

放出された放射能を追いかけて わかったこと(2)

——福島沿岸および外洋でのセシウムとトリチウム

青山道夫

あおやま みちお
筑波大学客員教授、福島大学客員教授

セシウム 137

福島原発事故直後の福島県沿岸でのセシウムやトリチウムの様相は、すでに筆者や筆者の共同研究者らが複数の論文¹⁻⁶および筆者の本誌掲載の論考(2014年8月号、2015年10月号、2018年7月号)で報告している。

福島事故後10年のまとめをするにあたり、全体像を見せるために沿岸だけでなく、外洋も含めて2020年12月までの各海域でのセシウム137(¹³⁷Cs)放射能濃度の推移を事故前から含めて一覧表として表1に示す。合わせて福島事故直後から2020年12月までのほぼ10年間の福島第一原発56北放水口(東京電力のモニタリング)、福島第一原発から南に9.7 kmに位置する富岡漁港および南175.5 kmに位置する波崎での観測結果(筆者の研究

による^{3,7})での表層海水中のセシウム137放射能濃度を図1に示す。福島第一原発56北放水口での10年間のセシウム137放射能濃度と北太平洋亜熱帯循環西部での1958年から2020年12月までの62年間のセシウム137放射能濃度を図2に示す。

2011年3月の福島事故後、東京電力による福島第一原子力発電所56北放水口でのモニタリング結果ではセシウム137の放射能濃度は2011年4月6日(地震の26日後)に68 MBq m⁻³に達した。セシウム137放射能濃度と¹³¹I/¹³⁷Cs放射能比の比較から、福島原発からの主要な直接漏洩は、2011年3月26日から2011年4月6日までの12日間に発生したことが示唆された¹。その後、放出量は大幅に減少したが、2011年8月から2012年末まで、福島原発付近のセシウム137放射能濃度は約1000~1万 Bq m⁻³のままであっ

表1—2020年12月までの各海域での¹³⁷Cs放射能濃度の推移(単位 Bq m⁻³)

場所	1970年までの観測最高値	2000年代後半	2011年事故直前	2011年事故直後
ベーリング海	23			0.8
北海道南親潮	177	2.0	1.3	最大514
福島第一原発56北放水口				最大6.8×10 ⁷
福島第一原発沖		1.6~1.8	1.7	
北太平洋亜熱帯循環西部	78	2.4	1.4	
北米大陸西岸	69	2.3	1.1	7.5
日本海	27	2.3	1.5	最大159
東シナ海	10	2.3	1.5	2.8
太平洋赤道域	22	0.9		
南太平洋亜熱帯循環	12	0.7		
南太平洋亜寒帯循環	17			

データは青山によるHAMglobal2018データベース(doi: 10.34355/CRiED.U.Tsukuba.00001)⁸および更新版(HAM

*Smith et al., 2015¹⁴の報告値

**事故起源分のみ Smith et al., 2017による

***2019年12月 <http://ourradioactiveocean.org/results.html> 2020年11月1日アクセス

た。2013年と2014年には、セシウム137放射能濃度は依然として100から数千 Bq m^{-3} であった。既に本誌2015年10月号に書いたが、海側遮水壁の効果は大きく、「東電による精密測定結果では、2015年3月くらいから100 Bq m^{-3} 以下の濃度がみられるようになり、明らかな漏えいの減少がみられる。この濃度低下は、著者が行っている富岡と波崎での継続的な測定結果とも整合している。また、福島第2原発北放水口のモニタリング結果でも、明らかな漏えいの減少にともなう放射能の低下がみられる。2015年6月の濃度から推定すると、2013年から2014年で見られていた外洋へのセシウム137の漏えいのソースの80%程度はこれらの海側トレンチであったことがわかる。しかし、完全に漏えいが止まると、時定数 -0.44 day^{-1} で減少しなければならないが、実態はそうではないので、1桁少ないが漏えいは続いていると見なければならぬ。今後の推移に注目する必要がある」とした。表2に2020年までの福島第一原子力発電所56北放水口での年平均値を示すが、2015年10月に海側遮水壁が完成する前に比べると、完成後はセシウム137放射能年平均濃度はさらに減少し2018年に極小となった。しかし図1と図2でも明瞭であるが、2020年では減少しないばかりか増加している。福島第一原子力発電所56北放水口での濃度に寄与する放出源については既に筆者が河川からの影

