

4.5.8 原子炉冷却材喪失(原子炉格納容器健全性評価)

4.5.8.1 過渡変化の原因及び説明

この事故は、原子炉の出力運転中に原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管あるいはこれに付随する機器等の破損等により、1次冷却材が系外に流出し、原子炉格納容器内の温度、圧力が異常に上昇する原子炉冷却材喪失を想定するものである。

ECCS及び原子炉格納容器スプレイ設備の作動により、原子炉格納容器内は減圧され原子炉格納容器に損傷を与えることなく事故は終止できる。

本事故とデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも、現行措置及び追加措置の多様化設備により、添付書類十解析（設計基準事故）と同様の過渡応答になると考えられる。本事故の事象進展を図 4.5.8-1 に示す。

4.5.8.2 解析ケース

添付書類十（設計基準事故）記載の破断ケースを対象に、ソフトウェア CCF 対策の有効性を評価する。解析ケースを表 4.5.8-1 に示す。なお、LOCA 時の原子炉格納容器内応答については、ループ数によらず解析結果の傾向は同様であると考えられることから、代表 4 ループプラントについては解析せず、代表 3 ループプラントの解析結果で代表する。

4.5.8.3 判断基準

4.1 節にて述べたとおり、設計基準事故に対して適用される、以下の判断基準を準用する。

原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力及び原子炉格納容器バウンダリにおける温度が最高使用圧力及び最高使用温度以下となること。

具体的な判断基準として、最高使用圧力 0.283MPa[gage]及び最高使用温度 132°Cを概ね満足することとする。なお、最高使用圧力/温度を上回る場合の判断基準として、既許認可で確認された原子炉格納容器の限界圧力（最高使用圧力の 2 倍（0.566MPa[gage]））/限界温度（200°C）を用いる。

4.5.8.4 解析条件

本事故については、以下に示す現行措置及び追加措置の多様化設備により、添付書類十解析（設計基準事故）と同様の過渡応答になると考えられる。このため、最適評価を適用する必要はないと判断されることから、添付書類十解析と同じ保守的評価条件を適用する。また、4.3 節の基本解析条件に基づく CCF 対策有効性評価の解析条件について、添付書類十解析との主な相違点を表 4.5.8-2 に示す。

<本事故で期待する多様化設備>

- ・ 現行措置：原子炉トリップ（原子炉圧力低）〔解析では模擬せず〕
- ・ 追加措置：高圧／低圧注入系（1 系列）の自動起動（原子炉圧力（異常）低）
原子炉格納容器スプレイの手動起動（現場操作）

表 4.5.8-1 原子炉格納容器健全性評価 解析ケース

	代表 3 ループプラント	代表 4 ループプラント
炉心	55Gwd/t ウラン + MOX	—
CD 値	1.0	
破断位置/体様	SG 出口側配管/両端破断	

表 4.5.8-2 「原子炉格納容器健全性評価」添付書類十解析との主な相違点

項目	添付書類十解析 (設計基準事故)	CCF 対策有効性評価
単一故障	あり (CV スプレイ設備 1 系列の不作動)	なし
外部電源	なし	あり
1 次冷却材ポンプ	外部電源喪失に伴い コーストダウン開始	手動停止※1, ※2 (CCF 発生時は自動停止せず)
高圧注入ポンプ 低圧注入ポンプ	高圧×2/2 + 低圧×2/2	高圧×1/2 + 低圧×1/2 (1 系列の自動作動※3) (残り 1 系列の手動起動は仮定せず)
CV スプレイポンプ	1/2 台	1/2 台 (CCF 発生時は自動作動せず※4)
その他	—	多様化設備としての作動限界値、 作動遅れ時間を反映

※1：設計基準事故（外部電源あり）の場合、原子炉トリップ信号と非常用炉心冷却設備作動信号の一致により 1 次冷却材ポンプはコーストダウンを開始するが、ソフトウェア CCF 発生時には同ロジックが機能せず自動停止しないため、手動による停止となる。

※2：1 次冷却材ポンプの取り扱いは以下とする。

- ・ CV 健全性：ブローダウン期間～再冠水完了/運転継続を仮定、再冠水完了以降/模擬せず^(注)

(注) 炉心再冠水完了以降の CV への放出エネルギーは、炉心崩壊熱、1 次系メタル放熱及び SG 2 次側からの伝熱で決まるため、1 次冷却材ポンプの模擬は不要。

