

令和3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

MRI 三菱総合研究所

2022年3月

セーフティ&インダストリー本部
原子力システム安全グループ

目次

| | |
|---|----|
| 1. はじめに..... | 1 |
| 2. トリチウム等 ALPS 処理水の取扱いに関する基礎的情報の提供 | 2 |
| 2.1 文献調査 | 2 |
| 3. 多核種除去設備等処理水に関連するデータの収集・分析支援..... | 6 |
| 3.1 主要国及び日本の原発立地地域におけるトリチウムの大気・海洋・河川・降雨の濃度..... | 6 |
| 3.2 主要国のトリチウム(大気・海洋)の排出量..... | 18 |
| 4. トリチウム分離技術の調査..... | 29 |
| 4.1 文献調査 | 29 |
| 4.2 まとめ | 46 |
| 5. おわりに | 47 |
| 6. 参考文献 | 48 |

図 目次

| | |
|---|----|
| 図 2-1 ICRP 1990 年勧告における放射線加重係数 | 2 |
| 図 2-2 ICRP 2007 年勧告における放射線加重係数 | 3 |
| 図 2-3 参照動植物の環境保護のため誘導考慮参考レベル(DCRL) | 5 |
| 図 3-1 ドイツにおける排水中のトリチウム量 | 24 |
| 図 3-2 スペイン原子力施設において排出された気体及び液体のトリチウム量(2018 年) | 24 |
| 図 3-3 チェルナヴォダ原子力発電所 1 号機の気体排出におけるトリチウム量 | 26 |
| 図 3-4 チェルナヴォダ原子力発電所 2 号機の気体排出におけるトリチウム量 | 26 |
| 図 3-5 チェルナヴォダ原子力発電所 1 号機の液体排出におけるトリチウム量 | 27 |
| 図 3-6 チェルナヴォダ原子力発電所 2 号機の液体排出におけるトリチウム量 | 27 |
| 図 4-1 LPCE における重水素の濃度及び DF と温度の関係 | 32 |
| 図 4-2 LPCE における重水素の濃度及び DF と G/L 比の関係 | 32 |
| 図 4-3 LPCE のフローチャート | 33 |
| 図 4-4 水素と水の化学同位体交換法 | 34 |
| 図 4-5 VPCE における各種触媒と出口水素中の重水素濃度 | 38 |

表 目次

| | | |
|--------|--|----|
| 表 3-1 | 2020 年英国における陸生食品および周辺環境の濃度(最大値)..... | 6 |
| 表 3-2 | 2020 年英国における海域の濃度(最大値)..... | 6 |
| 表 3-3 | 大気浮遊じん・大気の実験結果..... | 7 |
| 表 3-4 | 降下物の分析結果..... | 12 |
| 表 3-5 | 降水の実験結果..... | 13 |
| 表 3-6 | 陸水の実験結果..... | 13 |
| 表 3-7 | 海水の実験結果..... | 15 |
| 表 3-8 | 水産物の分析結果..... | 18 |
| 表 3-9 | 英国の再処理施設及び原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020 年)..... | 18 |
| 表 3-10 | カナダの原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2019 年)..... | 19 |
| 表 3-11 | 仏国の再処理施設及び原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020 年)..... | 19 |
| 表 3-12 | 韓国の原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2021 年)..... | 20 |
| 表 3-13 | 米国の原子力発電施設(BWR)における直近のトリチウム放出実績(2019 年)..... | 21 |
| 表 3-14 | 米国の原子力発電施設(PWR)における直近のトリチウム放出実績(2019 年)..... | 22 |
| 表 3-15 | スロベニア クルスコ原子力発電所の液体排出におけるトリチウム量..... | 25 |
| 表 3-16 | スロベニア クルスコ原子力発電所の気体排出におけるトリチウム量..... | 25 |
| 表 3-17 | 台湾の原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020 年)..... | 28 |
| 表 3-18 | 我が国の原子力施設における直近のトリチウム放出実績(令和 2 年度下期)..... | 28 |
| 表 4-1 | 調査文献一覧..... | 30 |
| 表 4-2 | 各種触媒を用いた際の Kd(重水素)..... | 36 |
| 表 4-3 | 各種触媒を用いた際の Kd(トリチウム)..... | 37 |
| 表 4-4 | 各成分の分離度合い..... | 41 |
| 表 4-5 | 各種水素同位体分離手法の特徴まとめ..... | 43 |
| 表 4-6 | CECE 法を用いた場合のシステム諸元..... | 44 |
| 表 4-7 | 同位体分離効果の温度依存性..... | 45 |

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(以下、「福島第一原発」という。)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したトリチウム水タスクフォースや「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会」など専門家による議論等を踏まえ、令和3年4月13日に「東京電力ホールディングス株式会社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の処分に関する基本方針」(以下、基本方針)を公表した。基本方針において、トリチウムの分離技術については、国内外の原子力関連施設において実用化されているものはあるが、濃度や量の観点でそのままALPS 処理水に適用することはできない。そのため、ALPS 処理水は希釈して放出していくこととするが、引き続き、新たな技術動向を注視し、現実的に実用可能な技術があれば、積極的に取り入れていくこととしている。

本事業では、ALPS 処理水の取扱い方法の検討に資するよう、分離技術等トリチウムに関する国内外の最新の研究状況を調査し、ALPS 処理水の取扱い方法の検討に資するよう、必要な調査・資料作成を行うことを目的とし、以下を実施した。

- トリチウム等 ALPS 処理水の取扱いに関する基礎的情報の提供(2章)
- 多核種除去設備等処理水に関連するデータの収集・分析支援(3章)
- トリチウム分離技術の調査(4章)

2. トリチウム等 ALPS 処理水の取扱いに関する基礎的情報の提供

2.1 文献調査

ALPS 処理水の取扱いに関して、トリチウムを中心とする放射性物質の取扱いに関する国内外の科学的・社会的な基礎的情報、国内外のトリチウムを始めとした健康影響に関する情報等について、最新の情報を収集するため、文献調査を行った。

従来からの研究により、トリチウムの生物学的効果比(RBE)の値が1以上であることが指摘されている^{[2-1],[2-2]}が、そのことをどの様に解釈し、今後のトリチウムの放射線健康影響評価にどの様に反映していくべきかについては、今後の重要な論点の一つとなってくると考えられる。

何故なら、放射線防護の基本的な枠組みと防護基準を勧告することを目的としている国際放射線防護委員会(ICRP)の1990年勧告^[2-3]や2007年勧告^[2-4]では、各放射線の放射線加重係数は図2-1や図2-2の様に定められており(なお、トリチウムは β 核種であるため、対象となる放射線は図中の「電子」に該当する)、生物学的効果比(RBE)の値は、放射線加重係数を検討する上では重要となってくるためである。

表1 放射線荷重係数¹⁾

| 放射線の種類とエネルギーの範囲 ²⁾ | 放射線荷重係数, w_R |
|-------------------------------------|----------------|
| 光子, すべてのエネルギー | 1 |
| 電子およびミュー粒子, すべてのエネルギー ³⁾ | 1 |
| 中性子, エネルギーが 10 keV 未満のもの | 5 |
| " 10 keV 以上 100 keV まで | 10 |
| " 100 keV を超え 2 MeV まで | 20 |
| " 2 MeV を超え 20 MeV まで | 10 |
| " 20 MeV を超えるもの | 5 |
| (図1も参照) | |
| 反跳陽子以外の陽子, エネルギーが 2 MeV を超えるもの | 5 |
| アルファ粒子, 核分裂片, 重原子核 | 20 |

¹⁾ すべての数値は、身体に入射する放射線、あるいは体内線源についてはその線源から放出される放射線に関するものである。

²⁾ 他の放射線に対する数値の選択については、付属書Aの中で論じられている。

³⁾ DNAに結合した原子から放出されるオージェ電子を除く(26項参照)。

図 2-1 ICRP 1990 年勧告における放射線加重係数

表2 放射線加重係数の勧告値

| 放射線のタイプ | 放射線加重係数, w_R |
|-------------------------|------------------------------|
| 光子 | 1 |
| 電子 ^{a)} とミュー粒子 | 1 |
| 陽子と荷電パイ中間子 | 2 |
| アルファ粒子, 核分裂片, 重イオン | 20 |
| 中性子 | 中性子エネルギーの連続関数 (図1と式(4.3) 参照) |

すべての数値は、人体へ入射する放射線、又は、内部放射線源に関しては取り込まれた放射性核種から放出される放射線に関係する。

^{a)} 116項と付属書BのB.3.3節に論じられているオージェ電子の特別な問題に注意。

図 2-2 ICRP 2007 年勧告における放射線加重係数

すなわち、生物学的効果比(RBE)の値が高い場合は、放射線加重係数を見直す必要性が生ずる可能性(すなわち高い値にすべきかも知れない可能性)があるためである。仮に放射線加重係数を従来よりも高いものとなるならば、内部被ばくにおける線量換算係数は見直される必要が生じ、被ばく線量評価に影響が生じることとなる。

なお、現在の我が国の法令・規制では、ICRP 1990 年勧告の値が用いられている。

そこで、ICRP における最新の議論を調査した。具体的には、最新情報として、ICRP PUBLICATION 148 (RADIATION WEIGHTING FOR REFERENCE ANIMALS AND PLANTS)^[2-5](以下、ICRP Pub148 と言う。)の内容について、トリチウムの生物への影響(特にRBEに係る考察)に焦点を当てて調査を行った。

放射線防護体系の中で、長年、防護の対象はヒトであったが、ICRP 2007年勧告において、主勧告としては初めて環境の防護が取り上げられ、その後、環境の放射線防護の枠組みに具体的に踏み込んだのがICRP Pub 108^[2-6]である。ICRP Pub148の特徴は、生物相(動物及び植物)の保護を対象として検討し、特に、低エネルギーβ放射体(例えばトリチウム)とα核種の生物相に関するRBEデータをレビューしていることにある。(今回の調査では、α核種については割愛し、β放射体に関する分析に焦点を当てて調査を行った)。

以下に、生物学的効果比(RBE)について簡単に解説するとともに、ICRP Pub148において生物学的効果比(RBE)がどのように認識され、分析の結果、放射線加重係数をどのように設定すべきと考えているかについてまとめる。

電離放射線に起因する生物学的影響は、放射線の種類に依存して変化し得ることが長い間認識されてきている。この差(放射線の種類による生物学的影響の差)は実験的に定量化され、特定の放射線タイプの生物学的効果比(RBE)として報告されている。

RBEは実験的に決定され、同じ生物効果をもたらす基準放射線(X線あるいはγ線)に対する着目放射線の吸収線量の逆比と定義される。

生物学的影響の大きさは、線量、放射線の種類、エネルギーだけでなく、線量が照射される速度やエンドポイント(生物効果の指標)にも依存する。このため、ICRPはヒトの放射線防護に適用するために、RBEデータを集計・分析し、放射線の種類に適した放射線加重係数を吸収線量に乗じた放射線防護量

「線量当量」として提供している(例えば、ICRP の 1990 年勧告や 2007 年勧告)。

トリチウムについては、UNSCEAR 2016 ^[2-7]の結論によれば、RBE の分布の中心は、X 線に対し約 1.5~2、 γ 線に対し約 2~2.5 が報告されている。

上記の状況を踏まえ、ICRP Pub148 では、「トリチウムの生物相に関する RBE データをレビューし、推奨すべき値を提示し、その根拠を明確にすること。」および、「非ヒト生物相における生物学的影響に関するトリチウム β 粒子の RBE データを検討し、生物相に対する放射線加重係数を用いた吸収線量率の推定値を「誘導考慮参考レベル(DCRL)」と比較のうえ修正する必要があるかどうかを検討すること。」を目的として検討が実施されている。ICRP Pub148 では、具体的には以下が実施されている。

- RBE と RBE に影響する要因についての説明
- 組織反応と確率的影響のエンドポイントの分析
- 生物学的エンドポイント: 早期死亡率、生殖機能障害、罹患率、および染色体損傷と突然変異、の各々に対する RBE の推定

ICRP Pub148 では、上述した検討により、以下の分析結果を示している。

- γ 線を基準放射線として使用した場合の RBE は、X 線と比較した場合よりも大きくなる傾向がある。
- 組織反応に対する RBE は、確率的影響に対する値よりも低い傾向がある。
- 早期死亡率に対するトリチウム β 粒子の RBE(全て HTO に対し)は、げっ歯類と陸生維管束植物で 1.0~1.7 の範囲の値を示した。
- 生殖機能障害に対すトリチウム β 粒子の RBE(全て HTO に対し)は、げっ歯類、魚類、多毛類の虫で 1.0~3.9 の範囲の値を示した。
- 罹患率に関連するトリチウム β 粒子の RBE(全て HTO に対し)は、げっ歯類(ラット、マウス、マウス白血病細胞、ハムスター細胞)のみでは 1.0~2.5 の範囲の値を示した。
- 染色体損傷および突然変異の誘発に対するトリチウム β 粒子の RBE(全て HTO に対し)は、昆虫と哺乳類のみで 1.0~3.8 の範囲を示した。
- DNA 前駆体(例えばトリチウム化チミジン)としてのトリチウム投与後のトリチウム β 粒子の RBE に関しては、使用した実験条件、選択した生物学的エンドポイント、および線量測定の不確実性のため、結論付けることはできなかった。
- 以上の全ての RBE は、DCRL バンド(図 2-3 参照。DCRL とは derived consideration reference levels の略であり、「誘導考慮参考レベル」と言われる。DCRL は、ある特定の種類の標準動物・標準植物の個体に、電離放射線により何らかの悪影響が生じる可能性がいくらかでもありそうと思われる線量率をバンドとして示したもの。)の中、またはそれ以上の線量率で得られ、線量率の減少とともに増加する傾向が示された。
- 魚類のデータの広がりには 1 からほぼ 4 であり、水生無脊椎動物の値は約 1 である。ラットについても同じ範囲が見受けられ、データの広がり自体については種を超えて一貫性があることが示された。生殖成功率の低下については、RBE は 1~3.9 の範囲であった。

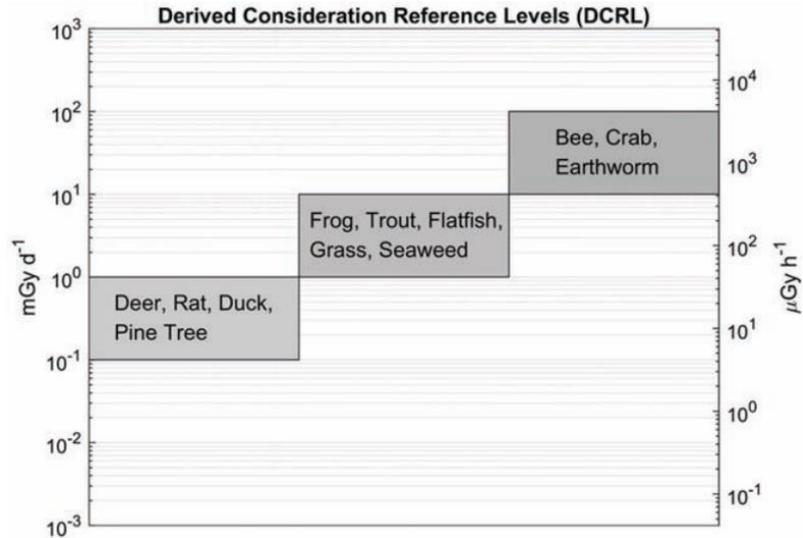


図 2-3 参照動植物の環境保護のため誘導考慮参考レベル(DCRL)

以上の分析結果も踏まえ、ICRP Pub148 ではトリチウムの RBE について、以下の様に結論付けている。

- RBE の範囲は、種間差やエンドポイントの違いによる明確なパターンを示さなかった。
- RAP(参照動植物)に対する「RBE で加重された吸収線量率」は、DCRL バンド(図 2-3)と比較した上で、全ての低 LET(線エネルギー付与)放射線について「1」を使用し計算されるべきである。ただし、DCRL の範囲内またはそれに近い場合には、RBE 加重の追加的な見直しや修正が正当化される。

