

2023年8月30日 水道橋全水道会館
原子力市民委員会(公開委員会)

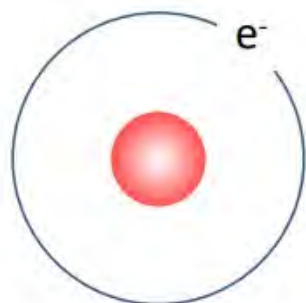
トリチウムの発生に関する解説

規制部会長 後藤政志

本資料は、ネット上や雑誌で掲載されている資料を元に、筆者の責任でまとめた。なお、過去に原子力市民委員会の規制部会で議論されたものも参照いただければ幸いです。

トリチウムは水素の仲間(水素の同位体)

(軽)水素



Protium (H)

質量数: 1

陽子 1個

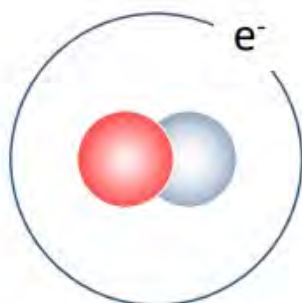
中性子 0個

電子 1個

安定同位体

存在比 99.985%

重水素



Deuterium (D)

質量数: 2

陽子 1個

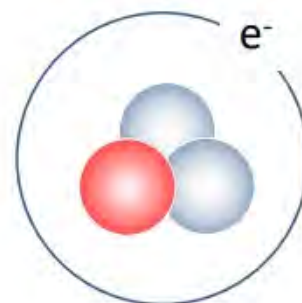
中性子 1個

電子 1個

安定同位体

存在比 0.015%

三重水素
(トリチウム)



Tritium (T)

質量数: 3

陽子 1個

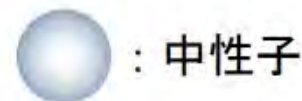
中性子 2個

電子 1個

放射性同位体

存在比 極微量

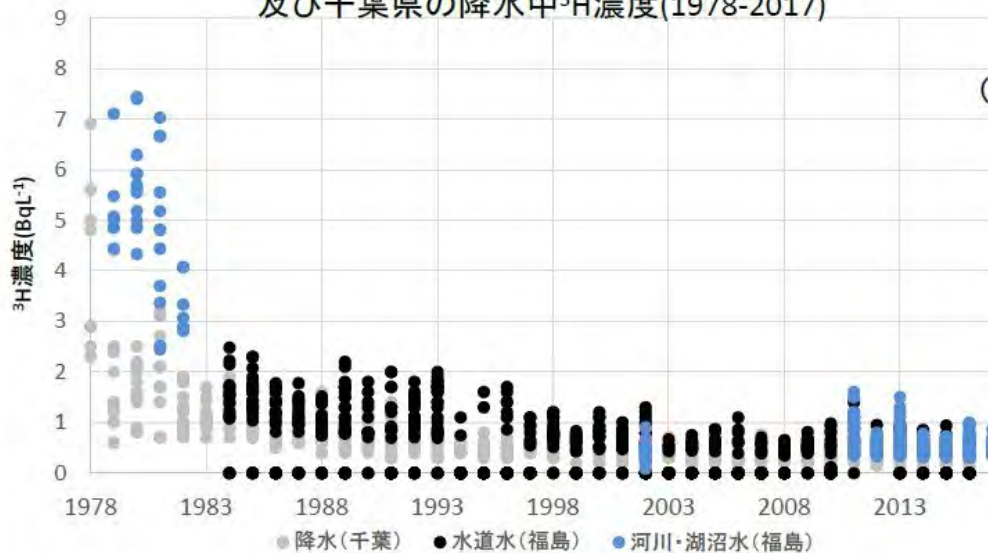
^3H とかTと
書きます。



トリチウムの基本情報

- トリチウムは水素の放射性同位体。(宇宙線等により生成するため、河川・海など自然界にも存在)
- トリチウムはβ線を放出するが、トリチウムのβ線はエネルギーが小さいため、紙1枚で遮へいが可能。また、そのため、外部被ばくはほとんどない。

福島県河川水及び水道水中³H濃度(1978-2016)
及び千葉県の降水中³H濃度(1978-2017)



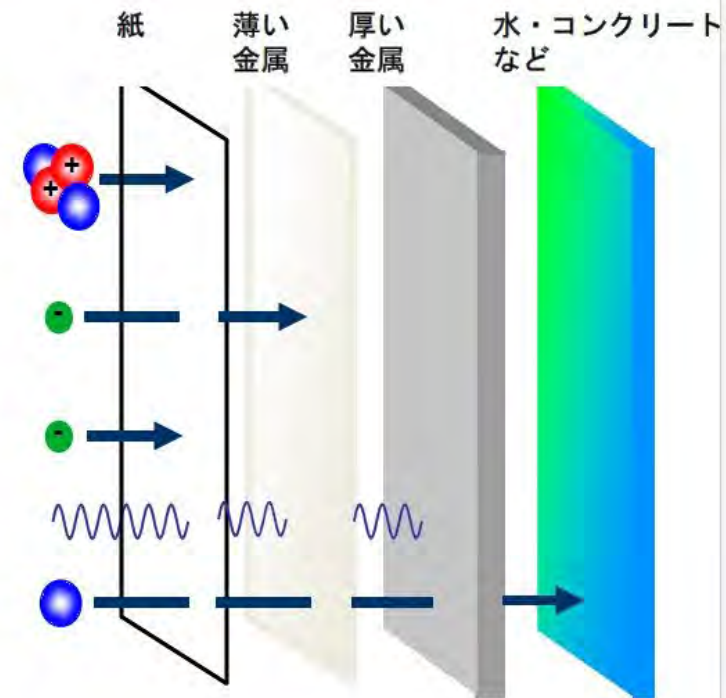
α線
(He原子核)

