

公開ワークショップ

「福島第一原子力発電所事故による  
環境放出と拡散プロセスの再構築」

# ソースターム推定に関する考察

平成24年3月6日

京都大学大学院工学研究科

原子核工学専攻

杉本 純

# 内 容

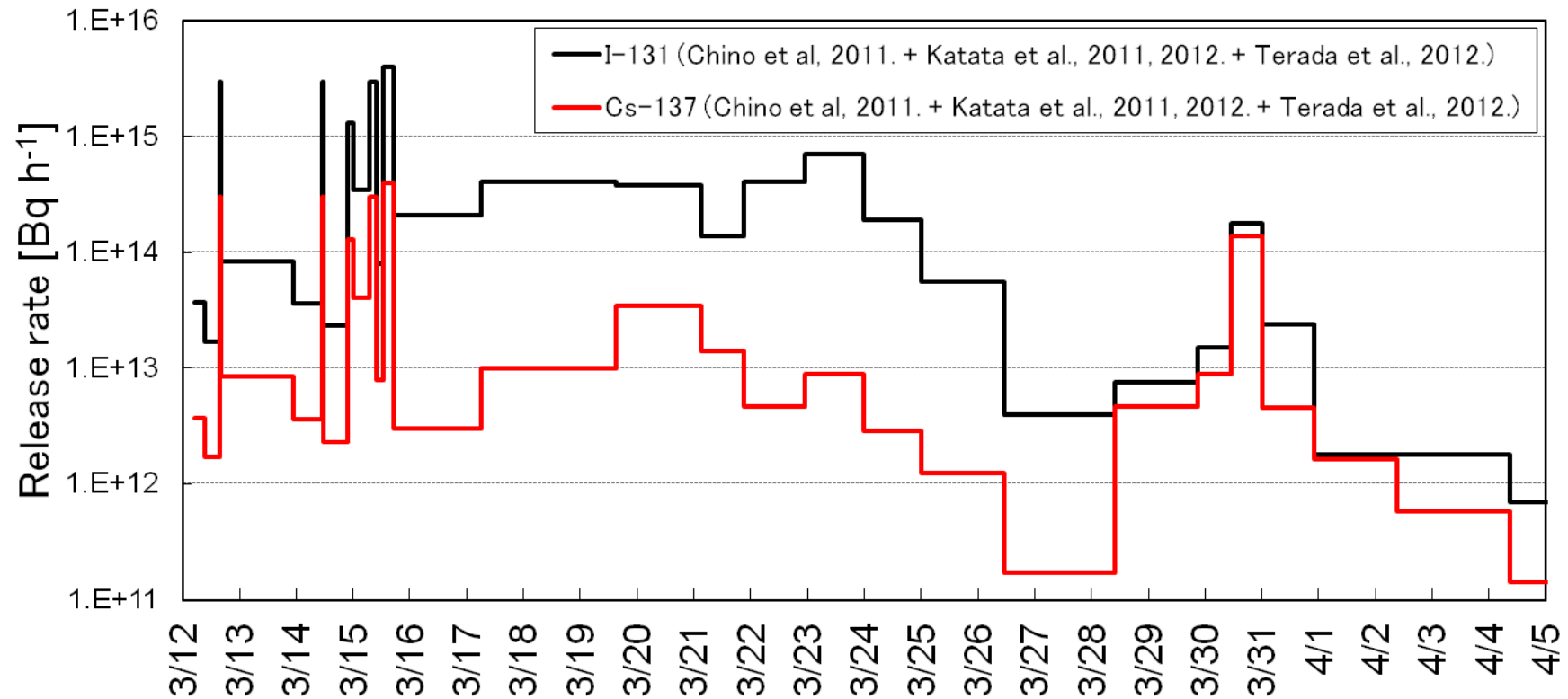
1. はじめに
2. 大気拡散からのソースターム推定
3. 炉内解析からのソースターム推定
4. ソースタームに関する考察
5. まとめ

# 1. はじめに

- ソースターム（環境への放出核種、放出量、放出タイミング）については、大気拡散 (SPEEDI) 及び炉内解析 (MELCOR) と原理的に異なる方法により推定
- ソースタームに関して、従来実施されたシビアアクシデント研究で得られた知見等に基づき、各推定について考察

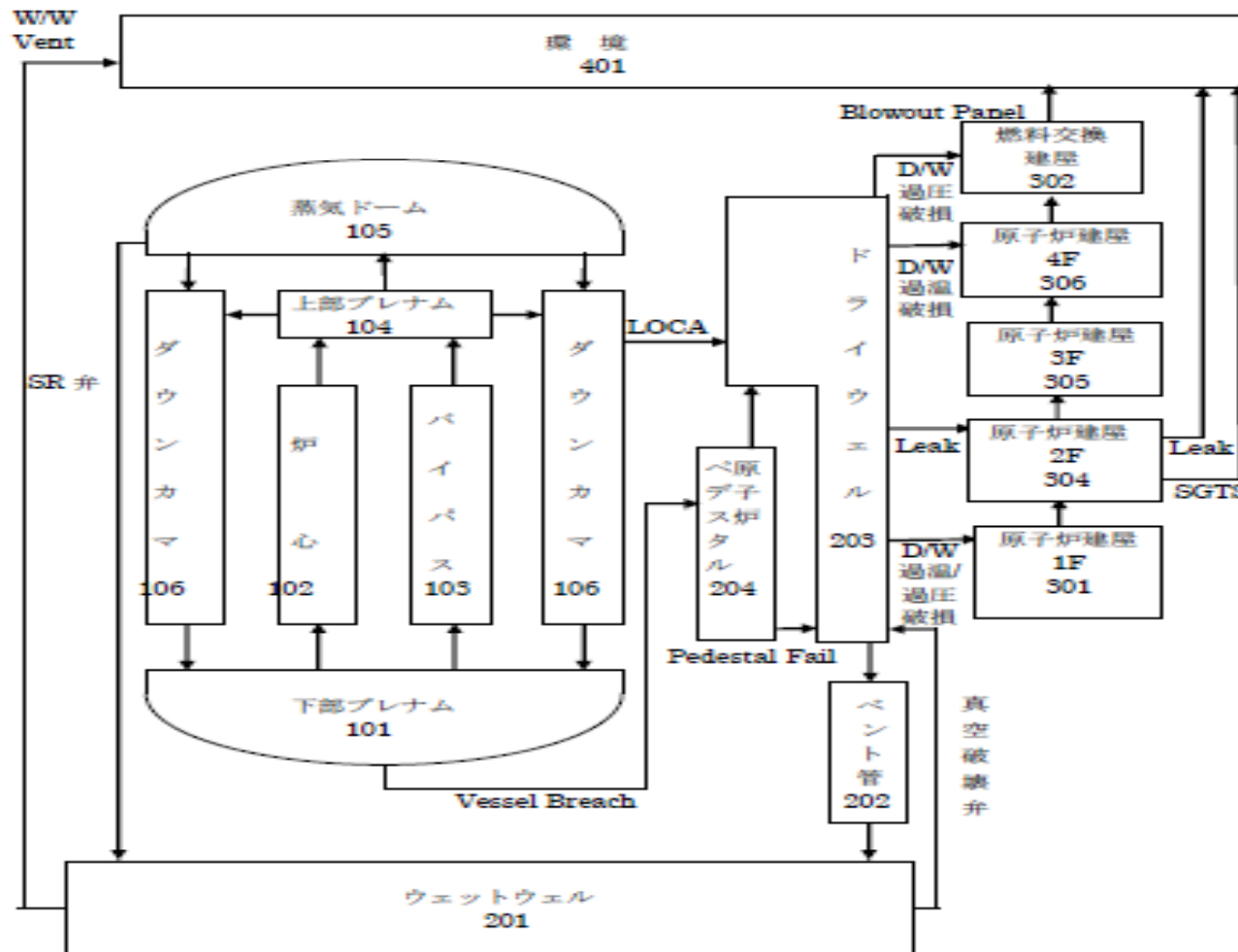
## 2. 大気拡散からのソースターム推定

(SPEEDIを用いた逆推定、JAEA 茅野ら)



