

令和 3 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 4 年 3 月

公益財団法人海洋生物環境研究所

ま え が き

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）事業は、我が国の原子力施設沖合に位置する主要漁場等を調査の対象海域として海産生物、海底土及び海水の放射能調査を実施し、調査海域における海洋中の放射能の移行挙動を定性・定量的に把握・評価を行うことにより漁場の安全の確認等に資することを目的に、国において昭和 58 年度に開始され、今日に至っている。その間、平成 2 年度には青森県及び岩手県の太平洋側に核燃料（原子燃料）サイクル施設沖合海域が調査海域として追加され、さらに平成 22 年度からは東京電力（現 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（以下、「東電福島第一原発」という）事故に伴う同発電所周辺海域のモニタリングが宮城県、福島県及び茨城県の太平洋側で開始された。

本事業の所管省庁としては、昭和 58 年度（当時、科学技術庁）から平成 24 年度まで文部科学省が担ってきたところ、平成 24 年 9 月に原子力規制委員会が発足したことに伴って移管され、平成 25 年度から原子力規制委員会原子力規制庁が所管する事業として継続的に実施されてきた。

令和 3 年度は、令和 2 年度に引き続き、公益財団法人海洋生物環境研究所が原子力規制委員会原子力規制庁から令和 3 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）事業を委託事業として受託し、次の調査等を実施した。

- I 海洋放射能調査
- II 東電福島第一原発周辺の海域モニタリング
- III 調査結果の評価
- IV 調査結果等の説明・報告
- V 本事業で得られた関連試料の保管・管理

これらのうち、海洋放射能調査では、原子力発電所等周辺海域及び核燃料（原子燃料）サイクル施設沖合海域の主要漁場から漁獲された海産生物試料の収集及び海底土試料、海水試料の採取を行い、これらの放射能濃度を調査してその現状を把握するとともに、併せて解析調査として海洋放射能調査を補完するための支援・解析を行う調査研究を実施した。

東電福島第一原発周辺の海域モニタリングでは、東電福島第一原発事故による放射性物質の影響を把握するため、宮城県から茨城県沿岸沖に設けた沖合海域及び外洋海域、並びに東電福島第一原発前面に設けた近傍・沿岸海域において海域モニタリングを実施し、海水及び海底土試料中の放射性核種濃度を把握し、併せてそれらの推移を把握するための調査を実施した。

調査の実施、結果の解析・評価に当たり、環境放射能を専門家とする有識者や漁業関係者

等から構成した「海洋放射能検討委員会」及び「データ解析専門部会」を設け、指導・助言を得て、総合的に取りまとめた。

調査結果等の説明・報告では、本事業の計画や事業内で得られた結果を用いて事業開始時及び中間とりまとめ時にそれぞれ地方自治体や漁業関係団体などの関係機関への説明を行うとともに、併せて海洋放射能調査の総合評価に必要な評価資料等を作成し、関係機関等に調査結果の報告及び配付を実施した。

本事業で得られた関連試料の保管・管理では、前年度までの同事業で採取した試料のうち、予備として採取したものや放射能分析に供したあとの残試料と併せて、倉庫にて適切に保管・管理を行った。

本調査報告書は、上記のとおりの内容で原子力規制委員会原子力規制庁からの委託事業として受託した本事業について、その調査結果として成果を取りまとめたものである。

本事業の実施と調査結果をとりまとめるに当たっては、委託元である原子力規制委員会原子力規制庁のご担当者様をはじめ、海洋放射能検討委員会及びデータ解析専門部会の委員各位より、ご指導やご助言を賜りました。また、地方自治体や漁業関係団体の皆様、そして試料採取や放射能分析においては本事業の趣旨をご理解いただき、多くの方々より快くご協力を賜りました。ここに深く感謝いたします。

令和4年3月

公益財団法人海洋生物環境研究所
理事長 保科 正樹

目次

【 I 】 海洋放射能調査	1
1. 海洋放射能調査海域周辺での調査	1
1) はじめに	1
2) 調査海域	1
3) 調査試料の採取	1
(1) 海産生物試料	1
(2) 海底土試料及び海水試料	2
4) 放射性核種の分析	12
(1) 分析対象放射性核種	12
(2) 海産生物、海底土及び海水試料の前処理及び分析法	12
(3) 計数誤差	17
(4) 検出下限値	17
(5) 減衰補正	17
5) 分析結果	21
(1) 海産生物試料の分析結果	21
(2) 海底土試料の分析結果	27
(3) 海水試料の分析結果	31
6) 海洋環境試料に含まれる放射性核種の放射能濃度の経年変化	37
(1) 発電所海域における経年変化	37
(2) 核燃海域における経年変化	44
7) 海産生物試料の代替について	86
(1) 令和3年度の事業における海産生物試料の代替実績	86
(2) これまでの代替実績	88
(3) まとめ	89
2. 解析調査	90
1) 対照海域放射能調査	90
(1) 対照海域における海水・海底土試料の放射能調査	90
(2) 対照海域における海産生物試料の放射能調査	116
2) 変動要因・移行挙動調査	126

(1) 海洋環境における $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比モニタリング	126
(2) 海水及び海産生物試料の ^{129}I 放射能濃度	135
(3) 海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの分布と その変動要因に関わる詳細調査	155
① はじめに	155
② 海底土に含まれる放射性セシウムの分布とその変動 要因に関わる詳細調査	155
③ 海水に含まれる放射性セシウムの分布とその変動要 因に関わる詳細調査	201
④ まとめ	216
(4) 原子力発電所等周辺海域における海水及び海産生物試料に 含まれるトリチウムの放射能濃度調査	219
① はじめに	219
② 方法	219
③ 海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度	222
④ 海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度	228
⑤ まとめ	232
3) 海洋環境関連調査報告書等の収集・整理	234
(1) はじめに	234
(2) 海洋放射能調査結果と自治体等機関の調査結果の比較	234
(3) まとめ	239

【Ⅱ】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 周辺の海域モニタリング

1. はじめに	241
2. モニタリング方法	241
1) 調査経過	241
2) 調査試料の採取	241
(1) 近傍・沿岸海域	241
(2) 沖合海域	241
(3) 外洋海域	242
3) 放射性核種の分析	248

3. モニタリング結果	251
1) 海水試料	251
(1) 近傍・沿岸海域	251
(2) 沖合海域	254
(3) 外洋海域	261
(4) 福島モニタリングにおける放射性核種の放射能濃度の 変動要因の考察	262
2) 海底土試料	267
4. まとめ	272
【Ⅲ】調査結果の評価	275
【Ⅳ】調査結果等の報告・説明	281
1. 報告資料の印刷	281
2. 関係機関・団体等への調査結果の報告・配布	281
【Ⅴ】本事業で得られた関連試料の保管・管理	283
資料編	285
【Ⅰ】海洋放射能調査	
資料 1-1 令和3年度に発電所海域で採取した海産生物試料に含まれる 放射性核種の放射能分析結果	286
資料 1-2 令和3年度に核燃海域で採取した海産生物試料に含まれる 放射性核種の放射能分析結果	301
資料 2-1 令和3年度に発電所海域で採取した海底土試料に含まれる 放射性核種の放射能分析結果	309

資料 2-2	令和 3 年度に核燃海域で採取した海底土試料に含まれる放射 性核種の放射能分析結果	324
資料 3-1	令和 3 年度に発電所海域で採取した海水試料に含まれる放 射性核種の放射能分析結果	330
資料 3-2	令和 3 年度に核燃海域で採取した海水試料に含まれる放射 性核種の放射能分析結果	345
資料 4-1	令和 3 年度 解析調査 海底土の性状	367

(参考 1)	平成 18 年度から平成 22 年度（事故前 5 年間）の調 査における海産生物試料の代替実績	373
(参考 2)	令和 3 年度までの直近 10 年間の調査における海産 生物試料の代替実績	374
(参考 3)	海洋放射能調査における作業等の様子	385

【Ⅱ】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周辺の海域モニタリング

資料 5-1-1	海水試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果 近傍・沿岸海域	388
資料 5-1-2	海水試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果 沖合海域	391
資料 5-1-3	海水試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果 外洋海域	404
資料 5-2-1	海底土試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果 沖合海域	408
資料 5-2-2	海底土試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果 （ α 線放出核種） 沖合海域	412
資料 5-2-3	海底土の色・質・生物種等	413
資料 5-2-4	令和 2 年度海底土試料に含まれる ^{90}Sr 放射能分析結果 沖合海域（再解析）	417

(参考 4)	東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子 力発電所周辺の海域モニタリングにおける作業等 の様子	418
--------	---	-----

【 I 】 海洋放射能調査

1. 海洋放射能調査海域周辺での調査

1) はじめに

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）事業は、我が国の原子力施設等沖合に位置する主要漁場を含めた海洋環境において、海産生物、海底土及び海水試料を採取し、試料に含まれる放射性核種の放射能調査を実施し、海洋環境における放射性核種（放射能）の推移を把握し、併せて移行挙動について定性・定量的に把握・評価を行い、漁場の安全の確認等に資することを目的として実施している。海洋放射能調査はこの目的を達成するための一つの調査項目であり、全国を対象とする海洋環境における海産生物、海底土及び海水に含まれる放射性核種の放射能濃度などについて、継続的かつ定期的な定点観測を実施することで得られる緻密な基礎的知見は必要不可欠と言える。

本調査の実施に当たっては、昭和 58 年度から継続的に実施してきた調査との継続性を考慮しつつ、調査の対象となる海域や試料及び分析を行う対象となる放射性核種を選定したうえで、海洋学や環境学をはじめ、海洋物理学、海洋生物学、放射化学、放射線計測学などに基づき計画的に調査を実施することとしている。

2) 調査海域

調査海域として、図 I-1-2-1 に示すとおり全国の原子力発電所等周辺海域（以下、「発電所海域」という。）及び青森県と岩手県の太平洋側の核燃料（原子燃料）サイクル施設沖合海域（以下、「核燃海域」という。）を対象とし、これらの選定に当たっては地方公共団体、水産関係団体及び原子力関係事業者団体等により別途実施されている原子力施設周辺放射線監視事業（電気事業者等が実施しているものも含む）などとの重複を避けるよう考慮した。

なお、発電所海域とは北海道、青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城、静岡、新潟、石川、福井第一、福井第二、島根、愛媛、佐賀及び鹿児島海域の計 15 海域を指す。

3) 調査試料の採取

(1) 海産生物試料

海産生物試料は、当該漁場に主として出漁している漁業協同組合等の協力を得て、仕様に沿うよう、特に次の事項について協議のうえで選定した。

- ・当該漁場における漁獲量が多い種であること
- ・当該漁場における生活期間が長い種であること

選定した海産生物試料は、漁獲した月日と漁場（または海域）を確認しつつ、発電所海域では 1 試料当たり生鮮重量で概ね 20kg、核燃海域では生鮮重量で概ね 30kg を分析に供することとし、年 2 回（概ね、前期（4 月～9 月）；後期（10 月～1 月））の調査を実施した。令和 3 年度に試料として収集した海産生物を表 I-1-3-1 及び表 I-1-3-2 に示す。

(2) 海底土試料及び海水試料

海底土試料及び海水試料の採取測点は、各発電所海域に設定した4測点（計60測点）及び核燃海域に設定した22測点について、次の事項を確認して図 I-1-3-1 から図 I-1-3-14 に示すとおりとした。

- ・当該施設沖合における主要漁場であること
- ・海底（底質）ができるだけ砂泥質の場所であること

なお、試料の採取に際しては、気象・海象条件に影響されにくく、かつ水深1,000m超にも対応できる大型採水器や大型採泥器を洋上で安全に運用するためのウインチ等、そして海洋観測機器などの必要機材を備えた大型調査船舶（例えば500トンクラス）を用いた。

また、位置情報の観測には海技士免状を有する者の助言^{※1}を受けて船舶用の全地球航法衛星システム（GNSS（Global Navigation Satellite System）と称されるシステムで衛星のみ使用時で精度±10m以下；国際海事機関（International Maritime Organization；IMO）が定める国際的な基準を満たしているもの）の利用や、正確な水深を把握するための極深海音響測深機などの観測結果から、試料採取位置について測点を中心として約1,800m以内（緯度で1分以内^{※2}）とし、併せて水深（深度）についてはウインチワイヤの長さ、音響測探機及び魚群探知機などの複数の機器により確認を行った。

海底土試料は、調査の対象とした海域に設定した測点で年1回、大型ボックス型採泥器（例えばスパード型採泥器等）またはマルチプルコアラー^{※3}を用いて海底土の表面から深さ3cmまでの層を、湿重量で約2kgを目安として採取した。採取した海底土試料は、採泥時に目視及び触手確認により、泥色^{※4}と大まかな粒形^{※5}を観察した。その後、必要量を分取して、ビニール袋に入れたのちプラスチック製容器に収納し、冷凍保管とした。

海水試料は、発電所海域においてそれぞれの海域に設定した4測点（海底土を採取した測点と同じ）で年1回、核燃海域では年2回、表層（海面から1m下）と下層（海底面から概ね10～40m上）の2層から、大型バンドーン採水器（120L×3連）を用いて発電所海域では約100L、核燃海域では約300L採取した。海水試料の採取に当たっては、採取深度、塩分及び水温を同時かつ連続的に観測できる機器を大型バンドーン採水器に装着して深度等の数値を確認しつつ、揚収時の採水容器間水温で±0.1℃（3連容器の場合、最大0.2℃の差）までを許容することとし、目的とする海水試料を採取した。

※1 放射能測定法シリーズ16「環境試料採取法」（昭和58年）に記載のとおり。

※2 日本経緯度原点（所在：東京都港区麻布台；北緯35度39分29秒、東経139度44分28秒）における「緯度1秒」は「30.820188m」である。

※3 海底土を採取する採泥器の一種。一回の作業で複数（Multiple）の柱状の海底土（Core）が得られることからマルチプルコアラーと呼ばれる。海底に到達するとポリカーボネイト製の円筒容器が海底に差し込まれ、引き抜くと同時に上下の蓋が閉まることで、表層の攪乱を起こすことなく長さ約40cm、直径約8cmの柱状の海底土を円筒容器内に採取することができる。

※4 農林水産省農林水産技術会議事務局監修 財団法人日本色彩研究所 色票監修「新版 標準土色帖」

※5 例えば、日本海洋学会編「海洋観測ガイドライン第五巻（底質分析）」2016年12月

採取した海水試料はろ過をせず、容量 20L のフレキシブル成形液体容器（藤森工業株式会社製成形液体容器「キュービテナー®」）等）に分取した。分取した海水試料は、海水に含まれる目的とする放射性核種の器壁への吸着を防ぐため、海水 1L 当たり 1mL の濃硝酸を添加して硝酸酸性とした。なお、核燃海域で調査対象としているトリチウム^{※1} を分析するための海水試料では、トリチウム分析に支障が生じるため、酸を添加せず、別途用意した容量 2L のプラスチック製容器に分取した。



図 I -1-2-1 調査の対象とした各海域（なお、核燃料（原子燃料）サイクル施設沖合海域は、これまでの調査を踏襲して「核燃料サイクル施設沖合海域」と表記した）

※1 一般的に水素には 3 つの同位体があることが知られており、それぞれ「¹H (protium)」、²H (deuterium)、「³H (tritium)」と呼ばれることが多い。この同位体のうちの一つである ³H (tritium) は多くの場合「トリチウム」と呼ばれる。このため、本報告書でも「³H」については「トリチウム」と表記する。

表 I -1-3-1 発電所海域における海産生物試料（収集実績）

調査海域	前期	後期
	漁獲期間： 令和3年4月1日 ～8月11日	漁獲期間： 令和3年10月1日 ～令和3年12月22日
北海道	ホッケ、ソウハチ、ミズダコ	ホッケ、ヒラメ、マサバ
青森	クロソイ、ホッケ、アイナメ	クロソイ、アイナメ、ヤリイカ
宮城	マダラ、アイナメ、マアナゴ	マダラ、アイナメ、マアナゴ
福島第一	ソウハチ、ババガレイ、ヤナギダコ	サバ類、ユメカサゴ、ヤリイカ
福島第二	マアナゴ、マガレイ、ヤナギダコ	カナガシラ、マガレイ、マダコ
茨城	カナガシラ、キンメダイ、ヤナギダコ	ヒラメ、ムシガレイ、ヤナギダコ
静岡	イサキ、ニベ、アカカマス	マゴチ、ニベ、アカシタビラメ
新潟	スケトウダラ、ホッケ、ミズダコ	スケトウダラ、ホッケ、ミズダコ
石川	ニギス、ハタハタ、ホッコクアカエビ	ニギス、アカガレイ、ホッコクアカエビ
福井第一	ハタハタ、アカガレイ、スルメイカ	ムシガレイ、アカガレイ、キダイ
福井第二	アカガレイ、スズキ、マアナゴ	アカガレイ、マダイ、マアナゴ
島根	マダイ、ヒラメ、ムシガレイ	マダイ、マトウダイ、ホウボウ
愛媛	ハモ、ケンサキイカ、エビ類	カナガシラ類、コウイカ、シログチ
佐賀	イサキ、マダイ、メジナ	イサキ、マダイ、メジナ
鹿児島	チダイ、カイワリ、アカエイ	ヘダイ、マアジ、アカエイ

表 I -1-3-2 核燃海域における海産生物試料（収集実績）

前期	後期
漁獲期間： 令和3年4月9日 ～8月30日	漁獲期間： 令和3年10月7日 ～12月28日
ミズダコ、ヒラメ（2試料）、 スルメイカ、サクラマス、 キアンコウ（2試料）、 マダラ（2試料）、 スケトウダラ、ホッケ、 ウスメバル、ブリ、 アイナメ、ヤリイカ	ミズダコ、ヒラメ、 スルメイカ（2試料）、 シロザケ（雌）、 シロザケ（雄）（2試料）、 マサバ、マダラ（2試料）、サバ類、 スケトウダラ、カタクチイワシ、 キアンコウ、サンマ

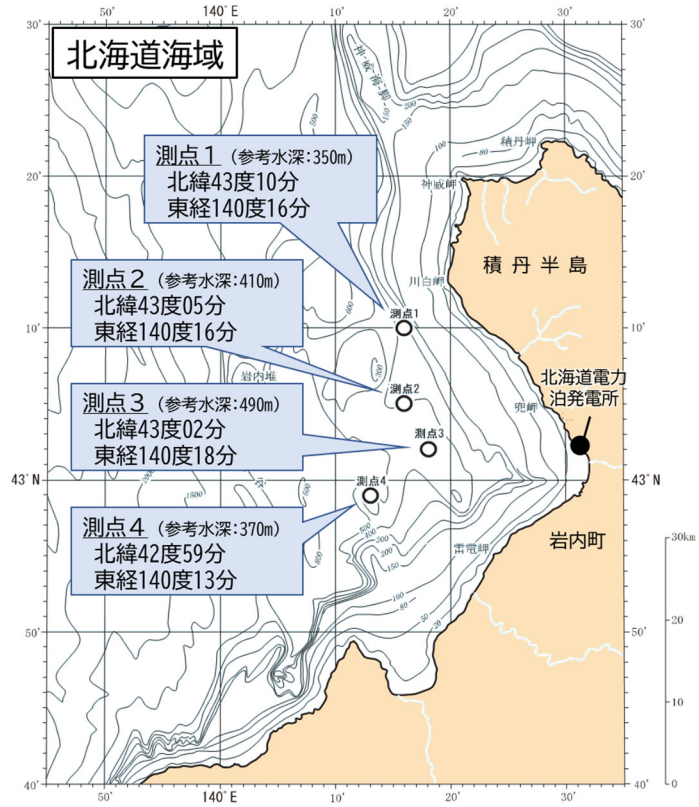


図 I -1-3-1 北海道海域における海底土・海水試料採取測点

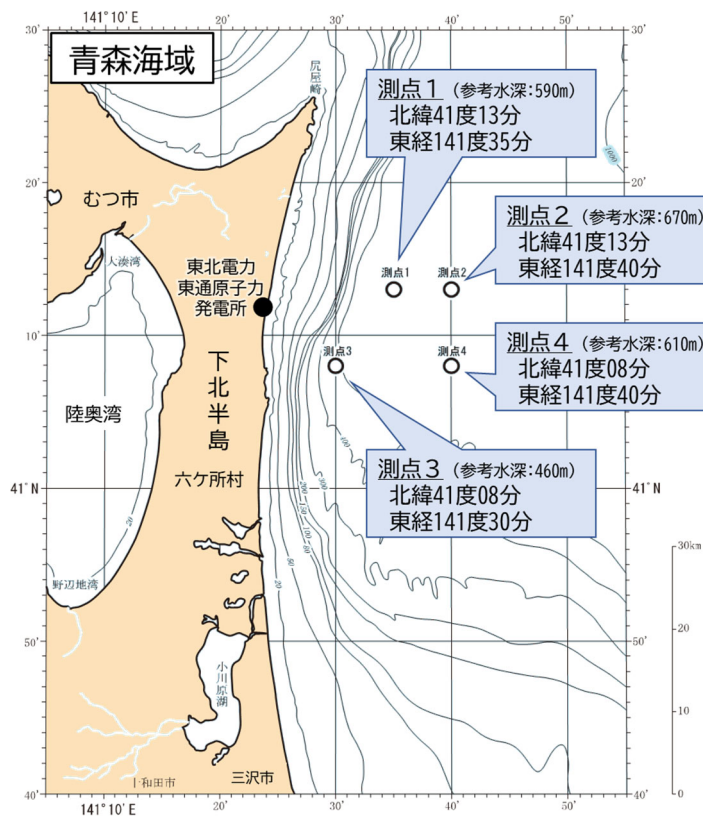


図 I -1-3-2 青森海域における海底土・海水試料採取測点

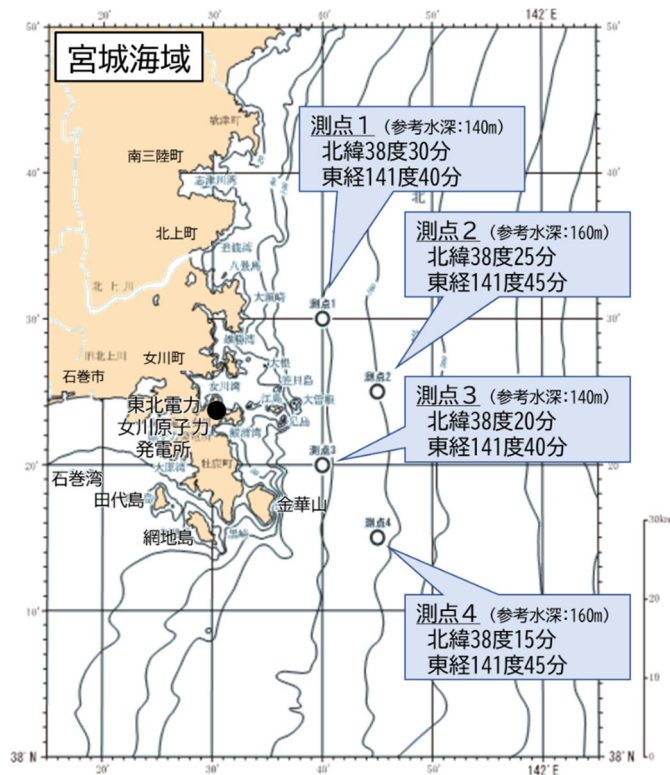


図 I -1-3-3 宮城海域における海底土・海水試料採取測点

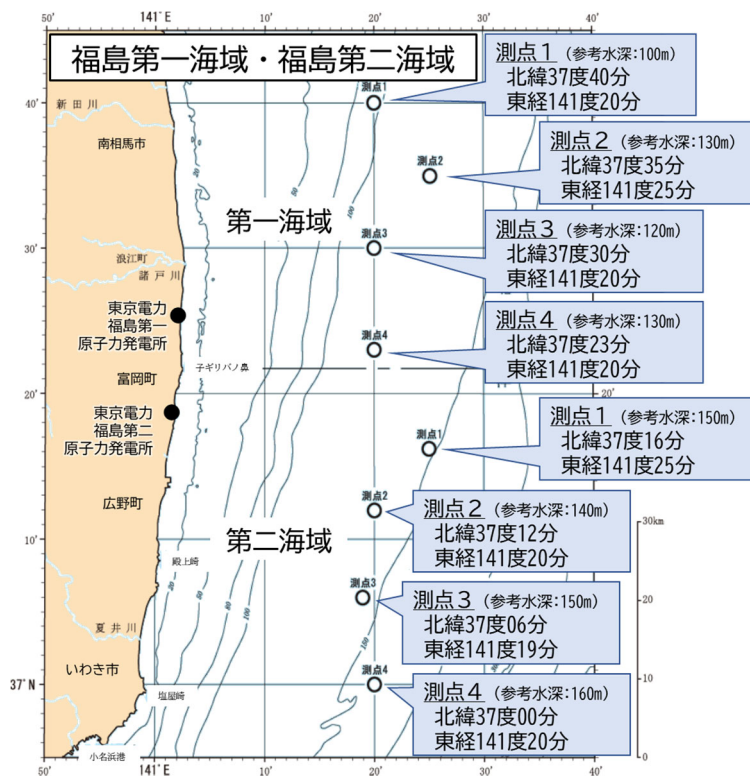


図 I -1-3-4 福島第一海域・福島第二海域における海底土・海水試料採取測点

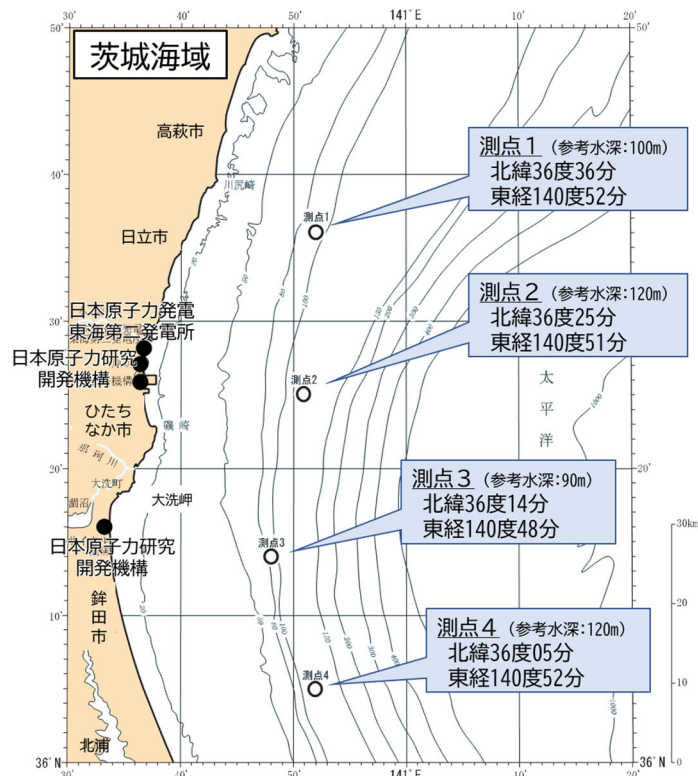


図 I -1-3-5 茨城海域における海底土・海水試料採取測点

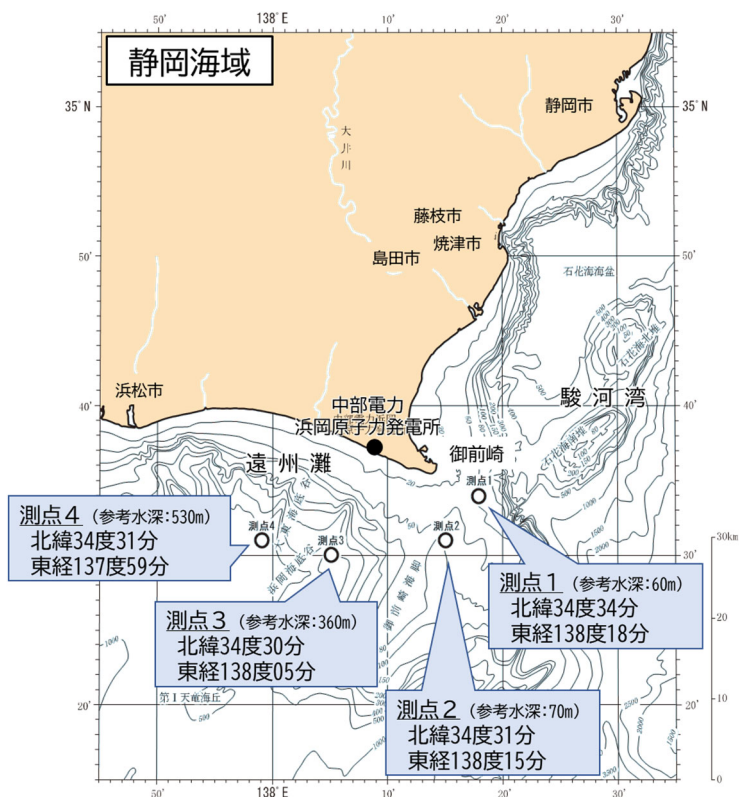


図 I -1-3-6 静岡海域における海底土・海水試料採取測点

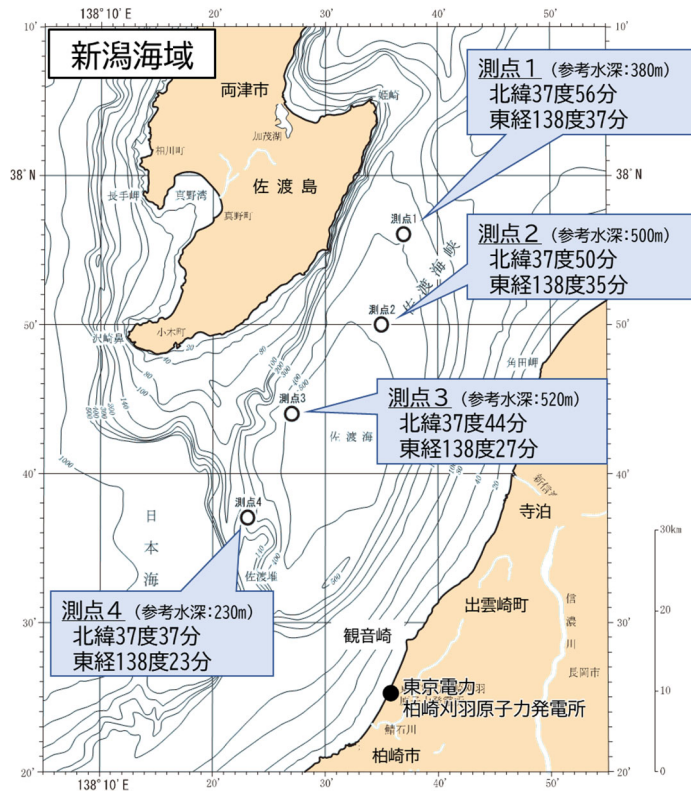


図 I -1-3-7 新潟海域における海底土・海水試料採取測点

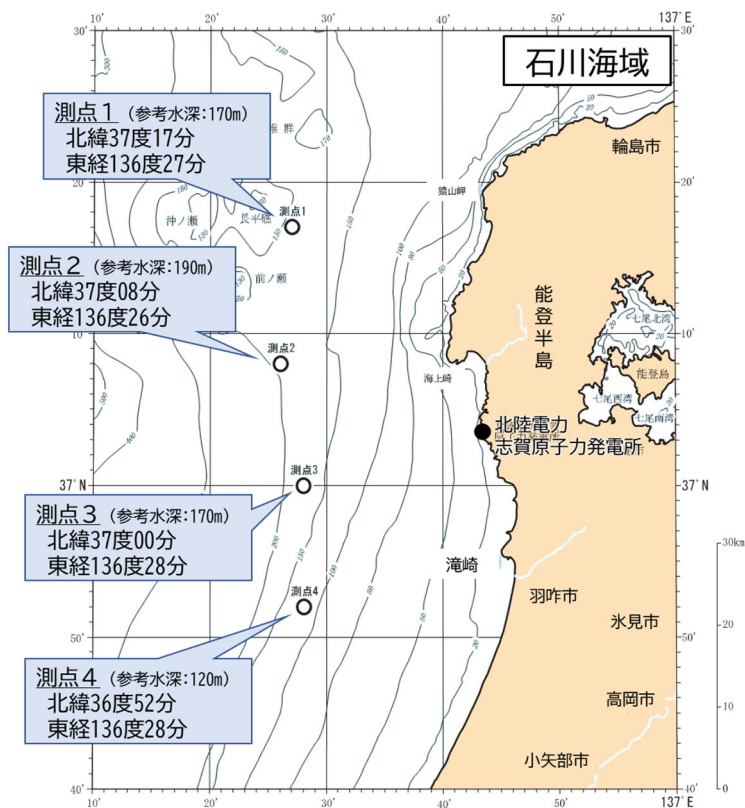


図 I -1-3-8 石川海域における海底土・海水試料採取測点

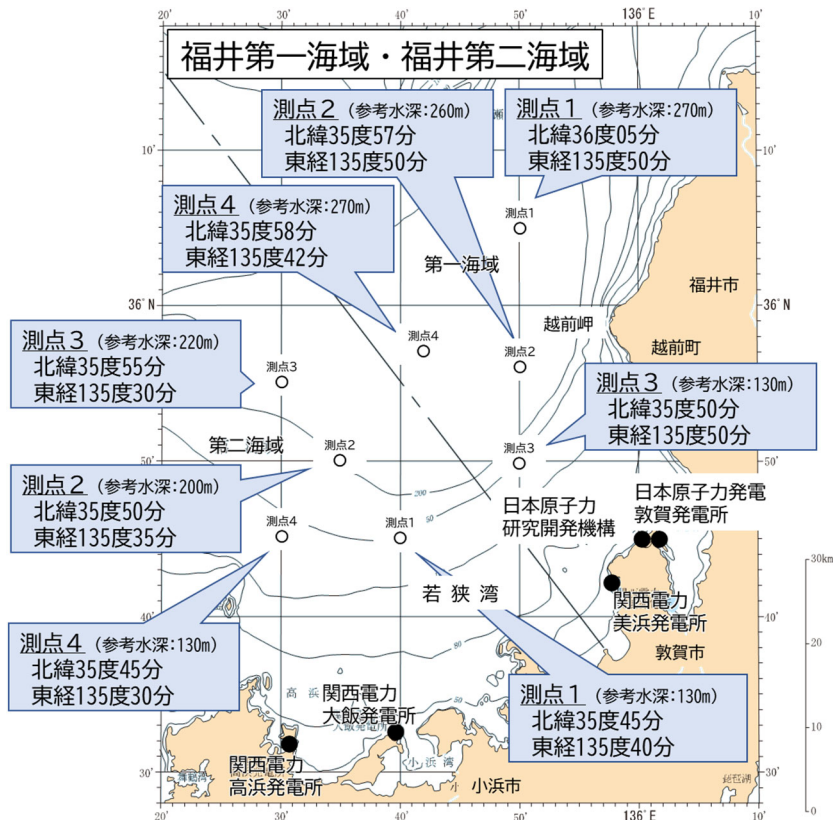


図 I -1-3-9 福井第一海域・福井第二海域における海底土・海水試料採取測点

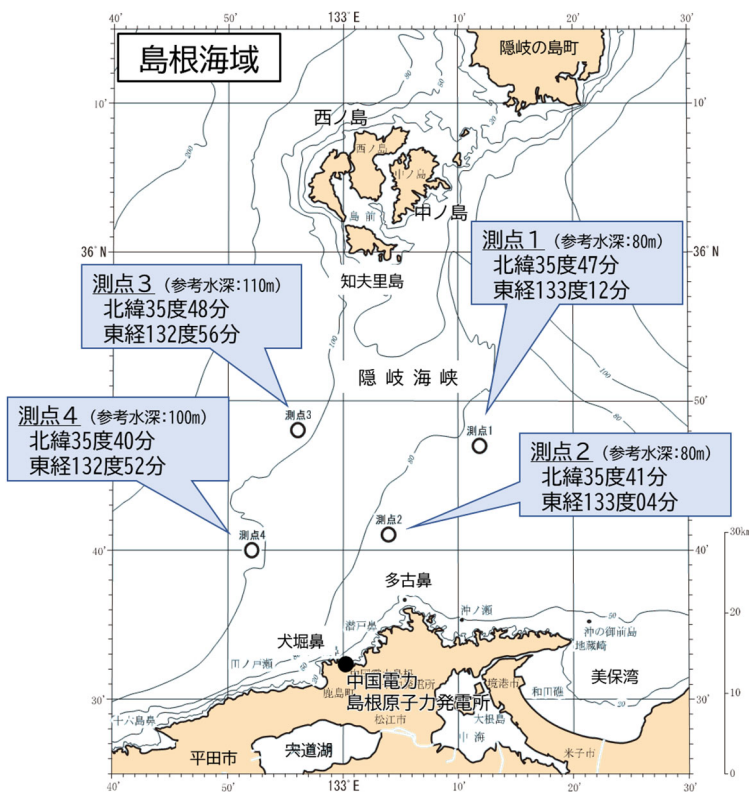


図 I -1-3-10 島根海域における海底土・海水試料採取測点

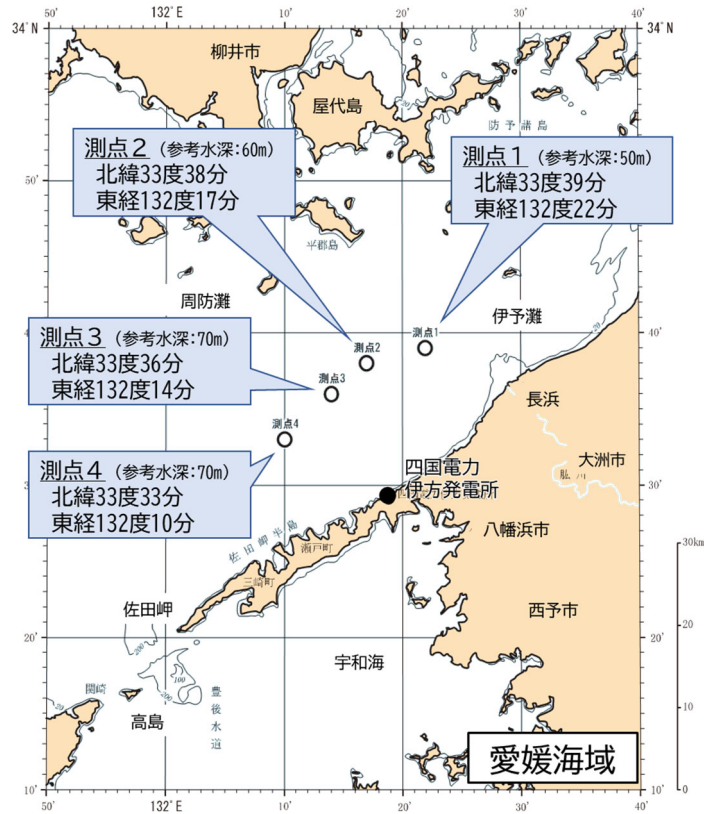


図 I-1-3-11 愛媛海域における海底土・海水試料採取測点

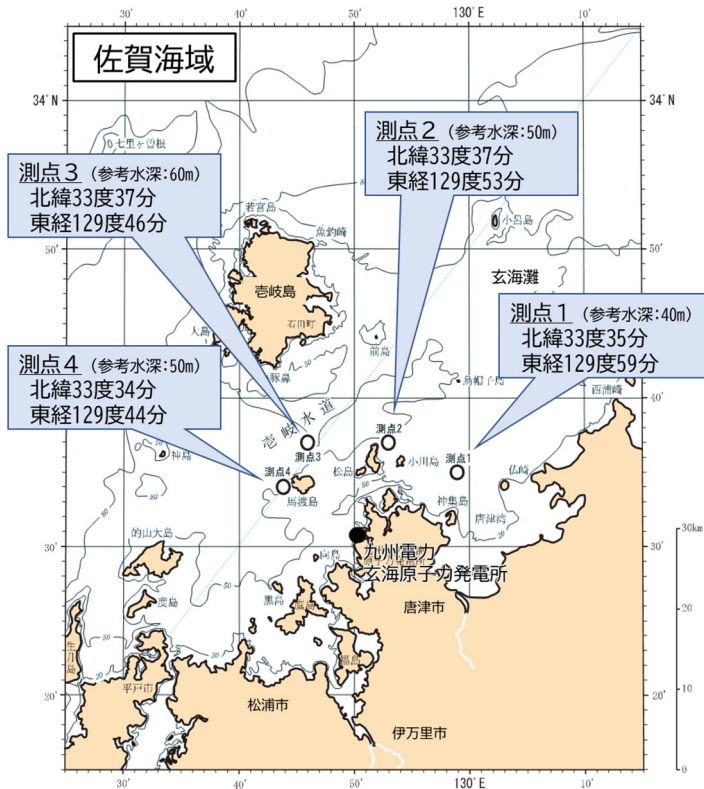


図 I-1-3-12 佐賀海域における海底土・海水試料採取測点

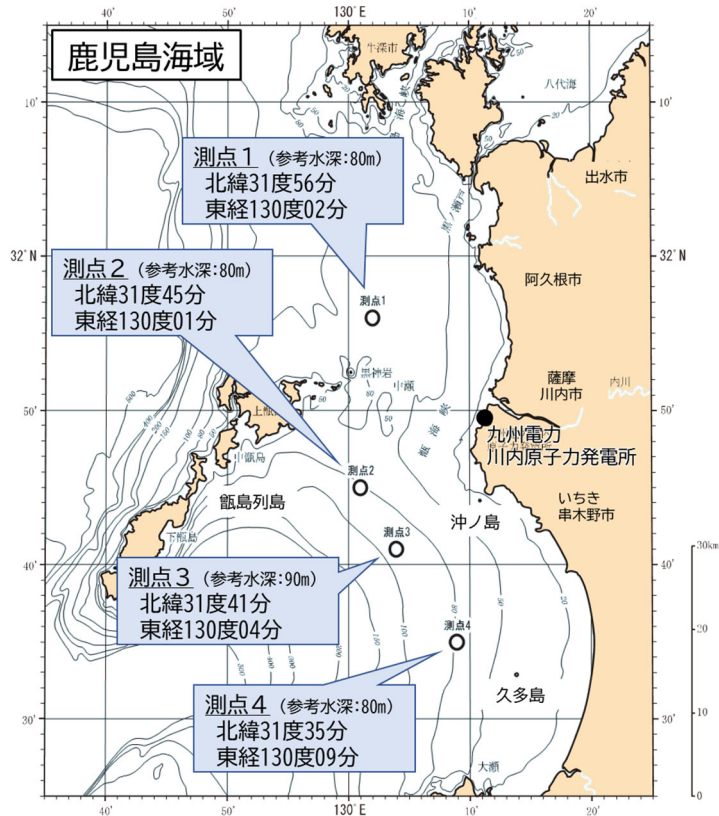


図 I-1-3-13 鹿児島海域における海底土・海水試料採取測点

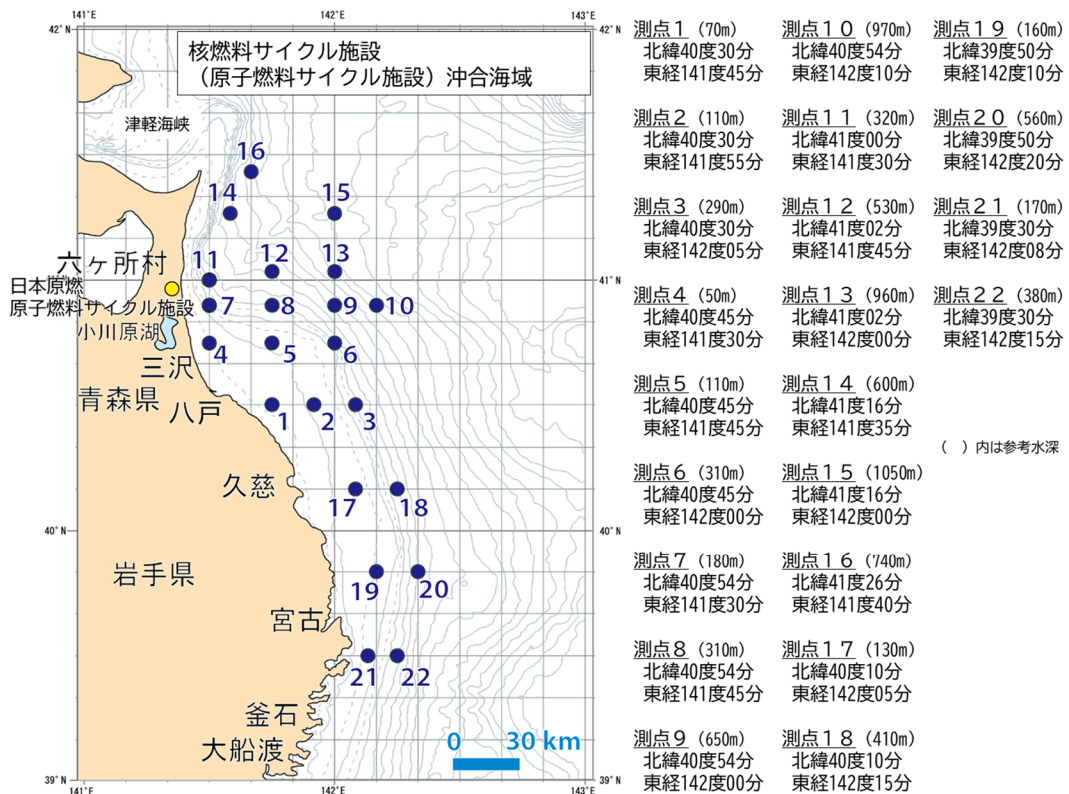


図 I-1-3-14 核燃海域における海底土・海水試料採取測点

4) 放射性核種の分析

(1) 分析対象放射性核種

分析対象とした放射性核種は、次の観点に基づいて表 I-1-4-1 に示す人工放射性核種と自然放射性核種を選定した。

[人工放射性核種]

- ・原子力施設由来の排水あるいは放射性降下物等に含まれる量や割合が高く、物理的半減期が比較的長い放射性核種であること
- ・海産生物あるいは海底土に蓄積されやすい性質を持つ放射性核種であること

[自然放射性核種]

- ・海産生物や海底土から検出される例が比較的多い放射性核種であること
(例えばウラン系列やトリウム系列に属する放射性核種あるいは高層大気と宇宙線の相互作用によりもたらされるベリリウム-7 (${}^7\text{Be}$)、地球誕生時から長半減期ゆえに単独で存在するカリウム-40 (${}^{40}\text{K}$) など)

(2) 海産生物、海底土及び海水試料の前処理及び分析法

海産生物、海底土及び海水試料の前処理及びこれらに含まれる放射性核種の放射能分析は、全て放射能測定法シリーズ^{※1}に基づいた方法により実施し、併せて放射能分析に係る質の保証について、国際機関が実施する技能試験等に積極的に参加した。

(海産生物試料の前処理)

収集した海産生物試料は魚種を指定して収集したものの、他の種が混入している場合があるため、前処理を行う際に半解凍した状態で魚種分類に詳しい者の助言や専門書^{※2}を参考に、魚の特徴を観察して魚種の同定と選別を行い、放射能分析に供した。

同定と選別を行った試料は、個体毎に表面の水分をふき取った後、各個体について全長及び体重を測定し、魚種毎に平均全長及び平均体重を算出した。次いで筋肉(肉部)や内臓等に分割するなど、目的とする部位について適切に分け取り、各部位毎に湿重量を計測後、分析供試部位である筋肉を 105℃で乾燥後、450℃で 24 時間の条件下で灰化に供した。

灰化した試料を目開き 0.35mm のステンレス製ふるいに通し、混入した小骨等を取り除いたものを均一になるようによく混合して分析試料とした。ただし、カタクチイワシのように魚体が極めて小さく、全体を食する魚種に関しては魚体全体を分析に供した。

また、試料の灰化に当たっては灰化前後の減容に伴う重量比(灰分(魚の肉部で概ね 1.2%、

※1 放射能測定法シリーズ(全 35 集あり、下記はそのうちの一部である)

- ・ 2 「放射性ストロンチウム分析法」(平成 15 年、4 訂)
- ・ 3 「放射性セシウム分析法」(昭和 51 年、1 訂)
- ・ 7 「ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」(令和 2 年 9 月改訂版)
- ・ 9 「トリチウム分析法」(平成 14 年、2 訂)
- ・ 12 「プルトニウム分析法」(平成 2 年、1 訂)
- ・ 16 「環境試料採取法」(昭和 58 年)

※2 例えば、中坊徹次編「日本産魚類検索 全種の同定(第三版)」東海大学出版会

イカ・タコの肉部で概ね 2~3%程度)) を目安とし、参考となる灰分^{※1}と比較することで適切に灰化処理が行われたことを確認した。灰化により得られた灰試料は、目的とする放射能分析を行うに当たり十分な量として、表 I-1-4-2 及び表 I-1-4-3 に示した目的とする放射性核種の放射能分析での検出目標レベルを担保できる量を確保した。

(海底土試料の前処理)

海底土試料の前処理として、凍結して送付された試料をバット上に移して自然解凍後よく混合した。次いで乾燥器を用いて 105℃で乾燥させたのち、目開き 2mm のステンレス製ふるいを通して小石等を除いたのち、粉碎・混合することにより、乾燥土状態の分析試料を得た。これらの海底土試料は、目的とする放射能分析を行うに当たり十分な量として、表 I-1-4-2 及び表 I-1-4-3 に示した目的とする放射性核種の放射能分析での検出目標レベルを担保できる量を確保した。

(海産生物及び海底土試料の放射能分析)

海産生物試料または海底土試料に含まれるストロンチウム-90 (⁹⁰Sr)、プルトニウム-239+240 (²³⁹⁺²⁴⁰Pu^{※2}) 及びガンマ線放出核種を定量するために必要な前処理や化学分離・精製を行った後、これらの対象とする放射性核種の定性・定量に当たっては、検出目標レベルを考慮した測定時間に加え、バックグラウンドの評価及び適切な校正曲線(効率曲線)等を適用することにより、それぞれ低バックグラウンドベータ線測定装置を用いたベータ線計測、シリコン半導体検出器を用いたアルファ線スペクトロメトリー及び高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにより定量した。

(海水試料の前処理)

採取後直ちに、硝酸酸性としたものを分析試料として供した。また、核燃海域で調査の対象としているトリチウム用海水試料は、未処理で分取・保管した海水をそのまま分析試料とした。(3 ページも併せて参照のこと)

(海水試料の放射能分析)

発電所海域で採取した海水試料について、化学分離・精製したのち、⁹⁰Sr を低バックグラウンドベータ線測定装置によるベータ線計測により、またセシウム-134 (¹³⁴Cs) 及びセシ

※1 例えば、

- ・放射能測定法シリーズ 16「環境試料採取法」(昭和 58 年)
- ・及川真司・太田博・早野和彦・野中信博(2004)．環境放射能分析における食品試料の灰分．分析化学, **53** (12), 1515-1519.
- ・及川真司・磯山直彦・御園生淳・稲富直彦・鈴木千吉・鈴木奈緒子・中原元和・中村良一・渡部輝久・森菌繁光・藤井誠二・原猛也(2009)．海産生物筋肉中 ¹³⁷Cs 放射能分析結果に対する試料前処理技術の影響および近年のバックグラウンド濃度．保健物理, **44** (2), 198-208.

※2 プルトニウム-239 (²³⁹Pu) とプルトニウム-240 (²⁴⁰Pu) は放出するアルファ線のエネルギーがほぼ等しく、通常のアルファ線スペクトロメトリーでは区別して定量できないので、両核種の合計量として定量する方法がとられている。このためプルトニウム-239+240 (²³⁹⁺²⁴⁰Pu) と表す。

ウム-137 (^{137}Cs) についてはリンモリブデン酸アンモニウム共沈法による化学分離・精製を行ったのち、高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにより定量した。

核燃海域で採取した海水試料のうち、酸を添加しない海水試料については、蒸留及び電解濃縮装置による濃縮・精製を行い、精製した試料溶液を有機系シンチレータと混合させ、試料溶液に含まれるトリチウムを低バックグラウンド液体シンチレーション計数装置による液体シンチレーション計測により定量した。また、酸を添加した海水試料について、 ^{90}Sr 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 及びガンマ線放出核種の定量に当たっては、化学分離・精製したのち、それぞれ低バックグラウンドベータ線測定装置を用いたベータ線計測、高純度シリコン半導体検出器を用いたアルファ線スペクトロメトリー及び高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにより定量した。

(放射能分析に係る質の保証)

放射能分析に係る品質保証活動の一環として、

- ・国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency ; IAEA) が主催・実施する技能試験 (Proficiency Test ; PT) への参加
- ・IAEA が主催・実施する分析機関間比較 (Inter-Laboratory Comparisons ; ILC) への参加
- ・公益社団法人日本分析化学会等の学術団体が実施する技能試験への参加

等を通じて放射能分析の維持・向上を図った。

なお、これらの放射能分析の際には標準試料 (認証物質あるいは所内標準物質など、その分析値が既知である試料) を用いた並行分析及び同一試料の重複分析なども併せて実施した。

IAEA が主催・実施した技能試験 (Proficiency Test 2021) では、トリチウム、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の分析・測定に関して「Accepted」の評価 (注) を受けた。また、同 IAEA が 2020 年に別途主催した分析機関間比較において、「海水中のトリチウム、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 、魚体中の ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の分析について、引き続き高い正確性と能力を有している」の評価を受けた。

(両試験の結果は、のちに IAEA の公式報告書として IAEA から公表される予定である)

(注) 国際原子力機関 (IAEA) が実施する海水試料を用いた Proficiency Test での評価については、「Accepted」「Warning」「Not accepted」の 3 つがあり、Accuracy (真値にどれだけ近いかを表す正確度)、Precision (複数回分析をした際のばらつきを表す精度)、そして、Trueness (測定結果のかたよりを表す真度) により判定される。なお、「Accepted」の要件はこの 3 つをすべてクリアする必要がある。詳しくは現時点で最新となる Proficiency Test の公式報告書 (IAEA Analytical Quality in Nuclear

Applications Series No. 58, IAEA-RML-2016-01 Proficiency Test for Determination of Radionuclides in Sea Water ; 次の URL で閲覧可能) を参照。

<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AQ-58web.pdf>
(令和 4 年 3 月閲覧)

表 I -1-4-1 分析の対象とした放射性核種と試料

放射性核種		半減期*1	海産生物		海底土		海水		
			発電所 海域	核燃 海域	発電所 海域	核燃 海域	発電所 海域	核燃 海域	
人工放射性核種	トリチウム*2	^3H	12.32 年	—	—	—	—	—	○
	マンガン - 54	^{54}Mn	312.2 日	○	○	○	○	—	○
	コバルト - 60	^{60}Co	5.271 年	○	○	○	○	—	○
	ストロンチウム - 90	^{90}Sr	28.79 年	—	○	—	○	○	○
	ルテニウム - 106	^{106}Ru	371.8 日	○	○	○	○	—	○
	セシウム - 134	^{134}Cs	2.063 年	○	○	○	○	○	○
	セシウム - 137	^{137}Cs	30.08 年	○	○	○	○	○	○
	セリウム - 144	^{144}Ce	284.9 日	○	○	○	○	—	○
	プルトニウム -239+240	$^{239+240}\text{Pu}$	—*3	—	○	—	○	—	○
	その他の ガンマ線放出核種*4			○	○	○	○	—	○
自然放射性核種	ベリリウム - 7	^7Be	53.22 日	○	○	○	○	—	—
	カリウム - 40	^{40}K	12.48 億年	○	○	○	○	—	—
	タリウム - 208*5	^{208}Tl	3.053 分	○	○	○	○	—	—
	ビスマス - 214*6	^{214}Bi	19.9 分	○	○	○	○	—	—
	アクチニウム - 228*5	^{228}Ac	6.15 時間	○	○	○	○	—	—

*1 半減期は「アイソトープ手帳 12 版（公益社団法人日本アイソトープ協会編集発行、2020 年 3 月（丸善出版株式会社）」より引用した。

*2 トリチウムは、宇宙線によって生じる自然放射性核種の一つであるが、核爆発実験や原子力発電所等の運転でも生じるため、ここでは人工放射性核種に分類した。

*3 プルトニウム-239 の半減期は 2.411 万年、プルトニウム-240 の半減期は 6,564 年である。

*4 半減期約 1 年以下の核種で、クロム-51 (^{51}Cr)、コバルト-58 (^{58}Co)、鉄-59 (^{59}Fe)、亜鉛-65 (^{65}Zn)、ジルコニウム-95 (^{95}Zr)、ニオブ-95 (^{95}Nb)、ルテニウム-103 (^{103}Ru)、銀-110m ($^{110\text{m}}\text{Ag}$)、アンチモン-125 (^{125}Sb) などがある。

*5 トリウム - 232 (^{232}Th 、半減期:140 億年) を親核種とするトリウム系列に属する子孫核種である。なお、定量に当たっては親核種との放射平衡を考慮する必要がある。

*6 ウラン - 238 (^{238}U 、半減期:44.68 億年) を親核種とするウラン系列に属する子孫核種である。なお、定量に当たっては親核種との放射平衡を考慮する必要がある。

(3) 計数誤差

放射性核種が壊変する事象は統計的事象であり、放射性核種の放射能を定量するために用いる放射線計測に際しても放射性核種の壊変に伴って放出される放射線の揺らぎによる計数誤差を付すことが一般的であり、併せて放射能測定法シリーズ（例えば、放射能測定法シリーズ 7「ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」解説資料参照）にその方法が示されている。本事業においても、放射能分析の定量結果に付す誤差については、正味の計数値から算出した放射能の計数誤差を誤差として付して解析等に資することとした。

なお、放射能測定法シリーズ 7「ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」（令和 2 年 9 月改訂）によれば、計数に係る不確かさ（uncertainty due to counting statistics）について、慣例的に計数誤差（counting error）という用語が用いられてきたとされ、計数 n に対して予測される誤差は標準偏差 σ で、 $\sigma = \sqrt{n}$ と表される。通常、測定値は $n \pm \sigma$ と記されるとあり、本事業においてもこれに準ずることとした。

(4) 検出下限値

環境試料に含まれる放射性核種の放射能分析において、放射能が有意に検出できなくなる濃度を検出下限値と呼んでいる。本事業では、放射性核種の放射能を定量する際に実施する放射線計測において、バックグラウンドを差し引いた正味の計数値が計数誤差の 3 倍を超えた場合に放射性核種が検出されたと判定し、計数誤差の 3 倍に等しい時の放射性核種の放射能やその値を検出下限値としている^{※1}。しかしながら、試料に含まれる放射能やその濃度の検出下限値は測定環境（特にバックグラウンド）、放射能分析のために供した試料の量、放射線検出器の計数効率等により試料の測定毎に計算されるため、一つの値として示すことができない。そこで、設定すべき検出下限値の目安として、過去に実施した経験を踏まえ、同様の試料の分析・測定で得られた検出下限値の実測例を参考として検出目標レベルを定めることとした。この検出目標レベルについて、一連の放射能分析方法とともに表 I-1-4-2 及び表 I-1-4-3 に示す。

(5) 減衰補正

放射性核種の放射能濃度についての減衰補正については、放射能測定法シリーズの考え方^{※2}に基づき、放射能が検出された場合にのみ行うこととした。また、減衰補正を行う対象とした放射性核種は、トリチウム、⁹⁰Sr、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs など比較的半減期の短い人工放射

※1 放射能測定法シリーズ 7「ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」（令和 2 年 9 月改訂）（12 ページ参照）に準じた考え方で、計数値に付す誤差は計数誤差となるもの。放射性核種の壊変に伴う放射線の計数値はポアソン分布となり、その計数値（ポアソン分布）の標準偏差は計数値の平方根になることが示されている。また、検出されたか否かの判定については「計数誤差の 3 倍を超えているか否かで行われることが一般的である。」とされ、本事業においてもこれに準ずることとした（同 56 ページ参照）。

※2 放射能測定法シリーズ 7「ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」（令和 2 年 9 月改訂）（176 ページ参照）に記載されたとおり。

性核種（ここではトリチウムも含む）とし、 $^{239+240}\text{Pu}$ についてはその対象から除外した。

また、自然放射性核種については同シリーズ記載のとおり（前ページ※2を参照）、天然の放射性壊変系列※1（いわゆるウラン系列やトリウム系列など）に属する放射性核種（例えば、 ^{208}Tl 、 ^{214}Bi 、 ^{228}Ac など）について、原則として測定終了時の値とした※2。

表 I -1-4-2 発電所海域における各試料の放射能分析方法及び検出目標レベル

試料		海産生物試料	海底土試料	海水試料		
分析対象核種		ガンマ線放出核種 (^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{106}Ru 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 等)	ガンマ線放出核種 (^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{106}Ru 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 等)	^{90}Sr	^{134}Cs 、 ^{137}Cs	
放射能分析方法	分析供試量	約 80g (灰)	約 100g (乾燥土)	50L		
	前処理等	灰化	乾燥後、粉砕・混合	化学分離・精製等		
	放射線計測等	ガンマ線スペクトロメトリー	ガンマ線スペクトロメトリー	ベータ線計測	ガンマ線スペクトロメトリー	
	計測時間(秒)	70,000	70,000	3,600~7,200	70,000	
検出目標レベル	放射能濃度					
			(Bq/kg-生鮮物)	(Bq/kg-乾燥土)	(mBq/L)	
	ガンマ線放出核種*1	^{54}Mn	0.03	0.9	—	—
		^{60}Co	0.05	0.9	—	—
		^{106}Ru	0.2	7	—	—
		^{134}Cs	0.03	1	—	0.9
		^{137}Cs	0.02	0.7	—	0.5
		^{144}Ce	0.2	4	—	—
^{90}Sr	—*2	—	0.4	—		

*1 ガンマ線放出核種は、分析の対象とした放射性核種のうち半減期が数十日以下のものを除いた代表的な人工放射性核種について記載した。なお、 ^{106}Ru 及び ^{137}Cs は純ベータ線放出核種であるが、それぞれ ^{106}Rh と $^{137\text{m}}\text{Ba}$ との放射平衡が成立することによりガンマ線計測によって定量できるため、ここではガンマ線放出核種に分類した。

*2 放射能分析の対象としていない放射性核種については「—」で示した。

※1 「放射性壊変系列」という用語については、「アイソトープ手帳 12 版（公益社団法人日本アイソトープ協会編集発行、2020 年 3 月（丸善出版株式会社）」より引用。

※2 本事業では、これらの系列に属さない ^7Be について原則として減衰補正を実施した。

表 I-1-4-3 核燃海域における各試料の放射能分析方法及び検出目標レベル

試料		海産生物試料			
分析対象核種		^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	ガンマ線放出核種	
放射能分析方法	分析供試量	約 30g (灰)	約 20g (灰)	約 80g (灰)	
	前処理等	灰化後、化学分離・精製		灰化	
	放射線計測等	ベータ線計測	アルファ線スペクトロメトリー	ガンマ線スペクトロメトリー	
	計測時間 (秒)	3,600~7,200	160,000	70,000	
		放射能濃度 (Bq/kg-生鮮物)			
検出目標レベル	ガンマ線放出核種 ^{*1}	^{54}Mn	— ^{*2}	—	0.03
		^{60}Co	—	—	0.05
		^{106}Ru	—	—	0.2
		^{134}Cs	—	—	0.03
		^{137}Cs	—	—	0.02
		^{144}Ce	—	—	0.2
	^{90}Sr	0.008	—	—	
	$^{239+240}\text{Pu}$	—	0.0007	—	

*1 ガンマ線放出核種は、分析の対象とした放射性核種のうち半減期が数十日以下のものを除いた代表的な人工放射性核種について記載した。なお、 ^{106}Ru 及び ^{137}Cs は純ベータ線放出核種であるが、それぞれ ^{106}Rh と $^{137\text{m}}\text{Ba}$ との放射平衡が成立することによりガンマ線計測によって定量できるため、ここではガンマ線放出核種に分類した。

*2 放射能分析の対象としていない放射性核種については「—」で示した。

表 I-1-4-3 核燃海域における各試料の放射能分析方法及び検出目標レベル（続き）

試料		海底土試料			海水試料				
分析対象核種		^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	ガンマ線放出核種	トリチウム	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	ガンマ線放出核種	
放射能分析方法	分析 供試量	乾燥土重量			0.6L	50L	100L	50L	
		約 150g	約 50g	約 100g					
	前処理等	乾燥土とし、 化学分離・精製等			蒸留・電 解濃縮	化学分離・精製等			
	放射線 計測等	ベータ 線計測	アルファ 線スペク トロメト リー	ガンマ線 スペクト ロメトリ ー	LSC*3	ベータ 線計測	アルファ 線スペク トロメト リー	ガンマ線 スペクト ロメトリ ー	
	計測時間 (秒)	3,600	80,000	70,000	30,000	3,600 ~7,200	160,000	70,000	
検出目標レベル	放射能濃度								
	(Bq/kg-乾燥土)				(Bq/L)	(mBq/L)			
	ガンマ線 放出核種 *1	^{54}Mn	—*2	—	0.9	—	—	—	0.8
		^{60}Co	—	—	0.9	—	—	—	0.9
		^{106}Ru	—	—	7	—	—	—	7
		^{134}Cs	—	—	1	—	—	—	0.9
		^{137}Cs	—	—	0.7	—	—	—	0.5
		^{144}Ce	—	—	4	—	—	—	4
	トリチウム	—	—	—	0.1	—	—	—	
	^{90}Sr	0.2	—	—	—	0.4	—	—	
$^{239+240}\text{Pu}$	—	0.03	—	—	—	0.007	—		

*1 ガンマ線放出核種は、分析の対象とした放射性核種のうち半減期が数十日以下のものを除いた代表的な人工放射性核種について記載した。なお、 ^{106}Ru 及び ^{137}Cs は純ベータ線放出核種であるが、それぞれ ^{106}Rh と $^{137\text{m}}\text{Ba}$ との放射平衡が成立することによりガンマ線計測によって定量できるため、ここではガンマ線放出核種に分類した。

*2 放射能分析の対象としていない放射性核種については「—」で示した。

*3 液体シンチレーション計数装置によるベータ線計測（Liquid Scintillation Counting）を示す。

5) 分析結果

(1) 海産生物試料の分析結果

① 発電所海域

令和 3 年度分の海産生物試料として

第 1 回収集（前期）：令和 3 年 4 月 1 日から令和 3 年 8 月 11 日まで

第 2 回収集（後期）：令和 3 年 10 月 1 日から令和 3 年 12 月 22 日まで

のそれぞれの期間において当初計画に沿って収集活動を行った。収集の対象とした試料は前期（45 試料）と後期（45 試料）の合わせて 90 試料である。これらは気象・海象などの自然現象に伴う漁獲量の変動により、当初計画していた魚種の漁獲が見込まれない状況が生じたことなどの理由で、海産生物試料の選定に関する注意事項^{※1}に基づいて計 32 試料（前期 14、後期 18）を別の魚種に変更したが、関係する漁業協同組合等の協力を頂き、全 15 海域から計 90 試料を収集した。

収集した海産生物試料に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲について、平成 18 年度からの結果と併せて表 I-1-5-1 に示した。

また、海産生物試料に含まれる放射性核種の放射能濃度のほか、一連の試料分析に関する記録について資料 I-1-1 から資料 I-1-15 に示した。

令和 3 年度に発電所海域で採取した海産生物試料から検出された人工放射性核種は ^{137}Cs であり、これらの放射性核種の放射能濃度は、東電福島第一原発事故後に実施した平成 23～27 年度よりも全体的に低くなっていたものの、直近の令和 2 年度と同程度であった。また、事故前に実施した過去 5 年間（平成 18～22 年度）（以下「事故前 5 年間」という。）の範囲と比較すると、一部の試料について上回るものが見られた。

（ $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ^{※2} について）

令和 3 年度の調査では、令和 2 年度に引き続き、調査対象海域で採取した海産生物試料から $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が検出されることはなかった。

なお、東電福島第一原発事故後の平成 23 年度から平成 24 年度までの調査において魚類から、平成 23 年度から平成 25 年度までの調査においてイカ・タコ類の一部の試料からそれぞれ検出されていたが、平成 26 年度以降の調査では、いずれの海域も採取した海産生物試料からは検出されなかった。

（ ^{134}Cs について）

令和 3 年度の調査では、いずれの海域も採取した海産生物試料から ^{134}Cs は検出されな

※1 「I 1. 3) (1)」参照。

※2 銀 (Ag) の放射性同位体（半減期 249.8 日；「m」は準安定状態を表す）のひとつで、主に安定核種である ^{109}Ag の放射化で生成する（同重体に ^{110}Pd が存在するため、 ^{134}Cs と同様に核分裂ではほぼ生成せず、大部分が放射化生成物と考えられる）。

かった。

なお、過年度の調査結果では、

令和 2 年度 : 福島第一及び福島第二海域で採取した 3 試料 (いずれも魚類) から検出され、その放射能濃度は 0.038~0.059Bq/kg-生鮮物の範囲

平成 31 年度 : 福島第一及び福島第二海域で採取した 3 試料 (いずれも魚類) から検出され、その放射能濃度は 0.047~0.070Bq/kg-生鮮物の範囲
(令和元)

平成 30 年度 : 福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した 6 試料 (いずれも魚類) から検出され、その放射能濃度は 0.044~0.19Bq/kg-生鮮物の範囲

であった。

(^{137}Cs について)

令和 3 年度の調査では、 ^{137}Cs が事故前 5 年間の最大値 (0.24Bq/kg-生鮮物) を超えた試料は、宮城、福島第二及び茨城海域の 3 海域で採取した魚類 9 試料であった。令和 2 年度に得られた調査結果と比較して全体的に放射能濃度は減少傾向にあった。これらの海域における ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は、福島第二海域で採取された海産生物試料の一試料から得られたもので、その放射能濃度は 0.72Bq/kg-生鮮物であった。その他の海域の試料では、事故前の過去 5 年間で得られた測定値の範囲内であった。なお、 ^{137}Cs の放射能濃度の最大値である 0.72Bq/kg-生鮮物は、国の定める食品中の放射性物質の基準値である 100Bq/kg と比べて約 1/139 以下の放射能濃度であり、十分に低かった。

過年度の調査結果では、事故前 5 年間の最大値 (0.24Bq/kg-生鮮物) を超えた試料は、

令和 2 年度 : 宮城、福島第一、福島第二及び茨城の 4 海域で採取した魚類 10 試料

平成 31 年度 : 宮城、福島第一、福島第二及び茨城の 4 海域で採取した魚類 12 試料
(令和元)

平成 30 年度 : 宮城、福島第一、福島第二及び茨城の 4 海域で採取した魚類 14 試料

であり、減少の傾向が続いている。

直近の令和 2 年度の調査結果で得られた結果のうち、最も高い値を示していたのは福島第一海域で採取された試料の 0.92Bq/kg-生鮮物 (事故前 5 年間の最大値 (0.24Bq/kg-生鮮物) の約 3.8 倍) であった。また、この試料からは 0.055Bq/kg-生鮮物の ^{134}Cs も検出されており、これらの和 (^{134}Cs 及び ^{137}Cs との合計) は、0.98Bq/kg-生鮮物で、基準値 (水産物の放射性セシウム) である 100Bq/kg と比べて十分に低い値 (1/102 以下) であった。令和 3 年度の調査結果より ^{137}Cs の放射能濃度の減少を改めて確認することができた。

表 I-1-5-1 海産生物試料（発電所海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲

(単位：Bq/kg-生鮮物)

年度	試料名	試料数	^{134}Cs	^{137}Cs	その他のガンマ線 放出核種*1
令和3年度	魚類	74	ND*2	0.054~0.72	ND
	イカ・タコ類	13	ND	ND ~ 0.082	ND
	エビ類	3	ND	0.032 ~ 0.042	ND
令和2年度	魚類	73	ND ~ 0.059	0.059 ~ 0.92	ND
	イカ・タコ類	14	ND	ND ~ 0.097	ND
	エビ類	3	ND	0.034 ~ 0.068	ND
平成31 (令和元) 年度	魚類	74	ND ~ 0.070	0.060 ~ 0.85	ND
	イカ・タコ類	13	ND	ND ~ 0.11	ND
	エビ類	3	ND	0.037 ~ 0.051	ND
平成30年度	魚類	75	ND ~ 0.19	0.036 ~ 2.1	ND
	イカ・タコ類	12	ND	ND ~ 0.16	ND
	エビ類	3	ND	0.043 ~ 0.077	ND
平成29年度	魚類	77	ND ~ 0.25	0.031 ~ 1.8	ND
	イカ・タコ類	12	ND	ND ~ 0.12	ND
	エビ類	1	ND	0.057	ND
平成28年度	魚類	76	ND ~ 0.49	0.032 ~ 3.0	ND
	イカ・タコ類	11	ND	ND ~ 0.14	ND
	エビ類	3	ND	ND ~ 0.083	ND
平成27年度	魚類	76	ND ~ 0.90	0.046 ~ 3.8	ND
	イカ・タコ類	11	ND	ND ~ 0.10	ND
	エビ類	3	ND	0.046 ~ 0.065	ND
平成26年度	魚類	75	ND ~ 2.0	0.028 ~ 5.8	ND
	イカ・タコ類	12	ND ~ 0.048	ND ~ 0.16	ND
	エビ類	3	ND	0.052 ~ 0.11	ND
平成25年度	魚類	75	ND ~ 7.7	0.057 ~ 18	ND
	イカ・タコ類	12	ND ~ 0.22	ND ~ 0.49	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~ 0.080
	エビ類	3	ND	0.046 ~ 0.070	ND
平成24年度	魚類	77	ND ~ 69	0.057 ~ 120	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~ 0.17
	イカ・タコ類	10	ND ~ 0.65	ND ~ 0.88	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~ 0.11
	エビ類	3	ND	0.046 ~ 0.082	ND

(続く)

表 I-1-5-1 海産生物試料（発電所海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲（続き）

年度	試料名	試料数	^{134}Cs	^{137}Cs	その他のガンマ線 放出核種*1
平成 23 年度	魚類	77	ND ~ 110	0.092 ~ 140	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~ 0.62
	イカ・タコ類	10	ND ~ 8.7	0.031 ~ 9.4	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~ 1.8
	エビ類	3	ND ~ 0.10	0.079 ~ 0.13	ND
平成 18~ 22 年度	魚類	375	ND	0.034 ~ 0.24	ND
	イカ・タコ類	60	ND	ND ~ 0.045	ND
	エビ類	15	ND	0.031 ~ 0.071	ND

*1 表 I-1-4-1 に示した放射性核種のうち、人工放射性核種として列挙した放射性核種を参照。

*2 ND は検出下限値以下を示す。なお、令和 3 年度に調査した海産生物試料（全 90 試料）の分析・測定で得られた検出下限値の平均は、 ^{134}Cs で 0.036、 ^{137}Cs で 0.026 (Bq/kg-生鮮物) であり、その他のガンマ線放出核種についても概ね表 I-1-4-2 に示した検出目標レベルと同程度である。

②核燃海域

令和 3 年度分の海産生物試料として

第 1 回収集（前期）：令和 3 年 4 月 9 日から 8 月 30 日まで

第 2 回収集（後期）：令和 3 年 10 月 7 日から 12 月 28 日まで

のそれぞれの期間において当初計画に沿って収集活動を行った。収集の対象とした試料は前期（15 試料）と後期（15 試料）合わせて 30 試料であり、気象・海象などの自然現象に伴う漁獲量の変動により、当初計画していた魚種の漁獲が見込まれない状況が生じたことなどの理由で、海産生物試料の選定に関する注意事項*1 に基づいて計 6 試料（前期 4、後期 2）を別の魚種に変更したが、関係する漁業協同組合等の協力を頂き、計 30 試料を収集した。

収集した海産生物試料（魚類及びイカ・タコ類；計 30 試料）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲について、平成 18 年度からの結果と併せて表 I-1-5-2 に示した。

また、海産生物試料に含まれる放射性核種の放射能濃度のほか、試料分析に関する記録について資料 1-2-1 から資料 1-2-8 に示した。

令和 3 年度に核燃海域で採取した海産生物試料から検出された人工放射性核種は ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ であり、これらの放射能濃度は、東電福島第一原発事故後に実施した平成 23 ~ 27 年度よりも全体的に低くなっていたものの、直近の令和 2 年度と同程度であった。また、事故前 5 年間の範囲と比較すると、一部の試料について上回るものが見られた。

なお、直近の令和 2 年度の調査では ^{137}Cs （26 試料）、 ^{90}Sr （1 試料のみ）及び $^{239+240}\text{Pu}$ （1 試料のみ）が検出されたが、平成 31（令和元）年度の調査では、 ^{137}Cs （25 試料）のみが検出されていた。平成 30 年度の調査では ^{137}Cs （28 試料）、 ^{90}Sr （1 試料のみ）及び $^{239+240}\text{Pu}$ （1

※1 「I 1. 3）(1)」参照。

試料のみ)が検出された。平成23年度に ^{110m}Ag (6試料)が検出されたが、以降令和3年度の調査までその他のガンマ線放出核種は検出されなかった。

(^{134}Cs について)

令和3年度の調査では、核燃海域で採取した30試料のいずれからも ^{134}Cs は検出されなかった。

なお、東電福島第一原発事故後に実施した平成23～27年度の調査結果からその放射能濃度は減少傾向にあって、とりわけ平成29年度には平成28年度と同程度で魚類1試料から検出されていたものの、以降令和3年度の調査まで検出されなかった。

(^{137}Cs について)

令和3年度の調査では、放射能濃度は魚類で0.052～0.24Bq/kg-生鮮物、イカ・タコ類でND～0.046Bq/kg-生鮮物の範囲にあり、30試料のうち4試料は検出されなかった。また、これらの放射能濃度の範囲のうち、最大値については「①発電所海域」での最大値を超えるものはなかった。これらの試料のうち、事故前5年間の最大値(魚類:0.18Bq/kg-生鮮物、イカ・タコ類:0.041Bq/kg-生鮮物)を超えた試料は魚類で2試料あり、イカ・タコ類では1試料(ヤリイカ)だった。

直近の令和2年度の調査では、魚類1試料(カタクチイワシ)及びイカ・タコ類3試料(ミズダコ(2試料)、スルメイカ)を除く27試料から ^{137}Cs が検出された。 ^{137}Cs の放射能濃度の最大値については「①発電所海域」での最大値を超えるものはなかった。これらの試料のうち、事故前5年間の最大値を超えた試料は魚類で4試料あり、イカ・タコ類では1試料(スルメイカ)だった。

平成31(令和元)年度の調査では、魚類1試料(カタクチイワシ)及びイカ・タコ類4試料(ミズダコ(2試料)、スルメイカ(2試料))を除く25試料から ^{137}Cs が検出された。 ^{137}Cs の放射能濃度の最大値については「①発電所海域」での最大値を超えるものはなかった。これらの試料のうち、事故前5年間の最大値を超えた試料は魚類で2試料あり、イカ・タコ類では1試料(スルメイカ)だった。

平成30年度の調査では、イカ・タコ類2試料(ミズダコ、スルメイカ)を除く28試料から ^{137}Cs が検出された。 ^{137}Cs の放射能濃度の最大値については「①発電所海域」での最大値を超えるものはなかった。これらの試料のうち、事故前5年間の最大値を超えた試料は、魚類で3試料あり、イカ・タコ類で1試料(スルメイカ)だった。

表 I-1-5-2 海産生物試料（核燃海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲

（単位：Bq/kg-生鮮物）

年度	試料名	試料数	⁹⁰ Sr	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	その他の ガンマ線 放出核種*1	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
令和3年度	魚類	24	ND*2	ND	0.052 ~ 0.24	ND	ND ~ 0.00094
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.046	ND	ND ~ 0.00062
令和2年度	魚類	24	ND~ 0.0083	ND	ND ~ 0.21	ND	ND
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.043	ND	ND ~ 0.00057
平成31 (令和元) 年度	魚類	24	ND	ND	ND ~ 0.23	ND	ND
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.053	ND	ND
平成30年度	魚類	24	ND~ 0.0067	ND	0.042 ~ 0.30	ND	ND
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.053	ND	ND ~ 0.00039
平成29年度	魚類	24	ND	ND ~ 0.029	0.059 ~ 0.31	ND	ND
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.036	ND	ND
平成28年度	魚類	24	ND	ND ~ 0.10	0.044 ~ 0.65	ND	ND ~ 0.00074
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.048	ND	ND
平成27年度	魚類	24	ND	ND ~ 0.059	0.035 ~ 0.32	ND	ND
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.049	ND	ND
平成26年度	魚類	24	ND~ 0.0067	ND ~ 0.56	0.056 ~ 1.7	ND	ND
	イカ・タコ類	6	ND	ND	ND ~ 0.096	ND	ND ~ 0.00048

（続く）

表 I-1-5-2 海産生物試料（核燃海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲（続き）

年度	試料名	試料数	^{90}Sr	^{134}Cs	^{137}Cs	その他のガンマ線放出核種*1	$^{239+240}\text{Pu}$
平成 25 年度	魚類	24	ND	ND ~ 1.9	0.052 ~ 4.1	ND	ND
	イカ・タコ類	6	ND	ND ~ 0.029	ND ~ 0.075	ND	ND ~ 0.00037
平成 24 年度	魚類	24	ND ~ 0.0062	ND ~ 5.2	0.089 ~ 7.6	ND	ND ~ 0.00094
	イカ・タコ類	6	ND	ND ~ 0.053	ND ~ 0.092	ND	ND ~ 0.00033
平成 23 年度	魚類	23	ND ~ 0.0098	0.069 ~ 10	0.12 ~ 11	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~0.23	ND ~ 0.00053
	イカ・タコ類	7	ND	0.042 ~ 0.24	0.064 ~ 0.32	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~0.44	ND ~ 0.00058
平成 18 ~ 22 年度	魚類	110	ND ~ 0.010	ND	ND ~ 0.18	ND	ND ~ 0.0010
	イカ・タコ類	30	ND	ND	ND ~ 0.041	ND	ND ~ 0.00051

*1 表 I-1-4-1 に示した放射性核種のうち、人工放射性核種として列挙した放射性核種を参照。

*2 ND は検出下限値以下を示す。なお、令和 3 年度に調査した海産生物試料（全 30 試料）の分析・測定で得られた検出下限値の平均は、 ^{90}Sr で 0.0068、 ^{134}Cs で 0.033、 ^{137}Cs で 0.025、 $^{239+240}\text{Pu}$ で 0.00036 (Bq/kg-生鮮物) であり、その他のガンマ線放出核種についても概ね表 I-1-4-3 に示した検出目標レベルと同程度である。

(2) 海底土試料の分析結果

① 発電所海域

令和 3 年度分の海底土試料を得るため、令和 3 年 5 月 19 日から 6 月 23 日までの期間に当初計画に沿って試料採取を行った。採取すべき海底土（表層 3cm）は全 15 海域 4 測点・計 60 試料であり、当該期間において当初計画した場所で欠測することなく採取を完了した。

採取した海底土試料（計 60 試料）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲を平成 18 年度からの結果と併せて表 I-1-5-3 に示す。また、各海域の海底土試料に含まれる放射性核種の放射能濃度のほか、試料分析に関する記録について資料 2-1-1 から資料 2-1-15 に示す。

令和 3 年度に発電所海域で採取した海底土試料から検出された人工放射性核種は ^{134}Cs 及び ^{137}Cs であり、これらの放射能濃度は、事故後に実施した平成 23 ~ 令和 2 年度の範囲よりも減少傾向にあったものの、東電福島第一原発事故前 5 年間の調査結果と比較すると、令和 2 年度と同様に最大値で約 4.3 倍となる放射能濃度の範囲にあった。

これらのうち、 ^{134}Cs が検出された海域及び測点は、福島第一（測点 1、3 及び 4）、福島

第二（測点 2 及び 3）及び茨城海域（測点 1、2 及び 4）の 3 海域（計 8 測点）であった。また、 ^{137}Cs については、福島第一（全測点）、福島第二（全測点）、茨城（全測点）及び新潟海域（測点 2）の 4 海域（計 13 測点）において、事故前の過去 5 年間の調査で得られた放射能濃度の最大値（7.7Bq/kg-乾燥土）より高い ^{137}Cs が検出された。これらの海域における ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は、33Bq/kg-乾燥土であり、令和 2 年度の調査において茨城海域で得られた 42Bq/kg-乾燥土から減少していた。その他の海域の試料では、事故前の過去 5 年間で得られた測定値の範囲内であった。

過年度の調査結果では、令和 2 年度に発電所海域で採取した海底土試料から検出された人工放射性核種は ^{134}Cs 及び ^{137}Cs であり、これらのうち、 ^{134}Cs が検出された海域及び測点は、福島第一（全測点）、福島第二（測点 1、3 及び 4）及び茨城海域（全測点）の 3 海域（計 11 測点）であった。また、 ^{137}Cs については、福島第一（全測点）、福島第二（全測点）、茨城（全測点）及び新潟海域（測点 2）の 4 海域（計 13 測点）において、事故前の過去 5 年間の調査で得られた放射能濃度の最大値（7.7Bq/kg-乾燥土）より高い ^{137}Cs が検出された。

平成 31（令和元）年度の調査で ^{134}Cs が検出された海域及び測点は、福島第一（全測点）、福島第二（全測点）及び茨城海域（全測点）の 3 海域（12 測点）であった。また、 ^{137}Cs については、 ^{134}Cs が検出された測点に新潟海域（測点 2）を加えた 13 測点において事故前 5 年間の最大値（7.7Bq/kg-乾燥土）よりも高い放射能濃度を観測し、その最大値は 63Bq/kg-乾燥土であった。

平成 30 年度の調査で ^{134}Cs が検出された海域及び測点は、福島第一（全測点）、福島第二（全測点）及び茨城海域（全測点）の 3 海域（12 測点）であった。

表 I-1-5-3 海底土試料（発電所海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲

（単位：Bq/kg-乾燥土）

年度	試料数	^{134}Cs	^{137}Cs
令和3年度	60	ND*1 ~ 1.1	ND ~ 33
令和2年度	60	ND ~ 2.5	ND ~ 42
平成31（令和元）年度	60	ND ~ 4.5	ND ~ 63
平成30年度	60	ND ~ 5.0	ND ~ 43
平成29年度	60	ND ~ 10	ND ~ 80
平成28年度	60	ND ~ 17	ND ~ 93
平成27年度	60	ND ~ 71	ND ~ 320
平成26年度	60	ND ~ 120	ND ~ 310
平成25年度	60	ND ~ 45	ND ~ 94
平成24年度	60	ND ~ 180	ND ~ 280
平成23年度	60	ND ~ 200	ND ~ 220
平成18~22年度	300	ND	ND ~ 7.7

*1 NDは検出下限値以下を示す。なお、令和3年度に調査した海底土試料（全60試料）の分析・測定で得られた検出下限値の平均放射能濃度は、 ^{134}Cs で0.56、 ^{137}Cs で0.52（Bq/kg-乾燥土）であった。その他のガンマ線放出核種については検出されておらず、これらの検出下限値は概ね表 I-1-4-2 に示した検出目標レベルと同程度である。

②核燃海域

令和3年度分の海底土試料を得るため、令和3年6月7日から6月24日までの期間に当初計画に沿って試料採取を行った。採取すべき海底土（表層3cm）は全22測点・計22試料であり、当該期間において当初計画した場所で欠測することなく採取を完了した。

採取した海底土試料（計22試料）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲を平成18年度からの結果と併せて表 I-1-5-4 に示す。また、各測点の海底土試料に含まれる放射性核種の放射能濃度のほか、試料分析に関する記録について資料2-2-1から資料2-2-6に示す。

令和3年度の調査において核燃海域で採取した海底土から検出された人工放射性核種は ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ で、これらの放射性核種の放射能濃度の範囲は、事故前5年間の範囲内かそれ以下であった。この傾向は、表 I-1-5-4 のとおり、過年度の調査結果から引き継ぎ得られてきたものと同様である。

表 I-1-5-4 海底土試料（核燃海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲

(単位：Bq/kg-乾燥土)

年度	試料数	^{90}Sr	^{134}Cs	^{137}Cs	$^{239+240}\text{Pu}$
令和3年度	22	ND* ¹ ~ 0.34	ND	ND ~ 4.4	0.33 ~ 4.8
令和2年度	22	ND ~ 0.30	ND	0.41 ~ 3.6	0.30 ~ 4.8
平成31 (令和元)年度	22	ND ~ 0.26	ND	ND ~ 3.9	0.35 ~ 4.0
平成30年度	22	ND ~ 0.42	ND	ND ~ 4.3	0.42 ~ 5.4
平成29年度	22	ND ~ 0.37	ND	ND ~ 4.4	0.31 ~ 5.0
平成28年度	22	ND ~ 0.39	ND	ND ~ 4.6	0.41 ~ 4.7
平成27年度	22	ND ~ 0.50	ND	ND ~ 5.3	0.37 ~ 4.9
平成26年度	22	ND ~ 0.54	ND	ND ~ 6.1	0.39 ~ 5.0
平成25年度	22	ND ~ 0.43	ND	ND ~ 6.1	0.42 ~ 5.3
平成24年度	22	ND ~ 0.40	ND	ND ~ 6.2	0.38 ~ 4.8
平成23年度	22	ND ~ 0.51	ND	ND ~ 4.6	0.37 ~ 4.1
平成18~22年度	104	ND ~ 0.78	ND	ND ~ 5.2	0.39 ~ 5.1

*1 NDは検出下限値以下を示す。なお、令和3年度に調査した海底土試料（全22試料）の分析・測定で得られた検出下限値の平均放射能濃度は、 ^{90}Sr で0.11、 ^{134}Cs で0.54、 ^{137}Cs で0.50、 $^{239+240}\text{Pu}$ で0.0080 (Bq/kg-乾燥土)であった。その他のガンマ線放出核種については検出されておらず、これらの検出下限値は概ね表 I-1-4-3 に示した検出目標レベルと同程度である。

(3) 海水試料の分析結果

①発電所海域

令和3年度分の海水試料として、令和3年5月19日から6月23日の期間に当初計画に沿って試料採取を行った。採取すべき海水試料は全15海域4測点・2層の計120試料であり、当該期間において当初計画した場所で欠測することなく採取を完了した。

採取した海水試料（表層水、下層水；各60試料（計120試料））に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲を平成18年度からの結果と併せて表I-1-5-5に示す。また、各海域の海水試料に含まれる放射性核種の放射能濃度のほか、試料分析に関する記録について資料3-1-1から資料3-1-15に示す。