β線
(電子)

トリチウムのβ線
(電子)

γ線
(電磁波)

中性子



出典：第15回トリチウム水タスクフォース参考資料3を基に事務局にて時点修正

トリチウムに関する環境中へのこれまでの排出状況

- 人工的なトリチウムの生成
 - 核実験により生成：約1.8～2.4兆(約 $1.8\sim 2.4\times 10^{20}$)ベクレル（1945～1963年）
 - 日本全国の前発による海洋へのトリチウム排出量は年間約380兆ベクレル（事故前5年平均）
- 事故前の原子力発電所の近隣海域のトリチウム濃度はND～21ベクレル/リットル

全国の原子力発電所等（事故前5年平均）

日本全国の原子力発電所合計
約380兆ベクレル/年

PWR（加圧水型原子炉）※
18～87兆ベクレル/年

BWR（沸騰水型原子炉）
0.02～2.0兆ベクレル/年

（参考）再処理施設
（液体）9.8～430兆ベクレル/年、（気体）0.9～4.0兆ベクレル/年

※炉心の冷却水にホウ素を入れるため、BWRとトリチウムの発生量が異なる。

出典：JNES「原子力施設運転管理年報」

近隣海域のトリチウム濃度

H22年度：ND～21ベクレル/リットル

H27年度：ND～2.6ベクレル/リットル

※NDとは検出下限以下を指す

出典：平成28年度海洋環境における放射能調査及び総合評価(海洋生物環境研究所)

原子力発電所の排出基準値

規制濃度基準：6万ベクレル/リットル

1発電所あたりの放出管理目標値：7.4兆～290兆ベクレル/年

出典：JNES「原子力施設運転管理年報」

福島第一原子力発電所のトリチウムに関する状況

- 事故前の放出管理目標値は年間22兆ベクレル。規制濃度基準は6万ベクレル/リットル以下。
- 実際の平均放出量は年間約2兆ベクレル。濃度はND～1ベクレル/リットル程度（2007年度）。
- 事故後は炉心溶融により、被覆管内に存在していたトリチウムが外部に流出。
- 現在、タンクに貯蔵されているALPS処理水は、貯蔵量約100万m³、濃度約100万ベクレル/リットル。約1000兆ベクレル。※多核種除去設備等により、トリチウムを除く核種について告示濃度限度以下までの浄化が可能。他方、原子力発電所や再処理施設等から排出される水についても同様にトリチウム以外の核種を除去したうえで排出している。
- サブドレン等で海洋に排水している地下水には、一定程度トリチウムが含まれている。
（運用目標：1500ベクレル/リットル以下、実際の排出濃度(平均値)：約660ベクレル/リットル、実際の排出濃度(最大値)：1100ベクレル/リットル）
- なお、WHOの飲料水水質ガイドラインの濃度は1万ベクレル/リットル。

福島第一原子力発電所におけるトリチウム放出量(ベクレル/年)

2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
約2.6兆	約1.4兆	約1.6兆	約2.0兆	約2.2兆

出典：原子力規制庁「原子力施設に係る平成27年度放射線管理等報告について」

サブドレンからのトリチウム放出量(ベクレル/年)

