

日本原子力学会  
「水化学部会」第46回定例研究会（Web会議）  
2023年10月26日(木) 13:40-14:20

# 核分裂生成物の基礎特性と 福島第一原子力発電所事故時のふるまい

(Basic properties of fission products and their behaviors  
after the accidents of Fukushima Daiichi NPP)

内田 俊介

福島第一原子力発電所(1F)事故により、汚染水として、主として、タービン建屋に蓄積された放射性核分裂生成物(FP)は、ALPSなどによる処理を経て、処理水として保管されていた。今夏以降、トリチウムを希釈した処理水はモニタリングのうえ海洋への放流が始まっている。一方で、まだ大量のセシウムを中心とするFPが原子炉格納容器(PCV)内に残されており、その量と分布の把握が、今後の廃炉作業を進めるうえでの喫緊の課題となっている。

本部会では、放射性腐食生成物(CP)の局所蓄積によるプラント線量率の上昇抑制など、CPの議論がなされてきたが、FPに関する議論はあまり見られなかった。

本部会発足以前の水化学関連研究専門委員会では、線量率上昇の要因の一つとしてのFP(主としてセシウム,Cs)の挙動,あるいは事故時のヨウ素化学などが議論されてきた経緯がある。

学会事故調\*では、汚染水中のトリチウムを含むCs挙動の評価が本部会の分担となり、過去の知見に基づいて、定量評価に寄与してきた。

本講演では、水化学とFPの関わりを紹介し、FPの基礎特性を解説すると共に、1F事故時におけるFPの振る舞いについての現在の理解状況を紹介する。

- 日本原子力学会 東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会

1. 放射性核分裂生成物と放射性腐食生成物  
その生い立ちと原子炉での振る舞いの差異
2. 核分裂生成物の基礎特性  
原子炉水化学ハンドブック改訂版にFP関連の1章を設けた
3. 1F事故時の核分裂生成物の挙動  
汚染水の評価とその浄化、トリチウムの挙動
4. 1F廃炉における核分裂生成物  
現在の状況把握と今後の課題
5. トリチウムについて  
処理水として海洋放出されるトリチウムについて
6. まとめ  
水化学部会と1F廃炉に係る核分裂生成物挙動」研究専門委員会の関係

## CPとFPの比較

### 放射性核分裂生成物

(Radioactive Fission Products)

- ・ ウランなどの核分裂により生成
- ・ 燃料体内に蓄積  
(燃料損傷がなければ燃料体内に留まり、冷却水中には出ない)
- ・ 燃料損傷に伴い冷却水中に放出
  - ☆ 環境への放出
  - ☆ プラント運転時の放射線源
  - ☆ 配管内面他に蓄積し、線量率上昇の要因
- ・ 燃料体と共に搬出され、燃料再処理時に放出される
- ・ 代表核種
  - $^{137}\text{Cs}$  (半減期 ; 30年)
  - $^{131}\text{I}$  (半減期 ; 8.0日)
  - $^{129}\text{I}$  (半減期 ;  $1.57 \times 10^7$ 年)
  - $^{90}\text{Sr}$  (半減期 ; 28.79年)

### 放射性腐食生成物

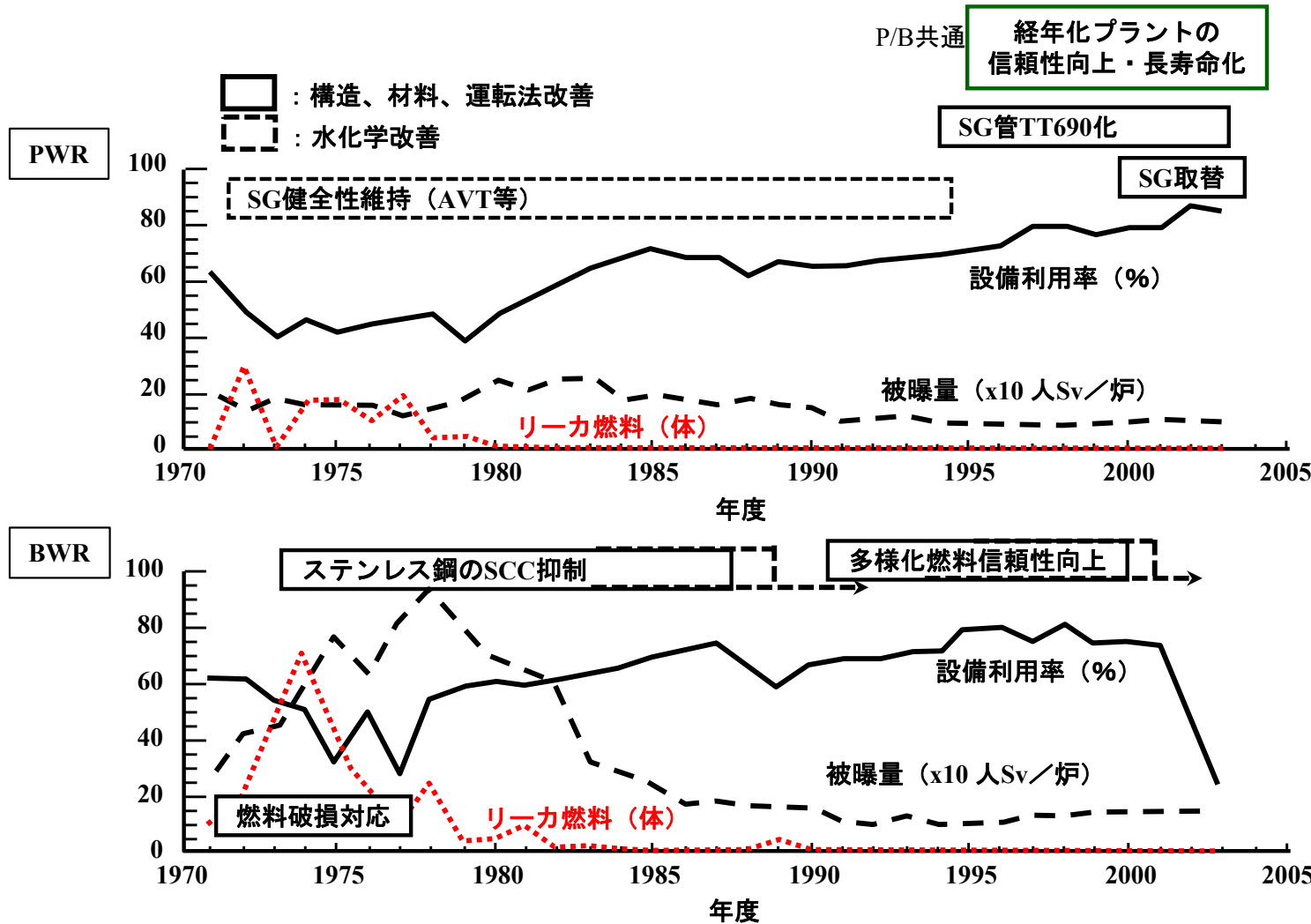
(Radioactive Corrosion Products)

- ・ 構造材の腐食によって生成し、原子炉内で放射化し、冷却系の機器配管内面に蓄積
- ・ 燃料体外、冷却水中で生成、蓄積
- ・ 燃料体外、冷却水中で発生
  - ☆ 放射性廃棄物への影響
  - ☆ 同左影響小 ( $^{16}\text{N}$ が主)
  - ☆ 同左
- ・ 通常炉の廃炉での影響大
  - ☆ 燃料表面蓄積物は再処理時除去要

Ref. [2]

# 1-2 放射性核分裂生成物と放射性腐食生成物

## 燃料損傷履歴



燃料、構造材、線量率低減の原子炉水化学に関わる3課題のうち燃料破損対策が最も早く収束

その後も大きな問題は顕在化していない。

過酷事故に関連してATF (Accident Tolerant Fuel) に対する新しいR&Dを推進中

- ・ステンレス鋼被覆材
- ・SiC被覆材
- など

図3.2-1 主要課題への対応とその成果 特に燃料健全性の実績

# 1-3 放射性核分裂生成物と放射性腐食生成物

## 通常運転時のFP挙動（BWR）と事故時のヨウ素挙動

燃料破損 => 炉水へのFP放出 => 各種経路から環境へ放出

・主放出経路

① BWRではタービンオフガス系

特に、原子炉停止時のヨウ素スパイク。通常時の10-100倍の放出

[希ガスホールドアップ装置]

・サブ放出経路の探索と放出形態、放出量の把握

② タービン軸封系(主蒸気による軸封)

軸封蒸気(当初主蒸気使用)に同伴して、タービン建屋に放出

=> ルーフベントから環境へ放出

[クリーン蒸気での軸封化]

③ 廃棄物タンクベント系(復水として凝縮後、復水脱塩器で除去)

復水樹脂逆洗水中のヨウ素の崩壊による希ガス

=> タンクベントから廃棄物処理建屋

脱塩器室の遮蔽強化

=> 環境

[タンクベントガス処理]

燃料損傷の撲滅と共に研究課題としてほぼ消滅

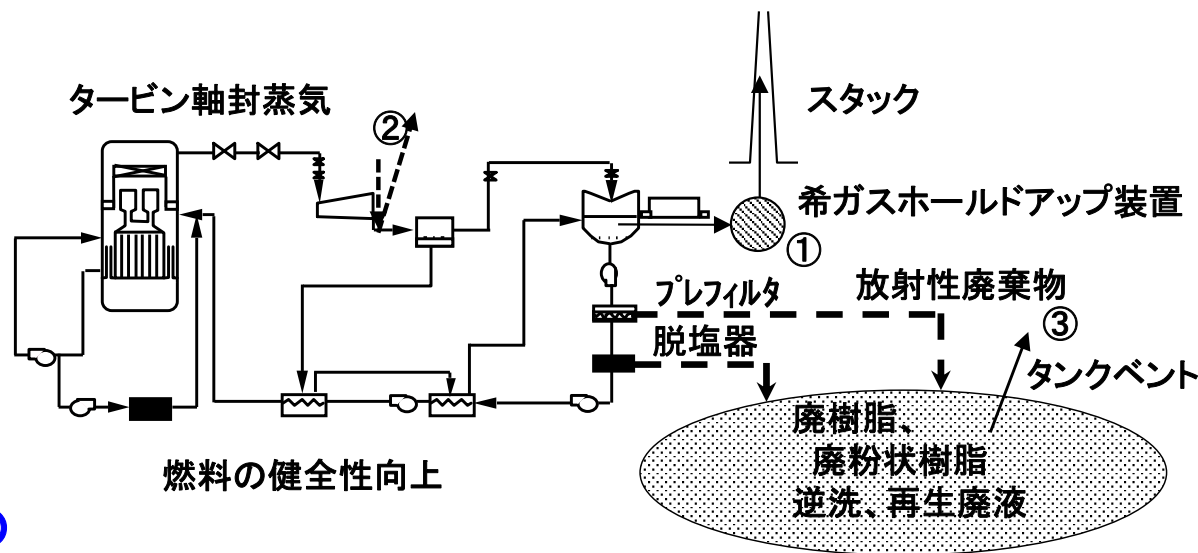
事故時のヨウ素挙動

・安全審査上の重要項目

事故時の環境への<sup>131</sup>Iの放出  
(甲状腺被ばく評価のため)

・放射線照射下でのヨウ素の複雑な  
化学形態変化評価

過酷事故評価が下火となり1990年代後半には  
研究アクティビティが急速に低下



燃料の健全性向上

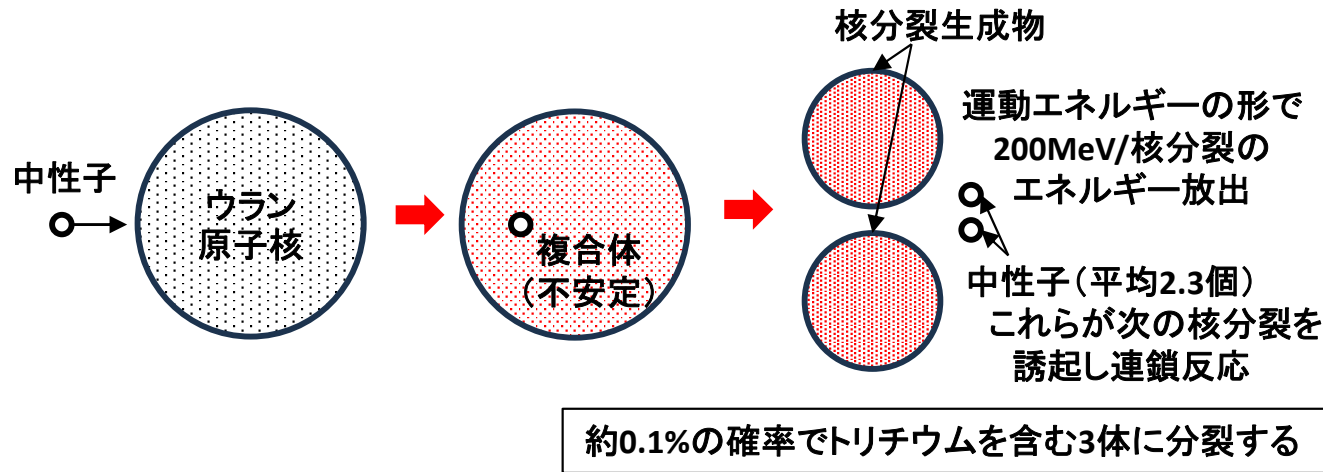
図3.1-2 プラント運転時・停止時の放出放射能低減(BWR)

