

福島環境動態について -海洋環境動態とALPS処理水の海洋放出-

津旨大輔

筑波大学

放射線・アイソトープ地球システム研究センター

tsumune.daisuke.gw@u.tsukuba.ac.jp

2025年7月1日

原子力委員会

謝辞

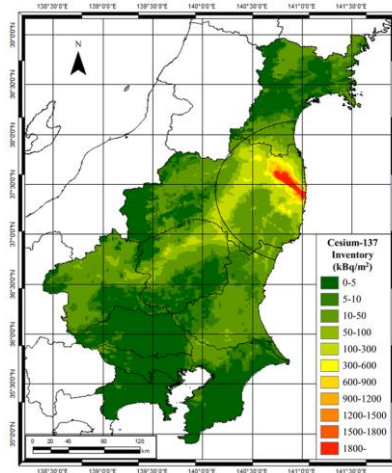
東京電力HD廃炉カンパニー、電力中央研究所、

筑波大学放射線・アイソトープ地球システム研究センター、日本学術会議 原発事故の環境影響に関する検討小委員会

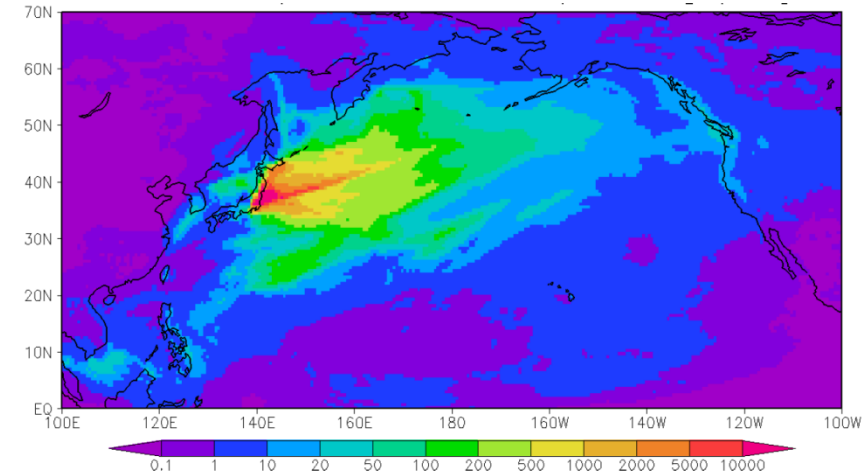
福島第一原子力発電所事故による ^{137}Cs の海洋環境への供給過程

- 大気放出 (^{137}Cs の放出量:15-20 PBq)
 - 大気降下 (初期の1ヶ月)
 - 北太平洋スケールの再循環
 - 陸域から河川を通じた供給
- 直接漏洩 (^{137}Cs の放出量: 3.6 ± 0.7 PBq)
 - 福島第一原子力発電所敷地または近傍地域からの現在も継続
- ALPS処理水の放出
- 大気圏核実験 (^{137}Cs の放出量: 500PBq)
- セラフィールド再処理工場 (^{137}Cs の放出量: 41PBq)

^{137}Cs 濃度が $1.8\text{E}+12$ Bq/ m^3 、検出限界が $1\text{E}-3$ Bq/ m^3 なので $1\text{E}+15$ の希釈倍率で検出が可能



^{137}Cs のインベントリ(Bq m^{-2})
トータルで2.5PBq (= 780g)
(kato et al., 2016)



^{137}Cs の大気降下のシミュレーション結果
(Bq m^{-2}) (by Masingar II of MRI)12-15PBq
(Aoyama et al., 2016)



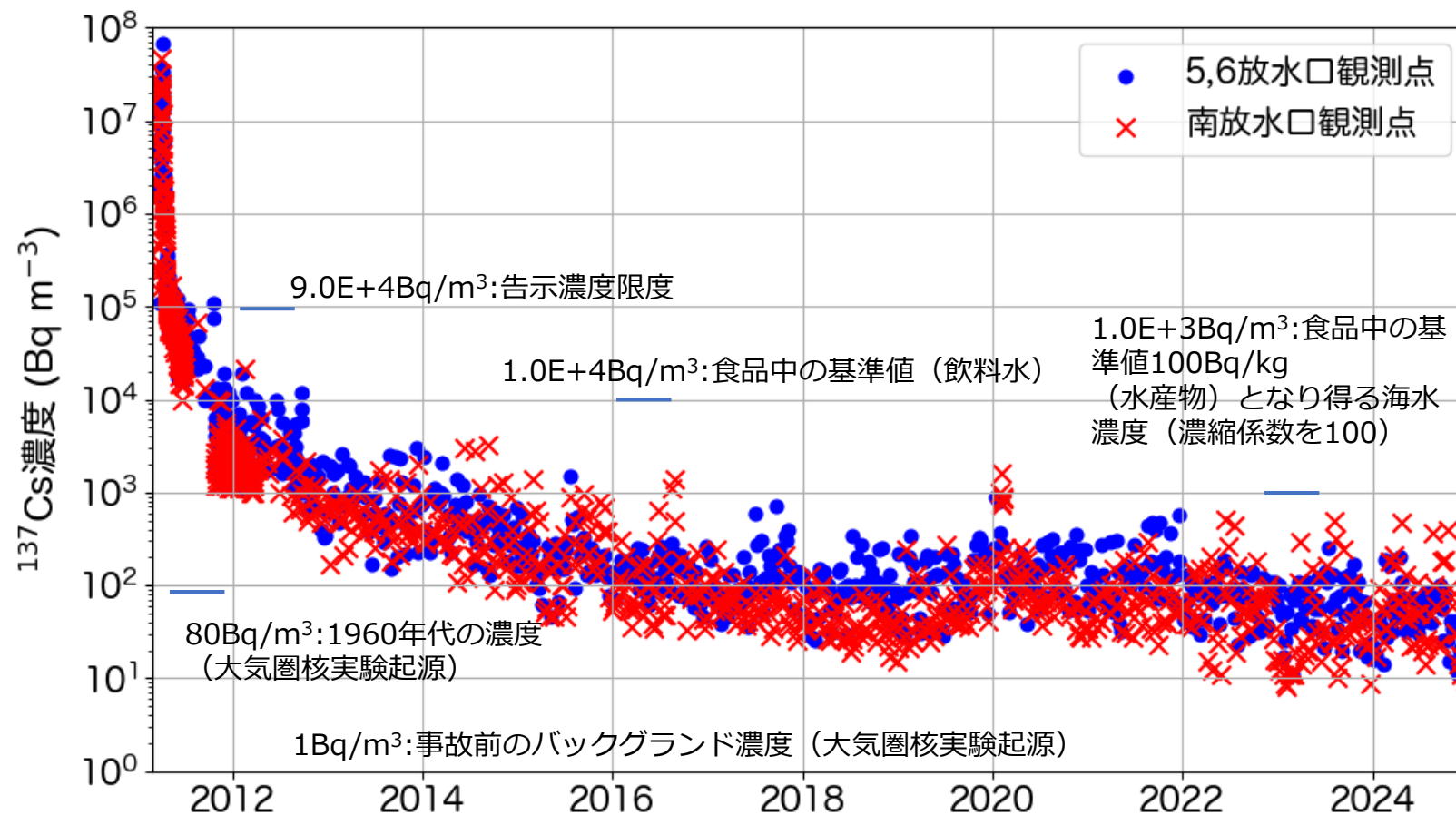
TEPCO Press release

直接漏洩量

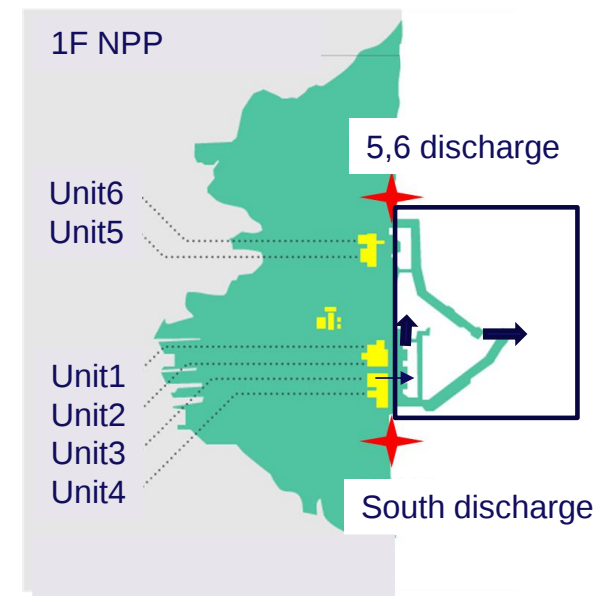
^{137}Cs : 3.6 ± 0.7 PBq

(Tsumune et al., 2012; 2013)

福島第一原子力発電所近傍の ^{137}Cs 濃度



福島第一原子力発電所近傍の ^{137}Cs 濃度



^{137}Cs 濃度の再構築

領域大気拡散モデル

(Hayami et al., 2012 ; Tsumune et al., 2013)

河川流量モデル

(HYDREEMS,
Toyoda et al.,
2009; Tsumune et al.,
2020; 2024a)

直接漏洩率の

推定(Tsumune et al., 2012)

海底堆積物移行
モデル(Misumi et al., 2014)

領域海洋モデル

(Tsumune et al., 2012;
2013; 2020; 2024a; 2024b)

動的海洋生物移行モデル

(Tateda et al., 2013; 2015; 2016; 2017; 2020)

北太平洋モデル

(Tsubono et al., 2016)

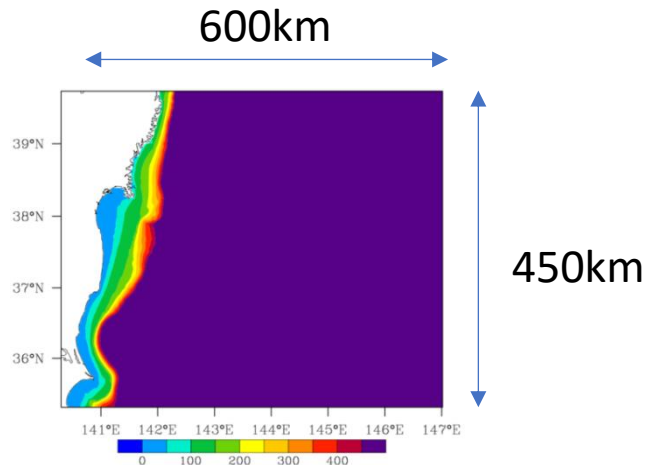
大気圏核実験に
よる ^{137}Cs の影響
も考慮



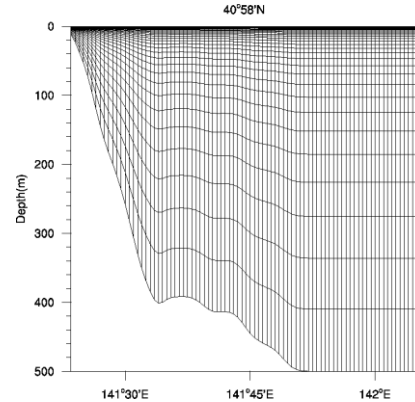
観測データとの比較を通じ、補間を行うことによって、現象解明に資する。

領域海洋モデル

- Regional Ocean Modeling system (ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005)
- 水平解像度: 1km x 1km, 鉛直30層(s座標), 最大水深 : 500m
- 福島第一原子力発電所近傍のみを、可変メッシュで200m x 200mに高解像度化

