

## 重大事故時の格納容器過圧破損防止対策について

### 1. はじめに

東海第二発電所の格納容器設計の特徴を踏まえた過圧破損防止対策について説明する。

### 2. 東海第二発電所の格納容器設計の特徴

放射性物質の最終障壁となる格納容器設計（設計基準事故対処設備）の特徴は以下のとおりである。

- ・ 改良標準化（定検時作業スペースの拡大等を採用）以前の設計である M a r k - II 型格納容器であり，原子炉熱出力に対する格納容器の自由体積が小さい
- ・ 格納容器の最高使用圧力は 0.31MPa[gage]であり，M a r k - I 型 / I 改型の 0.427MPa[gage] に比べて低い
- ・ A B W R プラントでは格納容器除熱系として残留熱除去系（3 系列）を設置する設計としているが，B W R 5 プラントでは残留熱除去系（2 系列）を設置する設計

この格納容器設計の特徴から，重大事故等の格納容器過圧事象発生時には，他の格納容器型式の国内 B W R プラントよりも格納容器ベントまでの時間が短くなる（別紙 1）。このため，その特徴を踏まえた格納容器過圧破損防止対策の設計を採用している。

### 3. 東海第二発電所の格納容器過圧破損防止対策の設計

設置許可基準規則第 50 条では，B W R プラントに対し重大事故時の過圧破損防止対策として格納容器圧力逃がし装置の設置が要求されているが，格

格納容器圧力逃がし装置は意図的に格納容器内の蒸気を放出する対策であり、フィルタを介するものの放射性物質の環境への放出を伴う特徴がある。東海第二発電所では、上記 2. の格納容器設計の特徴を踏まえ、事故後短期の格納容器ベントを実質的に排除するため、以下の重大事故等対処設備の設計を採用する（下線部はこれまでの設計からの変更点）。

- ① 格納容器過圧破損防止対策として環境への放射性物質の放出を伴わない格納容器除熱系（代替循環冷却系）の多重化設計の採用
- ② 事故後長期の放射線水分解に伴う格納容器内水素爆発防止対策のため代替窒素封入系（可搬型窒素供給装置）の強化及び格納容器圧力逃がし装置の採用

それぞれの設備について、以下の方針にて設計する。

(1) 代替循環冷却系

格納容器過圧破損防止対策として優先して使用する代替循環冷却系は、残留熱除去系との多様性、独立性を確保し位置的分散を図ることで、共通要因により同時に機能喪失することを防止する設計とする（別紙 2）。

(2) 代替窒素封入系（可搬型窒素供給装置）

代替窒素封入系（可搬型窒素供給装置）は、放射線水分解による格納容器内の酸素濃度上昇時に格納容器内に窒素封入することで、格納容器内の酸素濃度の上昇を抑制する設計とする（別紙 2）。

(3) 格納容器圧力逃がし装置

格納容器圧力逃がし装置は、残留熱除去系及び代替循環冷却系との多様性、独立性を確保し位置的分散を図ることで、共通要因により同時に

機能喪失することを防止する設計とする。また、サブプレッション・チェンバ側及びドライウエル側のいずれからも格納容器内の非凝縮性ガス等の排気を可能とし、排気中に含まれる放射性物質を低減するためのフィルタ装置を設置する設計とする（別紙2）。

#### 4. 代替循環冷却系の信頼性

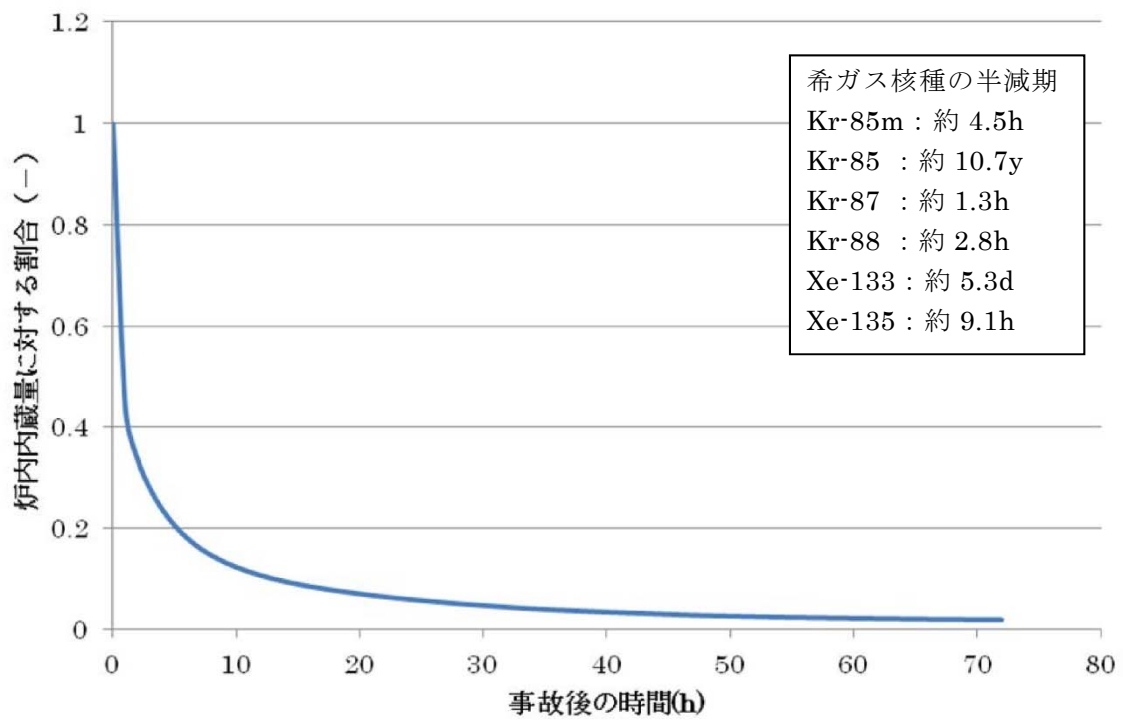
格納容器圧力逃がし装置による事故後短期のベントを実質的に排除するため設置する代替循環冷却系のシステム非信頼度は以下のとおりである。代替循環冷却系の多重化により、システム非信頼度が1桁程度低減することが可能である（別紙3）。

- ・ 代替循環冷却系2系列（A系及びB系） : 約  $3 \times 10^{-4}$  /demand
- ・ 代替循環冷却系1系列（A系のみの場合） : 約  $2 \times 10^{-3}$  /demand

#### 5. 代替循環冷却系による格納容器ベント遅延効果について（別紙4）

格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の有効性評価において、代替循環冷却系により格納容器除熱を実施する場合の可燃性ガス排出のための格納容器ベント時間は、事故後約40日後（約39.7日後）となる。また、放射線水分解の不確かさ（G値の不確かさ）を考慮した場合においても、代替循環冷却系により格納容器ベントの実施時期を事故後約5日後（約122時間後）に遅延することができる。

一方、代替循環冷却系に期待しない場合には、サブプレッション・プールの水位上昇によって格納容器ベントに至り格納容器過圧破損防止のための格納容器ベント時間が事故後約[追而]時間後となる。この結果から、代替循環冷却系の設置により格納容器ベントの実施時期を大幅に遅延し、格納容器ベントによる放射性物質の放出を低減することができる（第1図）。



第1図 事故発生後の希ガス発生量の時間変化 (核種合計)

## 東海第二発電所の重大事故等の格納容器過圧事象時のベント時間について

東海第二発電所は、設計基準事故対処設備としての格納容器設計の特徴から、重大事故等の格納容器過圧事象時には、他の格納容器型式の国内BWRプラントよりも格納容器ベントまでの時間が短くなる。その理由を以下に説明する。

## 1. R C C V型格納容器（柏崎刈羽原子力発電所6・7号炉）との差異の理由

- ・東海第二発電所は柏崎刈羽原子力発電所6・7号炉に比べ原子炉熱出力に対する格納容器の自由体積が小さく、格納容器からの除熱機能喪失による過圧事象発生時の格納容器の圧力上昇が早い

発電所	格納容器の自由体積／原子炉熱出力
東海第二発電所	9,800m <sup>3</sup> ／3,293MW≒3.0
柏崎刈羽原子力発電所6・7号炉	13,310m <sup>3</sup> ／3,926MW≒3.4

- ・東海第二発電所は柏崎刈羽原子力発電所6・7号炉に比べサプレッション・チェンバの自由体積が小さく、有効性評価においてベントラインの水没防止の観点から設定している格納容器への外部水源の持ち込み可能量（サプレッション・プールの通常運転水位から外部水源の持ち込み制限高さまでの水量）が少ない。このため、過圧事象発生時の外部水源の格納容器スプレイによる圧力抑制可能期間が短い。

発電所	外部水源の持ち込み可能量
東海第二発電所	約 2,800m <sup>3</sup> ※
柏崎刈羽原子力発電所6・7号炉	約 4,700m <sup>3</sup> ※

※ 東海第二発電所において、仮に外部水源の持ち込み可能量が4,700m<sup>3</sup>（1,900m<sup>3</sup>増加）となった場合、最大格納容器スプレイ流量：130m<sup>3</sup>/hでの連続スプレ

イを想定しても、15時間程度圧力抑制期間が長くなる

## 2. Mark-I型/I改型格納容器との差異の理由

- ・ 東海第二発電所はMark-I型/I改型格納容器プラントに比べ原子炉熱出力に対する格納容器の自由体積が小さく、格納容器からの除熱機能喪失による過圧事象発生時の格納容器の圧力上昇が早い
- ・ 格納容器の最高使用圧力 ( $P_d$ : 0.31MPa[gage]) がMark-I型/I改型の 0.427MPa[gage] に比べて低く、炉心損傷後の格納容器スプレイの実施基準 ( $1.5P_d$  到達) における格納容器圧力の絶対値が低いため格納容器スプレイの効果が小さいことに加えて、上記のとおり格納容器の過圧事象発生時の格納容器圧力の上昇が早いことから、圧力上昇を抑制するために必要な格納容器スプレイ流量が多い

