

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

令和 2 年 3 月

公益財団法人海洋生物環境研究所

(このページは空白ページです)

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サイクル施設（現 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株式会社（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における海洋放射能モニタリングが宮城県、福島県及び茨城県の太平洋側を中心とした海域で開始された。

本事業の所管官庁としては、昭和 58 年度当初（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が、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委託事業として継続的に実施されているところである。

平成 31 年度（5 月 1 日付けで「令和」に改元）は平成 30 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「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」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

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、これら試料に含まれる放射性核種の放射能濃度を調査するとともに、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、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に含まれる放射性核種の放射能濃度について、その現状を把握し、併せてそれ

らの推移を把握するための調査を実施した。

調査結果の評価では、調査の実施、結果の解析・評価に当たり、環境放射能の専門家等からなる「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にそれぞれ地方自治体や漁業関係団体などの関係機関を訪問し、それらの説明を行うとともに、中間とりまとめとして主に前期までの結果を取りまとめた資料を送付した。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布を実施した。

本事業で得られた関連試料の保管・管理では、前年度までの同調査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。

この調査報告書は、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、その成果を取りまとめたものである。

本業務の実施に当たりご指導、ご助言を賜った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、多大な協力を賜った地方自治体や漁業関係団体などに深く感謝いたします。

令和2年3月

公益財団法人海洋生物環境研究所

理事長 香川 謙二

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	16
(4) 検出下限値	16
(5) 減衰補正	16
5) 分析結果	20
(1) 海産生物試料の分析結果	20
(2) 海底土試料の分析結果	27
(3) 海水試料の分析結果	30
6) 海洋環境試料中の放射性核種濃度レベルの経年変化	38
(1) 発電所海域における経年変化	38
(2) 核燃海域における経年変化	45
7) 海産生物試料の代替について	88
(1) 背景	88
(2) これまでの代替実績	89
(3) 代替によるモニタリング結果への影響	90
2. 解析調査	93
1) 対照海域放射能調査	93
(1) 対照海域における海水・海底土試料の放射能調査	93
(2) 対照海域における海産生物試料の放射能調査	120
2) 変動要因・移行挙動調査	130
(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	130
(2) 海水及び海産生物の ^{129}I 濃度	139

(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	157
(4) 原子力発電所等周辺海域における海水及び海産生物のトリ チウム濃度調査	221
3) 海洋環境関連調査報告書等の収集・整理	230
(1) はじめに	230
(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	230
(3) まとめ	235
【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	237
1. はじめに	237
2. モニタリング方法	237
1) 調査経過	237
2) 調査試料の採取	237
(1) 近傍・沿岸海域	237
(2) 沖合海域	237
(3) 外洋海域	238
3) 放射性核種の分析	242
3. モニタリング結果	245
1) 海水試料	245
(1) 近傍・沿岸海域	245
(2) 沖合海域	248
(3) 外洋海域	254
(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	257
2) 海底土試料	261
4. まとめ	266
【Ⅲ】調査結果の評価	269
【Ⅳ】調査結果等の報告・説明	273
1. 報告資料の印刷	273

2. 関係機関・団体等への調査結果の報告・配布	273
【V】本事業で得られた関連試料の保管・管理	275
資料編	277
【I】海洋放射能調査	
資料 1-1 平成 31（令和元）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	278
資料 1-2 平成 31（令和元）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	293
資料 2-1 平成 31（令和元）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	301
資料 2-2 平成 31（令和元）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	316
資料 3-1 平成 31（令和元）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	322
資料 3-2 平成 31（令和元）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	337
資料 4-1 平成 31（令和元）年度 解析調査 海底土の性状	359
（参考資料）平成 21 年度から平成 31（令和元）年度までの調査における海産生物試料の代替実績	367
【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 海水中の放射性核種濃度 近傍・沿岸海域	376
資料 5-1-2 海水中の放射性核種濃度 沖合海域	379
資料 5-1-3 海水中の放射性核種濃度 外洋海域	392
資料 5-2-1 海底土中の放射性核種濃度 沖合海域	396
資料 5-2-2 海底土中の放射性核種濃度（ α 線放出核種） 沖合海域	400
資料 5-2-3 海底土の色・質・生物種等	401

(このページは空白ページです)

【 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において、海産生物、海底土及び海水試料を採取し、それら試料に含まれる放射性核種の放射能調査を実施し、海洋中の放射性核種（放射能）の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。

一連の調査計画や結果については、本事業内に関係分野を専門とする第三者で構成する「海洋放射能検討委員会」を設け、技術的・専門的立場からの指導・助言を得ながらとりまとめ等を行うこととした。

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、特に次の事項に注意して選定した（仕様書指示による）。

- ・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、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、漁獲した月日と場所を確認しつつ、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について年2回（概ね、前期（4月～9月）；後期（10月～1月））の調査を実施した。平成31（令和元）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、発電所海域については各海域に4測点、核燃海域については22測点を次の事項に注意して図I-1-3-1から図I-1-3-14に示すとおり設定した。

- ・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）を用いることとした。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^{※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機器による確認を行った。

海底土試料は、令和元年5月10日から6月24日（核燃海域では令和元年6月3日から6月26日）にかけて、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（例えばスペード型採泥器等）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、泥質等の目視観測を同時に行い、ビニール袋に入れたのち、プラスチック製容器（いわゆるタッパー）に収納し、冷凍保管とした。

海水試料は、発電所海域では令和元年5月10日から6月24日にかけて、それぞれの海域に設定した測点（海底土を採取した測点と同じ）で年1回、核燃海域では令和元年6月3日から6月26日及び令和元年10月10日から10月22日にかけて年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、大型バンドン採水器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

※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。

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ン採水器(120L×3連)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のプラスチック製容器(ロンテナ)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 調査の対象とした海域(核燃料(原子燃料)サイクル施設沖合海域は、ここでは「核燃料サイクル施設沖合海域」と称した)

※1 水素の放射性同位体の一つである³Hのことで、「三重水素」または「トリチウム」の複数名称が存在し、一般に「トリチウム」として知られている。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	第 1 回収集試料	第 2 回収集試料
	漁獲期間： 平成 31 年 4 月 1 日 ～令和元年 9 月 5 日	漁獲期間： 令和元年 10 月 1 日 ～令和 2 年 1 月 15 日
北海道	ホッケ、ソウハチ、ミズダコ	ホッケ、ヒラメ、スケトウダラ
青森	クロソイ、アイナメ、ヒラメ	ヒラメ、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	マガレイ、ババガレイ、イシガレイ	エゾイソアイナメ、マダラ、ヤナギダコ
福島第二	マダラ、マガレイ、ヤナギダコ	マダラ、マガレイ、マダコ
茨城	ヒラメ、ムシガレイ、ヤナギダコ	ヒラメ、ムシガレイ、ヤナギダコ
静岡	マゴチ、ニベ、シタビラメ類	マゴチ、ニベ、シタビラメ類
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	ソウハチ、アカガレイ、スルメイカ
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、ムシガレイ
愛媛	カナガシラ類、コウイカ、エビ類	カナガシラ類、コウイカ、シログチ
佐賀	スズキ、マダイ、メジナ	スズキ、マダイ、メジナ
鹿児島	チダイ、カイワリ、アカエイ	チダイ、ヘダイ、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）

第 1 回収集試料	第 2 回収集試料
漁獲期間： 平成 31 年 4 月 7 日 ～令和元年 9 月 30 日	漁獲期間： 令和元年 10 月 9 日 ～12 月 25 日
ミズダコ、ヒラメ（2 試料）、 スルメイカ（2 試料）、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、マイワシ、 ウスメバル、イカナゴ、 アイナメ	ミズダコ、ヒラメ、 スルメイカ（2 試料）、 シロザケ（雌）（2 試料）、 シロザケ（雄）（2 試料）、 マサバ、マダラ（2 試料）、 スケトウダラ、カタクチイワシ、 キアンコウ、サンマ

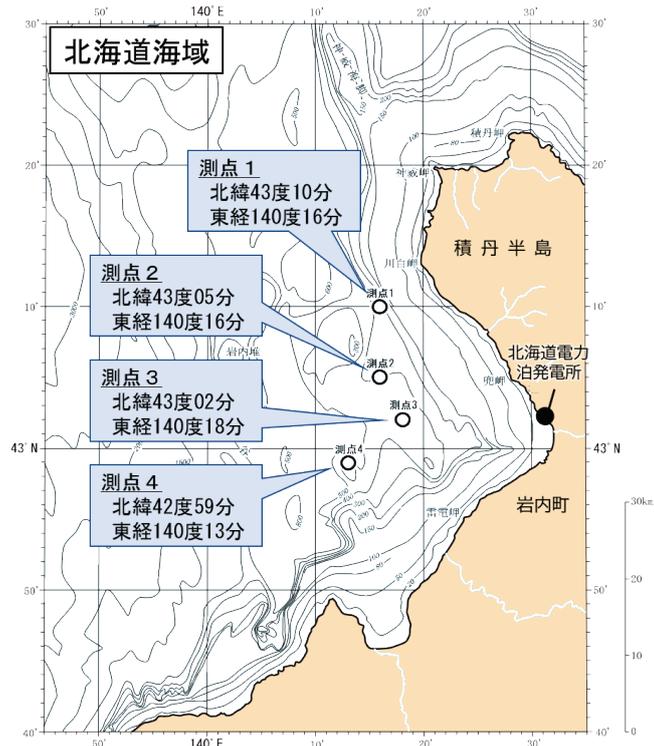


図 I -1-3-1 北海道海域における海底土・海水試料採取測点

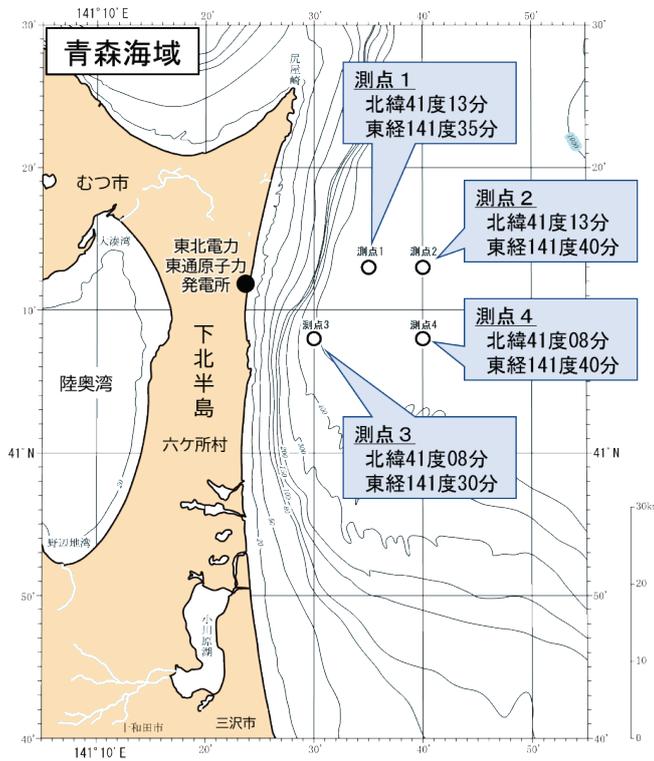


図 I -1-3-2 青森海域における海底土・海水試料採取測点

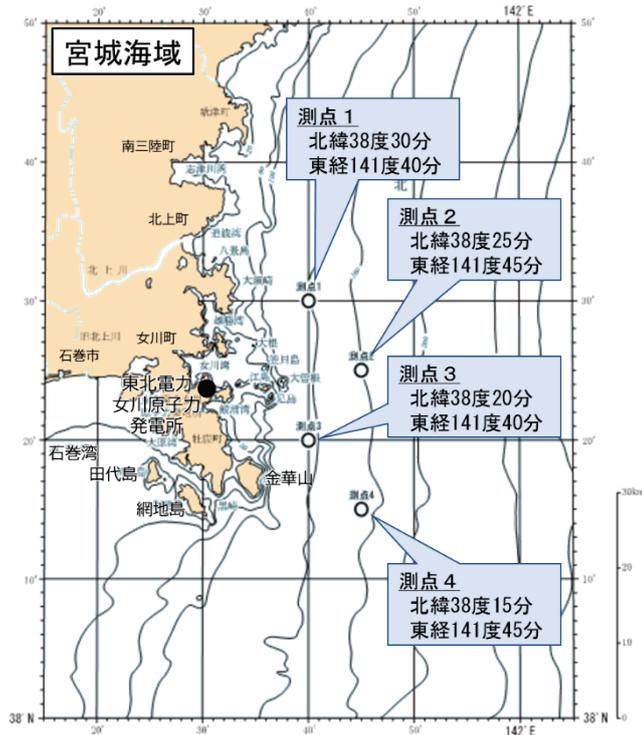


図 I -1-3-3 宮城海域における海底土・海水試料採取測点

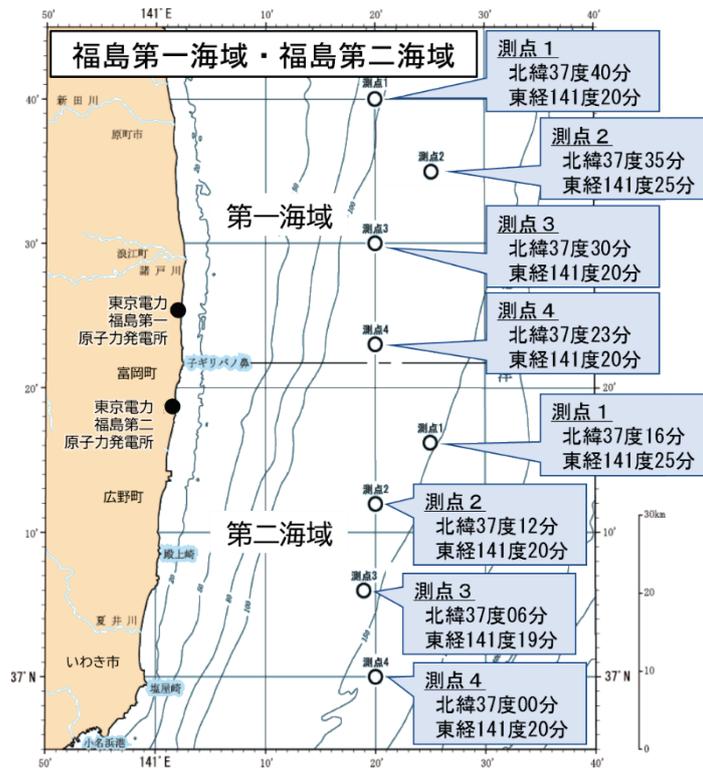


図 I -1-3-4 福島第一海域・福島第二海域における海底土・海水試料採取測点

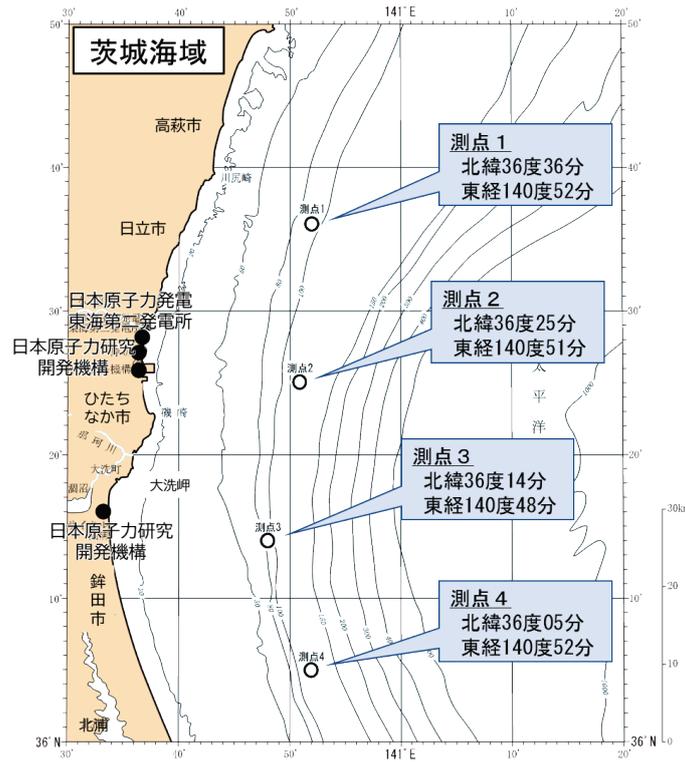


図 I -1-3-5 茨城海域における海底土・海水試料採取測点

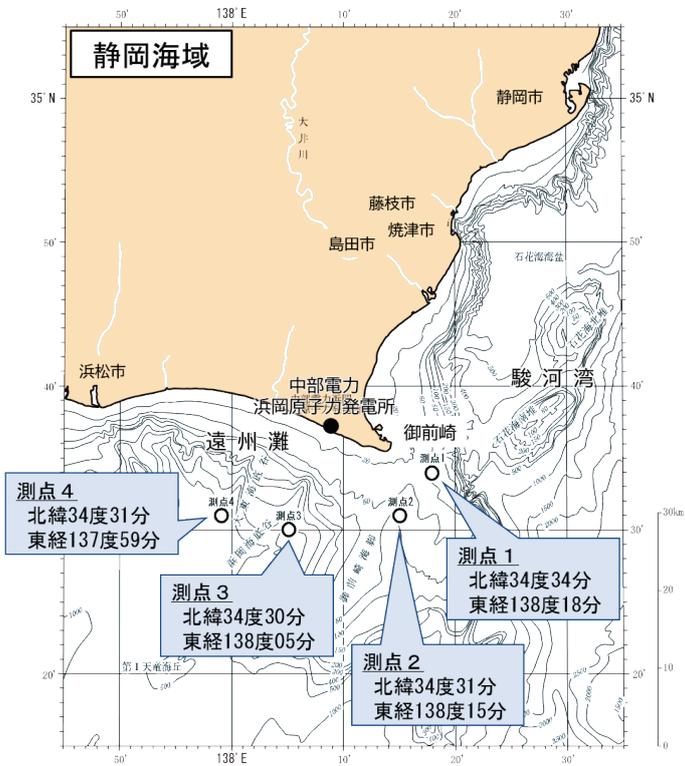


図 I -1-3-6 静岡海域における海底土・海水試料採取測点

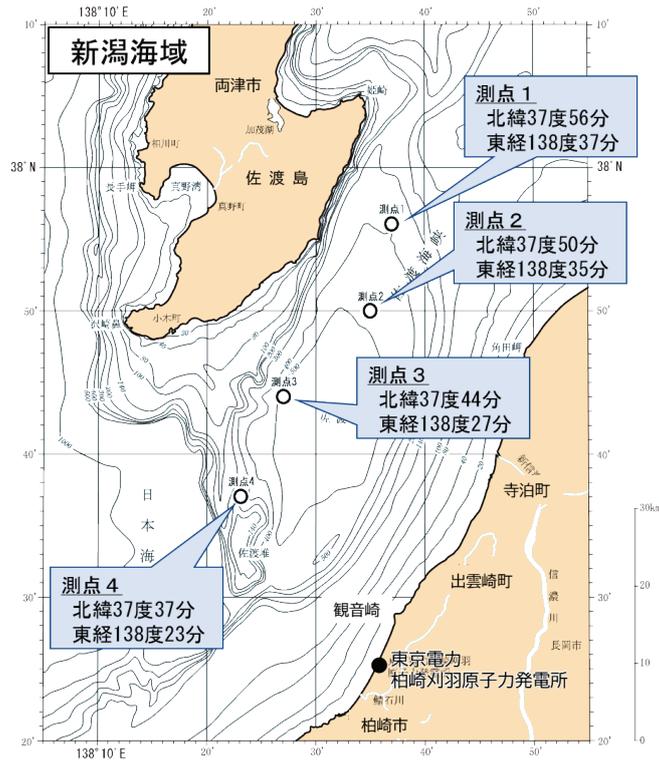


図 I -1-3-7 新潟海域における海底土・海水試料採取測点

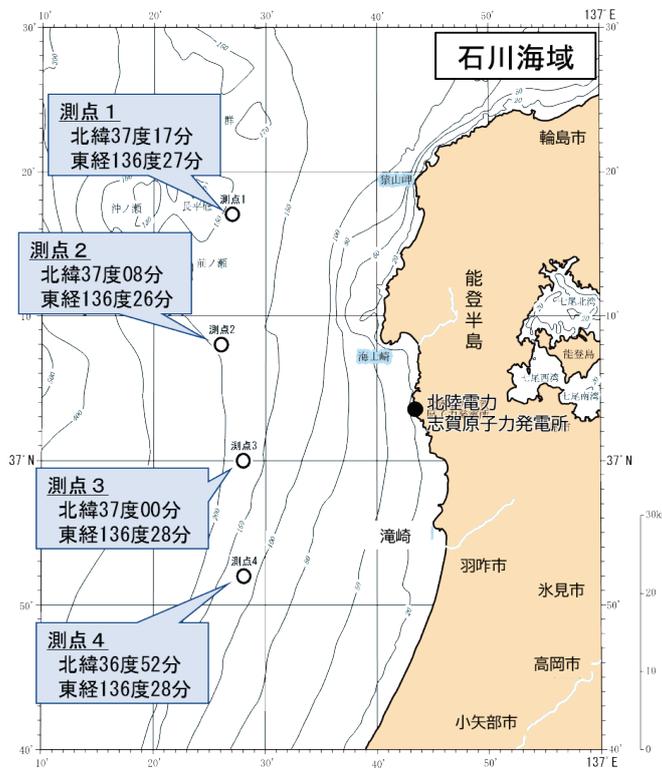


図 I -1-3-8 石川海域における海底土・海水試料採取測点

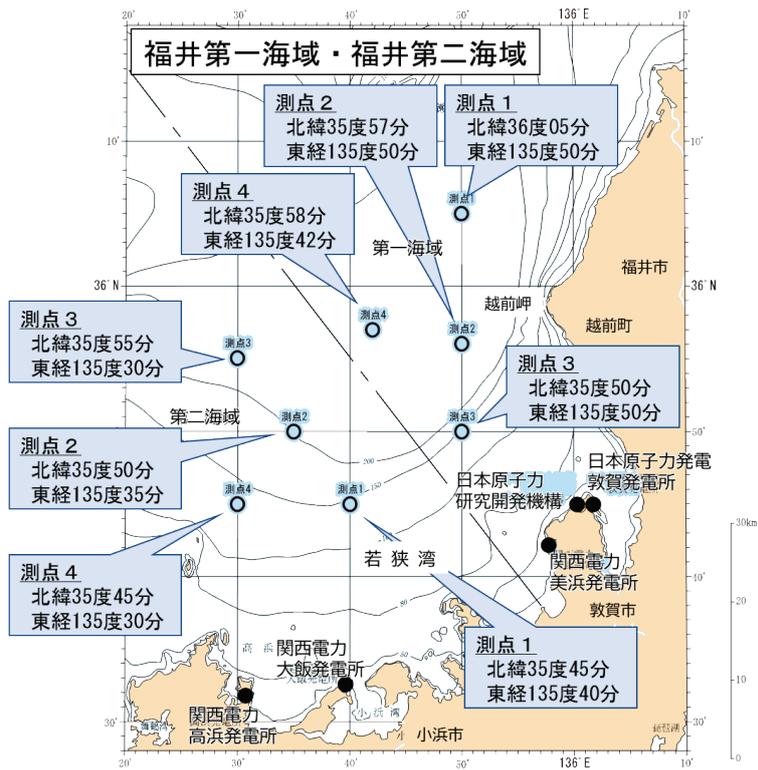


図 I -1-3-9 福井第一海域・福井第二海域における海底土・海水試料採取測点

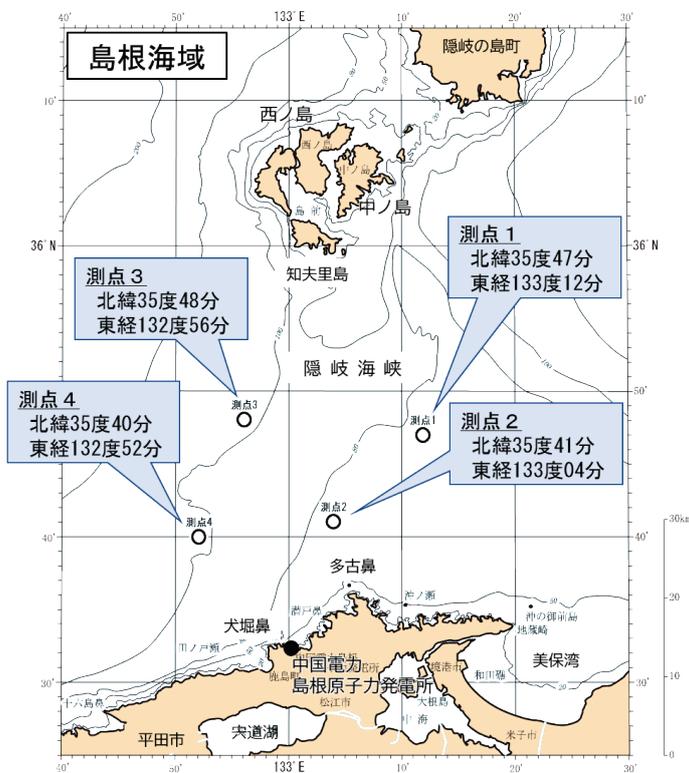


図 I -1-3-10 島根海域における海底土・海水試料採取測点

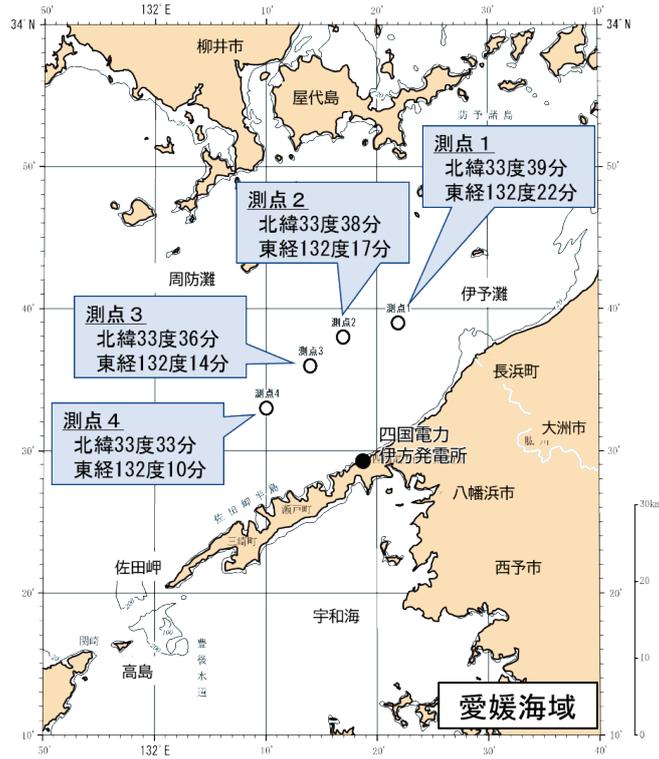


図 I-1-3-11 愛媛海域における海底土・海水試料採取測点

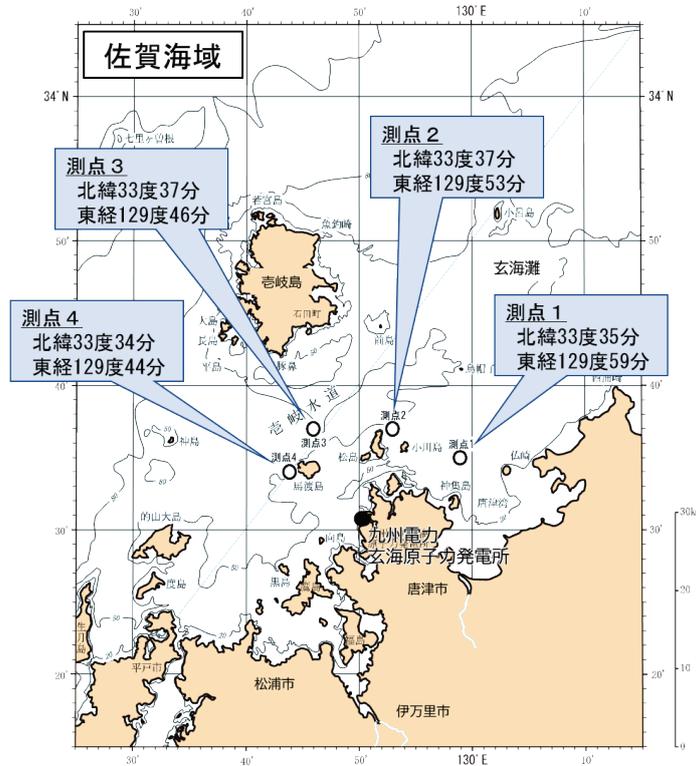


図 I-1-3-12 佐賀海域における海底土・海水試料採取測点

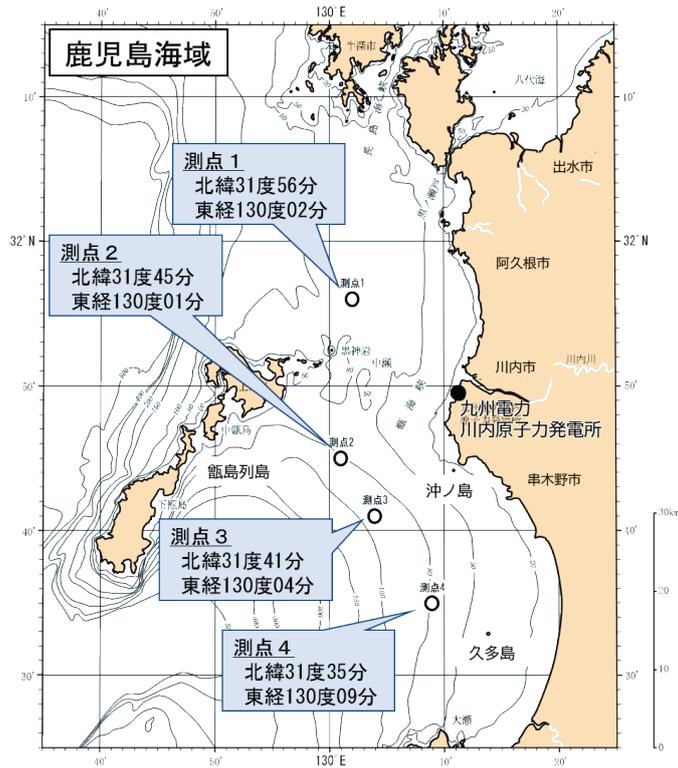


図 I-1-3-13 鹿兒島海域における海底土・海水試料採取測点

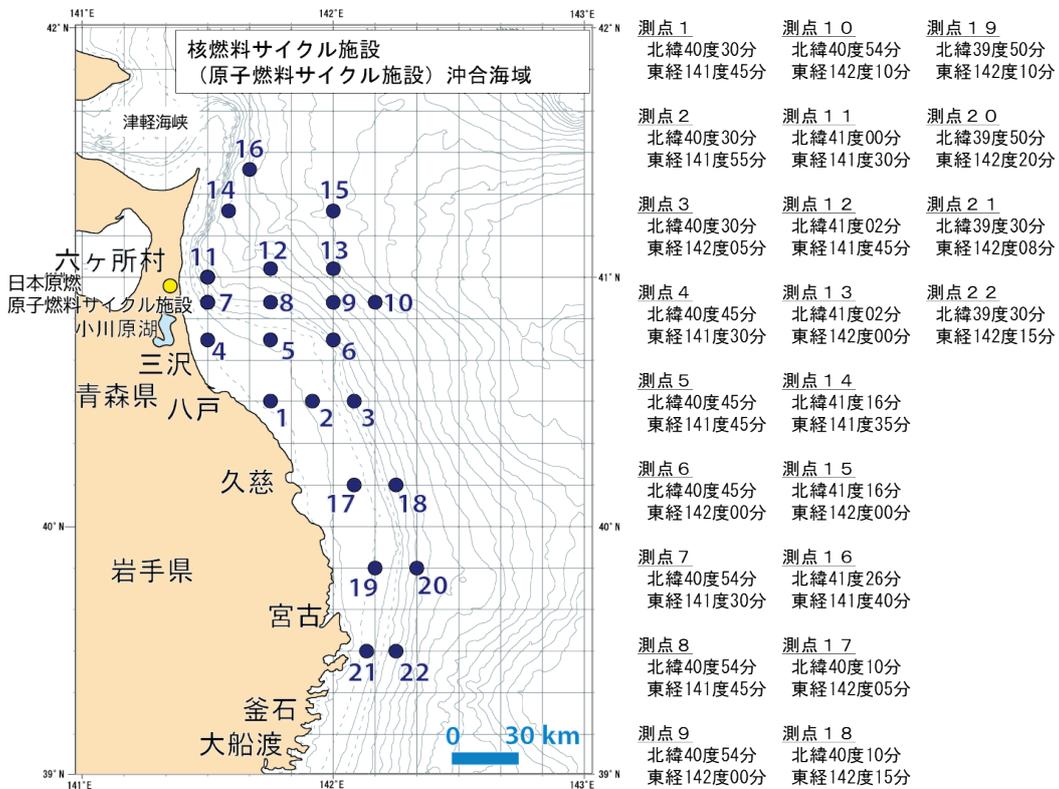


図 I-1-3-14 核燃海域における海底土・海水試料採取測点

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、放射性降下物等に含まれる濃度が高く、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壊変系列を持たず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、国際機関等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)

凍結して送付された海産生物試料を半解凍して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、平均全長及び平均体重を算出した。全長及び体重の測定が終了した試料は筋肉(肉部・うろこなし皮付き)、内臓等に分割し、放射能分析に供する部位として分け取った筋肉について 105℃で乾燥後、450℃で 24 時間灰化した。灰化した試料を 0.35mm のふるいに通し、混入した小骨等を取り除いたものをよく混合して分析試料とした。なお、カタクチイワシ等の魚体が極めて小さく全体を食す魚種については魚体全体を分析に供することとした。

(海底土試料の前処理)

凍結して送付された海底土試料を自然解凍後よく混合したのち、ブフナーロートを用いて吸引ろ過することにより湿土状態の分析試料を得た。次いで 105℃で乾燥させ、ふるい分け及び粉碎・混合することにより、乾燥土状態の分析試料を得た。

※1 放射能測定法シリーズ(全 32 集あり、下記はそのうちの一部分である)

- ・ 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」(平成 4 年、3 訂)
- ・ 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)

(海産生物及び海底土試料の放射能分析)

対象とするストロンチウム-90 (^{90}Sr)、プルトニウム-239+240 ($^{239+240}\text{Pu}$ ※1) 及びガンマ線放出核種を定量するために必要な化学分離・精製を行ったのち、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、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)

採取時に硝酸酸性として分取・保管したものを分析試料とした。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として、採取時に濃硝酸を添加せず分取・保管した海水をそのまま分析試料とした。

(海水試料の放射能分析)

発電所海域のものについて、化学分離・精製したのち、 ^{90}Sr 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(^{134}Cs)及びセシウム-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。

核燃海域のものについて、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、 ^{90}Sr 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 及びガンマ線放出核種については、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以下を行った。

- ・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）を用いた並行分析や二重分析
- ・国際原子力機関（International Atomic Energy Agency；IAEA）が実施する試験所間比較分析（Interlaboratory Comparisons；ILC への参加
- ・IAEA が実施する技能試験（proficiency test；プロフィシエンシーテスト）への参加

※1 プルトニウム-239 (^{239}Pu) とプルトニウム-240 (^{240}Pu) 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 ($^{239+240}\text{Pu}$) と表す。

なお、技能試験（Proficiency Test 2018）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（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（次の URL で閲覧可能）を参照。

<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AQ-58web.pdf>

（令和2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	³ H	12.33 年	—	—	—	—	—	○
	マンガン - 54	⁵⁴ Mn	312.1 日	○	○	○	○	—	○
	コバルト - 60	⁶⁰ Co	5.271 年	○	○	○	○	—	○
	ストロンチウム - 90	⁹⁰ Sr	28.74 年	—	○	—	○	○	○
	ルテニウム - 106	¹⁰⁶ Ru	373.6 日	○	○	○	○	—	○
	セシウム - 134	¹³⁴ Cs	2.065 年	○	○	○	○	○	○
	セシウム - 137	¹³⁷ Cs	30.04 年	○	○	○	○	○	○
	セリウム - 144	¹⁴⁴ Ce	284.9 日	○	○	○	○	—	○
	プルトニウム -239+240	²³⁹⁺²⁴⁰ 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	⁷ Be	53.29 日	○	○	○	○	—	—
	カリウム - 40	⁴⁰ K	12.77 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 11 版（社団法人日本アイソトープ協会編集発行、2011 年）」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 (⁵¹Cr)、コバルト-58 (⁵⁸Co)、鉄-59 (⁵⁹Fe)、亜鉛-65 (⁶⁵Zn)、ジルコニウム-95 (⁹⁵Zr)、ニオブ-95 (⁹⁵Nb)、ルテニウム-103 (¹⁰³Ru)、銀-110m (^{110m}Ag)、アンチモン-125 (¹²⁵Sb) などがある。

*5 トリウム - 232 (²³²Th、半減期:140.5 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。

*6 ウラン - 238 (²³⁸U、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。

(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計測時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。

(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濃度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、原子力規制庁が指示する検出目標レベルに併せて、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、人工由来のトリチウム、⁹⁰Sr、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs など比較的半減期の短い放射性核種とし、²³⁹⁺²⁴⁰Pu についてはその対象から除外した。なお、自然放射性核種については同シリーズ記載のとおり^{※2}、天然崩壊系列（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、²⁰⁸Tl、²¹⁴Bi、²²⁸Ac など）について、原則として測定終了時の値とした^{※3}。

※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」（平成 4 年改訂）（177～185 ページ）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。」とされており、本事業においてもこれに準ずることとした。

※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」（平成 4 年改訂）（155 ページ）に記載されたとおり。

※3 本事業では、これら系列に属さない⁷Be 及び⁴⁰K について原則として減衰補正を実施した。

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

試料名		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、 ^{110m} Ag、 ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Cs、 ¹⁴⁴ Ce等)	ガンマ線放出核種 (⁵⁴ Mn、 ⁶⁰ Co、 ¹⁰⁶ Ru、 ^{110m} 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*1)	50L		
	前処理等	灰化	乾燥後、 粉碎・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	70,000 秒	70,000 秒	3,600～ 7,200 秒	70,000 秒	
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 *2	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	－*3	－	0.4	－		

*1 平成 30 年度の調査では福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土については、湿土で相当量を供し、その含水率で乾燥土当たりの放射能に換算していたが、平成 31 (令和元) 年度の調査からすべての海底土試料について、乾燥土状態として分析・測定に供した。

*2 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、¹⁰⁶Ru 及び ¹³⁷Cs は純ベータ線放出核種であるが、ガンマ線計測によっても定量できるため、ここではガンマ線放出核種に分類した。

*3 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

試料名		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	3,600~7,200 秒	160,000 秒	70,000 秒	
検出目標レベル	放射能濃度		Bq/kg-生鮮物		
	ガンマ線放出核種*2	^{54}Mn	—*1	—	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 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。

*2 ガンマ線放出核種は、分析の対象とする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、ガンマ線計測によっても定量できるため、ここではガンマ線放出核種に分類した。

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）

試料名		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 ア線ス ペクト ロメト リー	ガンマ 線スペ クトロ メトリ ー	LSC*1	ベータ 線計測	アルフ ア線ス 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	3,600 秒	80,000 秒	70,000 秒	30,000 秒	3,600 ~7,200 秒	160,000 秒	70,000 秒	
放射能濃度		Bq/kg-乾燥土			Bq/L	mBq/L		
検出目標レベル	ガンマ 線放出 核種*2	^{54}Mn	—*3	—	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 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。

*2 ガンマ線放出核種は、分析の対象とする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、ガンマ線計測によっても定量できるため、ここではガンマ線放出核種に分類した。

*3 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。

5) 分析結果

(1) 海産生物試料の分析結果

① 発電所海域

平成 31（令和元）年度分の海産生物試料として

第 1 回収集（前期）：平成 31 年 4 月 1 日から令和元年 9 月 5 日まで

第 2 回収集（後期）：令和元年 10 月 1 日から令和 2 年 1 月 15 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。収集すべき試料数は前期（45 試料）と後期（45 試料）の合わせて 90 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 22 試料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 試料について収集を完了した。

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った。

海産生物試料の前処理に当たっては、目的とする部位を分け取り、必要量を灰化に供した。試料の灰化に当たっては灰化前後の重量比（灰分（魚の肉部で概ね 1.2%、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^{※3}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 で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。

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計測時間に加え、バックグラウンドの評価及び適切な校正曲線（効率曲線）での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を実施した。

収集した海産生物試料（魚類、イカ・タコ類及びエビ類；計 90 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、上述の一連の作業実施の結果について、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。

※1 「I 1. 3) (1)」参照。

※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

※3 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（Bunseki Kagaku），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（Hoken Butsuri），44（2），198-208．

平成 31（令和元）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 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs であり、これら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、直近の平成 30 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。

（ $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ^{※1} について）

平成 31（令和元）年度の調査では、平成 30 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、いずれの海域から採取した海産生物試料からも検出されていなかった。

（ ^{134}Cs について）

平成 31（令和元）年度の調査の調査では、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-生鮮物の範囲にあった。

なお、平成 28 年度の調査では青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城の 5 海域で採取した 18 試料（いずれも魚類）から検出されていた。平成 29 年度の調査では福島第一、福島第二及び茨城の 3 海域で採取した 12 試料（いずれも魚類）から検出されていた。

直近の平成 30 年度の調査では、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-生鮮物の範囲にあった。

（ ^{137}Cs について）

平成 31（令和元）年度の調査では、事故前 5 年間の最大値（0.24Bq/kg-生鮮物）を超えた試料は、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 試料であった。平成 30 年度と比較して全体的に放射能濃度は減少していたものの、魚類では比較的高い放射能濃度を示す試料も時として見られ、最も高い値を示したのは福島第二海域で採取された試料の 0.85Bq/kg-生鮮物（事故前 5 年間の最大値（0.24Bq/kg-生鮮物）の約 3.5 倍）であった。また、この試料からは 0.070Bq/kg-生鮮物の ^{134}Cs も検出されており、同試料の放射性セシウム（ ^{134}Cs 及び ^{137}Cs との合計）は、0.92Bq/kg-生鮮物であった。この値は国の定める基準値（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（1/108

※1 銀（Ag）の放射性同位体（半減期 249.8 日；「m」は準励起状態を表す）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しない）。

以下)であった。

なお、平成 28 年度の調査では北海道(第 1 回収集試料)、青森(第 2 回収集試料)、新潟(第 1 回及び第 2 回収集試料)、石川(第 1 回収集試料)及び愛媛海域(第 2 回収集試料)で収集したエビ類 1 試料(ホッコクアカエビ)、イカ・タコ類 5 試料(ミズダコ、ヤリイカ及びコウイカ)を除いた 84 試料から検出された。平成 29 年度の調査では北海道(第 1 回収集試料)、青森(第 2 回収集試料)、茨城(第 2 回収集試料)及び新潟海域(第 2 回収集試料)で収集したイカ・タコ類 4 試料(ミズダコ(2 試料)、ヤリイカ及びヤナギダコ)を除いた 86 試料から検出された。

直近の平成 30 年度の調査では、事故前 5 年間の最大値(0.24 Bq/kg-生鮮物)を超えた試料は、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 試料であった。全体的に放射能濃度は減少していたものの、魚類では比較的高い放射能濃度を示す試料も時として見られ、最も高い値を示したのは福島第二海域で採取された試料の 2.1Bq/kg-生鮮物(事故前 5 年間の最大値(0.24Bq/kg-生鮮物)の約 8.6 倍)であった。また、この試料からは 0.19Bq/kg-生鮮物の ^{134}Cs も検出されており、同試料の放射性セシウム(^{134}Cs 及び ^{137}Cs との合計)は、2.29Bq/kg-生鮮物であった。なお、この値は国の定める基準値(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(1/43 以下)であった。

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
平成 31 (令和元) 年度	魚類	74	ND*2 ~ 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
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、平成 31（令和元）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 0.039、 ^{137}Cs で 0.027 (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

平成 31（令和元）年度分の海産生物試料として

第 1 回収集（前期）：平成 31 年 4 月 7 日から令和元年 9 月 30 日まで

第 2 回収集（後期）：令和元年 10 月 7 日から 12 月 25 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。収集すべき魚種は前期（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 3 試料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 試料について収集を完了した。

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、発電所海域の場合と同様に前処理を行う際に半解凍した状態で魚類分類に詳しい者の助言や専門書を参考に、魚の特徴を観察して魚種の同定と選別を行った。

海産生物試料の前処理に当たっては、目的とする部位を分け取り、必要量を灰化に供した。試料の灰化に当たっては灰化前後の重量比（灰分）を目安とし、発電所海域の場合と同様に参考となる灰分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-1-4-3 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。

放射性核種の定性・定量に当たっては、目的とする放射性核種に応じて検出目標レベルを考慮した計測時間に加え、バックグラウンドの評価及び適切な校正曲線（効率曲線）での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、化学分離・精製をしたのち、シリコン半導体検出器によるアルファ線スペクトロメトリー、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、または液体シンチレーション計数装置を用いたベータ線計測を実施した。

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、上述の一連の作業実施の結果について、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 1-2-4 に示した。

平成 31（令和元）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 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、平成 30 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。

※1 「I 1. 3）(1)」参照。

なお、平成 29 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 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs であり、 ^{90}Sr 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 及びその他のガンマ線放出核種は検出されなかった。直近の平成 30 年度の調査では、 ^{134}Cs はすべての試料から検出されることはなかったものの、 ^{137}Cs (28 試料で検出)、 ^{90}Sr (1 試料のみ) 及び $^{239+240}\text{Pu}$ (1 試料のみ) が検出されていた。

(^{134}Cs について)

平成 31 (令和元) 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、直近の平成 30 年度の調査でも検出されることはなかった。

(^{137}Cs について)

平成 31 (令和元) 年度の調査では、核燃海域で採取した 30 試料のうち 25 試料から ^{137}Cs が検出され、その放射能濃度は魚類で ND~0.23 Bq/kg-生鮮物、イカ・タコ類で ND~0.053 Bq/kg-生鮮物の範囲にあった。

なお、平成 29 年度にはイカ・タコ類 3 試料 (ミズダコ (2 試料)、スルメイカ) を除く 27 試料から検出され、このうち、事故前 5 年間の最大値 (魚類: 0.18 Bq/kg-生鮮物、イカ・タコ類: 0.041 Bq/kg-生鮮物) を超えた試料は、魚類で 5 試料であり、イカ・タコ類では最大値を超えた試料はなかった。直近の平成 30 年度においては、イカ・タコ類 2 試料 (ミズダコとスルメイカ) を除く 28 試料から検出された。これらのうち、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 3 試料あり、イカ・タコ類ではこの最大値を超えた試料はなかった。

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	$^{239+240}\text{Pu}$
平成 31 (令和元) 年度	魚類	24	ND*2	ND	ND ~ 0.23	ND	ND
	ｲｶ・ﾀﾞ類	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・ﾀﾞ類	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・ﾀﾞ類	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・ﾀﾞ類	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・ﾀﾞ類	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・ﾀﾞ類	6	ND	ND	ND ~ 0.096	ND	ND ~ 0.00048
平成 25 年度	魚類	24	ND	ND ~ 1.9	0.052 ~ 4.1	ND	ND
	ｲｶ・ﾀﾞ類	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・ﾀﾞ類	6	ND	ND ~ 0.053	ND ~ 0.092	ND	ND ~ 0.00033
平成 23 年度	魚類	24	ND ~ 0.0098	0.069 ~ 10	0.12 ~ 11	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: ND ~0.23	ND ~ 0.00053
	ｲｶ・ﾀﾞ類	6	ND	0.042 ~ 0.24	0.064 ~ 0.32	$^{110\text{m}}\text{Ag}$: 0.080 ~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・ﾀﾞ類	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、平成 31 (令和元) 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 0.0057、 ^{134}Cs で 0.041、 ^{137}Cs で 0.028、 $^{239+240}\text{Pu}$ で 0.00030 (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

平成 31（令和元）年度分の海底土試料として、令和元年 5 月 10 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 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。

採取した海底土については、採泥時に目視及び触って確認することにより、泥色^{※1}と大まかな粒径^{※2}を判断した。その後、必要量を分取して冷凍状態のまま輸送・保管とした。

海底土試料の前処理として、自然解凍、ブフナーロートによる吸引ろ過を適切に行い、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 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。採取した海底土試料については、105℃で乾燥させ、粉碎・混合したものを分析用試料として供した。

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計測時間に加え、バックグラウンドの評価及び適切な校正曲線（効率曲線）での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を実施した。

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。

平成 31（令和元）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¹³⁴Cs 及び¹³⁷Cs であり、これらの放射能濃度は、事故後に実施した平成 23～30 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、平成 30 年度と同様に比較的高い放射能濃度にある傾向が見られた。これらのうち、¹³⁴Cs 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（全測点）の 3 海域（計 12 測点）であった。また、¹³⁷Cs 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（1 測点）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¹³⁷Cs が検出された。これらの海域における¹³⁷Cs の放射能濃度の最大値は、平成 30 年度の調査で得られた 43Bq/kg-乾燥土を若干上回る 63Bq/kg-乾燥土を福島第一海域で観測した。このことは、¹³⁷Cs の放射能濃度の傾向や¹³⁴Cs との放射能比などから鑑みて、東電福島第一原発事故に起因する¹³⁷Cs の自然変動により得られた結果であると推測できる。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。

※1 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」

※2 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

なお、平成 29 年度の調査において ^{134}Cs が検出された海域及び測点は、宮城（測点 4）、福島第一（全測点）、福島第二（全測点）及び茨城（全測点）の 4 海域（13 測点）であったが、直近の平成 30 年度の調査においては、福島第一（全測点）、福島第二（全測点）及び茨城（全測点）の 3 海域（12 測点）に減少していた。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 1、2、3）を加えた 15 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ていたことから、これらの海域においては、直近の平成 30 年度の調査時点においても東電福島第一原発事故に起因する放射性セシウムの影響により比較的高い放射能濃度が観測されていたものと推測できる。

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
平成 31（令和元）年度	60	ND*1 ~ 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、平成 31（令和元）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は、 ^{134}Cs で 0.54、 ^{137}Cs で 0.49（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

平成 31（令和元）年度分の海底土試料として、令和元年 6 月 3 日から 6 月 26 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。

採取した海底土については、採泥時に目視及び触って確認することにより、発電所海域と同様に泥色と大まかな粒径を判断した。その後、必要量を分取して冷凍状態のまま輸送・

保管とした。

海底土試料の前処理として、自然解凍、ブフナーロートによる吸引ろ過を行い、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-1-4-3 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。湿土状態とした海底土試料については、105℃で乾燥させ、粉碎・混合したものを分析用試料として供した。

放射性核種の同定や定量に当たっては、目的とする放射性核種に応じて検出目標レベルを考慮した計測時間に加え、バックグラウンドの評価及び適切な校正曲線（効率曲線）での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、化学分離・精製をしたのち、シリコン半導体検出器によるアルファ線スペクトロメトリー、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、または液体シンチレーション計数装置を用いたベータ線計測を実施した。

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。

平成 31（令和元）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。

なお、平成 29 年度及び平成 30 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 $^{239+240}\text{Pu}$ であり、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。

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	$^{239+240}\text{Pu}$
平成 31（令和元）年度	22	ND*1 ~ 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、平成 31（令和元）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は、 ^{90}Sr で 0.11、 ^{134}Cs で 0.50、 ^{137}Cs で 0.46、 $^{239+240}\text{Pu}$ で 0.0086（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

平成 31（令和元）年度分の海水試料として、令和元年 5 月 10 日から 6 月 24 日の期間に当初計画に沿って採取活動を行った。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。

放射性核種の定性・定量に当たっては、目的とする放射性核種に応じて放射能分析を行うに当たり十分な量として、表 I-1-4-2 に示した放射能分析での検出目標レベルを担保できる量を供した。その後、化学分離・精製をしたのち、検出目標レベルを考慮した計測時間に加え、バックグラウンドの評価及び適切な校正曲線（効率曲線）での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または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を実施した。

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。

平成 31（令和元）年度の調査においては、福島第一及び茨城海域で採取した一部の表層水試料及び茨城海域で採取した下層水試料の一部から、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、福島第一海域の一部の表層水から得られたもので、その放射能濃度は 3.0mBq/L 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、平成 29 年度においては、発電所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 ^{90}Sr 及び ^{137}Cs であった。平成 30 年度の調査においても同様に ^{90}Sr 及び ^{137}Cs が検出されていた。このうち、 ^{90}Sr の放射能濃度は事故前 5 年間の範囲内であったものの、 ^{137}Cs については事故後に実施した平成 23、24 年度に比べ減少傾向にあるものの、平成 29 年度と同程度の放射能濃度が得られており、一部の試料では、事故前 5 年間の範囲を上回るものがあった。なお、海水試料のうち、表層水と下層水に含まれる ^{134}Cs については、いずれの海域でも検出されることはなかった。

（表層水に含まれる ^{137}Cs ）

平成 31（令和元）年度の調査においては、福島第一（測点 1、2、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。一方、その他の海域では、事故前 5 年間の範囲内であった。

なお、平成 29 年度の調査においては、福島第一（測点 3、4）、福島第二（全測点）、茨城（全測点）及び静岡（測点 1、2）の 4 海域 12 測点で事故前の最大値（2.4mBq/L）をわずかではあるが上回る測点が認められた。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 測点でこの最大値（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 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。その他の海域では、事故前 5 年間の範囲内であった。

（下層水に含まれる ^{137}Cs ）

平成 31（令和元）年度の調査においては、茨城（測点 4）で観測された 2.5mBq/L が最大で、この値は事故前 5 年間の最大値（2.3mBq/L）をわずかながら上回るもので、概ね 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。

なお、平成 29 年度の調査においては、福島第一（測点 1、2、4）、福島第二（測点 2、3）、茨城（全測点）、静岡（測点 1、2）、石川（測点 3）、島根（測点 1）、愛媛（測点 3）及び鹿児島（測点 4）の 8 海域 15 測点で事故前 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。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）、茨城海域（測点 1）及び島根（測点 4）の 5 海域 6 測点においてこの最大値（2.3mBq/L）をわずかながら上回っていた。これらの海域における下層水の最大値は福島第二の測点 2（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 ^{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、直近の平成 30 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
平成 31 (令和元) 年度	表層水	60	0.56 ~ 1.1	ND*2	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 の試料数を示す。

*2 ND は検出下限値以下を示す。なお、平成 31 (令和元) 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 0.22、 ^{134}Cs で 0.70、 ^{137}Cs で 0.50 (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 (38 ページ 6) の注 1 参照のこと)。

②核燃海域

平成 31（令和元）年度分の海水試料として

前期：令和元年 6 月 3 日から 6 月 26 日まで

後期：令和元年 10 月 10 日から 10 月 22 日まで

の期間に当初計画に沿って採取活動を行った。採取すべき海水試料は全 22 測点で表層及び下層の 2 層から前期後期の 2 期に計 88 試料が対象で、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。

放射性核種の定量に当たっては、目的とする放射性核種に応じて放射能分析を行うに当たり十分な量として、表 I-1-4-3 に示した放射能分析での検出目標レベルを担保できる量を供した。その後、化学分離・精製をしたのち、検出目標レベルを考慮した計測時間に加え、バックグラウンドの評価及び適切な校正曲線（効率曲線）での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、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、液体シンチレーション計数装置を用いたベータ線測定または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を実施した。

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。

平成 31（令和元）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平成 30 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、直近の平成 30 年度の調査結果とほぼ同様の範囲であった。

これらは、当該海域のバックグラウンドと考えられる平成 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）開始前の期間である平成 13～17 年度にかけて行った調査結果から得られた放射能濃度と同様の範囲内（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、直近の平成 30 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、平成 29 年度及び平成 30 年度に引き続き平成 31（令和元）年度の調査においても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は 2.2mBq/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。

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

表層水及び下層水に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度については、直近の平成 30 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
平成 31 (令和元) 年度	表層水	44	ND*1 ~ 0.15	0.45 ~ 0.99	ND	1.1 ~ 2.4	ND ~ 0.0056
	下層水	44	ND ~ 0.11	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 ~ 0.098	ND ~ 1.1	ND	ND ~ 2.2	ND ~ 0.025
平成 29 年度	表層水	44	ND ~ 0.17	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	0.0011 ~ 0.0054
	下層水	44	ND ~ 0.15	ND ~ 1.2	ND	ND ~ 2.3	0.0014 ~ 0.023
平成 25 年度	表層水	44	ND ~ 0.16	ND ~ 1.1	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
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 ~ 1.3	ND ~ 360	2.3 ~ 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、平成 31 (令和元) 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 0.056 (Bq/L)、⁹⁰Sr で 0.23、¹³⁴Cs で 0.86、¹³⁷Cs で 0.63、²³⁹⁺²⁴⁰Pu で 0.0027 (mBq/L) 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。

【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) 海洋環境試料中の放射性核種濃度レベルの経年変化

(1) 発電所海域における経年変化

調査開始当初から平成 31（令和元）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及び各海域に設けた測点で採取した海底土及び海水試料に含まれる¹³⁷Cs 等の人工放射性核種の放射能濃度の経年変化を図 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、経年変化は、調査開始当初から平成 31（令和元）年までの全期間に当たる 37 年間を対象とし、この間に発生した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、放射能濃度を対数スケールとしている。

（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、¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs 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 ¹³⁴Cs 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 ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs 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 ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs を合わせた放射性セシウムの値になっている。そのため、経年変化図にはそれらの和「¹³⁴Cs+¹³⁷Cs」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、¹³⁷Cs 測定のための計数効率を使用しているため、¹³⁴Cs の値がやや低めにでており、厳密な意味での ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の合計値ではない）。なお、平成 24 年度からは、すべ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によって定量している。

（海産生物試料）

既に述べたように、平成 31（令和元）年度に発電所海域（全 15 海域）で採取した海産生物試料に含まれる ¹³⁷Cs の放射能濃度については、平成 30 年度とほぼ同じ水準にあり、新たな人為的な付加は認められなかった。また、予期しない放射性核種の付加も確認されなかった。

一方、長期的な経年変化を俯瞰すると、平成 23 年度は発電所海域の全 15 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り ¹³⁴Cs が検出され、併せて ¹³⁷Cs の放射能濃度で、測点間で変動はあるものの一時的な上昇が認められた（図 I-1-6-1～13 参照）。これら海域における ¹³⁷Cs 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。これら 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、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 を参照）。

なお、平成 31（令和元）年度は、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 ^{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、福島第二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 0.85Bq/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。放射能濃度の最大値である 0.85Bq/kg-生鮮物は、国の定める基準値である 100Bq/kg（注 2）と比べて 1/117 以下（注 3）の放射能濃度であり、十分に低いものであった。

一方、直近の平成 30 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 ^{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、福島第二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 2.1Bq/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。放射能濃度の最大値である 2.1Bq/kg-生鮮物は、国の定める基準値である 100Bq/kg（注 2）と比べて 1/47 以下（注 3）の放射能濃度であり、同様に十分に低いものであった。

（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、放射性セシウムの基準値として「100Bq/kg」と制定されている。また、ここで言う放射性セシウムとは ^{134}Cs と ^{137}Cs であり、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 年以上のすべての放射性核種（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） 0.85Bq/kg-生鮮物の ^{137}Cs 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 0.070Bq/kg-生鮮物の ^{134}Cs も併せて検出されており、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の合算値は 0.92Bq/kg-生鮮物となる。この場合、国の定める基準値と比べて 1/108 以下の放射能濃度となる。

海産生物試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の経年変化のうち、魚種間の相違については、イカ・タコ類、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きた。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^{※1}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の放射能濃度も直に増減することが指摘^{※2}されているが、これらが本結果の主たる要因となっているか否かについては、本調査で明らかにするには至っていない。

なお、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のトリチウム濃度調査」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た。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ばないと考えられる海域で採取した海産生物試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度との比較を行ったところ、発電所海域において得られた放射能濃度の範囲と対照海域で採取した海産生物に含まれる放射性セシウムの放射能濃度は同水準であった。このことから、これらの海域で採取した海産生物試料に含まれる放射性セシウムは、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由来するものであると考えられる。

（海底土試料）

平成31（令和元）年度に発電所海域（全15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、平成30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、新たな人為的な付加は認められなかった。また、予期しない放射性核種の付加も確認されなかった（表I-1-5-3を参照）。

平成31（令和元）年度においては、福島第一、福島第二、茨城及び新潟海域で採取した試料の一部から、事故前の過去5年間の放射能濃度の最大値より高い¹³⁷Csが検出された。これらの海域における¹³⁷Csの放射能濃度の最大値は、後述する平成30年度の結果を若干上回る63Bq/kg-乾燥土を福島第一海域で観測した。このことは、全体的な¹³⁷Csの放射能

※1 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, No. 719, pp. 32-36.

※2 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>）（平成31年3月閲覧）。

濃度の傾向や ^{134}Cs との放射能比などから鑑みて、東電福島第一原発事故に起因する ^{137}Cs の自然変動により得られた結果であると推測される。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。

また、直近の平成 30 年度においては、福島第一、福島第二、茨城及び新潟海域で採取した試料の一部から、事故前の過去 5 年間の放射能濃度の最大値より高い ^{137}Cs が検出された。これらの海域における ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は、茨城海域で得られた 43Bq/kg -乾燥土であった。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。

一方、長期的な経年変化を俯瞰すると、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。

平成 23 年度においては、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、併せて ^{137}Cs の放射能濃度で、緩急の差があるものの一時的な上昇が認められた（図 I-1-6-14～27 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濃度を超えていた。

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。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、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。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、平成 29 年度においては、事故前 5 年間の最大値より高い ^{137}Cs 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 -乾燥土であった。

これまでのところ、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 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。これら ^{137}Cs 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が、平成24年度以降には減少傾向に転じていた。一方、福島第一海域、福島第二海域、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ものの、一律に減少傾向は見えておらず、平成24年度から平成27年度にかけて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、福島第一海域と福島第二海域での調査結果では平成27年度から、茨城海域では平成29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。なお、その他海域においては概ね平成31（令和元）年度に実施した調査の結果も含めて漸減傾向が認められた。

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が、その補完として実施している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、過去5年間の最大値より高い¹³⁷Csの放射能濃度が認められたのは、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。

その他の海域（北海道、青森、静岡、石川、福井第一、福井第二、島根、愛媛、佐賀及び鹿児島）で採取した海底土試料においては、事故前の過去5年間の測定値の範囲内であった。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ばない海域で採取され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、これらの海域は対照海域と同水準であった。このことから、その他の海域において検出された放射性セシウムの放射能濃度は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

発電所海域（全15海域）で採取した表層の海水試料に含まれる⁹⁰Sr及び¹³⁷Csの放射能濃度については、平成30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

※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. *J. Environ. Radioact.*, 99, 875-881.

についても、新たな人為的な付加は認められなかった。また、予期しない放射性核種の付加も確認されなかった。

福島第一及び茨城海域で採取した表層水試料の一部から、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 (2.4mBq/L) より高い ^{137}Cs の放射能濃度が観測された。これらのうち、 ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は、福島第一海域から得られたもので、その放射能濃度は 3.0mBq/L 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 (表 I-1-5-6 を参照)。

なお、直近の平成 30 年度においては、宮城、茨城海域で採取した表層水試料の一部から、事故前の過去 5 年間の放射能濃度の最大値より高い ^{137}Cs の放射能濃度を観測した。これらの海域における ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は、茨城海域の表層水から得られたもので、その放射能濃度は 2.8mBq/L 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。

一方、長期的な経年変化を俯瞰すると、 ^{90}Sr について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、 ^{137}Cs についても昭和 60 年度までは漸減傾向を示したが、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ものの、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。

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 ^{134}Cs が検出され (注 4)、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-1-6-28~57 のうち、偶数の図を参照)。これら海域における ^{137}Cs 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 1,400mBq/L (注 5) であった。これら一時的な上昇が見られた海域における ^{137}Cs 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。平成 29 年度以降には再び減少傾向が観測され、その他の海域と同様に漸減傾向を示した。

(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 (38 ページの (注 1) を併せて参照のこと)。

平成 24 年度においては、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事故後の最大値（13mBq/L）を示した。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、事故前の放射能濃度と同程度になった。

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。また、茨城海域においては、平成24年度の概ね半分の放射能濃度まで低下していた。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。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放射能濃度の上昇が認められたが、事故前の放射能濃度を超えるものではなかった。

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。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。

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4）で得られた4.0mBq/Lであり、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10海域）を中心に、東電福島第一原発事故以降、 ^{137}Cs 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。これら、一部の海域で観測された平成27年度までの緩やかな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., Environ. Sci. Technol. 2018, 52, 2629-2637）。

平成31（令和元）年度の調査では、直近の平成30年度の調査結果に引き続き、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、日本海及び西日本の表層海水（北海道、静岡、新潟、石川、福井第二、島根、愛媛、佐賀及び鹿児島9海域）の高純度ゲルマニウム半導体検出器による長時間測定によるガンマ線スペクトロメトリーにより ^{134}Cs が検出されてきた。しかしながら、各年度の平均値を比較したところ、平成31（令和元）年度においては、平成30年度と同様に上昇傾向は見られなかった。

発電所海域の ^{90}Sr について、平成30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、すべ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

発電所海域（全 15 海域）で採取した下層の海水試料に含まれる ^{90}Sr 及び ^{137}Cs の放射能濃度については、平成 30 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、新たな人為的な付加は認められなかった。また、予期しない放射性核種の付加も確認されなかった。

茨城海域で採取した下層水試料の一部から、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 ^{137}Cs の放射能濃度 (2.5mBq/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、直近の平成 30 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、福島第二海域の下層水の一部から得られた 2.5mBq/L 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。

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。しかしながら、平成 25 年度以降では茨城海域を含めたすべての海域で事故前の放射能濃度と同じ水準に戻った。

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 年度まですべ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。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 年度以降は平成 31（令和元）年度を含め全海域でほぼ横ばいであった。

(2) 核燃海域における経年変化

調査開始当初から平成 31（令和元）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及び同海域に設けた 22 測点で採取した海底土及び海水に含まれる ^{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それぞれ図 I-1-6-58～60、図 I-1-6-61～63 及び図 I-1-6-64～71 に示した。

なお、図化した経年変化は、発電所海域の結果と同様に、調査開始当初から平成 31（令和元）年までの全期間に当たる 29 年間を対象とし、この間に発生した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、または各海域間での比較を行うことなどを容易にするために、放射能濃度を対数スケール（目盛）とした。

核燃海域に設けた測点については、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）

平成 31（令和元）年度において核燃海域で採取した海産生物試料では ^{137}Cs のみが検出され、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかった。 ^{137}Cs の放射能濃度については、平成 30 年度とほぼ同じ水準であり、新たな人為的な付加は認められなかった。また、予期しない放射性核種の付加も確認されなかった。

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、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-1-6-58～60 を参照）。これら ^{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 を参照）。

なお、 ^{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。平成 26 年度までの調査でほとんどの試料で検出下限値以下であった。直近の平成 30 年度の調査では、唯一、骨を含む全身を試料として供したカタクチイワシから極めて低い放射能濃度であるものの、 0.0067Bq/kg -生鮮物の ^{90}Sr が検出された。一方、魚類の一部から、事故前の過去 5 年間に核燃海域で得られた ^{137}Cs の放射能濃度の最大値をわずかに超える 0.30Bq/kg -生鮮物の ^{137}Cs が検出されたものの、前述の発電所海域での水準よりも低いものであった。

一方、 ^{137}Cs の放射能濃度は、平成 3 年度から平成 22 年度までほぼ同水準あるいは漸減傾向を示していたが、平成 23 年度には東電福島第一原発事故の影響を受け、すべての海産

生物試料で比較的高い放射能濃度水準（最大値：11Bq/kg-生鮮物）を示した。

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。平成 26～30 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おり、 ^{137}Cs の放射能濃度の最大値は平成 26 年度で 1.7Bq/kg-生鮮物、平成 27 年度で 0.32Bq/kg-生鮮物、平成 28 年度で 0.65Bq/kg-生鮮物、平成 29 年度で 0.31Bq/kg-生鮮物、直近の平成 30 年度で 0.30Bq/kg-生鮮物であった。

$^{239+240}\text{Pu}$ については、平成 31（令和元）年度に調査した 30 試料について、すべての試料で検出下限値以下であった。

なお、平成 27 年度までの調査で、骨を含む試料全身を分析に供したコウナゴやカタクチイワシ及びイカ・タコ類を中心として極めて低い放射能濃度水準ではあるものの $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。平成 28 年度も極めて低い放射能濃度水準であったが、キアンコウ、スケトウダラ及びヒラメの 3 試料から $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。平成 29 年度に採取した全試料で検出されなかった。直近の平成 30 年度では、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 0.00039Bq/kg-生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。

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ばないと考えられる対照海域で採取した海産生物試料の一部から得た ^{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。

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のトリチウム濃度調査」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核燃海域で採取し、ガンマ線放出核種をガンマ線スペクトロメトリーにより定量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た結果からも、同事故の影響は認められなかった。

（海底土試料）

平成 31（令和元）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、平成 30 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、新たな人為的な付加は認められなかった。また、予期しない放射性核種の付加も確認されなかった（表 I-1-5-4 を参照）。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-1-6-61～63 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する傾向が認められた。これら 3 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。平成 31（令和元）年度の調査では、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ばない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、検出された放射性セシウムは 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）

平成 31（令和元）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、平成 30 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、新たな人為的な付加は認められなかった。また、予期しない放射性核種の付加も確認されなかった（表 I-1-5-6 を参照）。

※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. *J. Environ. Radioact.*, 99, 875-881.