全てのエネルギーの光子及び電子(トリチウムのβ線も含む)において、RBE の値は最大 4 倍程度の幅が示されており、より低いエネルギーでより高い値を示している。にも関わらず、全てのエネルギーの光子及び電子の放射線加重係数は「1」とされている。このことに対して、ICRP Pub148 では、RAP に対する「RBE で加重された吸収線量率」の検討において RBE データを用いる場合、「放射線、種、および効果全体に適用するための単純なスキームが必要」としている。また、ヒトに対しては「計画されたばく露状況におけるヒトの防護のための線量限度及び線量拘束値は、組織反応が起こらず、確率的影響の推定リスクが非常に小さいレベル(DCRL と比べるとはるかに低い)に設定される」という考えに基づき、β線とγ線についての放射線加重係数が判断されている。このことは、低い線量域においては RBE のデータが得られておらず、高い線量域(DCRL は有害な影響が発生する可能性のあるレベル)において RBE のデータが得られていることとも関係があると言えるだろう。だからこそ、ICRP Pub148 では、「ただし、基準を逸脱しうるケース(DCRL の範囲内もしくは近傍)では、数値の上方修正も必要」としている。

以上、ICRP における最新の ICRP Pub148 の調査結果より、トリチウムのβ線に係る放射線加重係数は、これまでの勧告で示されてきた「1」という数値を変更する必要は無く、よって、現時点において線量換算係数の見直しも必要では無いと言える。

3. 多核種除去設備等処理水に関連するデータの収集・分析支援

3.1 主要国及び日本の原発立地地域におけるトリチウムの大気・海洋・河川・降雨の濃度

(1) 英国における各試料のトリチウム濃度

英国環境庁らによるレポート^[3-1]より、2020年におけるモニタリング結果を表 3-1 および表 3-2 にまとめる。

表 3-1 2020 年英国における陸生食品および周辺環境の濃度(最大値)

| サイト | 濃度 (Bq/kg) | 対象 |
|----------------------|------------|--|
| Sellafield | <17 | Grass (Braystones) |
| Dungeness | <13 | Grass (Lydd) 等 |
| Hartlepool | <20 | Grass (0.8km NW of site) |
| Heysham | <14 | Grass (Half Moon Bay, recreation ground) |
| Hinkley Point | <12 | Grass (Gunter's Grove) |
| Hunterston | <5 | Milk 等 |
| Sizewell | <18 | Grass (Sizewell common) |
| Torness | <5 | Milk 等 |
| Berkeley and Oldbury | <4.3 | Milk 等 |
| Bradwell | 4.2 | Freshwater(Coastal ditch, east face of turbine hall) |
| Chapelcross | <15 | Milk |
| Trawsfynydd | <7.8 | Grass |
| Wylfa | <15 | Grass(Foel Fawr) |

表 3-2 2020 年英国における海域の濃度(最大値)

| サイト | 濃度 (Bq/kg) | 対象 |
|----------------------|------------|-----------------------------|
| Irish Sea | 25 | North Anglesey |
| Dungeness | <25 | Pipeline 等 |
| Hartlepool | <25 | Pipeline 等 |
| Heysham | 110 | Winkles |
| Hinkley Point | <25 | Cod 等 |
| Hunterston | 1.5 | Seawater |
| Sizewell | <25 | Sprat 等 |
| Torness | - | |
| Berkeley and Oldbury | <25 | Mullet(Severn Beach) 等 |
| Bradwell | <3.5 | Seawater(Bradwell Pipeline) |
| Chapelcross | 6.5 | Shrimps |

| | | |
|-------------|------|-------------------------|
| Trawsfynydd | <3.4 | Freshwater(Afon Prysor) |
| Wylfa | 25 | Plaice(Pipeline) |

また、各試料の最大値はそれぞれ以下のとおりであった。

- ・ 牛乳:<5.1Bq/kg(Dumfriesshire)
- ・ 雨水:<1.7Bq/kg(Aberporth 等)
- ・ 飲料水(Scotland):5.0Bq/kg(Dumfries and Galloway Gullielands Burn)
- ・ 飲料水(England):<4.2Bq/kg(Derbyshire Arnfield Water Treatment Plant 等)
- ・ 飲料水(Northern Ireland):<7.2 Bq/kg (Co. Londonderry R Faughan 等)
- ・ 海水:20 Bq/kg (Heysham)

(2) 我が国における各試料のトリチウム濃度

公益財団法人日本分析センターの環境放射線データベース^[3-2]によれば、2021年1月～2022年3月の間の各試料のトリチウム分析結果は表 3-3 から表 3-8 のとおりである。(調査日:2022年3月24日)

表 3-3 大気浮遊じん・大気の実験結果

| 都道府県名 | 試料採取地点 | 試料名 | 試料採取開始日 | 核種名 | 放射能濃度 | 放射能濃度単位 |
|-------|---------|-----|------------|-----|-------|-----------|
| 青森県 | 青森市 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 青森市 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 青森市 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 青森市 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 青森市 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 青森市 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |

| | | | | | | |
|-----|---------|----|------------|-----|-------|-----------|
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 大気 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 福島市 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 2.5 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 福島市 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 690 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 福島市 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 4.3 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 福島市 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 1100 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 福島市 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 2.8 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 福島市 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 530 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡檜葉町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 2.2 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡檜葉町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 620 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡檜葉町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 1.7 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡檜葉町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 470 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡檜葉町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 5.4 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡檜葉町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 930 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡富岡町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 2 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡富岡町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 540 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡富岡町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 2 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡富岡町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 530 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡富岡町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 3.6 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡富岡町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 600 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 2.4 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 650 | mBq/L-水分 |

| | | | | | | |
|-----|--------|----|----------|-----|-------|-----------|
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 2 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 540 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 4.7 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 810 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 16 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 4200 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 9.1 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 2300 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 19 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 3200 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡双葉町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 2.8 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡双葉町 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 730 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡双葉町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 5.9 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡双葉町 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 1500 | mBq/L-水分 |
| 福島県 | 双葉郡双葉町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 8 | mBq/m3-空気 |
| 福島県 | 双葉郡双葉町 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 1300 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 新潟市西区 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 1.9 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 新潟市西区 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 450 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 新潟市西区 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 新潟市西区 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 新潟市西区 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 3.6 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 新潟市西区 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 640 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 2 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 450 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 4 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 700 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 2.1 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 470 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 2.9 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 520 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 2.3 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/1/4 | H-3 | 540 | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 検出されず | mBq/m3-空気 |

| | | | | | | |
|-----|--------|-------|------------|-----|-------|-----------|
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/2/1 | H-3 | 検出されず | mBq/L-水分 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 3.2 | mBq/m3-空気 |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 大気 | 2021/3/1 | H-3 | 560 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 福井市 | 大気中水分 | 2021/1/7 | H-3 | 800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 福井市 | 大気中水分 | 2021/2/3 | H-3 | 800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 福井市 | 大気中水分 | 2021/3/2 | H-3 | 600 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/1/8 | H-3 | 1600 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/2/3 | H-3 | 1200 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 1900 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2020/12/25 | H-3 | 1400 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/1/29 | H-3 | 2000 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/2/26 | H-3 | 1800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2020/12/25 | H-3 | 800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/1/29 | H-3 | 600 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/2/26 | H-3 | 1000 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/1/6 | H-3 | 1200 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/2/4 | H-3 | 1100 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/3/4 | H-3 | 1400 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/1/6 | H-3 | 1100 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/2/4 | H-3 | 800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/3/4 | H-3 | 1100 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2020/12/28 | H-3 | 1600 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 1600 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 900 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/1/8 | H-3 | 1200 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/2/3 | H-3 | 800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 敦賀市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 1300 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 2500 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 3000 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 1400 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 大気中水分 | 2021/1/8 | H-3 | 1300 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 大気中水分 | 2021/2/3 | H-3 | 1100 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 1300 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 大気中水分 | 2021/1/7 | H-3 | 9100 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 大気中水分 | 2021/2/2 | H-3 | 7900 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 大気中水分 | 2021/3/2 | H-3 | 6800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 大気中水分 | 2021/1/5 | H-3 | 2900 | mBq/L-水分 |

| | | | | | | |
|-----|---------|-------|----------|-----|------|-----------|
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 大気中水分 | 2021/2/2 | H-3 | 3800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 大気中水分 | 2021/3/2 | H-3 | 4800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 大気中水分 | 2021/1/5 | H-3 | 2900 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 大気中水分 | 2021/2/2 | H-3 | 3000 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 大気中水分 | 2021/3/2 | H-3 | 2500 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 大気中水分 | 2021/1/7 | H-3 | 2900 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 大気中水分 | 2021/2/2 | H-3 | 1800 | mBq/L-水分 |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 大気中水分 | 2021/3/2 | H-3 | 2400 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 2.7 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 610 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 4.2 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 1000 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 3.7 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 800 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 2.5 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 520 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 5.2 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 1100 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 4.8 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 780 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 2.7 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 610 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 2.9 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 680 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 2.4 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 430 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 2.7 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/1/4 | H-3 | 670 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 4.2 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/2/1 | H-3 | 820 | mBq/L-水分 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 4 | mBq/m3-空気 |
| 静岡県 | 御前崎市 | 大気中水分 | 2021/3/1 | H-3 | 820 | mBq/L-水分 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/1/5 | H-3 | 1.6 | mBq/m3-空気 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/1/5 | H-3 | 340 | mBq/L-水分 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/2/1 | H-3 | 2.9 | mBq/m3-空気 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/2/1 | H-3 | 550 | mBq/L-水分 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/3/2 | H-3 | 3.2 | mBq/m3-空気 |

| | | | | | | |
|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----------|
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/3/2 | H-3 | 470 | mBq/L-水分 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/1/5 | H-3 | 1.6 | mBq/m3-空気 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/1/5 | H-3 | 330 | mBq/L-水分 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/2/1 | H-3 | 2.7 | mBq/m3-空気 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/2/1 | H-3 | 500 | mBq/L-水分 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/3/2 | H-3 | 2.9 | mBq/m3-空気 |
| 島根県 | 松江市 | 大気水 | 2021/3/2 | H-3 | 430 | mBq/L-水分 |

表 3-4 降下物の分析結果

| 都道府県名 | 試料採取地点 | 試料名 | 試料採取開始日 | 核種名 | 放射能濃度 | 放射能濃度単位 |
|-------|--------|-------|----------|-----|-------|---------|
| 青森県 | むつ市 | 月間降下物 | 2021/1/4 | H-3 | 0.39 | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 月間降下物 | 2021/2/1 | H-3 | 0.45 | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 月間降下物 | 2021/3/1 | H-3 | 0.66 | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 月間降下物 | 2021/4/1 | H-3 | 0.62 | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 月間降下物 | 2021/5/6 | H-3 | 0.72 | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 月間降下物 | 2021/6/1 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 福島県 | 福島市 | 月間降下物 | 2021/1/4 | H-3 | 0.46 | Bq/L |
| 福島県 | 福島市 | 月間降下物 | 2021/2/1 | H-3 | 0.31 | Bq/L |
| 福島県 | 福島市 | 月間降下物 | 2021/3/1 | H-3 | 0.58 | Bq/L |
| 福島県 | 福島市 | 月間降下物 | 2021/4/1 | H-3 | 0.53 | Bq/L |
| 福島県 | 福島市 | 月間降下物 | 2021/5/6 | H-3 | 0.87 | Bq/L |
| 福島県 | 福島市 | 月間降下物 | 2021/6/1 | H-3 | 0.68 | Bq/L |
| 千葉県 | 千葉市稲毛区 | 月間降下物 | 2021/1/4 | H-3 | 0.37 | Bq/L |
| 千葉県 | 千葉市稲毛区 | 月間降下物 | 2021/2/1 | H-3 | 0.16 | Bq/L |
| 千葉県 | 千葉市稲毛区 | 月間降下物 | 2021/3/1 | H-3 | 0.34 | Bq/L |
| 千葉県 | 千葉市稲毛区 | 月間降下物 | 2021/4/1 | H-3 | 0.3 | Bq/L |
| 千葉県 | 千葉市稲毛区 | 月間降下物 | 2021/5/6 | H-3 | 0.62 | Bq/L |
| 千葉県 | 千葉市稲毛区 | 月間降下物 | 2021/6/1 | H-3 | 0.59 | Bq/L |
| 京都府 | 京都市伏見区 | 月間降下物 | 2021/1/4 | H-3 | 0.41 | Bq/L |
| 京都府 | 京都市伏見区 | 月間降下物 | 2021/2/1 | H-3 | 0.33 | Bq/L |
| 京都府 | 京都市伏見区 | 月間降下物 | 2021/3/1 | H-3 | 0.43 | Bq/L |
| 京都府 | 京都市伏見区 | 月間降下物 | 2021/4/1 | H-3 | 0.35 | Bq/L |
| 京都府 | 京都市伏見区 | 月間降下物 | 2021/5/6 | H-3 | 0.41 | Bq/L |
| 京都府 | 京都市伏見区 | 月間降下物 | 2021/6/1 | H-3 | 0.63 | Bq/L |

表 3-5 降水の分析結果

| 都道府県名 | 試料採取地点 | 試料名 | 試料採取開始日 | 核種名 | 放射能濃度 | 放射能濃度単位 |
|-------|---------|-----|------------|-----|-------|---------|
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 雨水 | 2020/12/28 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 雨水 | 2021/1/29 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 雨水 | 2021/2/26 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福井県 | 福井市 | 雨水 | 2021/1/6 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀市 | 雨水 | 2021/1/4 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀市 | 雨水 | 2021/1/4 | H-3 | 1.2 | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀市 | 雨水 | 2021/1/8 | H-3 | 0.8 | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀市 | 雨水 | 2021/1/8 | H-3 | 0.9 | Bq/L |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 雨水 | 2021/1/8 | H-3 | 0.9 | Bq/L |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 雨水 | 2021/1/4 | H-3 | 1.6 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 雨水 | 2021/1/7 | H-3 | 3.7 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 雨水 | 2021/1/5 | H-3 | 1 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 雨水 | 2021/1/5 | H-3 | 2.8 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 雨水 | 2021/1/7 | H-3 | 2 | Bq/L |
| 愛媛県 | 西宇和郡伊方町 | 降水 | 2021/2/1 | H-3 | 0.6 | Bq/L |
| 愛媛県 | 西宇和郡伊方町 | 降水 | 2021/3/1 | H-3 | 0.7 | Bq/L |
| 愛媛県 | 西宇和郡伊方町 | 降水 | 2021/3/30 | H-3 | 0.5 | Bq/L |

