

泊発電所3号炉

静的機器の単一故障に係る設計 説明資料

格納容器スプレイ系統における単一故障について

平成26年9月2日
北海道電力株式会社

- 泊発電所3号炉格納容器スプレイ系統における単一故障については、新規制基準適合性に対する審査において、想定される単一故障とは「機能を喪失すること」であり、配管については「流路が断たれること」(全周破断、完全閉塞)とすべきとの解釈が示された。
- 単一設計となっている立上り配管に「流路が断たれること」を仮定すると、スプレイ流量が確保できなくなり、格納容器スプレイ系統に求められる安全機能である「格納容器の冷却機能」を達成できなくなるため、立上り配管を追設することとした。
- 立上り配管追設後の静的機器の単一故障を想定した場合の影響を検討した結果、追設後も立上り配管の全周破断を想定した場合、健全側から破断箇所により流出することとなるため、従来の動的機器の単一故障を想定した場合の安全評価よりも厳しい結果となる見込みであることから、Dスプレイリングのリングヘッドーに逆止弁を設置することとした。
- 泊発電所3号炉格納容器スプレイ系統については、以上の設備対策を実施することにより、設置許可基準規則第12条第2項および同解釈4に記載されている「所定の安全機能を達成できるように設計されていること」への適合していることを確認した。
- 本資料では、これらの検討結果、評価結果等について説明する。

➤ 想定する静的機器の単一故障について

- 当該設備に要求される格納容器の冷却機能が喪失する恐れのある単一故障として、想定される最も過酷な条件である完全機能喪失となる「全周破断」を想定することとした。^{※1}
- 格納容器内立上り配管に「全周破断」を仮定すると、上流側のA,B系統の格納容器スプレイ系統がいずれも健全な場合においても、スプレイ水がスプレイリングに供給できなくなるため、スプレイ流量は確保できない。したがって、格納容器スプレイ系統に求められる安全機能である「格納容器の冷却機能」を達成することができず、多重性が確保されているとはいえない。

※1 格納容器内立上り配管、スプレイリングが単一設計の場合、「完全閉塞」については「全周破断」と同様に最も過酷な条件となるが、後述の格納容器内立上り配管追設後においては「全周破断」が最も厳しくなるため、ここでは統一して単一故障として「全周破断」を想定することとした。

- そこで、立上り配管に「全周破断」を仮定しても、格納容器スプレイ系統がその機能を維持できる多重化の方策を検討した。

➤ 多重化の方策検討について

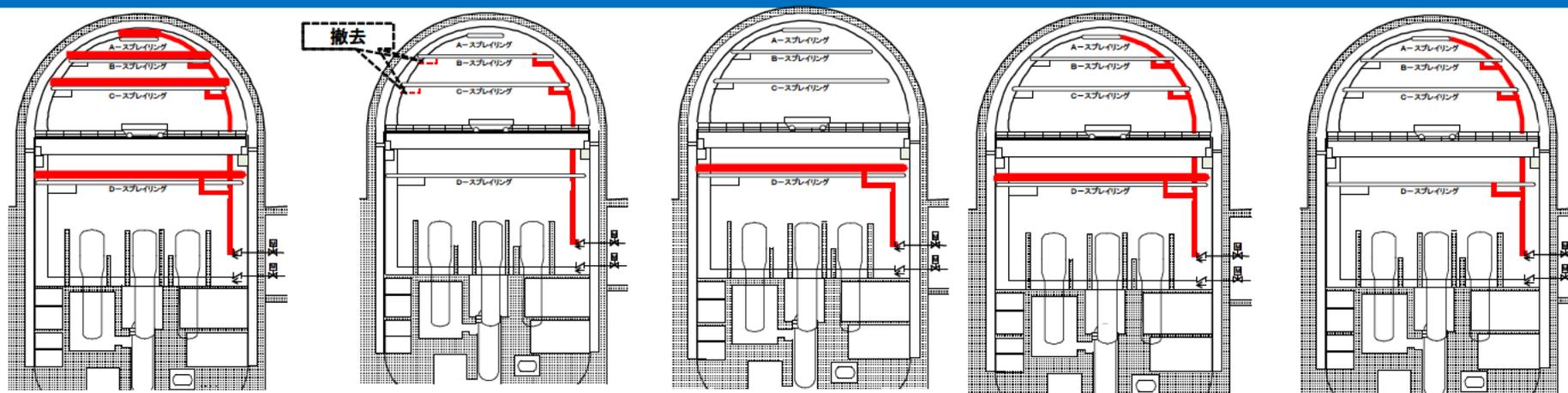
- スプレイリング、配管の増設について、以下の観点・目標で検討した。
 - ① 動的機器の単一故障を想定した場合の評価結果が従来と変わらないこと^{※2}
 - ② 工事が成立すること及び改造工事後の保守管理性^{※3}に問題がないこと
 - ③ 故障リスクの低い静的機器で構成すること
 - ④ 静的機器の単一故障を想定した場合の評価結果が従来の安全評価と同程度の結果に収まること

※2 動的機器の単一故障については、従来より最も厳しいケースとして考慮してきたものであり、従来の評価に影響を与えない設計とすることを目標としたものである。

※3 例えば定期的な点検が必要な機器を高所に設置する場合、点検するためにポーラークレーン上に足場の設置が必要になるなど、保守管理が非常に困難となる。また、機器を格納容器半球部に設置する場合等では、格納容器鋼板に近接することとなり、十分なスペースが確保できないことから、保守管理性が問題となる。

