

海洋における放射性核種の分布と変遷

公益財団法人 海洋生物環境研究所
中央研究所 海洋環境グループ
日下部 正志

【はじめに】

我々を取り巻く環境には多種多様な放射性核種が存在する。それらは人類が地球上に出現する以前からある天然放射性核種と第2次世界大戦後急激に増加した人工放射性核種に分けられる。後者は大気圏核実験と原子力発電所及び再処理工場等の施設からの放出により引き起こされた。本発表は両者の海洋環境における分布とその変遷について紹介する。

【天然放射性核種】

海水中に存在する陽イオンのうち4番目に濃度が高い元素がカリウムであり、その放射性同位体、カリウム-40 (^{40}K , 半減期: 1.3×10^9 年) は海水中で最も高い放射能 (11-12 Bq/L) を持ち、極めて均一に全海洋に分布している。その次に高い放射能を示すものが ^{238}U (半減期: 4.5×10^9 年)。その濃度は 0.04 Bq/L ($3 \mu\text{g/L}$) と ^{40}K と比べると小さいものの、一連の放射壊変により多様な化学的性質及び半減期を持つ核種を生み出す。同様に海洋環境には、 ^{235}U や ^{232}Th から始まる一連の放射壊変に起因する様々な種類の放射性核種が存在する。他には、宇宙線と空気の成分が反応してできる宇宙線生成核種も絶えず海に注ぎ込まれている。

【人工放射性核種】

人工放射性核種の海洋への供給源で最大のものは、1945年から1963年までの間に500回以上行われた大気圏での核実験である。放出された核種の総量はチェルノブイリ事故や東電福島第一原発事故のそれを凌駕している。例えば、 ^{137}Cs に関して言えば、核実験によるものは、チェルノブイリ事故の10倍以上、福島事故の40倍以上になる(表1)。海域的には、約半分は太平洋にあった(表2)。このほかにも原子力発電所や核燃料処理関連施設よりの事故による放出も過去に起こっているが、チェルノブイリ事故の数%かまたはそれよりはるかに少ない。また、核燃料処理関連施設からの計画的な放出も特にヨーロッパでは過去に無視しえない量が過去に放出されている。1963年に最高濃度に達した太平洋の人工放射性核種は以後放射壊変と海水混合により減少を続けていたが、福島第一原発事故により有意に上昇した。事故後は日本近海の濃度は事故前のレベルに戻りつつある。

表 1. 環境中に放出された主な核種性核種の放出量

	半減期	放出量 (PBq)*		
		核実験 ¹⁾	チェルノブイリ 事故 ¹⁾	東電福島第一 原発事故
⁸⁹ Sr	50.53 日	117,000	~115	
⁹⁰ Sr	28.78 年	622	~10	
¹³¹ I	8.02 日	675,000	~1760	200 (大気) ²⁾ 11.1 (海水) ³⁾
¹³⁴ Cs	2.06 年		~54	15-20 (大気) ⁴⁾ 3.6 (海水) ⁴⁾
¹³⁷ Cs	30.17 年	948	~85	15-20 (大気) ⁴⁾ 3.6 (海水) ⁴⁾
²³⁹ Pu	24,100 年	6.52	0.03	~0 ⁵⁾
²⁴⁰ Pu	6,561 年	4.35	0.042	~0 ⁵⁾
²⁴¹ Pu	14.29 年	142	~6	~0 ⁵⁾

* 1 PBq = 10¹⁵ Bq

¹⁾UNSCEAR 2000 Report, 2000, ²⁾Kobayashi et al., 2013), ³⁾Tsumune et al., 2013,

⁴⁾Aoyama et al., 2015, ⁵⁾Bu et al., 2014

表 2. 核実験による ¹³⁷Cs の海洋への放出 (単位 : PBq)

	北極海	大西洋	インド洋	太平洋	合計
北半球	7	157	21	222	408
南半球	0	44	63	89	195
合計	7	201	84	311	603

IAEA-TECDOC-1429, 2005 をもとに作成

海洋環境・水産物の放射能の推移 —事故後5年を経過して—

海洋における放射性核種の分布と変遷

2016年6月24日
中央研究所 海洋環境グループ
日下部正志

放射能調査報告会
6/24/2016
@TKP市ヶ谷カンファレンスセンター

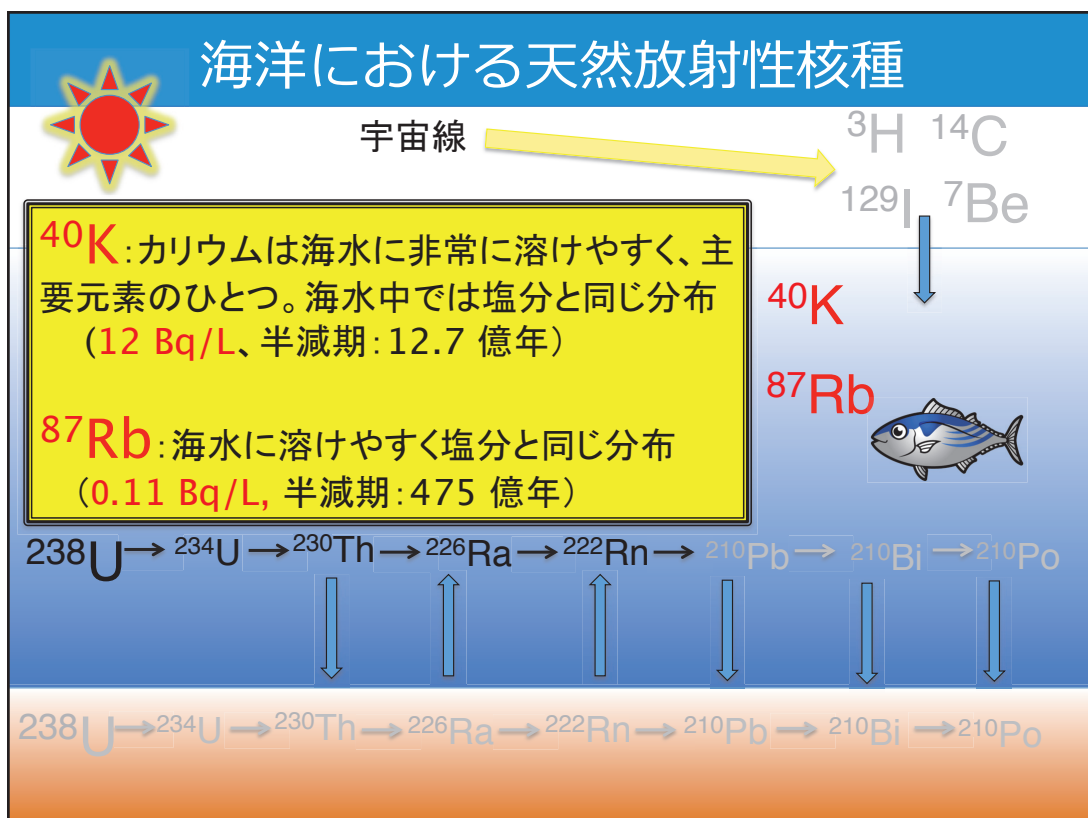
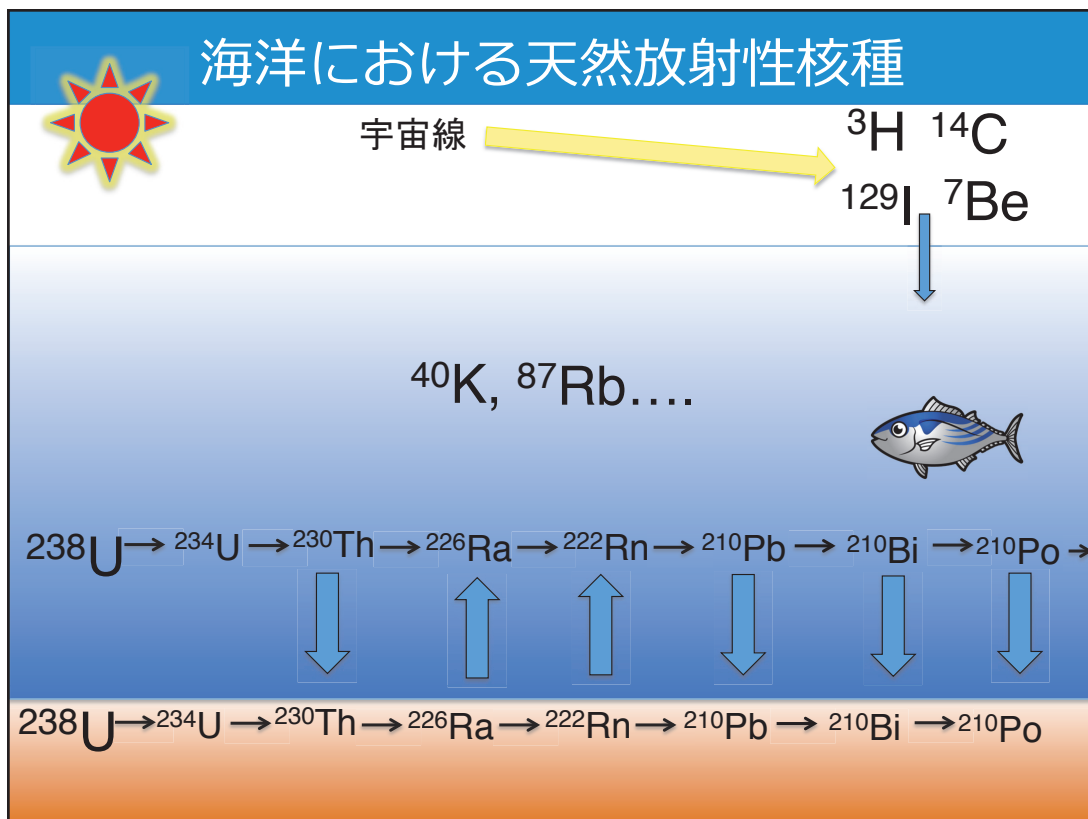
 公益財団法人
海洋生物環境研究所 © 2016Marine Ecology Research Institute.