令和3年度の調査において、海水試料から検出された人工放射性核種は ^{90}Sr 及び ^{137}Cs であり、それら放射能濃度の範囲は令和2年度とほぼ同様の水準であった。また、 ^{134}Cs は平成29年度から引き続き、いずれの試料からも検出されなかった。

（表層水に含まれる ^{137}Cs ）

令和3年度の調査においては、福島第一（測点1、2）及び石川海域（測点3）の2海域3測点で事故前5年間の最大値（2.4mBq/L）をわずかながら上回っていた。これらの海域における表層水の最大値は福島第一海域の測点1（2.6mBq/L）であり、事故前5年間の最大値の約1.1倍であった。一方、その他の海域では、事故前5年間の範囲内であった。

過年度の結果として、令和2年度の調査においては、福島第一（測点1、2）及び福島第二海域（測点4）の2海域3測点で事故前5年間の最大値（2.4mBq/L）をわずかながら上回っていた。これらの海域における表層水の最大値は福島第二海域の測点4（3.1mBq/L）であり、事故前5年間の最大値の約1.3倍であった。一方、その他の海域では、事故前5年間の範囲内であった。

また、平成31（令和元）年度の調査においては、福島第一（測点1、2及び3）及び茨城（測点1）の2海域4測点で事故前5年間の最大値（2.4mBq/L）をわずかながら上回っていた。これらの海域における表層水の最大値は福島第一海域の測点2（3.0mBq/L）であり、事故前5年間の最大値の約1.3倍であった。その他の海域では、事故前5年間の範囲内であった。平成30年度の調査においては、宮城（測点2）及び茨城（全測点）の2海域5測点で事故前5年間の最大値（2.4mBq/L）をわずかながら上回っていた。これらの海域における表層水の最大値は茨城海域の測点3及び測点4（2.8mBq/L）であり、事故前5年間の最大値の約1.2倍であった。その他の海域は事故前5年間の範囲内であった。

（下層水に含まれる ^{137}Cs ）

令和3年度の調査においては、茨城海域（測点1、3）の1海域2測点で事故前5年間の

最大値（2.3mBq/L）と同じかわずかながら上回っていた。このうち、測点3で観測された2.4mBq/Lが最大であった。一方、その他の海域では、事故前5年間の範囲内であった。

過年度の結果として、令和2年度の調査においては、福島第一（測点1、4）、福島第二（全測点）、茨城（測点2、3及び4）、静岡（測点3）、福井第二（測点4）及び鹿児島海域（測点3、4）の6海域13測点で事故前5年間の最大値（2.3mBq/L）と同じかわずかながら上回っていた。これらの海域における最大値は茨城海域（測点4）で観測された2.6mBq/Lであり、事故前5年間の最大値（2.3mBq/L）の約1.1倍であった。一方、その他の海域では、事故前5年間の範囲内であった。

平成31（令和元）年度の調査においては、茨城海域（測点4）で観測された2.5mBq/Lが最大で、事故前5年間の最大値（2.3mBq/L）をわずかではあるが上回っていた。その他の海域では事故前5年間の範囲内であった。

平成30年度の調査においては、宮城（測点1）、福島第一（測点1）、福島第二（測点2、3）、茨城（測点1）及び島根海域（測点4）の5海域6測点においてこの最大値（2.3mBq/L）と同じかわずかながら上回っていた。これらの海域における最大値は福島第二海域（測点2）の2.5mBq/Lであり、事故前5年間の最大値の約1.1倍であった。その他の海域では、事故前5年間の範囲内であった。

（表層水及び下層水に含まれる⁹⁰Sr）

表層水及び下層水に含まれる⁹⁰Srの放射能濃度については、直近の令和2年度の調査結果と同様に事故前5年間の範囲内かそれ以下であった。

表 I-1-5-5 海水試料（発電所海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲

(単位：mBq/L)

年度	試料名	試料数	^{90}Sr	^{134}Cs	^{137}Cs
令和3年度	表層水	60	0.43～1.0	ND ^{*2}	1.3～2.6
	下層水	60	ND～0.95	ND	0.80～2.4
令和2年度	表層水	60	0.53～0.97	ND	1.3～3.1
	下層水	60	0.26～0.91	ND	ND～2.6
平成31 (令和元)年度	表層水	60	0.56～1.1	ND	1.2～3.0
	下層水	60	0.33～1.0	ND	0.49～2.5
平成30年度	表層水	60	0.49～1.1	ND	1.3～2.8
	下層水	60	0.26～1.1	ND	0.51～2.5
平成29年度	表層水	60	0.50～1.1	ND	1.3～4.0
	下層水	60	0.29～1.1	ND	0.66～2.9
平成28年度	表層水	60	0.66～1.1	ND～0.98	1.6～5.0
	下層水	60	0.41～1.2	ND	0.69～3.2
平成27年度	表層水	60	0.67～1.2	ND～0.77	1.7～4.0
	下層水	60	0.30～1.1	ND	0.52～3.9
平成26年度	表層水	60	0.70～1.3	ND～1.6	1.3～5.3
	下層水	60	0.29～1.2	ND～2.2	0.77～6.5
平成25年度	表層水	60	0.77～5.8	ND～9.6	1.2～17
	下層水	60	0.30～1.3	ND～1.5	0.7～3.9
平成24年度	表層水	60	0.63～13	ND～29	1.0～41
	下層水	60	0.36～9.2	ND～14	0.61～21
平成23年度	表層水	60 (15) ^{*1}	0.84～24	ND～520	1.4～1400 ^{*4}
	下層水	60	0.24～3.6	— ^{*3}	0.47～360 ^{*4}
平成18～ 22年度	表層水	300 (75)	0.85～1.8	ND	1.1～2.4
	下層水	300	0.33～2.0	—	0.49～2.3

*1 () 内は、 ^{134}Cs も対象とした試料数を示す。

*2 ND は検出下限値以下を示す。なお、令和3年度に調査した海水試料（表層水と下層水を合わせた全120試料）の分析・測定で得られた検出下限値の平均は、 ^{90}Sr で0.25、 ^{134}Cs で0.75、 ^{137}Cs で0.54 (mBq/L) であった。

*3 「—」は調査対象外を示す。

*4 平成23年度の表層水45試料及び下層水60試料については、ベータ線計測のため、 ^{134}Cs の影響を含んでいる可能性がある（次項6）の注1参照のこと。

②核燃海域

令和 3 年度分の海水試料として

前期：令和 3 年 6 月 7 日から 6 月 24 日まで

後期：令和 3 年 10 月 5 日から 10 月 18 日まで

の期間に当初計画に沿って試料採取を行った。採取すべき海水試料は全 22 測点・2 層で前期後期の 2 期に計 88 試料であり、当該期間において当初計画した場所で欠測することなく採取を完了した。

採取した海水試料（全 22 測点・2 層・2 期の計 88 試料）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲を平成 18 年度からの結果と併せて表 I-1-5-6 に示す。また、各測点の海水試料に含まれる放射性核種の放射能濃度のほか、試料分析に関する記録について資料 3-2-1 から資料 3-2-22 に示す。

令和 3 年度に核燃海域で採取した海水試料から検出された人工放射性核種はトリチウム、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ であり、これらの放射能濃度は直近の令和 2 年度の調査結果とほぼ同様の範囲であった。

(トリチウム)

表層水及び下層水に含まれるトリチウムの放射能濃度は、直近の令和 2 年度の調査結果とほぼ同様の範囲であった。

これらは、平成 18 年度より日本原燃株式会社が六ヶ所村再処理施設において実施したアクティブ試験（使用済み核燃料を用いた再処理施設の操業前試験）開始前の平成 13～17 年度に、バックグラウンドを把握するために行った調査結果から得られた放射能濃度の範囲内（表層：ND～0.24Bq/L、下層：ND～0.21Bq/L）にあった。

(^{90}Sr)

表層水及び下層水に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度については、直近の令和 2 年度の調査結果と同様に事故前 5 年間の範囲内かそれ以下であった。

(^{134}Cs 及び ^{137}Cs)

東電福島第一原発事故以降（平成 23 年度及び平成 24 年度）に一部の測点で検出されていた ^{134}Cs については、直近の令和 2 年度の調査結果と同様にすべての測点において検出されることはなかった。

また、表層水に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は 2.4mBq/L、下層水に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の最大値も 2.3mBq/L で事故前 5 年間の最大値（表層：2.4mBq/L、下層：2.1mBq/L）と同程度であった。

(²³⁹⁺²⁴⁰Pu)

表層水及び下層水に含まれる ²³⁹⁺²⁴⁰Pu の放射能濃度については、直近の令和 2 年度の調査結果と同様に事故前 5 年間の範囲内かそれ以下であった。

表 I-1-5-6 海水試料（核燃海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲

(単位：mBq/L、ただしトリチウムは Bq/L)

年度	試料名	試料数	トリチウム (※)	⁹⁰ Sr	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
令和 3 年度	表層水	44	ND*1 ~ 0.13	0.51 ~ 0.90	ND	1.3 ~ 2.4	ND ~ 0.0050
	下層水	44	ND ~ 0.14	ND ~ 0.89	ND	ND ~ 2.3	ND ~ 0.023
令和 2 年度	表層水	44	ND ~ 0.13	0.57 ~ 0.97	ND	1.1 ~ 2.3	ND ~ 0.0091
	下層水	44	ND ~ 0.097	ND ~ 0.92	ND	ND ~ 2.3	ND ~ 0.027
平成 31 (令和元)年度	表層水	44	ND ~ 0.16	0.45 ~ 0.99	ND	1.1 ~ 2.4	ND ~ 0.0056
	下層水	44	ND ~ 0.12	ND ~ 0.97	ND	ND ~ 2.2	ND ~ 0.031
平成 30 年度	表層水	44	ND ~ 0.12	0.48 ~ 1.2	ND	1.1 ~ 2.3	ND ~ 0.0080
	下層水	44	ND ~ 0.10	ND ~ 1.1	ND	ND ~ 2.2	ND ~ 0.025
平成 29 年度	表層水	44	ND ~ 0.21	0.53 ~ 1.0	ND	1.4 ~ 2.3	ND ~ 0.0058
	下層水	44	ND ~ 0.13	ND ~ 1.1	ND	ND ~ 2.2	ND ~ 0.023
平成 28 年度	表層水	44	ND ~ 0.14	0.61 ~ 1.3	ND	1.5 ~ 2.8	ND ~ 0.0058
	下層水	44	ND ~ 0.15	ND ~ 1.1	ND	ND ~ 2.4	ND ~ 0.026
平成 27 年度	表層水	44	ND ~ 0.17	0.62 ~ 1.2	ND	1.0 ~ 2.7	ND ~ 0.0052
	下層水	44	ND ~ 0.12	ND ~ 1.1	ND	ND ~ 2.4	ND ~ 0.024
平成 26 年度	表層水	44	ND ~ 0.18	0.57 ~ 1.1	ND	0.82 ~ 2.4	ND ~ 0.0054
	下層水	44	ND ~ 0.15	ND ~ 1.2	ND	ND ~ 2.3	ND ~ 0.023
平成 25 年度	表層水	44	ND ~ 0.16	0.65 ~ 1.2	ND	0.97 ~ 2.4	ND ~ 0.0064
	下層水	44	ND ~ 0.16	ND ~ 1.3	ND	ND ~ 2.3	0.0023 ~ 0.027

(続く)

表 I-1-5-6 海水試料（核燃海域）に含まれる放射性核種の放射能濃度範囲（続き）

年度	試料名	試料数	トリチウム (※)	⁹⁰ Sr	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
平成 24 年度	表層水	44	ND ~ 0.15	0.68 ~ 1.2	ND ~ 4.3	ND ~ 6.5	ND ~ 0.0076
	下層水	44	ND ~ 0.16	ND ~ 1.3	ND ~ 6.1	ND ~ 11	ND ~ 0.022
平成 23 年度	表層水	44	ND ~ 0.15	0.78 ~ 13	ND ~ 360	2.2 ~ 370	ND ~ 0.0095
	下層水	44	ND ~ 0.15	ND ~ 1.3	ND ~ 5.4	ND ~ 7.8	0.0024 ~ 0.03
平成 18 ~ 22 年度	表層水	208	ND ~ 1.3	0.73 ~ 1.6	ND	0.81 ~ 2.4	ND ~ 0.013
	下層水	208	ND ~ 0.27	ND ~ 1.7	ND	ND ~ 2.1	ND ~ 0.029

*1 ND は検出下限値以下を示す。なお、令和 3 年度に調査した海水試料（表層水と下層水を合わせた全 88 試料）の分析・測定で得られた検出下限値の平均は、トリチウムで 0.058 (Bq/L)、⁹⁰Sr で 0.27、¹³⁴Cs で 0.86、¹³⁷Cs で 0.61、²³⁹⁺²⁴⁰Pu で 0.0029 (mBq/L) であった。その他のガンマ線放出核種は検出されず、これらの検出下限値は概ね表 I-1-4-3 に示した検出目標レベルと同程度である。

(※) 核燃海域で採取したトリチウムの放射能分析結果のうち、平成 29 年度～令和 2 年度までの 4 か年に実施された調査結果の一部について、原子力規制庁より令和 3 年 9 月 28 日付で正誤表による訂正があった。この表に記載の放射能濃度範囲はこれらの訂正内容を反映させたものである。

(https://www.nsr.go.jp/news_only/20210930_01.html ; 令和 4 年 3 月閲覧)

【参考】アクティブ試験開始前のトリチウムの放射能濃度

年度	試料名	試料数	トリチウム (Bq/L)
平成 13 ~ 17 年度	表層水	160	ND*1 ~ 0.24
	下層水	160	ND ~ 0.21

*1 ND は検出下限値以下を示す。

6) 海洋環境試料に含まれる放射性核種の放射能濃度の経年変化

(1) 発電所海域における経年変化

昭和 58 年度から令和 3 年度までに実施した発電所海域の主要な漁場において収集した海産生物、海底土及び海水試料に含まれる ^{137}Cs 等の人工放射性核種の放射能濃度の経年変化を、それぞれ図 I-1-6-1~13、図 I-1-6-14~27 及び図 I-1-6-28~57 に示した(注 1)。なお、この調査期間にはチェルノブイリ原子力発電所事故(1986(昭和 61)年 4 月 26 日)や東電福島第一原発事故(2011(平成 23)年 3 月 11 日~)の時期を含んでいる。このため、放射性核種の放射能濃度変化について大きな変化が認められた時期があり、経年変化図を示すことで大まかな放射能濃度を俯瞰して把握し、併せて各海域間での比較を行うことなどを容易にするために、放射能濃度を対数軸での表示としている。

(注 1) 発電所海域の海水試料については、従来、各海域に設けた 4 つの測点のうち測点 1 の表層についてのみ、 ^{134}Cs と ^{137}Cs を区別できるガンマ線計測によって分析し、測点 1 の下層、測点 2~4 の表層及び下層の試料については、事実上、平成 22 年度までの試料中に ^{134}Cs が含まれていなかったことから、より低い検出下限値を達成できうるベータ線計測により分析されてきた。ベータ線計測では ^{134}Cs と ^{137}Cs を弁別して測定できないことから、同様の方法で実施された平成 23 年度の測点 1 の表層以外の分析結果は、事故由来の ^{134}Cs と ^{137}Cs を合わせた放射性セシウムになっている。そのため、海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化図にはそれらの和「 $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ 」として“△”で図示している(ただし、平成 23 年度のベータ線計測においては、 ^{137}Cs 測定のための計数効率を使用しているため、 ^{134}Cs の値がやや低めにでており、厳密な意味での ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計値ではない)。なお、平成 24 年度からは、全ての測点の表層及び下層において高純度ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーによって定量している。

(海産生物試料)

図 I-1-6-1~13 に示したとおり、海産生物試料に含まれる ^{137}Cs の長期的な経年変化を俯瞰すると、平成 23 年度は東電福島第一原発事故の影響により当該発電所がある福島第一海域を中心に、北海道、青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城及び静岡海域で ^{137}Cs の放射能濃度の一時的な上昇が顕著に認められた。これらの海域における ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は、平成 23 年度後期に福島第二海域で採取された海産生物試料のうちの 2 試料から得られたもので、その放射能濃度は 140Bq/kg-生鮮物であった^{※1}。 ^{137}Cs の放射能濃度は、翌年の平成 24 年度から平成 25 年度の調査結果では急激に減少しており、以後、その他の海域と同様に漸減傾向を示した(表 I-1-5-1 及び図 I-1-6-4 を参照)。

また、前述の「5)分析結果の(1)海産生物試料の分析結果」で述べたとおり、令和 3 年度の調査では、宮城、福島第二及び茨城海域で採取した試料(魚類)の一部から、事故前の過去 5 年間の調査で得られた ^{137}Cs の放射能濃度の最大値より高い ^{137}Cs が検出された。これらの海域で採取した海産生物試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は、福島第

※1 海洋生物環境研究所(2012).平成 23 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書。

二海域で採取された海産生物試料の一試料から得られたもので、その放射能濃度は0.72Bq/kg-生鮮物であった。その他の海域の試料では、事故前の過去5年間で得られた放射能濃度の範囲内であった。なお、放射能濃度の最大値である0.72Bq/kg-生鮮物は、国の定める食品中の放射性物質の基準値である100Bq/kg(注2)と比べて約1/139以下(注3)の放射能濃度であり、十分に低かった。

直近の令和2年度の調査では、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した試料(魚類)の一部から、事故前の過去5年間の調査で得られた¹³⁷Csの放射能濃度の最大値より高い¹³⁷Csが検出された。これらの海域で採取した海産生物試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度の最大値は、福島第一海域で採取された海産生物試料の一魚種から得られたもので、その放射能濃度は0.92Bq/kg-生鮮物であった^{※1}。その他の海域の試料では、事故前の過去5年間で得られた放射能濃度の範囲内であった。

(注2) 食品を対象とした放射性物質の基準値(平成24年厚生労働省令第31号、平成24年厚生労働省告示第129号及び第130号にて平成24年3月15日公布、同4月1日施行)のことで、食用とされる海産生物はその食品群の一部である「一般食品」に含まれる。食品中の放射性物質の基準値のうち「一般食品」に対しては、セシウムの基準値として「100Bq/kg」と制定されている。また、ここで言うセシウムとは「放射性物質のうち¹³⁴Csと¹³⁷Csという」とされ、この基準値は「東電福島第一原発事故で放出された放射性物質のうち、半減期が1年以上の全ての放射性核種(セシウム134、セシウム137、ストロンチウム90、プルトニウム、ルテニウム106)を考慮したもの」とされている。なお、放射性セシウム以外の放射性核種は測定に時間を要するため、放射性セシウムとしての基準値がそれぞれの食品群に対して明示されている。

(注3) 0.72Bq/kg-生鮮物の¹³⁷Cs濃度と国の基準値(100Bq/kg)を比べた場合の値。この試料からは¹³⁴Csは検出されておらず、¹³⁴Csと¹³⁷Csの合算値は0.72Bq/kg-生鮮物と仮定した場合、国の定める基準値と比べて約1/139以下の放射能濃度となる。

海産生物試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度は、魚類間での顕著な相違はみられなかったが、魚類とイカ・タコ類を比較した場合、例えば北海道海域(ミズダコ)、茨城海域(ミズダコ)、新潟海域(ミズダコ)、福井第一海域・福井第二海域(スルメイカ)では、東電福島第一原発事故以前から魚類に比較して低濃度の結果が得られており、令和3年度の調査でも同様であった。イカやタコなどの頭足類は、代謝過程が魚類と異なることが指摘^{※2}され、また、頭足類が属する無脊椎動物は海水とほぼ同じ浸透圧を持つため、海水に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度が増減するとイカ・タコ類の筋肉に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度もそれに連れて増減することが指摘^{※3}されているが、これらが本結果の主たる要因となって

※1 海洋生物環境研究所(2021)．令和2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。

※2 立田穰(2014)．海産生物への放射性セシウム移行に関するモデル解析について．Isotope News, 719, pp. 32-36.

※3 厚生労働省「食品に関するリスクコミュニケーション～食品中の放射性物質に対する取組について～」(平成27年11月6日開催、小田原市)発表資料(森田、福島第一原発事故による水産物の汚染の今)より(<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/iyaku/syoku-anzen/iken/dl/151119-1-odawara-2-all.pdf>)(令和4年3月閲覧)。

いるか否かについてを明らかにするには至っていない。なお、魚類と頭足類の濃縮係数（海産生物に含まれる放射能濃度/海水に含まれる放射能濃度）の推奨値を比較するとそれぞれ 100 及び 9 である^{※1}ことから、魚類とイカやタコなどの頭足類の一般的な違いであると考えられる。

後述する 2. 解析調査 の「2）(4)原子力発電所等周辺海域における海水及び海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度調査」では、核燃料（原子燃料）サイクル施設及び東電福島第一原発事故による影響が懸念される、青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域の計 5 海域で採取した海産生物試料のうち、ガンマ線スペクトロメトリーを実施した海産生物と同一筋肉試料の一部を分取して、トリチウムの放射能濃度を求めている。その結果、同調査で測定された海水に含まれるトリチウムの放射能濃度と同水準であり、バックグラウンドレベルであることを確認している。

（海底土試料）

図 I-1-6-14～27 に示したとおり、海底土試料に含まれる ^{137}Cs の調査開始から平成 22 年度までの調査結果において、採取した海域の底質の違い（砂質あるいは泥質）に起因するとみられるばらつきが認められた。底質が主に砂質の場合（例えば、島根、佐賀または鹿児島海域）には、検出下限値に近い放射能濃度である場合が多く、また、検出下限値以下であることも多いために経年変化が把握しにくい。泥質あるいはシルト質の場合（例えば、水深が 500m を超えるような新潟海域など）には砂質の場合と異なり有意に検出されることが多いため、経年とともに漸減傾向が認められた。

なお、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域の調査で得られた事故後の調査結果は、事故前の 5 年間と比較して高めの放射能濃度で推移したが、平成 23 年以降減少傾向が続いていることを示した（図 I-1-6-17～19 を参照）。

過年度の調査結果のうち、平成 23 年度において、宮城、福島第一、福島第二、茨城及び新潟海域で採取した海底土試料において、東電福島第一原発事故の影響による ^{134}Cs が検出され^{※2}、当該発電所がある福島第一海域を中心に、宮城、福島第一、福島第二、茨城及び新潟海域で ^{137}Cs の放射能濃度の一時的な上昇が顕著に認められた（図 I-1-6-17～19 及び図 I-1-6-21 を参照）。

平成 24 年度においても、宮城、福島第一及び福島第二海域では平成 23 年度と同水準の放射能濃度であることが確認され、とりわけ茨城海域では平成 23 年度に得られた放射能

※1 IAEA. (2004). IAEA technical reports series No. 422. International Atomic Energy Agency, Vienna.

※2 海洋生物環境研究所 (2012). 平成 23 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書.

濃度を超えていた（図 I-1-6-17～19 を参照）。

平成 25 年度においては、北海道、福島第二及び新潟海域で平成 24 年度に得られた放射能濃度をわずかに超えたものの、青森、宮城、福島第一、茨城及び静岡海域では平成 24 年度に得た放射能濃度を下回る結果となった（図 I-1-6-16～20 を参照）。それ以降、平成 26 年度においては、福島第一海域（測点 3）で 310Bq/kg-乾燥土^{※1}、平成 27 年度においては、福島第一海域（測点 2）で 320Bq/kg-乾燥土^{※2} となる東電福島第一原発事故以降で最も高い放射能濃度を観測した（図 I-1-6-18 を参照）。さらに、平成 28 年度においては、福島第二海域（測点 1）で 93Bq/kg-乾燥土^{※3}、平成 29 年度においては、事故前 5 年間の最大値より高い ¹³⁷Cs の放射能濃度を観測した宮城、福島第一、福島第二、茨城及び新潟海域の海底土試料のうち、最も高い放射能濃度は茨城海域（測点 1）で得られた 80Bq/kg-乾燥土^{※4} であった（図 I-1-6-17～19 及び図 I-1-6-21 を参照）。

これまでのところ、これらの海域における ¹³⁷Cs の放射能濃度の最大値は、事故直後ではなく、平成 27 年度に福島第一海域で採取された海底土試料から得られたもので、その放射能濃度は前述のとおり 320Bq/kg-乾燥土であった^{※2}。¹³⁷Cs の一時的な上昇が見られた海域における放射能濃度は、海域によって異なる変動が認められてきた。例えば、宮城海域では、平成 23 年度の調査結果で急激な ¹³⁷Cs の放射能濃度の増加を観測した後に、平成 24 年度以降には減少傾向に転じていた（図 I-1-6-17 を参照）。一方、福島第一、福島第二及び茨城海域においては、平成 23 年度の調査結果で急激な ¹³⁷Cs の放射能濃度の上昇を観測した後に、平成 24 年度から平成 27 年度にかけて一律に減少傾向は見えておらず、横ばいあるいは最大となる ¹³⁷Cs の放射能濃度を観測するなど、一定した変動傾向が見られない状況であった。その後、福島第一及び福島第二海域での調査結果では平成 28 年度から、茨城海域では平成 27 年度の調査結果から ¹³⁷Cs の放射能濃度は減少傾向に転じていた（図 I-1-6-18～19 を参照）。

これまで述べた比較的高い ¹³⁷Cs の放射能濃度が得られた背景やその変動要因としては、東電福島第一原発事故の影響が考えられる。後述する 2. 解析調査の「2）（3）海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査」においても ¹³⁴Cs が検出されていることから、事故前 5 年間の最大値より高い ¹³⁷Cs の放射能濃度が認

※1 海洋生物環境研究所（2015）.平成 26 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 委託業務成果報告書。

※2 海洋生物環境研究所（2016）.平成 27 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。

※3 海洋生物環境研究所（2017）.平成 28 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。

※4 海洋生物環境研究所（2018）.平成 29 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。

められたのは、東電福島第一原発事故の影響のためであると考えられる。

また、発電所海域で採取した海底土試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度と、同2. 解析調査の「1) 対照海域放射能調査」において実施した対照海域で採取した海底土試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度との比較を行ったところ、北海道、青森、宮城、静岡、新潟、石川、福井第一、福井第二、島根、愛媛、佐賀及び鹿児島海域は対照海域と同水準であった。このことから、これらの海域において検出された放射性セシウムは1950～60年代の大気圏核爆発実験による影響であると考えられる。ただし、¹³⁷Csの放射能濃度は海域毎に異なる変動が見られた。その要因は明らかでないが、例えば陸域環境での土壌を対象とした研究事例^{※1}を参考にすると、海底土の粒径、有機物等の違い、すなわち海底土の性状の違いによることが推測される。その内容については2. 解析調査の「2) (3)海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査」で補完した。

(海水試料)

① 表層水

図I-1-6-28～57のうち、偶数番号の図に示したとおり、表層で採取した海水試料に含まれる⁹⁰Sr及び¹³⁷Csの長期的な経年変化を俯瞰すると、⁹⁰Srは調査開始から平成22年度まで全15海域において漸減傾向を示した。また、¹³⁷Csは昭和61年度にはチェルノブイリ原子力発電所事故に起因するとみられる放射能濃度の上昇が認められた海域があった。しかし、その後、昭和62年度には概ね昭和60年度に観測した放射能濃度と同水準まで低下し、平成22年度まで漸減傾向が認められた。

過年度の調査結果では、平成23年度において、青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城及び静岡海域で採取した表層水から、東電福島第一原発事故の影響による¹³⁴Csが検出され(注4)^{※2}、併せて¹³⁷Csの放射能濃度は、測点間で差があるものの一時的な上昇が認められた(図I-1-6-28～57のうち、偶数番号の図を参照)。これらの海域における¹³⁷Csの放射能濃度の最大値は、平成23年度に福島第一海域の一部の測点で採取した海水試料(表層水)から得られたもので、その放射能濃度は1.4Bq/L(注5)であった^{※2}。一時的な上昇が見られた海域のうち、青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域における¹³⁷Csの放射能濃度は、翌年の平成24年度の調査結果では急激に減少したものの、平成28年度の調査ではわずかではあるが上昇傾向を示した後に、平成29年度以降には再び減少傾向が観

※1 Tsukada, H., Takeda, A., Hisamatsu, S. and Inaba, J. (2008). Concentration and specific activity of fallout ¹³⁷Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, **99**, 875-881.

※2 海洋生物環境研究所(2012).平成23年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書.

測され、その他の海域と同様に漸減傾向を示した（図 I-1-6-34～41 のうち、偶数番号の図を参照）。また、静岡海域における ^{137}Cs の放射能濃度は、平成 24 年度に急激に減少したもののわずかではあるが上昇傾向を示した。平成 28 年度に減少したものの平成 29 年度にわずかではあるが上昇した。平成 30 年度以降には減少に転じ、漸減傾向を示した（図 I-1-6-42 を参照）。

（注 4）各発電所海域に設定した 4 測点のうち、測点 1 の表層水に限ってゲルマニウム半導体検出器による定量を行っていたため、 ^{134}Cs と ^{137}Cs について弁別した定量結果を得ていたことによるもの。

（注 5）ベータ線計測による値であり、 ^{134}Cs の影響を含んでいる可能性がある（37 ページの（注 1）を併せて参照のこと）。

平成 24 年度は、平成 23 年度に ^{90}Sr の放射能濃度の大幅な上昇が認められた福島第一及び福島第二海域では事故前の ^{90}Sr の放射能濃度と同水準まで低下したものの、茨城海域においては同海域の事故後の最大値（13mBq/L）を示した^{※1}（図 I-1-6-38 及び図 I-1-6-40 を参照）。一方、 ^{137}Cs の放射能濃度は、平成 23 年度の調査で大幅な上昇が確認されたいずれの海域でも減少していることが認められ、とりわけ、北海道、静岡及び新潟海域では、事故前の ^{137}Cs の放射能濃度と同程度になった（図 I-1-6-32、図 I-1-6-42 及び図 I-1-6-44 を参照）。

平成 25 年度は、福島第二海域の一部の測点で平成 24 年度の約 3 倍の ^{90}Sr の放射能濃度であった^{※2}。また、茨城海域においては、平成 24 年度の概ね半分の ^{90}Sr の放射能濃度まで低下していた（図 I-1-6-40 を参照）。一方、 ^{137}Cs の放射能濃度は青森、福島第一及び福島第二海域で平成 24 年度と同水準、宮城及び茨城海域で平成 24 年度に比べ減少が認められた（図 I-1-6-34～40 のうち、偶数番号の図を参照）。また、静岡、新潟、石川、福井第一、福井第二及び愛媛海域ではわずかに ^{137}Cs の放射能濃度の上昇が認められたが、事故前の値を超えるものではなかった（図 I-1-6-42～48 のうち、偶数番号の図及び図 I-1-6-52 を参照）。

平成 26、27 及び 28 年度では、 ^{90}Sr の放射能濃度は全海域でほぼ事故前と同程度にまで減少していた（図 I-1-6-28～57 のうち、偶数番号の図を参照）。また、 ^{137}Cs の放射能濃度については、他の海域と比べると比較的高い結果が得られた福島第一、福島第二海域で減少が認められたものの、その他の海域では横ばいかごくわずかではあるものの上昇傾向が認められた（図 I-1-6-28～57 のうち、偶数番号の図を参照）。

平成 29 年度において、福島第一、福島第二、茨城及び静岡海域で事故前の過去 5 年間の最大値より高い ^{137}Cs が検出された。これらの海域における最大値は、福島第一海域（測点

※1 海洋生物環境研究所（2013）.平成 24 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書.

※2 海洋生物環境研究所（2014）.平成 25 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書.

4) で得られた 4.0mBq/L であり^{※1}、その他の海域の海水試料では、事故前の過去 5 年間の測定値の範囲内であった。ただし、西日本及び日本海の表層海水（北海道、静岡、新潟、石川、福井第一、福井第二、島根、愛媛、佐賀及び鹿児島）を中心に、東電福島第一原発事故以降、¹³⁷Cs の放射能濃度が事故前（平成 22 年度調査結果）に比較して高い状況が確認されている（図 I-1-6-32、図 I-1-6-42～57 のうち、偶数番号の図を参照）。これらの一部の海域で観測された平成 27 年度までの緩やかな ¹³⁷Cs の放射能濃度の上昇については、海流の循環により数年の年月を経て再び西日本や日本海を含む日本近海へ付加されたものの寄与と推定される（注 6）。

（注 6）例えば、事故後太平洋へ広く拡散したものの内、北太平洋亜熱帯モード水として低緯度海域を西進し、さらに黒潮によって日本近海へもたらされたものと推測される（Takata *et al.* (2018) *Environmental Science and Technology*, **52**, 2629-2637）。

なお、令和 3 年度調査で得られた発電所海域の ⁹⁰Sr について、令和 2 年度と同様に、2. 解析調査の「1) 対照海域放射能調査」において比較検討を行ったところ、全ての海域において対照海域と同水準の放射能濃度の範囲であり、東電福島第一原発事故の影響は認められなかった。

② 下層水

図 I-1-6-28～57 のうち、奇数番号の図に示したとおり、下層で採取した海水試料に含まれる ⁹⁰Sr 及び ¹³⁷Cs の放射能濃度については、令和 2 年度とほぼ同じ水準にあり、いずれの放射性核種についても、放射能濃度の顕著な増減は認められなかった。

これらの結果のうち、茨城海域で採取した下層水の試料の一部から、事故前の過去 5 年間の調査で得られた放射能濃度の最大値 (2.3mBq/L) よりわずかに高い ¹³⁷Cs の放射能濃度 (2.4mBq/L) を観測した。その他の海域の試料では、事故前の過去 5 年間で得られた測定値の範囲内であった。

なお、直近の令和 2 年度においては、福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した下層水の試料の一部から、事故前の過去 5 年間の調査で得られた放射能濃度の最大値 (2.3mBq/L) よりわずかに高い ¹³⁷Cs の放射能濃度を観測した。最大値は茨城（測点 4）で観測された 2.6mBq/L であり^{※2}、この値は事故前 5 年間の最大値の概ね 1.1 倍であった。一方、その他

※1 海洋生物環境研究所（2018）. 平成 29 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。

※2 海洋生物環境研究所（2021）. 令和 2 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。

の海域では、事故前 5 年間の範囲内であった。

発電所海域で採取した海水試料のうち、下層水に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の経年変化については、調査開始から平成 22 年度まで漸減傾向を示したが、平成 23 年度には東電福島第一原発事故の影響と見られる若干の上昇傾向が福島第一及び茨城海域で認められた（図 I-1-6-28～57 のうち、奇数の図を参照）。

平成 24 年度には福島第一海域の放射能濃度は事故前と同水準に戻ったものの、茨城海域の一部の測点では平成 23 年度と比較して 3 倍程度までの上昇が認められた（図 I-1-6-39 及び図 I-1-6-41 を参照）。しかしながら、平成 25 年度以降では茨城海域を含めた全ての海域で事故前の放射能濃度と同じ水準に戻った（図 I-1-6-41 を参照）。

一方、 ^{137}Cs の放射能濃度については、昭和 61 年度に若干の上昇傾向が認められた海域があるものの、それ以降は平成 22 年度まで全ての海域で漸減傾向を示したが、平成 23 年度には宮城、福島第一、福島第二、茨城、静岡及び新潟海域での上昇が認められた（図 I-1-6-28～57 のうち、奇数番号の図を参照）。これらの海域では、平成 24 年度において放射能濃度の減少が確認され、平成 25 年度以降は令和 3 年度を含め全海域でほぼ横ばいであった（図 I-1-6-37～45 のうち、奇数番号の図を参照）。

（2）核燃海域における経年変化

調査開始当初から令和 3 年度までに実施した核燃海域の主要な漁場において収集した海産生物に含まれる ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の経年変化を図 I-1-6-58～60 に示した。また、同海域に設けた 22 測点で採取した海底土に含まれる ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の経年変化を図 I-1-6-61～63 に、同測点で採取した海水に含まれる ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 及びトリチウム（海水のみ）の放射能濃度の経年変化を図 I-1-6-64～71 に示した。なお、発電所海域の結果と同様に、放射能濃度を対数軸で表示した。

核燃海域に設けた測点については、青森県六ヶ所村に建設が進む使用済み核燃料再処理施設（原子燃料サイクル施設）のアクティブ試験の第 1 ステップ開始に伴い平成 19 年度から調査測点を拡張（測点「1～16」を測点「1～22」へ 6 測点増加）し、併せて海産生物試料数は年間 20 試料から 30 試料へ、海底土試料数は年間 16 試料から 22 試料へ、海水試料数は年間 64 試料から 88 試料へそれぞれ増加とした。

（海産生物試料）

令和 3 年度において核燃海域で採取した海産生物試料では ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。 ^{137}Cs の放射能濃度については、令和 2 年度とほぼ同じ水準であり、いずれの放

放射性核種についても、放射能濃度の顕著な増減は認められなかった。

一方、長期的な経年変化を俯瞰すると、平成 23 年度に核燃海域で採取した海産生物試料において、東電福島第一原発事故の影響による ^{134}Cs が検出され^{※1}、併せて ^{137}Cs の放射能濃度は、測点間で差があるものの一時的な上昇が認められた(図 I-1-6-59 を参照)。 ^{137}Cs の放射能濃度の一時的な上昇が見られた海域における放射能濃度は、その後、減少傾向に転じており、その他の海域と同様に漸減傾向を示した(表 I-1-5-2 及び図 I-1-6-59 を参照)。なお、平成 24 年度においても平成 23 年度と同水準の放射能濃度(最大値:7.6Bq/kg-生鮮物)であった^{※2}が、平成 25 年度には若干の減少が認められたものの、比較的高い放射能濃度水準(最大値 4.1Bq/kg-生鮮物)を示した^{※3}。平成 26~31(令和元)年度においては、それら放射能濃度の減少傾向は継続していた。直近の令和 2 年度における ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は 0.21Bq/kg-生鮮物であり^{※4}、横ばい傾向にあった。

^{90}Sr については、海産生物内で骨に集まる性質ゆえに筋肉に含まれる ^{90}Sr は容易に検出できないほど低い放射能濃度である。直近の令和 2 年度の調査では、骨を含む全身を試料として供したカタクチイワシから ^{137}Cs と比べると極めて低い放射能濃度であるものの、0.0083Bq/kg-生鮮物の ^{90}Sr が検出された^{※4}。

$^{239+240}\text{Pu}$ については、令和 3 年度に調査した 30 試料について、魚類では骨を含む全身を分析に供したカタクチイワシから極めて低い放射能濃度 0.00094Bq/kg-生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。また、イカ・タコ類の一部から極めて低い放射能濃度ではあるが最大で 0.00062Bq/kg-生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。平成 30 年度に採取した試料では、イカ・タコ類の一部から ^{90}Sr や ^{137}Cs と比べると極めて低い放射能濃度ではあるが 0.00039Bq/kg-生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された^{※5}。また、直近の令和 2 年度に調査した試料についても、イカ・タコ類の一部から 0.00057Bq/kg-生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された^{※4}。

また、後述する 2. 解析調査の「1) 対照海域放射能調査」において実施した原子力発電所等、核燃料(原子燃料)サイクル施設及び東電福島第一原発事故の影響が及ばないと考えられる対照海域で採取した海産生物試料から得た ^{137}Cs の放射能濃度と核燃海域で採取した海産生物試料から得た放射能濃度は同水準であった。

※1 海洋生物環境研究所(2012).平成 23 年度海洋環境放射能総合評価事業成果報告書。

※2 海洋生物環境研究所(2013).平成 24 年度海洋環境放射能総合評価事業成果報告書。

※3 海洋生物環境研究所(2014).平成 25 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書。

※4 海洋生物環境研究所(2021).令和 2 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。

※5 海洋生物環境研究所(2019).平成 30 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。

さらに、後述する 2. 解析調査の「2）(4)原子力発電所等周辺海域における海水及び海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度調査」では、核燃海域で採取した海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度を測定しており、その結果からは東電福島第一原発事故の影響は認められなかった。

(海底土試料)

表 I-1-5-4 に示したとおり、令和 3 年度において、核燃海域で採取した海底土試料に含まれる ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度については、令和 2 年度とほぼ同じ放射能濃度の水準にあり、いずれの放射性核種についても、放射能濃度の顕著な増減は認められなかった。

一方、長期的な経年変化を俯瞰すると、平成 23 年度から平成 25 年度にかけてわずかではあるものの ^{137}Cs の放射能濃度が上昇傾向を示したが、平成 26 年度には減少傾向に転じ、その後は発電所海域と同様に漸減傾向を示した (図 I-1-6-62 を参照)。

核燃海域で採取した海底土試料に含まれる ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、発電所海域でのこれまでの調査結果と同様に、採取を行った海域の底質の性状によってその放射能濃度が変動していた (後述する 2. 解析調査の「2）(3)海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査」、資料 2-2 及び資料 4-1 を参照)。3 核種 (厳密には 4 核種) の放射能濃度は、底質が砂質の場合には比較的低くなる一方で、泥質あるいはシルト質などの場合には比較的高くなる傾向を示す。この傾向は、特に ^{90}Sr で顕著であり、砂質の場合はほとんどの試料で検出下限値以下であった。令和 3 年度の調査では、令和 2 年度の調査結果と同様、いずれの放射性核種の放射能濃度も事故前 5 年間の範囲内かそれ以下であった。

また、後述する 2. 解析調査の「1) 対照海域放射能調査」において実施した原子力発電所等、核燃料 (原子燃料) サイクル施設及び東電福島第一原発事故の影響が及んでいないと考えられる対照海域と核燃海域で採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の比較を行ったところ、核燃海域は対照海域と同水準であった。このことから、検出された ^{137}Cs は 1950~60 年代に北半球を中心に盛んに実施された大気圏核爆発実験に起因するものであると考えられる。ただし、 ^{137}Cs の放射能濃度には変動が見られ、その要因は明らかでないが、例えば陸域環境での土壌を対象とした研究事例^{※1}を参考にすると、海底土の粒

※1 Tsukada, H., Takeda, A., Hisamatsu, S. and Inaba, J. (2008). Concentration and specific activity of fallout ^{137}Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, **99**, 875-881.

径、有機物等の違い、すなわち海底土の性状の違いによることが推測される。その詳細は 2. 解析調査の「2）(3)海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査」に示した。

このほか、2. 解析調査の「1) 対照海域放射能調査」において、核燃海域における海底土に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度と比較検討を行った結果、対照海域と同水準であること、さらに 2. 解析調査の「2）(1) 海洋環境における $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比モニタリング」において行った、日本全国の発電所海域における海底土の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比が事故前後において大きな違いがないことから、東電福島第一原発事故の影響は認められなかった。

(海水試料)

令和 3 年度において核燃海域で採取した海水試料に含まれるトリチウム、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度については、令和 2 年度とほぼ同じ放射能濃度の水準にあり、いずれの放射性核種についても、放射能濃度の顕著な増減は認められなかった（表 I-1-5-6 を参照）。

一方、長期的な経年変化を俯瞰すると、平成 23 年度に核燃海域で採取した海水試料（表層水及び下層水）において、東電福島第一原発事故の影響による ^{134}Cs が検出され（注 7）、併せて ^{137}Cs の放射能濃度において緩急の差があるものの一時的な上昇が認められた（図 I-1-6-68～69 を参照）。

（注 7）各発電所海域に設定した 4 測点のうち、測点 1 の表層水に限ってゲルマニウム半導体検出器による定量を行っていたため、 ^{134}Cs と ^{137}Cs について弁別した定量結果を得ていたことによるもの（前述 注 4 と同じ）。

平成 24 年度の調査結果では急激な減少が認められ、平成 25 年度も含めて減少傾向に転じた。しかし、平成 26 年度から令和 3 年度の調査結果では、ばらつきが生じていたが概ね横ばいの傾向であった（図 I-1-6-68～69 を参照）。

核燃海域で採取した海水試料に含まれるトリチウム、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の経年変化を見ると、トリチウムの放射能濃度では、表層水及び下層水とも平成 3 年度からほぼ一定の放射能濃度で推移してきたが、平成 19 年度及び平成 20 年度には表層水試料の一部に一時的な上昇が確認されている（最大値：1.3Bq/L）※1（図 I-1-6-64～65 を

※1 海洋生物環境研究所（2009）.平成 20 年度海洋環境放射能総合評価事業成果報告書。

参照)。これは、青森県六ヶ所村に建設が進む使用済み核燃料再処理施設（原子燃料サイクル施設）のアクティブ試験に伴う管理放出に起因するものと推定される。なお、翌年の平成 21 年度に実施した調査では同試験開始前（平成 13 年度から平成 17 年度）の放射能濃度と同水準まで戻っており、令和 3 年度においても直近の令和 2 年度に得られた放射能濃度と同じようにアクティブ試験開始前に得られた調査結果と同様の変動範囲内であった（図 I-1-6-64～65 を参照）。

^{90}Sr の放射能濃度は、平成 23 年度前期調査を実施した一部の測点（福島県沖合に近い測点 22）で採水した表層水から東電福島第一原発事故に起因するとみられる放射能濃度（13mBq/L）が検出された事例があったが、表層水及び下層水とも平成 3 年度から平成 28 年度まで漸減傾向を示しており、令和 3 年度も直近の令和 2 年度と同水準の放射能濃度であった（図 I-1-6-66～67 を参照）。

^{137}Cs の放射能濃度は、表層水及び下層水とも平成 3 年度から平成 22 年度までは漸減傾向を示してきたが、平成 23 年度は東電福島第一原発事故を受けて顕著な濃度上昇が確認され、測点 22 の表層水で 370mBq/L であった（図 I-1-6-68～69 を参照）。

平成 24 年度は、表層水及び下層水から得られた放射能濃度は平成 23 年度に比べ減少傾向にあった。平成 26 年度から平成 27 年度にかけてわずかに放射能濃度の上昇傾向が観測された（前述の 6）（1）の注 6 を参照）が、平成 28 年度には減少傾向となり、以後令和 3 年度までの結果では表層水及び下層水とも一部を除きほぼ事故前 5 年間で得られた放射能濃度と同水準であった（図 I-1-6-68～69 を参照）。

$^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、表層水及び下層水とも平成 3 年度から平成 22 年度まで穏やかな漸減傾向を示しており、令和 3 年度もその傾向は維持され、直近の令和 2 年度と同水準の放射能濃度であった（図 I-1-6-70～71 を参照）。

また、核燃海域で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ について、2. 解析調査の「1）対照海域放射能調査」において比較検討を行ったところ、全ての海域において対照海域と同程度の放射能濃度であったことから、東電福島第一原発事故の影響は認められなかった。

海産生物、海底土及び海水に含まれる放射性核種の放射能濃度について、長期的な経年変化を俯瞰して把握し、併せて海域間での比較を容易にするための工夫として、放射能濃度(縦軸)を対数として図化している(主目盛は1桁ずつ上がる)。また、海産生物試料のうち、黒字は計画時の魚種、青字は代替として供した魚種である。

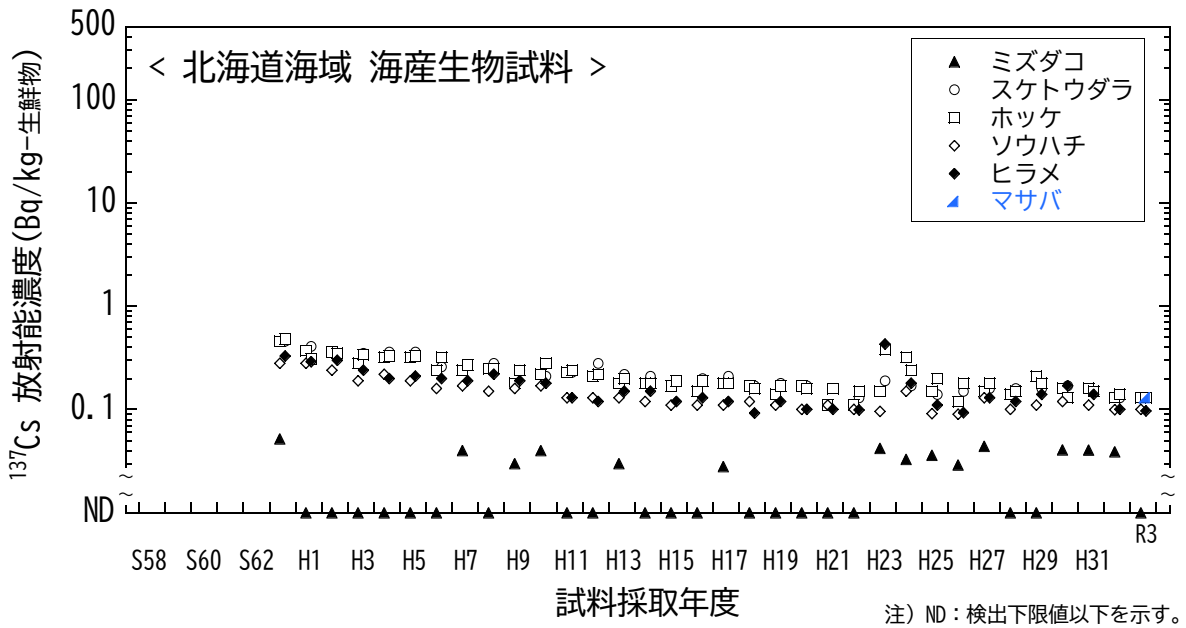


図 I-1-6-1 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (北海道海域)

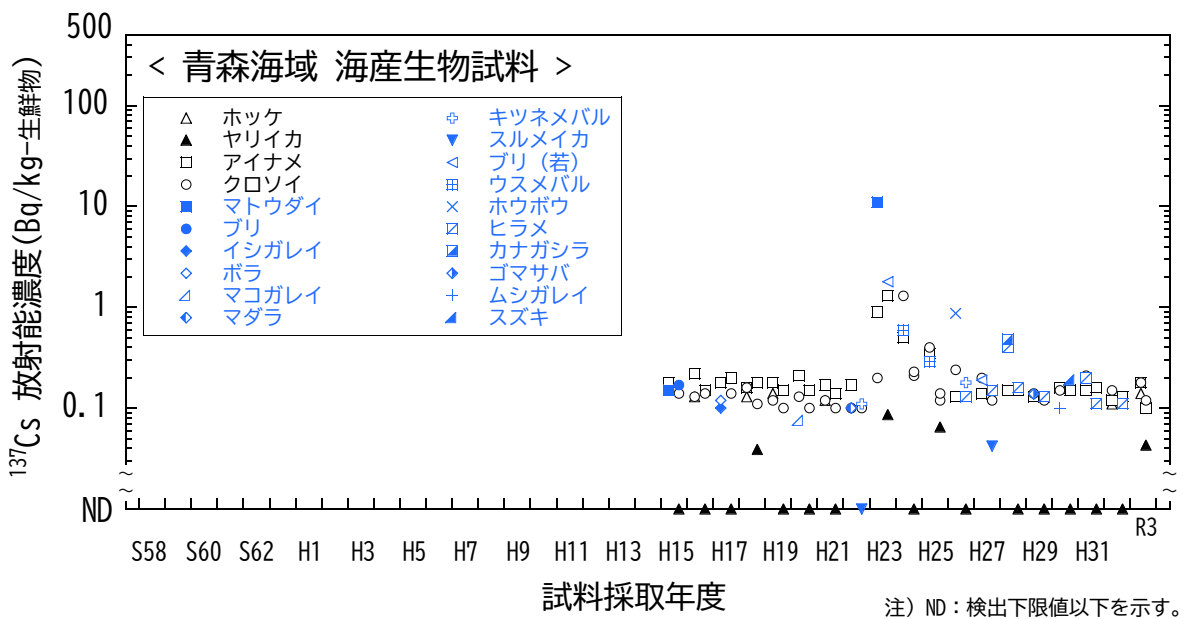


図 I-1-6-2 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (青森海域)

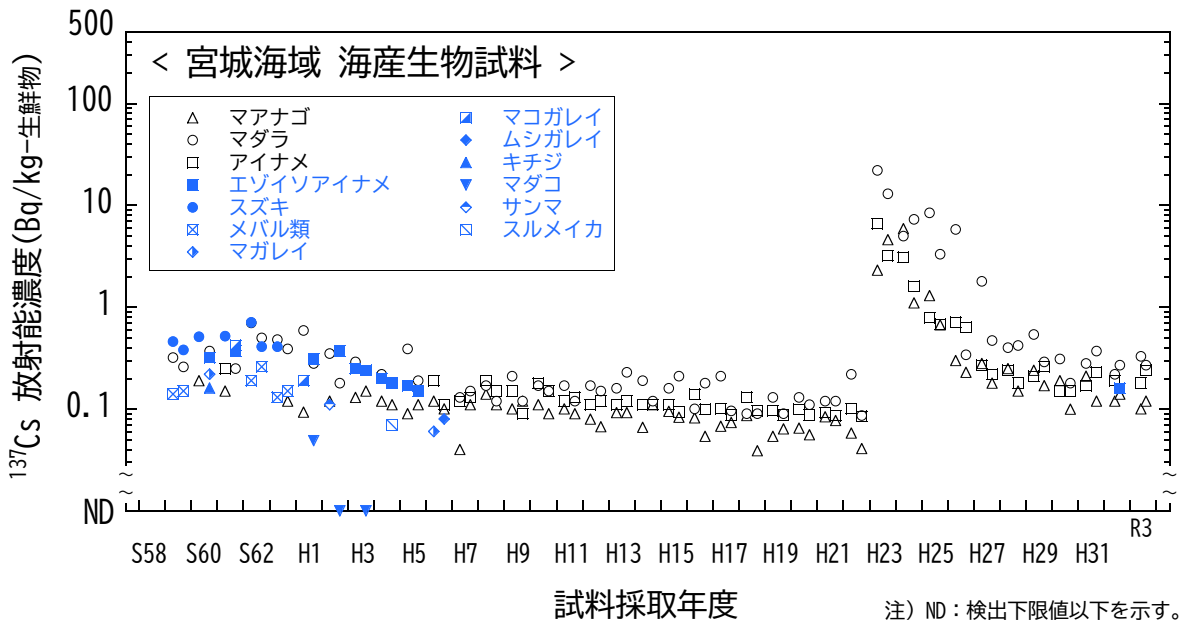


図 I-1-6-3 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (宮城海域)

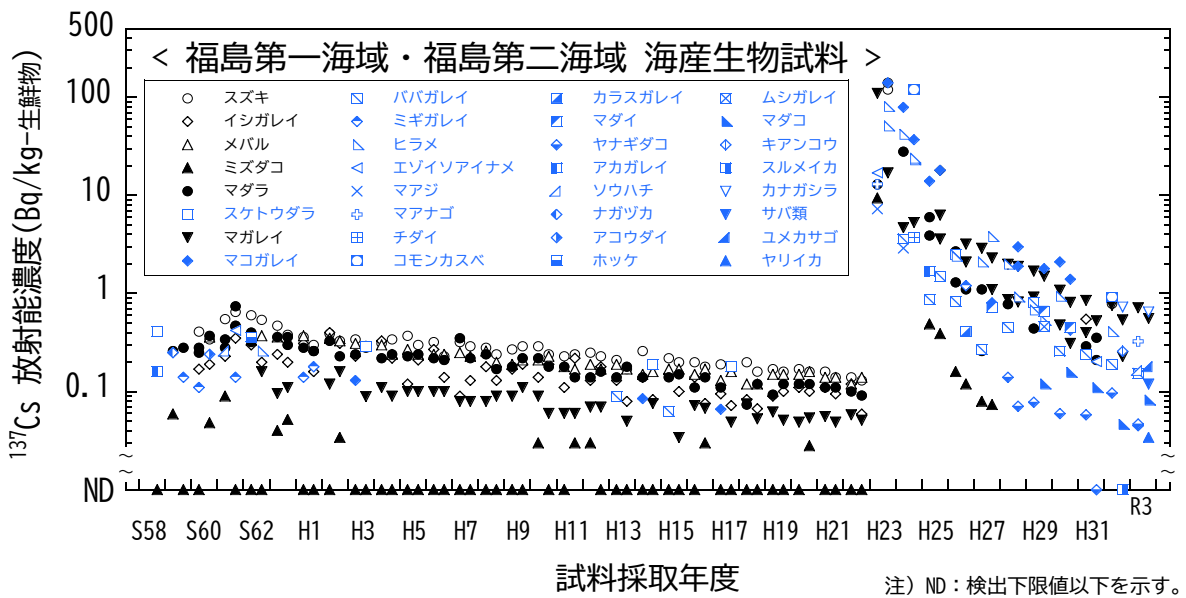


図 I-1-6-4 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (福島第一海域・福島第二海域)

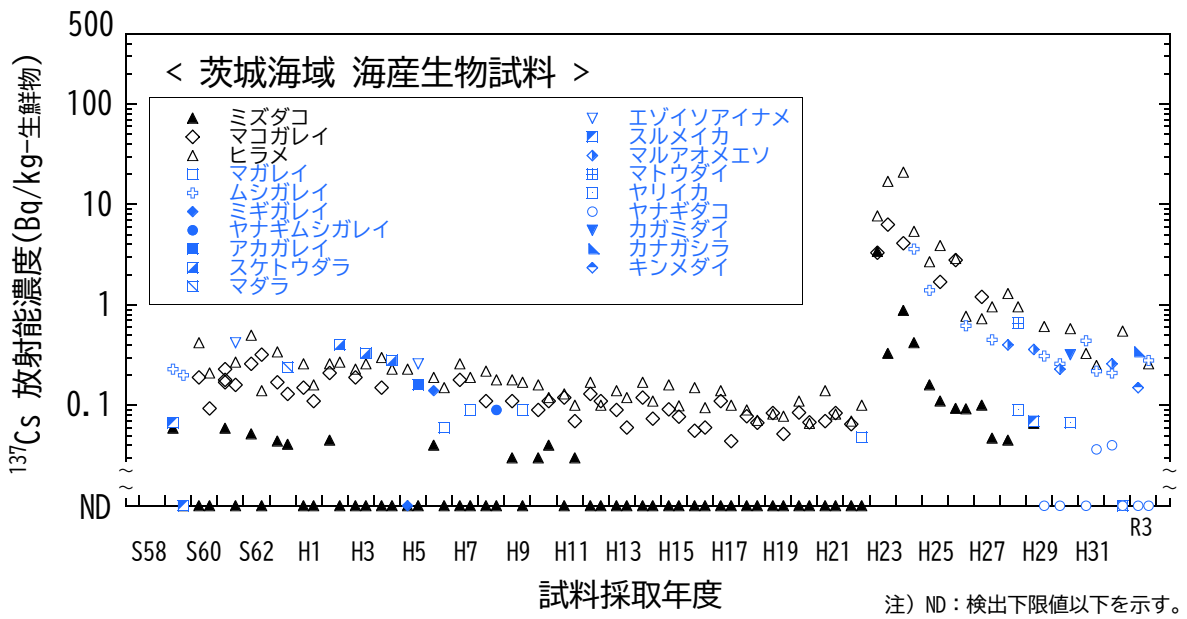


図 I-1-6-5 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化（茨城海域）

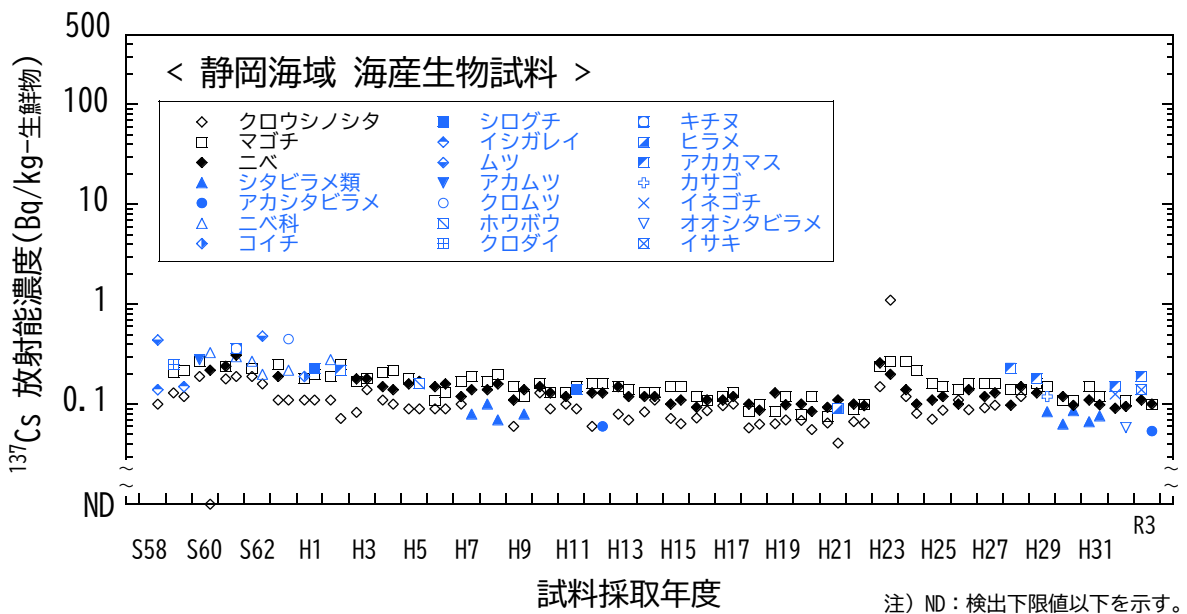


図 I-1-6-6 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化（静岡海域）

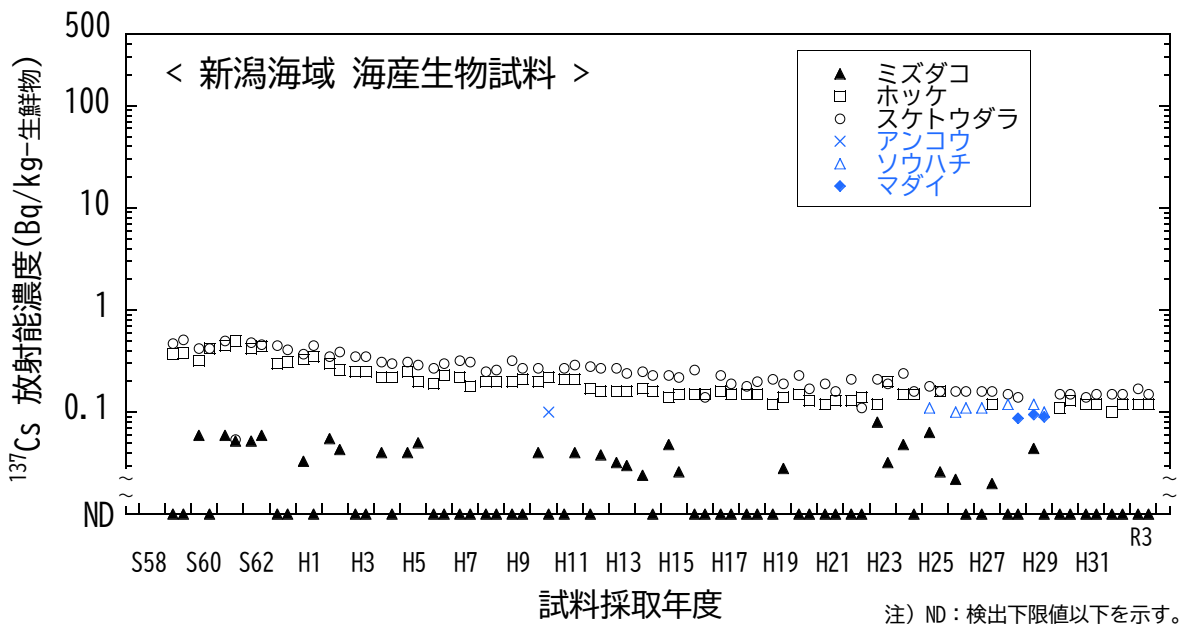


図 I-1-6-7 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (新潟海域)

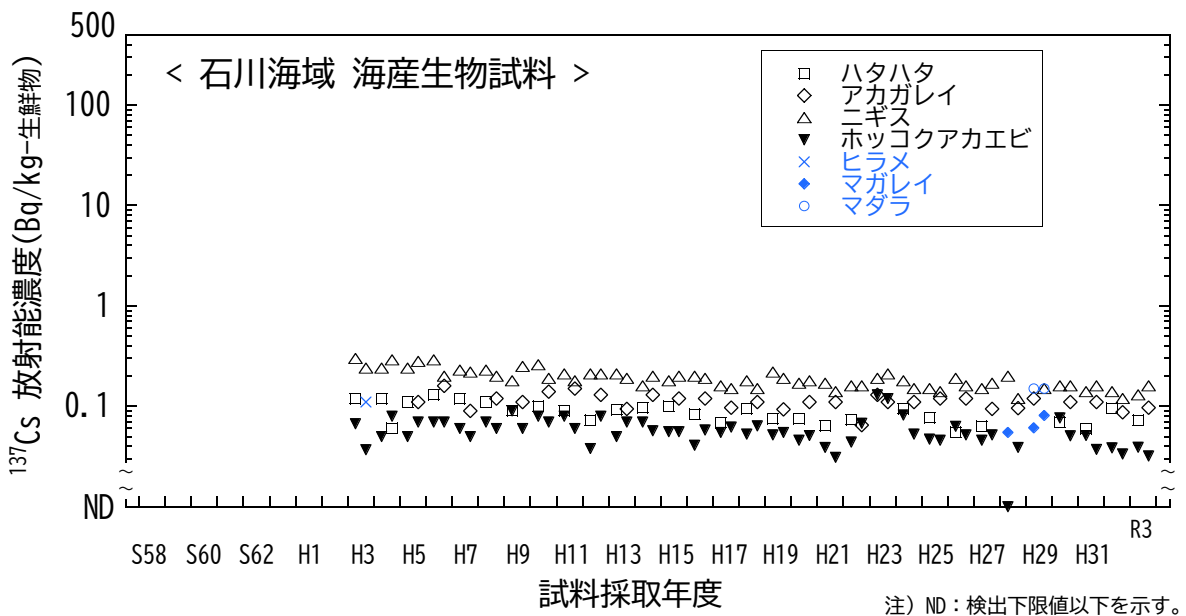


図 I-1-6-8 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (石川海域)

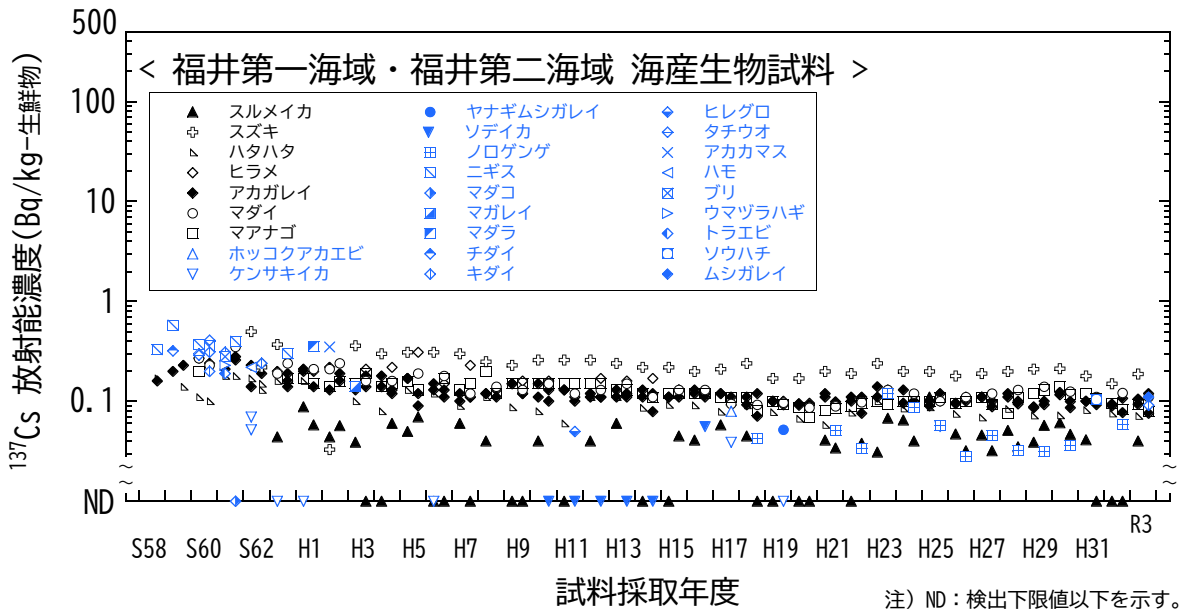


図 I-1-6-9 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (福井第一海域・福井第二海域)

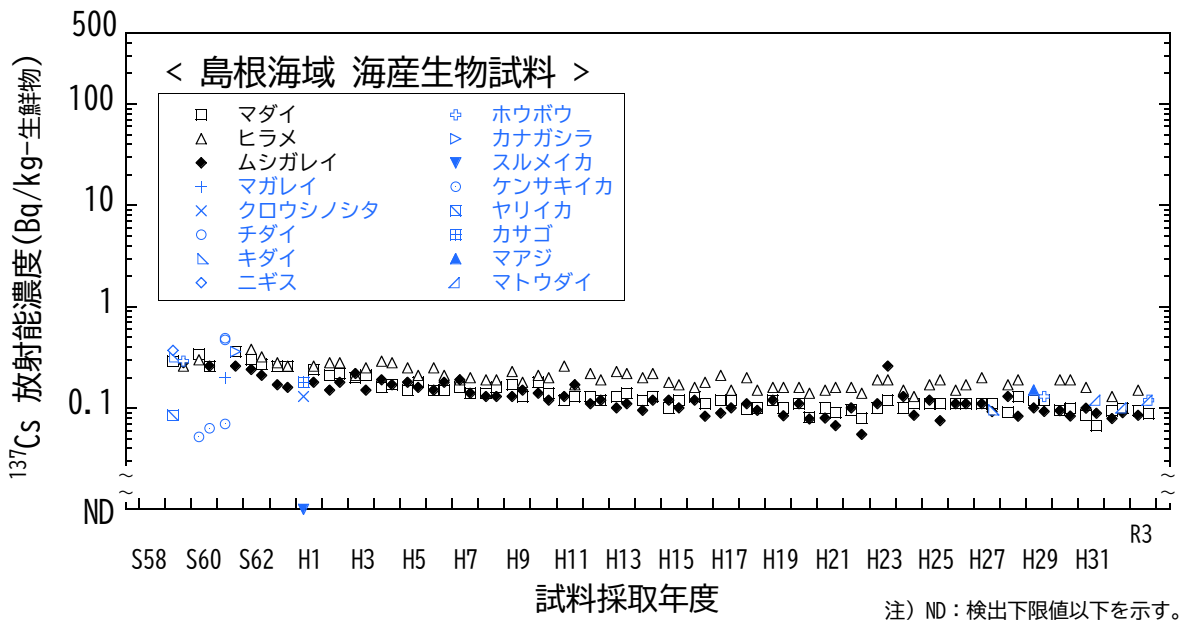


図 I-1-6-10 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (島根海域)

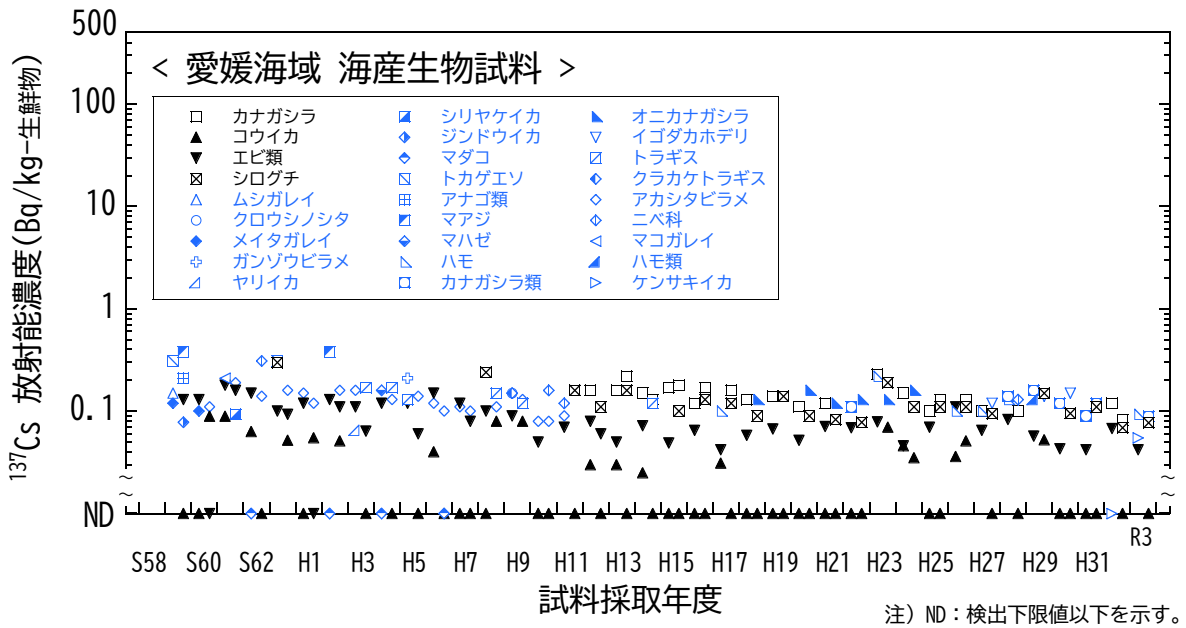


図 I-1-6-11 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (愛媛海域)

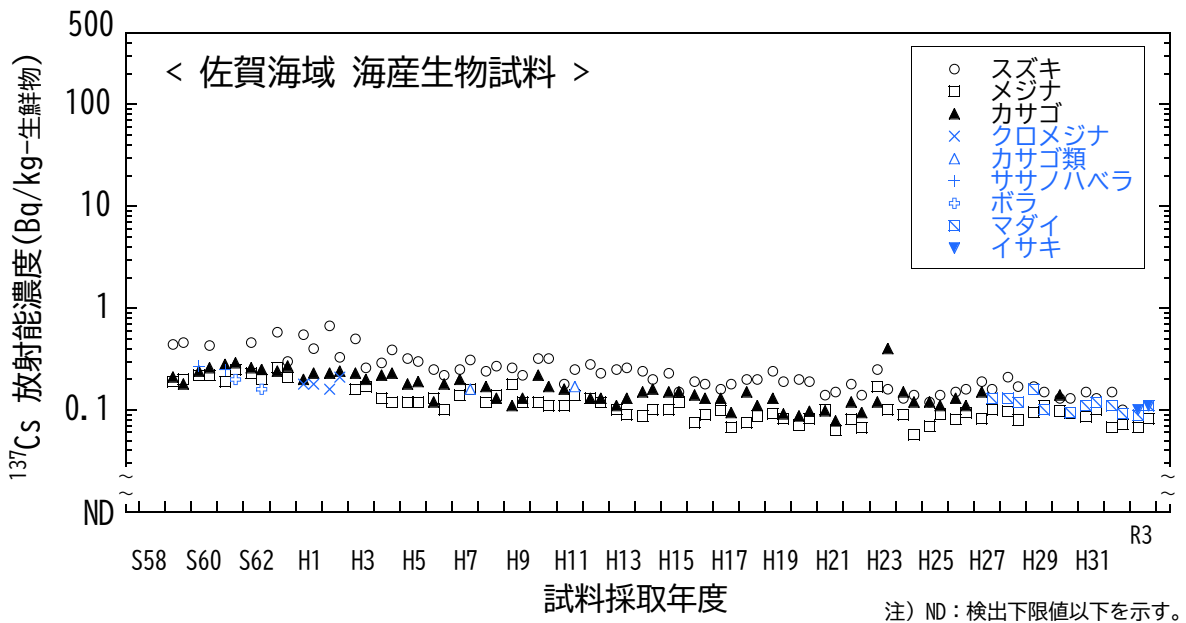


図 I-1-6-12 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (佐賀海域)

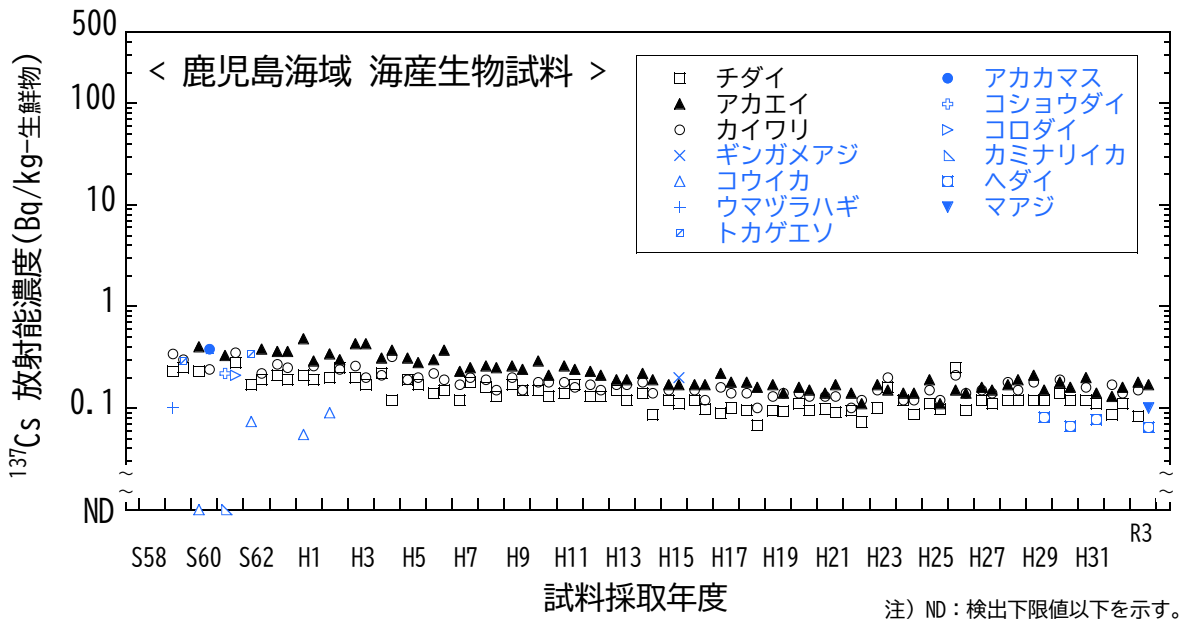
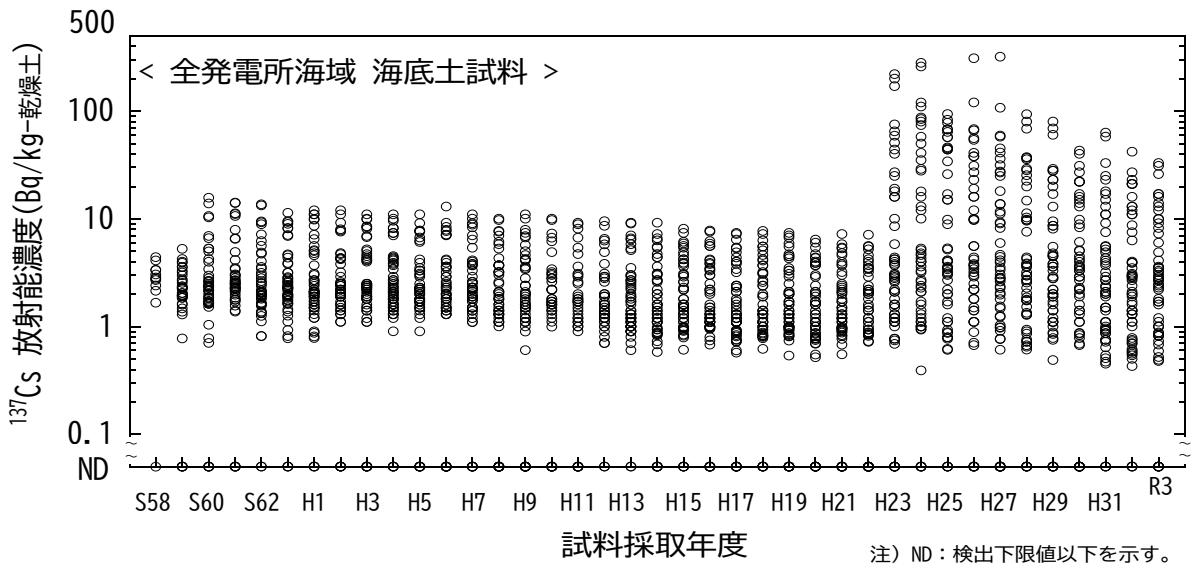


図 I-1-6-13 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (鹿児島海域)



昭和60年度以降、新潟、福井第一及び福井第二海域において採取点を変更した。

図 I-1-6-14 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (全発電所海域)

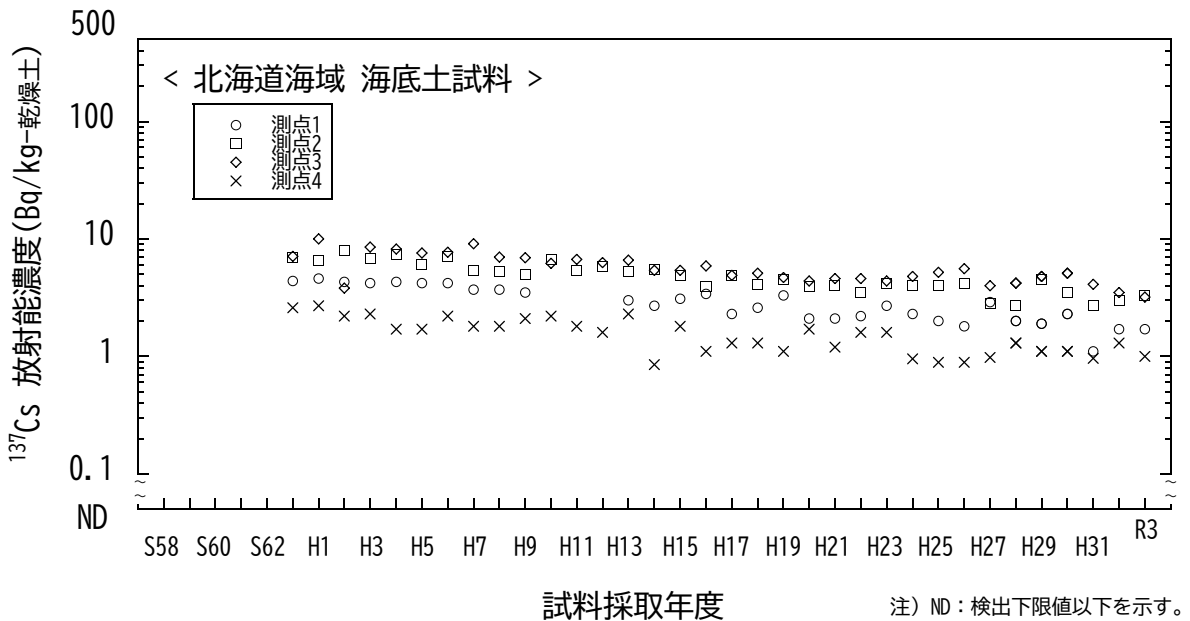


図 I-1-6-15 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (北海道海域)

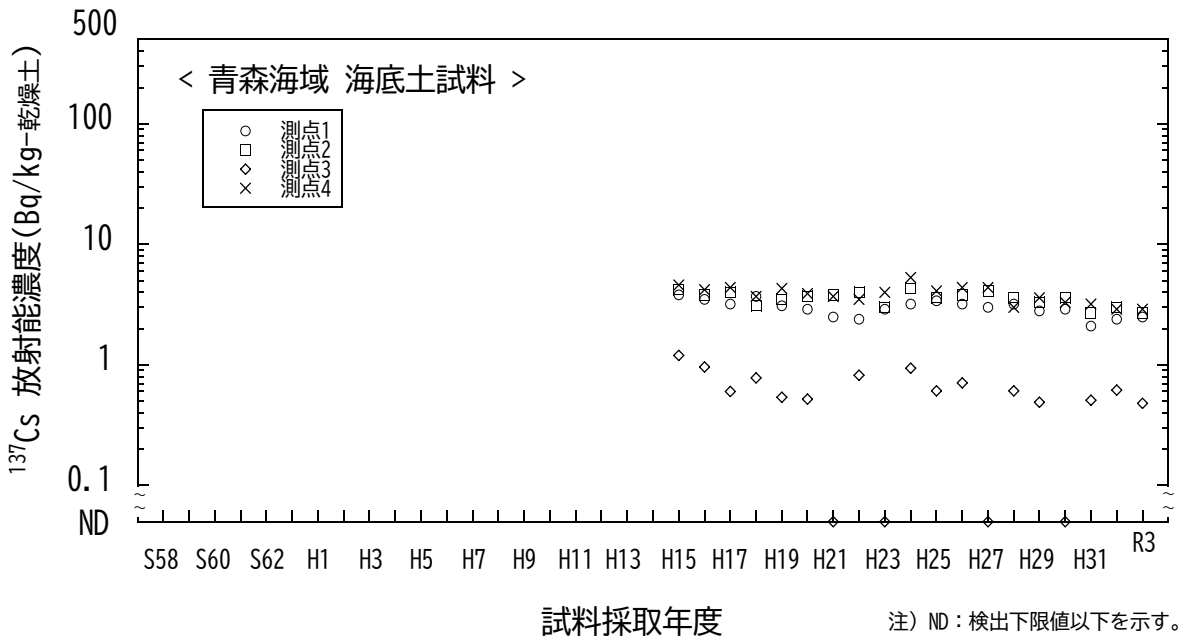


図 I-1-6-16 海底土試料の ¹³⁷Cs 放射能濃度の経年変化 (青森海域)

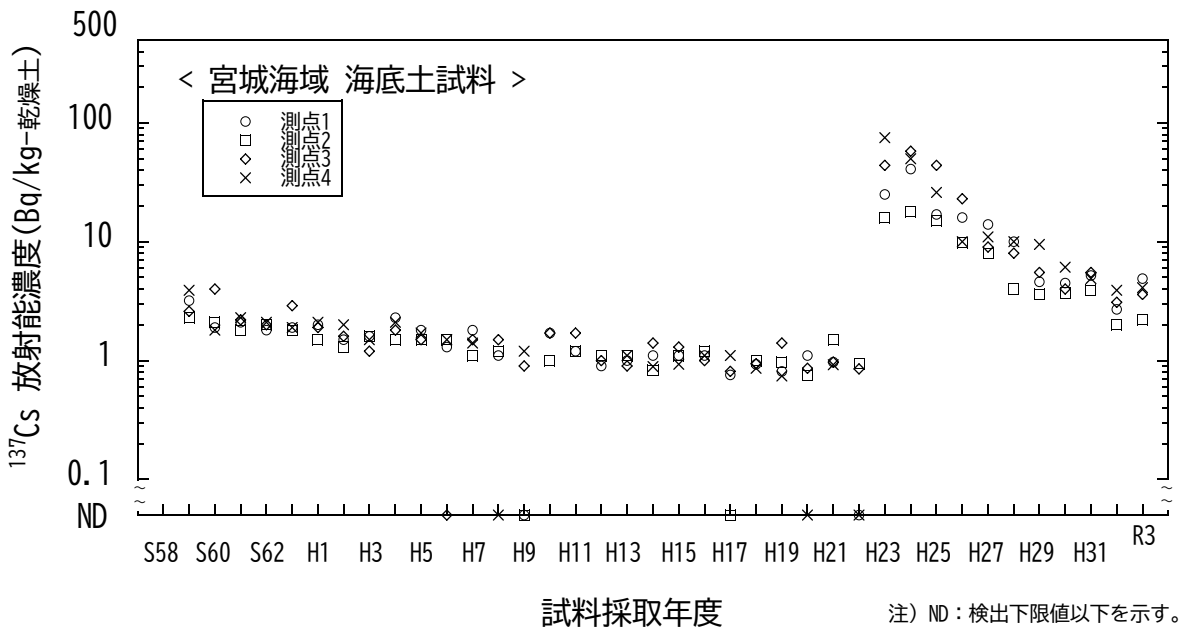


図 I-1-6-17 海底土試料の ¹³⁷Cs 放射能濃度の経年変化 (宮城海域)

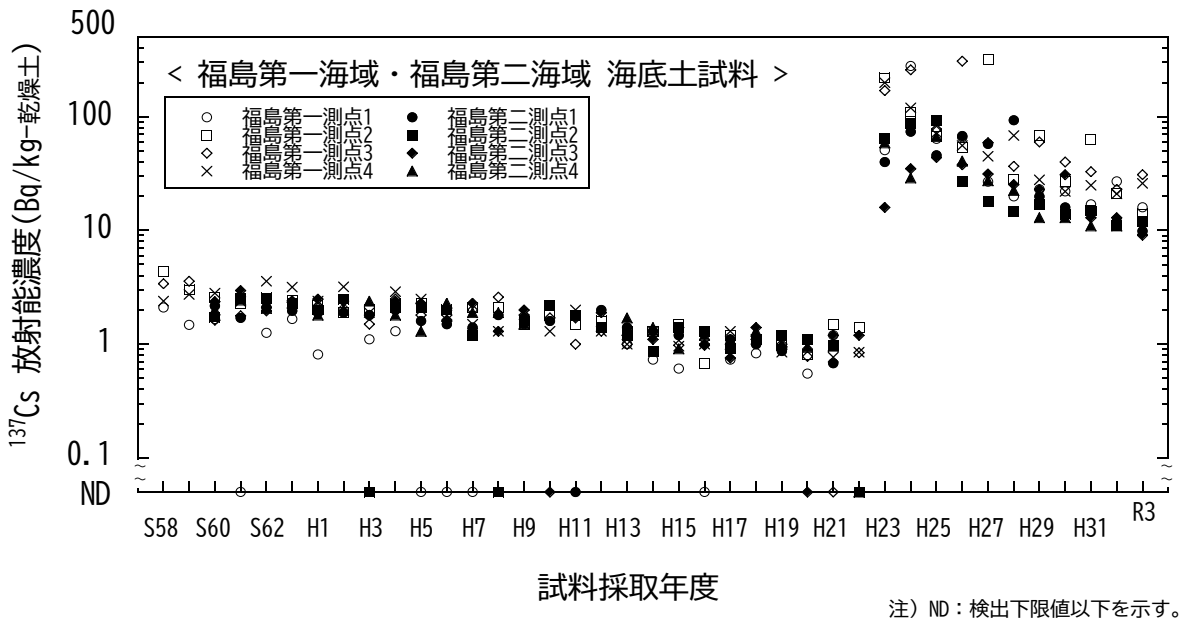


図 I-1-6-18 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (福島第一海域・福島第二海域)

