

環境科学セミナー

第二部 成果報告資料

令和5年度

公益財団法人 環境科学技術研究所

公益財団法人 日本海洋科学振興財団

本成果報告の内容は、青森県から（公財）環境科学技術研究所が受託している「排出放射性物質影響調査」及び（公財）日本海洋科学振興財団が受託している「六ヶ所村沖合海洋放射能等調査」により得られた成果の一部です。

本研究は青森県からの受託事業により得られた成果を利用しており、データの帰属は青森県にあります。未発表資料も含まれるため、データの使用を希望する方はご連絡願います。

目 次

1. 世界の海のトリチウム濃度の変遷と

六ヶ所村沖での観測例 1-16

(公財) 日本海洋科学振興財団

むつ海洋研究所海洋研究部 小藤 久毅

2. 海中のトリチウムは魚の体内に

どのくらい入る？たまる？ 17-29

(公財) 環境科学技術研究所

環境影響研究部 石川 義朗

世界の海のトリチウム濃度の変遷と 六ヶ所村沖での観測例

(公財) 日本海洋科学振興財団
むつ海洋研究所 海洋研究部
小藤 久毅

1

今日の話題

- ・海洋財団と六ヶ所村沖の海洋調査について
- ・環境中のトリチウムの起源と海への供給経路
- ・海洋のトリチウム濃度の変遷
- ・六ヶ所村沖のトリチウム濃度観測例
- ・最後に

日本海洋科学振興財団は、故 日高孝次先生(初代の東京大学海洋研究所長)により昭和46年(1971)に設立された日高海洋科学振興財団を前身として、平成7年10月(1995)に設立された財団です。

財団の目的

- ・海洋科学及び技術研究の振興を図ること
- ・海洋科学及び技術に関する調査研究等を行うこと
- ・我が国の海洋に関わる科学技術の発展に寄与すること
- ・.....



財団の詳細はこちら
をご覧ください



日本海洋科学振興財団HP
<http://jmsfmml.or.jp>

主な事業等

- ・「日本海洋学会日高論文賞」の副賞授与
- ・若手研究者への海外渡航費の援助
- ・海洋に関する調査研究
- ・六ヶ所村沖合海洋放射能等調査
(青森県からの受託事業)
- ・「むつ科学技術館」の管理運営、イベント等開催
(日本原子力研究開発機構からの受託事業)

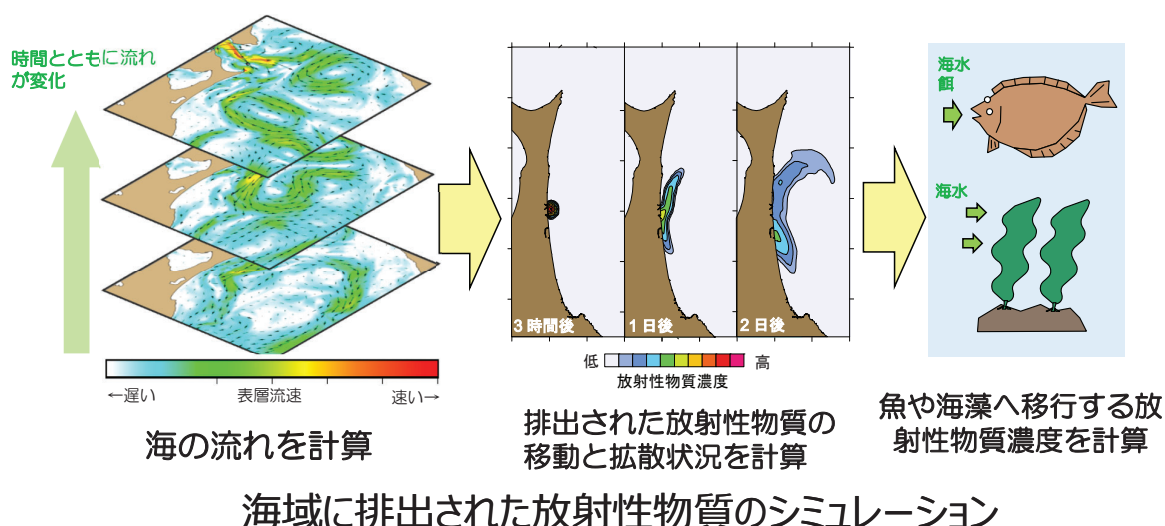


財団の所在地

3

六ヶ所村沖合海洋放射能等調査

大型再処理施設の操業によって排出される放射性物質の海洋への影響について科学的な理解を深めるために、六ヶ所村沖合地域に特有な現象を含めた海洋情報の収集、排出放射性物質の移行シミュレーションの開発を行い、これらの科学的な知見を基にした排出放射性物質影響評価を行う。



※詳しくはWebサイト「排出放射性物質影響調査 (<http://www.aomori-hb.jp>)」
の「排出放射性物質による環境影響に関する調査(海域部分)」をご覧ください。

4

観測と試料分析



係留式ブイによる観測



調査船による観測



定期船による観測

【観測・分析内容】

- ・海の流れの観測
- ・水温・塩分の観測（水塊の分布や成層の状況など）
- ・採水試料の放射性核種等の分析（現在の主な対象は ^3H と ^{129}I ）
 - ・ 大型再処理施設からの海洋放出における主要な放射性物質
 - ・ 排水の海洋での希釈・拡散を調べるためのトレーサーとして分析

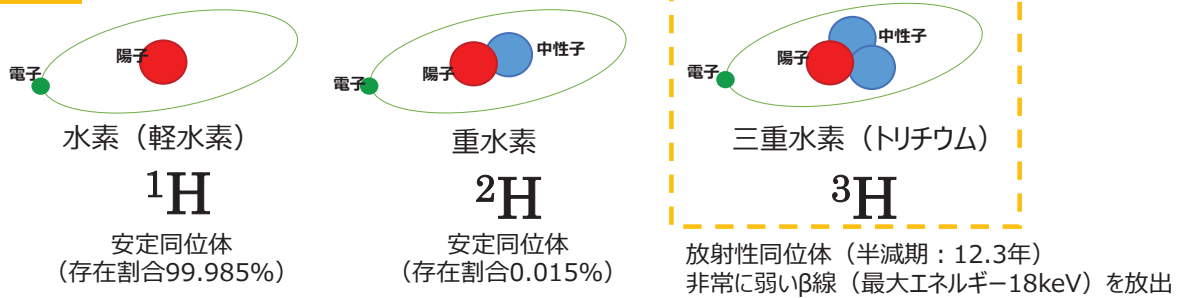
5

環境中のトリチウムの起源と 海への供給経路

6

トリチウムとは

トリチウムとは



どうやってできるか

天然：大気上層で酸素や窒素などの原子が宇宙線と反応して生成

人工：核実験（原子爆弾、水素爆弾）

特に水素爆弾の寄与が大きい

重水を冷却材とする原子炉ではトリチウムの生成量が多い

原子炉（ホウ素と中性子の反応、重水素と中性子の反応、ウランの三重核分裂）

核融合燃料（核融合反応：重水素+トリチウム→ヘリウム+中性子）

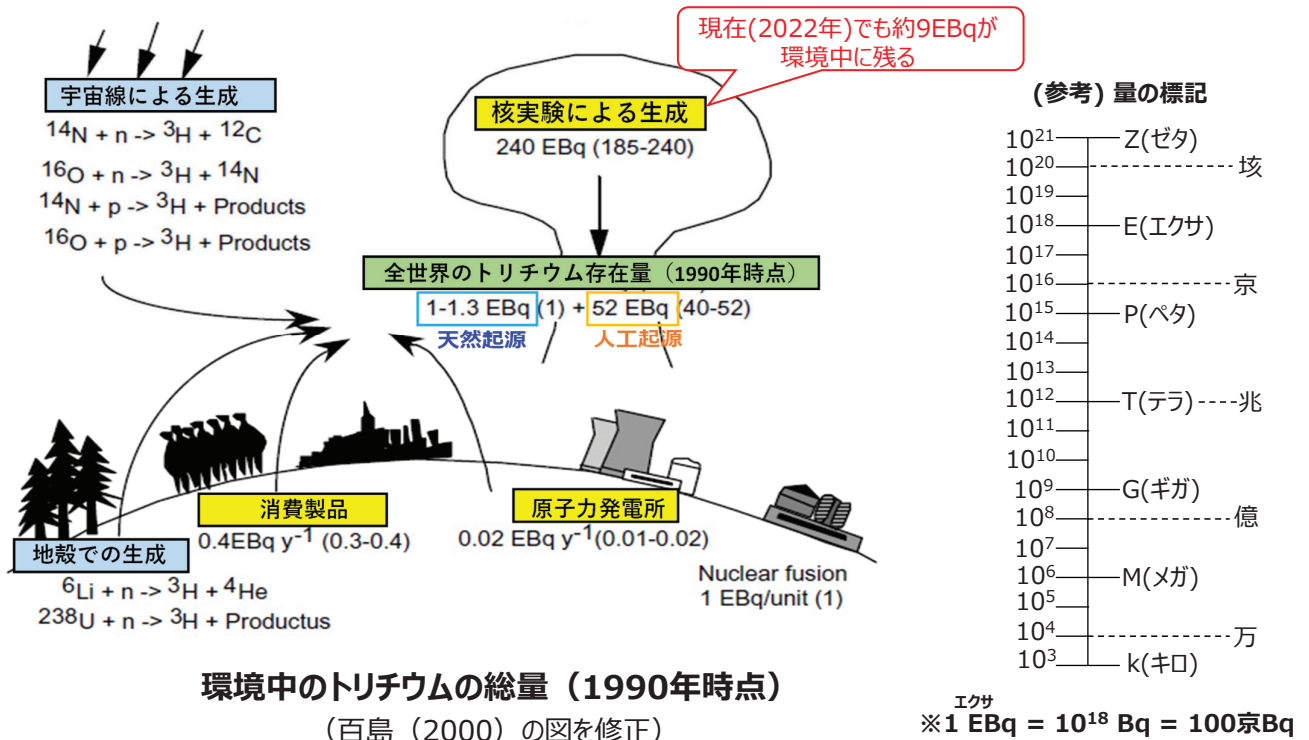
どのような特徴を持つか

H_2O の水素の一つがT（トリチウム）に置き換わったもの

- ・環境中では大部分が水（HTO）の形で存在。
- ・環境中では通常の水素（軽水素）と、概ね同様の挙動をとる。
- ・弱いベータ線しか出さないため、体内に摂取した場合の内部被ばくのみが問題となる。
- ・1Bq摂取あたりの影響（実効線量係数）は他の放射性核種に比べ小さい。

7

環境中のトリチウムの起源

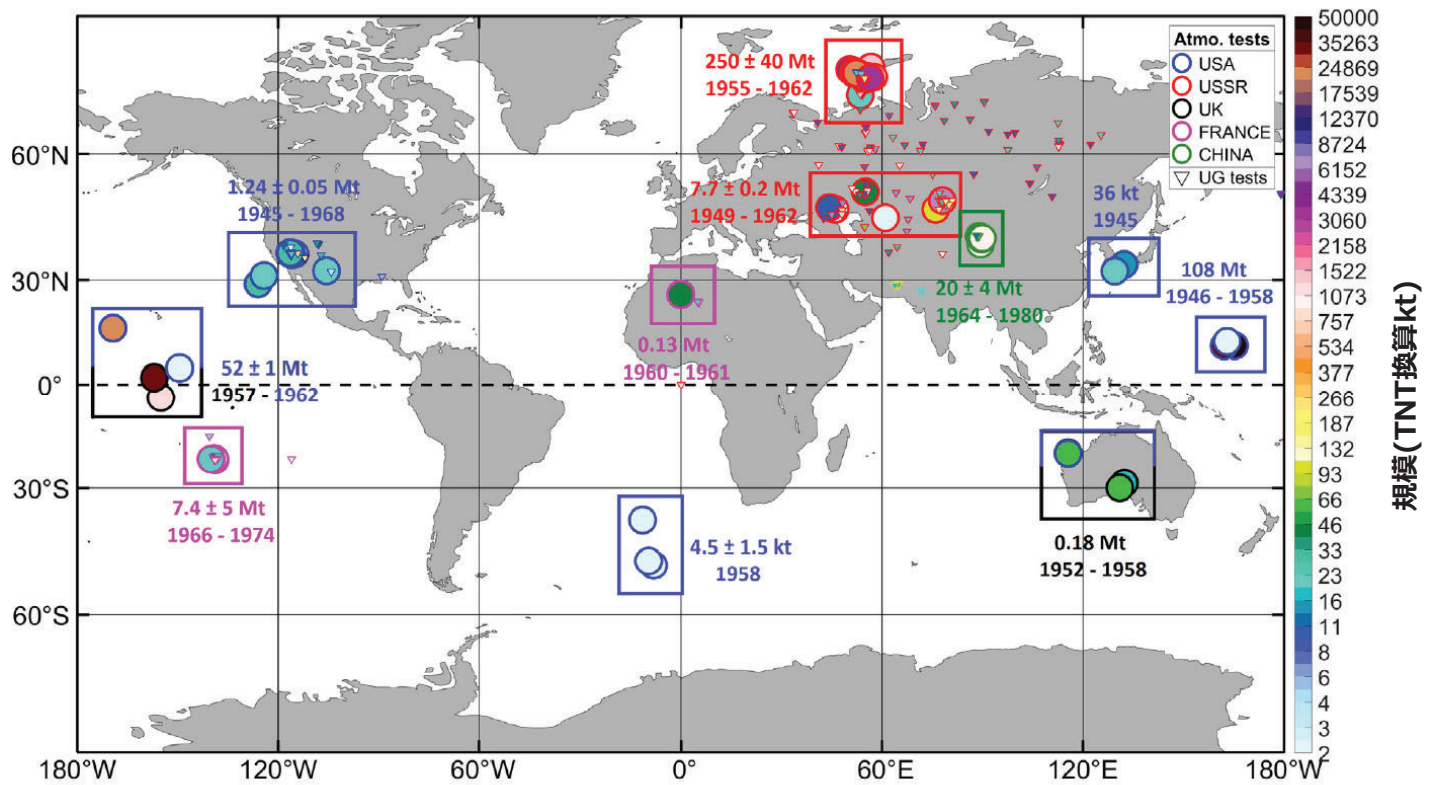


- ・核実験によって、それまで環境中に存在した量の約200倍のトリチウムがもたらされた。
- ・核実験由来トリチウムは年月とともに徐々に減少しているが、現在でも最も大きな割合を占める。

