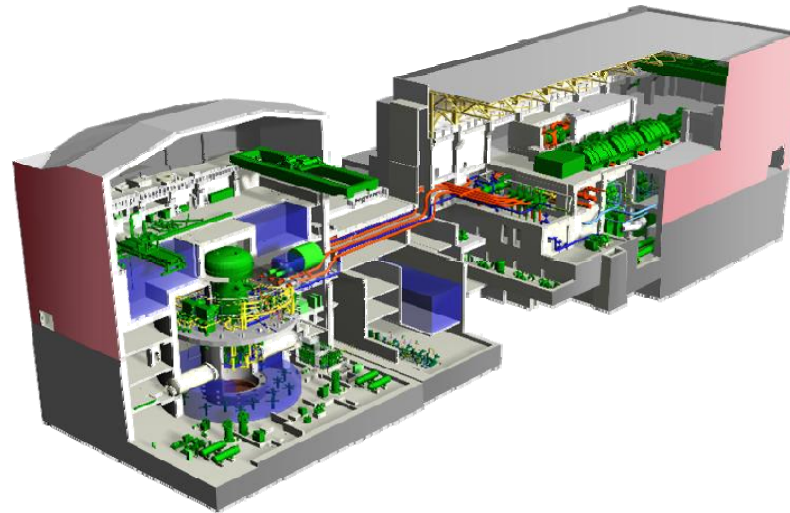


## 世界標準と安全設計 について ～原子力エンジニアからの一提案



2010年9月17日

日本原子力学会 2010年秋の大会  
原子力安全部会企画セッション

(株)東芝  
佐藤 崇

## Section-1 Beyond DBA に関する世界標準の状況

---

### ◆ Beyond DBA に関する安全設計の世界標準 (de facto) の状況

- EPR、AP1000、ESBWR、VVER1000等における対応状況

### ◆ ルールとしての世界標準 (de jure) の状況

- ルールを作った者が標準になる。

### ◆ WENRAの概要

- $CDF < 10^{-5}$  / 炉年を判断基準とせず、選択された多重故障への対策を要求。ただし、適切に正当化される場合は対策設備への要求緩和は容認。
- SA対応設計を要求。CV破損に至る物理現象を実質的に削除すること。
- 確率によるカットオフの排除(明確な対策の要求)
- SA時No Evacuation を要求。判断基準は5-50mSv。
- CVの長期(数ヶ月から数年)の破損防止を要求。

### ◆ AM策とは何が違うのか。

- AM策はAdd-on。後から追加したバックフィット対策。

### ◆ 既設炉にバックフィットしなくて良いのは何故か。

- 新規炉SA対策は、Build-in。
- 単なる安全対策ではなく、当初設計から組み込まれた、簡素化・合理化策と一体化された対策。新規炉としてより洗練された設計とした結果安全性も向上する。

### ◆ 日本独自の優位性は何か。

- 優れた耐震・免震技術

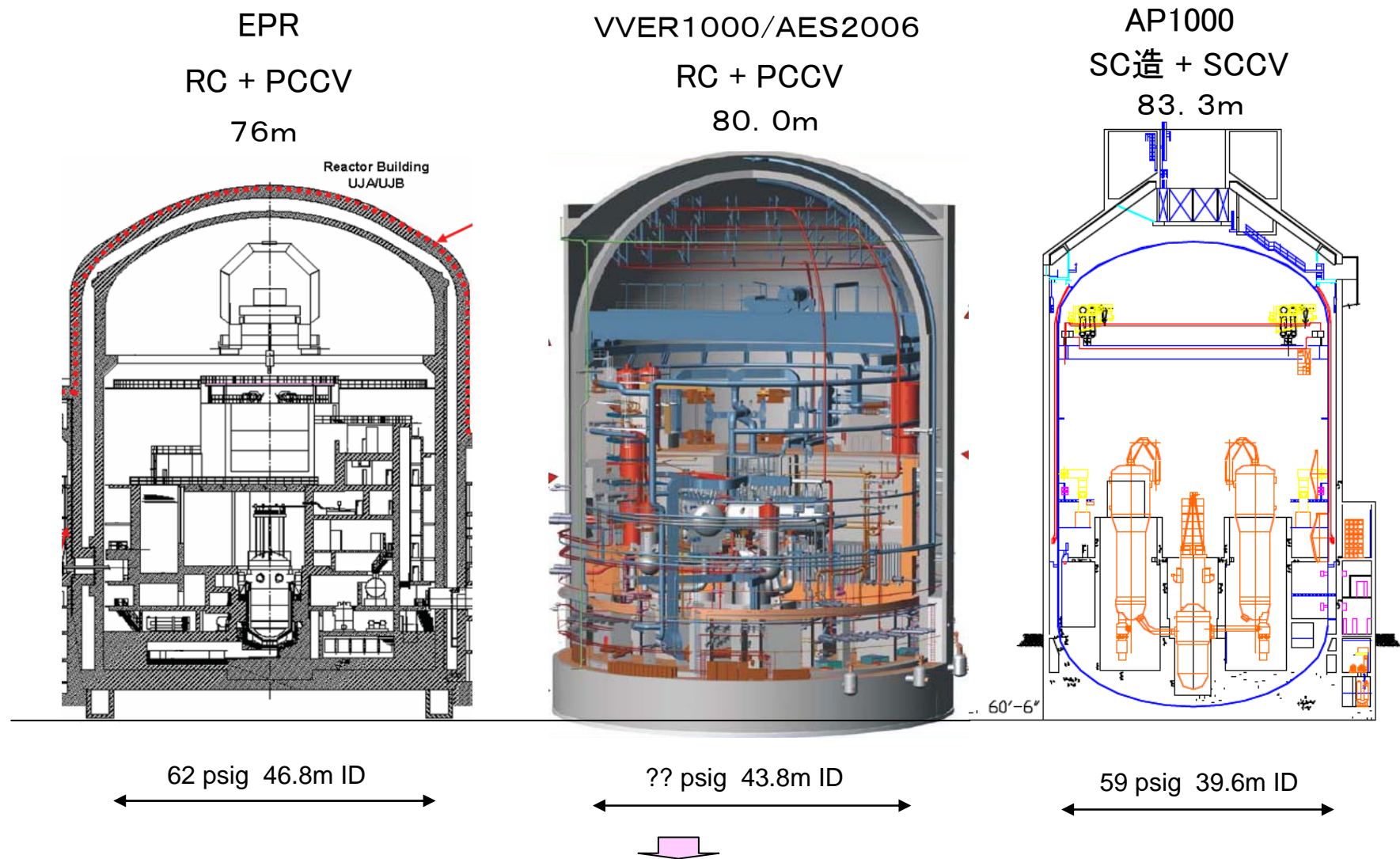
# 新規炉の安全目標／めやす線量の状況

	NRC/URD	EUR	IAEA	WENRA	STUK
炉心損傷頻度(CDF)	$<10^{-4}$ /炉年 (SRP19.0) $<10^{-5}$ /炉年 (URD)	$<10^{-5}$ /年	$<10^{-5}$ /炉年 (INSAG-12)	$10^{-5}$ /炉年は既設で達成済みで使用しない。 選択された多重故障事象に対して炉心溶融進展を防止すること。	$<10^{-5}$ /年 (YVL 2. 8)
大規模放出頻度(LRF)	$<10^{-6}$ /炉年 (Safety Goals, SRP19.0)	CLIを超える頻度 $<10^{-6}$ /年 CLI: Criteria for Limiting Impact (ICRP63相当) 早期放出及び大規模放出の頻度は $10^{-6}$ /年を十分に下回ること。	DCH, 水蒸気爆発、水素爆轟による早期破損; 長期におけるベースマツト溶融貫通、過圧破損; 停止時開放; SGTR及びインターフェースLOCAのようなCVバイパスを設計で実質的に削除 (NS-G-1.10)	~0 (確率によるカットオフを認めない。) 早期放出も大規模放出も実質的に削除されること。 左記IAEA要求も言及。	$<5 \times 10^{-7}$ /年 (YVL2. 8)
条件付き破損確率(CCFP)	$<0.1$ (SRP19.0)		~0 (実質的に削除)	~0 (実質的に削除)	
格納容器健全性維持時間	~24時間 (SRP19.0)			長期間 (安全機能維持が必要な期間、数ヶ月から数年)	
DBA(LOCA仮想事故相当)あるいはSAのめやす線量	2時間で250mSv (10CFR100)	CLI: Criteria for Limiting Impactを適用。 ・早期放出時800m以遠は緊急時対応は最小限(不要)であること。 ・約3km以遠はNo Delayed Action(退避不要)であること。 ・800m以遠は1年以上の移住が不要であること。		2日間で5-50mSv (永久的移住禁止、緊急時避難禁止、長期食料制限禁止、限定的屋内退避、十分な時間余裕)	
緊急時計画発動	50mSvで緊急時避難		50mSvで緊急時避難	2日間で5-50mSvで緊急時避難 (Directive 96/29/Euratom 1996)	
特徴	AM策で対応可能	DEC対応設備が必要	SA対策が必要	SA対策が必要	

