

# 新規制基準審査における主要な論点への 東京電力ホールディングス対応例と今後の課題



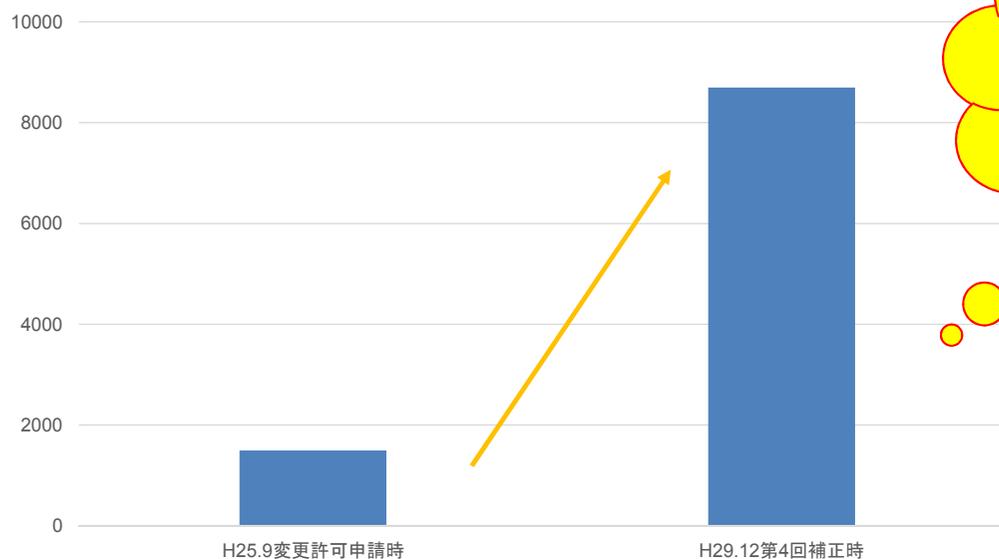
---

平成30年8月21日  
東京電力ホールディングス（株）  
今井英隆

- ・ H25年9月、東京電力ホールディングス柏崎刈羽6/7号炉の設置変更許可を申請
- ・ 厳格な審査を経て、外部事象やシビアアクシデントに関する知見を拡充。

<主な経緯>

- 平成25年9月27日 柏崎刈羽6号炉、7号炉設置変更許可申請
- 平成29年12月27日 同設置変更許可
- この期間中
  - 審査会合回数 152回
  - ヒアリング回数 400回超
  - 現地調査回数 6回
  - 対応人数 約150人（本店組織のみ）



設置変更許可申請書のページ数の推移

審査を経験し、申請書は約1500ページから約8700ページまで拡充

## <従来の規制基準>

## <新規制基準>

シビアアクシデントを防止するための基準(いわゆる設計基準)  
(単一の機器の故障を想定しても炉心損傷に至らないことを確認)

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
内部溢水に対する考慮(新設)
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

新設 (テロ対策)  
新設 (シビアアクシデント対策)  
強化又は新設  
強化

<http://www.nsr.go.jp/data/000070101.pdf> (原子力規制委員会資料より引用)

