

## 2011 年度定期総会

# 原発事故の放射性物質による海洋深層水汚染の可能性

Possibility of deep ocean water contamination  
by radioactive materials due to accidents of atomic nuclear power plants

高橋正征

Masayuki Mac TAKAHASHI

### 1. はじめに

2011年3月11日14時46分18秒（日本時間）に宮城県牡鹿半島の東南東沖130kmの海底を震源として発生した東北地方太平洋沖地震は、日本における観測史上最大のマグニチュード（Mw）9.0を記録し、震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北約500km、東西約200kmの広範囲に及びました。この地震で場所によっては波高10m以上、最大週上高40.5mにも達する大津波が発生し、東北地方を中心に関東地方と北海道の太平洋沿岸部に壊滅的な被害をもたらしました。

被災地には、北から青森県東通村（下北半島）、宮城県女川町・石巻市、福島県大熊町・双葉町、福島県富岡町・楢葉町、茨城県東海村に合計15機の原子力発電所がありますが、その内の福島県大熊町・双葉町の東京電力福島第一原子力発電所の6機の原発の温度制御が不能になって、炉心溶融と水素爆発が起こり、大量の放射性核種（“放射性物質”は漠然とした表現なので、ここでは“放射性核種”を使います。）が大気に飛び出し、時に放射性核種で汚染された水が海に洩れ出るという事態になりました。

東日本大震災直後、断水の影響でペットボトル入りの飲料水の需要が激増し、海洋深層水の飲料水の注文も突如増えました。しかし、放射性核種による

汚染水が海中に洩れていることが報道されるや、各地の海洋深層水の飲料水メーカーに放射性核種汚染の問い合わせが殺到し、中には注文がパタリと止まつたものもありました。

海洋深層水利用学会では、全国の海洋深層水取水施設にアンケートを送り、2011年5月16日までに放射性核種による風評被害と対策を知らせてもらったところ、15ヶ所から回答があり、明らかな風評被害を受けている所が7ヶ所、受けていない所が8ヶ所で、地理的に福島に近く、飲食物製品を多くつくっている所で被害が顕著でした。風評被害を受けているところでは、海洋深層水の放射能検査を実施し、合わせて海洋環境の特徴を紹介して、海洋深層水の放射性核種汚染の可能性の低さを懸命に説明している実態が窺えました。関係者が情報を共有し、共に風評問題に対応する必要性が強く感じられ、6月3日の学会総会の折に、急遽、予定を変更して「安全・安心な海洋深層水の利用促進」に向けた講演会と総合討論会を実施した次第です。何分、急なことで、学会長の私が放射性核種の俄か勉強をして話題提供し、その後、風評被害を受けている取水施設の実情を説明していただき、参加者で討論しました。

以下は、当日の私の話題提供の概略ですが、その後の展開も踏まえて、実際の内容とは力点が変わっています。いずれにしましても、私は放射性物質に

については素人ですから、間違って理解している部分もあるうかと思いますので、その点はお許しいただき、学会として真摯に放射性核種汚染と風評問題を取り組む姿勢を作り出すきっかけになれば幸いです。

## 2. 放射性核種とその人体への影響

放射性核種による汚染の具体的な内容に入る前に、放射性核種について、できるだけ共通の理解を持つておいたほうが良いと思いますので、最初に私が学んだことのおさらいから始めます。

放射性核種は放射線を出しながら崩壊し、最終的には放射線を出さない安定した同位体になります。放射線が半分にまで減るのに必要な時間が“半減期”で、これは温度などの条件が変わっても変化しません。放射線には $\alpha$ （アルファ）線や $\beta$ （ベータ）線などの荷電粒子、 $\gamma$ （ガンマ）線などの電磁波、そして中性子線などの非荷電粒子の3種類があります。 $\alpha$ 線は透過力が弱く、紙や数cmの空気で止められますが、電離作用が強いので、体内に取り込まないような注意が必要です。 $\beta$ 線も透過力は弱く、数mmのアルミ板や1cmのプラスチック板で遮ることができますが、遮った際にX線が発生するので、そちらも防ぐ必要があります。 $\gamma$ 線は透過力が強く、遮るには比重の大きな物質が必要で、10cmの厚みの鉛で1/100～1/1000にまで減らすことができます。また、X線は $\gamma$ 線と同様の電磁波ですが、後者が核内から放出されるのに対して、前者は原子核と核外電子の相互作用により放出されます。これらの放射線の強さは放射性核種によって違います。