上記要因により、水化学の分野での  
ヨウ素化学の研究は国内・国外共に  
不活発となった

Ref. [4]

# 2-1 核分裂生成物の基礎特性

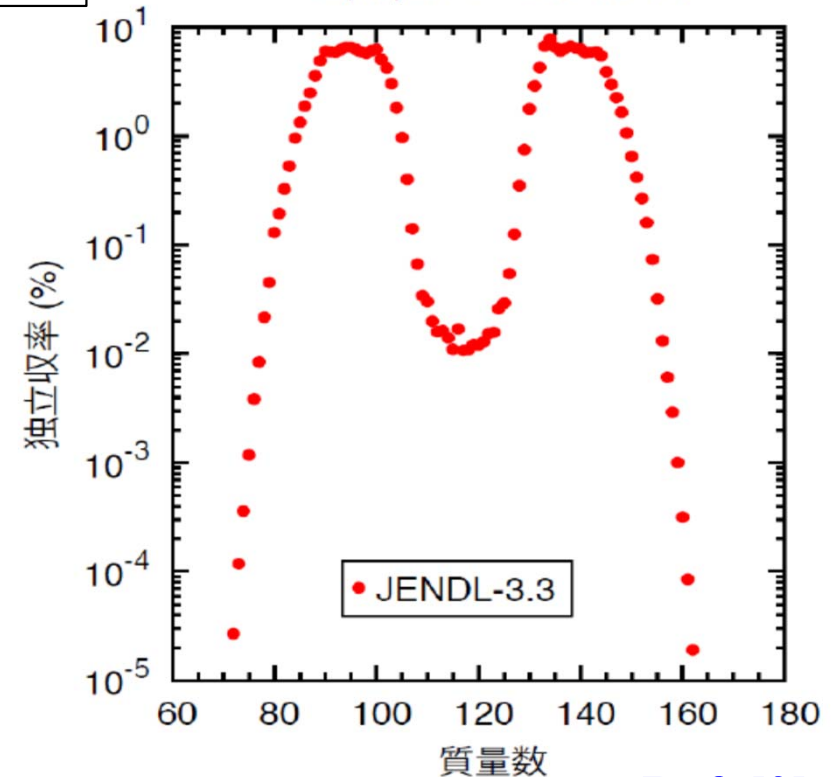
FPの生成（原子炉水化学ハンドブック改訂版より）



核分裂生成物収率



$^{235}\text{U}(n,f)$  at  $E = 0.0253 \text{ eV}$



Ref. [2]

## トリチウム

半減期：12.3年（ $\beta$ 壊変で $^3\text{He}$ に）

生物学的半減期：~12日

生態系での蓄積効果小

燃料体中に固定され、再処理時に放出される

1F全体では総量約10g（3.4 PBq）

なお、地上では太陽からの中性子により、

$^{14}\text{N}(n,t)^{12}\text{C}$  反応で、1 EBq/年生成

$^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{N}$

P; 10<sup>15</sup>

E; 10<sup>18</sup>



# 2-2 核分裂生成物の基礎特性

## 主要核分裂生成物の特性および特性による分類

表4.1.3 主要核分裂生成物の特性

核種	代表エネルギー (MeV)		壊変当たりのエネルギー (MeV/壊変)	実効線量率係数 ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}/\text{MBq}$ )	半減期
	$\gamma$ 線	$\beta$ 線			
$^{131}\text{I}$	0.36		0.36	0.0548	8.02d
$^{132}\text{I}$	0.72		1.87	0.0301	2.28h (3.26d <sup>*1</sup> )
$^{133}\text{I}$	0.53		0.53	0.0843	20.8h
$^{134}\text{Cs}$	0.80		1.55	0.211	2.07y
$^{136}\text{Cs}$	0.82		1.92		13.2d
$^{137}\text{Cs}$	0.66		0.56	0.0779	30.2y
$^{133}\text{Xe}$	0.081		0.027	0.0442	5.24h
$^{88}\text{Kr}$	2.39		1.69		2.84h
$^3\text{H}(^3\text{T})$	-	0.7825			12.3y
$^{129}\text{I}$	-	.150			1.57x10 <sup>7</sup> y
$^{90}\text{Sr}$	-	0.546			29.12y

表4.2.2 NUREG1465 における核分裂生成物の分類

No.	分類	主な核分裂生成物
1	希ガス	Xe, Kr
2	ハロゲン	I, Br
3	アルカリ金属	Cs, Rb
4	テルル群	Te, Sb, Se
5	バリウム,ストロンチウム	Ba, Sr
6	貴金属	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
7	希土類	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am
8	セリウム群	Ce, Pu, Np

\*1  $^{132}\text{I}$  の親核種で $^{132}\text{I}$ と放射平衡にある $^{132}\text{Te}$  の半減期

表4.2.1 短期・中期・長期的な観点で重要となる主な核分裂生成物

短期		中期		長期	
FP	半減期	FP	半減期	FP	半減期
$^{88}\text{Kr}$	2.84 h	$^{105}\text{Rh}$	35.4 h	$^{144}\text{Ce}$	285 d
$^{105}\text{Ru}$	4.44 h	$^{99}\text{Mo}$	65.9 h	$^{106}\text{Ru}$	373 d
$^{135}\text{Xe}$	9.14 h	$^{132}\text{Te}$	3.20 d	$^{134}\text{Cs}$	2.06 y
$^{91}\text{Sr}$	9.63 h	$^{127}\text{Sb}$	3.85 d	$^{125}\text{Sb}$	2.76 y
$^{97}\text{Zr}$	16.9 h	$^{131}\text{I}$	8.02 d	$^{154}\text{Eu}$	8.59 y
$^{133}\text{I}$	20.8 h	$^{131}\text{Xe}$	11.8 d	$^{85}\text{Kr}$	10.7 y
$^{143}\text{Ce}$	33.4 h	$^{140}\text{Ba}$	12.8 d	$^3\text{H}$	12.3 y
		$^{141}\text{Ce}$	32.5 d	$^{90}\text{Sr}$	28.8 y
		$^{95}\text{Zr}$	64 d	$^{137}\text{Cs}$	30.1 y
				$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249 y
				$^{129}\text{I}$	1.57x10 <sup>7</sup> y

表4.2.3 揮発性に応じた核分裂生成物のカテゴリ分け

分類	主な核分裂生成物
FPガス及び揮発性FP:	FPガス (Kr, Xe)、 揮発性FP (I, Cs, Br, Rb, Te, Sb, Ag)
中揮発性FP:	Mo, Rh, Ba, Pd, Tc
低揮発性FP:	Sr, Y, Nb, Ru, La, Ce, Eu
非揮発性FP:	Zr, Nd, Pr
アクチノイド:	低揮発性と同等の放出率を示す U及びNp 非揮発性と同等の放出率を示す Pu等



# 3-1 1F事故時の核分裂生成物の挙動

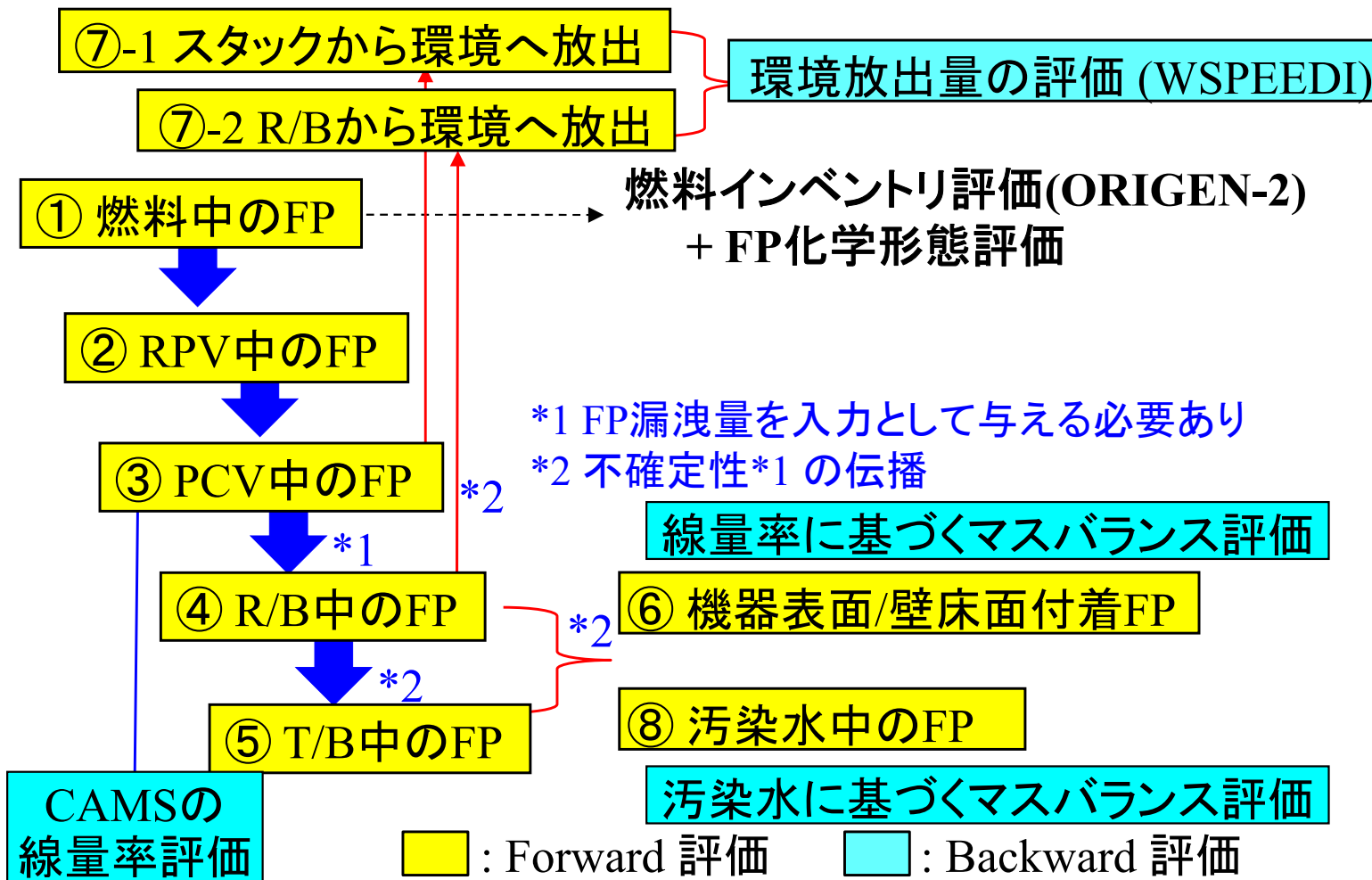
## TMI-2、チェルノブイリ、福島第一原子力発電所事故の比較

プラント	スリーマイル島2号機(TM-2)	チェルノブイリ4号機	福島第一原子力発電所
所在地 (国名)	ペンシルバニア州 (米国)	キエフ州 (ソビエト連邦、現ウクライナ)	福島県 (日本)
原子炉炉型	PWR	RBMW (黒鉛減速沸騰軽水圧力管炉)	BWR
原子炉電気出力	95.7MWe	1,000MWe	1号機:460MWe 2号機、3号機:780MWe
事故の要因	加圧器逃がし弁/安全弁 からの冷却水の漏えい	原子炉停止時発電系統の 実験時の炉制御不能	地震とそれに続く津波による 全交流電源喪失
国際原子力事象 レベル	レベル5	レベル7	レベル7
評価尺度(INES)	事業所外リスクを伴う事故	深刻な事故	深刻な事故
放出放射能	放射性希ガス:92 TBq 放射性ヨウ素 <sup>131</sup> I:0.6 TBq	推定 <sup>131</sup> I放出量:1.8 EBq	推定 <sup>131</sup> I換算総放出量:160 PBq

# 3-2 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## シビアアクシデント時のFP移行の主要プロセス

Ref. [4]-[6]



参考文献 : [1],[4],[5]