## 耐震・耐津波として強化された対策



津波の侵入を防ぐ防潮堤



重要区画への浸水を防ぐ水密扉



貫通孔の止水処理

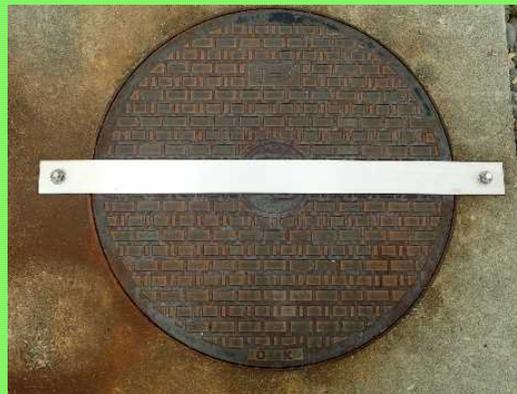
## 設計基準として強化された対策



森林火災の延焼を防ぐ防火帯



竜巻飛来物の侵入を防ぐ防護ネット



竜巻飛来物とならないための対策

## シビアアクシデント対策



SAで発生した水素を処理する触媒装置



原子炉や燃料プールに注水する可搬車両

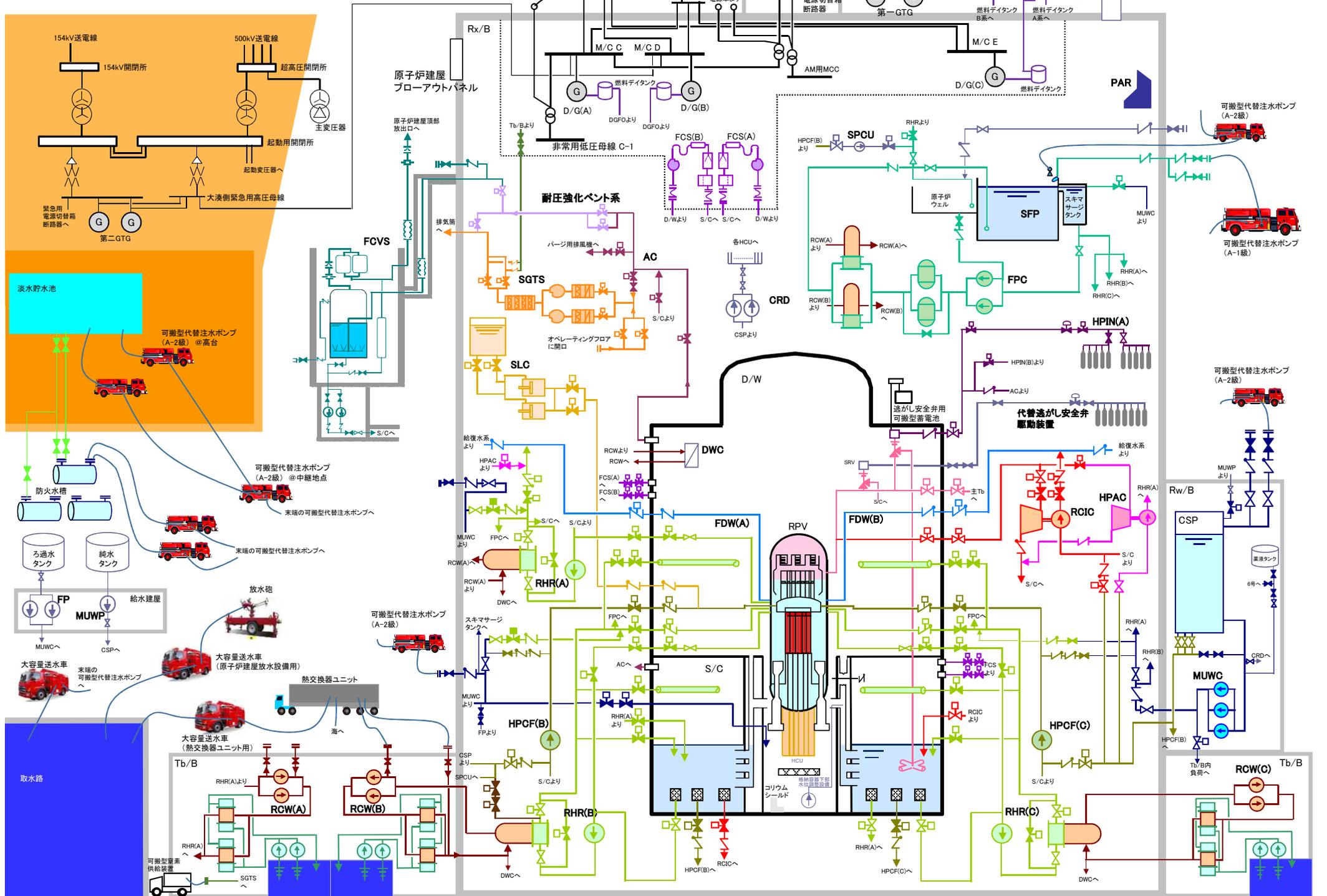


格納容器の圧力を逃がすフィルタバント

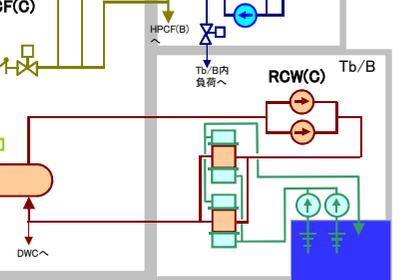
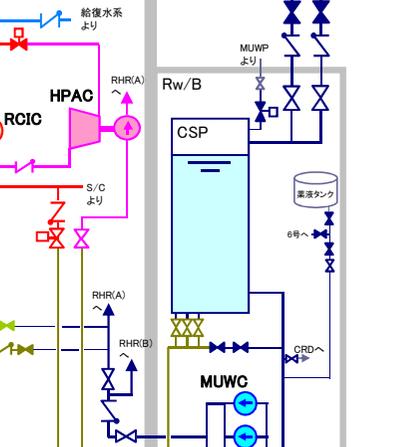
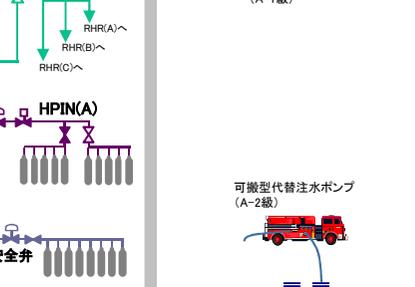
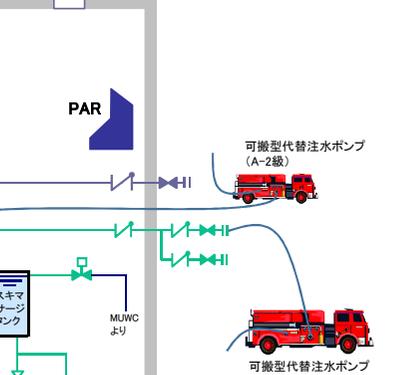
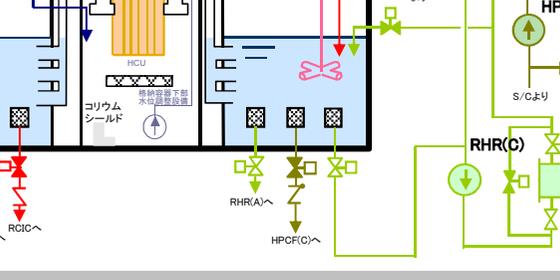
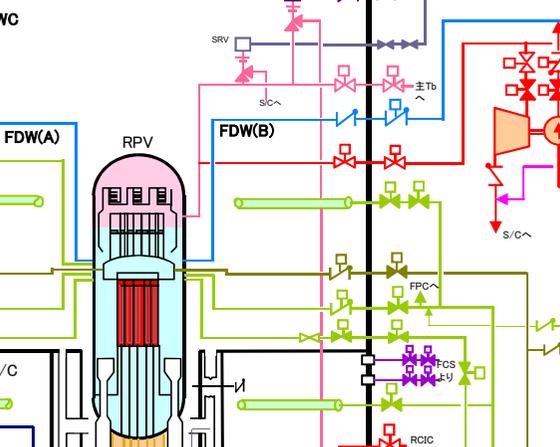
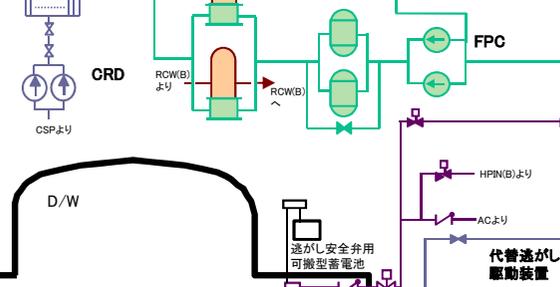
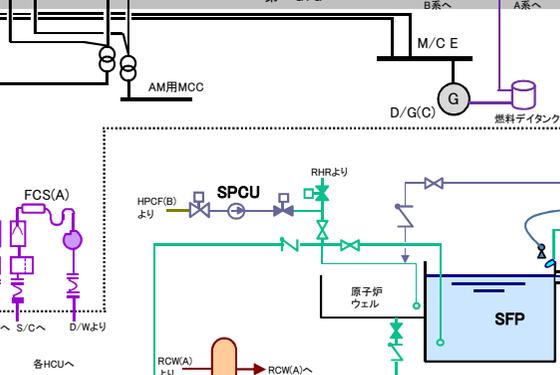
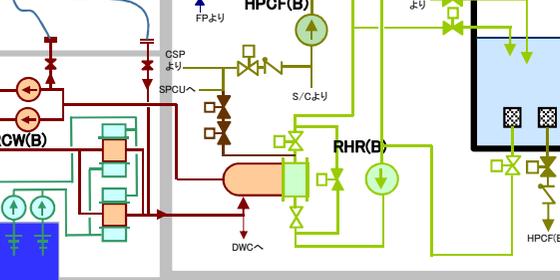
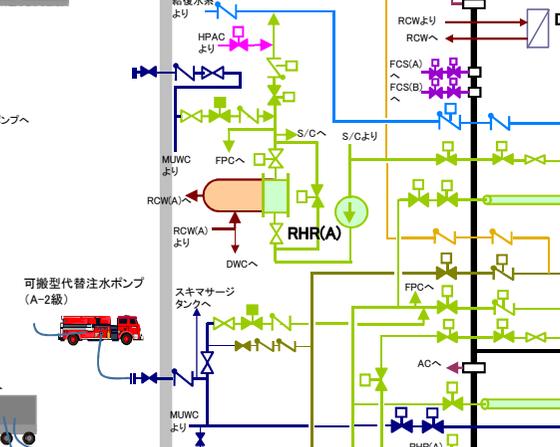
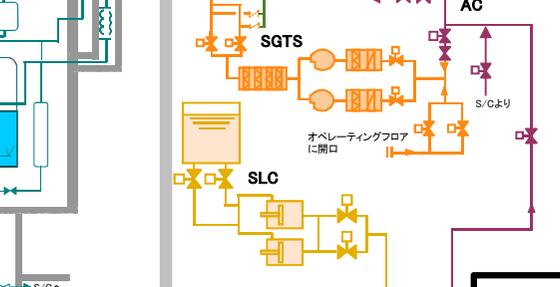
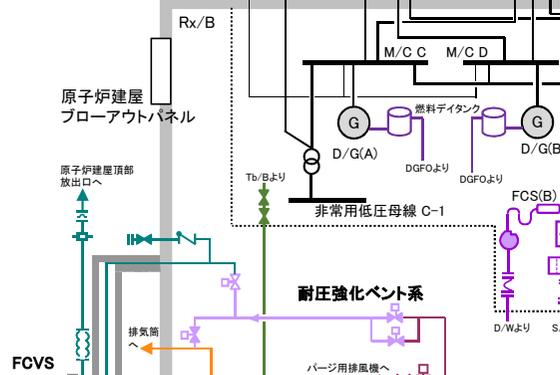
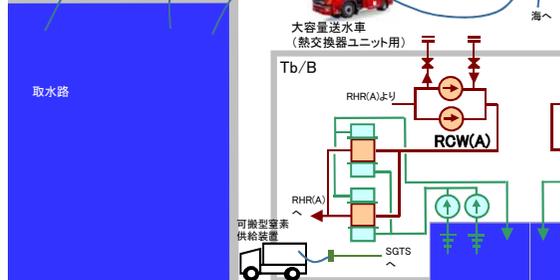
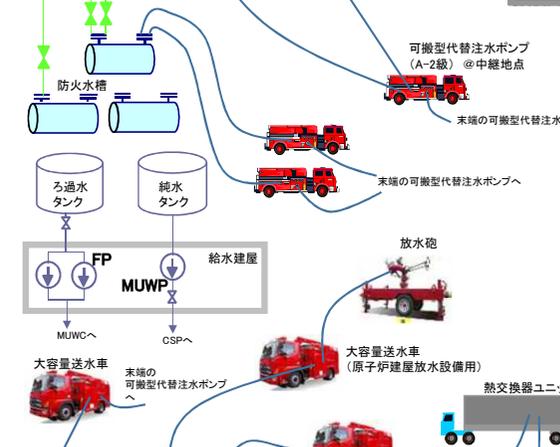
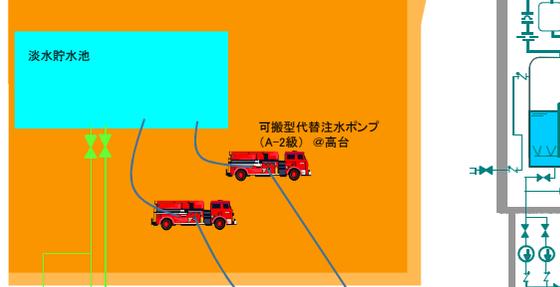
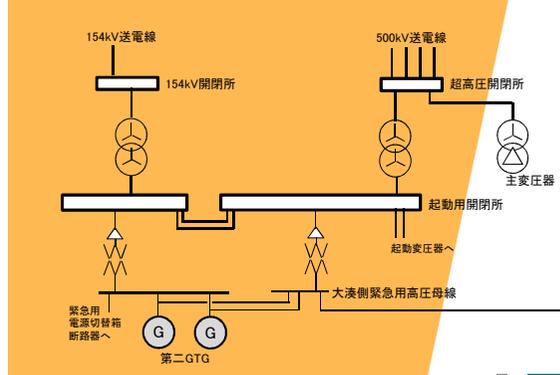