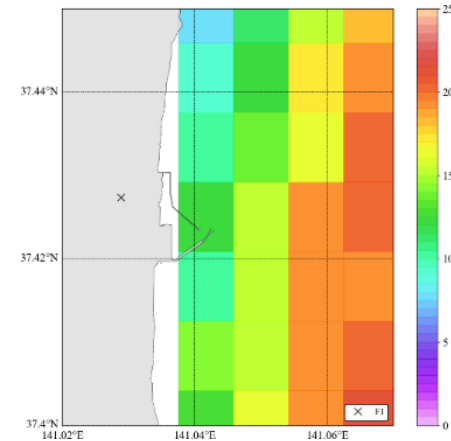


領域と海底地形

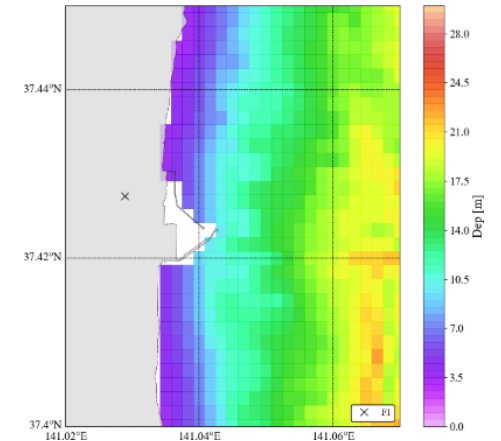


s座標

Tsumune et al., 2013

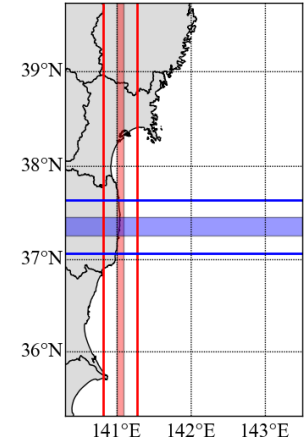


1km x 1km



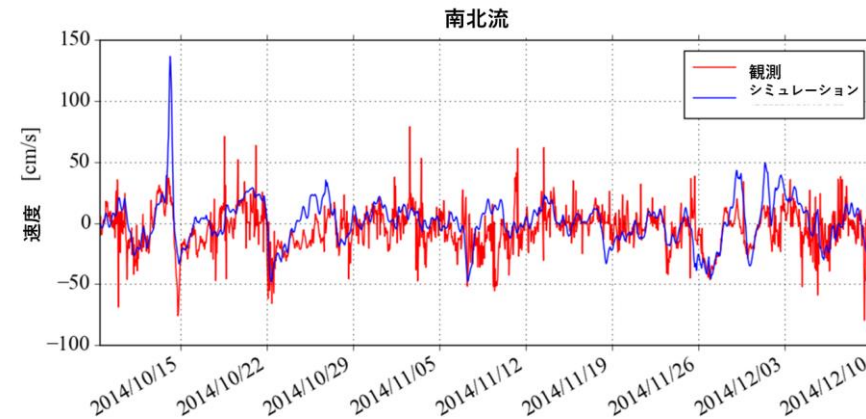
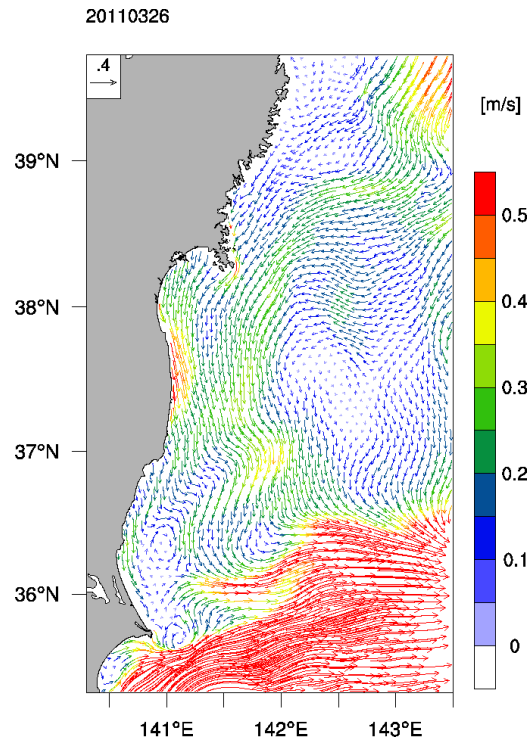
200m x 200m

Tsumune et al., 2024



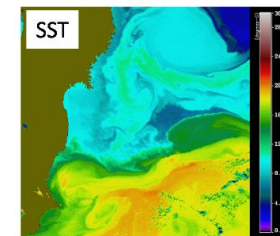
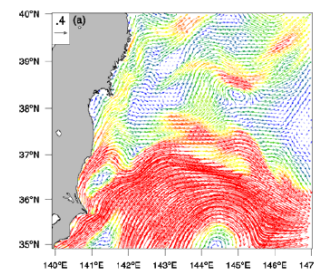
領域海洋モデル

- 気象庁再解析データ (JMA-GSM)を内挿する領域大気モデルによる風応力 (5km x 5km) (WRF; Skamarock et al., 2008)
- 境界条件(T, S, SSH (海洋再解析データJCOPE2, JCOPE2M(Miyazawa et al., 2009; 2017; 2019)))
- データ同化Nudging (T, S (海洋再解析データ, JCOPE2 , JCOPE2M (Miyazawa et al., 2009; 2017; 2019)))
- 潮汐 (TPX (Egbert and Erofeeva, 2002))



Tsumune et al., 2020

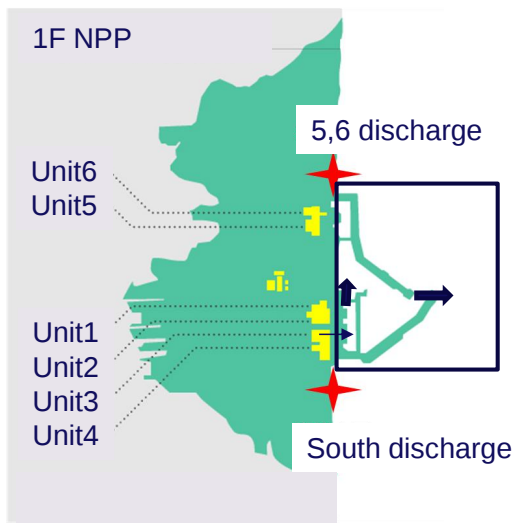
南北流の再現



中規模渦の再現

Tsumune et al., 2013

事故直後の直接漏洩率の推定結果



漏洩率
($Bq\ day^{-1}$)

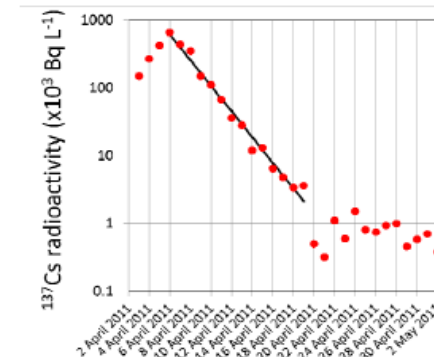
$$= \text{海水交換水量} \times \text{直接漏洩による } ^{137}\text{Cs} \text{濃度の観測結果}$$

(m^3/day) (Bq/m^3)

単位漏洩時の ^{137}Cs 濃度のシミュレーション結果
 ($(Bq\ m^{-3})/(Bq\ day^{-1})$)の逆数が
 海水交換水量(m^3/day)
 (Tsumune et al., 2012)



漏洩の状況の目視
 (東京電力, 2011)
 漏洩口の径と高さ、
 到達距離から流量を
 推定

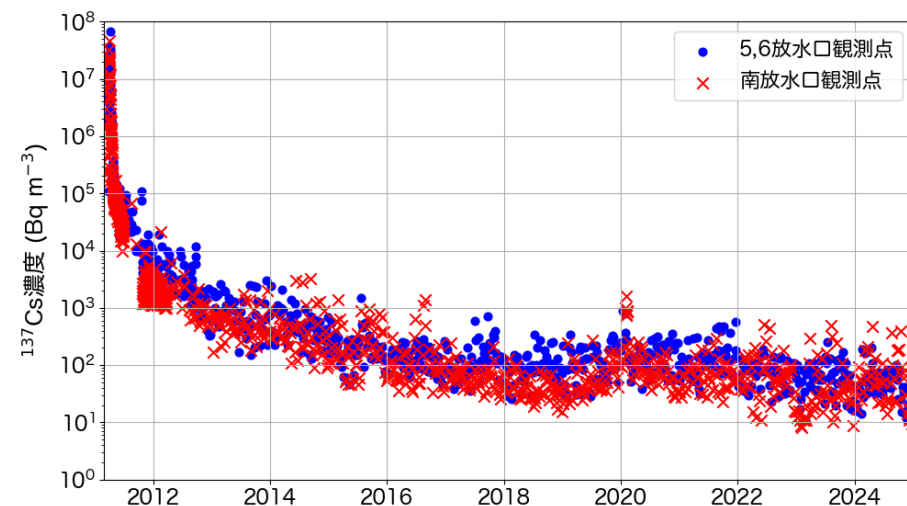


港湾内の ^{137}Cs の観測結果 (Kanda, 2013)
 港湾濃度の低減率から港湾の交換率を推定

期間	場所	海水交換水量	濃度	漏洩率	参考文献
		m^3/day	Bq/m^3	Bq/day	
2011/4/1 - 6	漏洩源	$1.03E+02$	$1.8E+12$	$1.9E+14$	Japanese Government (2011)
2011/4/3 - 6	港湾内	$8.3E+05$	$3.8E+08$	$3.1E+14$	Kanda(2013)
2011/3/26 - 4/6	港湾外	$2.0E+07$	$1.1E+07$	$2.2E+14$	Tsumune et al. (2012)