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-1-6-64～71 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 年度から平成 31（令和元）年度の調査結果では概ね横ばいの傾向ではあるものの、わずかではあるが増減を繰り返している傾向を示した。

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）。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、平成 31（令和元）年度においても直近の平成 30 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。

^{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）を観測した事例があったが、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、平成 31（令和元）年度も直近の平成 30 年度と同水準の放射能濃度であった。

^{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。

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り、平成 25～31（令和元）年度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。

$^{239+240}\text{Pu}$ 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、平成 31（令和元）年度もその傾向は維持され、直近の平成 30 年度と同水準の放射能濃度であった。

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、すべ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に、これら放射能濃度（縦軸）を対数スケールとしている（主目盛は1桁ずつ上がる）。

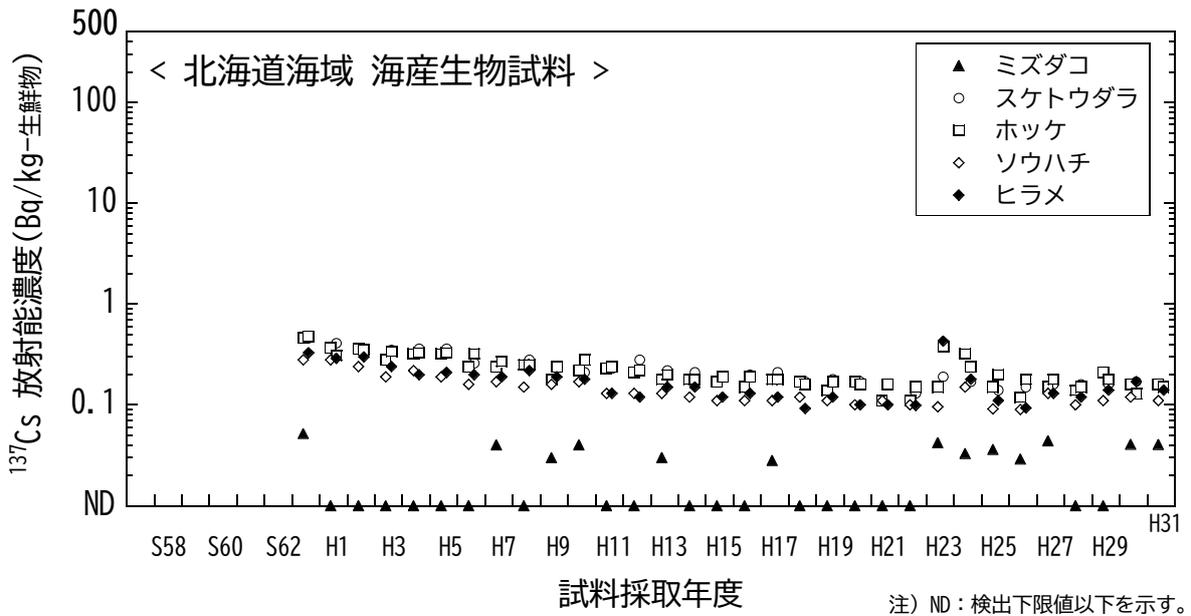


図 I-1-6-1 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化（北海道海域）

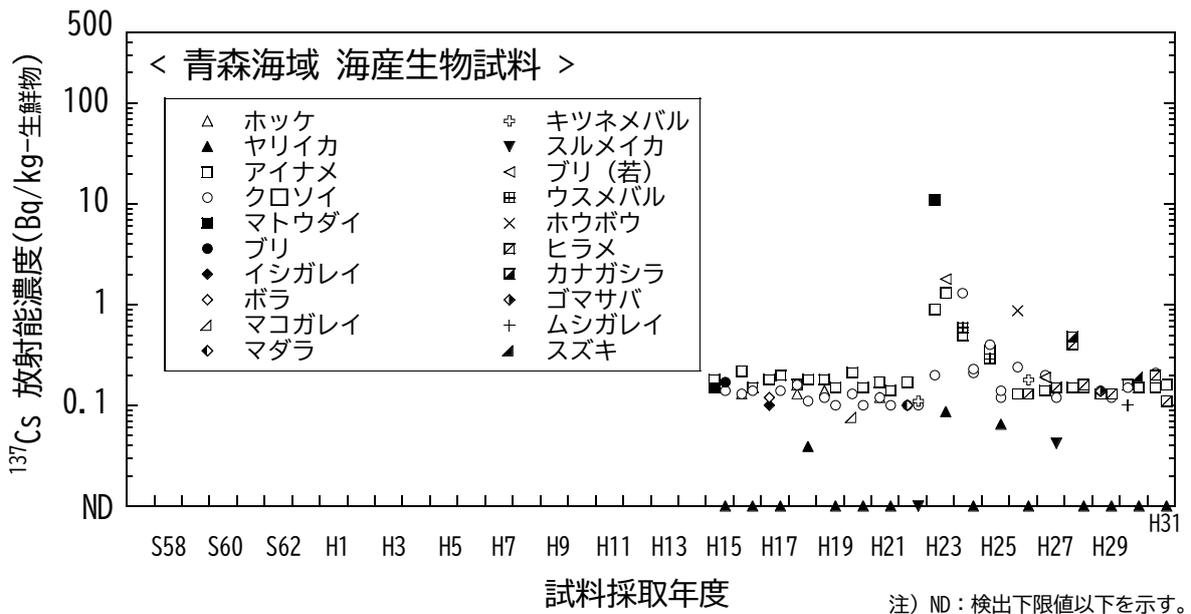


図 I-1-6-2 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化（青森海域）

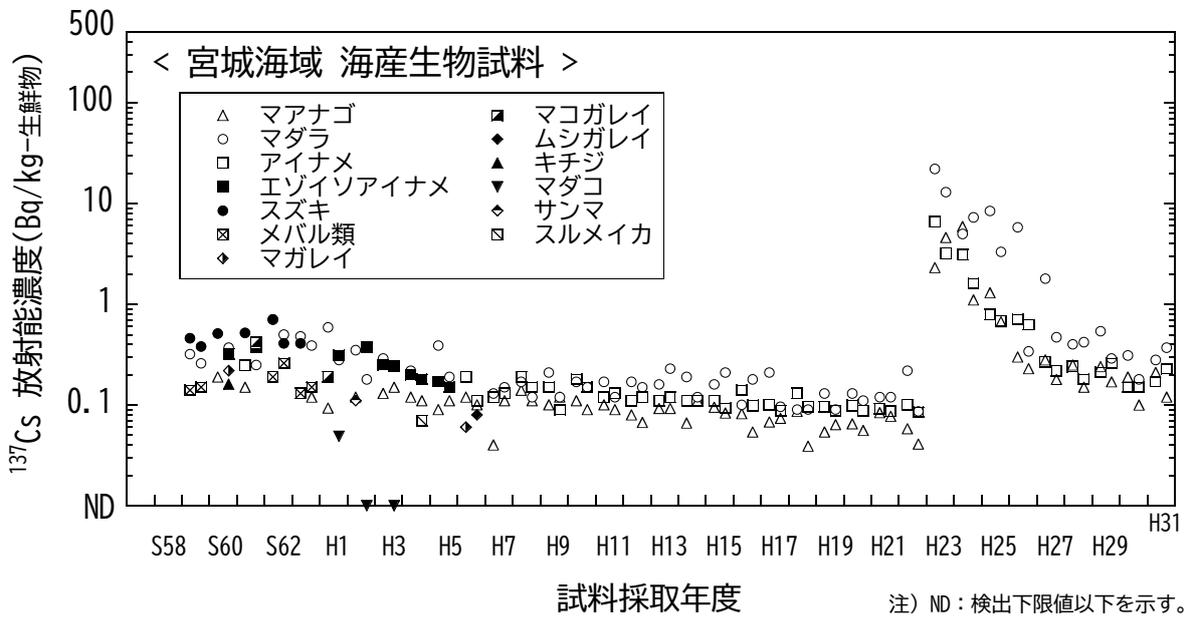


図 I-1-6-3 海産生物試料の ¹³⁷Cs 濃度経年変化 (宮城海域)

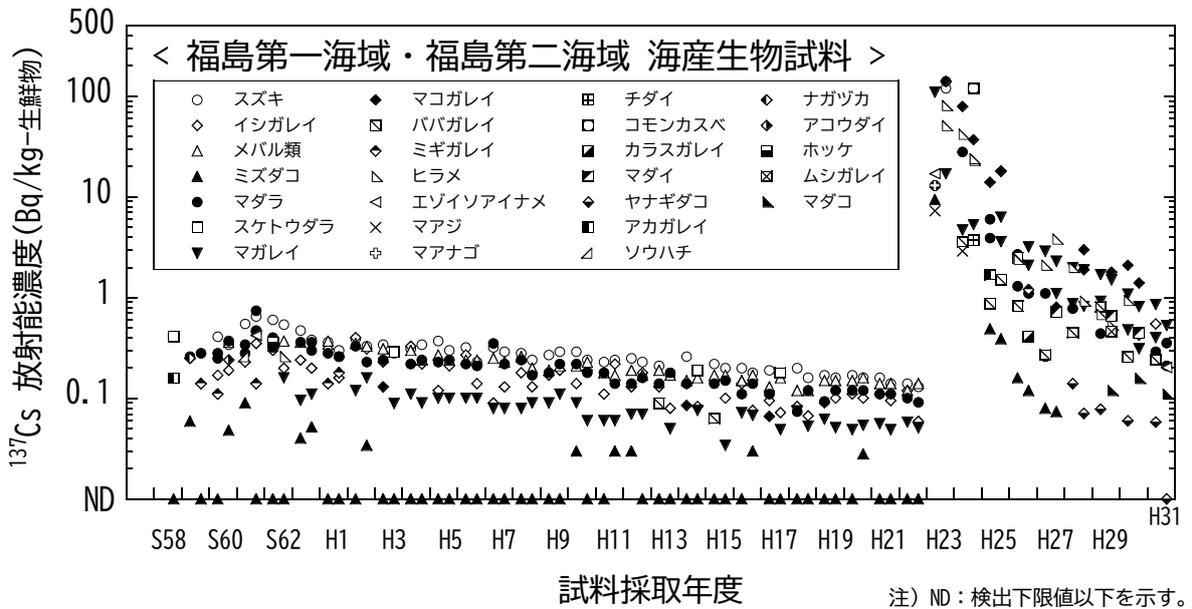


図 I-1-6-4 海産生物試料の ¹³⁷Cs 濃度経年変化 (福島第一海域・福島第二海域)

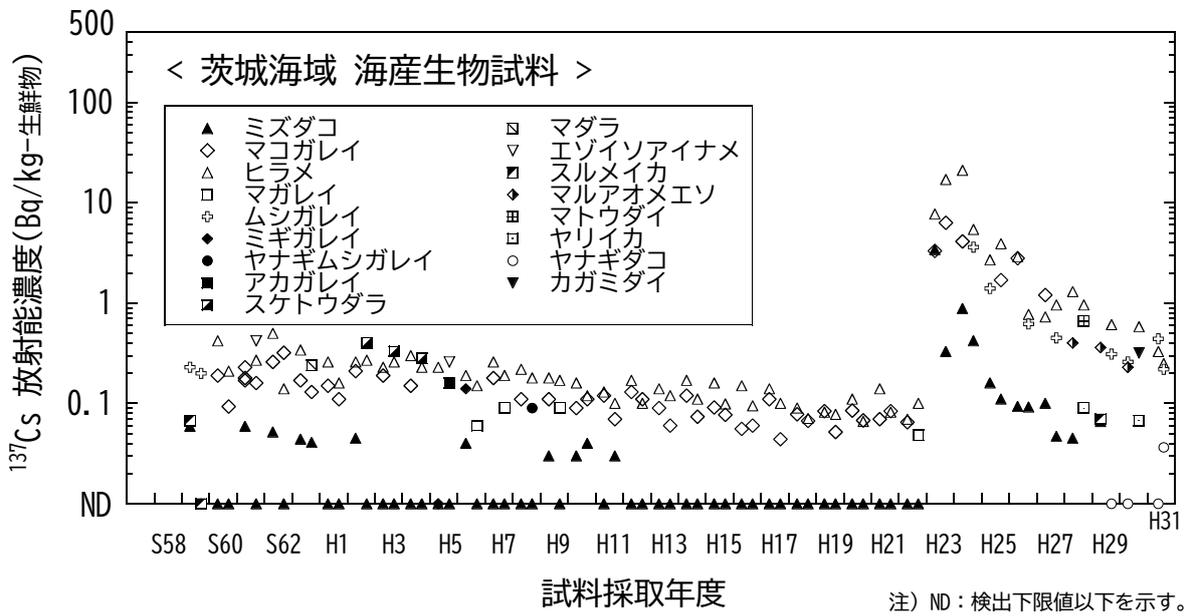


図 I-1-6-5 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (茨城海域)

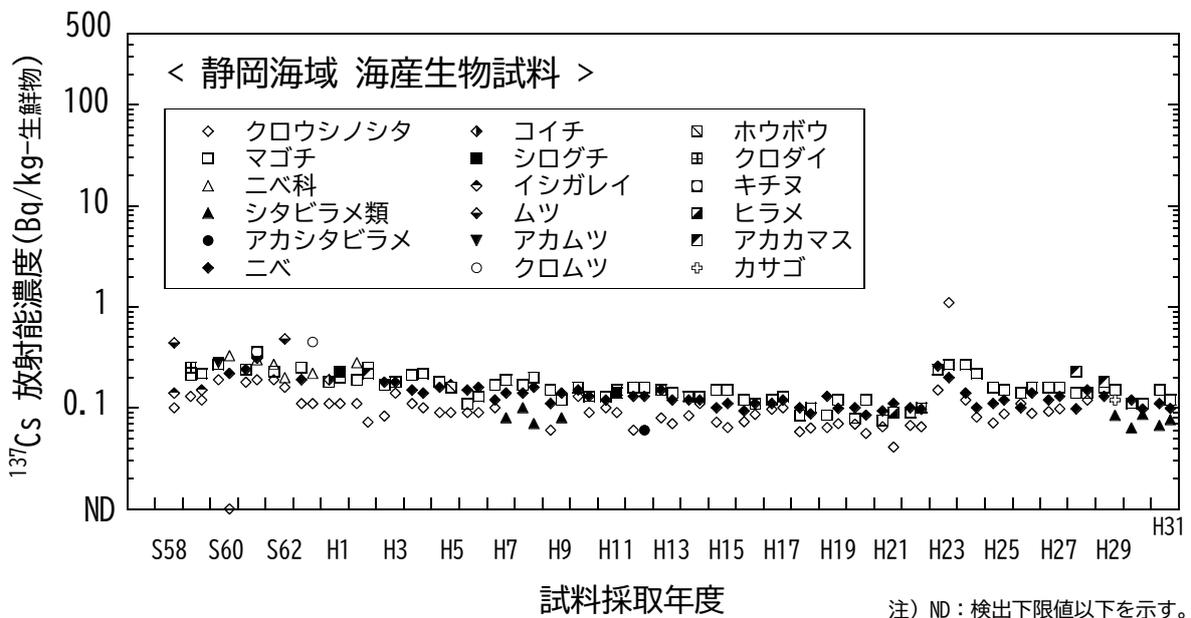


図 I-1-6-6 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (静岡海域)

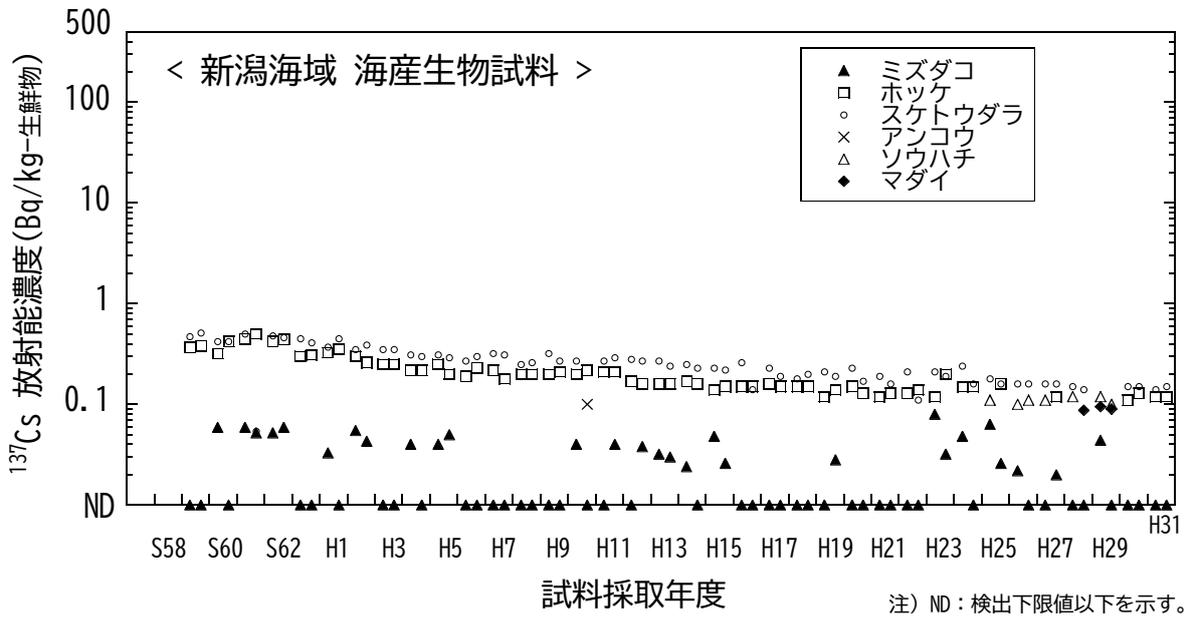


図 I-1-6-7 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (新潟海域)

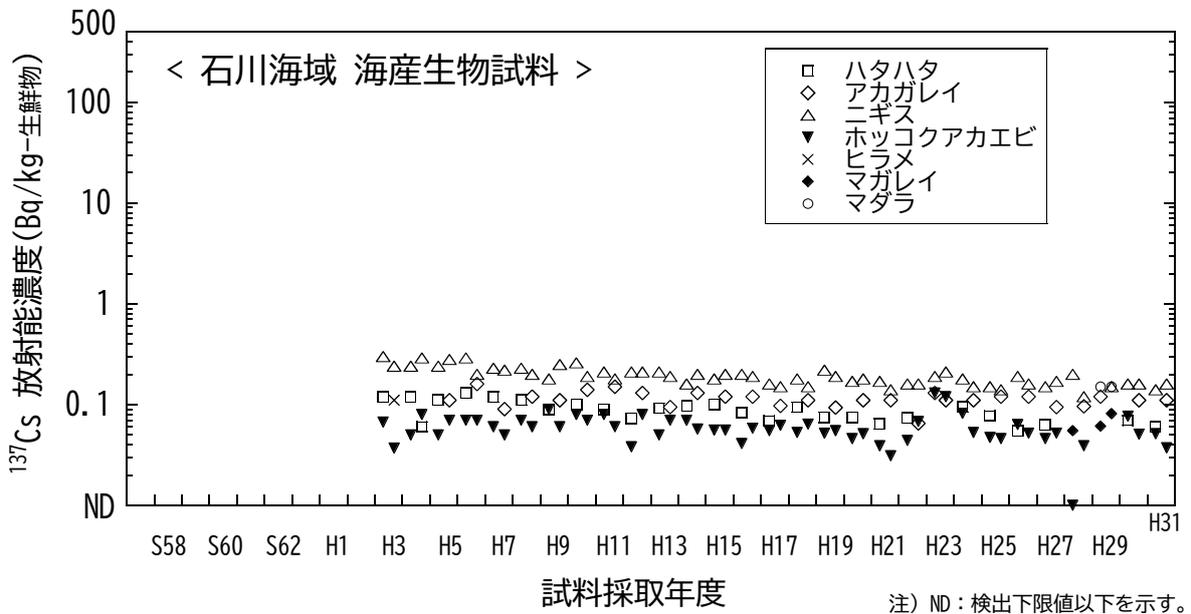


図 I-1-6-8 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (石川海域)

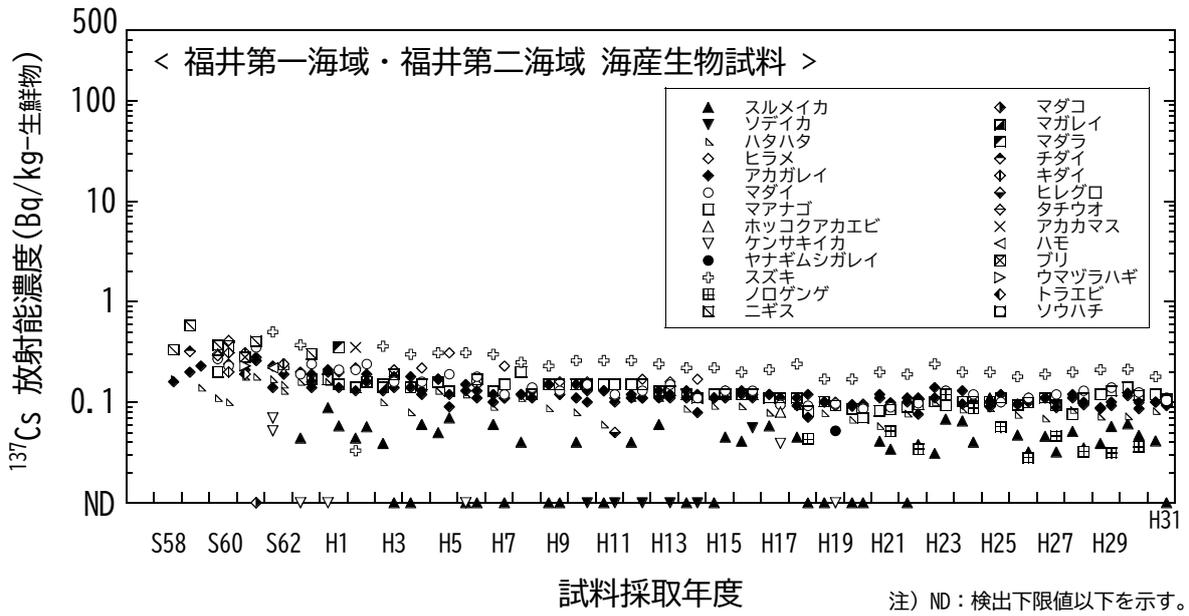


図 I-1-6-9 海産生物試料の ¹³⁷Cs 濃度経年変化 (福井第一海域・福井第二海域)

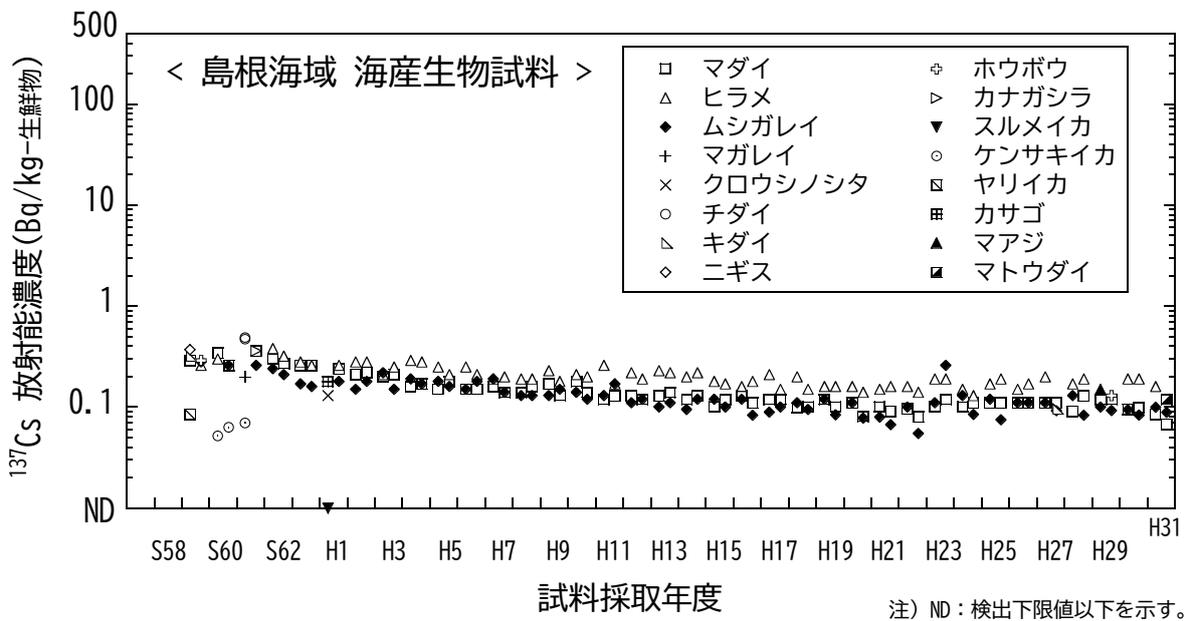


図 I-1-6-10 海産生物試料の ¹³⁷Cs 濃度経年変化 (島根海域)

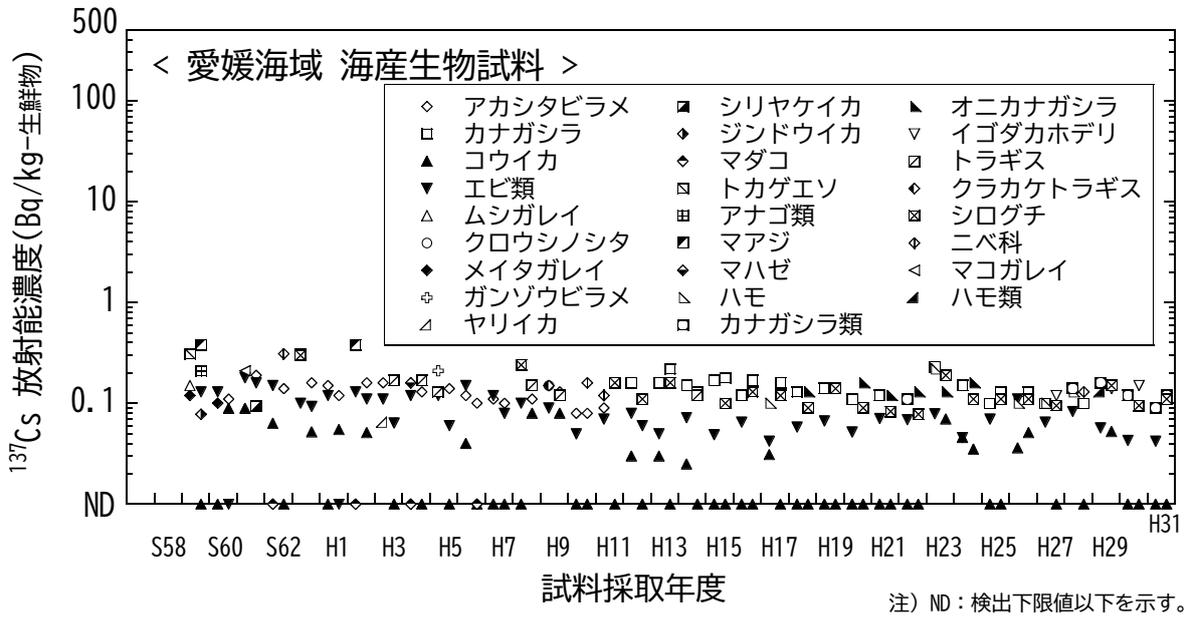


図 I-1-6-11 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (愛媛海域)

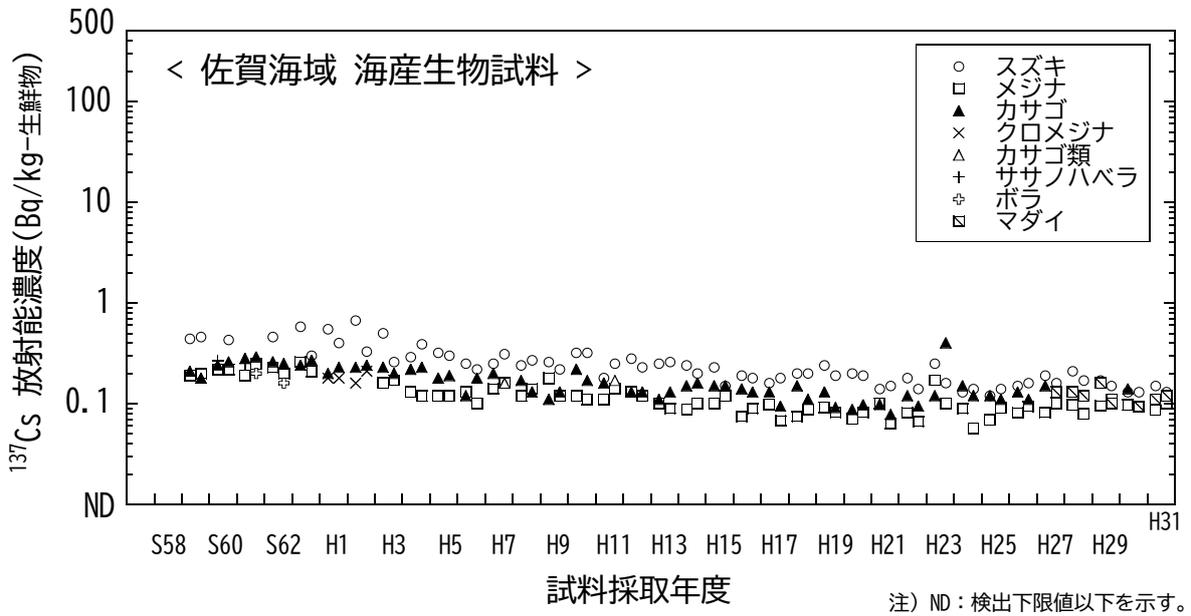


図 I-1-6-12 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (佐賀海域)

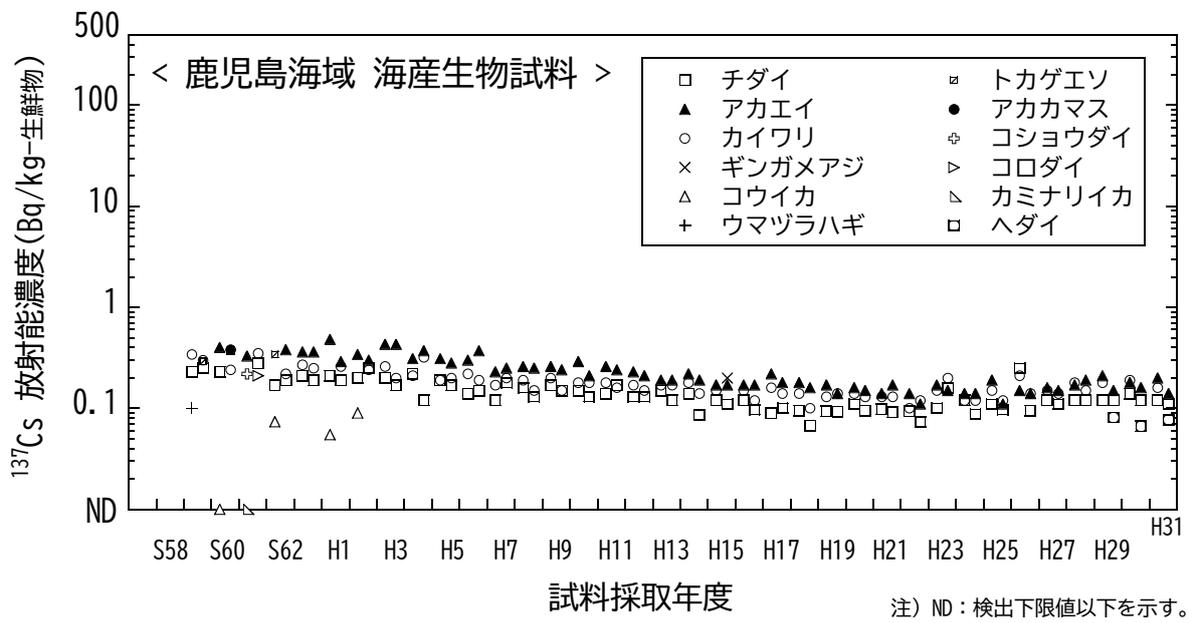
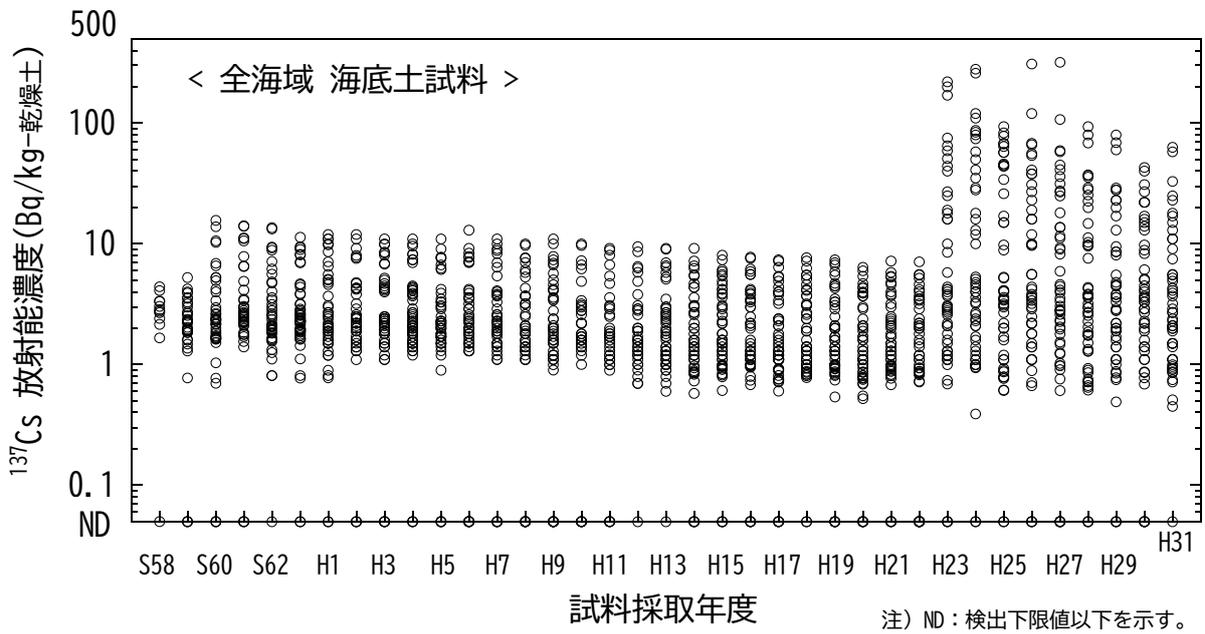


図 I-1-6-13 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (鹿児島海域)



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 濃度経年変化 (全海域)

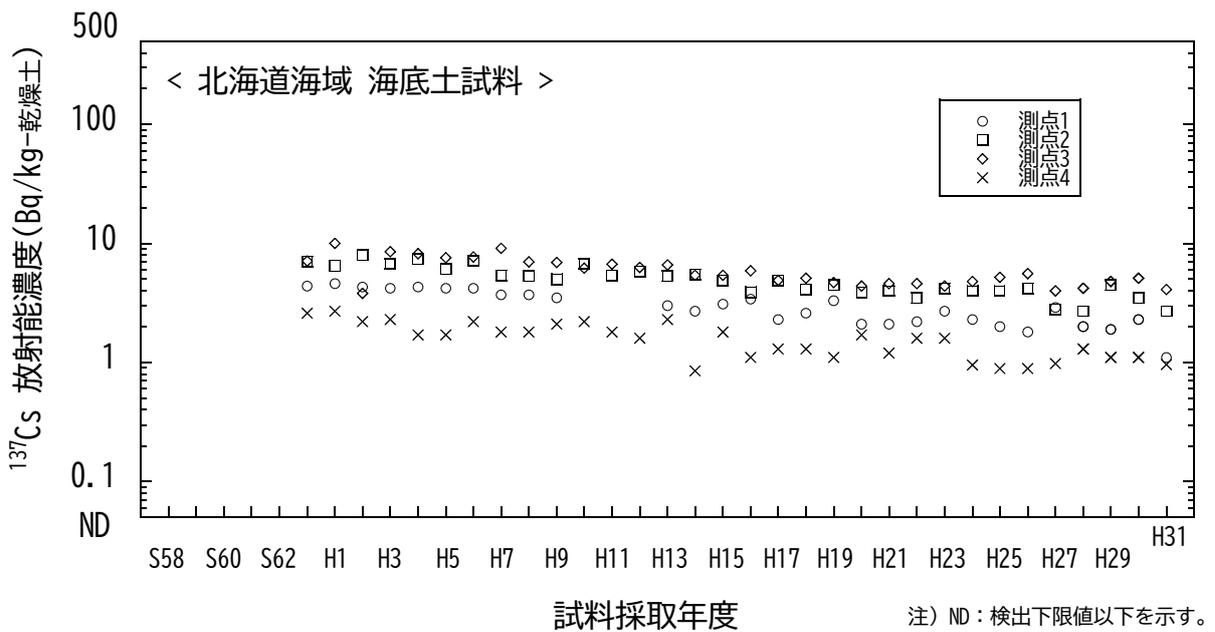


図 I-1-6-15 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (北海道海域)

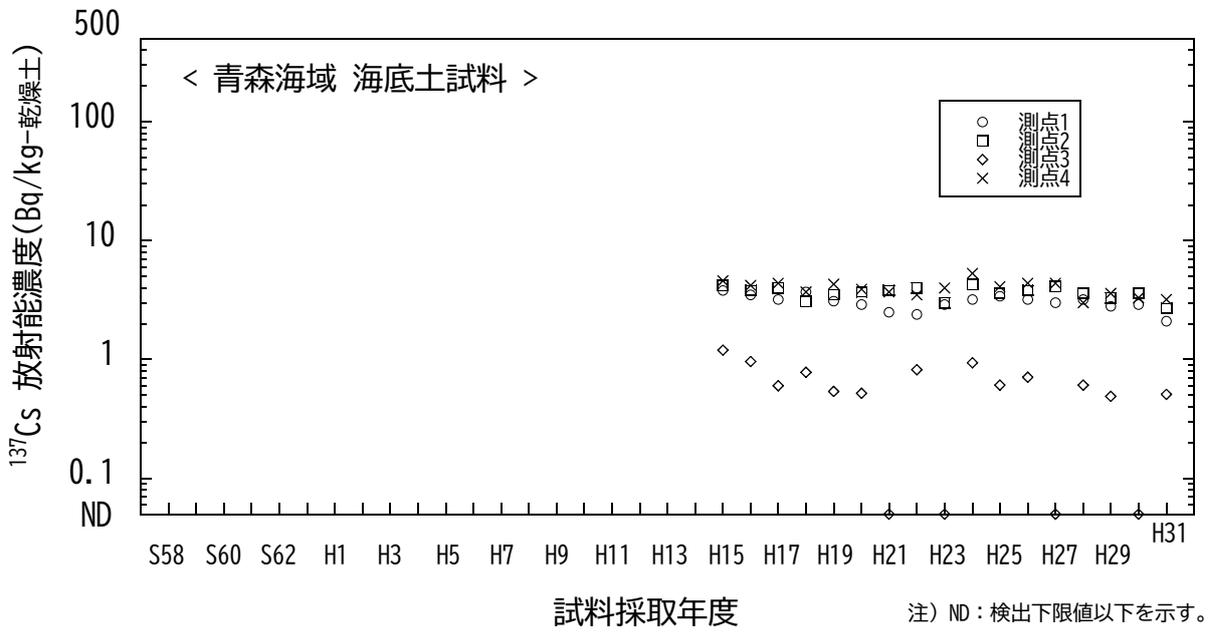


図 I-1-6-16 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (青森海域)

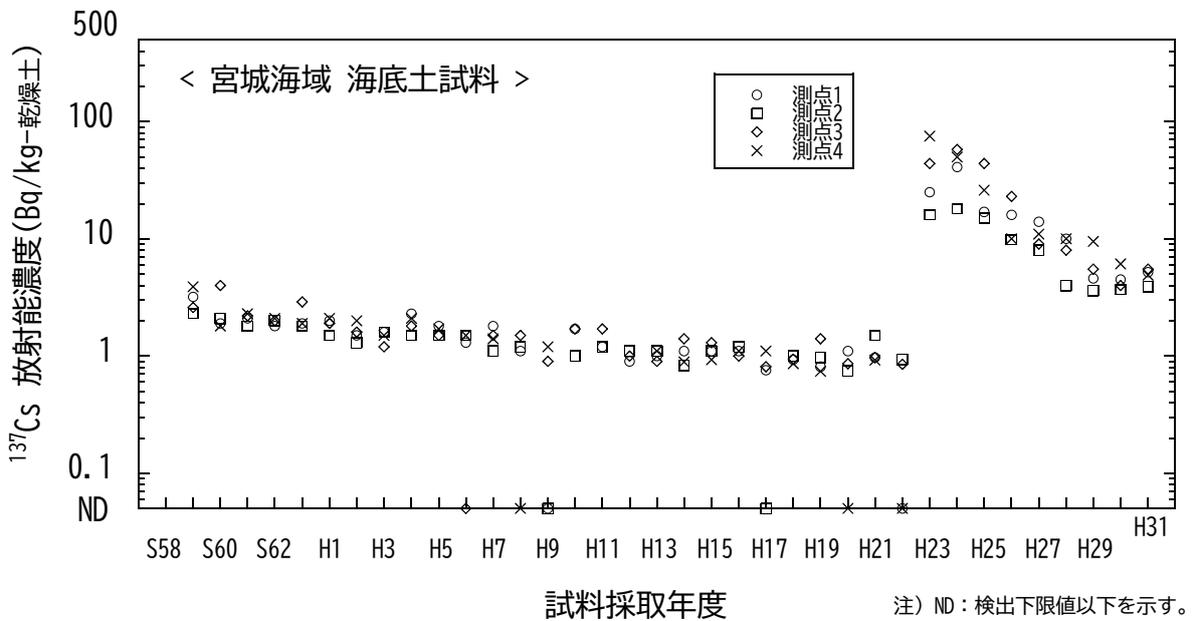


図 I-1-6-17 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (宮城海域)

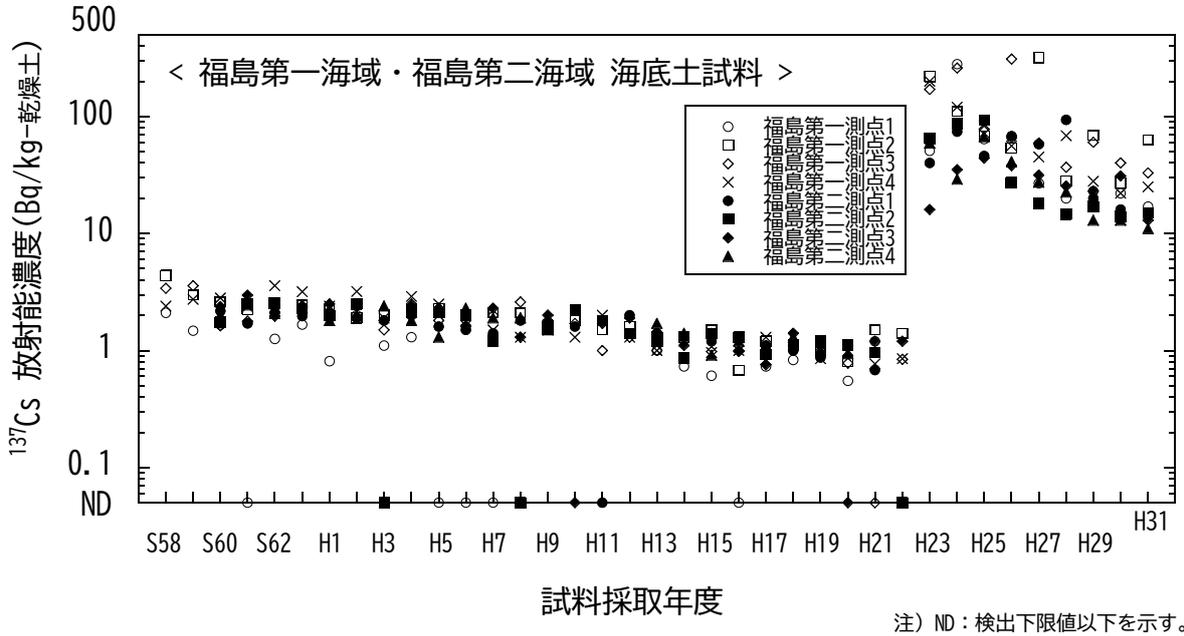


図 I-1-6-18 海底土試料の ¹³⁷Cs 濃度経年変化 (福島第一海域・福島第二海域)

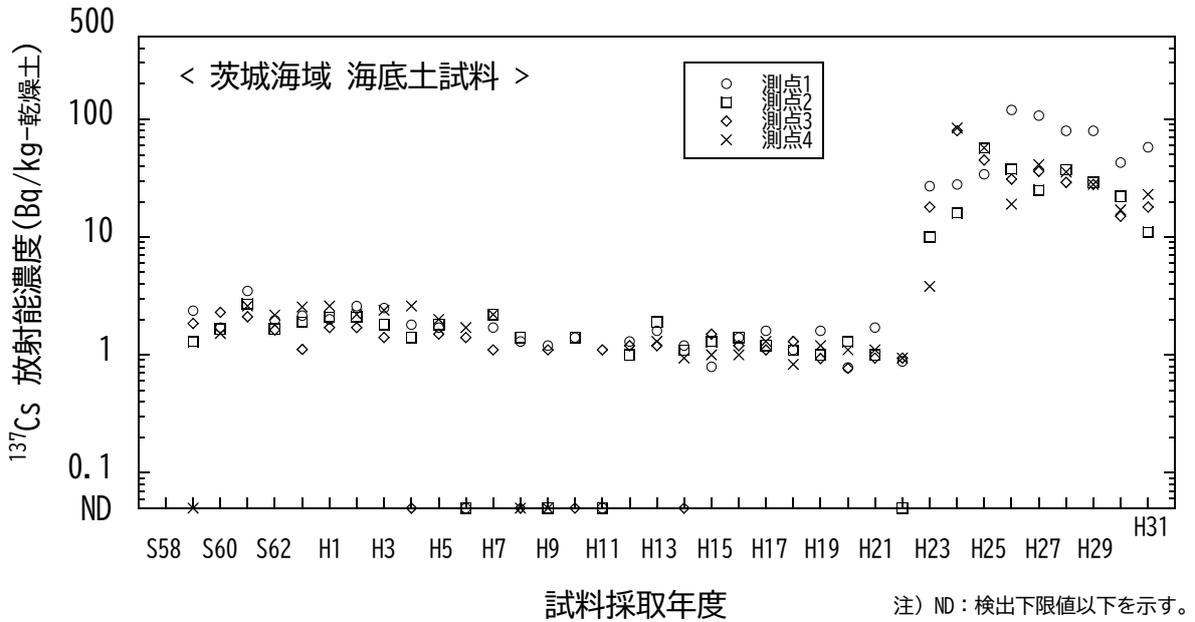


図 I-1-6-19 海底土試料の ¹³⁷Cs 濃度経年変化 (茨城海域)

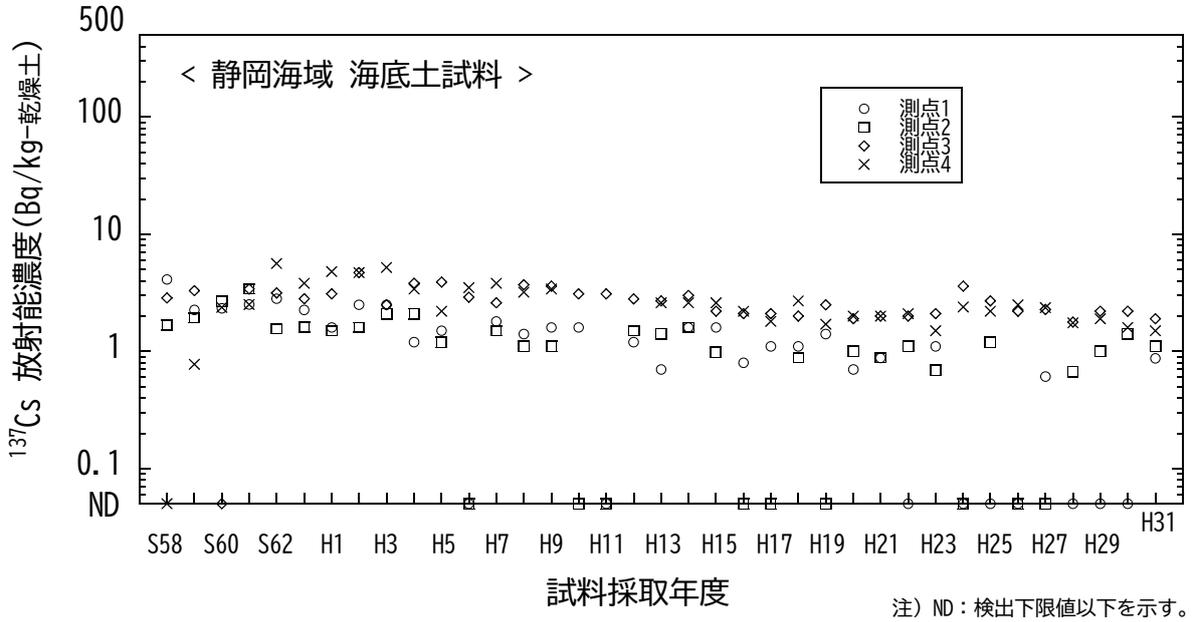


図 I-1-6-20 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (静岡海域)

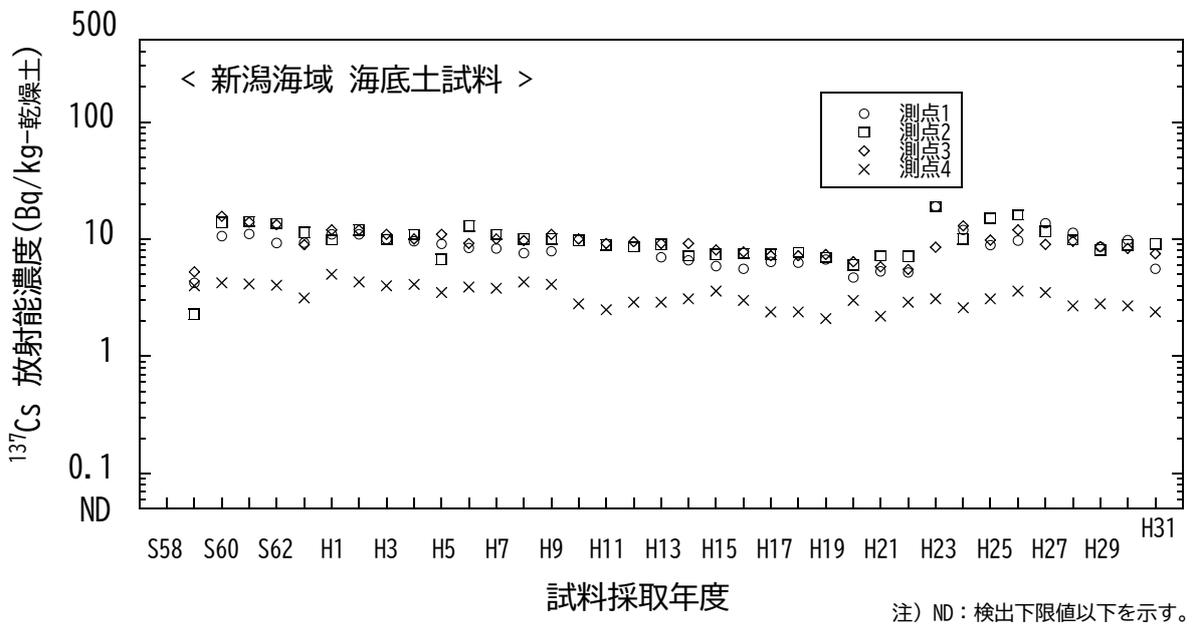


図 I-1-6-21 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (新潟海域)

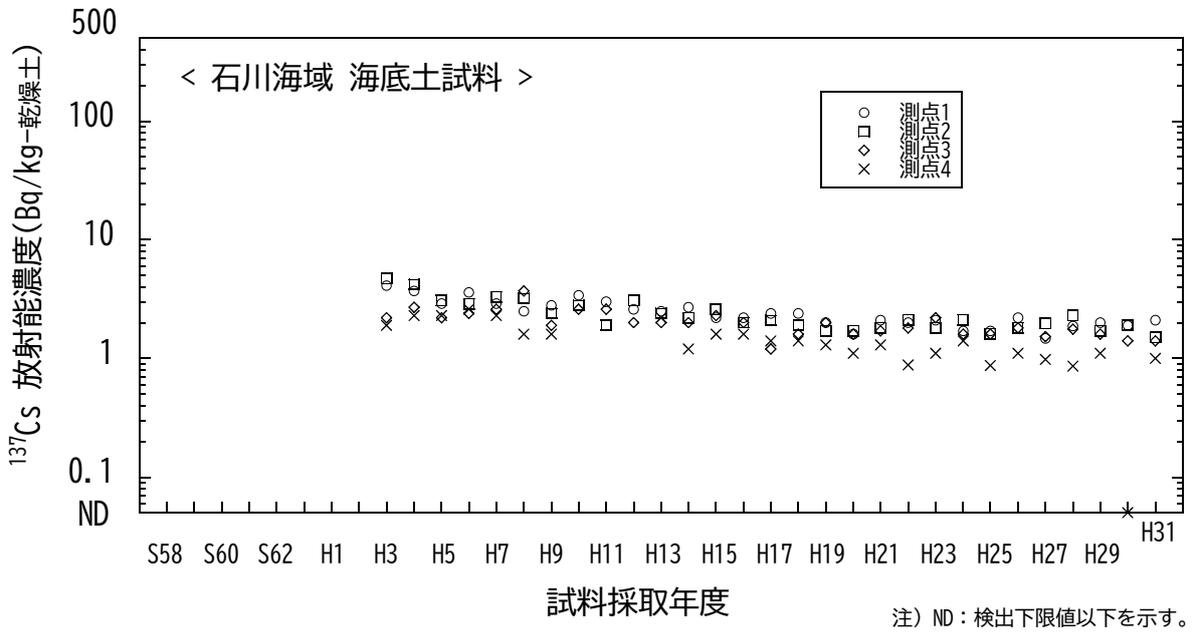


図 I-1-6-22 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (石川海域)

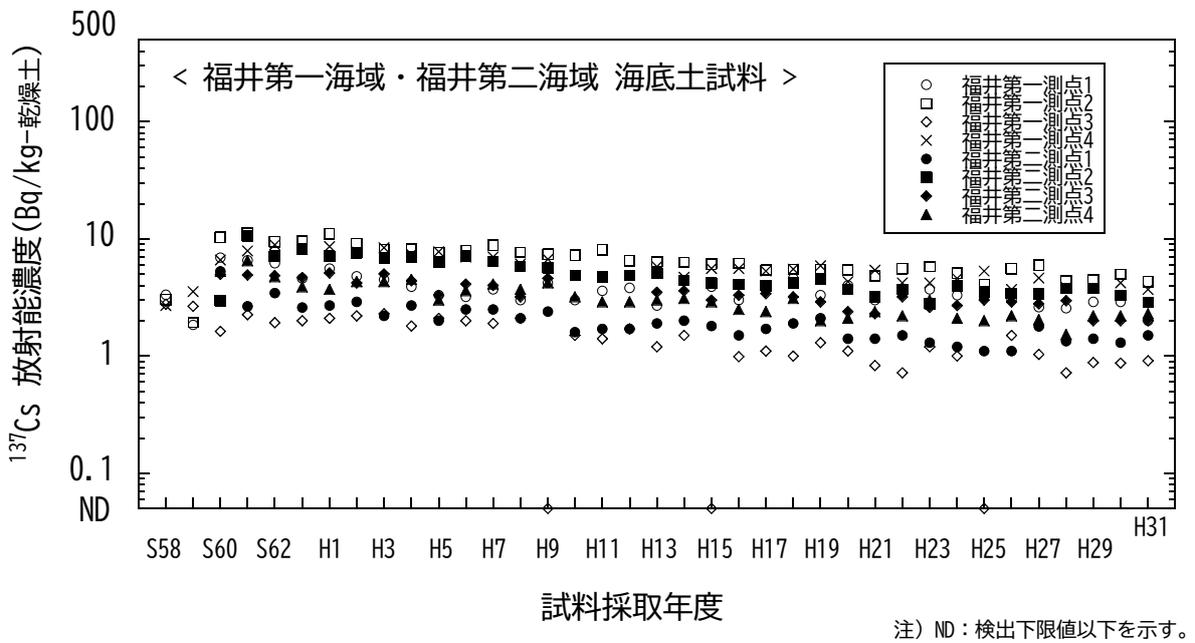


図 I-1-6-23 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (福井第一海域・福井第二海域)

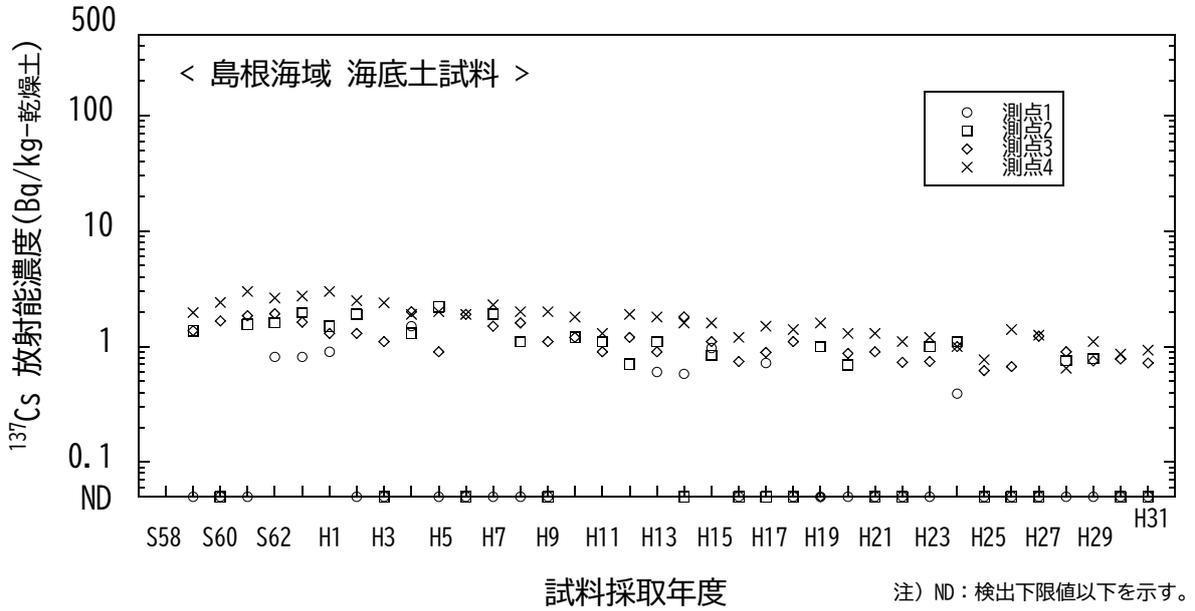


図 I-1-6-24 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化（島根海域）

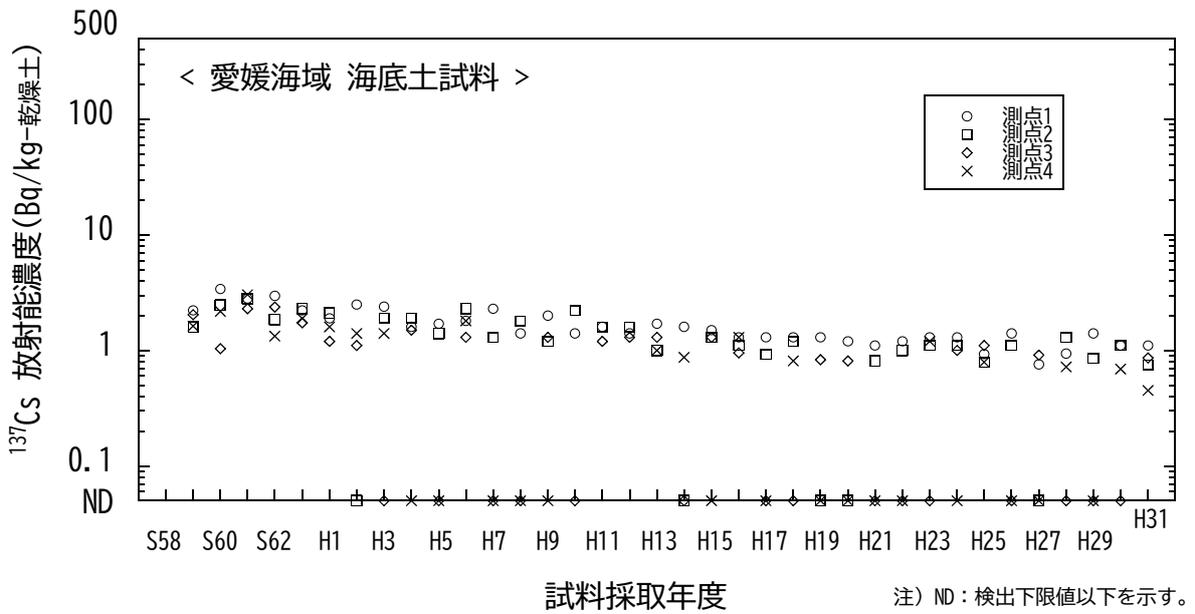


図 I-1-6-25 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化（愛媛海域）

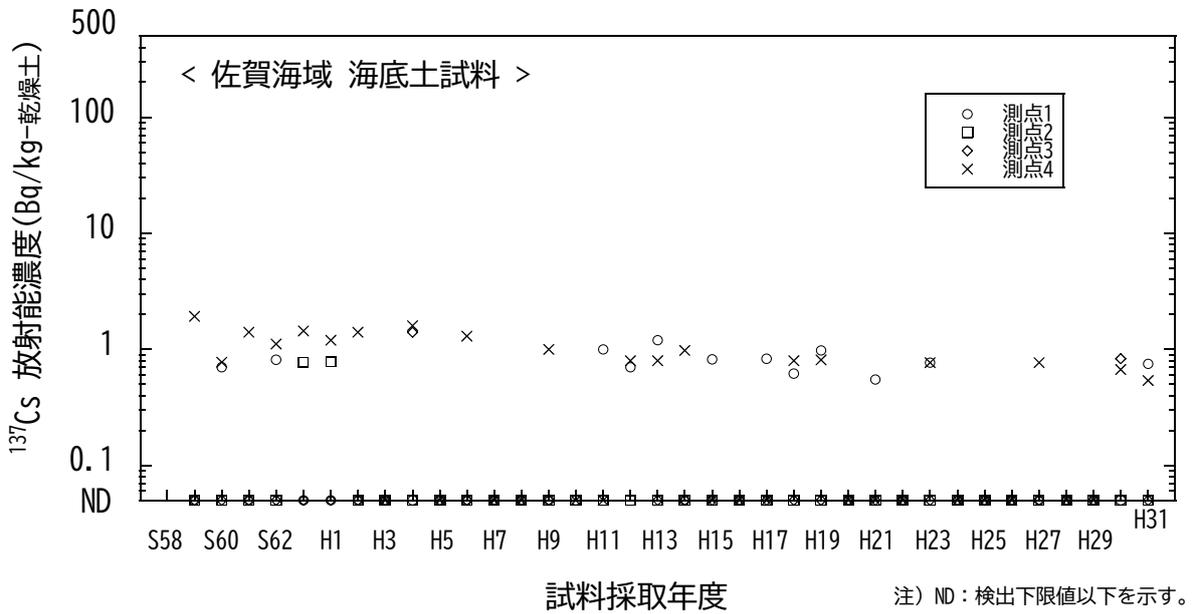


図 I-1-6-26 海底土試料の¹³⁷Cs濃度経年変化 (佐賀海域)

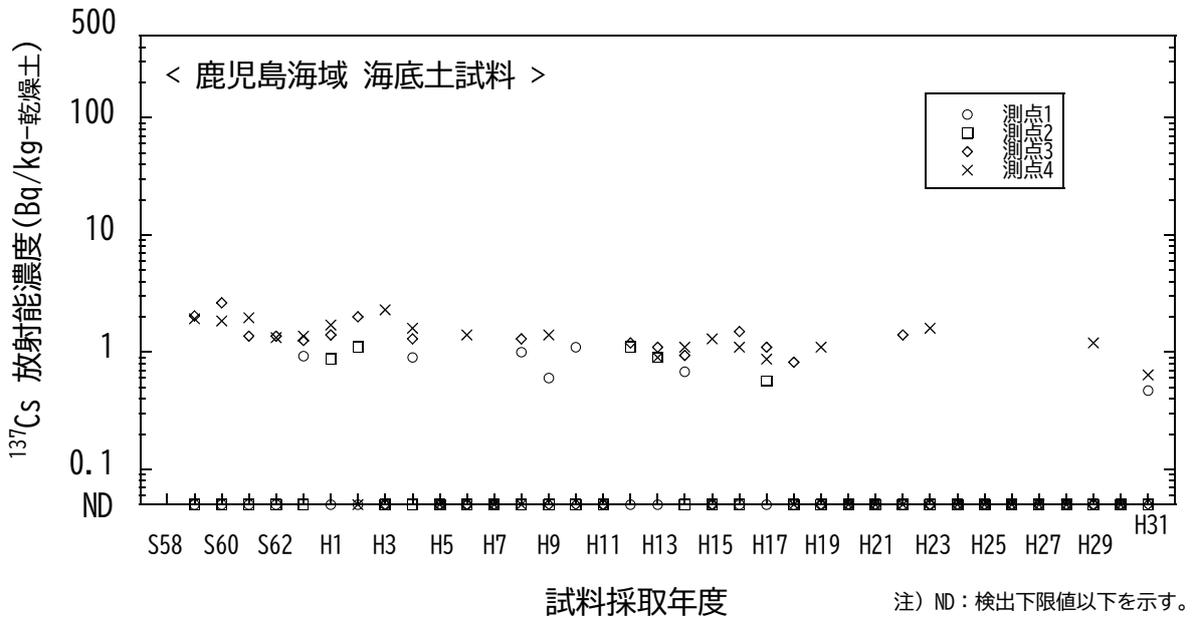


図 I-1-6-27 海底土試料の¹³⁷Cs濃度経年変化 (鹿児島海域)

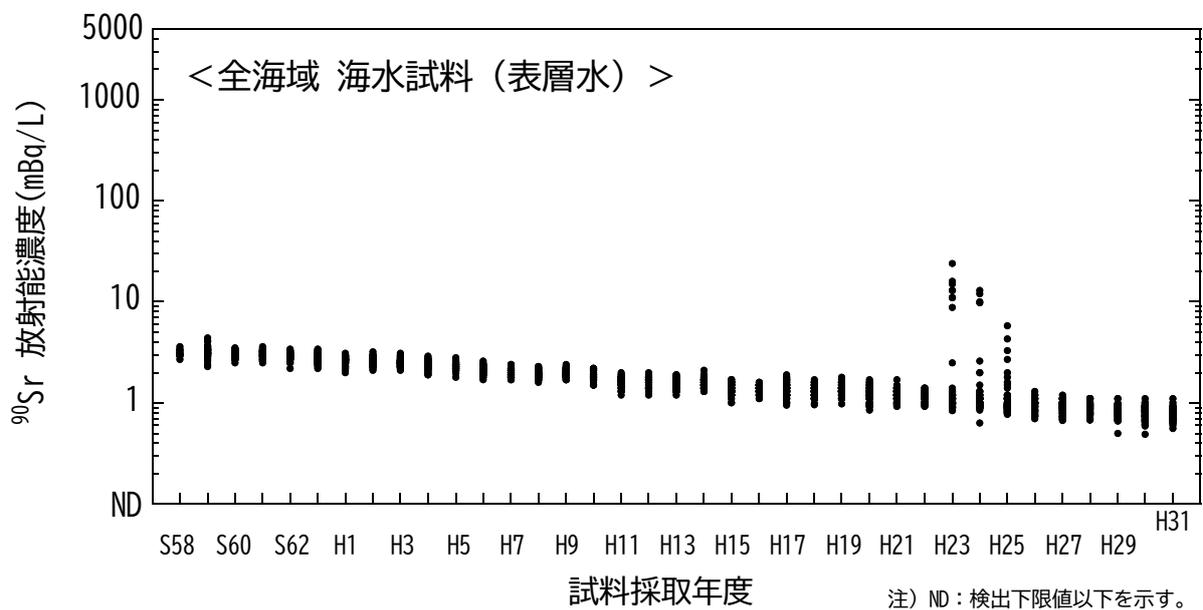


図 I-1-6-28 海水試料の ^{90}Sr 濃度経年変化（全海域・表層水）

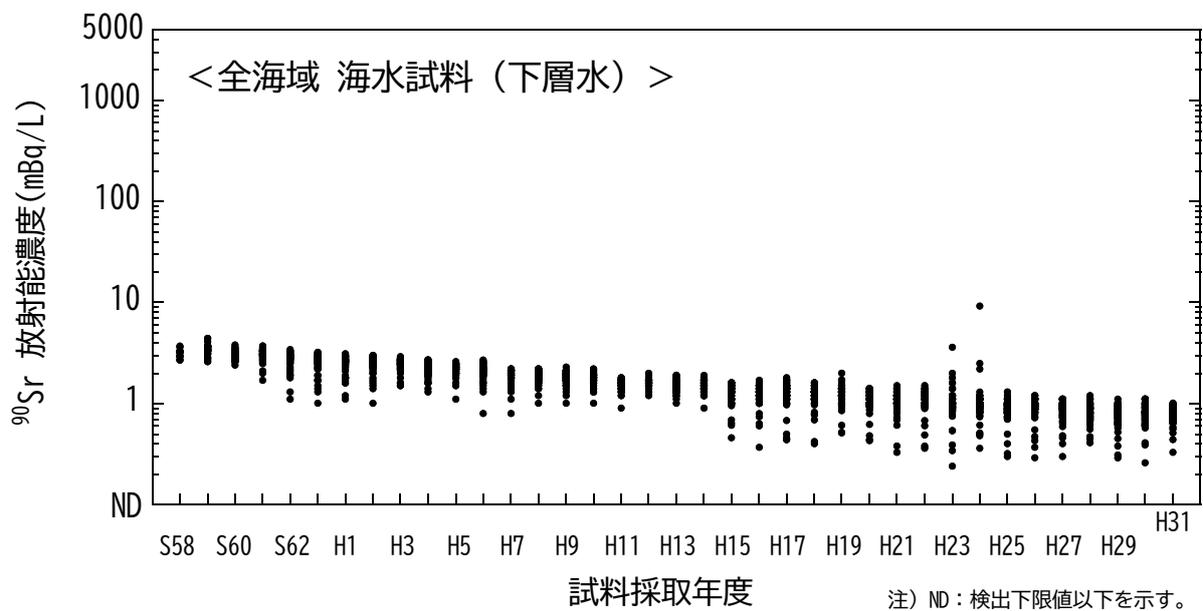


図 I-1-6-29 海水試料の ^{90}Sr 濃度経年変化（全海域・下層水）

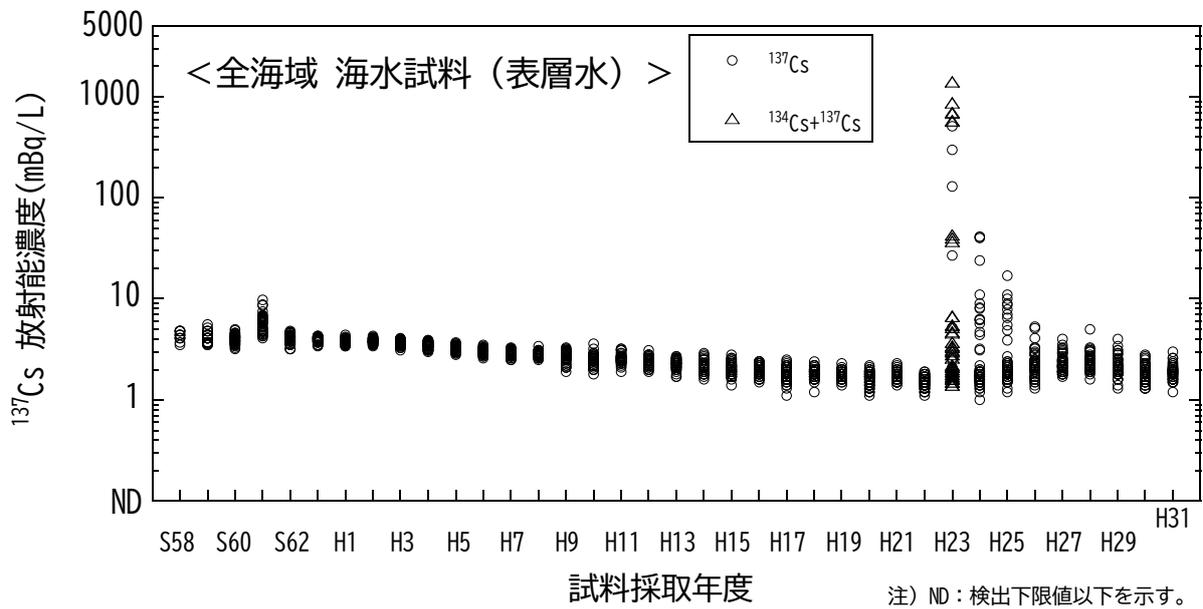


図 I-1-6-30 海水試料の ^{137}Cs 濃度経年変化（全海域・表層水）

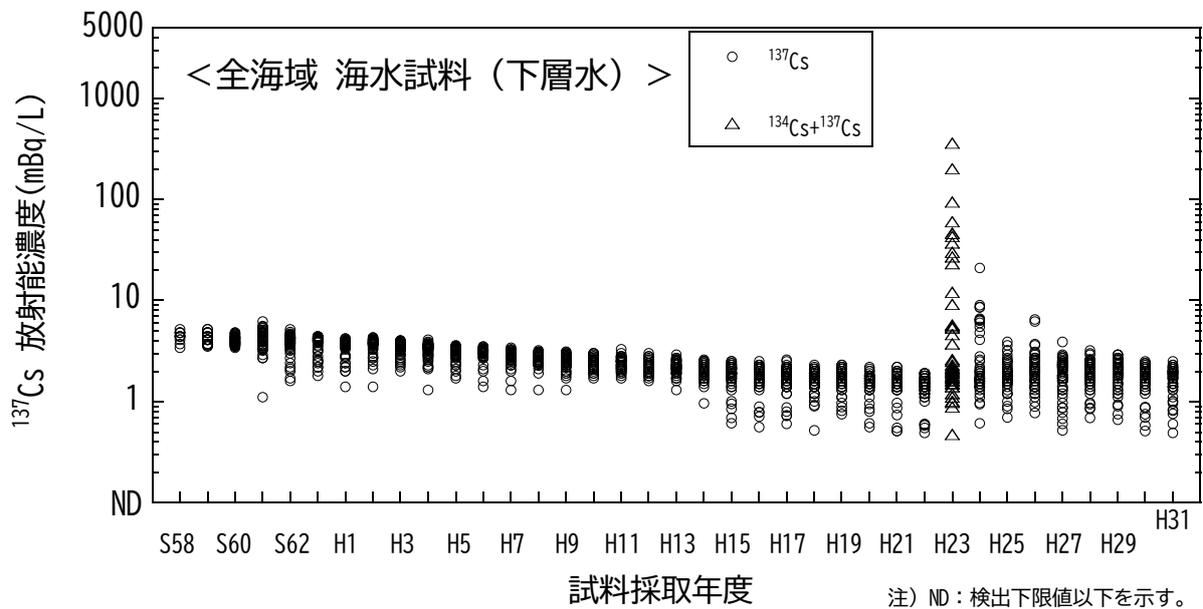


図 I-1-6-31 海水試料の ^{137}Cs 濃度経年変化（全海域・下層水）

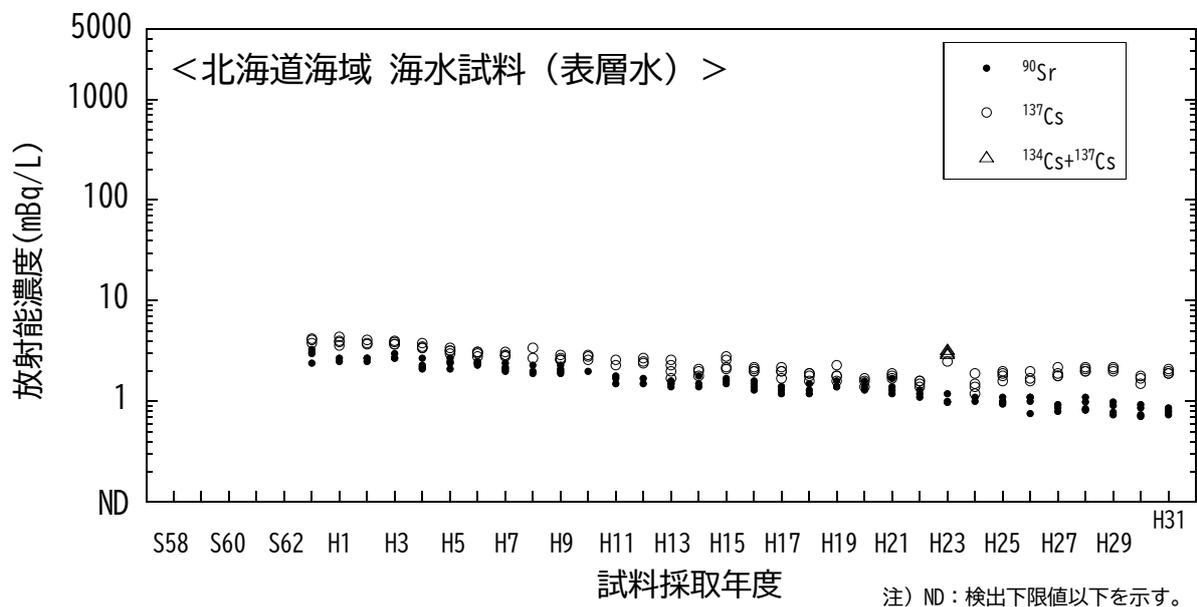


図 I-1-6-32 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（北海道海域・表層水）

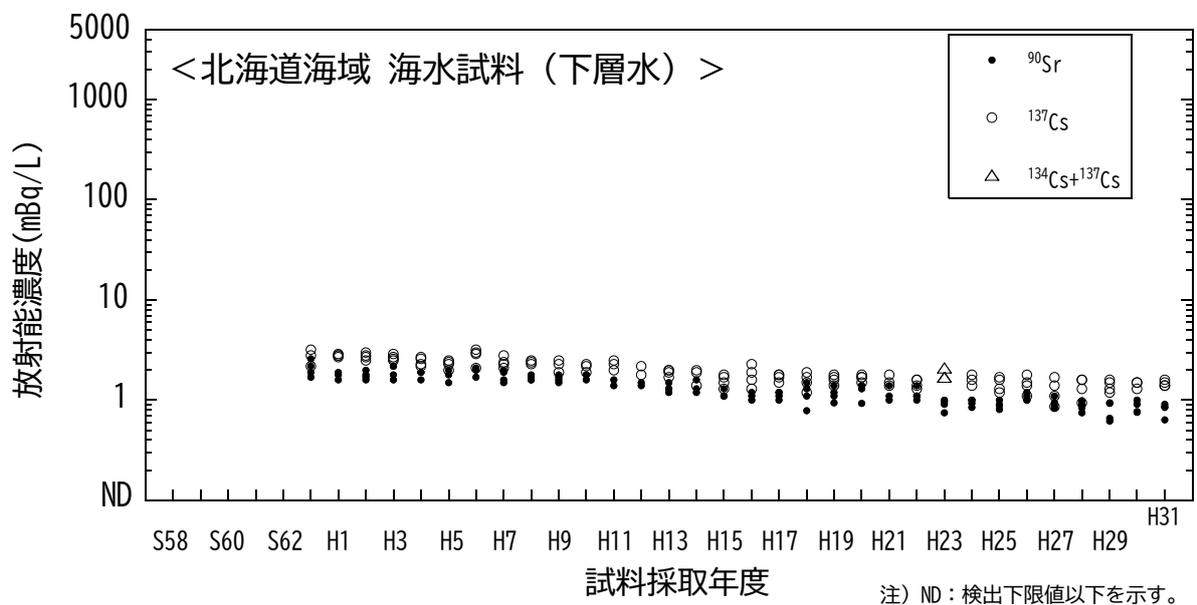


図 I-1-6-33 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（北海道海域・下層水）

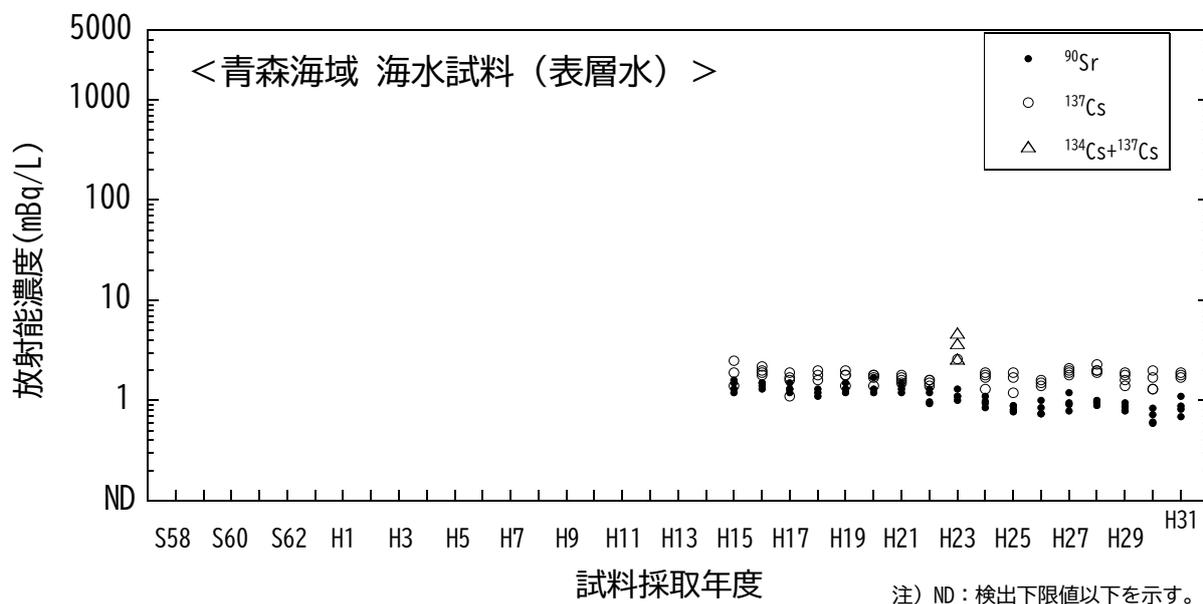


図 I-1-6-34 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化 (青森海域・表層水)