響が増えていることを示している(日本原子力学会2020年秋の年会)が、2015年の233 Bq m^{-3} と同程度の217 Bq m^{-3} に戻るほどの影響があることは考えにくく、ソースがどこであるかを福島原発サイト内で何が起きているかを含めて見る必要があると筆者は考える。

次に太平洋全域に目を向けてみる。世界の海洋でのセシウム137やストロンチウム90、プルトニウム同位体などの長寿命の人工放射性核種のデータは1953年にさかのぼる。海水中の長寿命の人工放射性核種の放射能濃度はその影響の大きさゆえに各国の政府や研究者の監視や研究の対象であり、環境への影響を評価するために用いられてきた。1950年代以降、世界の海水中のセシウム137濃度は、多くの研究によって広範囲に測定されており、筆者が構築した海洋環境の人工放射能のデータベースHAMglobal2018⁸および更新版(HAMglobal2020, 出版準備中)に収録してある。ここから該当海域のデータを抽出して表1、図2、図3を作成した。半減期が約30年のセシウム137の北太平洋での主な発生源は、大気圏内核実験による世界的(global fallout)および地域的(local fallout)な放射性降下物、チェルノブイリ事故と福島事故による放射性降下物および福島原発からの直接漏洩である。1950年代にビキニ環礁などで行われた核実験により、表層海水中のセシウム137放射能濃度は10~200 Bq m^{-3} の範囲であり、1970年

2012年	2014年	2015年	2016年	2018年	2020年7月	2020年10月	2020年12月
	1.3***	7.2		2.4***			
26.5	12.2	9.3					
330-19000	130-22000	47-7000		26-1000	52-1000	52-270	60-700
4700	1600	340-130		46			
1.0-4.5		1.0-2.6		1.4-1.9	1.31±0.07	1.18±0.06	
1.8*	3.6*	8**			4.2***		
9.0	3.6	3.8		1.0-1.9	1.5-1.8		
2.3	4.8	2.9		1.3	1.2		
1.2		0.7					
0.02-0.49							

global2020, 出版準備中)

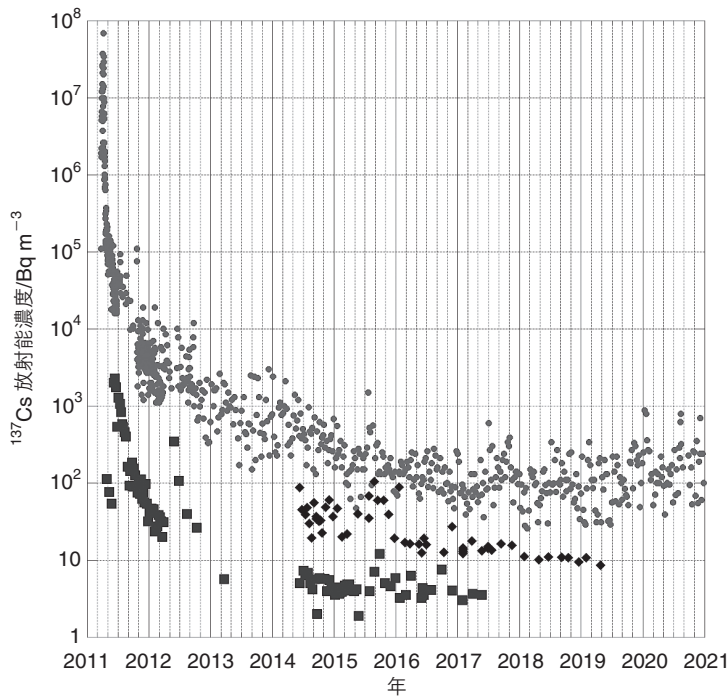


図1—福島事故直後から2020年12月までの福島第一原子力発電所56北放水口、富岡漁港および波崎での観測結果
 ●：東京電力による福島第一原子力発電所56北放水口でのモニタリング結果
 ◆：富岡漁港(福島第一原子力発電所から南に9.7 km)での筆者の観測結果⁹
 ■：波崎(福島第一原子力発電所から南に175.5 km)での筆者の観測結果¹⁰

表2—東京電力による福島第一原子力発電所56北放水口でのモニタリング結果(単位: Bq m⁻³)

