

原発事故とALPS処理水放出の海洋環境影響

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
津旨大輔

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

2025年1月20日
原子力総合シンポジウム2024

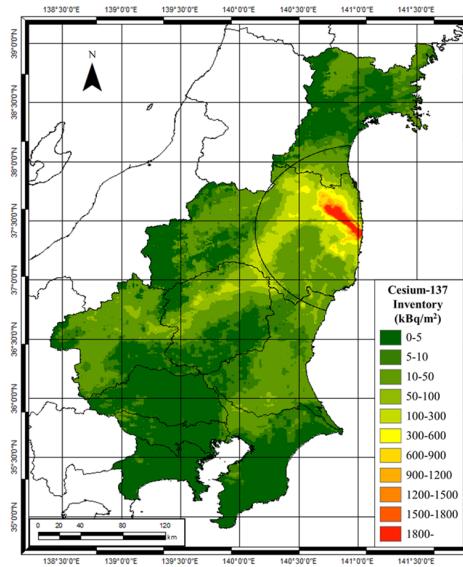
謝辞

原発事故の環境影響に関する検討小委員会、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

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
 - 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
- 福島第一原子力発電所敷地または近傍地域からの直接漏洩
 - 現在も継続
- 低レベル汚染水の放出
 - 影響は検出されなかった
- ALPS処理水の放出

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

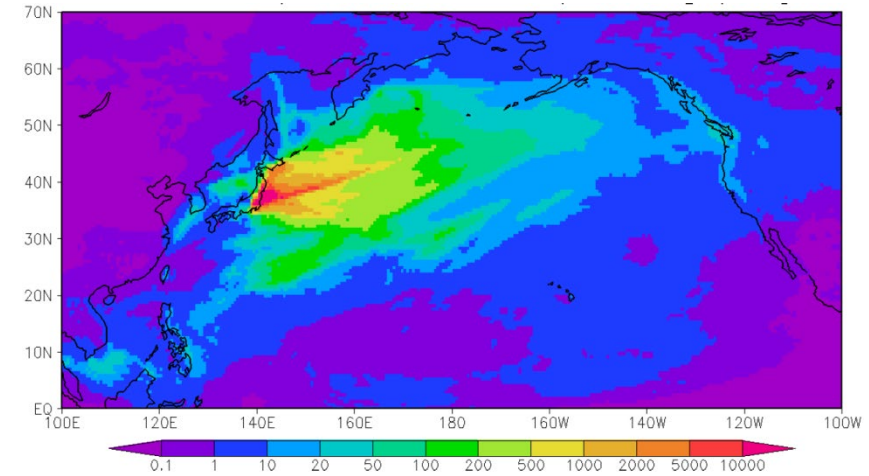


^{137}Cs のインベントリ
(Bq m^{-2})トータルで 2.5PBq
(kato et al., 2016)

直接漏洩

$^{137}\text{Cs} : 1.8\text{E}+12 \text{ Bq/m}^3$

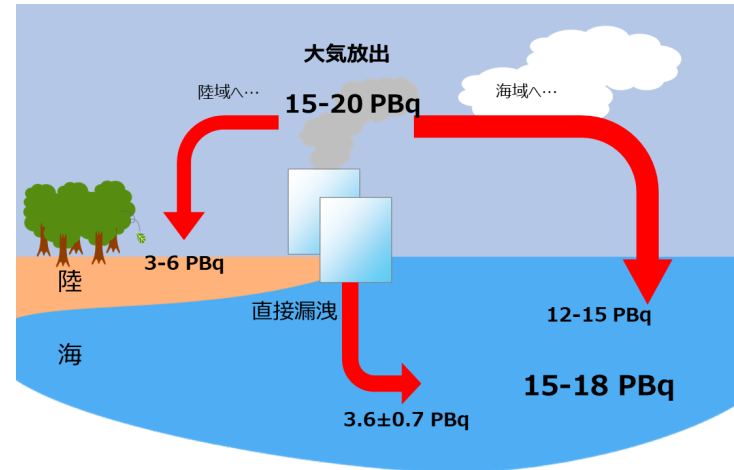
TEPCO Press release



^{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)
(Aoyama et al., 2016)



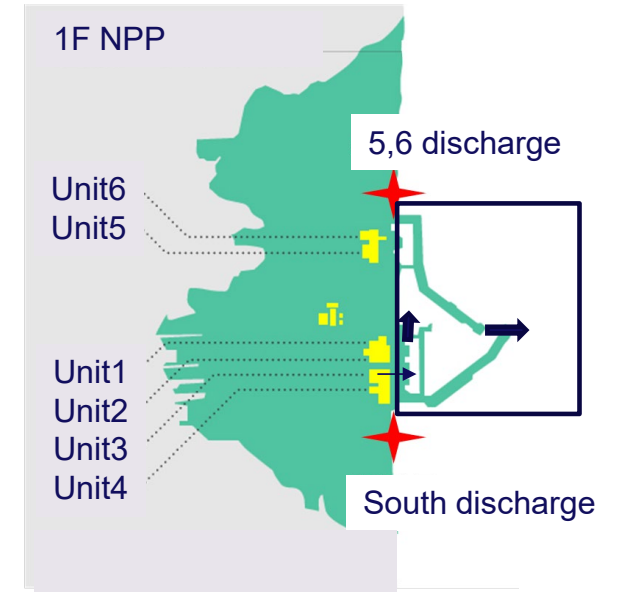
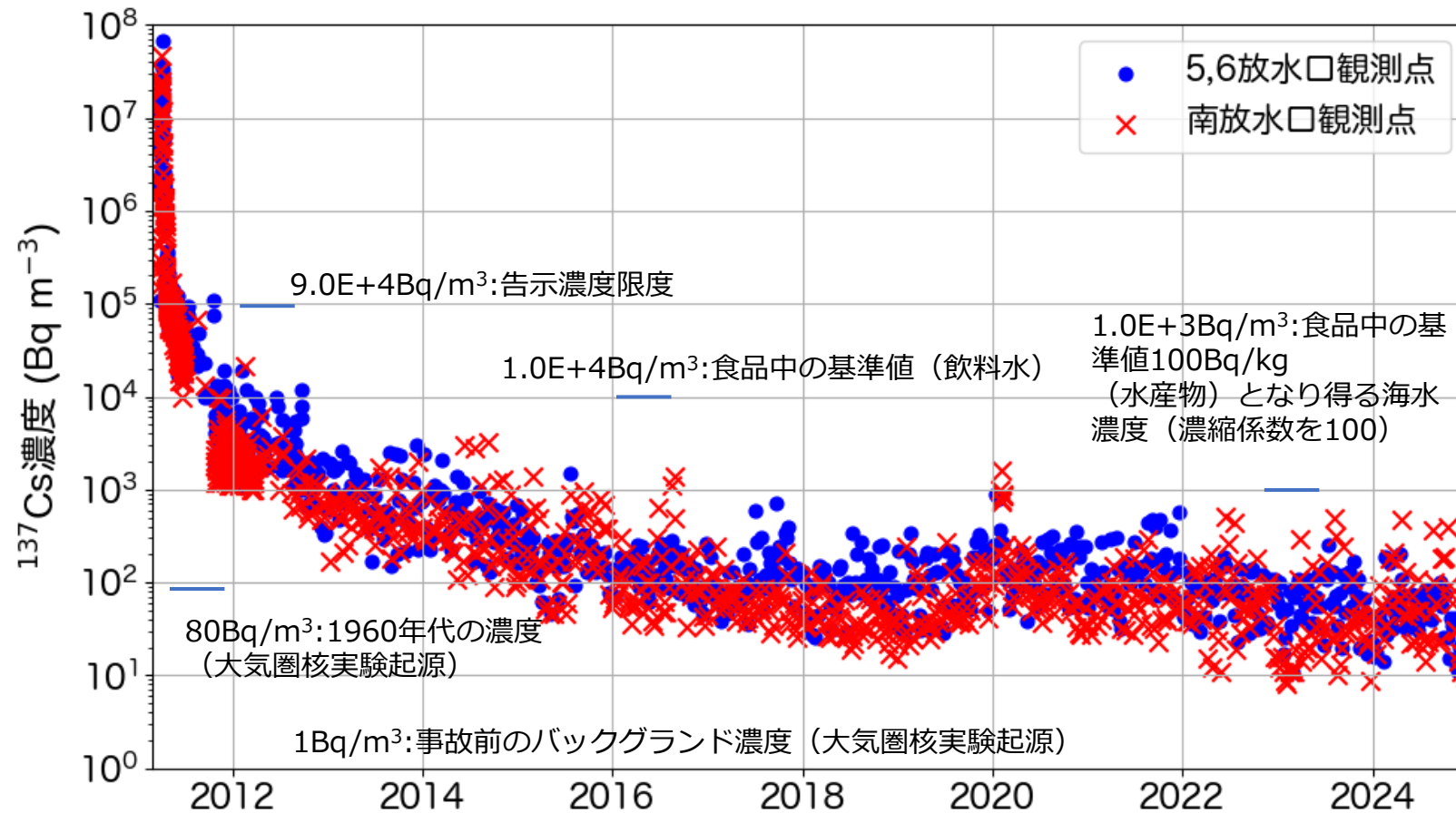
福島第一原子力発電所事故における ^{137}Cs の収支



