

日本原子力学会 原子力安全部会セミナー  
「新型炉の安全と安全規制」

## 革新軽水炉 iB1350

2022年10月29日

東芝エネルギーシステムズ株式会社

\* 青木 保高<sup>1</sup>、松本 圭司<sup>2</sup>、後藤 圭太<sup>1</sup>、  
佐藤 隆司<sup>1</sup>、新見 征之<sup>1</sup>、佐藤 崇<sup>2</sup>

\* 発表者

1 原子力システム設計部、2 原子力安全システム設計部

この技術資料は当社の所有財産であり  
未出願特許情報、ノウハウ等の機密  
情報を含んでおりますので、この技術  
資料に記載された技術情報の一部また  
は全部を第三者に開示されることが  
ないよう、お願いします。

東芝エネルギーシステムズ株式会社  
パワーシステム事業部

# Contents

01 iB1350の特徴

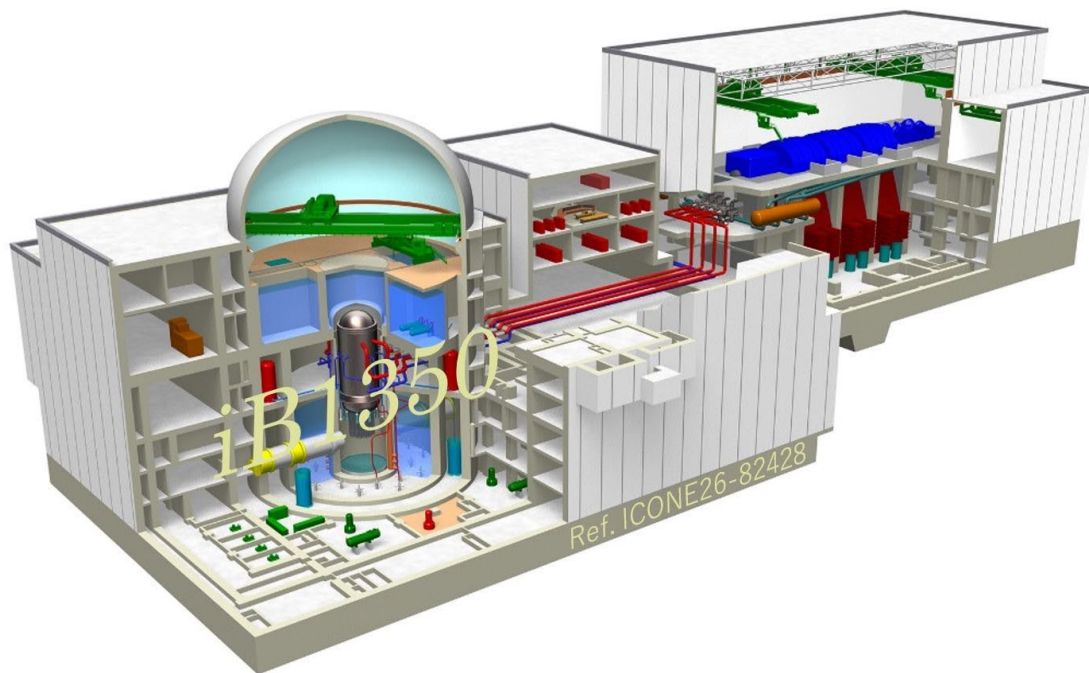
02 iB1350の安全思想

03 現行規制基準/審査との関連

04 まとめ

# 01

## iB1350の特徴



# iB1350とは

- iB1350のネーミングはinnovative, intelligent, inexpensive BWR 1350を略したものです。
- 炉心、炉内構造物、制御棒駆動系や再循環ポンプなど、原子炉周辺の機器や、タービンや発電機等の通常運転に必要な設備は、既に日本にて建設、運転実績のあるABWRと同一です。
- 格納容器を二重化し、静的冷却系を含む革新的な安全系を採用していますが、これらは既存技術(類似技術)に基づいており、ゼロからの新規開発要素はありません。
- 静的安全系は、テロ対策として航空機落下から防護された格納容器建屋内に収納されており、津波からも防護されることから、既設炉に要求される大型の外部特重施設を合理化することが可能です。
- 動的安全系も含めて、多重性と多様性を強化しており、外的事象への耐性も含めて安全性は格段に向上、軽水炉史上最高の安全性を有しています。
- 万一の事故時にも緊急避難、長期移住が不要で、社会との共生が可能です。

**iB1350はカーボンニュートラルの扉を開く革新的ABWRです**

## 地域社会と共生可能で経済性に優れた革新的安全炉 iB1350

### 背景・課題

1F事故後、多くの周辺住民が避難生活を余儀なくされている。今後の新設炉には、高い安全性と同時に、万一の事故も想定した地域住民への配慮が求められる。また、既設炉で多くの安全設備や特重施設が追設されており、経済性も課題となる。

### ポイント

1

#### 緊急時避難不要／長期移住無しの安全コンセプト

万一のシビアアクシデント時にも格納容器ベントが不要。FPの二重閉込め機能と静的放射能フィルター系でFPの放出が制限されるため、緊急時避難や長期移住が不要。

FP: Fission Products (放射性物質)

2

#### 静的安全系による7日間のグレースピリオド

大規模自然災害やシビアアクシデントの発生時でも、二重円筒格納容器及び革新的な静的安全系によって7日間のグレースピリオドを達成。

3

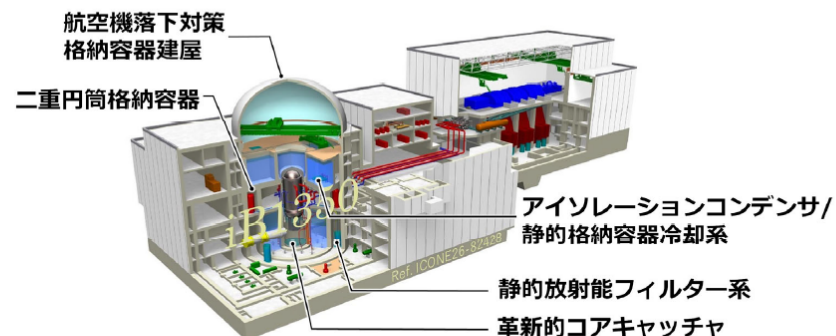
#### 建設容易性と高い経済性

建設実績のあるABWRをベースとしており建設が容易。APC対策格納容器建屋で静的安全系を防護しており、特重施設を合理化可能。

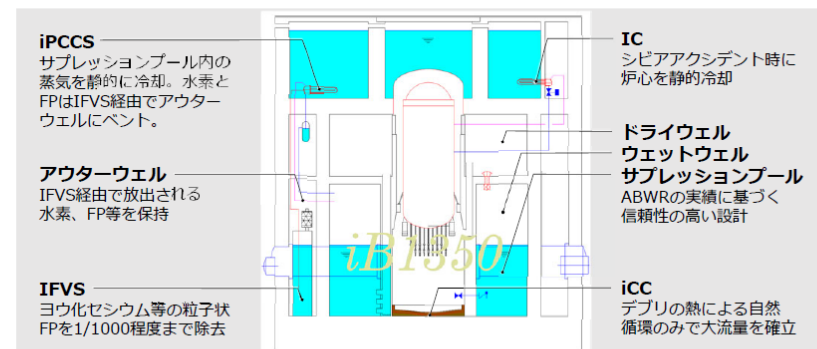
APC: Air Plane Crash (航空機衝突)

### iB1350の全体概要図

建設実績のあるABWRをベースとして、様々な革新的安全系を採用。高い安全性を達成しつつ、建設性や経済性にも配慮。



### 二重円筒格納容器と静的安全系



Ref. ICONE26-82428

iPPCCS: innovative Passive Containment Cooling System

IC: Isolation Condenser

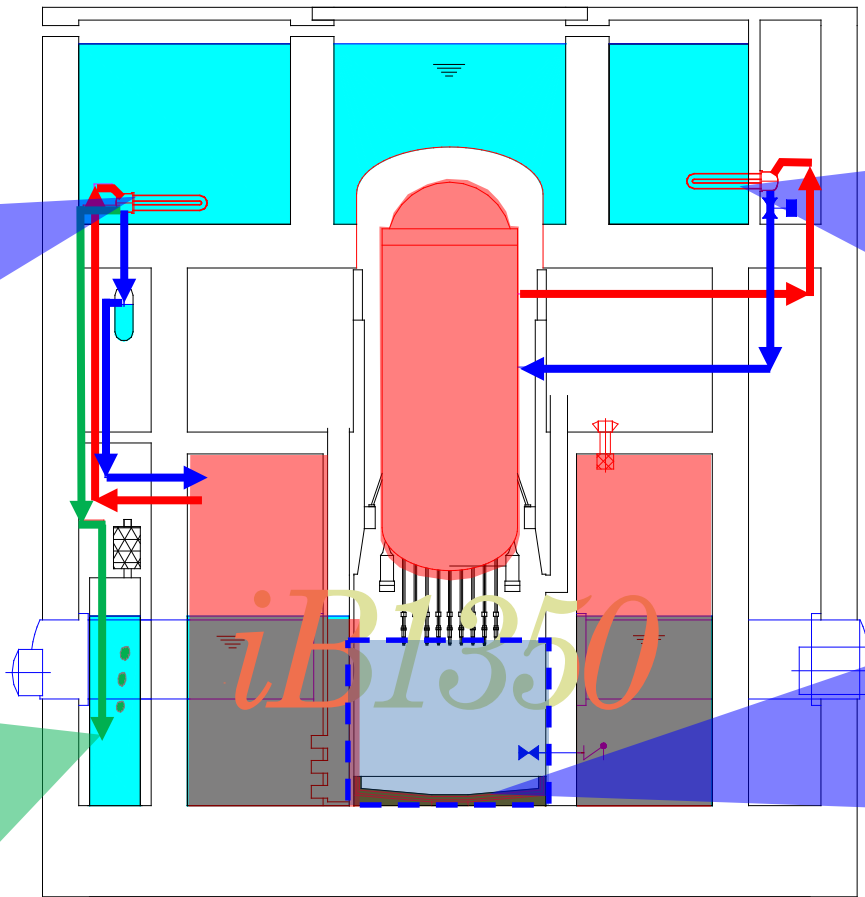
IFVS: In-containment Filtered Venting System

ICC: innovative Core Catcher

# iB1350を代表する静的安全系の概要

静的安全系  
(iPCCS※)により  
S/Cを冷却  
熱は静的に大気へ  
放出される

格納容器内蔵型  
フィルターベント  
(IFVS※)を經由し、  
二重円筒部  
(O/W※)  
に静的にFPを閉じ  
込める



静的安全系  
(IC※)  
によりRPVを冷却  
熱は静的に大気へ  
放出される

ドライキャビティ方  
式で溶け落ちたデ  
ブリを自動で冷却  
(iCC※ + 溶融弁)  
熱は静的にS/P  
水へ移行し、  
iPCCSを經由して  
静的に大気へ  
放出される

Ref. ICONE26-82428

※iPCCS: innovative Passive Containment Cooling System  
IC: Isolation Condenser  
IFVS: In-Containment Filtered Venting System