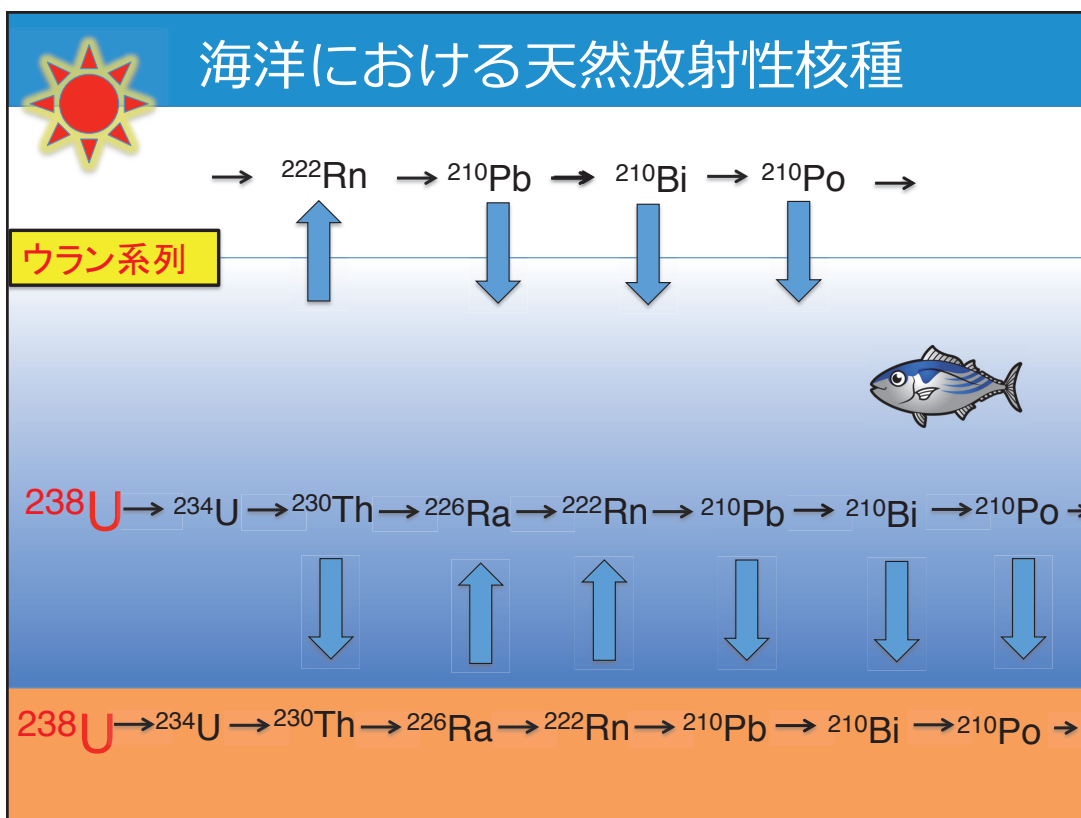
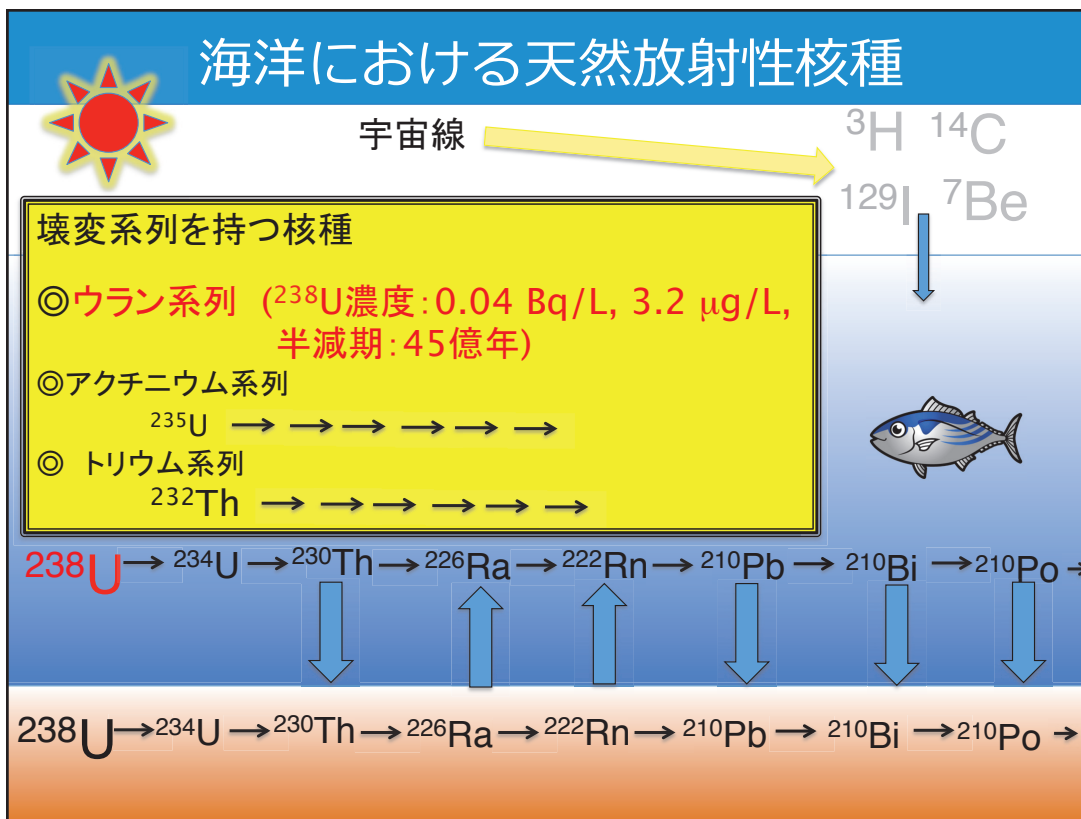
発表の概略

- (1) 海洋に存在する多様な天然放射性核種
- (2) 人工放射性核種の海洋への供給
 - ・ 大気圏核実験
 - ・ 原子力関連施設の事故
 - ・ 原子力関連施設からの放出
- (3) 核実験による環境汚染の実態
- (4) 原子力関連施設の事故
- (5) 原子力関連施設からの放出量と環境への影響


 公益財団法人
海洋生物環境研究所 © 2016Marine Ecology Research Institute.