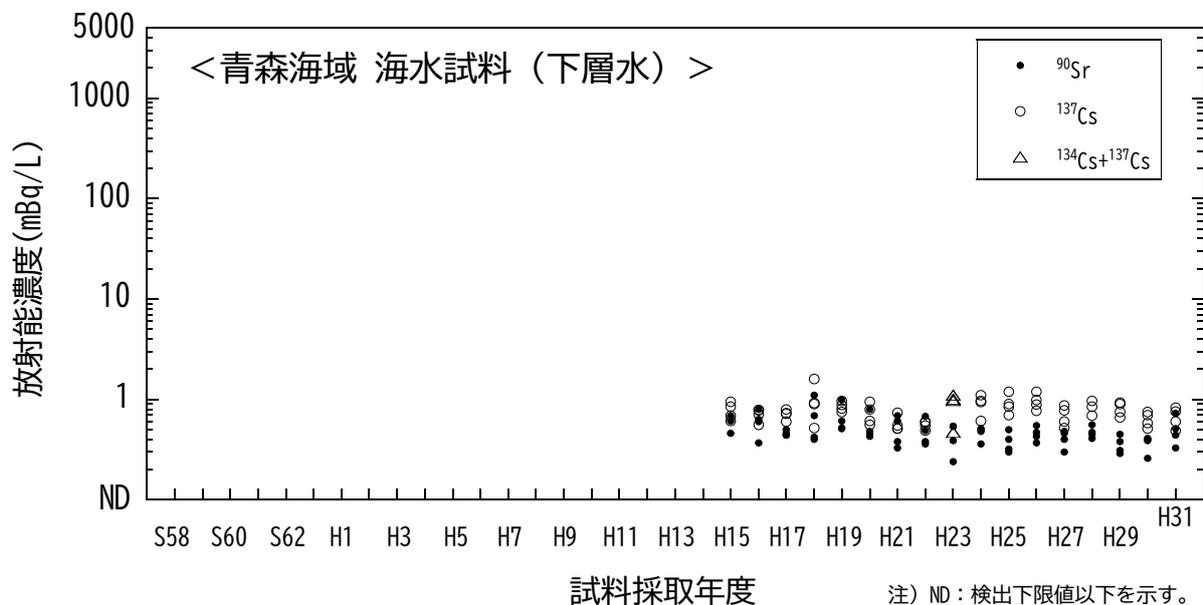


図 I-1-6-35 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化 (青森海域・下層水)

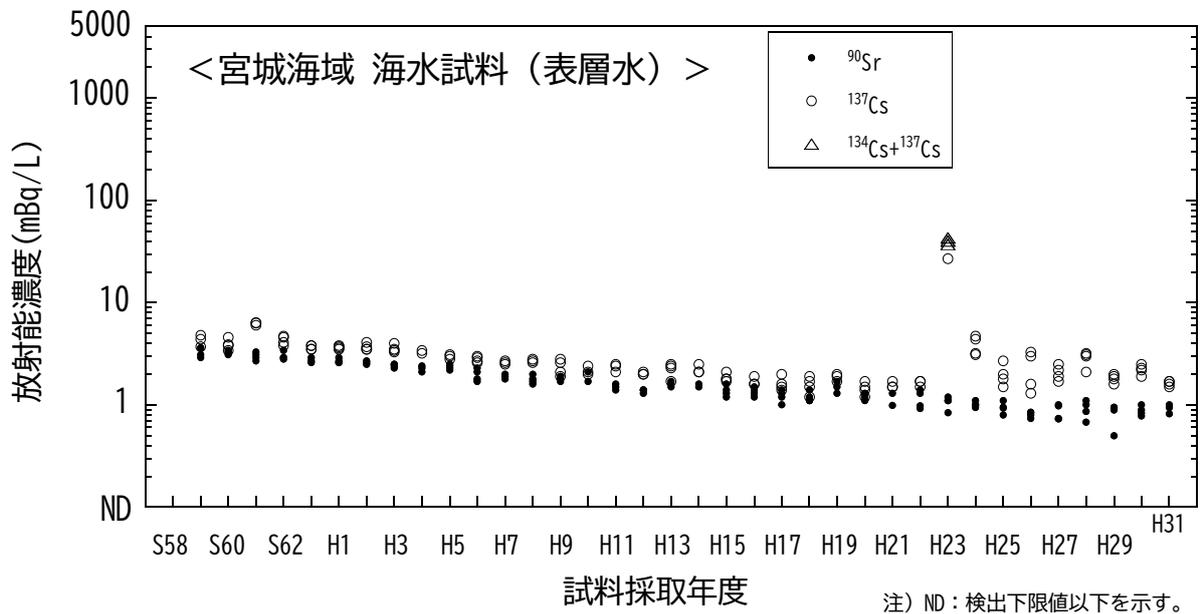


図 I-1-6-36 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（宮城海域・表層水）

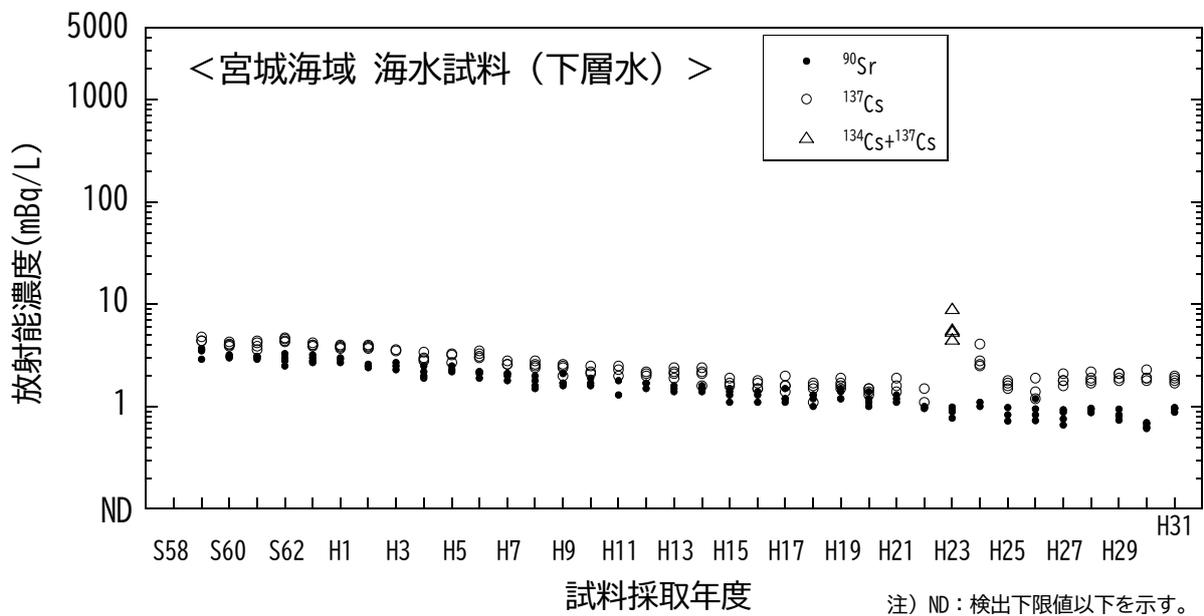


図 I-1-6-37 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（宮城海域・下層水）

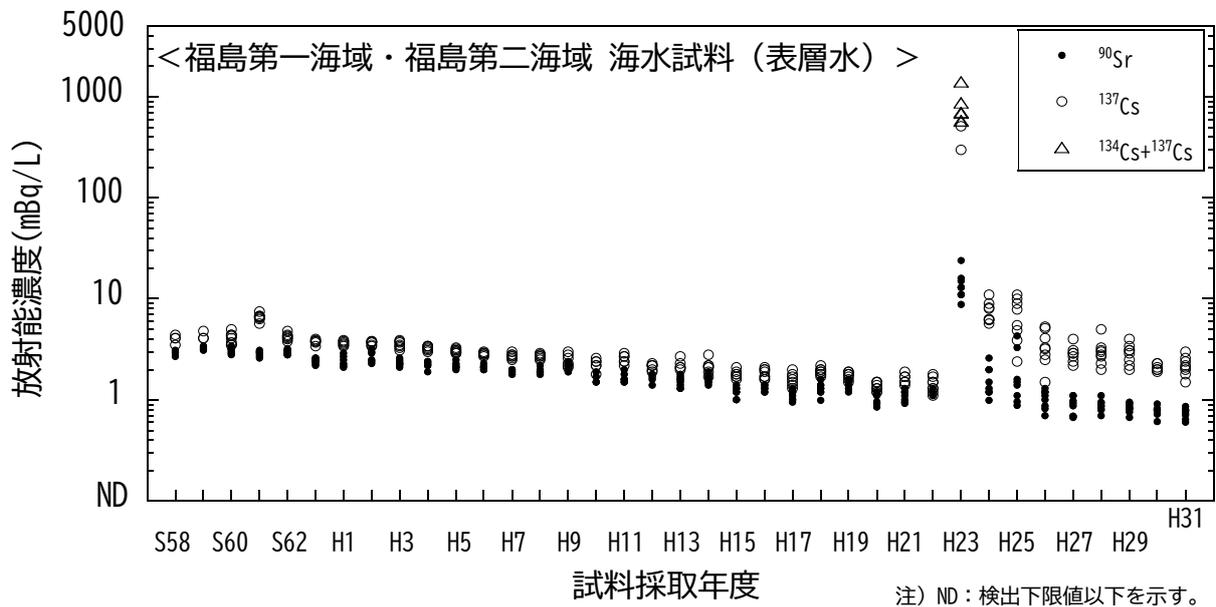


図 I-1-6-38 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化
(福島第一海域・福島第二海域・表層水)

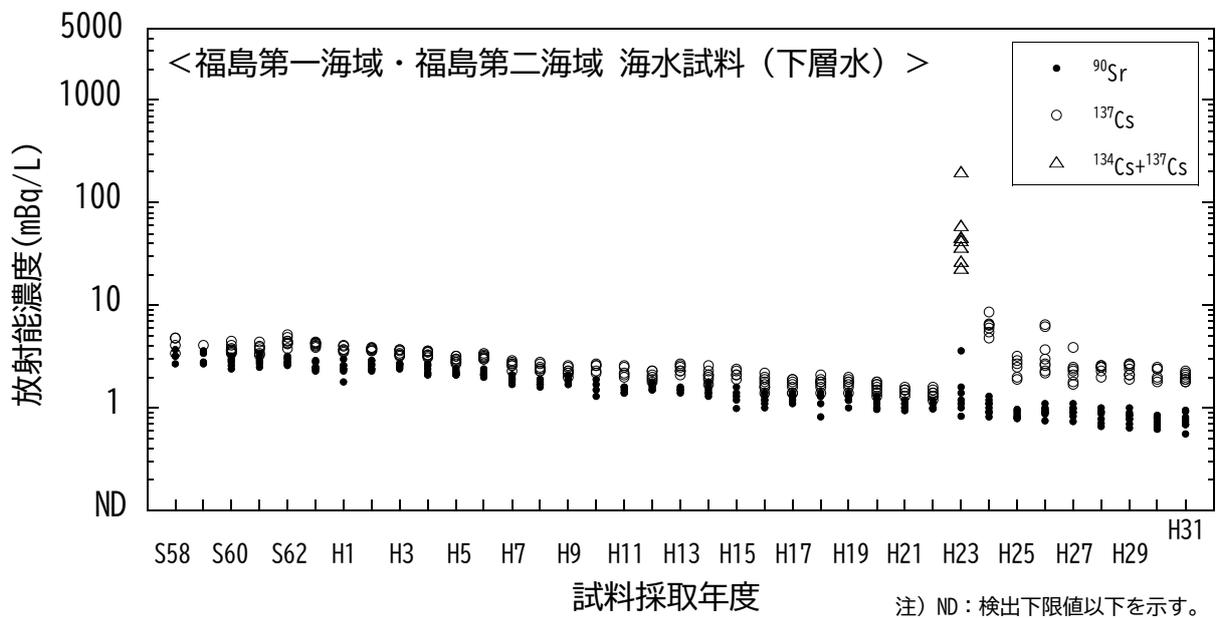


図 I-1-6-39 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化
(福島第一海域・福島第二海域・下層水)

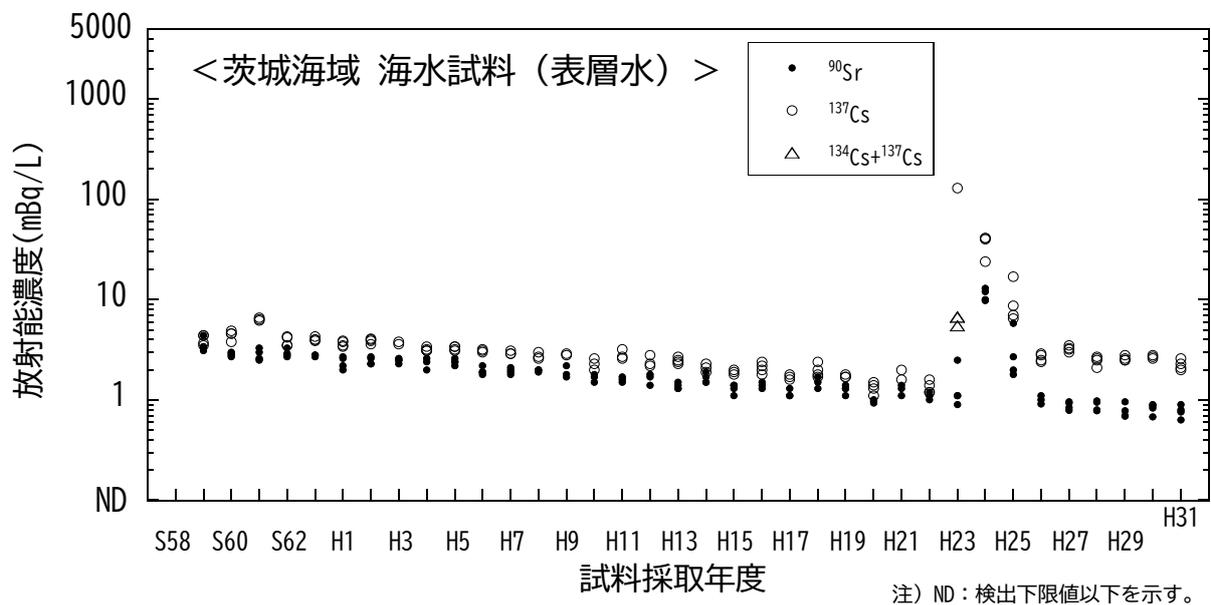


図 I-1-6-40 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（茨城海域・表層水）

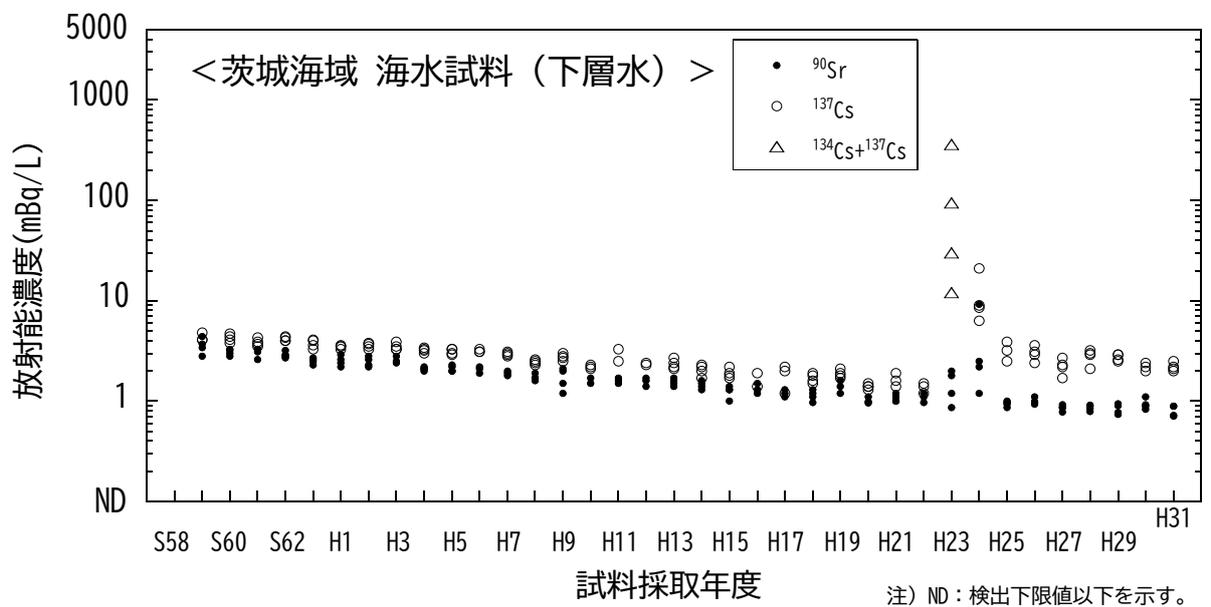


図 I-1-6-41 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（茨城海域・下層水）

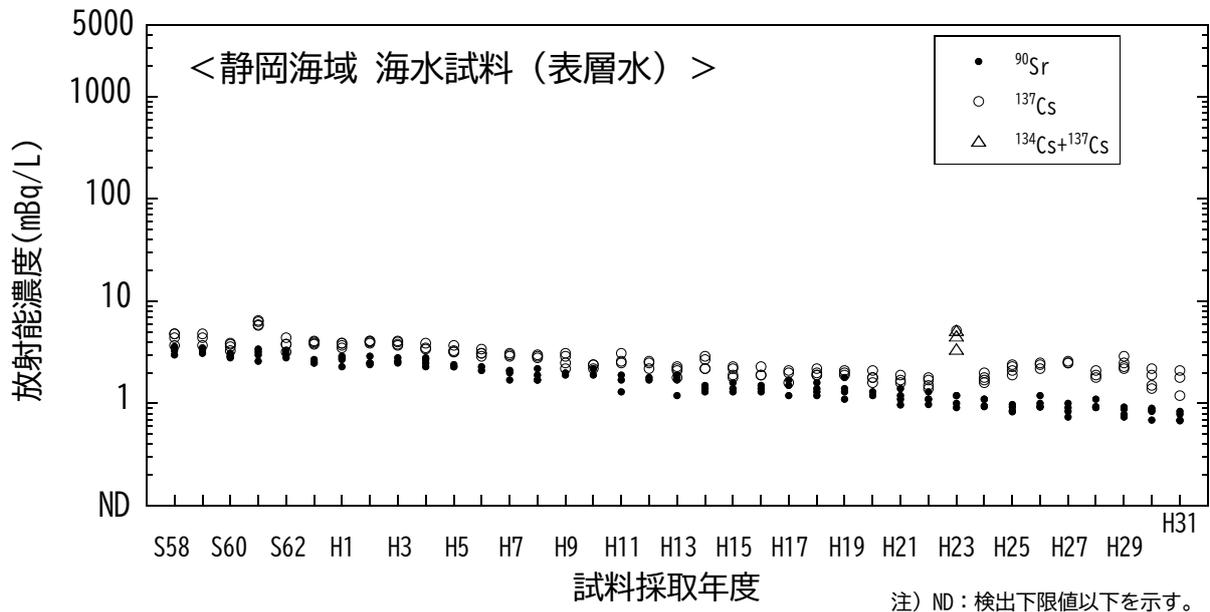


図 I-1-6-42 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（静岡海域・表層水）

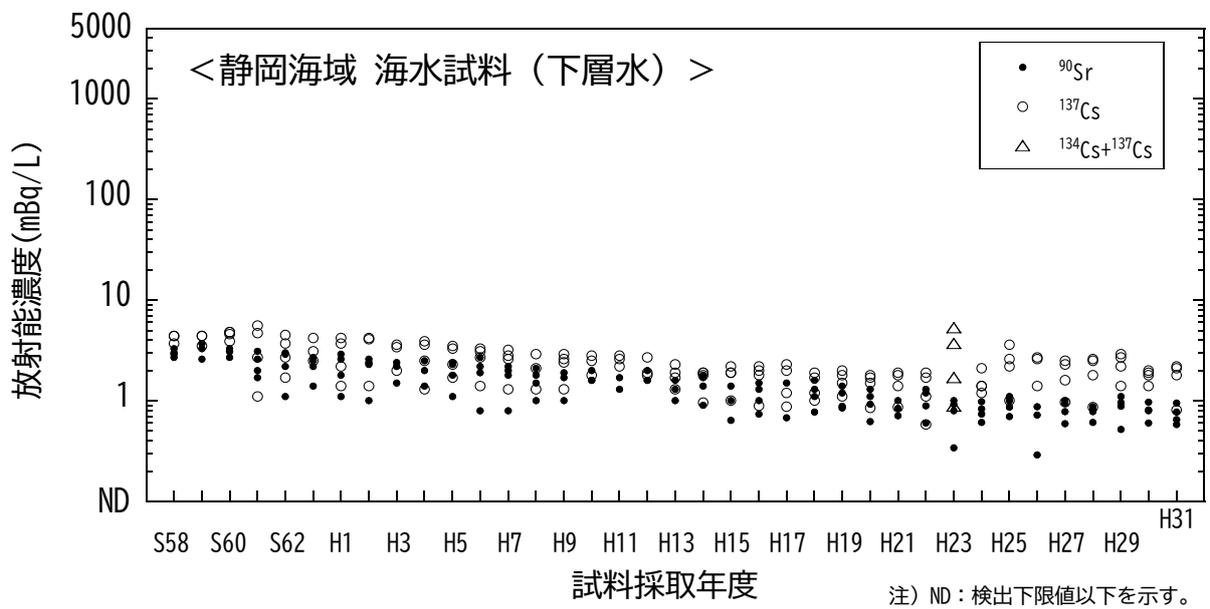


図 I-1-6-43 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（静岡海域・下層水）

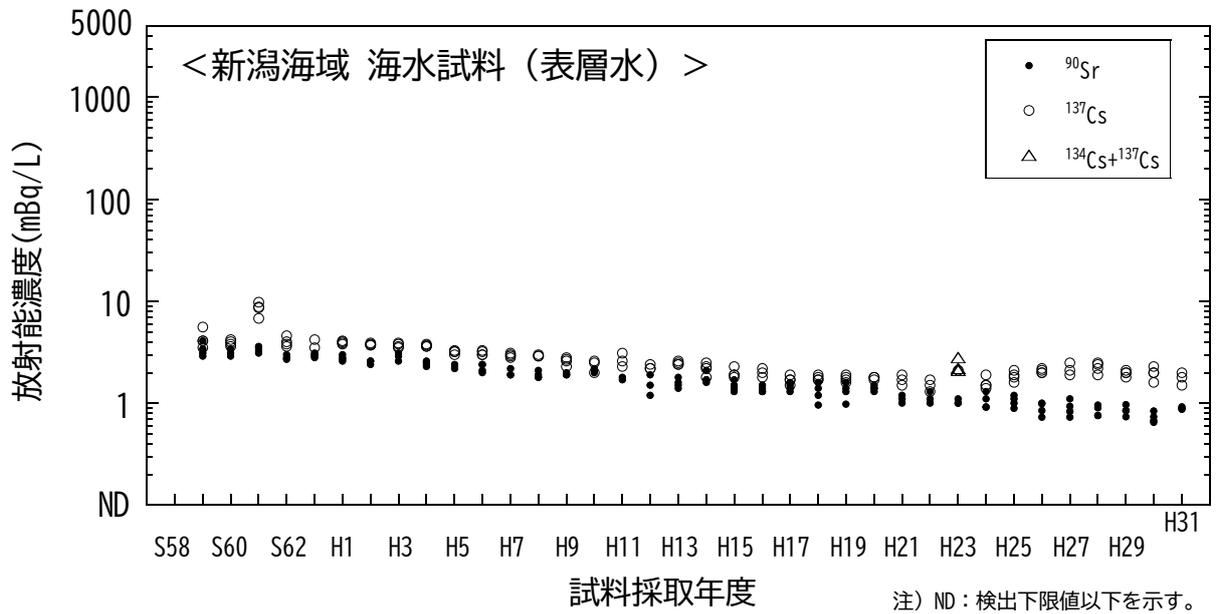


図 I-1-6-44 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化 (新潟海域・表層水)

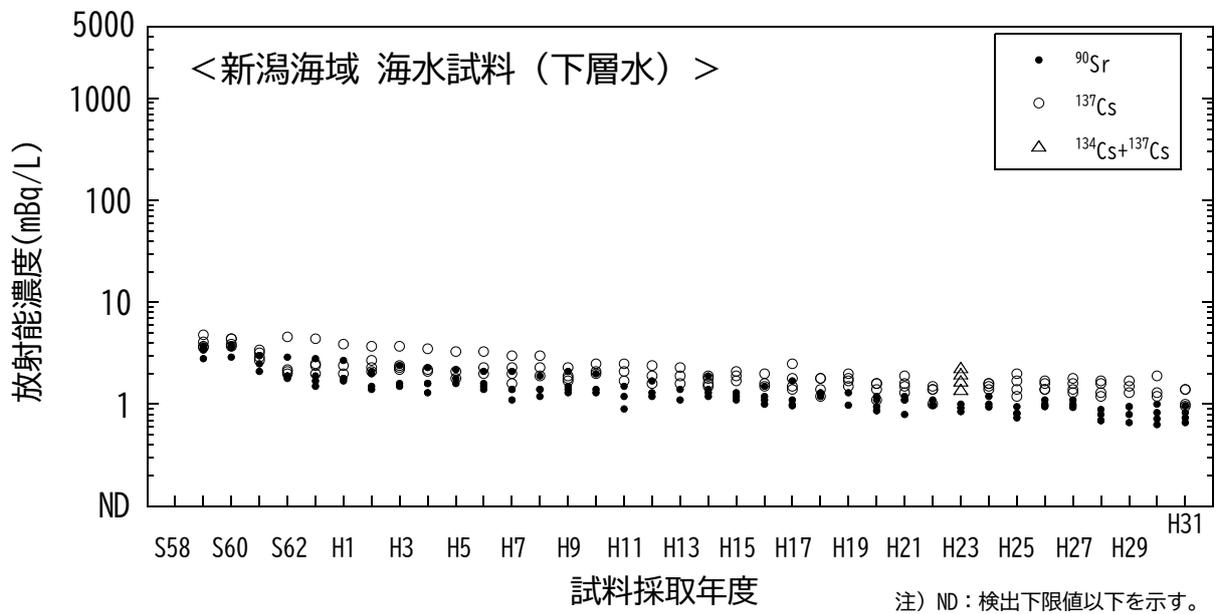


図 I-1-6-45 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化 (新潟海域・下層水)

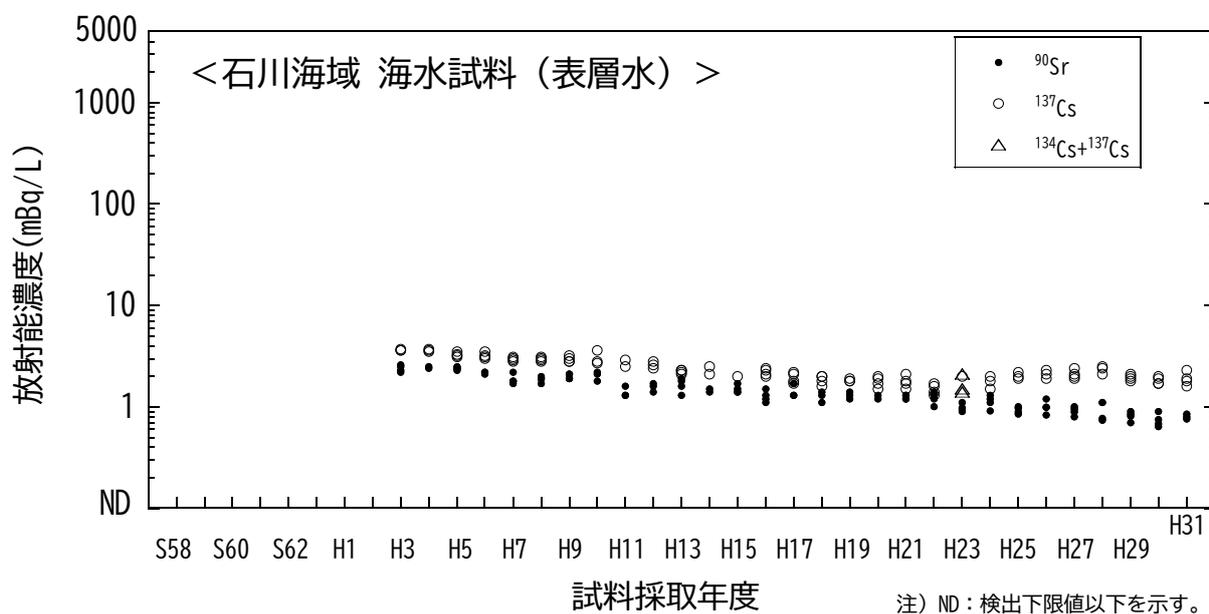


図 I-1-6-46 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（石川海域・表層水）

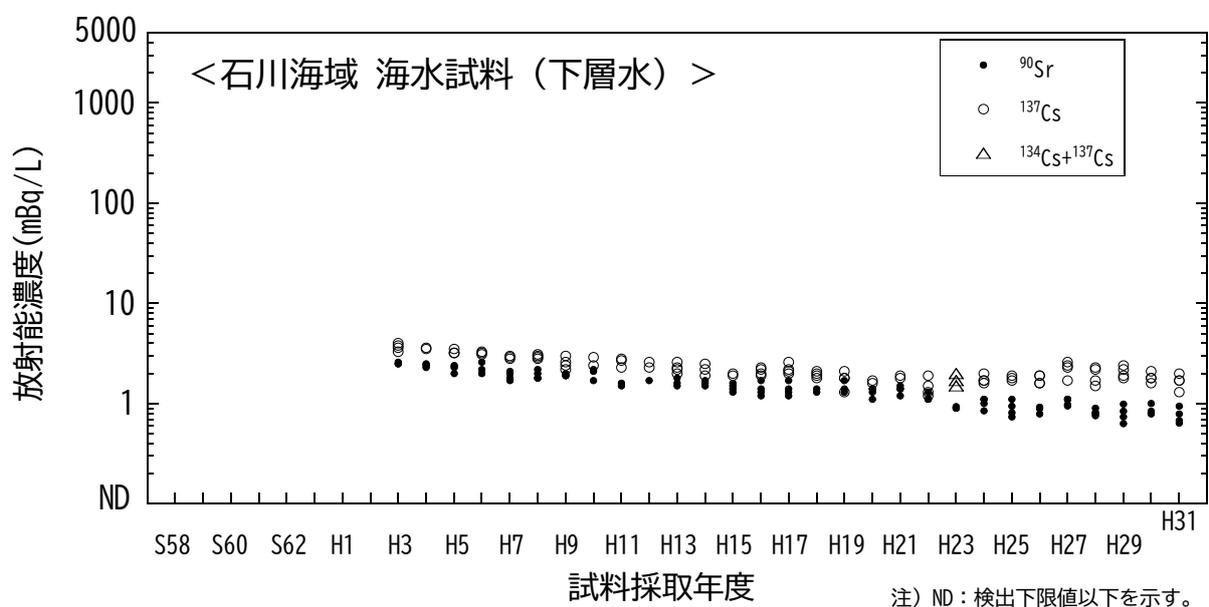


図 I-1-6-47 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（石川海域・下層水）

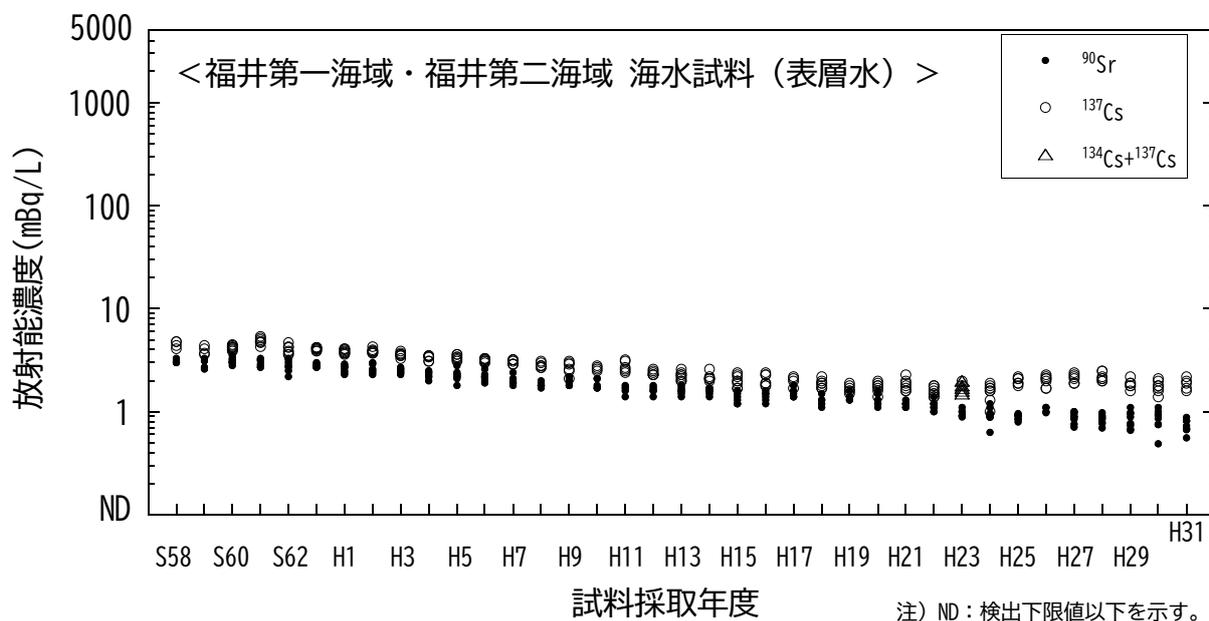


図 I-1-6-48 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化
(福井第一海域・福井第二海域・表層水)

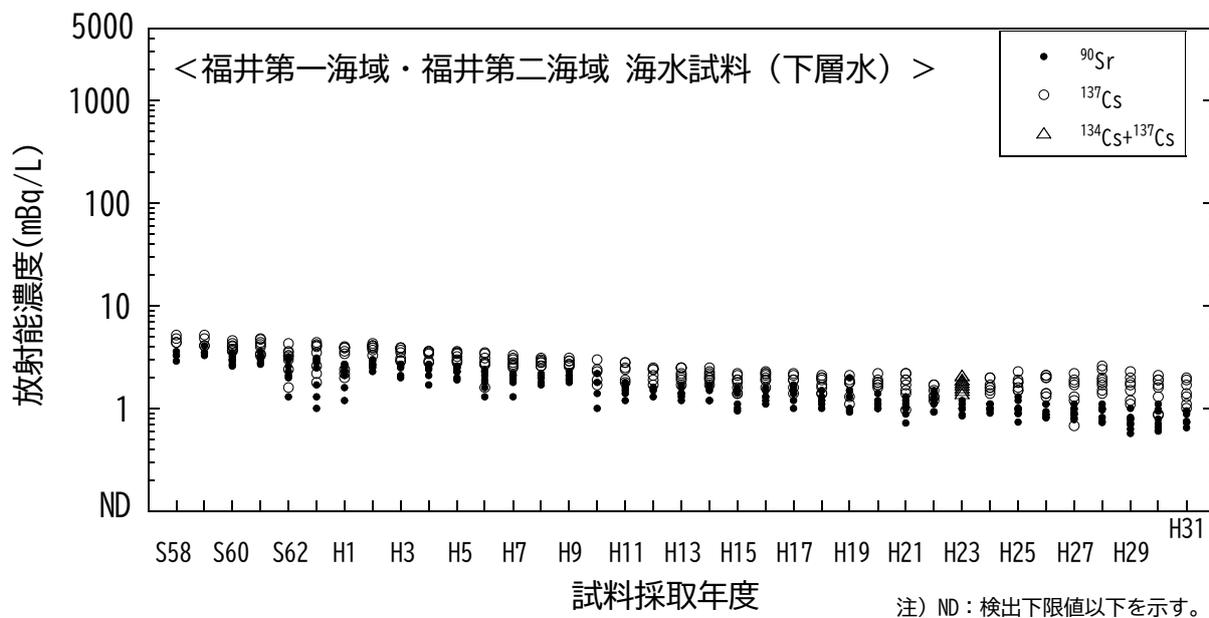


図 I-1-6-49 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化
(福井第一海域・福井第二海域・下層水)

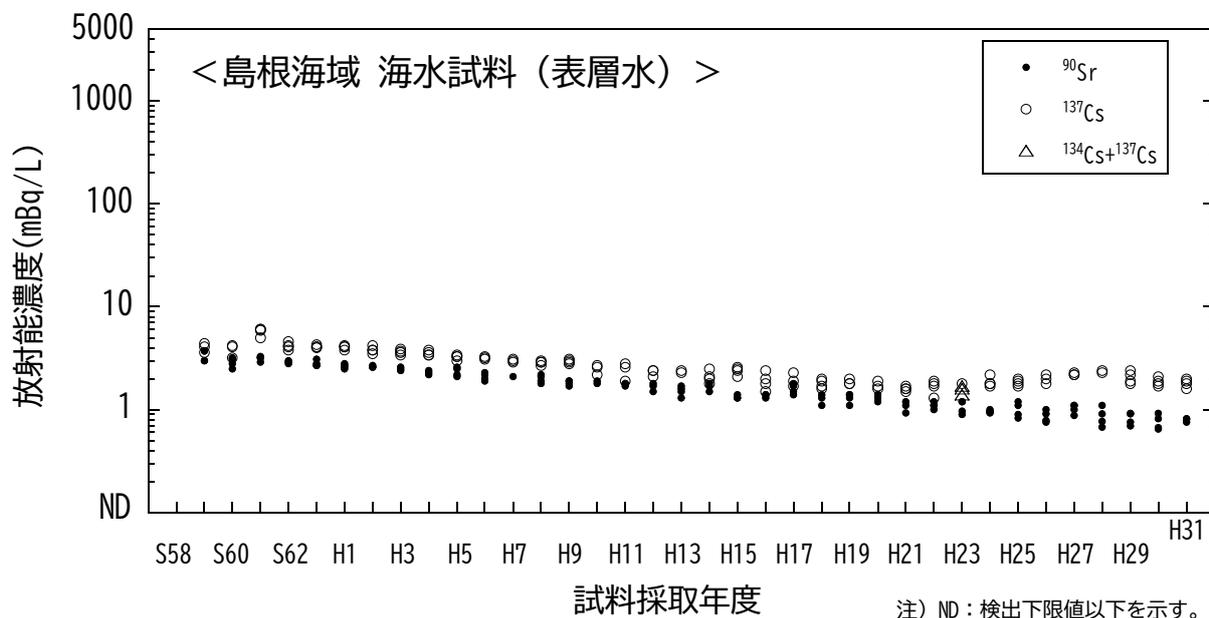


図 I-1-6-50 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（島根海域・表層水）

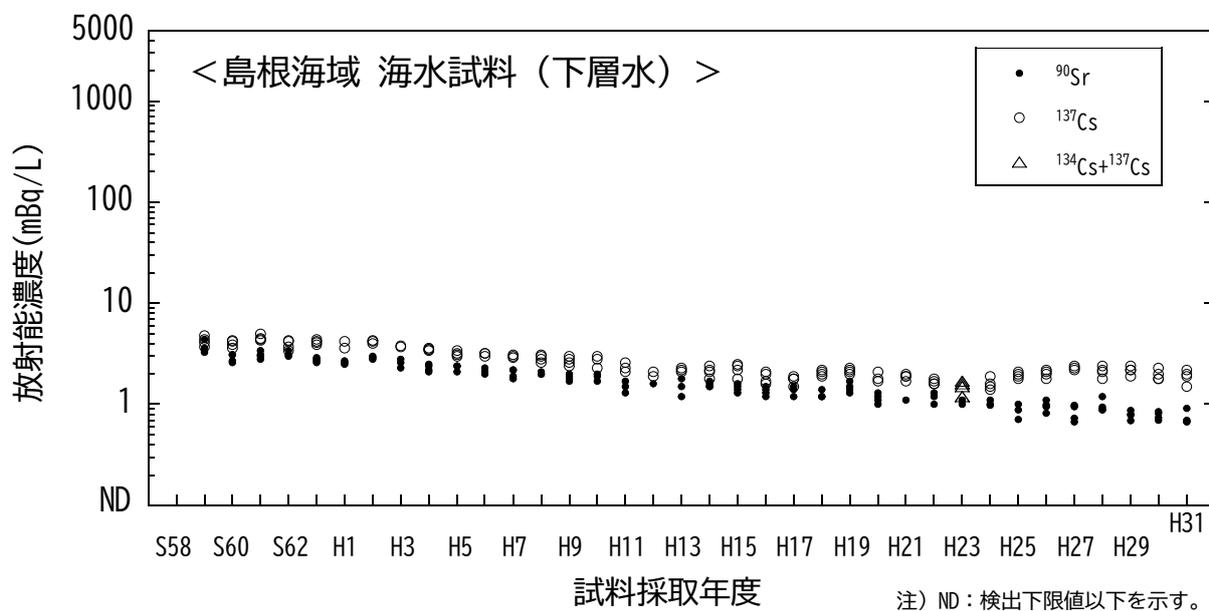


図 I-1-6-51 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（島根海域・下層水）

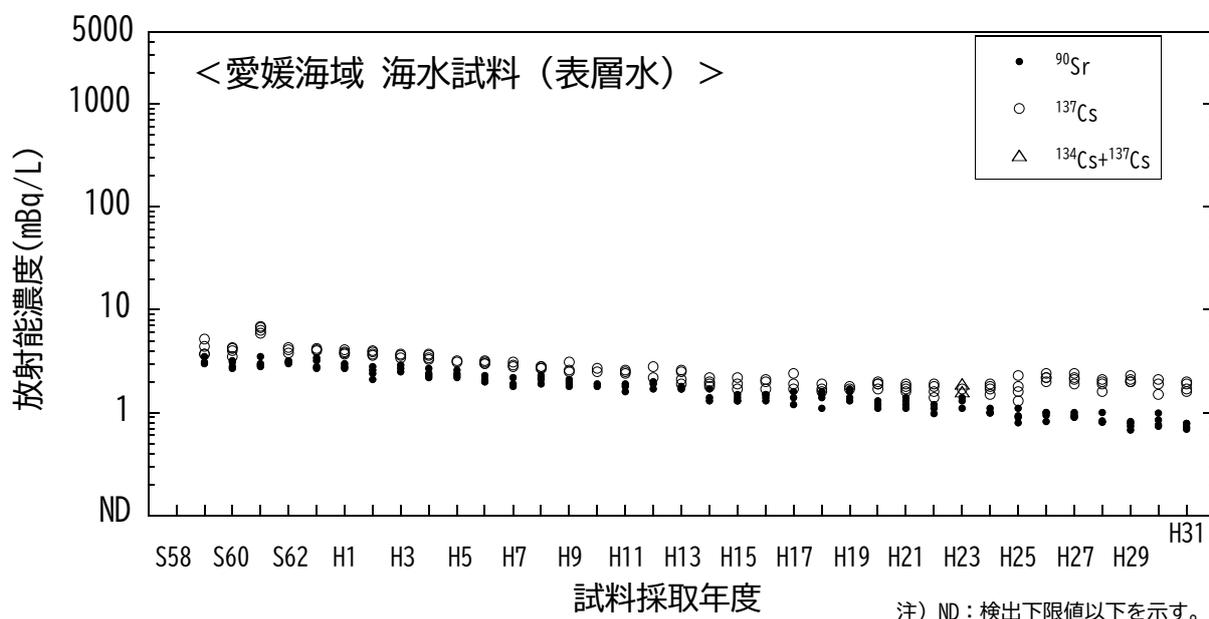


図 I-1-6-52 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（愛媛海域・表層水）

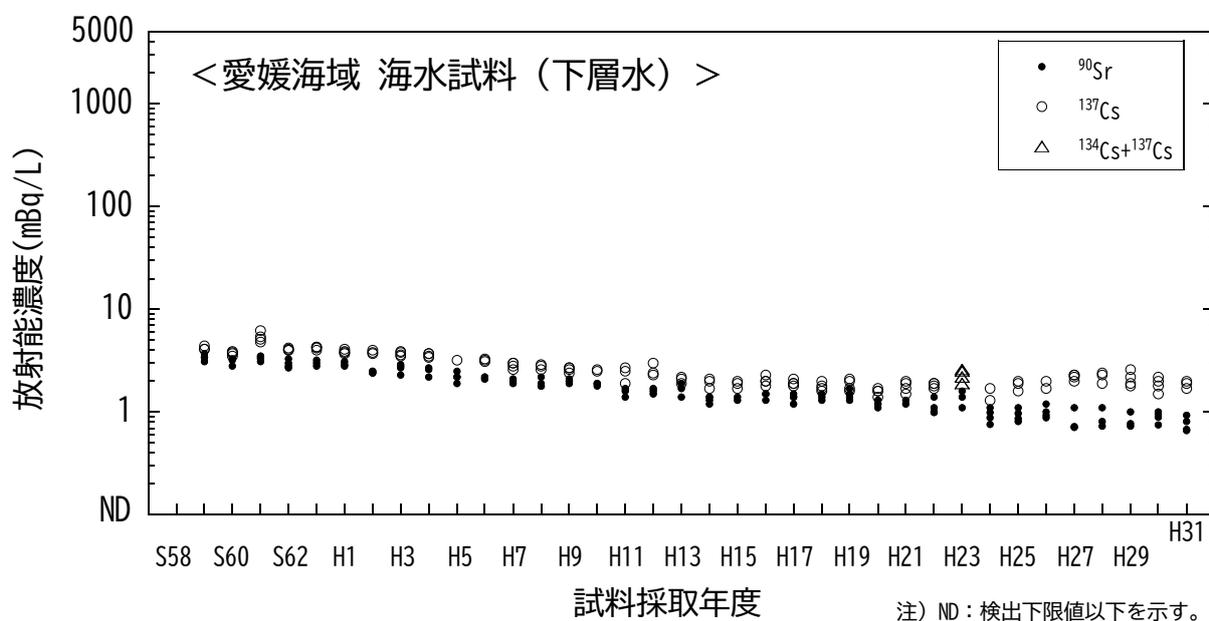


図 I-1-6-53 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（愛媛海域・下層水）

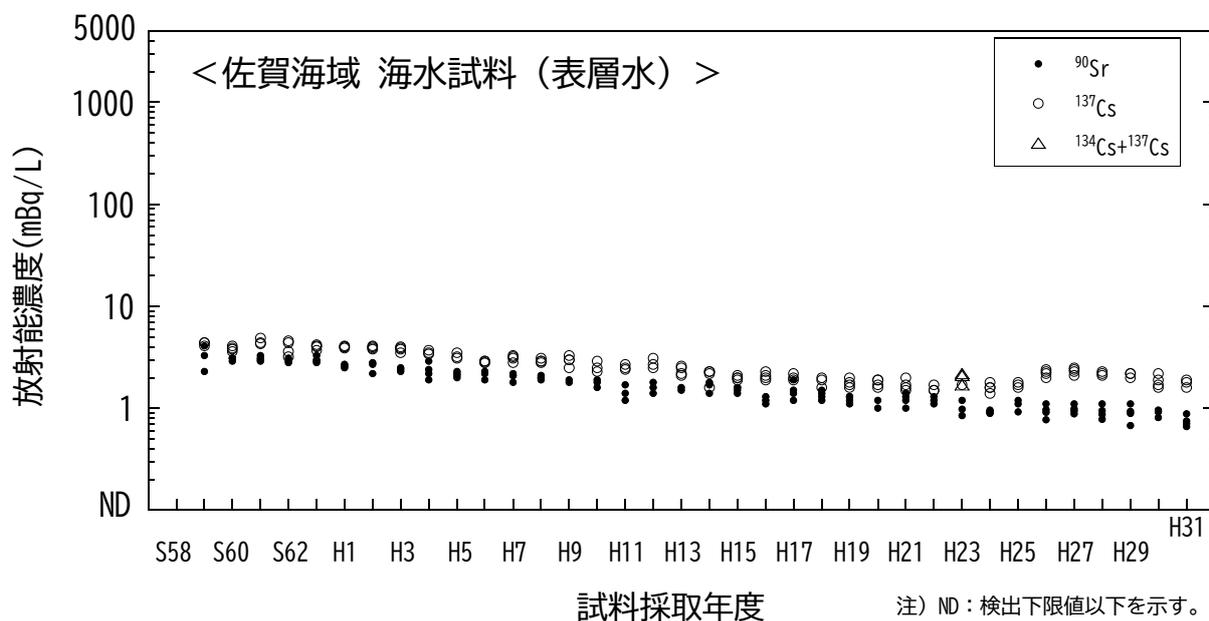


図 I-1-6-54 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化 (佐賀海域・表層水)

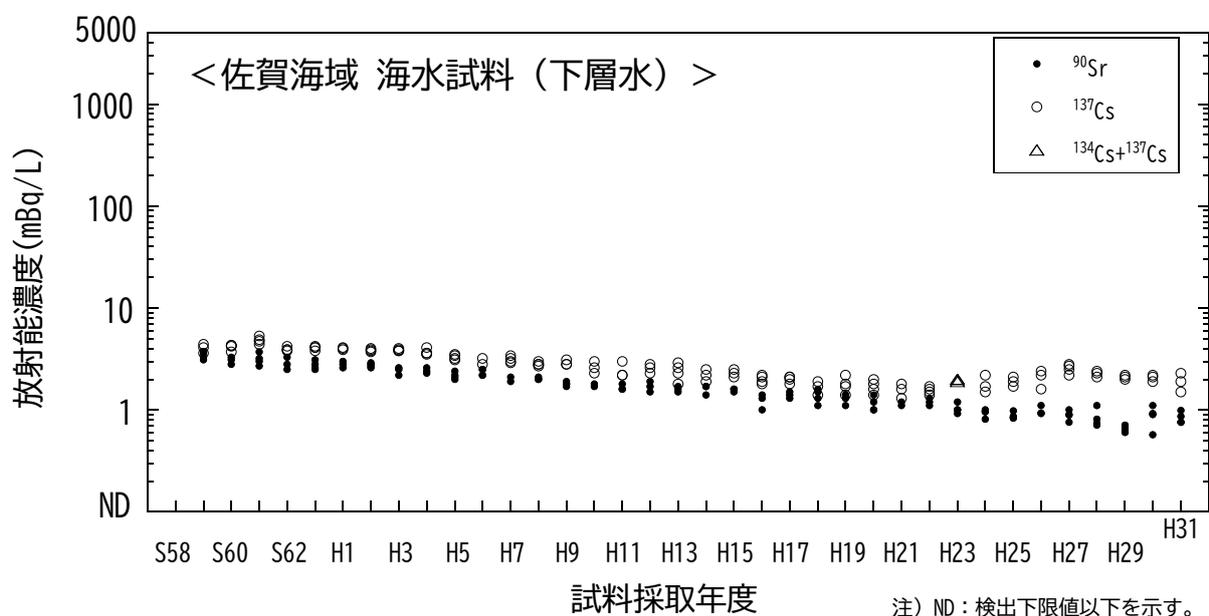


図 I-1-6-55 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化 (佐賀海域・下層水)

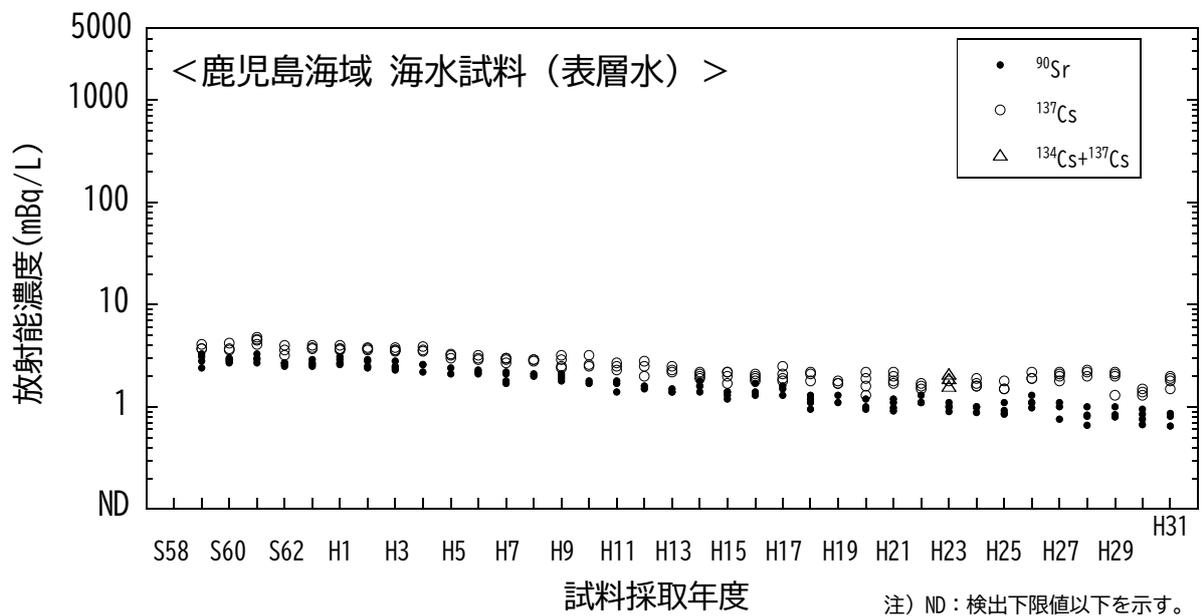


図 I-1-6-56 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（鹿児島海域・表層水）

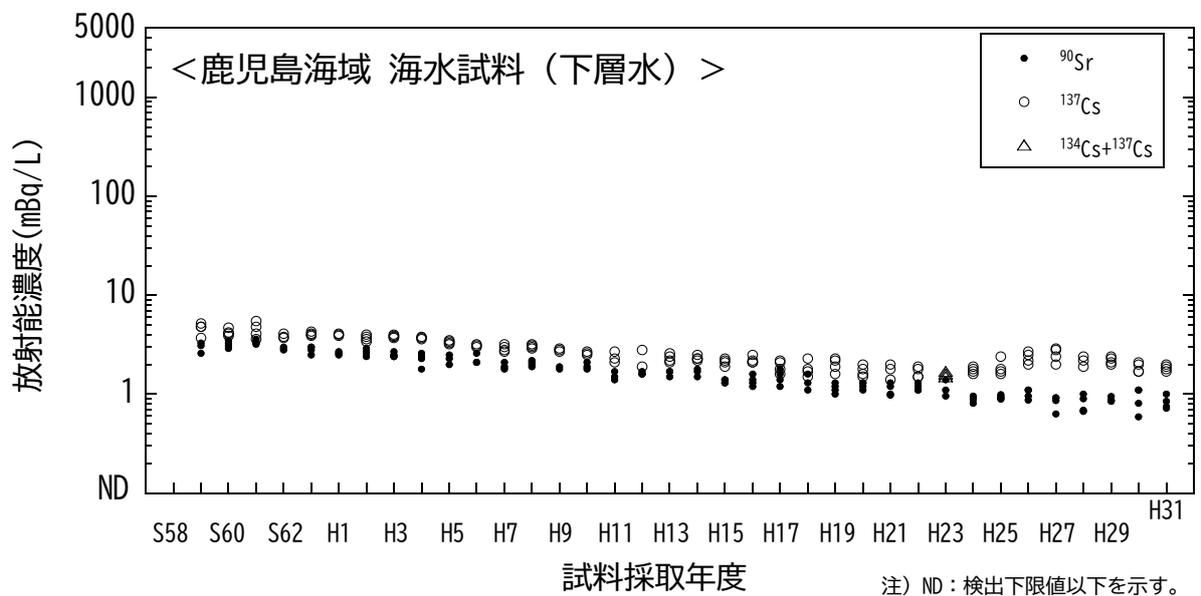


図 I-1-6-57 海水試料の ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 濃度の経年変化（鹿児島海域・下層水）

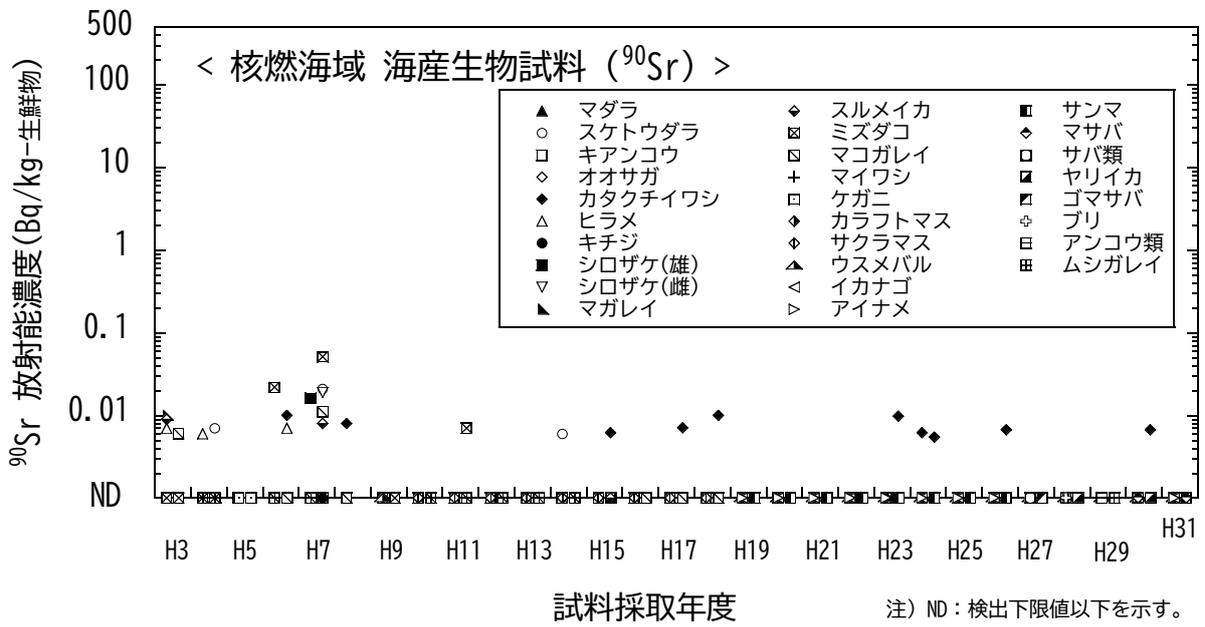


図 I-1-6-58 海産生物試料の ^{90}Sr 濃度経年変化 (核燃海域)

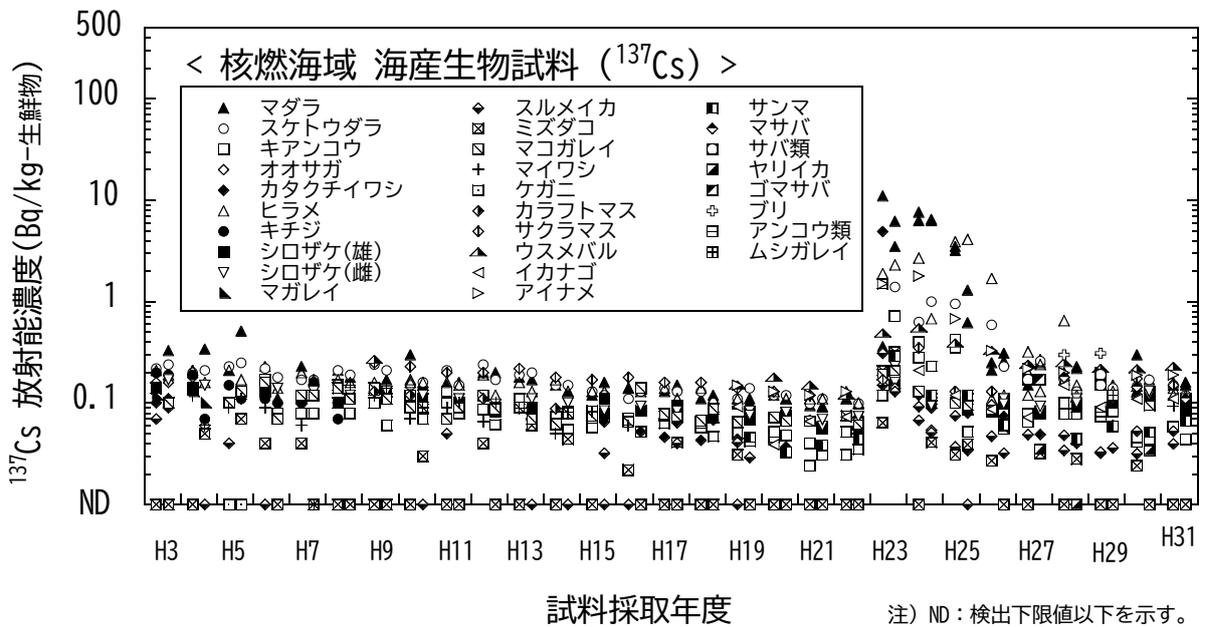


図 I-1-6-59 海産生物試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (核燃海域)

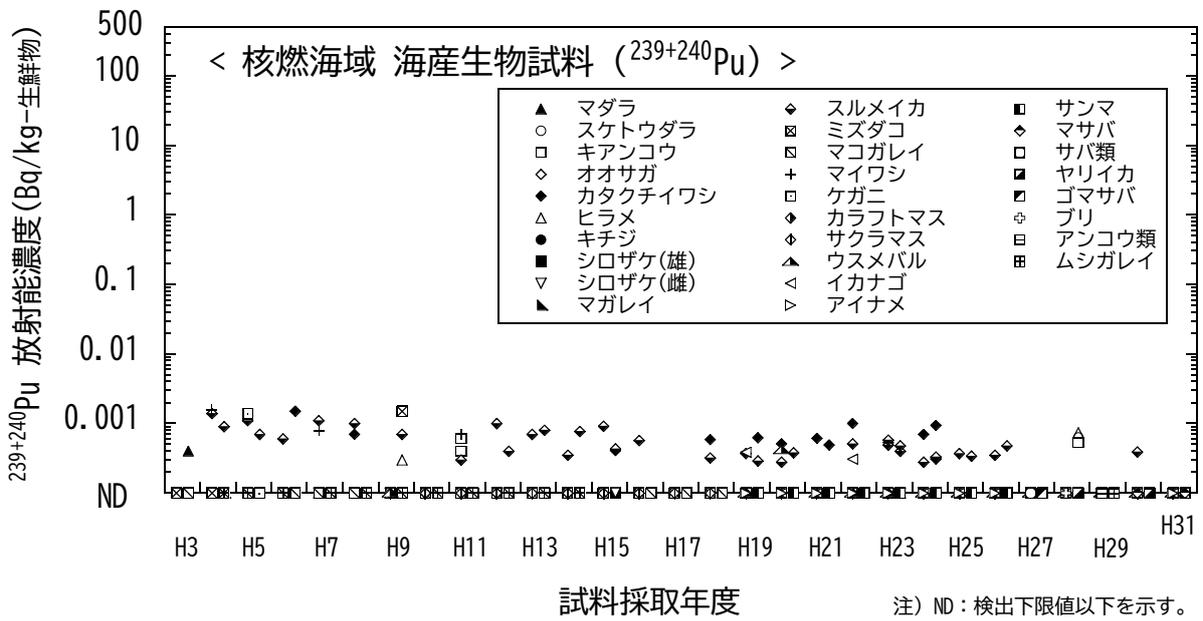


図 I-1-6-60 海産生物試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度経年変化 (核燃海域)

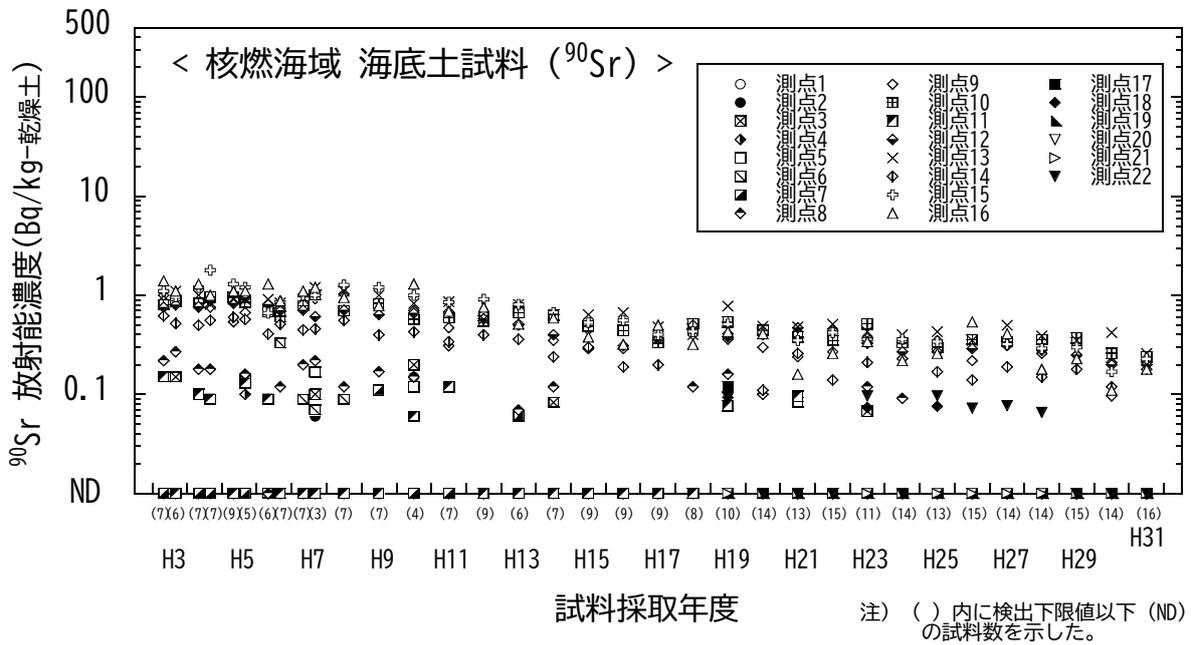


図 I-1-6-61 海底土試料の ^{90}Sr 濃度経年変化 (核燃海域)