放射線を出す能力を放射能と呼びますが、この放射能や放射線の量を表すのに3つの単位が用いられます。一つ目が放射能の量を表す単位のベクレル(Bq)で、単位時間当たりの放射壊変数で示します。二つ目は物質が吸収した放射線のエネルギー総量(吸収線量)でグレイ(Gy)、三つ目は人体が吸収した放射線のエネルギーが器官・組織あるいは全身に与える影響を評価するための単位でシーベルト(Sv)です。シーベルトは器官・組織の吸収線量で

あるグレイに放射線の種類ごとに定められた係数(放射線荷重係数)を乗じて求める等価線量と、全身に均一照射したときの線量と等価になるように、等価線量に人体の各器官・組織の全身の影響に対する寄与を表す係数(組織荷重係数)を乗じて求める実効線量があります。つまり、等価線量というのは、人体を構成している組織ごとに評価するものらしく、等価線量×組織荷重係数=実効線量となり、一般に使われているのはどうも実効線量のようです。

次に知っておきたいのは、放射線には自然と人工の放射性核種に由来する2種類があるということです。自然放射線による被ばく線量は、宇宙線や宇宙線によって放射化された放射性核種によるものが世界平均で0.35mSv/年、地殻起源によるものが0.45mSv/年、食物・飲料経由で摂取された放射性核種に起因するものが0.35mSv/年、大気経由で取り込まれた放射性核種によるものが1.25mSv/年で、合計2.4mSv/年程度といわれています。地殻起源と食物・飲料経由で最も大きな寄与を果たす放射性核種はカリウム40( $^{40}\text{K}$ )で、大気経由ではラドン222( $^{222}\text{Rn}$ )とされています。ただ、日本は世界平均よりも低く約1.5mSv/年と言われています。日本では東北と北海道は土壤中のウランの濃度が低いために自然放射線は少なく、一方、花崗岩の風化土壌の多い西日本で高い傾向があります。

人工放射線は人間活動によって作り出された放射性核種に由来するもので、人間活動により地下にあった自然の放射性核種が地表にもたらされて被ばくが高められた場合もこの範疇に含まれます。人工放射線の登場は主として1940年代以降で、様々なケースがありますが、大きなものとしては、(1)核実験、(2)原子力発電と核燃料サイクル、(3)原子炉事故などです。その他に、医療・工業・農業や各種の研究分野でも加速器などでつくられた人工放射線が利用されています。核実験では、数100種類の放射性核種ができると言われていますが、その中で人間の被ばくに大きくかかわるのはヨウ素131( $^{131}\text{I}$ )、セシウム137( $^{137}\text{Cs}$ )、プルトニウム239( $^{239}\text{Pu}$ )、ストロンチウム90( $^{90}\text{Sr}$ )、セリウム144( $^{144}\text{Ce}$ )、鉛239( $^{239}\text{Pb}$ )、炭素14( $^{14}\text{C}$ )、トリチウム( $^3\text{H}$ )、ジ

表1 福島第一原発事故以前の地球上における人工放射性核種の推定環境放出量  
<http://www.ist.or.jp/atomica/data/pict/09/09010506/01.gif>

