

第15回若手科学者によるプラズマ研究会

---

# 核融合プラント内・環境中 トリチウム移行経路分析とプラント設計

京都大学 登尾一幸、柴田敏宏、小西哲之

---

2012/3/14-16 原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

# はじめに

## プラント内での移行

### 核融合プラント

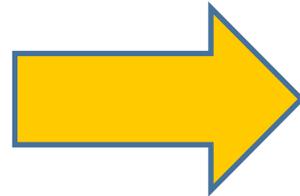
- プラズマ
- 燃料サイクル
- 発電系
- トリチウム除去系

消費量:  $10^{12}$ Bq/s

オーダー

インベントリ: 数百g

~1kgオーダー



トリチウム放出

- 量
- 放出形態・場所  
(排気、排水)
- 化学形態  
(HTO, HT, 炭化水素形)

## 環境内での移行

### 環境

- 大気中移行
- 環境中での移行、蓄積
  
- 人体への影響  
(発癌率等)
- 社会への影響  
(風評被害等)



プラント設計へのフィードバック



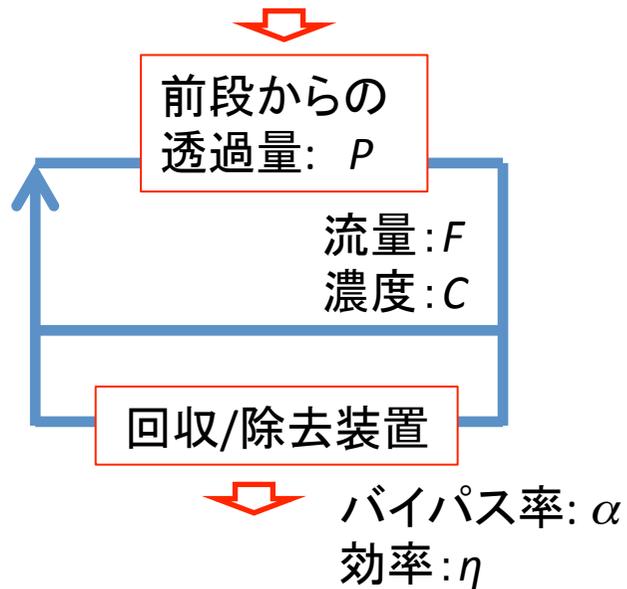
# 増殖・冷却・エネルギー変換方式の組み合わせ

エネルギー(熱)の取り出しに伴ってトリチウムも移動。  
ブランケット形式(増殖・冷却)、熱媒体、熱交換器、エネルギー変換方式に依存

増殖材 トリチウム回収	冷却	熱交換器	エネルギー 取り出し	検討(設計)例
Solid + He sweep	水	SG	蒸気タービン	SlimCS
Solid + He sweep	He	IHX	ガスタービン	PPCS-B
Liquid metal	水	SG	蒸気タービン	PPCS-A
Liquid metal	He + LM	IHX, Recuperator	ガスタービン	ARIES-ST
Liquid metal		IHX	燃料製造	GNOME (京大)
Liquid metal		IHX	ガスタービン	ARIES-AT
Liquid metal	He	IHX	ガスタービン	