8

核爆発マップ° (1945~1998年)

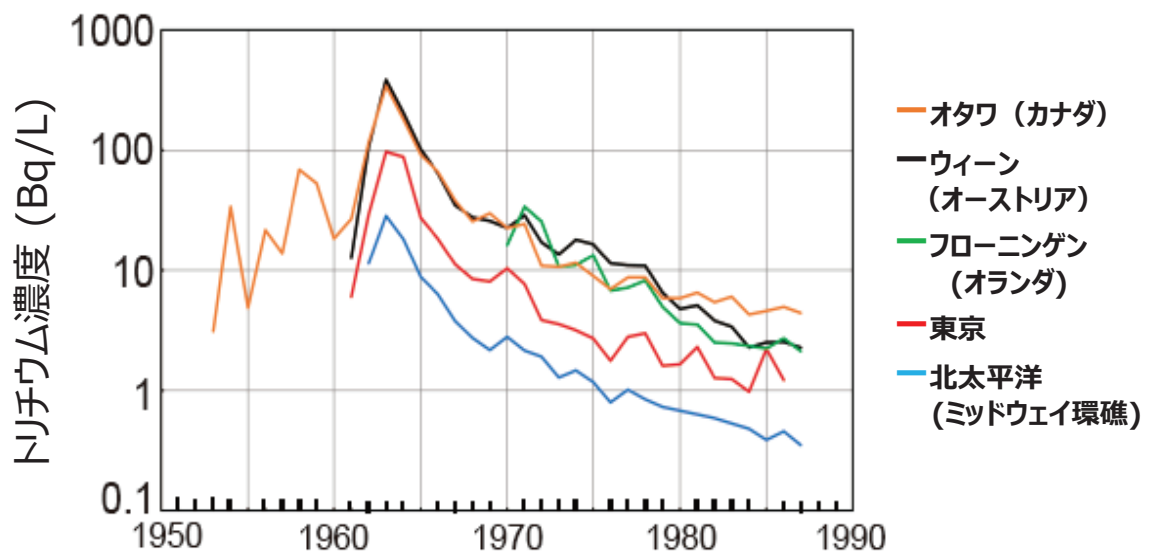
(Oms et al., 2019)



○大気圏内（空中・地表・水面など）、▽地下（トンネル、坑道、海底掘削坑など）
 □で囲ったものは同じ地域での核爆発の合計量（ktまたはMt表示）と実施年代

9

降水中のトリチウム濃度の傾向

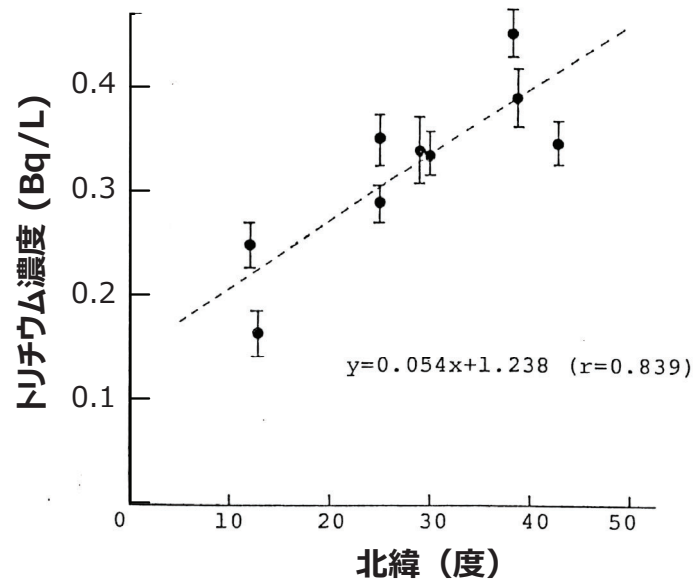
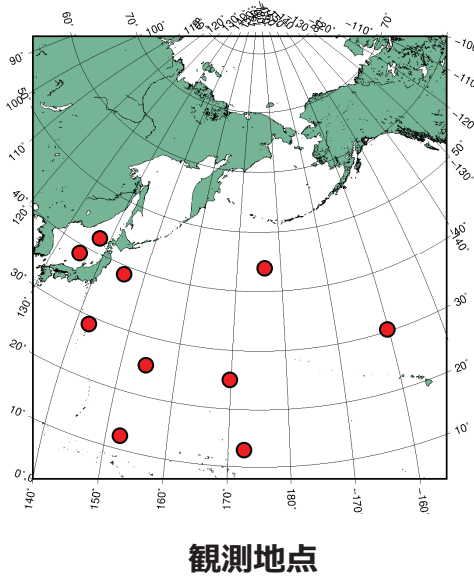


世界の降水中トリチウム濃度（年平均値）の変遷 (宮本, 2022)

- 核実験によって降水中のトリチウム濃度は世界の広範囲で数百Bq/Lにまで上昇した。1963年にアメリカ・イギリス・ソ連で部分的核実験停止条約が結ばれて以後、降水中の濃度は低下している。
- 降水中のトリチウム濃度は中～高緯度で高く、低緯度で低い。また、海からの水蒸気の寄与が少ない内陸で高く、海沿いでは低い。（海からの水蒸気による希釈）

10

表層海水中のトリチウム濃度の傾向



表層海水中のトリチウム濃度と緯度の関係（1985年時点）

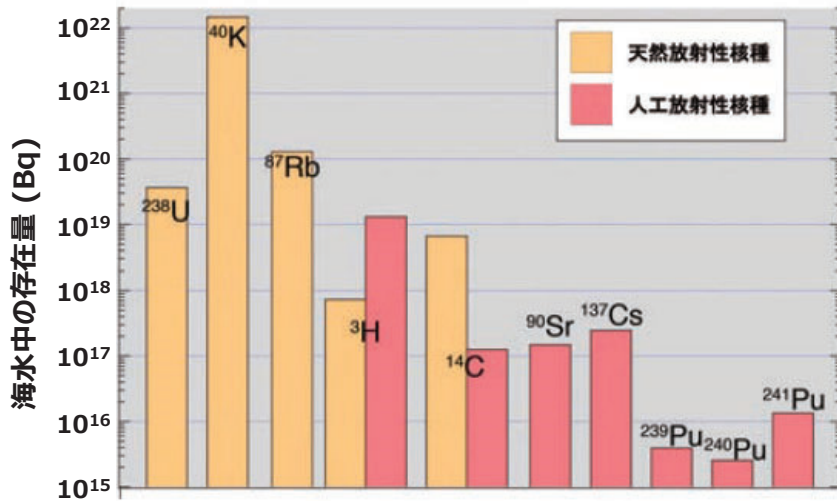
(Kaji et al., 1991)

- ・ 核実験由来トリチウムは、海洋へは主に降水によりもたらされる。
表層海水中のトリチウム濃度も、中～高緯度で高く、低緯度で低い。

11

海洋のトリチウム濃度の変遷

海水中に存在する放射性核種の例



2000年の海洋における主な人工放射性核種の存在量の比較。Aarkrog(2003)のデータに一部加筆。

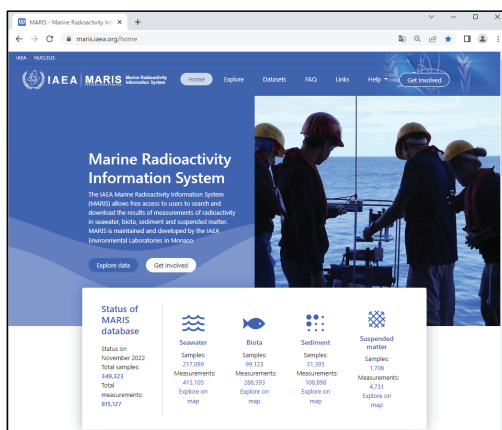
(日下部, 2016)

核種	半減期(年)	主な起源
^{238}U	4.47×10^9	天然 (地球誕生時から存在)
^{40}K	1.28×10^9	天然 (地球誕生時から存在)
^{87}Rb	4.8×10^{10}	天然 (地球誕生時から存在)
^3H	12.3	天然 (大気と宇宙線の核反応) 人工 (核実験、原子力施設)
^{14}C	5730	天然 (大気と宇宙線の核反応) 人工 (核実験、原子力施設)
^{90}Sr	28.6	人工 (核実験、原子力施設)
^{137}Cs	30.2	人工 (核実験、原子力施設)
^{239}Pu	2.41×10^4	人工 (核実験、原子力施設)
^{240}Pu	6563	人工 (核実験、原子力施設)
^{241}Pu	14.3	人工 (核実験、原子力施設)

- ・ 海水中で最も多い放射性核種はカリウム40（天然放射性核種）であり、海水中の濃度は、塩分34の場合で約12 Bq/L（塩分に比例する）。
- ・ 海水中の人工放射性核種の中で最も多いのはトリチウムである。

13

海洋放射能データベース（世界）

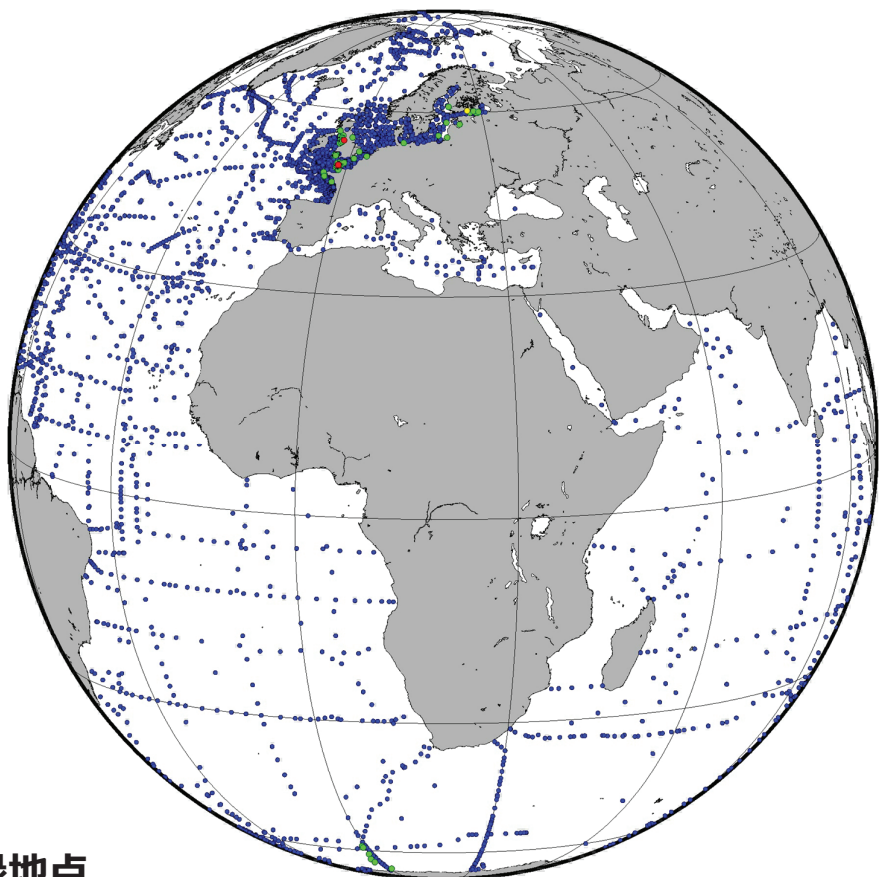


IAEA海洋放射能情報システム
(MARIS)
<https://maris.iaea.org>



データ登録地点

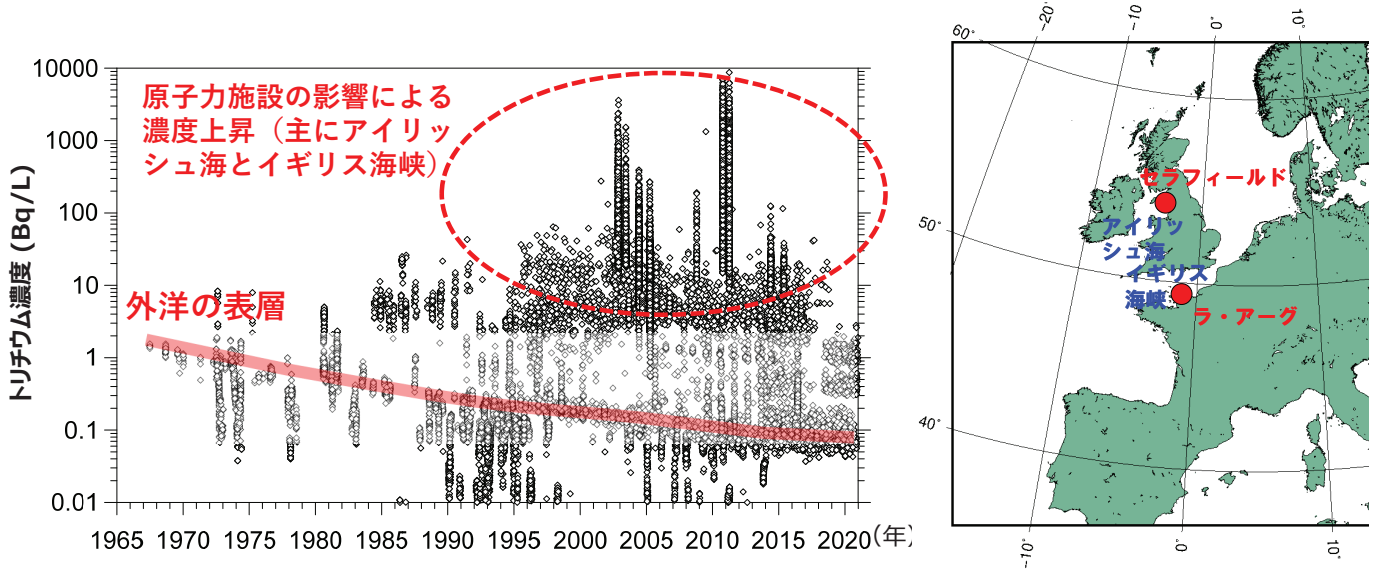
(2022年9月時点までのトリチウム登録地点)