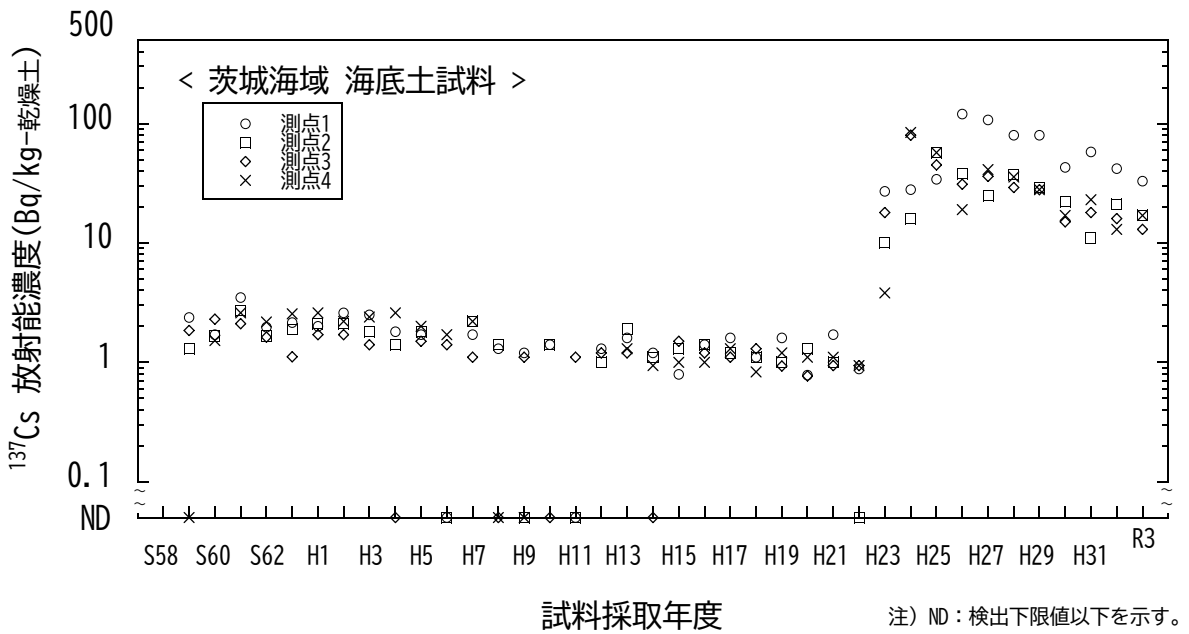


図 I-1-6-19 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (茨城海域)

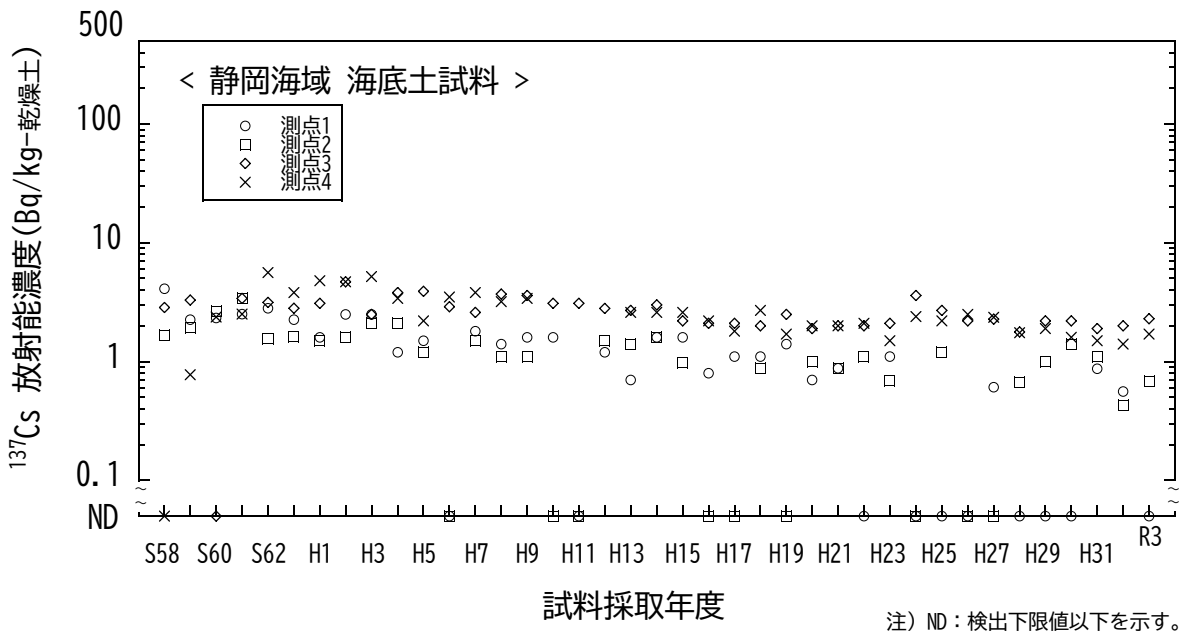


図 I-1-6-20 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (静岡海域)

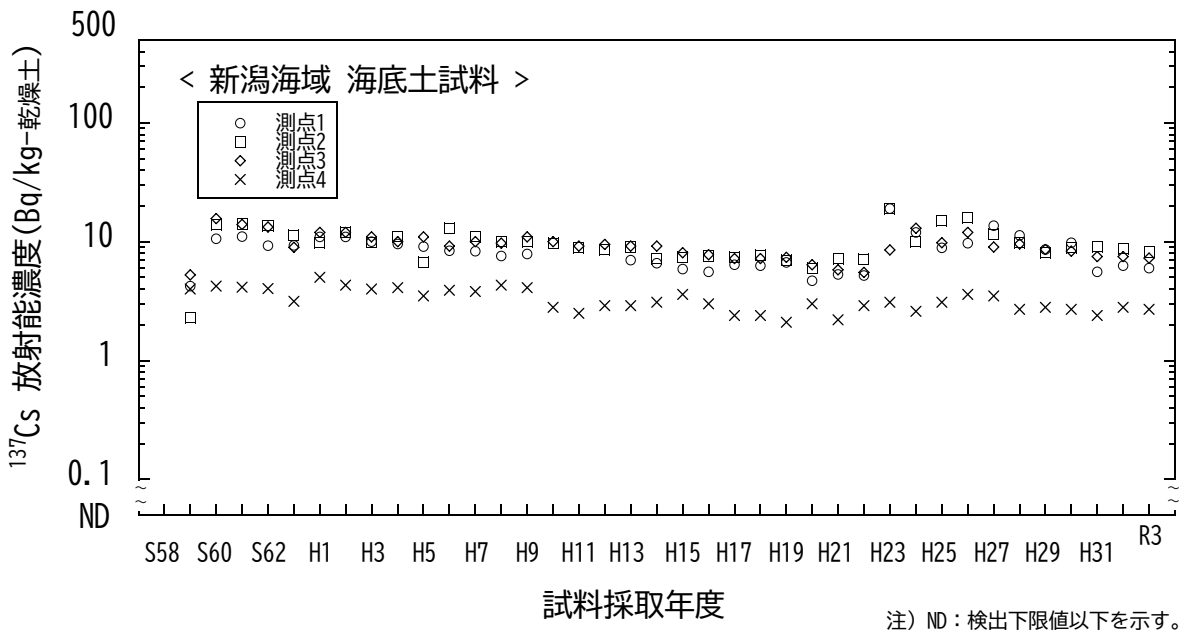


図 I-1-6-21 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (新潟海域)

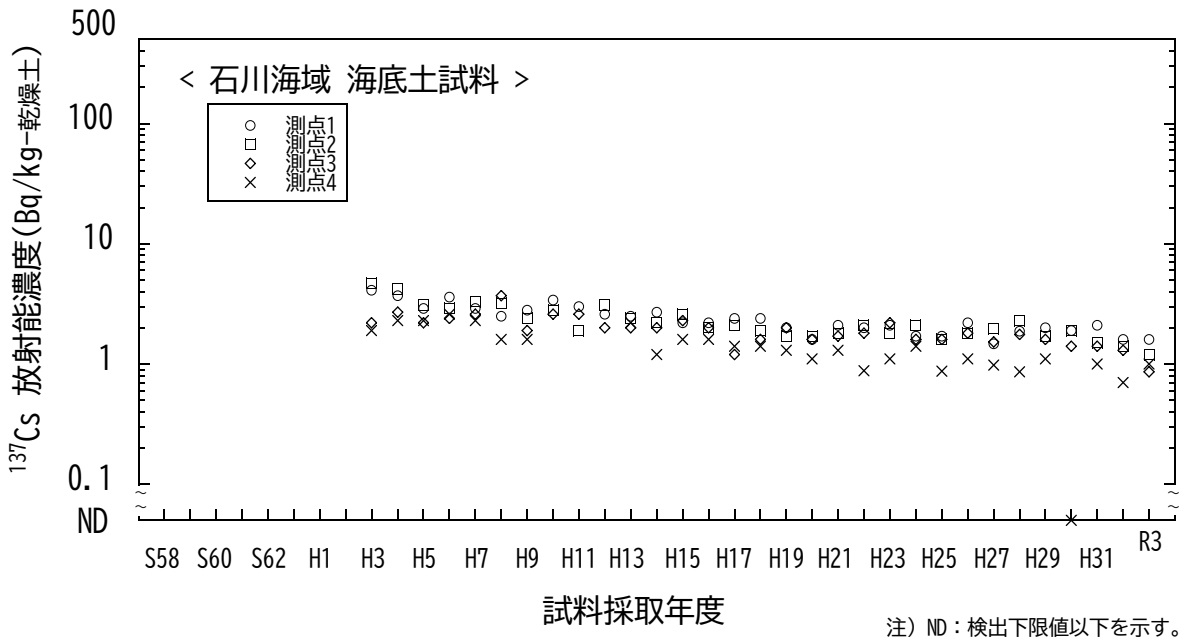


図 I-1-6-22 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (石川海域)

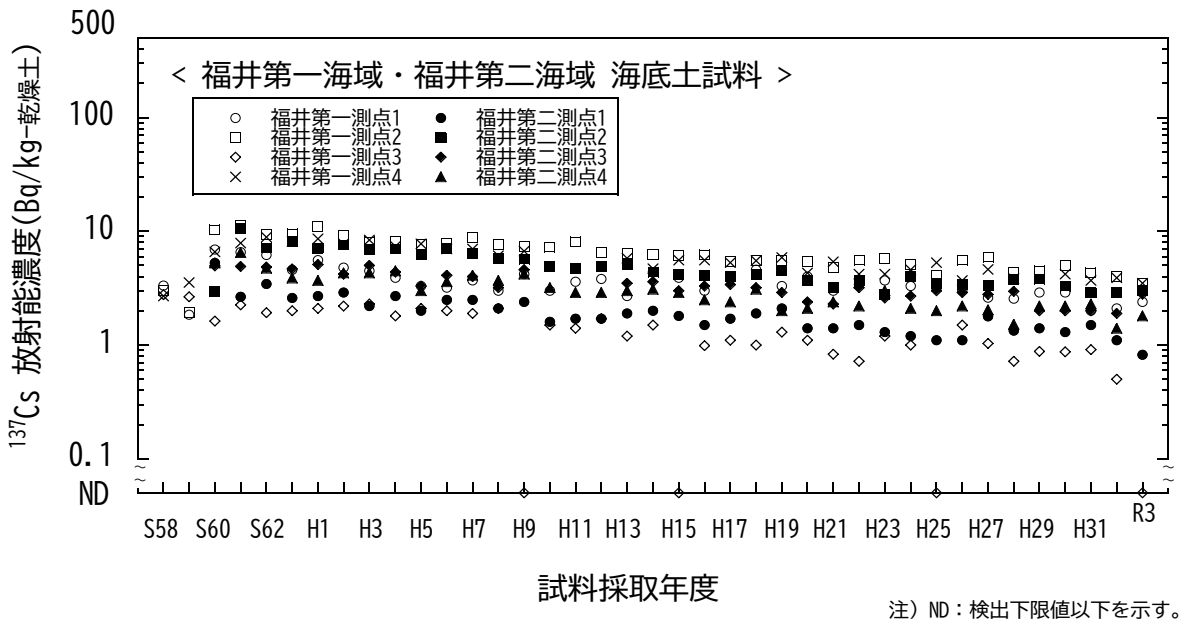


図 I-1-6-23 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (福井第一海域・福井第二海域)

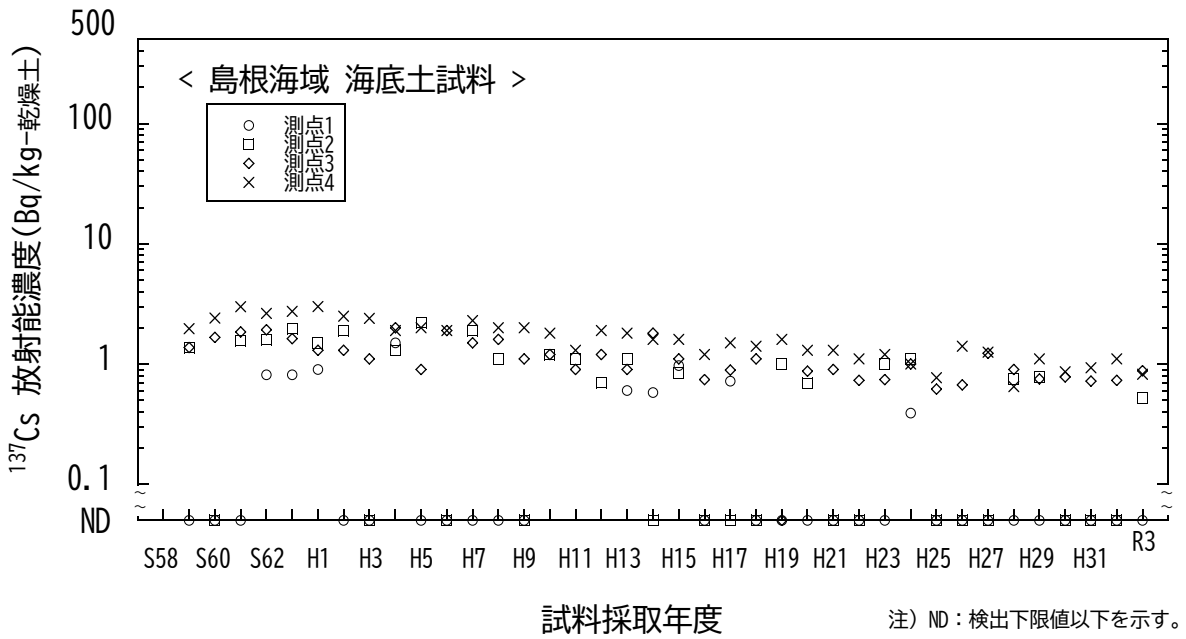


図 I-1-6-24 海底土試料の ¹³⁷Cs 放射能濃度の経年変化 (島根海域)

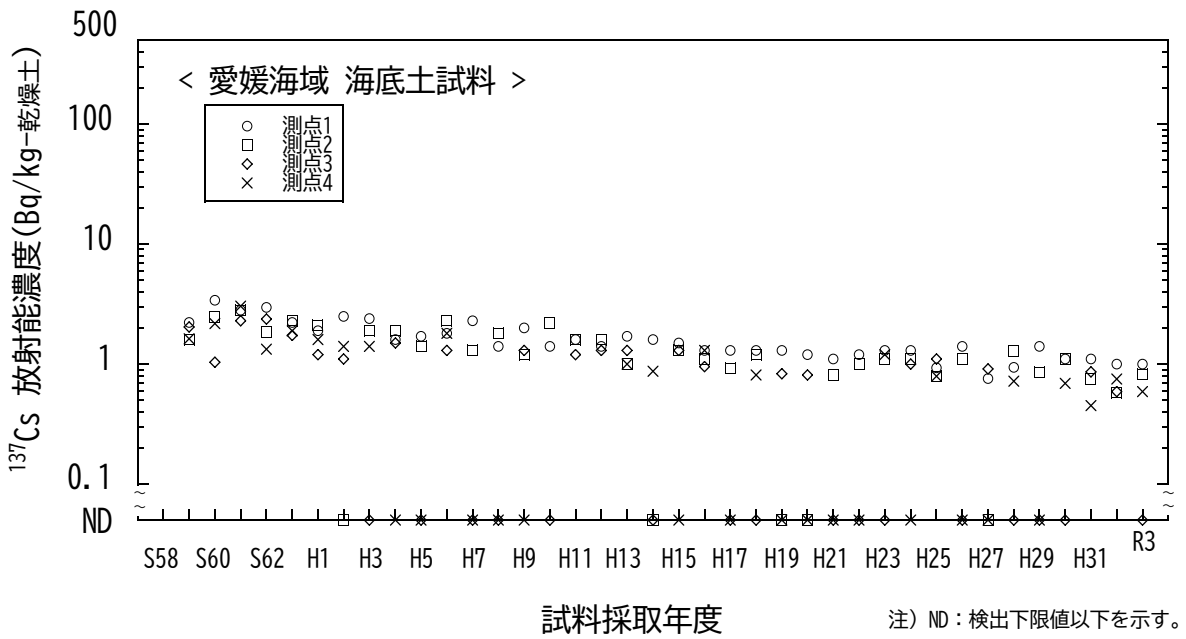


図 I-1-6-25 海底土試料の ¹³⁷Cs 放射能濃度の経年変化 (愛媛海域)

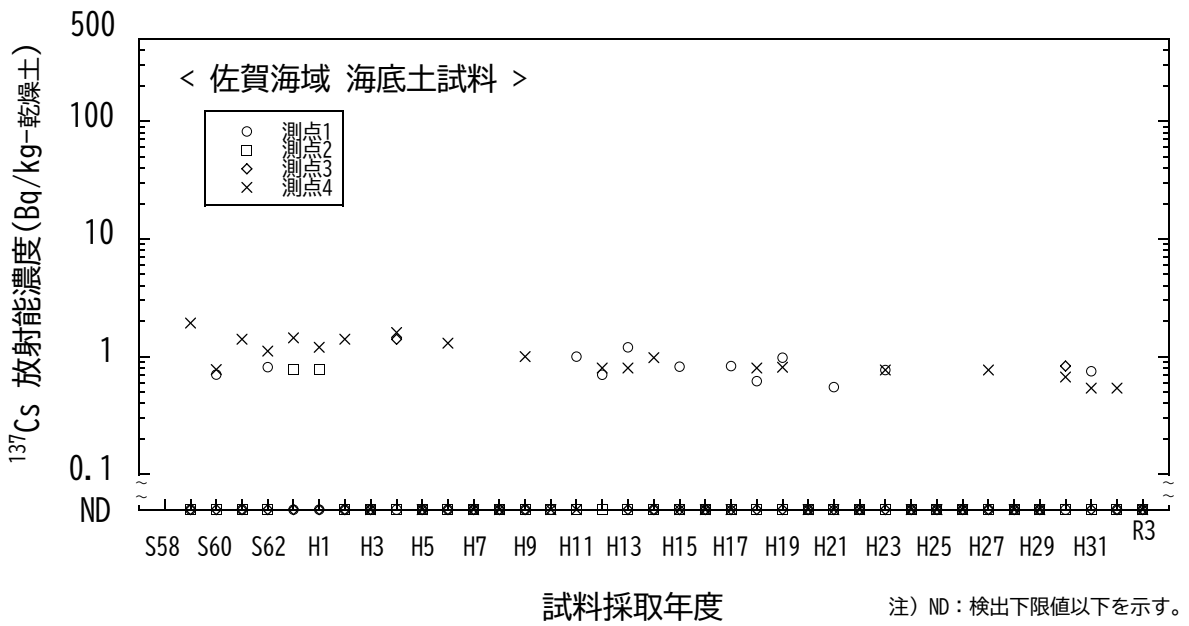


図 I-1-6-26 海底土試料の¹³⁷Cs 放射能濃度の経年変化 (佐賀海域)

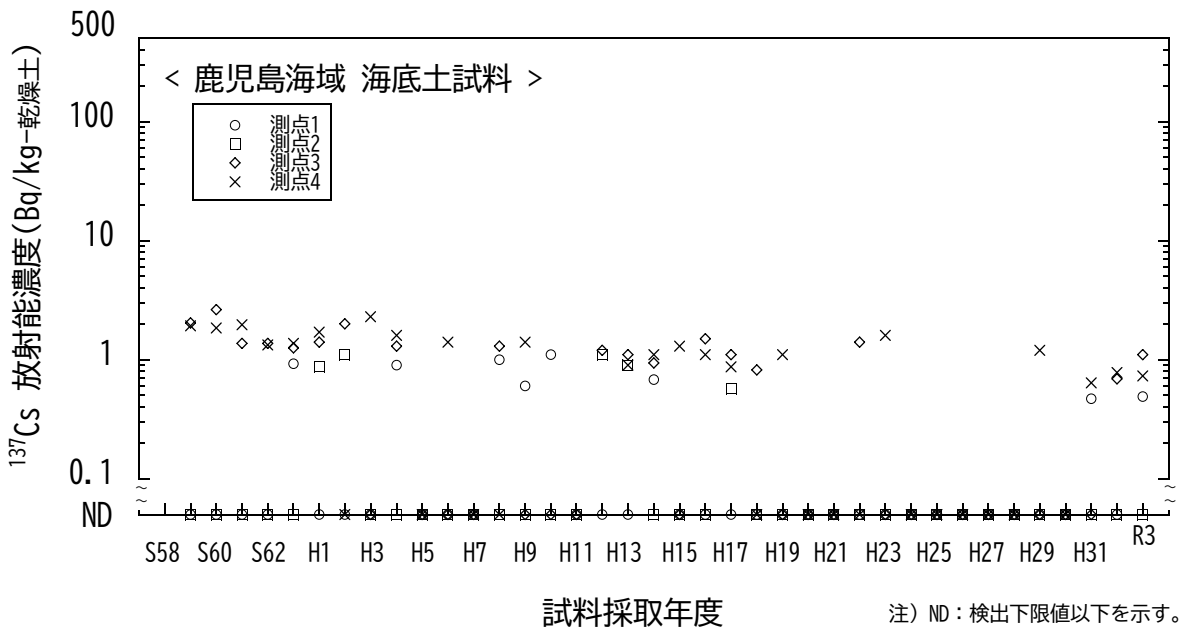


図 I-1-6-27 海底土試料の¹³⁷Cs 放射能濃度の経年変化 (鹿児島海域)

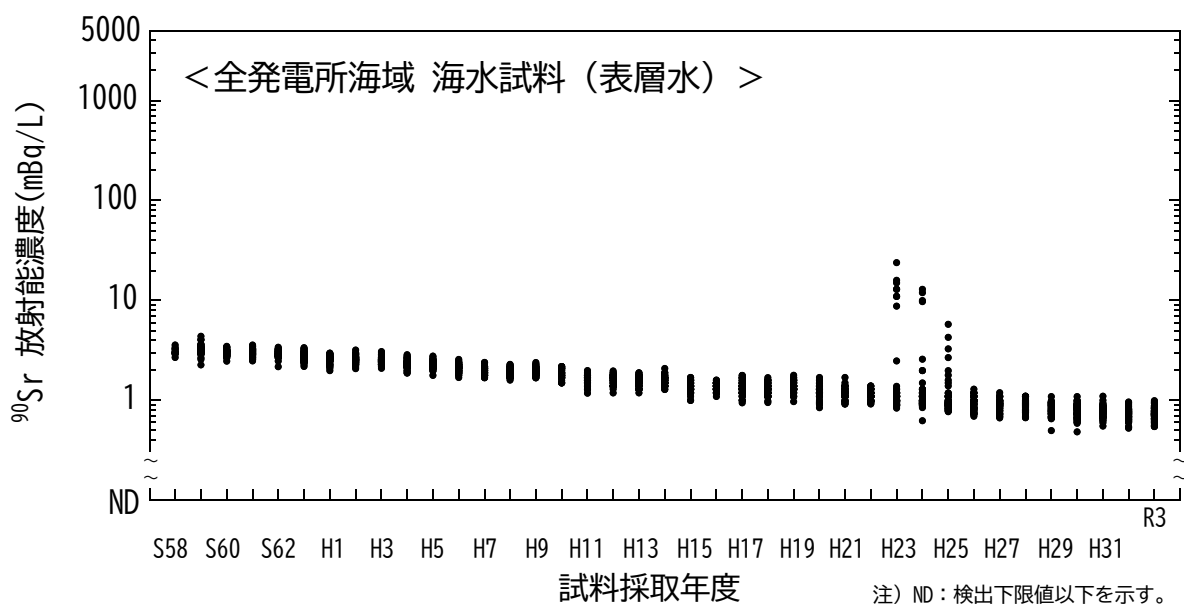


図 I-1-6-28 海水試料の ^{90}Sr 放射能濃度の経年変化（全発電所海域・表層水）

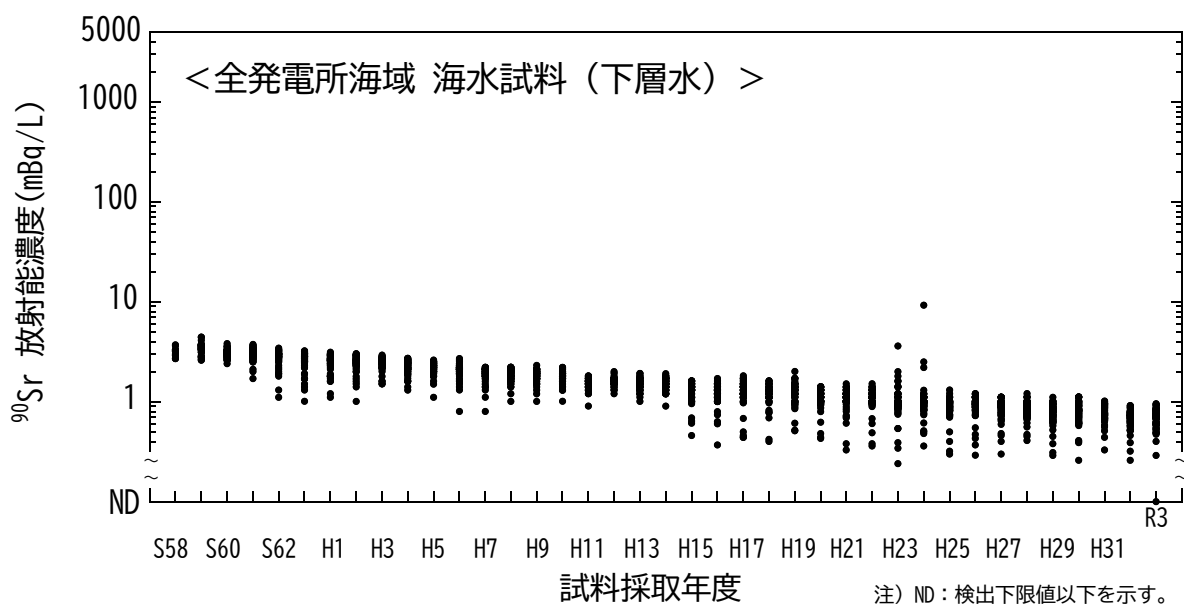


図 I-1-6-29 海水試料の ^{90}Sr 放射能濃度の経年変化（全発電所海域・下層水）

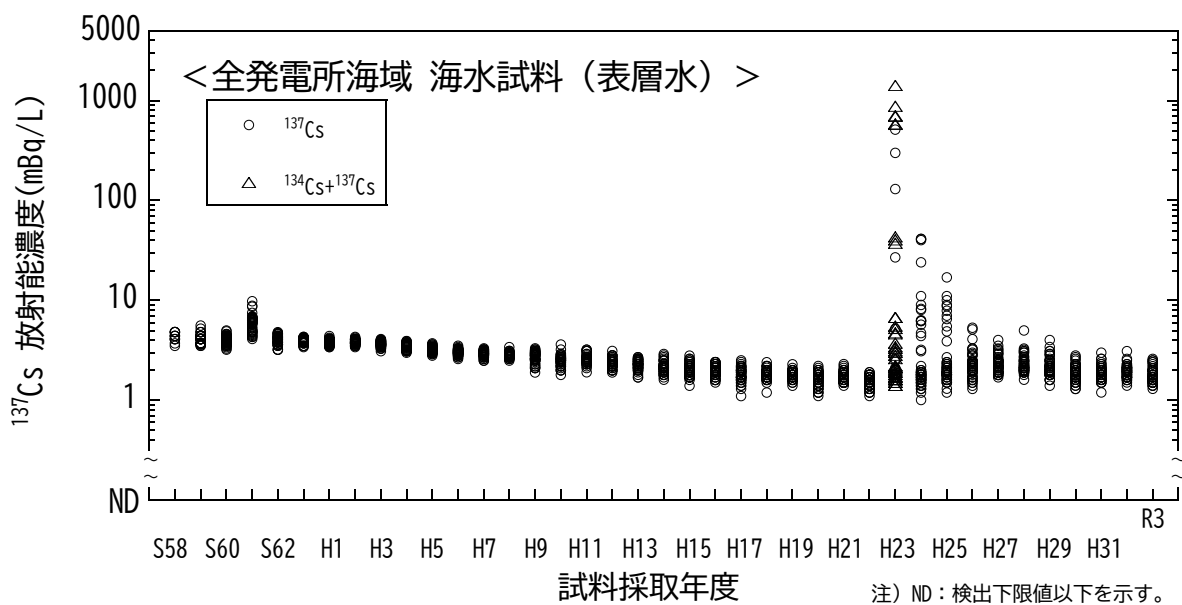


図 I-1-6-30 海水試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化（全発電所海域・表層水）

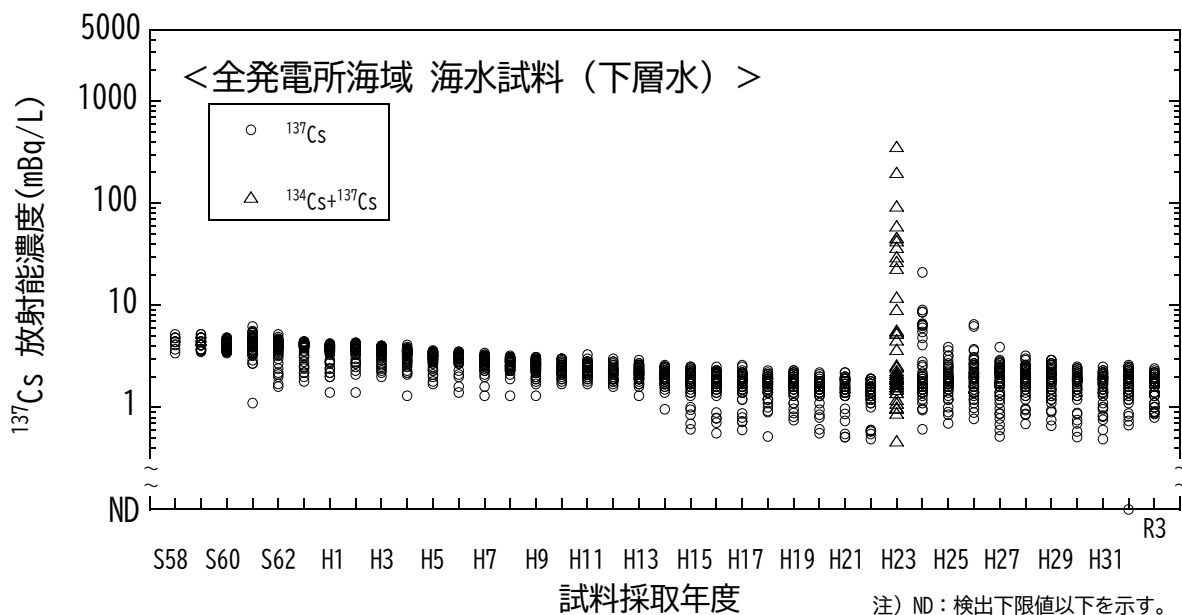


図 I-1-6-31 海水試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化（全発電所海域・下層水）

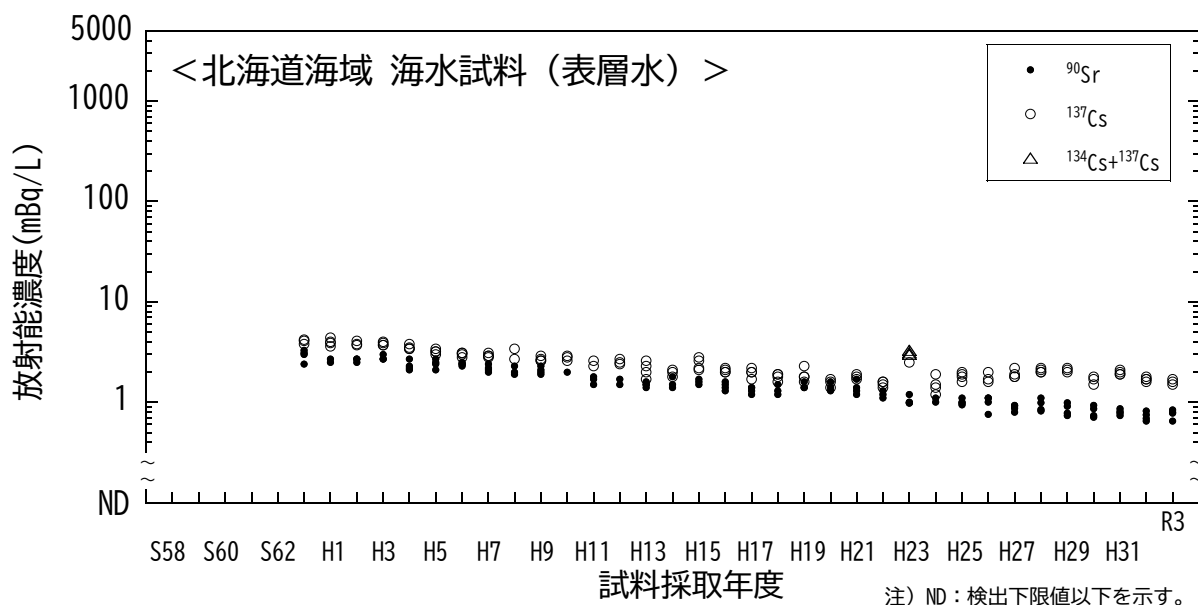


図 I-1-6-32 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (北海道海域・表層水)

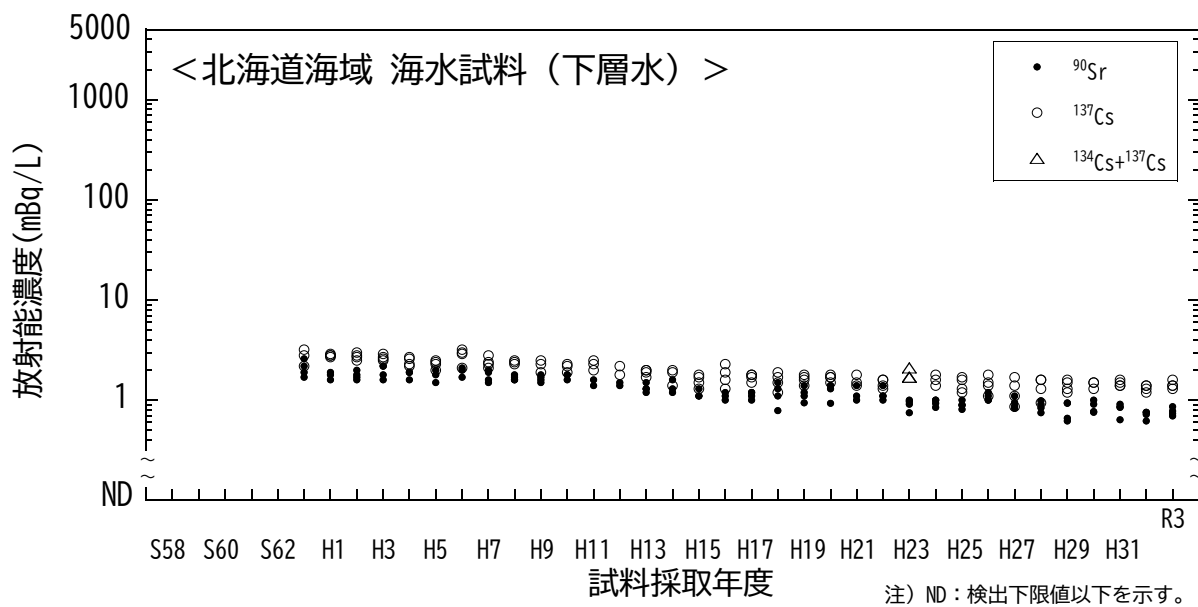


図 I-1-6-33 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (北海道海域・下層水)

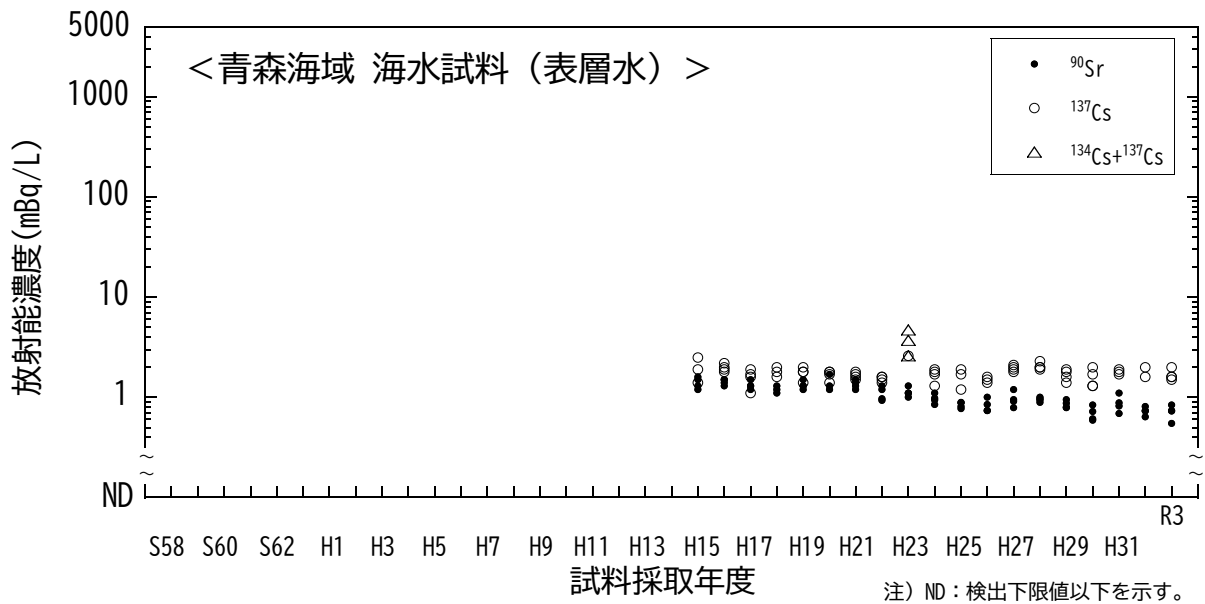


図 I-1-6-34 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (青森海域・表層水)

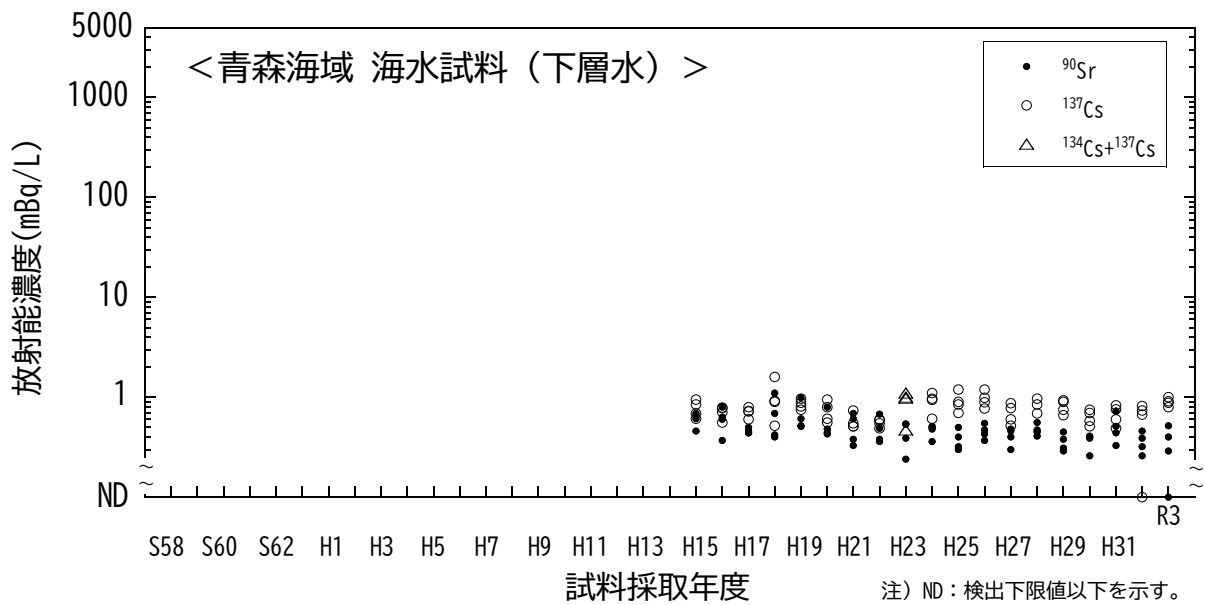


図 I-1-6-35 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (青森海域・下層水)

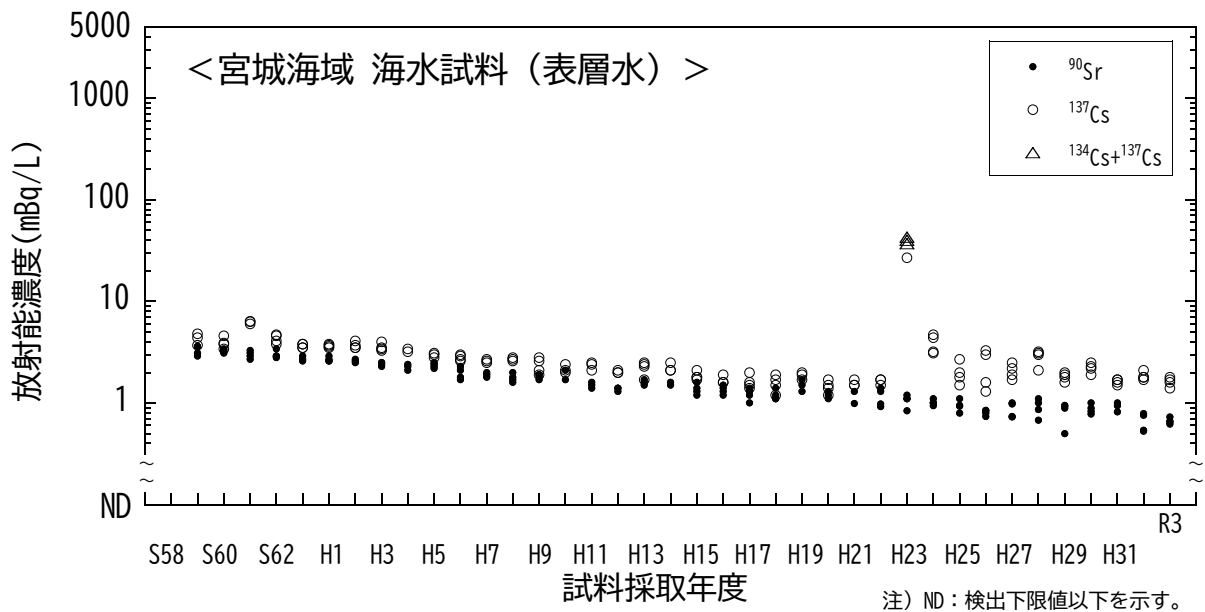


図 I-1-6-36 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (宮城海域・表層水)

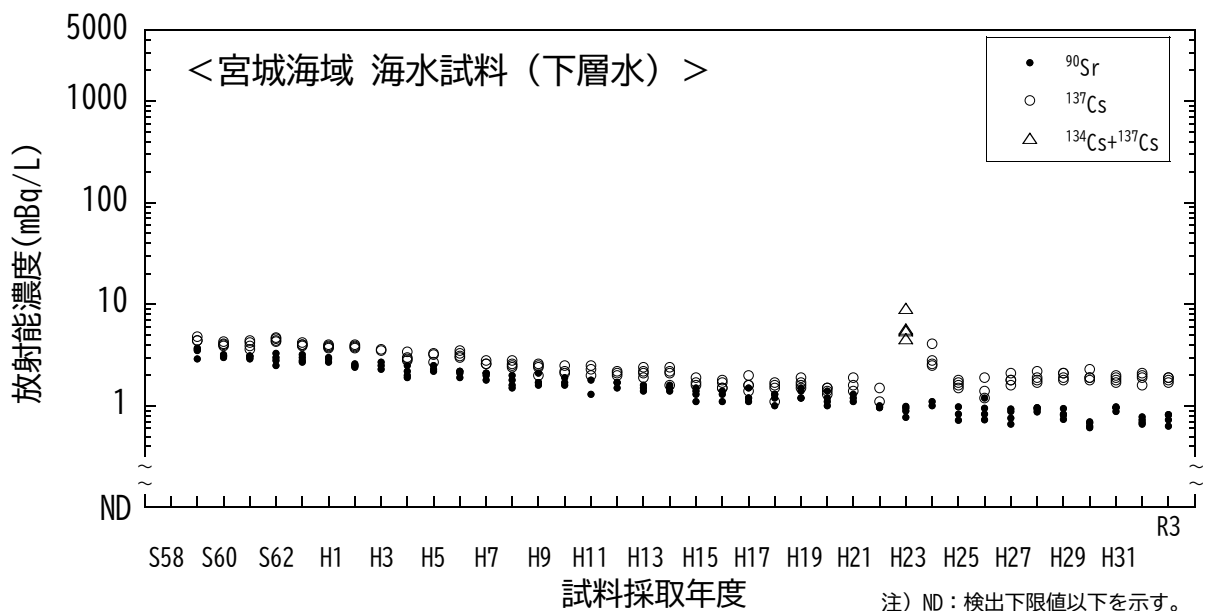


図 I-1-6-37 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (宮城海域・下層水)

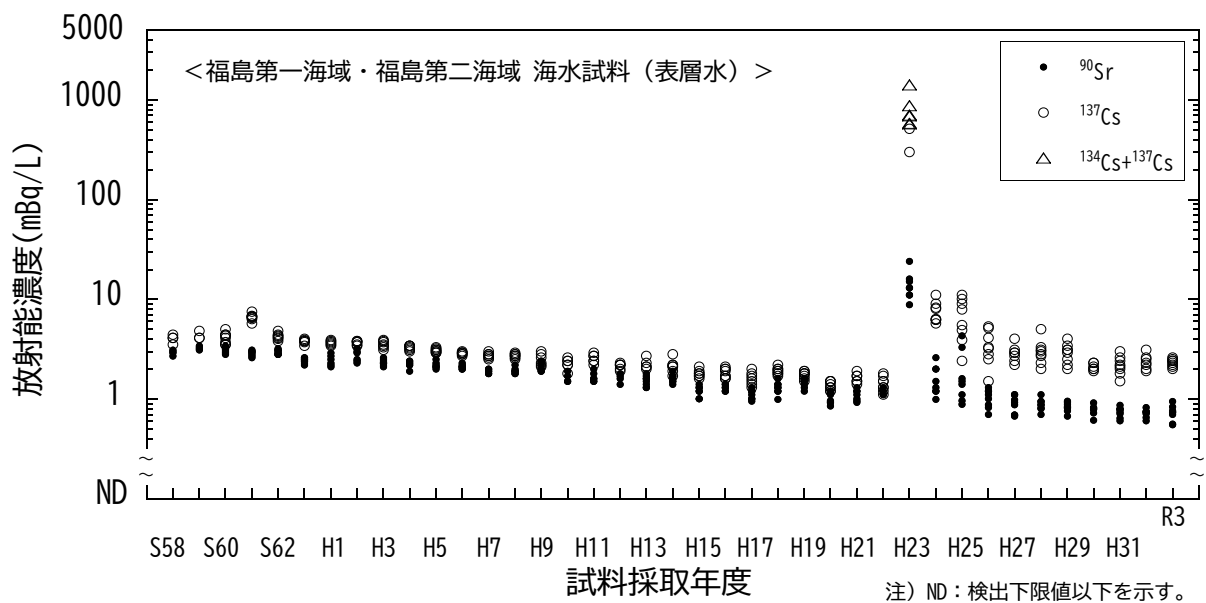


図 I-1-6-38 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (福島第一海域・福島第二海域・表層水)

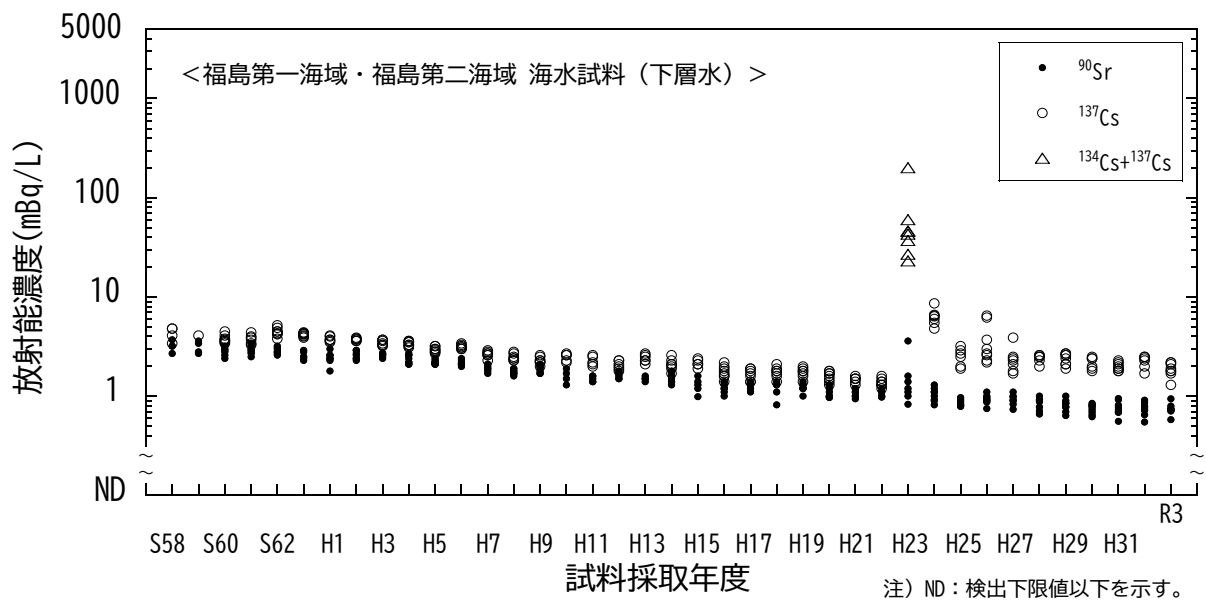


図 I-1-6-39 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (福島第一海域・福島第二海域・下層水)

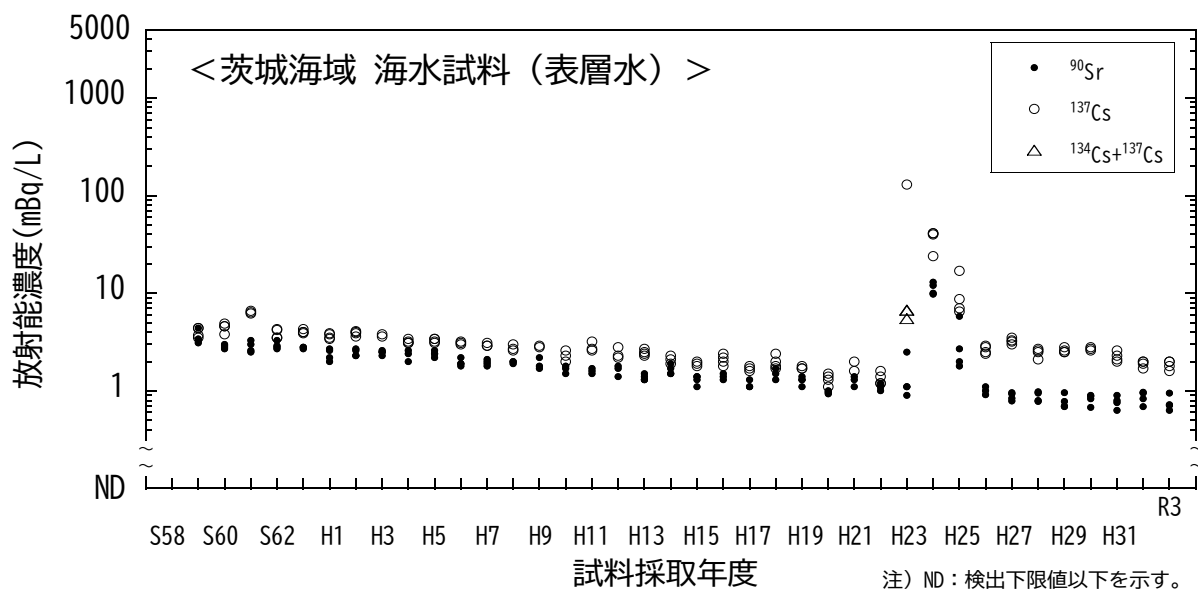


図 I-1-6-40 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (茨城海域・表層水)

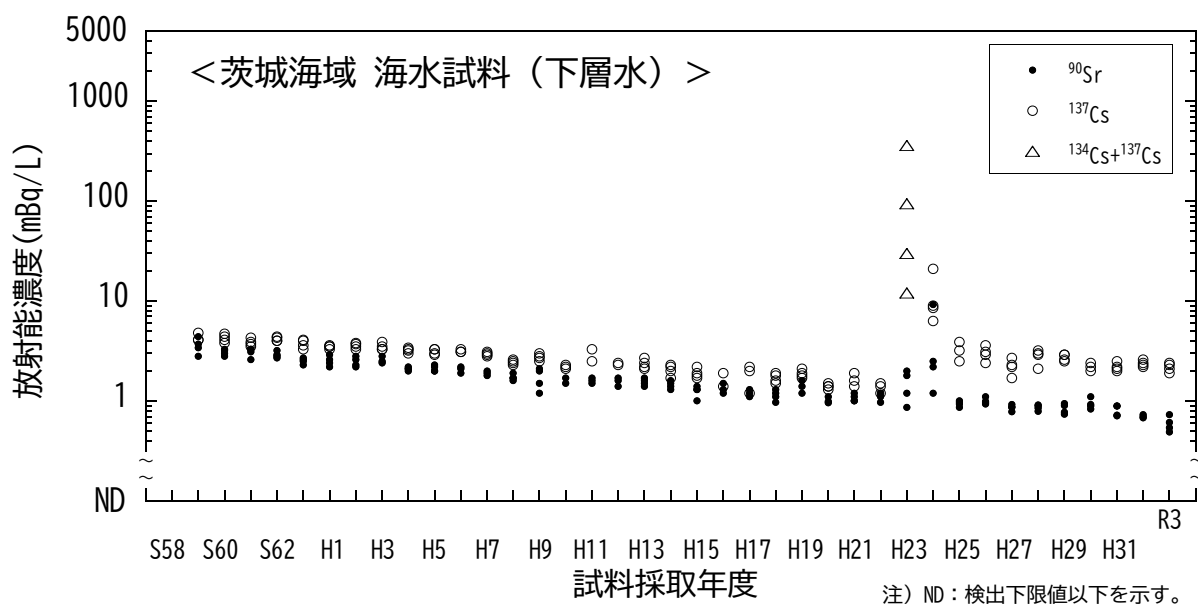


図 I-1-6-41 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (茨城海域・下層水)

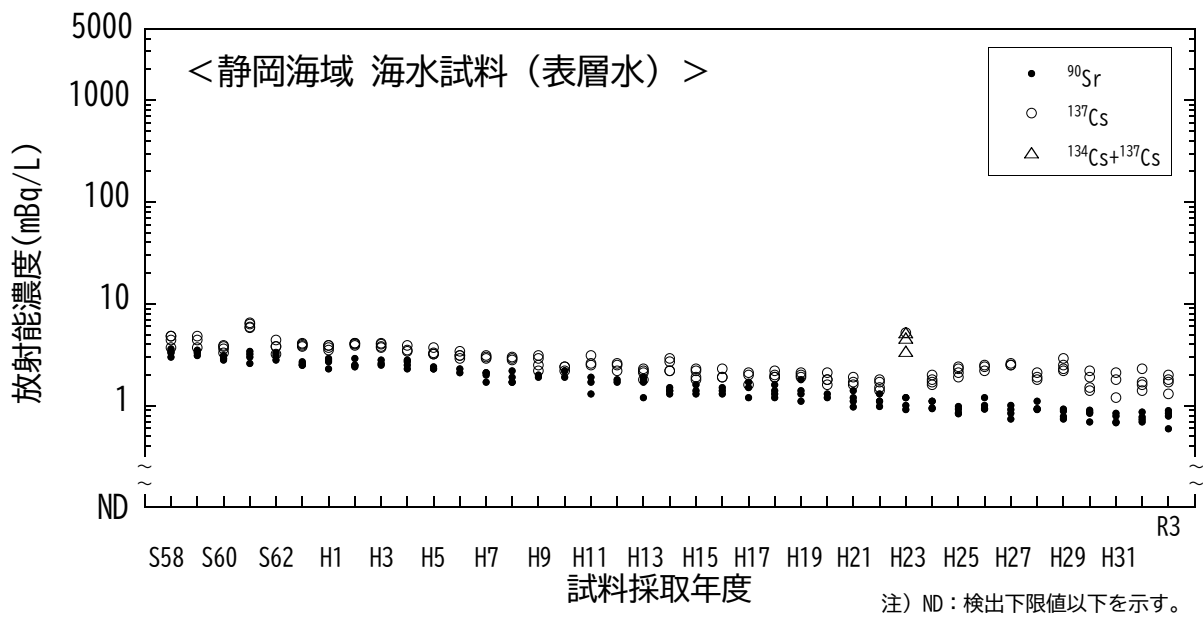


図 I-1-6-42 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (静岡海域・表層水)

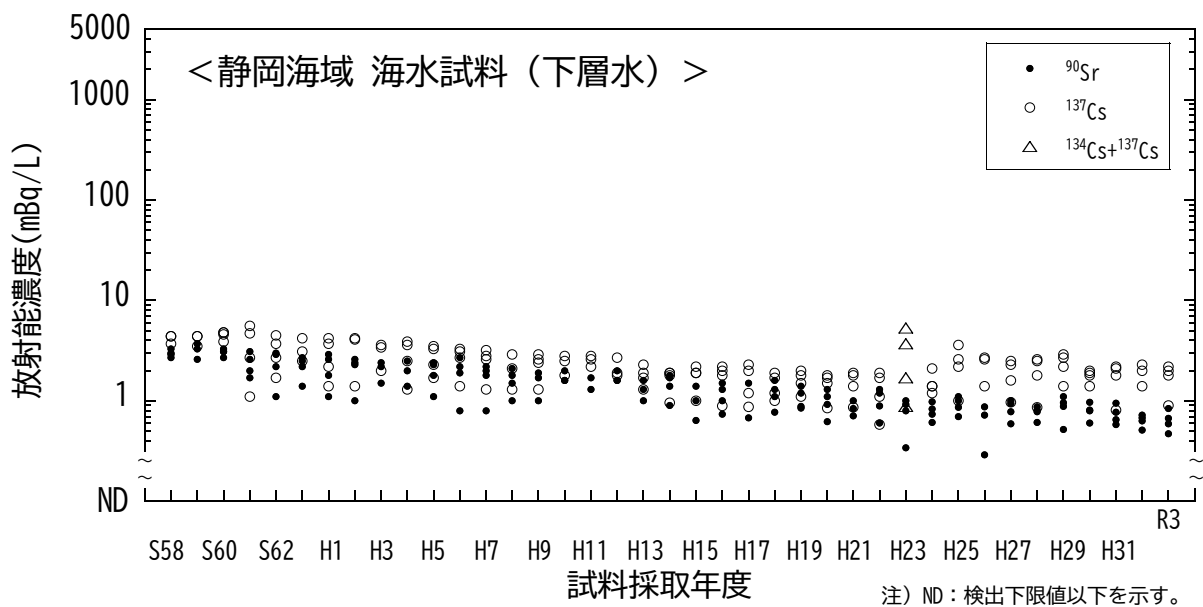


図 I-1-6-43 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (静岡海域・下層水)

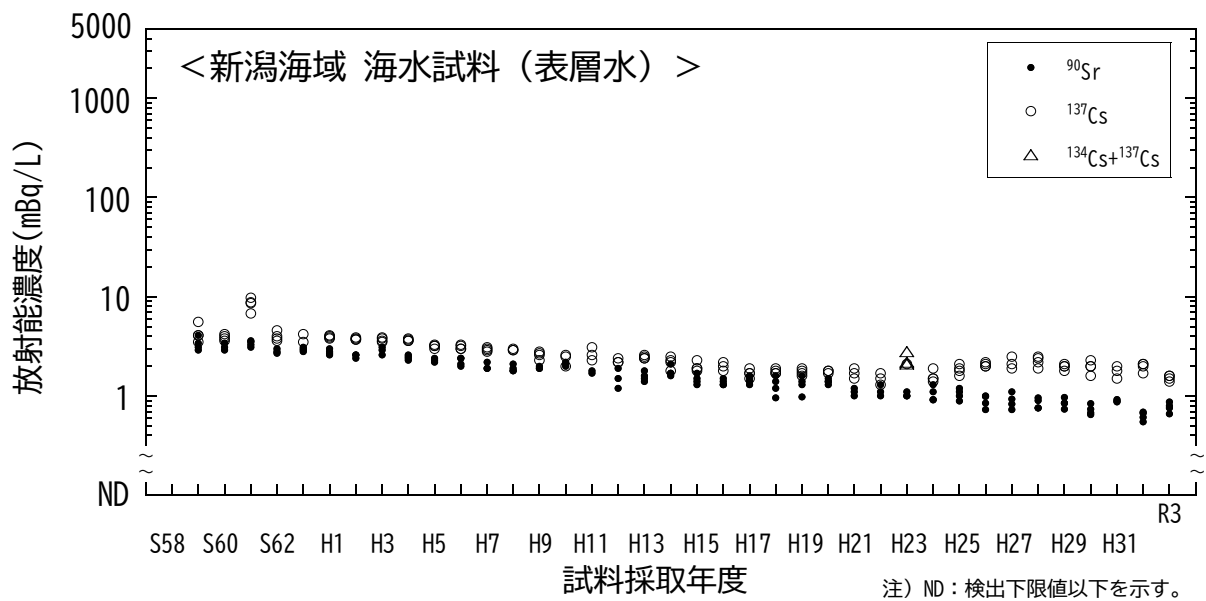


図 I-1-6-44 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (新潟海域・表層水)

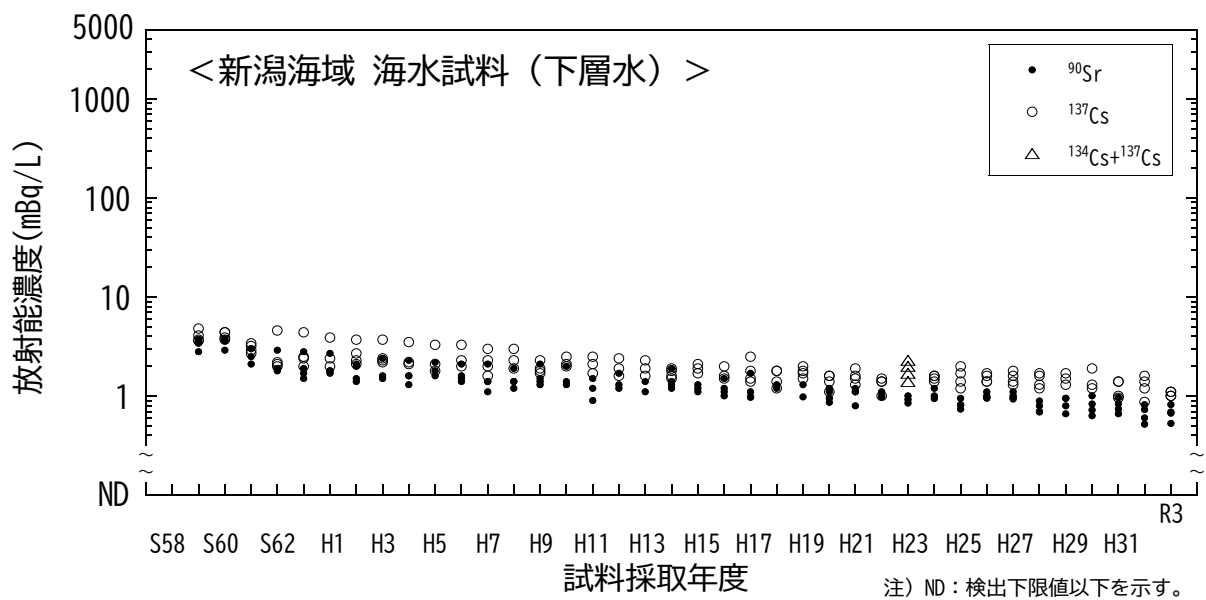


図 I-1-6-45 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (新潟海域・下層水)

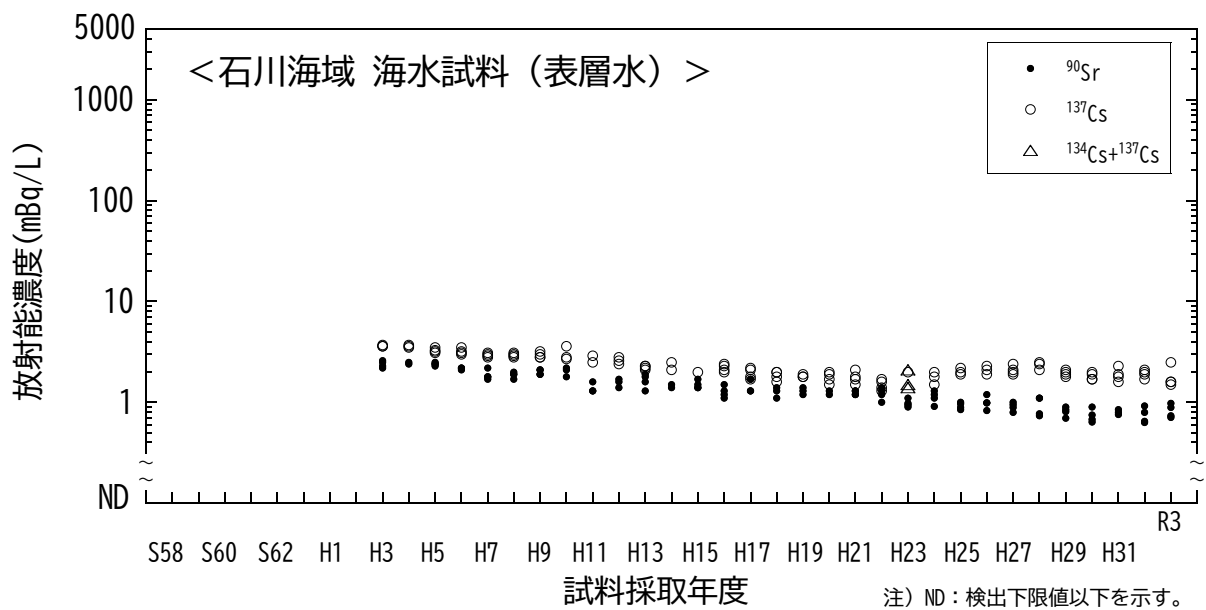


図 I-1-6-46 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (石川海域・表層水)

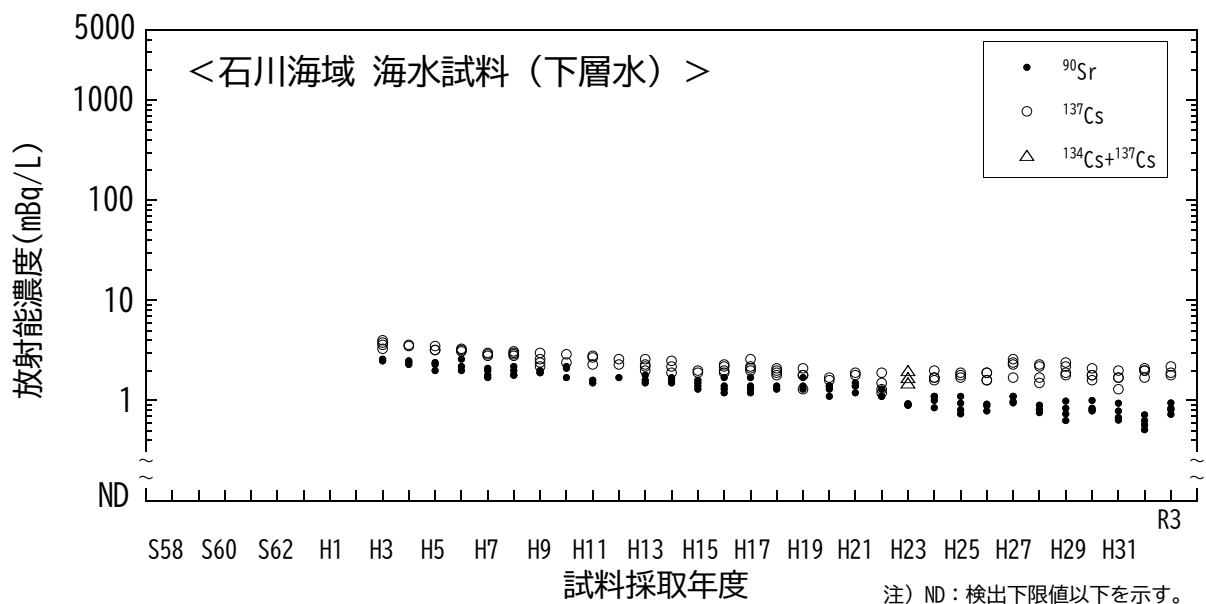


図 I-1-6-47 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (石川海域・下層水)

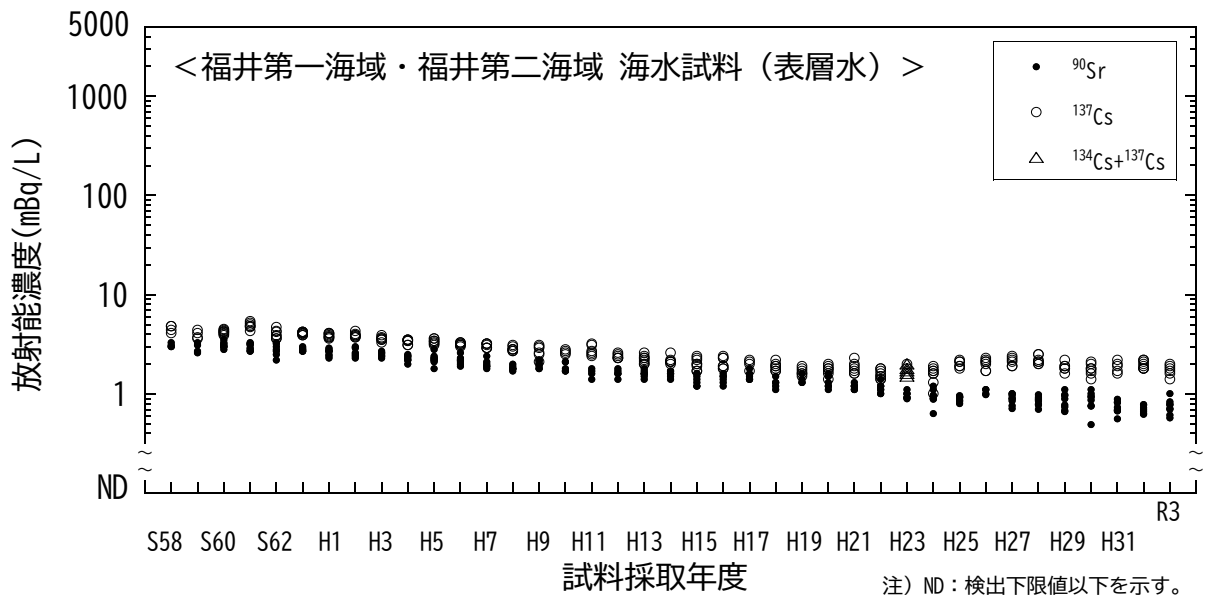


図 I-1-6-48 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化
(福井第一海域・福井第二海域・表層水)

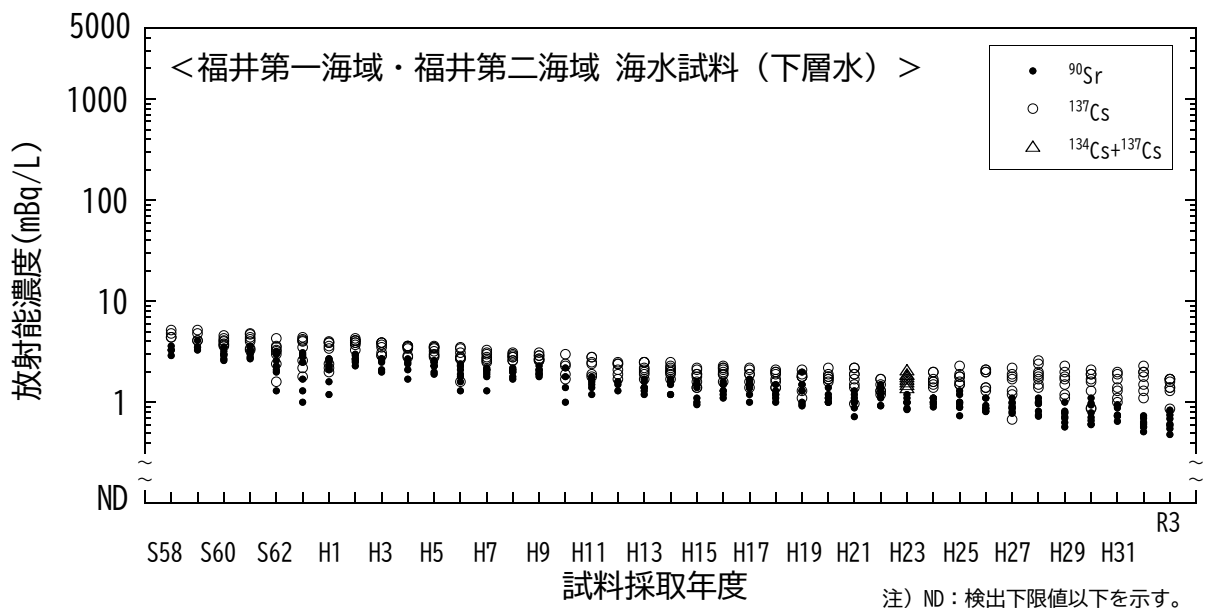


図 I-1-6-49 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化
(福井第一海域・福井第二海域・下層水)

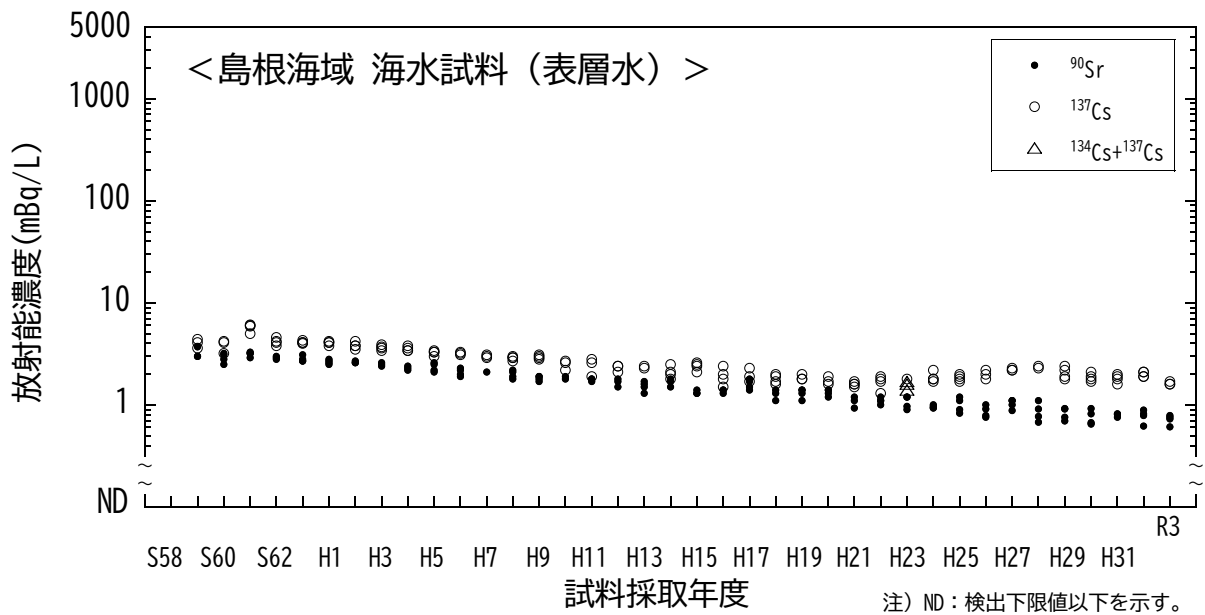


図 I-1-6-50 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (島根海域・表層水)

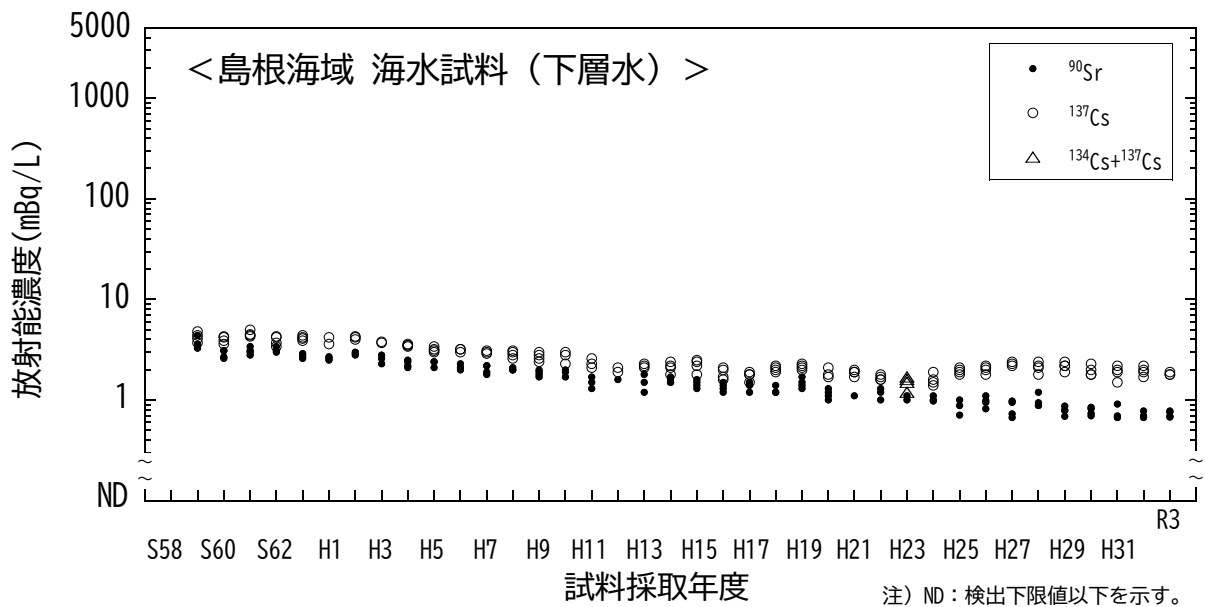


図 I-1-6-51 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (島根海域・下層水)

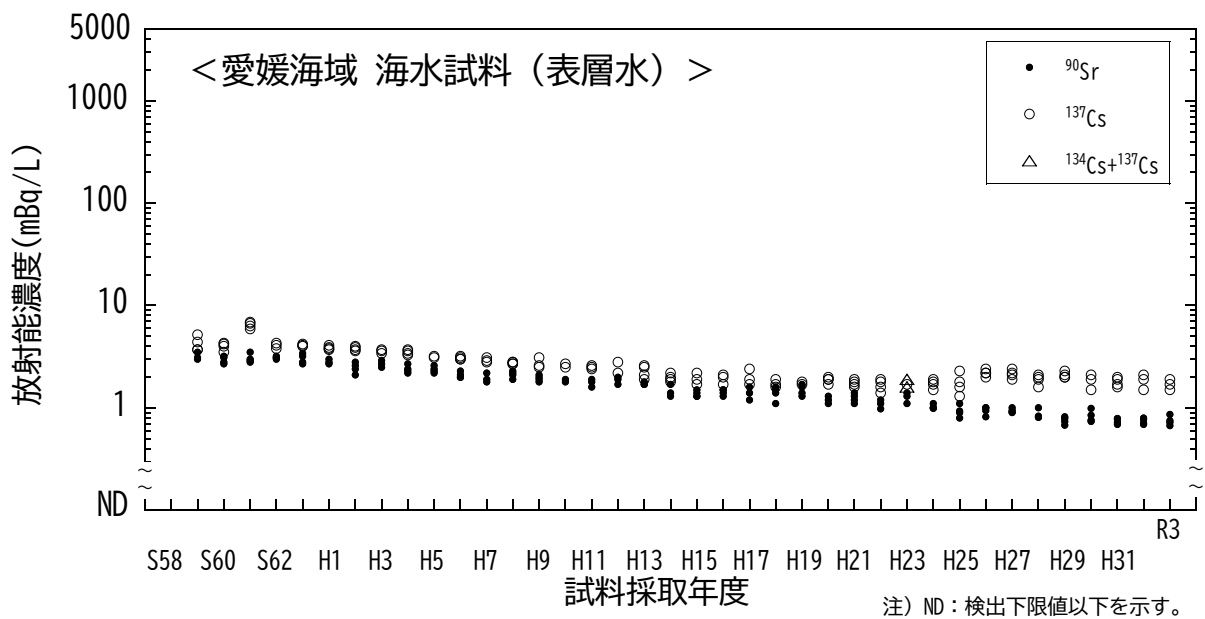


図 I-1-6-52 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (愛媛海域・表層水)

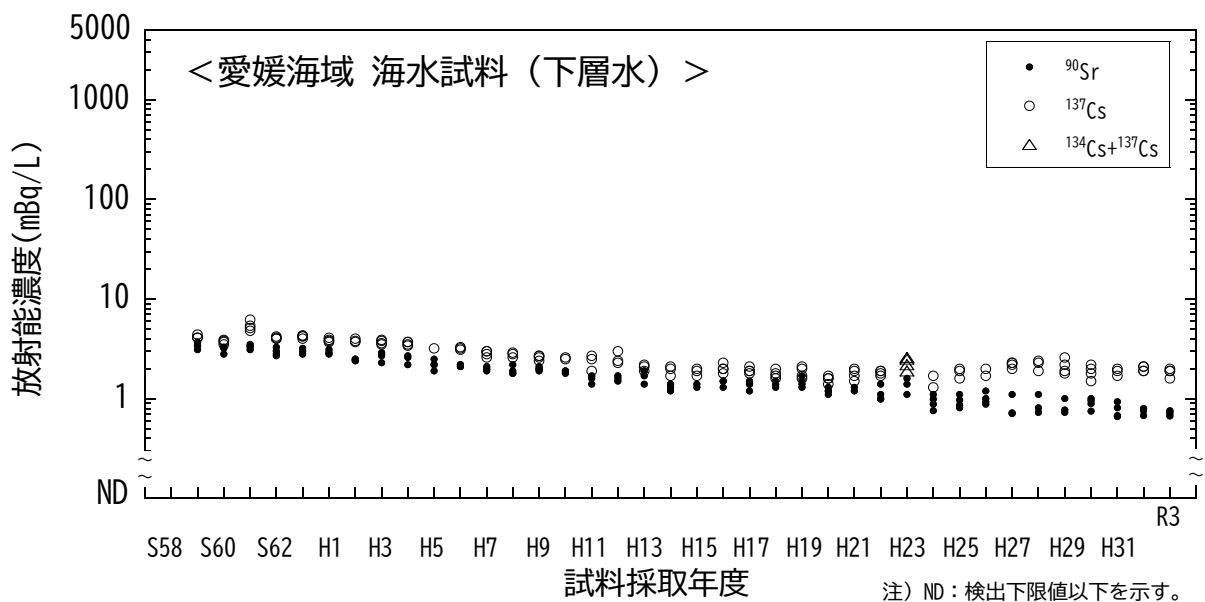


図 I-1-6-53 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (愛媛海域・下層水)

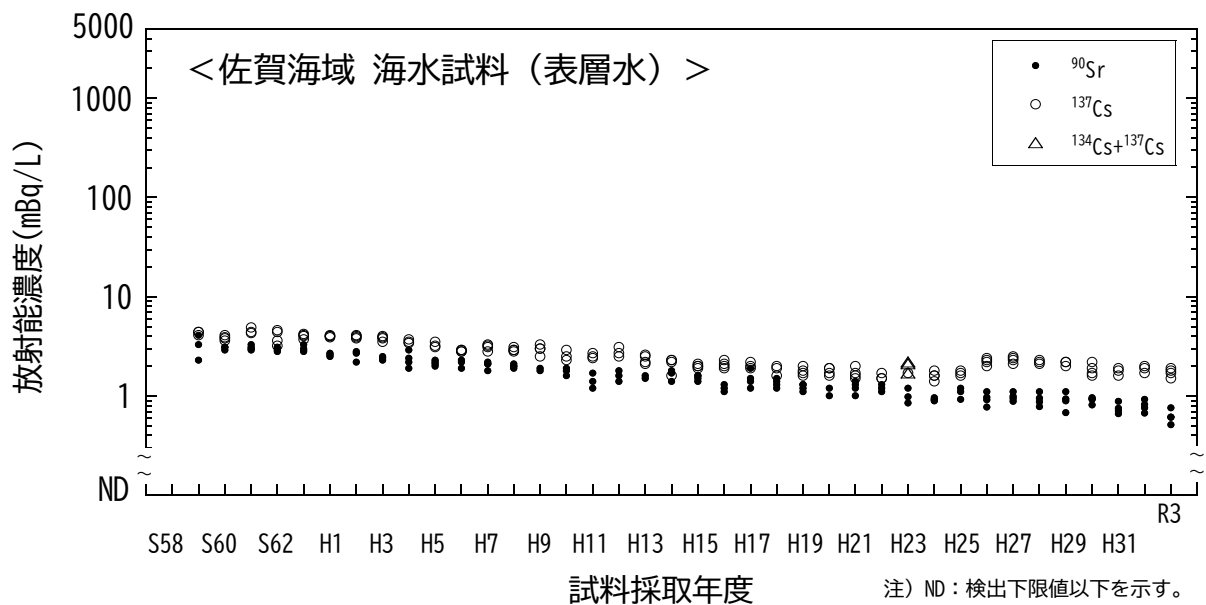


図 I-1-6-54 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (佐賀海域・表層水)

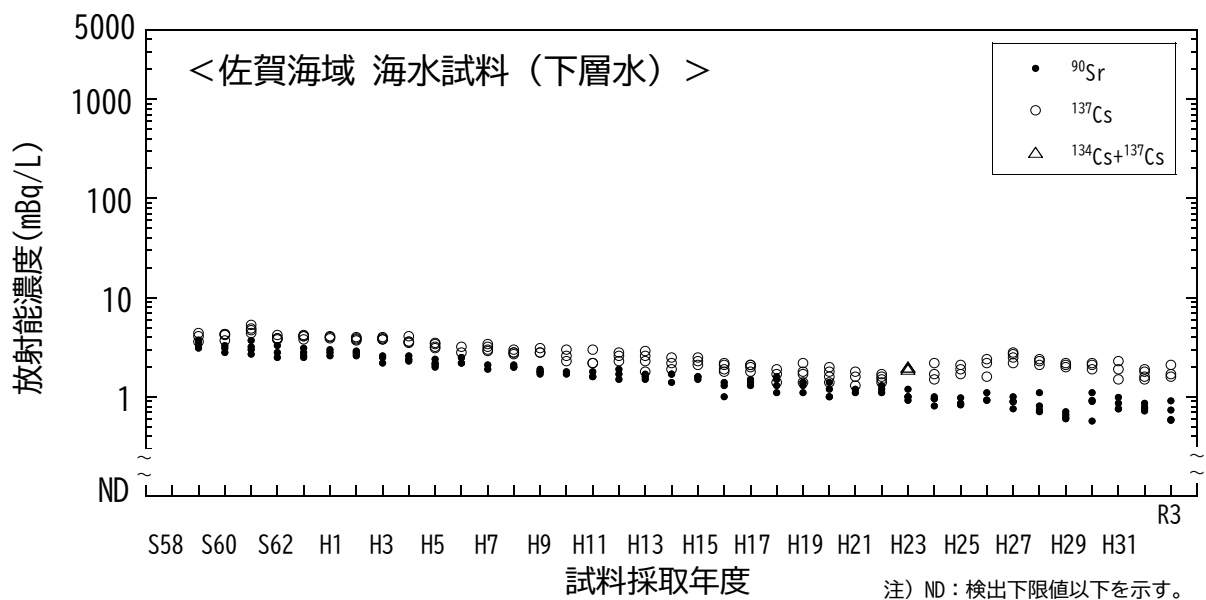


図 I-1-6-55 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (佐賀海域・下層水)