線 源	放出量(PBq)						集団実効線量 (人Sv)e	
	<sup>3</sup> H	<sup>14</sup> C	希ガス	<sup>90</sup> Sr	<sup>131</sup> I	<sup>137</sup> Cs	局地 および 地域	世 界
大気圏核実験								
世界	240000	220		604	650000	910		22300000
局地								
セミバラチンスク							4600	
ネバダ							500b	
オーストラリア							700	
太平洋実験サイト							160b	
地下核実験			50		15		200	
核兵器加工								
初期操業								
ハンフォード							8000c	
チェラビンスク							15000d	
その後の操業							1000	10000
							30000e	
原子力発電								
製錬と採鉱							2700	
原子炉運転	140	1.1	3200		004		3700	
燃料再処理	57	0.3	1200	6.9	0004	40	4600	
燃料サイクル							300000e	100000
放射性同位体の製造と利用	2.6	1.0	52		6.0		2000	80000
事故								
スリーマイルアイランド			370		0.0006		40	
Chernobyl					630	70		600000
キシチム				5.4		0.04	2500	
ウインズケール			1.2		0.7	0.02	2000	
パロマレス							3	
ツール							0	
スナップ9A								2100
コスモス954				0.003	0.2	0.003		20
Ciudad Juarez							150	
モハメディア							80	
ゴイアニア						0.05	60	
合計							380000	23100000
全集団実効線量(人Sv)							23500000	

a 10,000年で打ち切った。 d テチャ河への放射性核種の放出量から

b 外部被ばく線量のみ

e 尾鉛からのRn-222の放出による長期間集団線量

c 大気へのI-131から

[出典] 放射線医学総合研究所(監訳):国連科学委員会報告「放射線の線源と影響」, 1993年版,  
 (株)実業公報社 (1995) p.210

ルコニウム 95 (<sup>95</sup>Zr), ルテニウム 106 (<sup>106</sup>Ru) などです。原発事故で問題なのも、ヨウ素 131, セシウム 137, プルトニウム 239, ストロンチウム 90 などで、核実験と基本的には同じです。このように、人工放射線は自然放射線とは放射性核種が全く違います。表1は、福島第1原発事故以前に地球上で出された人工放射性核種の種類と量の推定値です。原

発事故ではストロンチウム 90 が相当量出ていると思われますが、ストロンチウム 90 はβ線しか出さないために、半導体検出器では測れないので測定されていません。

さて、次は被ばくです。体の外側から放射線を浴びるのが外部被ばく、一方、飲食物や呼吸などで身体に取り込んでしまった放射性核種が体内で出して

いる放射線を浴びるのが内部被ばくです。外部被ばくは、放射線のある環境から逃れる、あるいは衣服や皮膚に付着した放射性核種を除いたりすれば、以後の外部被ばくは防ぐことができます。しかし、内部被ばくは、放射性核種が体内にある限り続きます。炭素14とトリチウムは $\beta$ 線、プルトニウム239とプルトニウム240( $^{240}\text{Pu}$ )などは $\alpha$ 線を出し、これらの核種では内部被ばくが問題です。それ以外の核種の多くは崩壊する際に $\beta$ 線に加えて $\gamma$ 線やX線を出すために、内部被ばくと外部被ばくの両方が問題になります。身体に取り込まれた放射性核種は、必ずしも永久に体の中に留まっているわけではありません。ヨウ素131のように、8日程度で放射性核種自体が半減しますし、また、放射性核種は体内から体外に排泄もされます。排泄を考慮した各放射性核種の体内での半減期の例が表2です。

表2 原子力事故で放出される人体影響のある主な人工放射性核種の物理的半減期と体内の半減期(高木・渡辺, 1990)

人工放射線核種	物理的半減期	体内の半減期
ヨウ素131	8日	7.5日
セシウム137	30.2日	109日
プルトニウム239	24,100日	一生<
ストロンチウム90	28.9日	18年

現在、100 mSv/年が被ばくの危険レベルの目安の一つとされています。これは、広島・長崎で原子爆弾の被爆者を対象として、長期間にわたって疫学調査を行なって導かれた結果です。主として外部被ばくが対象となっているようです。100 mSv/年以上被ばくした人では明らかに被ばくによる疾患が確認されています。高レベルの放射線に被ばくすると、細胞のDNAが損傷を受けます。DNAは4つの塩基が化学結合して連結していますが、高いエネルギーをもった放射線があたると結合が切れてしまいます。DNAを構成している2重らせんの片方だけが壊れた場合は、残りのらせんが複製しますが、2重らせんの両方が損傷を受けると、修復は必ずしも容易ではなく、その結果、最悪の場合には細胞分裂ができなくなってしまいます。外部被ばくでは強い放射線を浴びる危険があり、3,000~4,000 mSv/年の放射線を浴びると、半数の人が死亡するといわれています。これは細胞が直接被害を受ける急性障害にあたり、図1の上の部分の高線量被ばくで、全ての人間に起こる、つまり確定的な現象です。