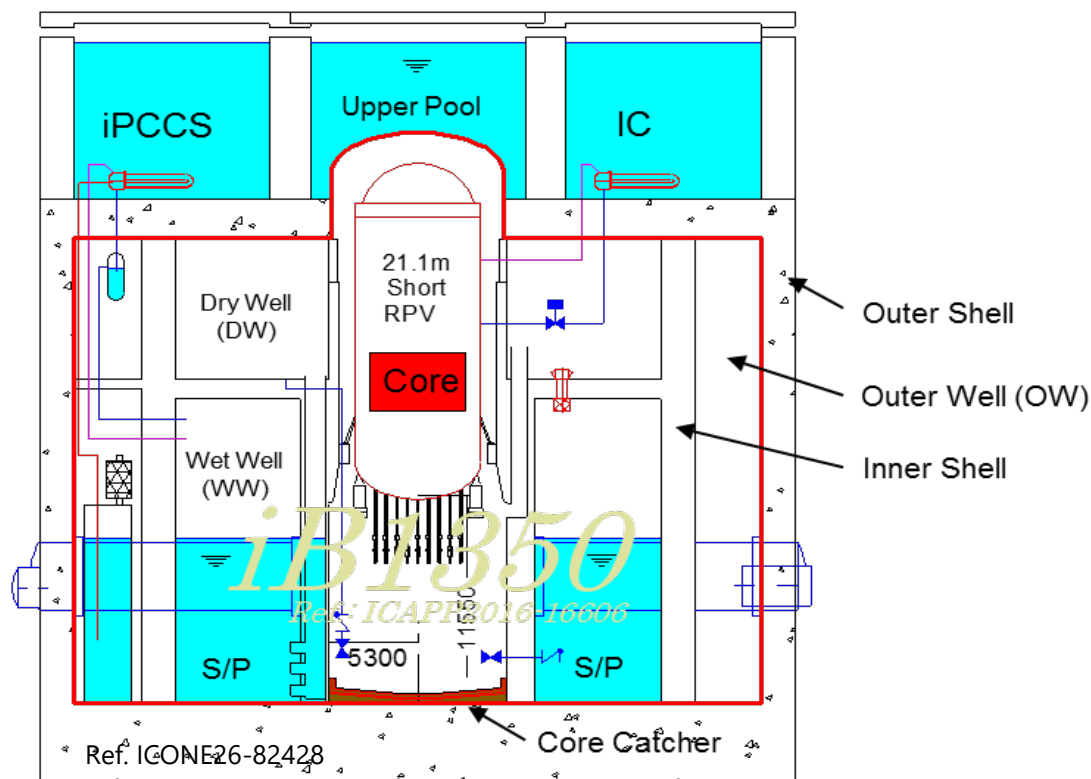
O/W: Outer Well  
iCC: innovative Core Catcher  
GDCF: Gravity Driven Corium Flooder

大規模自然災害による長期SBO時、SA時もRPV/PCVの自動冷却、  
熱の静的放出、そして静的なFP閉じ込めも可能な、新たな安全メカニズムを採用



## 二重円筒格納容器

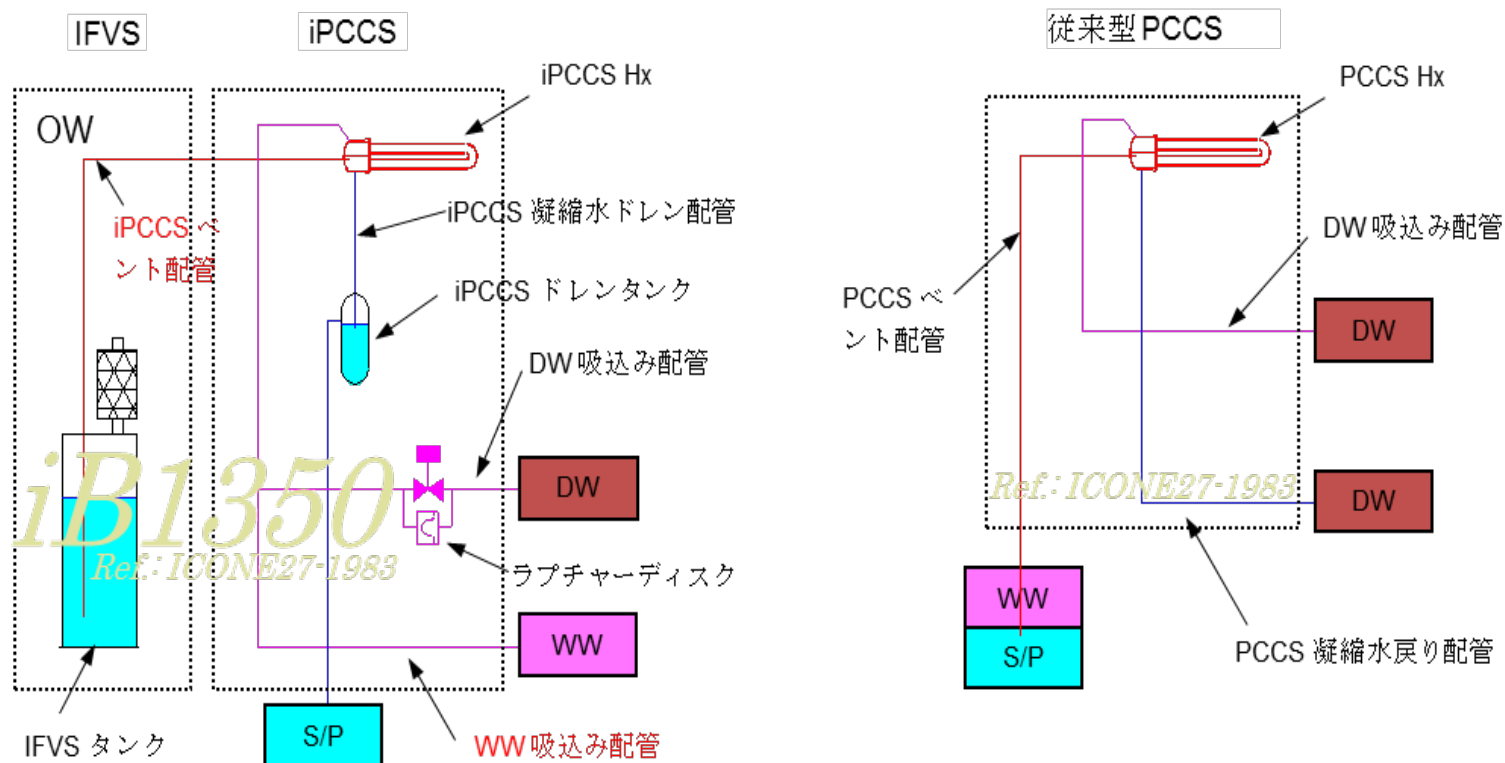
- ◆外殻にも耐圧性と気密性があり、外殻でFPを二重閉じ込め
- ◆事故時の圧力を内殻と外殻で分散し、設計圧を低減(45psig)。
- ◆ペネのある円筒部のPCVバウンダリーは外殻のみ。



二重化によりSA時圧力の低減、FPの閉じ込めに加え、耐震性も強化

# 革新的静的格納容器冷却系(iPCCS)

- ◆ アウターウェルにガスを排出できるiPCCSは半永久的に機能継続。ベント管水深6.5mのIFVSタンクでFPを除去。DFは1000。
- ◆ 従来型PCCSはFP加熱で高温化したWWにガスをベントできなくなる約3日半で機能喪失。ベント管水深も10cmでDFは0。

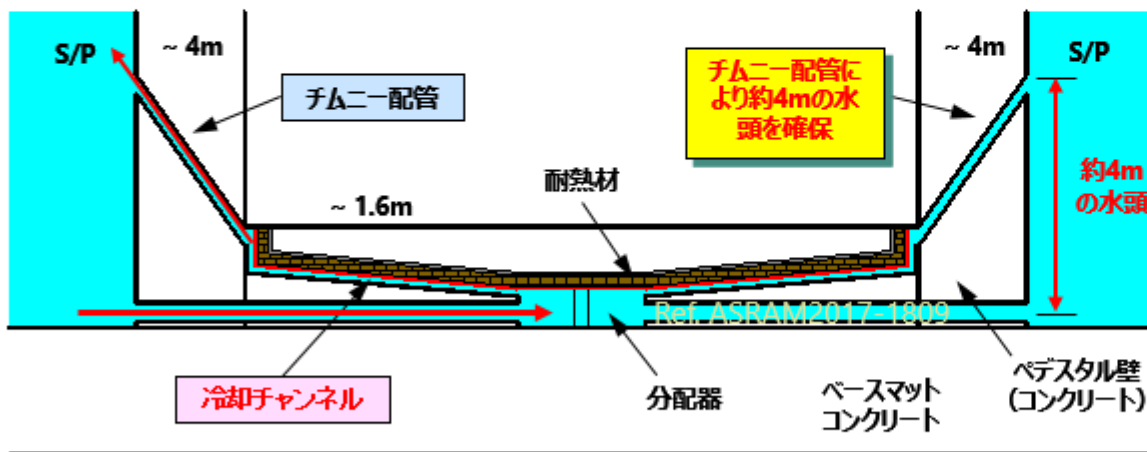


長期SBO時、SA時に格納容器を7日間冷却することが可能

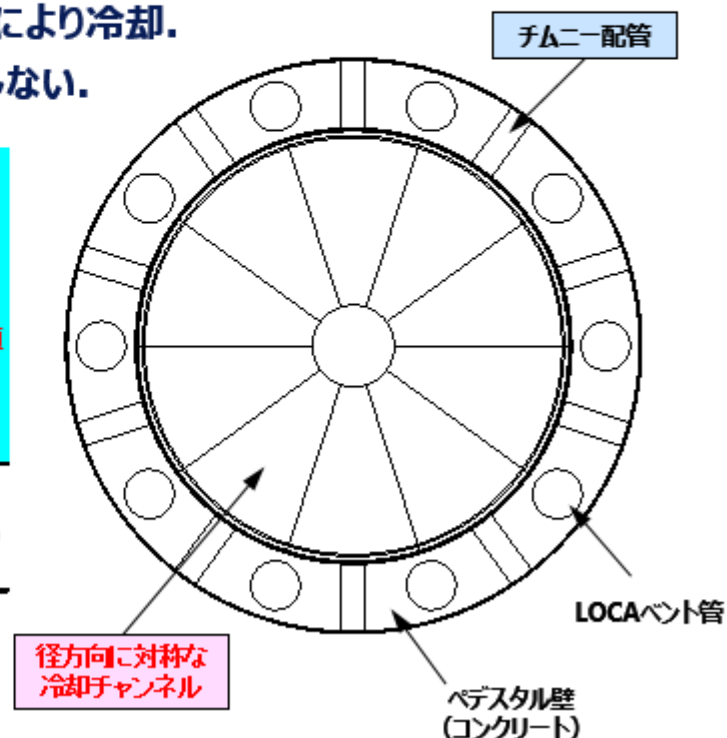


# 革新的コアキャッチャー(iCC)

- ◆ iCCはバイパスを回避するため**径方向に対称な冷却チャンネル**を採用。
- ◆ **冷却チャンネルは通常運転中S/P水で冠水**。冷却チャンネル同士は溶接し**一体型のベイスン**を構成。
- ◆ 炉心デブリによる流路の加熱により、自動かつ静的に自然循環が開始。デブリはGDCFで冠水。
- ◆ **チムニー配管により約4mの水頭を確保**、大きな自然循環流量を確保。チムニー配管はペDESTAL壁内に固定し耐震性を確保。
- ◆ 炉心デブリからの発熱は*icC*によりS/Pに輸送され、S/Pは*iCCS*により冷却。
- ◆ iCCの上部には開口がなく、炉心デブリは冷却チャンネルに流入しない。