表 3-6 陸水の分析結果

| 都道府県名 | 試料採取地点 | 試料名 | 試料採取開始日 | 核種名 | 放射能濃度 | 放射能濃度単位 |
|-------|---------|-----|-----------|-----|-------|---------|
| 北海道 | 玉川 | 河川水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 堀株川 | 河川水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 岩内郡共和町 | 蛇口水 | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 岩内郡共和町 | 井戸水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 岩内郡共和町 | 蛇口水 | 2021/1/14 | H-3 | 0.43 | Bq/L |
| 北海道 | 岩内郡共和町 | 蛇口水 | 2021/1/14 | H-3 | 0.69 | Bq/L |
| 北海道 | 岩内郡岩内町 | 蛇口水 | 2021/2/10 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 古宇郡泊村 | 蛇口水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 古宇郡泊村 | 蛇口水 | 2021/1/14 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 古宇郡神恵内村 | 蛇口水 | 2021/2/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 井戸水 | 2021/1/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 蛇口水 | 2021/1/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | むつ市 | 蛇口水 | 2021/1/5 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 蛇口水 | 2021/1/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡横浜町 | 井戸水 | 2021/1/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |

| | | | | | | |
|-----|---------|-----|-----------|-----|-------|------|
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 蛇口水 | 2021/1/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 井戸水 | 2021/1/5 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 井戸水 | 2021/1/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 蛇口水 | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 蛇口水 | 2021/1/8 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 蛇口水 | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 井戸水 | 2021/1/5 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 蛇口水 | 2021/1/8 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 上北郡六ヶ所村 | 蛇口水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 下北郡東通村 | 蛇口水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 下北郡東通村 | 井戸水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 下北郡東通村 | 蛇口水 | 2021/1/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 下北郡東通村 | 蛇口水 | 2021/1/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 宮城県 | 石巻市 | 源水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 宮城県 | 牡鹿郡女川町 | 源水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | いわき市 | 蛇口水 | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 田村市 | 蛇口水 | 2021/1/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 南相馬市 | 蛇口水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 伊達郡川俣町 | 蛇口水 | 2021/1/5 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡広野町 | 蛇口水 | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡橋葉町 | 蛇口水 | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡富岡町 | 蛇口水 | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡川内村 | 蛇口水 | 2021/1/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡大熊町 | 蛇口水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡双葉町 | 蛇口水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡浪江町 | 蛇口水 | 2021/1/6 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉郡葛尾村 | 蛇口水 | 2021/1/5 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 相馬郡飯館村 | 蛇口水 | 2021/1/5 | H-3 | 0.36 | Bq/L |
| 新潟県 | 柏崎市 | 蛇口水 | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 新潟県 | 柏崎市 | 蛇口水 | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 新潟県 | 柏崎市 | 井戸水 | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 蛇口水 | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 新潟県 | 刈羽郡刈羽村 | 蛇口水 | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 大坪川 | 河川水 | 2021/1/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 羽咋郡志賀町 | 蛇口水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 羽咋郡志賀町 | 蛇口水 | 2021/1/13 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 羽咋郡志賀町 | 蛇口水 | 2021/1/13 | H-3 | 検出されず | Bq/L |

| | | | | | | |
|------|-------------|-----|-----------|-----|-------|------|
| 福井県 | 敦賀市 | 蛇口水 | 2021/2/5 | H-3 | 0.8 | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀市 | 蛇口水 | 2021/2/8 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 蛇口水 | 2021/2/1 | H-3 | 0.9 | Bq/L |
| 福井県 | 三方郡美浜町 | 蛇口水 | 2021/2/1 | H-3 | 0.6 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 蛇口水 | 2021/2/2 | H-3 | 1.1 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 蛇口水 | 2021/2/2 | H-3 | 0.8 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡高浜町 | 蛇口水 | 2021/2/2 | H-3 | 0.6 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯郡おおい町 | 蛇口水 | 2021/2/2 | H-3 | 0.7 | Bq/L |
| 愛媛県 | 西予市 | 陸水 | 2021/1/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 愛媛県 | 西予市 | 陸水 | 2021/1/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 愛媛県 | 西予市 | 陸水 | 2021/1/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 佐賀県 | 玄海町 | 湖沼水 | 2021/1/20 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 佐賀県 | 唐津市 | 蛇口水 | 2021/2/1 | H-3 | 0.26 | Bq/L |
| 佐賀県 | 東松浦郡玄海町 | 蛇口水 | 2021/2/1 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 佐賀県 | 東松浦郡玄海町 | 河川水 | 2021/1/5 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 長崎県 | 嘉例川 | 河川水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 長崎県 | 幡鉢川 | 河川水 | 2021/2/16 | H-3 | 1.35 | Bq/L |
| 長崎県 | 久吹ダム | 湖沼水 | 2021/1/21 | H-3 | 0.88 | Bq/L |
| 長崎県 | 松浦市 | 湖沼水 | 2021/1/22 | H-3 | 0.39 | Bq/L |
| 長崎県 | 松浦市 | 河川水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 長崎県 | 松浦市 | 源水 | 2021/1/22 | H-3 | 0.46 | Bq/L |
| 鹿児島県 | 川内川（川内市高江町） | 河川水 | 2021/1/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 鹿児島県 | 宮山池 | 湖沼水 | 2021/1/5 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 鹿児島県 | 薩摩川内市 | 源水 | 2021/2/8 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 鹿児島県 | 薩摩川内市 | 井戸水 | 2021/1/19 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 鹿児島県 | 薩摩川内市 | 源水 | 2021/1/19 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 鹿児島県 | いちき串木野市 | 源水 | 2021/1/13 | H-3 | 検出されず | Bq/L |

表 3-7 海水の分析結果

| 都道府県名 | 試料採取地点 | 試料名 | 試料採取開始日 | 核種名 | 放射能濃度 | 放射能濃度単位 |
|-------|--------|-----|-----------|-----|-------|---------|
| 北海道 | 岩内沖 | 海水 | 2021/1/25 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 神恵内沖 | 海水 | 2021/1/26 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 泊沖 | 海水 | 2021/1/24 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 泊沖 | 海水 | 2021/1/25 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 泊沖 | 海水 | 2021/1/24 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 泊沖 | 海水 | 2021/1/25 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 北海道 | 泊沖 | 海水 | 2021/1/25 | H-3 | 検出されず | Bq/L |

| | | | | | | |
|-----|---------|---------|-----------|-----|-------|------|
| 北海道 | 泊沖 | 海水 | 2021/1/25 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 六ヶ所沖 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 六ヶ所沖 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 六ヶ所沖 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 東通村沖 | 海水 | 2021/1/13 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 東通村沖 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 東通村沖 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 東通村沖 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 東通村沖 | 海水 | 2021/1/13 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 宮城県 | 女川沖 | 海水(表層水) | 2021/1/20 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 宮城県 | 女川沖口 | 海水(表層水) | 2021/1/20 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/2/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/2/18 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 富岡・楡葉沖 | 海水(表面水) | 2021/2/19 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 富岡・楡葉沖 | 海水(表面水) | 2021/2/19 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 富岡・楡葉沖 | 海水(表面水) | 2021/2/19 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 富岡・楡葉沖 | 海水(表面水) | 2021/2/19 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 富岡・楡葉沖 | 海水(表面水) | 2021/2/19 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 夫沢・熊川沖 | 海水(表面水) | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 夫沢・熊川沖 | 海水(表面水) | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 夫沢・熊川沖 | 海水(表面水) | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/2/19 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・大熊沖 | 海水(表面水) | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・前田川沖 | 海水(表面水) | 2021/1/7 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・前田川沖 | 海水(表面水) | 2021/2/12 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福島県 | 双葉・前田川沖 | 海水(表面水) | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |

| | | | | | | |
|-----|---------|---------|-----------|-----|-------|------|
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/10 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/10 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/11 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/11 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/11 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/12 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/13 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島海域 | 海水 | 2021/1/13 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島第1海域 | 海水 | 2021/1/14 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島第1海域 | 海水 | 2021/1/14 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島第1海域 | 海水 | 2021/1/14 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島第1海域 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島第1海域 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島第1海域 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 福島県 | 福島第1海域 | 海水 | 2021/1/15 | H-3 | 0.1 | Bq/L |
| 新潟県 | 刈羽沖 | 海水(表層水) | 2021/2/1 | H-3 | 0.4 | Bq/L |
| 新潟県 | 刈羽沖 | 海水(表層水) | 2021/2/1 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 志賀沖 | 海水 | 2021/3/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 赤住(江野)沖 | 海水 | 2021/3/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 福浦(丹和)沖 | 海水 | 2021/3/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 石川県 | 志賀沖 | 海水 | 2021/3/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福井県 | 高浜沖 | 海水 | 2021/1/26 | H-3 | 2.6 | Bq/L |
| 福井県 | 高浜沖 | 海水 | 2021/2/12 | H-3 | 1.7 | Bq/L |
| 福井県 | 美浜沖 | 海水 | 2021/2/10 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 福井県 | 美浜沖 | 海水 | 2021/2/10 | H-3 | 0.6 | Bq/L |
| 福井県 | 立石沖 | 海水 | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福井県 | 高浜沖 | 海水 | 2021/1/26 | H-3 | 3.1 | Bq/L |
| 福井県 | 高浜沖 | 海水 | 2021/2/12 | H-3 | 2.8 | Bq/L |
| 福井県 | 高浜沖 | 海水 | 2021/2/12 | H-3 | 3.1 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯沖 | 海水 | 2021/2/12 | H-3 | 0.9 | Bq/L |
| 福井県 | 美浜沖 | 海水 | 2021/2/10 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 福井県 | 大飯沖 | 海水 | 2021/2/12 | H-3 | 0.8 | Bq/L |
| 福井県 | 高浜沖 | 海水 | 2021/1/26 | H-3 | 2.7 | Bq/L |
| 福井県 | 高浜沖 | 海水 | 2021/2/12 | H-3 | 2.2 | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀沖 | 海水 | 2021/2/12 | H-3 | 0.7 | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀沖 | 海水 | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福井県 | 敦賀沖 | 海水 | 2021/3/4 | H-3 | 検出されず | Bq/L |

| | | | | | | |
|------|------|---------|-----------|-----|-------|------|
| 福井県 | 白木沖 | 海水 | 2021/2/22 | H-3 | 0.7 | Bq/L |
| 福井県 | 白木沖 | 海水 | 2021/2/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 島根県 | 輪谷沖 | 海水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 島根県 | 鹿島町沖 | 海水 | 2021/1/21 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 愛媛県 | 平瀨沖 | 海水 | 2021/2/22 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 愛媛県 | 平瀨沖 | 海水 | 2021/2/22 | H-3 | 0.5 | Bq/L |
| 福岡県 | 二丈沖 | 海水 | 2021/2/2 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 福岡県 | 志摩沖 | 海水 | 2021/2/2 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 佐賀県 | 値賀崎沖 | 海水(表層水) | 2021/3/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 佐賀県 | 値賀崎沖 | 海水(表層水) | 2021/3/15 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 長崎県 | 松浦市 | 海水 | 2021/1/22 | H-3 | 0.7 | Bq/L |
| 長崎県 | 平戸市 | 海水 | 2021/1/21 | H-3 | 1.1 | Bq/L |
| 長崎県 | 壱岐市 | 海水 | 2021/2/16 | H-3 | 0.2 | Bq/L |
| 鹿児島県 | 久見崎沖 | 海水(表層水) | 2021/3/9 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 鹿児島県 | 久見崎沖 | 海水(表層水) | 2021/3/9 | H-3 | 検出されず | Bq/L |

表 3-8 水産物の分析結果

| 都道府県名 | 試料採取地点 | 試料名 | 試料採取開始日 | 核種名 | 放射能濃度 | 放射能濃度単位 |
|-------|--------|---------|-----------|-----|-------|---------|
| 青森県 | 六ヶ所沖 | 魚類(ヒラメ) | 2021/1/18 | H-3 | 検出されず | Bq/L |
| 青森県 | 六ヶ所沖 | 魚類(ヒラメ) | 2021/1/18 | H-3 | 検出されず | Bq/kg-生 |

3.2 主要国のトリチウム(大気・海洋)の排出量

英国の再処理施設及び原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020年)^[3-1]を表3-9に示す。

表 3-9 英国の再処理施設及び原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020年)

| サイト | 気体 (Bq/年) | 液体 (Bq/年) |
|---------------------|-----------|-----------|
| Sellafield | 3.75E+13 | 1.86E+14 |
| Berkeley | 5.58E+09 | 3.91E+07 |
| Bradwell | 6.10E+09 | 1.20E+09 |
| Chapelcross | 3.10E+13 | - |
| Dungeness A Station | 3.25E+10 | 1.52E+09 |
| Dungeness B Station | 4.95E+11 | 3.57E+12 |
| Hartlepool | 7.15E+11 | 3.67E+14 |
| Heysham Station 1 | 1.05E+12 | 2.51E+14 |
| Heysham Station 2 | 1.19E+12 | 3.23E+14 |

| | | |
|-------------------------|----------|----------|
| Hinkley Point A Station | 1.20E+10 | 5.77E+08 |
| Hinkley Point B Station | 4.79E+11 | 8.01E+13 |
| Hunterston A Station | 5.39E+08 | 1.30E+07 |
| Hunterston B Station | 6.61E+11 | 9.00E+13 |
| Oldbury | 3.65E+10 | 1.26E+09 |
| Sizewell A Station | 2.28E+10 | - |
| Sizewell B Station | 6.60E+11 | 2.27E+13 |
| Torness | 8.62E+11 | 2.99E+14 |
| Trawsfynydd | 1.95E+10 | 1.31E+09 |
| Wylfa | 4.00E+10 | 5.70E+08 |

カナダの原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2019年)^[3-3]を表 3-10 に示す。

表 3-10 カナダの原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2019年)

| サイト | 気体 (Bq/年) | | 液体 (Bq/年) |
|-----------|-----------|----------|-----------|
| | HT | HTO | |
| ダーリントン | 2.3E+13 | 2.0E+14 | 1.0E+10 |
| ピッカリング | | 5.6E+10 | 4.3E+10 |
| ブルース A | | 4.63E+10 | 2.12E+10 |
| ブルース B | | 3.30E+10 | 8.82E+10 |
| ポイント・ルプロー | | 2.5E+10 | 3.4E+10 |
| ジェンティリー | | 7.21E+10 | 8.22E+10 |

仏国の再処理施設及び原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020年)^[3-4]を表 3-11 に示す。

表 3-11 仏国の再処理施設及び原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020年)

| サイト | 気体 (Bq/年) | 液体 (Bq/年) |
|------------------------------|-----------|-----------|
| ORANO cycle La Hague | 5.81E+13 | 1.14E+16 |
| CNPE de Belleville-sur-Loire | 1.13E+12 | 5.14E+13 |
| CNPE du Blayais (1) | 9.41E+11 | 3.51E+13 |
| CNPE de Bugey | 7.05E+11 | 3.53E+13 |
| CNPE de Cattenom | 2.11E+12 | 8.87E+13 |
| CNPE de Chinon | 1.11E+12 | 4.16E+13 |
| CNPE de Chooz | 5.57E+11 | 3.29E+13 |
| CNPE de Civaux | 1.09E+12 | 6.01E+13 |
| CNPE de Creys-Malville | 4.92E+11 | 8.27E+09 |

| | | |
|--------------------------------|----------|----------|
| CNPE de Cruas | 1.14E+12 | 3.21E+13 |
| CNPE de Dampierre-en-Burly | 1.13E+12 | 3.71E+13 |
| CNPE de Fessenheim | 6.17E+11 | 1.60E+13 |
| CNPE de Flamanville | 7.28E+11 | 1.55E+12 |
| CNPE de Golfech | 7.76E+11 | 5.24E+13 |
| CNPE de Gravelines | 1.67E+12 | 5.92E+13 |
| CNPE de Nogent-sur-Seine | 6.84E+11 | 4.72E+13 |
| CNPE de Paluel | 1.58E+12 | 7.43E+13 |
| CNPE de Penly | 7.27E+11 | 5.06E+13 |
| CNPE de Saint-Alban | 1.04E+12 | 4.86E+13 |
| CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux | 7.26E+11 | 2.28E+13 |
| CNPE de Tricastin | 9.54E+11 | 3.85E+13 |

韓国の原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2021年)^[3-5]を表 3-12 に示す。

