資源エネルギー庁　御中

平成３０年度原子力の利用状況等に関する調査事業
（多核種除去設備等処理水の処分技術等に関する調査研究）
調査報告書

2019 年 3 月 29 日

株式会社三菱総合研究所
原子力安全事業本部

目 次

1. はじめに 1

2. 放射性液体廃棄物の処分に関連する科学的情報の基礎資料集の作成 2

2.1 基礎資料集の作成における基本的な考え方 2

2.2 基礎資料集の作成 2

3. 多核種除去設備等処理水処分に関する情報の理解情勢へ向けた取組の具体例の検討と実施 44

3.1 多核種除去設備等処理水の取扱いに係る説明・公聴会の開催について 44

3.2 意見表明と意見提出における論点の分類 45

4. 多核種除去設備等で処理した水を処分した際の被ばく影響調査結果の妥当性等評価 52

4.1 被ばく線量評価方法と結果の概要 52

4.2 被ばく線量評価方法および評価結果の妥当性についての検討 54

4.3 被ばく線量評価結果の提示方法案の検討 59

4.4 被ばく線量評価方法および評価結果の妥当性に関する有識者ヒアリング 60

5. 多核種除去設備等処理水に関連するデータの収集・分析 75

6. まとめ 94

図 目 次

図 2-1 物性 3
図 2-2 自然界での存在形態 4
図 2-3 生成量及び存在量 5
図 2-4 原子力発電所におけるトリチウムの生成理由 6
図 2-5 原子力発電所におけるトリチウムの生成量 7
図 2-6 原子力発電所におけるトリチウムの処分方法 8
図 2-7 原子力発電所におけるトリチウムの処分量(1/2) 9
図 2-8 原子力発電所におけるトリチウムの処分量(2/2) 9
図 2-9 原子力発電所におけるトリチウムのモニタリング 11
図 2-10 原子力発電所周辺への環境影響 12
図 2-11 福島第一原子力発電所の汚染水 13
図 2-12 汚染水対策 14
図 2-13 福島第一原子力発電所の処理水 15
図 2-14 トリチウムの分離 16
図 2-15 半減期による減少 17
図 2-16 処理水の処分方法 18
図 2-17 放射線被ばくによる影響 19
図 2-18 確定的影響と確率的影響(1/2) 20
図 2-19 確定的影響と確率的影響(2/2) 20
図 2-20DNA の損傷と修復 22
図 2-21 トリチウムによる内部被ばく、外部被ばくの影響 23
図 2-22 実効線量係数 24
図 2-23 トリチウムの体内挙動 25
図 2-24 トリチウムの核変換による影響 26
図 2-25 トリチウムによる生体影響（動物実験） 27
図 2-26 トリチウムによる生体影響（確定的影響事例） 28
図 2-27 トリチウムによる生体影響（疫学研究） 29
図 2-28 トリチウムによる水生生物影響（1/2） 30
図 2-29 トリチウムによる水生生物影響（2/2） 31
図 2-30 環境中のトリチウムの挙動（1/2） 32
図 2-31 環境中のトリチウムの挙動（2/2） 33
図 2-32 トリチウムの測定方法の概要 34
図 2-33 トリチウムの測定方法の特徴 35
図 2-34 トリチウムの環境モニタリング 36
図 2-35 トリチウムの環境モニタリング（福島県） 37
図 2-36 国内外の規制基準（濃度）（1/2） 38
図 2-37 国内外の規制基準（濃度）（2/2） 40
図 2-38 国内外の規制（総量） 41
図 2-39 国内外の規制基準（福島第一原子力発電所） 42

図 2-40 国内外の濃度基準（飲料水） 43
図 4-1 各選択肢による年間の被ばく線量上限値と一般公衆の年間線量限度および その他の自然、医療被ばくとの比較.....53
図 4-2 海洋放出に係る被ばく線量評価の概略 55
図 5-1 摂取した HTO に関する ICRP 代謝モデル 87
図 5-2 摂取した OBT に関する ICRP 代謝モデル.....88

表 目 次

表 3-1 説明・公聴会の開催結果概要 44
表 3-2 多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会に寄せられた意見の分類.45
表 4-1 トリチウムの化学形と内部被ばくの実効線量換算係数.....52
表 4-2 各選択肢における一般公衆（成人）の年間被ばく線量および考慮した不確実性 53
表 4-3 各評価に関する基本的な条件 56
表 4-4 核種$\boldsymbol{i}$の海産物に対する濃縮係数（$\boldsymbol{KFki}$：Bq/kg/Bq/m^3） 57
表 4-5 被ばく線量評価結果の提示方法案 59
表 4-6 海洋放出に関する確認点と結果 61
表 4-7 大気放出に関する確認点と結果 67
表 4-8 海洋放出に係る評価の課題点 73
表 4-9 大気放出に係る評価の課題点 73
表 5-1 カナダの各発電所の、年間トリチウム（気体廃棄物）放出限度.....80
表 5-2KiKK 研究報告書における小児がんのオッズ比（1/2） 83
表 5-3KiKK 研究報告書における小児がんのオッズ比（2/2） 83
表 5-4ICRP モデルにおける HTO 摂取後の HTO と OBT の配分と半減期 88
表 5-5ICRP モデルにおける OBT 摂取後の HTO と OBT の配分と半減期.....88

1. はじめに

東京電力ホールディングス株式会社の福島第一原子力発電所では、多核種除去設備等によって日々発生する汚染水を浄化処理した水（以下、「多核種除去設備等処理水」という。）をタンクにより大量貯蔵している。

原子力災害対策本部の汚染水処理対策委員会の下に設置されたトリチウム水タスクフォースにおいて、平成28年6月、多核種除去設備等処理水の取扱いを決定するための基礎資料として、様々な選択肢（地層注入、海洋放出、水蒸気放出、水素放出、地下埋設）についての技術的な評価が取りまとめられた。

その後、トリチウム水タスクフォース報告書で取りまとめられた技術的な観点に加え、風評被害など社会的な観点も含めて、総合的な検討を行うことを目的に、汚染水処理対策委員会の下に「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会」が平成28年9月に設置され、同年11月より議論が開始されているところである。

本業務では、福島第一原子力発電所の多核種除去設備等処理水の長期的な取扱い方法の決定に向けた今後の検討に資するよう、必要な調査・資料作成を行った。

2. 放射性液体廃棄物の処分に関連する科学的情報の基礎資料集の作成

本章では、トリチウムの物性、性状など科学的な情報を収集、整理し、安全性やリスクに関する情報を含めた基礎資料集を検討、作成した。

2.1 基礎資料集の作成における基本的な考え方

福島第一原子力発電所における多核種除去設備等処理水に係る問題及びトリチウムという核種については、例えばセシウム等の核種に比べて、広く国民の認知や理解が及んでいない状況にあると考えられる。

そこで、福島第一原子力発電所における多核種除去設備等処理水に係る問題及びトリチウムという核種について体系的かつ極力平易な形で説明可能な基礎資料集を作成することを目指した。なお、「トリチウムとは何か」と言った導入的な説明資料については過年度に検討済みであり、ここではある程度興味を有した読者を対象としてより詳細な内容にまで踏み込んだ基礎資料集とした。

今後、多様な場面で本基礎資料集を用いた説明が行われることを想定し、基礎資料集はスライド形式とした。また、基礎資料集全体として体系的な構成とするとともに、一つの項目のみを切り出して説明に用いることができる様、留意した。

極力平易な説明資料とするため、各スライドでは、上部に一つの疑問文を記載し、その下に端的な回答文を記載した。さらにスライド下部では図表等を掲載し、理解を補助可能とする形式とした。

基礎資料集の構成は、以下のとおりである。

1 章 トリチウムの基礎知識
2 章 原子力発電所におけるトリチウムの生成と取扱い
3 章 福島第一原子力発電所における処理水
4 章 放射線とトリチウムによる健康影響
5 章 トリチウムの環境影響

詳細については、次節にて記述する。

2.2 基礎資料集の作成

本節では、基礎資料集の具体的内容について記載する。次頁以降、スライド 1 枚につき 1 項目として、スライドに対する説明を詳述する。各スライドに対する説明文は、例えば、今後説明者が説明を行う際の参考とすることが可能である。

(1) 1.1 物性

トリチウムの物性に関して取りまとめたものを図 2-1 に示す。

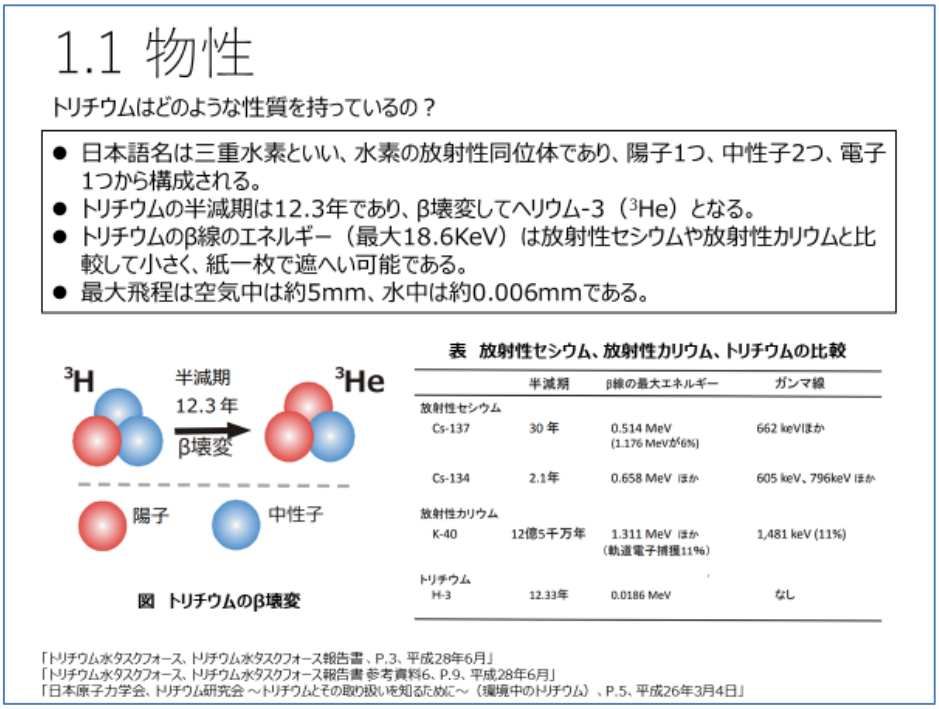

図 2-1 物性

トリチウムの日本語名は三重水素である。トリチウムは水素の放射性同位体であり、陽子 1 つ、中性子 2 つ、電子 1 つから構成される。水素の同位体として、軽水素、重水素、三重水素の 3 つがあるが、自然界に存在する水素の多くは軽水素である。なお、重水素は自然界の水素の約 0.015%、三重水素は自然界の水素の約$(0.1\sim10)\times10^{-18}$程度存在する。

トリチウムの半減期は 12.3 年であり、β壊変してヘリウム-3（^{3}He）となる。トリチウムのβ線のエネルギー（最大 18.6keV）は放射性セシウムや放射性カリウムと比較して小さい。一般的に放射線の種類として、α線、β線、γ線、中性子が存在する。α線は電気を帯びて重いため紙一枚での遮蔽が可能である。β線は電気を帯びているため薄い金属で遮蔽可能である。γ線は電磁波の一種なので金属は透過しにくく、中性子線は電気を帯びていないため重い物質では止まりにくく軽い物質に衝突して止まることが知られている。ただし、トリチウムのβ線に関しては、上述のようにエネルギーが小さいため紙 1 枚で遮蔽が可能である。

なお、最大飛程は空気中で約 5mm、水中では約 0.006mm である。飛程とは、荷電粒子が放出された後にエネルギーが無くなり停まるまでの距離のことを表す。

(2) 1.2 自然界での存在形態

トリチウムの自然界での存在形態に関して取りまとめたものを図 2-2 に示す。

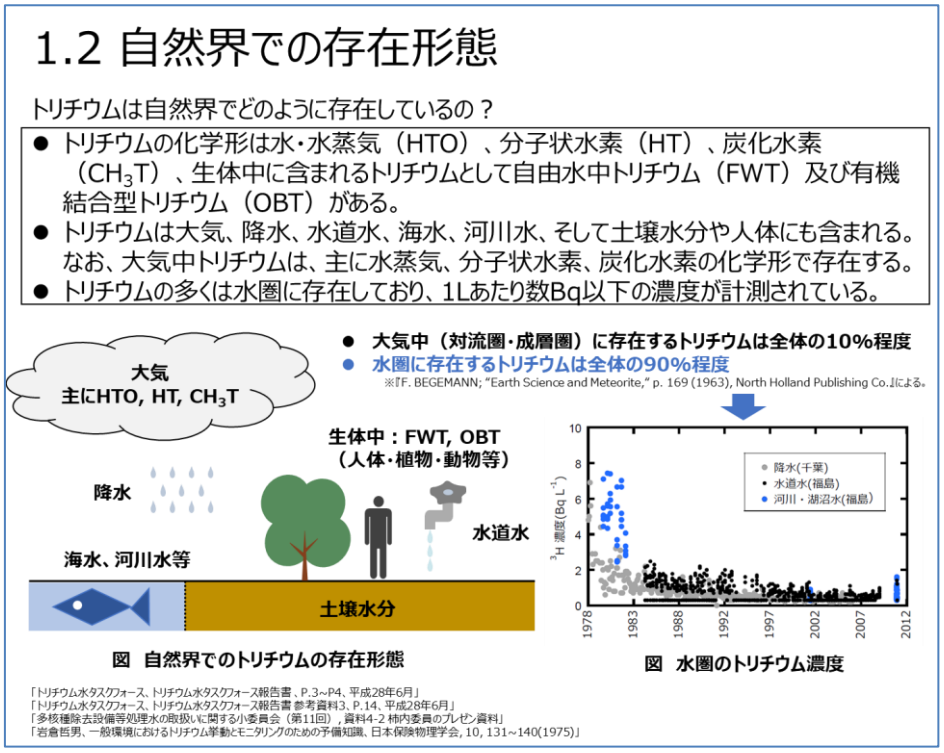

図 2-2 自然界での存在形態

トリチウムの化学形は水・水蒸気（HTO）、分子状水素（HT）、炭化水素（CH_3T）、生体中に含まれるトリチウムとして自由水中トリチウム（FWT）及び有機結合型トリチウム（OBT）がある。トリチウムは大気、降水、水道水、海水、河川水、そして土壌水分や人体にも含まれる。

大気中トリチウムは、主に水蒸気、分子状水素、炭化水素の化学形で存在する。トリチウムは大気中（対流圏及び成層圏）及び水中に存在するが、トリチウムは全体の 90%程度が水中に存在する。なお、水 1L あたり数 Bq 以下の濃度が計測されている。

水圏のトリチウム濃度は、1970 年代後半における濃度が高い。その理由は、1950 年代から 1960 年代初頭にかけて米国、旧ソ連を中心に実施されてきた大気圏内核実験に由来するトリチウムが検出されたためである。

(3) 1.3 生成量及び存在量

トリチウムの生成量及び存在量に関して取りまとめたものを図 2-3 に示す。

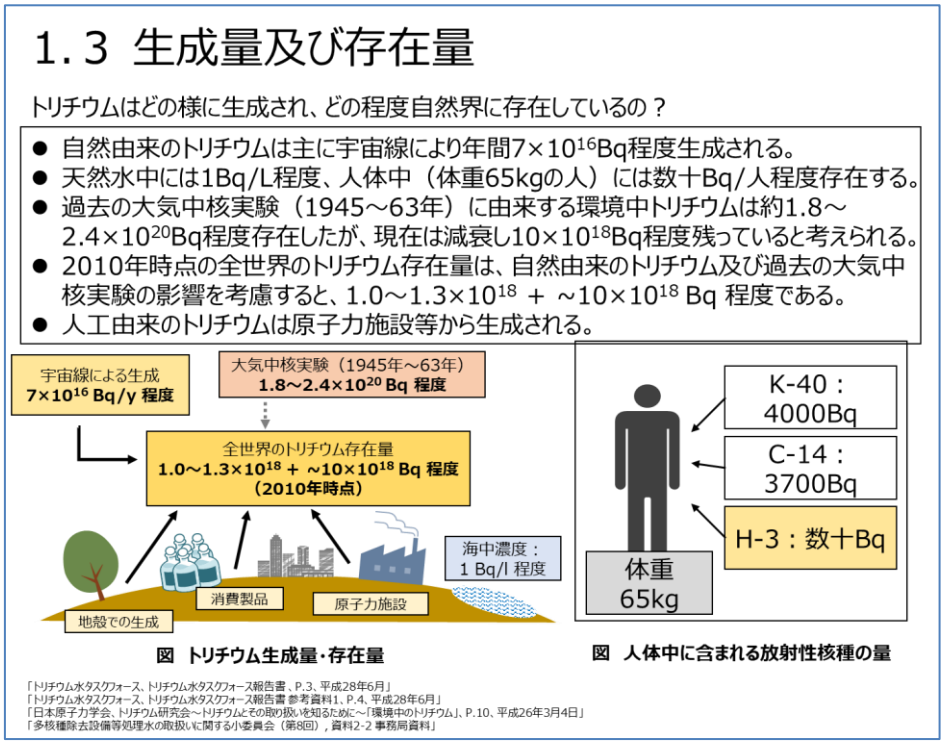

図 2-3 生成量及び存在量

自然由来のトリチウムは主に宇宙線により年間 7×10^{16}Bq 程度生成される。より具体的には、大気上層において、陽子や中性子と大気を構成する窒素原子や酸素原子との核反応により生成されている。また、トリチウムは人体中にも存在し、一人あたり数十 Bq 程度であるとされている。

自然由来のトリチウムが形成していた定常的な状態、すなわち大気上層における生成量と地球上のトリチウムの壊変量が釣り合った状態は、過去に大気中核実験（1945 年～63 年）により大きく乱された。具体的に、過去の大気中核実験に由来する環境中トリチウムは約 1.8～2.4×10^{20}Bq 程度存在した。しかしながら現在では減衰し、全世界に残存している大気核実験によるトリチウムは~10×10^{18}Bq 程度と考えられる。

2010 年時点の全世界のトリチウム存在量は、自然由来のトリチウム及び過去の大気中核実験の影響を考慮すると、1.0～1.3×10^{18}+ ~10×10^{18}Bq 程度である。

なお、人工由来のトリチウムは原子力施設等から生成される。

(4) 2.1 原子力発電所におけるトリチウムの生成理由

原子力発電所におけるトリチウムの生成理由に関して取りまとめたものを図 2-4 に示す。

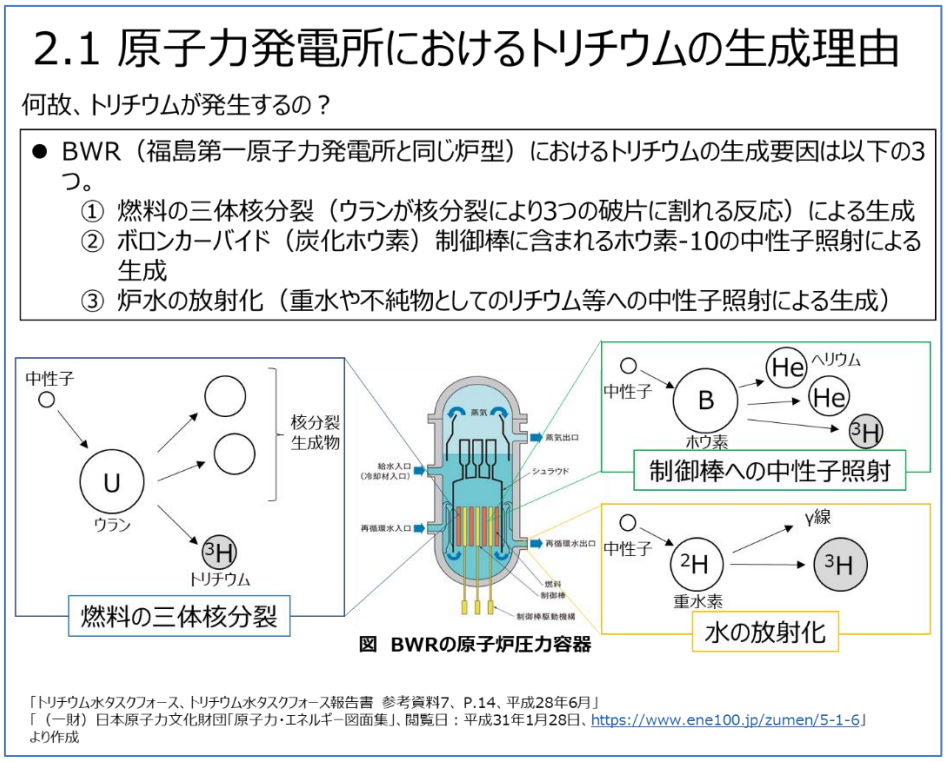

図 2-4 原子力発電所におけるトリチウムの生成理由

福島第一原子力発電所と同じ炉型である BWR では、主に次にあげる 3 つの要因によってトリチウムが生成される。

① 燃料の三体核分裂による生成（ウランが核分裂により 3 つの破片に割れる反応）

② ボロンカーボイド（炭化ホウ素）制御棒に含まれるホウ素-10 の中性子照射による生成

③ 炉水の放射化（重水や不純物としてのリチウム等への中性子照射による生成）

上記で示したトリチウム生成要因のうち①は、燃料中のウラン-235 やプルトニウム-239 が中性子と反応し三体核分裂を起こした際に、核分裂生成物とともにトリチウムが生成される現象である。②は、ボロンカーバイドを中性子吸収に用いた制御棒のポイズンチューブ内において、ホウ素-10 と中性子との反応によりトリチウムが生成される現象である。③は、炉水中の重水及び不純物としてのリチウム等に中性子が照射されることにより、トリチウムが生成される現象である。図 2-4 内の図は BWR の原子炉圧力容器の模式図であり、ここで挙げたトリチウムの生成要因が、圧力容器内のどの部分で発生するかを大まかに示している。

(5) 2.2 原子力発電所におけるトリチウムの生成量

原子力発電所におけるトリチウムの生成量に関して取りまとめたものを図 2-5 に示す。

2.2 原子力発電所におけるトリチウムの生成量

どれくらいのトリチウムが発生するの？

- BWR（福島第一原子力発電所と同じ炉型）におけるトリチウムの生成量は生成要因毎に以下のとおり。
  - ① 三体核分裂：110万kWのBWRを1か月運転すると約8.51×10^{13}Bq生成。ただし、燃料棒が破損しなければほとんど炉水に放出されない。（炉水に移行する割合は～10^{-4}）。
  - ② 制御棒の中性子照射：制御棒に含まれるボロンカーバイドのB^{10}が約半分に減少するまで照射された場合、多めに評価してボロンカーバイド1グラムあたり約1.48×10^{9}Bq生成。ただし、仮に制御棒が破損しても一度に放出されることはない。
  - ③ 炉水の放射化：110万kWのBWRを1か月運転すると約1.07×10^{10}Bq生成。

①三体核分裂による生成量

BWR出力	50万kWe	80万kWe	110万kWe
トリチウム生成量 Bq/月	4.07×10^{13}	6.29×10^{13}	8.51×10^{13}

③炉水の放射化による生成量

BWR出力	50万kWe	80万kWe	110万kWe
トリチウム生成量 Bq/月	4.44×10^{9}	6.29×10^{9}	1.07×10^{10}

「トリチウム水タスクフォース、トリチウム水タスクフォース報告書 参考資料7、P.14、平成28年6月」より作成

図 2-5 原子力発電所におけるトリチウムの生成量

BWR におけるトリチウムの生成要因は前項で示したとおりだが、生成要因毎に生成量は大きく異なっており、主に燃料の三体核分裂によって生成される。出力 110 万 kW の BWR を 1 か月運転した場合を想定すると、生成されるトリチウムの量は約 8.51×10^{13}Bq となる。ただしこの要因によって生成されたトリチウムは、燃料棒が破損しなければ炉水中に放出されることはほとんどなく、炉水への移行割合は~10^{-4} である。制御棒への中性子照射によるトリチウムの生成量は、制御棒内のボロンカーバイドのホウ素-10 が約半分になるまで照射された場合、多めに評価してボロンカーバイド 1g あたり約 1.48×10^{9}Bq となる。ただし、仮に制御棒が破損したとしても、制御棒中で生成されたトリチウムが一度に放出されることはない。炉水の放射化による生成量は、110 万 kW の BWR を 1 か月運転した場合に約 1.07×10^{10}Bq となる。

図 2-5 中の 2 つの表は、それぞれ三体核分裂及び炉水の放射化によるトリチウム生成量について、BWR の出力ごとに示したものである。表より、三体核分裂及び炉水の放射化により生成されるトリチウムの量は、BWR の出力が大きくなるにつれて、多くなることが確認できる。

(6) 2.3 原子力発電所におけるトリチウムの処分方法

原子力発電所におけるトリチウムの処分方法に関して取りまとめたものを図 2-6 に示す。

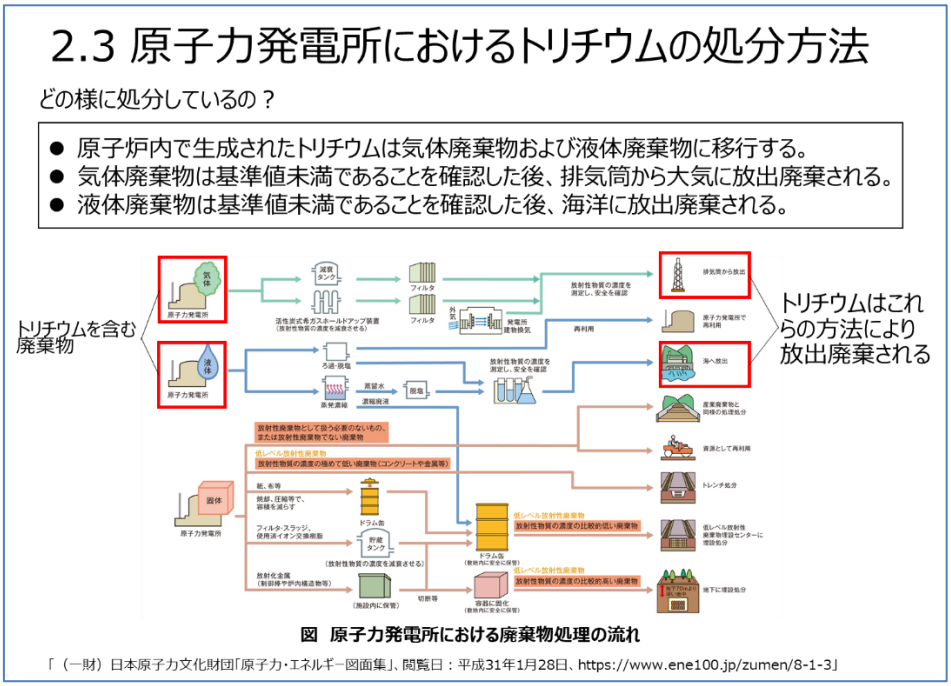

図 2-6 原子力発電所におけるトリチウムの処分方法

原子力発電所の原子炉内で生成されたトリチウムは、気体もしくは液体の形で存在する。原子力発電所における気体・液体の放射性廃棄物が処分されるまでの流れを図 2-6 中の図に示す。原子炉内で発生した気体廃棄物は、放射性物質の濃度を減衰させる処理を行った後、放射性物質濃度を測定、基準値未満であることを確認し、排気筒より大気中に放出される。また原子炉内で発生した液体廃棄物に関しては、蒸発濃縮により放射性物質濃度が高い部分と低い部分に分離し、濃縮廃液については低レベル放射性廃棄物として埋設処分を行う。また放射性濃度の低い蒸留水については、放射性物質濃度を測定し、基準値未満であることを確認した後、海洋に放出廃棄される。

(7) 2.4 原子力発電所におけるトリチウムの処分量

原子力発電所におけるトリチウムの生成理由に関して取りまとめたものを図 2-7、図 2-8 に示す。

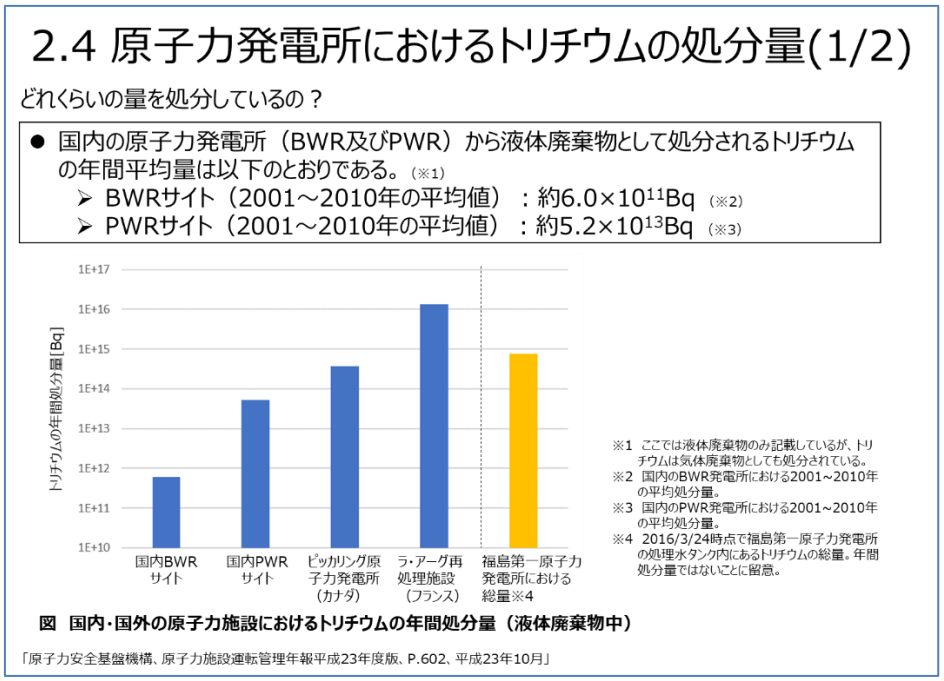

図 2-7 原子力発電所におけるトリチウムの処分量(1/2)

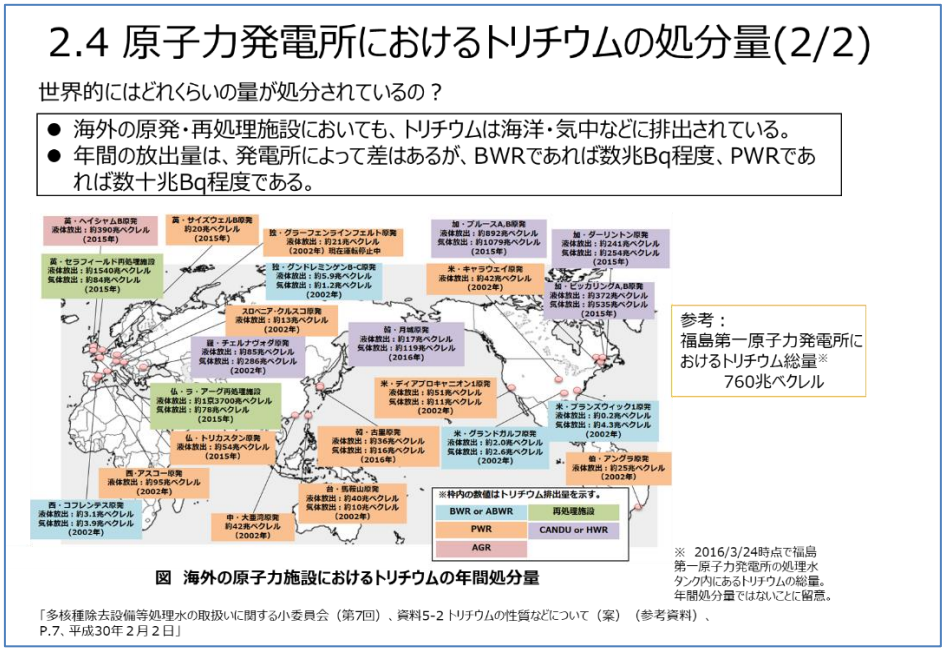

図 2-8 原子力発電所におけるトリチウムの処分量(2/2)