# プラント内トリチウム移行に影響を与える要素

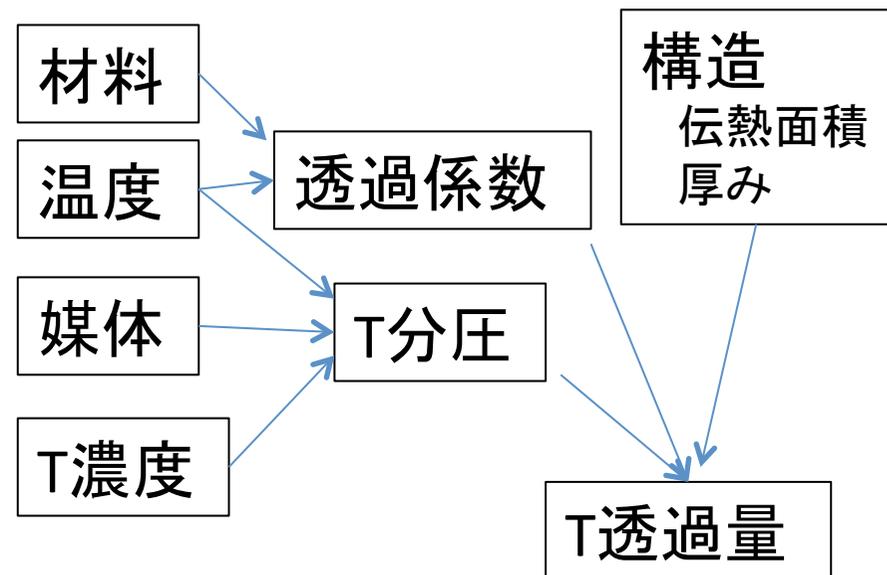
## トリチウム回収・除去装置の効率



定常状態では回収量 =  $P$   
→ 濃度  $C = P / (\alpha \eta F)$

高圧配管  
破断放出

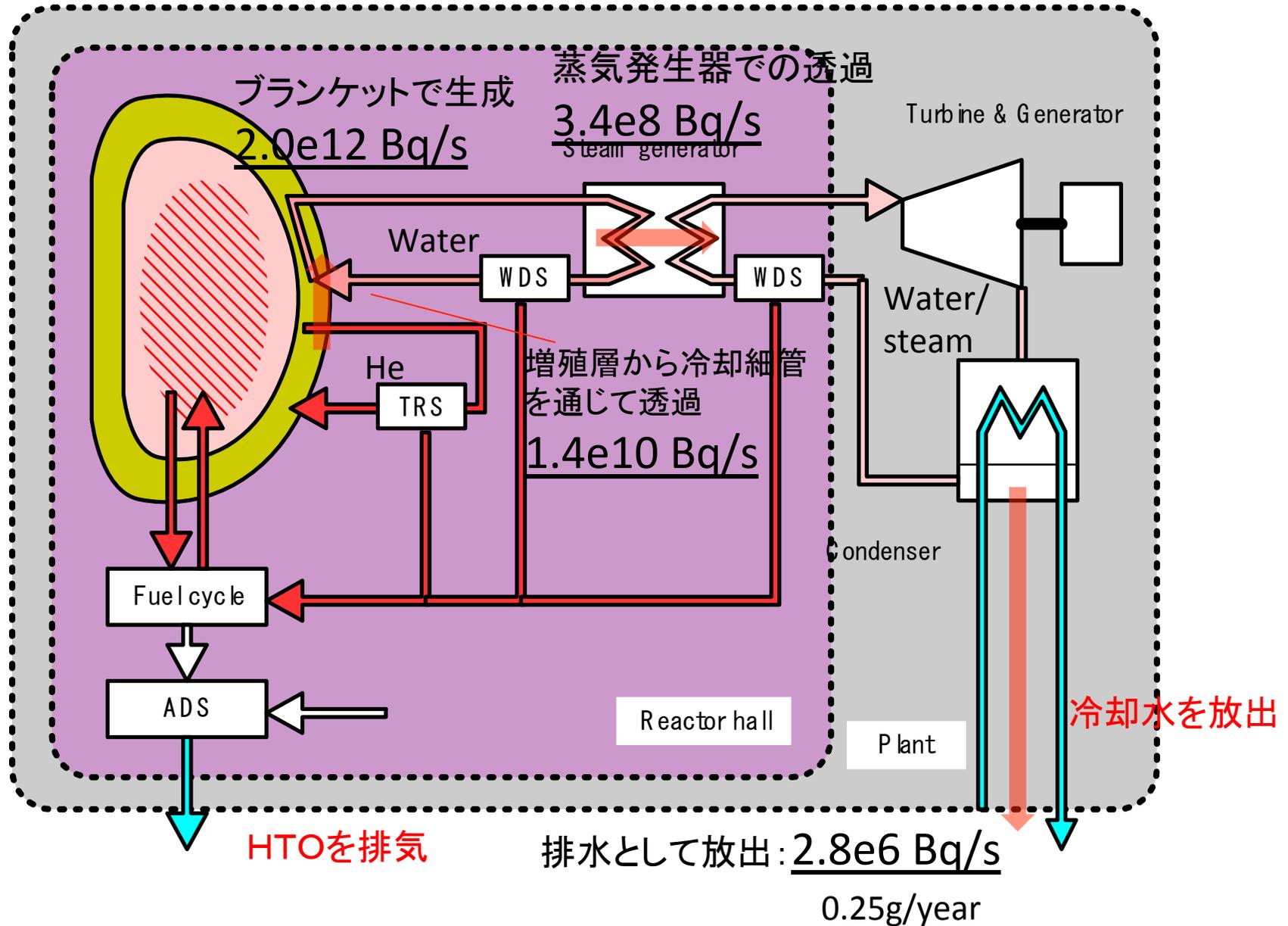
## 熱交換器等での透過量



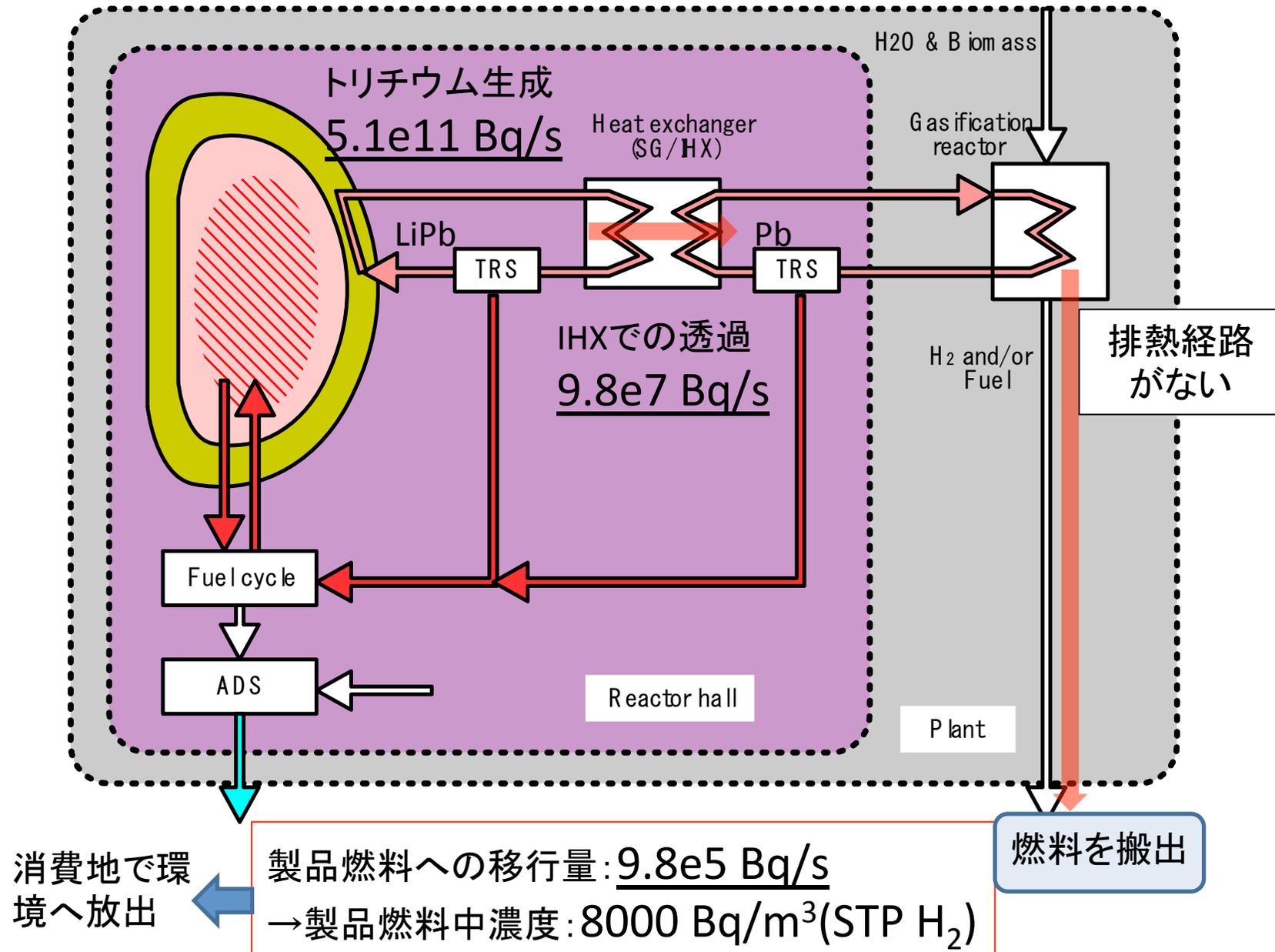