# ルール(de jure)の状況と安全設計の対応状況

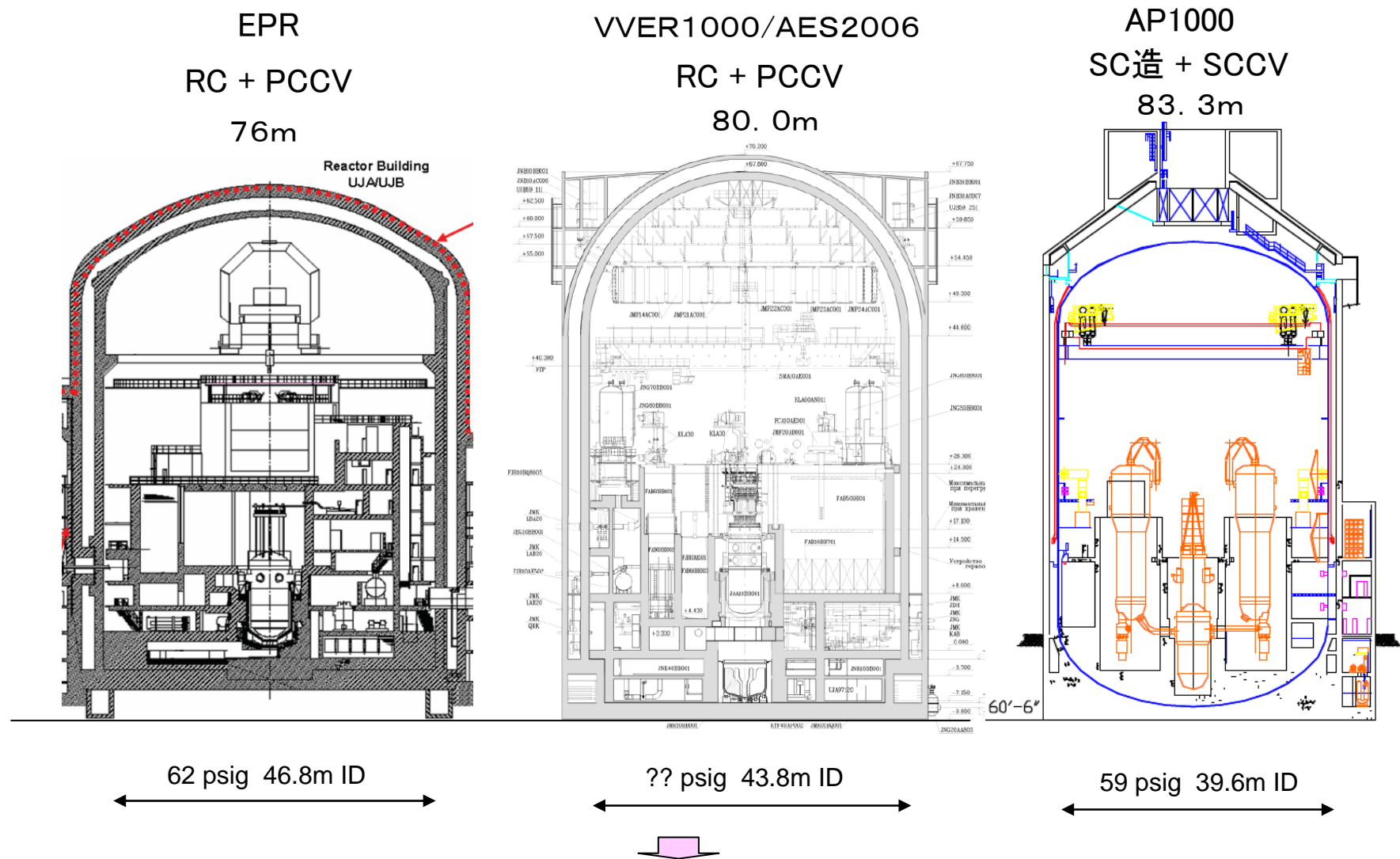
	NRC/URD	EUR	IAEA	WENRA	STUK
航空機落下／激突 (impacts)	新規炉に <b>大型旅客機激突</b> 対策を要求(10CFR50.150 Consideration of Aircraft Impacts for New Nuclear Power Reactors 6/09) <b>AP1000は遮蔽建屋をSC 造で設計強化。</b>	航空機落下対策は確率論的 手法に基づく。 <b>設計ベースは 戦闘機の落下</b> で壁厚は1.3 mで十分との記述があるが、 実際にはプラント別に荷重曲 線を設定して決定している。 因みに <b>EPRは1.8m二重C V</b> 。振動の影響も考慮。		SA対策との統合及びシナ ジーを要求。	Finland 6の設計で要求。 <b>EU ABWRはR/Bを設 計強化。</b> APWRとAPR1400の一 重PCCVは適合と判断。
コアキャッチャー／IV R／デブリ拡散面積	要求はURDの0.02m <sup>2</sup> ／ MWのみ。これを満たして いるのはUS ABWRだけ。 <b>AP1000はIVRで対応。</b> <b>ESBWRはコアキャッ チャーで対応。</b>	IVR or (0.02m <sup>2</sup> ／MW or コア キャッチャー)。事前水張りの オプションなし。 <b>EPRはコアキャッチャー。</b>	CV破損の事象を実質 的に削除	CV破損の事象を実質的 に削除。確率によるカット オフは認めない。	CVの底部溶融貫通防止 及びデブリ冷却手段を要 求。(YVL1.0) <b>EU ABWRはコアキャッ チャーを設置。APWRとA PR1400にコアキャッ チャーの追加設置を要求。</b>
水素ガス対策	100%AFC。イグナイター ／イナーティング	LOCAピーク圧＋100%AF C。 <b>EPRはPAR。</b>			100%Zr (YVL1.0 3.3 Containment function)
長期格納容器冷却	AP1000はPCS、ESBW RはPCCSで実施。	<b>EPRはSA専用HRS2系統 で実施。</b>			
炉内残留デブリ冷却 (過温破損防止)	AP1000、ESBWRはGD CSで実施。	<b>EPRはSA専用HRS2系統 で実施。</b>	—	—	—
SBO対策	動的炉はAlternate ACを 要求。静的安全炉はIC、静 的RHRで対応。	EPRはSBO DGを2基設置。 EUR自体はDEC対策にSF は要求しないことを明記。		多重故障としてSBOを想 定し炉心溶融への進展防 止を要求。	
N-2	—	EPRはN-2	安全保護系のみN-2 を要求。	—	<b>火災＋N-2を要求。(実 質N-3、YVL4.3 Fire protection at a nuclear plants)</b>
静的グレース・ペリオ ド	AP1000、ESBWRは3日	EPRは12時間。それまでは SAHRSを起動不要。	—	—	EU ABWRは1日
SA時緊急避難不要	50mSv以上で緊急避難発 動		50mSv以上で緊急避 難発動	EPRはSBO DG、SA専 用CS、アニュラス浄化系 で緊急避難不要が可能。	

# 航空機落下対策の実施例



二重障壁構造でCVの貫通防止と一次系機器への振動を抑制

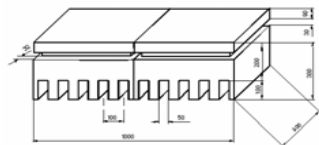
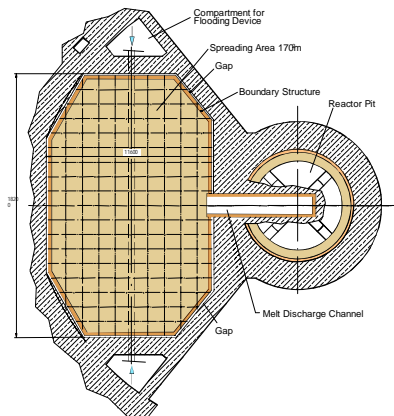
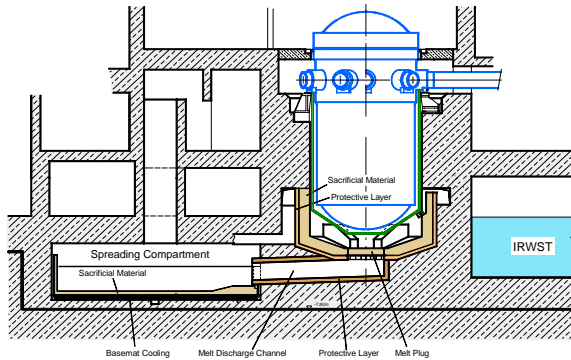
# 航空機落下対策の実施例



二重障壁構造でCVの貫通防止と一次系機器への振動を抑制

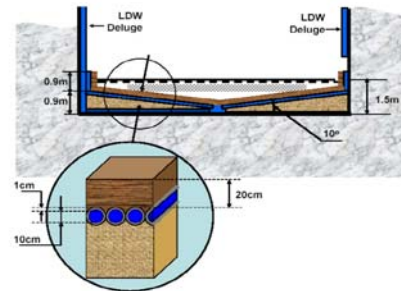
# コアキャッチャー／IVRの実施例

## EPR Large 170 m<sup>2</sup> Core Catcher

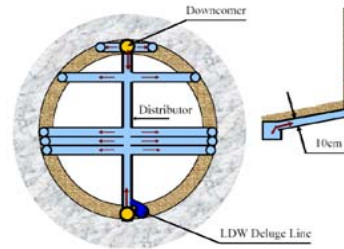


## GE ESBWR BiMAC (Basemat inter Melt Arrest and Coolability device)

### BiMAC Configuration



### BiMAC Flow Path



## AP1000 IVR (In-Vessel Retention)

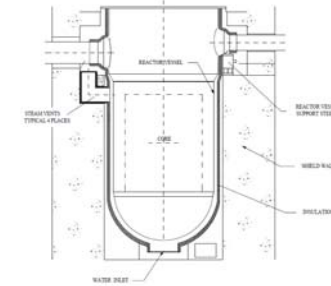
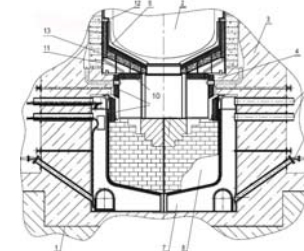
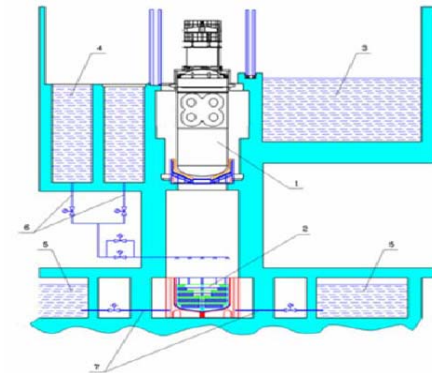


Figure 4 - AP1000 Severe Accident In-vessel Retention

## VVER1000

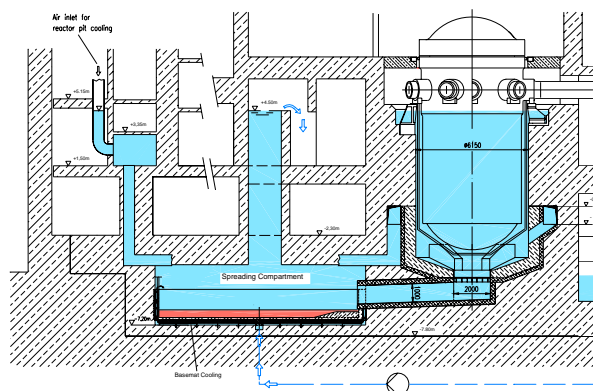


EURはIVRもしくはコアキャッチャーを容認。  
事前水張りの実施例は海外では存在しない。



# 炉内残留デブリ冷却(長期過温破損防止)の実施例

EPR

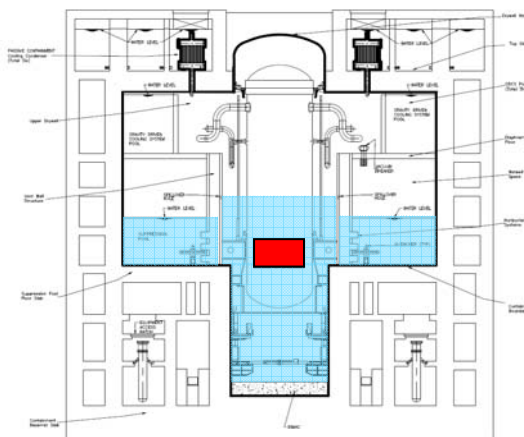


EPRは意図的に冠水機能を持たせ炉内残留デブリを冷却。  
12時間以内にSA専用のHRSを起動させて冠水を行う。

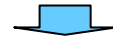


SBO DG、SAHRS等の動的システムの起動とCSモードからの切替が必要。

ESBWR

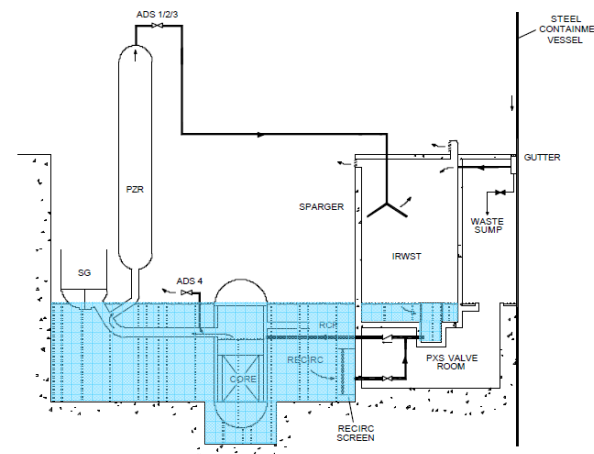


ESBWRはSA時にGDC S水を下部DWにドレンさせるので結果的に炉心部分も冠水する。



静的安全炉は自然に冠水しその後も放置可能。

AP1000



AP1000はIVRのためRPVノズル位置まで冠水する。  
最終的にRPVはほぼ冠する。

# SA時緊急避難なしのための対策実施例(1)

- ◆ 緊急避難なしの判断はCV破損ではなく、**<50mSv**。各国の防災指針で<50mSvが規定されている。
- ◆ CVが健全でもSGTS、アニュラス浄化系、格納容器スプレー等なしに<50mSvを達成することは困難。更新ソース・タームを使用しても困難。