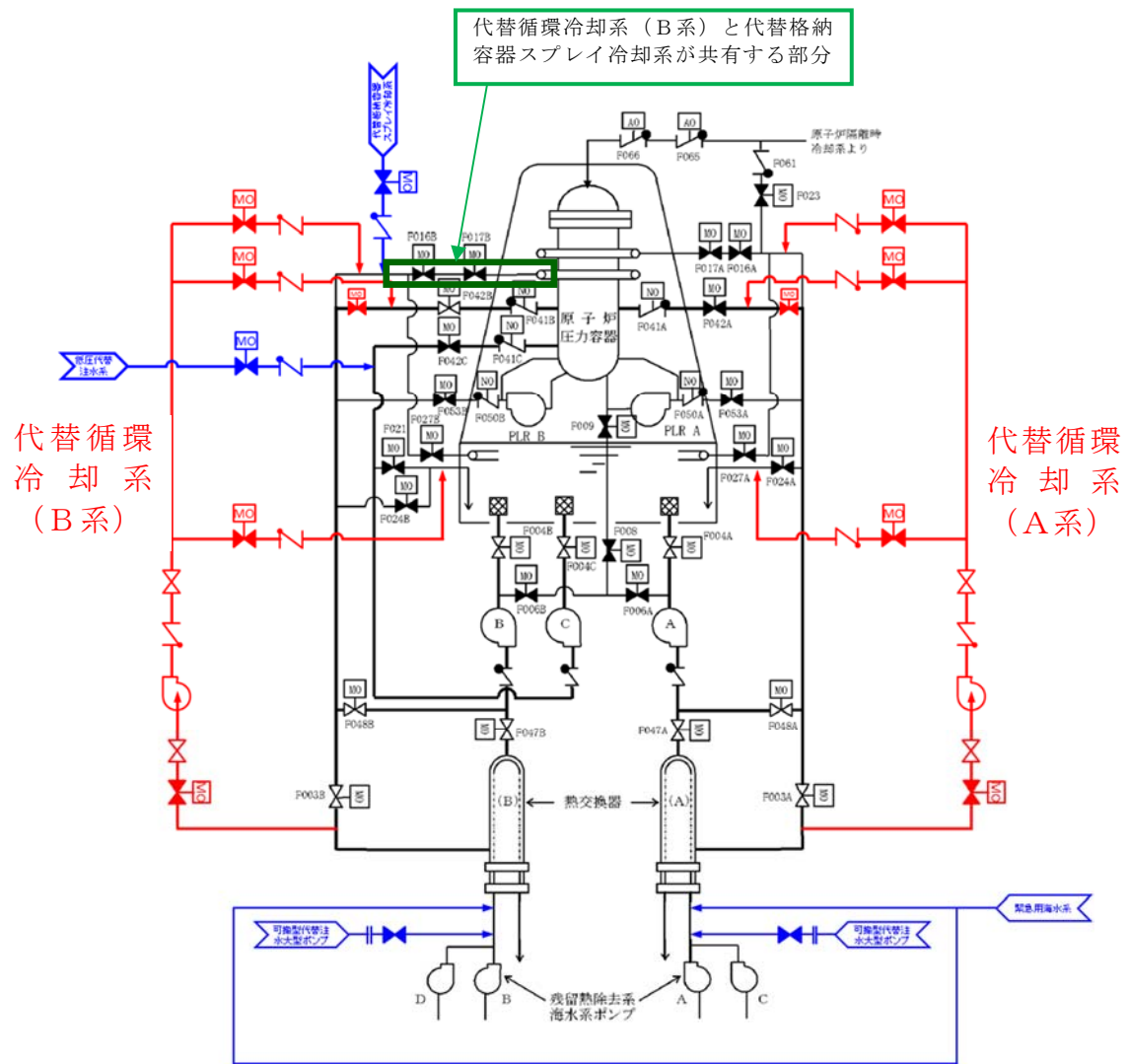
## 代替循環冷却系及び格納容器圧力逃がし装置の設計

## 1. 代替循環冷却系

## (1) 概要

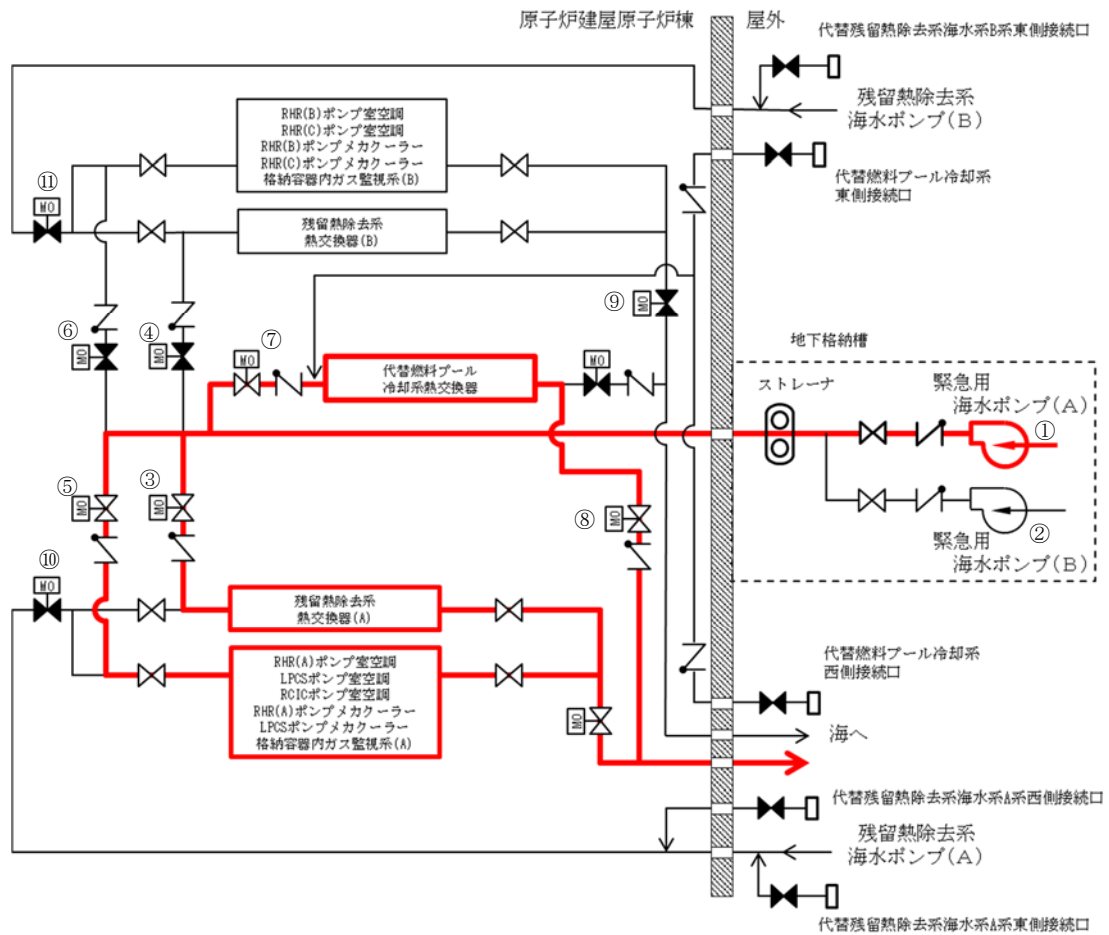
本システムの概要は以下のとおり。また、代替循環冷却系の系統概要を第 1 図に、代替循環冷却系の補機冷却系である緊急用海水系の系統概要を第 2 図に、代替循環冷却系の主要機器の仕様及び健全性を参考 1 に示す。

- ・ サプレッション・プールを水源とし、代替循環冷却系ポンプによる原子炉及び格納容器の循環冷却が可能な系統である。
- ・ 系統水は、サプレッション・プールから残留熱除去系ポンプを経由して残留熱除去系熱交換器を通り、代替循環冷却系ポンプに供給され、代替循環冷却系ポンプにより原子炉への注水及び格納容器スプレー等を実施可能な系統である。
- ・ 本システムは代替循環冷却系（A系）及び代替循環冷却系（B系）の 2 系列の設計とする。
- ・ 本システムは、全交流動力電源喪失した場合でも、発電所構内に配備した代替交流電源設備からの給電が可能な設計とする。
- ・ 代替循環冷却系の使用時には、緊急用海水系又は代替残留熱除去海水系からの冷却水の供給により、残留熱除去系熱交換器を介した冷却機能を確保する。（第 2 図：緊急用海水系の系統概要図）
- ・ 第 1 図の緑で囲った範囲に示すとおり、代替循環冷却系（B系）の格納容器スプレーラインと代替格納容器スプレー冷却系（常設）のラインが一部共有する。
- ・ 運転操作は中央制御室での遠隔操作が可能な設計とする。



第1図 代替循環冷却系の系統概要図





	機器名称		機器名称
①	緊急用海水ポンプ(A)	⑦	緊急用海水系代替F P C系隔離弁
②	緊急用海水ポンプ(B)	⑧	緊急用海水系代替F P C系出口弁(A)系
③	緊急用海水系RHR A系熱交換器隔離弁	⑨	緊急用海水系代替F P C系出口弁(B)系
③	緊急用海水系RHR B系熱交換器隔離弁	⑩	残留熱除去系-緊急用海水系系統分離弁(A)系
④	緊急用海水系RHR A系補機隔離弁	⑪	残留熱除去系-緊急用海水系系統分離弁(B)系
⑥	緊急用海水系RHR B系補機隔離弁		

第2図 緊急用海水系の系統概要図

(残留熱除去系海水系A系供給時)

(2) 設置許可基準規則の位置づけ

代替循環冷却系は、炉心の著しい損傷が発生した場合において格納容器の破損を防止する目的から格納容器内の圧力及び温度を低下させるための設備であり、設置許可基準規則 50 条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）の重大事故等対処設備として位置付ける。

なお、設置許可基準規則 47 条（原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）における炉心の著しい損傷、熔融が発生した場合、設置許可基準規則 49 条（原子炉格納容器内の冷却等のための設備）の重大事故等対処設備としても位置付ける。

(3) 代替循環冷却系の多様性及び独立性、位置的分散

代替循環冷却系は、設計基準事故対処設備である残留熱除去系と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、第1表で示すとおり多様性及び位置的分散を図った設計とする。

残留熱除去系と代替循環冷却系の独立性については、第2表で示すとおり、地震、津波、火災及び溢水により同時に故障することを防止するために、独立性を確保する設計とする。

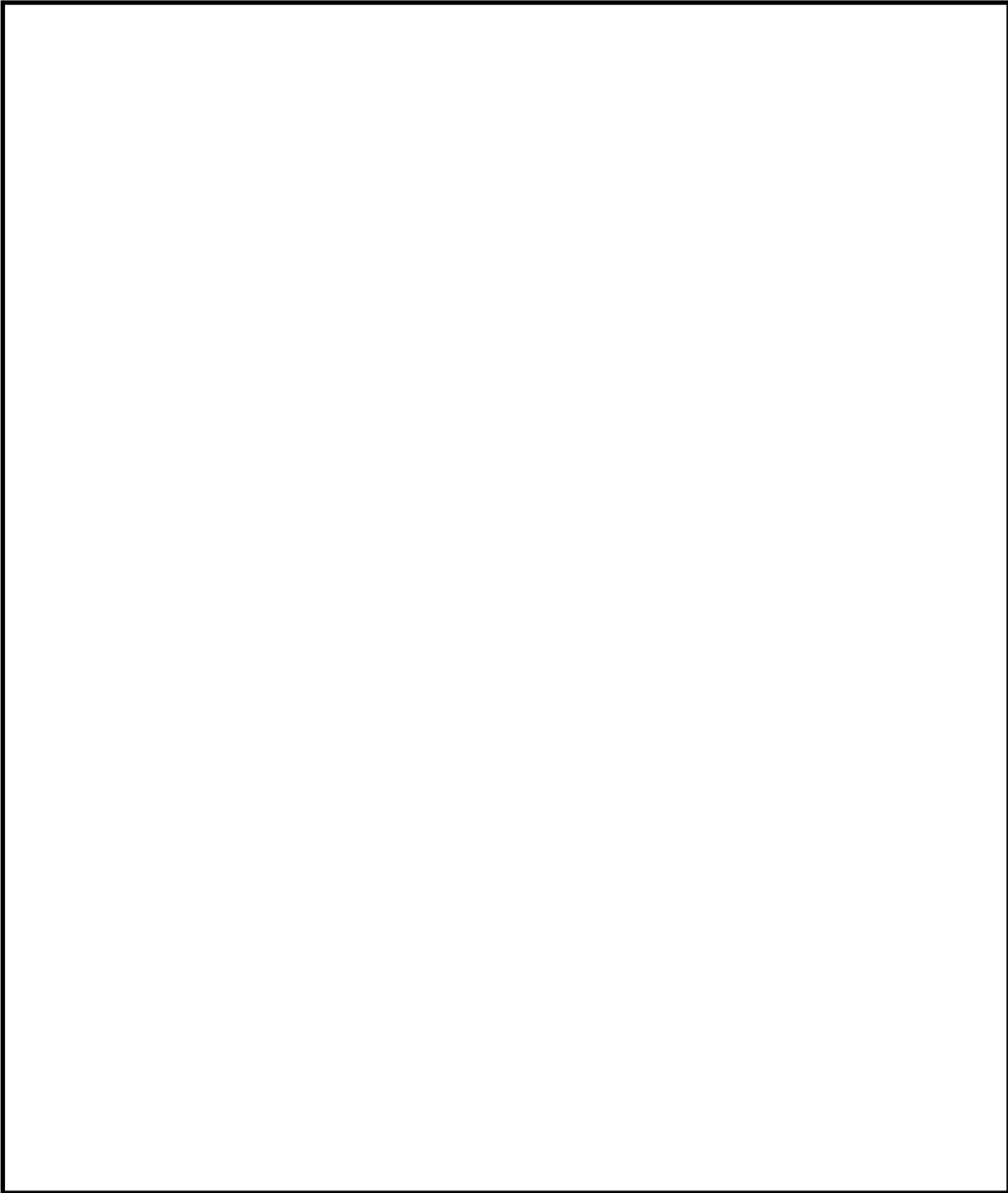
第3図に、代替循環冷却系ポンプ及び残留熱除去系ポンプの配置図を示す。

第1表 多様性及び位置的分散

項目	残留熱除去系	代替循環冷却系
ポンプ	残留熱除去系ポンプ	代替循環冷却系ポンプ
	原子炉建屋原子炉棟地下2階 残留熱除去系（A）及び（B） ポンプ室	原子炉建屋原子炉棟地下2階 残留熱除去系（A）及び（B） 熱交換器室
水源	サプレッション・プール	サプレッション・プール
	原子炉建屋原子炉棟地下2階	原子炉建屋原子炉棟地下2階
駆動用空気	不要	不要
潤滑油	不要（内包油）	不要（内包油）
冷却水	残留熱除去系海水系	不要（自然冷却）
駆動電源	非常用ディーゼル発電機	常設代替交流電源設備
	原子炉建屋付属棟地下1階	屋外