前項で示したとおり、原子炉で生成されたトリチウムは気体廃棄物及び液体廃棄物の形で処分される。図 2-7 では国内の原子力発電所（一基毎ではなく、サイト毎）について、BWR と PWR に分けて 2001~2010 年の期間において液体廃棄物として処分されたトリチウムの年間平均量を示している。BWR については約 6.0×10^{11}Bq であり、PWR については約

5.2×10^{13}Bq である。また図 2-7 中の図は、国内及び国外の原子力施設において液体廃棄物として処分されたトリチウムの年間処分量と福島第一原子力発電所の処理水タンク内にあるトリチウムの総量（2016/3/24 時点）を比較した図である。なおここでは液体廃棄物中のトリチウムのみを記載しているが、前項でも示した通り、トリチウムは気体廃棄物としても処分されている。

トリチウムは国内だけでなく、海外の原子力施設においても海洋や湖沼・大気に排出されている。図 2-8 中の図は海外の原子力施設において液体廃棄物及び気体廃棄物の形で年間に処分されているトリチウムの量を示している。年間の放出量について、原子力施設によって差はあるが、BWR であれば数兆 Bq 程度、PWR であれば数十兆 Bq 程度である。図中で最も処分量の多いフランスのラ・アーグ再処理施設では年間で約 1 京 3778 兆 Bq のトリチウムが処分されている。対して、福島第一原子力発電所の処理水タンク内にある 2016/3/14 時点でのトリチウムの総量は約 760 兆 Bq である。

(8) 2.5 原子力発電所におけるトリチウムのモニタリング

原子力発電所におけるトリチウムのモニタリングに関して取りまとめたものを図 2-9 に示す。

2.5 原子力発電所におけるトリチウムのモニタリング

何をどの様にモニタリングしているの？

- 原子力発電所から処分されたトリチウムが環境・人体に影響を及ぼさないことを確認するために、環境放射線のモニタリングが行われている。
- 原子力発電所周辺における陸水・大気中水分・雨水・海水について、放射性物質濃度の測定がされている。

表 トリチウムの環境モニタリング
（高浜原子力発電所におけるH22年度の測定例）

分析試料	測定概要	測定箇所
陸水（水道水）	年4回蛇口から採取した試料を調査	2か所
大気中水分	年12回除湿器で集めた水分を調査	2か所
雨水	年4回採取器で集めた雨水を調査	2か所
海水	年2~8回船にて採取した海水を調査	4か所

※採取頻度、箇所については原子力施設ごとに適切な回数・場所を設定している。
上記はあくまで高浜原子力発電所の平成22年度の測定条件である。

「福井県環境放射能測定技術会議、原子力発電所周辺の環境放射能調査報告 平成22年度年報、P.49、平成23年9月」より作成

図 2-9 原子力発電所におけるトリチウムのモニタリング

原子力発電所から処分されたトリチウムにより、環境・人体への影響がでないことを確認するために、原子力発電所周辺では環境放射線のモニタリングが行われている。トリチウムは環境において多くは水の形で存在するため、原子力発電所周辺の陸水・大気中水分・雨水・海水について放射性物質濃度の測定が行われている。図 2-9 中の表は高浜原子力発電所におけるトリチウム環境モニタリングの各分析試料及び測定概要・測定箇所を示している。陸水については計 2 か所の測定点にて、蛇口からの水道水を採取し、年 4 回測定が行われている。大気中水分については計 2 か所の測定点にて、除湿器で集めた水分を毎月測定している。雨水については計 2 か所の測定点にて、雨水を 3 か月間採取器で集め、年 4 回の測定を行っている。海水については計 4 か所の測定点において、船にて採取を行い、測定点によって回数は異なるものの年 2~8 回の測定を行っている。なお年間の測定回数や測定箇所については、原子力施設ごとに適切な回数・場所を設定しており、上記で示した設定はあくまで平成 22 年度に高浜原子力発電所にて実施された環境モニタリングにおけるものである。

(9) 2.6 原子力発電所周辺への環境影響

原子力発電所周辺への環境影響に関して取りまとめたものを図 2-10 に示す。

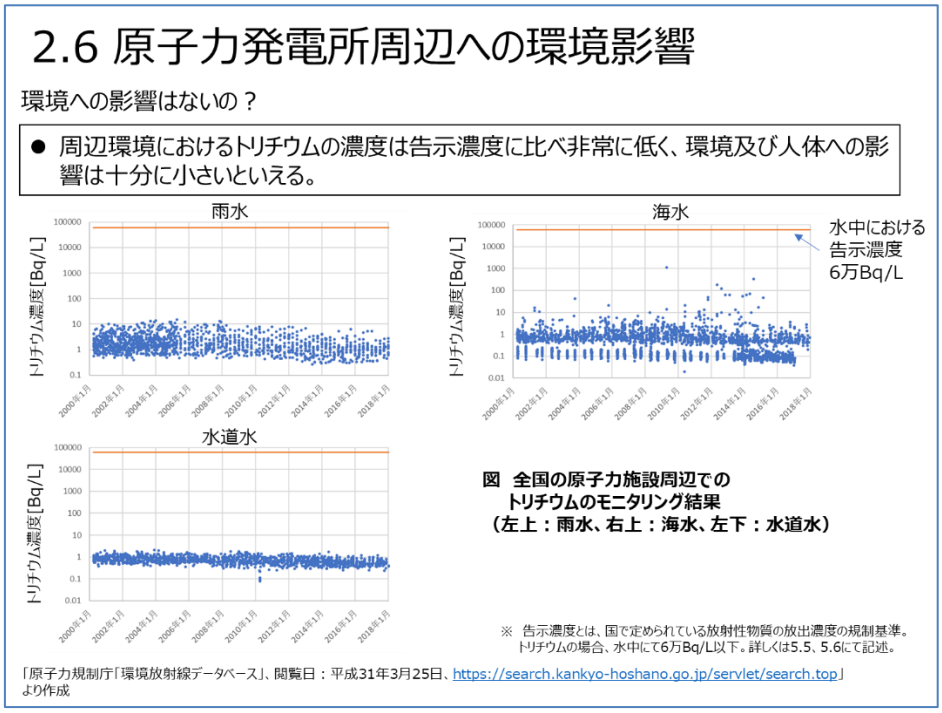

図 2-10 原子力発電所周辺への環境影響

図 2-10 中の図は、2000~2017 年にかけての国内の原子力発電所周辺での環境モニタリング結果（トリチウム濃度）をまとめて示したものである。左上図が雨水の測定結果、右上図は海水の測定結果、左下図が水道水の測定結果を示している。これらの図において、オレンジ色の線は国で定められている放射性物質の放出濃度の規制基準である告示濃度の 6 万 Bq/L を示している。告示濃度についてはこの後詳しく述べる。図よりこの環境モニタリングにおける雨水・海水・水道水中のトリチウム濃度は告示濃度に比べて非常に小さく、環境及び人体への影響は十分に小さいといえる。

(10) 3.1 福島第一原子力発電所の汚染水

福島第一原子力発電所の汚染水に関して取りまとめたものを図 2-11 に示す。

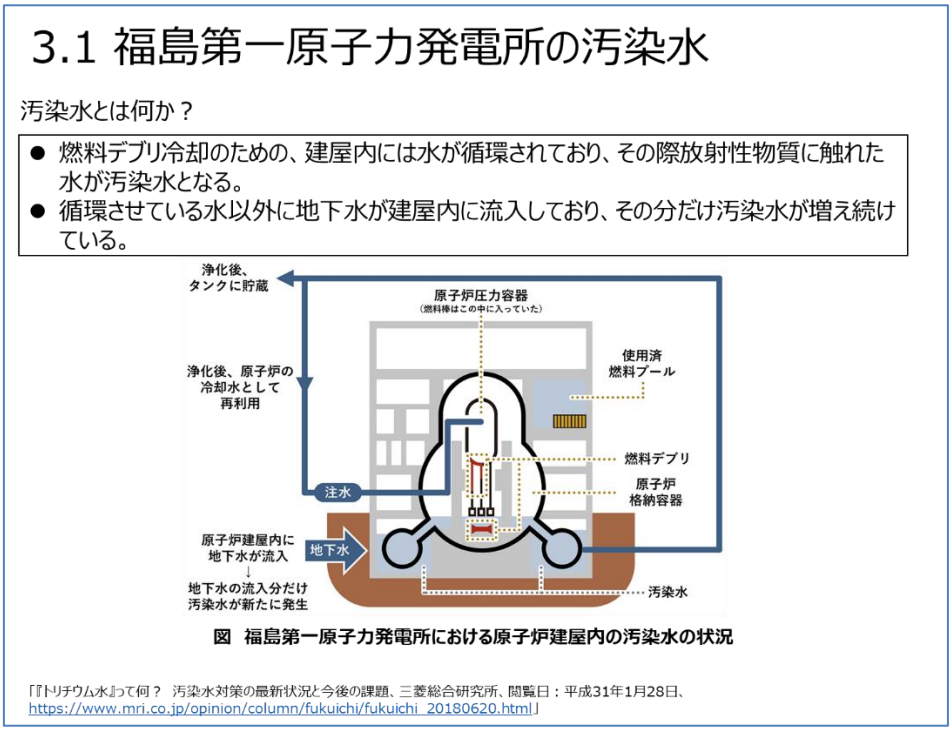

図 2-11 福島第一原子力発電所の汚染水

福島第一原子力発電所では、2011 年 3 月に発生した事故において、圧力容器内の燃料が溶融し、格納容器内の構造物とともに冷えて固まった結果、格納容器内に燃料デブリが生じている。この燃料デブリを冷却するために、原子炉建屋内には水が注水されている。注入された水は、放射性物質に触れ、汚染水として回収される。図 2-11 中の図は福島第一原子力発電所の原子炉建屋内における汚染水の状況を示している。図に示すとおり、原子炉建屋には燃料デブリ冷却用に注水されている水の他に、地下水が流入している。この流入した地下水も、冷却水と混ざり合い、汚染水として回収される。その結果流入した地下水の分だけ、汚染水が新たに増加する。回収された汚染水は浄化後に、一部は再び原子炉冷却水に利用されるが、地下水流入により増えた分については、タンクに貯蔵されている。

(11) 3.2 汚染水対策

汚染水対策に関して取りまとめたものを図 2-12 に示す。

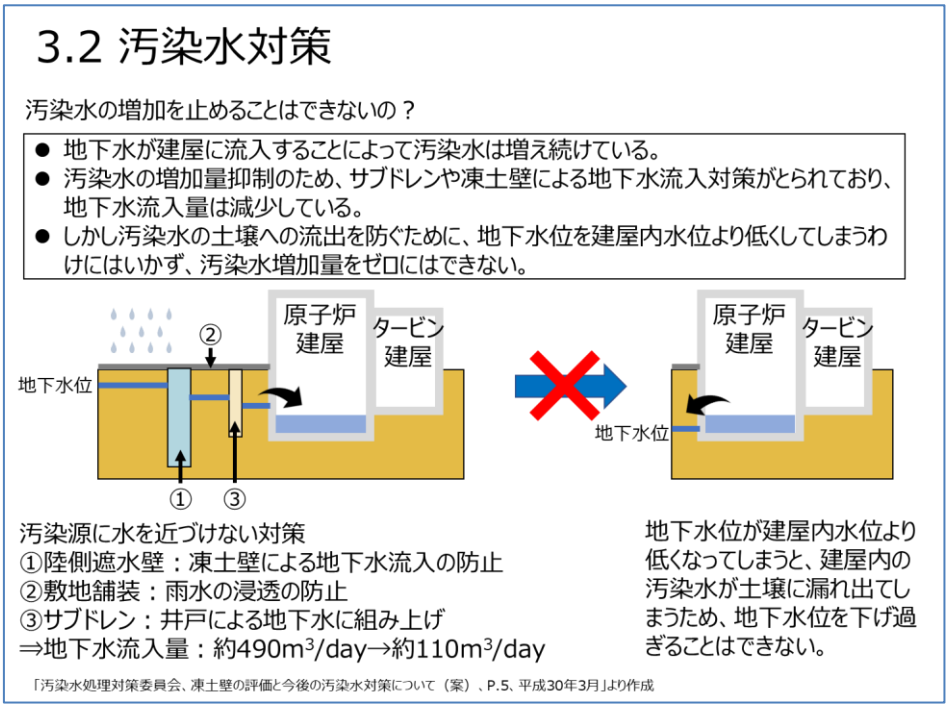

図 2-12 汚染水対策

福島第一原子力発電所では、事故以降汚染水の増加を抑制するために様々な対策を行ってきた。図 2-12 中の左図は、建屋に流入する地下水を抑制する対策を示している。建屋内にある汚染源に地下水を近づけないよう主に 3 つの対策が取られている。1 つ目は凍土壁による地下水流入防止である。凍土壁は、土壌を凍結させることで作られる氷の壁であり、建屋周辺をこの凍土壁で囲うことにより、地下水の流入を防いでいる。2 つ目の対策として、建屋周辺の敷地に舗装を行うことにより、雨水の土壌への浸透を防止する策が取られている。また 3 つ目の対策として、建屋周辺の地下水上流側にサブドレンと呼ばれるくみ上げ井戸を設置し、建屋に流入する前に地下水をくみ上げる策が取られている。これらの対策により、建屋に流入する地下水の量は当初約 490m^3/day であったのが、約 110m^3/day にまで減少した。

上記のように地下水流入量を減らす対策が取られている一方、地下水位が建屋内の水位より低くならないように配慮されている。その理由としては、地下水位が建屋内水位よりも低くなると、建屋内の汚染水が土壌へと漏れ出てしまうためである。そのため、建屋内に汚染水が残っている現状では、地下水位は常に建屋内水位より高くする必要があり、汚染水の増加量をゼロにすることはできない。

(12) 3.3 福島第一原子力発電所の処理水

福島第一原子力発電所の処理水に関して取りまとめたものを図 2-13 に示す。

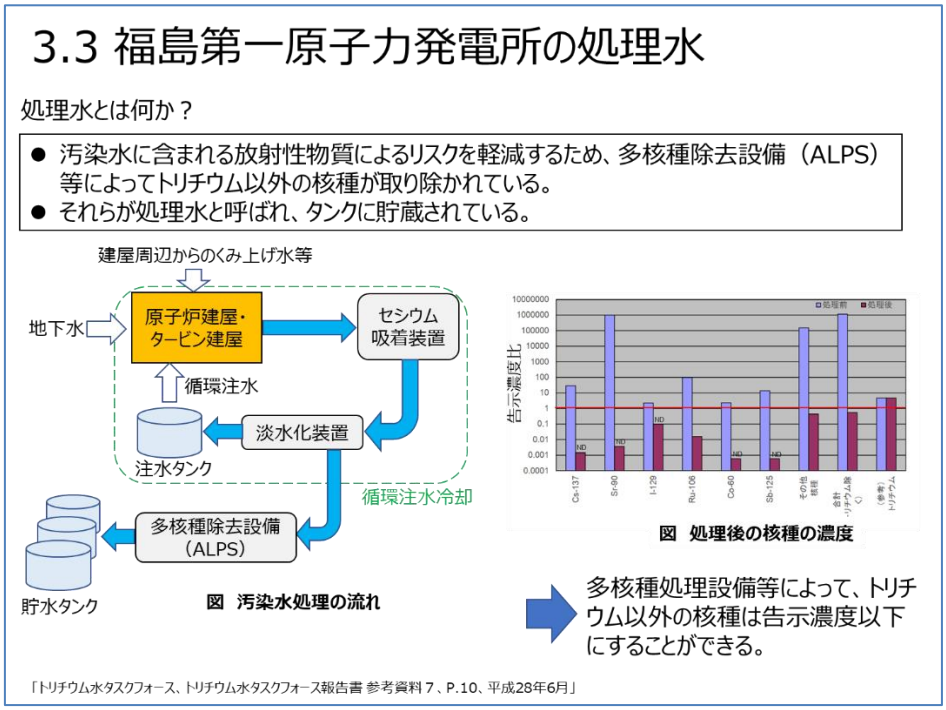

図 2-13 福島第一原子力発電所の処理水

汚染水に含まれる放射性物質によるリスクを軽減するために、建屋から回収された汚染水は様々な設備によって放射性核種の除去が行われる。図 2-13 中の左図は、汚染水処理の主な流れを示している。建屋から回収された汚染水はまずセシウム吸着装置により、セシウム等主要核種の除去が行われ、その後淡水化装置により塩分の除去が行われる。ここまで処理がなされた汚染水のうち一部はタンクに貯蔵後再び冷却水として建屋に注水される。地下水流入によって増えた分の汚染水に関しては、その後多核種除去設備（ALPS）にてトリチウム以外の核種の除去が行われ、処理水として貯水タンクに貯蔵される。

図 2-13 中の右図は多核種除去設備にて処理が行われた後の処理水中に残っている各核種の告示濃度に対する濃度の割合を示したものである。図よりトリチウム以外の核種については多核種除去設備等によって、告示濃度以下に低減できることが確認できる。

(13) 3.4 トリチウムの分離

トリチウムの分離に関して取りまとめたものを図 2-14 に示す。

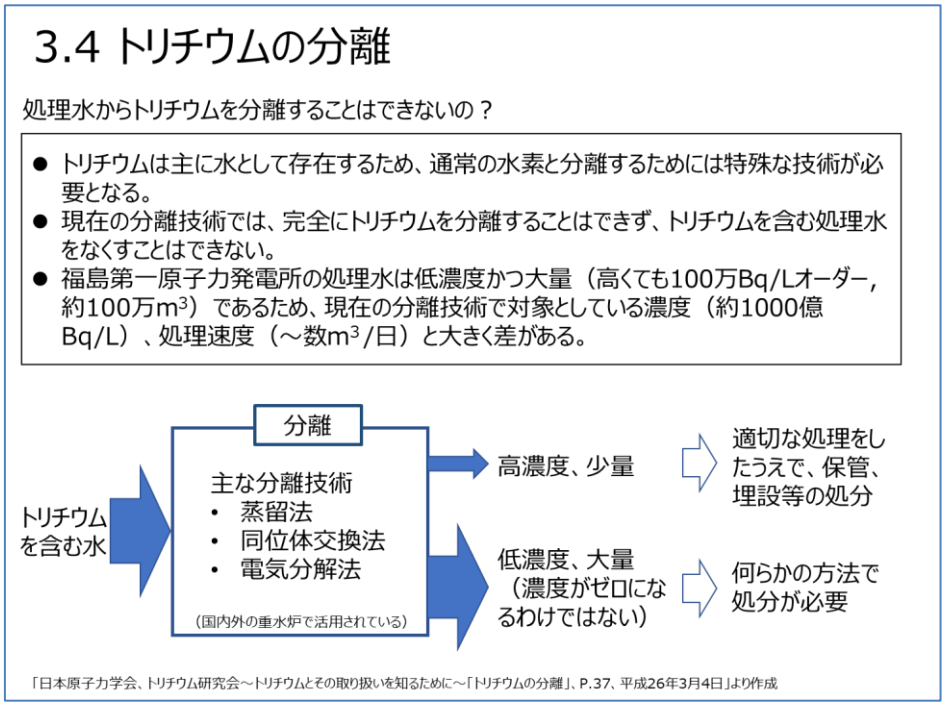

図 2-14 トリチウムの分離

トリチウムは水素の同位体であることから、環境中においては主に水として存在する。そのため他の核種と異なり水中において水素との分離が必要となり、特殊な技術が必要となる。トリチウムの分離技術については、これまで核融合分野や重水炉分野、また大学による研究などによって開発が進められてきた。トリチウムの主な分離技術としては蒸留法、同位体交換法、電気分解法などがある。ただし、現在の分離技術はトリチウムを完全に分離するようなものではない。そのため分離を行ったとしても、少量かつ高濃度のトリチウム水と、大量かつ低濃度のトリチウム水に分離されるだけであり、トリチウム濃度がゼロになるわけではない。高濃度部分については、適切な処理を行った上で保管や埋設などの処分が必要であり、低濃度部分に関しても何らかの方法での処分が必要になる。

福島第一原子力発電所の処理水は、低濃度かつ大量であるといった特徴を有しており、現在タンク中に貯蔵されている処理水は濃度が 100 万 Bq/L オーダー、総量が約 100 万 m^3 である。それに対し、現在の分離技術は主に 1000 億 Bq/L 程度の濃度のトリチウム水を対象としており、福島第一原子力発電所の処理水の濃度と大きく異なる。ちなみに、分離した後の低濃度側のトリチウム濃度は最も低いもので 400 万 Bq/L 程度であり、これは福島第一原子力発電所の処理水のうち最も高いトリチウム濃度のものと同程度である。また処理速度についても、現在の分離技術では数 m^3/day 程度の処理速度であるため、この速度で現在福島第一原子力発電所のタンク内に貯蔵されている処理水をすべて分離することは現実的ではない。

(14) 3.5 半減期による減少

半減期による減少に関して取りまとめたものを図 2-15 に示す。

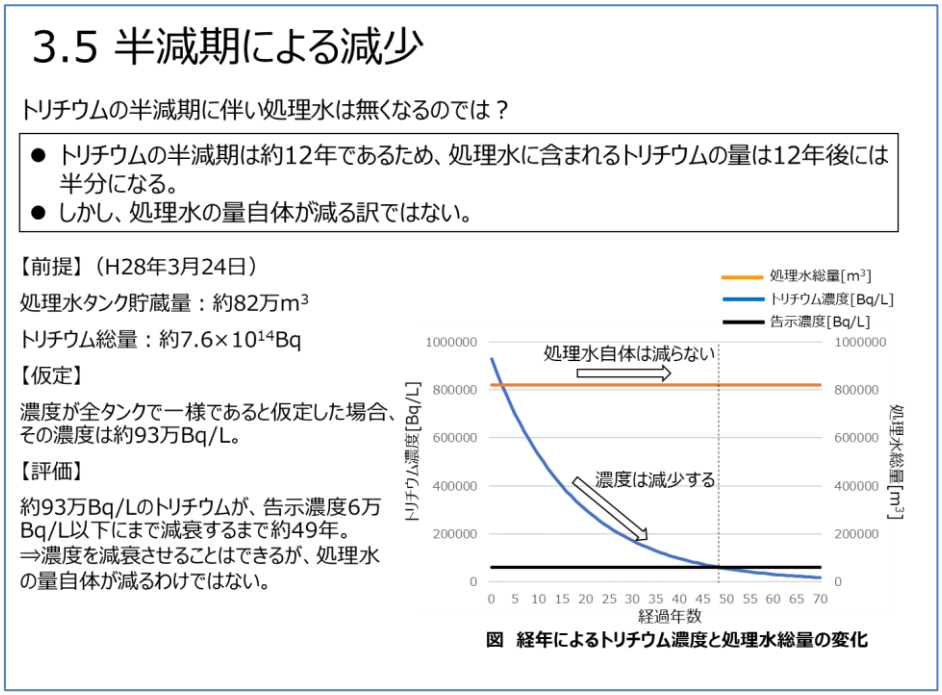

図 2-15 半減期による減少

トリチウムの半減期は 12 年であるため、現在福島第一原子力発電所に貯蔵されているトリチウムの放射能も 12 年後には約半分になっている。そのため、現在福島第一原子力発電所のタンクに貯蔵されている処理水のトリチウム濃度も、時間の経過とともに減少していく。例えば、平成 28 年 3 月 24 日時点において、貯蔵タンク中にある処理水の貯蔵量は約 82 万 m^3、その中のトリチウムの総量は約 7.6×10^{14}Bq である。このトリチウムについて、仮に全タンク中に一様に存在したと仮定するとその濃度は約 93 万 Bq/L である。この濃度のトリチウムが、告示濃度の 6 万 Bq/L まで減衰するには約 49 年かかる。しかし一方で処理水の量自体は減少しない。その結果告示濃度以下にまで濃度が下がったとしても、約 50 年経ってもトリチウムを含んだ処理水は残っており、いずれ何らかの方法で処分する必要があることに留意が必要である。

(15) 3.6 処理水の処分方法案

処理水の処分方法案に関して取りまとめたものを図 2-16 に示す。

3.6 処理水の処分方法案

処理水をどうするの？

- 現在タンクに貯蔵されている処理水について、永遠に貯蔵し続けることは難しいため、処分方法を検討する必要がある。
- これまで5つの処分方法について検討がされてきている。
- 技術的特徴や社会的影響を踏まえたうえで、適切な処分方法を選定する必要がある。

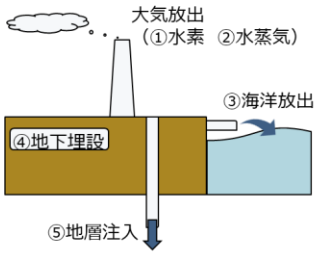

図　各処分方法の概要

表　各処分方法の概要と濃度基準

処分方法	概要	濃度基準
大気放出（水素）	電気分解により水素に還元し、大気に放出する	周辺監視区域の外の空気中にて7万Bq/L以下
大気放出（水蒸気）	蒸発処理を行い、大気に放出する	周辺監視区域の外の空気中にて5Bq/L以下
海洋放出	処理水を告示濃度以下まで希釈し、海洋に放出する	放水口にて6万Bq/L以下
地下埋設	処理水をセメント等により固形化し、地下に埋設する	–
地層注入	深い地層中に処理水を注入する	–

※　地下埋設、地層注入については現状対応する規制基準なし。

「トリチウム水タスクフォース、トリチウム水タスクフォース報告書、P.7～P.8、平成28年6月」より作成

図 2-16 処理水の処分方法

タンクに貯蔵されている処理水について、永遠にその場で貯蔵し続けることは困難なため、何らかの処分方法を検討する必要がある。これまで以下の 5 つの処分方法が検討されてきている。

① 水素の状態での大気放出
② 水蒸気の状態での大気放出
③ 海洋放出
④ 地下埋設
⑤ 地層注入

各処分方法について、①は電気分解等により水素に還元した上で、大気中に放出する方法、②は蒸発処理を行った上で、大気中に放出する方法、③は処理水を告示濃度以下にまで希釈した上で、海洋に放出する方法、④は処理水をセメントなどにより固形化した上で、地下に埋設する方法、⑤は深い地層中に処理水を注入する方法である。この中で①～③については、処分に係る濃度基準が定められており、水素の状態での大気放出では周辺監視区域の外の空気中において 7 万 Bq/L 以下、水蒸気状態での大気放出では周辺監視区域の外の空気中にて 5Bq/L 以下、海洋放出では排水口又は排水監視設備にて 6 万 Bq/L 以下となっている。地下埋設及び地層注入では、現状対応する規制基準は存在しない。処分方法の選定に際しては、技術的な特徴はもちろんのこと、社会的な影響も加味し、検討を行う必要がある。

(16) 4.1 放射線被ばくによる影響

放射線被ばくによる影響に関して取りまとめたものを図 2-17 に示す。

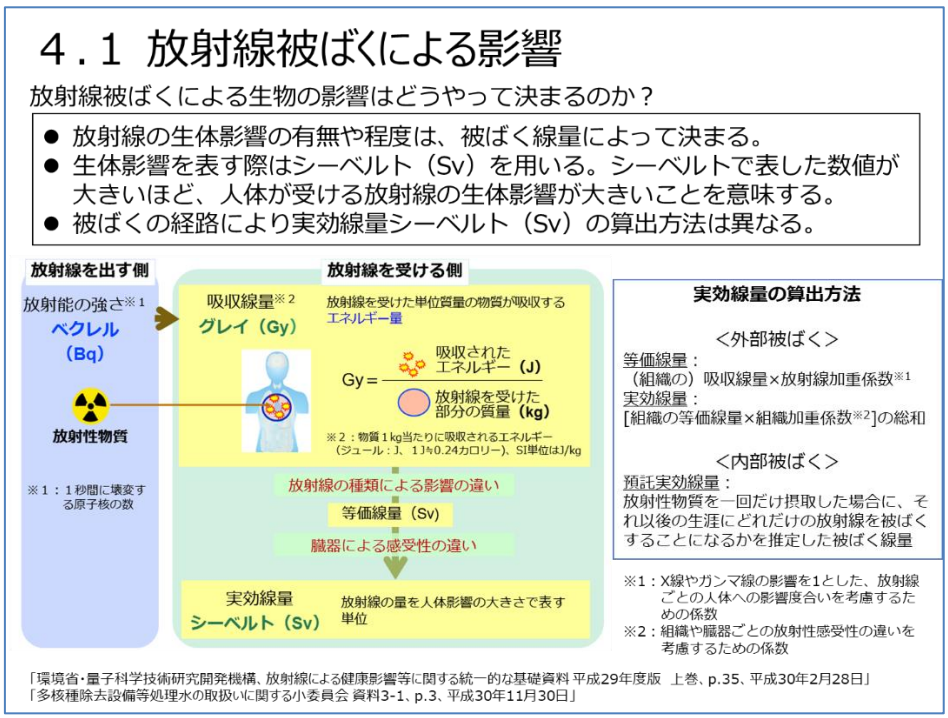

図 2-17 放射線被ばくによる影響

放射線被ばくによる生物の影響がどのように決まってくるのかについての整理を行った。放射線が生体に与える影響やその影響の程度は、被ばく線量によって決定されている。放射線に関する単位は、「放射線を出す側の単位」と「放射線を受ける側の単位」に大別されている。「放射線を出す側の単位」としては放射線の強さを示す単位であるベクレル（Bq）があり、「放射線を受ける側の単位」としては以下に示すグレイ（Gy）とシーベルト（Sv）がある。

放射線を受けた単位質量の物質が吸収するエネルギーの吸収線量の単位がグレイ（Gy）である。放射線の種類やエネルギーによって、吸収線量が同じでも、生体に与える影響は変わってくる。そこで、放射線の種類ごとに生体への影響の大きさに応じた重み付けをした線量が等価線量、放射線防護における被ばく管理のために考案された線量が実効線量とされている。等価線量も実効線量も、どちらもその単位はシーベルト（Sv）である。シーベルト（Sv）の数値が大きいほど、人体が受ける放射線の生体影響が大きいことを意味している。

また、被ばくの経路によって実効線量の算出方法が異なる。外部被ばくの場合、吸収線量に「放射線の種類ごとの人体への影響を考慮した係数（放射線加重係数）」と「組織や臓器ごとの感受性を考慮した係数（組織加重係数）」を乗じて算出される。一方、内部被ばくの場合は、1 回に摂取した放射性物質の量から、摂取以降の生涯にわたって受ける放射線量を推定して算出されるが、この一生分を積算した線量は預託実効線量と呼ばれている。

(17) 4.2 確定的影響と確率的影響

確定的影響と確率的影響に関して取りまとめたものを図 2-18、図 2-19 に示す。

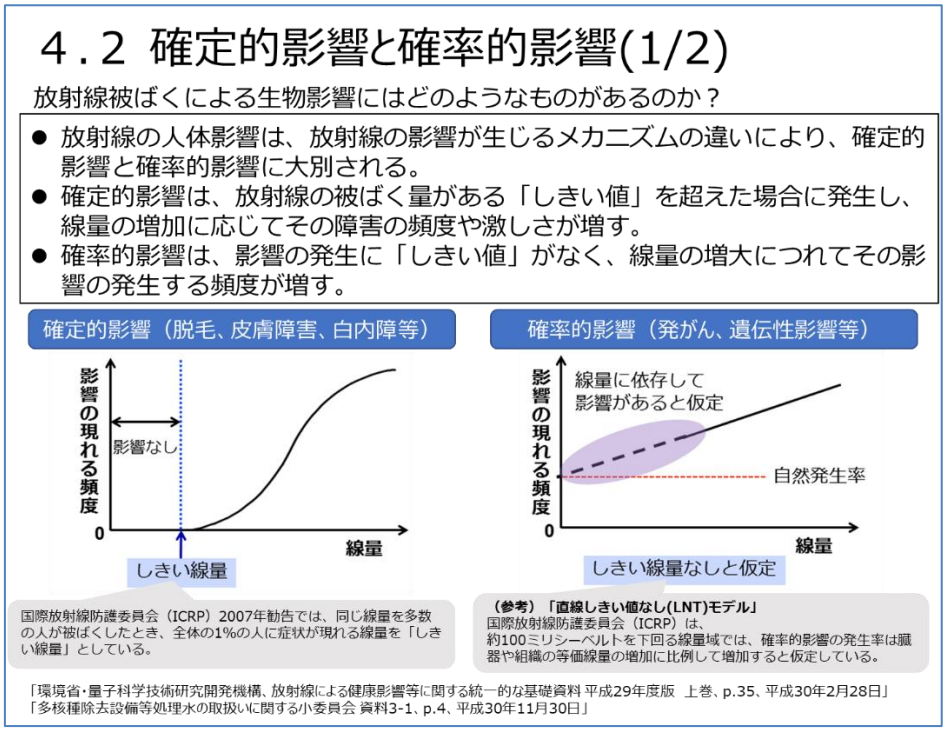

図 2-18 確定的影響と確率的影響(1/2)