LOCA時(仮想事故相当)の被ばく線量 (DCD記載値)

プラント 102%熱出力	ソースターム	クレジットを採る低減機能	標準サイト $\chi/Q$ @ EAB (s/m <sup>3</sup> )	LOCA時最悪2時間線量 (TEDE)
ESBWR 4590MWt	更新ソース・ターム ハロゲン放出率 30% 有機ヨウ素割合 0.15	PCV漏洩率 0.35%/d 建屋漏洩率 ~105%/d	2.00E-3	224 mSv (22.4 rem)
AP1000 3483MWt	更新ソース・ターム ハロゲン放出率 40% 有機ヨウ素割合 0.15	CV漏洩率 0.1%/d (<1d) 0.05%/d (>1d)	5.10E-4	246 mSv (24.6 rem)
US EPR 4612MWt	更新ソース・ターム ハロゲン放出率 40% 有機ヨウ素割合 0.15	CV漏洩率 0.25%/d (<1d) 0.125%/d (>1d) アニュラス浄化系フィルター効率 99% <b>格納容器スプレー除去効率 0%</b>	2.04E-3 ~ 1.82E-3	122 mSv (12.2 rem) <b>格納容器スプレーを使えば 容易に低減可能。</b>

従来の動的安全炉もSGTS、アニュラス浄化系、格納容器スプレーはいずれも電源が必要なので、SA時にはクレジットを取れない。**WENRAの安全目標はかなり硬直した要求。**



**WENRAの要求するSA時緊急避難なしを満たすためには、SA用被ばく低減対策が必要。**  
WENRAの意図は静的安全炉の欧州進出防止と対策の無いAPR1400等の差別化。

# SA時緊急避難なしのための対策実施例(2)

インドの最新型VVER1000  
Kudankulam, T. N.



Passive Heat Removal System

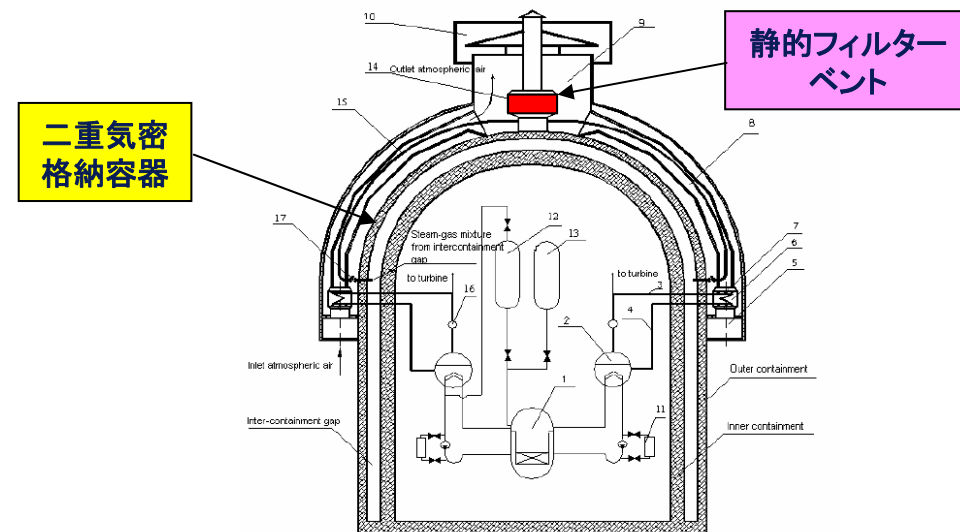


FIG. 1. Containment and the systems of VVER 11000/392 that used natural circulation  
(1 – reactor; 2 – steam generator; 3 – steam path; 4 – condensate path; 5 – inlet circular header; 6 – PHRS heat exchanger; 7 – PHRS slide valve; 8 – PHRS draught tube; 9 – PHRS exit header; 10 – deflector; 11 – quick boron supply system; 12 – HA-2; 13 – HA-1; 14 – filtering unit; 15 – tube of passive filtering system; 16 – steam header; 17 – valve).

## Section-2 日本は世界標準とどう向き合えばよいのか

### ◆ 前門の虎、後門の狼。

- 前門に虎を拒(ふせ)ぎ後門に狼を進(すす)む
- 虎(WENRA・EPR)から逃げると、得をするのはオオカミ(APR1400、VVER1000)。
- 島国ではガラパゴス化の道も

### ◆ 日本は何故国際競争力を失ったのか。

- 液晶テレビ、携帯電話、半導体、家電、パソコン — 障壁(優位性)なき価格競争
- デジタルカメラと携帯電話は何が違ったのか。 — キャリアの存在。日本特有の機能要求。
- 技術移転(漏洩)と為替レート — 高い方から低い方へ水と同じように流出する。
- 他者を差別化できるキーテクノロジー、障壁技術(barrier technology)の欠如。
- Loss of Technology Accident (LOTA)

### ◆ 虎と闘うにはどうすれば良いのか。

- 絶対優位性(absolute superiority)のあるものを作る。
- そうすれば、後は、虎と狼が勝手に喧嘩をしてくれる。

### ◆ ルールを作った者が標準(de jure)になる。

- FIFA、F-1、NBA、WBC
- 10CFR、GDC、EUR、IAEA、MDEP、WENRA

### ◆ 日本が作った世界標準

- K-1、アニメ、柔道、ゲートボール、スポーツ雪合戦
- 魔裟斗(チャンピオン)がいれば本当の世界標準になれる。
- ルールを外国に変更されると世界柔道のようになる。
- アニメは日本人がde factoで作った数少ない世界標準。



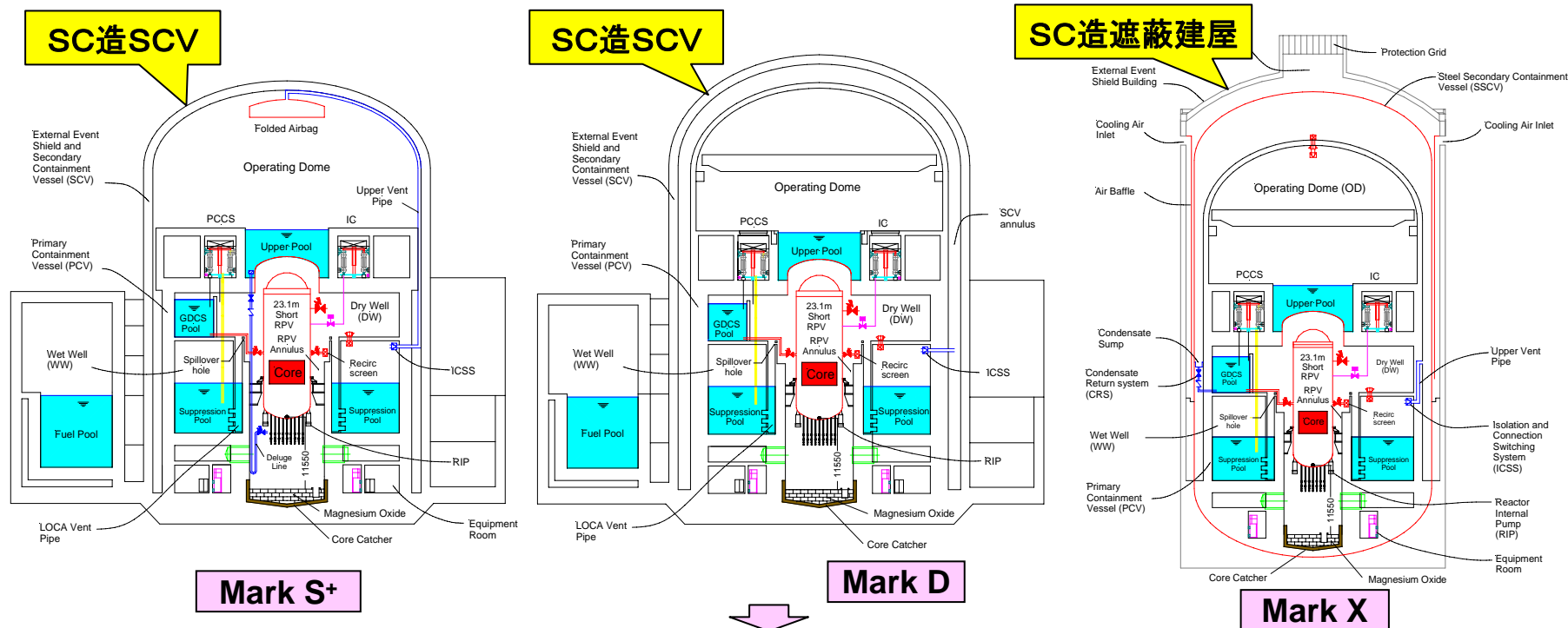
大盛況のアニメ・エキスポ2010 in L. A.  
米国の若者が日本のコスプレを着て日本語を話す。

## Section-3 日本発世界標準を目指す安全設計とは

- ◆ WENRAを超えて前に進(すす)む。前門から世界に打って出る。
- ◆ 日本の独自性を世界の共通利益へ。
  - 優れた耐震・免震技術
  - 地震リスクを低減できるSA対策で世界市場に貢献
  - 1990年以降20年間でM7. 5以上の大地震は世界で86回発生。3ヶ月に1回の頻度。
  - 関東大震災はM7. 9であったが、世界ではM8以上の巨大地震は216回発生。M9以上の超巨大地震も6回発生している。1952年以降でもM9以上が5回発生している。
  - 米国でも1700年に北西部でカスケード地震M9が発生。1811年12月から1812年2月にわたりM7. 5からM8. 3が3回連続でセントルイス近郊(ニューマドリッド地震)で発生。これはインター・プレート地震と呼ばれ発生メカニズムが解明されていない。
  - 中国でも巨大地震が多発している。1556年の華県地震M8. 3(西安近郊)では、死者／不明者83万人以上を記録し世界史上最悪の大震災になっている。
  - 2001年にインド西部で発生したインド西部地震M7. 7は2万人以上の死者／不明者を出し、これもインター・プレート地震で発生メカニズムが解明されていない。
- ◆ 世界の主流は動的PWR – EPR、APWR、ATMEA, APR1400、VVER1000、CNP1000
  - 動的PWRは競合の多い平易化技術。
  - 多数の国とメーカーが同一技術で厳しい競争。
  - WENRAで規制障壁を設けても動的安全PWRは全て設計強化で対応可能。(APR+等)
  - 即ち、WENRAでは、欧州は諸外国の動的安全PWRを差別化できない。
  - 虎と狼が熾烈な競争をする世界に – ミサイル・航空母艦・原潜との抱き合わせ販売 and/or 首脳外交・国家融資等が必要に
- ◆ BWRは競合の少ない障壁技術。
  - 限られた国とメーカーのみに存在する障壁技術。
  - BWRへのインセンティブが高まった場合でも、追撃できる狼はいない。
  - 課題は、虎に勝てるインセンティブの高いTruly Super BWR(TSBWR)と呼べるものを提供すること。