第 2 表 設計基準事故対処設備との独立性

項目		残留熱除去系	代替循環冷却系
共通要因故障	地震	設計基準事故対処設備の残留熱除去系は耐震 S クラス設計とし、代替循環冷却系は基準地震動 $S_s$ で機能維持できる設計とすることから、基準地震動 $S_s$ が共通要因となり故障することのない設計とする。	
	津波	設計基準事故対処設備の残留熱除去系は防潮堤及び浸水防止設備の設置により、また、代替循環冷却系は防潮堤及び浸水防止設備の設置に加え、原子炉建屋原子炉棟の水密化されたエリアに設置により、津波が共通要因となって故障することのない設計とする。	
	火災	代替循環冷却系と設計基準事故対処設備の残留熱除去系は火災が共通要因となり故障することのない設計とする。	
	溢水	代替循環冷却系と設計基準事故対処設備の残留熱除去系は溢水が共通要因となり故障することのない設計とする。	



第 3 図 代替循環冷却系ポンプの配置図

#### (4) 代替循環冷却系（B系）の成立性

格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」では、代替循環冷却系と代替格納容器スプレー冷却系（常設）を同時に使用しないため、代替循環冷却系（B系）を使用した場合でも事故進展に影響はない。

一方、格納容器破損モード「DCH, FCI, MCCI」では、原子炉圧力容器破損後に代替循環冷却系（A系）と代替格納容器スプレー冷却系（常設）による同時の格納容器スプレーを実施する条件で解析しているが、(1)に記載のとおり、代替循環冷却系（B系）と代替格納容器スプレー冷却系（常設）による同時の格納容器スプレーは実施できないことから、代替循環冷却系（B系）のみを使用<sup>※</sup>した条件でのMAAP解析を実施した。

※ 外部水源の持ち込みを制限し、サブプレッション・プール水位の上昇抑制による格納容器ベント遅延を図り、可能な限り外部への影響を軽減する観点から、代替格納容器スプレー冷却系（常設）より代替循環冷却系（B系）を優先して使用することを想定

第3表及び第4表に格納容器破損モード「DCH, FCI, MCCI」の評価シーケンスにおける代替循環冷却系（A系）に期待した場合と代替循環冷却系（B系）に期待した場合の解析条件及び解析結果の比較を示す。また、格納容器圧力挙動及び温度挙動を第4図から第7図に示す。

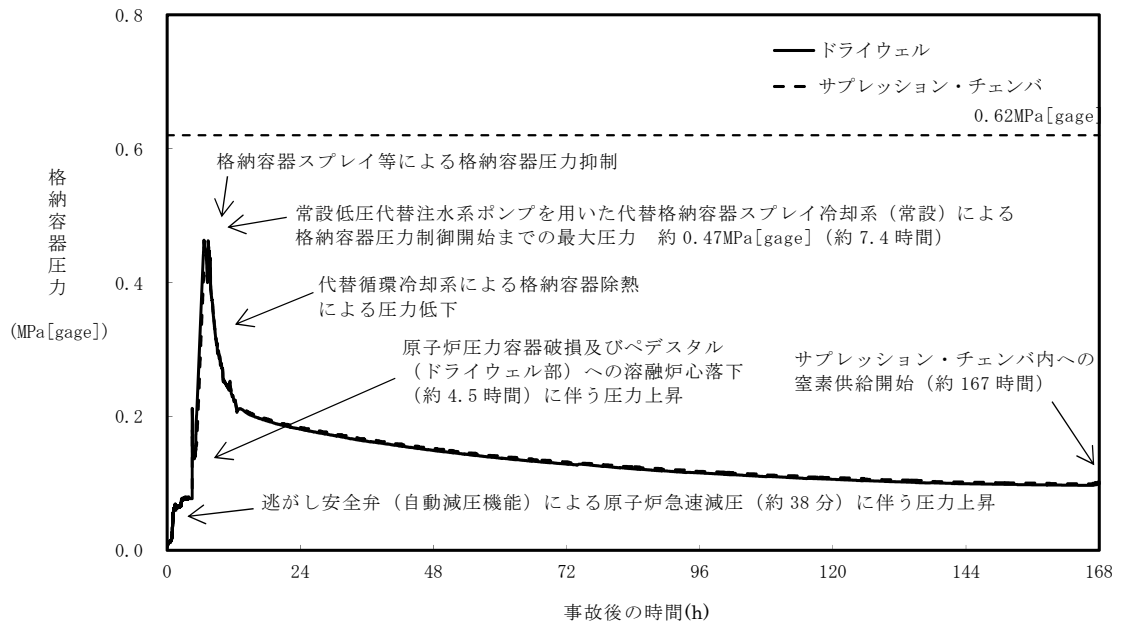
有効性評価の評価項目である格納容器温度 200℃以下、圧力 620kPa[gage]以下に抑えられることを確認した。

第3表 解析条件の比較

	代替循環冷却系A系に期待した場合 (有効性評価のベースケース)	代替循環冷却系(B系)に期待した場合 (今回の評価ケース)
注水及び又はスプレイを実施する系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉注水 代替循環冷却系(A系)</li> <li>格納容器スプレイ 代替循環冷却系(A系) 代替格納容器スプレイ冷却系(常設)</li> <li>ペDESTAL注水 格納容器下部注水系(常設)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉注水 代替循環冷却系(B系)</li> <li>格納容器スプレイ 代替循環冷却系(B系)</li> <li>ペDESTAL注水 格納容器下部注水系(常設)</li> </ul>
代替循環冷却系の機器条件・操作条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>事象発生90分後から250m<sup>3</sup>/hでドライウエルスプレイを実施</li> <li>R P V破損後に格納容器圧力が低下傾向に転じて30分後、150m<sup>3</sup>/hでドライウエルスプレイ、100m<sup>3</sup>/hで原子炉注水を実施</li> </ul>	代替循環冷却系A系に期待した場合と同じ
代替格納容器スプレイ冷却系(常設)の機器条件・操作条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉圧力破損+6分後から300m<sup>3</sup>/hでドライウエルスプレイを実施し、R P V破損後に格納容器圧力が低下傾向に転じて30分後に停止</li> <li>その後、間欠スプレイ(格納容器圧力400~465kPa[gage])を実施</li> </ul>	(実施しない)
格納容器下部注水系(常設)の機器条件・操作条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉圧力破損後+7分後から80m<sup>3</sup>/hで格納容器下部水位制御(水位2.25~2.75m)を実施</li> </ul>	代替循環冷却系A系に期待した場合と同じ

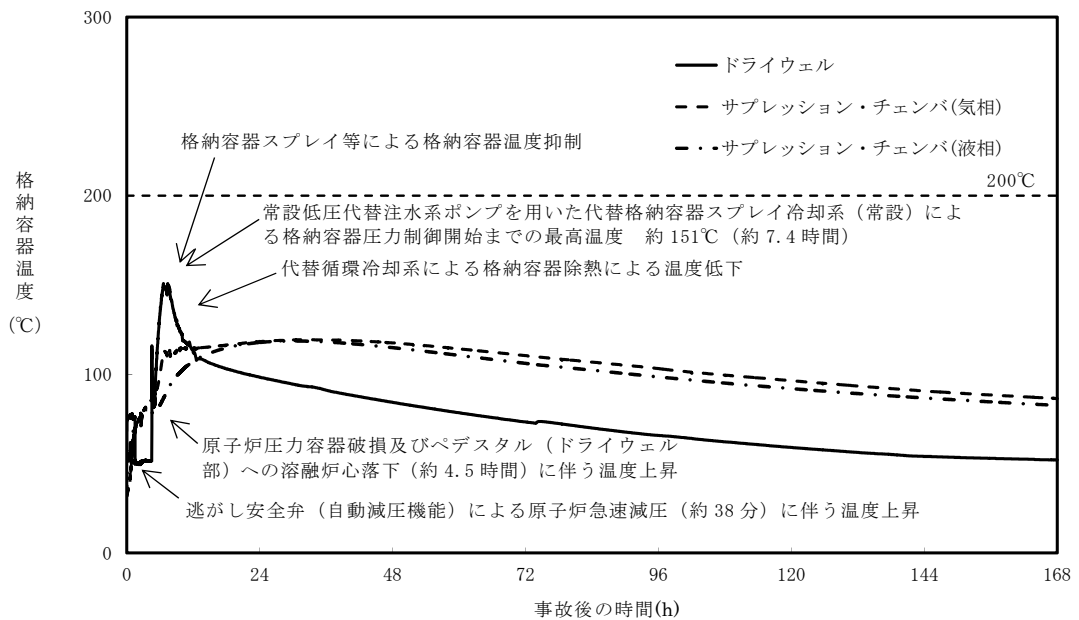
第4表 解析結果の比較

	代替循環冷却系A系に期待した場合 (有効性評価のベースケース)	代替循環冷却系(B系)に期待した場合 (今回の評価ケース)
格納容器圧力の最大値	0.47MPa[gage]	約0.58MPa[gage]
格納容器雰囲気温度の最大値	151℃	162℃