事象	大気への放出量	海洋への放出量
福島第一原子力発電所事故	15-20PBq ¹⁾	3.6 ± 0.7PBq ²⁾
大気圏核実験	770 PBq ³⁾	500 PBq ⁴⁾
チェルノブイリ原子力発電所事故	81 PBq ⁵⁾	—
セラフィールド再処理工場からの放出		41 PBq ⁶⁾

¹⁾Aoyama et al., (2016), ²⁾Tsumune et al. (2013), ³⁾Aoyama et al., (2006), ⁴⁾Tsumune et al., (2023), ⁵⁾UNSCEAR (2008), ⁶⁾Smith et al. (2003)

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)

領域海洋モデル

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

海底堆積物移行
モデル(Misumi et al., 2014)

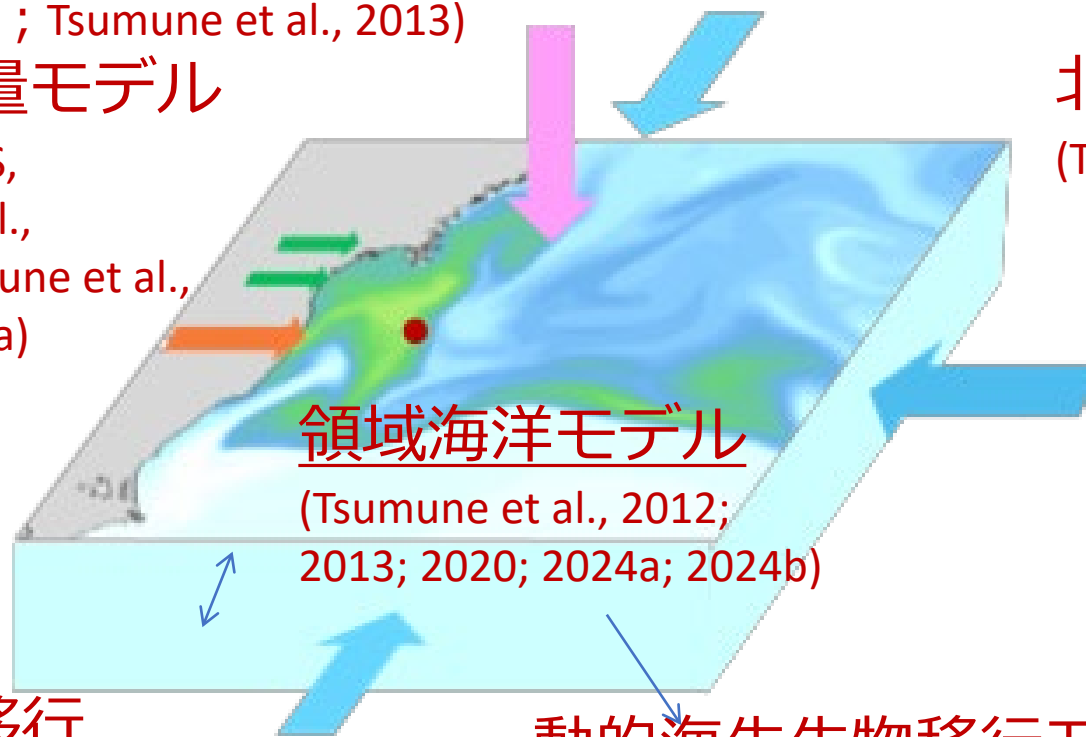
動的海洋生物移行モデル

(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。

日本学術会議

報告

東京電力福島第一原子力発電所事故によって
環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程
に関するモデル計算結果の比較



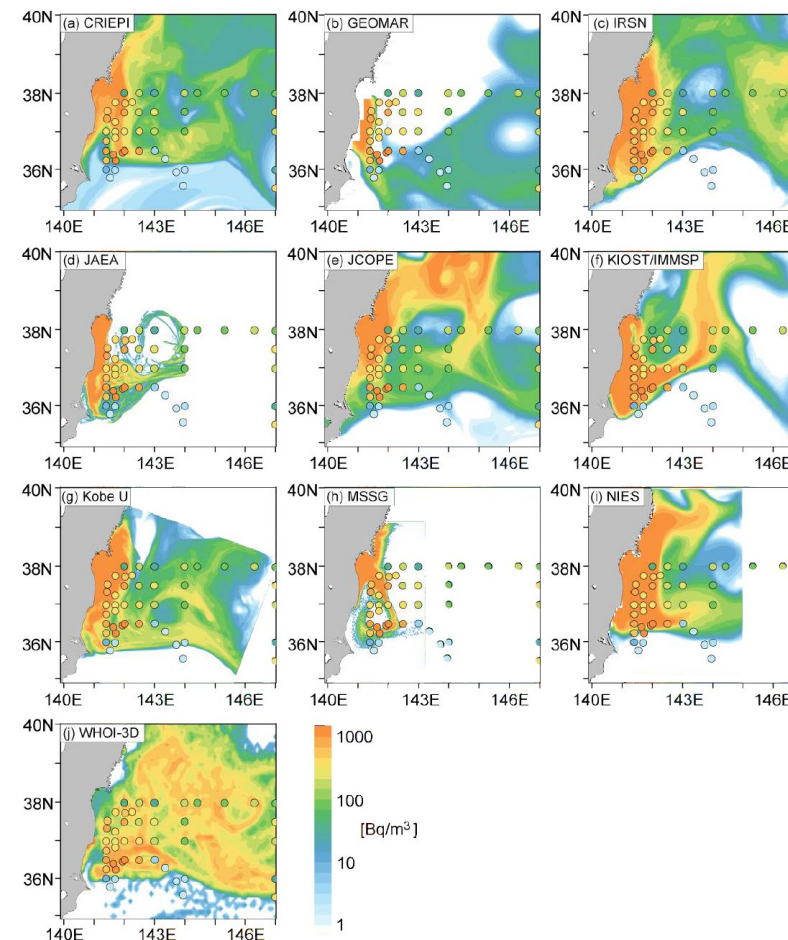
平成26年(2014年) 9月 2日

日本学術会議

総合工学委員会

原子力事故対応委員分科会

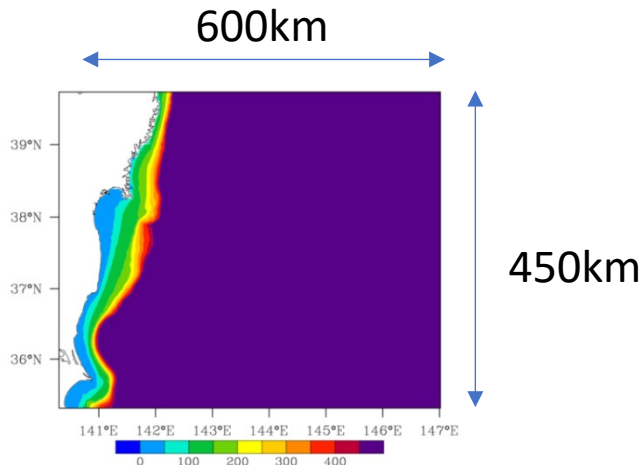
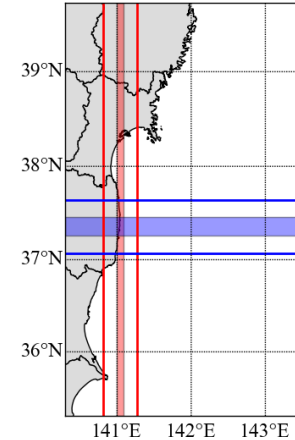
http://www.jpгу.org/scj/report/20140902scj_report_j.pdf