	2015年※1	2016年	2017年	計
サブドレン	約360億	約1300億	約1100億	約2760億

※1 サブドレンは、2015年9月14日から排水開始

出典：東京電力の資料より作成

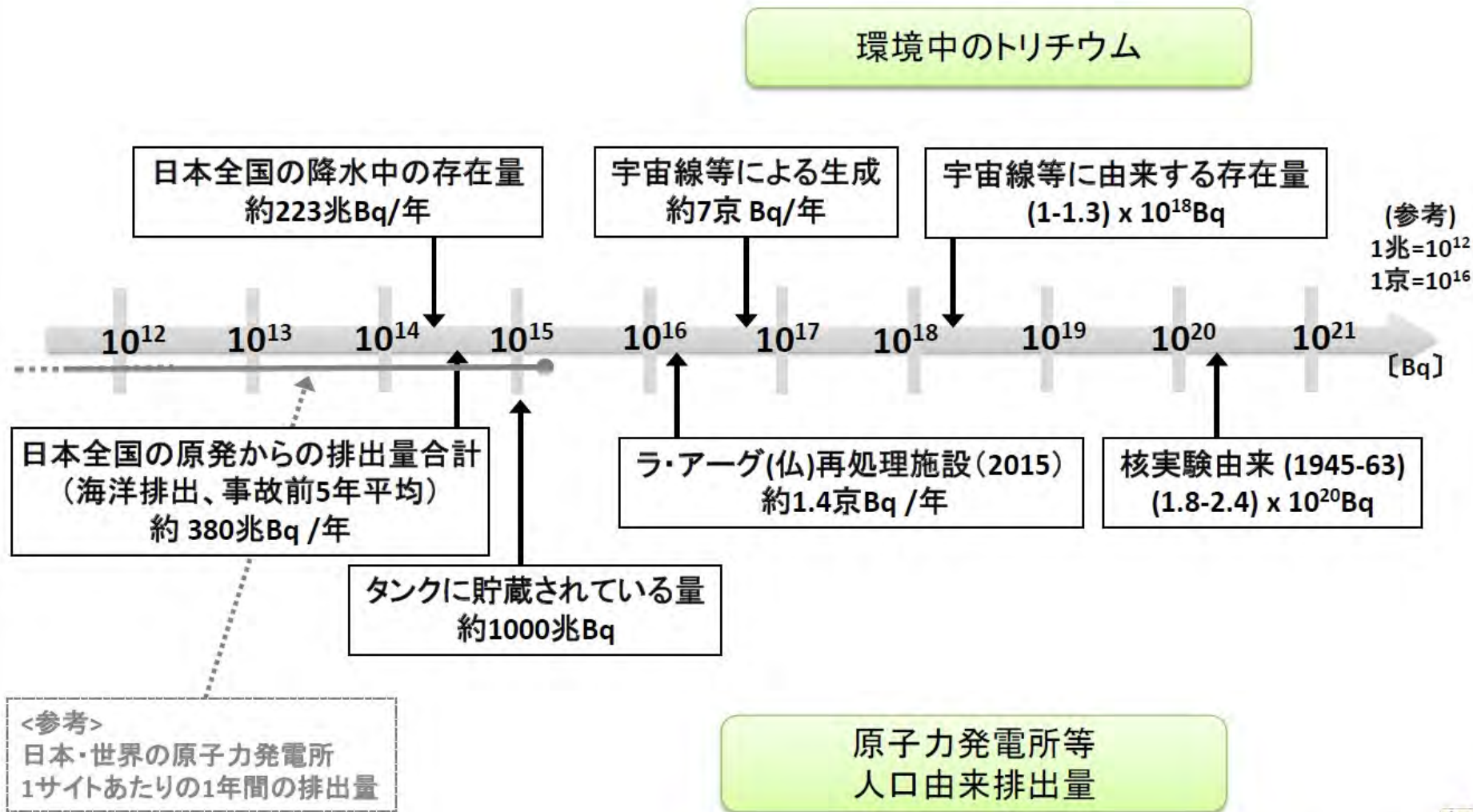
（参考）事故時の生成量及び放出量等について

事故時の1-3号機のH3量：3,400兆ベクレル

事故時の海域放出量の推定：100-500兆ベクレル※

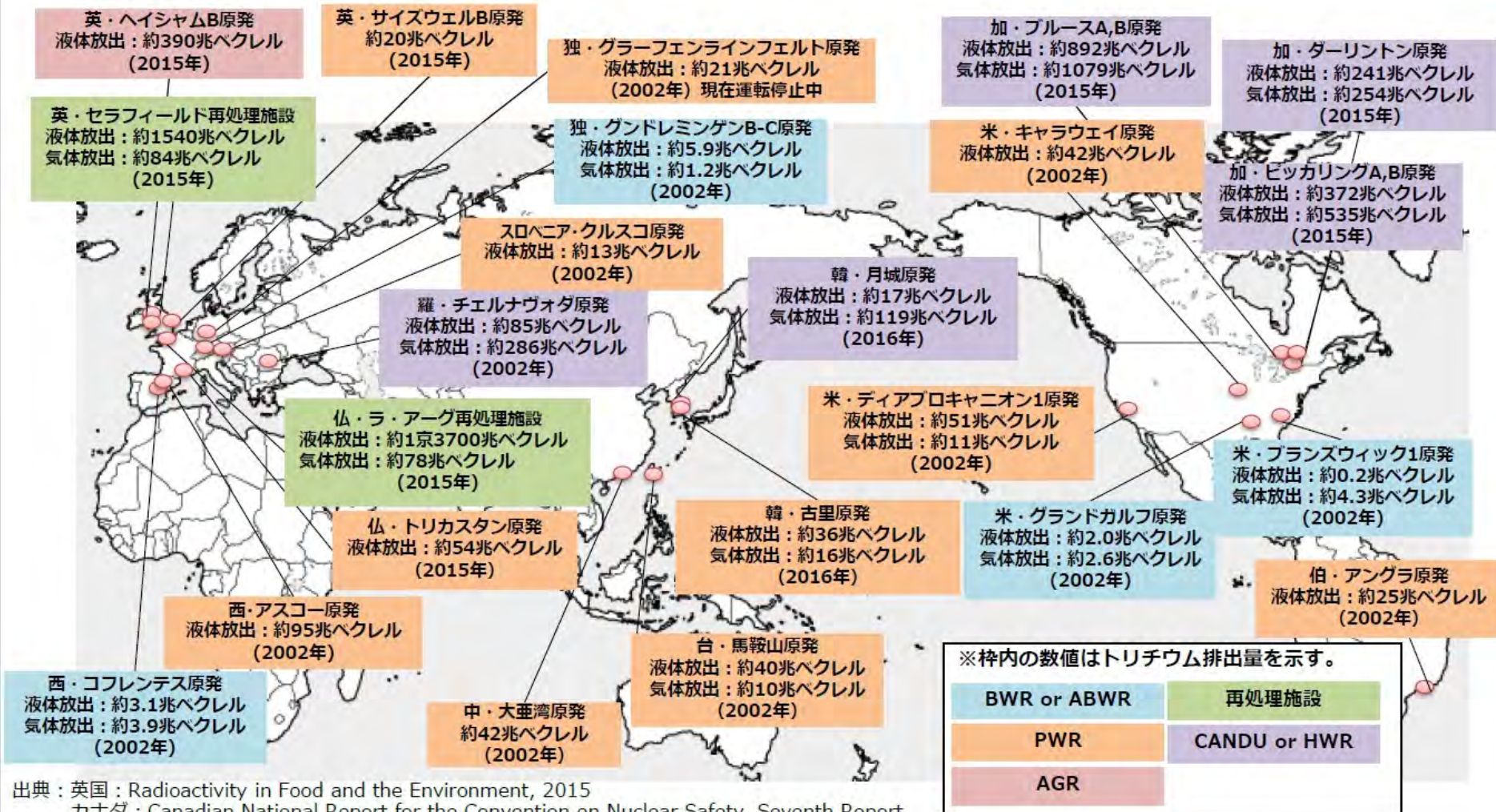
※トリチウム水タスクフォース第3回柿内委員資料より

トリチウムの生成・排出・存在量



(参考) 世界の原子力発電所等からのトリチウム年間排出量

- 海外の原発・再処理施設においても、トリチウムは海洋・気中等に排出される。



出典：英国：Radioactivity in Food and the Environment, 2015
 カナダ：Canadian National Report for the Convention on Nuclear Safety, Seventh Report
 フランス：トリチウム白書2016
 韓国：2016年度 原発周辺の環境放射能調査と評価報告書, 韓国水力・原子力発電会社 (KHNP)
 その他の国々：UNSCEAR「2008年報告書」

トリチウム水等海洋放出は何が問題か

「薄めて濃度が基準値を十分下回っているから安全」は間違っている。