- まず、①、②、③の観点から方策を選定し、選定したものについて④の観点での設計、評価を行って、妥当性を確認することとした。

格納容器スプレイ設備多重化に関する検討



①案 スプレイリングまで多重化
 ②案 既設のスプレイリングをA,B系統に分配
 ③案 B系統立上り配管、Dリング追設
 ④案 ③案に加え、A～CリングをA・B系統統合とする
 ⑤案 立上り配管追設

図1 格納容器スプレイ設備多重化の検討（検討対象：赤線）

表1 検討結果

対策	工事概要	工事成立性	動的単一故障評価への影響	採否
スプレイリングまで多重化【①案】	B系統の立上り配管及びスプレイリングを4基追加設置	× 設置スペースが限られており、スプレイ水を適切に噴霧できるよう設置するのは困難であり、既設スプレイリングを含めた抜本的な最適化が必要	◎ なし	否
既設のスプレイリングをA,B系統に分配【②案】	B系統の立上り配管を追設し、スプレイリングの追設は行わず、例えばB系統はB,Cスプレイリングに、A系統はA,Dスプレイリングに接続する。	○ 立上り配管の追設は、CV頂部へのアクセスが必要であり、やや困難だが可能。	× A系統、B系統とも、動的機器の単一故障想定時の評価結果に影響する。	否
B系統立上り配管、Dリング追設【③案】	B系統の立上り配管を追設、スプレイリングはDリングのみ追設する	× Dリングの追設は他の設備との干渉、スプレイ水を適切に噴霧できるように設置するのが困難。	× A系統の動的機器の単一故障想定時の評価結果に影響する。	否
③案に加え、A～CリングをA・B系統統合とする【④案】	B系統の立上り配管を追設、スプレイリングはDリングのみ追設し、さらに、A～CリングはA・B系統統合とする	× 立上り配管の追設については、CV頂部へのアクセスが必要であり、やや困難だが可能。 Dリングの追設は他の設備との干渉、スプレイ水を適切に噴霧できるように設置するのが困難。	× ポンプ1台による供給先が増えるため、動的単一故障評価に影響する可能性がある。	否
立上り配管追設【⑤案】	立上り配管を追設し、スプレイリングはA・B系統統合とする。	○ 立上り配管の追設は、CV頂部へのアクセスが必要であり、やや困難だが可能。	◎ なし	採用

従来の動的機器の単一故障を想定した安全解析に影響を与えないこと、工事の成立性の観点から立上り配管を追設する【⑤案】を採用することとした。

なお、いずれも保守管理面では問題はなく、配管、オリフィス等の静的機器のみで構成している。

格納容器内立上り配管を追設した上での設計検討

➤ 想定する静的機器の単一故障について

- 当該施設に要求される「格納容器の冷却機能」が喪失する恐れのある単一故障として、想定される最も過酷な条件として「全周破断」※1を想定した。

※1 立上り配管追設後において、「格納容器の冷却機能」等に影響を与えるスプレイ流量(スプレイリングからスプレイできる流量)が少なくなるのは系統外への流出が生じる破損であることから、「完全閉塞」でなく、「全周破断」を想定した。

- 最も過酷な条件となる破断箇所として、図2の①～⑨のうち破断流量が最も多くなりスプレイ流量が最も少なくなる、スプレイ配管立上り部(①)の最も低い位置(T.P.33.9m)を想定した。※2

※2 破断想定の検討対象範囲と想定位置

- ✓ 立上り配管を追設した場合でも、配管の故障により、健全側系統のスプレイ流量に影響を与える可能性があることから、格納容器内逆止弁下流側からスプレイリングまでのスプレイ配管も全周破断の想定対象とした。
- ✓ この場合、破断点が低位置にあるほど各リングと破断点の静水頭差が大きくなり、一方で配管抵抗による損失水頭変化分はそれほど大きくないため、スプレイリングからの回りこみ量が多くなるため①が破断流量が最も多くなる。