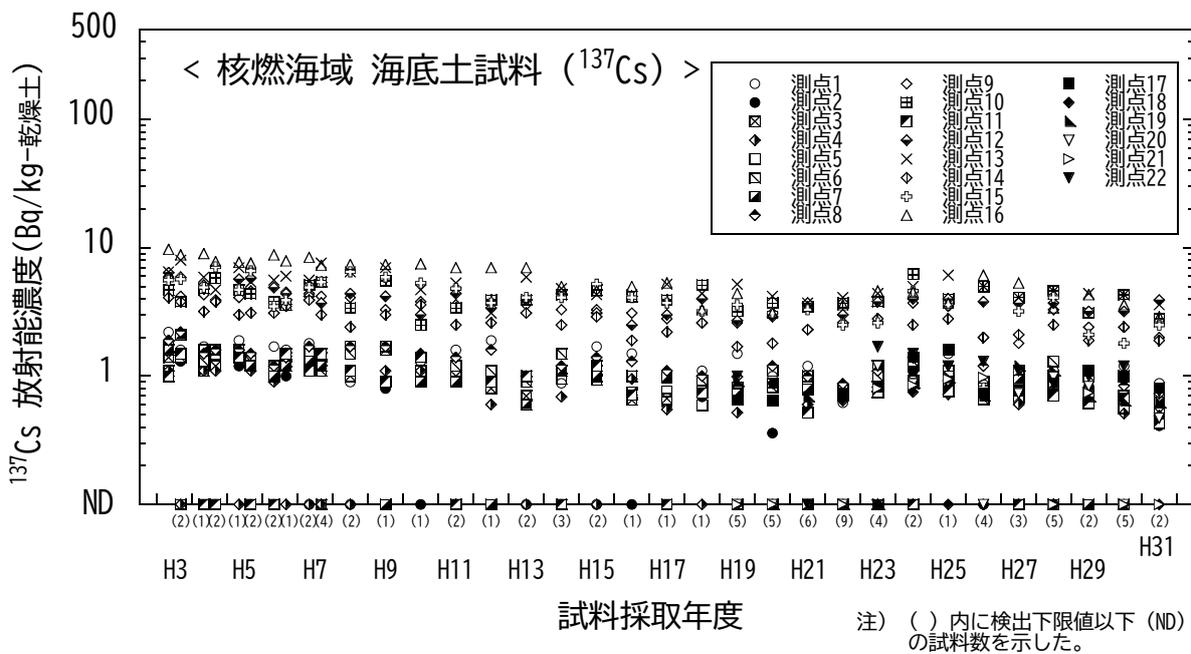


図 I-1-6-62 海底土試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (核燃海域)

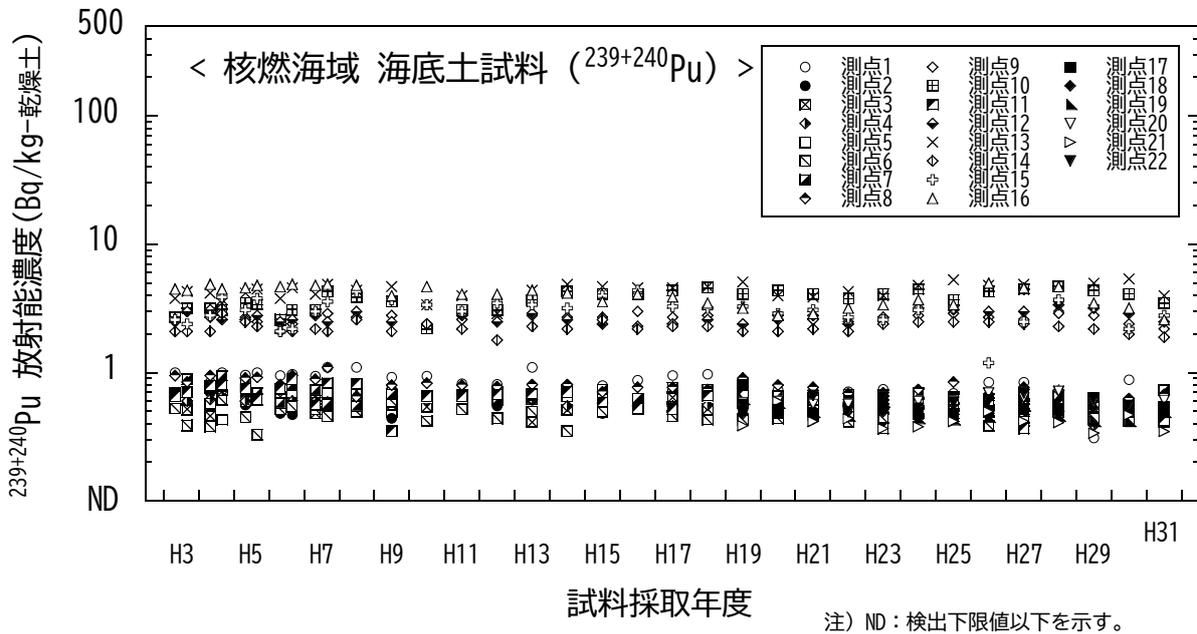


図 I-1-6-63 海底土試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度経年変化 (核燃海域)

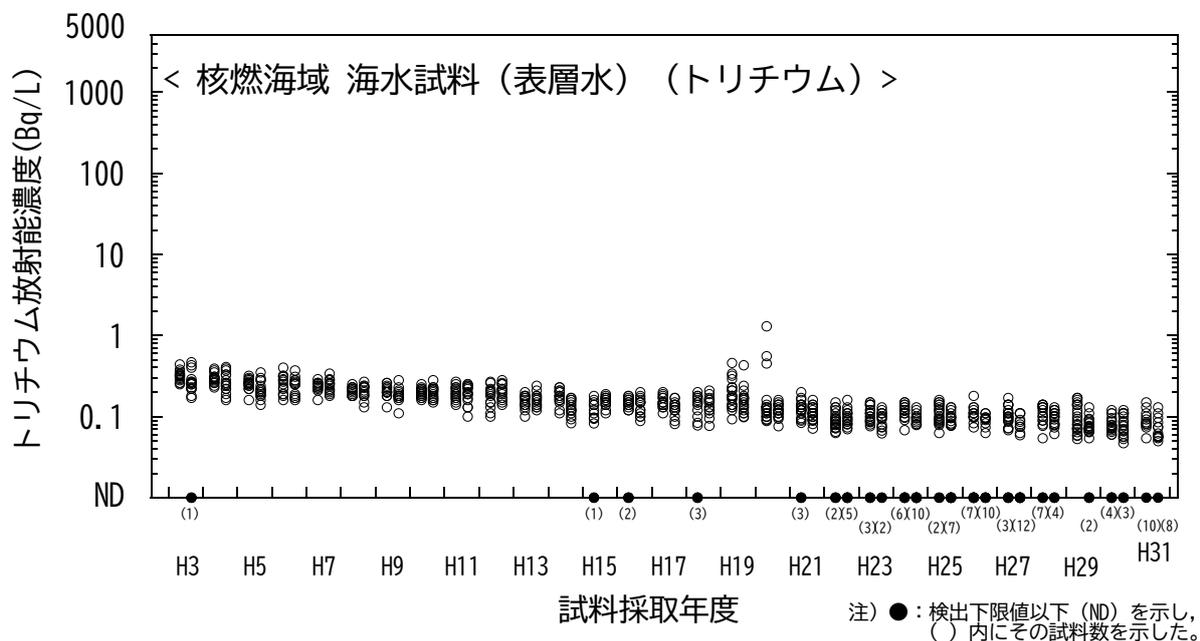


図 I-1-6-64 海水試料のトリチウム 濃度経年変化（核燃海域・表層水）

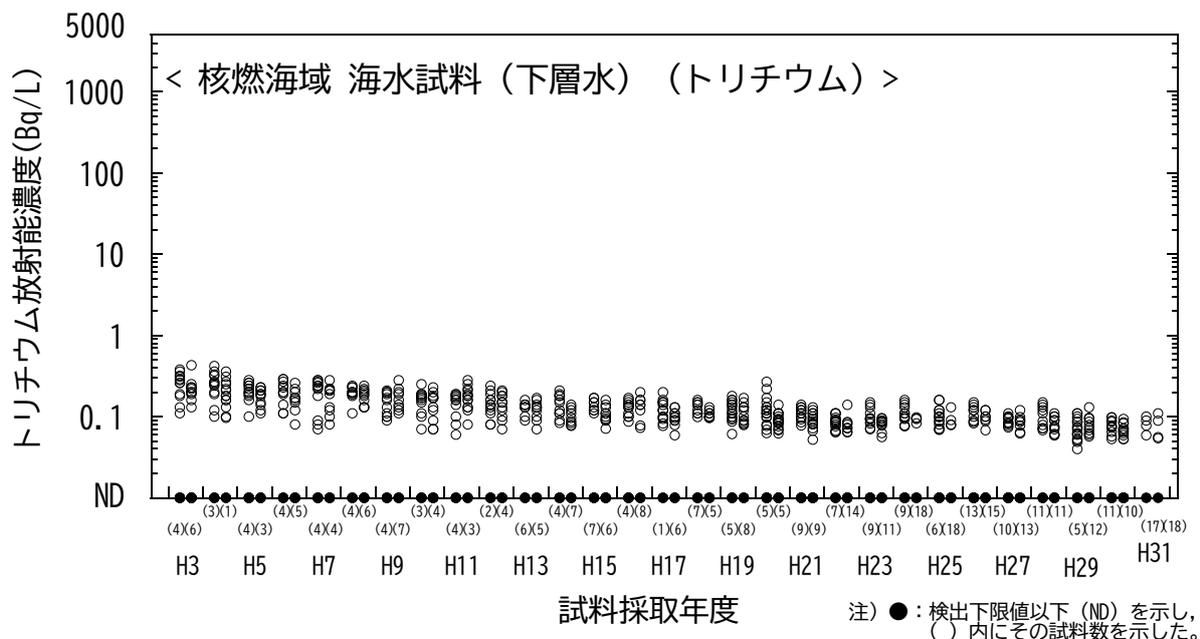


図 I-1-6-65 海水試料のトリチウム濃度経年変化（核燃海域・下層水）

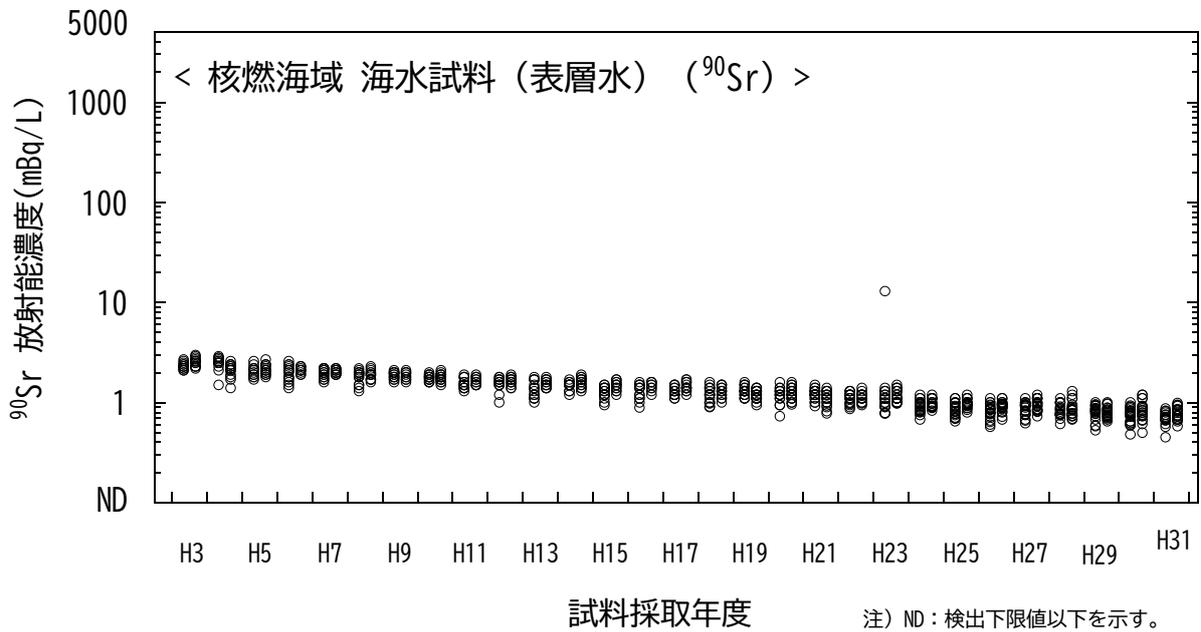


図 I-1-6-66 海水試料の ^{90}Sr 濃度経年変化 (核燃海域・表層水)

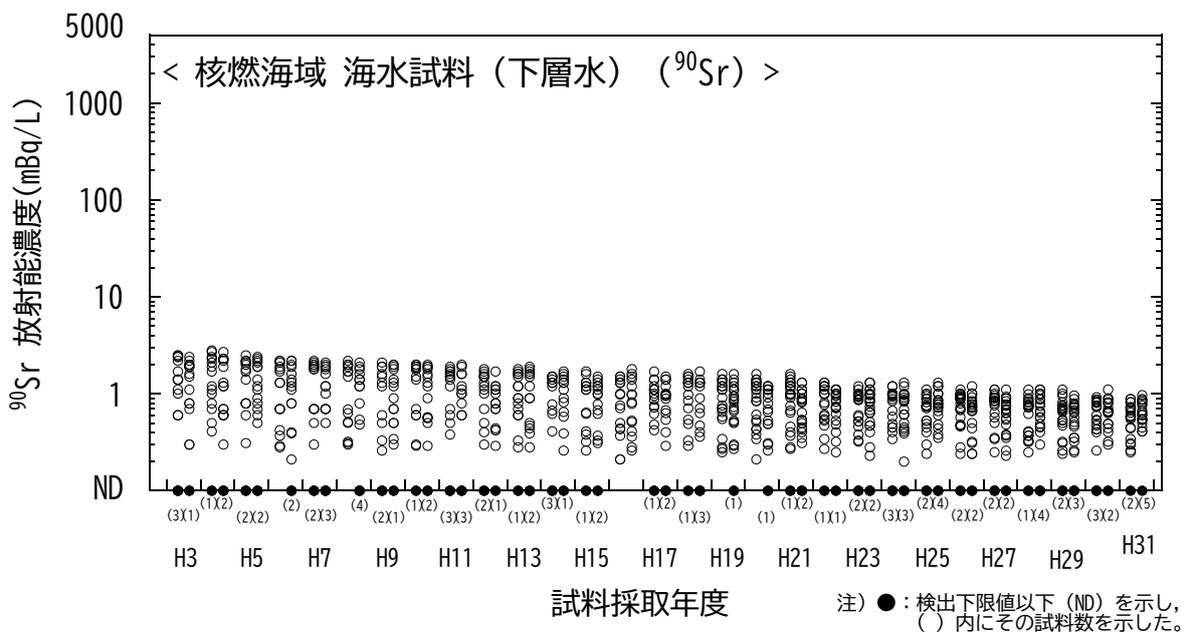


図 I-1-6-67 海水試料の ^{90}Sr 濃度経年変化 (核燃海域・下層水)

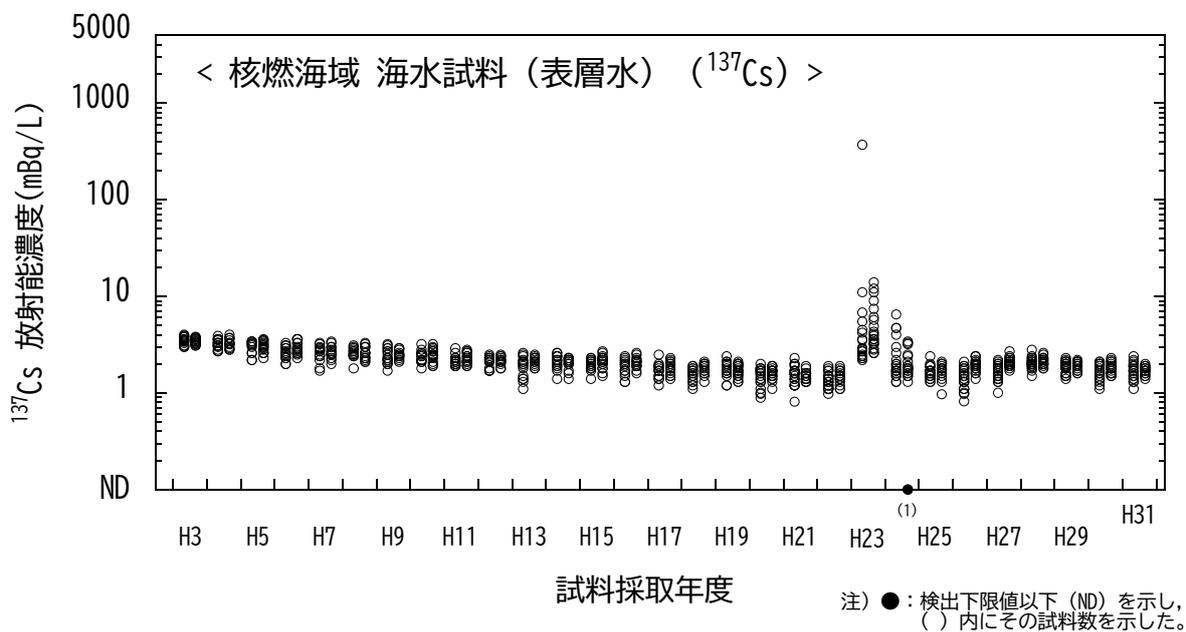


図 I-1-6-68 海水試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (核燃海域・表層水)

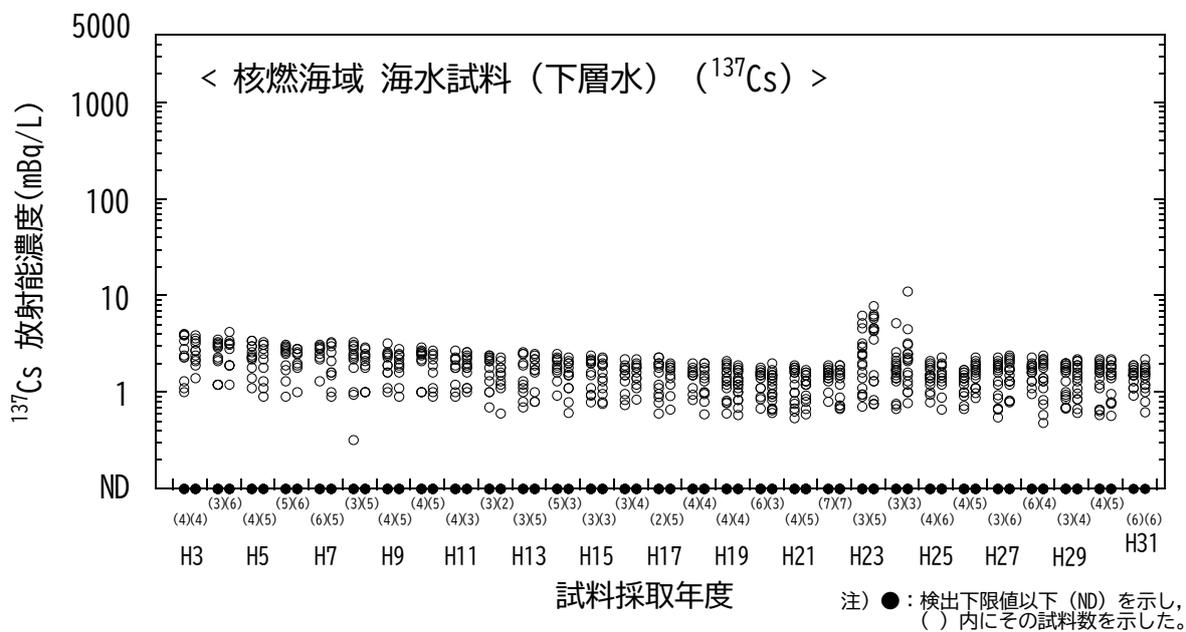


図 I-1-6-69 海水試料の ^{137}Cs 濃度経年変化 (核燃海域・下層水)

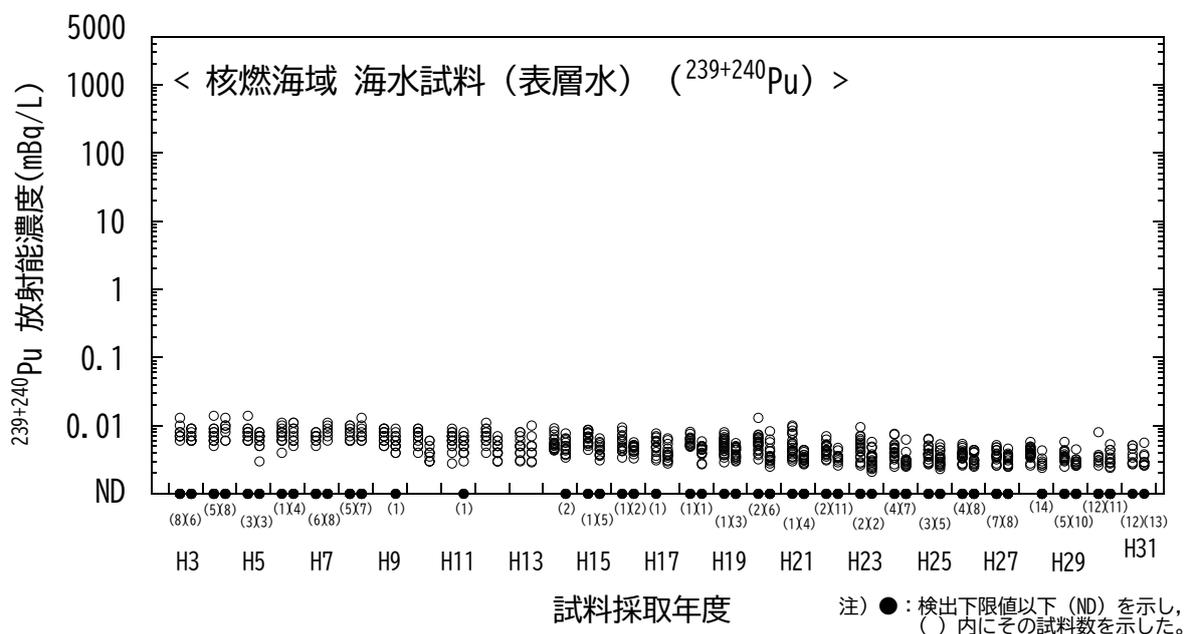


図 I-1-6-70 海水試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度経年変化 (核燃海域・表層水)

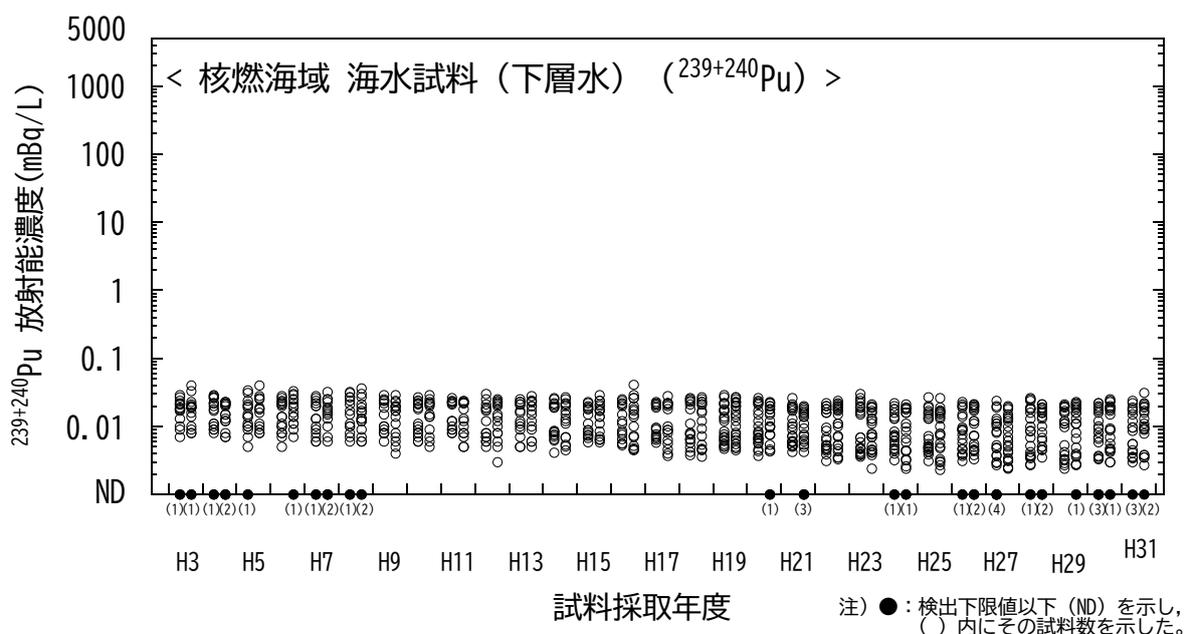


図 I-1-6-71 海水試料の $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度経年変化 (核燃海域・下層水)

7) 海産生物試料の代替について

(1) 背景

本事業において、「1. 海洋放射能調査」の一環として海産生物試料を対象とした放射能調査を実施しているところ、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」の関係個所で述べたとおり、別の魚種を選定したうえで代替試料として分析に供することで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、海産生物試料の選定に際しての注意事項である

- ・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

に従っている（1 ページも併せて参照）。

この試料代替については、当初計画時の海産生物ではなく別の海産生物を試料として供することで、漁場の安全に資するデータの提供を行うという事業の目的は十分に達成できると考えられるものの、データの継続性が損なわれることや、有意にデータの差が生じるか否かの確認が十分になされて来なかったのが現状である。

本項では、過去 10 年度分の海産生物試料の代替状況を整理し、放射能分析の結果を俯瞰することとした。なお、核燃海域で収集した海産生物試料については ^{90}Sr と $^{239+240}\text{Pu}$ も分析の対象となっているが、カタクチイワシ等の全身を供するごく一部の魚種を除いて筋肉部位を対象としているため、筋肉部位に集積しにくいといわれるストロンチウム (^{90}Sr) やプルトニウム ($^{239+240}\text{Pu}$) は検出されること自体が ^{137}Cs に比べて稀である結果が得られている（「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」を併せて参照）。このため、ここでの対象は ^{137}Cs に絞った。

表 I-1-7-1：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 21 年度	前期 60	前期 0 (0)
	後期 60	後期 4 (0)
平成 22 年度	前期 60	前期 1 (0)
	後期 60	後期 5 (0)
平成 23 年度	前期 60	前期 6 (3)
	後期 60	後期 9 (5)
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 8 (2)
	後期 60	後期 14 (4)

* () 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）

(2) これまでの代替実績

表 I-1-7-1 に平成 21 年度から平成 31 (令和元) 年度に実施した本事業について、海産生物試料の代替状況を示した。

これによると、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、福島第一海域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、試験操業となっていることを受けて計画通りに収集ができない期間が続いている状況である。試験操業ということで、本事業で対象とする漁場での漁に当たらないという見方もできるが、ここではほかの海域と同様に漁を行っているとして調査を進めた。一見、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、魚種の同定を以前にも増してきめ細かく行うようにしたことにより、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ものが増えたためと考えられる。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 (本書「資料編」の参考資料を併せて参照)。

表 I-1-7-2 には当該期間内に得られた結果について、すべての試料についての ^{137}Cs の放射能濃度の範囲を示すとともに、代替種を除いた試料及び代替種のみ試料についての放射能濃度範囲を併せて示した。これによると、海産生物試料の代替を行うことで ^{137}Cs の放射能濃度範囲に多少の増減があったものの、大きな変動はなかった。

表 I-1-7-2 : 平成 21 年度から平成 30 年度までの調査で得た海産生物試料を対象とした ^{137}Cs の放射能分析の結果

魚種	^{137}Cs の放射能濃度の範囲 (Bq/kg-生鮮物)		
	全ての試料	代替種を除いた試料	代替種のみ試料
硬骨魚類	0.028~140	0.041~120	0.028~140
イカ・タコ類	0.010~9.4	0.010~9.4	0.042~0.16
エビ類	0.031~0.13	0.031~0.13	—
軟骨魚類	0.11~120	—	120

また、表 I-1-7-2 に示した期間では東電福島第一原発事故の影響によって著しく ^{137}Cs の放射能濃度が変動した事例があり、平常時の調査において海産生物試料の代替をした場合の影響を判断することができない。そこで、事故前の調査結果から判断することとし、事故前 5 年間として平成 18 年度から平成 22 年度までの調査結果について、表 I-1-7-3 のとおりまとめた。

表 I-1-7-3：平成 18 年度～平成 22 年度に発電所海域で採取した海産生物試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の平均値とその標準偏差（単位は、Bq/kg-生鮮物）

魚種	発電所海域で採取した海産生物試料（平成 18 年度～平成 22 年度）		
	全試料	代替を除外	備考
硬骨魚類	0.11±0.04 (n=365)	0.11±0.04 (n=352)	
イカ・タコ類	0.036±0.0065 (n=60)	0.036±0.0064 (n=58)	
エビ類	0.055±0.012 (n=15)	-	代替実績なし
軟骨魚類	0.15±0.02 (n=10)	ND (n=2)	

この結果によると、海産生物試料の代替を行うか否かによらず、平均値とその標準偏差に差はなく、統計的な差を見出すことができなかった。

(3) 代替によるモニタリング結果への影響

昭和 58 年度から開始された本事業において、結果承認を受けた平成 30 年度までの 36 年間の調査で供した海産生物試料は硬骨魚類を中心に、イカ・タコ類及び甲殻類（主にエビ類）を含めて概ね 3,700 試料に及ぶ。これら海産生物試料に含まれる放射性核種 (^{137}Cs) の放射能濃度の経年変化を図 I-1-7-1 に示す。事業開始時には大気圏核実験の影響によりすでに ^{137}Cs は海産生物の筋肉部位から検出されており、平成 22 年度まで緩やかに減少していた。この傾向は海水に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の減少傾向に一致し、概ね 1~100 倍の放射能濃度になっている。その後、平成 23 年 3 月の東電福島第一

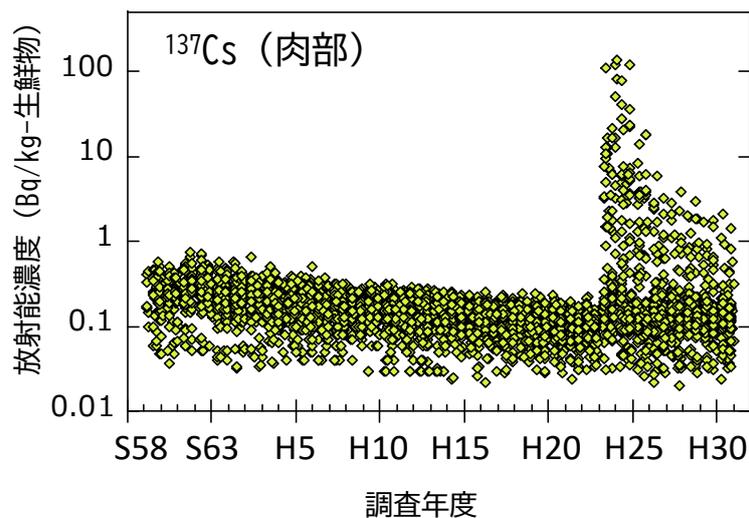


図 I-1-7-1：海産生物試料（肉部）に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の経年変化（全国 15 海域で 36 年間に得られた概ね 3700 試料の結果をすべてプロット）

原発事故の影響を受け、平成 23 年度の調査結果では宮城、福島及び茨城県の沖合海域で採取された海産生物試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度に大きな変化が生じたが、これまでのところ、事故前の放射能濃度範囲に戻ってはいないものの、概ね減少傾向が認められる。

これまでの調査結果から、海産生物の肉部に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度は、海産生物間の食性の違い（例えば、スズキ>ヒラメ>カレイ類）や種の違い（タコ類>イカ類）によって多少の差が生じることあるものの、代替に起因する変動の範囲は小さいと考えられる（図 I-1-7-2 参照）。

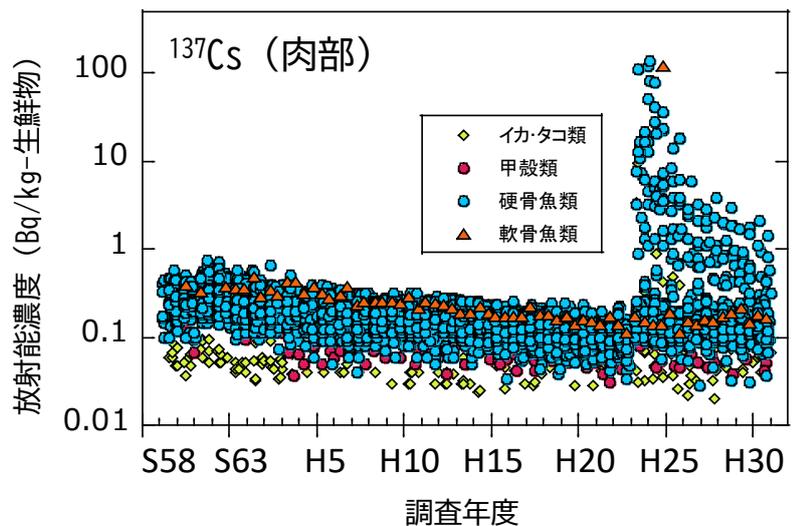


図 I-1-7-2：海産生物試料（肉部；魚種別）に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度の経年変化（全国15海域で36年間に得られた概ね3,700試料の結果をすべてプロット）

これまでに得られている海産生物試料を対象とした

調査結果は、原則として海洋放射能モニタリングを行う上であらかじめ選定された魚種について行ってきたものであるが、併せて漁獲状況によって収集ができない場合の欠測を避けるための措置として、「生息場所、食性等の生態学的特徴を基に代替種を検討する」という基準に従って代替した実績である。これらは目的とする当該漁場から得られた海産生物試料を対象とした調査結果であり、現状を把握するという観点で、本事業の目的に沿うものと考えられる。

(このページは空白ページです)

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。次いで、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、これら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。親潮は（寒流）、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。

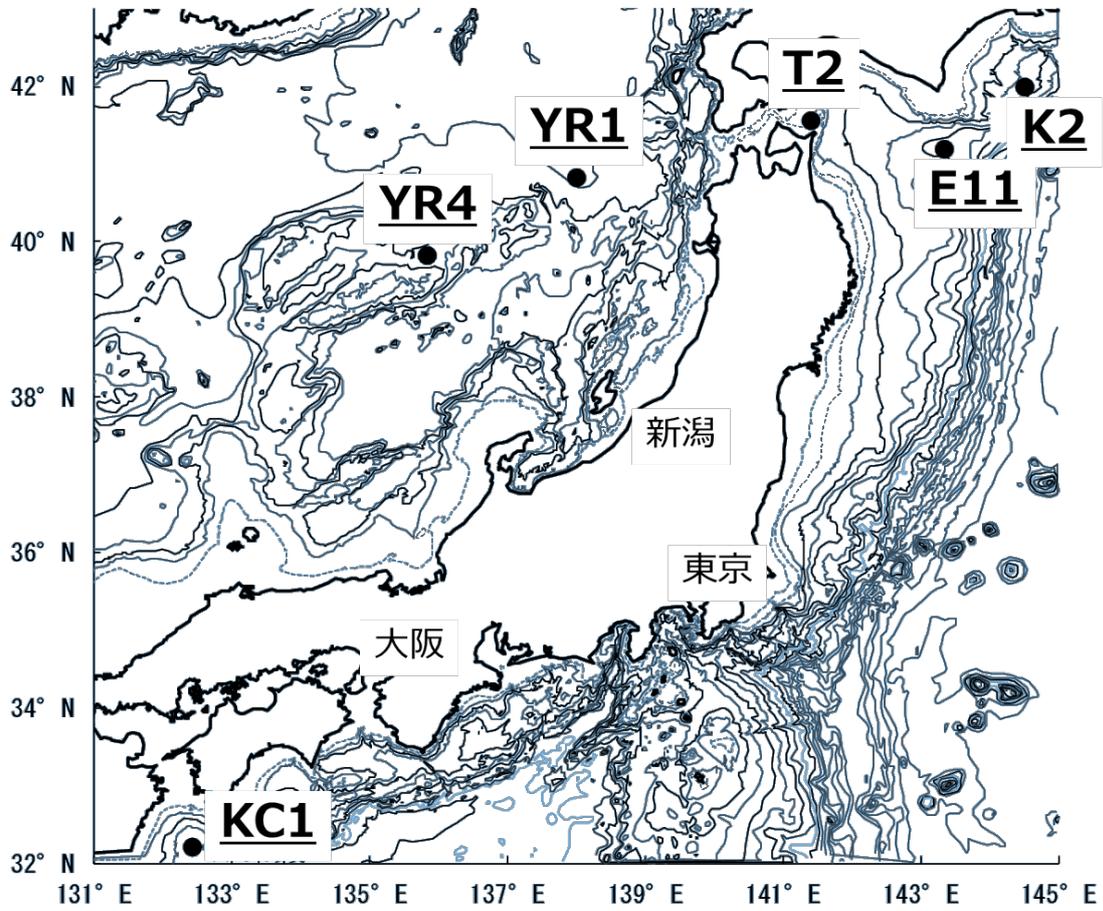


図 I -2-1-1-1 対照海域における調査測点。襟裳沖海域（襟裳沖：E11、核燃沖：T2、釧路沖：K2）、大和堆海域（YR1、YR4）及び四国沖海域（KC1）

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 (令和元年)	採取位置		水深*1 (m)
			N	E	
襟裳沖	E11 ・海水	6月19日	41° 12.0'	143° 20.0'	2,077
		10月21日			2,116
	T2 ・海水	6月7日	41° 34.0'	141° 24.0'	254
		10月22日			261
	K2 ・海水	6月11日	42° 00.0'	144° 30.0'	1,670
	四国沖	KC1 ・海水 ・海底土	6月18日	32° 13.0'	132° 26.0'
大和堆	YR1 ・海水 ・海底土	6月1日	40° 50.0'	138° 00.0'	3,645
		YR4 ・海水	6月2日	39° 50.0'	135° 50.0'

*1 当該測点の最下層について試料採取を行った際の水深を記載した。

海底土及び海水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）を用いることとした。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）までとし、適切に目的とする海

水試料を採取した。

放射能測定法シリーズの記載に従い、採取した海水はろ過をせず、容量20Lのプラスチック製容器（ロンテナ）に分取した。分取した海水試料は分析に供するまで適切に保管管理を行う観点で、海水に含まれる目的とする放射性核種を含む元素の吸着を防ぐため、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、大型のボックス型採泥器（45cm×45cm×50cm）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。採取した海底土については、泥質等の目視観測を同時に行い、ビニール袋に入れたのち、プラスチック製容器（タイトボックス等）に収納し、冷凍保管とした。

（放射能分析の方法）

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実施に当たっては、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、海水と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90L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）

平成31（令和元）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（ヘキサクロリド白金（IV）酸セシウムとも言い、化学形として「 $\text{Cs}_2[\text{PtCl}_6]$ 」となる。Na塩をはじめ多くは水に易溶だが、Cs塩は特に溶解度が小さい）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、本調査では事故前に環境中で見出されていた放射性セシウムを ^{137}Cs として、平成 31（令和元）年度の結果との比較に用いることとした。なお、直近の分析結果では、例えば平成 30 年度において ^{134}Cs が検出された海水試料は全 36 試料のうち 2 試料あったが、平成 31（令和元）年度に実施した結果については、全 36 試料のうち、1 試料（K2（表層）6 月期）から極めて低い放射能濃度ではあるものの ^{134}Cs が検出された。

（放射性セシウム）

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

YR1：0.26～1.4mBq/L

YR4：0.52～1.5mBq/L

の範囲であった。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緩やかに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 層>

YR1：1.3mBq/L

YR4：1.2mBq/L

<500m 層>

YR1：1.1mBq/L

YR4：1.1mBq/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。

襟裳沖海域において、 ^{134}Cs が検出されたのは 6 月期の調査における測点 K2 の表層のみで、その放射能濃度は 0.059mBq/L であった。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～1.1mBq/L

T2：1.6mBq/L（表層のみ）

K2：ND～1.1mBq/L

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

E11：ND～1.5mBq/L

T2：1.5mBq/L（表層のみ）

の範囲であった。また、E11 における ^{137}Cs の放射能濃度の平均値は、

E11:0.66mBq/L（ND となった 2,095m 層は除く）

であった。

襟裳沖海域における全測点で検出された¹³⁷Csの放射能濃度の平均値は、

6月期：0.60mBq/L（NDとなった測点E11の2,050m層、測点K2の1,643m層は除く）

10月期：0.80mBq/L（NDとなった測点E11の2,095m層は除く）

であった。また、測点E11及びK2における各層で検出された¹³⁷Cs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¹³⁷Csの放射能濃度を比較したところ、表層の3測点では1.1～1.6mBq/Lであり0.5mBq/Lの濃度差が見られた。これら結果の誤差を考慮しても明確な差が生じていることから、表層の水塊の違いによるものではないかと考えられる。一方、250m層では測点E11及びK2の両測点で0.09mBq/Lであり、750m層以深の放射能濃度と同様に両測点で同程度であった。さらに、それぞれの調査時期で¹³⁷Csの放射能濃度を比較すると、表層において

E11：1.1mBq/L（6月期）

1.5mBq/L（10月期）

T2：1.6mBq/L（6月期）

1.5mBq/L（10月期）

であり、わずかではあるものの0.5mBq/Lの濃度差が見られた。なお、250m層以深において、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、¹³⁴Csはすべての層で検出されなかった。また、¹³⁷Csはすべての層で検出され、その放射能濃度は0.019～1.8mBq/Lの範囲であった。測点KC1の各層における¹³⁷Csの放射能濃度の鉛直分布は、250m層で極大値（1.8mBq/L）を示し、それ以深で減少した。なお、このように250m層で極大値を示す現象は、直近の平成30年度に実施した調査でも同様にみられている。

(⁹⁰Sr)

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

YR1：0.21～0.99mBq/L

YR4：0.48～0.99mBq/L

の範囲にあった。両測点の各層で検出された⁹⁰Srの放射能濃度の鉛直分布は深さが増すにつれて減少する傾向が見られた。また、両測点における各層で検出された⁹⁰Srの放射能濃度を比較したところ、表層において0.95mBq/L(YR1)及び0.91mBq/L(YR4)であり、0.04mBq/Lの差が見られた。また250m層では両測点とも0.99mBq/Lであり、差が見られなかったもの

の、500m 層ではそれぞれ 0.91mBq/L (YR1) 及び 0.64mBq/L (YR4) であり、その濃度差は 0.27mBq/L であった。これら放射能濃度には差が見られるものの、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。

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~0.50mBq/L

T2 : 0.85mBq/L (表層のみ)

K2 : ND~0.69mBq/L

の範囲であった。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~0.73mBq/L

T2 : 0.77mBq/L (表層のみ)

の範囲であった。また、襟裳沖海域における全測点での ^{90}Sr の放射能濃度の平均値 (ND を除く) は、

6 月期 : 0.37mBq/L

10 月期 : 0.44mBq/L

であった。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する傾向が見られた。

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 0.50~0.85mBq/L であり 0.35mBq/L の差が見られた。250m 層では測点 E11 及び K2 で 0.50mBq/L 及び 0.59mBq/L であり概ね同程度、750m 層では測点 E11 及び K2 でそれぞれ 0.20mBq/L 及び 0.28mBq/L であり、それ以深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 : 0.50mBq/L (6 月期)

0.73mBq/L (10 月期)

T2 : 0.85mBq/L (6 月)

0.77mBq/L (10 月期)

であった。

四国沖海域において検出された ^{90}Sr の放射能濃度は、0.058~0.88mBq/L の範囲であり、それら放射能濃度の平均値 (ND を除く) は 0.41mBq/L であった。各層で検出された ^{90}Sr の放射能濃度は ^{137}Cs の放射能濃度と同様に 250m 層で極大値が観測された。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、両者は同様な海洋循環過程を有する¹⁾が、下層への ^{90}Sr の輸送 (移送) 量は少なかったと考えられる。事故前は ^{137}Cs と ^{90}Sr の放射能濃度から求めた放射能の比が約 1 であった¹⁾が、東

電福島第一原発事故による海洋への⁹⁰Srの放出量が $(90\sim 900) \times 10^{12}$ 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¹³⁷Csの放出量に比べて2桁以上低いので、¹³⁷Csと同様に冬季における鉛直混合によって⁹⁰Srが下層へ運ばれたとしても、事故前の放射能濃度(1.6mBq/L)¹⁾に対して、ほとんど影響しないと考えられる。

(²³⁹⁺²⁴⁰Pu)

大和堆海域において検出された²³⁹⁺²⁴⁰Puの放射能濃度とその平均は、

YR1：0.0054～0.031mBq/L (平均：0.021mBq/L)

YR4：ND～0.029mBq/L (平均：0.019mBq/L)

であった。大和堆海域における全測点での²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度の平均値は0.020mBq/Lであった。

²³⁹⁺²⁴⁰Pu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⁾。とりわけプルトニウムは海水中の粒子に吸着しやすく、また、沈降粒子とともに下層へと運ばれる性質があるため、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。

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

E11：ND～0.021mBq/L

K2：ND～0.036mBq/L

の範囲であった。また、10月期の調査で得られた²³⁹⁺²⁴⁰Puの放射能濃度は、測点E11がND～0.024mBq/Lの範囲であり、それら放射能濃度の平均値は0.018mBq/L(E11、NDを除く)であった。

襟裳沖海域における全測点で検出された²³⁹⁺²⁴⁰Puの放射能濃度は、NDを除いた平均値としては0.020mBq/L(6月期、測点E11およびK2)であった。また、測点E11及びK2において²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度の鉛直分布は、大和堆海域と同様に6月期及び10月期の調査結果ともに750～1,000m層で極大値を示しそれ以深で減少した。更に、6月期に調査した2測点(測点E11及びK2)における各層の放射能濃度を比較したところ、表層では両測点ともNDであった。この傾向は深度250m以深においてはほぼ同じであった。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出来なかった。

四国沖海域において検出された²³⁹⁺²⁴⁰Puの放射能濃度は、ND～0.024mBq/Lの範囲であり、そのNDを除いた平均値としては0.020mBq/Lであった。これら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、500m層で極大値を示した後に減少する傾向が見られた。

表 I-2-1-1-2 平成 31 (令和元) 年度に対照海域で採取した海水試料に含まれる人工放射性核種の放射能分析結果

航海期	海域測点	採取層 (m)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr		²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	
			(mBq/L)	(誤差)	(mBq/L)	(誤差)	(mBq/L)	(誤差)	(mBq/L)	(誤差)
6 月 期	襟裳沖 (E11)	1	ND	-	1.1	0.026	0.50	0.092	ND	-
		250	ND	-	0.90	0.020	0.50	0.081	0.013	0.0023
		750	ND	-	0.26	0.013	0.20	0.017	0.017	0.0029
		1,000	ND	-	0.13	0.0090	0.099	0.015	0.021	0.0028
		1,250	ND	-	0.077	0.0070	0.086	0.013	0.018	0.0026
		2,050	ND	-	ND	-	ND	-	0.016	0.0024
	襟裳沖 (K2)	1	0.059	0.017	1.1	0.025	0.69	0.086	ND	-
		250	ND	-	0.90	0.022	0.59	0.078	0.011	0.0021
		750	ND	-	0.32	0.011	0.28	0.018	0.021	0.0028
		1,000	ND	-	0.15	0.0090	0.17	0.015	0.036	0.0037
		1,250	ND	-	0.071	0.0076	0.099	0.015	0.029	0.0035
		1,643	ND	-	ND	-	ND	-	0.021	0.0028
襟裳沖	T2	1	ND	-	1.6	0.043	0.85	0.12	*	*
10 月 期	襟裳沖 (E11)	1	ND	-	1.5	0.028	0.73	0.10	ND	-
		250	ND	-	1.3	0.023	0.71	0.099	0.0078	0.0017
		750	ND	-	0.28	0.011	0.22	0.016	0.023	0.0028
		1,000	ND	-	0.17	0.0089	0.15	0.014	0.024	0.0029
		1,250	ND	-	0.068	0.0055	0.067	0.014	0.021	0.0027
		2,095	ND	-	ND	-	ND	-	0.013	0.0021
	襟裳沖	T2	1	ND	-	1.5	0.027	0.77	0.11	*
6 月 期	四国沖 (KC1)	1	ND	-	1.3	0.025	0.74	0.11	ND	-
		250	ND	-	1.8	0.048	0.88	0.11	0.011	0.0020
		500	ND	-	0.73	0.016	0.46	0.085	0.025	0.0031
		750	ND	-	0.24	0.010	0.23	0.015	0.023	0.0029
		1,000	ND	-	0.12	0.0076	0.12	0.017	0.021	0.0028
		1,673	ND	-	0.019	0.0034	0.058	0.013	0.020	0.0028
	大和堆 (YR1)	1	ND	-	1.4	0.031	0.95	0.11	0.0054	0.0015
		250	ND	-	1.3	0.028	0.99	0.11	0.012	0.0023
		500	ND	-	1.1	0.024	0.91	0.11	0.016	0.0024
		750	ND	-	0.95	0.022	0.90	0.12	0.029	0.0034
		1,000	ND	-	0.85	0.021	0.80	0.088	0.030	0.0034
		3,637	ND	-	0.26	0.010	0.21	0.016	0.031	0.0036
	大和堆 (YR4)	1	ND	-	1.5	0.033	0.91	0.12	ND	-
		250	ND	-	1.2	0.034	0.99	0.13	0.012	0.0021
		500	ND	-	1.1	0.023	0.64	0.11	0.017	0.0026
1,212		ND	-	0.52	0.014	0.48	0.076	0.029	0.0033	

「ND」は検出下限値以下を示す。また、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。なお、「*」は分析対象外を示す。

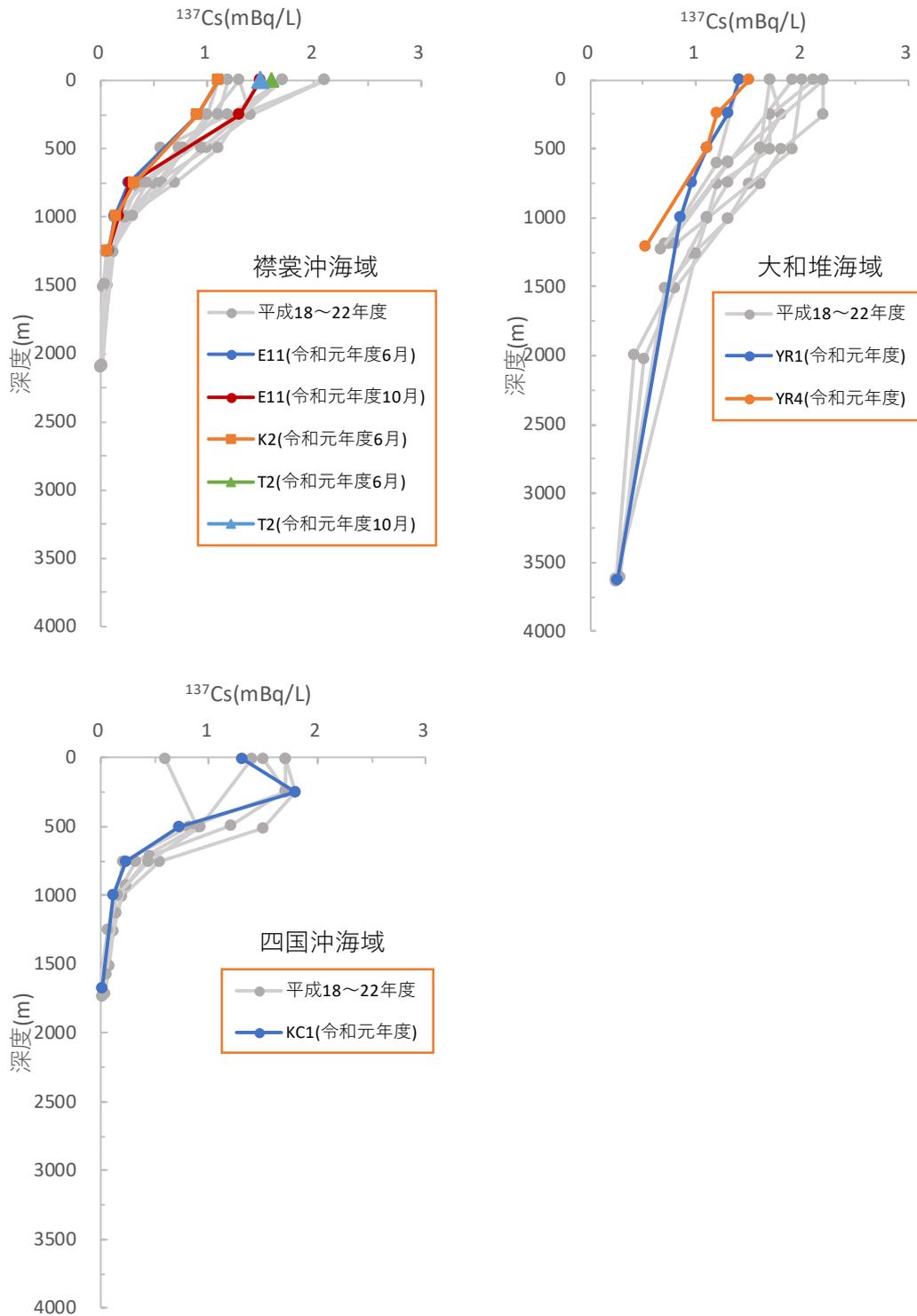


図 I -2-1-1-2 対照海域で採取した海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布

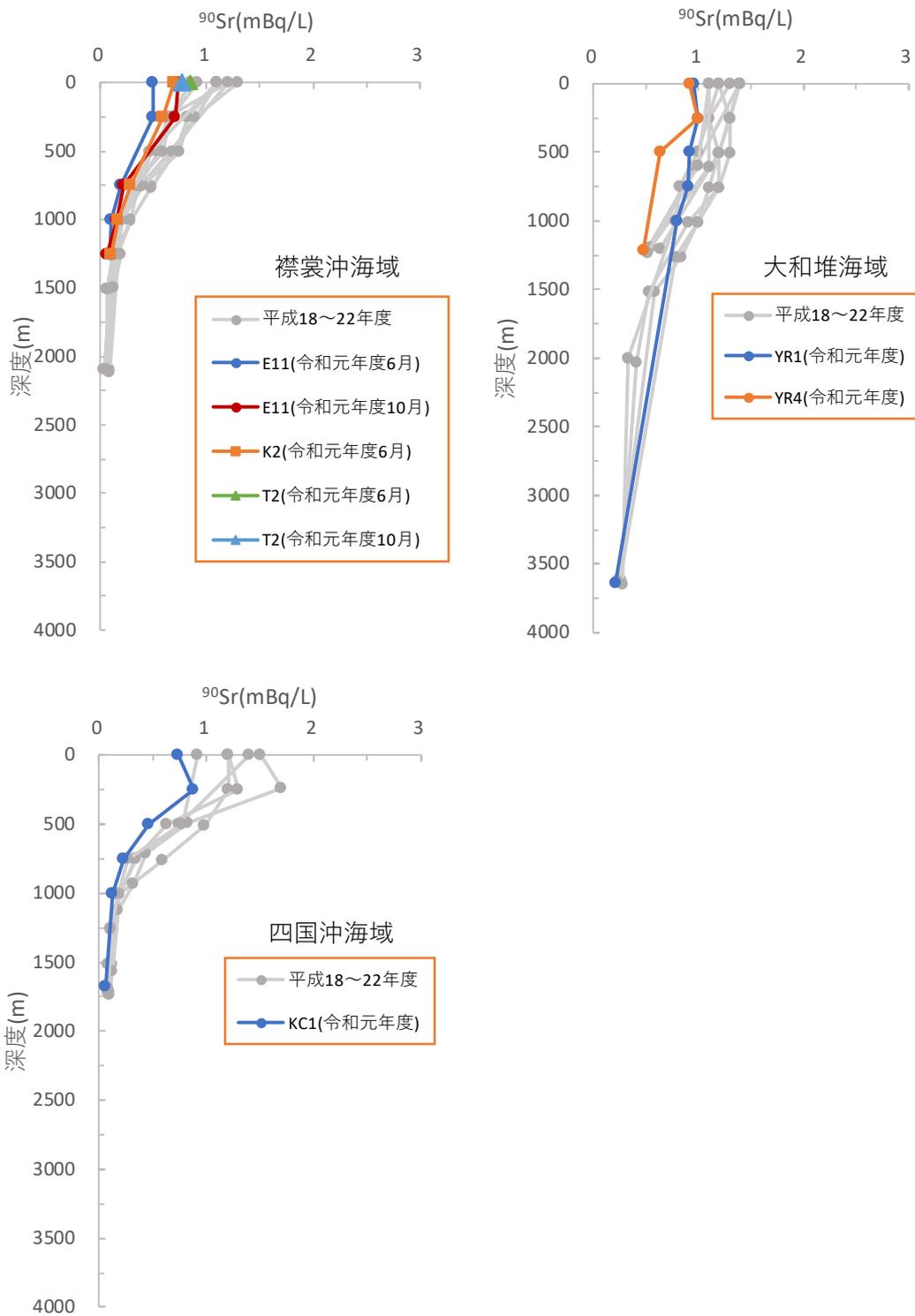


図 I -2-1-1-3 対照海域で採取した海水試料に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の鉛直分布

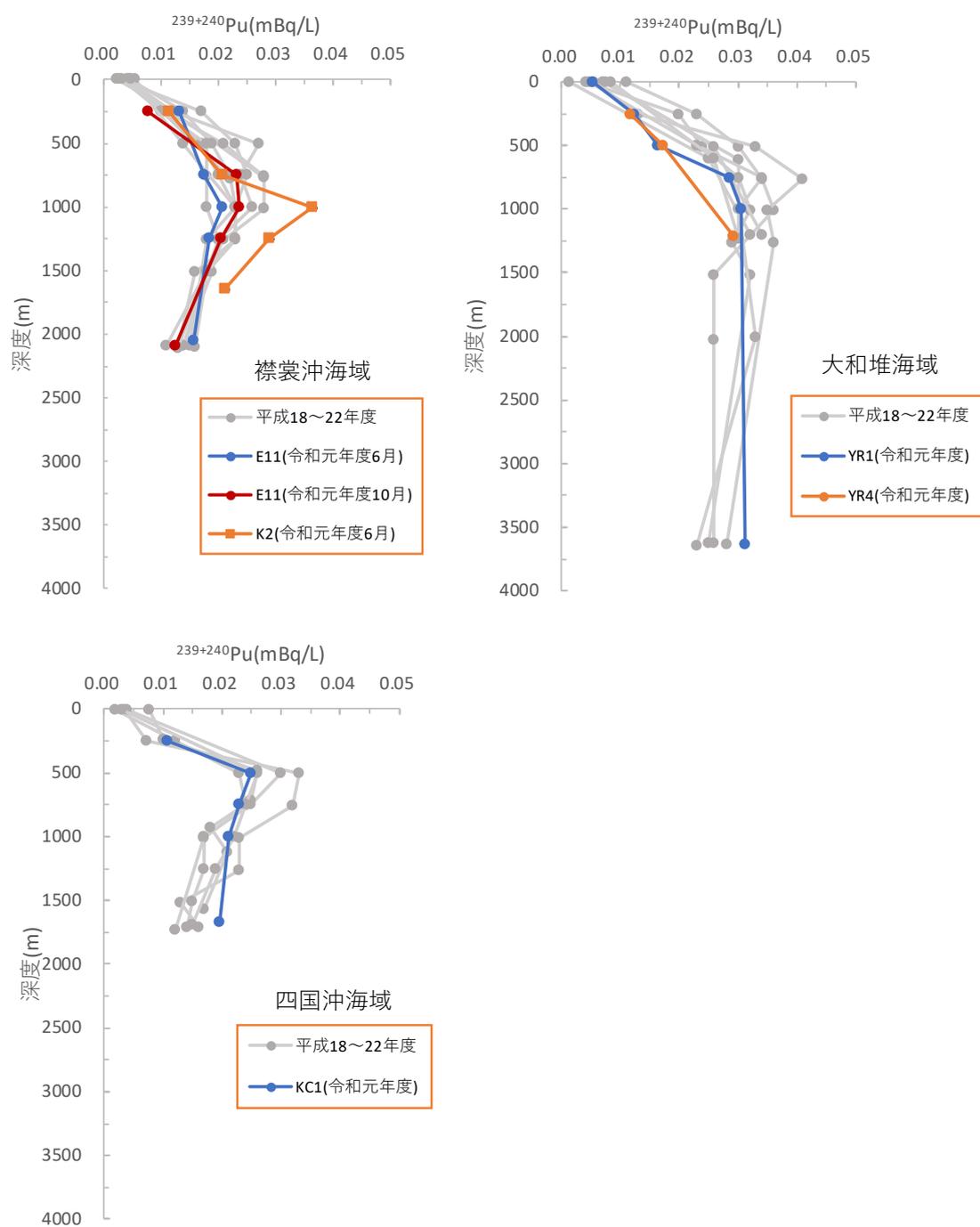


図 I -2-1-1-4 対照海域で採取した海水試料に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の鉛直分布

(海水試料における海洋放射能調査との比較)

平成 31 (令和元) 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、すべ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 平成 31 (令和元) 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 ^{137}Cs 及び ^{90}Sr の放射能濃度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	最大	平均	最小	最大	平均		
東日本	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	1.1	3.0	1.8	0.45	1.1	0.75	
			下層	ND	2.5	1.6	ND	0.98	0.67	
	対照 海域	襟裳沖 (6月)	表層	1.1	1.6	1.3	0.50	0.85	0.68	
			表層より 深い層	ND	0.90	0.35	ND	0.59	0.25	
	核燃海域 (10月)	表層	1.4	2.0	1.7	0.58	0.99	0.78		
		下層	ND	2.2	1.4	ND	0.97	0.65		
	対照 海域	襟裳沖 (10月)	表層	1.5	1.5	1.5	0.73	0.77	0.75	
			表層より 深い層	ND	1.3	0.45	ND	0.71	0.29	
	日本海	発電所 海域	北海道、 新潟、石川、 福井第一、 福井第二、 島根	表層	1.5	2.3	1.9	0.56	0.92	0.79
				下層	0.96	2.2	1.6	0.64	0.97	0.78
対照 海域		大和堆	表層	1.4	1.5	1.5	0.91	0.95	0.93	
			表層より 深い層	0.26	1.3	0.91	0.21	0.99	0.74	
西日本	発電所 海域	静岡、 愛媛、 佐賀、 鹿児島	表層	1.2	2.1	1.8	0.65	0.88	0.76	
			下層	0.81	2.3	1.8	0.58	1.0	0.80	
	対照海域	四国沖	表層*	1.3			0.74			
			表層より 深い層	0.019	1.8	0.58	0.058	0.88	0.35	

ND は検出下限値以下を示し、平均値の計算から除外した。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。

*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 平成 31 (令和元) 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 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度範囲及びその平均値

調査海域	採取層	$^{239+240}\text{Pu}$ (mBq/L)			
		最小	最大	平均	
核燃海域 (6月)	表層	ND	0.0051	0.0036	
	下層	ND	0.024	0.010	
核燃海域 (10月)	表層	ND	0.0056	0.0033	
	下層	ND	0.031	0.012	
対照海域	襟裳沖 (6月)	表層	ND		
		表層より 深い層	0.011	0.036	0.020
	襟裳沖 (10月)	表層	ND		
		表層より 深い層	0.0078	0.024	0.018
	大和堆	表層	ND	0.0054	—
		表層より 深い層	0.012	0.031	0.022
	四国沖	表層	ND		
		表層より 深い層	0.011	0.025	0.020

「ND」は検出下限値以下を示し、平均値の計算から除外した。なお、おおよその ND の値については、表 I-1-5-6 の脚注を併せて参照のこと。

「—」は検出された測点が1つであったので計算から除外した。

(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と平均値は、
発電所海域 (核燃海域も含む) :

1.1~3.0mBq/L (平均: 1.8mBq/L) (5~6月)

1.4~2.0mBq/L (平均: 1.7mBq/L) (10月: 核燃海域のみ)

対照海域 (襟裳沖): 1.1~1.6mBq/L (平均: 1.3mBq/L) (6月)

1.5mBq/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 の放射能濃度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 の放射能濃度とその平均は、

発電所海域：1.5～2.3mBq/L（平均：1.9mBq/L）（日本海海域）

1.2～2.1mBq/L（平均：1.8mBq/L）（西日本海域）

対照海域：1.4～1.5mBq/L（平均：1.5mBq/L）（大和堆）

1.3mBq/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。その要因は、Takata ら⁴⁾により示されたように、事故由来の放射性セシウムが日本海海域及び西日本海域沿岸部に到達しているためと推測される。

なお、大和堆海域の表層においては、放射性セシウムの移行について事故に起因する根拠となる ^{134}Cs の検出は平成 28 年度では見られなかったものの、平成 29 年度の調査で検出され、日本海においては事故の影響が及ぶ海域の広がりが確認されつつも、平成 30 年度及び平成 31（令和元）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 を除くその平均は、

発電所海域（核燃海域も含む）：

ND～2.5mBq/L（平均：1.6mBq/L）（5～6 月）（42 測点中、6 測点で ND）

ND～2.2mBq/L（平均：1.4mBq/L）（10 月：核燃海域のみ）（22 測点中、6 測点で ND）

対照海域（襟裳沖）：

ND～0.90mBq/L（平均：0.35mBq/L）（6 月）（10 測点中、2 測点で ND）

ND～1.3mBq/L（平均：0.45mBq/L）（10 月）（5 測点中、1 測点で 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、これら比較的高い ^{137}Cs 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の深度は 200m 未満であり、また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）。

一方、対照海域では下層の採取深度が 250m～2,095m 程度と発電所海域に比べて深いため、これらの採取層においては事故以前から ^{137}Cs は容易に検出できないほど低い傾向が見られる。また、6 月期における測点 E11 の表層は、 ^{134}Cs を含んだ津軽暖流の影響を受けた水塊を含む可能性がある一方、測点 K2 及び 10 月期における測点 E11 の表層は親潮の影響を受けた表層水であるため、 ^{134}Cs の存在を見出すことができなかったと考えられる。

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 の放射能濃度とその平均は、

発電所海域： 0.96～2.2mBq/L（平均：1.6mBq/L）（日本海海域）

0.81～2.3mBq/L（平均：1.8mBq/L）（西日本海域）

対照海域： 0.26～1.3mBq/L（平均：0.91mBq/L）（大和堆）

0.019～1.8mBq/L（平均：0.58mBq/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。その主たる要因としては、東日本海域の下層あるいは表層より深い層における ^{137}Cs の放射能濃度と同様に、発電所海域では下層の採取深度が対照海域に比べて浅いことにより事故の影響が見られた（後述「I 2.2 (3)③海水中の放射性セシウム」）が、その一方で、対照海域では採取深度が 250m 以深と深く、同事故以前から ^{137}Cs の放射能濃度が低い傾向にあること（図 I-2-1-1-2）、更に四国沖海域の 250m 層を除いて事故に由来すると ^{134}Cs の存在を見出していないことなどから、当該海域・層まで事故に由来する放射性セシウムの影響が及んでいないと推測される。

(^{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 の放射能濃度とその平均は、

発電所海域： 0.45～1.1mBq/L（平均：0.75mBq/L）（5～6 月）

0.58～0.99mBq/L（平均：0.78mBq/L）（10 月：核燃海域のみ）

対照海域（襟裳沖）： 0.50～0.85mBq/L（平均：0.68mBq/L）（6 月）

0.73～0.77mBq/L（平均：0.75mBq/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 の放射能濃度とその平均は、

発電所海域： 0.56～0.92mBq/L（平均：0.79mBq/L）（日本海海域）

0.65～0.88mBq/L（平均：0.76mBq/L）（西日本海域）

対照海域： 0.91～0.95mBq/L（平均：0.93mBq/L）（大和堆）

0.74mBq/L（平均：0.74mBq/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。しかし、平均値は四国沖の値は他の海域と比べて比較的高い結果が得られた。対照海域の表層水に含まれる ^{90}Sr の放射能濃度の平均値は（図 I-2-1-1-5）、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 年度から平成 30 年度にかけても同様の濃度範囲内にあったことから、同事故による影響は見られなくなったと考えられる。さらに、発電所海域においても同様

な結果を示すことから、平成 31（令和元）年度調査で見られた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、有意な差ではなく自然変動の範囲内にあるものと考えられる。

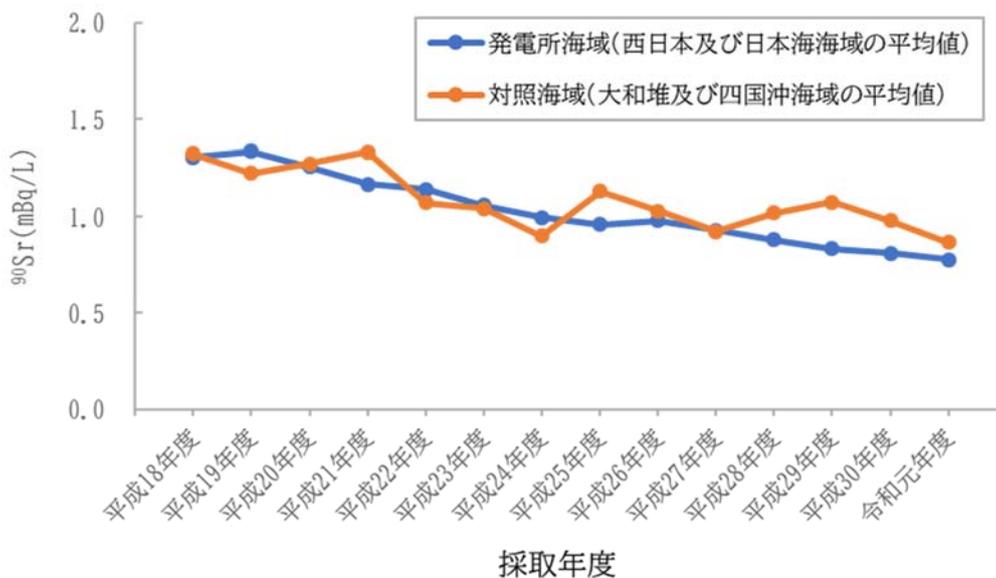
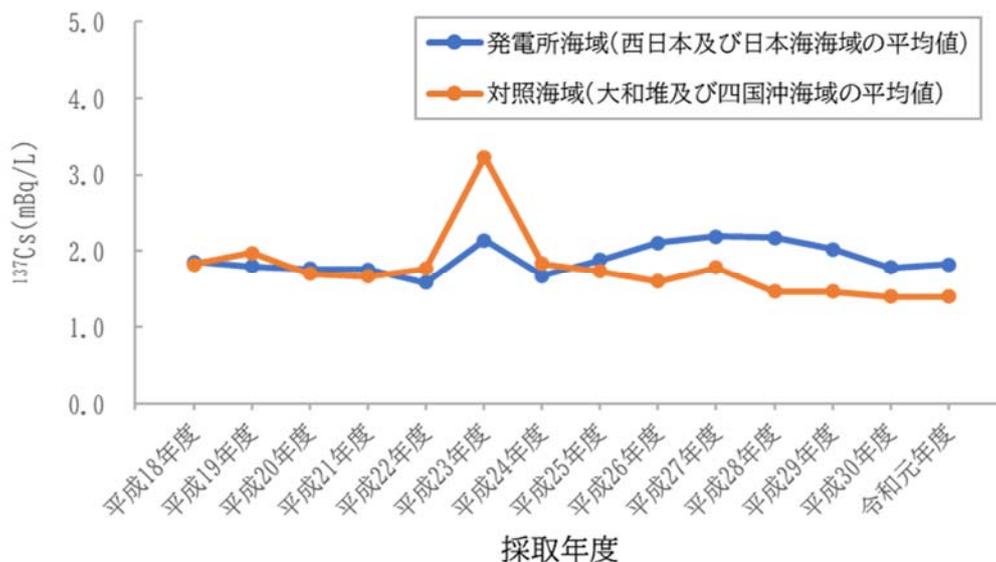