# 柏崎刈羽原子力発電所6/7号機 重大事故対応概念図 (自主対策含)

※本図は7号機を元にしたもの



- ・可搬型代替注水ポンプ (A-1級)
- ・可搬型代替注水ポンプ (A-2級)
- ・大容量送水車 (熱交換器ユニット用)
- ・大容量送水車 (原子炉建屋放水設備用)
- ・大容量送水車 (海水取水用)
- ・モニタリング・ポスト用発電機
- ・KK5TSC用可搬型電源設備



## 〈経緯〉

- ◆ 原子力発電所の安全上重要な施設が、竜巻が発生した場合において、その安全機能を損なわない設計とする。
- ◆ 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。
- ◆ これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、「ランキン渦モデル」、「非定常乱流渦モデル（LES）」といった数値解析がある。
- ◆ 当社の竜巻影響評価においては、地面に置かれた物体への影響をよく表現できている「フジタモデル」を採用し、評価対象施設の影響評価・防護対策を実施した。

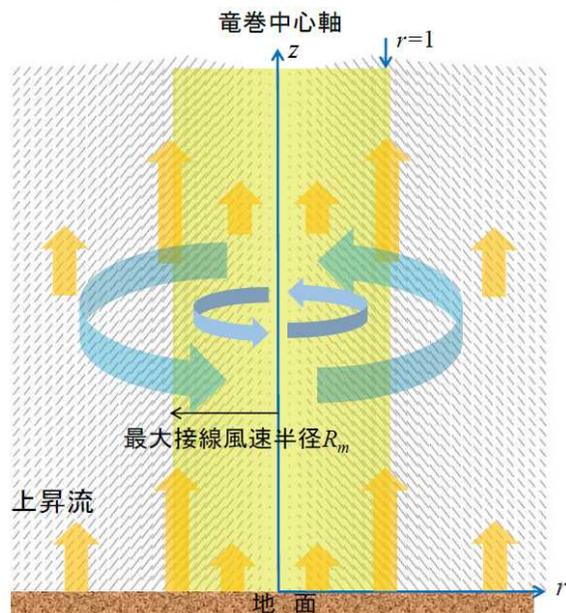
## 〈各風速場モデルの特徴の比較〉

風速場モデル	特徴
ランキン渦モデル	上空での水平方向風速は比較的よく表現できるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析するには適さない。
非定常乱流渦モデル（LES）	人為的な境界条件を設定していることや、小規模領域での計算結果を定数倍して実スケールサイズの値に変換していることから、地上付近での風速場が実現象と乖離していると考えられるため、地上からの飛散挙動をうまく表現できない。
フジタモデル	地面付近を含め、より実際の竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散に関するより現実に近い解析が可能。

## 〈フジタモデルとランキンモデルの比較〉

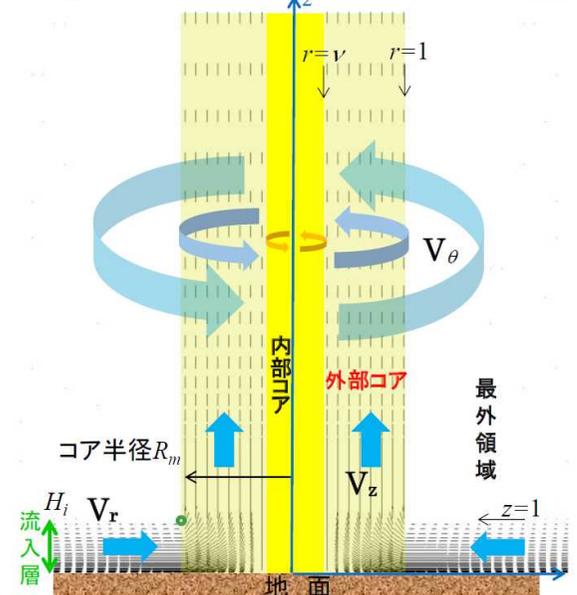
### ランキンモデル

- ・簡易な式により風速場を表現できる。
- ・流れの連続の式を満たしておらず、地上からの物体の浮上・飛散を模擬することができない。
- ・飛散評価を行う場合には、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価する。



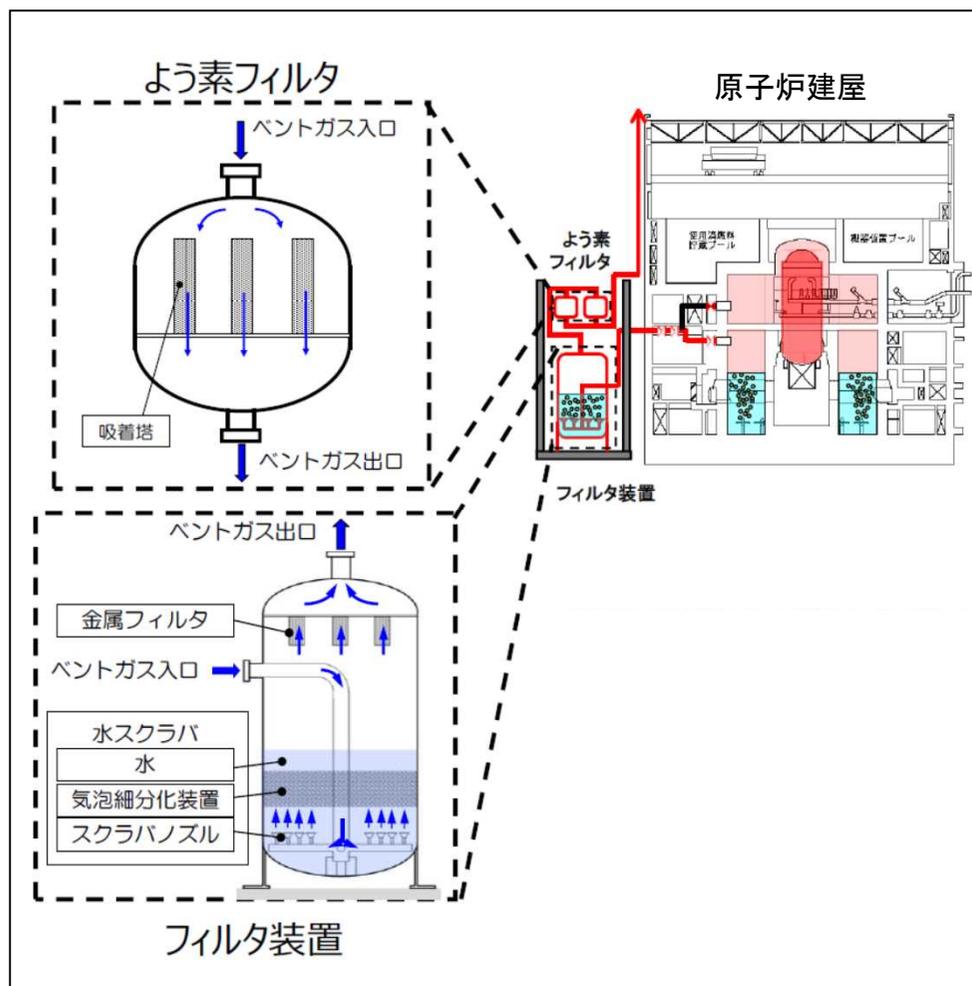
### フジタモデル

- ・地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している。
- ・流体の連続式を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