- 全周破断を想定するのは、原子炉冷却材喪失事故後の再循環切替操作時(事故発生後約25分)とした。

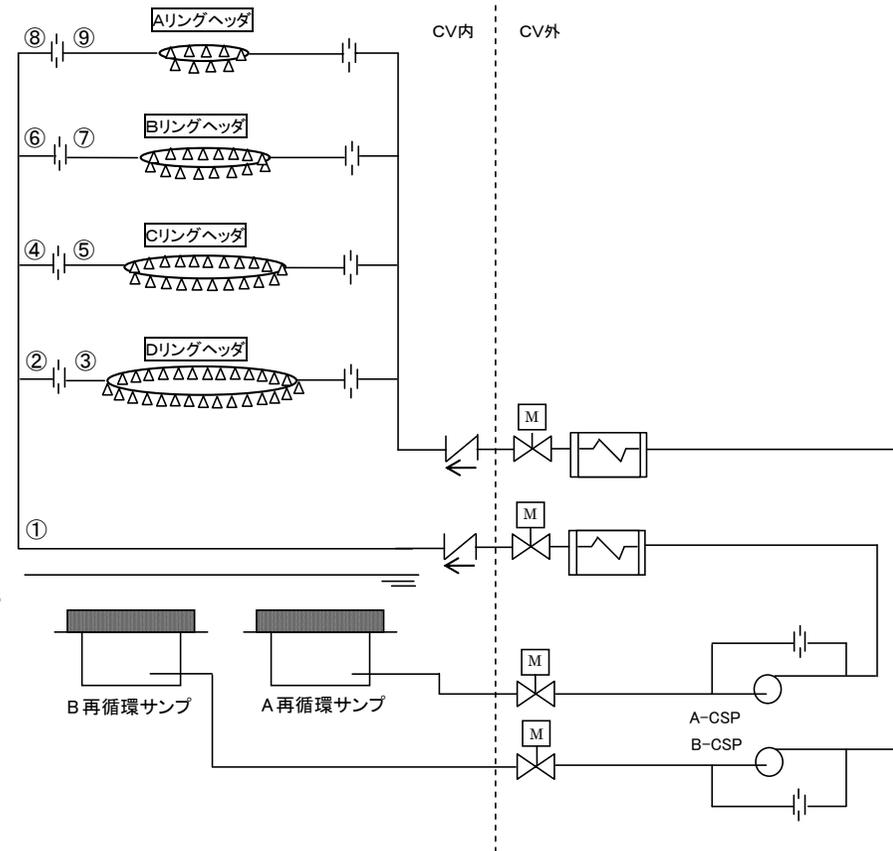


図2 立上り配管追設後の格納容器スプレイ系統と破損想定箇所

静的機器の単一故障の想定(影響評価)

- ・スプレィ配管立上り部(T.P.33.9m)に全周破断を想定すると、破断側系統のスプレィ水が破断口から流出するだけでなく、健全側系統のスプレィ水の一部がスプレィリングを通じて回り込み、破断口から流出するため、ほとんどのスプレィ水が、設置高さの最も低いDリングからのみスプレィされる。
- ・スプレィ流量は現行の安全解析で考慮している値(格納容器スプレィポンプの単一故障を仮定し、健全側ポンプ1台での流量908m³/h)の約19%となり、その場合、LOCA発生時の格納容器内圧力ピーク値は動的機器の単一故障を想定している現行の安全解析結果を下回るものの、長期的に第3のピークが生じることにより、後述の環境への放射性物質の異常な放出に関する評価や可燃性ガスの発生に関する評価においてはより厳しい結果となることが予想される。
- ・設計目標としていた「従来の評価と同程度」には収まらない見込みであることから、スプレィリングを通じた回り込みを極力防ぐことで、従来の評価と同程度の裕度を確保するための機能維持対策を検討した。なお検討にあたっては、スプレィ設備多重化の方策検討と同様の設計目標とした