年	平均	標準偏差
2014	580	442
2015	233	216
2016	138	60
2017	140	104
2018	104	63
2019	127	83
2020	217	200

以前はセシウム 137 放射能濃度の減少は速く、1970 年以降では表層海水中のセシウム 137 放射能濃度の見かけの半減時間は 15~20 年くらいであった(図2)¹¹。1986 年のチェルノブイリ事故に由来するセシウム 137 の小さなピークは、西部北太平洋でも見られた(図2)。2000 年代には、西部北太平洋でセシウム 137 放射能濃度は 1 Bq m⁻³ から 2 Bq m⁻³ まで低下していた(表1, 図2)。また核実験起源セシウム 137 が中緯度に多く降下した¹²ことを反映し、北太平洋中緯度亜熱帯循環域で極大を示す傾向は長く維持されていた(図2)。福島事故後では、セシウム 137 の北太平洋での最も速い輸送経路は、北太平洋の黒潮および黒潮続流の速度からも容易に類推されるように、表

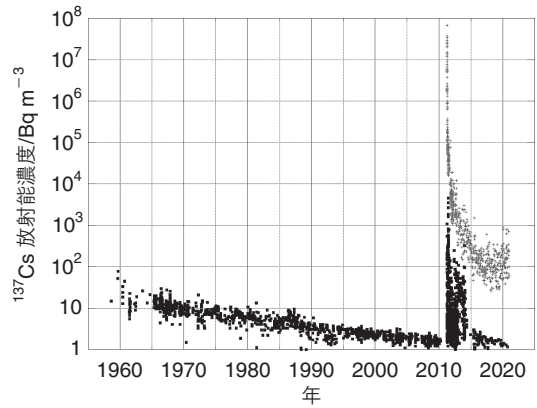


図2—1958年から2020年までの62年間の西部北太平洋亜熱帯循環域での表層海水中のセシウム 137 放射能濃度と2011年3月から2020年12月までの10年間の福島第一原発56北放水口でのセシウム 137 放射能濃度モニタリング結果
 +：東京電力による福島第一原子力発電所56北放水口でのモニタリング結果
 ■：データは青山によるHAMglobal2018データベース(doi: 10.34355/CRiED.U.Tsukuba.00001)⁹および更新版(HAMglobal2020, 出版準備中)

面輸送であった¹³。大気からの降下は、主に北東に移動した低気圧とともに事故サイトから主に北東側に広がった。表層でのセシウム 137 放射能濃度が 10 Bq m⁻³ を超える領域は 2011 年 7~9 月には東経 165 度まで広がっている。2011 年 10