表 3-12 韓国の原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2021年)

| 2021年 | 放出量 (TBq) | 古里 | セウル | ハンビット | ハンウル | 月城 |
|-------|--------------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1月 | 液体 | 0.95 | 0.18 | 5.98 | 3.04 | 12.09 |
| | 気体 | 1.19 | 0.04 | 1.4 | 1.29 | 6.63 |
| 2月 | 液体 | 0.71 | 0.21 | 1.41 | 2.43 | 3.34 |
| | 気体 | 1.26 | 0.03 | 1.32 | 0.57 | 6.76 |
| 3月 | 液体 | 7.6 | 0.7 | 1.42 | 3.23 | 7.3 |
| | 気体 | 1.73 | 0.04 | 1.55 | 0.99 | 7.26 |
| 4月 | 液体 | 3.98 | 0.35 | 2.28 | 6.56 | 14.6 |
| | 気体 | 1.31 | 0.03 | 1.67 | 0.8 | 6.75 |
| 5月 | 液体 | 10.34 | 0.64 | 3.61 | 3.72 | 8.25 |
| | 気体 | 1.72 | 0.03 | 1.41 | 0.61 | 7.52 |
| 6月 | 液体 | 7.87 | 1.19 | 1.54 | 11.73 | 7.77 |
| | 気体 | 1.71 | 0.04 | 1.44 | 1.04 | 7.95 |
| 7月 | 液体 | 2.88 | 0.62 | 1.86 | 2.59 | 3.67 |
| | 気体 | 1.72 | 0.03 | 1.57 | 1.84 | 8.29 |
| 8月 | 液体 | 0.75 | 22.8 | 1.86 | 3.87 | 4.98 |
| | 気体 | 2.76 | 0.04 | 1.51 | 1.89 | 9.15 |
| 9月 | 液体 | 2.16 | 7.28 | 0.93 | 2.3 | 3.22 |
| | 気体 | 2.16 | 0.07 | 1.51 | 1.78 | 7.88 |
| 10月 | 液体 | 2.77 | 1.02 | 1.07 | 1.25 | 2.11 |

| | | | | | | |
|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 気体 | 2 | 0.08 | 1.62 | 0.95 | 8.35 |
| 11 月 | 液体 | 4.62 | 0.18 | 1.19 | 6.45 | 1.97 |
| | 気体 | 1.45 | 0.09 | 1.44 | 0.86 | 7.95 |
| 12 月 | 液体 | 4.25 | 0.12 | 0.39 | 4.71 | 1.83 |
| | 気体 | 1.46 | 0.04 | 1.57 | 1.05 | 7.95 |
| 年間合計 | 液体 | 48.88 | 35.29 | 23.54 | 51.88 | 71.13 |
| | 気体 | 20.47 | 0.56 | 18.01 | 13.67 | 92.44 |

米国の原子力発電施設(BWR)における直近のトリチウム放出実績(2019 年)^[3-6]を表 3-13 に示す。

表 3-13 米国の原子力発電施設(BWR)における直近のトリチウム放出実績(2019 年)

| BWR Facility | 気体 H-3 (Ci) | 液体 H-3 (Ci) |
|-------------------|-------------|-------------|
| Peach Bottom 2 | 3.72E+01 | 4.58E+00 |
| Peach Bottom 3 | 3.72E+01 | 4.58E+00 |
| LaSalle 1 | 3.58E+01 | |
| LaSalle 2 | 3.58E+01 | |
| Clinton | 3.00E+01 | |
| Duane Arnold | 2.87E+01 | 1.73E-01 |
| Hatch 2 | 2.79E+01 | 2.99E+01 |
| Hatch 1 | 2.42E+01 | 5.88E+01 |
| River Bend | 2.21E+01 | 5.67E+01 |
| Grand Gulf | 2.15E+01 | 2.09E+01 |
| Nine Mile Point 1 | 1.61E+01 | |
| Columbia | 1.50E+01 | |
| Monticello | 1.40E+01 | |
| FitzPatrick | 1.35E+01 | 1.90E-02 |
| Dresden 3 | 1.06E+01 | 2.18E-02 |
| Cooper | 9.23E+00 | 5.22E+00 |
| Perry | 1.38E+00 | 2.22E+01 |
| Hope Creek | 3.84E+02 | 9.92E+02 |
| Browns Ferry 1 | 2.42E+02 | 5.34E+01 |
| Browns Ferry 2 | 2.42E+02 | 5.34E+01 |
| Browns Ferry 3 | 2.42E+02 | 5.34E+01 |
| Nine Mile Point 2 | 1.58E+02 | |
| Susquehanna 1 | 9.01E+01 | 1.57E+01 |
| Susquehanna 2 | 9.01E+01 | 1.57E+01 |

| | | |
|---------------|----------|----------|
| Brunswick 1 | 8.14E+01 | 4.95E+01 |
| Brunswick 2 | 8.14E+01 | 4.95E+01 |
| Fermi 2 | 4.61E+01 | |
| Quad Cities 1 | 4.35E+01 | 7.97E-02 |
| Quad Cities 2 | 4.35E+01 | 7.97E-02 |
| Limerick 1 | 4.32E+01 | 6.42E+00 |
| Limerick 2 | 4.32E+01 | 6.42E+00 |
| Dresden 2 | 3.88E+01 | 2.18E-02 |

米国の原子力発電施設(PWR)における直近のトリチウム放出実績(2019年)^[3-6]を表 3-14 に示す。

表 3-14 米国の原子力発電施設(PWR)における直近のトリチウム放出実績(2019年)

| PWR Facility | 気体 H-3 (Ci) | 液体 H-3 (Ci) |
|------------------|-------------|-------------|
| Point Beach 1 | 3.51E+01 | 3.15E+02 |
| Point Beach 2 | 3.51E+01 | 3.15E+02 |
| Summer | 3.28E+01 | 8.44E+02 |
| Davis-Besse | 3.23E+01 | 9.99E+02 |
| Robinson 2 | 2.61E+01 | 2.84E+02 |
| Arkansas 2 | 2.47E+01 | 5.10E+02 |
| Arkansas 1 | 2.10E+01 | 5.70E+02 |
| North Anna 1 | 2.00E+01 | 9.76E+02 |
| North Anna 2 | 2.00E+01 | 9.76E+02 |
| St. Lucie 1 | 1.97E+01 | 4.29E+02 |
| Watts Bar 1 | 1.93E+01 | 2.82E+03 |
| Surry 1 | 1.92E+01 | 6.22E+02 |
| Surry 2 | 1.92E+01 | 6.22E+02 |
| Indian Point 3 | 1.88E+01 | 3.78E+02 |
| Turkey Point 3 | 1.70E+01 | 4.97E+02 |
| Prairie Island 1 | 1.68E+01 | 2.16E+02 |
| Prairie Island 2 | 1.68E+01 | 2.16E+02 |
| Watts Bar 2 | 1.68E+01 | 2.87E+02 |
| Byron 1 | 1.47E+01 | 1.06E+03 |
| Farley 1 | 1.41E+01 | 7.14E+02 |
| Millstone 2 | 1.35E+01 | 3.67E+02 |
| Palisades | 1.30E+01 | 2.16E+02 |
| Comanche Peak 1 | 1.25E+01 | 6.13E+02 |

| | | |
|------------------|----------|----------|
| Comanche Peak 2 | 1.25E+01 | 6.13E+02 |
| Farley 2 | 1.17E+01 | 7.14E+02 |
| Turkey Point 4 | 1.02E+01 | 4.97E+02 |
| Indian Point 2 | 8.57E+00 | 4.54E+02 |
| St. Lucie 2 | 8.54E+00 | 4.29E+02 |
| Sequoyah 1 | 5.47E+00 | 9.15E+02 |
| Sequoyah 2 | 5.47E+00 | 9.15E+02 |
| Calvert Cliffs 1 | 3.95E+00 | 6.17E+02 |
| Calvert Cliffs 2 | 3.95E+00 | 6.17E+02 |
| Palo Verde 3 | 8.16E+02 | |
| Palo Verde 1 | 5.01E+02 | |
| Palo Verde 2 | 3.87E+02 | |
| Salem 1 | 2.37E+02 | 9.92E+02 |
| Ginna | 1.16E+02 | 6.39E+02 |
| Salem 2 | 1.09E+02 | 4.46E+02 |
| Vogle 1 | 9.52E+01 | 8.32E+02 |
| Catawba 1 | 9.48E+01 | 3.67E+02 |
| Catawba 2 | 9.48E+01 | 3.67E+02 |
| South Texas 1 | 7.43E+01 | 8.59E+02 |
| Wolf Creek | 7.15E+01 | 1.55E+03 |
| Harris | 7.03E+01 | 6.13E+02 |
| Seabrook | 6.73E+01 | 6.59E+02 |
| Beaver Valley 1 | 6.66E+01 | 4.97E+02 |
| Beaver Valley 2 | 6.66E+01 | 4.97E+02 |
| Waterford 3 | 5.99E+01 | 4.35E+02 |
| Cook 1 | 5.34E+01 | 1.35E+03 |
| Cook 2 | 5.34E+01 | 1.35E+03 |
| Oconee 1 | 5.10E+01 | 3.14E+02 |
| Oconee 2 | 5.10E+01 | 3.14E+02 |
| Oconee 3 | 5.10E+01 | 3.14E+02 |
| Millstone 3 | 5.04E+01 | 1.41E+03 |
| South Texas 2 | 4.40E+01 | 1.41E+03 |
| Vogle 2 | 3.94E+01 | 4.63E+02 |
| McGuire 1 | 3.92E+01 | 5.42E+02 |
| McGuire 2 | 3.92E+01 | 5.42E+02 |
| Byron 2 | 3.70E+01 | 1.06E+03 |
| Braidwood 1 | 3.66E+01 | 1.68E+03 |

| | | |
|-----------------|----------|----------|
| Braidwood 2 | 3.66E+01 | 1.68E+03 |
| Diablo Canyon 1 | 3.66E+01 | 1.11E+03 |
| Diablo Canyon 2 | 3.66E+01 | 1.11E+03 |
| Callaway | 3.65E+01 | 9.15E+02 |

ドイツの原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(液体)^[3-7]を図 3-1 に示す。

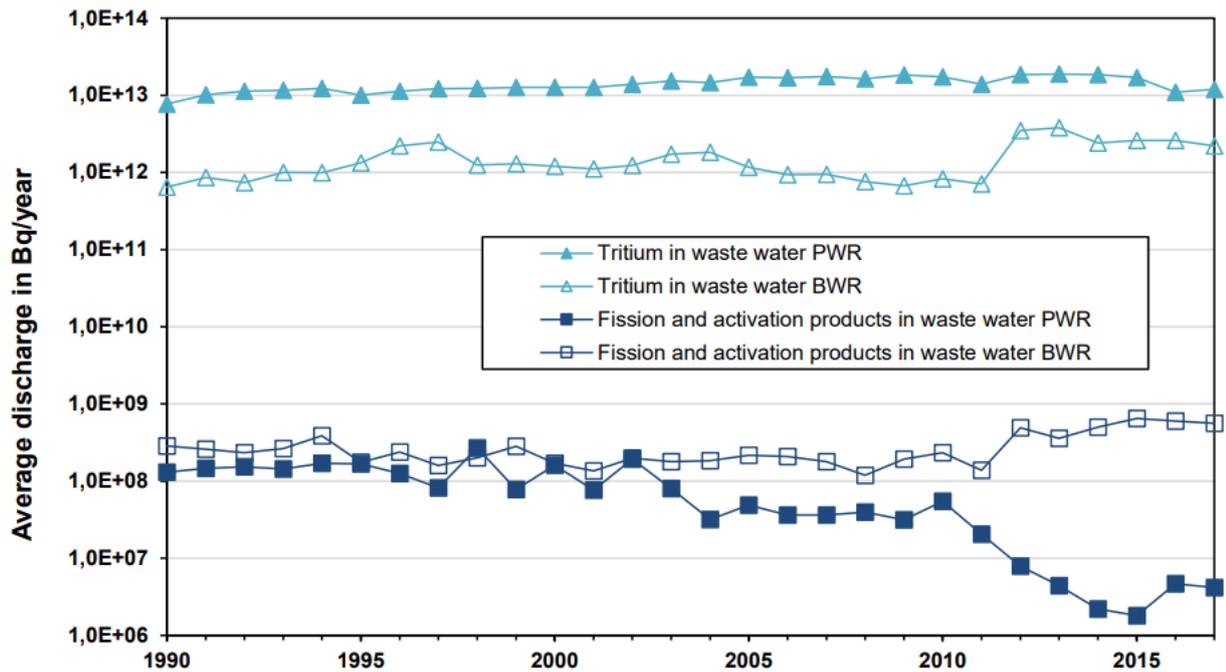


図 3-1 ドイツにおける排水中のトリチウム量

スペインの原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2018年)^[3-8]を図 3-2 に示す。

| | NPP José Cabrera (2) | NPP Almaraz I & II | NPP Ascó I | NPP Ascó II | NPP Vandellós II | NPP Trillo |
|--|----------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Liquid Effluents | | | | | | |
| Total except Tritium and Dissolved Gases | 5.43 10 ⁸ | 8.26 10 ⁹ | 1.69 10 ⁹ | 1.11 10 ⁹ | 8.64 10 ⁹ | 1.94 10 ⁸ |
| Tritium | 1.03 10 ⁸ | 3.51 10 ¹³ | 2.65 10 ¹³ | 4.63 10 ¹³ | 1.52 10 ¹³ | 2.24 10 ¹³ |
| Dissolved Gases | -- | 3.22 10 ⁸ | 5.40 10 ⁷ | 5.88 10 ⁶ | 1.03 10 ⁸ | (3) |
| Gaseous Effluents | | | | | | |
| Noble Gases | -- | 5.80 10 ¹¹ | 3.03 10 ¹¹ | 8.18 10 ¹⁰ | 6.14 10 ¹⁰ | 3.88 10 ¹¹ |
| Halogens | -- | ND | ND | ND | 4.82 10 ⁵ | ND |
| Particles | ND | 8.37 10 ⁴ | 1.56 10 ⁶ | 1.18 10 ⁶ | 4.58 10 ⁷ | ND |
| Tritium | 1.26 10 ⁸ | 3.12 10 ¹² | 5.17 10 ¹¹ | 6.81 10 ¹¹ | 2.27 10 ¹² | 5.79 10 ¹¹ |
| Carbon-14 | -- | 1.71 10 ¹¹ | 8.76 10 ¹⁰ | 1.17 10 ¹¹ | 2.61 10 ¹¹ | 2.68 10 ¹¹ |

図 3-2 スペイン原子力施設において排出された気体及び液体のトリチウム量(2018年)

スロベニアのクルスコ原子力発電所における直近のトリチウム放出実績(液体、気体)^[3-9]を表 3-15 および表 3-16 に示す。

表 3-15 スロベニア クルスコ原子力発電所の液体排出におけるトリチウム量

| LIQUID EFFLUENTS | | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Fission and activation products Limit: 100 GBq | Released activity | 33.6 MBq | 13.8 MBq | 7.2 MBq | 16.9 MBq |
| | % of the limiting value | 0.034 % | 0.014 % | 0.007 % | 0.017 % |
| Tritium (H-3) Limit: 45 TBq | Released activity | 16.3 TBq | 19.9 TBq | 8.6 TBq | 10.5 TBq |
| | % of the limiting value | 36.2% | 44.2% | 19.2% | 23.4% |

表 3-16 スロベニア クルスコ原子力発電所の気体排出におけるトリチウム量

| GASEOUS EFFLUENTS | | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---|-------------------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|
| Fission and activation gases Limit: dose < 50 μSv | Released activity | 3.72 TBq | 1.25 TBq | 1.33 TBq | 0.97 TBq |
| | % of the limiting value | 0.31% | 0.1% | 0.09% | 0.08% |
| Iodines (I-131 and others) Limit: 18,5 GBq (eq. ¹³¹ I) | Released activity | 764 MBq | 52.7 MBq | 8.2 MBq | 27.2 MBq |
| | % of the limiting value | 1.19 % | 0.06 % | 0.015 % | 0.014 % |
| Aerosols (cobalt, cesium ...) Limit: 18.5 GBq (eq. ¹³¹ I) | Released activity | 1.33 MBq | 730 kBq | 1.41 kBq | 5.94 kBq |
| | % of the limiting value | 7.2E-3% | 4E-3 % | 7.6E-6 % | 3.2E-5% |
| Tritium (H-3) No limit | Released activity | 5.56 TBq | 6.17 TBq | 6.08 TBq | 5.13 TBq |
| Carbon (C-14) No limit | Released activity | 78.6 GBq | 118 GBq | 76.7 GBq | 132 GBq |