高温高圧下で燃料損傷、溶融によりFP放出、移行(事故後数日)  
SA解析コード(既開発)で評価

中期FP  
→  
挙動評価

ほぼ常温常圧下で水、ガス(空気)を介して、FP移行(事故後数10年間)  
長期FP挙動解析コード(新規開発)で評価

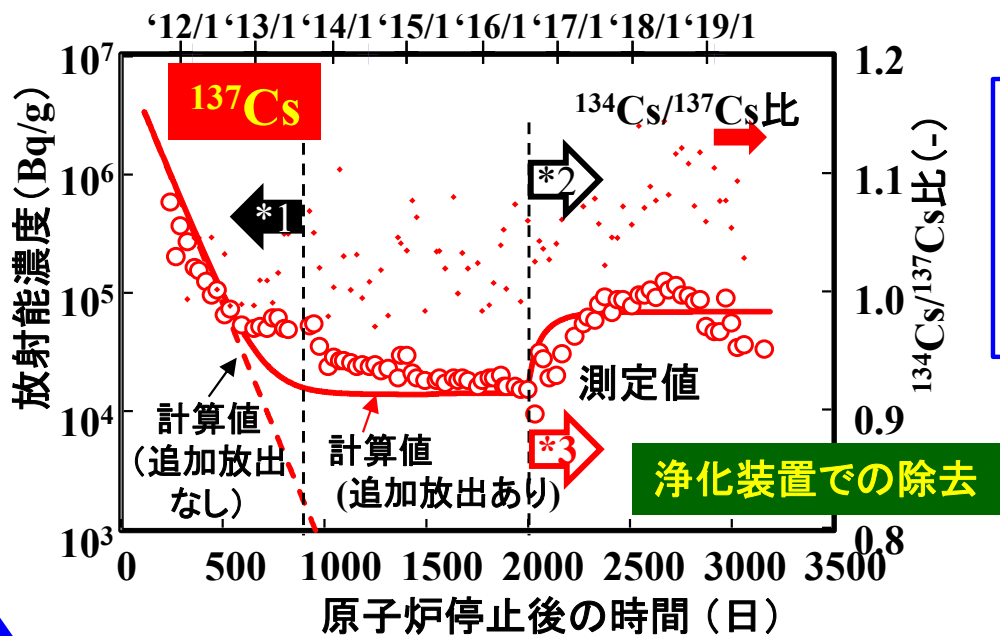
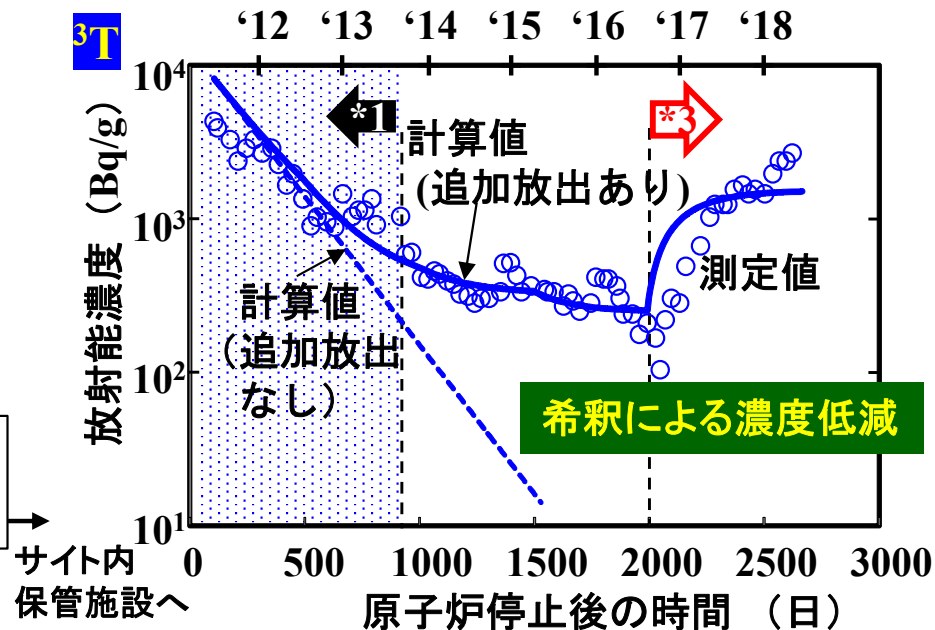
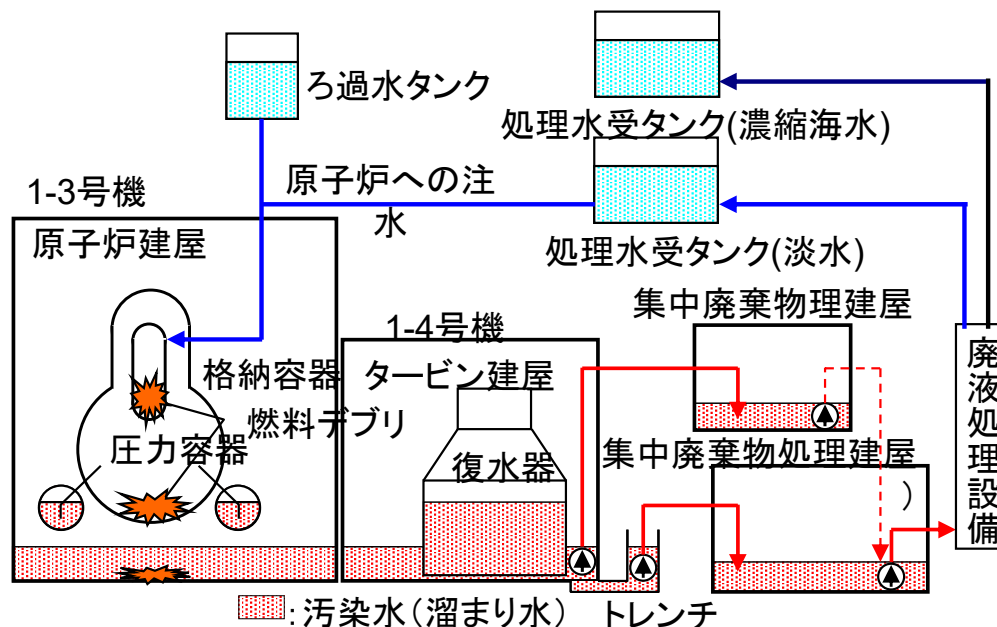
両者を結合させて、短/中/長期のFP挙動評価に資する(アクチノイドの挙動を付加)

## FP移行量の推算へのアプローチ

- ・ 比較的測定値の多いセシウム(Cs)を主に、
  - ① シビアアクシデント(AS)解析コードの結果に基づく Forward Evaluation Procedures
  - ② 線量率などPCV外部からの線量率測定値に基づく Backward Evaluation Procedures を用いて、PCV内の蓄積量を推算する。
  - ③ スミヤ分析値など直積測定データを加えて、プラント全体のマスバランスを評価する
- ・ SA解析コードでは事故後の短期間の評価に限定されるため、短/中/長期FP挙動解析を展開する
  - ① 短期解析(熱流動解析との連成解析): SA解析コードの適用(FP解析では不確実さ大)
  - ② 中期解析: 短期と長期の補完
  - ③ 長期解析: 一部は汚染水評価で開発済み。詳細な解析は今後の課題
  - ④ 解析結果の妥当性検証: (a) 線量率測定値を用いた逆解析法  
(b) プラント内でサンプリング測定値を用いた直接評価
- ・ 廃炉作業のリスク評価への適用  
上記FP分布(アクチノイドも付加)の評価結果に基づき、作業に伴う環境への放射性核種の放出、作業員の被ばくの各リスクをミニマムにできる作業法を固める必要がある

# 3-6 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## 汚染水のマスバランス評価結果8年間の汚染水処理(日本原子力学会事故調報告)

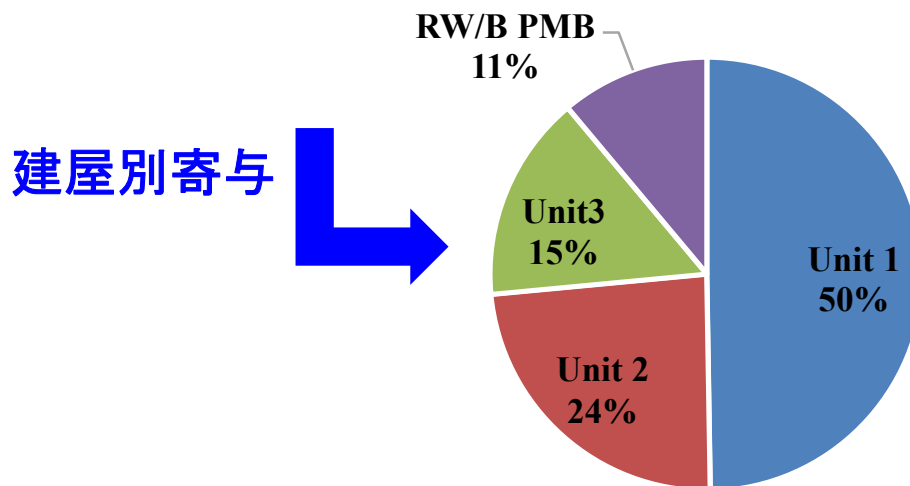
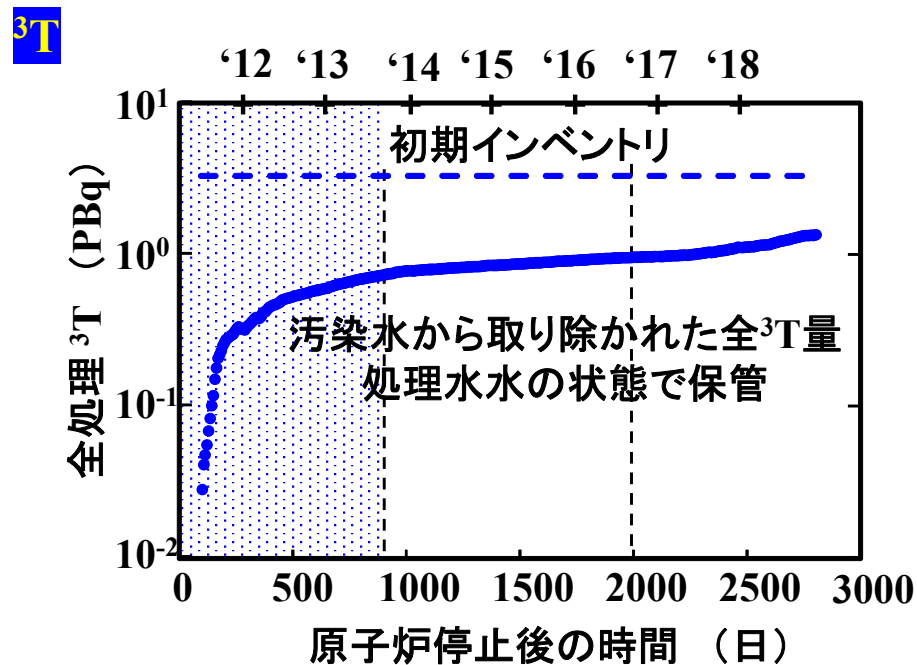
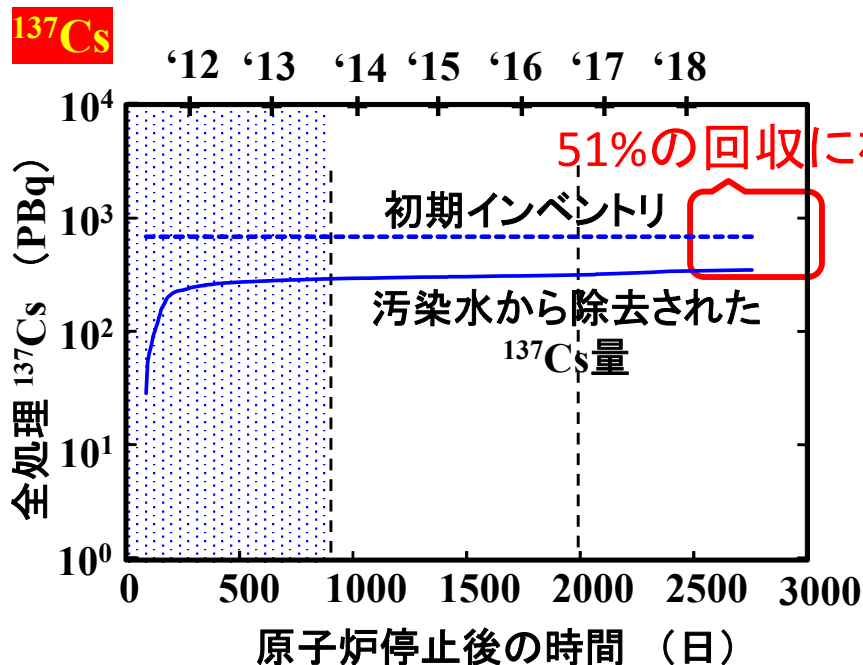


- $^{137}\text{Cs}$ は廃液処理系での除去により濃度低下
- $^3\text{T}$ は漏洩し、混入した地下水等による希釈効果で濃度低下

Ref. [1],[4],[8],[9]