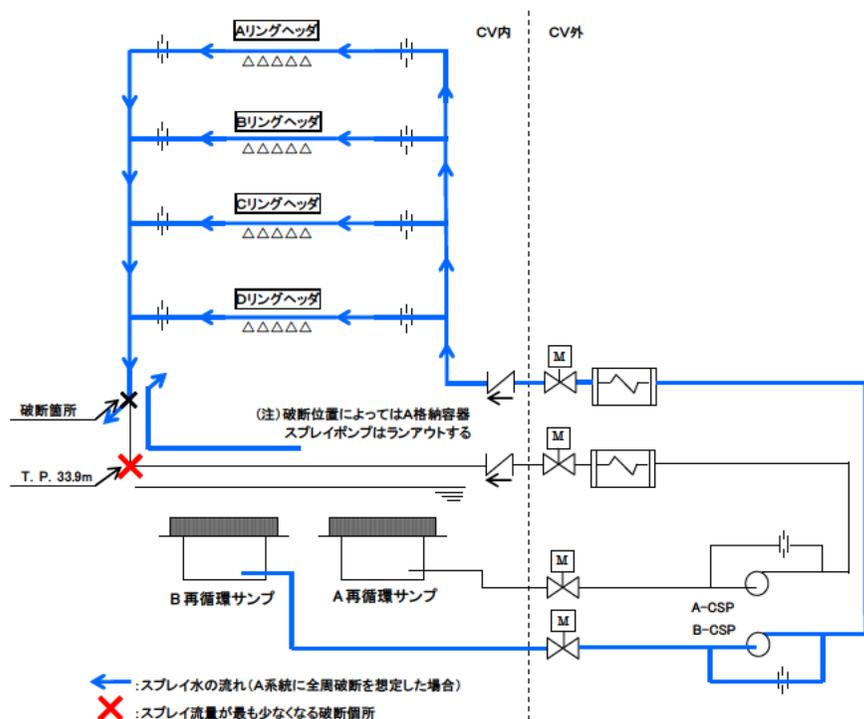


図3 スプレィ立上り配管の全周破断時のスプレィ水の流れ

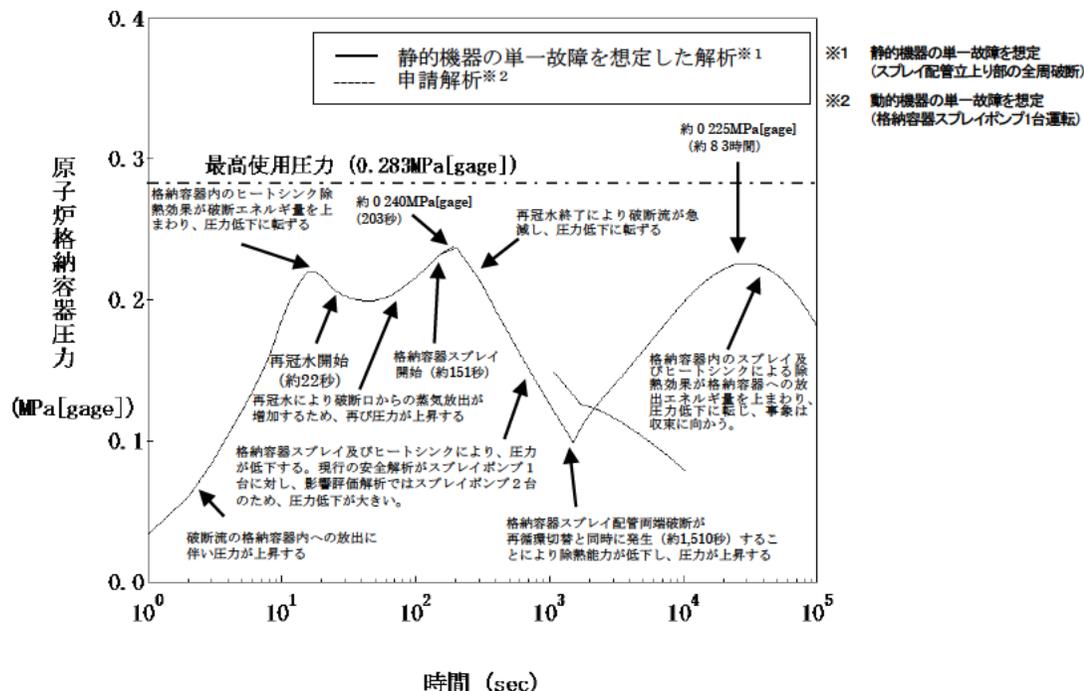


図4 スプレィ立上り配管の全周破断を想定した場合の格納容器内圧力 (スプレィ流量として安全解析で考慮している値の19%の場合)

立上り配管を追設した上での機能維持対策の検討 (1/2)

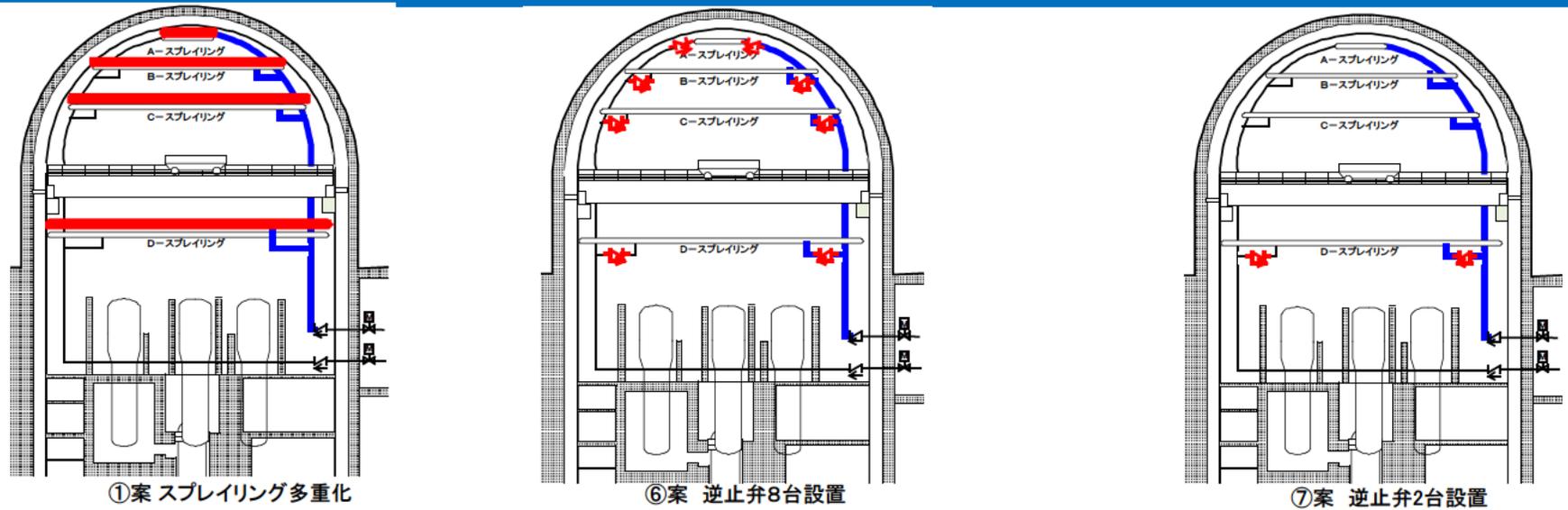


図5 立上り配管追設後の機能維持対策検討(検討対象:赤線)

表2 検討結果

対策	工事概要	工事成立性	保守管理	採否
スプレイング まで多重化 【①案】 (比較のため再掲)	B系統の立上り配管及 びスプレイングを4基 追加設置	× 設置スペースが限られており、ス プレイング水を適切に噴霧できるよ う設置するのは困難であり、既設ス プレイングを含めた抜本的な最 適化が必要。	◎ 高所だが、外観検査のみのため比較的容易(既設設 備に対する保守と同じ)。	否 〔工事成立 性の観点〕
逆止弁8台 設置 【⑥案】	各スプレイングごとに 2台の逆止弁を設置 (計8台の逆止弁設置)	△ 床面から約20m~50mの高所 にある配管8本に逆止弁を設置 するため困難。 また、逆止弁を保守点検できるよ うに設置するのは困難。	× A, B, Cリング及び同リングの接続配管への逆止弁 設置は、点検のためポーラクレーン上の高所に足場 の設置が必要。また、格納容器頂部の半球部に沿っ て設置されており、逆止弁と格納容器との間に、逆止 弁の保守点検に必要なスペースが確保できず、保守 管理が非常に困難。	否 〔保守管理 の観点〕
逆止弁2台 設置 【⑦案】	1つのスプレイングに 2台の逆止弁を設置 (計2台の逆止弁設置)	○ 床面から約20mの高所にある配 管2本に逆止弁を設置するため やや困難だが可能。	○ 高所に設置された2台の弁を定期的に分解点検する のはやや困難だが可能。	採用