Ref. ICONE26-82428



S/P水により自動的に時間遅れなしに冷却を開始、一体型で耐震性を確保

# 02

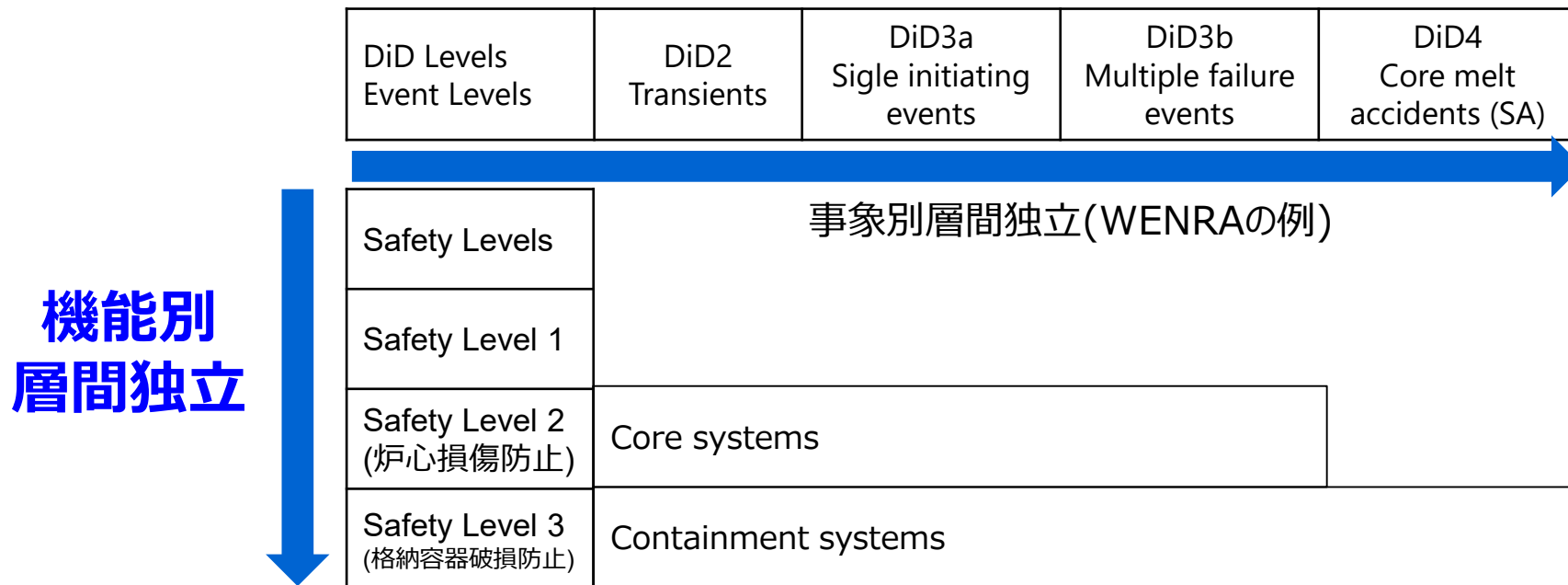
## iB1350の安全思想

## 開発の経緯

- ABWR開発直後(1990年代)から、巨大地震による長期SBOにより外的事象発生時のCDF値が高くなることを認識。動的安全システムの多様化を検討。
- 2000年代、チェルノビル事故の教訓とレベル2 PRAの知見によりSA時の水素発生によりPCVが過圧破損する可能性を認識。日本では巨大地震によりSAが発生するリスクがあり、その場合は緊急時避難は困難と認識。PCVベントを実施すると被ばく線量が増大することからノーベントで緊急避難不要にできるPCV概念の開発に着手。
- 2009年、大規模自然災害を対象とした深層防護を考案。地震時グレースピリオドを採用し、論文で3.11の事故を残余のリスクとして明確に予見し指摘(2009, 2010)。
- AP1000、ESBWRのDCDにより1重CVでは緊急時避難が必要になること、また緊急避難不要のためには2重CVが必要になることを認識。耐圧性の2重CVを採用し、iB1350の基本概念に到達。
- 2019年までiB1350の論文を継続して発表し、炉概念をブラッシュアップ。

# 深層防護レベル ～深層防護マトリクスについて(1/2)～

国内新規制基準、IAEA及びWENRAの深層防護レベルの独立性\*は、事象別層間独立の考え方に基づいている。しかしながら、事象別の層間独立は例外が必要となり、実質、設計上や安全上の意味はなく、新型炉の安全基準にはそぐわない。



## <WENRAに記載されているレベル間の独立性の例外(矛盾)>

- 非常用電源(DiD3a)をDiD2で、SBODG(DiD3b)をDiD4で、スクラム機能(DiD3)をDiD2で使用可
- RPV、PCV、ケーブル等は、異なるDiDレベルでも使用される(独立できない)

# 深層防護レベル ～深層防護マトリクスについて(2/2)～

## 機能別層間独立の特徴

- 炉心損傷防止(Safety Level 2)と格納容器破損防止(Safety Level 3)の独立性の例外は許容されない。(互いにクレジットを取ってはならない。)
- Safety Level 3は、従来の格納容器破損防止機能に加え、被ばくに関する安全要求を満たす必要がある。(新設炉のあるべき姿として、被ばくへの安全要求は必須。WENRAにおいても新型炉へ緊急避難不要と長期移住なし等を要求している。格納容器は破損していなくてもFPが漏洩するため漏洩抑制策が必須。)
- Safety Level 2内であれば、事象によらず(過渡、事故+単一故障、過渡+多重故障、事故+多重故障等)、設備の使用及び炉心溶融防止機能に期待してよい。
- Safety Level 3の設備 (PCV本体、PCCSなど) は事象 (SA、DBA、多重故障など) によらず格納容器破損防止機能に期待してよい。
- 同一のSafety Levelの中でお互いにバックアップが必要な系統は、系統間の独立性が確保される必要がある。ただし、これは信頼性確保のためであり層間独立性の要求ではない。

**事象別層間独立には複数の矛盾が生じるため、  
新型炉には機能別層間独立の考え方が必要**

## 深層防護レベル ～防護レベルの安全目標について(1/2)～

### 従来の原子炉(新型炉)に求められている安全目標

- 炉心損傷頻度(CDF) :  $10^{-5}$ /炉年以下
- 格納容器機能喪失頻度(CFF) :  $10^{-6}$ /炉年以下  
(条件付き格納容器破損確率(CCFP) :  $10^{-1}$ /炉年以下)

### 新たに新型炉に求めるべき安全目標

- 炉心損傷頻度(CDF) :  $10^{-7}$ /炉年以下
- 格納容器機能喪失頻度(CFF) :  $10^{-11}$ /炉年以下  
(条件付き格納容器破損確率(CCFP) :  $10^{-4}$ /炉年以下)

10回に1回は  
格納容器破損

既設炉や現状の新型炉(Gen III.5)よりも低いが、外的事象を考慮すると、CDFは $10^{-4}$ /炉年、CCFPは $10^{-3}$ /炉年程度に劣化すると考えられるため、外的事象込みで大規模放出頻度を $10^{-7}$ /炉年程度とする。

**機能別層間独立を満たすだけでなく、外的事象を踏まえた各防護レベル(層)における信頼性の向上が必須**

# 深層防護レベル ～防護レベルの安全目標について(2/2)～

## 1Fの事故事象を踏まえた反省

- 外的事象による共通要因故障でSafety Level 2がほぼ壊滅
- 炉心損傷後はCCFP値 $10^{-1}$ が機能せず、PCV破損に至る

## 新たに新型炉に求めるべき安全目標（信頼性確保）

### <Safety Level 2(炉心損傷防止)>

- 共通要因故障を排除するため、多様性の強化が必要
- 多重化/多様化した系統間の独立性の強化が必要

### <Safety Level 3(格納容器破損防止)>

- SAに至る外的事象(地震、津波)等からの確実な防護が必要
- 高い信頼性を確保するため、静的安全系の採用が必要  
(AC電源を使用する動的安全系では高い信頼性は得られない)

**新型炉にはより効果的な深層防護思想の実装が必要**



# iB1350の安全系の考え方

- 安全系には多様性と独立性を重視し、海水系が不要な電源、静的安全系を積極採用

[Basic構成]

DBA設備の動的安全系は、  
EDGとUHSの海水が必要

RHR + EDG (低圧/除熱)	RHR + EDG (低圧/除熱)
RHR + EDG (低圧/除熱)	RHR + EDG (低圧/除熱)



DEC設備は動的安全系、静的安全系  
で構成され、UHSの海水が不要

SAFWS + GTG (高圧)	SAFWS + GTG (高圧)
IC	

SA設備もUHSの海水が不要

iPCCS / iCC 等
---------------

- 現行規制の設計基準対処設備、重大事故等対処設備という枠を外し、iB1350の安全思想に基づき、Optimize Safety System(OS) 1、2として、全体の多様性を強化

[OS1の構成]

RHR + EDG (低圧/除熱)	RHR + EDG (低圧/除熱)	RCIC + 蒸気 (高圧)
FLS + GTG (低圧)	FLS + GTG (低圧)	SAFWS + GTG (高圧)
		IC
		iPCCS / iCC

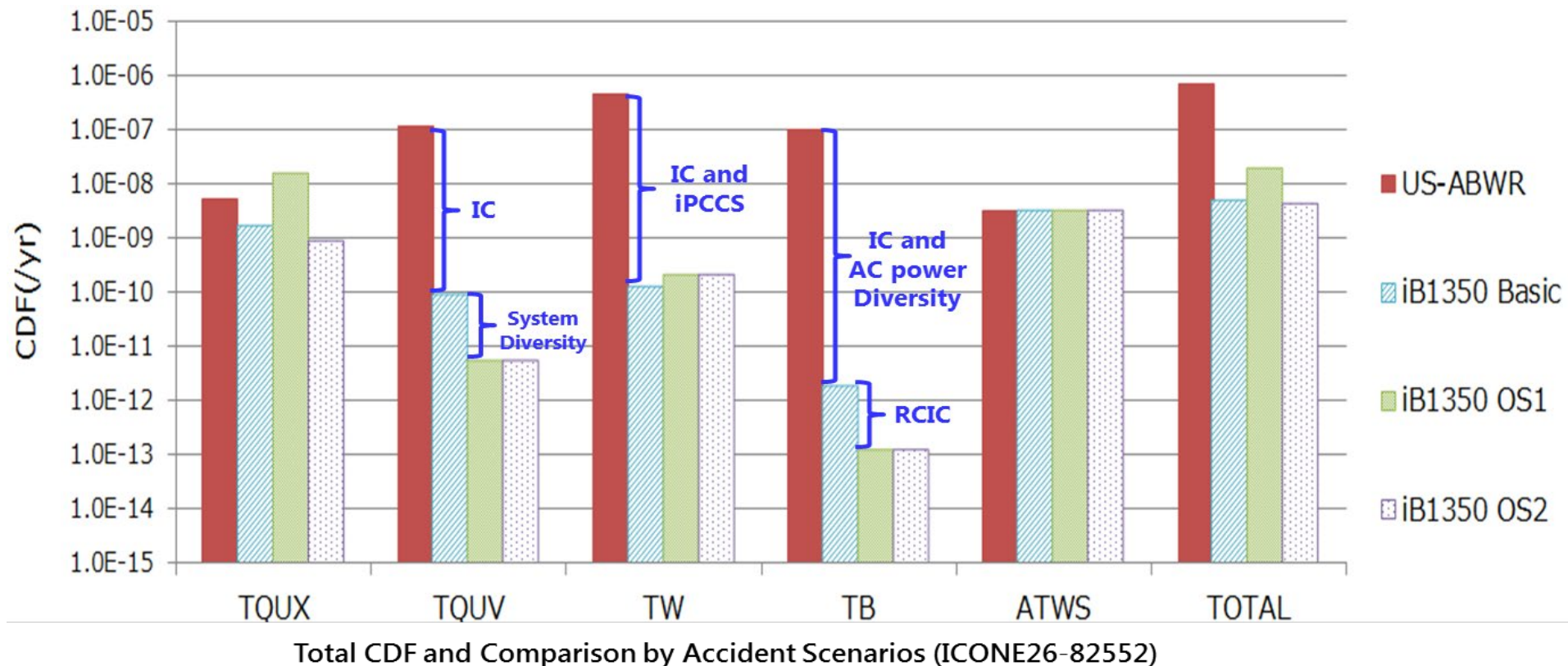
[OS2の構成]