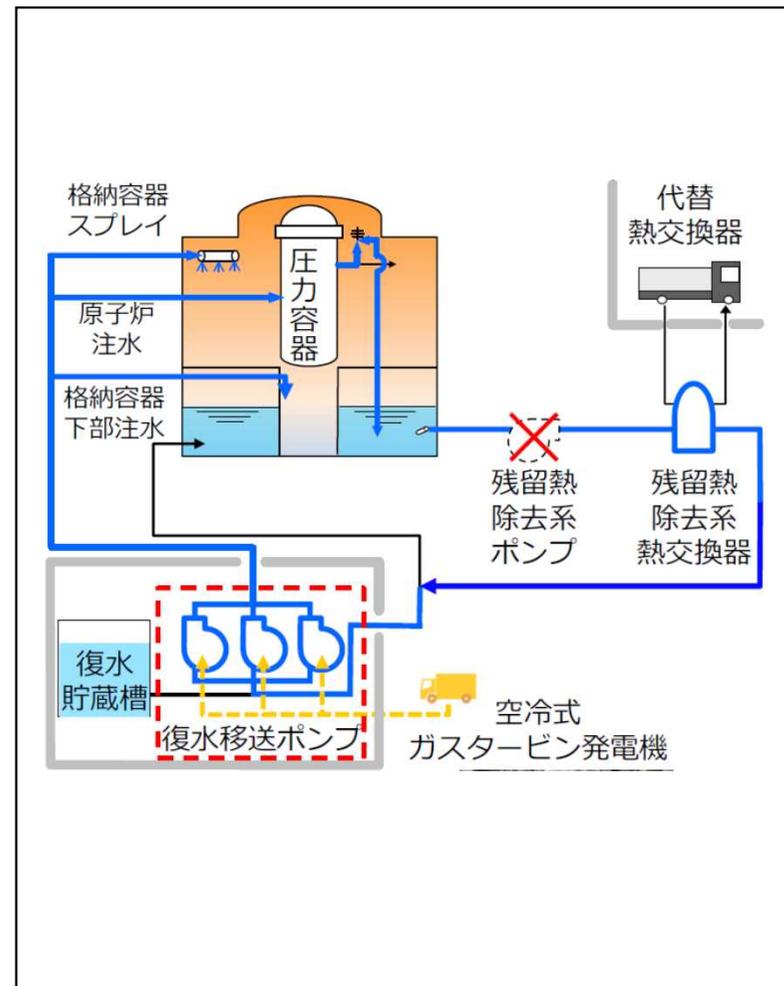


フジタスケール	風速範囲の上限値 (m/s)	竜巻接線風速 (m/s)	竜巻移動速度 (m/s)	自動車の被災状況	フジタモデルの飛散評価結果			ランキン渦モデルの飛散評価結果		
					速度 (m/s)	距離 (m)	高さ (m)	速度 (m/s)	距離 (m)	高さ (m)
F2	69	59	10	car blown off highway (自動車が道路からされる)	9.1	4.6	0.2	20.9	15.8	0.2
F3	92	78	14	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)	29.7	35.3	1.9	45.5	225.1	19.5
F4	116	98	18	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる、又は、かなりの距離を転がる)	50.5	91.7	4.4	57.0	341.6	51.3

変更申請当初（フィルタベントのみ）



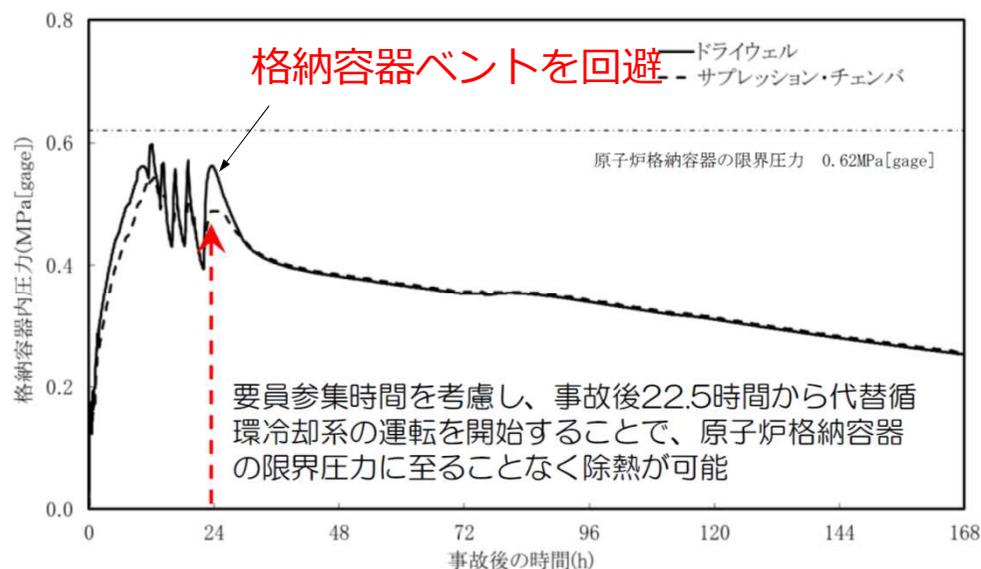
許認可申請最終形（代替循環冷却系を追設）



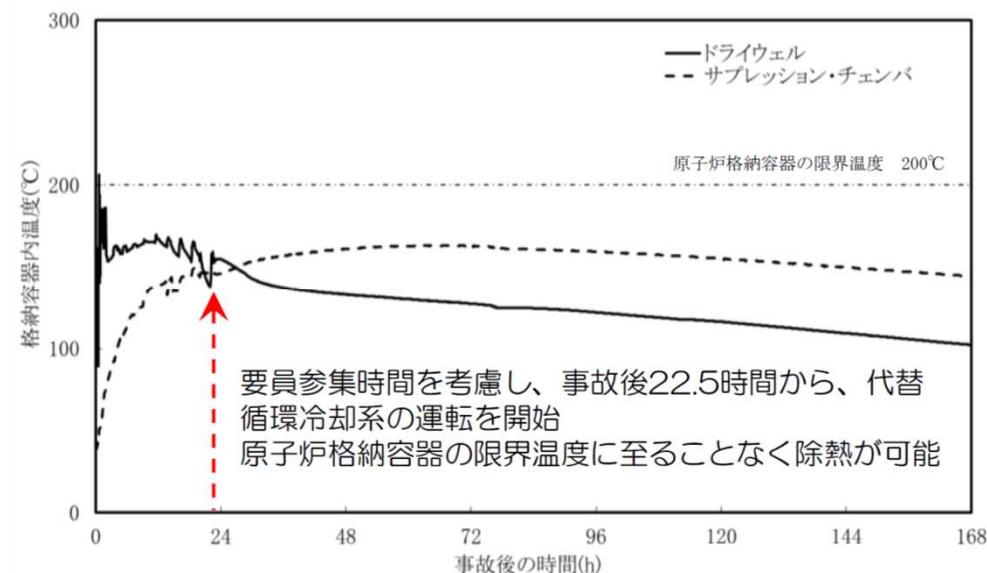
検討当初の格納容器からの除熱はフィルタベントのみであったが、格納容器ベント操作までの冗長性を持たせる等の観点から、代替循環冷却系を新たに導入することを検討。

## ・原子炉格納容器の新冷却システム（代替循環冷却系）を自社開発

- ・当初の検討では、炉心損傷後の格納容器破損防止対策は、フィルタベントを用いて格納容器内で発生した熱を大気へ放出（格納容器ベントを実施）することとしていた
  - ・しかしながら、格納容器による「閉じ込める機能」を強化すべく、さらなる安全性向上策として、新たな冷却システムである代替循環冷却系を開発し、設置することとした
- ⇒代替循環冷却系の導入によって、格納容器ベントを回避する手段を確保