工事成立性、保守管理の観点から、逆止弁を2弁追設する【⑦案】を採用することとした。
なお、いずれも静的機器で構成され、動的単一故障評価への影響はない。

➤ 逆止弁設置箇所の検討

- ・逆止弁2台を設置する箇所を選定するため、まず、逆止弁が設置可能な水平配管部分を抽出した。そのうえで、抽出した各箇所に逆止弁の設置を想定し、配管の全周破断が生じた場合のスプレィ流量等を評価することで、逆止弁の設置箇所を検討した。
- ・全周破断時にスプレィ水が最も多く流れ、かつスプレィ流量が最も多く確保可能なスプレィリングは、設置高さの最も低いDリングであるため、逆止弁設置箇所の検討にあたっては、Dリングからのスプレィ流量を確実に確保することとした。また、スプレィ水の回りこみを極力防ぐことにも留意した。
- ・その結果、図7に示すDリングヘッダの接続配管のオリフィス下流部に逆止弁を設置した場合が、Dリングを通じてのスプレィ水の回り込みを防止できるとともに、Dリングにおけるスプレィ水の確実な確保の観点から有効であることを確認した。

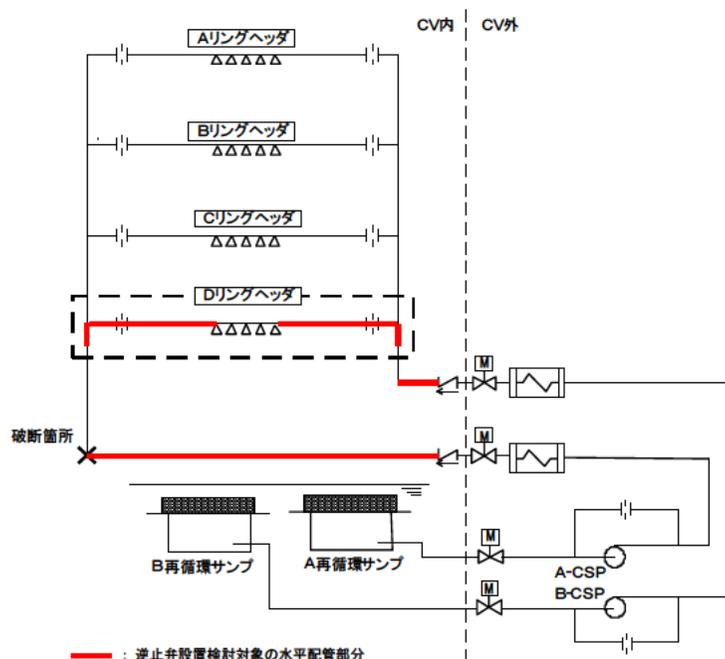


図6 逆止弁設置可能な水平配管部分

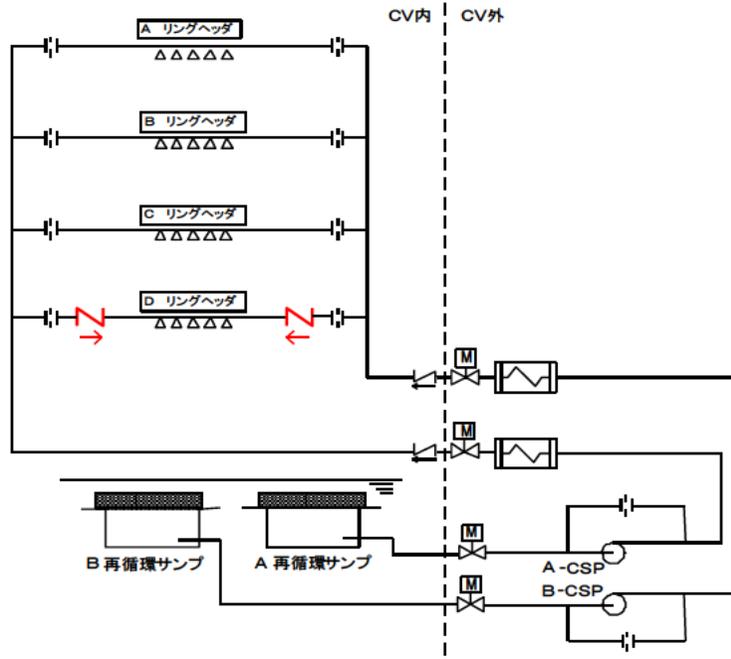


図7 逆止弁設置箇所検討

機能維持対策後の単一故障を想定した場合のスプレイ流量等への影響を確認した。

<スプレイシステムの破断箇所の想定>

図8に示す位置に逆止弁を設置する場合、スプレイ流量が最も少なくなる全周破断位置は、逆止弁を設置しない場合と同様に、スプレイ配管立ち上り部の最も低い位置(T.P.33.9m)である。

<スプレイ流量評価>

スプレイ配管立ち上り部のT.P.33.9mに全周破断を想定した場合のスプレイ流量を評価した。

その結果、スプレイ流量は約364m³/h(現行の安全解析で考慮している流量の約40%)となる。

よって、解析条件として用いる流量は、上記よりも保守的な条件として現行の安全解析で考慮している値の36%を用いる。

<スプレイ水の有効性>

全周破断を想定した場合には、各スプレイリングにおけるスプレイ流量及びスプレイ差圧が設計条件と異なることとなるが、スプレイ差圧の影響、格納容器内からの除熱効果、放射性物質除去効果について問題ないことを確認した。