# 3-7 1F事故時の核分裂生成物の挙動

汚染水から取り除かれた<sup>137</sup>Csと<sup>3</sup>T(日本原子力学会事故調報告)



Ref. [4]

## 短/中/長期FP挙動評価手法

タイミング	特徴
短期FP挙動解析手法	熱流動解析との連成解析 SA解析コード [SAMPSON、MELCOR、MAAP、ASTEC、THALES2など]
中期FP挙動解析手法	短期FP挙動解析の結果に基づく、局所的なFP移行解析 短/長期FP挙動解析コードのつなぎ [特にSA解析コードで取り扱われていない液滴洗浄効果など]
長期FP挙動解析手法	ほぼ常温常圧での長期的、準安定な質量移行解析 [特に、意図された操作(液体輸送、排気、除染等)起因のFP移行解析] ・汚染水解析(1点近似)                      開発的用済み ・汚染水解析(多点近似)                      開発中、一部適用済み ・建屋内主要部線量率評価 ・プラント内FP分布解析 ・廃棄物発生量解析

エネ総研でPCV内での長期FP 挙動モデル開発中

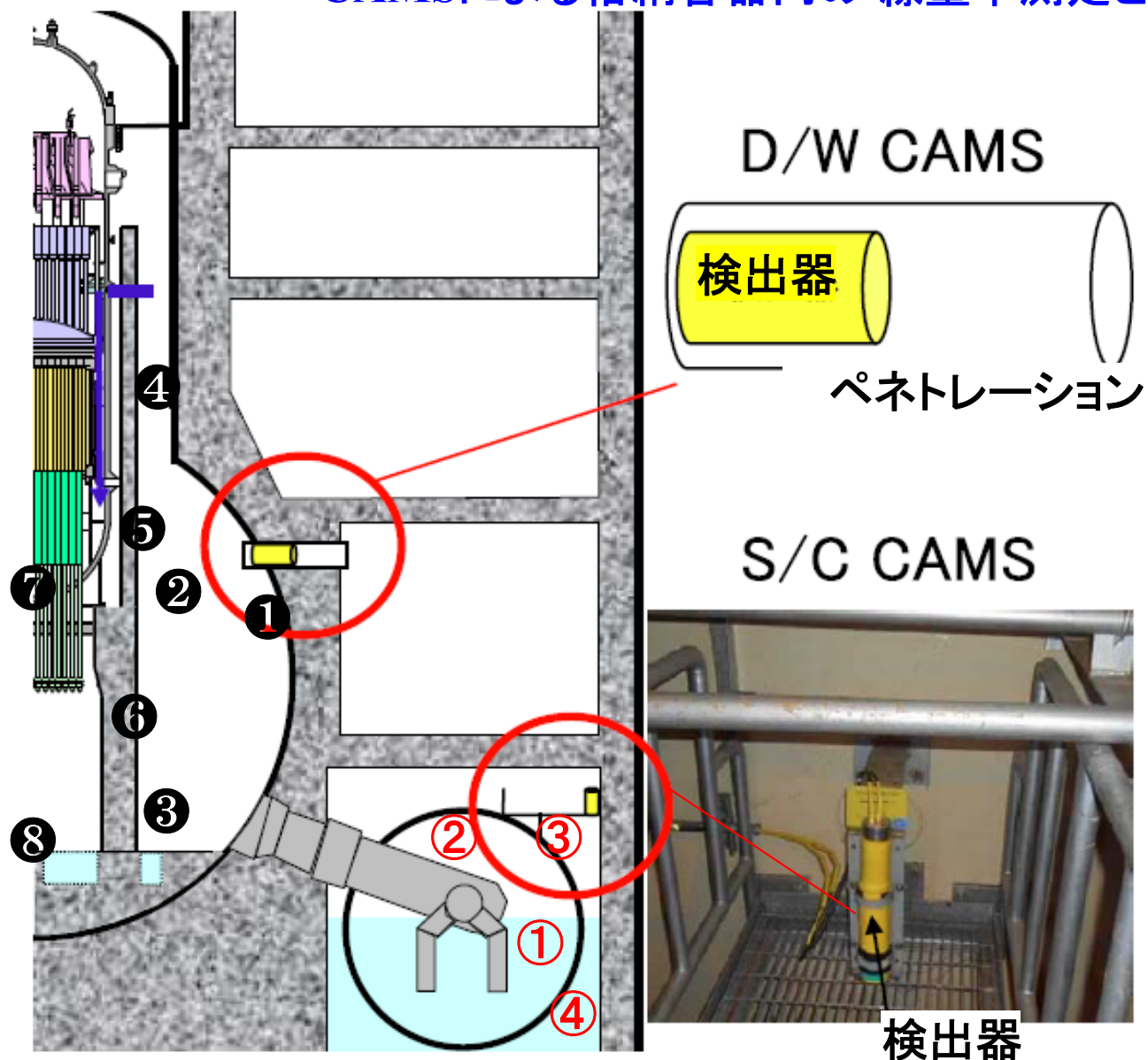
Ref. [7]



# 3-9 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## CAMSによる格納容器内の線量率測定とその評価

Ref. [4],[7]



### D/W中のFP

- ① D/W 内壁(球部)
- ② D/W ガス
- ③ PCV 底部 [寄与小]
- ④ PCV 上部 [寄与小]
- ⑤ 生体遮蔽表面
- ⑥ RPV 支持部壁[寄与小]
- ⑦ RPV底部 [寄与小]
- ⑧ ペDESTAL底部[寄与小]

形状複雑で散乱線の影響大  
線量率再生係数(build-up factor)  
の採用で対応可能

### S/C中のFP

- ① S/C 水
- ② S/C ガス
- ③ S/C ガス部内壁
- ④ 周辺水 [寄与小]

形状が単純であるため、  
点減衰核積分法で十分な精度  
が得られる。  
計算時間: 1分/ケース

CAMS データはweb-siteに掲載



# 3-10 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## CAMS線量率の順評価と逆評価

Ref. [4],[7],[10]

順解析 FP 核種分布の計算値/測定値

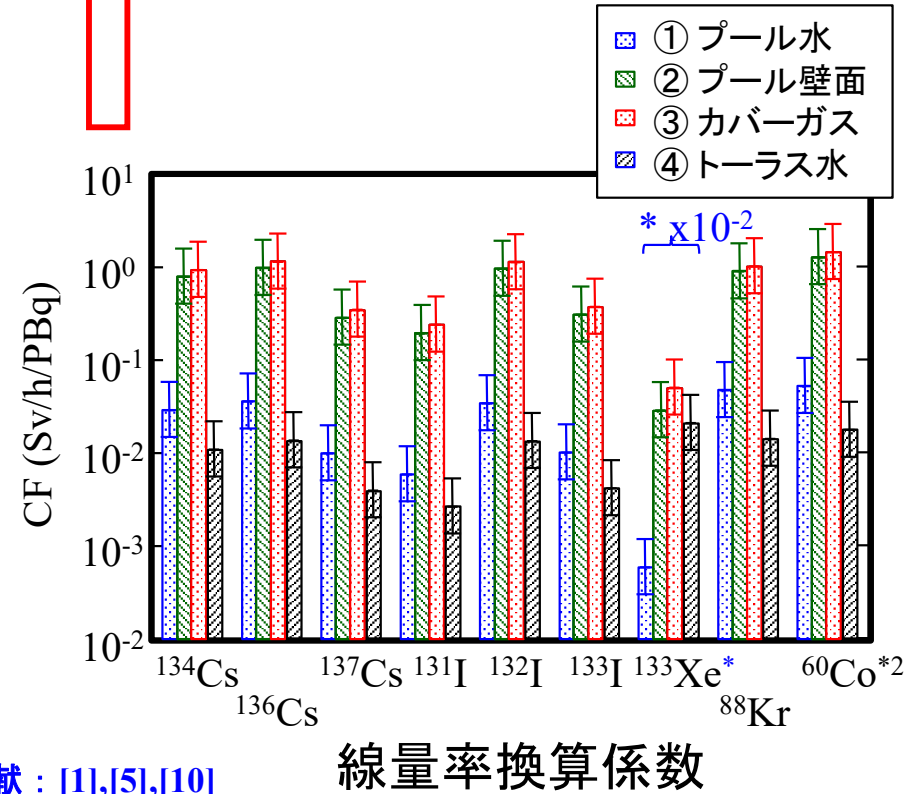
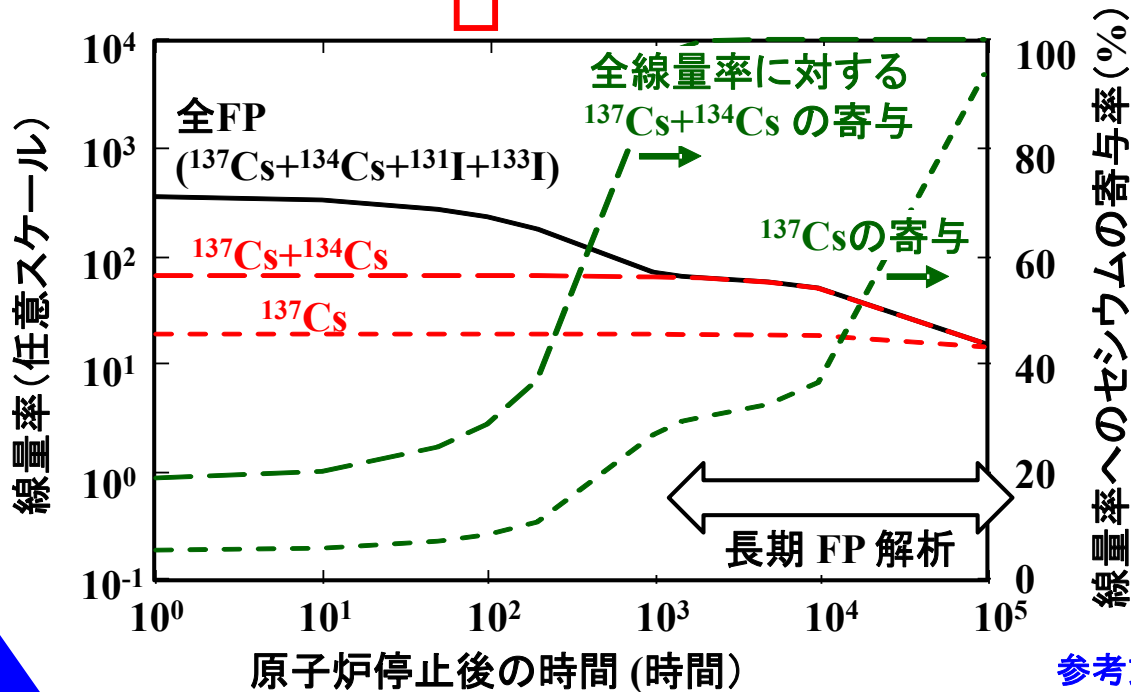
線量率換算係数  
を乗ずる

CAMS 検出器位置での  
線量率計算値

逆解析 CAMS 検出器位置での線量率測定値  
(線量率が $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ で支配される  
十分な冷却時間)