第4図 「DCH, FCI, MCC I」における

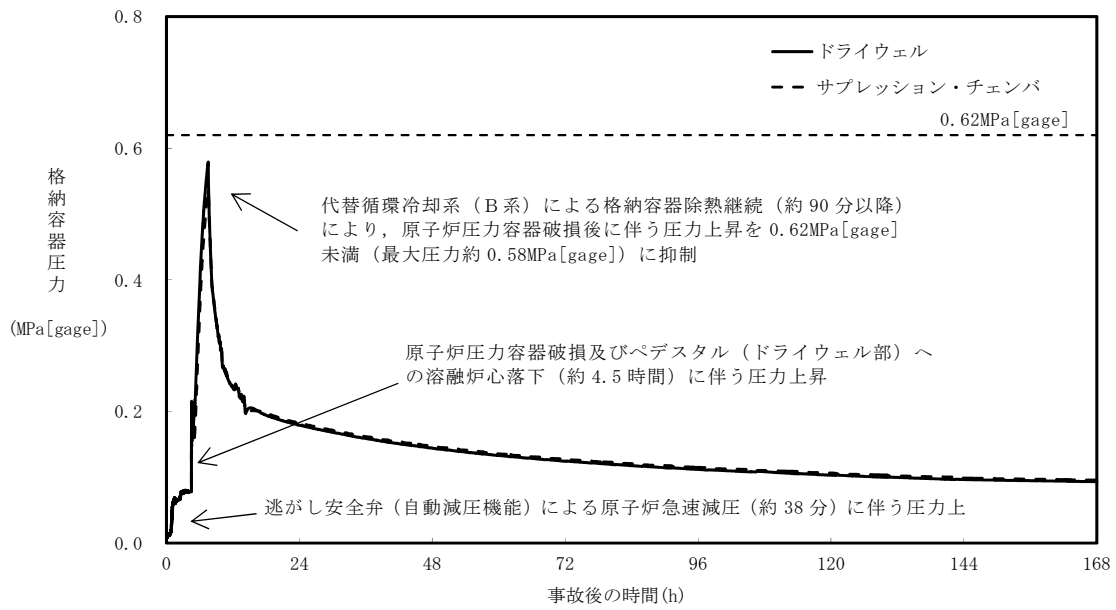
代替循環冷却系 (A系) に期待した場合の格納容器圧力の推移



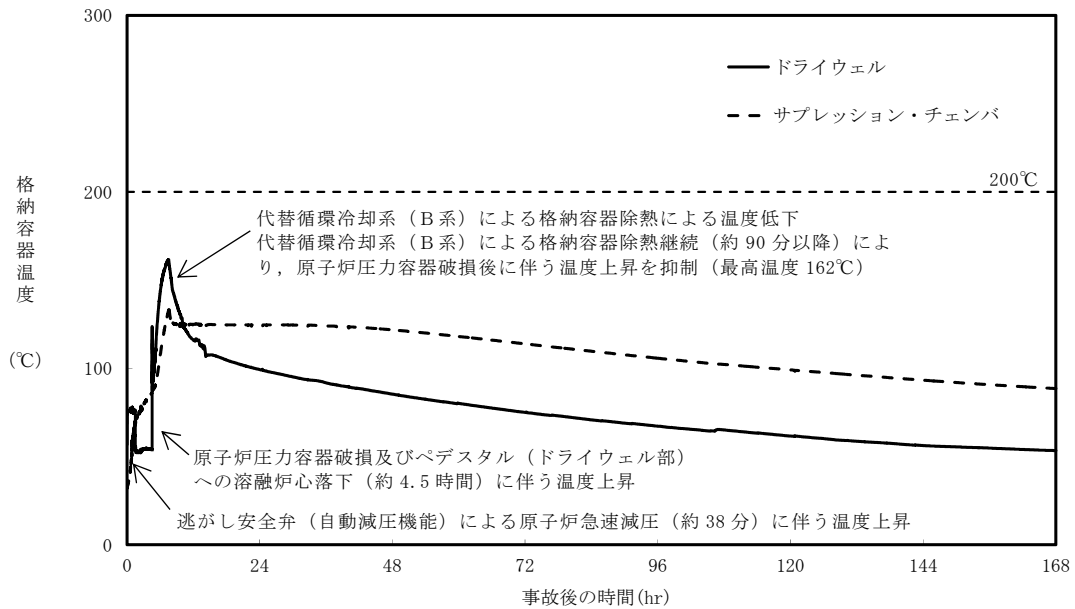
第5図 「DCH, FCI, MCC I」における

代替循環冷却系 (A系) に期待した場合の格納容器雰囲気温度の推移





第 6 図 「DCH, FCI, MCCI」シーケンスにおける  
代替循環冷却系 (B系) を使用した場合の格納容器圧力の推移



第 7 図 「DCH, FCI, MCCI」における  
代替循環冷却系 (B系) に期待した場合の格納容器雰囲気温度の推移

## 2. 格納容器圧力逃がし装置

### (1) 概要

本システムの概要は以下のとおり。また、格納容器圧力逃がし装置の系統概要を第8図に示す。

- ・ 格納容器圧力逃がし装置は、サブプレッション・チェンバ側及びドライウエル側のいずれからも格納容器内の非凝縮性ガス等の排気を可能な設計とする。
- ・ 排気中に含まれる放射性物質を低減するためのフィルタ装置を設置する設計とする
- ・ サプレッション・チェンバ内でのスクラビング効果が期待できるサブプレッション・チェンバ側からのベントを第一優先とするが、何らかの原因でサブプレッション・チェンバ側からのベントができない場合にはドライウエル側からのベントを行う。
- ・ 中央制御室での遠隔操作が可能な設計とする。また、全ての電源喪失時において現場で操作可能となるように遠隔人力操作機構を設け、原子炉建屋原子炉棟外から容易かつ確実に開閉できる設計とする。

### (2) 設置許可基準規則の位置づけ

格納容器圧力逃がし装置は、炉心の著しい損傷が発生した場合において格納容器の破損を防止する目的から、格納容器内の圧力及び温度を低下させるための設備であり、設置許可基準規則 50 条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）の重大事故等対処設備として位置付ける。

なお、設置許可基準規則 48 条（最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備）の重大事故等対処設備としても位置付ける。

(3) 格納容器圧力逃がし装置の多様性及び独立性，位置的分散

格納容器圧力逃がし装置は，設計基準事故対処設備である残留熱除去系と同時にその機能が損なわれる恐れがないよう，第5表に示すとおり多様性又は多重性，及び位置的分散を図った設計とする。

また，残留熱除去系との独立性については，第6表に示すとおり地震，津波，火災，溢水が共通要因となり機能喪失しないよう独立性を有する設計とする。

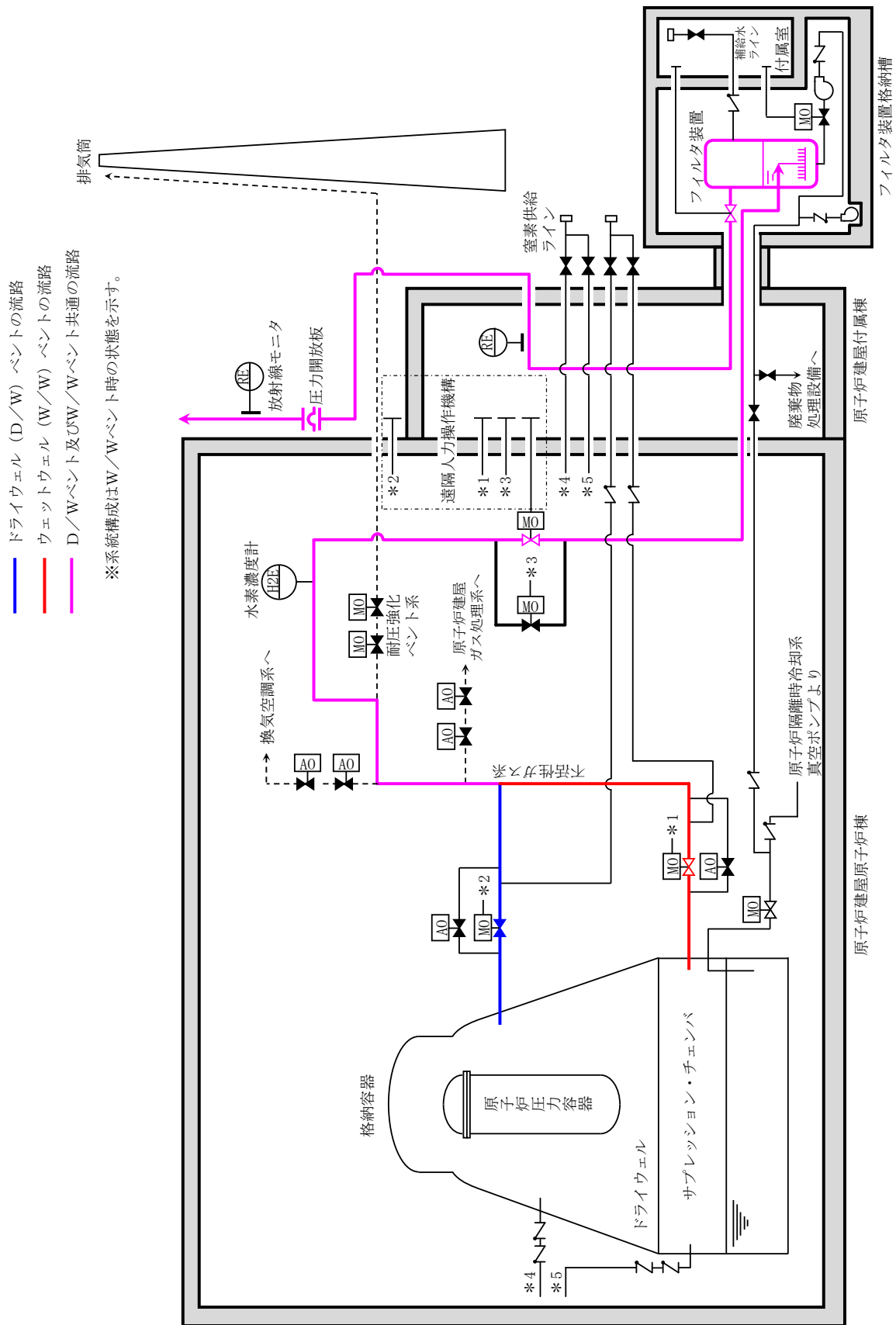
第5表 多様性又は多重性，位置的分散

項目	残留熱除去系	格納容器圧力逃がし装置
	原子炉建屋原子炉棟	格納容器圧力逃がし装置格納槽
ポンプ	残留熱除去系ポンプ (原子炉建屋原子炉棟地下2階)	不要*1
水源	サプレッション・プール (格納容器) 又は原子炉圧力容器	
駆動用空気	不要	
潤滑油	不要(内包油)	
冷却水	残留熱除去系海水系	
駆動電源	非常用ディーゼル発電機 (原子炉建屋附属棟地下1階)	

\*1：格納容器圧力逃がし装置は，原子炉建屋南側屋外の地下格納槽に設置する。

第6表 設計基準事故対処設備との独立性

項目	残留熱除去系	格納容器圧力逃がし装置
共通要因故障	地震	設計基準事故対処設備の残留熱除去系は耐震Sクラス設計であり、格納容器圧力逃がし装置は基準地震動 $S_s$ で機能維持できる設計とすることで、基準地震動 $S_s$ が共通要因となり故障することのない設計とする。
	津波	設計基準事故対処設備の残留熱除去系及び重大事故防止設備の格納容器圧力逃がし装置は、防潮堤及び浸水防止設備を設置することで、津波が共通要因となって故障することのない設計とする。
	火災	格納容器圧力逃がし装置と設計基準事故対処設備の残留熱除去系は火災が共通要因となり同時に故障することのない設計とする。
	溢水	格納容器圧力逃がし装置と設計基準事故対処設備の残留熱除去系は溢水が共通要因となり同時に故障することのない設計とする。



第 8 図 格納容器圧力逃がし装置の系統概要図

## 代替循環冷却系の主要機器の仕様及び健全性について

## 1. 主要機器の仕様

## (1) 代替循環冷却系ポンプ

種 類	: うず巻形
容 量	: 約250m <sup>3</sup> /h
全 揚 程	: 約120m
最高使用圧力	: 3.45MPa[gage]
最高使用温度	: 77℃
個 数	: 1
取 付 箇 所	: 原子炉建屋原子炉棟地下2階
原 動 機 出 力	: 約140kW

## (2) 残留熱除去系熱交換器A

個 数	: 1
最高使用圧力	: 3.45MPa[gage]
最高使用温度	: 249℃
伝 熱 容 量	: 19.4×10 <sup>3</sup> kW
取 付 箇 所	: 原子炉建屋原子炉棟地下2階

## 2. 代替循環冷却系の健全性

代替循環冷却系の健全性について、「代替循環冷却系ポンプの健全性」, 「残留熱除去系ポンプの健全性」, 「シール材の信頼性」の観点から評価した結果を以下に示す。なお, 残留熱除去系熱交換器については, 最高使用温度が 249℃で設計されているため, 健全性に問題はない。

(1) 代替循環冷却系ポンプの健全性

格納容器圧力が0.62MPa[gage] (2Pd) の場合においては、サブプレッション・プール水の温度は0.62MPa[gage] (2Pd)における飽和温度167℃となる。サブプレッション・プール水は残留熱除去系ポンプを経由し、緊急用海水ポンプからの海水を用いて残留熱除去冷却器にて冷却後、代替循環冷却系ポンプにて原子炉への注水及び格納容器スプレー等を行う。ここでは、残留熱除去系熱交換器において冷却したサブプレッション・プール水の温度が、代替循環冷却系ポンプの最高使用温度77℃を超えないことを確認する。評価条件は以下のとおり。