※3：CCF 対策の追加措置。「原子炉圧力（異常）低」により、1 系列の高圧/低圧注入系が自動作動。

※4：設計基準事故時には、「原子炉格納容器圧力異常高」の原子炉格納容器スプレイ作動信号により自動作動するが、ソフトウェア CCF 発生時には作動信号が発信されないため自動作動しない。事象発生を検知後、運転手順に基づく所定の操作所要時間（30 分）で手動起動させる。

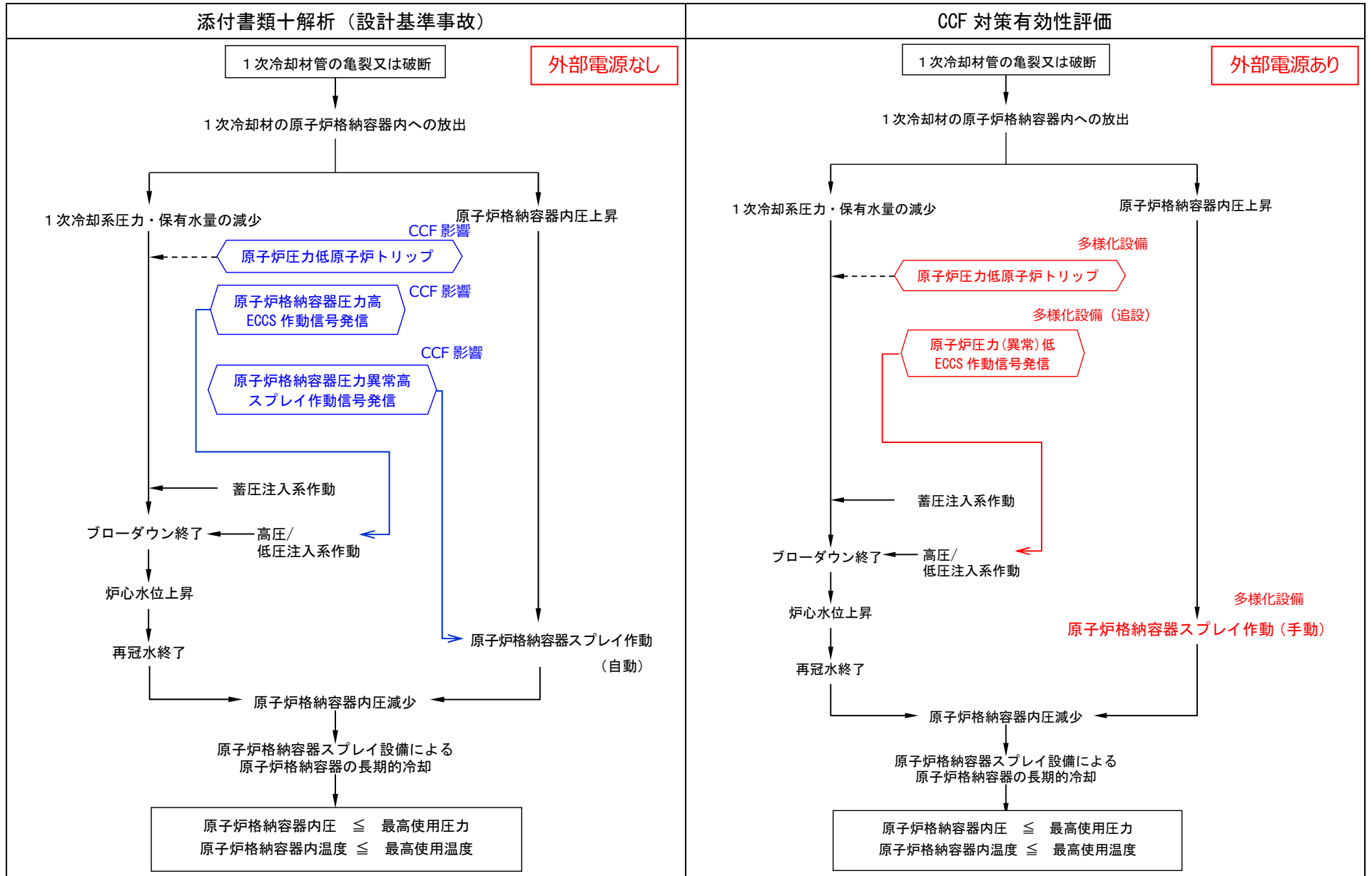


図 4.5.8-1 「原子炉冷却材喪失 (原子炉格納容器健全性評価)」の事象過程

4.5.8.5 代表3ループプラント

(1) 主要解析条件

本解析の主要解析条件を以下に示す。なお、添付書類十解析（以下、「基本ケース」と称す。）からの変更点に下線を引いて示す。

炉心熱出力	: 2,652×1.02 MWt
熱流束熱水路係数 (F _Q) (制限値)	: 2.32
炉心崩壊熱	: 日本原子力学会推奨の崩壊熱曲線 ⁽¹⁰⁾
1次冷却材圧力	: 15.41+0.21 MPa[gage]
蒸気発生器伝熱管施栓率	: 0%
1次冷却材低温側温度	: 283.6+2.2 °C
1次冷却材高温側温度	: 321.7+2.2 °C
原子炉容器頂部温度	: 321.7+2.2 °C
破断箇所及び破断体様	: 蒸気発生器出口側配管の両端破断
E C C S	
高圧注入ポンプの作動台数	: <u>1台</u>
余熱除去ポンプの作動台数	: <u>1台</u>
高圧/余熱除去ポンプの注入開始	: ブローダウン終了と同時に
蓄圧タンクの作動基数	: 3基
原子炉格納容器スプレイ設備	
格納容器スプレイポンプの作動台数	: <u>1台 (事象発生検知後 30分で手動起動)</u>

その他の解析条件については、添付 1-1 (代表3ループプラント) に示す。

(2) 主要解析結果

主要な解析結果を基本ケースと比較して表 4.5.8-3 に、主要なパラメータの過渡変化を図 4.5.8-2～図 4.5.8-3 に示す。また、事故経過の概要を以下に述べる。