No.2







海洋における天然放射性核種



宇宙線



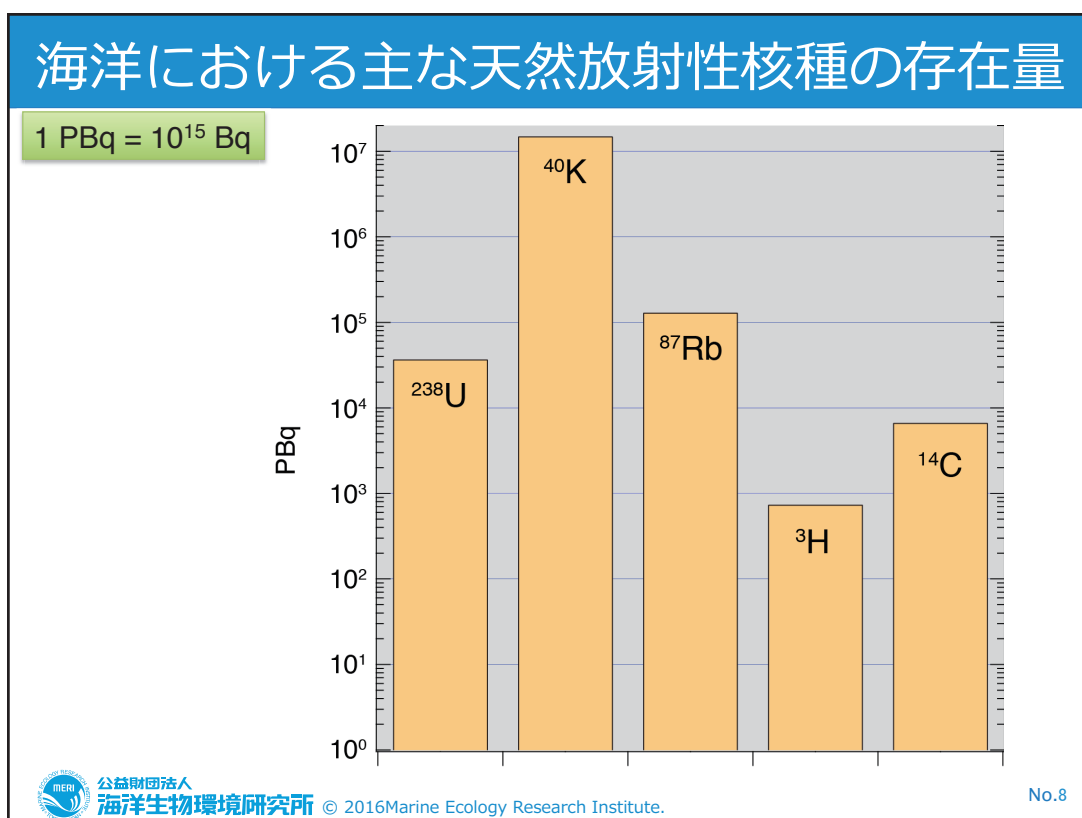
^3H ^{14}C
 ^{129}I ^7Be



宇宙線生成核種: 宇宙線と大気との核反応により生成

様々な核種が生成している:

- ^3H (半減期: 12.3 年)
- ^7Be (半減期: 53 日)
- ^{14}C (半減期: 5730年)
- ^{129}I (半減期: 1570 万年)
-



食品中の⁴⁰Kのおおよその放射能

表1 食品中のカリウム40のおおよその放射能

食品名	放射能 (ベクレル/kg)	食品名	放射能 (ベクレル/kg)
干し昆布	2000	魚	100
干し椎茸	700	牛乳	50
お茶	600	米	30
ドライミルク	200	食パン	30
生わかめ	200	ワイン	30
ホウレンソウ	200	ビール	10
牛肉	100	清酒	1

[出所] 放射線医学総合研究所資料

[出典] 渡利 一夫、稲葉次郎 (編): 放射能と人体、研成社(1999), p45

原子力百科事典 食品中の放射能(09-01-04-03)



公益財団法人
 海洋生物環境研究所 © 2016 Marine Ecology Research Institute.

No.9

主な天然放射性核種の食品中の標準的な濃度

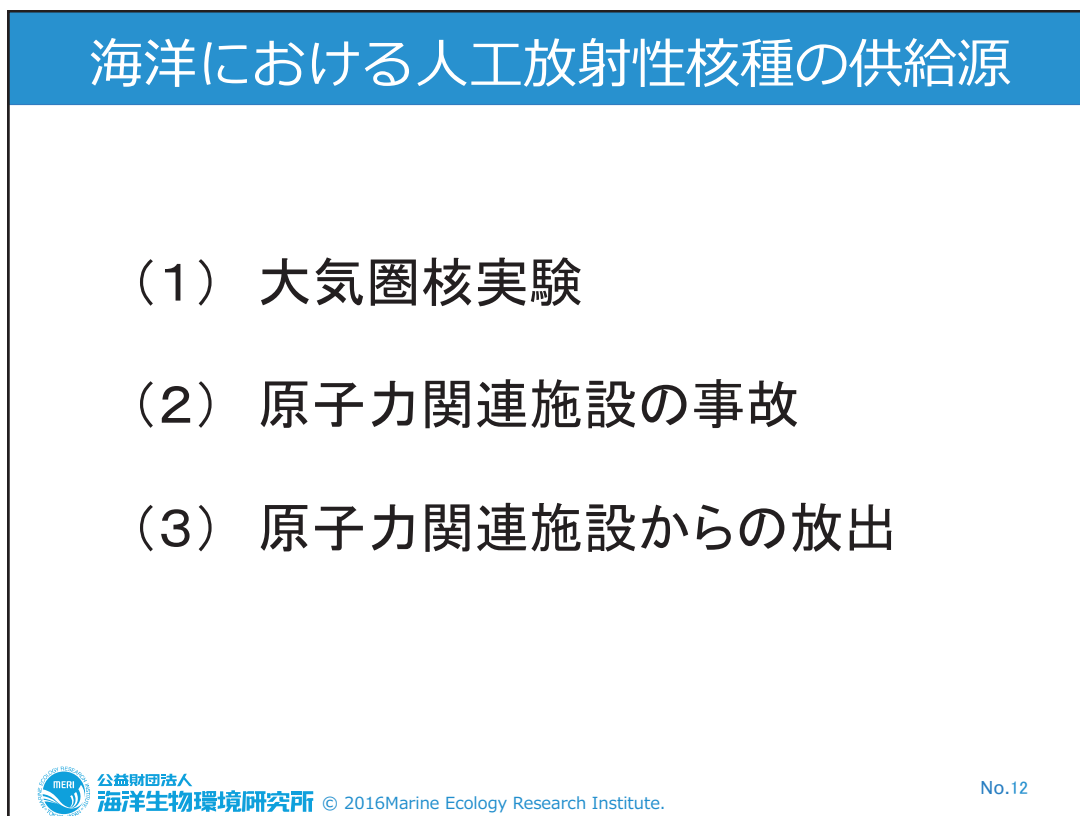
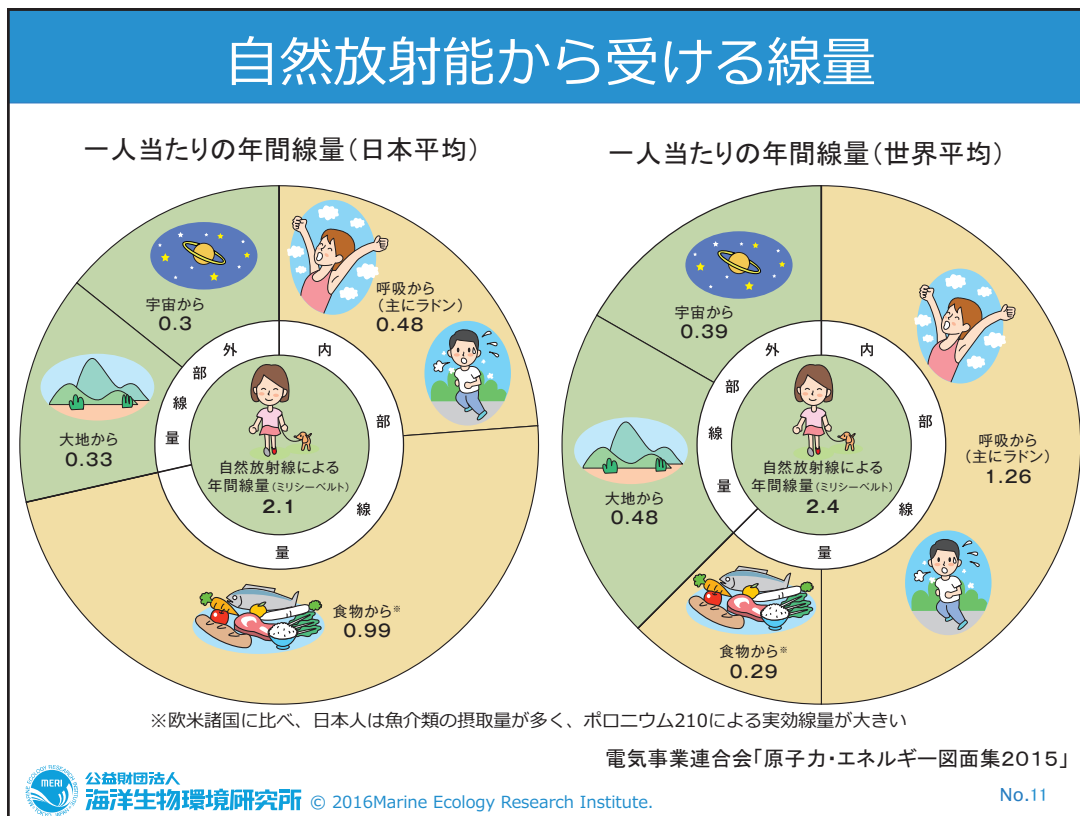
食品	生の食品の放射能濃度 (mBq/kg)					
	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th
牛乳製品	5	40	60	0.3	5	0.3
肉製品	15	80	60	1	10	1
穀物製品	80	100	100	3	60	3
葉菜	50	30	30	15	40	15
根菜および果実	30	25	30	0.5	20	0.5
魚製品	100	200	2000	-	-	-