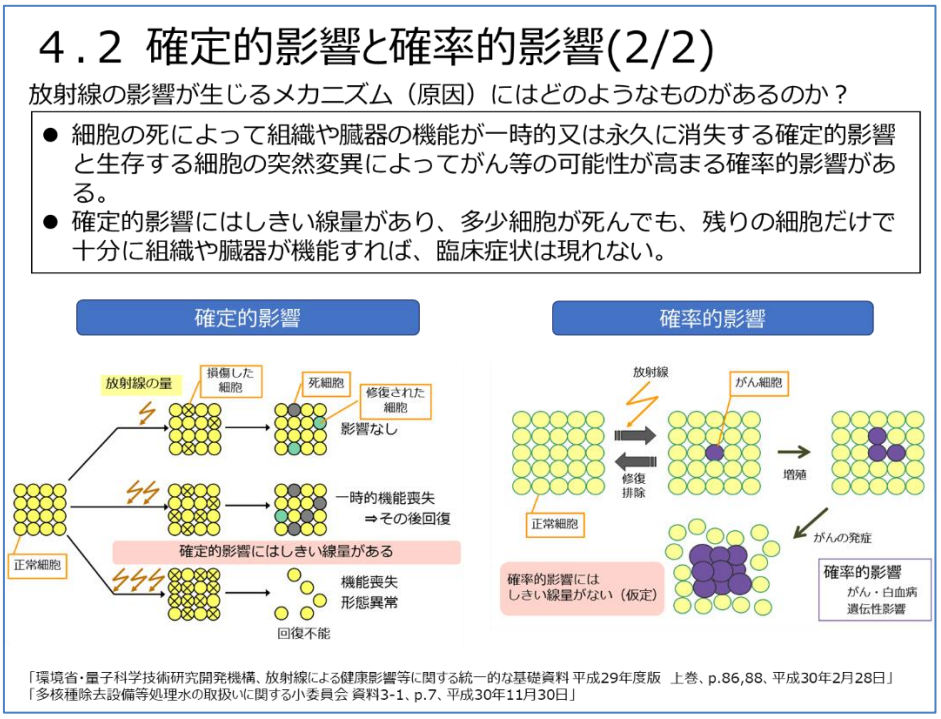

図 2-19 確定的影響と確率的影響(2/2)

放射線被ばくによる生物影響の種類についての整理を行った。放射線被ばくによる人体への健康影響は、放射線の影響が生じるメカニズムの違いによって、確定的影響と確率的影響に大別される。

確定的影響は、放射線の被ばく後の細胞の死によって組織や臓器の機能が一時的又は永久に消失する影響のことをいう。確定的影響では、放射線の被ばく量が「しきい値」を超えた場合に、脱毛・皮膚障害・白内障等の臨床症状が発生し、線量の増加に応じてその障害の頻度や激しさが増加する。放射線の被ばく量が「しきい値」以下の場合、多少細胞が死んでも、残りの細胞だけで十分に組織や臓器が機能するため、臨床症状は現れない。国際放射線防護委員会（ICRP）は、同じ線量を多数の人が被ばくしたとき、全体の 1%の人に症状が現れる線量を「しきい線量」としている。

確率的影響は、生存する細胞の突然変異によって、がん等の可能性が高まる影響のことをいう。確率的影響は、確定的影響とは異なり、前述したような影響の発生についての「しきい値」はなく、被ばく線量が増大するにつれて、発がんや白血病、遺伝性影響等の発生する頻度が増加する。一定の被ばく線量以下では、線量よりも他の発がん要因の影響が大きすぎて判断できないが、ICRP 等では、被ばく線量が低くても線量に依存して影響が出ると仮定している。

(18) 4.3DNA の損傷と修復

DNA の損傷と修復に関して取りまとめたものを図 2-20 に示す。

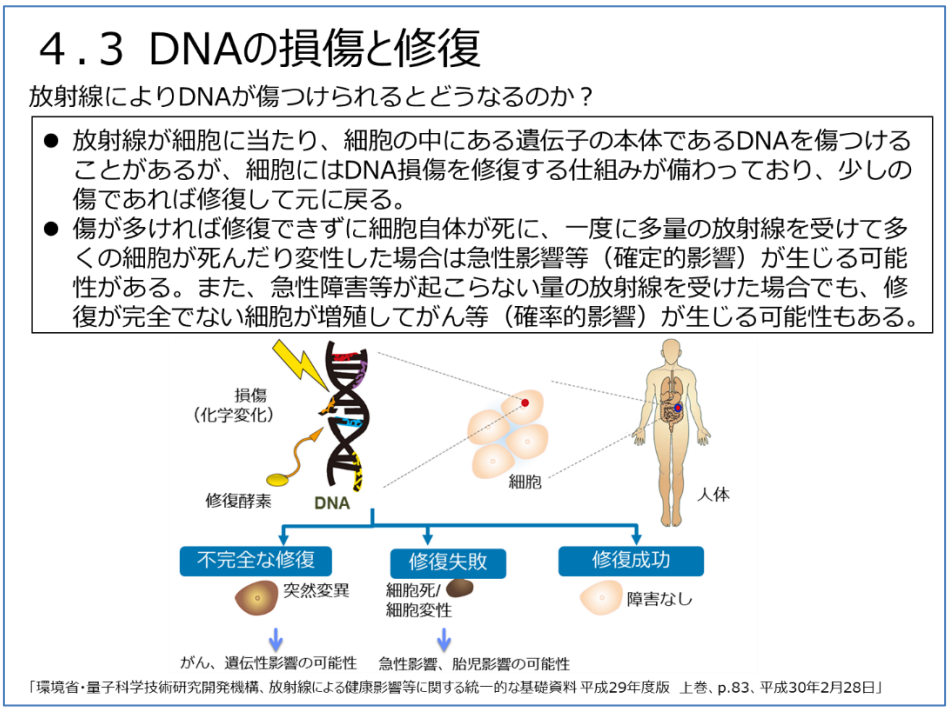

図 2-20DNA の損傷と修復

放射線被ばくによって人体の DNA が損傷した場合の影響についての整理を行った。放射線が当たった箇所を細かく見た場合、放射線が細胞に当たり、細胞の中にある遺伝子の本体である DNA に傷をつけることがある。

しかし、細胞には DNA 損傷を修復する仕組みが備わっており、少しの損傷であれば修復酵素の働きによって、損傷は修復され、DNA は元の状態に戻り、それらの細胞のある臓器や組織の機能に障害は発生しない。

また、少しの細胞が死んだとしても、他の細胞がその役割を代替できれば、それらの細胞のある臓器や組織の機能に障害は発生しない。

損傷が多ければ修復ができずに細胞自体が死ぬことになり、一度に多量の放射線を受けて多くの細胞が死んだり、変性した場合は急性影響や胎児影響（確定的影響）が生じる可能性がある。

また、急性障害等が起こらない量の放射線を受けた場合でも、修復が完全でない細胞が増殖して突然変異を起こし、がんや遺伝性影響等（確率的影響）が生じる可能性もある。

(19) 4.4 トリチウムによる内部被ばく、外部被ばくの影響

トリチウムによる内部被ばく、外部被ばくの影響に関して取りまとめたものを図 2-21 に示す。

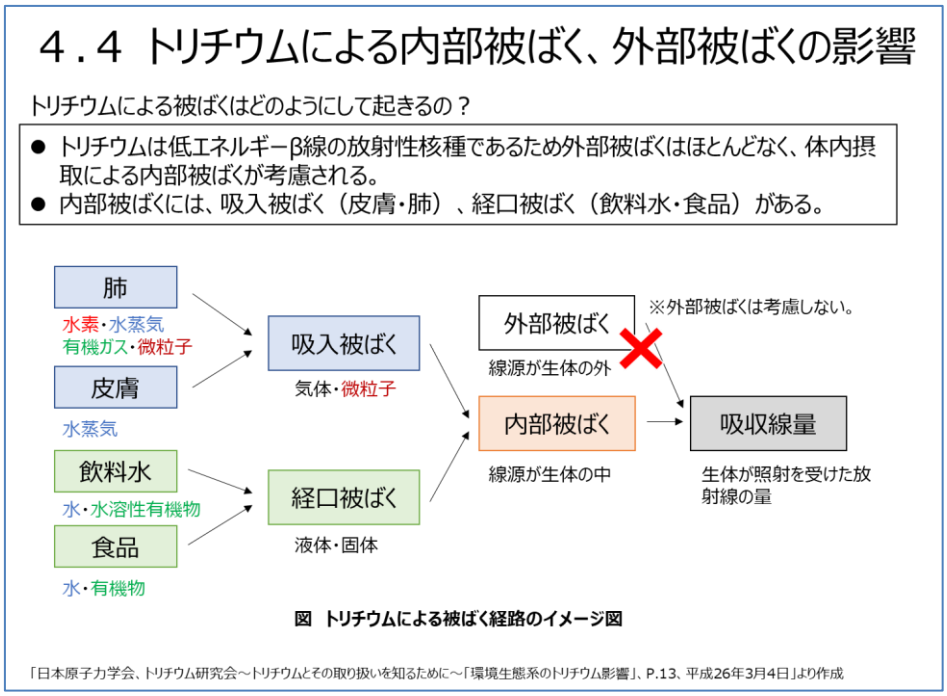

図 2-21 トリチウムによる内部被ばく、外部被ばくの影響

トリチウムは低エネルギーβ線の放射性核種であるため外部被ばくはほとんどなく、体内摂取による内部被ばくが考慮される。内部被ばくには、吸入被ばく（皮膚・肺）、経口被ばく（飲料水・食品）がある。

吸入被ばくにおいては、トリチウム水蒸気を含む空気を呼吸することによって肺に取り込まれるものと、皮膚からトリチウムが吸収されるケースも存在する。経口被ばくは、主に飲料水や食物から摂取されるトリチウムに由来している。

(20) 4.5 実効線量係数

実効線量係数に関して取りまとめたものを図 2-22 に示す。

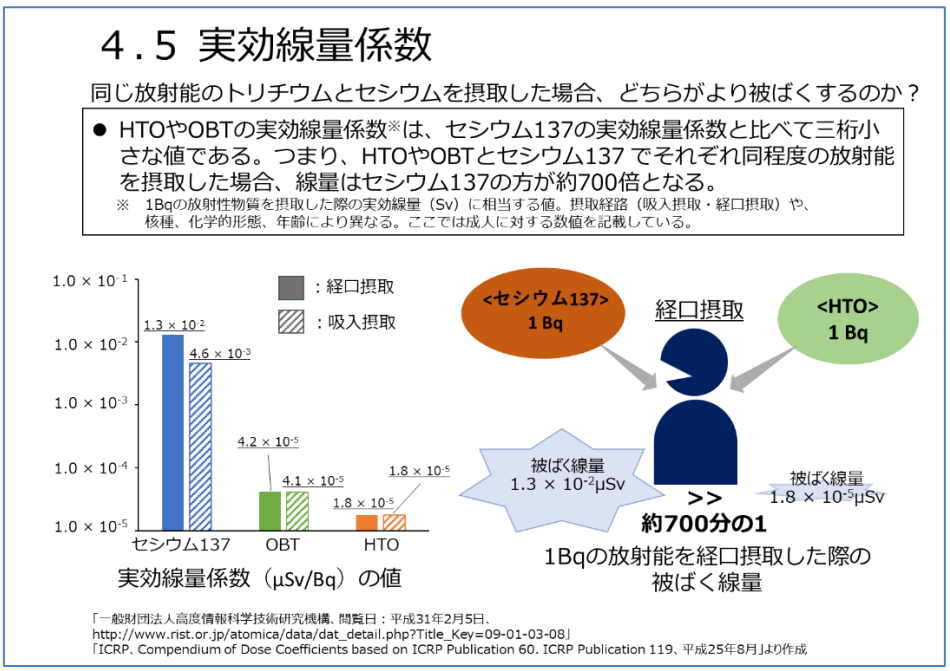

図 2-22 実効線量係数

トリチウム水（HTO）、有機結合型トリチウム（OBT）、セシウム 137（Cs137）を摂取した際の実効線量係数（μSv/Bq）について整理した。実効線量係数とは、1Bq の放射性物質を摂取した際の実効線量（Sv）に相当する値である。実効線量係数は、摂取した経路（吸入摂取・経口摂取）・核種・化学的形態、また摂取した人の年齢によって異なる。ここでは、成人を対象とした数値を基に記載する。

HTO、OBT、セシウム 137 についての、経口摂取による実効線量係数はそれぞれ以下の通りである。

- HTO : 1.8×10^{-5} μSv/Bq
- OBT : 4.2×10^{-5} μSv/Bq
- Cs137 : 1.3×10^{-2} μSv/Bq

HTO と OBT のように、同じトリチウムでも化学形によって実効線量係数が異なる。また、セシウム 137 の実効線量係数は、HTO の実効線量係数の約 700 倍、OBT の約 300 倍となっている。つまり、HTO、OBT、セシウム 137 で、それぞれ同程度の放射能を経口摂取した場合、セシウム 137 による被ばく線量は、HTO による被ばく線量に比べて約 700 倍、OBT による被ばく線量に比べて約 300 倍となる。

(21) 4.6 トリチウムの体内挙動

トリチウムの体内挙動に関して取りまとめたものを図 2-23 に示す。

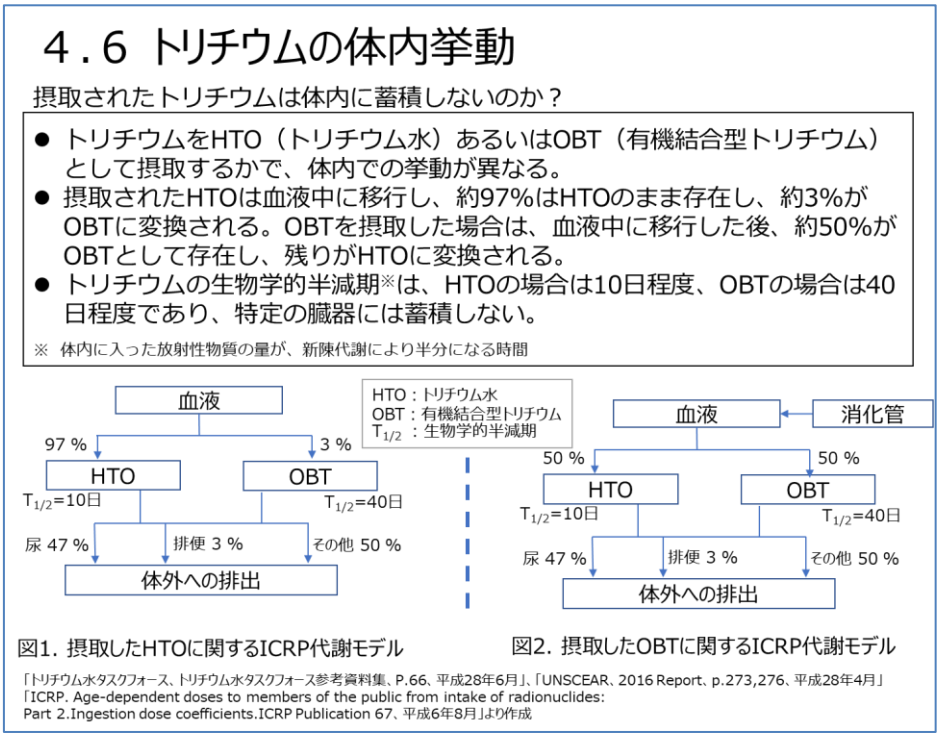

図 2-23 トリチウムの体内挙動

体内蓄積を含め、摂取されたトリチウムの体内での挙動について整理した。体内での挙動に関しては、摂取した際のトリチウムの化学形が重要とされている。例えば、トリチウム水（HTO）として摂取するか、あるいは有機結合型トリチウム（OBT）として摂取するかで、トリチウムの体内での挙動が異なる。

HTO として摂取された場合には、HTO はまず血液中に移行する。その後、その約 97%は HTO としてそのまま存在し続けるが、残りの 3%は OBT に変換される。

OBT として摂取された場合には、OBT はまず血液中に移行する。その後、その約 50%が OBT としてそのまま存在し続けるが、残りの OBT は HTO に変換される。

体内に入った放射性物質の量が、新陳代謝によって体外に排出され半分になる時間は生物学的半減期と呼ばれる。トリチウムの生物学的半減期は、HTO の場合は 10 日程度、OBT の場合は 40 日程度であり、特定の臓器には蓄積しないとされている。

(22) 4.7 トリチウムの核変換による影響

トリチウムの核変換による影響に関して取りまとめたものを図 2-24 に示す。

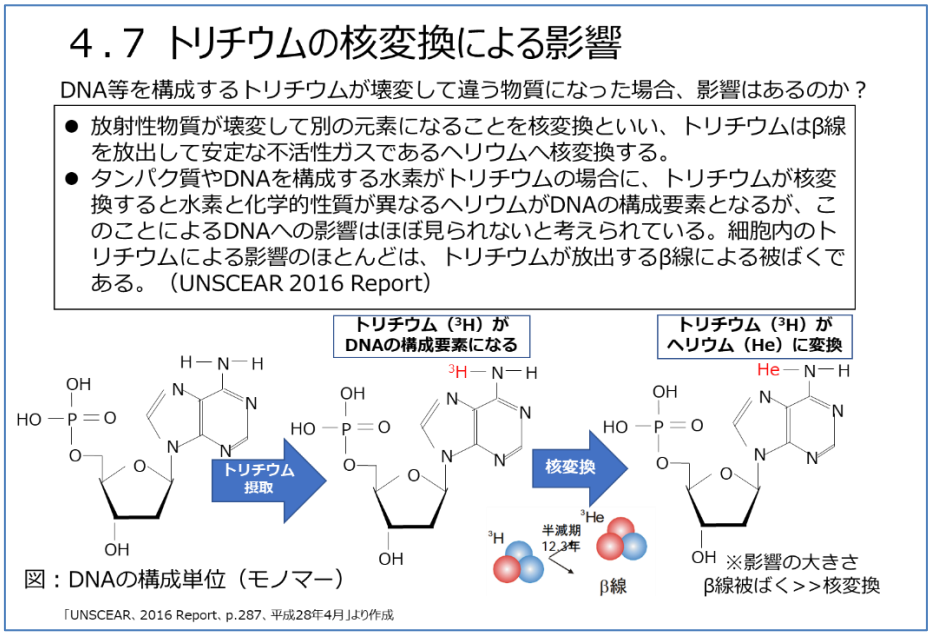

図 2-24 トリチウムの核変換による影響

トリチウムの核変換による DNA 等への影響についての整理を行った。核変換とは、放射性核種が放射壊変によって、化学的性質が異なる元素に変換されることである。

トリチウムの場合、12.3 年の半減期でβ線を放出して、安定な不活性ガスであるヘリウムに核変換する。ヘリウムは水素やトリチウムとは異なる化学的性質を持っている。

例えば、タンパク質や DNA を構成する水素がトリチウムであった場合、そのトリチウムが核変換すると、水素と化学的性質が異なるヘリウムが DNA の構成要素となる。しかし、水素と化学的性質が異なるヘリウムが DNA の構成要素となったことによる影響は、ほぼ見られないと考えられている。細胞内にトリチウムがあることによる影響のほとんどは、トリチウムが放出するβ線による被ばくの影響である。

(23) 4.8 トリチウムによる生体影響（動物実験）

トリチウムによる生体影響（動物実験）に関して取りまとめたものを図 2-25 に示す。

４．８ トリチウムによる生体影響（動物実験）

トリチウムからの被ばくにより生体影響が発生した事例はあるのか？

- マウスにHTOを生涯にわたって飲水投与し続けた事例では、 HTO非投与のマウスに比べて、3.6mGy/日以上の線量率で生存期間が短くなることが確認されている。

マウスにHTOを生涯にわたって飲水投与した事例

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	56	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)	44(83)	42(70)	42(70)	32(84)	34(76)
がんの内訳	胸腺リンパ腫	0	0	0	0	6	7	25	58	64
(全個体に占める	非胸腺リンパ腫	25	25	29	20	21	15	20	11	11
割合:%)	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/日 → 139,000,000 Bq/L
0.2 mGy/日 → 8,690,000 Bq/L
線量率は、50, 100, 200日後の組織中(主に脳、肝臓、筋肉)のトリチウム濃度を元に算定

「UNSCEAR、2016 Report、p.295、平成28年4月」、
「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会 資料3-1、p.15、平成30年11月30日」

図 2-25 トリチウムによる生体影響（動物実験）

トリチウムによる被ばくによって生体影響が発生した動物実験の事例として、トリチウム水（HTO）をマウスに生涯にわたり飲水投与し続けた事例を例示した。

本事例によれば、3.6mGy/日以上の被ばく線量率の場合、発がんした HTO 投与のマウスの割合は HTO 非投与のマウスの割合と比較して、有意に上昇するとされている。なお、139,000,000Bq/L の HTO を一生にわたって飲水投与した場合に、被ばく線量率は 3.6mGy/日となる。

また、3.6mGy/日以上の被ばく線量率の場合、HTO 投与のマウスは、HTO 非投与のマウスに比べて、生存期間が短くなるとされている。

なお、この線量率は 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基に算定されている。

(24) 4.9 トリチウムによる生体影響（確定的影響事例）

トリチウムによる生体影響（確定的影響事例）に関して取りまとめたものを図 2-26 に示す。

４．９　トリチウムによる生体影響（確定的影響事例）

トリチウムからの被ばくにより生体影響が発生した事例はあるのか？

- ヨーロッパのトリチウム蛍光塗料製造施設の作業員において、トリチウムの被ばく事故により死亡が確認された事例がある。
- 死亡した作業員は、化学操作の作業中にトリチウムを取り込み、尿中のトリチウム濃度から被ばく線量は死亡前の4年間で約3～5Sv、または死亡前の3年間で最大約20Svと推定された。

ヒトの健康に対するトリチウム被ばくの確定的影響の事例

被ばく者	被ばく線量（尿中トリチウム濃度からの推定値）	影響
ヨーロッパのトリチウム蛍光塗料製造施設の作業者	約3～5 Sv	肺あるいは骨髄に生じた障害により死亡
上記作業者のアシスタント	上記の約半分	貧血
上記とは異なるヨーロッパのトリチウム蛍光塗料製造施設の作業者	最大約20 Sv	肺あるいは骨髄に生じた障害により死亡

参考
- 福島第一原子力発電所周辺での推計トリチウム被ばく線量：約0.0000000002 Sv
- 日常生活での被ばく線量（全ての天然放射線核種から被ばくする線量）：0.0021 Sv

「UNSCEAR、2016 Report、p.289,294、平成28年4月」、「トリチウム水タスクフォース、トリチウム水タスクフォース報告書、P.4、平成28年6月」より作成

図 2-26 トリチウムによる生体影響（確定的影響事例）

トリチウムによる被ばくによって確定的影響が発生した事例として、ヨーロッパにおけるトリチウム蛍光塗料製造施設の作業員の被ばく事故事例を例示する。

同事例は、ヨーロッパのトリチウム蛍光塗料製造施設の作業員が、トリチウムの被ばく事故により死亡が確認されたというものである。死亡した作業員は、化学操作の作業中にトリチウムを取り込んでしまったとされている。この死亡した作業員の尿中のトリチウム濃度から、被ばく線量は死亡前の 4 年間で約 3~5 シーベルト（Sv）と推定されており、胚あるいは骨髄に生じた障害によって死亡したとされている。また、この死亡した作業員のアシスタントは、約 1.5~2.5Sv の線量を被ばくしたと推定され、貧血の症状が確認されている。

また、この施設とは異なるヨーロッパのトリチウム蛍光塗料製造施設でも作業員の被ばく事故事例が確認された。同施設で死亡した作業員は、最大約 20Sv の線量を被ばくしたと推定され、胚あるいは骨髄に生じた障害によって死亡したとされている。

なお、福島第一原子力発電所周辺でのトリチウムによる被ばく線量と日常生活におけるトリチウムだけでなく全ての天然放射性核種から被ばくする線量はそれぞれ以下のように推定されている。

- 1F 周辺でのトリチウムによる被ばく線量　：約 0.0000000002 Sv
- 日常生活での全ての天然放射性核種からの被ばく線量　：　0.0021000000 Sv

(25) 4.10 トリチウムによる生体影響（疫学研究）

トリチウムによる生体影響（疫学研究）に関して取りまとめたものを図 2-27 に示す。

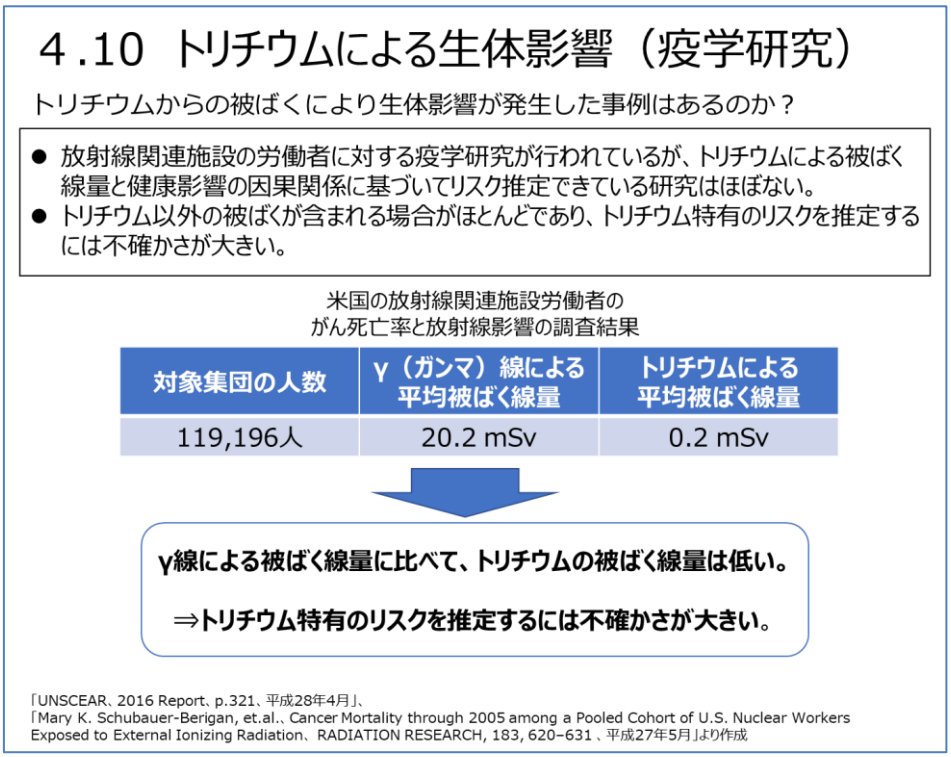

図 2-27 トリチウムによる生体影響（疫学研究）

トリチウムからの被ばくにより生体影響が発生した事例の有無を確認するために、放射線関連の労働者に対する疫学研究についての調査を実施した。調査の結果、トリチウムによる被ばく線量と健康影響の因果関係に基づいてリスク推定できている研究はほぼないことが確認された。これは、特定の地域・施設において、トリチウムに被ばくする可能性がある労働者数が少なく、かつそのような労働者のほとんどが被ばくしていないことから、トリチウム特有のリスクを推定するには十分なデータの蓄積がなく、個別事例を研究しても不確かさが大きいためとみられている。

一例として、米国の放射線関連施設労働者を対象とした疫学研究事例について調査を行い、がん死亡率と放射線影響を調査した対象集団の人数、γ線による平均被ばく線量、トリチウムによる平均被ばく線量を確認した。同研究事例では、約 12 万人が対象とされており、ある程度のデータ数が蓄積されている。しかし、γ線による平均被ばく線量は 20.2mSv である一方で、トリチウムによる平均被ばく線量は 0.2mSv となっており、トリチウムによる被ばく線量が低くいことから、不確かさが大きく、トリチウム特有のリスクを推定することが困難である。

(26) 4.11 トリチウムによる水生生物影響（1/2）

トリチウムによる水生生物影響（1/2）に関して取りまとめたものを図 2-28 に示す。

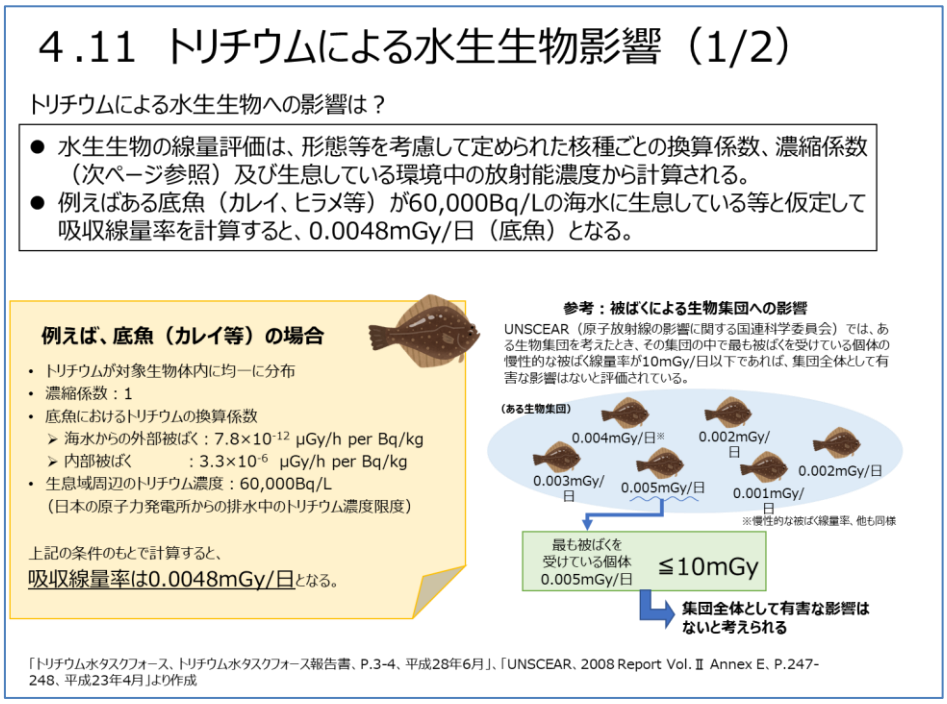

図 2-28 トリチウムによる水生生物影響（1/2）

トリチウムが水生生物に与える影響を整理した。水生生物の被ばく線量評価は、その生物の形態等を考慮して決められた核種毎の換算係数（①）や濃縮係数（②）、及び生息環境中の放射能濃度（③）から計算される。事例として以下にカレイ等の底魚の吸収線量率を評価してみる。