- ①環境に出したトリチウムが生体に与える影響はないということは、科学的にデータを持って説明できていない。環境や生体における放射性物質の影響は分かっていないことが多々ある。トリチウムは外部被曝線量ではなく、内部被曝の問題が重要。特に有機トリチウム。
- ②トリチウムは放射性物質であり、基本的には閾値(下限値)がない。
- ③環境影響は、長期的に時間をかけて検証しないと分からない。
- ④放射性物質の環境放出は、放射性物質の総量を規制すべき。
- ⑤自然界で生成されるトリチウムに比べて、無視できない量のトリチウムが世界中で放出されていることは、早急に手を打つ必要がある。
- ⑤科学は、不確実な部分が常にあり、不明な場合には予防原則を適用し、強行はしない。万が一判断を誤ると取り返しがつかないから。
- ⑥論文や報告等で、トリチウム等の悪影響が疑われる事例がいくつも出されており、安全性についての検証が必要である。

モルタル固化、大型タンクへの貯蔵など、対策はあるのに全く見通しのない「デブリ取出し」等のために、土地があるので、海洋放出するのは、同意できない。理由になっていないと同時に、事業関係者や周辺諸国の了解もとらずに海洋放出することは許されない。「科学」の限界も踏まえ「科学」の名の元に強行するな。

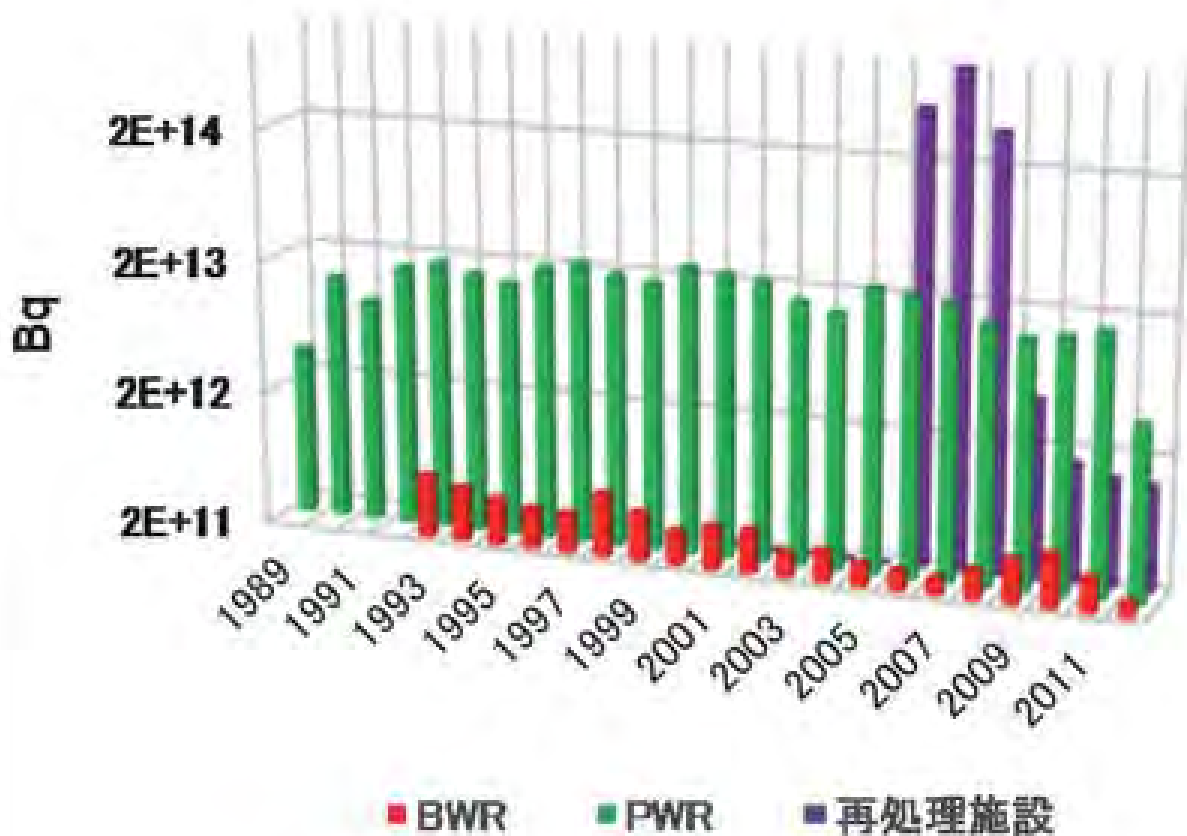
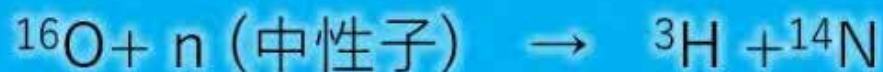
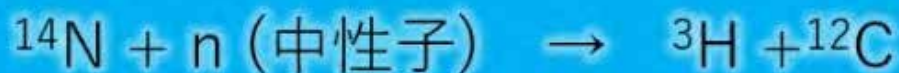


