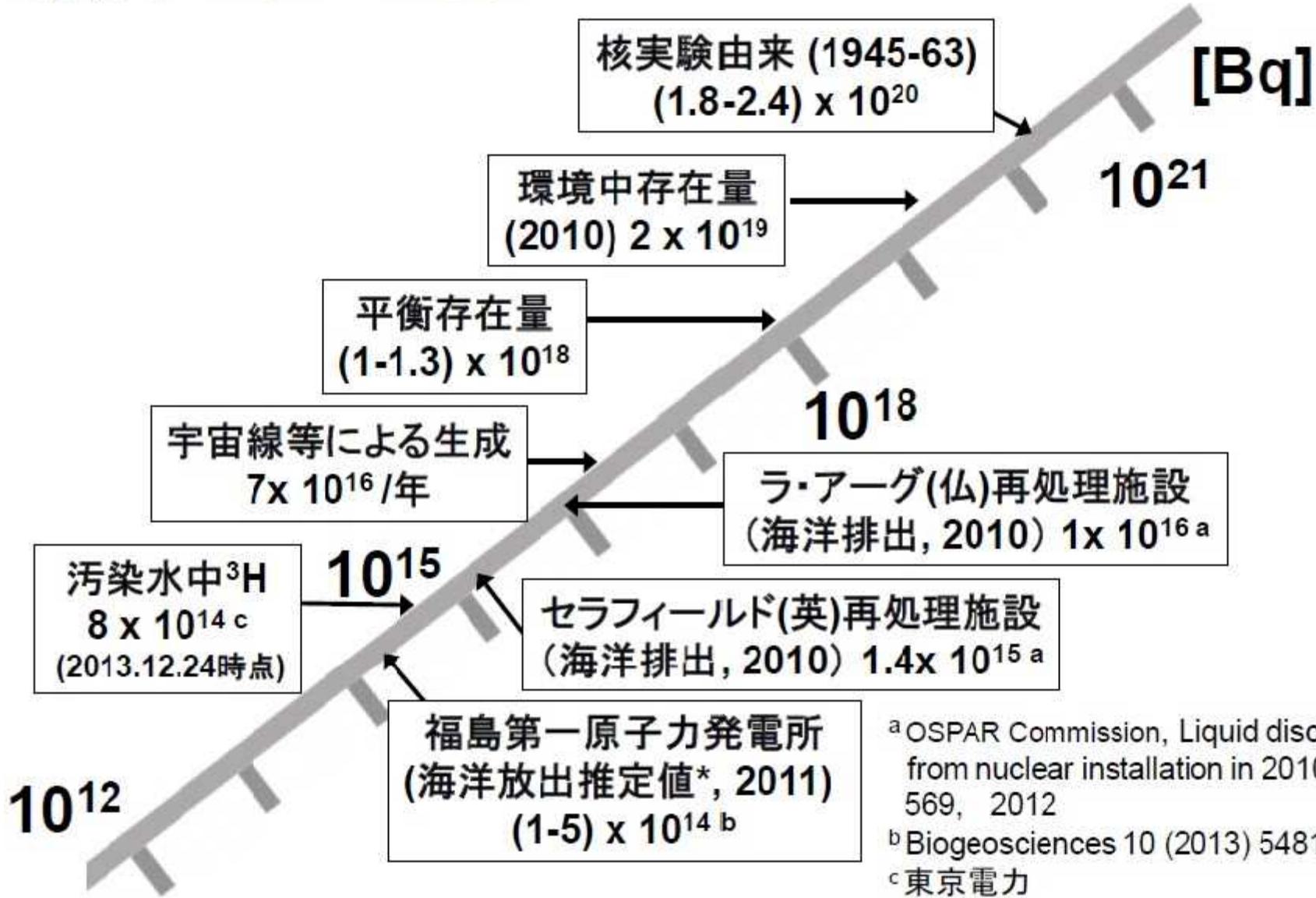
$$1.8 / 1300 = 0.00138$$

表 1. 経口摂取の場合の預託実効線量係数 (mSv/Bq) .

線量係数

	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}

環境中³Hインベントリー



^a OSPAR Commission, Liquid discharges from nuclear installation in 2010. No. 569, 2012

^b Biogeosciences 10 (2013) 5481-96.

^c 東京電力