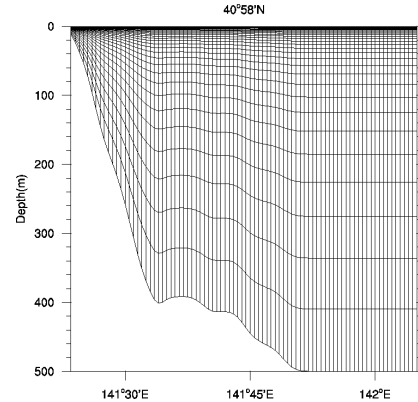
^{137}Cs 濃度分布の再現結果、コンターが計算結果、
○が観測結果

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

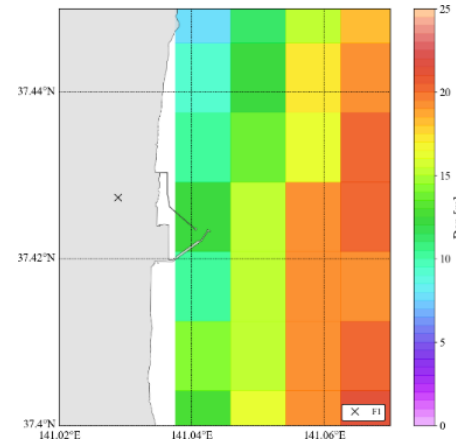


領域と海底地形

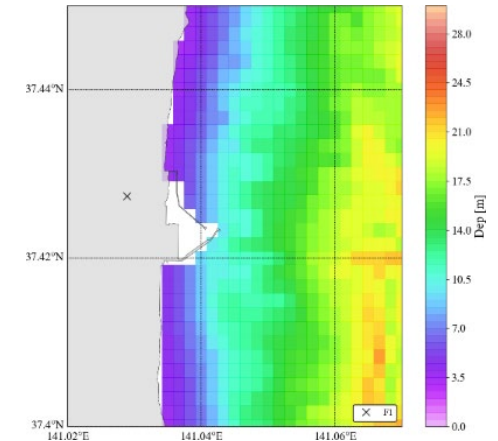


s座標

Tsumune et al., 2013



1km x 1km

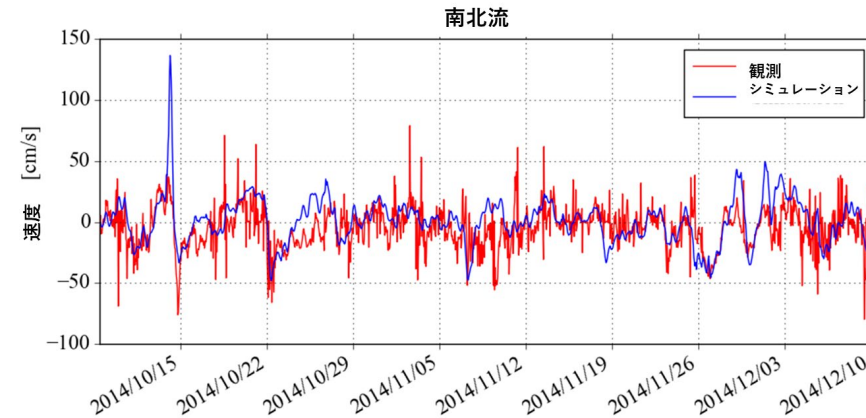
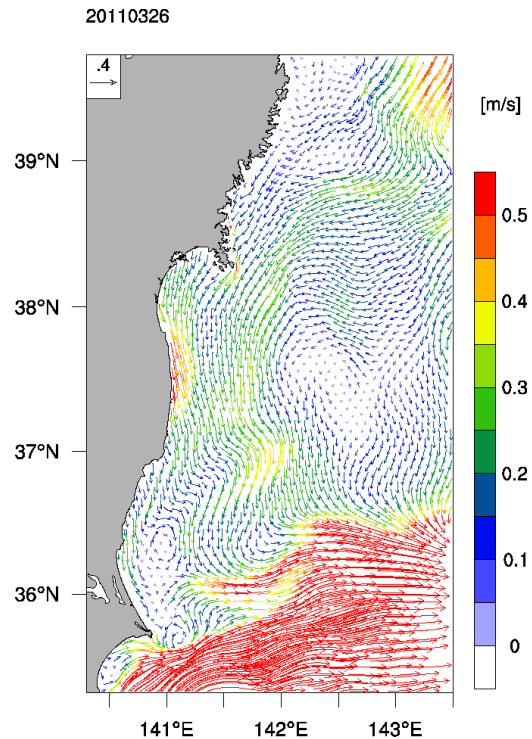


200m x 200km

Tsumune et al., 2024

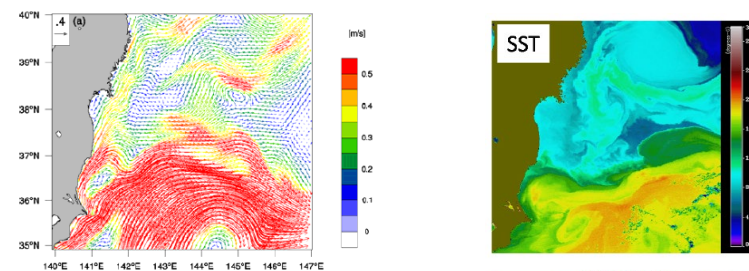
領域海洋モデル

- 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

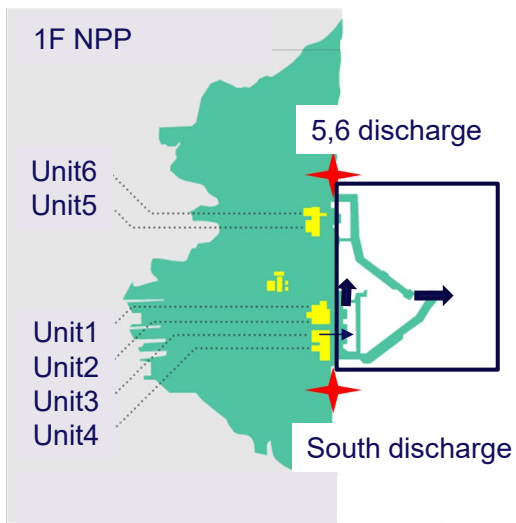
南北流の再現



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

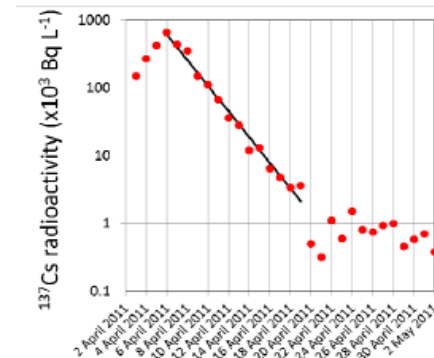


$$\begin{aligned} & \text{漏洩率} \\ & (Bq \text{ day}^{-1}) \\ & = \text{海水交換水量} \\ & (m^3/day) \times \text{直接漏洩による} \\ & \quad \text{}^{137}\text{Cs濃度の観測結果} \\ & \quad (Bq/m^3) \end{aligned}$$

単位漏洩時の ^{137}Cs 濃度のシミュレーション結果
 ($(Bq \text{ m}^{-3}) / (Bq \text{ day}^{-1})$)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