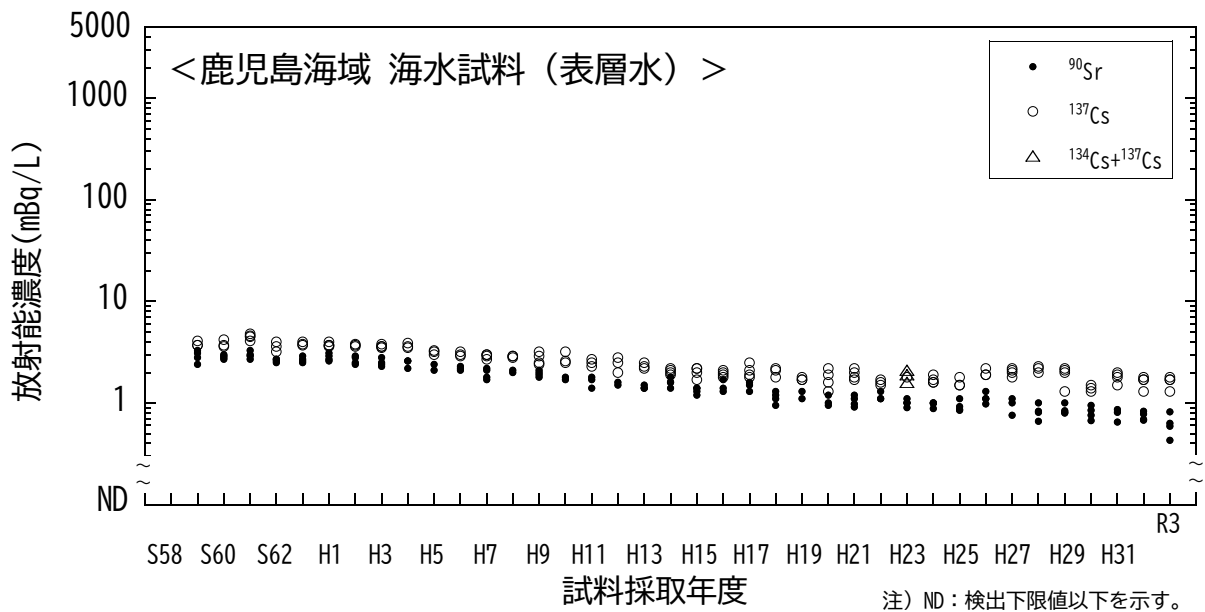


図 I-1-6-56 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (鹿児島海域・表層水)

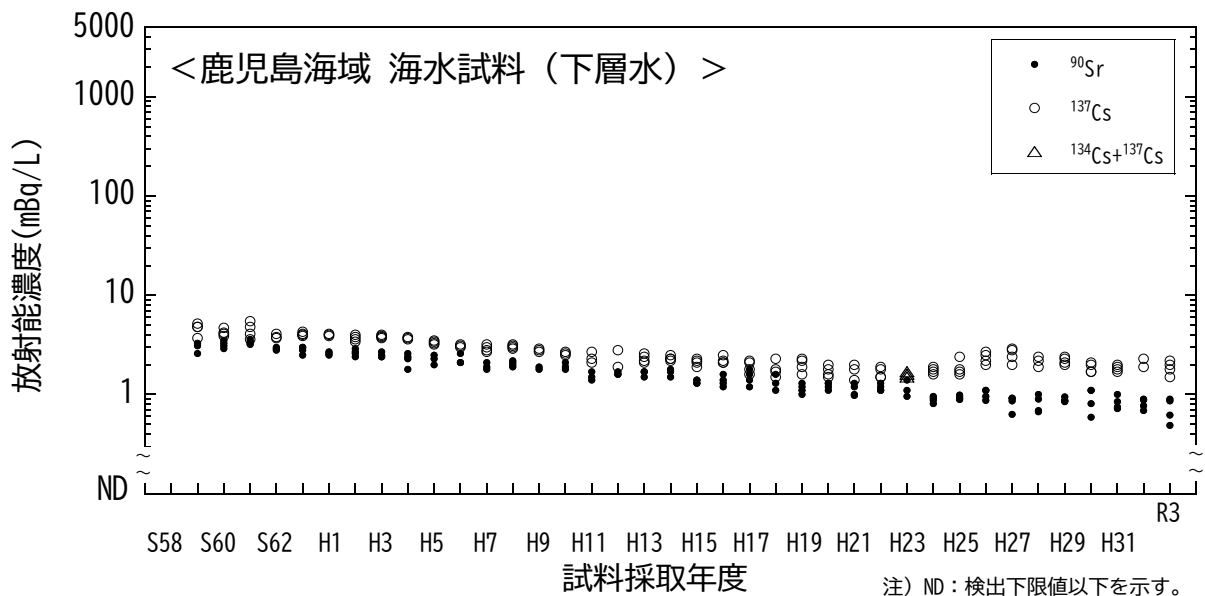


図 I-1-6-57 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (鹿児島海域・下層水)

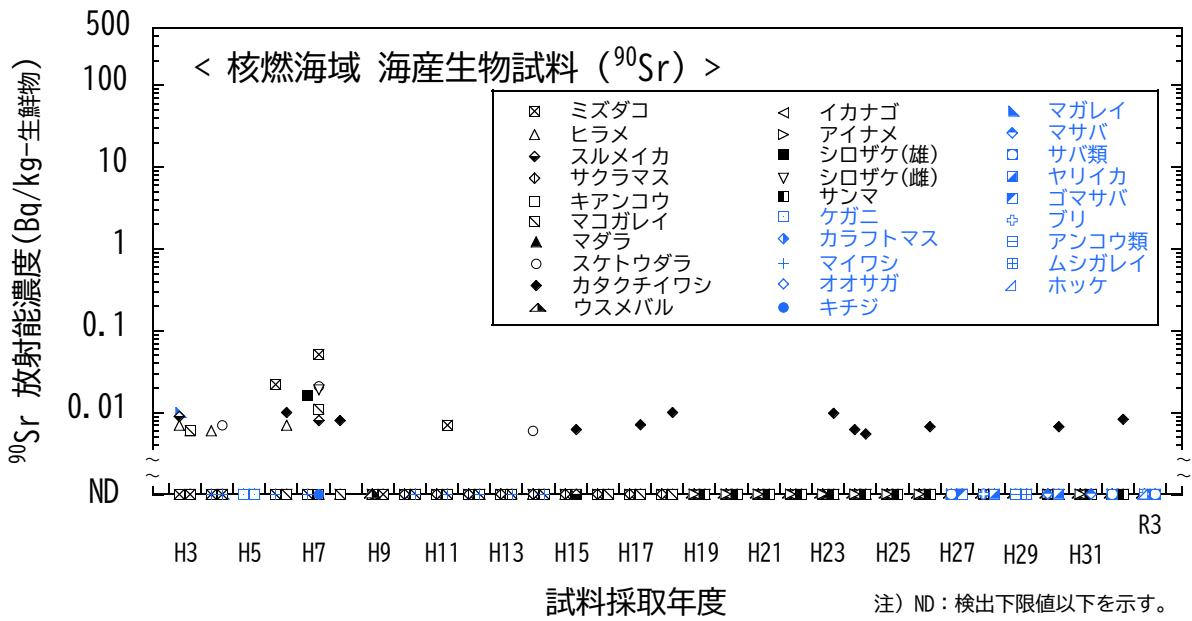


図 I-1-6-58 海産生物試料の ^{90}Sr 放射能濃度の経年変化 (核燃海域)

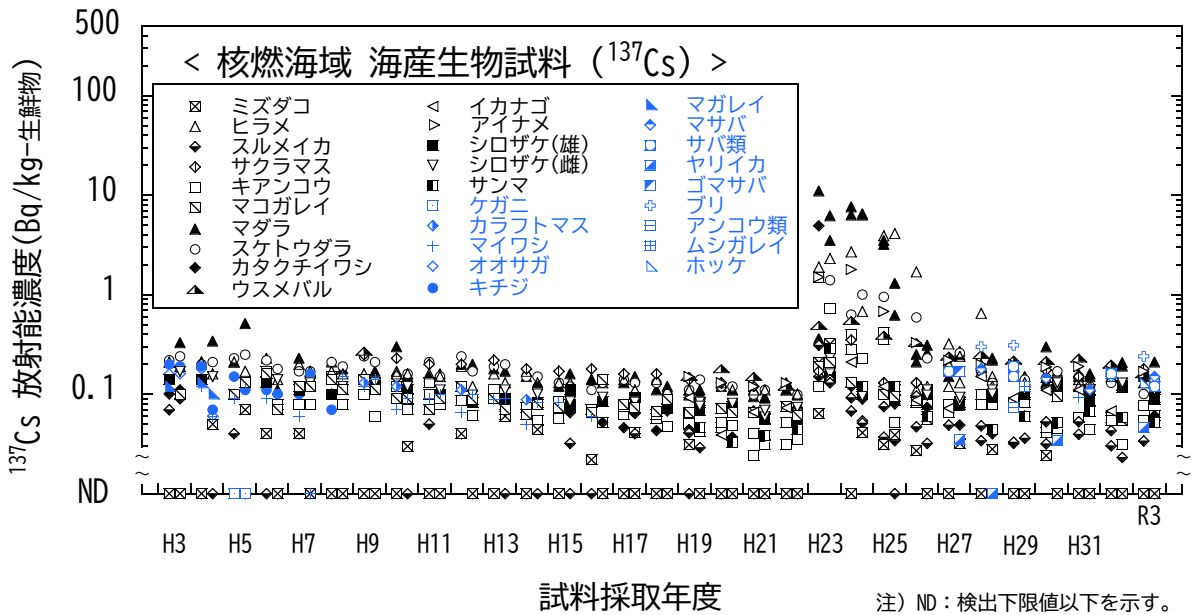


図 I-1-6-59 海産生物試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (核燃海域)

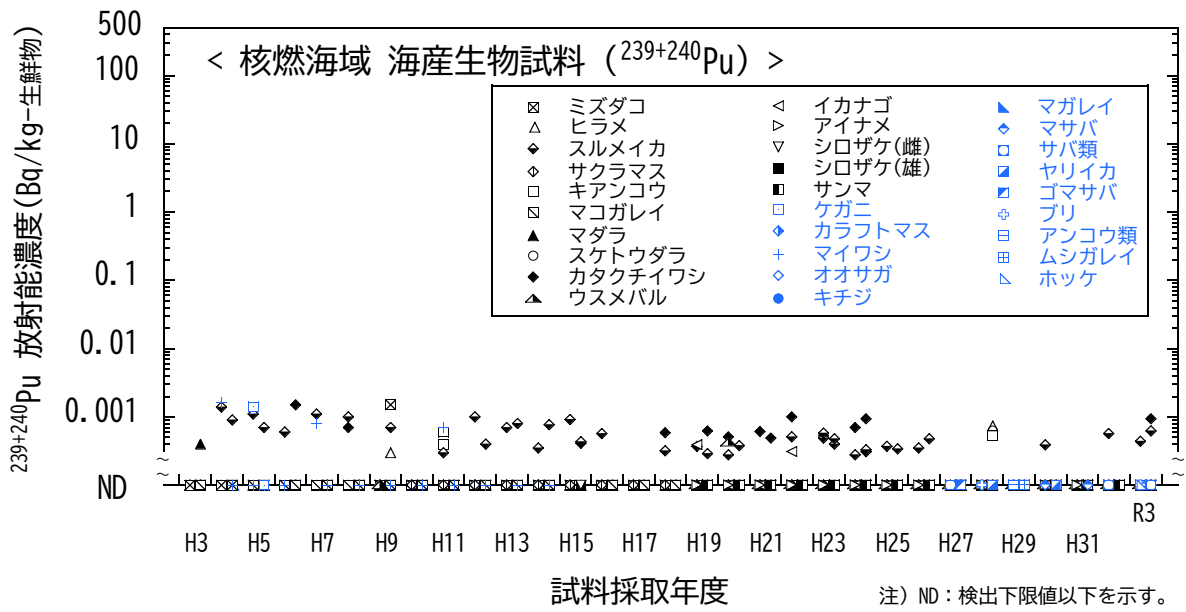


図 I-1-6-60 海産生物試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度の経年変化 (核燃海域)

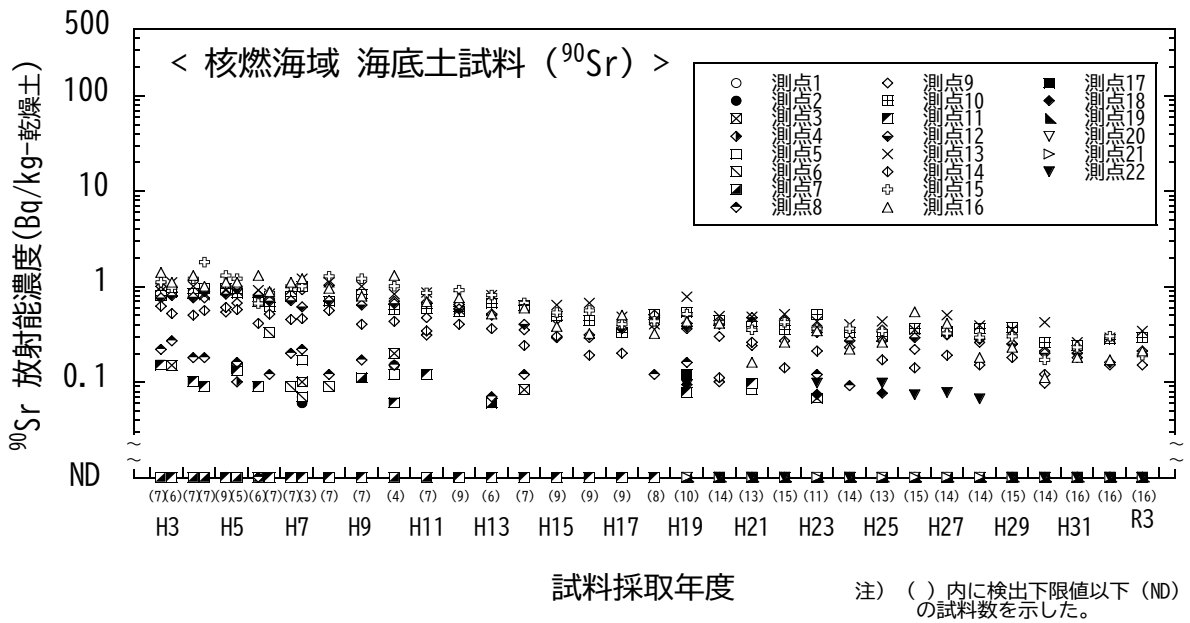


図 I-1-6-61 海底土試料の ^{90}Sr 放射能濃度の経年変化 (核燃海域)

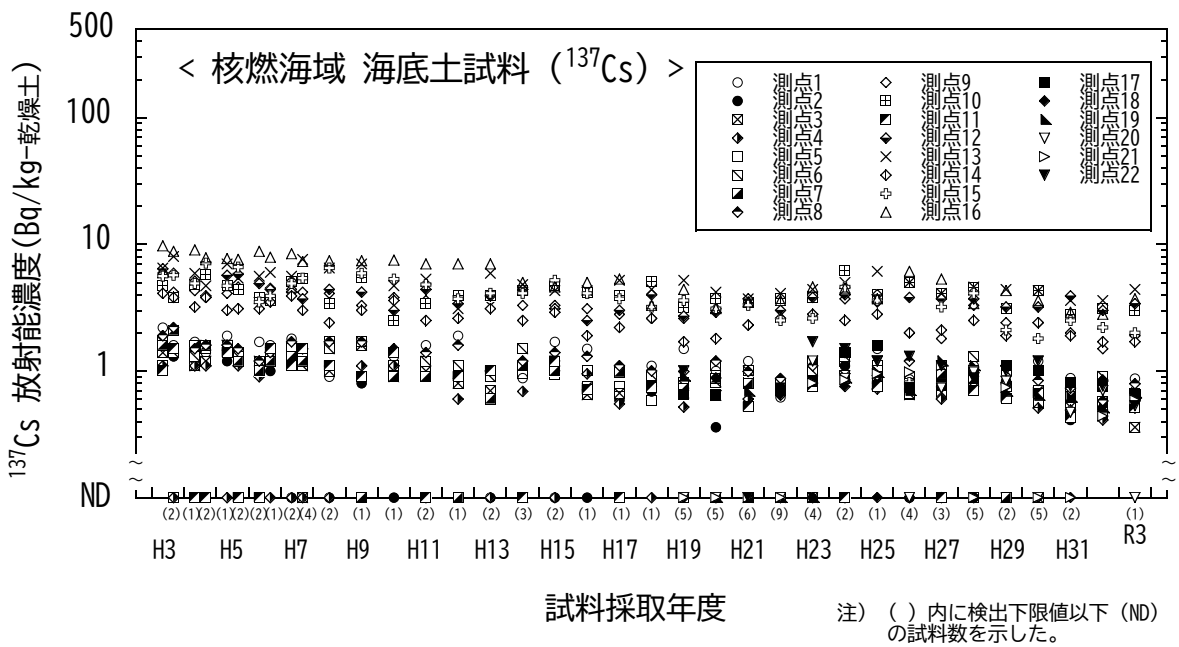


図 I-1-6-62 海底土試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (核燃海域)

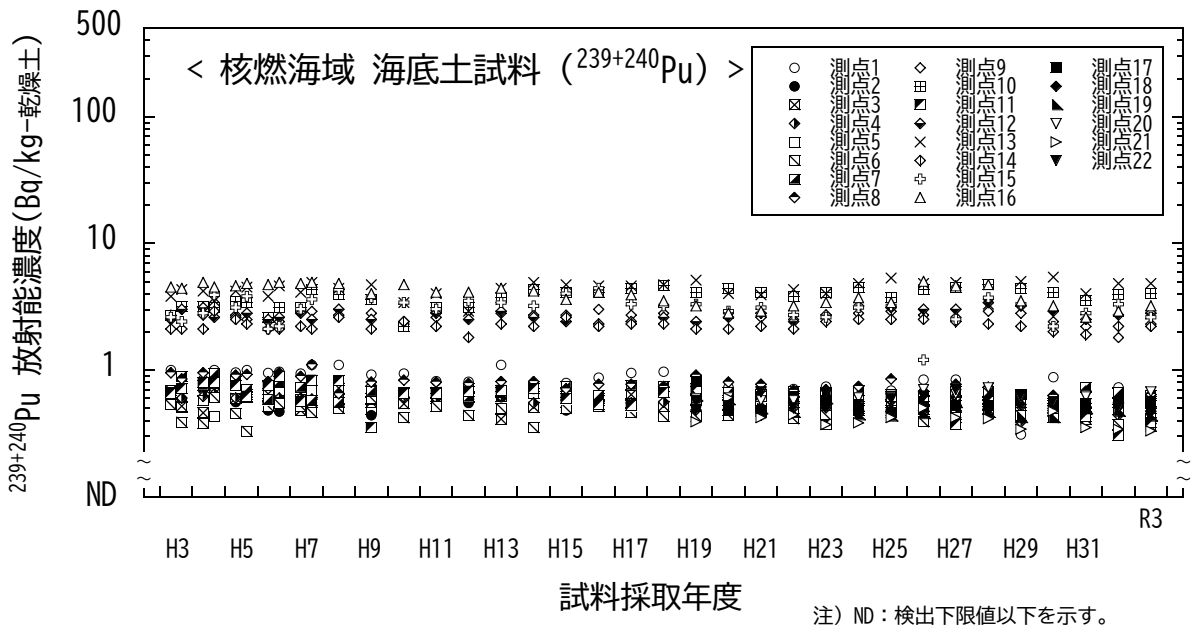


図 I-1-6-63 海底土試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度の経年変化 (核燃海域)

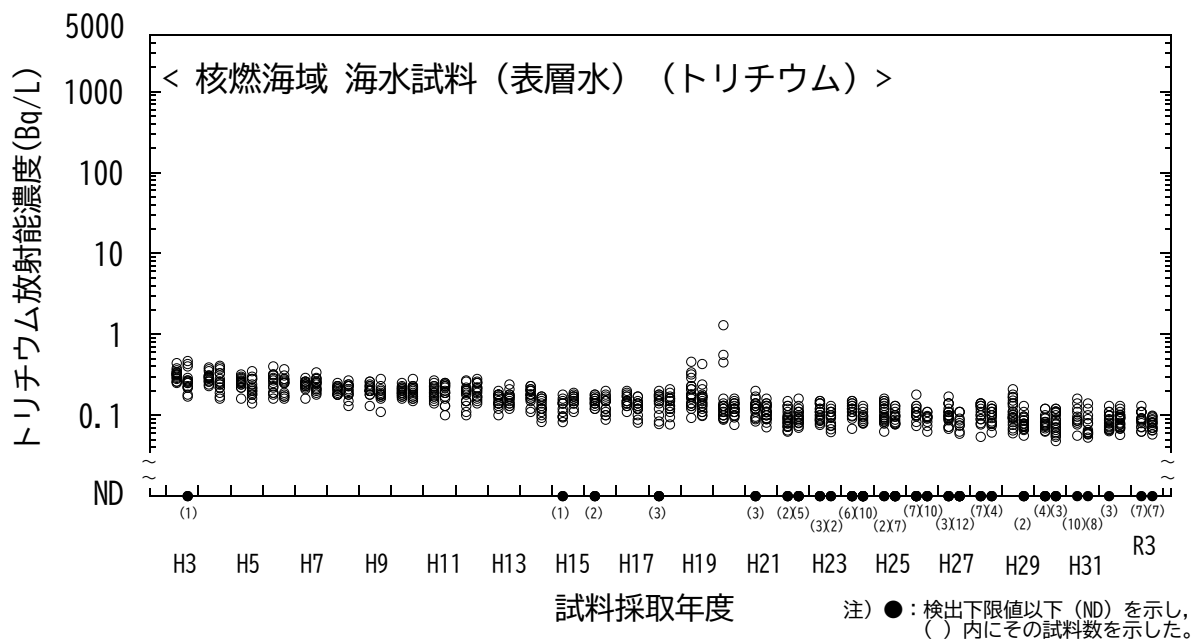


図 I-1-6-64 海水試料のトリチウム放射能濃度の経年変化（核燃海域・表層水）

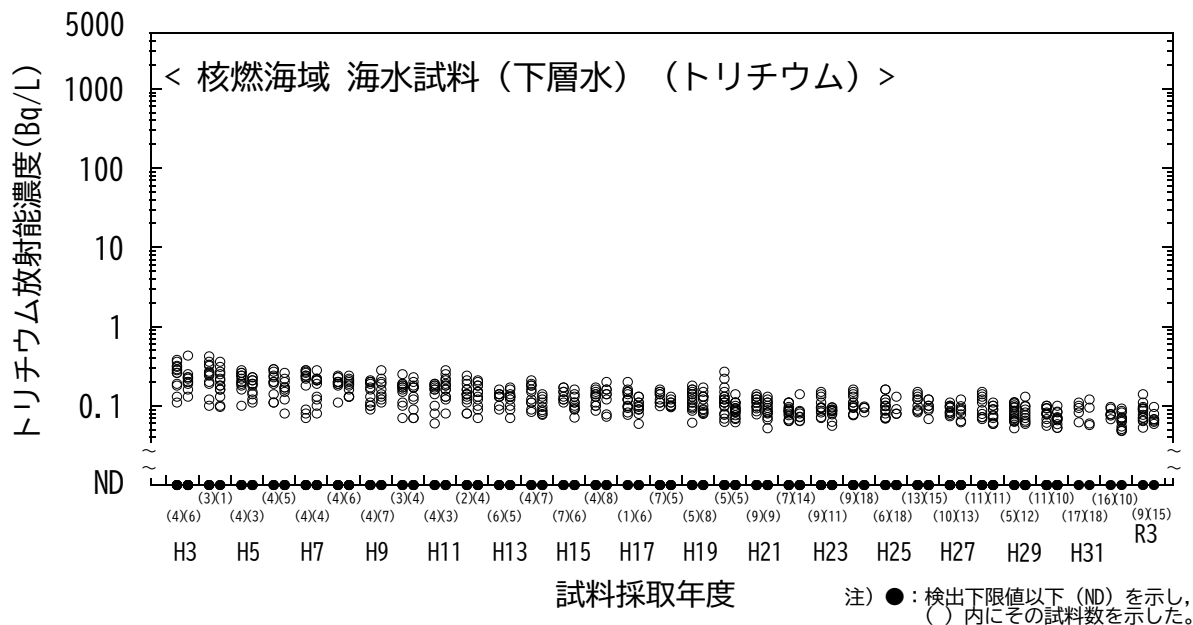


図 I-1-6-65 海水試料のトリチウム放射能濃度の経年変化（核燃海域・下層水）

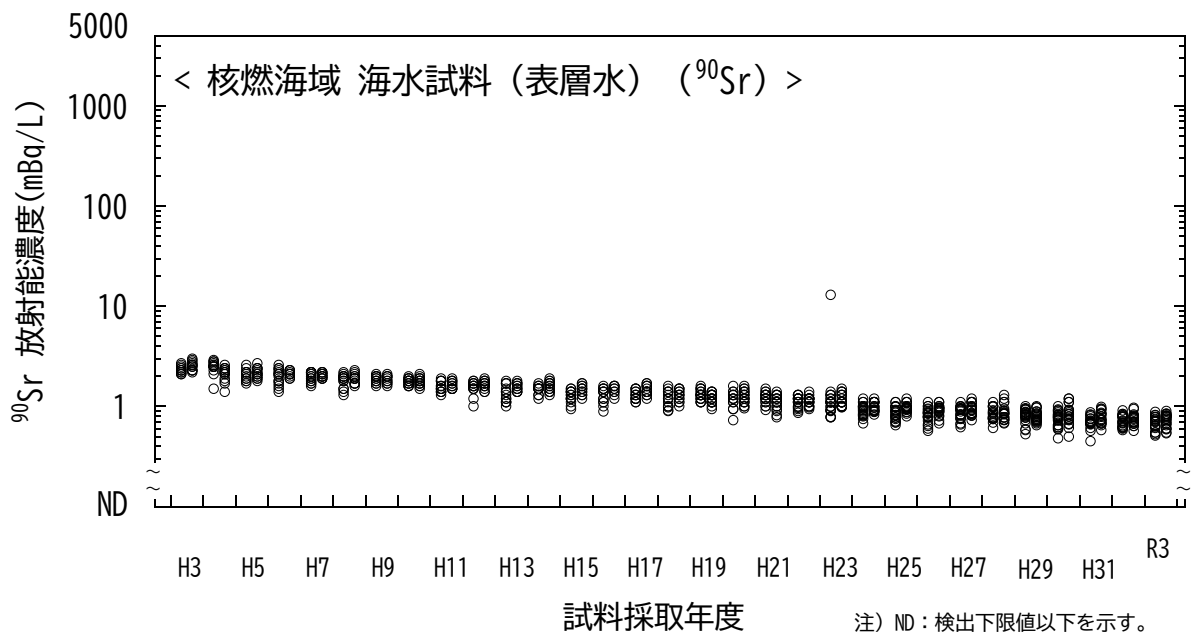


図 I-1-6-66 海水試料の ^{90}Sr 放射能濃度の経年変化（核燃海域・表層水）

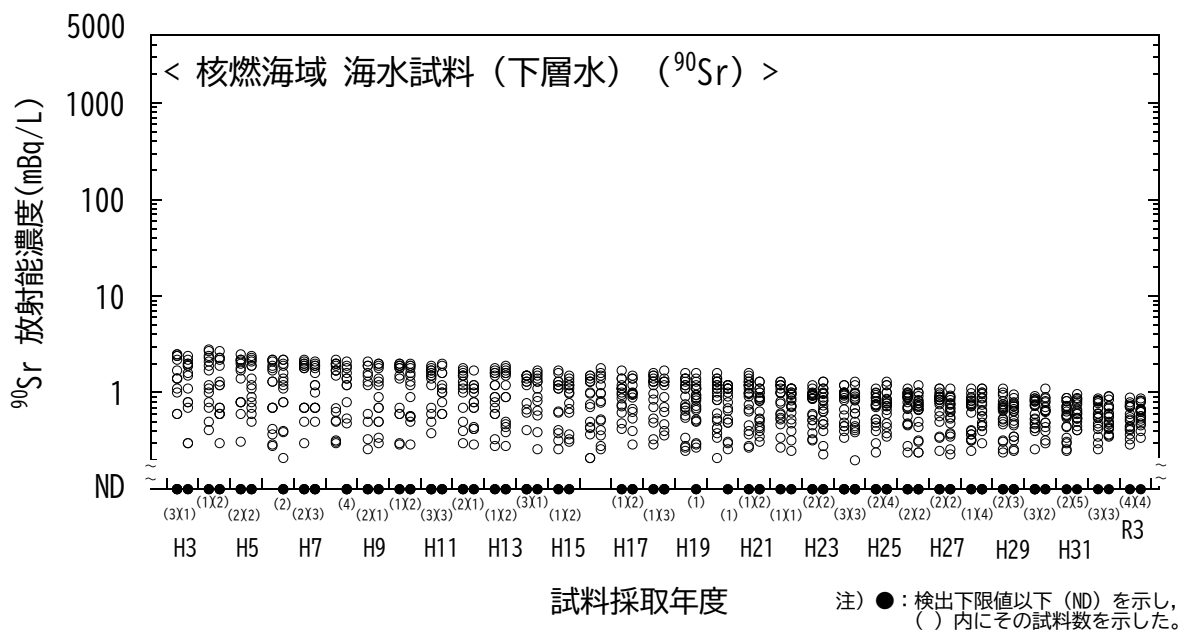


図 I-1-6-67 海水試料の ^{90}Sr 放射能濃度の経年変化（核燃海域・下層水）

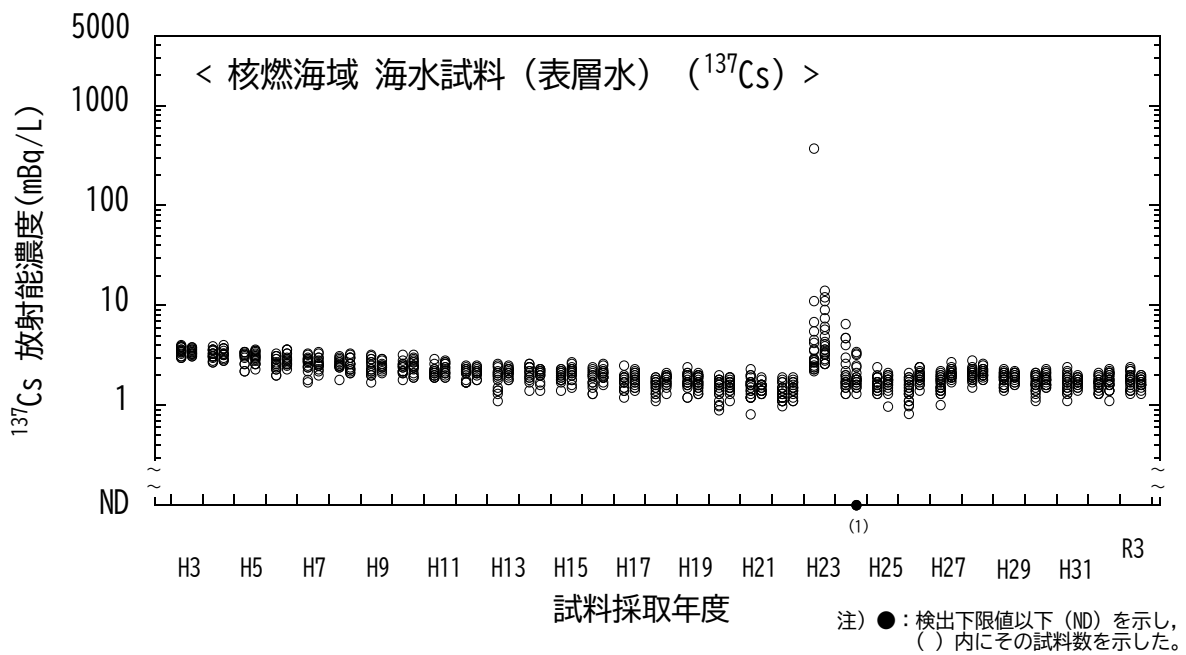


図 I-1-6-68 海水試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (核燃海域・表層水)

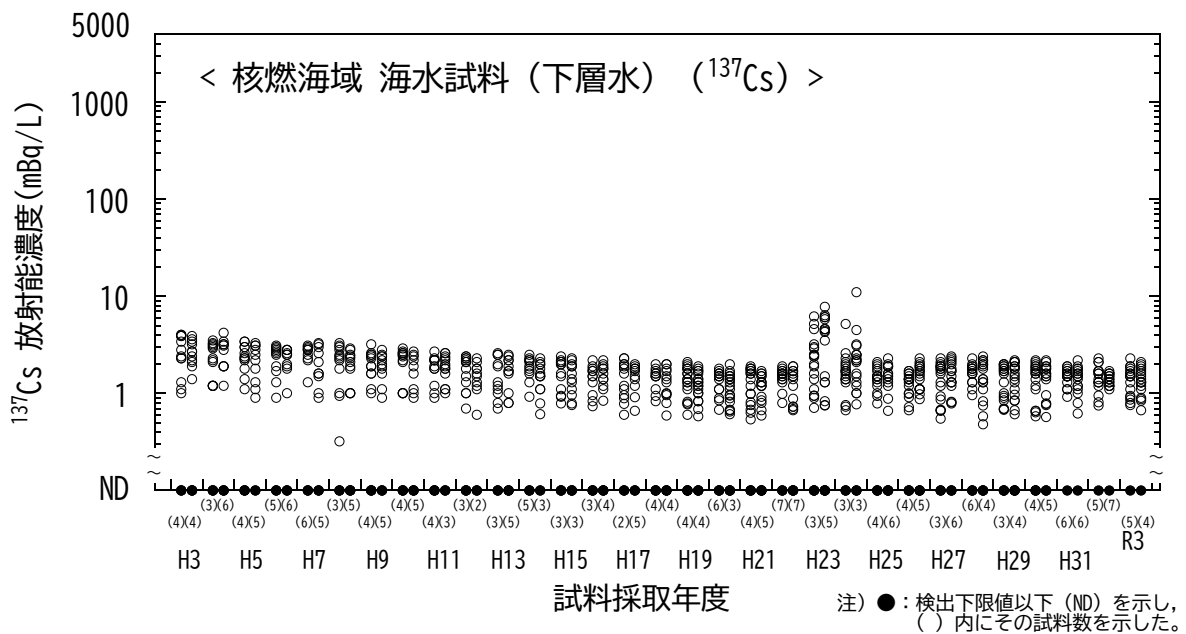


図 I-1-6-69 海水試料の ^{137}Cs 放射能濃度の経年変化 (核燃海域・下層水)

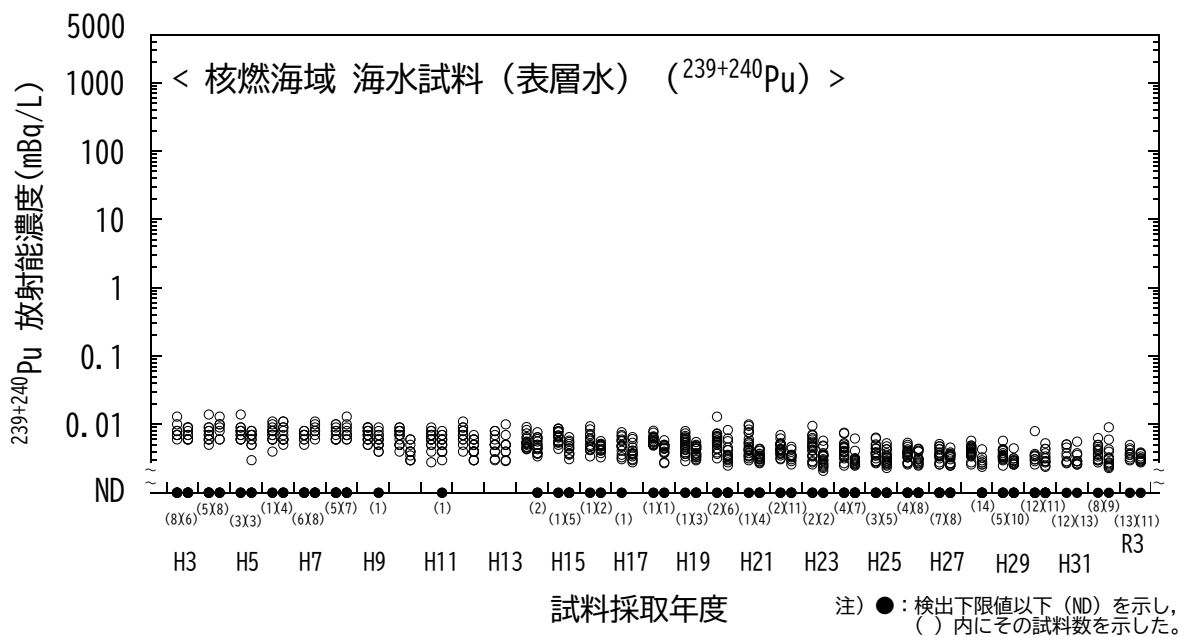


図 I-1-6-70 海水試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度の経年変化 (核燃海域・表層水)

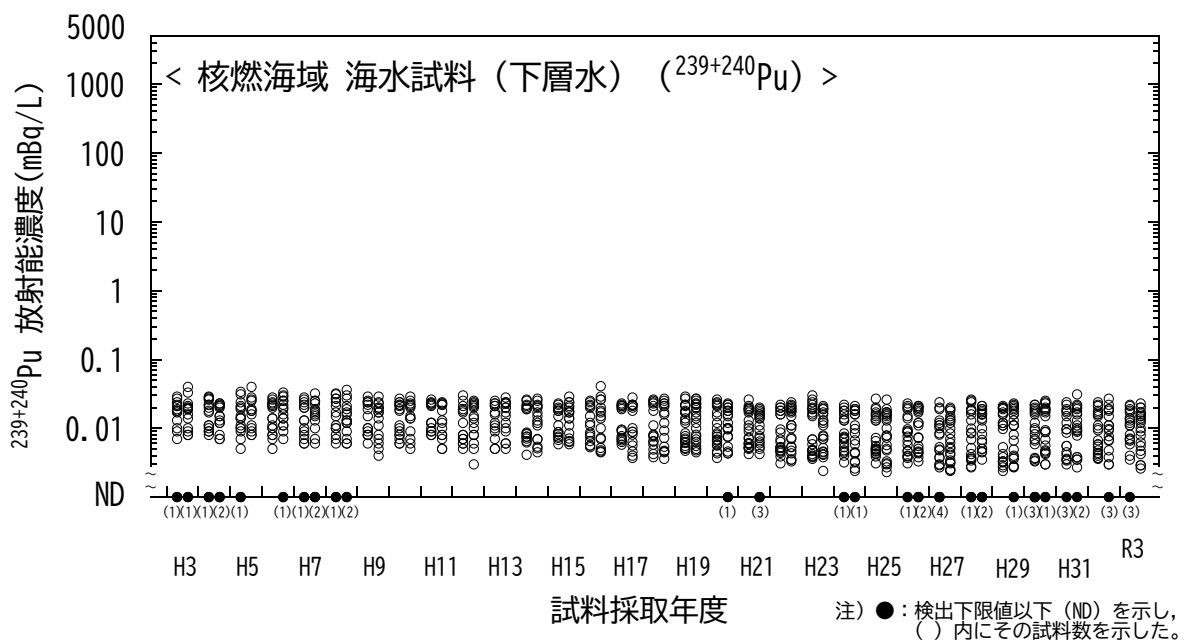


図 I-1-6-71 海水試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度の経年変化 (核燃海域・下層水)

7) 海産生物試料の代替について

(1) 令和3年度の事業における海産生物試料の代替実績

【1】海洋放射能調査の一環として実施している海産生物試料を対象とした放射能調査においては当初計画のとおり魚種が収集できないことがあり、「5) 分析結果」の関係箇所述べたとおり、別の魚種を選定したうえで代替試料として供することで予定する試料数として欠測にならないよう配慮している。試料の代替に当たっては、計画した当該海域で採取することに加えて、海産生物試料の選定（1 ページ参照）に際しての注意すべき事項として

- ・当該海域の漁場における漁獲量が多い種であること
- ・当該海域の漁場における生活期間が長い種であること

に従うよう、同じ海域で収集することはもちろん、生息層や食性の類似性の観点も参考とした。

令和3年度の調査では、表 I-1-7-1 のとおり、調査すべき 16 海域 120 試料のうち、前期（7 海域 18 試料）後期（11 海域 20 試料）の代替を実施した。

なお、ここで言う「代替」は、後述する例として「カナガシラ」を同定したところ、「カナガシラとオニカナガシラが混在」している場合、分別してしまうと放射能分析に必要な量を確保できず、やむを得ず「カナガシラ類」として混合した試料を供する場合も含めている。

表 I-1-7-1 令和3年度の調査における海産生物試料の代替実績

事業年度	時期	海域	予定魚種	代替魚種	同じ海域	生息層類似性	食性類似性
令和3年度	前期	福島第一	スズキ	ソウハチ	○	—	○
			メバル	ババガレイ	○	○	○
			イシガレイ	ヤナギダコ	○	○	○
		福島第二	マダラ	マアナゴ	○	—	○
			ミズダコ	ヤナギダコ	○	○	○
		茨城	ヒラメ	カナガシラ	○	○	○
			マコガレイ	キンメダイ	○	○	○
			ミズダコ	ヤナギダコ	○	○	○
		静岡	マゴチ	イサキ	○	—	○
			クロウシノシタ	アカカマス	○	—	○
		愛媛	カナガシラ	ハモ	○	○	○
			コウイカ	ケンサキイカ	○	—	○
		佐賀	スズキ	イサキ	○	○	○
			カサゴ	マダイ	○	—	○

(続く)

表 I-1-7-1 令和3年度の調査における海産生物試料の代替実績（続き）

事業年度	時期	海域	予定魚種	代替魚種	同じ海域	生息層類似性	食性類似性
令和3年度	前期	核燃（三沢）	マコガレイ	ヒラメ	○	○	—
		核燃（八戸）	カタクチイワシ	ホッケ	○	○	—
		核燃（山田）	スルメイカ	ヤリイカ	○	○	○
		核燃（釜石）	イカナゴ	ブリ	○	—	—
	後期	北海道	スケトウダラ	マサバ	○	—	○
		福島第一	スズキ	サバ類	○	○	○
			メバル	ユメカサゴ	○	○	○
			イシガレイ	ヤリイカ	○	—	○
		福島第二	マダラ	カナガシラ	○	○	—
			ミズダコ	マダコ	○	○	○
		茨城	マコガレイ	ムシガレイ	○	○	○
			ミズダコ	ヤナギダコ	○	○	○
		静岡	クロウシノシタ	アカシタビラメ	○	○	○
		福井第一	ヒラメ	ムシガレイ	○	○	—
			スルメイカ	キダイ	○	○	○
		島根	ヒラメ	マトウダイ	○	—	○
			ムシガレイ	ハウボウ	○	○	○
		愛媛	カナガシラ	カナガシラ類	○	○	○
		佐賀	スズキ	イサキ	○	○	○
			カサゴ	マダイ	○	—	○
		鹿児島	チダイ	ヘダイ	○	○	○
			カイワリ	マアジ	○	○	○
		核燃（三沢）	マコガレイ	マサバ	○	—	—
		核燃（釜石）	シロザケ（雌）	サバ類	○	○	○

「—」とした代替については類似性が弱いと思われるが、同一漁場から収集した試料であり、本調査の目的として欠測を避けるためにやむを得ず代替しても差し支えないと判断。

(2) これまでの代替実績

昭和 58 年度から開始した本事業では、前述のとおり試料数の欠測にならないよう、適宜代替を行ってきた。表 I-1-7-2 に東電福島第一原発事故前 5 年間と、令和 3 年度までの直近 10 年間に実施した海産生物試料の代替数を示した。

調査試料の収集については、当初の収集計画時のとおりに全て収集できるよう、漁業団体等の協力のもとで実施している。しかし荒天や気候変動などのやむを得ない理由で計画どおりに収集ができない場合、欠測とせず別海産生物を試料として供することで、試料数を確保しつつ漁場の安全に資する調査結果の提供を行ってきたところである。

これまでのところ、平成 23 年度以降に代替数の増加傾向が見られる。とりわけ福島第一及び福島第二海域で収集する魚種については平成 23 年度以降、試験操業（令和 3 年 3 月末で終了（※））となったことを受けて計画どおりに収集ができない期間が続いていたことも一因である。

一見すると、平成 27 年度以降に代替数が増加しているように見えるが、魚種の同定について、例えば、「カナガシラ」と称して収集した試料について同定作業の結果、「カナガシラ、オニカナガシラ、ホウボウ」といった具合に混合状態にある場合、厳密に試料仕分けを行うと放射能分析に際しての必要量が確保できない場合があり、その場合「カナガシラ → カナガシラ類」のように称することにしたことが一因と考えられる。また、漁獲の状況でやむを得ず、生息環境と食性についての類似性は認められるものの、代謝系が異なる魚類と頭足類の代替事例（例：「イシガレイ」→「ヤナギダコ」）などもあった（本報告書「資料編」の参考資料を併せて参照）。

（※）福島県が開設するホームページによれば、本格的操業に向けた取り組みの一環として、試験操業は令和 3 年 3 月をもって終了した旨の記載があり、併せて「令和 3 年 4 月からは、原発事故等の影響による、風評被害等で停滞した福島県の水産業の生産・流通を震災前の水準に回復するための課題を整理するとともに、解決に向けたロードマップを作成し、地区毎、漁業種類毎にできるところから課題を解決し、水揚量・流通量の拡大を目指している。」とされている。

福島県ホームページ参照（令和 4 年 3 月閲覧）：
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/list274-860.html>

表 I-1-7-2 海産生物試料の代替状況

事業実施年度	試料総数	代替実施数*
平成 18～22 年度	前期 335	前期 3 (0)
	後期 335	後期 16 (0)
平成 24 年度	前期 60	前期 6 (5)
	後期 60	後期 10 (6)
平成 25 年度	前期 60	前期 7 (4)
	後期 60	後期 6 (3)
平成 26 年度	前期 60	前期 8 (4)
	後期 60	後期 9 (4)
平成 27 年度	前期 60	前期 9 (3)
	後期 60	後期 12 (4)
平成 28 年度	前期 60	前期 15 (3)
	後期 60	後期 12 (4)
平成 29 年度	前期 60	前期 20 (3)
	後期 60	後期 20 (5)
平成 30 年度	前期 60	前期 13 (5)
	後期 60	後期 13 (5)
平成 31 年度 (令和元年度)	前期 60	前期 11 (3)
	後期 60	後期 14 (4)
令和 2 年度	前期 60	前期 14 (5)
	後期 60	後期 13 (5)
令和 3 年度	前期 60	前期 18 (5)
	後期 60	後期 20 (5)

* ()内の数字は、福島第一海域及び福島第二海域で採取した海産生物試料に生じた代替数の合計を表す（最大で6）

(3) まとめ

令和 3 年度に実施した本調査での海産生物試料の調査結果のうち、漁獲量の減少などにより目的とする海産生物試料が入手できないなどの理由により、欠測とならないように、(1) の考え方のもとで 16 海域計 120 試料のうち、計 38 試料について代替した。

2. 解析調査

1) 対照海域放射能調査

(1) 対照海域における海水・海底土試料の放射能調査

① はじめに

本調査は海洋放射能調査を補完するために、原子力発電所等、核燃料（原子燃料）サイクル施設及び東電福島第一原発事故の影響が及んでいないと考えられる海域を対照海域として設定した。この対照海域における海洋環境試料に含まれる人工放射性核種の放射能濃度を把握することは、海洋放射能調査等で得られた調査結果との対比などを行ってそれらの信頼性を検証するとともに、結果についての科学的考察を交えたとりまとめに資するためのものである。

② 対照海域の設定

我が国をとりまく海洋環境は規模の異なる暖流と寒流が入り組んで周囲を流れているため、複雑である。例えば、黒潮（暖流）は、東シナ海を北上しトカラ海峡から太平洋に入り日本列島の南側を沿うように流れ、房総半島沖を東に流れる。対馬海流（暖流）は、九州西方沖に分布する黒潮系の水塊と東シナ海の沿岸水が互いに混合することで形成され、対馬海峡を通過して日本海に流入する。親潮（寒流）は、千島列島を南下して日本の東側まで流れ込む。リマン海流（寒流）は間宮海峡（タートル海峡）からユーラシア大陸に沿って日本海を南下する。

これらの海流を考慮すると、我が国の領海内において大和堆海域、四国沖海域、襟裳沖海域（核燃沖及び釧路沖の海域を含む）の3海域はそれぞれ海流の上流に位置するところに原子力施設等がなく、当該海域の海水や海底土に含まれる放射性核種については、原子力施設等の影響を受けていないと考えられる。すなわち、大和堆海域は日本海中央部に位置し、対馬海流やリマン海流の支流に当たり、四国沖海域は黒潮の流れ込みがあり、襟裳沖海域は津軽海峡を経由した対馬海流の支流と親潮の流れ込みがある。そこで、海洋放射能調査で定めた測点での調査結果等を比較するための対照として、これらの3海域を対照海域として設定した。

③ 試料採取場所及び放射能分析の方法

（試料採取の場所及びその方法）

海底土及び海水を対象とした対照海域の調査測点を図 I-2-1-1-1 に示し、併せて試料採取位置及び試料採取日等を表 I-2-1-1-1 に示す。

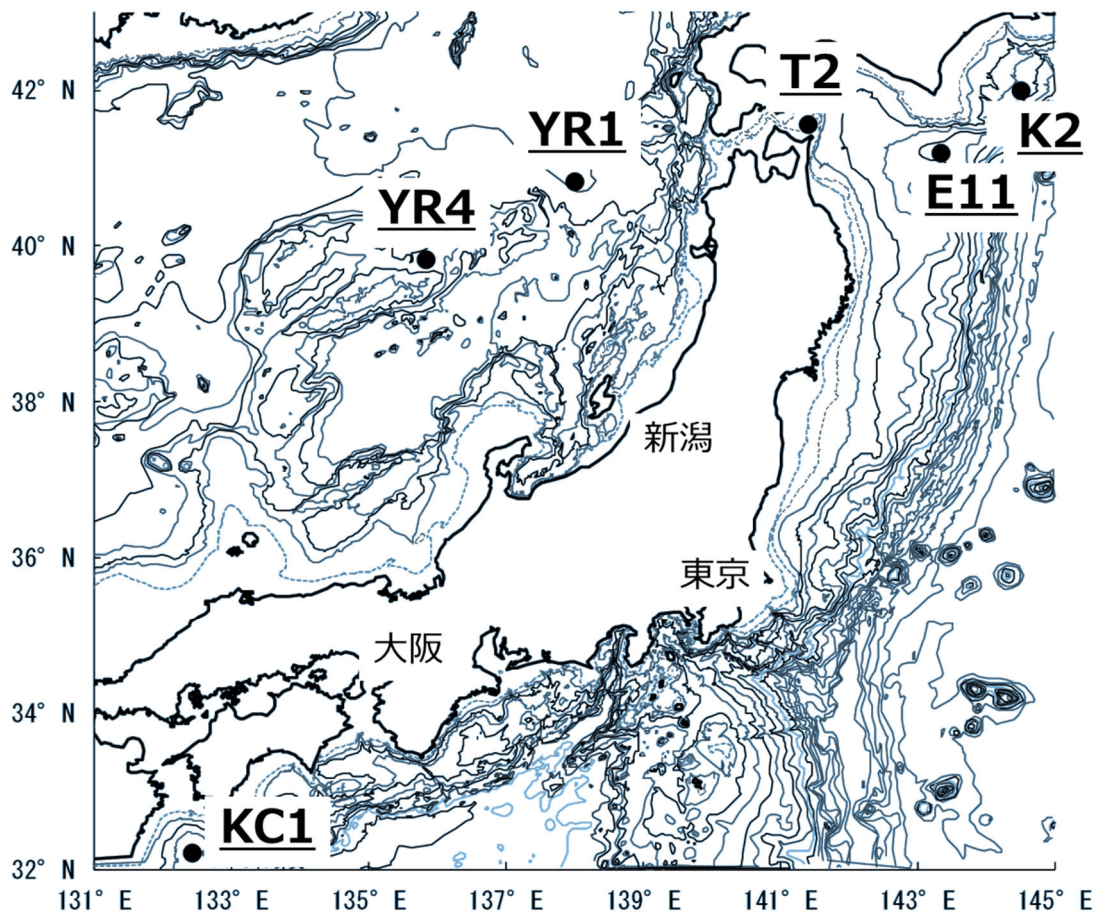


図 I -2-1-1-1 対照海域における調査測点。襟裳沖海域（襟裳沖：E11、核燃沖：T2、釧路沖：K2）、大和堆海域（YR1、YR4）及び四国沖海域（KC1）

表 I -2-1-1-1 対照海域の測点、試料採取日、採取位置及び水深

海域	測点	試料採取日 (令和3年)	採取位置*1		水深*1 (m)	採取層*2
			N	E		
襟裳沖	E11 ・海水	6月14日	41° 12'	143° 20'	2,096	鉛直6層
		10月12日			2,113	鉛直6層
	T2 ・海水	6月21日	41° 34'	141° 24'	255	表層
		10月11日			259	表層
	K2 ・海水	6月15日	42° 01'	144° 30'	1,648	鉛直6層
	四国沖	KC1 ・海水 ・海底土	6月15日	32° 13'	132° 26'	1,718
6月18日			40° 50'	138° 00'	3,561	鉛直6層
大和堆	YR1 ・海水 ・海底土	6月18日	40° 50'	138° 00'	3,561	鉛直6層
		YR4 ・海水	6月17日	39° 50'	135° 50'	1,240

*1 当該測点の表層について試料採取を行った際の採取位置と水深を記載した。

*2 採取層の深度の詳細は表 I -2-1-1-2 を参照のこと。

海水試料及び海底土試料の採取に当たっては、「1.海洋放射能調査」と同様に気象・海象条件に影響されにくく、かつ水深1,000m超にも対応できる大型採水器や大型採泥器を洋上で安全に運用するためのウインチ等、そして海洋観測機器などの必要機材を備えた大型調査船舶（例えば500トンクラス）を用いた。

また、位置情報の観測には海技士免状を有する者の助言を受けて船舶用の全地球航法衛星システム（GNSS（Global Navigation Satellite System）と称されるシステムで衛星のみ使用時で精度±10m以下；国際海事機関（International Maritime Organization；IMO）が定める国際的な基準を満たしているもの）の利用や、正確な水深を把握するための極深海音響測深機などを駆使し、試料採取位置について、測点を中心として約1,800m以内（緯度で1分以内）とし、併せて水深（深度）についてはウインチワイヤの長さ、音響測探機及び魚群探知機などの複数機器による確認を行った。

海水試料の採取に当たっては、採取深度、塩分及び水温を同時かつ連続的に観測できる機器を大型バンドーン採水器（120L×3連）に付帯させて深度等の数値を確認し、揚収時の採水容器間水温で±0.1℃（3連容器の場合、最大0.2℃の差）まで許容することとし、目的

とする海水試料を採取した。

採取した海水試料はろ過をせず、容量20Lのフレキシブル成形液体容器（藤森工業株式会社製成形液体容器「キュービテナー®」）等）に分取した。分取した海水試料は、海水に含まれる目的とする放射性核種の器壁への吸着を防ぐため、海水1L当たり1mLの濃硝酸を添加して硝酸酸性とした。

海底土試料の採取に当たっては、大型ボックス型採泥器（例えばスパー型採泥器等）またはマルチプルコアラーを用いて海底土の表面から深さ3cmまでを湿重量で約2kgを目安として採取した。採取した海底土については、採泥時に目視及び触手確認により、泥質と大まかな粒径を観測した。その後、必要量を分取して、ビニール袋に入れたのちプラスチック製容器に収納し、冷凍保管とした。

（放射能分析の方法）

海水及び海底土試料に含まれる放射性核種の放射能分析の実施に当たっては、「1. 海洋放射能調査」の場合と同様に、放射能測定法シリーズに準じた方法により実施することとし、海水及び海底土試料に含まれる放射性セシウム（高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーによる ^{134}Cs と ^{137}Cs の定量）、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能分析を行った。

なお、1,000mよりも深いところで採取した海水試料に含まれる放射性セシウムや ^{90}Sr については、その放射能濃度が極めて低く、容易に定量できないと予想されたため、例えば海水試料に対しては放射性セシウムについては約40Lを、 ^{90}Sr については約55L～約100Lを供することとし、併せて放射線計測の時間をより長くするなどの工夫をして、分析目標レベルを達成しつつ、より低い放射能濃度まで定量できるよう考慮した。

④ 結果

（海水試料）

令和3年度に実施した対照海域における放射性核種の放射能濃度の鉛直分布について、海域毎にまとめた結果を表I-2-1-1-2に、東電福島第一原発事故前の平成18～22年度の放射性核種の結果も併せて図I-2-1-1-2～4にそれぞれ示す。

なお、東電福島第一原発事故前における放射性セシウムの分析については、 ^{137}Cs を対象として実施したものであり、放射能測定法シリーズ3「放射性セシウム分析法」（昭和51年改訂）の方法に従った放射化学分析によりセシウムを化学分離・精製したのち、塩化白金酸セシウムとし、ベータ線計測により定量する方法を適用しているため、 ^{134}Cs の存在を考慮したものではない。東電福島第一原発事故前の平成22年度までは ^{134}Cs は周辺海域を含めて検出された事例はなく、ベータ線計測によって定量された放射性セシウムは全て ^{137}Cs と

見なせる。このようなことから、本調査では東電福島第一原発事故前に環境中で検出されていた放射性セシウムを ^{137}Cs として、令和 3 年度の結果との比較に用いることとした。

(放射性セシウム)

襟裳沖海域において、いずれの測点からも ^{134}Cs は検出されなかった。時期毎にみると、6 月期における ^{137}Cs の放射能濃度は、

E11 : ND~1.5mBq/L

T2 : 1.4mBq/L (表層のみ)

K2 : 0.024~1.2mBq/L

の範囲にあった。一方、10 月期における ^{137}Cs の放射能濃度は、

E11 : ND~1.5mBq/L

T2 : 1.4mBq/L (表層のみ)

の範囲にあった。また、測点 E11 及び K2 における各層で検出された ^{137}Cs の放射能濃度について、その鉛直分布は大和堆海域と同様に 6 月期及び 10 月期ともに深さが増すにつれて減少していた。

襟裳沖海域での 6 月期における各層で検出された ^{137}Cs の放射能濃度を比較したところ、表層の 3 測点では 1.2~1.5mBq/L であり、0.3mBq/L の差が見られ、250m では測点 E11 及び K2 の両測点でそれぞれ 1.2mBq/L 及び 0.81mBq/L であり、0.39mBq/L の差が見られた。これらは計数誤差 (表 I-2-1-1-2 を参照) を考慮しても差が生じていた。一方、750m を超える採取層の放射能濃度は両測点で同程度であった。さらに、それぞれの調査時期で ^{137}Cs の放射能濃度を比較すると、表層において

E11 : 1.5mBq/L (6 月期)

1.5mBq/L (10 月期)

T2 : 1.4mBq/L (6 月期)

1.4mBq/L (10 月期)

であった。なお、250m を超える採取層において、測点 E11 における各層での差はほぼ無かった。

四国沖海域の測点 KC1 において、 ^{134}Cs は全ての層で検出されなかった。また、 ^{137}Cs は全ての層で検出され、その放射能濃度は

KC1 : 0.025~1.9mBq/L

の範囲にあった。測点 KC1 の各層における ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布は、250m で極大値 (1.9mBq/L) を示し、250m を超える採取層で減少した。なお、このように 250m で極大値を示す現象は、直近の令和 2 年度に実施した調査でも確認されている。

大和堆海域において、いずれの測点でも ^{134}Cs は検出されなかった。一方、 ^{137}Cs については全ての測点で検出され、その放射能濃度は

YR1 : 0.21~1.3mBq/L

YR4 : 0.55~1.3mBq/L

の範囲にあった。両測点において ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布は表層で最大値を取った後、海底直上の深度まで減少する傾向が見られた。

両測点における各深度での ^{137}Cs の放射能濃度を比較したところ、

<250m>

YR1 : 1.2mBq/L

YR4 : 1.1mBq/L

<500m>

YR1 : 1.1mBq/L

YR4 : 0.92mBq/L

と同程度であった。これらのことから、大和堆海域の測点間の放射能濃度の差は確認されなかった。

(^{90}Sr)

襟裳沖海域において、6月期の調査で検出された ^{90}Sr の放射能濃度は、

E11 : ND~0.87mBq/L

T2 : 0.60mBq/L (表層のみ)

K2 : 0.045~0.54mBq/L

の範囲にあった。一方、10月期における調査で検出された ^{90}Sr の放射能濃度は、

E11 : ND~0.77mBq/L

T2 : 0.73mBq/L (表層のみ)

の範囲にあった。なお、測点 E11 及び K2 において検出された ^{90}Sr の放射能濃度の鉛直分布は6月期及び10月期ともに深さが増すにつれて減少し、 ^{137}Cs の鉛直分布と同様の傾向がみられた。この要因は海水中でのストロンチウムはセシウムと同様に海水中では比較的溶けやすい性質を持つことから、両者が同様な海洋循環過程を有する¹⁾ためと考えられる。

襟裳沖海域において6月期に調査した3測点での各層の放射能濃度を比較したところ、表層では0.54~0.87mBq/Lであった。250mでは測点 E11 及び K2 で0.52mBq/L 及び0.45mBq/L であり同程度、750mでは測点 E11 及び K2 でそれぞれ0.24mBq/L 及び0.18mBq/L であり、750mを超える採取層においても概ね同程度であった。さらに、調査時期での放射能濃度を比較すると、表層において

E11 : 0.87mBq/L (6月期)

0.77mBq/L (10月期)

T2 : 0.60mBq/L (6月期)

0.73mBq/L (10月期)

であった。なお、250mを超える採取層において、測点 E11 における各層での差はほぼ無かった。

四国沖海域において各層で検出された ^{90}Sr の放射能濃度は

KC1 : 0.068~0.82mBq/L

の範囲であり、表層から 250m にかけて同程度の放射能濃度が観測された一方で、 ^{137}Cs の鉛直分布でみられた 250m での極大層が確認されなかった。東電福島第一原発事故による海洋への ^{90}Sr の放出量が $(90\sim 900) \times 10^{12}\text{Bq}$ であると推定されていること²⁾を考慮すると、この量は ^{137}Cs の放出量に比べて 2 桁以上低いことから、 ^{137}Cs と ^{90}Sr の放射能の比を用いることで同事故の影響の有無を把握することができる。令和 3 年度に四国沖海域で採取した海水の $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 放射能比は 0.37~2.4 の範囲内であった。 ^{137}Cs の放射能濃度の極大値が確認された 250m における $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 放射能比は 2.4 であり、東電福島第一原発事故前に発電所海域で採取した海水試料の ^{137}Cs と ^{90}Sr の放射能比 (約 1)¹⁾と比較すると明らかに大きいことから、250m で確認された ^{137}Cs は東電福島第一原発事故による影響を受けていると考えられる。

大和堆海域において、いずれの測点 (各層) からでも ^{90}Sr が検出され、その放射能濃度は、

YR1 : 0.26~0.92mBq/L

YR4 : 0.55~0.87mBq/L

の範囲であった。また、両測点の各層で検出された ^{90}Sr の放射能濃度を比較したところ、誤差を考慮すれば概ね大和堆海域の測点間の違いは確認されなかった。

($^{239+240}\text{Pu}$)

襟裳沖海域において、6月期の調査で検出された $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、

E11 : ND~0.022mBq/L

K2 : ND~0.025mBq/L

の範囲であった。また、10月期の調査で検出された $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、測点 E11 が ND~0.024mBq/L の範囲であった。

襟裳沖海域の両測点における $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の鉛直分布は、大和堆海域と同様に 750~1,250m で極大値を示し、750~1,250m を超えると減少した。さらに、調査時期で比較すると、表層において測点 E11 が 6月期及び 10月期ともに ND であった。表層より深い採水層では各深度での差は 0.1mBq/L 以下であったことから、襟裳沖海域において、測点間及

び調査時期の違いは確認できなかった。

四国沖海域において各層で検出された $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、

KC1 : ND~0.022mBq/L

の範囲であった。放射能濃度の鉛直分布を確認したところ、表層から下層にかけて増加し、750~1,000m で極大値を示した後に減少する傾向が見られた。

大和堆海域における $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度の鉛直分布は、測点 YR1 及び測点 YR4 で深さが増すにつれて増加する傾向が見られた。海洋ではプルトニウムはセシウムやストロンチウムとは異なる振る舞いをすることが分かっている³⁾。すなわち、プルトニウムは海水中の粒子に吸着しやすく、沈降粒子とともに下層へと運ばれる性質がある。そのため、深度方向に対して放射能濃度が増す傾向が見られ、概ね 500~1,000m 層で極大値を示したのち、徐々に減少する。大和堆海域についても同じ傾向が認められた。

表 I-2-1-1-2 対照海域で採取した海水試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果

海域 測点	採取層 (m)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr		²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	
		(mBq/L)	誤差*1	(mBq/L)	誤差	(mBq/L)	誤差	(mBq/L)	誤差
6 月 期	襟裳沖 (E11)	1	ND*2	1.5	0.038	0.87	0.10	ND	
		250	ND	1.2	0.028	0.52	0.095	0.0090	0.0018
		750	ND	0.40	0.014	0.24	0.017	0.022	0.0029
		1,000	ND	0.20	0.0091	0.11	0.015	0.020	0.0026
		1,250	ND	0.10	0.0075	0.081	0.015	0.021	0.0027
		2,085	ND	ND		ND		0.013	0.0022
	襟裳沖 (K2)	1	ND	1.2	0.028	0.54	0.092	ND	
		250	ND	0.81	0.020	0.45	0.079	0.0093	0.0019
		750	ND	0.24	0.0095	0.18	0.015	0.019	0.0026
		1,000	ND	0.11	0.0080	0.14	0.015	0.021	0.0028
		1,250	ND	0.070	0.0062	0.087	0.015	0.025	0.0031
		1,662	ND	0.024	0.0036	0.045	0.014	0.014	0.0023
	襟裳沖	T2	1	ND	1.4	0.037	0.60	0.12	—*3
10 月 期	襟裳沖 (E11)	1	ND	1.5	0.033	0.77	0.090	ND	
		250	ND	1.5	0.031	0.74	0.10	0.0054	0.0014
		750	ND	0.54	0.018	0.30	0.017	0.018	0.0026
		1,000	ND	0.24	0.011	0.15	0.015	0.020	0.0027
		1,250	ND	0.096	0.0082	0.095	0.014	0.024	0.0029
		2,075	ND	ND		ND		0.012	0.0021
	襟裳沖	T2	1	ND	1.4	0.036	0.73	0.12	—
6 月 期	四国沖 (KC1)	1	ND	1.1	0.025	0.82	0.10	ND	
		250	ND	1.9	0.042	0.80	0.12	0.0090	0.0019
		500	ND	0.73	0.020	0.65	0.088	0.018	0.0026
		750	ND	0.32	0.010	0.23	0.016	0.022	0.0029
		1,000	ND	0.15	0.0074	0.14	0.016	0.022	0.0029
		1,642	ND	0.025	0.0037	0.068	0.014	0.011	0.0020
	大和堆 (YR1)	1	ND	1.3	0.033	0.83	0.12	ND	
		250	ND	1.2	0.026	0.92	0.12	0.0082	0.0018
		500	ND	1.1	0.024	0.86	0.12	0.016	0.0025
		750	ND	0.88	0.021	0.72	0.12	0.032	0.0035
		1,000	ND	0.67	0.018	0.51	0.089	0.030	0.0034
		3,540	ND	0.21	0.0095	0.26	0.018	0.027	0.0032
	大和堆 (YR4)	1	ND	1.3	0.035	0.87	0.13	ND	
		250	ND	1.1	0.025	0.76	0.11	0.014	0.0023
500		ND	0.92	0.022	0.81	0.11	0.020	0.0028	
1,204		ND	0.55	0.015	0.55	0.086	0.033	0.0034	

*1 「誤差」は係数誤差を示す。

*2 「ND」は検出下限値以下を示す。なお、おおよそのNDの値については、表 I-1-5-5 と表 I-1-5-6 の脚注を併せて参照のこと。

*3 「—」は分析対象外を示す。

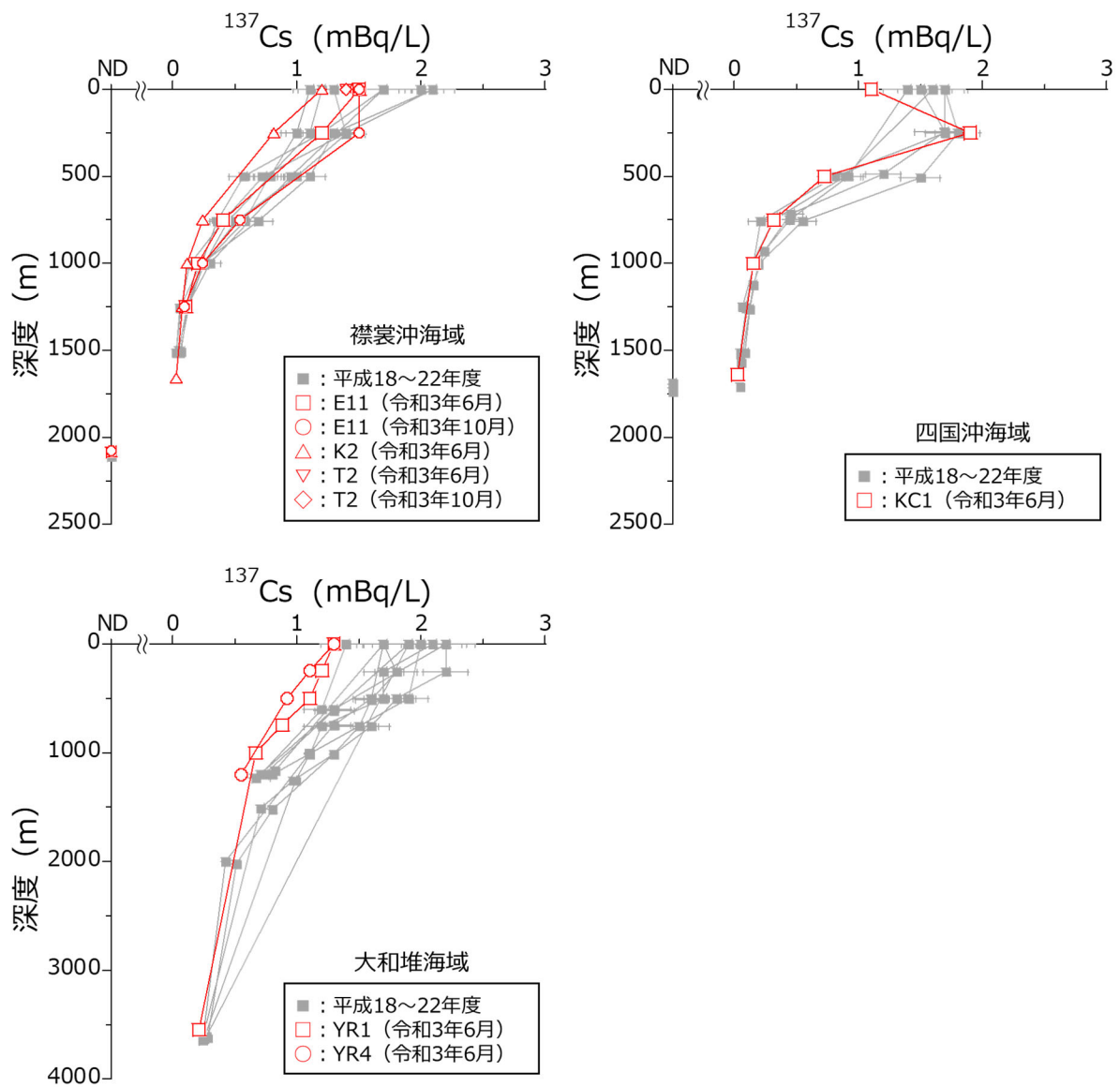


図 I -2-1-1-2 対照海域で採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。)

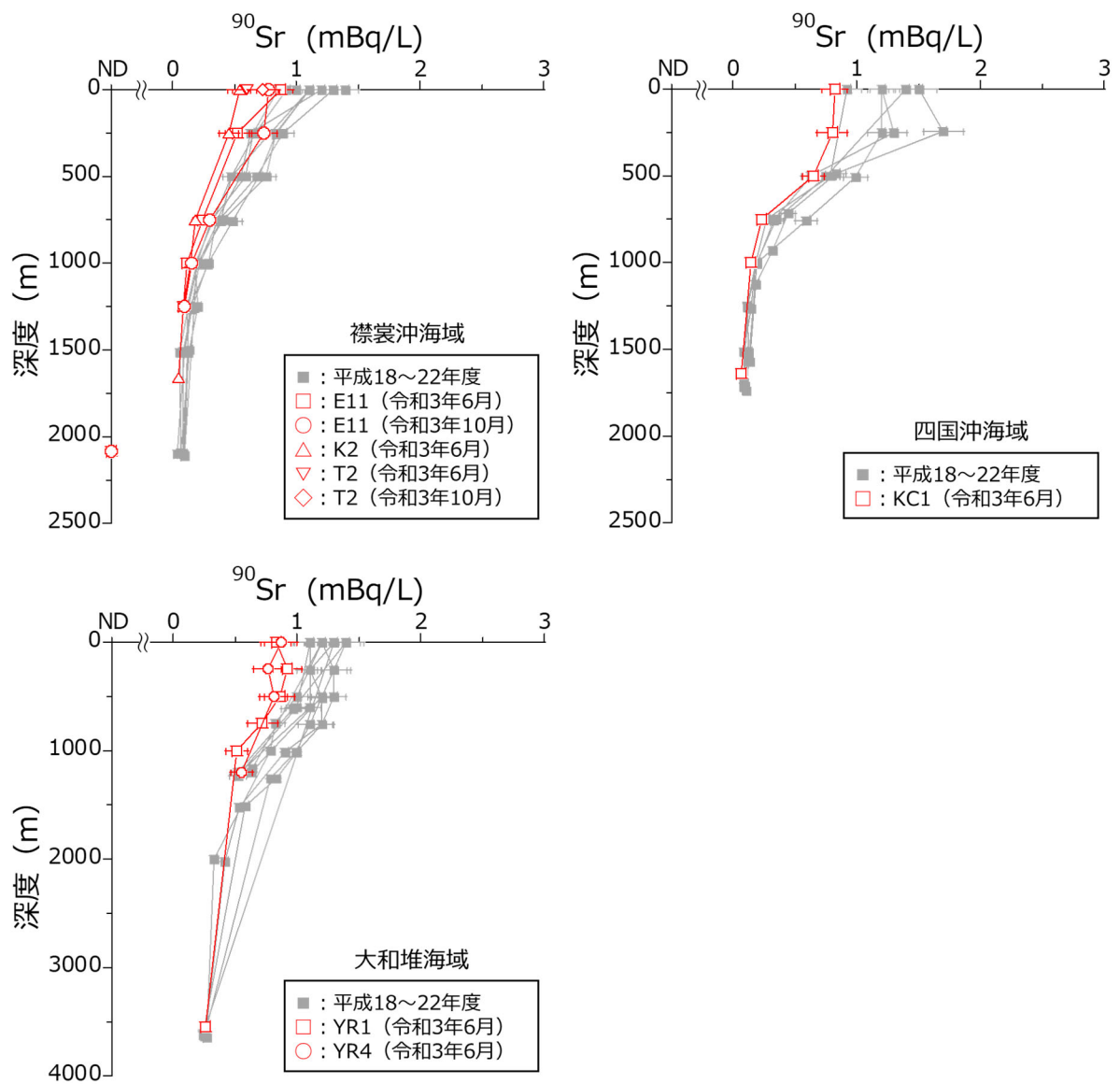


図 I -2-1-1-3 対照海域で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。)

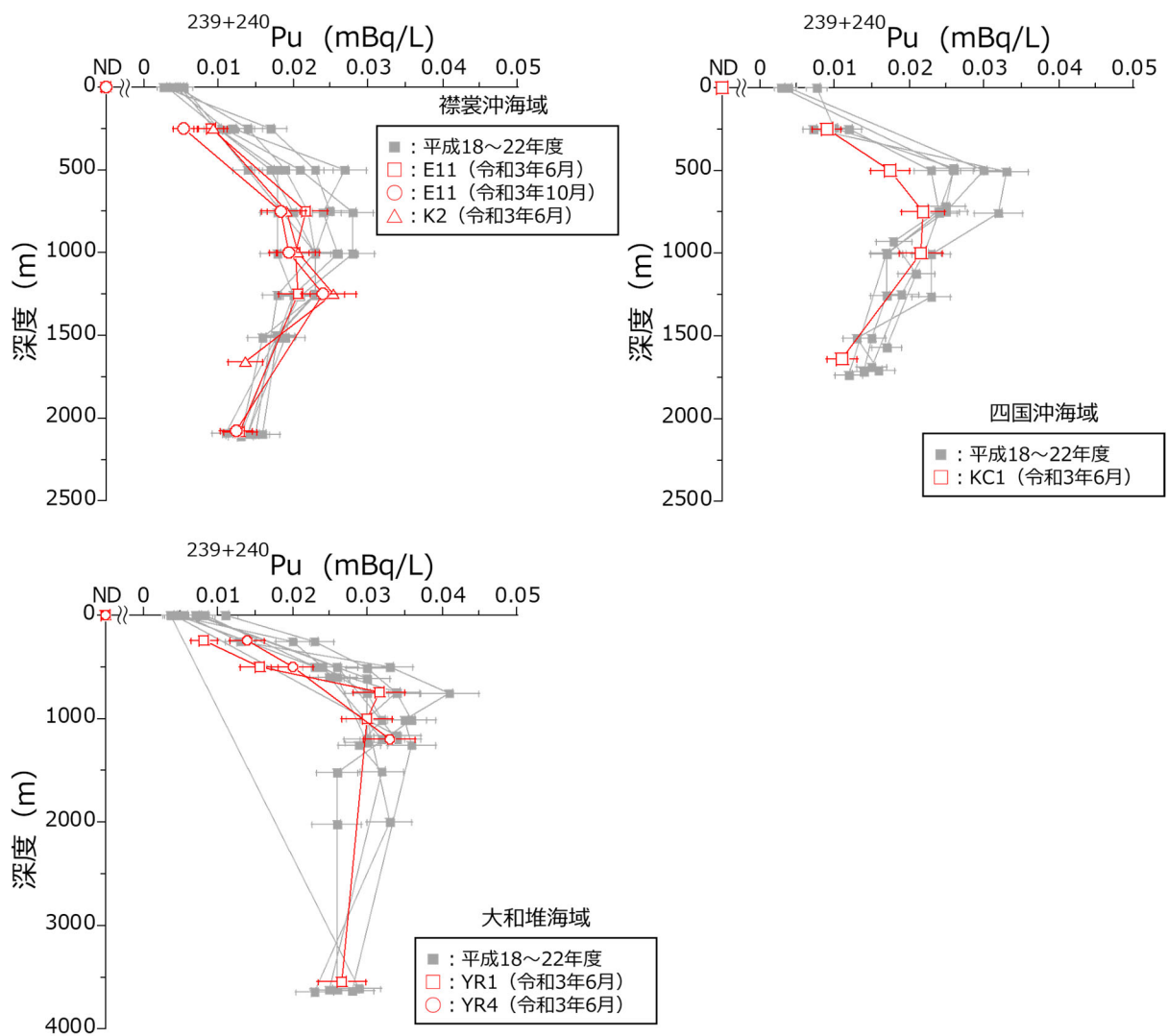


図 I -2-1-1-4 対照海域で採取した海水試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。)

(海水試料における海洋放射能調査との比較)

令和3年度に実施した海洋放射能調査(発電所海域(5~6月)及び核燃海域(6、10月))で得られた海水試料に含まれる ^{137}Cs 及び ^{90}Sr の放射能濃度の範囲について、各対照海域の結果と比較した。その際、対照海域では、表層と表層よりも深い層(250mを超える採取層)の2つに分けたほか、海洋放射能調査での調査海域を次に示すように区別した；

- ・親潮の影響がある海域として東日本海域(襟裳沖海域との比較)
青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城及び核燃
- ・日本海側に位置する海域として日本海海域(大和堆海域との比較)
北海道、新潟、石川、福井第一、福井第二及び島根
- ・黒潮の影響がある海域として西日本海域(四国沖海域との比較)
静岡、愛媛、佐賀及び鹿児島

また、海水試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ については核燃海域でのみ観測を行っているため、全ての対照海域と比較を行った。海域毎にまとめた結果について、 ^{137}Cs 及び ^{90}Sr については表I-2-1-1-3に、 $^{239+240}\text{Pu}$ については表I-2-1-1-4にそれぞれ示した。

表 I-2-1-1-3 令和3年度に発電所海域、核燃海域及び対照海域で採取した海水試料に含まれる¹³⁷Cs及び⁹⁰Srの放射能濃度の範囲及びその平均値

調査海域			採取層	¹³⁷ Cs (mBq/L)			⁹⁰ Sr (mBq/L)			
				最小値	最大値	平均値*1	最小値	最大値	平均値	
東日本海域	発電所海域 及び 核燃海域 (5-6月)	青森、 宮城、 福島第一、 福島第二、 茨城、核燃	表層	1.3	2.6	1.9	0.51	0.95	0.70	
			下層	ND*2	2.4	1.6	ND	0.94	0.62	
	対照 海域	襟裳沖 (6月)	表層	1.2	1.5	1.4	0.54	0.87	0.67	
			表層より 深い層	ND	1.2	0.35	ND	0.52	0.21	
	核燃海域(10月)		表層	1.3	2.0	1.7	0.54	0.90	0.73	
			下層	ND	2.1	1.4	ND	0.87	0.62	
	対照 海域	襟裳沖 (10月)	表層	1.4	1.5	1.5	0.73	0.77	0.75	
			表層より 深い層	ND	1.5	0.59	ND	0.74	0.32	
	日本海海域	発電所 海域	北海道、 新潟、石川、 福井第一、 福井第二、 島根	表層	1.4	2.5	1.7	0.57	1.0	0.77
				下層	0.86	2.2	1.5	0.48	0.95	0.72
対照 海域		大和堆	表層	1.3	1.3	1.3	0.83	0.87	0.85	
			表層より 深い層	0.21	1.2	0.83	0.26	0.92	0.67	
西日本海域	発電所 海域	静岡、 愛媛、 佐賀、 鹿児島	表層	1.3	2.0	1.7	0.43	0.89	0.69	
			下層	0.90	2.2	1.8	0.47	0.91	0.69	
	対照海域	四国沖	表層*3	1.1			0.82			
			表層より 深い層	0.025	1.9	0.63	0.068	0.80	0.38	

*1 「平均値」は算術平均値を示す。なお、平均値にはNDは含まない。

*2 「ND」は検出下限値以下を示す。なお、おおよそのNDの値については、表I-1-5-5と表I-1-5-6の脚注を併せて参照のこと。

*3 測点KC1の表層のみの結果であるため、最小、最大及び平均値は求めなかった。

表 I-2-1-1-4 令和3年度に核燃海域及び対照海域で採取した海水試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の範囲及びその平均値

調査海域		採取層	$^{239+240}\text{Pu}$ (mBq/L)		
			最小値	最大値	平均値*1
核燃海域 (5月)		表層	ND*2	0.0050	0.0038
		下層	ND	0.022	0.012
核燃海域 (10月)		表層	ND	0.0039	0.0033
		下層	0.0026	0.023	0.012
対照海域	襟裳沖 (5月)	表層	ND		
		表層より深い層	0.0090	0.025	0.017
	襟裳沖 (10月)	表層	ND		
		表層より深い層	0.0054	0.024	0.016
	大和堆	表層	ND		
		表層より深い層	0.0082	0.033	0.022
	四国沖	表層	ND		
		表層より深い層	0.0090	0.022	0.016

*1 「平均値」は算術平均値を示す。なお、平均値にはNDは含まない。

*2 「ND」は検出下限値以下を示す。なお、おおよそのNDの値については、表I-1-5-5と表I-1-5-6の脚注を併せて参照のこと。

(放射性セシウム)

東日本海域の表層で採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の範囲及び平均値±標準偏差は、

発電所海域（核燃海域も含む）：

1.3～2.6mBq/L（平均：1.9±0.32mBq/L）（5～6月）

1.3～2.0mBq/L（平均：1.7±0.17mBq/L）（10月：核燃海域のみ）

対照海域（襟裳沖）：1.2～1.5mBq/L（平均：1.4±0.12mBq/L）（5月）

1.4～1.5mBq/L（平均：1.5±0.050mBq/L）（10月）

であり、発電所海域での調査結果が比較的高い傾向が見られた。

発電所海域において東電福島第一原発事故以前の平均的な放射能濃度より高い ^{137}Cs が得られたのは福島第一、福島第二及び茨城海域であり、これらの場所は東電福島第一原発

周辺の海域であることから、同原発事故由来の放射性セシウムによる影響を含むと推測される。

日本海海域及び西日本海域の表層で採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の範囲及び平均値±標準偏差は、

発電所海域：1.4～2.5mBq/L（平均：1.7±0.22mBq/L）（日本海海域）

1.3～2.0mBq/L（平均：1.7±0.19mBq/L）（西日本海域）

対照海域：1.3mBq/L（大和堆）

1.1mBq/L（四国沖）

であり、発電所海域での調査結果が比較的高い傾向が見られた（図 I-2-1-1-5）。

なお、大和堆海域の表層においては、東電福島第一原発事故に起因する ^{134}Cs が平成 29 年度の調査で検出され、日本海において同事故の影響が及ぶ海域の広がり確認されたものの、平成 30 年度から令和 3 年度の調査では再び確認されることはなかった。

東日本海域の下層あるいは表層より深い層で採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度と ND を除く平均値±標準偏差は、

発電所海域（核燃海域も含む）：

ND～2.4mBq/L（平均：1.6±0.49mBq/L）（5～6 月）（42 測点中、5 測点で ND）

ND～2.1mBq/L（平均：1.4±0.40mBq/L）（10 月：核燃海域のみ）

（22 測点中、4 測点で ND）

対照海域（襟裳沖）：

ND～1.2mBq/L（平均：0.35±0.38mBq/L）（5 月）（2 測点（計 10 層）中、1 層で ND）

ND～1.5mBq/L（平均：0.59±0.55mBq/L）（10 月）（1 測点（5 層）中、1 層で ND）

であり、発電所海域において比較的高い結果が得られた。なお、比較的高い ^{137}Cs の放射能濃度が観測されたのは表層と同様に福島第一、福島第二及び茨城海域であった。これらの海域における下層では東電福島第一原発事故に起因する放射性セシウムの存在として指標となる ^{134}Cs が検出された（本報告書「【II】 東電福島第一原発周辺海域のモニタリング」の章を参照）。

日本海海域及び西日本海域の下層あるいは表層より深い層で採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の範囲及び平均値±標準偏差は、

発電所海域：0.86～2.2mBq/L（平均：1.5±0.33mBq/L）（日本海海域）

0.90～2.2mBq/L（平均：1.8±0.31mBq/L）（西日本海域）

対照海域：0.21～1.2mBq/L（平均：0.83±0.31mBq/L）（大和堆）

0.025～1.9mBq/L（平均：0.63±0.68mBq/L）（四国沖）

であり、対照海域に比べて比較的高い結果が得られた。

(^{90}Sr)

東日本海域の表層で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の範囲及び平均値±標準偏差は、

発電所海域（核燃海域も含む）：

0.51～0.95mBq/L（平均：0.70±0.11mBq/L）（5～6月）

0.54～0.90mBq/L（平均：0.73±0.10mBq/L）（10月：核燃海域のみ）

対照海域（襟裳沖）：0.54～0.87mBq/L（平均：0.67±0.14mBq/L）（5月）

0.73～0.77mBq/L（平均：0.75±0.020mBq/L）（10月）

であり、両海域での ^{90}Sr の放射能濃度は同程度であった。

日本海海域及び西日本海域の表層で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の範囲及び平均値±標準偏差は、

発電所海域：0.57～1.0mBq/L（平均：0.77±0.11mBq/L）（日本海海域）

0.43～0.89mBq/L（平均：0.69±0.13mBq/L）（西日本海域）

対照海域：0.83～0.87mBq/L（平均：0.85±0.020mBq/L）（大和堆）

0.82mBq/L（四国沖）

であり、発電所海域及び対照海域での ^{90}Sr の放射能濃度の範囲は同程度であった。対照海域の表層で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の平均値は、東電福島第一原発事故前の5年間（平成18～22年度）及び同事故後の5年間（平成23～27年度）にかけて、漸減傾向を示すほか、平成29年度から令和2年度にかけても同様の濃度範囲内にあった（図I-2-1-1-5）。さらに、発電所海域も同様な結果を示すことから、発電所海域及び対照海域における表層水に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の違いは自然変動の範囲内にあるものと考えられる。

東日本海域の下層あるいは表層より深い層で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度とNDを除く平均値±標準偏差は、

発電所海域（核燃海域も含む）：

ND～0.94mBq/L（平均：0.62±0.18mBq/L）（5～6月）（42測点中、5測点でND）

ND～0.87mBq/L（平均：0.62±0.15mBq/L）（10月：核燃海域のみ）

（22測点中、4測点でND）

対照海域（襟裳沖）：

ND～0.52mBq/L（平均：0.21±0.16mBq/L）（5月）（2測点（計10層）中1層でND）

ND～0.74mBq/L（平均：0.32±0.25mBq/L）（10月）（1測点（5層）中、1層でND）

で、発電所海域が対照海域に比べて比較的高い結果であった。

日本海海域及び西日本海域の下層あるいは表層より深い層で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の範囲及び平均値±標準偏差は、

発電所海域：0.48～0.95mBq/L（平均：0.72±0.11mBq/L）（日本海海域）

0.47～0.91mBq/L（平均：0.69±0.13mBq/L）（西日本海域）

対照海域：0.26～0.92mBq/L（平均：0.67±0.21mBq/L）（大和堆）

0.068～0.80mBq/L（平均：0.38±0.29mBq/L）（四国沖）

であり、西日本海域と四国沖を比較すると西日本海域で比較的高い結果が得られた。

以上のことから、発電所及び核燃海域で検出された ^{90}Sr の放射能濃度は対照海域より比較的高い傾向が見られるが、 ^{90}Sr の放射能濃度の水平分布は事故前と同じ程度である¹⁾ことから、両海域で検出される ^{90}Sr は過去の大気圏核爆発実験に由来する ^{90}Sr であり、東電福島第一原発事故に由来するものではないと考えられる。