14

世界の海水中のトリチウム濃度の推移

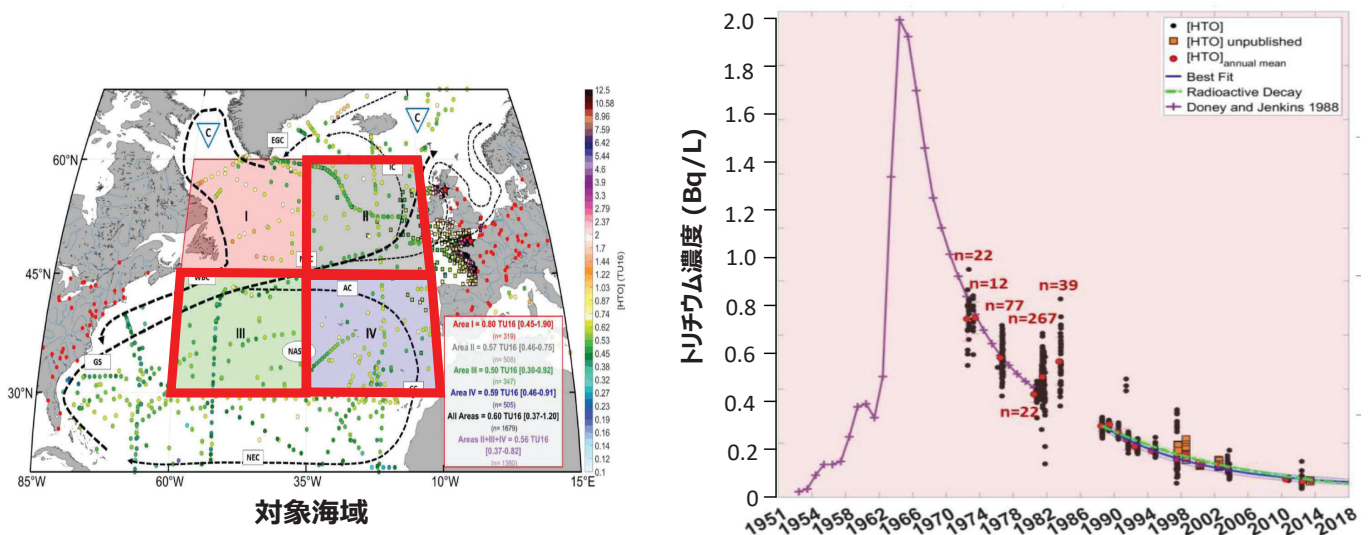
※MARISより抽出した100m以浅のデータをプロットした
検出下限値以下のデータはプロットしていない



- ・外洋の平均的な濃度は年代とともに低下傾向にある。
- ・欧州沿岸、特に、再処理施設（セラフィールドおよびラ・アーグ）に面しているイギリス海峡・アイリッシュ海などで上昇幅が大きい。

15

大西洋（沖合）のトリチウム濃度変化

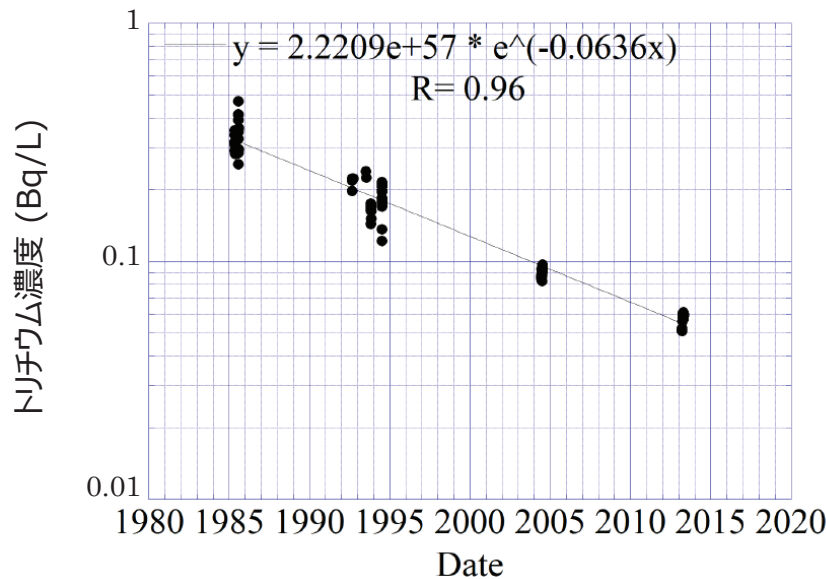


大西洋の0～500mにおけるトリチウム濃度の変化（Oms et al., 2019）

- 及び ■ : 観測データ ※左図の エリア
- モデルによる推定濃度（Doney and Jenkins, 1988）
- 1988以後についての観測データの回帰曲線（Oms et al., 2019）

- ・大西洋の沖合では、大気圏内核実験が行われていた頃が最も高く、概ね時間とともに減少している。
- ・地点によっては原子力施設の影響とみられる一時的上昇はあるものの、大西洋全体の濃度に影響するほどではない。

太平洋（沖合）のトリチウム濃度変化



太平洋西部中緯度域のトリチウム濃度変化
(WOCE/GOSHIPプログラム) (Aoyama et al., 2021)

- ・太平洋のトリチウムデータは大西洋ほど多くないが、沖合では大西洋と同様に時間とともに濃度が減少している。（大気圏内核実験の寄与の減少による）

17

海洋放射能データベース（日本）

日本の環境放射能と放射線：環境放射線データベース
<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/data/database/>

環境放射能と放射線
Environmental Radioactivity and Radiation in Japan

このサイトについて | 新着情報 | サイトマップ | English | 検索

放射線データを活用する | 放射線に関する基礎知識を学ぶ | ライブラリー | アーカイブ | お問い合わせ

環境放射線データベース

ホーム / 放射線データを活用する / 環境放射線データベース

条件選択

環境放射線データベースでは、原子力規制庁が関係省庁や47都道府県等の協力を得て実施した環境放射能調査の結果を検索することができます。環境放射線データベースに登録されているデータは、関係省庁や都道府県等において、有識者や職員による確認、評価を経ているものになります。

① 必須項目を全て選択した時点から該当データ件数がカウントされます。

調査期間 必須

検索の対象としたい期間を指定してください。

2022 年 1 月 ~ 2022 年 1 月

調査地域 必須

全国47都道府県から複数選択でき、日本全国を対象にすることもできます。

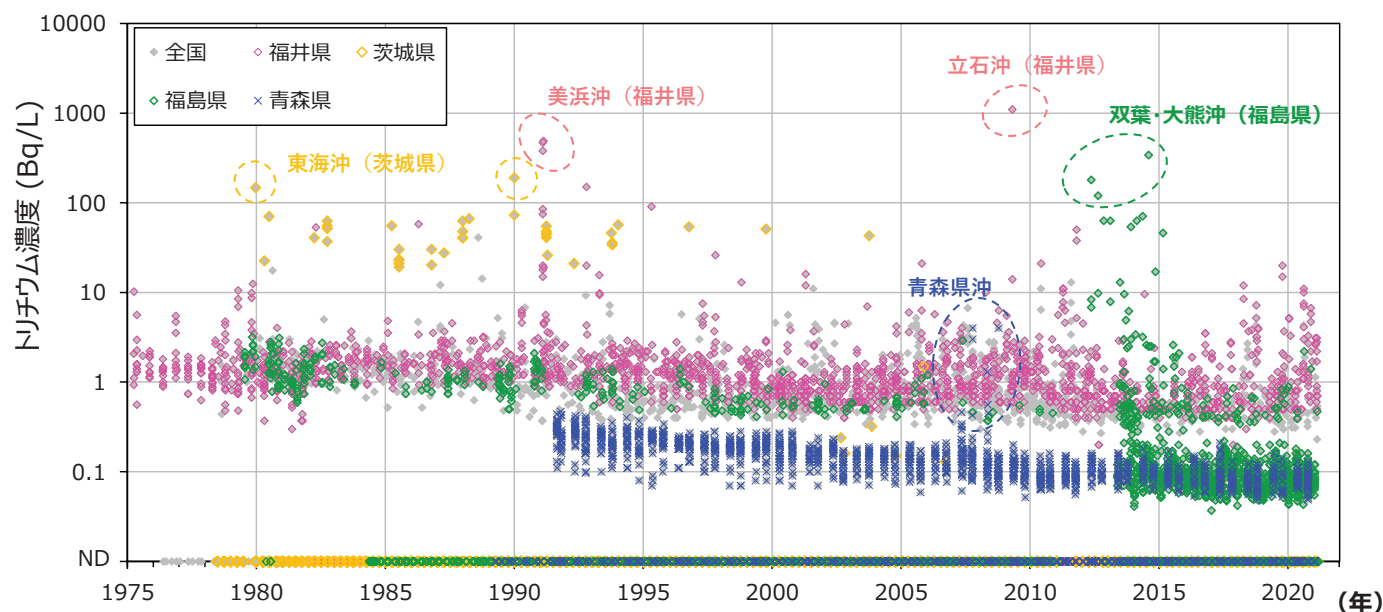
原子力規制庁からの委託
業務として日本分析セン
ターが運営・管理

全国の原子力サイト周辺
のモニタリングを中心とした
データが登録されている

18

海水中のトリチウム濃度の推移：日本沿岸

環境放射線データベースに登録されている100m以浅の海水データをプロットした



原子力サイト周辺の海水で見られる一時的な濃度上昇の要因の例

- ・茨城県東海沖：東海再処理工場からの管理放出
- ・1991年 福井県美浜沖：美浜原発2号機伝熱管破断事故
- ・2007, 2008年 青森県沖：六ヶ所再処理施設アクティブ試験時の管理放出
- ・2009年 福井県立石沖（敦賀湾）：ふげん（重水炉）廃止措置作業中の管理放出
- ・2012, 2014年 福島県双葉・大熊沖：福島第一原発事故

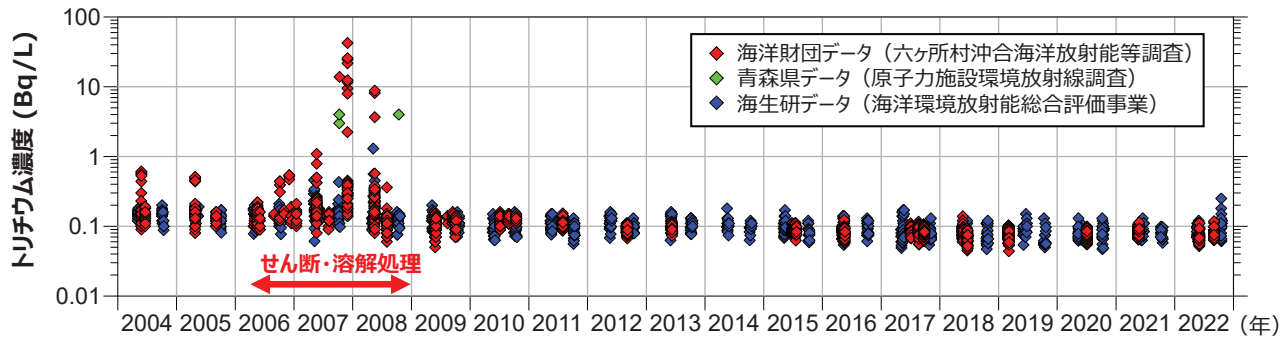
管理放出では、重水炉
および再処理工場から
の影響が大きい

19

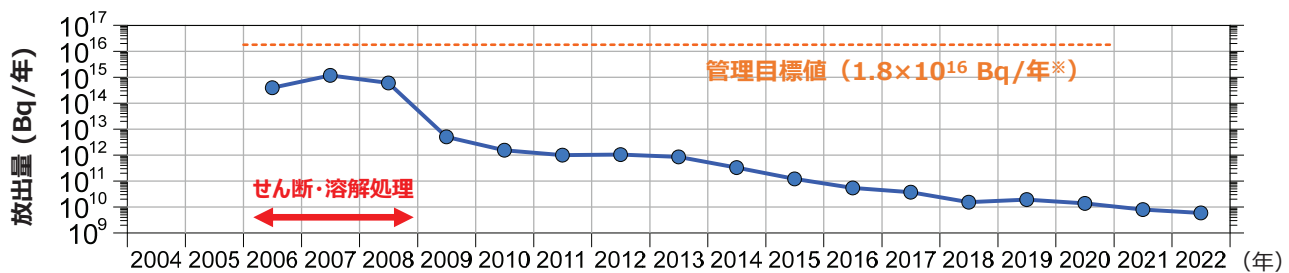
六ヶ所村沖での観測例

六ヶ所村周辺の海水中トリチウム濃度の推移

※陸水の影響が大きい試料（塩分データから判断）は除いてプロットした。
検出下限値未満のデータはプロットしていない。



- ・ 長期的に見ると、ベースラインの濃度がわずかに低下している。（核実験の寄与が低下し、天然のレベルに近づく）
- ・ アクティブ試験で使用済み核燃料のせん断・溶解処理を実していた時期（2006～2008年）にベースラインの濃度からの上昇が見られた。

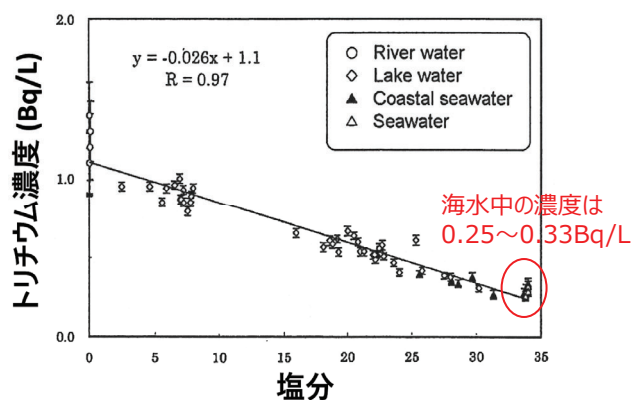


（参考）再処理施設からのトリチウム海洋放出量の推移（日本原燃定期報告データ）

※2020年までの管理目標値。現在は 9.7×10^{15} Bq/年で運用されている。

21

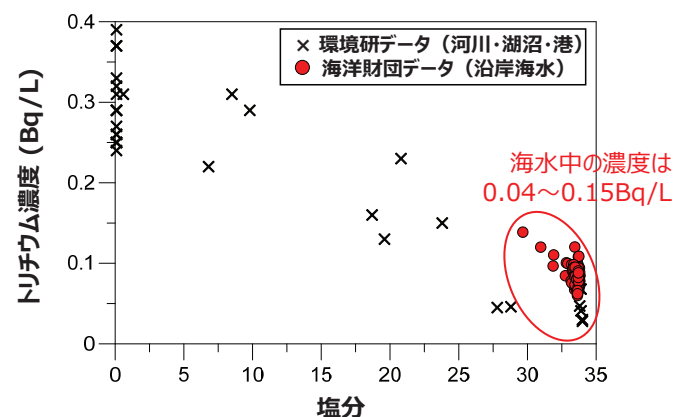
六ヶ所村の沿岸域・汽水域のトリチウム濃度 ～再処理施設の寄与が見られない場合の特徴～