事故直後は漏洩源からの漏洩率、港湾内への漏洩率、港湾外への漏洩率の推定結果は整合的であった。

^{137}Cs 濃度と漏洩率



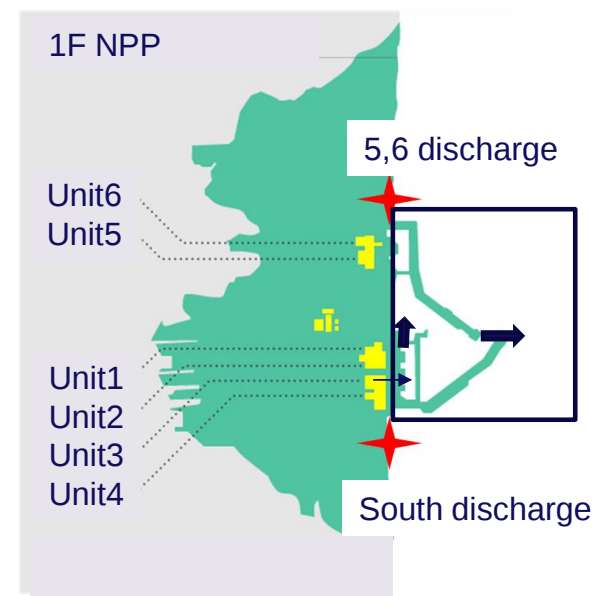
大気圏核実験による
 ^{137}Cs のバックグラウンド濃度は約 1 Bq m^{-3}

福島第一原子力発電所近傍における ^{137}Cs 濃度



^{137}Cs の港湾外への漏洩率は港湾内への漏洩率よりも一桁大きい。漏洩は継続しており、漏洩源は未解明

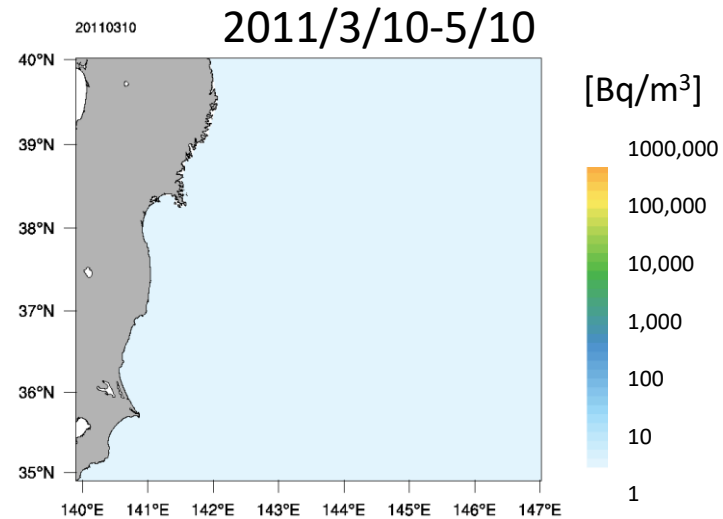
^{137}Cs 漏洩率の推定結果



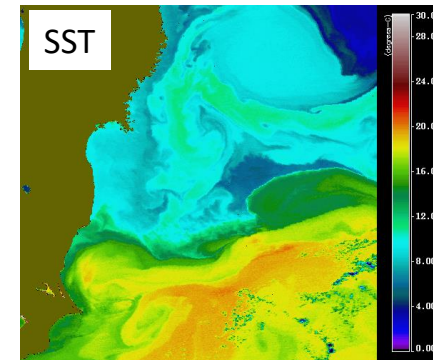
Tsumune et al., 2024a

表層 ^{137}Cs 濃度

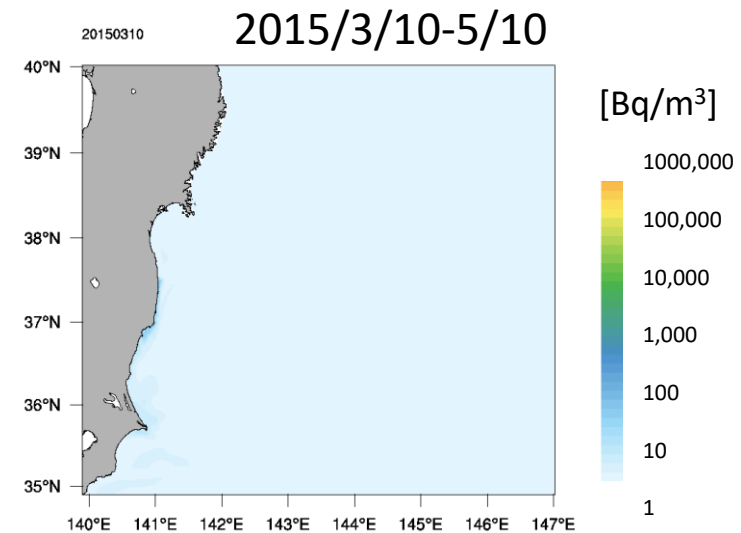
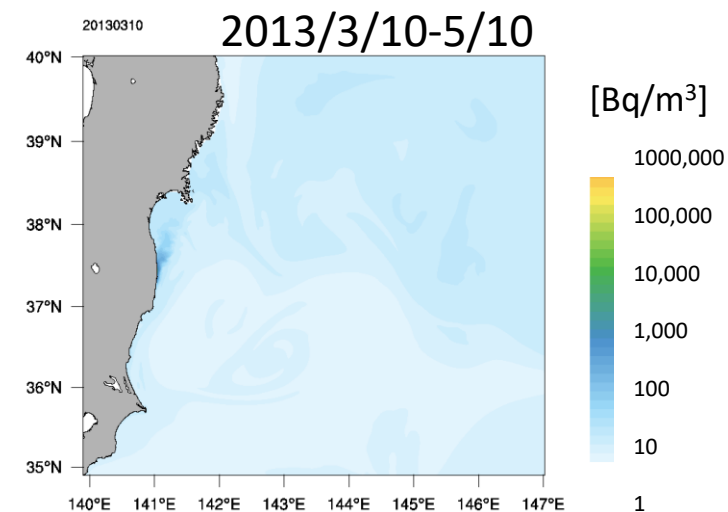
大気降下と
直接漏洩