1 次冷却材管の破断後、原子炉格納容器内に冷却材が流出するため、原子炉格納容器内圧は急速に上昇する。しかし、ブローダウンが進むにつれて流出流量が少なくなるとともに、圧力上昇に伴い温度も高くなり、熱吸収体による除熱が大きくなるため、事故発生後約 18 秒にブローダウンエネルギーによって形成される第 1 次ピーク圧力約 0.206MPa[gage]が現れる。その後、熱吸収体の効果により、圧力は漸減していくが、約 24 秒後に再冠水が始まり蒸気発生器を回って原子炉格納容器へ放出されるエネルギーの効果により、圧力は再び緩やかに上昇していく。

一方、ブローダウンによる原子炉格納容器内圧上昇により、約 7 秒後に「原子炉格納容器圧力異常高」信号の原子炉格納容器スプレイ作動限界値に到達するが、本評価では原子炉格納容器スプレイ設備は自動作動しない。

約 221 秒後には、再冠水による全炉心のクエンチにより、原子炉格納容器へのエネルギー放出が減少するため、第 2 次ピーク圧力約 0.216MPa[gage]が現れる。これ以降原子炉格納容器へ持ち込まれるエネルギーが減少するため、圧力は低下していくが、原子炉格納容器スプレイによる除熱が行われないため、熱吸収体の除熱効果は徐々に低下し、圧力は再び緩やかに上昇していく。

多様化設備の「原子炉圧力異常低」信号の非常用炉心冷却設備作動信号発信により事象発生を検知し、その後 30 分で原子炉格納容器スプレイ設備を手動起動することで、事象発生後 1922 秒に原子炉格納容器スプレイが開始され、これ以降原子炉格納容器スプレイによる除熱が行われることから、約 1922 秒後に第 3 次ピーク圧力約 0.226MPa[gage]、温度約 121℃が現れ、これが最高圧力、最高温度となる。

このようにして、原子炉格納容器圧力の最高値は約 0.226MPa[gage]、原子炉格納容器温度の最高値は約 121℃であり、基本ケースに比べわずかに厳しい結果となるものの最高使用圧力 0.283MPa[gage]、最高使用温度 132℃を下回り、想定事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも判断基準を下回ることから、安全上の問題とはならないことを確認した。

表 4.5.8-3 「原子炉格納容器健全性評価」 CCF 対策有効性評価結果

(蒸気発生器出口側配管両端破断 流出係数:1.0/蒸気発生器伝熱管施栓率 0%)