100 mSv/年以下の被ばくでは、高レベル被ばくのように被ばく者の全員が影響を受ける(確定的)のではなく、被ばく者の一部に影響ができる、つまり確率的です。図1の低線量被ばくの部分で、この領

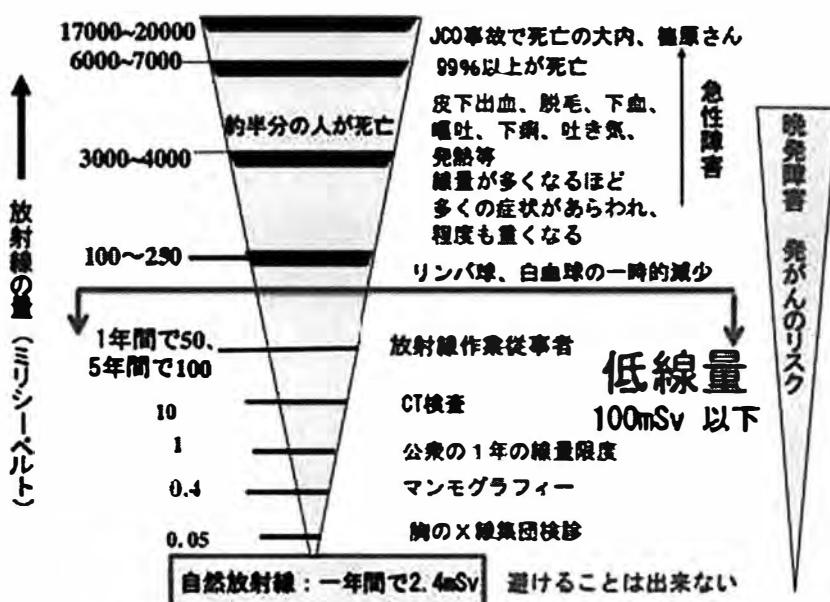


図1 放射線被ばくによる疾病リスク、100 mSv/年を目安にして、それ以上は高線量で被ばく影響は確定的、それ以下の被ばくリスクは確率的(崎山, 2011より)

域では、細胞が癌化して発癌するのが最も一般的な放射線障害で、被ばくした人のすべてではなく、一部が発癌により死亡することになります。すなわち、1万人の人が1 mSv の放射線を浴びると癌で死亡するのはその中の1人程度、10 mSvだと10人、100 mSvでは100人といったところが国際放射線防護委員会で出されている目安です（崎山, 2011）。こうした低線量域では、外部被ばくよりも長期間にわたる内部被ばくにより発癌して死亡することが問題です。

### 3. 原発事故の放射性核種と海洋への影響

原発事故では主に大気と廃棄水中に放射性核種が放出されます。大気中には気体としてキセノン133 (<sup>133</sup>Xe) とクリプトン85 (<sup>85</sup>Kr) などが、微粒子の降下物としてはヨウ素131、セシウム137、ストロンチウム90などが、そして重いために遠くには飛びにくいプルトニウム239とウラン235 (<sup>235</sup>U) などが微粒子で原発敷地内とその周辺を中心に飛散します。一方、汚染水など排水中には溶存物質と微粒子が混在し、主としてヨウ素131、セシウム134 (<sup>134</sup>Cs)、セシウム137、ストロンチウム90、コバルト58 (<sup>58</sup>Co) などです。

図2は原発事故が起こった場合の海域への放射性核種による汚染の経路を摸式的に示したものです。

大気中からは微粒子として放射性核種を海水中に落下させます。また、排水によって、微小粒子と溶存性の放射性核種が海に入ります。これらの海に入った放射性核種は、一部は凝集して海底に沈降し、残りの一部は懸濁物質に吸着されて海底に沈降したり、一部は生物に捕食されて生態系にとりこまれてからやがて糞などになって海底に沈降したりします。同時に、海水中の放射性核種は薄まりながら拡散し、移流で他の場所に運ばれていきます。放射性核種の濃度が濃いのは、岸近くに限られ、数10 km沖合では周辺水で薄められて濃度は著しく低下します。海洋での放射性核種の最終的な到達点は海底堆積物です。