T/HTO  
漏えい放出

# 通常時放出一固体増殖、水冷却、蒸気発電の場合

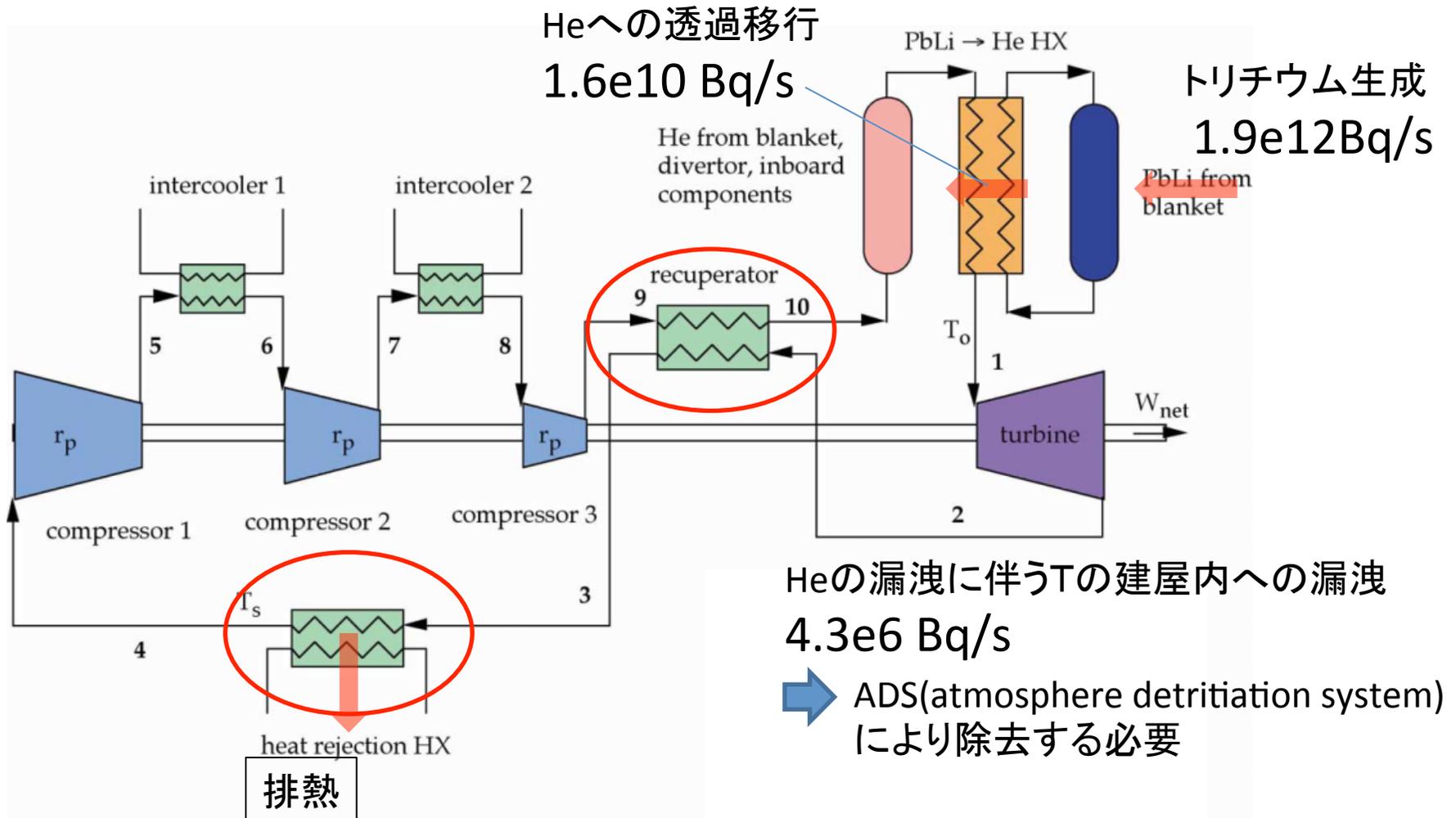
SlimCSの設計値とPWRを参考に計算



# LiPb増殖・冷却、燃料製造(GNOME)の場合



# ARIES-ST (LiPb増殖、LiPb&He冷却、Heタービン)での検討例\*



レキュペレータの使用により、外部との熱交換器を低温・小型熱交換器で行い、トリチウム透過を防ぐ。ただし、タービン媒体はトリチウムを含む。放出は主にHT.