項 目	基本ケース	CCF 対策有効性評価
第 1 次ピーク圧力 (MPa[gage])	約 0.206	約 0.206
第 1 次ピーク圧力到達時刻 (秒)	約 17	約 18
第 2 次ピーク圧力 (MPa[gage]) (判断基準)	約 0.214 (≤ 0.283)	約 0.216 —
第 2 次ピーク温度 (°C) (判断基準)	約 120 (≤ 132)	/
第 2 次ピーク圧力到達時刻 (秒)	約 182	約 221
CV スプレー作動開始時刻 (秒)	151	1922
第 3 次ピーク圧力 (MPa[gage]) (判断基準)	/	約 0.226 (≤ 0.283)
第 3 次ピーク温度 (°C) (判断基準)	/	約 121 (≤ 132)
第 3 次ピーク圧力到達時刻 (秒)	/	約 1922
事故後 1 日の圧力 (MPa[gage])	約 0.025	約 0.035

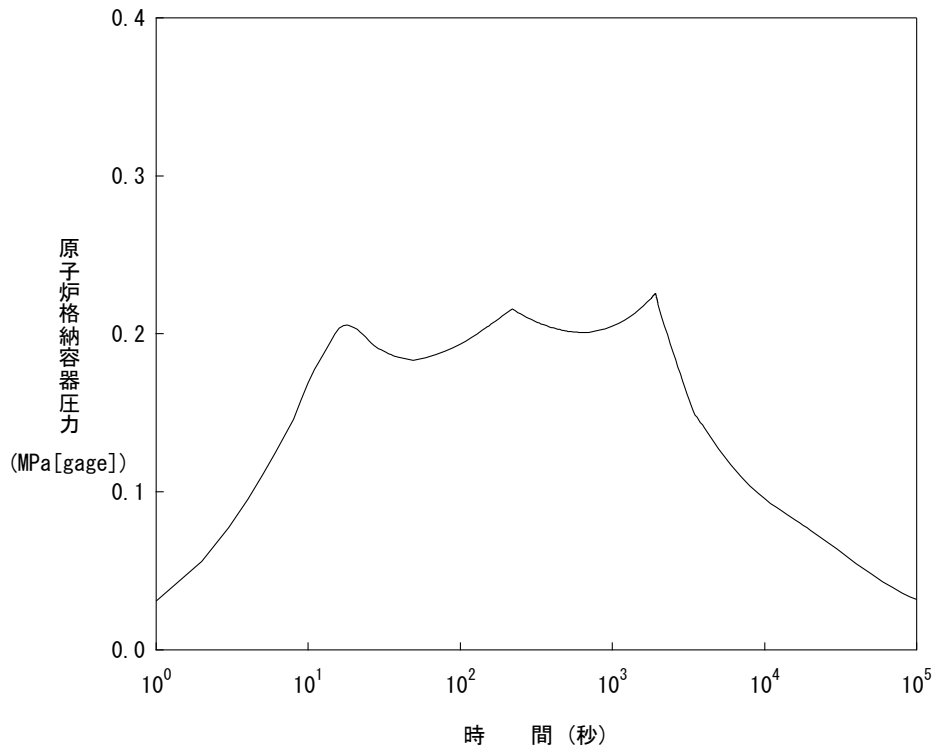


図4.5.8-2 原子炉格納容器圧力 (蒸気発生器出口側配管両端破断 CD=1.0)