# 3. 炉内解析からのソースターム推定 (MELCORに基づく推定、NISA/JNES 星ら)

BWRのノーディング例



# MELCORの主なモデル

## 燃料からのFP放出

CORSOR-Mモデル<sup>1)</sup>

FRC: Fractional Release Rate Coefficient (放出率速度係数、その温度における単位時間当たりの核種の放出割合)

$$FRC = K_0(I) * \exp(-Q(I) / 1.987E-3 * T)$$

ここで、 $K_0(I)$ : 核種Iに固有の定数 (1/min)

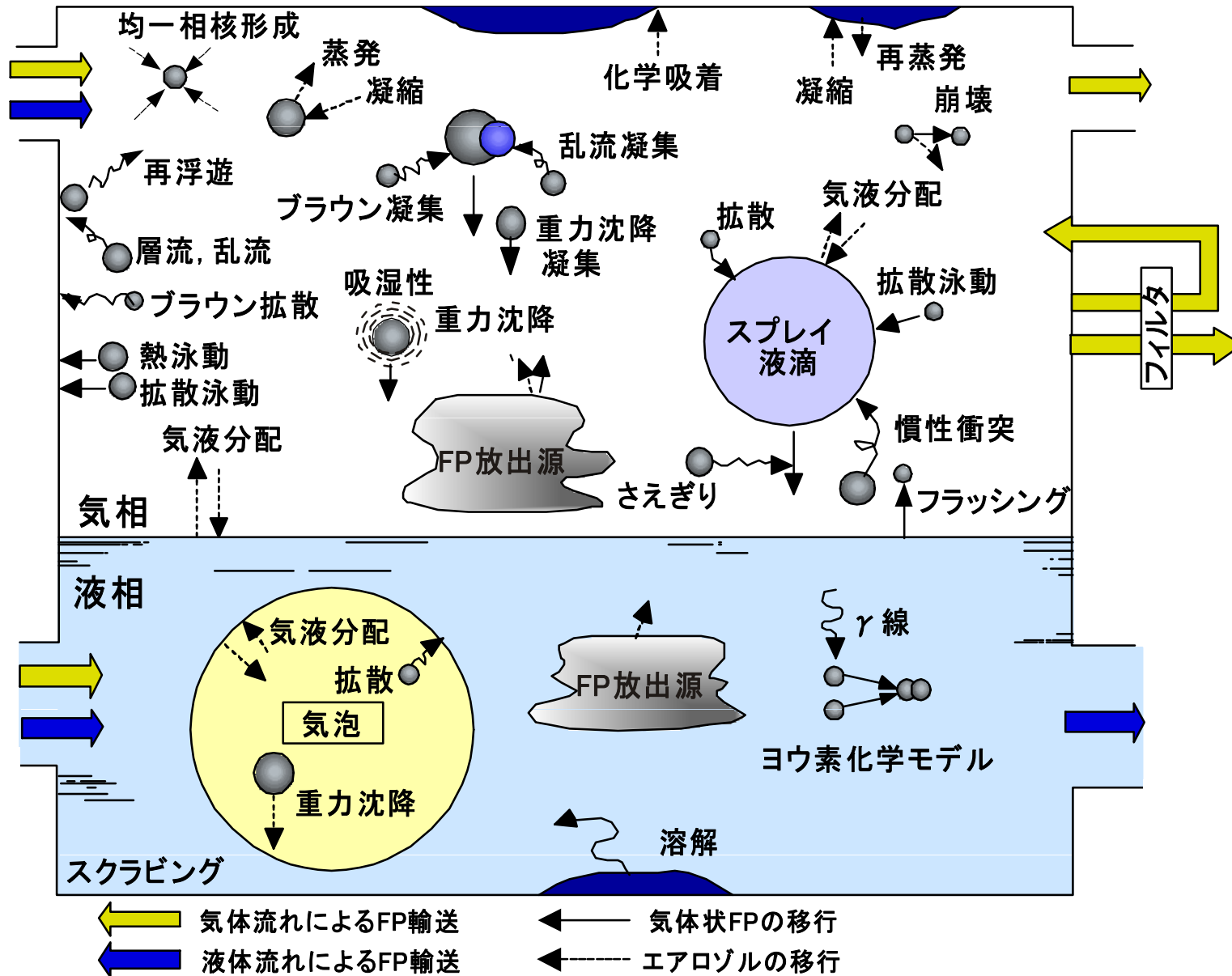
$Q(I)$ : 活性化エネルギー (kcal/mol)

$T$ : 温度 (K)

$1.987E-3$ : ガス定数

1) M. R. Kuhlman, et. Al., "CORSOR User's Manual," NUREG/CR-4173 (1985).

# FP挙動モデル (ARTコード、梶本らより。MELCORもほぼ同等)



# 2号機におけるCsIの分布 (JNES)

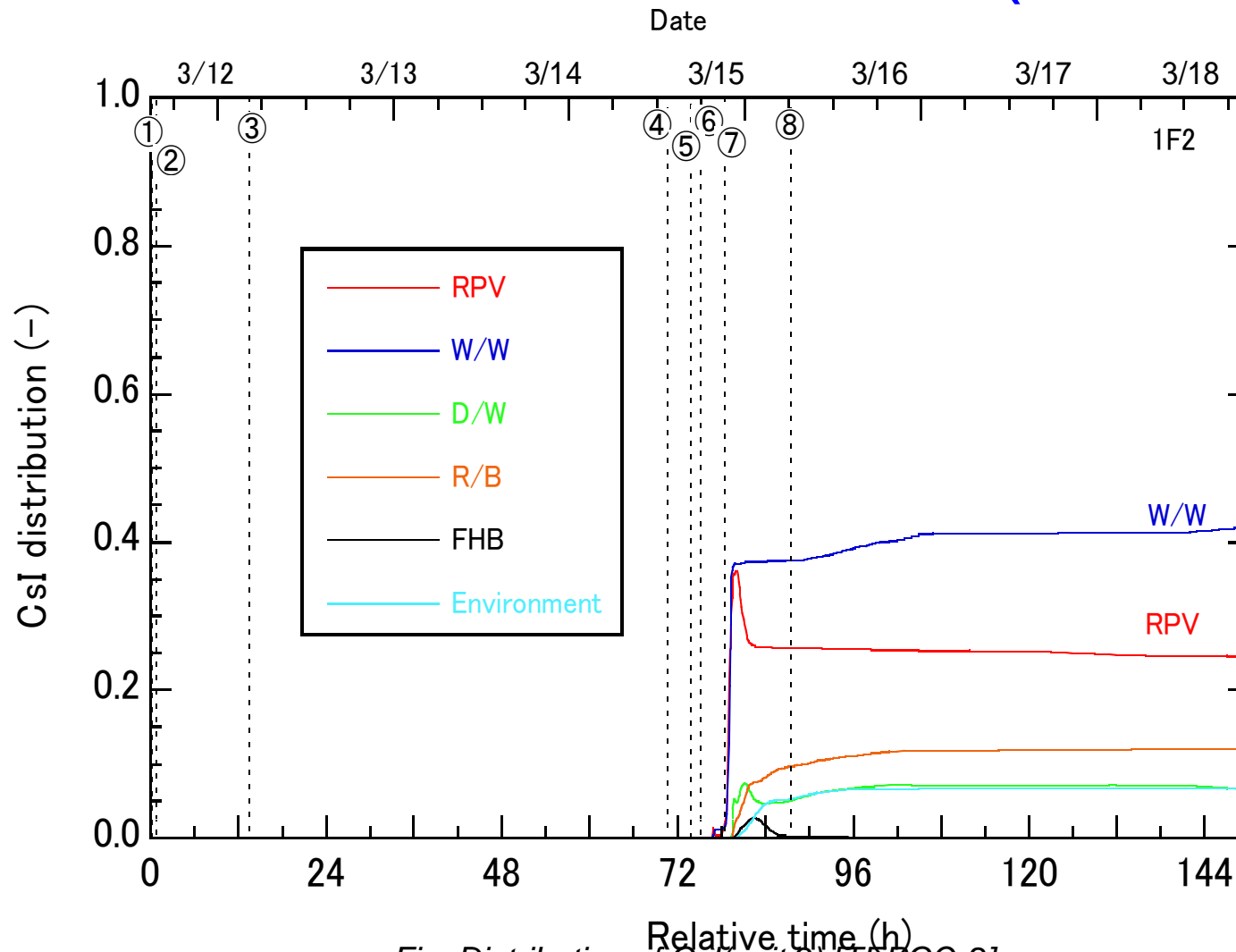


Fig. Distribution of CsI(unit 2) [TEPCO-2]