ルーマニアのチェルナヴオダ原子力発電所における直近のトリチウム放出実績(気体、液体)^[3-10]を図3-3 から図 3-6 に示す。

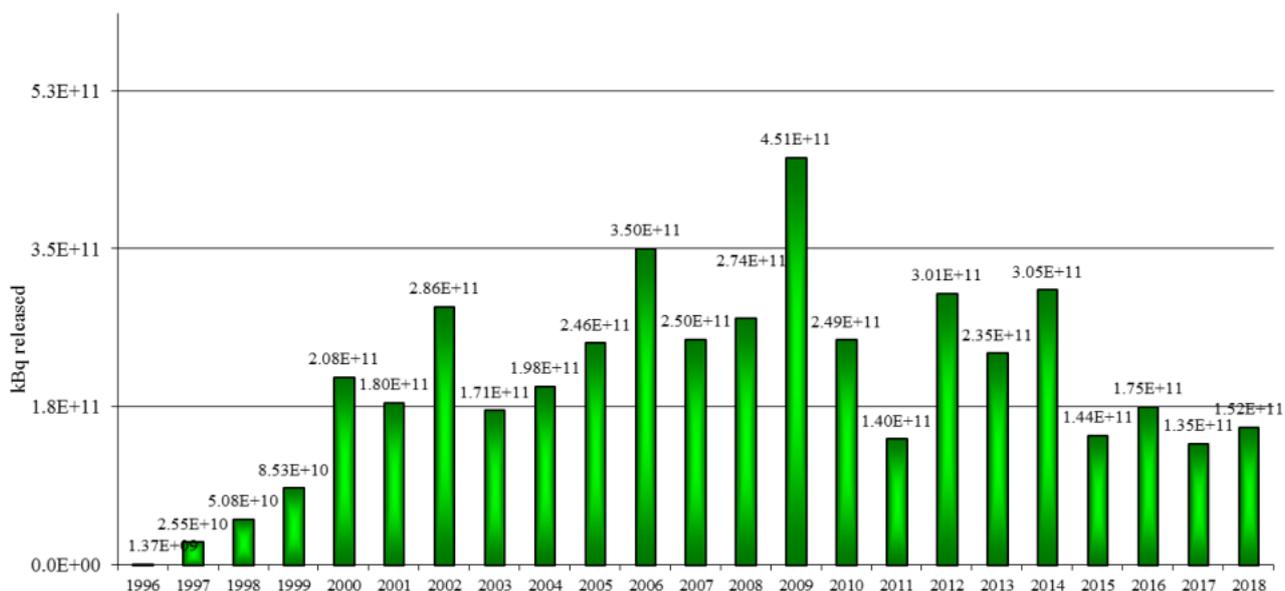


図 3-3 チェルナヴオダ原子力発電所 1 号機の気体排出におけるトリチウム量

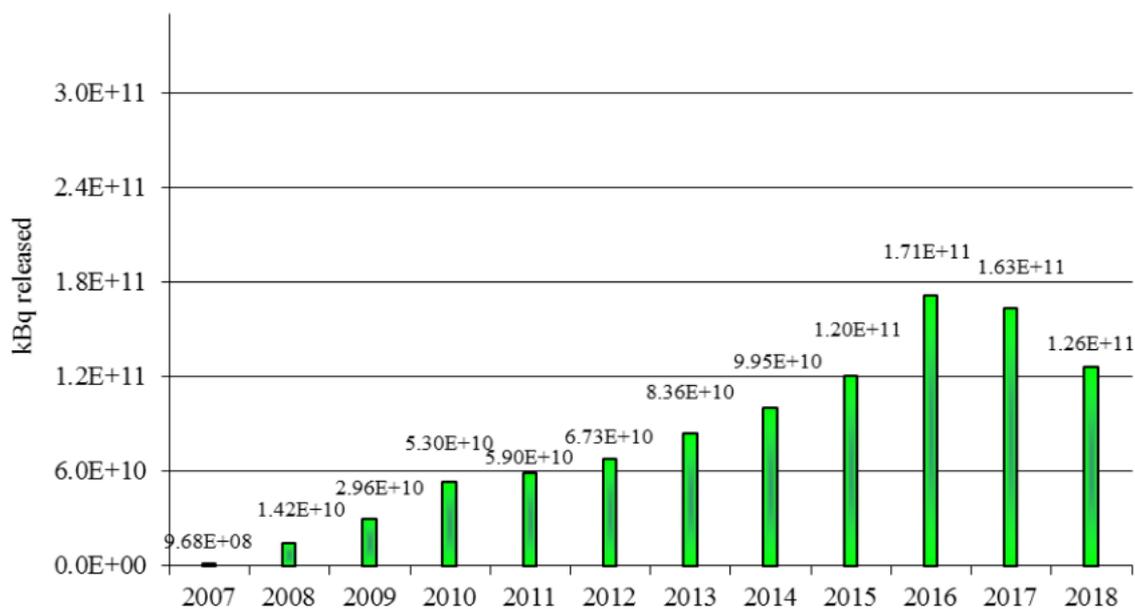


図 3-4 チェルナヴオダ原子力発電所 2 号機の気体排出におけるトリチウム量

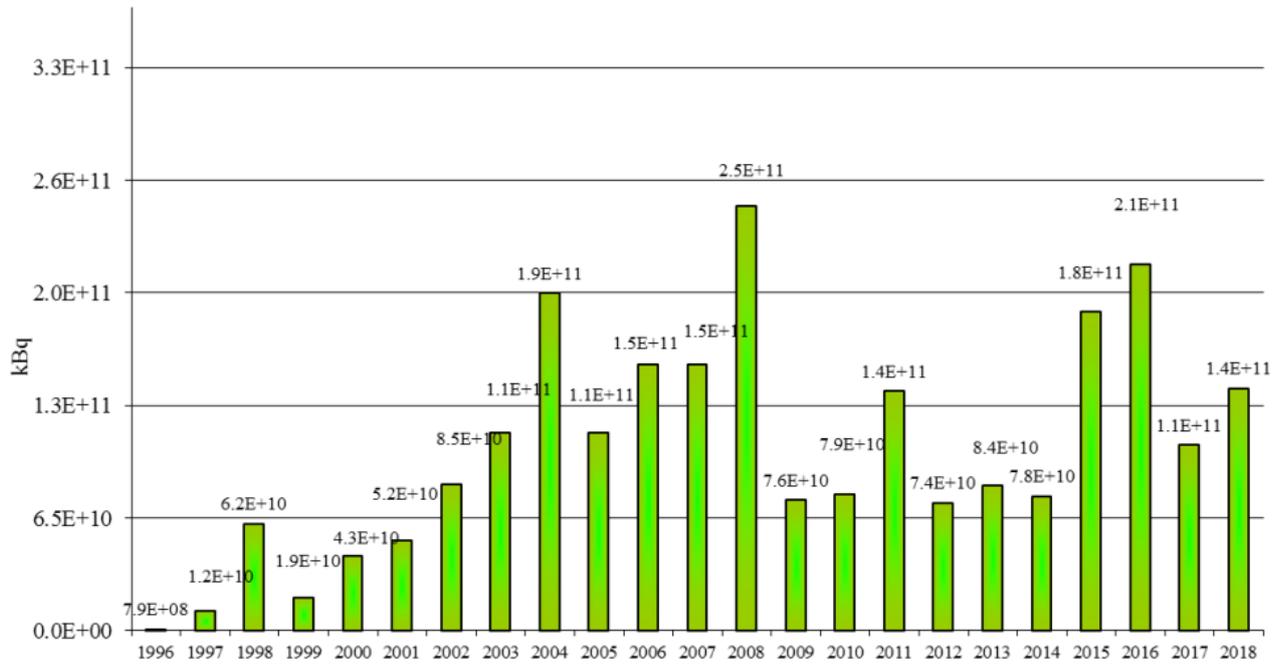


図 3-5 チェルナブォダ原子力発電所 1号機の液体排出におけるトリチウム量

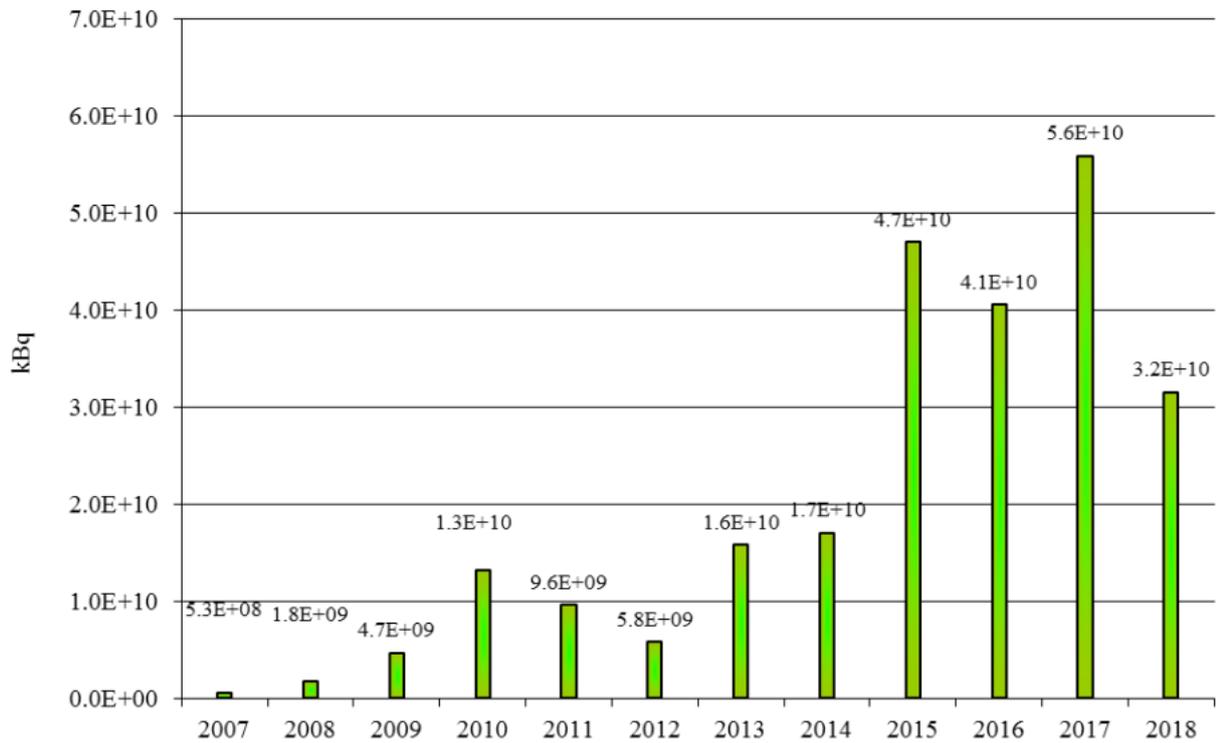


図 3-6 チェルナブォダ原子力発電所 2号機の液体排出におけるトリチウム量

台湾の原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020年)^{[3-11]、[3-12]、[3-13]}を表 3-17 に示す。

表 3-17 台湾の原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(2020年)

| サイト | 気体 H-3 (Bq) | 液体 H-3 (Bq) |
|----------|-------------|-------------|
| 金山 1 号機 | 3.24E+10 | 8.46E+09 |
| 金山 2 号機 | 9.38E+10 | 3.07E+09 |
| 国聖 1 号機 | 4.59E+09 | 6.35E+10 |
| 国聖 2 号機 | 4.19E+11 | |
| 馬鞍山 1 号機 | 3.95E+12 | 3.22E+13 |
| 馬鞍山 2 号機 | 5.86E+12 | |

我が国の原子力発電施設における直近のトリチウム放出実績(令和 2 年度下期)^[3-14]を表 3-18 に示す。

表 3-18 我が国の原子力施設における直近のトリチウム放出実績(令和 2 年度下期)

| 再処理工場・原子力発電所 | 気体 (Bq/年) | 液体 (Bq/年) |
|--------------|-----------|-----------|
| 六ヶ所 | 6.1E+10 | 1.3E+10 |
| 伊方 | 8.4E+11 | 4.4E+12 |
| 川内 | 1.4E+12 | 1.4E+13 |
| 玄海 | 1.1E+12 | 7.1E+13 |
| 柏崎刈羽 | 2.8E+11 | ND |
| 福島第二 | 1.4E+11 | 3.2E+09 |
| 福島第一 | 6.8E+10 | 放出実績なし |
| 島根 | 3.5E+10 | 1.4E+09 |
| 泊 | 1.0E+11 | 4.4E+09 |
| 東通 | 1.8E+10 | 9.0E+09 |
| 女川 | 1.4E+11 | 放出実績なし |
| 東海第二 | 3.8E+09 | 5.6E+09 |
| 東海 | 5.1E+09 | 4.9E+06 |
| 敦賀 | 8.6E+11 | 2.7E+11 |
| 高浜 | 5.4E+12 | 1.3E+13 |
| 美浜 | 3.4E+12 | 1.1E+12 |
| 大飯 | 9.9E+12 | 6.6E+13 |
| 浜岡 | 8.4E+10 | 5.8E+09 |
| 志賀 | 2.5E+10 | ND |

4. トリチウム分離技術の調査

4.1 文献調査

国内外のトリチウム分離技術の最新動向について、文献調査を行った。最新情報を収集するため、対象とする文献は 2021 年以降に発行されたものとし、トリチウムの分離や福島第一原発への適用(すなわち低濃度トリチウムへの対応)について言及されている日本語及び英語の論文等を対象とした。

【調査対象選定の考え方】

- 最新情報を収集するため、対象とする文献は 2021 年以降に発行されたものとする。
- 調査対象言語は、日本語および英語とする。
- トリチウム分離技術に関して言及されている全ての文献を対象とする。なお、本調査の目的に照らし、科学的知見が掲載されていない文献(例えば、コミュニケーションの方法論に対する示唆をまとめた文献、等)は今回の調査対象外とした。
- また、高濃度のトリチウム水を対象としたトリチウム分離技術(例えば、重水炉で用いられている重水からのトリチウム分離技術や核融合で利用されるトリチウムの濃縮、等)も今回の調査対象外とした。何故なら、これらの技術は、福島第一原発における多核種除去設備等処理水に含まれているトリチウム濃度に比べ桁高いトリチウム濃度の水からのトリチウム分離を対象としたものであり、多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会報告書でも、「工学的技術においては、桁が1つでも違えば、別の技術課題として扱われる。トリチウム含有水の量も濃度も桁が相当異なるのであるから、今まで研究開発されてきた技術は当然のことながらそのままの形では適用できない。」としているためである。

【調査対象選定の方法】

- できるだけ幅広く調査するため、本調査においては、世界的にも著名な文献検索サービスである「Google Scholar」および「Web of Science」を用いて文献の探索を行った。
- Google Scholar は、世界中の学術的な文献(論文、書籍、要約など)を検索・閲覧できるツールであり、網羅性は高いと言える(なお、完全なる網羅性を担保することは事実上困難である)。また、日本語検索、英語検索が可能である。
- Web of Science は、世界最大の文献データベースのひとつで、査読など一定の要件を満たした信頼性の高い文献を調査対象とすることができる。査読など一定の要件を満たした約 20,000 誌を対象としており、9,000 を超える主要な学術機関、企業、政府機関が利用しているとされている。但し、対象は英語文献のみであり、かつ、Web of Science に登録されている文献のみである(とは言え、「数億」の文献が登録されていると言われている)。
- 検索条件は、日本語の場合、「2021 年以降」、「トリチウム」、「分離」とした。また、英語の場合、「2021 年以降」、「tritium」、「separation」、「fukushima」とした。英語検索の際に「fukushima」を検索条件としたのは、上述のとおり、今回の調査対象を低濃度トリチウム水に適用可能な分離技術に絞り込むためである。

【詳細調査対象の選定】

- Google Scholar および Web of Science で検索した結果から得られた文献について、全て調査を行い、科学的知見が掲載されていない文献および、高濃度のトリチウム水におけるトリチウム分離技術を対象としている文献を除外した上で、下記の詳細調査を行った。