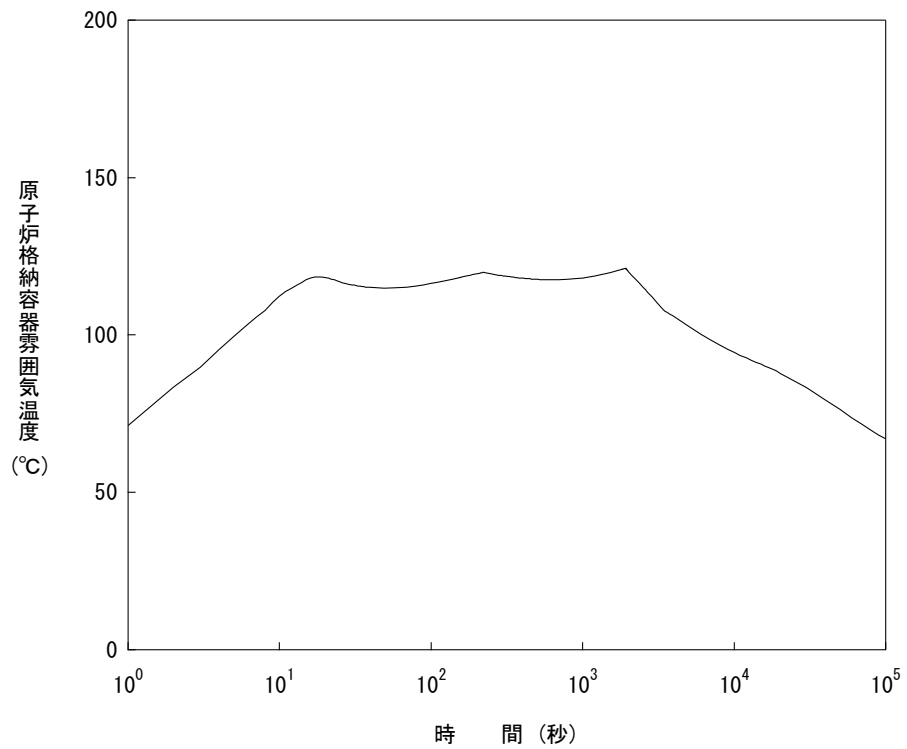


図4.5.8-3 原子炉格納容器雰囲気温度 (蒸気発生器出口側配管両端破断 CD=1.0)

4.6 有効性評価結果の適用性及び安全評価への影響に係る検討

代表3, 4ループプラントにおける多様化設備の有効性については、4.4節及び4.5節にて示したとおりである。代表3, 4ループプラントにて有効性を確認した多様化設備が、設備や燃料仕様の異なる同型3, 4ループプラント、及び2ループプラントに対しても有効性を有しているか、解析結果の分析に基づきその適用性を検討した。また、「可燃性ガスの発生」や被ばく評価について、代表3, 4ループプラントも含め、想定事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳する場合の影響を添付書類十解析等に基づき検討した。

4.6.1 Non-LOCA 解析の適用性

現実的条件を考慮した代表3, 4ループプラントの結果より、多様化設備の有効性が確認され、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力、燃料被覆管温度、(反応度投入事象の場合は燃料エンタルピ) が判断基準を下回ることを確認した。同型3, 4ループプラント及び2ループプラントにおいても各事象の進展は同様であるため、多様化設備の考え方に違いはなく、その有効性が期待できる。

それぞれの判断基準に対する分析結果は、以下のとおりである。

4.6.1.1 主給水流量喪失

代表3ループプラント及び代表4ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、CCF 対策の有効性評価では原子炉トリップにより出力が低下することから、SA 有効性評価の ATWS と比べて、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力が大きく緩和されることを確認した。また、燃料被覆管温度の最大値は、ATWS と同様に、有意に厳しくならないことを確認した。

本事象が生じた場合、プラント設備差及び炉心、燃料の仕様差によらず蒸気発生器水位が低下するため、代表プラント以外のプラントにおいても多様化設備による蒸気発生器水位低の原子炉トリップに至り、SA 有効性評価の主給水流量喪失+ATWS の解析よりも事象進展及び評価結果は緩和される。したがって、同型3, 4ループプラント及び2ループプラントにおいても代表プラントと同様に、多様化設備が作動することで、ATWS が発生する場合より事象進展は楽になり、判断基

準は満足すると判断できる。

4.6.1.2 原子炉冷却材流量の喪失

代表3ループプラント及び代表4ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、以下の傾向があり、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力および燃料被覆管最高温度は判断基準を下回ることを確認した。

- ・ CCF 対策有効性評価では減速材反応度帰還効果を考慮したことで、流量低下による冷却材温度上昇にあわせて出力が低下し（図 4.5.2.1-2、図 4.5.2.2-2）、燃料被覆管温度は有意に上昇しない（図 4.5.2.1-5、図 4.5.2.2-5）。
- ・ 1次冷却材ポンプ電源電圧低あるいは回転数低による原子炉トリップが期待できず、多様化設備の原子炉圧力高発信まで原子炉トリップを待つことになるため1次系圧力が上昇するが、出力の低下効果もあり急激な圧力の上昇は見られず、加圧器安全弁が開くこともない（図 4.5.2.1-3、図 4.5.2.2-3）。

上記はいずれも減速材反応度帰還効果を考慮したことにより生じた傾向であり、炉心、燃料の仕様差の影響が考えられる。一般に減速材反応度帰還効果はウラン炉心に比べ MOX 炉心の方が大きくなるが、CCF 対策有効性評価においては、代表3ループプラントでは MOX 炉心を対象としつつ減速材反応度帰還効果はウラン炉心も考慮した設定としていること、及び代表4ループプラントは減速材反応度帰還効果としてはより厳しいウラン炉心を対象とした厳しめの評価としている。そのため、炉心、燃料の仕様が異なるプラントにおいても、本事象が発生した場合には今回の多様化設備により判断基準を下回ると言える。