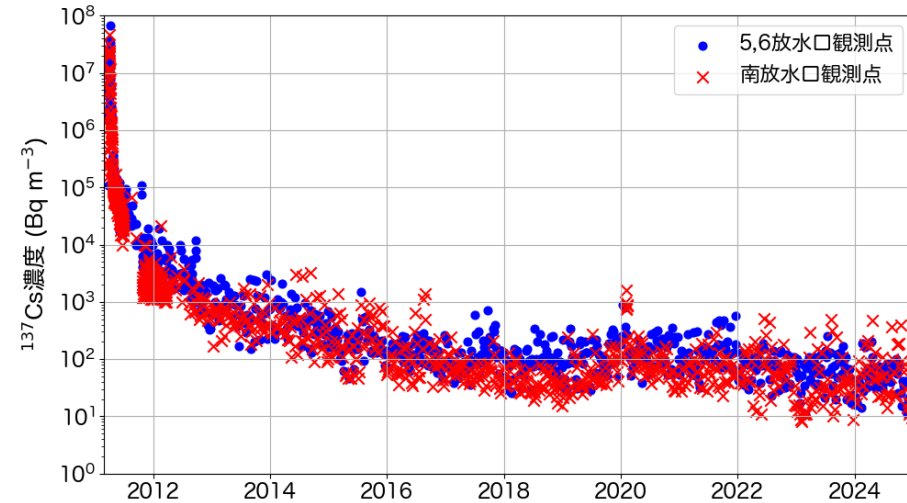


港湾内の ^{137}Cs の観測結果
 (Kanda, 2013)
 港湾濃度の低減率から港
 湾の交換率を推定

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

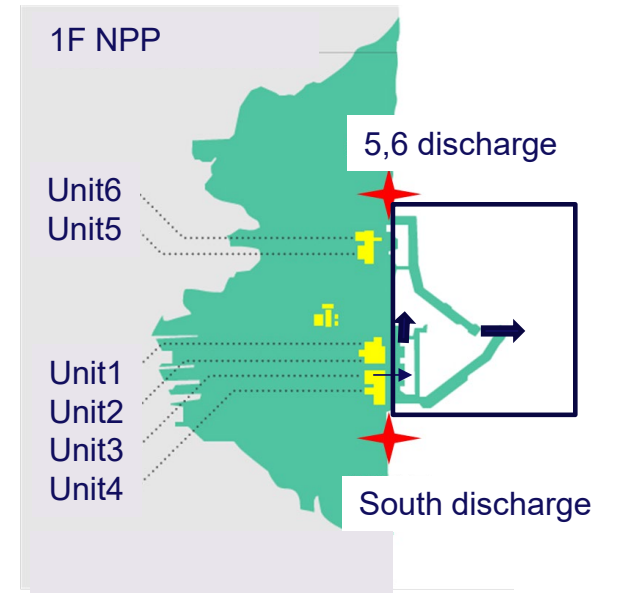


大気圏核実験による
 ^{137}Cs のバックグラウンド濃度は約 1 Bq m^{-3}

福島第一原子力発電所近傍における ^{137}Cs 濃度

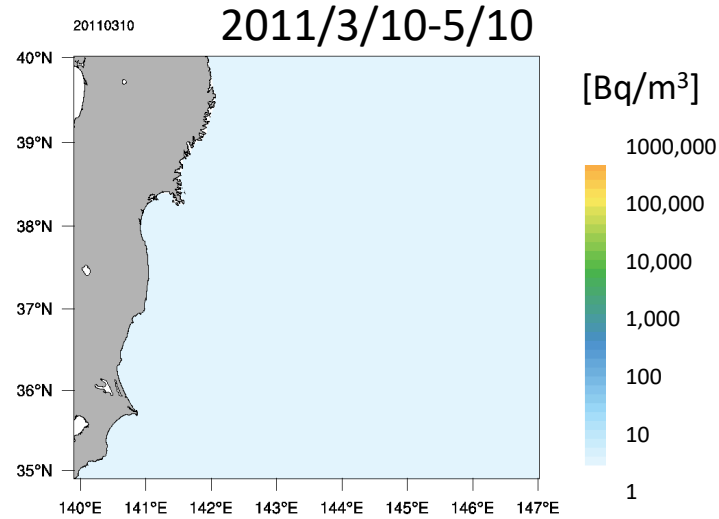
^{137}Cs の港湾外への漏洩率は港湾内への漏洩率よりも一桁大きい。漏洩は継続しており、漏洩源は未解明

^{137}Cs 漏洩率の推定結果

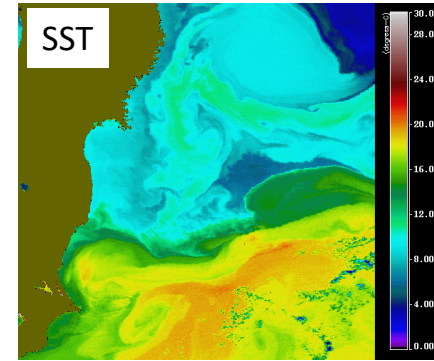


Tsumune et al., 2024a

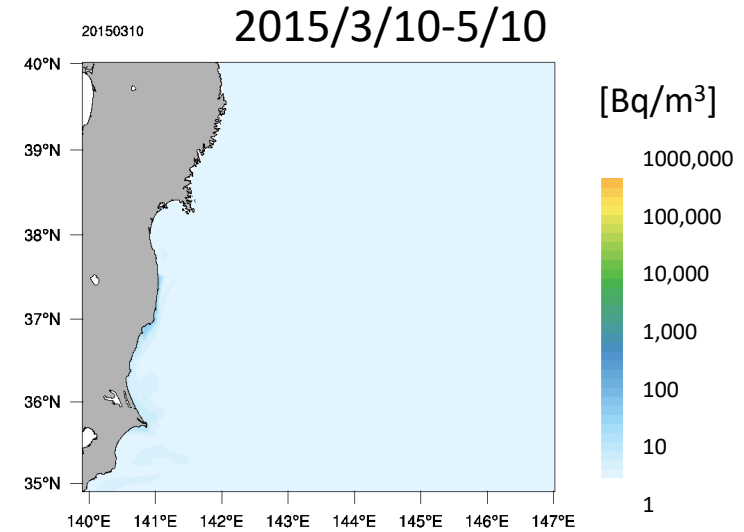
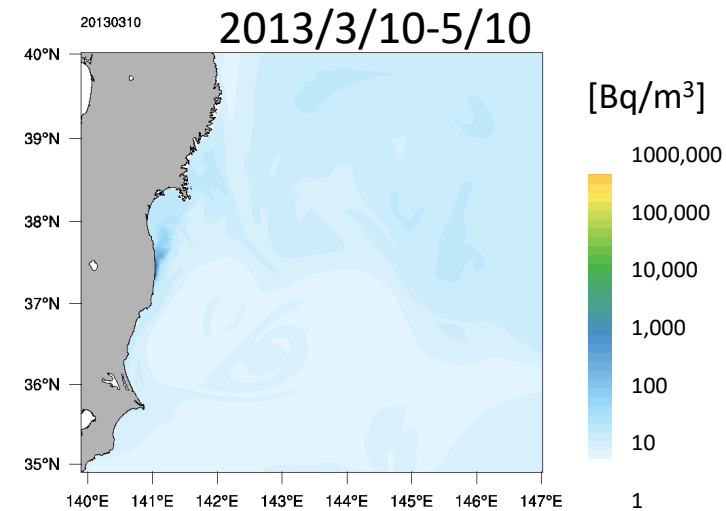
表層¹³⁷Cs濃度



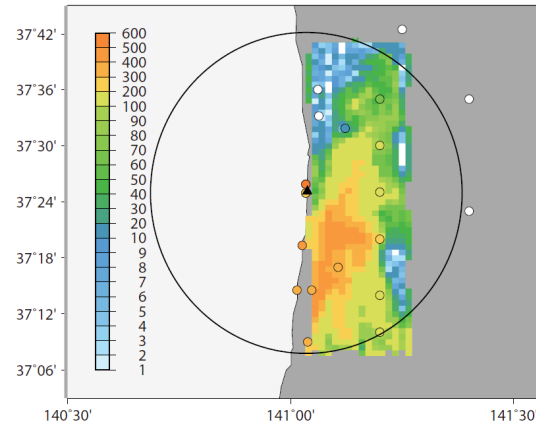
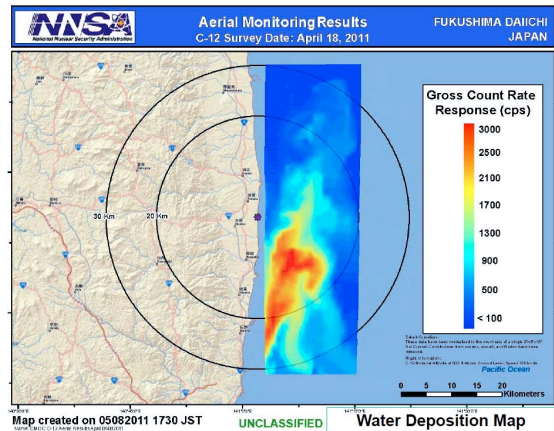
黒潮と中規模渦



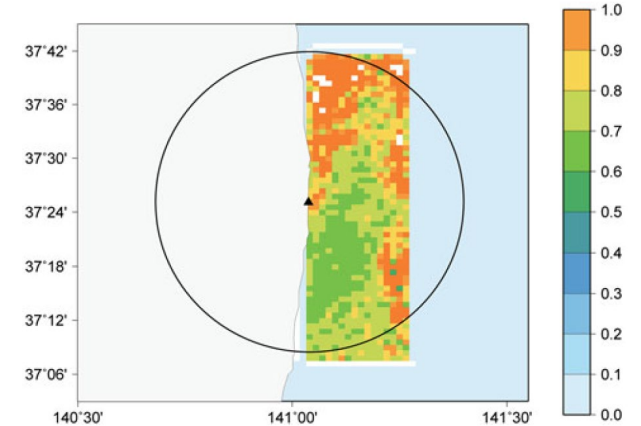
北太平洋モデル
(Tsubono et al.,
2016)の¹³⁷Cs濃度を
境界条件