再処理施設アクティブ試験前のトリチウム濃度

(Tonosaki et al., 2000)

※1994, 1995年採取試料の分析データ



最近のトリチウム濃度

(海洋財団；環境研, 2019)

※2018年採取試料の分析データ

- ・ 海洋放出の寄与が見られない期間は、陸水(河川水・湖沼水・浅層地下水)の影響が大きいほどトリチウム濃度が高く、海水の影響が大きいほど低い傾向を示す。

22

六ヶ所村周辺海水試料のトリチウム分析データ ～2006～2008年のデータ（海洋財団測定分）～

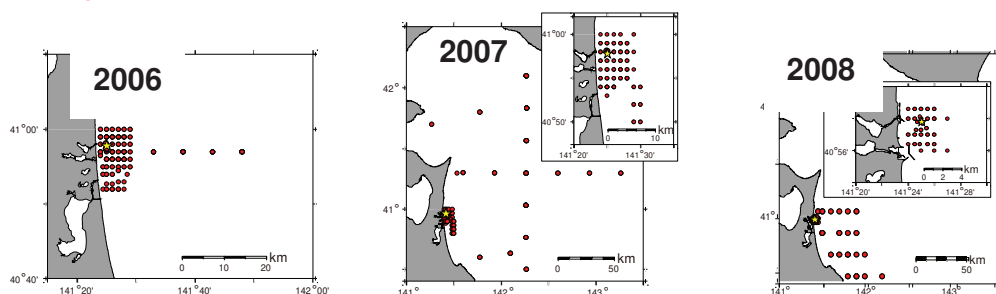
	2006年度	2007年度	2008年度
総試料数	145試料	157試料	121試料
≥2 Bq/L試料	0試料 (0%)	15試料 (9.6%)	4試料 (3.3%)
0.5～2 Bq/L試料	3試料 (2.1%)	24試料 (15.3%)	5試料 (4.1%)
<0.5 Bq/L試料	142試料 (97.9%)	118試料 (75.1%)	112試料 (92.6%)

再処理施設からのトリチウム
放出量（海洋放出）

3.9×10^{14} Bq/年

1.2×10^{15} Bq/年

6.0×10^{14} Bq/年

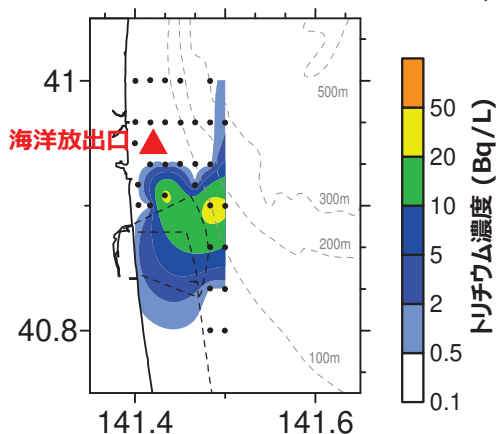


2006～2008年調査での採水地点

- ・ 再処理施設からの放出の寄与が検出できる試料は全体のごく一部である。
- ・ アクティブ試験での排出が多かったところでもトリチウム上昇は長期や広範囲に及ぶものでは無かった。

23

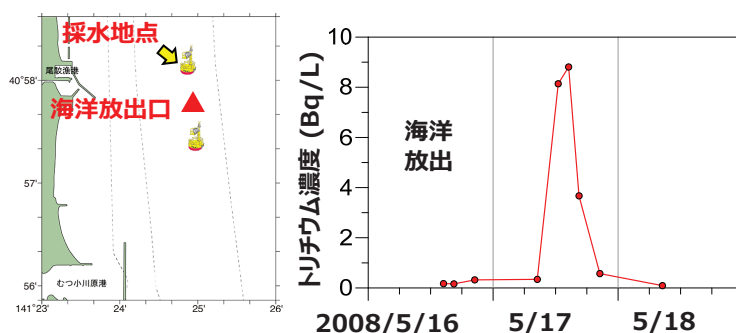
海洋放出されたトリチウム濃度の変化 ～海域での観測例～



放出翌日のトリチウム分布の観測例

- ・ 2007/11/29に海洋放出(^3H 放出量 4.9×10^{13} Bq)
- ・ 2007/11/30にむつ小川原港周辺海域で採水

放出の翌日で数kmの範囲に分布と見積もられる



放出当日～翌日のトリチウム濃度変化の観測例

- ・ 2008/5/16に海洋放出(^3H 放出量 1.2×10^{12} Bq)
- ・ 2008/5/16～5/17に放出口の約700m北にあるブイ上で採水

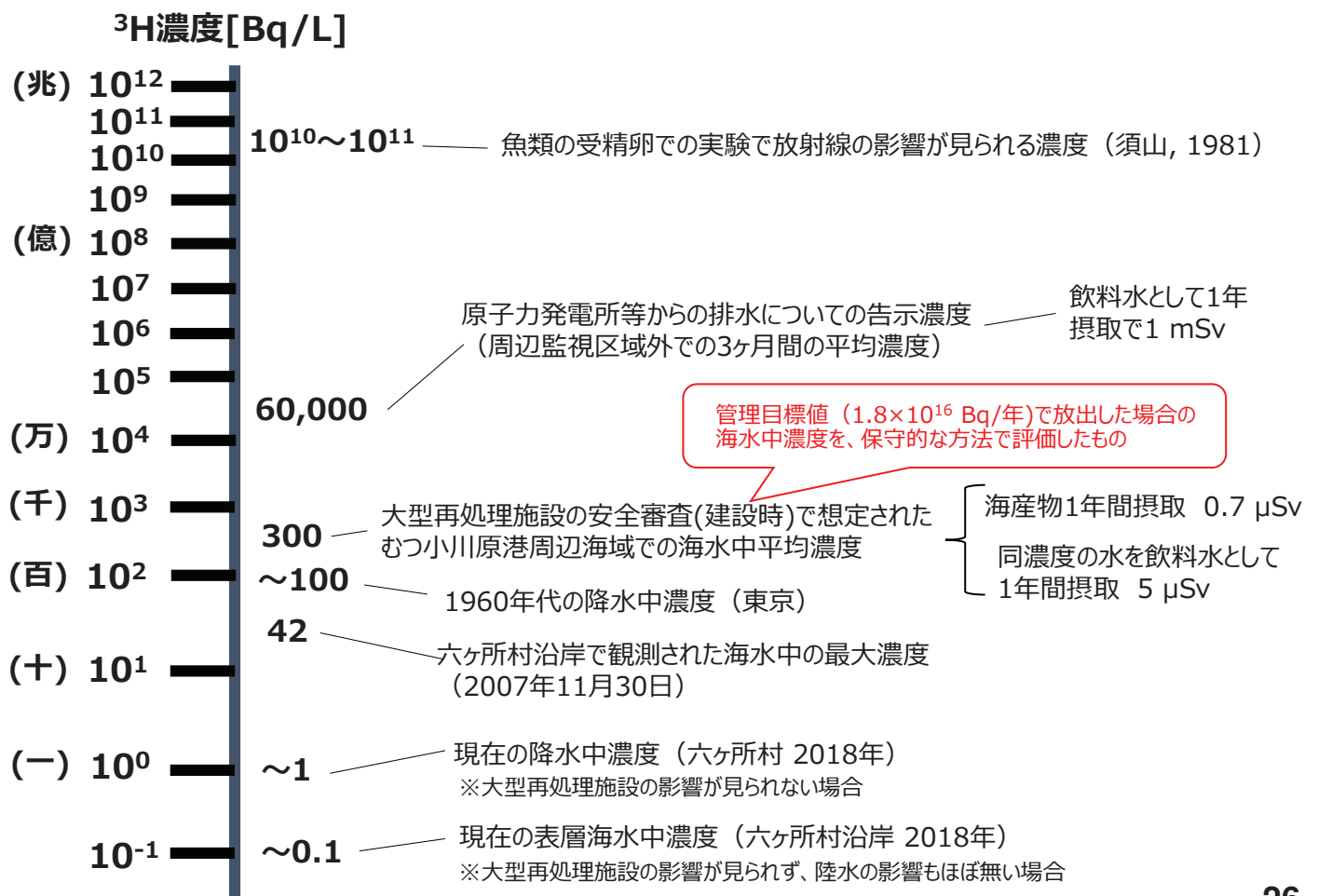
一旦濃度が上昇した後、数時間でもとの濃度に戻る

- ・ 放出の翌日に採取した海水で数Bq～数10Bqの濃度（排水中濃度の20万～30万分の1）が検出されている。
- ・ 海域の流れによりトリチウムの分布は移動し、トリチウム濃度が上昇した状態は長時間継続しない。

24

最後に

水中のトリチウム濃度の例



世界各国のトリチウム濃度に関する基準(1)

飲料水中のトリチウム濃度基準と1年間飲んだ場合の被ばく線量

柿内(2018) のとりまとめに註を追加

	トリチウム濃度基準(Bq L ⁻¹)	被ばく線量(mSv 年 ⁻¹)
EU ※1	100	0.001
アメリカ	740	0.01
カナダ	7,000	0.09
ロシア	7,700	0.10
スイス	10,000	0.13
WHO	10,000	0.13
フィンランド	30,000	0.4
オーストラリア	76,103	1.0

※1：パラメータ値であり濃度限度ではないことがEUのCouncil Directive (22-Oct-2013)に明記されている。「トリチウム濃度の上昇は、他の人工放射性核種の存在を示唆する場合がある。トリチウム濃度がパラメータ値を超えた場合、他の人工放射性核種の存在に関する分析が必要となる。」と注釈がつけられている。

六ヶ所村沖で見られた海水中のトリチウム濃度は、被ばく線量の観点では全く問題ない範囲内での変動である。

27

世界各国のトリチウム濃度に関する基準(2)

各国の原子力施設からのトリチウムの放出規制及び 飲料水に含まれるトリチウムの濃度基準

(山口, 2021)

※1兆=10¹², 1京=10¹⁶

国名	原子力施設からの放出に係る規制			飲料水中の濃度基準
	規制方法	気体廃棄物	液体廃棄物	
日本	濃度規制	5Bq/L	6 万 Bq/L (原発) なし (再処理)	なし
韓国	濃度規制	3Bq/L	4 万 Bq/L	なし
米国	濃度規制	3.7Bq/L	3 万 7000Bq/L	740Bq/L
カナダ	総量規制	12 京～ 85 京 Bq/ 年	37 京～ 4600 京 Bq/ 年	7,000Bq/L
英国	総量規制	3 兆～ 15 兆 Bq/ 年 (原発)	80 兆～ 700 兆 Bq/ 年 (原発)	100Bq/L
		1100 兆 Bq/ 年 (再処理)	1 京 8000 兆 Bq/ 年 (再処理)	
フランス	総量規制	4 兆 Bq, 4.5 兆 Bq/ 年等 (原発)	45 兆 Bq, 80 兆 Bq/ 年等 (原発)	100Bq/L
		150 兆 Bq/ 年 (再処理)	1 京 8500 兆 Bq/ 年 (再処理)	

(注)「原発」は原子力発電所、「再処理」は再処理施設に対する規制。日本の再処理施設については、トリチウム等の各放射性物質の濃度限度は定められていないが、放射性廃棄物の海洋放出に起因する実効線量限度(3 か月間につき 0.25mSv)が定められている。カナダ、英国、フランスでは施設ごとに基準値が設定されている。「京」は兆の1万倍を意味する。

(出典) 三菱総合研究所『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』2019.3.29, pp.38, 41. 経済産業省ウェブサイト <<https://www.meti.go.jp/medi-lib/report/H30FY/010703.pdf>>; 柿内秀樹「トリチウムの環境動態及び測定技術」『アトモスー日本原子力学会誌』Vol.60 No.9, 2018.9, p.32. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/60/9/60_537/_pdf/-char/ja>; Canadian Nuclear Safety Commission, "Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water," Part of the Tritium Studies Project, INFO-0766, 2008. <https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/info_0766_e.pdf> を基に筆者作成。

まとめ

- ・ 海水中のトリチウムは大部分が核実験によりもたらされたものである。核実験由来トリチウムは年月とともに徐々に減少しているが、現在でも最も大きな割合を占める。
- ・ 原子力施設周辺海域のトリチウム濃度は、施設からの放出の影響で上昇するが、時間・位置による変化が大きい。また、その放出は海洋全体の濃度を大きく変化させるものではない。
- ・ 六ヶ所再処理施設アクティブ試験時のトリチウムデータから、外洋に面した開放型の海では、移流や拡散により排水の影響は比較的短期間で低下すると推測される。