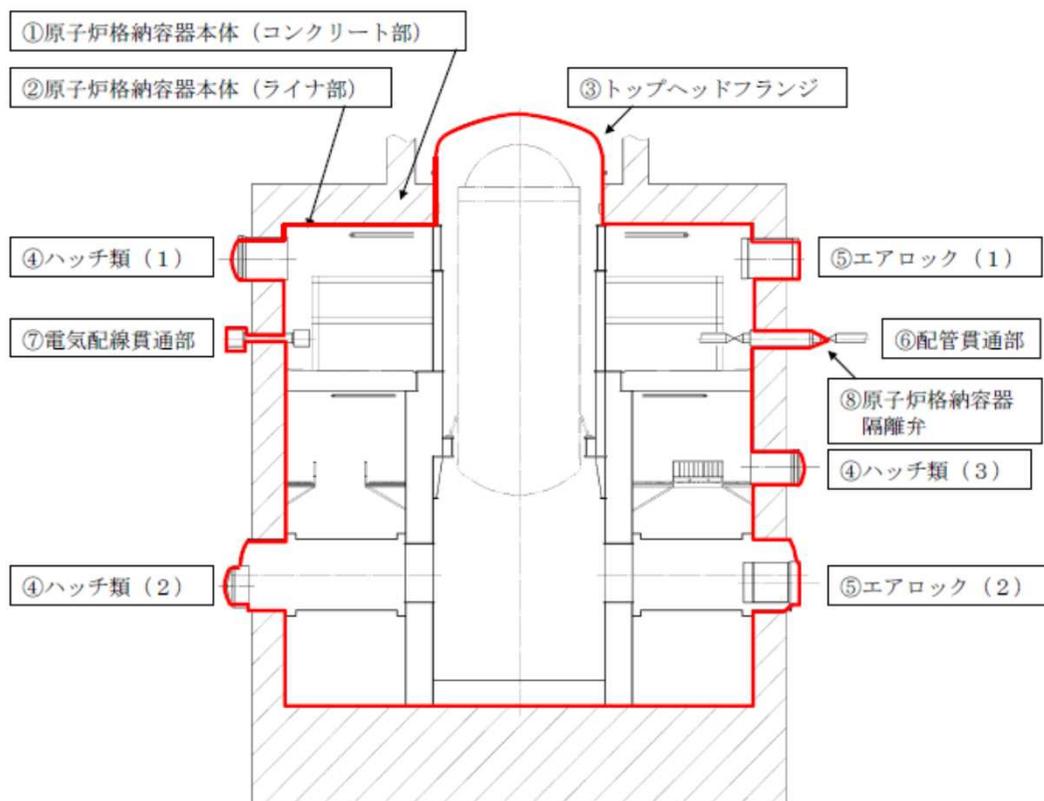
格納容器圧力の推移



格納容器温度の推移

# 主要な論点③ 建屋等による放射性物質の捕集効果

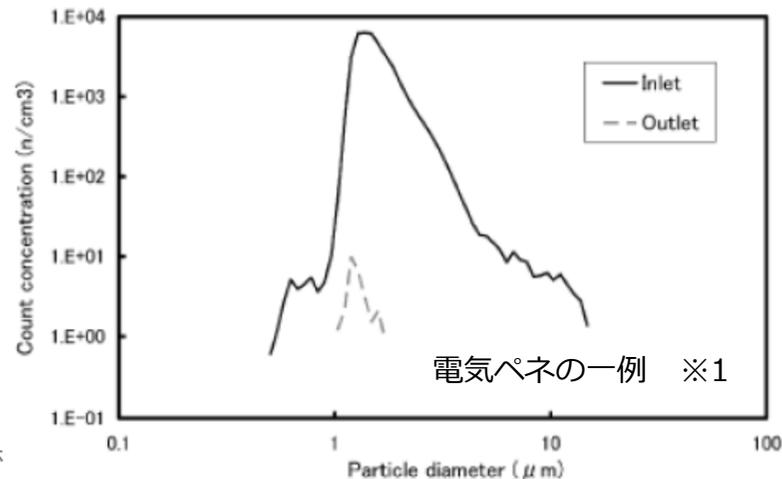
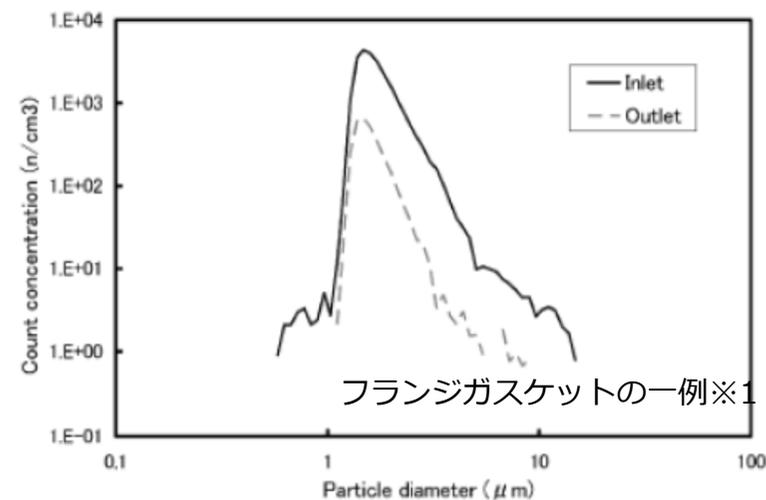
- ✓ 本来は一次格納容器（PCV）に放射性物質は一定程度吸着し、格納容器に放出された放射性物質が全量格納容器に放出されるわけではない。
  - 一次格納容器における放射性物質の捕集効果に期待せず、格納容器貫通孔シール部より格納容器の加圧に応じ放出されると評価としている。



※赤線は原子炉格納容器のバウンダリを示す

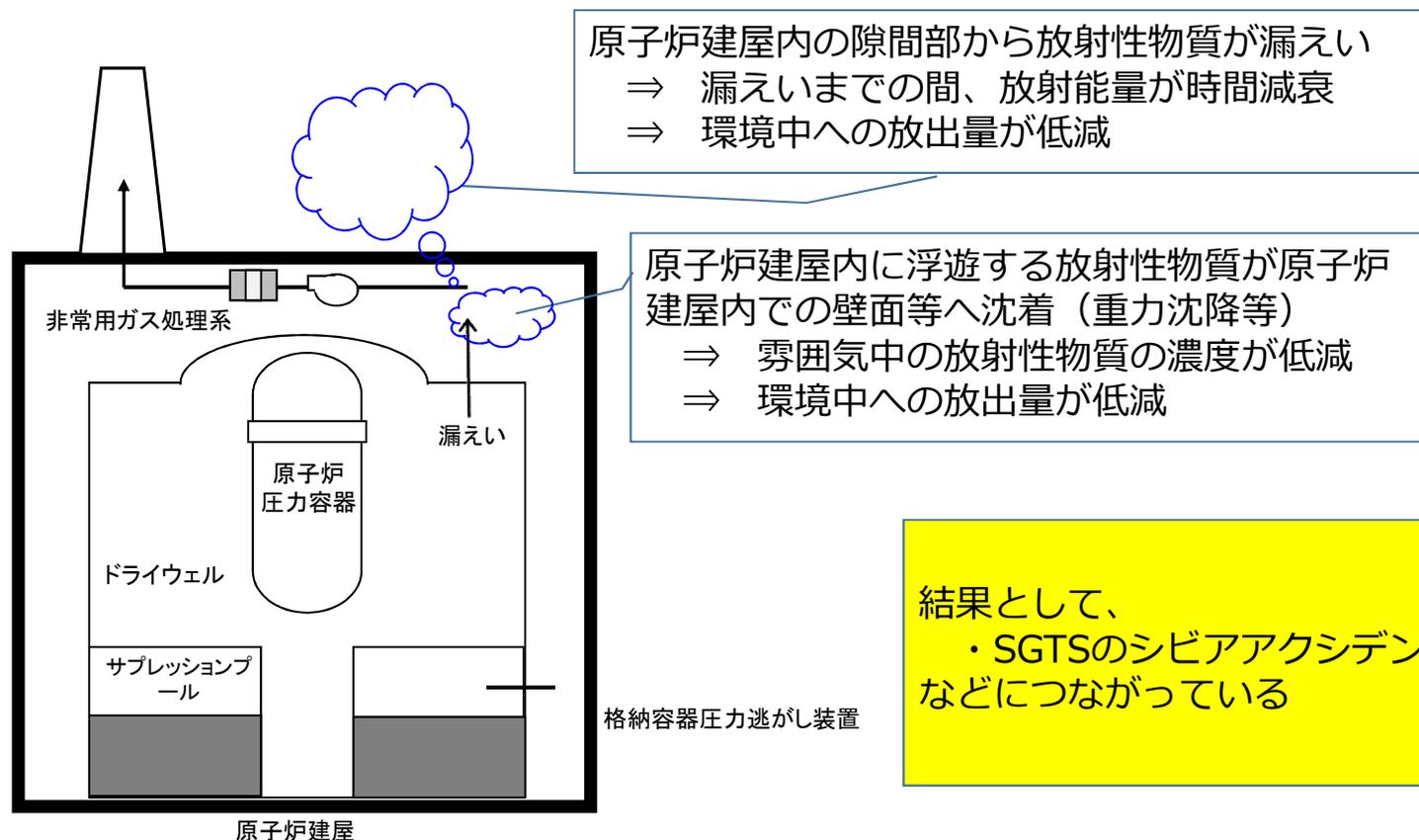
※1 シビアアクシデント時の格納容器貫通部リークパスでのFPエアロゾル捕集効果  
 (II) 貫通部での除染係数と実機への適用」(渡部氏 (Japan Nuclear Energy Safety Organization), 山田氏, 大崎氏 (Toshiba Corporation) 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 8, No. 4, p. 332-343 2009年)

漏えい孔前後のエアロゾル粒子数（実験結果）



### 主要な論点③ 建屋等による放射性物質の捕集効果

- ✓ 本来は二次格納容器（SC）に放射性物質は一定程度吸着し、放射性物質が全量格納容器に放出されるわけではない。
- ✓ 原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め効果の一部に期待しない評価としている。
  - 原子炉建屋内の負圧維持をしていない期間における、原子炉建屋から環境への放出速度を無限大とした評価としている
  - 原子炉建屋内での壁面等への沈着による除去効果に期待しない評価としている。
  - 非常用ガス処理系のHEPAフィルター、チャコールフィルターの除去効果にも期待せず