線量率換算係数  
で除する

線源位置での $^{137}\text{Cs}$ 量  
計算値

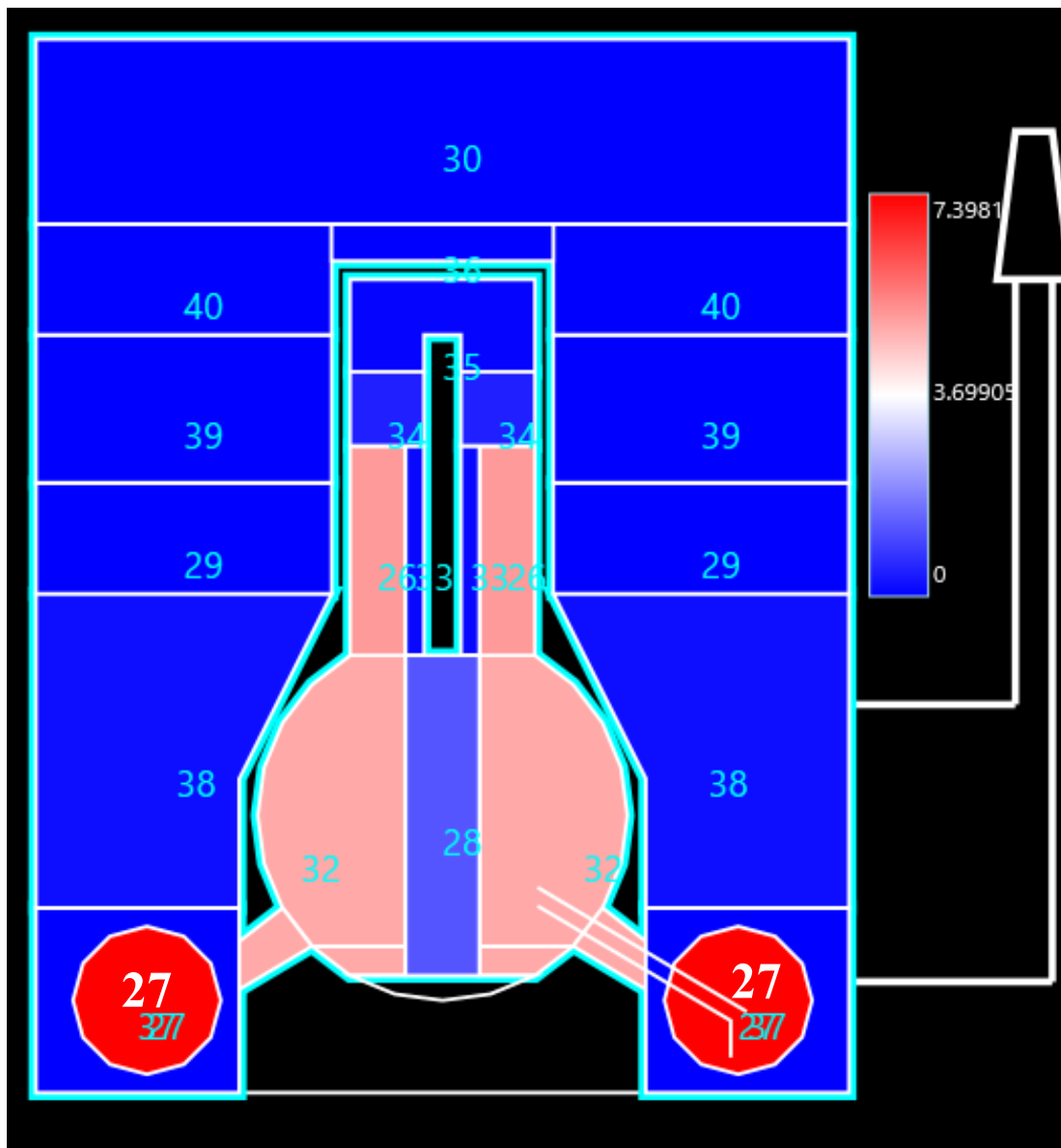


参考文献 : [1],[5],[10]

# 3-11 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## SAMPSONコードでのR/B内の領域分け

各領域内をガス、壁面、床面等に分割し、それぞれに一様に分散するものとして解析する。

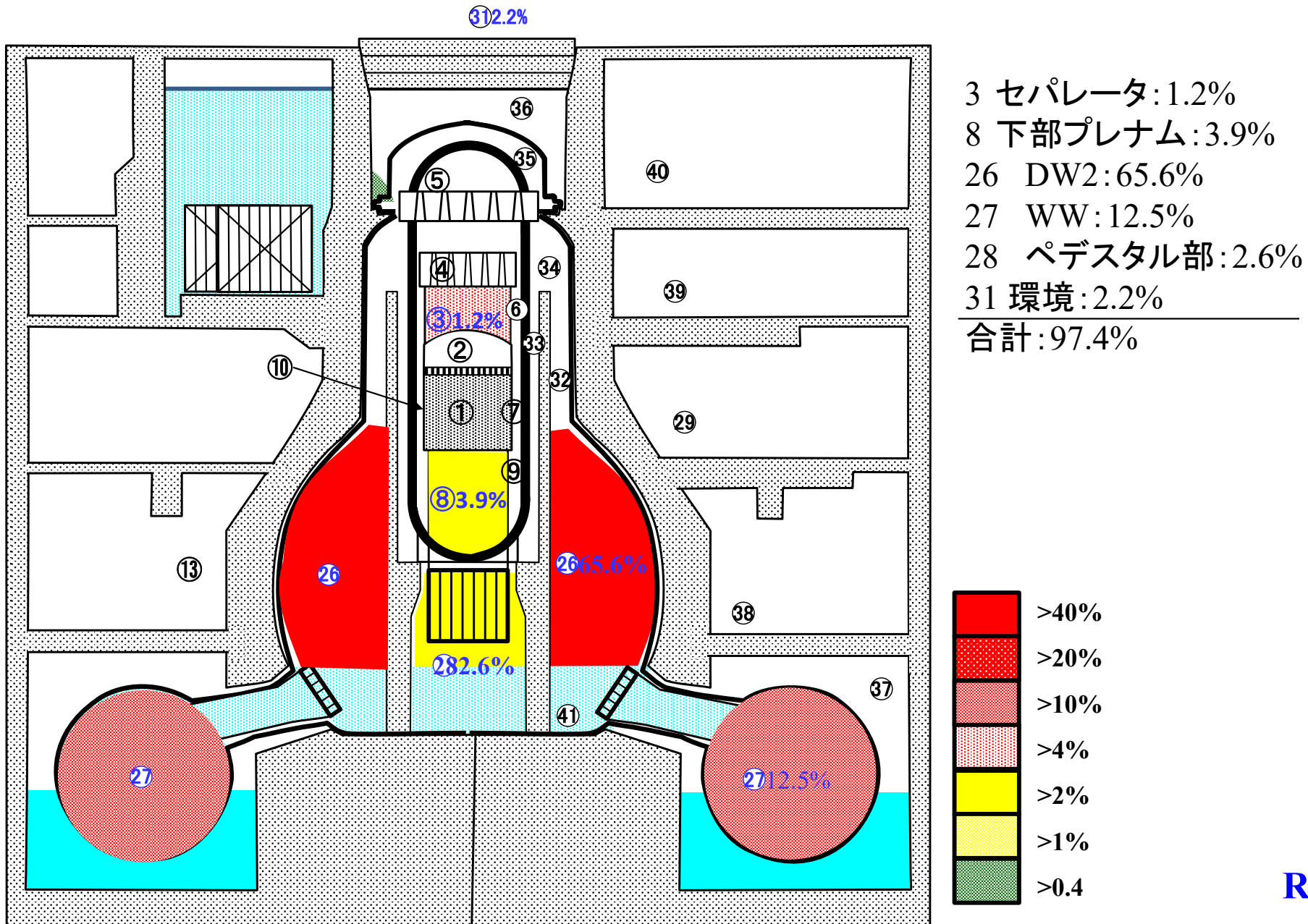


領域#	名称
8	炉心下部(詳細は左図外) 底部で代表に
26	PCV 垂直部(D/W上部) 生体遮蔽壁外面
27	S/C(W/W) 水相 気相 壁面 トーラス水(S/C周辺)
28	ペDESTアル 床面を代表に
32	PCV球形部(D/W) 気相 壁面 床面
33	RPV外部(生体遮蔽の内側)
38	R/B のS/C上部室

Ref. [4],[7]

# 3-12 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## 1号機のFP分布図(SAMPSONコードによる計算結果の一例)



Ref. [4],[7]

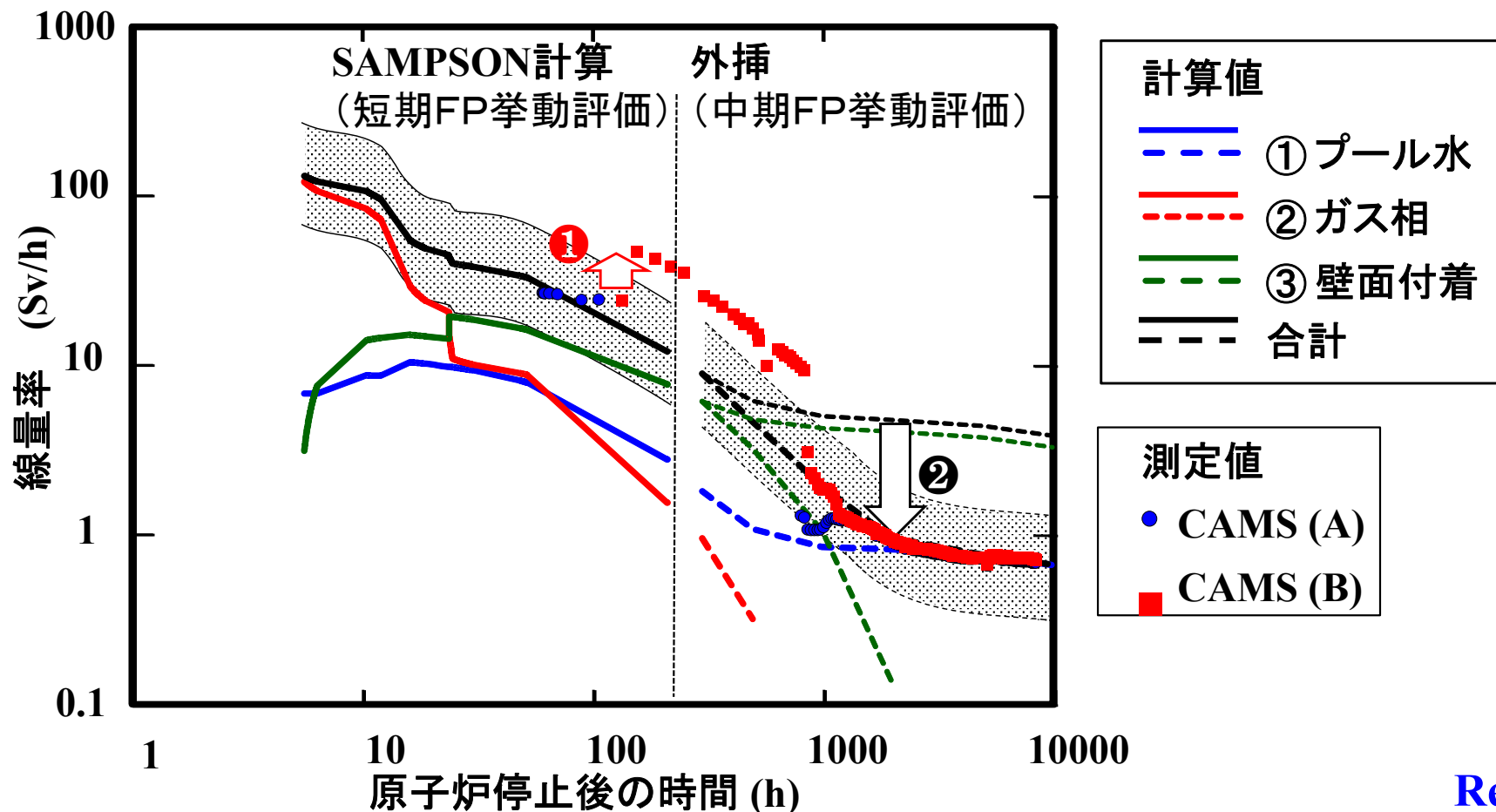
# 3-14 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## FEP: S/CのCAMS線量率1号機 (AESJ 2018 AMで報告)

ヨウ素はCsI以外にHOI, HIを加えて評価 ⇒ 壁面への付着量が1/5に低減  
 セシウムはCsI, CsOHのほかCs<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>を追加 ⇒ 大きな差異は見られず

① CAMS S/C (B) : 非均質[CAMS S/C (A)の約2倍]

② 上記凝縮に伴う水滴によるCsの除去効果 (除去率0.002 h<sup>-1</sup> を仮定)