図3 原子力発電所と核燃料再処理施設から環境へ放出されたトリチウム。**BWR**（浜岡発電所）と**PWR**（泊発電所）は100万kWあたりに換算した放出量。核燃料再処理施設（六ヶ所村）は年間放出量。現在、再処理施設はアクティブ試験期間中なので、本格操業が始まると放出量は増加する

宇宙線による生成



地殻等による生成

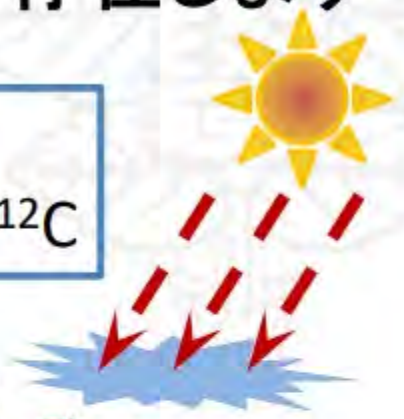
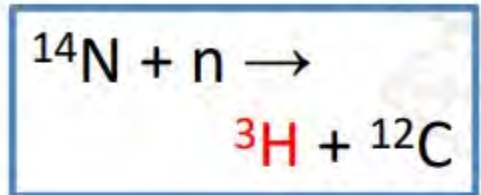


破碎反応 はさいはんのう

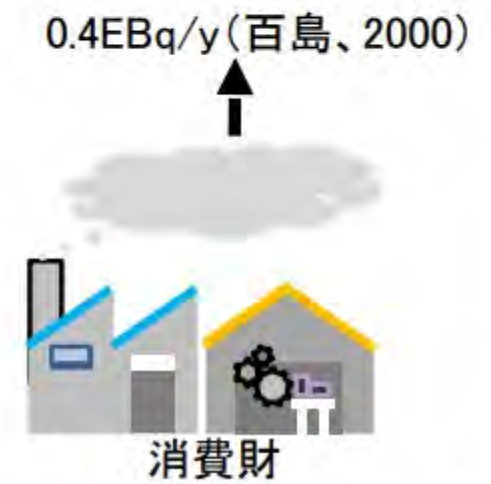
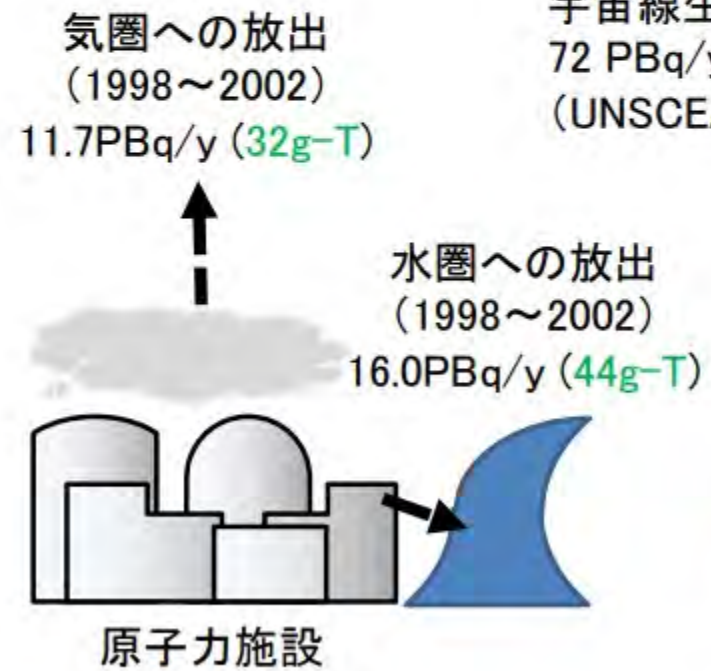
高エネルギー粒子の衝突により起こる核反応の一種で、正確には核破碎反応という。一般に数個以上の粒子（中性子、陽子、α粒子など）が放出される現象である。この他、代表的な核反応としては、弾性散乱、非弾性散乱、捕獲反応、粒子放出反応、核分裂反応がある。最近では、放射性廃棄物（TRU廃棄物等）中の超ウラン元素等の半減期の長い元素を核破碎反応により、半減期の短い元素または安定同位元素に転換する方法の研究が進められている。