\* M.S. Tillack, et al., Fusion Eng. Des. 65, 215-261

# 各種設計パラメータの与える影響

水冷却・固体増殖材、トリチウム生成量 =  $2.0 \times 10^{12} \text{Bq/s}$  の場合

一次冷却水WDS処理能力: ITER (20L/h) Darlington (360L/h)

WDS処理能力	一次冷却水への透過	一次冷却水中濃度	二次冷却水への透過	排水への漏洩透過
20kg/h	$1.4 \times 10^{10} \text{Bq/s}$	$2.5 \times 10^{12} \text{Bq/kg}$	$1.4 \times 10^9 \text{Bq/s}$	$1.2 \times 10^7 \text{Bq/s}$
360kg/h	$1.4 \times 10^{10} \text{Bq/s}$	$1.4 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$	$3.4 \times 10^8 \text{Bq/s}$	$2.8 \times 10^6 \text{Bq/s}$

ブランケット内冷却管の厚み、透過防止処理

冷却管厚み	一次冷却水への透過	一次冷却水中濃度	二次冷却水への透過	排水への漏洩透過
1.5mm	$1.4 \times 10^{10} \text{Bq/s}$	$1.4 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$	$3.4 \times 10^8 \text{Bq/s}$	$2.8 \times 10^6 \text{Bq/s}$
2mm	$1.0 \times 10^{10} \text{Bq/s}$	$1.0 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$	$2.9 \times 10^8 \text{Bq/s}$	$2.4 \times 10^6 \text{Bq/s}$
1.5mm, TPR=100	$1.4 \times 10^8 \text{Bq/s}$	$1.4 \times 10^9 \text{Bq/kg}$	$3.4 \times 10^7 \text{Bq/s}$	$2.8 \times 10^5 \text{Bq/s}$

他の条件 (WDS: プラント規模、冷却管: 冷却能力等) とのトレードオフ

# 各媒体中のトリチウム量

---

配管破断事故時に放出される可能性のあるトリチウム量

## 水冷却の場合

一次冷却水中:  $1.4 \times 10^{17} \text{Bq}$  (=390g) (一次冷却水量=1000tと仮定)  
高圧(15MPa)、トリチウム形態=HTO

## LiPb/He冷却(ARIES-ST)の場合 (H.Y.Khater et al., Fus. Eng. Des. 65 (2003))

LiPb中:  $5.7 \times 10^{15} \text{Bq}$  (=16g) 非高圧、トリチウム形態=T, HT  
He中:  $3.6 \times 10^{14} \text{Bq}$  (=1g) 高圧(12MPa)、トリチウム形態=HT

## LiPb増殖・冷却(GNOME)の場合

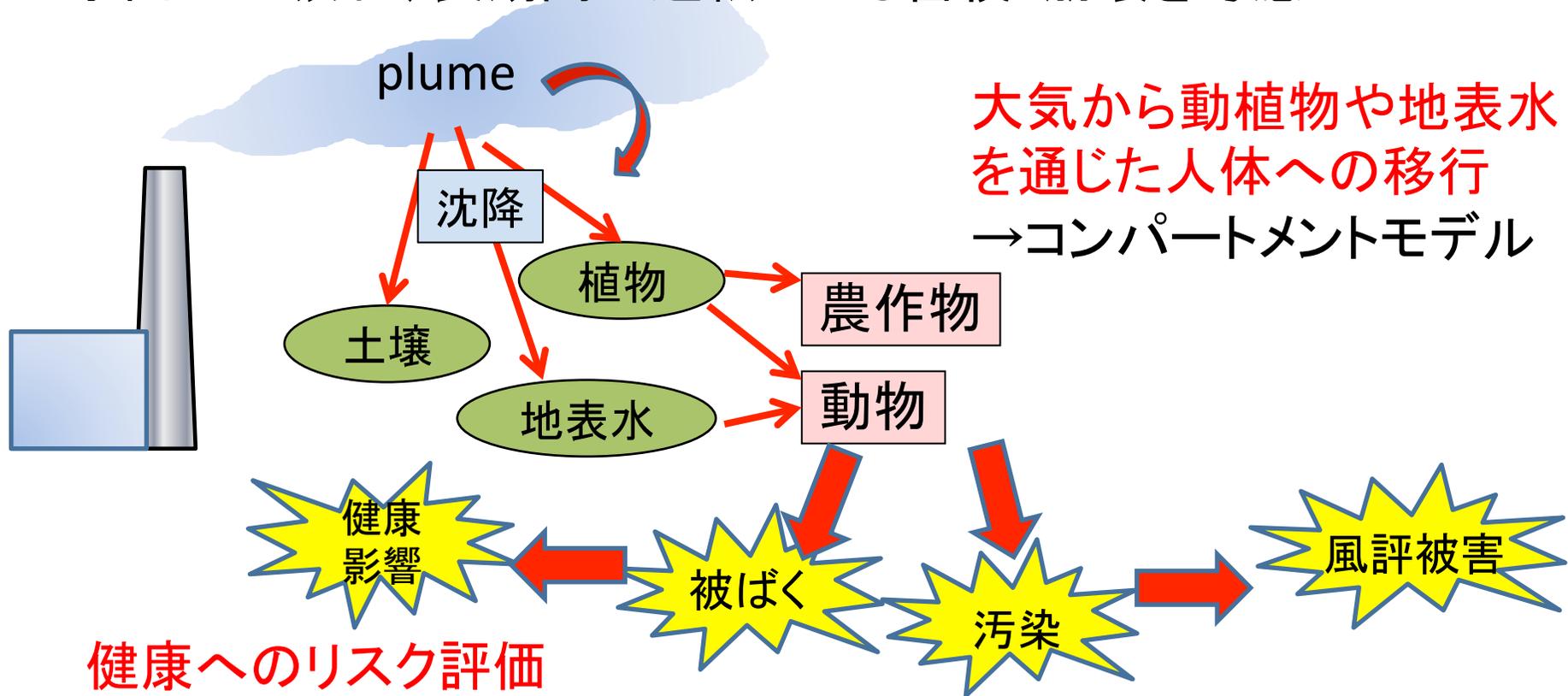
LiPb中:  $4.2 \times 10^{14} \text{Bq}$  (=1.2g) (LiPb量=300m<sup>3</sup>, T回収率=0.5と仮定)