図 I -2-1-1-5 対照、西日本及び日本海海域で採取した表層海水に含まれる ^{137}Cs と ^{90}Sr の放射能濃度の平均値を経年変化として示したもの（上図 ^{137}Cs ; 下図 ^{90}Sr ）

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⁹⁰Srの放射能濃度とNDを除く平均は、

発電所海域（核燃海域も含む）：

ND～0.98mBq/L（平均：0.67mBq/L）（5～6月）（42測点中、2測点でND）

ND～0.97mBq/L（平均：0.65mBq/L）（10月：核燃海域のみ）（22測点中、5測点でND）

対照海域（襟裳沖）：ND～0.59mBq/L（平均：0.25mBq/L）（6月）（10測点中、2測点でND）

ND～0.71mBq/L（平均：0.29mBq/L）（10月）（5測点中、1測点で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。この主たる要因としては、¹³⁷Csの放射能濃度の結果と同様に、発電所海域及び核燃海域における下層の深度は、200m未満が多い一方、対照海域では表層より深い層の採取層が250～2,050mと深く、これらの採取層における⁹⁰Srの放射能濃度がいまだに低いためと推測される（図I-2-1-1-3参照）。

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⁹⁰Srの放射能濃度とその平均は、

発電所海域：0.64～0.97mBq/L（平均：0.78mBq/L）（日本海海域）

0.58～1.0mBq/L（平均：0.80mBq/L）（西日本海域）

対照海域：0.21～0.99mBq/L（平均：0.74mBq/L）（大和堆）

0.058～0.88mBq/L（平均：0.35mBq/L）（四国沖）

であり、発電所海域で比較的高い結果が得られた。その主たる要因としては、東日本海域と同じく対照海域では表層よりも深い層の採取層が発電所海域に比べて深く、⁹⁰Srの放射能濃度に影響するほど東電福島第一原発事故の影響が及んでいないためと考えられる。

以上のことから、発電所及び核燃海域で見出される⁹⁰Sr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、その放射能濃度の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⁹⁰Srは過去の大気圏核爆発実験に由来する⁹⁰Sr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。

(²³⁹⁺²⁴⁰Pu)

表層の海水試料に含まれる²³⁹⁺²⁴⁰Puの放射能濃度とNDを除く平均は、

核燃海域：ND～0.0051mBq/L（平均：0.0036mBq/L）（6月）（22測点中、12測点でND）

ND～0.0056mBq/L（平均：0.0033mBq/L）（10月）（22測点中、13測点でND）

対照海域：ND（襟裳沖：6月及び10月）

ND～0.0054mBq/L（平均：0.0054mBq/L）（大和堆）（2測点中、1測点でND）

ND（四国沖）

であり、発電所海域と対照海域との差は見られなかった。

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 を除く平均は、

- 核燃海域： ND～0.024mBq/L（平均：0.010mBq/L）（6月）（22測点中、3測点でND）
ND～0.031mBq/L（平均：0.012mBq/L）（10月）（22測点中、2測点でND）
- 対照海域： 0.013～0.036mBq/L（平均：0.020mBq/L）（襟裳沖：6月）
0.0078～0.024mBq/L（平均：0.018mBq/L）（襟裳沖：10月）
0.012～0.031mBq/L（平均：0.026mBq/L）（大和堆）
0.011～0.025mBq/L（平均：0.020mBq/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、表層より深い層での $^{239+240}\text{Pu}$ 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ることなど、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),5)}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海底土試料に含まれる人工放射性核種の放射能濃度を図 I-2-1-1-6 に示す。平成 31（令和元）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）：2.3Bq/kg-乾燥土

四国沖海域（測点 KC1）：3.3Bq/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）：0.34Bq/kg-乾燥土

四国沖海域（測点 KC1）：0.40Bq/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）：0.64Bq/kg-乾燥土

四国沖海域（測点 KC1）：2.6Bq/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概ね 1Bq/kg-

乾燥土及び 0.06Bq/kg-乾燥土の差が見られ、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度では約 2Bq/kg-乾燥土の違いが見られたが、これは測点の水深や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) ※1 で $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度が 1.2~3.2Bq/kg-乾燥土と、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※2 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。

※1 平成 18 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 平成 20 年~平成 22 年度に実施した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 それぞれの調査報告書より

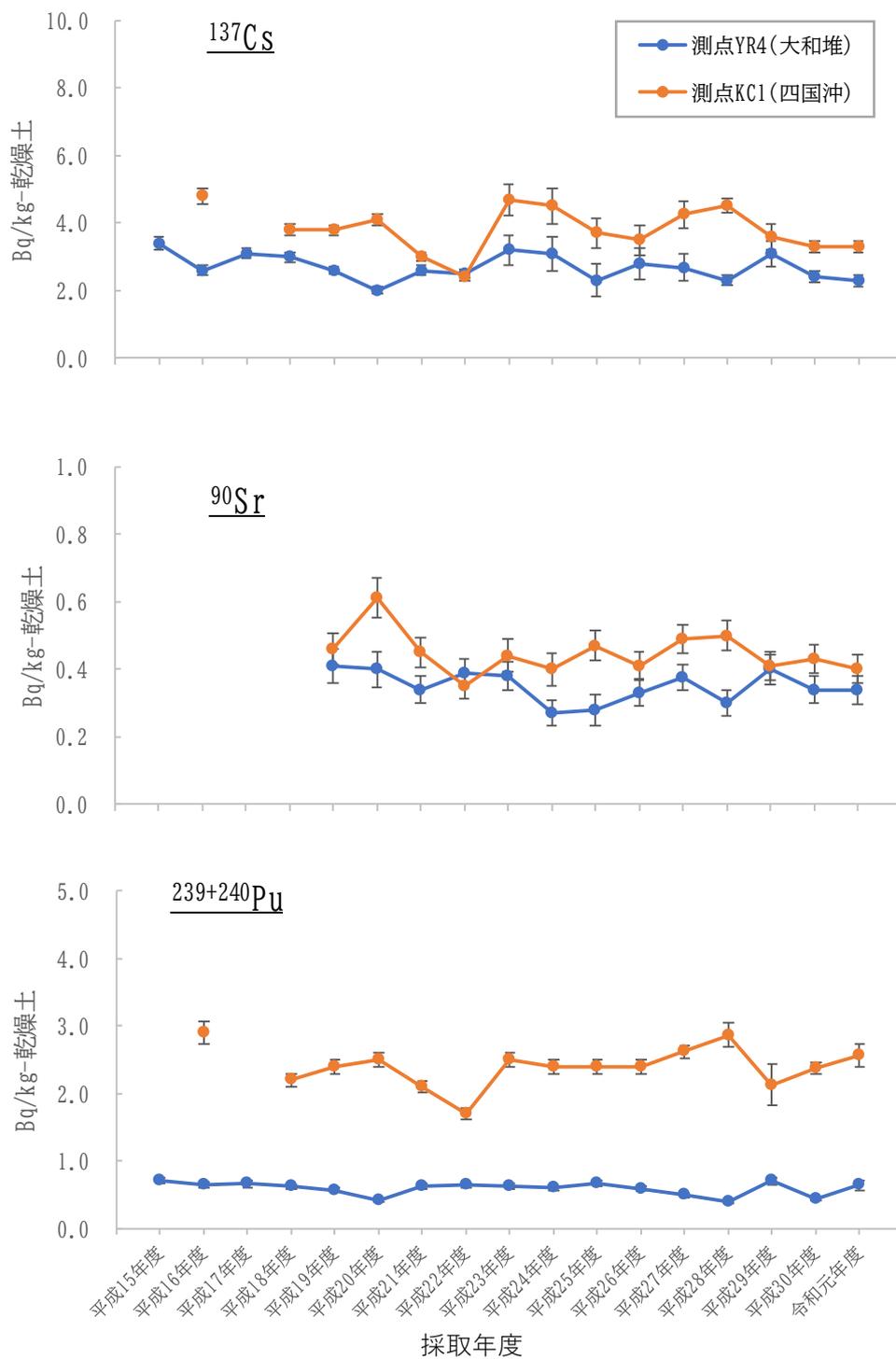


図 I-2-1-1-6 対照海域で採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度の経年変化（誤差は計数誤差。 ^{90}Sr は平成 19 年度より開始。YR4:大和堆海域、KC1: 四国沖海域を表す）

(海底土における海洋放射能調査との比較)

平成 31 (令和元) 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海底土中の放射性セシウム」)、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い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⁵⁾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 平成 31（令和元）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 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	最大	平均	最小	最大	平均
東日本	青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城、核燃	ND	4.5	1.8	ND	63	8.9
日本海	北海道、新潟、石川、福井第一、福井第二、島根	ND			ND	9.1	2.8
西日本	静岡、愛媛、佐賀、鹿児島	ND			ND	1.9	0.91
対照	大和堆* ¹	ND			2.3		
	四国沖* ²	ND			3.3		

*1 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。

*2 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。

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。

表 I-2-1-1-6 平成 31（令和元）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 $^{239+240}\text{Pu}$ 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	最大	平均	最小	最大	平均
東日本海域	核燃	ND	0.26	0.21	0.35	4.0	1.3
対照海域	大和堆	0.34			0.64		
	四国沖	0.40			2.6		

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。

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 $^{239+240}\text{Pu}$ の人工放射性核種についてそれらの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、一部（四国沖海域における 250m 層の放射性セシウムの放射能濃度）を除き、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同程度であった。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。これは、事故前 5 年間の範囲内にあり同程度の鉛直分布を示していることから、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これら放射性核種の放射能濃度は、事故前 5 年間の範囲内であった。

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、すべ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. *Sci. Total. Environ.*, 340, 199-211.
- 4) Takata, H., Kusakabe, M., Inatomi, N. and Ikenoue, T. (2018). Appearances of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Derived ^{137}Cs in the Coastal Waters Around Japan: Results from the Marine Monitoring off Nuclear Power Plants and Facilities in Japan (1983 to 2016). *Environ. Sci. Technol.*, 52, 2629-2637.
- 5) 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. *J. Environ. Radioact.*, 142, 113-123.
- 6) 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. *J. Environ. Radioact.*, 99, 875-881.

(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 に示した。

平成 31（令和元）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：スルメイカ、ゴマサバ

襟裳沖海域：マダラ、シロザケ（雄）

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（肝臓も分け取り、別途冷凍保管とした）。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。

ホッコクアカエビは腹肢に卵を抱えていた雌（市場で「甘えび」と称するもの）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。

ゴマサバ、マダラ及びシロザケは三枚に下ろし、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、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

（スルメイカ）

平成 31（令和元）年度の分析結果を表 I-2-1-2-1 に示す。対照海域の 3 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¹³⁷Cs の放射能濃度の経年変化を図 I-2-1-2-1 に示す。

平成 31（令和元）年度に大和堆海域で採取したスルメイカの筋肉からは¹³⁴Cs、¹³⁷Cs ともに検出されず、四国沖海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる放射性セシウムのうち¹³⁴Cs は検出されず¹³⁷Cs のみが検出され、その放射能濃度は 0.053Bq/kg-生鮮物であり、東電福島第一原発事故前の濃度と同程度であった。なお、襟裳沖海域では、不漁のため当初収集予定としていたスルメイカを入手することができず、マダラを代替として収集して試

料とした。

これまでの経過としては、平成 23 年度において東電福島第一原発事故の影響を受けて、いずれの海域においても事故前の最大値を超える ^{137}Cs の放射能濃度がスルメイカの筋肉で観測されたが、対照海域においては事故後に観測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：0.045Bq/kg-生鮮物

大和堆海域：0.065Bq/kg-生鮮物

福井第一海域：0.060Bq/kg-生鮮物

核燃海域：0.041Bq/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観測されてきた。

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 1-2-1-2-2 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 0.00029Bq/kg-生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出された。平成 31（令和元）年度に大和堆海域、四国沖海域で採取したスルメイカの筋肉からは $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかった。

なお、核燃海域で平成 27、28 及び 29 年度に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ため、平成 29 年度の対照海域との比較は出来なかった。平成 30 年度に採取したスルメイカ（核燃海域・前期・山田湾）の筋肉から 0.00039Bq/kg-生鮮物の $^{239+240}\text{Pu}$ が検出されたが、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。

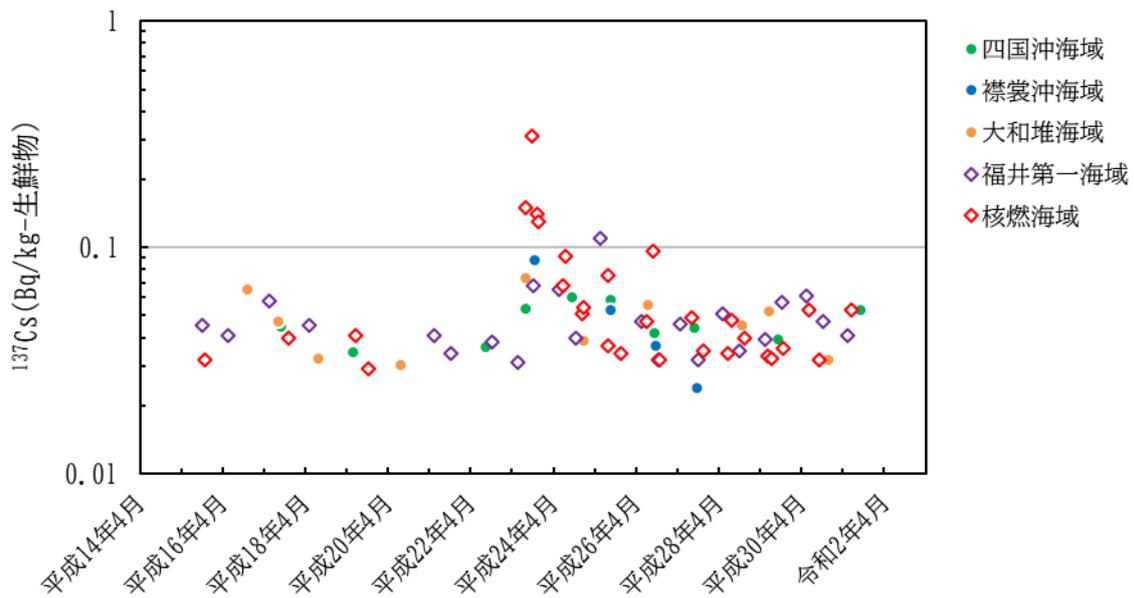


図 I -2-1-2-1 対照海域、福井第一海域及び核燃海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度を経年変化図として示したもの

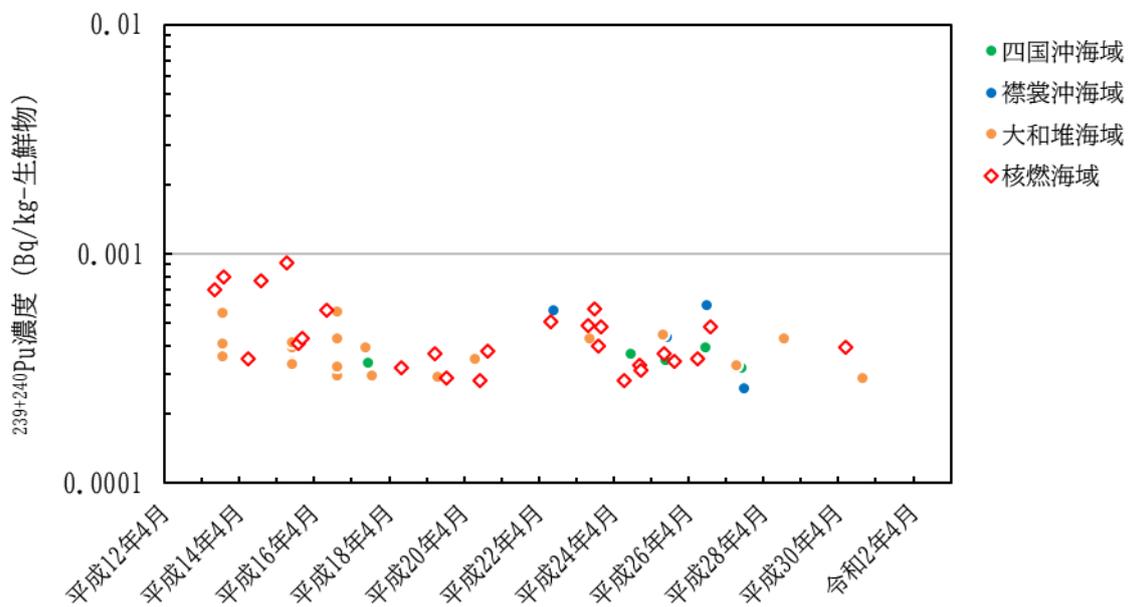


図 I -2-1-2-2 対照海域と核燃海域で採取したスルメイカの筋肉に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度を経年変化図として示したもの

(ホッコクアカエビ)

平成 31 (令和元) 年度に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 0.035Bq/kg-生鮮物、 $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度は 0.00048Bq/kg-生鮮物であった（分析結果を表 I-2-1-2-1 に、図 I-2-1-2-3 も併せて参照）。

一方、平成 31（令和元）年度の同時期（6 月）に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 0.051Bq/kg-生鮮物（前期）、0.037Bq/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、平成 31（令和元）年度の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 の放射能濃度は平成 28 年度以前において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）。

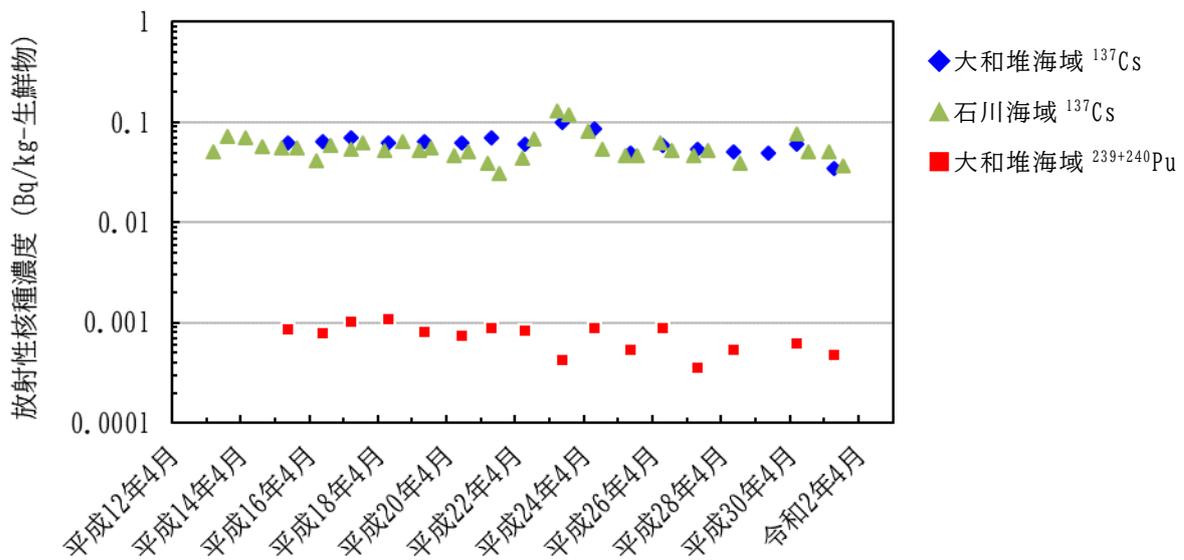


図 I-2-1-2-3 対照海域（大和堆海域）と石川海域で採取したホッコクアカエビの筋肉に含まれる放射性核種の放射能濃度を経年変化図として示したもの

（ゴマサバ）

平成 31（令和元）年度に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 0.11Bq/kg-生鮮物であり、 ^{134}Cs については平成 30 年度に引き続き検出されなかった（表 I-2-1-2-2 参照）。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、平成 31（令和元）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 参照）。

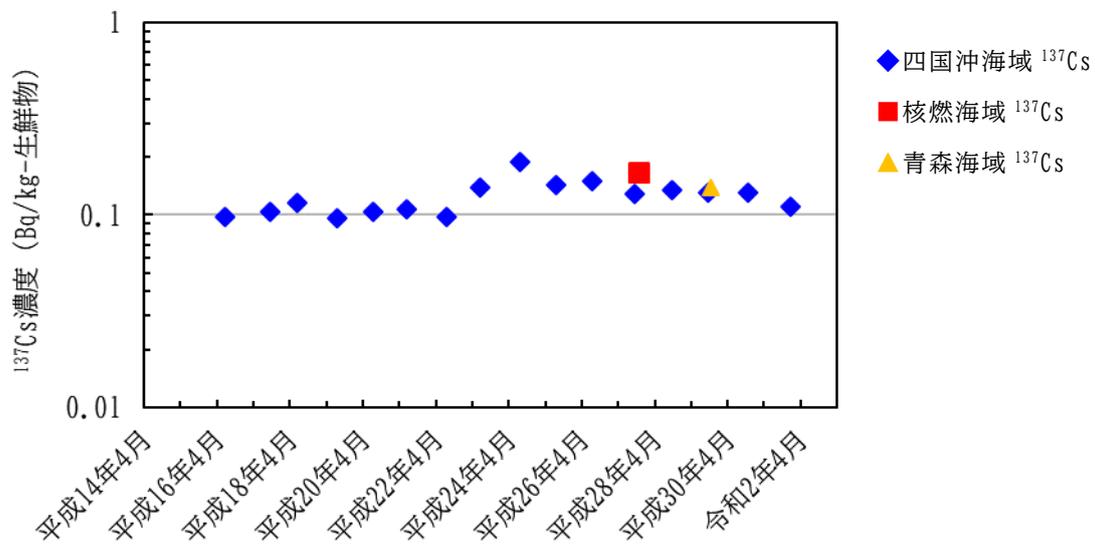


図 I-2-1-2-4 対照海域（四国沖海域）、核燃海域及び青森海域で採取したゴマサバの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度を経年変化図として示したもの

（シロザケ）

平成 31（令和元）年度における襟裳沖海域で採取したシロザケの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は 0.11Bq/kg-生鮮物であり、また、 ^{134}Cs については平成 30 年度に引き続き検出されなかった（表 I-2-1-2-3 参照）。

平成 19 年度に調査を開始して以来、襟裳沖海域で採取したシロザケの筋肉に含まれる放射性セシウムの放射能濃度は核燃海域のそれに比べ低いか、あるいは同程度で推移しており、東電福島第一原発事故後に見られた放射能濃度の上昇傾向は核燃海域で採取されたシロザケの筋肉に含まれる放射能濃度で見られた上昇傾向に比べて小さいものであった（図 I-2-1-2-5 参照）。

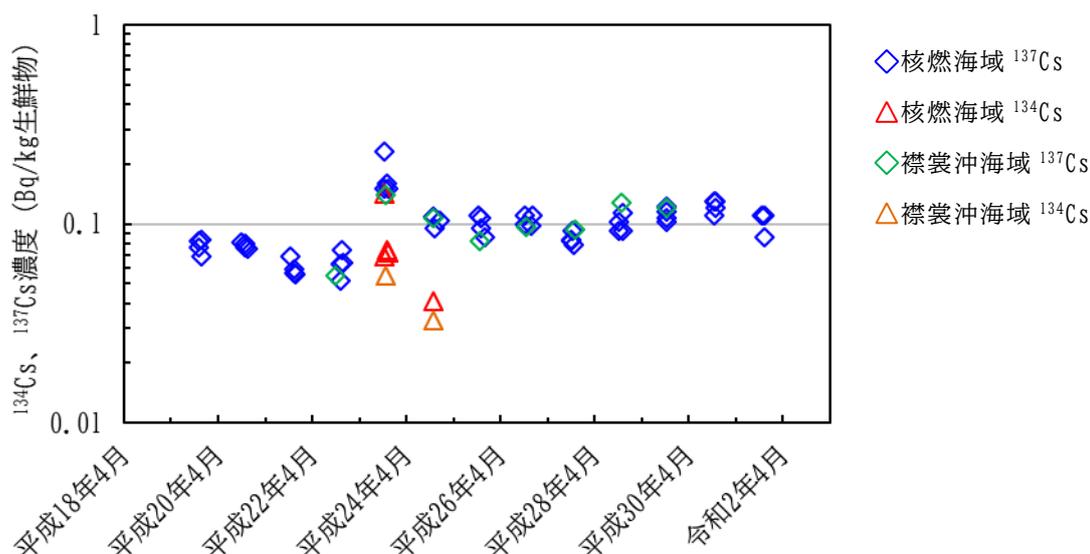


図 I-2-1-2-5 対照海域（襟裳沖海域）と核燃海域で採取したシロザケの筋肉に含まれる放射性セシウムの放射能濃度を経年変化図として示したもの

（マダラ）

平成 31（令和元）年度に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 0.13Bq/kg -生鮮物であり、また、 ^{134}Cs については検出されなかった（表 I-2-1-2-3 参照）。なお、直近の平成 30 年度に実施した本事業において、対照海域を対象とした調査でマダラを海産生物試料として供したことはなかったが、 ^{137}Cs の放射能濃度については、平成 31（令和元）年度に実施した海洋放射能調査の結果と比較すると、

宮城海域（後期）： 0.37Bq/kg -生鮮物

福島第一海域（後期）： 0.19Bq/kg -生鮮物

核燃海域（前期・後期）：ともに 0.15Bq/kg -生鮮物

と宮城海域で後期（11 月）に採取したマダラの筋肉に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度が若干高かったが、それ以外はほぼ同程度であった。

（マダラはスルメイカの代替として欠測を避けるためやむを得ず供することになった。生息域や食性を考慮すると代替として適切であるか否か検証を要するが、当該漁場から得られた海産生物試料であるという観点で試料とみなし、その結果等を記載した）

表 I -2-1-2-1 対照海域（大和堆海域）における海産生物試料の放射性核種濃度

(単位：Bq/kg-生鮮物)

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		令和元年8月2日	令和元年7月11日		
漁獲場所		大和堆	大和堆		
漁法		一本釣り	底曳網		
試料の個体数		233*5	1610*5		
平均全長±標準偏差 最小/最大(cm)		19.2±1.1*1*6 16.5/21.9*6	16.6±0.8*6 14.7/18.7*6		
平均体重±標準偏差 最小/最大(g)		132.1±25.4*6 82.8/207.8*6	19.1±2.8*6 13.4/26.2*6		
供試部位		筋肉	筋肉		
灰分(%)		2.03	1.51		
分析 供試量 (g 灰)	γ核種	62.86	59.87		
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	20.06	15.22		
測定 年月日	γ核種	令和元年11月7日	令和元年11月7日		
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	令和元年12月9日	令和元年12月9日		
放射性核種濃度*4	人工放射性核種	¹³⁴ Cs ¹³⁷ Cs	ND*2 ND	ND 0.035 ± 0.0073	
		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。		
	自然放射性核種	α ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	ND	0.00048 ± 0.00012	
		γ	⁷ Be	ND	ND
			⁴⁰ K	120 ± 0.82	77 ± 0.51
²⁰⁸ Tl	ND		ND		
²¹⁴ Bi	ND		ND		
²²⁸ Ac	ND		ND		

*1 外套長の計測値を示す。

*2 NDは検出下限値以下を示す。

*3 -は未測定を示す。

*4 試料の放射性核種濃度は、漁獲年月日（複数日にまたがる場合は、その最終日）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。

*5 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。

*6 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）における海産生物試料の放射性核種濃度

調査海域		対照海域（四国沖海域）		
試料		スルメイカ	ゴマサバ	
漁獲年月日		令和元年9月6日	令和元年12月12日	
漁獲場所		室戸市佐喜浜町沿岸	安芸郡芸西村沿岸	
漁法		定置網	定置網	
試料の個体数		66	53	
平均全長±標準偏差 最小／最大(cm)		24.1±1.2*1 22.0/26.8	35.4±1.1 32.6/38.2	
平均体重±標準偏差 最小／最大(g)		307.5±45.9 217.7/434	429.2±41.6 330.3/554.6	
供試部位		筋肉	筋肉	
灰分(%)		1.66	1.53	
分析 供試量 (g 灰)	γ核種	67.54	57.60	
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	16.70	15.39	
測定 年月日	γ核種	令和元年11月7日	令和2年1月8日	
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	令和元年12月9日	令和2年1月17日	
放射性核種濃度*3	人工放射性核種 γ	¹³⁴ Cs ¹³⁷ Cs	ND*2 0.053 ± 0.0095	ND 0.11 ± 0.0092
		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。	
		²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	ND	ND
	人工放射性核種 γ	⁷ Be	ND	ND
		⁴⁰ K	96 ± 0.66	140 ± 0.71
		²⁰⁸ Tl	ND	ND
		²¹⁴ Bi	ND	ND
²²⁸ Ac		ND	ND	

*1 外套長の計測値を示す。

*2 NDは検出下限値以下を示す。

*3 試料の放射性核種濃度は、漁獲年月日に減衰補正した値で、誤差は計数誤差である。

表 I-2-1-2-3 対照海域（襟裳沖海域）における海産生物試料の放射性核種濃度
（単位：Bq/kg-生鮮物）

調査海域		対照海域（襟裳沖海域）		
試料		マダラ*1	シロザケ（雄）	
漁獲年月日		令和2年1月10日	令和元年10月25日	
漁獲場所		釧路沖	釧路沖	
漁法		刺網	定置網	
試料の個体数		13	7	
平均全長±標準偏差 最小/最大(cm)		56.4±2.3 51.4/58.8	68.1±3.5 64.0/72.5	
平均体重±標準偏差 最小/最大(g)		1862.3±212.7 1617.9/2235.9	2954.8±596.2 2246.2/4084	
供試部位		筋肉	筋肉	
灰分(%)		1.43	1.28	
分析 供試量 (g 灰)	γ核種	54.18	60.50	
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	14.33	12.94	
測定 年月日	γ核種	令和2年1月27日	令和2年1月9日	
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	令和2年1月29日	令和2年1月17日	
放射性核種濃度*3	人工放射性核種 γ	¹³⁴ Cs ¹³⁷ Cs	ND*2 0.13 ± 0.011	ND 0.11 ± 0.0085
		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。	
		²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	ND	ND
	人工放射性核種 γ	⁷ Be	ND	ND
		⁴⁰ K	120 ± 0.76	120 ± 0.60
		²⁰⁸ Tl	ND	ND
		²¹⁴ Bi	ND	ND
²²⁸ Ac		ND	ND	

*1 漁獲量減少によりスルメイカをマダラに変更した。

*2 ND は検出下限値以下を示す。

*3 試料の放射性核種濃度は、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。

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スルメイカとゴマサバ及び襟裳沖海域で採取したマダラとシロザケ（雄）について ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 及び $^{239+240}\text{Pu}$ の定量を行った。

平成 31（令和元）年度に採取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 $0.035\sim 0.13\text{Bq/kg}$ -生鮮物であった。また、筋肉に含まれる $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度については、きわめて低い放射能濃度ではあるがホッコクアカエビ（大和堆海域、令和元年 7 月採取）から 0.00048Bq/kg -生鮮物として検出された。

上記の結果を踏まえると、平成 31（令和元）年度に実施した海洋放射能調査において対象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人工放射性核種の放射能濃度は、対照海域で採取された海産生物試料に含まれる人工放射性核種の放射能濃度との対比から、一部の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現状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

海洋におけ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内核爆発実験である¹⁾。海洋環境に存在する大気圏内核爆発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)

である²⁾。

大気圏内核爆発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、チュール空軍基地米軍機墜落事故、核燃料搭載人工衛星(SANP-9A)爆発事故等がある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内核爆発実験による大量の地球規模放射性降下物（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（ビキニ及びエニウェトク環礁）にあった米国太平洋核実験場（Pacific Proving Grounds: PPG）で行われた大気圏内核爆発実験による放射性降下物（局地フォールアウト）

大気圏内核爆発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 ：0.50 PBq（0.78kgに相当）

^{239}Pu ：4.5 PBq（2,980kgに相当）

^{240}Pu ：4.0 PBq（477kgに相当）

^{241}Pu ：24 PBq（6.2kgに相当）

が太平洋に存在しているの見積もられており、このうち

^{239}Pu の 2.4 PBq

^{240}Pu の 2.7 PBq

^{241}Pu の 17 PBq

が太平洋核実験場での大気圏内核爆発実験（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) は起源によって異なるために有用である。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 ± 0.014 ⁵⁾、太平洋核実験場での大気圏内核爆発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 $0.30-0.36$ 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、このふたつの起源の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 $^{239+240}\text{Pu}$ 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、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

($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 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 16 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、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：測点 2 (計 15 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、2 mm 孔径のふるいにかけて、分析用試料とした。

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

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。

海底土試料約 2g-乾燥土を分取・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、試料を磁製るつぼに移し、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、ホットプレート上で 160°C ・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 3000 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) に還元した後、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 流して Pu (III) を溶離した。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; サーマ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、測定の感度向上のために、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品質管理を行った。本方法を用いて検出された $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度及び $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は認証値・文献値とよく一致した。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)

平成31 (令和元) 年度の分析結果を表 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、0.39~3.43 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。平成31 (令和元) 年度は、平成30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、 $^{239+240}\text{Pu}$ 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。平成31 (令和元) 年度の調査で得られた放射能濃度の範囲は、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⁺²⁴⁰Pu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⁺²⁴⁰Puの放射能濃度及び²⁴⁰Pu/²³⁹Pu原子数比

採取 海域	測点	採取日	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu
			(Bq/kg-乾燥土)	原子数比
北海道	2	令和元年6月8日	2.42 ± 0.11	0.228 ± 0.006
青森	2	令和元年6月18日	3.43 ± 0.15	0.223 ± 0.005
宮城	2	令和元年5月15日	0.54 ± 0.03	0.244 ± 0.010
福島第一	2	令和元年5月14日	0.94 ± 0.05	0.244 ± 0.007
福島第二	2	令和元年5月13日	0.92 ± 0.05	0.244 ± 0.010
茨城	2	令和元年5月11日	0.66 ± 0.03	0.242 ± 0.008
静岡	2	令和元年6月21日	0.45 ± 0.03	0.263 ± 0.009
静岡	4	令和元年6月21日	1.36 ± 0.07	0.251 ± 0.016
新潟	2	令和元年5月31日	2.22 ± 0.13	0.216 ± 0.010
石川	2	令和元年6月4日	0.81 ± 0.05	0.235 ± 0.011
福井第一	2	令和元年6月5日	2.65 ± 0.12	0.229 ± 0.007
福井第二	2	令和元年6月6日	2.08 ± 0.12	0.239 ± 0.006
島根	2	令和元年6月9日	0.42 ± 0.02	0.249 ± 0.015
愛媛	2	令和元年6月19日	0.39 ± 0.02	0.254 ± 0.008
佐賀	2	令和元年6月16日	0.54 ± 0.03	0.257 ± 0.008
鹿児島	2	令和元年6月17日	0.73 ± 0.03	0.265 ± 0.007

(誤差は、質量分析計による3から5回の繰り返し測定から得た標準偏差を示す)

(今期に限り、静岡海域・測点2を追加実施)

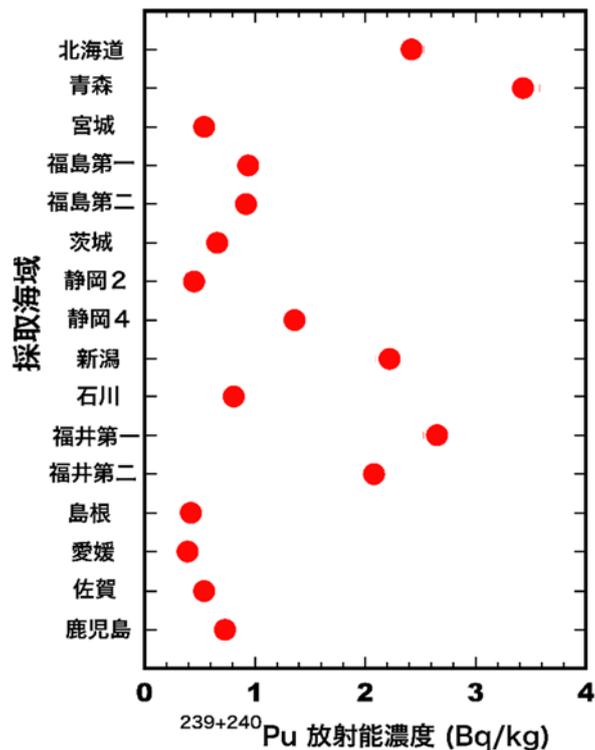


図 I-2-2-1-1 各海域で採取した海底土に含まれるプルトニウム ($^{239+240}\text{Pu}$) の放射能濃度

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

平成 31 (令和元) 年度に採取した発電所海域の海底土に含まれるプルトニウムの $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は、表 I-2-2-1-1 に示すとおり、0.216~0.265 の範囲にあり、平成 20~30 年度の調査結果と同じ範囲であった。表 I-2-2-1-2 に示すとおり、日本海海域と太平洋海域の平均値を比較しても有意の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比の差は認められなかった。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⁾と同程度であり、Bu ら¹⁵⁾は福島第一原子力発電所からのプルトニウムの海洋への放出は無視しようとしている。平成 31 (令和元) 年度の結果からも東電福島第一原発事故起源の $^{239+240}\text{Pu}$ の発電所海域の海底土へ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 0.33³⁾を用いた。表 I-2-2-1-2 に示すとおり、発電所全海域の海底土に含まれる ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 原子数比の平均値は 0.243 である。

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：49%
- ・グローバルフォールアウト起源：51%

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概ね半分ずつ存在していた。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⁾、粒子による沈降・除去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³⁾との報告もあり、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、東電福島第一原発事故などの事象に起因するものであるか否かを科学的に判断することも含め、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。

表 I-2-2-1-2 海底土に含まれる採取海域毎の ²³⁹⁺²⁴⁰Pu の放射能濃度及び ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 原子数比の平均値

採取 海域	海域数	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu
		(Bq/kg-乾燥土)	原子数比 (atom ratio)
日本海海域	7	1.59 ± 0.66	0.236 ± 0.009
太平洋海域	9	1.05 ± 0.58	0.248 ± 0.008
全海域	16	1.28 ± 0.45	0.243 ± 0.007

(誤差は平均値の標準偏差を付した)

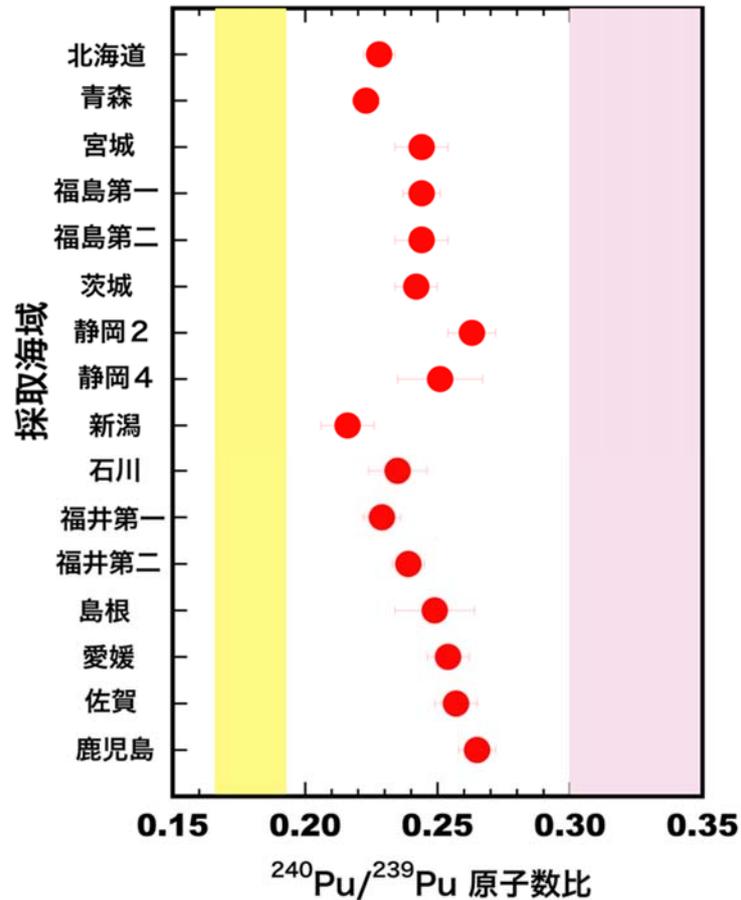


図 I -2-2-1-2 各海域で採取した海底土に含まれるプルトニウムの $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比（黄色及び赤色の網掛けは、それぞれグローバルフォールアウト比及び太平洋核実験場起源の局地フォールアウト比を示す）

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、 $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度や $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 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、過去の大気圏内核爆発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が概ね半分ずつ存在していた。

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 Res. 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. *Mar. Environ. Res.*, **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*, vol. **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 ^{237}Np . *Sci. Total Environ.*, **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. *Phys. Rev.*, **119**, 2000-2004.
- 7) Komura, K., Sakanoue, M. and Yamamoto, M. (1984) Determination of $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ratio in environmental samples based on the measurement of Lx/ α -ray activity ratio. *Health Phys.*, **46**, 1213-1219.
- 8) Muramatsu, Y., Hamilton, T., Uchida, S., Tagami, K., Yoshida, S. and Robinson, W. (2001) Measurement of $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ isotopic ratios in the soil from the Marshall Islands using ICP-MS. *Sci. Total Environ.*, **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. *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 3498-3504.
- 10) Wang, Z.-L. and Yamada, M. (2005) Plutonium activities and $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratios in sediment cores from the East China Sea and Okinawa Trough: Sources and inventories. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **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. *Anal. Chem.*, **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. *Anal. Chem.*, **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. *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, **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. *J. Environ. Radioact.*, **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. *Environ. Sci. Tech.*, **48(16)**, 9070-9078.
- 16) Yamada, M. and Zheng, J. (2010) Temporal variation of $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratio and $^{239+240}\text{Pu}$ inventory in water columns of the Japan Sea. *Sci. Total Environ.*, **408**, 5951-5957.

(2) 海水及び海産生物の¹²⁹Iの放射能濃度

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2つの起源を持ち；

(1) 大気中のキセノン(Xe)と宇宙線との核破碎反応(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

(2)には原子力関連施設から計画的に放出されるものと、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。また、大気圏核実験や原発事故では、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。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原子燃料サイクル施設の稼働に伴って¹²⁹Iが計画的に放出され、施設の周辺海域で¹²⁹I濃度レベルが変動することが懸念される。海洋におけるヨウ素のモニタリングに資するためには、¹²⁹I放射能濃度のバックグラウンドレベルを正確に把握する必要がある。

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濃度変化を捉えている^{4~11)}。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。特に、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^{12, 13)}。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¹⁴⁾、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である¹⁵⁾。

本調査では、前年度に引き続き、核燃海域や他の海域における海水中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中の¹²⁹Iの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の放射能濃度も調べた。

② 方法

(試料)

海水試料は発電所海域（青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城）、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、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、令和元年 5~6 月に各測点で表層水を採取した。核燃海域では、令和元年 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、襟裳沖）では令和元年 6 月に、表層から底層まで複数層で採水した。

コンブ類については、下北沖海域（青森県白糠漁協）及び岩手県三陸沖海域（重茂漁協）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（青森県三厩漁協）のマコンブ及び根室海峡（北海道羅臼漁協）のオニコンブをあわせて収集した。

(分析)

海水試料は賀佐ら¹⁶⁾の方法で前処理を行い、分離、濃縮した¹²⁹I 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¹²⁷I 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¹⁷⁾で測定した。

コンブ類については、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¹²⁹I の放射能濃度を測定した。同時に、試料中の¹²⁷I 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。詳細は平成 28 年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

(核燃海域の海水の ^{127}I (安定ヨウ素) 濃度及び ^{129}I の放射能濃度)

核燃海域で採取した表層水の ^{127}I 濃度及び ^{129}I の放射能濃度を表 I-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ので、ここでは青森海域も核燃海域に含める。平成 31(令和元)年度の同海域表層水中の ^{127}I 濃度の平均値と標準偏差は、

前期： $(51.8 \pm 0.4) \times 10^{-6} \text{g/L}$

後期； $(52.4 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{g/L}$

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

前期： $(51.6 \pm 0.4) \times 10^{-6} \text{g/L}$

後期： $(51.9 \pm 0.6) \times 10^{-6} \text{g/L}$

であり、前期と後期に有意な差は見られず、平成 31(令和元)年度に実施した調査の値は過去の分析値と有意の差はない。

平成 31(令和元)年度における表層水の ^{129}I の放射能濃度の平均値と標準偏差は、

前期： $(22.7 \pm 1.1) \times 10^{-9} \text{Bq/L}$

後期： $(18.9 \pm 1.7) \times 10^{-9} \text{Bq/L}$

であった。図 I-2-2-2-1(上段)に示すように、これらの値はアクティブ試験による ^{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。しかし、前期と後期の濃度を比較すると前期の値が 20%ほど高い。このような季節変動はアクティブ試験による ^{129}I 放出がほとんど無い平成 24 年以降でも見られる傾向である。今後水温や塩分等のデータを活用し、その変動メカニズムの解明が必要である。

一方、 ^{129}I の放射能濃度の年変化は更に大きい。平成 18 年~平成 31(令和元)年度の各測点における表層水の ^{129}I の放射能濃度の推移を図 I-2-2-2-1(上段)に示す。平成 19 年度と 20 年度に一部の測点で際だった濃度の上昇が見られた(AM1~8, AM17~22)。これらは再処理施設のアクティブ試験の影響と考えられる。平成 23 年度前期の AM4、AM5、AM22 で ^{129}I の放射能濃度の上昇が見られたが、この期間に再処理施設からの ^{129}I の放出はほとんど無く、東電福島第一原発事故の影響と考えられる。

表層海水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比は ^{129}I の放射能濃度と同時期に増減しており、前記の平均値($(6.60 \pm 0.35) \times 10^{-11}$)も後期のそれ($(5.43 \pm 0.49) \times 10^{-11}$)よりも約 22%高い。

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

測点*1	採取日	^{127}I ($\times 10^{-6}$ g/L)		^{129}I ($\times 10^{-9}$ Bq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
		濃度	誤差	濃度	誤差	原子数比	誤差
AM1	令和元年 6 月 5 日	52.2	0.2	23.5	0.4	6.77	0.12
AM3	令和元年 6 月 5 日	51.5	0.2	24.6	0.6	7.18	0.18
AM4	令和元年 6 月 14 日	50.8	0.2	23.4	0.8	6.93	0.24
AM6	令和元年 6 月 25 日	52.4	0.2	22.1	0.6	6.34	0.17
AM7	令和元年 6 月 14 日	52.0	0.2	23.4	0.5	6.77	0.15
AM10	令和元年 6 月 20 日	52.1	0.2	25.3	0.8	7.30	0.23
AM11	令和元年 6 月 22 日	51.8	0.2	23.1	0.7	6.70	0.20
AM13	令和元年 6 月 20 日	52.3	0.1	22.3	0.4	6.41	0.12
AM14	令和元年 6 月 24 日	51.2	0.1	22.7	0.3	6.67	0.09
AM15	令和元年 6 月 21 日	51.9	0.1	20.9	0.3	6.05	0.09
AM16	令和元年 6 月 21 日	52.1	0.1	21.6	0.3	6.23	0.09
AM17	令和元年 6 月 4 日	51.7	0.1	23.2	0.5	6.75	0.15
AM18	令和元年 6 月 4 日	51.0	0.1	23.6	0.3	6.96	0.09
AM19	令和元年 6 月 4 日	51.9	0.1	22.3	0.5	6.46	0.15
AM20	令和元年 6 月 3 日	51.6	0.1	23.2	0.7	6.76	0.20
AM21	令和元年 6 月 3 日	51.4	0.1	21.8	0.6	6.38	0.18
AM22	令和元年 6 月 3 日	51.7	0.1	23.7	0.5	6.89	0.15
HG1	令和元年 6 月 24 日	52.2	0.2	21.2	0.3	6.11	0.09
HG2	令和元年 6 月 18 日	52.1	0.2	21.8	0.8	6.29	0.23
HG3	令和元年 6 月 24 日	51.4	0.2	22.7	0.7	6.64	0.21
HG4	令和元年 6 月 18 日	52.5	0.2	21.0	0.4	6.01	0.12
平均と標準偏差		51.8	0.4	22.7	1.1	6.60	0.35

*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。

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

測点*1	採取日	^{127}I ($\times 10^{-6}$ g/L)		^{129}I ($\times 10^{-9}$ Bq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
		濃度	誤差	濃度	誤差	原子数比	濃度
AM1	令和元年 10 月 16 日	52.1	0.1	20.9	0.6	6.03	0.17
AM3	令和元年 10 月 16 日	52.3	0.1	19.8	0.3	5.69	0.09
AM4	令和元年 10 月 17 日	52.4	0.1	23.2	0.3	6.66	0.09
AM6	令和元年 10 月 16 日	53.1	0.1	19.4	0.3	5.49	0.09
AM7	令和元年 10 月 17 日	52.1	0.1	18.1	0.3	5.22	0.09
AM10	令和元年 10 月 18 日	52.3	0.1	20.7	0.6	5.95	0.17
AM11	令和元年 10 月 17 日	52.3	0.1	21.2	0.3	6.09	0.09
AM13	令和元年 10 月 22 日	52.3	0.1	17.0	1.0	4.89	0.29
AM14	令和元年 10 月 22 日	52.3	0.1	17.4	0.7	5.00	0.20
AM15	令和元年 10 月 22 日	52.4	0.2	18.1	0.8	5.19	0.23
AM16	令和元年 10 月 22 日	52.5	0.1	16.7	0.3	4.78	0.09
AM17	令和元年 10 月 11 日	52.3	0.1	18.2	0.6	5.23	0.17
AM18	令和元年 10 月 11 日	52.5	0.2	18.8	0.7	5.38	0.20
AM19	令和元年 10 月 10 日	52.4	0.1	17.4	0.7	4.99	0.20
AM20	令和元年 10 月 10 日	52.3	0.1	18.6	0.7	5.35	0.20
AM21	令和元年 10 月 10 日	52.3	0.1	18.5	0.7	5.32	0.20
AM22	令和元年 10 月 10 日	52.3	0.1	17.5	0.7	5.03	0.20
平均と標準偏差		52.4	0.2	18.9	1.7	5.43	0.49

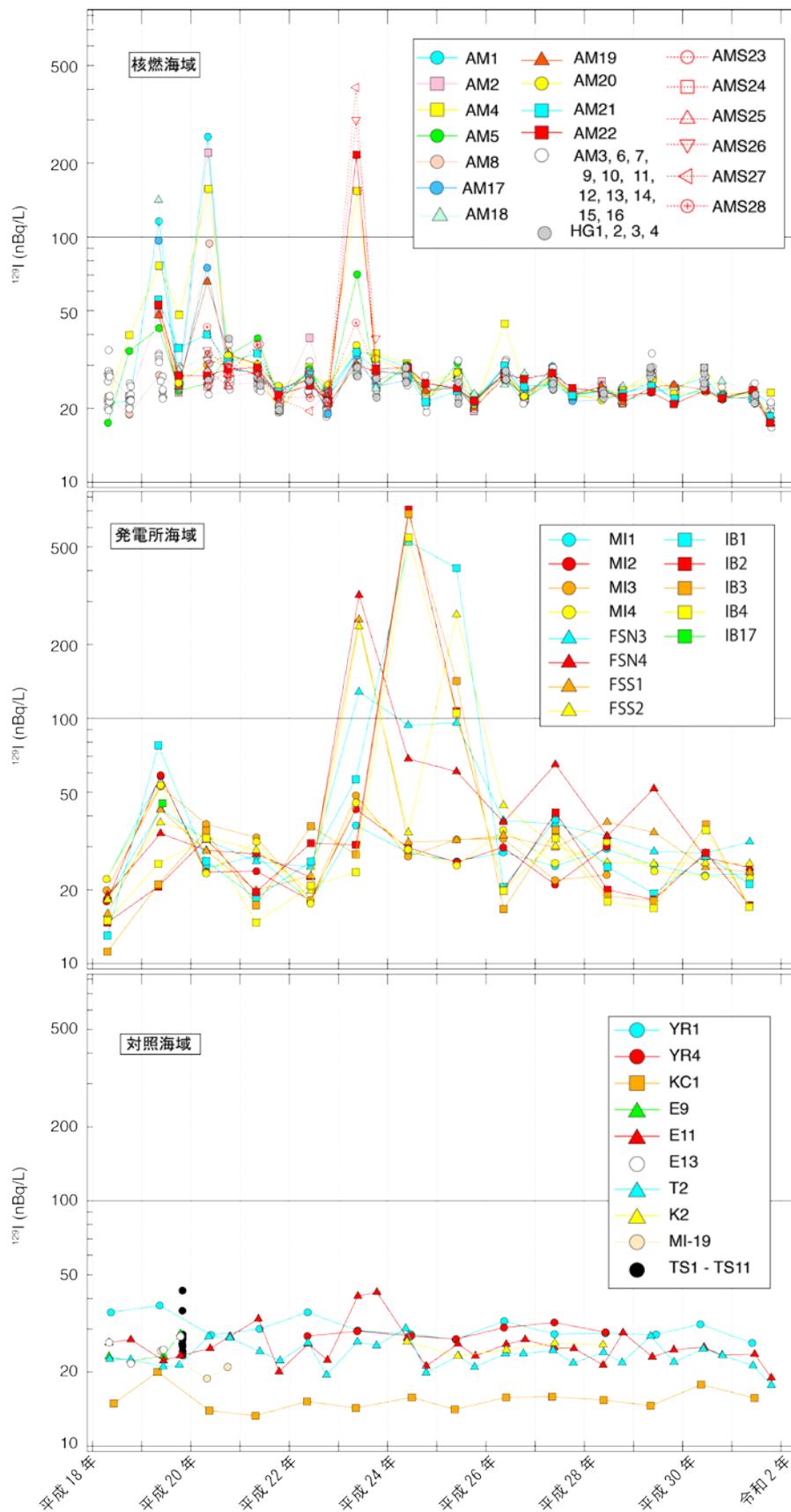


図 I -2-2-2-1 核燃海域、発電所海域及び対照海域における表層水の ^{129}I 放射能濃度の推移

(発電所海域の ^{127}I (安定ヨウ素)濃度及び ^{129}I の放射能濃度)

令和元年5月に核燃海域の南に位置する3つの発電所海域(宮城、福島第一・第二、茨城海域)において表層海水を採取し、 ^{127}I 濃度と ^{129}I の放射能濃度を測定した。それぞれの測点で得られた ^{127}I 濃度及び ^{129}I の放射能濃度並びに $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比を表 I-2-2-2-4 に示す。また、同海域における ^{129}I の放射能濃度の時系列変化を図 I-2-2-2-1(中段)に示す。

表 I-2-2-2-4 表層水の ^{127}I (安定ヨウ素)濃度と ^{129}I の放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比(発電所海域)

測点	採取日	^{127}I ($\times 10^{-6}$ g/L)		^{129}I ($\times 10^{-9}$ Bq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
		濃度	誤差	濃度	誤差	原子数比	誤差
宮城海域							
MI1	令和元年5月15日	50.6	0.2	23.3	1.1	6.92	0.33
MI4	令和元年5月16日	51.0	0.2	22.3	1.0	6.57	0.30
平均と標準偏差		50.8	0.2	22.8	0.5	6.75	0.17
福島第一・第二海域							
FSN3	令和元年5月14日	51.1	0.2	31.4	0.4	9.24	0.12
FSN4	令和元年5月14日	51.5	0.2	24.6	0.9	7.18	0.26
FSS1	令和元年5月13日	51.6	0.2	23.6	0.8	6.88	0.23
FSS2	令和元年5月13日	50.5	0.2	25.6	0.6	7.62	0.18
平均と標準偏差		51.2	0.4	26.3	3.0	7.73	0.91
茨城海域							
IB1	令和元年5月12日	52.0	0.2	21.1	0.6	6.10	0.18
IB2	令和元年5月11日	54.2	0.2	17.3	0.6	4.80	0.17
IB3	令和元年5月10日	54.1	0.2	17.1	0.8	4.75	0.22
IB4	令和元年5月10日	54.1	0.2	17.0	0.9	4.72	0.25
平均と標準偏差		53.6	0.9	18.1	1.7	5.09	0.58

令和元年5月の ^{127}I 濃度は、宮城海域が $(50.6\sim 51.0)\times 10^{-6}\text{g/L}$ 、福島第一・第二海域が $(50.5\sim 51.6)\times 10^{-6}\text{g/L}$ 、茨城海域が $(52.0\sim 54.2)\times 10^{-6}\text{g/L}$ であった。平成18~22年度の各海域の ^{127}I 濃度の範囲は、宮城海域が $(47.7\sim 53.7)\times 10^{-6}\text{g/L}$ 、福島第一・第二海域が $(49.8\sim 54.1)\times 10^{-6}\text{g/L}$ 、茨城海域が $(47.3\sim 54.9)\times 10^{-6}\text{g/L}$ であり、平成31(令和元)年度の測定値は事故前の変動幅に収まっている。

3つの海域（宮城、福島、茨城）における海水中 ^{129}I の放射能濃度の平均値は(18.1～26.3)× 10^{-9} Bq/L の範囲にあった。平成 18～30 年度の同海域における ^{129}I の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（中段））。そのため、3 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濃度を見積もることは容易ではなく、平成 31（令和元）年度のデータが事故前のレベルにあるかどうか判定が難しい。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 ^{129}I 放射能濃度の上昇が見られる前のレベルに戻っている。平成 31（令和元）年度の分析結果は平成 22 年の結果から逸脱するものではなく、発電所海域の ^{129}I の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だろう。

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

対照海域 3 海域における海水中の ^{127}I 濃度及び ^{129}I の放射能濃度を表 I-2-2-2-5 に示す。

<表層>

表層水中の ^{127}I 濃度は観測された 4 つの測点（YR1、KC1、E11、T2）では比較的小さい変動幅（52～53）× 10^{-6} g/L にあった。一方、 ^{129}I の放射能濃度は下に示すように海域毎に大きく変動する。

YR1:26.3× 10^{-9} Bq/L KC1:15.7× 10^{-9} Bq/L E11:23.7× 10^{-9} Bq/L
T2（前期）：21.3× 10^{-9} Bq/L T2（後期）：17.7× 10^{-9} Bq/L

$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比も ^{129}I の放射能濃度の変動を反映して $4.4\sim 8\times 10^{-11}$ の範囲にあり、四国沖海域（KC1）で最小値を示す。

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、平成 31（令和元）年のみの傾向ではない（図 I-2-2-2-1（下段））。

<鉛直分布>

対照海域の 3 つの測点、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 の放射能濃度の鉛直分布を調べた。 ^{127}I 濃度は、平成 31（令和元）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。即ち、いずれの海域でも表層（52～53× 10^{-6} g/L）から水深とともに濃度が増し、おおよそ深度 1000m で（56～60）× 10^{-6} g/L に達し、それ以深ではほぼ一定である。一方、 ^{129}I の放射能濃度は全ての海域で水深とともに濃度が減る傾向を示した（図 I-2-2-2-2）。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

込んでいることがわかる。また、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の鉛直分布は ^{129}I の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 の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。東電福島第一原発事故の起きた平成 23 年は青色、平成 31（令和元）年のデータは赤色で示されている。図 I-2-2-2-1（下段）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 年には表層で高い値を示している。なお、他の 2 つの海域では事故の影響は見られず、平成 31（令和元）年度の分析結果も前年度までの濃度レベルと同様であった。

表 I-2-2-2-5 表層水の ^{127}I (安定ヨウ素)濃度と ^{129}I の放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比 (対照海域)

測点	採取日	採取深度	^{127}I ($\times 10^{-6}$ g/L)		^{129}I ($\times 10^{-9}$ Bq/L)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
			濃度	誤差	濃度	誤差	原子数比	誤差
大和堆海域								
YR1	令和元年 6 月 1 日	1 m	52.2	0.2	26.3	0.6	7.58	0.17
YR1	令和元年 6 月 1 日	250 m	53.6	0.2	26.7	0.8	7.49	0.23
YR1	令和元年 6 月 1 日	500 m	55.2	0.2	24.7	0.1	6.73	0.03
YR1	令和元年 6 月 1 日	750 m	56.5	0.2	20.4	0.2	5.43	0.06
YR1	令和元年 6 月 1 日	1000 m	56.4	0.2	17.6	0.3	4.69	0.08
YR1	令和元年 6 月 1 日	3637 m	57.3	0.2	4.3	0.1	1.13	0.03
四国沖海域								
KC1	令和元年 6 月 18 日	1 m	53.3	0.1	15.7	0.4	4.43	0.11
KC1	令和元年 6 月 18 日	250 m	55.7	0.1	15.6	0.3	4.21	0.08
KC1	令和元年 6 月 18 日	500 m	57.7	0.1	8.6	0.2	2.24	0.05
KC1	令和元年 6 月 18 日	750 m	58.9	0.1	3.8	0.1	0.97	0.03
KC1	令和元年 6 月 18 日	1000 m	59.3	0.1	2.3	0.2	0.58	0.05
KC1	令和元年 6 月 18 日	1673 m	59.8	0.1	1.2	0.1	0.30	0.03
襟裳沖海域								
E11	令和元年 6 月 19 日	1 m	51.9	0.2	23.7	0.3	6.87	0.09
E11	令和元年 6 月 19 日	250 m	56.1	0.2	17.0	0.3	4.56	0.08
E11	令和元年 6 月 19 日	750 m	59.3	0.2	4.6	0.1	1.17	0.03
E11	令和元年 6 月 19 日	1000 m	59.8	0.2	3.0	0.2	0.75	0.05
E11	令和元年 6 月 19 日	1250 m	60.1	0.2	2.4	0.2	0.60	0.05
E11	令和元年 6 月 19 日	2050 m	60.4	0.2	0.8	0.2	0.20	0.05
E11	令和元年 10 月 21 日	1 m	52.3	0.1	19.0	0.4	5.46	0.12
襟裳沖海域								
T2	令和元年 6 月 7 日	1 m	52.1	0.2	21.3	0.5	6.15	0.15
T2	令和元年 10 月 22 日	1 m	52.6	0.1	17.7	0.5	5.06	0.14

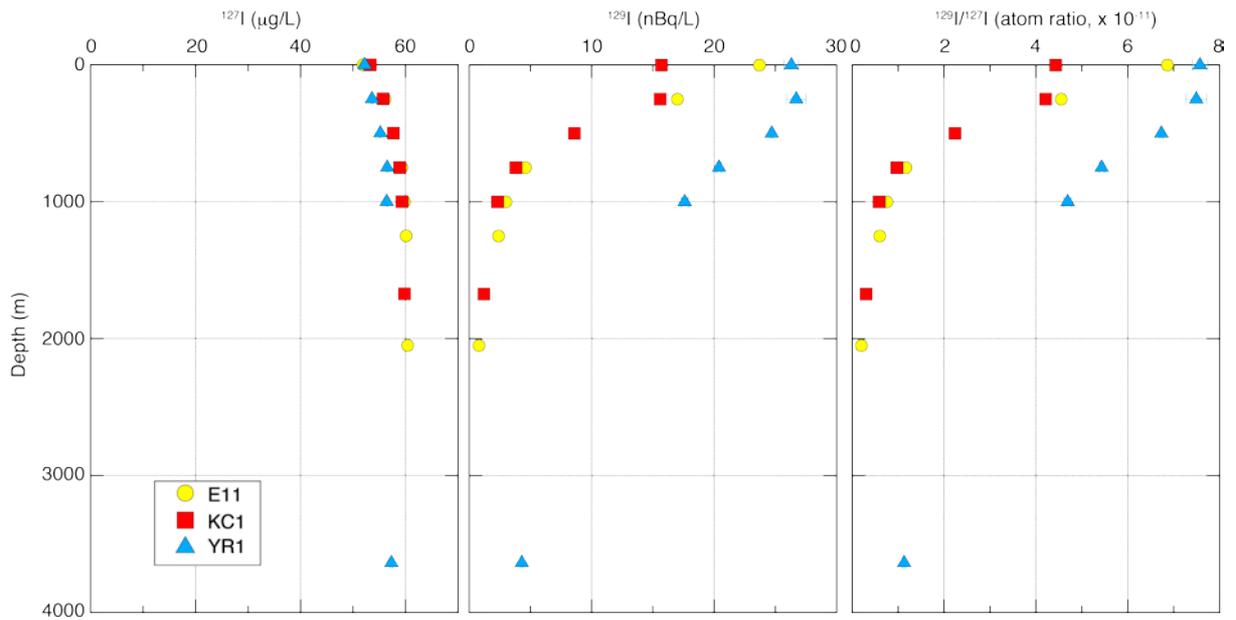


図 I -2-2-2-2 対照海域における海水中の ^{127}I 濃度、 ^{129}I の放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の鉛直分布

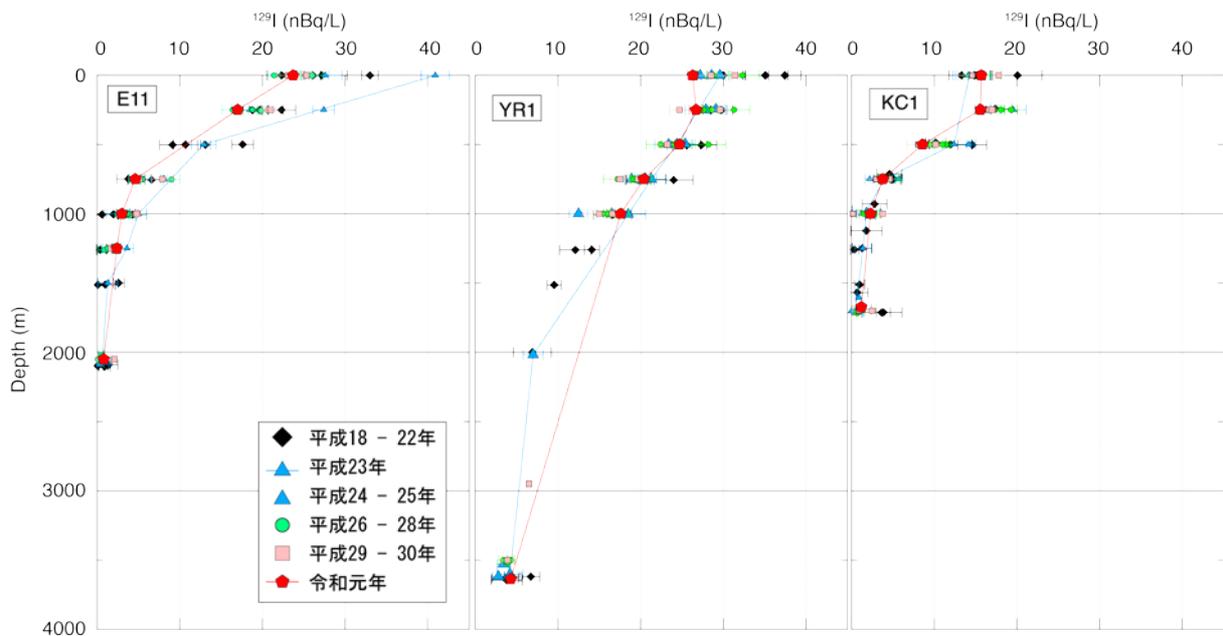


図 I -2-2-2-3 対照海域における海水中 ^{129}I の放射能濃度の鉛直分布の時系列変化。東電福島第一原発事故が起こった年（平成 23 年）のデータは青色で、最新のデータ（令和元年）は赤色で示す。

(コンブ類試料に含まれる ^{127}I (安定ヨウ素)濃度と ^{129}I の放射能濃度)

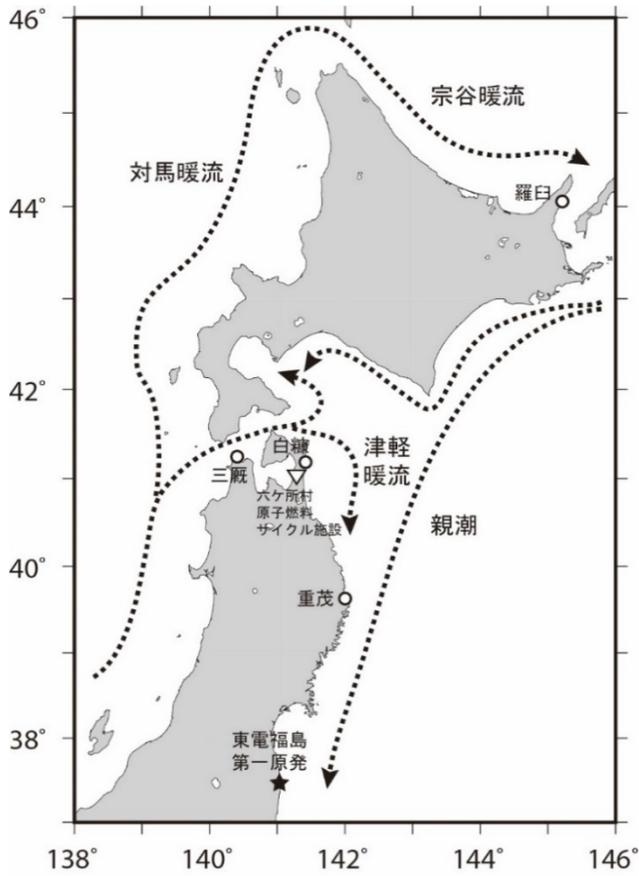


図 I-2-2-2-4 コンブ類試料の採取

コンブ類試料の採取地点を図 I-2-2-2-4 に、平成 31 (令和元) 年度のコンブ類試料の分析結果を表 I-2-2-2-6 に示す。 ^{127}I 濃度及び ^{129}I の放射能濃度は海域間で大きく変動していた。平成 31 (令和元) 年度の調査で得た ^{127}I 濃度の範囲は $(0.69 \sim 2.98) \times 10^{-3}$ (g/g-乾物)、 ^{129}I の放射能濃度は $(0.31 \sim 1.55) \times 10^{-6}$ (Bq/g-乾物) の範囲にあり、また両者の原子数比は $(5.54 \sim 7.85) \times 10^{-11}$ の範囲にあった。

平成 19 年度から平成 31 (令和元) 年度までのコンブ類試料の ^{127}I 濃度と ^{129}I の放射能濃度および両者の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比の推移を図 I-2-2-2-5 に示す。平成 19 年度から平成 30 年度までのコンブ類試料の ^{127}I 濃度は $(0.58 \sim 4.90) \times 10^{-3}$ (g/g-乾物) の範囲にあり、平成 31 (令和元) 年度に得られた結果は過去の測定値の範囲内であった。

表 I-2-2-2-6 コンブ類試料中の ^{127}I (安定ヨウ素)濃度と ^{129}I の放射能濃度及び $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比

試料	採取地	採取日	^{127}I ($\times 10^{-3}$ g/g-乾物)		^{129}I ($\times 10^{-6}$ Bq/g-乾物)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ($\times 10^{-11}$)	
			令和元年	濃度	誤差	濃度	誤差	原子数比
オニコンプ	羅臼沿岸	7月26日	2.98	0.02	1.55	0.04	7.85	0.21
マコンブ	三厩沿岸	10月1日	0.689	0.004	0.31	0.01	6.78	0.22
マコンブ	白糠沿岸	7月30日	2.29	0.02	0.84	0.06	5.54	0.40
マコンブ	重茂沿岸	7月17日	1.81	0.01	0.75	0.02	6.26	0.17