RHR + EDG (低圧/除熱)	RHR + EDG (低圧/除熱)	RCIC + 蒸気 (高圧)
EFWS + GTG (高圧)	EFWS + GTG (高圧)	FLS + GTG (低圧)
		IC
		iPCCS / iCC

: 海水必要電源
  : 海水不要電源  
 : 蒸気駆動
  : 静的安全系(UHS大気)

# iB1350の炉心損傷頻度(CDF) (1/2)

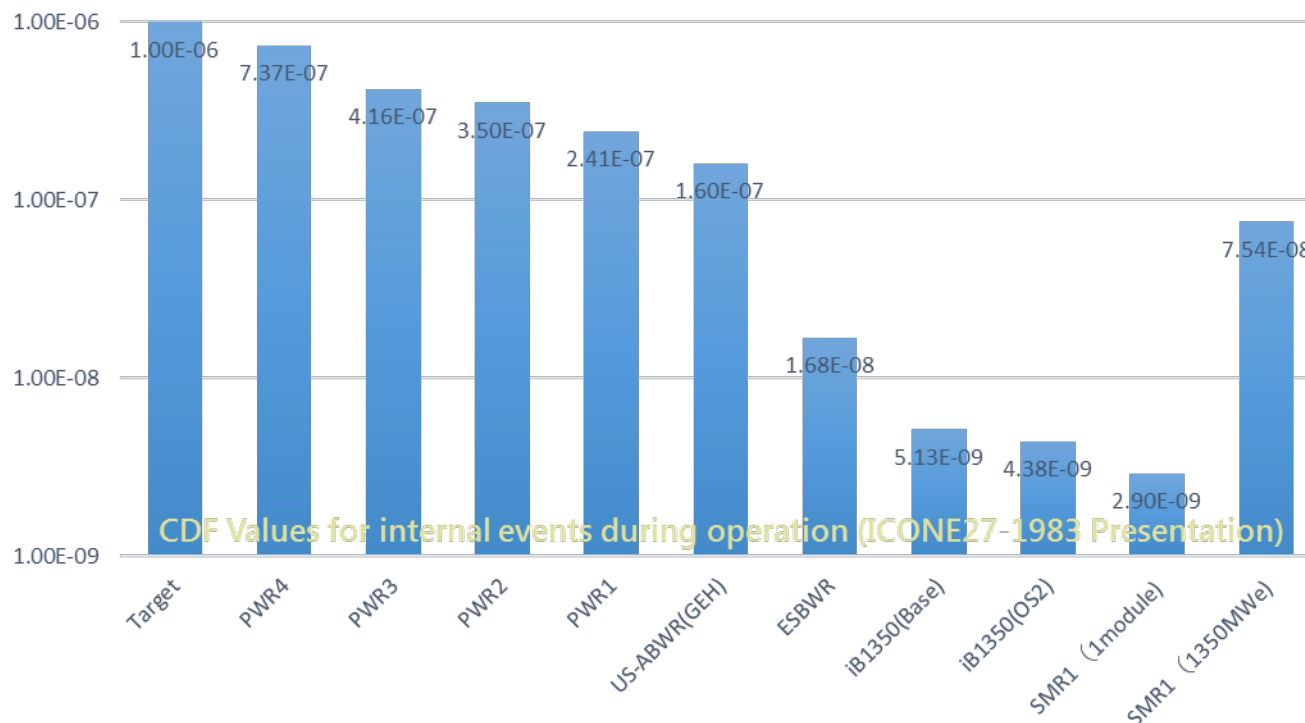
- ◆ iB1350の安全系はUS-ABWRと同じ動的な安全ポンプ6台構成。そこに多様性と静的安全系を加えたことによる比較評価を実施。



静的安全系とシステム多様化でCDFは $10^{-9}$ /炉年オーダー  
SA時の対策だけでなく、炉心損傷防止機能も大幅に強化

## iB1350の炉心損傷頻度(CDF) (2/2)

- ◆ GenIII.5のPWRのCDF値は $10^{-7}$ /炉年のオーダーでGEHが評価したUS-ABWRのCDF値よりも高い。
- ◆ iB1350(OS2)のCDF値は大型LWRのなかで最小となり、 $10^{-9}$ /炉年のオーダーに。
- ◆ SMR1(1モジュール\_50MWe想定)のCDF値はiB1350のCDF値よりもさらに若干低い。しかし、SMR1(27モジュール)で135万kWe相当の出力とすると、CDF値は大幅に上昇しUS-ABWRの半分程度になる。



CDF Values for internal events during operation (ICONE27-1983 Presentation)

**iB1350のCDF値はGenIII.5炉より2桁低く、  
同一出力で比較するとSMRよりも1桁低い**

# 深層防護レベル ～被ばくに関する安全要求 (1/2)～

## 国内/海外での要求

- WENRAでは、新型炉に対して緊急避難不要と長期移住なしを要求し、5km以遠の全ての防災(長期移住、避難、屋内退避、ヨウ素剤服用)を不要とすることを設計ゴールとしている。
- IAEA GS-R-2(2002)では一時退避基準を1週間の回避線量で50mSvとしていたが、IAEA GSR Part7(2015)で実効線量で100mSvを一次移住の一般基準としている。
- 国内では想定する格納容器破損モードに対して、Cs-137の放出量を100TBq以下とする。(周囲への被ばく量の基準はないが、原子炉制御室、緊急時対策所、特重施設の緊急時制御室に関しては、運転員の実効線量が事故後7日間で100mSvを超えないよう要求あり。)

## 深層防護レベル ～被ばくに関する安全要求 (2/2)～

### 新たに新型炉に求めるべき安全目標

- 格納容器および補助系によりSA時の被ばく線量を低減し、PAZの範囲をサイト境界内に収めること。  
(iB1350では事故後1ヶ月間で敷地境界で20mSv以下と設定している。)
- 土地汚染についてはCs-137の放出量を100TBq以下とすること。
- WENRA要求である緊急避難不要、長期移住なしの要求を満足すること。
- Safety Level 3(格納容器破損防止)に要求されるCCFPと同じ信頼度で上記を達成すること。

新型炉は、事故が起きても地域社会に  
極力影響を与えないプラントとすべき

# 03

## 現行規制基準/審査との関連



# 重大事故等対処設備全般について

## <解釈の前提条件>

- 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」によると、各重大事故への要求(特定重大事故含む)には、一部設備要求の記載が含まれているものの、「○○するために必要な設備とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための設備をいう。」との記載があり、この解釈をベースに、新たな安全思想の適用、安全設備の導入が現行規制にも満足するものであると考えている。

## <iB1350の設計への適用例および現行規制基準との論点>

- 第43条 可搬型重大事故等対処設備の設置要求  
⇒iB1350では可搬型設備は設けない設計としている。新設炉として一部の建屋および施設の外的事象対策、航空機衝突対策を行うことにより、第43条で要求される地震、津波、航空機衝突に対しての可搬型設備に対する要求全てを常設設備のみで対応可能としている。これは大規模自然災害時にサイト内の道路等が崩壊している状況で、可搬型設備に期待するよりも安全性は高い。
- 第50条 原子炉格納容器の過圧破損防止に対する要求  
⇒BWRについては代替循環冷却系、格納容器圧力逃がし装置(放射性物質の低減含む)が明示されているが、iB1350では静的格納容器冷却系(iPCCS)、格納容器内フィルターベント(IFVS)、さらにガスの放出先も格納容器内(O/W)とする静的安全系により、同解釈における性能要求を全て満足した上で、動的設備よりも高信頼度で規制要求を達成している。



# 航空機衝突(APC)への対応について

## <APCに対する安全要求>

- 国内の現行規制基準では、格納容器破損防止を要求(日本のみの要求)。
- 一方、海外規制では炉心損傷防止のみを要求。

## <iB1350における対策>

- 国内外規制への適合の観点から、APC時の炉心損傷防止、格納容器破損防止の両方を満足させる。
- APC時の炉心損傷防止設備は、現行規制基準における要求(SA設備)ではないため、APC防護されたDBA設備、DEC設備を用いる。
- SA設備である静的安全系は、APCや津波に防護された格納容器建屋内に設置し、ビルトイン特重施設として使用する。
- 上記SA設備は、APC時の炉心損傷(対策済であるが、深層防護の観点)においても、被ばく線量低減機能も格納容器破損防止に要求されるCCFPと同じ信頼度で達成させる。

## <現行規制基準との論点>

- 既設炉では必須とならざるを得ない「外部特重施設」が、その本来の機能要求を満たすのであれば、SA設備のAPC防護で認められるべき。
- 革新軽水炉では、地域住民との共生、また海外規制を踏まえ、炉心損傷防止設備もAPC防護することを規制化するべき。

# 特定重大事故等対処施設(特重施設)について

## <特重施設に対する安全要求>

- 大型航空機の衝突その他のテロリズムに対し、必要な機能が損なわれない。
- 格納容器の破損を防止するために必要な設備を有する。
- 発電所外からの支援が受けられるまでの間、使用できる(例えば7日間)。
- 地震、津波による損傷を防止する。(本来はテロ対策施設には不要の要求であり、SA設備のバックアップを兼ねていると解釈される。)