結果として、  
・SGTSのシビアアクシデント設備化などにつながっている

- (竜巻) JEFスケールの導入
- (竜巻) 気象状況に基づいた竜巻発生ของ事前予測
- (竜巻) リスク論に基づいた竜巻防護対策の検討
- (SA) 試験等に基づくG値の不確かさ解析
- (被ばく) 放射性物質の壁面、地表面等への沈着速度のデータ拡充
- (被ばく) 格納容器内放射性物質の化学反応に関するpH依存性のデータ拡充

- KK67の審査の経験を通じて、外部事象やシビアアクシデントに関連する知見が拡充された。
- 今後の原子力発電所審査においては、得られた課題を克服するとともに、さらなる現象理解や不確実性低減に関する知見を深めていく。

以下、参考資料

## ランキンモデル

無次元座標  $r = R / R_m$

接線風速  $V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速  $V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$

上昇風速  $V_z = \frac{2}{3} V_\theta$

水平方向風速  $V_h = \sqrt{V_r^2 + V_\theta^2} = V_m F_r(r)$

連続の式:  $c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{R_m} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$

$$c = \begin{cases} -\frac{2V_m}{\sqrt{5}R_m} & (r < 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases}$$

ランキン渦モデルでは、 $r < 1$  で連続の式を満たさない。 $(r < 1$  では流体が消滅する)

## フジタモデル

無次元座標  $r = R / R_m, \quad z = Z / H_i$

接線風速  $V_\theta = F_r(r) F_h(z) V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 
$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq \nu) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1 - \nu^2} \left( 1 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1 - z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1 - \nu^2} A (16z^{6/5} - 7z^{8/5}) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1 - \nu^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

$k_0, k, \nu, \eta, A, B$  は定数

$V_\theta$	接線(周)方向風速
$V_r$	半径方向風速(中心方向が正)
$V_z$	上昇風速
$V_m$	最大接線風速
$R_m$	外部コア半径

連続の式:  $c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$

フジタモデルでは  $c = 0$  となり連続の式を満たす。

# 【参考】 FスケールとJEFスケールの比較

## 〈Fスケール〉

竜巻等の突風は地上に設置された既存の風速計から風速の実測値を得ることは困難であることから、建築物等の被害状況から推定する「Fスケール」が考案された。

Fスケールの評価は、**風速幅**で求められる。

表 Fスケール

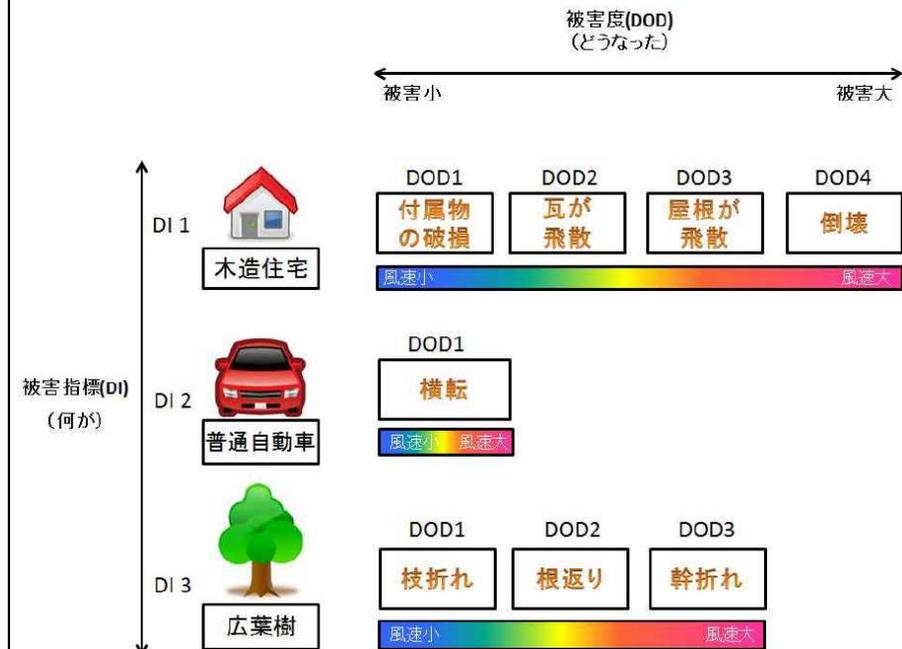
階級	風速	被害の状況
F0	17～32m/s (約 15 秒間の平均)	テレビのアンテナなどの弱い構造物が倒れる。小枝が折れ、根の浅い木が傾くことがある。非住家が壊れるかもしれない。
F1	33～49m/s (約 10 秒間の平均)	屋根瓦が飛び、ガラス窓が割れる。ビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木は幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。
F2	50～69m/s (約 7 秒間の平均)	住家の屋根がはぎとられ、弱い非住家は倒壊する。大木が倒れたり、ねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、車が脱線することがある。
F3	70～92m/s (約 5 秒間の平均)	壁が押し倒され住家が倒壊する。非住家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。汽車は転覆し、自動車はもち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半折れるか倒れるかし、引き抜かれることもある。
F4	93～116m/s (約 4 秒間の平均)	住家がバラバラになって辺りに飛散し、弱い非住家は跡形なく吹き飛ばされてしまう。鉄骨づくりでもペシャンコ。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十メートルも空中飛行する。1トン以上ある物体が降ってきて、危険この上もない。
F5	117～142m/s (約 3 秒間の平均)	住家は跡形もなく吹き飛ばされるし、立木の皮がはぎとられてしまったりする。自動車、列車などがもち上げられて飛行し、とんでもないところまで飛ばされる。数トンもある物体がどこからともなく降ってくる。

## 〈JEFスケール〉

被害指標 (DI) と被害度 (DOD) に分け、30種類のDIとそれに対応する複数のDODを設定した。

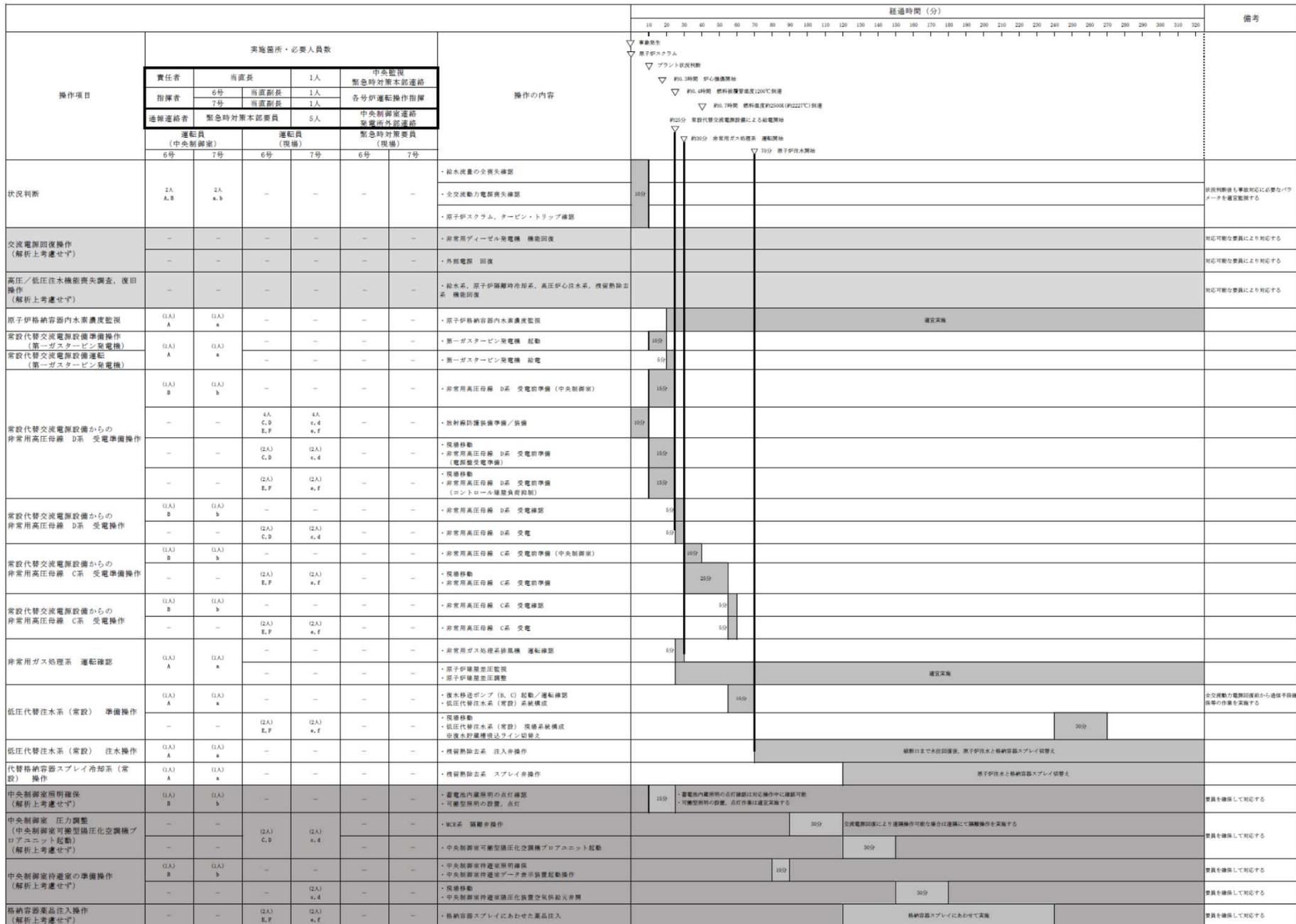
各DI・DODに対応する風速が設定され、従来のFスケールに比べより細かな評価が可能となり、得られる風速の精度も向上した。