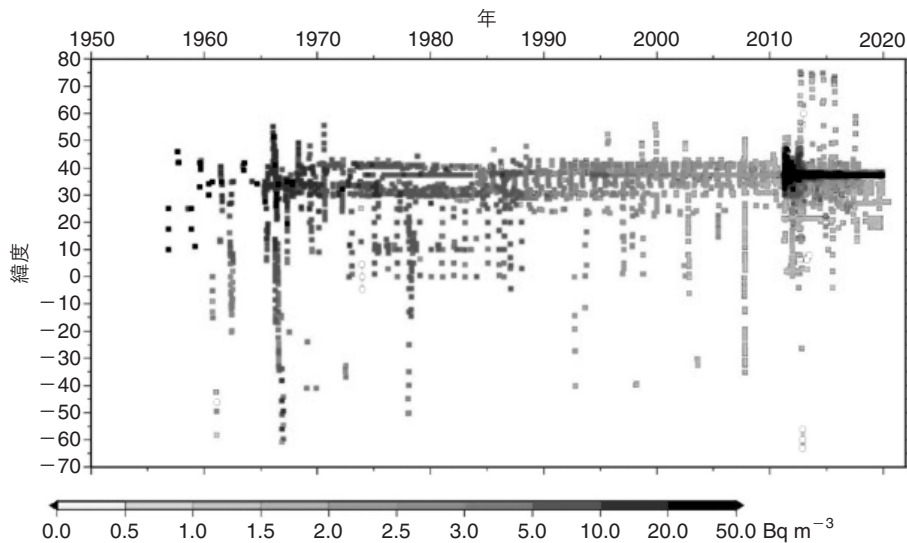


図3—西部太平洋での表層海水中のセシウム137放射能濃度の変遷

～12月には東経170度程度まで広がっており、さらにその東側の東経170度から西経170度の領域でも、わずかなセシウム137放射能濃度の上昇が見出されていた。さらに、2012年1～3月では表層でのセシウム137放射能濃度が10 Bq m⁻³を超える領域は東経180度線(日付変更線)付近まで達していることが観測された。この観測結果から東への移動速度を見積もると、270日間で1800 km 移動したことになり、1日あたり7 kmあるいは8 cm s⁻¹という推定ができた¹³。海洋物理学の観測から見積もられているこの海域での表層の流速は4～16 cm s⁻¹であることから、得られた速度はセシウム137が環境中に放出されたあとよく溶けて海水と共に輸送されていると考えることができることを示している。表1に示すように2014年夏には北米大陸沿岸で福島事故由来のセシウム137が検出されている¹⁴。厳密には大気輸送で事故直後にすでに北米大陸沿岸や北米大陸上に福島事故起源セシウムは到達していた¹⁵。海洋表層を経由して太平洋を横断した福島事故起源セシウムの移動速度は東太平洋では1日あたり3 km まで低下していた。これは東西での風速分布の差で基本的には説明可能な大きさであった¹³。北向き輸送では、北極海カナダ海盆では、2012年および2013年には事故起源セシウム137は観測されなかったが、2014年にはわずかでは

あるが深度150 m 付近の太平洋起源水中に事故起源セシウム134が検出された。セシウム137の表層輸送に関しては、モデルシミュレーションによる再現計算でも、北太平洋で観測されたセシウム137の輸送の様相と良好な一致を示し、ほぼ3年で太平洋を横断し北米大陸西海岸に到達した¹⁵ことが再現された。北米大陸西海岸での表層海水中セシウム137放射能濃度は2016年でも上昇傾向にあった。2015年から2017年の間に西部亜寒帯地域ではセシウム137放射能濃度は減少し、ベーリング海では増加していた。ベーリング海での増加は、おそらく北太平洋の亜寒帯循環によるベーリング海への福島原発事故由来のセシウム137の長距離輸送に起因している。そして長距離輸送に関連する2017年のベーリング海での増加は、将来北極海でセシウム137が増加する可能性を示唆している¹⁶。北緯20度付近で2019年・2020年とわずかな北太平洋中緯度域から赤道域への輸送も図3からは見てとれる。

南太平洋でのデータは少ないが、それでも北太平洋と同様に南太平洋中緯度亜熱帯循環域で濃度極大(1960年代)を示すこと、セシウム137放射能濃度自体は北太平洋に比べると小さいこと、福島原発事故の影響は認められないことがわかる。

青山(Isotope News, 2021年2月号)に詳しく書いたが、海洋への内部輸送は長期の影響評価においても重

要なので、簡単に触れておく。外洋に出た放射性セシウム 137 の輸送過程については、観測およびモデル研究によって、(1)表層輸送、(2)中央モード水形成にともなう長い時間スケールの内部輸送、(3)亜熱帯モード水形成にともなう相対的に早い内部輸送の3つの輸送経路が明らかになってきた^{7, 10, 13, 17~23}。これらの3つの領域への配分の結果は前回(3月号)図1に示してある。また表層輸送については既に前の節で述べた。2012年6~7月のセシウム 137 放射能濃度の最大値は、東経 165 度線上では北緯 34~39 度の約 400 m の深さで観測された²¹。この深さは中央モード水の範囲にあり、セシウム 137 放射能濃度は亜熱帯モード水を含むすべての周囲の海水の放射能濃度よりも高かった。2015 年では中央モード水に相当する水塊では事故起源放射性セシウムは観測されず、東方に輸送されてしまっていた。第三の経路は亜熱帯モード水の形成である。事故直後に黒潮・黒潮続流のすぐ南側に大気から沈着した放射性セシウムは、2011 年 3 月に同海域で形成されていた亜熱帯モード水の沈み込みに伴って亜熱帯域の亜表層(深度約 200~400 m)を南に運ばれ、2012 年 1 月には北緯 20 度まで到達した。さらに 2015 年夏に行った東経 165 度線に沿う観測の結果からは、セシウム 134 放射能濃度で見ることが出来る福島原発事故由来の放射性セシウムは亜熱帯モード水領域内の北緯 20 度から 30 度の深さ 300 m から 400 m に極大をもつ分布をしていることがわかっている(Aoyama 出版準備中)。これらの鉛直分布の観測結果は、福島原発事故由来の放射性セシウムが1年の時間スケールで海洋内部に導入される最も有効な経路が、亜熱帯モード水と中央モード水形成に伴う沈み込みであることを示していた。表層から沈み込んだ放射性セシウムは、放射壊変と移流拡散により濃度は減少していくが、一部は既に日本海に輸送されているとともに^{24, 25}、将来は太平洋赤道域からインド洋を通じて大西洋、および太平洋赤道域東部で赤道を南に越えて南太平洋に輸送されるであろう¹⁶。