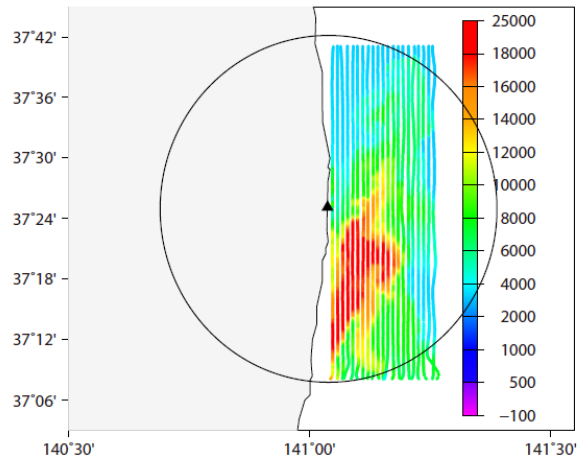
航空機モニタリング結果と比較



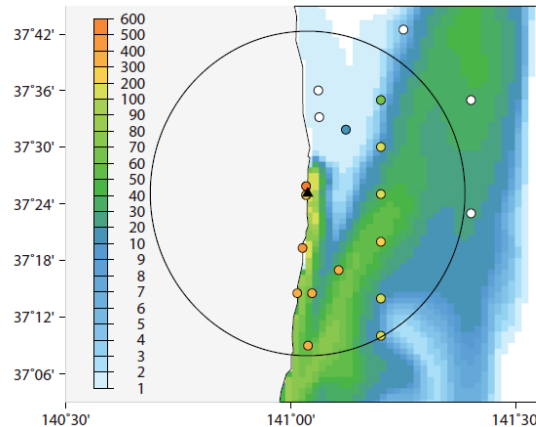
^{137}Cs 濃度 (Bq L⁻¹)



$^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比
0.72が直接漏洩起源
(Tsumune et al., 2012)



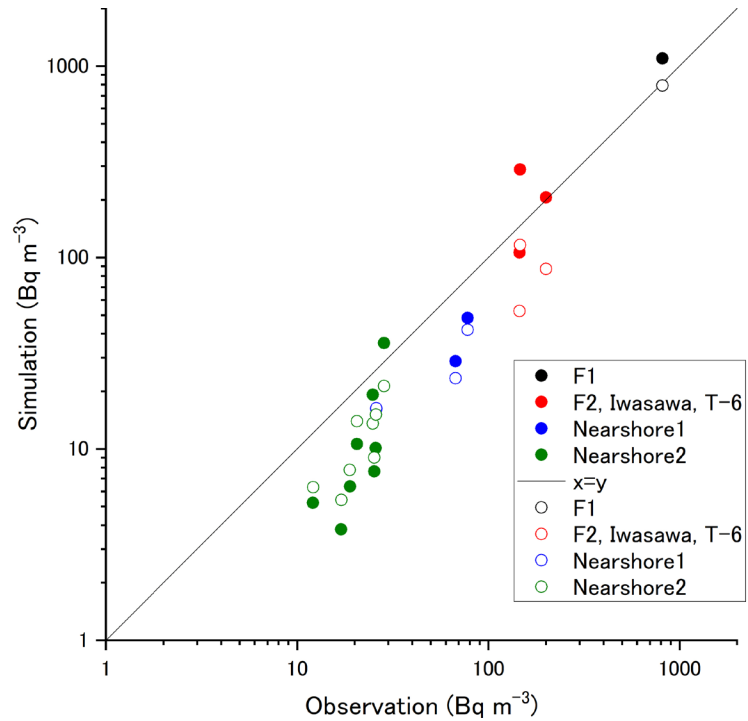
観測値(cps)



モデルによる ^{137}Cs 濃度 (Bq L⁻¹)