# スタックから定常放出されたトリチウムの環境中での移行

## 大気中移流・拡散

→ガウス・プルームモデル/移流拡散モデル

水面への吸収、長期間の運転による蓄積・崩壊を考慮

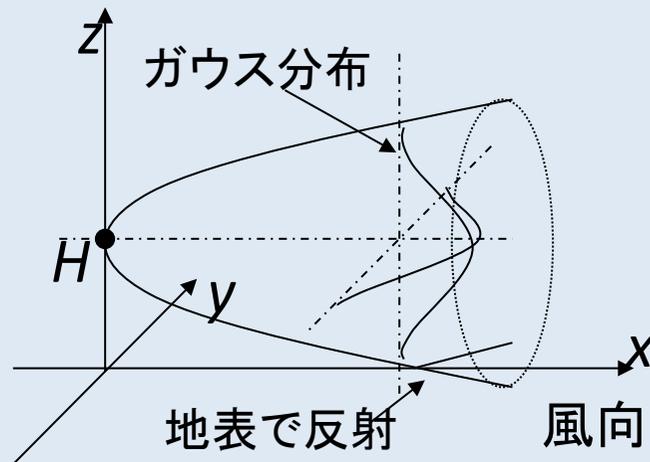


# 環境中トリチウム移行の解析

ガウスプルームモデルや移流拡散モデルを用いて核融合炉や核燃料再処理施設から定常的に放出されるトリチウムの環境中での挙動を解析。

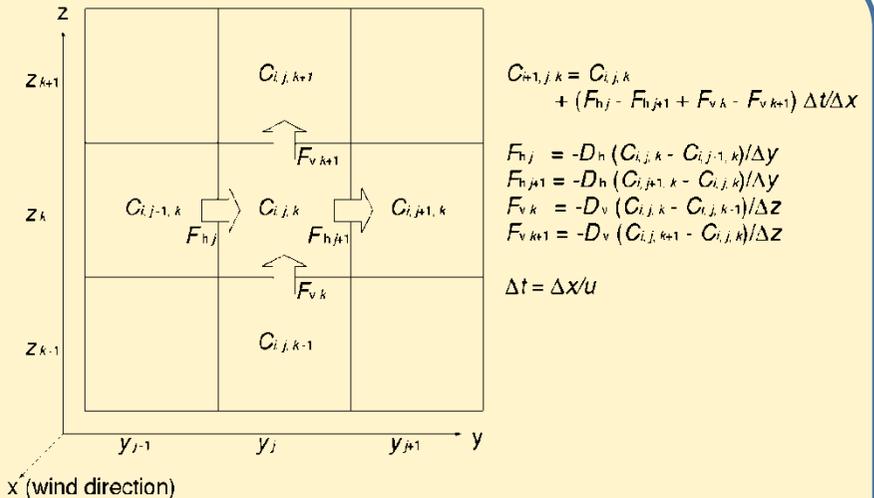
- 多量の水(海面など)による吸収・同位体希釈の効果
- 長期運転による蓄積

## 既存＝ガウスプルームモデル



- 放出源からのトリチウム移行  
＝風による移流＋拡散(ガウス分布を仮定)
- 地表では全反射を仮定(水面の影響考慮せず)