29

参考文献

- 百島則幸：トリチウムの環境動態，富山大学水素同位体科学研究センター研究報告，**20**，1-10，2000
- 宮本霧子：海洋におけるトリチウムの動態と海洋生物への蓄積，海生研研報，**27**，71-80，2022
- T. Kaji, Y. Takashima: Behavior of tritium in the ocean, *Radiochim. Acta*, **54**, 117-120, 1991
- 日下部正志：海洋における放射性核種の分布と変遷，海生研研報，**22**，3-16，2016
- IAEA: Marine Radioactivity Information System, <https://maris.iaea.org>
- P. E. Oms, P. B. Bois, F. Dumas et al.: Inventory and distribution of tritium in the oceans in 2016, *Sci. Total. Environ.*, **656**, 1289-1303, 2019
- S. C. Doney, W. J. Jenkins, J. L. Bullister, A comparison of ocean tracer dating techniques on a meridional section in the eastern North Atlantic, *Deep-Sea Res. I*, **44**(4), 603-626, 1997
- M. Aoyama, S. Charmasson, Y. Hamajima et al.: Tritium activity concentration and behaviour in coastal regions of Fukushima in 2014, *Biogeosciences Discuss.* Preprint, 2021
- 日本の環境放射能と放射線：環境放射線データベース, <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/data/database/>
- 日本原燃：環境モニタリング 定期報告データ, <https://www.jnfl.co.jp/ja/business/monitoring/periodic/>
- 海洋生物環境研究所：令和4年度 原子力施設等防災対策等委託費 海洋環境における放射能調査及び総合評価事業 調査報告書，令和5年3月，<https://www.kaiseiken.or.jp/publish/itaku/rep2023.pdf>
(平成16年度～令和3年度報告書については省略)
- 青森県：原子力施設環境放射線調査報告書（令和3年度報），
https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kikikanri/atom/files/houkokusho_R3.pdf
(平成16年度～令和2年度報告書については省略)
- K. Tonosaki, H. Kudoh, H. Kimura: Tritium concentrations of natural waters in Rokkasho-mura, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **243**(2), 579-585, 2000
- 須山一兵，江藤久美：水生生物に対するトリチウム水の影響，日本原子力学会誌，**22**(8)，564-570，1981
- 柿内秀樹：トリチウムの環境動態及び測定技術，日本原子力学会誌，**60**(9)，537-541，2018
- EU理事会：飲料水中の放射性物質に関する一般公衆の健康保護に関する要求事項，Council Directive 22-Oct-2013, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:296:0012:0021:EN:PDF>
- 山口聡：福島第一原発のALPS処理水の海洋放出をめぐる問題，レファレンス（国立国会図書館調査及び立法考査局編），**850**，97-121，2021

30

海中のトリチウムは魚の体内に どのくらい入る？たまる？

(公財) 環境科学技術研究所
環境影響研究部
石川義朗

1

本日の話題

- ・環境研とは？
- ・トリチウムについて
- ・研究の目的
- ・魚を使った実験
- ・結果とモデル
- ・まとめ



3

環境研の設立経緯と目的

平成2年 核燃料サイクル施設の立地にあたり、青森県の要請を受けて六ヶ所村に設立

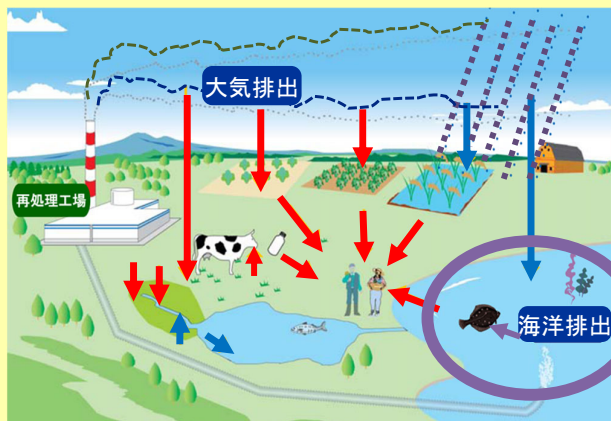
放射性物質及び放射線による環境・生物への影響を調査研究し、その成果を広く発信して、住民の理解増進を図る

常勤役職員69名(R5.10.1)

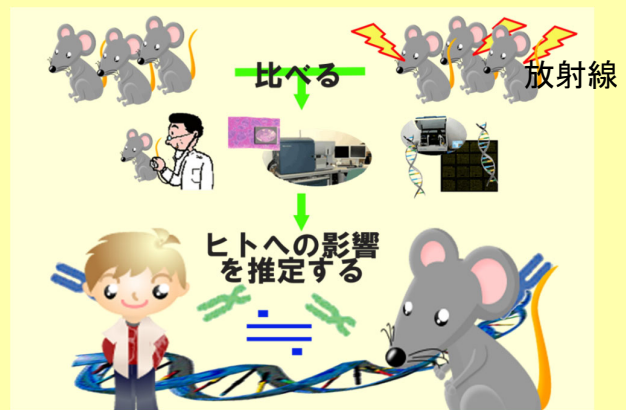
内 役員 2名 研究部門 37名

4

環境影響研究部

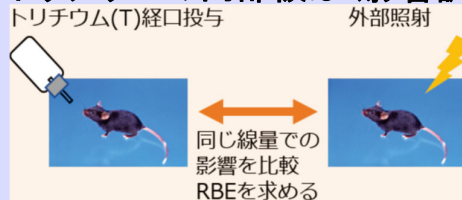


生物影響研究部



トリチウム研究センター

トリチウムの内部被ばく影響調査



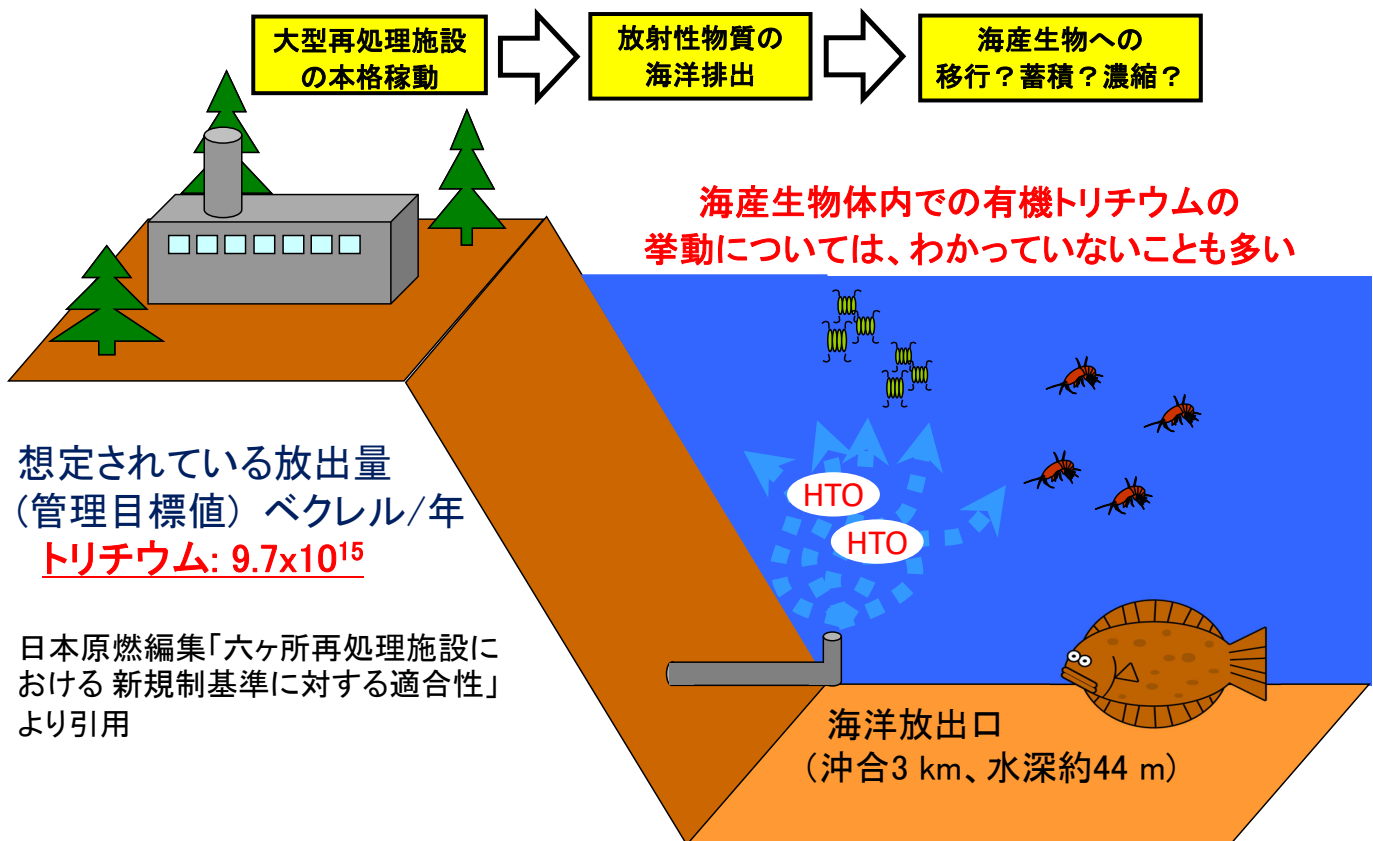
理解醸成活動

共創センター

調査事業で得られた客観的データや科学的知見について、地域住民を始めとする県民の皆様に対して丁寧な情報発信を行うとともに、双方向のコミュニケーションにより理解醸成を図る。

5

水産物トリチウム移行研究の背景 —大型再処理施設の海洋排出—



想定されている放出量
(管理目標値) ベクレル/年
トリチウム: 9.7×10^{15}

日本原燃編集「六ヶ所再処理施設における新規制基準に対する適合性」より引用

海洋放出口
(沖合3 km、水深約44 m)

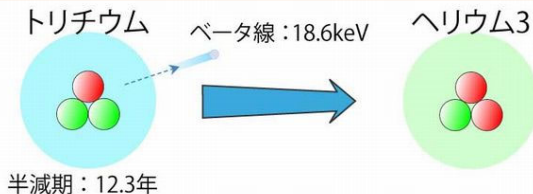
トリチウム(^3H): 水素の放射性同位体
HTO: トリチウム水

6

トリチウムってなに？

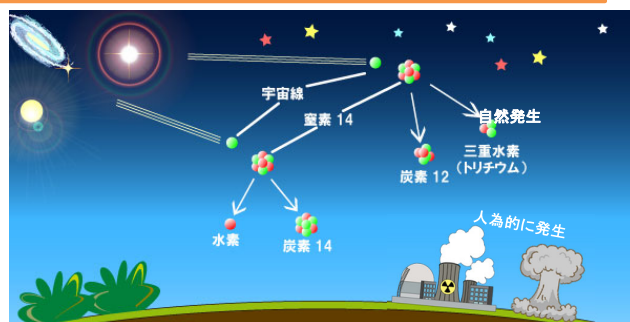
- トリチウム(^3H)とは
質量数が3の水素の同位体 : T
(水素と化学的性質は同じで、重さが違う)
質量数1: 軽水素 : H
質量数2: 重水素 (^2H) : D

	^1H	^2H	^3H
陽子	1	1	1
中性子	0	1	2
質量数	1	2	3
存在比	99.985%	0.015%	ごく微量
呼称	水素	重水素	トリチウム



- 弱いエネルギーのベータ線を出して放射性物質ではないヘリウム3になる
半減期: 12.3年 (半分になる時間)

- 発生源:
 - 天然: 宇宙からの放射線と空気中の窒素や酸素の核反応により生成
 - 人為: 過去の大気圏内核実験や原子炉内で発生
 $\Rightarrow$ できる量、減る量が釣り合っている
ので、自然界には常に一定量存在

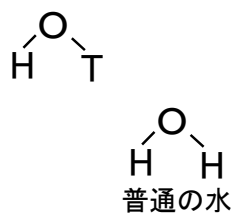


7

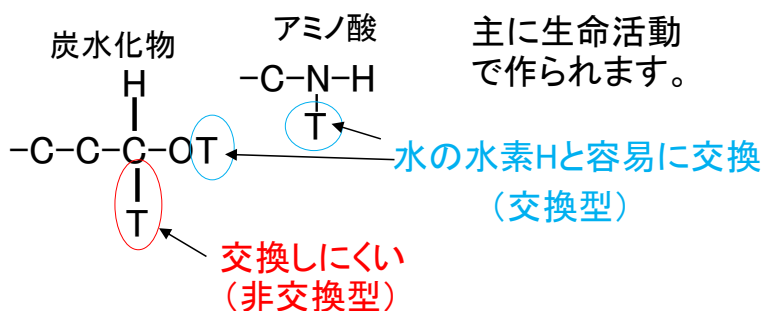
環境中でのトリチウムは？ 実験では？

- トリチウムは環境中 (水中) では主に2つの状態で存在する!

トリチウム水 (HTO)



有機トリチウム (OBT)

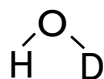


- 実験では放射性物質のトリチウムを扱うのは難しい! だから...

