

トリチウムの物性等について

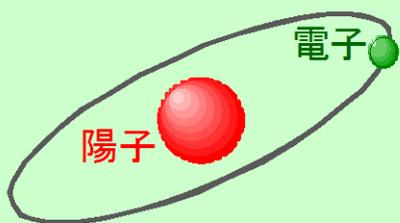
平成25年12月25日

(独)日本原子力研究開発機構

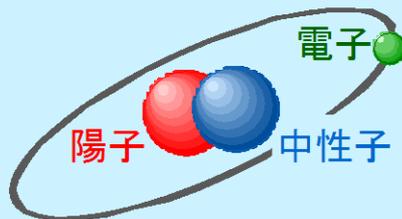
山西 敏彦

トリチウムとは

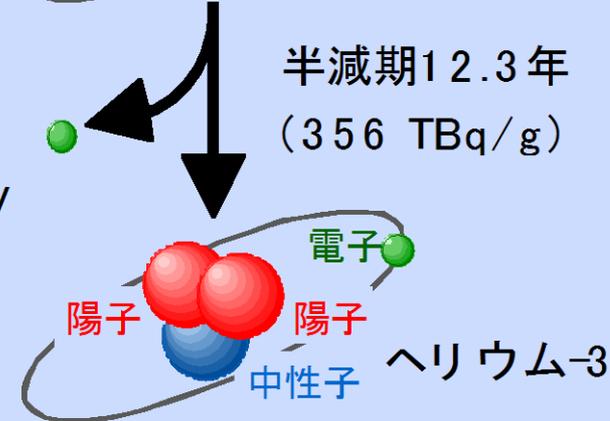
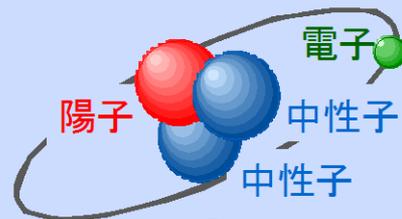
プロチウム(軽水素)
いわゆる「水素」



デューテリウム(重水素)
自然界に水素の
約0.015% 存在



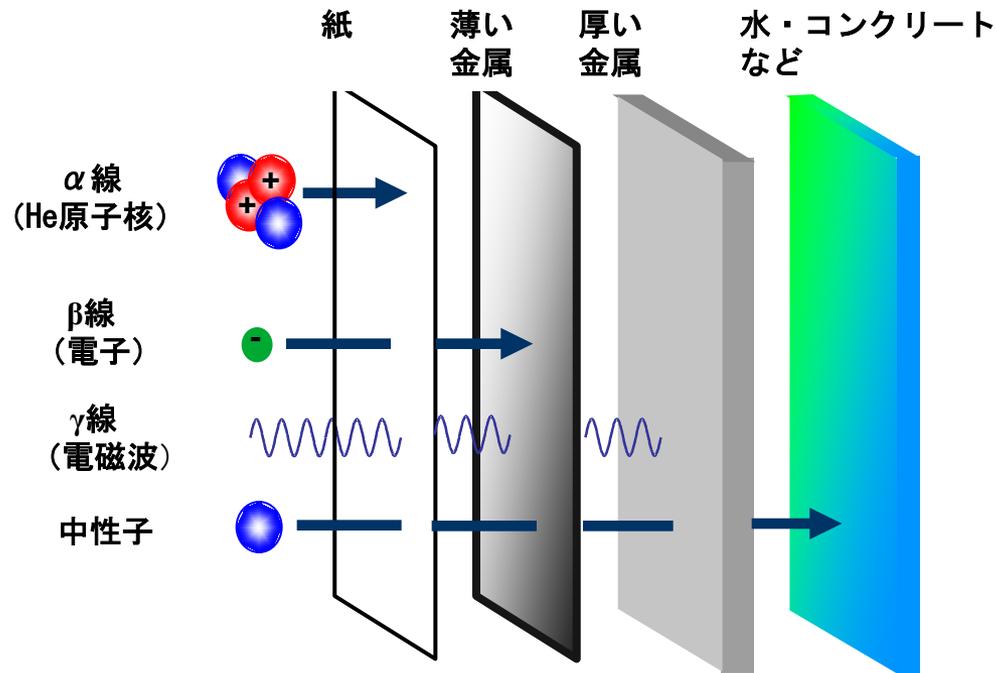
トリチウム(三重水素)
自然界に水素の
(0.1~10) × 10⁻¹⁸ 程度存在



天然水中のトリチウム
… 1Bq/l 程度
人体中のトリチウム
… 数十Bq/人

トリチウムの出すβ線:
最大エネルギー18.6keV
最大飛程 5mm 空气中
6μm 水中

放射線の種類と遮へい



放射線の特徴

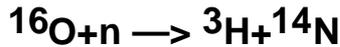
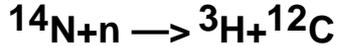
- α線：電気を帯びて重いので紙一枚ですぐに止まる。
- β線：電気を帯びているので薄い金属ですぐに止まる。
- γ線：電磁波の一種なので、金属は透過しにくい。
- 中性子：電気を帯びていない。重い物質では止まりにくく、軽い物質に衝突して止まる。

ちなみに、トリチウムのβ線はエネルギーが小さいため（最大18keV、テレビの電子銃の電子線エネルギーより小さい）、紙1枚で遮へいが可能。

環境中のトリチウム

宇宙線による生成

窒素や酸素から生成している。
約200 g/年 3 kg 程度常に存在



核実験による放出

240 EBq (185-240)

E:エクサ, 10^{18}

海: 1Bq/lの濃度

(1 lに数億個のトリチウム。ベータ線が1秒間に1個ずつ発生)

全世界のトリチウム存在量

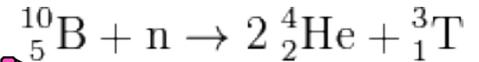
1-1.3 EBq (1) + ~10 EBq (現在)

原子炉でのトリチウム生成

ウラン等の中性子との三体核分裂

一万回に1回程度

制御棒中のホウ素の中性子捕獲



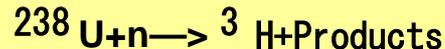
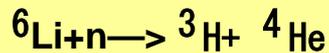
消費製品

0.4 Ebq/年 (0.3-0.4)

原子力発電所

0.02 Ebq/年
(0.01-0.02)

地殻での生成



特に、カナダ、韓国等の重水炉の重水減速材からの生成が多い。

- ・カナダ; トリチウム生産量約 2 kg/年、保有量10数kg

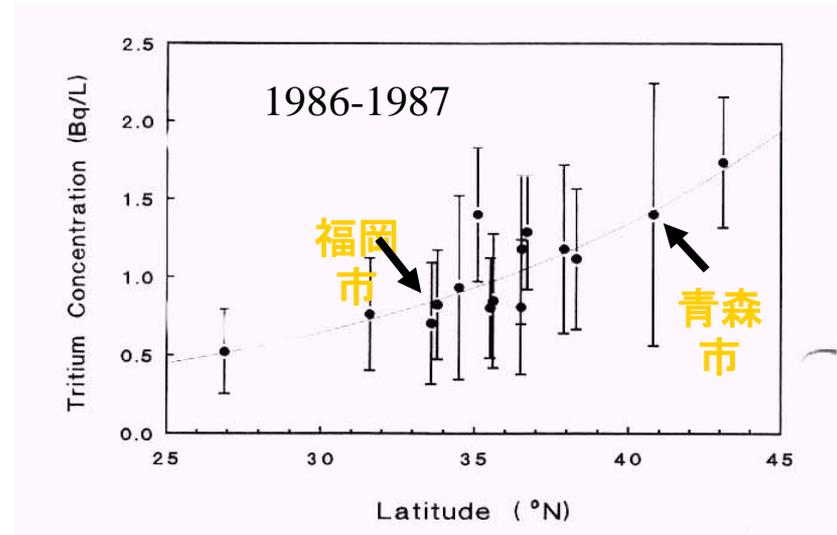
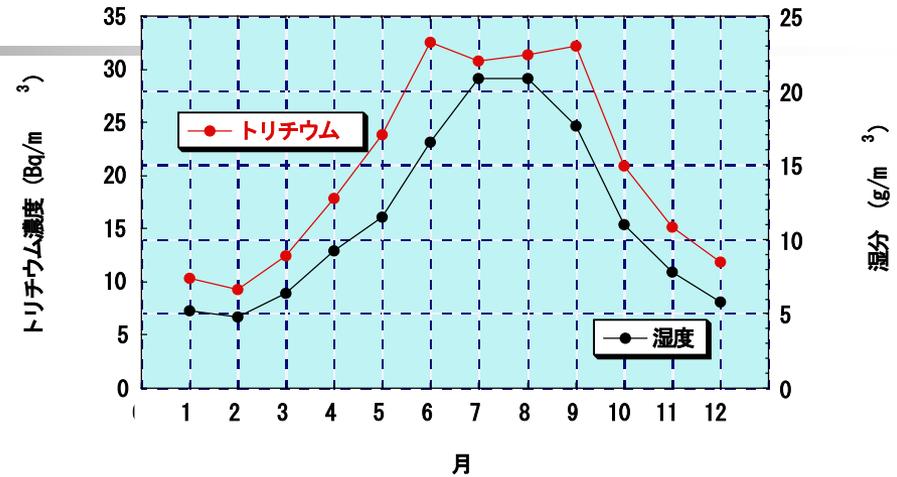
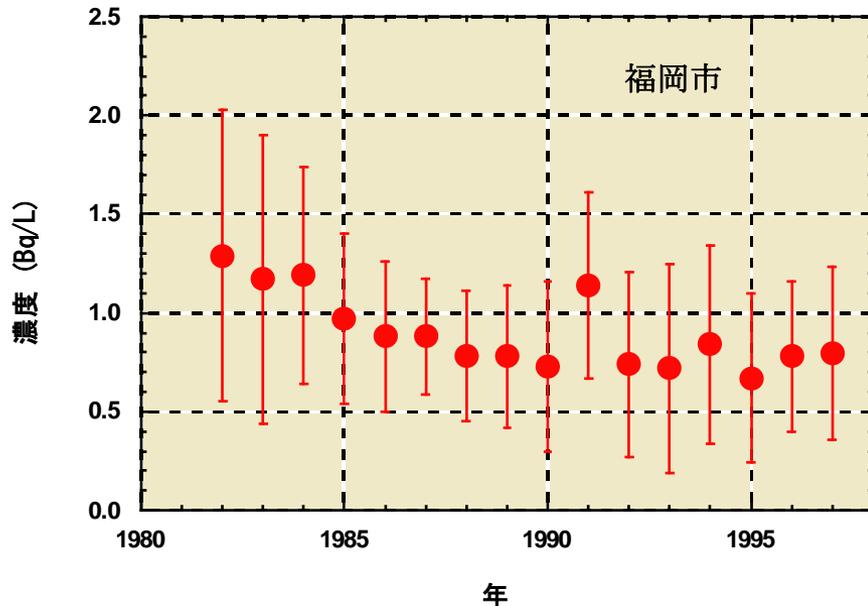
- ・韓国; 2007年よりトリチウム生産プラント稼働、

数百 g/年の処理能力、kgオーダーで回収との情報

環境中のトリチウム2

雨のトリチウム濃度（年平均）

大気中のトリチウム濃度は
湿分に連動して変化する
雨のトリチウム濃度は緯度依
存性を示す



シンポジウム「核融合炉の安全性及びトリチウム」より

主催：日本原子力学会核融合炉ブランケット工学特別専門委員会 2003年3月20日 青森国際ホテル

トリチウムに関する我が国の規制

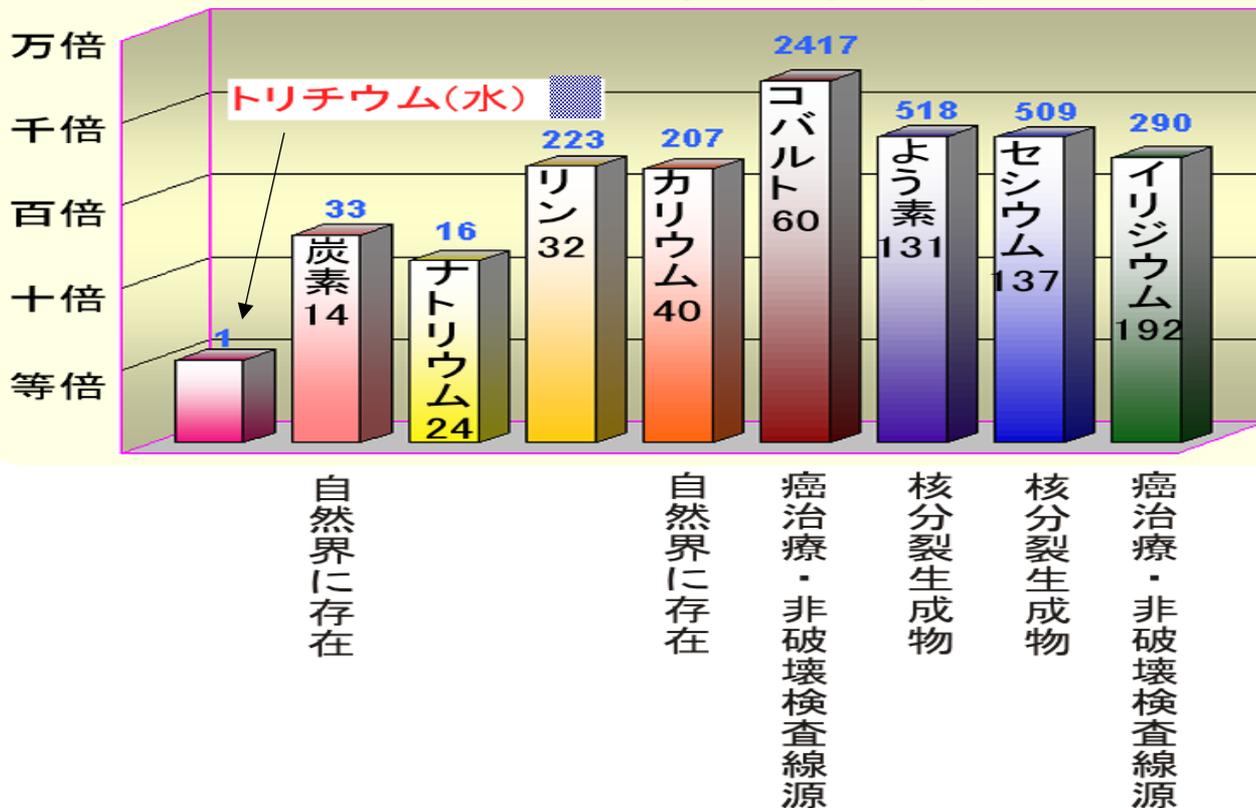
放射線障害防止法関連法令で定められた値

トリチウムの化学形	実効線量係数 (mSv/Bq)		濃度限度 (Bq/cm ³)		
	吸入	経口	作業環境の 空气中 (1週間の平均値)	排気中 (3ヶ月の平均値)	排液又は 排水中 (3ヶ月の平均値)
元素状水素	1.8×10^{-12}		1×10^4	7×10^1	
メタン	1.8×10^{-10}		1×10^2	7×10^{-1}	
水	1.8×10^{-8}	1.8×10^{-8}	8×10^{-1}	5×10^{-3}	6×10^1
有機物(メタン以外)	4.1×10^{-8}	4.2×10^{-8}	5×10^{-1}	3×10^{-3}	2×10^1
上記を除く化合物	2.8×10^{-8}	1.9×10^{-8}	7×10^{-1}	3×10^{-3}	4×10^1

(福島第一原発) 汚染水量: 約30万m³、濃度: ~5000 Bq/cm³、トリチウム量: 数g

トリチウムの生物影響

トリチウムとよく知られた放射性核種との生物影響の比較
(単位放射能吸入摂取時の影響)

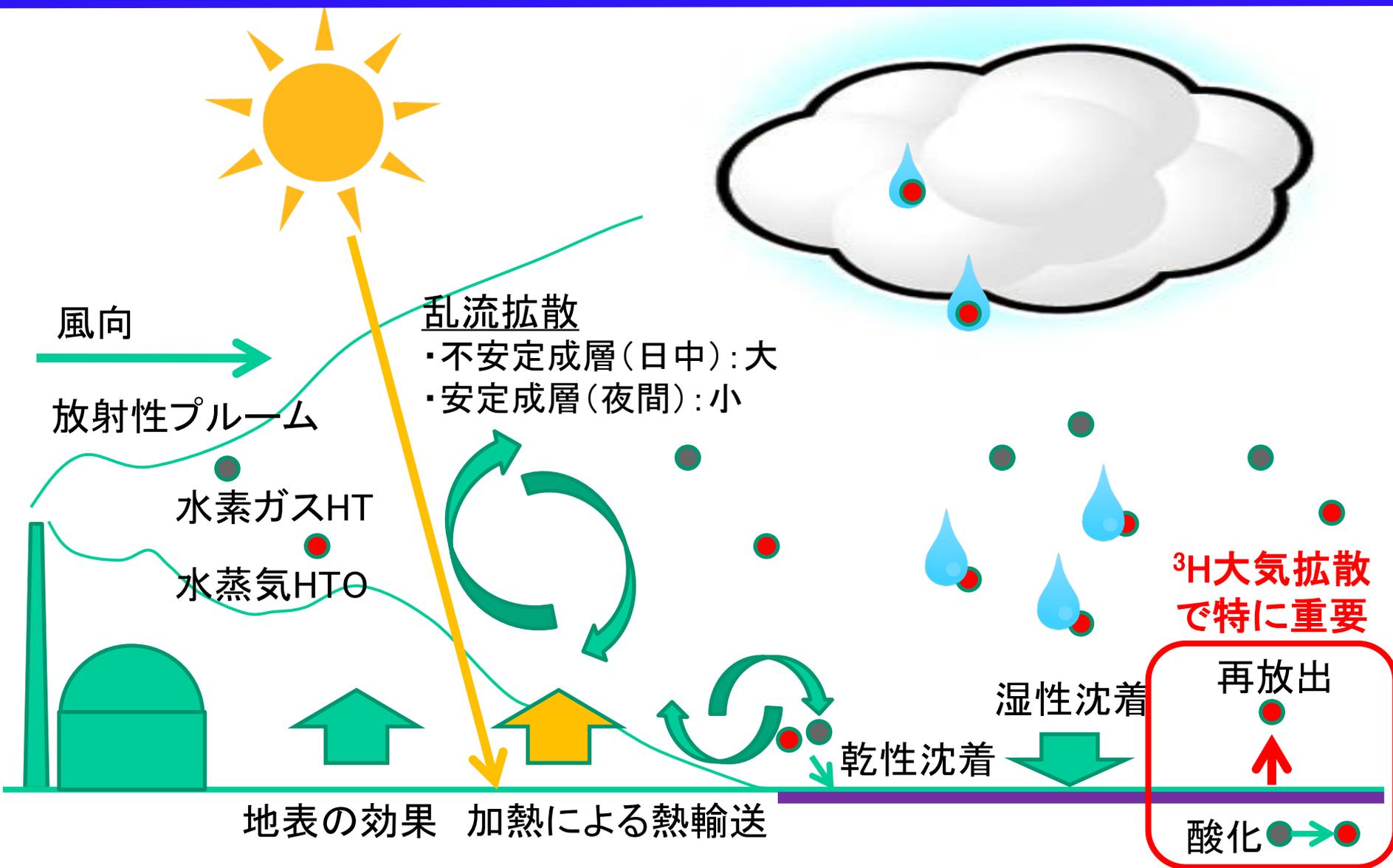


体重65kgの人は
カリウム40
4000 Bq
炭素14
3700 Bq
トリチウム水
100 Bq

新陳代謝
水素の仲間は**水の形で10日**、**有機物の場合で平均40日**で入ってきた量の半分が体外に排出されます。

トリチウムの環境中における拡散現象 — 評価モデルの考え方 —

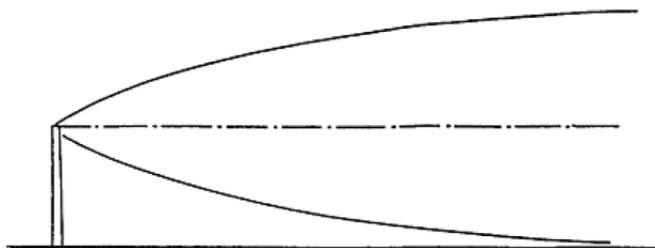
日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門
環境動態研究グループ



放出時の気象条件で拡散状況は大きく異なり、単純な評価はできない

ガウス・プルームモデル

例: 米国MACCS2



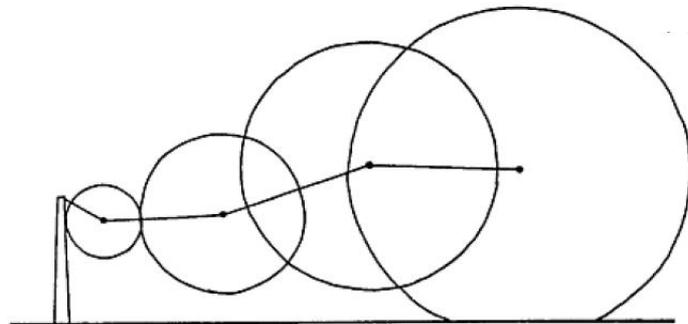
- 定常放出
- 平地・近距離(数km以内)
- 時間空間的に一様な風速場
- 移流・拡散方程式の解析解



近距離における簡易的な評価

流跡線パフモデル

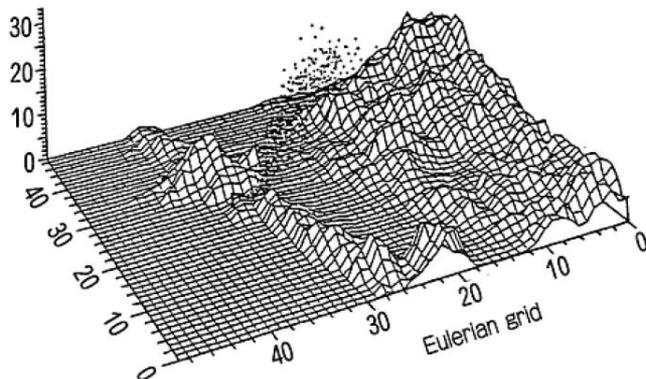
例: 米国RASCAL



- 変動放出
- 移流計算: 風速変動に伴う流跡線解析
- 拡散計算: ガウス分布パフの広がりの変化

数値計算モデル
(粒子拡散モデル)

例: 米国NARAC
日本(W) SPEEDI



- 変動放出
- 複雑地形、局地から広域まで
- 時間空間的に変動する風速場
- 移流・拡散方程式を数値的に計算



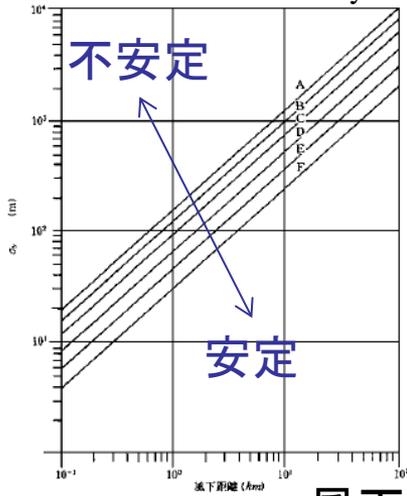
地形・気象を考慮した厳密評価

基本拡散式

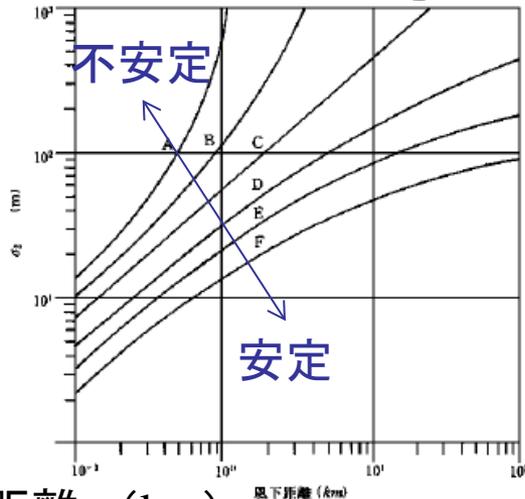
$$\chi(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

- $\chi(x, y, 0)$: 地上濃度 (Bq/m³)
- Q : 放出率 (Bq/s)
- U : 風速 (m/s)
- σ_y : 水平方向の拡散幅 (m)
- σ_z : 鉛直方向の拡散幅 (m)
- H : 放出源の高さ (m)

水平拡散幅 σ_y



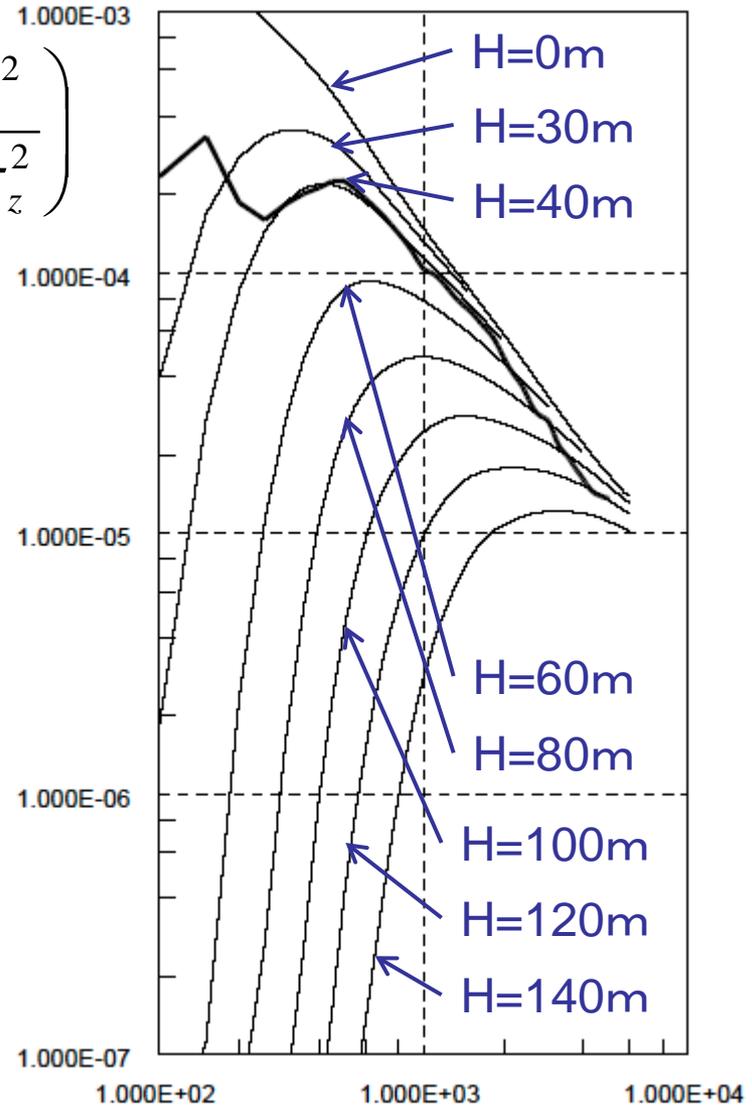
鉛直拡散幅 σ_z



風下距離 x (km)

風下距離 (km)

正規化地上濃度 $U \cdot (\chi/Q)$ (m⁻²)



風下距離 x (m)

濃度の目安：風下距離10倍で2桁近く低下、大気安定度の違いで2桁程度の差

MM5 (PSU/NCAR開発)

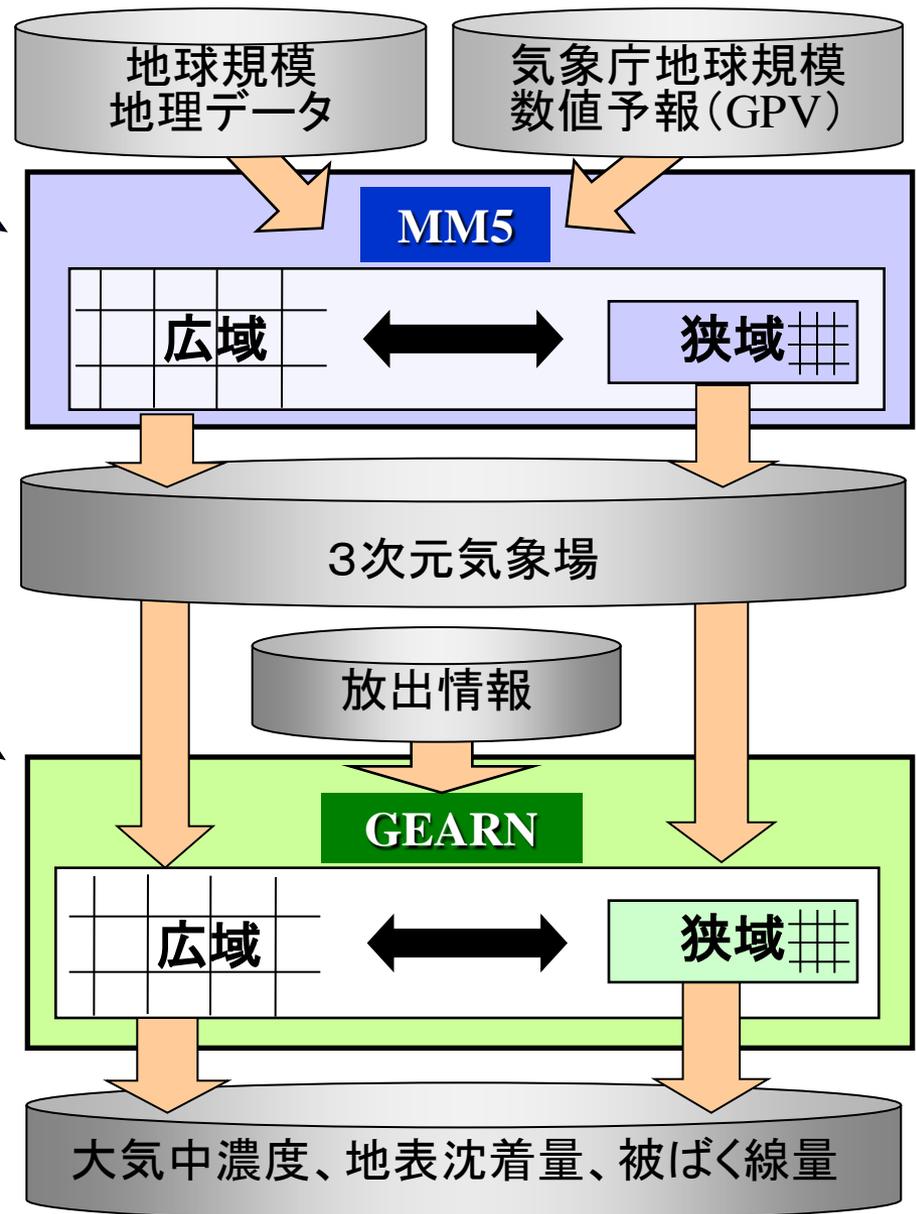
領域気象力学モデル

- 雲・降水、大気放射等の各種物理過程を考慮
- 気流、乱れ、降雨、雲量等の気象変数の予測

GEARN (原子力機構開発)

ラグランジュ型粒子拡散モデル

- 放射性核種の移流・拡散・沈着・崩壊を考慮
- 大気中濃度、地表沈着量、被ばく線量の予測



参考文献：寺田、他：緊急時環境線量情報予測システム(世界版)WSPEEDI第2版の開発,日本原子力学会和文論文誌, 7[3], 257-267 (2008).



■ 座標系

水平：地図投影面上での距離直交座標(x, y)、鉛直：地形準拠座標(z*)

■ 移流拡散方程式（+座標系、沈着、放射性崩壊を考慮）

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w^* \frac{\partial C}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_{z^*} \frac{\partial C}{\partial z^*} \right)$$

■ 数値解法：ラグランジュ型輸送計算（多数の仮想粒子の位置を追跡）

$$\begin{aligned} x_{t+\Delta t} &= x_t + u\Delta t + R_x, \\ y_{t+\Delta t} &= y_t + v\Delta t + R_y, \\ z_{t+\Delta t}^* &= z_t^* + w^*\Delta t + R_{z^*} \end{aligned}$$

x, y, z^* : 粒子位置[m]

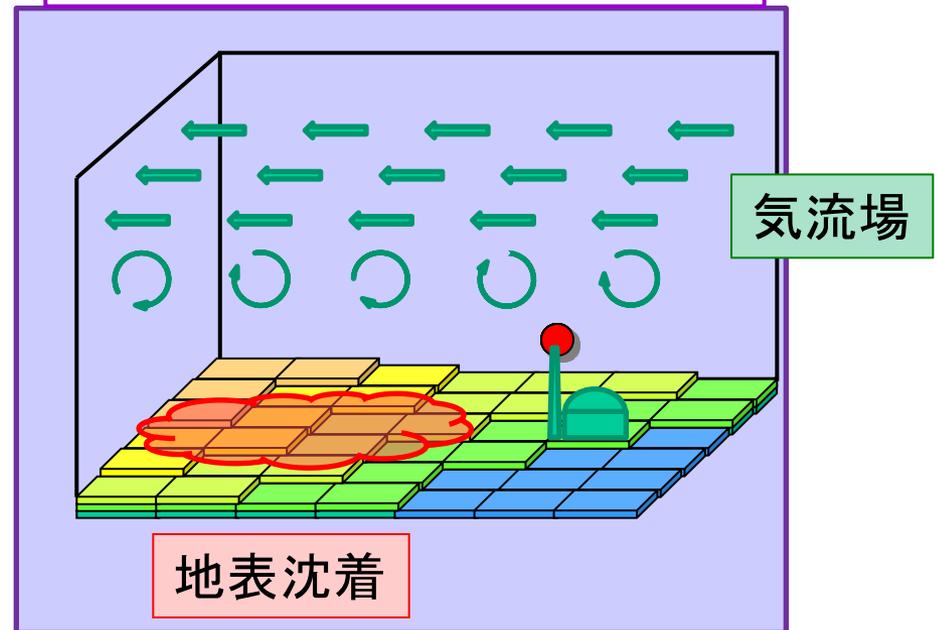
u, v, w^* : 風速[m/s]

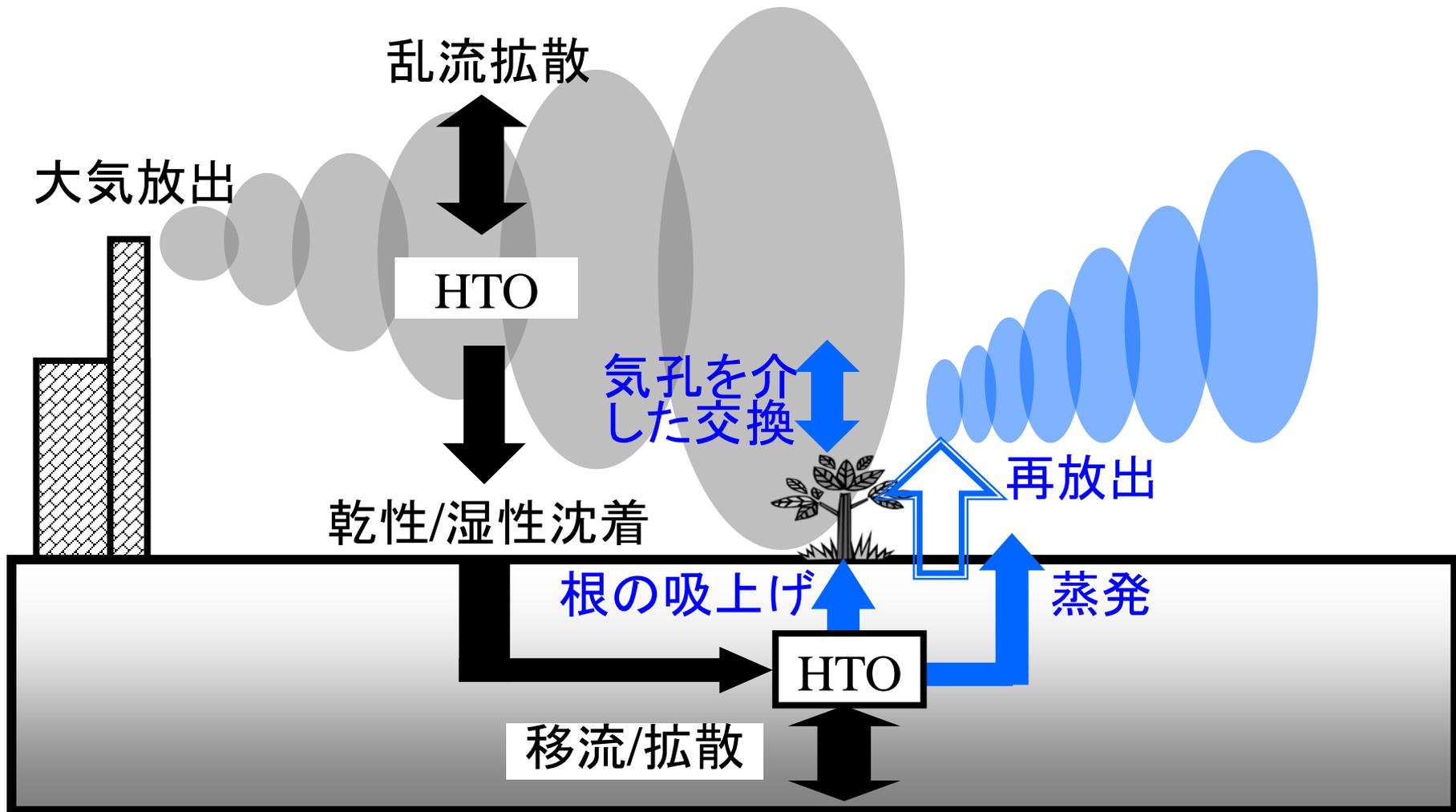
Δt : 時間増分[s]

R_{x,y,z^*} : 拡散項[m]

■ 拡散項：ランダムウォーク法で計算

粒子拡散計算のイメージ





HTO乾性沈着
HTO湿性沈着
HTO再放出

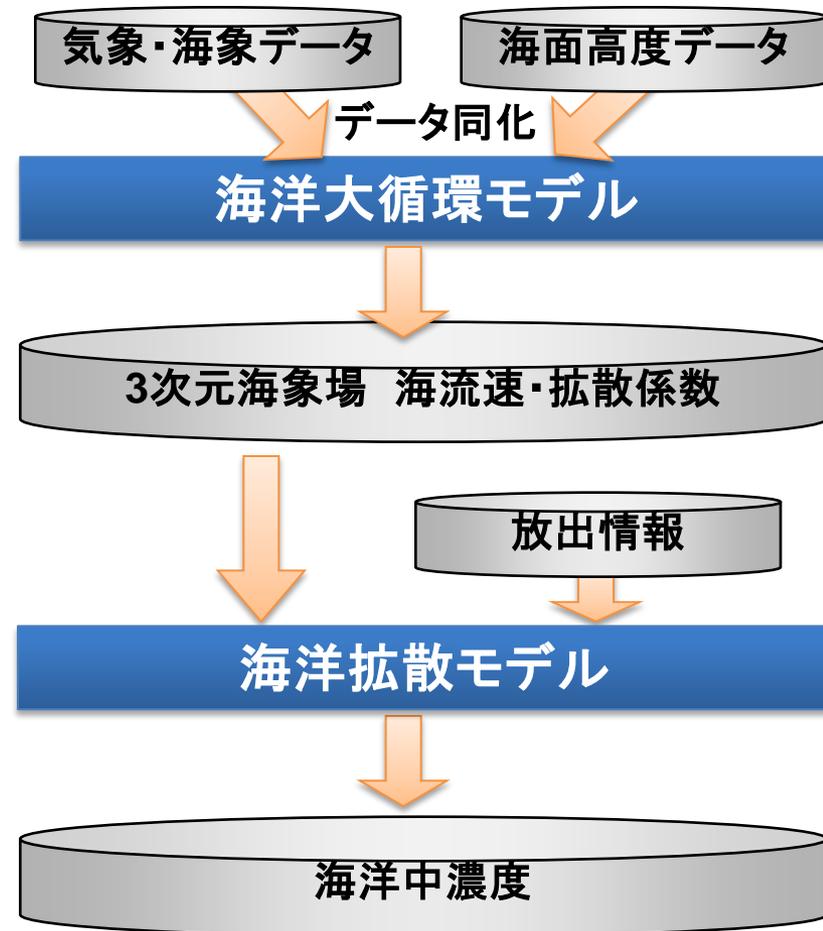
沈着速度: $4 \sim 8 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$

沈着率は降水状況により変化

初期48時間: $0.9 \sim 8.7\% \text{ h}^{-1}$ 、48時間以降: $0.25 \sim 1.5\% \text{ h}^{-1}$

海水循環モデル

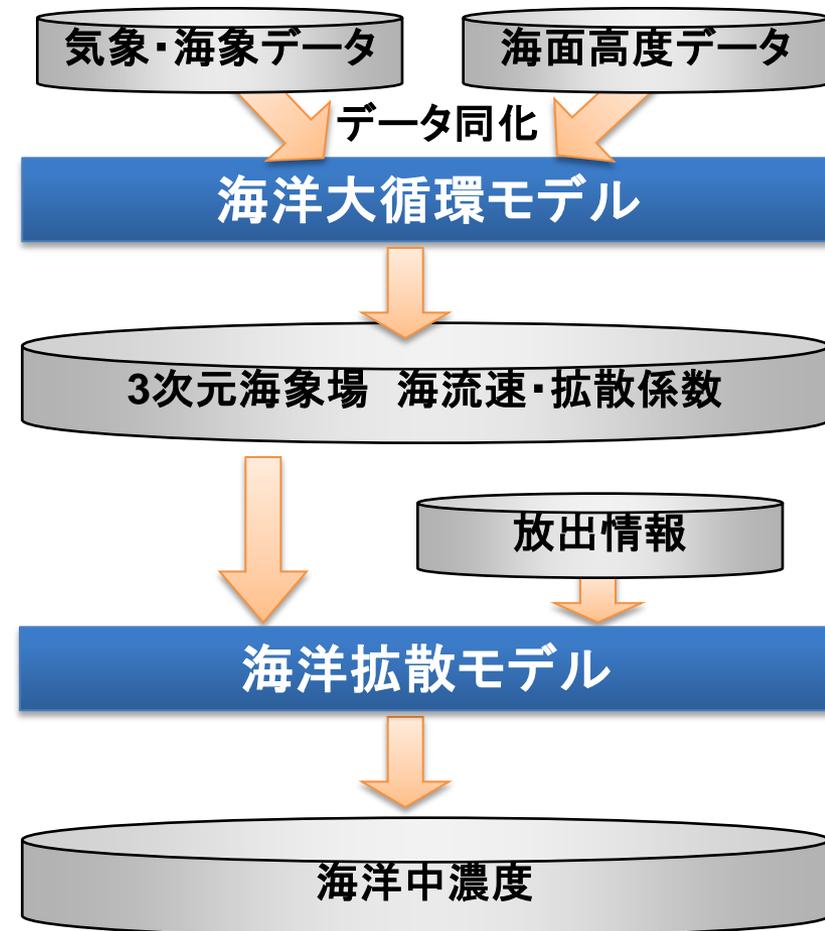
- 海洋中の流速、水温、塩分などの物理量の3次元構造とその変動を物理法則に基づいて求める
- 海洋を格子状に分割し、海面では大気との運動量、熱・淡水の交換を与え、各格子点間では運動方程式や熱・塩分の保存則を満たすように、流速変動、熱、塩分の移動や拡散を計算する
- 人工衛星や船舶から得られた海洋の観測データにモデル結果がより近くなるように、海洋の状態や大気との交換を修正する「データ同化」とよばれる手法を用いて、より現実的な海洋変動を再現する
- 目的に応じて解像度を変化
 - 沿岸付近では高分解能モデル(~2km格子)、原子力機構では、京都大学、海洋研究開発機構、日本海洋科学振興財団が共同開発したモデルの結果を利用する
 - 広域海洋では低分解能モデル(10~100km格子)、原子力機構では、気象庁気象研究所が開発したモデルの結果を利用する



海洋拡散評価モデルの計算の流れ

海洋拡散モデル

- 海洋中の放射性物質濃度の3次元構造とその変動を物理・化学法則に基づいて求める
- 一般的なモデルは、海水中の放射性物質の存在形態を、溶存相、粒子相、海底堆積物相と定義し、それぞれの相間を吸着・脱着、沈降・再浮遊により濃度の移行を考慮する
- トリチウムに関しては海水（溶存相）として動き、他の相との交換過程は無視する
- 原子力機構では自主開発したモデルを使用
 - 放射性核種を多数の粒子で模擬しランダムウォークモデルで追跡することで放射性核種の移流・拡散を計算



海洋拡散評価モデルの計算の流れ

(一般的な事例をもとに)

典型的な太平洋側の沿岸からの放出計算結果

(海流による移流拡散のみを考慮)

- 放出位置の計算格子の濃度に対して、約10km下流では約1桁低下、約50km下流では約2桁低下、約100km下流では約3桁低下
- 季節が変わっても同様の傾向を示す

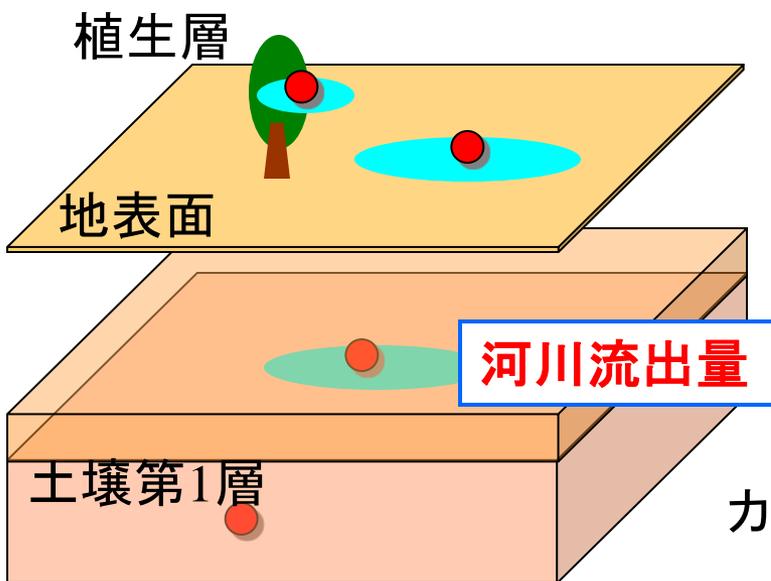
陸域移行モデル

粒子生成：

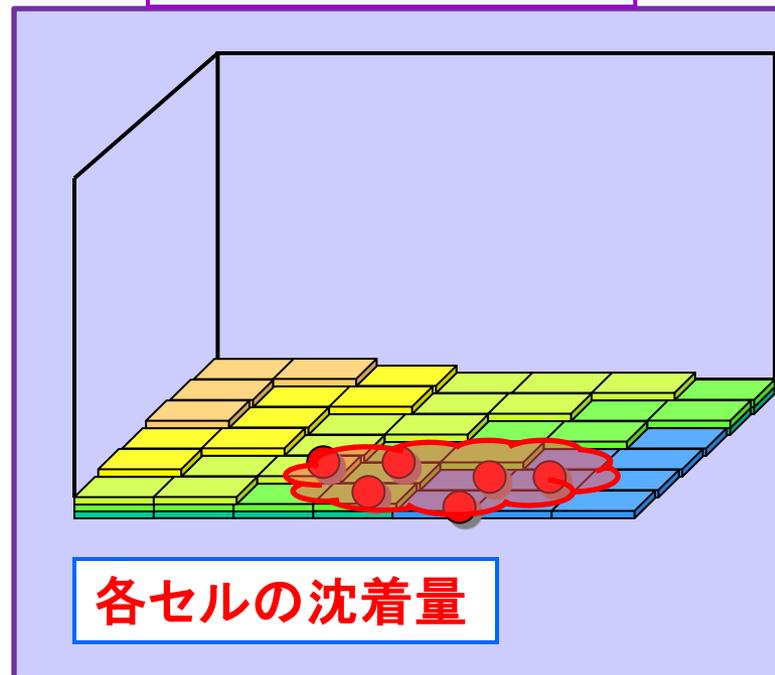
- ・各セル内地表面に粒子配置
- ・沈着量により放射エネルギー付加

粒子移動計算：

- ・水流出により移動（溶存物質）
- ・地表、土壌、河川の3次元移動
- ・崩壊・放出で放射エネルギー減衰



大気拡散モデル



Coupler

海洋拡散モデル

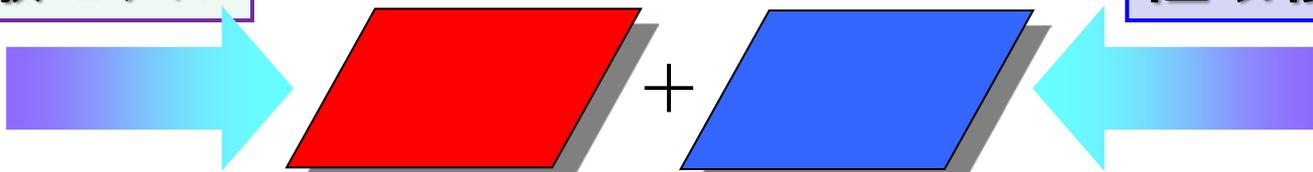
カップラー：時間・空間補間

大気拡散モデル

海表面沈着量

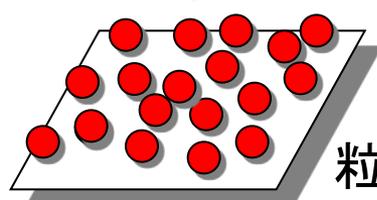
河川流出量

陸域移行モデル



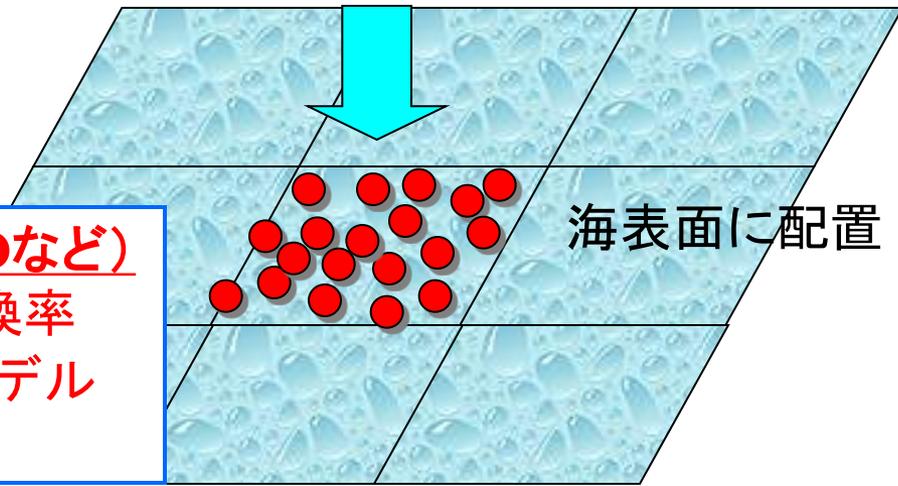
河口域

河川流出量と海表面沈着量の和



粒子に分配

Coupler



海表面に配置

海面放出量 (HTOなど)

海表濃度 × 水交換率

水交換率: 大気モデル
で計算

海洋拡散モデル

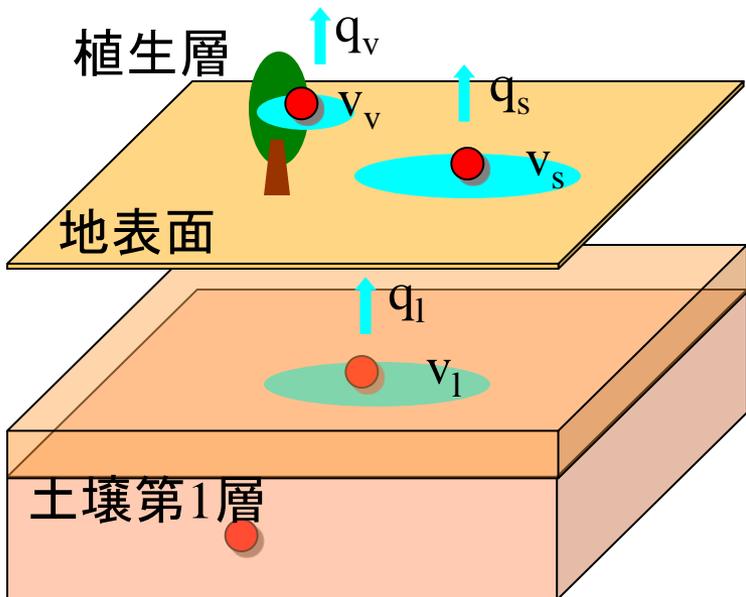
陸域移行モデル

各セル時間ステップ放出量：

$$FQ = \sum_i Q(i) \times r(i)$$

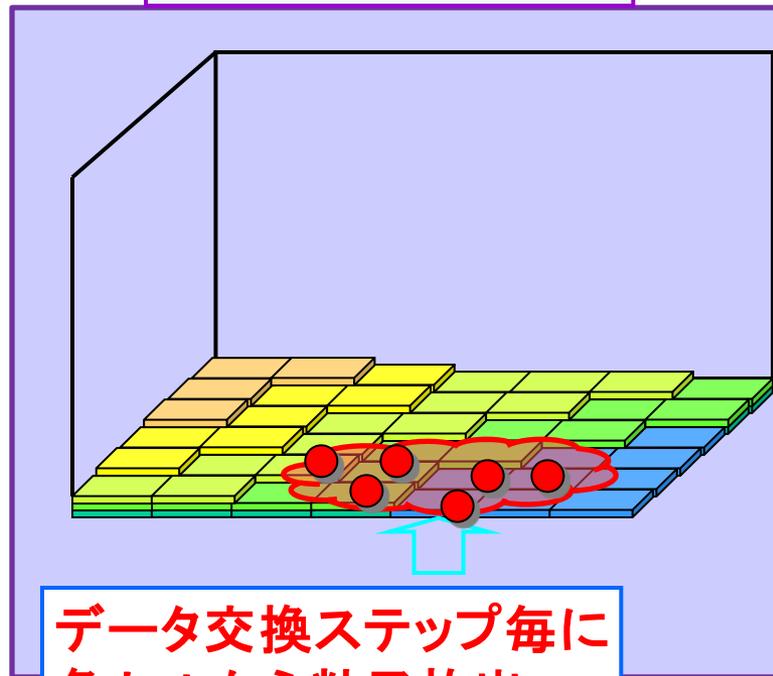
$Q(i)$ ：各粒子の放射エネルギー

$r(i) = q/v$ ：放出率（粒子位置毎）



放出エリア
土壌表層

大気拡散モデル



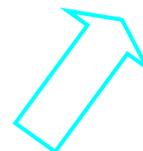
データ交換ステップ毎に
各セルから粒子放出

Coupler

データ交換ステップ
で積算

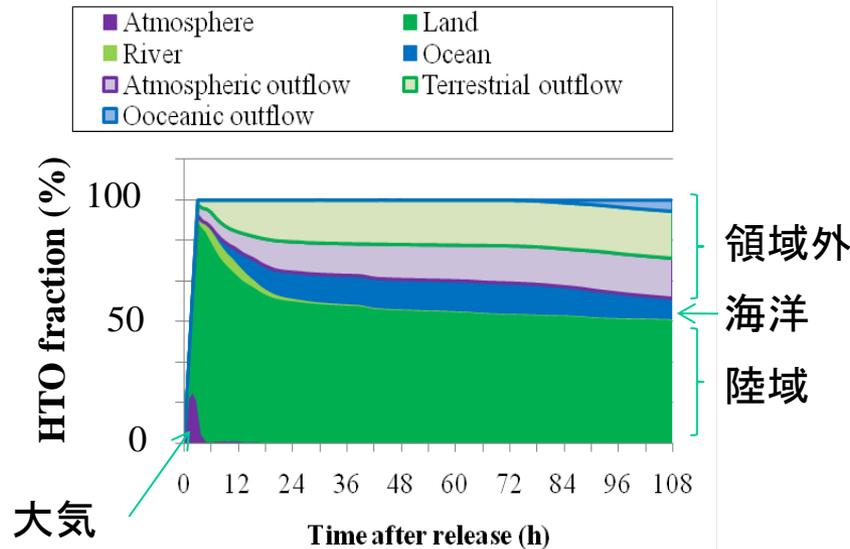
各セルの放出量
海陸分布の融合

海洋拡散モデル

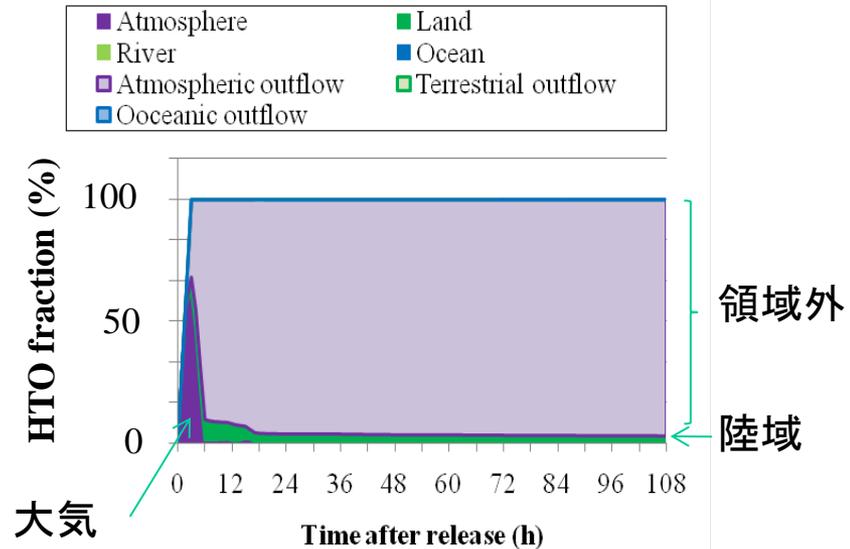


HTO大気放出時の環境中存在割合(130km四方領域内)の降水依存性
 (JAEA結合モデルによる感度解析、放出条件:地上50mからの3時間定常放出)

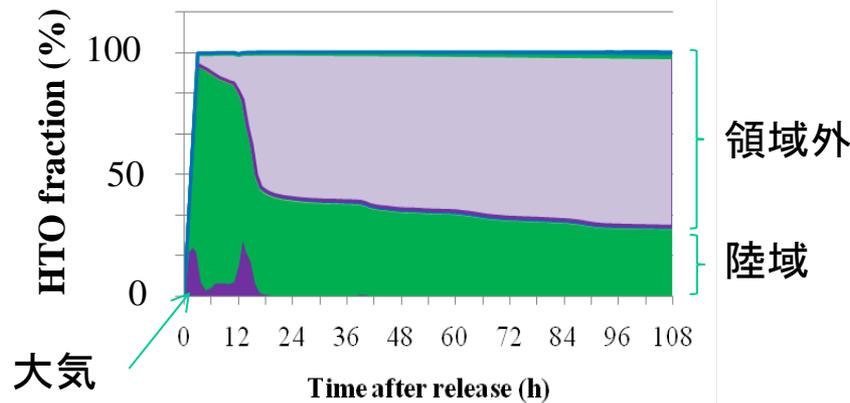
(a) 豪雨ケース



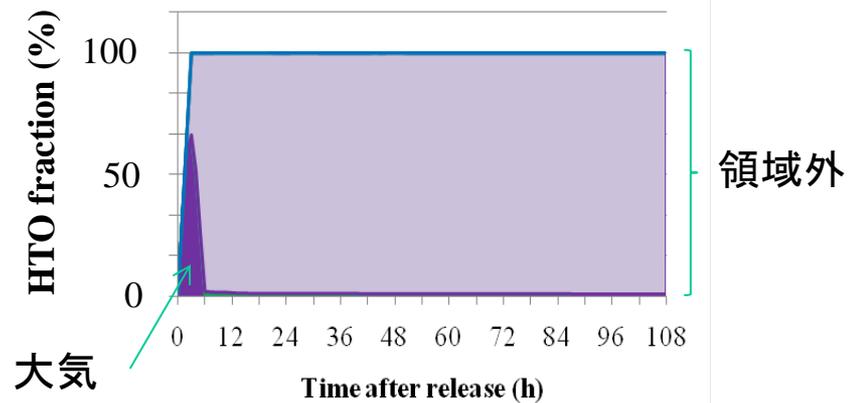
(c) 弱雨ケース



(b) 通常降雨ケース



(d) 雨なしケース



■ トリチウム(^3H)の環境動態

- ・環境 ^3H の分類
- ・ ^3H の分析法
- ・一般環境の ^3H
- ・事故由来の ^3H

(公財)環境科学技術研究所
柿内秀樹

はじめに

トリチウム(^3H , T)とは
水素の放射性同位体

■天然のトリチウム

宇宙線との相互作用により生成

■人為起源のトリチウム

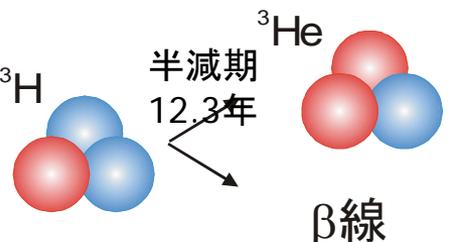
トリチウムの環境中挙動

- (1) 地球規模での挙動
- (2) 局所的に放出された場合の挙動

^3H は低エネルギー β 線放出核種であるため、ヒトへの影響を考える場合は体内摂取、すなわち内部被ばくを考慮する。

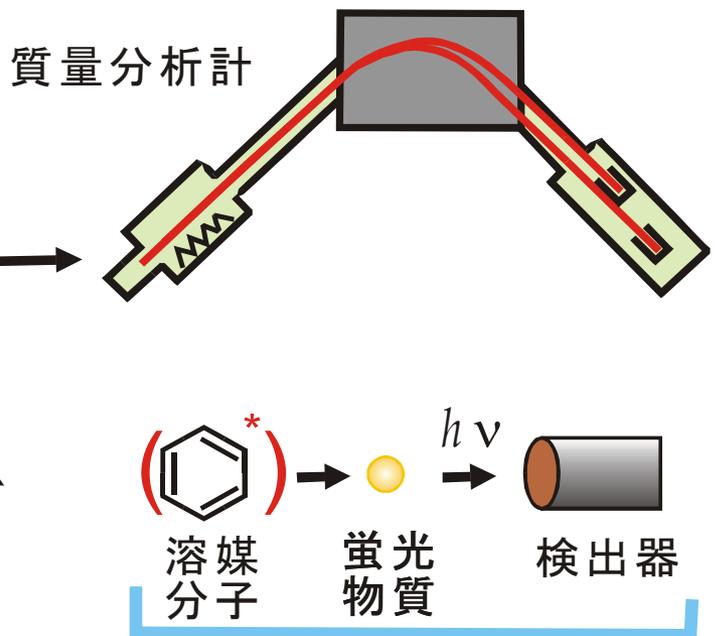
国際放射線防護委員会(ICRP)が提示している ^3H の線量換算係数(Sv/Bq)は、吸入および経口摂取のいずれの場合も、その化学形により大きく異なっているため、環境中の ^3H の存在形態を知ることは、その挙動を知るためだけでなく、ヒトへの影響を考える上でも重要である。

環境³Hの計測



陽子

中性子



液体シンチレーション
カウンティング (LSC)



VG-5400
Micromass



Quantulus 1220
PerkinElmer



Hitachi-Aloka
LSC-LB7

環境³Hの試料分類と測定法

大気水蒸気(HTO)
分子状水素 (HT)
炭化水素 (CH₃T)

降水、水道水、河川水、
海水

有機物 (FWT)

有機物 (OBT)

土壤水分

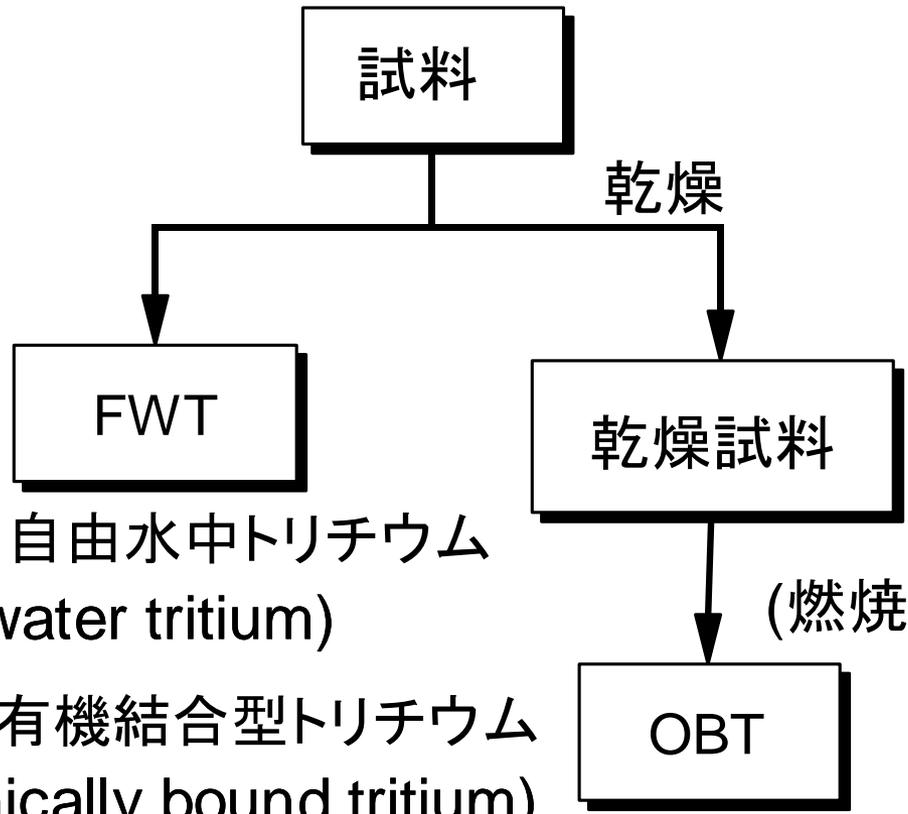
水試料

LSCによる
³H測定

乾燥試料

質量分析法に
よる³H由来の
³He測定

有機物中トリチウム

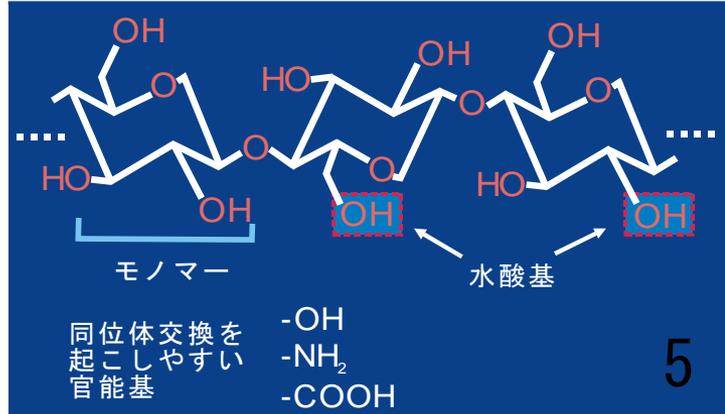
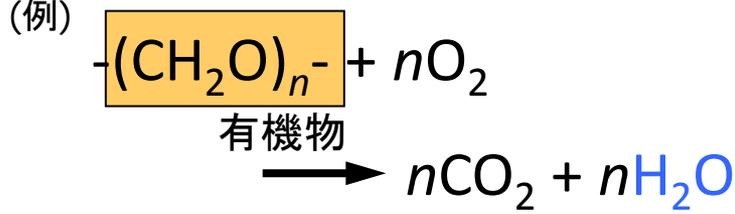


FWT 自由水中トリチウム
(Free water tritium)

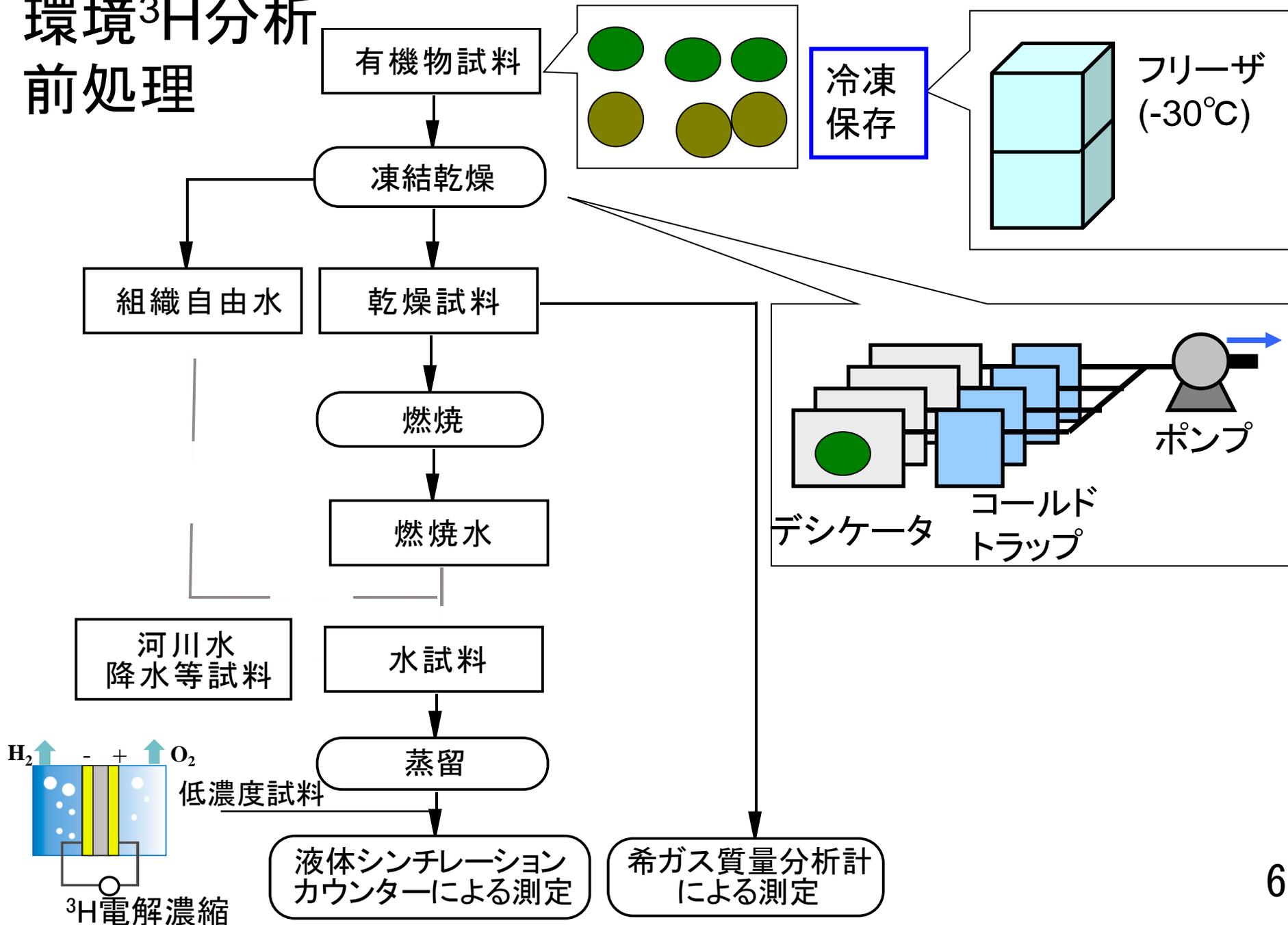
OBT 有機結合型トリチウム
(Organically bound tritium)

- { 交換型 OBT
- { 非交換型 OBT 同位体交換の有無

OBTは生体に吸収されやすく、
生物学的半減期が長いため
線量評価上重要



環境³H分析 前処理



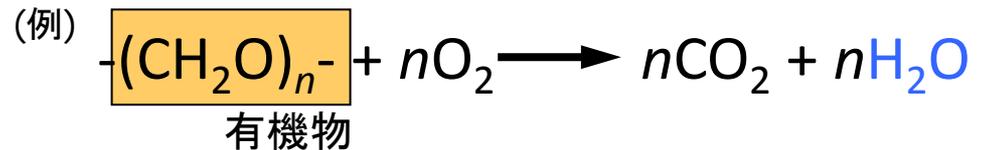
環境試料中³H濃度の表し方

水

- 1Lあたりに1 Bq存在 → 1 Bq L⁻¹ (1 Bq/L)
- 水素原子10¹⁸個あたり³H原子が1個存在
→ 1 TU (= 0.118 Bq L⁻¹)

有機物

- 有機物試料1kgあたりに1 Bq存在 → 1 Bq kg⁻¹-湿
- 乾燥試料1kgあたりに1 Bq存在 → 1 Bq kg⁻¹-乾
- 燃焼水1Lあたりに1 Bq存在 → 1 Bq L⁻¹-燃焼水



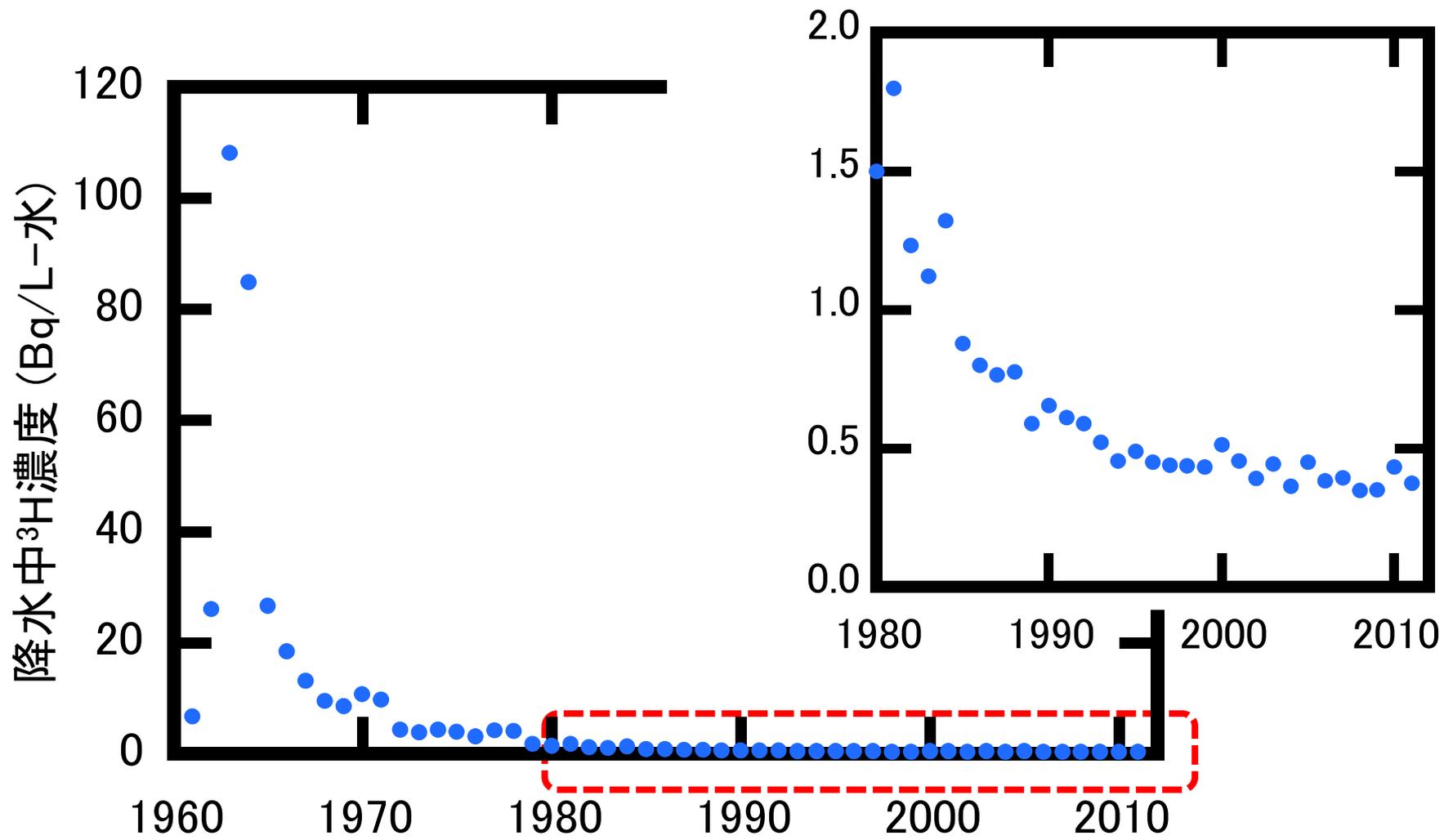
大気

- 大気1m³あたりに1 Bq存在 → 1 Bq m⁻³ (1 Bq/m³)

(HTO)

- 水蒸気1 Lあたりに1 Bq存在 → 1 Bq L⁻¹ (1 Bq/L)

降水中³H濃度の推移(東京、千葉)



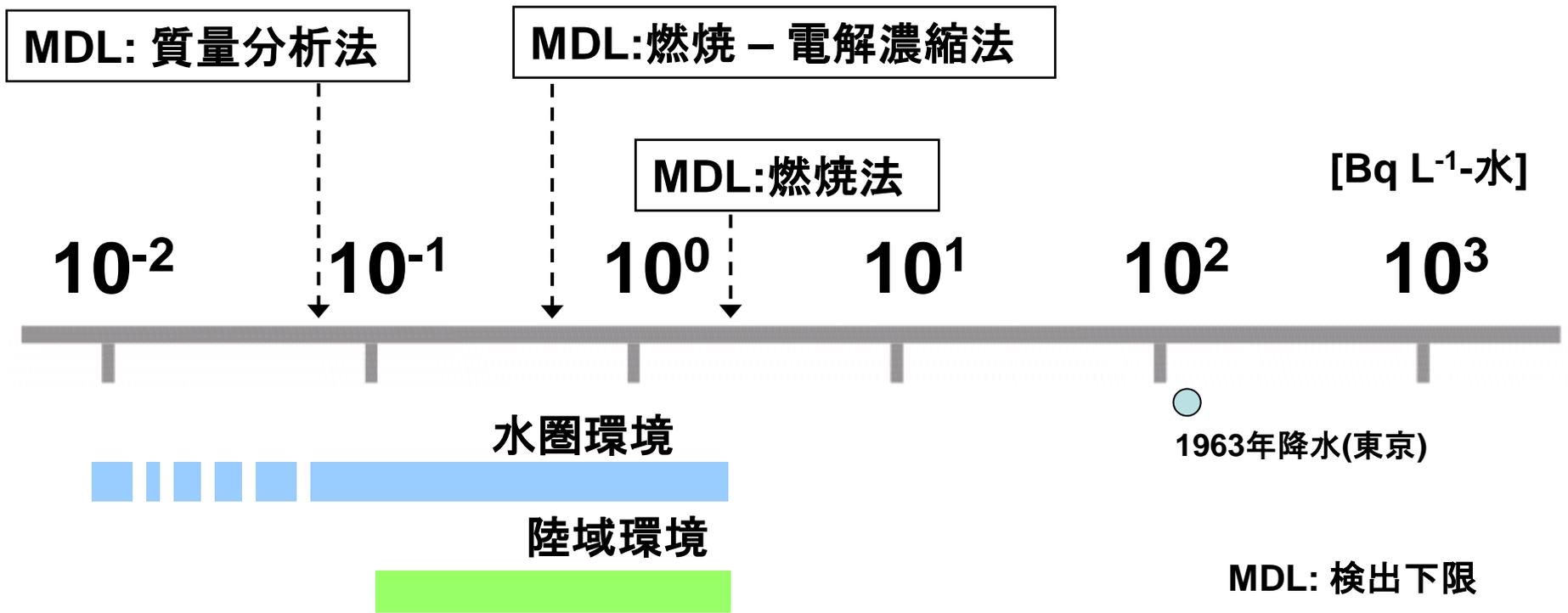
<http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/NetsDB.html#>
<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/>

・ 最近の降水中トリチウム濃度は 0.5 Bq/Lを下回っている 8

環境試料中OBT濃度定量法の比較

測定法	燃焼法	燃焼-電解濃縮法	質量分析法
試料 乾燥重量 (g)	30	500	30
検出下限 (Bq L ⁻¹)	2	0.2	0.02
前処理時間 (1試料当たり)	7 d	40 d	3 d
貯蔵期間	-	-	2 month

一般環境中の³H濃度レベル

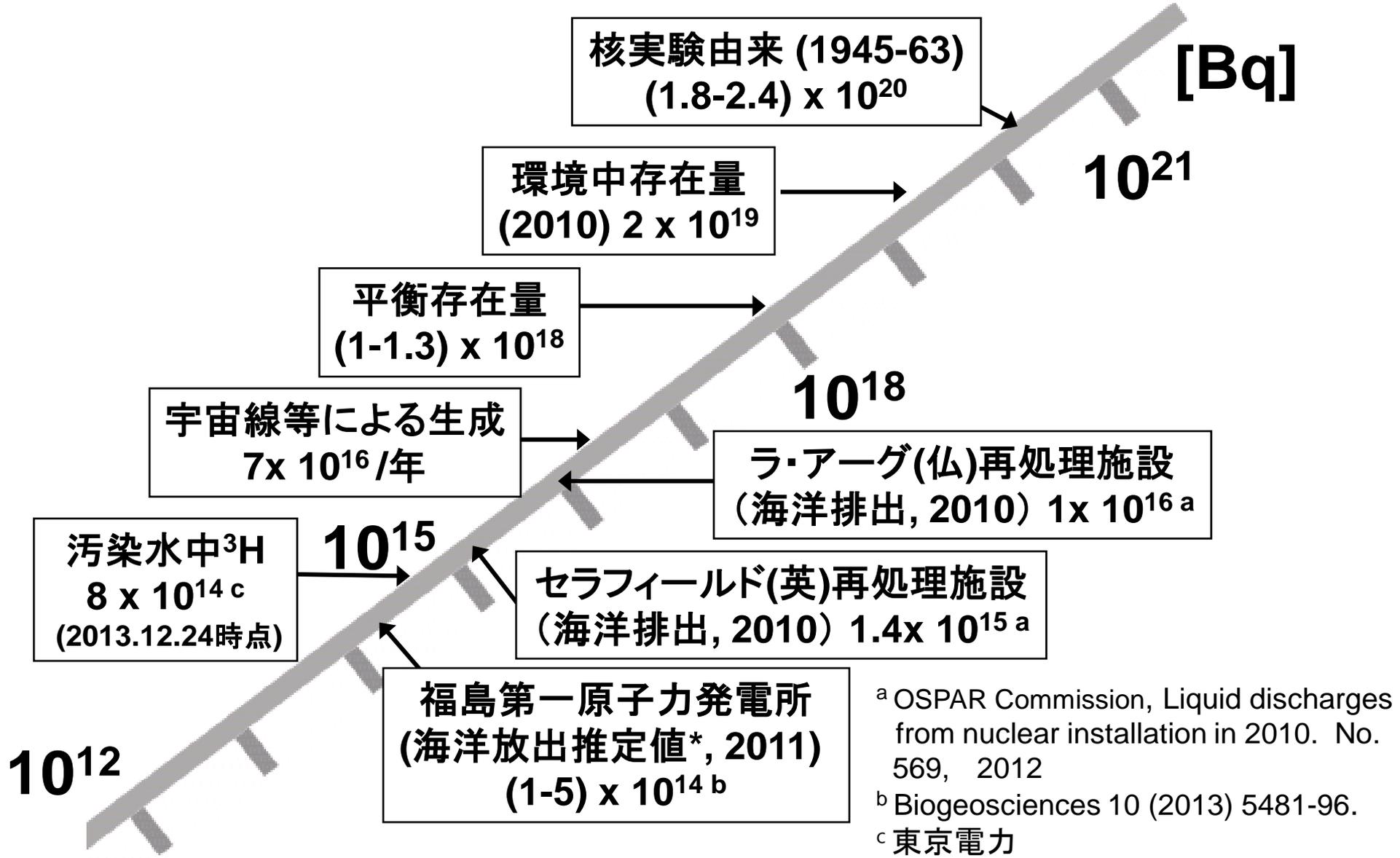


大氣中³H濃度

Location	Period	HTO (mBq m ⁻³)	HT (mBq m ⁻³)	CH ₃ T (mBq m ⁻³)
Kumamoto	2003–2005	6.7 ± 5.4	12.5 ± 6.9	9.0 ± 8.2
Toki	2003–2006	9.0 ± 6.5	9.0 ± 1.6	2.0 ± 1.2
Rokkasho	2005–2006	3.6 ± 2.3	8.5 ± 2.6	1.9 ± 0.8

	(TU)	(TU)	(TU)
	7	4 x 10 ⁵	2 x 10 ⁴

環境中³Hインベントリー



^a OSPAR Commission, Liquid discharges from nuclear installation in 2010. No. 569, 2012

^b Biogeosciences 10 (2013) 5481-96.