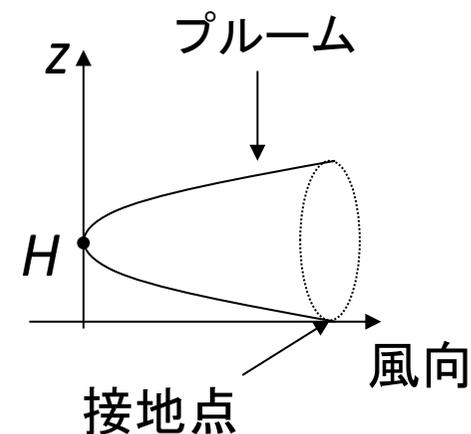
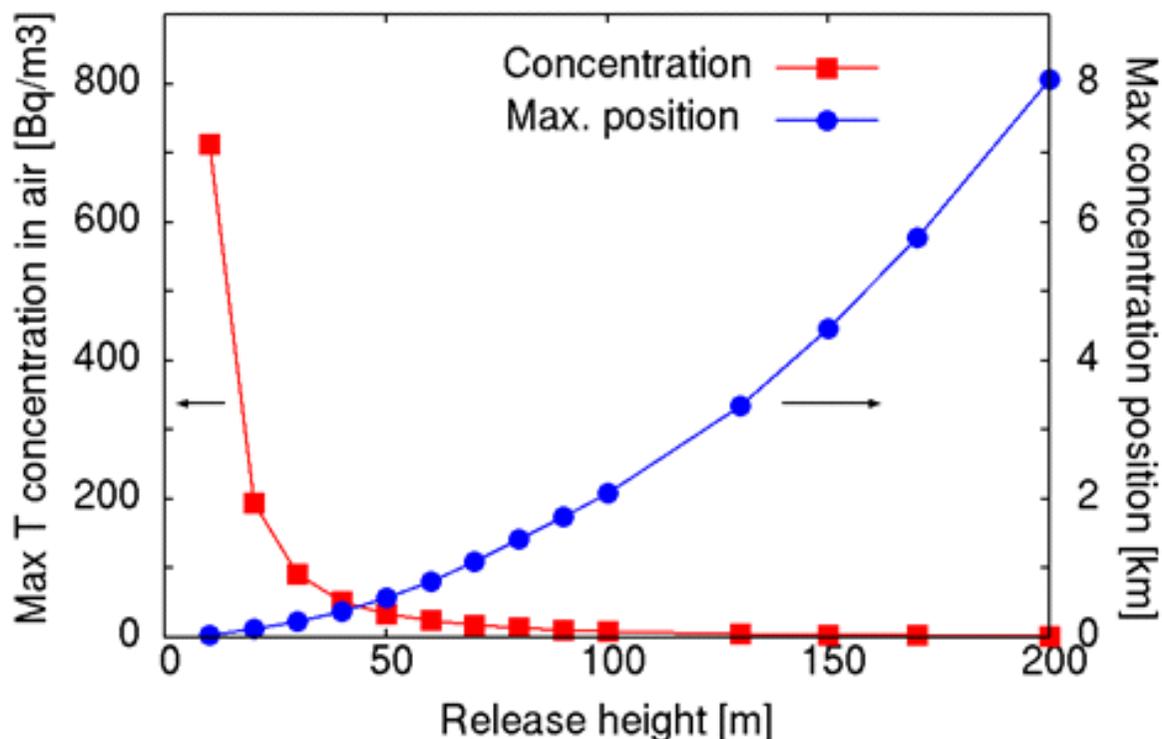
## 3次元移流拡散モデル



- 3次元空間中の移流拡散を計算
- 風方向＝時間発展
- 風に直交する方向＝拡散方程式
- 表面の境界条件を場所に応じて与えることで陸域(反射)、水域(吸収)を表現

# 放出高さによる大気中濃度への影響

放出点高さに対する地表近傍での大気中トリチウム最大濃度および最大地点までの距離（風速:2m/s一様, 0.1g-T/year as HTO）

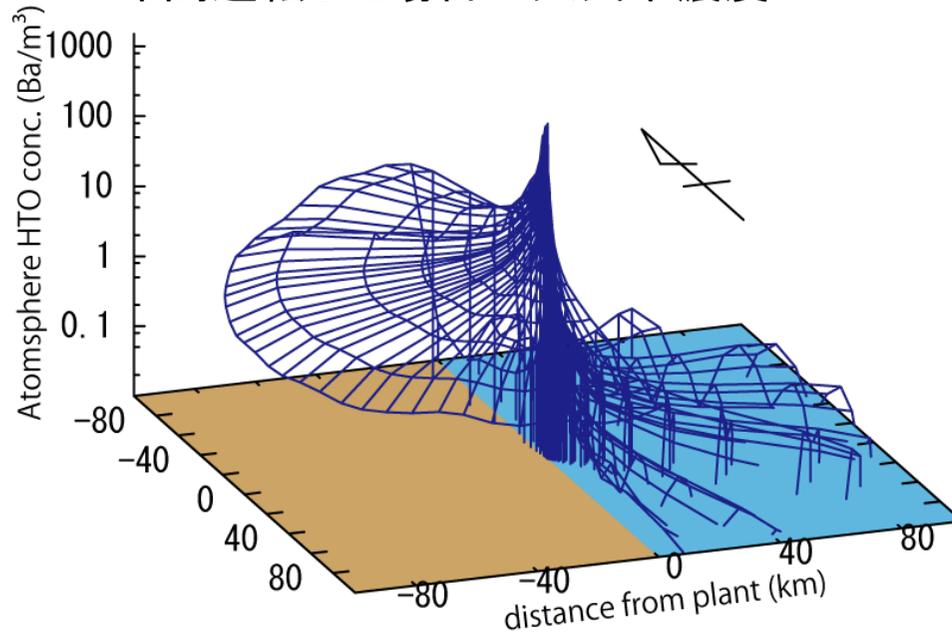


放出点(スタック)の高さによっても挙動は異なる。

- プルームの接地点が最も濃度が高くなる(必ずしもプラントに近い場所で濃度が高くなるわけではない)。スタックが高いほど接地点は遠くなる。
- 接地点が遠いほど濃度自体は薄くなる。