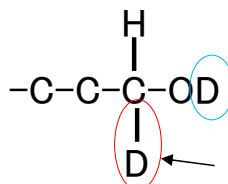
	^1H	^2H	^3H
陽子	1	1	1
中性子	0	1	2
質量数	1	2	3
存在比	99.985%	0.015%	ごく微量
呼称	水素	重水素	トリチウム

実験では、重水素(D)を使います。
(重さが違うので判別が可能)

重水 (HDO)



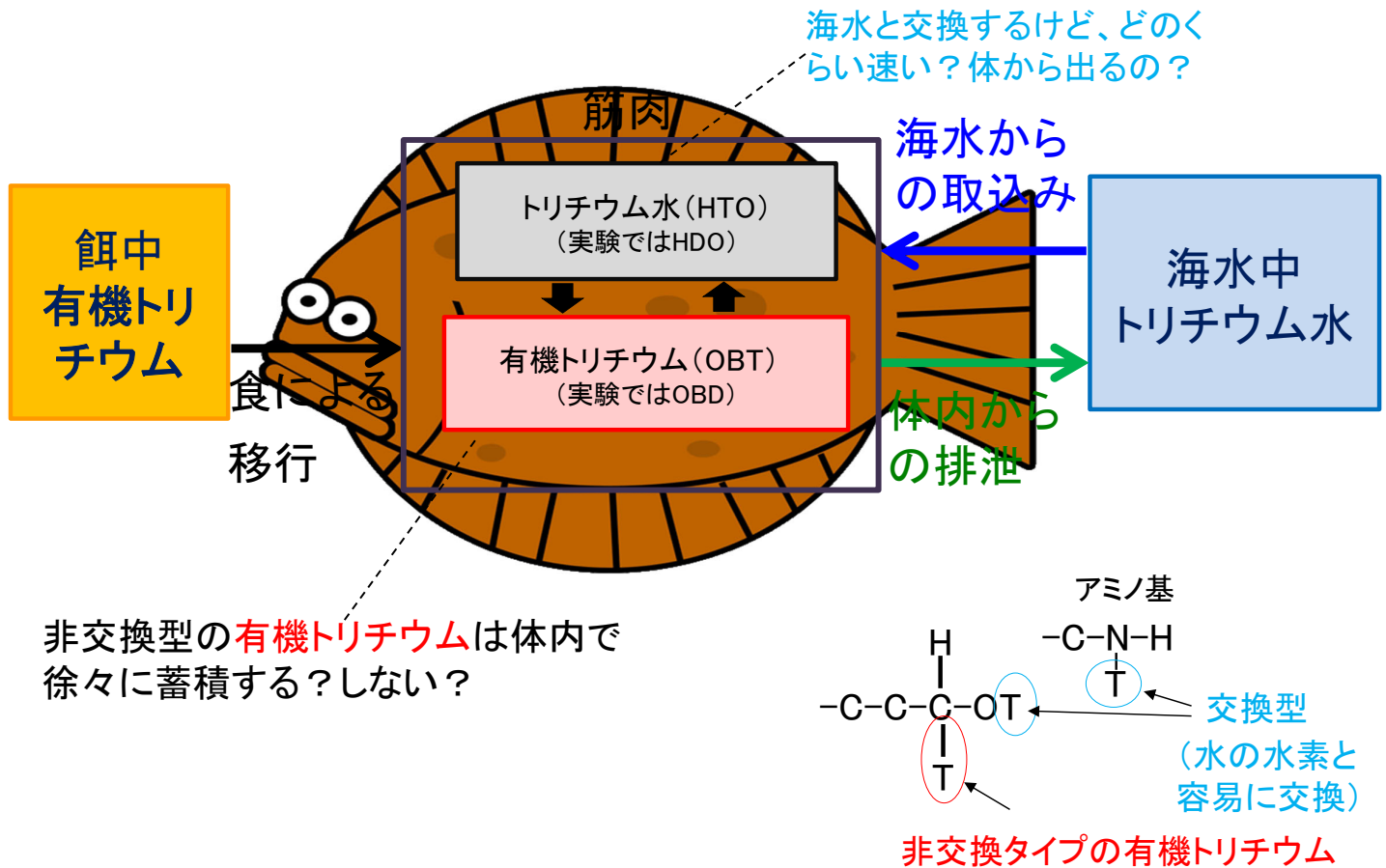
有機重水素 (OBD)



N_xOBD

非交換の有機重水素

研究の背景 ー魚の体内での水素の移行ー



9

濃縮とは？：言葉の定義

小学館「新選国語辞典」金田一京介他編集

濃縮：液を煮詰めてその濃度を高めること(文例：濃縮ジュース)

蓄積：たくわえ、つむこと。たくわえ。

移行：うつっていくこと

生物濃縮：海水中の濃度より高く、その濃度が維持されている状態

【海洋生物による生物濃縮の例】

➤ 海藻中のヨウ素

コンブは乾燥重量で 2200 ppm ← 海水中のヨウ素濃度は 0.06 ppm

➤ ホタテのウロ(中腸線)の貝毒、カドミウム

貝毒：餌として食べた海水中の微生物中の毒

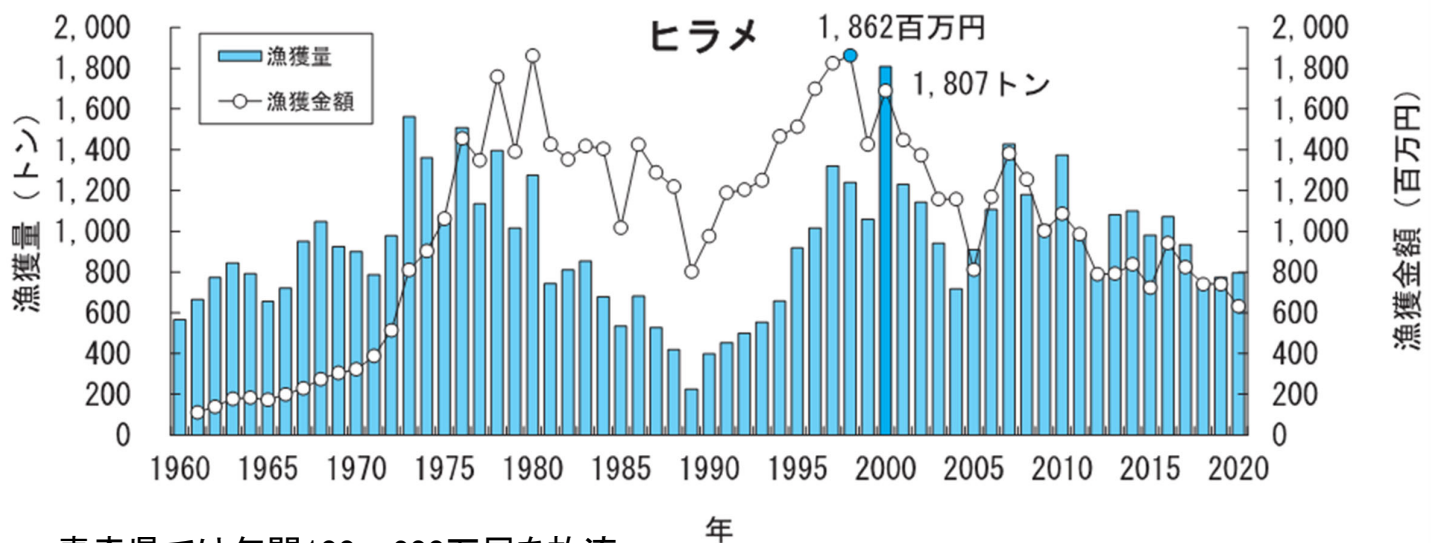
乾燥重量で 数10～100 ppm ← 海水のカドミウムは 0.05～0.1 ppm

→ 魚はトリチウムを体内に濃縮するのか？

実験対象の水産物：青森県のヒラメについて

青森県におけるヒラメ漁獲数量及び漁獲金額（青森県水産総合研究所統計資料より）

1987年に青森県の魚として制定



青森県では年間100～200万尾を放流

全国でもトップクラスの漁獲量（ほぼ1位から3位）

令和3年度の集計：全国5790t、1位北海道818t(14%)、2位青森760t(13%)

13

ヒラメを用いた重水素を使った実験の方法

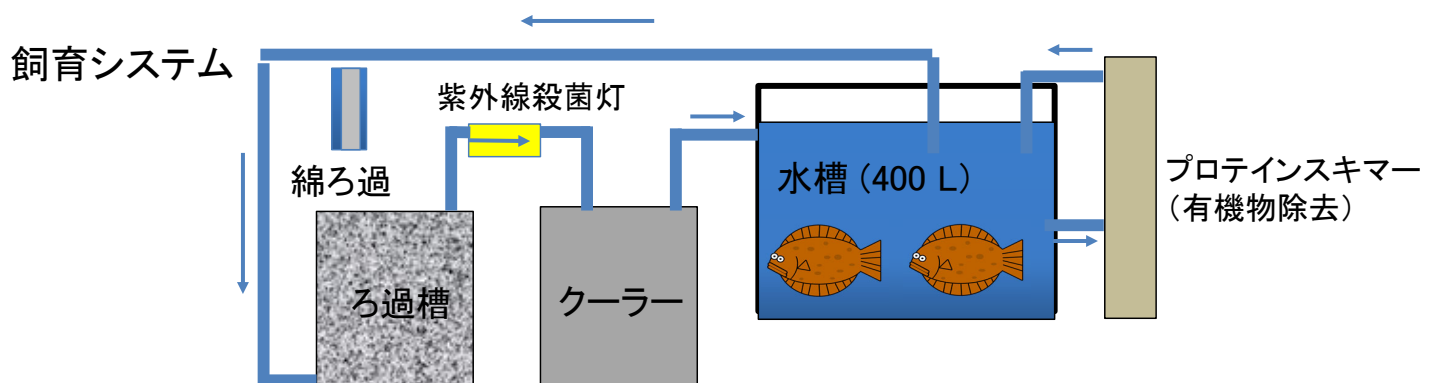
海水中の水（重水）がヒラメ体内の水分に移行する、あるいは排泄される割合や速度を測定する。

ばく露実験

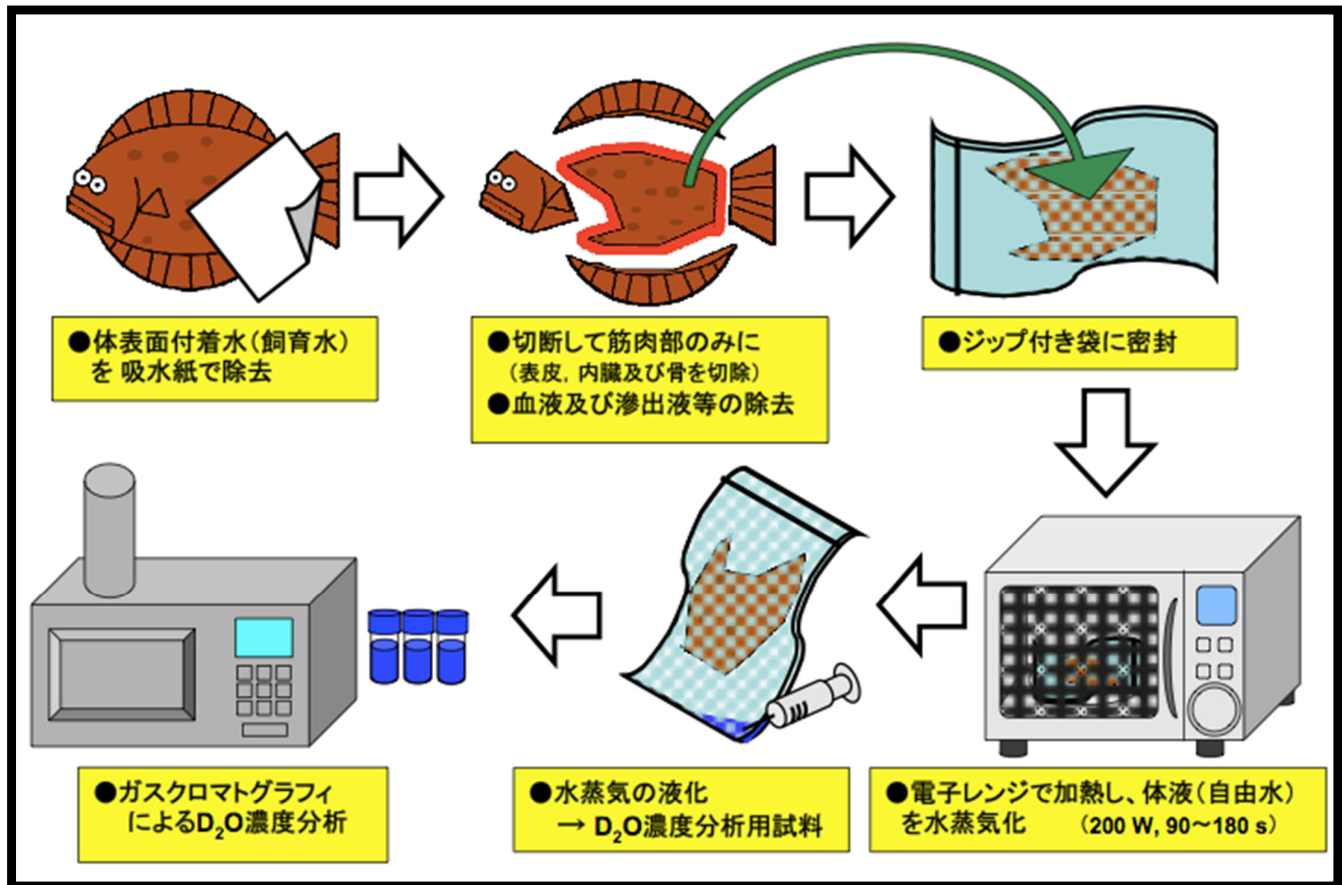
- 重水を添加した海水（約2000 or 4000 $\mu\text{mol D/mol H}$ ）でヒラメを飼育
- 飼育開始からの時間or日数ごとにヒラメを採取
- 筋肉中の重水素(HDO)の測定

排泄実験

- 重水添加海水で飼育済みのヒラメを、天然海水で継続して飼育
- 天然海水に移してから時間or日数別にヒラメを採取
- 筋肉中の重水素(HDO)の測定



重水素の実験: 試料の前処理方法

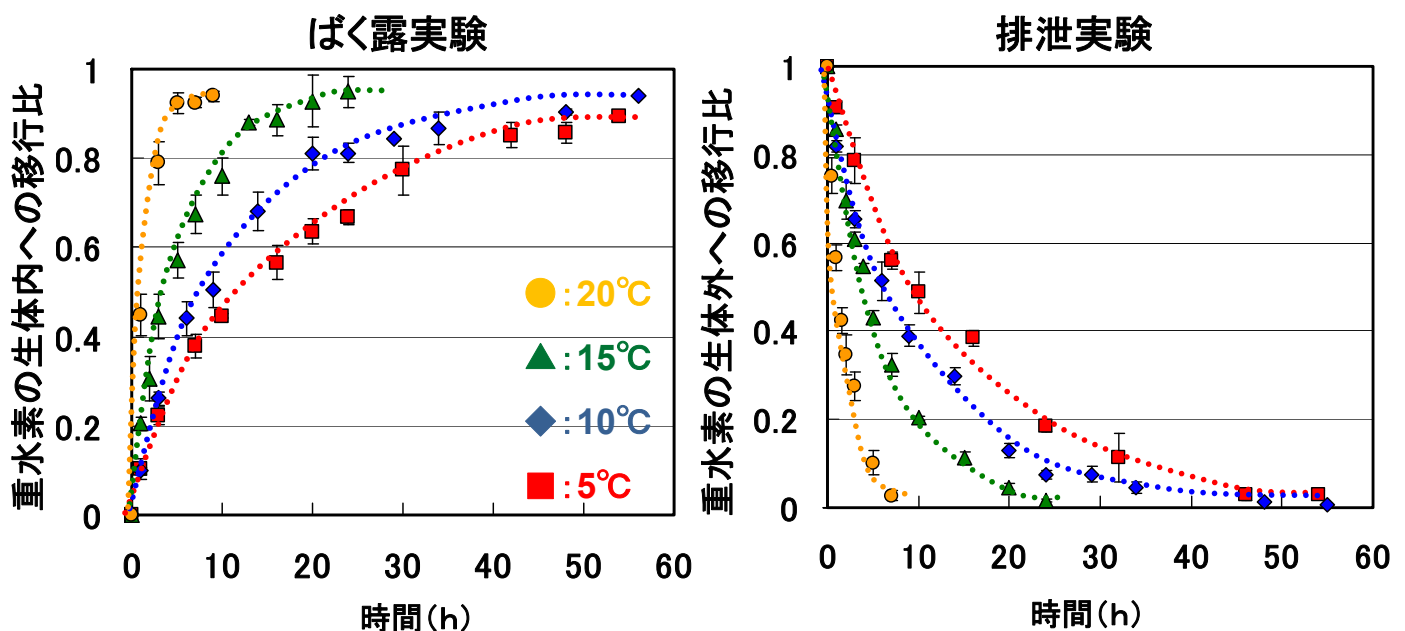


D₂O: 重水(HDOと同じと考えてください)