日本周辺のような温帯の海では一年中温度成層が顕著ですから、数10 m以浅の表層海水が、それ以深の海水と混合する機会はほとんどありません。ですから溶けたり懸濁したりしている放射性核種が水とともに深層に行く可能性はなく、表層から深層への放射性核種の移動は、主として粒状物質の沈降によるものです。水中での放射性核種の濃度の高い陸近くの浅い大陸棚では一定面積内の放射性核種の海底への沈降量の大きな場所、いわゆるホットスポットがでてくるかもしれません、水深の深い海域での放射性核種の海底への沈降量は長い距離を沈降していく間の拡散・移流などで薄まるので限定的と考えられます。

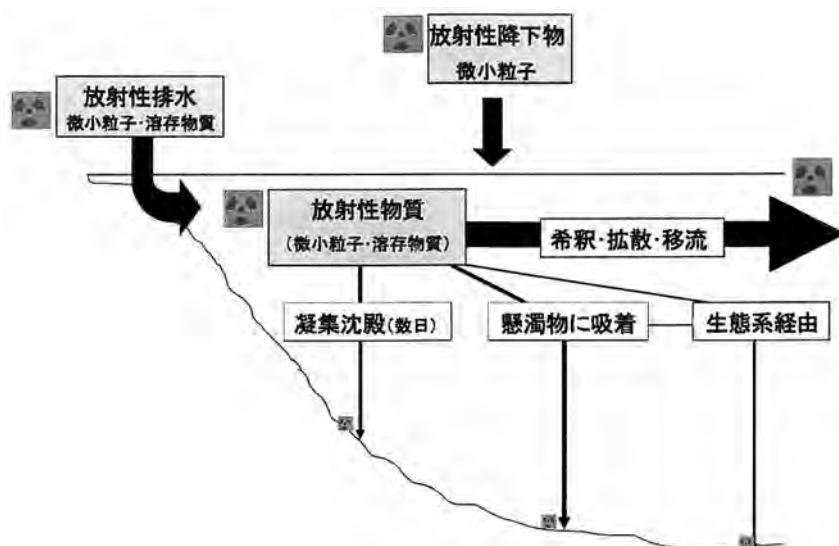


図2 原発事故による海域への放射性核種の汚染経路

人工放射性核種は、1940年頃から核爆発などで地表に撒き散らされていますから、地表だけでなく既に海洋も人工放射性核種で汚染されています。図3は、1999年以前の日本近海でのセシウム137の鉛直分布の様子です（吉田、1999）。表層水にはセシウム137が10mBq/L程度含まれていて、深くなると濃度は急速に低下しています。1000mで表層の1/10、2000mで1/100程度です。つまり、

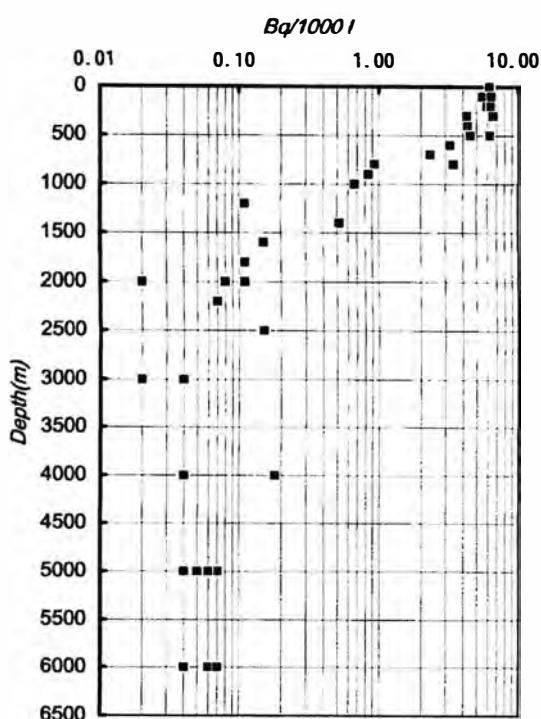


図3 日本近海の海水中のセシウム137濃度の鉛直分布  
(吉田、1999)