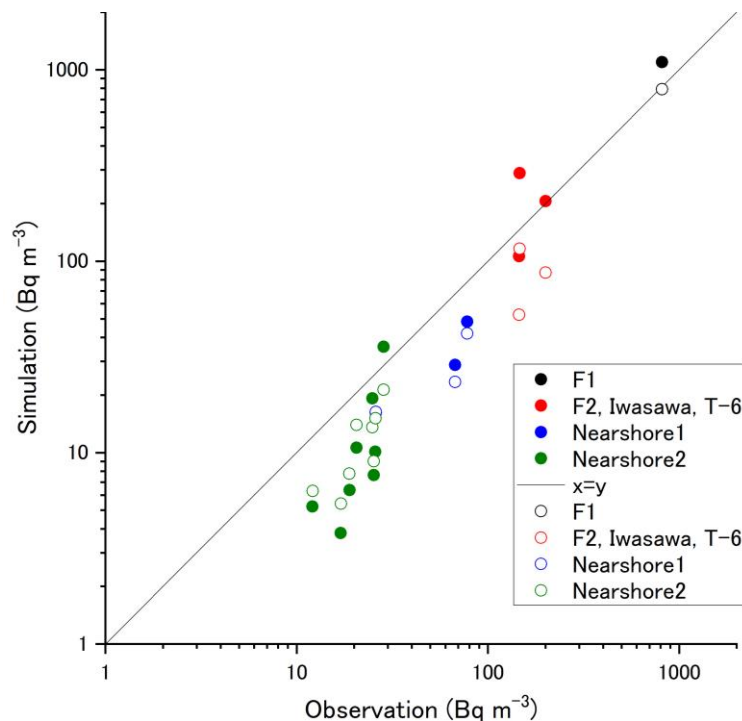
黒潮と中規模渦



北太平洋モデル
(Tsubono et al.,
2016)の ^{137}Cs 濃度を
境界条件



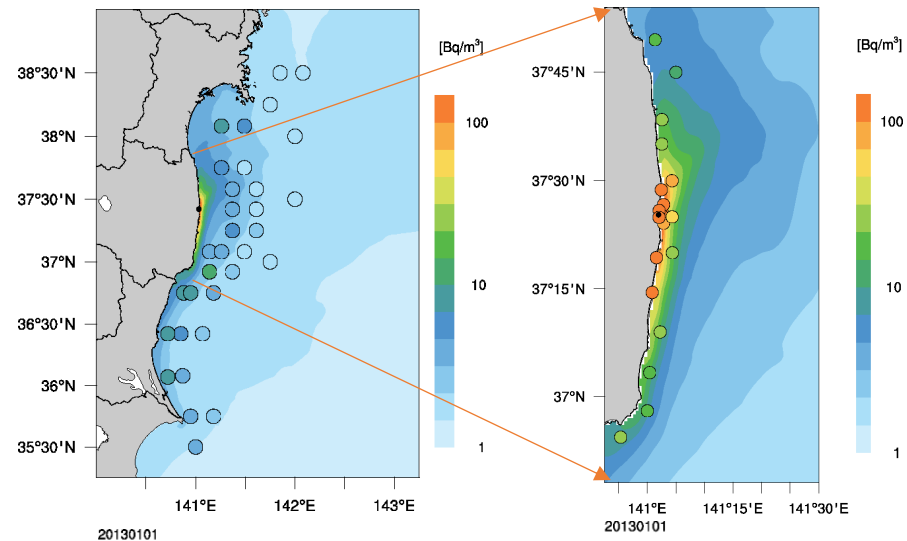
表層 ^{137}Cs 濃度



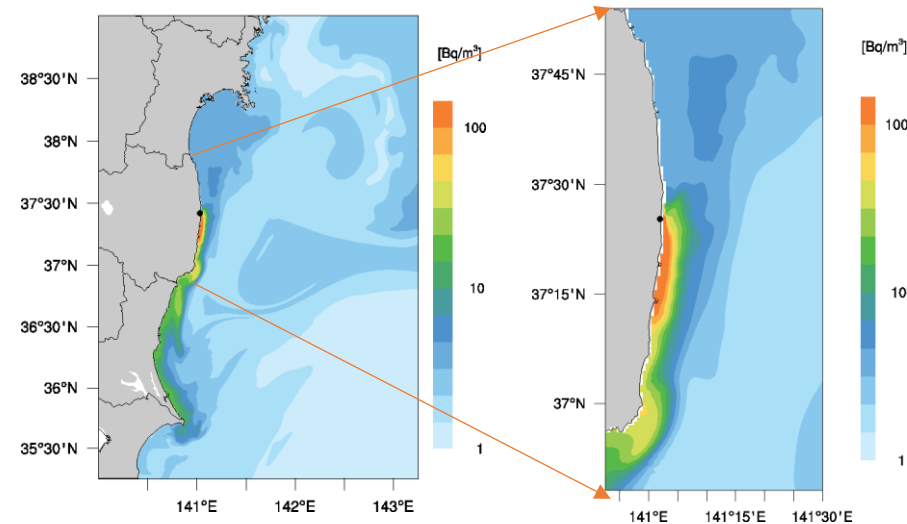
年平均表層 ^{137}Cs 濃度の観測結果
と計算結果の比較

Tsumune et al., 2020; 2024a

年平均



日平均



表層 ^{137}Cs 濃度

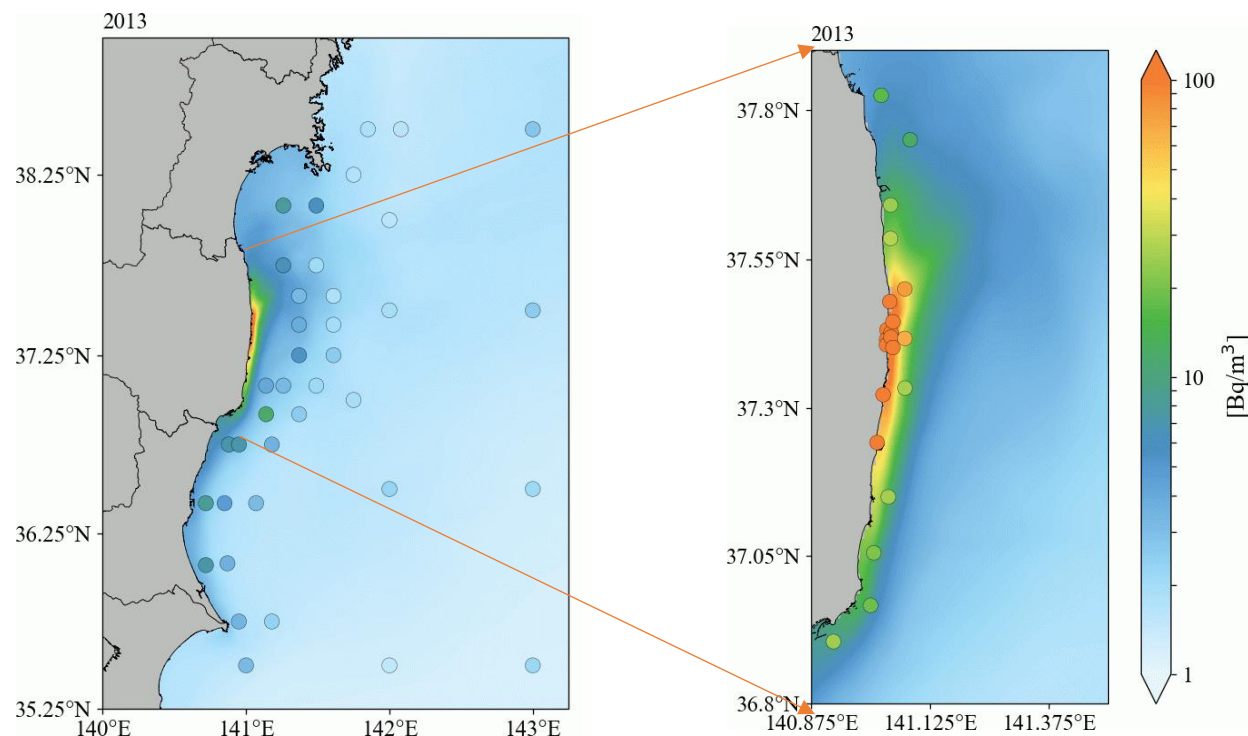
観測データ

- ERAN database
- MARIS database
- 包括的海域モニタリング閲覧システム

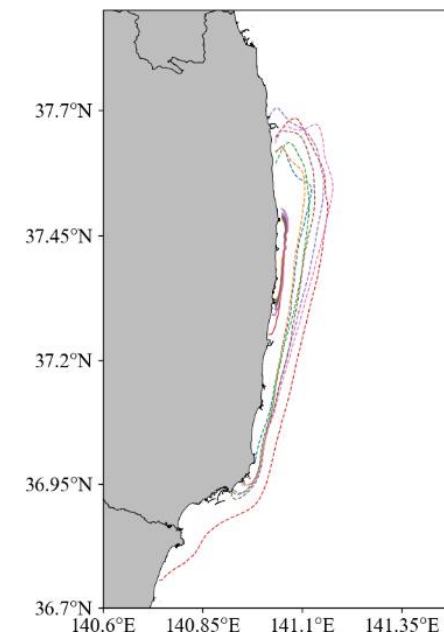
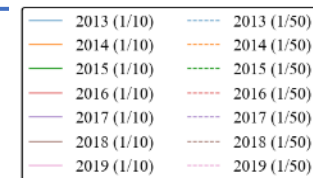
年平均表層 ^{137}Cs 濃度

点源からの放出率が分かれば，年平均濃度分布は予測可能である(Tsumune et al., 2020).

河川からの供給を
考慮することによ
って再現性は向上
した
(Tsumune et al.,
2024b)



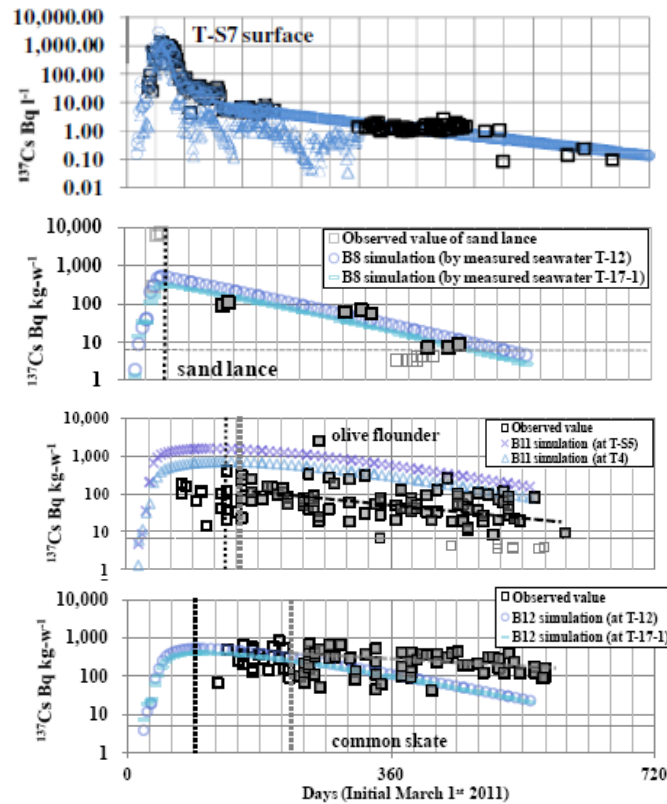
年平均表層 ^{137}Cs 濃度分布



各年の最大濃度に対する
希釈率の分布

2013年から2019年の年平均濃度分布は相似

動的海洋生物移行モデル



海水

イカナゴ

ヒラメ

コモンカスベ

海産魚の濃度は、吸収と代謝のバランスで動的に決まる。
海水の濃度変化が大きい場合は濃縮係数は適用できない。

Tateda et al., 2013

福島第一原子力発電所事故後の海洋汚染に対する評価では、実質的に食品中（水産物）の基準値（ ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計で100 Bq/kg）が最も重要な指標となっていた。

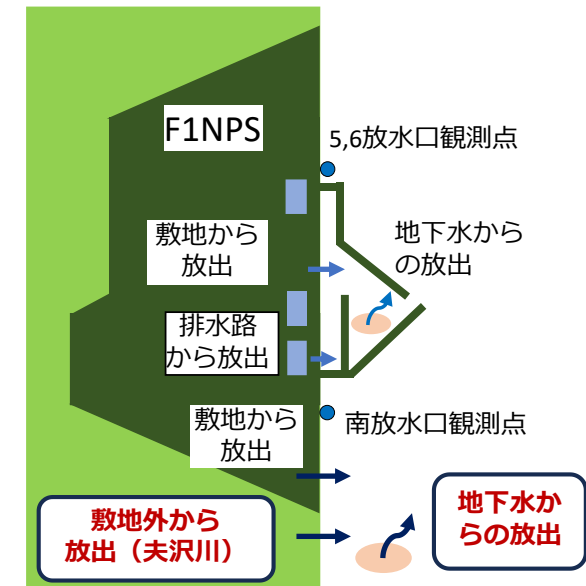
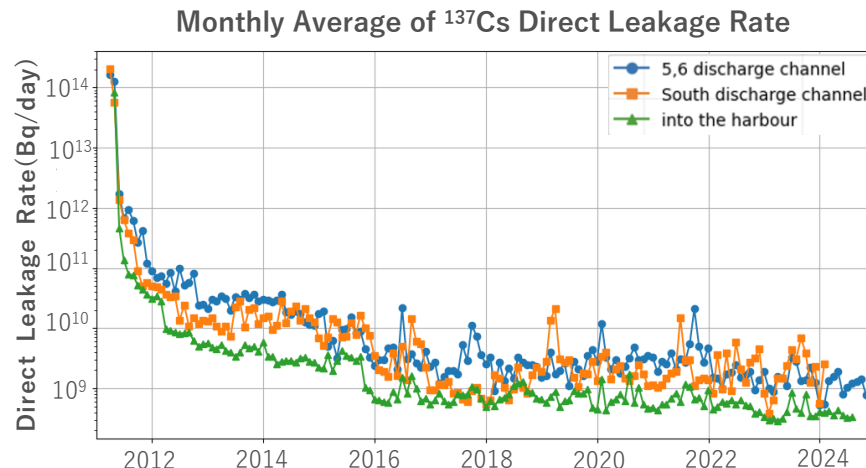
そのため、たとえ海水中の放射性セシウム濃度が ^{137}Cs の告示濃度（90 Bq/L）および ^{134}Cs の告示濃度（60 Bq/L）を下回っていたとしても、生物濃縮などの影響により水産物中の濃度が基準値を超える可能性がある。

魚種名	採取日	検出値 (Bq/kg)
コモンカスベ	2019年1月31日	161
クロソイ	2021年2月22日	500
クロソイ	2022年1月26日	1,400

これ以降、海洋において基準値を超える水産物は見つかっていない

福島第一原子力発電所事故の影響評価のまとめ

- 福島第一原子力発電所事故以降、海洋分散モデルの再現性が向上し、観測結果に対して定量的な比較が可能となった。
- 大量の観測データとモデル結果を組み合わせることによって、実態解明につながった。
- 敷地からの直接漏洩率がわかれば年間平均濃度分布は予測可能であることが分かった。
- 不確実性は残されている。
 - 継続している漏洩のメカニズム
 - 大気から海洋への降下の評価には不確実性が大きい
- 過酷事故時対応のための海洋モデルの準備は海外で整備されつつある。