地球上にはたくさんのトリチウムが存在します

全球存在量(1990)
1-1.3 EBq + 52EBq(142kg-T)
(百島、2000)



宇宙線生成量
72 PBq/y (200g-T)
(UNSCEAR 2000 付属書B Table 4)



E(エクサ): 100京 10¹⁸
P(ペタ) :1,000兆 10¹⁵

原発におけるトリチウムの生成生成

【トリチウムを生成する核反応】

1. 燃料中のウランやプルトニウムの三体核分裂
2. 冷却材中に存在する重水素の中性子吸収
3. ホウ素やリチウムの核反応

【トリチウムを生成する場所】…中性子照射がある

1. 被覆管内の核燃料、制御棒。健全なら外へ出ない。
ただし、被覆管にはピンホールが開きやすい。
2. 原子炉水中のホウ素、リチウムから生成。
炉水は循環しているが、ドレン水として、一定量は外部に出る。フィルター等で濾すがトリチウムは残る。

軽水炉におけるトリチウム生成

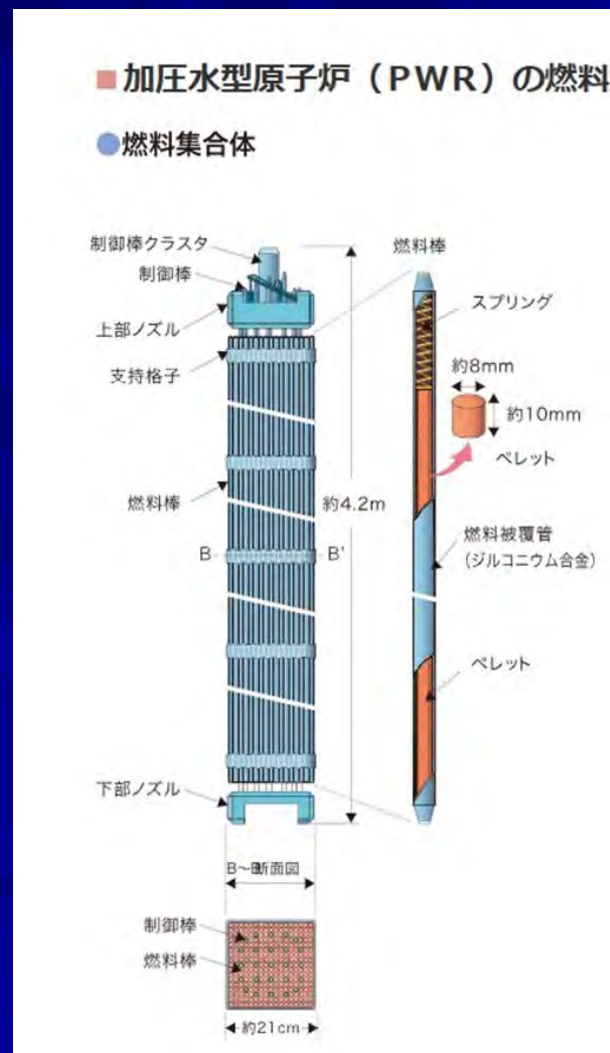
1. 燃料中のウランやプルトニウムの三体核分裂

ウランやプルトニウムは、2つに核分裂し複数の中性子を放出。**1000回に数回程度は、原子核が3つに分裂する(三体核分裂)。**

この3つ目の小さな原子核の一部がトリチウムであり、 ^{235}U の核分裂およそ1万回に1個の割合でトリチウムが生成する。

発電量1GWの発電所で、年間 $6 \times 10^4 \text{Bq}$ 程度発生する。しかし、燃料被覆管が健全であれば、三体核分裂で生じるトリチウムの大部分は、燃料内に閉じ込められている。福島事故のように、燃料被覆管が破損すると、他の核種と共に1次冷却水の中に出てくる。