① 底魚におけるトリチウムの換算係数は、UNSCEAR の 2008 年報告書[1]によると、以下のように定められている。

- 海水からの外部被ばく：7.8×10^{-12} μGy/h per Bq/kg
- 内部被ばく：3.3×10^{-6} μGy/h per Bq/kg

② トリチウムの濃縮係数は 1 とされている。

③ 生息環境を日本の原子力発電所から排出される水のトリチウム濃度限度である 60,000 Bq/L の海水とする。

これらの仮定のもとで計算すると、底魚が 60,000 Bq/L のトリチウム濃度の環境に居た場合の吸収線量率は 0.0048mGy/日となる。

一方、UNSCEAR の 2008 年報告書によると、ある生物集団への被ばくによる影響を考える際、その生物集団の中で最も被ばくを受けている個体の慢性的な被ばく線量率が 10mGy/日以下であれば、集団全体としての有害な影響はないと評価されている。これはつまり、複数の底魚からなる群れのうち、最も被ばくしている固体の吸収線量率が 0.005mGy/日程度であれば、集団全体として有害な影響はないと考えられるということを示している。

(27) 4.11 トリチウムによる水生生物影響（2/2）

トリチウムによる水生生物影響（2/2）に関して取りまとめたものを図 2-29 に示す。

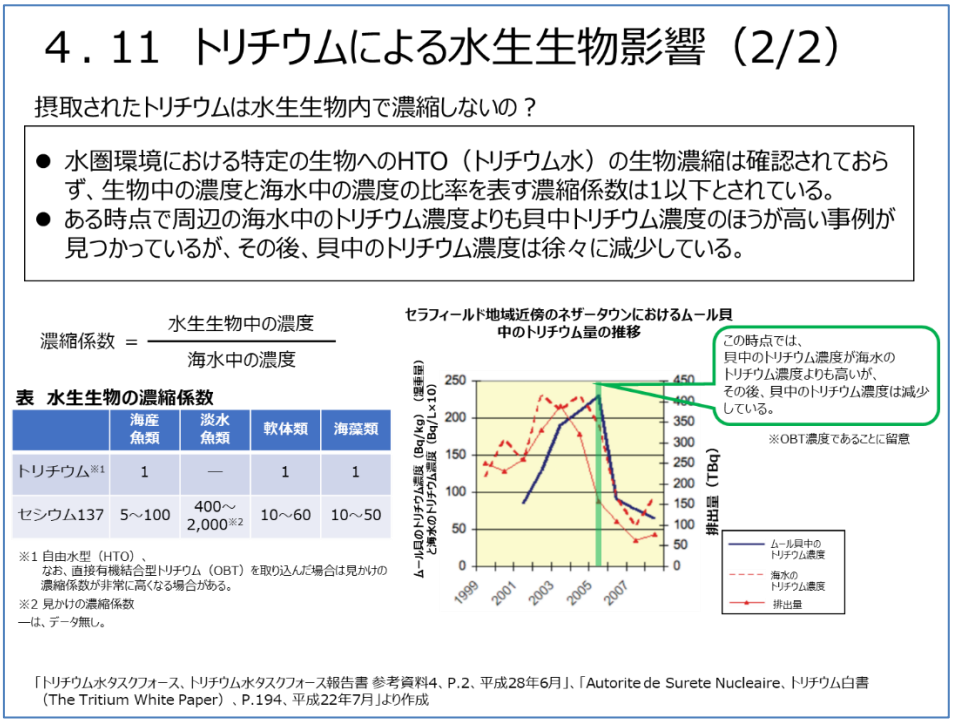

図 2-29 トリチウムによる水生生物影響（2/2）

水生生物がトリチウムを摂取した場合の生物内での濃縮（生物濃縮）について整理した。生物濃縮の評価は「濃縮係数」をもとに行われる。濃縮係数とはある核種の水生生物中の濃度と海水中の濃度の比によって算出される値である。トリチウムの場合、その濃縮係数は 1 以下とされている。濃縮係数が 1 以下ということは水生生物中のトリチウム濃度が海水中のトリチウム濃度よりも低いということであり、海水中のトリチウムが生体内で蓄積・濃縮していないことを強く示唆している。また、水圏環境における特定の生物へのトリチウム水（HTO）の生物濃縮は確認されていない。

時に周辺海域のトリチウム濃度よりも高い濃度を持った生物が見つかることがある。右図のグラフはイギリス・セラフィールド地域近傍のネザータウンにおけるムール貝中のトリチウム濃度と、周辺に排出されたトリチウムの量と、周辺海域のトリチウム濃度の推移を比較したものである。これを見ると、2005 年～2006 年の期間では、ムール貝中のトリチウム濃度が海水中のトリチウム濃度よりも高くなっている。ただしこれは一時的な現象にすぎず、海水中のトリチウム濃度の低下とともにムール貝中のトリチウム濃度も低下し、2006 年～2007 年の期間にはムール貝中の濃度と海水中の濃度は同程度になっている。

(28) 5.1 環境中のトリチウムの挙動（1/2）

環境中のトリチウムの挙動（1/2）に関して取りまとめたものを図 2-30 に示す。

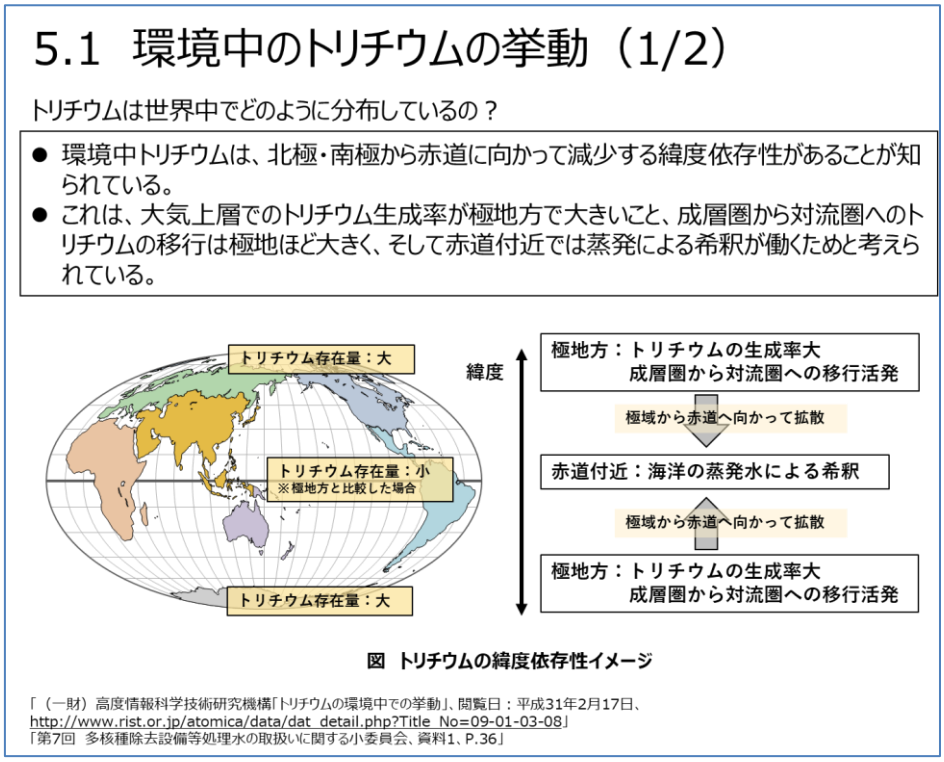

図 2-30 環境中のトリチウムの挙動（1/2）

大気上層で生成されたトリチウムは降水として地上に降下した後、海や河川へと流れる。その後、海水は蒸発して大気圏の水蒸気となり、再び降水として地上に降下する。このようにトリチウムは地球上を循環しているが、環境中のトリチウム濃度は北極・南極から赤道に向かって減少する緯度依存性があることが知られている。

これは、大気上層でのトリチウム生成率が極地方で大きいこと、成層圏から対流圏へのトリチウムの移行は極地ほど大きいため、一方、赤道付近では蒸発による希釈が働くためと考えられている。

(29) 5.1 環境中のトリチウムの挙動（2/2）

環境中のトリチウムの挙動（2/2）に関して取りまとめたものを図 2-31 に示す。

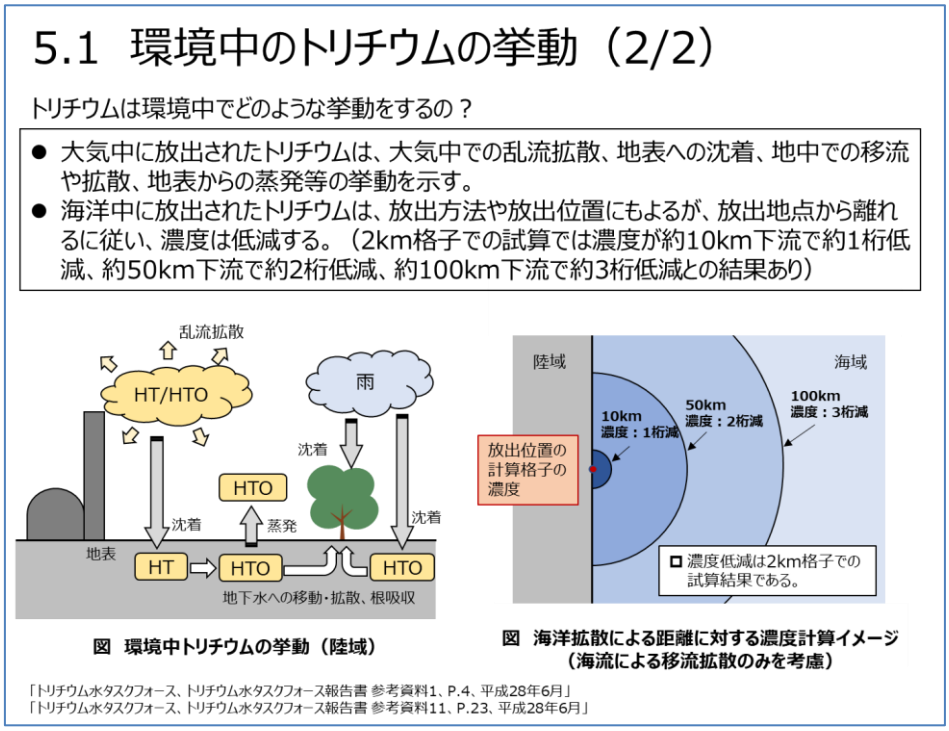

図 2-31 環境中のトリチウムの挙動（2/2）

大気中に放出されたトリチウムは、大気中での乱流拡散、地表への沈着、地中での移流や拡散、地表からの蒸発等の挙動を示す。放出時の気象条件で拡散状況は大きく異なるため、単純な評価は困難である。

海洋中に放出されたトリチウムは、放出方法や放出位置にもよるが、放出地点から離れるに従い、濃度は低減する。（2km 格子での試算では、濃度は約 10km 下流で約 1 桁低減、約 50km 下流で約 2 桁低減、約 100km 下流で約 3 桁低減するとの試算結果がある）。

(30) 5.2 トリチウムの測定方法の概要

トリチウムの測定方法の概要に関して取りまとめたものを図 2-32 に示す。

5.2 トリチウムの測定方法の概要

トリチウムはどうやって計るの？

- トリチウムがβ壊変した後のヘリウムの数を計測する方法と、β線の数を計測する方法がある。
- ヘリウムの数の計測には質量分析法が使用され、β線の数の計測には放射能計測法が使用される。放射能計測法が一般的にはよく使用される。
- 放射能計測法の代表的な方法が、液体シンチレーション法（LSC法）である。

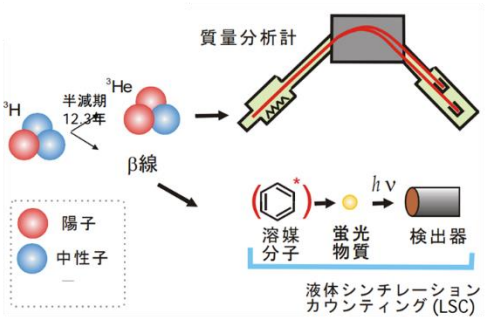

図　ヘリウム及びβ線計測に関するイメージ図

「トリチウム水タスクフォース、トリチウム水タスクフォース報告書 参考資料3、P.3、平成28年6月」
「日本原子力学会、トリチウム研究会～トリチウムとその取り扱いを知るために～、P.1、平成26年3月4日」

図 2-32 トリチウムの測定方法の概要

トリチウムがβ壊変した後のヘリウムの数を計測する方法と、β線の数を計測する方法がある。ヘリウムの数の計測には質量分析法が使用され、β線の数の計測には放射能計測法が使用される。放射能計測法が一般的にはよく使用される。

放射能計測法の代表的な方法が、液体シンチレーション法（LSC 法）である。トリチウムはエネルギーの低いβ線を放出する核種であるため、単なる放射線モニタリングでは検出できない。そのため、試料を検出器の内部に入れて測定する必要があるが、その代表的な方法として LSC 法がよく用いられている。

(31) 5.3 トリチウムの測定方法の特徴

トリチウムの測定方法の特徴に関して取りまとめたものを図 2-33 に示す。

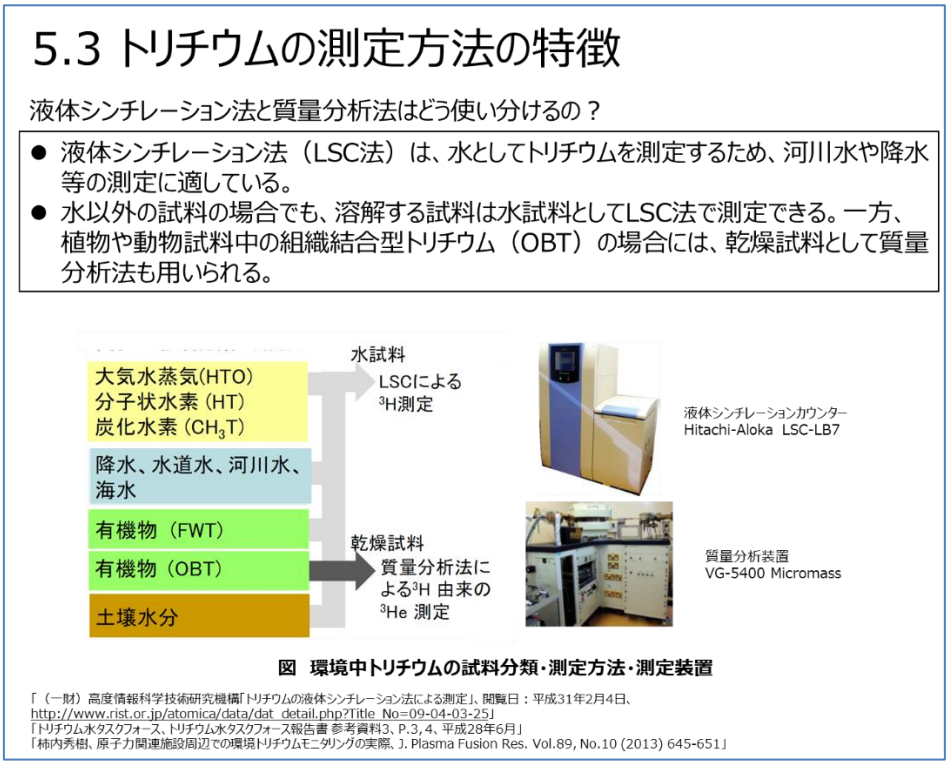

図 2-33 トリチウムの測定方法の特徴

液体シンチレーション法（LSC 法）は、水としてトリチウムを測定するため、河川水や降水等の測定に適している。水以外の試料の場合でも、溶解する試料は水試料として LSC 法で測定できる。

一方、植物や動物試料等の有機物中に存在するトリチウムには組織自由水トリチウム（FWT）と OBT があるため、凍結乾燥等により FWT と OBT を分けた後、OBT は乾燥試料として質量分析法も用いられる。

(32) 5.4 トリチウムの環境モニタリング

トリチウムの環境モニタリングに関して取りまとめたものを図 2-34 に示す。

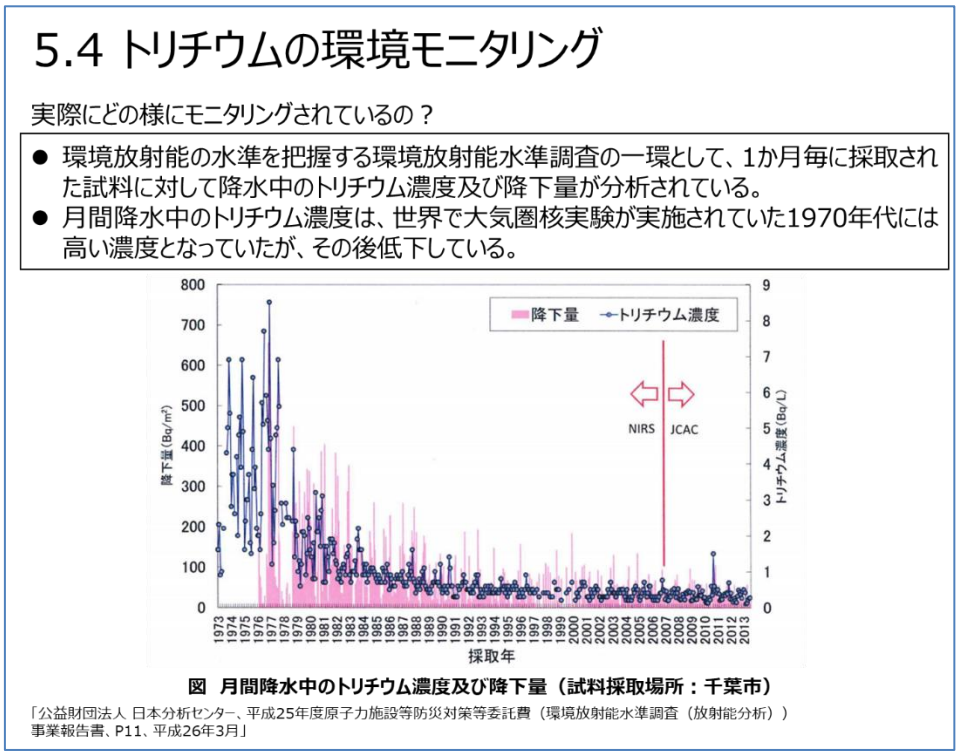

図 2-34 トリチウムの環境モニタリング

47 都道府県における環境放射能の水準を把握する「環境放射能水準調査」の一環として、トリチウム調査が実施されており、同調査の結果を確認した。

同調査では、公益財団法人　日本分析センター本部（千葉市）の建屋屋上（地上 3.5m）に設置した降水採取装置を用いて、1 カ月毎に降水を試料として採取し、降水中のトリチウム濃度及び降下量が分析されている[1]。

月間降水中のトリチウム濃度は、世界各地で大気圏核実験が行われていた 1970 年代には高い濃度となっていたが、その後低下している。

[1] 同調査は、2007 年以降は（公財）日本分析センターにより実施されているが、それ以前は放射線医学研究所（現　国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所）（千葉市）において実施されていた。

(33) 5.5 トリチウムの環境モニタリング（福島県）

トリチウムの環境モニタリング（福島県）に関して取りまとめたものを図 2-35 に示す。

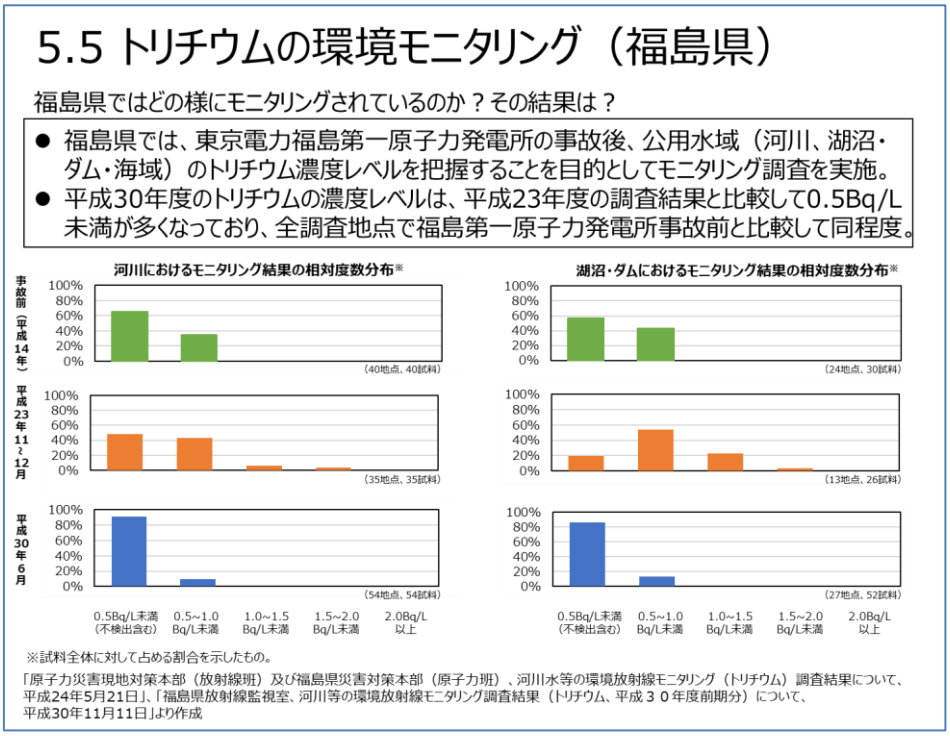

図 2-35 トリチウムの環境モニタリング（福島県）

福島県では、福島第一原子力発電所の事故後、公共用水域（河川、湖沼・ダム、海域）のトリチウム濃度レベルを把握することを目的に、モニタリング調査を実施しており、同調査の結果を整理した。

調査結果を取りまとめるにあたって、0.5Bq/L 毎の階級分けによる相対度数分布を作成した。

平成 30 年 6 月の調査では、平成 23 年度の調査と比較して 0.5Bq/L 未満（不検出を含む）が多くなっており、全調査地点で福島第一原子力発電所事故前と比較して同程度となっている。

(34) 5.6 国内外の規制基準（濃度）（1/2）

国内外の規制基準（濃度）（1/2）に関して取りまとめたものを図 2-36 に示す。

5.6 国内外の規制基準（濃度）（1/2）

国内外の原子力発電所におけるトリチウムの放出濃度に関する規制基準は？

- 国内の原子力発電所では、放射性物質がトリチウムのみの場合の濃度限度は、一種類の核種のみで年間1mSvの被ばく量となる値として、空気中の濃度については水蒸気の状態で 5Bq/L、水素ガスの状態で 70,000Bq/L、水中の濃度については60,000Bq/Lの数値が定められている。
- 米国は被ばく線量が1mSv/年を超えないよう逆算した数値として、空気中の濃度（水蒸気）については3.7Bq/L 、液体の濃度については37,000Bq/Lであり、韓国も同程度の数値を設定している。
- 一方、仏国、英国、カナダは統一した濃度限度を設定していない。

表 国内外の規制基準（濃度）

	液体廃棄物		気体廃棄物	
	濃度基準	考え方	濃度基準	考え方
米国	37,000 Bq/L	被ばく線量 1mSv/年から逆算	3.7 Bq/L	被ばく線量 1mSv/年から逆算
韓国	40,000 Bq/L		3 Bq/L	
日本	60,000 Bq/L		5 Bq/L	

※仏国、英国、カナダは統一した濃度限度を設定していない。
※米国は、職業人の線量限度（8×10^4 (μCi/年)）から公衆の線量限度（1mSv/年）への換算を行うことで算出している。

「株式会社三菱総合研究所、平成29年度原子力の利用状況等に関する調査事業（多核種除去設備等処理水の処分技術等に関する調査研究）調査報告書、P.124、平成30年3月」

図 2-36 国内外の規制基準（濃度）（1/2）

国内の原子力発電所では、放射性物質がトリチウムのみの場合の濃度限度は、一種類の核種のみで年間 1mSv の被ばく量となる値として、以下の値が定められている。

空気中の濃度（水蒸気の状態） 5Bq/L

空気中の濃度（水素ガスの状態） 70,000Bq/L

水中の濃度については 60,000Bq/L

米国は被ばく線量が 1mSv/年を超えないよう逆算した数値として、空気中の濃度（水蒸気）については 3.7Bq/L 、液体の濃度については 37,000Bq/L であり、韓国も同程度の数値を設定している。一方、仏国、英国、カナダは統一した濃度限度を設定していない。

なお、米国の線量限度の計算方法に関して補足する。米国の規制文書である 10CFR の Part20 においては、職業人の線量限度 5 rem(0.05 Sv)から、公衆の 1mSv の基準に適合するよう逆算し、排気・排水時の濃度限度を設けていると説明されている。具体的に、職業人の線量限度 5 rem に対して、臓器ごとに設定した線量係数を掛け合わせることで、職業人の線量限度がおよそ 8×10^4 (μCi)であることが導き出される（ALI）。これに対して、それぞれ以下のようにして排気・排水時の濃度限度を計算する。

排気時の濃度限度：8×10^4 (μCi) ÷ 300 ÷ 2.4×10^9 ≒ 1.0×10^{-7} (μCi/ml) ≃ 3.7(Bq/L)

ここで、除している 300 は 50×3×2 の意味合いとして以下のとおり分解できる。

・ 50 は、職業人の線量限度（5rem）から公衆の線量限度（0.1rem=1mSv）への換算係数

・　3 は、職業人と公衆の暴露時間と吸入速度の差を調整する係数
・　2 は、他の年齢群に適用できるよう調整する係数　である。

次に､除している 2.4×10^9 は 2000×60×20000 の意味合いとして以下のとおり分解できる。
・　2000 は、職業人の年間作業時間である（単位：時間）
・　60 は、時間を分に単位換算する係数である（単位：分/時間）
・　20000 は、軽作業時の条件下で 1 分あたりに呼吸する量である（単位：ml/分）

排水時の濃度限度：8×10^{4} (μCi) ÷ $7.3\times10^{7}\simeq1.0\times10^{-3}$ (μCi) ≃ 37000 (Bq/L)

ここで、除している 7.3×10^{7} は 50×2×730000 の意味合いとして以下のとおり分解できる。
・　50 は、職業人の線量限度（5rem）から公衆の線量限度（0.1rem=1mSv）への換算係数
・　2 は、他の年齢群に適用できるよう調整する係数
・　730000 は、年間水分摂取量の係数（単位：ml）

(35) 5.6 国内外の規制基準（濃度）（2/2）

国内外の規制基準（濃度）（2/2）に関して取りまとめたものを図 2-37 に示す。

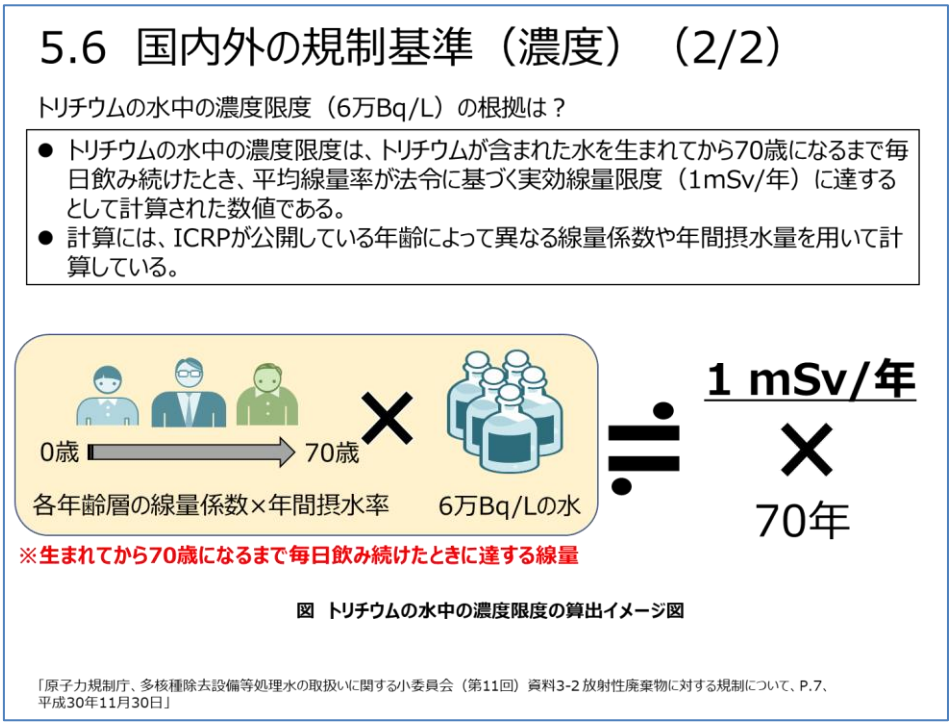

図 2-37 国内外の規制基準（濃度）（2/2）

トリチウムの水中の濃度限度は、トリチウムが含まれた水を生まれてから 70 歳になるまで毎日飲み続けたとき、平均線量率が法令に基づく実効線量限度（1mSv/年）に達するとして計算された数値である。計算には、ICRP が公開している年齢によって異なる線量係数や年間摂水量を用いて計算している。

(36) 5.7 国内外の規制（総量）

国内外の規制（総量）に関して取りまとめたものを図 2-38 に示す。

5.7 国内外の規制（総量）

国内外の原子力施設におけるトリチウムの放出総量に関する規制基準は？

- 国内の原子力発電所に対して、トリチウムの放出総量に関する規制基準値も、放出管理目標値※1も設定されていない。
- 英国、仏国、カナダの原子力発電所では、総量規制の基準値が設定されている。

表 諸外国の原子力施設におけるトリチウムの放出総量に関する規制基準

		対象	液体廃棄物	気体廃棄物
英国	原子炉	発電所毎	80～700兆Bq/年	3～15兆Bq/年
	再処理	セラフィールド※2	18,000兆Bq/年	1,100兆Bq/年
仏国	原子炉	発電所毎	（例） 45兆Bq/年 80兆Bq/年	（例） 4兆Bq/年 4.5兆Bq/年
	再処理	ラ・アーグ※3	18,500兆Bq/年	150兆Bq/年
カナダ	原子炉	発電所毎	370,000～46,000,000兆Bq/年	120,000～850,000兆Bq/年

*1: 線量目標値の達成を可能とする範囲内の年間の放出量のこと。原子力事業者が超えることのない様に務めることとされている値である。なお、トリチウムを除く液体廃棄物については放出管理目標値が設定され、管理が行われている。
*2：英国で唯一の再処理施設。
*3：仏国で唯一の再処理施設。

各種資料より作成

図 2-38 国内外の規制（総量）

日本及び英国、仏国、カナダを対象として、原子力発電所及び再処理施設からのトリチウムの放出総量に関する規制基準を確認した。国内の発電所では規制基準値も、管理目標値も設定されてない。なお、この管理目標値とは、線量目標値の達成を可能とする範囲内の年間の放出量のことであり、原子力事業者が超えることのないように努めることとされている値である。英国、仏国、カナダでは原子力施設ごとに以下のように総量規制の基準値が設定されている。

英国では現在 8 カ所で原子力発電所が稼働中であり、トリチウムを液体廃棄物として放出する場合、最も低い基準値の発電所で 80 兆 Bq/年、最も高い値の発電所で 700 兆 Bq/年となっている。気体廃棄物として放出する場合は、最も低い値の発電所で 3 兆 Bq/年、最も高い値の発電所で 15 兆 Bq/年とされている。英国の再処理施設はセラフィールドにあるのみだが、その基準値は液体・気体での放出で、それぞれ 18,000 兆 Bq/年、1,100 兆 Bq/年である。仏国では現在 19 カ所で発電所が稼働中であり、例として確認した発電所では、液体放出の場合は 45 兆 Bq/年や 80 兆 Bq/年、気体放出の場合は 4 兆 Bq/年や 4.5 兆 Bq/年が基準値とされている。仏国の再処理施設はラ・アーグにあるのみだが、その基準値は液体・気体での放出で、それぞれ 18,500 兆 Bq/年、150 兆 Bq/年とされている。カナダでは現在 4 カ所で発電所が稼働中であり、液体の場合は最も低い基準値の発電所で 370,000 兆 Bq/年、最高値の発電所で 46,000,000Bq/年、気体の場合は最低値の発電所で 120,000 兆 Bq/年、最高値の発電所で 850,000 兆 Bq/年とされている。