海洋への ^{137}Cs 放出経路の概念図

敷地には海側遮水壁があるため、夫沢川、敷地外からの海底地下水の放出率、放出経路の解明が重要

ALPS処理水の海洋放出

- ^3H の影響、他の核種の影響
- 原子力施設からの放射性物質の海洋放出は認められているが、事故を起こした原子力施設の海洋放出は前例がない
- 福島第一原子力発電所事故起源の ^{137}Cs は北太平洋全域で検出されたため、ALPS処理水の海洋放出でも同じことが起きるのではないか
- 東京電力は「ALPS処理水の海洋放出に係る 放射線環境影響評価報告書（建設段階・改訂版）（2023年2月）」を公表
- <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/images/230220.pdf>
 - ^3H の年間放出率は事故前の福島第一原子力発電所と同じ22兆Bq/年とし、放出 ^3H 最大濃度は基準値の1/40の1500Bq/Lとした海洋放出。
 - 放射線影響は小さいことが示された。
- この結果はIAEAによっても支持された。
- https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_comprehensive_alps_report.pdf
 - 放射線影響は無視できる。
- 2023年8月に放出開始。放出水の濃度管理に加え、周辺海域の海洋モニタリングも実施

ALPS処理水の海洋への放出率と世界の放出率の比較

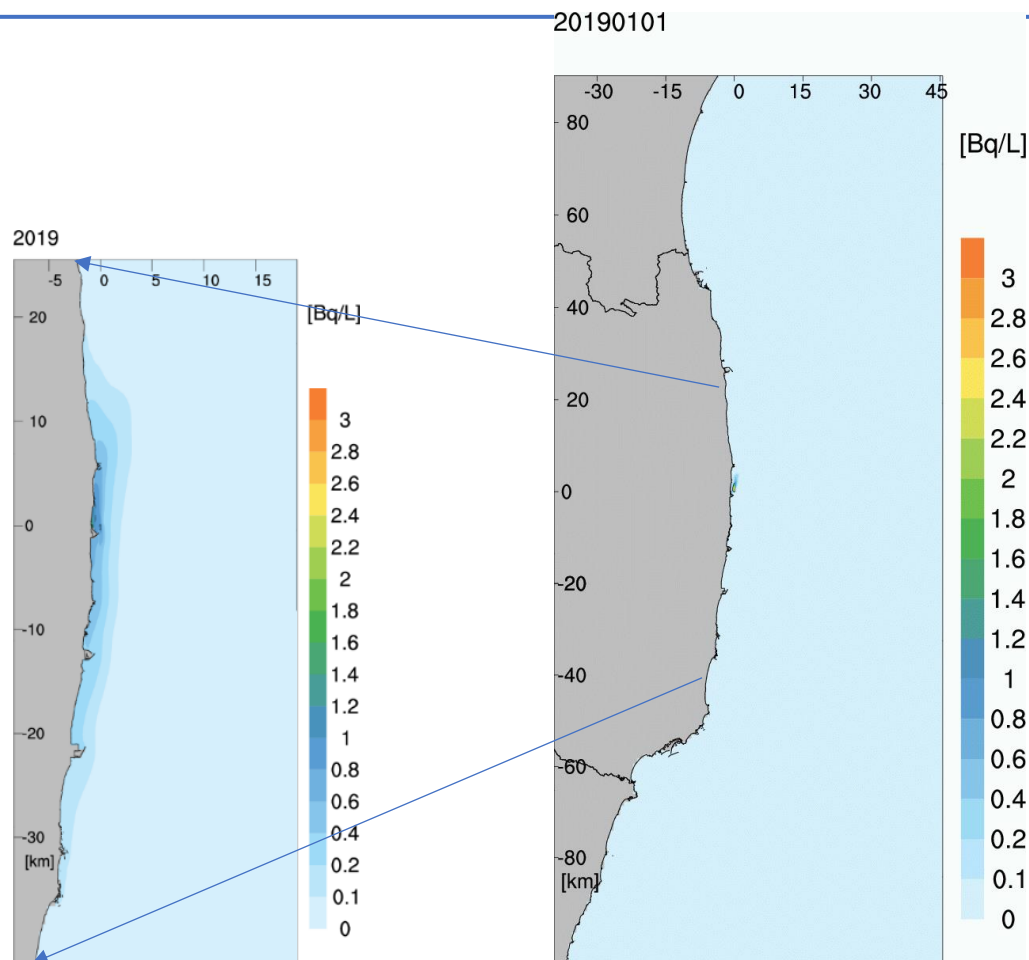
Nuclide	Annual release rate from F1NPS (K1 tank) (Bq/year)	Maximum annual liquid release rate in the world (Bq/year)	Site	Country	Year
H-3	2.2E+13	1.0E+22	Bohunice	Slovakia	2017
C-14	2.4E+09	1.2E+13	Sellafield	UK	1995
Mn-54	1.3E+04	2.5E+12	Winfrith	UK	1984
Fe-55	3.3E+08	3.1E+13	Winfrith	UK	1980
Co-60	3.5E+07	2.2E+13	Winfrith	UK	1980
Ni-63	3.3E+08	3.2E+12	Sellafield	UK	1988
Se-79	2.4E+08				
Sr-90	3.0E+07	6.0E+14	Sellafield	UK	1978
Y-90	3.0E+07	1.2E+12	Hinkley Point	UK	1976
Tc-99	1.1E+08	1.9E+14	Sellafield	UK	1995
Ru-106	6.6E+06	1.6E+15	Sellafield	UK	1956
Sb-125	1.4E+07	1.8E+14	Cap de la Hague	France	1987
Te-125m	1.4E+07	2.3E+11	Hinkley Point	UK	1969
I-129	3.3E+08	1.8E+12	Cap de la Hague	France	1997
Cs-134	1.2E+06	1.1E+15	Sellafield	UK	1975

Nuclide	Annual release rate from F1NPS (K1 tank) (Bq/year)	Maximum annual liquid release rate in the world (Bq/year)	Site	Country	Year
Cs-137	5.8E+07	5.3E+15	Sellafield	UK	1975
Ce-144	8.3E+04	6.4E+14	Sellafield	UK	1971
Pm-147	7.1E+06	8.6E+13	Sellafield	UK	1980
Sm-151	1.4E+05				
Eu-154	1.2E+06	3.8E+13	Sellafield	UK	1978
Eu-155	2.4E+06	7.8E+12	Sellafield	UK	1978
U-234	9.9E+04	1.6E+11	Sellafield	UK	1973
U-238	9.9E+04	1.2E+12	Sellafield	UK	1973
Np-237	9.9E+04	1.2E+13	Sellafield	UK	1978
Pu-238	9.4E+04	1.6E+11	Sellafield	UK	1973
Pu-239	9.9E+04	5.4E+13	Sellafield	UK	1973
Pu-240	9.9E+04	2.1E+05	Ringhals	Sweden	2008
Pu-241	3.5E+06	9.8E+15	Sellafield	UK	1977
Am-241	9.7E+04	1.2E+14	Sellafield	UK	1974
Cm-244	8.0E+04	2.6E+09	Cap de la Hague	France	2006

TEPCO, 2023

IAEA DIRATA database

ALPS処理水放出時の ^3H 濃度分布予測



年平均

日平均

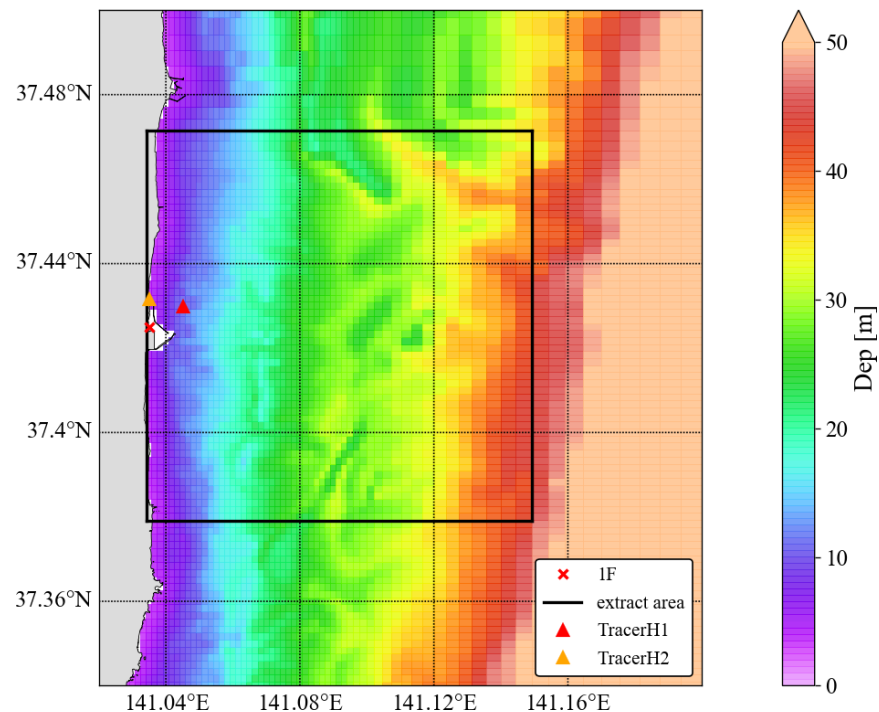
表層 ^3H 濃度分布

年平均濃度分布において、バックグラウンド濃度よりも高くなるのは福島沿岸のみ

日平均濃度の時空間変動は大きい

多核種除去設備等処理水（ALPS 処理水）の海洋放出に係る放射線環境影響評価報告書（建設段階・改訂版）
2023 年2 月 東京電力ホールディングス株式会社

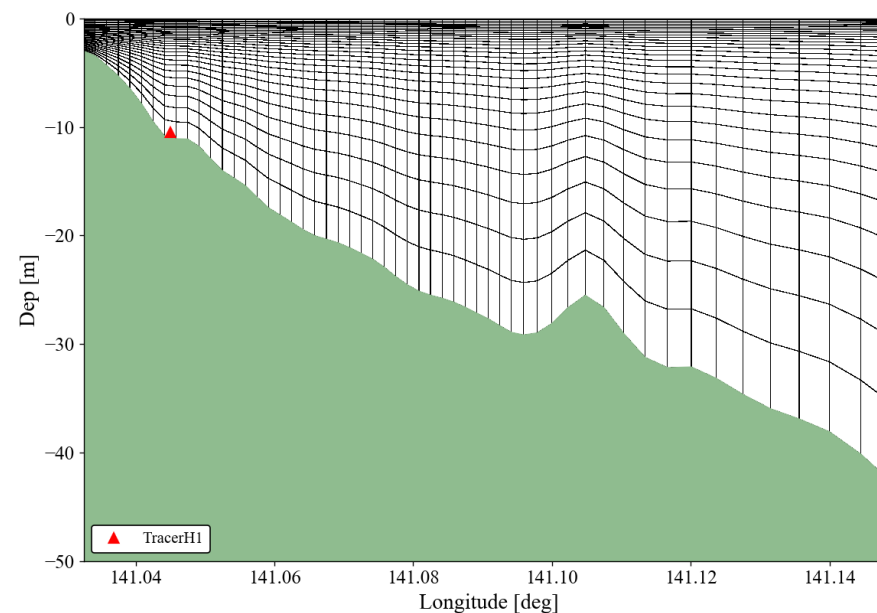
年平均 ^3H 濃度



海底地形
(10km x 10kmの範囲)
(IAEA, GSG-10, 2018)