トリチウム

トリチウム(³H)は、半減期が 12.4 年の水素の放射性同位体である。トリチウムの主な発生源は、宇宙線生成、核兵器実験、軍事生産、原子炉運転(特に重水炉運転)と核燃料再処理工場である²⁶。毎年約 78 PBq のトリチウムが宇宙線による核破砕によって生成され、大気中のトリチウムの総量は 1.3 EBq(EBq=10¹⁸ Bq)である。さらに、核実験によって 240 EBq のトリチウムが大気圏に注入されたと推定されている²⁶。核燃料再処理工場から、1970 年から 2008 年の間に 0.276 EBq が主に大西洋に放出された²⁷。原子炉の運転では、1990 年から 1997 年の間に、51.8 PBq のトリチウムが大気中に放出され、79.2 PBq のトリチウムが海洋に放出された(UNSCEAR 2000 レポートの付録 C の表 32 および表 35)。そしてそのほとんどは重水炉によって放出されている。1952 年に水爆実験が開始される前は、降水量のトリチウム放射能濃度は 180~1000 Bq m⁻³ の範囲であった。このトリチウム放射能バックグラウンド濃度は宇宙線による核破砕に起因し、地球の南北半球のそれぞれの中緯度で最大となっていた。1952 年の大気圏内核実験以降は実験によって生成されたトリチウムが降水中のトリチウムの主要なソースであった。前述のように、大気圏内核実験がトリチウムの最大の発生源であるため、表層海水中のトリチウム放射能濃度は、陸上の淡水と同様の傾向を示し、1963 年では北半球の多くの場所で表層海水中のトリチウム放射能濃度は極大となり 500~1 万 2000 Bq m⁻³ の範囲であった。その後、表層海水中のトリチウム放射能濃度は、降水や河川水中のトリチウム放射能濃度の減少傾向と同様に急速に減少した。世界海洋循環実験計画(WOCE)において北太平洋亜熱帯循環域でのトリチウム放射能濃度が得られている。1986 年、1993 年、1994 年、2004 年、2013 年に主に北緯 32 度および北緯 24 度の観測線に沿って得られたトリチウム放射能濃度は、1986 年に約 200~500 Bq m⁻³ であったが、

2013年には約 $50\sim 60\text{ Bq m}^{-3}$ に減少していた。したがって、福島事故が起きた2011年前後での外洋で原子力発電所からの計画的排出の影響を受けない場所でのトリチウム放射能濃度は、約 $50\sim 60\text{ Bq m}^{-3}$ であったと言える。対照的に、日本政府のモニタリングによる福島原発近傍でのモニタリング結果を図4に示すが、福島事故前の福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所からの運転に伴うトリチウムの計画的排出の結果、トリチウム放射能濃度は1986年には約 1000 Bq m^{-3} であった。これは外洋の値より数倍大きかった。2002年から2010年には、約 $450\sim 600\text{ Bq m}^{-3}$ に減少していた。その時は外洋よりほぼ1桁高かった。ここに見ることができる福島県沿岸での時間経過に伴う減少は、福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所の両方から1年あたりで約 $2\sim 3\text{ TBq}$ または1日あたりなら $5\sim 8\text{ GBq}$ までトリチウム排出量が減少していたことを示している。福島原発事故後では、トリチウム放出は福島第一原子力発電所からは制御できず、福島第二原子力発電所からは運転が止まっていてゼロとなっていることを反映し、図4に示すように福島第一原子力発電所近傍では十分に混合されおらずトリチウム放射能濃度は、1桁から2桁くらい事故前に比べると高いが、それ以外の場所では $50\sim 200\text{ Bq m}^{-3}$ となり、最低値は外洋の値と同じレベルとなっている。