^c 東京電力

福島沖海水中³H濃度 (2011年6月)

福島沖表層海水(200-300 mまで)中³H濃度^a

バックグラウンド 0.07 Bq L⁻¹

事故後 0.15 Bq L⁻¹

水圏環境において、生物中FWT濃度 [FWT]と水中³H濃度[HTO]は速やかに平衡に達する。

水から生物へ³Hの生体濃縮は起こらないので、水棲生物中OBT濃度 [OBT]と[HTO]の比は1を超えない。^b

$$[\text{FWT}] \doteq [\text{HTO}]$$

$$\frac{[\text{OBT}]}{[\text{HTO}]} \leq 1$$

事故後上昇した海水中³H濃度から線量の推定

- (仮定) ・魚を年間60kg摂取^c
- ・[OBT]=[HTO]
- ・魚中³HがすべてOBTとして存在

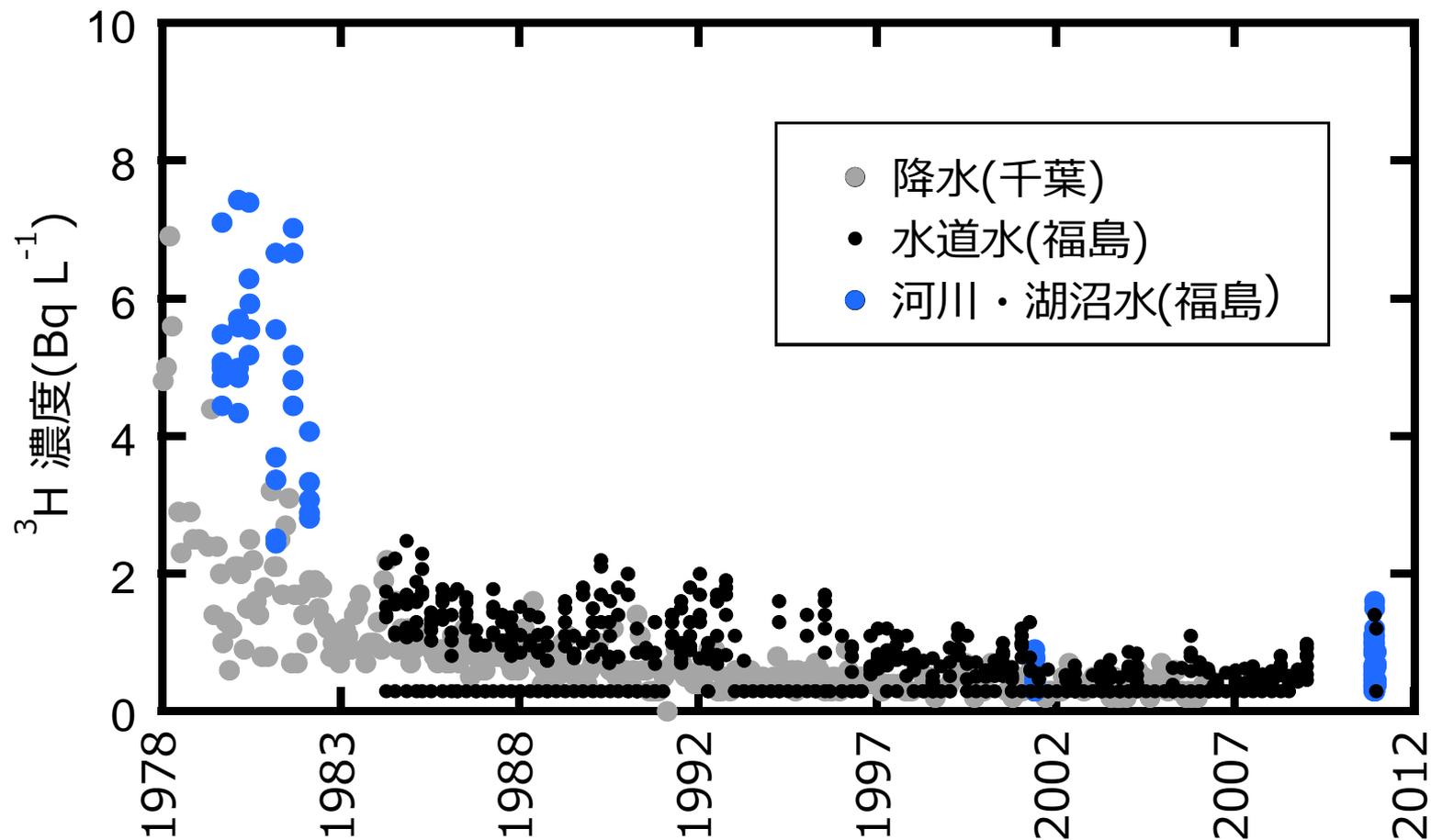
$$60 \text{ (kg/y)} \times 0.08 \text{ (Bq/kg)} \times 4.2 \times 10^{-11} \text{ (Sv/Bq)} = 2 \times 10^{-10} \text{ (Sv/y)}$$

^a Povinec, P. P. et al. Cesium, iodine and tritium in NW Pacific waters - a comparison of the Fukushima impact with global fallout, Biogeosciences 10 (2013) 5481-96.

^b Jean-Baptiste, P., et. al. Environmental OBT/TFWT ratios revisited, Fusion Science and Technology, 60, (2011) 1248-1251.

^c http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h22_h/trend/1/t1_2_1_1.html

福島県河川水及び水道水中³H濃度 (1978 -2011) 及び千葉県の前降水中³H濃度 (1978 -2007)

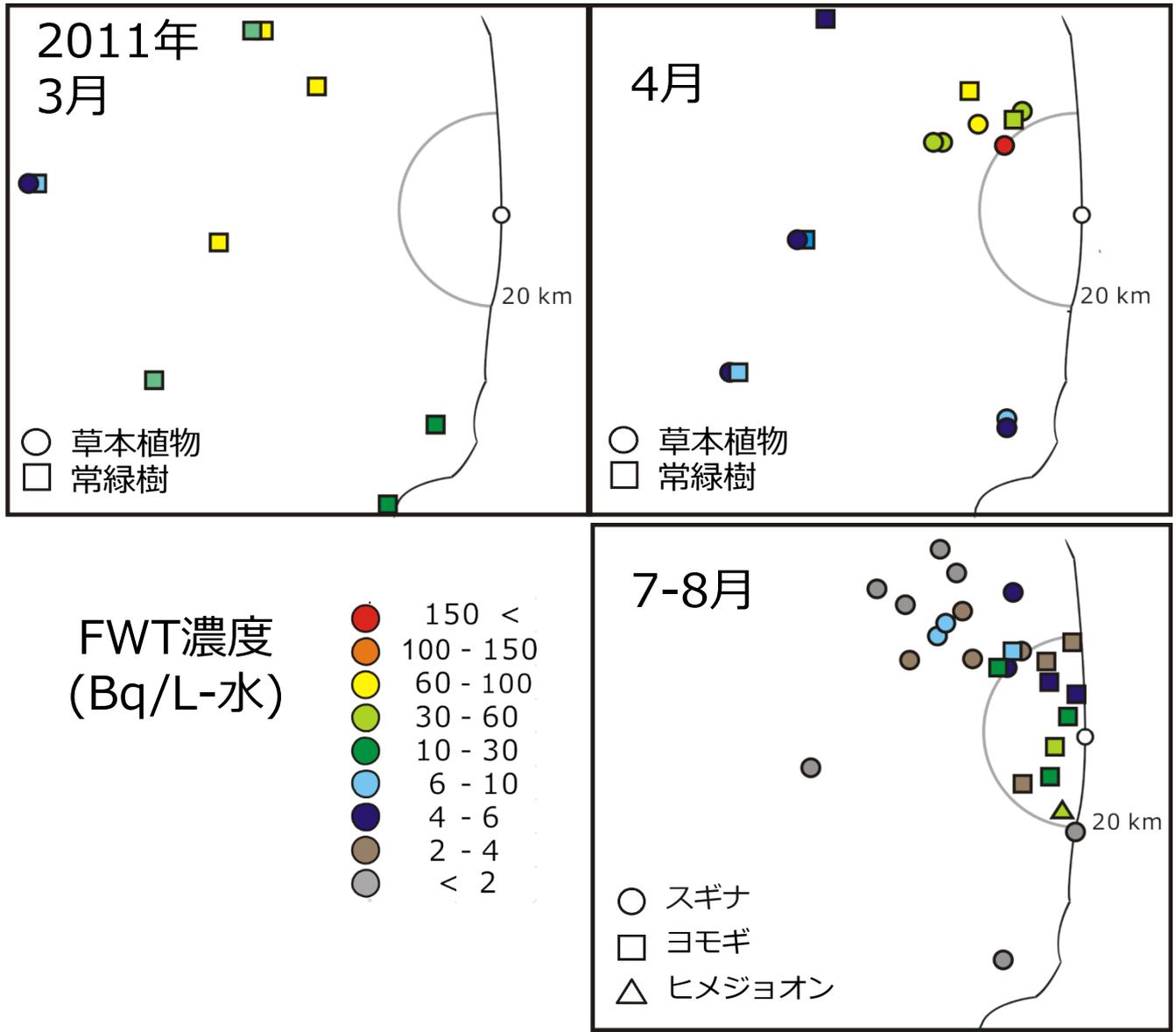


<http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/NetsDB.html#>.

<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/>

<http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/tritium111115-111215.pdf>

2011年福島県で採取した植物中FWT濃度



Kakiuchi, H. et al., Sci. Rep. 2, 947 (2012).

^3H の環境移行と線量評価

ヒトへの被ばく経路(トリチウムは内部被ばくが重要)

1. 経口摂取(OBT、FWT)

- ・光合成によるOBTの形成

 - 食物連鎖によるヒトへの移行

 - 摂取したOBTによる被ばく、組織への蓄積

- ・飲み水

2. 吸入摂取

- ・呼吸

- ・モデル解析による被ばく線量評価

- ・環境データによる安全確認が必要

トリチウムの水産物への影響評価について

森田貴己

(独) 水産総合研究センター

放射性セシウムとトリチウムの比較

濃縮係数(生物中濃度/水中濃度)

	 海産魚類	 淡水魚類	 軟体類	 海藻類
Cs-137	5 ~ 100	400~2000*1	10 ~ 60	10 ~ 50
H-3 *2	1	—	1	1

*1 見かけの濃縮係数、*2 自由水、—は、データ無し。参考文献(1,2)

- 直接、有機結合型H-3を取り込んだ場合は、**見かけの濃縮係数**が非常に高くなる場合がある。例として、Nycomed-Amersham plant (UK) からの放出で、海産魚類(約3700)、貝類(約3100)、海藻類(約56) 参考文献(3)

生物学的半減期

	 海産魚類	 淡水魚類	 軟体類	 海藻類
Cs-137	19 ~ 84 日	50 ~ 340 日	75 日	54 日
自由水 H-3	—	12 ~ 54 分	11~190日	0.2 ~ 75 分
有機結合型 H-3	—	5 ~ 8 日	11~190日	2.3 ~ 50日(増殖期) 150日(飽和期)

—は、データ無し。参考文献(4, 5, 6, 7, 8)

- 飲水をほとんど行わない淡水魚に対して、海産魚は1日最大体重の20%の飲水をするので、H-3(特に自由水)の交換は早いと思われる。

トリチウムの海洋生物への影響評価

- 海洋生物に対する線量評価は、「標準生物」を対象に行う。
- 「標準生物」は、分類学的な種ではなく、形態や大きさ、生息環境等で分類されたものである（例えば、ヒラメ、マス、カニといった形が違う海洋生物）。
- 一般的には、こうした形態等を考慮して作成された換算係数（文献8）を用いて、放射能濃度（Bq/kg）から計算する。

外部被ばく（海水より）の換算係数（ $\mu\text{Gy/h per Bq/kg}$ ）

	浮魚	底魚	褐藻	カニ
H-3	7.9×10^{-12}	7.8×10^{-12}	8.2×10^{-11}	1.0×10^{-11}
Cs-137	2.7×10^{-4}	2.9×10^{-4}	3.4×10^{-4}	2.8×10^{-4}

内部被ばくの換算係数（ $\mu\text{Gy/h per Bq/kg}$ ）

	浮魚	底魚	褐藻	カニ
H-3	3.3×10^{-6}	3.3×10^{-6}	3.3×10^{-6}	3.3×10^{-6}
Cs-137	1.9×10^{-4}	1.8×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.9×10^{-4}

トリチウムの海洋生物への影響評価

例：底魚において、トリチウムが対象生物体内に均一に分布、海水濃度が放出基準値の60000 Bq/L、濃縮係数1と仮定すると、被ばく線量率は、 $0.48 \times 10^{-2} \text{ mGy/day}$ と計算される。

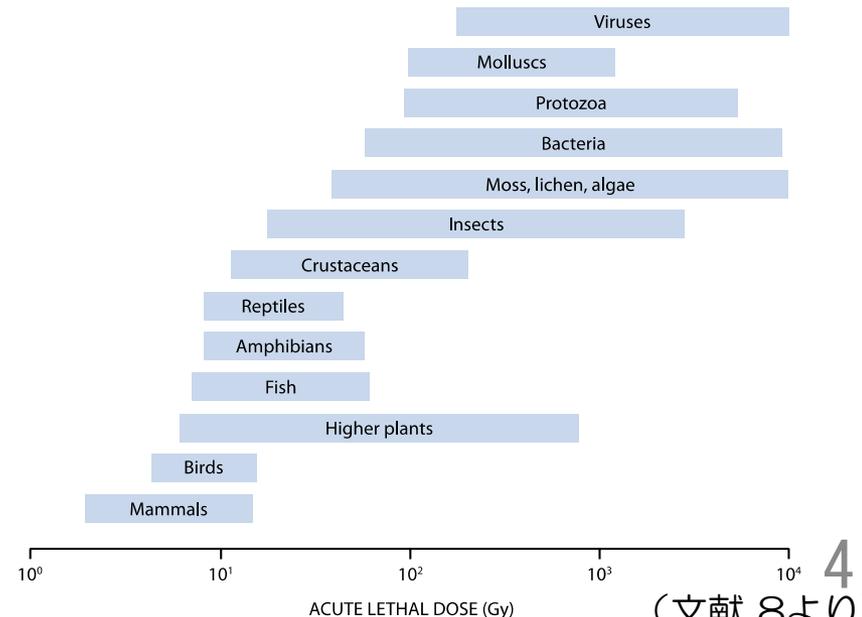
評価基準の例：

NCRP: 「ある水生生物集団において、最大の被ばくを受ける個体が10 mGy/day程度の慢性的な線量率であるなら集団の防護に十分であると考えられる」 (文献 9)

IAEA: 「水圏環境において、生物集団の最大の被ばくを受ける個体が10 mGy/dayあるいはそれ以下に慢性的な線量率を制限すれば集団を適切に防護できると考えられる」 (文献 10)

UNSCEAR: それ以下の線量では影響でないと予想される「標準線量率」に、植物プランクトン、動物プランクトン、底生生物、魚類にそれぞれ、8.2, 6.8, 2.5, 1.6 mGy/day を与えている (文献 8)

Approximate acute lethal dose ranges for various taxonomic groups



○福島第一原発2号基の前面で採取されたアイナメから放射性セシウムが74万Bq/kg生検出された例があり、この魚の被ばく線量率は、3.2 mGy/day と計算されるが、

多産及び初期生残率が極端に低い水生生物においては、局所的な高濃度の汚染は集団に与える影響は低いと考えられる。

漁業者の不安

- トリチウムを含んだ汚染水の海洋放出は、水産物の**新たな風評被害**を生じさせる。
- 風評被害を払拭するには、放射性セシウム同様、測定データを公表していく必要がある。
- 生物の測定は非常に難しい。仮に濃縮係数1として海水の測定値で代用しても、**基準値がないので安全の判断ができない。**
- **被ばく量の問題を無視して、危険性が高いことのみを強調する言説が流布していることから、専門家から正しい情報を提供していただくことが必要。**

トリチウムに関しては以下の理由により、基準値に含まれていない。

- トリチウムの食品中濃度が問題となるのは、環境中に大量かつ継続的に放出され、光合成によって植物に取り込まれ、有機物として蓄積する場合である。今回の事故においては、これらの核種は放出されて拡散している可能性があるが、放射性ブルームは比較的短期間で通過しており、既に、環境中において拡散希釈されていると考えられる。よって、考慮しなければならぬほどの線量となることは考えかたい
(厚生労働省 薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会 放射性物質対策部会報告書より)。
- トリチウムは、食品中において考慮しなければならないほどの線量となるとは考えられないことから、基準値には含まれていません (厚生労働省HPより)。

参考：食品の基準値

- 食品中の放射性物質に関する現行基準値は、放射性セシウム以外の放射性物質（ストロンチウム90、プルトニウム、ルテニウム106）からの影響も考慮したもの（参考：厚生労働省HP）。

水産物の場合：(Sr-90 + Pu + Ru-106)が(Cs-134 + Cs-137)と同線量存在と仮定

食品全体にすると（海産物は、19歳以上男子で、1日111.1g摂取と仮定）



※食品によって仮定線量比は異なる。

1 ミリシーベルト（基準値のもととなる1人当たりの年間線量の上限値）

飲料水
約0.1mSv

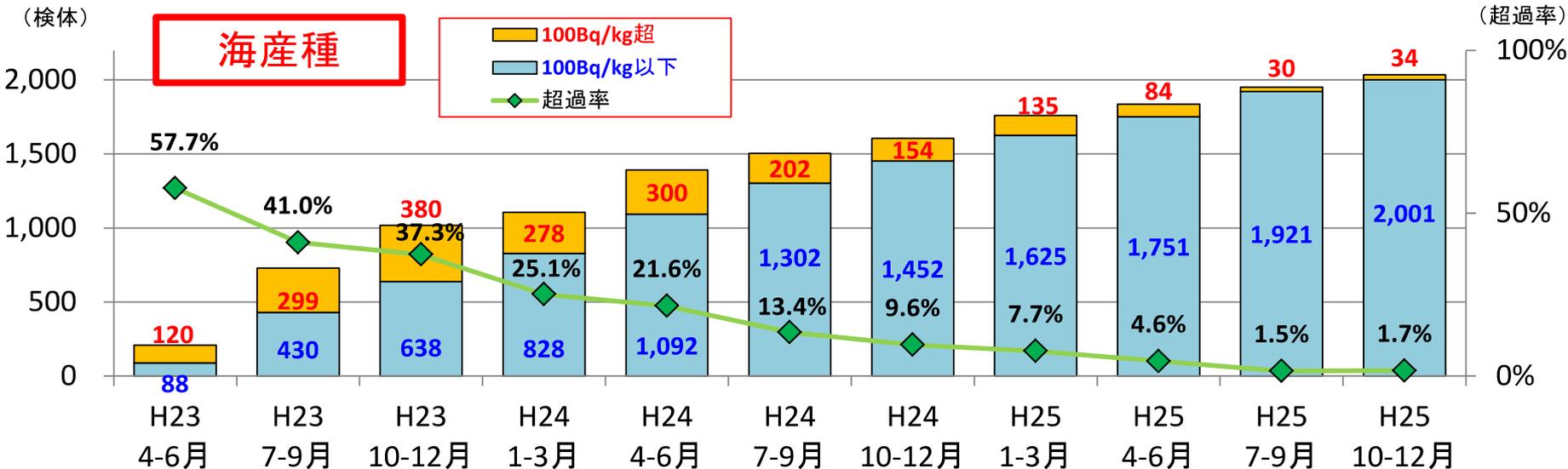
食品 約0.9mSv

放射性セシウム以外が約12%

5

福島県の水産物の汚染状況（水産庁HPより）

平成25年12月末日



(検体)

淡水種

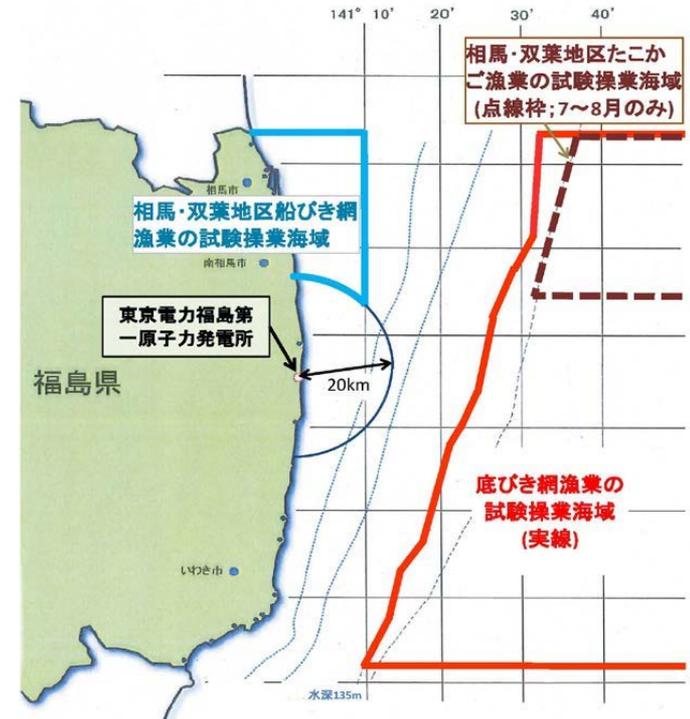
(超過率)

福島県の試験操業の状況（水産庁HPより）

これまでの取組み・予定

- 平成24年6月～
- ・ ミズダコ等3種を対象に開始(相馬双葉地区の沖合底びき網及びたこかご)
- 平成24年9月～
- ・ 順次、沖合底びき網の対象種の追加及び試験操業海域の拡大を実施
- 平成25年3月
- ・ コウナゴ(イカナゴの稚魚)の試験操業を開始(相馬双葉地区の船びき網)
- 平成25年9月
- ・ 汚染水漏洩報道を受け、9月1日からの試験操業の実施を一時見合わせ
 - ・ その後の海域及び対象種のモニタリング結果を確認し、25日から相馬双葉地区で底びき網による試験操業を実施
- 平成25年10月
- ・ シラス(イワシの稚魚)の試験操業を開始(相馬双葉地区の船びき網)
 - ・ いわき地区で底びき網による試験操業を開始

試験操業海域



平成26年1月7日現在

参 考 文 献

1. International Atomic Energy Agency (2004) Sediments Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in Marine Environment, IAEA Technical Reports Series No.422.
2. 市川龍資 (1978) 濃縮係数, 生物濃縮、山縣登編
3. McCubbin D, Leonard KS, Bailey TA, Williams J, Tossell P (2001) Incorporation of organic tritium (^3H) by marine organisms and sediment in the severn estuary/Bristol channel (UK), Marine Pollution Bulletin, 42, 852-863.
4. 笠松不二男 (1999) 海産生物と放射能-特に海産魚中の ^{137}Cs 濃度に影響を与える要因について-, Radioisotopes, 48, 266-282.
5. Vives i Batlle J, Wilson RC, McDonald P (2007) Allometric methodology for the calculation of biokinetic parameters for marine biota. Science and Total Environment, 388, 256-269.
6. Nakahara M, Nakamura R, Suzuki Y, Ueda T (1989) Accumulation and excretion of radionuclides by scallop. Final Report on the Project Research “Assessment of Human Exposure to Environmental Radiation” ; National Institute of Radiological Sciences: Chiba, Japan, NIRS- R-17, pp 78-82.
7. Blaylock BG., Hoffmann FO., Frank ML.(1986) Tritium in the Aquatic Environment, Radiation Protection Dosimetry, 16, 65-71.
8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008) Source and Effect of Ionizing Radiation.
9. National Council on Radiation Protection and Measurement (1991) Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms, NCRP report No. 109.
10. International Atomic Energy Agency (1992) Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at levels Implied by Current Radiation Protection Standards, IAEA Technical Reports Series No.322.

汚染水処理対策委員会
トリチウム水タスクフォース
2014年2月7日

健康影響の一般論と疫学

立崎英夫

((独)放射線医学総合研究所 REMAT 医療室)

内容

- 低線量影響の基礎〈一般論〉
- 内部被ばくの基礎〈一般論〉
- トリチウムの人への健康影響

低線量影響の基礎<一般論>

表1 放射線の人体影響 – 確率的影響と確定的影響–

分子	細胞		組織・臓器			個体	
損傷	障害	種類	臨床症状	分類	発症機構(原因)	線量効果関係	線量影響関係
DNA 損傷	突然異変	生殖細胞	遺伝性影響	確率的 影響	単一細胞 の突然 変異		
		体細胞	がん				
	細胞死 あるいは 細胞変性	生殖細胞	不妊	確定的 影響	多細胞の 細胞死		
		体細胞	機能損失 (脱毛、皮膚障害、 急性放射線症 など)				

((独)放射線医学総合研究所:医学教育における被ばく医療関係の教育・学習のための参考資料(2012.6.6改訂)より)

組織反応のしきい値

全身ガンマ線被ばく後の成人の臓器及び組織に関わる罹病の1%発生率と死亡率に対する、急性吸収線量のしきい値の予測推定値

影響	臓器／組織	影響の発現時間	吸収線量 (Gy)
罹病:			1%発生率
一時的不妊	睾丸	3-9 週間	~0.1 (約)
永久不妊	睾丸	3週間	~6
永久不妊	卵巣	< 1週間	~3
造血系の能低下	骨髄	3-7 日	~0.5
皮膚発赤の主要期	皮膚(広い区域)	1-4 週間	<3-6
皮膚火傷	皮膚(広い区域)	2-3週間	5-10
一時的脱毛	皮膚	2-3週間	~4
白内障(視力障害)	眼	数年	~1.5* (*その後改定あり)

(出典:ICRP[国際放射線防護委員会の2007年勧告](Tab A.3.4)日本アイトープ協会 2009 より改変)

固形癌過剰相対リスク

Excess Relative Risk for Solid Cancer

原爆被爆者の疫学研究より

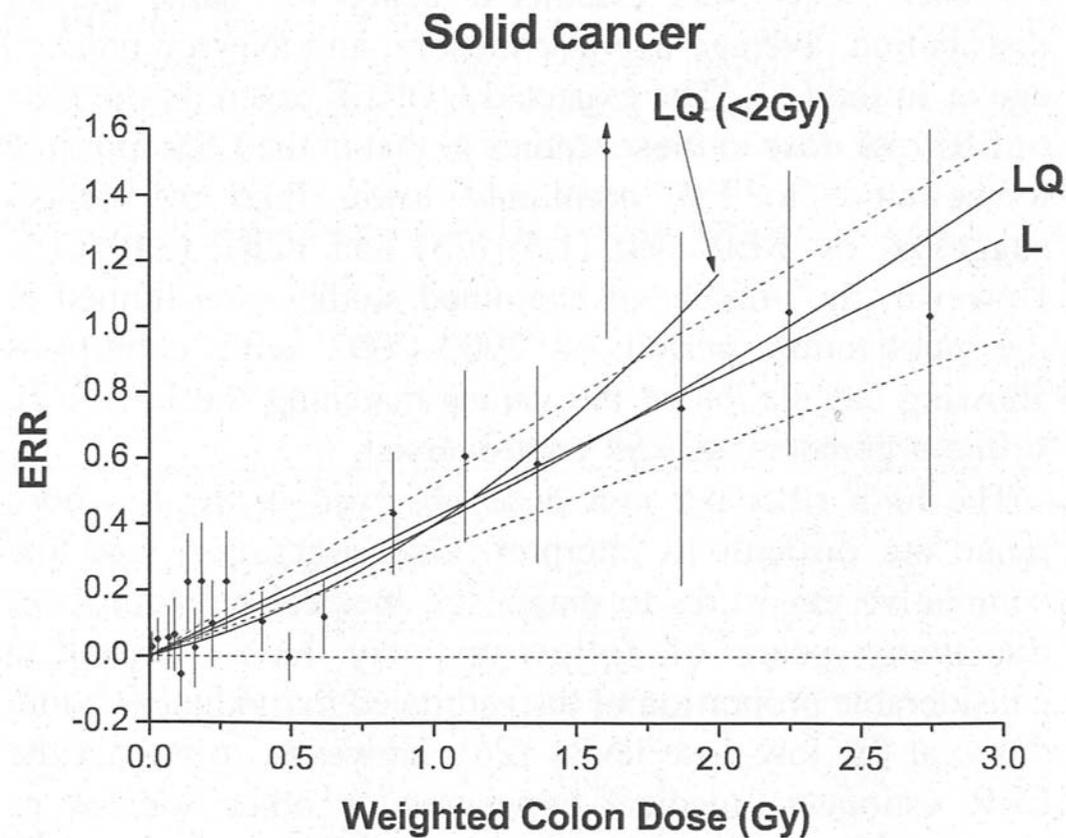
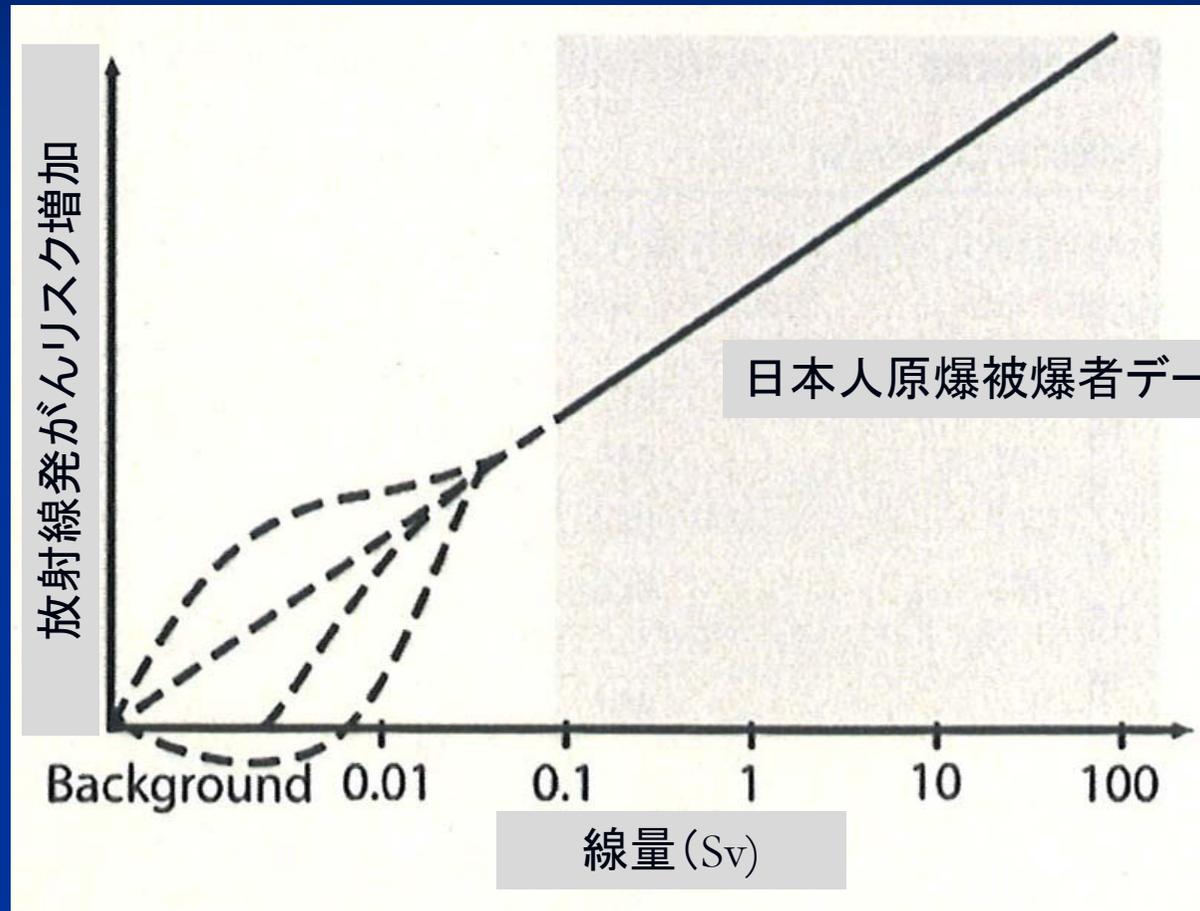


FIG. 4. Excess relative risk (ERR) for all solid cancer in relation to radiation exposure. The black circles represent ERR and 95% CI for the dose categories, together with trend estimates based on linear (L) with 95% CI (dotted lines) and linear-quadratic (LQ) models using the full dose range, and LQ model for the data restricted to dose < 2 Gy.

(LSS A-bomb Report 14)
(from Ozasa k et al.; Radiat Res
177:229-243, 2012)

低線量影響を外挿するモデル



直線で外挿したのが直線しきい値無しモデル(LNTモデル)

(Hendee WR & O'Connor MK, Radiology 264(2):312-321より改変)

2.2.2. 人体への影響に着目した線量(放射線防護量)と単位

放射線の人体に与える影響

実効線量： E (シーベルト： Sv)

$$E = \sum_T (W_T \times \sum_R (W_R \times D_{T-R}))$$

D_T : 組織ごとの吸収線量

W_R : 放射線加重係数

W_T : 組織加重係数



内部被ばくの基礎〈一般論〉

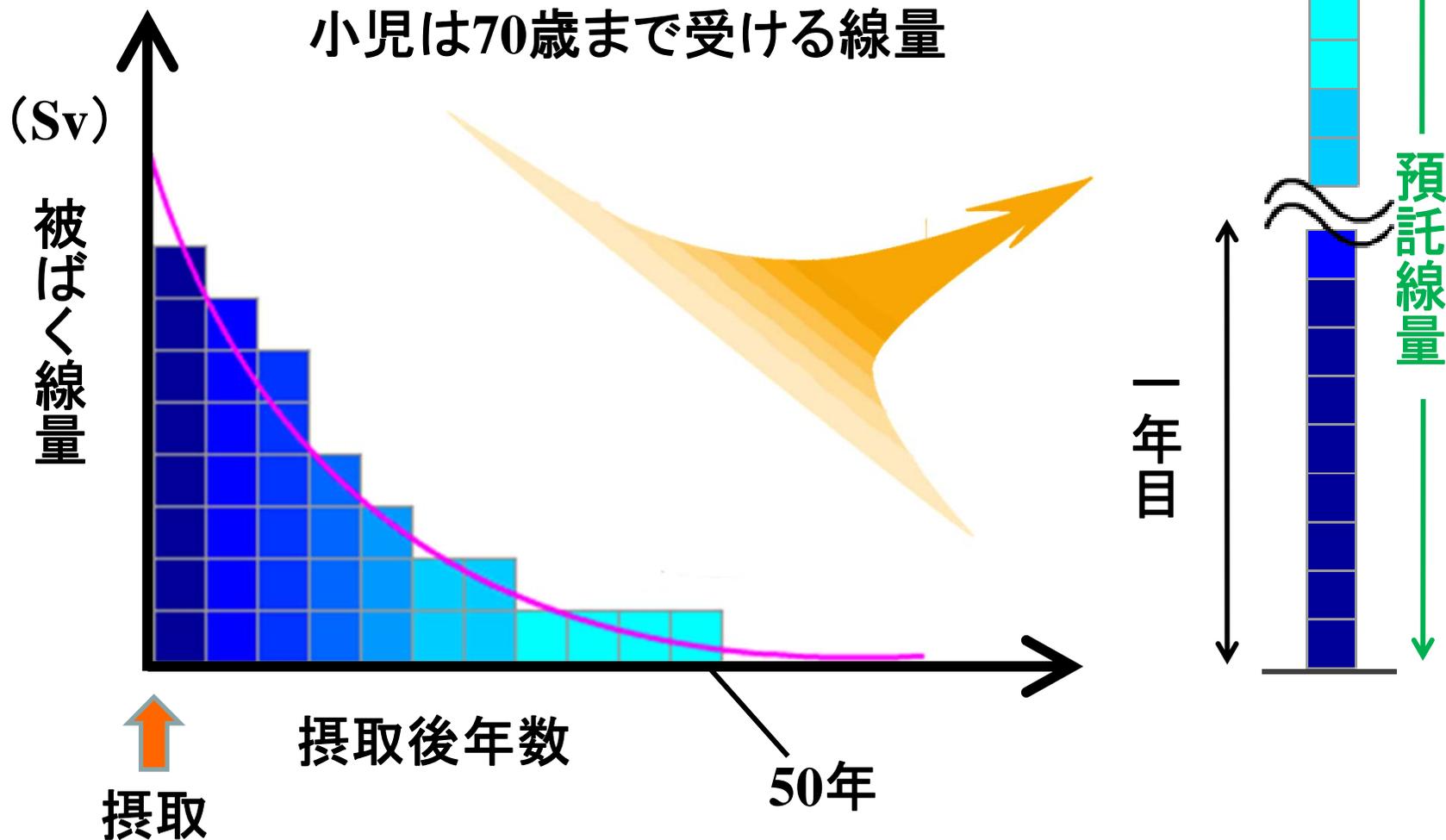
内部被ばく



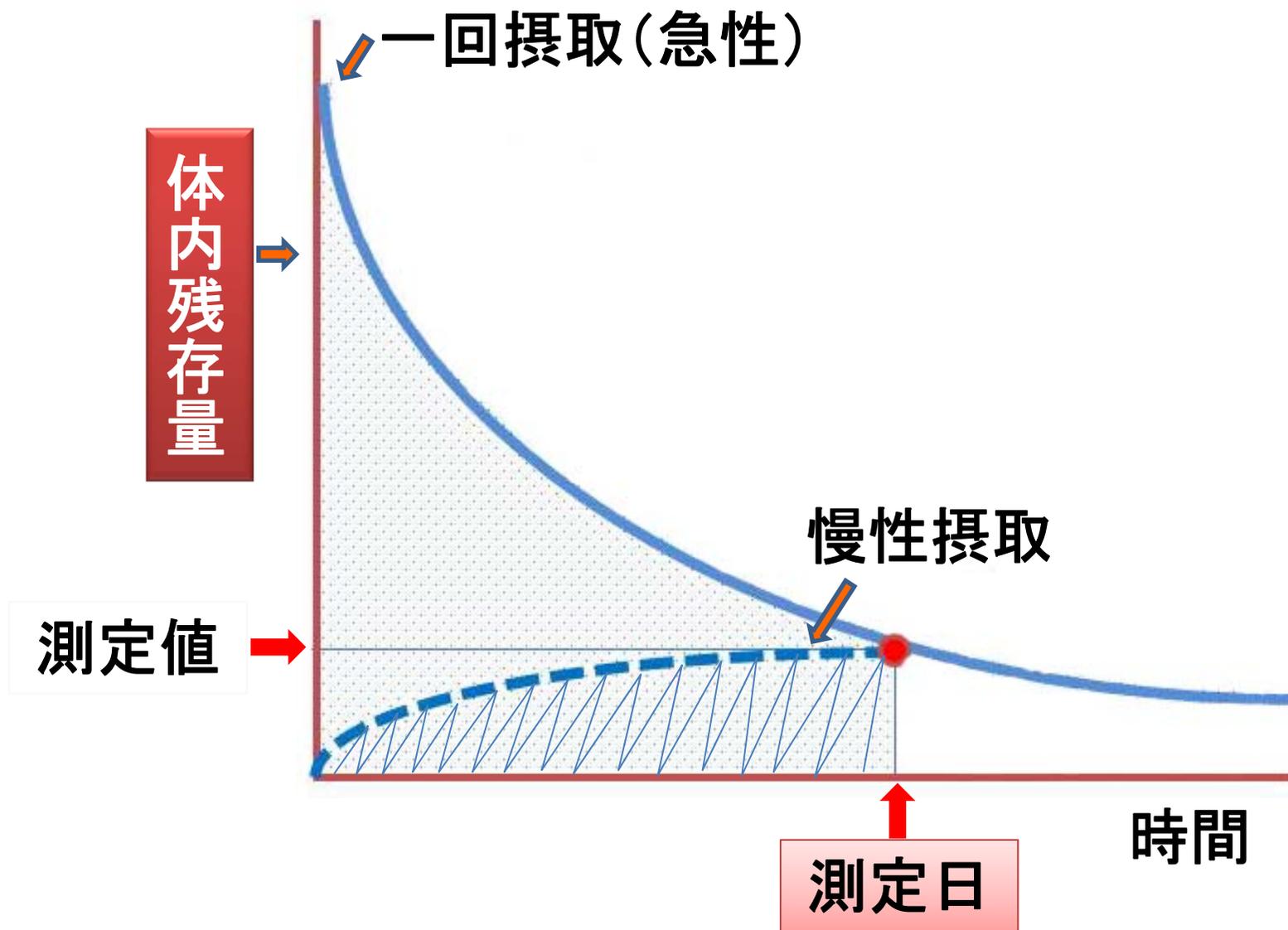
内部被ばくの線量

- 預託線量 -

放射性物質の摂取後、大人は50年間、
小児は70歳まで受ける線量



1時点の計測値



線量係数

Dose coefficient

- 放射性物質の単位摂取量あたりの線量の同義語として用いられる。

(ICRP[国際放射線防護委員会の2007年勧告], 用語解説, 日本アイソトープ協会 2009 より)

- 預託実効線量 = 摂取量 x 実効線量係数
- 単位: Sv/Bq
- 摂取経路により異なる
- 核種、化学的形態、年齢により異なる

トリチウムの人への健康影響

放射線加重係数(W_R)関連事項

勧告	年	放射線のタイプ	係数名	W_R
ICRP 26	1977	(X線, γ 線および) 電子 (L_∞ 不明の場合)	線質係数 Q	1
ICRU 40 (Joint Task Group of ICRP/ICRU)	1986	トリチウムの β 線	Acceptable approximation value Q(bar)	2
ICRP 60	1990	電子(及びミュー粒子), 全てのエネルギー	放射線(荷)重係数 W_R	1
ICRP 103	2007	電子(とミュー粒子)	放射線加重係数 W_R	1

トリチウム水被ばくで観察されたすべての影響(実験的データ)を考えると, RBE値は1~3.5の範囲にあった。ガンマ線と比較すると, 大部分の値は1~3の間にあり, またX線に対しては大部分は1~2で, その多くは1~1.5の値であった。

トリチウム水としてのトリチウムからのベータ線放射について得られたRBE値は, 低LET放射線に対して一般に観察される値の範囲内であり, 単一の放射線加重係数値として1を使用するという単純化されたアプローチはトリチウムに適応できる。(ICRP 103, 2007, B94項, B96項, より)

トリチウムによる人に対する事故

- 1960年代のヨーロッパで、トリチウムを含む夜光剤を使用する工場では研究者あるいは作業員に被ばく事故が発生している。
- 2例の死亡が報告
- 被ばく線量は極めて不確定：尿中のトリチウム量などから3～20 Svと推定
- 死因は骨髄障害による汎血球減少症
- このうち1例の助手に貧血発生

疫学研究 — レビュー

- トリチウムの被ばくに関連する疫学研究の系統的レビュー
- Little MP, Wakeford R., “Systematic review of epidemiological studies of exposure to tritium.”, J Radiol Prot. 2008 Mar;28(1):9-32.
- 対象:
 - 作業員(英国、米国、カナダ)
 - 環境放出による胎内被ばくと作業員の子孫(カナダ、ドイツ、米国)
- 結論: 作業員や公衆についてのがんやその他の健康影響に対する利用可能な研究は、トリチウムに特化した線量の欠如、低線量、少数の対象人数によって有用性が損なわれている。英国作業員のコホート研究で個人のトリチウム線量を得られる可能性はあるが、多くの労力(資金)を要する。英国以外でも、カナダや米国での作業員の研究も同じく可能性がある。

トリチウム水の生体影響について(基礎実験データから)

茨城大学理学部 田内 広

<http://tauchilab.sci.ibaraki.ac.jp>

放射線の線質と生体影響の大きさについて

ガンマ線、X線(光子)

基本的にエネルギーが変わっても生体影響の度合いはほとんど変化しない。

ICRPによる線質(荷重)係数は 1

粒子線(α 線や中性子、重粒子線)

エネルギーに依存して影響は(指標によって)数倍から10倍程度まで変化する。

(ただし、一般的に荷電粒子では粒子ごとに影響が最大になるエネルギー

範囲がある) → 線エネルギー付与(LET)が100keV/ μ m付近でピークとなる

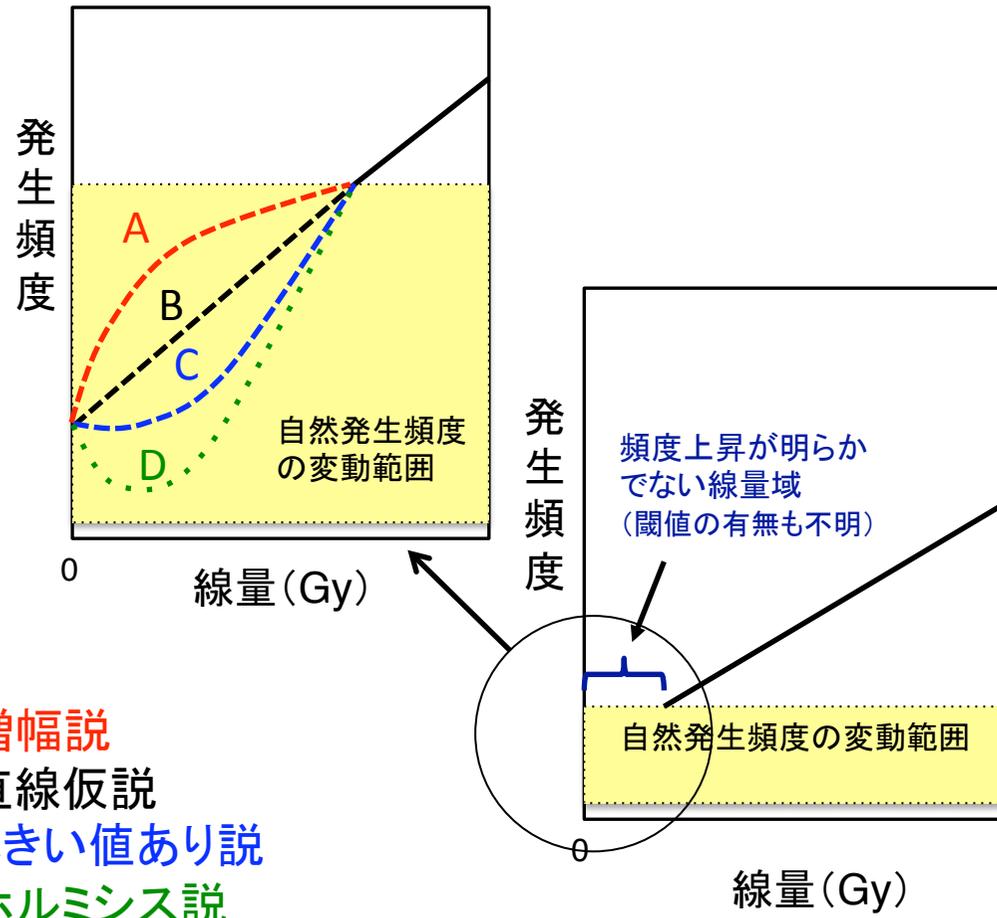
ICRPによる線質(荷重)係数は粒子エネルギーに応じて 5、10、20

電子線(ここでは β 線)

エネルギーが高い方が影響がやや大きい傾向はあるが、大幅には変化しない。

急性の被ばくの場合、トリチウム β 線はガンマ線の1.0~2.0倍程度の影響とされる。ただし、ICRPは電子線の線質(荷重)係数を全て1としている*なお β 線のエネルギーは生体への吸収エネルギー(被ばく線量)に影響する

確率的影響(がん)と低線量被ばく



- A: 増幅説
- B: 直線仮説
- C: しきい値あり説
- D: ホルミシス説

トリチウム生体影響の特徴(これまでの文献データの概要)

- ・ トリチウム被ばくは通常**内部被ばく**である
- ・ 生体内では、水(HTO)および有機物結合型(OBT)として存在する
- ・ 生体内での半減期は、7日～18日(HTO)および40日程度(OBT)
- ・ 生物学的効果比(RBE)は1.0～2.0程度
(これより高い、あるいは低いという報告もある)
- ・ 半致死線量は8Gy程度
(マウス腹腔内投与で0.56～0.93 GBq/g体重)

表3 マウスを使った研究から得られたトリチウムβ線のRBE.

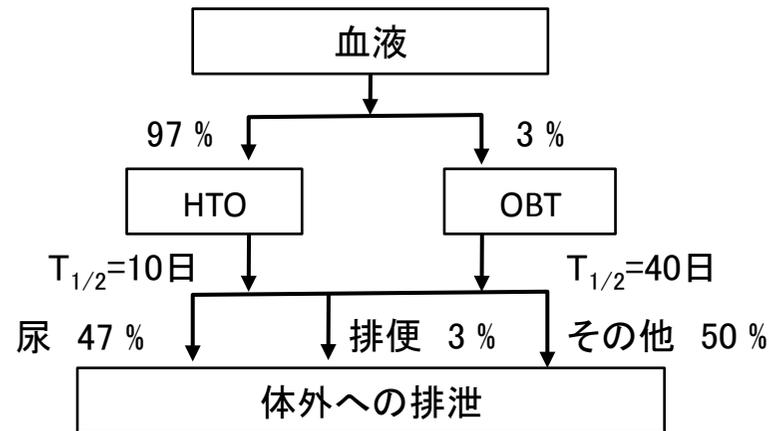
評価の方法	RBE	吸収線量 (Gy)	研究者
LD _{50/30}	1.7	4～8	J.E. Furchner (1957)
脾臓と胸腺の萎縮	1.3～1.5	1～10	J.B. Storer <i>et al.</i> (1957)
造血細胞の染色体異常	1.0～2.0	0.6	R. Kozkowski <i>et al.</i> (2001)
小腸クリプト細胞のアポトーシス	1.4～2.1	0.13～0.28	K. Ijiri (1989)
卵母細胞の生存率	1.6～3.0	0.055	R.L. Dobson <i>et al.</i> (1976)

出典:馬田ほか プラズマ核融合学会誌 2012

* RBE: ガンマ線やX線を1としたときの放射線の生体影響の大きさをあらわす

体内に取り込まれたトリチウム水の挙動

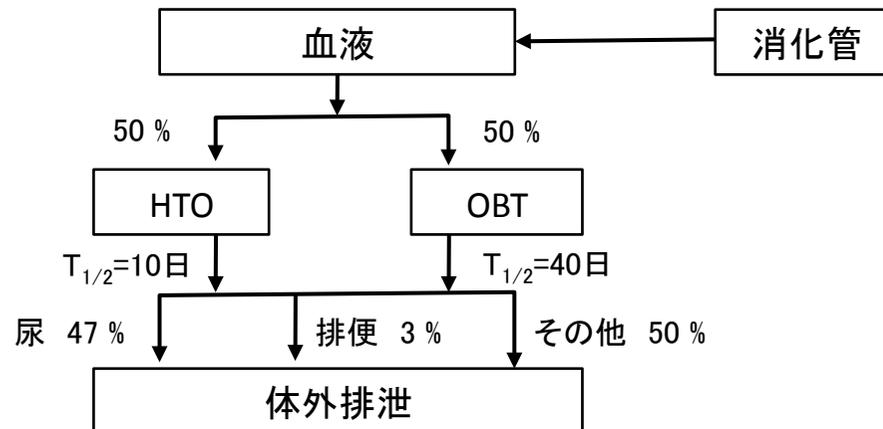
摂取したHTOに関するICRP代謝モデル (ICRP Publ.71, 1995ほか)



HTO: トリチウム水

OBT: 有機結合型トリチウム

【参考】 OBT摂取に関するICRP代謝モデル

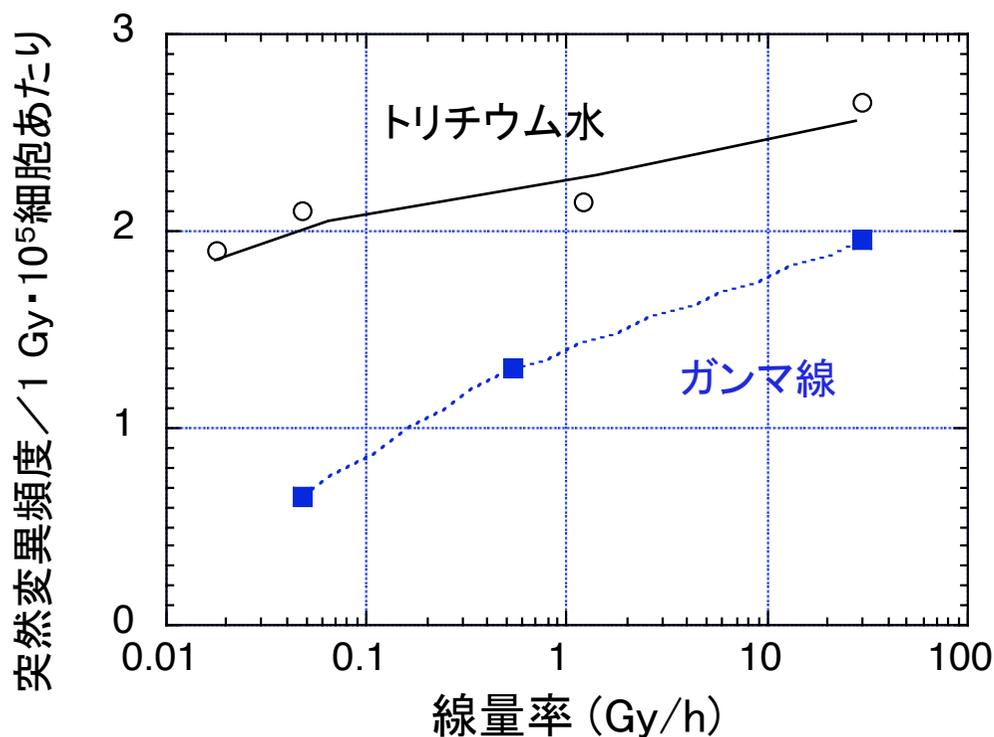


放射線影響は線量率に依存して変化する

被ばく線量が同じでも、時間あたりの被ばく量（線量率）が小さければ放射線の影響は小さくなります。

ICRPの見積：慢性（低線量率）長期被ばくの影響は、急性（高線量率）被ばくの影響の半分

トリチウム水被ばくの線量率効果：ガンマ線やX線ほど変化しない



マウス細胞の遺伝子突然変異の線量率依存性 (Okada *et al.* 1986より改変)

マウスにトリチウム水を生涯にわたって飲水投与し続けた実験例

Yamamoto, O.ほか *International Journal of Radiation Biology* 68: 47- 54 (1995)
 “Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. II: Tumour development”

Yamamoto, O. ほか *International Journal of Radiation Biology* 73: 535-541 (1998)
 “Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. III: Low dose-rate irradiation and threshold dose-rate for radiation risk”

線量率 (mGy/day)		非投与	0.2	0.9	3.6	10	24	48	96	240
実験したマウスの個体数		120	55	58	120	53	60	60	38	45
平均寿命(日)		811	790	758	804	622	481	414	259	165
±標準偏差		±134				±121	±112	±68	±92	±38
発がんしたマウス: 個体数(%)		59(48)	27(49)	45(78)	26(46)	4(83)	42(70)	42(70)	32(84)	34(76)
がんの内訳 (全個体に占める 割合: %)	胸腺リンパ腫	0	0	0	0	6	7	25	58	64
	非胸腺リンパ腫	25	25	29	20	21	15	20	11	11
	線維肉腫	8	9	22	9	11	7	3		
	卵巣がん	5	5	3	9	6	21	13	7	5
	肝がん	8	8	17	2	4				
	肺がん	4		7	2	15	5	2		
	その他	5	7	5	4	8	26	25	13	5

【参考】

飲水のHTO濃度: 3.6 mGy/day → 1.39×10^8 Bq/L

0.2 mGy/day → 8.69×10^6 Bq/L

線量率は、50, 100, 200日後の組織中(主に脳、肝臓、筋肉)のトリチウム濃度を元に算定

排水中濃度限度(体内での分布がトリチウムと類似する放射性セシウムと比較する)

トリチウム水 60 Bq/ml (有機化合物は20) 排水中濃度限度は1mSv/年を担保する値
 Cs-137 0.09 Bq/ml → 違いの理由はBqあたりの実効線量

Dose coefficient(実効線量係数)

核種の体内動態のシミュレーションモデルに基づいて組織等価線量を算出し、組織荷重係数をかけて実効線量をBqあたりに換算している。もちろん、モデル計算なので不確かさは残るが、違ったとしても、大幅に違うことはない。

成人の場合 (経口摂取、単位は μ Sv/Bq)

トリチウム(水) 0.000018(有機化合物は0.000042)

セシウム-137 0.013

セシウム-134 0.019

カリウム-40 0.0062

出典:ICRP Publ.119 (2007)

実効線量係数が違う理由は？

	セシウム 137	セシウム 134	トリチウム(HTO)
物理的半減期	30年	2.1年	12.3年
生物学的半減期	70~100日	70~100日	7~18日*
放出する β 線最大エネルギー	主に514keV	主に658keV	18keV
主なガンマ線	662keV	605、796keV	なし

* 有機結合型トリチウムは生物学的半減期が40日程度

放射性セシウムは体内滞留期間が長い(約10倍)、 β 線エネルギーが大きい(壊変あたりの被ばくが多い)、ガンマ線も放出される(被ばく範囲の広がり、被ばく量の増加)。結果として、トリチウムの場合は放射性セシウムの300分の1以下になる

【参考】

トリチウム水の内部被ばくで

体内濃度が平衡状態の時に生体組織(の細胞)が受ける線量率の算出式

NCRP 1979, Yamaguchi 1987

$$D \text{ (mGy/h)} = C \text{ (MBq/ml)} \times 3.29 \times W \text{ (ml/g)}$$

3.29は定数

$$1 \times 10^6 \text{ 壊変/s} \cdot \text{MBq} \times 3600 \text{ s/h} \times \underline{5.7 \times 10^3 \text{ eV壊変}} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J/eV} \times 10^6 \text{ mGy} \cdot \text{g/J}$$

Wは含水率:細胞や組織、生物種により0.7~0.9(平均0.8程度)

注:Gyは吸収線量(物理量)。放射線防護ではこの値を元にSvを算出する。

同様の式を他の核種にも適用し、放射線エネルギーの大半が生体で吸収されるとすれば(特にβ線は体内でほぼ吸収される)、アンダーラインを引いた平均(付与)エネルギーの違いが線量の違いになる。

H-3: β線平均エネルギー $5.7 \times 10^3 \text{ eV}$ 、ガンマ線 なし

Cs-137: β線平均エネルギー $1.9 \times 10^5 \text{ eV}$ 、ガンマ線 $6.6 \times 10^5 \text{ eV}$

Cs-134: β線平均エネルギー $1.6 \times 10^5 \text{ eV}$ 、ガンマ線 $(6.0+7.9) \times 10^5 \text{ eV}$

注:ガンマ線は身体を透過する成分があるため、全てが吸収されるわけではない

放射性セシウム、放射性カリウム、トリチウムの比較

	半減期	β線の最大エネルギー	ガンマ線
放射性セシウム			
Cs-137	30年	0.514 MeV (1.176 MeVが6%)	662 keVほか
Cs-134	2.1年	0.658 MeV ほか	605 keV、796keV ほか
放射性カリウム			
K-40	12億5千万年	1.311 MeV ほか (軌道電子捕獲11%)	1,481 keV (11%)
トリチウム			
H-3	12.33年	0.0186 MeV	なし

福島第一原子力発電所における 汚染水処理とトリチウムの状況

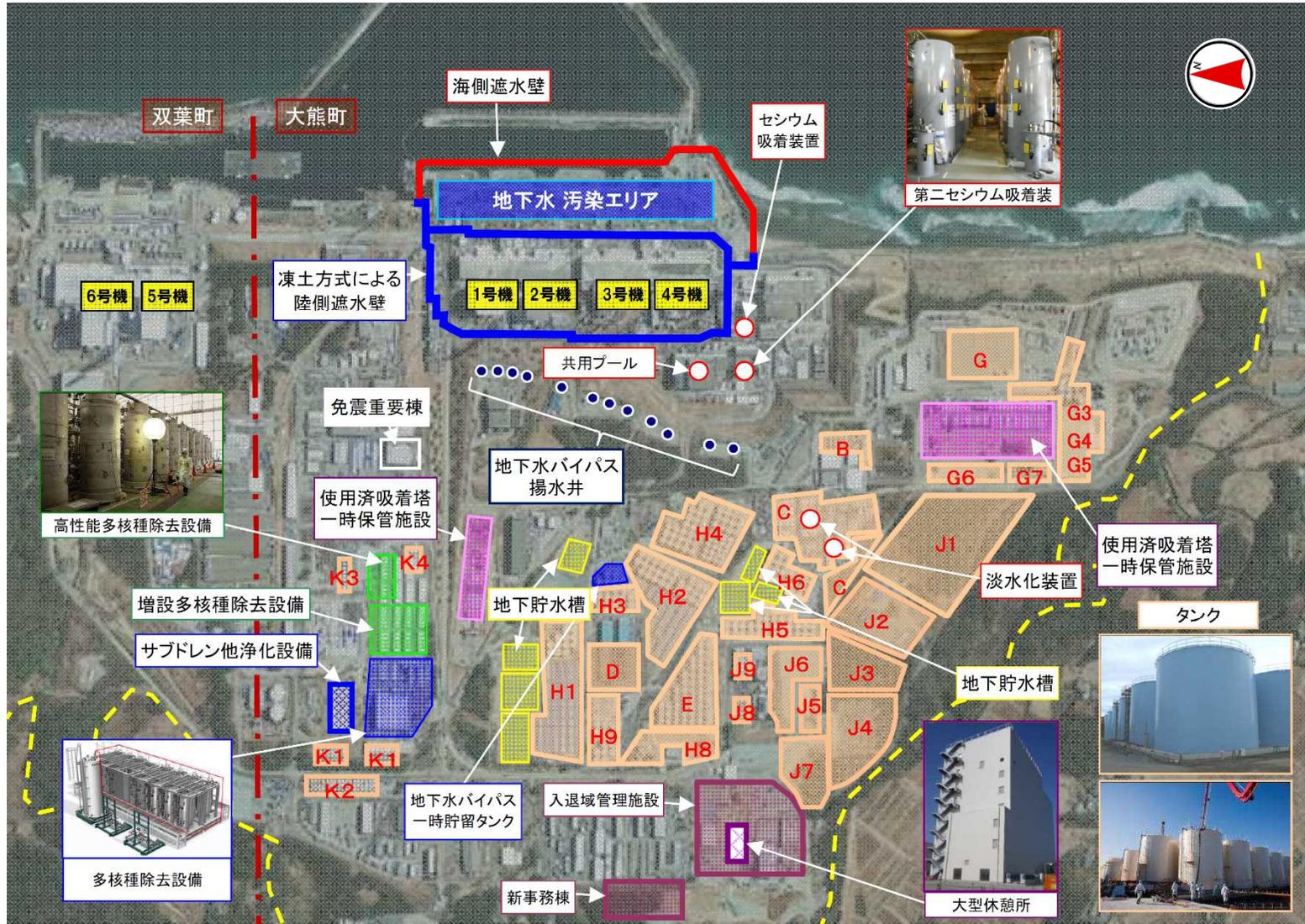
2016年5月27日

東京電力ホールディングス株式会社

目次

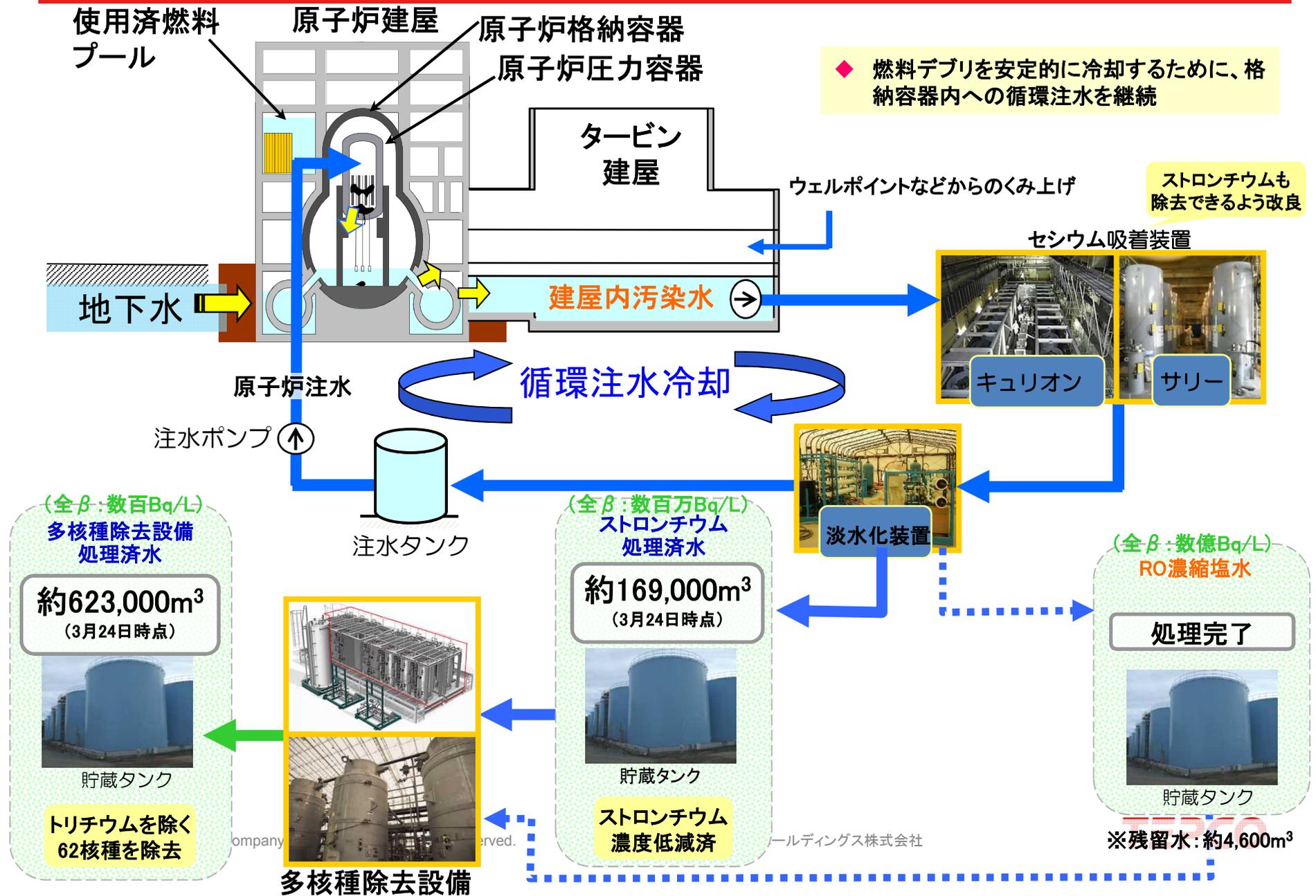
- 1 福島第一原子力発電所 構内配置図
- 2 循環注水冷却の概念図
- 3 汚染水処理の概要
- 4 トリチウムの総量
- 5 新たにRO処理される水に含まれるトリチウムの濃度
- 6 福島第一でタンクに貯蔵されるトリチウムの累積量
- 7 原子力発電所でのトリチウム生成
- 8 事故時炉内インベントリーと貯水に含まれるトリチウム
- 9 「汚染水対策」の3つの基本方針
- 10 サブドレン設備
- 11 陸側遮水壁
- 12 汚染水マップ
- 13 汚染水の貯蔵状況
- 14 水バランスシミュレーション

1 福島第一原子力発電所 構内配置図



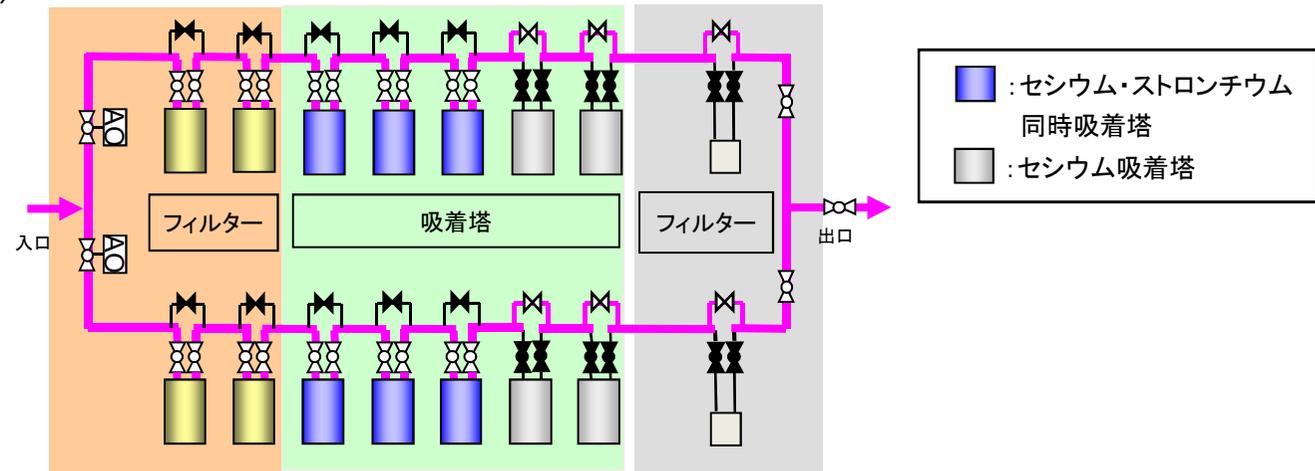
提供：日本スペースイメージング(株), (C)DigitalGlobe

2 循環注水冷却の概念図



3-1 汚染水処理の概要 セシウム吸着装置

- セシウム吸着装置(セシウム吸着装置、第二セシウム吸着装置)は、吸着塔に汚染水を通水し、汚染水に含まれる主要な核種(セシウム)を除去する設備。
- また、セシウムに加えてストロンチウムを除去する吸着塔を導入(2014年12月～)し、安定して処理を継続中。
- 第二セシウム吸着装置の系統図(例)



吸着塔の搬入状況

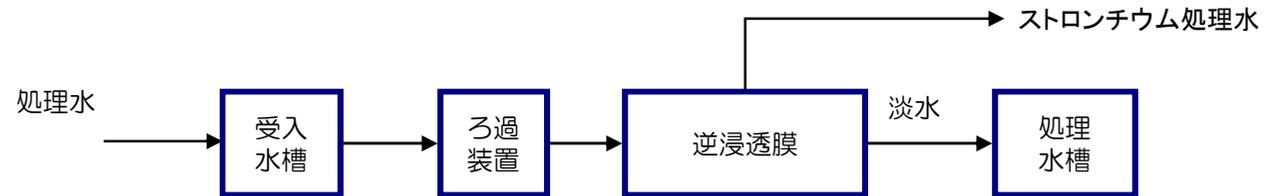


吸着塔の設置状況



3-2 汚染水処理の概要 淡水化装置(逆浸透(RO)方式)

- セシウム吸着装置で処理した水に含まれるイオンや塩類など、水以外の不純物を通さない逆浸透膜の性質を利用して塩分を除去し、淡水にする設備。
- 受入水槽、ろ過装置、逆浸透膜、処理水槽などから構成される。



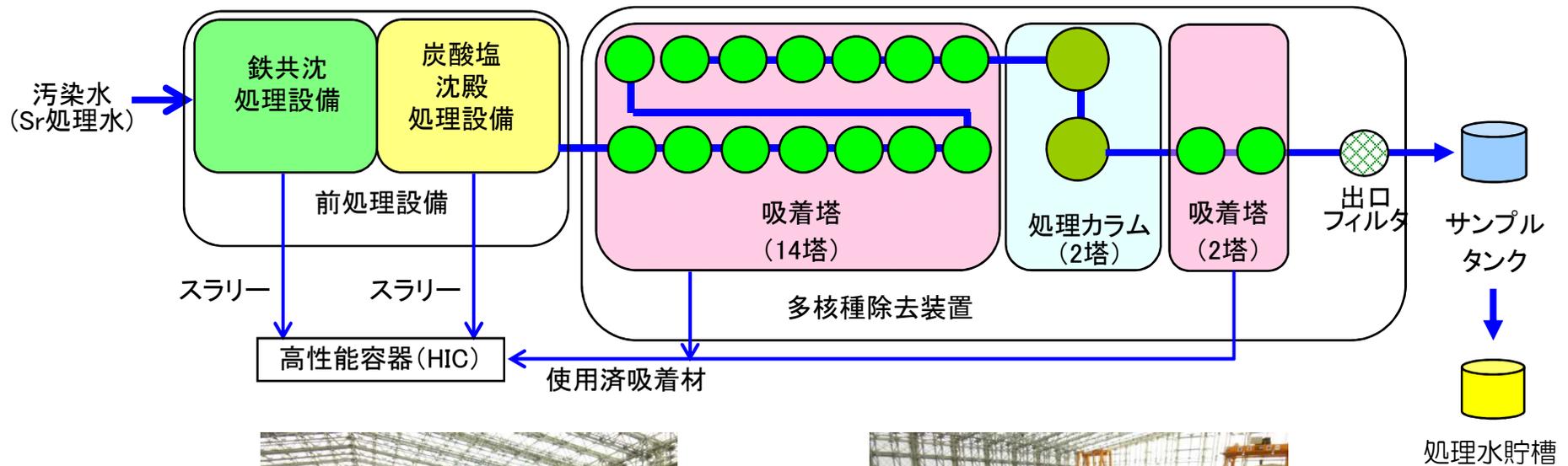
<淡水化装置 (ROモジュール)>



<淡水化装置 (ろ過装置)>

3-3 汚染水処理の概要 既設多核種除去設備

- 汚染水中の放射性物質(トリチウム除く)を除去。
- これまでの運転経験等に基づき、吸着塔構成変更及び吸着塔の16塔から18塔への増塔を実施済。



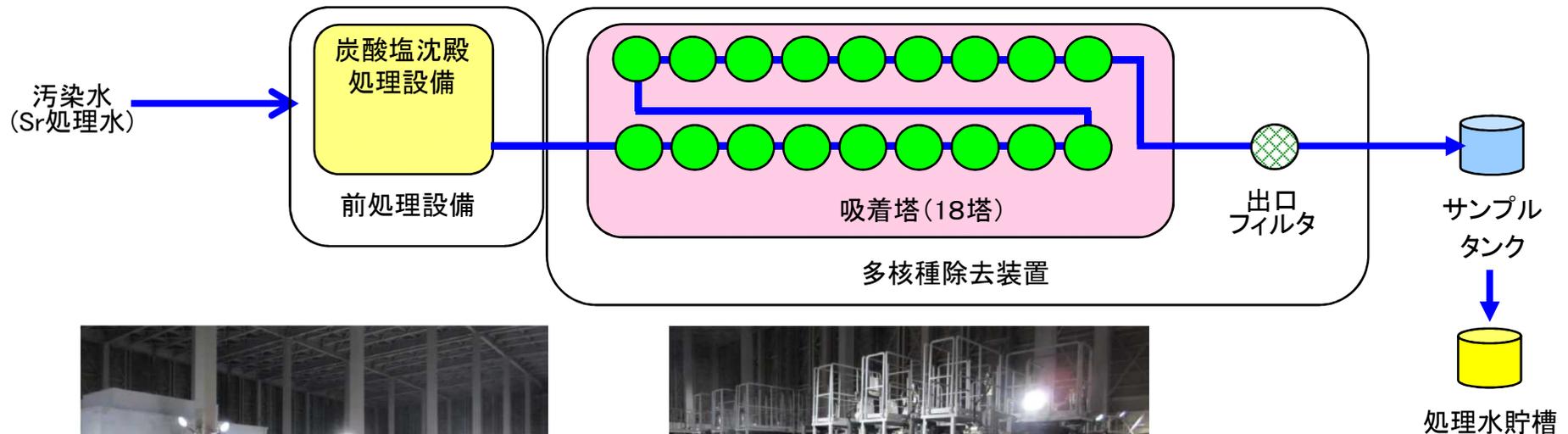
HICEリア



建屋内全景

3-4 汚染水処理の概要 増設多核種除去設備

- 既設多核種除去設備の知見およびラボ試験等の結果を反映し、既設多核種除去設備から主に下記2点について変更。
 - ✓ 前処理設備のうち鉄共沈処理を削除
 - ✓ 多核種除去装置の吸着塔の塔数を16塔(処理カラム2塔含む)から18塔に増塔



増設多核種除去設備 HIC取扱エリア

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.