年平均 ^3H 濃度(Bq/L)
10km x 10kmの範囲

年	全層	表層	底層
2019	5.6E-02	1.2E-01	6.0E-02



放射性物質濃度の予測結果とデータベースにおける濃度との比較

Nuclide	ALPS	Maxmum activity in MARIS				Adjacent to the F1NPS	
	Average activity at 10km x 10km area (Bq/L)	Activity (Bq/L)	Lat	Lon	Date	Activity (Bq/L)	Date
H-3	5.6E-02	7.0E+03	49.66	-1.96	2010/10/10		
C-14	6.0E-06	5.4E-04	33.10	-139.57	1973/8/30		
Mn-54	3.4E-11						
Fe-55	8.4E-07						
Co-60	8.8E-08	5.1E-02	49.71	-1.95	1991/2/15	5.9E+04	2011/3/25
Ni-63	8.4E-07						
Se-79	6.0E-07						
Sr-90	7.6E-08	1.9E-01	46.55	31.40	1988/7/25	8.5E+05	2012/3/26
Y-90	7.6E-08						
Tc-99	2.8E-07	3.3E+00	54.41	-3.57	1995/12/15		
Ru-106	1.7E-08	7.5E+00	54.40	-3.53	1983/5/4	3.7E+05	2011/3/23
Sb-125	3.4E-08	7.4E-01	49.65	-1.94	1983/5/3	1.5E+04	2012/3/26
Te-125m	3.4E-08						
I-129	8.4E-07	7.0E-05	58.31	10.72	2007/7/15		
Cs-134	3.0E-09	5.3E+01	54.43	-3.59	1974/11/21	6.7E+07	2011/4/7

Nuclide	ALPS	Maxmum activity in MARIS				Adjacent to the F1NPS	
	Average activity at 10km x 10km area (Bq/L)	Activity (Bq/L)	Lat	Lon	Date	Activity (Bq/L)	Date
Cs-137	1.5E-07	2.0E+02	54.43	-3.59	1974/11/21	6.8E+07	2011/4/7
Ce-144	2.1E-10	2.4E-02	59.03	21.08	1987/8/27		
Pm-147	1.8E-08						
Sm-151	3.4E-10						
Eu-154	3.1E-09						
Eu-155	6.0E-09						
U-234	2.5E-10	4.2E-02	34.27	35.65	2009/7/1		
U-238	2.5E-10	6.0E-02	22.32	91.83	1995/1/15		
Np-237	2.5E-10	1.0E-06	56.67	12.00	2008/6/15		
Pu-238	2.4E-10	1.2E+00	38.15	9.12	2004/6/24		
Pu-239	2.5E-10	1.8E-06	56.67	12.00	2008/6/15		
Pu-240	2.5E-10	1.2E-06	56.67	12.00	2008/6/15		
Pu-241	8.8E-09	2.6E-04	41.33	11.50	1975/9/21		
Am-241	2.5E-10	7.6E+00	35.78	-4.80	1999/12/15		
Cm-244	2.0E-10	9.0E-07	55.42	10.95	1994/5/19		

TEPCO, 2023

IAEA MARIS database

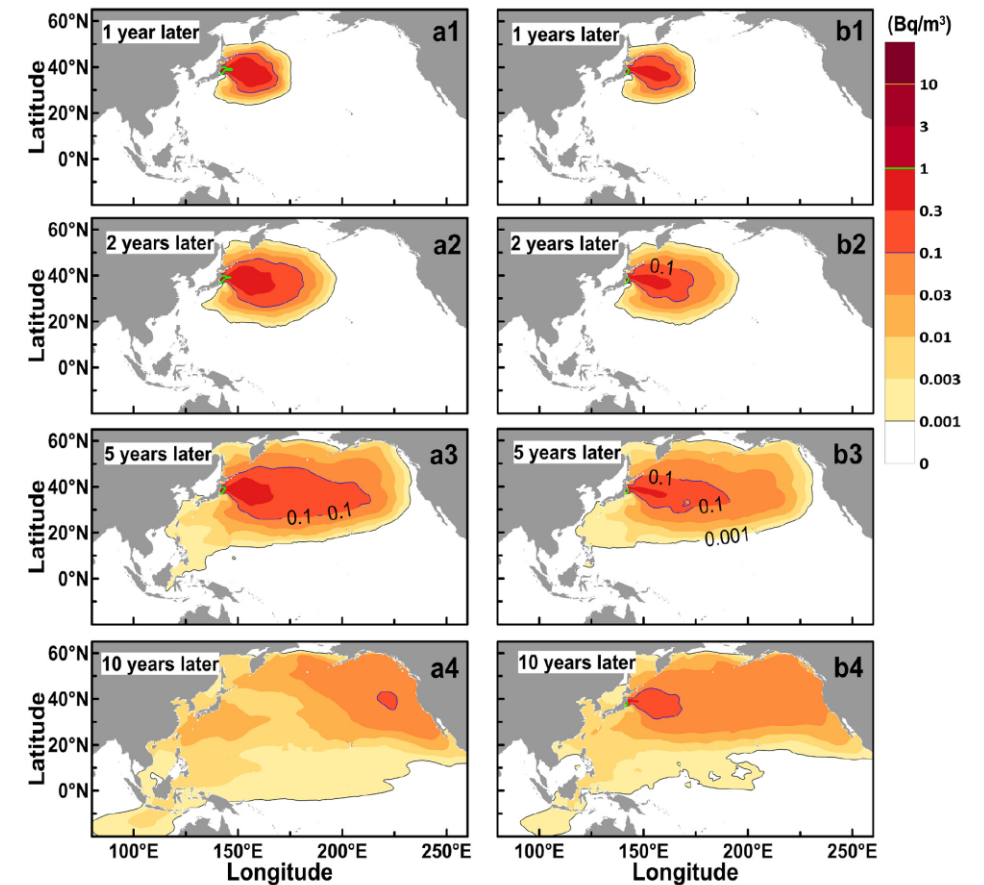
被ばく線量評価結果(東京電力, 2023)

評価ケース	ソースターム	K4 tank group		J1-C tank group		J1-G tank group	
	海産物摂取量	平均	多い	平均	多い	平均	多い
外部被ばく (mSv/year)	海水面	4.6E-10		1.7E-10		3.7E-10	
	船体	4.9E-10		1.8E-10		3.7E-10	
	水泳	3.2E-10		1.2E-10		3.5E-10	
	海浜砂	5.4E-07		2.0E-07		4.3E-07	
	漁網	1.1E-07		3.9E-08		8.3E-08	
内部被ばく (mSv/year)	飲水	3.4E-07		3.1E-07		3.1E-07	
	しぶき吸入	9.2E-08		1.9E-07		3.8E-07	
	海産物摂取	6.9E-06	3.1E-05	1.2E-06	5.5E-06	2.6E-06	1.1E-05
合計 (mSv/year)		8E-06	3E-05	2E-06	6E-06	4E-06	1E-05

国外から公表された影響評価論文

バックグラウンド濃度は70Bq/m³

- 影響は小さい (Smith et al., 2023; Bezhenar et al., 2021; Maderich et al., 2024)
- 「ALPS処理水」ではなく「Radioactive waste water」とした論文が公開されている。
- 放出率の違いを無視し、福島第一原子力発電所事故と同様に越境汚染とする論文が公開されている(Wang, et al., 2022; 2024) (ただし、福島第一原子力発電所事故において北太平洋規模で濃度上昇は観測されたが広域の汚染はなかった)。
- 福島汚染水処理は、環境に対して甚大かつ破滅的なリスクをもたらす可能性がある (Liu et al., 2025)。
 - 反論ペーパーを投稿済み
- 影響評価結果の検証が重要



2.1E+14 Bq/year (for one month) 9.1E+13 Bq/year (for one year)
表層トリチウム濃度(Zhao et al., 2019)

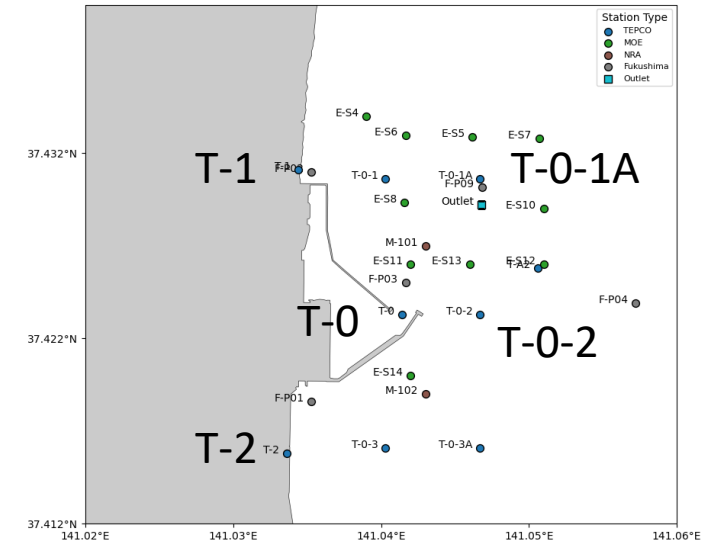
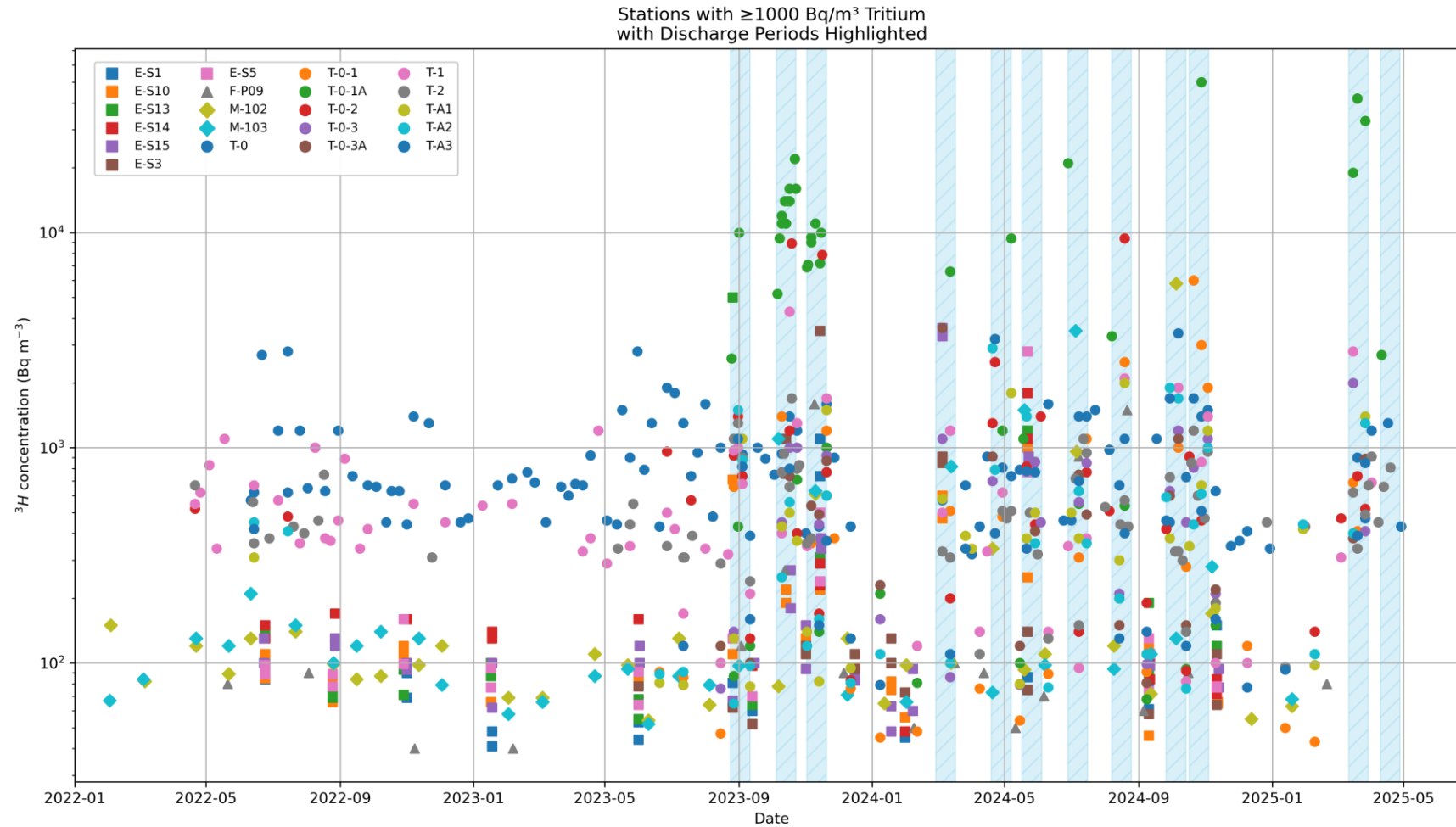
ALPS処理水の放出（22兆Bq／年以下）