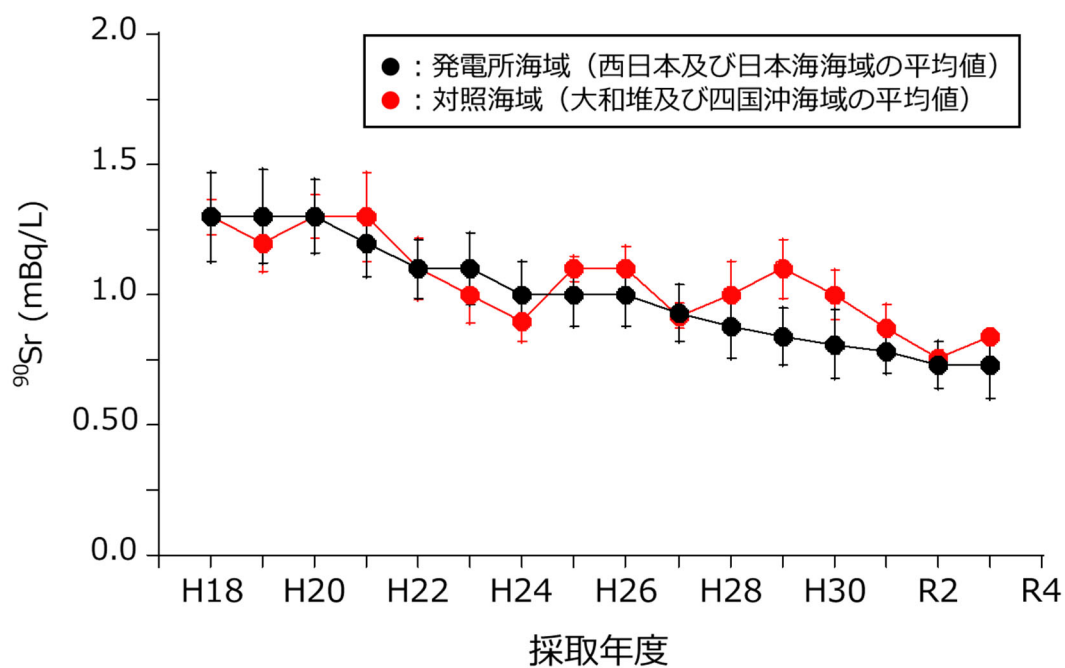
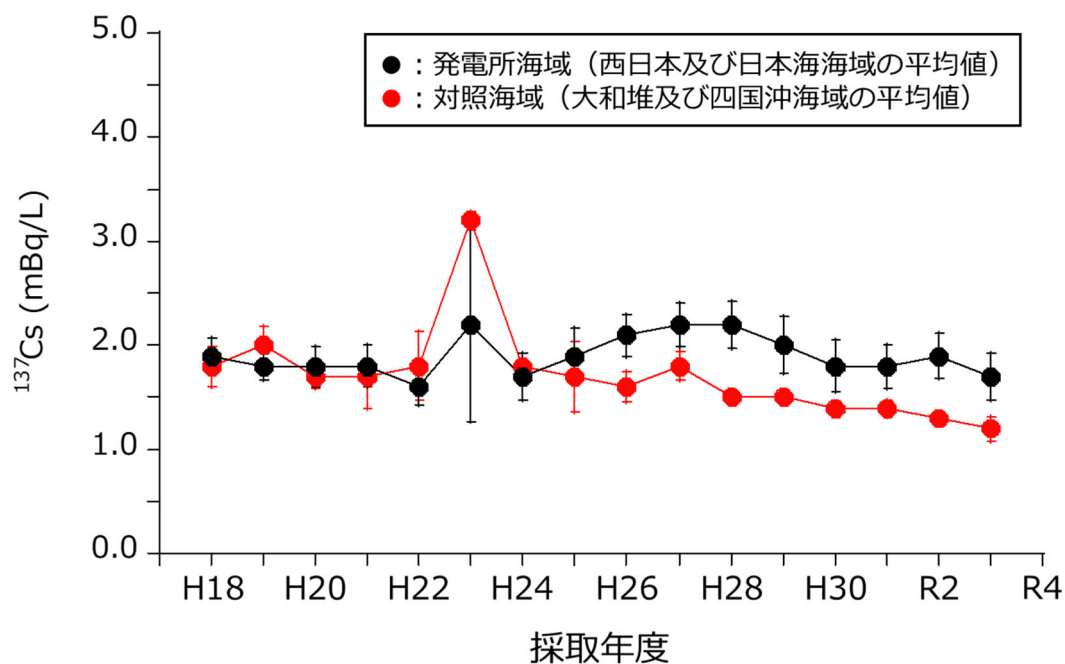


図 I -2-1-1-5 発電所海域及び対照海域で採取した表層海水試料に含まれる ^{137}Cs と ^{90}Sr の放射能濃度の平均値の経年変化 (誤差棒は各年度の標準偏差を示す。)

($^{239+240}\text{Pu}$)

表層の海水試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度と ND を除く平均値±標準偏差は、

核燃海域：ND～0.0050mBq/L（平均：0.0038±0.00064mBq/L）（5月）

（22測点中、13測点でND）

ND～0.0039mBq/L（平均：0.0033±0.00036mBq/L）（10月）

（22測点中、11測点でND）

対照海域：ND（襟裳沖：5月）（2測点中、2測点でND）

ND（襟裳沖：10月）

ND（大和堆）（2測点中、2測点でND）

ND（四国沖）

であった。

下層あるいは表層より深い層で採取した海水試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度と ND を除く平均値±標準偏差は、

核燃海域：ND～0.022mBq/L（平均：0.012±0.0056mBq/L）（5月）

（22測点中、3測点でND）

0.0026～0.023mBq/L（平均：0.012±0.0061mBq/L）（10月）

対照海域：0.0090～0.025mBq/L（平均：0.017±0.0054mBq/L）（襟裳沖：5月）

0.0054～0.024mBq/L（平均：0.016±0.0065mBq/L）（襟裳沖：10月）

0.0082～0.033mBq/L（平均：0.022±0.0086mBq/L）（大和堆）

0.0090～0.022mBq/L（平均：0.016±0.0053mBq/L）（四国沖）

であり、対照海域が発電所海域に比べてやや高い傾向が見られた。対照海域において高い放射能濃度が見られたのは、上述した ^{137}Cs や ^{90}Sr の放射能濃度が示す傾向とは異なり、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度が深度方向に対して増加することも要因の一つとして挙げられる。これは、核燃海域では全 22 測点のうち、下層の大半の深度が 200m に満たない状況である一方、対照海域では核燃海域に比べて表層よりも深い層の採取層が 250m よりも深い状況にあり、これらの深い採取層での $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度が比較的高いことから、両海域での $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度に違いが見られたと考えられる。ただし、核燃海域及び全ての対照海域における下層あるいは表層よりも深い層における $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度分布は事故前と同程度である^{3,4)}ことから、両海域で検出された $^{239+240}\text{Pu}$ は過去の大気圏核爆発実験に由来するものであり、東電福島第一原発事故に起因するものではないと考えられる。

(海底土試料)

対照海域の大和堆及び四国沖海域で採取した表層海底土試料に含まれる ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度を図I-2-1-1-6に示す。令和3年度の対照海域において、大和堆海域及び四国沖海域のいずれからとも ^{134}Cs は検出されなかった。

一方、 ^{137}Cs の放射能濃度は、

大和堆海域(測点YR4): 1.9Bq/kg-乾燥土

四国沖海域(測点KC1): 3.0Bq/kg-乾燥土

であった。また、 ^{90}Sr の放射能濃度は、

大和堆海域(測点YR4): 0.38Bq/kg-乾燥土

四国沖海域(測点KC1): 0.47Bq/kg-乾燥土

であった。さらに、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、

大和堆海域(測点YR4): 0.85Bq/kg-乾燥土

四国沖海域(測点KC1): 1.9Bq/kg-乾燥土

であった。

両海域で採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs と ^{90}Sr 放射能濃度はそれぞれ1.1Bq/kg-乾燥土及び0.09Bq/kg-乾燥土の差が見られ、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度では約1Bq/kg-乾燥土の違いが見られたが、これは測点の水深や海底土の性状が異なることに起因すると考えられる。

平成18年度の調査においては、四国沖海域の測点(KC2、KC4及びKC6)で $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度が1.2~3.2Bq/kg-乾燥土⁵⁾と、本調査での測点KC1における $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度と同程度であった。一方、平成20~22年度における測点KC1と同じ西日本海域に位置する静岡、愛媛及び鹿児島海域で採取した海底土試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度が0.8Bq/kg-乾燥土未満^{6~8)}であることから、採取場所により $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度に大きな差があることが分かった。なお、調査を開始した平成15年度以降、両海域において検出された ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の大きな変化は認められなかった。

これらのことから、大和堆海域及び四国沖海域は海底土試料についても核燃料(原子燃料)サイクル施設及び東電福島第一原発事故の影響は及んでいないと解釈できる。

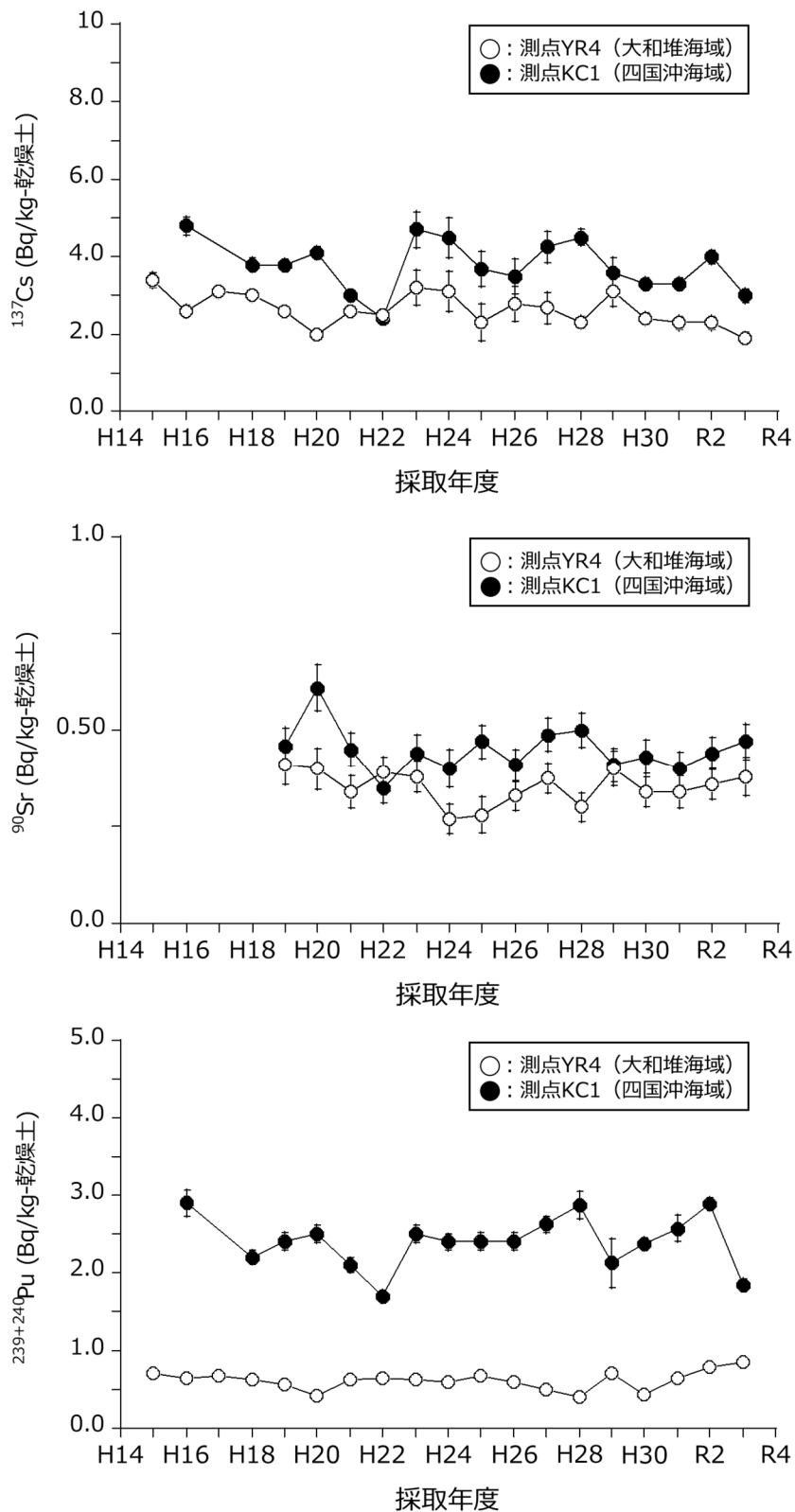


図 I -2-1-1-6 対照海域で採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の経年変化 (誤差棒は計数誤差を示す。)

(海底土における海洋放射能調査との比較)

令和3年度の調査で得られた海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の範囲について、発電所海域及び核燃海域の結果を海水同様に東日本海域、日本海海域及び西日本海域に区分して、大和堆海域及び四国沖海域と比較した。また、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ については、核燃海域でのみ観測を行っているため、両対照海域と比較した。海域毎にまとめた結果として、放射性セシウムについて表I-2-1-1-5に、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ について表I-2-1-1-6に示した。

東電福島第一原発事故以降、東日本海域及び日本海海域の一部(新潟海域)で採取した海底土試料から ^{134}Cs が検出され(後述「【I】2.2)(3)②海底土に含まれる放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査」)、また、対照海域に比べて比較的高い ^{137}Cs の放射能濃度の範囲及びそれらの平均値が得られていることから、当該海域で採取した海底土試料には事故直後に比べれば十分低いものの、東電福島第一原発事故に起因する影響がまだ存在するものと考えられる。

西日本海域においては、対照海域の値に比べて比較的低い結果が得られた。西日本海域の海底土の多くは砂質であり放射性セシウムを含みにくい性質である一方、対照海域は泥質であり放射性セシウムを含みやすい性質⁴⁾であることから、海底土の性状の違いにより ^{137}Cs の放射能濃度に差が生じたと考えられる。

一方、核燃海域で得られた ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度範囲及び平均値は対照海域と同程度だった。

表 I -2-1-1-5 令和 3 年度に発電所海域、核燃海域及び対照海域で採取した海底土試料に含まれる ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度の範囲及びその平均値

調査海域		^{134}Cs			^{137}Cs		
		(Bq/kg-乾燥土)					
		最小値	最大値	平均値* ¹	最小値	最大値	平均値
東日本 海域	青森、宮城、 福島第一、 福島第二、 茨城、核燃	ND* ²	1.1	0.79	ND	33	6.4
日本海 海域	北海道、新潟、 石川、 福井第一、 福井第二、島根	ND			ND	8.2	2.6
西日本 海域	静岡、愛媛、 佐賀、鹿児島	ND			ND	2.3	1.0
対照 海域	大和堆* ³	ND			1.9		
	四国沖* ⁴	ND			3.0		

*1 「平均値」は算術平均値を示す。なお、平均値には ND は含まない。

*2 「ND」は検出下限値以下を示す。なお、おおよその ND の値については、表 I-1-5-3 と表 I-1-5-4 の脚注を併せて参照のこと。

*3 測点 YR4 のみの結果であるため、最小、最大及び平均値は求めなかった。

*4 測点 KC1 のみの結果であるため、最小、最大及び平均値は求めなかった。

表 I -2-1-1-6 令和 3 年度に発電所海域、核燃海域及び対照海域で採取した海底土試料に含まれる ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の範囲及びその平均値

調査海域		^{90}Sr			$^{239+240}\text{Pu}$		
		(Bq/kg-乾燥土)					
		最小値	最大値	平均値* ¹	最小値	最大値	平均値
東日本 海域	核燃	ND* ²	0.34	0.23	0.33	4.8	1.3
対照 海域	大和堆* ³	0.38			0.85		
	四国沖* ⁴	0.47			1.9		

*1 「平均値」は算術平均値を示す。なお、平均値には ND は含まない。

*2 「ND」は検出下限値以下を示す。なお、核燃海域のおおよその ND の値については、表 I-1-5-4 の脚注を併せて参照のこと。

*3 測点 YR4 のみの結果であるため、最小、最大及び平均値は求めなかった。

*4 測点 KC1 のみの結果であるため、最小、最大及び平均値は求めなかった。

⑤ まとめ

海洋放射能調査を補完するために、原子力発電所等、核燃料（原子燃料）サイクル施設及び東電福島第一原発事故の影響が及んでいないと考えられる海域として、大和堆、四国沖及び襟裳沖を対照海域に設定した。これらの海域で採取した海水試料に加え、大和堆及び四国沖海域で採取した海底土試料について、放射性セシウム、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ について放射能濃度を分析した。その結果から、発電所海域及び核燃海域における当該海域のバックグラウンドと考えられる放射能濃度を把握した。

対照海域における海水試料に含まれる放射性セシウム及び ^{90}Sr の放射能濃度は、同海域における東電福島第一原発事故前の5年間（平成18～22年度）の範囲内にあり、また、平均値は発電所海域及び核燃海域の調査結果と大きく異ならなかった。対照海域における海水中の $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、表層で核燃海域の値と同程度かそれよりも低く、表層より深い層で核燃海域の値よりも高い傾向が見られた。これらの放射能濃度は、事故前5年間の範囲内にあることから、過去の大気圏核爆発実験に由来するプルトニウムであると考えられる。対照海域における海底土に含まれる放射性核種の放射能濃度は、事故前5年間の範囲内にあった。

これらのことから、本調査で設定した対照海域は、発電所海域及び核燃海域における海水及び海底土に含まれる放射性核種の放射能濃度について、そのバックグラウンドを把握するうえで有効であると解釈できる。

また、発電所海域及び核燃海域における海水試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度を比較した結果から、東電福島第一原発事故による影響のあった海域においても対照海域と同じ放射能濃度レベルに近づきつつあることが分かった。海水試料に含まれる ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度については、全ての海域において対照海域と同程度であった。

このほか、海底土において、福島第一、福島第二及び茨城海域で東電福島第一原発事故の影響による放射性セシウムが検出されており、対照海域に比べて比較的高い結果が得られた。しかし、それ以外の海域や核燃海域の海底土試料に含まれる ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は対照海域と同じ放射能濃度の範囲にあったことから、東電福島第一原発事故の影響が及んでいないものと考えられる。

引用文献

- 1) 及川真司・渡部輝久・高田兵衛・鈴木千吉・中原元和・御園生 淳 (2013) . 日本周辺の海水, 海底土, 海産生物に含まれる ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の長期的推移—チェルノブイリ事故前から福島第一原子力発電所事故後まで—. 分析化学, **62**, 455-474.
- 2) Casacuberta, N., Masqué, P., Garcia-Orellana, J., Garcia-Tenorio, R. and Buesseler, K.O. (2013). ^{90}Sr and ^{89}Sr in seawater off Japan as a consequence of the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Biogeosciences*, **10**, 3649-3659.
- 3) Zheng, J., and Yamada, M. (2005). Vertical distributions of $^{239+240}\text{Pu}$ activities and $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratios in sediment cores: implications for the sources of Pu in the Japan Sea. *Science of the Total Environment*, **340**, 199-211.
- 4) Oikawa, S., Watabe, T. and Takata, H. (2015). Distributions of Pu isotopes in seawater and bottom sediments in the coast of the Japanese archipelago before and soon after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **142**, 113-123.
- 5) 海洋生物環境研究所 (2007). 平成 18 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書
- 6) 海洋生物環境研究所 (2009). 平成 20 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書
- 7) 海洋生物環境研究所 (2010). 平成 21 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書
- 8) 海洋生物環境研究所 (2011). 平成 22 年度海洋環境放射能総合評価事業 成果報告書

(2) 対照海域における海産生物試料の放射能調査

① はじめに

海洋放射能調査を補完するために、海産生物試料を採取して、それらに含まれる放射性核種の放射能濃度等を調査するとともに、海産生物試料を対象とした海洋放射能調査で得られた結果との比較を行った。

設定した対照海域について、海水及び海底土試料採取のための調査測点を含めた概略図を図 I-2-1-1-1 に示す。

令和 3 年度の調査では、

大和堆海域：スルメイカ、ホッコクアカエビ

四国沖海域：マアジ（スルメイカの代替）、ゴマサバ

襟裳沖海域：ババガレイ（スルメイカの代替）、マダラ（シロザケ（雄）の代替）

をそれぞれ収集して分析試料とした。

② 方法

スルメイカについては部位別に分け、筋肉（外套膜、腕足、頭部）を分析用試料として放射能分析に供した。漁獲された時期が 4～9 月の試料を前期、10～12 月の試料を後期と区分し、以降の文中で記載した。

ホッコクアカエビ（市場で「甘えび」と称するもの）は腹肢に卵を抱えていた雌を分析対象とし、その腹部より、側甲、腹肢、尾肢及び尾節を取り除き、筋肉のみとして放射能分析に供した。

マアジ、ゴマサバ、ババガレイ及びマダラは三枚または五枚に下ろし、分け取った筋肉を分析用試料として放射能分析に供した。

それぞれの分析用試料については、「1. 海洋放射能調査」と同様に放射能測定法シリーズに準拠した放射能分析法を適用することとした。

③ 結果

海産生物試料に含まれる放射性核種の放射能濃度のほか、一連の試料分析に関する記録について表 I-2-1-2-1～3 に示す。

(スルメイカ)

対照海域、海洋放射能調査の対象とした福井第一海域及び核燃海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の経年変化を図 I-2-1-2-1 に示す。

大和堆で採取したスルメイカの筋肉から ^{134}Cs と ^{137}Cs はともに検出されなかった。過去の調査では、平成 23 年度に東電福島第一原発事故の影響を受けて、全ての海域において事故前の最大値を超える ^{137}Cs の放射能濃度が検出されたが、対照海域においては事故後に

検出された最大値が事故前の最大値と同程度であり、大きな変化は認められなかった。

平成 15 年度から事故前までの期間に実施してきた調査で得られた ^{137}Cs に係る結果のうちで最も高い放射能濃度は、それぞれ

四国沖海域： $0.045 \pm 0.011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物

大和堆海域： $0.065 \pm 0.012 \text{Bq/kg}$ -生鮮物

福井第一海域： $0.058 \pm 0.011 \text{q/kg}$ -生鮮物

核燃海域： $0.041 \pm 0.011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物

であり、襟裳沖海域では全ての試料で検出下限値以下であった。また、海洋放射能調査の調査海域である福井第一海域及び核燃海域では事故後に 0.1Bq/kg -生鮮物を超える値が検出された。

対照海域及び核燃海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の経年変化を図 I-2-1-2-2 に示す。

平成 29 年度では、大和堆海域と四国沖海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は検出下限値以下であった。平成 30 年度においては、大和堆で採取したスルメイカの筋肉から $0.00029 \pm 0.000081 \text{Bq/kg}$ -生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。平成 31（令和元）年度から令和 2 年度は大和堆海域、四国沖海域で採取したスルメイカの筋肉から $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかったが、令和 3 年度は大和堆海域で採取したスルメイカの筋肉から $0.00043 \pm 0.00013 \text{Bq/kg}$ -生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。

なお、核燃海域では平成 31（令和元）年度に採取したスルメイカの筋肉からは $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかったものの、令和 2 年度及び令和 3 年度に採取したスルメイカの筋肉から $0.00044 \sim 0.00062 \text{Bq/kg}$ -生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出されており、大和堆海域で採取した前述のスルメイカの結果と近年の放射能濃度とほぼ同水準であった。

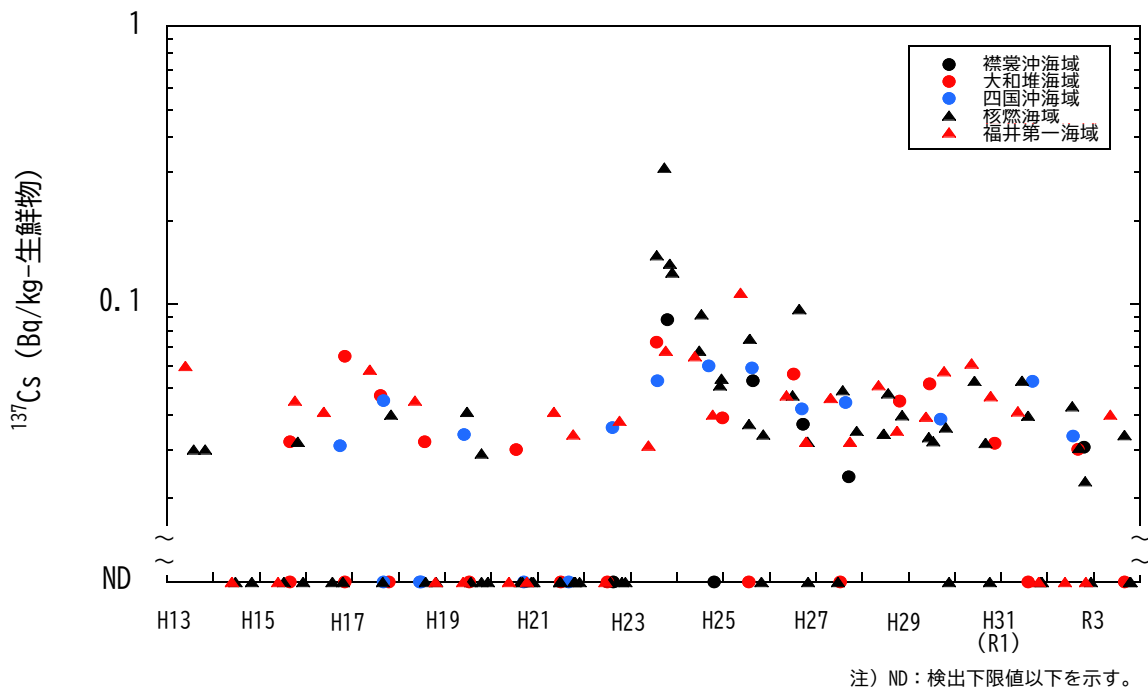


図 I -2-1-2-1 対照海域、福井第一海域及び核燃海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の経年変化

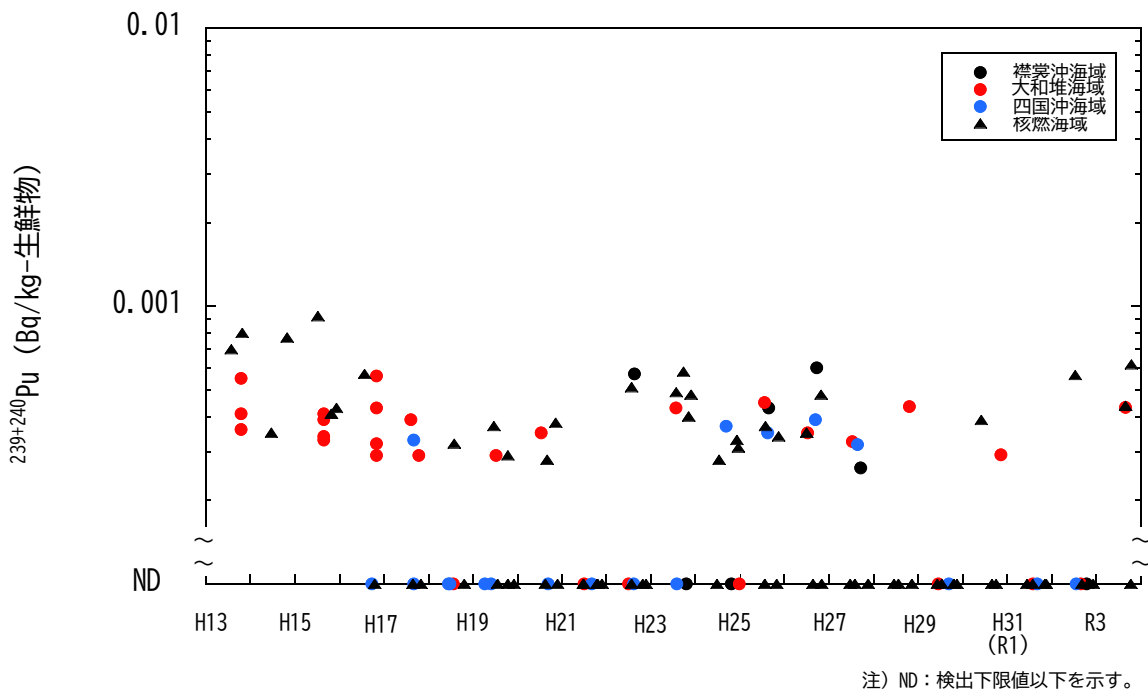


図 I -2-1-2-2 対照海域と核燃海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の経年変化

(ホッコクアカエビ)

大和堆海域で採取したホッコクアカエビの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.045 \pm 0.0071 \text{Bq/kg}$ -生鮮物、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は $0.00041 \pm 0.00011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物であり、令和2年度と同程度であった。

一方、石川海域で採取したホッコクアカエビの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.039 \pm 0.0075 \text{Bq/kg}$ -生鮮物（前期）、 $0.032 \pm 0.0085 \text{Bq/kg}$ -生鮮物（後期）であり、大和堆海域で採取されたものと同程度の放射能濃度であった。また、大和堆海域で採取したホッコクアカエビの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は、令和2年度以前において石川海域で採取したものや東電福島第一原発事故前に大和堆海域や石川海域で採取したものと同程度であった（図 I-2-1-2-3）。

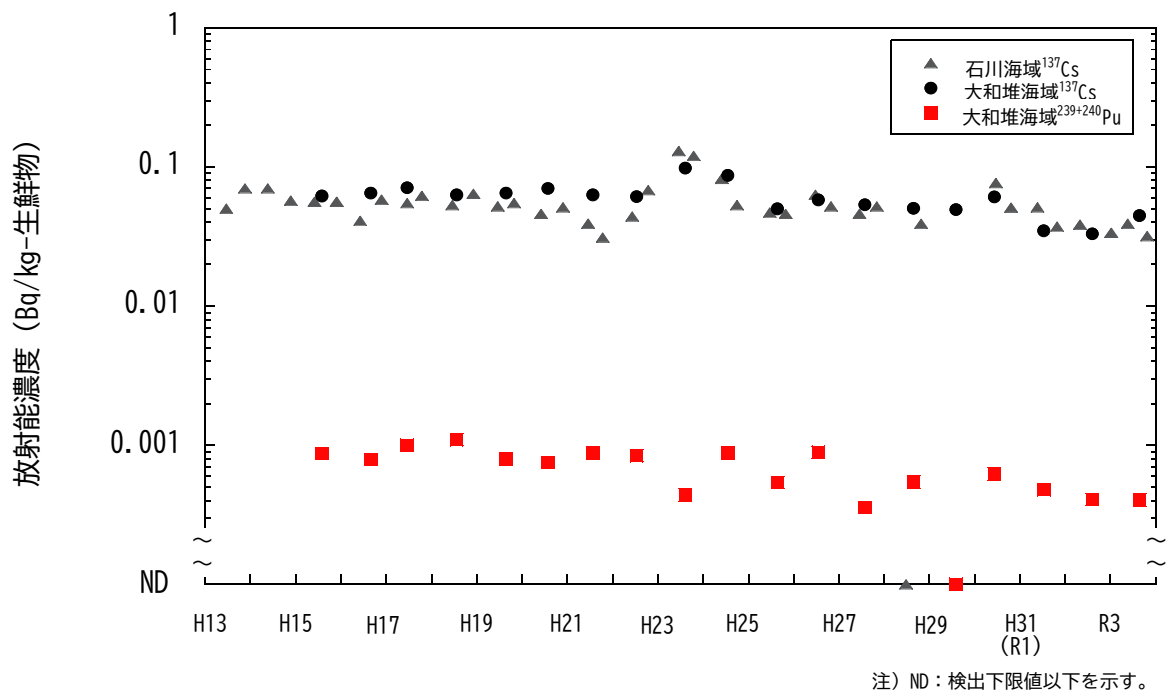


図 I-2-1-2-3 対照海域（大和堆海域）と石川海域で採取したホッコクアカエビの筋肉に含まれる ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の経年変化

(ゴマサバ)

四国沖海域で採取したゴマサバの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.10 \pm 0.0085 \text{Bq/kg}$ -生鮮物であり、 ^{134}Cs と $^{239+240}\text{Pu}$ は令和 2 年度に引き続き検出されなかった。また、ゴマサバの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は平成 27 年度に核燃海域で採取したゴマサバ及び平成 29 年度に青森海域で採取したゴマサバと同程度であった。なお、四国沖海域で採取したゴマサバの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は、東電福島第一原発事故後の平成 24 年度に採取したものでわずかに上昇が見られたが、それ以降に大きな放射能濃度の変化は認められず、令和 3 年度に採取したものについては事故前の値と同程度であった (図 I-2-1-2-4)。

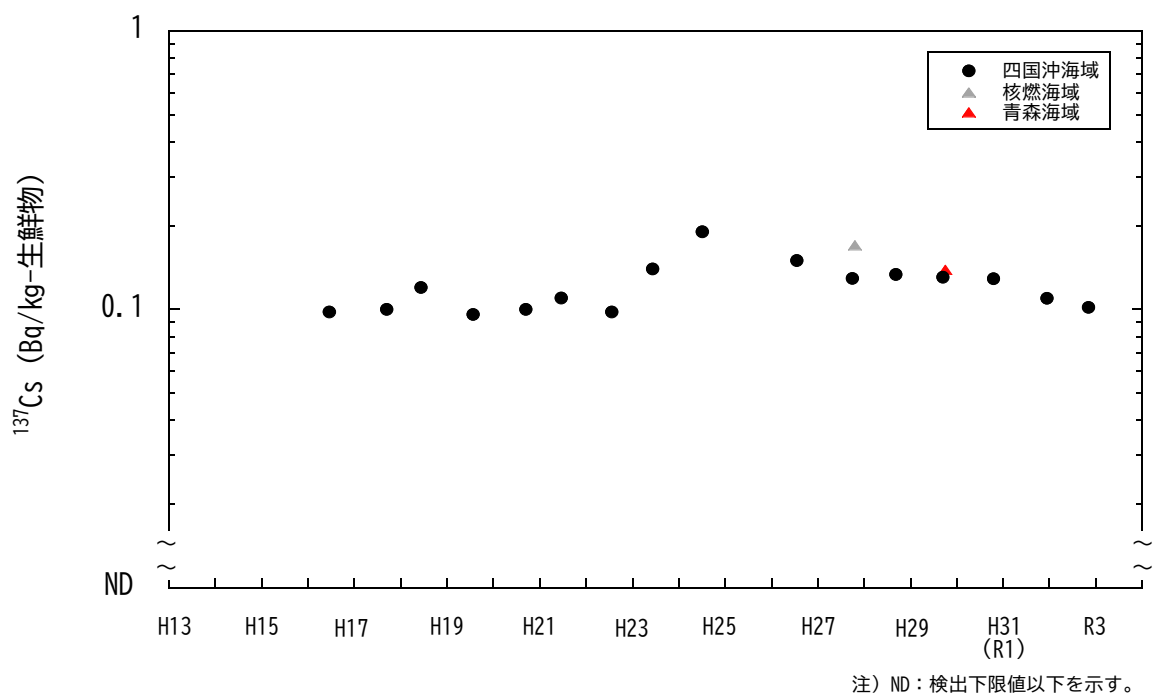


図 I-2-1-2-4 対照海域 (四国沖海域)、核燃海域及び青森海域で採取したゴマサバの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の経年変化

(マアジ)

四国沖海域で採取したマアジの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.15 \pm 0.011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物であり、平成 30 年度の結果 ($0.18 \pm 0.0055 \text{Bq/kg}$ -生鮮物)と同程度であった。また、 ^{134}Cs と $^{239+240}\text{Pu}$ は平成 30 年度と同様に検出されなかった。令和 3 年度の調査においてマアジは鹿児島海域でも採取されており、鹿児島海域で採取したマアジの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.10 \pm 0.011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物であり、四国沖海域で採取したものと同程度の放射能濃度であった。

(ババガレイ)

襟裳沖海域で採取したババガレイの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.035 \pm 0.0080 \text{Bq/kg}$ -生鮮物であり、 ^{134}Cs と $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかった。令和 3 年度の調査においてババガレイは福島第一海域（前期）でも採取されており、福島第一海域で採取したババガレイの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.15 \pm 0.0086 \text{Bq/kg}$ -生鮮物であり、襟裳沖海域で採取したものは福島第一海域で採取したものに比べて約 1/4 倍の放射能濃度であった。

(マダラ)

襟裳沖海域で採取したマダラの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.14 \pm 0.011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物であり、平成 31（令和元）年度の結果 ($0.13 \pm 0.011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物)と同程度であった。また、 ^{134}Cs と $^{239+240}\text{Pu}$ は平成 31（令和元）年度と同様に検出されなかった。令和 3 年度の調査においてマダラは宮城海域や核燃海域（八戸沖及び三陸北部沖）でも採取されており、宮城海域で採取したマダラの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は $0.33 \pm 0.011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物（前期）、 $0.27 \pm 0.013 \text{Bq/kg}$ -生鮮物（後期）であり、核燃海域では $0.14 \sim 0.21 \text{Bq/kg}$ -生鮮物の範囲にあった。襟裳沖海域で採取したマダラは核燃海域で採取したものと同程度の放射能濃度であった。また、襟裳沖海域で採取したマダラの ^{137}Cs の放射能濃度は、東電福島第一原発事故前の過去 5 年間（平成 18～22 年）の発電所海域（福島第一、福島第二及び宮城海域）及び核燃海域のマダラの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度濃度範囲（ $0.074 \sim 0.22 \text{Bq/kg}$ -生鮮物）内であった。

表 I-2-1-2-1 対照海域（大和堆海域）で採取した海産生物試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果

調査海域		対照海域（大和堆海域）		
試料		スルメイカ	ホッコクアカエビ	
漁獲年月日		令和3年8月29日	令和3年8月23日	
漁獲場所		大和堆	大和堆	
漁法		釣り	底曳網	
試料の個体数		95	1533 ^{*3}	
平均全長±標準偏差 最小/最大(cm)		22.7±1.2 ^{*2} 20.0/25.8 ^{*2}	16.2±0.8 ^{*4} 14.2/18.3 ^{*4}	
平均体重±標準偏差 最小/最大(g)		228.0±38.7 138.2/331.7	16.6±2.9 ^{*4} 10.5/24.9 ^{*4}	
供試部位		筋肉	筋肉	
灰分(%)		1.99	1.55	
分析 供試量 (g 灰)	γ核種	73.47	66.98	
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	19.90	15.54	
測定 年月日	γ核種	令和3年11月1日	令和3年11月1日	
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	令和3年12月13日	令和3年12月13日	
放射能濃度 ^{*1} (Bq/kg-生鮮物)				
人工 放射 性核 種	γ	¹³⁴ Cs	ND	ND
		¹³⁷ Cs	ND	0.045±0.0071
	その他の γ核種	⁵¹ Cr、 ⁵⁴ Mn、 ⁵⁸ Co、 ⁶⁰ Co、 ⁵⁹ Fe、 ⁶⁵ Zn、 ⁹⁵ Zr、 ⁹⁵ Nb、 ¹⁰³ Ru、 ¹⁰⁶ Ru、 ^{110m} Ag、 ¹²⁵ Sb、 ¹⁴⁰ Ba 及び ¹⁴⁴ Ce は、すべて検出下限値以下であった。		
α	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	0.00043±0.00013	0.00041±0.00011	
自然 放射 性核 種	γ	⁷ Be	ND	ND
		⁴⁰ K	120±0.75	73±0.46
		²⁰⁸ Tl	ND	ND
		²¹⁴ Bi	ND	ND
		²²⁸ Ac	ND	ND

*1 試料の放射能濃度は漁獲年月日に減衰補正した値（²³⁹⁺²⁴⁰Pu は測定終了時の値）で、誤差は計数誤差である。測定値が検出下限値以下の場合は「ND」で示す。

*2 外套長の値である。

*3 任意の100個体から得られた平均体重で試料重量を除いて求めた個体数である。

*4 任意の100個体から得られた値である。

表 I-2-1-2-2 対照海域（四国沖海域）で採取した海産生物試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果

調査海域		対照海域（四国沖海域）	
試料		マアジ*2	ゴマサバ
漁獲年月日		令和4年1月18日	令和4年1月13日
漁獲場所		安芸郡芸西村沖	土佐清水沖
漁法		定置網	一本釣り
試料の個体数		59	50
平均全長±標準偏差 最小／最大(cm)		33.1±1.5 31.0/38.5	35.6±1.3 33.6/38.2
平均体重±標準偏差 最小／最大(g)		330.0±32.4 286.1/435.3	453.7±53.7 376.6/586.8
供試部位		筋肉	筋肉
灰分(%)		1.44	1.51
分析 供試量 (g 灰)	γ核種	62.62	58.52
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	14.57	15.21
測定 年月日	γ核種	令和4年2月3日	令和4年1月31日
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	令和4年2月8日	令和4年2月8日
放射能濃度*1 (Bq/kg-生鮮物)			
人工 放射性 核種	γ	¹³⁴ Cs	ND
		¹³⁷ Cs	0.15±0.011
	その他の γ核種	⁵¹ Cr、 ⁵⁴ Mn、 ⁵⁸ Co、 ⁶⁰ Co、 ⁵⁹ Fe、 ⁶⁵ Zn、 ⁹⁵ Zr、 ⁹⁵ Nb、 ¹⁰³ Ru、 ¹⁰⁶ Ru、 ^{110m} Ag、 ¹²⁵ Sb、 ¹⁴⁰ Ba 及び ¹⁴⁴ Ce は、すべて検出下限値以下であった。	
α	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	ND	ND
自然 放射性 核種	γ	⁷ Be	ND
		⁴⁰ K	130±0.72
		²⁰⁸ Tl	ND
		²¹⁴ Bi	ND
		²²⁸ Ac	0.16±0.043

*1 試料の放射能濃度は漁獲年月日に減衰補正した値（²³⁹⁺²⁴⁰Pu は測定終了時の値）で、誤差は計数誤差である。測定値が検出下限値以下の場合は「ND」で示す。

*2 漁獲量の減少によりスルメイカをマアジに変更した。

表 I-2-1-2-3 対照海域（襟裳沖海域）で採取した海産生物試料に含まれる放射性核種の放射能分析結果

調査海域		対照海域（襟裳沖海域）	
試料		ババガレイ*2	マダラ*3
漁獲年月日		令和3年12月16日	令和3年12月23日
漁獲場所		釧路沖	釧路沖
漁法		刺網	刺網
試料の個体数		19	7
平均全長±標準偏差 最小/最大(cm)		41.5±2.4 38.7/47.2	59.6±2.9 55.9/63.7
平均体重±標準偏差 最小/最大(g)		1080.7±222.2 834.8/1475.4	2254.5±217.3 1930.8/2492.8
供試部位		筋肉	筋肉
灰分(%)		1.12	1.36
分析 供試量 (g 灰)	γ核種	57.50	56.80
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	11.26	13.60
測定 年月日	γ核種	令和4年2月3日	令和4年2月2日
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	令和4年2月10日	令和4年2月12日
放射能濃度*1 (Bq/kg-生鮮物)			
人工放射性核種	γ	¹³⁴ Cs	ND
		¹³⁷ Cs	0.035±0.0080
	その他のγ核種	⁵¹ Cr、 ⁵⁴ Mn、 ⁵⁸ Co、 ⁶⁰ Co、 ⁵⁹ Fe、 ⁶⁵ Zn、 ⁹⁵ Zr、 ⁹⁵ Nb、 ¹⁰³ Ru、 ¹⁰⁶ Ru、 ^{110m} Ag、 ¹²⁵ Sb、 ¹⁴⁰ Ba 及び ¹⁴⁴ Ce は、すべて検出下限値以下であった。	
人工放射性核種	α	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	ND
	人工放射性核種	γ	⁷ Be
⁴⁰ K			95±0.57
²⁰⁸ Tl			ND
²¹⁴ Bi			ND
²²⁸ Ac			ND

*1 試料の放射能濃度は漁獲年月日に減衰補正した値（²³⁹⁺²⁴⁰Pu は測定終了時の値）で、誤差は計数誤差である。測定値が検出下限値以下の場合は「ND」で示す。

*2 漁獲量の減少によりスルメイカをババガレイに変更した。

*3 漁獲量の減少によりシロザケ（雄）をマダラに変更した。

④ まとめ

対照海域で採取した海産生物試料のうち、大和堆海域で採取したスルメイカとホッコクアカエビ、四国沖海域で採取したマアジとゴマサバ及び襟裳沖海域で採取したババガレイとマダラについて ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度を把握した。

それぞれの海産生物の筋肉に含まれる ^{134}Cs はいずれの試料からも検出されなかったものの、 ^{137}Cs の放射能濃度は $\text{ND} \sim 0.15 \text{Bq/kg}$ -生鮮物の範囲にあった。また、筋肉に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ については、スルメイカ及びホッコクアカエビ（ともに大和堆海域、令和3年8月採取）からそれぞれ $0.00043 \pm 0.00013 \text{Bq/kg}$ -生鮮物及び $0.00041 \pm 0.00011 \text{Bq/kg}$ -生鮮物が検出された。

上記の結果を踏まえると、令和3年度に実施した海洋放射能調査の対象海域とした発電所海域及び核燃海域で採取した海産生物試料に含まれる ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、対照海域で採取された海産生物試料に含まれる ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度との対比から、福島第一海域で東電福島第一原発事故の影響が確認されたものの、海洋環境の放射能濃度のバックグラウンドと同程度であることを把握することができた。

2) 変動要因・移行挙動調査

(1) 海洋環境における $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比モニタリング

① はじめに

海洋に存在するプルトニウム同位体の主要な起源は、1945年から1980年にかけて行われた大気圏核実験であり¹⁾、大気圏核実験起源の主要なプルトニウム同位体は、

^{238}Pu (半減期：87.7年)、

^{239}Pu (半減期： 2.411×10^4 年)

^{240}Pu (半減期：6,564年)

^{241}Pu (半減期：14.35年)

の4核種である²⁾。

大気圏核実験以外のプルトニウム同位体の起源として、セラフィールド・ラアーグ・マヤーク等の核燃料再処理施設からの排出、チェルノブイリ原子力発電所事故、グリーンランド・チューレ空軍基地近傍での核兵器搭載米軍爆撃機墜落事故、 ^{238}Pu 燃料電池搭載人工衛星(SANP-9A)打ち上げ失敗等がある³⁾。

北太平洋において、プルトニウム同位体の主要な起源はさらに次の二つに大別される；

- ・1950年代から1960年代はじめに行われた大気圏核実験による大量の地球規模放射性降下物 (Global fallout；グローバルフォールアウト)
- ・1946年から1958年にかけてマーシャル諸島 (ビキニ及びエニウエトク環礁) にあった米国太平洋核実験場 (Pacific Proving Grounds：PPG)で行われた大気圏核実験による放射性降下物 (Local fallout；局地フォールアウト)

大気圏核実験により環境中へ放出されたプルトニウム同位体のうち、2000 (平成12)年1月1日現在、

^{238}Pu ：0.50PBq (0.78kgに相当)

^{239}Pu ：4.5PBq (2,980kgに相当)

^{240}Pu ：4.0PBq (477kgに相当)

^{241}Pu ：24PBq (6.2kgに相当)

が太平洋に存在していると見積もられており、このうち

^{239}Pu の 2.4PBq

^{240}Pu の 2.7PBq

^{241}Pu の 17PBq

が太平洋核実験場での大気圏核実験 (いわゆるビキニ核実験) による局地フォールアウト起源である⁴⁾。

(Pはペタ (10^{15}) を表す)

海洋に存在するプルトニウムの起源を探るうえで、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比 (atom ratio) はその起源によって異なるために有用である。例えば、グローバルフォールアウトによる $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は $0.180 \pm 0.014^{5)}$ 、太平洋核実験場での大気圏核実験による局地フォールアウトの $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は $0.30 \sim 0.36$ と報告されている^{6~8)}。日本周辺海域の海底土試料において、この二つを起源とするプルトニウムが堆積していることが分かっている^{9,10)}。

そこで、海底土に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度とその原子数比を把握し、プルトニウムの起源を特定するうえで必要となる情報を取得し、もって海洋放射能調査で実施している核燃海域での調査結果を補完するデータに資することとした。

② 方法

($^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度及び $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比)

<採取海域及び採取測点>

海洋放射能調査を実施した海域のうち、発電所海域での海底土については、以下の海域の測点 (計 15 試料) において表層から 3cm までの海底土を採取し、分析に供した。

- ・北海道、青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城、新潟、石川、福井第一、福井第二、島根、愛媛、佐賀及び鹿児島海域：測点 2 (計 14 測点)
- ・静岡海域：測点 4

<前処理>

冷凍保存した試料を解凍した後、重量を測定し、 105°C で乾燥した。その後、目開き 2 mm のふるいにかけて、分析用試料とした。

< $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度及び $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比の分析>

海底土の分析は、放射能測定法シリーズ 16「環境試料採取法」に準じて前処理を行ったのち、放射能測定法シリーズ 12「プルトニウム分析法」に準じて行った。試料の化学分離・精製及び測定は、同位体希釈法を応用した高精度質量分析法によった。詳細は文献の^{11~13)}に記載のとおりである。

乾燥土とした海底土試料約 1.5g を分取・秤量し、正確に分取した 0.57pg の ^{242}Pu を回収率補正のためのトレーサとして添加した。次に、その後の化学分離において妨害となる有機物を分解するため、試料を磁製するつばに移し、マッフル炉を用いて 450°C で 5 時間灰化した。灰化試料を 50mL テフロン容器に移し、10mL の硝酸を加え、ホットプレート上において 160°C で 4 時間以上加熱し、試料を溶解した。冷却後、上澄み液をろ紙 (No. 5C) でろ過し、100mg のカルシウム及びランタンをそれぞれ加え、さらに 2mL の 20% 塩化チタン (III) を添加し、Pu (IV) 及び Pu (V) を Pu (III) に還元した。46% フッ化水素酸 7mL を注意深く添加し、毎分 3,000 回転で 15 分間遠心分離した

後、ホウ酸 0.5g を添加した。フッ化カルシウム/フッ化ランタンの沈殿物を 3M 硝酸 20mL で溶解し、抽出クロマトグラフィによる分離を行った。0.3g の亜硝酸ナトリウムを加えて、Pu の原子価を Pu (IV) に調整し、真空ボックス内で 10mL の 3M 硝酸で前処理した TEVA 樹脂 (Eichrom Technologies 社製) カラムに通した。10mL の 3M 硝酸を流してカルシウム、鉄及び希土類元素を除去、続いて 40mL の 1M 硝酸を流してウラン、鉛、タリウム及び白金を除去、さらに 10mL の 9M 塩酸でトリウム、ビスマス及びハフニウムを除去した。プルトニウムの溶離前に、3M 硝酸 10mL で前処理した UTEVA 樹脂 (Eichrom Technologies 社製) カラム及び DGA 樹脂 (Eichrom Technologies 社製) カラムを TEVA 樹脂カラムに接続した。Pu (IV) を Pu (III) に還元して TEVA 樹脂から Pu (III) を溶離するために、3M 硝酸-0.1M アスコルビン酸-0.02M 鉄 (II) (25% 鉄スルファミン酸塩から調製) を 20mL 流した。溶離した Pu (III) 画分を UTEVA 樹脂カラムに通し、さらに DGA 樹脂カラム上に保持した。溶離後、TEVA 及び UTEVA 樹脂カラムを取り外し、DGA 樹脂に 30mL の 0.1M 硝酸を流して、ウラン、タリウム、鉛、白金、ハフニウム及び鉄を取り除いた。最後に、樹脂上のプルトニウムを 20mL の 0.5M 塩酸-0.1M 塩酸ヒドロキシルアミンで溶離した。最終的に 4% 硝酸 0.7mL に溶解し、二重収束型誘導結合プラズマ質量分析計 (SF-ICP-MS ; Element XR ; サーモフィッシャーサイエンティフィック社製) により、 m/z 239、240 及び 242 での計測を行って ^{239}Pu 及び ^{240}Pu の放射能濃度、併せて $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比を求めた。また、測定感度向上のために、高感度・脱溶媒試料導入システム (APEX-Q ; エレメンタルサイエンティフィック社製) も併せて用いた。

なお、海底土標準試料 IAEA-385 と NIST-4357 の分析も並行して用い、海底土中のプルトニウム測定の品質管理を行った。本方法を用いて検出・測定したこれらの標準試料の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、

- ・ IAEA-385 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}=0.182\pm 0.008$; $^{239+240}\text{Pu}=2.70\pm 0.15$ Bq/kg)
- ・ NIST-4357 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}=0.233\pm 0.006$; $^{239+240}\text{Pu}=9.70\pm 0.36$ Bq/kg)

であり、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は認証値・文献値である

- ・ IAEA-385 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}=0.174\sim 0.193$; $^{239+240}\text{Pu}=2.89\sim 3.00$ Bq/kg)
- ・ NIST-4357 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}=0.233\sim 0.244$; $^{239+240}\text{Pu}=9.3\sim 13.2$ Bq/kg)

とよく一致した。本分析法が海底土中のプルトニウム分析に十分な精度があることを確認した。

③ 結果

(海底土試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度)

令和3年度に採取した海底土試料の分析結果を表 I-2-2-1-1 に示す。海底土試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、0.34~3.58 Bq/kg-乾燥土の範囲にあった。この放射能濃度範囲は、日本周辺海域で得られている範囲^{9,10)} と比較して同水準であった。令和3年度は、令和2年度と同様に青森海域(測点2)で採取した海底土から得られた結果で最高値を示した。

また、図 I-2-2-1-1 に示すとおり、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度が 2Bq/kg -乾燥土を超える海域は、北海道、青森、新潟、福井第一及び福井第二の5海域であり、東電福島第一原発事故前の平成20年度から平成23年度に発電所海域の海底土で得られた結果¹⁴⁾と同様であった。海底土試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は、表層水中の生物生産性、海底土採取水深、底質（粒径・比表面積・構成成分）あるいは海底土の酸化還元状態等によって異なる。令和3年度の調査で得られた濃度範囲は、平成3年度から核燃海域で継続的に調査している海底土に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の範囲と比較しても同水準であった。

表 I-2-2-1-1 発電所海域で採取した海底土試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度及び $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比

採取海域	測点	採取日	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$
			(Bq/kg-乾燥土)	原子数比
北海道	2	令和3年6月22日	2.37 ± 0.19	0.219 ± 0.011
青森	2	令和3年6月18日	3.58 ± 0.06	0.208 ± 0.002
宮城	2	令和3年5月21日	0.55 ± 0.03	0.237 ± 0.008
福島第一	2	令和3年5月23日	0.97 ± 0.16	0.255 ± 0.041
福島第二	2	令和3年5月24日	0.74 ± 0.04	0.244 ± 0.011
茨城	2	令和3年5月20日	0.80 ± 0.03	0.245 ± 0.009
静岡	4	令和3年6月9日	1.22 ± 0.06	0.248 ± 0.007
新潟	2	令和3年6月16日	2.47 ± 0.13	0.212 ± 0.009
石川	2	令和3年6月20日	0.87 ± 0.05	0.226 ± 0.009
福井第一	2	令和3年6月21日	2.59 ± 0.12	0.217 ± 0.006
福井第二	2	令和3年6月22日	2.08 ± 0.08	0.223 ± 0.007
島根	2	令和3年6月23日	0.39 ± 0.02	0.250 ± 0.013
愛媛	2	令和3年6月11日	0.34 ± 0.02	0.257 ± 0.012
佐賀	2	令和3年6月13日	0.42 ± 0.02	0.266 ± 0.008
鹿児島	2	令和3年6月14日	0.61 ± 0.03	0.270 ± 0.009

誤差は、質量分析計による3~5回の繰り返し測定から得た標準偏差を示す。

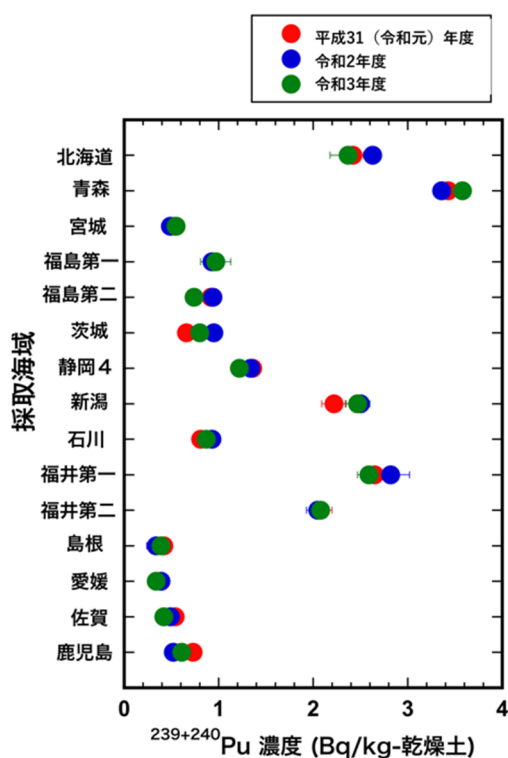


図 I-2-2-1-1 各海域で採取した海底土に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度 (緑、青及び赤丸は、それぞれ、令和 3 年度、令和 2 年度及び平成 31(令和元)年度の放射能濃度を示す。)

(海底土試料の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比)

令和 3 年度に発電所海域で採取した海底土試料に含まれる $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は、表 I-2-2-1-1 に示すとおり、0.208~0.270 の範囲にあり、東電福島第一原発事故前に実施された平成 20~23 年度の結果¹⁴⁾ を含む平成 20~令和 2 年度の調査結果と同じ範囲であった。また、東電福島第一原発事故後に福島県沿岸の海底土で報告されている $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比^{15,16)} と同程度であり、Bu *et al.*¹⁵⁾ は東電福島第一原発事故に起因するプルトニウムの海洋への放出は無視しうるとしている。令和 3 年度の結果からも発電所海域で採取した海底土は東電福島第一原発事故起源の $^{239+240}\text{Pu}$ の沈着は認められなかった。

北太平洋において、プルトニウム同位体の主要な起源は、グローバルフォールアウトと太平洋核実験場起源の局地フォールアウトである⁴⁾。図 I-2-2-1-2 に示すとおり、発電所海域の海底土に含まれるプルトニウムはこの二つの起源の混合であり、それぞれの起源の寄与率を求めた。なお、グローバルフォールアウト起源の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比を 0.18⁵⁾、太平洋核実験場起源の局地フォールアウト比は 0.30~0.36 の範囲が報告されている^{6~8)}

が計算では 0.33⁸⁾を用いた。令和 3 年度の発電所全海域の海底土に含まれる ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 原子数比の平均値と標準偏差は 0.238±0.020 であった。

これらの数値を用いて寄与率を求めた結果、発電所海域の海底土は、

- ・太平洋核実験場の局地フォールアウト起源：39%
- ・グローバルフォールアウト起源：61%

となった。

発電所海域の海底土のプルトニウムは、グローバルフォールアウト起源と太平洋核実験場の局地フォールアウト起源が存在しており、寄与率は文献値^{9~10,15,16)}と同程度であった。太平洋核実験場の局地フォールアウト起源のプルトニウムは、北赤道海流及び黒潮並びに対馬海流によって日本周辺海域に運ばれ^{16,17)}、粒子による除去・沈降によって海底土にもたらされている。

なお、ビキニ及びエニウェトク環礁のラグーンから、現在でも年間 0.2TBq (※) のプルトニウムが放出されているとの報告³⁾もあり、海洋環境で見出される放射性セシウムに限らず、プルトニウムについても、例えば、新たな付加があるかどうかを検知するため、今後も我が国周辺海域での海洋放射能モニタリングを継続して実施することが必要であると考えられる。

(※) Tはテラ (10¹²) を表す。

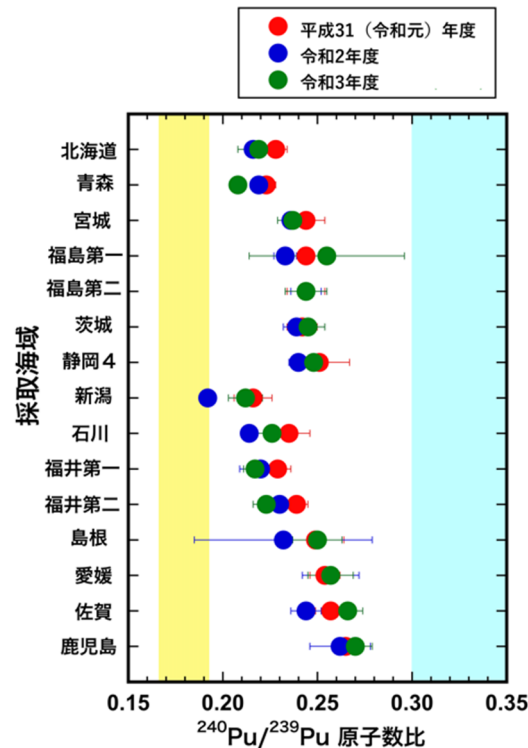


図 I-2-2-1-2 各海域で採取した海底土に含まれるプルトニウムの $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比 (緑、青及び赤丸は、それぞれ、令和3年度、令和2年度及び平成31(令和元)年度の原子数比を示す。黄色及び水色の網掛けは、それぞれ、グローバルフォールアウト比及び太平洋核実験場起源の局地フォールアウト比を示す。)

④ まとめ

海洋放射能調査で実施している発電所海域で得られた海底土において、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度と $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比を求めて考察したところ、東電福島第一原発事故前と同水準の放射能濃度及び原子数比を示したことから、過去の大気圏核実験に由来するプルトニウム以外の起源を持つプルトニウムの存在は確認されなかった。発電所海域の海底土には、グローバルフォールアウト起源と太平洋核実験場の局地フォールアウト起源のプルトニウムが存在しており、それぞれのフォールアウトの寄与率は文献値と同程度であった。

引用文献

- 1) UNSCEAR. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations, New York.
- 2) Aarkrog, A. (2003). Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean. Deep-Sea Research II, **50**, 2597-2606.
- 3) Lindahl, P., Lee, S.-H., Worsfold, P. and Keith-Roach, M. (2010). Plutonium isotopes as tracers for ocean processes: A review. Marine Environmental Research, **69**, 73-84.
- 4) Hamilton, T.F. (2004). Linking legacies of the Cold War to arrival of anthropogenic radionuclides in the oceans through the 20th century. In: Livingston, H.D. (Ed), Radioactivity in the Environment **6**. Marine Radioactivity. Elsevier Ltd, Oxford, pp. 23-78.
- 5) Kelley, J.M., Bond, L.A. and Beasley, T.M. (1999). Global distribution of Pu isotopes and ²³⁷Np. Science of the Total Environment, **237/238**, 483-500.
- 6) Diamond, H., Fields, P.R., Stevens, C.S., Studier, M.H., Fried, S.M., Inghram, M.G., Hess, D.C., Pyle, G.L., Mech, J.F., Manning, W.M., Ghiorso, A., Thompson, S.G., Higgins, G.H., Seaborg, G.T., Browne, C.I., Smith, H.L. and Spence, R.W. (1960). Heavy isotope abundances in 'Mike' thermonuclear device. Physical Review, **119**, 2000-2004.
- 7) Komura, K., Sakanoue, M. and Yamamoto, M. (1984). Determination of ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu ratio in environmental samples based on the measurement of Lx/ α -ray activity ratio. Health Physics, **46**, 1213-1219.
- 8) Muramatsu, Y., Hamilton, T., Uchida, S., Tagami, K., Yoshida, S. and Robinson, W. (2001). Measurement of ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu isotopic ratios in the soil from the Marshall Islands using ICP-MS. Science of the Total Environment, **278**, 151-159.
- 9) Zheng, J. and Yamada, M. (2004). Sediment core record of global fallout and Bikini close-in fallout Pu in Sagami Bay, western Northwest Pacific margin. Environmental Science and Technology, **38**, 3498-3504.
- 10) Wang, Z.-L. and Yamada, M. (2005). Plutonium activities and ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu atom ratios in sediment cores from the East China Sea and Okinawa Trough: Sources and inventories. Earth and Planetary Science Letters, **233**, 441-453.
- 11) Wang, Z.T., Zheng, J., Ni, Y.Y., Men, W., Tagami, K. and Uchida, S. (2017). High performance method for rapid determination of Pu isotopes in soil and sediment samples by sector-field inductively coupled plasma mass spectrometry. Analytical

- Chemistry, **89**, 2221-2226.
- 12) Wang, Z.T., Yang, G.S., Zheng, J., Cao, L.G., Yu, H.J., Zhu, Y.B., Tagami, K. and Uchida, S. (2015). Effect of ashing temperature on accurate determination of plutonium in soil samples. *Analytical Chemistry*, **87**, 5511-5515.
 - 13) Zheng, J. (2015). Evaluation of a new sector-field ICP-MS with Jet Interface for ultra-trace determination of Pu isotopes: from femtogram to attogram levels. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, **15**, 7-13.
 - 14) Oikawa, S., Watabe, T. and Takata, H. (2015). Distribution of Pu isotopes in seawater and bottom sediments in the coast of the Japanese archipelago before and soon after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **142**, 113-123.
 - 15) Bu, W.T., Fukuda, M., Zheng, J., Aono, T., Ishimaru, T., Kanda, J., Yang, G., Tagami, K., Uchida, S., Guo, Q.J. and Yamada, M. (2014). Release of Pu isotopes from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident to the marine environment was negligible. *Environmental Science and Technology*, **48(16)**, 9070-9078.
 - 16) Yamada, M., Oikawa, S., Shirotani, Y., Kusakabe, K. and Shindo, K. (2021). Transuranic nuclides Pu, Am and Cm isotopes, and ⁹⁰Sr in seafloor sediments off the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant during the period from 2012 to 2019. *Journal of Environmental Radioactivity*, **227**, 106459.
 - 17) Yamada, M. and Zheng, J. (2010) Temporal variation of ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu atom ratio and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu inventory in water columns of the Japan Sea. *Science of the Total Environment*, **408**, 5951-5957.

(2) 海水及び海産生物試料の¹²⁹I 放射能濃度

① はじめに

海洋には、主に2種類のヨウ素同位体が存在する。ヨウ素の同位体で唯一の安定同位体の¹²⁷Iと放射性同位体の¹²⁹Iである。¹²⁷I濃度の鉛直分布は、生物活動により海洋表層で若干低い値を示し、下層に向かって濃度の増加を示すことが一般的である。一方、海洋に存在する¹²⁹I(半減期： 1.57×10^7 年)は主に以下の2つの起源を持つ；

- (1) 大気中のキセノン(Xe)と宇宙線との核破碎反応により生成されたもの(宇宙線生成核種)
- (2) 原子力関連施設や核実験により人工的に放出されたもの

このうち、(2)には原子力関連施設から計画的に排出されるものと、事故などにより環境へ非意図的に放出されるものがある。なお、大気圏核爆発実験や原子力発電所事故では、短寿命核種である¹³¹I(半減期：8.02日)も自然界に放出される。これは半減期が短く、広域へ長時間にわたる影響を及ぼすことは少ないものの、事故等の直後に、拡散域やその近隣に存在して影響を与える可能性もある。

核燃海域(図 I-1-3-14)では、青森県六ヶ所村にある核燃料(原子燃料)サイクル施設の稼働に伴って¹²⁹Iが計画的に排出され、施設の周辺海域で¹²⁹I放射能濃度レベルが変動することが懸念される。また、東電福島第一原発事故により大気及び海洋へ¹²⁹Iが放出されたとの報告があり^{1~3)}、過年度の本調査において、事故由来と思われる¹²⁹I放射能濃度変化を捉えている^{4~12)}。

¹²⁹Iの放射能は微弱であり、事故由来の¹²⁹Iが海洋生態系に与える影響は小さいと考えられるが、その海洋における分布と時系列変化を解析することにより、事故により海洋へもたらされた人工放射性核種の動態に関する知見が得られる。さらに、¹³¹Iの海洋における挙動は短寿命ゆえ観測から予測することは難しいが、¹²⁹Iの詳細な解析により、間接的に¹³¹Iの挙動を推測することが可能になる。

ヨウ素は親生元素として知られており、種々の海産生物においてヨウ素の蓄積が確認されている^{13,14)}。なかでも、コンブ類は自然界で最もヨウ素を蓄積する生物の一つとして知られており¹⁵⁾、日本では北海道沿岸を中心に三陸海岸にも分布する代表的な食用海藻の一つである¹⁶⁾。

本調査では令和2年度に引き続き、核燃海域や他の海域における海水に含まれる¹²⁹Iの放射能濃度分布を調査した。同時に、北日本沿岸に生息するコンブ類と海水に含まれる¹²⁹I放射能濃度の関係性を調べるために、コンブ類試料に含まれる¹²⁹I放射能濃度も調べた。また、これまでの調査により、北海道から東北沿岸のコンブ類についてのヨウ素のデータが蓄積されつつある。一方で、日本近海で採取されるコンブ類の分布域は、マコンブでは北海道沿岸～宮城県沿岸、オニコンブは道東沖と限られていることから、海域による違い

や生物種による違いを比較するためのデータが不足している。そのため、今年度より食用海藻試料の比較として西日本沿岸に生息するワカメに含まれる ^{129}I 放射能濃度を調査した。

② 方法

(試料採取及び分析)

海水試料は発電所海域（青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域）、核燃海域及び対照海域で採取した。測点のリストを表 I-2-2-2-1 に示す。測点の位置は図 I-1-3-2～5、図 I-1-3-14 及び図 I-2-1-1-1 を参照のこと。

発電所海域では、令和 3 年 5～6 月に各測点で表層水を採取した。核燃海域では、令和 3 年 6 月（前期）及び 10 月（後期）の 2 回、各測点で表層水を採取した。対照海域（大和堆、四国沖及び襟裳沖）では令和 3 年 6 月に、表層から底層まで複数層で採取した。

海藻類については、下北沖海域（青森県・白糠）及び岩手県三陸沖海域（岩手県・重茂）においてマコンブを収集した。また、対照試料として津軽海峡（青森県・外ヶ浜）のマコンブ、根室海峡（北海道・羅臼）のオニコンブ、有明海（長崎県・島原湾）のワカメ及び丸山沖（兵庫県・淡路島）のワカメを収集した。なお、海水試料については陸から離れた沖合で採取し、海藻試料については沿岸部で採取した。

海水試料は賀佐ら¹⁷⁾の方法で前処理を行い、分離、濃縮した ^{129}I を加速器質量分析法 (AMS) により測定した。同時に海水中の安定ヨウ素である ^{127}I もアスコルビン酸還元法を用いたイオンクロマトグラフィー¹⁸⁾で測定した。

海藻類については、凍結させた後、真空凍結乾燥機で乾燥し、乾燥させた試料から抽出したヨウ素をヨウ化銀とした後、AMS により ^{129}I を測定した。同時に、試料中の ^{127}I 濃度は、インジウムを内標準とした誘導結合プラズマ質量分析法により測定した。

^{129}I の測定は試料に含まれる $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比から求めた。 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比の測定には 3MV 加速器質量分析装置 (High Voltage Engineering Europa 製) を用いた。なお、標準試料及び各種試料の測定は、1 試料当たり 3360～4200 秒 (28 秒/ブロック×10 ブロック/回×12～15 回) 実施した。

測定された $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比は、標準試料の測定値から標準化を実施した。標準試料には NIST SRM 3231 Level II ($^{129}\text{I atoms} \cdot \text{L}^{-1} = 4.138 \pm 0.0506 \times 10^{13}$) を表層海水で希釈したものを測定して標準化係数を算出し、 ^{129}I 放射能濃度を計算した。詳細は平成 28 年度の本事業調査報告書⁹⁾を参照のこと。

表 I-2-2-2-1 海水試料採取測点

海域	測点	略号	海域	測点	略号	海域	測点	略号
発電所海域			核燃海域			対照海域		
青森海域	1	HG1	核燃海域	1	AM1	襟裳沖海域(核燃沖)	2	T2
青森海域	2	HG2	核燃海域	3	AM3	襟裳沖海域(襟裳沖)	11	E11
青森海域	3	HG3	核燃海域	4	AM4	大和堆海域	1	YR1
青森海域	4	HG4	核燃海域	6	AM6	四国沖海域	1	KC1
宮城海域	1	MI1	核燃海域	7	AM7			
宮城海域	4	MI4	核燃海域	10	AM10			
福島第一海域	3	FSN3	核燃海域	11	AM11			
福島第一海域	4	FSN4	核燃海域	13	AM13			
福島第二海域	1	FSS1	核燃海域	14	AM14			
福島第二海域	2	FSS2	核燃海域	15	AM15			
茨城海域	1	IB1	核燃海域	16	AM16			
茨城海域	2	IB2	核燃海域	17	AM17			
茨城海域	3	IB3	核燃海域	18	AM18			
茨城海域	4	IB4	核燃海域	19	AM19			
			核燃海域	20	AM20			
			核燃海域	21	AM21			
			核燃海域	22	AM22			

③ 結果

(核燃海域で採取した海水試料に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素) 濃度及び ^{129}I 放射能濃度)

核燃海域で採取した表層水に含まれる ^{127}I 濃度及び ^{129}I 放射能濃度を表 I-2-2-2-2 と表 I-2-2-2-3 に示す。なお、本来は発電所海域である青森海域の測点は AM11~AM13 及び AM14、AM15 で囲まれた海域に存在するため、ここでは青森海域も核燃海域に含める。

核燃海域で採取した表層水に含まれる ^{127}I 濃度の平均値と標準偏差は、

前期：52±0.95µg/L

後期：52±0.31µg/L

(µはマイクロ(10⁻⁶)を表す。)

であった。なお、平成 18~22 年度の ^{127}I 濃度の平均値と標準偏差は、

前期：52±0.75µg/L

後期：52±0.85µg/L

であり、前期と後期に有意な差は見られず、過去の分析値との有意の差もない。

核燃海域で採取した表層水に含まれる ^{129}I 放射能濃度の平均値と標準偏差は、

前期：24±3.1nBq/L

後期：24±2.4nBq/L

(nはナノ(10⁻⁹)を表す。)

であった。平成 18 年度～令和 3 年度の各測点における表層水に含まれる ^{129}I 放射能濃度の推移を図 I-2-2-2-1 (a) に示す。令和 3 年度の値は六ヶ所村の核燃料（原子燃料）サイクル施設のアクティブ試験（以下、「アクティブ試験」という。）※1による ^{129}I 放出がほとんど無かった平成 21 年後期～22 年度までの値と同程度であった。アクティブ試験による ^{129}I 放出がほとんど無い平成 24 年～令和 2 年の期間の核燃海域の表層水に含まれる ^{129}I 放射能濃度の前期の平均値（26nBq/L）と後期の平均値（22nBq/L）であるが、令和 3 年度の後期の放射能濃度は前期と同程度の値が確認された。今後、水温や塩分等のデータを活用し、 ^{129}I 放射能濃度の測点間の変動や経年変化について解明が必要である。

一方、前期と後期の季節変動に比べて ^{129}I 放射能濃度の年変化はさらに大きい。平成 19 年度と 20 年度に一部の測点で際立った放射能濃度の上昇が見られた（AM1～8、AM17～22）。これらはアクティブ試験の影響と考えられる。また、平成 23 年度前期の AM4、AM5、AM22 で ^{129}I 放射能濃度の上昇が見られたが、この期間には六ヶ所村の核燃料（原子燃料）サイクル施設からの ^{129}I の放出はほとんど無いことから、東電福島第一原発事故の影響と考えられる。

令和 3 年度の表層水に含まれる $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比は ^{129}I 放射能濃度と同様に、前期の平均値（ $(7.1 \pm 1.0) \times 10^{-11}$ ）が後期の平均値（ $(6.8 \pm 0.68) \times 10^{-11}$ ）と同程度であった（表 I-2-2-2-2～3）。

※1 アクティブ試験は平成 18 年 3 月 31 日より開始し、令和 4 年 3 月現在も継続中である。 ^{129}I 放出量は液体廃棄物、気体廃棄物ともに平成 18 年 4 月から平成 20 年 10 月までの期間で相対的に高い。放出量の時系列変化は図 I-2-2-2-1 を参照のこと

表 I -2-2-2-2 表層水に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素) 濃度、 ^{129}I 放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比 (核燃海域*1、前期)

測点*1	採取日	^{127}I ($\mu\text{g/L}$)		^{129}I (nBq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
		濃度	誤差*2	放射能 濃度	誤差	原子数比	誤差
AM1	令和3年6月9日	53	0.15	24	0.90	6.8	0.26
AM3	令和3年6月9日	53	0.13	24	0.80	7.0	0.23
AM4	令和3年6月10日	51	0.11	28	0.70	8.3	0.21
AM6	令和3年6月10日	53	0.13	25	0.84	7.3	0.24
AM7	令和3年6月13日	52	0.11	27	0.69	7.8	0.20
AM10	令和3年6月16日	51	0.14	29	1.2	8.4	0.35
AM11	令和3年6月23日	52	0.13	23	0.91	6.8	0.26
AM13	令和3年6月16日	51	0.11	26	0.72	7.6	0.21
AM14	令和3年6月18日	52	0.12	26	1.1	7.7	0.32
AM15	令和3年6月17日	53	0.11	23	0.66	6.6	0.19
AM16	令和3年6月21日	52	0.11	26	0.98	7.4	0.29
AM17	令和3年6月8日	52	0.12	30	0.66	8.6	0.19
AM18	令和3年6月8日	54	0.13	20	0.61	5.7	0.17
AM19	令和3年6月8日	54	0.12	21	0.97	5.9	0.27
AM20	令和3年6月7日	54	0.13	20	0.47	5.6	0.13
AM21	令和3年6月7日	54	0.11	19	0.77	5.4	0.22
AM22	令和3年6月7日	53	0.090	21	0.32	6.0	0.092
HG1	令和3年6月17日	51	0.082	29	2.3	8.5	0.67
HG2	令和3年6月18日	51	0.12	26	1.6	7.6	0.48
HG3	令和3年6月23日	53	0.10	20	1.7	5.7	0.48
HG4	令和3年6月18日	51	0.11	26	1.3	7.6	0.38
平均と標準偏差		52	0.95	24	3.1	7.1	1.0

*1 青森海域 (HG1~4) は発電所海域に分類されるが、その測点は核燃海域内にあるので、ここでは核燃海域に含めて記載する。

*2 ^{127}I 及び ^{129}I の誤差は、分析機器による3回の繰り返し測定から得た標準偏差を示す。また、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ の誤差は、それぞれの誤差を伝播して得られた数値を示す。

表 I-2-2-2-3 表層水に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素) 濃度、 ^{129}I 放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比 (核燃海域、後期)

測点	採取日	^{127}I ($\mu\text{g/L}$)		^{129}I (nBq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
		濃度	誤差*1	放射能 濃度	誤差	原子数比	誤差
AM1	令和3年10月7日	52	0.11	24	0.82	6.8	0.24
AM3	令和3年10月7日	53	0.11	22	1.1	6.3	0.33
AM4	令和3年10月8日	52	0.11	26	0.94	7.5	0.27
AM6	令和3年10月8日	52	0.12	24	0.80	6.9	0.23
AM7	令和3年10月10日	52	0.11	31	1.0	9.0	0.30
AM10	令和3年10月18日	52	0.088	24	0.30	7.0	0.088
AM11	令和3年10月10日	52	0.099	23	0.83	6.7	0.24
AM13	令和3年10月16日	52	0.11	24	0.87	7.0	0.25
AM14	令和3年10月11日	52	0.085	25	0.76	7.3	0.22
AM15	令和3年10月16日	52	0.13	24	0.92	7.0	0.27
AM16	令和3年10月16日	52	0.088	24	0.91	6.9	0.26
AM17	令和3年10月7日	52	0.091	21	0.83	6.1	0.24
AM18	令和3年10月7日	52	0.071	23	0.88	6.5	0.26
AM19	令和3年10月5日	52	0.12	21	0.57	6.2	0.17
AM20	令和3年10月5日	52	0.11	21	0.62	6.2	0.18
AM21	令和3年10月5日	51	0.072	23	0.75	6.7	0.22
AM22	令和3年10月5日	52	0.12	22	0.98	6.2	0.28
平均と標準偏差		52	0.31	24	2.4	6.8	0.68

*1 ^{127}I 及び ^{129}I の誤差は、分析機器による3回の繰り返し測定から得た標準偏差を示す。また、 $^{127}\text{I}/^{129}\text{I}$ の誤差は、それぞれの誤差を伝播して得られた数値を示す。

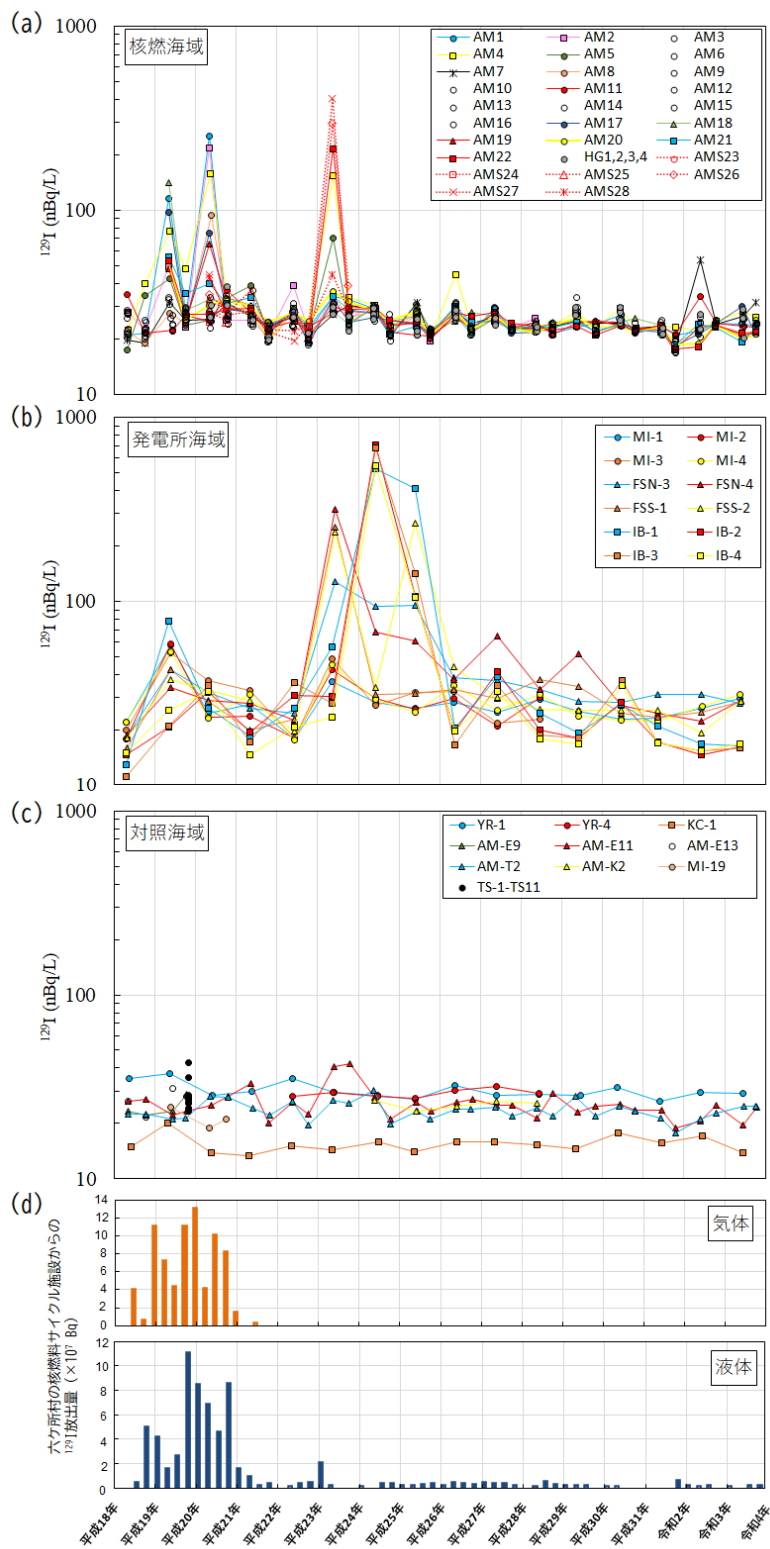


図 I -2-2-2-1 (a)核燃海域、(b)発電所海域及び(c)対照海域における表層水に含まれる ^{129}I 放射能濃度の推移と(d)六ヶ所村の核燃料（原子燃料）サイクル施設からの ^{129}I 放出量（(d)は、平成18～令和3年度六ヶ所再処理工場に係る定期報告書を参照した。）

(発電所海域の¹²⁷I(安定ヨウ素)濃度及び¹²⁹I放射能濃度)

核燃海域の南に位置する4つの発電所海域(宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域)において表層海水を採取し、¹²⁷I濃度と¹²⁹I放射能濃度を測定した。それぞれの測点で得られた¹²⁷I濃度及び¹²⁹I放射能濃度並びに¹²⁹I/¹²⁷I原子数比を表I-2-2-2-4に示す。また、同海域における¹²⁹I放射能濃度の時系列変化を図I-2-2-2-1(b)に示す。

¹²⁷I濃度は、

発電所海域で採取した表層水に含まれる¹²⁷I濃度の平均値と標準偏差は、

宮城海域：51±0.77μg/L

福島第一・福島第二海域：51±0.18 μg/L

茨城海域：54±0.35μg/L

であった。なお、平成18～22年度の各海域における¹²⁷I濃度の範囲は、

宮城海域：48～54μg/L

福島第一・福島第二海域：50～54μg/L

茨城海域：47～55μg/L

であり、令和3年度の測定値は事故前の変動幅に収まっている。

発電所海域で採取した表層水に含まれる¹²⁹I放射能濃度の平均値は16～31nBq/Lの範囲にあった。平成18～令和3年度の同海域における¹²⁹I放射能濃度の時系列変化は核燃海域のそれと大きく異なるのみならず、海域毎での変動パターンも東電福島第一原発事故やアクティブ試験の影響の程度により各々が異なっている(図I-2-2-2-1(b))。そのため、これらの3つの海域におけるバックグラウンドレベル、すなわち、上記2つのイベントの影響を排除した放射能濃度を見積もることは容易ではなく、令和3年度の分析結果が事故前のレベルにあるかどうかとも判定が難しい。しかし、平成19年～20年にかけて行われたアクティブ試験の影響により、ほとんどの測点において放射能濃度の上昇が見られたが、平成22年にはアクティブ試験による¹²⁹I放射能濃度の上昇が見られる前のレベルに戻っている。令和3年度の分析結果は平成22年の結果と同程度であり、発電所海域の¹²⁹I放射能濃度レベルは概ね事故前のレベルに戻っている可能性は高いが、その判断は今後の観測結果を待たなければならないと思われる。また、¹²⁹I/¹²⁷I原子数比は各海域の¹²⁹I放射能濃度に依存していると考えられる。

表 I -2-2-2-4 表層水に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素)濃度、 ^{129}I 放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比 (発電所海域)

測点	採取日	^{127}I ($\mu\text{g/L}$)		^{129}I (nBq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
		濃度	誤差*1	放射能 濃度	誤差	原子数比	誤差
宮城海域							
MI1	令和3年5月21日	50	0.14	30	0.80	9.0	0.24
MI4	令和3年5月21日	51	0.095	31	1.1	9.1	0.33
平均と標準偏差		51	0.77	31	0.60	9.1	0.040
福島第一・第二海域							
FSN3	令和3年5月22日	51	0.099	28	1.0	8.3	0.30
FSN4	令和3年5月23日	51	0.15	29	0.99	8.5	0.29
FSS1	令和3年5月24日	51	0.099	28	1.1	8.4	0.33
FSS2	令和3年5月24日	51	0.10	29	1.3	8.4	0.37
平均と標準偏差		51	0.18	29	0.32	8.4	0.080
茨城海域							
IB1	令和3年5月20日	54	0.12	16	0.88	4.6	0.24
IB2	令和3年5月20日	54	0.11	16	0.41	4.6	0.12
IB3	令和3年5月19日	54	0.12	16	0.49	4.5	0.14
IB4	令和3年5月19日	54	0.13	17	0.97	4.7	0.27
平均と標準偏差		54	0.35	16	0.30	4.6	0.078

*1 ^{127}I 及び ^{129}I の誤差は、分析機器による3回の繰り返し測定から得た標準偏差を示す。また、 $^{127}\text{I}/^{129}\text{I}$ の誤差は、それぞれの誤差を伝播して得られた数値を示す。

(対照海域における ^{127}I (安定ヨウ素)濃度及び ^{129}I 放射能濃度)

対照海域 3 海域で採取した海水試料に含まれる ^{127}I 濃度及び ^{129}I 放射能濃度を表 I-2-2-2-5 に示す。

<表層>

表層水に含まれる ^{127}I 濃度は、51~54 $\mu\text{g/L}$ と比較的小さい変動幅にあった。一方、 ^{129}I 放射能濃度は下に示すように海域毎に大きく変動する。

YR1 : 29nBq/L

KC1 : 14nBq/L

E11 (前期) : 20nBq/L

E11 (後期) : 25nBq/L

T2 (前期) : 25nBq/L

T2 (後期) : 25nBq/L

$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比も ^{129}I 放射能濃度の変動を反映して $(4.1\sim 8.6)\times 10^{-11}$ の範囲にあり、四国沖海域 (KC1) で最小値を示した。これらの海域毎の濃度の差異は過去のデータでも示されており、令和 3 年度のみ傾向ではない。

<鉛直分布>

YR1 (大和堆海域)、KC1 (四国沖海域) 及び E11 (襟裳沖海域)において多層採水を行い、 ^{127}I 濃度及び ^{129}I 放射能濃度の鉛直分布を調べた。結果を表 I-2-2-2-5 に示す。同時に過去のデータと合わせて鉛直分布を図 I-2-2-2-2 に図示する。 ^{127}I 濃度は、令和 3 年度においても、これまでの観測結果と同様な分布を示した。すなわち、いずれの海域でも表層 (51~54 $\mu\text{g/L}$) から水深とともに濃度が増し、おおよそ深度 1,000m で 57~60 $\mu\text{g/L}$ に達し、それ以深ではほぼ一定である。一方、 ^{129}I 放射能濃度は全ての海域で水深とともに濃度が減少する傾向を示した。しかし、その深さによる減少率は観測海域ごとに異なっており、大和堆では最も深くまで ^{129}I が入り込んでいることが分かる。また、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の鉛直分布は、 ^{129}I 放射能濃度の分布パターンに依存していると考えられる。

^{129}I 放射能濃度の鉛直分布の時系列変化を図 I-2-2-2-3 に示す。図 I-2-2-2-1 (c) でも明らかなように、東電福島第一原発事故の影響は E11 のみで認められ、平成 23 年度に表層で高い値を示した。なお、他の 2 つの海域では事故の影響は見られず、令和 3 年度の分析結果も前年度までの放射能濃度レベルと同様であった。

前述したとおり、核燃料 (原子燃料) サイクル施設の稼働に伴って ^{129}I が計画的に放出されることで ^{129}I 放射能濃度レベルが変動することが懸念されている。本調査で ^{129}I 放射能濃度のバックグラウンドレベルを把握できたことから、 ^{129}I の放出があった場合に濃度変動の評価を行うことが可能になる有用なデータになると考えられる。