表3 スプレイ流量評価結果

項目		評価結果
スプレイリングヘッドからのスプレイ流量	Aスプレイリングヘッド	約364.2m ³ /h
	Bスプレイリングヘッド	
	Cスプレイリングヘッド	
	Dスプレイリングヘッド	
	合計	

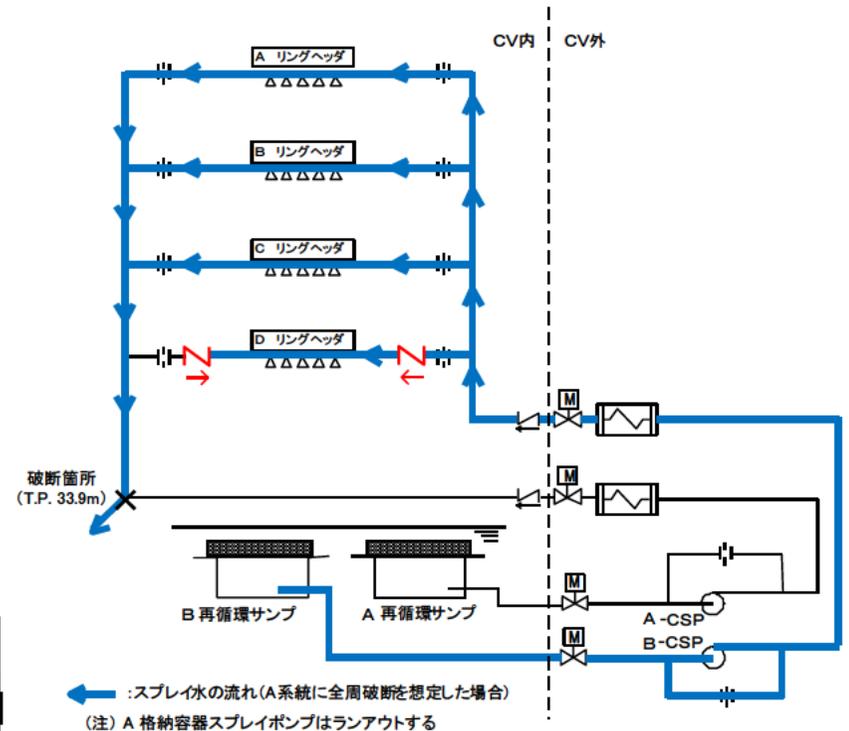


図8 スプレイ立ち上り配管の全周破断時のスプレイ水の流れ (接続配管のオリフィスの下流に逆止弁を設置した場合)

➤ 機能維持対策後の単一故障を想定した場合の安全評価への影響

再循環モードにおける格納容器スプレイ流量の減少により格納容器内圧、温度に大きな影響を与える安全評価事象としてLOCAが挙げられることから、大破断LOCAに起因する以下3つの評価について、単一故障として格納容器内スプレイ配管立上り部の全周破断を想定した解析を実施した。

この3つの評価の解析条件は、単一故障の想定およびスプレイ流量減少による解析結果への影響を確認するという観点から、スプレイ流量減少およびそれに伴って変更になる解析条件以外については変更していない。

なお、動的機器の単一故障を仮定した場合の評価結果は、従来の安全評価と同じである。

- ・ 格納容器内圧評価(健全性評価)
- ・ 可燃性ガスの発生に関する評価
- ・ 環境への放射性物質の異常な放出(原子炉冷却材喪失)に関する評価

✓ 格納容器内圧評価(健全性評価)

表4-1 主要な解析条件の比較

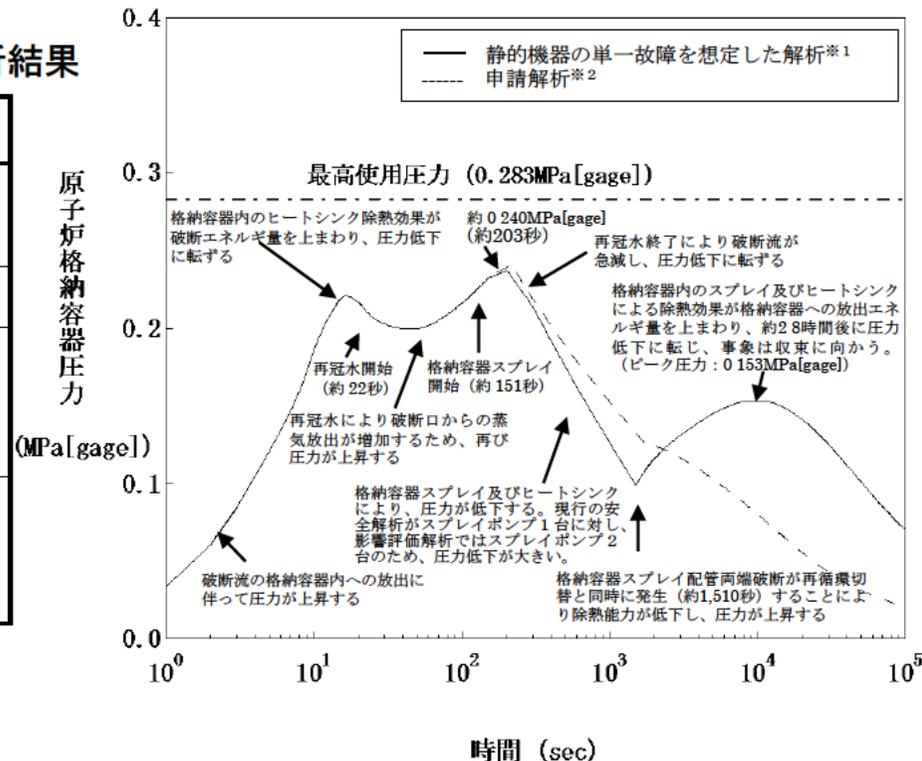
項 目		現行の安全解析	静的機器の単一故障を想定した解析	選定理由
単一故障	動的機器	格納容器スプレイ設備 1系統	短期(再循環切替まで): 考慮しない(スプレイポンプ2台運転) 長期(再循環切替後): 考慮しない(1台はランアウト)	<現行安全解析> 動的機器の単一故障として、 格納容器内圧上昇の観点から 最も厳しい。
	静的機器	考慮しない	短期(再循環切替まで): 考慮しない 長期(再循環切替後): スプレイ配管立上り部1系統での全周破 断を考慮	