(37) 5.8 国内外の規制基準（福島第一原子力発電所）

国内外の規制基準(福島第一原子力発電所)に関して取りまとめたものを図 2-39 に示す。

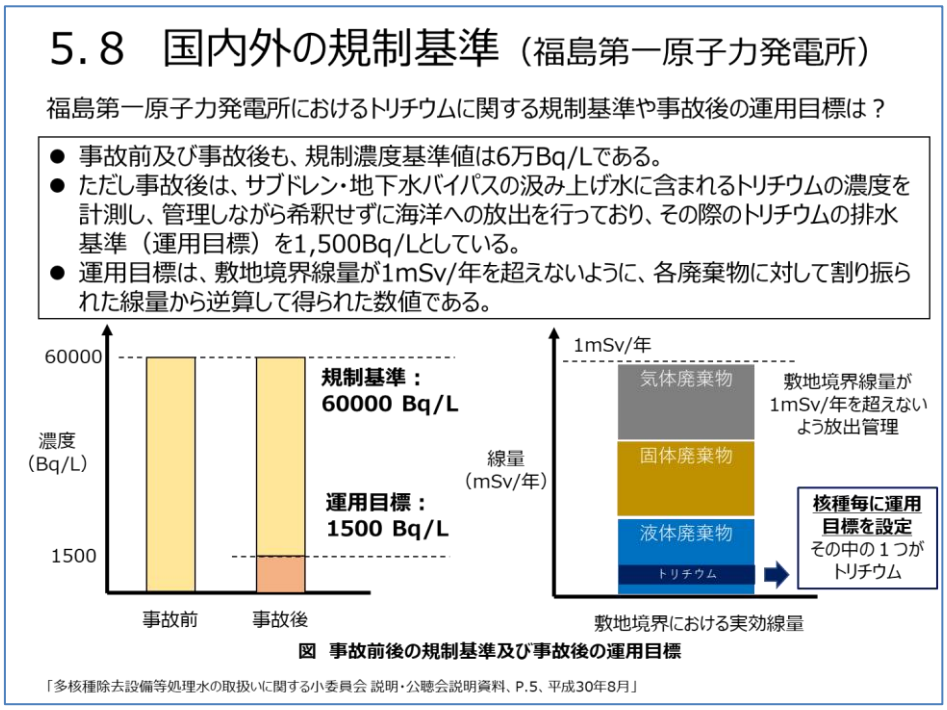

図 2-39 国内外の規制基準（福島第一原子力発電所）

事故前及び事故後も、規制濃度基準値は 6 万 Bq/L である。ただし事故後は、サブドレン・地下水バイパスの汲み上げ水に含まれるトリチウムの濃度を計測し、管理しながら希釈せずに海洋への放出を行っており、その際のトリチウムの排水基準（運用目標）を 1,500Bq/L としている。運用目標は、敷地境界線量が 1mSv/年を超えないように、各廃棄物に対して割り振られた線量から逆算して得られた数値である。

(38) 5.9 国内外の濃度基準（飲料水）

国内外の濃度基準（飲料水）に関して取りまとめたものを図 2-40 に示す。

5.9　国内外の濃度基準（飲料水）

飲料水に含まれるトリチウムの濃度基準は？

- WHOの「飲料水水質ガイドライン（第4版）」では、飲料水に含まれるトリチウムの指標（ガイダンスレベル）は10,000Bq/Lである。
- 我が国では、飲料水に含まれるトリチウムの基準値は設定されていない※1。
- カナダ、米国、英国、仏国等、飲料水に含まれるトリチウムの基準値が設定されている国もある。

表：諸外国における飲料水中のトリチウムの基準値

	基準値	基準値の位置づけ	基準値の意味
WHO	10,000Bq/L	ガイダンスレベル	超過していなければ、飲料水の消費に問題がないと各国当局が判断できるように設定された指標値。
カナダ	7,000 Bq/L	最大許容濃度（MAC：Maximum Acceptable Concentrations）	規制基準ではなく、超過していなければ飲料水の消費に問題がないと判断できるように設定された、指標となる値。
米国	740 Bq/L	最大汚染レベル（MCL：Maximum Contaminant Level）	規制基準として設定。超過していれば規制違反。
英国※2	100 Bq/L	パラメータ値	規制基準ではない。超過していれば、トリチウム以外の人工放射性核種の存在を調査しなければならなくなる指標値。
仏国	100 Bq/L	パラメータ値	同上

※1: 我が国の2012年4月からの食品中の放射性物質基準値の設定において、東京電力福島第一原子力発電所事故により放出・拡散した可能性のあるトリチウムは考慮しなければならないほどの線量になるとは考えがたいとして、トリチウムは考慮されていない。
※2: 英国ではイングランド、ウェールズ、スコットランド、北アイルランドの各地方政府に環境規制権限があり、ここでは最も多くの原子力施設のあるイングランドの基準を記載。

各種資料より作成

図 2-40 国内外の濃度基準（飲料水）

日本、世界保健機関（WHO）、カナダ、米国、英国、仏国を対象として、飲料水に含まれるトリチウムの濃度基準を整理した。日本国内では、2012 年 4 月からの食品中の放射性物質基準値の設定時に、東京電力福島第一原子力発電所事故により放出・拡散した可能性のあるトリチウムは考慮しなければならないほどの線量になるとは考えがたいとされたことから、飲料水に含まれるトリチウムに対する濃度基準は設定されていない。

WHO の「飲料水水質ガイドライン（第 4 版）」では、飲料水に含まれるトリチウムの濃度のガイダンスレベルとして、10,000Bq/L が設定されている。この WHO のガイダンスレベルとは、同値を超過していなければ飲料水の消費に問題がないと各国当局が判断できるように設定された指標としての値である。

飲料水に含まれるトリチウムの濃度基準が設定されている国の例としては、例えばカナダでは最大許容濃度として、7,000 Bq/L が設定されている。これは規制基準ではなく、同値を超過していなければ飲料水の消費に問題がないと判断できるように設定された指標としての値である。また、米国では規制基準があり、最大汚染レベルとして 740 Bq/L が設定されている。英国[2]及び仏国では、飲料水に含まれるトリチウムの濃度のパラメータ値として、100 Bq/L が設定されている。これは規制基準ではなく、同値を超過した場合にはトリチウム以外の人工放射性核種の存在を調査しなければならない指標としての値である。

[2] 英国ではイングランド、ウェールズ、スコットランド、北アイルランドの各地方政府に環境規制権限があるが、ここでは英国で最も多くの原子力施設のあるイングランドの情報を記載。

3. 多核種除去設備等処理水処分に関する情報の理解情勢へ向けた取組の具体例の検討と実施

多核種除去設備等処理水処分に関する情報の理解醸成へ向けた説明・公聴会について、必要な情報の提供や意見の集計等を実施した。

3.1 多核種除去設備等処理水の取扱いに係る説明・公聴会の開催について

ALPS 処理水の取扱いについては、汚染水処理対策委員会の「トリチウム水タスクフォース」において、平成 25 年 12 月から平成 28 年 6 月にかけて技術的な評価が実施された。その後、風評被害などの社会的な影響も含めた総合的な検討を行うことを目的に、「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会」（以下、小委員会という）が設置（平成 28 年 9 月）され、議論やヒアリングが行われてきた。

平成30年8月、小委員会では風評被害の問題について国民の認識や懸念を把握するため、説明・公聴会および意見募集を実施した。弊社は当取り組みについて資料作成に資する情報提供など、説明・公聴会および意見募集のサポートを実施した。表 3-1 に説明・公聴会の日時および会場、参加者数などを整理した。説明・公聴会は計 3 会場で実施され、意見表明者は延べ 44 名、傍聴者は延べ 274 名であった。また、書面での意見募集については、39 日間の募集で 135 名から意見が提出された。

表 3-1 説明・公聴会の開催結果概要

	富岡会場	郡山会場	東京会場
日時	平成 30 年 8 月 30 日（木）午前	平成 30 年 8 月 31 日（金）午前	平成 30 年 8 月 31 日（金）午後
場所	富岡町文化交流センター学びの森	郡山商工会議所	イイノホール
意見表明者数	14 名	14 名	16 名
傍聴者数	101 名	88 名	85 名

3.2 意見表明と意見提出における論点の分類

説明・広聴会での意見表明者が事前に提出した「当日表明する意見の概要」および書面で提出された「御意見」について、延べ 179 件の意見を整理し、論点を分類した。また、各分類について、主な意見をまとめた。小委員会に寄せられた意見は大きく以下の論点に分類した。

① 処分方法について
② 貯蔵継続について
③ トリチウムの生物影響について
④ トリチウム以外の核種の取扱いについて
⑤ モニタリング等の在り方について
⑥ 風評被害対策について
⑦ 合意形成の在り方について
⑧ その他
⑨ ALPS 処理水に関係しないもの

意見の整理結果を表 3-2 に示す。なお、表中の具体例は必ずしも原文のままではなく、短文で意味の分かるよう補足や類似意見の統合等を行っている。

表 3-2 多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会に寄せられた意見の分類

大分類	小分類	具体例
①処分方法について	1 処分全般	➢ 福島県漁連からの要望に対して、東京電力から「多核種除去設備で処理した水は発電所敷地内のタンクにて貯留いたします。」との回答、経済産業省からは「関係者の理解なしには、いかなる処分も行いません。」との回答を得ている中、国民理解を得ずしての海洋放出には反対。 ➢ 委員会が提案する 5 つの提案には全て反対である。 ➢ あえて、人為的にトリチウム水を放出することは倫理に反する。 ➢ ALPS 処理後のトリチウム汚染水の環境放出は容認できる。理由は、①貯蔵スペースの確保が困難である、②人体への影響リスクは小さいと思われる、③トリチウムは自然環境に大量に存在している、④世界の原発などからのトリチウムの環境放出による影響がこれまで報告されていないためである。 ➢ 5 つの処分方法の中で、水素放出のみが同意できた。水蒸気放出の方が、特定の産業（漁業）に負担が集中しない。また、広く拡散するイメージがあり受け入れられそう。 ➢ 地下貯蔵について再度検討して欲しい。 ➢ 安全であることを処分の前にシミュレーションするべきである。
	2 総量規制の在り方	➢ たとえ法令の濃度を守っても、総量規制がなければ海の汚染は必至である。 ➢ 原子力発電所の炉型によって総量規制値が変わっており、現在の総量規制値自体の根拠がない。 ➢ 処分方法の検討時に震災前の総量規制値の制約を外しているのはおかしい。震災前の総量規制が守られるべきである
	3 処分場所	➢ 発電所放流口からの放出では実害はないものの、地元（福島）の沿岸漁業に対し風評被害が発生し補償費がかかる。タンカー船によるトリチウム水の輸送や配管を引くことで、沖合での海水希釈・海洋放出をすればよいのではないか。 ➢ 沿岸に ALPS 処理水を移送する配管を引くことで、福島第二原子力発電所など別の場所からの放出をするべきではないか。また、海流の速い外洋での放出も検討すべき。 ➢ FAX で海上から海中に放出するとの提案をしたが検討されたのか。

大分類	小分類	具体例
	4 コスト比較の是非	➢ 未経験の国難から民を守る為、開発コストを惜しんではならない。 ➢ コストを優先して海洋放出することは、漁業者に更なる打撃を与え、福島第一原発事故の被害をさらに広げ、水産業及び地域社会への打撃など社会的影響が甚大であることを思料すべき。 ➢ 廃炉費用に莫大な予算がつぎ込まれる中、なぜ ALPS 処理水のみコストを前面的に出すのかわからない。 ➢ 安全・安心を担保したうえで、コストの議論をすべきである。
	5 新技術等に関しての追加調査・評価	➢ タスクフォースで定められた処分技術以外にも新たな技術があり、これらを評価すべきである。 ➢ 近畿大学や京都大学、ロスアトムにより、トリチウムを除去できる技術に関して報道があり、それらについて調査をすべきである。 ➢ トリチウム水の除去は技術開発を前提としていないのはなぜか。 ➢ タスクフォース報告書では“直ちに実用化できる段階にある技術が確認されなかった”とあります。 タスクフォースは２０１６年５月で活動を終えており、その後に出現した分離技術が漏れています。２０１８年６月２７日に近畿大学ほかから発表された技術は一考に値すると考えます。タスクフォースでの検討に期限があることは当然と思いますが、将来のリスクを低減し、後世により良い環境を残していくために再度検討をお願いしたく思います。
②貯蔵継続について	1 将来の技術進展を期待した処分方法の考慮	➢ 保管期間にトリチウムを分別する方法が確立する可能性もあり、当分の保管が最善と考える。 ➢ 十分に放射線量が減衰するのを待ってリスク低減を図り、分離技術など新しい技術を開発促進する時間を確保すべきである。
	2 長期保管の検討	➢ 長期保管を行えば、減衰により処分量を減らすことが出来る。仮に 120 年待てば、処分量は千分の一になる。 ➢ 大型タンクによる長期保管を検討すべきである。 ➢ これまでの「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会」では、委員より、「現在タンクは適切に管理されており一番リスクが低い状況にあり、この点について理解が進んでいない」という意見が出されており、タンクへの貯蔵の継続を含めて検討されるべき。 ➢ 貯蔵継続は選択肢としてありうべきだが、状況の固定化を招き、最終的な選択肢を減らすことにしかならないのではないか。 ➢ 管理を続けるコストは、貯蔵することによる健康および経済面のメリットに比べて大きい。さらに大型タンクの管理作業上のリスクもある。また、貯蔵継続であっても風評被害は避けられない。
	3 保管の方法・場所	➢ 法的には敷地外保管も可能である。それにも関わらず、敷地内しか選択肢がないかのように誘導するのは誤っている。 ➢ 将来的には、石油の備蓄としての洋上タンクや地上タンクを参考に福島沖に洋上タンクを設置することもすすめるべきだろう。 ➢ 仮に長期保管を行うならば、県外、特に東京電力管内での保管も行わなければ、沖縄の基地問題同様、他県の人々にとれば、福島に問題を押し付けておけばいい他人事、という形になってしまうことを強く懸念する。

大分類	小分類	具体例
③トリチウムの生物影響について	1 危険性（特に有機結合系）についての情報追加	➢ トリチウムは生体のあらゆる場所に取り込まれ、内部から被曝、活性酸素等を介して間接的に細胞膜やミトコンドリアを破壊する。 ➢ トリチウムは直接的に遺伝子、DNA の化学結合を切断する。遺伝子の水素原子とトリチウムが入れ替わり、トリチウムがヘリウムに壊変、遺伝子の化学結合が切断されるが、この点が考慮されていないのではないか。 ➢ 最も影響を受けやすい胎児や乳幼児への影響を考慮してほしい。 ➢ トリチウム高放出原発立地自治体と低放出原発立地自治体の住民の各死因による死亡率の統計学的比較すると住民の白血病、循環器系疾患による死亡率には統計学的有意差がある。 ➢ トリチウム水を放出することは生物濃縮、食物連鎖の結果、人体に蓄積する可能性があり、内部被曝による影響を生じ得るのではないか。 ➢ 将来世代への多大な被害が出た場合の責任の所在はどこか。
	2 過去の被害事例情報の追加	➢ 過去旧ソ連邦、旧西ドイツ、スイス、イギリスでトリチウムによる被ばく事故があり、4 人が死亡し、7 人が負傷したという事例があるが、それらの情報が説明されていない。
		➢ 1970～1980 年代には、低濃度でもトリチウムが染色体異常を起こすこと、母乳を通して子どもに残留することが動物実験で報告がされている。
		➢ 原発から放出されたトリチウムによって玄海原発周辺の住民の白血病の増加、世界各国の再処理工場周辺の小児白血病の増加、原発周辺の小児がんの増加等が報告されている。 ➢ 1975 年稼働開始の玄海原発は全国一トリチウム放出量が多い（2002～2012 年合計）。2003～07 年の年平均では、原発がある玄海町の白血病による死亡率は、全国平均の 6 ～7 倍というデータがある。
		➢ カナダ／ピッカリング重水原子炉（年間 2,500 兆 Bq のトリチウムを放出）周辺の都市では 80%増ものダウン症候群の赤ん坊の出産や中枢神経系統に異状のある赤ん坊の出産も明らかにされている。
	3 安全性の根拠	➢ 福島第一原発から海に流される排水中のトリチウムの告示濃度は 6 万 Bq/ L とされているが、とりわけトリチウムが有機結合した場合の内部被ばくリスクについては様々な科学的見解が存在しており、この濃度をもって安全性が担保されたことにはならない。 ➢ トリチウム（三重水素）は生物への影響の有無が「証明されていない」のであって、「影響が無い」とは断言できない。 ➢ 国際社会で認知されている規制値をもって放出するのではなく、県民を含めて関係者と協議の上、安心が得られる数値の設定が求められる。 ➢ トリチウム濃度を 6 万 Bq/L 以下に薄めれば無害という主張は根拠がない。 ➢ 他の発電所や再処理工場で大量にトリチウムを放出している実績があるからといって、東京電力福島第一原子力発電所でも放出しても安全ということにはならない。 ➢ 経産省の資料には、健康被害はないといった根拠や論文が示されていない。
④トリチウム以外の核種の取扱いについて	1 ALPS 処理水の保管実態（特にトリチウム以外）	➢ ALPS でトリチウム以外の核種が取り除かれるという前提だったが、トリチウム以外にも半減期 1570 万年のヨウ素 129 などが法令基準値超で残存していることが明らかとなっており、小委員会で考えていた前提が覆っている。
		➢ 多核種除去設備等処理水を希釈しても生物濃縮によって再び濃度が高まる核種もあると考える。
		➢ どのタンクにどれだけ何が入っているのかを確認するのが先決である。

大分類	小分類	具体例
	2 トリチウム以外の核種の処理・処分	➢ トリチウム以外にもタンクに残っていることが明らかになった以上、（それらの処理処分方法が論じられない中で）トリチウムのみを検討対象として処分方法を検討するという事自体が間違っている。タスクフォースに遡って再度議論すべき。 ➢ 原子力規制委員長の発言から、トリチウム以外の放射能物質も希釈して海に放出する疑念がある。 ➢ （規制庁は）希釈すれば流せると言うが、その理屈なら薄めれば何でも流せるではないか。 ➢ 様々な放射性物質を希釈して海に流す前例となり、このような無責任が、今後の放射性廃棄物管理において、当然のことにされてしまうのではないかと強く危惧する。
⑤モニタリング等の在り方について	1 計測・モニタリングの妥当性	➢ トリチウムは計測するのに時間がかかり、測定結果が出た時には放出後であり、懸念がある。 ➢ サンプリング調査では部分的に核種が濃縮していたような場合を把握できず、懸念がある。 ➢ 現在福島産の食品に関して出荷前に残留セシウム量を測定し、消費者を安心させている。トリチウムについても、放出前後で飲料水などの含有量が増加していないことを示す必要がある。
	2 計測・モニタリングの方法	➢ 国民、県民の不安払しょくのためには安全なトリチウムの海洋放出が必要だが、この為にはタンク内の汚染水のサンプル計測によるトリチウムの濃度計測に頼るのではなく、海洋放出に向けて汚染水の全量を計測するシステムを採用すべき。 ➢ 海洋放出前に複数の機関が独自に検証すべき。

大分類	小分類	具体例
⑥風評被害対策について	1 風評被害への懸念について	➢ 放射性物質は専門性が非常に高い分野であることから、その性質や特徴、危険性について、正しく国民に認識されているとはいえず、風評被害を招く。 ➢ すでに東京電力第一原発周辺の海には様々な核種の放射性物質が大量に流されており、少なくなったとはいえ、いまだに基準値をこえる魚が獲れたりする。そこに新たにトリチウムの放出となれば、消費者、漁業者の心配は増す。 ➢ 出荷制限が解除になった水産物を対象に試験操業として漁を再開し、水揚げ量を徐々に増加中。そんな中、トリチウムを含む多核種除去設備等処理水の海洋放出は明らかにマイナス要因であり、福島県産水産物の流通を回復させることに尽力してきた労力が無駄になる可能性がある。 ➢ 近隣諸国の輸入規制にまで広がりかねない。 ➢ 見切りをつけて福島県の漁業・水産業から撤退する人々が現れ、福島県の漁業・水産業の縮小になり地場産業の衰退に繋がる。 ➢ 値下がり分を補償・補填されたとしても、風評被害によって失った取引先を取り戻せないことが問題である。 ➢ 海洋放出について、海洋資源国日本がどのような影響を受けるのか充分検討されたのか。 ➢ 近年、消費者の目は厳しくトレーサビリティーや衛生管理に関して高度なものが求められる中、トリチウムを含む多核種除去設備等処理水を放出した海域において漁獲された水産物は、消費者にはどう写るか懸念。 ➢ 「風評被害が生じるメカニズム」の根本的原因は何か、どこにあると認識しているか。 ➢ トリチウムは現在も国内外の原子力施設から、管理された状態で海洋に放出されており、福島第一だけが特別の扱いになるのは合理的ではなく、かえって、「やはり福島第一は危険だ」と海外からも思われてしまい、逆に風評被害となるのでは。 ➢ 風評被害に対して賠償金を受け取っても、喜び・生きがいを感じ、誇りを持つことはできない。 ➢ 東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会の方々が小名浜魚市場を視察し、復興五輪としてできるだけ福島産の食材を利用、復興の後押しをするとした。国全体として福島県の復興を後押ししていくのではないのか。 ➢ 海洋放出の是非を議論する前に、福島第一原発による周辺海域の汚染実態、現状を説明すべき。
	2 風評被害との表現	➢ 風評とは「根も葉もない噂により経済的な被害を受けること、非難を受ける対象とは別のものが攻撃されてしまうことなどを意味する言葉」である。原発事故による放射能汚染は風評ではなく明らかに実害である。なぜ、実害ではなく風評という言葉を使うのか。 ➢ ①事故が収束していない②解決しない汚染水問題③廃炉まで 40 年④低線量被ばくの医学的知見の未確立などの現実は、消費者が福島県のものを「買わない、選ばない」という合理的な根拠となり得る。「風評被害」ではなく「実害」と言うべき。
	3 風評被害額のシミュレーション	➢ 処分に係るコストのシミュレーション同様に、風評被害額のシミュレーションも行うべきである。

大分類	小分類	具体例
⑦合意形成の在り方について	1 情報発信の充実	➢ 仮に、海洋放出や大気放出等、住民の生活環境への放出を伴う取り扱いがなされる場合には、総理大臣など国の責任者による全国民及び全世界への丁寧な説明、発信が必須である。 ➢ 国民に十分な周知、説明が得られていない現段階で放出を決断すると、不安と不信が増大し風評被害が甚大となる。首相や大臣などが、国民に広く公表し、国民的議論に付すべき。 ➢ 汚染水が廃棄される場所に選定された自治体、近隣自治体に住む国民の意見を聞くべき。 ➢ 市町村や行政単位による説明会を開き、意見聴取すべき。 ➢ トリチウム濃度が安全基準を十分に充たしていていも、風評被害が起こり得る。その原因の一つは、国や東電などの事故処理側が重大な問題を隠していると感じるからかもしれない。その背景の一つには、事故後今までの地元民への説明の不手際がある。無害なことを分かりやすく、丁寧に、且つ根気良く PR しなければならない。PR には役人や技術者ではなく、それなりに説明技術を持った高度な専門家が必要。国民の理解が得られるよう、丁寧かつ慎重に議論してほしい。
		➢ 小委員会においては海洋放出を除く手法についても検討されているとのことだが、大気への放出を含む４つの手法について、具体的にどのような検討、意見交換が行われたのか詳細について聞きたい。
		➢ 今回、国民から提示されている意見・懸念のベースになっているエビデンス（根拠）について、小委員会が提示しているエビデンス（根拠）との食い違いが一部ある。その食い違いはどこにあるのか、その整理結果を広く共有することが、今後の検討の第一歩となる。
	2 説明・公聴会の在り方	➢ 傍聴者も意見交換に参加することを求める。 ➢ 小委員会の委員だけでなく、他の専門家も招聘して行うべきである。トリチウム処理の科学的知見を有している委員が少なく、委員の選出が偏っている。 ➢ 一人当たりの意見表明時間が短すぎるのでもっと長くして欲しい。 ➢ 開催回数 3 回は少なく、10 回以上は開催すべき。 ➢ 説明・公聴会は、せめて風評被害を受けうる海に面した県、市町村で必要である。 ➢ 平日の昼間の開催では多くの人が参加できない。一般の方が参加しやすい休日を選ぶべきである。 ➢ 公聴会には一般層の参加者が少なく、特定の関心傾向の方が多く見られた。こうした方々も国民の一部であるということは間違いないが、より広い層、また、現実的に利害が発生する層からの意見の吸い上げができるよう工夫すべき。 ➢ 今回は公聴会という形式でしたが、漁連や流通・小売、市場関係者、また沿岸の産業に携わる人、関係自治体を含めた、福島県外の関係者を含めた恒常的な委員会を設置し、課題や方向性を討議する場を設けてもいいだろう。
		➢ 「説明会・公聴会・説明資料」では、「風評被害の問題については、～広く国民の皆様から」認識・懸念を「伺った上で～」とあり「５つの方法」について「伺う」ことは除かれていますが何故ですか。
	3 諸外国からの同意	➢ 汚染水を海洋放出の時には、近隣国の承諾を得るのか。
		➢ ロンドン条約に「国際原子力機関が定義し、かつ、締約国によって採択される免除レベルの濃度以上の放射能を有するものについては投棄を検討することを禁止」とあるので国際条約違反になる可能性がある。
⑧その他	1 適切な情報の伝達順序	➢ 風評被害を受けうる我々漁師に先に説明してから、県民に意見を聴くべきではないか。その優先順位に疑問を持っている。

大分類	小分類	具体例
	2 福島への更なる被害の是非	➢ すでに福島事故で放射能汚染を受けた地元住民や一般消費者に追加して負担を負わせるべきではない。
	3 判断・決定主体の適格性	➢ 処分や保管を受け入れるかどうかは自治体ごとに住民投票等を用いて判断すべきであり、国や東電が決めるべきではない。 ➢ 地元福島県の世論調査で 67%が海洋放出に反対している現状において、 原発事故の責任を負うべき政府と東京電力が一方的な判断を下して、海洋放出を行うことは道義的にも許されない ➢ 経産省が後押しする安倍政権が、「国民」に嘘をつき続け、官僚の記憶を無くさせ記録を捨てさせ改竄させ、国民主権をないがしろにする政策を実施しているため風評被害が生じる。国に風評被害を論じる資格はない。 ➢ ALPS 処理水は当初より想定されているべきで、事故処理、廃炉に要する土地の必要性を理由に挙げるのは無責任。 ➢ タスクフォースも小委員会も全く信用できない。再度委員を選びなおして、議論すべき。
	4 ALPS 処理水に関係するもの	➢ トリチウムを捨てるのではなく、資源として活用する方策も考えられるのではないか。 ➢ 原子力規制委員会が汚染水海洋投棄の旗振りをしているのは本末転倒。 ➢ 規制委員会と小委員会とで方針について意思疎通と共有化を行うべき。海洋放出については、規制委員長が「放出しかない」と繰り返し発言したことが、「結論ありきの議論だ」と、結果として大きな不信感を招きました。これは、資源エネルギー庁と本小委員会の責任ではありませんが、政府全体の問題として考えるならば、対応すべき問題であろう。 ➢ トリチウム水処分を早く実施し、他の廃炉作業に注力してほしい。
		➢ ７月に提出された与党提言は、処理手法についてどのように提言したものと受け止めているか。
	5 自社技術等に関するもの	➢ 残存しているストロンチウム等を取り除く装置等の開発提案が自社で可能である。 ➢ 汚染水の増加を止める方法についての提案
⑨ALPS 処理水に関係しないもの		➢ 全国の原子力施設で事故が起きうる。その時無限定に放出が可能とならないよう、原子炉等規制法の告示濃度の厳格化、環境基本法、放射能汚染対処特措法などの放射能基準の精緻化、厳格化を求める。 ➢ 放射能汚染物質デブリについては、地下埋没とするのか、海洋放出とするのか、いずれにしても自然・環境汚染の問題を避けては通れません。これらも膨大な予算を必要とします。タスクフォースチームの検討結果をお聞かせ下さい。 ➢ このような問題を起こす原子力発電に頼ることをそもそも止めるべきである。 ➢ 日本政府は原子炉の耐用年数を 40 年としていますが、WH/GE の技術陣は 25 年としていました。となると、国内原子炉 50 基のうち約半数が既に耐用年数に到達しています。科学的・合理的な裏付けが不十分なままで耐用年数を延長することには賛成できません。

4. 多核種除去設備等で処理した水を処分した際の被ばく影響調査結果の妥当性等評価

4.1 被ばく線量評価方法と結果の概要

過年度に汚染水処理対策委員会の下に設置されたトリチウム水タスクフォースにより、東京電力ホールディングス株式会社の福島第一原子力発電所における汚染水処理対策のうち、多核種除去設備等処理水の最終的な処分の在り方として成立し得る、5 つの処分選択肢が洗い出された。平成 29 年度には、これらの処分選択肢（海洋放出、水素放出、水蒸気放出、地下埋設、地層注入）に「処分せず貯蔵を継続するという選択肢（貯蔵継続）」を加えた 6 つの選択肢（以降、「各選択肢」と呼ぶ。）について、その健康・環境・社会への影響を検討する指標とすべく、各選択肢の被ばく線量評価を実施した。（参考文献 1）

評価にあたっては、内部被ばくの実効線量換算係数については（原子力規制委員会告示第八号）「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」（以降、「告示」と呼ぶ。）（参考文献 2）に記載の数値を用いた。なお、以下の表 4-1 のように、実効線量換算係数はトリチウムの化学形によってその数値は大きく異なっている。そこで評価においては、各選択肢における被ばく経路を勘案し、トリチウムの化学形を仮定することで、内部被ばくの実効線量換算係数を設定した。

表 4-1 トリチウムの化学形と内部被ばくの実効線量換算係数

トリチウムの化学形	実効線量換算係数[μSv/Bq]	
	吸入摂取	経口摂取
元素状水素	1.8×10^{-9}	-
メタン	1.8×10^{-7}	-
水	1.8×10^{-5}	1.8×10^{-5}
有機物（メタンを除く）	4.1×10^{-5}	4.2×10^{-5}
上記以外の化合物	2.8×10^{-5}	1.9×10^{-5}

また、トリチウムの実効線量換算係数以外のパラメータにも不確実性があるため、被ばく線量に大きく影響があると考えられる一部のパラメータは、幅のある値として適用して、被ばく線量を算定するなど、より現実に即したパラメータ値を用いた評価を実施した。

各選択肢の評価を実施した結果、各選択肢における一般公衆（成人の年間の被ばく線量は以下の表 4-2 のとおりであった。

表 4-2 各選択肢における一般公衆（成人）の年間被ばく線量および考慮した不確実性

選択肢	被ばく線量	考慮した不確実性
海洋放出	1 ～ 2×10 μSv/y 以下	海産物による核種の濃縮係数
水素放出	7 ～ 4×10 μSv/y 以下	方位別の被ばく地点、水素の水への変化割合
水蒸気放出	2 ～ 6 μSv/y 以下	方位別の被ばく地点
地下埋設	2×10^{-1} ～ 7 μSv/y 以下	実効拡散係数、収着分配係数
地層注入	6×10^{-7} ～ 2×10^{-5} μSv/y 以下	母岩中の地下水流速
貯蔵継続	1×10 ～ 5×10 μSv/y 以下	被ばく地点（タンクまでの距離）

いずれの選択肢も、一般公衆の年間線量限度である 1mSv と比較すると、極めて低い被ばく線量であった。また以下の図 4-1 で示すように、身の回りの放射線による被ばく線量と比べると、東京・ニューヨーク間の航空機往復による自然放射線の被ばく線量はおよそ 110～160 μSv/回であり（参考文献 3）、これらに比べると各選択肢による被ばく線量は 1 桁低い値であった。また、医療被ばくとして一般的な胸部 X 線撮影での被ばく線量は 60 μSv/回であり（参考文献 4）、これと比べても、いずれの選択肢も低い被ばく線量であった。