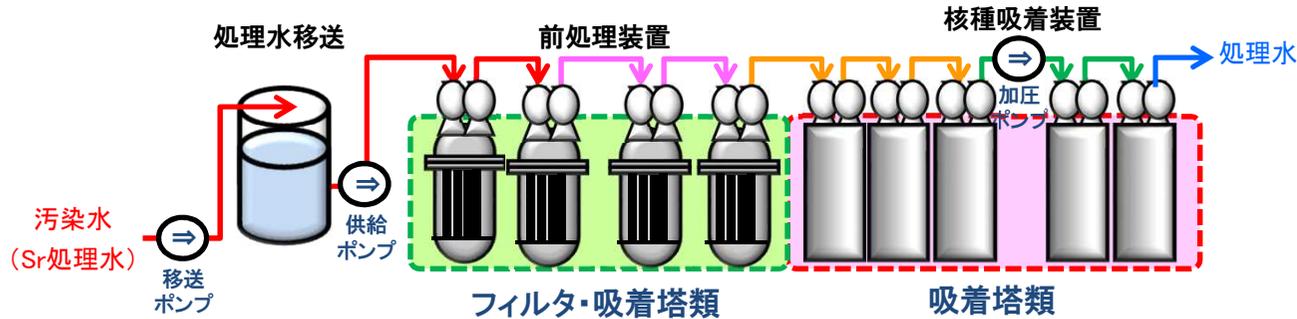
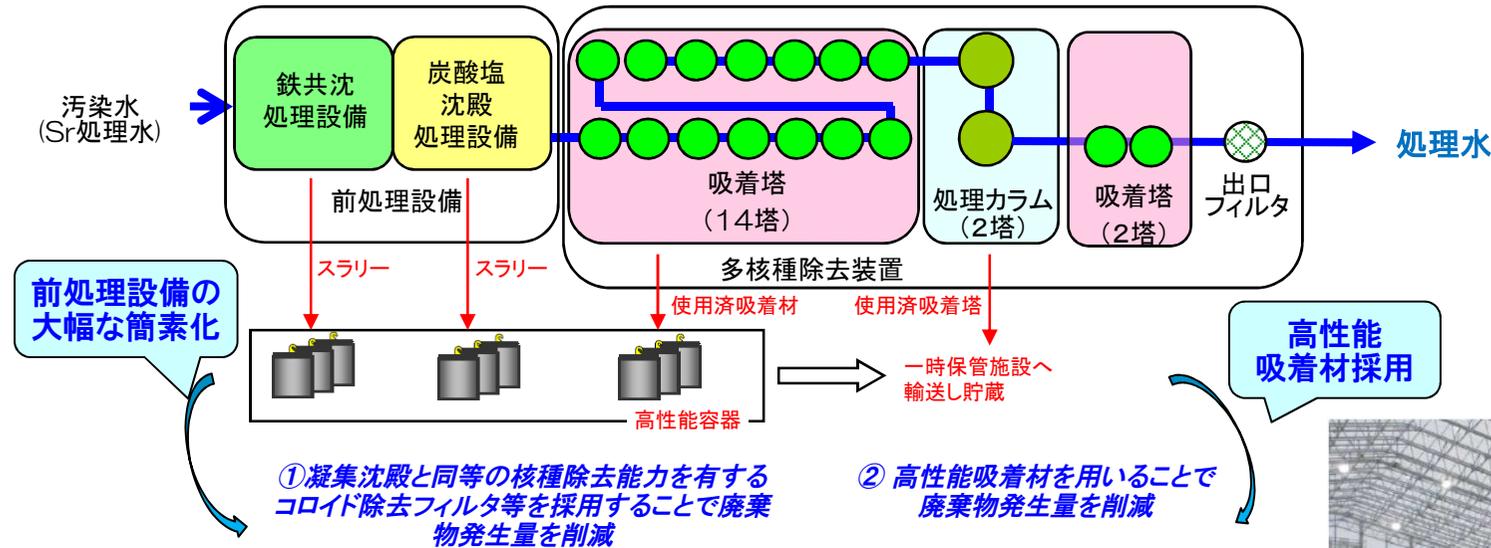
増設多核種除去設備 吸着塔

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

3-5 汚染水処理の概要 高性能多核種除去設備

■ 高性能多核種除去設備は、前処理設備（鉄共沈・炭酸塩沈殿処理）を簡素化するとともに、前処理に相当する除去性能を有するフィルタ・吸着材を採用し、放射性物質を除去。

【既設多核種除去設備】



【高性能多核種除去設備】



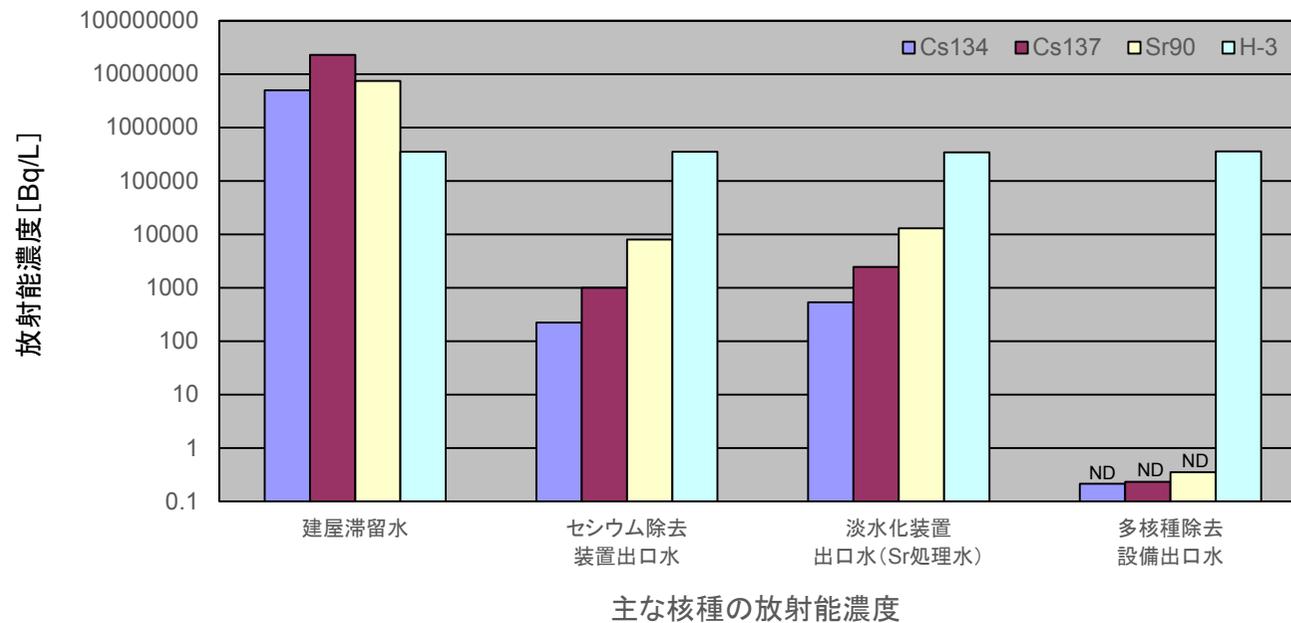
高性能多核種除去設備 吸着塔

3-6 汚染水処理の概要 汚染水処理過程の放射能濃度

- ① 主要な放射線源であるセシウム・ストロンチウムを、セシウム除去装置により低減
- ② 原子炉冷却水として使用する為、淡水化装置により塩分を除去
- ③ タンク貯留水の放射性物質濃度(トリチウムを除く)を、多核種除去設備により低減

■汚染水の状況

- ・水処理設備は安定して運転を継続。
- ・RO濃縮塩水は、2015年5月に一部を残して全量処理完了。



【補足事項】

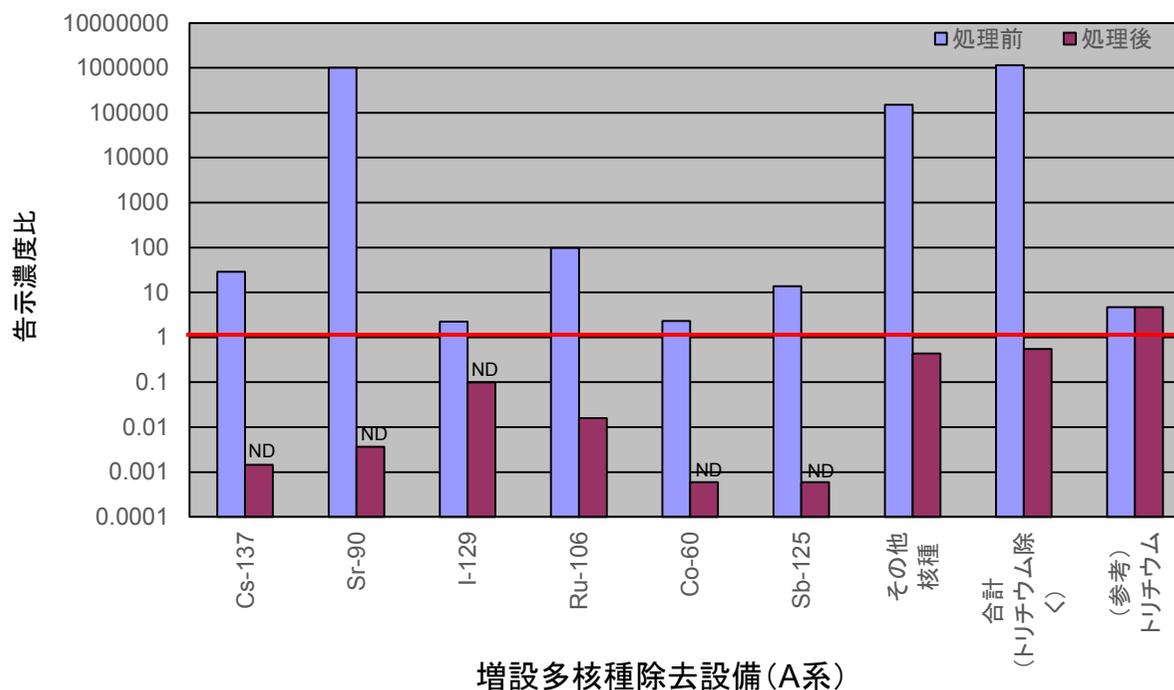
- ・建屋滞留水: HTI建屋滞留水濃度。
但し、H-3はセシウム除去装置出口水濃度。
- ・多核種除去設備出口水: 増設多核種除去設備A系濃度。
- ・検出限界値以下(ND)の場合は、検出限界値を示す。
- ・セシウム除去装置出口水: 淡水化装置入口水濃度。
- ・採取日: 2016.3.8 (セシウム除去装置出口水のSr90: 2016.3.5)
(多核種除去設備出口水: 2016.3.21)

3-7 汚染水処理の概要 多核種除去設備の除去性能評価

- ・多核種除去設備による処理済水について、除去対象とする62核種の除去性能を評価。
- ・分析の結果、主要な核種であるSr-90の放射能濃度は、1/1億～1/10億程度に低減。
- ・また、処理済水に含まれる放射性核種(トリチウムを除く)を『实用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示』に定める周辺監視区域外の水中の濃度限度(以下、「告示濃度」という。)より低いレベルまで低減できる能力を有している※。

※: 既設多核種除去設備(増塔後)の除去性能は評価中

■ 増設多核種除去設備の除去性能(例)



【補足事項】

・採取日: 2014.9.20~28
(トリチウムは淡水化装置出口水(2014.10.7)の分析結果を使用。)

・検出限界値以下(ND)の場合は、検出限界値を使用。

4 トリチウムの総量

■福島第一原子力発電所(1～4号機)における、トリチウムの量は以下と推測される。

2016.3.24時点(2016.3.24で半減期補正)

推定箇所		トリチウムの量		備考
		[Bq]	[g]※1	
総量		約 2.6×10^{15}	T:約 7.2	※2
[内訳]	・タンク貯留水	約 7.6×10^{14}	T:約 2.1 (THO:約14.0)	※3
	・建屋滞留水	約 2.7×10^{13}	T:約 0.1 (THO:約0.5)	※4
	・海水配管トレンチ内水	-	-	※5
	・その他	約 1.8×10^{15}	T:約 5.0	※6

※1:トリチウム原子の重量(括弧内は「THO」の形態に相当する量を示す)

※2:事故時の炉内トリチウムインベントリをORIGEN2を使用し評価

※3:淡水化装置出口濃度データとタンク貯留水量より推測

※4:淡水化装置出口濃度データ(2016.3)と建屋滞留水量(約79,800m³)より推測

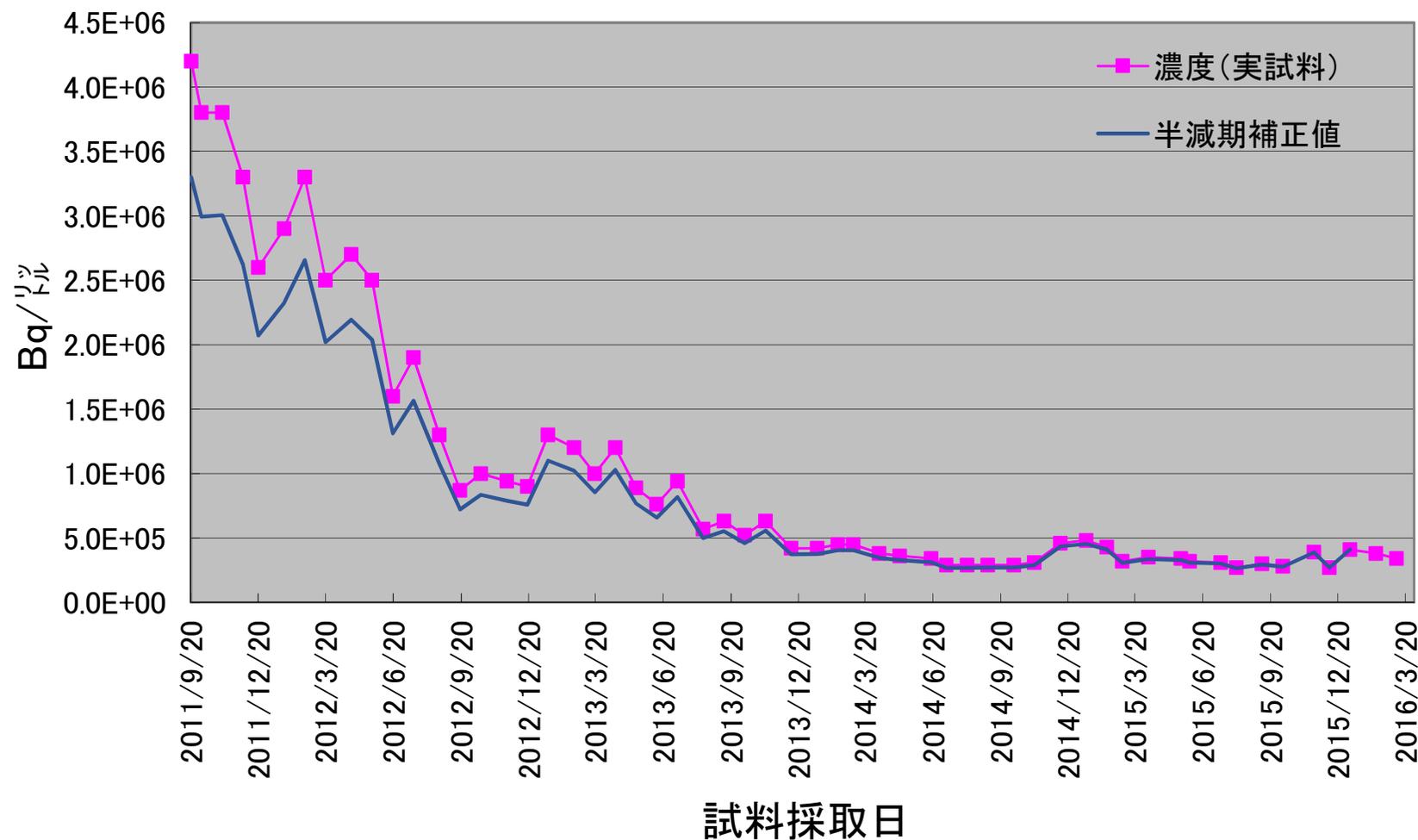
※5:2,3,4号機海水配管トレンチ内の水は2015.12までに全量移送完了

※6:総量からタンク貯留水・建屋滞留水・トレンチ内水のトリチウム量を差し引いて算出

(事故時に環境に放出されたものを含むが、主に燃料デブリ内などに存在するものと想定される)

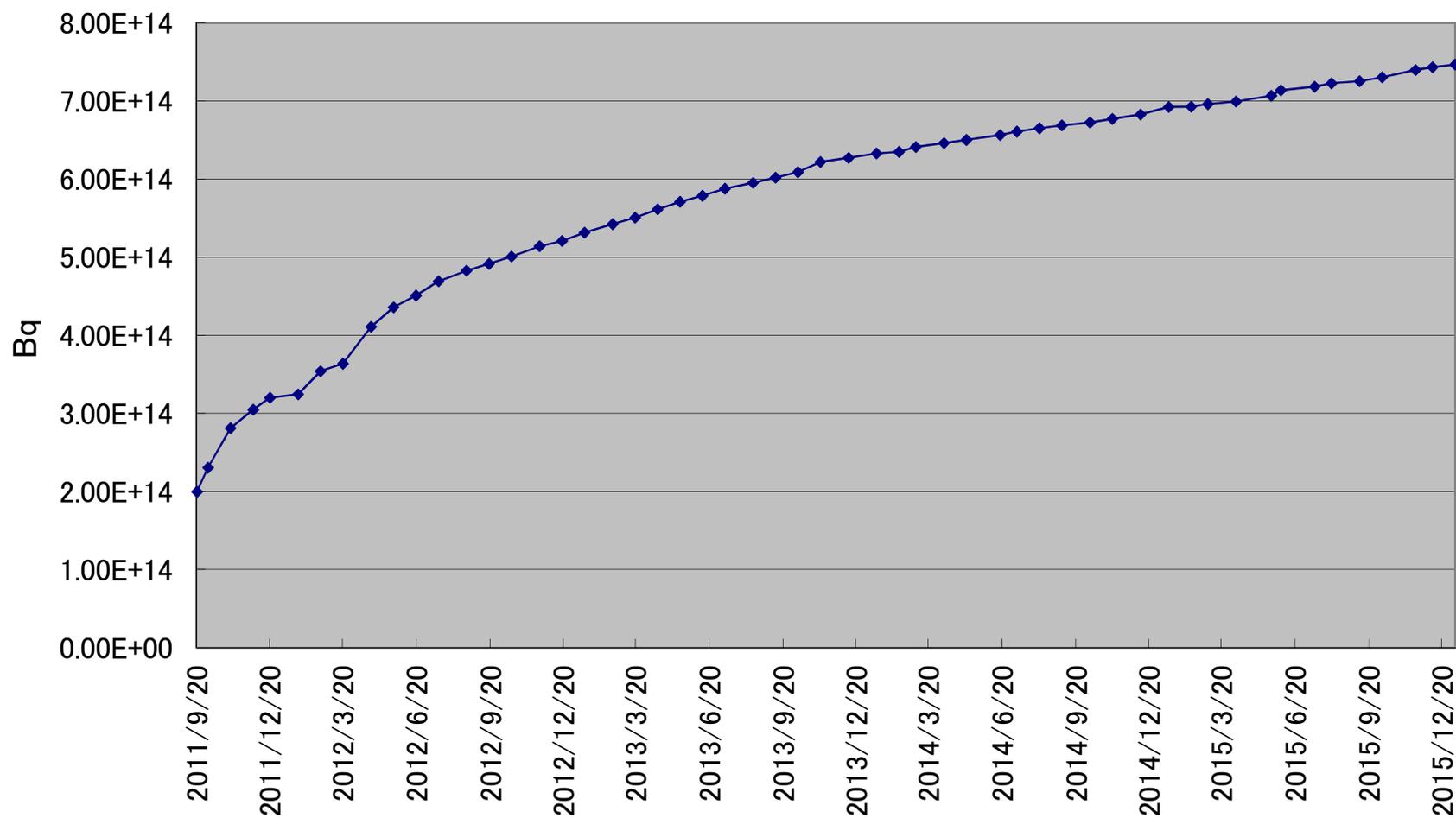
5 新たにRO処理される水に含まれるトリチウムの濃度

新たにRO処理される水に含まれるトリチウムの濃度



6 福島第一でタンクに貯蔵されるトリチウムの累積量

トリチウムの累積量



確認日 2016年3月24日時点で半減期補正した評価

7-1 原子力発電所でのトリチウム生成(1/2)

原子力発電所でのトリチウム生成源

- ① 燃料の三体核分裂(ウランが核分裂により3つの破片に割れる反応)による生成
- ② ボロンカーバイド(炭化ホウ素)制御棒に含まれるホウ素-10の中性子照射による生成
- ③ 炉水の放射化(重水や不純物としてのリチウム等への中性子照射による生成)

上記①が主要な発生源だが、現在の福島第一では未臨界であることから追加生成はない

① 燃料の三体核分裂による生成

- 燃焼中の ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂生成物としてトリチウムが生成される。この量は ^{235}U で0.013%、 ^{239}Pu で0.023%程度で、燃焼が進んだ燃料では ^{239}Pu の燃料が支配的になるが、平均的に0.018%とすると1MWあたりで生成されるトリチウムは次のようになる。

$$N_F \times 1.8 \times 10^{-4} \times \lambda = 1.01 \times 10^4 \text{ Bq/s} \cdot \text{MWt}$$

NF : 1秒間における 1MWt あたりの 核分裂数 = $3.15 \times 10^{16} / \text{s} \cdot \text{MWt}$

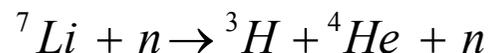
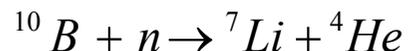
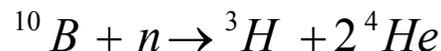
- 炉内で生成されるトリチウム量はおよそ次のとおりだが、燃料棒が破損しなければほとんど放出されない。(被覆管を透過する割合は $\sim 10^{-4}$ 程度)

トリチウム生成量	50万kWe	80万kWe	110万kWe
Bq/月	4.07E+13	6.29E+13	8.51E+13

7-2 原子力発電所でのトリチウム生成(2/2)

② ボロンカーバイド(炭化ホウ素)制御棒に含まれるホウ素の中性子照射による生成

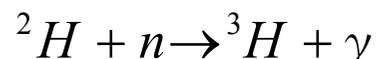
- B_4C (ボロンカーバイド)を中性子吸収に用いた制御棒のポイズンチューブ内では次の反応によりトリチウムが生成する。



- ^{10}B が約50%減少するまで照射された B_4C 1g中には保守的に評価して 1.48×10^9 Bq/g B_4C 程度のトリチウムが生成するが、制御棒が破損しても一度に放出されることはない。

③ 炉水の放射化(重水等への中性子照射による生成)

- 炉水中の重水への中性子照射によりトリチウムが生成する。重水によるトリチウム生成は次式で算出される。



$$N^3H = \Sigma(D_2O) \times \phi \times V \times \rho \times (D/H) \times t$$

N^3H :トリチウム 生成量 V :炉水体積

ΣD_2O :重水の反応断面積 ρ :水の密度補正

ϕ :熱中性子束 D/H :重水存在比

- 炉内で生成されるトリチウム量はおよそ次のとおり

トリチウム生成量	50万kWe	80万kWe	110万kWe
Bq/月	4.44E+09	6.29E+09	1.07E+10

8 事故時炉内インベントリーと貯水に含まれるトリチウム

- 炉内トリチウムインベントリーは三体核分裂によるものが主なものであることから、ORIGEN2(原子燃料燃焼計算コード)を使用し、事故時の詳細な評価を行うと次のようになる。

(Bq)

	1号機	2号機	3号機	合計
TEPCO	1.0E+15	1.2E+15	1.2E+15	3.4E+15
<参考>JAEA*	9.4E+14	1.2E+15	1.2E+15	3.3E+15

* 日本原子力学会和文論文誌「福島第一原子力発電所の滞留水への放射性核種放出」(西原賢司 他)

- 事故前は評価結果のトリチウムのうち、約60%程度が燃料棒の被覆管に吸蔵※していたと考えられる。
- 現在(2014年3月末)、タンクに貯水される水に含まれるトリチウムの総量は 8.34×10^{14} Bqと推定され、2016年2月末では約 9×10^{14} Bqになると推定される。
- この時(2016年2月末)の新たに処理される水に含まれるトリチウムの濃度は 6.7×10^4 Bq/リットル程度であると推定される。
- 表中の1~3号機のトリチウムを合計した 3.4×10^{15} Bqはトリチウム原子の重量9.5gに相当する量。(トリチウムが「THO」の形態で存在した場合、63.3gに相当する)

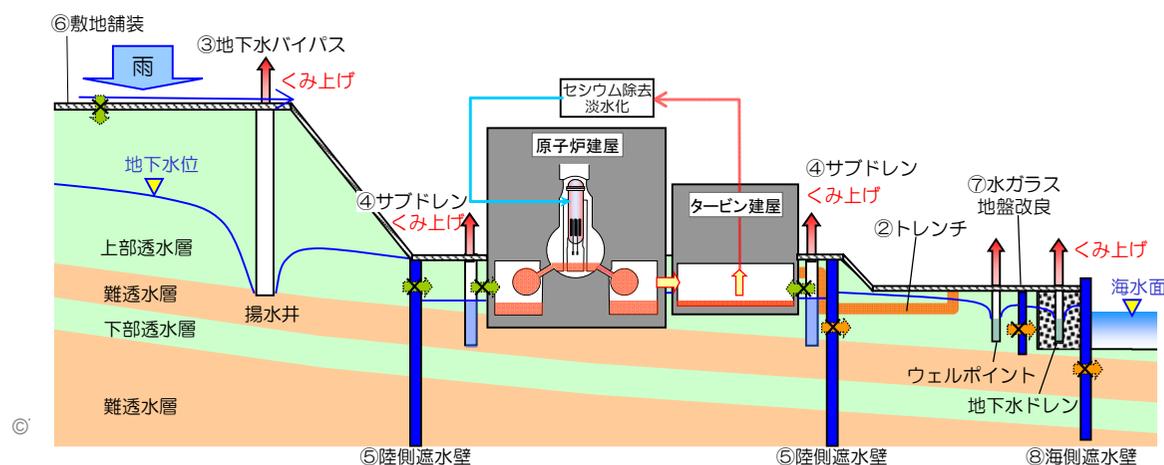
※ (株)東芝「実ハル圧縮試験」(JAEA(旧動力炉・核燃料開発事業団)契約業務報告書) 1996年9月

9 「汚染水対策」の3つの基本方針

- 汚染水対策は、下記の3つの基本方針に基づき、予防的・重層的に進めている。

□ : 対策完了、目標達成、運転・運用を継続中

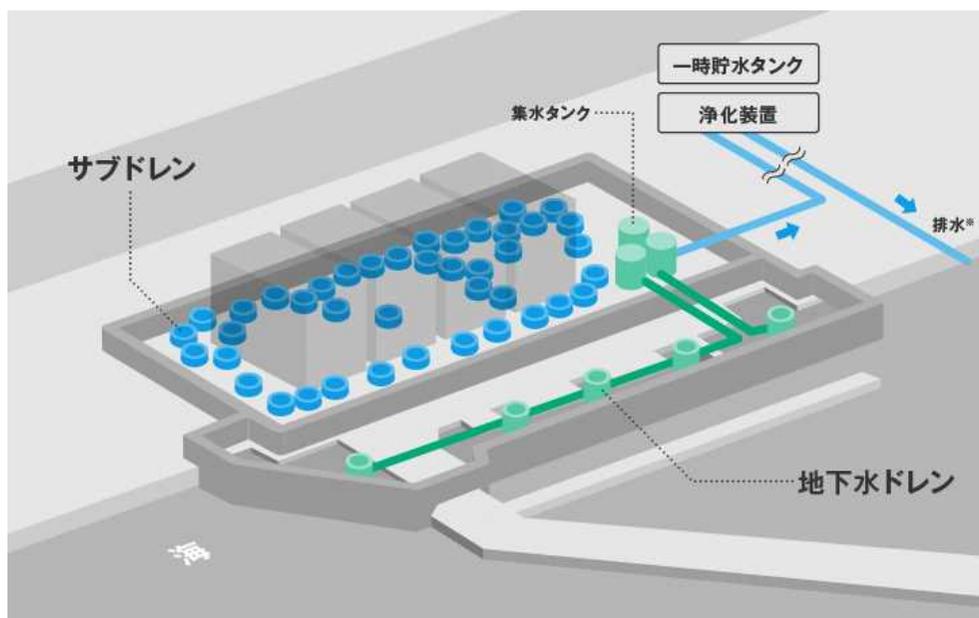
汚染水対策	実施状況	効果		
方針1 汚染源 を取り除く	①多核種除去設備による汚染水浄化	2015年5月、RO濃縮水処理完了。 安定して処理を継続中。	安定運転 継続	敷地内の線量低減や、万が一、汚染水が漏れた時などの リスク低減
	②トレンチ(※)内の汚染水除去 ※配管などが入った地下トンネル。	2015年12月汚染水除去処理完了。	完了	
方針2 汚染源 に水を 近づけない	③地下水バイパスによる地下水汲み上げ	安定して汲み上げを継続中。	継続運用	原子炉建屋への地下水流入量の減少
	④建屋近傍の井戸での地下水くみ上げ			
	⑤凍土方式の陸側遮水壁の設置	3月31日凍結開始。	凍結開始	原子炉建屋への地下水流入量の減少
	⑥雨水の土壌浸透を抑える敷地舗装	2015年度目標エリアの舗装を計画通り完了。	約9割舗装完了	原子炉建屋への地下水流入量の減少、敷地内線量低減 (作業員の被ばく低減)
方針3 汚染水を漏らさない	⑦水ガラスによる地盤改良	2014年3月、地盤改良完了。	設置完了	地下水の海洋への流出抑制
	⑧海側遮水壁の設置	2015年10月、遮水壁閉合完了	閉合完了	
	⑨タンクの増設(溶接型へのリプレース等)	新たに発生する汚染水発生量を満足するように増設等を継続中	増設継続	汚染水を安定して管理された状況で保管



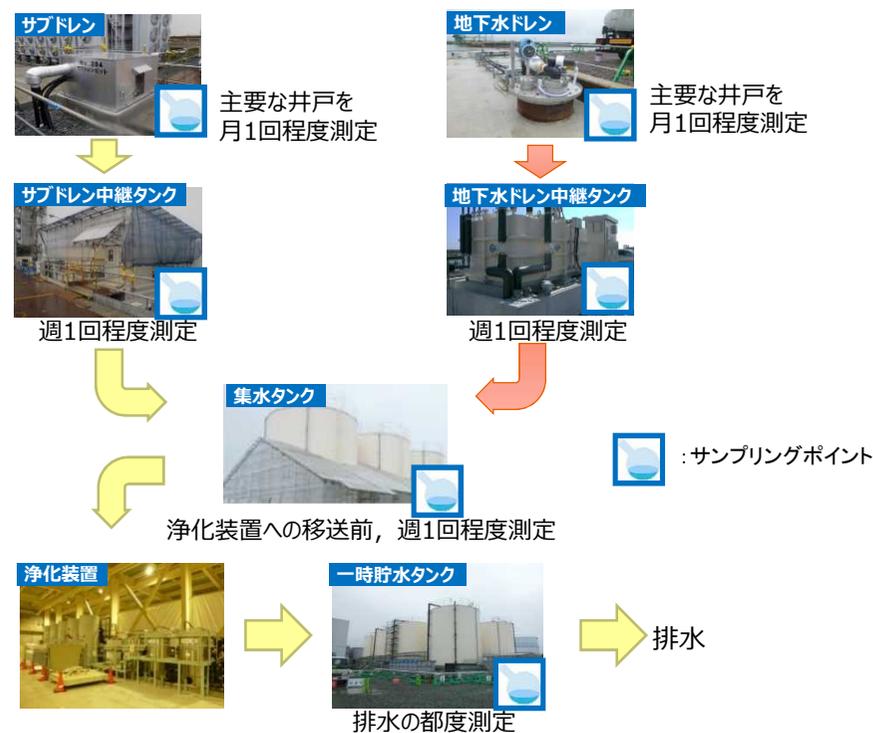
PCO

10 サブドレン設備

- サブドレンは、建屋近傍の井戸から地下水をくみ上げ、より直接的に建屋周囲の地下水位を下げる。
- サブドレンからの地下水は、放射性物質を含んでいるため、専用の浄化設備を設置して、放射性物質濃度を1/1,000～1/10,000 程度まで低減。
- 2015年9月3日より地下水をくみ上げ、水質が運用目標値未満であることを確認した上で、計118回排水(総排水量92,316 m³)。(2016年4月10日現在)



サブドレン概略図



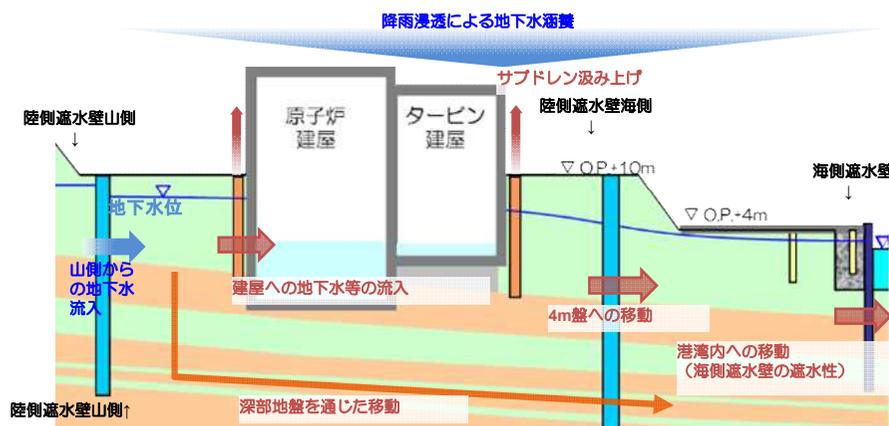
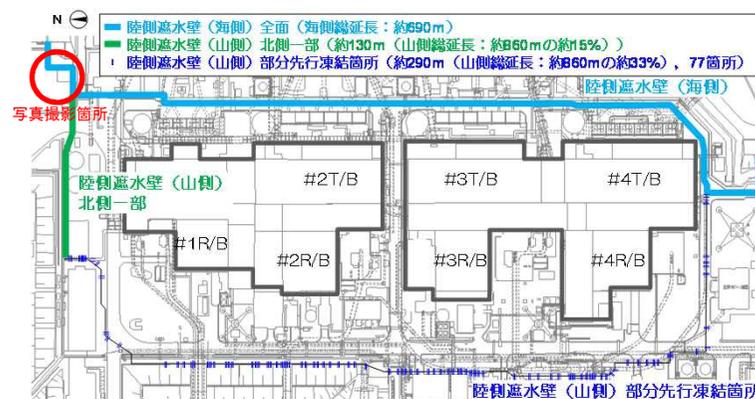
11 陸側遮水壁

- 建屋への地下水流入を抑制するため、3月31日に1～4号機建屋を取り囲む陸側遮水壁※1の凍結を開始。
- なお、陸側遮水壁を造成する際には、建屋内の汚染水が流出することの無いように、段階的に進めている。

※1: ブライン(冷却材)を各凍結管に送り、周囲の土の温度を下げることで土を凍結させ、凍土の壁を作る。

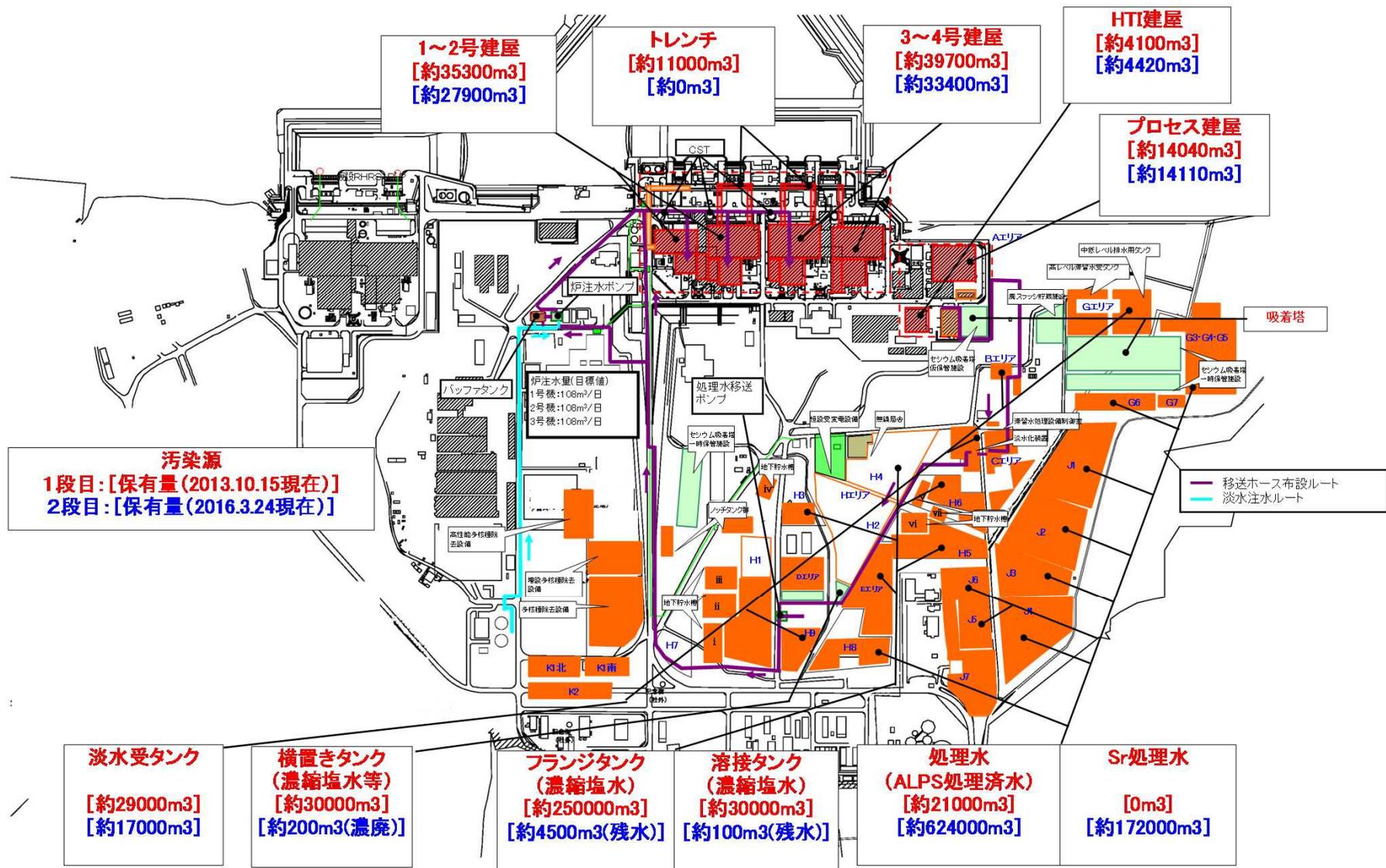
- 陸側遮水壁造成の進め方
 - ・ 陸側遮水壁の海側の閉合を先行させ、陸側遮水壁の山側についても段階的な閉合を目指す。
 - ・ 陸側遮水壁の閉合は以下の3段階で進めていく。
 - 第一段階: 海側全面閉合＋山側部分閉合する段階
 - フェーズ1: 海側全面＋山側(北側一部と部分先行凍結箇所)
 - フェーズ2: 海側全面＋山側(部分閉合実施箇所)
 - 第二段階: 第一段階と第三段階の間の段階
 - 第三段階: 完全閉合する段階

■ 現在凍結を進めている範囲(第一段階フェーズ1)



陸側遮水壁 凍結開始後の状況

12 汚染水マップ



13 汚染水の貯蔵状況

- 貯蔵タンクは、日々発生する汚染水を確実に貯蔵できるように、建設を進めている。
- 限られた敷地内で効率的に貯蔵することや、フランジタンクの漏えいリスクを低減することを目的に、信頼性の高い溶接接合タンクへのリプレースを進めていく。
- 日々発生する汚染水は、放射性物質の濃度を低減(リスクを低減)し、タンクに貯蔵している。

■ フランジタンクリプレース



2015.10時点



2016.3時点

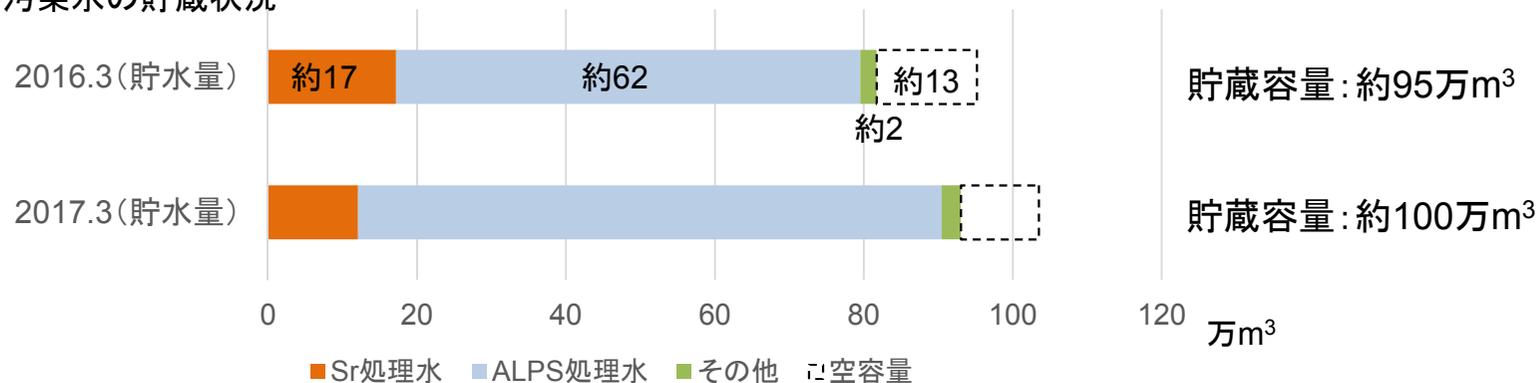


フランジ接合

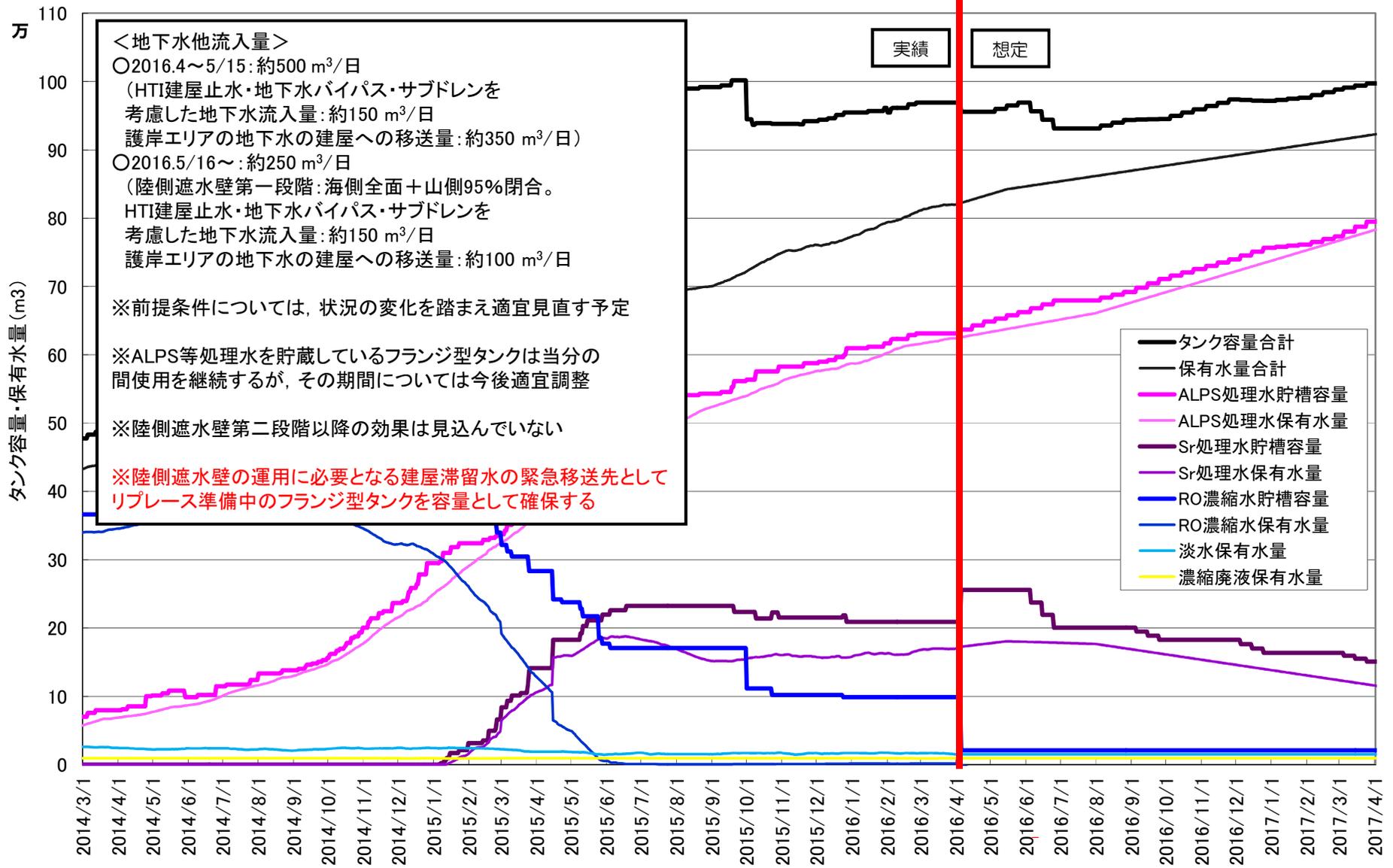


溶接接合

■ 汚染水の貯蔵状況



14 水バランスシミュレーション



東京電力福島第一原子力発電所敷地境界における実効線量の制限の 達成に向けた規制要求について

平成26年2月26日

原子力規制委員会

1. 経緯

- (1) 原子力規制委員会は、原子炉等規制法に基づき東京電力福島第一原子力発電所を特定原子力施設に指定し、「特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項について」（平成24年11月7日原子力規制委員会決定。以下「措置を講ずべき事項」という。）を示し、実施計画の提出を求めた。措置を講ずべき事項では、「施設内に保管されている発災以降発生した瓦礫や汚染水等による敷地境界における実効線量（施設全体からの放射性物質の追加的放出を含む実効線量の評価値）について、平成25年3月までに1mSv/年未満とすること」としている。
- (2) 措置を講ずべき事項で求めている実効線量の制限である1mSv/年未満は、平成25年3月時点の評価では達成されていた。しかしながら、同年4月に発生した地下貯水槽からの漏えいに対応するため、地下貯水槽に貯蔵されていた汚染水が敷地境界近くのタンクに移送されたことに伴い、これを超過し、同年12月の実施計画の変更認可申請によれば、当該タンク付近の敷地境界における実効線量の評価値は約8mSv/年となっている（参考1～4）。
- (3) 原子力規制委員会は、施設全体からの放射性物質等の追加的放出による実効線量の評価値が措置を講ずべき事項で求めている制限を大幅に超過している状況と汚染水対策の緊急性とを総合的に検討し、当該実効線量の評価値を線量低減対策等により、早急に1mSv/年未満に復帰させる必要があるとの留意事項を示した上で、平成25年8月14日に、東京電力から提出された実施計画を認可した。

2. 現状に係る課題

施設全体からの放射性物質等の追加的放出による実効線量の評価値が、措置を講ずべき事項で求めている制限から大幅に超過している原因は、汚染水の地下貯水槽からタンクへの移送、汚染水貯蔵量の増大、瓦礫の撤去に伴う固体廃棄物貯蔵量の増加である。また、今後の汚染水貯蔵量の増大や固体廃棄物の貯蔵状況により、当該実効線量の評価値は更に増大するおそれがある。

このため、以下の課題について対応する必要がある。

- (1) 措置を講ずべき事項で求めている実効線量の制限について、いつまでに達成できるかが明確になっていないこと。

- (2) 措置を講ずべき事項で求めている実効線量の制限を満足していないため、達成時期までの間において、状況が改善されていくことを確認できるアプローチが存在しないこと。

3. 今後の対応

東京電力に対し、以下を内容とする実施計画の変更を指示する。

(1) 措置を講ずべき事項で求めている実効線量の制限を達成する時期の明確化

措置を講ずべき事項で求めている実効線量の制限である敷地境界で1 mSv/年未満を達成する時期は、遅くとも平成28年3月末とする。

(2) 上記(1)の達成時期までの実効線量の制限

上記(1)の達成時期まで、毎年状況が改善されていくことを確認できるアプローチとして以下の措置を講じる。

- ① 上記(1)の達成時期(遅くとも平成28年3月末)まで、敷地境界における実効線量(評価値)の低減目標は、平成27年3月末には2 mSv/年未満、平成28年3月末には1 mSv/年未満とする。
- ② タンクに貯蔵された汚染水以外に起因する敷地境界における実効線量(評価値)の低減目標は、遅くとも平成27年3月末までに1 mSv/年未満とする。ただし、以下の3つを起源とする敷地境界における実効線量(評価値)の低減目標は、実施計画の認可日から継続して1 mSv/年未満とする。
 - a) 実施計画(変更認可申請中のものも含む)に記載されているものであって、敷地の外に排出する水
 - b) 原子炉建屋から放出される気体廃棄物
 - c) タンクに貯蔵された汚染水以外に起因する直接線・スカイシャイン線

(3) 制限の対象とする排水の範囲の明確化

排水路の水を含め濃度及び量を把握でき、排出を制御できる水全般について、上記実効線量の規制対象である液体廃棄物と同様に扱う。また、それによる敷地境界における実効線量の評価に当たっての考慮事項は別紙のとおりとする。

(4) 敷地内における空間線量低減に係る計画の明確化

作業員の被ばく線量を可能な限り低減するため、発電所内の除染について、少なくとも「緊急安全対策」(平成25年11月8日)に示された発電所内の除染などに関する計画を明確化する。

液体廃棄物等の実効線量の評価に当たっての考慮事項

1. 特定原子力施設の敷地境界における実効線量の評価方法

敷地境界の実効線量を評価するにあたっては、従来から、ガレキ等の表面線量率やモニタリング等の実測値に基づき、施設の実態に即した評価を可としている。

2. 排出される水の実効線量の評価方法

(1) 排出する排水口ごとに濃度の評価を行うことが原則ではあるが、複数の地点から排出される水のうち、混合する効果が見込める場合に限り、それぞれの水の濃度を放出量に応じて加重平均したものをもって評価することができることとする。

(2) 上記により得られた濃度のうち最大のものを、排出される水全体の濃度とする。

3. 液体廃棄物の実効線量の評価方法

液体廃棄物関連の評価方法については、以下で示す方法も可とする。

(1) 計測対象とする核種の選定

評価にあたっては、原則、管理対象となる水（液体廃棄物等）に含まれるすべての核種を対象とする。ただし、各核種の生成過程や半減期を考慮し、計測対象を被ばく評価上有意なものに限定することができるものとする。

(2) 3ヶ月平均の濃度算出方法

管理対象とする核種の濃度の計測は、定期的なサンプリングによって行うことができるものとする。

3ヶ月平均濃度の算出にあたっては、定期的なサンプリングによる測定結果から算出される管理対象核種の総量と排出する水の総量から求められる3ヶ月の平均値を用いることができるものとする。

なお、台風・豪雨等の際のモニタリングについては、労働災害防止の観点からサンプリングに伴う危険性を回避して推計を行うことができるものとする。

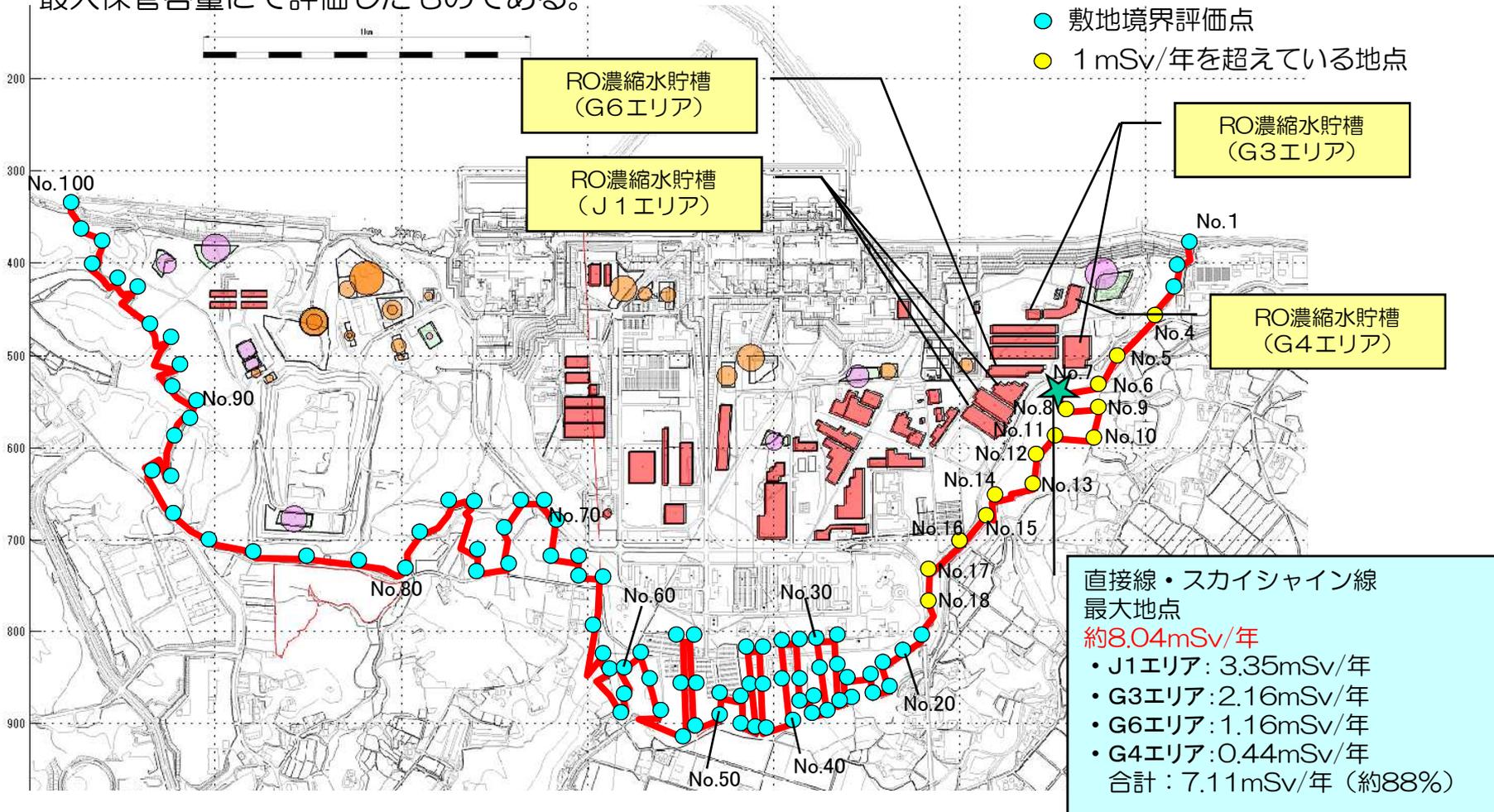
(3) 排水口でのサンプリング

排水口での放射能濃度に代えて、その上流に設ける集水ますなどのサンプリング地点の放射能濃度を用いることができるものとする。ただし、その妥当性については、実測によって定期的に確認するものとする。

1. 現状（直接線・スカイシャイン線の最大評価地点）

敷地境界における直接線・スカイシャイン線は、敷地南側にて最大約8.04mSv/年と評価。

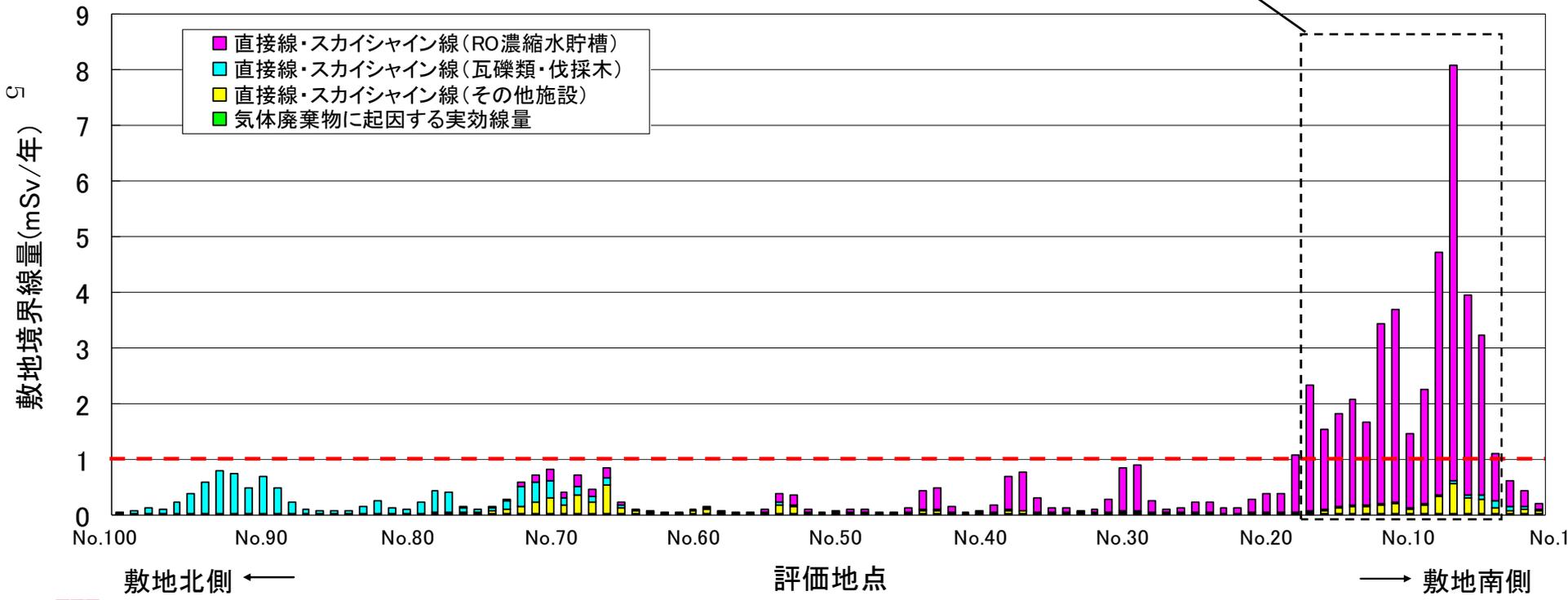
なお、現在の評価値は実際に保有している逆浸透膜濃縮水（RO濃縮水）や瓦礫等によるものではなく、最大保管容量にて評価したものである。



1. 現状（評価点における敷地境界線量）

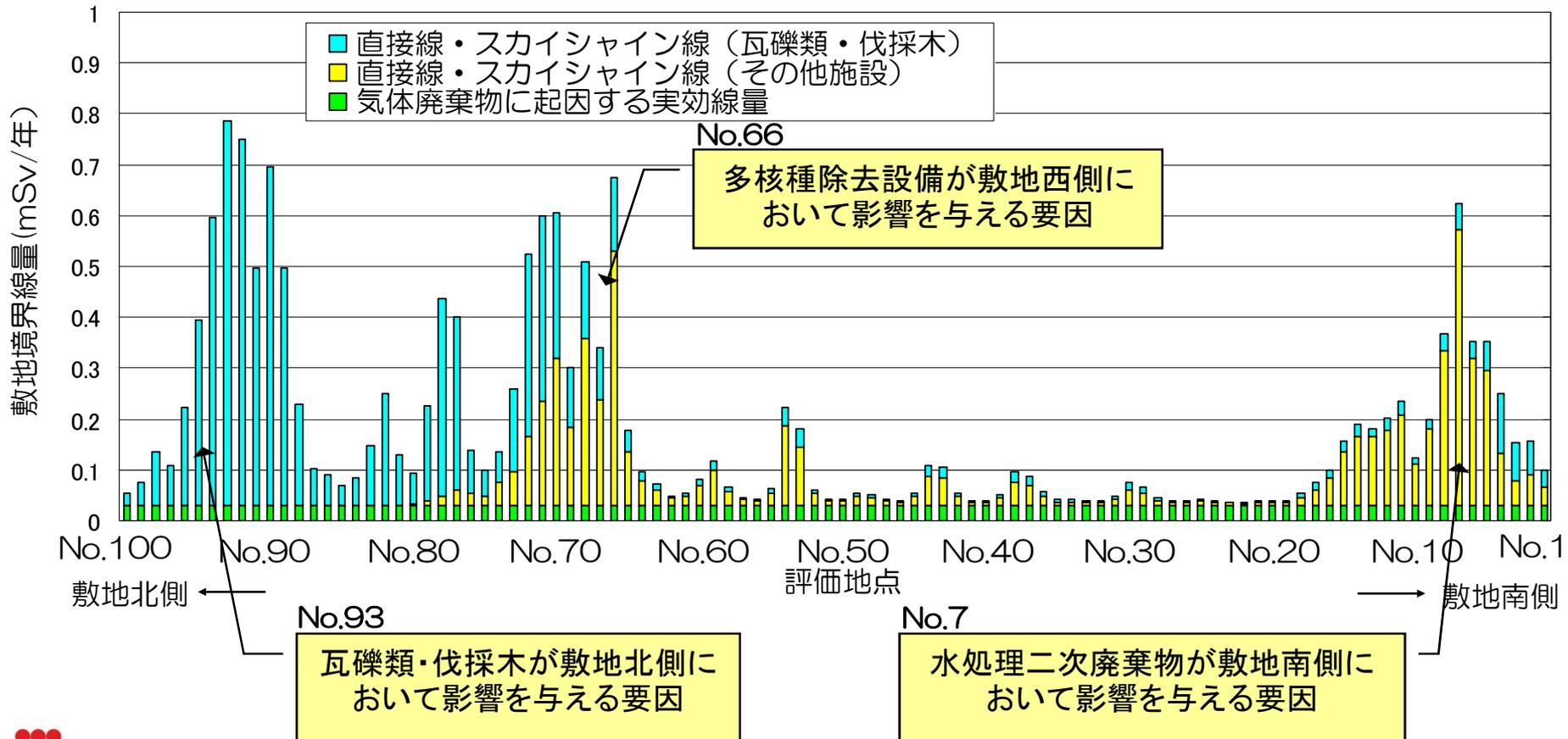
敷地境界の評価点（100地点）における敷地境界線量を以下に示す。
敷地南側は主にRO濃縮水貯槽の影響があり、敷地北側は主に瓦礫類・伐採木の影響がある。

1mSv/年を超える評価点（No.4~No.18）について次ページに示す。



1. 現状 (RO濃縮水貯槽以外の実効線量)

■RO濃縮水貯槽の影響を除いた場合には、敷地境界における実効線量は1 mSv/年未満となる。ただし、排水等の評価は含まれていない。



排水路の現況について

(参考4)

採取日	14/2/7
Cs-134 (Bq/L)	8.3
Cs-137 (Bq/L)	20
全β (Bq/L)	40
H-3 (Bq/L)	—※
告示濃度比	0.58

採取日	14/2/7
Cs-134 (Bq/L)	5.8
Cs-137 (Bq/L)	19
全β (Bq/L)	34
H-3 (Bq/L)	—※
告示濃度比	0.48

採取日	14/1/29
Cs-134 (Bq/L)	0.78
Cs-137 (Bq/L)	2.5
全β (Bq/L)	16
H-3 (Bq/L)	19
告示濃度比	0.27

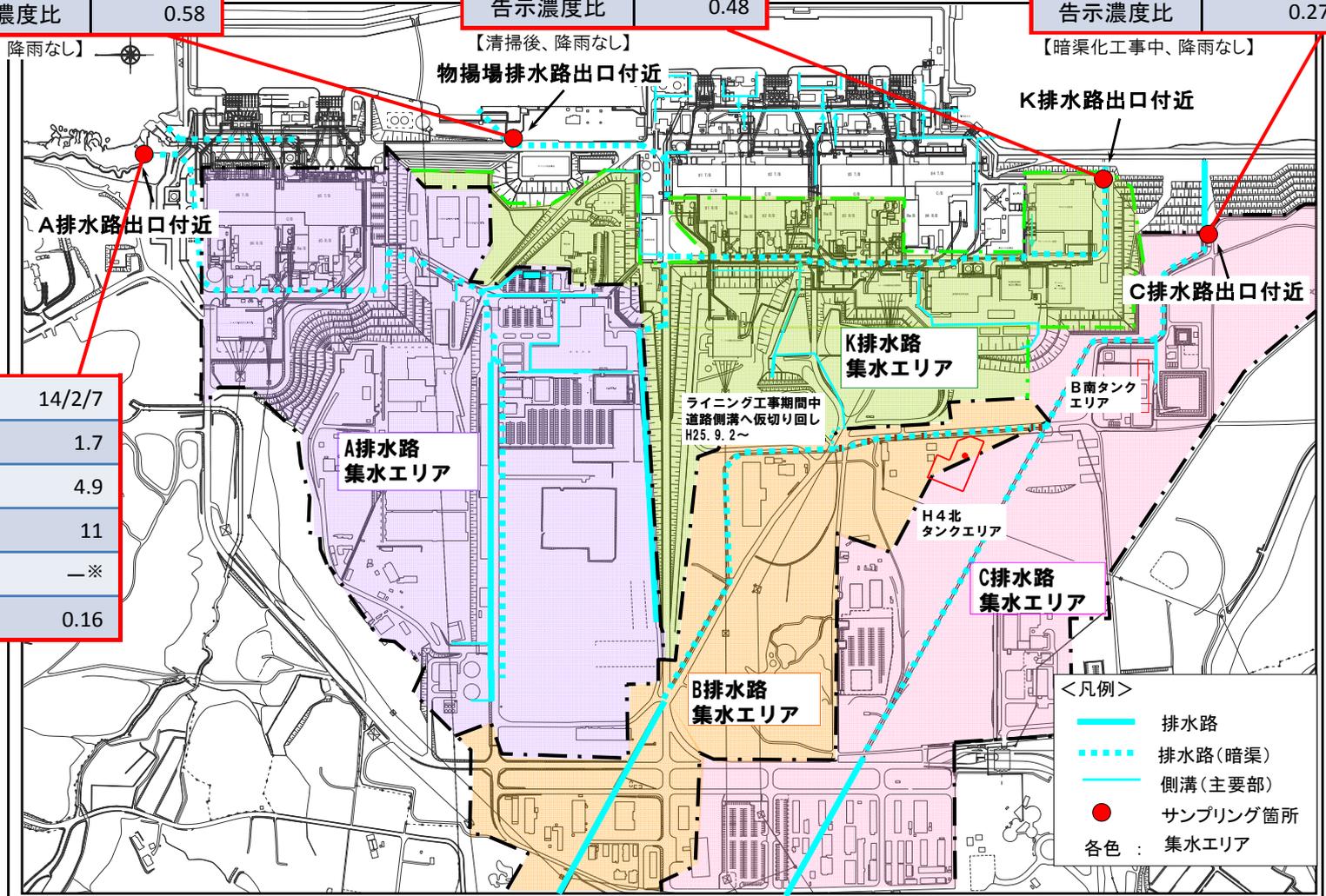
【清掃後、降雨なし】

【清掃後、降雨なし】

【暗渠化工事中、降雨なし】

採取日	14/2/7
Cs-134 (Bq/L)	1.7
Cs-137 (Bq/L)	4.9
全β (Bq/L)	11
H-3 (Bq/L)	—※
告示濃度比	0.16

【清掃後、降雨なし】



※ H-3は過去の分析の結果、告示濃度に比べ十分低いため、測定していない。



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

参考資料9



TMI-2 Tritiated Water Experience

Presented to the
**Tritiated Water Task Force of the Committee on
Contaminated Water Countermeasures**
26 March 2014

By: Chuck Negin

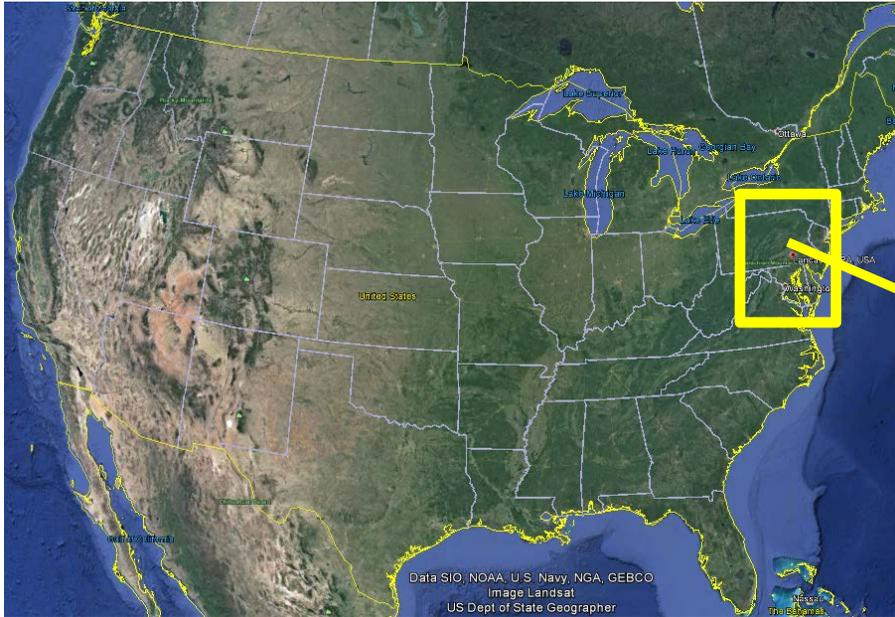


EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Location in the USA



❑ By Road

- 200 km north of Washington DC
- 160 km from the Delaware Bay
- 40 km to city of Lancaster, PA

❑ By River

- 26 km to the city of Lancaster, PA water intake



EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Overhead Aerial



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Relative to the City of Lancaster



EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

How much Tritium?