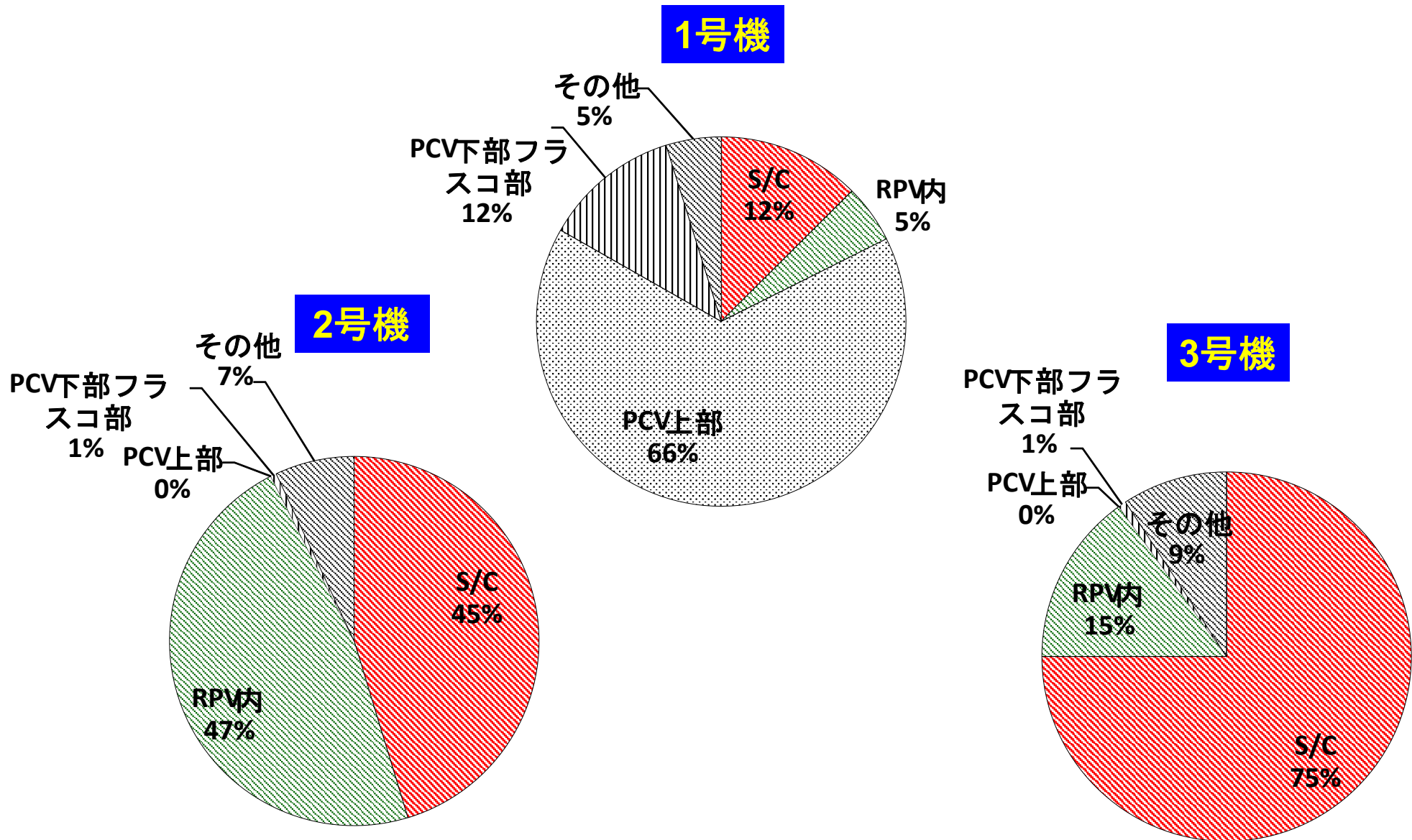


Ref. [4],[7]

S/C内でのFP移行解析 ⇒ より詳細な評価へ改善要

# 3-15 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## 1-3号機各炉のPCV内でのFPバランス図（SAMPSONコードによる解析結果）

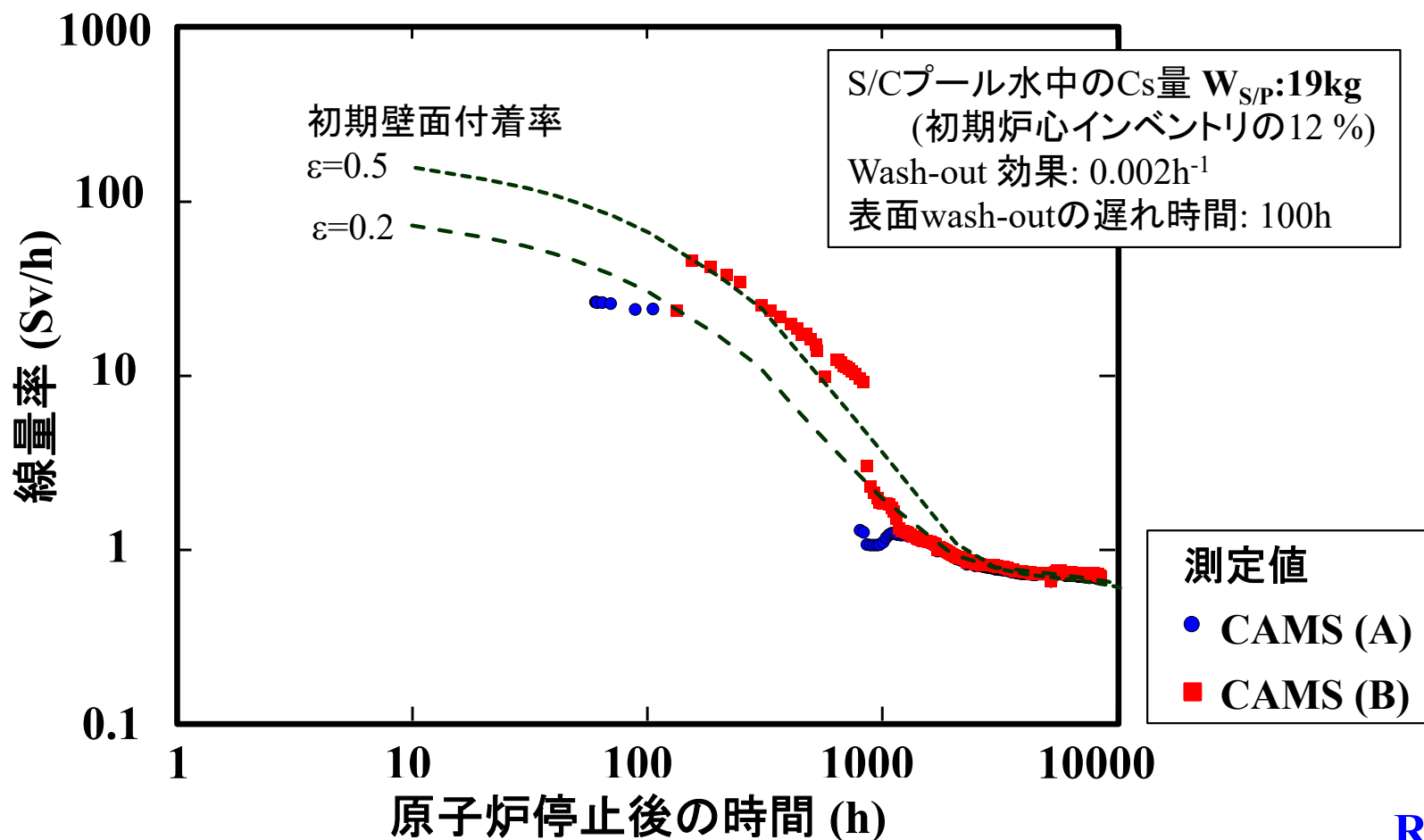


Ref. [4]

# 3-16 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## BEP: S/C CAMS 検出器位置での線量率(1号機)

- ・ 炉停止後9,000h のCAMS 線量率からその時点でのCs量を推定
- ・ Cs, I, TEについて初期炉心の核種比(半減期は補正)を用いて、各核種の変化を逆算
- ・ S/C壁面からプール水中への移行(wash-out)モデル採用

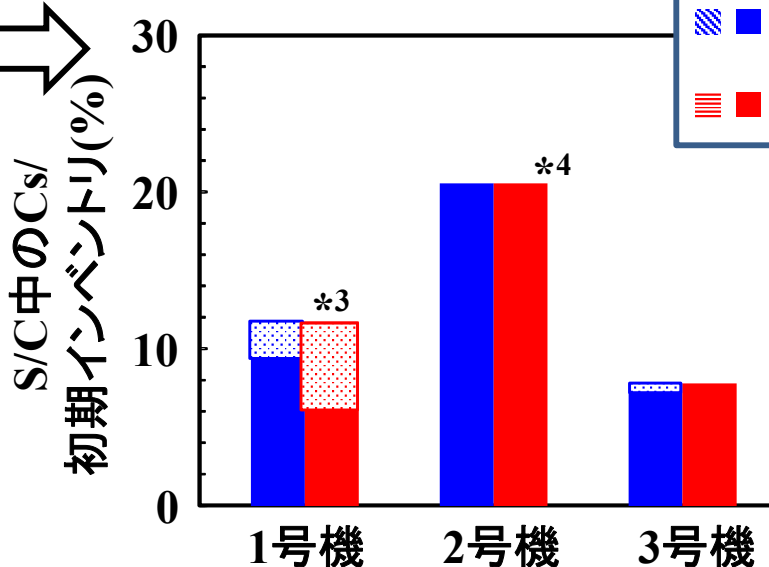
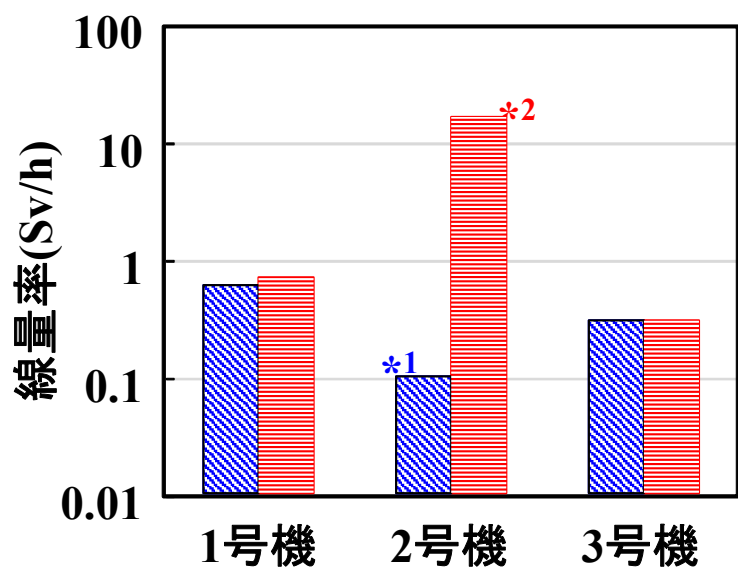


Ref. [4]

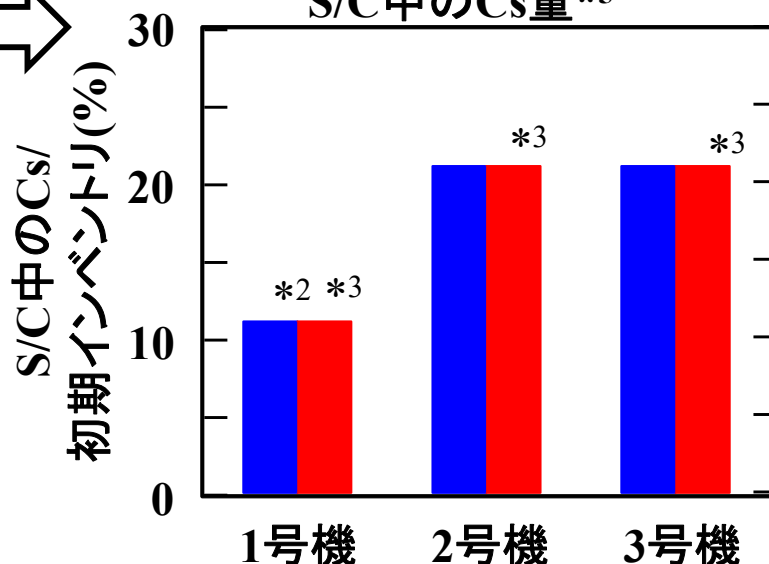
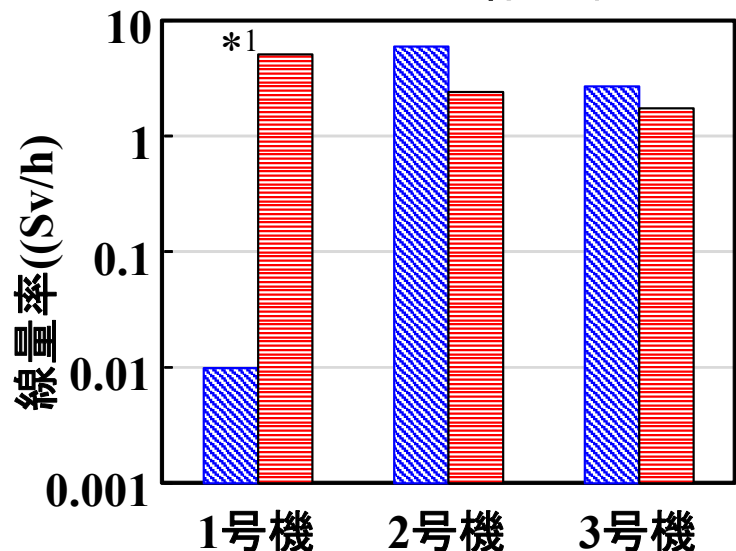
# 3-17 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## CAMSデータに基づくCs量の逆方向解析

線量率からの解析



- \*1 S/C 水の漏出
- \*2 シンク破壊弁付近への付着
- \*3 初期のS/C壁面への付着
- \*4 除去困難
- \*5 原子炉停止後9,000h



- \*1 洗浄困難
- \*2 water leakage from PCV 底部からの漏洩
- \*3 壁面からの洗浄効果
- \*4 原子炉停止後9,000h

Ref. [4]