15

重水素の移行実験 結果: ヒラメの水温別の移行

海水温は季節によって異なるために、水温を変えて実験を行った。



移行比 = $\frac{\text{生体中の採取時の重水素濃度}}{\text{ばく露した海水中の重水素濃度}}$

ヒラメ体内の重水は、低い水温でも2日程度で周囲の海水の重水素濃度とほぼ平衡に達した(移行比は1を超えない)。体内から排泄される速度も同程度であった。

ヒラメを用いた有機重水素に関する実験方法

水として取り込まれた重水素が、ヒラメの体内で有機重水素(OBD)になる。
また、体内の有機重水素(OBD)が排泄される。これらの割合や速度を測定する。

ばく露実験

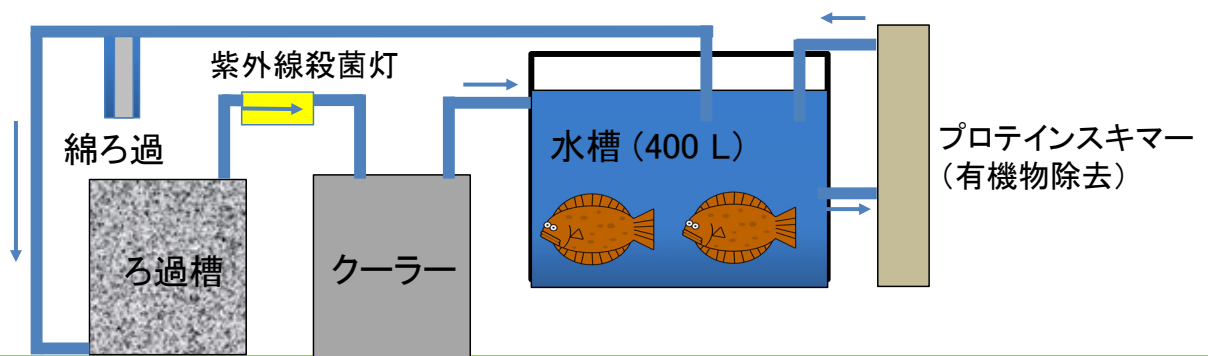
- 重水素添加海水(約2000 $\mu\text{mol D/mol H}$)で生物を飼育
- 飼育開始からの日数ごとに生物を採取
- 筋肉中の**有機重水素(NxOBD)**の測定

排泄実験

- 重水素添加海水で飼育済みの生物を、天然海水で継続して飼育
- 天然海水に移してからの日数別に生物を採取
- 筋肉中の**有機重水素(NxOBD)**の測定

水温;7, 10, 15, 20, 23℃の5段階で実施

飼育システム(閉鎖循環式水槽による長期飼育)



17

有機重水素に関する実験: 給餌の様子

餌は週二回ヒラメ用として市販されているものをサイズに合わせて投与、食べなくなるまで与える飽和投与

ヒラメ給餌中

(動画)

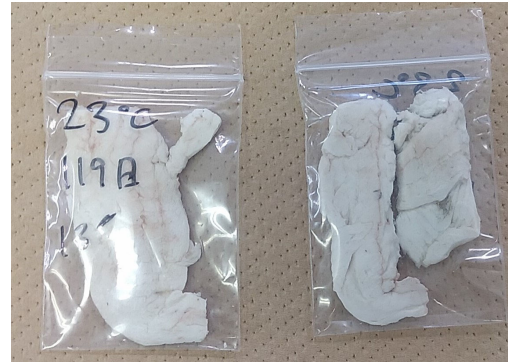


有機重水素に関する実験: 試料個体の採取処理

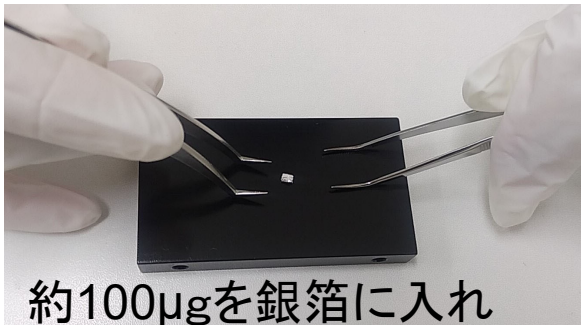
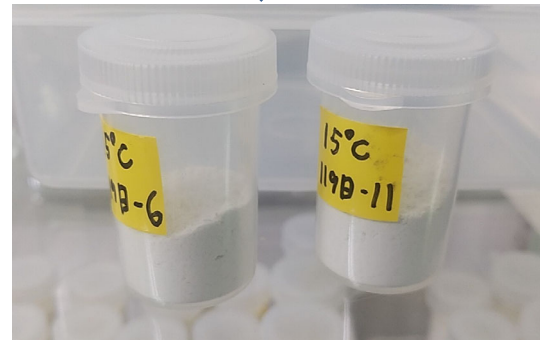
ヒラメの5枚おろし



フリーズ
ドライ
処理



粉碎化



約100 μ gを銀箔に入れて、小さく小さく包みます

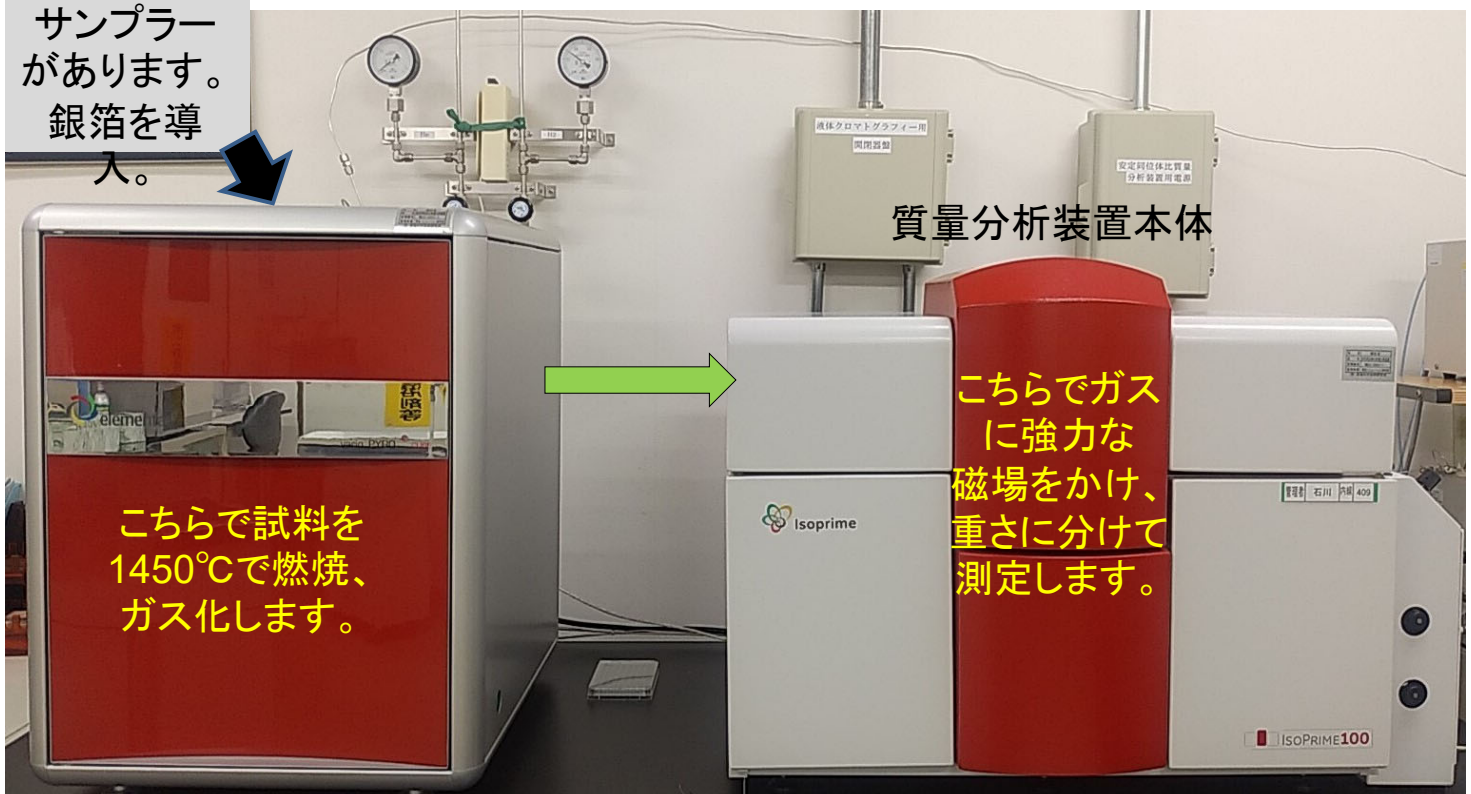
19

有機重水素に関する実験: 分析

水素同位体比測定装置 IsoPrime100

(^1H と ^2H (D)の重さの違いを利用した分析装置)

ここにオート
サンプラー
があります。
銀箔を導入。



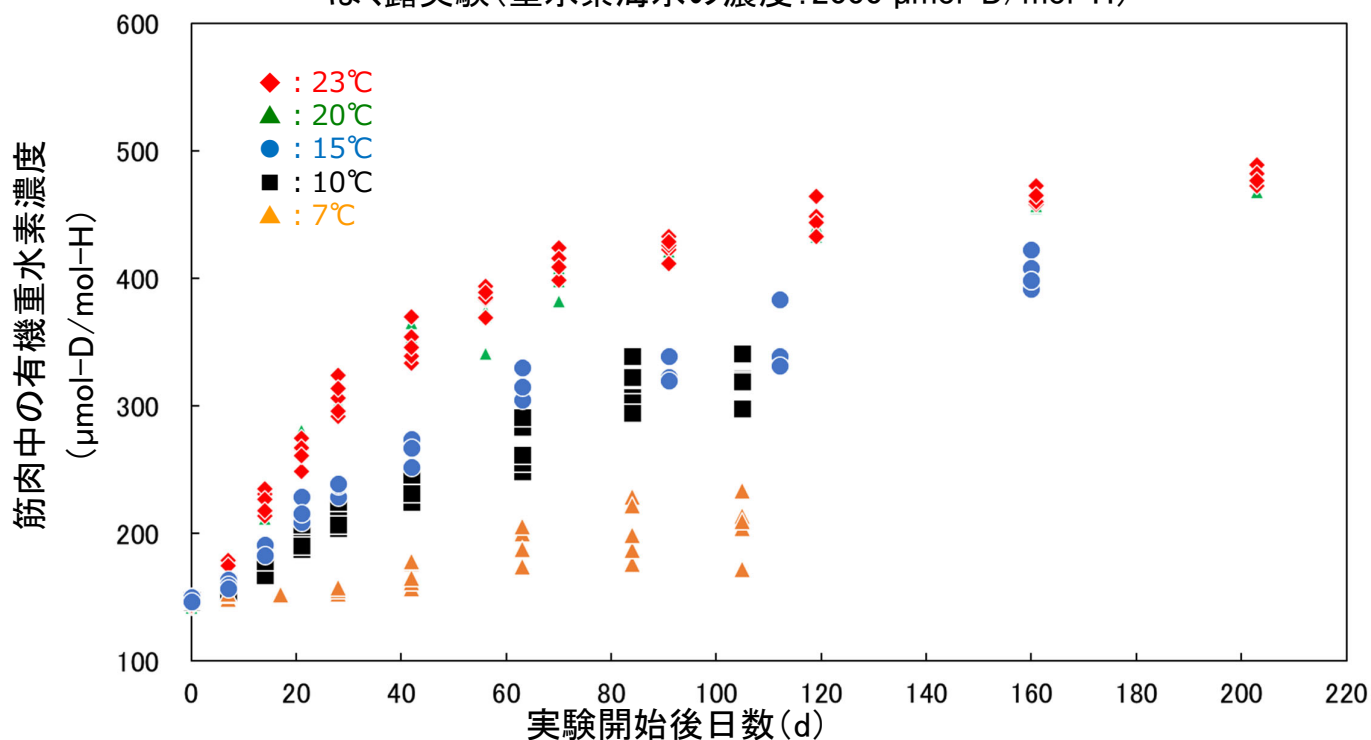
質量分析装置本体

こちらで試料を
1450°Cで燃焼、
ガス化します。

こちらでガス
に強力な
磁場をかけ、
重さに分けて
測定します。

有機重水素に関する実験—ヒラメの結果(ばく露)—

ばく露実験(重水素海水の濃度: 2000 $\mu\text{mol-D/mol-H}$)