Inomata et al., 2014

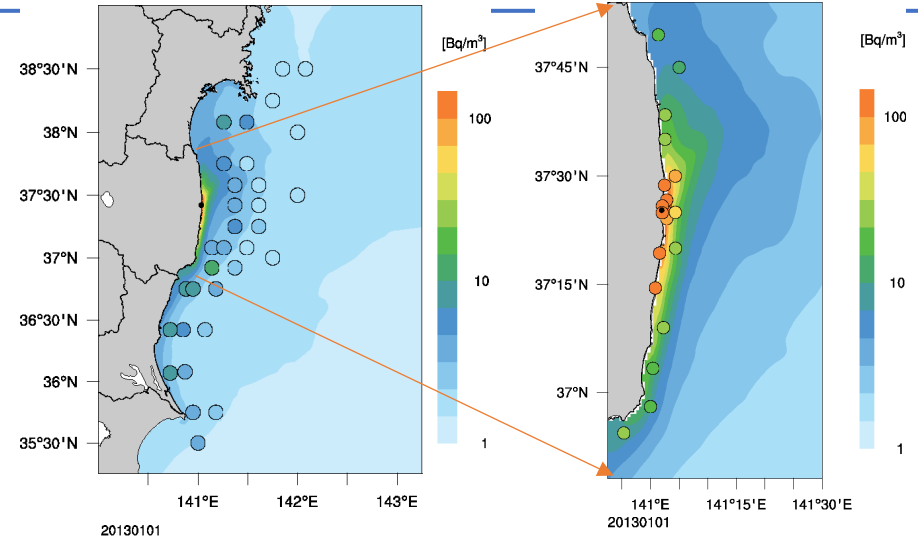
表層¹³⁷Cs濃度



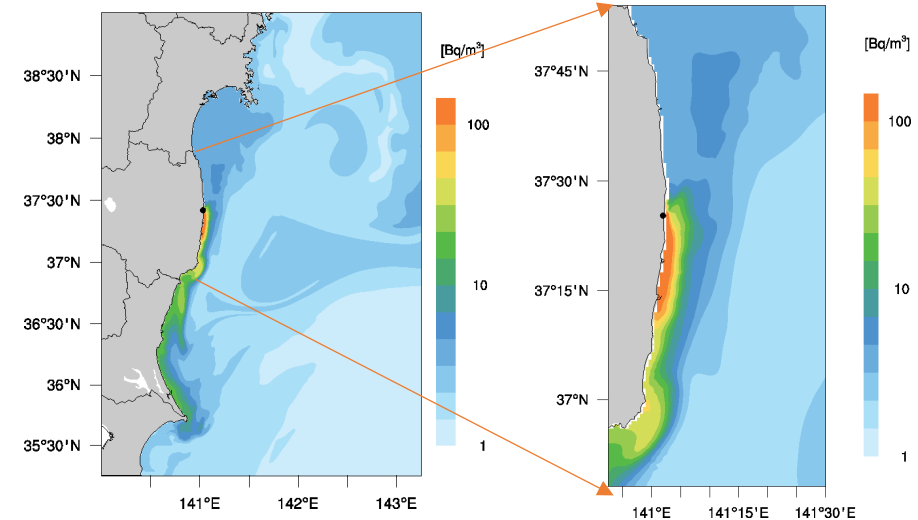
年平均表層¹³⁷Cs濃度の観測結果と計算結果の比較

Tsumune et al., 2020; 2024a

年平均



日平均

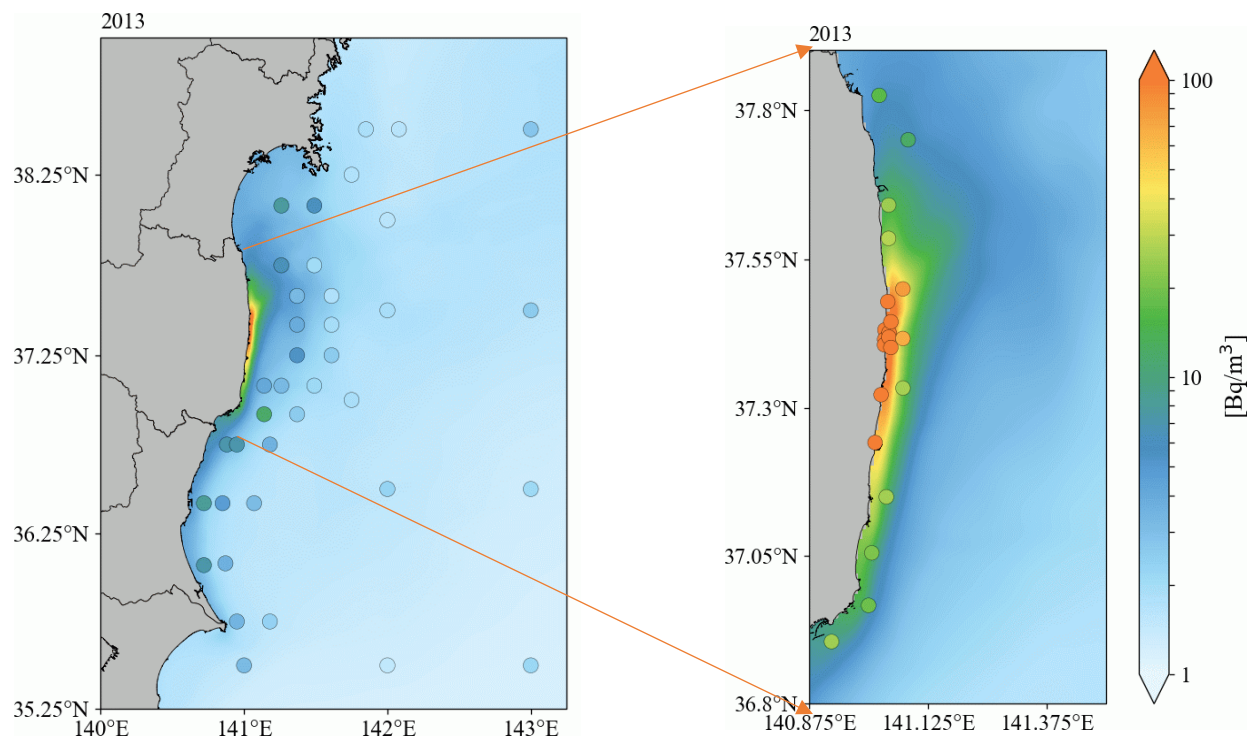


表層¹³⁷Cs濃度

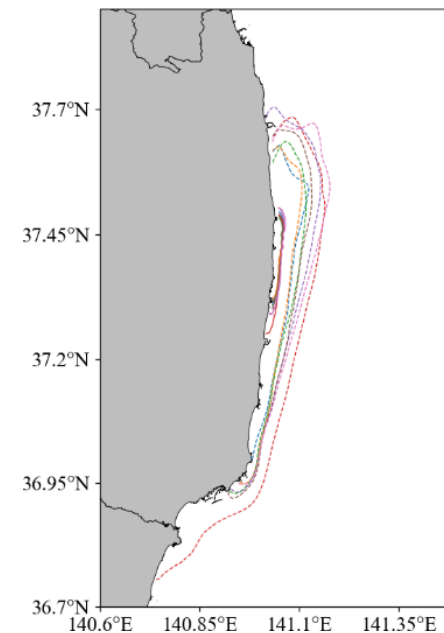
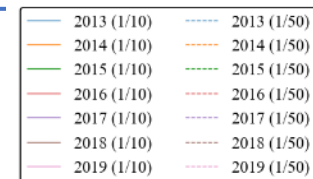
年平均表層¹³⁷Cs濃度

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)



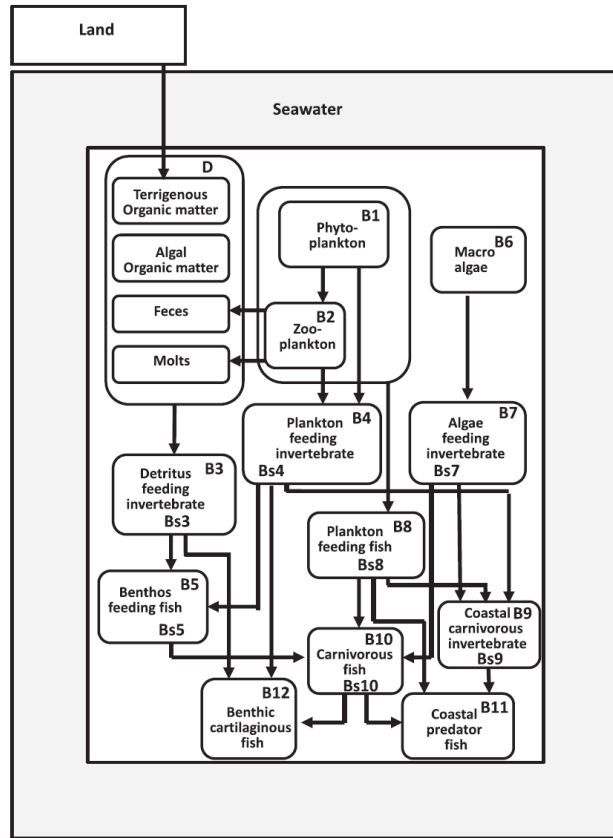
年平均表層¹³⁷Cs濃度分布



各年の最大濃度に対する希釈率の分布

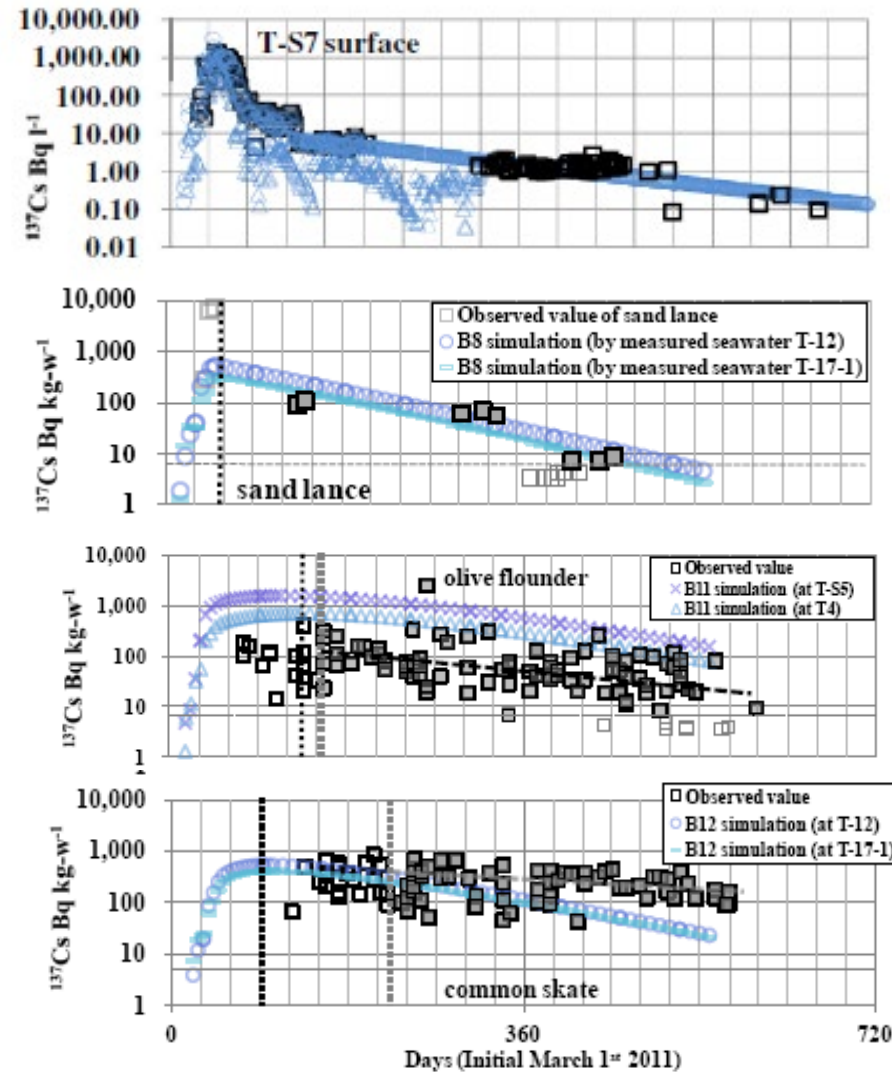
2013年から2019年の年平均濃度分布は相似

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



海水

イカナゴ

ヒラメ

コモンカスベ

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。
 - 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

- JAEA STERMER (Kobayashi et al., 2017)
- フランス IRSN STERNE (Duffa et al., 2015)
- ノルウェー CERAS OpenDrift (Simonsen et al., 2024)
- 原子力規制庁のモデル