①RCIC start manually, ②SBO, ③Water source change from CST to S/P, ④RCIC stop, ⑤ Sea water inject., ⑥RPV depressurized (S/R valve-1 open), ⑦S/R valve-2 open, ⑧Impact sound



# 2号機におけるCsの分布 (JNES)

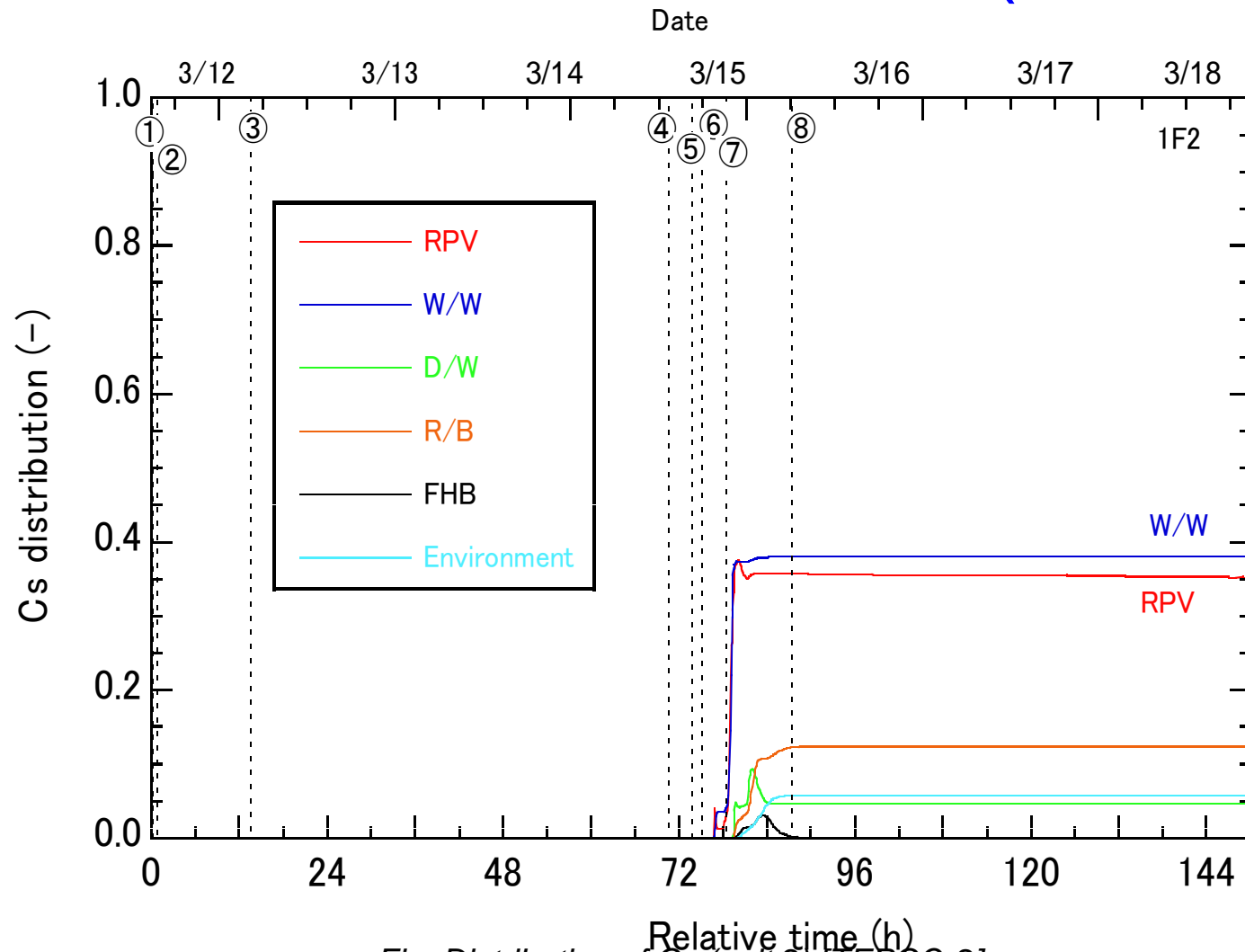


Fig. Distribution of Cs (unit 2) [TEPCO-2]

①RCIC start manually, ②SBO, ③Water source change from CST to S/P, ④RCIC stop, ⑤ Sea water inject., ⑥RPV depressurized (S/R valve-1 open), ⑦S/R valve-2 open, ⑧Impact sound

# 環境への放出量の推定結果

	1号機	2号機	3号機	合計
Xe-133	$3.4 \times 10^{18}$	$3.5 \times 10^{18}$	$4.4 \times 10^{18}$	$1.1 \times 10^{19}$
I-131	$1.2 \times 10^{16}$	$1.4 \times 10^{17}$	$7.0 \times 10^{15}$	$1.6 \times 10^{17}$
Cs-134	$7.1 \times 10^{14}$	$1.6 \times 10^{16}$	$8.2 \times 10^{14}$	$1.8 \times 10^{16}$
Cs-137	$5.9 \times 10^{14}$	$1.4 \times 10^{16}$	$7.1 \times 10^{14}$	$1.5 \times 10^{16}$
Sr-89	$8.2 \times 10^{13}$	$6.8 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$
Ba-140	$1.3 \times 10^{14}$	$1.1 \times 10^{15}$	$1.9 \times 10^{15}$	$3.2 \times 10^{15}$
Te-132	$2.5 \times 10^{16}$	$5.7 \times 10^{16}$	$6.4 \times 10^{15}$	$8.8 \times 10^{16}$
Ru-103	$2.5 \times 10^{09}$	$1.8 \times 10^{09}$	$3.2 \times 10^{09}$	$7.5 \times 10^{09}$
Pu-241	$3.5 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^{12}$	$1.6 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^{12}$
Cm-242	$1.1 \times 10^{10}$	$7.7 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{11}$
合計(Xe除く)	$3.9 \times 10^{16}$	$2.3 \times 10^{17}$	$1.8 \times 10^{16}$	$2.9 \times 10^{17}$

(Bq)