緊急用海水ポンプ流量	: 600m <sup>3</sup> /h
代替循環冷却系ポンプ流量	: 250m <sup>3</sup> /h
海水温度	: 32℃
サブプレッション・プール水温度	: 167℃

上記の条件で残留熱除去系熱交換器出口温度を評価した結果、出口温度は約70℃と評価され、代替循環冷却系ポンプの最高使用温度77℃を下回る。なお、代替循環冷却系ポンプの運転に伴うポンプ入熱による影響及びサブプレッション・プール水中の核分裂生成物による発熱による影響については、代替循環冷却系ポンプの入口側に残留熱熱交換器が設置されており、代替循環冷却系ポンプの運転によって、残留熱除去系熱交換器により冷却された水に入れ替わることから影響はないものとする。

以上より、2Pdの条件下においても、代替循環冷却系ポンプの健全性については問題ない。



## (2) 残留熱除去系ポンプの健全性

代替循環冷却系については、残留熱除去系ポンプ(最高使用圧力:3.51MPa, 最高使用温度:182℃)を流路として使用する。

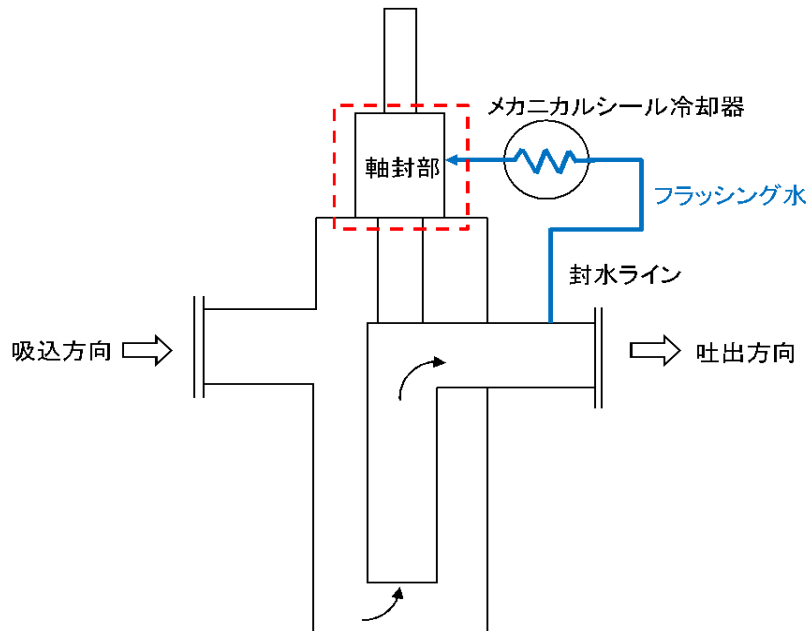
代替循環冷却系は代替循環冷却系ポンプでサプレッション・プールの水を循環させる系統構成となっており、残留熱除去系が機能喪失している前提で使用する設備であるため、残留熱除去系ポンプは、停止している状態でポンプ内を系統水が流れることとなる。残留熱除去系ポンプの軸封部はメカニカルシールで構成されており、ポンプ吐出側から分岐して送水される冷却水(フラッシング水)により温度上昇を抑える設計としている(第1図)。

ポンプ停止時に系統水が流れる状態においては、通常どおりメカニカルシールに冷却水(フラッシング水)が送水されないことが考えられるため、その際のシール機能への影響について確認した。

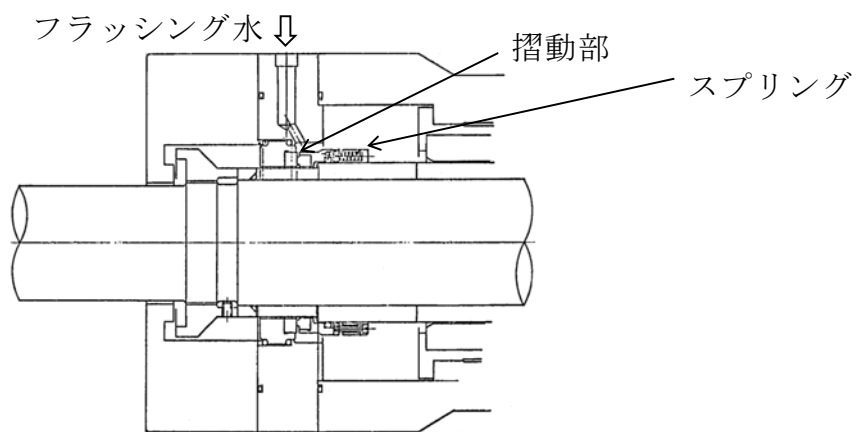
残留熱除去系ポンプのメカニカルシールは、スプリングによって摺動部を押さえつける形でシールする構造となっている(第2図)。代替循環冷却系運転時には残留熱除去系ポンプが停止している状態であるため、通常のポンプ運転時のように冷却水(フラッシング水)が封水ラインを通じてメカニカルシール部に通水されないことが想定されるが、上述のとおり、冷却水(フラッシング水)はメカニカルシールの摺動による温度上昇を抑えるためのものであり、ポンプが停止している状態では冷却の必要がなく、特にメカニカルシールの機能に影響はない。

なお、軸封部及び封水ラインにおいては、代替循環冷却系ポンプ運転時には残留熱除去系ポンプが停止していることから、ポンプの吐出圧力に相当する圧力がかかることはなく、格納容器圧力である0.62MPa[gage](2Pd)であるため、軸封部への影響はないと考える。

したがって、代替循環冷却系運転時において軸封部からの系統水の著しい漏えいはないと考えており、残留熱除去系ポンプの最高使用温度以下で通水されることから健全性については問題ない。



第1図 残留熱除去系ポンプ 概要図



第2図 残留熱除去系ポンプメカニカルシール 構造図

### (3) シール材の健全性について

代替循環冷却系を使用する場合に、系統内の弁、配管及びポンプのバウンダリに使用されているシール材について高温環境による影響、放射線影響及び化学種による影響によって材料が劣化し漏えいが生じる可能性がある。これらの影響について下記のとおり評価を行った。

#### ① 高温環境及び放射線による影響

代替循環冷却系は、重大事故時に炉心損傷した状況で系統を使用することとなる。このため、高温環境下であること及び系統内を高放射能の流体が流れることから、高温及び放射線による劣化が懸念される。

上記に示す部材のうち、配管フランジガスケット及び弁グランドシールには膨張黒鉛材料もしくはステンレス等の金属材料が用いられている。これらは、耐熱性があること、及び無機材料であり高放射線下においても劣化の影響はないか極めて小さい。このため、これらについては評価温度である200℃以上の耐熱性を有することに加え、放射線による影響についても、耐放射線性能が確認されたシール材を用いることから、シール性能が維持されるものとする。

残留熱除去系ポンプのバウンダリを構成する部材(メカニカルシール、ケーシングシール等)のシール材には、エチレンプロピレンゴム (EPDM) やフッ素ゴムが用いられており、高温環境下での使用による影響及び放射線による影響を受けて劣化することが考えられるため、200℃の環境下において7日間の高耐熱性を有し、耐放射線性に優れた改良EPDM製シール材への取り替えを今後行うことにより、耐熱性及び耐放射線性を確保する。

また、代替循環冷却系ポンプのバウンダリを構成する部材(ケーシングシール等)のシール材についても同様に、耐熱性及び耐放射線性に優

れた材料を適用する。

## ② 核分裂生成物による化学的影響

炉心損傷時に発生する核分裂生成物の中で化学的な影響を及ぼす可能性がある物質として、アルカリ金属であるセシウム及びハロゲン元素であるよう素が存在する。このうち、アルカリ金属のセシウムについては、水中でセシウムイオンとして存在しアルカリ環境の形成に寄与するが、膨張黒鉛ガスケットや金属ガスケットはアルカリ環境において劣化の影響はなく、また、E P D Mについても耐アルカリ性を有する材料であることから、セシウムによるシール機能への化学的影響はないものと考えられる。

一方、ハロゲン元素のよう素については、無機材料である膨張黒鉛ガスケットや金属ガスケットでは影響がないが、有機材料であるE P D Mでは影響を生じる可能性がある。設備での使用を考慮している改良E P D Mについては、電力共同研究により、よう素による影響の確認を行っており、炉心損傷時に想定されるよう素濃度（約450mg/m<sup>3</sup>）よりも高濃度のよう素環境下（約1,000mg/m<sup>3</sup>）においても、圧縮永久ひずみ等のシール材としての性状に大きな変化がないことを確認している。また、ガスケットメーカーにおいて、よう素に対するE P D M材の耐性として、第1表に示すとおり、5段階評価（ランク1が最も耐性がある）のうち、ランク2に位置づけられており、よう素に対する耐性があるものとする。

このように、よう素に対する性能が確認された材料を用いることにより、漏えい等の影響が生じることはないものとする。

第1表 EPDMの特性

薬品	耐性ランク
ヨウ素	2

<耐性ランクの凡例>

- 1：動的部分にも使用可能で体積変化率は10%以内。
- 2：動的部分にも条件により使用可能，体積変化率は20%以内。
- 3：静的部分には使用可能，体積変化率は30%以内。
- 4：静的部分には条件により使用可能，体積変化率は100%以内。
- 5：使用できない，体積変化率は100%以上。

出典：日本バルカー工業(株)発行「バルカーハンドブック」より抜粋

格納容器圧力逃がし装置を使用する際、サプレッション・プール水の酸性化を防止すること及びサプレッション・プール水中の核分裂生成物由来のヨウ素を捕捉することにより、ヨウ素の放出量の低減を図るため、サプレッション・プール水pH制御装置を自主的な取組みとして設ける計画である。サプレッション・プール水pH制御装置を使用により、アルカリ薬液である水酸化ナトリウムを格納容器へ注入することとなるため、アルカリ薬液によるシール性への影響が懸念されるが、耐アルカリ性を有する改良EPDMを使用することにより、格納容器バウンダリのシール機能には影響はない。

## 代替循環冷却系のシステム非信頼度について

## 1. はじめに

フォールトツリー手法を用いて、代替循環冷却系のシステム非信頼度を評価する。

## 2. 評価条件

評価条件は第 1 表のとおり。

第 1 表 代替循環冷却系のシステム非信頼度の評価条件

システム非信頼度の評価範囲	代替循環冷却系，緊急用海水系，及び常設代替交流電源設備（別紙 2 において期待している系統）
代替循環冷却系の成功基準	2 系列中 1 系列
緊急用海水系の成功基準	ポンプ 2 台中 1 台
常設代替交流電源設備の成功基準	常設代替高圧電源装置 5 台中 2 台
システム非信頼度の評価	機器のランダム故障を対象 使命時間 24 時間

## 3. 評価結果

代替循環冷却系のシステム非信頼度を，第 1 図のフォールトツリーを用いて評価した。その結果，第 2 表に示すとおり，代替循環冷却系（A 系及び B 系）のシステム非信頼度は約  $3 \times 10^{-4} / \text{demand}$ ，1 系列を想定した場合（A 系のみの場合）の非信頼度は約  $2 \times 10^{-3} / \text{demand}$  となり，代替循環冷却系の多重化設計により，システム非信頼度は 1 系列時に比べて 1 桁程度低減する。