平成 19 年度から平成 30 年度までのコンブ類試料の ^{129}I の放射能濃度は、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、 $(0.27\sim 2.9)\times 10^{-6}$ (Bq/g-乾物) の範囲にあり、平成 31 (令和元) 年度に得られた結果は過去の測定値の範囲内であった。平成 31 (令和元) 年度の調査において採取した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) : $(4.8\sim 7.3)\times 10^{-11}$

核燃海域 (岩手県沖 AM17～AM22) : $(5.0\sim 7.0)\times 10^{-11}$

襟裳沖海域 (E11) : $(5.5\sim 6.9)\times 10^{-11}$

津軽海峡 (T2) : $(5.1\sim 6.2)\times 10^{-11}$

であり、コンブ類試料に含まれるヨウ素の比は海水試料に含まれるヨウ素の示す比を反映していた。

図 I-2-2-2-5(d)に示すようにアクティブ試験により六ヶ所村に所在する核燃料 (原子燃料) サイクル施設から ^{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。

平成 19 年度から平成 31 (令和元) 年度までのコンブ類試料に含まれる ^{129}I の放射能濃度の最大値 (42×10^{-6} Bq/g-乾物) は平成 20 年 8 月の三厩沿岸で見られた (図 I-2-2-2-5(b))。平成 19～20 年度のコンブ類試料に含まれる ^{129}I の放射能濃度はアクティブ試験の影響を受けてやや高い値が見られた。平成 19 年度のコンブ類試料に含まれる ^{129}I の放射能濃度の範囲は $(3.6\sim 6.2)\times 10^{-6}$ (Bq/g-乾物)、平成 20 年度は $(5.2\sim 42)\times 10^{-6}$ (Bq/g-乾物) の範囲であり、それぞれ平均値は 5.1×10^{-6} (Bq/g-乾物)、 17×10^{-6} (Bq/g-乾物) であった。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。図 I-2-2-2-4 に示された海流を考慮すると、液体廃棄物に含まれる ^{129}I が津軽海峡に位置する三厩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 ^{129}I の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 ^{129}I が乾性沈着及び降雨によって降下し、コンブ類試料に取り込まれた可能性がある。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のコンブ類試料の ^{129}I の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の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比にも認められた。平成 19 年度の範囲は $(20.7\sim 58.1)\times 10^{-11}$ 、平成 20 年度は $(36.2\sim 264)\times 10^{-11}$ 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 $(2.07\sim 11.6)\times 10^{-11}$ 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 年はいずれの測点でも平成 22 年に比べて原子数比にやや増加がみられたが、海水試料に比べるとほとんど影響は見られなかった。東電福島第一原発事故による ^{129}I の放出はアクティブ試験に比べると放出している期間が短く、コンブ類試料中の ^{129}I の放射能濃度および $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比に与えた影響は小さかったと推測される。

対照海域 (T2, E11) 及び核燃海域 (北部: AM1-AM16, 南部: AM17-AM22) における $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 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

$$(6.98 \pm 0.83) \times 10^{-11}$$

となる。一方、コンブ類試料中の ^{129}I と ^{127}I 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様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)。それらを除いたデータセットに対し、直線を回帰させた。得られた回帰式を以下に示す。

$$^{129}\text{I} = (8.44 \pm 0.87) \times 10^{-11} \times ^{127}\text{I} + (-2.02 \pm 1.05) \times 10^8$$

$$r^2 = 0.753$$

回帰直線から得られた $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比 $((8.44 \pm 0.87) \times 10^{-11})$ は海水中の比の平均値 $((6.98 \pm 0.83) \times 10^{-11})$ と変動の範囲内で一致している。即ち、コンブ類中の ^{129}I の放射能濃度は海域毎に大きく変動しているが、その $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比は海水中とほぼ同じレベルである。そのため、コンブ類中の比の時系列変化を解析することにより、海水中の ^{129}I の放射能濃度の変動も再現できる可能性がある。

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) の時空間的な変動要因に関しては、海洋放射能調査を実施する際の補完項目として今後も更なる調査研究が必要である。

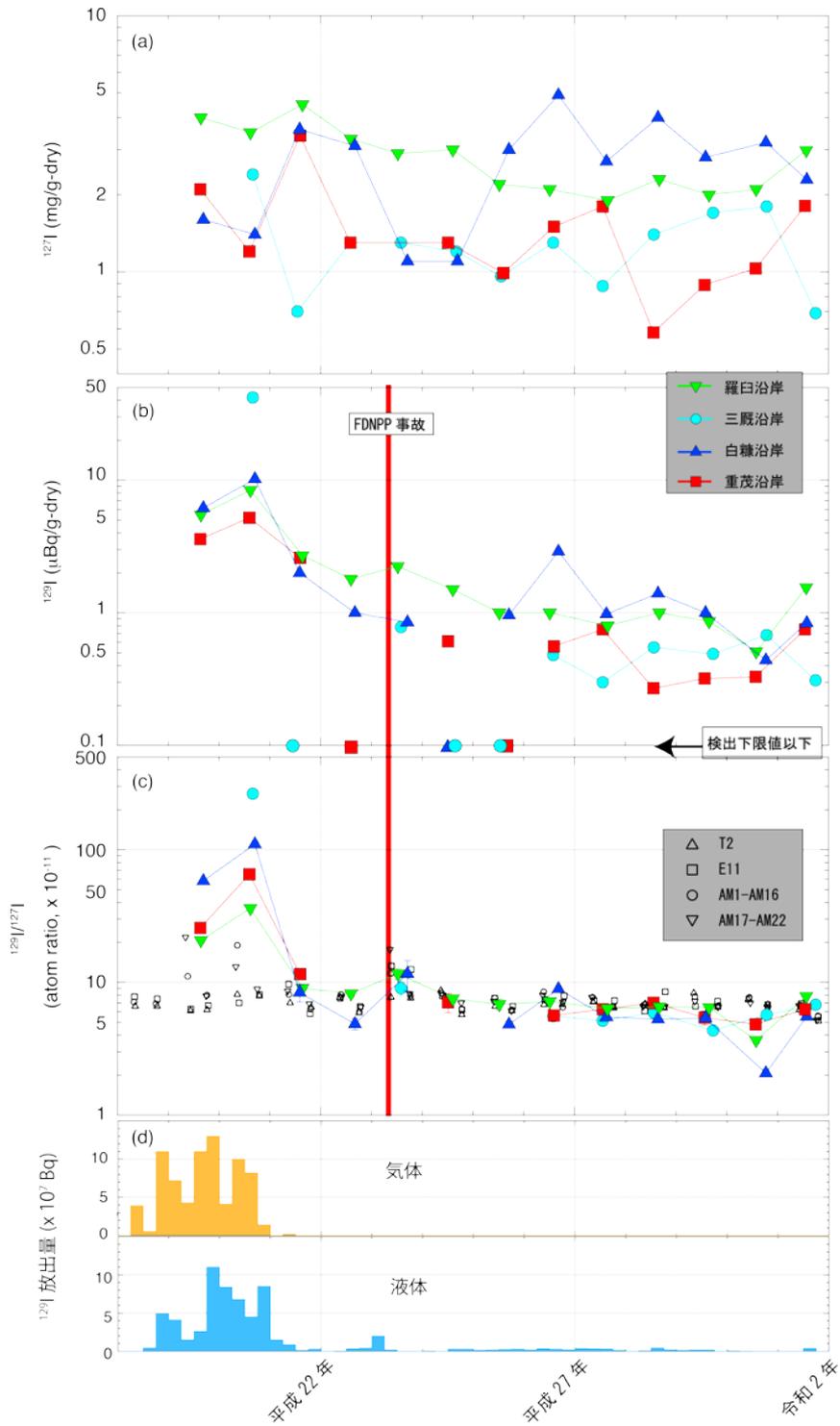


図 I-2-2-2-5 (a)コンブ中の ^{127}I (安定ヨウ素)濃度、(b)コンブ中の ^{129}I の放射能濃度、(c)コンブ及び海水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比、(d)核燃料再処理施設からの ^{129}I 放出量。AM1-AM16 及び AM17-AM22 における海水中的の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 原子数比は核燃海域の北部と南部の測点の平均値 (図中 FDNPP は東電福島第一原発の意味)

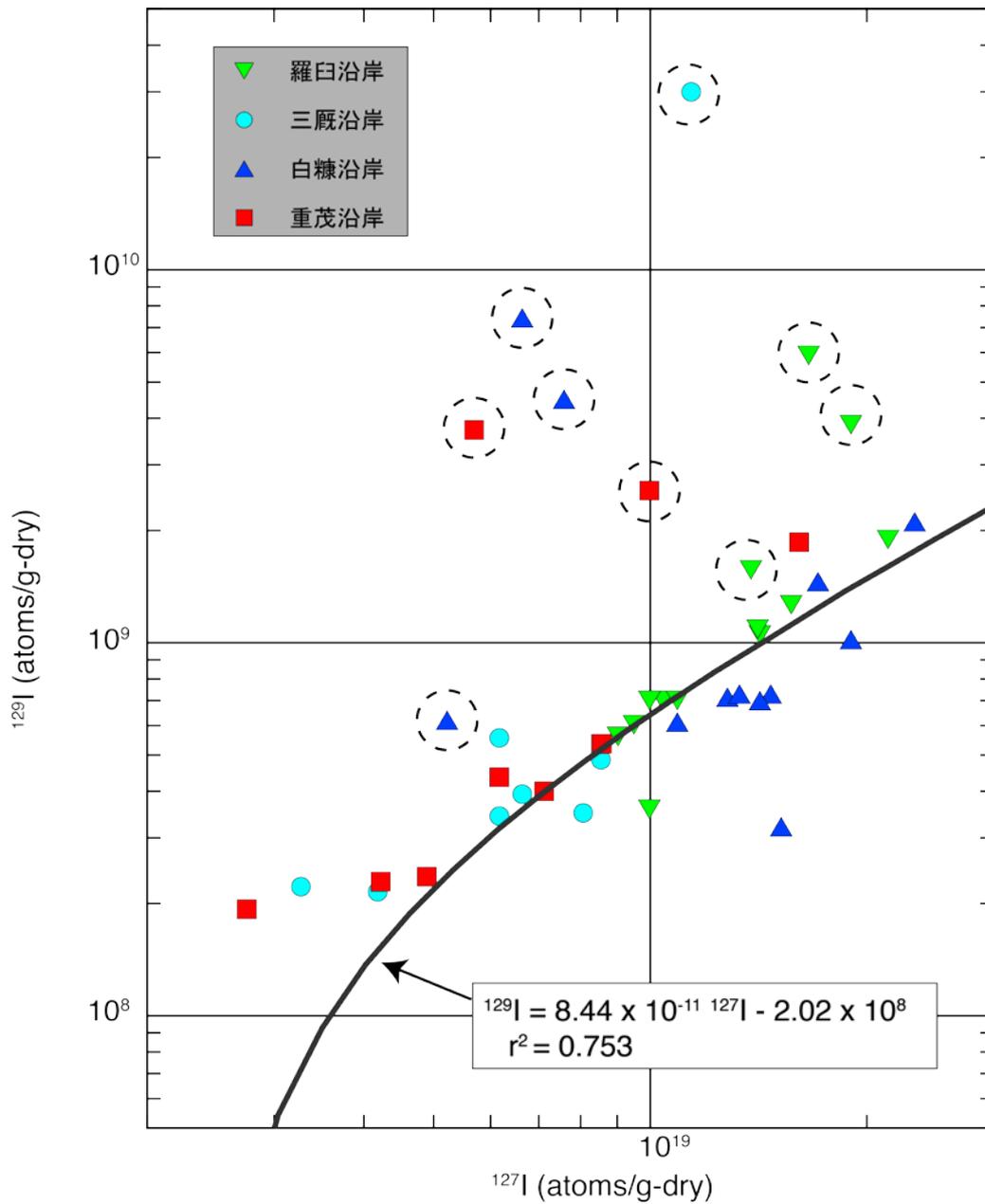


図 I-2-2-2-6 コンブ試料中の ^{127}I と ^{129}I の関係 図中の回帰直線は、点線で囲まれたアクティブ試験及び原発事故の影響があるものを除いて計算した。

引用文献

- 1) Guilderson T.P., Tumej, S.J., Brown, T.A. and Buesseler, K.O. (2014). The ¹²⁹I content of subtropical Pacific waters: impact of Fukushima and other anthropogenic ¹²⁹I-iodine sources. *Biogeosci.*, 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 ¹²⁹I and ¹³⁷Cs levels, and ¹²⁹I/¹³⁷Cs ratios in soil near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan. *J. Environ. Radioact.*, 151, 209-217.
- 3) Honda M., H. Matsuzaki, H. Nagai, H. and Sueki, K. (2017). Depth profiles and mobility of ¹²⁹I originating from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant disaster under different land uses. *Appl. Geochem.* 85, 169-179.
- 4) 海洋生物環境研究所(2012) 平成 23 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(2013) 平成 24 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.
- 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) Goldberg, W.M. (1978). Chemical changes accompanying maturation of the connective tissue skeletons of gorgonian and antipatharian corals. *Mar. Biol.*, 49, 203-210.
- 13) 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.
- 14) Hou, X., Chai, C., Qian, Q., Yan, X. and Fan, X. (1997). Determination of chemical species of iodine in some seaweeds (I). *Sci. Total Environ.*, 204, 215-221.

- 15) 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*. *J. Jpn. Bot.*, 83, 165-176.
- 16) 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.
- 17) 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.

(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、海水中の東電福島第一原発事故に起因す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レベルに近づきつつあるものの、完全に消え去ってはいない。そのため、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や放射性粒子による影響、動物プランクトン試料の放射性セシウムの放射能濃度の変遷、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 海底土中の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堆積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かかわり、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。

（分析法）

令和元年 5～6 月において、発電所海域の 60 測点で採取した海底土試料（計 60 試料）及び核燃海域の 22 測点で採取した海底土試料（計 22 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。

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
見かけ比重・ 含水率	JIS A 1225 に基づく土の湿潤密度試験方法及び JIS A 1203 に基づく土の含水比試験方法
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結果の詳細データを資料 4-1 に示す。

（粒径）

海底土試料の 50%粒径の範囲は 0.002~0.73mm であり、75 μ m 通過質量率は 0~99.5% であった。平均値はそれぞれ 0.14mm 及び 39% であった。本調査で得られた海底土試料の粒度分布は広範囲であった。見かけ上の区分と、それらの 50%粒径の平均値との比較を行ったところ、

粗砂混じり中細砂：0.4mm

中細砂：0.23mm

泥混じり中細砂：0.13mm

中細砂混じり泥：0.12mm

泥：0.02mm

であり、本調査の沈降分析により、採取時に判断した見かけ上の粒径区分は相応に分別できていることが明らかになった。

（見かけ比重及び含水率）

海底土試料に含まれる放射性核種の存在量を求めるには、見かけ比重及び含水率と放射性核種の放射能濃度を用いて計算する必要があるため、これらは重要なパラメータである。分析処理から求めた見かけ比重は 1.2~1.9g/cm³、含水率は 17~70% の範囲であった。平均値は、見かけ比重が 1.5g/cm³、含水率が 38% であった。

(有機物含量及び元素濃度)

海底土試料中の有機物含量の範囲は全有機炭素が 0.9~34.5mg/g-乾燥土、全窒素が 0.2~4.3mg/g-乾燥土であった。

海底土試料に含まれる元素の濃度分布を図 I -2-2-3-1 に示す。本調査で対象としたのは、海底土の起源や酸化還元状態を探るうえで有用な元素(アルミニウム、ストロンチウム、カドミウム、モリブデン、希土類及びウラン)、有機物との関連性のある元素(コバルト、ニッケル、銅及び鉛)と放射性セシウムとの関連性を評価する際に重要な元素(マンガン、鉄、ルビジウム、セシウム(Cs;この場合は安定同位体の¹³³Csを指す)及びバリウム)である。各元素の濃度範囲において、最大値と最小値の比が 10 倍を超えた元素はマンガン(最大値/最小値:11、以下同様)、銅(10)、ルビジウム(10)、ストロンチウム(10)、銀(24)及びカドミウム(29)であった。各元素の平均値は Takata *et al.*¹⁾で報告された日本沿岸域における海底土中の値と一致した。

本調査で得られた海底土中の元素で最も高い濃度であったのはアルミニウムであり、最も高かったのは核燃海域の測点 5 ($83 \times 10^3 \mu\text{g/g}$ -乾燥土もしくは 8.3%) であった。他の海域では、最大値との濃度の差は小さいが、最も低かった佐賀海域の測点 3 ($23 \times 10^3 \mu\text{g/g}$ -乾燥土もしくは 2.3%) は 1 桁程の違いが見られた。また、酸化還元状態を確認する上でモリブデン及びウランが用いられており^{2,3)}、モリブデンの濃度が $3.8 \mu\text{g/g}$ -乾燥土以上かつウランの濃度が $2.7 \mu\text{g/g}$ -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福井第一海域の測点 2 の $2.3 \mu\text{g/g}$ -乾燥土であるが、モリブデンの濃度は $1.1 \mu\text{g/g}$ -乾燥土である。モリブデンの濃度の最大値は核燃海域の測点 16 の $1.9 \mu\text{g/g}$ -乾燥土だが、ウランの濃度は $2.1 \mu\text{g/g}$ -乾燥土である。ゆえに、どちらの海底土も還元状態ではなく酸化状態であり、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が上記以下であったことから、本調査で採取した海底土はすべて酸化状態であることが分かった。以上のように、多種の元素を測定することで調査海域の海底土の組成や酸化還元状態を把握することができた。

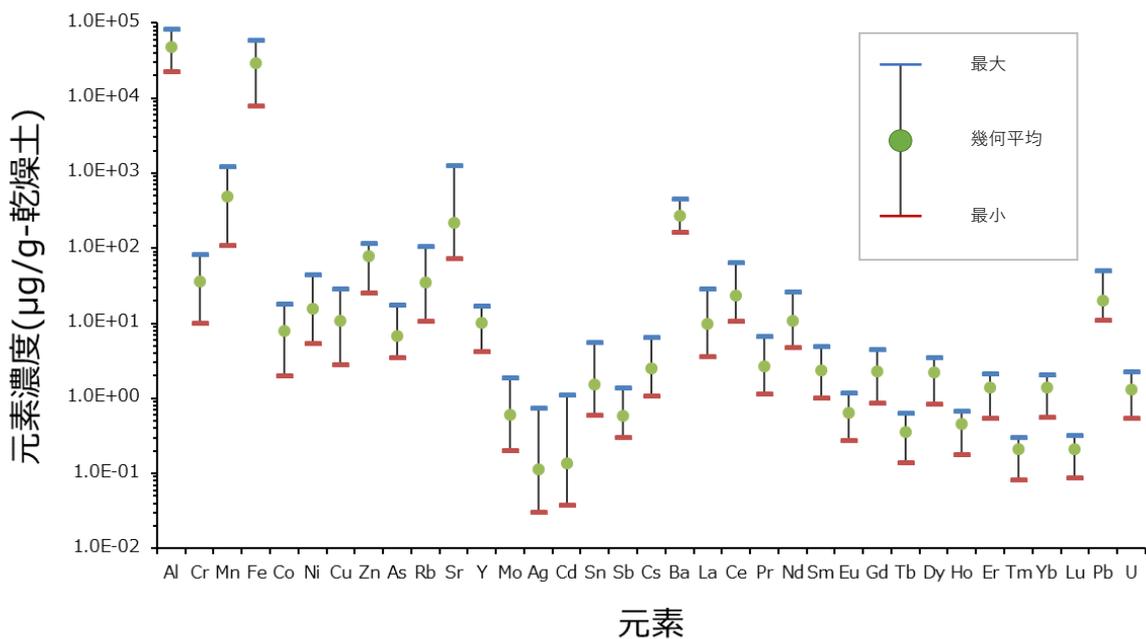


図 I -2-2-3-1 海底土試料に含まれる元素濃度範囲

(放射性セシウムと性状との関係)

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」における放射性セシウムの放射能濃度の範囲は、 ^{134}Cs が ND~4.5Bq/kg-乾燥土、 ^{137}Cs が ND~63Bq/kg-乾燥土であった(表 I-1-5-3)。これらの海域には東電福島第一原発事故の影響のある海域と、そうでない海域が存在する。そこで、ここでは東電福島第一原発事故以降、同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、鹿児島、佐賀及び核燃)と、検出されたことのある海域を東電福島第一原発事故の影響の程度が大きい東日本海域(宮城、福島第一、福島第二及び茨城)と影響の程度が小さい日本海海域(新潟)に分けて詳述する。

(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 が検出されたことがない海域)

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」で得られた北海道、青森、静岡、石川、福井第一、福井第二、島根、愛媛、鹿児島、佐賀及び核燃海域では、海底土に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度が ND~4.3Bq/kg-乾燥土の範囲にあった(資料 2-1)。本調査における海底土の 50% 粒径と ^{137}Cs の放射能濃度との関係を図 I-2-2-3-2 に示す。50% 粒径と ^{137}Cs の放射能濃度には強い負の相関($r=-0.92(p<0.0001)$)があった。これらのことから、 ^{137}Cs の放射能濃度は、粒径の減少に伴って増加する傾向があり、既存の調査研究⁴⁾と同様に、 ^{137}Cs の放射能濃度の変動は海底土の粒径に依存することが分かった。

^{137}Cs の放射能濃度と全有機炭素との関係を図 I-2-2-3-3 に示す。 ^{137}Cs の放射能濃度と

全有機炭素の間に強い相関 ($r=0.94(p<0.0001)$) があった。このことから、 ^{137}Cs の放射能濃度変動は有機物含有量にも依存すると考えられる。しかしながら、図 I-2-2-3-4 に示すように全有機炭素と 50% 粒径には強い負の相関 ($r=-0.93(p<0.0001)$) があることから、有機物含有量が海底土の粒径に依存している可能性もある。そのため、逐次抽出法等によって有機物分画や鉱物分画といった各分画ごとに ^{137}Cs の放射能濃度を把握し、 ^{137}Cs の放射能濃度と海底土の粒径や有機物含有量との関係についてより詳細な解析を行う必要がある。

平成 31 (令和元) 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となっていると考えられる (図 I-2-2-3-2、図 I-2-2-3-3)。従って、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以下となる傾向があり、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。

また、 ^{137}Cs と強い相関 ($r>0.70$) を示した他の元素はニッケル ($r=0.80(p<0.0001)$)、銅 ($r=0.89(p<0.0001)$)、モリブデン ($r=0.73(p<0.0001)$)、銀 ($r=0.72(p<0.0001)$)、アンチモン ($r=0.79(p<0.0001)$) 及び鉛 ($r=0.87(p<0.0001)$) であった。この傾向は平成 30 年度の結果と同じであるが、強い相関関係を示した要因は不明であるものの、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。一方、セシウム (安定核種である ^{133}Cs) の元素濃度と ^{137}Cs の放射能濃度とは相関関係は示さなかった。これは、 ^{133}Cs は海底土中に元来含まれているのに対し、 ^{137}Cs は土壌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⁵⁾。

(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. 海洋放射能調査海域周辺での調査」で得られた宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域では、海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度が 3.9~63Bq/kg-乾燥土の範囲であった (資料 2-1)。これらの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の海洋への放射性セシウムの放出の履歴 (海底土への沈着量の違い) 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^{5~7)}。粒径の大きさに関する考察を行うために、海底土の 50% 粒径と ^{137}Cs の放射能濃度との関係を図 I-2-2-3-5 に示す。50% 粒径と ^{137}Cs の放射能濃度には負の相関 ($r=-0.64(p<0.01)$) があった。これらのことから、東電福島第一原発事故由来の放射性セシウムが検出されたことのある海域においても、 ^{137}Cs の放射能濃度は、粒径の減少に伴って増加する傾向があることを示している。

^{137}Cs の放射能濃度と全有機炭素との関係を図 I-2-2-3-6 に示す。 ^{137}Cs の放射能濃度と全有機炭素の間に相関 ($r=0.56(p<0.05)$) があった。このことから、 ^{137}Cs の放射能濃度変

動は有機物含有量にも依存すると考えられる。しかしながら、図 I-2-2-3-7 に示すように全有機炭素と 50% 粒径は負の相関がある ($r=-0.63(p<0.01)$) ことから、有機物含有量が海底土の粒径に依存している可能性がある。なお、他の元素との関係について、強い相関 ($r>0.70$) を示した元素は無かった。

これらの結果から、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域においても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海域と同様に、 ^{137}Cs の放射能濃度は海底土の粒径や有機物濃度等によって左右されていることが分かった。しかしながら、粒径や有機物含有量と ^{137}Cs の放射能濃度の相関関係は ^{134}Cs が検出されたことのない海域に比べて弱いことから、海底土試料の粒径や有機物含有量以外の要因にも依存している可能性がある。この要因として、東電福島第一原発事故当初の海洋への放射性セシウムの放出の履歴（海底土への沈着量の違い）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及び放射性粒子（周りの粒子に比べて、放射性セシウムを多く含む粒子を指す）等の影響を受けていることなどが考えられる^{5, 8~10)}

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」で得られた新潟海域の海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は 2.4~9.1Bq/kg-乾燥土の範囲であった（資料 2-1）。同海域における海底土の 50% 粒径及び全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度との関係をそれぞれ、図 I-2-2-3-8 及び図 I-2-2-3-9 に示す。また、50% 粒径と全有機炭素との関係を図 I-2-2-3-10 に示す。前述した 3 つの関係において相関の検定を行ったところ、全てにおいて有意の結果は得られなかった（50% 粒径と ^{137}Cs の放射能濃度 $p=0.27$ ；全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度 $p=0.49$ ；50% 粒径と全有機炭素 $p=0.05$ ）。この結果から、新潟海域では ^{137}Cs の放射能濃度と粒径や有機物含有量等の海底土の性状には関係がなく、他の要因に依存している可能性がある。新潟海域の測点（1 及び 2）は、Inoue *et al.*¹¹⁾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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs の沈着の影響を受けていると考えられる。

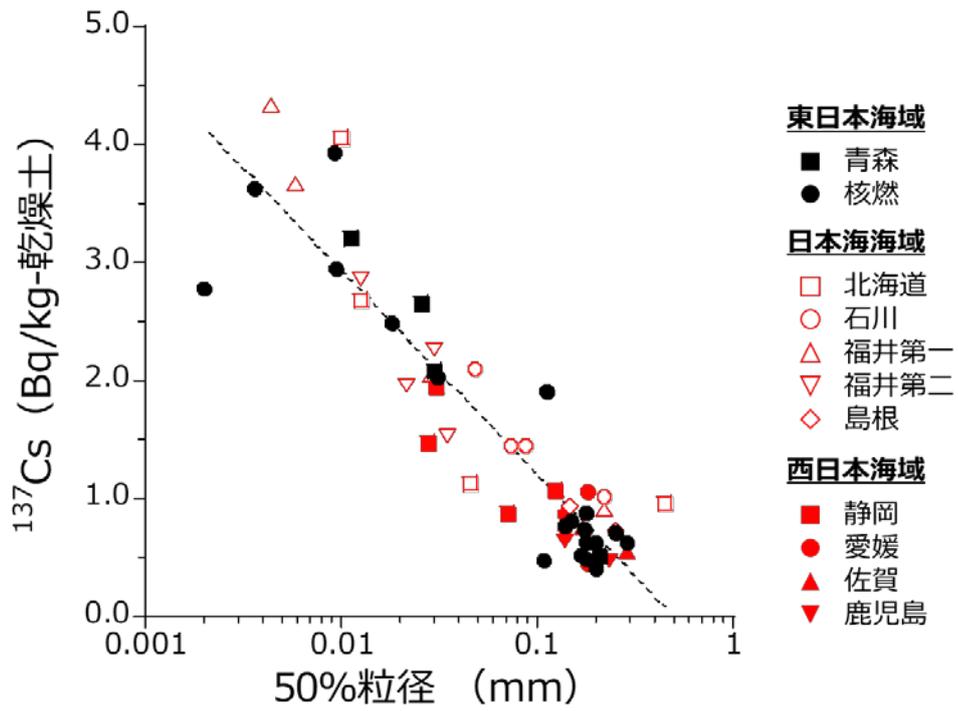


図 I-2-2-3-2 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土の 50% 粒径と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

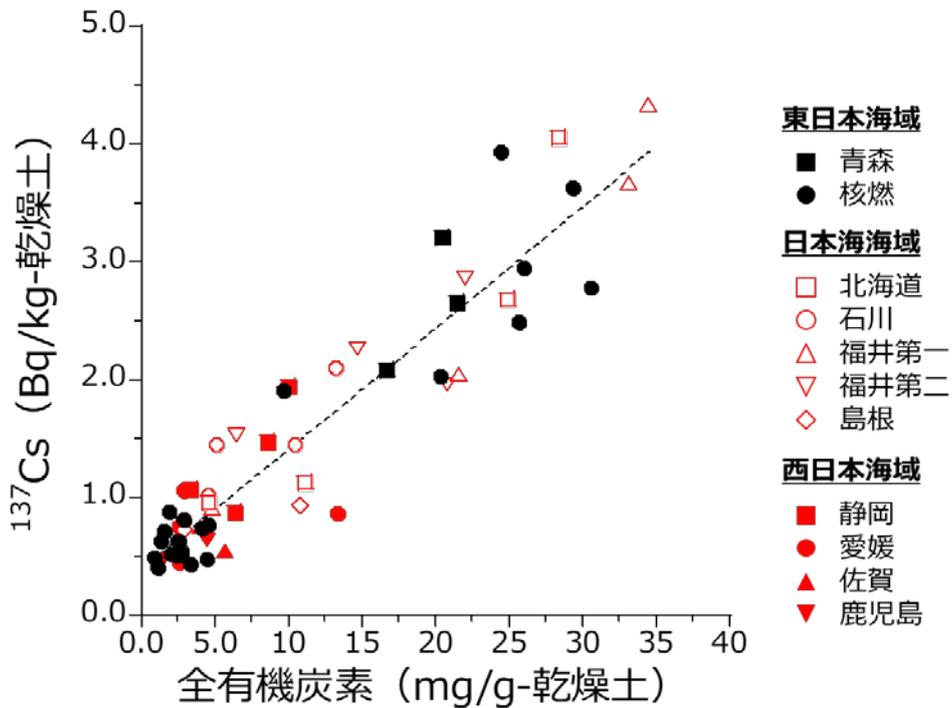


図 I-2-2-3-3 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土の全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

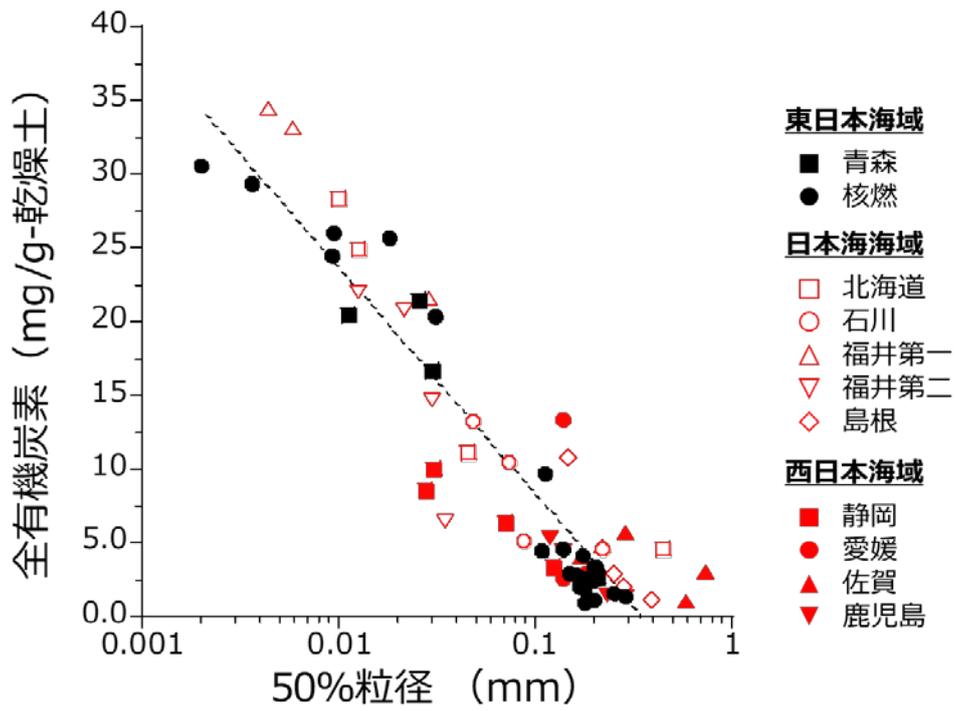


図 I-2-2-3-4 ^{134}Cs が検出されなかった海域で採取した海底土の 50% 粒径と全有機炭素の関係

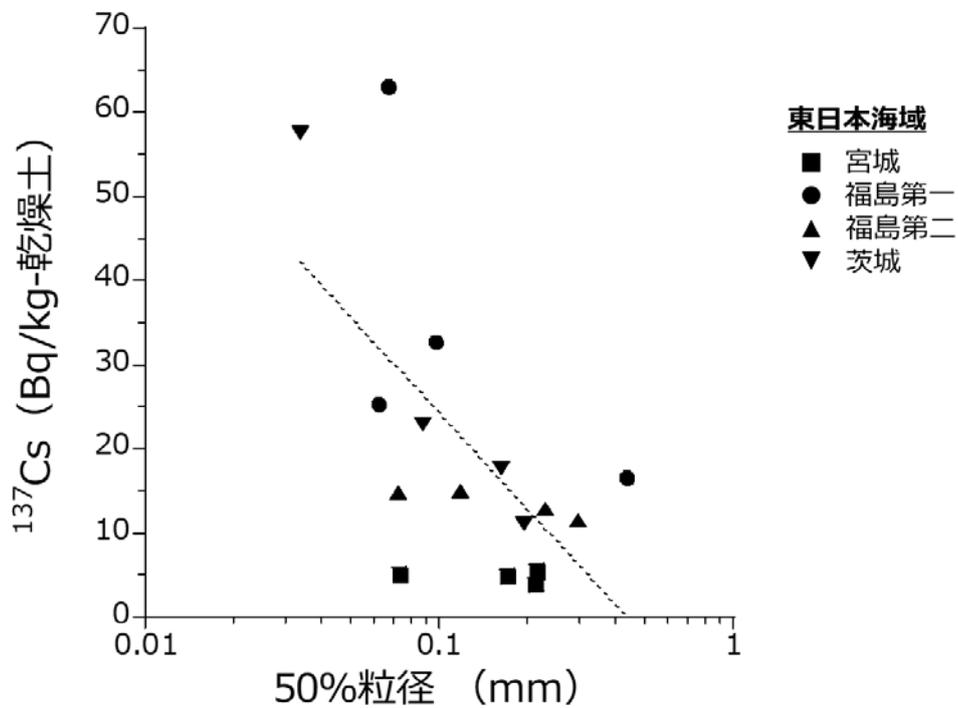


図 I-2-2-3-5 宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土の 50% 粒径と ^{137}Cs の放射能濃度との関係

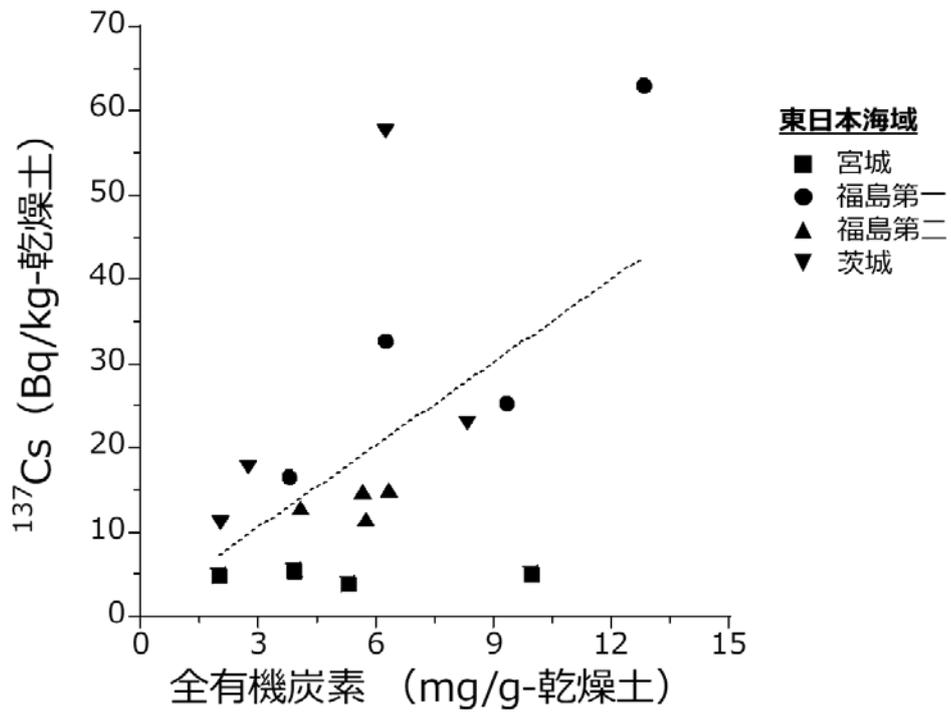


図 I-2-2-3-6 宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土の全有機炭素と ¹³⁷Cs の放射能濃度の関係

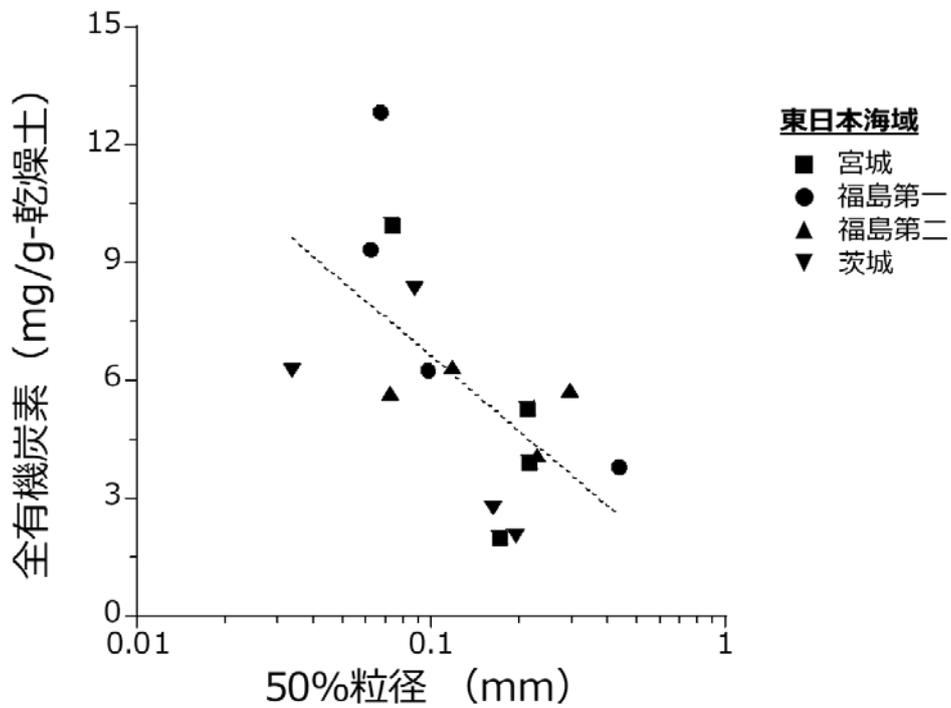


図 I-2-2-3-7 宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域で採取した海底土の 50% 粒径と全有機炭素の関係

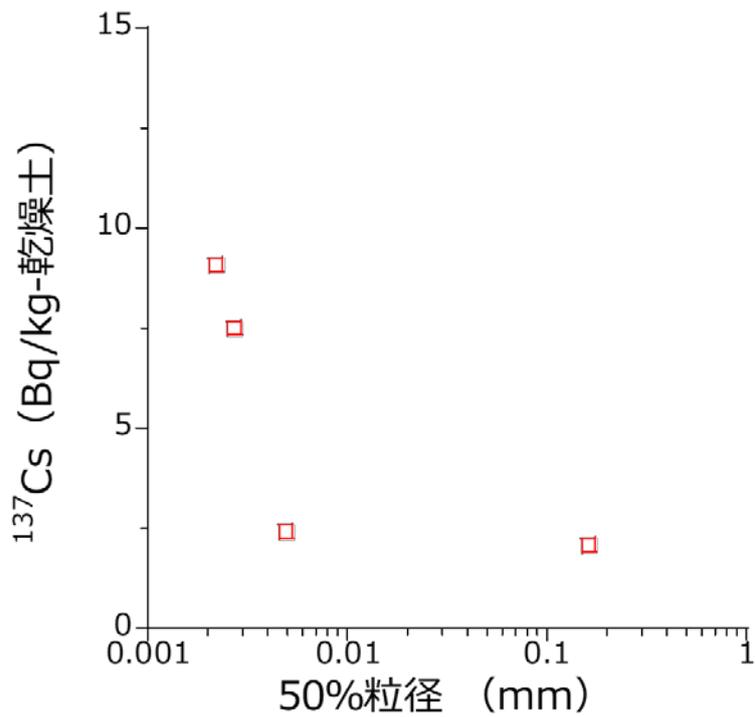


図 I -2-2-3-8 新潟海域で採取した海底土の 50%粒径と ^{137}Cs の放射能濃度の関係

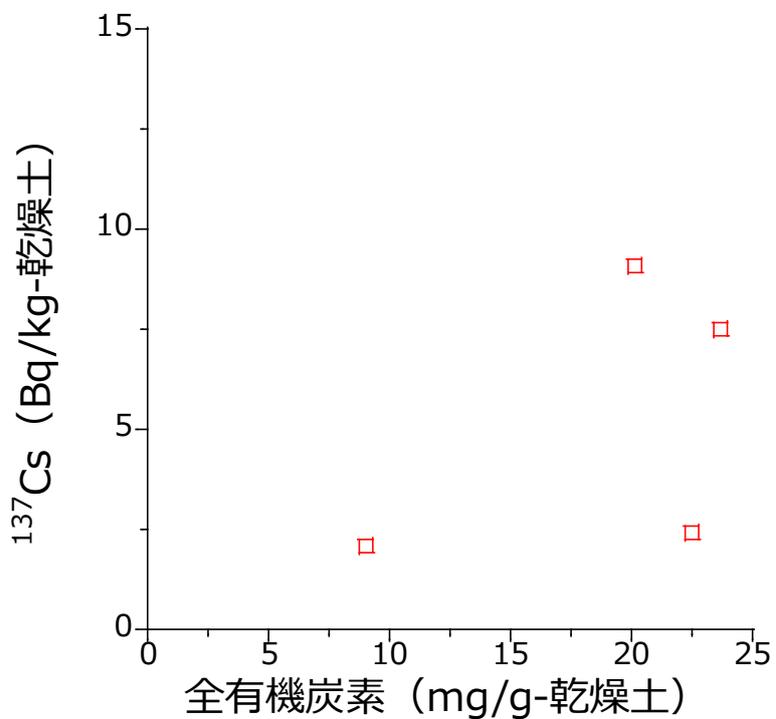


図 I -2-2-3-9 新潟海域で採取した海底土の 50%粒径と全有機炭素の関係

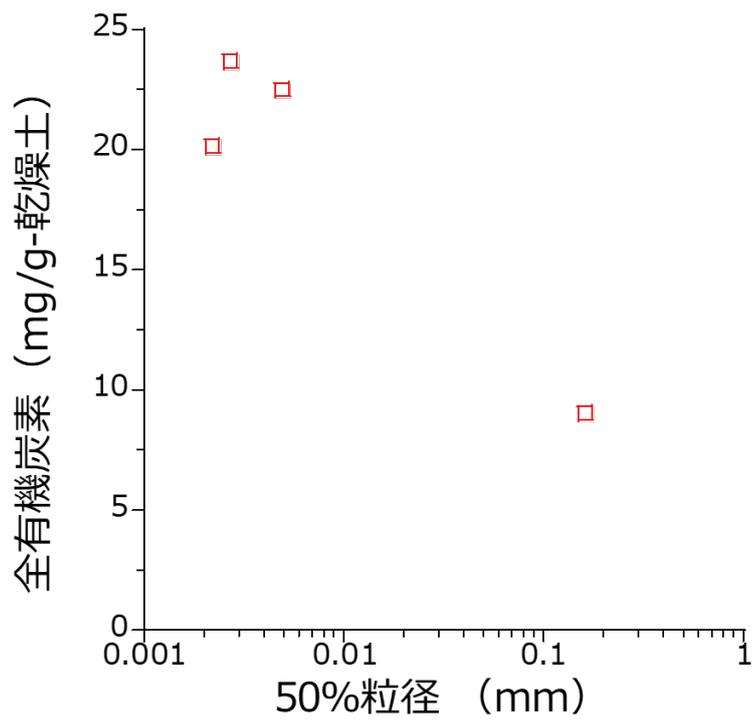


図 I -2-2-3-10 新潟海域で採取した海底土の全有機炭素と ^{137}Cs の放射能濃度との関係

(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 までの層における放射性セシウム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し、その傾向を明らかにするとともに、海底土に含まれる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)

海底土の柱状試料は、静岡海域は測点 4、その他の海域においては測点 2 において採取を行った(表 I-2-2-3-2)。採取にはマルチプルコアラーまたはボックスコアラーを用いた。放射能測定用に十分な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 までの層では 1.5cm 毎、6~10cm の層では 2cm 毎、10cm 以深の層では 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 を参照のこと。なお、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能分析の実施に当たって目標とした検出下限値は、それぞれ 0.3Bq/kg-乾燥土以下とした。

(結果)

分析結果を表 I-2-2-3-3(1)~(4)と図 I-2-2-3-11(1)~(3)に示す。以下に東日本海域(青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城)、西日本海域(静岡、愛媛、鹿児島、佐賀)及び日本海海域(島根、福井第一、福井第二、石川、新潟、北海道)に分けて結果を詳述する。

東日本海域では、福島第一海域で ^{134}Cs の放射能濃度が 10cm 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約 1 であったことから、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おり⁴⁾、 ^{134}Cs が検出された海域では福島第一海域の見かけ比重が最も小さいことから、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。このため、海域毎による放射性セシウムの放射能濃度の鉛直分布が異なるのは、主に海底土の粒径の差によるものであると考えられる。また、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あり、この要因として放射性粒子の存在によるものであると考えられている¹⁰⁾。福島第一海域の測点 2 (図 I-2-2-3-10(1))において、深度 6~13cm の放射能濃度が大きく変動しているのも、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 は表層から最深部(青森海域 16.0~19.0cm; 宮城海域 13.0~16.0cm)まで検出された。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）の濃度範囲内（3.1～4.2Bq/kg-乾燥土）またはそれ以下であった。このことから、青森海域で検出された ^{137}Cs は同事故前の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）の濃度範囲（ND～1.5Bq/kg-乾燥土）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。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 ^{137}Cs 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 ^{134}Cs が検出されなかった。 ^{137}Cs については、すべ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。また、新潟海域において、東電福島第一原発事故前 5 年間（平成 18～22 年度）の濃度範囲（2.1～7.7Bq/kg-乾燥土）を超える値が検出された。この海域では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^{11,12)}。また、 ^{134}Cs について平成 27～29 年度の調査において既に 10cm よりも深い層で検出されていることから、同事故数年後には表層から 3cm よりも深い深度まで東電福島第一原発事故由来の放射性セシウムが到達していることが分かった。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 0.5 であったことから、新潟海域において検出された ^{137}Cs の約半分は東電福島第一原発事故に由来するものと考えられる。

西日本海域において採取した海底土試料において、 ^{134}Cs は検出されなかったが、 ^{137}Cs 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、愛媛、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。これらの海域では、見かけ比重と ^{137}Cs の放射能濃度には強い負の相関があることが確認された ($r=-0.80$ ($p<0.0001$))。これらのことから、海域毎による ^{137}Cs の放射能濃度やその鉛直分布のパターンが異なるのは、見かけ比重の違い、すなわち海底土の粒径の違いによると考えられる。

表 I -2-2-3-2 海底土柱状試料の採取測点、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	令和元年6月8日	43	5.0	140	16.0	405
青森	2	令和元年6月18日	41	13.0	141	40.0	651
宮城	2	令和元年5月15日	38	24.9	141	45.2	163
福島第一	2	令和元年5月14日	37	34.5	141	25.0	136
福島第二	2	令和元年5月13日	37	12.2	141	20.3	144
茨城	2	令和元年5月11日	36	25.0	140	50.9	118
静岡	4	令和元年6月21日	34	30.7	137	58.5	557
新潟	2	令和元年5月31日	37	50.2	138	34.8	493
石川	2	令和元年6月4日	37	7.6	136	26.1	189
福井第一	2	令和元年6月5日	35	56.7	135	50.1	257
福井第二	2	令和元年6月6日	35	49.9	135	35.2	201
島根	2	令和元年6月9日	35	41.1	133	4.5	77
愛媛	2	令和元年6月19日	33	38.1	132	17.1	62
佐賀	2	令和元年6月16日	33	36.9	129	52.8	51
鹿児島	2	令和元年6月17日	31	45.0	130	0.8	84

表 I-2-2-3-3(1) 海底土の採取深度及び放射性セシウムの放射能濃度と見かけ比重の鉛直結果

海域	測点	採取深度	^{134}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs	^{137}Cs	みかけ 比重
		(cm)	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
北海道	2	0.0-1.5	ND ¹⁾	—	2.9	0.3	1.20
		1.5-3.0	ND	—	4.0	0.4	1.22
		3.0-4.5	ND	—	3.0	0.3	1.22
		4.5-6.0	ND	—	4.3	0.4	1.21
		6.0-8.0	ND	—	3.5	0.3	1.22
		8.0-10.0	ND	—	3.7	0.4	1.22
		10.0-13.0	ND	—	1.8	0.3	1.20
		13.0-16.0	ND	—	1.4	0.3	1.24
		16.0-19.0	ND	—	0.7	0.1	1.20
青森	2	0.0-1.5	ND	—	2.9	0.4	1.19
		1.5-3.0	ND	—	3.5	0.4	1.21
		3.0-4.5	ND	—	3.4	0.3	1.21
		4.5-6.0	ND	—	2.8	0.3	1.23
		6.0-8.0	ND	—	3.0	0.3	1.23
		8.0-10.0	ND	—	3.4	0.3	1.26
		10.0-13.0	ND	—	3.4	0.3	1.28
		13.0-16.0	ND	—	1.5	0.1	1.29
		16.0-19.0	ND	—	0.7	0.1	1.26
宮城	2	0.0-1.5	ND	—	2.5	0.2	1.61
		1.5-3.0	ND	—	3.8	0.3	1.64
		3.0-4.5	ND	—	4.8	0.2	1.72
		4.5-6.0	ND	—	3.9	0.2	1.72
		6.0-8.0	ND	—	3.6	0.2	1.71
		8.0-10.0	ND	—	2.3	0.2	1.70
		10.0-13.0	ND	—	1.9	0.2	1.82
		13.0-16.0	ND	—	1.0	0.2	1.71
福島第一	2	0.0-1.5	2.4	0.3	31.5	0.7	1.45
		1.5-3.0	2.6	0.3	30.0	0.6	1.42
		3.0-4.5	1.7	0.2	25.0	0.5	1.53
		4.5-6.0	2.0	0.2	26.6	0.5	1.51
		6.0-8.0	5.4	0.3	67.0	0.8	1.47
		8.0-10.0	1.6	0.2	17.8	0.5	1.45
		10.0-13.0	7.0	0.3	92.0	1.0	1.51
		13.0-16.0	ND	—	4.5	0.3	1.37
16.0-19.0	ND	—	2.0	0.2	1.43		

¹⁾ND は検出下限値以下を示す。

表 I-2-2-3-3(2) 海底土の採取深度及び放射性セシウムの放射能濃度と見かけ比重の鉛直結果

海域	測点	採取深度	^{134}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs	^{137}Cs	みかけ 比重
		(cm)	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
福島第二	2	0.0-1.5	0.9	0.3	13.9	0.5	1.50
		1.5-3.0	1.2	0.2	18.1	0.4	1.47
		3.0-4.5	1.6	0.2	21.3	0.5	1.56
		4.5-6.0	2.0	0.2	24.6	0.5	1.55
		6.0-8.0	1.3	0.2	17.7	0.5	1.59
		8.0-10.0	0.9	0.2	10.7	0.3	1.57
		10.0-13.0	ND ¹⁾	—	10.8	0.4	1.59
		13.0-16.0	ND	—	3.0	0.2	1.58
茨城	2	0.0-1.5	1.3	0.2	14.4	0.4	1.67
		1.5-3.0	1.7	0.2	19.8	0.4	1.68
		3.0-4.5	1.3	0.2	16.3	0.4	1.69
		4.5-6.0	1.6	0.2	24.1	0.5	1.69
		6.0-8.0	0.9	0.2	14.5	0.4	1.63
		8.0-10.0	1.1	0.2	13.7	0.3	1.67
		10.0-13.0	ND	—	5.6	0.3	1.59
		13.0-16.0	ND	—	4.0	0.2	1.63
静岡	4	0.0-1.5	ND	—	1.5	0.1	1.06
		1.5-3.0	ND	—	1.45	0.1	1.07
		3.0-4.5	ND	—	1.6	0.1	1.11
		4.5-6.0	ND	—	1.4	0.1	1.07
		6.0-8.0	ND	—	1.3	0.1	1.05
		8.0-10.0	ND	—	1.2	0.1	1.01
		10.0-13.0	ND	—	0.6	0.1	1.06
		13.0-16.0	ND	—	ND	—	1.10
		16.0-19.0	ND	—	ND	—	1.10
新潟	2	0.0-1.5	ND	—	6.8	0.2	1.16
		1.5-3.0	ND	—	10.3	0.2	1.19
		3.0-4.5	ND	—	9.3	0.3	1.20
		4.5-6.0	ND	—	9.2	0.2	1.20
		6.0-8.0	ND	—	9.1	0.4	1.18
		8.0-10.0	ND	—	6.8	0.4	1.21
		10.0-13.0	ND	—	3.7	0.3	1.20
		13.0-16.0	ND	—	2.6	0.3	1.20
		16.0-19.0	ND	—	1.0	0.1	1.19

¹⁾NDは検出下限値以下を示す。

表 I-2-2-3-3(3) 海底土の採取深度及び放射性セシウムの放射能濃度と見かけ比重の鉛直結果

海域	測点	採取深度	^{134}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs	^{137}Cs	みかけ 比重
		(cm)	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
石川	2	0.0-1.5	ND ¹⁾	—	1.5	0.2	1.54
		1.5-3.0	ND	—	1.2	0.2	1.56
		3.0-4.5	ND	—	1.5	0.2	1.50
		4.5-6.0	ND	—	1.5	0.2	1.54
		6.0-8.0	ND	—	1.2	0.2	1.46
		8.0-10.0	ND	—	1.1	0.1	1.52
		10.0-13.0	ND	—	0.7	0.1	1.55
		13.0-16.0	ND	—	ND	—	1.51
福井第一	2	16.0-19.0	ND	—	ND	—	1.50
		0.0-1.5	ND	—	4.1	0.4	1.12
		1.5-3.0	ND	—	4.2	0.3	1.13
		3.0-4.5	ND	—	4.3	0.4	1.18
		4.5-6.0	ND	—	5.3	0.4	1.15
		6.0-8.0	ND	—	4.6	0.4	1.13
		8.0-10.0	ND	—	4.6	0.3	1.13
		10.0-13.0	ND	—	5.5	0.4	1.12
福井第二	2	13.0-16.0	ND	—	5.8	0.2	1.18
		16.0-19.0	ND	—	3.8	0.2	1.18
		0.0-1.5	ND	—	3.5	0.3	1.16
		1.5-3.0	ND	—	2.3	0.3	1.26
		3.0-4.5	ND	—	3.3	0.3	1.24
		4.5-6.0	ND	—	3.6	0.3	1.26
		6.0-8.0	ND	—	3.7	0.4	1.26
		8.0-10.0	ND	—	4.3	0.3	1.22
島根	2	10.0-13.0	ND	—	3.4	0.3	1.20
		13.0-16.0	ND	—	2.0	0.2	1.24
		16.0-19.0	ND	—	0.7	0.2	1.29
		0.0-1.5	ND	—	0.5	0.1	1.48
		1.5-3.0	ND	—	0.4	0.1	1.49
		3.0-4.5	ND	—	0.6	0.1	1.49
愛媛	2	4.5-6.0	ND	—	0.4	0.1	1.50
		6.0-8.0	ND	—	0.4	0.1	1.50
		8.0-10.0	ND	—	0.5	0.1	1.55
		0.0-1.5	ND	—	0.8	0.1	1.14
		1.5-3.0	ND	—	0.9	0.1	1.18
		3.0-4.5	ND	—	0.9	0.1	1.22
		4.5-6.0	ND	—	0.8	0.1	1.21
		6.0-8.0	ND	—	0.9	0.1	1.18
愛媛	2	8.0-10.0	ND	—	0.9	0.1	1.22
		10.0-13.0	ND	—	0.6	0.1	1.29
		13.0-16.0	ND	—	0.7	0.1	1.24
		16.0-19.0	ND	—	0.4	0.1	1.27

¹⁾ND は検出下限値以下を示す。

表 I-2-2-3-3(4) 海底土の採取深度及び放射性セシウムの放射能濃度と見かけ比重の鉛直結果

海域	測点	採取深度	^{134}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs	^{137}Cs	みかけ 比重
		(cm)	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	(Bq/kg-乾燥土)	誤差	
佐賀	2	0.0-1.5	ND ¹⁾	—	0.2	0.1	1.36
		1.5-3.0	ND	—	0.3	0.1	1.44
		3.0-4.5	ND	—	0.2	0.1	1.41
		4.5-6.0	ND	—	ND	—	1.45
		6.0-8.0	ND	—	ND	—	1.41
		8.0-10.0	ND	—	ND	—	1.40
鹿児島	2	0.0-1.5	ND	—	0.3	0.1	1.26
		1.5-3.0	ND	—	0.3	0.1	1.28
		3.0-4.5	ND	—	0.4	0.1	1.31
		4.5-6.0	ND	—	0.4	0.1	1.26
		6.0-8.0	ND	—	0.4	0.1	1.26
		8.0-10.0	ND	—	0.3	0.1	1.30

¹⁾ND は検出下限値以下を示す。

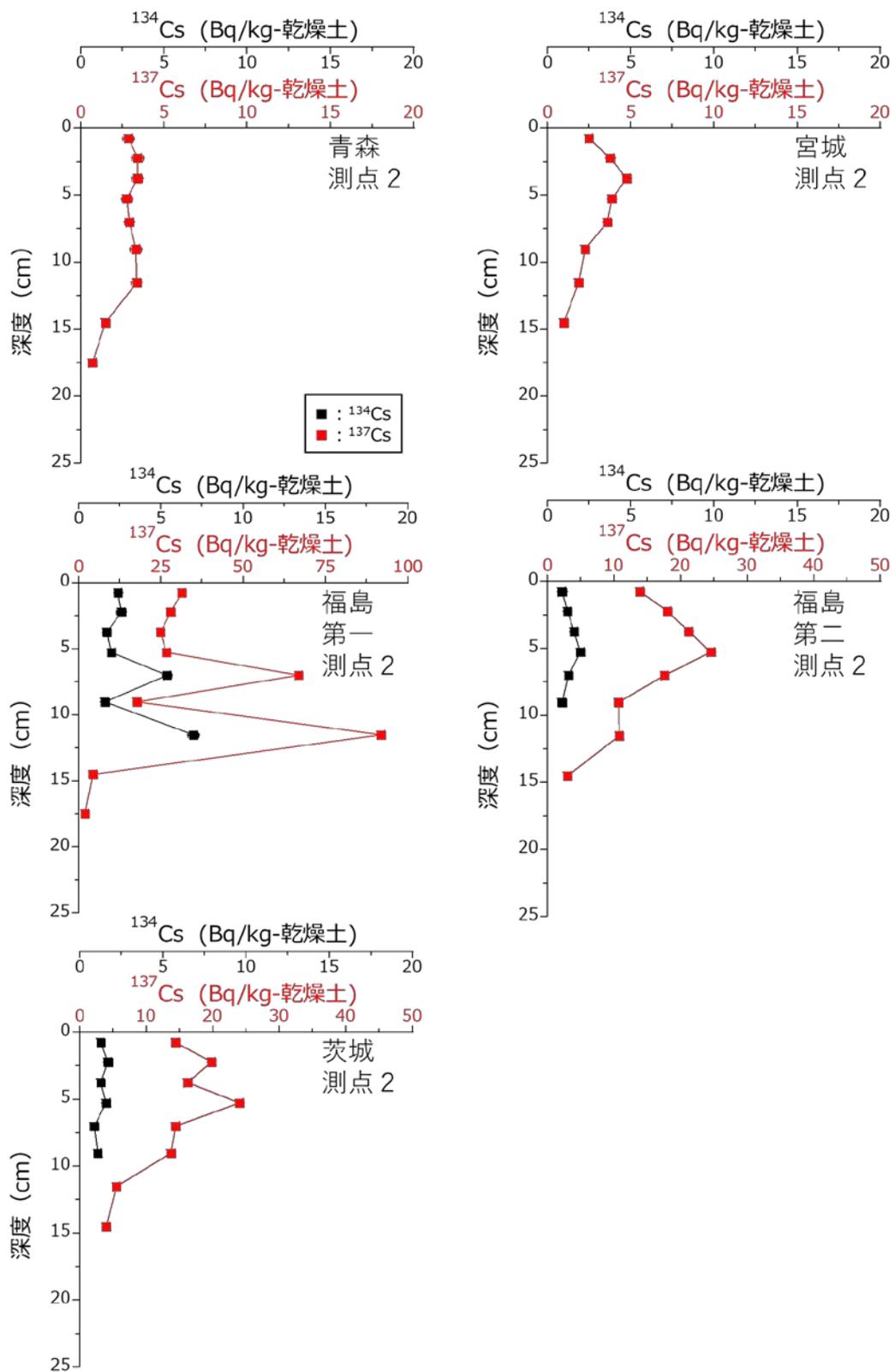


図 I -2-2-3-11(1) 海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布 (東日本海域)

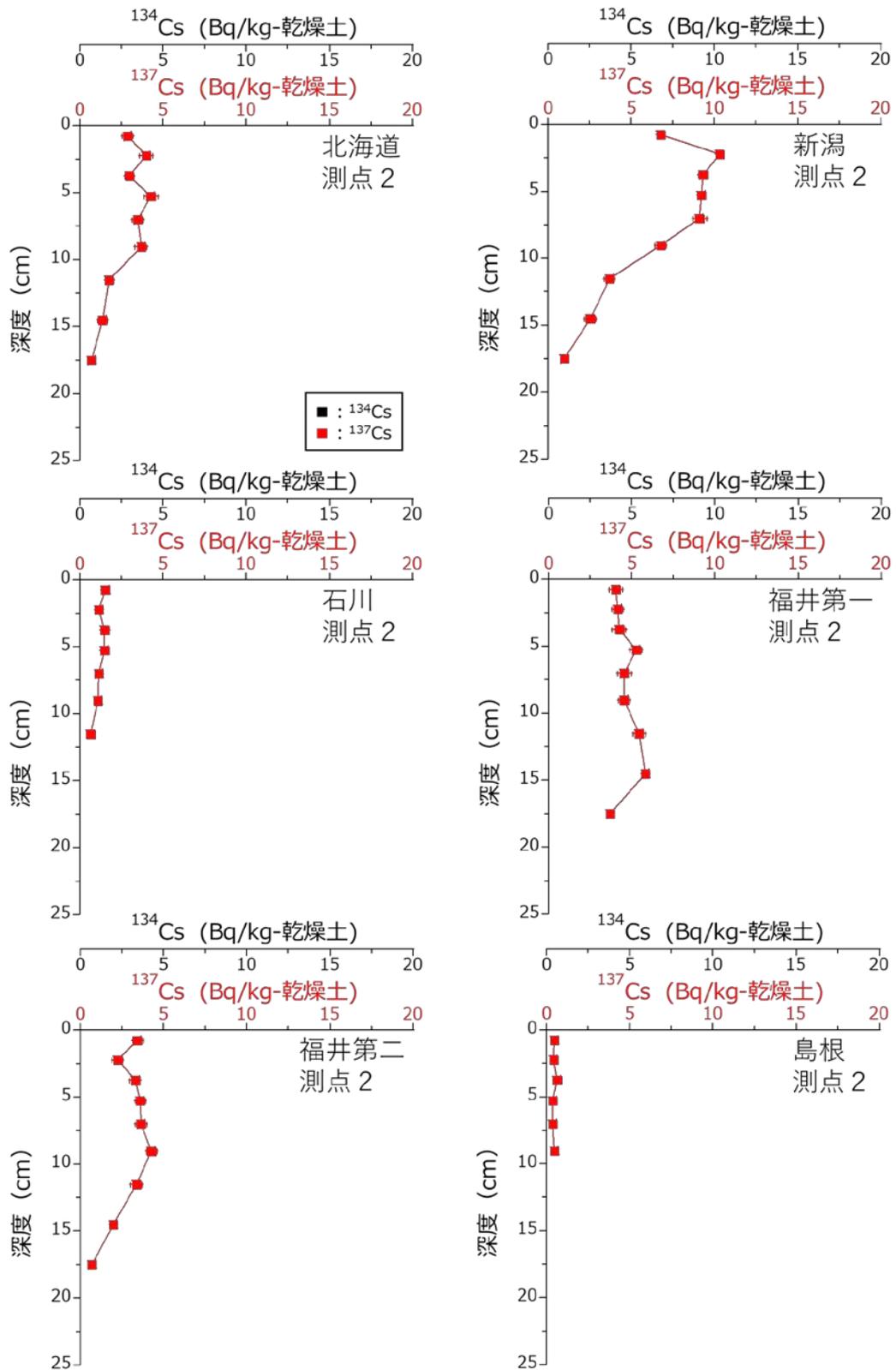


図 I -2-2-3-11(2) 海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布 (日本海海域)

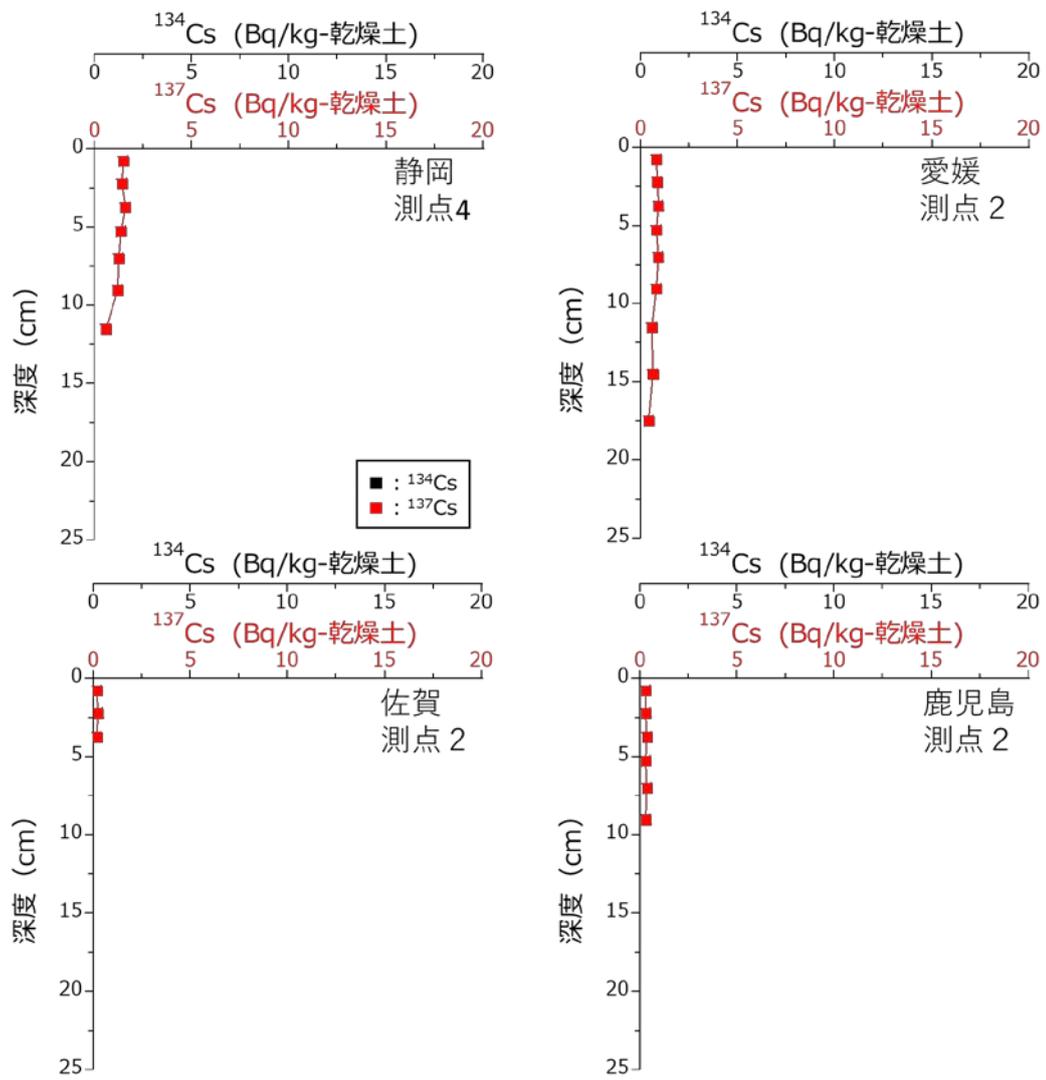


図 I -2-2-3-11(3) 海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布 (西日本海域)

(海底土中の放射性粒子)

本事業の調査海域として設定した原子力発電所等周辺海域(図 I-1-2-1 参照)のうち、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含まれる¹³⁷Csの放射能濃度は、東電福島第一原発事故後に一時的に上昇したものの、その後は減少傾向にある。しかしながら、これらの海域の海底土試料に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度は、測点間において均一でなく、ある程度の違いが見られたほか、同じ測点でも時系列的に変動している。また、平成27年度には、福島第一及び福島第二海域において、東電福島第一原発事故以降、最も高い値が観測された。このような地理的及び時系列的なばらつきは、曳航式ガンマ線計測装置を用いて海底面の放射性物質を連続的に計測した調査において、海底土に含まれる¹³⁷Csの放射能濃度が周囲より局所的に高い場所が数メートルから数百メートルに及ぶ範囲内で観測されている¹³⁾。

東電福島第一原発事故直後の各海域の海底土の放射性セシウム濃度の分布は、事故直後の汚染水の経路(放射性セシウムを多量に含む汚染水が海底土の上を通ったかどうか)と各海域の海底土の粒径に応じていたと考えられる^{5~7)}。その後の放射性セシウムの放射能濃度分布は、海底土の再懸濁と水平移動あるいは海底土からの溶出・脱着など、主として海底土の性状の違いに起因することが分かってきているものの¹⁴⁾、海底土の性状の違いのみで明確に説明できるわけではない。近年では東電福島第一原発事故後の大気中の浮遊塵や陸域の土壌粒子からは周りの粒子に比べて、放射性セシウムを多く含む粒子の存在が報告されている^{15,16)}。このような粒子は、主としてイメージングプレート(IP;放射線写真法)を用いて確認されたもので、放射能の総量が微量であっても局所的な点状放射能分布の計測に適した方法によるものである。この方法により放射線を黒点として確認された粒子は「radioactive particles(放射性粒子)」と言われている^{15,16)}。海洋環境中にもこのような放射性粒子が存在することが示唆されており^{10,17)}、実際のところこれまでに確認されたものについて、放射性セシウムでは1粒子あたりの放射能で数ベクレル程度であることが分かっている¹⁵⁾。

本事業の海洋放射能調査を実施するに当たり、海底土試料にこのような粒子が存在すると過年度よりも過度に高い放射能濃度が観測されることがある。そこで、平成31(令和元)年度の海洋放射能調査海域周辺でのモニタリング結果を評価する際の補完として、原子力発電所等周辺海域の海底土試料を調査し、¹³⁷Csの放射能濃度のばらつきに放射性粒子が関与しているか否かを検討した。

本調査では、試料中の放射性粒子の有無を確認するため、IPを用いた計測を行った。IPは、通常のエックス線フィルムの千倍にも及ぶ高い感度を有する。なお、本調査においても、「IPに反応した試料中の放射性粒子のこと」を「放射性粒子」と呼ぶこととする。

(方法)