放射線医学総合研究所監訳: 放射線源と影響、1995
 原子力百科事典 食品中の放射能(09-01-04-03)



公益財団法人
 海洋生物環境研究所 © 2016 Marine Ecology Research Institute.

No.10



環境中に放出された主な放射性核種の放出量

	半減期	放出量 (PBq)*		
		核実験	チェルノブイリ 事故	東電福島第一 原発事故
⁸⁹ Sr	50.53 日	117,000	~115	
⁹⁰ Sr	28.78 年	622	~10	0.09-0.9 (海水)
¹³¹ I	8.02 日	675,000	~1760	200 (大気) 11.1 (海水)
¹³⁴ Cs	2.06 年		~54	15-20 (大気) 3.6 (海水)
¹³⁷ Cs	30.17 年	948	~85	15-20 (大気) 3.6 (海水)
²³⁹ Pu	24,100 年	6.52	0.03	~0
²⁴⁰ Pu	6,561 年	4.35	0.042	~0
²⁴¹ Pu	14.29 年	142	~6	~0

* 1 PBq = 10¹⁵ Bq

UNSCEAR 2000 Report, 2000, Casacuberta et al., 2013, Kobayashi et al., 2013,
 Tsumune et al., 2013, Aoyama et al., 2015, Bu et al., 2014

No.13

海洋における人工放射性核種の供給源(1)

(1) 大気圏核実験

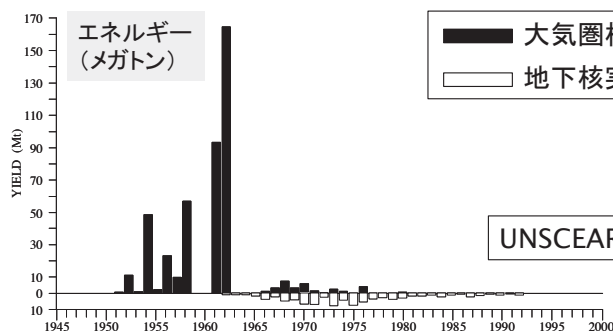
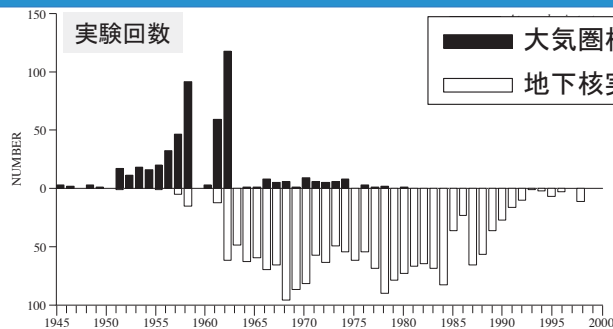
1945年以降大気圏では約500回の核実験。
 1963年部分的核実験禁止条約締結
 海洋における人工放射能核種の供給源としては最大。

(2) 原子力関連施設の事故

(3) 原子力関連施設からの計画的な放出



海洋における人工放射性核種の供給源(1)



公益財団法人 海洋生物環境研究所 © 2016 Marine Ecology Research Institute.