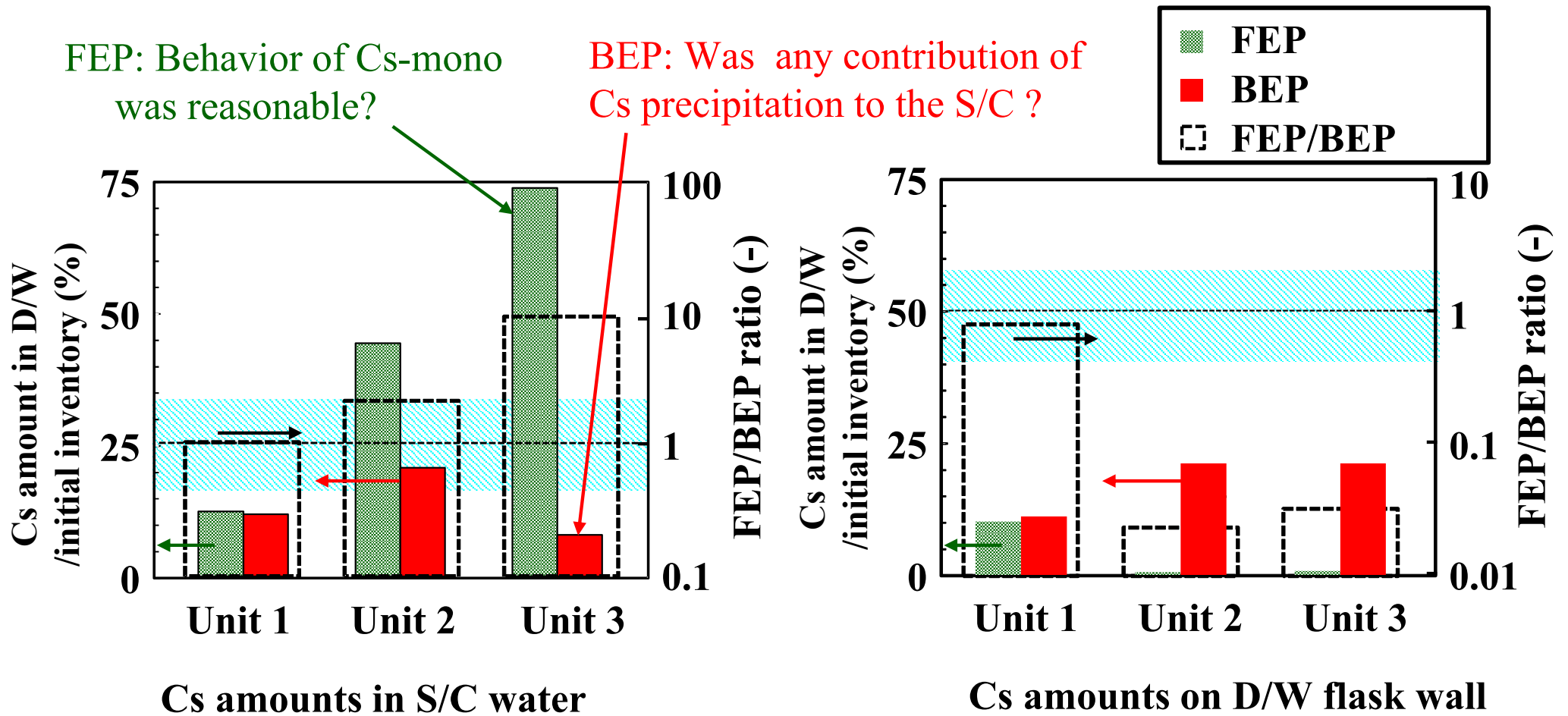
### FP移行量の推算

- ・ 福島第一原子力発電所(1F)の廃炉作業の安全、確実な遂行のためには、FPその他の放射性核種が、プラント内の何処に、どれだけの量が、どのような形態で残存するかを把握することが必須である。
  - ① 廃炉作業は、燃料デブリ(デブリ)の存在箇所を同定し、これらを安全かつ確実に取り出して、最終的に安全に保管することで終結。
  - ② 約40年にわたるデブリ取り出し作業では、環境への放射性物質の飛散を最小限に抑え、同時に従事する作業者の放射線被ばくを最小に抑制することが必須。
  - ③ 廃炉作業を遂行の障害となるのが、セシウム(Cs)をはじめとする放射性核種である。
  - ④ 事故後、時間とともに変わる放射性核種の分布を可能な限り正確に把握し、その対応に万全を尽くし、放射性核種の飛散、被ばく抑制に資する。
- ・ 格納容器(PCV)外部に関しては、汚染水を含め、定量的な評価が行われているが、圧力容器(RPV)を含めたPCV内の残存量は十分な測定が実施されていないため、さまざまな推算値に基づく評価が主である。
- ・ これまで比較的測定値の多いCsを主に、プラント内でのマスバランスを評価し、PCV内の残存量を把握することで、今後の廃炉作業の計画立案に資することができるものと考えらる。

Ref. [4]

# 3-18 1F事故時の核分裂生成物の挙動

## 前進解析と逆方向解析の比較 (S/C 内及びD/W内のCs量評価)



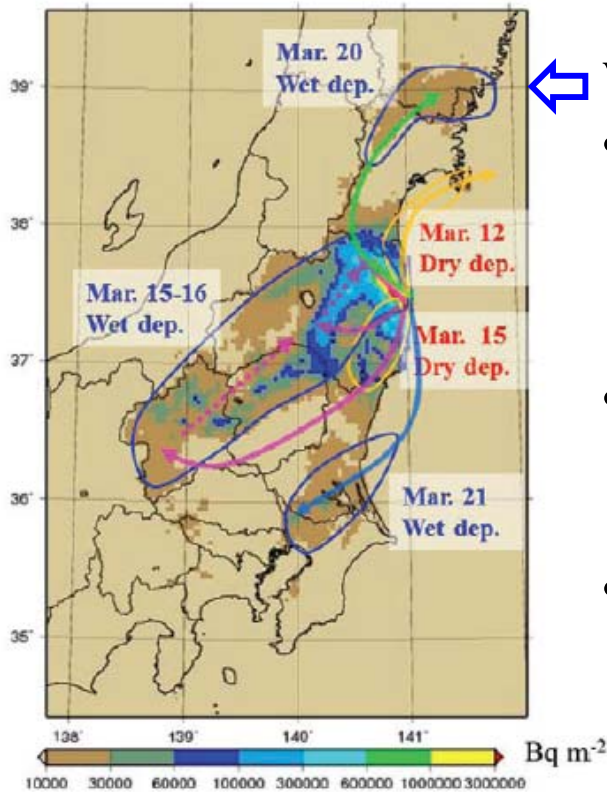
S/C CAMS

D/W CAMS

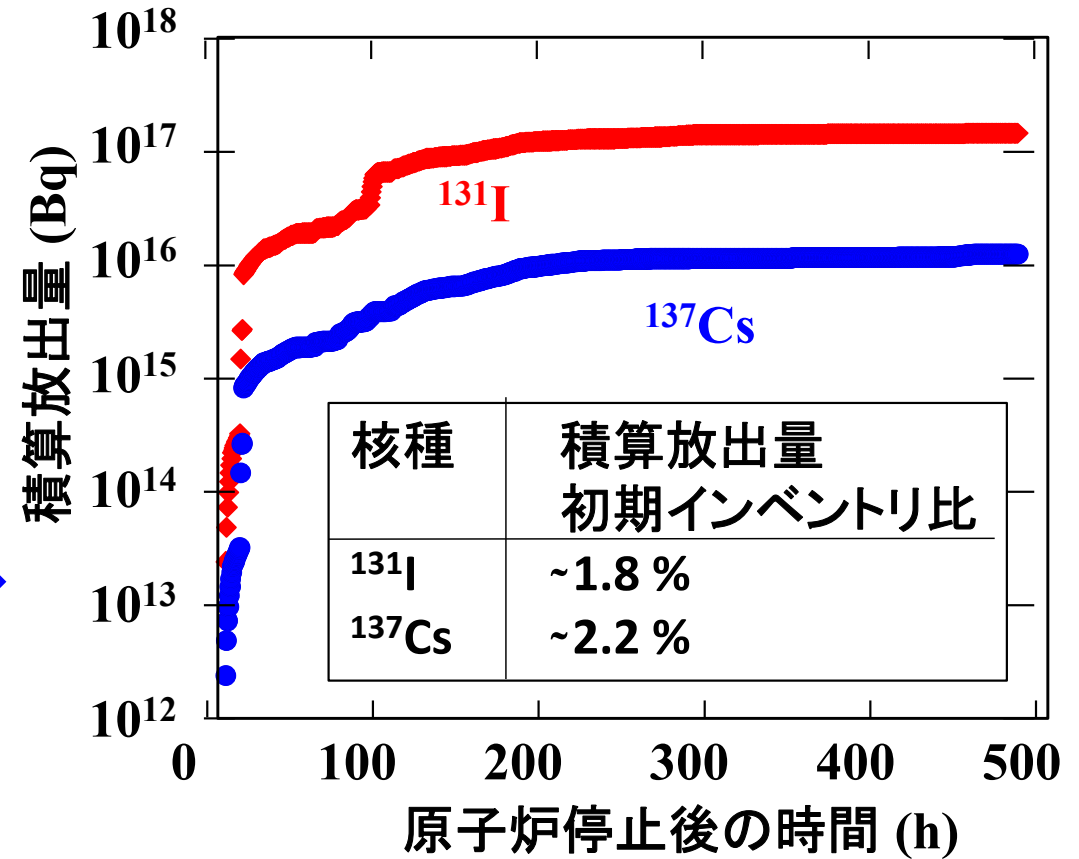
Ref. [4]

## 環境放出推定値からのBackward評価 (WSPEEDI)

WSPEEDIで推定された環境への放出量を積算し、プラントから環境への移行量を評価



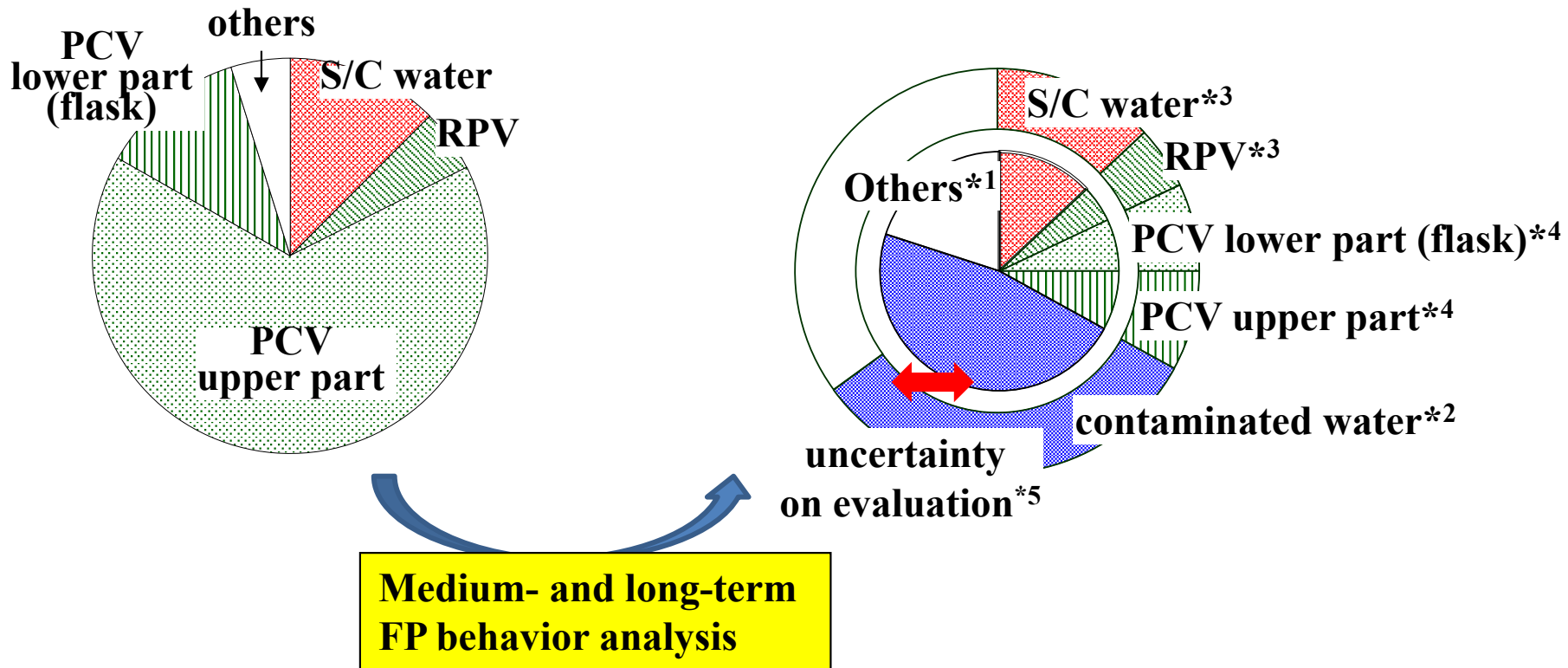
- ← WSPEEDI:
- 時間依存の環境中放射性核種濃度
  - ↑
  - 時間依存放出量
  - ↓
  - 積算放出量 →



Ref. [4],[6]