## 環境に放出された放射性物質の推定量

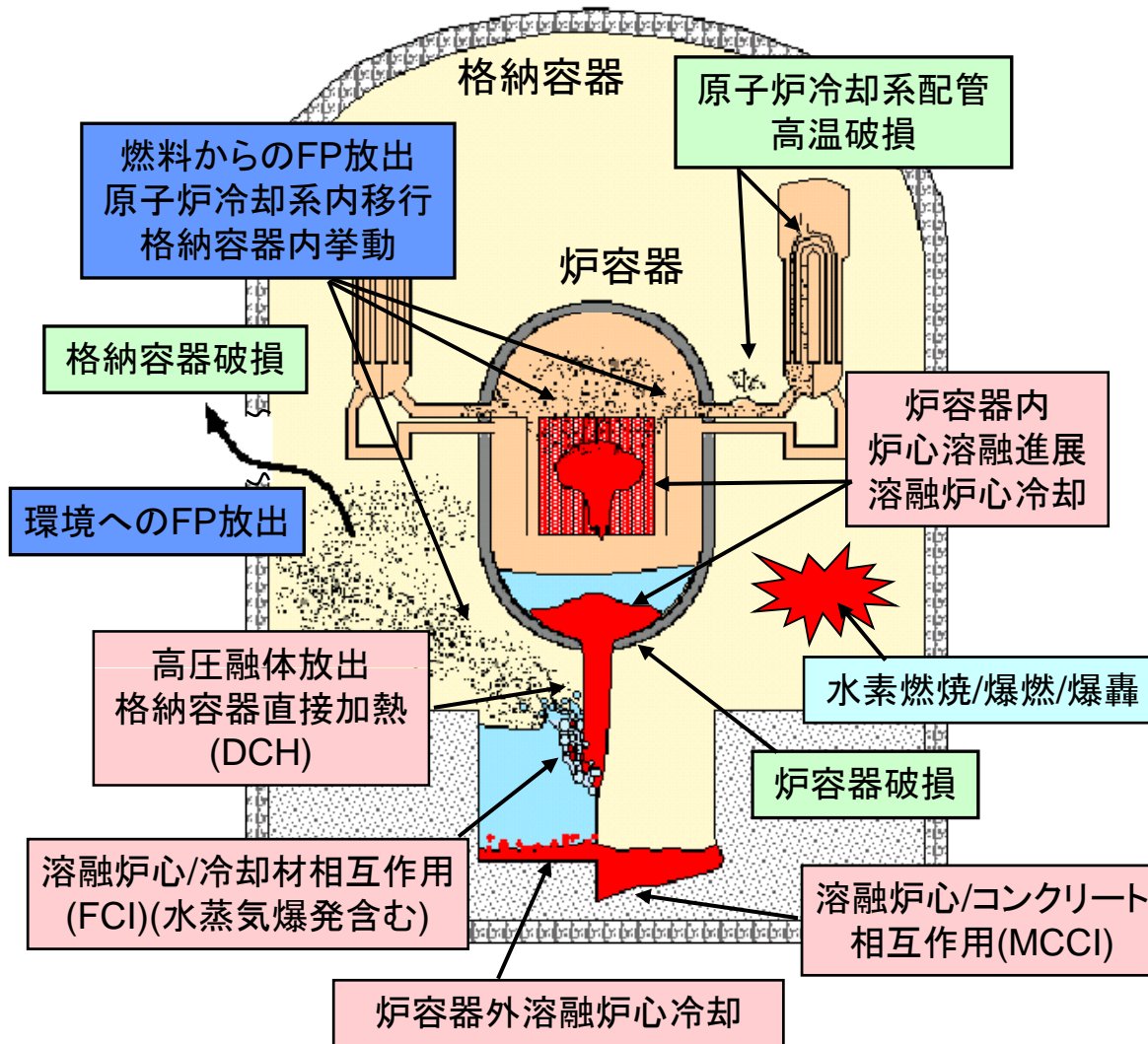
機関	ヨウ素131	セシウム137
原子力安全・保安院(4月)*	$1.3 \times 10^{17}$	$6.1 \times 10^{15}$
原子力安全・保安院(5月)*	$1.6 \times 10^{17}$	$1.5 \times 10^{16}$
原子力安全委員会(5月)**	$1.5 \times 10^{17}$	$1.2 \times 10^{16}$
日本原子力研究開発機構	$1.3 \times 10^{17}$	$0.9 \times 10^{16}$

\* 原子力安全基盤機構による原子炉の事故進展解析に基づく推定 (単位:ベクレル)

\*\* 日本原子力研究開発機構による環境モニターデータと拡散解析(SPEEDI)に基づく推定

# 4. ソースタームに関する考察

## 4.1 シビアアクシデントの主な現象



止める

冷やす

閉じ込める

**溶融炉心の挙動**

- 主な熱源(崩壊熱)
- 冷却材、構造材との相互作用で機械的負荷(衝撃力)や格納容器加圧(ガス発生)
- 冷却の可否と防護壁への影響が重要

**核分裂生成物(FP)の移行挙動**

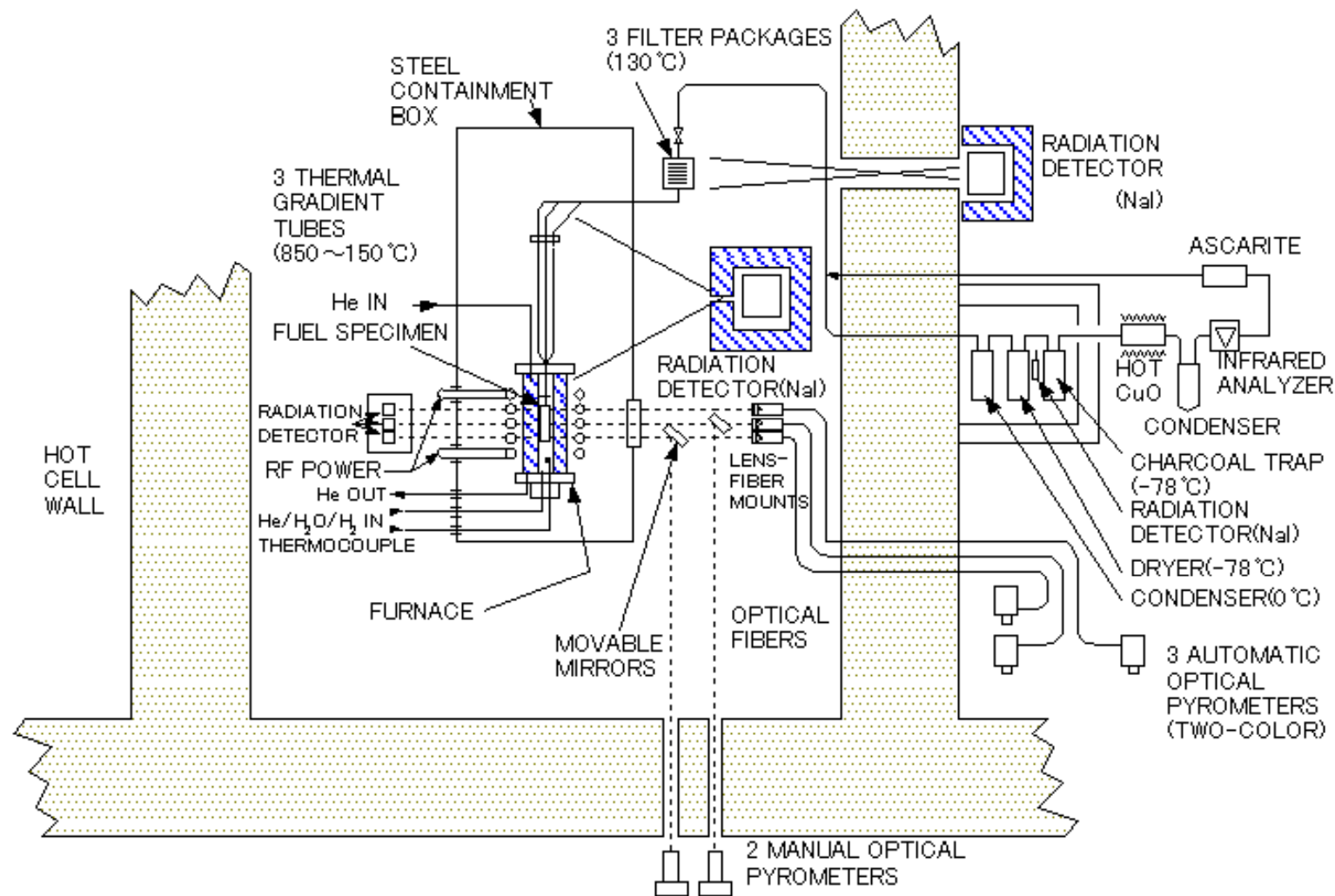
- ガス、エアロゾル等として移行
- 1次系から格納容器内へ、格納容器から環境への**放出時期・量・化学形が重要(ソースターム)**