福島原発事故後の福島沿岸のトリチウムの分析とその挙動を解析した結果について、筆者はつい最近論文を投稿した(印刷時点で下記で公開討論中 <https://doi.org/10.5194/bg-2021-10>, Tritium activity concentration and behaviour in coastal regions of Fukushima in 2014)。この論文で述べた内容の概要を以下に示す。2014～2015年に、福島の高沿岸でのトリチウム放射能濃度は、 90 Bq m^{-3} から 175 Bq m^{-3} の範囲であったが、沿岸から $12\sim 16\text{ km}$ に位置する観測点では $67\sim 83\text{ Bq m}^{-3}$ に減少していた。これは政府のモニタリング結果(図4)とも整合している。また、福島第一原発の56北放水口でのトリチウム放射能濃度は、大きく変動し2013年から

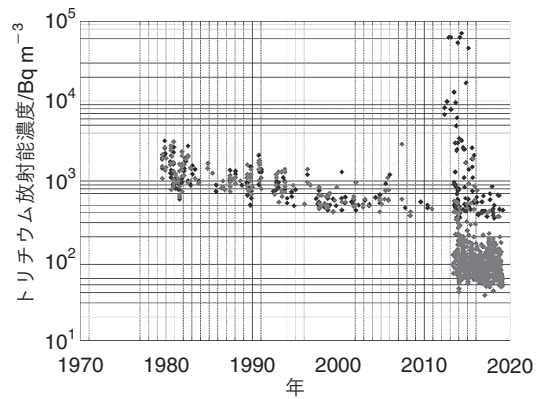


図4—日本政府のモニタリングによる福島第一原子力発電所近傍のトリチウムの長期モニタリング結果
 黒：福島第一原発極近傍前面海域、灰色：福島県沿岸(環境放射能データベース <https://search.kankyo-hoshano.go.jp/servelet/search.SelectMain?paraSelectKind=2&pageSID=225937480> アクセス日：2020年10月20日)

2019年の期間に一般的に減少傾向を示したが、請戸港と福島第二原発の港でのトリチウム放射能濃度は、2013年から2019年までの期間で大きな差はなかった。2014年、福島第一原発56北放水口ではトリチウム放射能濃度は河川水より有意に高いが、これを除いて、福島県沿岸の複数の河口と複数の港でのトリチウム放射能濃度は河川水のトリチウム放射能濃度と同じ程度であった。また、トリチウム放射能濃度は、福島第一原発の北と南に位置する観測点では同じ程度を示したが、セシウム137放射能濃度は、福島第一原発の北の観測点で低く、福島第一原発の南の観測点で高かった。これは、セシウム137の主な発生源が点発生源としての福島第一原発サイトである可能性があることを示しており、一方トリチウムの場合この点発生源に加えて南北に位置する河川からのトリチウムの海洋への輸送に関連している可能性があることを示している。また、福島第一原発サイトの近くで収集された魚の筋肉中の自由水中トリチウム放射能濃度は周囲の海水のトリチウム放射能濃度と同程度であった。これは、トリチウムの生体濃縮係数が約1である過去の知見と一致している。福島沿岸地域のトリチウムフラックスについては、福島第一原発サイトの北からの外洋海水によるものが1日あたり 52 GBq の大きな

フラックスを示したが、サイトの北に位置する河川によるフラックスは1日あたり3~5 GBqであった。一方福島第一原発の港湾からのトリチウムフラックスは1日あたり1.9~4.5 GBqと推定され、これは福島第一原発の北に位置する河川から得られたトリチウムフラックスに匹敵している。

(次回(3)に続く)