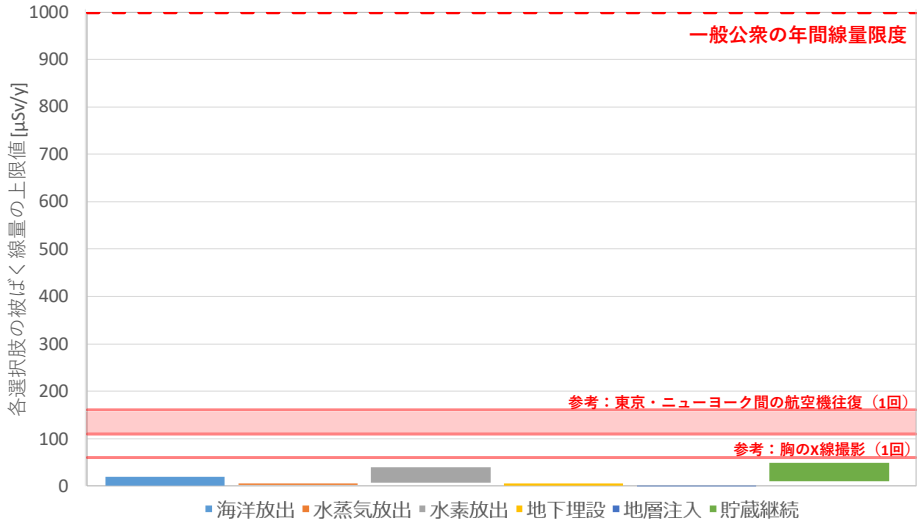

図 4-1 各選択肢による年間の被ばく線量上限値と一般公衆の年間線量限度および
その他の自然、医療被ばくとの比較

4.2 被ばく線量評価方法および評価結果の妥当性についての検討

（1）被ばく線量評価のねらい

過年度におけるトリチウム水タスクフォースでは、追加線量 1mSv/年という一般公衆に対する線量限度を基準に、各処分選択肢（海洋放出、水蒸気放出、水素放出、地下埋設、地層注入）を実行した際に、健康及び環境への影響が科学的に問題にならないことを示した。

しかし、特に以下の観点から、具体的な被ばく線量評価が必要であるとされた。

○ 多核種除去設備等処理水にはトリチウム以外の核種も微量ながら含まれていること

○ 一般公衆への説明を行う際には、具体的にどの程度の被ばくが起こり得るのかの説明が望まれること

そこで平成 29 年度、多核種除去設備等処理水の長期的な取り扱い方法の決定に向けた検討に資するため、各選択肢についての情報整理の一部として、被ばく線量評価を実施した。評価は、極端に保守的な被ばくリスクでの線量を評価することではなく、実際に各選択肢を実行した際にどの程度のリスクがあり得るのかという観点から実施した。これは、以下に示すような、ある程度の現実的な状況を鑑みながら被ばく線量評価を実施し、その結果を得ることで、多核種除去設備等処理水の処分の在り方の検討材料を充実させるという意図が背景にあった。

- トリチウム水タスクフォース報告書では、処分される多核種除去設備等処理水の濃度は、法令によって定められた告示濃度限度以下になるとされていること
- そのような濃度の多核種除去設備等処理水の拡散や移行を考慮した被ばく線量評価の結果は一般公衆の被ばく線量限度である年間 1 mSv を大きく下回ると予想されること
- 処理水に主に含まれる核種はトリチウムであるが、トリチウム以外で含まれる核種についても考慮すること

以上のことを踏まえて、以下を目的として、被ばく線量評価を実施した。

- 規制のための評価ではないため、パラメータ等の設定において、しばしば規制で用いられる様な過度に保守的な条件設定は避け、現実に即した条件から、各選択肢のリスクを把握し、そのリスクレベルを見積ること
- 各選択肢の被ばく線量の大小から、その優劣を比較するのではなく、処分に伴う被ばく線量が一般公衆の被ばく線量限度などと比べて、十分に小さい事を確認すること

なお、被ばく線量評価のためには処分地を仮設定する必要があるため、福島第一原子力発電所での処分を想定して評価を実施した。また、現実的な評価を目指したものの、不確実性・保守性を排除することはできないため、不確実性・保守性を含み、かつ、被ばく線量に大きく寄与すると考えられるパラメータについて調査・検討し、被ばく線量の評価結果は不確実性の幅を持って示すこととした。

（2）被ばく線量評価の妥当性について

今年度の調査では、前述した被ばく線量評価のねらいと平成 29 年度に実施した評価方法

等を照らしあわせ、評価の妥当性についてのレビューを実施した。

【ねらい】

➢ 現実的な条件に沿ったリスクの把握とそのリスクレベルの見積り

【評価方法等】

➢ 例えば、処分選択肢の 1 つである海洋放出に係る被ばく線量評価では、「海洋での希釈を考慮しない」というような、極端に保守的なモデル・パラメータを選択せずに、以下の図 4-2 に示すように「処理水が海水によって、さらに希釈される」という前提で評価を実施している。一方で、海産生物による濃縮は考慮している。

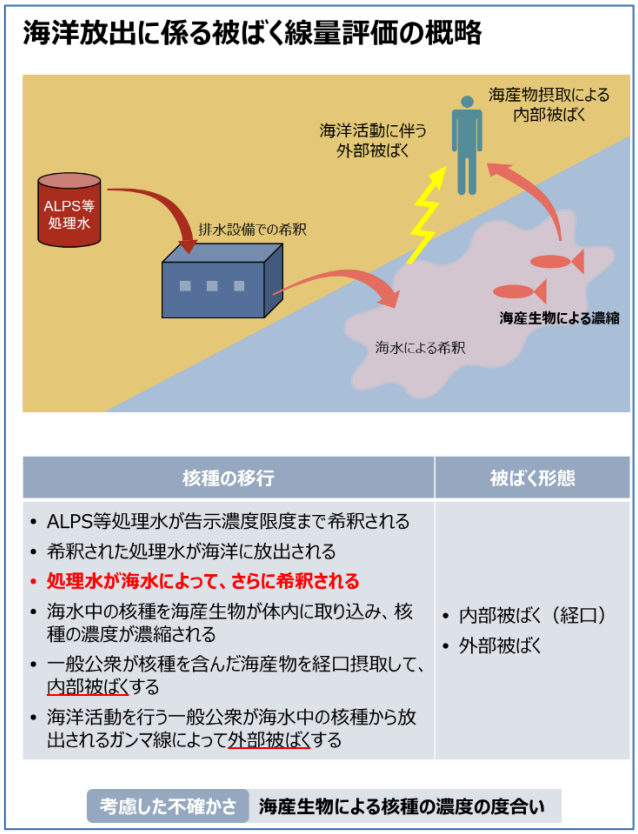

図 4-2 海洋放出に係る被ばく線量評価の概略

【ねらい】

➢ 被ばく線量の大小を影響検討の指標としないこと

【評価方法等】

➢ 多核種除去設備等処理水の長期的な取扱いの決定に向けた検討では、他の技術的論点や社会的影響など多角的な評価に関する情報も重要であり、被ばく線量評価結果はあくまでもその一部情報として位置づけ、各選択肢の被ばく線量の大小を比較することなく、先述の図 4-1 に示すように、一般的な線量限度等に対するリスクの程度が示せるように評価を実施している。

- 一方、各選択肢の被ばく線量評価の条件設定で差が出ることが無いよう、パラメータを共通的に利用する等、以下の表 4-3 に示すように、評価条件を極力統一して評価を実施している。

表 4-3 各評価に関する基本的な条件

多核種除去設備等処理水	総量：80万m^3 トリチウム濃度：420万Bq/L 原水処理量：400m^3/日	
被ばく期間	海洋放出 水素放出 水蒸気放出 地層注入 貯蔵継続	1年間の被ばく線量を評価 （時間に依存しない静的な評価）
	地下埋設	最も被ばく線量が大きくなる時点での放射性物質濃度で、1年間の被ばく線量を評価 （地下水移行という動的な評価）
評価対象地域	処分施設が福島第一原子力発電所に存在すると仮定 ※現時点で処分地は決定していないが、被ばく線量評価にかかる自然環境の条件を設定するために仮定した	
評価対象核種	多核種除去設備等処理水に含まれる48核種 検出下限値の核種は濃度をその下限の値に設定	
評価対象者	一般公衆（成人）	
評価シナリオ	海洋放出 水素放出 水蒸気放出 地下埋設 貯蔵継続	トリチウム水TFで示された平常的な運転時
	地層注入	処分地近傍に断層が存在した場合 ※トリチウムTFの処分概念では「漏れない」

【ねらい】

- 評価結果が確定的であるとの理解を避けること

【評価方法等】

- 被ばく線量評価は自然環境や社会環境、科学的知見の蓄積に大きく依存する。将来の処分時の自然・社会環境を現時点で見通すことは難しく、また科学的な知見も完全では無いことから、不確実な要素を含んでいることを踏まえて、平成 29 年度の評価は概略評価であるとの位置づけを明確にして実施している。例えば、評価対象者を年齢区分に応じて区分して小児や幼児を対象としたり、より高い放射線量を被ばくする可能性のある廃炉作業員を対象としたりはせずに一般公衆（成人）のみとしている。また処分選択肢の 1 つである海洋放出に係る被ばく線量評価では、より精緻な評価を実施するために使用されるような、海洋での拡散や移流を考慮したモデルは使用せずに簡易なモデルが用いられている。
- 不確かな要素を含む被ばく線量を点推定した場合の注意点として、非専門家（一般公衆）があたかもその値が真の値であるとの印象を持つ可能性があることを踏まえて、不確かさの大きいパラメータは幅で考慮して、評価を実施している。例えば、処分選択肢の 1 つである海洋放出に係る被ばく線量評価では、以下の表 4-4 に示すように、パラメータの 1 つである海産生物の濃縮係数について幅を持たせている。

表 4-4 核種iの海産物に対する濃縮係数（K_{Fki}：Bq/kg/Bq/m^3）

核種	海水魚類		海水無脊椎動物		海藻類	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
H-3	1.00×10^{-3}	9.26×10^{-4}	1.00×10^{-3}	9.26×10^{-4}	1.00×10^{-3}	9.26×10^{-4}
Mn-54	1.00	4.00×10^{-1}	5.00×10	3.00×10^{-1}	2.00×10	6.00
Co-60	1.00	1.00×10^{-1}	2.00×10	2.00×10^{-1}	1.00×10	1.00
Ni-63	1.00	1.00×10^{-1}	2.00	1.00×10^{-1}	2.00	2.50×10^{-1}
Zn-65	2.00	1.00	3.00×10^{2}	4.00	2.00×10	1.00
Sr-89	3.00×10^{-3}	5.00×10^{-4}	3.00×10^{-2}	1.00×10^{-3}	2.00×10^{-2}	5.00×10^{-3}
Sr-90	3.00×10^{-3}	5.00×10^{-4}	3.00×10^{-2}	1.00×10^{-3}	2.00×10^{-2}	5.00×10^{-3}
Y-90	2.50×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00	4.00×10^{-2}	5.00	1.00
Y-91	2.50×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00	4.00×10^{-2}	5.00	1.00
Tc-99	8.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00	5.00×10^{-2}	3.00×10	1.00
Ru-106	5.00×10^{-2}	1.00×10^{-3}	2.00	5.00×10^{-2}	2.00	2.00
Rh-106	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-2}	2.00	1.00	5.00×10	2.00
Ag-110m	1.00×10	5.00×10^{-1}	2.00×10^{2}	3.33	5.00	2.00×10^{-1}
Cd-113m	5.00	1.00	2.50×10^{2}	3.00	2.00×10	1.00
Sn-119m	5.00×10^{2}	3.00	5.00×10^{2}	1.00	2.00×10^{2}	1.00×10^{-1}
Sn-123	5.00×10^{2}	3.00	5.00×10^{2}	1.00	2.00×10^{2}	1.00×10^{-1}
Sn-126	5.00×10^{2}	3.00	5.00×10^{2}	1.00	2.00×10^{2}	1.00×10^{-1}
Sb-124	1.00	4.00×10^{-2}	4.00×10^{-1}	5.00×10^{-3}	2.00	2.00×10^{-2}
Sb-125	1.00	4.00×10^{-2}	4.00×10^{-1}	5.00×10^{-3}	2.00	2.00×10^{-2}
Te-123m	1.00	1.00×10^{-2}	1.00×10^{2}	1.00×10^{-1}	1.00×10	1.00×10
Te-125m	1.00	1.00×10^{-2}	1.00×10^{2}	1.00×10^{-1}	1.00×10	1.00×10
Te-127	1.00	1.00×10^{-2}	1.00×10^{2}	1.00×10^{-1}	1.00×10	1.00×10
Te-127m	1.00	1.00×10^{-2}	1.00×10^{2}	1.00×10^{-1}	1.00×10	1.00×10
I-129	3.00×10^{-2}	9.00×10^{-3}	1.00×10^{-1}	3.00×10^{-3}	1.00×10	1.00
Cs-134	1.00×10^{-1}	3.00×10^{-2}	6.00×10^{-2}	9.00×10^{-3}	5.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}
Cs-135	1.00×10^{-1}	3.00×10^{-2}	6.00×10^{-2}	9.00×10^{-3}	5.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}
Cs-137	1.00×10^{-1}	3.00×10^{-2}	6.00×10^{-2}	9.00×10^{-3}	5.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}
Ba-137m	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-1}	7.00×10^{-4}	5.00×10^{-1}	7.00×10^{-2}
Ce-144	5.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}	5.00	1.00×10^{-2}	5.00	1.00×10^{-2}
Pr-144	2.50×10^{-2}	2.50×10^{-2}	1.00	1.00	1.00×10	5.00
Pr-144m	2.50×10^{-2}	2.50×10^{-2}	1.00	1.00	1.00×10	5.00
Pm-146	5.00×10^{-1}	2.50×10^{-2}	7.00	1.00	5.00	1.00
Pm-147	5.00×10^{-1}	2.50×10^{-2}	7.00	1.00	5.00	1.00
Sm-151	5.00×10^{-1}	2.50×10^{-2}	7.00	1.00	5.00	3.00
Eu-152	5.00×10^{-1}	2.50×10^{-2}	1.00×10	5.00×10^{-1}	5.00	3.00
Eu-154	5.00×10^{-1}	2.50×10^{-2}	1.00×10	5.00×10^{-1}	5.00	3.00
Eu-155	5.00×10^{-1}	2.50×10^{-2}	1.00×10	5.00×10^{-1}	5.00	3.00
Gd-153	5.00×10^{-1}	2.50×10^{-2}	7.00	1.00	5.00	3.00
Pu-238	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-3}	3.00	5.00×10^{-2}	4.00	3.50×10^{-1}
Pu-239	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-3}	3.00	5.00×10^{-2}	4.00	3.50×10^{-1}
Pu-240	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-3}	3.00	5.00×10^{-2}	4.00	3.50×10^{-1}
Pu-241	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-3}	3.00	5.00×10^{-2}	4.00	3.50×10^{-1}
Am-241	2.00×10^{-1}	1.00×10^{-2}	2.00×10	1.00×10^{-1}	1.00×10	2.00
Am-242m	2.00×10^{-1}	1.00×10^{-2}	2.00×10	1.00×10^{-1}	1.00×10	2.00
Am-243	2.00×10^{-1}	1.00×10^{-2}	2.00×10	1.00×10^{-1}	1.00×10	2.00
Cm-242	2.00×10^{-1}	1.00×10^{-2}	3.00×10	2.00×10^{-1}	1.00×10	2.00
Cm-243	2.00×10^{-1}	1.00×10^{-2}	3.00×10	2.00×10^{-1}	1.00×10	2.00
Cm-244	2.00×10^{-1}	1.00×10^{-2}	3.00×10	2.00×10^{-1}	1.00×10	2.00

（注）各種文献から、海産物ごとに最大値と最小値を設定した。なお、「海水無脊椎動物」というカテゴリがない文献については、「甲殻類」「軟体動物」「頭足類」の中で最大/最小の値を設定した。

以上の検討により、平成 29 度実施した被ばく線量評価はその目的等に照らして、適切な評価方法等で実施されたことを確認し、被ばく線量評価結果は妥当であるとの結論に至った。この分析に基づいて実施した、有識者への諮問結果については後述する。

4.3 被ばく線量評価結果の提示方法案の検討

平成 29 年度に実施した被ばく線量評価の結果は、多核種除去設備等処理水の長期的な取扱いを決定するための基礎的な情報の一つになり得ると考えられるが、国民や東京電力ホールディングス株式会社にとっても注意を要する内容であり、結果の公表にあたっては極めて慎重な対応が求められる。このため、以下の表 4-5 のように、被ばく線量評価結果の提示方法について複数の案を検討した。

表 4-5 被ばく線量評価結果の提示方法案

案	結果の取扱い方	メリット	デメリット
1	・各選択肢の被ばく線量を横並びに示す。 ・各選択肢に関する評価の概要を 1 件 1 葉にまとめ、同時に示す（別紙と同じ示し方）。	・各選択肢について、一通りの評価内容を公表するため、誠実に議論されているという印象を受けることが期待される。	・いずれの選択肢も極めて線量が低いにも関わらず、各選択肢が順序付けられて見えてしまう可能性がある。（選択肢間の大小に目が行ってしまう）。
2	・「いずれの選択肢も被ばく線量は低かった」ということのみを示す。	・各選択肢を被ばく線量のみで順序付けられることがない。（大小を論じない）。	・具体的な数字が無いため、説明不足感が否めず、不誠実な印象を与える可能性がある。
3	・いずれの選択肢も被ばく線量は「●●～●●μSv/年」の間に収まり、この値は非常に低い値であることを説明する。 ・各選択肢に関する評価の概要を 1 件 1 葉にまとめ、同時に示す。	・各選択肢を被ばく線量のみで順序付けられることがない。（大小を論じない）。 ・各選択肢について、一通りの評価内容を公表するため、一定の誠実さは伝わる。	・公表内容から選択肢ごとの結果が存在することは明らかなので「なぜ各選択肢についての数字を表（オモテ）に出さないのか」という疑念を抱かれる可能性がある。

検討の結果、第 2 案、第 3 案は、内容的に第 1 案に包含されていること、第 1 案をベースに容易に提示方法を作成できることから、第 1 案を被ばく線量評価結果の提示方法として選定した（結果は図 4-1 に示したとおりである）。

4.4 被ばく線量評価方法および評価結果の妥当性に関する有識者ヒアリング

平成 29 年度に実施した被ばく線量評価およびその結果の妥当性について、有識者の見解を得るために、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）の有識者に対してヒアリングを行った（2019 年 1 月 29 日に実施）。その結果、得られた意見を以下に記載する。得た。

【全般について】

- 大気放出と海洋放出において、用いるパラメータを恣意的に変えていなければ、評価の考え方や方法は良いと考えられる。
- 今回の評価結果が選択肢を検討する際の参考情報とすることを念頭に置くと、地域を福島に特定するのではなく、公平に一般的な数値を選ぶことが望ましいだろう。
- 大気放出において排気筒の高さを現実的な高さに設定していることは評価できる。

【Sn（スズ）の影響について】

- 海洋放出においては、濃縮係数の設定の影響で Sn が効いている。海産生物については、海藻でも種類が異なると濃縮係数が大きく変わるため、東京電力が設置許可申請書で用いているものと比較して精査し、評価を実施することも考えられる。
- 船底に付着している貝において Sn の濃縮係数が高いという話を聞いたことがある。そのデータが引用されている可能性がある。評価の際に利用した文献には、特異なものが記載されているとは考えられないが、Sn については何を想定しているのか等、精査することが望まれる。
- Sn の分配係数（Kd）は非常に高いため、Sn の海水から海底土への移行は考慮することが望ましい。
- （評価とは別の話であるが、）測定を工夫して ND 値を下げることも一考である。Sn はゲルマニウム半導体検出器で測定していることから高い数値になっていると考えられる。

【ND（検出限界未満）の取扱いについて】

- 検出限界未満（ND）値の扱いは難しい。今回は概略的な評価を目的としているため、現状の取扱いで良いと考えるが、詳細な検討を実施する場合は、例えば Sn 等については実態を考慮していく必要がある。
- ND 核種の影響が支配的となっている評価結果を比較して何かを論ずることは意味が無いと考えられる。

【被ばく線量評価の横並び実施方法について】

- 「UNSCEAR ハンドブック」を使用して評価を行えば、海洋放出と大気放出を比較する観点も含め、公平性を担保できると考えられる。

以上のような有識者の見解より、平成 29 年度に実施した被ばく線量評価方法および評価

結果は概ね妥当と考えられる。

また、平成 29 年度の被ばく線量評価の代替案の一つとして、有識者から提示されたUNSCEAR の被ばく線量評価モデル（参考文献 5）を用いて、63 核種（トリチウム＋62 核種）を改めて評価するため、UNSCEAR の被ばく線量評価ツールの調整と入力データセットの準備、評価実施に当たっての課題の抽出を行った。（UNSCEAR の被ばく線量評価ツールでは、63 核種をカバーしていなかったため、ツールの調整が必要であった）。

当初、UNSCEAR の被ばく線量評価ツールのサンプルを基に、入力データを変更して、被ばく評価を実施しようとしたが、単純な数値等の変更だけでは適切な評価ができないことが確認された。そこで、63 核種を対象とした被ばく線量評価を実施する場合に、UNSCEAR の被ばく線量評価ツールのサンプルに関して変更すべきと考えられる点および不明点を整理するとともに、それらの点について、JAEA の有識者に対して再度ヒアリングを行い、課題点を明らかにした。

海洋放出および大気放出に関する有識者への確認内容と回答結果をそれぞれ表 4-6、表 4-7 にまとめた。

表 4-6 海洋放出に関する確認点と結果

確認箇所	確認内容	有識者回答
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Radionuclide"には放出される核種（評価対象核種）を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	正しい
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"First progeny"には放出される核種（評価対象核種）の娘核種を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す理解は正しいか。 放出される核種（評価対象核種）は ALPS で除去対象とする 62 核種とトリチウムとしている。娘核種は 62 核種とトリチウムに含まれる核種のみを考慮すれば十分である。 もし、この理解が誤りとすれば、子孫核種をどこまで考慮し、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Is progeny"には"Radionuclide"の核種が"First progeny"の列に含まれる場合には"=TRUE"を入力する。含まれない場合には"=FALSE"を入力する。	

	もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Is noble"には"Radionuclide"の核種が希ガス核種（He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn）の場合には"=TRUE"を入力する。それ以外の核種は"=FALSE"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"B_{fish}"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I3]の TABLE Ⅲの「Recommended value」の値を入力する。"Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"0"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	親子関係であれば親の数値を使っているため左記のとおりでよい。唯一 Rb については 85Rb(n,γ)86Rb であり、Rb の値がないが、Table 3 の括弧書きのように best estimates として類推するか、86Rb の半減期は 18 日であるため、162 半減期経過していることから、1e-50 倍になっていることから 86Rb は計算不要と思われる。
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"B_{crust}"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I3]の TABLE Ⅳの「Recommended value」の値を入力する。"Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"0"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"$B_{molluscs}$"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I3]の TABLE V の「Recommended value」の値を入力する。"Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"0"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Ding"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I14]の Table.F.1 の最も値の大きい「Adult」の値を入力する。"Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"0"を入力する。ただし、化学系が明白な場合には、同表の対応する化学系の場合の「Adult」の値を入力する	正しい

	（UNSCEAR2016 の Excel サンプルではトリチウムの化学系を「Tritiated water.」として評価している）。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"$K_{d,local}$"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I3]の TABLE II の「Recommended Kd value」の値を入力する。"Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"#N/A"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	正しい
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"$K_{d,regional}$"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I3]の TABLE I の「Recommended Kd value」の値を入力する。"Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"#N/A"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	UNSCEAR2016 では ANNEX A のリファレンスとして[I9]が示されていたが、代わりとして ICRP Publ.107 を用いることが可能か。可能であれば、Excel の"λ"には、ICRP Publ.107 の Table A.1 の「Half-life」から計算される崩壊定数（崩壊定数=ln2/「Half-life」）を入力するとして良いか。	可能である。また、入力して良い。
Input Sheet "Other parameters"	以下に示す理解は正しいか。 ある特定の地域（例えば福島）等を考慮しない場合には、Excel シートの"Other parameters"に入力されている値は変更する必要が無い。 もし、この理解が誤りとすれば、どのパラメータをどのように変更すればよいか。	正しい
calculationSheet "Intermediate calcs"	"Disch'g'd r'nuclide"には何を入力すべきか。Sheet "Radionuclides"の"Radionuclide"および"First progeny"とどのように関係するのか。	シートから類推するに Disch'g'd r'nuclide'には親を入力、Progeny にはその子孫を順に入れればよいと考えられる。
	"Progeny"には何を入力すべきか。Sheet "Radionuclides"の"Radionuclide"および"First progeny"とどのように関係するのか。	

calculation Sheet "Intermediate calcs"	以下に示す理解は正しいか。 ・C 列、D 列には UNSCEAR2016 の ANNEX A の Table A4 にある Equation(M38)を用いる。 ・E 列、F 列には Equation(M41)を用いる。 ・I 列、J 列には Equation(M45)を用いる。 ・K 列、L 列、M 列、N 列、O 列、P 列には Equation(M46)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	正しい 正しい
calculation Sheet "Intermediate calcs"	以下に示す理解は正しいか。 ・G 列では、放射平衡にある娘核種および Ba-137m 以外は Equation(M43)を用いる。 ・放射平衡にある核種は、親核種と同じ値とする（1 つ上のセルの値を参照する）。 ・Ba-137m は Cs-137 の値に収率を掛ける（1 つ上のセルの値に収率を掛ける）。	
calculation Sheet "Intermediate calcs"	以下に示す理解は正しいか。 セル G8-G13、G19、G20、G36、G40、G45 は、Excel の数式（関数”if”の 2 番目の引数）が規則的で無いが、62 核種とトリチウムで評価する際、他の G 列のセルに入力されている数式のように変更しても結果に影響しない。	
calculation Sheet "Intermediate calcs"	以下に示す理解は正しいか。 ・H 列では、放射平衡にある娘核種および Ba-137m 以外は Equation(M44)を用いる。 ・放射平衡にある核種は、親核種と同じ値とする（1 つ上のセルの値を参照する）。 ・Ba-137m は Cs-137 の値に収率を掛ける（1 つ上のセルの値に収率を掛ける）。	
calculation Sheet "Intermediate calcs"	以下に示す理解は正しいか。 セル H8-H13、H19、H20、H36、H40、H45 は、Excel の数式（関数”if”の 2 番目の引数）が規則的で無いが、62 核種とトリチウムで評価する際、他の H 列のセルに入力されている数式のように変更しても結果に影響しない。	
calculation Sheet "Intermediate calcs"	以下に示す理解は正しいか。 セル Q8-Q13、Q19、Q20、Q36、Q40、Q45 は、Excel の数式（関数”if”の 2 番目の引数）が規則的で無いが、62 核種とトリチウムで評価する際、他の G 列のセルに入力されている数式のように変	

	更しても結果に影響しない。	正しい
calculation Sheet "Intermediate calcs"	以下に示す理解は正しいか。 セル Q28 の Excel の数式（関数”if”の 2 番目の引数）が規則的で無いのは、1 つ上のセルにある Rn-222 の表面密度について、特別に 0 と仮定しているためである。	
result Sheet "Individual doses"	以下に示す理解は正しいか。 "Disch'g'd r'nuclide"と"Progeny"には"Intermediate calcs"と同じ入力にする。	
result Sheet "Individual doses"	以下に示す理解は正しいか。 ・C 列、D 列、E 列には UNSCEAR2016 の ANNEX A の Table A4, Parameters and Equation list: Marine environment, P116 にある Equation(M49)を用いる。 ・Y-90、Rh-106、Ba-137m は親核種の線量換算係数に娘核種の寄与も含まれるため、0 としている。 ・これは"Intermediate calcs"にある"C_{fish}"、"C_{crust}"、"$C_{molluscs}$"の娘核種の値が、親核種に比べてオーダーで小さいため、この寄与を含めなくとも過小評価にはならないためである。	
result Sheet "Individual doses"	上記の理解が正しいとした際、以下に示す理解は正しいか。 62 核種とトリチウムで評価を実施する際も、親核種の線量換算係数に娘核種の寄与も含まれ、かつ、"Intermediate calcs"にある"C_{fish}"、"C_{crust}"、"$C_{molluscs}$"の娘核種の値が、親核種に比べてオーダーで小さければ、0 とする。	
result Sheet "Individual doses"	以下に示す理解は正しいか。 ・F 列には Equation(M50)を用いる。 ・G 列には Equation(M48)を用いる。 ・H 列には Equation(M51)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
result Sheet "Collective doses"	以下に示す理解は正しいか。 "Disch'g'd r'nuclide"と"Progeny"には"Intermediate calcs"と同じ入力にする。	
result Sheet "Collective doses"	以下に示す理解は正しいか。 ・C 列、G 列には UNSCEAR2016 の ANNEX A の Table A4, Parameters and Equation list: Marine environment, P120 にある Equation(M52)を用いる。 ・D 列、E 列、H 列、I 列には Equation(M53)を用いる。	

result Sheet "Collective doses"	C-E 列、G-I 列では Y-90 のみが 0 と入力されている。これは "Individual doses"の計算と同様の理由と思われるが、Rh-106、Ba-137m では数式を用いているのはなぜか。	数式を用いているものの結果は「0」であるため影響はないと考えられるが、念のため UNSCEAR に確認することが妥当
result Sheet "Collective doses"	以下に示す理解は正しいか。 ・F 列、J 列には Equation(M54)を用いる。	正しい
method	"Individual doses"と"Collective doses"で計算される線量率は単位放出率あたりであるため、具体的な線量率を求めるためには、放出する物質の放出速度と核種毎の濃度を乗算する必要がある。62 核種とトリチウムで評価する場合、測定されている各核種の濃度を掛ければよいか。娘核種について特別な取り扱いをする必要は無いと考えてよいか。	よい
method	以下に示す理解は正しいか。 我々は、サンプルとして公開されている Excel に対して、対象核種を追加して、被ばく線量を評価しようとしている。 その際、単純に行を追加して評価しようとした場合、セルの参照範囲を変更する必要があると考えている。 しかし、そのような Excel の構造を修正する作業では、ミスを犯す可能性をはらんでいる。 そこで、以下の様に対応したいと考えているが、問題ないか。 ・サンプルとして公開されている Excel を複数準備する。 ・行を追加することなく、評価したい核種を入力する。（複数ファイル作成する） ・なお、多くの核種を複数のファイルにふり分ける際には、親娘関係にある核種が別ファイルに分かれることが無い様に注意する。（親娘関係にある核種は同一のファイルに入力する）	正しい
method	以下に示す理解は正しいか。 UNSCEAR2016 ANNEX A の 117 ページ、Table A4 の Equation(M44)に含まれる"$\Lambda_{l,r}$：Equation(M41)"は"$\Lambda_{r,i}$：Equation(M42)"が正しい。	

表 4-7 大気放出に関する確認点と結果

確認箇所	確認内容	有識者回答
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Radionuclide"には放出される核種（評価対象核種）を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	正しい
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"First progeny"には放出される核種（評価対象核種）の娘核種を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す理解は正しいか。 放出される核種（評価対象核種）は ALPS で除去対象とする 62 核種とトリチウムとしている。娘核種は 62 核種とトリチウムに含まれる核種のみを考慮すれば十分である。 もし、この理解が誤りとすれば、子孫核種をどこまで考慮し、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Is progeny"には"Radionuclide"の核種が"First progeny"の列に含まれる場合には"=TRUE"を入力する。含まれない場合には"=FALSE"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Is noble"には"Radionuclide"の核種が希ガス核種（He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn）の場合には"=TRUE"を入力する。それ以外の核種は"=FALSE"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"Absorption type"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I12]の Table.2 の「Lung absorption Type(s)」の右肩に「b（Recommended default absorption Type）」と付記されている記号（F, M, S のいずれか）を入力する。「b」が付記されていない場合"-"を入力する。"Is nobel"が"TRUE"の場合には"n/a"を入力する。	

	もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	正しい
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"D_{inh}"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I14]の Table.G.1 の「Type」と"Absorption type"が一致する「Adult」の値を入力する。"Absorption type"が"-"の場合は、最も値の大きい「Type」の「Adult」の値を入力する。 "Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"0"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"$D_{ex,cloud}$"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス［P2]の Table A1 の「Effective dose」の「Reference adult」の値を入力する。[P2]に値がない場合には[E2]で補完する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"$D_{ex,deposit}$"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス［P2]の Table A3 の「Reference adult」の値を UNSCEAR ANNEX A の式(9)の e^{dot}_{dep} として計算して入力する。[P2]に値がない場合には[E2]で補完する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"D_{ing}"には、UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[I14]の Table.F.1 の最も値の大きい「Adult」の値を入力する。 "Radionuclide"の核種に対応する値がリファレンスに記載されていない場合には"0"を入力する。ただし、化学系が明白な場合には、同表の対応する化学系の「Adult」の値を入力する（UNSCEAR2016 の Excel サンプルではトリチウムの化学系を「Tritiated water.」として評価している）。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	

Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"n"には、"Radionuclide"の核種が"H-3"または希ガス（"Is noble"が"TRUE"）の場合には"1.2"を入力する。 "Radionuclide"の核種が"C-14"の場合には"1.4"を入力する。 "Radionuclide"の核種がその他の場合には"1.42"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	正しい
Input Sheet "Radionuclides"	以下に示す入力の規則は正しいか。 Excel の"V_t"には、"Radionuclide"の核種が"H-3"または"C-14"または希ガス（"Is noble"が"TRUE"）の場合には"0"を入力する。 "Radionuclide"の核種がその他の場合には"0.002"を入力する。 もし、この入力の規則が誤りとすれば、どのように Excel に入力すればよいか。	
Input Sheet "Radionuclides"	UNSCEAR2016 では ANNEX A のリファレンスとして[I9]が示されていたが、代わりとして ICRP Publ.107 を用いることが可能か。可能であれば、Excel の"λ"には、ICRP Publ.107 の Table A.1 の「Half-life」から計算される崩壊定数（崩壊定数=ln2/「Half-life」）を入力するとして良いか。	可能である。また、入力するとして良い。
Input Sheet "Other parameters"	以下に示す理解は正しいか。 ある特定の地域（例えば福島）等を考慮しない場合には、Excel シートの"Other parameters"に入力されている値は変更する必要が無い。 もし、この理解が誤りとすれば、どのパラメータをどのように変更すればよいか。	正しい
calculation Sheet "Concentrations" result Sheet "Ind dose in plume" Sheet "Ind dose deposit" Sheet "Ind dose food" Sheet "Total doses"	"Disch'g'd r'nuclide"には何を入力すべきか。Sheet "Radionuclides"の"Radionuclide"および"First progeny"とどのように関係するのか。	シートから類推するに Disch'g'd r'nuclide'には親を入力、Progeny にはその子孫を順に入れればよいと考えられる。
	"Progeny/species"には何を入力すべきか。Sheet "Radionuclides"の"Radionuclide"および"First progeny"とどのように関係するのか。	

calculation Sheet "Concentrations"	以下に示す理解は正しいか。 ・C-G 列の"C_{air}(Bq m^{-3})"の計算では、放射平衡にある娘核種および Cs-135、Cs-138、Ba-137m 以外は Equation(T1)を用いる。 ・Cs-135, Cs-138 の計算には Equation(T2)を用いる。 ・放射平衡にある核種は、親核種と同じ値とする（1 つ上のセルの値を参照する）。 ・Ba-137m は Cs-137 の値に収率を掛ける（1 つ上のセルの値に収率を掛ける）。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	正しい
calculation Sheet "Concentrations"	以下に示す理解は正しいか。 "C_{air}(Bq m^{-3})"を計算している C 列、D 列、E 列、F 列、G 列の 10-16、21、30、32、38、39、49 行目は、Excel の数式（関数”if”の 2 番目の引数）が規則的で無いが、62 核種とトリチウムで評価する際、他のセルに入力されている数式のように変更しても結果に影響しない。	
calculation Sheet "Concentrations"	以下に示す理解は正しいか。 H-L 列の"d(Bq m^{-2} s^{-1})"の計算では Equation(T3)を用いる。この計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
calculation Sheet "Concentrations"	以下に示す理解は正しいか。 M-Q 列の"$C_{sw,HTO}$(Bq L^{-1})"の計算では Equation(T7)を用いる。	
calculation Sheet "Concentrations"	以下に示す理解は正しいか。 R-V 列の"$C_{pasture}$(Bq kg^{-1})"の計算では、 ・"Progeny/species"が"H-3(HTO)"の場合は、Equation(T8)を用いる。 ・"Progeny/species"が"H-3(OBT)"の場合は、Equation(T11)を用いる。 ・"Disch'g'd r'nuclide"が"C-14"の場合は、Equation(T5)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
calculation Sheet "Concentrations"	以下に示す理解は正しいか。 C-G 列の"C_{cereal}"の計算、H-L 列の"C_{veg}"の計算、M-Q 列の"C_{milk}"の計算、R-V 列の"C_{meat}"の計算では、	

	・"Progeny/species"が"H-3(HTO)"の場合は、Equation(T8)を用いる。 ・"Progeny/species"が"H-3(OBT)"の場合は、Equation(T11)を用いる。 ・"Disch'g'd r'nuclide"が"C-14"の場合は、Equation(T5)を用いる。 ・その他の核種の場合は、Equation(T4)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	正しい
result Sheet "Ind dose in plume"	以下に示す理解は正しいか。 C-G 列の計算では、 ・"Progeny/species"が"H-3(HTO)"あるいは"H-3(OBT)"の場合は"0"とする（吸入摂取は考慮しない）。 ・"Progeny/species"が"Y-90"の場合は、線量換算係数"D_{inh}"を"0"に設定せず、結果を"0"とする。 ・Rn-222 の娘核種の場合は、線量換算係数"D_{inh}"を"0"に設定せず、結果を"0"とする。 ・その他の核種の場合は、Equation(T13)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
result Sheet "Ind dose in plume"	以下に示す理解は正しいか。 H-L 列の計算では、 ・Rn-222 の娘核種の場合は、線量換算係数"$D_{ex,cloud}$"を"0"に設定せず、結果を"0"とする。 ・その他の核種の場合は、Equation(T15)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
result Sheet "Ind dose deposit"	以下に示す理解は正しいか。 C-G 列の計算では、 ・Rn-222 の娘核種の場合は、吸入摂取と比較して無視できるため、結果を"0"とする。 ・その他の核種の場合は、Equation(T16)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
result Sheet "Ind dose food"	以下に示す理解は正しいか。 C-V 列の計算では、 ・Rn-222 の娘核種以外の場合は、Equation(T17)を用いる。	

	・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	正しい
result Sheet "Ind dose food"	以下に示す理解は正しいか。 W-AA 列の計算では、 ・Rn-222 の娘核種以外の場合は、Equation(T18)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
result Sheet "Ind dose food"	Rn-222 の娘核種の場合は、経口摂取による線量を無視できるとして、結果が"0"とされている。UNSCEAR2016 ANNEX A の Table A5 によると、無視できる場合は Rn-222 よりも長寿命の娘核種とされているが、なぜ Po-218 まで無視しているのか。	Rn-222 由来の短寿命核種は、食物に取り込まれて人間の口に入るまでに完全減衰することから、そもそも取り扱わないものと考えられる。
result Sheet "Total doses"	以下に示す理解は正しいか。 C-G 列の計算では、Equation(T19)を用いる。この計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	正しい
result Sheet "Total doses"	以下に示す理解は正しいか。 ・H-K、N-Q、T-W 列の計算では、Equation(T20)を用いる。 ・L 列、R 列、X 列の計算では、Equation(T21)を用いる。 ・M 列、S 列、Y 列の計算では、Equation(T22)を用いる。 ・これらの計算は、核種（62 核種とトリチウム）によって Excel の数式を修正する必要がない。	
method	"Individual doses"と"Collective doses"で計算される線量率は単位放出率あたりであるため、具体的な線量率を求めるためには、放出する物質の放出速度と核種毎の濃度を乗算する必要がある。62 核種とトリチウムで評価する場合、測定されている各核種の濃度を掛ければよいか。娘核種について特別な取り扱いをする必要は無いと考えてよいか。	考えてよい。
method	以下に示す理解は正しいか。 我々は、サンプルとして公開されている Excel に対して、対象核種を追加して、被ばく線量を評価しようとしている。 その際、単純に行を追加して評価しようとした場合、セルの参照範囲を変更する必要があると考えている。 しかし、そのような Excel の構造を修正する作業では、ミスを犯	正しい。また、問題ない。

	す可能性をはらんでいる。 そこで、以下の様に対応したいと考えているが、問題ないか。 ・サンプルとして公開されている Excel を複数準備する。 ・行を追加することなく、評価したい核種を入力する。（複数ファイル 作成する） ・なお、多くの核種を複数のファイルにふり分ける際には、親娘関係 にある核種が別ファイルに分かれることが無い様に注意する。 （親娘関係にある核種は同一のファイルに入力する）	
method	以下に示す理解は正しいか。 UNSCEAR2016 ANNEX A の 106 ページ、Table A2 の Equation(T22)以下の”Value”に含まれる"$S_{E(atmos),r,i}$(regional)：Equation(T21)"は"$S_{E(atmos),r,i}$(regional)：Equation(T22)"が正しい。	正しい

また、上記の確認において解決できなかった課題について以下の表 4-8 および表 4-9 にまとめた。これらの課題については、今後、UNSCEAR から直接回答を入手する必要がある。

表 4-8 海洋放出に係る評価の課題点

確認箇所	課題点
Input Sheet "Radionuclides"	UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[E2]のどの値をどのように処理して Excel の"$D_{ex,deposit}$"の入力とするべきかが明確ではない。
calculation Sheet "Intermediate calcs"	放射平衡にある娘核種の Q 列での計算について、 ・beach での表面密度で平衡を仮定しているが、娘核種の"$K_{d,local}$"が親核種のものよりも大きい場合には、親核種との放射平衡による表面密度と、I 列で計算した C(t)を含む Equation(M47)で計算した値を足し合せる必要があると考えられるが、その様な計算にはなっていない。

表 4-9 大気放出に係る評価の課題点

確認箇所	課題点
Input Sheet "Radionuclides"	UNSCEAR2016 ANNEX A のリファレンス[E2]のどの値をどのように処理して Excel の"$D_{ex,cloud}$"の入力とするべきかが明確ではない。
Input Sheet "Radionuclides"	62 核種とトリチウムで評価する場合に不足する、Excel の"$C_{cereal,unit}$"、"$C_{veg,unit}$"、"$C_{milk,unit}$"、"$C_{meat,unit}$"の値が明確ではない。

（4 章参考文献）

1) 株式会社三菱総合研究所、平成 29 年度原子力の利用状況等に関する調査事業（多核種除去設備等処理水の処分技術等に関する調査研究）、調査報告書、2018 年 3 月
2) 原子力規制委員会告示第八号：「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」、平成 27 年 8 月 31 日
3) 環境省、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所、放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 平成 28 年度版 ver.2017001
4) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所、CT 検査など医療被ばくの疑問に答える医療被ばくリスクとその防護についての考え方 Q&A、（http://www.nirs.qst.go.jp/rd/faq/medical.html）、2013 年 9 月 27 日更新
5) SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION、UNSCEAR 2016、Report to the General Assembly, with Scientific Annexes、2017

5. 多核種除去設備等処理水に関連するデータの収集・分析

2018 年 8 月に開催された多核種除去設備等処理水の取扱いに係る説明・公聴会では、事前に実施された意見の募集および説明・公聴会の当日の意見表明において、トリチウムによる健康影響に関する質問や不安、疑念が数多く呈された。これらを踏まえ、トリチウムによる健康影響に関連する事項について国内外の公的な文書を中心に調査、整理した。結果を以下（1）～（13）項に示す。

(1) カナダにおけるトリチウムに関する飲料水基準
(2) 英国におけるトリチウムに関する飲料水基準
(3) フランスにおけるトリチウムに関する飲料水基準
(4) EU におけるトリチウムに関する飲料水基準
(5) カナダにおけるトリチウムの気体放出基準
(6) フランスにおけるトリチウムの気体放出基準
(7) 海外（旧西ドイツ、スイス、英国、旧ソ連、インド）におけるトリチウム被ばく事故による死傷事例
(8) ドイツとフランスの再処理工場周辺の小児白血病の増加事例、及び原子力発電所周辺の小児がんの増加事例
(9) カナダのピッカリング原子力発電所周辺での健康影響
(10) カナダの原子力発電所周辺での新生児・小児健康被害
(11) カナダにおけるトリチウムによる影響に関する動物実験事例
(12) トリチウムの放射線の生物学的影響
(13) トリチウムによる身体・組織への影響

(1) カナダにおけるトリチウムに関する飲料水基準

カナダでは保健省（Health Canada）が、飲料水の水質に係るガイドラインを発表しており、その中で放射性物質の最大許容濃度（MAC : Maximum Acceptable Concentrations）が設定されている。同省の 2009 年のガイドライン（参考文献 1）では、飲料水中のトリチウムの MAC は 7,000Bq/L と設定されている。また、ガイドラインで示されている MAC を踏まえ、カナダの各州はトリチウム基準値を独自に設定することができる（参考文献 2）。

オンタリオ州では、"Ontario Drinking Water Quality Standard"（2007 年）において、MAC が 7,000Bq/L と定められている。この MAC について助言を得ること等を目的として、オンタリオ州の環境相が直接、有識者の審議会に対し、検討を要請した。その検討結果及び提言が、環境相に対して報告された（参考文献 3）。有識者は最大許容濃度を 20Bq/L にすることを提言したが、2009 年 6 月にカナダ原子力安全委員会（CNSC）が公表した「核物質処理施設の運転認可更新申請に係る経過記録」（参考文献 4）によれば、「CNSC はオンタリオ州の環境相の提言に対する対応を注視し、オンタリオ州政府が 20Bq/L という基準を採用する場合には、同省と協議の上で、CNSC の許認可に対する潜在的な影響について特定する」とされている。オンタリオ州のトリチウムの MAC を改めて確認したところ、その数値は 7,000Bq/L となっており（参考文献 5）、オンタリオ州政府は有識者の提言を採択していない。

なお、オンタリオ州が、提言された基準値を採用するかどうか判断する際には、CNSC（及びカナダ政府）は関与しないと考えられる。また、CNSC がオンタリオ州政府と協議したか否かについての情報は確認できなかった。

(2) 英国におけるトリチウムに関する飲料水基準

欧州連合（EU）では 2013 年に、公衆の健康を保護するために飲料水中の放射性物質の基準に係る要件を定めた「理事会指令（COUNCIL DIRECTIVE 2013/51/EURATOM of 22 October 2013）」（参考文献 6）が公布された。同指令では加盟国が遵守すべき飲料水に関する規定があり、この規定を遵守するために各国は国内法を整備することとされている。なお理事会指令で示された規定より厳しい規定を、各国で独自に設定することができる。

この理事会指令に基づき、イングランド及びウェールズの水道水を対象とした「2016 年水供給（水質）規則」（参考文献 7）が策定された。これらいずれの地域においても、飲料水中のトリチウムの基準値として遵守すべき数値は規定されていないが、100Bq/L を超過するトリチウム濃度が検出された場合は、トリチウム以外の人工放射性核種の存在を調査しなければならないことが規定されている 。

(3) フランスにおけるトリチウムに関する飲料水基準

フランスにおいても前述した英国と同様に、飲料水中の放射性物質の基準に係る要件を定めた 1998 年の EU 指令に基づき、飲料水中の放射性物質の基準が設定されている。EU 指令は「ミネラルウォーターを除く飲料水に関する 2001 年 12 月 20 日のデクレ」（参考文献 8）により国内法化され、その後、同デクレは公衆衛生法典に再編され、同法典の付属書において、トリチウムについては 100Bq／L が設定された。その後の法改正により、現在は連帯・保健省の省令（アレテ）「生水と飲料水の制限と品質基準に関する 2007 年 1 月 11 日のアレテ」（参考文献 9）において定められている。なお、トリチウムのモニタリングや、100Bq/L を超えた場合の対応については、「飲料水の放射線学的品質の管理に関する 2004 年 5 月 12 日のアレテ」（参考文献 10）に定められている。

2007 年 1 月 11 日のアレテで、100Bq/L という数値は、飲料水中のトリチウムの基準値として遵守すべき数値として規定されているわけではなく、同値を超過するトリチウム濃度が検出された場合は、トリチウム以外の人工放射性核種の存在を調査しなければならないことが規定されている 。

原子力安全機関（ASN）、放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）、厚生省の 3 者によって 2009 年 1 月に取りまとめられた 2005～2007 年のフランスの水質に関する報告書（参考文献 11）では、トリチウムが 100Bq/L 以上に水中に存在することは、人為的な汚染の兆候であるとみなされ、異常事態が発生しており、環境調査と対策を講じる必要性があるとの判断につながるとされている。

(4) EU におけるトリチウムに関する飲料水基準

前述したように、欧州連合（EU）では 2013 年に、公衆の健康を保護するために飲料水中の放射性物質の基準に係る要件を定めた「理事会指令（COUNCIL DIRECTIVE

2013/51/EURATOM of 22 October 2013)」(参考文献 12)が公布された。同指令では加盟国が遵守すべき飲料水に関する規定があり、この規定を遵守するために各国は国内法を整備することとされている。飲料水中のトリチウムの基準値として遵守すべき数値は規定されていないが、100Bq/L を超過するトリチウム濃度が検出された場合は、トリチウム以外の人工放射性核種の存在を調査しなければならないことが規定されている 。なお、理事会指令で示された規定より厳しい規定を、各国で独自に設定することができる。

この 100Bq/L は EU 指令においてはパラメータ値とされている。以下のように EU 指令の冒頭の(7)では「パラメータ値は、限界値とみなされてはならない」とあり、第 2 条(4)で「パラメータ値」の定義が規定されている。また、第 5 条 1 では、「EU 加盟国は 100Bq/L に従ってパラメータ値を設定しなければならない」とされており、第 8 条では国内法制化について規定されている。

冒頭(7) パラメータ値は、限界値とみなされてはならない。人の消費を意図した水のモニタリングがパラメータ値に適合しないことを示す場合には、関係加盟国は、措置を必要とするような人の健康に危険をもたらすものかどうかを考慮し、必要な場合には、放射線保護の観点から人の健康の保護のための要求事項に適合するレベルまで水質を改善するための修復措置をとるべきである。
第 2 条　定義 第 2 条(4) 「パラメータ値」は、人の消費を意図した水における放射性物質の値を意味し、この値を超過した場合、加盟国は、人の消費を意図した水における放射性物質の存在が措置を必要とする危険を及ぼすか評価しなければならず、必要であれば是正措置を講じ、放射線防護の観点から人の健康を保護するための要求事項に適合するレベルまで水質を改善しなければならない。
第 5 条 1 加盟国は、附属書 I に従って人の消費を意図した水における放射性物質のモニタリングのために適用可能なパラメータ値を設定しなければならない。 ※附属書 I「人の消費を意図した水におけるラドン、トリチウム及び指標線量のパラメータ値」にトリチウム 100Bq/L の記載あり

出所）EU 指令の関連する条文の和訳、 (公財)水道技術研究センターの資料より抜粋

なお、100Bq/L というパラメータ値の算出理由及び算出方法に関する情報については確認することができなかった。以下では、同値の設定経緯について記載する。

2013 年の EU 指令（理事会指令）によれば、以下の文書・提言等を考慮して同指令が作成されたとされている。

- 欧州原子力共同体（EURATOM）設立条約（特に 31、32 条）（参考文献 13）
- EURATOM 設立条約の 31 条に則り、EU 加盟国の専門家で構成された科学技術委員会によって任命された人々の意見を聴取した上で、欧州委員会（EC）が行った提案
- 欧州経済社会評議会 （EESC）の意見（参考文献 14）

これらの文書・提言によれば、専門家の意見をふまえた EC の提案、EESC の意見に基づき、最終的には欧州理事会（European Council）がパラメータ値を決定したとされている。なお、EURATOM 条約では、「安全性を十分に確保できる最大許容線量」、「被ばく及び汚染の最大許容レベル」といった意味で、「基礎的な基準（basic standards）」を設定することが規定されている。また、2013 年の EU 指令の条文の冒頭では、「理事会指令（COUNCIL DIRECTIVE 96/29/EURATOM of 13 May 1996）」（参考文献 15）に則って、公衆の被ばくが合理的に達成可能な限り低く（ALARA）保たれなければならないことや、指標としての水質基準の設定及びモニタリングが必要であることが示されている。

また、この EU 指令のパラメータ値については、カナダ原子力安全委員会（CNSC）が、各国の飲料水中のトリチウム基準値について調べた報告書（参考文献 16）において、以下のような見解を示している。

トリチウムのパラメータ値（100Bq/L）は有効なスクリーニング値であり、環境中に放出された他のより有害な人工放射性核種が存在する可能性を示すものである。トリチウム濃度及び総線量(Total Indicative Dose：TID)とは、（パラメータ値及び TID を）超過した際に、放射線に係る潜在的な問題を示すものであり、限界値と見なされてはいけない[3]。

実際、2013 年の EU 指令の附属書 I の脚注では、「トリチウム濃度の上昇により、他の人工放射性核種の存在が示唆されている可能性がある。トリチウム濃度がパラメータ値を超過する場合は、他の人工放射性核種が存在しないか分析しなければならない」と示されている。また、EC が開催したトリチウム等の放出に関するセミナーの会議記録[4]には、専門家らの見解として、「100Bq/L というパラメータ値は、飲用可能な限界値ではなく、調査レベル（investigation level）とされるべきものである」ことが示されている。

【参考】関連する文書の和訳（一部意訳）

- EURATOM 設立条約
  - 30 条
    電離放射線によって引き起こされる危険から労働者及び公衆の健康を守るために、EURATOM において「基礎的な基準（basic standards）」が設定されるものとする。
    「基礎的な基準」の意味：
    - 安全性を十分に確保できる最大許容線量.
    - 被ばく及び汚染の最大許容レベル
    - 労働者の健康の監視を規定する基本原則
  - 31 条

---

[3] ISTISAN, Istituto Superiore di Sanità, 2000. Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption: calculation of derived activity concentrations. Italy. から、CNSC が引用した一文。

[4] EC が、最新の知見を有する科学者を招いて開催するセミナー。セミナーで出された結論は、欧州の放射線防護に係る法制度を見直す際の、重要な情報と見なされる。
RADIATION PROTECTION NO 152-- EU Scientific Seminar 2007“Emerging Issues on Tritium and Low Energy Beta Emitters”

EU 加盟国における科学の専門家、とりわけ公衆衛生に係る専門家で構成された科学技術委員会によって任命された人々の意見を聴取した上で、EC が「基礎的な基準」を策定するものとする。EC は、この基準に関して EESC から意見を聴取するものとする。

欧州議会との協議の後に欧州理事会は、科学技術委員会や EESC からの意見、EC の提案に基づき、「基礎的な基準」を設定するものとする。欧州理事会は、特定多数決による採決を行うものとする。

- 32 条

  欧州委員会（EC）あるいは加盟国の要請があれば、本条約 31 条の手続きに則り、「基礎的な基準」の改定あるいは補完を行うことができる。

  EC は、加盟国からのいかなる要請についても検討するものとする。

- EESC の意見

  (1.2.4)

  （100Bq/L という）トリチウムのパラメータ値は、世界保健機関（WHO）の飲料水水質ガイドライン（2008 年第 3 版[5]）で設定されたガイダンスレベルの百分の一である。WHO の値よりはるかに低いこのパラメータ値は、不当に制約を加えるものではなく、他の問題に対する有力な指標となりうる。ただし、将来の技術動向に応じて値が見直される必要がある。

- 2013 年の EU 指令のうち、関連する条文

  (1)

  （前略）理事会指令 96/29/Euratom に則り、電離放射線からのリスクを含む行為による、公衆全体の被ばくへの寄与は、合理的に達成可能な限り低く（as low as reasonably achievable：ALARA）保たなければならない。

  (2)

  人の健康には飲料水の水質が重要であることを考慮すると、コミュニティーレベルで指標関数となる水質基準を設けることや、基準を遵守するモニタリングを実施することが必要である。

(5) カナダにおけるトリチウムの気体放出基準

カナダでは、気体廃棄物のトリチウムに対し、総量基準が設定されている。原子力安全管理法（NSCA）の下、事業者が各原子力発電所から放出される核種ごとに導出した放出限度（DRL）の上限値を設定し（参考文献 17）、カナダ原子力安全委員会（CNSC）がそれを承認することとされている。

各事業者が設定している、発電所外へのトリチウム（気体廃棄物）の放出限度は、以下の表 5-1 のとおりである。

---

[5] 最新版は、2011 年に公表された第 4 版。
http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/dwq_guidelines/en/

表 5-1 カナダの各発電所の、年間トリチウム（気体廃棄物）放出限度

事業者	原子炉	炉型	運開年	設備容量（万kW）	原子力発電所	年間限度（TBq）
ブルース・パワー社	ブルース1	CANDU 炉（PHWR）	1977	760	ブルースA	1.98×10^5
	ブルース2	同上	1976	730		
	ブルース3	同上	1977	750		
	ブルース4	同上	1978	750		
	ブルース5	同上	1984	817	ブルースB	3.16×10^5
	ブルース6	同上	1984	817		
	ブルース7	同上	1986	817		
	ブルース8	同上	1987	817		
オンタリオ・パワー・ジェネレーション社	ダーリントン1	同上	1990	878	ダーリントン	8.5×10^5 (HT)
	ダーリントン2	同上	1990	878		
	ダーリントン3	同上	1992	878		
	ダーリントン4	同上	1993	878		
	ピッカリング1	同上	1971	515	ピッカリング A	1.2×10^5
	ピッカリング4	同上	1973	515		
	ピッカリング5	同上	1982	516	ピッカリング B	1.9×10^5
	ピッカリング6	同上	1983	516		
	ピッカリング7	同上	1984	516		
	ピッカリング8	同上	1986	516		
ニューブランズウィック・パワー社	ポイントルプロー	同上	1982	660	ポイントルプロー	2.8×10^5

出所）CNSC, “Regulatory Oversight Report for Canadian Nuclear Power Plants: 2015” 等の情報に基づき三菱総合研究所作成）

事業者は、2000 年放射線防護規則によって定められている公衆に対する線量限度である年間 1mSv を下回るように、各核種の DRL（Bq）の上限値を導出しなければならないとされている。また事業者は、放射性物質が環境中を通って人体に取り込まれることを説明する方程式を用いて DRL を導出したその方法について、説明しなければならないともされている。なお DRL は、カナダ規格協会（Canadian Standard Association : CSA）のガイドライン（CSA standard N288.1-08）で推奨（参考文献 18）されている方法に基づき導出される。

なお、カナダが濃度基準ではなく何故総量基準を採用しているのか、その理由に関する情報を確認することはできなかった。

(6) フランスにおけるトリチウムの気体放出基準

1) トリチウム排ガスの処分に係る法令・規則

フランスでは環境法典第 L.593-10 条では、原子力施設から排出される放射性物質の排出上限は原子力安全機関（ASN）が定める規則によって規定されること、当該 ASN 規則は、原子力安全を管轄する大臣の承認を得ることが定められている（参考文献 19）。また、環境法典の施行政令（デクレ）である「原子力基本施設及び原子力安全・放射性物質輸送管理に関する 2007 年 11 月 2 日の政令（2007-1557）」（以下、手続きデクレ）の第 3 条では、放射性物質の排出上限を定める ASN の規則（法的拘束力を持つ ASN の決定 : decision）は、原子力安全を管轄する大臣の省令（アレテ）によって公布されること、また第 18 条では、排出上限に関する ASN の決定案は、その概略をまとめた報告書を添付した上で、当該原子力施設が立地する県の知事と、当該原子力施設の周辺に設置されている地域情報委員会（CLI）に送付されることが規定されている（参考文献 20）。環境法典、手続きデクレの措置の施行のために定められた 2012 年 2 月 17 日のアレテの第 4.1.2 条では、施設の排出、取水、放出の制限値は、施設の性質、立地、及び地域の環境条件を考慮して受容し得る技術的・経済的条件において利用可能な最高の技術に基づいて設定されることが規定されている（参考文献 21）。また放出量は、1998 年 2 月 2 日のアレテ[6]に定められた制限を超えてはならないことも規定されている（参考文献 22）。

以下では、個別に定められた ASN の決定のうち、フランス電力（EDF）のシヴォー原子力原子力発電所の排出上限について定めたものについて記載する。

2009 年 6 月 2 日付 ASN 決定 2009-DC-0139 の附属書のうち、セクション 2 の第 2 条において、同発電所の原子炉補助建屋の 2 つの排気塔からの放射性排ガスの年間上限値が規定されており、トリチウムに関しては 5,000GBq／年とされている。また、各排気塔からの放射性物質の濃度の上限値について、各月の 1～7 日、8～14 日、15～21 日、22 日から月末までのそれぞれの平均値として、5×10^{6}Bq／秒との値が規定されている（参考文献 23）。

なお、トリチウム排ガスの濃度に関しては、EDF の原子力発電所の従業員向けのガイド「原子力発電所と環境」において、シヴォー原子力発電所については、地表におけるトリチウム濃度の上限が 50Bq／m^3 であることが規制上定められていることが示されている（参考文献 24）。

2) トリチウム排ガスの処分に係る法令・規則で定められた基準値の考え方

上記のトリチウム排ガスの年間排出上限値の考え方については、EDF、ASN、政府機関等の公式ウェブサイト上の公開情報からは確認できない。ただし、トリチウム白書において放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）は、年間排出上限値の設定に関して見解を示すにあたっての考え方について説明している。これによれば、まず、原子力基本施設（INB）の実

---

[6] 原子力発電所については、サイト内に存在する原子炉の運転に関わらない施設や敷地外に存在する施設が、環境保護の観点からリスクが高いと判断される事業を行う特定の施設：環境保護指定施設（ICPE）に分類され、原子力施設に適用される法令規則とは別の法令体系の適用対象となる。1998 年 2 月 2 日のアレテは、ICPE の取水、水の消費、あらゆる種類の排出について定めたものである。

際の運転及び安全報告書等に示された運転状況と整合した運転を行った場合に放出が予想される最大値を予測することから始めるとされている。この予測が、過去の運転実績データに基づくものである場合、総合的な運転状態、トリチウムの一時的なサイト内での貯蔵による影響、廃液中のトリチウム測定装置の性能を考慮して、試算された最大値を基に調整するとされている。

(7) 海外（旧西ドイツ、スイス、英国、旧ソ連、インド）におけるトリチウム被ばく事故による死傷事例

旧西ドイツ、スイス、英国、旧ソ連、インドを対象として、トリチウム被ばく事故による死傷事例についての調査を行った。

旧西ドイツ、スイスでの事例は、1988 年の国際原子力機関（IAEA）の報告書（参考文献 25）で確認できる。IAEA 報告書によれば、旧西ドイツ、スイスの事故はトリチウム塗料によるものとされている。

英国の事例は原子放射線の影響に関する UNSCEAR の 2000 年の報告書（参考文献 26）で確認できる。UNSCEAR 報告書によれば、英国の事故はガス状トリチウム光源の充填中に吸気部品が破損し、11~15 テラ・ベクレルのトリチウムが放出され、2 名が被ばくした（全身線量はそれぞれ 0.62Sv、0.64Sv）とされている。

旧ソ連の事例については、カナダ原子力安全委員会（CNSC）の 2010 年報告書（参考文献 27）において、「詳細は不明だが、トリチウムが 2 名の作業者の死因とされた事故例とされている。被ばく線量は 10~12Gy と見積もられており、多量に摂取したものと思われる。」と記載されている。