- ❑ Initial tritium: somewhat less than 3000 curies (111 tBq)
- ❑ Final tritium: 658* curies (24.3 tBq)
- ❑ Final Water: 2.3 million gallons (8706 metric tons)
- ❑ Final Concentration: 2.8×10^6 Bq/liter
- ❑ US EPA Drinking water standard: 740 Bq/liter
- ❑ Where did the tritium go? It was reduced by:
 - radioactive decay (12 year half life),
 - used for decontamination; loss via evaporation; removed by ventilation systems
 - via the air ejectors**

* Final PEIS estimate was 1020 Ci (37.7 tBq) in 1987

* * The air ejectors were used to maintain cooling in the reactor via the steam generators and the steam system; they were under internal vacuum relative to the reactor containment where they were located.



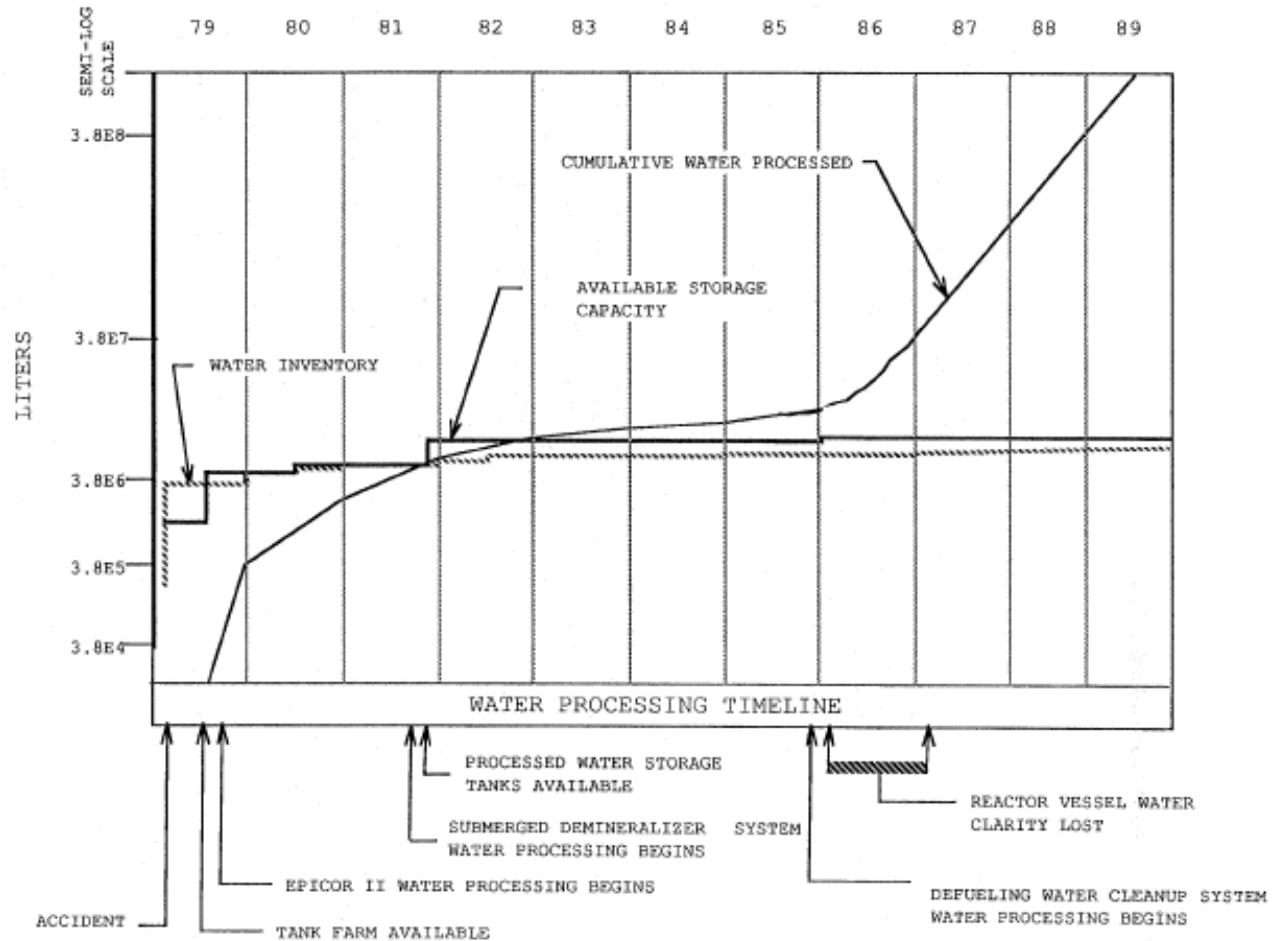
EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Why Disposal Waited 10 Years

- The addition of water was not at a high rate
- There was some evaporation and discharge via ventilation
- Several storage locations within the plant
- The containment basement acted as a “surge tank”
- Eventually built 2 half million gallon tanks (5,000 metric tons) for processed water storage



March 1981 NRC:

"a decision could be deferred until after the water has been processed. Then the concentration of radionuclides remaining in the water will be low enough for the water to be stored safely onsite until the disposal decision is made ."



EM Environmental Management

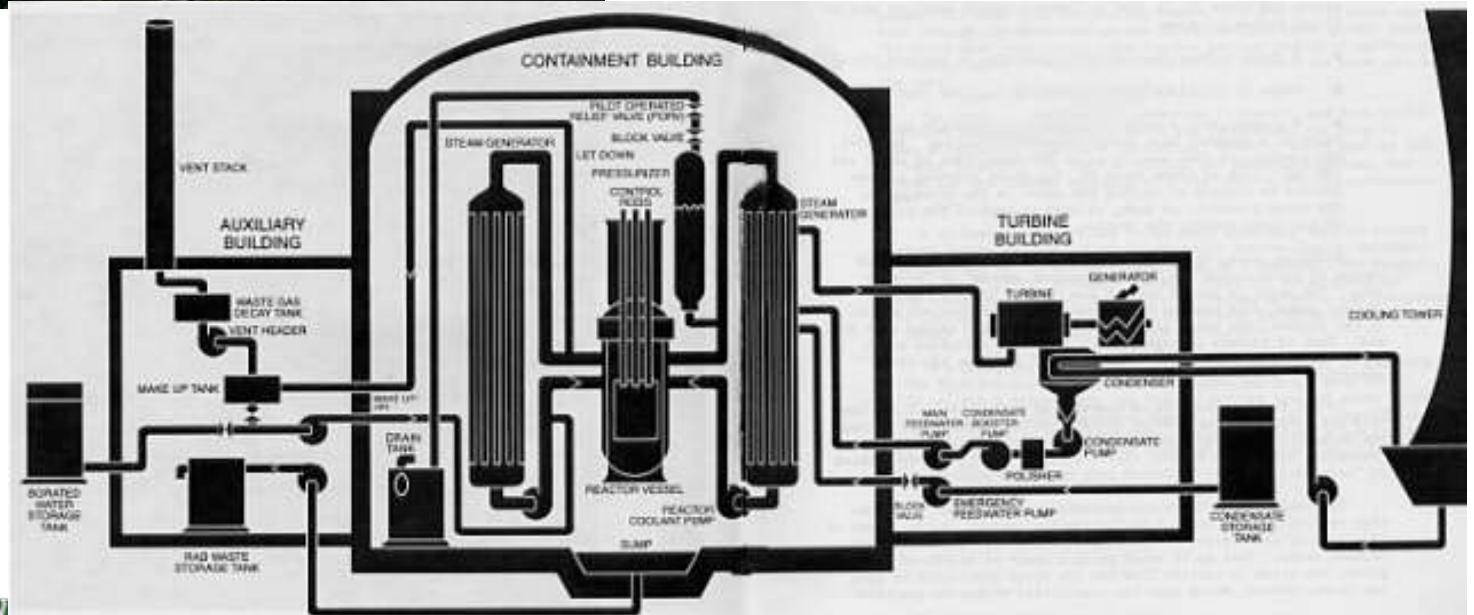
safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

TMI-2 Containment



Unit 2
Containment

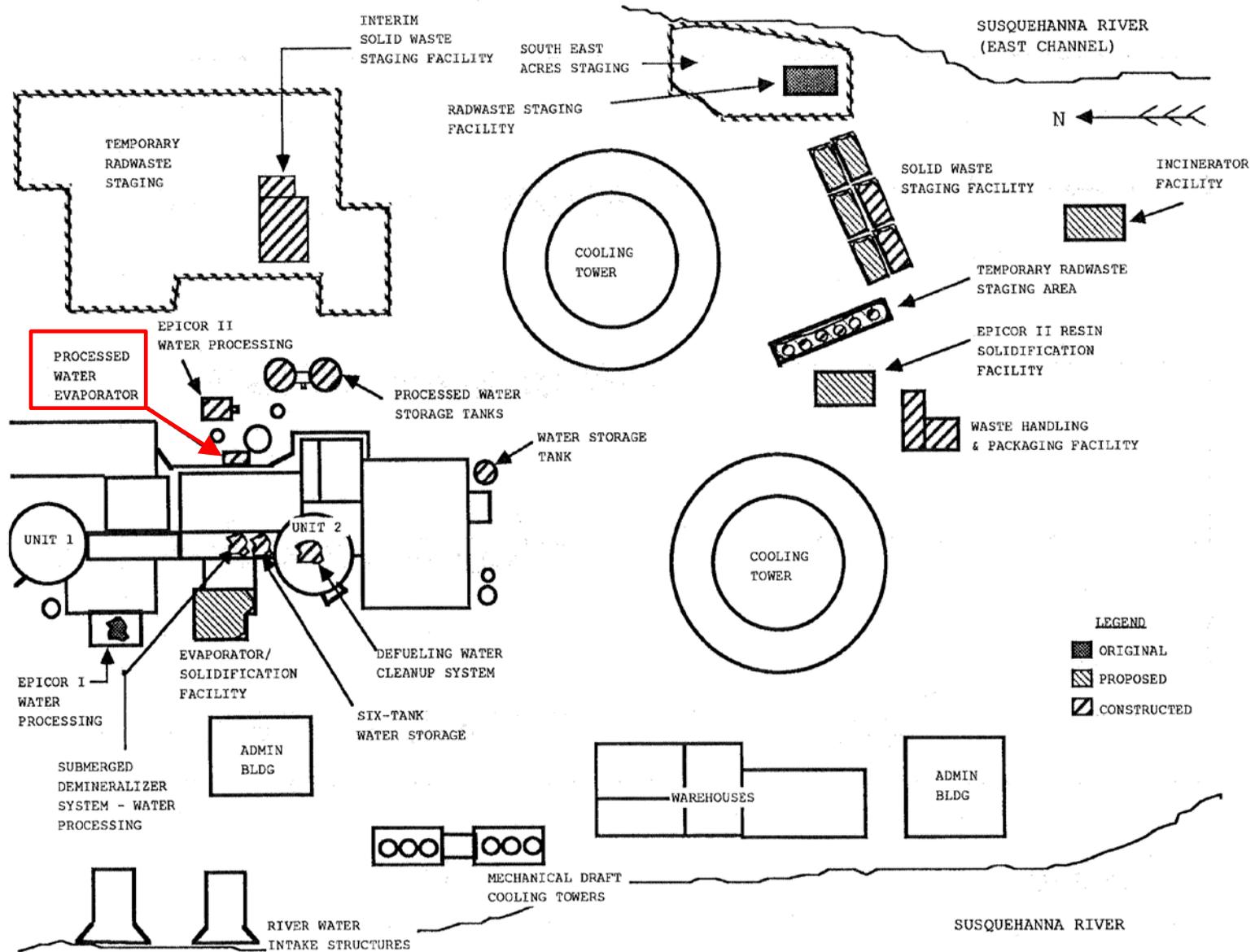


EM Enviro

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

TMI-2 Waste Management Facilities



LEGEND

- ORIGINAL
- ▨ PROPOSED
- ▩ CONSTRUCTED



EM I

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Why Evaporation was Preferred at TMI-2

- From the on-site and owner's viewpoint:
 - Know technology, system design was not complex
 - Could be designed, procured, installed, and operated without outside specialists
 - Reasonable cost
 - No offsite dependencies
 - Could begin in reasonable time

- Why not grouting the tritiated water and transport for disposal?
 - Technically feasible
 - On-site processing systems and buildings
 - Very large number of shipments
 - Very high cost for solidification, transport, and disposal.



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Evaluation Method Background

- ❑ The National Environmental Protection Act (NEPA) requires evaluation for government actions affecting the environment
- ❑ Three levels of evaluation; increasing order of complexity:
 - Categorical Exclusion
 - Environmental Assessment
 - Environmental Impact Statement
- ❑ Environmental Impact Statement Topics (General)
 - Environmental Resource Impacts (subject table below)
 - Cumulative Impacts
 - Irreversible and Irretrievable Commitment Of Resources
 - Unavoidable Adverse Impacts

1. Land Use	6. Socioeconomic	11. Transportation Safety
2. Geology and Soils	7. Water Resources	12. Traffic
3. Noise	8. Historic Archeological and Native American Resources	13. Environmental Justice
4. Greenhouse Gas Impacts and Climate Change	9. Biological Resources	
5. Air Quality	10. Human Health and Safety	



EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

TMI-2 Evaluation Method

- ❑ Programmatic Environmental Impact Statement (PEIS)
 - License approval for discharge at TMI-2 is a government action, therefore a PEIS was conducted
 - PEIS conducted by the NRC (using specialists from national laboratories, such as SRNL, PNNL)
- ❑ TMI-2 Impacts see later viewgraph....
- ❑ Note: Separate safety analysis and operating specifications for the evaporator; Similar to NRA approval of Implementation Plans for Fukushima Daiichi operations.



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Nine Options Evaluated by the NRC

Option	Disposition of Tritium	Disposition of Borate*
Evaporation, solidification of bottoms**, and disposal at a licensed burial ground	Atmosphere at TMI	Commercial LLW burial ground
Evaporation, solidification of bottoms, and retention onsite	Atmosphere at TMI	TMI Site
Distillation (closed cycle evaporation), solidification of bottoms, and disposal at a licensed burial ground followed by river disposal of the distillate.	Susquehanna River	Commercial LLW burial ground
Offsite Evaporation at the DOE Nevada Test Station (NTS)	Atmosphere at NTS	Shallow land burial at NTS
Solidification and permanent onsite storage of solidified waste	Atmosphere at TMI	Ground at TMI Site
Solidification and disposal at a commercial low-level waste site	Atmosphere at TMI	Commercial LLW burial ground
Long term (years) discharge to the Susquehanna River	Susquehanna River	Susquehanna River
Short term (days) discharge to the Susquehanna River	Susquehanna River	Susquehanna River
Liquids storage in tanks (the no-action alternative)	TMI	TMI Site

* In every case there would be some cesium-137 and strontium-90 associated with the borate; however, in those options employing re-treatment of the water, the quantity is approximately 1/10 of what it is without retreatment

** "bottoms" refers to the concentrated solids mixed with water in the evaporator.



EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Impacts and Range

Impacts	Range of Impacts
Bone dose to the offsite population	0 to 14 person-rem total population (0 to 0.14 person-Sv) 0 to 0.4 mrem to the maximally exposed offsite individual (0 to 4 uSv)
Total body dose to the offsite population	0 to 3 person-rem total population (0 to 0.03 person-Sv) 0 to 5 mrem to the maximally exposed offsite individual (0 to 50 uSv)
Thyroid dose to the offsite population	Up to 6 person-rem total population (0 to 0.06 person-Sv) Up to 4 mrem to the maximally exposed offsite individual (0 to 40 uSv)
Estimated number of radiation-caused cancer fatalities to the offsite population	0 to 0.0004
Estimated number of radiation-caused genetic disorders to the offsite population	0 to 0.002
Occupational dose	0 to 25 person-rem (0 to 0.25 Sv)
Estimated number of radiation-caused cancer fatalities to the worker population	0 to 0.003
Land commitment	0 to 49,000 square feet (0 to 4552 square meters)
Radioactive waste burial ground volume	0 to 460,000 cubic feet (0 to 13,026 cubic meters)
Cost to the Licensee	\$100 thousand to \$41 million
Time to complete	0 to 36 months
Number of traffic accidents	0 to 12
Estimate number of traffic fatalities	0 to 0.8
Maximum individual dose from accidents	0 to 60 mrem total body (0 to 600 uSv) 0 to 3000 mrem bone (0 to 30 mSv)
Population dose from accidents	0 to 0.7 person-rem bone (0 to 70mSv) 0 to 0.02 person-rem total body (0 to 0.2 mSv)



EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

NRC Conclusions (partial)

No alternative was found to be clearly preferable to the licensee's proposed action. The total estimated impact to persons living near TMI and to the work force from any alternative is very small. While the quantitative estimates for some potential impacts (i.e., cost, long-term commitment of space, and time required) were found to vary for some of the alternatives, **these differences were not judged sufficiently large to allow for either identification of a clearly preferable alternative or rejection of any of the nine evaluated alternatives.**

The NRC staff has concluded, based on this evaluation and after considering comments on the draft supplement, that the licensee's proposal to evaporate accident-generated water is an acceptable disposal plan. As identified in this report, evaporation of the water at the TMI site, followed by the solidification and disposal of the remaining low-level radioactive solids **will not significantly affect the quality of the human environment.**



EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Fifteen Options Rejected*

Ocean Disposal	Disposal at the Oak Ridge National Laboratory Hydrofracturing Facility
Pond evaporation onsite	Reuse
Distillation and solidification of the distillate	Land spraying at the Nevada Test Site (NTS)
Distillation followed by open cycle evaporation	Combined catalytic exchange treatment
Onsite cooling tower evaporation and concentrates disposal to the river	Water distillation treatment
Deep-well injection at Three Mile Island	High-altitude disposal
Deep well injection at the Nevada Test Site	Open cycle evaporation at Maxey Flats, Kentucky
Crib disposal at Hanford	

* Discussion of reasons are provided on a separate handout

C. Negin Personal Observations

- ❑ Several evaluations of isotopic separation for waste water were negative; leads me to conclude the same will result for Fukushima Daiichi
- ❑ The NRC's health and safety summary of acceptable options leads me to infer the same will result for Fukushima Daiichi
- ❑ If not allowed to discharge to the ocean at the site, barging to a selected location reasonably offshore should be an option.
- ❑ Regarding Evaporation
 - Operation at the site must consider weather conditions for condensation on the site as well as rain and snow
 - Evaporation could also be done offshore, but would be costly to install and operate on a ship or barge



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Stakeholder Involvement at TMI-2

- Press Briefings; immediately after the accident
- Information meeting with residents in the beginning
- Advisory Panel formed November 1980, 20 months after the accident
- Public invited to submit comments on the Programmatic Environmental Impact Statement (PEIS)
- Eight State agencies were invited to comment on the PEIS



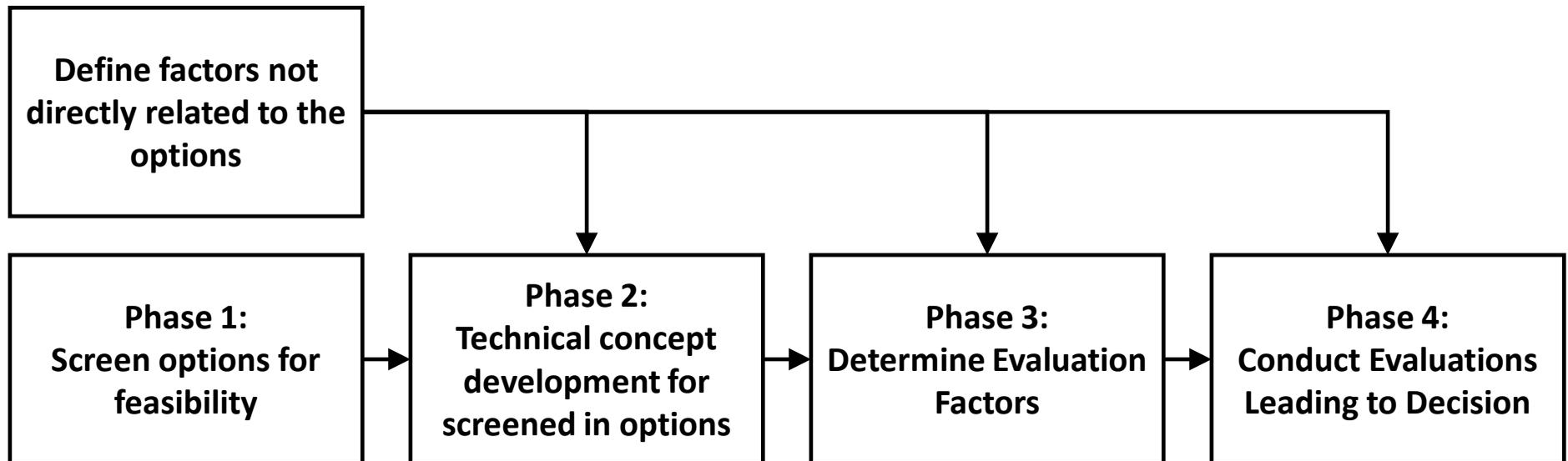
EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Considerations for the Path Forward

- ❑ Factors that can affect evaluations
- ❑ Technical sequence for evaluating options:
 - “Screening” to reduce the number options to be evaluated
 - Develop sufficient details for those remaining to support the evaluation
 - Conduct evaluation of the impacts to support decisions



Examples of Factors not Directly Related to the Options

- ❑ Criteria for what is acceptable with regard to dose impact, population dose, maximum exposed individual, and worker
- ❑ Pathways analysis; describe steps, analytical methods to be used, form of results, etc. for dose to humans via all exposure paths for tritium
- ❑ Organization and Stakeholders:
 - Who has prime responsibility for conducting evaluations? NRA? METI? TEPCO?
 - Who will do an independent review of the analysis, what are required qualifications, the review approach, etc.
 - Is a qualified stakeholder group to be involved in following the analyses (like the NRC's advisory panel)?
 - Prefectures' review and public comment submittal and response
- ❑ Interpretation of the London convention; is this "dumping waste" if concentrations are similar to standard discharges from operating plants?
- ❑ Impacts of "no action" (continued storage) for the long term
- ❑ Elements of a monitoring program once an option is selected for implementation



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Phase 1: Screen Options for Feasibility (1)

1. Identify all options to be screened identifying the combination of the following phases as applicable to each
 - Processing/conditioning
 - Packaging/containerizing
 - Transportation
 - Disposal of tritium, other radionuclides (Cs, Sr, etc), and other constituents (e.g., borate)
2. Decide on technical screening factors, such as:
 - Past experience with the method
 - Technology maturity, degree of R&D needed
 - Technical data needed (example, geological conditions for deep well disposal)
 - Will a demonstration pilot plant be needed?
 - Processing rate



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Phase 1: Screen Options for Feasibility (2)

3. Decide on project implementation screening factors, such as:
 - Order of magnitude cost
 - Timeline
 - Effect on other operations
4. Conduct screening (Example: Judgment; maybe Kepner-Tregoe method)
 - Decide if any can be eliminated outright as not feasible
 - Conduct screening to select those for detailed evaluation



Screening Evaluation Approach

- What is the Kepner-Tregoe Method?
- Partially shown in the Criteria and Scoring viewgraphs #10 through #14 in the March 13 presentation by Stuart Knipe
- Scoring and ranking is done by a knowledgeable group of individuals
- When ranking is completed, the final step is to adjust using judgment to consider less tangible factors



Phase 2: Technical Concept Development

1. Describe functions and steps
2. Concept description identifying facilities, systems, and equipment.
3. Overview description of the operations (for example, with high level process flow diagram, etc.).
4. Environmental and public exposure pathways for the release of water considering tritium, other residual radionuclides, total quantity, periods over which the disposal would occur, and other parameters that may be unique to each option.
5. Order of magnitude cost estimate for capital investment, overall project management, operations, and other important cost elements.



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Phase 3: Determine Evaluation Factors

1. Environmental Resource

Impact factors

- Land use
- Geology and soils
- Noise
- Greenhouse gas
- Air Quality
- Socioeconomic
- Water resources
- Historical preservation
- Biological resources
- Transportation safety
- Traffic impact

2. Human Health and Safety Factors

- Bone dose to the offsite population
- Total body dose to the offsite population
- Thyroid dose to the offsite population
- Estimated number of radiation-caused cancer fatalities to the offsite population
- Estimated number of radiation-caused genetic disorders to the offsite population
- Occupational dose
- Estimated number of radiation-caused cancer fatalities to the worker population
- Maximum individual dose from accidents
- Population dose from accidents

3. Implementation factors

- Laws, treaties, regulations, and standards that could be a barrier
- Radioactive waste burial ground volume
- Cost
- Time to complete



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Phase 4: Conduct Evaluations & Decide

1. Evaluate screened options for the selected factors and draft the results
2. Submit for prefecture review and public comment
3. Resolve prefecture and public comments (could require including an option that was screened out)
4. Recommend one or more options for implementation
5. Decide



At the Hanford Site

- ❑ Disposal of low tritium concentration, high volume tritiated water at Hanford
- ❑ Overall conclusion was that tritium removal technologies are not economically viable for the large volumes of water with low concentrations.
- ❑ Deep well injection selected
- ❑ From December 1995, through August 2010, approximately 416 (15.4 tBq) curies of tritium were discharged in 10^9 liters of water; the concentrations were very low compared with TMI-2.
- ❑ Pacific Northwest National Laboratory is the best source for further details.

TABLE
Summary of Tritium Removal and Mitigation Technologies

Technology	Year Report Prepared						
	1994	1995	1997	1999	2001	2004	2009
Distillation	D, h		D, h				
Gaseous diffusion	D, h						
Laser isotope separation	T, h	T, h	T, h				
Electrolysis	D, h	D, h	D, h				
Combined electrolysis and catalytic exchange (CECE)	D, h	D, h	D, h	D, h	D, h	D, h	D, h
Combined electrolysis catalytic exchange with vapor phase catalytic exchange					D, h		
Membrane separation process	T, l	T, l	T, l				
Cryogenic distillation	D, h	D, h	D, h	D, h	D, h		
Bithermal catalytic exchange		D, h		D, h	D, h	D, h	D, h
Isotopic exchange, air sparge		T, l					
Finely divided nickel catalyst		O					
Separation by Metanetix Inc.		O					
Substituted naphthalene		O					
Crown Ether Complexes		O					
Girdler-sulfide Process			D, h				
Palladium Membrane Reactor							D, h
GE Integrated Systems							D, h
Liquid phase catalytic exchange with solid oxide electrolyte			D, h	D, h	D, h		
Liquid phase catalytic exchange with high-temperature steam electrolysis (Hot Elly)			D, h	T, l	T, l		
Sulfur resin ion exchange			O				
Metal hydride exchange			T, h				
Soil column discharge	D, l, h		D, l, h				
Barrier formation			O	D, l, h	D, l, h	D, l, h	D, l, h
Air sparging			T, l				
Dual-temperature liquid-phase catalytic exchange				D, h			
Tritium resin separation process				T, l	T, l	T, l	T, l
Kinetic-isotope effect for concentrating tritium				T, l	T, l		
Pumping and recharging				D, l	D, l	D, l	D, l
Phytoremediation					D, l	D, l	D, l
Evaporation						D, l	D, l

Maturity:

- D = Demonstrated or developed technology that has been successfully applied in the field
- T = Testing or theoretical stage of development
- O = Observation indicates a potential process needing funding to continue

Applicability:

- l = Technology is applicable to larger wastewater volumes having lower levels of tritium (less than 1.0E-05 Ci/L)
- h = Technology is applicable to smaller wastewater volumes having higher levels of tritium (greater than 1.0E-05 Ci/L)



At the Savannah River Site

- ❑ From Task Force Meeting 1 presentation
 - Overview of the Savannah River Site
 - Status and Practicality of Detritiation WSRC-RP-96-0075 is related to environmental remediation
- ❑ P Reactor Disassembly Basin Evaporation during In Situ Decommissioning (Entombment) in 2010
- ❑ Tritium Separation Processes
- ❑ Savannah River National Laboratories is the best source for further details

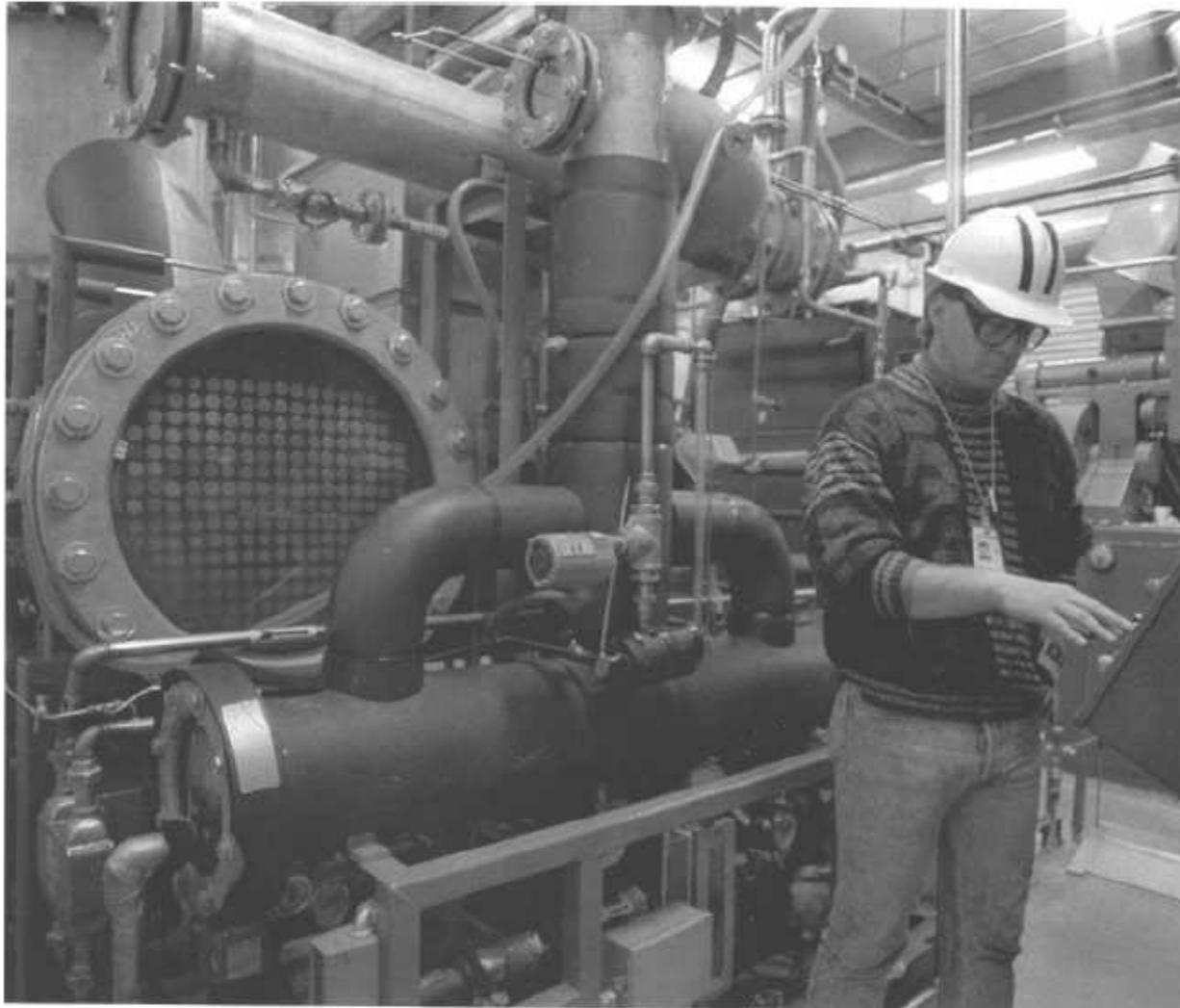


EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

TMI-2 Evaporation Operations

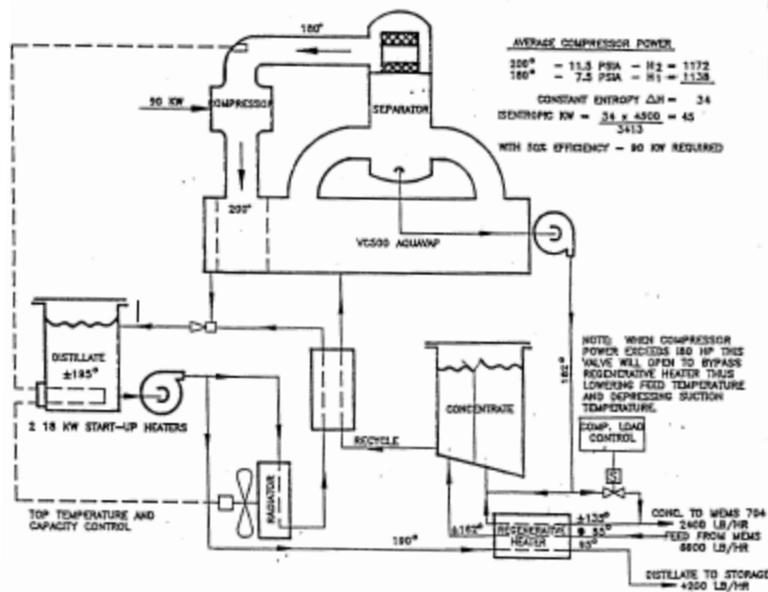
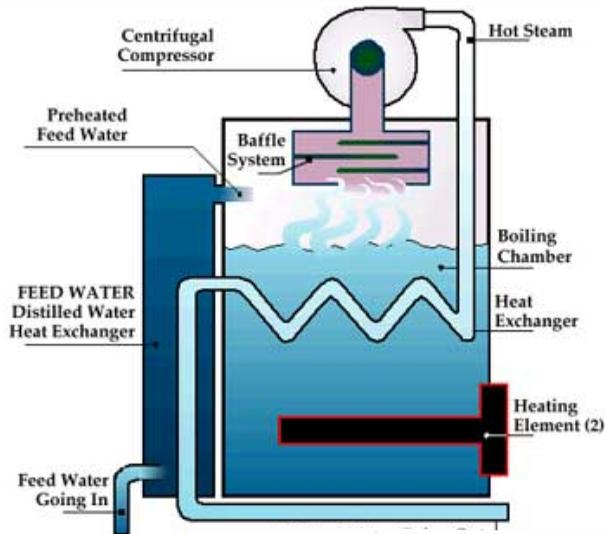


EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Vapor Compression Distillation

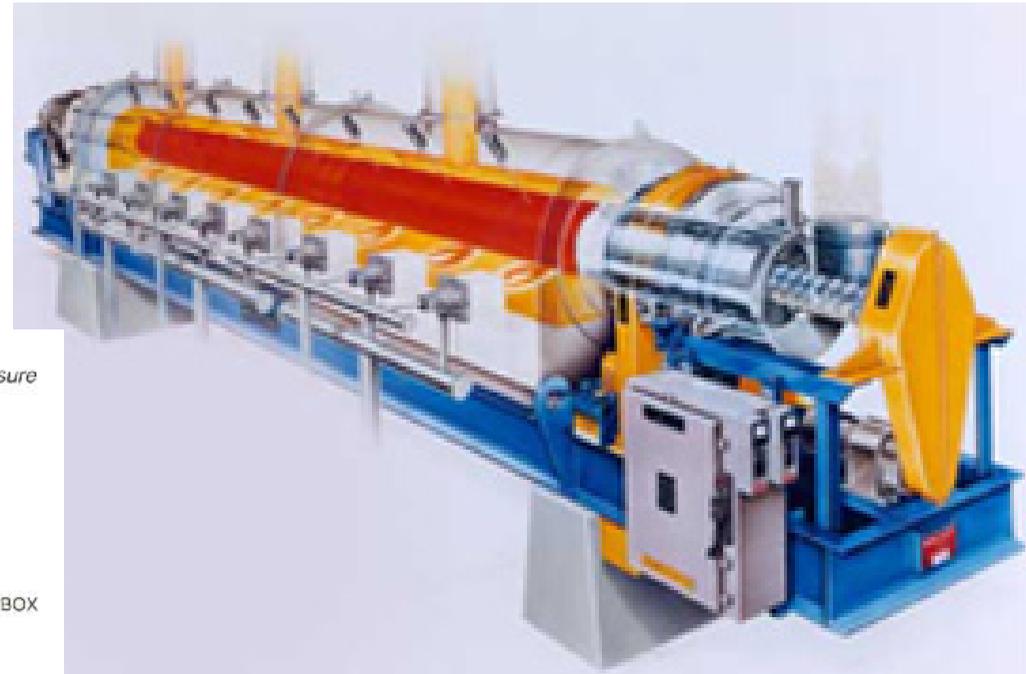


EM Environmental Management

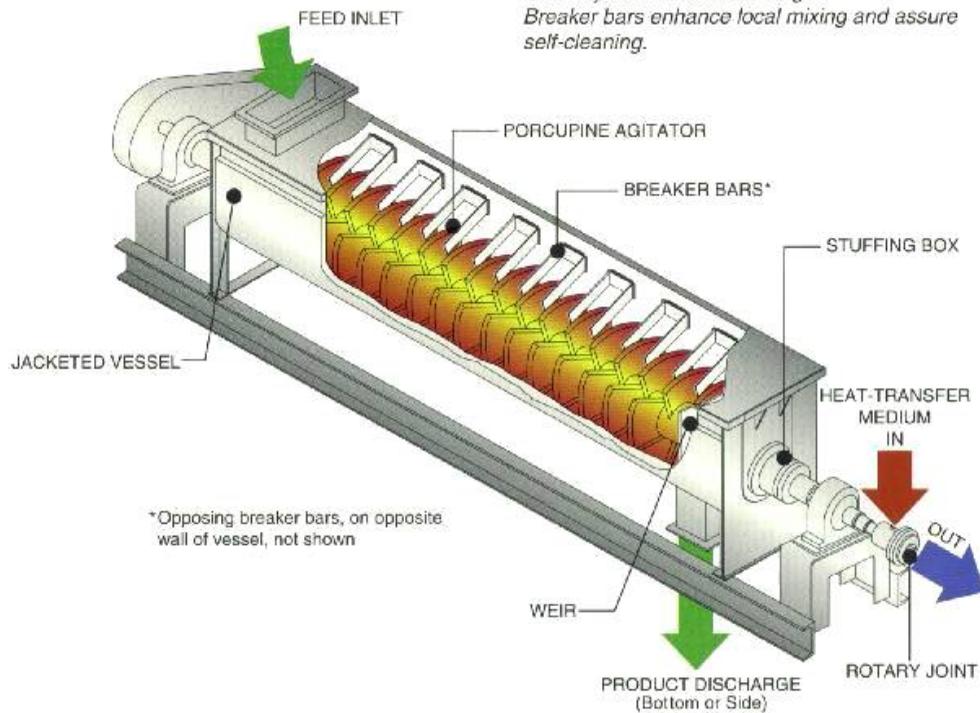
safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Calciner



*Cutaway shows unitized design.
Breaker bars enhance local mixing and assure
self-cleaning.*

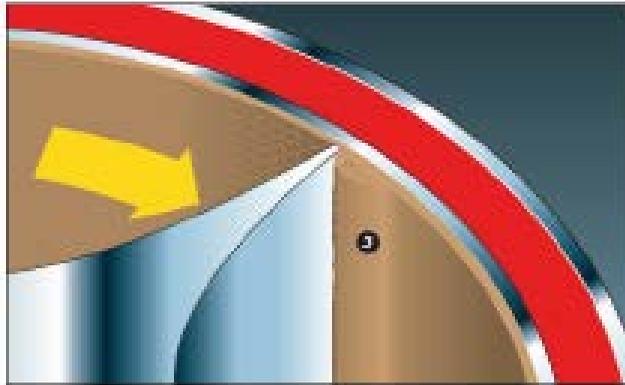


EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Wiped Film Evaporator



An inherently simple device, the LCI agitated thin-film processor consists of two major assemblies: a heated body and a rotor. Product enters ❶ above the heated zone and is evenly distributed over the unit's inner surface by the rotor. As the product spirals ❷ down the wall, bow waves ❸ developed by the rotor blades generate highly turbulent flow, resulting in optimum heat flux and mass transfer.

Volatile components are rapidly evaporated. Vapors flow either countercurrently ❹ or co-currently ❺ through the unit, depending on the application. In both cases, vapors are ready for condensing or subsequent processing.

Nonvolatile components are discharged at the outlet ❻. Continuous washing by the bow waves minimizes fouling of the thermal wall where product or residue is concentrated most.

The combination of

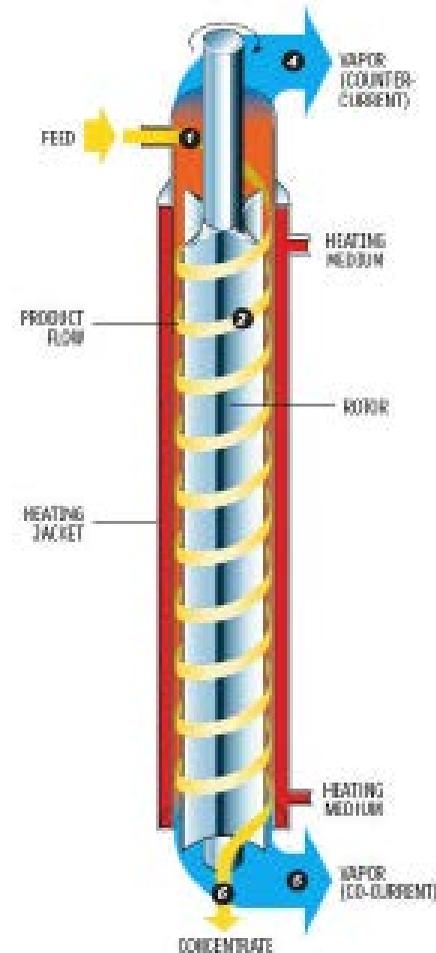
- extremely short residence time
- high turbulence
- narrow residence time distribution
- rapid surface renewal

permits the LCI thin-film evaporator to successfully handle heat-sensitive, viscous, and fouling-type fluids.

HEAT TRANSFER RATES VS. PROCESS PARAMETERS

System design must consider many variables such as feed rate, temperature, rotor speed, blade clearance, wall thickness, construction materials, and the physical and thermodynamic properties of processed materials.

These variables are interrelated in how they affect performance. Selecting the optimum combination to best solve your processing problems is just one of LCI's valuable services.



CONCEPTUAL REPRESENTATION OF A VERTICAL AGITATED THIN-FILM PROCESSOR

Source: <http://www.lci.com> and www.purdue.edu

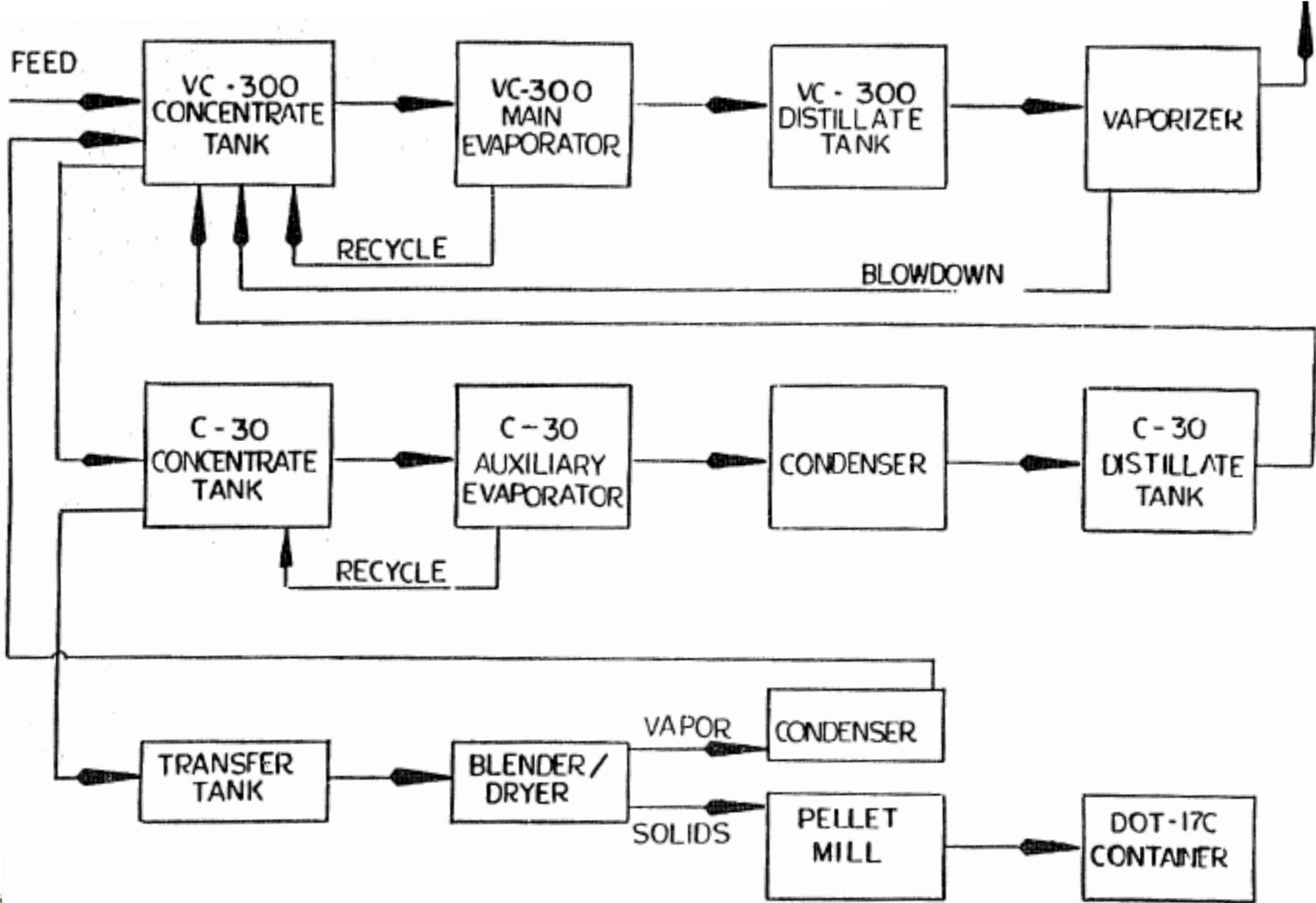


EM Environmental Management

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Process Water Disposal System Block Diagram



Block Diagram Description

The PWDS disposed of the AGW via a two-stage evaporation process.

The PWDS consists of:

1. a vapor recompression distillation unit (main evaporator) that distilled the processed water in a closed cycle and recycled the purified distillate for subsequent release by vaporization;
2. an auxiliary evaporator that further concentrated the bottoms from the main evaporator;
3. a flash vaporizer unit that heated and vaporized the purified distillate from the main evaporator and released the vapor to the atmosphere in a controlled and monitored manner;
4. a waste dryer that further evaporated water from the concentrated waste, and produced a dry solid: and
5. a packaging system that prepared the dry solid waste in containers acceptable for shipment and burial in a commercial low level radioactive waste disposal site.



EM *Environmental Management*

safety ❖ performance ❖ cleanup ❖ closure

www.em.doe.gov

Evaporation Timeline

1980	The Susquehanna Valley Alliance, based in Lancaster, successfully prevented GPU/Met Ed from dumping 700,000 gallons (2650 metric ton) of radioactive water into the Susquehanna River.
December 1990	GPU began evaporating 2.3 million gallons (8706 metric tons) of accident generated radioactive water (AGW). The evaporator was shut down two days after operations commenced due to mechanical problems.
January 1991	The evaporator was shut down four times due to electrical and mechanical "difficulties."
February 1991	An operator "inadvertently flooded the vaporizer" and several days later an operator was discovered "apparently sleeping."
March, 1991	A "small quantity of accident generated water was vaporized" without being processed.
April-May 1991	The evaporator was shut down for most of this period so GPU could "rewrite the main operating procedure." The Nuclear Regulatory Commission (NRC) issued a Notice of Violation related to evaporator operations
February 1992	The evaporator was shut down again due to the failure of the blender dryer. Replacement of the blender was delayed until August.
May 1992	GPU decided to use a "temporary" blender-dryer until a permanent replacement was installed in August..
August-Sept. 1992	Some of the water in the evaporator's borated water storage tank was "processed" twice due to "slightly higher activity levels."
Nov. 1992	Approximately 600,000 gallons (2271 metric tons) of AGW was processed twice due to "slightly higher activity levels."
August, 1993	Evaporation of 2.3 million gallon (8706 metric tons) of AGW was completed over six months behind schedule. The evaporator will be disassembled and removed from the site by October, 1993.
October 28, 1993	According to the Pennsylvania Department of Environmental Resources, the total activity during evaporation was 658 curies (24.3 teraBq)of tritium or 1 to 1.3 mR (.01 to .013 mSv) dose to the public.



Tritium

The French situation

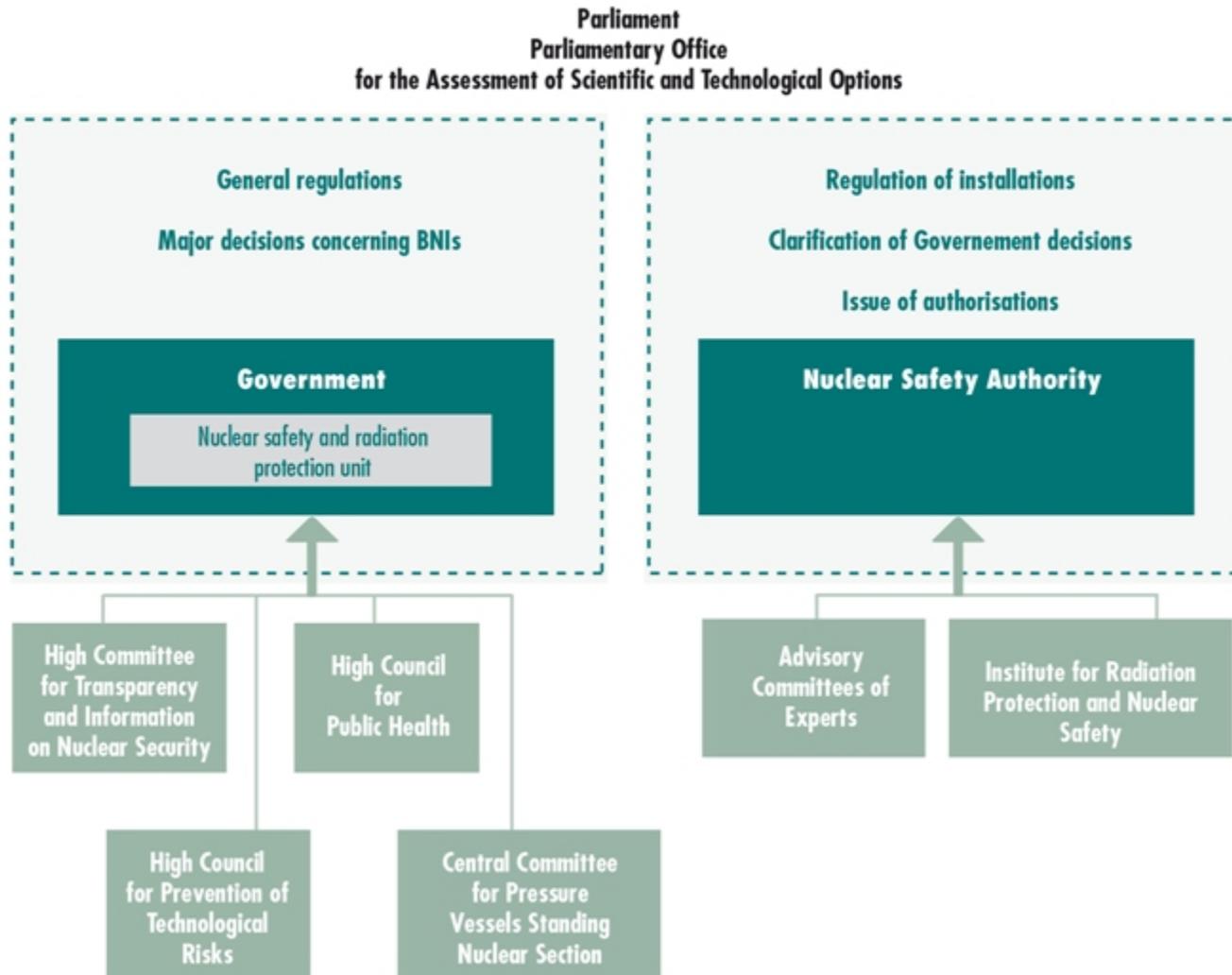
Jean-Luc LACHAUME
Deputy Director General
ASN

- The regulation of the discharges of tritium from nuclear facilities in France
- The tritium controversy in France
=> « The Tritium white book »

The regulation of the discharges of tritium from nuclear facilities in France

Regulation of the discharges of tritium from nuclear facilities

Regulation of nuclear safety and radiation protection in France





- **A board of 5 commissioners**

- A full-time job
- A non-renewable 6 year mandate

ASN Chairman:

Pierre-Franck Chevet (appointed in 2012 for 6 years)

Commissioners:

Michel Bourguignon (appointed in 2008 for 6 years)

Jean-Jacques Dumont (appointed in 2010 for 6 years)

Philippe Jamet (appointed in 2010 for 6 years)

Margot Tirmarche (appointed in 2012 for 6 years)



Designated by



President of the Republic

President of the Senate

President of the National Assembly

- **ASN Commission Tasks:**

- Defines ASN general policy
- Takes the major decisions
- Adopts public statements on key issues within ASN competence



Regulation of the discharges of tritium from nuclear facilities

ASN duties

Regulates

Authorizes

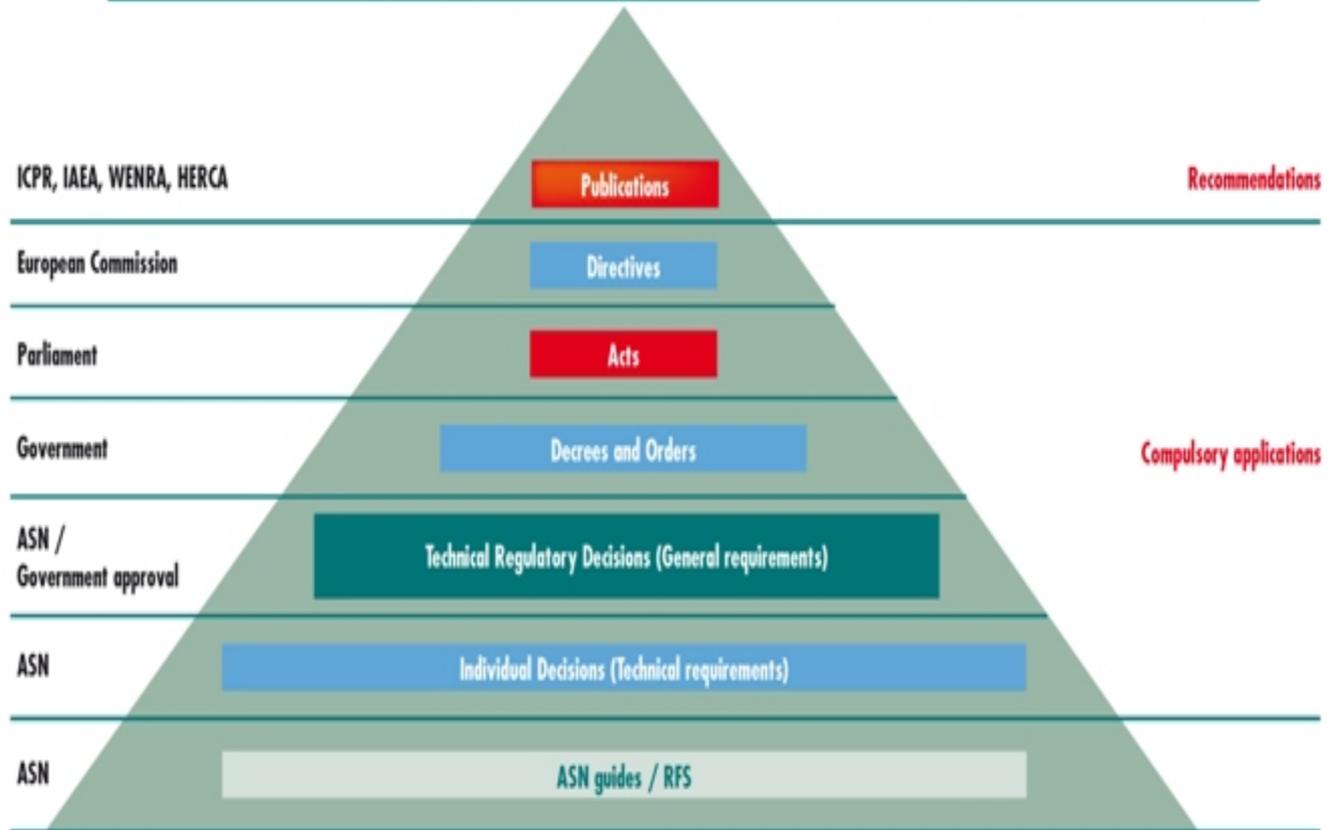
Controls: inspections and enforcement actions

Contributes to the emergency situations response

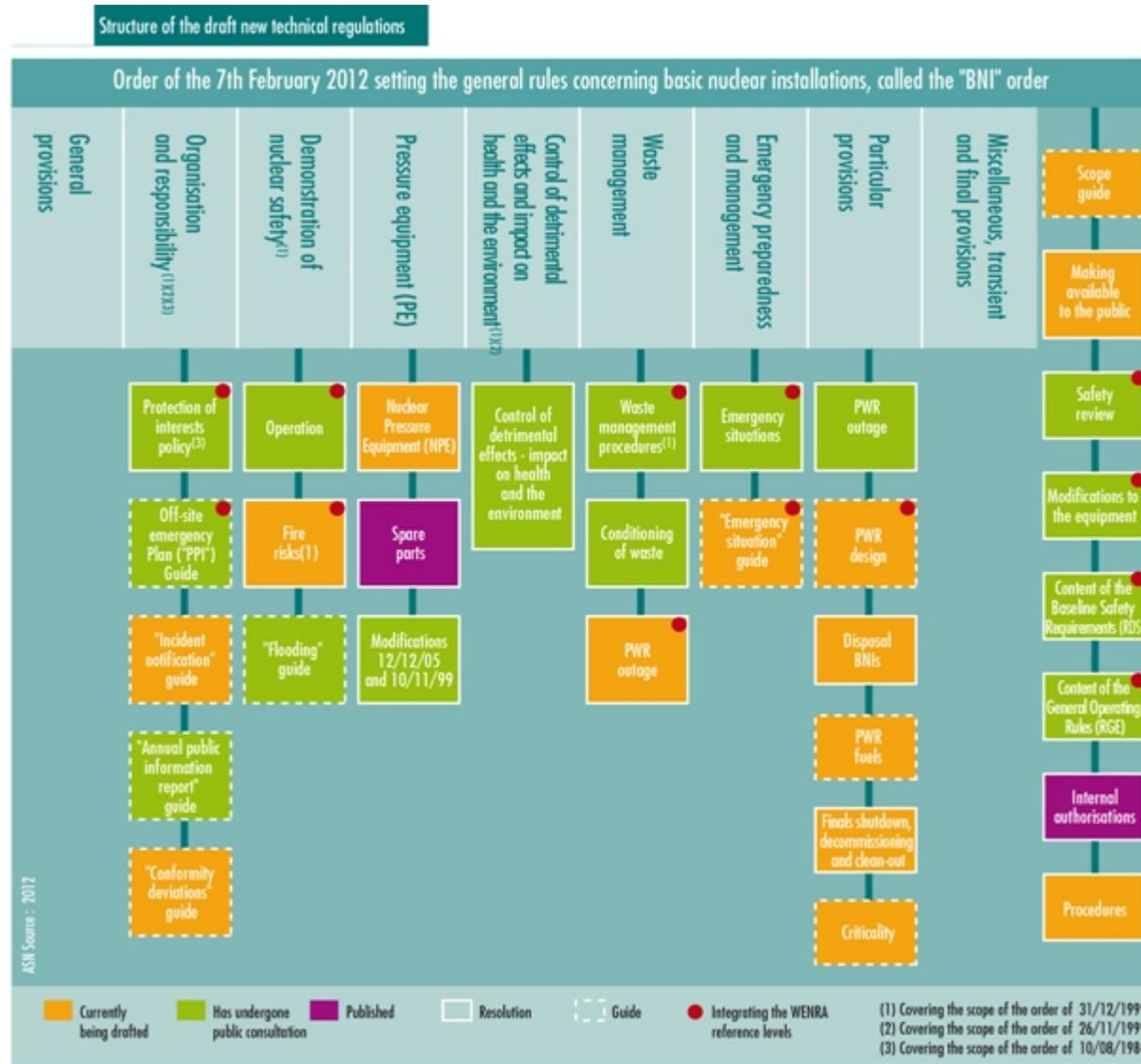
Informs the public

Regulation of the releases of tritium from nuclear facilities

Various levels of regulation in the field of small-scale nuclear activities in France (orientations, recommendations): legally binding or non-binding nature



Regulation of the discharges of tritium from nuclear facilities



Regulation of the discharges of tritium from nuclear facilities

- For each nuclear installation in France, there are two ASN's resolutions
 - water intake and discharges limits (gaseous, liquid)
 - general requirements (water intake, discharges operations, environmental and discharges monitoring...)
- The limit values for emissions, water intakes, and effluent discharges from the installation are set on the basis of the best available techniques under technically and economically acceptable conditions, considering the characteristics of the installation, its geographical location and the local environmental conditions

- Gaseous discharges:
 - Usual limits (NPP) :
 - Yearly total discharged activity: 5 TBq (2 reactors), 8 TBq (4 reactors)
 - Weekly added volume activity, estimated after dispersion at ground level: 50 Bq/m³
 - Control:
 - Sampling at the stack with bubbling systems (2 jars), measurements for each period (7 to 10 days), DL = 40 Bq/m³



Regulation of the releases of tritium from nuclear facilities

- Liquid discharges (NPP) :
 - Usual limits:
 - 40/45 TBq (2 reactors)
 - discharged activity in the river (mixing area) : Volume activity in the river shall not be above: 280 Bq/l
- Control:
 - Measurement of each tank before discharge: DL=200 Bq/l
 - Sampling at discharge location and measurement in laboratory
 - Sampling in the river at the “well mixed” location and measurement in laboratory: DT≈10 Bq/L

Environment

- Atmosphere:
 - HTO in Air: $DT \approx 10$ Bq/L
 - HTO in precipitation: $DT \approx 10$ Bq/L

- Water body:
 - If the water is to be used for human consumption: a tritium activity equal or above 100 Bq/L implies an analysis to verify the absence of artificial radionuclides
 - For other uses: $DT \approx 10$ Bq/L
 - Piezometer: $DT \approx 10$ Bq/L

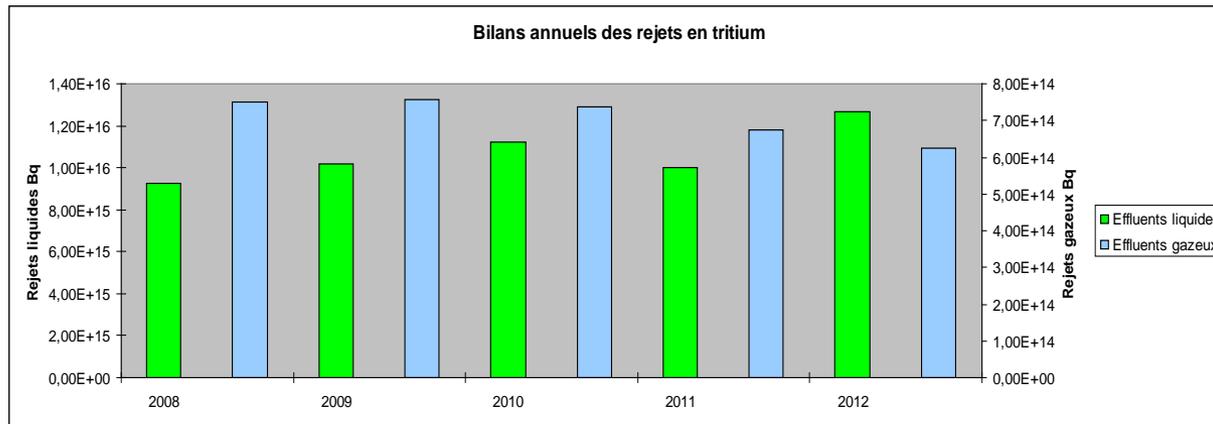
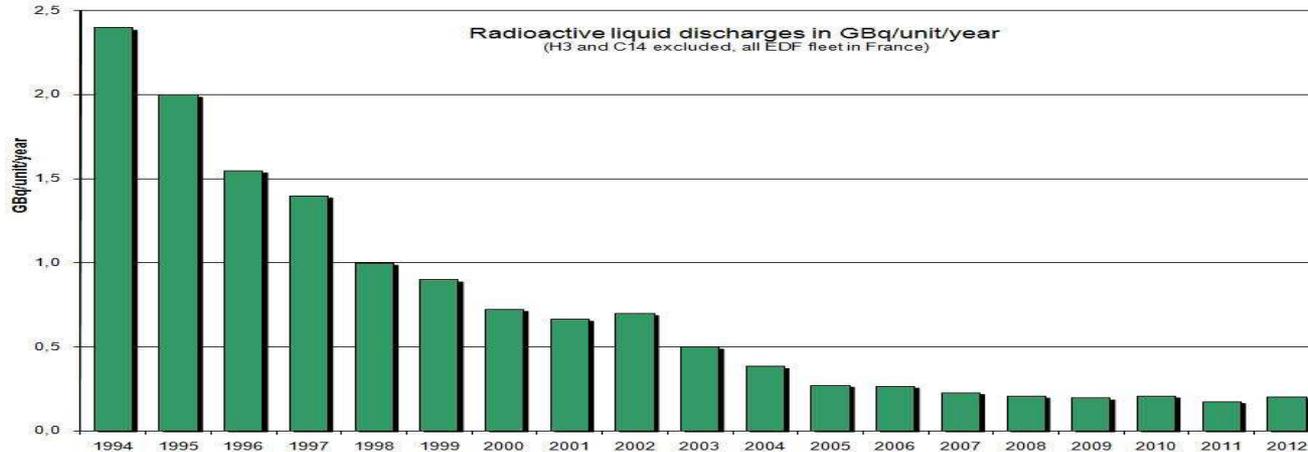


Regulation of the discharges of tritium from nuclear facilities

Tritium discharges in France

	Annual average releases	
	Liquid releases (TBq/year)	Air releases (TBq/year)
La Hague	12 000	70
Parc EDF (58 reactors)	1 000	30
Research (CEA)	20 (99% Marcoule)	700 (85% Marcoule and Valduc)

Conclusion



Radioactive discharges have very much decreased during the last 20 years in France. However, Tritium discharges are stable and are an issue for the stakeholders
=> The tritium white book



The Tritium white book



The Tritium “white book”

Context in 2007:

- Global agreement about the low toxicity of tritium and no technical possibilities for treating tritium in the industry; agreement about the low health impact of tritium
- France consider that the way of dealing with tritium should be periodically reviewed
- End of 2007: ASN decided to create two independent working groups with the stakeholders
 - The "tritium impact" group: inventory of the scientific knowledge concerning tritium's impact on health;
 - The "defense in depth" group: state of the art about technical possibilities for treating tritium.

Results:

- A « state-of-art » white book is published the 8th of July 2010
 - <http://www.asn.fr/sites/tritium/>



The Tritium “white book”

Tritium Working Groups Recommendations

<http://www.asn.fr/sites/tritium/fichiers/summary-of-work-and-recommendations-tritium-impact.pdf>

The issue of bioaccumulation

Measurements

Health effects of tritium

<http://www.asn.fr/sites/tritium/fichiers/summary-of-work-and-recommendations-defence.pdf>

Recommendations from the “Tritium Impact” working group

All these recommendations are taken into account in the ASN position

<http://www.asn.fr/sites/tritium/fichiers/position-and-action-plan.pdf>



The Tritium “white book”

ASN position

1 ASN action plan

1.1 Measurements

There is currently no standardised measurement protocol for the various physico-chemical forms of tritium, in particular the various organic forms of tritium (exchangeable and non-exchangeable). The fact that there is no standardised method makes it difficult to interpret existing studies and data. The CEA’s CETAMA (commission for the establishment of analysis methods) has started work to define shared and recognised measurement protocols.

In the ASN’s view, this work:

- must lead to the production of a guide to the measurement of organically bound tritium;
- is a vital first step prior to launching further studies.



The Tritium “white book”

ASN position

1 ASN action plan

1.2 Control of discharges

It is currently felt to be unrealistic to detritiate discharges from nuclear reactors and the La Hague fuel reprocessing plant at an acceptable cost using the best technologies currently available. In addition, detritiation would only have a limited effect on the radiological impact from these facilities. Given the increase observed in tritium discharges from civilian nuclear facilities and the absence of a detritiation method, the ASN, as part of the development of defence in depth, considers that:

- publishing the quantities discharged for each facility on an annual basis will ensure a long-term, reliable inventory of sources of tritium production. The public should be regularly and specifically informed of this inventory of tritium discharges by nuclear operators;
- accounting for discharges from all facilities should continue to be managed in all circumstances, as is the case today;
- a “technology watch” should be set up with respect to detritiation technologies.



The Tritium “white book”

ASN position

1 ASN action plan

1.3 Environmental monitoring

Tritium monitoring in the environment and throughout the food chain must be supplemented as follows:

- measurements performed must take into account the physico-chemical forms present. The ASN will consequently ask operators to characterise the physico-chemical forms of tritium in the discharges, particularly with regard to any possible organic precursors (small tritiated organic molecules);
- sampling plans in the different compartments of the environment must be undisputed and shared. In particular, the choice of animal and plant species to be measured must be reviewed in order to remove any species bias.



The Tritium “white book”

ASN position

1 ASN action plan

1.4 Impact assessment

Some studies mention the potential for underestimating the relative biological effectiveness (RBE) of tritium radiation. The ASN will ask the ICRP to review the value of the tritium weighting factor (w_R) used in calculating effective doses. Even before the ICRP’s response is known, the ASN will ask operators to supplement the radiological impact studies for their projects with a critical study in which a variant using a tritium weighting factor (w_R) of two is included.



The Tritium “white book”

ASN position

2 Research themes

Current knowledge about the biological effects of tritium is in some areas rather fragmentary. The following topics should be investigated further by research bodies in order to answer all the questions:

- Harmonisation of dose assessment methods according to the physico-chemical form of the tritium, contamination pathway and length of exposure;
- Studies into the effects of tritium exposure on embryos and fetuses;
- Investigation of new approaches to the potential induction of hereditary effects.

In most cases, this research will require international cooperation.



The Tritium “white book”

Tritium Monitoring Committee

Finally, the ASN believes that all stakeholders must continue to think about and discuss these issues and to this end suggests the establishment of a supervisory committee to oversee the actions undertaken following the recommendations of the working groups.

- A monitoring committee was created
 - to follow action plan progress with all stakeholders
 - to oversee the actions undertaken following the recommendations of the working groups
- A meeting once a year (2011, 2012, 2013)
 - Progress on research and ideas ;
 - Action plan



The Tritium “white book”

ASN action plan : measurements

French interlaboratory test (ILT) was organized in 2010 in biological sample for the measurement of OBT : ASN delivered specific approvals for OBT

Standard for OBT measurement (AFNOR/BNEN) : ASN ask french standardisation organisation to provide a standard for OBT measurement. A draft has been established

The Tritium “white book”

ASN action plan : environmental and discharges monitoring

ASN publishes on a web site the quantities discharged for each facility on an annual basis : <http://www.asn.fr/sites/tritium/>

- annual liquid and gaseous discharges ;
- estimation of the doses received by the public based on the actual discharges
- dose share of tritium





The Tritium “white book” ASN action plan : environmental and discharges monitoring

ASN asked operators to demonstrate that they release only HTO

Measurement of OBT is required by regulation in environmental monitoring (ASN Resolution 2013-DC-0360 of 16th July 2013 relative to control of nuisance effects and the impact of basic nuclear installations on health and the environment) :

- sampling of aquatic flora and fauna (yearly) ;
- sampling of the main agricultural produces, particularly in areas situated downwind of the prevailing winds (yearly)



The Tritium “white book”

ASN action plan :

Impact assessment

ASN asked the ICRP to review the value of the tritium weighting factor (w_R) used in calculating effective doses.

ICRP response

ASN asked operators to supplement the radiological impact studies for their projects with a critical study in which a variant using a tritium weighting factor (w_R) of two is included.

General Conclusion

- Important decrease of the radioactive discharges in France during the last 20 years; however, the tritium discharges remain stable
- The Tritium whitebook: a fruitful experience still going on

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Environmental behaviour of tritium released by nuclear facilities in marine and terrestrial ecosystems:

State-of-the-art and examples



Denis Maro

(IRSN, Laboratoire de Radioécologie de
Cherbourg-Octeville
Mail: denis.maro@irsn.fr)

Task force tritium

METI, Tokyo
March 13, 2014

- ***Context***
- ***Objectives***
- ***Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems***
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - Marine ecosystem
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystems
- ***Conclusions***

- **Context**
- *Objectives*
- *Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems*
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - Marine ecosystem
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystems
- *Conclusions*

Why is it important to study the transfer of tritium in the environment?

Except for rare gases, the amounts (Bq) of tritium from controlled release are higher than for other radionuclides (10-100 times)

Increase of tritium releases in France

- Tritium is released by Nuclear Power Plants (NPP), Nuclear Reprocessing Plants (NRP, e.g. AREVA NC La Hague), research centers and defense facilities;
- In the future, the releases will increase with the commissioning of new built nuclear facilities like the Laser Megajoule (LMJ), the European Pressurized Reactor (EPR) and the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER).

Uncertainties on transfers in marine and terrestrial ecosystems

- existing uncertainties on transfer knowledge in marine and terrestrial ecosystems, e.g. transfer kinetics of tritiated water (HTO), tritiated hydrogen (HT) and Organically Bound Tritium (OBT) in the different compartments of ecosystems.

Anticipate concerns from the public

Main document in France, white paper on tritium (2010), coordinated by ASN (French Nuclear Safety Authority): see lecture on tritium “the French situation” by J. L. Lachaume (ASN, Deputy Director General) at METI.

asn AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

Tritium

Carte des rejets tritium

Accueil > English version

English version

Context

Tritium is a hydrogen isotope that is a low-energy beta emitter (mean energy 5.7 keV). The most commonly-found form in the biosphere is tritiated water and the dominant exposure route is ingestion. The radiotoxicity of tritium is low. The overall impact of tritium releases in France is also low, with an annual effective dose of roughly one μSv or less for the reference groups.

Radioactive releases in the environment around civilian nuclear facilities have significantly decreased over the last few decades, with the exception of tritium. Discharges of this element are forecast to increase due to expected changes in the fuel management methods used by the NPP, and also due to new tritium-emitting facilities, including new power plants that are to be built, and the ITER project.

In late 2007, papers published in the UK (RIFE 11 report, study by the HPA's Advisory Group on Ionising Radiation (AGIR)) raised questions as to the behaviour of tritium in the environment, in particular focusing on potential accumulation in organisms of organically bound tritium (OBT) from tritium released into the environment and on methods for assessing the biological impact of tritium in humans.

Given this context, ASN wanted to get a clear analysis of the existing studies into the issue and in early 2008 decided to establish two broad working groups, chaired by Dr Patrick Smeesters of the Belgian Federal Agency for Nuclear Control (AFCN) and Mr Roland Masse of the Académie des technologies. The groups were formed of experts (from the CEA, CNRS, GSIEN, Institut Curie, IRSN, universities and European Commission "Article 31" experts), representatives of operators (ANDRA, AREVA, CEA, EDF and ITER), associations (ANCCLI, ACRO and CLI) and safety authorities (ASN, DSND). Their findings and recommendations were submitted in early April 2010.

The ASN is pleased with the high quality of the work and the large bibliography provided, which have led to the recommendations issued at the end of each group's summary.

The studies highlight the small impact that tritium releases have in France. However, they do also show the need to carry out further study and research in order to supplement current data and knowledge on the behaviour of tritium in the environment.

The ASN has drawn up its action plan on the basis of the recommendations made by the two working groups. It also hopes that research bodies take into account the requests made by the working groups, as described in the summary of work and recommendations.