再処理では燃料を裁断するから放射能がでる。



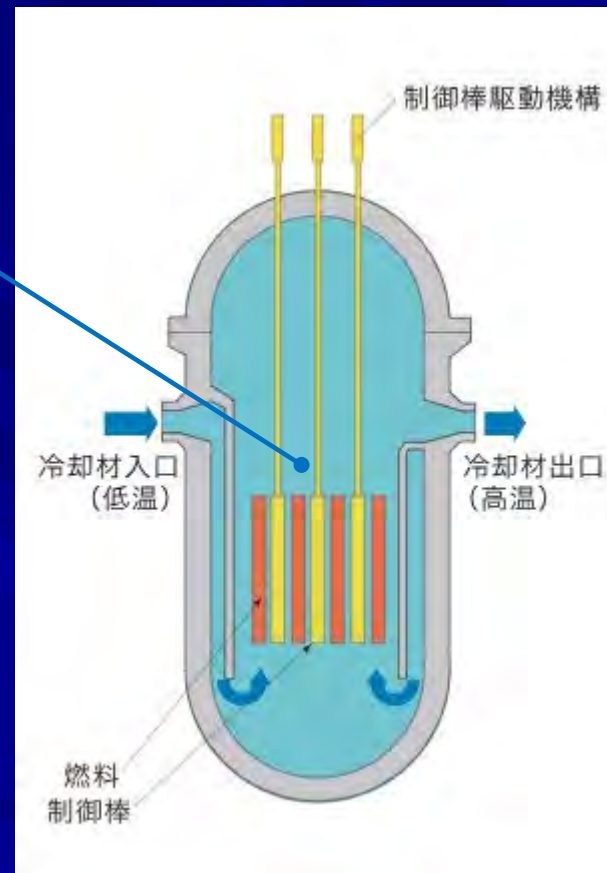
2. 冷却材中に存在する重水素の中性子吸収

冷却水中に微量の重水素が存在する。

重水素は核分裂で発生する中性子を吸収することで、

$^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ 反応 によりトリチウムを生成。

軽水炉において過程で発生するトリチウム量は、1. 「三体核分裂」や2. 「ホウ素やリチウム」と比べて小さく、**発電量1GWの原子炉で、1年間に $2 \times 10^{11}\text{Bq}$ 程度**である。



3. ホウ素やリチウムの核反応

BWRの制御棒/PWRの炉水

ホウ素 ^{10}B は中性子を吸収する。
BWRでは、炭化ホウ素(B_4C)が制御棒として使用されている。

PWRでは、ホウ酸として原子炉水で濃度を变化させて核反応を制御する。また、phの低下を防ぐため、水酸化リチウムを添加する。

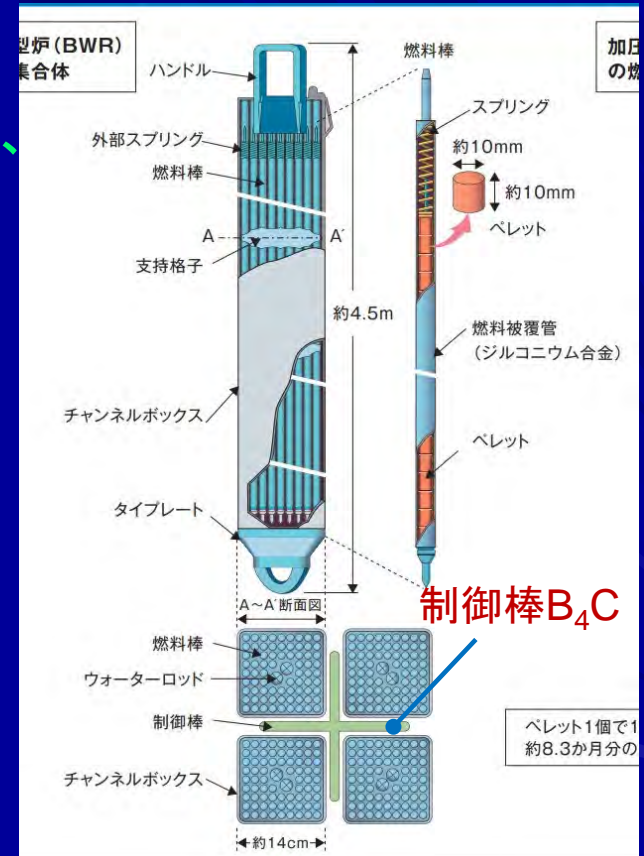
下記核反応で、ホウ素やリチウムがトリチウムを発生させる。



BWRでの B_4C からトリチウム発生は $1.15 \times 10^{14}\text{Bq}$
制御棒が健全なら閉じ込められている。

通常運転中に冷却水に出てくるナトリウムは冷却水中の、重水素、ホウ素、リチウムである。

炉水からPWR: $10^{13}\text{Bq}/\text{年}$ 、BWR: $10^{11} \sim 10^{12}\text{Bq}/\text{年}$