# Section-4 ケース・スタディ (TSBWWRの場合)

SC造二次格納容器(SCV)／遮蔽建屋により合理化しつつSA時緊急避難なしを達成



SC造による建屋合理化・工期短縮 → 二重気密格納容器＋航空機落下対策  
 静的安全系による簡素化合理化 → SA対策に活用＋AM策削除合理化

CV破損実質削除のSA対策、SA対策と航空機落下対策の融合、SA時緊急避難なし → WENRAに完全適合  
 巨大地震、大津波、巨大ハリケーン等の自然災害時の静的グレース・ペリオドを大幅強化 → WENRAを超越

# TSBWRの主な特徴

## ◆ 中型から大型BWRに適用可能

- Mark S+ 及び D は1,830 MWe まで可能
- Mark X は ~1,000 MWe まで可能

## ◆ DBAに対してもSAに対しても二重気密格納容器で緊急避難不要

- SA時と仮想事故時の被ばく線量を50mSv以下に制限可能。
- SGTsと耐震スタックが不要に。スタックの耐震SS化が不要になる。

## ◆ SA時物理現象等によるCV破損を実質的に削除した静的安全格納容器

- 長期過圧破損防止 – PCVベントなしにPCV圧力を設計圧以下に制限し過大漏洩を防止
- 長期過温破損防止 – 炉心上部まで自然に冠水し炉内残存デブリを冷却(AM注水策不要)
- マット熔融貫通防止 – 0.02m<sup>2</sup>/MWt以上のデブリ拡散面積 and/or 放射状チャンネルコアキャッチャー
- DCH防止 – ADS and/or DPVにより高圧シーケンスを削除
- 水蒸気爆発防止 – 下部DWへの事前水張りの禁止・不要化
- 水素爆燃・爆轟防止 – 窒素封入によりイグナイターなしで完全防止
- 大型航空機落下対策 – SC造二次格とRCCVの二重障壁機能で貫通だけでなく、振動・燃料流入火災も防止

## ◆ Build-in Passive Safety System (BIPSS)により静的グレース・ペリオドを確保

- ICにより地震時SBO (Seismically Induced SBO: SISBO)に対して3日間の炉心冷却が可能
- PCCSによりSA時に3日間のCV冷却が可能
- Mark Xは空冷機能により無限時間のグレース・ペリオドを確保。(permanent grace period)

## ◆ Gen V への準備 – Gen III. 5より安全でGen IVよりも大出力。

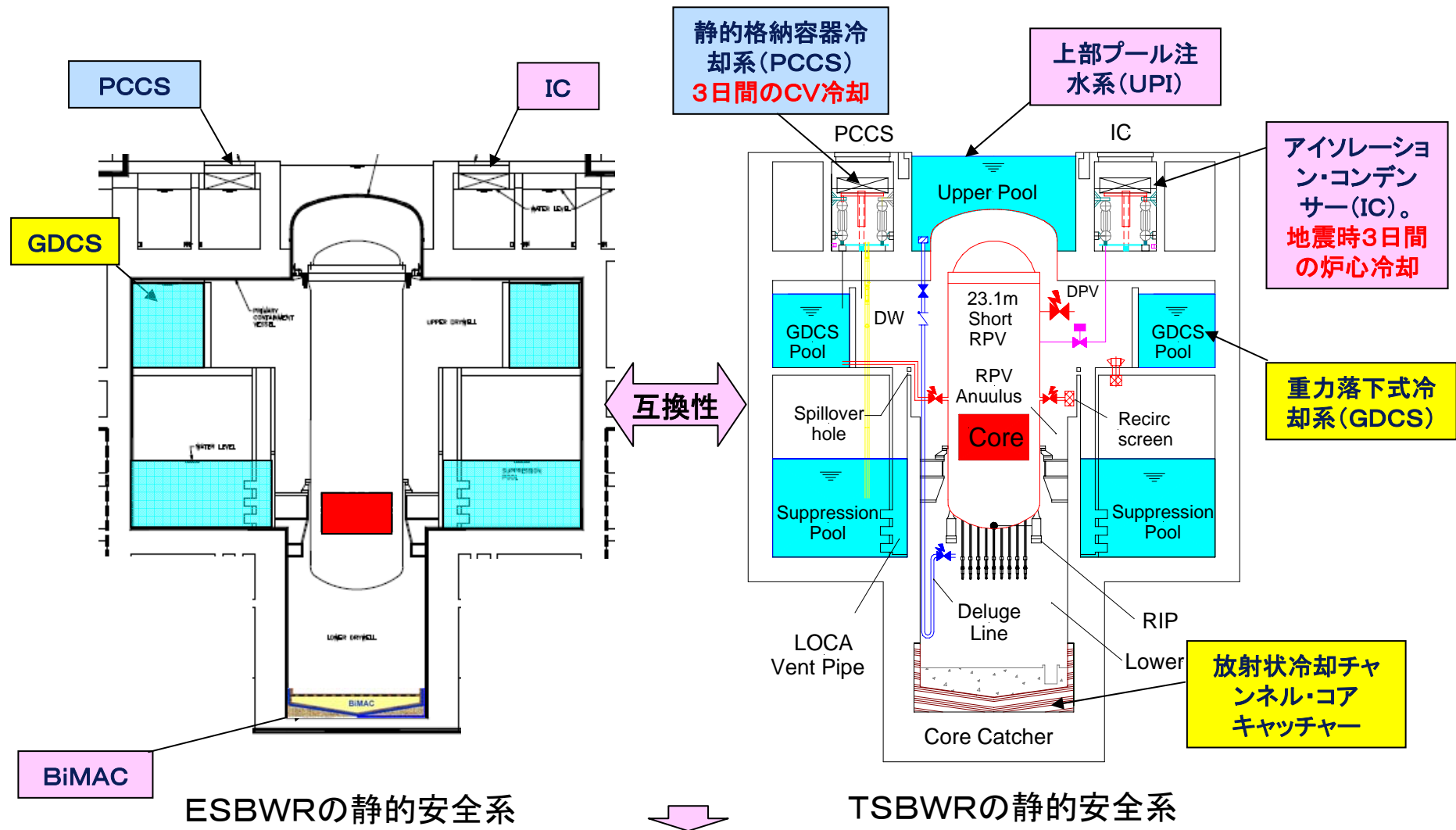
- WENRA安全目標の完全適合 + 静的グレース・ペリオド + 二重気密格納容器
- 欧州では重視されていない巨大地震、大津波、巨大ハリケーン等の自然災害への対応力強化。世界中のどこに建てても安全。
- Mark XはPermanent Grace Period で中国やカザフ等の内陸地に建てても安全。非常時冷却水の補給が不要

## ◆ リアクターはABWRとESBWRの両方に対応可能な互換性を持ったプラント概念

- PCV内径、PCV形状はESBWRと同一性を確保

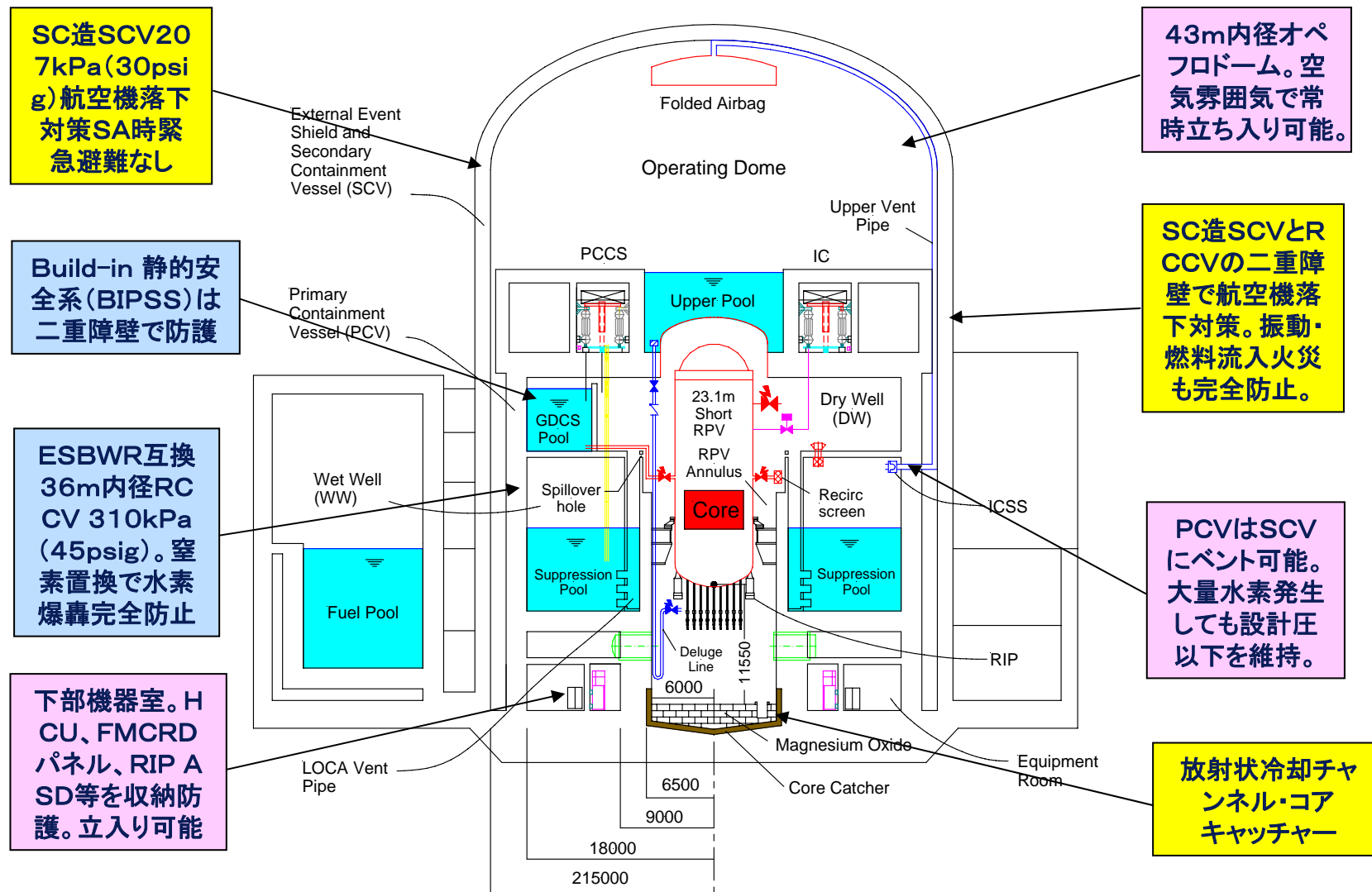
## ◆ 次世代軽水炉と同様の要素技術(SC造、PCCS、静的デブリ冷却等)による検討の過程で使用したもの。ただし、PCVはRCCV構造なので30ヶ月建設工程を満たさない点が課題。