文献

- 1—Tsumune, D., et al., Distribution of oceanic ¹³⁷Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *J. Environ. Radioact.*, 2012. **111**: 100–108.
- 2—Inomata, Y., et al., Distribution of radionuclides in surface seawater obtained by an aerial radiological survey. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2014. **51**(9): 1059–1063.
- 3—Aoyama, M., et al., Dataset of time series of radiocaesium activity concentrations at Tomioka, Fukushima during the period from 10 June 2014 to 24 April 2019. 2020, Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics, University of Tsukuba.
- 4—Kumamoto, Y., et al., Radiocesium in North Pacific coastal and offshore areas of Japan within several months after the Fukushima accident. *J. Environ. Radioact.*, 2019. **198**: 79–88.
- 5—Tsumune, D., et al., One-year, regional-scale simulation of ¹³⁷Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, 2013. **10**(4): 5601–5617.
- 6—Aoyama, M., et al., Temporal variation of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs activities in surface water at stations along the coastline near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident site, Japan. *Geochem. J.*, 2012. **46**: 321–325.
- 7—Aoyama, M., et al., Mass balance and latest fluxes of radiocesium derived from the Fukushima accident in the western North Pacific Ocean and coastal regions of Japan. *J. Environ. Radioact.*, 2020. **217**: 106206.
- 8—Aoyama, M., HAM, Historical Artificial radioactivity database in Marine environment, Global 2018. 2019, Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics, University of Tsukuba.
- 9—Aoyama, M., et al., Dataset of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs activity concentrations in dissolved form and all particles at Tomioka, Fukushima in August 2014. 2020, Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics, University of Tsukuba.
- 10—Aoyama, M., et al., Fukushima radionuclides in the marine environment from coastal region of Japan to the Pacific Ocean through the end of 2016. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2019. **6**: 1–7.
- 11—Inomata, Y., M. Aoyama, and K. Hirose, Analysis of 50-y record of surface ¹³⁷Cs concentrations in the global ocean using the HAM-global database. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009. **11**(1): 116–125.
- 12—Aoyama, M., K. Hirose, and Y. Igarashi, Re-construction and updating our understanding on the global weapons tests ¹³⁷Cs fallout. *J. Environ. Monit.*, 2006. **8**(4): 431–438.
- 13—Aoyama, M., et al., Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs. *Biogeosciences*, 2013. **10**: 3067–3078.
- 14—Smith, J. N., et al., Arrival of the Fukushima radioactivity plume in North American continental waters. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2015. **112**(5): 1310.
- 15—Tsubono, T., et al., Evaluation of radioactive cesium impact from atmospheric deposition and direct release fluxes into the North Pacific from the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016. **115**: 10–21.
- 16—Kumamoto, Y., et al., Radiocesium in the western subarctic area of the North Pacific ocean, Bering Sea, and Arctic Ocean in 2015 and 2017. *Polar Science*, 2019. **21**: 228–232.
- 17—Aoyama, M., et al., ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. Part two: estimation of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs inventories in the North Pacific Ocean. *Journal of Oceanography*, 2016. **72**(1): 67–76.
- 18—Inomata, Y., et al., Estimate of Fukushima-derived radiocesium in the North Pacific Ocean in summer 2012. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018. **318**(3): 1587–1596.
- 19—Kumamoto, Y., et al., Time evolution of Fukushima-derived radiocesium in the western subtropical gyre of the North Pacific Ocean by 2017. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018. **318**: 2181–2187.
- 20—Kumamoto, Y., et al., Fukushima-derived radiocesium in the western North Pacific in 2014. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017. **311**(2): 1209–1217.
- 21—Aoyama, M., et al., ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. Part one: surface pathway and vertical distributions. *Journal of Oceanography*, 2016. **72**(1): 53–65.
- 22—Kumamoto, Y., et al., Impact of Fukushima-derived radiocesium in the western North Pacific Ocean about ten months after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of environmental radioactivity*, 2015. **140**: 114–122.
- 23—Kumamoto, Y., et al., Southward spreading of the Fukushima-derived radiocesium across the Kuroshio Extension in the North Pacific. *Scientific Reports*, 2014. **4**: 4276.
- 24—Inomata, Y., et al., Transport of FNPP1-derived radiocaesium from subtropical mode water in the western North Pacific Ocean to the Sea of Japan. *Ocean Sci.*, 2018. **14**(4): 813–826.
- 25—Aoyama, M., et al., Recirculation of FNPP1-derived radiocaesium observed in winter 2015/2016 in coastal regions of Japan. *Appl. Radiat. Isot.*, 2017. **126**: 83–87.
- 26—Galeriu, D. and A. Melintescu, Tritium: Radionuclide, in *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*. 2011, John Wiley & Sons, Ltd.
- 27—Aoyama, M., Artificial Radionuclides, in *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2019. pp. 136–152.