詳細調査を行った文献一覧を表 4-1 に示す。

以降、各文献についてその主旨や得られた知見についてその概要をまとめる。

表 4-1 調査文献一覧

| 項番 | 文献名 | 参考文献番号 |
|----|--|--------|
| 1 | トリチウムの保健物理の最前線 原子力施設でのトリチウム発生 | [4-1] |
| 2 | Thermodynamics Study on Liquid Phase Catalytic Exchange for Water Detritiation | [4-2] |
| 3 | Current State of Research in the Field of Detritiation of Technological Water Flows: A Review | [4-3] |
| 4 | Hydrogen isotope exchange behavior of protonated lithium metal compounds | [4-4] |
| 5 | A series of Ni-Al ₂ O ₃ catalysts derived from layered double hydroxides for vapor phase catalytic exchange between water and hydrogen | [4-5] |
| 6 | ASSESSMENT OF RADIONUCLIDES IN FORMER SALASPILS NUCLEAR REACTOR COOLING WATER | [4-6] |
| 7 | Separation of Hydrogen Isotopes Using Bilayer Membranes | [4-7] |
| 8 | Water Distillation as a Method for Separation of Hydrogen and Oxygen Isotopes: State of the Art and Prospects | [4-8] |
| 9 | Atomic-Hydrogen Energy and Tritium Purification of NPP Discharges Based on WWER Generation 3+ Reactors | [4-9] |
| 10 | Hydrogen isotopes separation in Ag(I) exchanged ZSM-5 zeolite through strong chemical affinity quantum sieving | [4-10] |

(1) トリチウムの保健物理の最前線 原子力施設でのトリチウム発生

本文献は、軽水炉、重水炉、核融合炉におけるトリチウム発生機構、トリチウム取扱量および放出量、トリチウム分離の原理や福島第一原発の処理水へ適用する際の問題点について解説されたものである。

本文献においては、新型転換炉ふげん、韓国 Wolsong 発電所におけるトリチウム分離手法の福島第一原発の所処理水への適用性について議論がなされ、以下の問題が指摘されている。

- ・ 福島第一原発の処理水の量は、これまで対象とされてきたトリチウム水と比べて桁違いに大きい。重水炉の減速用重水の量が 300 トン程度なのに対し、福島第一原発の処理水は 121 万トンであり、3 桁の開きがある。処理水への適用には技術開発とそれに要する時間、ならびに大規模な設備と投資が必要となる。
- ・ 排水側のトリチウム濃度は、同位体分離技術を適用することにより低下はするが、ゼロになるわけではない。Wolsong 発電所の例でも、トリチウム除去設備の設置により年間の放出量は減少しているものの、現在も 2×10^{14} Bq/年程度の放出は続いている。同位体分離をする場合でも、どの程度の濃度(量)であれば環境中への排水を許容するのか、という議論を避けて通ることはできない。
- ・ 同位体分離を行うと、量は少ないがトリチウム濃度の高い濃縮水が生成する。処理水をどの程度まで減容するか、ということは濃縮水中のトリチウム濃度をどの程度まで高めるか、ということとイコールである。濃度が高いトリチウム水は、自身の放射線により分解が起こるリスクもあるため、その保管方法についても議論が必要となる。

また、以下について述べられている。

- ・ トリチウム濃度をある基準値以下に希釈して処理水を海水中に放流しさらに希釈することは、上記問題点を踏まえた現実的な選択肢と位置付けられる。トリチウムでは内部被ばくのみが問題となる。ヒトが1日に摂取する水の量にはおのずと限界があるので、トリチウム濃度管理は被ばく管理として有効である。
- ・ 韓国の Wolsong 発電所において、1980 年代から現在までの間に処理水中の値を超える量のトリチウムが放出されているが、周辺における被ばく量は十分小さく、健康への悪影響も報告されていないという事実は広く認識されるべき。

当該文献では、福島第一原発の処理水に対して、トリチウム分離を行うことの難しさに言及し、また仮に分離ができたとしてもトリチウム濃度はゼロにはならないため課題が残ることを示唆している。また、韓国の Wolsong 発電所では、1980 年代から現在までの間に福島第一原発の処理水中の値を超える量のトリチウムが放出されているが、周辺における被ばく量は十分小さく、健康への悪影響も報告されていないという実例が挙げられており、福島第一原発の処理水を適切に海洋放出することで、安全を担保することができると言える。

(2) Thermodynamics Study on Liquid Phase Catalytic Exchange for Water Detritiation

本文献は、水素同位体分離に係る計算法を高度化した研究について、その成果をまとめたものである。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ 気相触媒交換 (VPCE) や他のいくつかのプロセスと比較して、液相触媒交換 (LPCE) には、適度な操作条件でより単純なプロセスであること、より高い分離係数でかつより低いエネルギー消費で済むこと、などの利点がある。
- ・ LPCE プロセスは、複数の平衡反応を経て全体として液体の水と水素ガスの間での軽水素と重水素の同位体交換を実現する。
- ・ 温度が上昇すると、水素ガスの重水素濃度 (以降 C_D) は増加し、液相の C_D は減少する。重水素係数 (以降 DF) は入口水素の C_D と出口水素の C_D の比率として定義。

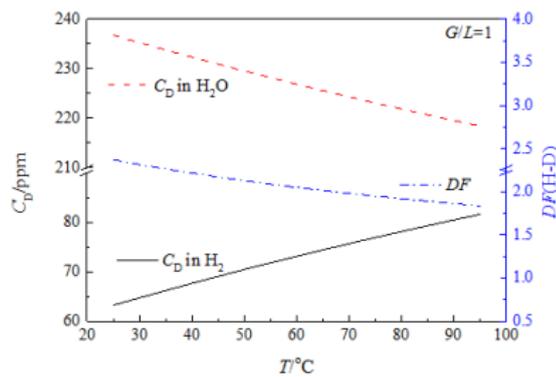


Fig.5. The concentration of deuterium and DF in a single-stage LPCE.

図 4-1 LPCE における重水素の濃度及び DF と温度の関係

- ・ 上の図より、低い温度では水素ガス中の重水素濃度が低くなり、液相中の重水素濃度が増加し、排水に重水素が増える。このことは低温度での DF が大きいことから分かる。

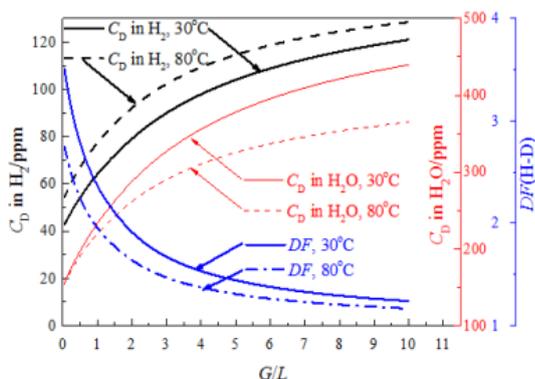


Fig. 7. The deuterium concentration and DF with G/L in a single-stage LPCE.

図 4-2 LPCE における重水素の濃度及び DF と G/L 比の関係

- ・ 上の図より液相に対するガスのモル供給比(G/L)の上昇とともに水素ガス中の重水素濃度は上昇する。
- ・ 各反応器から生成された水素ガス中の CD は、カスケードプロセスのステージ数の増加に応じて減少する。ただし、水素ガス中の CD の減少率は、段階が上がるにつれて遅くなる。各ステージからの生成水中の CD も、ステージ数が増えるにつれて大幅に減少、第 4 段階の重水素濃縮水(液相)の CD は、天然存在比にほぼ近い。

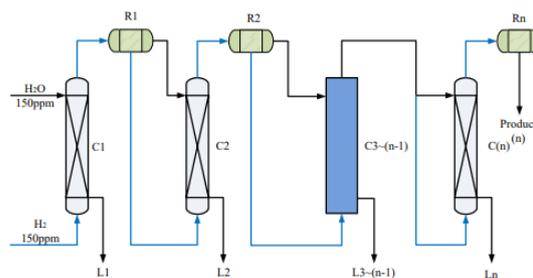


Fig. 11. Flowchart of the auto-oxidation cascade process 2 (P#2)

図 4-3 LPCE のフローチャート

- ・ 最後の液相中に残る水素生成物中の CD は、各ステージの G/L を下げるか、より低い T(温度)で操作することでさらに減らすことが出来るが、熱力学による制限を受ける。このボトルネックを解消するために、上図に示すある種の自動酸化カスケードプロセスを提案することで、CD をさらに削減できると考えられる。
- ・ カスケードプロセス P#2 の 2 番目以降のステージから生成されるガスと水の重水素濃度はすべて天然存在比よりも低く、5.2ppm から 115.4ppm までの濃度分布を示す。

当該文献では、水素同位体交換の予測はギブズの自由エネルギーの最小化の原理を利用した今研究の計算方法でより正確になり、計算結果と実験データの間の平均誤差は 4.45%~6.65%から 2.17%に減少するとされている。また、ここで確立された計算モデルと研究方法は、異なる水素同位体 (H2、HD、HT、D2、DT、T2)と酸化物(H2O、HDO、HTO)の触媒反応特性を同時に計算できるトリチウムシステムに拡張できるとしている。計算法の高度化は、水素同位体分離技術をより効率的に行うための検討に役立つものと思われるため、更なる研究の進展が期待される。

(3) Current State of Research in the Field of Detritiation of Technological Water Flows: A Review

本文献は、既存のトリチウム分離技術に係る成果・知見についてレビューを行ったものである。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ 災害後に福島第一原発周辺で採取された地下水を分析した結果、原子力発電所付近のトリチウムの濃度は (184 ± 2) Bq/Lであった。
- ・ 保管されたトリチウム水中の濃度は、日本の放流水の許容レベルである 6×10^4 Bq/Lよりも大幅に高くなっている。
- ・ 排出水の基準は国によって異なり、EU 諸国の 100Bq/kg からロシアの 7600Bq/kg までさまざまであることに注意するべき。
- ・ トリチウム水を濃縮して浄化するには、水の電気分解、蒸留、化学同位体交換などの水素同位体の分離方法を使用する必要がある。
- ・ Atomic Energy of Canada Limited(AECL)はトリチウム濃度が最大 8.5×10^{12} Bq/kg の水を処理するためのアルカリ電解ユニットの設計と操作について提案した。
- ・ プロトン交換膜電解槽(PEM)を使用する技術は、少量の水で済み、アルカリがないという 2 つの理由から、アルカリ溶液の電気分解に基づく技術の代替として魅力的である。ナフィオン型の過フッ素化スルホカチオン膜が電解質の役割を果たす。Nafion®N117CS 膜は、累積線量が 1000kGy を超えるとイオン伝導率が低下、累積線量が 1500kGy までは機械的強度を保持する。
- ・ トリチウムをより高い値に濃縮するために、Pd-Al 合金膜を備えたバイポーラ膜を使用することが提案され、 7.4×10^{13} Bq/kg のレベルのトリチウム含有量の水の電気分解中に安定した動作を示した。
- ・ 水素と水の化学同位体交換(ChIE)法による水素同位体の分離は分離係数の値が高く、分離の効率が良い。水-水素システムでの同位体交換の実行は、触媒の存在下でのみ可能であり、ChIE プロセスの実際の実装は、液体の水の存在下で触媒活性を失わない白金化疎水化触媒の作成後に可能になった。

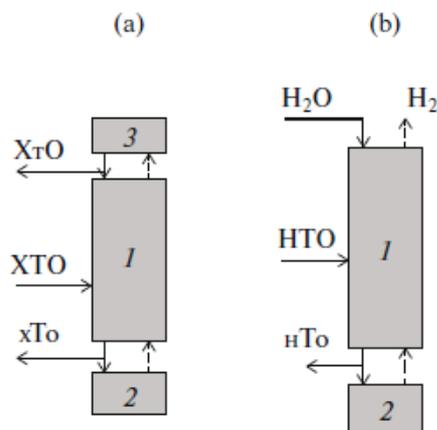


図 4-4 水素と水の化学同位体交換法

- ・ 上図はトリチウム濃縮物の取得を行うユニットの基本図を示す。このユニットを用いることでトリチウム廃棄物の量の削減できる。図(a)は主に重水におけるトリチウム除去を目的としており、図(b)は軽水におけるトリチウム除去を目的としている。
- ・ 水素と水の化学同位体交換(ChIE)法を用いる際、水と水素の流れが反転することを防ぐために2温度でChIE法を用いる技術の開発が進んでいる。2温度法では「ホット」カラムと「コールド」カラムの温度をそれぞれ438K(P = 2.17 MPa)と330 K(P = 0.1 MPa)に設定し、高圧下で同位体交換を行う。LPCEは液相触媒交換のプロセスであり水素と液体の水の間の同位体交換が行われる。ChIE法では、カラム内に疎水性触媒と親水性の層を規則的に配置している。
- ・ 福島原発事故の後にトリチウム含有が認められた水の浄化に関する研究としてトリチウム濃度 $2.7 \times 10^3 \text{ Bq / cm}^3$ の軽水 400 m^3 /日を減損する設備のモデル化に関する研究が行われた。
- ・ ChIE法による軽水での脱トリチウムの比較推定を行った結果、CECE法を用いた場合と比べてLPCEカラムで2温度のカラムを通過するカスケードを用いる場合は約1000倍のトリチウムが除去された。その後処理中に抽出されるトリチウムは、 0.033 mol / h の量で、 $6.57 \times 10^{10} \text{ Bq / (dm}^3 \text{ H}_2)$ の活性を持つガス状水素の形で、金属水素化物の形で長期保管に送られる。
- ・ しかし、上記のモデルのような施設の作成には、約17.8トンの白金を含む約 6000 m^3 の疎水性触媒が必要であり、さらに、この量の90%以上が2温度カスケードに関連する。ここで、触媒の体積の3~4倍の量の親水性パッキングの必要量を考慮すると、そのような施設の建設にかかる寸法と資本コストは莫大となる。
- ・ 水素の低温での蒸留は、とても高い分離効率を持ちグルノーブル(フランス)の研究用原子炉の重水炉のトリチウム除去に用いられている。軽質(プロチウム)水が約 $160 \text{ kg H}_2\text{O / 年}$ 、トリチウムが最大 $8.9 \times 10^{15} \text{ Bq / 年}$ のガス状水素の形で除去された。
- ・ 圧縮ヒートポンプに基づく効率的な熱回収方法の開発や真空下での蒸留、およびヒートポンプの適用のさまざまな研究がロシアのメンデレーエフ化学技術大学で行われている。この方法によりトリチウムの除去に安価な熱媒体を使用できる可能性がある。

当該文献では、既存のトリチウム分離技術に係る成果・知見についてレビューが行われており、新たなデータや知見等の研究成果が得られた訳ではない。中には、我が国が行った汚染水処理対策技術検証事業(トリチウム分離技術検証試験事業)に関するものと思われる言及も見られるが、施設の建設にかかる寸法と資本コストは莫大と評している。

なお、EUにおける 100 Bq / kg という基準を排出基準としているが、飲料水基準(追加調査の必要性を判断するスクリーニング値)の誤りであると思われる。

(4) Hydrogen isotope exchange behavior of protonated lithium metal compounds

本文献は、プロトン化されたリチウム金属化合物と重水素化水またはトリチウム水との間の水素同位体の交換挙動を実験的に調査ものである。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ 水素同位体間の質量差が比較的大きいため、水蒸留、極低温ガス蒸留、水の電気分解、または触媒化学交換によるトリチウムの効率的な分離が可能である。
- ・ トリチウム水と $HxMn_2O_4$ のプロトンとの間の $H + / T +$ 交換により、軽水からトリチウムを効率的に除去できる。
- ・ $HxMn_2O_4$ はプロトン化リチウム金属化合物の一種でスピネル構造を持ち、トリチウムを吸着する。スピネル構造リチウムマンガン酸化物 (LMO)、スピネル構造リチウムマンガンニッケルコバルト酸化物 (LMNCO)、層状コバルト酸リチウム (LCO)、およびオリビン構造のリチウム酸鉄リチウム (LIP) というプロトン化リチウム金属化合物と重水素またはトリチウム水との間の水素同位体の交換挙動を調査した。
- ・ プロトン化されたリチウム金属化合物は、リチウム金属化合物 LMO、LMNCO、LCO、および LIP の単純な酸処理によって調製された。