# Build-in Passive Safety System (BIPSS)



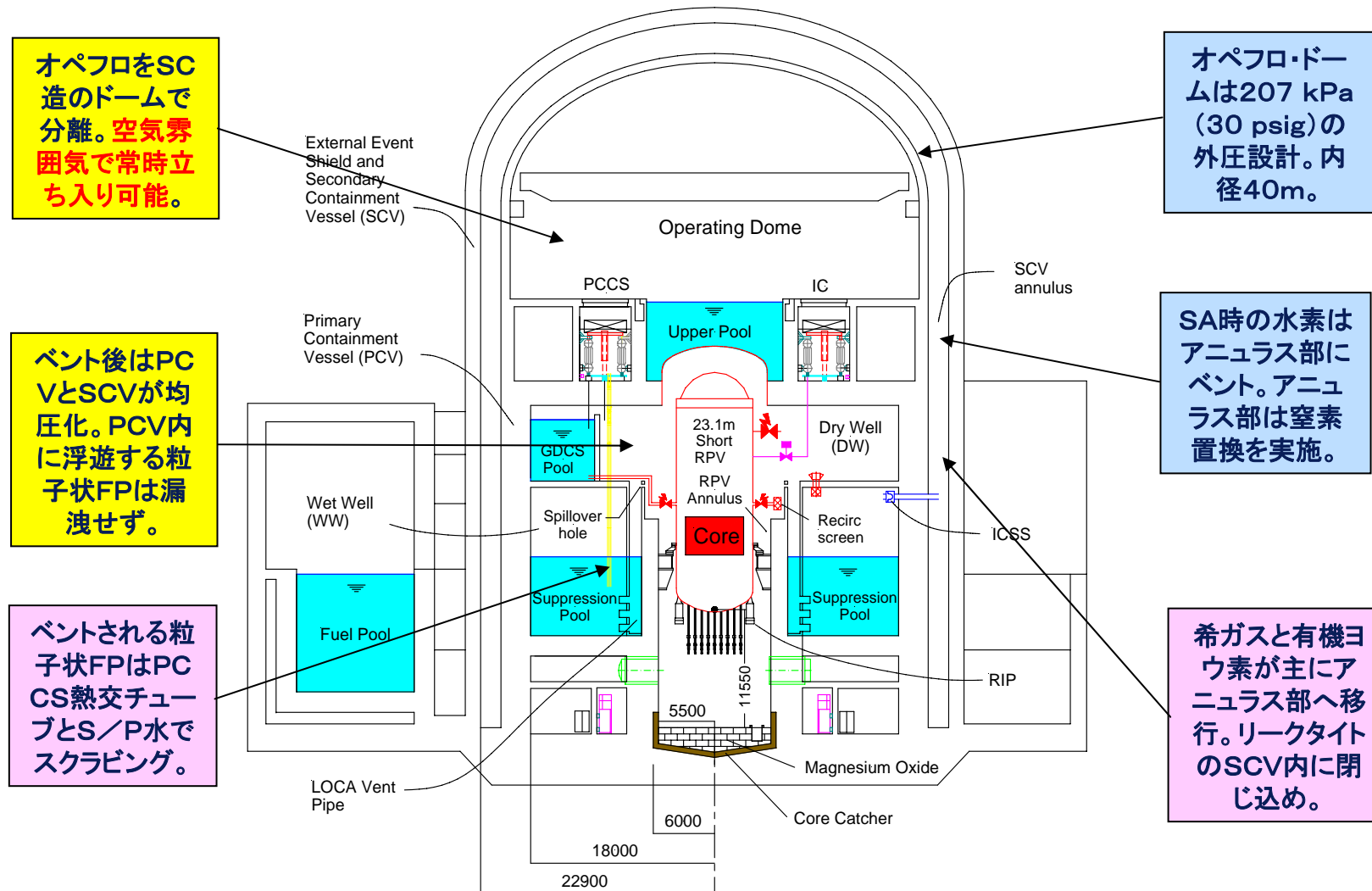
PCV内径と形状はESBWRと完全互換。静的安全系は格納容器Envelope 内にBuild - inされ防護。

# Mark S<sup>+</sup> containment for TS1800



二重気密格納容器でSA時被ばく線量を静的に制限(〜0)。二重障壁構造で完全な航空機落下対策。

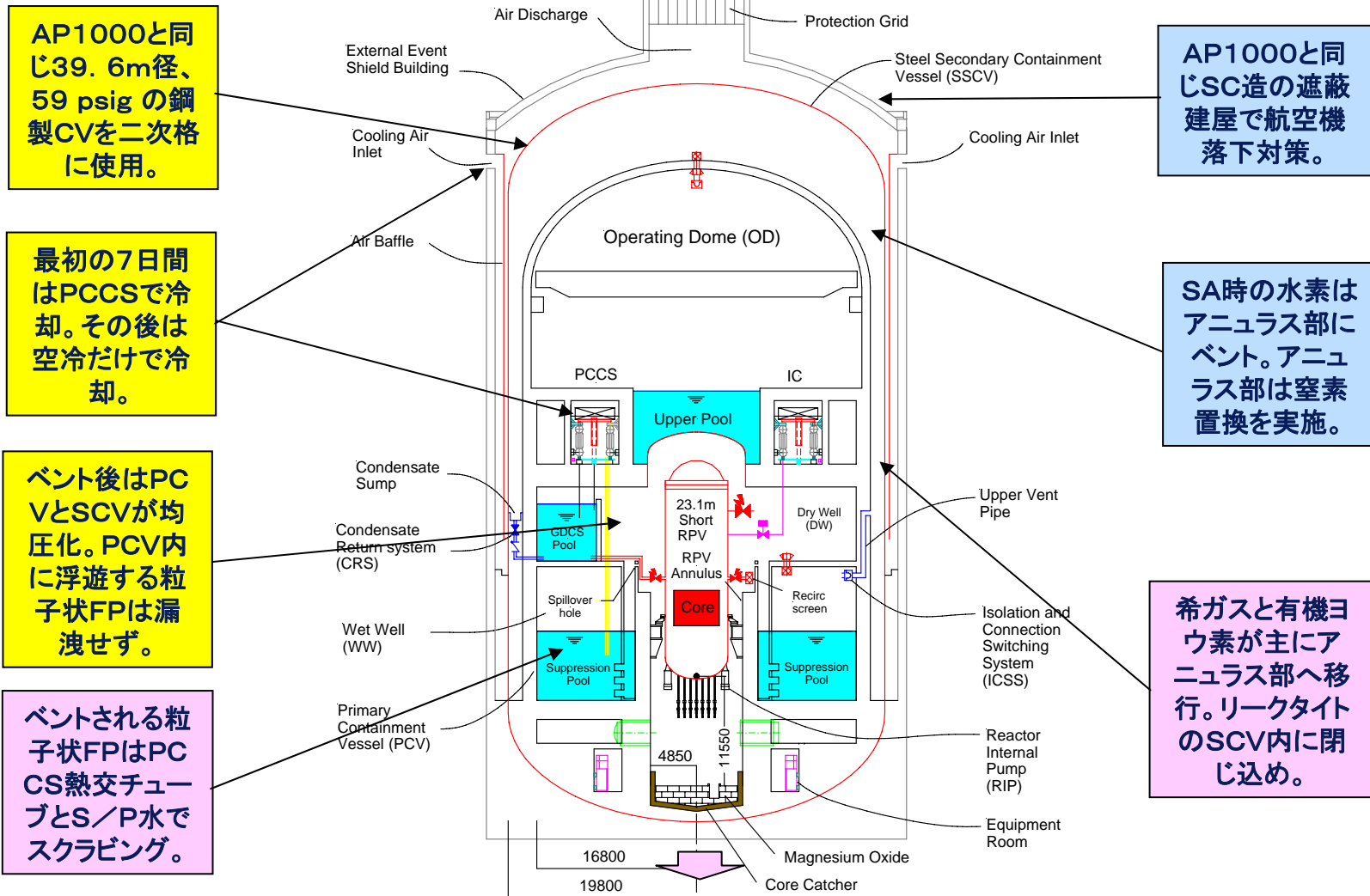
# Mark D containment for TS1600



二重格納容器でSA時被ばく線量を静的に制限(〜0)。二重障壁構造で完全な航空機落下対策。

# Mark X containment for TS1000

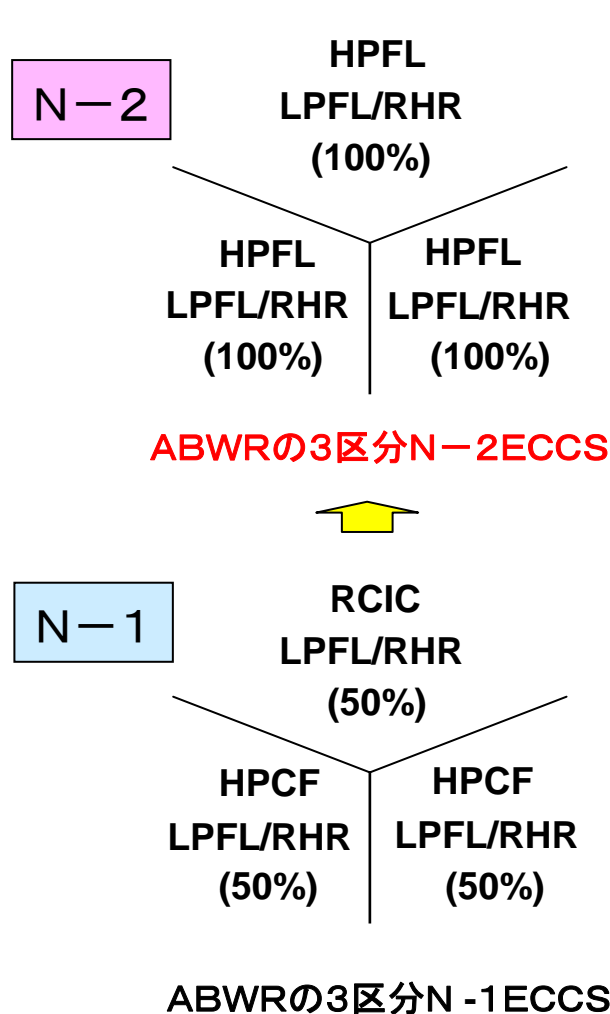
AP1000と同じ空冷により永久グレース・ペリオドを確保した概念



非常用冷却水源の確保しにくい内陸立地あるいは自然災害で孤立する虞のある地域に最適。

## N-2 and In-Depth Hybrid Safety (IDHS)

## ABWRの3区分ECCSは容易にN-2化が可能



## フィンランド規制要求

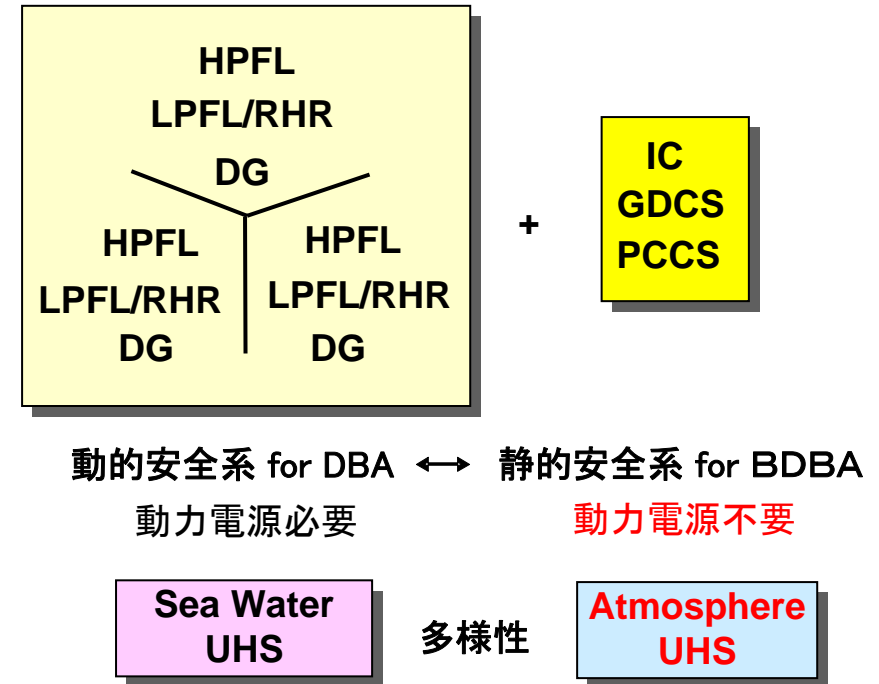
火災 + N-2  
(事実上N-3)