インドの事例については、インド議会における議員質問に対する政府回答文書で確認できた。同文書によると、インドのラジャスタン原子力発電所（重水炉（PHWR））では、5 号機で 2012 年 6 月 23 日、4 号機で 7 月 19 日にそれぞれ、作業員が点検作業中にトリチウム被ばくする事象が発生した。いずれの事象でもトリチウム漏えいはプラント内の限られた場所に特定され、外部への放出はない。6 月の事象は、配管溶接作業の際にガス配管のカバーが開いたことによるもので、この事象で 1 名の作業員（契約社員）が 20.4 ミリシーベルト/年の被ばくをし、契約社員の基準値である 15 ミリシーベルト/年を越えた。当該作業員に健康影響は出ておらず、その後はプラントの別のエリアで作業に従事した。7 月の事象はポンプシールからの重水漏れによるもので、被ばくした作業員（社員）の被ばく線量は 2.97～7.96 ミリシーベルト/年で、社員の基準値である 20 ミリシーベルト/年の範囲内であった。これらの作業員はこの事象後も 4 号機で通常の業務を続けている（参考文献 28、29）。

以上のとおり、旧ソ連、旧西ドイツ、スイス、英国、インドにおいて、死傷事例を伴うトリチウム被ばく事故が発生していたことが確認できた。

(8) ドイツとフランスの再処理工場周辺の小児白血病の増加事例、及び原子力発電所周辺の小児がんの増加事例

諸外国（米国、ドイツ、フランス、イギリス）について、再処理工場周辺の小児白血病の増加事例、及び原子力発電所周辺の小児がんの増加事例の調査を行った。

1) ドイツ

ドイツでは、連邦環境・自然保護・原子炉安全省（BMU）傘下の連邦放射線防護庁の委託でドイツ小児がん登録（DKKR）によって「原子力発電所周辺における小児がんに関する疫学研究（KiKK）」が実施された。本研究結果は、2007 年に BMU に提出され、政府の諮問委員会である放射線防護委員会（SSK）の評価を受けた後、2007 年 12 月に公表されている（参考文献 30）。

本研究では、DKKR に記録された小児がん患者の集団と、これらの小児がん患者と年齢や性別、居住地などの条件が可能な限り同じ非患者の集団とを比較する症例対照研究（case-control study）の手法がとられている。

本研究では当初、原子力発電所から 5km 圏内および 10km 圏内とそれ以外の対比のみを検討の対象としていた。表 5-2 は小児がん全体について、5km 圏内および 10km 圏内に関するオッズ比を示したものである。左から、原子力発電所からの距離、以遠地域と比較したオッズ比、95%信頼区間下限、p 値（有意確率）、症例数、対照例数が示されている。（※数値中のコンマは小数点、ピリオドは桁区切りを示す）。

表 5-2KiKK 研究報告書における小児がんのオッズ比（1/2）

Tabelle 3.17: Geschätzte Odds Ratios aus der Modellierung nach Abstandskategorien (Modell(8))
Diagnose 1980-2003, alle Erkrankungen

	Odds Ratio	Untere eins. 95%-Konfidenzgrenze	p-Wert	Fälle	Kontrollen
<5km zu ≥5km Zone	1,61	1,26	0,0006	1.592	4.735
<10km zu ≥10km Zone	1,18	1,03	0,0251	1.592	4.735

出所）ドイツ KiKK 研究報告書

しかし、委託者である BMU 等の指摘を受けて、実施者が後から検討の範囲を 20km 以遠にも拡大したところ、小児がん全体について、以下の表 5-3 のような結果が出た。これを参照すると、より離れた 30km 圏内で 20km 圏内よりオッズ比が高く、さらに離れた 50km 圏内については、5km 圏内を除くすべてのゾーンと比べてオッズ比が高くなっている。

表 5-3KiKK 研究報告書における小児がんのオッズ比（2/2）

Tabelle 3.17a: Geschätzte Odds Ratios aus der Modellierung nach zusätzlichen Abstandskategorien (in Anlehnung an Modell(8))
Diagnose 1980-2003, alle Erkrankungen

	Odds Ratio	Untere eins. 95%-Konfidenzgrenze	p-Wert	Fälle	Kontrollen
<20km zu ≥20km Zone	1,06	0,96	0,1781	1.592	4.735
<30km zu ≥30km Zone	1,10	0,98	0,0903	1.592	4.735
<40km zu ≥40km Zone	1,04	0,88	0,3615	1.592	4.735
<50km zu ≥50km Zone	1,38	1,05	0,0247	1.592	4.735

（出所：KiKK 研究報告書）

したがって、小児がんリスクと発電所からの距離の近さとの間の相関はあるとはいえず、本研究では、5km 圏内で統計的に、他のゾーンよりオッズ比が高いという現象が確認されたに留まる。なお、5km 圏内における白血病のオッズ比（2.19）についてはKiKK 報告書中にも記載があるが、これ以外の距離ゾーンに関するデータは示されていない。なお、本研究は原子力発電所からのトリチウムをターゲットに行われた研究ではないことに留意が必要である。

BMU の委託を受けた SSK は、本研究についてがんの原因はさまざまであり、また環境放射線などの計測値から合理的な説明ができず、原子力発電所に原因があるとすれば計測値の 1000 倍以上の放射線被ばくが必要といった見解（上掲で BMU 意見として示されている部分）を示しているほか、放射線被ばくの特定や（がんに係る）影響要素の調査等の方法論の面で問題があることなどを指摘している（参考文献 31）。

2) フランス

フランス放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）による、フランス国内の 19 ヵ所の原子力発電所の 5km 圏内に住む子どもたちの白血病発生率についての調査結果は、2012 年 1 月に International Journal of Cancer 誌に発表された。その調査結果では、原子力発電所から 5km 圏内に住む 15 歳以下の子どもたちは、白血病の発症率が 1.9 倍高く、5 歳未満では 2.2 倍高いとの結果が示されている。

IRSN はこの調査結果は無視できないものであるとしつつも、このような結果が得られたサンプル数が 14 と非常に少ないこと、また 1990 年から 2001 年にかけて IRSN が実施した同様の調査では、このような増加は認められなかったこと等について注意喚起したうえで、今回の調査結果から、原子力発電所サイト近傍の住民に対するリスク管理の観点からの対処等が必要になるといった結果は導出できないと結論づけている（参考文献 32、33）。

(9) カナダのピッカリング原子力発電所周辺での健康影響

カナダのピッカリング原子力発電周辺での健康影響についての調査を行った。カナダ原子力安全委員会（CNSC）による 2010 年の報告書「トリチウム研究プロジェクトの一環としてのトリチウムによる健康影響、線量、及び放射線防護」では、トリチウムの大気濃度が最も高い場合（12.5%）に、中枢神経系統への異常の発生率が上昇することが示されている。ただし、中枢神経系統への異常の発生率と、トリチウムの被ばくとの間には、統計的に有意な関連性はないとされている。

また、同報告書では、ピッカリング原子力発電所周辺ではダウン症候群の乳児の数が、期待値[7]よりも統計的に増加しているとされている。さらに、”observed=24, expected=12.9”との記載があることから、増加率を計算すると約 86%となる。ただし、ダウン症候群の発症と大気へのトリチウムの放出レベルには有意な相関がないことや、ダウン症の発症と地上モ

[7] 報告書では、実測罹患数と期待罹患数の比である標準化罹患比（Standardized Incidence Ratio：SIR）は 1.85 と記載されている。ここでの期待値とは、期待罹患数のことである。

ニタリングのデータとの間に有意な相関がないことが示されている（参考文献 34）。

(10) カナダの原子力発電所周辺での新生児・小児健康被害

カナダの原子力発電所周辺での新生児･小児健康被害に関して調査を行った。カナダでは、1988 年に市民グループが公表した原子力発電所周辺での新生児・小児の健康被害に関する情報を受けて、カナダ原子力管理委員会が調査を実施し、その結果を報告書として 1991 年に公表した。報告書では調査結果として、以下の点が示されている（参考文献 35）。

- オンタリオ州にある原子力施設周辺での小児白血病の発症に関する異常リスクは確認されなかった。
- また、原子力発電所周辺での発症予測値より観察値が上回ることはあったが、偶然そうなっただけかも知れない。
- ピッカリング原子力発電所周辺の 6 自治体における死産率、新生児死亡率、幼児死亡率が増加しているという仮説は支持しない。
- ただし、ピッカリングとエイジャックスの 2 つの自治体における、ダウン症の出生率の上昇については注意が必要である。
- ダウン症の出生率とトリチウムの気体･液体放出との間に一貫した傾向はないが、相関性がある可能性を排除してはならない。複数のテストにおいて相関が確認されたことから、時には有意な相関が確認される可能性もある。そこで、両自治体のダウン症の子の母親の出産時の居住地を確認する必要がある。また、妊娠時の初期における居住地についての情報はない。したがって、両自治体におけるダウン症の発症については更なる調査をする必要があると考えらえる。

上記の最後の点として示されている、更なる調査の必要性に直接関連して実施された調査の有無は確認できない。

しかし、2010 年のカナダ原子力安全委員会（CNSC）の報告書「トリチウム研究プロジェクトの一環としてのトリチウムによる健康影響、線量、及び放射線防護」では、1991 年の報告書後に実施された、類似調査の結果が次のように示されている。

ピッカリング原子力発電所のあるダラム地域の保健局が 2007 年に公表した、同地域における先天異常等に関する調査結果では、1993 年から 2004 年におけるダウン症の発症率はオンタリオ州全体での発症率と同ベルであるとされている。またピッカリングとエイジャックスにおける発症率は 1984 年から 1986 年をピークに以降減少しているとされている（参考文献 36）。

(11) カナダにおけるトリチウムによる影響に関する動物実験事例

カナダにおけるトリチウムによる影響に関する動物実験事例についての調査を行った。カナダ原子力安全委員会（CNSC）の 2010 年の報告書「トリチウム研究プロジェクトの一環としてのトリチウムによる健康影響、線量、及び放射線防護」では、動物実験や疫学調査で分かった健康影響について以下のように報告されている。

① 動物実験

- 動物実験の結果、公衆の被ばく線量より数百万倍高い線量が照射された場合に、胚や胎

児の生育が妨げられ、遺伝影響、生殖毒性、細胞死、がんを誘発することが分かった。

- これらの影響を引き起こす放射線量は、体重 1g あたり数 GBq を投与された場合、あるいは 500mSv を超える線量である。

② 疫学調査

- 疫学調査の結果や、あらゆる放射線被ばくによる過剰リスクがないことに基づくと、現在の環境レベルあるいは職業レベルにおいてトリチウムによって被ばくする集団では、出生異常、がん発症、死亡が増えるとの証拠はほとんどない。
- 上記集団での過剰リスクに関する最新の証拠がないということは、トリチウムによる健康リスクが、一般の人が有する他のリスクと比べてごくわずかで識別できないほどであることを意味している。

(12) トリチウムの放射線の生物学的影響

トリチウムの放射線による生物学的影響についての調査を行った。USNCEAR による 2016 年の報告書では、トリチウム水（HTO）及び有機結合型トリチウム（OBT）が体内に取り込まれた際の挙動について、以下のように報告されている。

- 哺乳類の体内への摂取後の HTO の挙動は、水交換の一貫で排泄される早期成分（体内での半減期が 4～18 日）と長期的に排泄される OBT 中のトリチウム（全体の約 1%、体内での半減期が 23～104 日）とに分けられる。17 人の人体観察から得られた実効線量に対する OBT の平均寄与は 3%であった。
- グルコース、アミノ酸、ホルモン、DNA 及び RNA 前駆体などのトリチウム化された生化学的基質は、血液に吸収され細胞内の活発に代謝している部分に輸送された場合、身体組織内の有機分子に組み込まれることがある。特定の形態の OBT の取り込みの程度はトリチウム化合物の形態や分子内での位置、キャリアの量に依存する。トリチウム化された高分子の前駆体から作られた OBT は HTO より長い期間組織に保持される。OBT は、トリチウムが部分的に酸化され HTO として体内水に戻るか、低分子有機物へと異化（より簡単な物質に分解）されることで排泄される。高分子のトリチウム前駆体を摂取した場合、同量の HTO を摂取した場合に比べ、組織への線量が最大で 10 倍となり、線量への OBT の寄与が支配的であると言える。
- トリチウムチミジンやトリチウムデオキシシチジンなどの DNA 前駆体は様々な経路で体内に入り、一部は HTO に分解され、残りは DNA に組み込まれ、その後増殖細胞の核が選択的にベータ線被ばくする。トリチウムデオキシシチジンは、胎児の増殖細胞、骨髄や小腸また低い頻度で筋肉や肝臓などの有糸分裂を行う組織に優先的に組み込まれる。トリチウム化された DNA 前駆体の急性及び長期摂取について、増殖細胞の核の吸収線量は、等量の HTO 摂取に対して 1～2 桁大きくなる可能性がある。トリチウムベータ線の照射範囲が細胞核の大きさより小さいため、組織への平均線量を用いる際に、吸収されたのがトリチウムヌクレオシドであるならば慎重に検討する必要がある。ICRP の OBT に対する線量係数はトリチウム化された DNA 前駆体摂取に直接適用するべきではない。

また、OBT の生態濃縮については、以下のように示されている。

- トリチウム化された生化学物質が体内及び細胞内でどのように分配されるか調べた多

くの研究では、これらの物質による被ばく影響はほとんど調べられていない。入手可能ないくつかの研究では、ほとんどの有機化合物が HTO とほぼ同じ有効性であることを示している。なぜなら、それら有機化合物は細胞全体に分布し、核の優先照射には至らないからである。しかしながら、いくつかのトリチウム化アミノ酸及びトリチウム化ヌクレオシド（チミジンなど）の取り込みは、より長い保持期間を持つ核におけるトリチウムの蓄積や単位摂取量に比例したより大きな線量となる可能性がある。

一方、カナダ原子力安全委員会（CNSC）の 2010 年報告書の 6.2「国際放射線防護委員会（ICRP）の HTO モデルによるトリチウム化合物の内部線量」及び 6.3「国際放射線防護委員会（ICRP）の OBT モデルによるトリチウム化合物の内部線量」においては、以下のように HTO と OBT の体内挙動が示されている。

- ICRP モデルでは、HTO は、体内摂取されて直ぐに血液中に移行し、生物学的半減期 6 時間[8]を維持して、血液から全身に均一にいきわたる。体内摂取された HTO のうち 97%は HTO のままであるが、うち 3%は OBT に転換する。大人の体内では、HTO は生物学的半減期が 10 日、OBT は 40 日とされている。なお、年齢が低くなるほどこれらの半減期は短くなる。
- 一方、OBT は、体内摂取されて直ぐに、また完全に血液中に移行し、均一に体内組織にいきわたる。体内摂取された OBT のうち 50%は OBT のままで、50%は HTO に異化する。

なお、濃縮の有無や特定の臓器等に滞留する傾向などについての記載は示されていない。

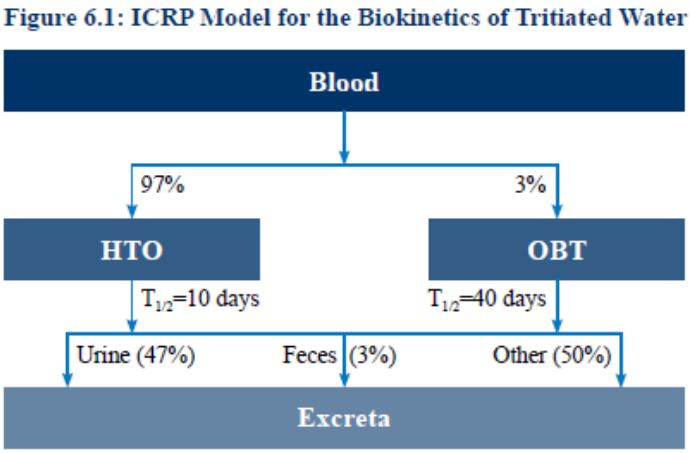

図 5-1 摂取した HTO に関する ICRP 代謝モデル

出所）UNSCEAR、2016 年報告書

[8] ICRP モデルにおける生物学的半減期であり、同報告書ではモデルの想定半減期が示された後に、実際の大人の半減期、低年齢・短半減期が示されている。

Figure 6.2: ICRP Model for the Biokinetics of Organically Bound Tritium

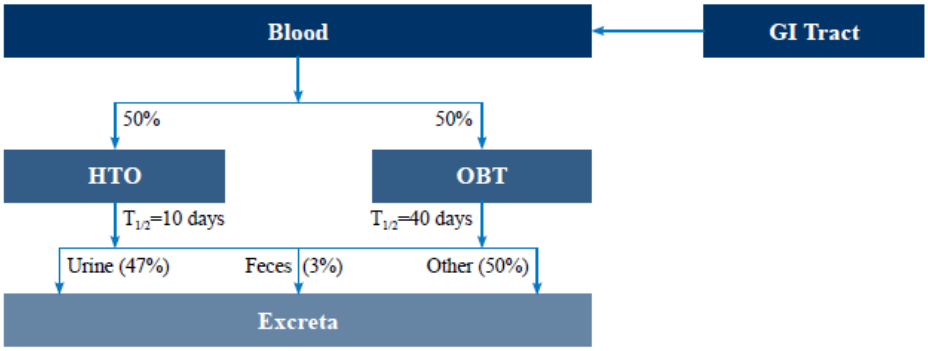

図 5-2 摂取した OBT に関する ICRP 代謝モデル

出所）UNSCEAR、2016 年報告書

なお、これらの図については、2014 年 4 月 24 日の第 8 回トリチウム水タスクフォース会合の参考資料 6「トリチウム水の生体影響（基礎実験データから）」（茨城大学理学部　田内　広」の中でも引用されている。

表 5-4ICRP モデルにおける HTO 摂取後の HTO と OBT の配分と半減期

Table 6.1: Parameters Describing the Distribution and Retention of tritium After acute intakes of Tritiated Water

Age	Distribution (%)		Biological Half-Life (Days)	
	HTO Component	OBT Component	HTO Component	OBT Component
3 months	97	3	3.0	8
1 year	97	3	3.5	15
5 years	97	3	4.6	19
10 years	97	3	5.7	26
15 years	97	3	7.9	32
Adult	97	3	10.0	40

出所）UNSCEAR、2016 年報告書

表 5-5ICRP モデルにおける OBT 摂取後の HTO と OBT の配分と半減期

Table 6.4: ICRP (1993) Partitioning Between HTO and OBT After Dietary Intakes of OBT

Age	Distribution (%)		Biological Half-Life (Days)	
	HTO Component	OBT Component	HTO Component	OBT Component
3 months	50	50	3.0	8
1 year	50	50	3.5	15
5 years	50	50	4.6	19
10 years	50	50	5.7	26
15 years	50	50	7.9	32
Adult	50	50	10.0	40

出所）UNSCEAR、2016 年報告書

(13) トリチウムによる身体・組織への影響

○　染色体への影響

放射線による遺伝的影響については、確率的な影響であり、その発生頻度は線量の増加とともに大きくなる。しかし線量が低い領域については、線量の増加と発生頻度の上昇の関係が明らかでないとされている（参考文献 37）。低線量域におけるトリチウムの染色体への影響については、ヒトの培養リンパ球を用いた実験が行われている（参考文献 38）。この実験ではトリチウム水及び ^{3}H-チミジンの濃度と、それらによって誘発される染色体異常の相関について調べられた。実験より、トリチウム水に関しては約 5μCi/ml（=1 億 8500 万 Bq/L）、^{3}H-チミジンについては約 3×10^{-2}μCi/m（=110 万 Bq/L）を境に低濃度域では濃度の増加に伴う染色体異常の発生頻度の上昇が緩やかになっていることが確認された。これは、この濃度を境に低濃度域では β 線により誘発される染色体 DNA の切断頻度が低く、細胞の修復能力によって切断の大部分が修復されるためと考えられている。またこの実験からトリチウム水に関して、約 0.001μCi/ml（＝3 万 7 千 Bq/L）以下の濃度における染色体異常発生率は、トリチウム処理を施さない場合の染色体異常発生率とほぼ等しくなり、統計的な有意差は認められないともされている。

○　母乳を通した乳児への影響

母体に摂取されたトリチウムは母乳を介して、乳児の体に取り込まれる。母乳を介して取り込まれたトリチウムが、乳児の体内においてどの器官に多く残留するかについて、マウスを用いた実験が行われた（参考文献 39）。この実験では母マウスに対して哺乳開始から離乳までの期間にトリチウム水を投与し、母乳を介して間接的に子マウスに対してトリチウムを与えて、その代謝を調べている。実験の結果、長期間後に体内に残留しているトリチウムは主に脂質、DNA、タンパク質成分として存在していることが確認された。特に脳の脂質成分における残留は顕著であり、他の臓器の 10～100 倍程度の残留濃度となっている。これは体内に取り込まれたトリチウムが、有機化合型トリチウムの形で、代謝的に比較的安定である脳のミエリン成分に残留したためと考えられている。しかし、この結果はあくまでトリチウムの脳への残留割合が大きいことということを示した結果であり、量的な線量の評価までは行われておらず、放射能の生物影響まで論ずることはできないとされている（参考文献 40）。

○　核変換効果による細胞への影響

DNA 中に取り込まれたトリチウムが β 壊変を起こし ^{3}He になると、水素とヘリウムの化学的性質の違いにより DNA から脱離し、DNA 鎖切断が生じる。このトリチウム核変換による DNA 鎖切断の影響について、シミュレーションによる検証が行われている（参考文献 41）。この結果、トリチウム核変換に起因して起こる DNA 鎖切断について、修復が困難とされる 2 本鎖切断が起こる可能性は極めて低く、そのほとんどが 1 本鎖切断で終わっていることが確認されている。

また海外においても、人がトリチウムを含んだ食品や水を摂取した際の核変換効果による影響が調べられている（参考文献 42）。Carsten による研究から、核変換効果によって生じる DNA 損傷が人に与える影響について、DNA 中の水素原子のうちシトシン環の 5 位に位置する水素原子はわずか 2%であり損傷は最小限になるため、リスクは有意でないほど小

さいと結論付けている。また Feinendegen、Bond による研究から、細胞内のトリチウムによる効果は放射性核種のベータ照射によるものが圧倒的であり、核変換効果はほとんどの条件下で測定可能な効果をもたらさないとされている。英国の Advisory Group on Ionising Radiation（AGIR）においても同様の結論に至っており、もし核変換による DNA 損傷が起こったとしても、放射線による効果と分離することは困難であるとされている。

（5 章参考文献）

1) カナダ政府、Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document – Radiological Parameters、https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/guidelines-canadian-drinking-water-quality-guideline-technical-document-radiological-parameters.html?_ga=2.146188596.1662128643.1529285345-1936252688.1519354193
2) カナダ原子力安全委員会（CNSC）、Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water Part of the Tritium Studies Project INFO-0766、January 2008、http://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/info_0766_e.pdf
3) カナダ Ontario Drinking Water Advisory Council、Report and Advice on the Ontario Drinking Water Quality Standard for Tritium Prepared for the Honourable John Gerretsen Ontario Minister of the Environment、May 21, 2009、http://www.inaco.co.jp/isaac/shiryo/genpatsu/052109_ODWAC_Tritium_Report.pdf
4) カナダ原子力安全委員会（CNSC）、核物質処理施設の運転認可更新申請に係る経過記録、http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/the-commission/pdf/2009-06-10-Decision-ShieldSource-e-Final-Edocs3404725.pdf
5) カナダ・オンタリオ州、飲料水基準、https://www.ontario.ca/laws/regulation/030169
6) 欧州連合、EU 指令（COUNCIL DIRECTIVE 2013/51/EURATOM of 22 October 2013）、https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0051&from=EN
7) 英国政府法令ウェブサイト、The Water Supply (Water Quality) Regulations 2016、http://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/614/contents/made
8) フランス環境法典第 R1321-20 条（2001 年 12 月 20 日のデクレの関連条文）、https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=935EC7F3D282339419B8993F7860C192.tplgfr31s_1?idSectionTA=LEGISCTA000006198724&cidTexte=LEGITEXT000006072665&dateTexte=20180627
9) フランス政府法令サイト、生水と飲料水の制限と品質基準に関する 2007 年 1 月 11 日のアレテ、https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT000000465574
10) フランス政府法令サイト、飲料水の放射線学的品質の管理に関する 2004 年 5 月 12 日のアレテ、https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000438517&dateTexte=20180627
11) フランス原子力安全機関（ASN）、放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）、厚生省、La qualité radiologique de l’eau mise en distribution en France 2005-2007、2009 年 1 月、https://www.asn.fr/content/download/51869/361800/version/1/file/BILAN_EAUX_ASN_DGS_IRSN_100609.pdf
12) 欧州連合、EU 指令（COUNCIL DIRECTIVE 2013/51/EURATOM of 22 October 2013）、https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0051&from=EN
13) 欧州連合、CONSOLIDATED VERSION OF THE TREATY ESTABLISHING THE EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY (2012/C 327/01)
14) 欧州経済社会評議会 （EESC）、Opinion of the European Economic and Social Committee on the ‘Proposal for a Council directive laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption’

15) 欧州連合、電離放射線から生じる危険から労働者及び公衆の健康を保護するための、基本的安全性基準を定めた理事会指令
16) カナダ原子力安全委員会（CNSC）、Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water Part of the Tritium Studies Project INFO-0766、January 2008、http://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/info_0766_e.pdf
17) カナダ政府、REGDOC1.1.3, “Licence Application Guide: Licence to Operate a Nuclear Power Plant
18) カナダ規格協会（CSA）、CSA standard N288.1-08, “Guidelines for calculating derived release limits for radioactive materials in airborne and liquid effluents for normal operation of nuclear facilities”
19) フランス政府法令ウェブサイト、環境法典第 L.593-10 条、https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000025109696&dateTexte=&categorieLien=cid
20) フランス政府法令ウェブサイト、原子力基本施設及び原子力安全・放射性物質輸送管理に関する 2007 年 11 月 2 日の政令（2007-1557）、https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000469544&dateTexte=20161115
21) フランス政府法令ウェブサイト、原子力基本施設（INB）アレテ、https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/2/7/DEVP1202101A/jo#JORFSCTA000025338643
22) フランス政府法令ウェブサイト、1998 年のアレテ、https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000204891&dateTexte=20161115
23) フランス原子力安全機関（ASN）、シヴォー原子力発電所の排出上限を定める ASN の 2009 年 6 月 2 日付決定 2009-DC-0139、https://www.asn.fr/content/download/52752/364465/version/2/file/Decision-2009-DC-0139.pdf
24) フランス電力（EDF）、原子力発電所と環境、2013 年、http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Nucleaire/General/ebookedfbassedef.pdf
25) International Atomic Energy Agency, The Radiological Accident in Goiania, 1988
26) 原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）、Occupational radiation exposures、2000 年、http://www.unscear.org/docs/reports/annexe.pdf
27) カナダ原子力安全委員会（CNSC）、Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium Part of the Tritium Studies Project (INFO-0799)、2010 年
28) World Nuclear News、Tritium incidents at Rajasthan、2012 年 7 月 25 日、http://www.world-nuclear-news.org/RS_Tritium_incidents_at_Rajasthan_2507122.html
29) インド原子力庁、議会質疑応答文書、2012 年 8 月 23 日付、http://www.dae.nic.in/writereaddata/rsus1245.pdf
30) ドイツ連邦放射線防護庁委託研究、原子力発電所周辺における小児がんに関する疫学研究（KiKK）、http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-20100317939
31) ドイツ放射線防護委員会（SSK）、原子力発電所周辺における小児がんに関する疫学研究（KiKK）評価、https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2008/Kikk_Studie_e.pdf?__blob=publicationFile

32) International Journal of Cancer、Childhood leukemia around French nuclear power plants−The geocap study, 2002‐2007、https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ijc.27425
33) フランス放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）、Etudes épidémiologiques des leucémies autour des installations nucléaires chez l’enfant et le jeune adulte : Revue critique、2008 年 4 月、
https://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Pages/20120113_scientific-publication-leukaemia.aspx
34) カナダ原子力安全委員会（CNSC）、Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium Part of the Tritium Studies Project (INFO-0799)、2010 年
35) カナダ原子力安全委員会（CNSC）、INFO-0300-2　Childhood Leukaemia around Canadian Nuclear Facilities ‐ Phase II Final Report, Dr.E.A.Clarke(Ontario Cancer Treatment and Research Foundation、1991 年 6 月
36) カナダ原子力安全委員会（CNSC）、INFO-0401　TRITIUM RELEASES FROM THE PICKERING NUCLEAR GENERATING STATION AND BIRTH DEFECTS AND INFANT MORTALITY IN NEARBY COMMUNITIES 1971-1988 (AECB Project No. 7.156.1)、1991 年 10 月
37) 田内広「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会　トリチウム水及びトリチウム化合物の生体影響について」（2018 年 11 月 30 日）
38) 堀 雅明、中井 斌「トリチウム水によるヒト培養リンパ球における染色体異常」、日本放射線影響学会　第 17 回大会、（1974 年 10 月）
39) 斎藤眞弘、石田政弘「トリチウムの代謝と線量評価」、保健物理　20 巻（1985 年）2 号、（1985 年 4 月 8 日）
40) 斎藤眞弘「トリチウム、水、そして環境（2）」
http://anshin-kagaku.news.coocan.jp/sub040208saitou.2.htm、閲覧日：2018 年 10 月 22 日
41) 河野裕彦「トリチウム壊変による DNA 鎖切断ダイナミクス」
https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-15K13614/15K13614seika.pdf
閲覧日：2018 年 10 月 22 日
42) UNSCEAR “Sources,Effects and Risks of Ionizing Radiation, ANNEX C Biological Effects of Selected Internal Emitters - Tritium”、2016

6. まとめ

本調査業務では、福島第一原子力発電所の多核種除去設備等処理水の長期的な取扱い方法の決定に向けた今後の検討に資するよう、必要な調査・資料作成を行った。

2 章では、一般になじみが深いとは言えないトリチウムという核種について、また福島第一原子力発電所における多核種除去設備等処理水に係る問題について、広く国民の認知や理解を得ることを念頭に、トリチウムの物性、性状など科学的な情報を収集、整理し、安全性やリスクに関する情報を含めた基礎資料集を検討、作成した。

3 章では、多核種除去設備等処理水の処分に関して、国民がこの問題をどの様に認識し、どの様な懸念を有しているのかを把握することを目的とした説明・公聴会において、意見表明者が事前に提出した「意見表明」および一般から事前に書面で提出された「意見募集結果」を対象に、延べ 179 件の意見を整理し、主要な論点を分析・分類した。

4 章では、過年度に実施された被ばく線量評価の方法及び評価結果について、目的に照らした妥当性を分析した。また、有識者のヒアリングを通して、その妥当性に関して確認を行った。その一環として、UNSCEAR が提供する被ばく線量評価ツールの調整、入力データセットの準備、評価実施に当たっての課題の抽出・整理を行った。

5 章では、多核種除去設備等処理水の取扱いに係る説明・公聴会において、トリチウムによる健康影響に関する質問や不安、疑念が数多く呈されたことから、これらを踏まえ、トリチウムによる健康影響に関連する事項について主に国内外の公的な文書を対象として調査を行い、必要な情報を整理した。

これらの成果は、福島第一原子力発電所の多核種除去設備等処理水の長期的な取扱い方法の決定に向けた今後の検討の参考とすることが可能である。

平成３０年度原子力の利用状況等に関する調査事業

（多核種除去設備等処理水の処分技術等に関する調査研究）

2019 年 3 月

株式会社三菱総合研究所
原子力安全事業本部

二次利用未承諾リスト

報告書の題名：平成３０年度原子力の利用状況等に関する調査事業（多核種除去設備等処理水の処分技術等に関する調査研究）調査報告書

委託事業名：平成３０年度原子力の利用状況等に関する調査事業（多核種除去設備等処理水の処分技術等に関する調査研究）

受注事業者名：株式会社　三菱総合研究所

頁	図表番号	タイトル
83	表5-2	KiKK研究報告書における小児がんのオッズ比（1/2）
83	表5-3	KiKK研究報告書における小児がんのオッズ比（2/2）
87	図5-1	摂取したHTOに関するICRP代謝モデル
88	図5-2	摂取したOBT に関するICRP 代謝モデル
88	表5-4	ICRP モデルにおけるHTO 摂取後のHTO とOBT の配分と半減期
88	表5-5	ICRP モデルにおけるOBT 摂取後のHTO とOBT の配分と半減期