		希釈前の平均 ³ H濃度(Bq/L)	告示濃度 比総和	放出開始	放出終了	希釈後の最大 ³ H濃度(Bq/L)	³ Hの放出 量（兆Bq）
2023年度	1回目	140,000	0.28	2023年8月24日	2023年9月11日	220	1.1
	2回目	140,000	0.25	2023年10月5日	2023年10月23日	189	1.1
	3回目	130,000	0.25	2023年11月2日	2023年11月20日	200	1
	4回目	170,000	0.34	2024年2月28日	2024年3月17日	254	1.3
合計							4.5
2024年度	1回目	190,000	0.31	2024年4月19日	2024年5月7日	266	1.5
	2回目	170,000	0.17	2024年5月17日	2024年6月4日	234	1.3
	3回目	170,000	0.18	2024年6月28日	2024年7月16日	276	1.3
	4回目	200,000	0.12	2024年8月7日	2024年8月25日	267	1.6
	5回目	280,000	0.078	2024年9月26日	2024年10月14日	405	2.2
	6回目	310,000	0.083	2024年10月17日	2024年11月4日	436	2.4
	7回目	310,000	0.076	2025年3月12日	2025年3月30日	403	2.4
合計							12.7

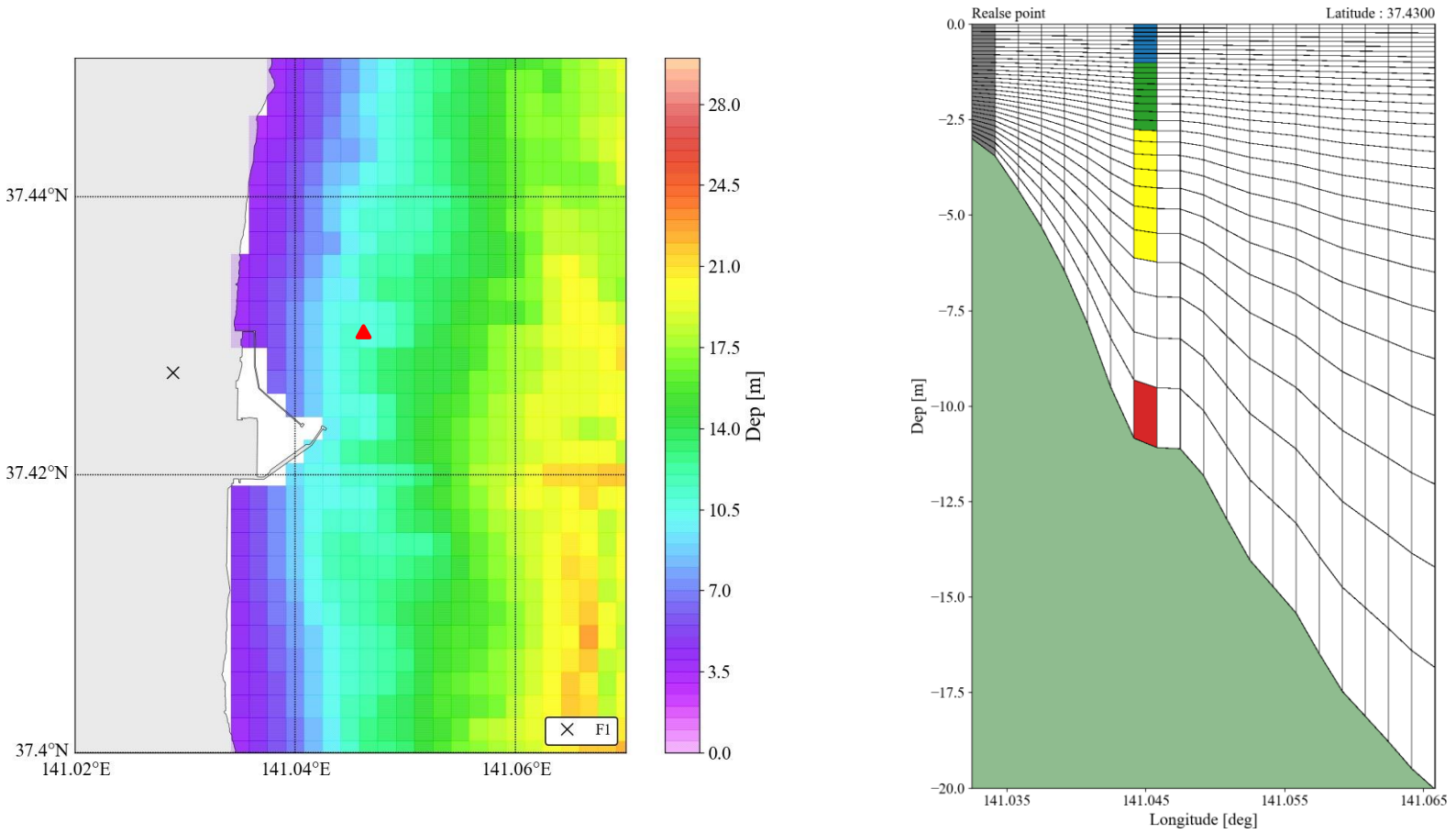
モニタリング

- 指標（放出停止判断レベル）（放出口付近（発電所から3km以内10地点）：700Bq/L、放出口付近の外側（発電所正面の10km四方内4地点）：30Bq/L）を超える濃度は見られなかった。
- 海生生物の濃度も海水の濃度レベルと変わらなかった。
- 被ばく線量評価に用いた10km x 10kmの範囲の年平均濃度をモニタリングから推定することは困難である。モニタリング結果で、モデル結果を検証することが重要である。
- モデルのスキルの検証例としても重要である。