表 I-2-2-2-5 海水に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素) 濃度、 ^{129}I 放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比 (対照海域)

測点	採取日	採取層 (m)	^{127}I ($\mu\text{g/L}$)		^{129}I (nBq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
			濃度	誤差*1	放射能濃度	誤差	原子数比	誤差
大和堆海域								
YR1	令和3年6月18日	1	52	0.10	29	2.2	8.6	0.64
YR1	令和3年6月18日	250	54	0.060	26	1.9	7.1	0.51
YR1	令和3年6月18日	500	56	0.096	21	2.0	5.7	0.53
YR1	令和3年6月18日	750	57	0.056	17	1.1	4.6	0.28
YR1	令和3年6月18日	1,000	57	0.063	14	1.0	3.7	0.26
YR1	令和3年6月18日	3,540	58	0.059	4.1	0.52	1.1	0.14
四国沖海域								
KC1	令和3年6月15日	1	51	0.057	14	0.85	4.1	0.25
KC1	令和3年6月15日	250	56	0.068	15	1.3	4.0	0.35
KC1	令和3年6月15日	500	58	0.070	8.9	0.86	2.3	0.22
KC1	令和3年6月15日	750	59	0.048	4.3	0.57	1.1	0.14
KC1	令和3年6月15日	1,000	60	0.052	2.1	0.45	0.5	0.11
KC1	令和3年6月15日	1,642	60	0.056	1.2	0.52	0.31	0.13
襟裳沖海域								
E11	令和3年6月14日	1	54	0.11	20	1.6	5.5	0.45
E11	令和3年6月14日	250	55	0.087	21	3.4	5.7	0.95
E11	令和3年6月14日	750	59	0.097	6.5	0.95	1.7	0.24
E11	令和3年6月14日	1,000	60	0.095	3.3	0.59	0.84	0.15
E11	令和3年6月14日	1,250	60	0.11	1.9	0.43	0.49	0.11
E11	令和3年6月14日	2,085	61	0.12	0.35	0.39	0.09	0.098
E11	令和3年10月12日	1	52	0.092	25	0.97	7.1	0.28
襟裳沖海域								
T2	令和3年6月21日	1	52	0.10	25	0.72	7.2	0.21
T2	令和3年10月11日	1	52	0.071	25	1.1	7.2	0.33

*1 ^{127}I 及び ^{129}I の誤差は、分析機器による3回の繰り返し測定から得た標準偏差を示す。また、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ の誤差は、それぞれの誤差を伝播して得られた数値を示す。

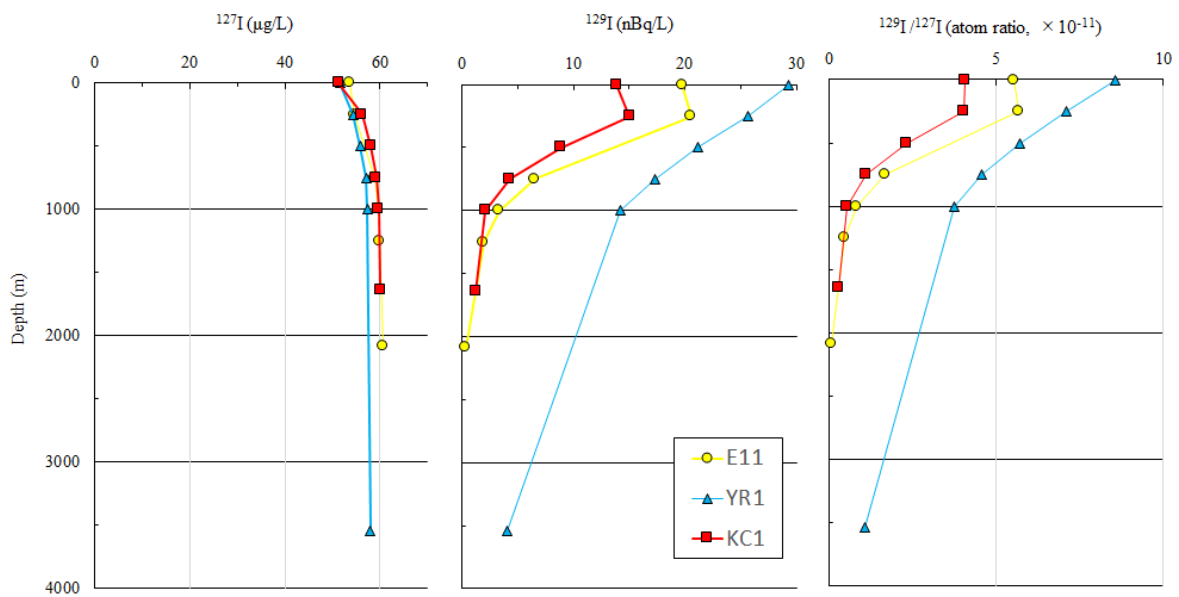


図 I-2-2-2-2 対照海域における海水試料に含まれる ^{127}I 濃度、 ^{129}I 放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の鉛直分布

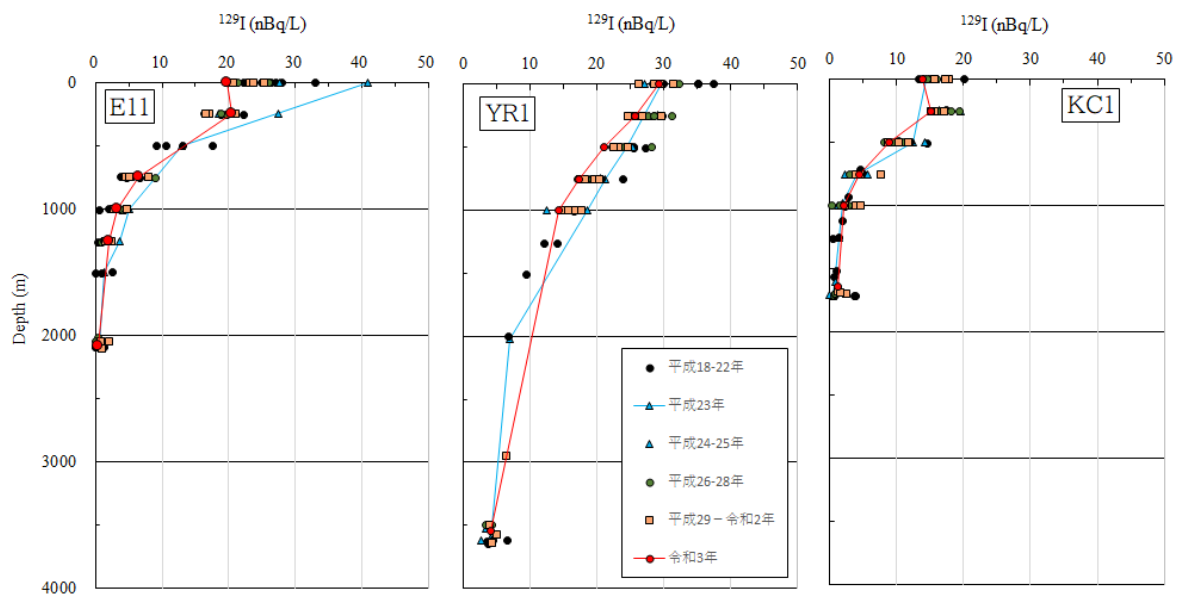


図 I-2-2-2-3 対照海域における海水試料に含まれる ^{129}I 放射能濃度の鉛直分布の時系列変化（東電福島第一原発事故が起こった年（平成 23 年）のデータは青色で、最新のデータ（令和 3 年）は赤色で示す。）

(海藻試料に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素) 濃度と ^{129}I 放射能濃度)

海藻試料の採取地点を図 I-2-2-2-4 に、
分析結果を表 I-2-2-2-6 に示す。海藻試料
に含まれる ^{127}I 濃度及び ^{129}I 放射能濃度は
海域間で大きく変動しており、

コンブ類に含まれる ^{127}I 濃度：

0.96~5.8mg/g-乾物

ワカメに含まれる ^{127}I 濃度：

0.12~0.13mg/g-乾物

コンブ類に含まれる ^{129}I 放射能濃度：

0.55~3.6 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物

ワカメに含まれる ^{129}I 放射能濃度：

0.13~0.16 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物

の範囲にあった。また、コンブ類とワカメの
原子数比は、それぞれ $(8.7\sim 10) \times 10^{-11}$ と
 $(15\sim 20) \times 10^{-11}$ の範囲にあった。

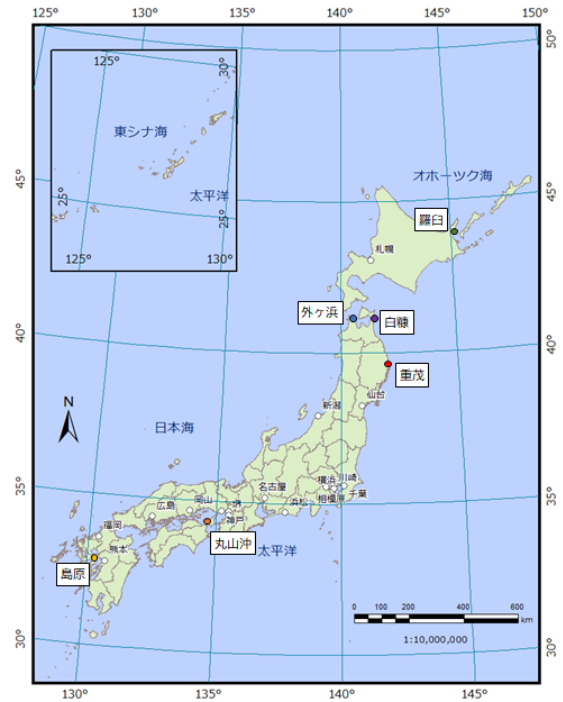


図 I-2-2-2-4 海藻試料の採取地点

表 I-2-2-2-6 海藻試料に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素) 濃度、 ^{129}I 放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比

試料	採取地	採取日	^{127}I (mg/g-乾物)		^{129}I ($\mu\text{Bq/g}$ -乾物)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
			令和3年	濃度	誤差*1	放射能濃度	誤差	原子数比
オニコンブ	羅白沿岸	7月29日	2.5	0.0060	1.7	0.063	10	0.38
マコンブ	外ヶ浜沿岸	10月9日	1.9	0.0044	1.2	0.071	9.2	0.57
マコンブ	白糖沿岸	7月11日	5.8	0.015	3.6	0.095	9.4	0.25
マコンブ	重茂沿岸	7月31日	0.96	0.0022	0.55	0.029	8.7	0.46
ワカメ	島原湾	4月16日	0.13	0.00051	0.13	0.0096	15	1.1
ワカメ	丸山沖	4月6日	0.12	0.00020	0.16	0.011	20	1.3

*1 ^{127}I 及び ^{129}I の誤差は、分析機器による3回の繰り返し測定から得た標準偏差を示す。また、 $^{127}\text{I}/^{129}\text{I}$ の誤差は、それぞれの誤差を伝播して得られた数値を示す。

平成 19 年度から令和 3 年度までの海藻試料の ^{127}I 濃度、 ^{129}I 放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の推移を図 I-2-2-2-5 に示す。平成 19 年度から令和 2 年度までの ^{127}I 濃度は 0.58 ~ 4.9 mg/g-乾物の範囲にあり、令和 3 年度に得られた結果はコンブ類については白糠で採取されたコンブの測定値が上回ったが、変動の範囲内にあると考えられる。

図 I-2-2-2-5(d) に示すように、六ヶ所村に所在する核燃料（原子燃料）サイクル施設からアクティブ試験により ^{129}I の放出が開始されたのが平成 18 年の後半であり、平成 20 年後半まで比較的 ^{129}I の放出量の多い状態が続いた（図 I-2-2-2-5(d)）。平成 19 年度から令和 2 年度までの ^{129}I 放射能濃度は、アクティブ試験による ^{129}I 放出量が比較的多かった平成 19~20 年を除けば、0.27~2.9 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物の範囲にあり、令和 3 年度に得られた結果はコンブ類については白糠で採取されたコンブの測定値が上回ったが、変動の範囲内にあると考えられる。

令和 3 年度調査における表層水試料に含まれる $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比を求めたところ、

核燃海域（青森県沖 AM1~AM16）：(6.3~9.0) $\times 10^{-11}$ 平均値：7.0 $\times 10^{-11}$

核燃海域（岩手県沖 AM17~AM22）：(5.4~8.6) $\times 10^{-11}$ 平均値：6.3 $\times 10^{-11}$

襟裳沖海域（E11）：(5.5~7.1) $\times 10^{-11}$ 平均値：6.3 $\times 10^{-11}$

津軽海峡（T2）：7.2 $\times 10^{-11}$

であり、上記の海域における表層海水の平均値と標準偏差は(6.9 \pm 0.84) $\times 10^{-11}$ であった。令和 3 年度に採取したコンブ類試料の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の範囲は(8.7~10) $\times 10^{-11}$ 、平均値と標準偏差は(9.4 \pm 0.76) $\times 10^{-11}$ と海水試料に比べ 37% 高く、両者は一致しなかった。コンブ類試料の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比は生育した環境の海水の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比を反映していると考えられ、両者の比が一致しなかった原因としては、コンブ類試料と海水試料では採取場所が異なることが第一に挙げられる。また、第二に海水試料は採取時の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比を表すのに対して、コンブ類の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比はコンブが生育していた期間の海水の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比を反映したした値を表している。コンブのヨウ素の取り込みは、その成長速度や海水中のヨウ素の滞留時間に影響を受けると考えられるため、両者の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比に違いが出たと考えられる。

平成 19 年度から令和 3 年度までのコンブ類試料に含まれる ^{129}I 放射能濃度の最大値(42 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物)は、平成 20 年 8 月の外ヶ浜沿岸で採取されたマコンブで見られた（図 I-2-2-2-5(b)）。平成 19 年度のコンブ類試料に含まれる ^{129}I 放射能濃度の範囲は 3.6~6.2 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物、平成 20 年度は 5.2~42 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物の範囲であり、それぞれ平均値は 5.1 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物、17 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物であった。平成 19~20 年度は全ての試料で平成 21 年度~令和 2 年度の ^{129}I 放射能濃度(0.27~2.9 $\mu\text{Bq/g}$ -乾物)に比べて高い値が観測され、アクティブ試験による影響と見られた。アクティブ試験による ^{129}I の液体廃棄物の放出（図 I-2-2-2-5(d)）

は、太平洋側で行われている。海流を考慮すると、液体廃棄物に含まれる¹²⁹Iが津軽海峡に位置する外ヶ浜沿岸のコンブ類試料と、根室海峡に位置する羅臼沿岸のコンブ類試料中の¹²⁹I放射能濃度に影響を与えた可能性は低く、気体廃棄物に含まれる¹²⁹Iの乾性沈着及び湿性沈着により、コンブ類試料に取り込まれた可能性がある¹⁸⁾。東電福島第一原発事故が発生した平成23年は平成22年に比べて羅臼、外ヶ浜、白糠沿岸のコンブ類試料の¹²⁹I放射能濃度にやや増加が見られたものの、アクティブ試験の影響ほど顕著ではなかった。

アクティブ試験による影響は、コンブ類試料に含まれるヨウ素の¹²⁹I/¹²⁷I原子数比にも認められた。平成19年度の範囲は(21~58)×10⁻¹¹、平成20年度は(36~260)×10⁻¹¹であり、平成19~20年度を除く時期におけるコンブ類試料の原子数比の範囲(2.1~12)×10⁻¹¹に比べて数倍から1桁以上高い値が見られた。東電福島第一原発事故が発生した平成23年は平成22年に比べて羅臼沿岸と外ヶ浜沿岸のコンブ類試料に含まれるヨウ素の¹²⁹I/¹²⁷I原子数比が1.2~2.1倍に増加したが、海水試料に比べると影響は少なかった。

対照海域(T2、E11)及び核燃海域(北部:AM1-AM16、南部:AM17-AM22)における¹²⁹I/¹²⁷I原子数比の時系列変化のデータセット(図I-2-2-2-5(c))よりアクティブ試験の影響が考えられる平成19~20年と原発事故のあった平成23年のデータを除いて、平均と標準偏差を計算すると

$$(6.9 \pm 0.81) \times 10^{-11}$$

となる。一方、コンブ類及びワカメ試料に含まれる¹²⁹Iと¹²⁷Iの関係を図I-2-2-2-6に示す。図中のデータの一部には上に示したようにアクティブ試験と原発事故の影響が見られる(図中破線で囲まれているデータ)。それらを除いたコンブ類のデータセットに対し、直線を回帰させた。なお、ワカメ試料のデータは含まない。得られた回帰式を以下に示す。

$$^{129}\text{I} = 8.8 \times 10^{-11} \times ^{127}\text{I} - 1.9 \times 10^8$$

$$r^2 = 0.81$$

回帰直線から得られた¹²⁹I/¹²⁷I原子数比(8.8×10⁻¹¹)は、核燃海域(青森海域を含む)の表層海水に含まれる¹²⁹I/¹²⁷I原子数比の平均値((6.9±0.81)×10⁻¹¹)と2σの範囲内で一致している。すなわち、コンブ類試料に含まれる¹²⁹I放射能濃度は海域毎に大きく変動しているが、その¹²⁹I/¹²⁷I原子数比は海水とほぼ同じレベルである。そのため、コンブ類試料に含まれる¹²⁹I/¹²⁷I原子数比の時系列変化を解析することにより、コンブが生育していた期間の海水に含まれる平均的な¹²⁹I放射能濃度の変動も再現できる可能性がある¹⁹⁾。一方、ワカメについてはコンブ類で得られた回帰直線から外れた傾向が確認された。データが本年度の分しかなく不明な点が多いが、種によるヨウ素の取り込み過程の違いや海域の違いを反映している可能性が考えられる。

コンブ類試料に含まれるヨウ素濃度及びその同位体比(原子数比)の時空間的な変動は、海水試料よりも長いタイムスケールの海水に含まれる¹²⁹I放射能濃度の変動を反映してい

ると考えられる。そのため、コンブ類試料に含まれるヨウ素濃度の調査は海洋放射能調査の補完項目として今後も継続が必要である。また、今年度より調査を始めたワカメ試料はコンブ類試料に比べて ^{127}I 濃度及び ^{129}I 放射能濃度が低く、両者の原子数比は高い傾向にあった。種による違いや採取された海域間の違いが考えられるが、原因については現時点では不明である。今後も調査を継続し、データの取得をしていく必要があると考えられる。

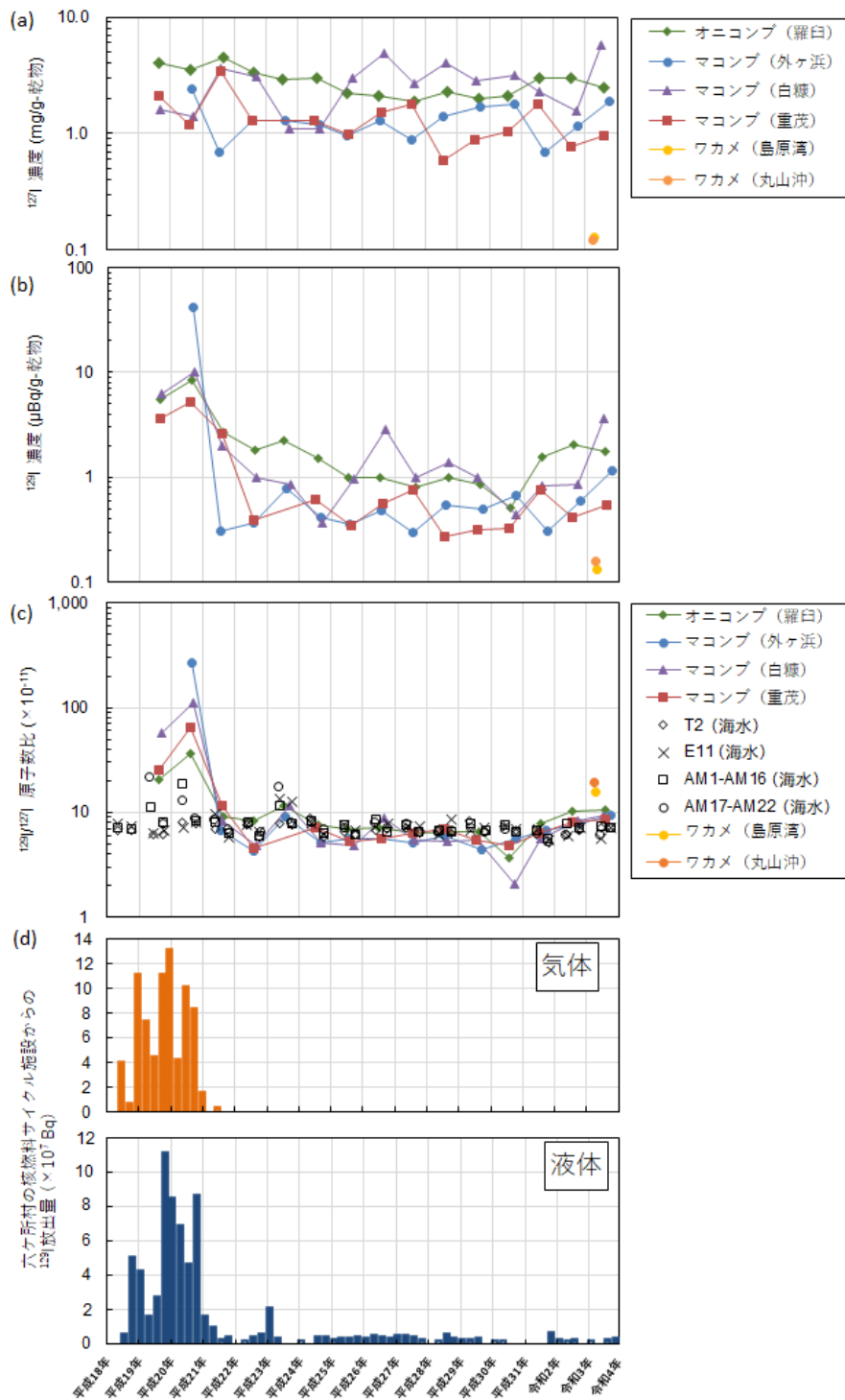


図 I-2-2-2-5 (a)海藻試料に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素)濃度、(b)海藻試料に含まれる ^{129}I 放射能濃度、(c)海藻及び海水試料に含まれる $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比、(d)六ヶ所村の核燃料（原子燃料）サイクル施設からの ^{129}I 放出量(AM1-AM16 及び AM17-AM22 で採取した海水試料に含まれる $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比は核燃海域の北部と南部の測点の平均値である。また、(d)は、平成 18～令和 3 年度六ヶ所再処理工場に係る定期報告書を参照した。)

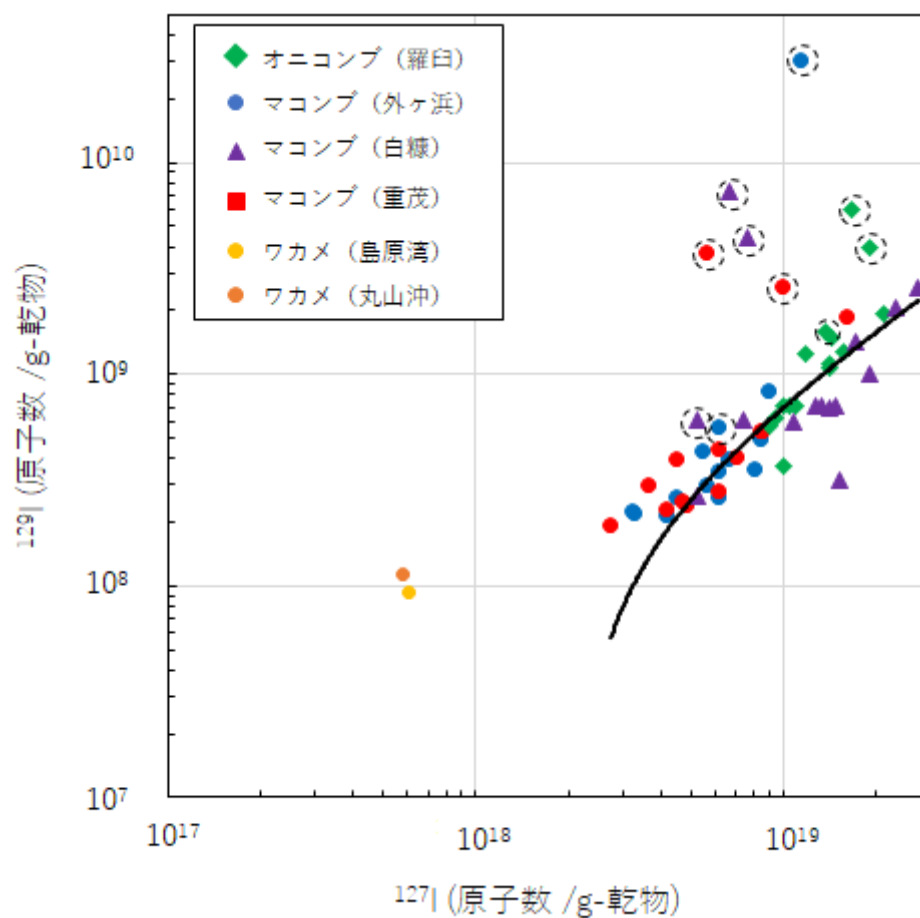


図 I-2-2-2-6 海藻試料に含まれる ^{127}I と ^{129}I の関係 (図中の回帰直線は、点線で囲まれたアクティブ試験及び原発事故の影響があるものを除いたコンブ類試料のみで計算した。)

引用文献

- 1) Guilderson, T.P., Tumey, S.J., Brown, T.A. and Buesseler, K.O. (2014). The ^{129}I -iodine content of subtropical Pacific waters: impact of Fukushima and other anthropogenic ^{129}I -iodine sources. *Biogeosciences*, **11**, 4839-4852.
- 2) Matsunaka, T., Sasa, K., Sueki, K., Takahashi, T., Satou, Y., Matsumura, M., Kinoshita, N., Kitagawa, J. and Matsuzaki, H. (2016). Pre-and post-accident ^{129}I and ^{137}Cs levels, and $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ ratios in soil near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, **151**, 209-217.
- 3) Honda M., Matsuzaki, H. Nagai, H. and Sueki, K. (2017). Depth profiles and mobility of ^{129}I originating from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant disaster under different land uses. *Applied Geochemistry*, **85**, 169-179.
- 4) 海洋生物環境研究所(2012). 平成 23 年度海洋環境放射能総合評価事業 調査報告書.
- 5) 海洋生物環境研究所(2013). 平成 24 年度海洋環境放射能総合評価事業 調査報告書.
- 6) 海洋生物環境研究所(2014). 平成 25 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.
- 7) 海洋生物環境研究所(2015). 平成 26 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.
- 8) 海洋生物環境研究所(2016). 平成 27 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.
- 9) 海洋生物環境研究所(2017). 平成 28 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.
- 10) 海洋生物環境研究所(2018). 平成 29 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.
- 11) 海洋生物環境研究所(2019). 平成 30 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.
- 12) 海洋生物環境研究所(2020). 平成 31 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.
- 13) Goldberg, W.M. (1978). Chemical changes accompanying maturation of the connective tissue skeletons of gorgonian and antipatharian corals. *Marine Biology*, **49**, 203-210.
- 14) Küpper, F.C., Schweigert, N., Gall, E.A., Legendre, J.M., Vilter, H. and Kloareg, B. (1998). Iodine uptake in Laminariales involves extracellular, haloperoxidase-mediated oxidation of iodide. *Planta*, **207**, 163-171.

- 15) Hou, X., Chai, C., Qian, Q., Yan, X. and Fan, X. (1997). Determination of chemical species of iodine in some seaweeds (I). *Science of the Total Environment*, **204**, 215-221.
- 16) Yotsukura, N. Kawashima, S., Kawai, T., Abe, T. and Druehl, L.D. (2008). A systematic re-examination of four Laminaria species: *L. japonica*, *L. religiosa*, *L. ochotensis* and *L. diabolica*. *Journal of Japanese Botany*, **83**, 165-176.
- 17) 賀佐信一・釜本真琴・河村日佐男 (2004) イオンクロマトグラフによる海水中の安定ヨウ素の定量. 第41回理工学における同位元素・放射線研究発表会要旨集, p.164.
- 18) 賀佐信一・澤藤奈都子・甲昭二・木下尚喜・天野光・河村日佐男 (2007). 溶媒抽出法を用いた加速器質量分析法による海水中 ^{129}I の定量. *Radioisotopes*, **56**, 155-162.
- 19) Ikenoue, T., Kusakabe, M., Yamada, M., Oikawa, S. and Misonoo, J. (2020). Temporal variation of iodine-129 concentrations in kelps (*Saccharina*) from coastal waters off northern Japan. *Marine Pollution Bulletin*, **161**, 111775.

(3) 海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査

① はじめに

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」では、海底土試料に含まれる放射性セシウム（以下 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の両核種を指す。）の測定は表面から深さ 3cm までの層に限られており、3cm より深い層における放射性セシウムの有無や放射能濃度、海底土の性状に関する情報が乏しい。また、同調査の海底土表面から 3cm までの層における時空間的な放射性セシウムの放射能濃度の変動を解析・解明する上で、それに関わると思われる種々のパラメータを取得して検討する必要がある。一方、東電福島第一原発事故に起因する海水に含まれる放射性セシウムは、既に本報告書に述べられているように事故前の値に近づきつつあるものの、未だに検出されており、今後も事故起源の放射性セシウムの存在や移動過程は注意深く把握して行かなければならない。

そこで本詳細調査では、海洋放射能調査海域周辺での調査結果を補完すべく、原子力発電所周辺海域において、海底土試料の性状、放射性セシウムの鉛直分布、さらに表層海水試料の極微量放射能分析や海水中における放射性セシウムの鉛直分布の把握を通じて、放射性セシウムの分布とその変動要因及び存在量などについて検討を行った。

② 海底土に含まれる放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査

（放射性セシウムの放射能濃度変動と性状の関係）

海底土試料に含まれる放射性セシウムの時空間的な変動は、海水から海底土に移行する機構と移行後の動態によりコントロールされ、どちらも海底土の性状が密接に関わっている¹⁾。本調査では放射性セシウムの変動要因を解析するための基礎データとするため、海洋放射能調査を実施した海域における調査で得られた海底土試料の性状を物理・化学的手法などによって分析し、海底土試料の性状と放射性核種との関わり、とりわけ ^{137}Cs の放射能濃度の分布との比較検討を行った。

（分析試料及び分析法）

令和 3 年 5～6 月において、発電所海域の 30 測点で採取した海底土試料、核燃海域の 22 測点で採取した海底土試料及び対照海域の 2 測点で採取した海底土試料の計 54 試料について性状分析を行った。分析項目と分析法を表 I-2-2-3-1 に示す。なお、詳細は以下のとおりである。

粒度分析：JIS A 1204「土の粒度試験方法」に基づき、海底土の粒度を求めた。粒度とは、土粒子径の分布状態を質量百分率で表したものをいい、本報告書では、粒径の細かさを表すパラメータとして 50%粒径（海底土粒子の平均的な大き

き)と75 μ m通過率(75 μ m目開きのふるいを通過した質量百分率)を用いた。

全有機炭素・全窒素：海底土に含まれる有機炭素含有量と窒素含有量を求めた。海底土は有機炭素に加えて無機炭素(炭酸カルシウム等)を含んでいるため、分析を行う際にはあらかじめ塩酸で前処理を行い、元素分析装置(CHNコーダー)による測定を行った。

密度・見かけ比重：JIS A 1225「土の湿潤密度試験方法」及びJIS Z 8807「固体の密度及び比重の測定方法」を参考に、密度及び見かけ比重を求めた。見かけ比重とは、海底土粒子間にある空隙を体積に含めた比重を指す。

元素分析：海底土に硝酸及びフッ酸を加え、マイクロウェーブ分解装置を用いて高温・高圧下での分解を行い溶液化し、誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)により測定を行った。測定を行った元素は、海底土の起源や酸化還元状態を評価する元素(アルミニウム、クロム、マンガン、鉄、ストロンチウム、モリブデン、銀、カドミウム、スズ、アンチモン及びウラン)、生物生産や有機物などに関連のある元素(ニッケル、銅、亜鉛、ヒ素及び鉛)、放射性セシウムとの関連を評価する際に重要となる元素(セシウム(安定元素、¹³³Cs))の17元素であり、標準物質としてNMIJ CRM 7302-a 海底質(有害金属分析用)を用いた。

表 I-2-2-3-1 海底土試料の分析項目と分析法

分析項目	分析法
粒度分析	JIS A 1204 に基づき粒径加積曲線を求める
全有機炭素・全窒素	酸処理の後、元素分析装置(CHNコーダー)による測定
密度・見かけ比重	JIS A 1225 及び JIS Z 8807 を参考に測定
元素分析	酸分解処理の後、誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)による測定

(結果)

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」で得られた各測点の海底土試料の性状分析結果の詳細データを資料 4-1 に示す。

(海底土の性状)

一連の実験で得られた海底土試料の性状を表 I-2-2-3-2 に示す。これらの数値の分布は広範囲にわたっており、海域の相違のみならず、同じ海域にある測点によっても粒径や見かけ比重、元素濃度など海底土試料の性状が大きく異なることが分かった。

表 I-2-2-3-2 性状分析の結果

性状	最大	最小	平均	標準偏差	中央値	試料数
50%粒径 (mm)	0.55	0.0018	0.14	0.12	0.16	54試料
75 μ m通過率 (%)	100	0	38	37	20	(発電所海域 30測点 +
全有機炭素 (mg/g)	35	0.90	10	10	4.5	核燃海域 22測点 +
全窒素 (mg/g)	4.7	0.25	1.5	1.4	0.85	対照海域 2測点)
見かけ比重	1.88	1.15	1.53	0.23	1.57	
密度 (g/cm ³)	3.50	1.74	2.59	0.29	2.63	

(海底土の元素濃度)

海底土試料に含まれるアルミニウム、クロム、マンガン、鉄、ニッケル、銅、亜鉛、ヒ素、ストロンチウム、モリブデン、銀、カドミウム、スズ、アンチモン、セシウム(安定)、鉛及びウランの元素濃度について、これらの幾何平均値とその最大値及び最小値を併せてグラフ化したものを図 I-2-2-3-1 に示す。

最も広範囲の濃度分布を示したのは銀であり、最大値と最小値では2桁程の差が見られた。他の元素濃度の分布も広範囲にわたっており、最大値と最小値の差が最も小さかったアンチモンにおいても、濃度には5倍程の差があった。なお、これらの値は、平成28～令和2年度で得られた値とおおむね一致する。

また、堆積環境の酸化還元状態を示す指標としてモリブデン及びウランが用いられており^{2,3)}、例えばモリブデンの濃度が3.8 μ g/g-乾燥土以上かつウランの濃度が2.7 μ g/g-乾燥土以上である場合、還元状態であることが報告されている。ウランの濃度の最大値は核燃海域の測点16の2.5 μ g/g-乾燥土であるが、モリブデンの濃度は2.6 μ g/g-乾燥土であった。

モリブデンの濃度から酸化状態である海底土と言える。また、その他の海域においてもモリブデン及びウランの濃度は既知の結果以下であったことから、本調査で採取した海底土は全て酸化状態であることが分かった。海底土は、陸に近い沿岸を除き表層では酸化状態であり、深くなるにつれ還元的な状態となることが知られている。本調査で分析を行った海底土は全て海底土の表面から3cmまでの層であることから、海底土は酸化状態であると考えられ、これは本調査の結果とも一致する。多種の元素を測定することによって、調査海域の海底土の組成や酸化還元状態について概ね把握することができた。

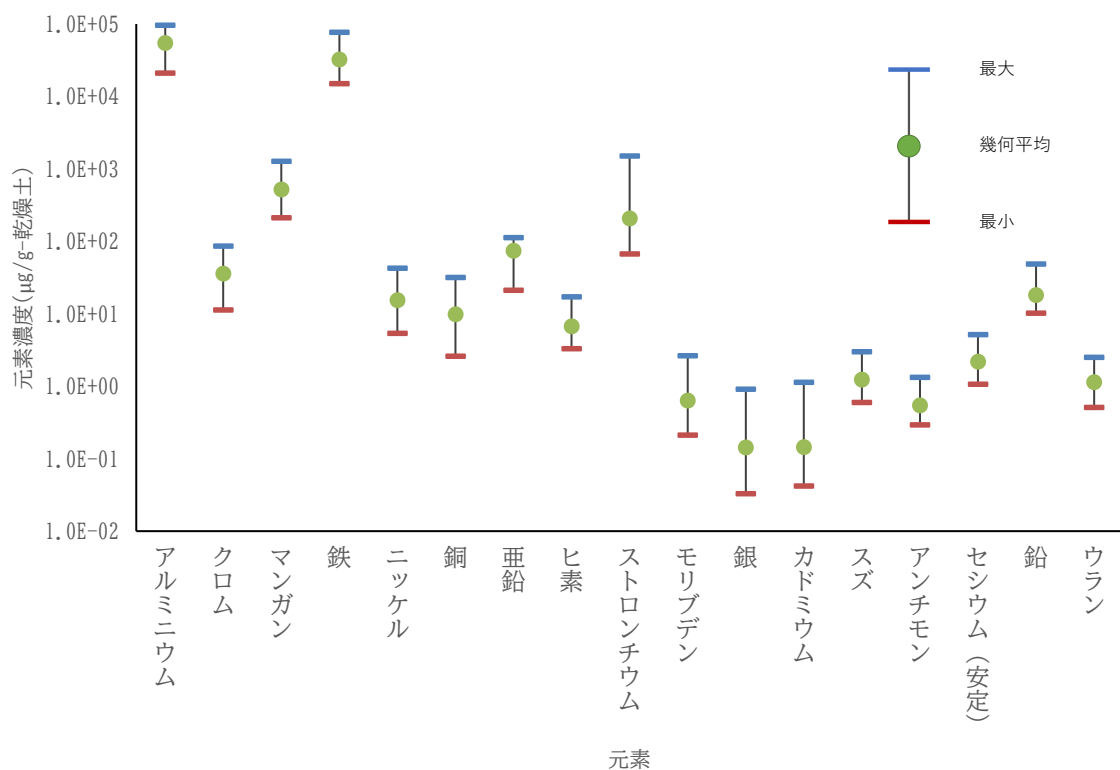


図 I -2-2-3-1 海底土試料に含まれる元素濃度範囲

(相関分析)

^{137}Cs の放射能濃度と海底土の性状及び元素濃度との関係について、統計的な手法の一つである相関分析を行い、互いにどのような相関があるのか否かについて検討を行った。相関分析には、平成 28～令和 3 年度までの 6 年間で得られた生データを用いた。

(海底土の性状間の相関分析)

海底土の各性状で相関分析を行った結果を表 I-2-2-3-3 に示す。

海底土の粒子の大きさを表すパラメータである 50%粒径と 75 μm 通過率の間に強い負の相関 ($r=-0.85$ ($p<0.0001$)) が認められた (図 I-2-2-3-2)。また、見かけ比重と 50%粒径及び 75 μm 通過率にも強い相関が認められた (図 I-2-2-3-3~4)。これは、一般に粒径が細かいほど空隙率が大きくなる傾向があり、空隙は土壌粒子よりも密度の小さい海水で満たされていることから見かけ比重が小さくなるためである。つまり、見かけ比重も 50%粒径や 75 μm 通過率と同じく海底土の粒子の大きさを表すパラメータであり、これらの 3 つの性状の間に強い相関が表れても不思議ではない。

有機物含有量に着目すると、全有機炭素と全窒素の間にも非常に強い正の相関 ($r=0.97$ ($p<0.0001$)) があった (図 I-2-2-3-5)。また、海底土の粒子を表すパラメータと有機物含有量には強い相関が認められたことから、海底土の粒径が小さいほど有機物含有量が高くなる傾向があり、海底土の有機物含有量は粒径に依存していると考えられる (図 I-2-2-3-6~8)。

表 I-2-2-3-3 各性状の相関行列を計算した結果 (相関関係がある ($r>0.8$ もしくは $r<-0.8$) かつ 5 %の有意水準 ($p<0.05$) を満たすものは着色で示した。)

相関係数	50%粒径	75 μm 通過率	見かけ比重	全有機炭素	全窒素	密度
試料数	464試料					
50%粒径						相関係数r
75 μm 通過率	-0.85					> 0.8
見かけ比重	0.84	-0.80				< -0.8
全有機炭素	-0.83	0.87	-0.86			
全窒素	-0.82	0.83	-0.85	0.97		
密度	0.08	-0.01	0.19	-0.06	-0.06	

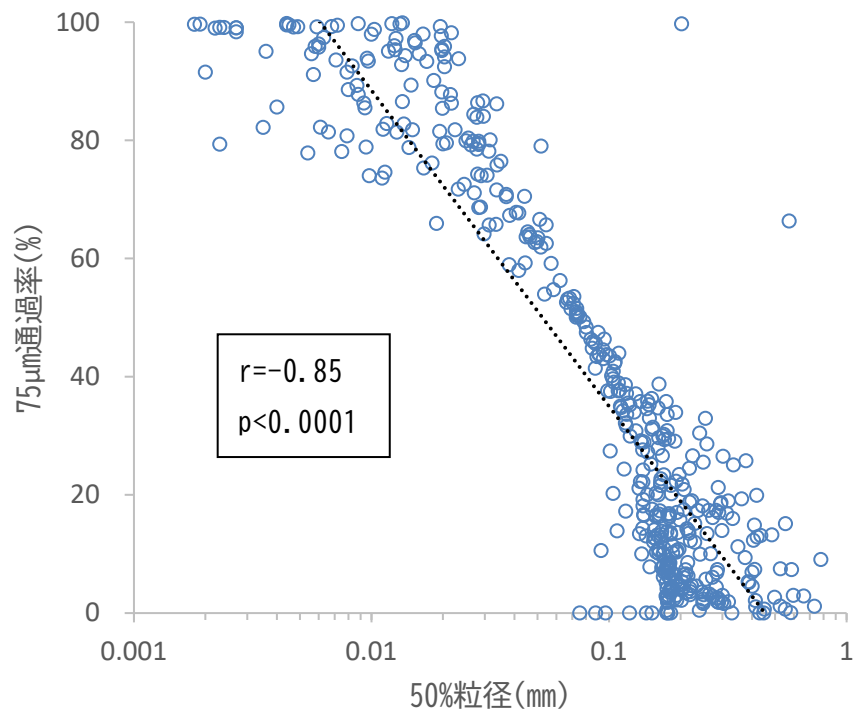


図 I -2-2-3-2 海底土の 50%粒径と 75μm 通過率の関係

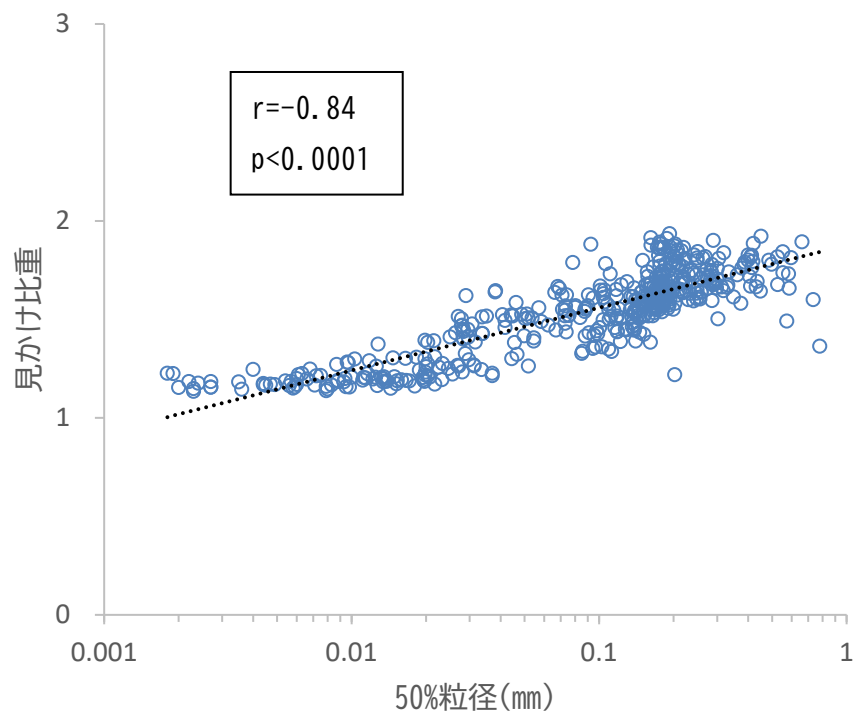


図 I -2-2-3-3 海底土の見かけ比重と 50%粒径の関係

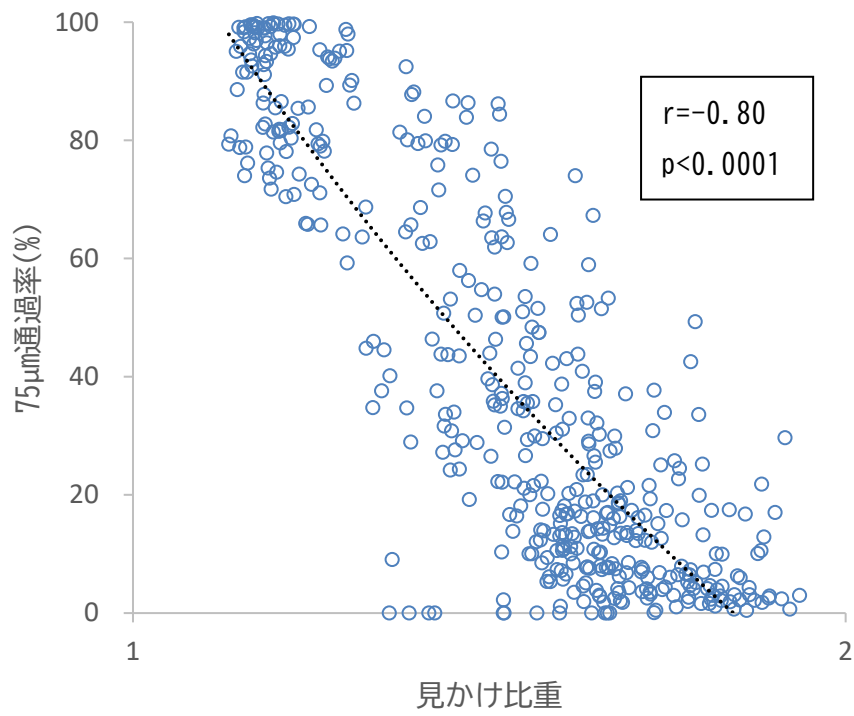


図 I -2-2-3-4 海底土の見かけ比重と 75 μ m 通過率の関係

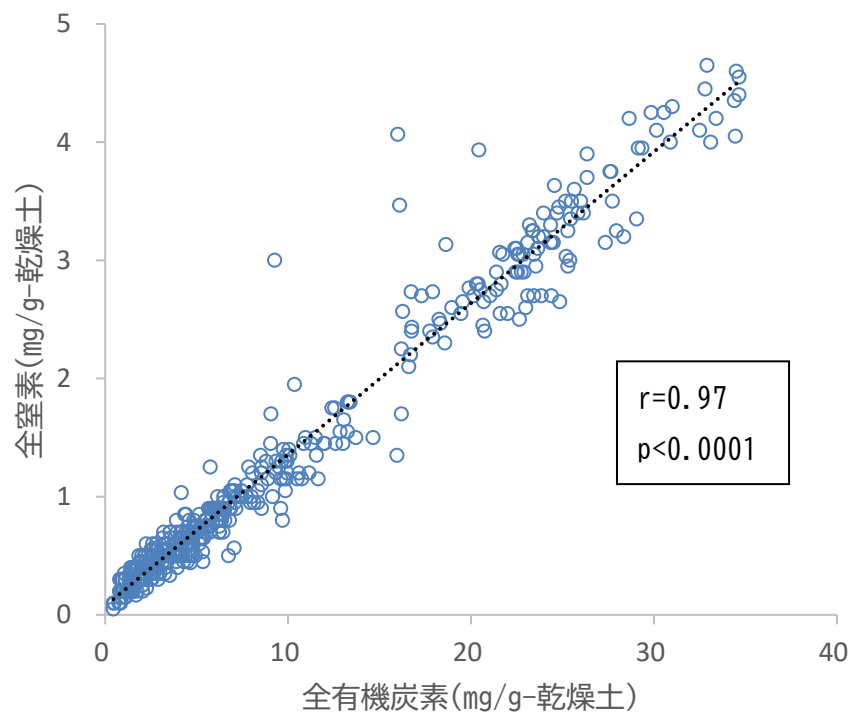


図 I -2-2-3-5 海底土の全有機炭素と全窒素の関係

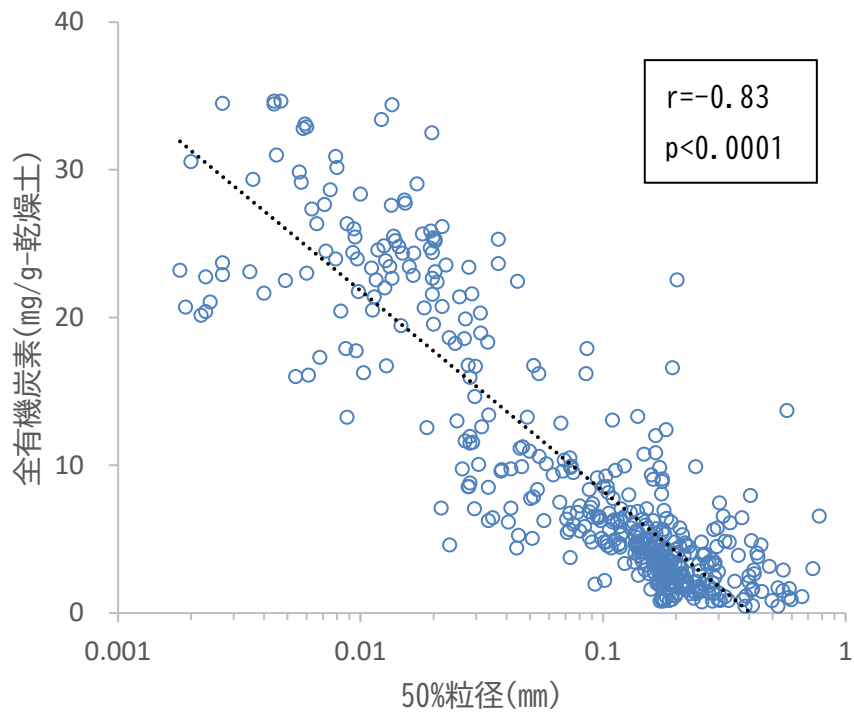


図 I -2-2-3-6 海底土の 50%粒径と全有機炭素の関係

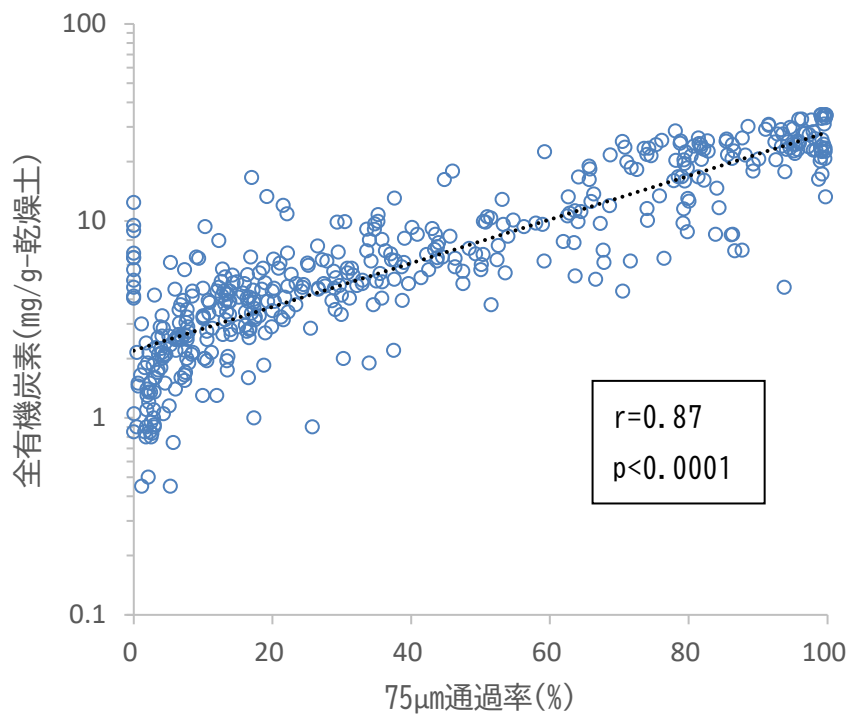


図 I -2-2-3-7 海底土の 75μm 通過率と全有機炭素の関係

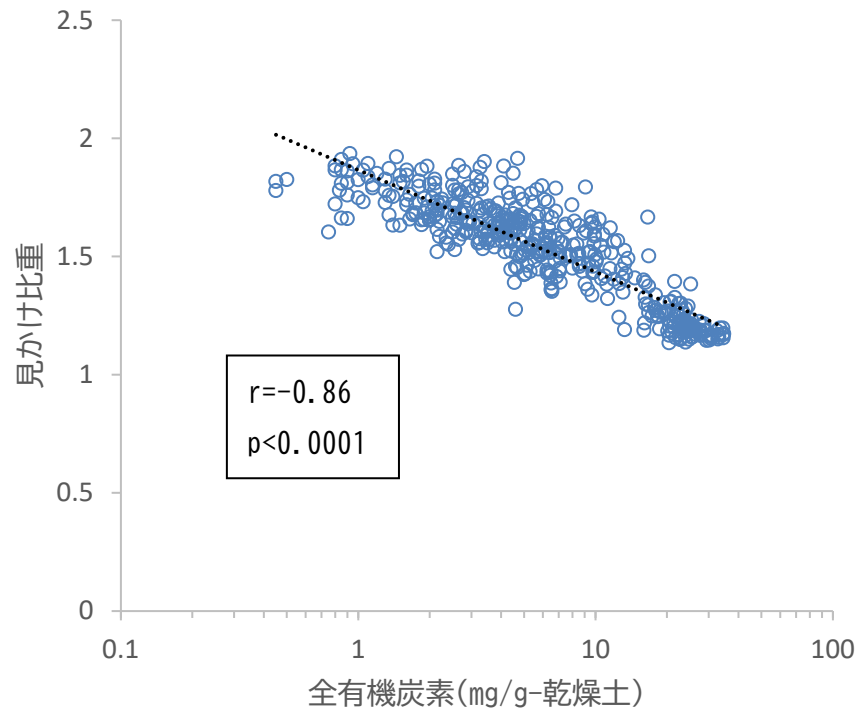


図 I -2-2-3-8 海底土の見かけ比重と全有機炭素の関係

(^{137}Cs の放射能濃度と性状及び元素濃度の関係)

^{137}Cs の放射能濃度と海底土の性状及び元素濃度との関係について、相関分析を行った。 ^{137}Cs の放射能濃度については、東電福島第一原発事故以降にその放射性同位体である ^{134}Cs が検出されたことがあるか否かによって解釈を分けることにした。 ^{134}Cs は半減期約 2 年の放射性核種で核爆発実験ではほとんど生成せず、原子力施設の炉内で主として放射化物として生成するものである。物理壊変を考慮すれば昨今の環境中で見いだされる ^{134}Cs は平成 23 年 3 月の東電福島第一原発事故に起因するものである。

ここでは、東電福島第一原発事故以降、本調査で ^{134}Cs が検出されたことのある海域（宮城、福島第一、福島第二、茨城及び新潟海域）、すなわち過去の大気圏核爆発実験に由来する ^{137}Cs と東電福島第一原発事故に由来する ^{137}Cs が混在すると考えられる海域と、東電福島第一原発事故以降、本調査で ^{134}Cs が検出されたことのない海域（北海道、青森、静岡、石川、福井第一、福井第二、島根、愛媛、佐賀、鹿児島及び核燃海域）、すなわち東電福島第一原発事故に由来する ^{137}Cs の影響を受けていない海域に分けて考察を行った。

^{134}Cs が検出されたことのある海域における放射性セシウムの放射能濃度は、東電福島第一原発事故当初に放出された高濃度の放射性セシウムを含む海水の水平分布と、粒径の大きさに依存した放射性セシウムの分配率（細かい粒径に多く分配される）が空間的な変動に影響を与えていると指摘されている^{4~6)}。そのため、 ^{134}Cs が検出されたことのある海域を東電福島第一原発事故に由来する ^{137}Cs の影響の程度により、3 つ（①宮城海域、②福島第一、福島第二及び茨城海域、③新潟海域）に分けて考察を行った。なお、各海域における ^{137}Cs の放射能濃度レベルは以下のとおりである。

本調査で ^{134}Cs が検出されたことのある海域

- ①宮城海域：2.0～10Bq/kg-乾燥土
- ②福島第一、福島第二及び茨城海域：10～93Bq/kg-乾燥土
- ③新潟海域：2.4～11Bq/kg-乾燥土

本調査で ^{134}Cs が検出されたことのない海域

0.36～5.1Bq/kg-乾燥土（検出下限値以下を除く）

^{137}Cs の放射能濃度と海底土の性状及び元素濃度について相関分析を行い、それらの結果を表 I-2-2-3-4 に示す。

表 I-2-2-3-4 ^{137}Cs の放射能濃度と性状及び元素濃度の相関係数（相関関係があり、かつ 5% の有意水準 ($p < 0.05$) を満たすものについては着色で示した。）

海域		^{134}Cs が 検出されたこと のない海域	宮城海域	福島第一・第二・ 茨城海域	新潟海域	相関係数r
相関関係		^{137}Cs	^{137}Cs	^{137}Cs	^{137}Cs	
試料数		286	22	66	22	
性状	50%粒径	-0.85	0.32	-0.31	-0.45	> 0.7
	75 μm 通過率	0.88	-0.19	0.41	0.63	0.4~0.7
	全有機炭素	0.87	0.05	0.42	0.47	-0.4~0.4
	全窒素	0.85	0.02	0.37	0.48	-0.4~0.7
	見かけ比重	-0.84	0.37	-0.26	-0.34	< -0.7
	密度	0.01	0.13	-0.11	-0.08	
元素濃度	アルミニウム	-0.27	-0.37	-0.11	0.55	
	クロム	0.54	0.28	0.04	0.67	
	マンガン	-0.52	0.16	-0.42	0.45	
	鉄	-0.30	0.21	-0.33	-0.61	
	ニッケル	0.75	0.20	0.10	0.79	
	銅	0.81	0.28	0.30	0.66	
	亜鉛	0.58	0.16	-0.19	0.55	
	ヒ素	0.65	0.39	0.42	-0.30	
	ストロンチウム	-0.62	0.32	-0.02	-0.28	
	モリブデン	0.61	-0.09	0.46	0.52	
	銀	0.68	-0.22	0.19	0.44	
	カドミウム	0.52	-0.11	0.43	0.66	
	スズ	0.66	-0.06	0.22	0.68	
	アンチモン	0.77	0.31	0.33	0.55	
	セシウム (安定)	0.58	0.43	0.40	0.57	
	鉛	0.83	0.21	0.31	0.65	
	ウラン	0.71	0.26	0.51	0.42	

<東電福島第一原発事故由来の放射性セシウムとして ^{134}Cs が検出されなかったことがない海域>

本調査で ^{134}Cs が検出されなかった海域において、海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度と 75 μm 通過率、全有機炭素及び全窒素との間に強い正の相関があった（図 I-2-2-3-9~10）。また、 ^{137}Cs の放射能濃度と 50%粒径及び見かけ比重との間には強い負の相関があった（図 I-2-2-3-11~12）。すなわち、 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は、粒子の大きさ及び有機物含有量に関連していると考えられる。

令和 3 年度において、佐賀及び鹿児島海域において採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度が低い、または不検出となることが多いのは、海底土の粒径が大きく有機物含有量が低いことが要因の一つとなっていると考えられる。したがって、海底土の粒径が大きく有機物含有量が低い海域では ^{137}Cs の放射能濃度が低い、もしくは検出下限値未満となる傾向がある。これらのことから、 ^{137}Cs の放射能濃度は、粒径の減少及び有機物含有量の増加に伴って高くなる傾向があり、既存の調査研究⁷⁾と同様に、粒径及び有機物含有量は ^{137}Cs の放射能濃度の変動を把握する上で重要なパラメータであることが分かった。

また、 ^{137}Cs の放射能濃度とニッケル、銅、アンチモン、鉛及びウランとの間に強い相関があった。海底土の鉛濃度と ^{137}Cs の放射能濃度の関係をグラフ化したものを図 I-2-2-3-13 に示す。また、 ^{137}Cs の放射能濃度とクロム、亜鉛、ヒ素、モリブデン、銀、カドミウム及びスズとの間に相関も確認された。

一方で、 ^{137}Cs の放射能濃度とマンガン及びストロンチウムとの間に負の相関が、 ^{137}Cs の放射能濃度とアルミニウム及び鉄との間に弱い負の相関が認められた。

相関が見られた元素は、海水中において粒子に吸着しやすいもの（銅、マンガン、スズ及び鉛）や水に溶解しやすいもの（ストロンチウム、アンチモン、モリブデン及びウラン）などに分けられるが、それぞれ性質が異なるため一概には説明できず、これらの元素濃度と ^{137}Cs の放射能濃度に相関が見られる理由は不明である。しかし、これらの元素は粒径、有機物含有量と同様に ^{137}Cs の放射能濃度の変動を把握する上で有用なパラメータであることが分かった。さらに、 ^{137}Cs の放射能濃度とセシウム（安定）濃度との間にも正の相関があった（図 I-2-2-3-14）。同じ元素であるにも関わらず相関が弱い要因として、セシウム（安定）は海底土を構成する鉱物等の中に元来含まれているのに対し、 ^{137}Cs は海底土粒子の表面を中心に吸着しており、両者の存在形態が異なることが要因であると考えられる⁴⁾。

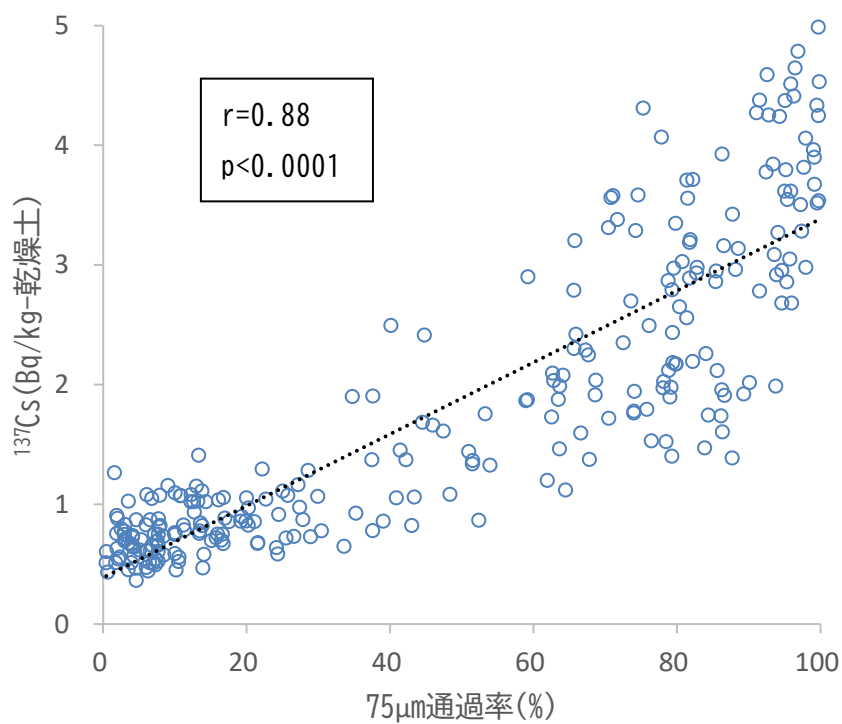


図 I-2-2-3-9 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土の $75\mu\text{m}$ 通過率と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

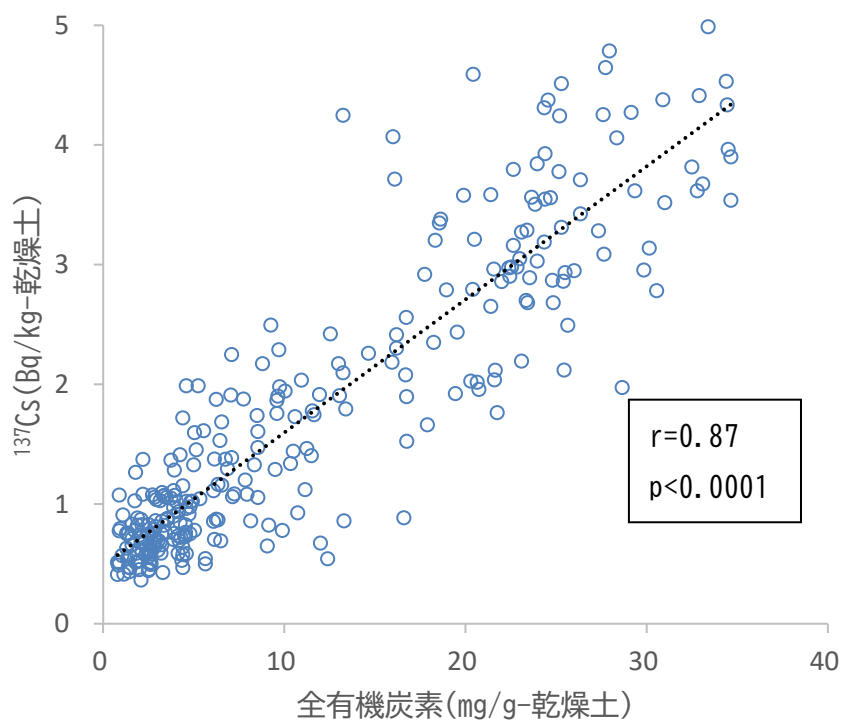


図 I-2-2-3-10 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土の全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

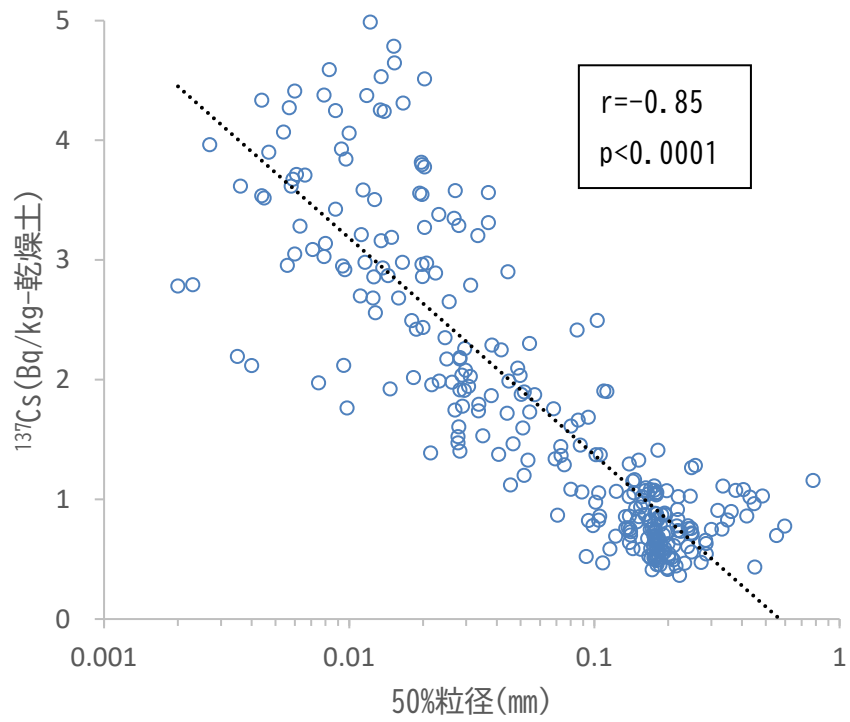


図 I-2-2-3-11 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土の 50%粒径と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

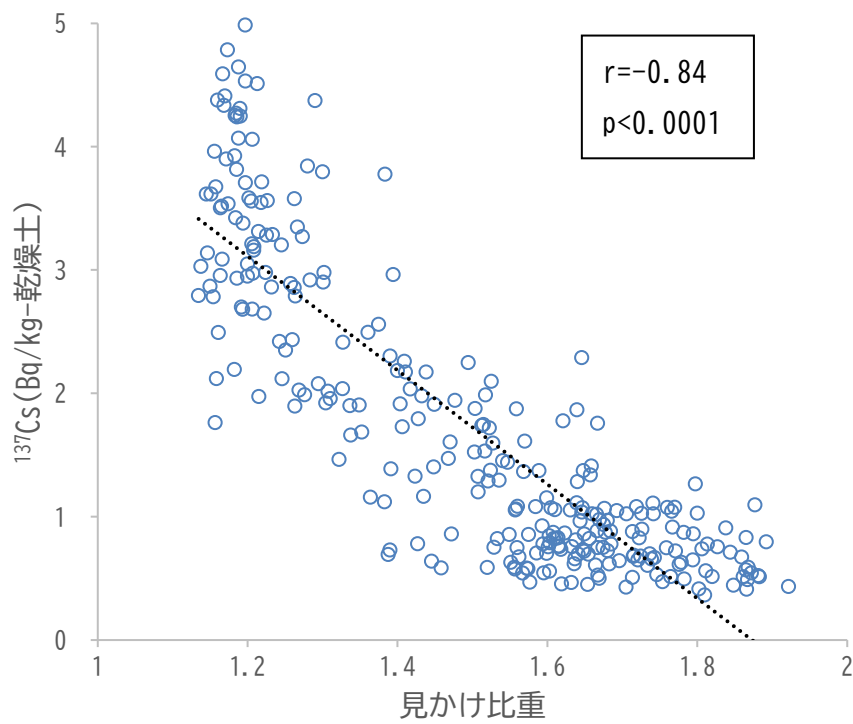


図 I-2-2-3-12 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土の見かけ比重と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

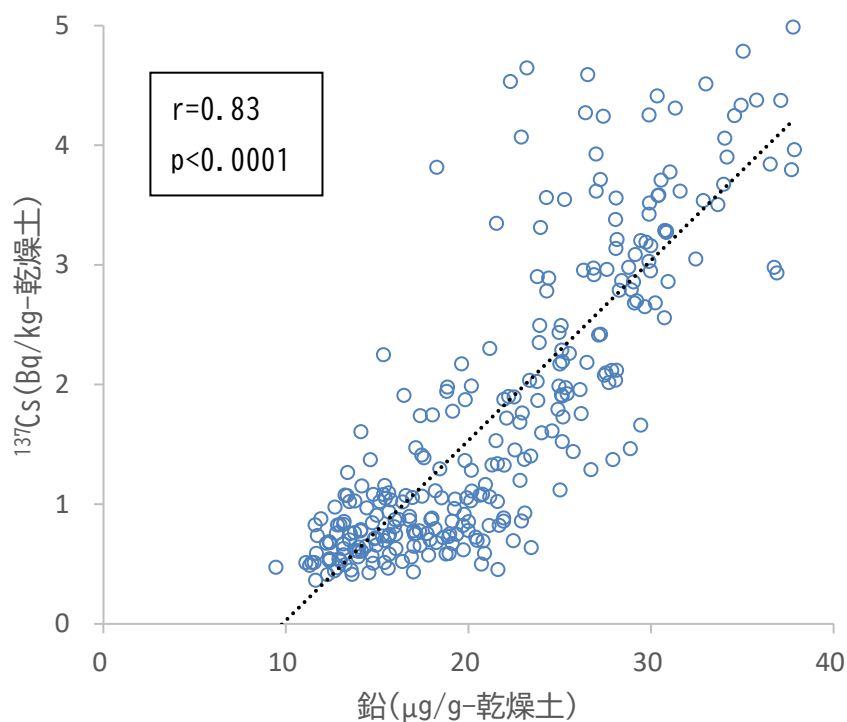


図 I-2-2-3-13 ^{134}Cs が検出されることがない海域で採取した海底土に含まれる鉛の濃度と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

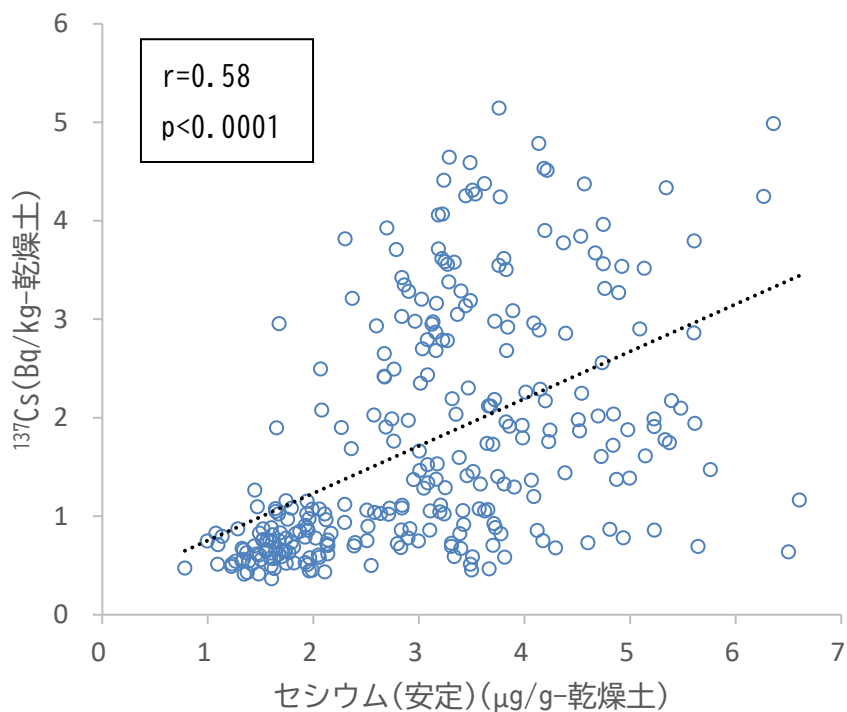


図 I-2-2-3-14 ^{134}Cs が検出されることがない海域で採取した海底土に含まれるセシウム(安定)の濃度と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

<東電福島第一原発事故由来の放射性セシウムとして ^{134}Cs が検出されたことのある海域>

① 宮城海域

宮城海域で得られた海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度と海底土の性状の間に有意な相関は見られなかった（図 I-2-2-3-16~19）。この要因として、東電福島第一原発事故当初に放出された高い ^{137}Cs 放射能濃度を含む海水の水平分布が空間的な変動に影響を与えていることや、海底土中で起こる生物攪乱、再懸濁や海流による水平移動並びに放射性粒子（特異的に高い放射能を持つ微粒子）の影響を受けていることなどが考えられる^{4,8~10}。また、宮城海域は海底土の性状のパラメータの変動が小さく、さらに他の海域に比べ試料数が少ないことが影響している可能性も考えられる。

^{137}Cs の放射能濃度と元素濃度との間には、セシウム（安定）濃度にのみ相関（ $r=0.43(p<0.05)$ ）が見られた（図 I-2-2-3-20）。後述する②福島第一、福島第二及び茨城海域や③新潟海域では、東電福島第一原発事故由来の海底土に沈着した放射性セシウムが、海底土中で起こる生物攪乱や再懸濁等により混合されて均一化が進んだことで、 ^{134}Cs が検出されたことのない海域における放射性セシウムの移行や挙動に徐々に近づいてきた可能性が示唆されている。宮城海域は、福島第一、福島第二及び茨城海域よりも ^{137}Cs の放射能濃度が低く、東電福島第一原発事故の影響は少ないと考えられるため、福島第一、福島第二及び茨城海域と比べ、 ^{134}Cs が検出されたことのない海域における放射性セシウムの移行や挙動により近い傾向を示すはずである。しかし、海底土の性状と ^{137}Cs の放射能濃度の間に相関関係は見られず、なぜ ^{137}Cs の放射能濃度とセシウム（安定）濃度にのみ相関が表れたのかは不明である。

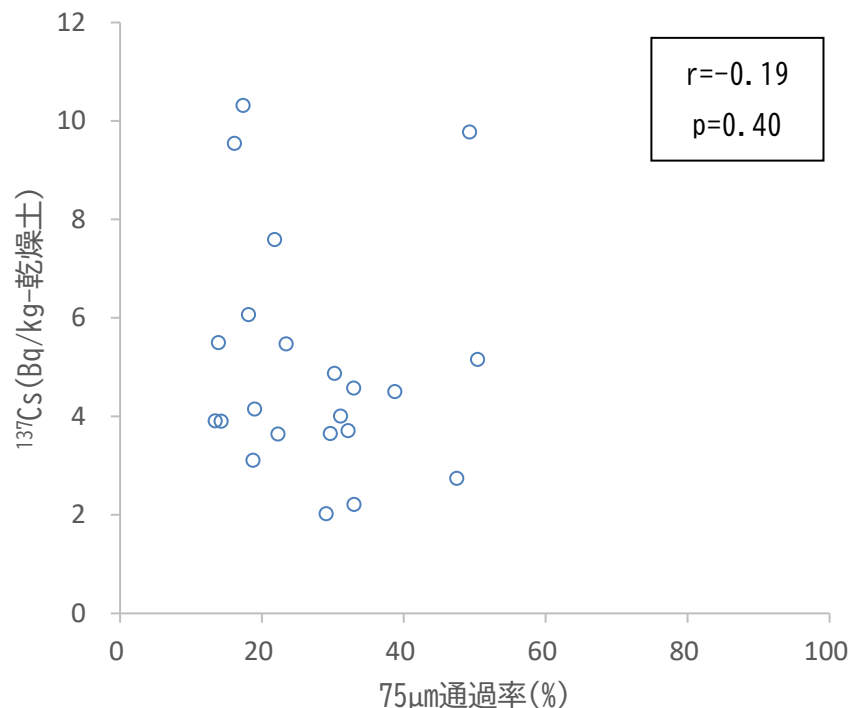


図 I-2-2-3-16 宮城海域で採取した海底土の 75μm 通過率と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

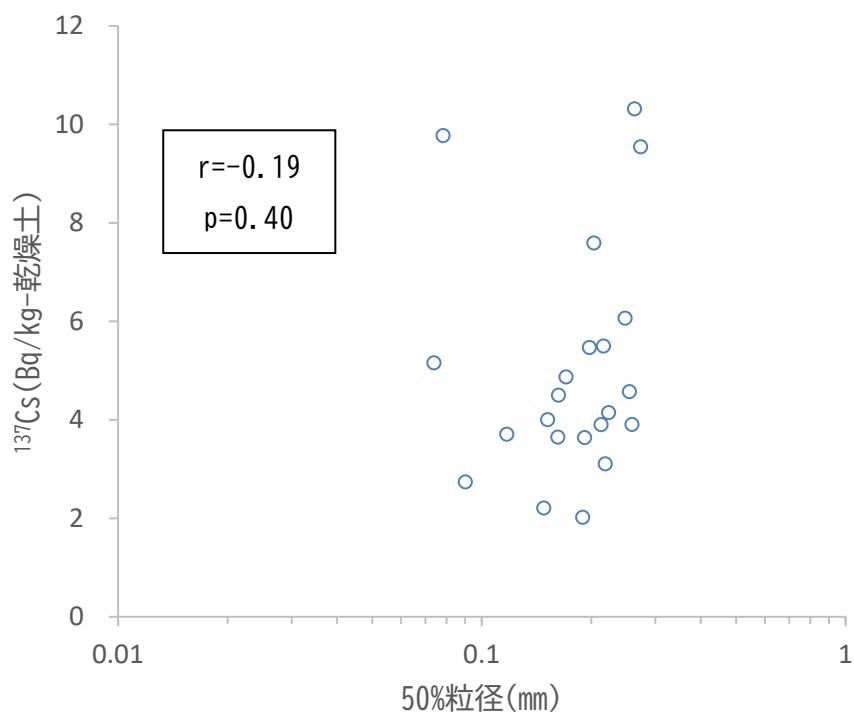


図 I -2-2-3-17 宮城海域で採取した海底土の 50%粒径と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

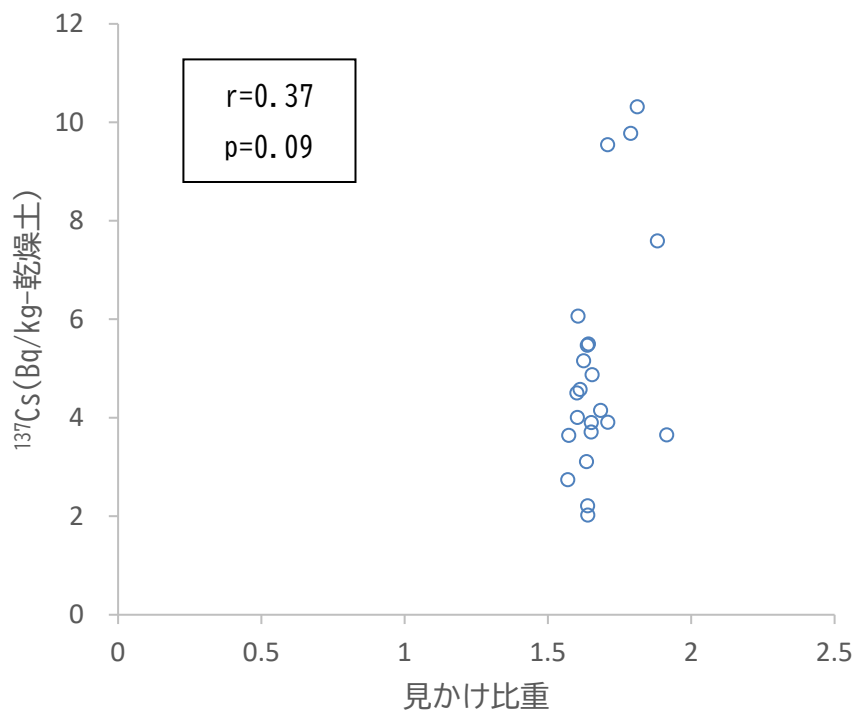


図 I -2-2-3-18 宮城海域で採取した海底土の見かけ比重と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

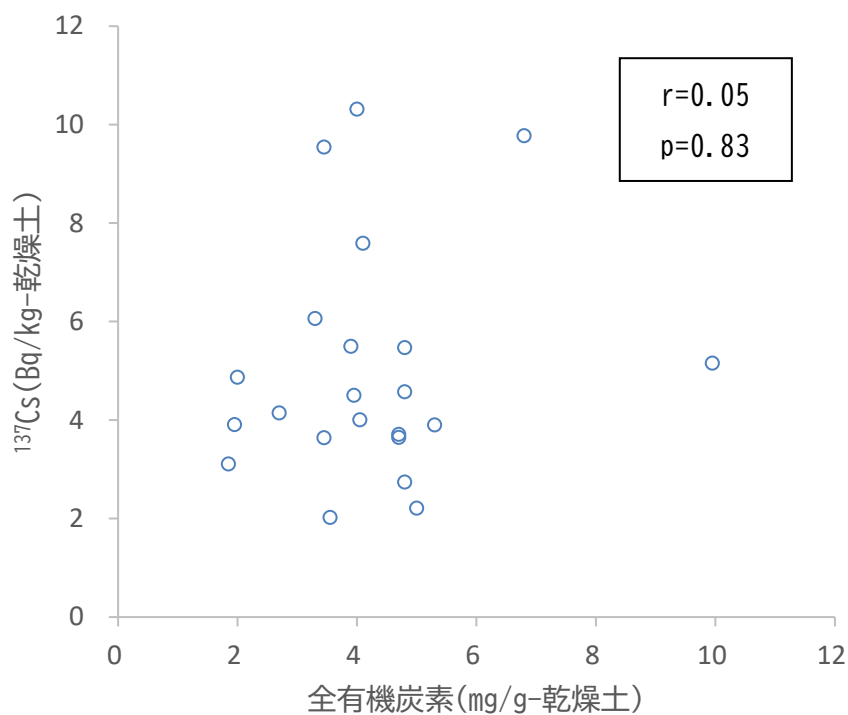


図 I-2-2-3-19 宮城海域で採取した海底土の全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

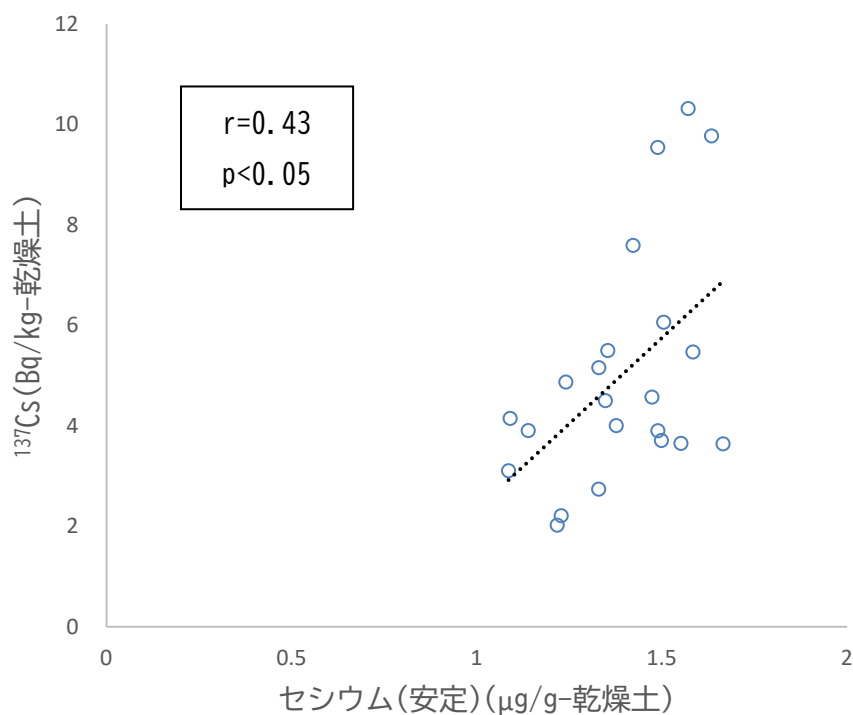


図 I-2-2-3-20 宮城海域で採取した海底に含まれるセシウム（安定）の濃度と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

② 福島第一、福島第二及び茨城海域

福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度については、75μm通過率、全有機炭素及び全窒素との間に相関が認められた(図I-2-2-3-21~22)。また、50%粒径及び見かけ比重との間には弱い負の相関が認められた(図I-2-2-3-23~24)。このことから、福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土試料の¹³⁷Csの放射能濃度の変動は、海底土の粒径及び有機物含有量に少なからず依存していると考えられる。

また、¹³⁷Csの放射能濃度とヒ素、モリブデン、カドミウム、セシウム(安定)及びウランとの間に相関が認められた。海底土に含まれるウランの濃度と¹³⁷Csの放射能濃度の関係をグラフ化したものを図I-2-2-3-25に示す。一方で、銅、アンチモン及び鉛との間に正の相関が、マンガンとの間に負の相関があった。海底土に含まれるマンガンの濃度と¹³⁷Csの放射能濃度の関係をグラフ化したものを図I-2-2-3-26に示す。また、¹³⁷Csの放射能濃度と鉄の間に弱い負の相関があった

この傾向は、前述の¹³⁴Csが検出されることがない海域での¹³⁷Csの放射能濃度と海底土の性状における相関関係と類似しており、平成28~30年度の間では見られなかった傾向である¹¹⁾。この要因として、東電福島第一原発事故由来の海底土に沈着した放射性セシウムが、海底土中で起こる生物攪乱、再懸濁や海流による水平移動により混合されて均一化が進んだことで、¹³⁴Csが検出されることがない海域における、核爆発実験フォールアウト後半世紀を経た放射性セシウムの移行や挙動に徐々に近づいてきた可能性が考えられる。

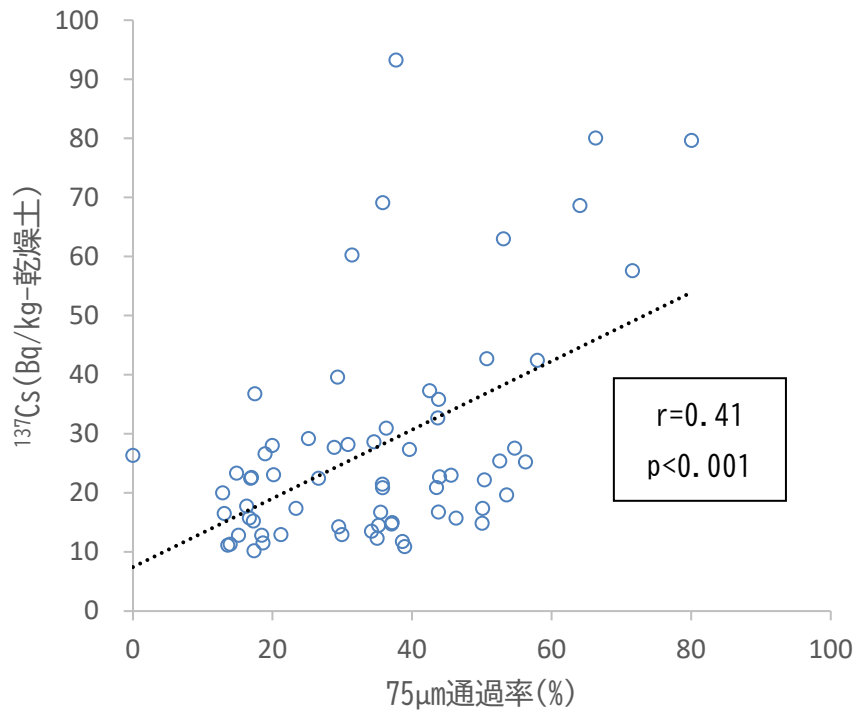


図 I-2-2-3-21 福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土の 75μm 通過率と ¹³⁷Cs の放射能濃度の関係