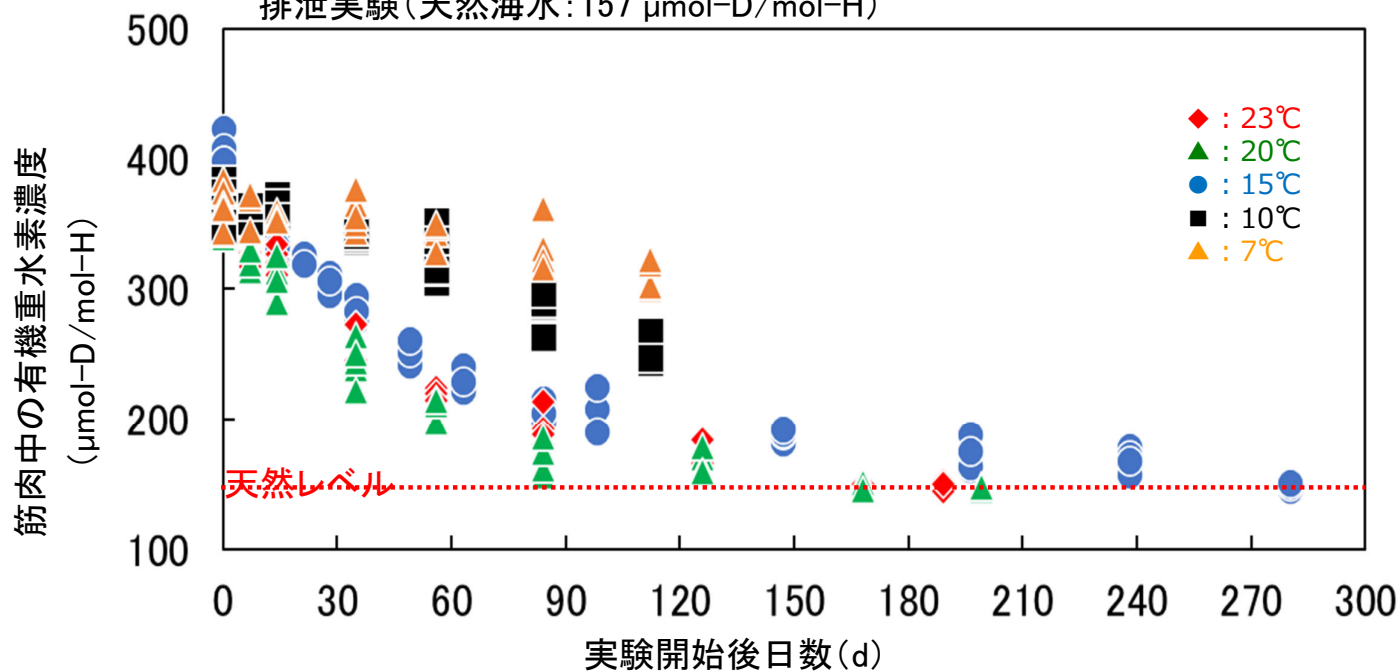


水温が高くなるほど有機重水素が速くできる。

21

有機重水素に関する実験—ヒラメの結果(排泄)—

排泄実験(天然海水: 157 $\mu\text{mol-D/mol-H}$)



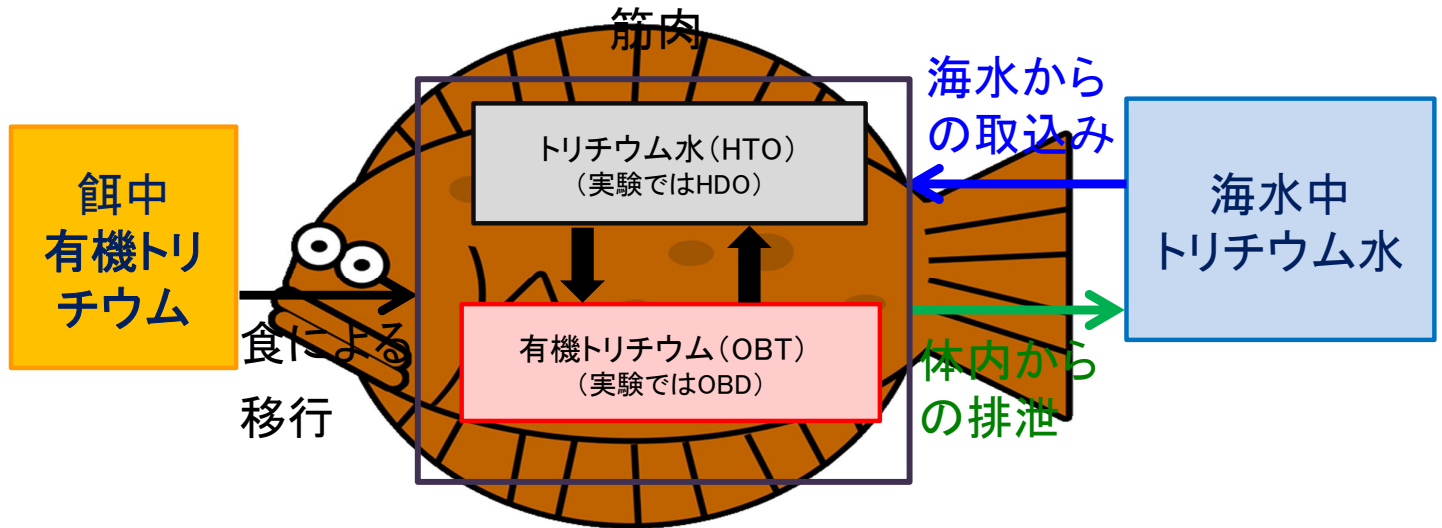
- ・ばく露実験の結果と同様に、水温が高くなるほど有機重水素は速く減少する。
- ・ばく露に比べてやや期間が長いが有機重水素は排泄により天然レベルに戻る。
- ・有機物となった重水素(トリチウム)が体内に蓄積することはない。

22

有機重水素移行実験のモデル化

原子力施設等から海洋に排出されたトリチウムが、魚の体内に入ったと仮定して、どの程度のトリチウム濃度になるのか(海水中のトリチウム濃度や水温、時間経過などを考慮)を推定するために、計算ができるモデルを作成した。

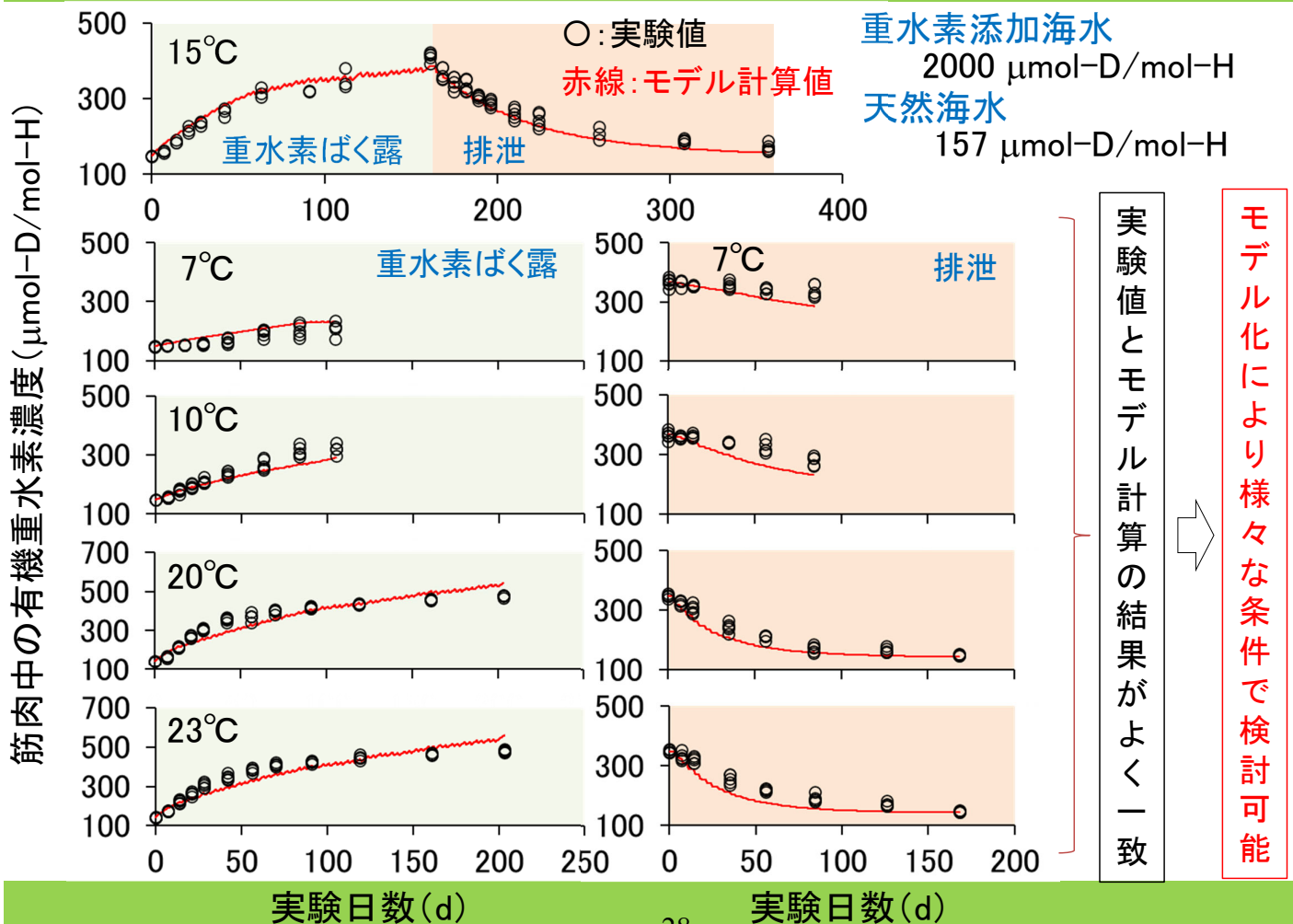
得られた実験結果を基にして、図中の→↓←に仮の速度を当てはめて試行錯誤の計算をする。



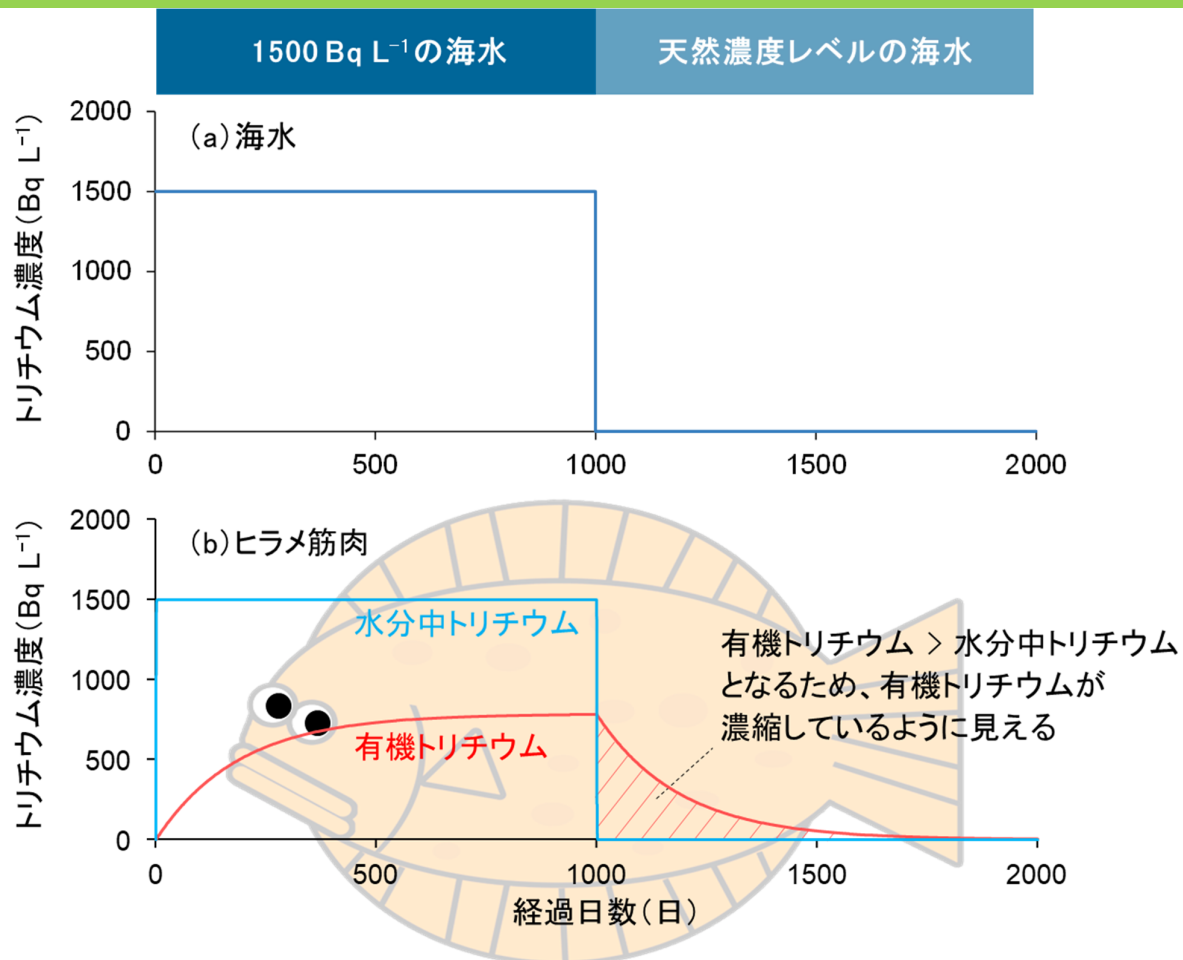
実験結果と計算結果がよく一致した速度を見つけ出す。

23

有機重水素移行実験の結果とモデル計算の比較



モデル計算によるヒラメ体内のトリチウム



25

まとめ

魚介類体内への重水素水について

- ・魚(ヒラメ)の中の濃度は周りの海水の濃度を超えなかった。
- ・15℃での重水素の取り込みに要する時間は24時間程度、排泄されるのに要する時間も同程度(24時間)であった。

魚類の有機重水素について

- ・体内の濃度が一定になるまでには15℃で約160日程度を要した。
- ・周りの海水の濃度より低い濃度で一定になった。
- ・排泄に要する時間は取り込みよりわずかに長い、元の濃度レベルに戻った。
- ・実験結果をもとにヒラメの水素移行モデルを作成し、トリチウムの移行を予想可能とした。

共通として

- ・魚の体内への重水素(トリチウム)の出入りには、水温が大きく影響する。水温が高くなるほど早くなり、低くなるほど遅くなる。

講演内容等の問合せ先：青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字家ノ前1番7
公益財団法人 環境科学技術研究所
共創センター 共創推進課
TEL 0175-71-1240