✓ 格納容器内圧評価(健全性評価)

・解析の結果、再循環切替以降圧力は機能維持対策前よりも低く推移することを確認した。

表4-2 格納容器内圧評価(健全性評価)の解析結果

項目	現行の安全解析	静的機器の単一故障を想定した解析
最高圧力 (MPa[gage])	約0.241	約0.240
最高温度(°C)	約124	約124
判断基準 (最高使用圧力 (MPa[gage]))	≦ 0.283	
判断基準 (最高使用温度 (°C))	≦ 132	



※1 静的機器の単一故障を想定 (スレイ配管立上り部の全周破断)
 ※2 動的機器の単一故障を想定 (格納容器スレイポンプ1台運転)

図9 格納容器健全性評価 格納容器内圧力

✓ 可燃性ガスの発生

- 静的機器の単一故障を想定した場合、LOCA時の格納容器内温度の履歴が現行の安全解析から変わるため、解析条件のうち格納容器内温度を変更した。

表5-1 主要な解析条件の比較

項目		現行の安全解析	静的機器の単一故障を想定した解析	選定理由
単一故障	動的機器	低圧注入系1系列故障	格納容器内圧評価(健全性評価)の影響評価解析に同じ	<現行安全解析> ECCS性能評価に同じ。
	静的機器	考慮しない		
金属腐食反応割合		格納容器内雰囲気温度に対応した腐食率(MOX炉心を考慮)	同左 ただし、格納容器内温度は現行申請解析と異なる。	指針の考え方どおり。

✓ 可燃性ガスの発生

- ・ LOCA時の格納容器内温度を考慮して金属腐食の反応割合を求めることから、格納容器内温度の履歴が変わることにより、現行の安全解析に対し、金属腐食反応による水素発生量が増加する。
- ・ 解析の結果、格納容器内水素濃度は、現行の安全解析値の約3.3%に対して約3.5%と若干上回るが、判断基準を満足していることを確認した。

表5-2 可燃性ガスの発生の解析結果

項目	現行の安全解析	静的機器の単一故障を想定した解析
格納容器内水素濃度 (%)	約3.3	約3.5
判断基準 (%)	≦ 4	

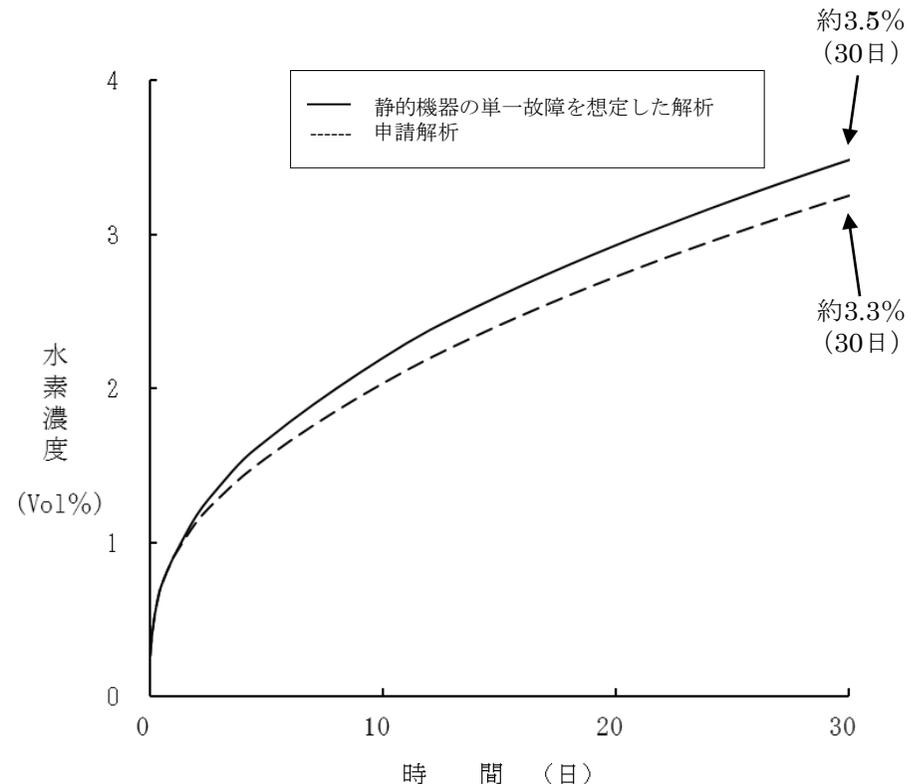


図10 可燃性ガスの発生

✓ 環境への放射性物質の異常な放出(原子炉冷却材喪失)

- 静的機器の単一故障を想定した場合、前述の通りLOCA時の格納容器内圧力の履歴が現行の安全解析から変わるため、解析条件のうち、格納容器圧力に応じて算出する格納容器からの漏えい率を変更した。