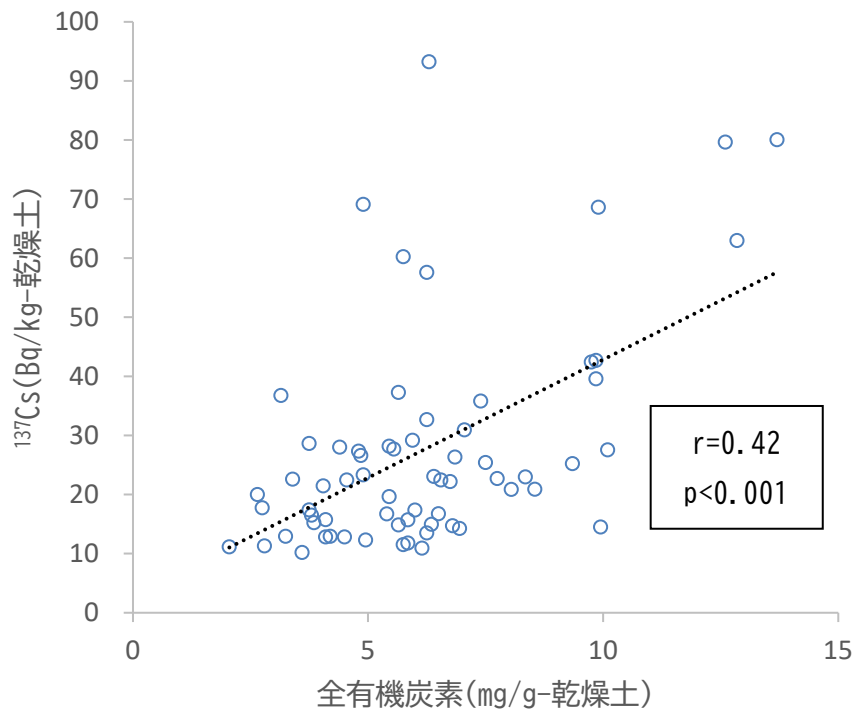


図 I-2-2-3-22 福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土の全有機炭素と ¹³⁷Cs の放射能濃度の関係

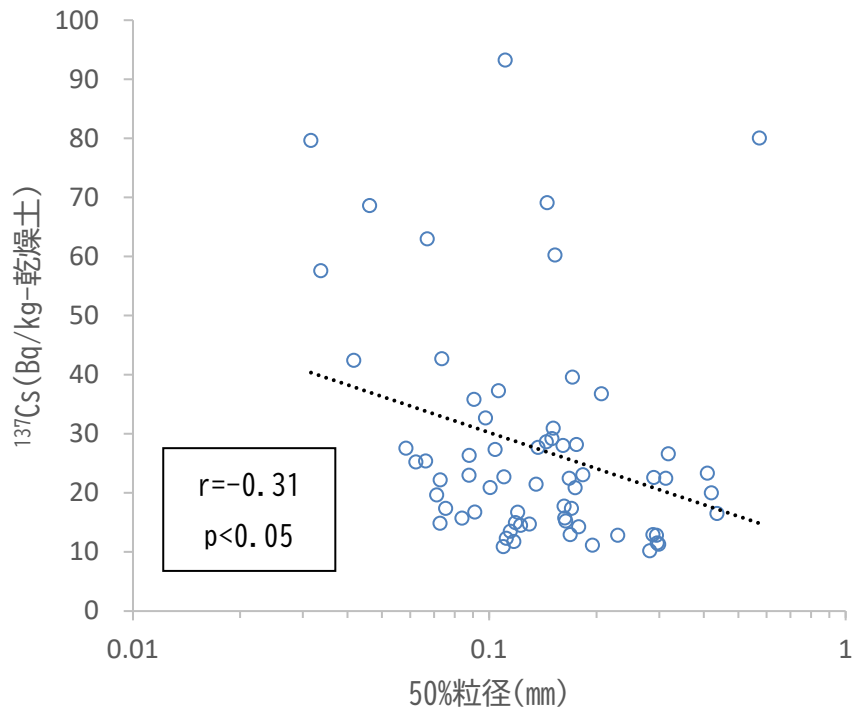


図 I-2-2-3-23 福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土の 50%粒径と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

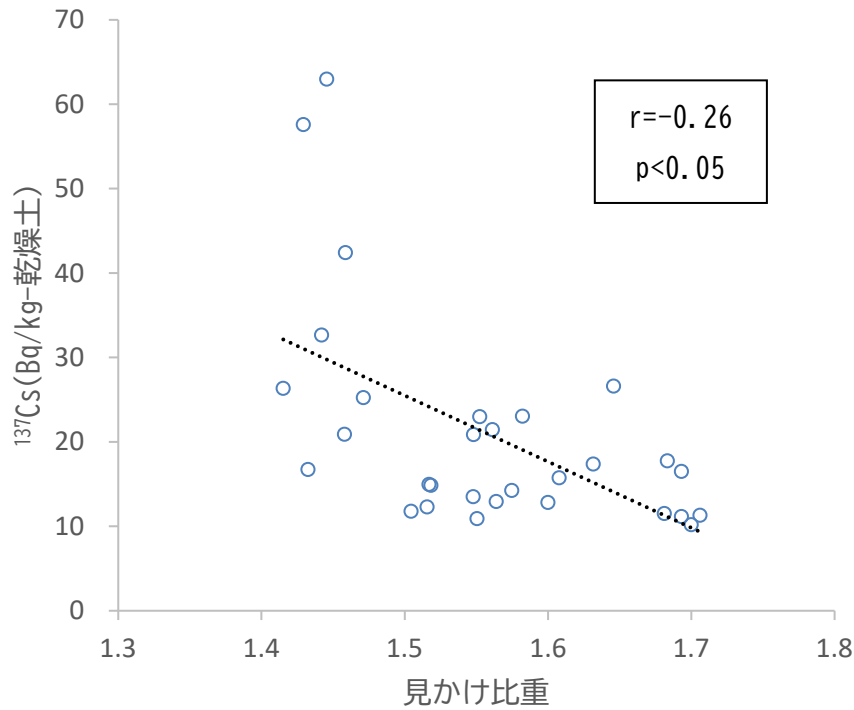


図 I-2-2-3-24 福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土の見かけ比重と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

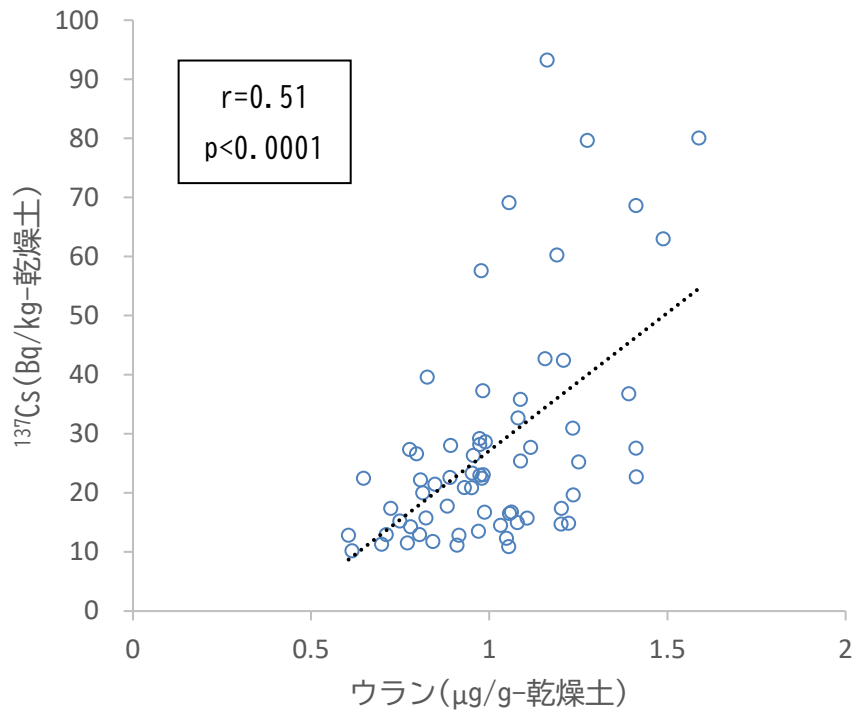


図 I-2-2-3-25 福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土に含まれるウランの濃度と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

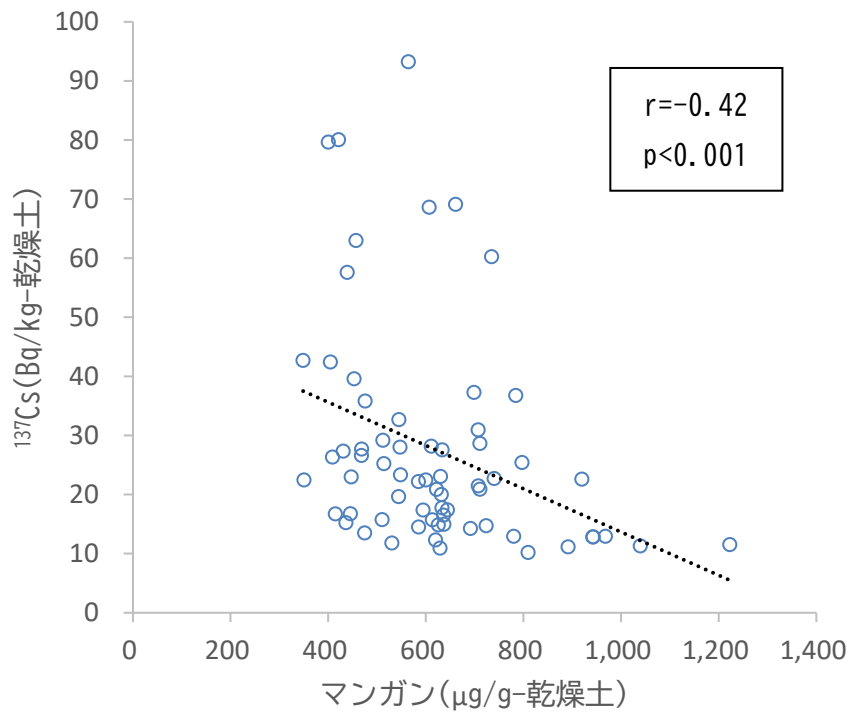


図 I-2-2-3-26 福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土に含まれるマンガンの濃度と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

③ 新潟海域

新潟海域で採取した海底土試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度においては、75μm通過率、全有機炭素及び全窒素との間に相関が認められた(図I-2-2-3-27~28)。一方で、50%粒径との間に負の相関関係が認められた(図I-2-2-3-29)。これらのことから、新潟海域においても、海底土に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度は粒径等に依存していると考えられる。

また、前述のほか、¹³⁷Csの放射能濃度とニッケルとの間に強い正の相関が、アルミニウム、クロム、マンガン、銅、亜鉛、モリブデン、銀、カドミウム、スズ、アンチモン、セシウム(安定)及び鉛との間に正の相関が認められた一方で、鉄との間に負の相関があった。海底土に含まれるセシウム(安定)の濃度と¹³⁷Csの放射能濃度の関係をグラフ化したものを図I-2-2-3-30に示す。

新潟海域においても、前述の福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土試料と同様、¹³⁴Csが検出されたことのない海域における放射性セシウムの挙動と類似した傾向を示している。さらに、¹³⁷Csの放射能濃度と各性状の相関係数がより大きく、元素濃度についても相関を示す元素が多い。このため、福島第一、福島第二及び茨城海域よりも新潟海域のほうが¹³⁷Csはより混合され、かつ均質化が進んでいる可能性が示された。新潟海域は福島第一・福島第二・茨城海域よりも東電福島第一原発事故の影響が小さいため、均質化がより進んだと考えられる。

新潟海域(測点1及び2)は、既往知見¹²⁾において東電福島第一原発事故由来の放射性セシウムの輸送が指摘されている阿賀野川の河口から数十km圏内に位置している。そのため、新潟海域における¹³⁷Csの放射能濃度の分布は、海底土の性状だけでなく、阿賀野川を介して輸送された東電福島第一原発事故由来の¹³⁷Csの沈着の影響を受けており、河川により何らかの影響を受けて混合がより進んだと考えられる。

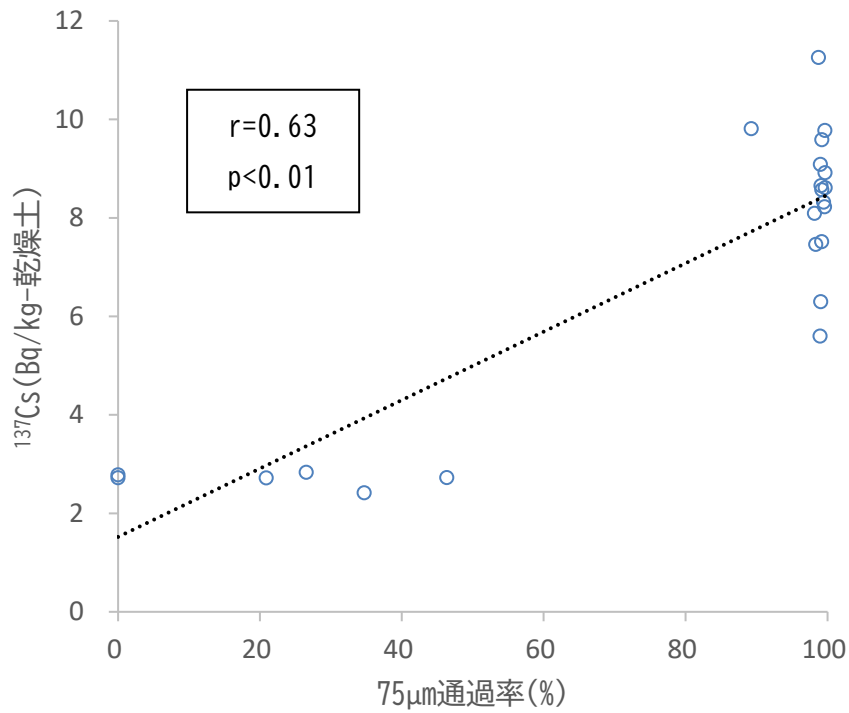


図 I -2-2-3-27 新潟海域で採取した海底土の 75μm 通過率と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

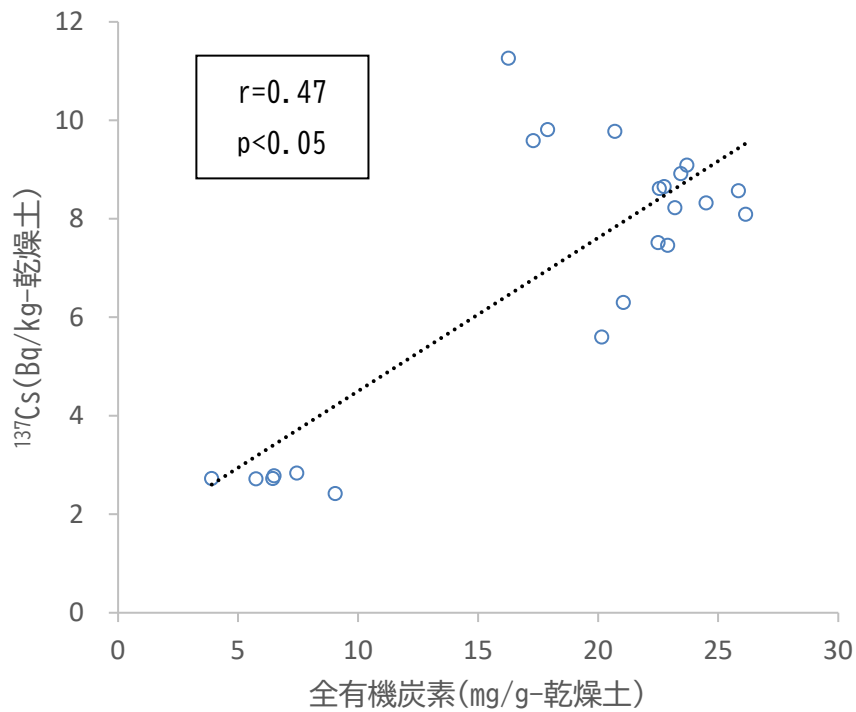


図 I -2-2-3-28 新潟海域で採取した海底土の全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

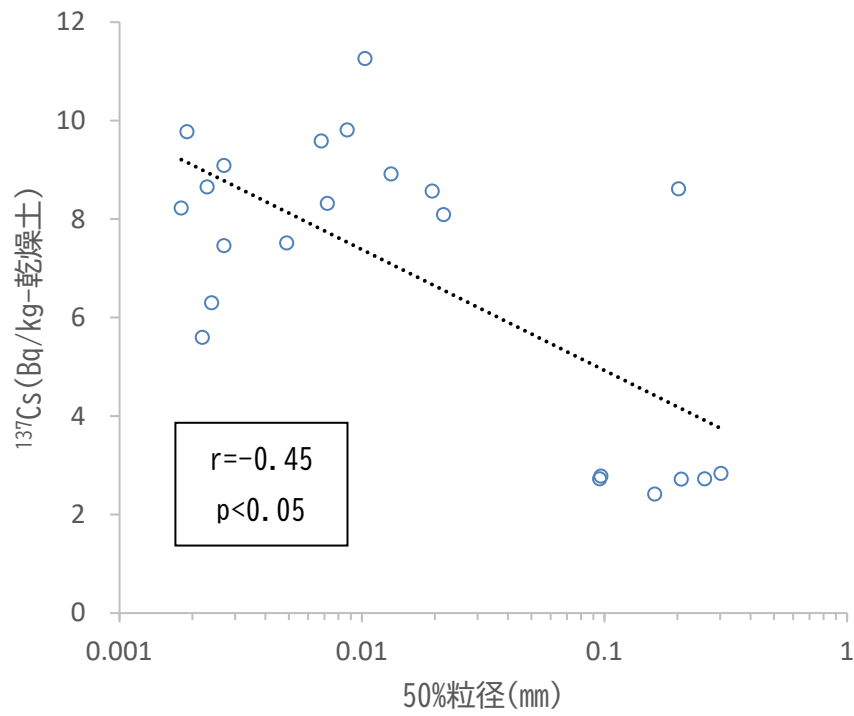


図 I -2-2-3-29 新潟海域で採取した海底土の 50%粒径と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

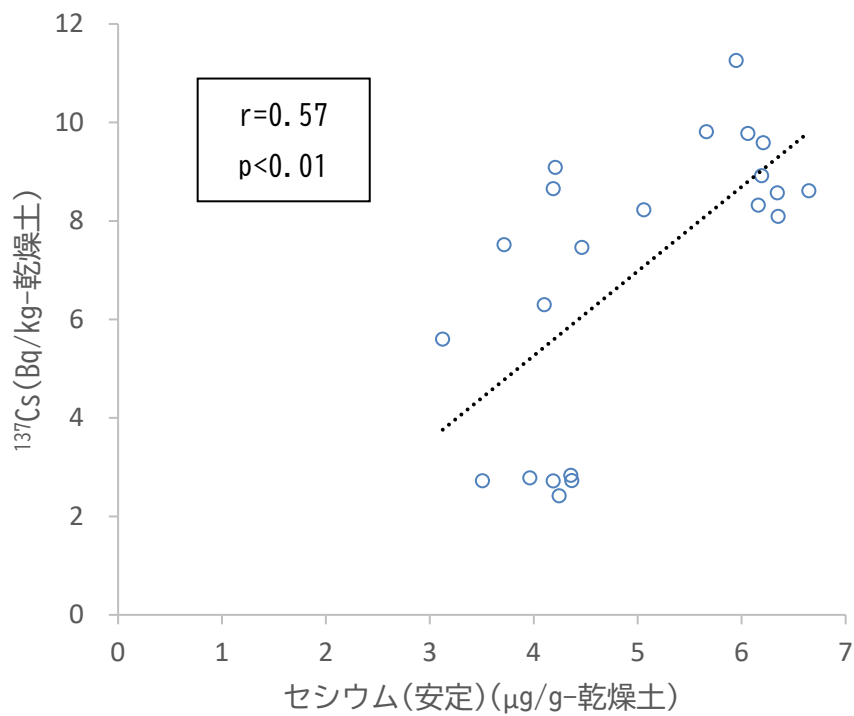


図 I -2-2-3-30 新潟海域で採取した海底土に含まれるセシウム（安定）の濃度と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

(各海域の比較)

^{137}Cs の放射能濃度と海底土の性状の関係について、各海域を色分けした図を図 I-2-2-3-31~33 に示す。本調査で ^{134}Cs が検出されたことのない海域及び新潟海域における海底土の性状の分布が広範囲に及んでいる一方で、宮城海域、福島第一、福島第二及び茨城海域では海底土の性状の分布範囲が狭い傾向があった。このことから宮城海域において ^{137}Cs の放射能濃度と海底土の性状との間に相関がなかった要因として、分布範囲が小さく、試料数が他の海域に比べ少なかったことが考えられる。なお、新潟海域では、測点 1~3 は粒径が小さく有機物含有量が多いのに対し、測点 4 は粒径が大きく有機物含有量が低い結果が得られている。そのため、粒径が大きく有機物含有量の高い測点(測点 1~3)と、粒径が小さく有機物含有量が低い測点(測点 4)で分布が二極化したことにより相関係数が高くなったと考えられる。

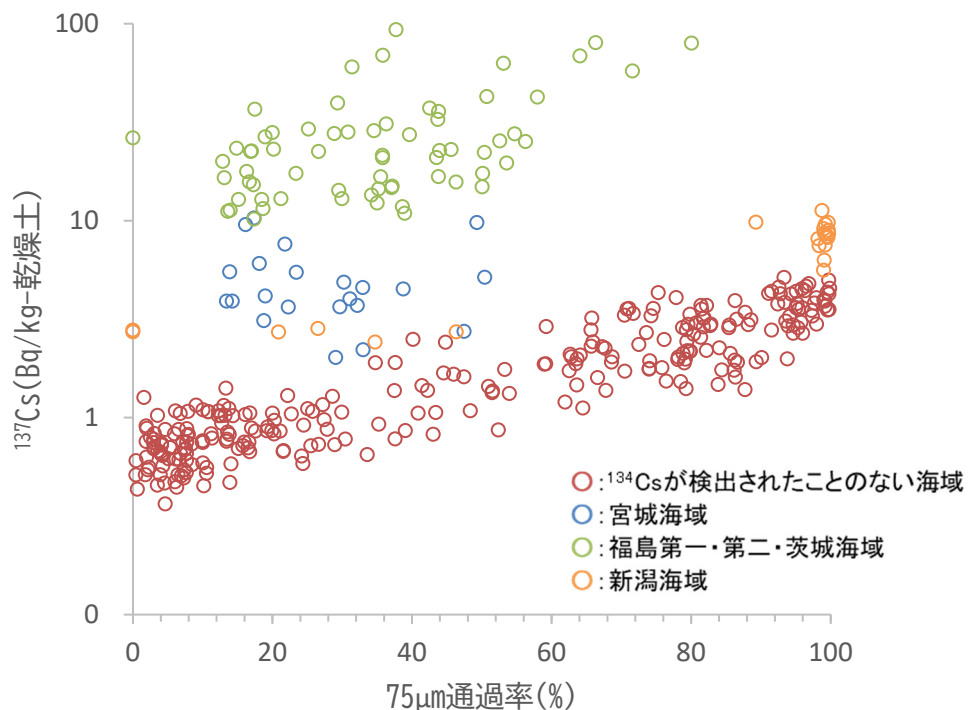


図 I-2-2-3-31 各海域で採取した海底土の 75 μm 通過率と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

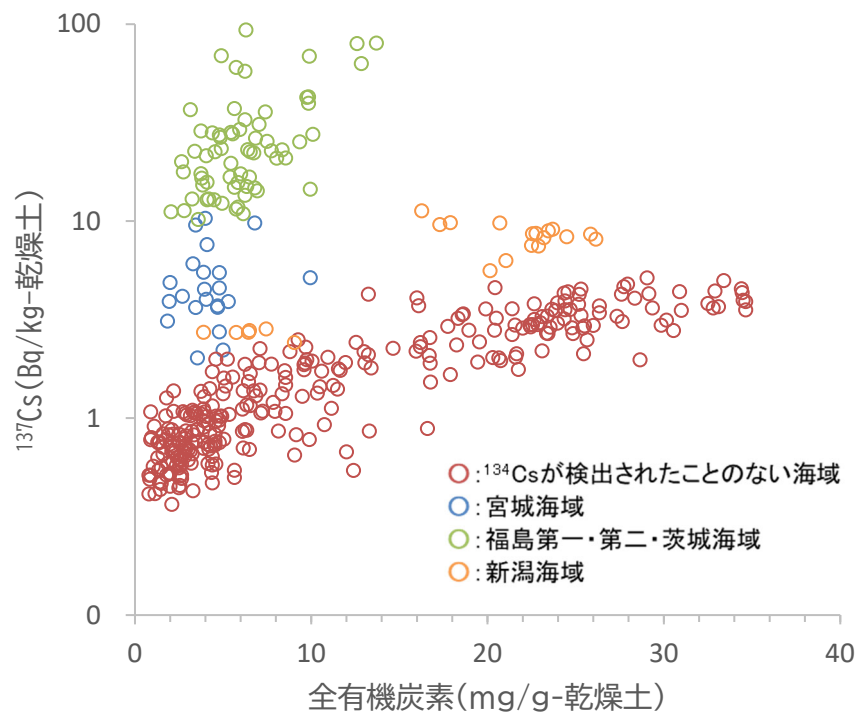


図 I -2-2-3-32 各海域で採取した海底土の全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

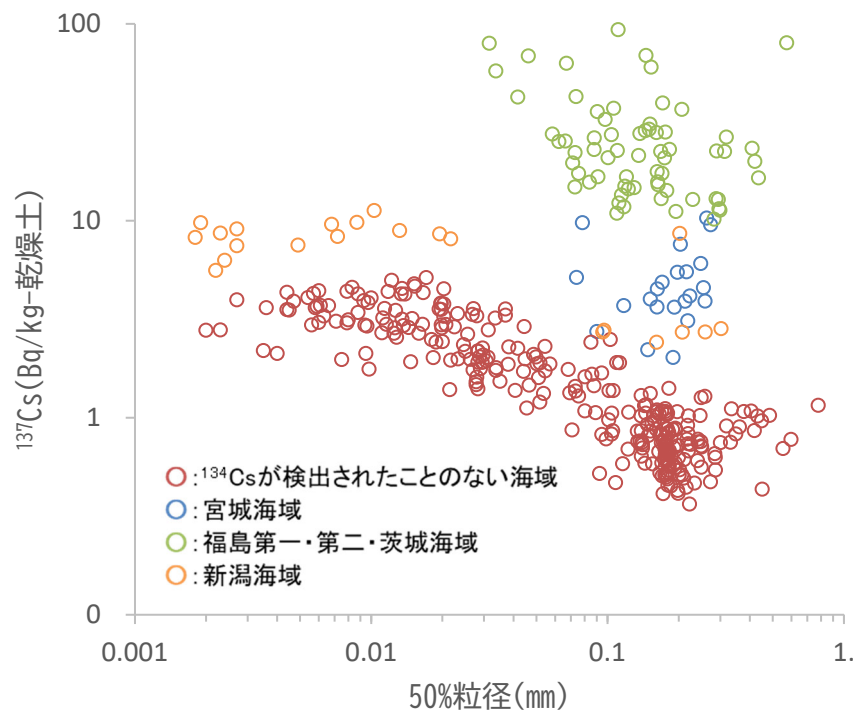


図 I -2-2-3-33 各海域で採取した海底土の 50%粒径と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

(発電所海域における元素濃度の経年変化)

海域ごとに元素濃度の平均値の経年変化を図 I-2-2-3-34 に示す。各海域の元素濃度の平均値は、一定の水準で推移しているが、年度によって大きく変動する元素も確認された。しかし、同じ海域でも年度や測点によって濃度が増減するため、図 I-2-2-3-35 に各元素について海域毎の変動幅を示す。アルミニウムやクロム、鉄、亜鉛、ヒ素及びウランなどは海域間に濃度差が見られたものの海域内の測点間の変動幅は大きくない。しかし、新潟海域では、マンガンや鉄、ニッケル、銅、モリブデン、スズ、アンチモン、セシウム（安定）及び鉛について測点間の変動幅が大きくなった。これらの元素について、元素濃度と¹³⁷Cs の放射能濃度には相関が確認されていることから、¹³⁷Cs の濃度変動に関わっている可能性がある。また、ほかにも福井第一海域の銅、青森海域のヒ素とカドミウムや佐賀海域のストロンチウムなどにも測点間に大きな変動幅が確認された。これらの元素も¹³⁷Cs の放射能濃度と相関が確認されている。このように海域で大きな変動を示す元素の変動要因を明らかにすることができれば、¹³⁷Cs の濃度変動を説明する一助となる可能性がある。

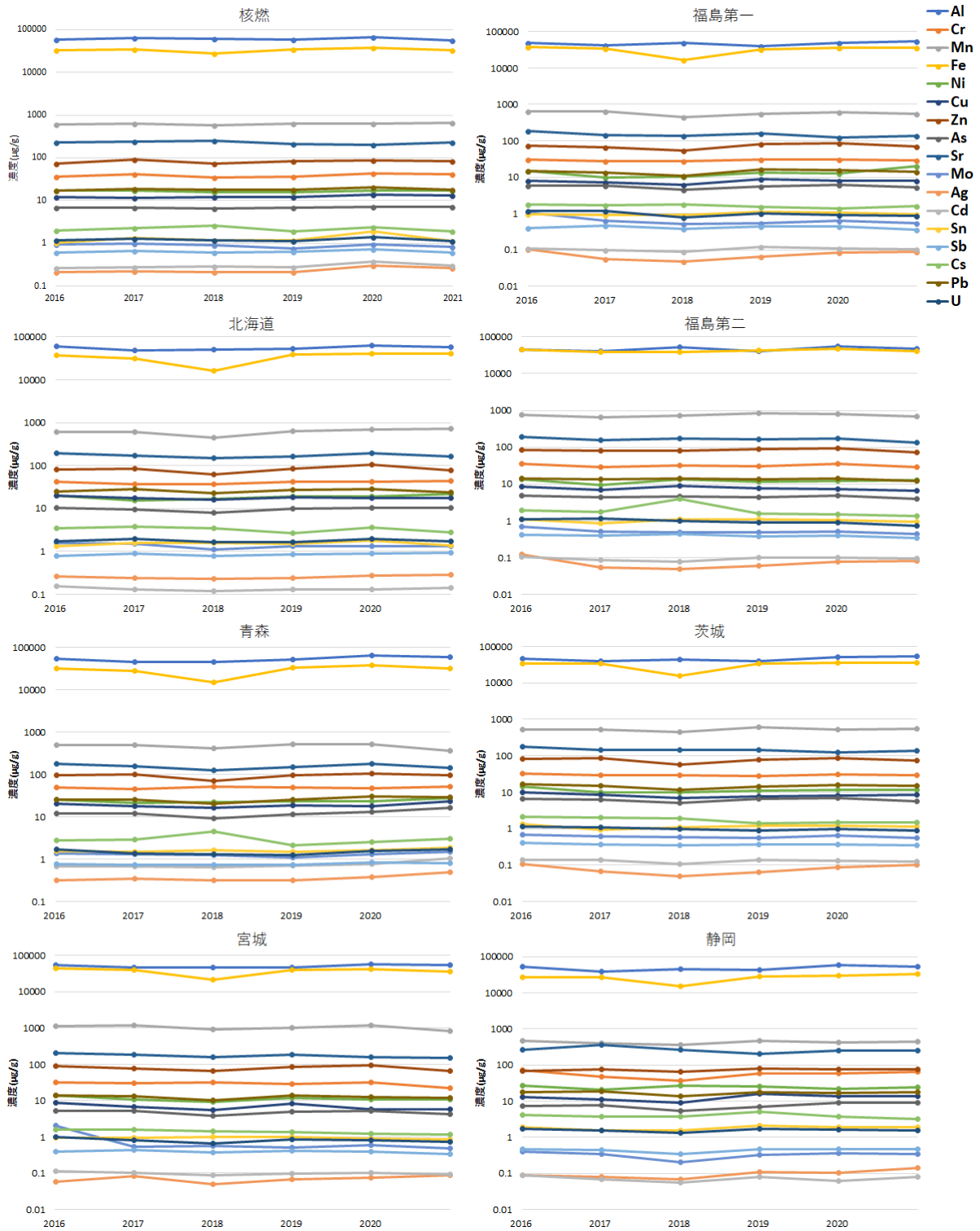


図 I -2-2-3-34(1) 各海域における元素濃度の平均値の経年変化

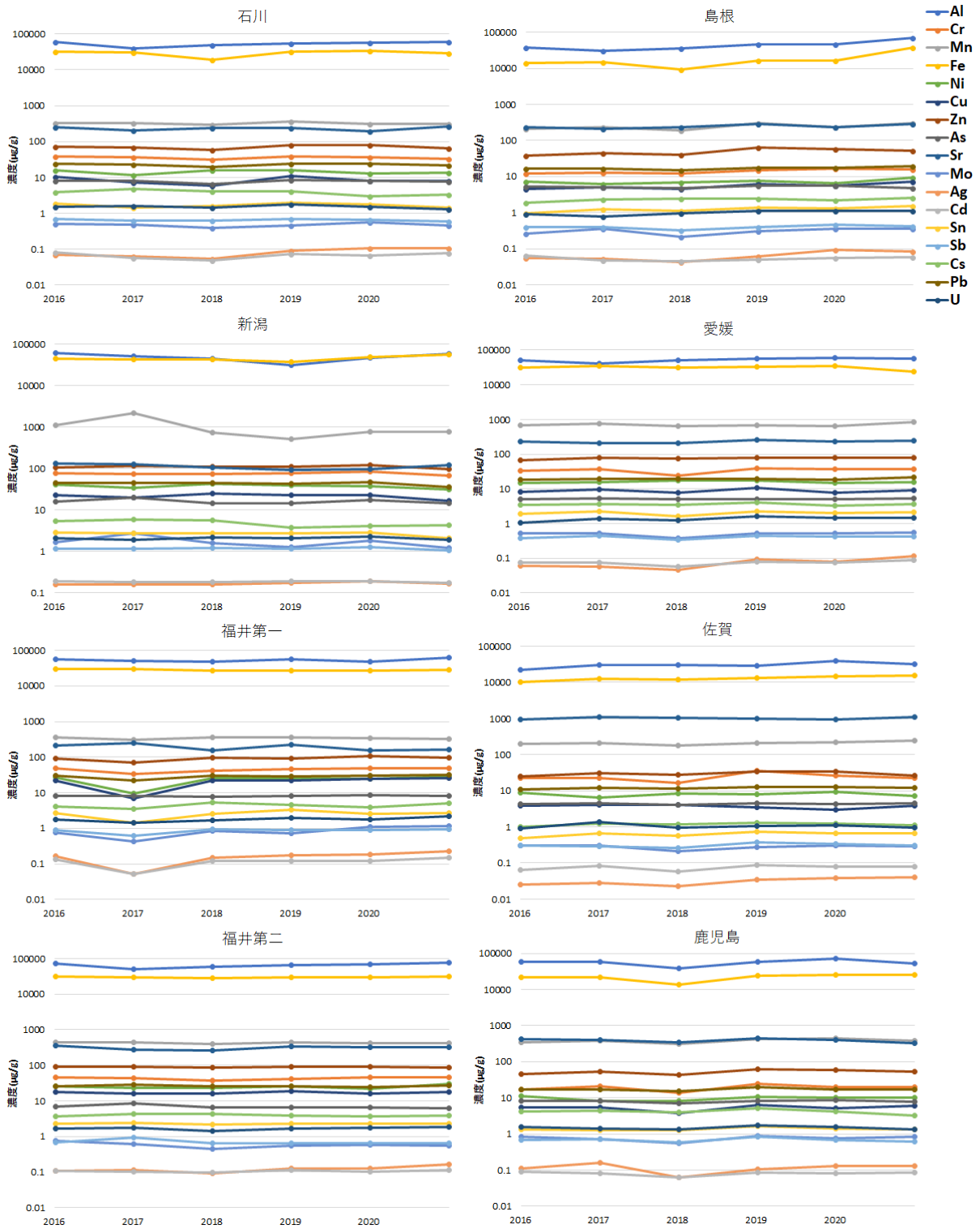


図 I -2-2-3-34(2) 各海域における元素濃度の平均値の経年変化

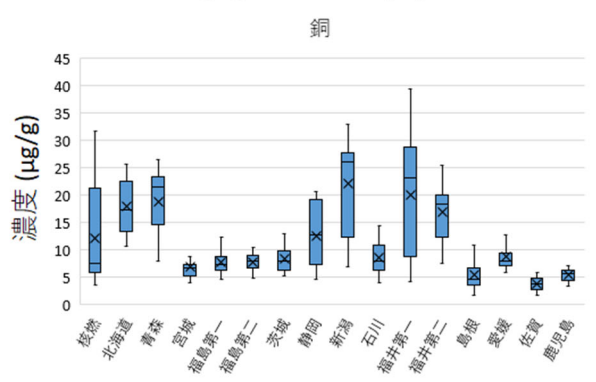
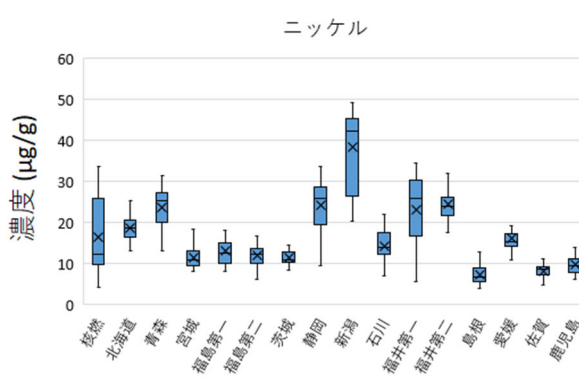
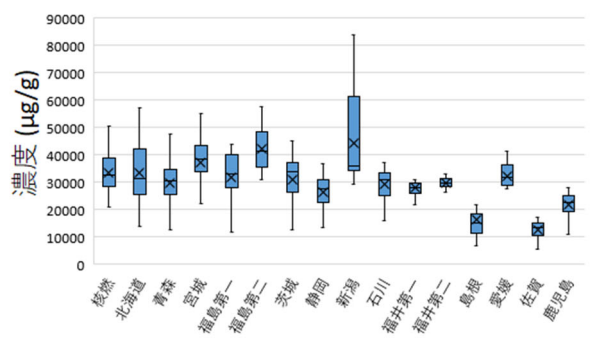
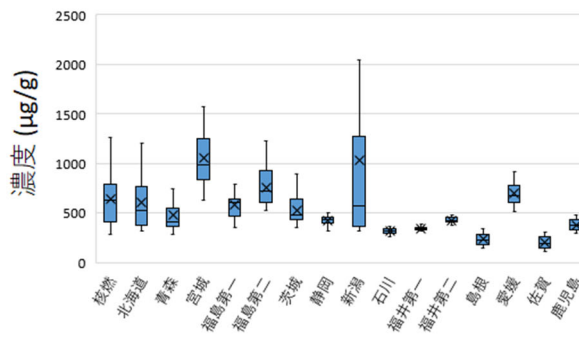
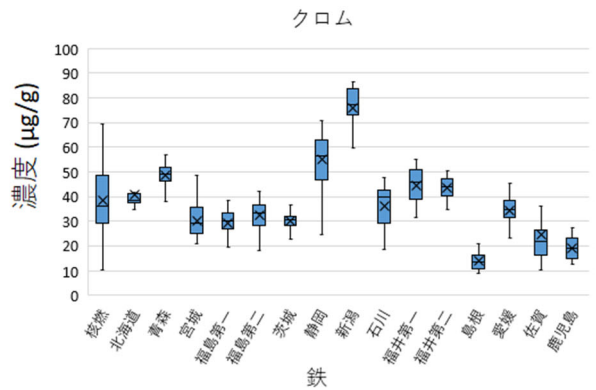
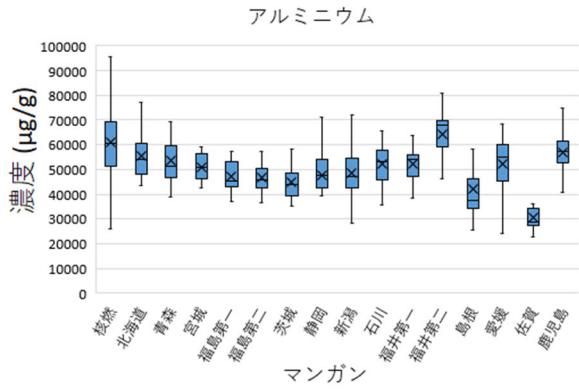


図 I-2-2-3-35(1) 元素濃度の変動幅

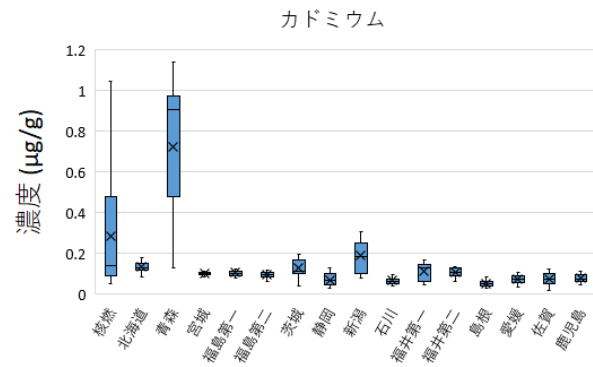
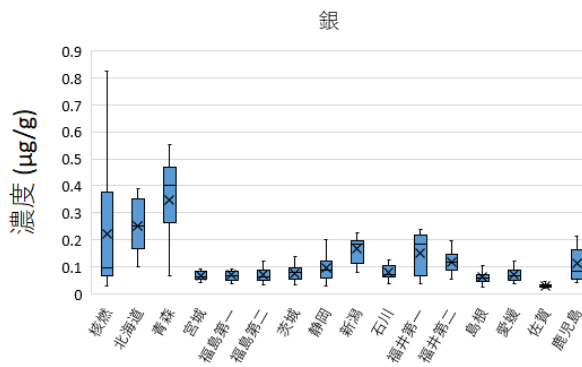
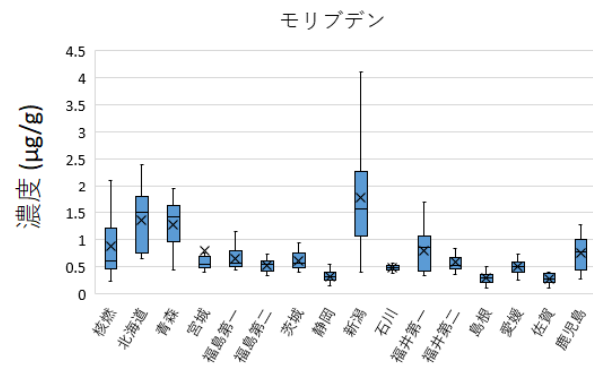
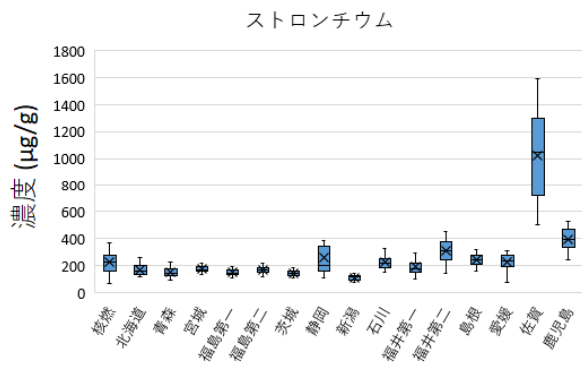
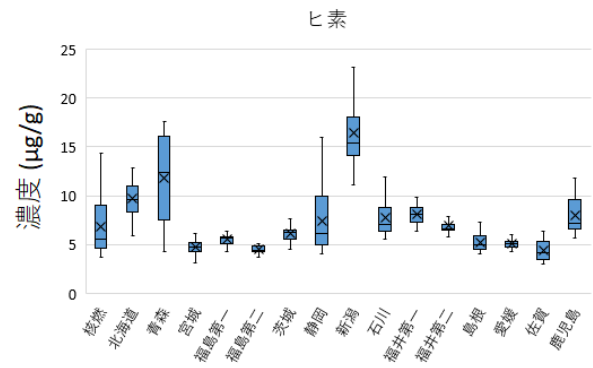
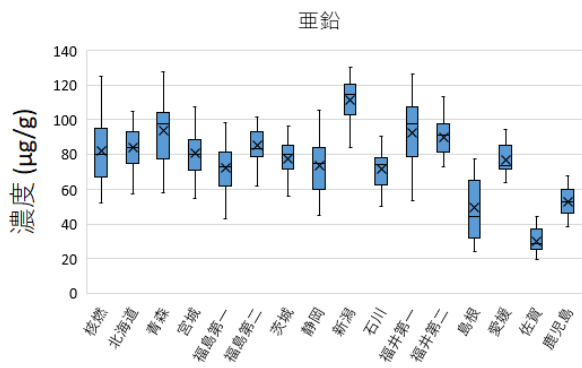


図 I -2-2-3-35(2) 元素濃度の変動幅

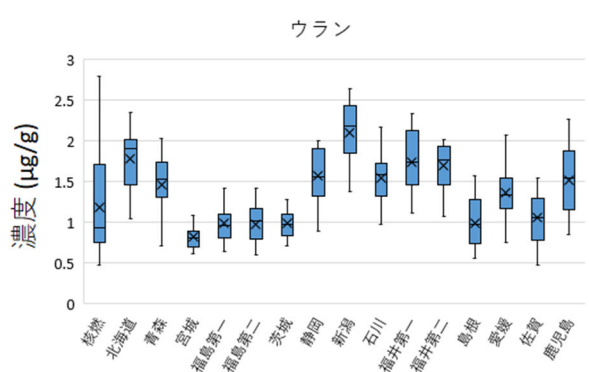
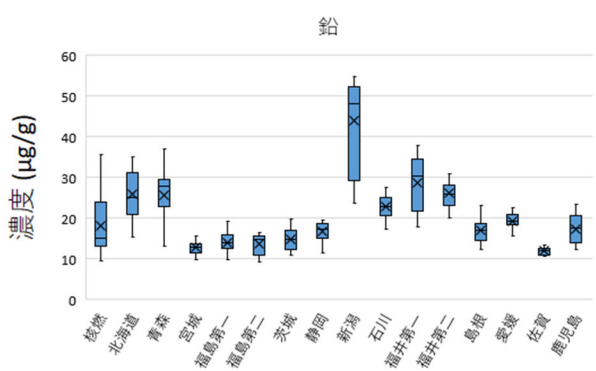
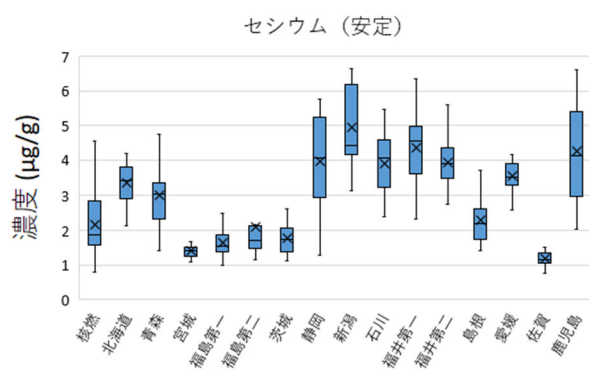
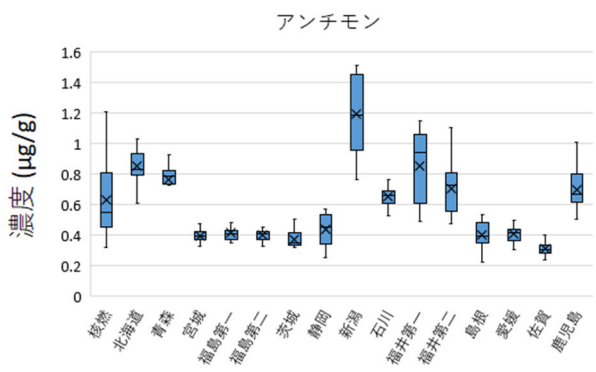
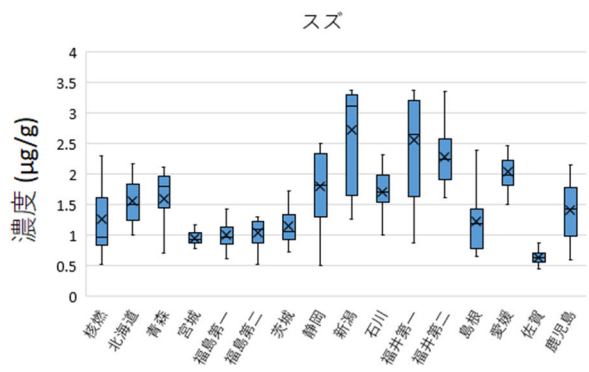


図 I-2-2-3-35(3) 元素濃度の変動幅

(放射性セシウムの鉛直分布)

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」による海底土の表面から3cmまでの層における¹³⁴Csや¹³⁷Csの放射能濃度は時空間的な変動を示している。放射性セシウムの表層における放射能濃度分布からも水平的には把握できるが、深度方向のデータが乏しい。ここでは、全国の発電所海域における放射性セシウムの鉛直分布を示すとともに、放射性セシウムの蓄積量を見積もる際の補完データに資することにした。

(方法)

柱状海底土試料は、静岡海域は測点4、その他の海域においては測点2においてボックス型採泥器またはマルチプルコアラーを用いて採取した(表I-2-2-3-5)。なお、放射能分析用に十分な試料量を確保するために、採取は2~3回行った。採取後の海底土は、

- ・表面から深さ6cmまでの層：1.5cm 毎
- ・同6~10cmの層：2cm 毎
- ・同10cm以深の層：3cm 毎

の厚さで試料を分割・採取した。放射能分析の手順は表I-1-4-2と同様である。

表I-2-2-3-5 海底土試料の採取測点、採取日、位置及び採取水深

海域	測点	採取日	緯度(N)		経度(E)		水深(m)
北海道	2	令和3年6月22日	43°	4.8'	140°	16.3'	417
青森	2	令和3年6月18日	41°	12.9'	141°	40.3'	665
宮城	2	令和3年5月21日	38°	25.3'	141°	45.2'	165
福島第一	2	令和3年5月23日	37°	35.1'	141°	24.6'	135
福島第二	2	令和3年5月24日	37°	12.0'	141°	20.4'	145
茨城	2	令和3年5月20日	36°	24.7'	140°	51.0'	121
静岡	4	令和3年6月9日	34°	31.0'	137°	59.0'	556
新潟	2	令和3年6月16日	37°	50.1'	138°	35.0'	487
石川	2	令和3年6月20日	37°	8.1'	136°	26.0'	189
福井第一	2	令和3年6月21日	35°	56.9'	135°	50.0'	257
福井第二	2	令和3年6月22日	35°	50.0'	135°	35.0'	201
島根	2	令和3年6月23日	35°	41.2'	133°	4.5'	78
愛媛	2	令和3年6月11日	33°	38.0'	132°	17.0'	61
佐賀	2	令和3年6月13日	33°	37.0'	129°	53.0'	53
鹿児島	2	令和3年6月14日	31°	45.0'	130°	1.0'	84

(結果)

分析結果を表 I-2-2-3-6(1)～(3)と図 I-2-2-3-36(1)～(3)に示す。なお、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能濃度は試料採取日に減衰補正を行った。

以下に東日本海域(青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域)、西日本海域(静岡、愛媛、鹿児島及び佐賀海域)及び日本海海域(北海道、新潟、石川、福井第一、福井第二及び島根海域)に分けて結果を詳述する。

東日本海域では、福島第一、福島第二及び茨城海域で ^{134}Cs が海底土の表面から 3cm よりも深い層から検出された。また、福島第一、福島第二及び茨城海域において、 ^{134}Cs と ^{137}Cs (平成 23 年 3 月 11 日に減衰補正)の放射能比 ($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比)が表層から最深部まで事故放出時の放射能比(～1)と一致することから、これらの海域の海底土から検出された放射性セシウムのほとんどは東電福島第一原発事故由来であることが分かった。放射性セシウムの放射能濃度は海底土の粒径に依存していることから⁴⁾、福島第一海域ではより粒径の細かい粒子が堆積していると考えられる。

なお、福島第一海域(図 I-2-2-3-36(1))において、深度 4.5～6.0cm の放射能濃度が他の深度に比べて突出していることから、東電福島第一原発事故に由来し、周囲の粒子に比べて放射性セシウムを多く含む粒子(以下、「放射性粒子」という。)が混入している可能性がある。なお、放射性粒子の存在により、海底土は同じ測点でも局所的に高い放射能値を示すことが報告されている¹⁰⁾。そこで、測定に供した試料(以下、「バルク試料」という。)を 4 分割し、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs について高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにより定量することで、放射性粒子の混入の有無及び放射性粒子の寄与を確認した。分割した試料のうち、2つの試料からバルク試料よりも高い ^{137}Cs 放射能濃度が検出され、その放射能濃度の平均値と標準偏差は $89 \pm 21 \text{Bq/kg-乾燥土}$ であった。一方で、高い ^{137}Cs 放射能濃度が検出された試料を除く 2つの試料の ^{137}Cs 放射能濃度の平均値±標準偏差は $16 \pm 2.0 \text{Bq/kg-乾燥土}$ でほぼ一定の値に収まっており、上下の層の ^{137}Cs 放射能濃度と同水準であった。これらのことから、バルク試料には放射性粒子が混入しており、放射能濃度の大きな変動は放射性粒子の偏在によるものであると考えられる。

青森海域や宮城海域で採取した海底土試料から ^{134}Cs は検出されなかったが、 ^{137}Cs は 10cm よりも深い層から検出された。青森海域で検出された値は同海域の調査開始時(平成 15 年度)から東電福島第一原発事故前(平成 22 年度)の放射能濃度 ($3.1 \sim 4.2 \text{Bq/kg-乾燥土}$) の範囲内またはそれ以下であった。これらのことから、青森海域で検出された ^{137}Cs は過去の大気圏核爆発実験に由来するものであることが考えられる。一方で、宮城海域は平成 27～30 年度の調査において ^{134}Cs が検出されていたことや東電福島第一原発事故前 5 年間(平成 18～22 年度)の放射能濃度 ($\text{ND} \sim 1.5 \text{Bq/kg-乾燥土}$) の範囲を超える値が検出されたことから、宮城海域には東電福島第一原発事故由来の ^{137}Cs も含まれることが考えられる。なお、平成 30 年度の調査結果において ^{134}Cs が検出された層の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比(平成 23 年 3 月

11 日に減衰補正) を求めたところ約 1 であったことから、宮城海域において検出された¹³⁷Cs のほとんどは東電福島第一原発事故に由来するものと考えられる。

日本海海域においては、全ての海域において¹³⁴Cs が検出されなかった。¹³⁷Cs については、全ての海域で検出されており、表層から 3cm よりも深い層で検出された。¹³⁷Cs の放射能濃度やその鉛直分布のパターンは、海底土の粒径、堆積速度、沈降物に含まれる¹³⁷Cs の放射能濃度の時系列変化及び海底土の攪乱の違いなど複合的な要因により決まると考えられる。なお、日本海海域では、含水率と¹³⁷Cs の放射能濃度には正の相関があることが確認された ($r=0.73$ ($p<0.0001$))。一般的に含水率の大きい海域では粒子が堆積しやすい場であることが多いため粒径が細かく、放射性核種の放射能濃度も高くなる傾向がある。海域毎の¹³⁷Cs の放射能濃度やその鉛直分布のパターンが異なる一因として、含水率の違い、すなわち海底土の粒径の違いが考えられる。

なお、新潟海域で検出された¹³⁷Cs は、全ての層において東電福島第一原発事故前 5 年間 (平成 18~22 年度) の放射能濃度 (2.1~7.7Bq/kg-乾燥土) の範囲内であった。この海域では、平成 27~31 (令和元) 年までは東電福島第一原発事故前 5 年間の濃度範囲を超える値が検出されており、猪苗代湖に沈着した東電福島第一原発事故由来の放射性セシウムが阿賀野川を經由して、その河口付近まで到達していることが分かっている^{12,13)}。新潟海域を除いた日本海海域において含水率と¹³⁷Cs の放射能濃度には強い正の相関がある ($r=0.87$ ($p<0.00001$)) ことから、新潟海域において検出された¹³⁷Cs は東電福島第一原発事故前 5 年間の濃度範囲内であるものの、わずかに東電福島第一原発事故の影響を受けており、東電福島第一原発事故による¹³⁷Cs の付加によって¹³⁷Cs の放射能濃度と海底土の含水率、すなわち¹³⁷Cs の放射能濃度と海底土の粒径との相関が弱くなったと考えられる。

西日本海域において採取した海底土試料において、¹³⁴Cs は検出されなかったが、¹³⁷Cs は全ての海域で表層 3cm よりも深い層で検出された。ただし、鹿児島及び佐賀海域においては、検出下限値をわずかに超える値であった。これらの海域の含水率と他の海域の含水率には有意な差 ($p<0.00001$) があることが確認された。これらのことから、西日本海域においても日本海海域と同様に¹³⁷Cs の放射能濃度やその鉛直分布のパターンが異なる一因として、含水率の違い、すなわち海底土の粒径の違いによると考えられる。

表 I -2-2-3-6(1) 東日本海域において採取した海底土試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度と含水率

海域	測点	採取深度 (cm)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		含水率 (%)
			(Bq/kg-乾燥土)	誤差*1	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
青森	2	0.0-1.5	ND*2	—	2.8	0.25	72
		1.5-3.0	ND	—	2.6	0.30	70
		3.0-4.5	ND	—	2.4	0.24	68
		4.5-6.0	ND	—	2.4	0.28	65
		6.0-8.0	ND	—	3.4	0.35	62
		8.0-10.0	ND	—	3.0	0.25	59
		10.0-13.0	ND	—	2.8	0.25	56
		13.0-16.0	ND	—	ND	—	52
		16.0-19.0	ND	—	ND	—	52
宮城	2	0.0-1.5	ND	—	2.3	0.20	37
		1.5-3.0	ND	—	2.6	0.19	33
		3.0-4.5	ND	—	3.4	0.20	31
		4.5-6.0	ND	—	3.7	0.21	30
		6.0-8.0	ND	—	3.6	0.22	28
		8.0-10.0	ND	—	2.7	0.17	26
		10.0-13.0	ND	—	2.2	0.18	26
福島第一	2	0.0-1.5	0.98	0.19	14	0.35	46
		1.5-3.0	1.1	0.22	14	0.38	36
		3.0-4.5	0.68	0.12	14	0.32	34
		4.5-6.0	1.7	0.20	40	0.59	31
		6.0-8.0	0.71	0.16	16	0.34	31
		8.0-10.0	ND	—	11	0.31	29
		10.0-13.0	ND	—	12	0.32	29
		13.0-16.0	ND	—	3.4	0.20	30
福島第二	2	0.0-1.5	ND	—	9.6	0.32	37
		1.5-3.0	ND	—	10	0.29	36
		3.0-4.5	ND	—	12	0.34	36
		4.5-6.0	0.84	0.18	11	0.32	35
		6.0-8.0	ND	—	10	0.31	32
		8.0-10.0	ND	—	9.0	0.30	32
		10.0-13.0	ND	—	6.3	0.26	30
		13.0-16.0	ND	—	5.6	0.25	29
		16.0-19.0	ND	—	3.1	0.19	28

(続く)

表 I -2-2-3-6(1) 東日本海域において採取した海底土試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度と含水率（続き）

海域	測点	採取深度 (cm)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		含水率 (%)
			(Bq/kg-乾燥土)	誤差*1	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
茨城	2	0.0-1.5	0.58	0.12	18	0.38	38
		1.5-3.0	0.66	0.14	20	0.41	37
		3.0-4.5	0.96	0.16	20	0.42	35
		4.5-6.0	0.79	0.15	18	0.36	35
		6.0-8.0	ND	—	13	0.32	30
		8.0-10.0	ND	—	9.3	0.30	30
		10.0-13.0	ND	—	6.5	0.24	30
		13.0-16.0	ND	—	4.0	0.22	29
		16.0-19.0	ND	—	2.9	0.20	29

*1 誤差は計数誤差を示す。

*2 ND は検出下限値以下を示す。

表 I -2-2-3-6(2) 日本海海域において採取した海底土試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度と含水率

海域	測点	採取深度 (cm)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		含水率 (%)
			(Bq/kg-乾燥土)	誤差*1	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
北海道	2	0.0-1.5	ND*2	—	2.9	0.12	72
		1.5-3.0	ND	—	3.1	0.12	68
		3.0-4.5	ND	—	3.2	0.13	65
		4.5-6.0	ND	—	3.3	0.13	63
		6.0-8.0	ND	—	3.2	0.12	62
		8.0-10.0	ND	—	2.9	0.12	61
		10.0-13.0	ND	—	2.6	0.12	59
		13.0-16.0	ND	—	2.2	0.12	57
		16.0-19.0	ND	—	2.0	0.11	57
新潟	2	0.0-1.5	ND	—	6.2	0.34	81
		1.5-3.0	ND	—	7.1	0.35	74
		3.0-4.5	ND	—	7.4	0.40	71
		4.5-6.0	ND	—	7.6	0.37	69
		6.0-8.0	ND	—	6.4	0.30	64
		8.0-10.0	ND	—	5.2	0.30	63
		10.0-13.0	ND	—	3.4	0.29	62
		13.0-16.0	ND	—	2.3	0.22	61
		16.0-19.0	ND	—	1.1	0.18	61
石川	2	0.0-1.5	ND	—	1.3	0.18	48
		1.5-3.0	ND	—	1.4	0.18	45
		3.0-4.5	ND	—	1.8	0.22	42
		4.5-6.0	ND	—	1.3	0.18	41
		6.0-8.0	ND	—	1.3	0.19	40
		8.0-10.0	ND	—	1.3	0.17	40
		10.0-13.0	ND	—	1.1	0.20	39
福井第一	2	0.0-1.5	ND	—	3.4	0.27	80
		1.5-3.0	ND	—	3.3	0.30	77
		3.0-4.5	ND	—	3.8	0.32	74
		4.5-6.0	ND	—	3.8	0.26	72
		6.0-8.0	ND	—	4.1	0.30	70
		8.0-10.0	ND	—	5.0	0.33	69
		10.0-13.0	ND	—	4.7	0.30	67
		13.0-16.0	ND	—	4.0	0.29	64
16.0-19.0	ND	—	3.5	0.33	65		

(続く)

表 I -2-2-3-6(2) 日本海海域において採取した海底土試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度と含水率（続き）

海域	測点	採取深度 (cm)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		含水率 (%)
			(Bq/kg-乾燥土)	誤差*1	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
福井第二	2	0.0-1.5	ND*2	—	2.8	0.31	67
		1.5-3.0	ND	—	2.6	0.23	65
		3.0-4.5	ND	—	2.5	0.24	62
		4.5-6.0	ND	—	2.9	0.24	59
		6.0-8.0	ND	—	2.6	0.24	57
		8.0-10.0	ND	—	3.0	0.27	56
		10.0-13.0	ND	—	3.3	0.23	54
		13.0-16.0	ND	—	2.9	0.25	53
		16.0-19.0	ND	—	1.4	0.21	52
島根	2	0.0-1.5	ND	—	0.27	0.081	22
		1.5-3.0	ND	—	0.29	0.095	20
		3.0-4.5	ND	—	0.44	0.077	20

*1 誤差は計数誤差を示す。

*2 ND は検出下限値以下を示す。

表 I -2-2-3-6(3) 西日本海域において採取した海底土試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度と含水率

海域	測点	採取深度 (cm)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		含水率 (%)
			(Bq/kg-乾燥土)	誤差*1	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
静岡	4	0.0-1.5	ND*2	—	1.3	0.095	57
		1.5-3.0	ND	—	1.7	0.10	46
		3.0-4.5	ND	—	1.7	0.093	43
		4.5-6.0	ND	—	1.6	0.10	43
		6.0-8.0	ND	—	1.6	0.095	42
		8.0-10.0	ND	—	1.0	0.097	42
		10.0-13.0	ND	—	ND	—	40
		13.0-16.0	ND	—	ND	—	38
		16.0-19.0	ND	—	ND	—	38
愛媛	2	0.0-1.5	ND	—	0.84	0.078	42
		1.5-3.0	ND	—	0.78	0.081	35
		3.0-4.5	ND	—	0.78	0.080	35
		4.5-6.0	ND	—	0.64	0.084	33
		6.0-8.0	ND	—	0.74	0.080	32
		8.0-10.0	ND	—	0.74	0.078	31
		10.0-13.0	ND	—	0.56	0.077	30
		13.0-16.0	ND	—	0.73	0.078	29
		16.0-19.0	ND	—	0.46	0.073	28
佐賀	2	0.0-1.5	ND	—	0.21	0.058	24
		1.5-3.0	ND	—	ND	—	20
		3.0-4.5	ND	—	ND	—	20
		4.5-6.0	ND	—	ND	—	20
		6.0-8.0	ND	—	0.19	0.058	22
		8.0-10.0	ND	—	ND	—	17
鹿児島	2	0.0-1.5	ND	—	0.39	0.069	33
		1.5-3.0	ND	—	0.27	0.064	29
		3.0-4.5	ND	—	0.21	0.068	30
		4.5-6.0	ND	—	0.43	0.067	31
		6.0-8.0	ND	—	0.36	0.063	29
		8.0-10.0	ND	—	0.33	0.059	28
		10.0-13.0	ND	—	0.37	0.069	28
		13.0-16.0	ND	—	0.22	0.064	29

*1 誤差は計数誤差を示す。

*2 NDは検出下限値以下を示す。

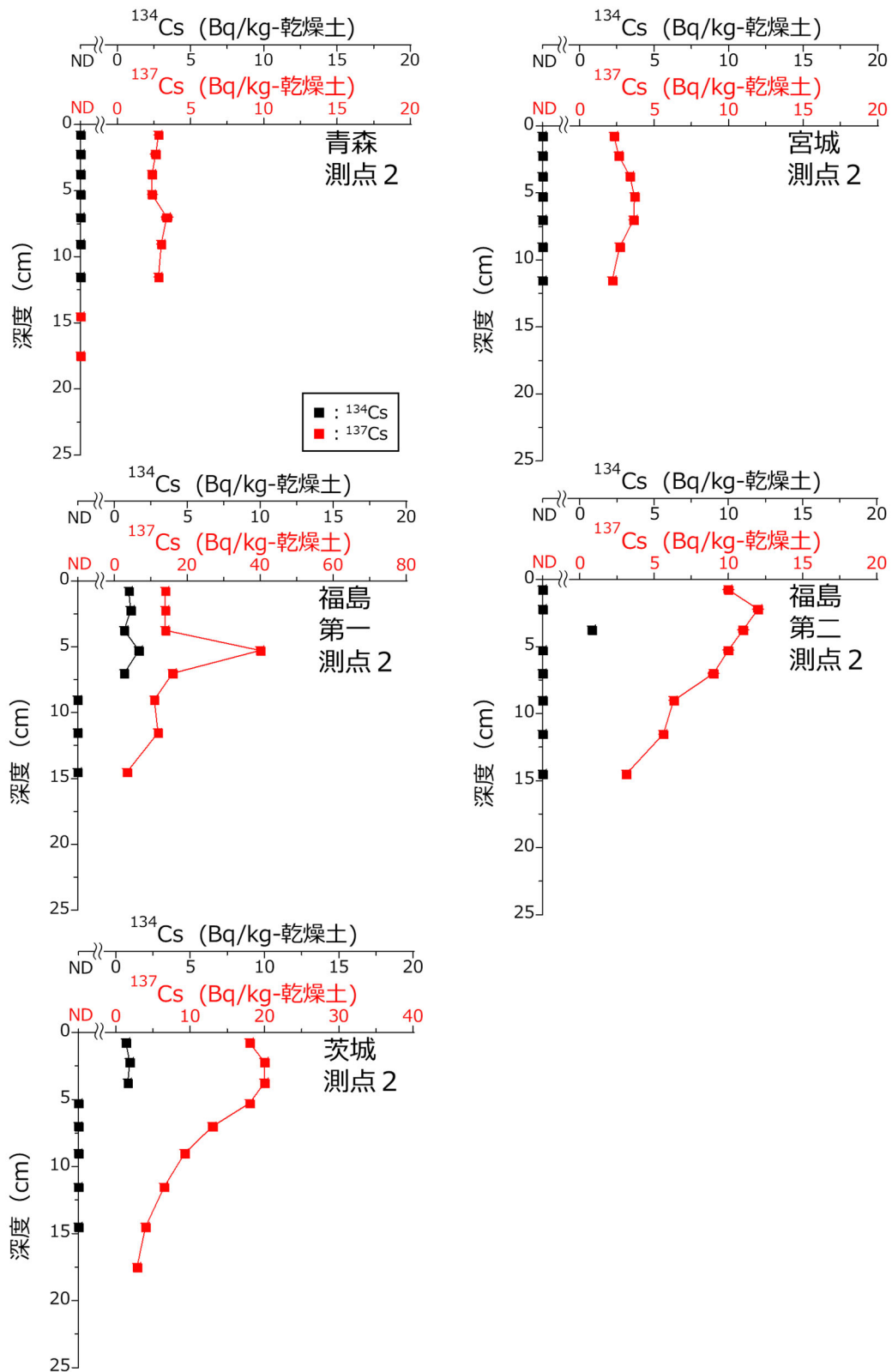


図 I -2-2-3-36(1) 東日本海域において採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。)

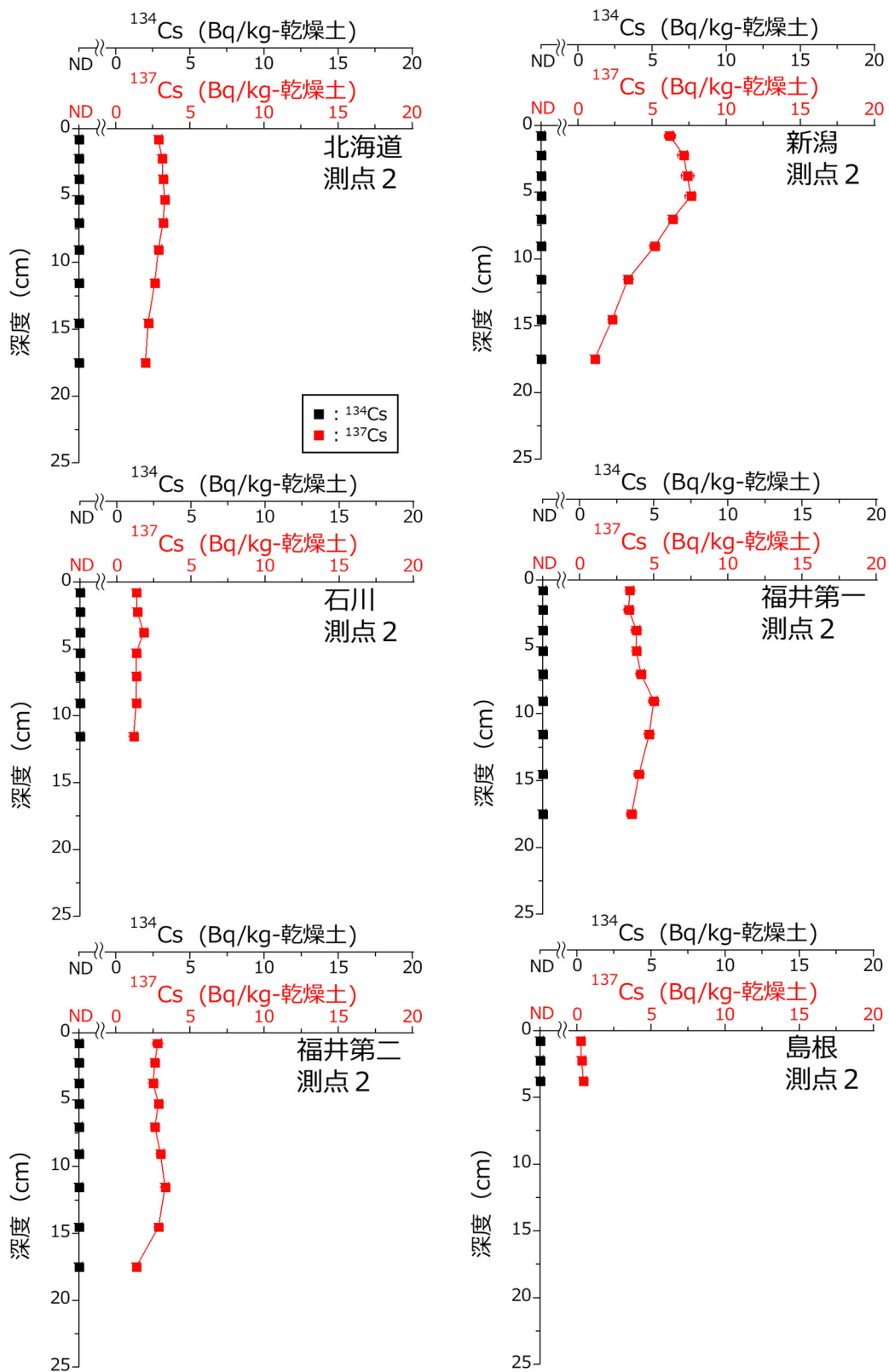


図 I -2-2-3-36(2) 日本海海域において採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。)

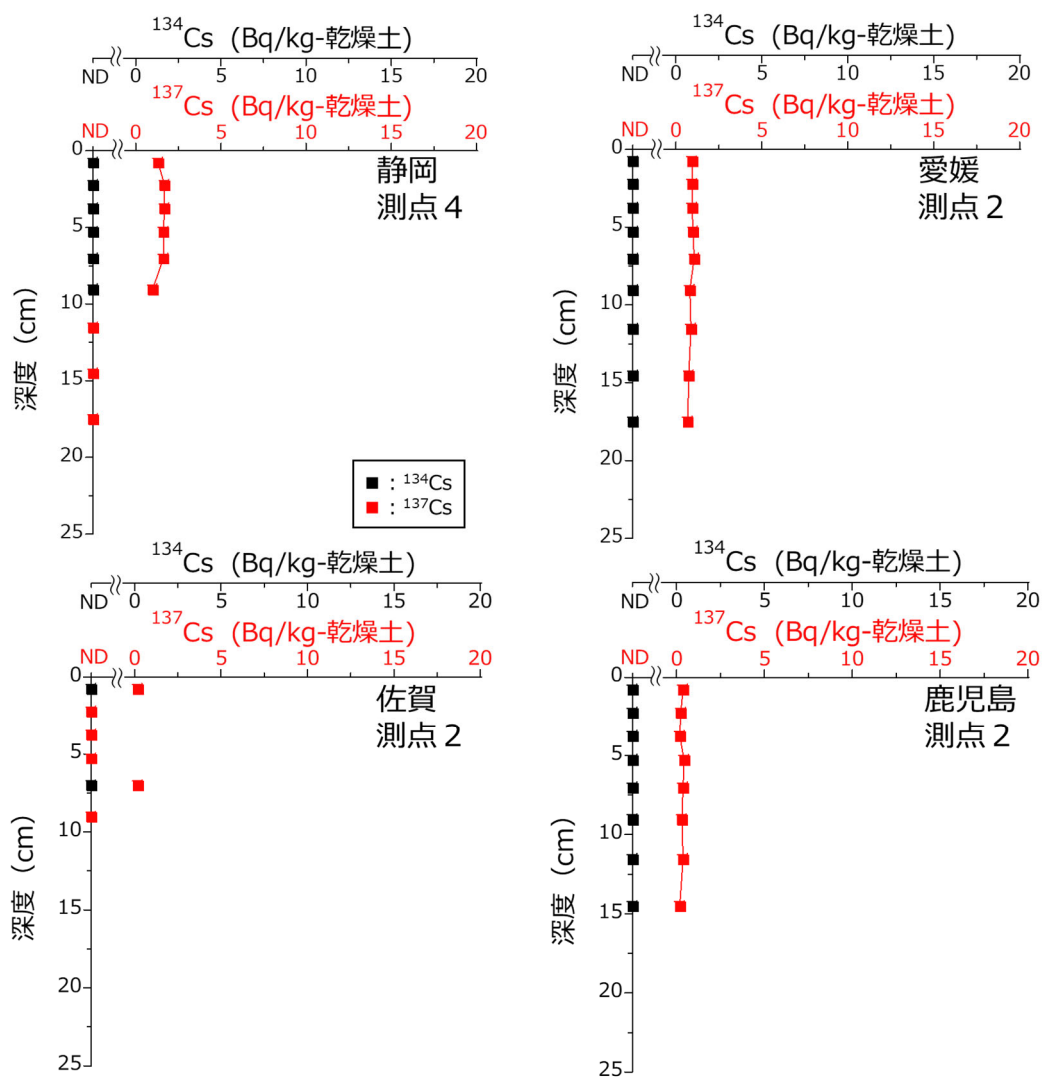


図 I -2-2-3-36(3) 西日本海域において採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。)

(海底土試料に含まれる ^{137}Cs の存在量)

放射性セシウムの鉛直分布から海底土試料に含まれる放射性セシウムの放射能は、3cm 以深にも検出されることが明らかになった。このため、放射性セシウムの放射能濃度だけでなく、単位面積当たり存在する放射能として存在量(以下、「インベントリ」という。)による比較・評価を行う必要がある。そこで、 ^{137}Cs の鉛直分布から ^{137}Cs のインベントリを算出し、直近の5年間(平成28年度から令和2年度)の調査で得られた結果と比較することにより、海洋放射能調査における放射性セシウムの変動要因解明に資することとした。

(方法)

各層における ^{137}Cs のインベントリは以下の式を用いて算出した；

$$\text{各層の } ^{137}\text{Cs} \text{ インベントリ (kBq/m}^2\text{)} = 10 \times \rho_s \times C \times (1-\phi) \times D / 1000 \dots\dots (A)$$

ここで、

ρ_s : 土粒子密度 (g/cm³)

C : ^{137}Cs の放射能濃度 (Bq/kg-乾燥土)

ϕ : 空隙率

D : 試料厚 (cm)

とした。土粒子密度は Berner¹⁴⁾によって報告されている一般的な堆積物密度 2.5g/cm³ を用いた。また、空隙率 ϕ は成田・乙坂¹⁵⁾に従い以下の式を用いて算出した；

$$\text{空隙率 } \phi = (w/100 \times \rho_s) / ((1-w/100) \times \rho_w + (w/100 \times \rho_s)) \dots\dots (B)$$

ここで、

w : 含水率 (%)

ρ_s : 土粒子密度 (g/cm³)

ρ_w : 純水の密度 (g/cm³)

とした。なお、土粒子密度は前述したとおり Berner¹⁴⁾によって報告されている一般的な堆積物密度 2.5g/cm³ を、純水の密度は 0.9982 g/cm³ (20.0℃の際の値)を用いた。各層におけるインベントリを積算することで調査測点の ^{137}Cs のインベントリを算出した。

(結果)

発電所海域(全15海域)で採取した柱状海底土試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリの経年変化を図 I-2-2-3-37 に示す。令和3年度調査における ^{137}Cs のインベントリは 0.023 ~ 2.5kBq/m² の範囲にあり、直近5年間の調査結果と同水準であった。海域間の差を比較したところ、未だに東電福島第一原発事故に由来する ^{134}Cs が検出されている福島第一、福島第二及び茨城海域を含む東日本海域では ^{134}Cs が検出されていない西日本海域や日本海海域に比べて1桁以上大きいインベントリが見られた。

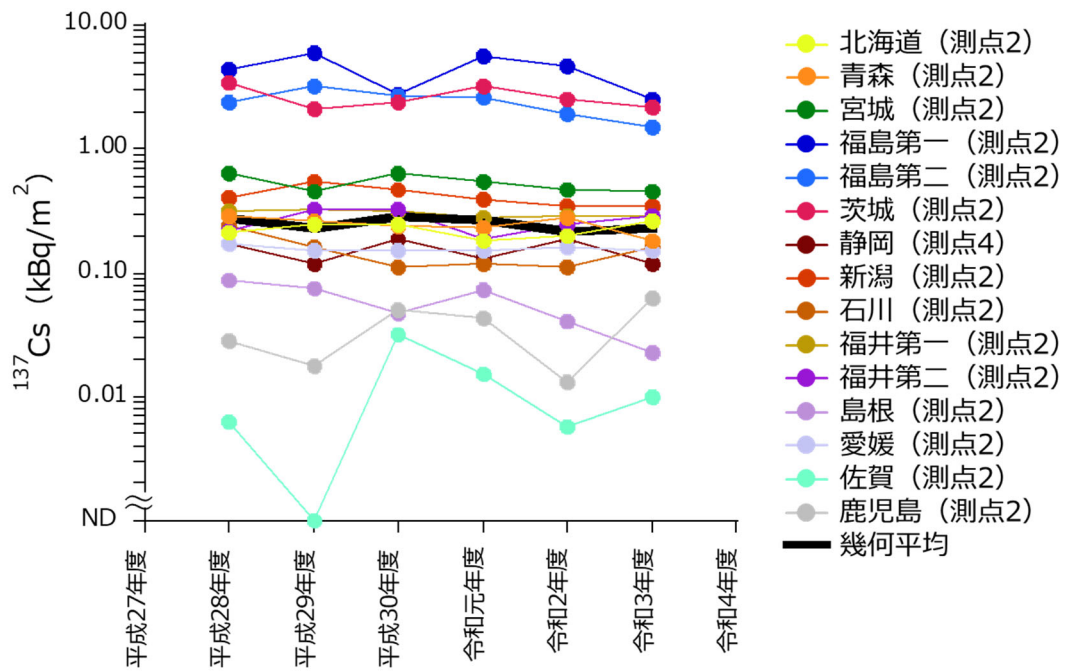


図 I-2-2-3-37 発電所海域（全 15 海域）で採取した柱状海底土試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリの経年変化（ND は検出下限値以下を示す。）

③ 海水に含まれる放射性セシウムの分布とその変動要因に関わる詳細調査

(放射性セシウムの放射能濃度の変動)

海洋放射能調査の原子力発電所周辺 15 海域のうち、西日本並びに日本海海域の表層海水を中心に、東電福島第一原発事故以降、海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度が事故前（平成 22 年度調査結果）に比べ平成 25 年から高いことが確認されている。平成 28 年度に実施した本調査により、西日本及び日本海海域の表層海水に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の上昇は、 ^{134}Cs の放射能濃度として付加された分と一致することから、東電福島第一原発事故によって海洋環境へ放出された放射性セシウムが同海域に到達していることが明らかとなった。また、平成 30、31 年には、対照海域（襟裳岬周辺海域）の測点 K2 の表層海水で東電福島第一原発事故由来の ^{134}Cs が検出された（図 I-2-2-3-38 内の黒破線丸）。当該の海域は親潮、津軽暖流、黒潮続流の影響を受ける水塊構造の複雑な海域のため、検出された ^{134}Cs がどの海流の水塊に由来するものなのか判断しづらい。

そこで本調査では海水に含まれるラジウム同位体 (^{226}Ra (半減期：1600 年)、 ^{228}Ra (半減期：5.75 年)) を用いて水塊の由来について判断することを試みた。ラジウム同位体は大陸棚の堆積物や河川水から海水に供給されることから、供給源に近い沿岸域や大陸棚付近の海水ではラジウム同位体の放射能濃度が高く、供給源の無い外洋では放射能濃度が低いことが知られている^{17,18)}。この違いを利用し、沿岸性の水塊と外洋性の水塊の混合を解明する有効なトレーサとしてラジウム同位体の放射能濃度やラジウム同位体比 ($^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 比など) が広く利用されている^{17,18)}。このラジウム同位体と塩分や水温の関係より水塊構造を把握することが可能であると考えられる。

そこで、令和 3 年度では東電福島第一原発事故によって放出された放射性セシウムが北太平洋亜寒帯循環によって回帰する可能性を鑑みて、対照海域（襟裳岬周辺海域）の測点 K2、E11 及び T2 についてラジウム同位体の放射能濃度を測定し、水塊構造について解析を試みた。

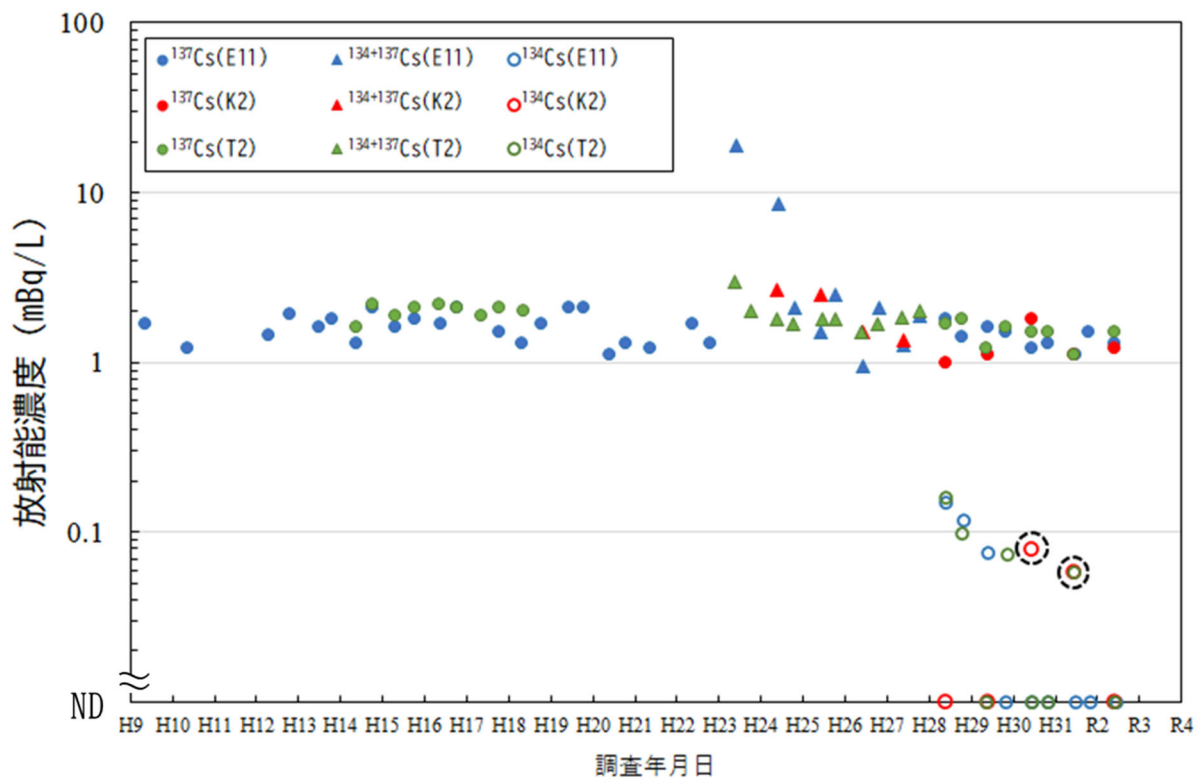


図 I -2-2-3-38 対照海域（測点 K2、E11 及び T2）における ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度の時系列変化（ND は検出下限値以下を示す。）

(試料採取及び分析)

対照海域のうち、平成 31 (令和元) 年度に調査を行った測点 K2 及び E11 の表層、250m、750m、1,000m、1,250m 及び底層と測点 T2 の海水 20 試料について金沢大学低レベル放射能実験施設 (LLRL) の協力を得て、超低バックグラウンドガンマ線スペクトロメータによってラジウム同位体の放射能濃度を求めた。なお、ラジウム同位体の放射能濃度は試料採取日に減衰補正を行った。

(結果)

襟裳沖の対照海域 (E11、K2 及び T2) のラジウム同位体の測定結果を表 I-2-2-3-7 に示す。図 I-2-2-3-39 にラジウム同位体のうち、 ^{228}Ra 放射能濃度と塩分の関係を示す。既往知見^{17,18)}により、黒潮続流、親潮、対馬暖流は以下のように特徴づけることが報告されている。

- ・ 黒潮続流 (高塩分、低 ^{228}Ra 放射能濃度)
- ・ 親潮 (低塩分、低 ^{228}Ra 放射能濃度)
- ・ 津軽暖流 (中塩分、高 ^{228}Ra 放射能濃度)

図 I-2-2-3-39 内に黒破線丸で示したプロットが平成 30 及び平成 31 (令和元) 年度の調査において東電福島第一原発事故由来の ^{134}Cs が検出された測点 K2 の表層である。この関係から、平成 30 年度調査時と平成 31 (令和元) 年度調査時に測点 K2 で検出された ^{134}Cs は属する水塊が異なることが示唆された。平成 30 年度調査時 (6 月) の測点 K2 の表層海水は黒潮続流と親潮の混合が主であり、ほとんど対馬暖流の影響がみられないと考えられる。一方、平成 31 (令和元) 年度調査時における測点 K2 の表層海水は親潮に属する水塊が主であることが確認された。同時期の調査でも年度ごとに水塊が異なり、襟裳岬周辺海域の水塊構造が複雑であることが確認できた。今後、それぞれの水塊の混合比を計算することでより詳細な水塊構造の把握が必要と考えられる。

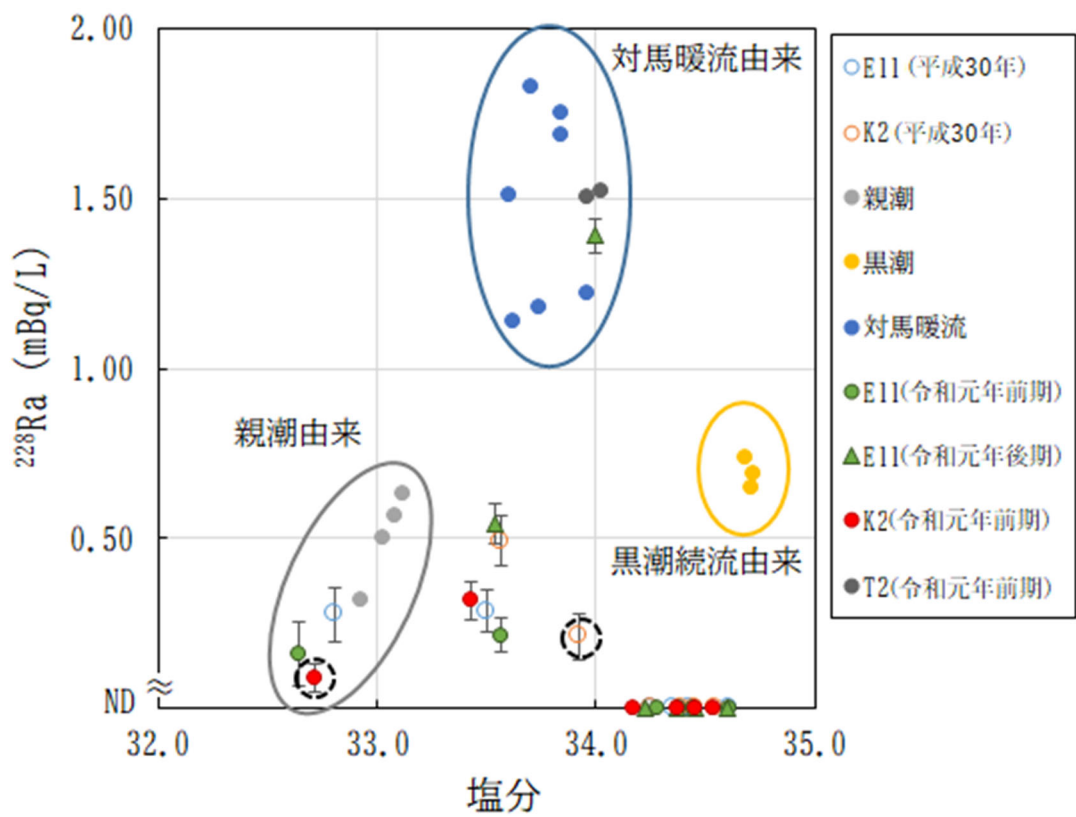


図 I -2-2-3-39 ^{228}Ra 放射能濃度と塩分の関係 (ND は検出下限値以下を示す。また、黒潮続流と親潮の ^{228}Ra の放射能濃度塩分の範囲は既往知見^{17,18)}を参照した。)