## 動的4区分？

## 日本人の知恵

動的4区分はコストアップし、自然災害等の共通原因故障には無力。  
SA及び地震等の自然災害には静的安全系による多様性とグレース・ペリオドの方が有効。

## 深層ハイブリッド安全系

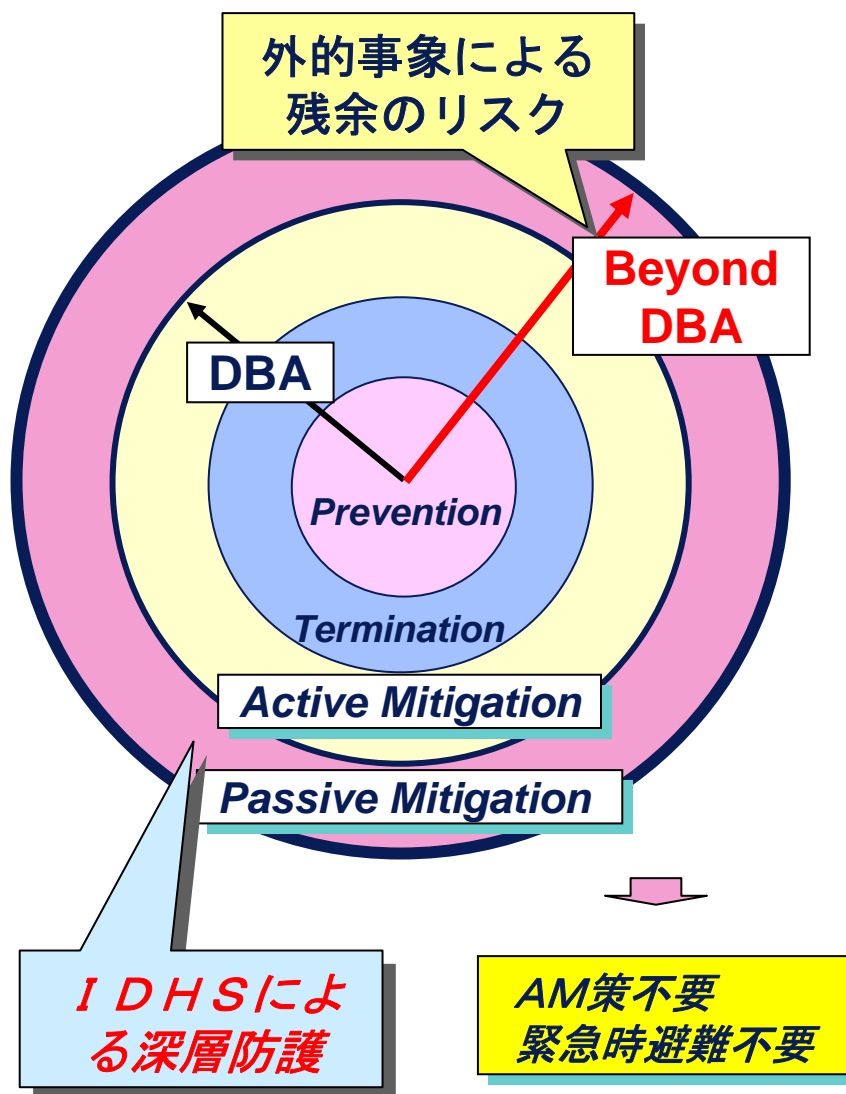


## *In-Depth and Independent*

## **IDHS for Complete N-2 design**

深層ハイブリッド安全系による動的安全系と静的安全系の多様性こそが巨大地震や大津波等の残余のリスクに対して生き残ることを可能にする。

# 残余のリスクに対する深層防護



- ◆ ABWRは最初から多重性・多様性の強化により多重故障への対応を強化 — WENRAの多重故障の要求は既に30年前に対策実施済み。
  - 3区分高圧ECCSにより給水喪失時の多重故障に対応
  - 3区分RHRにより除熱喪失の多重故障に対応
  - FMCRDの電動挿入機能(水圧スクラムへの多様性)によりATWSに対応
  - 3台DG+Alternate AC 電源によりSBOに対応
- ◆ 従って、ABWR自体の安全性(3段階の深層防護)は極めて高い。**内的事象に起因する残留リスクは既に実質的に削除されている。**
- ◆ 潜在的な残余のリスクは、国際市場における立地条件と外的要因がもたらす外的事象に起因する。
  - 巨大地震、大津波、巨大ハリケーン、大洪水など
  - 大型航空機激突、戦闘機落下など
  - その他の破壊活動など
- ◆ In-Depth Hybrid Safety (IDHS)は、これらの外的事象に起因する残余のリスクに対し追加の、かつ、高信頼度の防護を提供する。
- ◆ IDHSが提供する動的安全と静的安全による多様性の深層防護が外的事象がもたらす重篤な残余のリスクを実質的に削除することを可能にする。

**Four Levels of Safety protect our Future ABWR.**

## Section-5 ルール作りをどうするか。

---

◆ ルールを作ったものが標準になる。

◆ WENRA $\pm \alpha$ で対応する。

- 規制を全部整備するのは大変。
- WENRAを準用する。目的は世界市場にプラントを提供すること。

◆ WENRA＋静的グレース・ペリオド(PGP)を推奨する。

- 巨大地震、大津波、巨大ハリケーン等の自然災害によるリスク低減のため静的グレース・ペリオドを推奨する。
- 長期のSBOに対し静的に炉心冷却を継続可能なこと。
  - ✓ 広域巨大地震や巨大ハリケーン時等には、外部電源が長期喪失する虞。
  - ✓ DGは免震のR/B内に設置して防護しても燃料の補給ができないとSBOになる。
  - ✓ 運転に外気導入を必要とするDGは大津波で冠水すると機能停止する。
  - ✓ 従って、外部動力電源を必要とする動的機器ではなく、静的機器による安全性確保が有効。
- 巨大地震等を想定して、3日以降も冷却水源の補給手段を確保すること。ただし、3日以降の水源補給は専用の動的手段を用いて良い。7日以降はAC電源の復旧を期待して良い。

◆ WENRA－動的なAdd-On対策の禁止を推奨する。

- SBO DGのような動的なSA対策を禁止する。従来型の動的なAdd-Onの対策を禁止する。
- SBO DGは巨大地震・大津波ではクレジットが取れない。巨大地震を想定しないヨーロッパでしか有効性がない。
- SBO DGのようなAdd-Onの対策は、既設炉でもバックフィットが可能であり、新規炉として最適化された設計とは言えない。即ち、追加すれば単純にコストアップになってしまう。
- 既設炉にもバックフィット可能なAdd-OnのSA対策を施した物は新規炉とは言えない。

## Section-6 我が国における位置づけをどうするか

- ◆ 安全性の枠組みは既設炉も新規炉も同一。安全性は同様に確保される。
  - How safe is safe enough? の安全目標のゴールは、本来、既設炉も新規炉も同一である。
- ◆ 従って、SA対策はAM策と安全上の位置づけは同じであるが、設計上の位置づけを変えることは可能。
  - AM策は、既に基本設計が決まっている炉型に対してAdd-on対策として実施するもの。
  - SA対策は、新規炉の基本設計に最適化して取り込んだBuild-in設計として設計段階から実施するもの。
- ◆ 規制としては、既設炉にAM策を自主的に実施することを強く推奨した。これと同様に、新規炉にSA対策を設計段階から実施することを強く推奨することは考えられる。
- ◆ AM策とSA対策は、安全上の位置づけ(Beyond DBAに対する自主的な改善策との位置づけ)が同一であるから、その安全上の要求内容も同一になる。ただし、SA対策は、設計段階から最適化を計り実施するものであるから、その結果として、Add-on対策のAM策よりも必然的に安全性のさらなる改善を期待することは電力要件としては考えられる。
- ◆ 一方、航空機落下対策は、それぞれの国情を反映して実施されるもの。
  - 米国の10CFR150は9. 11のテロ対策であることを明文化している。一方、EURは戦闘機の墜落を設計条件としている。
  - 海外進出のため、メーカーが自主的に実施するもの。
- ◆ 逆に、SA対策に関して、我が国特有の条件の設定が望ましい場合は、JEAG等の民間規定を活用することが妥当と考えられる。
- ◆ PSAによる安全性の確認については、規制として実施する場合、AM策とSA対策において安全上の位置づけが同一であるので、新規炉及び既設炉について同一に実施されなければならない。これは、PSAの規制要件化である。
  - ただし、新規炉は設計段階からSA対策を実施することを推奨するのであるから、我が国規制として、今後型式承認等の制度整備を実施し、その過程において評価が行われることが望ましい。
- ◆ 我が国の新規炉規制に求められるのは、標準型式承認制度の法的整備である。型式承認制度があればその評価プロセスの中でSA対策の妥当性についても評価が可能になる。

# チェルノビル事故以後の深層防護(1)-IAEA

◆IAEAはAMを深層防護の第4のレベルに位置づけている。

- 深層防護の妥当性は確率的な安全目標(リスクレベル)で判断する。
- AM策の要求信頼度レベルはこの判断基準で決まる。

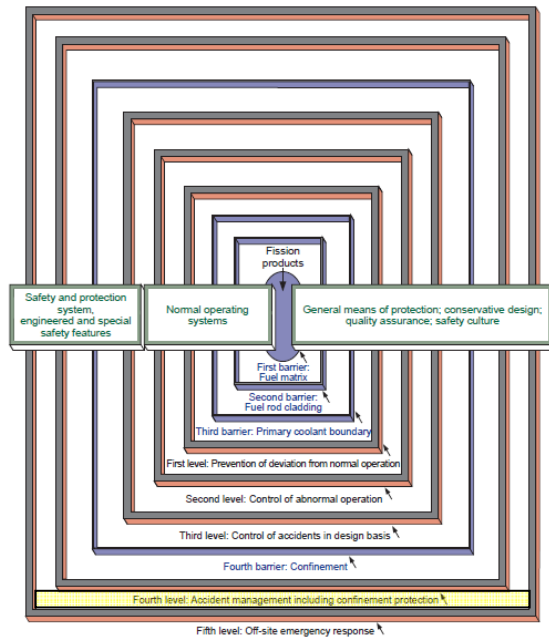


FIG. 4. The relation between physical barriers and levels of protection in defence in depth.