表層水に比べて海洋深層水は放射性核種による汚染が桁違いに低いことが分かります。また、日本沿岸域の表層海水中的セシウム137の濃度は、1984年には4.5mBq/L程度でしたが、1986年の切尔ノブイリ事故で5mBq/L程度にまで上昇し、その後年々低下して1997年には3mMBq/L以下になりました（笠松、1999）。

図4は各地のクジラの仲間が体内に含んでいるセシウム137量の分析結果です。太平洋に比べて北大西洋での値が最大で20倍近く高いことが一目瞭然です（田辺、2011）。これは、海水のセシウム137の汚染レベルが太平洋では他の海域に比べて低いことを示しています。

表3は海産魚の放射性核種の生物濃縮係数で、水銀や難分解性有機汚染物質に比べると放射性核種で

表3 食物連鎖による放射性核種の生物濃縮の可能性（笠松、1999）

$$\text{濃縮係数} = \frac{\text{生物中の濃度}}{\text{海水中の濃度}}$$

物質名	海産魚の濃縮係数
セシウム	5~100
ヨウ素	10
ウラン	10
プルトニウム	3.5
水銀	360~600
DDT	12,000
PCB	1,200~1,000,000

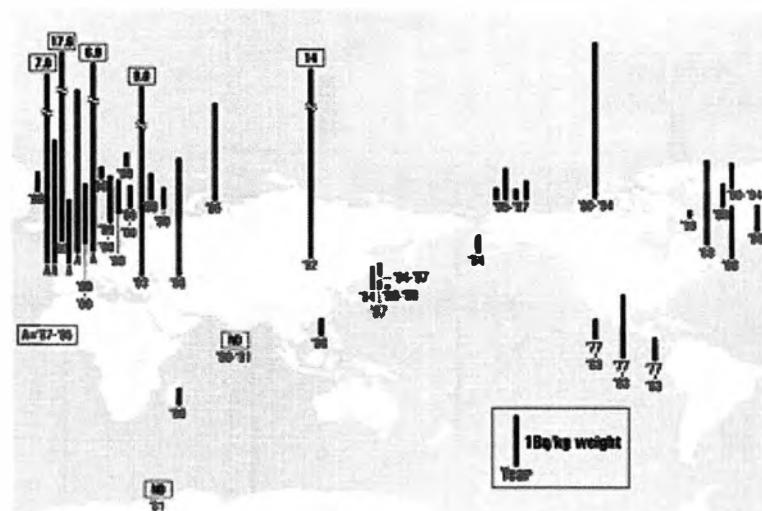


図4 20世紀後半における世界のクジラ類のセシウム137の汚染程度（田辺、2011）

は2～5桁ほど低くなりますが、若干の生物濃縮は認められます。

以上のように、今回の福島第1原発の事故以前に、既に陸や海は様々な人工放射性核種で汚染されてしまっています。その汚染程度は表層水で高く、深層に行くほど桁違いに低くなります。日本近海と太平洋の放射性核種の汚染が、今回の福島第1原発事故で今後どのように推移していくかは今後の調査に待つしかありませんが、福島周辺の大陸棚の水と海底を中心に汚染レベルの高まることが考えられます。海水の汚染は原発からの排気・排水がなくなれば海水の移流・拡散で濃度は低くなっていくでしょうが、いったん汚染された海底の問題の解決は困難です。

#### 4. 放射性核種による海洋深層水の汚染の可能性

海洋深層水は、高緯度海域の冬の冷気で表層水が冷やされ重くなって深層に沈み込んでできたものが低緯度に移動してきていますから、水温の高い表層水と直接混じることはありません。ですから、海洋深層水ではそうした表層海水と深層海水の直的的混合による放射性核種の汚染は考えられません。放射性核種を含んだ表層海水が高緯度に移動し、そこで冷やされて深層に沈み込んだ場合の汚染は考えられますが、それには100年かそれ以上の時間がかかるでしょうし、その間に放射性核種は薄まります。