表 I-2-2-3-7 対照海域 (E11、K2 及び T2) *1 のラジウム同位体の放射能濃度

海域	測点	採取深度	採取日	²²⁶ Ra	誤差*2	²²⁸ Ra	誤差
		(m)		(mBq/L)		(mBq/L)	
対照海域	E11	1	令和元年 6 月 19 日	0.60	0.034	0.16	0.051
		250		2.5	0.062	0.22	0.061
		750		3.7	0.044	ND*3	
		1,000		3.9	0.063	ND	
		1,250		4.0	0.057	ND	
		2,050		4.9	0.083	ND	
		1	令和元年 10 月 21 日	1.4	0.050	1.4	0.096
		250		2.2	0.039	0.54	0.051
		750		3.6	0.051	ND	
		1,000		3.6	0.072	ND	
		1,250		4.2	0.067	ND	
		2,095		4.5	0.064	ND	
	K2	1	令和元年 6 月 11 日	0.75	0.031	0.089	0.041
		250		3.0	0.056	0.32	0.058
		750		4.1	0.047	ND	
		1,000		4.8	0.073	ND	
		1,250		4.4	0.059	ND	
		1,643		5.2	0.055	ND	
T2	1	令和元年 6 月 7 日	1.3	0.041	1.5	0.082	
	1	令和元年 10 月 22 日	1.2	0.041	1.5	0.083	

*1 測点の詳細については図 I-2-1-1-1 及び表 I-2-1-1-1 を参照のこと。

*2 誤差は計数誤差を示す。

*3 ND は検出下限値以下を示す。

(放射性セシウムの放射能濃度の鉛直分布)

海洋放射能調査海域周辺において採取した海水試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度は、表層水・下層水ともに時空間的に変化している。表層水や下層水における放射性セシウムの放射能濃度の分布からも水平的な変化は把握できるが、海洋では海流や乱流、潮汐などの物理的な要因による鉛直的な混合も生じることから、海域ごとに鉛直的な変化も把握する必要がある。そこで、全国の原子力発電所等周辺海域（全 15 海域）において放射性セシウムの放射能濃度の鉛直分布を把握し、その傾向を明らかにすることによって海洋放射能調査で実施している調査結果を補完するデータに資することにした。

(試料採取及び分析)

海水試料は、静岡海域では測点 4、その他の海域においては測点 2 において、表層及び下層（海底から 10～30m 上）以外の採水層（10m、20m、50m、100m、200m 及び 300m）から大型バンドーン採水器を用いて約 100L 採取した（表 I-2-2-3-8）。また、海水試料の採取に当たっては、電気伝導度水温水深計（CTD）を大型バンドーン採水器に装着し深度、塩分及び水温を同時かつ連続的に観測した。採取した海水 1L に対して濃硝酸 1mL を添加し、分析まで冷暗所にて適切に保存した。放射能分析の手順は表 I-1-4-2 のとおりである。

表 I-2-2-3-8 海水試料の採取測点、採取層、採取水深及び層数

海域	測点	採取日	緯度*1		経度*1		水深*1 (m)	採取層*2 (m)
			(N)		(E)			
北海道	2	令和 3 年 6 月 22 日	43°	4.7′	140°	15.6′	415	20, 50, 100
青森	2	令和 3 年 6 月 18 日	41°	12.9′	141°	40.1′	660	20, 50, 100, 300
宮城	2	令和 3 年 5 月 21 日	38°	24.8′	141°	45.3′	165	20, 50
福島第一	2	令和 3 年 5 月 23 日	37°	35.0′	141°	24.8′	135	20, 50
福島第二	2	令和 3 年 5 月 24 日	37°	12.1′	141°	20.0′	145	20, 50
茨城	2	令和 3 年 5 月 20 日	36°	25.1′	140°	51.0′	120	20, 50
静岡	4	令和 3 年 6 月 9 日	34°	31.1′	137°	59.0′	537	20, 50, 100, 300
新潟	2	令和 3 年 6 月 16 日	37°	50.0′	138°	34.9′	489	20, 50, 100, 300
石川	2	令和 3 年 6 月 20 日	37°	8.0′	136°	26.1′	187	20, 50
福井第一	2	令和 3 年 6 月 21 日	35°	57.0′	135°	49.9′	258	20, 50, 100
福井第二	2	令和 3 年 6 月 22 日	35°	50.0′	135°	35.1′	201	20, 50
島根	2	令和 3 年 6 月 23 日	35°	40.9′	133°	4.1′	78	20
愛媛	2	令和 3 年 6 月 11 日	33°	38.0′	132°	17.0′	62	20
佐賀	2	令和 3 年 6 月 13 日	33°	37.0′	129°	53.0′	54	10, 20
鹿児島	2	令和 3 年 6 月 14 日	31°	45.0′	130°	1.0′	84	20, 50

*1 当該測点の表層について試料採取を行った際の採取位置と水深を記載した。

*2 海洋放射能調査において採取された表層水及び下層水を除く。

(結果)

分析結果を表 I-2-2-3-9(1)~(3)に示す。 ^{134}Cs は全ての層で検出下限値以下であったことから、各海域における ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布について詳述する。

各海域における塩分の鉛直分布と ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布を図 I-2-2-3-40(1)~(3)に示し、併せて東日本海域、日本海海域及び西日本海域に分けて詳述する。

(東日本海域)

青森海域の ^{137}Cs の放射能濃度は表層から中間層 (20~300m 層) にかけて均一な放射能濃度 (1.3~1.5mBq/L) を示した後、下層までゆるやかに減少した。宮城海域では中間層 (20~50m 層) で極小値を示し、下層でわずかに増加する鉛直分布を示した。福島第一海域と福島第二海域では ^{137}Cs の放射能濃度が表層で極大値を示した後、中間層 (20~50m 層) にかけて放射能濃度が減少し、下層でわずかに増加する鉛直分布を示した。茨城海域では表層から中間層 (20~50m 層) にかけて均一な放射能濃度 (1.6~1.8mBq/L) を示した後、下層で極大値を示す鉛直分布を示した。東電福島第一原発事故前の海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度を測定値から $1.6 \pm 0.3\text{mBq/L}$ とした場合、現在は同事故の影響が一部に限られていることが分かった。

(日本海海域及び西日本海域)

日本海海域の北海道海域における ^{137}Cs の放射能濃度は、表層から下層にかけて均一な放射能濃度 (1.4~1.5mBq/L) を示した。新潟海域では表層から 100m 層にかけて均一な放射能濃度 (1.4~1.5mBq/L) を示した後、下層まで減少した。福井第一海域においては、表層で極大値 (1.8mBq/L) を、中間層 (20~100m 層) で均一な放射能濃度 (1.4~1.5mBq/L) を示した後、下層までゆるやかに減少した。石川海域及び福井第二海域においては、中間層 (20~50m 層) で極小値 (1.4mBq/L) を示し、それよりも深くなるにつれてゆるやかに増加した。島根海域では、20m 層で極小値を示し、下層に至るまでゆるやかに増加した。

西日本海域の静岡海域における ^{137}Cs の放射能濃度は、表層で極大値を、中間層 (20~300m 層) で均一な放射能濃度 (1.4~1.6mBq/L) を示した後、それよりも深くなるにつれて減少した。一方、水深が 100m よりも浅い佐賀、愛媛及び鹿児島海域においては塩分の鉛直分布がほとんど変化していないものの、愛媛海域では下層で ^{137}Cs の放射能濃度は極大値を示した。一方で、佐賀海域と鹿児島海域では中間層 (佐賀海域: 10~20m 層、鹿児島海域: 20~50m 層) で極小値を示し、下層でわずかに増加する鉛直分布を示した。しかしながら、誤差を考慮すれば佐賀海域と鹿児島海域では表層と下層の放射能濃度の違いは確認されなかった。

日本海海域及び西日本海域の水深が比較的深い海域では、表層水を除いて塩分が増加す

ると ^{137}Cs の放射能濃度が増加する傾向が見られた。一方で、比較的浅い海域では、塩分の変化と ^{137}Cs の放射能濃度の変化は対応していなかった。水深の比較的浅い海域では沿岸流や乱流、潮汐などの物理的な要因を強く受けることによって放射能濃度の鉛直分布が複雑になる。そのため、水深の比較的浅い海域において ^{137}Cs の鉛直分布を解釈するためには、他の現場観測データの解析や化学トレーサ分析といったより詳細な解析が必要だと考えられる。

表 I -2-2-3-9(1) 東日本海域において採取した海水試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度

海域	測点	採取深度 (m)	^{134}Cs		^{137}Cs	
			(mBq/L)	誤差*1	(mBq/L)	誤差
青森	2	1	ND*2		1.5	0.20
		20	ND		1.5	0.032
		50	ND		1.4	0.037
		100	ND		1.5	0.038
		300	ND		1.3	0.029
		641	ND		1.0	0.19
宮城	2	1	ND		1.7	0.22
		20	ND		1.4	0.032
		50	ND		1.4	0.031
		154	ND		1.8	0.21
福島第一	2	1	ND		2.5	0.23
		20	ND		1.8	0.036
		50	ND		1.3	0.031
		125	ND		2.2	0.20
福島第二	2	1	ND		2.2	0.20
		20	ND		1.9	0.039
		50	ND		1.3	0.032
		134	ND		1.7	0.20
茨城	2	1	ND		1.6	0.20
		20	ND		1.7	0.036
		50	ND		1.8	0.039
		113	ND		2.1	0.20

*1 誤差は計数誤差を示す。

*2 ND は検出下限値以下を示す。

表 I-2-2-3-9(2) 日本海海域において採取した海水試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度

海域	測点	採取深度 (m)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs	
			(mBq/L)	誤差*1	(mBq/L)	誤差
北海道	2	1	ND*2		1.5	0.21
		20	ND		1.4	0.037
		50	ND		1.5	0.032
		100	ND		1.4	0.030
		400	ND		1.4	0.20
新潟	2	1	ND		1.4	0.22
		20	ND		1.5	0.039
		50	ND		1.5	0.042
		100	ND		1.4	0.036
		300	ND		1.1	0.028
		470	ND		1.0	0.21
石川	2	1	ND		1.6	0.21
		20	ND		1.4	0.038
		50	ND		1.4	0.036
		174	ND		1.8	0.21
福井第一	2	1	ND		1.8	0.20
		20	ND		1.4	0.035
		50	ND		1.4	0.036
		100	ND		1.5	0.031
		248	ND		0.86	0.20
福井第二	2	1	ND		2.0	0.22
		20	ND		1.4	0.035
		50	ND		1.4	0.030
		185	ND		1.6	0.21
島根	2	1	ND		1.7	0.23
		20	ND		1.4	0.037
		69	ND		1.9	0.22

*1 誤差は計数誤差を示す。

*2 ND は検出下限値以下を示す。

表 I-2-2-3-9(3) 西日本海域において採取した海水試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度

海域	測点	採取深度 (m)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs	
			(mBq/L)	誤差* ¹	(mBq/L)	誤差
静岡	4	1	ND* ²		2.0	0.22
		20	ND		1.5	0.030
		50	ND		1.4	0.037
		100	ND		1.6	0.039
		300	ND		1.6	0.038
		533	ND		0.90	0.21
愛媛	2	1	ND		1.5	0.20
		20	ND		1.3	0.028
		55	ND		2.0	0.20
佐賀	2	1	ND		1.7	0.22
		10	ND		1.4	0.031
		20	ND		1.5	0.030
		45	ND		1.7	0.22
鹿児島	2	1	ND		1.7	0.21
		20	ND		1.4	0.031
		50	ND		1.4	0.037
		76	ND		1.8	0.23

*1 誤差は計数誤差を示す。

*2 ND は検出下限値以下を示す。

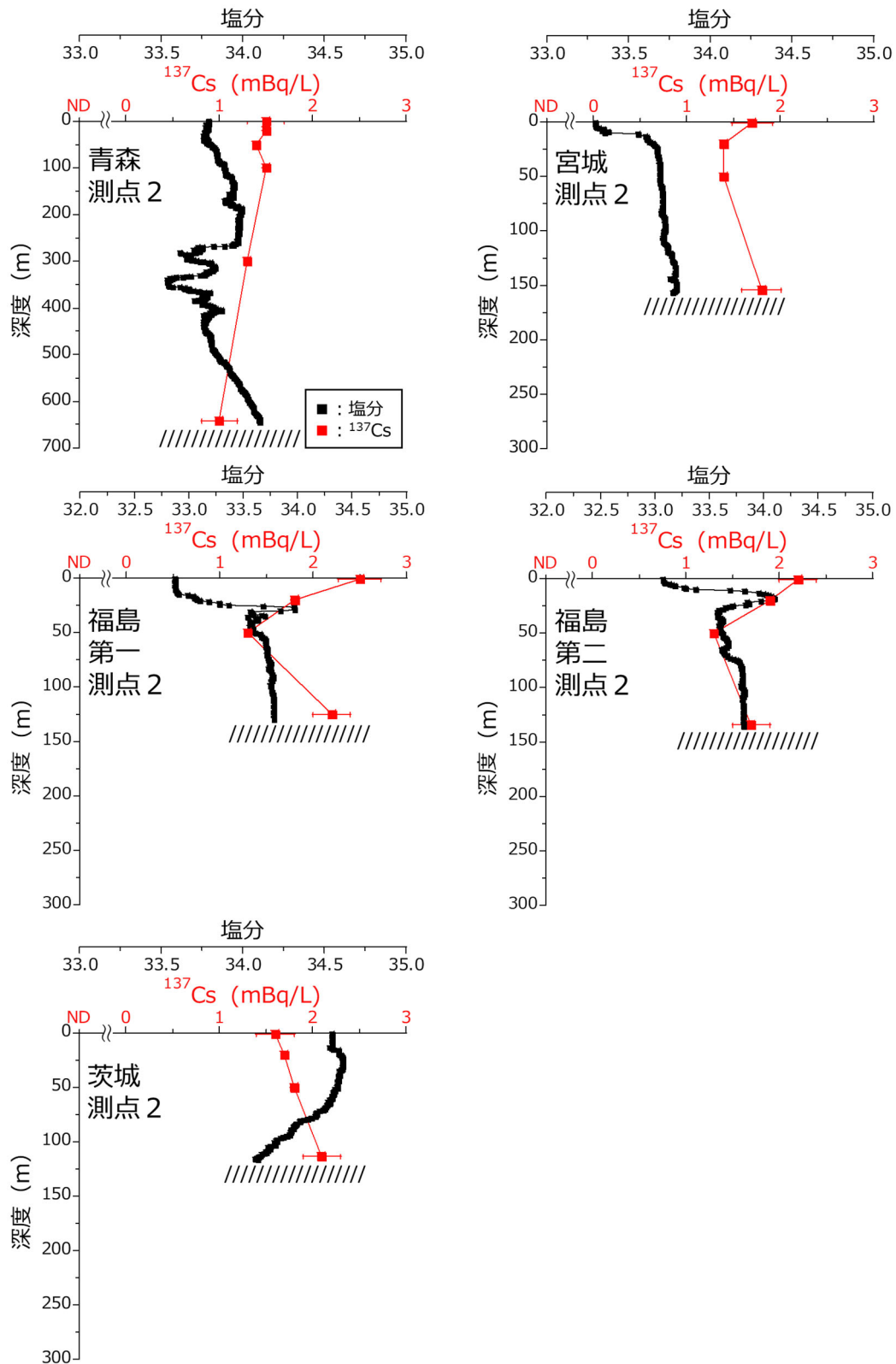


図 I-2-2-3-40(1) 東日本海域において採取した海水試料に含まれる ¹³⁷Cs の放射能濃度及び塩分の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。図中の斜線は海底面を表す。)

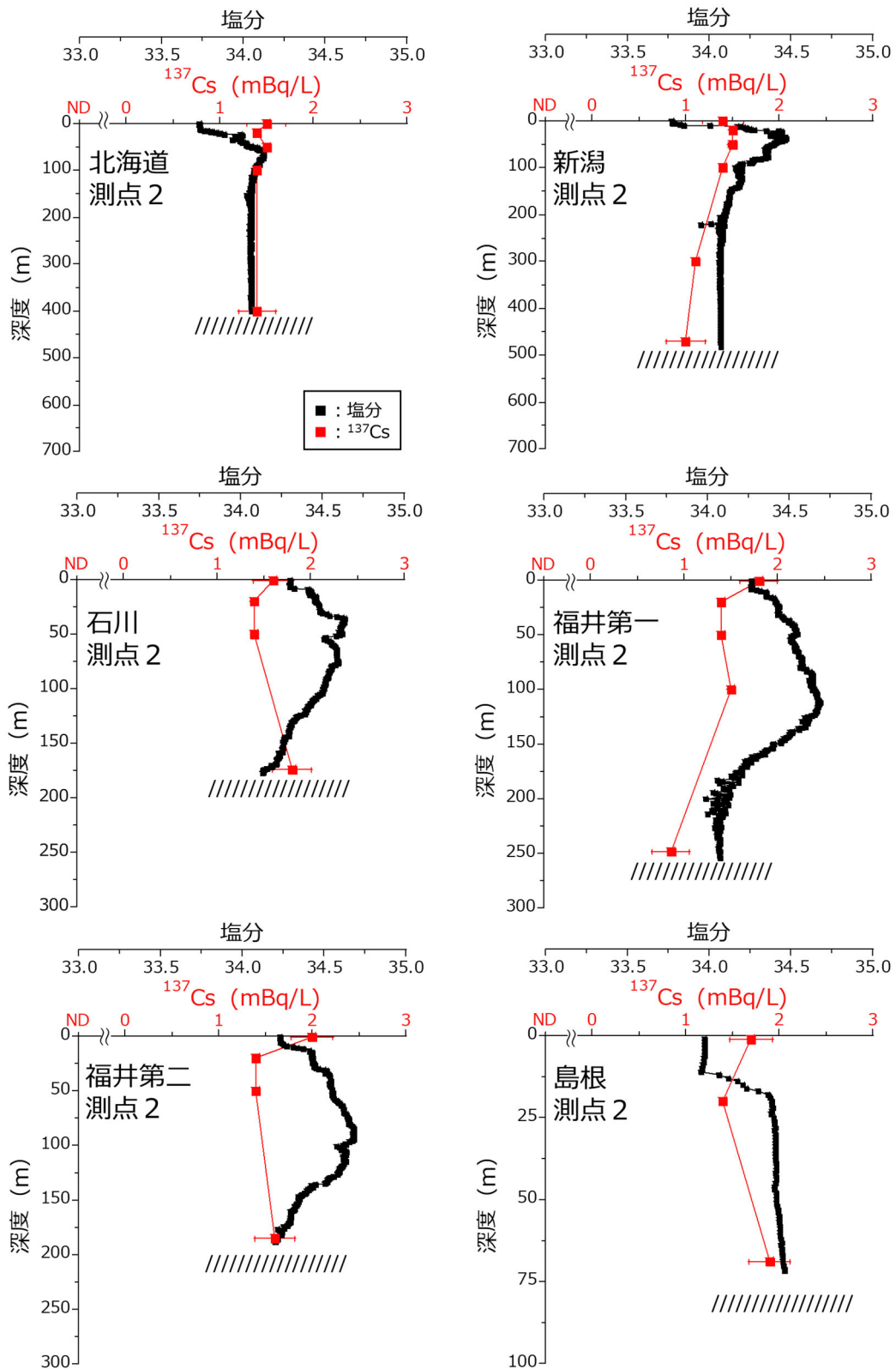


図 I -2-2-3-40(2) 日本海海域において採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度及び塩分の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。図中の斜線は海底面を表す。)

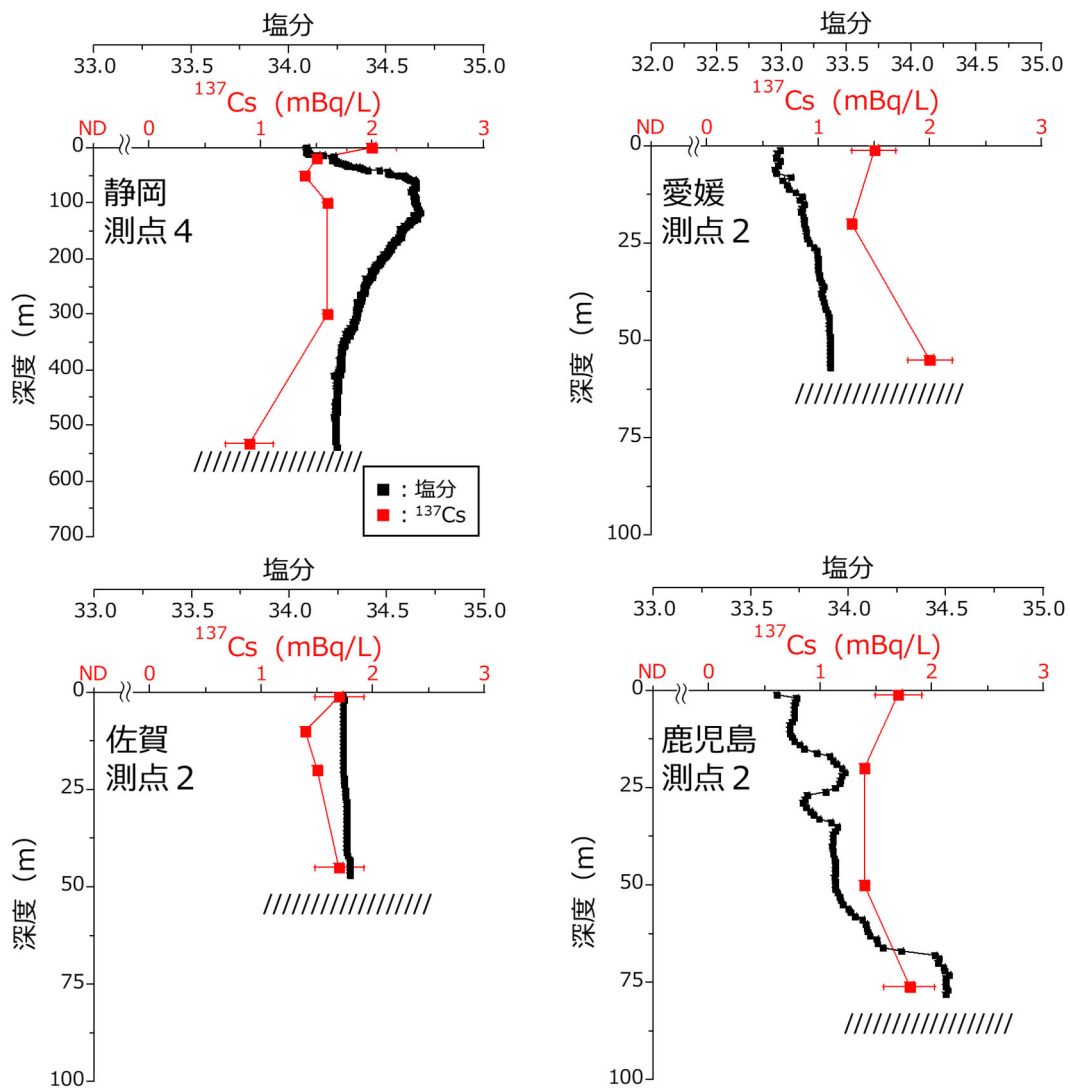


図 I-2-2-3-40(3) 西日本海域において採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度及び塩分の鉛直分布 (ND は検出下限値以下を示す。図中の斜線は海底面を表す。)

(海水試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリ)

前述のとおり、海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は、採取深度によって値が変わることが明らかになった。このため、海水試料においても ^{137}Cs の鉛直分布から ^{137}Cs の単位海表面あたりの水柱中放射エネルギー (インベントリ) を算出し、直近 5 年間 (平成 28 年度から令和 2 年度) の結果と比較することによって海洋放射能調査における放射性セシウムの変動要因解明に資することとした。

(方法)

海水試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリは海水の採取場所の水深によって大きく異なる。そこで、本報告書では表層から 50m 層までの ^{137}Cs のインベントリを対象とした。なお、表層から 50m 層までの ^{137}Cs のインベントリは、各層の放射エネルギーを求めて足し合わせていく方法¹⁹⁾を用いて見積もった。

(結果)

表層から 50m 層までの ^{137}Cs のインベントリは $70\sim 89\text{Bq/m}^2$ の範囲にあり、直近 5 年間の調査結果に比べて減少した (図 I-2-2-3-41)。また、東電福島第一原発事故前にあたる平成 22 年度に採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリを $80\pm 15\text{Bq/m}^2$ (同事故前の海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度が表層から 50m 層までを測定値から $1.6\pm 0.3\text{mBq/L}$ と推定) と見積もった場合、令和 3 年度に得られた結果は多くの海域では同事故前の値と同程度もしくは下回っているものの、福島第一海域、福島第二海域及び茨城海域ではこの値をわずかに上回っていた。しかしながら、令和 3 年度に得られた結果について、一元配置分散分析 (※) に相当するノンパラメトリック検定である Kruskal-Wallis の検定を用いて東日本海域、日本海海域及び西日本海域における表層から 50m 層までの ^{137}Cs のインベントリの有意差を検討したところ、海域間に有意差は認められなかった。

※ 一元配置分散分析は one-way ANOVA (ANOVA: Analysis of Variance) と称され、3 群以上のデータ (対応のないデータ) に対して、要因を 1 つとした場合に平均の差を検定する際に用いられる手法の 1 つ。

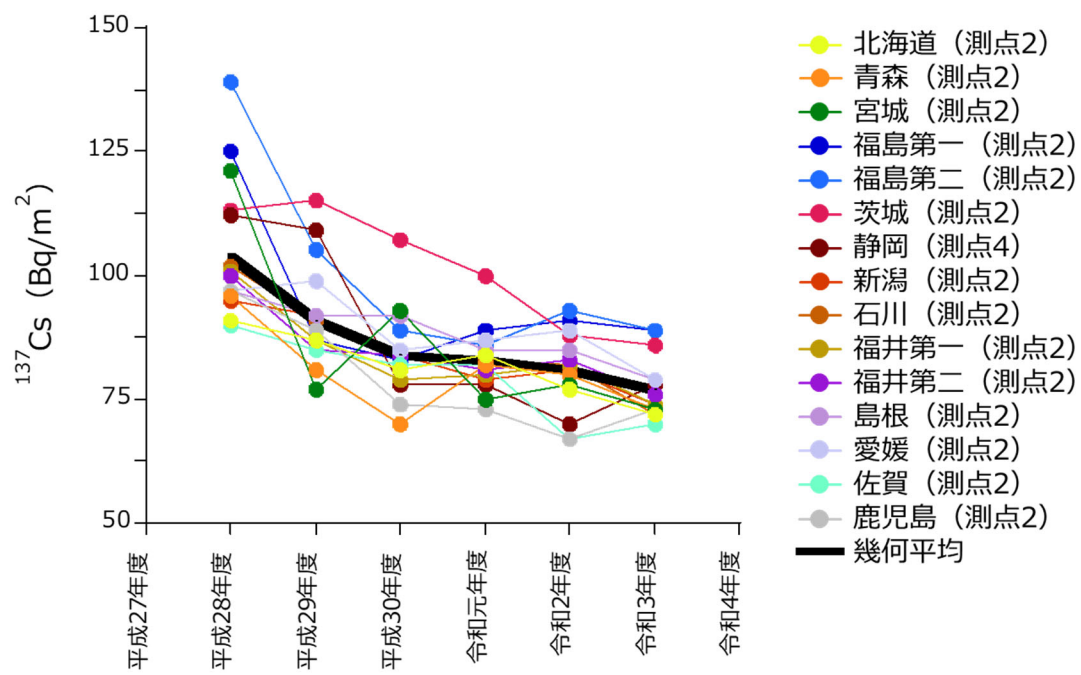


図 I -2-2-3-41 発電所海域(全 15 海域)で採取した表層から 50m 層までの海水試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリの経年変化

④ まとめ

本詳細調査では、「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」における調査結果を補完すべく、海洋放射能調査海域周辺において採取した海底土試料の性状や放射性セシウムの鉛直分布、海水試料の極微量放射能分析や放射性セシウムの鉛直分布、さらに海底土及び海水の放射性セシウムのインベントリなどについて調査を行った。

海底土に関する調査では、 ^{137}Cs の放射能濃度と海底土の性状、元素濃度の関係を把握した。また、放射性セシウムの鉛直分布やインベントリを把握した。これまでの調査から ^{137}Cs 放射能濃度の変動に関係があると考えられる性状や元素が分かりつつある。今後は ^{137}Cs 放射能濃度の変動の一因と考えられる元素の存在形態などに関する解析が必要である。

海水に関する調査では、ラジウム同位体による水塊解析を行い、襟裳岬周辺の水塊構造を把握した。また、海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの鉛直分布やインベントリを把握した。調査対象海域の水塊構造や放射性セシウムの鉛直分布を定量的に評価するために、今後は現場観測データの解析や化学トレーサ分析といったより詳細な解析が必要である。

引用文献

- 1) Takata, H., Aono, T., Tagami, K. and Uchida, S. (2016). A new approach to evaluate factors controlling elemental sediment-seawater distribution coefficients (Kd) in coastal regions, Japan. *Science of the Total Environment*, **543**, 315-325.
- 2) Chaillou, G., Anschutz, P., Lavaux, G., Schäfer, J. and Blanc, G. (2002). The distribution of Mo, U, and Cd in relation to major redox species in muddy sediments of the Bay of Biscay. *Marine Chemistry*, **80**, 41-59.
- 3) Thornton, S.F. and McManus, J. (1994). Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **38**, 219-233.
- 4) Kusakabe, M., Oikawa, S., Takata, H. and Misonoo, J. (2013). Spatiotemporal distributions of Fukushima derived radionuclides in nearby marine surface sediments. *Biogeosciences*, **10**, 5019-5030.
- 5) Ambe, D., Kaeriyama, H., Shigenobu, Y., Fujimoto, K., Ono, T., Sawada, H., Saito, H., Miki, S., Setou, T., Morita, T. and Watanabe, T. (2014). Five-minute resolved spatial distribution of radiocesium in sea sediment derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, **138**, 264-275.
- 6) Otosaka, S. and Kato, Y. (2014). Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi

- Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories. *Environmental Science: Processes and Impacts*, **16**, 978-990.
- 7) Kusakabe M. and Takata, H. (2020) Temporal trends of ^{137}Cs concentration in seawaters and bottom sediments in coastal waters around Japan: implications for the K_d concept in the dynamic marine environment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **323**, 567-580.
 - 8) Takata, H., Hasegawa, K., Oikawa, S., Kudo, N., Ikenoue, T., Isono, S.R. and Kusakabe, M. (2015). Remobilization of radiocesium on riverine particles in seawater: the contribution of desorption to the export flux to the marine environment. *Marine Chemistry*, **176**, 51-63.
 - 9) Otosaka, S. and Kobayashi, T. (2013). Sedimentation and remobilization of radiocesium in the coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Environmental Monitoring and Assessment*, **185**, 5419-5433.
 - 10) Ikenoue, T., Ishii, N., Kusakabe, M. and Takata, H. (2018). Contribution of ^{137}Cs -enriched particles to radiocesium concentrations in seafloor sediment: Reconnaissance experiment. *PLOS ONE*, **13**, e0204289.
 - 11) 工藤なつみ・及川真司・日下部正志 (2020). 日本沿岸域における海底土の ^{137}Cs 放射能濃度と化学的及び物理的要素との相関分析. *分析化学*, **69**, 599-606.
 - 12) Inoue, M., Yoneoka, S., Ochiai, S., Morokado, T., Uemura, H. and Nagao, S. (2018). Low levels of ^{134}Cs in suspended solids in rivers discharging into the Sea of Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **316**, 1233-1241.
 - 13) Inoue, M., Uemura, H., Kofuji, H., Fujimoto, K., Takata, H., Shirotani, Y., Kudo, N. and Nagao, S. (2017). Spatial variation in low-level ^{134}Cs in the coastal sediments off central Honshu in the Sea of Japan: implications for delivery, migration, and redistribution patterns. *Journal of Oceanography*, **73**, 571-584.
 - 14) Berner, R.A. (1980). *Early diagenesis: a theoretical approach*. Princeton University Press, Princeton NJ.
 - 15) 成田尚史・乙坂重嘉 (2018). 堆積物の物理的性質 (含水率, 現場密度および空隙率). 日本海洋学会 (編), *海洋観測ガイドライン - 第四版 -*, G502JPrl:001-012. https://kaiyo-gakkai.jp/jos/guide_line/jp/Voll10JP20180801protected.pdf (令和4年3月閲覧)
 - 16) Takata, H., Kusakabe, M., Inatomi, N. and Ikenoue, T. (2018). Appearances of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant-Derived ^{137}Cs in Coastal Waters around Japan: Results from Marine Monitoring off Nuclear Power Plants and Facilities, 1983-2016. *Environmental Science and Technology*, **52**, 2629-2637.

- 17) Kawakami, H. and Kusakabe, M. (2008). Surface water mixing estimated from ^{228}Ra and ^{226}Ra in the northwestern North Pacific. *Journal of Environmental Radioactivity*, **99**, 1335-1340.
- 18) Inoue, M., Tanaka, K., Watanabe, S., Kofuji, H., Yamamoto, M. and Komura, K. (2006). Seasonal variations in $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ ratio within coastal waters of the Sea of Japan: implications for water circulation patterns in coastal areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, **89**, 138-149.
- 19) Takata, H., Kusakabe, M., Inatomi, N., Ikenoue, T. and Hasegawa, K. (2016). The Contribution of Sources to the Sustained Elevated Inventory of ^{137}Cs in Offshore Waters East of Japan after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station Accident. *Environmental Science and Technology*, **50**, 6957-6963.

(4) 原子力発電所等周辺海域における海水及び海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度調査

① はじめに

平成3年度から核燃料（原子燃料）サイクル施設周辺海域（以下、核燃海域という。）において、また、平成23年度から東電福島第一原発周辺海域において、海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度のモニタリングを実施してきた。さらに、プルトニウムや核分裂生成物の取扱いに係る再処理施設の安全機能及び機器・設備の性能を確認するための使用済核燃料を用いたアクティブ試験の海洋環境への影響を評価するために、本事業における解析（支援）調査として平成13年度から核燃海域において、海産生物試料に含まれるトリチウムのモニタリングを実施してきたが、生物種や海域が極めて限定的であった。

一方、海洋放射能調査周辺海域のうち、発電所海域では海水、海底土及び海産生物試料に含まれるトリチウムは、分析の対象の放射性核種には含まれていなかった。そのため、日本周辺海域におけるトリチウムの放射能濃度のバックグラウンドデータを把握するに当たって不足している部分があると考えられ、日本近海の広範囲な海域において原発事故あるいはアクティブ試験による影響評価を行うことができなかった。

これらの背景を踏まえ、日本周辺海域におけるトリチウムの放射能濃度のバックグラウンドの把握と影響評価のため、平成29年度から解析調査において観測海域を新たに追加してきた。令和3年度は「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」において採取・収集した海水及び海産生物試料のうち、海水試料は、各発電所海域で採取した表層水試料の測定点を増やすとともに、対照海域（襟裳沖海域、大和堆海域及び四国沖海域）で採取した海水試料に含まれるトリチウムの放射能測定を行い、そのバックグラウンドを把握するための基礎となるデータを収集することとした。また、海産生物は、核燃料（原子燃料）サイクル施設及び東電福島第一原発事故の影響をモニタリングすることを想定し、核燃海域に加え、各発電所海域から収集した海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度に関する調査を広範囲に行い、そのバックグラウンドを把握するための基礎データを収集することとした。

② 方法

（試料）

<海水試料>

海水試料のうち表層水試料は、「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」における発電所海域（15海域各2測点）及び対照海域（3海域6測点）で合計36試料を採取した。また、トリチウムの鉛直分布を把握するための試料として、対照海域の測点K2（襟裳沖海域）と測点KC1（四国沖海域）の2測点（各5層）で計10試料を採取した。なお、トリチウム分

析用として採取した海水試料はポリエチレン製容器に 2L 分取し、酸を添加せず、分析を開始するまで冷暗所で適切に保存した。

<海産生物試料>

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」の実施対象となっている発電所海域（計 15 海域）及び核燃海域において、令和 3 年度第 1 回収集時に漁獲された各 3 種の海産生物試料から 2 種または 1 種を選び、計 21 試料の海産生物を対象に、トリチウムの放射能分析を行った。一部の海産生物試料については組織自由水型トリチウム（以下、TFWT^{※1}という。）のみ測定し、有機物に含まれる有機結合型トリチウム（以下、OBT^{※2}という。）は測定しなかった。

TFWT は生物の体液に含まれるトリチウムであり、水分子の一部がトリチウムに置き換わっている（ $^1\text{H}^3\text{H}_0$ （HTO と表記する場合もある））。OBT は筋肉、内臓などを乾燥させた有機物に含まれるトリチウムを指す。OBT は有機物に含まれるヒドロキシル基（-OH）やアミノ基（-NH₂、-NHR）の水素分子の一部がトリチウムに置換した交換型 OBT と有機物に含まれる炭素原子に直接結合したトリチウムである非交換型 OBT の二種類に大別され、これら 2 つを合わせて全 OBT という。

各海産生物試料から可食筋肉部位を分け取った後、全個体分をよく混合したものから生鮮重量で約 1kg 程度を分取・凍結保存して、トリチウム分析用に供した。いずれの試料も「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」の一環として、灰化後ガンマ線放出核種等を対象とした放射能分析を行っており、一部の試料には ^{137}Cs の放射能濃度等に東電福島第一原発事故の影響が見られている。

※1 組織自由水型トリチウム（Tissue Free Water Tritium）のことで、TFWT と称される。

※2 有機結合型トリチウム（Organically Bound Tritium）のことで、OBT と称される。

（放射能分析）

トリチウム（核種として ^3H と表記されるが、「T」と表示する場合もある。）は水素の放射性同位元素であり、環境中ではそのほとんどが水（ $^1\text{H}^3\text{H}_0$ （「HTO」と表記する場合もある））の形で存在している。本調査においては、放射能測定法シリーズ¹⁾のトリチウム分析法に準じた方法を適用することとし、海水試料に含まれるトリチウムは電解濃縮法にて分離濃縮し、液体シンチレーションカウンタによるベータ線計測により定量を行った。

またトリチウムは水素の放射性同位元素として、物理・化学・生物学的に水（ $^1\text{H}^3\text{H}_0$ ）と同じ挙動をするため、海産生物に取り込まれて体内で代謝されたトリチウムは、特定の臓器等に集まることはなく、生物体全体の組織水分や有機成分に分布する。そのため、海産生

物のトリチウムの放射能分析は、TFWT と OBT に分けて行われる。従来、国内の OBT 分析は、放射能測定法シリーズ¹⁾に準じた方法により行われ、全 OBT として測定される。しかし、トリチウムは常温において試料周辺の大気中水蒸気の吸収や試料自身の TFWT と OBT 間の同位体交換などが非常に速く起こりやすい核種であるため、近年諸外国では、生物が試料として採取される前に体内代謝によって有機成分に取り込んだトリチウムのみを分析することを目的に非交換型 OBT の測定^{2~4)}が行われている。したがって本調査では、OBT について両方の分析方法を比較並行的に行うこととした。

図 I-2-2-4-1 にトリチウムの放射能分析に関するフロー図を示す。放射能測定法シリーズ¹⁾に準じた方法で定量される OBT は、試料保存や分析作業の環境中のトリチウムの放射能濃度や試料自身の TFWT の放射能濃度に影響を受ける「交換型 OBT」も含まれる「全 OBT」として評価される。非交換型 OBT 測定法では、凍結乾燥した試料についてトリチウムを含まない水（例えば、長期間大気との接触がない深地下水など）に浸漬し凍結乾燥を行う過程を 3 回繰り返すことによって「交換型 OBT」を洗浄除去できるため、生物代謝の同化・異化作用によって有機分子に取り込まれ、生物体内の滞留時間も比較的長い炭素原子に結合した「非交換型 OBT」だけを分析することができる。なお TFWT については、どちらの分析方法においても、真空凍結乾燥で得られた水分の電解濃縮を行ってから液体シンチレーションカウンタによりトリチウム定量を行うことによって、検出下限値を下げるができる。しかし、全 OBT 及び非交換型 OBT については電解濃縮を行うための試料量を確保することが極めて困難なため電解濃縮法による分離濃縮は行っていない。

なお、海産生物によるトリチウムの取り込みは、水 ($^3\text{H}^1\text{O}$ の化学形) として海水から吸収され、体内で水の代謝によって体液や有機物へ移行する。そのため、海産生物に含まれるトリチウムの放射能濃度を海水に含まれるトリチウムの放射能濃度と比較評価するため TFWT は Bq/L-水、OBT については Bq/L-燃焼水で放射能濃度を表した。また海産生物中に含まれるトリチウムの放射能濃度として Bq/kg-生鮮物も併せて示した。

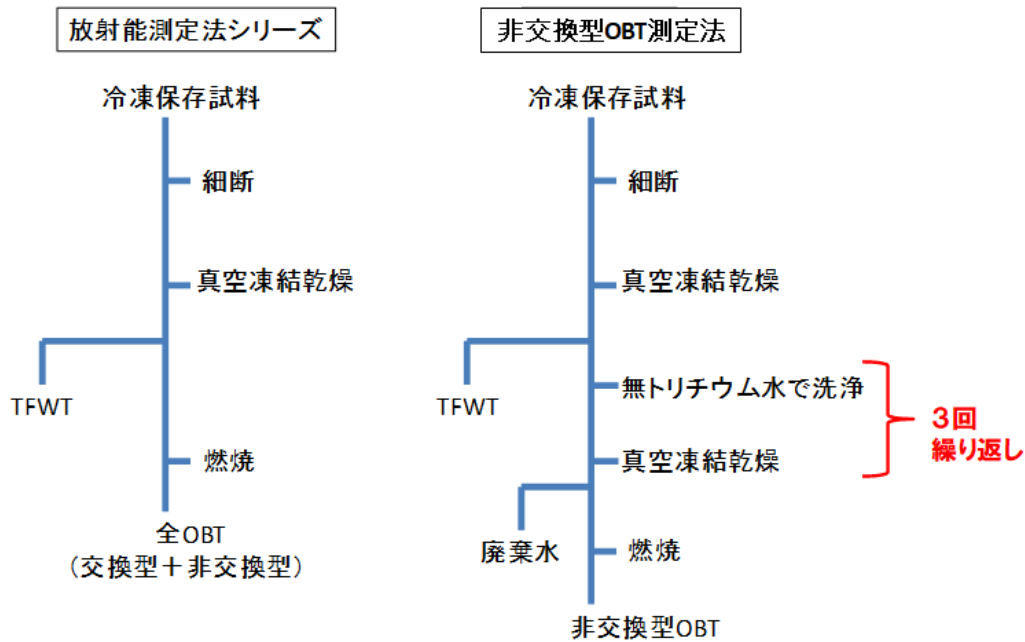


図 I -2-2-4-1 放射能測定法シリーズ及び非交換型 OBT 測定法による海産生物に含まれる TFWT 及び OBT の分析フロー図

③ 海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度

分析結果を表 I -2-2-4-1 に示す。結果について、東日本海域（青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域）と西日本海域（静岡、愛媛、鹿児島及び佐賀海域）、日本海海域（北海道、新潟、石川、福井第一、福井第二及び島根海域）及び対照海域（襟裳沖、大和堆及び四国沖海域）に分けて詳述する。

令和 3 年度の調査で得られた海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度は、

東日本海域：ND～0.14Bq/L（平均値±標準偏差：0.093±0.028Bq/L）

西日本海域：ND～0.11Bq/L（平均値±標準偏差：0.091±0.026Bq/L）

日本海海域：ND～0.16Bq/L（平均値±標準偏差：0.097±0.030Bq/L）

対照海域：ND～0.12Bq/L（平均値±標準偏差：0.098±0.017Bq/L）

であった。なお、平均値と標準偏差には ND は含まない。放射能濃度や平均値に海域間での有意な差は見られず、海域の違いによる事故の影響は確認できなかった。また、直近の調査にあたる令和 2 年度の分析値との有意の差も見られなかった。

対照海域におけるトリチウムの放射能濃度、水温及び塩分の鉛直分布を図 I -2-2-4-2 に示す。測点 KC1（四国沖海域）は、深さが増すにつれて放射能濃度が減少する傾向がみられた。一方、測点 K2（襟裳沖海域）は、表層から 750m 層までは検出下限値以下であった。

が1,000m層で放射能濃度が上昇し、1,250m層で極大値が確認された。1,000m層で確認された放射能濃度は測点 KC1 の1,000m層と同程度であるが、1,250m層の放射能濃度は0.10Bq/Lであり、同対照海域の測点 T2 及び日本近海の表層海水の放射能濃度と同程度であった。水温、塩分については1,250m層で比較的高い放射能濃度が確認された要因を示すような鉛直分布は確認できず、現時点でその要因は不明であり、今後も調査を継続して日本近海のトリチウムの放射能濃度の鉛直分布について把握する必要があると考えられる。

なお、本調査における海水に含まれるトリチウムの放射能濃度（ND～0.16Bq/L）は、各自治体等機関によって行われている原子力施設等周辺環境放射線等を監視する事業の調査結果（ND～11Bq/L*）に比べ、最大値が1桁低くなっている。これは各自治体等機関の調査の測点が放水口付近等の沿岸部に設けられているのに対し、本調査では漁場を対象としているため30kmほど離れた沖合に測点が設けられていることにより、放射能濃度に違いが生じたと考えられる。

*【1】2.解析調査3) 海洋環境関連調査報告書等の収集・整理 に記載

表 I-2-2-4-1 海水試料に含まれるトリチウム (^3H) の放射能分析結果

海域	測点	試料採取日	採取層	トリチウム	誤差* ¹	検出下限値
			(m)	(Bq/L)		
北海道	2	令和3年6月22日	1	0.16	0.016	0.044
	4	令和3年6月22日	1	0.11	0.016	0.044
青森	2	令和3年6月18日	1	0.14	0.015	0.041
	4	令和3年6月18日	1	0.12	0.016	0.046
宮城	2	令和3年5月21日	1	ND* ²		0.052
	4	令和3年5月21日	1	0.061	0.016	0.048
福島第一	2	令和3年5月23日	1	0.081	0.016	0.047
	4	令和3年5月23日	1	0.088	0.017	0.049
福島第二	2	令和3年5月24日	1	0.11	0.017	0.050
	4	令和3年5月25日	1	ND		0.051
茨城	2	令和3年5月20日	1	0.081	0.016	0.048
	4	令和3年5月19日	1	0.060	0.016	0.046
静岡	2	令和3年6月9日	1	0.067	0.017	0.049
	4	令和3年6月9日	1	0.060	0.016	0.048
新潟	2	令和3年6月16日	1	0.075	0.018	0.053
	4	令和3年6月15日	1	0.12	0.017	0.048
石川	2	令和3年6月20日	1	ND		0.056
	4	令和3年6月20日	1	0.076	0.016	0.047
福井第一	2	令和3年6月21日	1	0.080	0.019	0.055
	4	令和3年6月21日	1	0.11	0.018	0.051
福井第二	2	令和3年6月22日	1	ND		0.053
	4	令和3年6月22日	1	0.083	0.017	0.049
島根	2	令和3年6月23日	1	0.055	0.016	0.046
	4	令和3年6月23日	1	0.098	0.018	0.053
愛媛	2	令和3年6月11日	1	0.11	0.017	0.048
	4	令和3年6月11日	1	0.11	0.017	0.049
佐賀	2	令和3年6月13日	1	0.11	0.020	0.058
	4	令和3年6月13日	1	ND		0.059
鹿児島	2	令和3年6月14日	1	ND		0.058
	4	令和3年6月14日	1	ND		0.058

(続く)

表 I-2-2-4-1 海水試料に含まれるトリチウム (^3H) の放射能分析結果 (続き)

海域	測点	試料採取日	採取層	トリチウム	誤差*1	検出下限値
			(m)	(Bq/L)		
襟裳沖	T2	令和3年6月21日	1	0.12	0.020	0.059
	E11	令和3年6月14日	1	ND*2		0.046
	K2	令和3年6月15日	1	ND		0.056
	K2	令和3年6月15日	250	ND		0.057
	K2	令和3年6月15日	750	ND		0.059
	K2	令和3年6月15日	1,000	0.059	0.019	0.058
	K2	令和3年6月15日	1,250	0.10	0.019	0.055
	K2	令和3年6月15日	1,662	ND		0.055
大和堆	YR1	令和3年6月18日	1	0.089	0.015	0.043
	YR4	令和3年6月17日	1	0.081	0.015	0.045
四国沖	KC1	令和3年6月15日	1	0.10	0.018	0.051
	KC1	令和3年6月15日	250	0.096	0.017	0.051
	KC1	令和3年6月15日	500	0.065	0.016	0.049
	KC1	令和3年6月15日	750	0.056	0.016	0.048
	KC1	令和3年6月15日	1,000	0.049	0.016	0.049
	KC1	令和3年6月15日	1,642	ND		0.047

*1 誤差は計数誤差を示す。

*2 NDは検出下限値以下を示す。

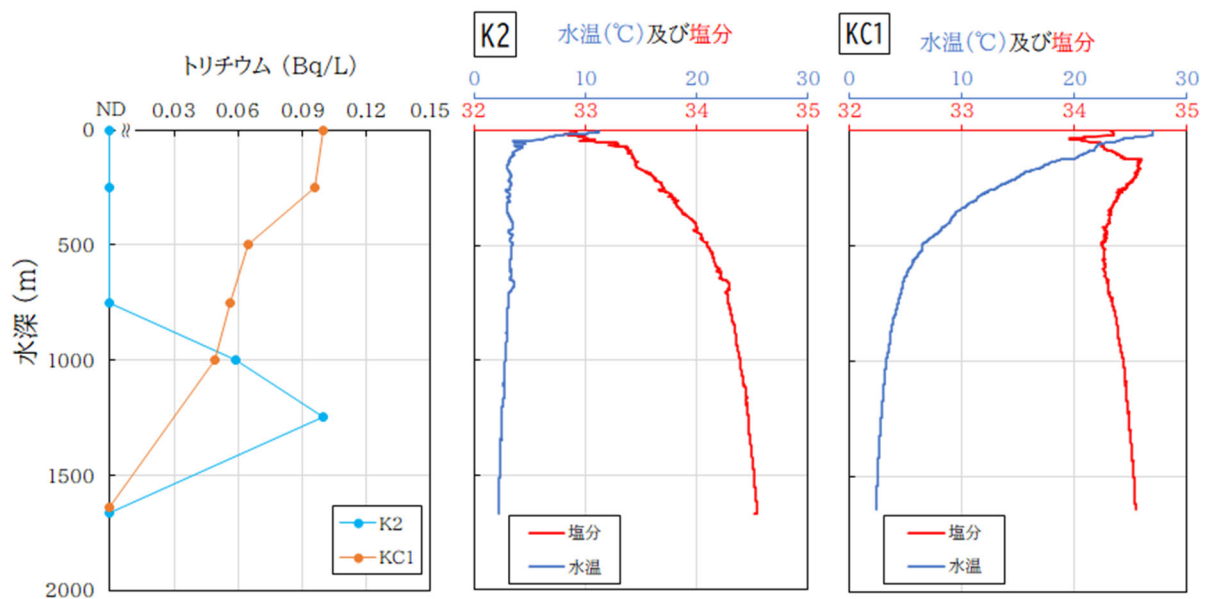


図 I-2-2-4-2 対照海域におけるトリチウムの放射能濃度の鉛直分布 (NDは検出下限値以下を示す。)

図 I-2-2-4-3 に平成 3 年度から令和 3 年度に核燃海域で採取した海水試料及び平成 29 年度から令和 3 年度に発電所海域と対照海域で採取した海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度の経年変化を示す。核燃海域で採取した海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度は、東電福島第一原発事故前の平成 18 年度から平成 22 年度の 5 年間ではアクティブ試験の影響が観測された平成 19～20 年度の結果を除いて ND～0.21Bq/L であり、平成 19～20 年にはアクティブ試験の影響により、主に南側の測点でトリチウムの放射能濃度の上昇（最大 1.3Bq/L）が確認された。東電福島第一原発事故後の核燃海域において採取された海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度は平成 29 年度から令和 2 年度の 4 年間では ND～0.21Bq/L であり、令和 3 年度の発電所海域及び対照海域で採取された海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度はこの範囲内であった。また、海域間において傾向や違いは確認されず、日本近海では同水準の放射能濃度で推移していることが確認できた。

核燃海域におけるトリチウムの放射能濃度の推移について考察し、その結果と発電所海域を比較することにより、今後、ALPS 処理水の放出や再処理施設の本格稼働に伴う海洋へのトリチウムの付加に伴う放射能濃度の変動に関する評価方法を確立する必要がある。そこで、核燃海域で採取した表層海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度を基に、放射能濃度推移の予測式を検討した。

核燃海域の表層海水に含まれるトリチウムの放射能濃度の減衰傾向は次第に穏やかになり、一定の値に減衰する傾向が示唆されている。この結果について、大気からの付加と海洋中における拡散及び物理壊変のバランスの結果、一定の平衡値に収束すると解釈した。そのため、拡散及び物理壊変により、放射能濃度の減衰に比例して、海洋中に大気から一定の付加があると仮定し、以下の式を用いて海水 1L におけるトリチウムの収支を算出した；

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\lambda C(t) + I \quad \dots (1)$$

$$C(0) = C_0 \quad \dots (2)$$

ここで、

C : 表層海水に含まれるトリチウムの放射能濃度 (Bq/L)

C₀ : 初期放射能濃度 (Bq/L)

t : 観測開始からの年数

I : 大気からの付加 (Bq/L/年)

λ : 拡散及び物理壊変による減衰係数 (年⁻¹)

とした。この式を C(t) について整理すると以下の式となる；

$$C(t) = (C_0 - \frac{1}{\lambda})e^{-t \ln[2]/T} + \frac{I T}{\ln[2]} \quad \dots (3)$$

ここで、

T：拡散及び物理壊変による半減期（実効半減期）（年）
 とした。半減期は以下のように定義される；

$$T = \frac{\ln[2]}{\lambda} \quad \dots (4)$$

上述の式（1）～（4）に記載されているパラメータのうち、 C_0 、 λ 及びIは未知パラメータである。これらについて、トリチウムの放射能濃度を表層について以下の条件を全て満たすように残差二乗和が最小となるようフィッティングを行った；

$$0 < I < 1$$

$$0 < T < 12$$

$$0.01 < C_0 < 4.0$$

なお、収束条件の設定については、真値と推定される値を含む、十分広い範囲を設定した。半減期（T）については、トリチウムの物理壊変による半減期以下であると考えられることから最大値を12年と設定した。また、アクティブ試験の影響が認められた、平成19～20年に観測された放射能濃度及びNDを除外してフィッティングを行った。

フィッティングの結果を図I-2-2-4-3に併せて示す。フィッティング式から核燃海域における表層海水のトリチウムの実効半減期を求めたところ、 8.2 ± 0.53 年と計算された。このため、表層海水がトリチウムの放射能濃度の低い海水との混合などによりトリチウムの物理半減期よりも早く減少していることが示唆される。今後、得られた大気からの付加について降水や陸水のデータから海洋への付加を想定し、計算によって得られた付加の値の整合性を確認する必要があると考えられる。

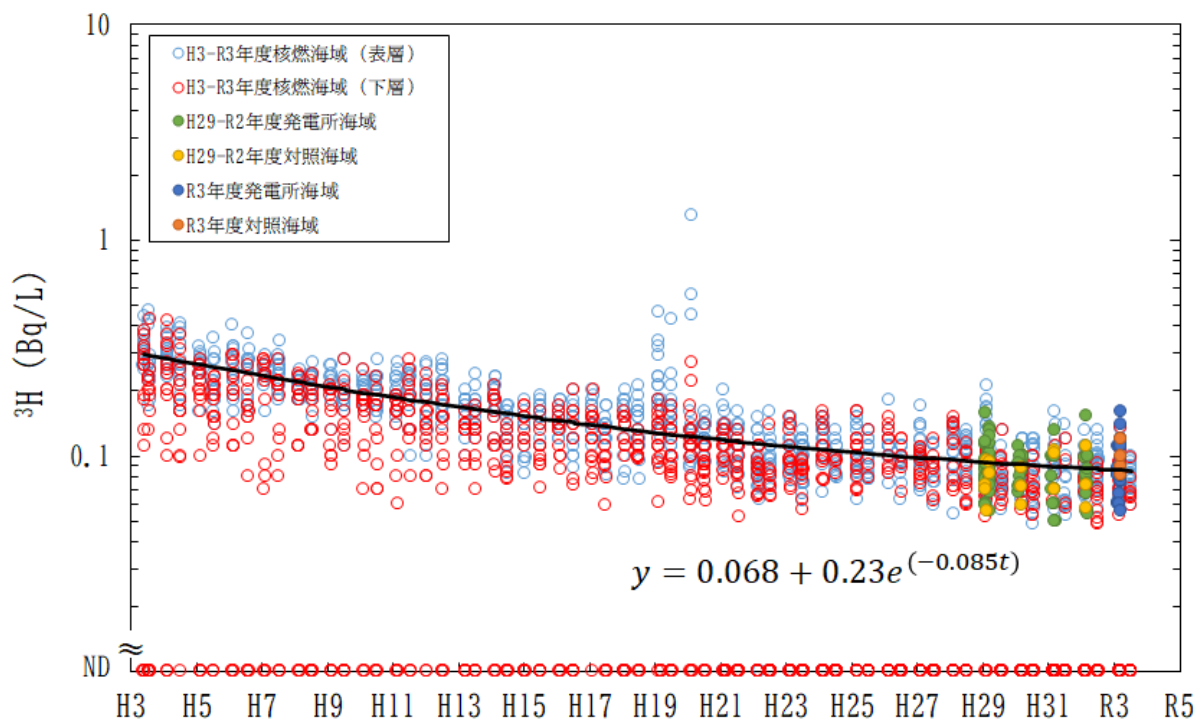


図 I-2-2-4-3 海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度の経年変化（ND は検出下限値以下を示す。また、回帰曲線の時間（t）の単位は年（year）である。）

④ 海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度

表 I-2-2-4-2 に分析結果を示す。TFWT の放射能濃度は 0.052～0.19Bq/L-水（0.036～0.14Bq/kg-生鮮物）の範囲にあり、平均値±標準偏差は 0.091±0.031Bq/L-水（0.068±0.022Bq/kg-生鮮物）であった。平成 18～20 年度にはアクティブ試験の影響が一時的に確認された（平成 18～20 年度当該事業の調査報告書記載）が、平成 21 年度以降は確認されなくなり、東電福島第一原発事故前の平成 21～22 年度の調査で核燃海域において採取した海産生物に含まれる TFWT の放射能濃度は ND～0.23Bq/L-水（ND～0.17Bq/L-生鮮物）であり、平均値±標準偏差は 0.13±0.034Bq/L-水であった。なお、令和 3 年度に実施した調査のうち、15 海域で収集した海産生物の TFWT の測定値は、これらと同程度の放射能濃度であった。

全 OBT 及び非交換型 OBT は全て検出下限値以下であり、平成 24～令和 2 年度に引き続き、海産生物の有機成分中に見出すことはなかった。そのため全 OBT の放射能濃度と非交換型 OBT の放射能濃度の比較分析についてその差異を考察することはできなかった。TFWT や海水の検出下限値に比べ一桁高いことから、OBT が検出されなかったことに関して評価をすることは難しいが、平常時は TFWT に比べて OBT が一桁以上濃縮されてはいないことが確認された。

図 I-2-2-4-4 に海産生物試料の TFWT の結果と核燃海域の海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度を示す。アクティブ試験時には、一部の海産生物試料において、海水の数倍から 10 倍程度高い TFWT が確認された。海産生物の漁獲日とアクティブ試験によるトリチウム放出日を確認したところ、漁獲日 5 日前から当日の間に $10^{12} \sim 10^{13}$ Bq 程度のトリチウムが放出されていることが確認できた。このため、アクティブ試験によって放出された比較的高いトリチウムの放射能濃度を含む海水に棲息していた海産生物を漁獲したこと、もしくは比較的高いトリチウム放射能濃度の海水にさらされた後に、放射能濃度の低い海水に移動するなどによって、TFWT が下がりきるよりも前に漁獲されたことが考えられる。

Blaylock and Frank⁵⁾は、淡水魚の TFWT の放射能濃度 (Bq/L) は環境水に含まれるトリチウムの放射能濃度 (Bq/L) に速やかに追従して変化すると報告しており、海産生物についても同様の関係が成り立つと考えられる。EMRAS Tritium/C14 Working Group⁶⁾によると、ムール貝の淡水域での TFWT の取り込みは数時間で水中のトリチウムの放射能濃度と平衡になることが報告されている。

本調査においても、平成 21 年度以降、海水において高濃度のトリチウムは確認されておらず、海産生物についてもそれを追従するように高い TFWT は確認されていない。平常時は海産生物の TFWT は海水に含まれるトリチウムの放射能濃度と同程度であり、海水のトリチウムの変動を反映していることが確認された。

表 I-2-2-4-2 海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能分析結果

海域	試料	漁獲日	漁獲場所	個 体 数 *1	トリチウムの放射能濃度			
					TFWT		全 OBT	非交換 型 OBT
					上段は (Bq/L-水) 下段は (Bq/kg-生鮮物) *2		上段は (Bq/L-燃焼水) 下段は (Bq/kg-生鮮物) *2	
北海道	ソウハチ	令和3年 6月7日	岩内沖	91	0.10 ± 0.011*3	—*4		
					0.078 ± 0.0081			
核燃	ミズダコ	令和3年 4月9日	尻屋沖	3	0.081 ± 0.0090	ND*3	ND	
					0.067 ± 0.0075	ND	ND	
	ヒラメ	令和3年 7月1日	三沢沖	46	0.069 ± 0.010	ND	ND	
					0.053 ± 0.0079	ND	ND	
青森	アイナメ	令和3年 4月24日	白糠沖	39	0.080 ± 0.0092	ND	ND	
					0.062 ± 0.0071	ND	ND	
	ホッケ	令和3年 4月21日	東通村 小田野沢沖	64	0.097 ± 0.0094	ND	ND	
					0.070 ± 0.0067	ND	ND	
宮城	マダラ	令和3年 4月12日	女川沖	7	0.083 ± 0.010	ND	ND	
					0.066 ± 0.0082	ND	ND	
	アイナメ	令和2年 4月21日	石巻沖	25	0.12 ± 0.011	ND	ND	
					0.090 ± 0.0082	ND	ND	
福島 第一	ソウハチ	令和3年 4月25日	相馬市沖	57	0.084 ± 0.0082	ND	ND	
					0.066 ± 0.0065	ND	ND	
	ババガレイ	令和3年 4月25日	相馬市沖	69	0.076 ± 0.0082	ND	ND	
					0.061 ± 0.0066	ND	ND	
福島 第二	マアナゴ	令和3年 5月13日	久ノ浜沖	57	0.082 ± 0.010	ND	ND	
					0.057 ± 0.0070	ND	ND	
	マガレイ	令和3年 5月13日	広野沖	94	0.080 ± 0.010	ND	ND	
					0.063 ± 0.0080	ND	ND	
茨城	カナガシラ	令和3年 4月7日	日立市沖	213	0.079 ± 0.0091	ND	ND	
					0.061 ± 0.0070	ND	ND	
	ヤナギダコ	令和3年 4月8日	日立市沖	23	0.055 ± 0.0083	ND	ND	
					0.046 ± 0.0069	ND	ND	

(続く)

表 I-2-2-4-2 海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能分析結果 (続き)

海域	試料	漁獲日	漁獲場所	個 体 数 *1	トリチウムの放射能濃度			
					TFWT		全 OBT	非交換 型 OBT
					上段は (Bq/L-水) 下段は (Bq/kg-生鮮物) *2		上段は (Bq/L-燃焼水) 下段は (Bq/kg-生鮮物) *2	
静岡	ニベ	令和 3 年 6 月 4 日	御前崎 ～相良沖	68	0.064 ± 0.010	—		
					0.047 ± 0.0077			
新潟	ホッケ	令和 3 年 4 月 12 日	出雲崎沖	58	0.086 ± 0.011	—		
					0.061 ± 0.0078			
石川	ニギス	令和 3 年 4 月 8 日	西海港沖	236	0.085 ± 0.011	—		
					0.061 ± 0.0076			
福井 第一	アカガレイ	令和 3 年 4 月 12 日	越前岬沖	71	0.076 ± 0.011	—		
					0.056 ± 0.0079			
島根	ヒラメ	令和 3 年 5 月 31 日	恵曇沖～ 島根半島沖	21	0.13 ± 0.016	—		
					0.094 ± 0.012			
愛媛	ハモ	令和 3 年 8 月 11 日	伊方原発沖	40	0.19 ± 0.012	—		
					0.14 ± 0.0085			
佐賀	メジナ	令和 3 年 5 月 7 日	玄海灘	41	0.052 ± 0.011	—		
					0.036 ± 0.0077			
鹿児島	チダイ	令和 3 年 4 月 21 日	川内沖	115	0.13 ± 0.012	—		
					0.090 ± 0.0083			

*1 個体数については海産生物の放射能分析全てに必要な試料量を確保するための個体数を示す。本調査では、良く混合した全量から生鮮重量で約 1 kg 程度を分取して分析を行った。

*2 海産生物によるトリチウムの取り込みは、水 ($^3\text{H}^1\text{H}_2\text{O}$ の化学形) として海水から吸収され、体内で水の代謝によって有機物へ移行するため、その放射能濃度を比較評価するために、 ^1H に対する比 ($^1\text{H}_2\text{O}$ あたり) とした放射能濃度に統一して評価するのが適している。したがって放射能濃度の表示単位として、Bq/kg-生鮮物で表したもののほか、 $^1\text{H}_2\text{O}$ との比とした放射能濃度にほぼ等しい Bq/L-水及び Bq/L-燃焼水によっても示した。

*3 誤差は計数誤差を示す。なお、令和 3 年度に調査した海産生物試料 (全 21 試料) の分析・測定で得られた検出下限値の範囲は、TFWT で 0.023~0.046Bq/L-水及び 0.018~0.033Bq/kg-生鮮物、全 OBT で 0.23~0.28Bq/L-燃焼水及び 0.027~0.062Bq/kg-生鮮物、非交換型 OBT で 0.22~0.28Bq/L-燃焼水及び 0.027~0.062Bq/kg-生鮮物であった。

*4 「—」は分析対象外を示す。

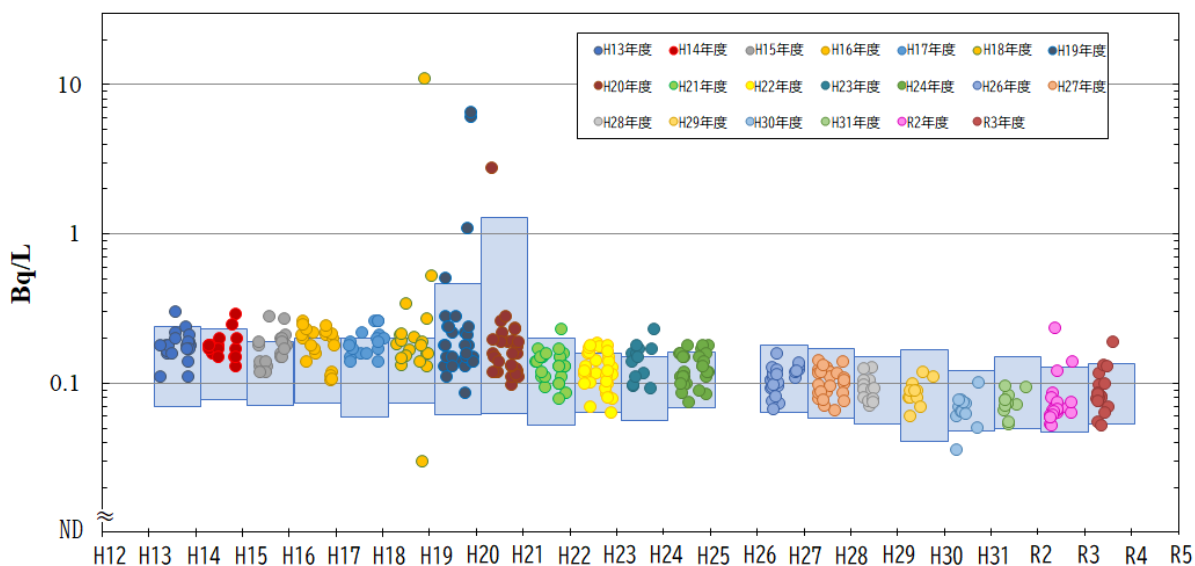


図 I-2-2-4-4 海産生物試料の TFWT の放射能濃度の経年変化 (ND は検出下限値以下を示す。また、図中の青色の範囲は各年度の核燃海域における海水試料のトリチウムの放射能濃度の範囲を示す。)

⑤ まとめ

発電所海域及び対照海域で採取した海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度と海産生物試料に含まれる TFWT の放射能濃度を比較すると、令和 3 年度に採取したこれら試料に含まれるトリチウムは令和 2 年度と同水準の放射能濃度であり、バックグラウンドレベルであることが分かった。

海産生物はその体内代謝に伴う水の取り込み速度が比較的速度いため、TFWT の放射能濃度は海水に含まれるトリチウムの放射能濃度に追従して変化し、併せて交換型 OBT も TFWT の放射能濃度の影響を受けてやや遅れて追従する。しかし、非交換型 OBT については体内代謝でトリチウムが内部に取り込まれるまで比較的時間を要するため、放射能濃度の追従は遅れることが多い。従って試料に含まれる TFWT の放射能濃度と全 OBT の放射能濃度が高い場合でも、非交換型 OBT の放射能濃度は高くない場合がある。とりわけ、海産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度を比較対照として海水に含まれるトリチウムのバックグラウンドを評価する場合には、継続した調査も必要であるが、併せてこれらの生物学的な事項に留意する必要がある。

引用文献

- 1) 放射能測定法シリーズ9「トリチウム分析法」(平成15年改訂)。
- 2) Pointurier, F., Baglan, N., Alanic, G. and Chiappini, R. (2003). Determination of organically bound tritium background level in biological samples from a wide area in the south-west of France. *Journal of Environmental Radioactivity*, **68**, 171-189.
- 3) Pointurier, F., Baglan, N. and Alanic, G. (2004). A method for the determination of low-level organic-bound tritium activities in environmental samples. *Applied Radiation and Isotopes*, **61**, 293-298.
- 4) Vichot, L., Boyer, C., Boissieux, T., Losset, Y. and Pierrat, D. (2008). Organically bound tritium (OBT) for various plants in the vicinity of a continuous atmospheric tritium release. *Journal of Environmental Radioactivity*, **99**, 1636-1643.
- 5) Blaylock, B. G. and Frank, M. L. (1978). Distribution of tritium in a chronically contaminated lake (No. IAEA-SM-232-74). Oak Ridge National Laboratory.
- 6) EMRAS Tritium/C14 Working Group. (2008). THE MUSSEL UPTAKE SCENARIO, Inter-model Comparison of Tritium Concentrations in Freshwater Barnes Mussels (*Elliptio complanata*) Following an Abrupt Increase in Ambient Tritium Exposure Conditions. Final Report, IAEA.
<https://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/emras/tritium/mussel-uptake-final.pdf> (令和4年3月閲覧)

3) 海洋環境関連調査報告書等の収集・整理

(1) はじめに

原子力発電所立地県及び核燃料（原子燃料）サイクル施設立地県は原子力施設等周辺放射線監視事業を実施し、その結果を公表している^{1~15)}。同様に、海上保安庁海洋情報部¹⁶⁾（以下、「海上保安庁」という。）、農林水産省農林水産技術会議事務局¹⁷⁾（以下、「農水省」という。）及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構¹⁸⁾（以下、「原子力機構」という。）は、日本近海の海水、海底土及び海産生物に関する放射能調査を実施、公表している（以下、上記全ての機関を総称し「自治体等機関」という。）。

令和2年度に実施、公表された自治体等機関の調査結果より、海産生物、海底土及び海水に含まれる放射性核種の放射能濃度分析値を集計するとともに、海産生物、海底土及び海水試料に含まれる放射性核種の放射能分析の結果について、令和2年度の本事業において実施された海洋放射能調査結果（以下、「本調査」という。）と比較し、評価するための資料として整理した。また、調査結果公表の時期により、農水省及び原子力機構の2機関は令和元年度の調査結果を比較の対象とした。

なお、各資料から集計した結果のうち、検出下限値については記載がない場合や誤差の3倍などのように一律ではないため、これらの集計結果については、各資料から読み取った数値をもとに記載した。

(2) 海洋放射能調査結果と自治体等機関の調査結果の比較

本調査及び本項で集計した結果より、令和2年度の放射性核種の放射能濃度範囲を、表I-2-3-2-1~3に示し、自治体等機関と本事業の調査結果の比較を行った。

(海産生物試料)

海産生物試料を調査対象としている機関は13道県、農水省及び原子力機構である（表I-2-3-2-1）。

^{90}Sr は12道県及び原子力機構が調査しており、その放射能濃度はND(検出下限値以下)~0.15Bq/kg-生鮮物の範囲であった。本調査で得られた ^{90}Sr の放射能濃度はND~0.0083Bq/kg-生鮮物であり、自治体等の調査結果の範囲内であった。

放射性セシウムのうち、 ^{134}Cs は、12道県、農水省及び原子力機構が調査しており、最大値0.065Bq/kg-生鮮物は福島県沖のコンゴウアナゴであった。本調査では福島第一及び福島第二海域で採取した3試料（コモンカスベ、スズキ及びマガレイ）から ^{134}Cs が検出され、その放射能濃度は0.038~0.059Bq/kg-生鮮物の範囲にあった。

^{137}Cs は、13道県、農水省及び原子力機構が調査しており、ND~21.4Bq/kg-生鮮物の範囲

にあった。福島県や茨城県において高めの傾向はみられるものの、福島県で調査した 3,737 検体のうち ^{137}Cs が検出されたのは 5 検体であり、検出率は 0.13% に留まっていた。本調査で得られた ^{137}Cs の放射能濃度範囲は ND~0.92Bq/kg-生鮮物（最大値：福島第二海域、コモンカスベ）にあり、自治体等機関の調査結果の濃度範囲内であった。

$^{239+240}\text{Pu}$ は、青森県、茨城県、福井県、愛媛県の 4 県と原子力機構が調査しており、その放射能濃度は ND~0.014Bq/kg-生鮮物の範囲にあった。一方、本調査の $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度範囲は ND~0.00057Bq/kg-生鮮物にあり、自治体等機関の調査結果の放射能濃度範囲内であった。

表 I-2-3-2-1 令和 2 年度 道県原子力発電所周辺環境放射能調査結果等による放射性核種の放射能濃度範囲（海産生物試料）（一部、令和元年度の結果を含む）

自治体	年度	^{134}Cs (Bq/kg-生鮮物)		^{137}Cs (Bq/kg-生鮮物)		^{90}Sr (Bq/kg-生鮮物)		$^{239+240}\text{Pu}$ (Bq/kg-生鮮物)		総検体数
		検体数	最小 ~ 最大	検体数	最小 ~ 最大	検体数	最小 ~ 最大	検体数	最小 ~ 最大	
北海道	R2	73	ND*1	73	ND ~ 0.13	19	ND		—*2	73
青森県	R2	31	ND	31	ND	31	ND	18	ND ~ 0.012	31
宮城県	R2	18	ND	18	ND ~ 0.53	9	ND		—	18
宮城県 (指標海産生物)	R2	28	ND	28	ND ~ 0.17	5	ND ~ 0.046		—	28
福島県	R2	3,737	ND	3,737	ND ~ 21.4		—		—	3,737
茨城県	R2	20	ND	64	ND ~ 0.94	64	ND	48	ND ~ 0.0041	64
静岡県	R2	26	ND	26	ND ~ 0.16	14	ND		—	26
新潟県	R2	10	ND	10	ND ~ 0.15	5	ND ~ 0.0089		—	10
新潟県 (指標海産生物)	R2	20	ND	20	ND ~ 0.081	5	0.020 ~ 0.039		—	20
石川県	R2	51	ND	51	ND	14	ND		—	51
福井県	R2	114	ND	114	ND ~ 0.3	11	ND ~ 0.047	6	0.0073 ~ 0.010	114
島根県	R2	44	ND	44	ND ~ 0.08	5	ND ~ 0.15		—	44
愛媛県	R2	42	ND	42	ND ~ 0.13	4	ND ~ 0.068	3	ND ~ 0.014	42
佐賀県	R2	19	ND	19	ND ~ 0.14	8	ND ~ 0.052		—	19
鹿児島県	R2		—	20	ND ~ 0.10	12	ND ~ 0.03		—	20
農林水産省	R1	275	ND ~ 0.065	275	ND ~ 0.9		—		—	275
日本原子力 研究開発機構	R1	33	ND	33	ND ~ 0.57	33	ND ~ 0.022	33	ND ~ 0.0034	33
海洋放射能調査	R2	120	ND ~ 0.059	120	ND ~ 0.92	30	ND ~ 0.0083	30	ND ~ 0.00057	120

*1 ND は検出下限値以下を示す。

*2 分析対象外核種について「—」で示した。

(海底土試料)

海底土試料を調査対象としている機関は 13 道県、海上保安庁、農水省及び原子力機構である (表 I-2-3-2-2)。

^{90}Sr は、9 道県、海上保安庁、農水省及び原子力機構が調査しており、その放射能濃度は ND~9.6Bq/kg-乾燥土の範囲にあり、福島県で最大値が確認された。本調査では核燃海域において海底土試料に含まれる ^{90}Sr を分析しており、その放射能濃度は ND~0.30Bq/kg-乾燥土の範囲にあり、自治体等機関の調査結果の範囲内であった。

放射性セシウムのうち、 ^{134}Cs は 12 道県、海上保安庁、農水省及び原子力機構が、 ^{137}Cs は 13 道県、海上保安庁、農水省及び原子力機構が調査している。 ^{134}Cs 及びの ^{137}Cs の放射能濃度は、それぞれ ND~18Bq/kg-乾燥土、ND~350Bq/kg-乾燥土の範囲にあり、ともに福島県で最大値を示した。また、茨城県においても ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度が高い傾向が見られた。

本調査で得られた結果では、 ^{134}Cs の放射能濃度は ND~2.5Bq/kg-乾燥土、 ^{137}Cs の放射能濃度は ND~42Bq/kg-乾燥土の範囲にあり、自治体等機関の調査結果の範囲内であった。

$^{239+240}\text{Pu}$ は、6 県、海上保安庁、農水省及び原子力機構が調査しており、その放射能濃度は 0.079~5.0Bq/kg-乾燥土の範囲で、最大値は農水省調査の相模湾 (水深 948m) で確認された。本調査で得られた $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は 0.30~4.8Bq/kg-乾燥土の範囲にあり、自治体等機関の $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度範囲内であった。なお、海底土に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は採取した水深が深いほど濃度が高くなる傾向があることが報告されている¹⁹⁾。本調査の最大値 (4.8Bq/kg-乾燥土) が得られた試料は、水深 948m から採取された試料であり、農水省調査で得られた $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の最高値 (5.0Bq/kg-乾燥土) が確認された試料が採取された水深と同程度の値であった。

表 I-2-3-2-2 令和 2 年度 道県原子力発電所周辺環境放射能調査結果等による放射性核種の放射能濃度範囲（海底土試料）（一部、令和元年度の結果を含む）

自治体	年度	¹³⁴ Cs (Bq/kg-乾燥土)		¹³⁷ Cs (Bq/kg-乾燥土)		⁹⁰ Sr (Bq/kg-乾燥土)		²³⁹⁺²⁴⁰ Pu (Bq/kg-乾燥土)		総検体数
		検体数	最小 ~ 最大	検体数	最小 ~ 最大	検体数	最小 ~ 最大	検体数	最小 ~ 最大	
北海道	R2	12	ND*1	12	ND	4	ND	—*2		12
青森県	R2	9	ND	9	ND	4	ND	7	0.23 ~ 0.51	9
宮城県	R2	13	ND ~ 0.8	13	ND ~ 16.9	1	ND	—		13
福島県	R2	49	ND ~ 18	49	5.5 ~ 350	31	ND ~ 9.6	27	0.15 ~ 0.50	49
茨城県	R2	42	ND ~ 3.0	42	1.3 ~ 59	26	ND	20	0.21 ~ 1.3	42
静岡県	R2	80	ND	80	ND ~ 2.1	—		—		80
新潟県	R2	14	ND	14	ND	—		4	0.079 ~ 0.15	14
石川県	R2	19	ND	19	ND	16	ND	—		19
福井県	R2	92	ND	92	ND ~ 7.0	—		5	0.032 ~ 1.4	92
島根県	R2	3	ND	3	ND	—		—		3
愛媛県	R2	8	ND	8	ND ~ 0.80	2	ND ~ 0.33	2	0.29 ~ 0.36	8
佐賀県	R2	12	ND	12	ND	8	ND	—		12
鹿児島県	R2	—		8	ND ~ 0.8	4	ND	—		8
海上保安庁	R2	11	ND ~ 2.3	11	0.72 ~ 47	11	0.026 ~ 0.32	2	0.52 ~ 0.67	11
農林水産省	R1	200	ND	200	ND ~ 68	26	ND ~ 1.0	26	0.087 ~ 5.0	200
日本原子力 研究開発機構	R1	8	ND ~ 1.4	8	2.1 ~ 18	8	ND	8	0.28 ~ 0.62	8
海洋放射能調査	R2	82	ND ~ 2.5	82	ND ~ 42	22	ND ~ 0.30	22	0.30 ~ 4.8	82

*1 ND は検出下限値以下を示す。

*2 分析対象外核種について「—」で示した。

（海水試料）

海水試料を調査対象としている機関は 13 道県、海上保安庁及び原子力機構である（表 I-2-3-2-3）。

トリチウムは、13 道県及び原子力機構が調査しており、その放射能濃度は ND~11Bq/L の範囲にあり、最大値は福井県で確認された。本調査では核燃海域においてトリチウムを分析対象としており、その放射能濃度は ND~0.13Bq/L の範囲にあり、自治体等機関の調査結果の放射能濃度範囲内であった。

⁹⁰Sr は、10 道県、海上保安庁及び原子力機構が調査しており、その放射能濃度は福島県以外が ND~2.2mBq/L の範囲、福島県が ND~7.2mBq/L の範囲にあった。本調査で得られた

^{90}Sr の放射能濃度は ND~0.97mBq/L の範囲にあり、福島県以外の自治体等機関の調査結果と同程度の値であった。

放射性セシウムのうち、 ^{134}Cs は 12 道県、海上保安庁及び原子力機構が、 ^{137}Cs は 13 道県、海上保安庁及び原子力機構が調査している。 ^{134}Cs は福島県以外では検出されず、福島県では ND~22mBq/L の範囲にあった。また、 ^{137}Cs の放射能濃度は福島県以外において ND~7.9mBq/L、福島県では ND~450mBq/L の範囲にあった。本調査では ^{134}Cs は検出されず、 ^{137}Cs の放射能濃度は ND~3.1mBq/L の範囲にあり、福島県以外の自治体等機関の調査結果と同程度の値であった。

$^{239+240}\text{Pu}$ は青森県、福島県、愛媛県、海上保安庁及び原子力機構が調査しており、その放射能濃度は ND~0.042mBq/L の範囲にあった。本調査で得られた $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は ND~0.027mBq/L の範囲にあり、自治体等機関の調査結果の範囲内であった。

表 I-2-3-2-3 令和 2 年度 道県原子力発電所周辺環境放射能調査結果等による放射性核種濃度範囲（海水試料）（一部、令和元年度の結果を含む）

自治体	年度	^{134}Cs (mBq/L)		^{137}Cs (mBq/L)		^{90}Sr (mBq/L)		$^{239+240}\text{Pu}$ (mBq/L)		トリチウム (Bq/L)		総検体数
		検体数	最小値 ~ 最大値	検体数	最小値 ~ 最大値	検体数	最小値 ~ 最大値	検体数	最小値 ~ 最大値	検体数	最小値 ~ 最大値	
北海道	R2	32	ND*1	32	ND ~ 2.2	4	ND		-*2	32	ND	32
青森	R2	32	ND	32	ND	18	ND	18	ND	32	ND	32
宮城県	R2	25	ND	25	ND ~ 2.4	1	2.2		-	7	ND	25
福島県	R2	105	ND ~ 22	105	2 ~ 450	81	ND ~ 7.2	75	ND ~ 0.018	105	ND ~ 2.2	105
茨城県	R2	6	ND	54	ND ~ 4.8	26	ND		-	156	ND	156
静岡県	R2	80	ND	80	ND ~ 3.7		-		-	4	ND ~ 0.47	80
新潟県	R2	18	ND	18	ND ~ 2.9	1	1.2		-	18	ND ~ 0.45	18
石川県	R2	19	ND	19	ND ~ 2.0		-		-	19	ND	19
福井県	R2	54	ND	54	ND ~ 2.3		-		-	88	ND ~ 11	92
島根県	R2	16	ND	16	1.4 ~ 2.3	1	1.5		-	14	ND	16
愛媛県	R2	10	ND	10	ND ~ 2.3	2	1.3 ~ 1.4	2	0.0036 ~ 0.0051	10	ND ~ 1.0	10
佐賀県	R2	20	ND	20	ND ~ 2.4	8	0.77 ~ 1.3		-	12	ND ~ 1.9	20
鹿児島県	R2		-	12	ND ~ 1.8	4	ND ~ 1.2		-	8	ND	12
海上保安庁	R2	35	ND	35	0.60 ~ 2.5	35	0.28 ~ 0.85	8	ND ~ 0.042		-	35
日本原子力 研究開発機構	R1	6	ND	6	ND ~ 7.9	6	ND	6	ND	17	ND	17
海洋放射能調査	R2	208	ND	208	ND ~ 3.1	208	ND ~ 0.97	88	ND ~ 0.027	88	ND ~ 0.13	208

*1 ND は検出下限値以下を示す。

*2 分析対象外核種について「-」で示した。

(3) まとめ

本項では、原子力発電所立地道県及び核燃料サイクル施設立地県における原子力施設等周辺放射線監視事業の結果と、本事業において実施された海洋放射能調査結果を比較して評価するための資料として整理した。東電福島第一原発事故後は、福島県、茨城県及び宮城県において、それ以外の道県とで海洋環境試料に含まれる放射性核種の放射能濃度に差が見られた。この傾向は、本調査で得られた結果と同じであった。このことから、自治体等機関における結果を対照することで、自治体等機関の結果と本調査の測定値は整合することが明らかになった。

引用文献

- 1) 北海道. 泊発電所周辺環境放射線監視結果報告書：環境放射線. 令和2年度第1四半期～第4四半期.
- 2) 青森県. 原子力施設環境放射線調査報告書（令和2年度報）.
- 3) 青森県. 原子力施設環境放射線調査報告書 データ集(令和2年度報)
(https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kikikanri/atom/files/houkokusho_R2.pdf)
- 4) 宮城県. 令和2年度 女川原子力発電所環境放射能調査結果. 令和2年度第1四半期～第4四半期.
(<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/gentai/kankyo-onhaisui.html>)
- 5) 福島県. 令和2年度 原子力発電所周辺環境放射能測定結果報告書.
(<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/483849.pdf>)
- 6) 福島県. 福島県ホームページ> 水・食品等の放射性物質検査> 農林水産物> 農林水産物の緊急環境放射線モニタリング結果【詳細】
(<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/mon-kekka.html>)
- 7) 茨城県. 環境放射線監視季報. 第188報(令和元年度第1四半期)～第191報(令和元年度第4四半期).
- 8) 静岡県. 浜岡原子力発電所周辺環境放射能調査結果. 第189号(調査期間 令和2年4月～令和3年3月).
- 9) 新潟県. 令和2年度 柏崎刈羽原子力発電所周辺環境放射線監視調査結果報告書.
- 10) 石川県. 志賀原子力発電所周辺環境放射線監視結果報告書. 令和2年度年報.
- 11) 福井県. 原子力発電所周辺の環境放射能調査. 2020年度年報(令和2年).
- 12) 島根県. 令和2年度 島根原子力発電所周辺環境放射線等調査結果.
- 13) 愛媛県. 令和2年度 伊方原子力発電所周辺環境放射線等調査結果.
- 14) 佐賀県. 玄海原子力発電所の運転状況及び周辺環境調査結果(年報)(令和2年度).
- 15) 鹿児島県. 川内原子力発電所周辺環境放射線調査結果報告書(令和2年度 年報).
- 16) 海上保安庁海洋情報部. 放射能調査報告書. 令和2年調査結果.

- 17) 農林水産省. 令和元年度農林水産省関係放射能調査研究年報 C水産関係.
- 18) 日本原子力研究開発機構. 東海再処理施設周辺の環境放射線モニタリング結果-2019年度-.
- 19) Oikawa, S., Watabe, T. and Takata, H. (2015). Distributions of Pu isotopes in seawater and bottom sediments in the coast of the Japanese archipelago before and soon after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **142**, 113-123.