No.15

核実験による¹³⁷Csの海洋への放出

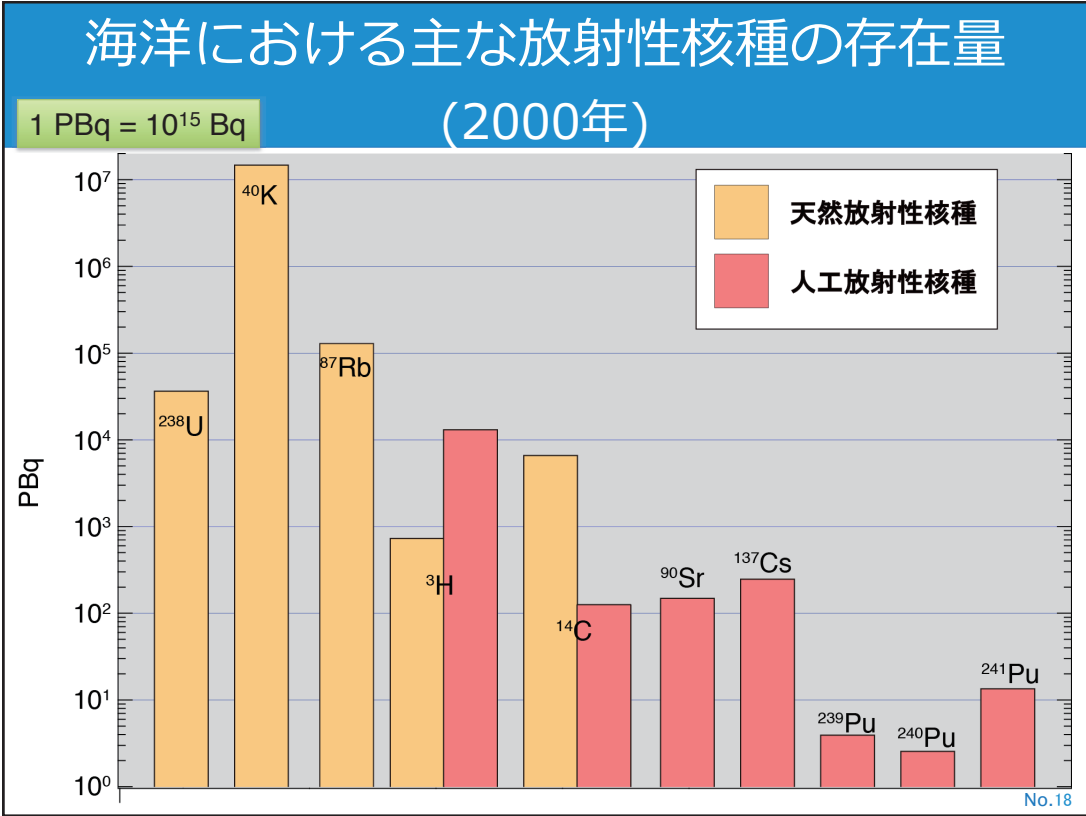
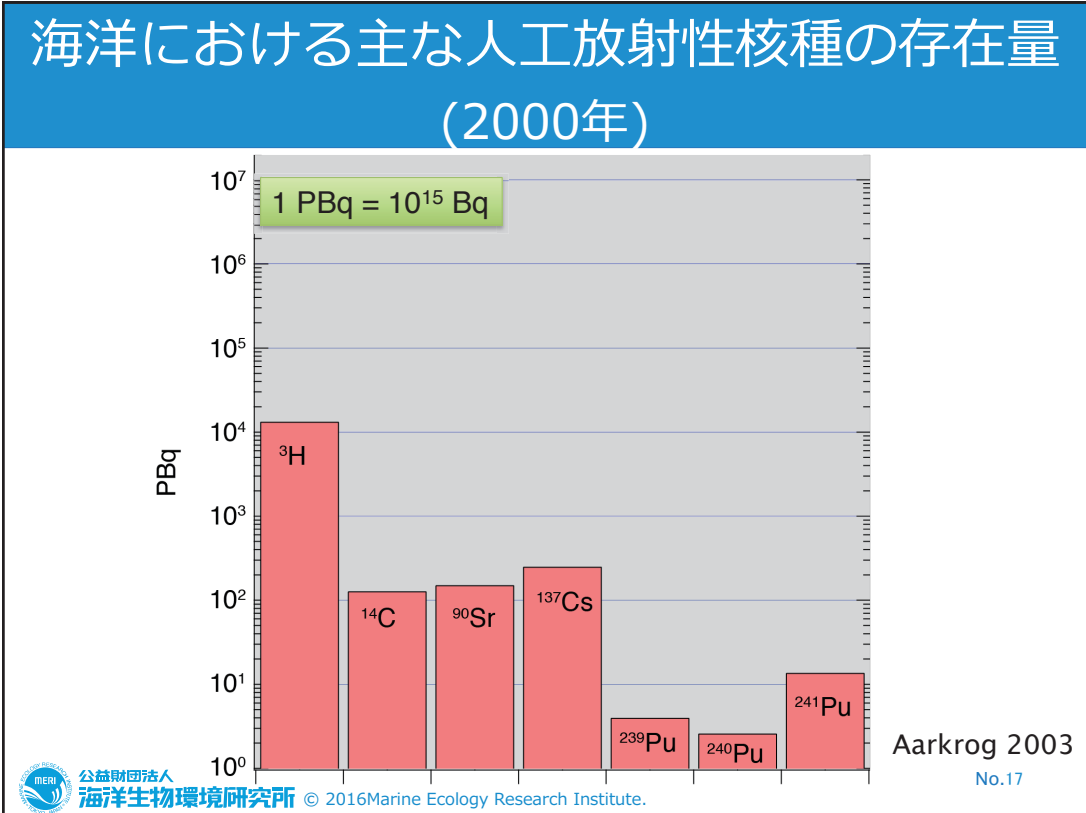
	北極海	大西洋	インド洋	太平洋	合計
北半球	7	157	21	222	408
南半球	0	44	63	89	195
合計	7	201	84	311	603

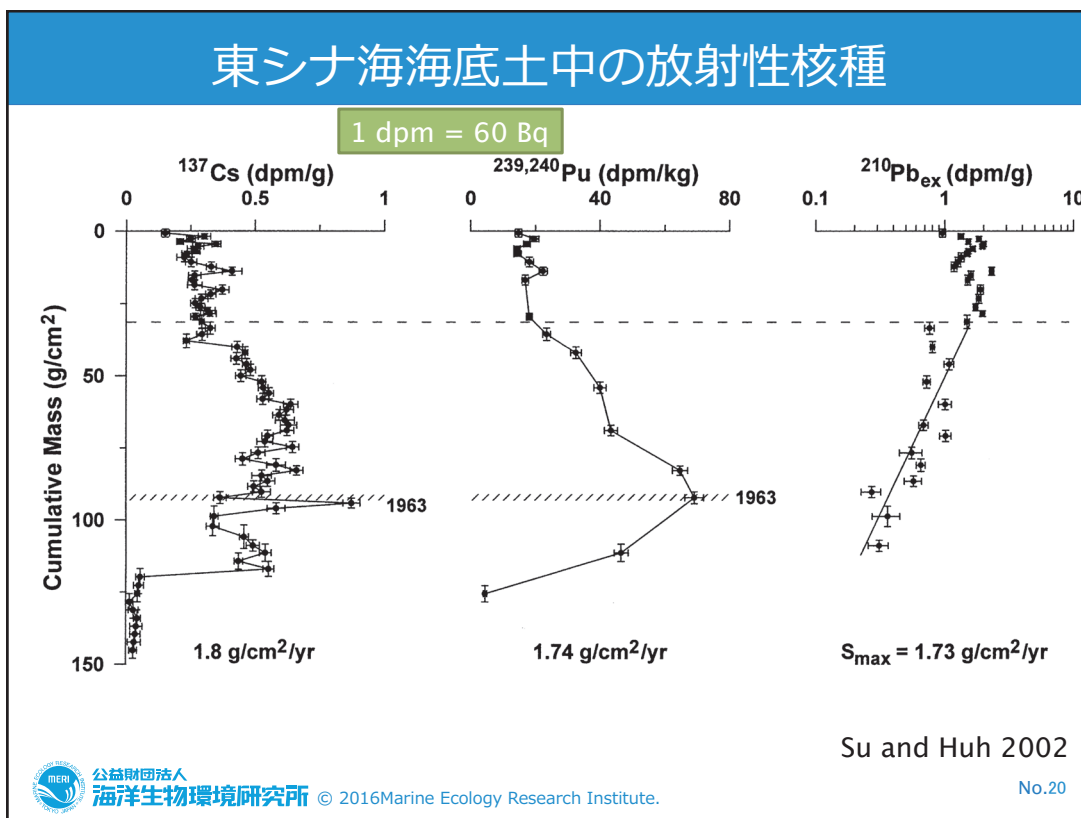
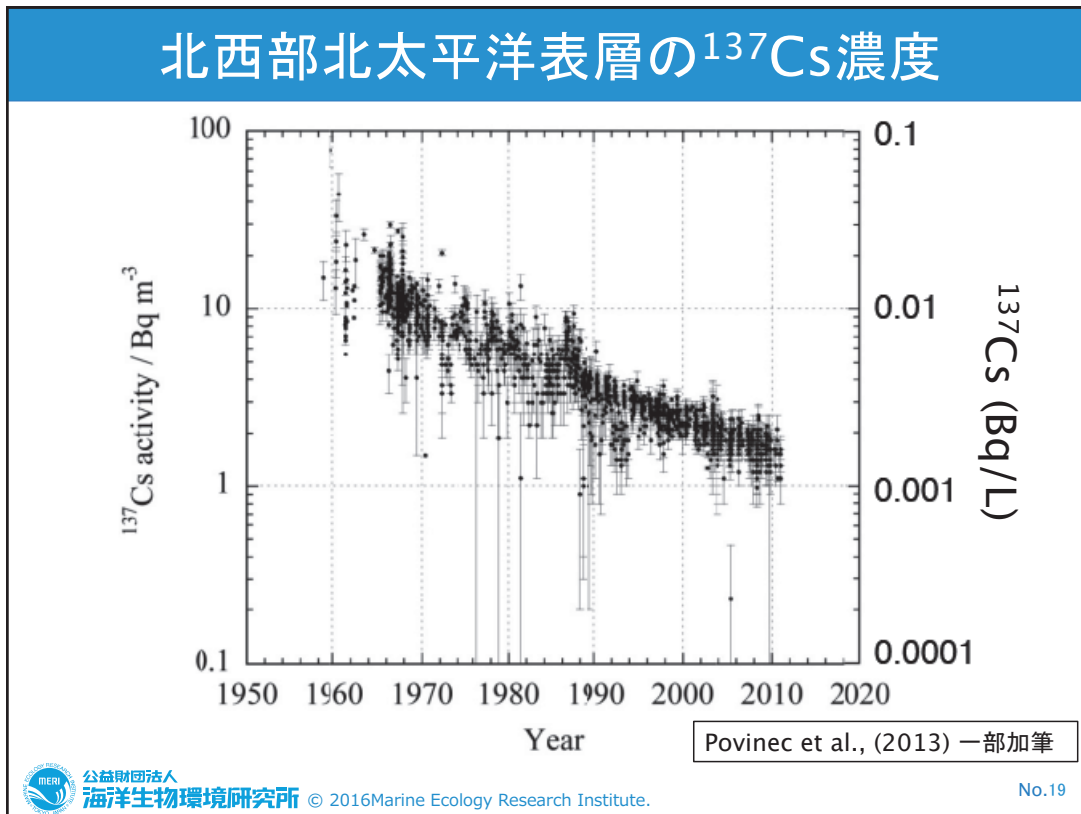
IAEA-TECDOC-1429, 2005 をもとに作成