# 3-20 1F事故時の核分裂生成物の挙動

1Fプラントでの<sup>137</sup>Csのマスバランス (FEP, BEPおよび直接測定 of 組合せ)



- a) Short-term evaluation
- b) (SAMPSON code)

b) Long-term evaluation (measured and analyzed)

- \*1 Containing the environmental release based on WSPEEDI
- \*2 Based on contaminated water analysis
- \*3 Conservation of Sampson code results
- \*4 FP transfer in to water due to wash-out effects
- \*5 Analysis of contaminated water data

Figure 19 <sup>137</sup>Cs distribution in Unit 1 (Comparison of short- and long-term evaluation results for Unit1)

Ref. [4],[7]

## 1. 宇宙線による生成

### トリチウムの主な生成プロセス

[1EBq/y]

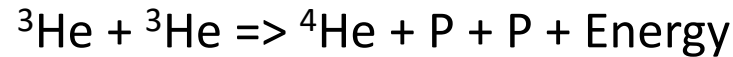
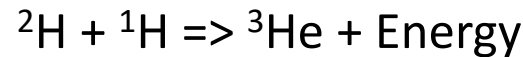
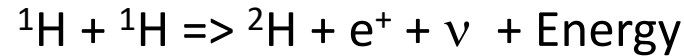
太陽からの中性子と  
大気中の窒素、酸素  
との反応



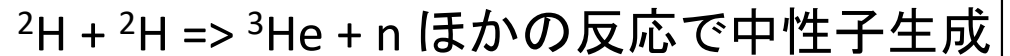
1Ci=3.7x10<sup>10</sup>Bq、

1Bq=1壊変/s

中性子は太陽の核融合反応で生成



一連の核融合反応の中で



中性子の半減期:10.6 m

太陽-地球:15000万km(光速で8分強)

太陽からの中性子は地上に届き、トリチウム生成

## 2. 原子力発電所での生成

[0.02EBq/y]

福島第一原子力発電所の総トリチウム量

[0.0034EBq]

総量で約10g(これが130万トンの処理水中に混合)

## 3. 核融合炉(100万We級)での使用 3kg/y

[1EBq/y]

核融合炉ではD-T反応の燃料となるため

T(d, n)<sup>4</sup>Heで生成される中性子(n)の運動エネルギーで発電

## 4. 核実験による放出

(過去型)

[~240EBq]

E:エクサ(6) (10<sup>3</sup>)<sup>6</sup> =10<sup>18</sup> k;3, M;6, G;9, B;12, P;15, E;18, Z;21, Y;24  
万;10<sup>4</sup>, 億;10<sup>8</sup>, 兆;10<sup>12</sup>, 京;10<sup>16</sup>, 垓;10<sup>20</sup>

Ref. [2]

## 4-2 トリチウムについて

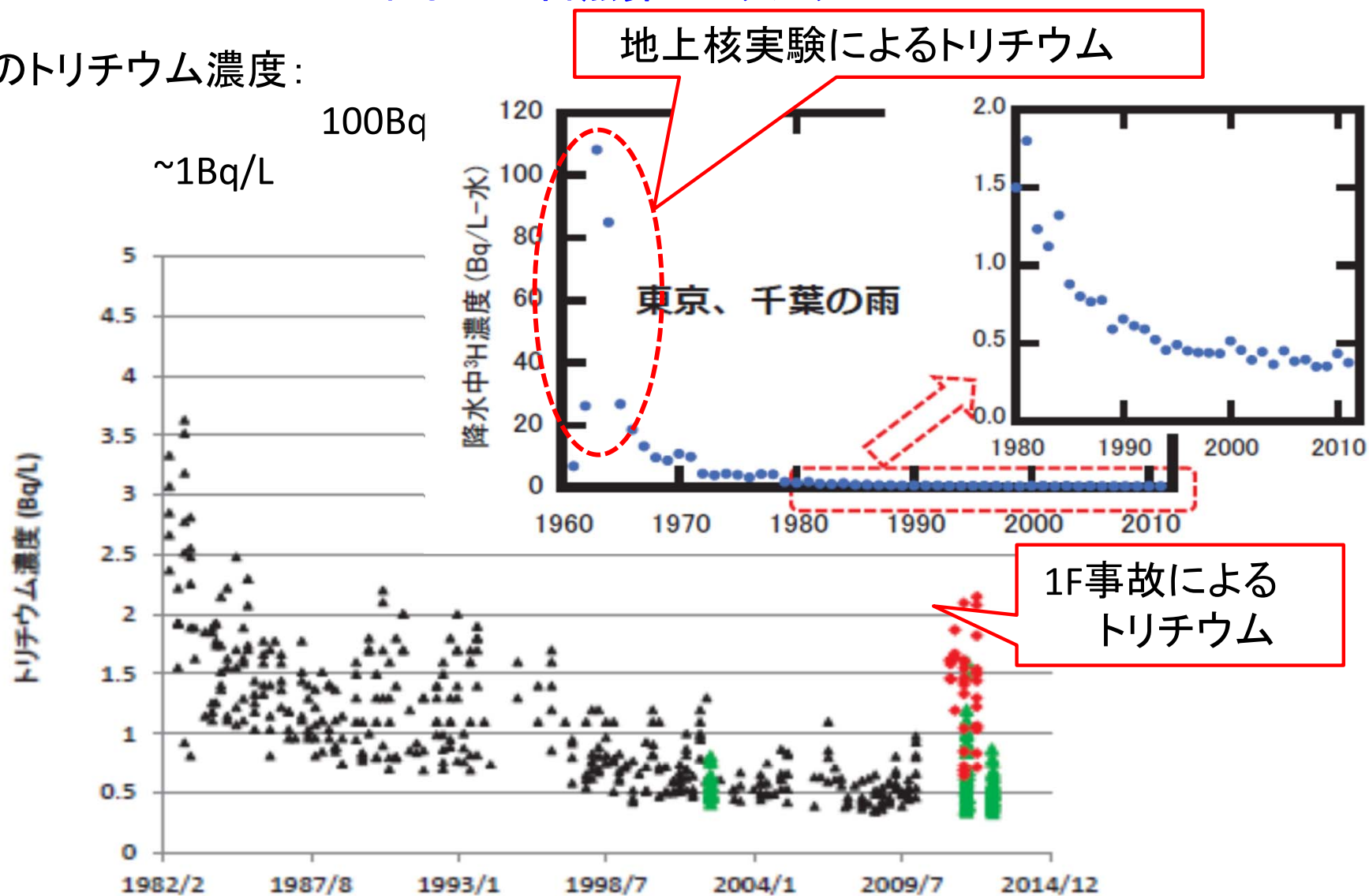
### これまでの自然界のトリチウム

1963年の  
降雨水中のトリチウム濃度:

最近では:

~1Bq/L

100Bq



事故後の環境水中のトリチウム濃度は1980年代より小さい



## トリチウム汚染水の処理についての原子力学会事故調会での提案

トリチウム以外の核種は、ALPSほかで除去可能であるがトリチウム除去は困難

対応策	概要	課題	現実性	判断
1. サイト内貯蔵	放出せずに保管	地下水汚染のポテンシャル大	○	△
2. トリチウム除去と濃縮	トリチウム濃縮装置の適用 (各種同位体交換法の適用)	工学的には困難 [現実的な除染係数:10]		
2.1 除去水の放出	放出基準濃度以下して放出能 放出するのであれば希釈も同じ		△	△
2.2 高濃縮減容保管	大半のトリチウムを濃縮・減容 残りを希釈放出		△	△
3. 希釈放出*2	トリチウム以外の核種は除去 トリチウムは希釈放出	総量規制に抵触*1	○	△

\*1 保安規定との整合性 福島第1の保安規定: 放出基準濃度; 20 Bq/g[法的には60 Bq/g]  
 総量規制; 0.022 PBq/y  
 再処理施設の保安規定: 放出基準濃度; 20 Bq/g[法的には60 Bq/g]  
 総量規制; 18 PBq/y

\*2 復水器冷却用海水ポンプを用いて希釈排出可能

1,100MWeBWRの復水器海水ポンプ(2.8x10<sup>5</sup> t/h)を用いた希釈放出例

除去系1系統の処理量(250t/d)を希釈すると、

トリチウム濃度: 2000Bq/g => <0.01 Bq/g(自然界BGLレベル)

総量規制への対応 0.5TBq/d x 40d/y => 20TBq/y 処理に20年強要

総量規制値オーバ 0.5TBq/d x 300d/y x 2系統 => 0.3TBq/y 2年弱 Ref. [1]



## 4-4 トリチウムについて

No.29

### 各国のトリチウム排出基準(濃度規制)と排出実績(総量規制)

#### 排出基準 (濃度規制)

国・機関	飲料水基準(Bq/L)	排出基準(Bq/L)
日本		60,000
オーストラリア	76,103	
フィンランド	30,000	
WHO	10,000	
カナダ(オンタリオ)	7,000	
米国	740	
EU	100	
フランス		40,000

Ref. [11],[12]

#### 排出実績 (総量規制)

プラント	(国)	排出実績	排出年度
ブランズウィック 1号機、BWR	(米国)	<3.7 TBq	2019
トリカスタン、PWR	(フランス)	35 TBq	2018
紅沿河、PWR	(中国)	87 TBq	2019
泰山3号機	(中国)	143 TBq	2020
寧徳	(中国)	102 TBq	2021
陽江	(中国)	11 TBq	2021
古里、PWR	(韓国)	91 TBq	2019
ダーリントン、CANDU	(カナダ)	220 TBq	2018
ラ・アーグ、再処理施設	(フランス)	11 PBq	2018
ALPS処理水	(日本)	<22 TBq	予定

TBq:  $10^{12}$ Bq

PBq:  $10^{15}$ Bq

Ebq:  $10^{18}$ Bq

本報告で示したFP挙動、FEP/BEPの解析手法及びその結果の多くは「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会報告書に記載。また、原子力学会の春の年会/秋の大会でも発表。

現状まだ十分な定量化がなされてはいないが、廃炉作業も、燃料デブリ取出しにも手が付け始められようとしている現在、技術の現状と今後の展開を明確にしておくことが必須と考える。

マスバランスに基づくFP分布の適用先として、リスク評価分科会の廃炉リスク評価への動きも見えてきているので、FPのマスバランスとFP分布評価のシステムへの対応を議論いただければ幸甚です。

特に、格納容器内のFPのデータ取得はまだ先になるかと考えるため、当面FEP/BEPでの評価が主となるものとする。

$^{137}\text{Cs}$ 以外の核種への外挿にはJAEAの駒様が廃棄物を主対象に開発されている輸送比の概念を適用を検討することも重要と考える。

## 参考文献

- [1] 日本原子力学会東電福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会、“福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言-学会事故調最終報告書-”、丸善出版(株) (平成26年3月11日)
- [2] 日本原子力学会水化学部会、「改訂 原子炉水化学ハンドブック」、コロナ社 (2022年9月)
- [3] 内田、連載講座 軽水炉プラントの水化学 第1回 軽水炉プラントにおける水の役割と水化学制御、日本原子力学会誌、51(2)、PP.106-111, 2009.
- [4] 「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会、“シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動”、日本原子力学会(2021年)
- [5] 西原 健司、岩元 大樹、須山 賢也、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、JAEA-Data/Code 2012-018、日本原子力研究開発機構 (2012年7月) .<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2012-018.pdf>
- [6] Nagai, H., Terada, H., Chino, M., Katata, G., Mikami, S. and Saito, K.,2015. Source Term Estimation for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident by Combined Analysis of Environmental Monitoring and Plant Data through Atmospheric Dispersion, Proc. 16th Int. Topical Meeting Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), Hyatt Regency Chicago, Chicago, IL, USA, August 30-September 4 (in CD).
- [7] S. Uchida, H. Karasawa, C. Kino, M. Pellegrini, M. Naitoh, M. Ohsaka M, An Approach toward evaluation of long-term fission product distributions in the Fukushima Daiichi NPP after severe accidents, Nucl. Sci. Eng., 380 (2021) 111256.
- [8] S. Uchida, M. Naitoh, H. Suzuki, H. Okada, S. Konishi, Evaluation of Accumulated Fission Products in the Contaminate Water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Nucl. Technol., 188 (3), 252-265 (2014).
- [9] 日本原子力学会編“原子力の今と明日”、丸善出版(株)(平成31年3月25日)
- [10] S. Uchida, M. Pellegrini, M. Naitoh, Conversion factors bridging fission product distributions in the primary containment vessel of Fukushima Daiichi npp and dose rates measured by the containment atmosphere monitoring system, Nucl. Eng. Design., 380 (2021) 111303.
- [11] 柿内秀樹、トリチウムの環境動態及び測定技術、日本原子力学会誌、60(9), pp31-35 (2018).
- [12] 環境省ホームページ:環境省\_トリチウムの年間処分量 ~海外との比較;  
<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r4kisoshiryo/r4kiso-06-03-09.html>