Strategy	Accident prevention			Accident mitigation	
Operational state of the plant	Normal operation	Anticipated operational occurrences	Design basis and complex operating states	Severe accidents beyond the design basis	Post-severe accident situation
Level of defence in depth	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Objective	Prevention of abnormal operation and failure	Control of abnormal operation and detection of failures	Control of accidents below the severity level postulated in the design basis	Control of severe plant conditions, including prevention of accident progression, and mitigation of the consequences of severe accidents, including confinement protection	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials
Essential features	Conservative design and quality in construction and operation	Control, limiting and protection systems and other surveillance features	Engineered safety features and accident procedures	Complementary measures and accident management, including confinement protection	Off-site emergency response
Control	Normal operating activities		Control of accidents in design basis	Accident management	
Procedures	Normal operating procedures		Emergency operating procedures	Ultimate part of emergency operating procedures	
Response	Normal operating systems		Engineered safety features	Special design features	Off-site emergency preparations
Condition of barriers	Area of specified acceptable fuel design limit			Fuel failure	Severe fuel damage
				Fuel melt	Uncontrolled fuel melt
				Loss of confinement	
Colour code	NORMAL			POSTULATED ACCIDENTS	
				EMERGENCY	

FIG. 3. Overview of defence in depth.

TABLE I. LEVELS OF DEFENCE IN DEPTH

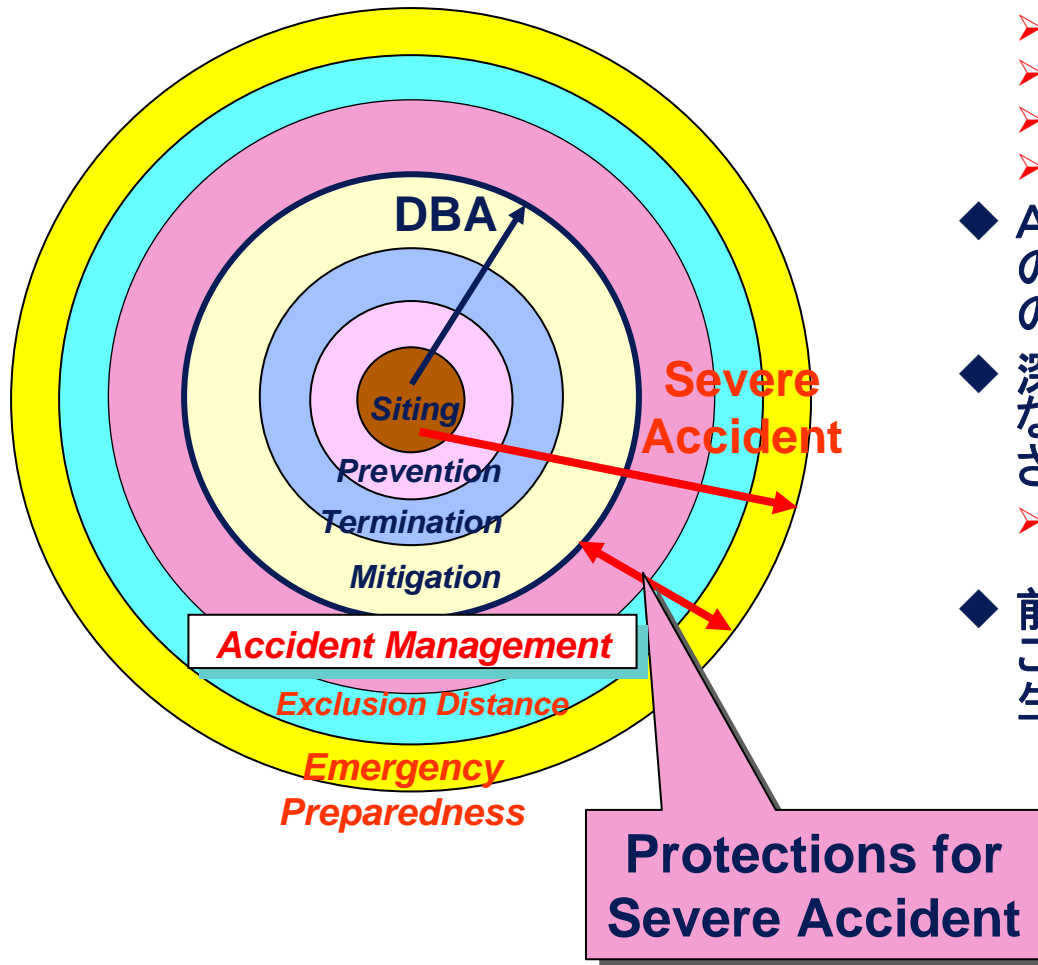
Levels of defence in depth	Objective	Essential means
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design and high quality in construction and operation
Level 2	Control of abnormal operation and detection of failures	Control, limiting and protection systems and other surveillance features
Level 3	Control of accidents within the design basis	Engineered safety features and accident procedures
Level 4	Control of severe plant conditions, including prevention of accident progression and mitigation of the consequences of severe accidents	Complementary measures and accident management
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials	Off-site emergency response

INSAG 10  
“Defense in depth in Nuclear Safety”(1996)

INSAG 12 “Safety Principles for Nuclear Power Plants”(1999)

# チェルノビル事故以後の深層防護(2)-佐藤一男先生

## 7層の深層防護



- ◆ 7層の深層防護を提案。(原子力安全の論理、P. 51)
- ◆ 従来の深層防護に以下の4層を追加。
  - 立地
  - **AM (Accident Management)**
  - 離隔 (Exclusion Distance)
  - 防災対策 (**Emergency Preparedness**)
- ◆ AM策の位置づけはIAEAと同じ従来の3つの深層防護に追加される第4のレベル。
- ◆ 深層防護の妥当性は、やはり確率的な安全目標(リスクレベル)により判断される。
  - AM策の要求信頼度レベルはこの判断基準で決まる。
- ◆ 前段否定の深層防護に立地を入れることは、立地条件を超える事象の発生に備えることを意味する。

# ゼロディフェクト思想の変化

---

## ◆ 1979年3月28日 : Three Mile Island-2(米国)の炉心損傷事故

- 異常な過渡事象に端を発し、多重の故障とヒューマン・エラーによって炉心が長時間露出し、重大な炉心損傷が発生。
- 事故＋単一故障の決定論ではなく、むしろ軽微な異常＋多重故障で炉心損傷にいたることが認識され、**多重故障のシナリオ**を確率で評価する**確率論の重要性**が認識された。

## ◆ 1986年4月25日 : チェルノブイリ4号機(ソ連)の過酷事故

- 核的逸走事故と水素爆轟により原子炉及び原子炉建屋が吹き飛び大量の放射性物質が環境に放出。
- **過酷事故対策**と緊急時防災対策の重要性が認識された。
- 全ての軽水炉に過酷事故対策(Accident Management : AM策)を追加

## ◆ 従来の3層の深層防護に修正を行うとともに、**確率的な安全目標**を設定し、How safe is safe enough? の問題に一定の答えを出し、実際に**確率論的安全評価(PSA)**で安全性を確認することになった。

- 従来の設計基準事故を仮定し、安全系に単一故障を仮定して解析を行う決定論的安全評価も実施。PSAはこれを補完。

# 安全目標と修正された深層防護

- ◆ 炉心損傷や大規模放射能放出などは**絶対に発生しないというゼロディフェクトの考えから確率によりディフェクトが発生する許容リスクレベルを設定する発想を導入。**

➤ ゼロディフェクトからHow safe is safe enough? へ

- ◆ 安全目標 (Safety Goal) (米国) 1986年8月

➤ 定性的安全目標

- ✓ 公衆の個々は、原子力プラントの運転の影響により、その生命及び健康に**有意なリスクの増加がない**ように保護されなければならない。
- ✓ 原子力発電プラントの運転によってもたらされる生命及び健康に対する社会的リスクは、他の現実的な代替発電技術によるリスクと同程度もしくはそれ以下であり、かつ他の**社会的リスクに有意な増加をもたらさないもの**でなければならない。

➤ 定量的リスク目標

- ✓ 原子力プラント近傍の平均的個人に関する、原子炉事故により生じるかもしれない急性死亡のリスクは、米国民が一般にさらされている**事故による急性死亡のリスクの0.1%を超えてはならない**。(1マイル以内で評価)
- ✓ 原子力発電プラント周辺の公衆に対する、同施設の運転により生じるかもしれないガン死亡のリスクは、**他の全ての原因によるガン死亡のリスクの0.1%を超えてはならない**。(10マイル以内で評価)

➤ 補助的数値目標 (性能目標)

- ✓ **大規模放射能放出頻度  $< 10^{-6}$  / 炉年**

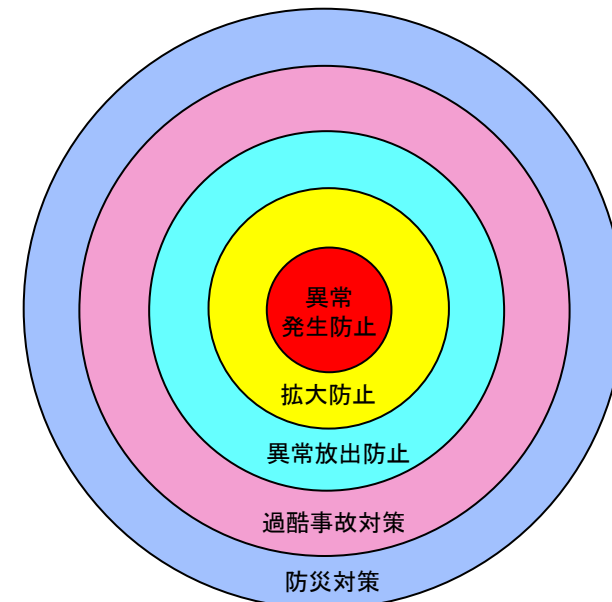
- ◆ 米国NRCによる運用 (Standard Review Plan)

- ✓ 炉心損傷頻度  $< 10^{-4}$  / 炉年
- ✓ 大規模放射能放出頻度  $< 10^{-6}$  / 炉年
- ✓ 原子炉格納容器の機能維持時間 ~ 24時間
- ✓ 原子炉格納容器の条件付き破損確率  $< 0.1$

- ◆ 日本の安全目標案 (平成15年)

- ✓ 原子力施設の事故に起因する、施設の境界付近の公衆の個人の放射線被ばくによる平均死亡リスク  $< 10^{-6}$  / 炉年
- ✓ 原子力施設の事故に起因する、施設からある範囲の距離にある公衆の個人の放射線被ばくによって生じ得るがんによる平均死亡リスク  $< 10^{-6}$  / 炉年
- ✓ 炉心損傷頻度  $< 10^{-4}$  / 炉年
- ✓ 大規模放射能放出頻度  $< 10^{-5}$  / 炉年
- ✓ 原子炉格納容器の条件付き破損確率  $< 0.1$

## 修正された5層の深層防護



5層の対策の全ての効果で  
確率的に安全目標を満たせば  
Safe enough と判断する。

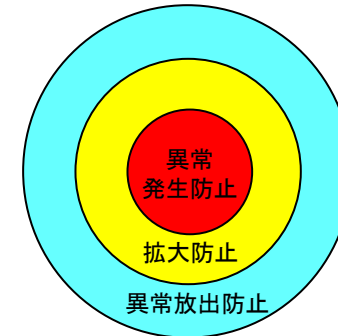
修正された5層の深層防護にはディフェクト(大規模放出)の発生を一定のリスクレベルで許容するという発想がある。