通常運転時のBWRとPWRのトリチウム発生量の違い

【BWR】

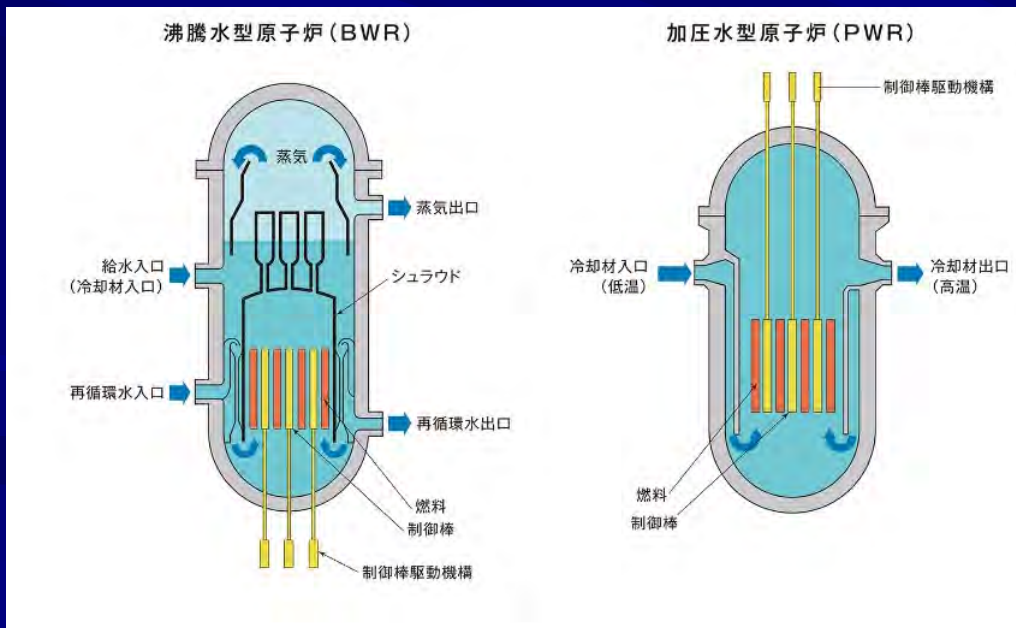
主として制御棒の B_4C と、炉水中微量の重水がトリチウム生成の原因。

制御棒が健全なら、制御棒に閉じ込められているので、生成されるトリチウムはPWRより1桁以上少ない。

【PWR】

主として、炉水中のホウ素とリチウムが主、後は微量の重水がトリチウム生成の原因。

したがって、燃料棒や制御棒が破損していなければ、炉水に含まれているホウ素とリチウムによるナトリウムが大半を占め、それに少量の重水が関与。

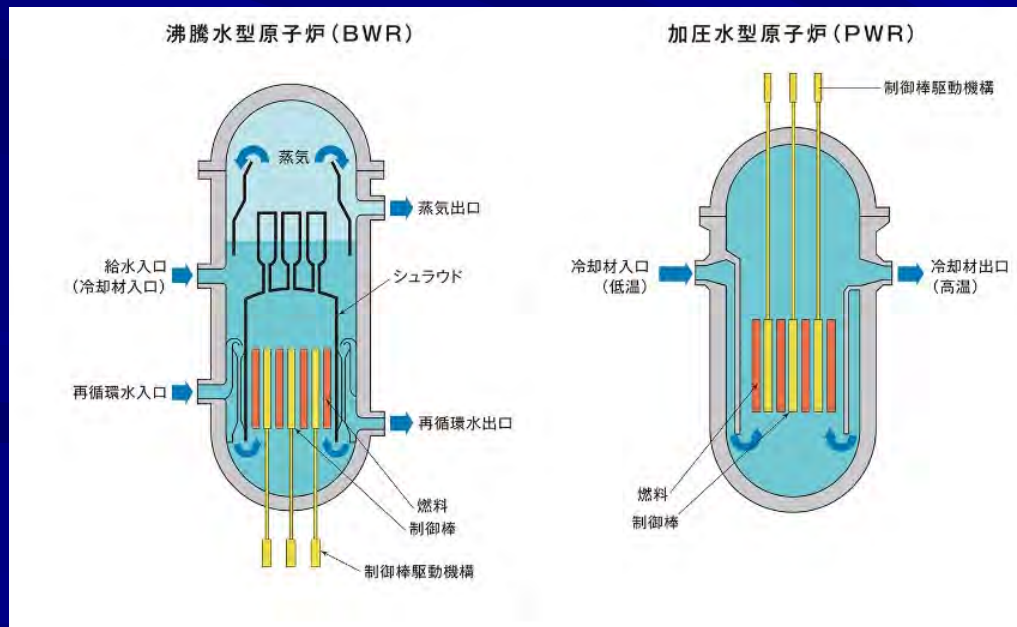


事故時に核燃料の核反応によりでた放射性物質と原子炉水に中性子が捕獲されてできたトリチウム生成要因

【炉心溶融】

BWRもPWRも、燃料被覆管も制御棒も損傷しているため、核燃料の ^{235}U やプルトニウム等の核反応で発生した核種が大量に炉水中にでる。同時に燃料被覆管内や制御棒内にあったトリチウムも炉水にでる。福島事故では、トリチウム以外の核種が冷却水中に大量に出ており、アルプスで処理しきれない核種が大量に残っている。

原理的にはアルプスで処理できるはずだが、トリチウム以外の放射性物質がどれだけ溜まっているのか、海洋放出した場合に、どの核種がどれだけの量の放射性物質として外界に出ていくのか、きちんと把握するべきだ。



トリチウムの発生原因と環境への流出について報告しました

トリチウム処理汚染水に関して、様々な議論がされてきましたが、**事故時と通常時のトリチウムの発生原因と環境への流出について**、一部混乱も見受けられましたので、改めて「トリチウム水」の発生に限定してまとめてみました。

気中へのトリチウム放出や環境に対する詳細な議論は別途必要かと考えます。

解説論文や公表されている資料を元に、原子力市民員会で短時間で説明するために、作成したもので、一部にでも間違いあるいは、不正確な部分もあるかも知れませんので、その節は特にご意見がある方はご一報いただければ幸いです。

まとめ

汚染水問題を突き詰めると同時に、政府が進めるあまりにも無謀な『原発回帰』に対抗して、「放射性物質を環境に出さない」、「再稼働はやめるべき」、「老朽原発は動かさない」、「通常時も事故時も、エネルギー安全保障上緊急事態においても電力の安定供給は原発ではしにくい」等々から、原発に依存しない世界を目指して、多くの人たちと連帯して【私たちの目指す脱原発への道】を自信をもっと進めよう。