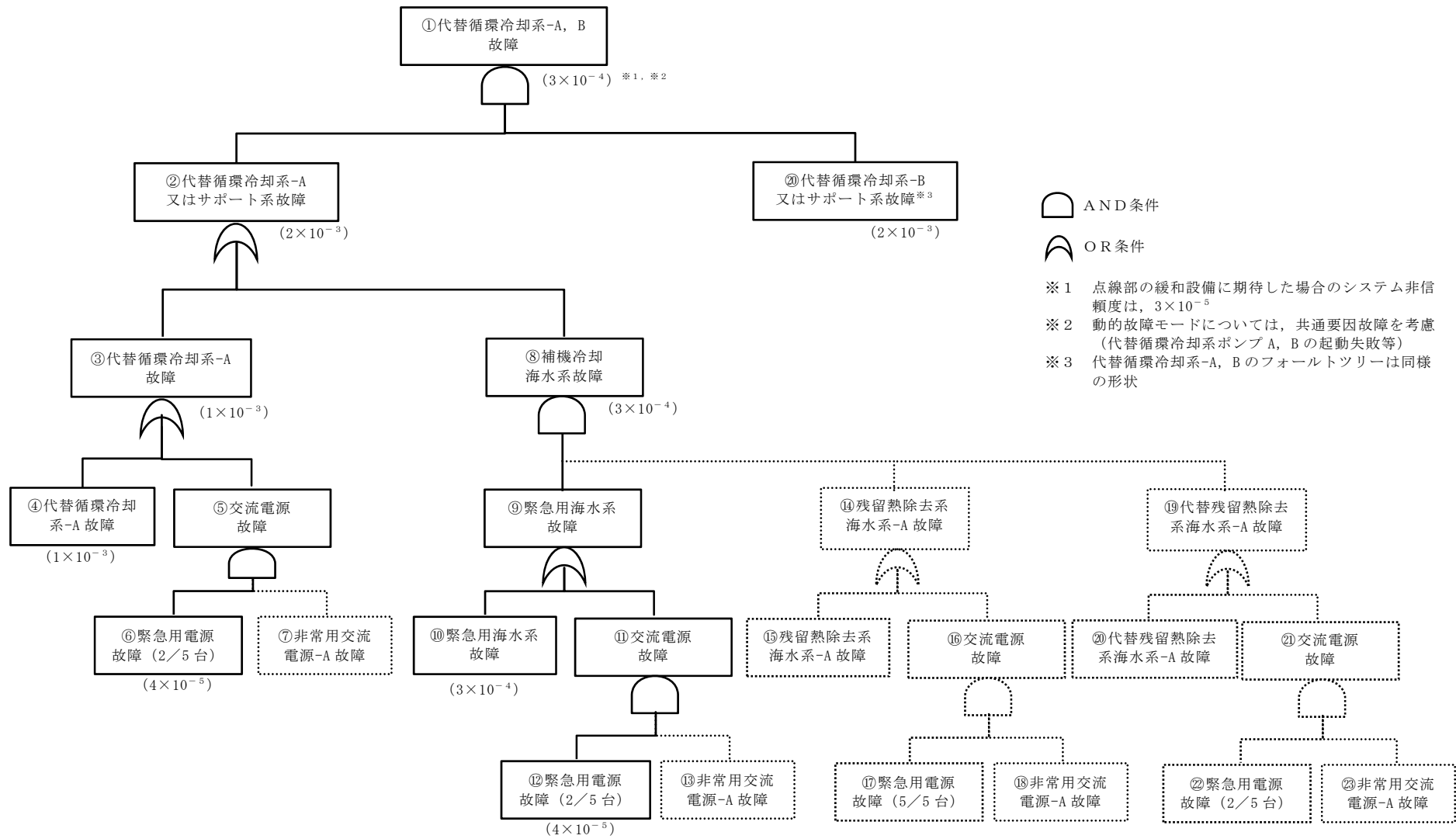
なお，代替循環冷却系のサポート系として残留熱除去系海水系，代替残留熱除去系海水系及び非常用交流電源が使用可能な場合のシステム非信頼度は

約  $3 \times 10^{-5}$  / demand となり，代替循環冷却系を多重化することでシステム非信頼度は 2 桁程度低減する。

第 2 表 代替循環冷却系のシステム非信頼度

	システム非信頼度 ( / demand)	
	サポート系として緊急用海水系，常設代替交流電源設備を考慮した場合	他のサポート系にも期待した場合 (参考※)
代替循環冷却系 1 系列	約 $2 \times 10^{-3}$	約 $1 \times 10^{-3}$
代替循環冷却系 2 系列	約 $3 \times 10^{-4}$	約 $3 \times 10^{-5}$
低減割合 (代替循環冷却系 2 系列 / 代替循環冷却系 1 系列)	≒ 0.2	≒ 0.03

※ 設計基準事故対処設備としての残留熱除去海水系，非常用電源及び代替残留熱除去系海水系の使用を考慮した場合の参考評価



第1図 システム非信頼度の評価に用いたフォールトツリー



## 代替循環冷却系による格納容器ベント遅延効果

## 1. 代替循環冷却系に期待する場合

格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の有効性評価におけるベースケースでは、代替循環冷却系により格納容器除熱を実施し、重大事故相当のG値を想定した条件としており、可燃性ガス排出のための格納容器ベント基準となる格納容器内酸素濃度4.3vol%（ドライ条件）に到達する時間は事故後約40日後（約39.7日後）となる。

また、酸素濃度が早く上昇する場合の影響を確認するため、酸素濃度上昇を厳しくする設計基準事故相当のG値を想定した感度解析ケースでは、可燃性ガス排出のための格納容器ベント基準となる格納容器内酸素濃度4.3vol%（ドライ条件）に到達する時間は事故後約5日後（約122時間後）になる。

なお、代替循環冷却系に期待する場合には、格納容器内に窒素供給を実施することにより格納容器内酸素濃度の上昇を抑制し、格納容器ベントの開始時間を大幅に遅延させる手順とする。格納容器内への窒素注入手順としては、格納容器バウンダリの健全性に対する裕度の確保及び格納容器漏えいの影響を考慮し、格納容器圧力310kPa[gage]（1Pd）までの注入を基本とするが、本感度解析のように1Pdまで窒素を注入しても早期の格納容器ベント（事故後7日以内を想定）に至る場合には、465kPa[gage]（1.5Pd）までの追加の窒素注入を実施することで可能な限り格納容器ベント遅延させ、環境への影響を低減させることとする。

窒素注入条件を第1表及び第2表に示す。また、重大事故相当のG値及び設計基準事故相当のG値を想定した場合の格納容器圧力等の推移を第1図か

ら第 8 図に示す。

上記の格納容器ベント時間と「2. 代替循環冷却系に期待しない場合」における格納容器ベント時間を比較することで、代替循環冷却系による格納容器ベント遅延効果を確認する。

第 1 表 重大事故相当の G 値を想定した場合の窒素注入条件

時間		窒素注入条件
①	PCV 酸素 4.0vol% (ドライ条件) 到達	S/C への窒素注入 (窒素 198Nm <sup>3</sup> /h, 酸素 2Nm <sup>3</sup> /h) を開始する
②	PCV 圧力 310kPa[gage]到達	S/C への窒素注入を停止する

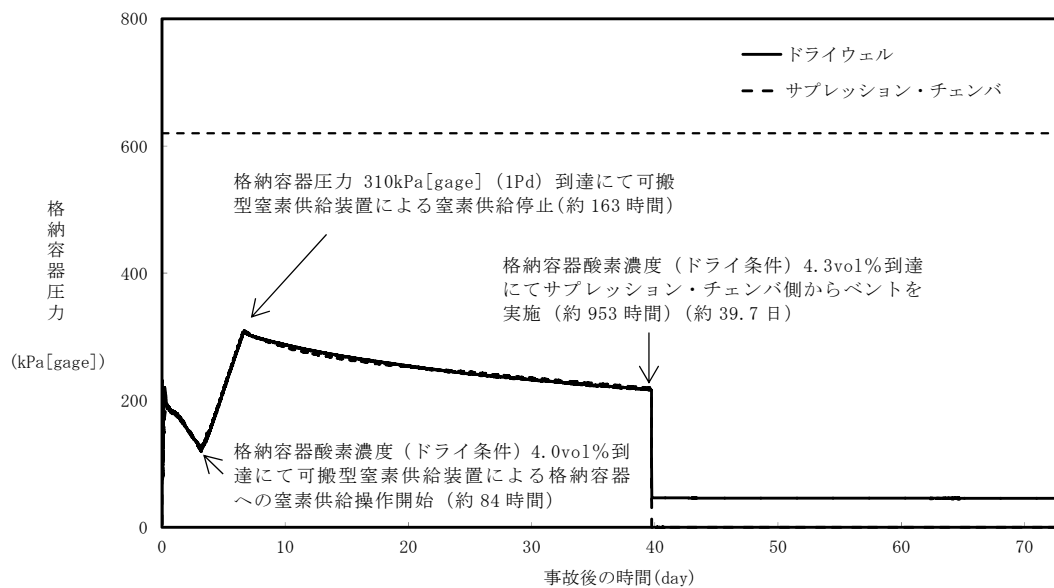
※ PCV : 格納容器, S/C : サプレッション・チェンバ, D/W : ドライウエル

第 2 表 重大事故相当の G 値を超える酸素濃度上昇を

想定した場合の窒素注入条件 (設計基準事故相当の G 値)

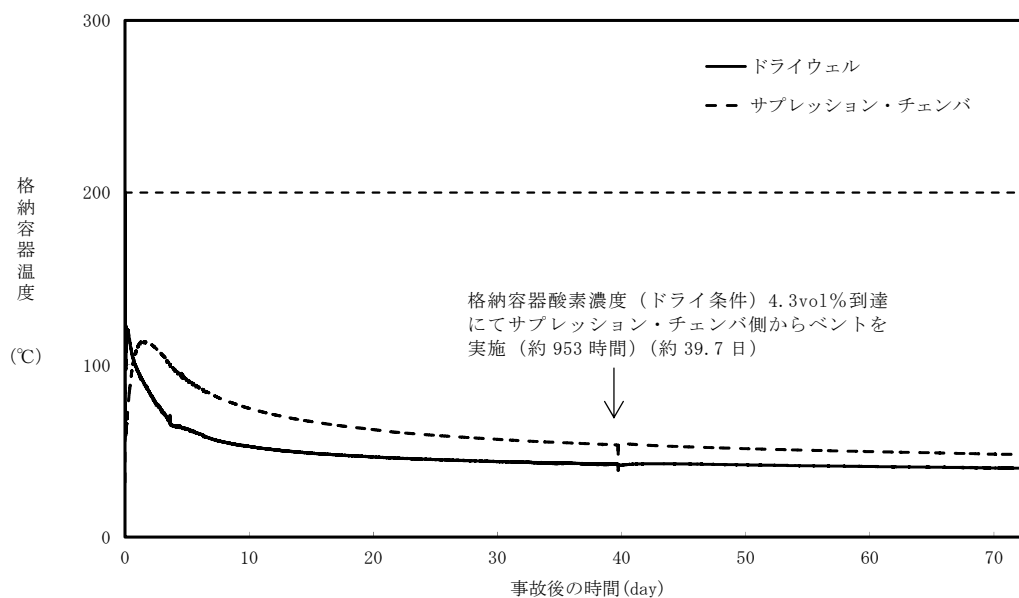
時間		窒素注入条件
①	PCV 酸素 4.0vol% (ドライ条件) 到達	S/C への窒素注入 (窒素 198Nm <sup>3</sup> /h, 酸素 2Nm <sup>3</sup> /h) を開始する
②	酸素濃度が上昇傾向 (解析上は①実施 30 分後)	S/C への窒素注入は継続したまま, 追加で D/W への窒素注入 (窒素 198m <sup>3</sup> /h, 酸素 2m <sup>3</sup> /h) を開始する。 (合計窒素 396Nm <sup>3</sup> /h, 酸素 4Nm <sup>3</sup> /h を格納容器内に注入する)
③	PCV 圧力 310kPa[gage]到達	S/C 及び D/W への窒素注入を停止する
④	PCV 酸素 4.0vol% (ドライ条件) 到達	S/C への窒素注入 (窒素 198Nm <sup>3</sup> /h, 酸素 2Nm <sup>3</sup> /h) を開始する
⑤	酸素濃度が上昇傾向 (解析上は④実施 30 分後)	S/C への窒素注入は継続したまま, 追加で D/W への窒素注入 (窒素 198m <sup>3</sup> /h, 酸素 2m <sup>3</sup> /h) を開始する。 (合計窒素 396Nm <sup>3</sup> /h, 酸素 4Nm <sup>3</sup> /h を格納容器内に注入する)
⑥	PCV 圧力 465kPa[gage]到達	S/C 及び D/W への窒素注入を停止する