**防護壁の耐性**

- とくに格納容器は最後の障壁
- 破損モード、時期が重要

シビアアクシデント時の現象解明のための研究

- 超高温の炉心融体、放射性物質の移動等、過酷環境下、複雑な系の熱流体力学、物理、化学の混合課題

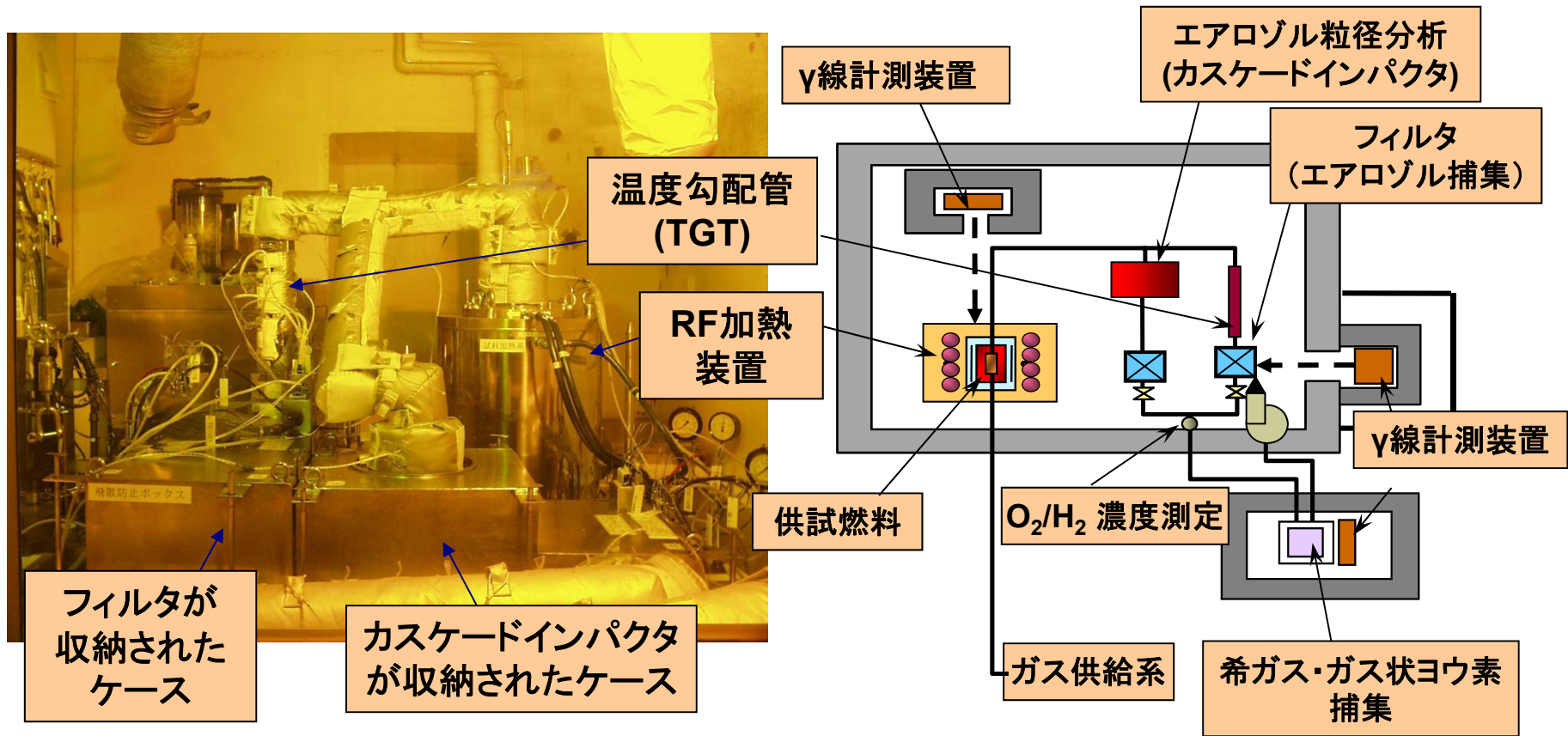


## ORNLのV-I 実験装置系統図

[出典] 杉本 純ほか：シビアアクシデント研究に関するCSARP研究の成果、  
日本原子力学会誌、39(2), p.131(1997)

[参考：ATOMICA<<http://www.rist.or.jp/atomica/>>]

# 照射済み燃料からのFP放出実験 (VEGA) (原子力機構)



フィルタが  
収納された  
ケース

カスケードインパクタ  
が収納されたケース

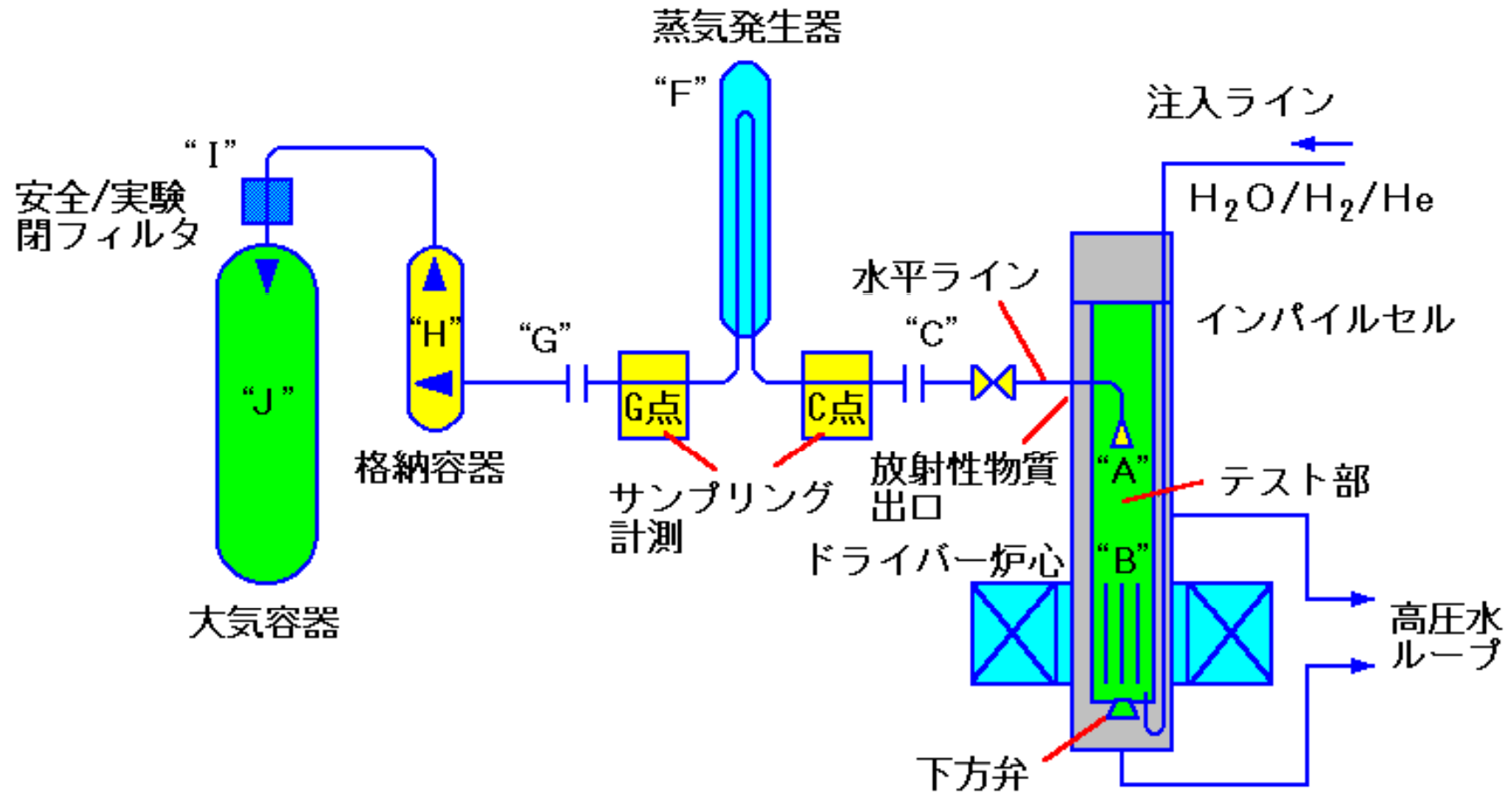
- 特徴
- 最高温度; 3150K
  - 最高圧力; 1.0MPa
  - 高燃焼度UO<sub>2</sub>燃料及びMOX燃料からの低揮発性FP及びアクチニド放出
  - 温度、圧力、雰囲気の影響を調べる

放出メカニズムの  
説明  
放出モデルの改良

ソースターム評価にお  
ける不確かさを低減

日高、J. Nucl. Sci. Technol, 48, No.1, pp.85-102 (2011).