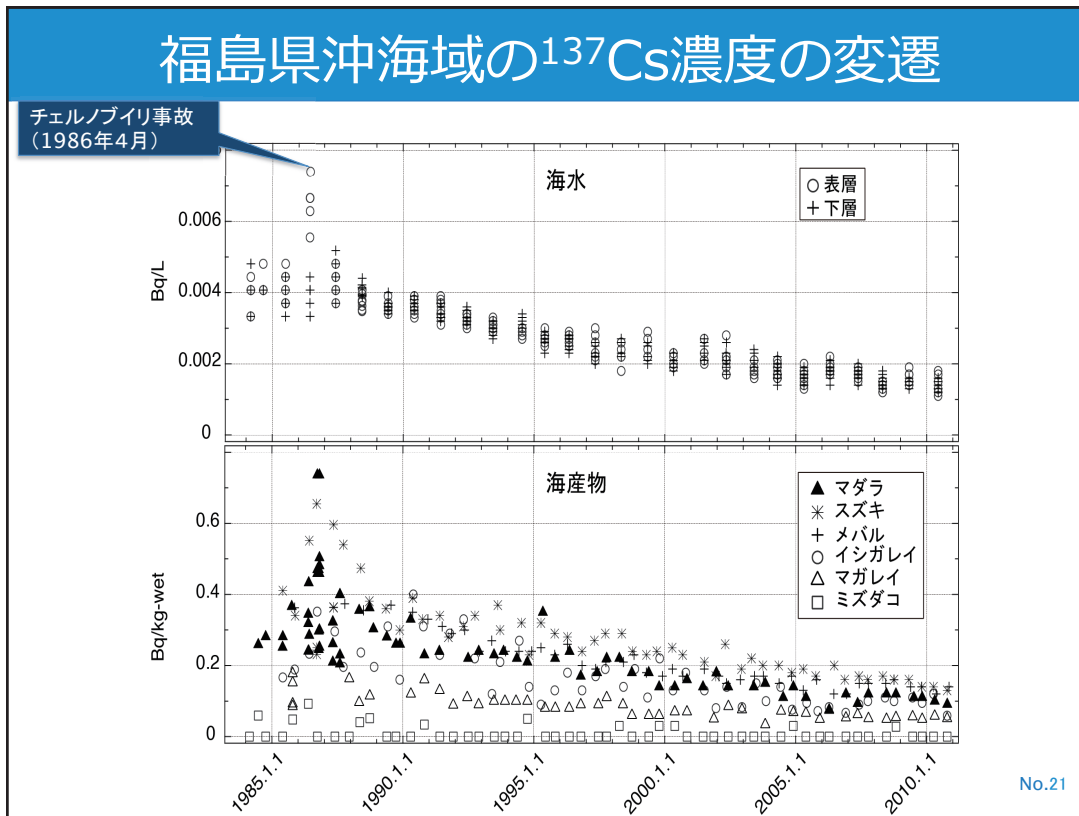


公益財団法人 海洋生物環境研究所 © 2016 Marine Ecology Research Institute.

No.16







太平洋表層水における人工放射性核種の見かけの半減期

海域	半減期 (年)		
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
北太平洋	12 ± 1	13 ± 1	7 ± 1
赤道太平洋	21 ± 2	23 ± 3	10 ± 2
南太平洋	18 ± 1	22 ± 1	12 ± 4
太平洋全域	13 ± 1	14 ± 1	7 ± 1

(Povinec et al., 2005)

公益財団法人 海洋生物環境研究所 © 2016 Marine Ecology Research Institute. No.22

外洋及び沿岸域における元素の分配係数 (k_d)

元素	外洋	沿岸
	K_d (推奨値)	
Sr	2×10^2	8×10^0
I	2×10^2	7×10^1
Cs	2×10^3	4×10^3
Pu	1×10^5	1×10^5

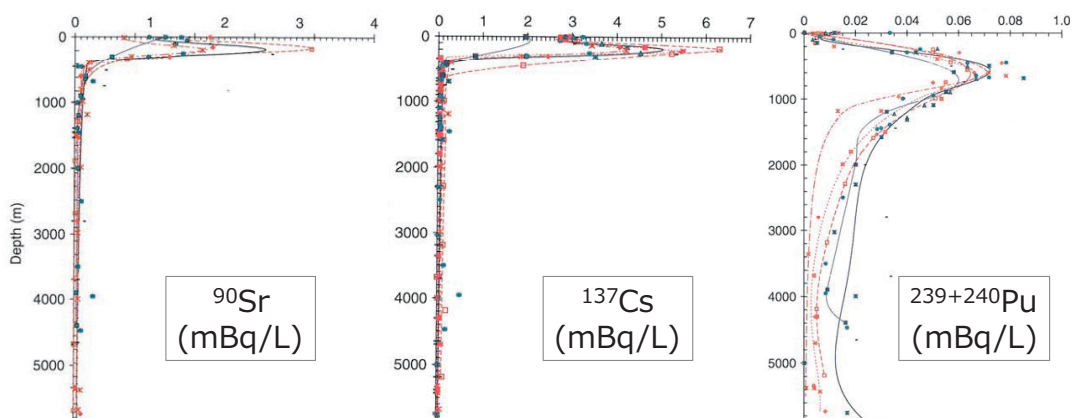
(IAEA,2004)

(平衡状態を仮定)

$$\text{分配係数 } (k_d) = \frac{\text{粒状物中の濃度}}{\text{海水中の濃度}}$$



北太平洋における ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 $^{239+240}\text{Pu}$ の鉛直分布 (1973-1997)



Aoyama 2010



海洋における人工放射性核種の供給源(2)

(1) 大気圏核実験

(2) 原子力関連施設の事故

1957, チェリャビンスク(ソ連)

1957, ウインズケール (イギリス)

1979, スリーマイルアイランド (アメリカ)