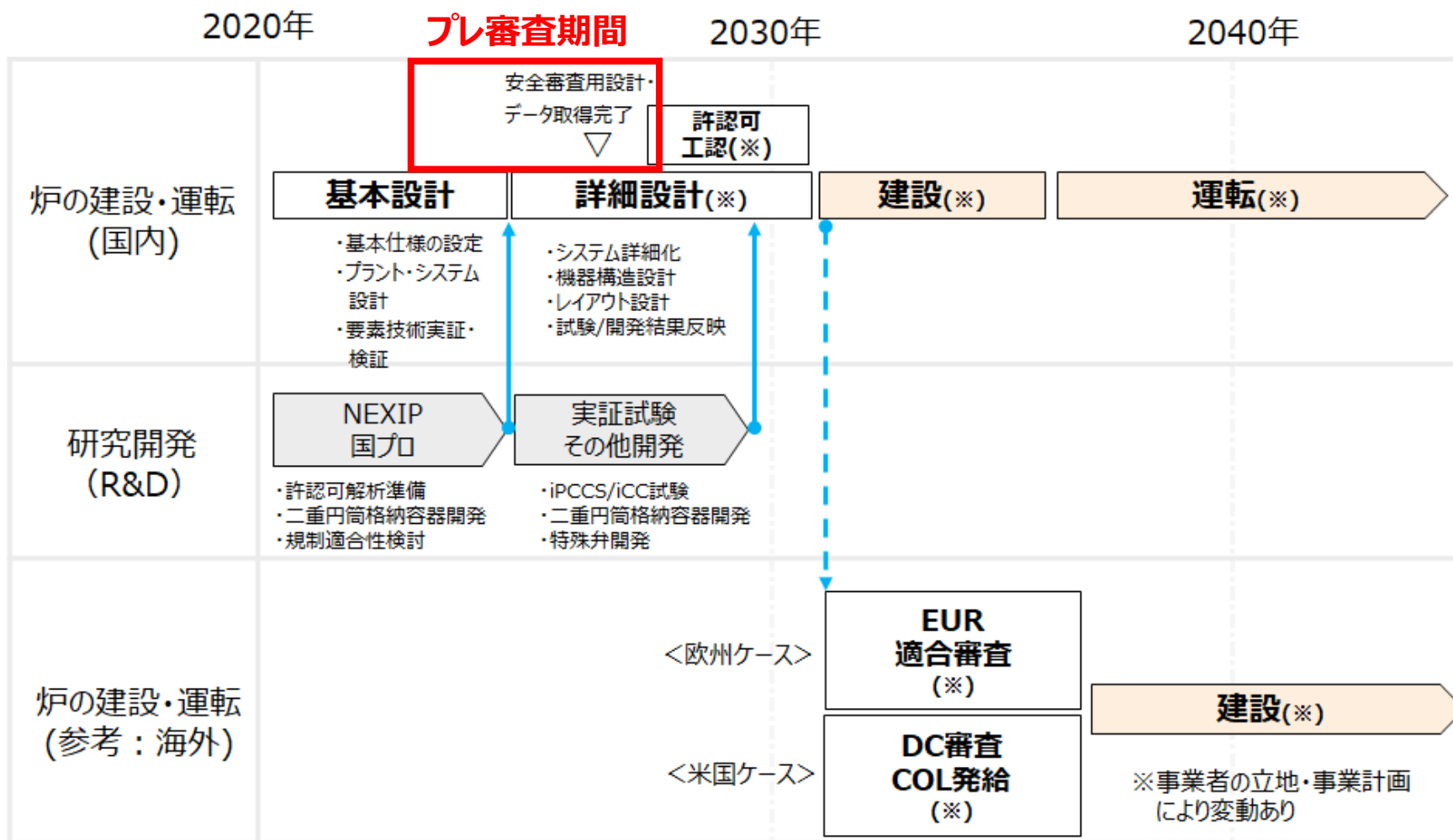
## <iB1350における対策>

- 炉心損傷防止、格納容器破損防止、被ばく線量低減を担う設備は、航空機衝突対策済の格納容器建屋内に収納するか、対策を行うことで、外部の特重施設は設けない。
- 特重施設を担う設備は、7日間は外部からの支援(水の補給等)がなくても機能する容量を確保する。
- テロ対策施設とSA設備の両方を兼ねることとなるため、地震や津波に対しても、機能を損なわないよう設計する。

## <現行規制基準との論点>

- 外部特重施設を設置しないことに対する既設炉と新設炉(革新軽水炉)の考え方の違いが認められるべき。
- 現行規制基準の性能要求は全て満足した上で、実際に信頼性や安全性を高めた対策が認められるべき。

# 規制適合性審査に向けたスケジュール



2020年代後半の許認可審査の前に、規制の予見性を高めるためのプレ審査等の活動が必要

# 04

まとめ

# iB1350の安全方針のまとめ（安全設備実装の考え方）

- 大規模自然災害によりSBOやLUHSが発生し炉心溶融に至った場合にも対応可能なように**第4層設備は電源や海水系が不要な静的安全系を実装**する。静的安全系には以下の利点がある。
  - 静的安全系はUHS（大気）までの放熱経路の実装が確実に可能。海水系よりも実装が確実に可能。
  - 静的安全系は大型のAC電源、海水系、ポンプが不要なため信頼性が高く第4層の信頼性を高めることが可能。
  - 第3層と第4層のバランスを適切に確保した深層防護の実装が可能。
  - 静的安全系は自律性が高くグレースピリオドを長くすることが可能。
  - 静的安全系は熱交換器と配管で主に構成されるため低コストで実装が可能。
  - 静的安全系は外部に伸びる海水系がなくコンパクトなためAPC防護された格納容器建屋内に収納(ビルトイン)することが可能。
- コアキャッチャーは設置するだけでは不十分で、**長期の冷却機能の実装が必要**。iB1350のコアキャッチャーはドライキャビティ方式でデブリが落下したとほぼ同時に冷却チャンネル内の冷却水によって崩壊熱をS/Pへ伝達。また、溶融弁でデブリを冠水して冷却。コアキャッチャーの冷却は初期も長期も自動かつ静的に実施され、崩壊熱はiPCCSによってUHSに放熱される。**完全に静的に長期冷却が可能なコアキャッチャーを実装**している。
- 既設炉は既に建設されているため、外部特重施設や可搬式設備をAdd-onして安全設備を実装した。しかし、革新軽水炉iB1350は、設計段階からこれらの安全設備の機能を取り込み、**新たな安全メカニズムを組み込んだ（Built-inした）革新軽水炉として実装**。
  - 外部特重施設ではなく**内部（Built-in）特重施設を実装**。
  - 既設炉が必要とした可搬式設備の機能もBuilt-in 安全設備として実装。可搬式設備には頼らない設計。世界の革新的軽水炉で可搬式設備を主要な安全設備としているものはない。

## iB1350は静的安全系をビルトインした革新軽水炉

**TOSHIBA**

# 補足資料



## 新型炉の論点/横断的な事項 新型炉に活用できる既存のしくみ

- 新技術導入に対する規制の枠組みをどのように考えるか。活用できる既存のしくみは何か。
- 規制の枠組みとして機能がより上回るものは認めるという基本原則がある。これにより静的安全系などの新技術の導入が可能。
- 特重施設は堅牢な建屋に収納することも認めている（規制の枠組みとしては外部であることを必ずしも一元的に要求はしていない）
- 既設では外部の丘の上に特重施設を設置しているが、APC対策上は明らかに不利な設計で矛盾している。APCではなく防潮堤を超えるさらなる大津波を心配してのことと想像できる。
- 従って、特重施設は格納容器建屋内にビルトインして防潮堤を超える大津波にも防護されていれば丘の上に設置する必要はないものと考えられる。

内部（ビルトイン）特重施設は現行の枠組みの活用が可能

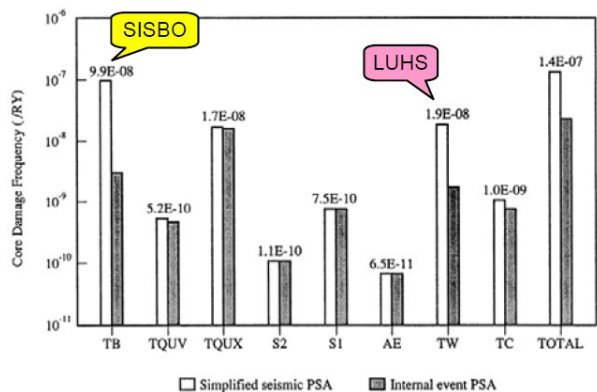
# 新設炉に対する規制基準と既設炉に対する現行規制基準の関係

- 現行規制基準には、APC時に炉心溶融防止の要求はないが、**新設炉ではAPC時に炉心溶融の防止ができることの要求があるべき。**
- この対策設備は特重施設ではなく、炉心溶融の防止設備なので、**APC防護されたDBA設備及びDEC設備での対応を認めるべき。**
- また、現行規制基準にはAPC後の炉心溶融の緩和対策（特重施設）の要求があり、世界で唯一の稀有な安全要求となっている。
- 新設炉では、APC時の炉心溶融緩和対策は、炉心溶融緩和設備であるSA設備での対応を認めるべき。
- 既設炉のSA対策は必ずしも十分ではないため、さらに特重施設が必要との現行規制基準になっているが、**新型炉では十分な安全機能を持ったSA対策設備をAPC防護することによってAPC時の炉心溶融緩和対策として使用することが認められる体系とするべき。**
- 但し、全ての安全設備をAPC防護するのではなくAPC時に使用する安全設備だけをAPC防護する体系とするべき。

**特重施設ではなくAPC防護したDBA、DEC、SA設備を  
プラント建設時から要求するべき**

# 開発の経緯 (1/5) 1990年代：地震時SBO対策の検討

- ABWR開発直後（1990年代）から検討を開始。
- 1990年代 ABWRはTMI 2 事故の教訓等を反映して多重故障やヒューマンエラーへの対応を強化し内的事象のCDF値を低減したが、**巨大地震による長期SBO（SISBO）により外的事象のCDF値が高くなることを認識。SISBO対策として多様化動的システム（ARCIC, HDIS, GTGなど）を採用。**
  - Basic Philosophy of the Safety Design of the Toshiba Boiling Water Reactor, Nuclear Technology, Vol. 99 1992.
  - PSA in design of passive & active safety reactors, Reliability Eng., 1995.
  - ICONET7(7331) Toshiba\_Study\_on\_Advanced\_ECCS\_Configuration\_For\_The\_Next\_Generation\_BWRs\_April\_1999.



Result of simplified seismic PSA in comparison with internal event PSA for the ABWR (Sato et al., 1995)

ARCIC：自分の発電機でDC充電できるRCIC  
 HDIS：ディーゼル駆動高圧注水系

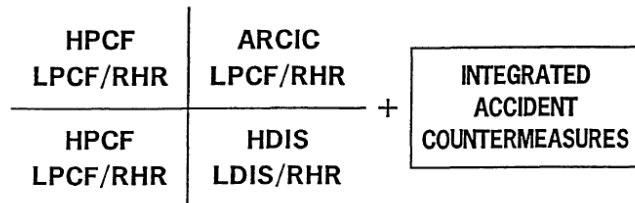


Fig.8. Safety system configuration of TSBWR (Sato et al., 1995)

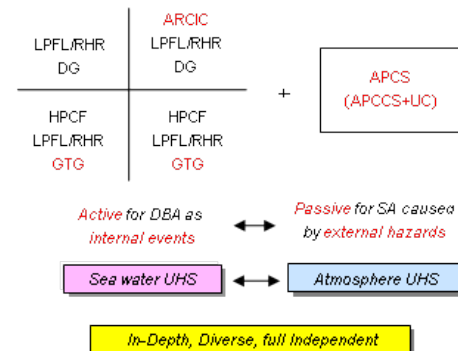


Fig.4. Safety System Configuration of TSBWR II next generation BWR (Sato et al., 1999) (Sato et al., 2004) [9,10].