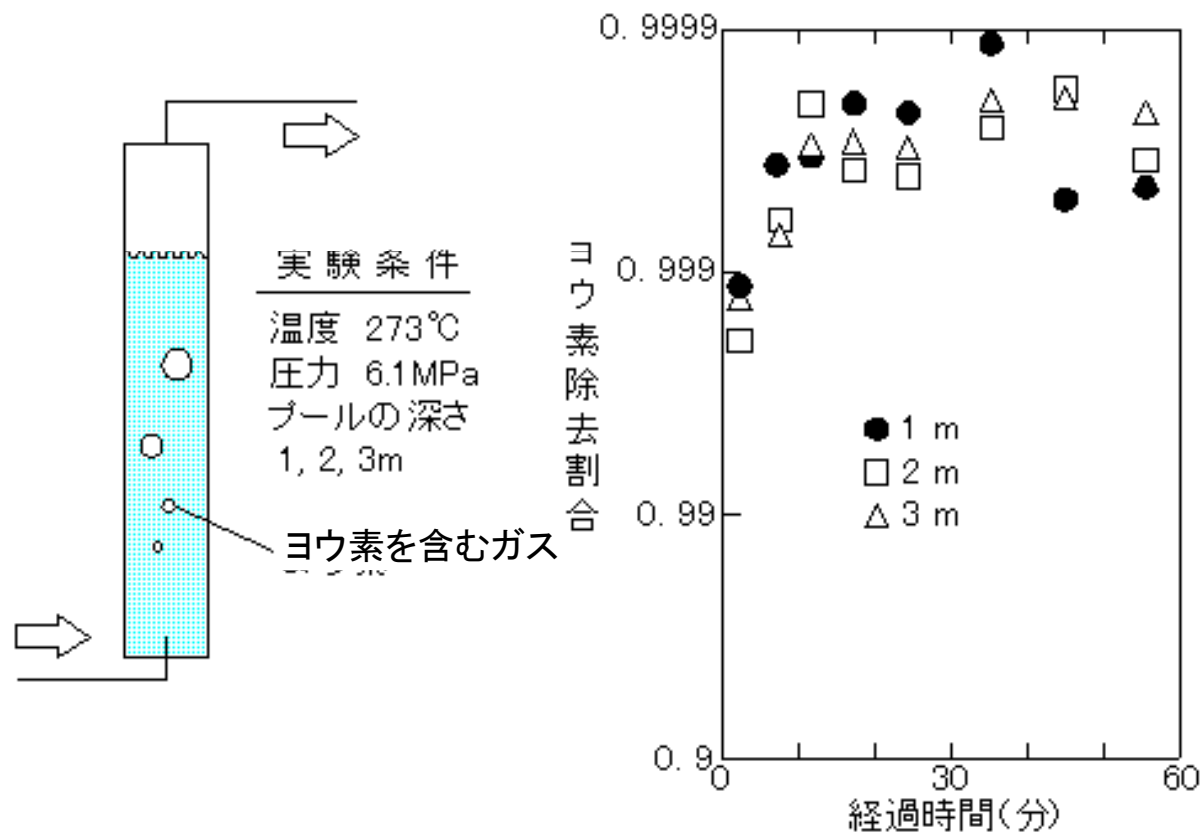
# Phebus-FP実験



PHEBUS-FP計画実験装置の概要

[出典] M.Schwaz and von der Hardt : Proc. Twenty-Third Water Reactor Safety Information Meeting, Maryland, USA, p254 (1995)

[参考 : ATOMICA<<http://www.rist.or.jp/atomica/>>]



装置模式図

実験結果

## 原研のプールスクラビング装置の模式図と実験結果

【出典】西沢 嘉寿成ほか：軽水炉のシビアアクシデント研究の現状、  
 原子力学会誌、35(9), p.781(1993年)

[参考：ATOMICA<<http://www.rist.or.jp/atomica/>>]



## 4.2 大気拡散からの推定に関する考察

### ピークと炉内事象の関連

1号機RBの水素爆発(3/12, 15:36)

3号機RBの水素爆発(3/14, 11:01)

2、3号機の格納容器からのベント

2号機の圧力抑制プール付近の破損  
(3/15, 6:00頃)