令和元年 5 月～6 月に原子力発電所等周辺海域で採取した柱状海底土試料のうち比較的放射性セシウムの放射能濃度が高い福島第一海域・測点 2 で採取した試料を放射性粒子の調査試料として選択した。試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度の測定結果を表 I-2-2-3-4 に示す。表中の放射性セシウムの放射能濃度はいずれも試料採取日に減衰補正した値である。

採取層の中で比較的放射性セシウムの放射能濃度の高かった 2 層 (6.0-8.0cm、10.0-13.0cm) について放射性粒子の有無を調査した。また、放射性粒子がどのような形状、化学組成をしているのかを調査するため、平成 23 年 9 月に沖合海域測点 D1 で採取した海底土試料 (表層 0.0-3.0 cm) から放射性粒子の一部を単離し、形状及び元素組成を調査した。

表 I-2-2-3-4 海底土試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度等

採取海域と 測点	採取日	採取層 (cm)	乾燥重量 (g)	$^{134}\text{Cs}^{1)}$		$^{137}\text{Cs}^{1)}$		$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比
				(Bq/kg-乾燥土)		(Bq/kg-乾燥土)		
福島第一 測点 2	令和元年 5 月 14 日	0.0-1.5	111.0	2.4 ± 0.3		31.5 ± 0.7		0.07
		1.5-3.0	111.0	2.6 ± 0.3		28.0 ± 0.6		0.09
		3.0-4.5	111.9	1.7 ± 0.2		25.0 ± 0.5		0.07
		4.5-6.0	116.3	2.0 ± 0.2		26.6 ± 0.5		0.08
		6.0-8.0	114.3	5.4 ± 0.3		67.0 ± 0.8		0.08
		8.0-10.0	116.3	1.6 ± 0.2		17.8 ± 0.5		0.09
		10.0-13.0	112.9	7.0 ± 0.3		92.0 ± 1.0		0.08
		13.0-16.0	108.5	ND ²⁾		4.5 ± 0.3		-
		16.0-19.0	105.4	ND		2.0 ± 0.2		-

1) ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能濃度は試料採取日に減衰補正した値

2) ND は検出下限以下を示す。

海底土試料に含まれる放射性粒子の分け取りと放射性セシウムの存在量を計算するに当たっては Ikenoue *et al.*¹⁰⁾の方法によって実施した。

分け取った放射性粒子を含む海底土試料から Furuki *et al.*¹⁸⁾の懸濁法を用いて放射性粒子の一部を単離した。単離した放射性粒子は、平成 23 年 9 月に沖合海域測点 D1 で採取した海底土試料のオートラジオグラフィ画像の中で最大の黒点を示した 1 粒子と比較的大きな黒点を示した粒子群の中の 1 粒子である。単離した放射性粒子はカーボンテープの上に乗せてガンマ線測定を行った上で、エネルギー分散型エックス線分光法 (EDX: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) により粒子を構成する元素を同定した。EDX は、電子線

照射により発生する特性エックス線を検出し、そのエネルギーで分光することによって、元素分析や組成分析を行う手法であり、EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) と呼ばれる。本調査には走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) および走査型透過電子顕微鏡 (Scanning Transmission Electron Microscope: STEM) に付属している SEM-EDX と STEM-EDX を用いた。

(結果)

<残試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度>

残試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度の測定結果を表 I-2-2-3-5 に示す。測定結果はいずれも試料採取日に減衰補正した値である。

3分割して測定した残試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の平均値とその標準偏差はそれぞれ

6.0~8.0cm : $39.0 \pm 6.8 \text{ Bq/kg}$ -乾燥土

10.0~13.0cm : $17.5 \pm 1.4 \text{ Bq/kg}$ -乾燥土

であり、分割試料の間で値のばらつきは 14%以内の変動であった。

表 I-2-2-3-5 残試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度

採取海域と 測点	採取層 (cm)	分割試料 No.	乾燥重量 (g)	^{134}Cs (Bq/kg-乾燥土)		^{137}Cs (Bq/kg-乾燥土)		$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比	
福島第一 測点 2	6.0-8.0	1	36.6	2.4	± 0.4	34.5	± 0.9	0.07	
		2	40.0	4.0	± 0.4	46.8	± 0.8	0.08	
		3	33.1	3.4	± 0.5	35.6	± 0.9	0.10	
		平均			3.2	± 0.8	39.0	± 6.8	0.08
	10.0-13.0	1	35.4	2.3	± 0.6	16.1	± 0.6	0.14	
		2	37.0	1.1	± 0.3	17.5	± 0.7	0.06	
		3	38.6	1.3	± 0.3	18.9	± 0.6	0.07	
平均				1.6	± 0.6	17.5	± 1.4	0.09	

<海底土試料中の放射性粒子の存在>

放射性粒子を除く前と後の海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の変化を図 I-2-2-3-12 に示す。

福島第一海域の測点 2 で採取した海底土試料について、放射性粒子を除いた後、採取層 6.0~8.0cm と 10.0~13.0cm でそれぞれ 28.1Bq/kg-乾燥土及び 74.4Bq/kg-乾燥土の ^{137}Cs 濃度の減少が見られた。

各測点の試料全体（いわゆるバルク試料）と分け取った全放射性粒子に含まれる放射性セシウムを存在量を表 I-2-2-3-6 に示す。放射性粒子全体の放射能を平成 23 年 3 月 11 日の値に補正した場合、6.0-8.0cm 層と 10.0-13.0cm 層における放射性粒子全体の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は、それぞれ 0.96、0.93 である。東電福島第一原発事故当時の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を 1 とした場合、放射性粒子全体の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は、分け取った放射性粒子が東電福島第一原発事故に由来することを示していた。

試料全体に含まれる ^{137}Cs の存在量に対する放射性粒子の寄与の割合は、福島第一海域測点 2 の採取層 6.0~8.0cm と 10.0~13.0cm でそれぞれ 42%及び 81%であった。以上のような高い寄与の割合から、試料中の放射性粒子の存在と分布は海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度を変動させる要因の一つであることが確認された。

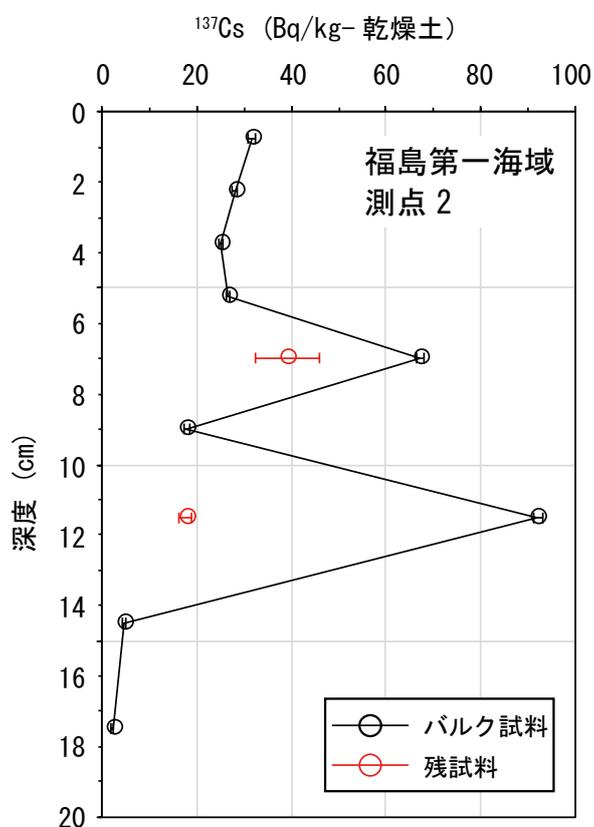


図 I-2-2-3-12 放射性粒子を除く前と後の海底土試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布の変化

表 I-2-2-3-6 海底土試料全体、残試料及び放射性粒子に含まれる放射性セシウムの存在量

採取 海域 と測点	採取層 (cm)	試料全体		残試料		放射性粒子		
		¹³⁴ Cs (Bq)	¹³⁷ Cs (Bq)	¹³⁴ Cs (Bq)	¹³⁷ Cs (Bq)	¹³⁴ Cs (Bq)	¹³⁷ Cs (Bq)	¹³⁴ Cs/ ¹³⁷ Cs 放射能比
福島 第一	6.0-8.0	0.61 ± 0.03	7.7 ± 0.1	0.37 ± 0.09	4.5 ± 0.8	0.24 ± 0.10	3.2 ± 0.8	0.08
測点 2	10.0-13.0	0.79 ± 0.04	10.4 ± 0.1	0.18 ± 0.07	2.0 ± 0.2	0.61 ± 0.08	8.4 ± 0.2	0.07

< 海底土試料中の放射性粒子の形状・元素組成 >

海底土試料中の放射性粒子の形状・元素組成の測定には、表 I-2-2-3-7 に示す平成 23 年 9 月に沖合海域測点 D1 で採取した海底土試料から単離した放射性粒子を使用した。

表 I-2-2-3-7 海底土試料全体、残試料及び放射性粒子に含まれる放射性セシウムの存在量

採取海域と 測点	採取日	採取 層 (cm)	減衰補正日	試料全体		放射性粒子	
				¹³⁴ Cs (Bq)	¹³⁷ Cs (Bq)	¹³⁴ Cs (Bq)	¹³⁷ Cs (Bq)
沖合測点	平成 23 年	0.0-	採取日	159.8 ± 0.5	185.4 ± 0.4	44.9 ± 5.7	49.1 ± 7.3
D1	9 月 13 日	3.0	平成 23 年 3 月 11 日	189.5 ± 0.6	187.6 ± 0.4	53.3 ± 6.8	49.7 ± 7.4

海底土試料のオートラジオグラフィ画像において最大の黒点を示した放射性粒子を D1-MAX、比較的大きな黒点を示した放射性粒子群の 1 つを D1-MID と表現する。2 個の放射性粒子 D1-MAX と D1-MID を海底土試料から単離し、それぞれの形状・元素組成を調査した。

SEM による観察の結果、放射性粒子 D1-MAX は直径 5 マイクロメートル程度の不定形の粒子であった (図 I-2-2-3-13)。放射性粒子 D1-MAX について γ 線測定を行った結果を表 I-2-2-3-8 に示す。D1-MAX に含まれる放射性セシウムの放射能は平成 23 年 3 月 11 日の値に減衰補正した場合、¹³⁷Cs と ¹³⁴Cs がそれぞれ 27.4 ± 0.1 Bq、28.4 ± 0.1 Bq であり、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放射能比は 1.04 ± 0.01 であった (表 I-2-2-3-8)。

東電福島第一原発事故後、汚染水の処理が始まる以前の原子炉各号機における¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放射能比はそれぞれ異なっているとの報告があり、これらはそれぞれ

1号機：0.89～0.93 程度

2号機：0.96～1.05 程度

3号機：0.97～1.04 程度

であるとされ¹⁹⁾、放射性粒子 D1-MAX はこの放射能比から鑑みて、2号機もしくは3号機に由来すると考えられた。放射性粒子 D1-MAX の試料全体の¹³⁷Cs 放射能に対する寄与の割合は、15%であり、全放射性粒子に対しては57%であった。

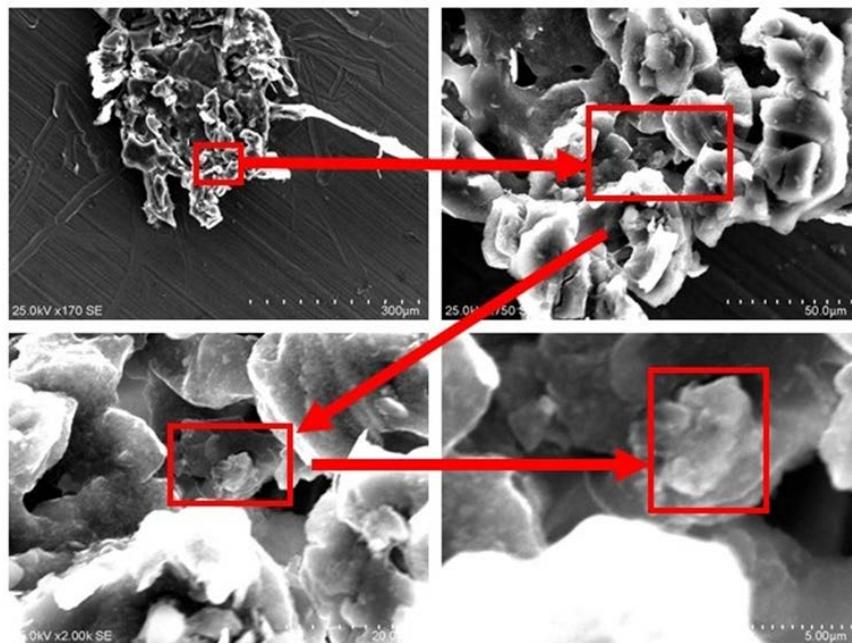


図 I -2-2-3-13 放射性粒子 D1-MAX の SEM 撮影画像。4 枚の画像は赤枠で囲った範囲を矢印の順に拡大したもの。4 番目の画像の赤枠の中が放射性粒子 D1-MAX を表す。放射性粒子以外の周囲の物質は測定のために放射性粒子を載せたカーボンテープの破片と他の堆積物粒子である。

表 I -2-2-3-8 放射性粒子 D1-MAX の γ 線測定結果(平成23年3月11日に減衰補正した値)

試料	核種	放射能 (Bq)	放射能比
D1-MAX	¹³⁷ Cs	27.4 ± 0.1	1.04 ± 0.01
	¹³⁴ Cs	28.4 ± 0.3	

放射性粒子 D1-MAX について SEM-EDX による元素組成の測定を行った結果を図 I-2-2-3-14 に示す。図 I-2-2-3-14(a)の赤い枠で示した 2 つの面について測定を行った結果、図 I-2-2-3-14(b)の EDX スペクトルからは鉄 (Fe) やアルミニウム (Al) が検出された。しかし、図 I-2-2-3-13 の SEM 撮影画像に見られるように放射性粒子 D1-MAX は測定時にカーボンテープの中に埋もれていたため、図 I-2-2-3-14(a)の元素マッピングが不鮮明であり、放射性粒子 D1-MAX に由来する正しいスペクトルは得られていないと考えられた。より詳しい分析を行うため集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) による放射性粒子 D1-MAX の切り出しと STEM-EDX による測定を行った。

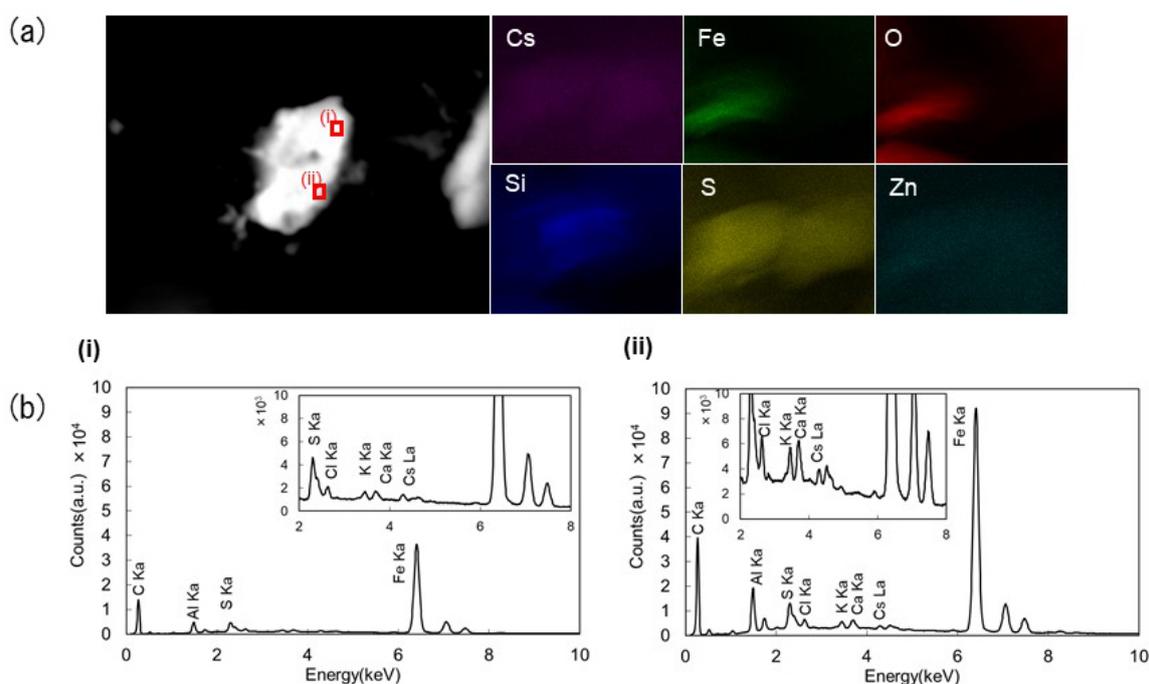


図 I-2-2-3-14 SEM-EDX による放射性粒子 D1-MAX の(a)元素マッピング画像および (b)面分析範囲における EDX スペクトル。面分析範囲(i)、(ii)を赤枠で示す。

FIB により放射性粒子 D1-MAX の一部を切り出し、STEM-EDX により面分析範囲 001~007 において元素組成を測定した結果を図 I-2-2-3-15~18 に示す。検出された元素は酸素(O)、Al、ケイ素(Si)、硫黄(S)、塩素(Cl)、チタン(Ti)、マンガン(Mn)、Fe、亜鉛(Zn)、Cs、鉛(Pb)であった。このうち、O、Al、Si、Fe、Cs はほとんどの面分析範囲において検出され、面分析範囲によってばらつきはあるが、放射性粒子 D1-MAX の主要な成分であった。Ti は面分析範囲 001 と 002 のみで検出されたが、Fe とともに酸化物として 66%~88% の高い割合を占めた。S と Zn は面分析範囲によって検出されるが微量であった。Cl、Mn、

Pb は面分析範囲 001 でのみ検出され、酸化物としてそれぞれ 0.26%、2.45%、3.37%と微量であった。Cs は核燃料からの核分裂生成物、O、Al、Si は断熱材やコンクリート、S、Mn、Fe、Zn は原子炉の構成材料、Cl については極微量であるが、冷却のために原子炉内に注入された海水に由来する可能性がある。

Fe 濃集が認められた部分の結晶構造を調べるため、図 I-2-2-3-19(a)に示す元素マッピングにより Fe 濃集が認められた部分のうち試料の厚みが薄い箇所について点分析を行い、図 I-2-2-3-19(b)に示す電子回折像を得た。電子回折像から得られたリング半径により、格子面間隔(d 値)を計算し、Fe 濃集部分はヘマタイト(赤鉄鉱、化学組成は Fe_2O_3)であると同定された。

以上の元素組成の測定結果から、放射性粒子 D1-MAX は格納容器内のコンクリートに由来するケイ酸塩ガラスを母体とし、核燃料からの核分裂生成物である放射性セシウムを含むと考えられるセシウム、原子炉等に由来する元素を含有した微小粒子であると言える¹⁸⁾。

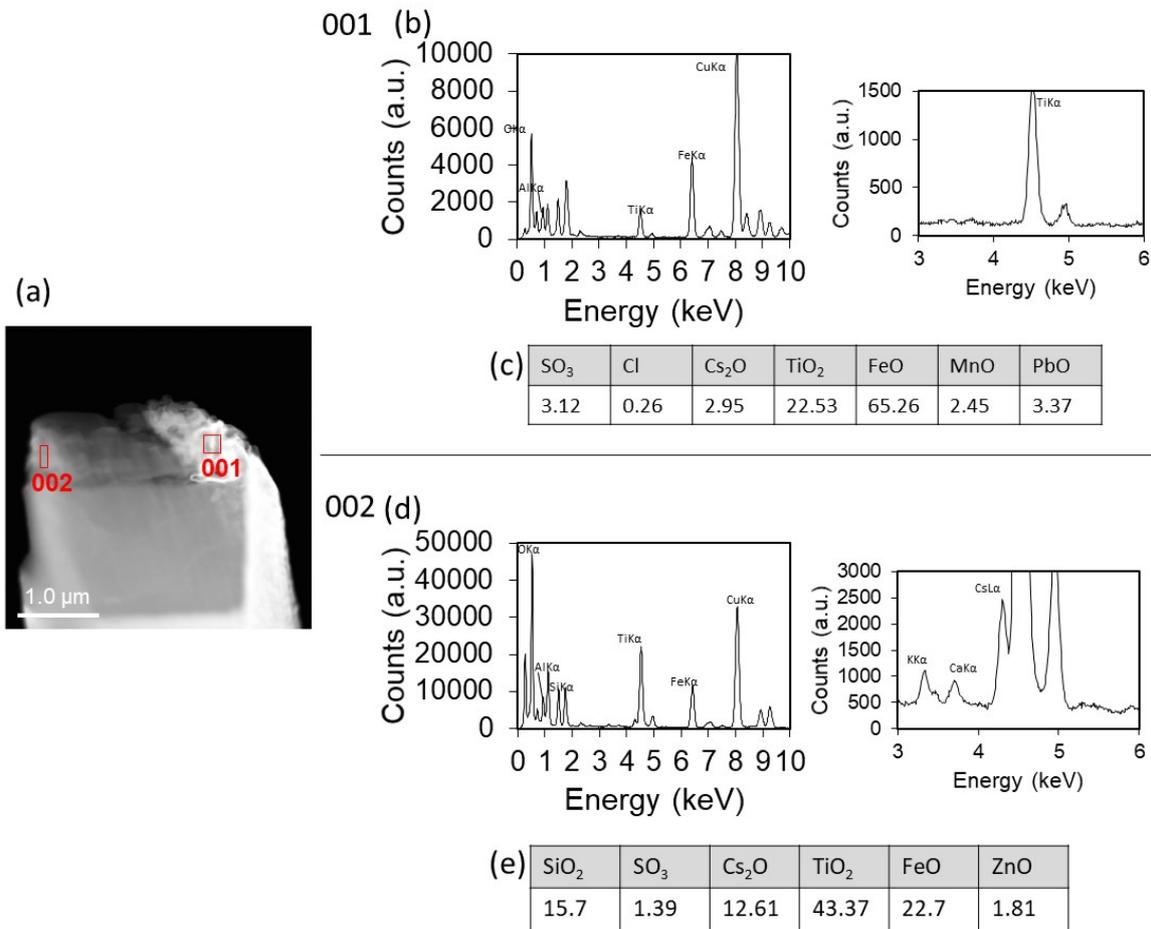


図 I-2-2-3-15 放射性粒子 D1-MAX の(a)STEM 撮影画像。STEM-EDX による面分析範囲 001 の (b)EDX スペクトルおよび(c)スペクトルから計算した化学組成の定量結果 (重量%)。STEM-EDX による面分析範囲 002 の (d)EDX スペクトルおよび(e)スペクトルから計算した化学組成の定量結果 (重量%)。面分析範囲を赤色の枠で示す。

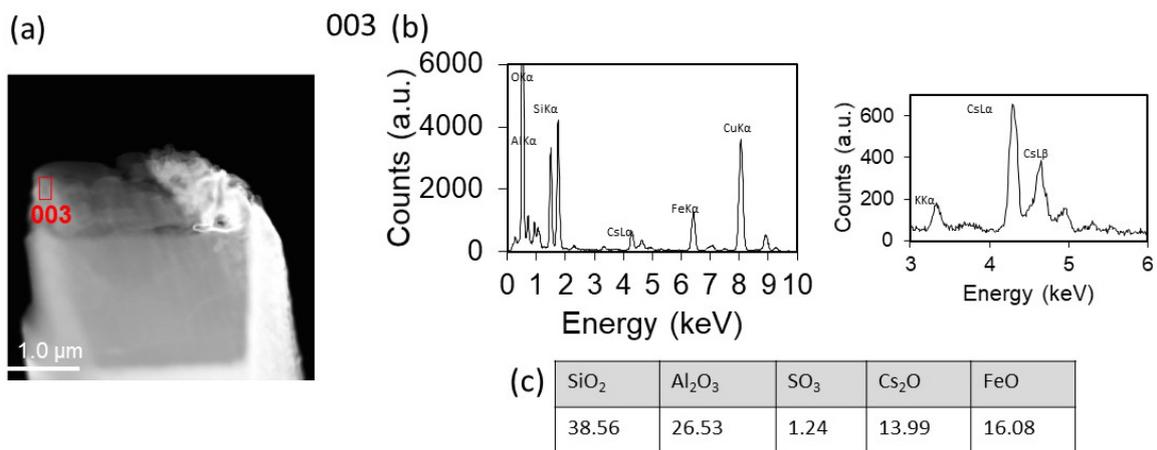


図 I -2-2-3-16 放射性粒子 D1-MAX の(a)STEM 撮影画像。STEM-EDX による面分析範囲 003 の(b)EDX スペクトルおよび(c)スペクトルから計算した化学組成の定量結果(重量%)。面分析範囲を赤色の枠で示す。

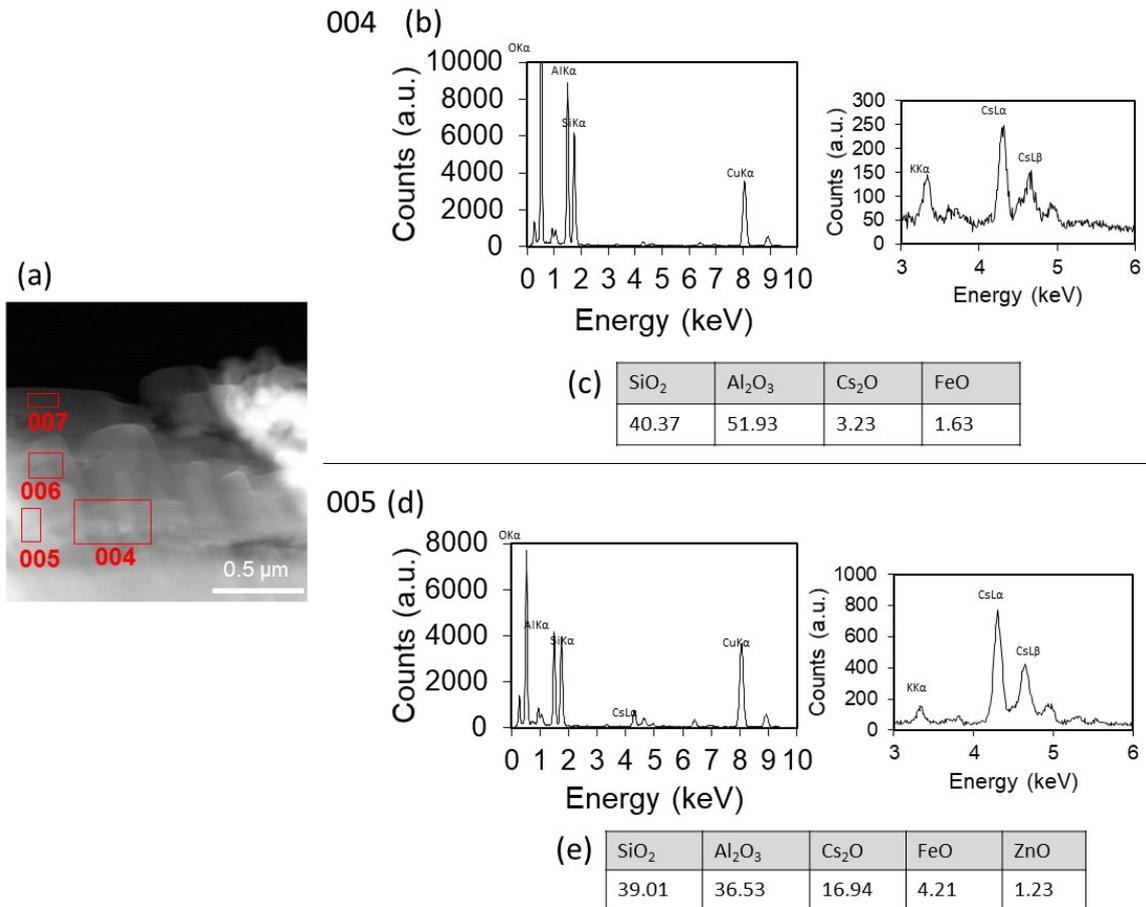


図 I -2-2-3-17 放射性粒子 D1-MAX の(a)STEM 撮影画像。STEM-EDX による面分析範囲 004 の (b)EDX スペクトルおよび(c)スペクトルから計算した化学組成の定量結果 (重量%)。STEM-EDX による面分析範囲 005 の (d)EDX スペクトルおよび(e)スペクトルから計算した化学組成の定量結果 (重量%)。面分析範囲を赤色の枠で示す。

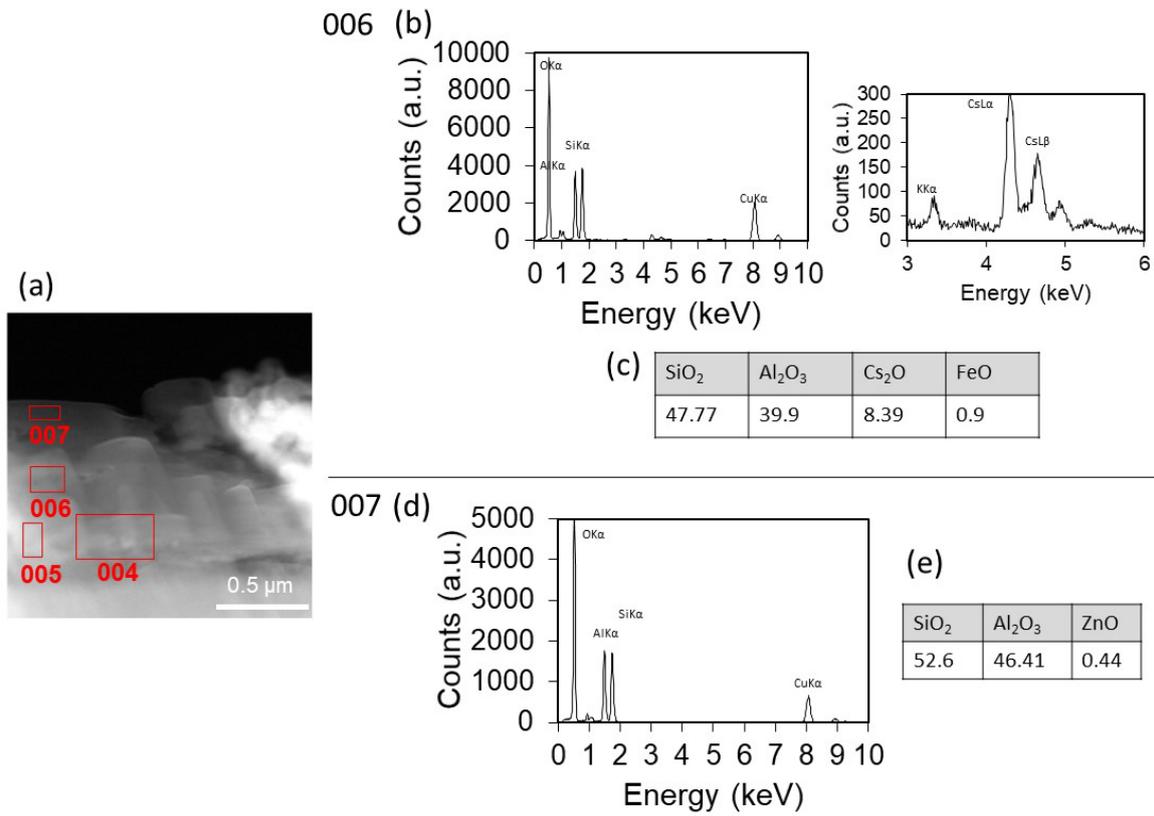


図 I -2-2-3-18 放射性粒子 D1-MAX の(a)STEM 撮影画像。STEM-EDX による面分析範囲 006 の (b)EDX スペクトルおよび(c)スペクトルから計算した化学組成の定量結果(重量%)。STEM-EDX による面分析範囲 007 の (d)EDX スペクトルおよび(e)スペクトルから計算した化学組成の定量結果(重量%)。面分析範囲を赤色の枠で示す。

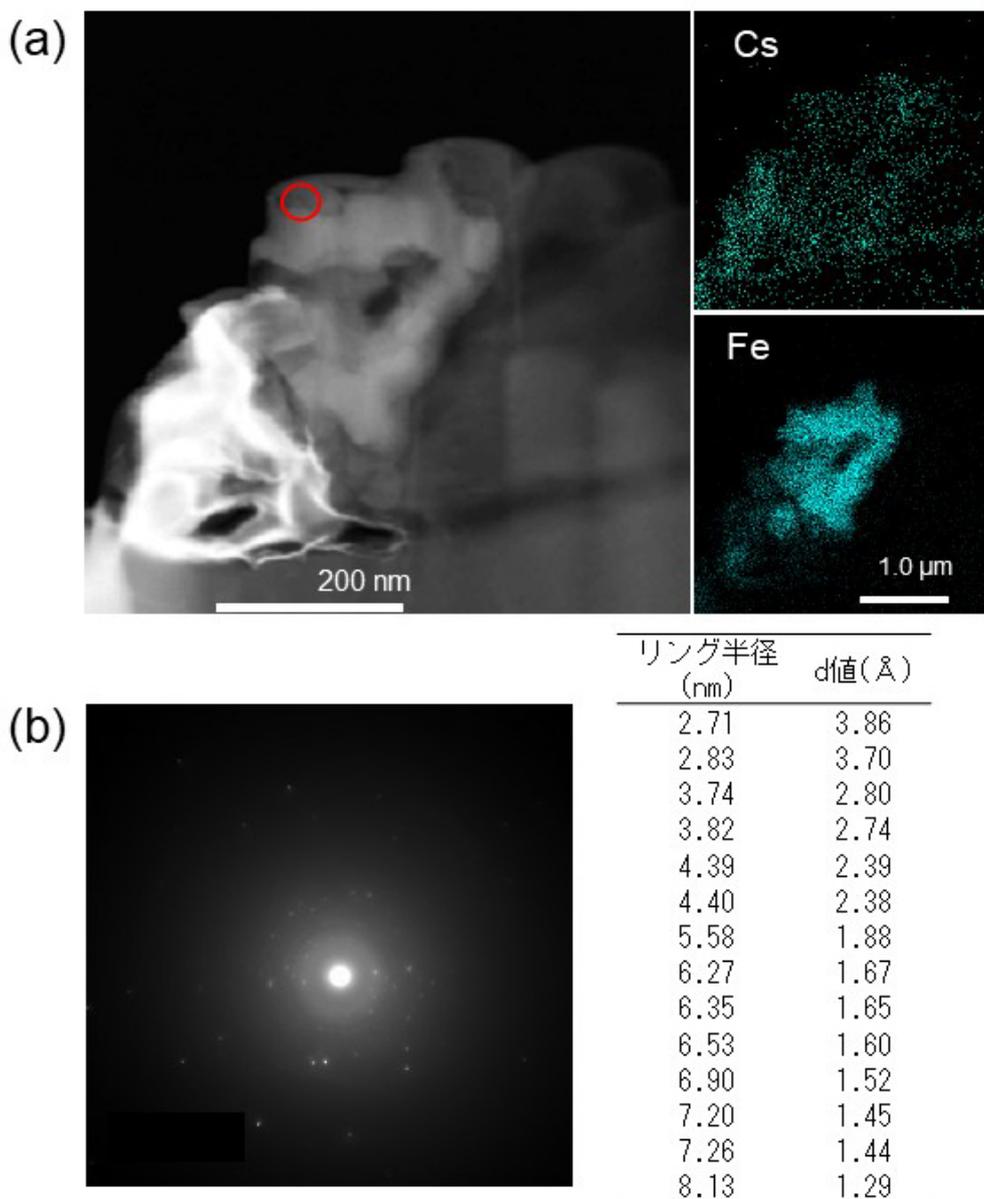


図 I-2-2-3-19 放射性粒子 D1-MAX の(a)STEM 撮影画像と STEM-EDX による元素マッピング画像および点分析による (b) 電子回折像および電子回折像から得られたリング半径と格子面間隔(d 値)。点分析範囲を赤色の枠で示す。

放射性粒子 D1-MID について実体顕微鏡と走査型電子顕微鏡で撮影した写真及びガンマ線測定の結果をそれぞれ図 I-2-2-3-20 及び表 I-2-2-3-9 に示す。顕微鏡観察の結果、放射性粒子 D1-MID は直径 1mm 程度の比較的大きな粒子であった。分析途中に粒子が複数個に分裂してしまったため、便宜上試料 1、2、3 に分けて分析した。ガンマ線測定の結果、

放射性粒子 D1-MID に含まれる ^{137}Cs の放射能は、平成 23 年 3 月 11 日での値に減衰補正した場合、試料 1、2、3 の合計で 0.668Bq であった（表 I-2-2-3-9）。

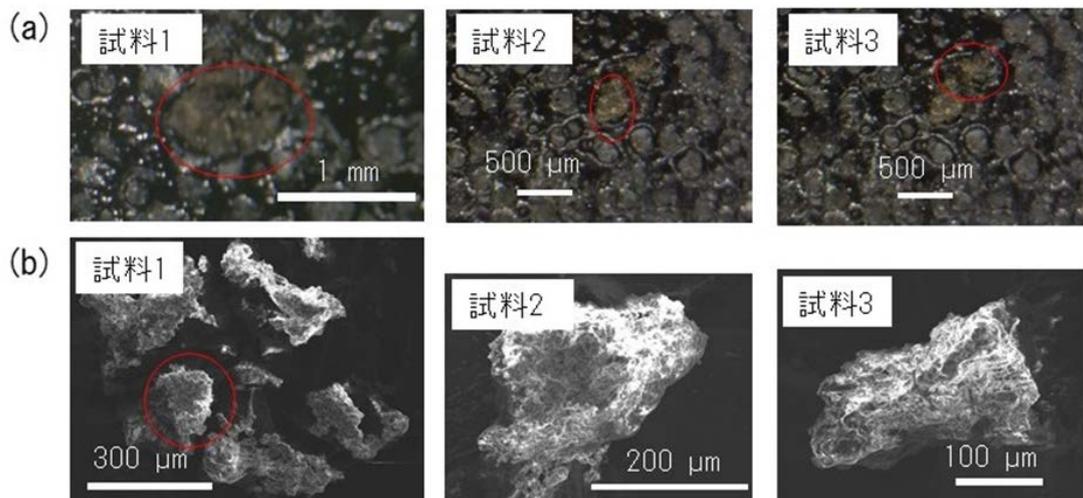


図 I-2-2-3-20 放射性粒子 D1-MID の(a)実体顕微鏡により撮影した画像、(b)SEM による撮影画像。

表 I-2-2-3-9 放射性粒子 D1-MID の γ 線測定結果（平成 23 年 3 月 11 日に減衰補正した値）

試料	核種	放射能 (Bq)	放射能比
D1-MID	^{137}Cs	0.668 ± 0.013	-
	^{134}Cs	ND	

SEM-EDX による化学組成の測定結果を図 I-2-2-3-21～23 に示す。分析の結果、試料 1、2、3 のいずれからもマグネシウム (Mg)、Al、Si、カリウム (K) が検出された。放射性粒子 D1-MAX と同様に Al と Si の酸化物を主成分とするが (66～86%)、Mg、K を含むことから、放射性粒子は Cs-clay(水溶性 Cs が吸着した層状ケイ酸塩鉱物)であると同定された。

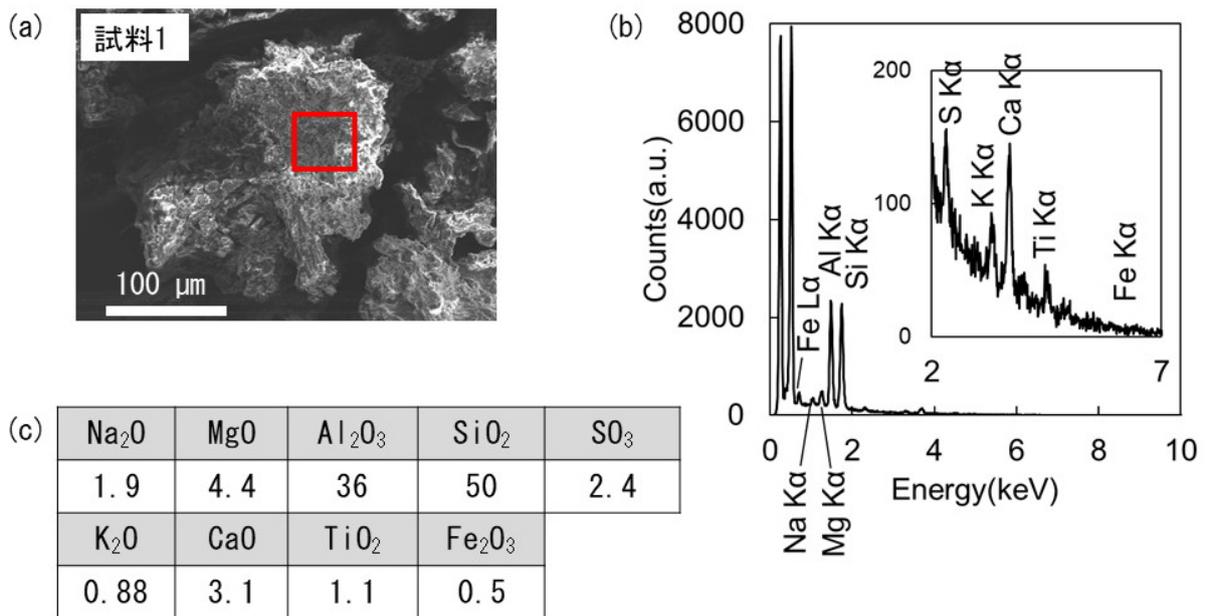


図 I -2-2-3-21 SEM-EDX による放射性粒子 D1-MID (試料 1)の(a)面分析範囲、(b)面分析範囲における EDX スペクトルおよび(c)スペクトルから計算した化学組成の定量結果 (重量%)。面分析範囲を赤枠で示す。

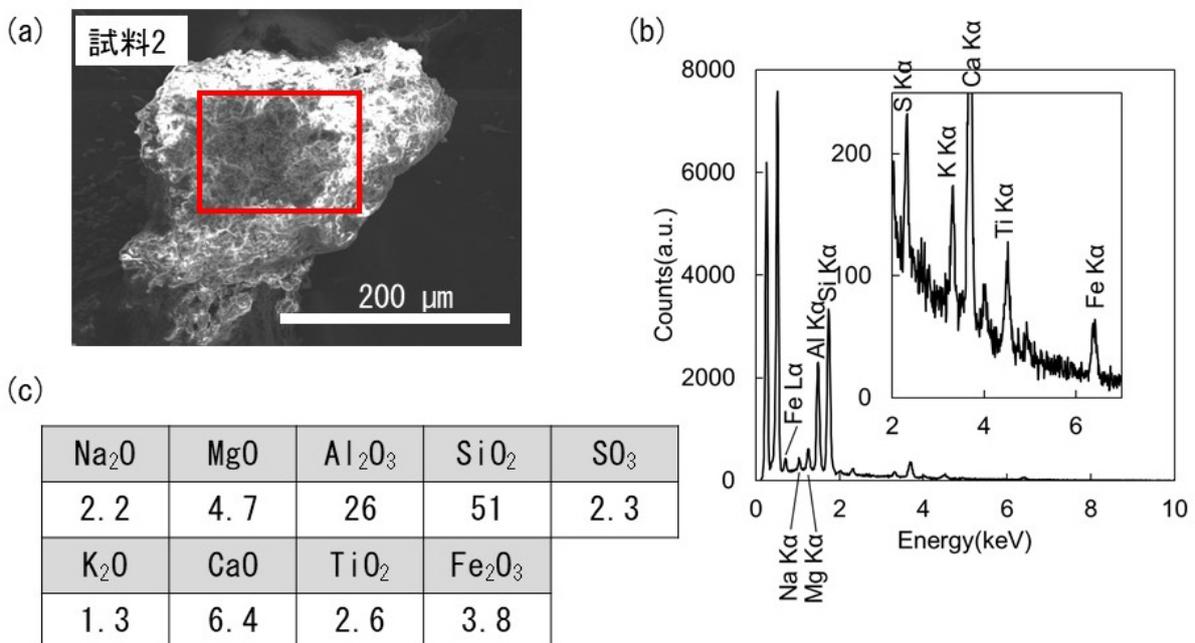


図 I -2-2-3-22 SEM-EDX による放射性粒子 D1-MID (試料 2)の(a)面分析範囲、(b)面分析範囲における EDX スペクトルおよび(c)スペクトルから計算した化学組成の定量結果 (重量%)。面分析範囲を赤枠で示す。

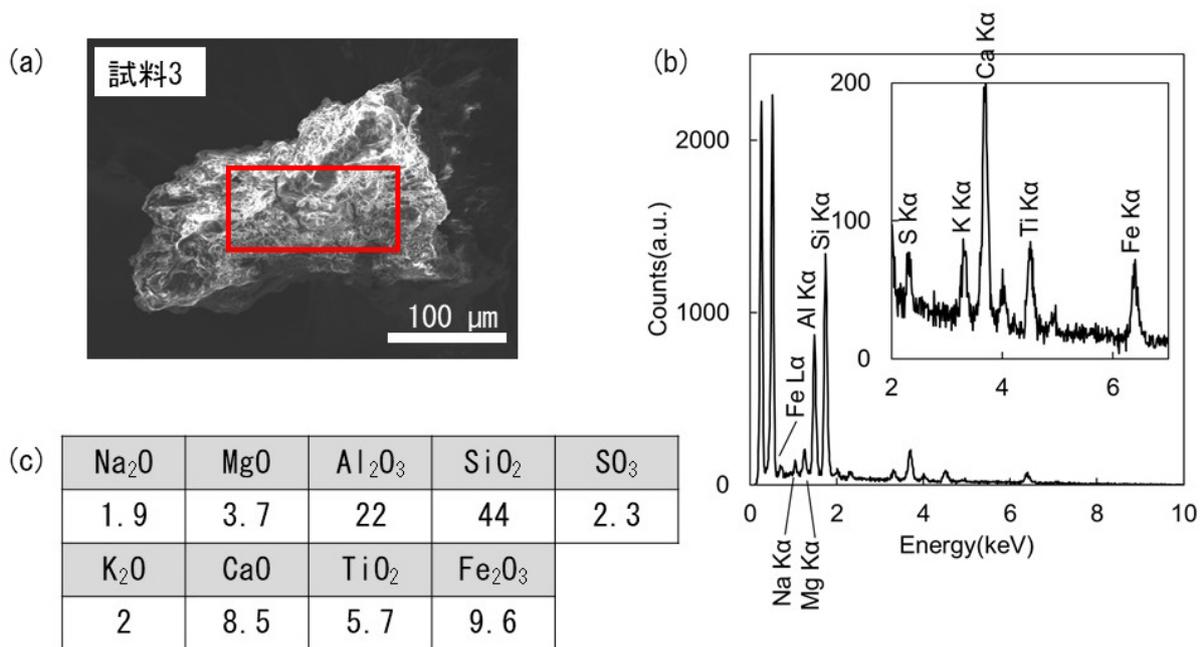


図 I -2-2-3-23 SEM-EDX による放射性粒子 D1-MID (試料 3)の(a)面分析範囲、(b)面分析範囲における EDX スペクトルおよび(c)スペクトルから計算した化学組成の定量結果 (重量%)。面分析範囲を赤枠で示す。

これまでに IP を用いて環境試料中から見出された放射性粒子のうち形状・元素組成が報告されているものは、ケイ酸塩ガラス (主たる構成 (組成) として SiO₂) にセシウムが主要元素として溶け込んだ直径数マイクロメートルの球形のもの^{15, 18, 20)}や、同じくシリカガラスではあるものの、直径が数百マイクロメートルかつ不定形のもの²¹⁾、あるいは層状ケイ酸塩鉱物に¹³⁷Cs が吸着して濃縮したもの²²⁾等さまざまである。本調査で分析した 2 個の放射性粒子は海底土試料のオートラジオグラフィ画像において特に大きな黒点とそれ以外に多数観察される比較的大きな黒点の一つであり、測定の結果、それぞれケイ酸塩ガラスを母体とする比較的高濃度の放射性セシウムを含有する数マイクロメートルの微小粒子と層状ケイ酸塩鉱物に¹³⁷Cs が吸着して濃縮した 1mm 程度の比較的大きな粒子であることが分かった。本調査において同定された放射性粒子の種類が海底土中の放射性粒子を代表するものであるかは、現段階では研究例が少ないため判断できないが、沖合海域測点 D1 の海底土試料を構成する放射性粒子についてその内訳の一部が明らかになった。海底土中に観察される放射性粒子は海洋環境における放射性物質の挙動を左右する可能性があるが、未だ研究・報告例がほとんどないため、今後も放射性粒子の存在に留意しつつ、海洋環境放射能のモニタリングを継続する必要がある。

③ 海水中の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。平成 29～30 年度ではその上昇は確認されなかった。

平成 31（令和元）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の上昇傾向を確認するため、同海域での海水に含まれる ^{134}Cs が検出されるか否かを試みた。また、本年度は北太平洋亜寒帯循環による放射性セシウムの回帰に備え、太平洋側のバックグラウンドデータとして平成 24～31（令和元）年度の青森海域の測点 4 の ^{134}Cs が検出されるか否かを試みた。

(試料採取及び分析)

発電所海域のうち、放射能分析を行った平成 24～31（令和元）年度の表層及び下層合わせて 34 試料の概要及び結果（AMP 吸着試料：10 海域から 1 測点）を表 I-2-2-3-10 に示す。なお、試料採取の海域は次の項目に挙げる方法に沿って選定した。

- ^{137}Cs 濃度が事故前（平成 22 年度）の平均値に比べ高いと考えられる海域の内、東電福島第一原発からの直接流入による影響を受けやすい海域（核燃、宮城、福島第一、福島第二、茨城海域）を除く。
- 平成 31（令和元）年度において、各海域（福井第一、福井第二は 1 海域とする）で事故前よりも高い ^{137}Cs 濃度が検出された測点のうち、1 測点における表層海水。
- 日本海対馬暖流および親潮による影響を受けやすい青森海域（1 測点）の平成 24～31 年度の表層及び下層海水。
- 平成 29 年度に測定することのできなかった発電所海域（9 海域：1 測点）の下層海水。

平成 24～31（令和元）年度に実施した海洋放射能調査において測定済み試料について、金沢大学低レベル放射能実験施設（LLRL）の超低バックグラウンドガンマ線スペクトロメータによる長時間測定を行って ^{134}Cs の放射能濃度を求めた（目標検出下限値：0.2mBq/L）。

(結果)

測定結果を表 I-2-2-3-10 に示す。なお、測定結果は平成 23 年 3 月 11 日時点に減衰補正した。事故日に補正することで半減期による減少を除くことができ、海洋環境中での混合・希釈による減少などをとらえることができる。

西日本及び日本海海域の表層海水の ^{134}Cs の放射能濃度の平均値は、平成 24 年度から平成 28 年度にかけて 0.22 から 0.82mBq/L と上昇し、平成 31 年度は 0.81mBq/L であり、これまでに得られた平均値と同水準で推移している (図 I-2-2-3-24)。これは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と推測される ^{134}Cs の付加により、西日本海域及び日本海海域での ^{134}Cs 放射能濃度が減少していない²³⁾と考えられる。平成 29 年度の下層海水中にも ^{134}Cs の存在が確認された。青森海域では平成 27 年度から平成 28 年度にかけて西日本海域及び日本海海域の平均値よりも高い値が確認された。これは事故当時の東電福島第一原発からの直接流入による影響が拡散して確認されたものだと考えられる。平成 29 年度からは西日本海域及び日本海海域の平均値を下回り、海洋環境中での混合・希釈による減少と考えられる。平成 31 (令和元) 年度には再び濃度が上昇した。青森海域は親潮、黒潮及び対馬暖流の 3 つの主要な海流の影響下にあり、水塊構造が複雑な海域であるため本調査のデータのみでは上昇要因について解明はできなかった。しかし、この海域は北太平洋亜寒帯循環による放射性セシウムの回帰が予想されており、今後も濃度が上昇する可能性がある。水温、塩分及び密度の基礎データやラジウム同位体比などの溶存成分から水塊構造を把握し ^{134}Cs の放射能濃度の上昇について解析をする必要がある。西日本海域及び日本海海域で採取した表層海水において、平成 31 (令和元) 年度も東電福島第一原発事故由来の ^{134}Cs の存在が確認されたが、その値は年度ごとでほぼ同水準で推移していることを確認できた。

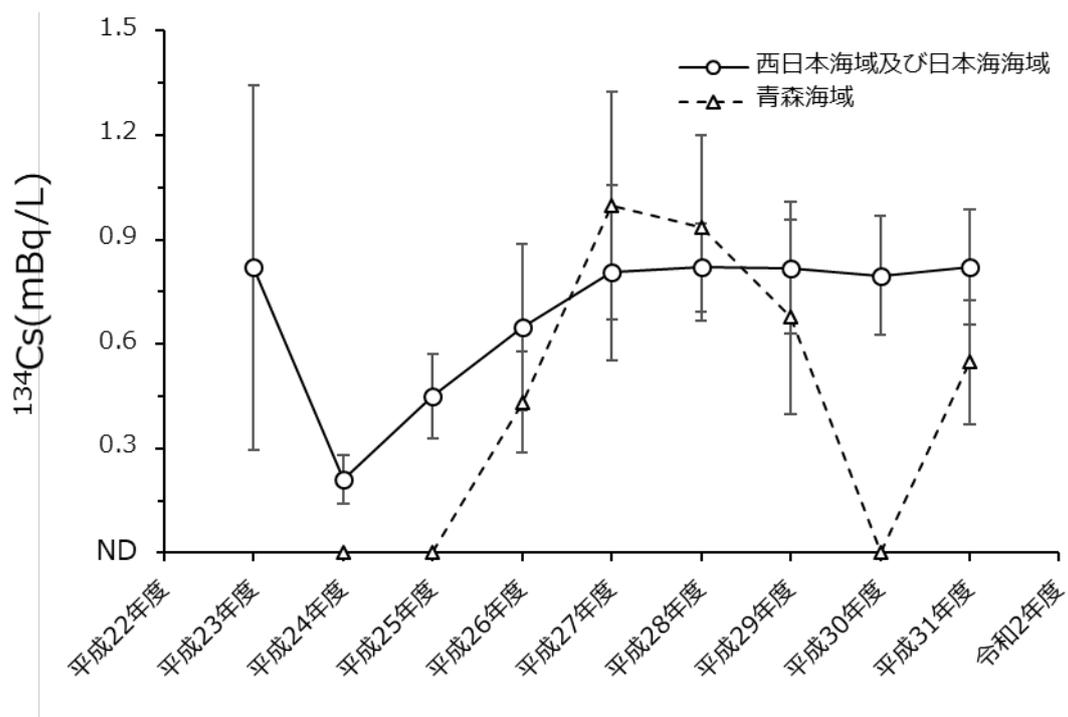


図 I -2-2-3-24 日本海海域及び西日本海域で採取した表層水に含まれる¹³⁴Csの放射能濃度の平均値と青森海域（測点4）を経年変化図として示したもの（平成23年3月11日時点に減衰補正した値）

表 I-2-2-3-10(1) 長時間測定による海水中の放射性セシウムの放射能濃度

海域	測点	採取深度	採取日	$^{134}\text{Cs}^{1)}$	$^{134}\text{Cs}^{1)}$	$^{137}\text{Cs}^{1)}$	$^{137}\text{Cs}^{1)}$
		(m)		(mBq/L)	誤差	(mBq/L)	誤差
北海道	3	471	平成 29 年 5 月 9 日	ND ²⁾		1.27	0.04
		1	令和元年 6 月 9 日	0.74	0.24	2.01	0.05
青森	4	1	平成 24 年 5 月 18 日	ND		1.65	0.05
		580	平成 24 年 5 月 18 日	ND		0.70	0.03
		1	平成 25 年 6 月 12 日	ND		1.59	0.06
		590	平成 25 年 6 月 12 日	ND		0.75	0.03
		1	平成 26 年 5 月 29 日	0.43	0.15	1.57	0.04
		568	平成 26 年 5 月 29 日	ND		0.84	0.03
		1	平成 27 年 5 月 13 日	1.00	0.33	2.05	0.07
		592	平成 27 年 5 月 13 日	ND		0.64	0.04
		1	平成 28 年 5 月 24 日	0.93	0.27	2.15	0.07
		598	平成 28 年 5 月 24 日	ND		0.78	0.04
		1	平成 29 年 5 月 6 日	0.68	0.28	1.86	0.05
		594	平成 29 年 5 月 6 日	ND		0.72	0.03
		1	平成 30 年 6 月 9 日	ND		1.46	0.04
		601	平成 30 年 6 月 9 日	ND		0.68	0.04
		1	令和元年 6 月 18 日	0.55	0.18	2.04	0.04
599	令和元年 6 月 18 日	ND		0.68	0.02		
静岡	3	330	平成 29 年 5 月 9 日	0.50	0.14	2.07	0.05
		1	令和元年 6 月 21 日	0.50	0.25	1.76	0.05
新潟	2	477	平成 29 年 6 月 16 日	ND		1.40	0.04
		1	令和元年 5 月 31 日	1.02	0.25	2.05	0.05
石川	4	105	平成 29 年 6 月 19 日	0.85	0.12	2.22	0.05
		1	令和元年 6 月 4 日	0.99	0.22	2.16	0.06
福井 第二	3	201	平成 29 年 6 月 22 日	0.34	0.12	1.56	0.05
		1	令和元年 6 月 6 日	0.88	0.26	2.09	0.06
島根	3	92	平成 29 年 6 月 23 日	0.75	0.11	2.19	0.04
		1	令和元年 6 月 9 日	0.89	0.23	2.10	0.04
愛媛	3	54	平成 29 年 6 月 25 日	0.95	0.16	2.26	0.06
		1	令和元年 6 月 19 日	0.83	0.24	2.15	0.05

¹⁾平成 23 年 3 月 11 日時点に減衰補正した値。

²⁾ ND は検出下限値以下を示す。

表 I-2-2-3-10(2) 長時間測定による海水中の放射性セシウムの放射能濃度

海域	測点	採取深度	採取日	$^{134}\text{Cs}^{1)}$	$^{134}\text{Cs}^{1)}$	$^{137}\text{Cs}^{1)}$	$^{137}\text{Cs}^{1)}$
		(m)		(mBq/L)	誤差	(mBq/L)	誤差
佐賀	3	50	平成 29 年 6 月 25 日	0.90	0.13	2.25	0.04
		1	令和元年 6 月 16 日	0.89	0.21	1.99	0.04
鹿児島	3	87	平成 29 年 5 月 6 日	0.77	0.12	2.27	0.05
		1	令和元年 6 月 17 日	0.65	0.22	2.04	0.06

¹⁾平成 23 年 3 月 11 日時点に減衰補正した値。

(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、300m）から約 60～80L 採取した（表 I-2-2-3-11）。この海水 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 を参照のこと。

表 I-2-2-3-11 海水試料の採取測点、採取層、採取水深及び層数

海域	測点	採取層 (m) *	水深 (m)	層数
北海道	2	20, 50, 100	405	3
青森	2	20, 50, 100, 300	652	4
宮城	2	20, 50	162	2
福島第一	2	20, 50	135	2
福島第二	2	20, 50	143	2
茨城	2	20, 50	120	2
静岡	4	20, 50, 100, 300	565	4
新潟	2	20, 50, 100, 300	494	4
石川	2	20, 50	186	2
福井第一	2	20, 50, 100	258	3
福井第二	2	20, 50	199	2
島根	2	20	81	1
愛媛	2	20	67	1
佐賀	2	10, 20	56	2
鹿児島	2	20, 50	81	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)

海水試料のうち、中間層から得られた分析結果を表 I-2-2-3-12(1)～(2)に示す。 ^{134}Cs は大多数の採取層で検出下限値以下であったことから鉛直分布や変化の傾向を議論することは困難である。そのため、各海域における ^{137}Cs の放射能濃度の鉛直分布について議論する。

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について、「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」で得られた表層及び下層の結果を併せて図 I-2-2-3-25(1)～(3)に示す。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で極大値 (1.9mBq/L) を、中間層 (20～100m 層) にかけて均一な放射能濃度 (1.5～1.6mBq/L) を示した後、下層までゆるやかに減少した。また、福島第一及び福島第二海域では ^{137}Cs の放射能濃度が表層で極大値を、中間層 (20～100m 層) で極小値を示し、下層で僅かに増加する鉛直分布を示した。一方で、茨城海域では表層から下層にかけて均一な放射能濃度 (2.0～2.2mBq/L) 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、表層で極大値 (2.1mBq/L) を示し、中間層から下層にかけて均一な放射能濃度 (1.5～1.6mBq/L) であった。新潟海域においては、表層から 100m 層にかけて均一な放射能濃度 (1.5～1.6mBq/L) を示した後、下層まで減少した。石川及び福井第二海域においては、中間層 (20～50m 層) で極小値 (1.5～1.6mBq/L) を示し、それよりも深くなるにつれて増加した。福井第一海域においては、石川及び福井第二海域と同様に中間層 (20～50m 層) にかけて極小値 (1.6mBq/L) を示し、100m 層で増加した後に、下層に至るまで減少した。島根海域では、20m 層で極小値を示し、下層に至るまで増加した。

西日本海域の静岡海域における ^{137}Cs の放射能濃度は、表層から 20m 層にかけて 2.1mBq/L から 1.3mBq/L まで減少し、中間層 (100～300m 層) にかけて 1.9～2.0mBq/L まで増加した後、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、愛媛海域では表層と下層で ^{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下層で極大値を示し、それ以外の層では 1.4～1.6mBq/L であった。

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、塩分との関連性がある鉛直分

分布を示し、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おらず、塩分変化とは関係性がない鉛直分布を示した。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-2-2-3-12(1) 海水中の放射性セシウムの放射能濃度

海域	測点	試料採取日	採取層 (m)	¹³⁴ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³⁷ Cs
				(mBq/L)	誤差	(mBq/L)	誤差
北海道	2	令和元年6月8日	1	ND ¹⁾	—	2.1	0.18
北海道	2	令和元年6月8日	20	ND	—	1.6	0.04
北海道	2	令和元年6月8日	50	ND	—	1.5	0.04
北海道	2	令和元年6月8日	100	ND	—	1.5	0.03
北海道	2	令和元年6月8日	379	ND	—	1.5	0.17
青森	2	令和元年6月18日	1	ND	—	1.9	0.18
青森	2	令和元年6月18日	20	ND	—	1.6	0.04
青森	2	令和元年6月18日	50	ND	—	1.5	0.04
青森	2	令和元年6月18日	100	ND	—	1.5	0.03
青森	2	令和元年6月18日	300	ND	—	1.3	0.02
青森	2	令和元年6月18日	625	ND	—	0.83	0.16
宮城	2	令和元年5月15日	1	ND	—	1.7	0.23
宮城	2	令和元年5月15日	20	ND	—	1.4	0.04
宮城	2	令和元年5月15日	50	ND	—	1.5	0.03
宮城	2	令和元年5月15日	147	ND	—	1.8	0.21
福島第一	2	令和元年5月14日	1	ND	—	3.0	0.20
福島第一	2	令和元年5月14日	20	ND	—	1.5	0.04
福島第一	2	令和元年5月14日	50	ND	—	1.4	0.04
福島第一	2	令和元年5月14日	122	ND	—	2.2	0.18
福島第二	2	令和元年5月13日	1	ND	—	2.1	0.20
福島第二	2	令和元年5月13日	20	ND	—	1.7	0.04
福島第二	2	令和元年5月13日	50	ND	—	1.5	0.04
福島第二	2	令和元年5月13日	132	ND	—	2.1	0.20
茨城	2	令和元年5月11日	1	ND	—	2.0	0.24
茨城	2	令和元年5月11日	20	ND	—	2.0	0.05
茨城	2	令和元年5月11日	50	ND	—	2.0	0.05
茨城	2	令和元年5月11日	111	ND	—	2.2	0.22
静岡	4	令和元年6月21日	1	ND	—	2.1	0.22
静岡	4	令和元年6月21日	20	ND	—	1.3	0.03
静岡	4	令和元年6月21日	50	ND	—	1.6	0.03
静岡	4	令和元年6月21日	100	0.06	0.02	2.0	0.04
静岡	4	令和元年6月21日	300	0.08	0.02	1.9	0.04
静岡	4	令和元年6月21日	540	ND	—	0.81	0.19

¹⁾ND は検出下限値以下を示す。

表 I-2-2-3-12(2) 海水中の放射性セシウムの放射能濃度

海域	測点	試料採取日	採取層 (m)	¹³⁴ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³⁷ Cs
				(mBq/L)	誤差	(mBq/L)	誤差
新潟	2	令和元年5月31日	1	ND ¹⁾	—	1.5	0.19
新潟	2	令和元年5月31日	20	ND	—	1.6	0.04
新潟	2	令和元年5月31日	50	ND	—	1.6	0.04
新潟	2	令和元年5月31日	100	ND	—	1.6	0.04
新潟	2	令和元年5月31日	300	ND	—	1.1	0.02
新潟	2	令和元年5月31日	475	ND	—	0.96	0.18
石川	2	令和元年6月4日	1	ND	—	1.9	0.19
石川	2	令和元年6月4日	20	ND	—	1.6	0.04
石川	2	令和元年6月4日	50	ND	—	1.6	0.04
石川	2	令和元年6月4日	171	ND	—	2.0	0.20
福井第一	2	令和元年6月5日	1	ND	—	2.0	0.20
福井第一	2	令和元年6月5日	20	ND	—	1.6	0.04
福井第一	2	令和元年6月5日	50	ND	—	1.5	0.04
福井第一	2	令和元年6月5日	100	ND	—	1.7	0.04
福井第一	2	令和元年6月5日	243	ND	—	1.1	0.19
福井第二	2	令和元年6月6日	1	ND	—	1.7	0.18
福井第二	2	令和元年6月6日	20	ND	—	1.6	0.04
福井第二	2	令和元年6月6日	50	ND	—	1.6	0.04
福井第二	2	令和元年6月6日	180	ND	—	1.9	0.20
島根	2	令和元年6月9日	1	ND	—	1.9	0.20
島根	2	令和元年6月9日	20	0.08	0.03	1.5	0.04
島根	2	令和元年6月9日	73	ND	—	2.2	0.20
愛媛	2	令和元年6月19日	1	ND	—	1.9	0.18
愛媛	2	令和元年6月19日	20	ND	—	1.6	0.03
愛媛	2	令和元年6月19日	52	ND	—	1.9	0.17
佐賀	2	令和元年6月16日	1	ND	—	1.9	0.20
佐賀	2	令和元年6月16日	10	0.07	0.02	1.6	0.04
佐賀	2	令和元年6月16日	20	ND	—	1.5	0.04
佐賀	2	令和元年6月16日	46	ND	—	2.3	0.20
鹿児島	2	令和元年6月17日	1	ND	—	1.5	0.22
鹿児島	2	令和元年6月17日	20	ND	—	1.4	0.04
鹿児島	2	令和元年6月17日	50	ND	—	1.5	0.03
鹿児島	2	令和元年6月17日	71	ND	—	1.7	0.22