モニタリングによる ^3H 濃度

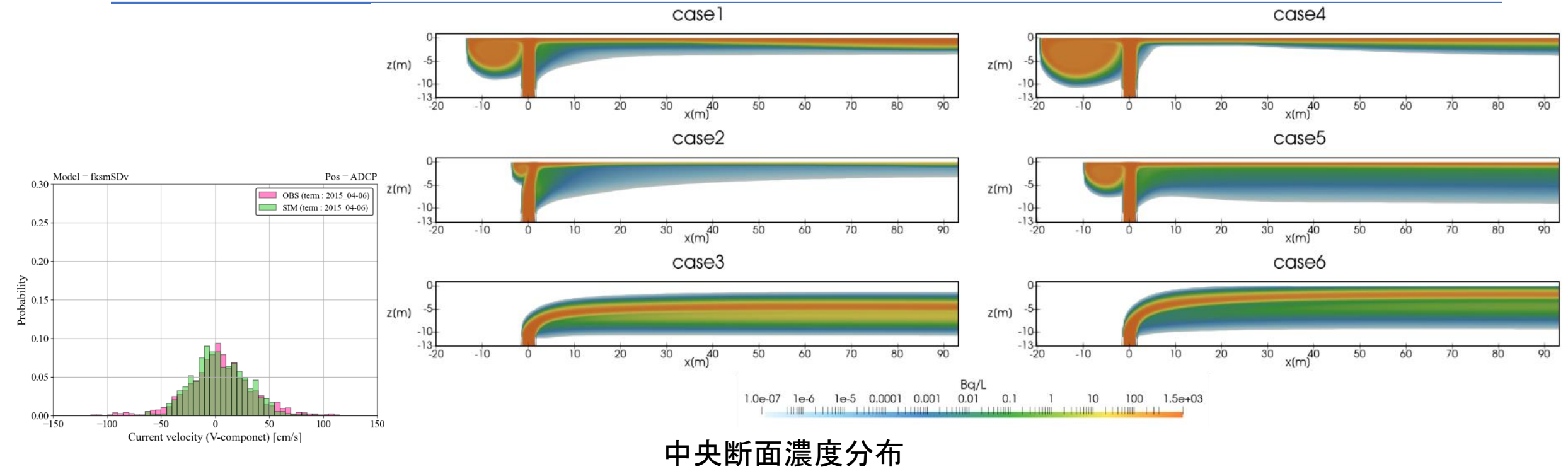


ALPS処理水の再現シミュレーション

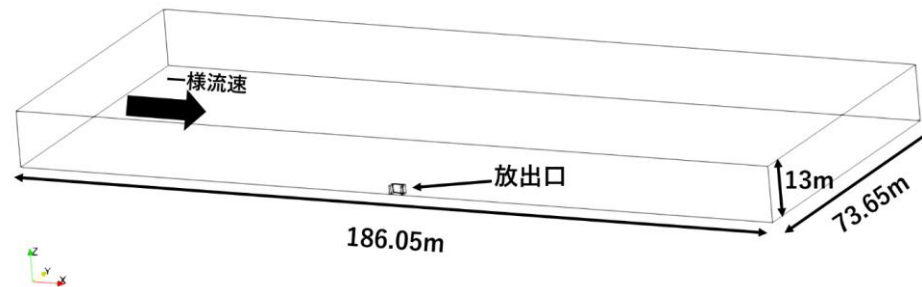


放出ト レーサ名	放出高さ
表層放出	0-1m
中層放出 1	1-3m
中層放出 2	3-6m
底層放出	9-11m

近傍モデルによる放出高さの評価

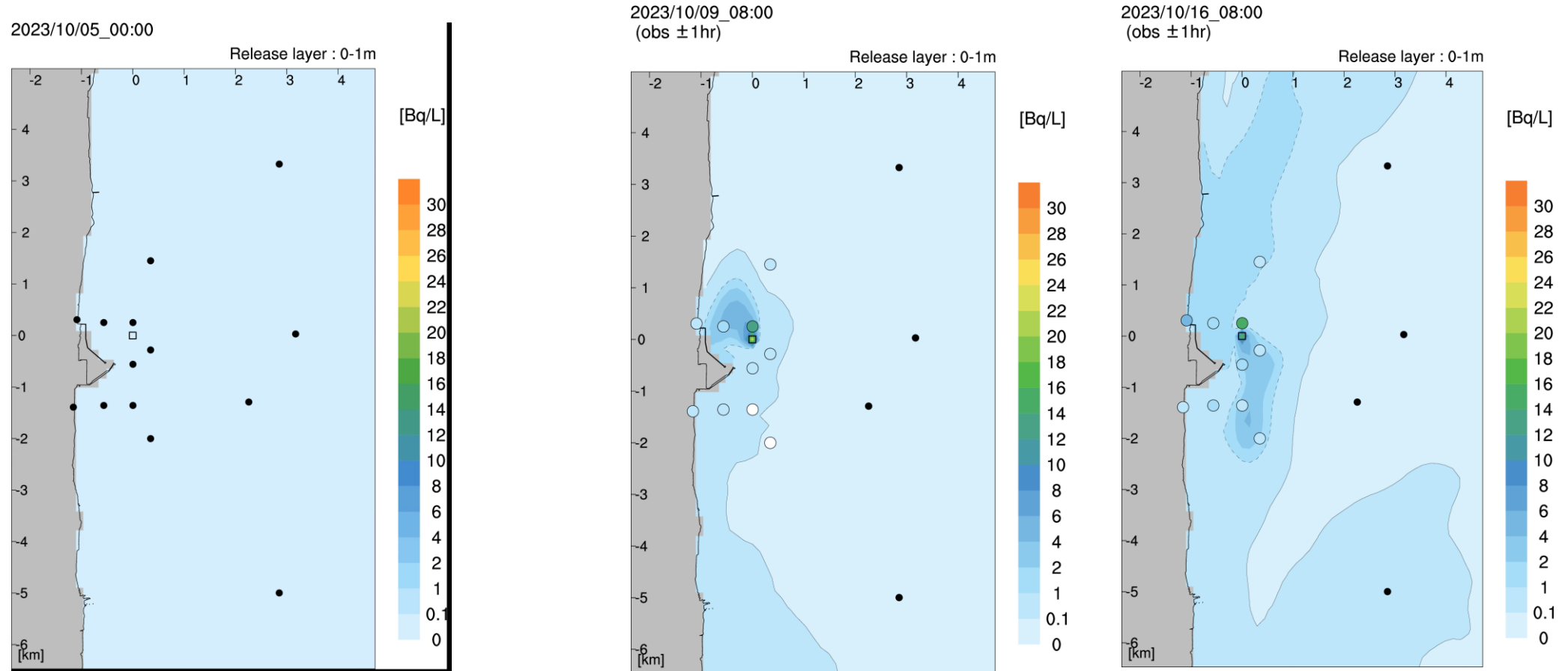


2015年4月から6月の
流速の観測結果と計
算結果の頻度分布

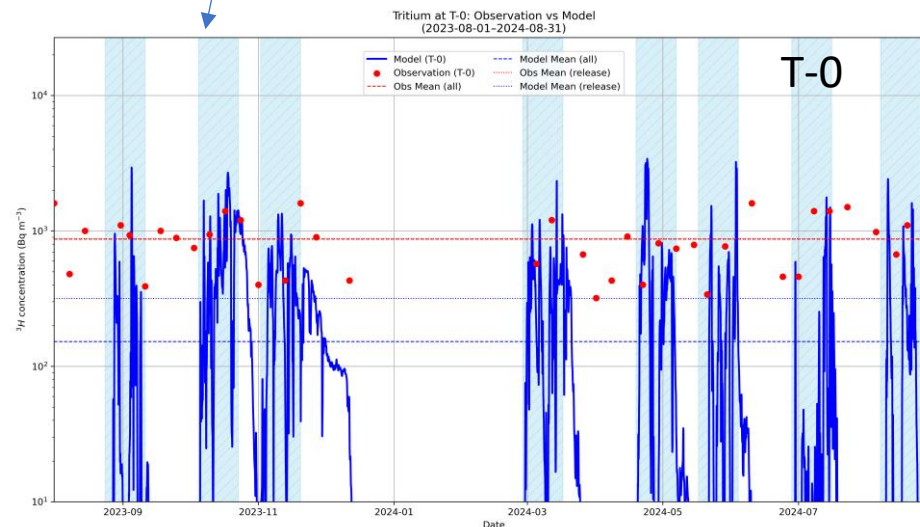
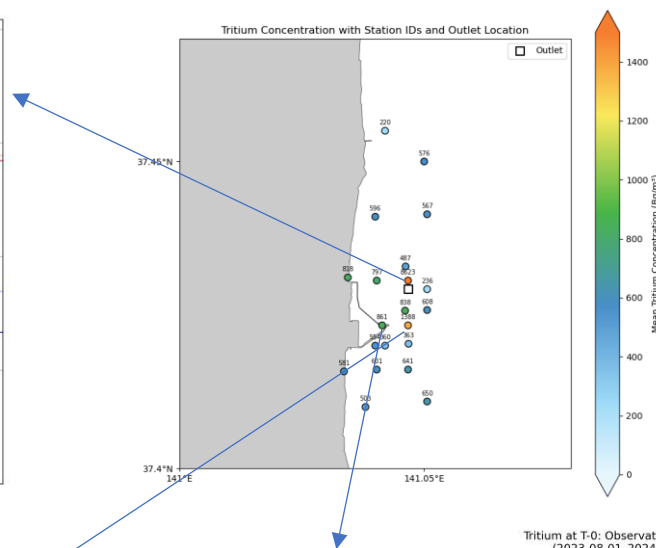
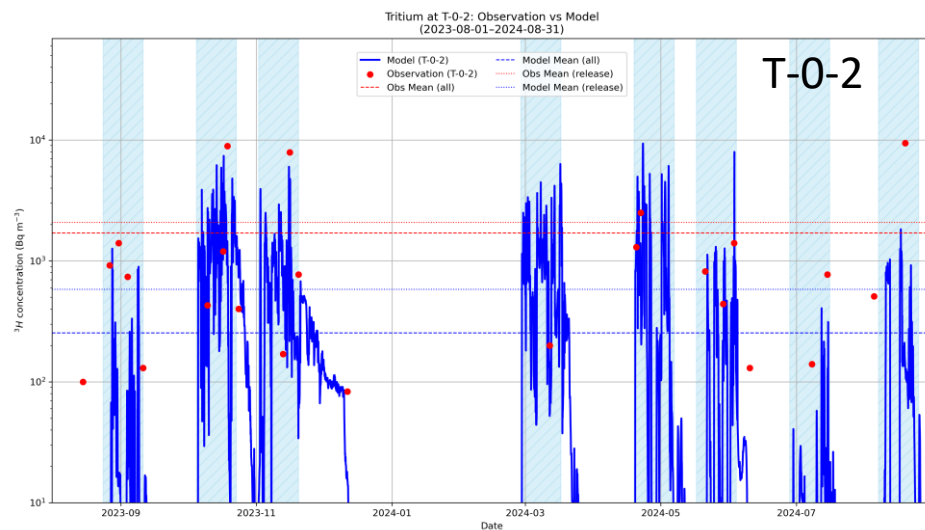
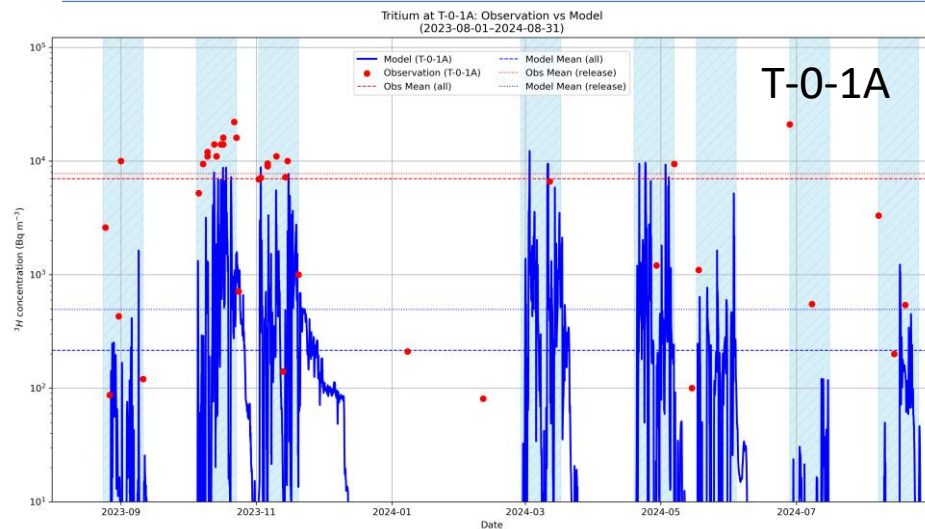


Case	海流 cm/s	放出流量 m ³ /s	放出流量 cm/s	放出濃度 Bq/L
1	5	3.9	62	1500
2	50	3.9	62	1500
3	100	3.9	62	1500
4	5	6	104	1500
5	50	6	104	1500
6	100	6	104	1500

Model reproducibility



観測結果とシミュレーション結果の比較



- 放出口の南北の濃度が高い
- モデルの解像度が200mなので極近傍の濃度上昇を再現できない。
- 観測結果の検出限界が100Bq/m³と比較的高いため、平均濃度が高めとなる
- 継続する漏洩の影響が見られる

ALPS処理水の海洋放出の影響評価

- 福島第一原子力発電所事故評価において検証された海洋モデルをALPS処理水の海洋放出の影響評価に用いた。
- 公衆の被ばく線量、標準動物および標準植物の線量率も非常に小さいと評価された。
- モニタリング結果における検出可能範囲は小さい。
- モデルの検証には至っていない。ただし、検出範囲が限定的という意味で、モニタリングとモデルは整合的である。
 - モデル相互比較
- 安全性について、モニタリング結果とともに継続的に情報発信を行う必要がある。