- 1. [ASN's position and action plan](#)
- 2. [What is Tritium ?](#)
- 3. [Tritium working groups: objectives and approach](#)
- 4. [Summary of work and recommendations](#)
 - 1. ["Tritium Impact" working group](#)
 - 2. ["Tritium: Defence in Depth" working group](#)

Carte des rejets tritium

Livre Blanc du Tritium

Written by a group of experts with various backgrounds (governmental experts, operators, experts from non-governmental laboratories): The white paper encompasses the state of the art and recommendations from IRSN dedicated to the environmental impact of tritium

<http://www.asn.fr/sites/tritium/plus/english-version.html>

- | *Context*
- | ***Objectives***
- | *Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems*
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - Marine ecosystem
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystems
- | *Conclusions*

- ***Increase knowledge on the quantification (e.g. fluxes) of tritium transfers in marine and terrestrial ecosystems with a focus on speciation and kinetic of OBT build up:***
 - Estimation of tritium turnover in aquatic biota: e.g. marine seaweed, marine invertebrates such as shellfish, fish ;
 - Quantification of tritium in grassland ecosystem: kinetic of OBT biosynthesis throughout the human food chain; dry and wet deposition;
- ***Improve tritium transfer models between the source of release and the different components of the ecosystems (seawater: MARS, atmosphere: TOCATTA);***
 - ***... to have a more realistic human dose assessment.***

- | *Context*
- | *Objectives*
- | ***Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems***
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - Marine ecosystem
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystems
- | *Conclusions*

Tritium is present into biota mainly in two forms:

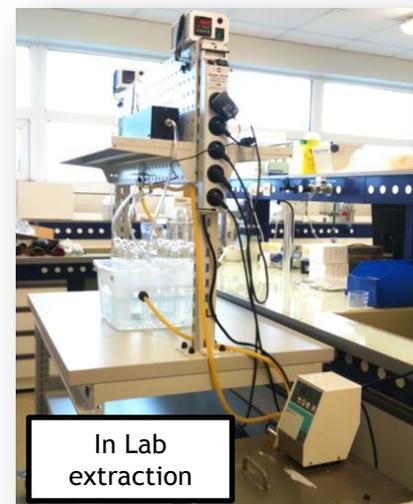
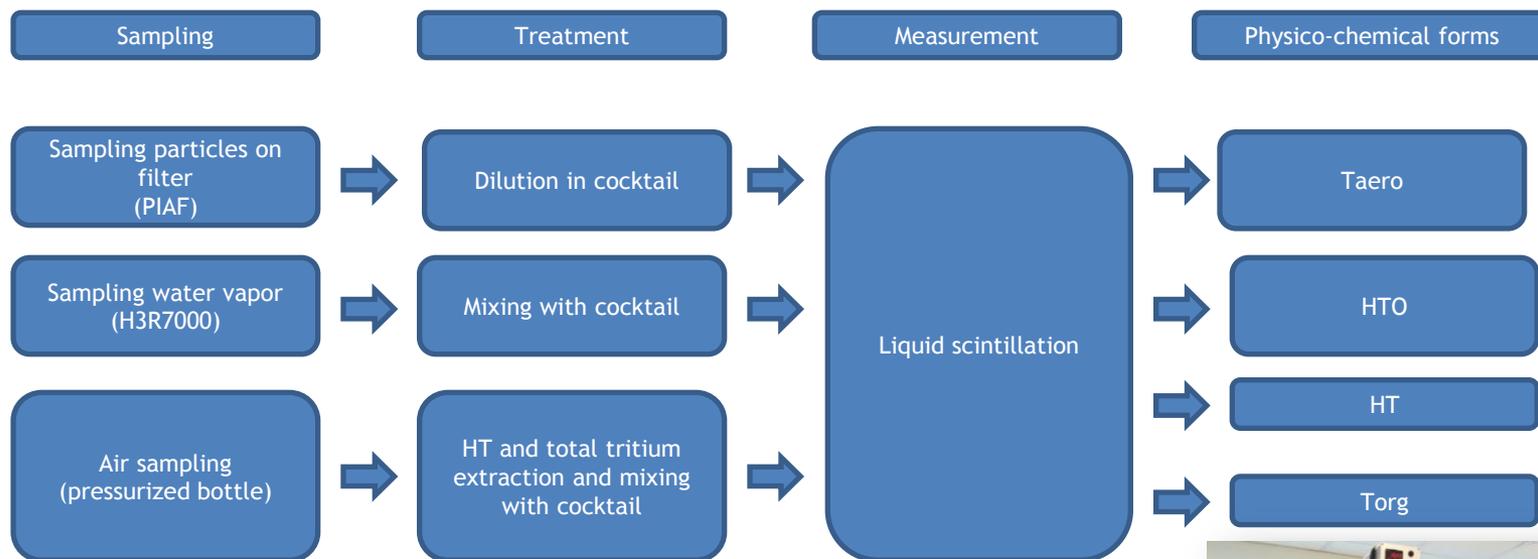
- TFWT (Tissue Free Water Tritium): tritium is incorporated with water exchanges;
 - ❑ Quick exchange with the environment (~hour);
- OBT (Organically Bound Tritium): tritium is incorporated with biochemical processes;
 - ❑ Relatively slow exchange with the environment (~month).

Tritium speciation of atmospheric or aquatic releases and bioavailability:

- HTO (tritiated water): bioavailable for species with high exchange velocity (few hours) with TFWT;
- Organic molecules: bioavailability depends on the molecule;
- HT (tritiated hydrogen in the atmospheric releases): not bioavailable for species but can be oxidized by biogeochemical reactions and become bioavailable.

Importance of knowledge of the speciation

Example of speciation in AREVA NC La Hague NRP atmospheric plume in the environment: how can we study the speciation?



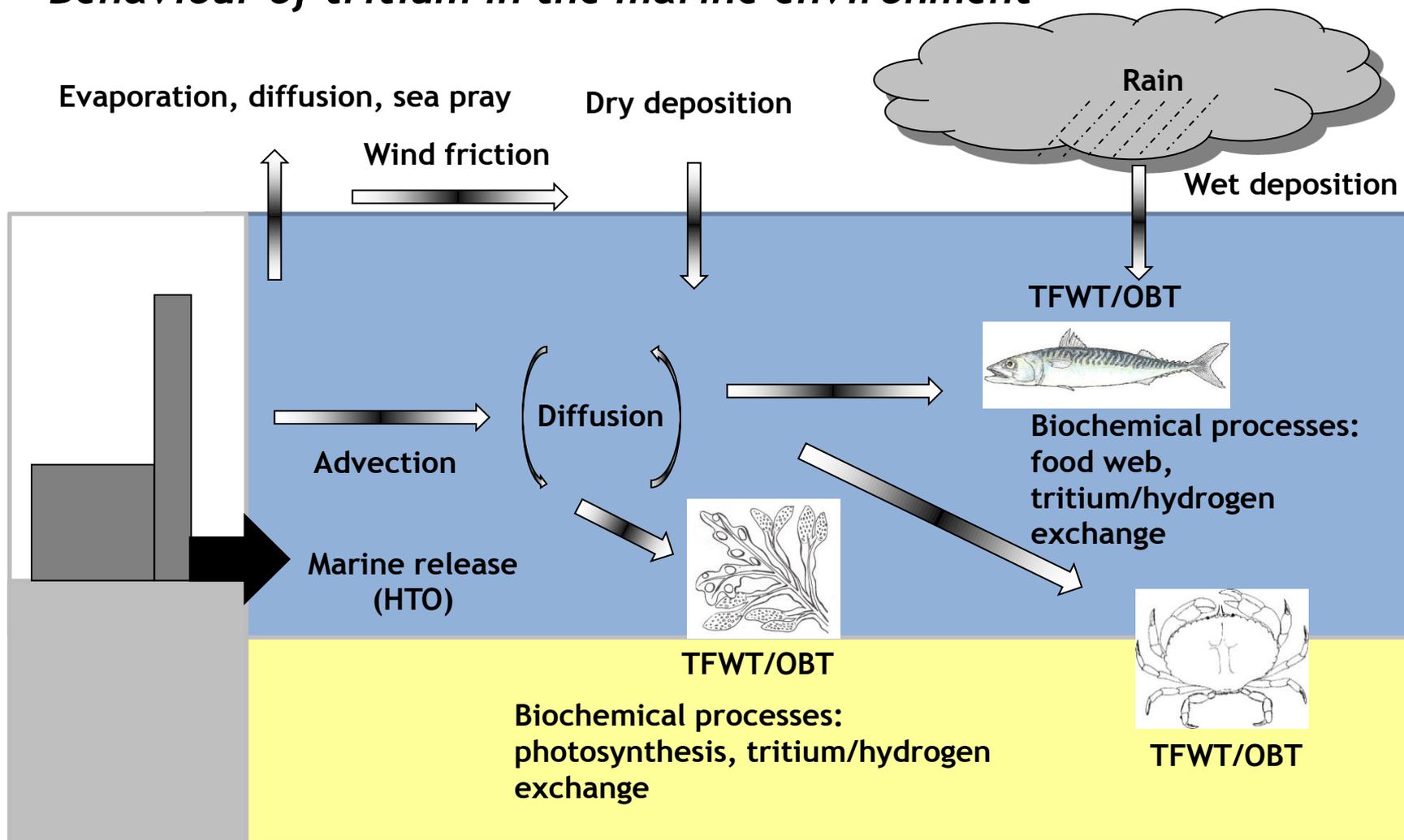
Example of speciation in AREVA NC La Hague NRP atmospheric plume (in 2013 ~ $6.0 \cdot 10^{13}$ Bq year⁻¹)

Number	Sampling date	Aerosol (Bq m ⁻³)	HTO (Bq m ⁻³)	HT (Bq m ⁻³)	Torg (Bq m ⁻³)
1	2013/02/22 10:20	<0.02	0.46 ± 0,01	1.2 ± 0,3	<0.4
2	2013/02/22 11:50	<0.02	0.37 ± 0,01	2.8 ± 0,5	<0.5
3	2013/06/13 10:15	<0.02	0.46 ± 0,02	2.0 ± 0,4	<0.4
4	2013/06/13 12:30	<0.02	0.48 ± 0,02	2.5 ± 0,5	<0.6
5	2013/06/27 14:27	<0.02	0.72 ± 0,02	4.1 ± 0,6	<0.9
6	2013/12/10 11:50	<0.02	0.40 ± 0,01	2.1 ± 0,4	<0.6
Mean		<0.02	0.50 (17%)	2.5 (83%)	<0.6

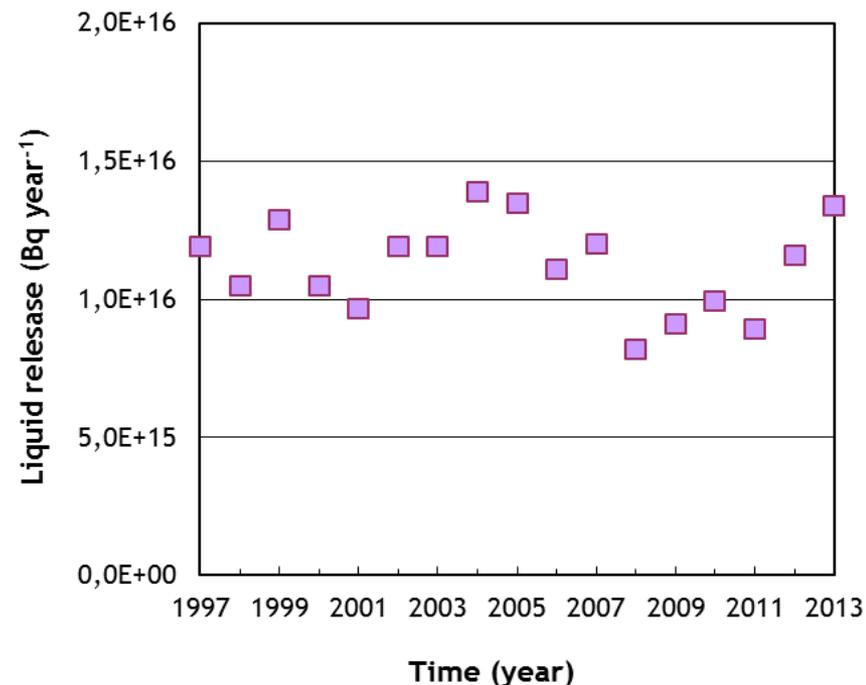
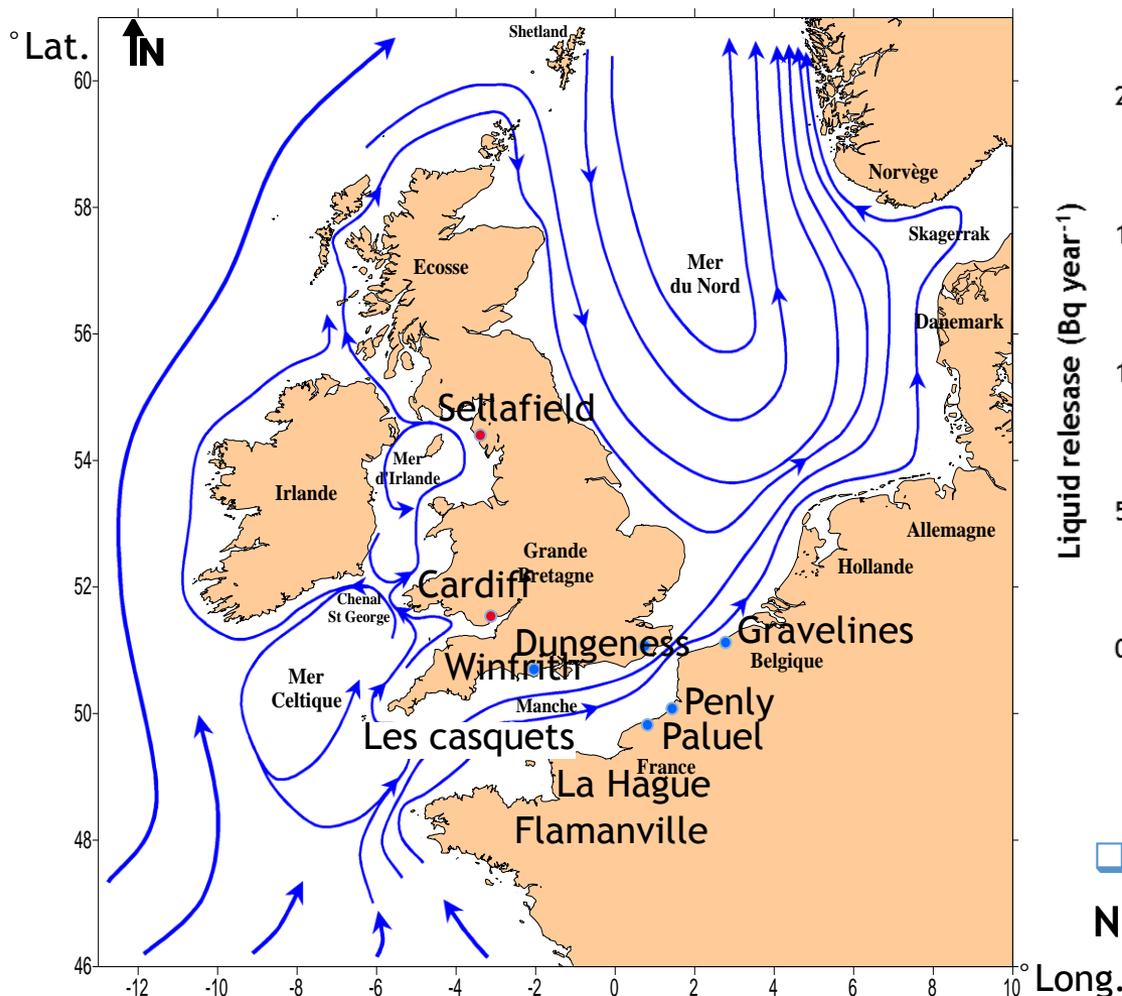
83 % of T released by the NRP is in the form of HT

- | *Context*
- | *Objectives*
- | ***Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems***
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - **Marine ecosystem**
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystem
- | *Conclusions*

Behaviour of tritium in the marine environment



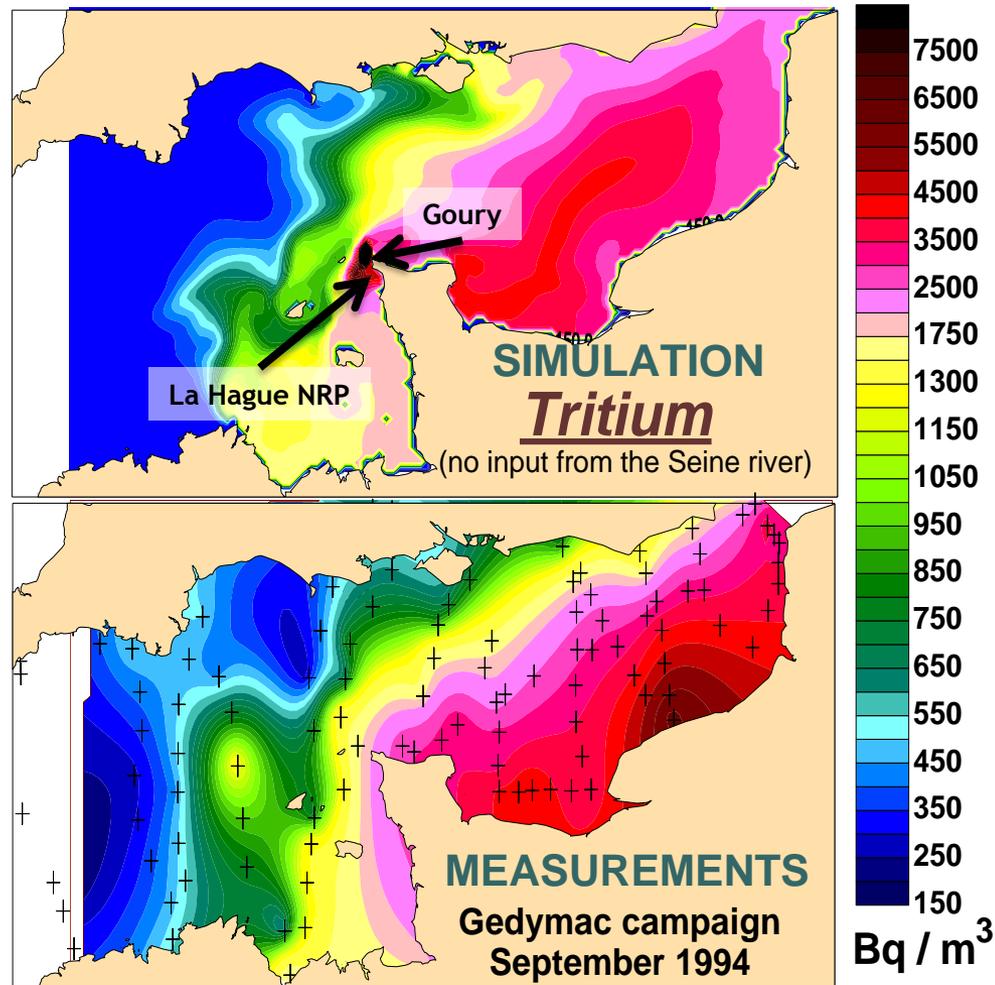
Liquid releases in the English Channel by AREVA NC: HTO



□ One PWR NPP: 1/100 of La Hague NRP release

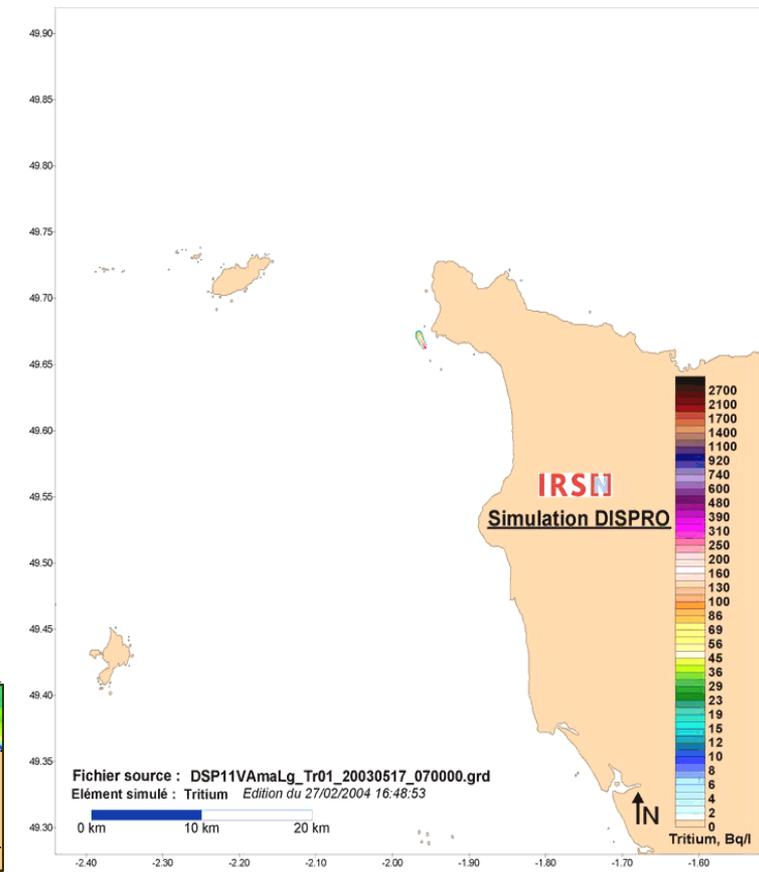
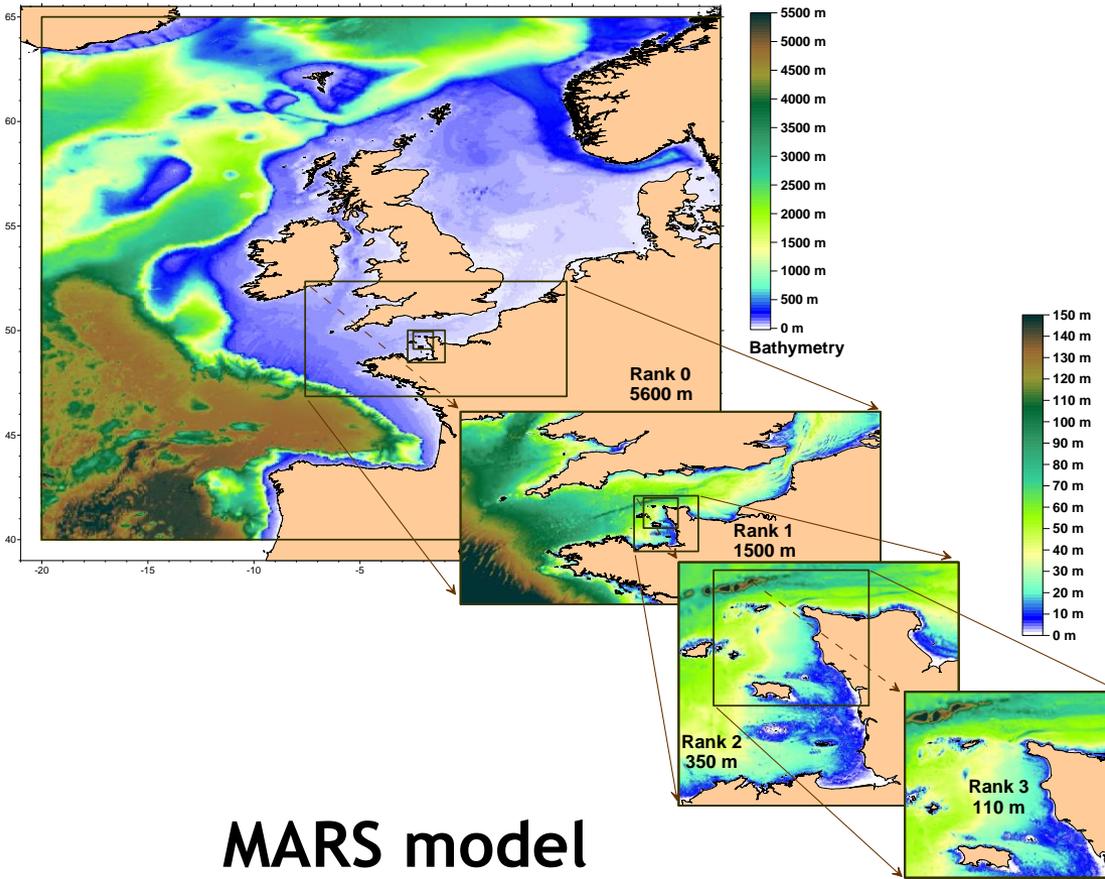
□ Annual releases are quite stable ~ $1.2 \cdot 10^{16}$ Bq year⁻¹

Model validation of hydrodynamic dispersion (numerous in-situ measurements vs. modeling)



- Average dilution coefficient close to the outfall of La Hague (Goury) - NRP is well known
~ $0,76 \text{ Bq m}^{-3}$ per TBq year^{-1}

Concentration in water: hydrodynamic modeling



**MARS model
frames and mesh sizes**

**Real discharges and meteorology,
one frame every 15 min**

- ❑ After model validation, the uncertainties for individual measurements are around 50% (the model is highly reliable)

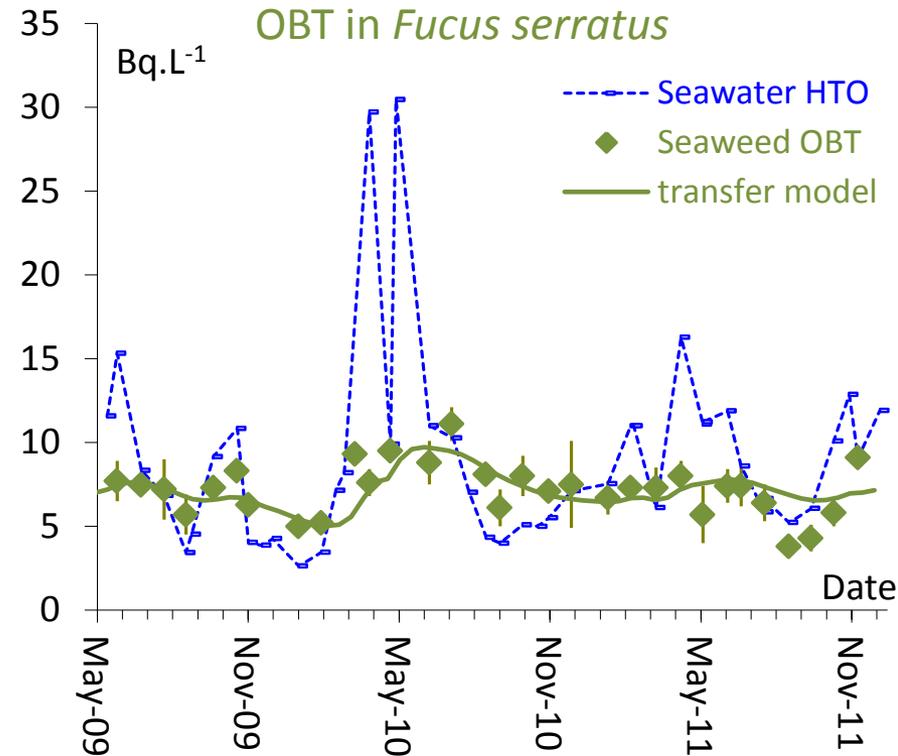
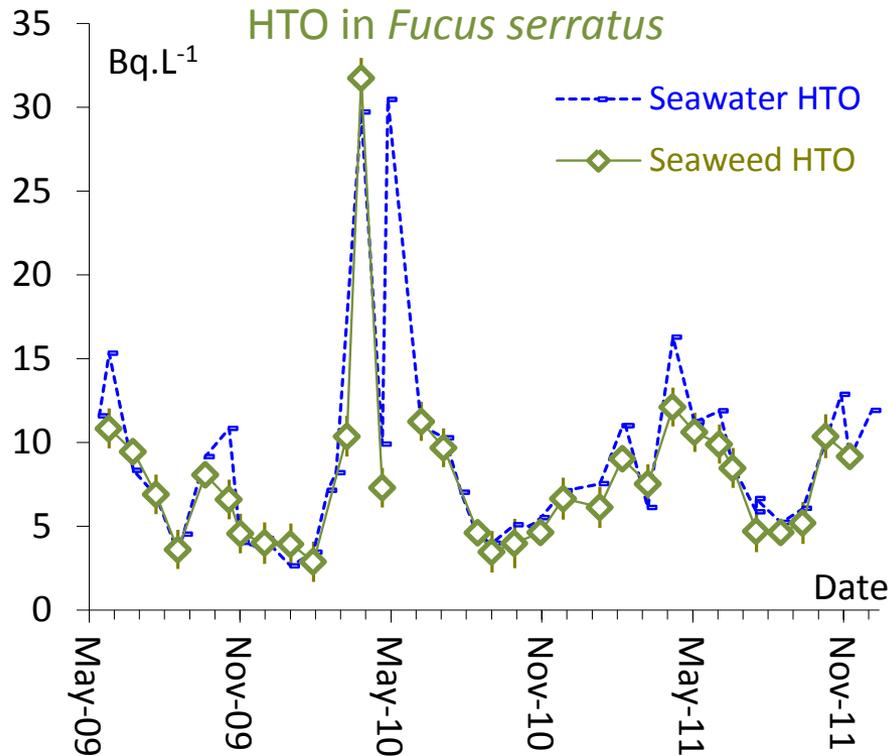
Concentration in marine biota near the point of release

Nature	Species	Location	Sample date	Bq.Kg ⁻¹ fresh ± 10%	TFWT, Bq.l ⁻¹ ± 10%	OBT, Bq.l ⁻¹ ± 10%	Ratio OBT/HTO
Mollusc	earshell	Omonville La Rogue	21/07/1997	14.7	14.9	10.6	0.7
Crustacean	edible crab	Omonville La Rogue	21/07/1997	11.7	11.7	11.6	1.0
Mollusc	periwinkle	St Germain des Vaux	21/07/1997	12.5	12.7	9.3	0.7
Mollusc	periwinkle	Herquemoulin	21/07/1997	19.0	19.3	13.1	0.7
Crustacean	edible crab	Jobourg	21/07/1997	12.7	12.5	16.0	1.3
Fish	mackerel	Omonville La Rogue	21/07/1997	11.8	11.8	11.8	1.0
Mollusc	earshell	Herqueville	21/07/1997	15.6	15.9	10.8	0.7
Seaweed	<i>Fucus serratus</i>	Carteret	16/03/2006	4.0	3.9	5.0	1.3
Seaweed	<i>Fucus vesiculosus</i>	Dielette	15/03/2006	11.0	11.0	11.2	1.0
Seaweed	<i>Fucus serratus</i>	Dielette	15/03/2006	9.7	9.5	12.5	1.3
Seaweed	<i>Fucus vesiculosus</i>	Goury	14/03/2006	10.8	10.7	12.4	1.1
Seaweed	<i>Fucus serratus</i>	Goury	14/03/2006	11.4	11.3	12.3	1.2
Seaweed	<i>Fucus serratus</i>	Sciotot	15/03/2006	8.0	8.1	6.6	0.8
Crustacean	lobster	Carteret	23/05/2006	10.7	10.8	8.3	0.8
Crustacean	lobster	Flamanville	26/04/2006	10.1	10.1	9.1	0.9
Mollusc	limpet	Carteret	30/03/2006	4.0	4.0	4.2	1.1
Mollusc	limpet	Dielette	28/03/2006	17.2	17.4	14.2	0.8
Mollusc	whelk	Flamanville	26/04/2006	5.3	5.1	9.5	1.9
Mollusc	limpet	Goury	27/03/2006	16.0	16.1	13.1	0.8
Fish	plaice	Carteret	19/06/2006	5.9	5.8	8.6	1.5
Fish	sea wrasse	Carteret	19/06/2006	7.0	6.9	9.7	1.4
Fish	sole	Flamanville	26/04/2006	13.5	13.5	13.8	1.0
Fish	sea wrasse	Flamanville	26/04/2006	14.0	14.0	13.3	1.0

Mean 11.1 11.2 10.7 1.0

□ Around 10 Bq L⁻¹ (TFWT, OBT) for 1.2 10¹⁶ Bq year⁻¹

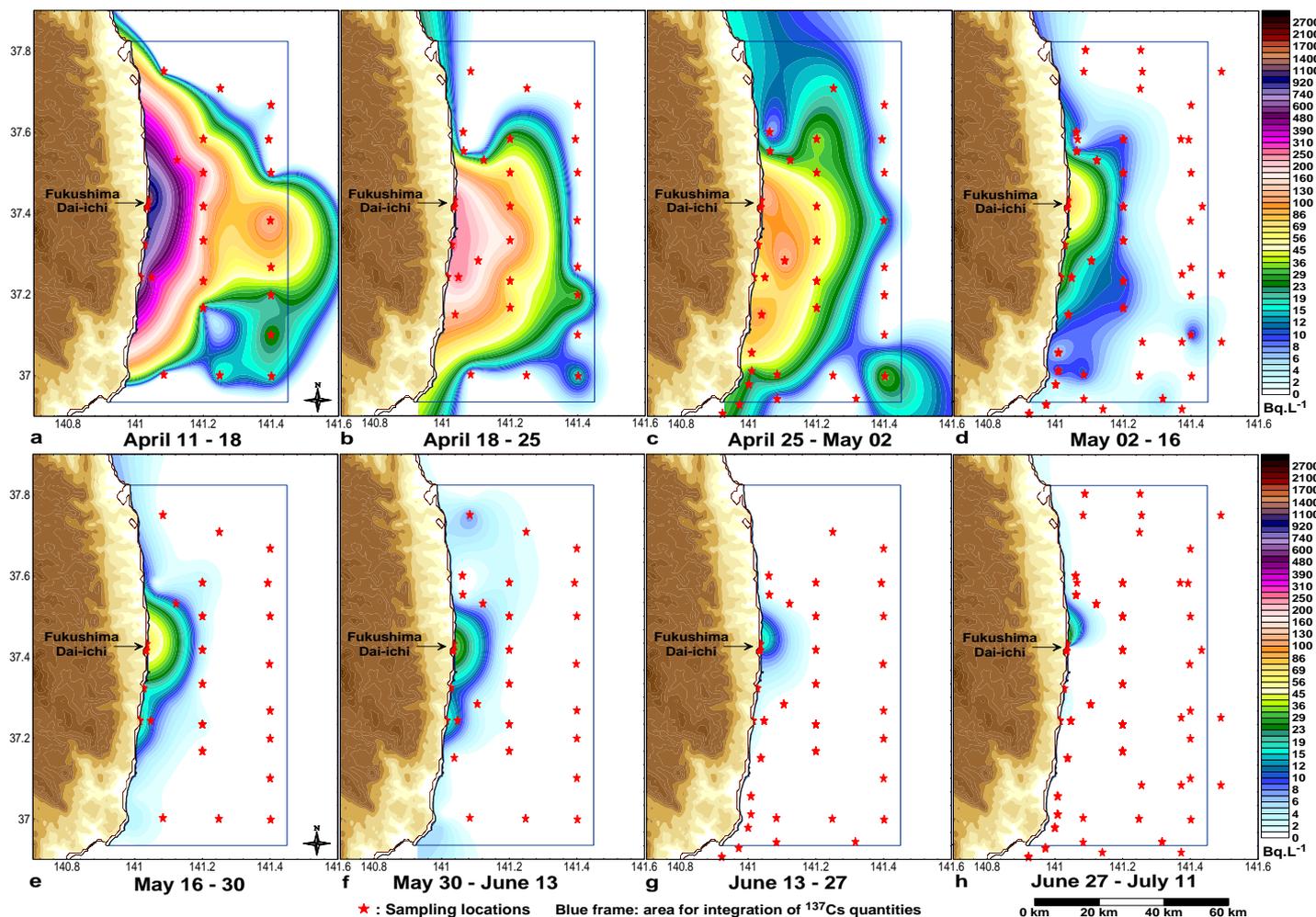
Concentration in seaweed as function of water concentration



Steady state between seawater and seaweed TFWT is rapidly achieved while transfer between HTO and OBT is much slower: need to take this into account when modeling

Transfer parameters	OBT/HTO(steady state), expecting 1	$t_{1/2}$ bio (day) half-life
<i>Fucus serratus</i>	0.78 [0.76-0.82]	128 [99-175]

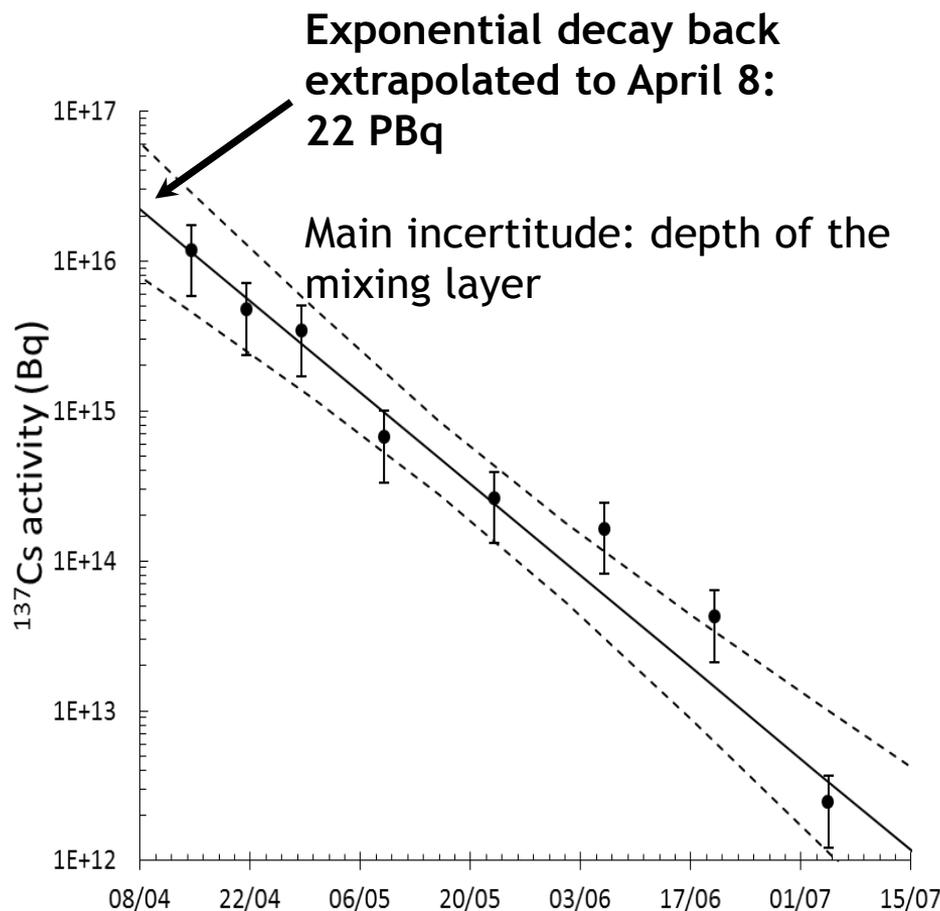
Estimation of ^{137}Cs quantities from measurements



Interpolated
 ^{137}Cs
 concentrations
 from April 11
 to July 11

^{137}Cs quantities were estimated on the basis of individual measurements in a 50 x 100 km (100-1000 measurements for each period) area around the plant (issues: depth, mixing layer, atmospheric fallout, rain water washout, ...)

Estimation of the rate of seawater renewal



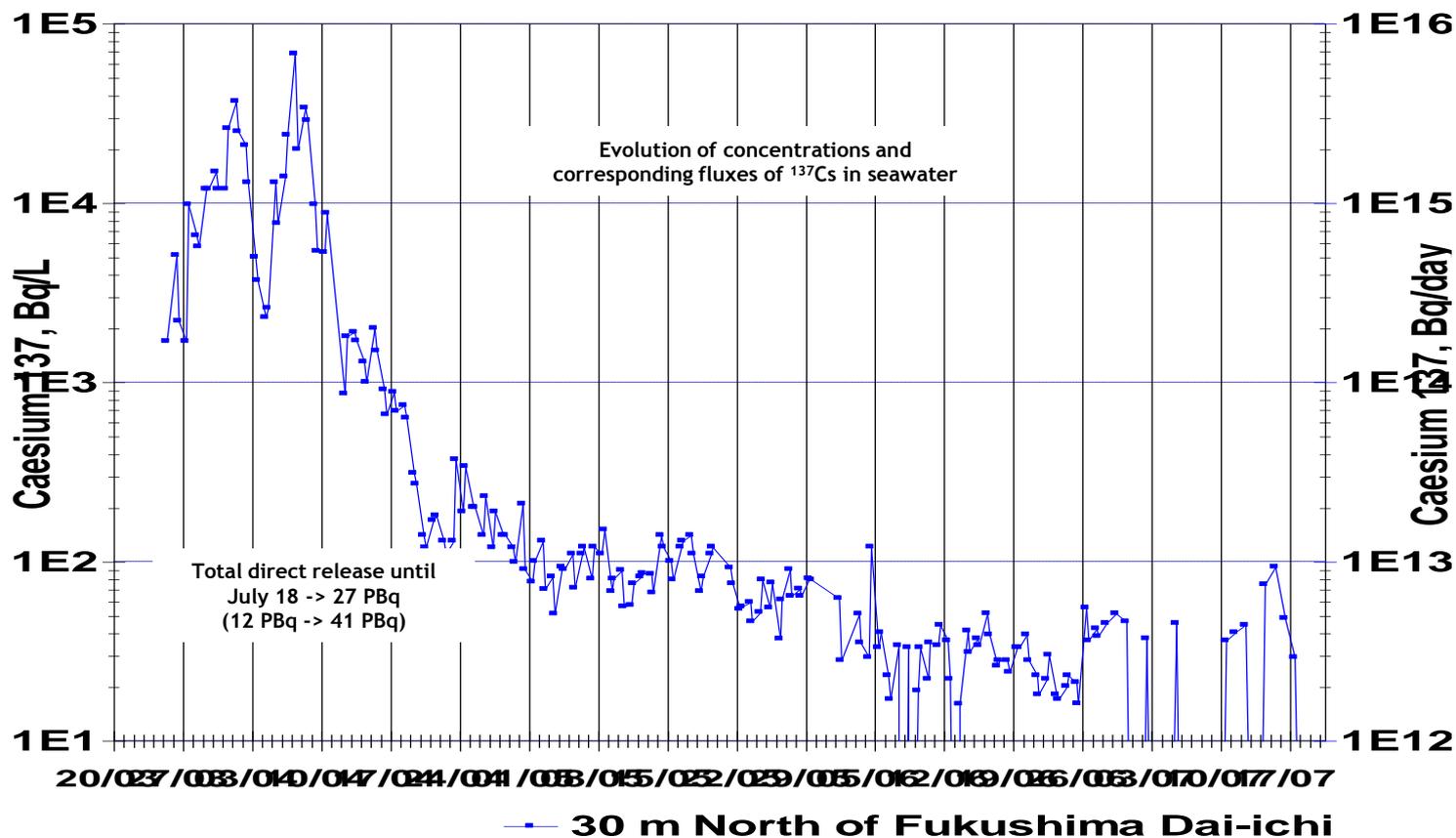
Evolution of ^{137}Cs quantities measured in seawater

Constant dilution by clean water through marine currents due to convergence of Kuroshio and Oyashio currents:

- Seasonal changes in the ocean circulation ?
- Return of contaminated water back in the area ?

- ❑ Environmental half-time exponential decay $t_{1/2} = 6.9$ days
- ❑ This source-term could be used in numerical dispersion models

Flux estimation of ^{137}Cs from direct releases and the dilution coefficient



Assumptions:

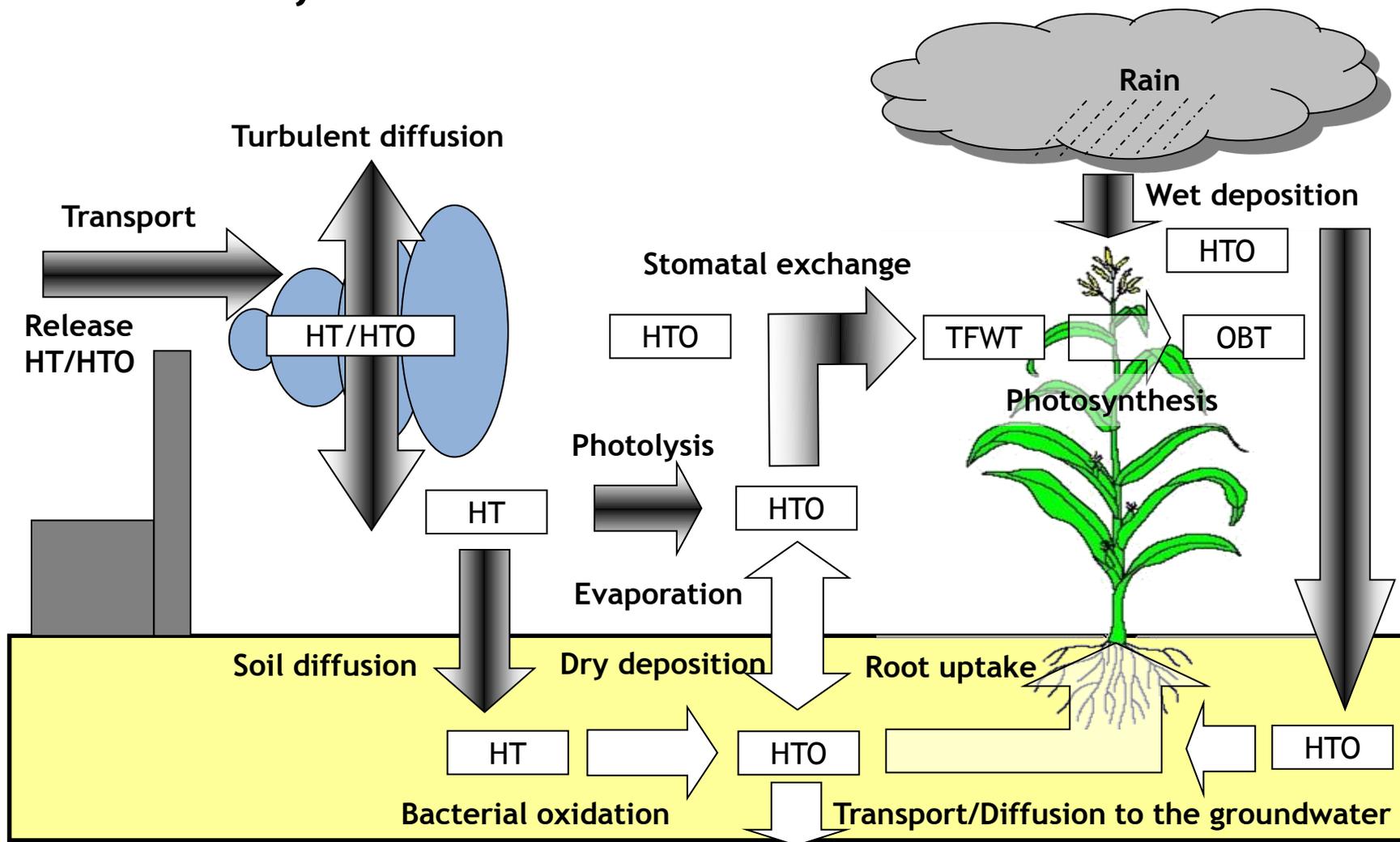
- Measurements close to the plant are representative of the released flux;
- Amount of 22 PBq corresponds to the quantity of ^{137}Cs released from March 26 to April 8; (average concentration: 15 716 Bq.L⁻¹, number of values = 28, duration = 13.2 days);
- Right Y axis in figure shows this conversion.

Fluxes of ^{137}Cs could be deduced from concentrations by applying the factor: $1.06 \cdot 10^{11}$ Bq released per Bq L⁻¹ measured

Conversely, concentrations could be estimated from fluxes

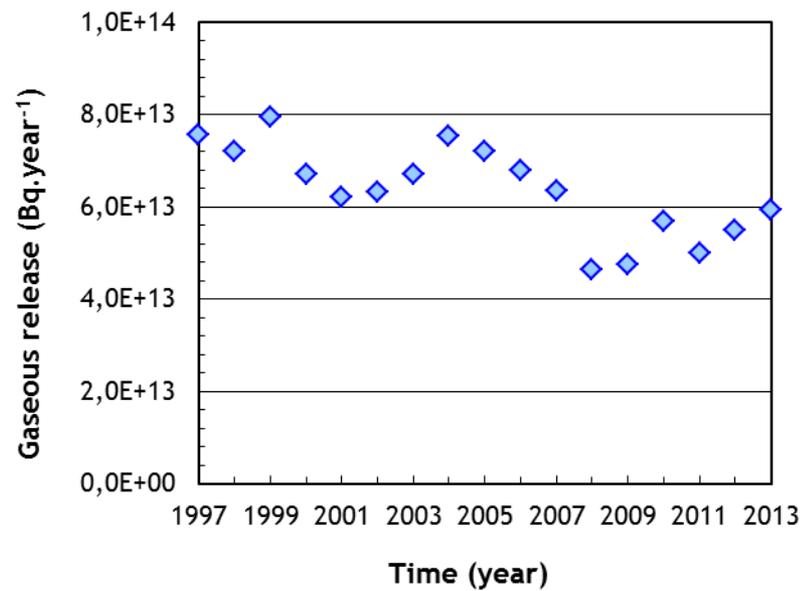
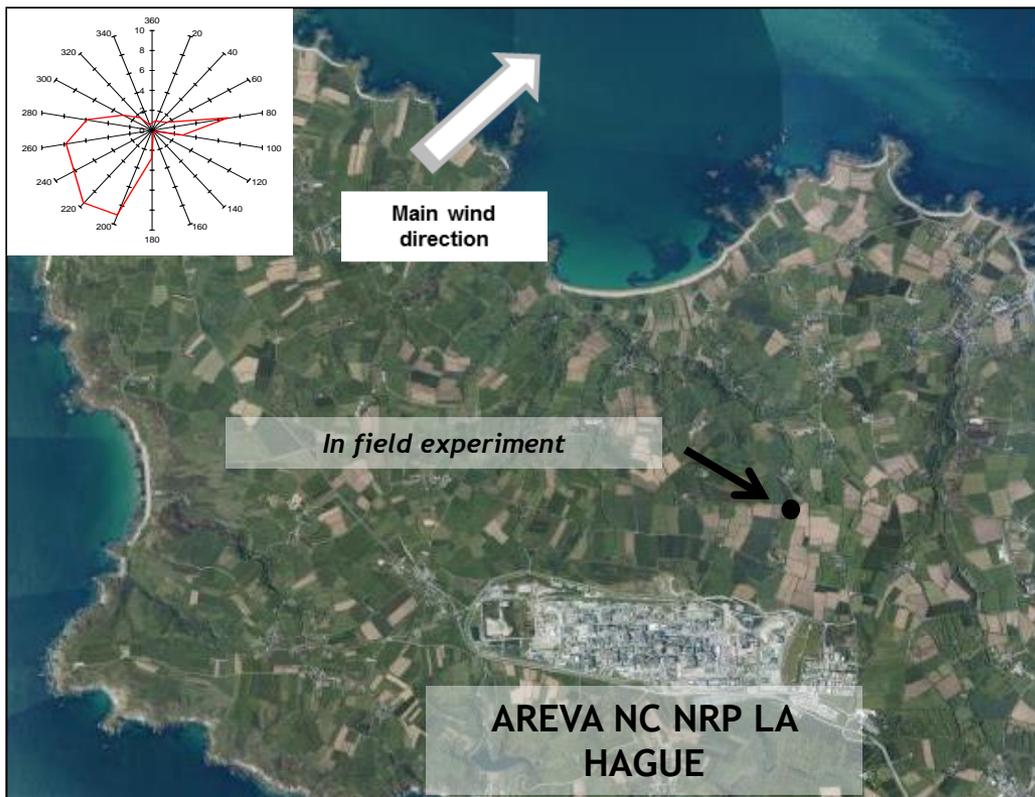
- | *Context*
- | *Objectives*
- | ***Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems***
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - Marine ecosystem
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystems
- | *Conclusions*

Behaviour of tritium in the terrestrial environment



□ Background level in North hemisphere < 1 Bq L⁻¹ water vapor (10⁻² Bq m⁻³ air)

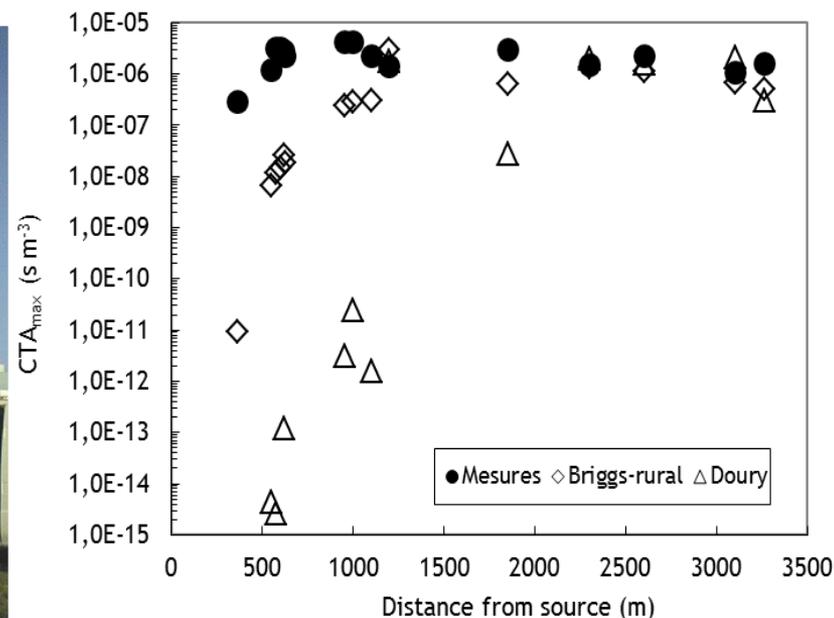
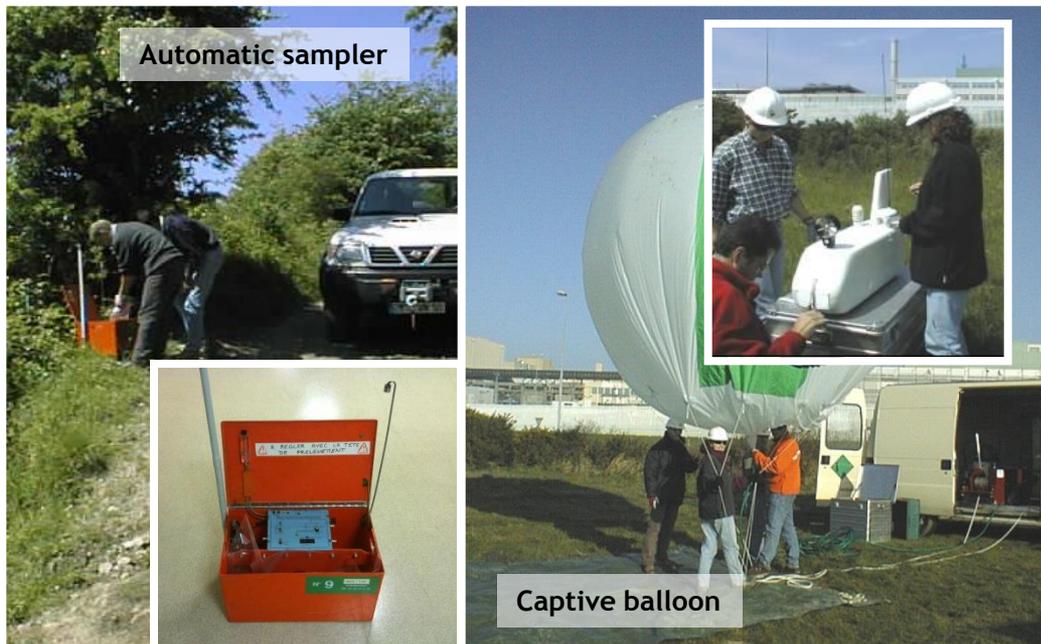
Gaseous release in the atmosphere by AREVA NC: HTO/HT



□ One PWR NPP: 1/50 of La Hague NRP release

□ Gaseous release decrease: in 2013 ~ 6.0 10¹³ Bq year⁻¹

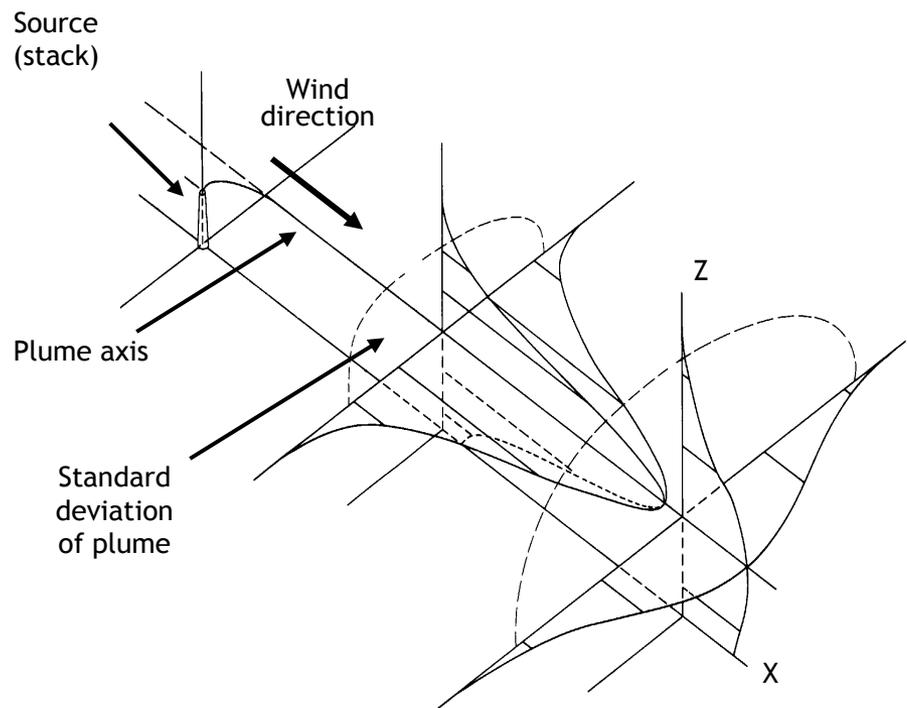
Model validation: krypton 85 as a tool to validate atmospheric dispersion modeling



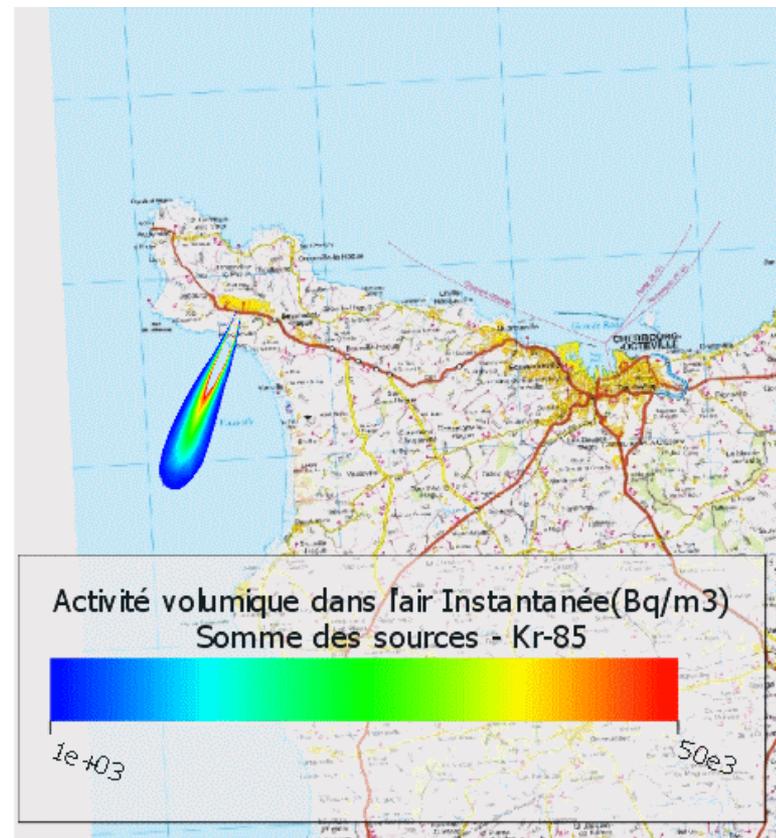
❑ Strong discrepancy between models and measurements

❑ Atmospheric Transfer Coefficient (ACT) $\sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ s m}^{-3}$

Concentration in the atmosphere: Gaussian modeling



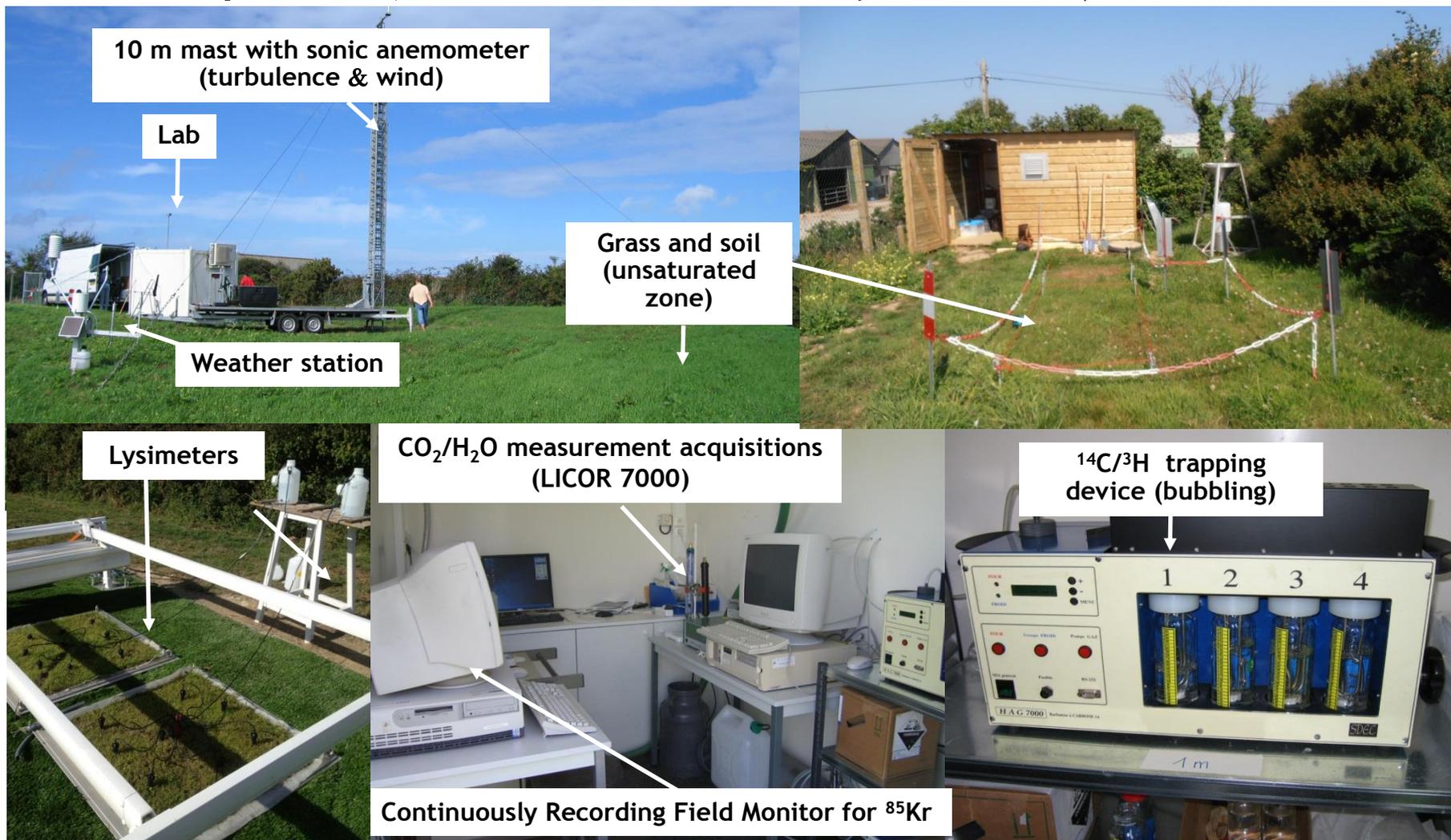
Gaussian modeling



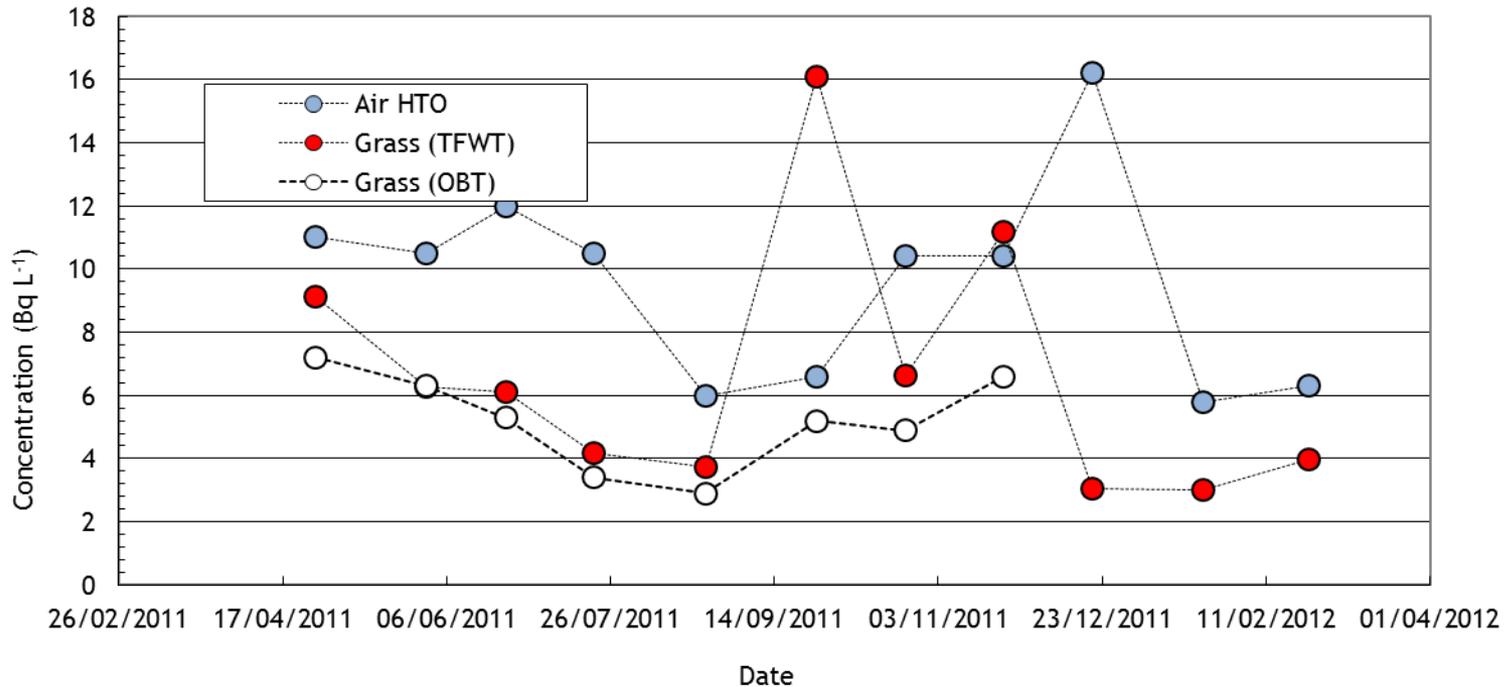
- ❑ After model validation the uncertainties are below a factor of 3 for in all meteorological conditions

Terrestrial ecosystem: transfer to biota

“In field experiment” technical platform (2 km downwind distance) to study tritium transfer (kinetics of OBT, dry and wet deposition, microbial oxidation of HT in soil)



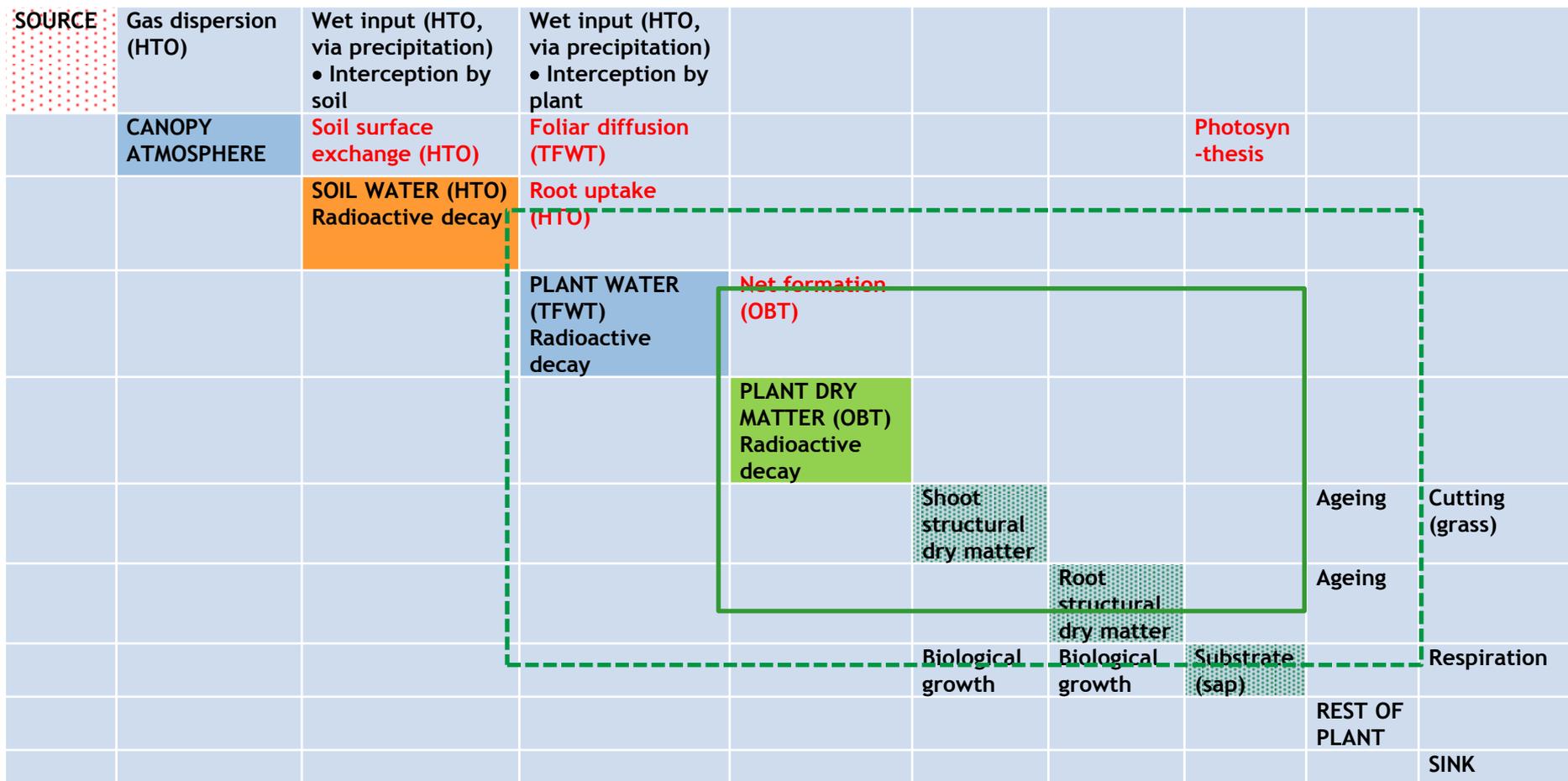
Concentration in grass around the NRP: “In field experiment” technical platform (2 km downwind distance)



□ around 10 Bq L⁻¹ for 6.0 10¹³ Bq year⁻¹

In La Hague area, concentrations in vegetable are in the same order of magnitude

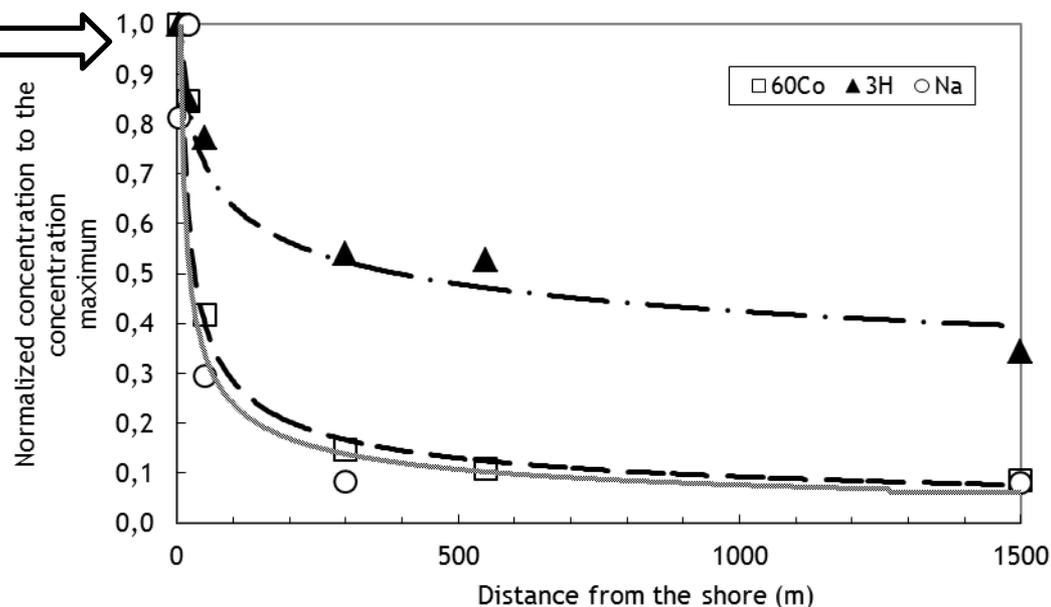
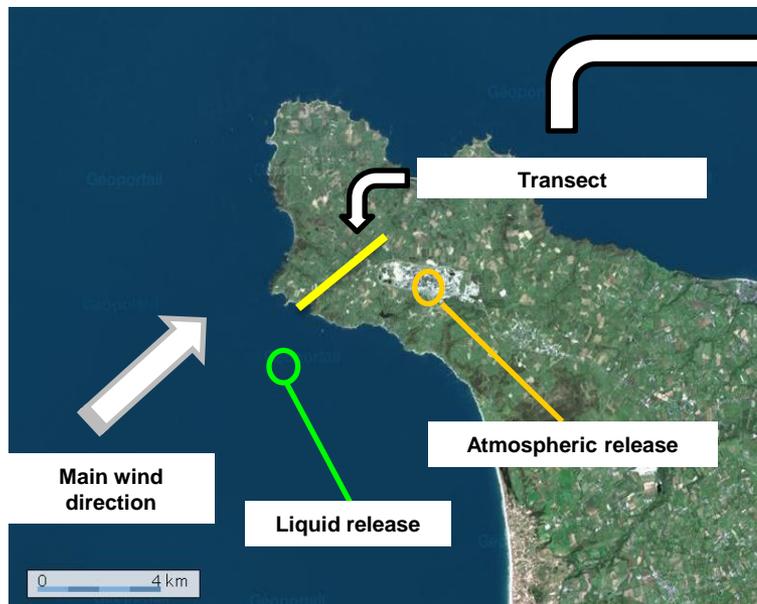
Modeling of tritium transfer in terrestrial ecosystem (TOCATTA), a part of the SYMBIOSE Platform



- TOCATTA is a hourly time-step model, implemented within the SYMBIOSE modeling platform

- | *Context*
- | *Objectives*
- | ***Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems***
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - Marine ecosystem
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystems
- | *Conclusions*

Tritium evaporation and partial pressure equilibrium induce transfer between water and the atmosphere



- Near the shore the atmospheric tritium concentration due to seawater is around 5 Bq L⁻¹ of water vapor

- *Context*
- *Objectives*
- *Transfer of tritium in marine and terrestrial ecosystems*
 - Importance of the knowledge of speciation (HT, HTO, OBT)
 - Marine ecosystem
 - Terrestrial ecosystem
 - Interface between marine and terrestrial ecosystems
- *Conclusions*

What do we need to estimate the human dosimetric impact of tritium releases into the environment?

- Speciation of releases (HTO/HT/organic molecule): Tritium released in the environment as HTO behaves like H from H₂O. The transfer to the biota, is very quick (hours) for TFWT and slower (months) for OBT;
- Dispersion: validation of dilution coefficients or dilution models are prerequisites to estimate the transfer to biota (e.g. Fukushima, 1.06 10¹¹ Bq released per Bq L⁻¹ measured);
- Transfer to biota: a constant ratio ³H/H is kept in all compartments of the environment (e.g. water/air and TFWT/OBT);
- Water to atmosphere: this pathway could be taken into account for population close to seawater.

Monitoring the tritium concentrations in the environment:

- Water: direct sampling;
- Air: HTO by cold trap (e.g. H3R7000) and speciation by bubbling device (e.g. MARC 7000);
- Biota and specifically food web: freeze drying to separate TFWT and OBT (combustion water extraction from dry matter).

Measurement by counting scintillation (DL ~ 1 Bq L⁻¹). For lower levels: ³He ingrown (Mass Spec);

For example, in the vicinity of La Hague NRP, average tritium concentrations are 10 Bq L⁻¹ in the marine and the terrestrial ecosystems.

This methodology was used by North-Cotentin Radioecology Group:

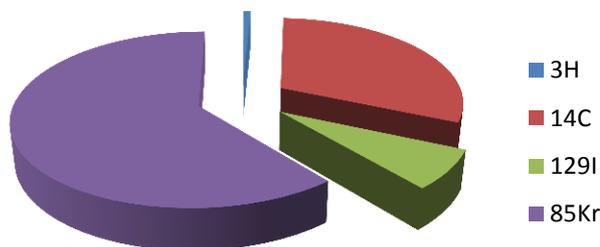
- Indeed, epidemiological studies have shown in 1997 a trend towards an excess number of leukaemia cases in the region of Nord-Cotentin (France) and it was suggested that the risk of leukaemia was associated with some aspects of lifestyle;
- To respond to public concern, the French Ministries of the Environment and Health decided to commission complementary epidemiological studies and a detailed radioecological analysis;
- The radioecological study was entrusted to a group of experts with various backgrounds (inspectors, governmental experts, operators, experts from non-governmental laboratories and foreign experts)-the North-Cotentin Radioecology Group;
- Its principal objective was to estimate the exposure levels to ionizing radiation and associated risk of leukemia for populations in the Nord-Cotentin.