## 地震起因の長期SBO（SISBO: Seismically Induced SBO）の対策を検討

# 開発の経緯 (2/5) 2000年代 ノーベントPCVの検討

- 2000年代 チェルノビル事故の教訓とレベル2 PRAの知見によりSA時の水素発生によりPCVが過圧破損する可能性を認識。日本の場合は巨大地震によりSAが発生するリスクがあり**緊急時避難は困難と認識**。PCVベントを実施すると被ばく線量が増大することから**ノーベントで緊急避難不要にできるPCV概念の開発に着手**。IC/PCCSによる冷却を採用。耐圧性のオペロドームにベントする案を採用し水素閉じ込めに使用。
  - Different variations of a passive safety containment for a BWR with active and passive safety systems (ASBWR and Mark X containment), Nuclear Engineering and Design, 2005.
  - Variations of a passive safety containment for a BWR with active and passive safety systems (TSBWR, Mark S), Nuclear Engineering and Design, 2007.
  - ICONE15-10618 Two Types of a Passive Safety Containment (Mark S & Mark X), 2007.
  - Two types of a passive safety containment for a near future BWR with active and passive safety systems (TS1800, Mark S, TS1000, Mark X), Nuclear Engineering and Design, 2009.
- 巨大地震による長期SBO (SISBO)対策としてGDCCSの設置にこだわり、大量水素発生対策としてオペロドームを使用する概念に限界。オペロを窒素封入する必要があり理論的に成立しても実機としての成立性に限界。ノーベントで水素を閉じ込められる圧力抑制型PCVの現実的な案が思いつかない。

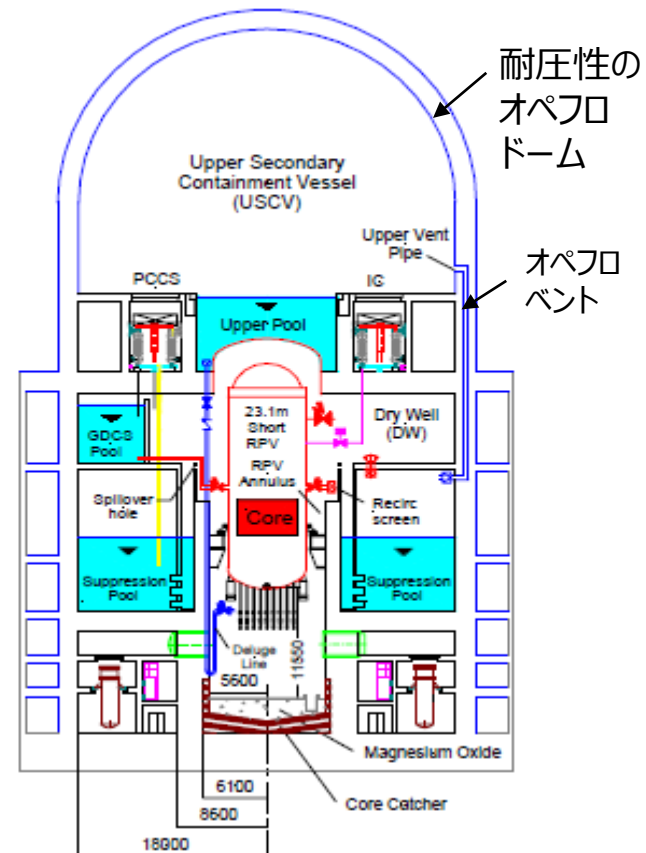


Fig.3. The AB1600 in the Mark S Containment. ICONE15-10618

## 3.11のリスクを20年前から予見するも解決方法なし

# 開発の経緯 (3/5) 3.11前 巨大地震と大津波のリスク

- 2009年4月 中越地震、奥尻島大津波、インド洋大津波、チリM9地震などから巨大地震と大津波によるリスクを認識。大規模自然災害を対象とした深層防護を考案。地震時グレースピリオドを採用。3.11を残余のリスクとして明確に予見し指摘(2009, 2010)
  - ICAPP09-9447 Safety Design Philosophy of the ABWR for the Next Generation LWRs, 2009.
  - INPRO workshop, February 2-4, 2010, IAEA, Vienna, Austria.  
[http://www.iaea.org/OurWork/NE/NENP/INPRO/1st\\_Dialogue\\_Forum/26-Sato.pdf](http://www.iaea.org/OurWork/NE/NENP/INPRO/1st_Dialogue_Forum/26-Sato.pdf)

*“Only very small residual risks, if any, exist rather in external events, including;*

- *Extremely severe earthquake far beyond design basis*
- *Extremely strong cyclone, hurricane, and typhoon*
- *Extremely large tsunami*
- *Large airplane crash*
- *Intentional attack by terror”*  
*(Sato et al., 2009a, Enhancements are added.) [7]*

Ref. ICAPP09-9447

TABLE II  
DiD for Residual Risks of Devastating External Events by Sato in 2009 (rDiD)

rDiD Levels		Event categories	Essential means
Level 1		Normal operation	Conservative design and high quality
Level 2		Operational occurrences	Control, limiting and protection systems (SCRAM)
Level 3		Design basis accidents	Engineered safety features (EDG and ECCS)
Level 4	Level 4a	Severe external events (SISBO, LUHS)	Additional safety features Grace period > 3 days Autonomy > 7 days
	Level 4b	Severe external events (SA)	Passive containment systems (containment itself and passive supporting systems) Passive grace period > 3 days Autonomy > 7 days
No failure of DiD by on-site measures		Eliminate significant releases and limit consequences	Do not rely on off-site emergency response. No permanent relocation and no need for emergency evacuation.

Ref. ICONE27-1983

3.11の前に巨大地震と大津波を前提とした深層防護を作成、新型炉の設計に適用

# 開発の経緯 (4/5) 3.11直前 二重円筒PCV完成

- 2010年6月 AP1000、ESBWRのDCDにより1重CVでは緊急時避難が必要になることを認識。緊急時避難不要のためには2重CVが必要になることを認識。耐圧性の2重CVを採用。
  - ICONE18-29789 Three Types of a Passive Safety Containment for a Near Future BWR with Active and Passive Safety Systems (Mark S+, Mark D, Mark X), 2010.
- 2010年11月 3.11前に3.11に対応できる二重円筒PCV(Mark W)とSATOR1600の炉概念を完成。(SATOR: Severe Accident Tolerant and Optimized Reactor)。GDCSを削除した空間に耐圧性の OUTER ウェルを採用。水素を保持可能な実炉概念をついに完成。
  - ICONE19-43342 International Nuclear Safety Categories (INSC) for LWRs, 2011.

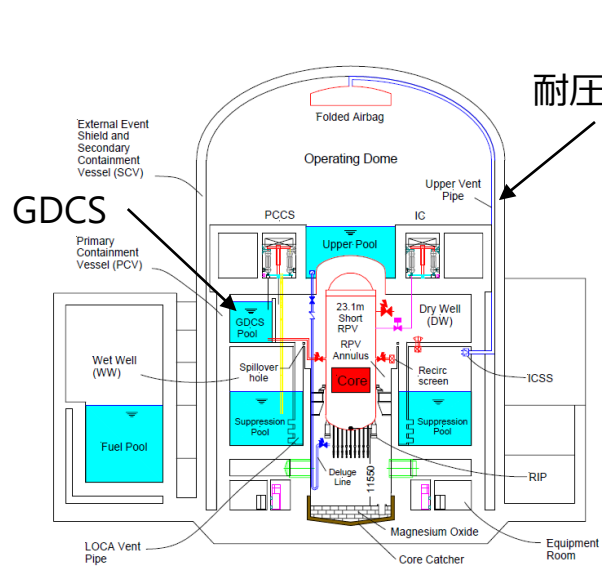


Fig.2. Mark S+ Containment for the TS1800. ICONE18-29789

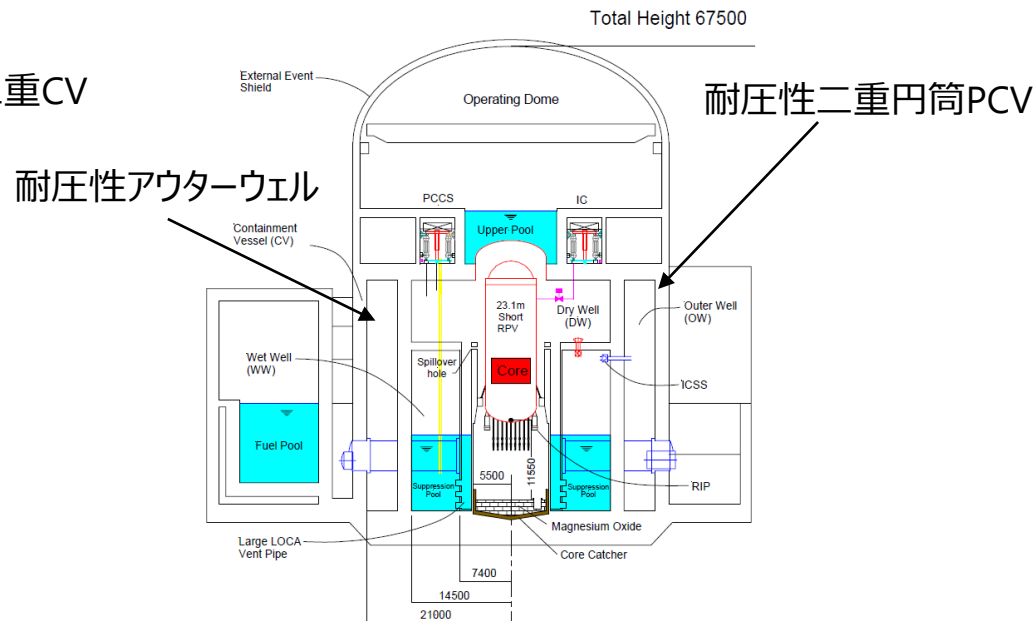


Fig.5 Mark W containment for the SATOR1600. ICONE19-43342

## 3.11の前年にiB1350の基本概念を構築



# 開発の経緯 (5/5) 3.11後 iB1350のブラッシュアップ

- 2011年11月 HP-ABWRに二重円筒PCVを提案。2012年5月正式採用となる。
- 2014年 SATOR1600をブラッシュアップしたiBRを発表。ABWR設計を踏襲するため出力を135万kWに変  
更しPCVを小型化。外置き燃料プールを廃止。
  - ICONE22-30309 The iBR – A Generation III.7 Reactor after the Fukushima Daiichi Accident, 2014.
- 2015年 商標の観点よりプラント名をiB1350に変更。W/Wから蒸気を吸引するiPCCSを採用。2019年まで  
iB1350の論文を継続して発表しブラッシュアップ。iB1350関連の論文は全部で18件
  - ICONE23-1638, ICONE23-1642, ICONE23-1645, ICONE23-1647, 2015. iPCCSを追加、MAAP解析、PRA、SA時被ばく評価
  - ICAPP2016-16606, ICONE24-60523, ICONE24-60919, 2016. iCCを追加、新型炉比較評価
  - ICAPP2017-17443, -18253, -17447, -17445, ASRAM2017 1089. 2017. OS1及びOS2を追加、外的事象PRA
  - ICONE26-82428, ICONE26-82552, 2018. 深層防護の考え方を整理
  - ICONE27-1983, ICONE27-1984, 2019. iB1000、iB800のラインアップを追加