※ PCV : 格納容器, S/C : サプレッション・チェンバ, D/W : ドライウエル



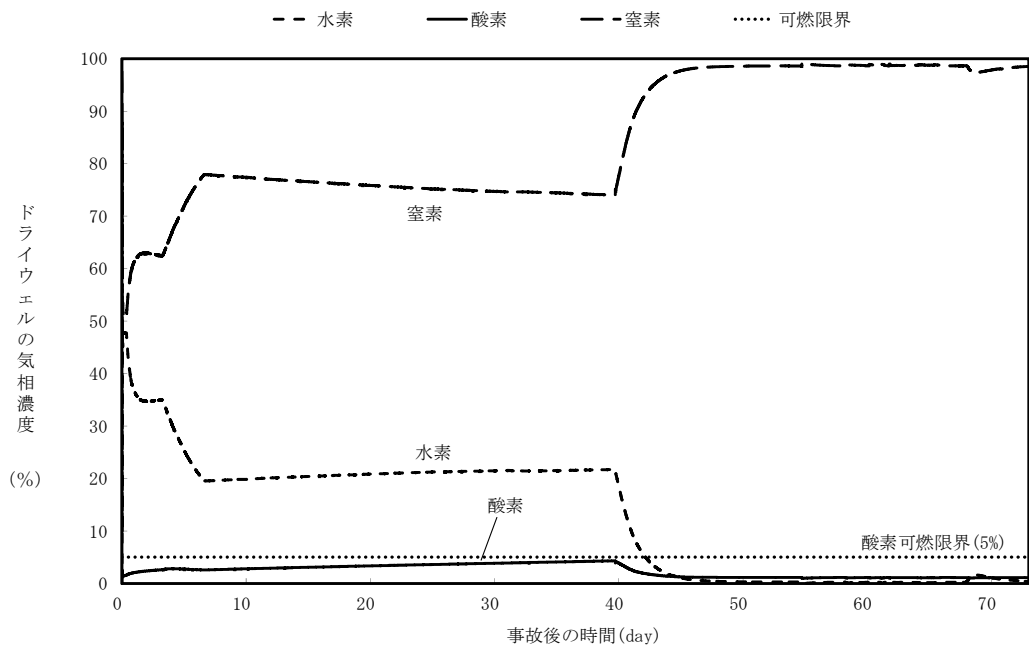
第1図 格納容器圧力の推移（重大事故相当のG値を想定）

※ 格納容器から原子炉建屋への漏えいを考慮

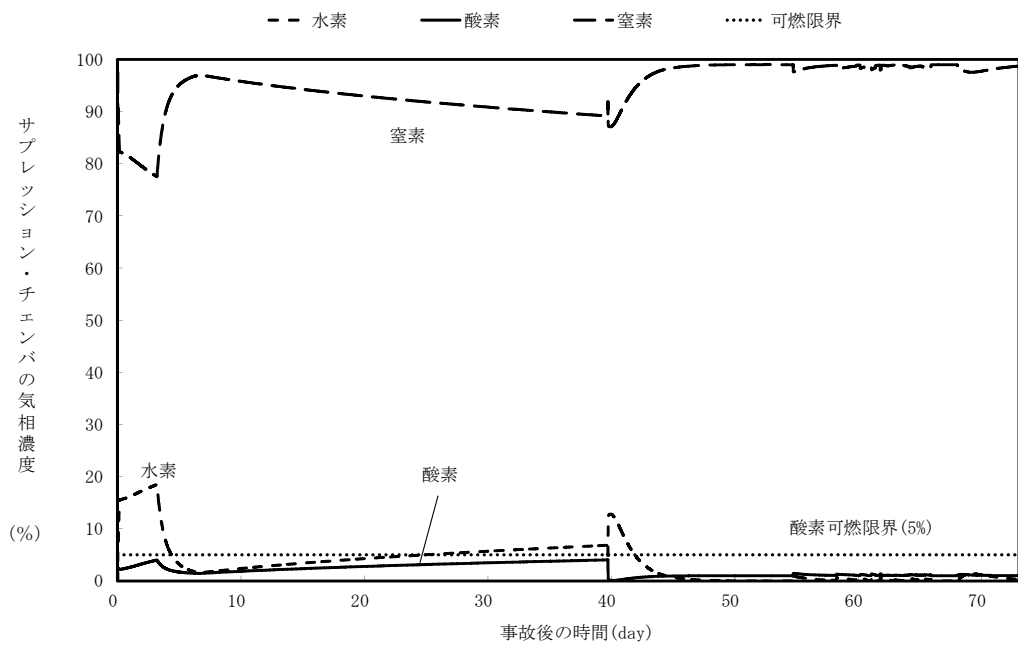


第2図 格納容器雰囲気温度の推移（重大事故相当のG値を想定）

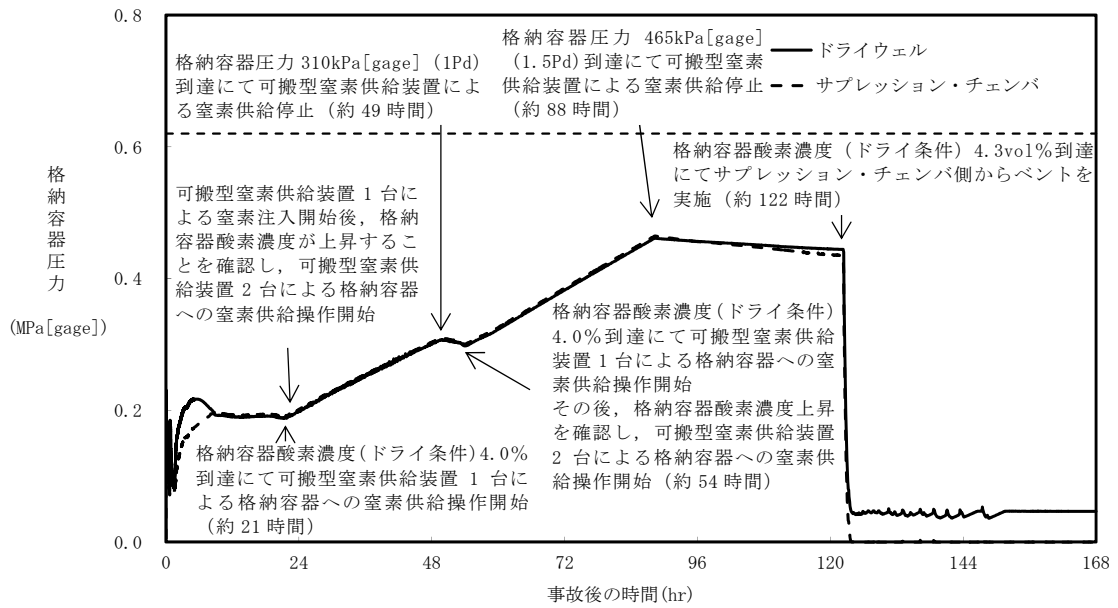
※ 格納容器から原子炉建屋への漏えいを考慮



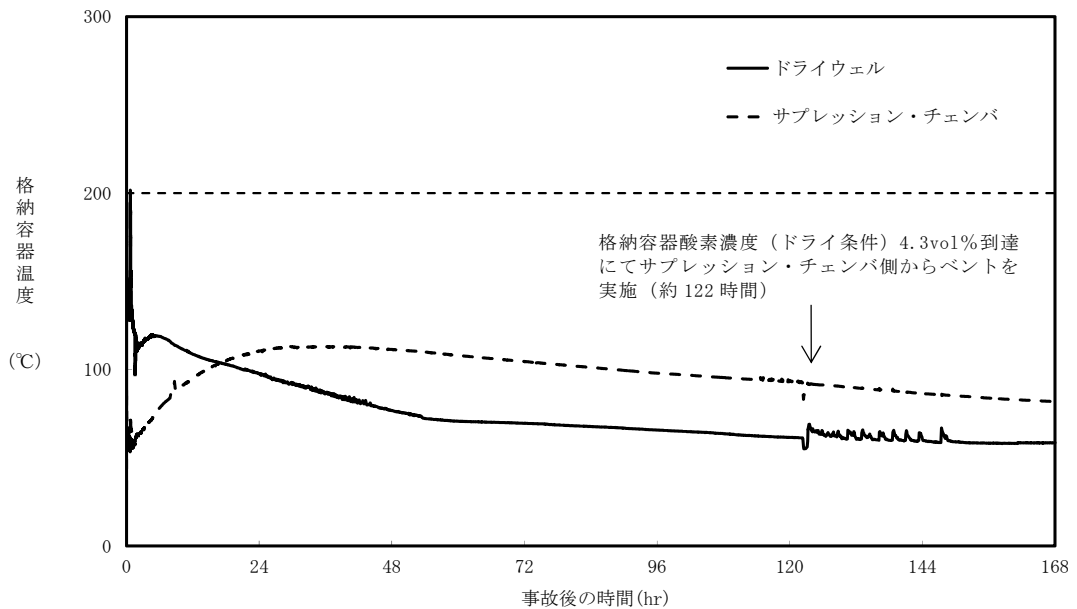
第 3 図 ドライウエルの気相濃度の推移（重大事故相当のG 値を想定）



第 4 図 サプレッション・チェンバの気相濃度（重大事故相当のG 値を想定）



第 5 図 格納容器圧力の推移 (設計基準事故相当の G 値を想定)



第 6 図 格納容器雰囲気温度の推移

(設計基準事故相当の G 値を想定)

追而

第7図 ドライウェルの気相濃度の推移  
(設計基準事故相当のG値を想定)

追而

第8図 サプレッション・チェンバの気相濃度  
(設計基準事故相当のG値を想定)

## 2. 代替循環冷却系に期待しない場合

### (1) 評価結果について

代替循環冷却系による格納容器ベントの遅延効果を評価する観点から、代替循環冷却系に期待しない場合の格納容器ベント時間を評価した。評価にあたっては、より現実的な格納容器ベント時間を評価するため、第3表に示すとおり、格納容器スプレイ温度等を現実的な評価条件とした（「(2) 現実的な解析条件の妥当性について」参照）。この結果、格納容器ベント基準となるサブプレッション・プール水位通常水位+6.5mに到達する時間が事故後約[追而]時間後となり、「1. 代替循環冷却系に期待する場合」で示す格納容器ベント時間と比較すると、代替循環冷却系に期待することで格納容器ベントの実施時期を大幅に遅延することが可能となる。各評価ケースの格納容器ベント時間を第4表に、格納容器圧力及び雰囲気温度の推移を第9図及び第10図に示す。

第3表 現実的な評価条件

	現実的な評価条件	設定理由
外部水源温度 (スプレイ温度)	20℃*	有効性評価のベースケースでは35℃一定としているが、地下式タンクを水源としており、約20℃以下の水温になることが想定されるため、現実的な評価条件では水源補給されるまでは20℃を設定
格納容器 スプレイ流量	・格納容器圧力465kPa[gage] (1.5Pd) 到達 102m <sup>3</sup> /hにて流量調整 格納容器圧力400kPa[gage] (1.3Pd) 到達 格納容器スプレイ停止	有効性評価のベースケースでは1.3~1.5Pdの間欠スプレイ時の流量として最大である130m <sup>3</sup> /hとしているが、現実的な評価条件ではスプレイ液滴径2mmが確保される最低流量として102m <sup>3</sup> /hを設定
ペDESTAL (ドライウェル 部) 水位	1m	ペDESTAL(ドライウェル部)の水張りを有効性評価のベースケースでは考慮していない、格納容器の熱容量に寄与しベント遅延効果があるため、現実的な評価条件では考慮して設定

※ 代替淡水貯槽の水量が1000m<sup>3</sup>到達以降は西側淡水貯水設備(地下)からの補給が開始されるため、補給開始以降は水温の条件は変更となるが、補給開始が格納容器ベント開始以降となることから、本評価においては20℃一定とした