### 全体トレンド

初期蓄積量 Cs:I 約10:1

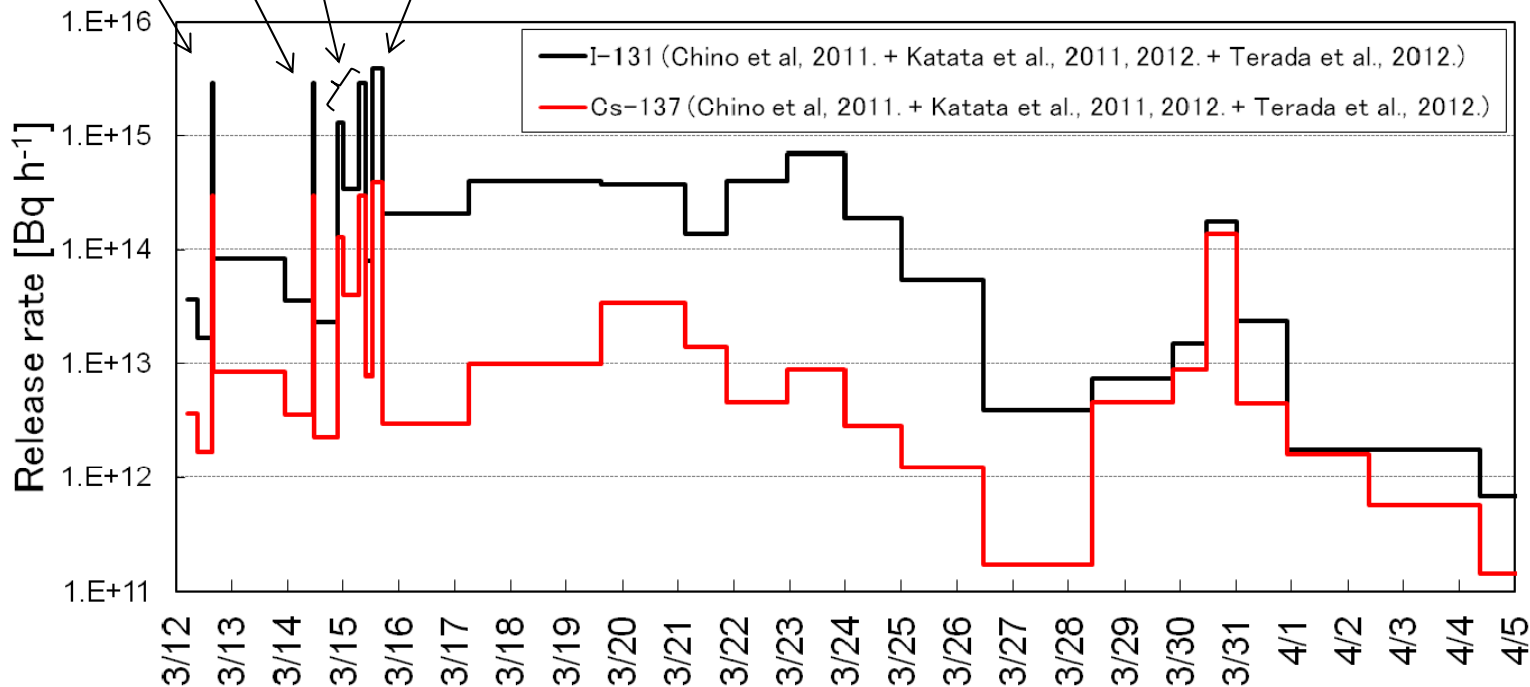
ヨウ素はCsI、残りはCsOH

両者の挙動は類似、I-131の

半減期は8日、Cs-137は30年

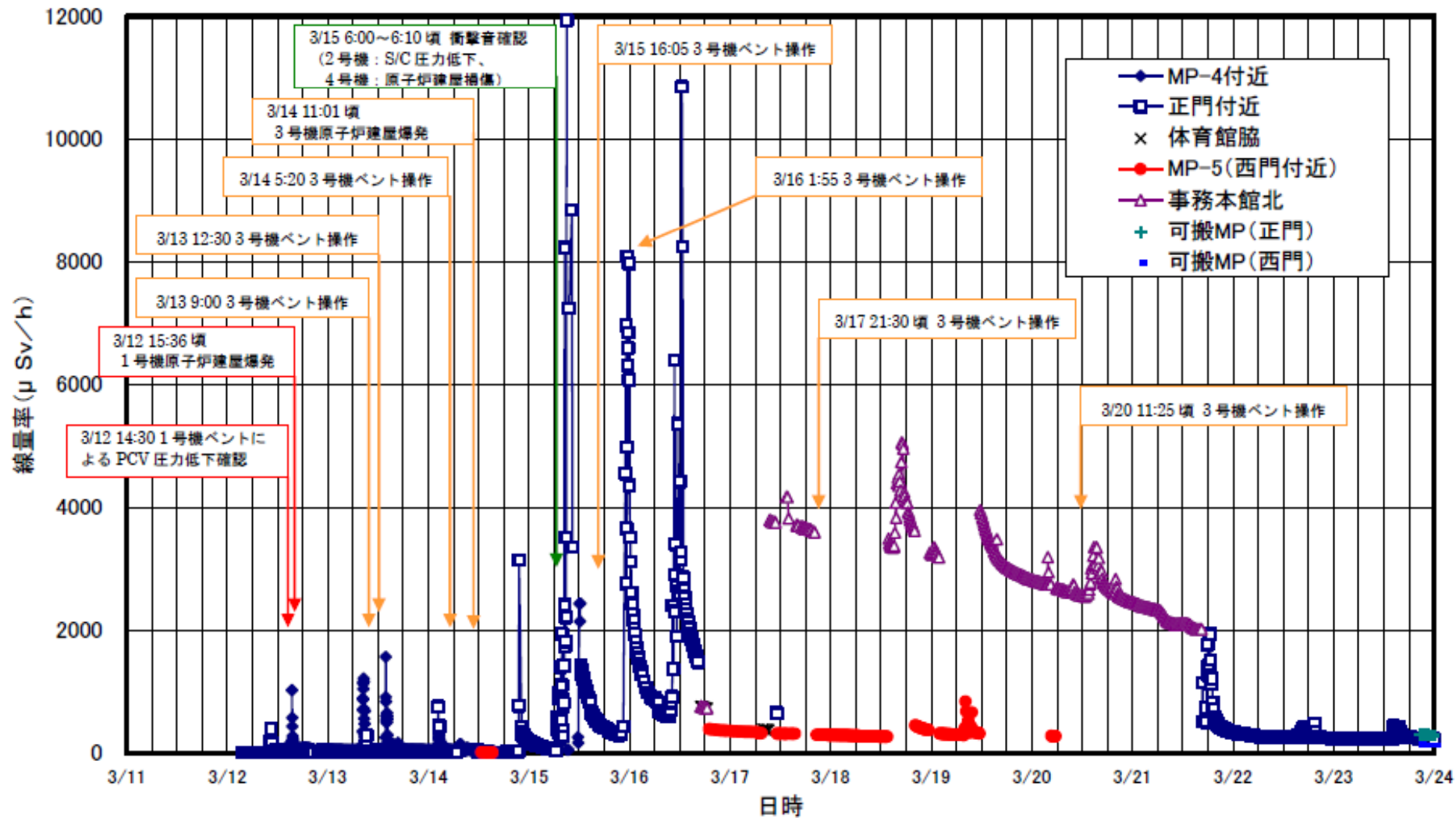
➡ 全体トレンドは定性的に妥当

3/23, 3/30のピークは、注水  
不足による炉心温度上昇?



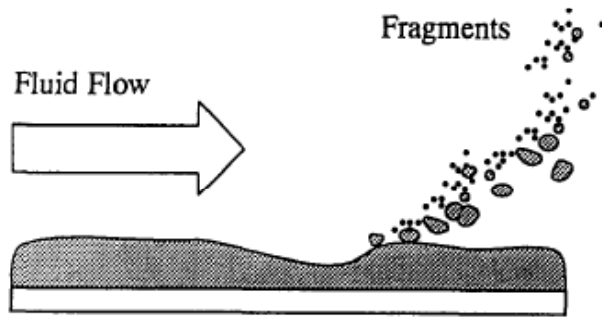
参考(「IAEAに対する日本国政府の追加報告書-福島原子力発電所事故について-(第2報)」より)

福島第一 線量率推移 (モニタリングカー)