# 大気中移行—長期間運転後の環境への蓄積

放出量 $1.35 \times 10^{14}$  Bq/yearを仮定、  
100年間運転した場合の大気中濃度

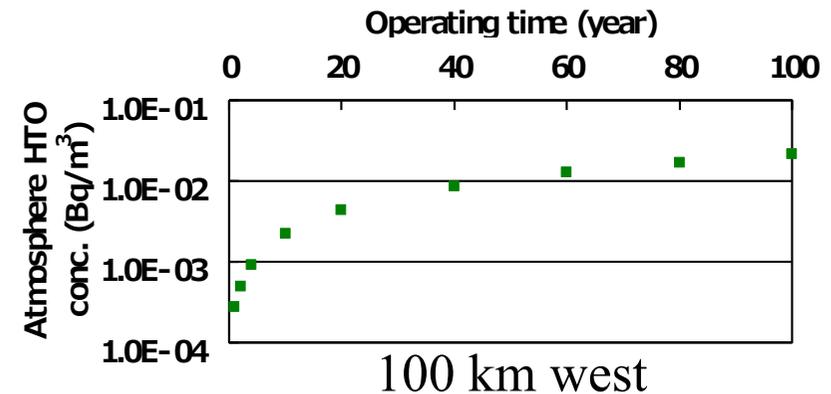
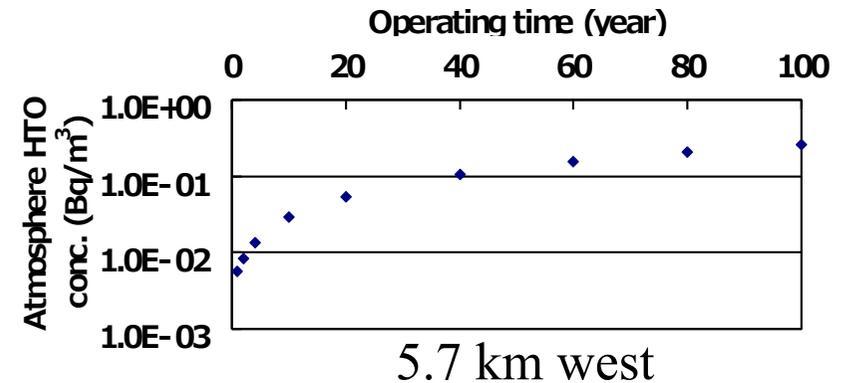


海面への吸収により低い値に

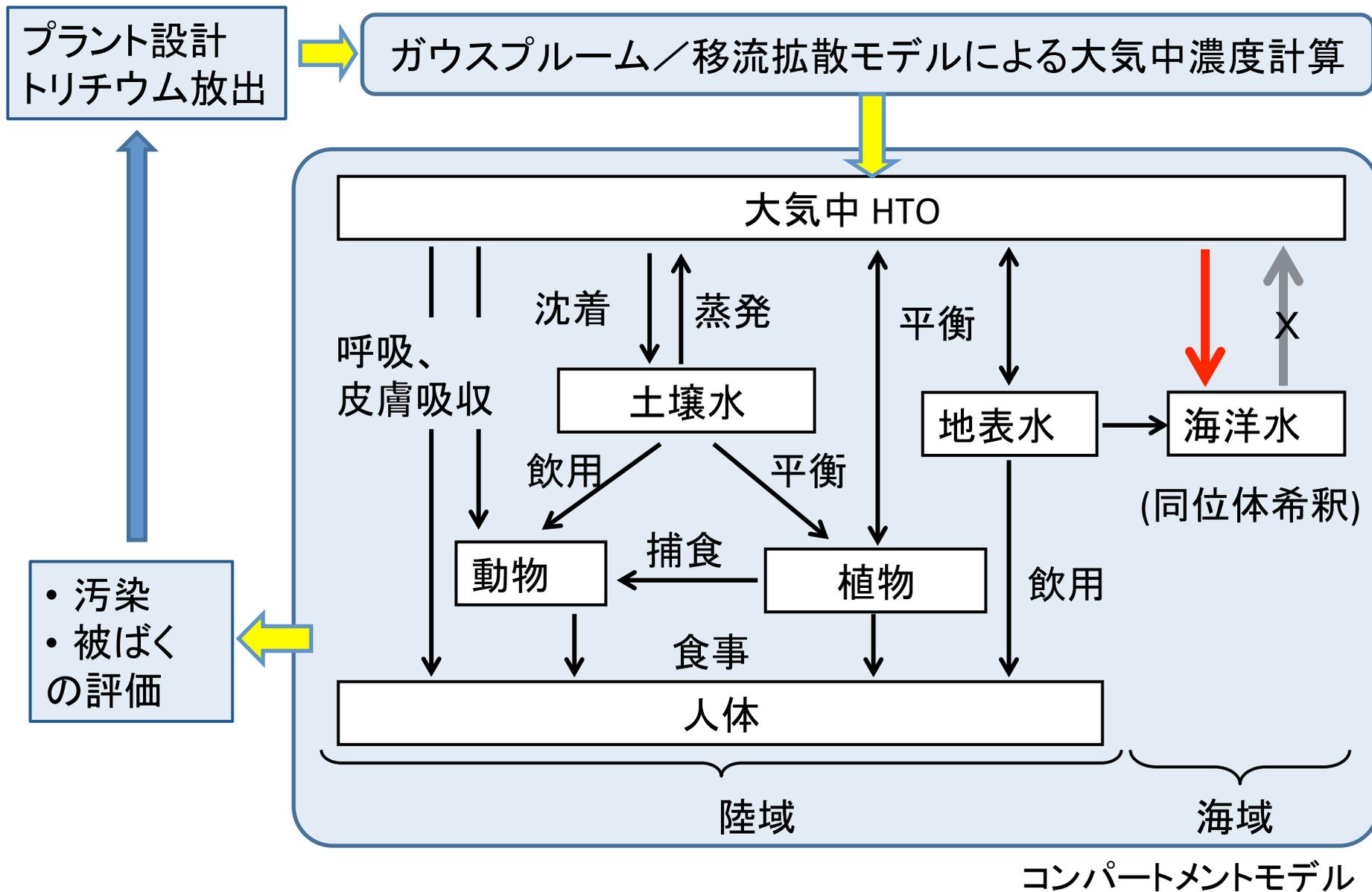
食品中で検出可能。  
→風評被害の恐れ

数十年間は蓄積により大気中トリチウム  
濃度は上昇し続ける  
(現状の限度 = 年毎の放出量で規定)