粒状の放射性核種や、粒子に付着した放射性核種、あるいは放射性核種が付着した粒子を生物が食べて糞粒にする、といった何らかの粒状化が起こった結果、表層から深層へ放射性核種が沈降して深層を汚染する可能性があります。これも大部分は汚染発生源近くの大陸棚上で顕著に起こると考えられます。

ただ、海洋深層水の陸上取水施設の取水ポイントは陸から数kmの所が多く、陸沿いに流れる放射性核種による汚染水の影響（放射性物質を沈降供給）を受ける可能性は考えられますが、福島第1原発の排水の影響を受けそうな深層水取水施設は今のところありません。また、海洋深層水の取水では海底直上水を取水していて、堆積物の影響を極力避けていますから、仮に海底が放射性核種で汚染したとして

もその影響は受けにくいと考えられます。

実際に、これまでのところ放射性核種の濃度測定を実施しているどの取水施設からも通常の分析レベルでは放射性核種による汚染は検出されていません。

#### 5. おわりに

日本各地で汲み上げられている海洋深層水は、その多くが人間活動の活発化していない100年以上昔に高緯度で冷やされてつくられたものです。確かに、図3で紹介したように、深層にも100年に満たない歴史の人工放射性核種のセシウム137が検出されますが、これは粒状物質としてその後に付け加わったもので、その量は極めて微量です。というわけで、現在得られている海洋深層水は、私たちが飲食物用として使っている他の多くの資源に比べて極めて清浄性が高いという特徴があります（高橋・池谷、2002）。

現在放射性核種に関連して起こっている飲食物の風評被害は、放射性物質の安全レベルがはっきりしない現状では、克服は容易ではありません。同様に安全レベルの確定していない人工毒物に、ダイオキシン・PCB・DDTなど既に国際認証されている難分解性有機汚染物質（POPs）12種類があり、こちらの方が放射性物質よりも地球上の汚染状況は深刻と思われますが、これまでのところ大きな風評被害にはなっていません。一部の放射線が簡単に測定できてしまうというのも、風評被害を大きくしている一つの原因のように感じます。

安全を求める気持ちは十分に理解できますが、人工放射性核種にしろ、難分解性有機汚染物質にしろ、私たち人類がつくりだして環境を汚染してしまった危険物質は相当数に上ります。毒物だけでなく、自動車、電車、飛行機などの交通機関、地下鉄や地下街、高層ビルなど、至るところ危険だらけです。現状では、それらに対する絶対安全をつくりだすことは難しく、私たちはロシアルーレットのようにいつもに当たるかといった心配を常にしながら生活することを余儀なくされています。こうした危険を生み出した原因是、行き着くところ私たちの“物欲”で

す。物欲を否定するものでは決してありませんが、今回の放射性核種問題をきっかけに、真剣に考えたいものです。

## 謝　　辞

藤田大介編集委員長のはからいで第2章については専門家による丁寧な査読を受け、内容の正確さと的確な表現についての多くの有益なコメントを頂きました。お陰様で読者の皆さんのが混乱がかなり回避されたと思います。

## 文　　献

- 笠松不二男（1999）日本沿岸海産生物と放射能－放射能濃度の変動要因と生体トレーサーとしての放射能－。海洋と生物，21，200-209。
- 崎山比早子（2011）放射線は身体にどのような影響を与えるか～福島第1原子力発電所事故を踏まえて～。2011年3月28日，第二東京弁護士環境保全委員会，43 pp. [http://www.niben.jp/or/kankyo/houkoku/h\\_20110328.pdf.html](http://www.niben.jp/or/kankyo/houkoku/h_20110328.pdf.html)
- 高木仁三郎・渡辺美紀子（1990）食卓にあがった死の灰。講談社現代新書，東京，246 pp.
- 高橋正征・池谷透（2002）海洋深層水の清浄性。海洋深層水研究，3，91-100。
- 田辺信介（2011）東日本大震災で懸念される海の化学汚染。Ship & Ocean Newsletter, 261, 2-3.
- 吉田勝彦（1999）深海域への Cs-137 の生物輸送－シンカイヨロイダラ (*Coryphaenoides yaquinae*) をめぐって－。海洋と生物，21，210-218。