# 安全設計の基本的な考え方(従来の考え方)

## ◆ 深層防護(多重防護): Defense in Depth

- 各対策レベルの安全確保に努めつつ、前段の防護対策が成功しなかった場合に備えて、次の3つのレベルの対策を用意

- ✓ 第1のレベル — 異常発生防止
- ✓ 第2のレベル — 事故への拡大防止
- ✓ 第3のレベル — 放射性物質の異常放出防止



◆ 第1のレベルでは、ゼロディフェクトを目指して設計

◆ 第2、第3のレベルでは、それでも異常や事故の発生を仮定して、安全系を設置

- 安全系には、必ず単一の機器の故障を仮定(単一故障基準)し2重系以上の信頼性を確保
- 特に重要な原子炉停止系は設計原理の異なる2種類を設置。

◆ 深層防護の範囲内ではディフェクトを仮定する 前段否定の安全ロジック

◆ 決定論によって、異常や事故の発生を仮定し、安全系の単一故障を一律に仮定しても大丈夫なように設計。

◆ これによって、第3のレベルの対策が破られることはなく、炉心損傷事故も放射性物質の異常放出事故も防止できるという、**深層防護全体のゼロディフェクトを主張。**



従来は決定論によるゼロディフェクト設計思想

# SA対策は基本設計にBuild-inされた最適設計

---

- ◆ SA対策も深層防護における第4のレベルであり、AM策と位置づけは全く同じもの。
  - 深層防護の妥当性を、AM策と同様に確率的な許容リスクレベルで判断するのであれば、SA対策への要求信頼度レベルはAM策と同一になる。
  - 基本設計にBuild-inされた最適設計であるため、AM策よりも合理的で効果的な対策となる場合がある。このような努力を求めることは電力要件にはなり得る。
- ◆ 一方、WENRAのように、CDF値による判断を採用せず、また、CV破損に至る物理現象の実質的な削除を確率的なカットオフではなく、具体的なSA対策で求めることは、実は、**深層防護によるゼロディフェクト思想への回帰**を意味する。
  - この場合のSA対策は、従来のAM策とは一線を画したものとなり、その要求信頼度レベルも異なってくる。
  - Only zero defect is safe enough. を指向したものとなる。
- ◆ このようなことは、基本設計にBuild-inして最適設計を行うことにより、既設炉よりもより高度化・合理化されたものとして実現される。今後の新規炉はこのようなことを指向して、国内プラントとして最適化され、かつ、国際競争力を持ったものでなければならない。

## 耐震要求をどうするか

---

- ◆規制上はAM策と同じ位置づけとなるので、耐震要求は生じない。
- ◆しかし、実際には、地震リスクの低減に寄与するため、機能維持が必要になる。
- ◆AM策のように後からAdd-onしたものは、耐震設計を実施すると追加の問題が大きいが、SA対策として基本設計にBuild-inしたものの耐震設計はより容易になる。
  - 例えば、EPRのようにSBO DGとSA専用のHRSを設置すると、これは、実際にはAdd-on設計なので補機冷を含めて耐震設計を行うと大変である。
  - 一方、PCCS/ICのように静的システムをBuild-inすると、動的機器がなく、建屋外の設備もないので影響は緩和される。PCCSはPCVバウンダリーを構成し、ICはRPVバウンダリーを構成するので、必然的にバウンダリーとしての耐震設計を実施することになる。従って、**SA時の機能維持が可能になる**。
  - SC造の二次格もR/Bとしての耐震設計を実施すれば、SA時の機能維持が可能になる。SC造としたことによるコスト低減効果と工期短縮効果の方が大きい。

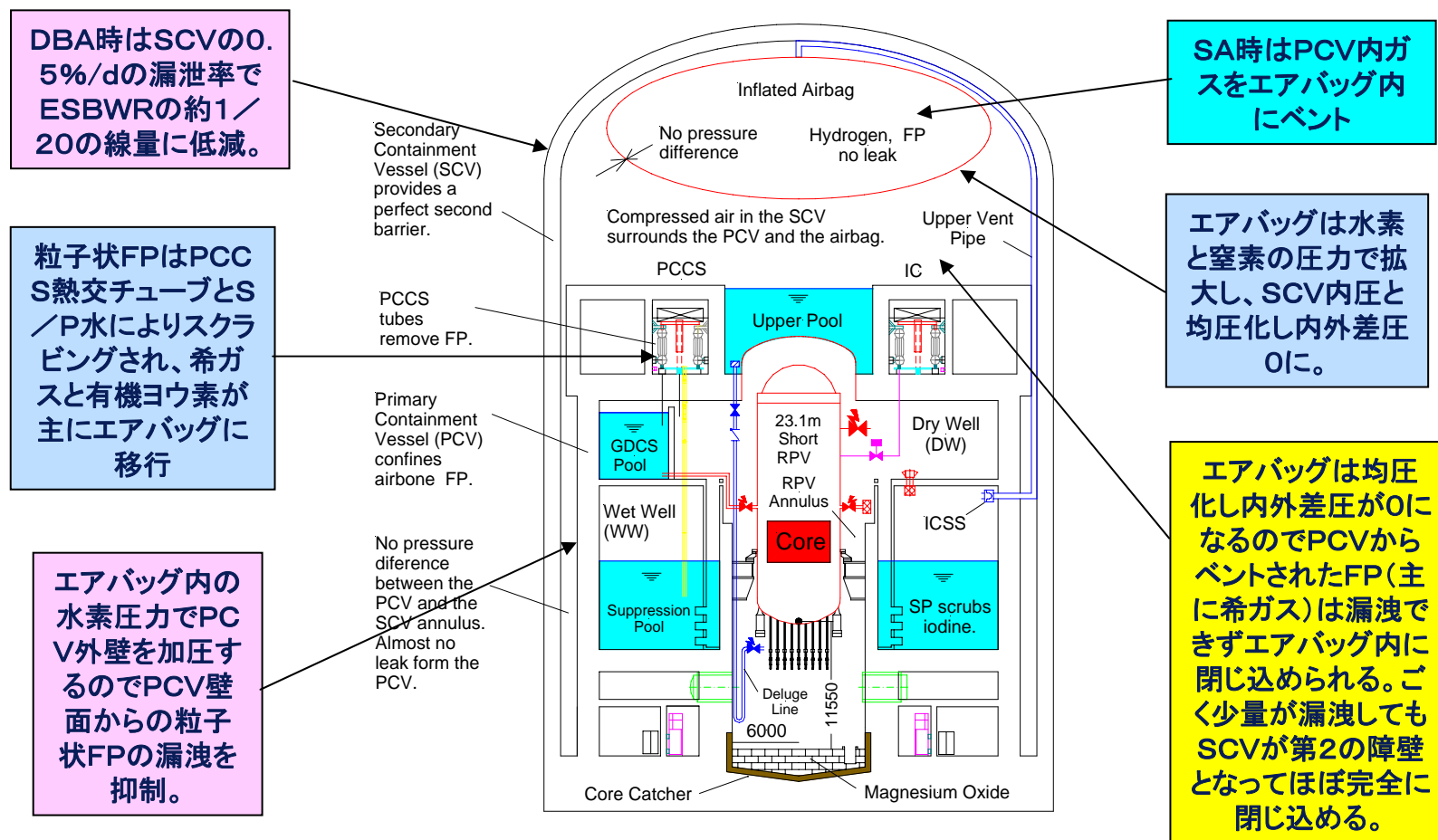
## まとめ

---

- ◆ 安全性の枠組みは、AM策とSA対策で同じ。安全性は同様に確保される。
  - How safe is safe enough? の目標は既設炉にも新規炉にも普遍的に適用される。
  - 安全性をコスト効果で議論する(割り切る)ことに社会的受容性がない。
- ◆ AM策同様国が強く指導する位置づけは可能。
- ◆ 電力要件としては、基本設計で最適化を行うSA対策に安全性の向上を求めることは技術の進歩として考えられる。
- ◆ メーカーとしては、国際市場での競合のためSA対策等を取り入れる必要がある。メーカーとしては、SA対策を基本設計段階から最適化し、国内向けとしても、国際市場向けとしても同時に最適の設計とすることが望ましい。そのためには、新規要素技術を活用した新しいプラント概念の創出へのチャレンジが重要である。
- ◆ Consistency is the last refuge of the unimaginative. 一貫性とは想像力に欠ける者の最後のより所である。(Oscar Wilde, Irish poet, playwright and novelist, 1854-1900)

## 添付1. Mark S<sup>+</sup> CVの静的二重閉じ込め機能

DBA時は二重気密CVで、SA時は均圧化とスクラビングによりさらに強力にFPを閉じ込め



SA時の物理現象と水素のエネルギーを利用してFPをほぼ完全に閉じ込め。

## 添付2. In-Containment (内部) 水源による自動冠水機能

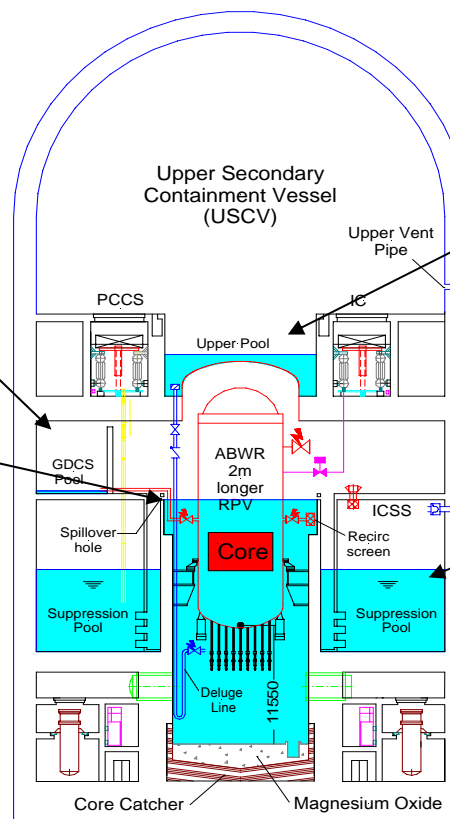
外部水源と外部動力が不要な自己完結型冠水機能

内部水源だけで炉心上部位置まで冠水可能。外部水源は全く不要。地震時等に外部水源が不要。

AM策無しに自動的に炉心上部位置 (Spillover hole) まで冠水

得られる効果

- ・炉内残存デブリの冷却 (過温破損防止)
- ・炉外デブリの冷却 (溶融貫通防止)
- ・停止中のLOCA
- ・LOCA後長期のECCS停止
- ・DBAの想定を超える大LOCA (底部大破断、複数配管破断)



オペフロ・ベント後は均圧化するので上部プールもドレン可能

SA時は、DGCSとUPIの水源で冠水。DBA時はS/P水で冠水。

AM策が不要でSA時のwalk-away safety性を高める。

SA時の冠水状態

巨大地震等の自然災害時に電源融通や外部注水等の運転員操作が不要。

## 添付3. TS1000とAP1000の比較

- ◆ TS1000はAP1000と同一仕様の鋼製CV、内径39.6 m, 59 psig 設計圧、0.1 %/d 設計漏洩率を使用。
- ◆ Mark X は、ABWRタイプのRCCVをAP1000タイプの鋼製CVに収納し、SA時にも緊急避難なしを実現。