表6-1 主要な解析条件の比較

項目		現行安全解析	静的機器の単一故障を想定した解析	選定理由
単一故障	動的機器	ディーゼル発電機1系列	格納容器内圧評価(健全性評価)の影響評価解析に同じ	<現行安全解析> 動的機器の単一故障として、放射性物質の放出の観点から最も厳しい。
	静的機器	考慮しない		
原子炉格納容器からの漏えい率		格納容器内圧力に対応した漏えい率	格納容器内圧力に対応した漏えい率(但し、格納容器内圧力の推移が現行安全解析と異なる。)	指針の考え方どおり、事故後の格納容器内圧力に対応した漏えい率とする。

- 現行の安全解析に対し、格納容器内圧力の履歴が変わることにより長期的に格納容器からの漏えい率が高くなったことから、大気中に放出されるよう素及び希ガスの量は若干上昇する。
- 敷地等境界外における実効線量は、現行の安全解析値の約0.23mSvと同程度になることを確認した。

表6-2 環境への放射性物質の異常な放出(原子炉冷却材喪失)の解析結果

項目	現行安全解析	静的機器の単一故障を想定した解析
環境に放出されるよう素量(Bq) (I-131等価量-小児実効線量係数換算)	約 2.7×10^{11}	約 3.1×10^{11}
環境に放出される希ガス量(Bq) (γ 線エネルギー0.5MeV換算)	約 6.1×10^{13}	約 7.5×10^{13}
敷地等境界外における最大実効線量(mSv)	約0.23*	約0.23*
判断基準(mSv)	≤ 5	

* 実効線量には、原子炉格納容器内浮遊核分裂生成物による直接線量及びスカイシャイン線量(約0.086mSv)を含む。

- 建設当時の設計の考え方について
 - 格納容器スプレイ系統は設備設計上の信頼性は十分に確保されていることから故障は想定し難い。
 - このことから設計当時、スプレイリング、さらにスプレイ配管に対しても、静的機器の単一故障(フランジ部からの漏洩)よりも動的機器の単一故障(スプレイポンプの1台停止)を仮定するほうが格納容器の健全性評価上厳しい想定となり、単一設計による解析評価上の影響はないと評価していた。

- 新規制基準への適合性について
 - 今回、当該設備については、き裂からのリーク、ノズル1個の閉塞も発生する可能性は非常に小さいと考えられるが、静的機器の単一設計箇所についての信頼性を確認するため、配管内径の1/2の長さと同配管肉厚の1/2の幅を有する貫通クラックからのリークを想定される静的機器の単一故障とし、所定の安全機能を達成できることを示すこととした。

 - しかし、今回、新規制基準適合性に対する審査において、実用発電用原子炉及びその附属設備の位置、構造及び設備の基準に関する規則における定義より、単一故障については「所定の安全機能を失うこと」とされ、配管の機能が流体を運ぶことと考え、その単一故障は「流路が断たれること」とすべきとの解釈が示された。

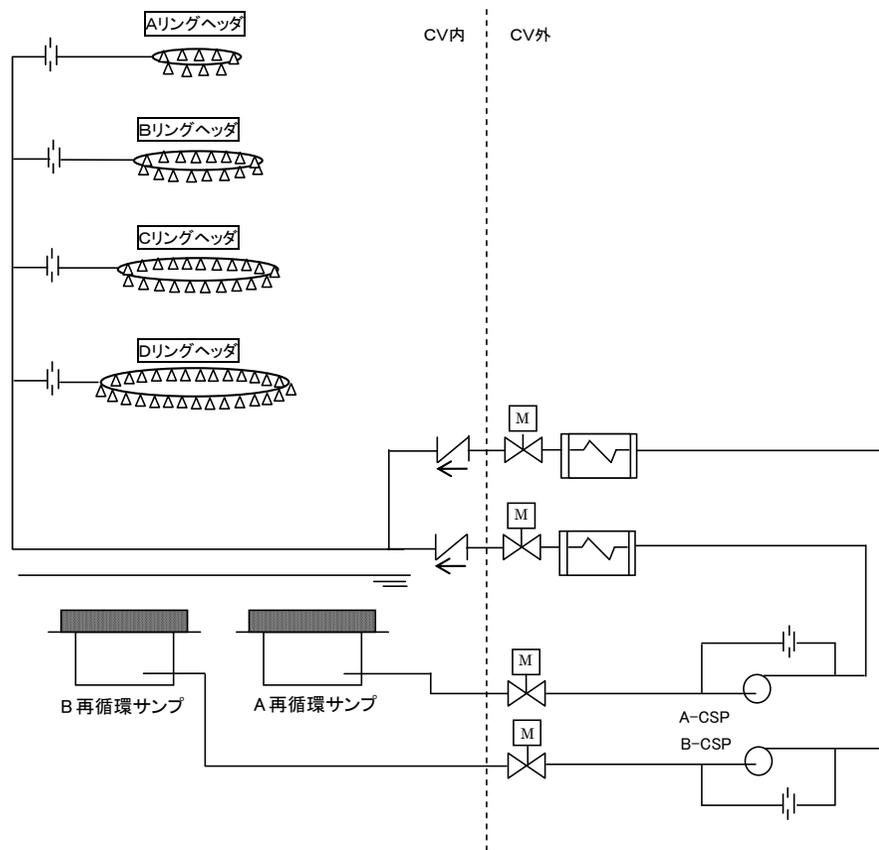


図 従来の格納容器スプレイ系統