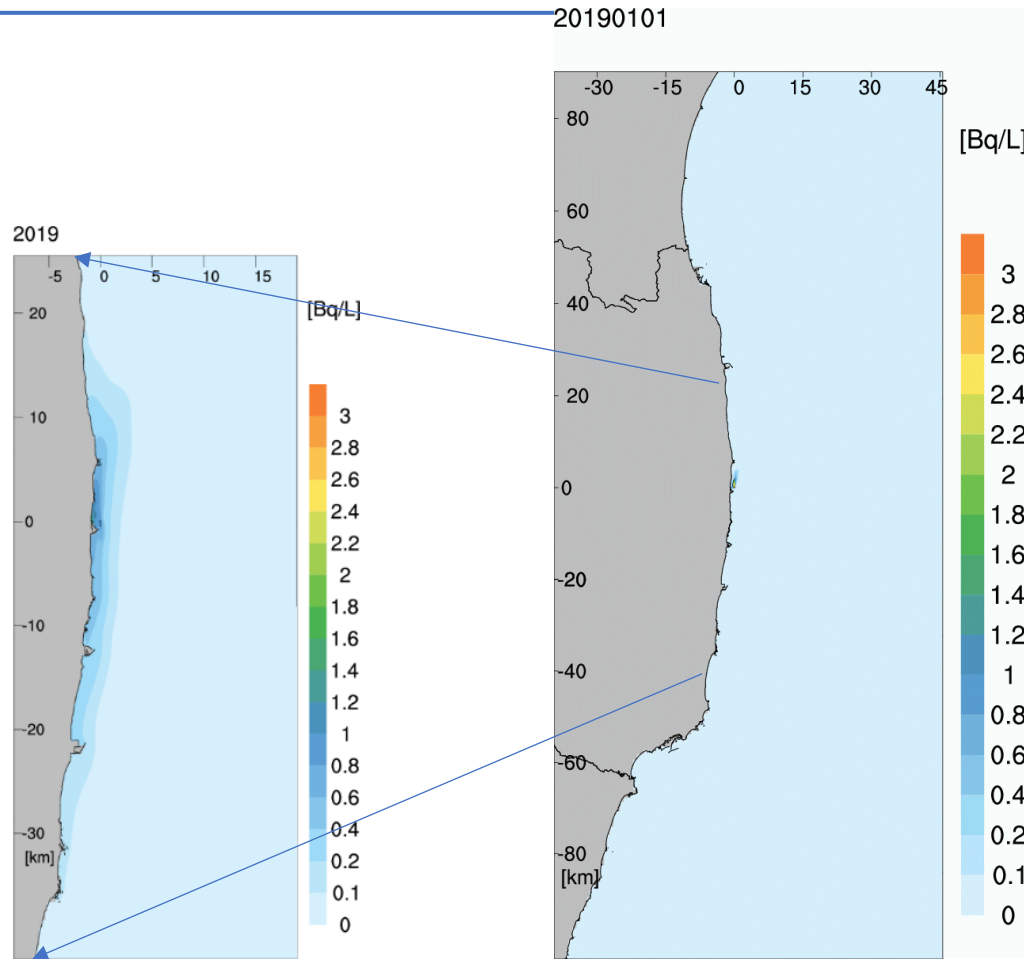
- 仮想事故時の海洋影響評価
 - トルコ(Tsabarlis et al., 2021)、イラン(Maderich et al., 2023)、スペイン(Perianez et al., 2023)、セラフィールド地点(Liland et al., 2020)、ウクライナZaporizhzhia原子力発電所(Bezhenar and Kovalets, 2022)

- 電力中央研究所のモデル(Tsumune et al., 2020; 2024)をALPS処理水の影響評価に適用、再現性の検証

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

対象核種（30核種）

	Nuclide	Half-life	Limit*		Nuclide	Half-life	Limit*		Nuclide	Half-life	Limit*
1	³ H	12 y	6.0E+4	11	¹⁰⁶ Ru	370 d	1.0E+2	21	¹⁵⁵ Eu	4.8 y	3.0E+3
2	¹⁴ C	5700 y	2.0E+3	12	¹²⁵ Sb	2.8 y	8.0E+2	22	²³⁴ U	2.5E+5 y	2.0E+1
3	⁵⁴ Mn	310 d	1.0E+3	13	^{125m} Te	57 d	9.0E+2	23	²³⁸ U	4.5E+9 y	2.0E+1
4	⁵⁵ Fe	2.7 y	2.0E+3	14	¹²⁹ I	1.6E+7 y	9.0E+0	24	²³⁷ Np	2.1E+6 y	9.0E+0
5	⁶⁰ Co	5.3 y	2.0E+2	15	¹³⁴ Cs	2.1 y	6.0E+1	25	²³⁸ Pu	88 y	4.0E+0
6	⁶³ Ni	100 y	6.0E+3	16	¹³⁷ Cs	30 y	9.0E+1	26	²³⁹ Pu	2.4E+4 y	4.0E+0
7	⁷⁹ Se	3.0E+5 y	2.0E+2	17	¹⁴⁴ Ce	280 d	2.0E+2	27	²⁴⁰ Pu	6600 y	4.0E+0
8	⁹⁰ Sr	29 y	3.0E+1	18	¹⁴⁷ Pm	2.6 y	3.0E+3	28	²⁴¹ Pu	14 y	2.0E+2
9	⁹⁰ Y	64 h	3.0E+2	19	¹⁵¹ Sm	90 y	8.0E+3	29	²⁴¹ Am	430 y	5.0E+0
10	⁹⁹ Tc	2.1E+5 y	1.0E+3	20	¹⁵⁴ Eu	8.6 y	4.0E+2	30	²⁴⁴ Cm	18 y	7.0E+0

*告示濃度（Bq/L）

ALPS処理水の告示濃度比総和は1未満である。

K4 tank group; 0.26, J1-C tank group 0.21, J1-G tank group 0.1

さらに、ALPS処理水の³H濃度は1500Bq/L未満に希釈（100～1000倍）され、海洋放出される。

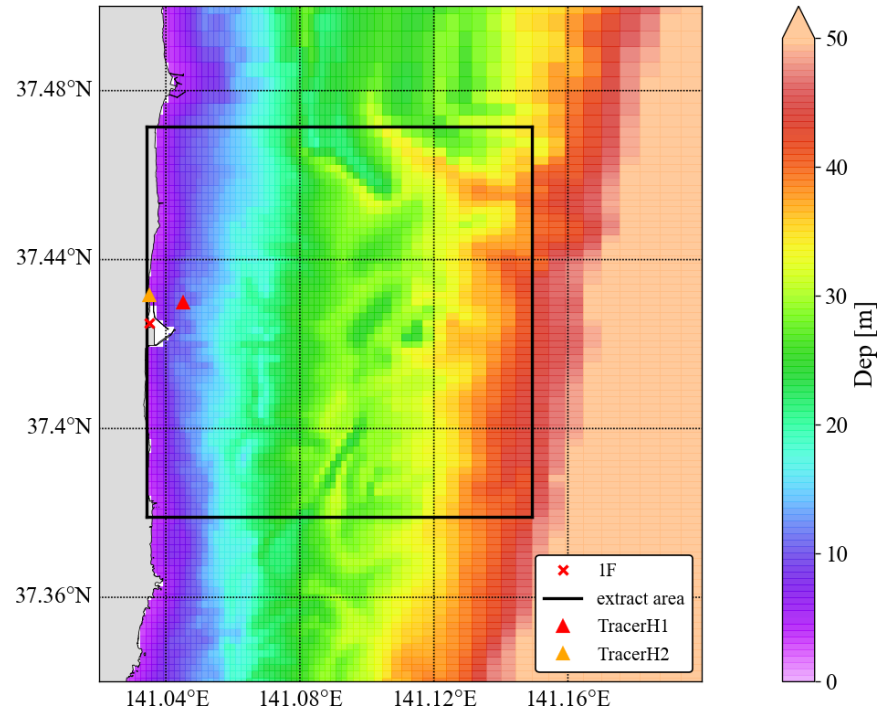
年間放出率(Bq/year)

	K4 tank	J1-C tank	J1-G tank
^3H	2.2E+13	2.2E+13	2.2E+13
^{14}C	1.7E+09	4.8E+08	1.3E+09
^{129}I	2.4E+08	3.2E+07	2.7E+07

TEPCO, 2023

- ALPS処理水中のH-3の年間放出率は、2.2E+13 Bq/年（事故前の福島第一原子力発電所の年間放出制限値）未滿に制限されている。
- ^3H と ^{14}C と ^{129}I の年間放出率は、各タンクグループの核種組成によって決定される。これらの核種の年間放出率は、再処理工場からの放出よりも小さい（ ^3H ; 1E+16 Bq/年。 ^{14}C ; 1E+12Bq/年、 ^{129}I ; 1E+12Bq/年（UNSCEAR, 2008; 2016））。
- 宇宙線による天然起源の ^3H の生成は7.0E+16 Bq/年（UNSCEAR, 2016）