蓄積された環境中濃度や被曝量から許容される放出量が決定される。

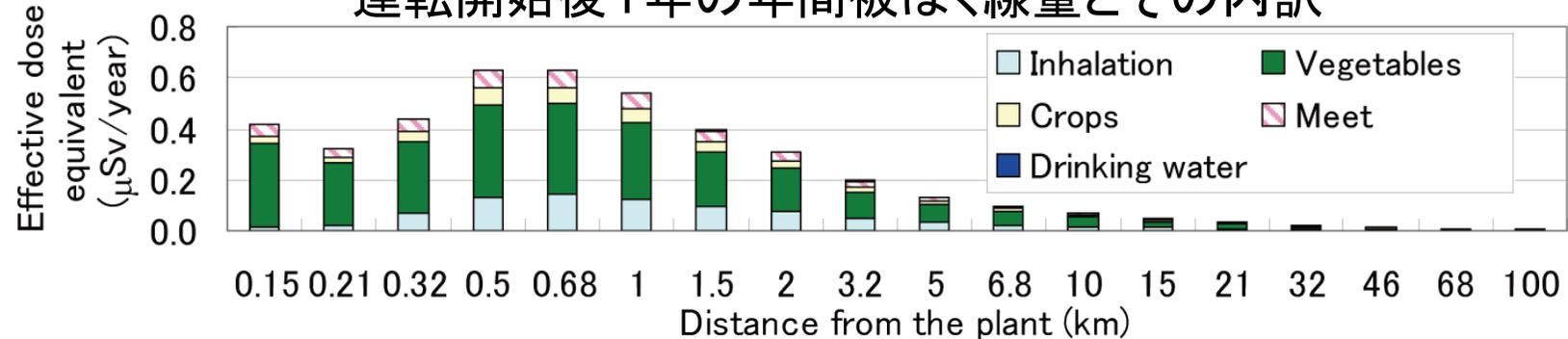


# 環境中要素間のトリチウム移行解析

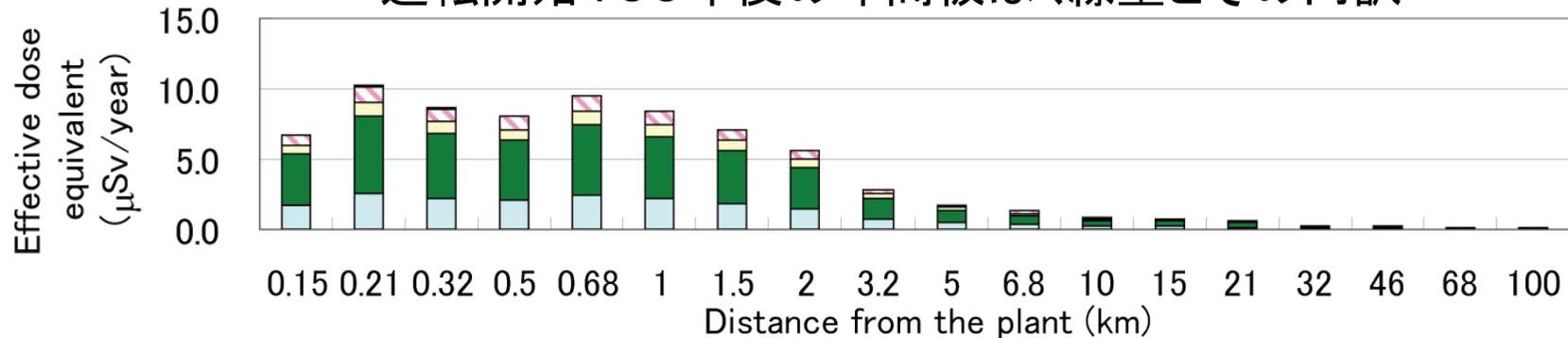


# 長期運転による蓄積を考慮した被ばく量評価

## 運転開始後1年の年間被ばく線量とその内訳



## 運転開始100年後の年間被ばく線量とその内訳



100年間運転後の被ばく線量予測

- 総被ばく線量約 10  $\mu\text{Sv}/\text{year}$ 以下
- 1年間通常運転の場合に比べ約15倍まで増加

# まとめ

---

増殖／冷却方式、発電方式に応じたプラント内でのトリチウム移行経路を分析し、プラントからの放出による環境中の移行挙動を解析した。

- 熱（エネルギー）の流れにそってトリチウムも移行し、最終的に排水・排気として環境に放出される。
- 海洋への排出の場合は希釈される。
- 異常時は、高温高圧のブランケット媒体の炉室放出が問題となり得る。化学形や量は媒体による。
- 大気中への排気は大気中移流拡散・コンパートメントモデルで解析可能。
- 被ばくとともに、環境で低濃度ながら検出可能で蓄積するため、風評被害が問題となる可能性がある。
- スタック高さや場所（海への距離等）も重要なパラメータ。長期、広域の影響を考えればスタックは必ずしも有効でない。

これらの影響をふまえ、**安全性、信頼性、環境保全性**を満たす設計とすることが求められる。