表 4-2 各種触媒を用いた際の K_d (重水素)

| Sample | Residual 2H in water (mmol/g) | 3Bound 2H (mmol/g) | K_d (g/g) |
|--------|----------------------------------|--------------------------|-------------|
| LMO | 9.976 ± 0.003 | 0.51 ± 0.15 | 0.05 |
| LMNCO | 9.975 ± 0.004 | 0.55 ± 0.20 | 0.06 |
| LCO | 9.970 ± 0.005 | 0.83 ± 0.27 | 0.08 |
| LIP | 9.975 ± 0.004 | 0.58 ± 0.21 | 0.06 |
| PMO | 9.960 ± 0.008 | 1.33 ± 0.42 | 0.13 |
| PMNCO | 9.948 ± 0.006 | 1.92 ± 0.32 | 0.19 |
| PCO | 9.959 ± 0.008 | 1.36 ± 0.40 | 0.14 |
| PIP | 9.961 ± 0.012 | 1.25 ± 0.54 | 0.12 |

- ・ 上表よりプロトン化されたリチウム金属化合物に保持された重水素の量は $1.25 \sim 1.92$ mmol / g であり、これは元のプロトン化されたリチウム金属化合物 ($0.51 \sim 0.83$ mmol / g) に結合した量の 2 倍以上である。PMNCO は水中の重水素濃度の最大の減少をもたらした。

表 4-3 各種触媒を用いた際の Kd(トリチウム)

| Sample | Residual ³ H in water (kBq/kg) | ¹ Bound ³ H (Bq/g) | K _d (g/g) |
|--------|---|--|----------------------|
| PMO | 156.3 ± 0.8 | 69.9 ± 0.4 | 0.45 |
| PMNCO | 154.4 ± 0.9 | 163.9 ± 1.0 | 1.06 |
| PCO | 156.2 ± 0.4 | 75.1 ± 0.2 | 0.48 |
| PIP | 155.9 ± 0.1 | 87.3 ± 0.1 | 0.56 |

- PMNCO と反応させた場合のみ水性媒体中のトリチウム濃度の低下は 24 時間後も維持され、PMNCO に保持されるトリチウムの量は上表より 163.9Bq / g である。上表よりトリチウムの Kd 値(0.45~1.06 g / g)は、前の表で示したプロトン化リチウム金属化合物に対する重水素の Kd 値(0.13~0.19 g / g)よりも高く、今回の表の 4 つの金属は重水素よりもトリチウムに対する化合物の親和性が高い。

当該文献では、リチウム金属化合物を用いて、軽水中の重水素もしくはトリチウムの同位体交換を行う技術について述べている。Kd 値は 1.06 であり、わずかに濃縮できていると言え、基礎研究段階にあるものと考えられる。

(5) A series of Ni-Al₂O₃ catalysts derived from layered double hydroxides for vapor phase catalytic exchange between water and hydrogen

本文献は、VPCE に用いる触媒を、非貴金属である Ni を用いて安価に作成し、実験によりその性能を確かめた研究である。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ VPCE では水蒸気内のトリチウム(HTO)をガス相(HT)に移動する。従来の活性触媒は貴金属ベースでコストがかかる。貴金属と比較して、非貴金属 Ni ベースの触媒は同等の活性と低コストのため、VPCE の触媒の有望な候補となり得る。
- ・ 層状複水酸化物(LDH)は、層状構造の陰イオン性粘土として知られており、中間層に負の陰イオンを持つ正に帯電した層で構成されるイオン性層状化合物である。この LDH の金属イオンのモル比を操作することで、その触媒特性を調整することができる。
- ・ 活性金属を含む触媒を得るための別の効率的な方法は、その場成長法であり、その場成長法はより高い金属分散を実現し、特に高い反応性金属負荷の下で制御不能な凝集を回避する優れた性能を示し、触媒活性を調整できる。Ni ベースの触媒の成分は、LDH によるその場成長法によって便利に調整および十分に制御することができる。
- ・ Ni / Al 比の異なる一連の Ni_x-Al₂O₃ 触媒を、NiAl-LDH の還元によって調製し、化学組成と触媒性能の関係を調査した。Ni_x-Al₂O₃ の Ni 含有量が増加すると、電子は Al から Ni に移動しやすくなる。これにより四面体の 3 価のアルミニウムイオンと金属 Ni が生成され、触媒活性に影響を与える。
- ・ H₂ と HDO(0.2g/min)の混合物を 100-500 度の所定の温度まで加熱し、反応させた。出口水素中の重水素濃度は触媒の活性を直接反映しており、濃度が高いほど触媒活性が高いことが分かる。

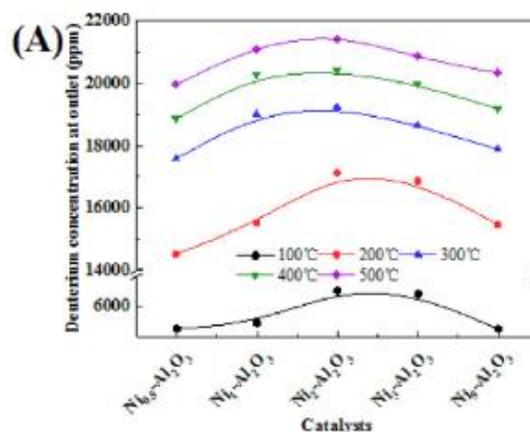


図 4-5 VPCE における各種触媒と出口水素中の重水素濃度

- ・ 上図より出口水素の重水素濃度は、温度が上昇すると増加し、高温での蒸気と水素の間の重水素交換が速いことが分かる(縦軸: 重水素濃度)。約 8.3 時間の安定性試験後、重水素濃度の明らかな低下は観察されなかった

当該文献では、触媒効率のデータは示されているものの、システムとしての分離率がどの程度になるのかまでは伺い知ることはできず、基礎研究段階にあるものと想定される。

(6) ASSESSMENT OF RADIONUCLIDES IN FORMER SALASPILS NUCLEAR REACTOR COOLING WATER

本文献は、リチウムマンガン酸化物というスピネル構造を持つ吸着剤のトリチウム水廃棄物の除染への効果を検証しようとしたものである。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ Li-H 交換にはスピネルベースの構造に利点がある。部分的に水素化されたスピネル構造はプロチウム-重水素およびプロチウム-トリチウムイオン交換を活性化する。
- ・ 酢酸セルロース(CA)をトリチウム水の吸着剤の繊維として利用した。
- ・ 純粋なりチウムマンガン酸化物と比較して、酢酸セルロースと組み合わせた酸加水分解リチウムマンガン酸化物の方が、トリチウム吸着品質が高い。
- ・ さまざまな酸化鉄を含むハイブリッド吸着剤の磁気特性を促進することにより、サンプル水をさらに汚染することなく、トリチウム化吸着剤を収集できる。

当該文献では、性能に関するデータ等が示されていないため、現段階において、例えば福島第一原発の処理水への適用性について判断することはできない。

(7) Separation of Hydrogen Isotopes Using Bilayer Membranes

本文献は、二分子膜を用いた量子分子篩による水素同位体分離のメカニズムの計算結果について説明しているものである。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ 数学的な解析によって同位体分離を検討し、二分子膜を用いることで同位体分離が可能であること、分離割合を高める手法を提案する。
- ・ 分子間相互作用の解析にあたっては、Lennard-Jones ポテンシャルの式を用いており、膜透過性を算出している。その結果、プロチウム/重水素混合物においては透過性 1.01×10^8 、トリチウムが混合されているプロチウム/重水素化水素の混合物において 1.8×10^{10} であることが示されている。(二分子膜を用いない同位体分離の場合の透過性は 10^3 である。)
- ・ トリチウムの分離に関しては他の同位体と比較し、分離割合が低いことが TABLE.1(トリチウムは T_2 として記載)から分かるが、水素同位体混合物から先ずは重水素を分離し、次にプロチウム/トリチウム/重水素水素の混合物からトリチウムを分離する手法が提案されている。

表 4-4 各成分の分離度合い

TABLE 1. Values of the Degree of Separation of Components and the Corresponding Values of the Temperature T and the Distance between the Energy Peaks of the Membrane b

| Separated component | Component delayed by the barrier | | | |
|---------------------|--|--|--|--|
| | H ₂ | D ₂ | T ₂ | HD |
| H ₂ | – | $R = 1.01 \cdot 10^8$ $T = 30.77\text{K}$ $b = 2.035 \text{ nm}$ | $R = 1.78 \cdot 10^{10}$ $T = 30.635\text{K}$ $b = 0.905 \text{ nm}$ | $R = 1.83 \cdot 10^{10}$ $T = 30.635\text{K}$ $b = 0.905 \text{ nm}$ |
| D ₂ | $R = 9.71 \cdot 10^4$ $T = 44.235\text{K}$ $b = 1.25 \text{ nm}$ | – | $R = 2.63 \cdot 10^{10}$ $T = 33.735\text{K}$ $b = 2.25 \text{ nm}$ | $R = 2.70 \cdot 10^{10}$ $T = 33.735\text{K}$ $b = 2.25 \text{ nm}$ |
| T ₂ | $R = 4.16 \cdot 10^4$ $T = 47.67\text{K}$ $b = 1.05 \text{ nm}$ | $R = 1.43 \cdot 10^4$ $T = 32.96\text{K}$ $b = 1.85 \text{ nm}$ | – | $R = 1.41 \cdot 10^6$ $T = 32.96\text{K}$ $b = 1.85 \text{ nm}$ |
| HD | $R = 1.09 \cdot 10^5$ $T = 36.49\text{K}$ $b = 0.665 \text{ nm}$ | $R = 7.47 \cdot 10^7$ $T = 40.8\text{K}$ $b = 1.74 \text{ nm}$ | $R = 7.34 \cdot 10^5$ $T = 36.14\text{K}$ $b = 2.545 \text{ nm}$ | – |

当該文献は、膜を用いた同位体分離に係る基礎的な研究であり、工学規模における適用およびその性能について論じられる段階にはないと考えられる。今後の研究開発の進捗に期待したい。

(8) Water Distillation as a Method for Separation of Hydrogen and Oxygen Isotopes: State of the Art and Prospects

本文献は、ロシアにおける原子力発電所施設への導入を目的とした同位体分離技術の一つである蒸留法(水蒸留)の原理の説明および諸外国も含めた過去の開発成果・実績をまとめた論文である。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ 水蒸留による同位体分離に関して、本論文が提案している同位体分離技術の原理については下記のとおりである。
- ・ 蒸発・凝縮の繰り返し(蒸留)により、沸点の高いトリチウム水を液相に濃縮させ、水の平衡蒸気圧を利用して同位体分離を行う水蒸留は蒸発・濃縮の繰り返し回数が多くなるほど、塔が高くなることから、分離施設が大規模になってしまう。そこで、水-水素同位体交換法といった他の同位体分離技術と組み合わせることで、効率的なトリチウム分離を可能とする真空蒸留プロセスの設計を実施している。提案されている複合三段カスケードによる真空蒸留プロセス(トリチウム処理容量: 10kg/h)では、三段目においてトリチウム除去が行われる。精製水中のトリチウム濃度の反応速度は、 $Kr=10^3$ を目標としていたが、最終的に得られたトリチウム濃度を評価したところ、トリチウム濃度の反応速度としては $Kc=10^4$ であった。
- ・ 原子力発電所から排出される低位蒸気を用いたカスケード設計を実施した結果、トリチウム処理を 100kg/h 処理する施設では、4 つのカラムを直並列接続させる必要があること、浄化プロセスを 187 回実施することで、トリチウム濃縮度を 1000 倍まで高めることができることを述べている。また、重水減速材用のカスケード設計を実施し、以下の活性化式(2)を基にトリチウム除去率の計算を実施した。中性子束を $\phi_n=5\times 10^{17}\text{n/m}^2\cdot\text{s}$ であると仮定し、200t の重水($N_d=2\times 10^7\text{mol}$) が供給された場合、220kCi/年のトリチウム除去が可能であることが示された。

$$A = \frac{\sigma_{n\gamma} \Phi_n N_D}{3.7 \times 10^{10}} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}}\right) \quad (2)$$

当該文献では、トリチウム分離技術として一般的に用いられている技術の一つである蒸留法について説明した論文である。具体的な分離施設の設計(仮定)を行い、年間 220kCi のトリチウムを除去することができるとしているが、除去対象の原水のトリチウム濃度は不明である。仮に、200 トンの重水に 220kCi のトリチウムが含まれていたとすると(実際には除去しきれないため、もっと多いと考えられるが)、原水のトリチウム濃度は約 400 億 Bq/L であり、福島第一原発における処理水のトリチウム濃度とは 4 桁の違いがあることになる。

(9) Atomic-Hydrogen Energy and Tritium Purification of NPP Discharges Based on WWER Generation 3+ Reactors

原子力発電所、中でも第三世代原子炉 WWER からのトリチウムが将来的に環境中へ放出されることが懸念されており、ロシアでは水処理システムへのトリチウム分離施設(除去処理プラント)導入を目的として、多くの研究開発が進められている。その様な中、本論文は水素同位体分離の開発状況をまとめたものである。

本文献においては、以下が述べられている。

- ・ トリチウムの分離に関しては、これまで深冷蒸留法、水-硫化水素二重温度交換法(Girdler Sulfide 法)、クロマトグラフィー法、米国サバンナリバー研究所の熱サイクル吸蔵法(Thermal Cycling Absorption Process)といった方法がこれまで研究されてきたが、いずれの分離手法も分離係数が低く、時間がかかるため多くのエネルギーを要する。
- ・ WWER 一基の稼働期間中における一次冷却水 300t のトリチウム濃度が $5 \times 10^7 \text{Bq/kg}$ であったことから、トリチウム濃度を低減させるべく研究開発を進めてきたが、効率性・経済性等の観点から、低レベルのトリチウム水からのトリチウム分離は実用化には至っていない。
- ・ 世界各国において用いられている水素同位体分離の手法を表 4-5 にまとめている(主な適用例は重水炉の一次冷却水)が、2 番目に示されている水-水素化学交換法による水素同位体分離は今日も多くの国(中国、イラン、インド、ルーマニア)において用いられている手法である。また、蒸留法による水素同位体分離は他の分離方法と比べ安全性が高いが、分離係数は水-水素化学交換法より低い手法である。

表 4-5 各種水素同位体分離手法の特徴まとめ

Table 1. Some characteristics of the employed physical and chemical methods for the separation of hydrogen isotopes

| Method | T, K | P, MPa | α_{HD} | α_{HT} | Application area |
|---|---------|---------|----------------------|----------------------|---|
| Water electrolysis | 313–333 | 0.1–0.5 | 1.5–10 | 2–25 | Production of D ₂ O |
| ChIE H ₂ S–H ₂ O, TT | 303/403 | 2.0–2.2 | 2.34/1.82 | 3.34/2.36 | Production of D ₂ O |
| ChIE NH ₃ –H ₂ | 353 | 40 | 2.70 | | Production of D ₂ O |
| Fractional distillation of H ₂ | 23 | 0.1 | 1.47 | 1.90 | Production of D ₂ O Detritiation of water |
| Fractional distillation of NH ₃ | 253 | 0.2 | 1.036 | | Production of D ₂ O |
| Fractional distillation of H ₂ O | 333 | 0.02 | 1.047 | 1.055 | Production of D ₂ O Detritiation of water |
| ChIE H ₂ O–H ₂ | 328 | 0.1 | 3.22 | 5.40 | Waste recycling Detritiation of water |