1986, チェルノブイリ(ソ連)

2011, 福島 (日本)

(3) 原子力関連施設からの放出



海洋における人工放射性核種の供給源(2)

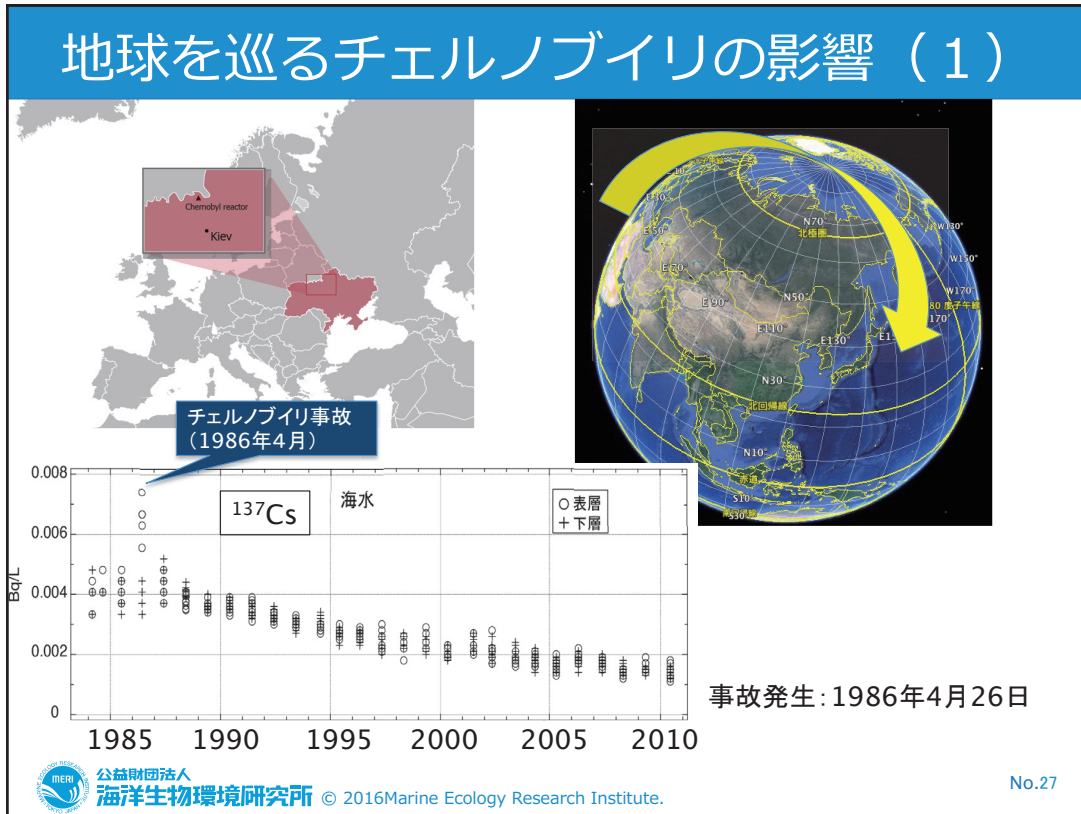
原子力関連施設の事故による環境への供給

単位: PBq (= 10¹⁵ Bq)

場所	チェリャビンスク州	ウインズケール	スリーマイル島	チェルノブイリ	福島	
国	ソ連	イギリス	アメリカ	ソ連	日本	
年	1957	1957	1979	1986	2011	
核種	⁹⁰ Sr	4	7 × 10 ⁻⁵		~10	0.09-0.9 (海水)
	¹³¹ I		0.74	5.55 × 10 ⁻⁴	~1760	200 (大気) 11.1 (海水)
	¹³⁷ Cs	0.03	0.022		~85	15-20 (大気) 3.6 (海水)
	²³⁹ Pu		1.6 × 10 ⁻⁶		0.03	~0
	²⁴⁰ Pu				0.042	~0
	²⁴¹ Pu				~6	~0
	ワラル核惨事。キシユテム事故。内陸地のため海洋への影響はほとんどなし	影響は内陸側	主な他の核種: ⁸⁵ Kr, ¹³³ Xe	¹³⁷ Csの海洋への流入: 15-20 PBq	大気経由で海洋に入った ¹³⁷ Cs: 12-15 PBq	

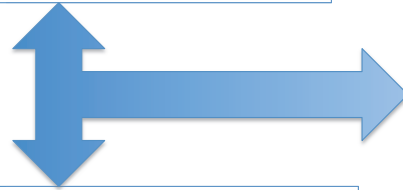
出典: UNSCEAR 2000 Report, 2000, Runde et al., 2010, Casacuberta et al., 2013, Kobayashi et al., 2013, Tsumune et al., 2013, Aoyama et al., 2015, Bu et al., 2014





東電福島第一原発事故による 北太平洋における¹³⁷Csの存在量の変化

2011年3月1日以前 : 69 PBq



存在量が22-27%の上昇

直接漏えい : 3.5 ± 0.7 PBq
大気より : 12-15 PBq

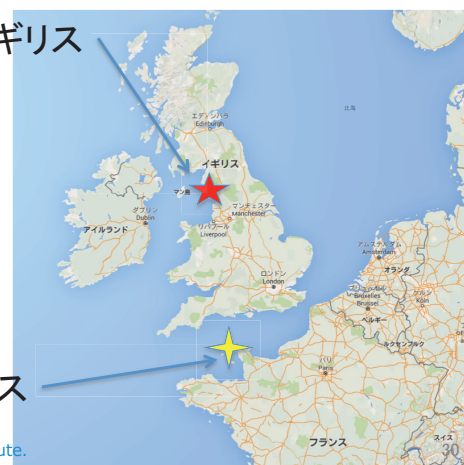
Aoyama et al., 2016

海洋における人工放射性核種の供給源(3)

- (1) 大気圏核実験
- (2) 原子力関連施設の事故

(3) 原子力関連施設からの放出

セラフィールド、イギリス



ラ・アーグ、フランス

原子力関連施設からの放出

Radioactive discharges from Sellafield and Cap de la Hague 1970-1998 (TBq)

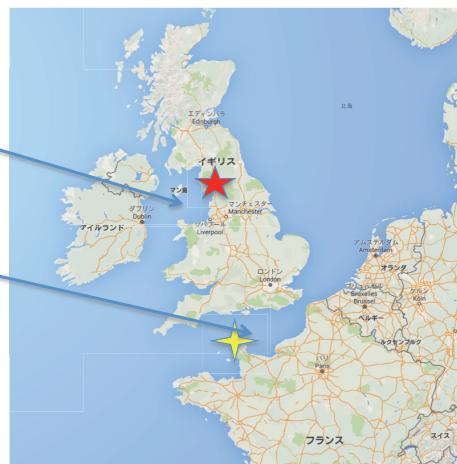
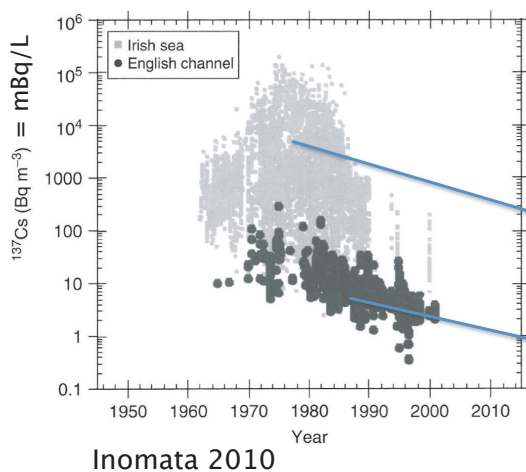
Year	セラフィールド、イギリス				ラ・アーグ、フランス				ac:2000年の規格化
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs ac	⁹⁰ Sr ac	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs ac	⁹⁰ Sr ac	
1970	1200	230	600	112	89	2	45	1	
1971	1300	460	665	229	243	8	124	4	
1972	1289	562	675	286	33	16	17	8	
1973	770	280	413	146	69	19	37	10	
1974	4100	390	2249	208	56	52	31	28	
1975	5230	466	2936	255	34	38	19	21	
1976	4289	381	2464	214	35	20	20	11	
1977	4480	427	2634	245	51	36	30	21	
1978	4090	597	2460	351	39	70	23	41	
1979	2600	250	1601	151	23	56	14	34	
1980	2970	352	1871	217	27	29	17	18	
1981	2360	277	1522	175	39	27	25	17	
1982	2000	319	1320	207	51	86	34	56	
1983	1200	204	810	135	23	142	16	94	
1984	434	72	300	49	30	110	21	75	
1985	325	52	230	36	29	47	21	33	
1986	18	18	13	13	10	69	7	49	
1987	12	15	9	11	8	57	6	42	
1988	13	10	10	7	9	40	7	30	
1989	29	9	22	7	13	29	10	22	
1990	24	4	19	3	13	16	10	13	
1991	15	4	12	3	6	30	5	24	
1992	15	4	12	3	3	18	2	15	
1993	22	17	19	14	4	25	3	21	
1994	14	29	12	25	11	16	10	14	
1995	12	28	11	25	5	30	4	27	
1996	10	16	9	15	2	11	2	10	
1997	8	37	7	34	3	4	3	4	
1998	8	18	7	17	3	3	3	3	
トータル (PBq)	38.8	5.5	22.9	3.2	1.0	1.1	0.6	0.7	