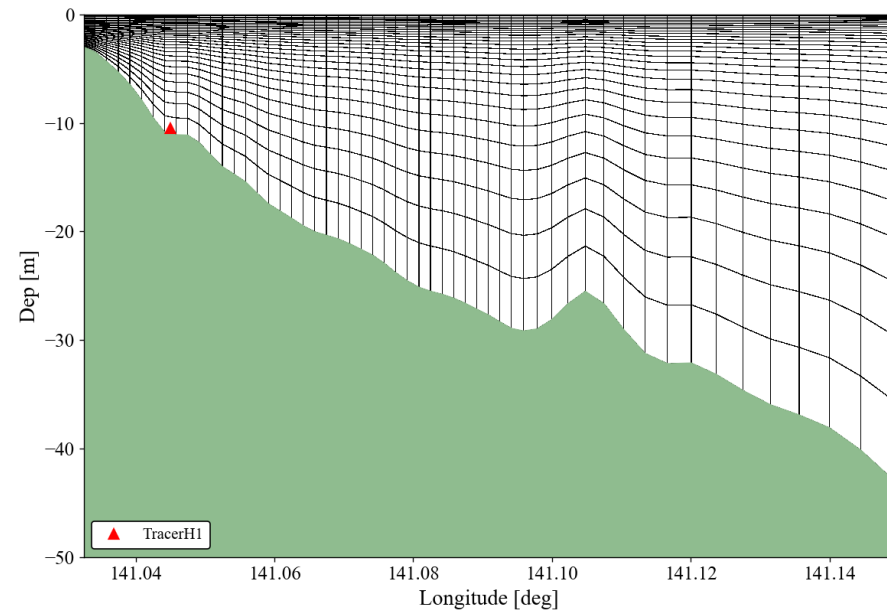
年平均³H濃度



海底地形
(10km x 10kmの範囲)

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



年平均濃度

10km x 10kmの年平均表層濃度(Bq/L)

	K4	J1-C	J1-G
^3H	5.6E-02	5.6E-02	5.6E-02
^{14}C	4.4E-06	1.2E-06	3.3E-06
^{129}I	6.2E-07	8.2E-08	6.8E-08

東京電力, 2023

福島第一原子力発電所事故前の西部北太平洋のバックグラウンド濃度

^3H 濃度は0.07 Bq/L (Povinec et al., 2013)

^{14}C 濃度は6.0E-03 Bq/L (Povinec et al., 2017)

^{129}I 濃度は1.0E-08 Bq/L (Casacuberta et al., 2017)

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	
		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

被ばく線量評価結果(東京電力, 2023)

海産物の摂取による被ばく線量 (mSv/year)

	K4 tank	J1-C tank	J1-G tank
^3H	3.2E-08	3.2E-08	3.2E-08
^{14}C	1.4E-06	3.8E-07	1.0E-06
^{129}I	2.7E-06	3.6E-07	3.0E-07

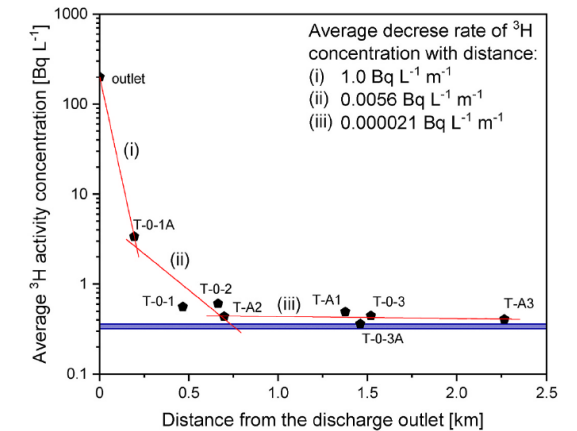
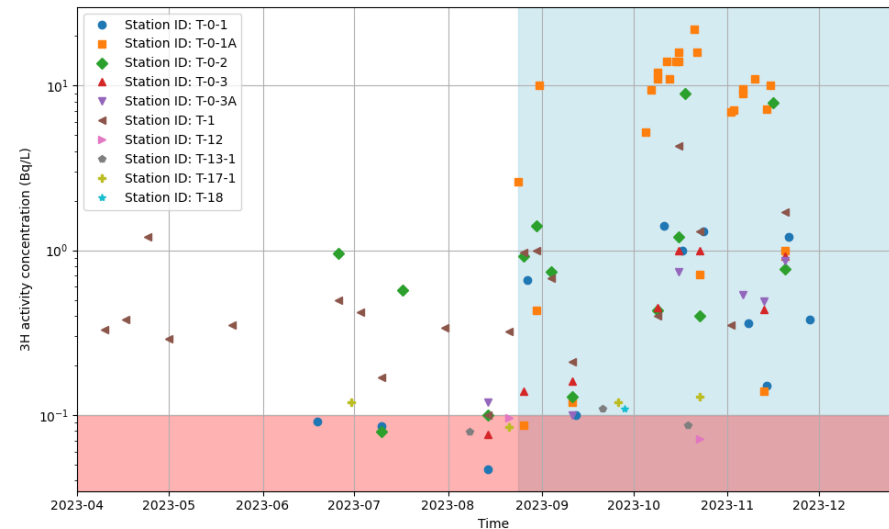
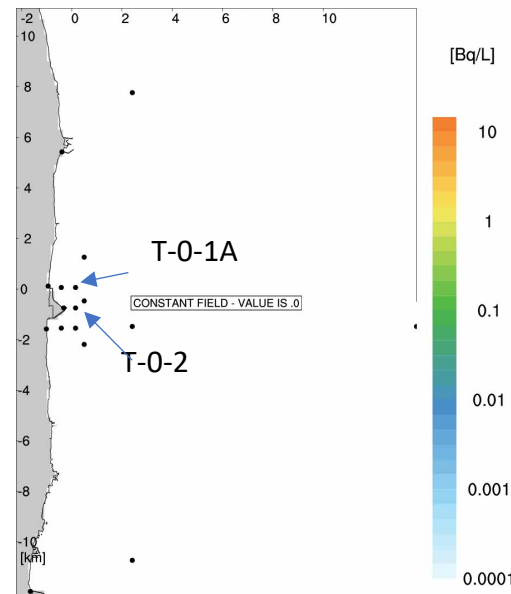
環境防護の評価

- 標準動物および標準植物への線量率も非常に小さいと評価された。

^3H 濃度のモニタリング

- 2023年8月からALPS処理水の放出が開始された。
- 2024年8月までの1年間で8回にわたって10兆Bqが放出された（影響評価においては22兆Bq/年で連続放出）
- 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。

2023/08/24_09:00

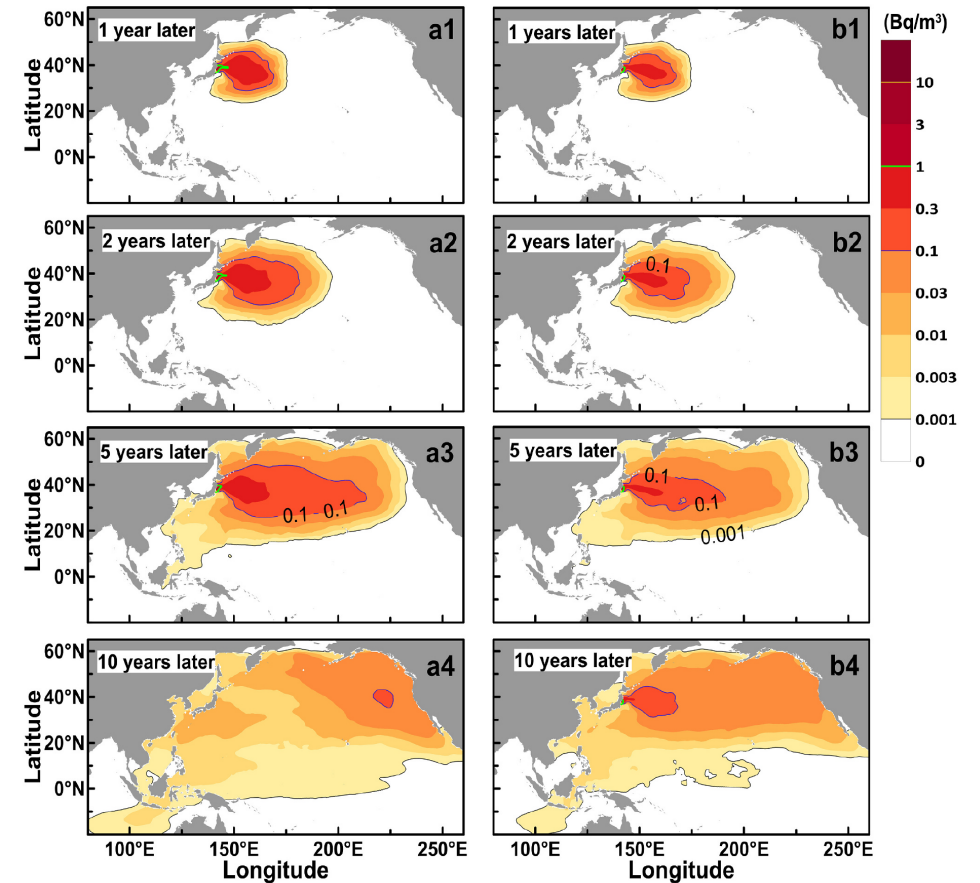


Kaizer et al., 2024

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)。
- ALPS処理水の放出によって、海洋汚染のみならず、海底地下水の汚染にもつながるという論文も公表された (Wei et al., 2024)。



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。