¹⁾ND は検出下限値以下を示す。

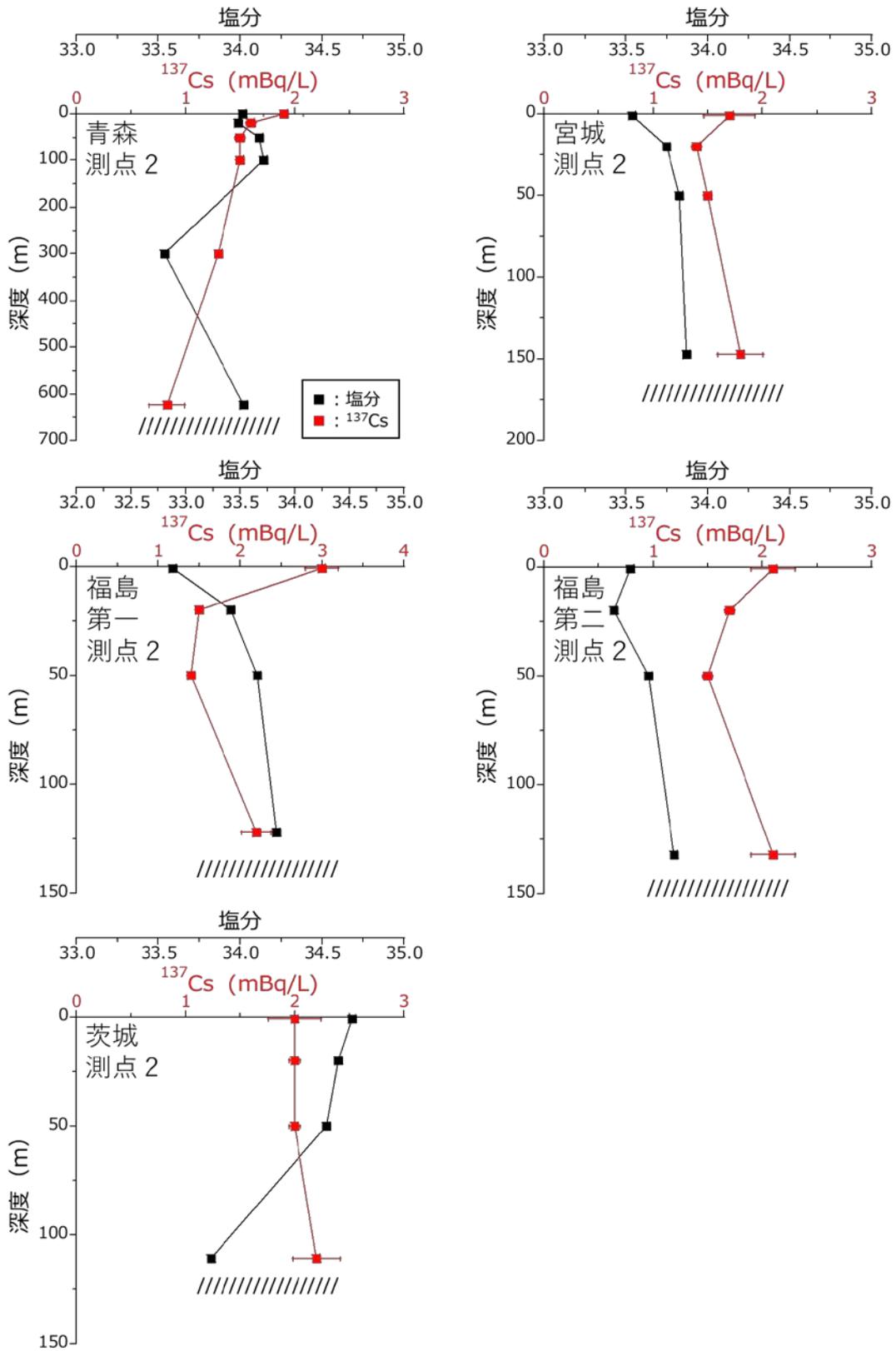


図 I -2-2-3-25(1) 東日本海域における ^{137}Cs の放射能濃度及び塩分の鉛直分布

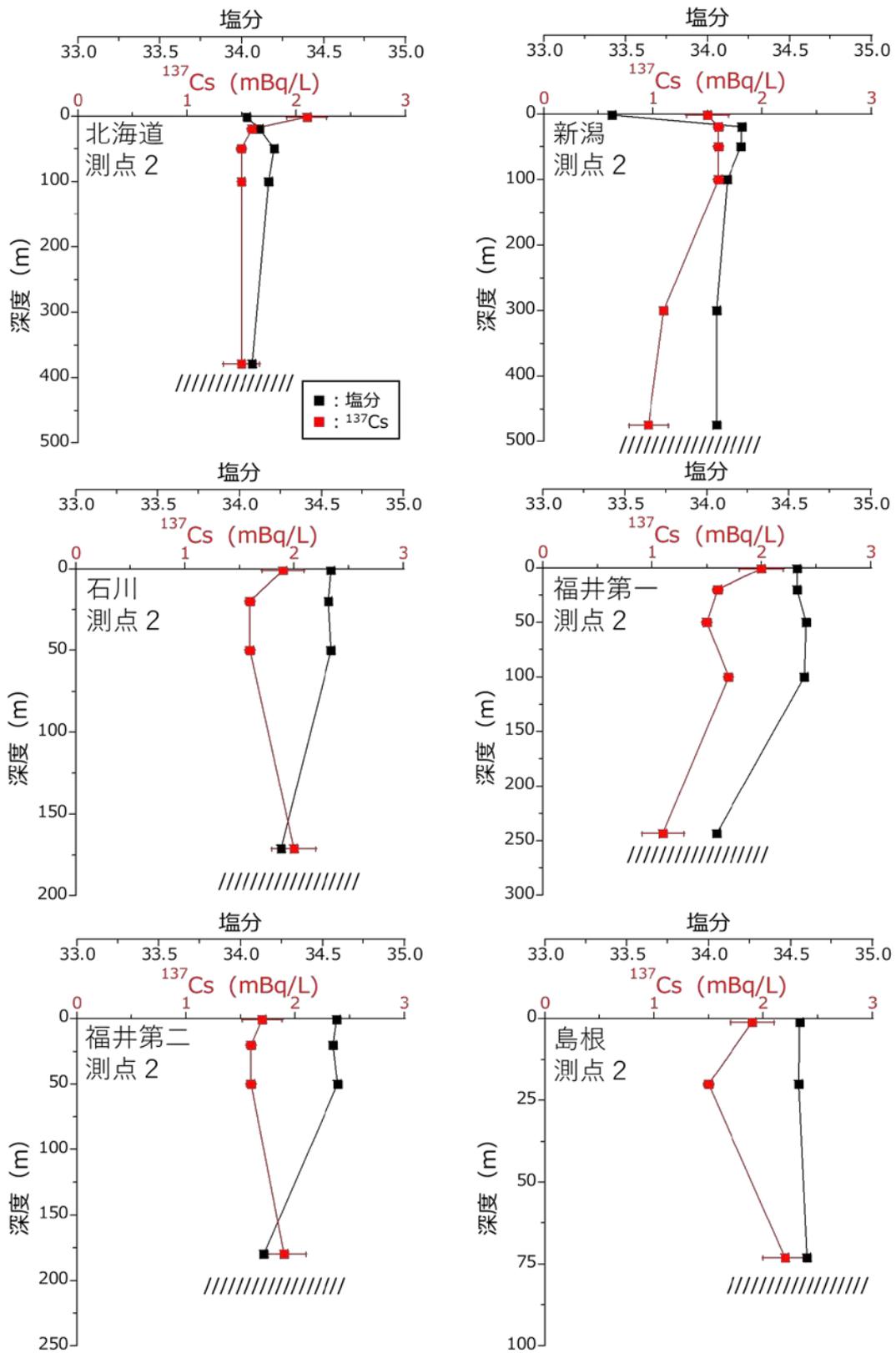


図 I-2-2-3-25(2) 日本海海域における ^{137}Cs の放射能濃度及び塩分の鉛直分布

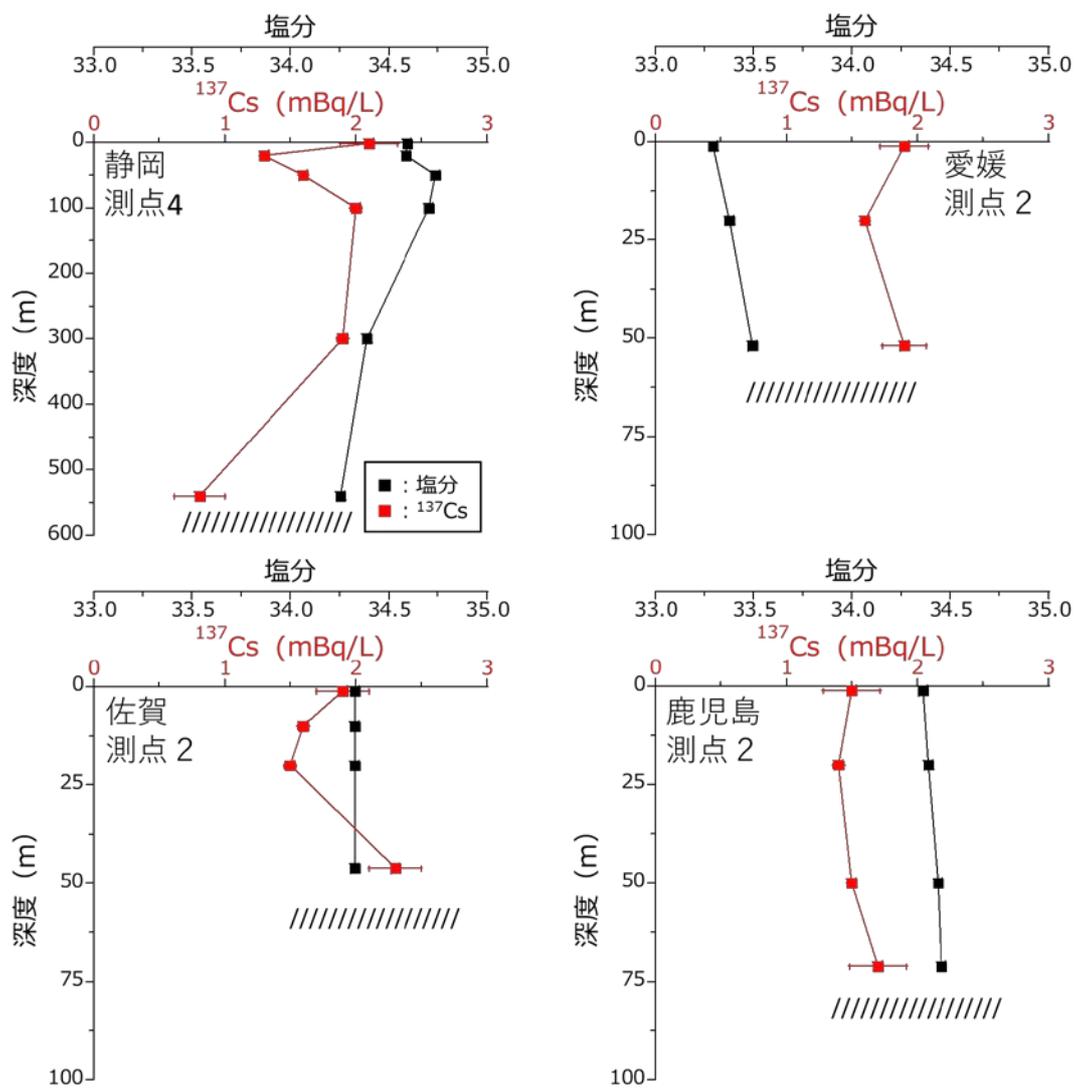


図 I-2-2-3-25(3) 西日本海域における ^{137}Cs の放射能濃度及び塩分の鉛直分布

④ 動物プランクトン中の放射性セシウムの放射能濃度とその変動要因に関わる詳細調査

海水中に含まれる放射性セシウムについては、過去の大気圏核爆発実験に加え、平成 23 年 3 月の東電福島第一原発事故により環境に付加されたものと考えられるが、平成 31（令和元）年度までの本事業で得てきた経年変化を俯瞰すれば、その放射能濃度は徐々に減少しており、近年では東電福島第一原発事故前の一定の値に近づきつつあることが分かってきた。これ以後、海産生物に含まれる放射性セシウムの放射能濃度の変動要因としては、食物連鎖における移行や濃縮・取り込みの過程に起因する放射能濃度の変化が主たる要因のひとつになると考えられる²⁴⁾。

なかでも動物プランクトンは海洋食物網の低次に位置しており、高次への放射性セシウムの移行に関して重要な役割を果たすと考えられる。加えて、海洋環境全体の放射性セシウムの現況把握を行うためには、これらの放射性セシウムの放射能濃度並びに群集組成との関係が重要となる。

そこで、海洋放射能調査で対象とした発電所海域のうち、基礎生産量（光合成や化学合成によって、栄養塩等の無機物から有機物が生産されること（植物学では光合成の速度として解釈）が比較的高いと考えられる北海道、福島第二及び茨城海域における動物プランクトンに含まれる放射性セシウムの放射能濃度及び群集組成について解析を行った。

また、動物プランクトンに含まれる放射性セシウムの放射能濃度の変遷及び現況を把握するため、東電福島第一原発事故前と平成 24 年度から平成 31（令和元）年度の調査で得られた結果についての比較を併せて行った。

（方法）

平成 31（令和元）年度調査において、動物プランクトン試料は発電所海域の 3 海域（北海道、福島第二及び茨城）の測点 2 で採取した。採取方法は各測点の深度約 50～90m において、0.5 ミリメートルのメッシュを持つプランクトンネット（口径：直径 1.6m）を用いて、数十分間の水平曳きを 2～3 回行った。得られたプランクトン試料のうち、放射能分析用として凍結保存し、残りは群集組成分析のためにホルマリン固定^{※1}して冷暗所にて保存した。調査の概要を表 I-2-2-3-13 に示す。

※1 ホルマリン（formalin）に含まれるホルムアルデヒド（formaldehyde; HCHO）が、組織の細胞内外に浸透し、分子中のアルデヒド基（aldehyde group; -CHO）が主に組織中のタンパク質のアミノ基に結合し、さらに架橋することで、蛋白質の立体構造を損なわせ、それ以上のたんぱく質の変性、酵素活性、輸送、分泌などの様々な生物活性を停止させる作用を持つので、生体や生物組織標本作製する際の防腐剤あるいは固定処理に用いられるもの。

表 I-2-2-3-13 動物プランクトン調査の概要

試料採取時期	海域_測点	採集層	測定項目	海水ろ過量
令和元年 5~6 月	北海道 (測点 2) 福島第二 (測点 2) 茨城 (測点 2)	約 50~90m	群集組成	15988~ 51374m ³
			¹³⁷ Cs	

放射能分析用試料は解凍後、生重量を秤量し、105℃に設定した乾燥機内で恒量になるまで乾燥し、その重量を測定した。その後、乾燥試料を粉碎し、プラスチック容器に充填し、充填重量の秤量及び試料充填高さを計測した。放射能測定は放射能測定法シリーズに記載された方法に従い、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り放射性核種を定量（測定時間約 22 万秒）した。動物プランクトン試料に含まれる安定 Cs (¹³³Cs) については、放射能分析用試料の一部を用いて誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) により定量した。

(結果)

<平成 31 (令和元) 年度発電所海域で採取した動物プランクトン試料の ¹³⁷Cs の放射能濃度>

発電所海域で採取した動物プランクトン試料に含まれる ¹³⁷Cs の放射能濃度の結果を図 I-2-2-3-26 及び表 I-2-2-3-14 に示す。平成 31 (令和元) 年度に採取した動物プランクトン試料に含まれる ¹³⁷Cs の放射能濃度は、0.55~1.7Bq/kg-乾物の範囲にあり、このうち福島第二海域 (測点 2) において最大値 1.7Bq/kg-乾物が観測された。また、全測点の平均値は、1.0Bq/kg-乾物であった。海水 1m³ 当たりの動物プランクトン試料に含まれる ¹³⁷Cs の放射能濃度 (μBq/m³) を換算すると、北海道海域 (測点 2) で他の測点と比較して最も高い値を示した。また、¹³⁴Cs の放射能濃度はすべての測点で検出下限値以下であった。

平成 31 (令和元) 年度に採取した動物プランクトン試料の群集別個体数組成を表 I-2-2-3-15 に示す。いずれの測点においても顎脚綱^{※1}が高い割合を占め (76.7~82.3%、全平均で 79.6%)、次いで、軟甲綱^{※2}が比較的多く見られた (8.1~11.5%、全平均で 9.7%)。平

-
- ※1 顎脚綱 (がっきやくこう、Class Maxillopoda) は、甲殻類に含まれる動物群の名で、カイアシ類、ケンミジンコ、フジツボあるいはカメノテなどがこれに属する。
 ※2 軟甲綱 (なんこうこう、Class Malacostraca) は、甲殻亜門の中で最大の綱である。例えばカニ、ロブスター、小エビなど十脚目 (エビ目) や口脚目 (シャコ目)、オキアミ目などの目を含む。
 ※3 ヤムシ綱 (やむしこう、Class Sagittoidea) は、毛顎 (もうがく) 動物の総称。体は矢のような形をしており、動きが素早いことからヤムシ (矢虫) と呼ばれる。

成 31（令和元）年度は動物プランクトンの ^{137}Cs 濃度と群集別個体数組成との間に関連性は見られなかった。

平成 31（令和元）年度に採取した動物プランクトン試料の群集別乾燥重量組成を表 I-2-2-3-16 に示す。いずれの測点においても顎脚綱が高い割合を占めた（39.8～84.8%、全平均で 59.8%）。また、北海道海域（測点 2）、福島第二海域（測点 2）でヤムシ虫綱^{※3}が高い割合を占めた（それぞれ 30.9%、38.9%）。北海道海域（測点 2）では軟甲綱が 19.9%と比較的多く見られた。平成 30 年度から平成 31（令和元）年度の動物プランクトンの ^{137}Cs 濃度と群集別乾燥重量組成の間に関連性は見られなかった。

<平成 31（令和元）年度と平成 30 年度に採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の比較>

平成 30 年度に採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は、

北海道海域（測点 2）：0.23Bq/kg-乾物

福島第二海域（測点 2）：検出下限値以下

茨城海域（測点 2）：0.62Bq/kg-乾物

であった。

各測点で平成 30 年度及び平成 31（令和元）年度に採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度を比較すると、平成 31（令和元）年度は、計数誤差を考慮すると全測点で平成 30 年度と同程度の放射能濃度であった。

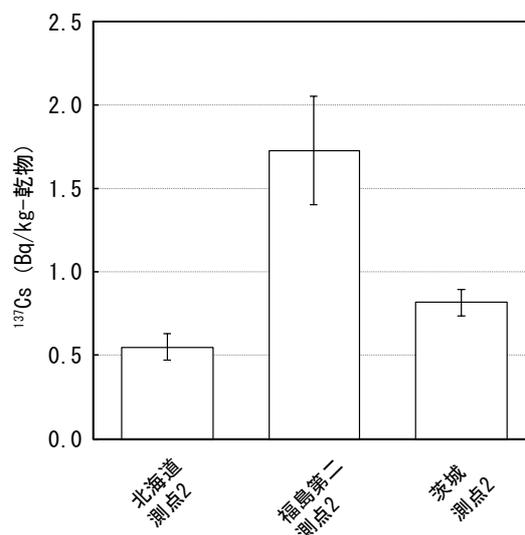


図 I-2-2-3-26 平成 31（令和元）年度に各海域の測点で採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度。エラーバーは計数誤差を表す。

表 I-2-2-3-14 動物プランクトン試料の概要、動物プランクトン試料に含まれる放射性セシウム及び同時期に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

海域と測点	北海道 測点 2	福島第二 測点 2	茨城 測点 2
採取日	令和元年 6月8日	令和元年 5月13日	令和元年 5月11日
採取深度 (m)	51-57	55-77	54-88
105℃乾燥重量 (g)	142.8	19.9	98.3
水分含量 (%)	93.01	90.58	88.19
現存量 (mg-乾物/m ³)	9.0	0.7	1.9
動物プランクトンに含まれる ¹³⁴ Csの放射能濃度 (Bq/kg-乾物)	ND ¹⁾	ND	ND
動物プランクトンに含まれる ¹³⁷ Csの放射能濃度 (Bq/kg-乾物)	0.55±0.08	1.7±0.3	0.82±0.08
海水 1m ³ 当たりの動物プランクトンに含まれる ¹³⁷ Csの放射能濃度 (μBq/m ³)	5.0±0.7	1.2±0.2	1.6±0.2
海水の ¹³⁴ Cs放射能濃度 (mBq/L)	ND	ND	ND
海水の ¹³⁷ Cs放射能濃度 (mBq/L)	1.5	1.5	2.0
見かけの ¹³⁷ Csの濃縮係数	26	110	48

¹⁾NDは検出下限値以下を示す。

表 I -2-2-3-15 平成 31 (令和元) 年度に採取した動物プランクトン試料の
 個体数密度及び群集別個体数組成結果一覧

海域と測点	北海道 測点 2	福島第二 測点 2	茨城 測点 2
動物プランクトン個 体数密度 (個体数/m ³)	20.5	13.4	247.5
ヒドロ虫綱 (%)	0.0	0.0	1.0
腹足綱 (%)	0.0	0.4	4.2
鰓脚綱 (%)	0.0	0.0	0.0
顎脚綱 (%)	82.3	79.8	76.7
軟甲綱 (%)	8.1	11.5	9.7
ヤムシ綱 (%)	3.2	8.4	3.1
タリア綱 (%)	0.0	0.0	1.0
尾虫綱 (%)	6.5	0.0	1.0
硬骨魚綱 (%)	0.0	0.0	3.1

表 I -2-2-3-16 平成 31 (令和元) 年度に採取した動物プランクトン試料の群集別乾
 燥重量組成結果一覧

分類群	区分	北海道 測点 2	福島第二 測点 2	茨城 測点 2
ヒドロ虫綱 (%)	乾重量	8.4	— ¹⁾	0.04
鰓脚綱 (%)	乾重量	—	計測不能 ²⁾	計測不能
顎脚綱 (%)	乾重量	39.8	54.9	84.8
軟甲綱 (%)	乾重量	19.9	6.0	4.0
ヤムシ綱 (%)	乾重量	30.9	38.9	3.9
タリア綱 (%)	乾重量	—	—	0.2
尾虫綱 (%)	乾重量	0.8	計測不能	0.1
硬骨魚綱 (%)	乾重量	0.1	0.1	2.8
その他分類群	乾重量	0.1	0.1	4.3

¹⁾ 「—」は試料中に観察されなかったことを示す。

²⁾ 負の値になるなど対象の重量が非常に小さく、誤差が生じたと考えられるものは計測不能とした。

<平成 31（令和元）年度と東電福島第一原発事故前に採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の比較>

東電福島第一原発事故前に岩手県及び青森県沖で採取した動物プランクトンに含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は 0.09~0.4Bq/kg-乾物の範囲であり²⁵⁾、平成 31（令和元）年度に採取したものについては、いずれの測点においても、事故前の最大値（0.4Bq/kg-乾物）よりわずかに高い値が観測された。濃縮係数は対象とする放射性核種の海水中の放射能濃度が一定の環境で、その核種の生物への取り込みと排泄（排出）が均衡していること（いわゆる平衡状態に達していること）を前提とする²⁶⁾。

平成 31（令和元）年度の調査においては、海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は事故前のレベルに戻りつつあることが分かったが、未だ一定に達しているわけではないため、ここでは、Kaeriyama *et al.*²⁷⁾ の定義に従い、「見かけの濃縮係数」を用いた。動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度と動物プランクトン試料を採取した深度周辺で同時期に採取した海水に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度との比を計算し、動物プランクトン試料の「見かけの ^{137}Cs 濃縮係数」として求めたものを表 I-2-2-3-14 に示す。動物プランクトン試料の見かけの濃縮係数は、26~110（平均 61）であり、事故前の濃縮係数（6.3~14.2、平均 10.2）²⁵⁾ より高かった。海水に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度は 1.5~2.0mBq/L の範囲であり、事故前 5 年間の濃度範囲（1.1~2.4mBq/L）まで下がってきている。そのため、動物プランクトンに比較して ^{137}Cs の放射能濃度の高い粒子が混入しない限り、動物プランクトン試料の ^{137}Cs 放射能濃度も今後は事故前の調査で得られていた範囲に徐々に近づいていくと考えられる。

<動物プランクトン試料の ^{137}Cs の放射能濃度の時系列変化（平成 24 年度~平成 31（令和元）年度）>

平成 24 年度から平成 27 年度まで実施した調査のうち、東電福島第一原発周辺の海域で採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の時系列変化と平成 28 年度より実施し、発電所海域において採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度及び $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の時系列変化を合わせて図 I-2-2-3-27 に示す。

この期間中に採取した動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度の最大値（184Bq/kg-乾物）は、東電福島第一原発事故から 432 日後（平成 24 年 5 月 16 日）の測点 J1 で見られた。その後は、事故から 1,929 日後（平成 28 年 6 月 21 日）まで 10Bq/kg-乾物を超える比較的高い濃度が採取時期や測点によらず散発的に見られる傾向にあった。しかし、事故から 2,247~2,276 日後（平成 29 年 5 月 5 日から 6 月 3 日）に ^{137}Cs の放射能濃度が 1Bq/kg-乾物を超えたのは、福島第二海域（測点 2）のみであり、2,642~2,659 日後（平成 30 年 6 月 4 日から 6 月 21 日）では宮城海域（測点 2）のみであり、2,983~3,011 日後（令和元年 5 月 11 日から 6 月 8 日）では福島第二海域（測点 2）のみであった。海水 1m³ 当たりの動物プランクトンに含まれる ^{137}Cs も同様の減少傾向が見られた。動物プラン

クトン試料から見出された放射性セシウムの $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は、減衰曲線（東電福島第一原発事故当初の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を 1 とした場合の理論曲線）に概ね従って減衰しており、動物プランクトンに含まれる放射性セシウムのほとんどが東電福島第一原発事故に由来することを示している。

<動物プランクトン試料と海水試料における $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 原子数比の比較>

表 I-2-2-3-17 に動物プランクトン試料に含まれる ^{133}Cs 濃度の測定結果を示す。また、図 I-2-2-3-27 に東電福島第一原発周辺海域及び発電所海域で採集した動物プランクトン試料に含まれる安定セシウム (^{133}Cs) と ^{137}Cs の原子数比 ($^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 比) 及び動物プランクトン試料を採取した深度周辺で採取した海水試料に含まれる $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 比について、その採取時期毎の平均を示す。

^{137}Cs はセシウムの放射性同位体の一つであり、海水から動物プランクトン体内への取り込みと排出の過程においては安定同位体である ^{133}Cs と化学的に同様に振る舞い、同位体分別は無視できるほど小さいと考えられる。平成 26 年 11 月と平成 27 年 1 月～2 月に動物プランクトンを採取した深度周辺で採取した海水に含まれるセシウム濃度の平均値とその標準偏差は、 $316 \pm 7 \text{ ng/L}$ であり、東電福島第一原発事故前の北太平洋の海水試料に含まれるセシウム濃度 (306 ng/L)²⁸⁾ と比較すると事故の前後で変化が無いことが確かめられた。そのため、海水試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度が動物プランクトンの世代時間を超える十分に長い間一定であれば、 $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 原子数比は海水と動物プランクトンとの間で一致することになる。事故から起算して 432 日後から 1929 日後までの期間に採取した海水試料と動物プランクトン試料から得られた $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 比は、ほとんどの試料において一致しなかった。すなわち、平成 28 年 6 月までは後者の比は前者のものよりも 1 桁以上高かった。しかし、事故から起算して 2247 日後以降（平成 29 年 5 月 5 日以降）には、1 桁以上の差異はほとんど見られなくなった。平成 31（令和元）年度の動物プランクトン試料の $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 比は海水との差異は小さくなっているものの、海水試料に比べて未だに数倍高かった。そのため、動物プランクトン試料中には Ikenoue *et al.*¹⁷⁾ において報告されたような放射性粒子が混入していると考えられる。

表 I-2-2-3-17 動物プランクトンに含まれる ^{133}Cs 濃度 (ng/g-乾物)

令和元年 5～6 月	
北海道測点 2	49 ± 0.6
福島第二測点 2	77 ± 2
茨城測点 2	38 ± 0.2

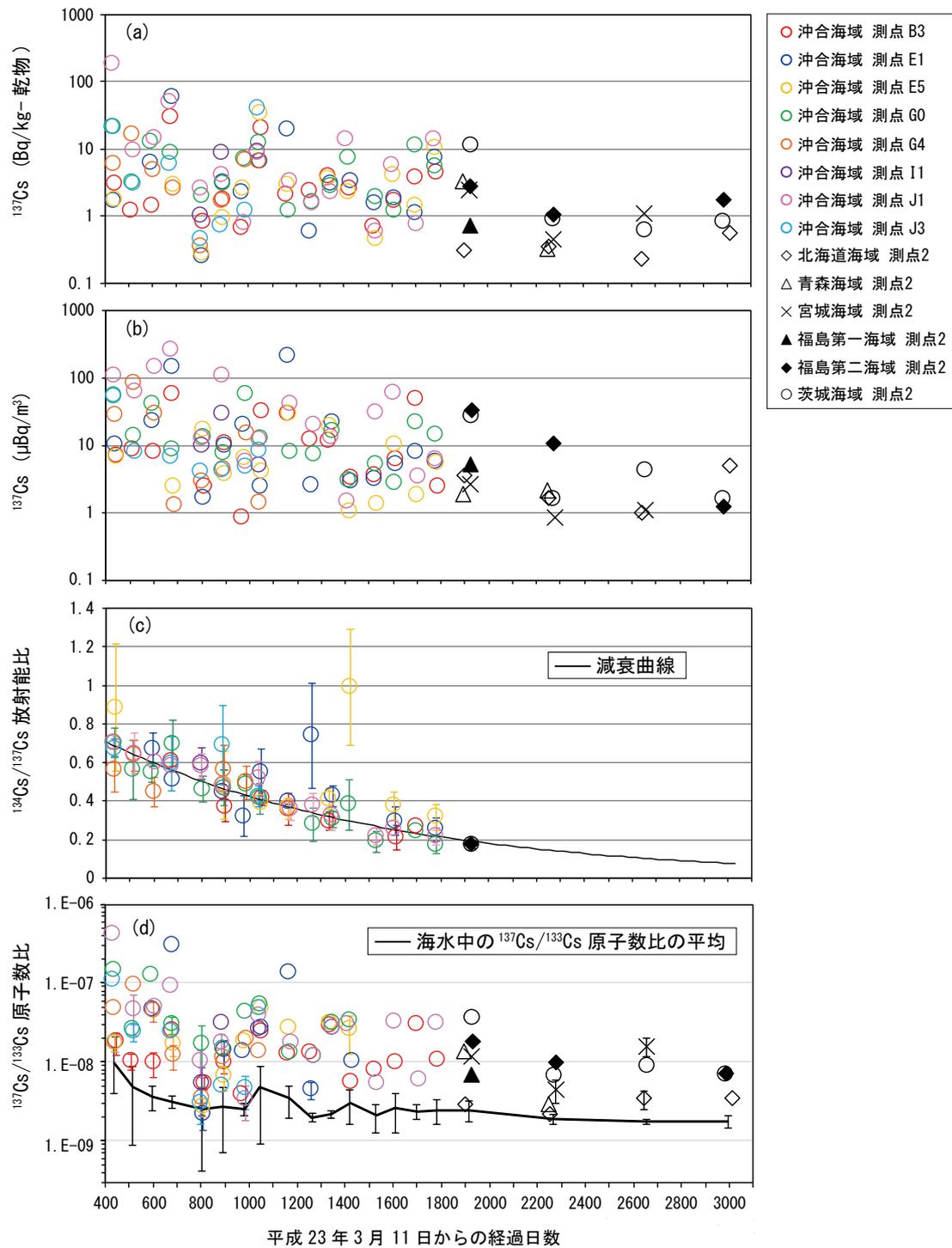


図 I -2-2-3-27 東電福島第一原発事故後の動物プランクトンの放射性セシウム濃度と $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 原子数比の時系列変化。(a) 動物プランクトン試料に含まれる ^{137}Cs の放射能濃度(Bq/kg-乾物)、(b) 海水 1m^3 当たりの動物プランクトンの ^{137}Cs の放射能濃度 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)、(c) 動物プランクトン試料の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比、(d) 動物プランクトン試料の $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 原子数比

⑤ 発電所周辺海域における放射性セシウムの存在量

海洋放射能調査海域周辺における放射性セシウムの詳細調査の結果から、海底土試料及び海水試料に含まれる放射性セシウムの放射能濃度は、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、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）によって海域ごとの比較や評価を行う必要がある。そこで、全国の原子力発電所等周辺海域（全 15 海域）で採取した海底土試料及び海水試料を用い、 ^{137}Cs の鉛直分布から ^{137}Cs のインベントリを算出し、直近 3 年（平成 28 年から 30 年）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。

（海底土試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリ）

各海域において柱状採泥を行った測点での ^{137}Cs のインベントリの経年変化を図 I-2-2-3-28 に示す。 ^{137}Cs のインベントリは $0.012\sim 5.4\text{ kBq/m}^2$ の範囲にあり、直近 3 年の調査結果と同水準であった。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 ^{137}Cs のインベントリの有意性を検討したところ、海域間に有意差が認められ、海底土試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリには海域間に差があることが分かった。とりわけ、未だに東電福島第一原発事故由来の放射性セシウム（ ^{134}Cs ）が検出されている福島第一海域、福島第二海域及び茨城海域を含む東日本海域では ^{134}Cs が検出下限値以下であった西日本海域や日本海海域に比べて 1 桁以上の違いが見られた。

（海水試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリ）

海水試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリは採取場所の水深によって大きく異なる。そこで、表層から 50m 層までの ^{137}Cs のインベントリを算出した（図 I-2-2-3-29）。表層から 50m 層までの ^{137}Cs のインベントリは $0.073\sim 0.10\text{ kBq/m}^2$ の範囲にあり、直近 3 年の調査結果に比べて減少した。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 $0.080\pm 0.015\text{ kBq/m}^2$ （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、同事故前の値と同程度の海域もあるものの、多くの海域ではこの値をわずかに上回っていた。しかしながら、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性を検討したところ、海域間に有意差は認められなかった。

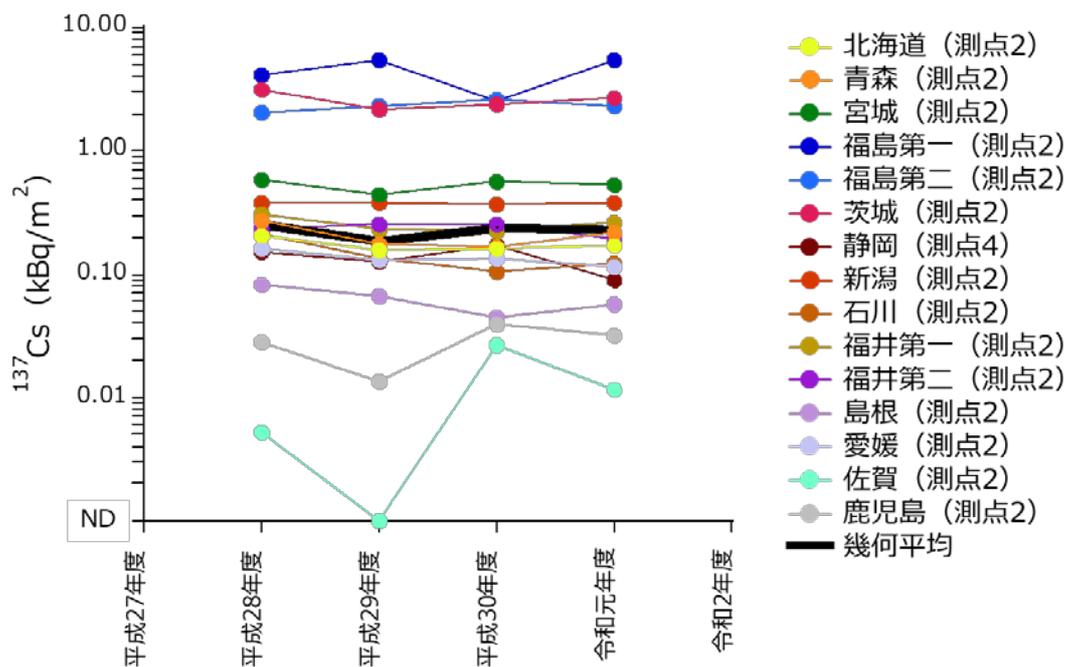


図 I -2-2-3-28 発電所海域（全 15 海域）で採取した海底土試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリの経年変化

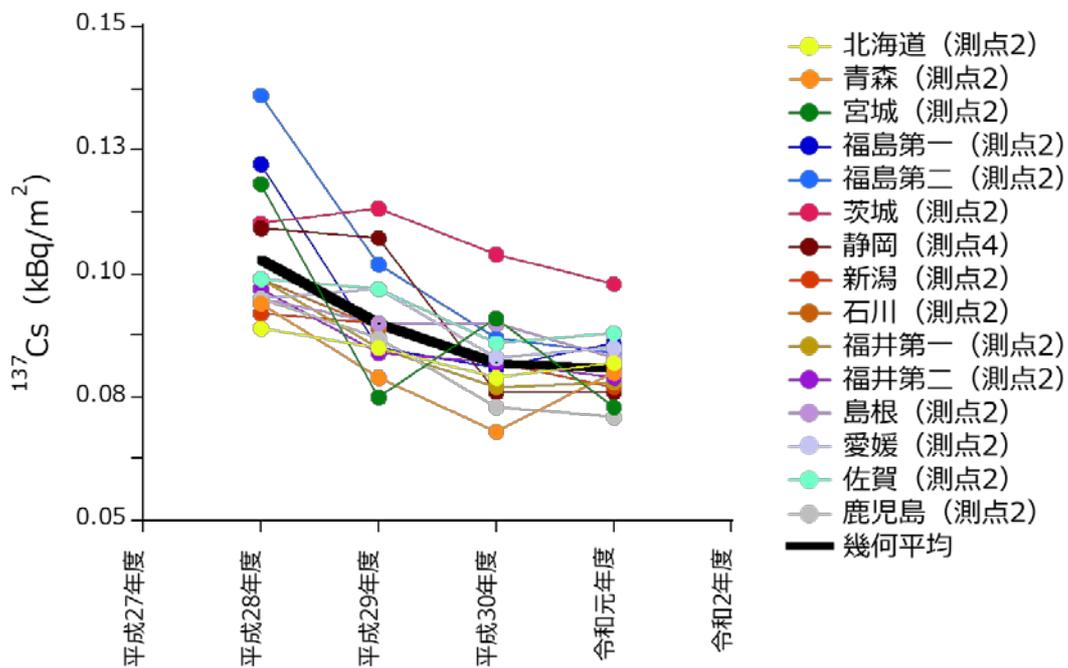


図 I -2-2-3-29 発電所海域(全 15 海域)で採取した表層から 50m 層までの海水試料に含まれる ^{137}Cs のインベントリの経年変化

⑥ 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、放射性セシウムの鉛直分布や放射性粒子による影響、動物プランクトン試料の放射性セシウムの放射能濃度の変遷、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、さらに海底土及び海水の放射性セシウムの存在量などについて調査を行った。

平成 31（令和元）年度に得られた海底土に関わる結果から、東電福島第一原発事故による放射性セシウムの影響を受けたと考えられる海域では、同事故直後に漏洩した放射性セシウムの時空間的な変化に伴う海水から海底土に移行する機構に加え、堆積後の動態や放射性粒子の存在が影響していると考えられる。動物プランクトンに含まれる放射性セシウムの放射能濃度は、同事故から数年の間については変動が大きかった。しかしながら、平成 31（令和元）年度の調査では、放射性セシウムの放射能濃度が同事故前と同水準となった。海水中について、平成 24 年度から平成 28 年度にかけて、日本海海域及び西日本海域で微増傾向にあったが、平成 31（令和元）年度に実施した調査結果（長時間測定）から、同事故由来の放射性セシウムの影響による増加傾向は見られなかった。これは ^{137}Cs の存在量について平成 30 年度に得られた結果との比較からも明らかである。

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 (K_d) in coastal regions, Japan. *Sci. Total Environ.*, 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. *Mar. Chem.*, 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. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 38, 219-233.
- 4) 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. *J Radioanal. Nucl. Chem.*, 323, 567-580.
- 5) 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.

- 6) 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. *J. Environ. Radioact.*, 138, 264-275.
- 7) Otsuka, S. and Kato, Y. (2014). Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 16, 978-990.
- 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. *Mar. Chem.*, 176, 51-63.
- 9) Otsuka, 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. *Environmen. Monitor. Assess.*, 185, 5419-5433.
- 10) Ikenoue, T., Ishii, N., Kusakabe, M. and Takata, H. (2018). Contribution of ¹³⁷Cs-enriched particles to radiocesium concentrations in seafloor sediment: Reconnaissance experiment. *PLoS ONE*, 13, e0204289.
- 11) Inoue, M., Yoneoka, S., Ochiai, S., Morokado, T., Uemura, H. and Nagao, S. (2018). Low levels of ¹³⁴Cs in suspended solids in rivers discharging into the Sea of Japan. *J Radioanal. Nucl. Chem.*, 316, 1233-1241.
- 12) Inoue, M., Uemura, H., Kofuji, H. Fujimoto, K., Takata, H., Shirotani, Y., Kudo, N. and Nagao., S. (2017). Spatial variation in low-level ¹³⁴Cs in the coastal sediments off central Honshu in the Sea of Japan: implications for delivery, migration, and redistribution patterns. *J. Oceanogr.*, 73, 571-584.
- 13) Thornton, B., Ohnishi, S., Ura, T., Odano, N., Sasaki, S., Fujita, T., Watanabe, T., Nakata, K., Ono, T. and Ambe, D. (2013). Distribution of local ¹³⁷Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Mar. Poll. Bull.*, 74, 344-350.
- 14) Kusakabe, M., Inatomi, N., Takata, H. and Ikenoue, T. (2017). Decline in radiocesium in seafloor sediments off Fukushima and nearby prefectures. *J. Oceanogr.*, 73, 529-545.
- 15) Adachi, K., Kajino, M., Zaizen, Y. and Igarashi, Y. (2013). Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident. *Sci. Rep.*, 3, 2554.
- 16) Itoh, S., Eguchi, T., Kato, N. and Takahashi, S. (2014). Radioactive particles in soil, plant, and dust samples after the Fukushima nuclear accident. *Soil Sci.*

- Plant Nutr.*, 60, 540-550.
- 17) Ikenoue, T., Takata, H., Kusakabe, M., Kudo, N., Hasegawa, K. and Ishimaru, T. (2017). Temporal variation of cesium isotope concentrations and atom ratios in zooplankton in the Pacific off the east coast of Japan. *Sci. Rep.*, 7, 39874.
 - 18) Furuki, G., Imoto, J., Ochiai, A., Yamasaki, S., Nanba, K., Ohnuki, T., Grambow, B., Ewing, R.C. and Utsunomiya, S. (2017). Caesium-rich micro-particles: A window into the meltdown events at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Sci. Rep.*, 7, 42731.
 - 19) 西原健司・岩元大樹・須山賢也 (2012). 福島第一原子力発電所の燃料組成評価. JAEA-Data/Code 2012-018. 日本原子力研究開発機構, 茨城.
 - 20) Kogure, T., Yamaguchi, N., Segawa, H., Mukai, H., Motai, S., Akiyama-Hasegawa, K., Mitome, M., Hara, T. and Yaita, T. (2016). Constituent elements and their distribution in the radioactive Cs-bearing silicate glass microparticles released from Fukushima nuclear plant. *Microsc.*, 65, 451-459.
 - 21) 小野貴大・飯澤勇信・阿部善也・中井泉・寺田靖子・佐藤志彦・末木啓介・足立光司・五十嵐康人 (2017). 福島第一原子力発電所事故により 1 号機から放出された放射性粒子の放射光マイクロビーム X 線分析を用いる化学性状の解明. *分析化学*, 66, 251-26.
 - 22) Mukai, H., Hatta, T., Kitazawa, H., Yamada, H., Yaita, T. and Kogure, T. (2014). Speciation of radioactive soil particles in the Fukushima contaminated area by IP autoradiography and microanalyses. *Environ. Sci. Technol.* 48, 13053-13059.
 - 23) 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. *Environ. Sci. Technol.* 52, 2629-2637.
 - 24) 高田兵衛・帰山秀樹・喜多村稔・横田瑞郎・池上隆仁・日下部正志 (2015). 海洋環境における動物プランクトン中の東電福島第一原発由来放射性 Cs の動態. *海洋と生物*, 37, 310-318.
 - 25) Kaeriyama, H., Watabe, T., and Kusakabe, M. (2008). ^{137}Cs concentration in zooplankton and its relation to taxonomic composition in the western North Pacific Ocean. *J. Environ. Radioact.*, 99, 1838-1845.
 - 26) IAEA. (2004). IAEA technical report series No 422. International Atomic Energy Agency, Vienna.
 - 27) Kaeriyama, H., Fujimoto, K., Ambe, D., Shigenobu, Y., Ono, T., Tadokoro, K., Okazaki, Y., Kakehi, S., Ito, S., Narimatsu, Y., Nakata, K., Morita, T. and Watanabe, T. (2015). Fukushima-derived radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs in zooplankton and seawater samples collected off the Joban-Sanriku coast, in Sendai Bay, and in

the Oyashio region. *Fish. Sci.*, 81, 139-153.

- 28) Spencer, D. W., Robertson, D. E., Turekian, K. K. and Folsom, T. R. (1970). Trace element calibrations and profiles at the GEOSECS test station in the northeast Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 75, 7688-7696.

(4) 原子力発電所等周辺海域における海水及び海産生物のトリチウム濃度調査

① はじめに

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（ ^3HHO （「HTO」と表記する場合もある））の形で存在している。一般に環境におけるトリチウムの放射能濃度は河川水より海水の方が低く、沿岸から離れる程に、また深度が増すごとに低くなる傾向がある。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（ ^3HHO ）と同じ挙動をするため、海産生物中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中に分布する。

東電福島第一原発事故後、平成24年度からの解析調査によって、福島第一及び福島第二海域で漁獲された海産生物に含まれるトリチウムの放射能濃度に関する調査を行ってきたが、事故の影響を明確に示す調査結果は出ていない。核燃料（原子燃料）サイクル施設及び東電福島第一原発周辺海域においては海水に含まれるトリチウムの放射能濃度についてモニタリングを実施してきた。「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」のうち、発電所海域では海水及び海産生物試料に含まれるトリチウムについては、 ^{90}Sr や ^{137}Cs といった人工放射性核種と異なり、調査すべき放射性核種に挙げられていない。そのため、我が国の海洋環境におけるトリチウムの放射能濃度の比較等をするためのバックグラウンドの把握ができていないなど、同一の機関が同時期に同一の方法を適用した広範囲での影響調査並びに複数海域に及ぶような影響評価ができないのが現状である。

平成31（令和元）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、海水試料については、各発電所海域で採取した表層の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、併せて海産生物については、核燃料（原子燃料）サイクル施設沖合及び東電福島第一原発の影響をモニタリングすることを想定し、核燃料（原子燃料）サイクル施設沖合に加え、青森、宮城、福島第一・第二及び茨城の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。

さらに、新たに真空凍結乾燥機を導入し平成30年度に採取した海産生物の一部について組織自由水型トリチウム（TFWT；後述参照）の測定を行った。今回導入した真空凍結乾燥機によってTFWTの分析が感度よく行われたかを確認するため、平成30年度の同調査で分析された結果（外部分析機関）と相互比較（いわゆるクロスチェック）を行う。

② 方法

（試料）

令和元年5月11日から6月21日にかけて発電所海域の15海域各1測点及び対照海域

の1海域3測点において表層海水を合計18試料採取した。採取後、褐色ポリ容器に2Lを分取し、酸の添加は行わず、分析を行うまでの期間冷暗所に保存した。

核燃料（原子燃料）サイクル施設沖合、青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城海域の計6海域において、平成31年（令和元）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種ずつを選び、計12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。

各海産生物試料から可食筋肉部位を分け取った後、よく混合し生鮮重量で約1kg程度を分取・凍結保存して、トリチウム分析用に供した。残りの試料は「海洋放射能調査」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、一部の試料は ^{137}Cs 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。

クロスチェックに供した試料は、核燃海域と青森海域で漁獲された2魚種について冷凍残試料（約2kg）を使用した。

（分析）

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を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トリチウムの定量を行った。

海産生物のトリチウムの放射能濃度に関する分析は、組織自由水型トリチウム（以下、「TFWT」という^{※1}。）と、有機物中の有機結合型トリチウム（以下、「OBT」という^{※2}。）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に準じた方法により行われる。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国際標準法^{2)、3)、4)}に準じた方法で行われている。従って本調査では、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。国際標準法では、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」を洗浄除去できるので、生物代謝の同化・異化作用によって有機分子中に取り込まれ、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

※1 組織自由水型トリチウムはTFWT (Tissue Free Water Tritium) と称される。

※2 有機結合型トリチウムはOBT (Organically Bound Tritium) と称される。

交換型 OBT」だけを分析することができる。

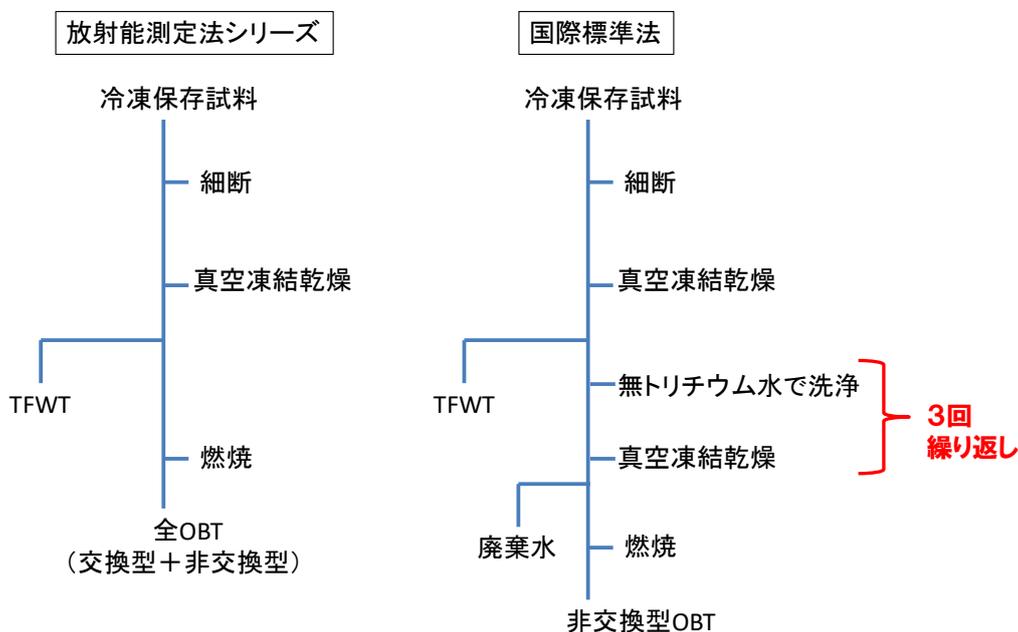


図 I-2-2-4-1 放射能測定法シリーズ及び国際標準法による海産生物に含まれる TFWT 及び OBT の分析フロー図

③ 結果

(海水中トリチウム濃度)

表 I-2-2-4-1 に分析結果を示す。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（青森、宮城、福島第一、福島第二、茨城）と西日本海域（静岡、愛媛、鹿児島、佐賀）、日本海海域（島根、福井第一、福井第二、石川、新潟、北海道）及び対照海域（襟裳沖）に分けて比較する。

平成 31（令和元）年度の調査で得られたトリチウムの放射能濃度は、

- ・ 東日本海域：0.03～0.10Bq/L
- ・ 西日本海域：0.05～0.13Bq/L
- ・ 日本海海域：0.03～0.10Bq/L
- ・ 対照海域：0.10～0.11Bq/L

であった。各海域間で比較しても有意な違いはみられず、海域の違いによる海水への事故の影響は確認できなかった。なお、平成 30 年度の発電所および対照海域と比較してもトリチウムの放射能濃度は同水準であった。

図 I-2-2-4-2 に平成 3 年度から平成 30 年度に核燃海域で採取した表層水に含まれるト

リチウムの放射能濃度と平成 31（令和元）年度に実施した調査結果の比較を示す。核燃海域で採取した表層水に含まれるトリチウムの放射能濃度は事故後 5 年間で 0.05～0.18Bq/L、事故前 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 0.06～0.21Bq/L であり、平成 31（令和元）年度に実施した調査結果はその範囲内であった。事故からおよそ 9 年経過した現在では海水試料に含まれるトリチウムの放射能濃度への影響は確認できず、バックグラウンドレベルであることが確認できた。

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 (m)	^3H (Bq/L)	^3H (誤差)	検出下限値 (Bq/L)
北海道	2	令和元年 6 月 8 日	1	0.06	0.02	0.05
青森	2	令和元年 6 月 18 日	1	0.07	0.02	0.04
宮城	2	令和元年 5 月 15 日	1	0.07	0.01	0.05
福島第一	2	令和元年 5 月 14 日	1	0.10	0.02	0.05
福島第二	2	令和元年 5 月 13 日	1	0.08	0.02	0.06
茨城	2	令和元年 5 月 11 日	1	0.03	0.02	0.04
静岡	4	令和元年 6 月 21 日	1	0.05	0.02	0.05
新潟	2	令和元年 5 月 31 日	1	0.10	0.02	0.05
石川	2	令和元年 6 月 4 日	1	0.06	0.01	0.04
福井第一	2	令和元年 6 月 5 日	1	0.03	0.02	0.05
福井第二	2	令和元年 6 月 6 日	1	0.05	0.02	0.05
島根	2	令和元年 6 月 9 日	1	0.07	0.02	0.05
愛媛	2	令和元年 6 月 19 日	1	0.13	0.02	0.05
佐賀	2	令和元年 6 月 16 日	1	0.10	0.02	0.05
鹿児島	2	令和元年 6 月 17 日	1	0.10	0.02	0.05
襟裳沖	E11	令和元年 6 月 19 日	1	0.11	0.02	0.05
	K2	令和元年 6 月 11 日	1	0.10	0.02	0.05
	T2	令和元年 6 月 7 日	1	0.07	0.02	0.05

* 誤差は計数誤差（ 1σ ）を示す。

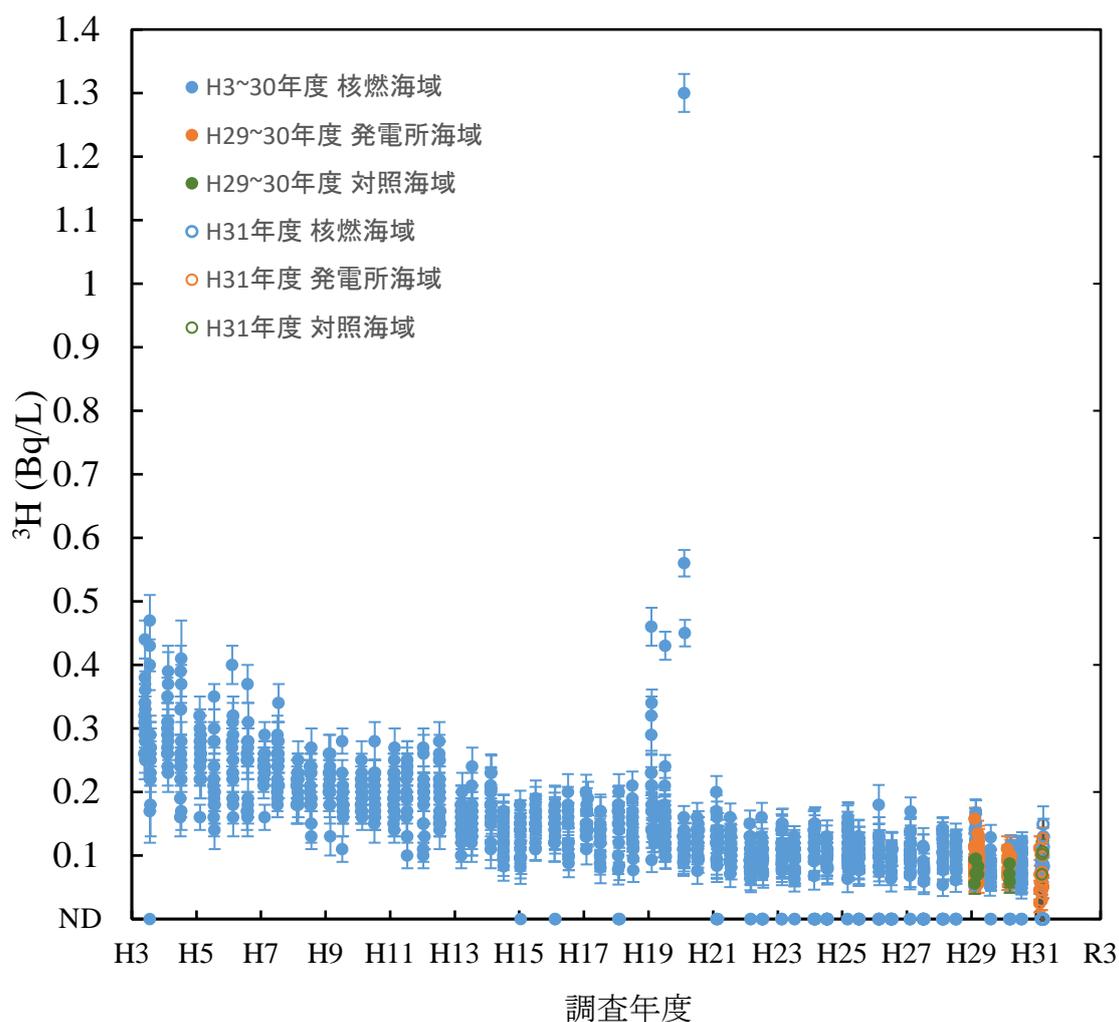


図 I-2-2-4-2 核燃海域で採取した表層水に含まれるトリチウムの放射能濃度（平成3年度～平成30年度調査実施分）と本調査結果（平成31（令和元）年度調査分）
 （*横軸上にプロットされたものは検出下限値以下を示す。）

（海産生物中トリチウム濃度）

表 I-2-2-4-2 に分析結果を示す。TFWT の放射能濃度は 0.05～0.10Bq/L-水（0.04～0.08 Bq/kg-生鮮物）の範囲にあり、平均値は 0.07Bq/L-水（0.06 Bq/kg-生鮮物）であった（Bq/L-水と Bq/kg-生鮮物については表 I-2-2-4-2 の脚注を参照のこと）。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、19、20 年度当該報告書参照）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 0.06～0.23Bq/L-水（0.05～0.17Bq/L-生鮮物）であり、平均値は 0.13Bq/L-水であった。

なお、平成 31（令和元）年度に実施した調査のうち、6 海域で収集し海産生物の TFWT の

測定値は、これらと同水準の放射能濃度レベルである。

全 OBT 及び非交換型 OBT は平成 24～30 年度に引き続き本年度も全て検出下限値以下であった。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が、検出下限値をみると全 OBT が 0.24～0.28Bq/L-水、非交換型 OBT が 0.27～0.28Bq/L-水であり、分析法としては国際的にも遜色のない感度良い分析が行われた。

クロスチェックの結果については表 I-2-2-4-3 に示す。今回測定された試料の TFWT の放射能濃度は平成 30 年度に測定された値と誤差の範囲以内で概ね一致しているが、本年度の測定結果が全体としてわずかに高くなる傾向があった。これについては電解濃縮率の低さが要因と考えられる。本年度の分析の際、電解濃縮率が 4 倍程度と比較的低くなってしまい（通常の場合は 6～7 倍）、誤差が大きくなったことや濃縮前の放射能濃度に換算する際に計算上の放射能濃度が高くなってしまったことが考えられる。そのため、TFWT の放射能濃度を精度よく測定するには電解濃縮率を最低でも 5 倍以上にできていることを確認しなければならないと考えられる。

表 I-2-2-4-2 平成 31 (令和元) 年度に採取した海産生物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	トリチウム濃度		
					TFWT	全 OBT	非交 換型 OBT
					上段は (Bq/L-水) 下段は (Bq/kg-生鮮物) *1		
核燃	ミズダコ	平成 31 年 4 月 8 日	尻屋沖	3	0.07 ± 0.01*2	ND*3	ND
					0.05 ± 0.01	ND	ND
	ヒラメ	令和元年 9 月 30 日	淋代沖～六 川目沖	42	0.09 ± 0.01	ND	ND
					0.07 ± 0.01	ND	ND
青森	アイナメ	令和元年 5 月 14 日	東通村白糠～ 小田野沢沖	41	0.08 ± 0.01	ND	ND
					0.07 ± 0.01	ND	ND
	ヒラメ	令和元年 7 月 17 日	東通村 小田野沢沖	36	0.07 ± 0.01	ND	ND
					0.06 ± 0.01	ND	ND
宮城	マダラ	令和元年 5 月 2 日 ～5 月 7 日	女川町 江の島沖	7	0.07 ± 0.01	ND	ND
					0.06 ± 0.01	ND	ND
	アイナメ	令和元年 5 月 2 日 ～5 月 11 日	女川町 江の島沖	32	0.07 ± 0.01	ND	ND
					0.06 ± 0.01	ND	ND
福島 第一	マガレイ	令和元年 5 月 14 日	相馬沖	84	0.05 ± 0.01	ND	ND
					0.04 ± 0.01	ND	ND
	ババガレイ	令和元年 5 月 14 日	相馬市沖	65	0.06 ± 0.01	ND	ND
					0.04 ± 0.01	ND	ND
福島 第二	マダラ	平成 31 年 4 月 18 日	広野沖	22	0.08 ± 0.01	ND	ND
					0.06 ± 0.01	ND	ND
	マガレイ	平成 31 年 4 月 18 日	広野沖	91	0.07 ± 0.01	ND	ND
					0.06 ± 0.01	ND	ND
茨城	ヒラメ	平成 31 年 4 月 17 日	日立市沖	43	0.08 ± 0.01	ND	ND
					0.06 ± 0.01	ND	ND
	ヤナギダコ	平成 31 年 4 月 16 日	日立市沖	9	0.10 ± 0.01	ND	ND
					0.08 ± 0.01	ND	ND

*1 海産生物によるトリチウムの取り込みは、水 ($^3\text{H}_2\text{O}$ 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。従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) によっても示した。

*2 誤差は 1σ 計数誤差を示す。

*3 検出下限値：TFWT (0.03～0.04Bq/L-水、0.02～0.03 Bq/kg-生鮮物)、全 OBT(0.24～0.28Bq/L-水、0.03～0.05 Bq/kg-生鮮物)、非交換型 OBT(0.27～0.28Bq/L-水、0.03～0.05 Bq/kg-生鮮物)。

表 I-2-2-4-3 平成 30 年度に採取した海産生物に含まれるトリチウムを用いたクロスチェック結果

海域	試料	漁獲日	漁獲場所	測定年月日	トリチウム濃度 (TFWT)		
					上段は (Bq/L-水) 下段は (Bq/L-生鮮物)		
核燃	ミズダコ	平成 30 年 4 月 6 日	東通村 尻屋沖	平成 30 年	0.06	±	0.01
				11 月 22 日	0.05	±	0.01
				令和 2 年	0.10	±	0.03
				2 月 5 日	0.08	±	0.02
	ヒラメ	平成 30 年 9 月 19 日	三沢市 四川目沖	平成 30 年	0.10	±	0.01
				11 月 25 日	0.08	±	0.01
令和 2 年				0.12	±	0.03	
2 月 11 日				0.09	±	0.02	
青森	アイナメ	平成 30 年 4 月 22 日	東通村 白糠前沖	平成 30 年	0.07	±	0.01
				11 月 21 日	0.05	±	0.01
				令和 2 年	0.10	±	0.02
				2 月 21 日	0.07	±	0.02
	ムシガレイ	平成 30 年 5 月 14 日	小田野沢沖	平成 30 年	0.08	±	0.01
				12 月 5 日	0.06	±	0.01
令和 2 年				0.10	±	0.02	
2 月 22 日				0.08	±	0.02	

④ まとめ

核燃、青森、宮城、福島第一、福島第二及び茨城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に含まれる TFWT の放射能濃度を海域毎に比較すると、平成 31 (令和元) 年度に採取したこれら試料に含まれるトリチウムは、平成 30 年度と同程度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。

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 (0.07~0.13 Bq/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の環境放射線等を監視する事業の調査結果 (ND~12 Bq/L*) に比べ、最大値が 2 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。

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、海水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産生物試料に含まれるトリチウムの放射能濃度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しなければならない。

*【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

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. *J. Environ. Radioact.*, 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. *Appl. Radiat. Isot.*, 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. *J. Environ. Radioact.*, 99, 1636-1643.

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⁾。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¹⁷⁻¹⁸⁾（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¹⁹⁾（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。）。

平成 30 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、海底土及び海水試料に含まれる¹³⁷Cs等の放射性核種濃度分析値をデータベース化（以下「自治体データベース」という。）するとともに、海産生物、海底土及び海水試料に含まれる¹³⁷Cs等の放射性核種の放射能分析の結果について、本事業において実施された平成 30 年度の海洋放射能調査結果と比較し評価するための資料として整理した。なお、調査結果公表の時期により、農水省¹⁷⁻¹⁸⁾は平成 28 年度および平成 29 年度、原子力機構¹⁹⁾は平成 29 年度の調査結果を比較の対象とした。

(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

「1. 海洋放射能調査海域周辺での調査」及び自治体データベースより、平成 30 年度の放射性核種濃度範囲を、表 I-2-3-1~3 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。

⁹⁰Sr は 12 道県、原子力機構が調査しており、その濃度は ND~0.075Bq/kg-生鮮物の範囲であり、福井県において最大値が認められた。本調査で得られた⁹⁰Sr の放射能濃度は ND~0.0067Bq/kg-生鮮物の範囲であり、これら自治体等の濃度範囲内であった。

放射性セシウムのうち¹³⁴Cs は 11 道県、農水省及び原子力機構が調査しており、農水省で認められたが（平成 28 年度の最大値が 0.11Bq/kg-生鮮物、平成 29 年度の最大値が 0.074Bq/kg-生鮮物）、他の 11 道県、原子力機構では認められなかった。本調査の¹³⁴Cs 濃度は ND~0.19Bq/kg-生鮮物の範囲であり、自治体等の調査結果より高かったが、福島県で¹³⁷Cs の最高濃度が検出された試料の¹³⁴Cs 放射能濃度は、「検出せず(<11 Bq/kg-生鮮物)」となっており、定量下限値を考慮すると必ずしも本調査の結果が高かったとは言えないと考えられる。¹³⁷Cs は、13 道県、農水省、原子力機構が調査しており、ND~49.6Bq/kg-生鮮物の範囲で、福島県において最大値が認められるとともに、福島県、茨城県において高め

の傾向であった。本調査で得られた ^{137}Cs の放射能濃度は ND~2.1Bq/kg-生鮮物の範囲であり、これら自治体等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~0.029Bq/kg-生鮮物の範囲であり、福井県において最大値が認められた。本調査の $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度は ND~0.00039Bq/kg-生鮮物であり、これら自治体等の放射能濃度範囲内であった。

表 I-2-3-1 平成 30 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（海産生物試料）

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	H30	75	ND*1	75	ND ~ 0.16	19	ND	—*2		75
青森県	H30	32	ND	32	ND	32	ND ~ 0.05	19	ND ~ 0.009	32
宮城県	H30	18	ND	18	ND ~ 0.173	9	ND ~ 0.028	—		18
宮城県 (指標海産生物)	H30	15	ND	15	ND ~ 0.16	4	ND ~ 0.027	—		15
福島県	H30	6316	ND	6316	ND ~ 49.6	—	—	—		6316
茨城県	H30	20	ND	65	ND ~ 0.68	65	ND	49	ND ~ 0.0035	65
静岡県	H30	24	ND	24	ND ~ 0.18	12	ND	—		24
新潟県	H30	11	ND	11	ND ~ 0.21	2	ND ~ 0.018	—		11
新潟県 (指標海産生物)	H30	20	ND	20	ND ~ 0.062	5	0.028 ~ 0.053	—		20
石川県	H30	51	ND	51	ND	14	ND	—		51
福井県	H30	146	ND	146	ND ~ 0.3	17	ND ~ 0.075	26	ND ~ 0.029	146
島根県	H30	—	—	40	ND ~ 0.10	4	ND	—		40
愛媛県	H30	37	ND	37	ND ~ 0.15	4	ND ~ 0.031	3	ND ~ 0.0135	37
佐賀県	H30	25	ND	25	ND ~ 0.17	11	ND ~ 0.058	—		25
鹿児島県	H30	—	—	20	ND ~ 0.13	11	ND	—		20
農林水産省	H28	207	ND ~ 0.11	207	ND ~ 0.63	—	—	—		207
農林水産省	H29	285	ND ~ 0.074	285	ND ~ 0.54*3	—	—	—		285
日本原子力 研究開発機構	H29	30	ND	30	ND ~ 1.3	30	ND ~ 0.027	30	ND ~ 0.0026	30
海洋放射能調査	H30	120	ND ~ 0.19	120	ND ~ 2.1	30	ND ~ 0.0067	30	ND ~ 0.00039	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。

*3 農水省の H29 年度・海産生物の調査では、胃内容物 3 検体 (^{137}Cs の最高値：1.3Bq/kg-生鮮物) を含んでいたが、本調査は可食部を測定対象としているので、このデータは除いて集計した。

(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。

^{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~2.9Bq/kg-乾燥土の範囲であり、農水省の平成 29 年度に最大値が認められた。本調査では核燃海域において海底土試料の ^{90}Sr を分析しており、その濃度は ND~0.42Bq/kg-乾燥土の範囲にあり、これら自治体等の濃度範囲内であった。

放射性セシウムのうち ^{134}Cs は 11 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 の放射能濃度は ND~38Bq/kg-乾燥土、 ^{137}Cs の放射能濃度は ND~410Bq/kg-乾燥土の範囲であり、各濃度とも福島県が最高値であった。

本調査で得られた結果のうち、 ^{134}Cs の放射能濃度は ND~5.0Bq/kg-乾燥土、 ^{137}Cs の放射能濃度は ND~43Bq/kg-乾燥土の範囲であり、これら自治体等の濃度範囲内であった。また、宮城県、福島県及び茨城県において高い傾向も同様であった。

$^{239+240}\text{Pu}$ 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 ND~4.6Bq/kg-乾燥土の範囲で、農水省の平成 29 年度に最大値が認められた。本調査で得られた $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は 0.42~5.4Bq/kg-乾燥土の範囲であり、これら自治体等の $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度範囲よりも高かった。海底土中の $^{239+240}\text{Pu}$ 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分かっている²⁰⁾。本調査では、自治体等機関よりも深い水深で海底土を採取している測点があり（例えば核燃海域の測点 10 及び 15）、 $^{239+240}\text{Pu}$ 放射能濃度が高かったのは、深い水深場所で採取されたためと考えられる。

表 I-2-3-2 平成 30 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（海底土試料）

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	H30	12	ND* 1	12	ND	4	ND	-* 2		12
青森県	H30	9	ND	9	ND	4	ND	7	0.11 ~ 0.45	9
宮城県	H30	13	ND ~ 1.9	13	ND ~ 22.3	1	ND	-		13
福島県	H30	33	ND ~ 38	33	2.5 ~ 410	27	ND ~ 0.45	27	0.12 ~ 0.54	33
茨城県	H30	26	ND ~ 3.8	26	1.9 ~ 40	26	ND	20	0.21 ~ 0.87	26
静岡県	H30	64	ND	64	ND ~ 2.6	-		-		64
新潟県	H30	14	ND	14	ND	-		4	0.095 ~ 0.17	14
石川県	H30	19	ND	19	ND	16	ND	-		19
福井県	H30	92	ND	92	ND ~ 7.8	-		14	0.015 ~ 1.4	92
島根県	H30	-		3	ND	-		-		3
愛媛県	H30	14	ND	14	ND ~ 1.4	8	ND	8	0.27 ~ 0.63	14
佐賀県	H30	18	ND	18	ND	10	ND	-		18
鹿児島県	H30	-		8	ND ~ 1.1	4	ND	-		8
海上保安庁	H30	16	ND ~ 2.8	16	ND ~ 36	16	ND ~ 0.44	7	ND ~ 1.9	16
農林水産省	H28	209	ND ~ 11	209	ND ~ 65	4	ND	4	0.66 ~ 2.0	209
農林水産省	H29	199	ND ~ 18	199	ND ~ 130	21	ND ~ 2.9	21	0.73 ~ 4.6	199
日本原子力 研究開発機構	H29	8	ND ~ 1.7	8	1.9 ~ 14	8	ND	8	0.19 ~ 0.59	8
海洋放射能調査	H30	82	ND ~ 5.0	82	ND ~ 43	22	ND ~ 0.42	22	0.42 ~ 5.4	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。

トリチウム (³H) は 13 道県、原子力機構が調査しており、その濃度は ND~12Bq/L の範囲で、福井県が最大値を示した。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~0.12Bq/L の範囲であり、これら自治体等機関の放射能濃度範囲内であった。

⁹⁰Sr は 10 道県、海上保安庁、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~1.8mBq/L の範囲、福島県が ND~13mBq/L の範囲であり、福島県が高めの値であった。本調査で得られた ⁹⁰Sr の放射能濃度は ND~1.2mBq/L の範囲であり、福島県以外のこ

れら自治体等と同水準の値であった。

放射性セシウムのうち ^{134}Cs は 11 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 放射能濃度は ND～31mBq/L、 ^{137}Cs の放射能濃度は ND～340mBq/L の範囲であり、何れも福島県が最高値であった。本調査で得られた ^{134}Cs 放射能濃度は ND～0.1mBq/L、 ^{137}Cs 放射能濃度は ND～2.8mBq/L であり、これら自治体等機関の放射能濃度範囲内にあり、福島県で高い傾向も同様であった。

$^{239+240}\text{Pu}$ 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～0.043mBq/L の範囲であった。本調査で得られた $^{239+240}\text{Pu}$ の放射能濃度は ND～0.025mBq/L の範囲であり、これら自治体等機関の放射能濃度範囲内にあった。

表 I-2-3-3 平成 30 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）

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	H30	32	ND*1	32	ND ~ 2.6	4	ND		—*2	32	ND ~ 0.4	32
青森	H30	32	ND	32	ND	18	ND	18	ND	32	ND	32
宮城県	H30	19	ND	19	ND ~ 3.3	1	1.4		—	7	ND	19
福島県	H30	81	ND ~ 31	81	3 ~ 340	75	ND ~ 13	75	ND ~ 0.013	81	ND ~ 0.66	81
茨城県	H30	4	ND	54	ND ~ 11	26	ND		—	156	ND	156
静岡県	H30	64	ND	64	ND ~ 4.9		—		—	28	ND ~ 0.71	64
新潟県	H30	18	ND	18	ND ~ 2.6	1	0.98		—	18	ND	18
石川県	H30	19	ND	19	ND ~ 2.0		—		—	19	ND	19
福井県	H30	54	ND	54	ND ~ 2.5		—		—	88	ND ~ 12	92
島根県	H30		—	16	1.4 ~ 2.2	1	1.5		—	14	ND	24
愛媛県	H30	12	ND	12	ND ~ 2.8	4	1.0 ~ 1.4	4	0.0048 ~ 0.0094	4	ND	12
佐賀県	H30	26	ND	26	ND ~ 2.5	10	0.60 ~ 1.8		—	18	ND ~ 0.75	26
鹿児島県	H30		—	12	ND ~ 2.0	4	0.87 ~ 1.3		—	8	ND ~ 0.3	12
海上保安庁	H30	37	ND	62	0.09 ~ 4.4	62	ND ~ 0.93	25	0.0019 ~ 0.043		—	62
日本原子力 研究開発機構	H29	6	ND	6	ND ~ 6.7	6	ND	6	ND	17	ND	17
海洋放射能調査	H30	256	ND ~ 0.1	256	ND ~ 2.8	208	ND ~ 1.2	88	ND ~ 0.025	88	ND ~ 0.12	256

*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、本調査の測定値の妥当性が確認された。

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. 平成30年度第1四半期～平成30年度第4四半期.
- 2) 青森県. 原子力施設環境放射線調査報告書 平成30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(平成30年度報)
(http://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kikikanri/atom/files/R1_kanshi_houkokusho_data_H30.pdf) (令和2年3月24日 最終閲覧)
- 4) 宮城県. 平成30年度 女川原子力発電所環境放射能調査結果. 第38巻5号.
- 5) 福島県. 平成30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/369482.pdf>)
(令和2年3月24日 最終閲覧)
- 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.
(<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/mon3004.html>)
～ (<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/mon3103.html>) (計12ファイル)
(令和2年3月24日 最終閲覧)
- 7) 茨城県. 環境放射線監視季報. 第184報(平成30年度第1四半期)～第187報(平成30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181号(調査期間 平成30年4月～平成31年3月).
- 9) 新潟県. 平成30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. 平成30年度年報.
- 11) 福井県. 原子力発電所周辺の環境放射能調査. 平成30年度年報(2018).
- 12) 島根県. 平成30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. 平成30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)(平成30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(平成30年度 年報).

- 16) 海上保安庁. 放射能調査報告書. 平成 30 年調査結果.
- 17) 農林水産省. 平成 28 年度農林水産省関係放射能調査研究年報 C水産関係.
- 18) 農林水産省. 平成 29 年度農林水産省関係放射能調査研究年報 C水産関係.
- 19) 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-2017 年度-.
- 20) 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. *J. Environ. Radioact.*, 142, 113-123.