- ・ 軽水からのトリチウム分離に関しては、水-水素化学交換法が有効であり、日本の「ふげん」をはじめとし、韓国の月城(ウォルソン)や、カナダのチョークリバー・サイトでも用いられている。Veolia (仏)社の Nuclear Solutions は、モジュール型トリチウム分離システム(MDS®)を開発し、現在米国で商用利用されている。
- ・ 第三世代原子炉 WWER からのトリチウムに対しては、MDS®システムにも用いられている化学交換電解セル複合法(CECE)が有効であると述べており、初期濃度 $5.3 \times 10^7 \text{Bq/kg}$ のトリチウム水 1500kg/day が放出される原子力発電所に対して、除去処理施設を導入した際の規模やトリチウム除去後のトリチウム濃度を評価した結果を表 4-6 にまとめる。原子力発電所の運用期間を

60年とした場合、除去処理施設で処理されるトリチウムの総量は 1.74×10^{15} Bqとなり、廃止措置のタイミングでは、除去処理施設ユニットの総量は 10m^3 、施設内のトリチウム水のトリチウム濃度は 2.61×10^{13} Bq/kgであり、低レベル放射性廃棄物として処分できる放射能レベルである。

表 4-6 CECE 法を用いた場合のシステム諸元

Table 3. Parameters of the ChIE installation in the water–hydrogen system in relation to the purification of 1500 kg/day of unbalanced water from the nuclear power plant

| Designed installation parameter | Parameter value |
|--|-----------------|
| ChIE column height, m | 5.5 |
| Isotope exchange column diameter, mm | 450 |
| Natural water flow, L , kg/h | 22.5 |
| Tritiated water flow supplied for cleaning, F , kg/h | 62.5 |
| Tritium concentration in outgoing (commercial) hydrogen Bq/m ³ | ≪1900 |
| Electrolyzer capacity, m ³ /h | 100 |
| Power consumption, kW | 550–600 |
| Total liquid volume of intermediate tank and electrolyzer, m ³ | 10 |
| Time of continuous operation of the installation, during which the limit concentration of tritium will be reached, years | 60 |

- ・ ロスアトム傘下のロスエネルギーアトムによれば、トリチウム除去処理プラントを運用することで、エネルギー消費量は 4.8×10^6 kWh/yearであり、経済的なインパクトは960万ルーブル(2ルーブル/kWh換算)であることが示されている。しかし、年間 $800,000\text{m}^3$ の電解水素と $400,000\text{m}^3$ の酸素の生成が可能になるため、産業界に対して、生成した水素と酸素を製品として売り出すことによる年間売上が1億5,000万ルーブルを見込めることから(工業用水素の価格を1000ルーブル/シリンダとして換算)、費用対効果が高く、売り上げを原子力発電所の施設費用として補填することが可能である。

当該文献では、国内外のトリチウム分離技術を概観し、「トリチウム濃度を低減させるべく研究開発を進めてきたが、効率性・経済性等の観点から、低レベルのトリチウム水からのトリチウム分離は実用化には至っていない」としており、低濃度のトリチウム水からトリチウムを分離することの難しさを物語っている。なお、文献中で取り上げられている、Veolia(仏)社のNuclear Solutionsは、モジュール型トリチウム分離システム(MDS®)は、我が国が行った汚染水処理対策技術検証事業(トリチウム分離技術検証試験事業)に関するものと思われる。

(10) Hydrogen isotopes separation in Ag(I) exchanged ZSM-5 zeolite through strong chemical affinity quantum sieving

本文献は、重水中の同位体分離(含トリチウム)を目的とした研究であり、化学親和量子篩作用(CAQS)によって水素同位体分離を可能とする Ag(I)イオン交換 ZSM-5 型ゼオライトの作成および水素同位体分離効果をまとめた論文である。

本文献においては、以下が述べられている。

- Ag(I)イオン交換 ZSM-5 型ゼオライトを用いた場合、CAQS による水素同位体の選択性には温度依存性があることを述べており、77K~160K の範囲内では選択性が維持される。ただし、物理吸着に関しては 100K 以上で吸着されなくなる。77K 以上における選択性を評価したところ、表 4-7 に示される実験結果と概ね結果が一致することが確認でき、この結果よりトリチウムと重水素の混合物からのトリチウム分離も可能であることを示している。
- 具体的には、2個の水素同位体原子からなる分子(D₂, TD, TH, H₂)からのトリチウム(T₂)選択性は温度依存性があり、77K において 1.4~48.8、160K においては、1.1~4.7 であることが示されている。なお、理論計算においては、電子密度の汎関数によって化合物の電子状態を表現する密度汎関数理論(Density Functional Theory, DFT)を用いている。

表 4-7 同位体分離効果の温度依存性

Table 2

Predicted selectivity of hydrogen isotopologues at the Ag(I) center of the I2 site of the Ag-ZSM-5 (Mol-I2-Ag(I)) as a function of temperature from density functional theory calculations (B3LYP/6-311 + G**/LANL2DZ_ecp). The mole ratio of the mixture gases is chosen as 1:1.

| Temperature (K) | S (D ₂ /H ₂) | S (D ₂ /H ₂) ^a | S (D ₂ /DH) | S (T ₂ /D ₂) | S (T ₂ /TD) | S (T ₂ /H ₂) | S (T ₂ /TH) |
|-----------------|-------------------------------------|--|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| 40 | 374.6 | 68.4 | 16.5 | 17.6 | 2.5 | 6580.1 | 62.1 |
| 60 | 34.6 | 44.2 | 5.5 | 5.5 | 1.6 | 190.2 | 11.4 |
| 77 | 13.2 | 8.7 | 3.4 | 3.7 | 1.4 | 48.8 | 6.2 |
| 80 | 11.6 | - | 3.2 | 3.5 | 1.4 | 40.6 | 5.6 |
| 100 | 6.3 | 5.0 | 2.3 | 2.6 | 1.2 | 16.4 | 3.6 |
| 120 | 4.2 | 3.4 | 1.9 | 2.2 | 1.1 | 9.2 | 2.8 |
| 140 | 3.2 | 3.3 | 1.7 | 2.0 | 1.1 | 6.3 | 2.3 |
| 160 | 2.6 | 3.1 | 1.5 | 1.8 | 1.1 | 4.7 | 2.0 |

^a Experimental results in our work.

当該文献は、材料化学における実験・理論計算レベルであり、具体的な分離性能の記載はなく、選択性のみが示されており、基礎研究段階にあるものと想定される。

4.2 まとめ

本調査では最新の文献(2021年以降の文献)を対象に、トリチウム分離に係る文献を探索した。その結果、トリチウム分離に係る科学的知見に言及している10件の文献を抽出し、それらの情報を整理した。

調査結果からは、以下のことが言える。

- 従来の原子力施設等で用いられている既存のトリチウム分離技術(蒸留法、VPCE、LPCE、CECE、電解法、等)において、福島第一原発における処理水からトリチウムを合理的に分離することは困難であると考えられる。これは、多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会における結論と同様である。
- 仮に、福島第一原発における処理水からトリチウムを分離しようとした場合、(仮に成功したとしても)莫大なコストが必要となることが考えられる。
- 従来技術ではないトリチウム分離技術(従来の原子力施設等で用いられていない技術)の検討もなされているが、未だ基礎的研究のレベルであると考えられ、福島第一原発における処理水からのトリチウム分離への適用を論ずる状況にはないと考えられる。

5. おわりに

本事業では、ALPS 処理水の取扱い方法の検討に資するよう、分離技術等トリチウムに関する国内外の最新の研究状況を調査し、ALPS 処理水の取扱い方法の検討に資するよう、必要な調査・資料作成を行うことを目的とし情報をとりまとめた。

2 章「トリチウム等 ALPS 処理水の取扱いに関する基礎的情報の提供」では、最新の ICRP の動向として ICRP Pub148 の調査を行い、トリチウムの β 線の放射線加重係数は、これまでの勧告で示されてきた「1」という数値を変更する必要は無く、よって、現時点において線量換算係数等の見直しも必要では無いことを示した。

3 章「多核種除去設備等処理水に関連するデータの収集・分析支援」では、国内外における環境分析結果から得られたトリチウム濃度、および国内外における原子力関連施設からのトリチウム放出実績に係るデータを整理した。

4 章「トリチウム分離技術の調査」では、トリチウム分離に係る科学的知見に言及している最新の文献（2021 年以降の文献）を対象に調査を行い、現時点においては福島第一原発における処理水からトリチウムを合理的に分離することは困難であると考えられることを示した。

6. 参考文献

第2章

- [2-1] C. Fayolle, M. Fournier, G. Plancque, N. Reynal and O. Riviere , Rejets de tritium dans l'environnement et impact: évolutions récentes et perspectives, 2021
- [2-2] 志村勉, 山口一郎, 寺田宙, 温泉川肇彦, 牛山明、トリチウムの生体への影響と低線量放射線影響研究の課題、2021
- [2-3] 日本アイソトープ協会、国際放射線防護委員会の1990年勧告、ICRP Publication 60、1991
- [2-4] 日本アイソトープ協会、国際放射線防護委員会の2007年勧告、ICRP Publication 103、2009
- [2-5] ICRP、RADIATION WEIGHTING FOR REFERENCE ANIMALS AND PLANTS、2021
- [2-6] 日本アイソトープ協会、環境防護 標準動物および標準植物の概念と使用、ICRP Publication 108、2017
- [2-7] UNSCEAR、SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION、2017

第3章

- [3-1] ENVIRONMENT AGENCY, FOOD STANDARDS AGENCY, FOOD STANDARDS SCOTLAND, NATURAL RESOURCES WALES, NORTHERN IRELAND ENVIRONMENT AGENCY, SCOTTISH ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY、Radioactivity in Food and the Environment, 2020、2021
- [3-2] 公益財団法人日本分析センター、環境放射線データベース、<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/data/database/>、2022年3月22日閲覧
- [3-3] Canadian Nuclear Safety Commission、Regulatory Oversight Report for Nuclear Power Generating Sites: 2019、2021
- [3-4] ASN、LIVRE BLANC TRITIUM(トリチウム白書)、2022
- [3-5] KHNP ウェブサイト、
https://npp.khnp.co.kr/board/list.khnp?boardId=BBS_0000020&menuCd=DOM_00000103003004001&startPage=1、2022年3月4日閲覧
- [3-6] NRC、Radioactive Effluents from Nuclear Power Plants Annual Report 2019、2021
- [3-7] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety、Report by the Federal Government for the Eighth Review Meeting of the Convention on Nuclear Safety in March/April 2020、2020
- [3-8] Consejo de Seguridad Nuclear、Convention on Nuclear Safety Eighth National Report、2019
- [3-9] REPUBLIC OF SLOVENIA MINISTRY OF THE ENVIRONMENT AND SPATIAL PLANNING SLOVENIAN NUCLEAR SAFETY ADMINISTRATION、Slovenian Report on Nuclear Safety、2019
- [3-10] ROMANIA 、National Report under the Convention on Nuclear Safety、2019
- [3-11] 台湾電力公司放射試験室、台湾電力公司第一核能發電廠 111 年環境輻射監測計畫、2021

- [3-12] 台灣電力公司放射試驗室、台灣電力公司第二核能發電廠 111 年環境輻射監測計畫、2021
- [3-13] 台灣電力公司放射試驗室、台灣電力公司第三核能發電廠 111 年環境輻射監測計畫、2021
- [3-14] 原子力規制委員会、規制法令及び通達に係る文書、
https://www.nsr.go.jp/disclosure/law_new/202105.html、2022 年 3 月 22 日閲覧

第 4 章

- [4-1] 波多野 雄治、トリチウムの保健物理の最前線 原子力施設でのトリチウム発生、2021
- [4-2] Li, Peilong; Chen, Min; Zhang, Zexuan; Luo, Wenhua; Wen, Ming; Zhang, Xin; Yu, Bin; Jiang, Fei; Shi, Yan; Song, Jiangfeng、Thermodynamics Study on Liquid Phase Catalytic Exchange for Water Detritiation, 2021
- [4-3] E. P. Magomedbekov, I. L. Rastunova & N. N. Kulov , Current State of Research in the Field of Detritiation of Technological Water Flows: A Review, 2021
- [4-4] ChanWooPark, Sung-WookKim, YounghoSihn, Hee-ManYang, IlgookKim, Kwang SeLee, ChanghyunRoh, In-HoYoon , Hydrogen isotope exchange behavior of protonated lithium metal compounds, 2021
- [4-5] Peilong Li, Xiaoyu Hua, Zexuan Zhang, Ming Wen, Min Chen, Bin Yu, Linsen Zhou, Wenwen Yong, Jiangfeng Song, Xin Zhang, Wenhua Luo , A series of Ni-Al₂O₃ catalysts derived from layered double hydroxides for vapor phase catalytic exchange between water and hydrogen, 2021
- [4-6] Armands Egleskalns, Ingars Reinholds, Konstantins Bavrins, Gunta Kizane , ASSESSMENT OF RADIONUCLIDES IN FORMER SALASPILS NUCLEAR REACTOR COOLING WATER, 2021
- [4-7] V. A. Poteryaeva, M. A. Bubenchikov , Separation of Hydrogen Isotopes Using Bilayer Membranes, 2021
- [4-8] M. B. Rozenkevich, Yu. S. Pak, A. N. Bukin, S. A. Marunich, V. G. Barchukov, P. P. Surin , Water Distillation as a Method for Separation of Hydrogen and Oxygen Isotopes: State of the Art and Prospects, 2021
- [4-9] M. B. Rozenkevich, Yu. S. Pak, A. N. Bukin, S. A. Marunich, V. G. Barchukov, P. P. Surin, Atomic-Hydrogen Energy and Tritium Purification of NPP Discharges Based on WWER Generation 3+ Reactors, 2021
- [4-10] RenjinXiong, Jinfan Chen, Linda Zhang, Peilong Li, Xiayan Yan, Yaqi Song, Wenhua Luo, Tao Tang, Ge Sang, Michael Hirscher , Hydrogen isotopes separation in Ag(I) exchanged ZSM-5 zeolite through strong chemical affinity quantum sieving, 2021

令和3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)

2022年3月

株式会社三菱総合研究所
セーフティ&インダストリー本部
TEL (03)6858-3577

二次利用未承諾リスト

報告書の題名：令和3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：令和3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 |
|----|-------|--|
| 2 | 図2-1 | ICRP 1990年勧告における放射線加重係数 |
| 3 | 図2-2 | ICRP 2007年勧告における放射線加重係数 |
| 5 | 図2-3 | 参照動植物の環境保護のため誘導考慮参考レベル（DCRL） |
| 24 | 図3-1 | ドイツにおける排水中のトリチウム量 |
| 24 | 図3-2 | スペイン原子力施設において排出された気体及び液体のトリチウム量（2018年） |
| 25 | 表3-15 | スロベニア クルスコ原子力発電所の液体排出におけるトリチウム量 |
| 25 | 表3-16 | スロベニア クルスコ原子力発電所の気体排出におけるトリチウム量 |
| 26 | 図3-3 | チェルナヴォダ原子力発電所1号機の気体排出におけるトリチウム量 |
| 26 | 図3-4 | チェルナヴォダ原子力発電所2号機の気体排出におけるトリチウム量 |
| 27 | 図3-5 | チェルナヴォダ原子力発電所1号機の液体排出におけるトリチウム量 |
| 27 | 図3-6 | チェルナヴォダ原子力発電所2号機の液体排出におけるトリチウム量 |
| 32 | 図4-1 | LPCEにおける重水素の濃度及びDFと温度の関係 |
| 32 | 図4-2 | LPCEにおける重水素の濃度及びDFとG/L比の関係 |
| 33 | 図4-3 | LPCEのフローチャート |
| 34 | 図4-4 | 水素と水の化学同位体交換法 |
| 36 | 表4-2 | 各種触媒を用いた際のKd（重水素） |
| 37 | 表4-3 | 各種触媒を用いた際のKd（トリチウム） |
| 38 | 図4-5 | VPCEにおける各種触媒と出口水素中の重水素濃度 |

| | | |
|----|------|--------------------|
| 41 | 表4-4 | 各成分の分離度合い |
| 43 | 表4-5 | 各種水素同位体分離手法の特徴まとめ |
| 44 | 表4-6 | CECE法を用いた場合のシステム諸元 |
| 45 | 表4-7 | 同位体分離効果の温度依存性 |