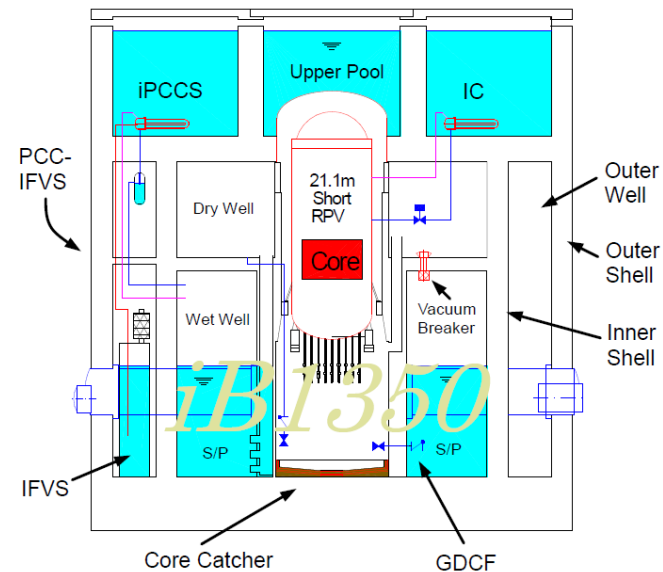
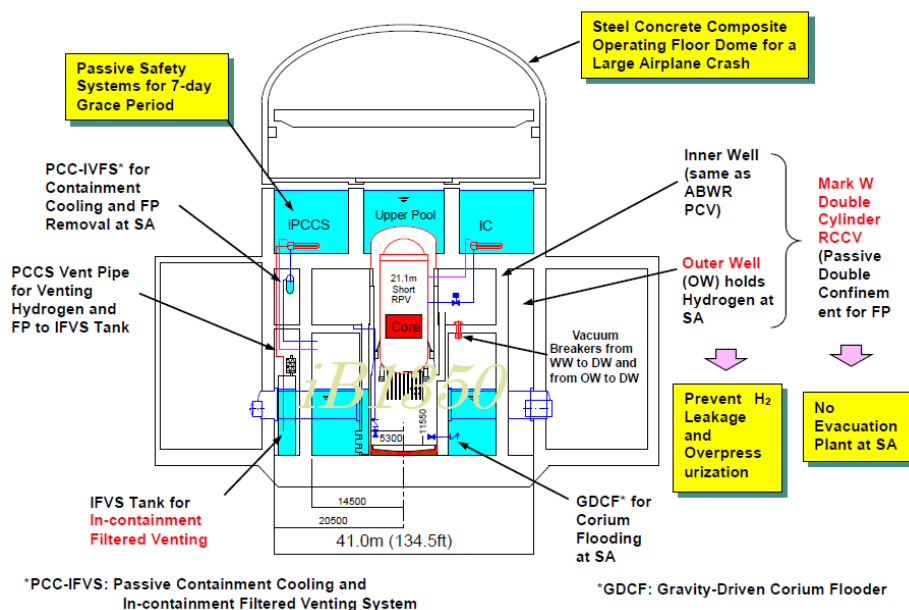


Fig.5. Main Characteristics of the iB1350. ICONE23-1638

Fig.6. Built-in passive safety systems (BiPSS) of the Mark W containment. ICONE23-1638

2019年までは主に論文活動により炉概念をブラッシュアップ



# iB1350の各シーケンスにおける炉心損傷頻度(CDF) (1/4)

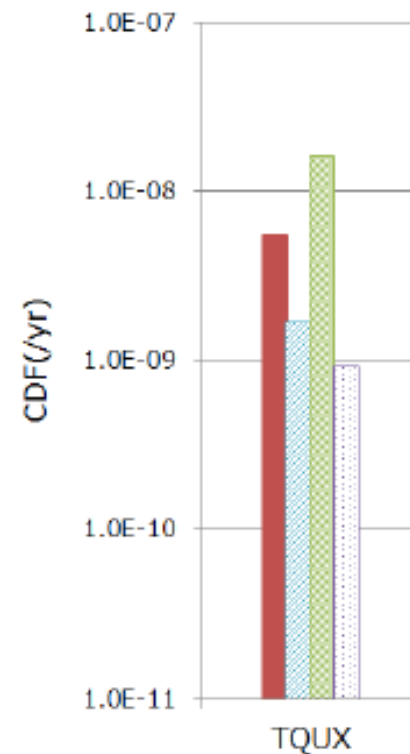
## ◆TQUXシーケンス:

### 高圧注水・減圧失敗

- 高圧注水系の系統数の影響大.
- 逃がし弁開固着(SORV)シナリオが最も支配的.

	US-ABWR	iB1350 Basic	iB1350 OS1	iB1350 OS2
Safety System *	<u>RCIC</u> 2 HPCF	<u>IC</u> 2 SAFWS	<u>IC</u> <u>RCIC</u> SAFWS	<u>IC</u> <u>RCIC</u> 2 EFWS
Total	3	3	3	4
Total (SORV)	2	2	1	2

\*: Underlined system cannot be credited for SORV due to reactor depressurization.



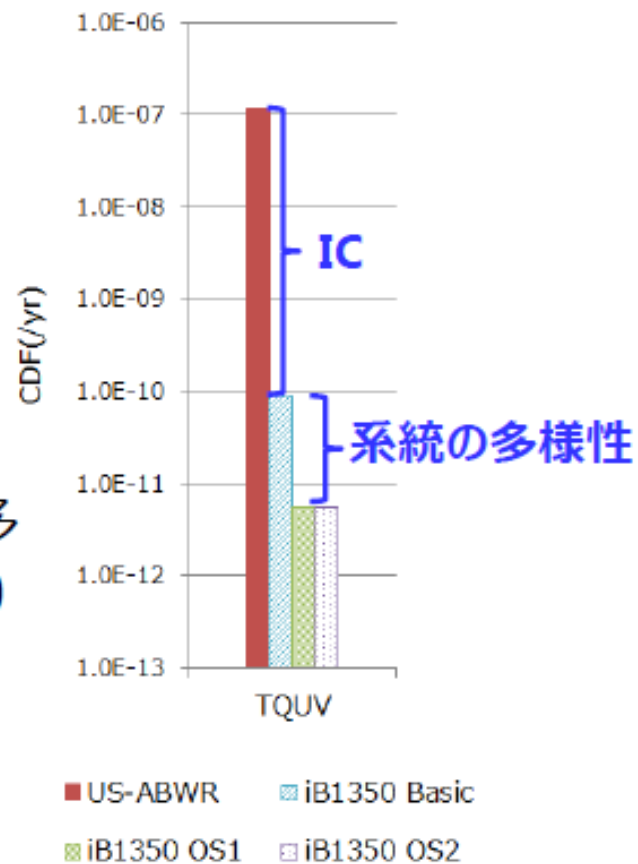
■ US-ABWR    ■ iB1350 Basic  
■ iB1350 OS1    ■ iB1350 OS2

# iB1350の各シーケンスにおける炉心損傷頻度(CDF) (2/4)

## ◆TQUVシーケンス:

### 高圧・低圧注水失敗

- 高圧・低圧注水系の系統数の影響大.
- いずれのiB1350オプションにもICがあるため, US-ABWRよりも大幅に低いCDFを達成.
- 既述の通り, iB1350 OS1とOS2では系統の多様性が強化されているため, iB1350 Basicよりも低いCDFを達成.

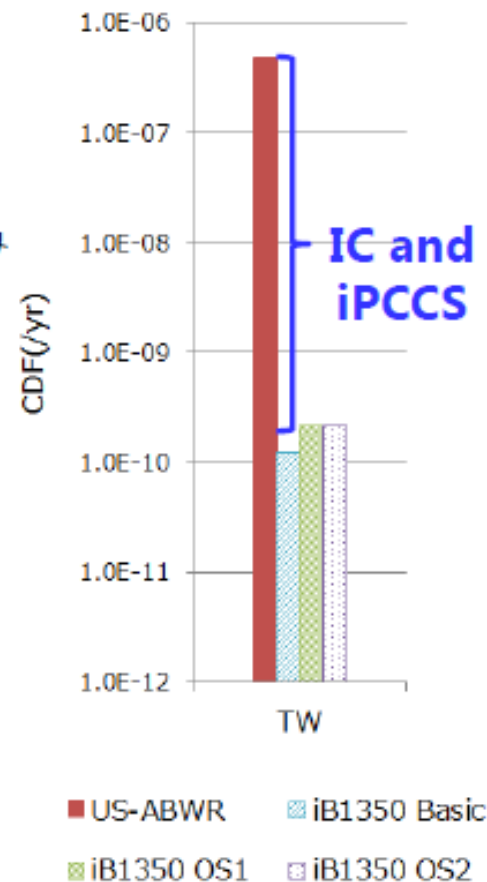


# iB1350の各シーケンスにおける炉心損傷頻度(CDF) (3/4)

## ◆TWシーケンス:

炉心注水成功, 崩壊熱除去失敗

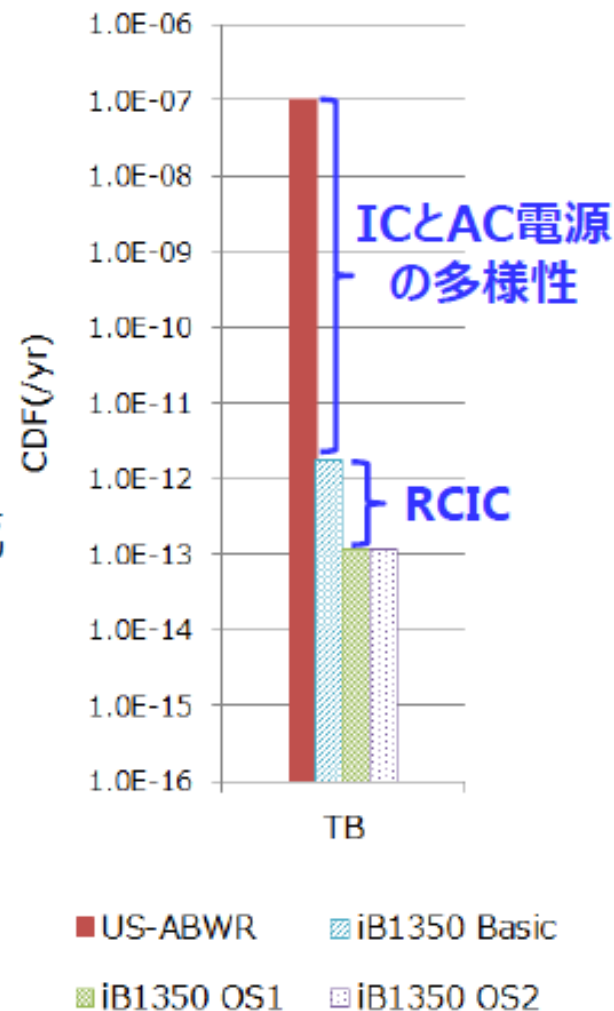
- 残留熱除去系であるRHR, ICとiPCCSの系統数が影響.
- US-ABWRではICもiPCCSもないため, RHRのみが頼り.
- 全てのiB1350オプションでICとiPCCSがあるため, US-ABWRよりも低いCDFを達成.
- iB1350 OS1とOS2ではRHRの冗長性を減じているが(4⇒2系統), 共通要因故障が支配的であるためCDFへの影響は無視できる.



# iB1350の各シーケンスにおける炉心損傷頻度(CDF) (4/4)

## ◆TBシーケンス: 交流電源喪失

- 交流電源の数と多様性によりほぼ決定.
- AC電源に依存しないため, IC/RCICによりCDF低減が可能.
- 全てのiB1350オプションでICと交流電源の多様性により, US-ABWRよりも低いCDFを達成
- iB1350 OS1とOS2ではRCICがあるため, iB1350 Basicよりも低いCDFを達成.