Conclusions: application

Example, the gaseous/liquid releases contribution to the dose to the public in 2010: $8.7 \mu\text{Sv y}^{-1}$ for the farmer and $4.7 \mu\text{Sv y}^{-1}$ for the fisherman

- Gaseous releases: ^3H contribution $\sim 1\%$ for 57 TBq y^{-1}

Farmer (Digulleville)



^3H dose: $6.3 \cdot 10^{-2} \mu\text{Sv y}^{-1}$

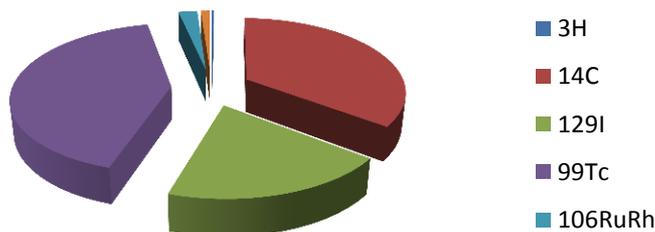
Fisherman (Goury)



^3H dose: $2.4 \cdot 10^{-2} \mu\text{Sv y}^{-1}$

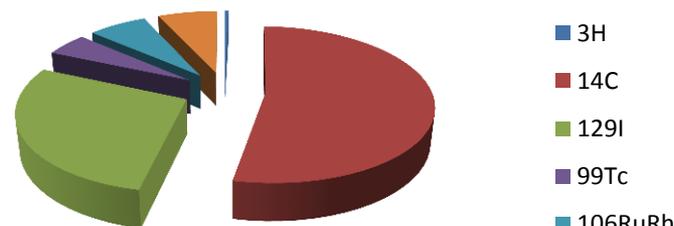
- Liquid releases: ^3H contribution $\sim 1\%$ for $10\,000 \text{ TBq y}^{-1}$

Farmer (Digulleville)



^3H dose: $2.6 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv y}^{-1}$

Fisherman (Goury)



^3H dose: $9.6 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv y}^{-1}$

- *In France tritium releases will increase in the future with new built nuclear facilities.*
- *ASN has coordinated a work on tritium (White book, 2010) and recommended to improve knowledge on tritium transfers in the ecosystems: see lecture on tritium “the French situation” by J. L. Lachaume (ASN, Deputy Director General) at METI.*
- *IRSN studies tritium behaviour to have more realistic dose assessment for human and biota.*
- *Uncertainties remain in the marine and terrestrial ecosystems (kinetic of OBT formation, wet deposition...).*
- *IRSN will carry on developing specific programs on these topics (e.g. VATO project).*

- ***How can IRSN help for calculating dosimetric impact of controlled release of tritium?***
 - IRSN has developed up-to-date parameterized models of tritium transfers in marine & terrestrial ecosystems where various scenarios can be tested and compared in terms of resulting human dosimetric impact, including sensitivity and uncertainty analyses;
 - IRSN has developed sampling methodologies for environmental monitoring of tritium in various compartments and ecosystems;
 - IRSN has developed low-level tritium metrology adapted to environmental monitoring.

Future IAEA tritium meeting group
MODARIA
will be organized by IRSN in Cherbourg
June 10-13, 2014



Last tritium workshop CNSC - IRSN 2011



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

Overview of Stakeholder Dialogue

Steve Robinson

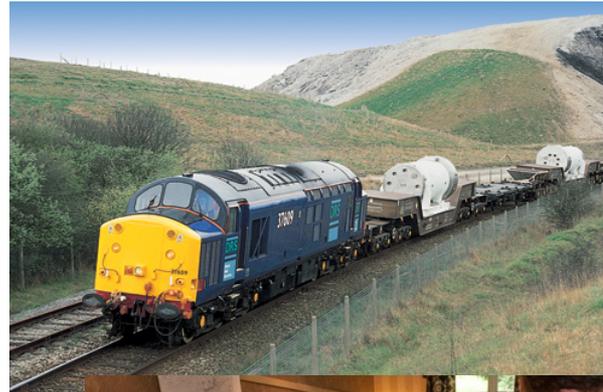
Managing Director

SJR Strategic Consulting Ltd

Steve Robinson & Stakeholder Dialogue



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions



Disagreement & Conflict



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions



LOWER TRUST

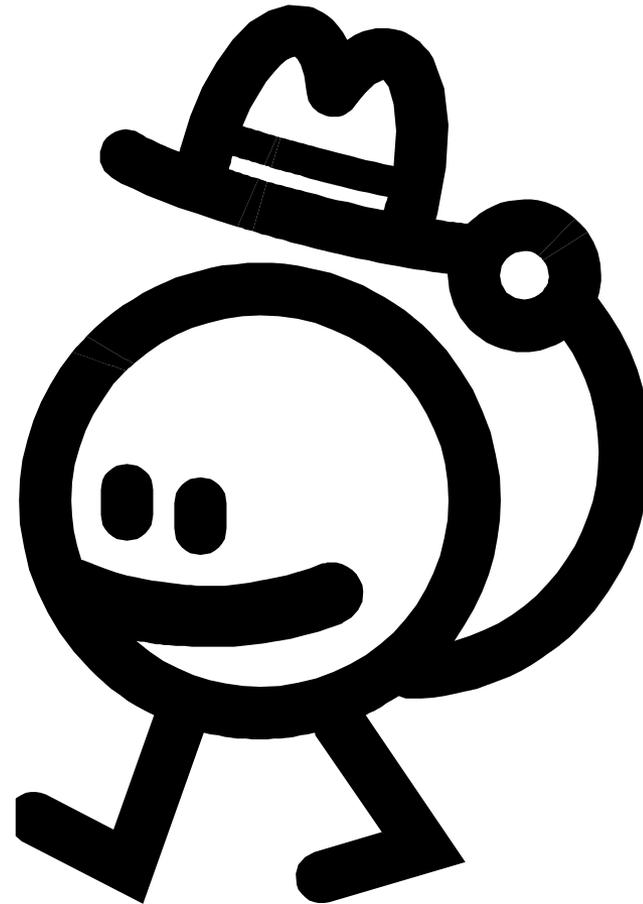
Building Trust



STRATEGIC CONSULTING LTD

Responsible decisions • Sustainable actions

RESPECT



Stakeholder Dialogue shows Respect



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

Fielding competent & committed senior team

Empathising with and actively listening to Participants

Developing and using consensual statements

Showing confidence and allowing budget

Jointly agreeing Aims & Agendas and being flexible

Giving feedback on dialogue-informed decisions

Relevance to Nuclear



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

Situations complex & Trust may be low

Choices are difficult

Many Parties could be affected

Many Parties have a 'Stake'

Stated 'Positions' will differ

Two approaches to difficult decisions



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

1. Telling People



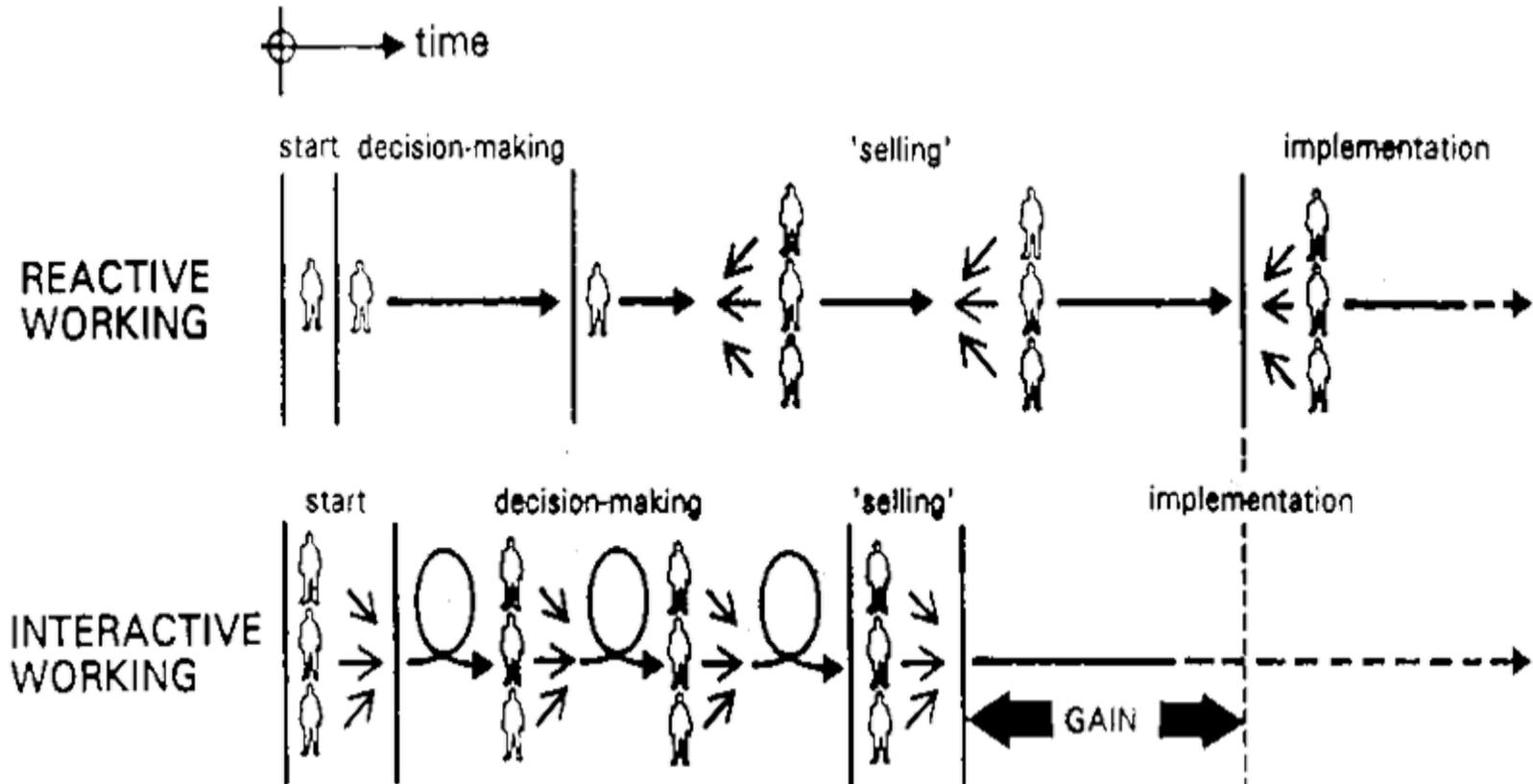
2. Involving People



Involving has Benefits



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions



Source: Allen Hickling

Benefits



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

Confront the Issues not each other

Wider Understanding & TRUST

Retained Disagreements

Wider Ownership

More Informed Decisions

Reduced legal & other costs of conflict

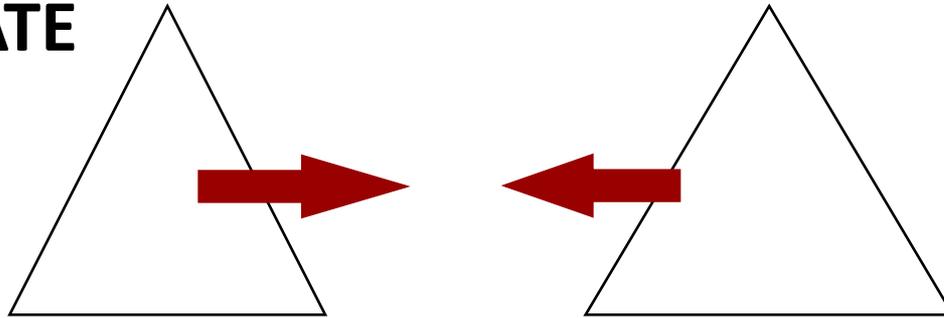
Less stress on key staff

Dialogue Vs Debate

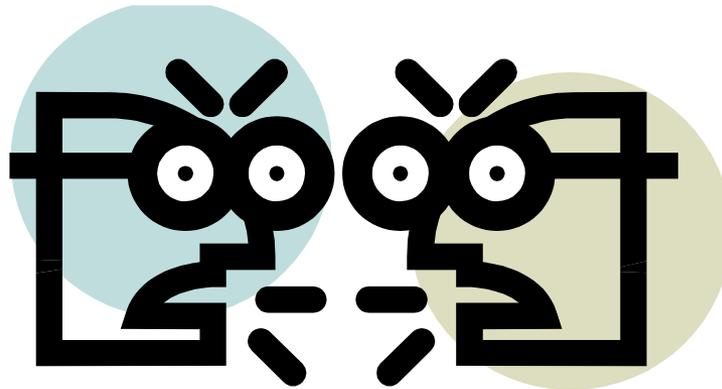


STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

DEBATE



Positions

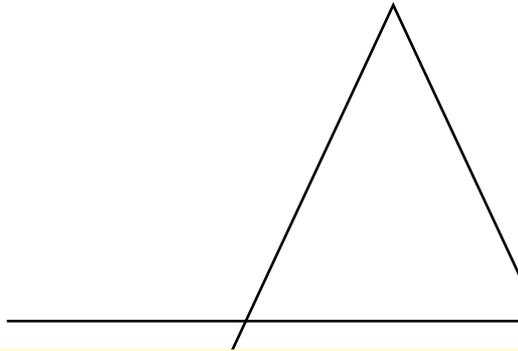


Dialogue Vs Debate



STRATEGIC CONSULTING LTD

Responsible decisions • Sustainable actions

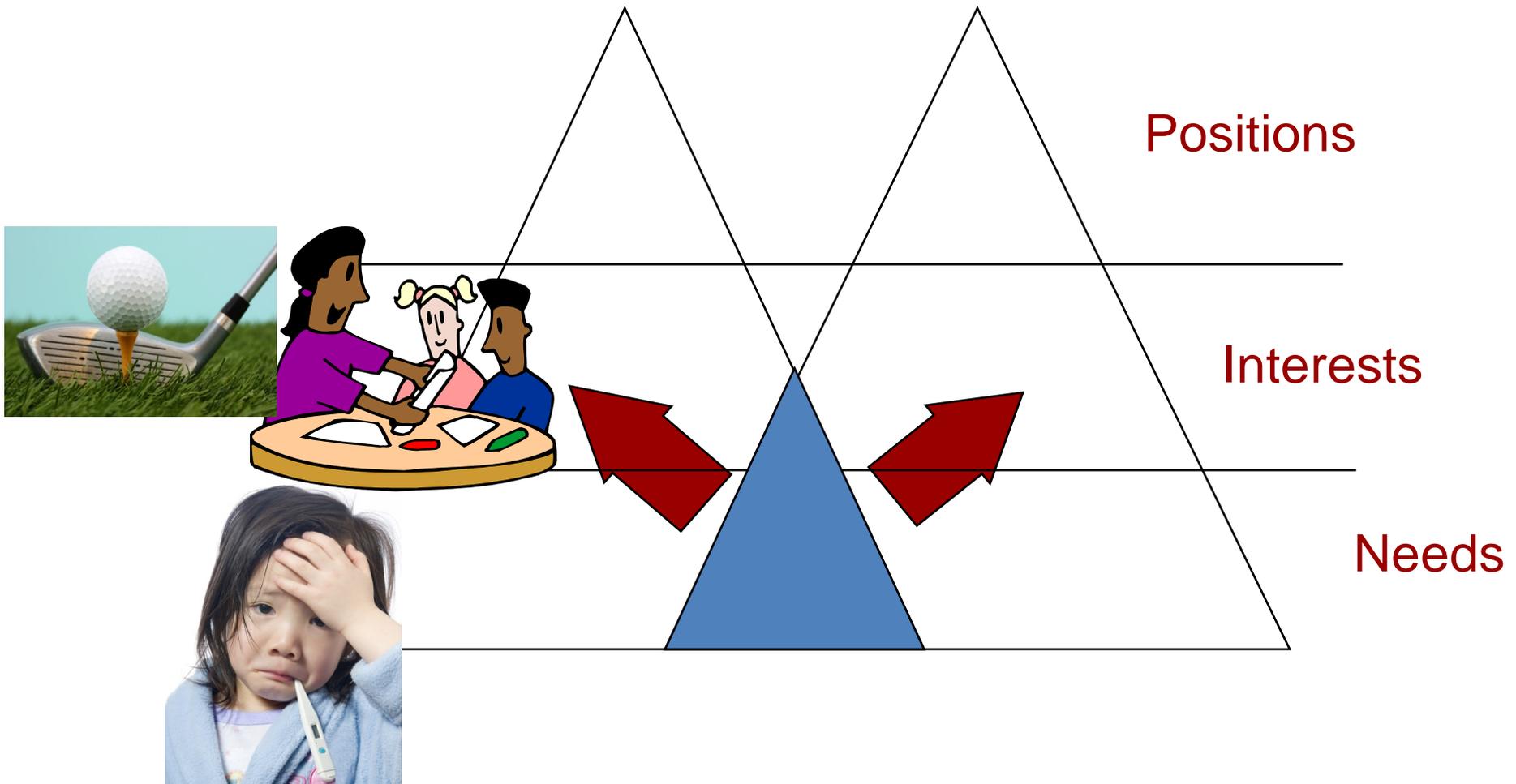


Build on Common Ground



STRATEGIC CONSULTING LTD

Responsible decisions • Sustainable actions



Working together



STRATEGIC CONSULTING LTD

Responsible decisions • Sustainable actions



Early Dialogue – Strategic Options



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

6 Strategic Connection Options

↔
c85Km



**Options
3 & 4
Preferred**

Sellafield Discharges



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

- Discussed at great length in our stakeholder dialogues & learning is:
 1. There are many Marine Stakeholders including nearby countries
 2. Regulators can participate in discussions
 3. Short term higher discharges were tolerable if from the 'balancing benefit' of speeding up decommissioning or reducing hazard

NDA & Bellona



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

- I know this discussion is about tritium, but if we take radioactive discharges in general the example of the 'InfoArena' dialogue involving NDA, Sellafield Ltd from UK & Bellona and others from Norway is interesting

Tritium



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

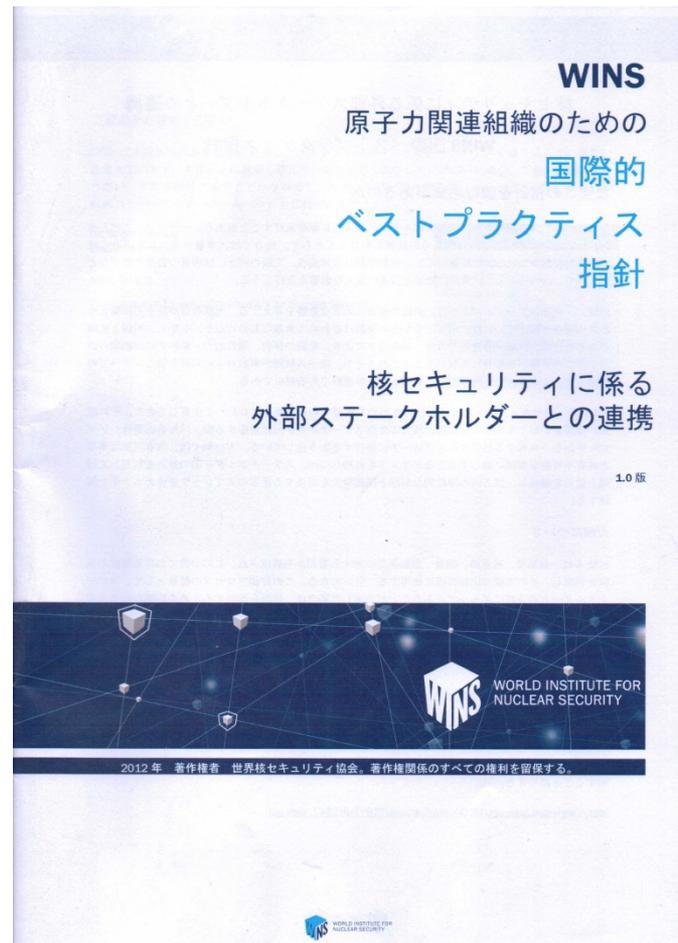
- There are obviously many different options for dealing with this issue, and one of the challenges is to work out a suitable process to come to a conclusion.
- You may be interested in this system, which we have used in the UK to distinguish between reactor systems

WINS

Best Practice Guide



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions



Available to
Members from
www.WINS.org
Membership is free

Contact



STRATEGIC CONSULTING LTD
Responsible decisions • Sustainable actions

Steve Robinson

SJR Strategic Consulting Ltd

steve@sjrscltd.com

t. +44 20 8878 9362

m +44 79 63 948 761

Introduction to the Culham Centre for Fusion Energy (CCFE) By Stuart Knipe (Head of Tritium & Vacuum Unit)



CCFE is the fusion research arm of the **United Kingdom Atomic Energy Authority**

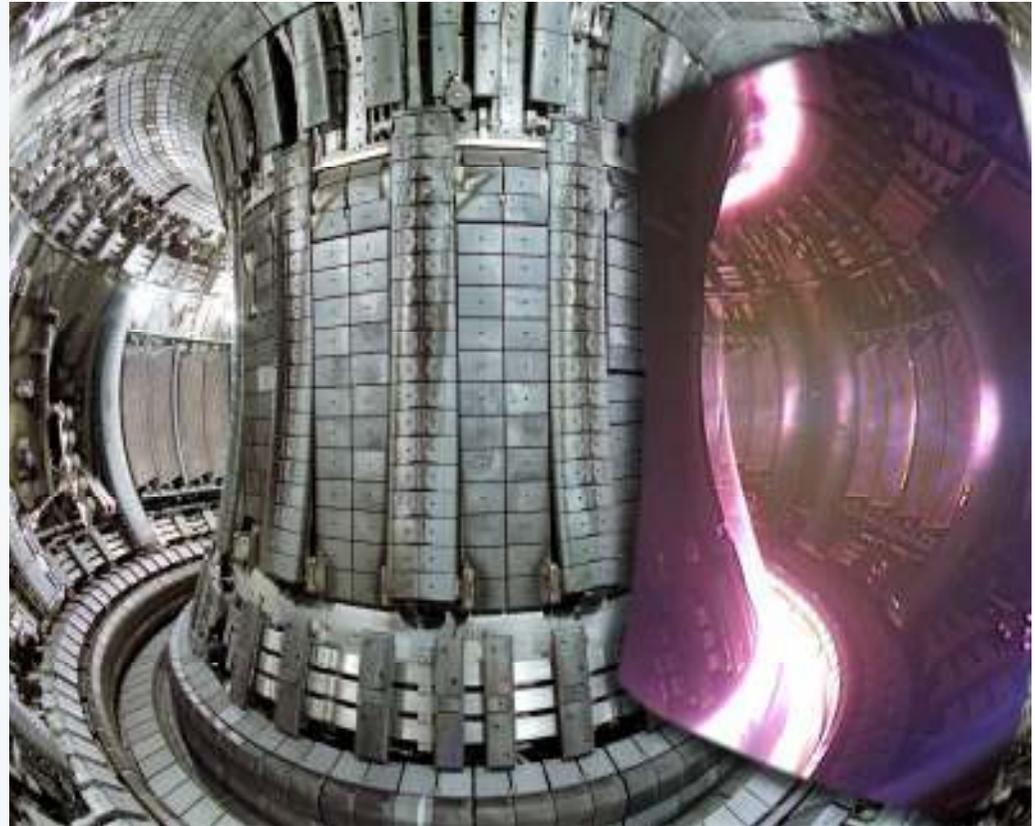
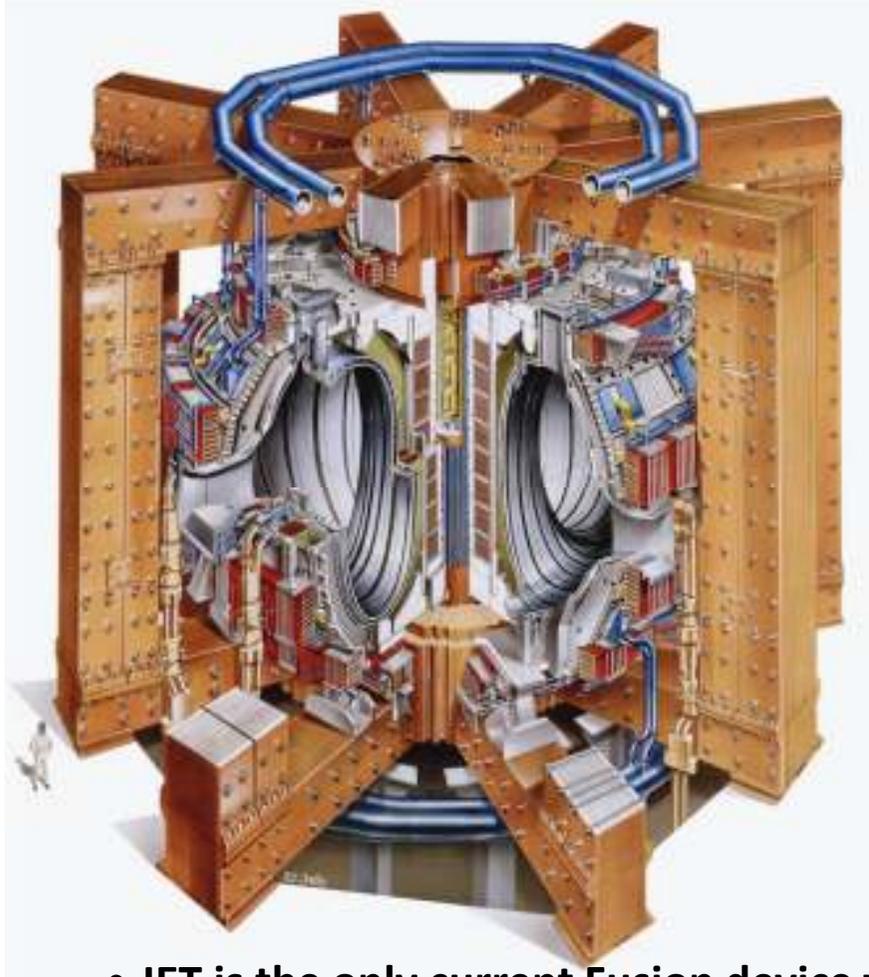


Culham Centre For Fusion Energy

- Operates JET (Joint European Torus) on behalf of the European Commission.
- Operates MAST (Mega Amp Spherical Tokamak) as part of the UK domestic program.
- Theory and Modelling research.
- Technology and Materials programme.
- International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) contracts
- DEMO (Demonstration Fusion Reactor) work under European consortium.
- **Tritium Science and Engineering**



CCFE Operates JET



- JET is the only current Fusion device with a Tritium Fuelling capability

CCFE Expertise

- A dedicated Tritium Science and Engineering Group with over 20 Scientists and Engineers
- Over 20 years of Operational, Research & Development expertise with tritium systems
- Founding member of UK Tritium Users Group
 - Established to 'encourage and maintain effective information exchange on tritium issues and studies'
 - leading to the sharing and exploitation of "best practice" methodologies in tritium operations and waste treatment.

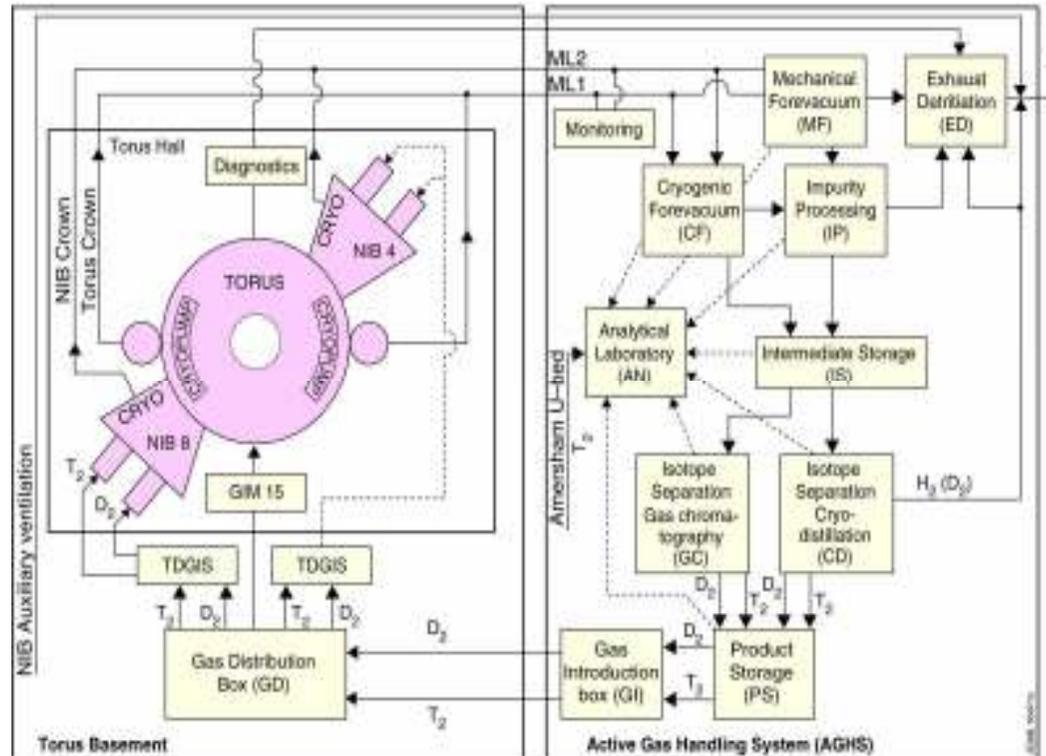
Tritium Sources and Users

- Atmospheric via cosmic rays
 - Natural inventory = 3.5kg, 200g produced every year ^[1]
 - Small amounts additionally produced within the Earth
- Nuclear weapons tests
 - Residual atmospheric tritium levels amount to $1.26 \cdot 10^7$ TBq (35kg) ^[1]
- Nuclear fission power plants
 - Fission products and nuclear fuel reprocessing
 - Activation of deuterium in CANDU/heavy water reactors
- **Fusion facilities**
- Nuclear weapons research/production
- Radio-nuclide labelling
 - Particularly significant due to the production of tritiated organic molecules
- Luminescent devices

1 - Livre Blanc (White Book) du Tritium, l'Autorité de sûreté nucléaire, 2010



Tritium Operations

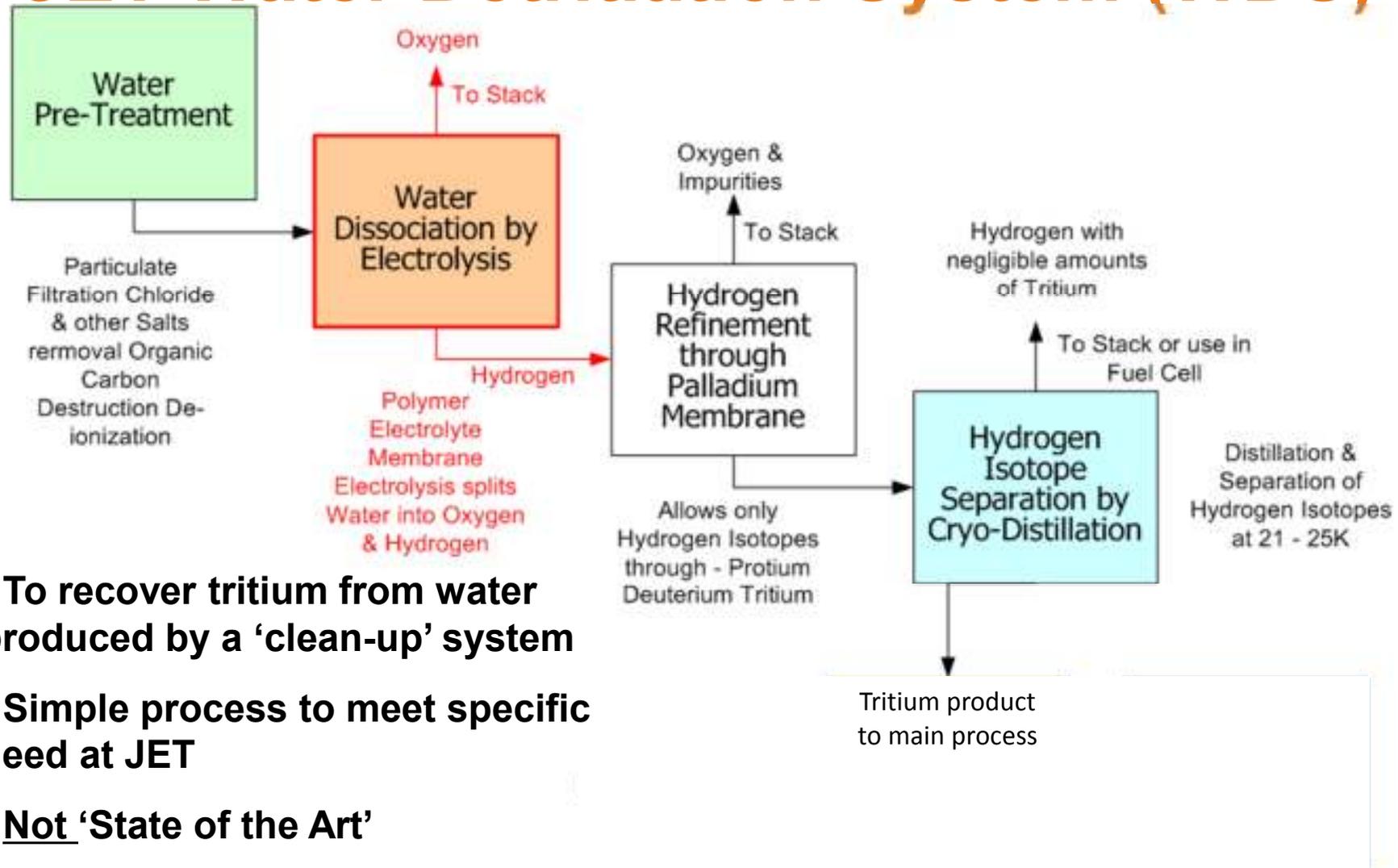


Active Gas Handling System (Tritium Plant)

- Closed loop tritium fuel cycle
- Authorisation for 90g Tritium (32,000 TBq)
- Water Detritiation System Commissioning in 2014



JET Water Detritiation System (WDS)



- To recover tritium from water produced by a 'clean-up' system
- Simple process to meet specific need at JET
- Not 'State of the Art'

Water Detritiation System (WDS)

- Reprocessing plant (Canada) unable to accept water due to chemical impurities
- Simple system employing water purification, electrolysis, hydrogen purification and hydrogen distillation
- Non 'State of the Art' design from considering options available
- Not optimum efficiency
- Capital cost of ~ £1.5M
- Process up to 135 kg of water per day (34m³ per year based on 250 operating days per year)
- Activity up to 0.18TBq/l (6,000TBq per year)
- No residual water. Full conversion to molecular hydrogen
- Power consumption ~ 130kW (Electrolysers 40kW)

Water Treatment Options

- 4 individual options involving 5 locations were considered in combination to produce 30 options.
 - Purify
 - Concentrate (water)
 - Detritiate
 - Discharge (via an external organisation)
- 10 passed 'pre-screening' which included being technically viable to achieve disposal and being able to address existing inventory and future arisings.
- Each option assessed against 16 criteria under 5 headings
- Sensitivity analysis performed against each of the 5 headings. Each normalised before applying a weighting factor of 2.

Criteria and Scoring (1)

Heading	Criteria	Notes	Scoring (1 to 5)
Availability/ Practicality	Lead time	Time required for full availability	1 – Greater than 3 years 3 – 1-3 years 5 – Currently available
	Continued availability	Likelihood of continued availability	1 – Route closed in 2-3 yrs 3 – Route available 5-10 yrs 5 – Available for foreseeable future
	Proven technology	Technology proven for use	1 – Theoretical 3 – Proven for samples 5 – Proven at required scale

Criteria and Scoring (2)

Heading	Criteria	Notes	Scoring (1 to 5)
Financial	Start-up cost	Initial cost to set up route	1 – High 3 – Medium 5 – Low
	Operational cost	Running cost: utilities, raw materials, training etc.	1 – High 3 – Medium 5 – Low
	Decommissioning	Decommissioning cost	1 – High 3 – Medium 5 – Low
	Commercial Benefit	Potential for commercial opportunities	1 – Low 3 – Medium 5 – High

Criteria and Scoring (3)

Heading	Criteria	Notes	Scoring (1 to 5)
Environmental	Transport emissions	Emissions/carbon associated with transporting HTO	3 – As current route
	Process energy use	Energy used (excluding transport) for entire route – including off-site	3 – As current route
	Tritium recovery	Does method allow tritium to be recovered for re-use	1 – None recovered 3 – Some recovered 5 – All recovered
	Volume reduction	Overall volume of waste reduction (including secondary waste)	3 – As current route

Criteria and Scoring (4)

Heading	Criteria	Notes	Scoring (1 to 5)
Health and Safety	Proximity Principle	Dispose/manage close to point of production	3 – As current route
	HTO Handling	Risk of exposure during handling	3 – As current route
	Number of processes	Increased opportunity for accidents	3 – As current route

Criteria and Scoring (5)

Heading	Criteria	Notes	Scoring (1 to 5)
Regulatory/ Public Relations	Change to Environmental Permit	Would option require change to Permit	1 – Major or immediate change required 3 – Minor change or change in 2+ years 5 – No change required
	Legislation	Feasible under current/future legislation	1 – Potential for legal breach 3 – Legal breach unlikely 5 – No potential for legal breach
	Public Image	Perceived harm/potential for damage to image	

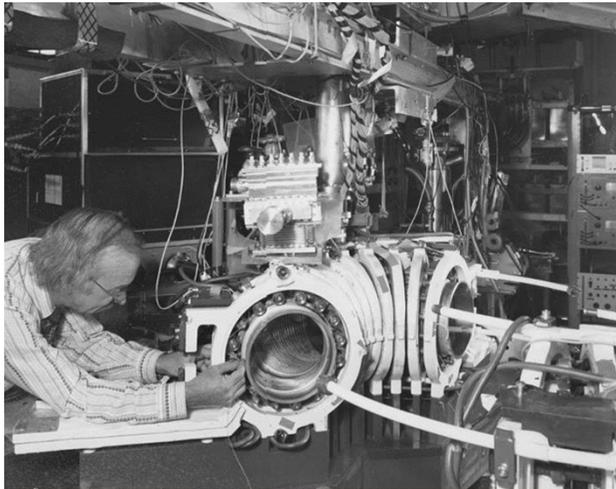
Local Stakeholder Engagement

- Twice yearly Culham Local Liaison Committee (LLC)
 - Discussion with local politicians, tenants, local inhabitants (schools and villages) and regulators. Present progress and future plans. Chaired by CCFE Chief Executive
- Close links with local councils – especially economic development teams and planning
- Close links with local MPs (UK Parliament) and MEPs (European Parliament).
- Open evenings/days – one per month, 100 people attending each. Many of them local residents; some dedicated to local villages and towns. Free to attend.

Local Stakeholder Engagement

- ‘Best Available Techniques’ (BAT) Study performed by independent organization to develop Culham Integrated Waste Strategy considering all waste streams not just radioactive.
- Local stakeholders and regulator are an integral part of the BAT study team. Independent technical experts present to provide balanced view.
- Considers all aspects of strategy including traffic, noise, energy, discharges, employment and timescales etc.

History of Culham



Dedicated fusion laboratory since 1965

Selected to host The Joint European Torus (JET) in mid 1970s – JET completed in 1983.

Run by the UK Atomic Energy Authority

The UK Atomic Energy Authority Mission

The Authority's principal mission is to position the UK as a leader in a future, sustainable energy economy by advancing fusion science & technology and related technologies to the point of commercialisation.

Thank you for your attention

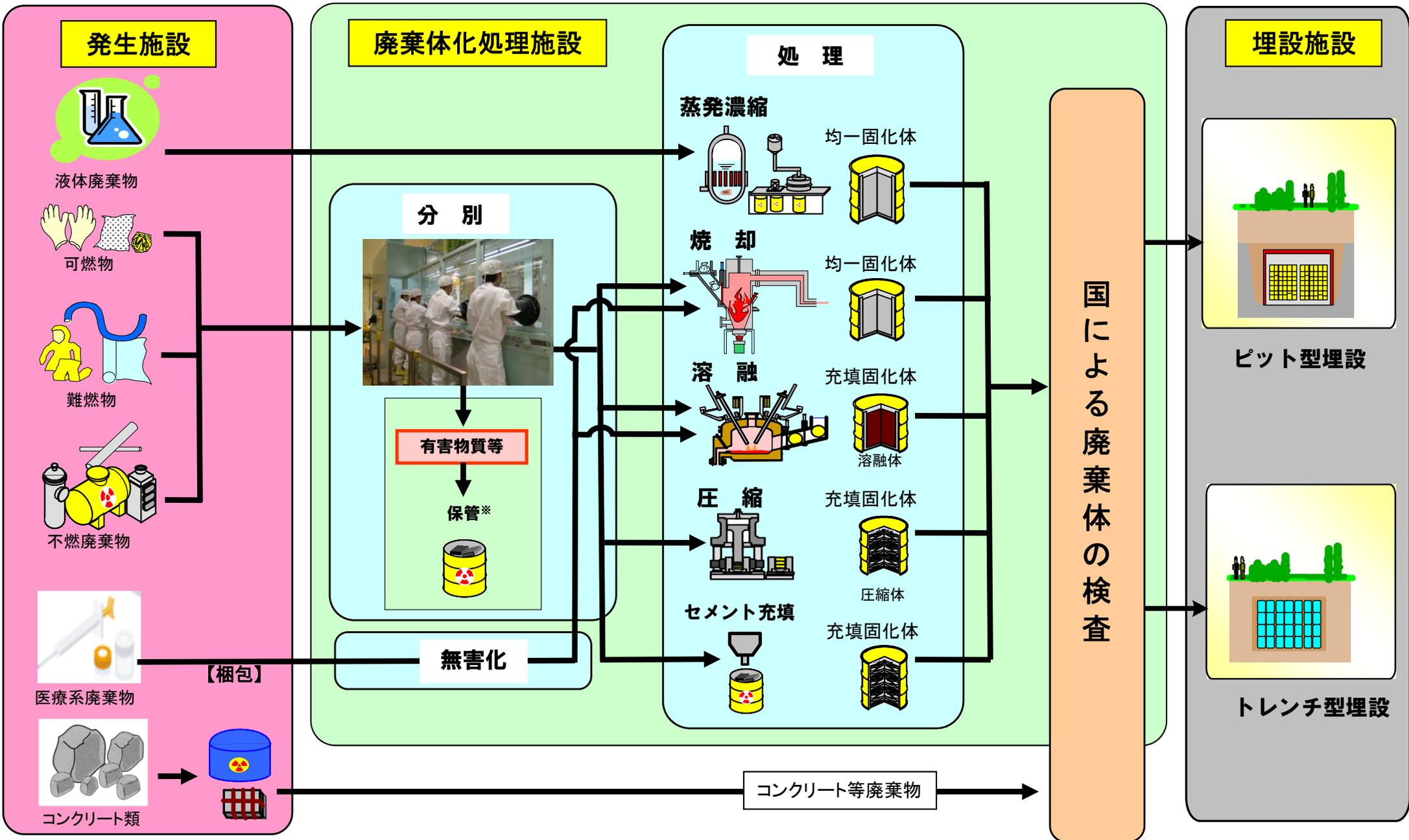


浅地中埋設処分施設の基本概念と 安全評価の考え方について

平成26年 2月27日(木)

原子力機構 埋設事業推進センター
設計技術課

① 放射性廃棄物の処理・処分



② 放射性廃棄物の処分方法

処分深度(目安)

地表

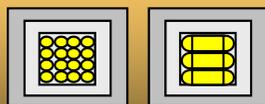
50m

100m

200m

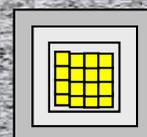
300m

トレンチ型埋設処分



ピット型埋設処分

余裕深度処分



低レベル放射性廃棄物

低

放射能濃度

高

高レベル放射性廃棄物

(低レベル放射性廃棄物の一部)

(ガラス固化体)

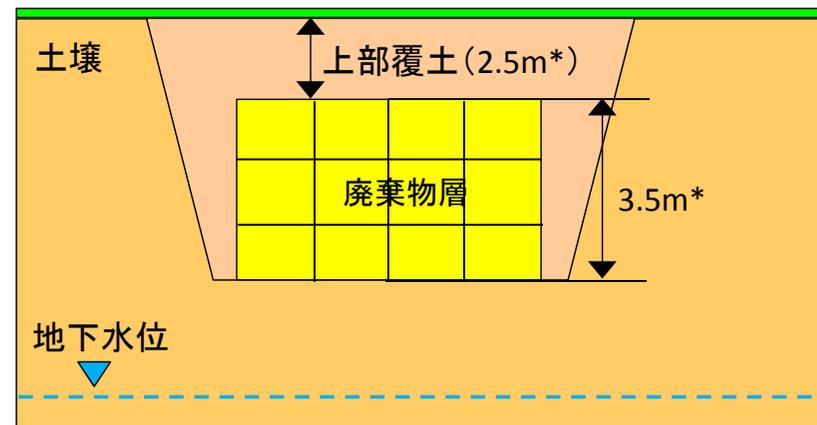


地層処分

③-1 浅地中処分施設概念 -トレンチ処分施設-

- 放射能濃度の極めて低い廃棄物を対象とし、コンクリートピット等の人工バリアを設置しない処分施設。
- 地下水に放射性廃棄物が直接接触しないように地下水位より上部に施設を設置し、廃棄物の周囲に土砂等を充填し、上部に覆土を敷設。
- 原子力機構の原子力科学研究所において、動力試験炉JPDRの解体により発生したコンクリート等廃棄物のトレンチ処分を実施。現在埋設作業を終了し、埋設地の管理を実施(保全段階)。

トレンチ処分施設のイメージ図



* 原子力機構の埋設施設の例



廃棄物埋設用トレンチ外観及び雨水浸入防止用テント(定置開始前)



フレキシブルコンテナ封入廃棄物の定置作業状況

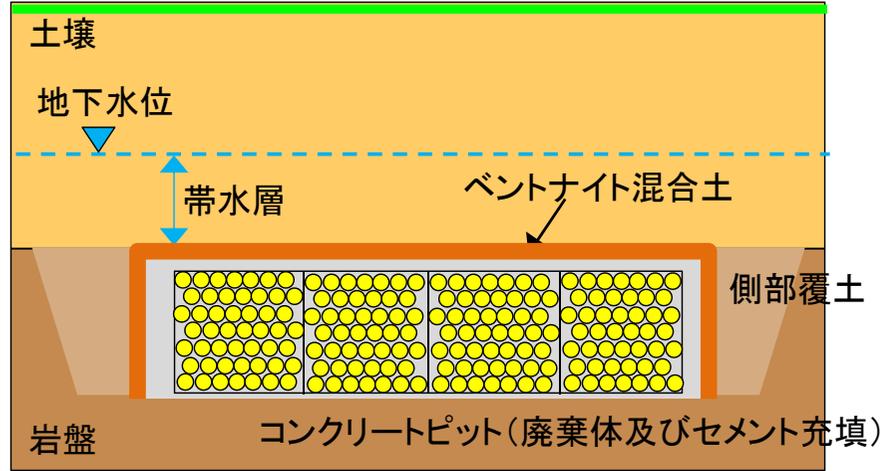


廃棄物埋設地(保全段階)

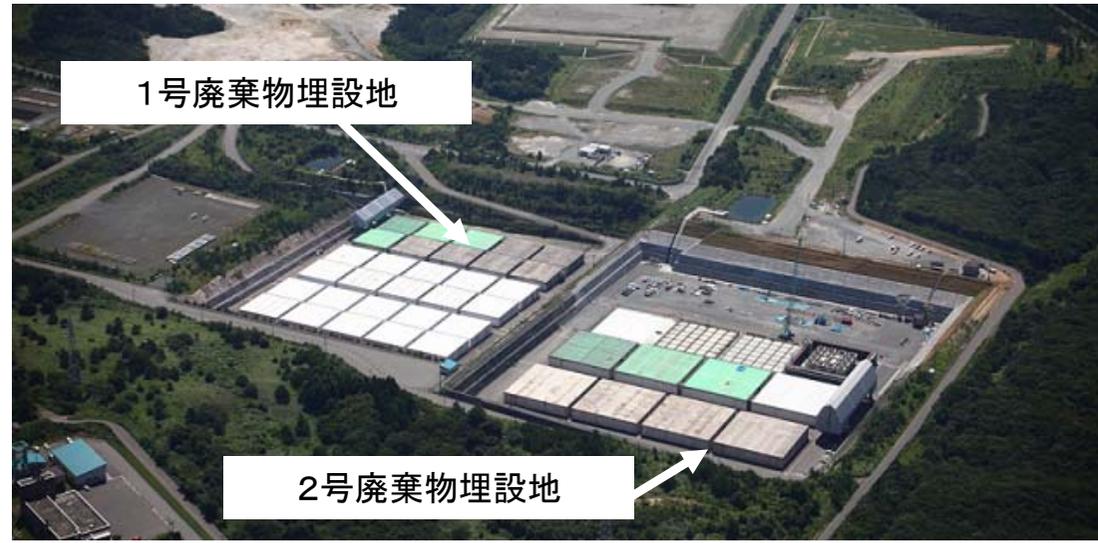
③-2 浅地中処分施設概念 -コンクリートピット処分施設-

- 低レベル放射性廃棄物を容器に固型化して廃棄体とし、コンクリートピットに処分する方法。
- 放射性物質の移行を抑制するため、ピット全体が透水性の低い岩盤内となるように設置。
- コンクリートピット内はセメント系材料で充填され、側部と上面に透水性の小さいベントナイト混合土層を設置。
- 発電所廃棄物のうち、ピット処分対象の廃棄物については、日本原燃(株)の低レベル放射性廃棄物埋設センターにて、処分が実施されている。

コンクリートピット処分施設のイメージ

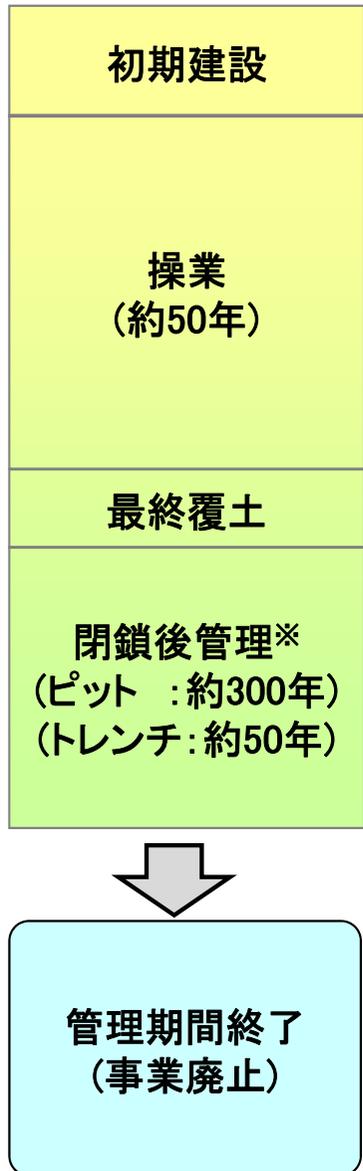


日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センターのコンクリートピット処分施設



原子力委員会 新大綱策定会議 (第5回) (平成23年3月8日)
資料第3-1号「放射性廃棄物の処理・処分を巡る取組の現状について」より引用

④ 浅地中処分施設の安全評価



作業・管理期間中の評価

処分施設の管理(作業)期間中において、事業所(周辺監視区域)境界上の最大となる地点で、一般公衆が受ける線量を評価し、線量目標値以下であることを確認

【例:コンクリートピット施設からのスカイシャイン線量の評価】

線量基準 : 1mSv/y ※
線量目標値: 50 μSv/y ※

管理期間終了後の評価

管理期間終了後、埋設地及び周辺において、一般公衆が受けると想定される線量を評価し、管理期間終了後の線量のめやす値以下であることを確認

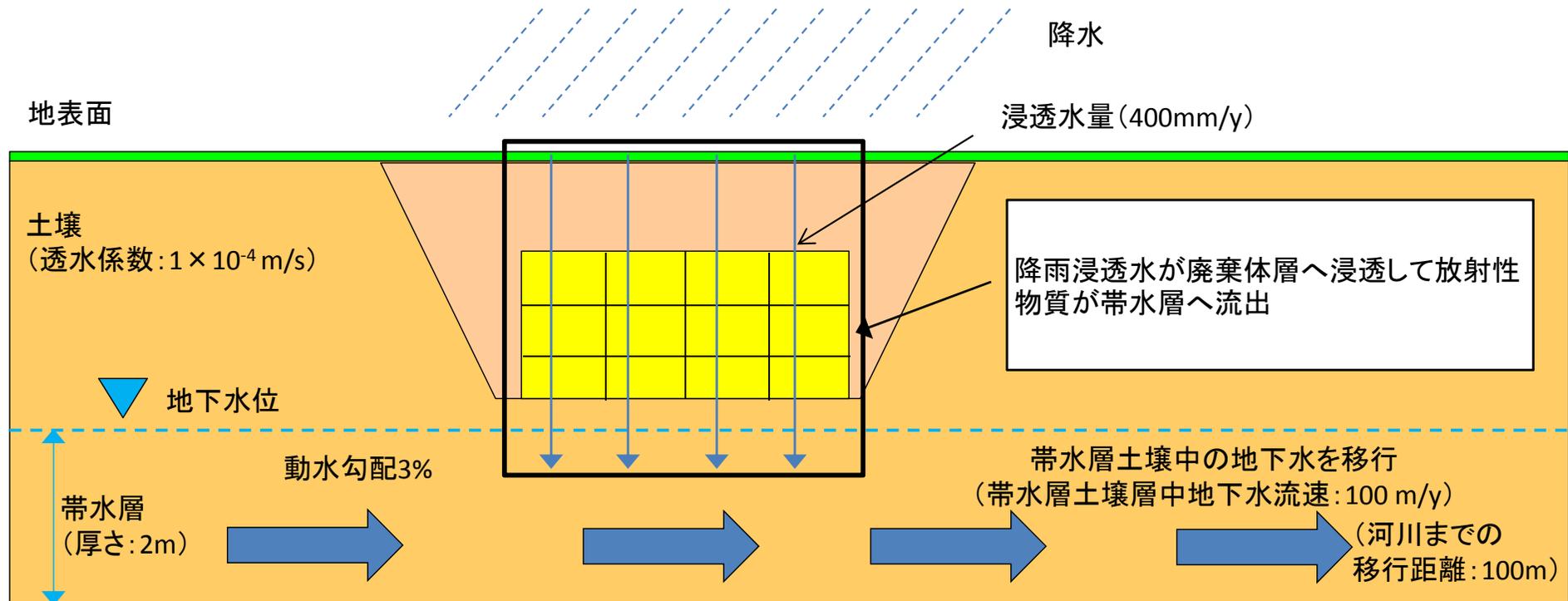
線量めやす値
基本シナリオ (確からしい想定に基づくシナリオ)
: 10 μSv/y ※
変動シナリオ (周辺環境や埋設施設の変動を想定したシナリオ)
: 300 μSv/y ※
等

放射性物質が処分施設から地下水へ浸出し、その放射性物質による周辺環境における線量評価、埋設地を利用することにより埋設地に残存する放射性物質からの線量評価を実施する。

※ 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈(制定平成25年11月27日原管廃発第1311277号原子力規制委員会決定)

⑤-1 トレンチ処分施設からの流出・移行モデル概念

コンクリート施設の安全評価モデル

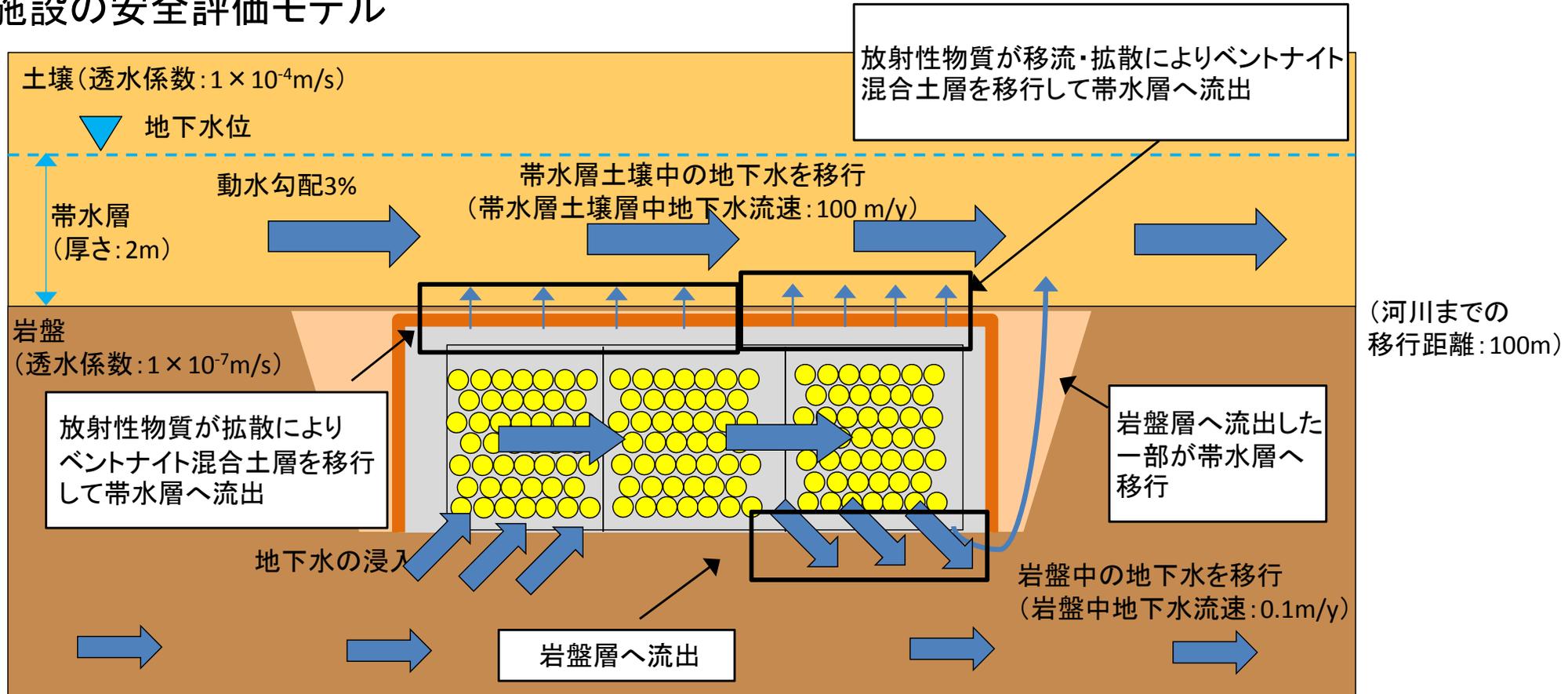


- 降雨浸透水がトレンチ施設に浸入し、放射性物質は、トレンチ施設内の土壌と浸透水の分配平衡により浸透水中を移行し、トレンチ施設下方の帯水層に流出するモデル
- 帯水層土壌中の放射性物質の移行計算は、既設の埋設施設の安全評価で用いられている一次元の移流による評価式を用いて評価

※ 図中の透水係数等のパラメータは、天澤ら「研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計」JAEA-Technology 2012-031(2012)で設定した我が国の一般的な環境条件より引用

⑤-2 コンクリートピット処分施設からの流出・移行モデル概念

ピット施設の安全評価モデル

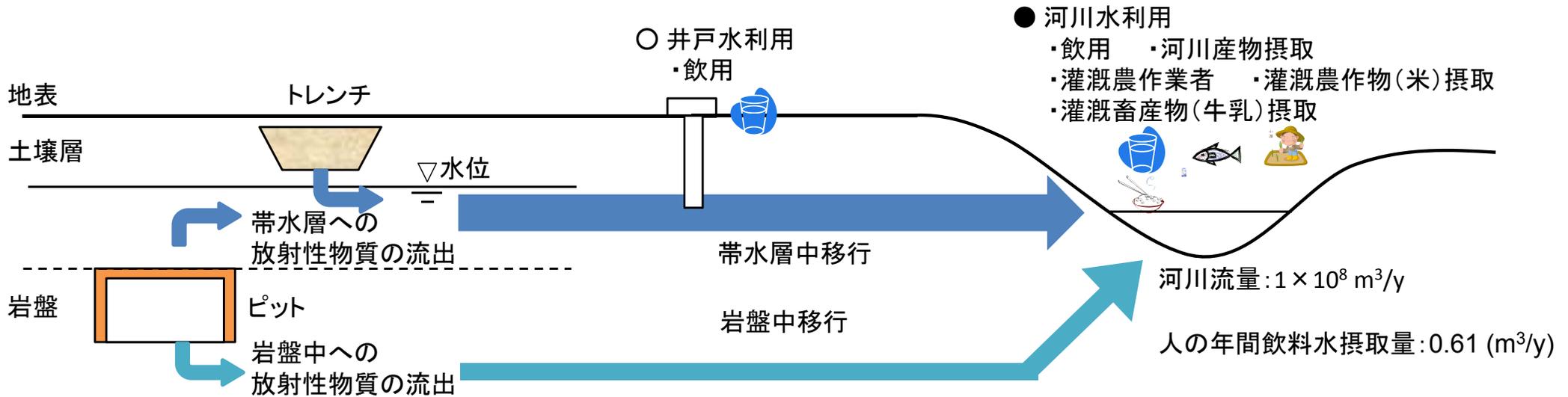


- ピット内に地下水が浸入し、放射性物質が地下水とセメント系材料の分配平衡により、浸入水へ移行
- 放射性物質はピット内から移流により岩盤へ流出、またはピット内から地下水流の下流側のベントナイト混合土層内を移流及び拡散により通過して帯水層へ流出
- 地下水流の上流側のベントナイト混合土層では、地下水流の移流量が非常に小さいと考えられ、放射性物質は拡散により帯水層へ流出
- ピット施設内から岩盤層へ流出した放射性物質の一部が、地下水流の移行に伴い帯水層へ移行することを考慮
- 帯水層土壌中・岩盤中の放射性物質の移行計算は、既設の埋設施設の安全評価で用いられている一次元の移流による評価式を用いて評価

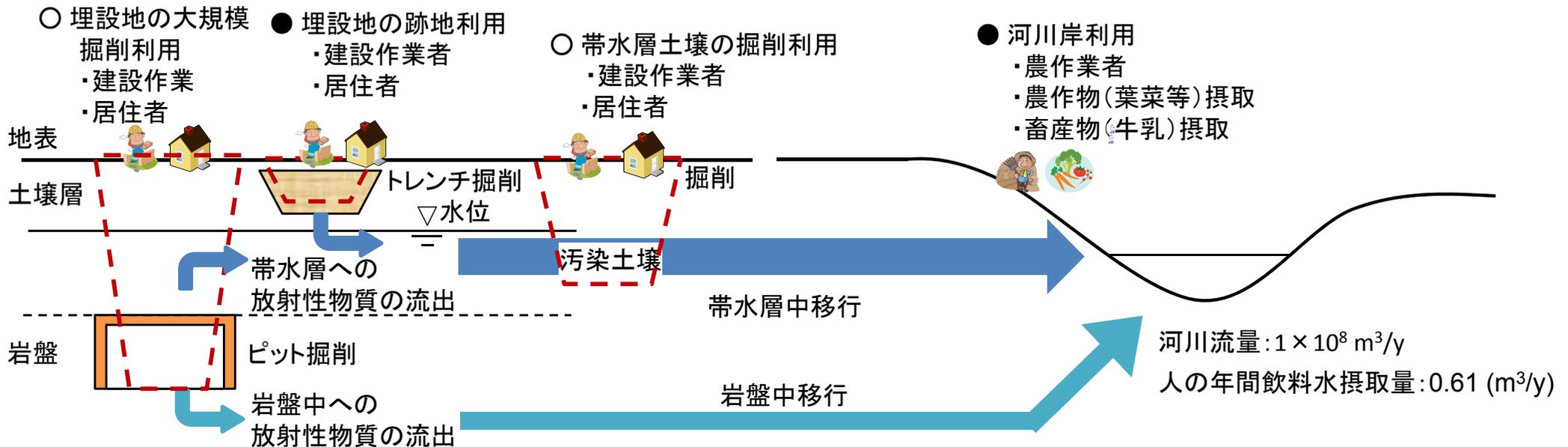
※ 図中の透水係数等のパラメータは、天澤ら「研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計」JAEA-Technology 2012-031(2012)で設定した我が国の一般的な環境条件より引用

⑥ 線量評価シナリオの概念図

地下水移行シナリオ ●基本シナリオ ○変動シナリオ



土地利用シナリオ ●基本シナリオ ○変動シナリオ



※ 図中の透水係数等のパラメータは、天澤ら「研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計」JAEA-Technology 2012-031(2012)で設定した我が国の一般的な環境条件より引用

⑦-1 H-3の線量評価結果(研究施設等廃棄物浅地中処分施設の事例)

計算条件

		トレンチ施設	ピット施設	備考
放射能濃度(Bq/g)		100	10,000	設定値。
放射能(Bq)		1.4E+13	7.2E+14	放射能の算出方法を参照。
廃棄体総量	本数(本)	3.8E+05	2.2E+05	JAEA-Technology 2012-031より引用。200Lドラム缶の本数。
	体積(m ³)	7.6E+04	4.4E+04	JAEA-Technology 2012-031より引用。
	重量(ton)	1.5E+05	1.2E+05	JAEA-Technology 2012-031より引用。
分配係数	土壌(m ³ /kg)	0	0	JAEA-Technology 2012-031より引用。
	岩盤(m ³ /kg)	0	0	JAEA-Technology 2012-031より引用。

放射能の算出方法

	①放射能濃度(Bq/g)	②施設: 密度(kg/m ³)	③廃棄体: 体積(m ³)	④施設: 空隙率(-)	⑤放射能(Bq)
トレンチ施設	100	2,600	7.6E+04	0.30	1.4E+13
ピット施設	10,000	2,500	4.4E+04	0.35	7.2E+14

算出式: ① × ② × ③ × (1-④) = ⑤

基本シナリオ(めやす線量: 10 μSv/y)

シナリオ	評価経路	被ばく形態	被ばく線量(μSv/y)		
			トレンチ	ピット	
地下水シナリオ	河川水利用	飲用	経口摂取	8.2E-01	1.3E-01
		河川産物摂取	経口摂取	8.1E-04	1.3E-04
		灌漑農業者	外部・吸入	2.2E-07	3.5E-08
		灌漑農作物(米)摂取	経口摂取	6.7E-02	1.1E-02
		灌漑畜産物(牛乳)摂取	経口摂取	4.5E-01	7.0E-02
土地利用シナリオ	河川岸利用	農業者	外部・吸入	2.6E-07	4.1E-08
		農作物(葉菜等)摂取	経口摂取	8.8E-03	1.4E-03
		畜産物(牛乳)摂取	経口摂取	1.2E-02	1.9E-03
	埋設地の掘削利用	建設作業	外部・吸入	6.1E-06	
		居住者(農作物(葉菜等)摂取を含む)	外部・吸入・経口摂取	4.1E-02	

※ 河川水利用と河川岸利用の評価経路では、放射性物質が施設閉鎖後から地下水中に移行を開始することを想定し、施設閉鎖後からの最大線量、埋設地の利用の評価経路は、管理期間終了後(トレンチ50年、ピット300年)からの最大線量として評価。

変動シナリオ(めやす線量: 300 μSv/y)

シナリオ	評価経路	被ばく形態	被ばく線量(μSv/y)		
			トレンチ	ピット	
地下水シナリオ	井戸水飲用	飲用	経口摂取	1.4E-05	3.9E-07
土地利用シナリオ	埋設地の大規模掘削利用	建設作業	外部・吸入	2.2E-05	1.7E-09
		居住者(農作物(葉菜等)摂取を含む)	外部・吸入・経口摂取	1.5E-01	1.1E-05
	帯水層土壌の掘削利用	建設業者	外部・吸入	—	—
		居住者(農作物(葉菜等)摂取を含む)	外部・吸入・経口摂取	1.4E-08	—

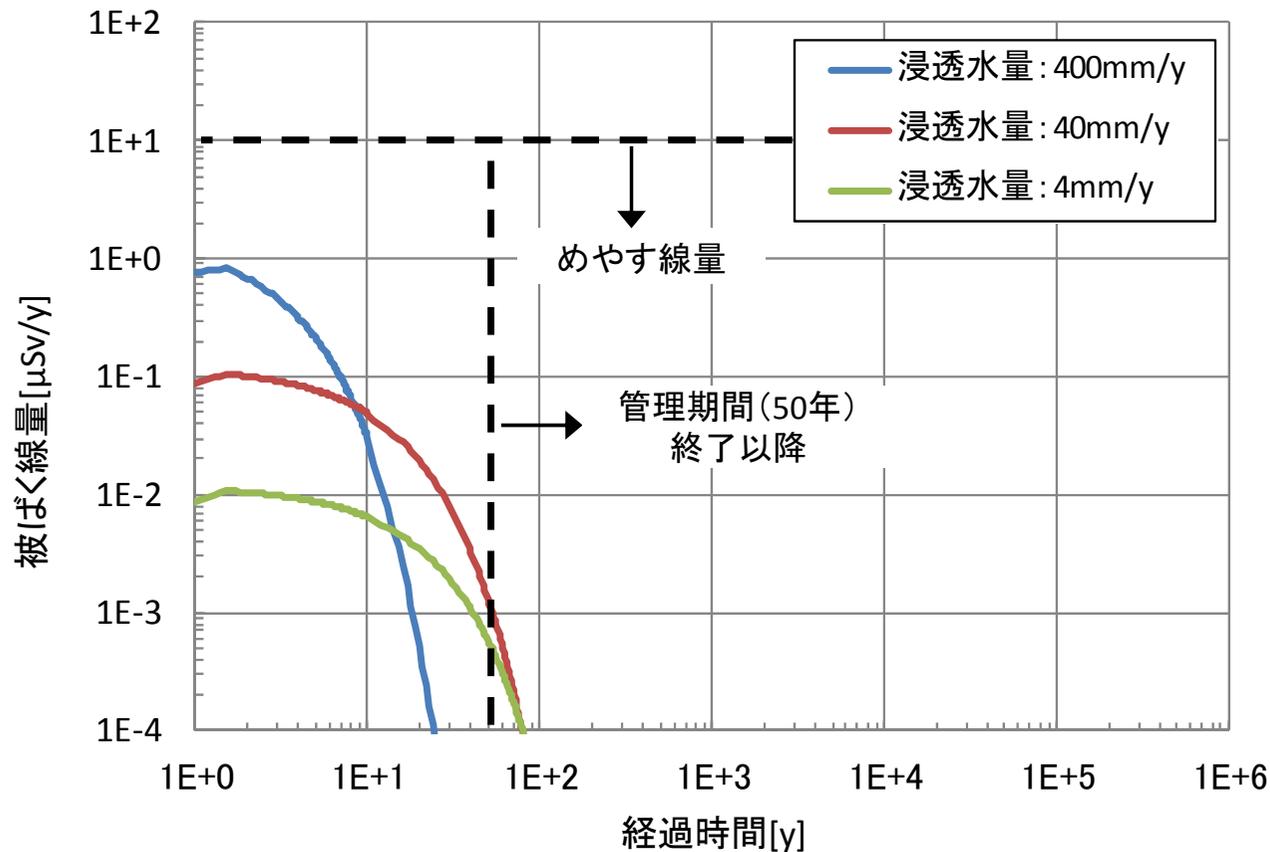
※ 上記の移行経路は、埋設地及び近傍の地下水を利用する経路であることから、管理期間終了後(トレンチ50年、ピット300年)からの最大線量として評価。「—」は1×10⁻¹⁰μSv/y以下であることを示す。

※ 上記の計算条件の一部は、天澤ら「研究施設等廃棄物浅地中処分施設概念設計」JAEA-Technology 2012-031(2012)に基づいて設定

⑦-2 H-3の検討(1):トレンチ処分施設

トレンチ処分施設から河川に流出したH-3を人が飲用した場合の線量

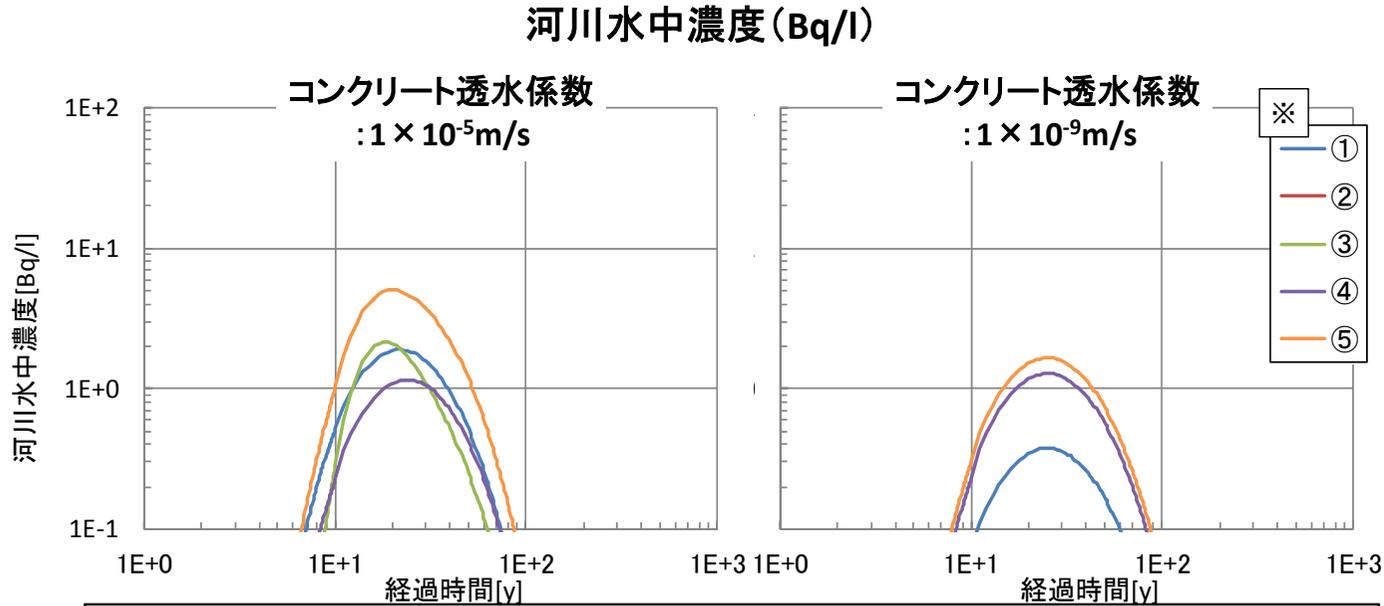
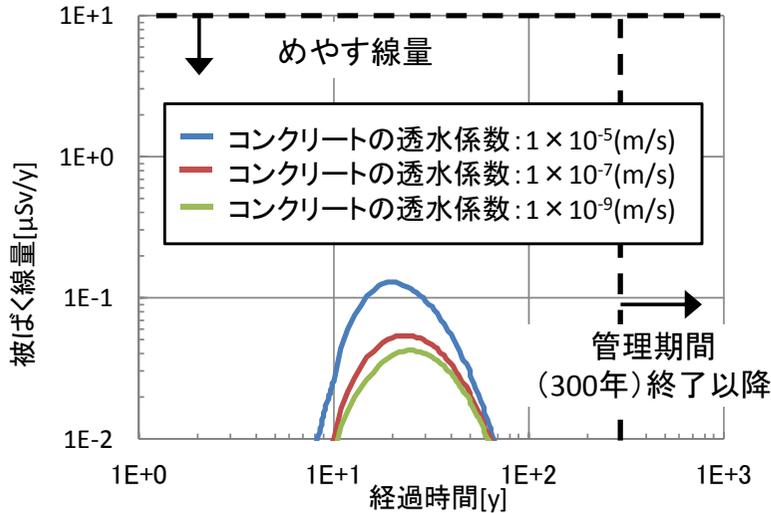
- 廃棄体層への浸透水量(降水量から蒸発散量差し引いた量)を一般的な値400mm/y に設定
- 上部に遮水シートや粘土層を設置した場合として、浸透水量を1/10、1/100に想定したケースも試算