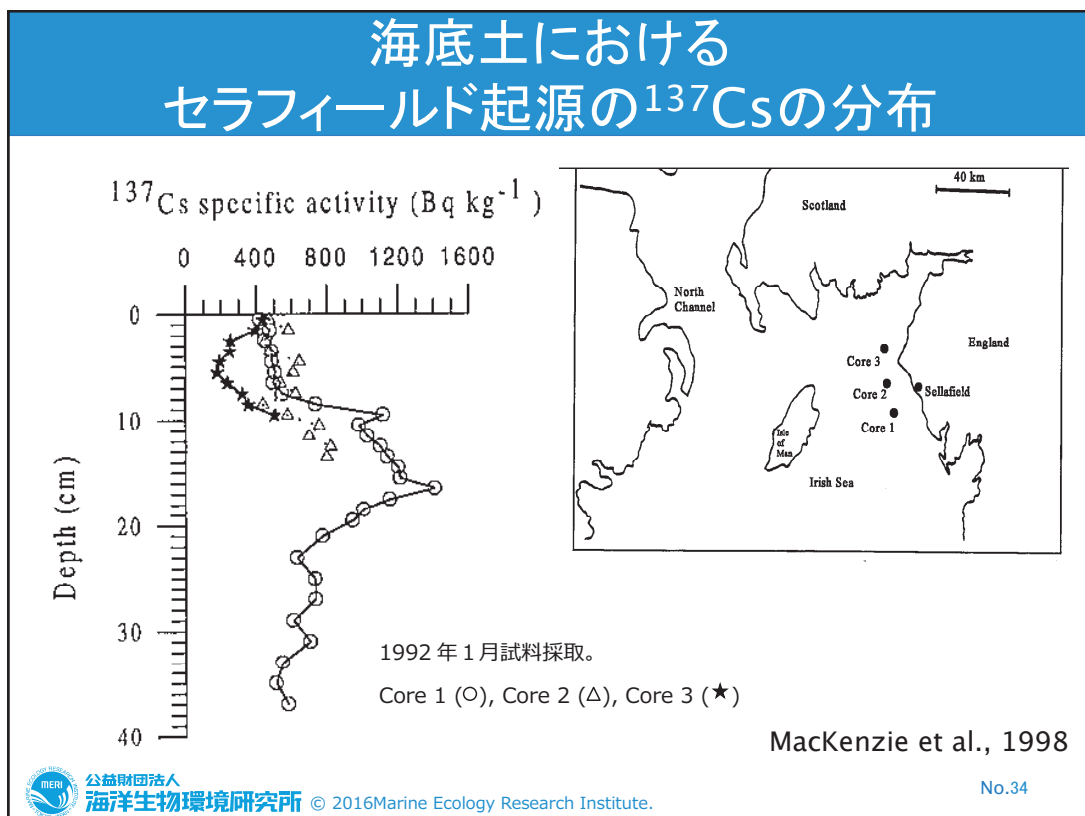
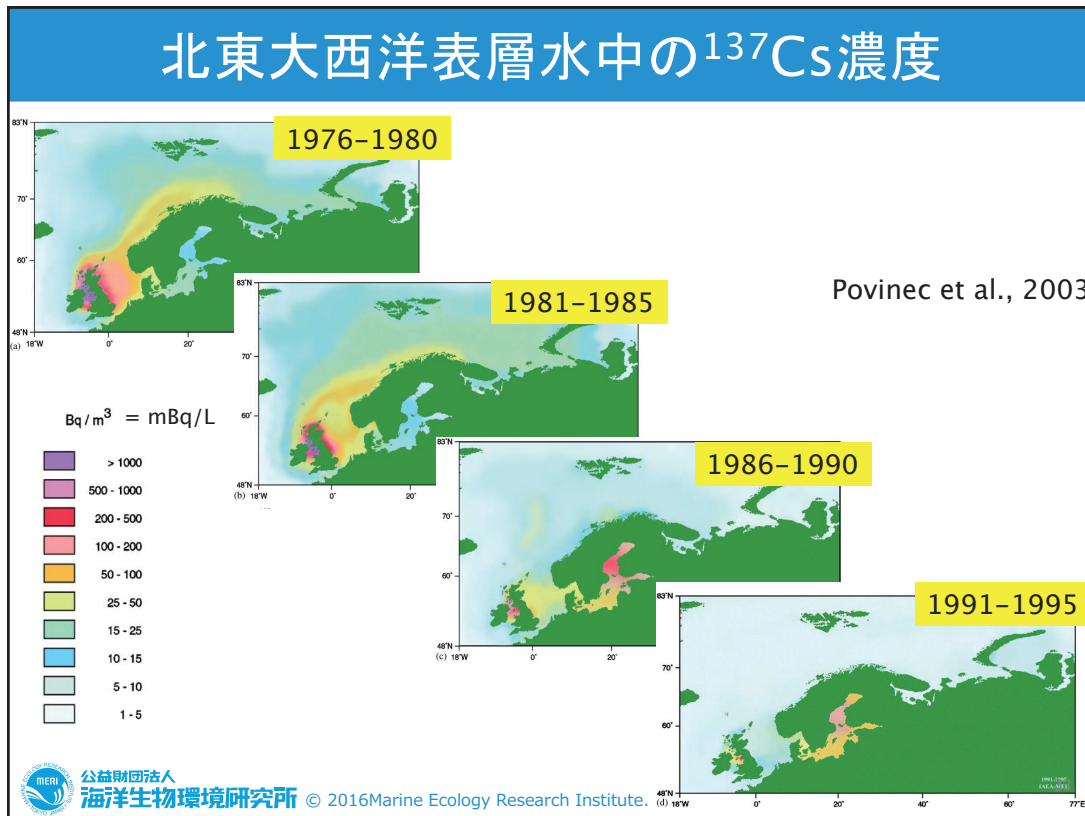
1 TBq = 10¹² Bq

Aakrog (2003) に加筆

No.31

北東大西洋表層水中の¹³⁷Cs濃度





まとめ

- (1) 人類はその発生以来、多様な天然放射性核種に囲まれて生きてきた。同時に体内にも一定量の放射性物質を蓄積している。
- (2) 海洋環境における放射能汚染の最大のものは大気圏核実験である。
- (3) 最大規模の原子力関連施設における事故はチェルノブイリ原子力発電所で起きた。
- (4) 欧州の再処理工場からは過去に大量の人工放射性核種が海洋に放出されたが、最近の年間放出量は最盛期の数百分の1まで減少している。