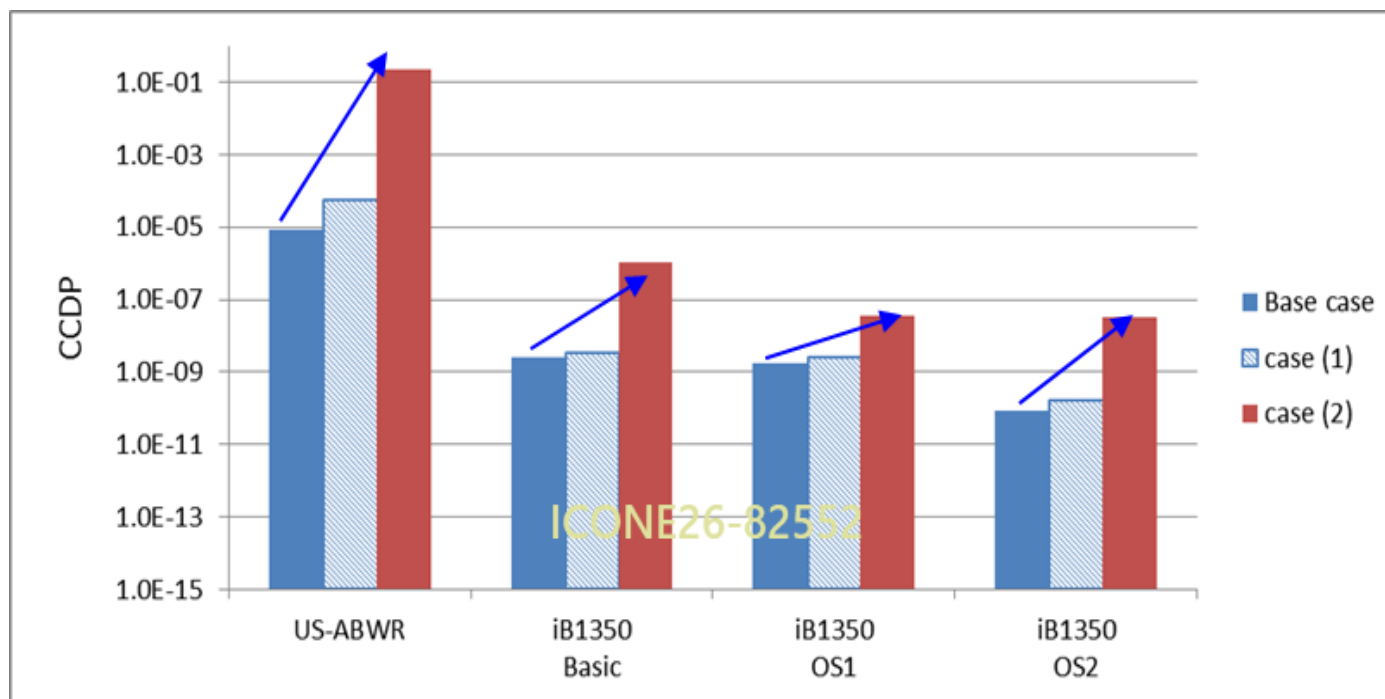
# iB1350の外的事象に対するプラント耐性(1/2)

- ◆ 甚大自然災害に対するプラントの耐性を評価。
- ◆ 外電喪失が発生頻度 1 で発生したと仮定、さらに、外的事象による安全機能喪失を仮定し、条件付き炉心溶融確率（CCDP）を評価。

	評価条件	甚大自然災害のタイプ
ベースケース	LOOP（電源復旧あり）	通常のLOOP（自然災害なし）
想定ケース 1	LOOP（電源復旧なし）	巨大竜巻、巨大地震、大型台風 (ex. 千葉県台風)
想定ケース 2	LOOP（電源復旧なし） さらに 最終的な熱の逃がし場の 喪失 (LUHS) 及びそれによ って SBO が従属的に発生	LUHS/SBO を発生させる甚大な 自然災害。巨大津波、巨大サイク ロン、巨大ハリケーン、巨大台 風 (ex. 3.11)

## iB1350の外的事象に対するプラント耐性(2/2)

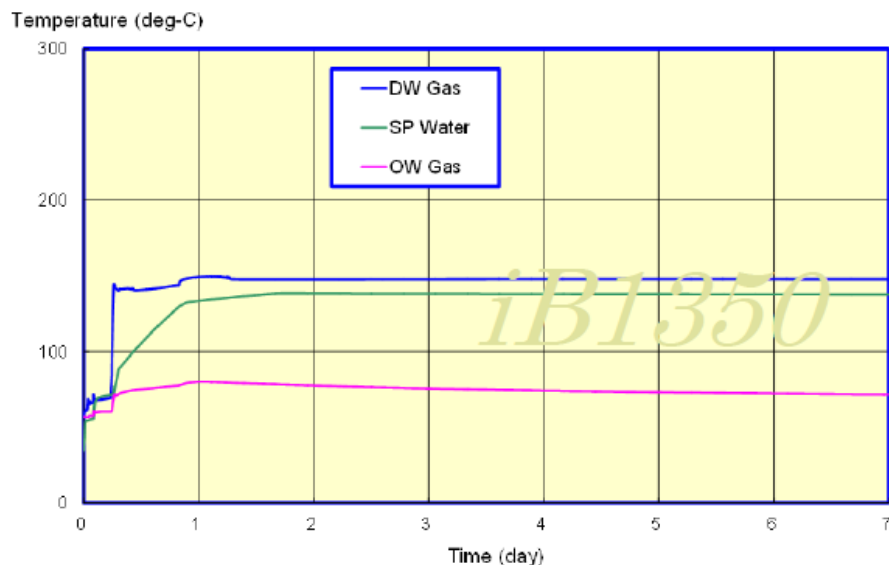
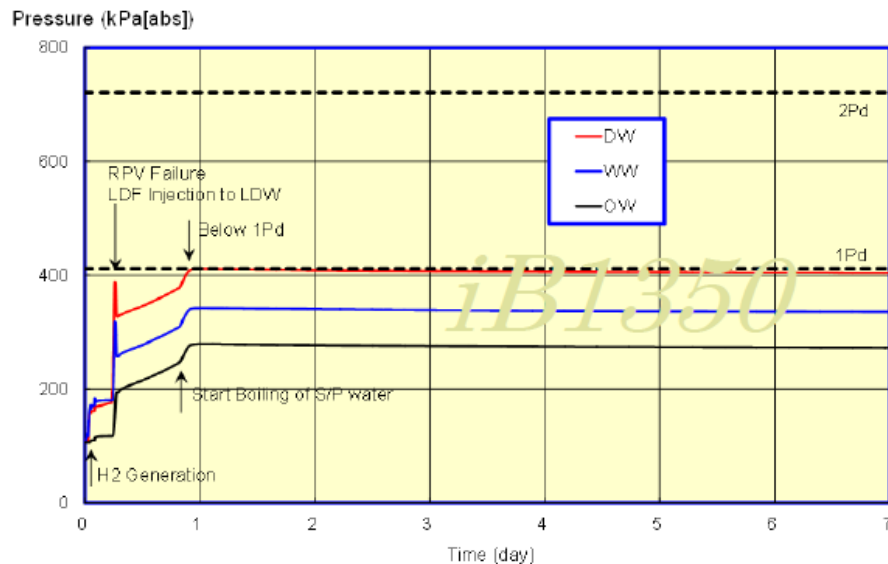
- ◆ ケース1ではICのないUS-ABWRがベースから若干増加。iB1350はICと電源の多様性からほぼ増加なし。iB1350は長期外電喪失に極めて強い。
- ◆ ケース2ではUS-ABWRはLUHSによりECCSとEDGが喪失、CCDPは0.2程度に増加。一方、iB1350のCCDPはICと電源の多様性により $10^{-8} \sim 10^{-6}$ と極めて低い。Basicでは $10^{-6}$ 、特にGTGが3系統あるOS1とOS2では $10^{-8}$ とさらに低い。
- ◆ iB1350は3.11のような甚大自然災害においても、実質的に炉心溶融しない。IC/iPCCSで炉蒸気がDW内に流入しないので一次系機器の財産損失も発生しない。



iB1350は甚大自然災害によるLUHS/SBOへの耐性が大きい

# iB1350のSAに対する性能 (TQUV)

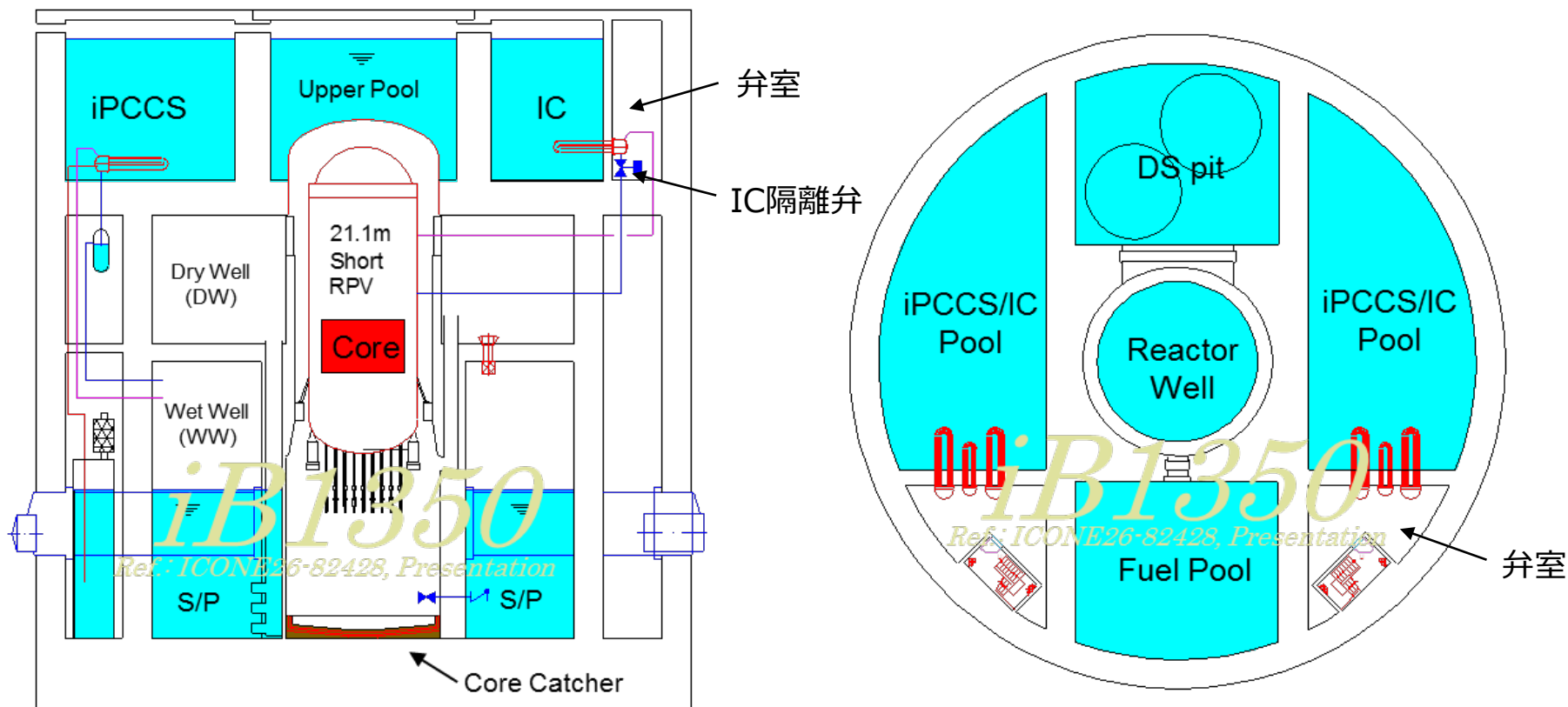
- ◆ TQUV : 給水喪失後に高圧注水と低圧注水に成功するものの、減圧に失敗するシーケンス.
- ◆ TQUVシーケンスについてMAAP 4.0.7により7日間解析.
- ◆ PCV圧力を長期に亘り1Pd以下に維持.
- ◆ PCVバウンダリ (アウターウェル) 温度は100 °C以下に抑制.
- ◆ ドライウェル温度を長期に亘り150°C以下に抑制.





# アイソレーションコンデンサー(IC)

- ◆ IC隔離弁 (DC電動弁) はPCV外の弁室に設置 (外2弁)。L3で自動開。現場開も可能。
- ◆ 水位低 (L1)で自動隔離。ATWS時にも使用するので約4%の除熱容量。
- ◆ SA時にはICは事前に自動隔離するため、熱交配管破断時のICからのFPの大漏洩を防止。



長期SBO時にも原子炉を7日間冷却することが可能