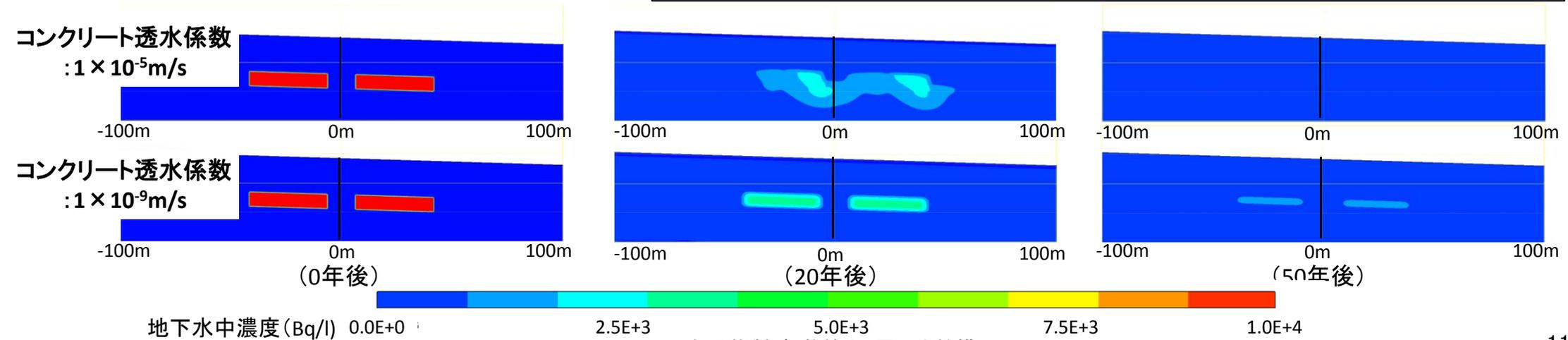
⑦-3 H-3の検討(2):ピット施設

ピット施設のコンクリートの劣化状態を考慮して、透水係数を 1×10^{-5} 、 1×10^{-7} 及び 1×10^{-9} m/s を設定した場合における地下水移行シナリオ(河川水飲用経路)の被ばく線量を試算

	最大線量 (μ Sv/y)
コンクリート透水係数: 1×10^{-5} m/s	1.3E-01
コンクリート透水係数: 1×10^{-7} m/s	5.4E-02
コンクリート透水係数: 1×10^{-9} m/s	4.2E-02

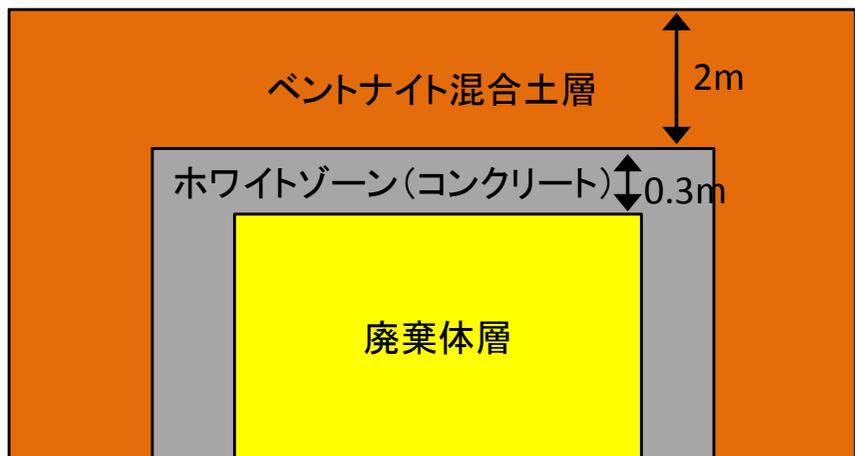


※ ①ベントナイト混合土層から土壌層へ移行(移流+拡散) ②岩盤層へ移行(移流)
 ③岩盤層から土壌層へ移行(移流) ④ベントナイト混合土層から土壌層へ移行(拡散)
 ⑤ ①から④の合計



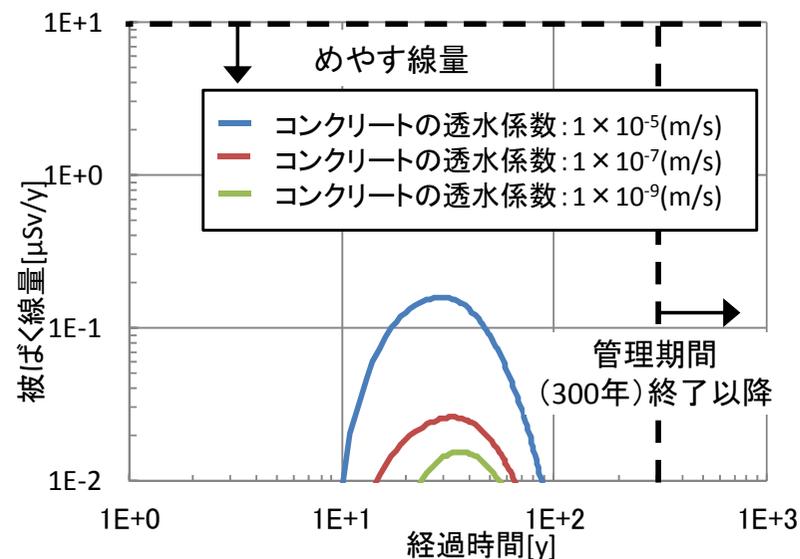
⑦-3 H-3の検討(3):ピット施設

ピット施設内にホワイトゾーンを設置した場合の地下水移行シナリオ (河川水飲用経路)の被ばく線量を試算

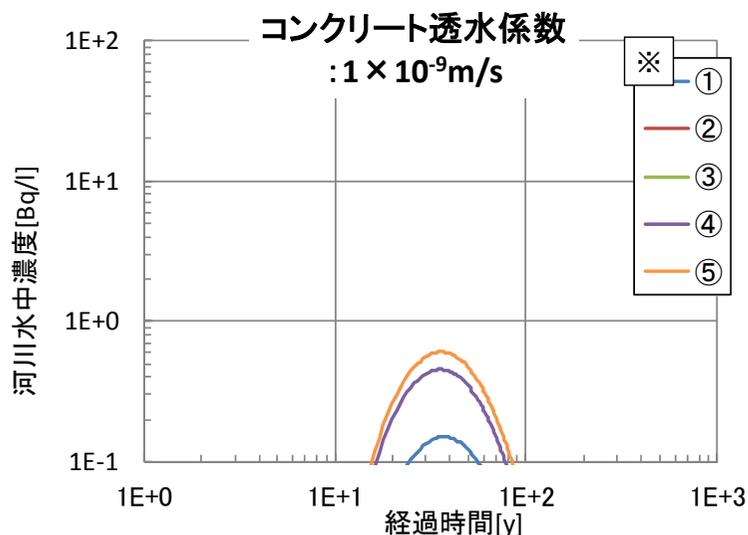
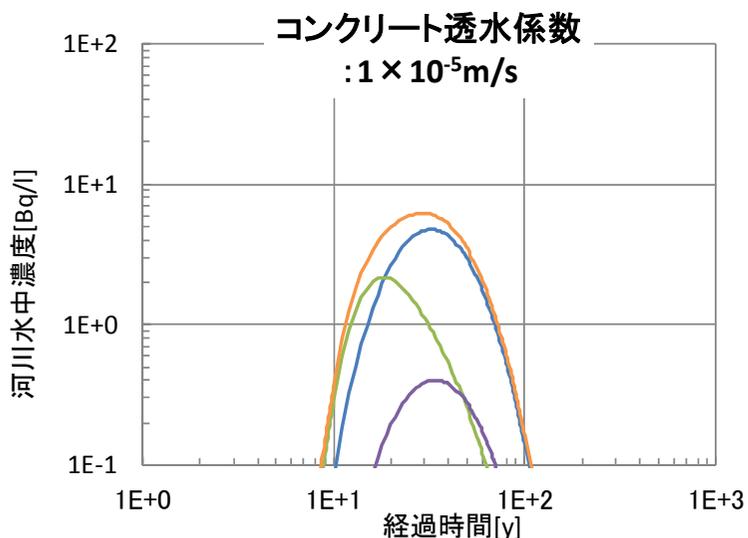


ベントナイト混合土中の拡散係数 : $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
 ホワイトゾーン(コンクリート)中の拡散係数 : $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
 廃棄体層中の拡散係数 : $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$

ホワイトゾーン(コンクリート)の設置した場合の被ばく線量



河川水中濃度 (Bq/l)



- ※
- ① ベントナイト混合土層から土壌層へ移行 (移流+拡散)
 - ② 岩盤層へ移行 (移流)
 - ③ 岩盤層から土壌層へ移行 (移流)
 - ④ ベントナイト混合土層から土壌層へ移行 (拡散)
 - ⑤ ①から④の合計

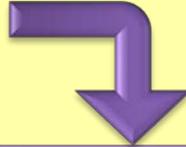
トリチウム水の浅地中処分に係る検討

独立行政法人日本原子力研究開発機構

平成26年10月24日

トリチウム水の処分の選択肢の1つとして浅地中処分方式による検討

前回*1は一般的な環境条件の下での浅地中処分方式による安全確保について提示



環境条件等を考慮した安全評価結果を提示

*1:平成26年2月27日 トリチウム水タスクフォース(第4回) 資料2 浅地埋設処分施設の基本概念と安全評価の考え方について

トリチウム水の条件

総水量 : $8 \times 10^5 \text{m}^3$
放射能濃度 : X Bq/L

- 放射性廃液の埋設処分に際しては、200Lドラム缶等にセメント等の固型化剤で固型化した後、コンクリートピット等へ定置
- 総水量が $8 \times 10^5 \text{m}^3$ なので、200Lドラム缶でセメント固化体を製作すると総量は約667万本と試算
- 研究施設等廃棄物のコンクリートピット(12,960本/基*2)を参考とすると、コンクリートピットが515基必要



ピットの区画内にトリチウム水とセメント系固型化材を混練して直接流し込み施設と一体的に固化する方法を想定

想定したコンクリートピット施設の概要

ピット施設の条件

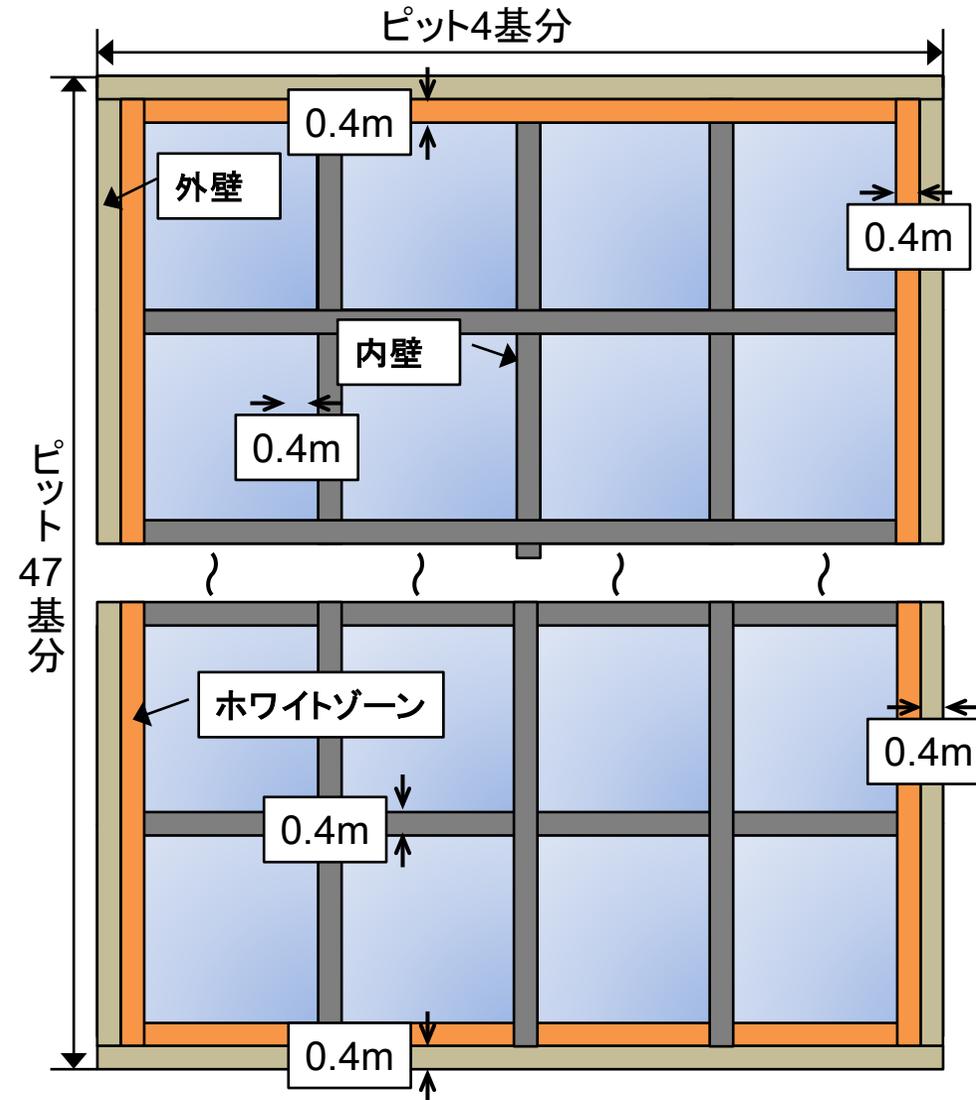
ピット1基の大きさ

施設規模	: 40m × 36m × 6.9m
外周壁(ホワイトゾーン)	: 0.4m
内部壁厚	: 0.4m
底板	: 0.6m
上板	: 0.5m

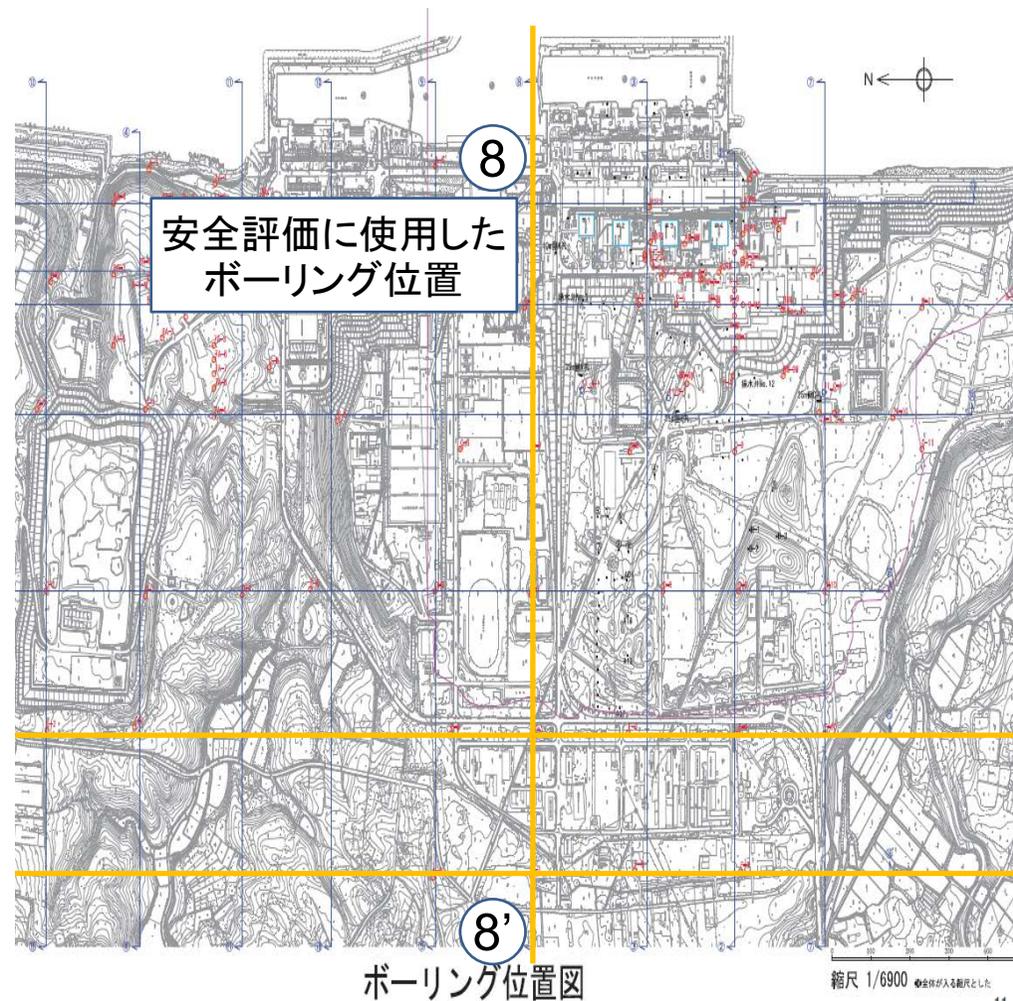
ピット施設全体の大きさ

ピット基数	: 188基 (4行 × 47列)
ピット外容積	: $1.9 \times 10^6 \text{m}^3$
ピット内容積	: $1.4 \times 10^6 \text{m}^3$
(H-3 埋設最大容量: $8.2 \times 10^5 \text{m}^3$)	

海岸までの距離900m



想定したコンクリートピット施設の規模のイメージ



施設規模のイメージ図
(左の地図と同じ縮尺である)

200Lドラム缶を用いて処分する場合(ピット:515基)

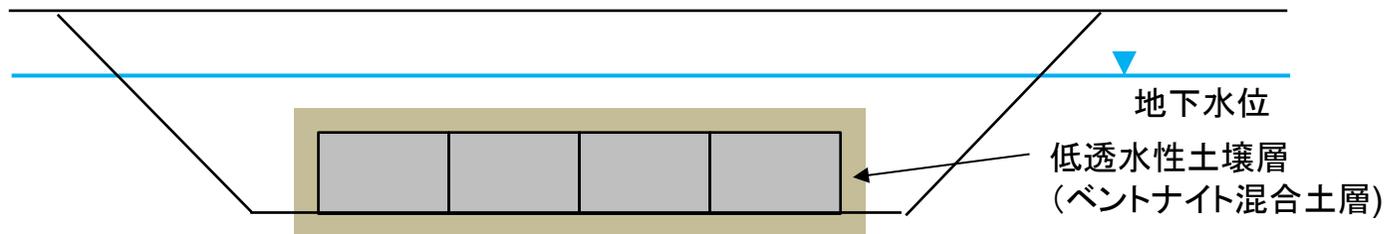


〔解析を行う上で、仮に1Fサイトへ設置した場合を例とした。〕

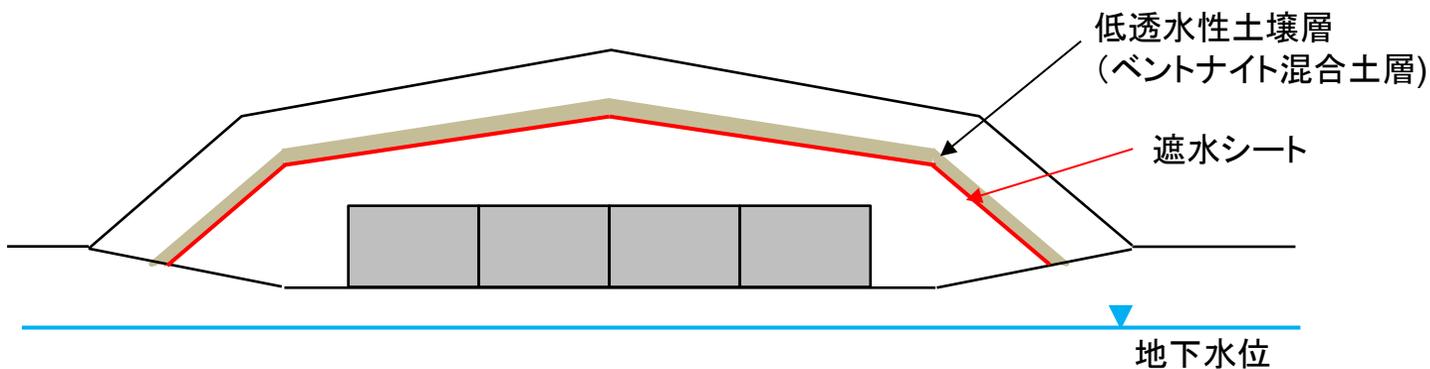
実際の配置では、地形、既存構造物、施設点検路等の考慮が必要であり、より広大な面積が必要

想定したコンクリートピット施設の配置概念

◆ 施設を地下水位より深い位置に設置する場合



◆ 施設を地下水位より浅い位置に設置する場合



評価に用いた地質条件

- ①降雨量:年平均降水量 1545mm(4.2mm/日)
 ②降雨浸透率 55%(蒸発散量を年間700mmとした)
 ③地山ならびに構造物の透水係数

地層区分	震災前		震災後		間隙率 (実流速換算時)	備考
	透水係数(cm/sec)		透水係数(cm/sec)			
地層名	水平	鉛直	水平	鉛直		
盛土	2.8E-03	2.8E-03	2.8E-03	2.8E-03	0.46	
段丘堆積物	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	0.41	中粒砂岩層同様
沖積層	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	0.41	文献値
中粒砂岩	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	0.41	
中粒砂岩(南側、上部)	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	35m盤の3B
中粒砂岩(南側、下部)	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
互層	1.0E-03	1.1E-06	1.0E-03	1.1E-06	0.41	異方性考慮
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
細粒砂岩	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
粗粒砂岩	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
建屋基礎およびMMR	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	0.30	コンクリート相当
建屋側壁	1.0E-06	1.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	0.30	感度解析から設定 ^{※1}
既設矢板	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-04	1.0E-04	0.30	感度解析から設定、施工幅0.8m ^{※2}
ポンプ室およびピット	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	0.30	コンクリート相当
4m盤グラウチング	—	—	3.0E-05	3.0E-05	0.30	中粒砂岩層の1/100相当、施工幅2m
砕石	—	—	1.0E-01	1.0E-01	0.41	埋立部
海側遮水壁	—	—	1.0E-06	1.0E-06	0.30	施工幅1m
陸側遮水壁	—	—	0.0E+00	0.0E+00	—	施工幅2m

評価に使用した
互層の透水係数

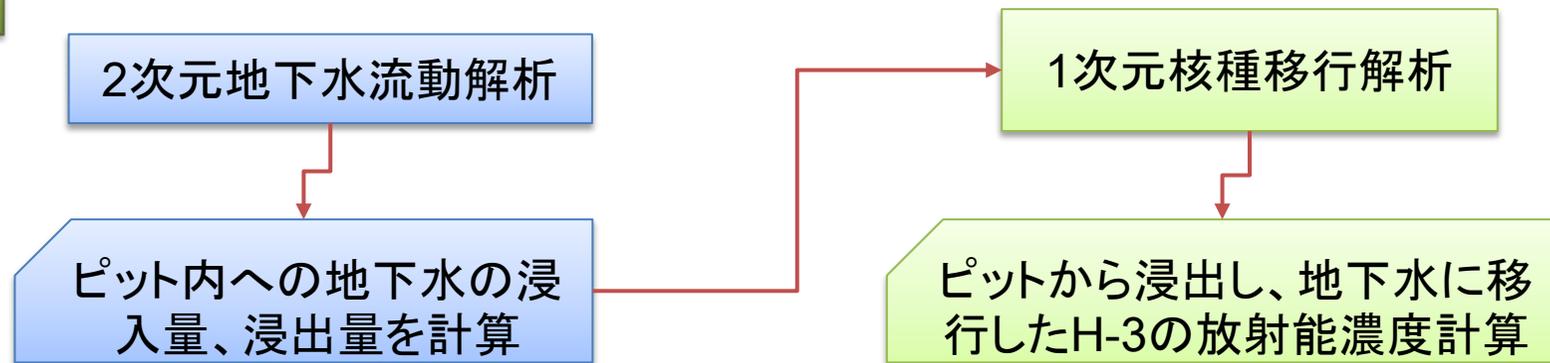
※1: 建屋への流入量が400m³/日を再現できる透水係数
 ※2: 地下水位(C-3, C-4, C-5)が再現できる透水係数

- ④境界条件
 海域: 平均潮位の静水圧
 陸域: 地表からの静水圧

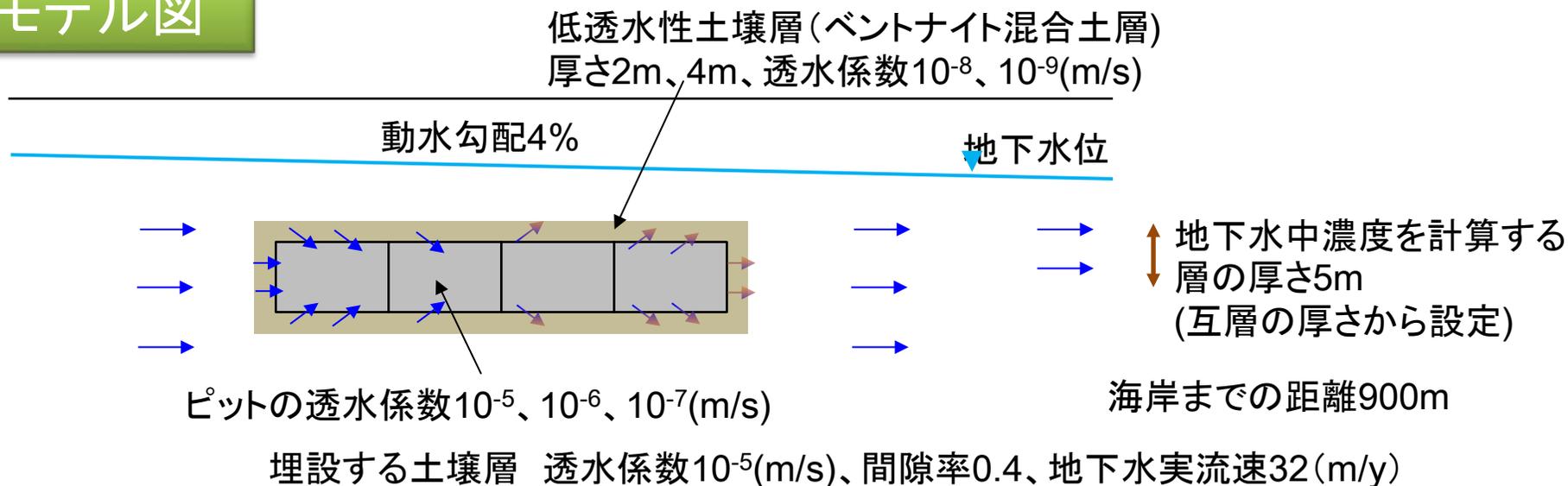
沖積層の透水係数については実測データがないため、日本の地盤を対象とした地下水データベース(梅田浩司, 柳澤孝一, 米田茂夫(1995):日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成, 地下水学会誌, 第37巻, 第1号, 1995)の第四紀更新世(平均値:1.2E-03 cm/sec)と第四紀完新世(平均値:5.6E-04cm/sec)の透水係数の平均値(8.1E-4cm/sec)から1E-3(cm/sec)と設定した。

コンクリートピットからの安全評価について -地下水より深い位置に設置する場合-

評価フロー

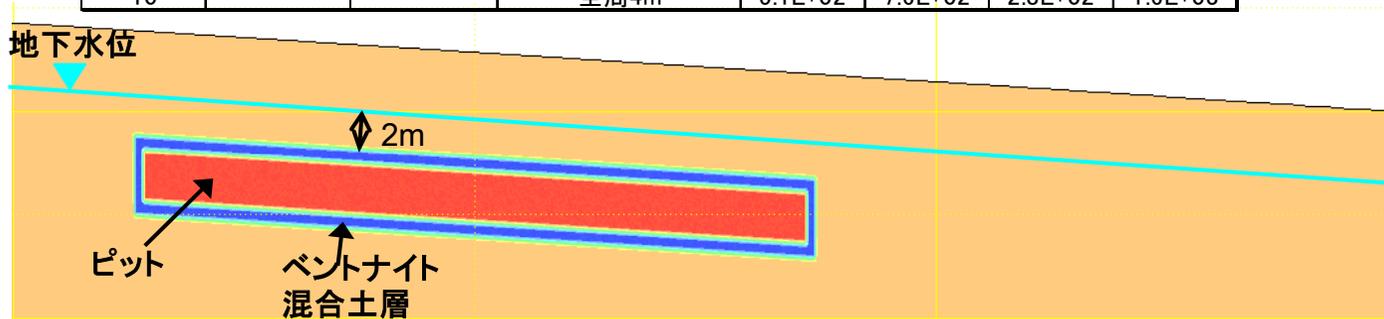


評価モデル図

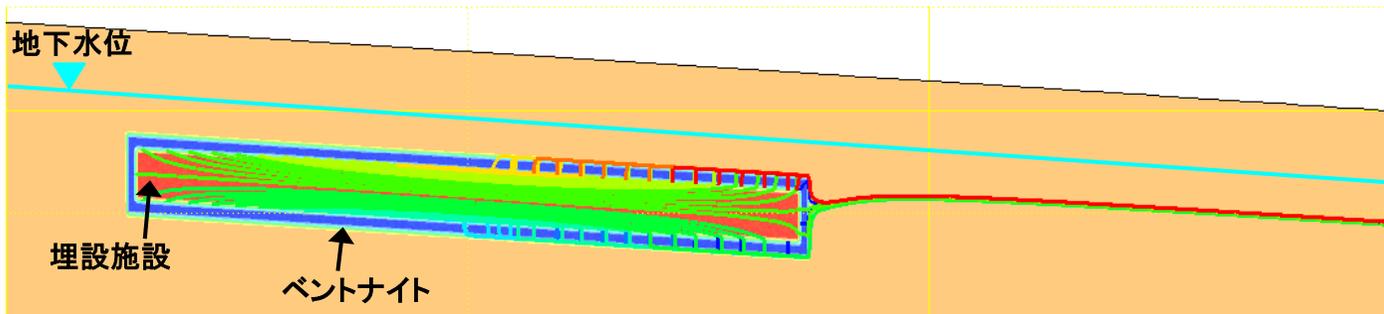


2次元地下水流動解析による浸出水量の計算結果

case	透水係数(m/s)		ベントナイト厚さ	流出水量(m ³ /y)			
	コンクリート	ベントナイト		上面	下面	側面	合計
1	1E-05	1E-09	全周2m	3.2E+03	3.5E+03	8.8E+02	7.6E+03
2			上下面2m、側部4m	3.2E+03	3.5E+03	5.6E+02	7.3E+03
3			全周4m	1.7E+03	2.0E+03	5.5E+02	4.3E+03
4			1E-08	全周4m	1.4E+04	1.6E+04	4.9E+03
5	1E-06	1E-09	全周2m	2.4E+03	2.7E+03	7.2E+02	5.8E+03
6			上下面2m、側部4m	2.4E+03	2.7E+03	4.7E+02	5.6E+03
7			全周4m	1.4E+03	1.7E+03	5.0E+02	3.6E+03
8	1E-07	1E-09	全周2m	5.8E+02	9.0E+02	3.3E+02	1.8E+03
9			上下面2m、側部4m	6.1E+02	9.5E+02	2.2E+02	1.8E+03
10			全周4m	5.1E+02	7.6E+02	2.8E+02	1.6E+03



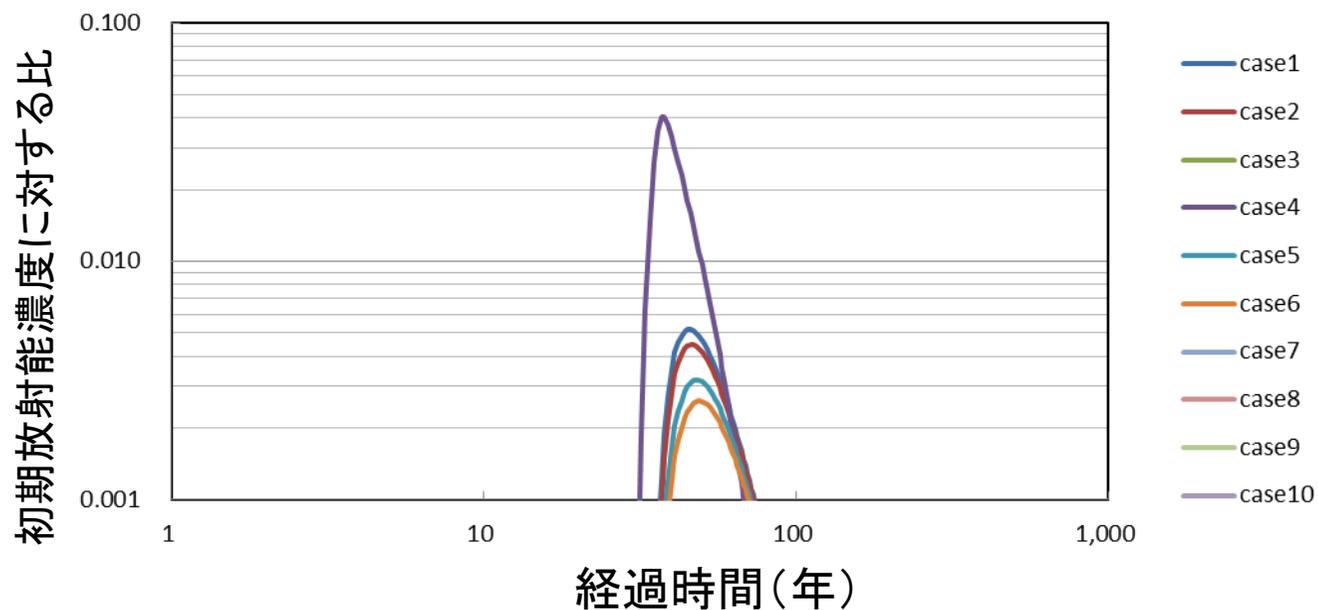
地下水流動解析における地盤、ピット施設のモデル図



地下水流動解析によるピット施設への浸入水および浸出水の流跡線図

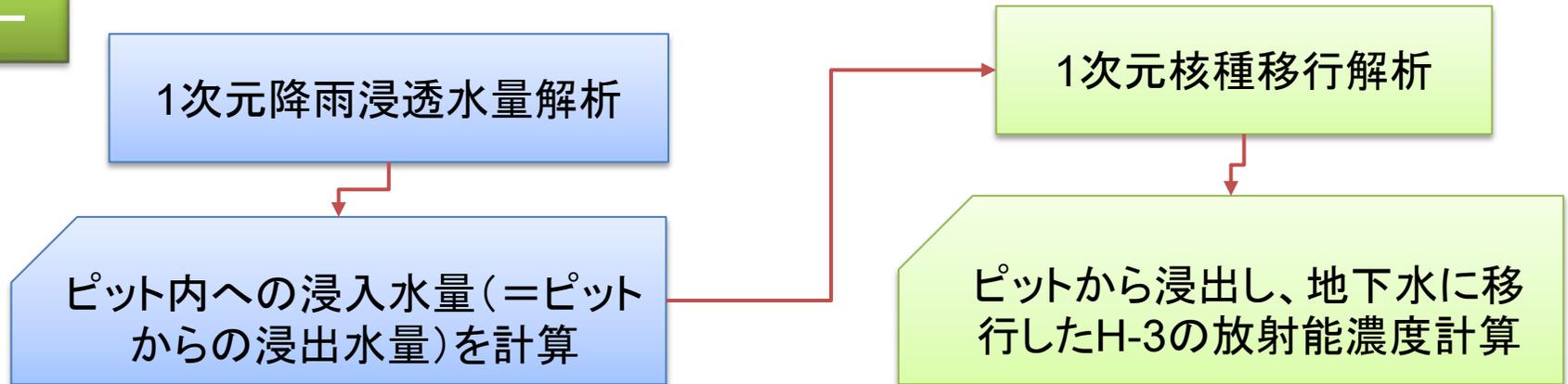
地下水中H-3濃度(海岸地点)の計算結果 -地下水位より深い位置に設置した場合-

case	透水係数(m/s)		ベントナイト厚さ	初期濃度に対する海岸到達時の地下水ピーク濃度の比	地下水中濃度ピーク到達時間(年)
	ピット及びピット内(コンクリート)	ベントナイト混合土			
1	1E-05	1E-09	2m	5.2E-03	46
2			上下面2m、側部4m	4.5E-03	46
3		4m	3.5E-04	71	
4		1E-08	4m	4.0E-02	37
5	1E-06	1E-09	2m	3.2E-03	48
6			上下面2m、側部4m	2.6E-03	49
7		4m	2.3E-04	74	
8	1E-07	1E-09	2m	3.9E-04	56
9			上下面2m、側部4m	3.9E-04	56
10		4m	3.8E-05	81	

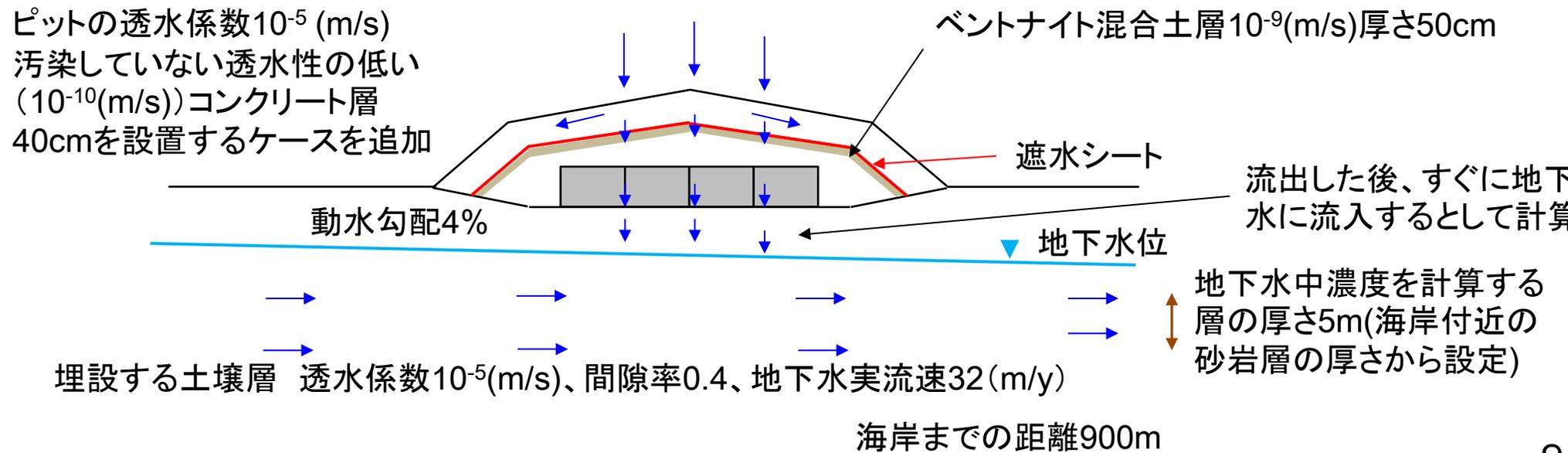


コンクリートピットからの安全評価について -地下水より浅い位置に設置する場合-

評価フロー



評価モデル図

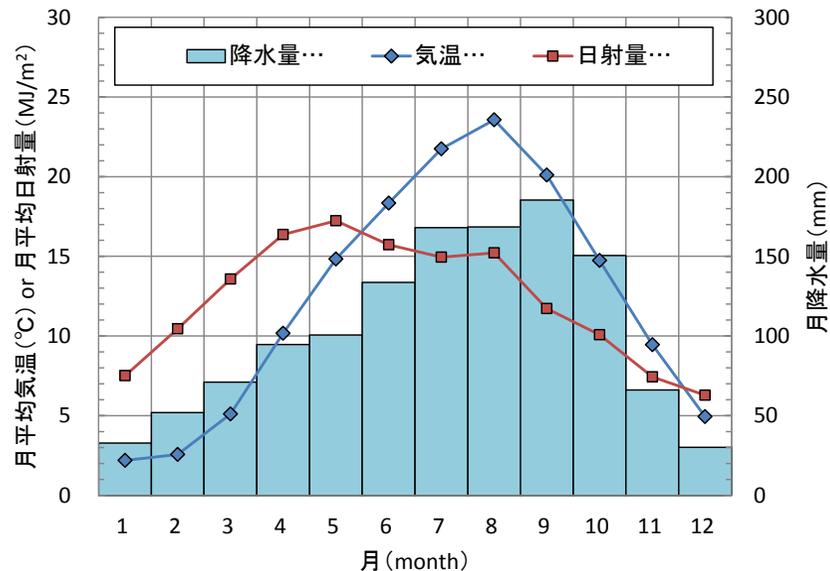


降雨浸透水量解析のための1F 近郊の気象データと疑似気象 データの作成

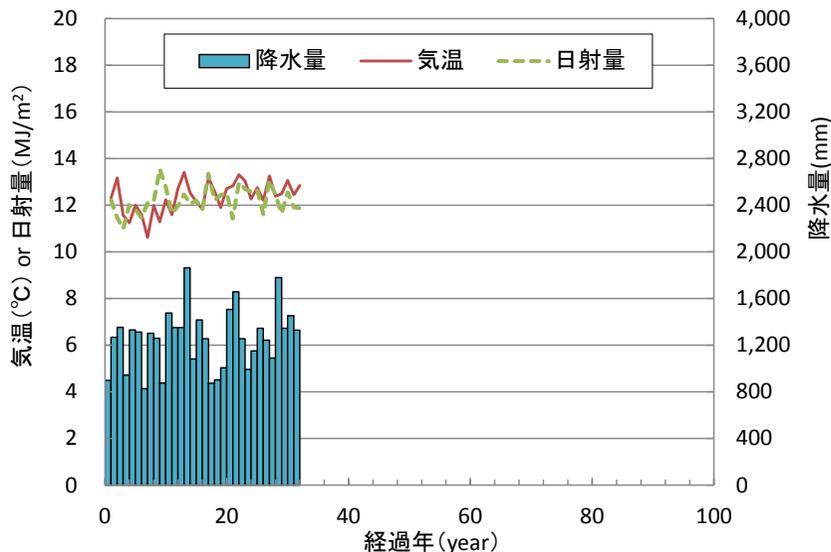
- (独) 農業環境技術研究所で公開している農業環境データセンターのHPより1kmメッシュ毎の4メッシュ分の1978年から2009年の日単位のデータを取得
- 100年分の疑似気象データを作成*2*3

*2:計算にはHELP(The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance model)コードを使用

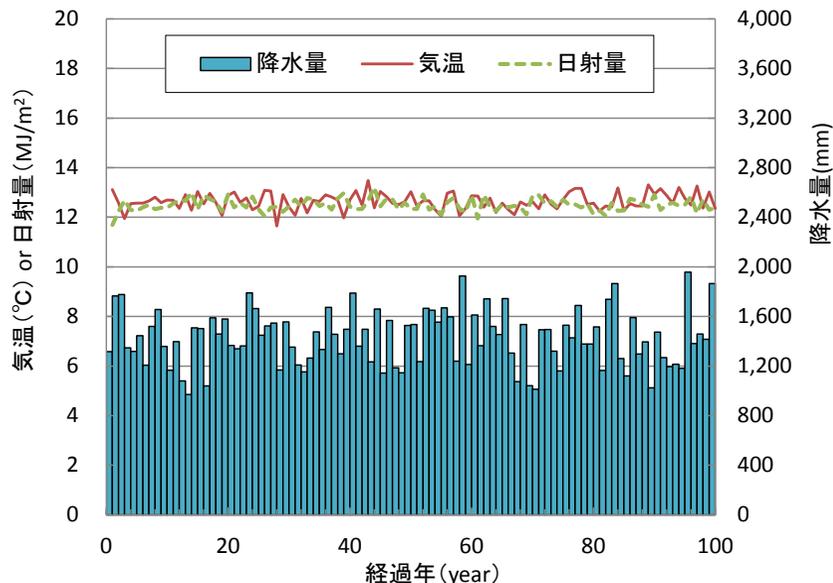
*3:JAEA-Tech.2014-013”研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設の上部覆土内への浸透水量の評価”



解析に用いた気象データ(月平均)



解析に用いた気象データ(過去データ)



作成した疑似気象データ(年毎の経時変化)

遮水シートからの漏洩の概念

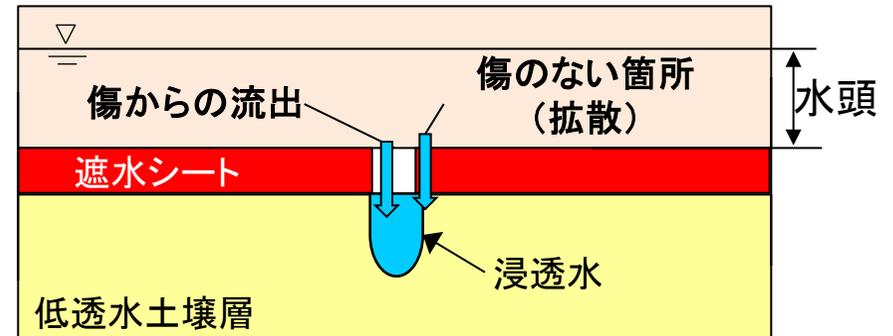
- 遮水シートからの流出は、傷のある箇所、傷のない箇所からの漏洩の2種類を想定するモデル^{*2*3}
- 遮水シートの設置条件は以下の4ケースのうち、一部に傷やたわみがあるgoodとpoorの状態を想定
- 遮水シートの傷は、25個/haに設定した。(計算コードの推奨値)

遮水シートの設置条件

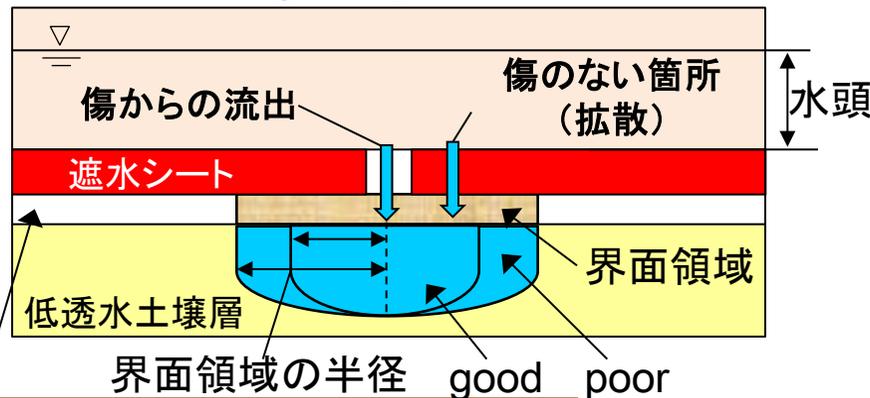
- ① perfect : 全く隙間がない状態(密着した状態)
- ② good : 遮水シートに若干のたわみ^{*}がある状態
- ③ poor : 遮水シートに一定のたわみ^{*}がある状態
- ④ worst : 遮水シートが劣化している状態

※ 遮水シートと下層土壌が密着していない事を示す。

① perfectの場合(一般的ではない)

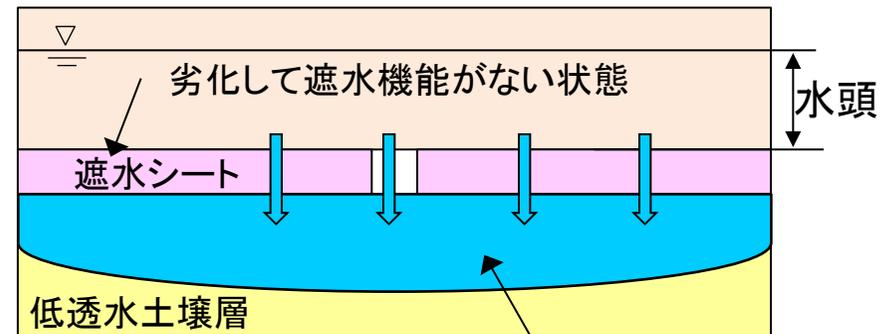


②③ good、poorの場合



密着の状態は、界面領域の半径で表される。

④ worstの場合

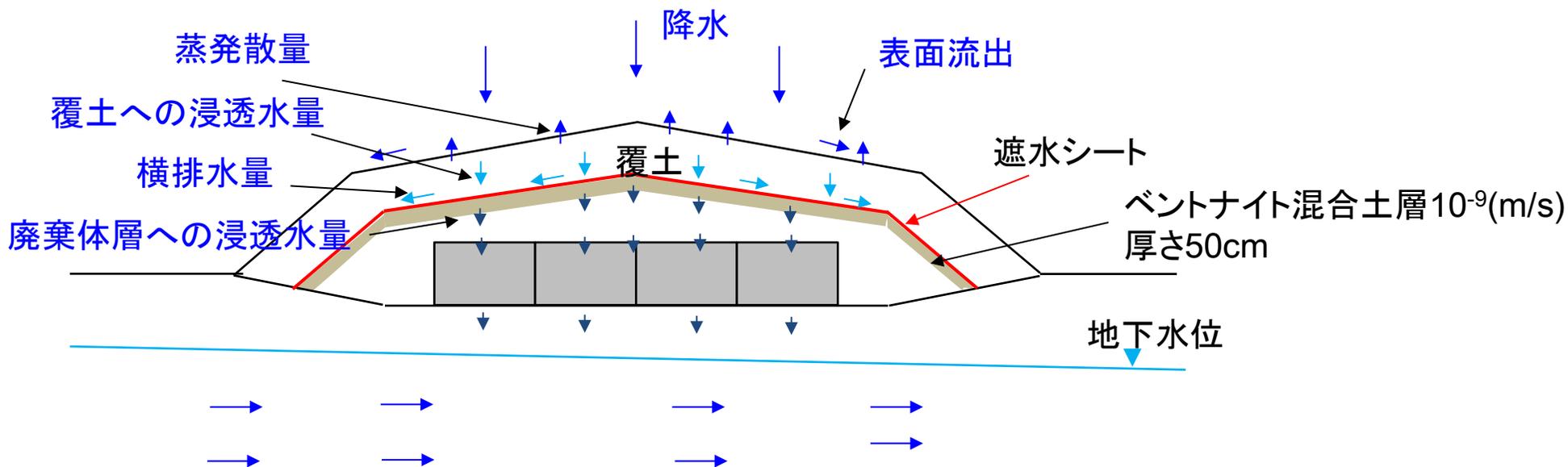


*2:計算にはHELP(The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance model)コードを使用

*3:JAEA-Tech.2014-013"研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設の上部覆土内への浸透水量の評価"

地下水より浅い位置に設置したコンクリートピットへの浸透水量の評価結果

浸透水量評価モデル

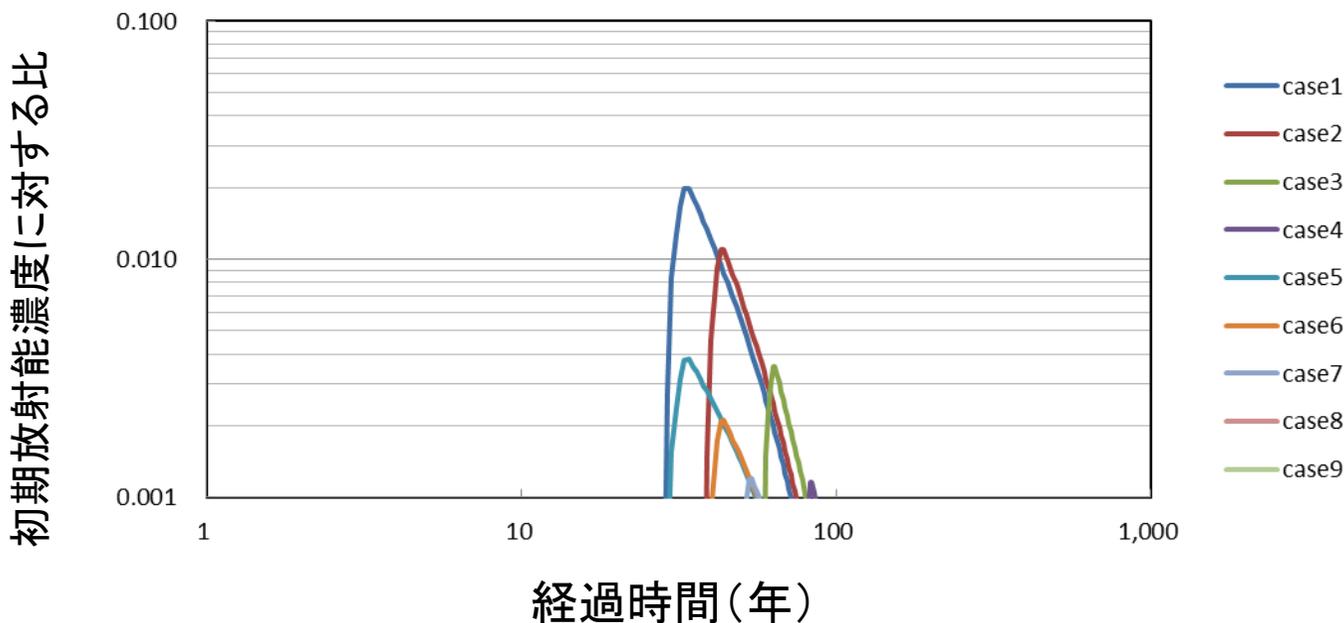


浸透水量の評価結果

case	土壌の透水系数 (m/sec)	葉面積指数 (-)	蒸発ゾーン 深さ (cm)	遮水シートの 有無	遮水シート の状態	年間平均水量(mm)					
						降水量	表面流出	蒸発散量	覆土への 浸透水量	横排水量	廃棄体層への 浸透水量
1	1E-09	2.5	30	あり	good	1.3E+03	3.4E+01	6.1E+02	6.1E+02	6.1E+02	4.6E+00
poor					1.3E+03	3.4E+01	6.1E+02	6.1E+02	6.1E+02	4.9E+00	
3				なし	—	1.3E+03	3.4E+01	6.1E+02	6.1E+02	5.8E+02	3.2E+01

地下水中H-3濃度(海岸地点)の計算結果 -地下水位より浅い位置に設置した場合-

case	遮水シートの有無	廃棄体層への浸透水量 (mm/y)	流出水量 (m ³ /y)	備考	初期濃度に対する海岸到達時の地下水ピーク濃度の比	地下水中濃度ピーク到達時間 (年)
1	なし	3.2E+01	9.0E+03	0年後 漏洩開始	2.0E-02	33
2				10年後 漏洩開始	1.1E-02	44
3				30年後 漏洩開始	3.5E-03	64
4				50年後 漏洩開始	1.2E-03	84
5	あり	5.0E+00	1.4E+03	0年後 漏洩開始	3.8E-03	34
6				10年後 漏洩開始	2.1E-03	44
7				20年後 漏洩開始	1.2E-03	54
8				30年後 漏洩開始	6.8E-04	64
9				0年後 漏洩開始 ホワイトゾーンを評価	6.4E-04	43



まとめ

- トリチウム水の処分の選択肢の1つとして浅地中処分方式による検討を行った。
- 総水量80万 m^3 のトリチウム水を浅地中処分するには、少なくとも28.2万 m^2 以上の土地が必要である。

CO₂を地下へ圧入・貯留する技術について — 苫小牧におけるCCS実証プロジェクト —

汚染水処理対策委員会
トリチウムタスクフォース(第9回)

平成26年7月9日
日本CCS調査株式会社

ご紹介内容

1. CO₂貯留の仕組みと貯留可能性のある場所
2. 苫小牧CCS実証試験の概要
3. 適する地層の調査方法・期間
4. 圧入装置（圧縮機、ポンプ、坑井）
5. 法的規制および環境影響評価

1. CO₂貯留の仕組みと貯留可能性のある場所

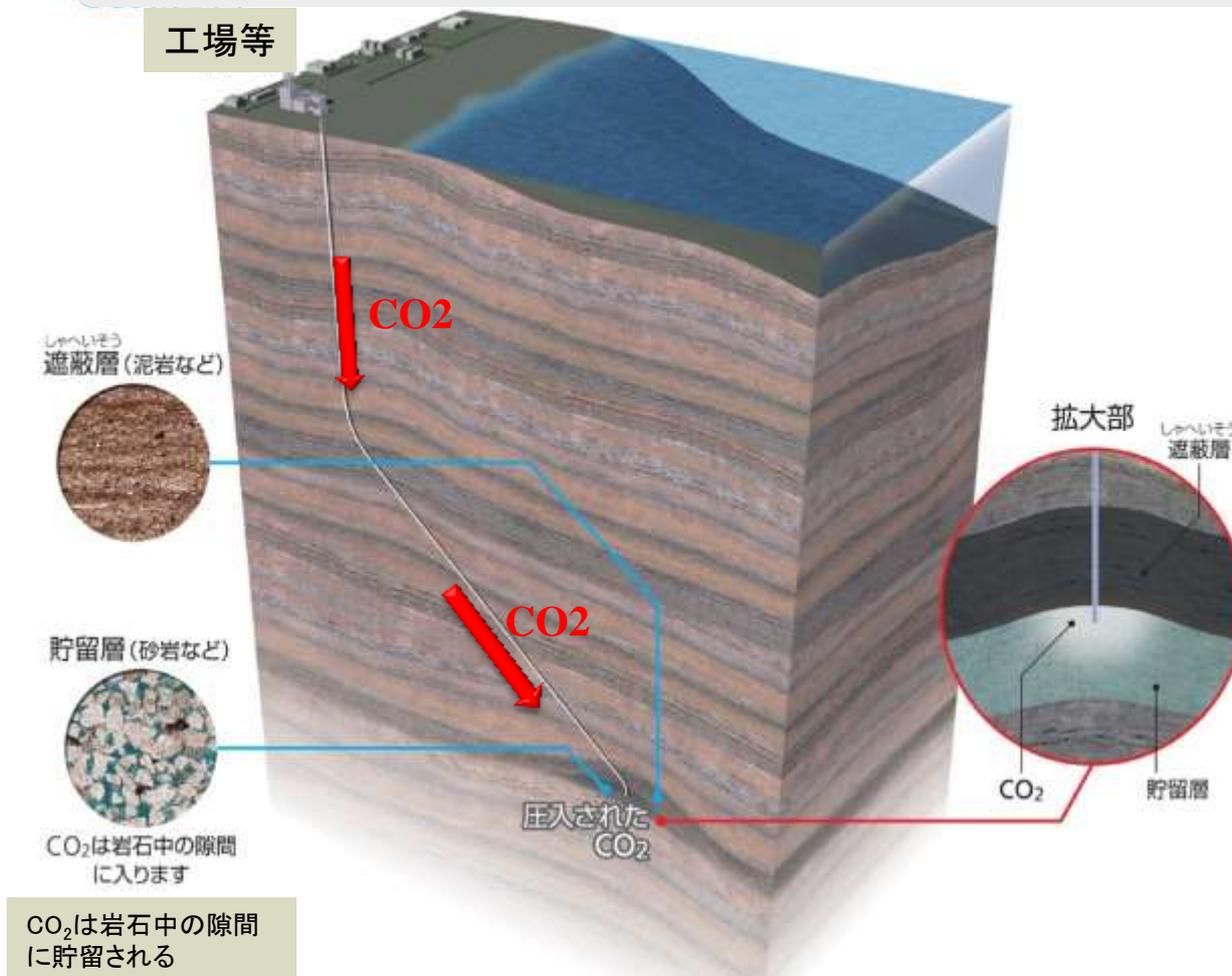
火力発電所や大規模工場などで排出されるCO₂(Carbon dioxide)を大気中に放散する前に捕らえて(Capture)、地中に貯留する(Storage)技術

Carbon dioxide Capture and Storage

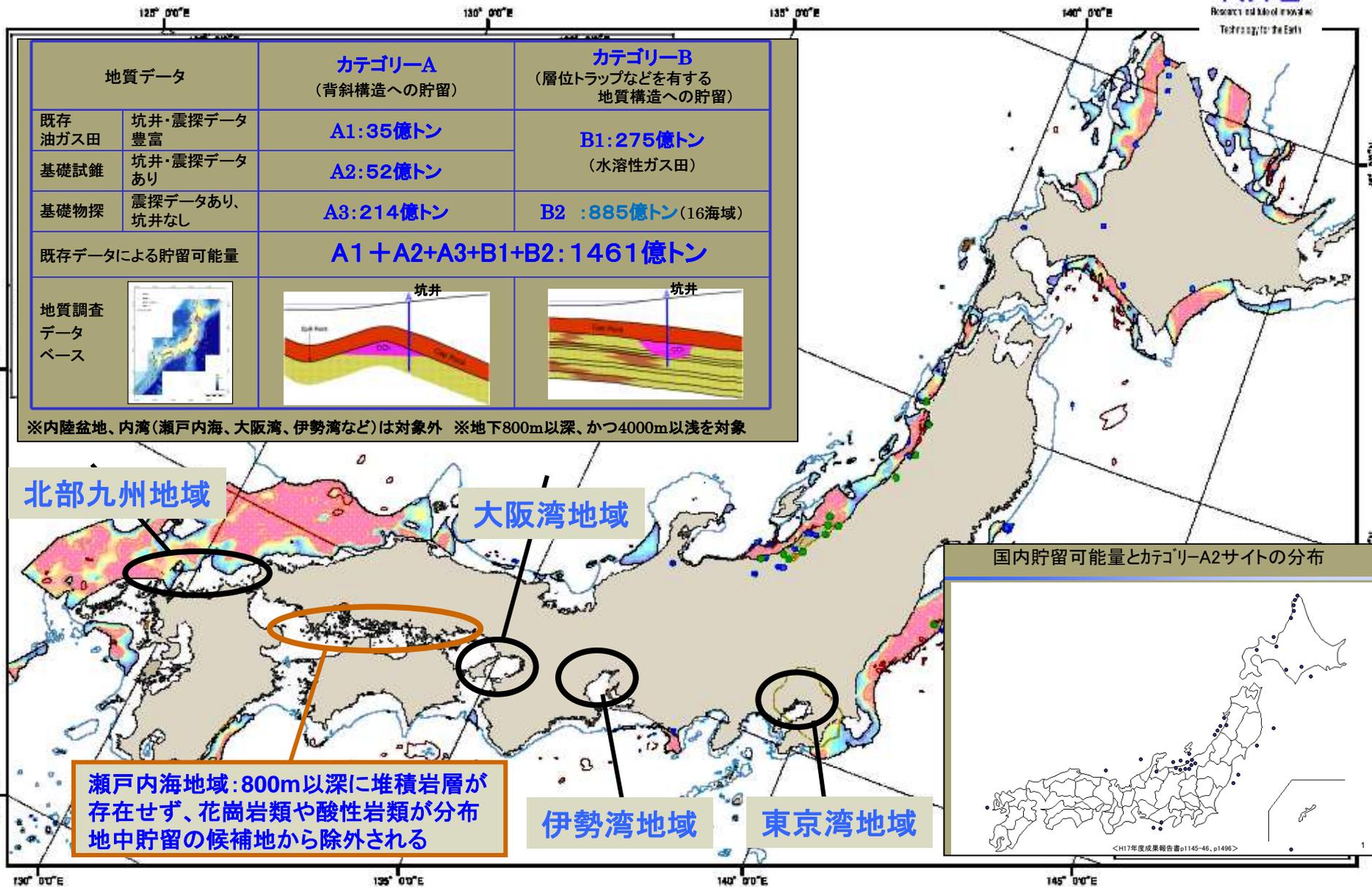
二酸化炭素を

回収して

貯留する



貯留可能量と帯水層分布(沿岸域の貯留層調査)

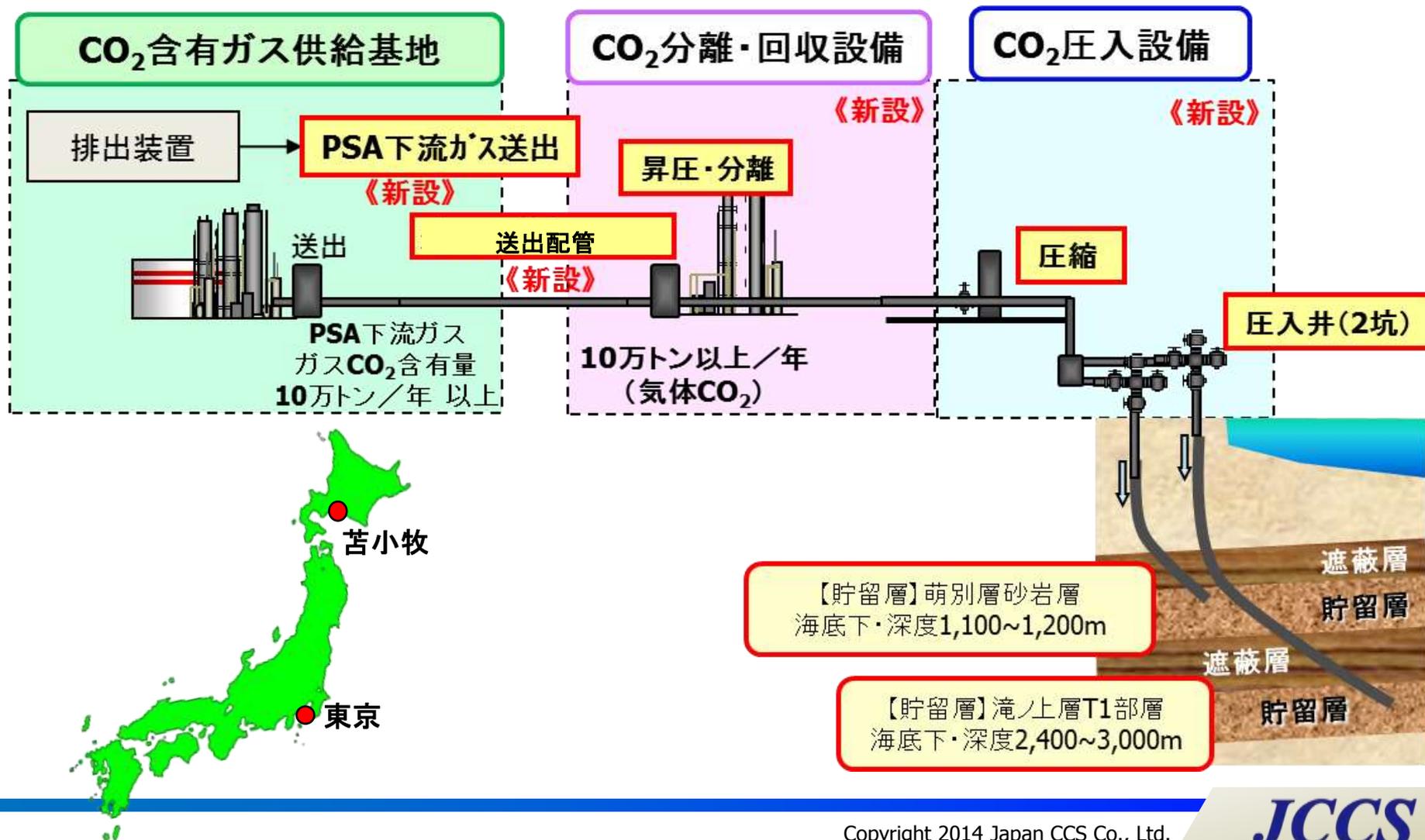


日本CCS調査(株)による注記: 黒丸で囲った地域の内、東京湾地域以外は上記貯留可能量には含まれないが、貯留層があることが確認されている。

2. 苫小牧CCS実証試験の概要

CCS大規模実証試験の全体概要

- ・実証試験は、経済産業省が日本CCS調査(株)に委託して実施中。商業運転中の出光興産(株)北海道製油所の水素製造装置オフガスからCO₂を分離・回収し、年間10万トン以上のCO₂を苫小牧沖の2つの貯留層に圧入。
- ・平成24～27年度は、これら地上設備の設計・建設と圧入井掘削、および地上設備の試運転を行う。



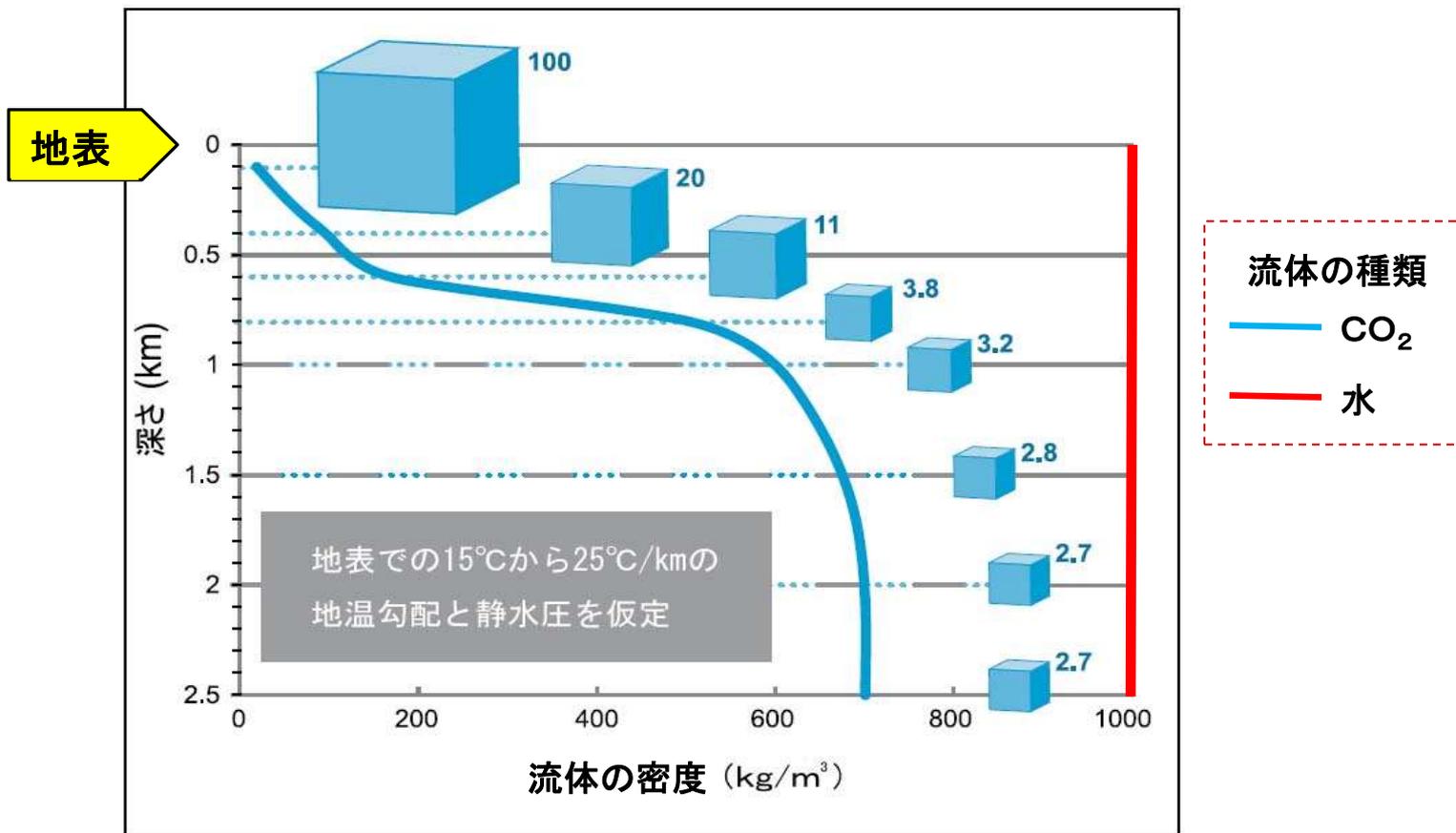
実証試験の目的と課題

【2020年頃の実用化を目指す】

- 分離・回収から貯留までのCCS全体を、一貫システムとして実証する
- 適用した既存の各技術が、それぞれ適切かつ有効に機能することを確認する
- CCSが、安全かつ安心できるシステムであることを実証する
- 貯留サイト選定指針の妥当性を、漏出が起きないことによって確認する
- 地震に関連する不安を、収集したデータに基づいて払拭する
 - 自然地震が起きても、貯留したCO₂に影響が及ぶことはない
 - CO₂の圧入によって地震が起こることはない
- 地質モデルの構築、改良に対する指針が、妥当であることを確認する
- プロジェクトの操業および安全に関する技術基準を作成する
- プロジェクト情報およびデータを開示し、市民にCCSを理解してもらう
- 実用化へ向けて、改善すべき課題、解決すべき課題を明らかにする

3. 適する地層の調査方法・期間

地表と地下での流体の密度変化(CO₂と水の比較)



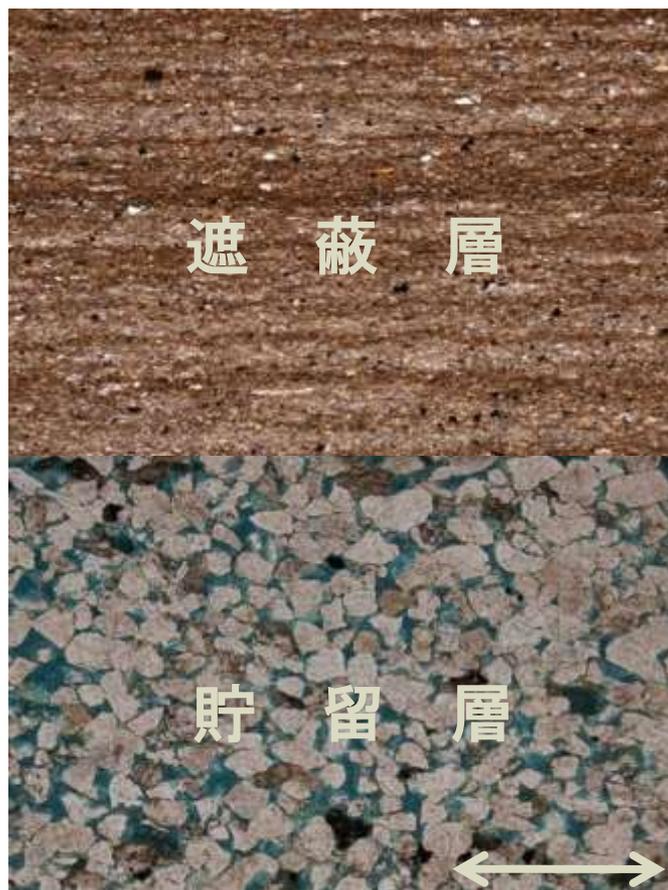
地層の圧力と温度は深度の増加に伴って増加し、CO₂は圧力と温度の増加に伴って密度が急激に増加する。立方体はCO₂が占める相対体積であり、深度の増加に伴って小さくなる。