第4表 評価結果

	代替循環冷却系に期待する場合		代替循環冷却系に期待しない 場合
	重大事故相当のG値を想定した場合	設計基準事故相当のG値を想定した場合	
格納容器 ベント時間	約39.7日(約953時間)	約5日(約122時間)	約[追而]時間

追而

第 9 図 格納容器圧力の推移  
(代替循環冷却系に期待しない場合)

追而

第 10 図 格納容器雰囲気温度の推移  
(代替循環冷却系に期待しない場合)



(2) 現実的な解析条件の妥当性について

① 外部水源温度（スプレイ温度）

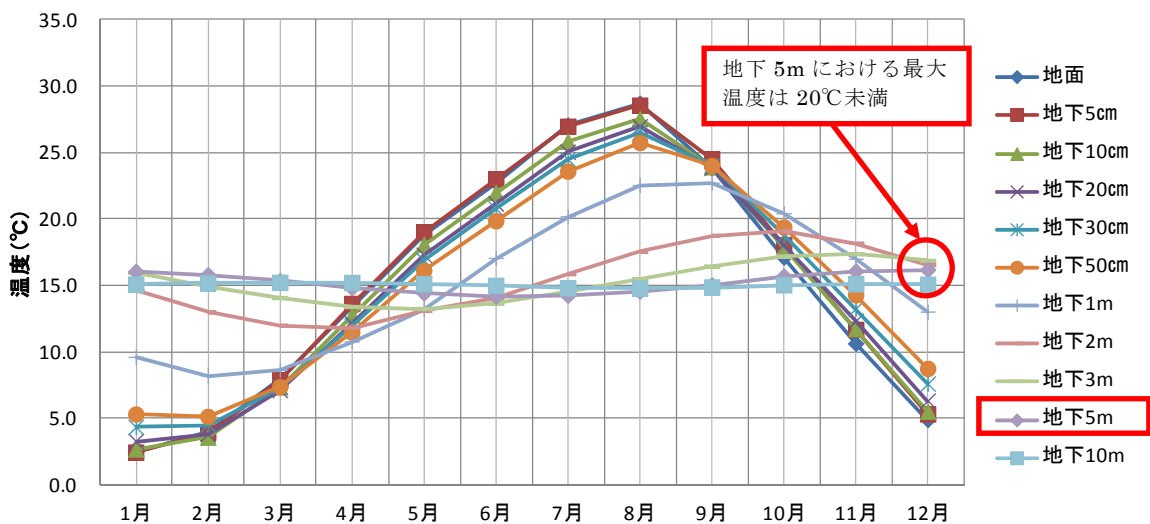
代替格納容器スプレイ冷却系（常設）の水源となる代替淡水貯槽は地下式のタンクであり，最大水位が地下 6m 位置であること及び第 11 図に示すとおり地下 5m の地中温度の最大が 20℃未満であることを踏まえ，代替淡水貯槽の温度を 20℃とした。

② 格納容器スプレイ流量

スプレイ液滴径 2mm が確保される最低流量として  $102\text{m}^3/\text{h}$  を設定した（参考 2）。

③ ペDESTAL（ドライウェル部）の水位

ペDESTAL（ドライウェル部）の水位は，MAAP 解析において格納容器内の熱容量に寄与する。これを踏まえ，格納容器ベント遅延効果を確認するための感度解析では，実運用に沿った水位として 1m とした。



第 11 図 地中温度の年間月別平均温度の変動（水戸市）

（「地中温度等に関する資料」（農業気象資料第 3 号，1982）に基づく）

## 格納容器スプレイの流量調整について

## 1. 格納容器スプレイの流量調整における方針

外部水源を用いた格納容器圧力制御のための格納容器スプレイ時は、可能な限り格納ベントを遅延させる目的から以下の手順とする。

- (1) 格納容器スプレイの流量調整範囲は  $102\sim 130\text{m}^3/\text{h}$  とし、可能な限り連続スプレイとなるよう流量を少なくする。
- (2) (1)の流量調整範囲において連続スプレイとなる場合、格納容器圧力制御範囲（炉心損傷前： $0.7\text{Pd}(217\text{kPa}[\text{gage}])\sim 0.9\text{Pd}(279\text{kPa}[\text{gage}])$ ，炉心損傷後： $1.3\text{Pd}(400\text{kPa}[\text{gage}])\sim 1.5\text{Pd}(465\text{kPa}[\text{gage}])$ ）で、可能な限り高い圧力に維持するよう流量調整し、格納容器スプレイ効率を高くする。
- (3) (1)の流量調整範囲において間欠スプレイとなる場合、格納容器圧力制御範囲（炉心損傷前： $0.7\text{Pd}(217\text{kPa}[\text{gage}])\sim 0.9\text{Pd}(279\text{kPa}[\text{gage}])$ ，炉心損傷後： $1.3\text{Pd}(400\text{kPa}[\text{gage}])\sim 1.5\text{Pd}(465\text{kPa}[\text{gage}])$ ）で、最低流量である  $102\text{m}^3/\text{h}$  で間欠スプレイを実施し格納容器への持ち込み水量の抑制を図る。

## 2. 格納容器スプレイ流量下限値の設定

## (1) 設計上の流量調整の下限値

外部水源を用いた格納容器圧力制御のための格納容器スプレイでは常設低圧代替注水系ポンプを用いるが、弁キャビテーションを防止する観点から設定する流量調整の下限値は  $70\text{m}^3/\text{h}$  である。

## (2) スプレイ液滴径について

格納容器スプレー流量は液滴径と相関があり、格納容器スプレー流量を低下させた場合、液滴径が大きくなることでエアロゾル除去効率が低下するおそれがあるが、格納容器スプレー流量とスプレー液滴径の関係における実験<sup>[1]</sup>による知見に基づき、格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の有効性評価では、スプレー液滴径を 2mm に設定している。

実験における記録ではスプレー液滴径にばらつきがあるが、第 1 図に示すノズル当たりの流量が  以上の場合、最大の液滴径は 2 mm 以下となる。東海第二におけるスプレーヘッドのノズル数を考慮すると、スプレー液滴径 2mm 以下を確保するための最低流量は 102m<sup>3</sup>/h となる。

○東海第二発電所におけるスプレーヘッドのノズル数： ノズル

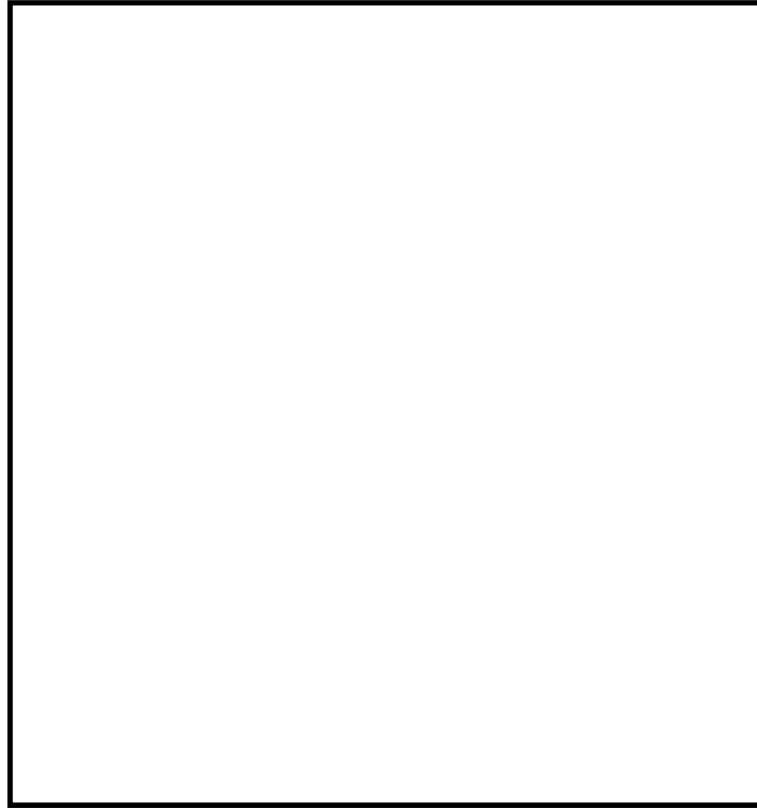
○最低流量= (L/min/ノズル) ×  (ノズル)

$$=1700 \text{ (L/min)}$$

$$=102 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

### (3) 運用上の流量調整の下限値

上述の設計上の流量調整の下限値及びスプレー液滴径 2mm を確保するための最低流量を考慮し、運用上の流量調整の下限値は 102m<sup>3</sup>/h とする。



第1図 スpray液滴径の実験結果

(ノズル当たりの流量 )

[1] 共同研究報告書,放射能放出低減装置に関する開発研究(PHASE2)

(平成5年3月)

## 代替循環冷却系に期待しない場合の評価

(中央制御室の居住性評価等の評価シナリオの設定について)

代替循環冷却系の優先順位（格納容器ベントの遅延のために格納容器圧力逃がし装置よりも代替循環冷却系を優先して使用）及び代替循環冷却系の信頼性（多重化により信頼性が向上）を踏まえ、格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の有効性評価では、代替循環冷却系に期待した評価とすることが考えられる。

一方、代替循環冷却系による格納容器ベントの遅延効果を評価する観点から、現実的な評価条件にて代替循環冷却系に期待しない場合の格納容器ベント時間を評価しているが、中央制御室の居住性評価や中央制御室待避室の遮蔽設計等を保守的に評価する観点からは、より早期の格納容器ベントに至る条件を設定することで、評価及び設計の保守性を確保することとする。そのため、代替循環冷却系による格納容器ベントの遅延効果を評価するための評価条件と比べて、格納容器スプレイ温度等について保守的な評価条件を用いた。

代替循環冷却系による格納容器ベント遅延効果を評価するための評価条件、中央制御室の居住性評価等の保守的な評価条件設定のための評価条件及び格納容器ベント時間等を第 1 表に示す。代替循環冷却系による格納容器ベント遅延効果を確認する観点から評価した格納容器ベント時間は事故後約 [迫而] 時間後、中央制御室の居住性評価等の保守的な評価条件を設定する観点から評価した格納容器ベント時間は事故後約 19 時間後となり、中央制御室の居住性評価や中央制御室待避室の遮蔽設計等において保守的な評価条件が設定できている。

第 1 表 解析条件及び格納容器ベント時間

評価ケース	評価条件	評価目的	格納容器ベント時間
格納容器ベント遅延効果を 確認するための 評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外部水源温度（スプレイ温度）：20℃※</li> <li>・格納容器スプレイ流量： 格納容器圧力 465kPa[gage]（1.5Pd）到達 102m<sup>3</sup>/hにて流量調整</li> <li>格納容器圧力 400kPa[gage]（1.3Pd）到達 格納容器スプレイ停止</li> <li>・ペDESTAL（ドライウエル部）水位：1m</li> </ul>	代替循環冷却系に期待しない場合におけるより現実的な評価条件による格納容器ベント時間を評価し、代替循環冷却系による格納容器ベント遅延効果を確認するため	約[追而]時間
中央制御室の 居住性評価等 の保守的な条 件設定のため の評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外部水源温度（スプレイ温度）：35℃</li> <li>・格納容器スプレイ流量： 格納容器圧力 465kPa[gage]（1.5Pd）到達 130m<sup>3</sup>/hにて流量調整</li> <li>格納容器圧力 400kPa[gage]（1.3Pd）到達 格納容器スプレイ停止</li> <li>・ペDESTAL（ドライウエル部）水位：0m</li> </ul>	中央制御室の居住性評価、現場作業の成立性、環境条件設定、中央制御室待避室の遮蔽設計、格納容器圧力逃がし装置の設計を保守的な条件で行うため	約 19 時間

※ 代替淡水貯槽の水量が 1000m<sup>3</sup>到達以降は西側淡水貯水設備（地下）からの補給が開始されるため、補給開始以降は水温の条件は変更となるが、補給開始が格納容器ベント開始以降となることから、本評価においては 20℃一定とした