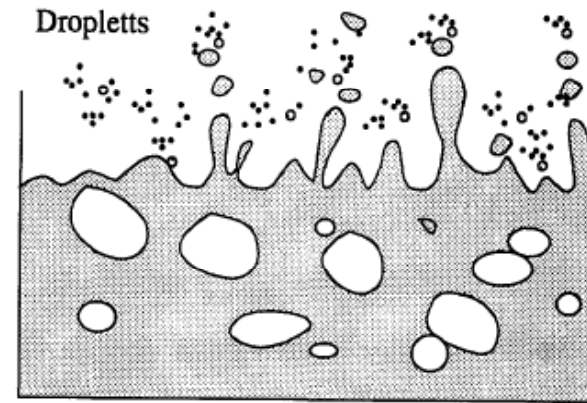


# 水素爆発によるソースタームの増大

## 高速流れによる再浮遊

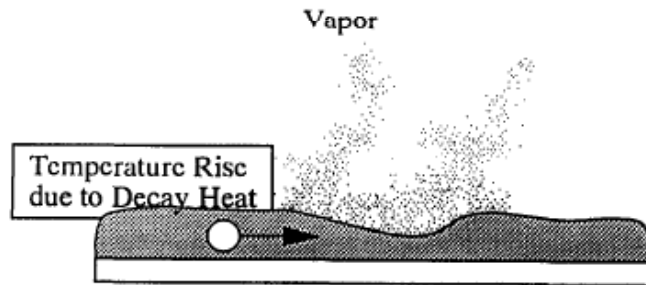


(a) Resuspension

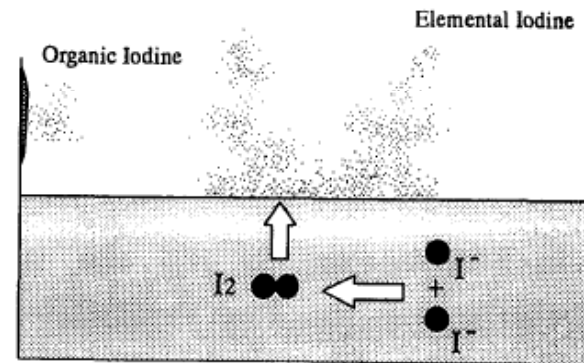


(c) Reentrainment

## 高温による再蒸発



(b) Revaporization



(d) Revolatilization

参考:他の増大要因

減圧による再随伴

放射線等による再揮発

J. Sugimoto, et. al. OECD NEA/CSNI/R (94) 30 (1994)より

### 4. 3 炉内解析からの推定に関する考察(1)

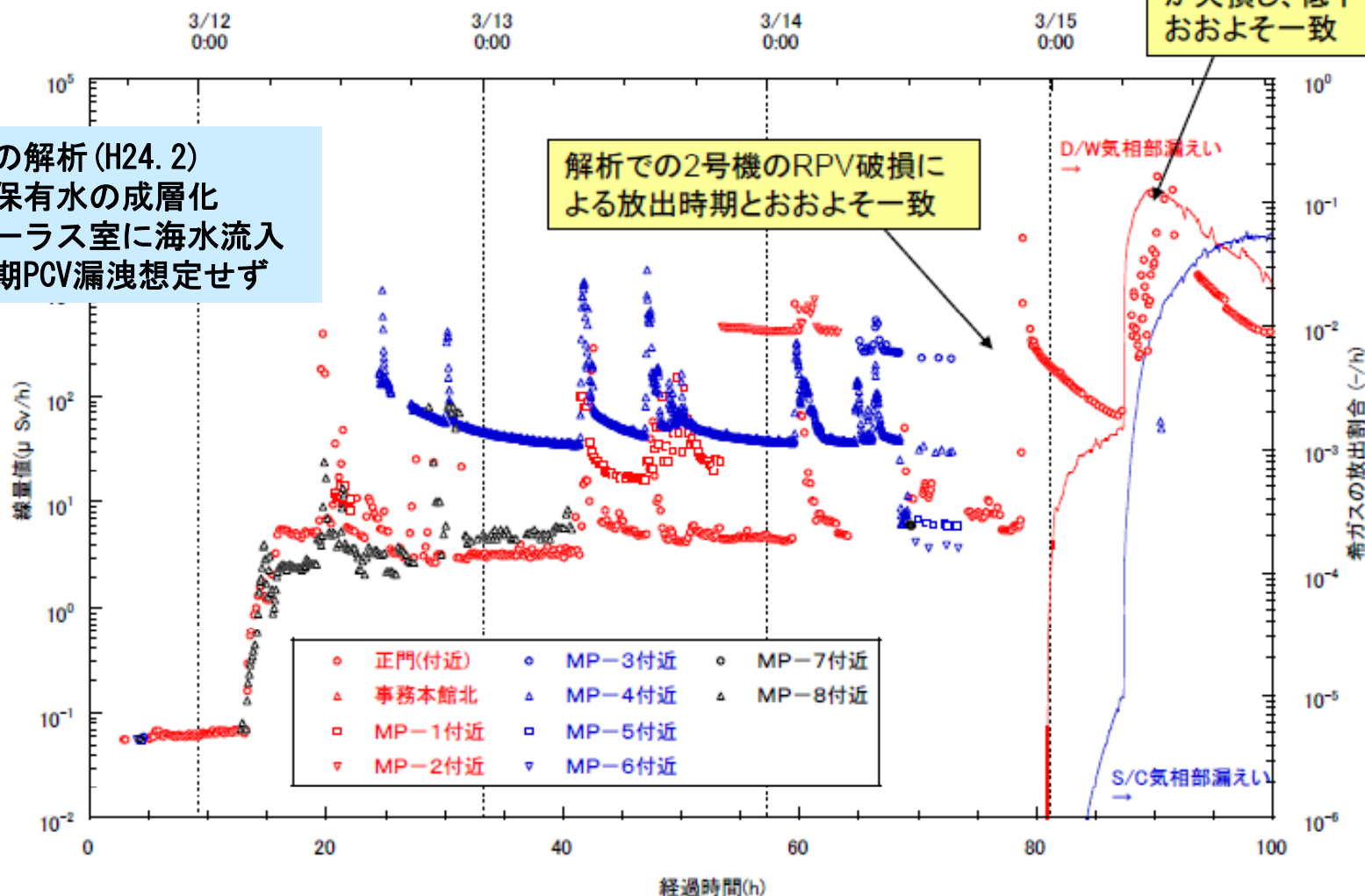
- (1) 格納容器内現象（燃料からのFP放出、冷却系配管内の移行・沈着挙動）については、燃料リロケーションや圧力容器下部の状態予測について不確実性はあるものの、燃料からのFP放出は温度で、環境中への放出は格納容器は破損口面積とベント回数でほぼ決まるため、ソースタームの積算値の観点からMELCORコードはほぼ適切に予測
- (2) ただし、最近のMELCOR解析では、2号機の格納容器破損口をS/CかPCV上部に置く仮定するかでソースタームが桁違いに変化（プールスクラビングの効果）

# 4.2.5 モニタリング値との比較

2号機のPCV圧力の測定値が欠損し、低下する時期とおおよそ一致

最近の解析 (H24. 2)

- ・ SC保有水の成層化
- ・ トーラス室に海水流入
- ・ 早期PCV漏洩想定せず



D/W気相部の漏えいを仮定した場合の希ガスの放出挙動の方がモニタリングと類似している

## 5.2 環境への放射性物質の放出量の推定(2号機)

初期インベントリに対する環境への放出割合

環境への放出量(Bq)

元素群	早期PCV漏えいを仮定した場合の放出割合*	S/P温度成層化を仮定した場合の放出割合		核種	早期PCV漏えいを仮定した場合*	S/P温度成層化を仮定した場合	
	PCV上部(約50 cm <sup>2</sup> )**	S/C(約32 cm <sup>2</sup> )**	PCV上部(約32 cm <sup>2</sup> )**		PCV上部(約50 cm <sup>2</sup> )**	S/C(約32 cm <sup>2</sup> )**	PCV上部(約32 cm <sup>2</sup> )**
希ガス	$9.6 \times 10^{-1}$	$3.9 \times 10^{-1}$	$8.6 \times 10^{-1}$	Xe-133	$3.5 \times 10^{18}$	$1.3 \times 10^{18}$	$3.0 \times 10^{18}$
				I-131	$1.4 \times 10^{17}$	$1.8 \times 10^{15}$	$1.0 \times 10^{17}$
				Cs-134	$1.6 \times 10^{16}$	$6.8 \times 10^{13}$	$4.5 \times 10^{15}$
CsI	$6.7 \times 10^{-2}$	$9.1 \times 10^{-4}$	$5.4 \times 10^{-2}$	Cs-137	$1.4 \times 10^{16}$	$6.0 \times 10^{13}$	$4.0 \times 10^{15}$
Cs	$5.8 \times 10^{-2}$	$2.4 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-2}$	Sr-89	$6.8 \times 10^{14}$	$1.9 \times 10^{13}$	$1.7 \times 10^{15}$
Te	$3.0 \times 10^{-2}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-2}$	Ba-140	$1.1 \times 10^{15}$	$3.1 \times 10^{13}$	$2.7 \times 10^{15}$
Ba	$2.6 \times 10^{-4}$	$7.4 \times 10^{-6}$	$6.8 \times 10^{-4}$	Te-132	$5.7 \times 10^{16}$	$6.6 \times 10^{14}$	$3.4 \times 10^{16}$
Ru	$5.4 \times 10^{-10}$	$1.2 \times 10^{-11}$	$2.0 \times 10^{-9}$	Ru-103	$1.8 \times 10^{09}$	$4.0 \times 10^{07}$	$6.4 \times 10^{09}$
Ce	$4.0 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-12}$	$1.1 \times 10^{-10}$	Pu-241	$1.2 \times 10^{12}$	$3.7 \times 10^{05}$	$3.2 \times 10^{07}$
La	$8.4 \times 10^{-7}$	$9.7 \times 10^{-10}$	$1.87 \times 10^{-7}$	Cm-242	$7.7 \times 10^{10}$	$9.0 \times 10^{07}$	$1.6 \times 10^{10}$

\*原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書、JNES-RE-2011-0002記載の2号機に関する事業者解析2の結果  
\*\*主たる漏えい口

22

圧力抑制室保有水の温度成層化による原子炉格納容器初力等への影響等の検討、JNES, H24.2

## 4. 2 炉内解析からの推定に関する考察(2)

(3) 大気拡散からの推定に関する考察と同様、原子炉建屋またはタービン建屋地下溜まり水からの気液分配反応、及び原子炉建屋内構造物へのFP沈着と水素爆発時の再蒸発または再浮遊により、ソースタームの増加は実際には緩やかに増大していると考えられるが、MELCORでは適切にモデル化されていない。

(4) 原子炉建屋またはタービン建屋地下溜まり水に溶解ヨウ素の再揮発化(I2ガス)については、炉心への注入水や地下水の流入が継続的にあったのに加え、比較的早い段階でヒドラジンが投入されたので、溜まり水が酸性化したとは考え難い。そのためヨウ素の再揮発化は考慮不要

(5) ヨウ素及びセシウムの化学形 (PHEBUS/FPT-3実験で観測されたB4C制御棒が存在する場合のCH3I生成増加、JAEA観測結果によると、気体状セシウムが30%以上) については、MELCORではモデル化されていないので、今後検討が必要

## 5. まとめ

- ✓ 大気拡散からのソースターム推定 (SPEEDI) は全体トレンドは定性的にはほぼ妥当。計算されたピークは炉内事象（水素爆発、格納容器ベント、炉心温度上昇等）と多くは関連
- ✓ 炉内解析からのソースターム推定 (MELCOR) は、モデルの制約から実際に比べて比較的短時間に放射性物質が環境中に放出される傾向。放出総量については、格納容器破損口をどこに置くかで結果が大きく変化。PCV上部に破損口を仮定すると逆推定とオーダー的に一致
- ✓ 両者の総放出量がオーダー的に一致するのは妥当と考えられるが、計測データの不備、計算の仮定などに不確実性があることから、ファクター5程度の不確実性と思量。今後精査（漏洩の発生時間、漏洩箇所、破損口、海水の浸入等）が必要