一方、水の密度はこの圧力と温度の範囲ではほとんど変化しない。水の地下での密度はCO₂の約1.4倍である(同じ質量で比べると、水の体積はCO₂の約70%)。

図の出典: 二酸化炭素回収・貯留に関するIPCC 特別報告書(日本語版)p218 (2005)に加筆

CO₂の貯留に適した地層

CO₂を地中に貯留するためには、貯留層とその上部を覆う遮蔽層が対になった構造が条件。遮蔽層は貯留層に入れたCO₂が漏れ出さないようフタの役割を果たす。



- 泥岩
- すき間が少ない(すき間は地層水で満たされている)
- CO₂が浸透しにくい性質

CO₂を通さない

- 砂岩、火山岩など
- すき間が多い(すき間は地層水で満たされている)
- CO₂が浸透しやすい性質

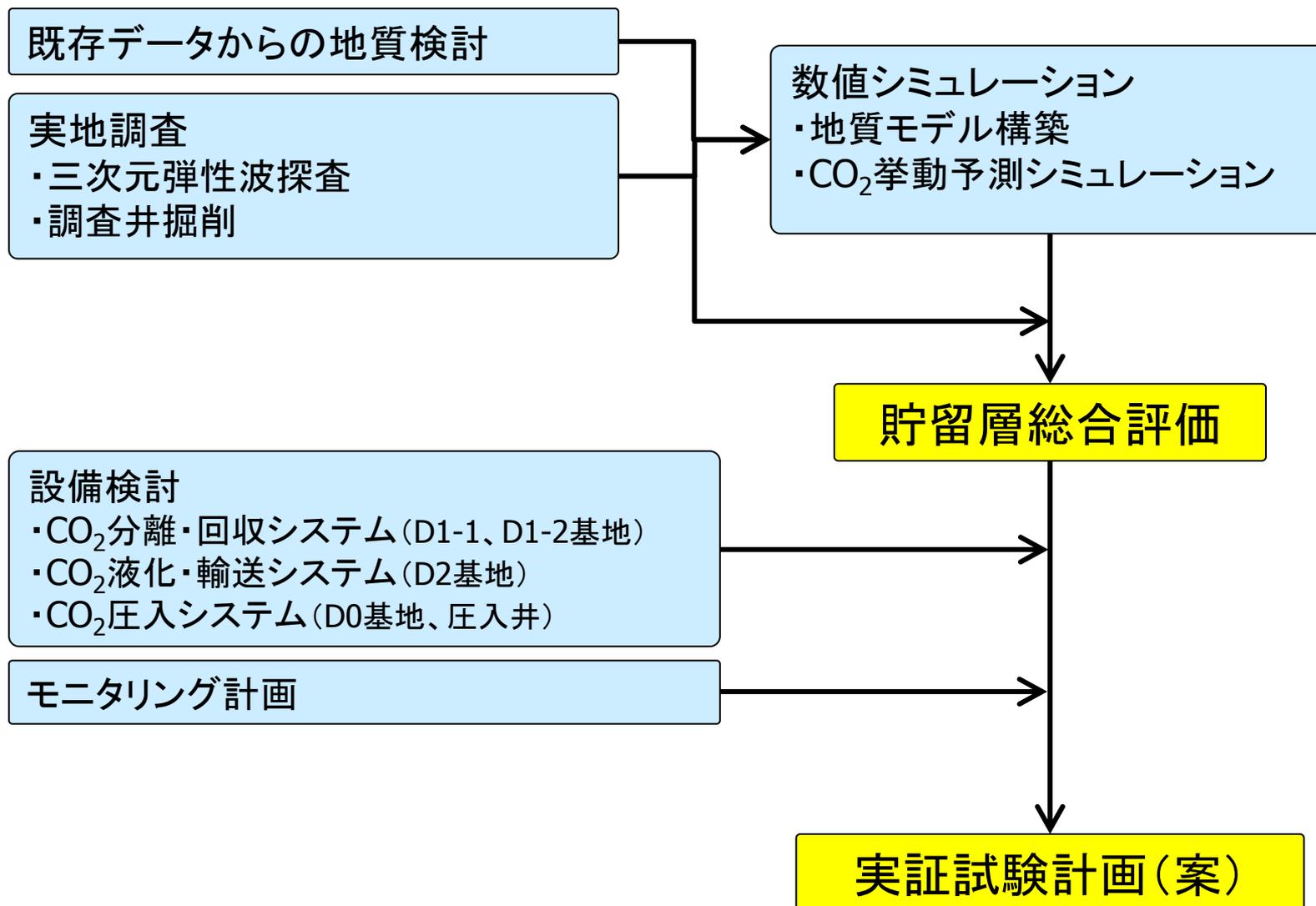
CO₂を貯められる

CCS大規模実証プロジェクトのスケジュール

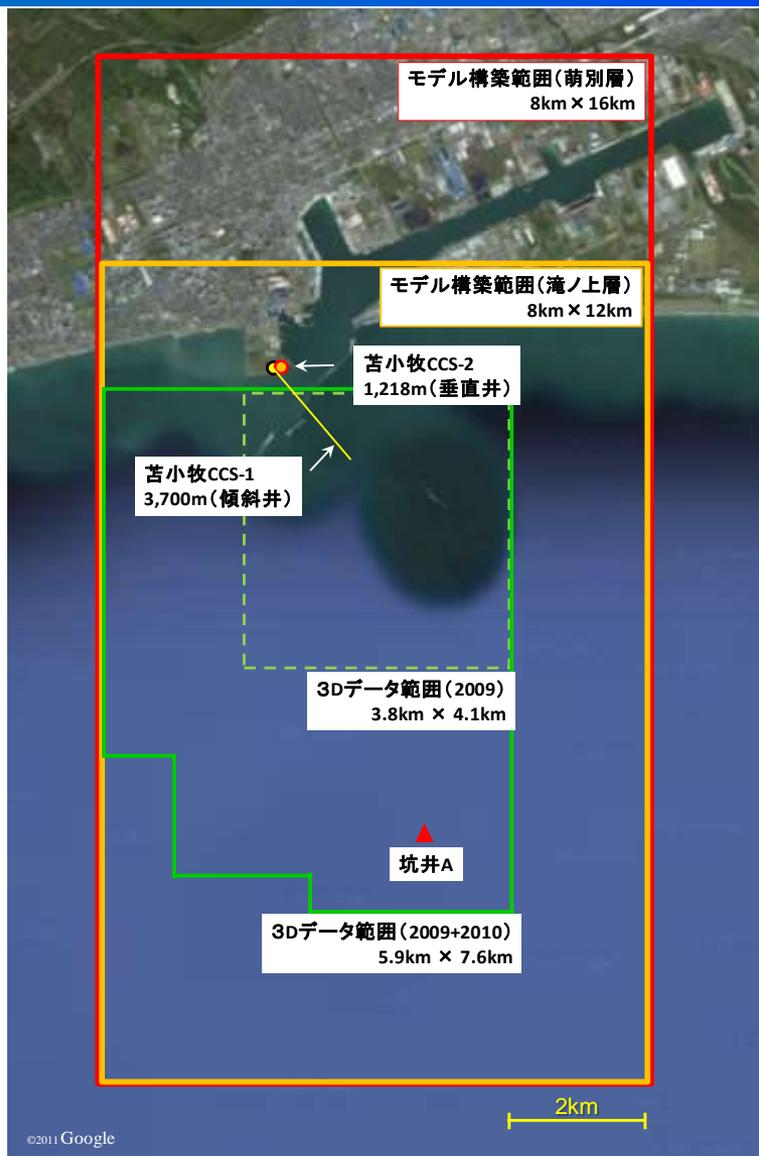
- 平成20-23年度は調査期間
- 平成24-27年度は準備期間
設備の設計・建設、坑井の掘削、操業の準備などを実施
- 平成28-32年度はCO₂ 圧入・モニタリング期間
年間10万トン以上のCO₂を3年間(平成28-30年度)圧入



苫小牧地点 調査段階(平成20-23年度)の成果概要



苫小牧における貯留層評価に係る調査



- ・第一次3次元弾性波探査
- ・第二次3次元弾性波探査
- ・滝ノ上層調査井(傾斜井)
- ・萌別層調査井(垂直井)
- ・地層モデル構築(滝ノ上層)
- ・地層モデル構築(萌別層)
- ・CO₂挙動予測シミュレーション(滝ノ上層)
- ・CO₂挙動予測シミュレーション(萌別層)

苫小牧地点実地調査(3D弾性波探査の測定風景)

各種手法を駆使して貯留サイト近傍の地質構造および性状を把握

発振船



航行速度 6km/h
発振サイクル 25m毎 (約15秒間隔)

エアガン発振で
生じた水泡



エアガン
海面下約6m

撮影 2009.10.22

調査井掘削(苫小牧CCS-1、滝ノ上層対象)

《目的》

苫小牧地区における地質構造の詳細な把握によるCCSの可能性調査

《期間》

敷地工事 平成22年7月～9月

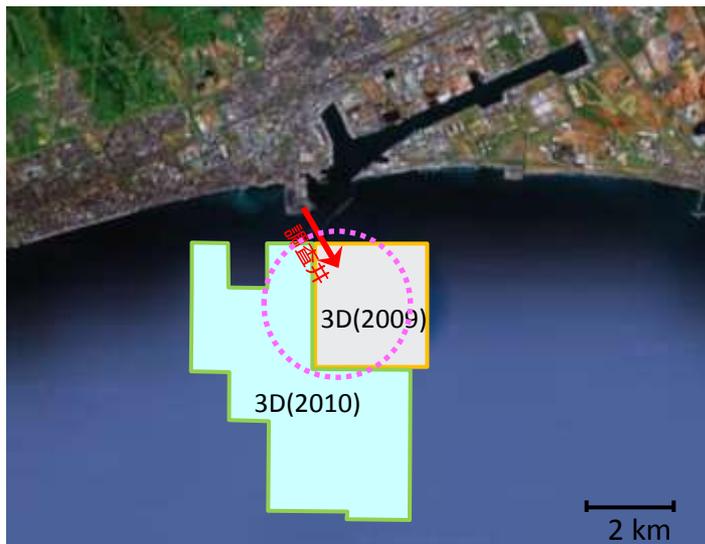
調査井掘削 平成22年10月～平成23年3月

《調査井位置》

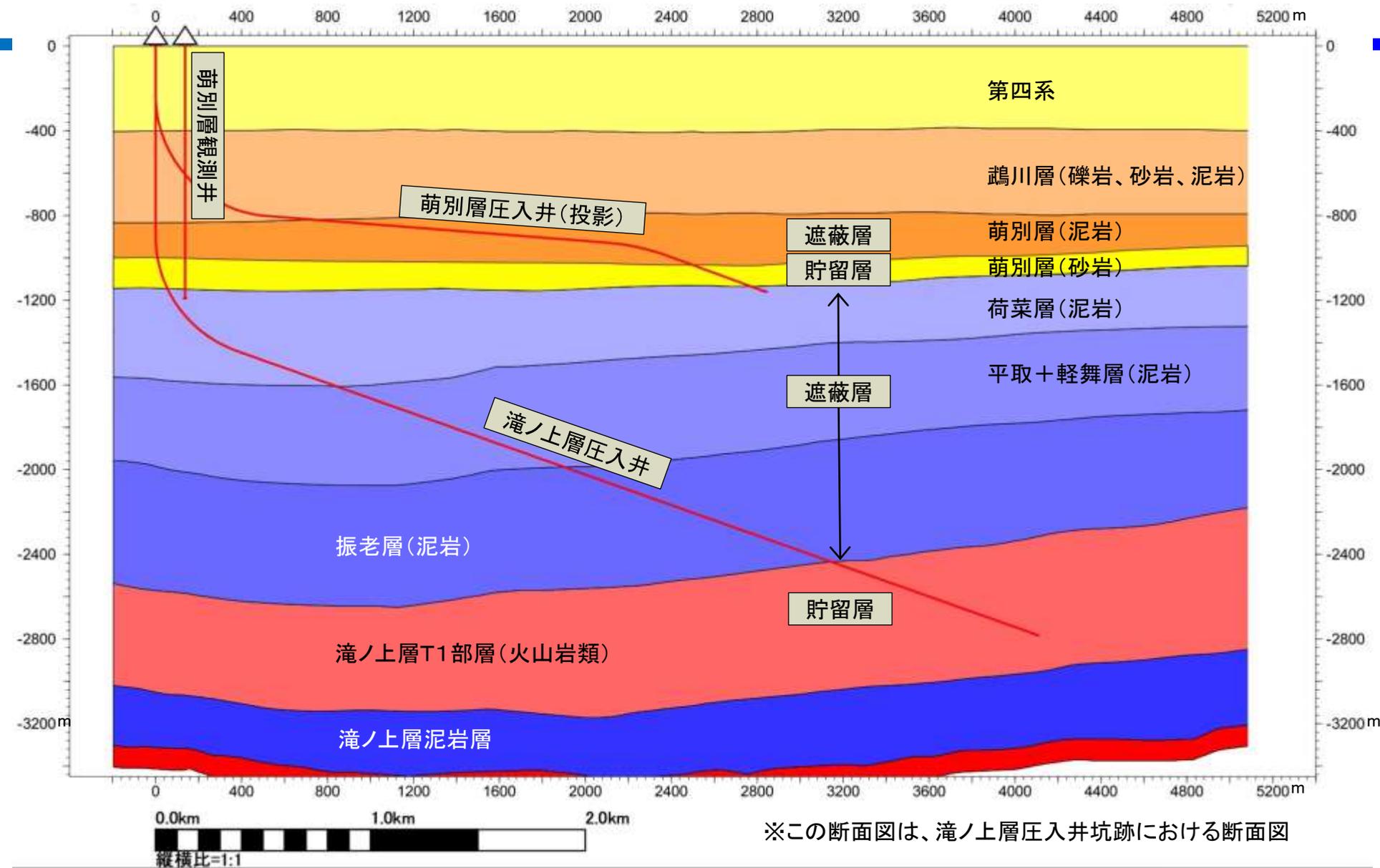
北海道苫小牧市汐見町地先 西港区土砂処分場内
(国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部所管)

《掘削方法》

掘削リグを使用して、陸上から沖合に向かって坑井をコントロールして曲げながら(傾斜掘り)、目的地層深度(約3,700m、垂直深度:3,050m)まで掘削した。



リグ(掘削機械)
高さ:48.50m

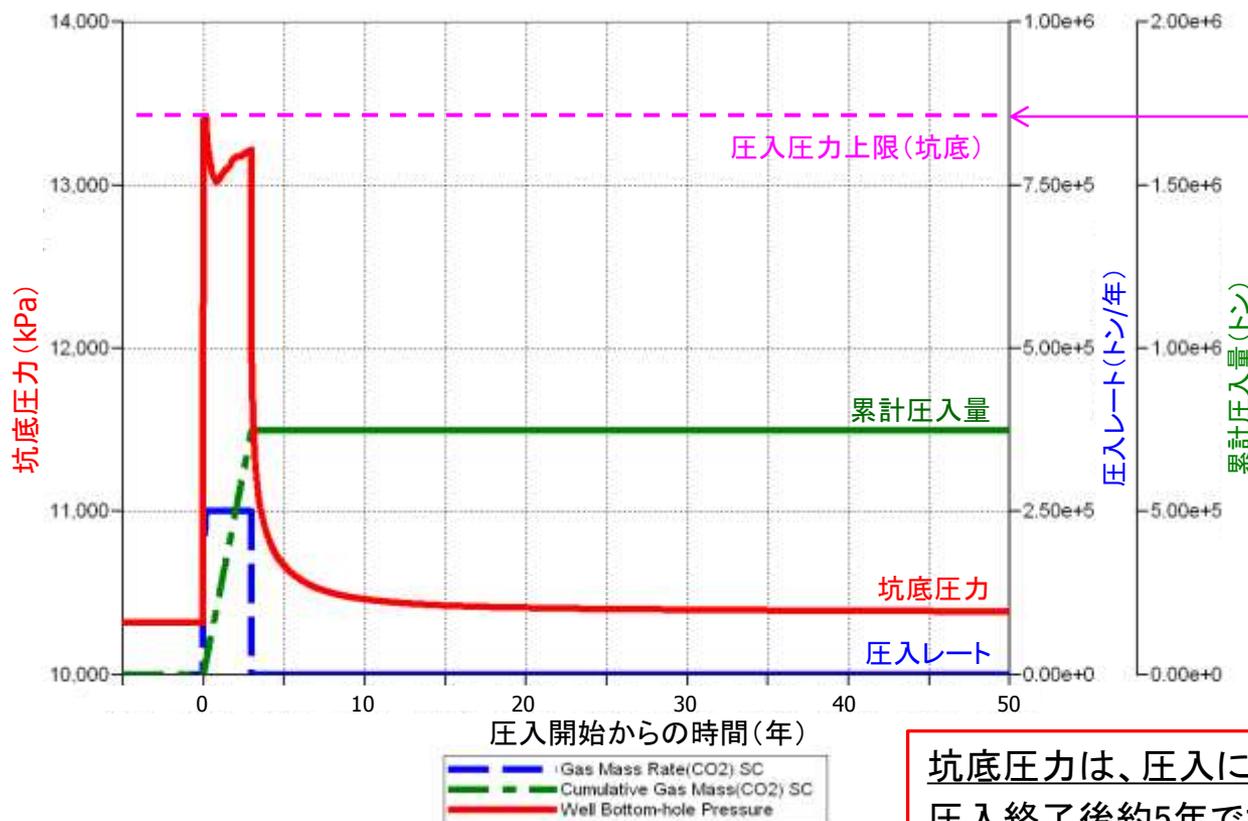


CO₂圧入挙動(萌別層)

(i) 圧力挙動 (シミュレーション結果)

- ・ベースケース: 25万トン/年 × 3年間の圧入を確認。

JCCS D-area 2011 Moebetsu Study
Base



圧入圧力上限(坑底): 13.4 MPa

【計算方法】

リークオフ圧力(等価泥水比重: 1.50)と貯留層上限深度(1011.9mVD)から地層破壊圧が14.9MPaとなる。その90%を圧入圧力上限(坑底)とした。

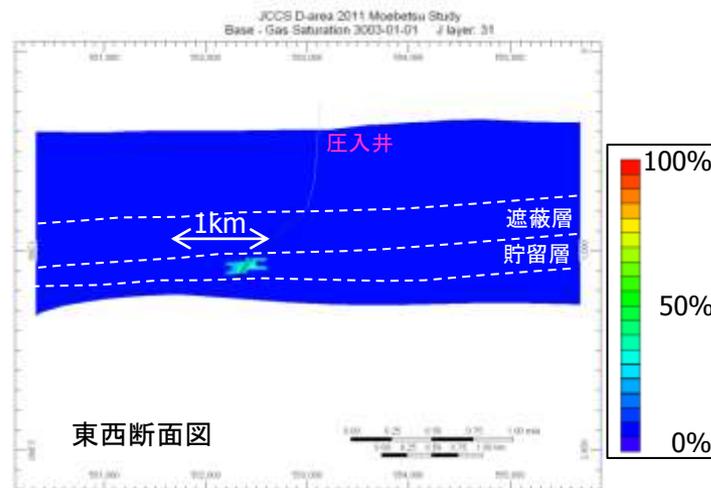
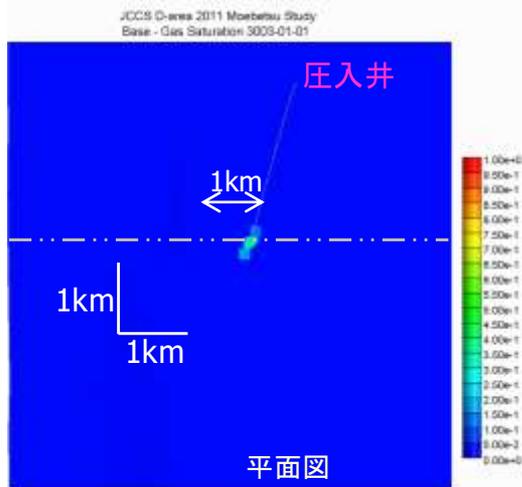
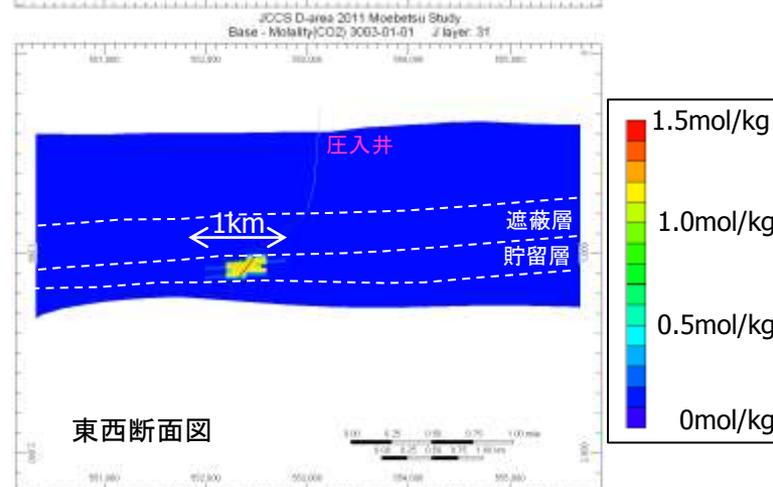
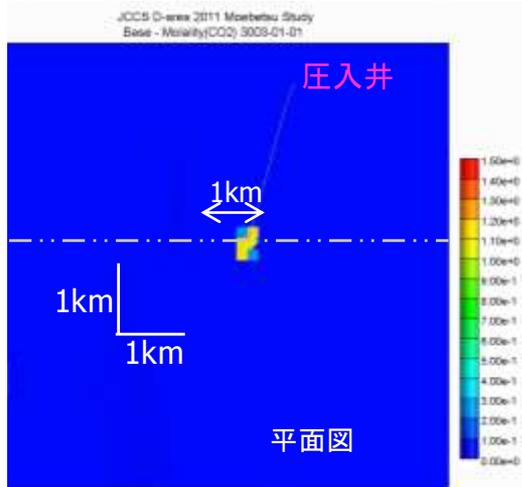
圧入圧力挙動(ベースケース)

坑底圧力は、圧入によって上昇するが、
圧入終了後約5年で大きく降下し、
以後ゆっくりと初期地層圧に近づく。

貯留CO₂の長期挙動予測(萌別層) 3年後(圧入終了時)

(i) 長期挙動予測 圧入終了時(3年後)

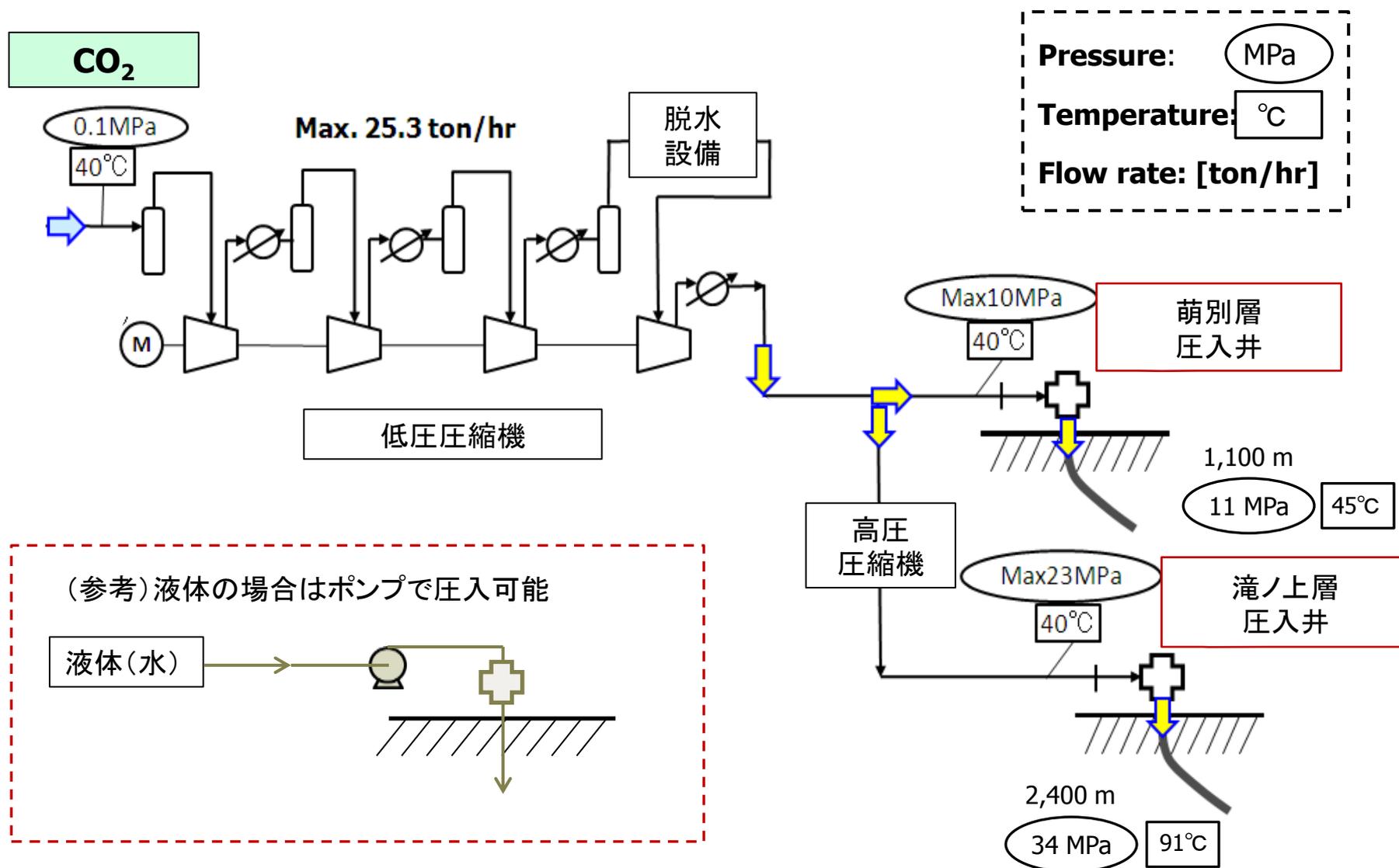
- ・気相CO₂は圧入井近傍で東西約400m、南北約600mに飽和率の高い範囲が広がる。
- ・溶解CO₂濃度は圧入井近傍で東西約400m、南北約600mに広がる。

CO₂飽和率
(ベース
ケース)溶解CO₂濃度
(ベース
ケース)

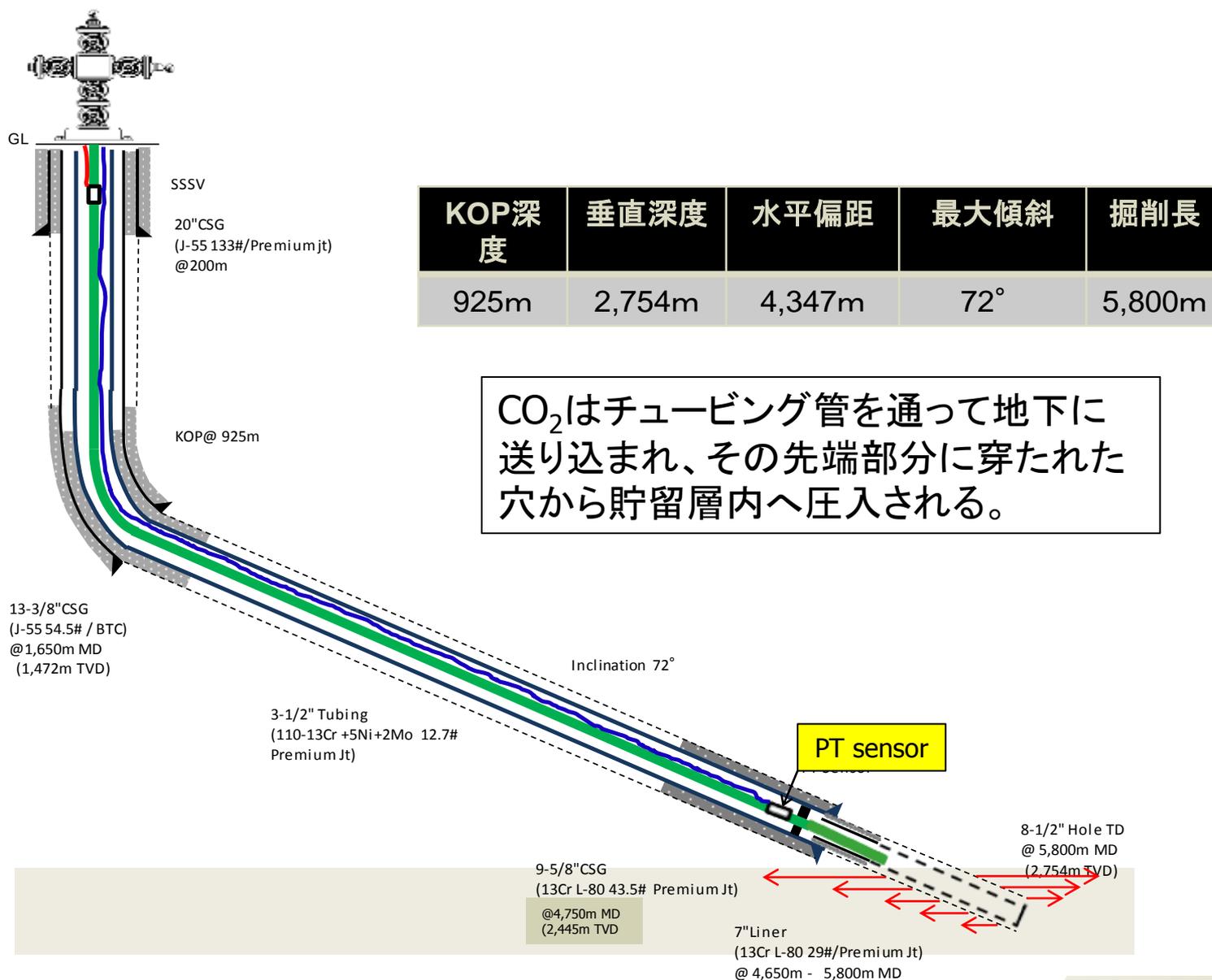
4. 圧入装置(坑井、圧縮機、ポンプ)

地上設備の位置関係



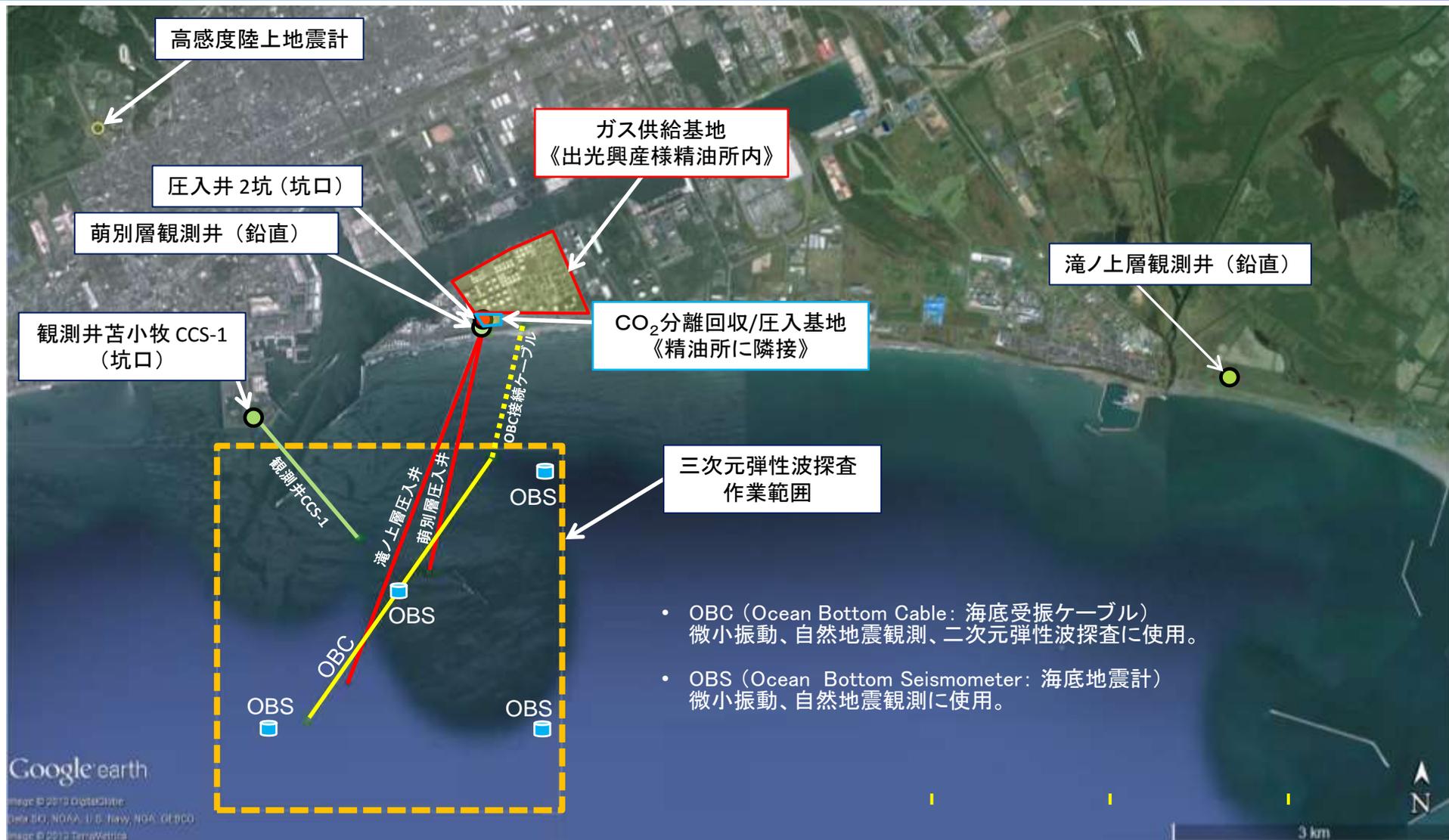
CO₂ 圧縮・圧入システム

滝ノ上層圧入井



5. 法的規制および環境影響評価

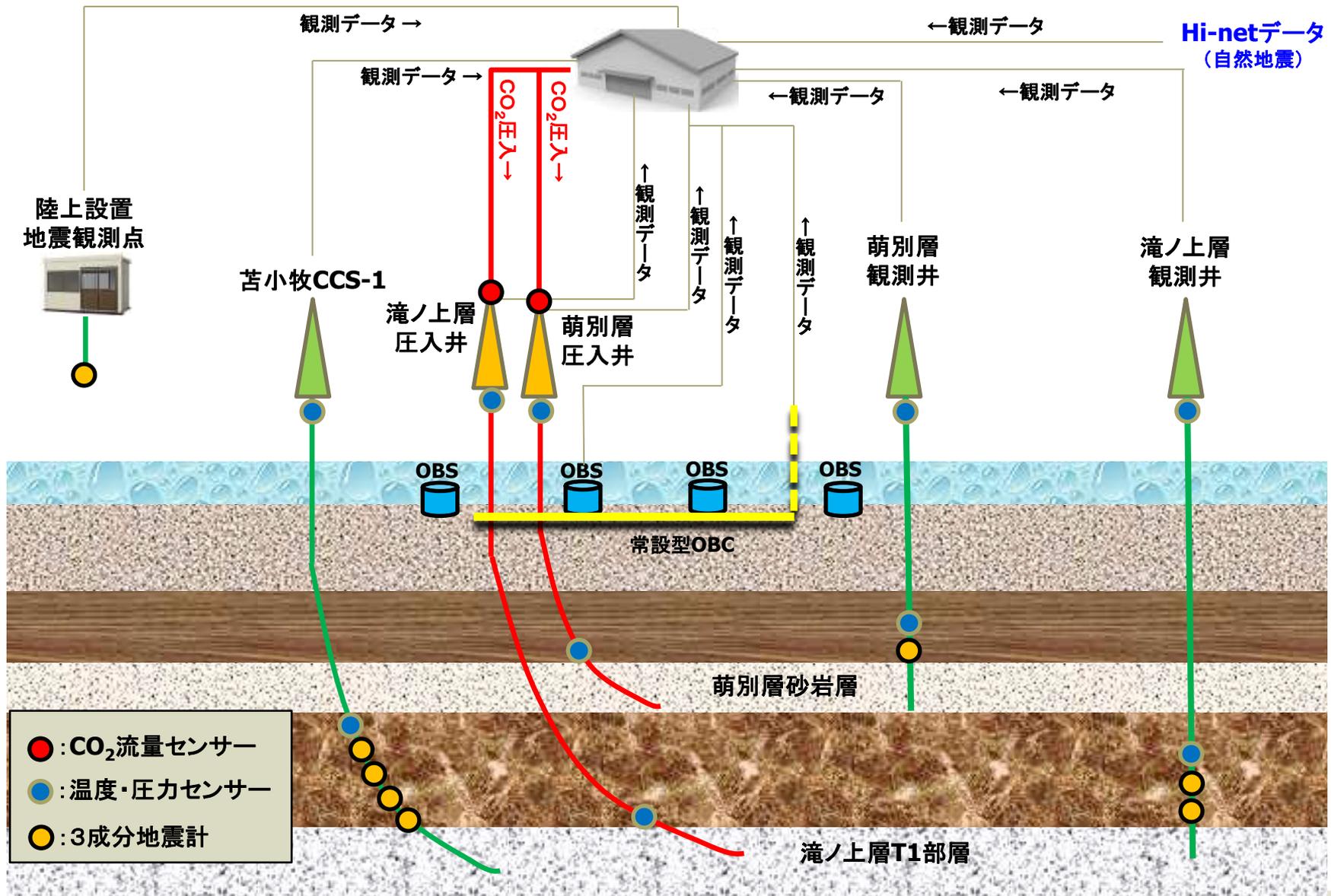
圧入およびモニタリングシステムの位置関係



- OBC (Ocean Bottom Cable: 海底受振ケーブル)
微小振動、自然地震観測、二次元弾性波探査に使用。
- OBS (Ocean Bottom Seismometer: 海底地震計)
微小振動、自然地震観測に使用。

モニタリングシステムの概要

圧入基地管理棟



- ◆ CCS実証試験の実施に際しては、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（海洋汚染防止法）」に則り、海洋環境調査を実施しなければならない。

1. 調査範囲(左図)

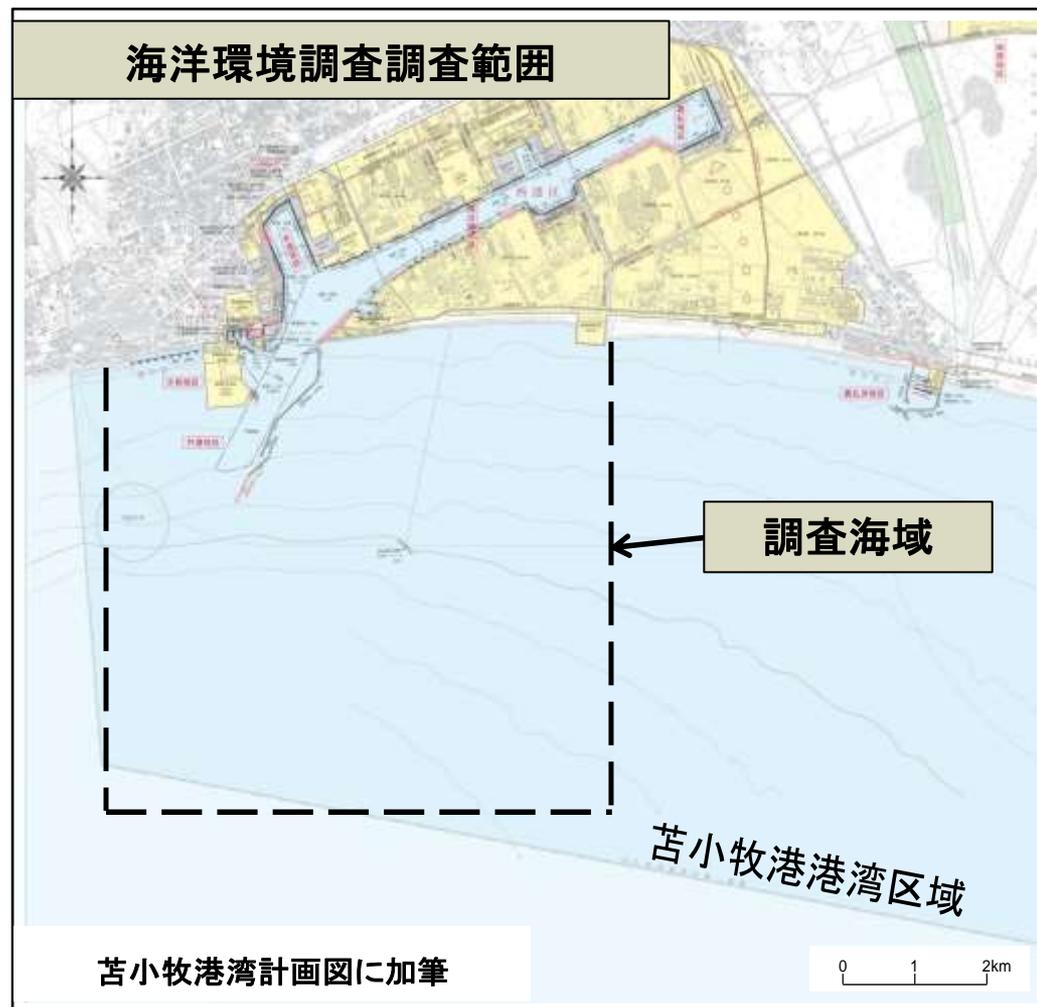
- 苫小牧港港湾区域内12観測点

2. 調査方法

- サイドスキャンソナー／サブボトムプロファイラー
- 流向・流速計による測定（海水の流れの方向と速さを調査）
- 採水器での採集（塩分濃度等、およびプランクトンの状況を調査）
- 採泥器での採集（海底堆積物の状況を調査）
- 網や簡易ドレッジによる採捕（底生生物の種類、数などを調査）
- ダイバーやROVによる底生生物の撮影

3. 三段階にわたる調査

- 準備・建設段階
- 実証試験実施段階
 - CO₂ 圧入運転中
 - CO₂ 圧入運転後
- 実証試験終了後



ロンドン条約96年議定書と海洋汚染防止法の改正

2006年にロンドン条約96年議定書が改定され、CO₂の海底下地中貯留が国際法上で可能となった。

わが国では、2007年に海洋汚染防止法が改正・施行され、ロンドン条約が批准された。

【改正法の骨子】

1. 廃棄物の海底下廃棄の原則禁止

廃棄物を海底の下に廃棄することは、2の許可を受けた場合を除き禁止。

2. CO₂の海底下廃棄に係る許可制度の創設

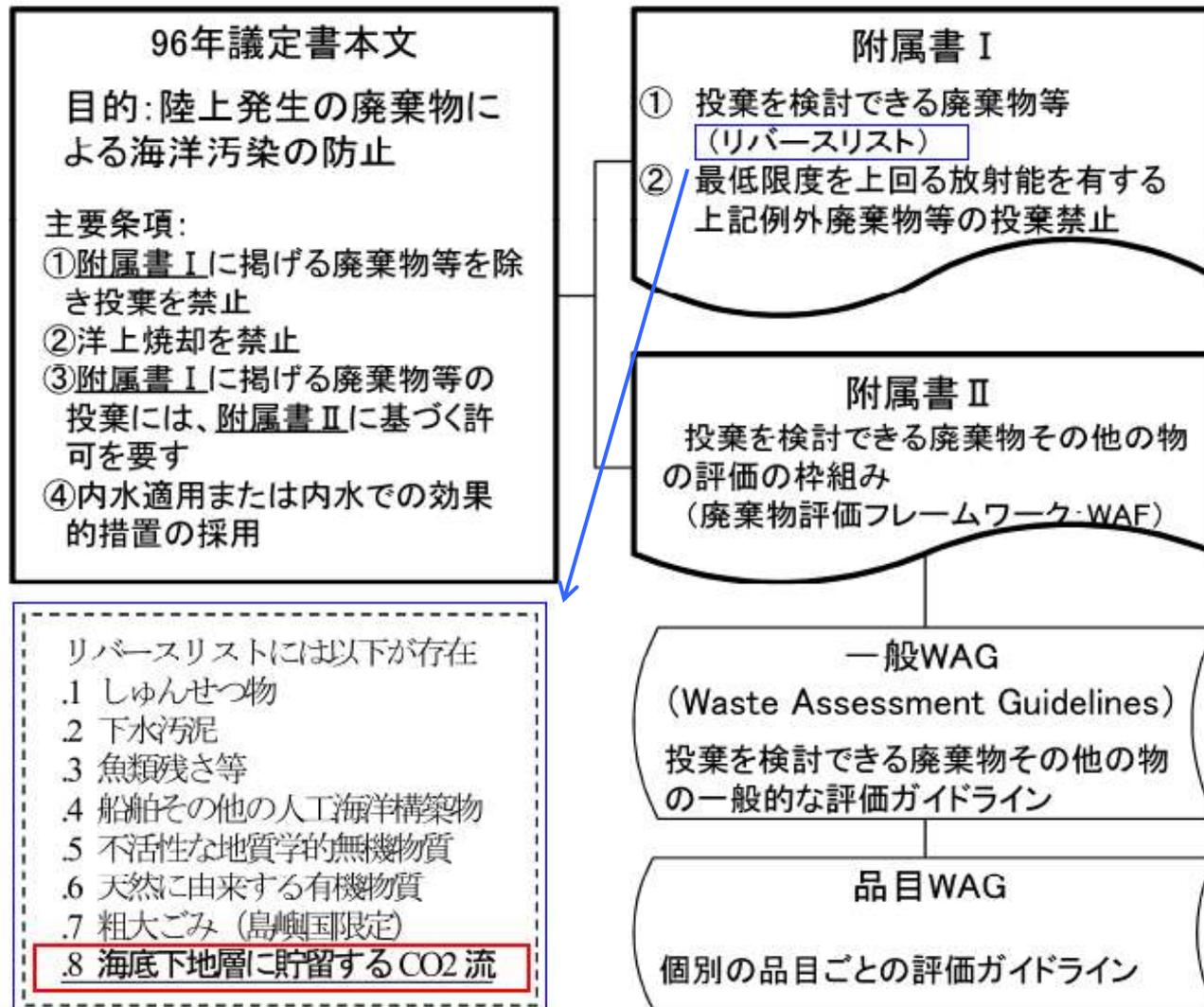
(1) CO₂を海底の下に廃棄しようとする者(陸域から廃棄しようとする者を含む。)は、環境大臣の許可を受けなければならない。

(2) (1)の許可を受けようとする者は、環境影響を評価しなければならない。

(3) 許可を受けてCO₂を海底の下に廃棄する者は、海洋環境の保全に障害を及ぼさないよう廃棄し、また、海洋環境を監視しなければならない。

海洋汚染防止法では「貯蔵」も廃棄に含まれるが、当社ではCO₂の「貯留」を用いる。

ロンドン条約96年議定書の概要



(平成19年2月中央環境審議会答申資料)

平成25年度に行った情報提供活動例



パネル展(合計18回)



子供向け科学実験教室(合計10回)



CCS 講演会 (H26.3月、苫小牧市)



現場見学会(合計19回)



大学向け講演会(合計12回)



プレス発表(合計10回)



建設現場ライブ映像公開
(ホームページ)



2013地球温暖化防止展(H25.5月)



エコプロダクツ2013
(H25.12月)



CCSバナー



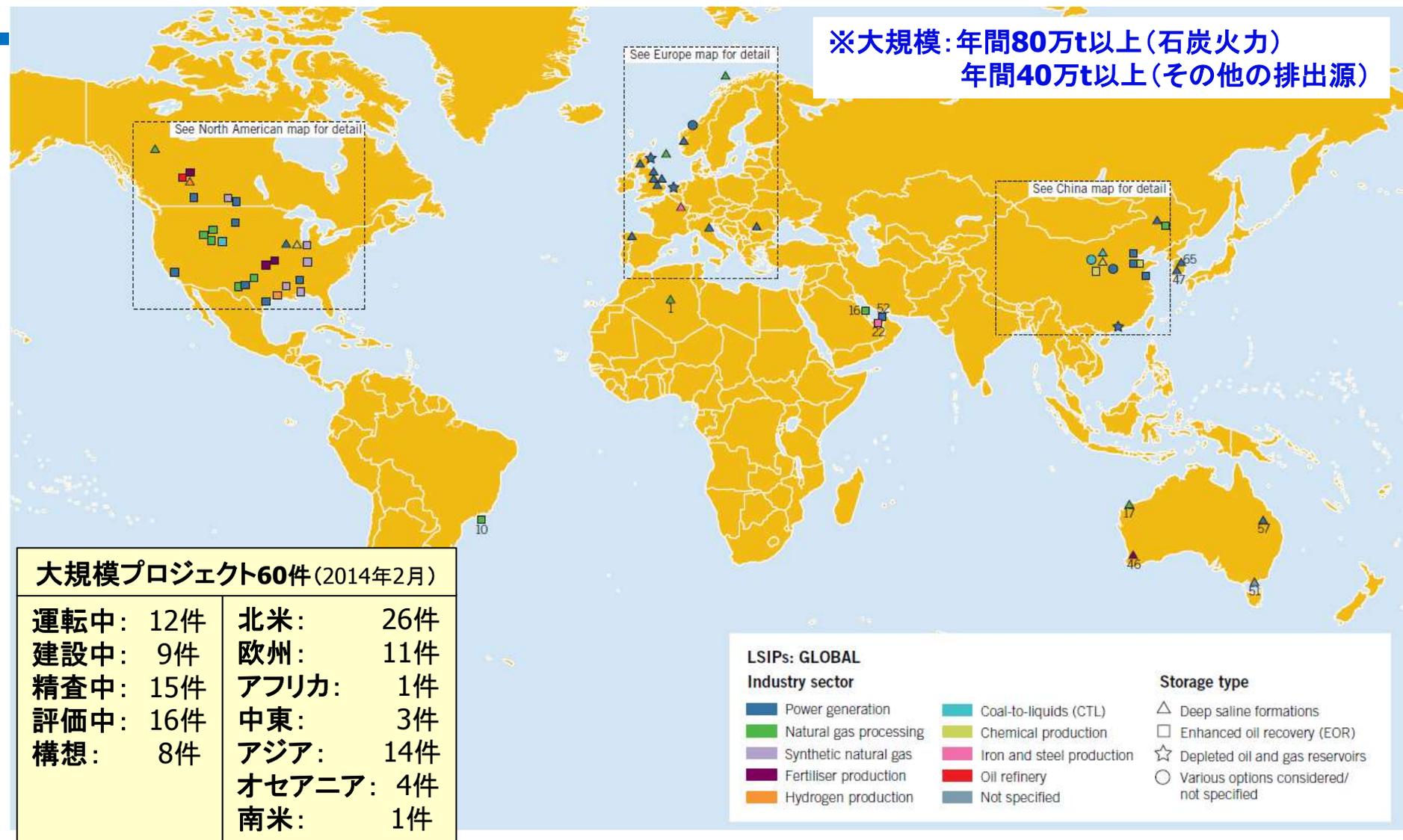
CCS解説アニメーション

ご清聴ありがとうございました

<http://www.japanccs.com/>

CCS/CO₂-EOR: 世界の大規模プロジェクト

※大規模: 年間80万t以上(石炭火力)
年間40万t以上(その他の排出源)



出典: Global CCS Institute, “The Global Status of CCS 2013” および “The Global Status of CCS February 2014”に基づいて作成、一部追記

大規模CCS事業：稼働中プロジェクト

	プロジェクト名	国	CO ₂ 量/年	運転開始	排出源	回収	輸送距離	輸送	貯留
						タイプ		タイプ	タイプ
1	Val Verde Natural Gas Plants ¹⁾	米国	130 万トン	1972	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	132 km	陸→陸 パイプライン	EOR
2	Enid Fertilizer CO ₂ -EOR Project ¹⁾	米国	68 万トン	1982	肥料生産	燃焼前	225 km	陸→陸 パイプライン	EOR
3	Shute Creek Gas Processing Facility ¹⁾	米国	700 万トン	1986	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	190 km	陸→陸 パイプライン	EOR
4	Sleipner CO ₂ Injection	ノルウェー	100 万トン	1996	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	0 km	直接圧入	海底下 帯水層
5	Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale Project	カナダ	300 万トン	2000	合成天然ガス	燃焼前	315 km	陸→陸 パイプライン	EOR
6	In Salah CO ₂ Storage ²⁾	アルジェリア	100 万トン	2004	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	14 km	陸→陸 パイプライン	陸上 帯水層
7	Snøhvit CO ₂ Injection	ノルウェー	70 万トン	2008	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	152 km	陸→海底 パイプライン	海底下 帯水層
8	Century Plant ¹⁾	米国	840 万トン	2010	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	256 km	陸→陸 パイプライン	EOR
9	Air Products Steam Methane Reformer EOR Project	米国	100 万トン	2013	水素製造	燃焼前 (合成ガス)	101 – 150 km	陸→陸 パイプライン	EOR
10	Petrobras Lula Oil Field CCS Project	ブラジル	70 万トン	2013	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	0 km	直接圧入	EOR
11	Coffeyville Gasification Plant	米国	100 万トン	2013	肥料製造	工業分離	112 km	陸→陸 パイプライン	EOR
12	Lost Cabin Gas Plant	米国	100 万トン	2013	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	不明	陸→陸 パイプライン	EOR

1) 米国の4件のEORプロジェクトは、適切な貯留CO₂のモニタリングがなされていないため、IEAやCSLFではCCSプロジェクトとしては認められていない。

2) In Salahプロジェクトは2011年6月から操業を停止している。

出典：Global CCS Institute, “The Global Status of CCS 2013” および “The Global Status of CCS February 2014”に基づいて作成

社会的視点からの評価項目や留意点**福島県民目線で感じること**

1月15日、第2回トリチウム水タスクフォース会合での報告資料

コープふくしま 野中俊吉

I、社会的な視点からの評価項目や留意点

(1) 2013年12月20日閣議決定「原子力災害からの福島復興の加速に向けて」の通り一連の取り組みは福島復興の加速のためにあるべきと理解しています。

だからこそ、個別課題ごとの選択肢は福島県民の目線に十分配慮された切り口であることが大切であり、福島県民が復興の加速を実感できる内実が求められると思います。

被災者(県民)の現状(いくつかの事例・・・3年過ぎてこの状態)

- ①不慣れな避難生活や度重なる避難先の変更などにより、関連死者数は被災3県中最多で、津波被害による死者数をすでに上回っています。
- ②強制避難住民の家はネズミや他の野生動物に荒らされ、そのまま住める状態ではない。(震災当日、近所の人と外の小屋で焚き火をして一夜を過ごし、朝になるとすぐに防災無線で避難指示が出され、地震で倒れた家具等の片付けもできずに着の身着のまま避難して、避難先を何箇所もさまよい、間も無く3年が過ぎようとしている。その間、我が家はネズミ等に荒らされ、ネズミの食べたカスやネズミの糞で覆われている) *ある仮設住宅・・・双葉町の仮設住宅だけでも県内何箇所にも点在している・・・の自治会長は『仮設住宅では息が詰まるので時々双葉町の我が家に帰る。しかし家の中を見ると落込むので、家には入らず外の物置周辺に腰をかけてタバコをすいながら数時間滞在して気分を紛らわせてまた仮設住宅に帰っていく』と話していました。
- ③富岡町の夜ノ森公園近くの民家の庭先にイノブタが9頭もたむろしていました。視察に訪れたわれわれのバスが停車して覗き込んでも、恐れることも無く平然としていました。
- ④すぐにでも帰還を考えている田村市の都路地区を通ると、民家の敷地や道路横に除染したものが詰まったフレコンバッグが無造作に置かれていました。
- ⑤住民帰還を進めようとしている南相馬市小高区(旧小高町)は住民が瓦礫撤去に取り組んでいますが、夏の間は生い茂ったセイタカアワダチソウに隠れて見えなかった瓦礫(ひっくり返った車等)が、草が枯れた今(冬)は姿を現し、小高地区でさえも帰還の準備が遅々として進んでいないという印象を受けます。
- ⑥浪江町は昨年末ころインフラ復旧に着手したようですが、瓦礫撤去などはほぼ手付かずという印象を持ちます。打ち上げられた漁船はそのままですし、津波遭難者捜索の際に積上げられた瓦礫の山はそのまま放置されています。

(2) 福島第一原発に関する住民(県民)の気持ち

- ① 住民(県民)にとって、トリチウムはセシウムと比べて知識(「なじみ」)が薄いと思います。
- ② 住民(県民)にとって、トリチウムは新たな(謎の)放射能(放射性物質)として映っています。
- ③ 住民(県民)にとって、事故後2年以上経過してトリチウムが取りざたされることは、“またしても隠されていた”“二年間いったい何をしてきたんだ”という不信感を大きくしていると思います。
- ④ 住民(県民)にとって、トリチウム汚染水問題が今になって持ち出されることは、一号機から三号機への不安(不信感)を増大させていると思います。
- ⑤ 漁協組合長の声(漁業関係者としては、苦肉の策で、復興のため地下水バイパスにも協力しようとしている)
- ⑥ 住民(県民)は、第一原発からはすべての核種の放射性物質が海に流れていると思っっていますが、口に出せない人も大勢いると感じています。辛くて話題にしたくない人も大勢いると思います。
- ⑦ トリチウム汚染水を海に放出するということは、東京電力も国も放射能をコントロールする能力が無いという評価になってしまうと思います。
- ⑧ 住民(県民)は、『もうこれ以上福島県民に原発事故の犠牲を押し付けしないで欲しい』と考えています。

(3) トリチウムを海岸から放出したらどんなことが起るか(考えられるか)

- ① 住民(県民)の政府に対する信頼は地に落ちると思います。
- ② 避難指示解除されても住民の帰還意欲は萎えると思います。
- ③ 漁民の怒りは爆発すると思います。
- ④ この間努力してきてようやく回復基調にある農産物の風評被害は拡大すると思います。
- ⑤ 国際的な風評も拡大すると思います。

II、トリチウム汚染水処理の選択肢と評価項目に関して

- ① トリチウムの影響が小さいとの話を聴きましたが、そうであれば今後設置されるであろう仮置き場に保管させてもらって、保管施設のメンテナンスを続けたほうが良いと思います。万が一漏れても影響が小さいならそれを修理していけばよい気がしますので、そういう選択肢も評価して欲しいと思います。
- ② タンクが満杯になる(80万トン)との説明がありましたが、何が要因か?、土地の問題か?。もっと増やせばタンク貯蔵できると思います。設置場所は東電敷地内に限定しなくても良いと思います。

(リスク)コミュニケーションの可能性と課題

大阪大学コミュニケーションデザイン・センター

小林 傳司

本日の話の流れ

- 科学技術と社会の関係についての認識の変化
 - 科学技術基本計画(1986ー)を素材に
 - ルーツとしての「トランスサイエンス論」(1972)
 - OECDでの議論(2008)
- リスクコミュニケーションの反省
 - GMOの例
 - システミックリスク

科学技術社会論学会(2001年設立)趣意書から

21世紀を迎え、自然環境に拮抗する人工物環境の拡大によって深刻化する地球環境問題、情報技術や生命技術の発展に伴う伝統的生活スタイルや価値観との相克など、社会的存在としての科学技術によって生じているさまざまな問題が、社会システムや思想上の課題として顕在化してきている。今や、われわれは、過去の経験に学びつつ、科学技術と人間・社会の間に新たな関係を構築することが求められているのである。

第2期科学技術基本計画(2001－2005)

「人文・社会科学の専門家は、科学技術に関心をもち、科学技術と社会の関係について研究を行い発言するとともに、社会の側にある意見や要望を科学技術の側に的確に伝えるという双方向のコミュニケーションにおいて重要な役割を担う。わが国の人文・社会科学は、これまで科学技術と社会の関係の課題に取り組む点で十分とはいえなかった。今後は、“**社会のための科学技術、社会のなかの科学技術**”という観点に立った人文・社会科学的研究を推進し、その成果を踏まえ媒介的活動が活発に行われるべきだ。」

社会・国民に支持される科学技術

(第3期科学技術基本計画)2006-10

- 科学技術が及ぼす**倫理的・法的・社会的課題**への責任ある取り組み
 - ・人々の懸念(クローン技術などの生命倫理問題、遺伝子組み換え食品に対する不安、個人情報悪用など)
 - ・社会に開かれたプロセスによるルール作り
- 科学技術政策に関する**説明責任と情報発信**の強化
 - ・成果の国民への還元をわかりやすく説明
 - ・研究者の**アウトリーチ**活動の強化
 - ・学協会の政策提言機能
- 国民への科学技術への**主体的な参加の促進**
「各府省が、社会的な影響や国民の関心の大きな研究開発プロジェクトを実施する際、その基本計画、研究内容及び進捗状況を積極的に公開し、それに対する意見等を研究開発プロジェクトに反映させるための取り組みを進める。」

第4期科学技術基本計画(2011－15)

V. 社会とともに創り進める政策の展開

2. 社会と科学技術イノベーションとの関係深化

(1) 国民の視点に基づく科学技術イノベーション政策の推進

① 政策の企画立案及び推進への国民参画の促進

② 倫理的・法的・社会的課題への対応

科学技術が進展し、その内容が複雑化、多様化する中、先端的な科学技術や生命倫理に関する問題、東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けた原子力の安全性に対する不安など、科学技術と国民の関わりは、倫理的、法的、社会的にますます深くなりつつある。このため、国として、科学技術が及ぼす社会的な影響やリスク評価に関する取組を一層強化する。

第4期科学技術基本計画

推進方策

- 国は、科学的合理性と社会的正当性に関する根拠に基づいた審査指針や基準の策定に向けて、レギュラトリーサイエンスを充実する。
- 国は、テクノロジーアセスメントの在り方について検討するとともに、生命倫理等の問題にかかわる先端的な科学技術等について、具体的な取組を推進する。また、政策等の意思決定に際し、テクノロジーアセスメントの結果を国民と共有し、幅広い合意形成を図るための取組を進める。
- 国は、東京電力第一原子力発電所の事故の検証を行ったうえで、原子力の安全性向上に関する取組について、国民との間で幅広い合意形成を図るため、テクノロジーアセスメント等を活用した取組を促進する。

レギュラトリー・サイエンス

- 科学技術の進歩を人間との調和の上でもっとも望ましい姿に調整する科学(内山、2002)
- 科学技術と何らかの形で関係のある問題に関して、その科学技術的妥当性と社会的正当性の両方を担保するもの(小林信一、2002)

⇒「規制」のための科学に尽きるものではない

テクノロジーアセスメント

- 研究開発の発展段階に応じ、科学技術が社会や国民に与える影響について調査分析、評価を行う活動(第四期科学技術基本計画)
- 従来の研究開発・イノベーションシステムや法制度に準拠することが困難な先進技術に対し、その技術発展の早い段階で将来の様々な社会的影響を予想することで、技術や社会のあり方についての問題提起や意思決定を支援する制度や活動を指す。(鈴木達治郎2009)

トランス・サイエンス(1972)

- 「トランス・サイエンス」(A. Weinberg)の出現

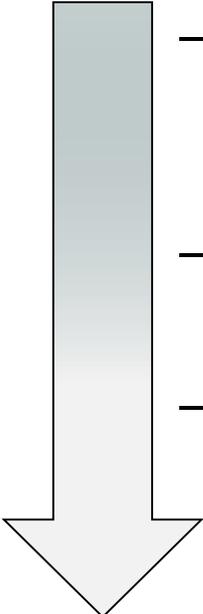
「科学に問うことはできるが、科学だけでは答えることができない問題群」

→しかし、意思決定しなければならない

- 低線量被ばく
- 原子力発電所の事故の可能性(低確率)
- 社会科学(予測能力の限界)
- 価値に関する問題(純粋研究か応用研究か)

トランス・サイエンス(1972)

- 原子力発電所のリスクを例に

- 
- 原子力発電所の多重防護の安全システムについて、そのすべて同時に故障するとどうなるか
 - このような事態が生じる確率はどのくらいのものか
 - 「きわめて低い確率」を、科学的な見地から「事故は起こりえない」と言っているのか、あるいはいくら低確率でも起きれば凄まじい被害が生じるのだから、「事故は起こりうる」と想定し、さらに対応策を考えるべきなのか。

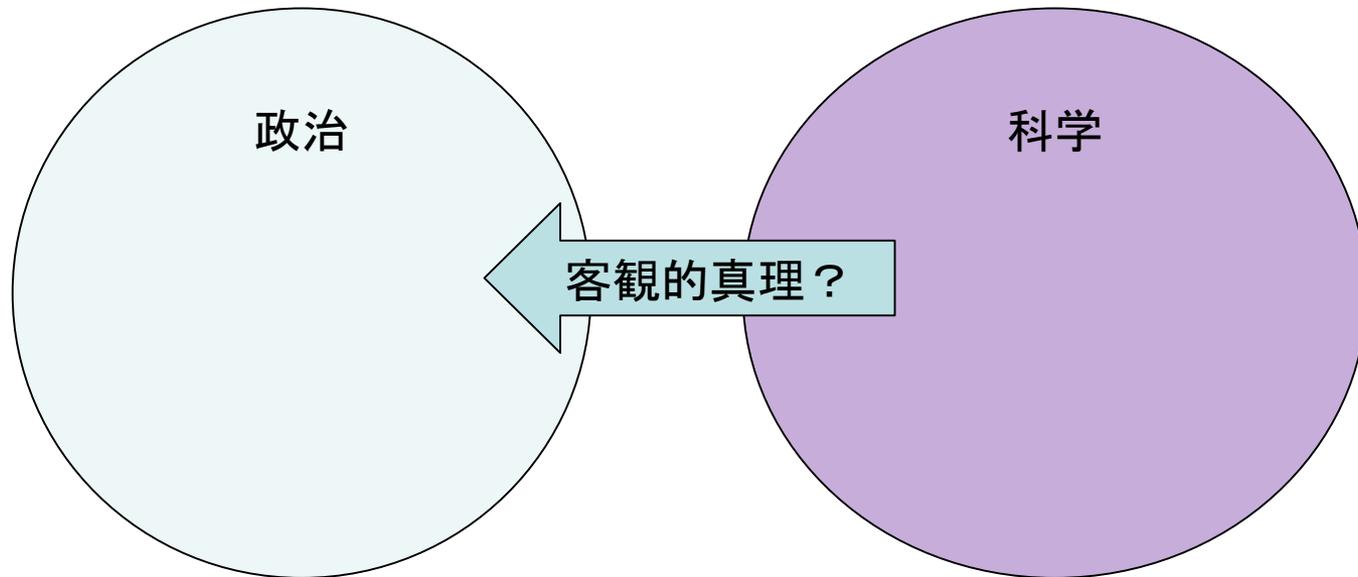
トランス・サイエンス

どうするか

ワインバーグの答え

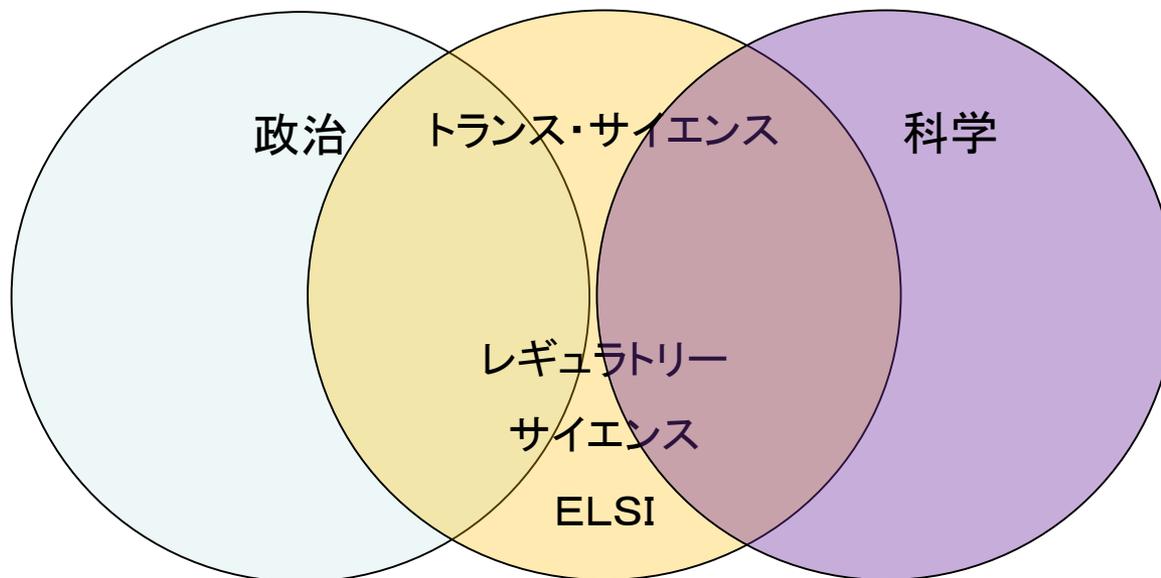
- 専門家だけでは決めない
- 社会で議論して決める
- これが民主主義国アメリカのやり方

トランス・サイエンスの時代



「科学的・定量的判断に基づく意思決定」の前提

トランス・サイエンスの時代



「社会的討議に基づく意思決定」

*Organisation for Economic Co-
Operation and Development
Global Science Forum
Rome Meeting – 9-10 october 2008*

Improving the Dialogue with Society on Scientific Issues
First results

Background and rationale

- Government's preoccupations :
 - To optimise the interaction with **the general public concerning issues that have a significant scientific component**
 - Why ? **Number of issues increasing**
 - Examples : GMO, génétic testing, nano, nuclear waste, science and religion, global warming, ...
 - Number of public debates more or less organised in different countries
 - So an important difference appears, compared with periods where discussion was limited to a few experts, either for States or for industry : **publics want to express**

« Golden age » traditions

- Transfer of knowledge to lay persons most of the time by education 「素人には教育」
- Unadequacy of understanding of public 「無知」
- Top down decisions 「トップダウン」
- « Deficit model » 「欠如モデル」
- One way communication 「一方向コミュニケーション」
- But ...

Limits of the model

- Today's life of citizens is affected by science and technology in a large number of areas

「科学技術の生活への溢れ出し」

- Scientific enterprise is no longer accepted as automatically beneficial to society

「科学技術への懐疑」

- Need for a bidirectional dialogue, going beyond traditional science education ?

「双方向的対話の必要性」

New questions

- How to assess and identify the concerns of the public ?

「ひとびとの懸念の把握と評価」

- Are they different from those of public's elected representatives ?

「議員の発想と人々の発想の違い」

- How can consultations be translated to actionable policy decisions ?

「public consultation と政策の関係」

- ...

リスクコミュニケーションの反省

Fischhoff, B. (1995) *Risk Analysis*, Vol. 15, No.2, 1995

Leiss, W. (1996) *The Annals of the American Academy*, 545, May 1996.

第一フェーズ (1975-84)

- ・ 第一段階: 数値を把握すればよい
- ・ 第二段階: 数値を市民に知らせればよい

第二フェーズ (1985-94)

- ・ 第三段階: 数値の意味を知らせればよい
- ・ 第四段階: 類似のリスクをこれまで受け入れてきたことを知らせればよい
- ・ 第五段階: 「得な取引」であることを伝えればよい
- ・ 第六段階: 丁寧に対応すればよい

第三フェーズ (1995-)

- ・ 第七段階: パートナーとして扱えばよい

言うは簡単
でも
どうやって？

GM論争の例(1990年代)

日欧の政府や専門家の基本的発想

- 欠如モデルによる対応
- 科学に基づく安全性
- ゼロリスクはない

一般市民がGMOに抱く主要な疑問

(PABE: Marris *et.al.* 2001)

- なぜGMOが必要なのか？ その便益は何か？
- GMOの利用で利益を得るのは誰か？
- GMOの開発は誰がどのように決定したのか
- GM食品が商業化される前に、なぜもっとよい情報を与えられなかったのか？
- なぜ、GM製品を買うか買わないかを選ぶもっと効果的な手段を与えられていないのか？
- 規制当局はGM開発を進める大企業を効果的に規制するのに十分な権限と能力を持っているのか？

一般市民がGMOに抱く主要な疑問

(PABE: Marris *et.al.* 2001)

- 規制当局による管理は有効に運用されているのか？
- リスクは真剣に評価されているのか？
- 長期的な潜在的影響は評価されているのか？
- 解消できない不確実性や未知の事柄は、意思決定の中でどのように考慮されているのか？
- 予見されていない有害な影響が生じた場合の救済策として、どんなプランが立てられているのか？
- 予見されなかった被害が生じたときには誰が責任を負うのか、どうやって責任をとるのか？

自然科学だけで応えられない問いばかり

3.11以後の原発問題、放射線被曝問題の場合はどうか？

よう

イギリスの反省

2.51 Sir Robert May made this point clearly last year in a publication on GM crops: "There are real social and environmental choices to be made. **They are not about safety as such, but about much larger questions of what kind of a world we want to live in**"[23].

In Select committee on Science and Technology Third Report
Science and Society, 2000

「この論争は安全性についてなどではなかった。それよりもっと大きな問い、つまり我々はどんな世界に住むことを欲しているかをめぐるものだった。」

リスクを例に

生起確率 × ハザード

だけで考えていいのか？

システミックリスクという考え方

O.Renn & A. Klinke *EMBO reports* vol.5 2004

リスクの性質

- 損害の程度
死亡や傷害、物品の損害など自然的単位で計量可能な負の影響
- 生起確率
相対頻度での見積もり
- 不確実性 (Incertitude)
さまざまな不確実性 (uncertainty) 要素の総括的指標
- 遍在
潜在的損害の地理的分布
- 持続性
潜在的被害の時間的広がり
- 可逆性
損害の生じる以前の状態への復旧可能性
- 遅延効果
起回事象と損害の出現の間の潜伏時間
- 平等性の侵犯
利益の享受者とリスクの担い手の不一致
- 社会的動揺の可能性
個人や、社会、文化の利害や価値の侵犯により、社会的紛争やその結果に苦しめられたと感じる個人や集団を生み出す可能性。これはまた、リスクとベネフィットの分配の不平等性や不公正さの知覚によっても生み出される。

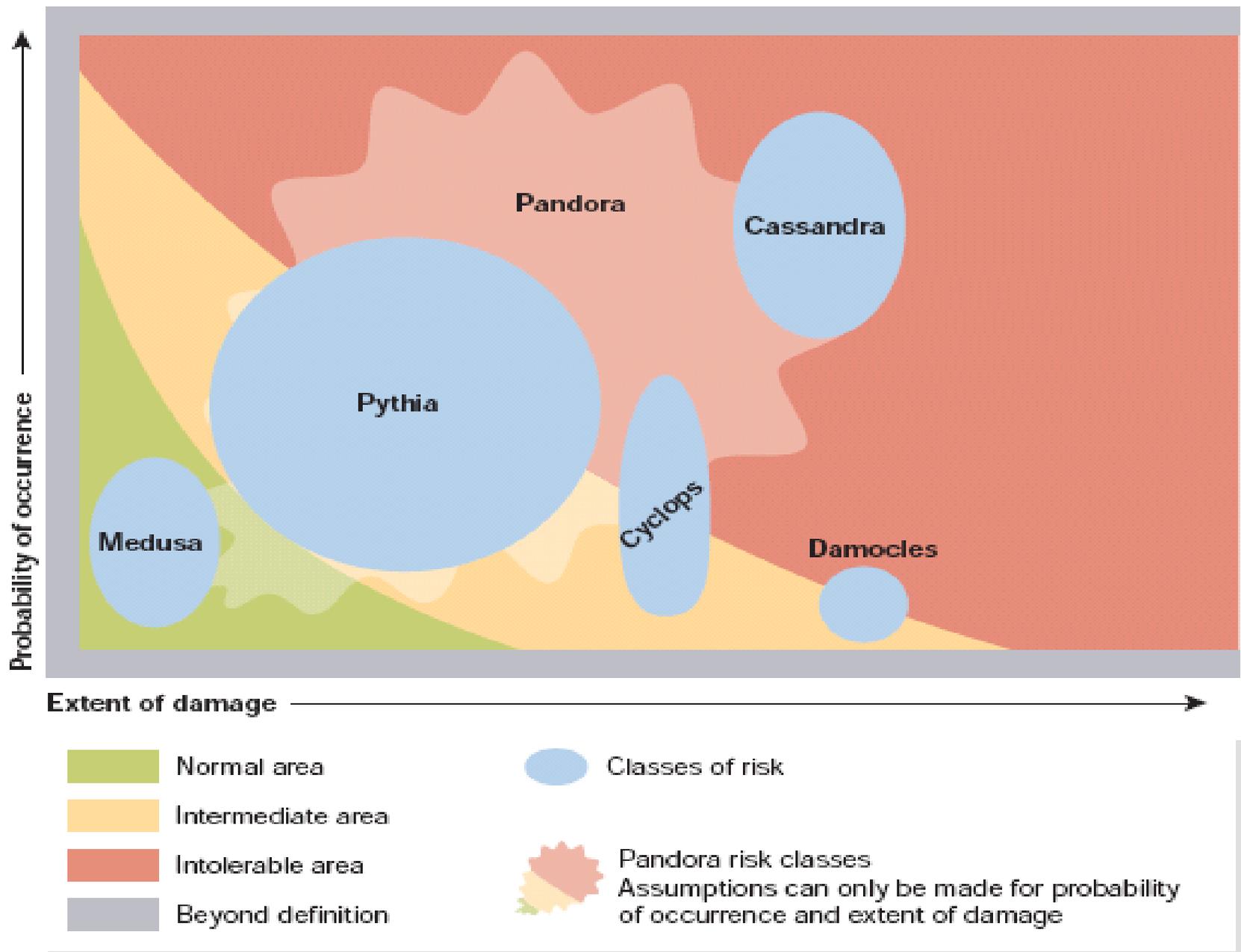


Fig 1 | Risk classes (WBGU, 2000)

リスクのタイプ

- **ダモクレス型**
 - 原発、化学工場、ダム
- **キュークロープス型**
 - 火山噴火、津波、洪水、HIV／AIDS、疫病
- **ピューティア型**
 - 突然の気候変動、農業・食品への遺伝子組み換え技術利用
- **パンドラ型**
 - フロンガス、内分泌攪乱物質
- **カッサンドラ型**
 - 気候変動、生物多様性減少
- **メデューサ型**
 - 電磁波問題

リスクマネジメントの方式(一例)

マネジメント	リスクのクラス	損害の程度	生起確率	戦略
科学に基づく	ダモクレス キュークローポス	高い 高い	低い 不確実	災厄の可能性削減 確率の確実性増加 柔軟さの増加 パニック抑止 危機管理
予防原則 (事前警戒原則)	ピューティア パンドラ	不確実 不確実	不確実 不確実	予防原則の適用 代替案の開発 知識の改善 削減と抑止 危機管理
討議型	カッサンドラ メデューサ	高い 低い	高い 低い	意識構築 信頼構築 市民参加 リスクコミュニケーション 偶発性の管理

関与者(参加者)拡大の意義

- 民主主義体制の当然の要請
- 不要な対立の解消と信頼の醸成
 - 懸念の発見
 - 適切なフレーミング
 - 信頼=意図/能力 「日掛貯金」(木下富雄)
- 政策の質の向上
 - 多様な専門知、ローカル知の動員
 - 多様な価値、利害の反映と調整、公益の発見
- 合理的失敗
 - 納得のいく失敗
 - 後悔の最小化

まとめ？

1. コミュニケーションに馴染む話題ではないように感じる。(むしろテクノロジー・アセスメント？)
2. リスクコミュニケーションは流行しているが、いわゆる合意形成論と同様に、勝手な期待が先行しているのであって勘違いが多い。
3. それでもどうしても何かコミュニケーションをやりたいというのであれば、お勧めはしないが、下記の項目に対する準備と覚悟が必要。
 - イ. コミュニケーション活動の実施主体の信頼性確保の方策(東電、エネ庁では困難でしょう)。
 - ロ. コミュニケーションの獲得目標の明確化(落としどころを事前に決めておけという意味ではない。合意など形成されないことを覚悟しつつ、どういう成果が期待できるかについてイメージを持つこと)。
 - ハ. コミュニケーションの手法の検討(目的とテーマ依存)。
 - ニ. 出てきた結果の利用方法について、コミュニケーション活動の冒頭で説明できるようにすること(その覚悟がなければやるな)。
4. 専門家の中で合意形成ができない問題は、社会とのコミュニケーションでも合意はできない可能性が高いという認識を持て。
5. それでも、適切なコミュニケーション活動に取り組めば、担当組織(例えば エネ庁)の信頼は向上する可能性があるし、課題に対する対応策についての賛成、あるいは「我が事化」は進展する可能性はある。また意外な発見(専門家等が思いつかなかった解決方策)もあり得る。でも合意は無理だろう。できるのは「メタ」合意までと覚悟すべし。