JEFスケールの評価は、**風速**で求められる。



出典：日本版改良藤田スケールに関するガイドライン（気象庁作成）

# 【参考】代替循環冷却系に関連するタイムチャート (1/2)





# 【参考】過去の竜巻をJEFスケールを用いて評定した結果 **TEPCO**

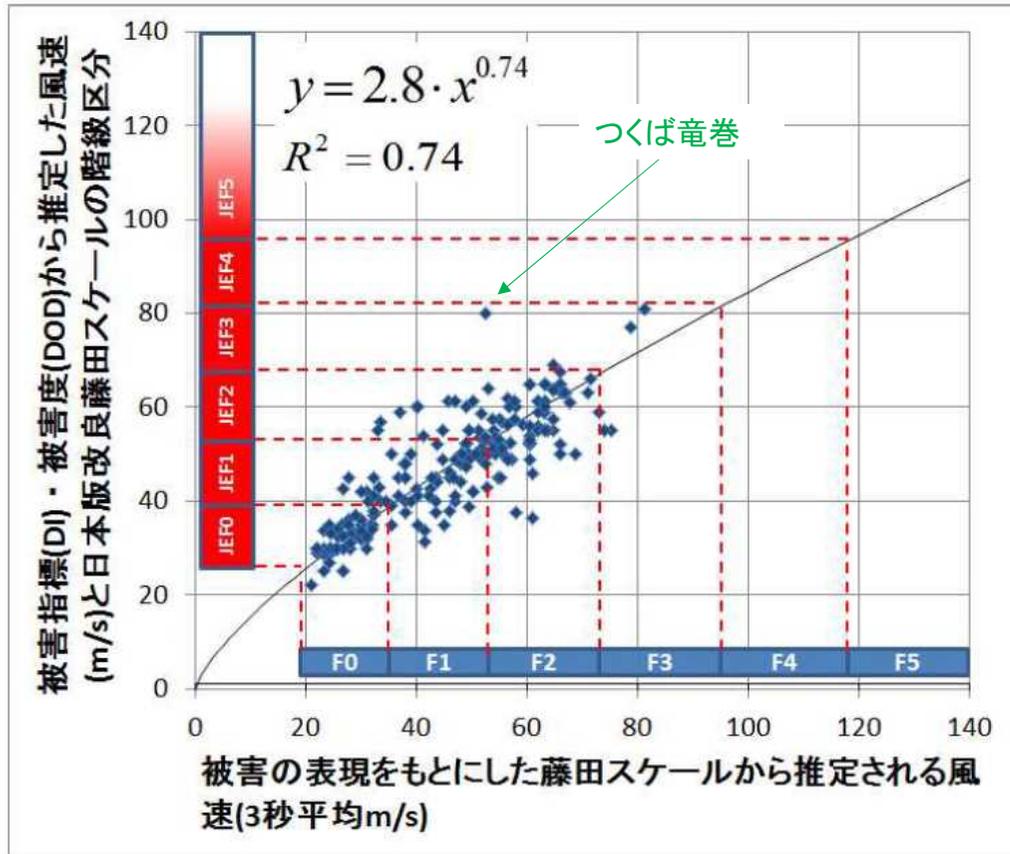


図 Fスケール及びJEFスケールの相関

出典：日本版改良藤田スケールに関するガイドライン（気象庁作成）

- Fスケール及びJEFスケールの相関を調査するために、右図のとおり散布図を作成し、回帰分析によりFスケール及びJEFスケールにより推定した風速の相関について分析した。
- 得られた回帰曲線とFスケールの各階級の風速範囲からJEFスケールの階級と風速の対応を決定した。

基本的に同じ階級になるように設定

例) F2 → JEF2

# 【参考】 事故時の水の放射線分解による可燃性ガス発生割合（G値）

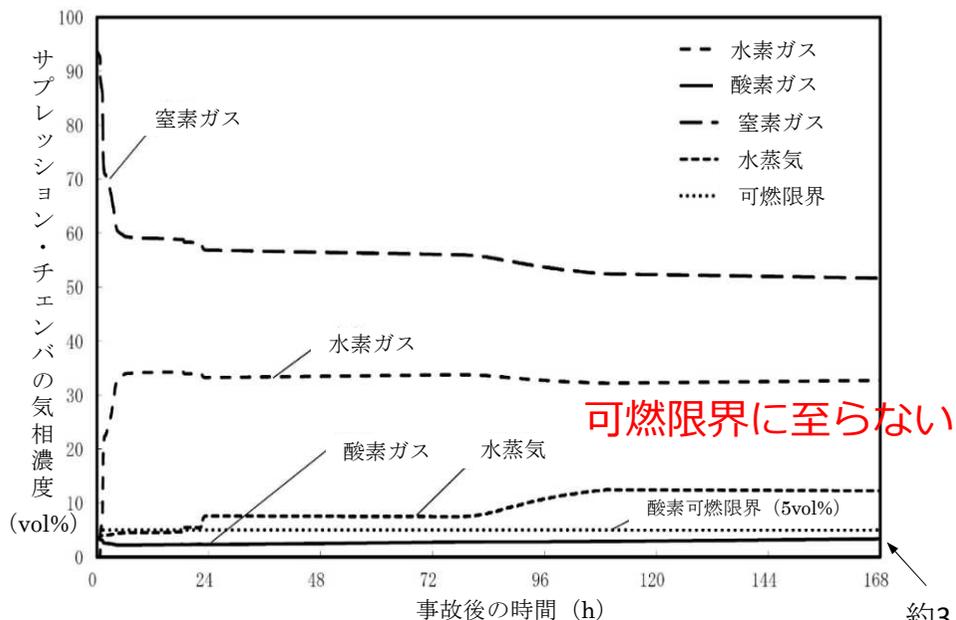
・ 重大事故時には水の放射線分解によって、格納容器内に可燃性ガス（酸素ガス、水素ガス）が蓄積する可能性があるが、その発生割合（G値）には不確かさがある。

① 最新の実験（電共研）ベースのG値 → 水素ガス：酸素ガス=0.06：0.03

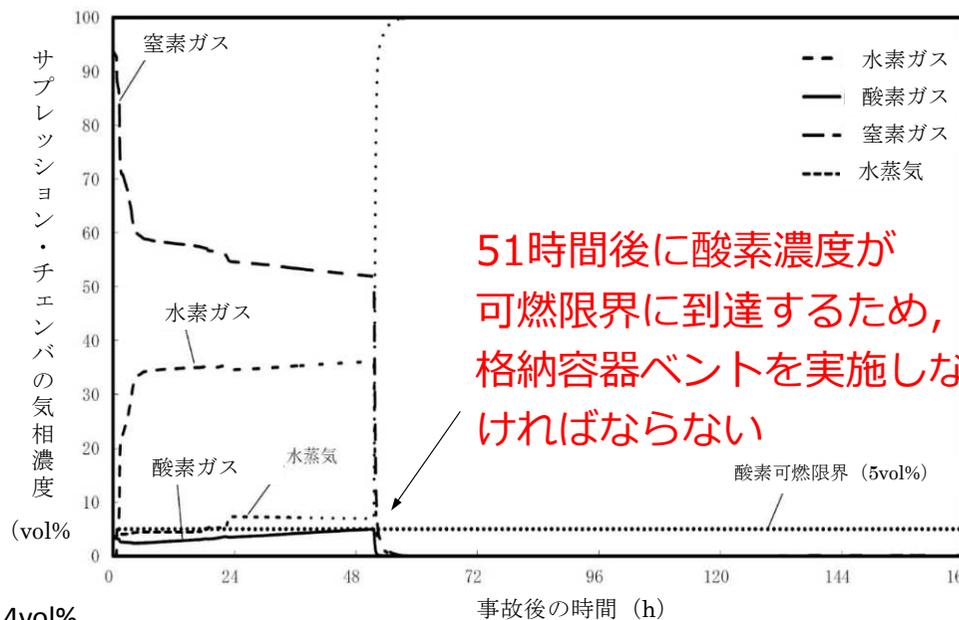
② 従来の設計基準事故ベースのG値 → 水素ガス：酸素ガス=0.4：0.2

・ 柏崎刈羽原子力発電所6, 7号機の安全審査においては、最新の実験に基づくより現実的なG値（上記①）と従来の設計基準事故に基づくG値（上記②）を用いた評価結果とを合わせて、評価の妥当性が審査された。設計基準事故に基づくG値の場合は、事象発生約51時間後に格納容器内の可燃性ガス（酸素ガス）濃度が可燃限界（5vol%）に至り、格納容器ベントを実施することになる。

・ G値については、実験においてもばらつきが確認されたこと、及びG値に影響する事故時の格納容器内の環境には不確かさがあるため、今後詳細な実験などで確認が必要



可燃性ガスの濃度推移  
(最新の実験に基づくG値の場合)



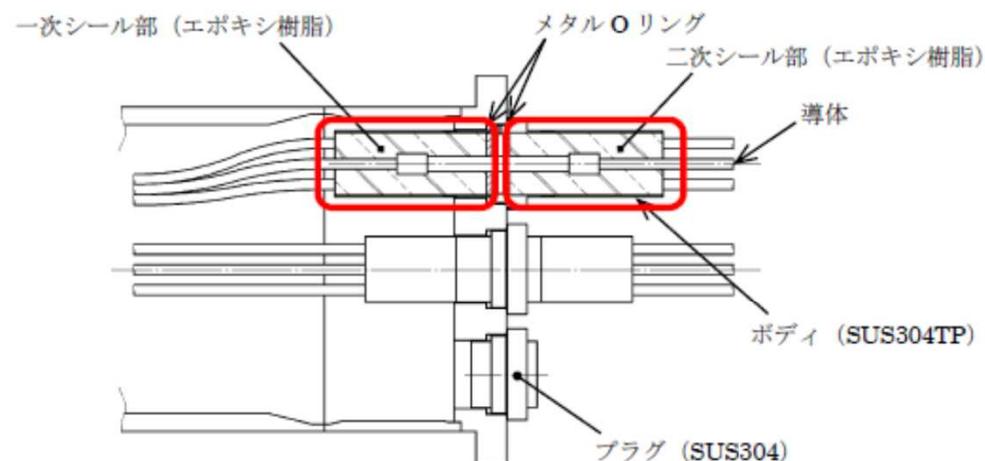
可燃性ガスの濃度の推移  
(許認可G値の場合)

51時間後に酸素濃度が  
可燃限界に到達するため、  
格納容器ベントを実施しな  
ければならない

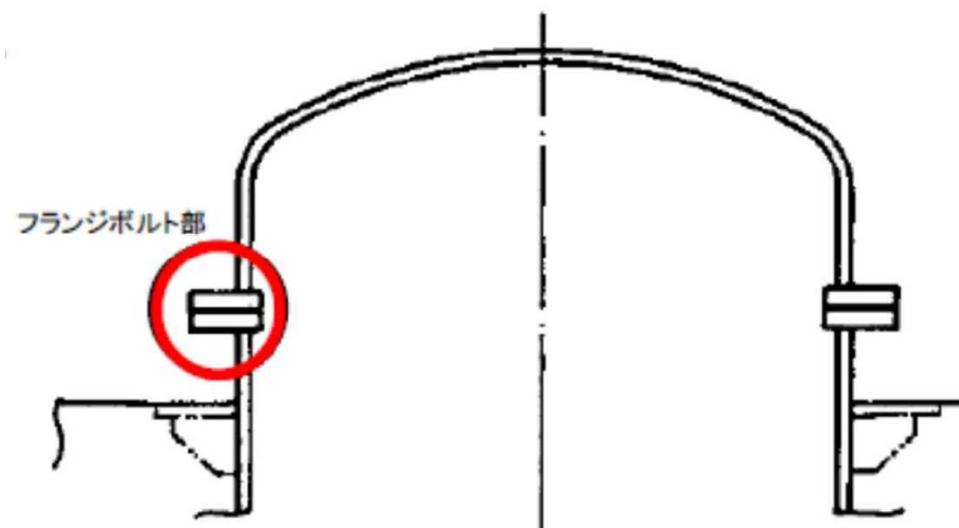
# 【参考】貫通部DF評価の例

Test piece	Overall DF (-) (0.5~5 μm)
<b>Low voltage module</b>	
0.9 mm <sup>2</sup> (a)	36,000*
0.9 mm <sup>2</sup> (b)	1,300
0.9 mm <sup>2</sup> (c)	700
0.9 mm <sup>2</sup> (d)	2,100
0.9 mm <sup>2</sup> (T/C) (a)	260
0.9 mm <sup>2</sup> (T/C) (b)	160
Coaxial cable	340
100 mm <sup>2</sup>	340
2 mm <sup>2</sup>	26**
-----	
Average	4,500
Average <sup>a)</sup>	740
<b>Flange gasket</b>	
Semi-round gasket (a)	14
Semi-round gasket (c)	10
Semi-round gasket (d)	14
Semi-round gasket (e)	12
Groove & tongue gasket	18
-----	
Average	14

<sup>a)</sup> Except for both maximum value (\*) and minimum value (\*\*).

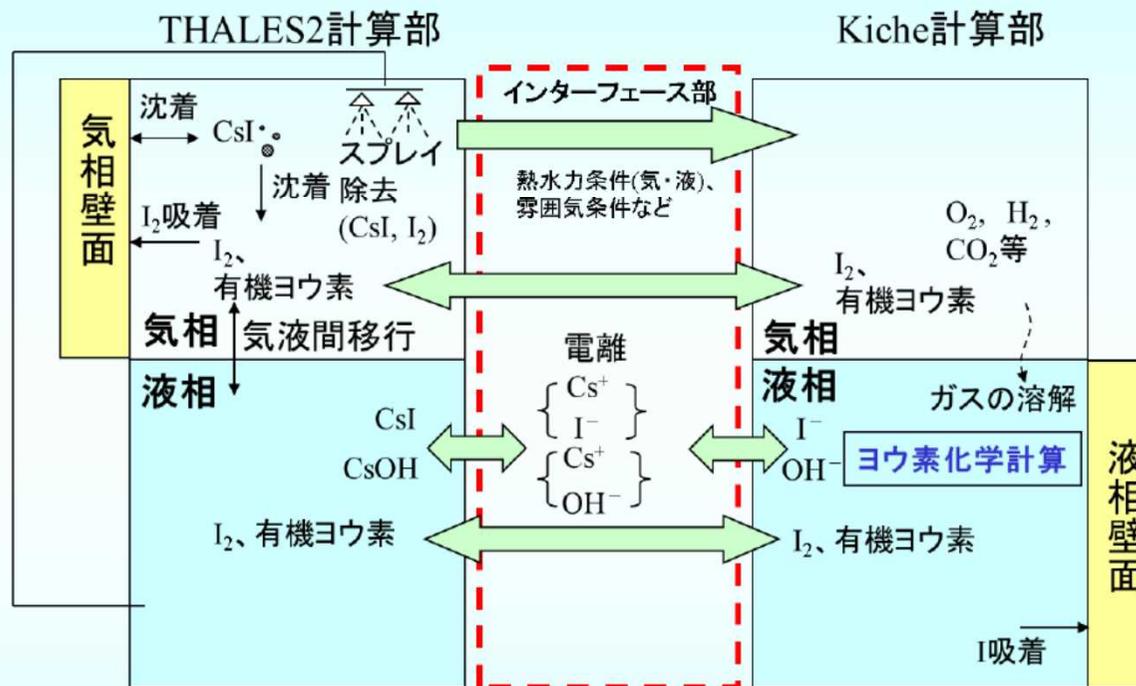


低電圧用モジュール（低電圧動力用及び計測制御用）



## THALES2/Kicheコード連携解析手法

⑤



- 炉心損傷を含む主要なSA現象の扱い
- 安全・緩和系の作動
- 放射性物質・構造材等の複雑な移行・沈着挙動等

- 液相反応(気体状ヨウ素生成の主要過程)
  - 水の放射線分解
  - 無機ヨウ素反応(I<sub>2</sub>生成・分解)
  - 有機ヨウ素反応(Org-I生成・分解)等
- 有機物のペイント壁からの溶出・放射線分解
- 酸生成に伴うpH低下等



(出典 : [https://www.jaea.go.jp/04/anzen/archives\\_seikahoukoku/h25/25-4.pdf](https://www.jaea.go.jp/04/anzen/archives_seikahoukoku/h25/25-4.pdf))