また、本事象は全ループの流量が等しく低下するため、上記の減速材反応度帰還効果がループ数に依存せずに期待できる。そのため、異なるループ数のプラントにおいても、本事象が発生した場合には今回の多様化設備により判断基準を下回ると推定できる。その他、本事象においてプラント間の差として影響し得る設備仕様差としては、1次冷却材ポンプのコストダウン特性が挙げられるが、代表3ループプラント及び代表4ループプラントの結果（図 4.5.2.1-1、図 4.5.2.2-1）が示すように、その差は小さくなく、前述の減速材反応度帰還効果による出力

低下の寄与の方が大きいと言える。

以上のとおり、代表3，4ループプラントで有効性を確認した本事象に対するCCF対策は、同型3，4ループプラント及び2ループプラントに対してもその適用が有効である。

4.6.1.3 原子炉冷却材ポンプの軸固着

代表3ループプラント及び代表4ループプラントを対象にCCF対策の有効性を評価した結果、以下の傾向があり、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力および燃料被覆管最高温度は判断基準を下回ることを確認した。

- ・ CCF対策有効性評価では減速材反応度帰還効果を考慮したことで、流量低下による冷却材温度上昇にあわせて出力が低下し（図4.5.3.1-2、図4.5.3.2-2）、燃料被覆管温度は有意に上昇しない（図4.5.3.1-5、図4.5.3.2-5）。
- ・ 1次冷却材流量低による原子炉トリップが期待できないが、減速材反応度帰還効果による出力低下効果により急激な圧力の上昇は見られず、加圧器安全弁が開くこともない（図4.5.3.1-3、図4.5.3.2-3）。また、1次冷却材流量は早期に整定することから、原子炉トリップに至らない。

上記はいずれも減速材反応度帰還効果を考慮したことにより生じた傾向であり、炉心、燃料の仕様差の影響が考えられる。一般に減速材反応度帰還効果はウラン炉心に比べMOX炉心の方が大きくなるが、CCF対策有効性評価においては、代表3ループプラントではMOX炉心を対象としつつ減速材反応度帰還効果はウラン炉心も考慮した設定としていること、及び代表4ループプラントは減速材反応度帰還効果としてはより厳しいウラン炉心を対象とした厳しめの評価としている。そのため、炉心、燃料の仕様が異なるプラントにおいても、本事象が発生した場合には今回の多様化設備により判断基準を下回ると言える。

一方で、本事象は1台の1次冷却材ポンプの固着を想定するため、ループ数の違いの影響を受ける。ループ数が少ないほど1台の1次冷却材ポンプ固着時の炉心流量の低下が大きくなる傾向であり、代表プラントのCCF対策有効性評価の結果を比較しても3ループプラントの方が4ループプラントよりも原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力が僅かに高めとなっている（表4.5.3.1-3、表

4.5.3.2-3)。2ループプラントではさらに圧力が高めとなる可能性があるが、CCF 対策有効性評価では減速材反応度帰還効果を考慮することで添付書類十解析の結果以下となることが代表プラントの結果で確認されており、この効果はループ数の違いによらず期待できることから、2ループプラントにおいても CCF 対策有効性評価の圧力は添付書類十解析を超えず、判断基準を満足すると言える。以上のおおりに、代表3、4ループプラントで有効性を確認した本事象に対する CCF 対策は、同型3、4ループプラント及び2ループプラントに対してもその適用が有効である。

4.6.1.4 主給水管破断

代表3ループプラント及び代表4ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、以下の傾向があり、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力および燃料被覆管最高温度は判断基準を下回ることを確認した。

- CCF 対策有効性評価では主給水管破断直後から現実的な二相放出を考慮したことで、事象初期に1次冷却材温度及び圧力が一時的に低下した後を上昇に転じ、加圧器安全弁の動作によって1次冷却材圧力は抑制される（図4.5.4.1-2、図4.5.4.2-2）。
- 事象初期の1次冷却材温度の一時的な低下によって出力が上昇するものの、早期に原子炉トリップに至るため燃料被覆管温度の上昇は僅かである（図4.5.4.1-6、図4.5.4.2-6）。
- 原子炉トリップ後の長期的な蒸気発生器水位の低下に対し、健全側蒸気発生器への補助給水開始が遅れるものの、1次冷却材圧力は蒸気発生器の残存保有水による冷却及び加圧器安全弁で抑えられ、短期的に生じた最大値を超えることはない（図4.5.4.1-2、図4.5.4.2-2）。

上記の内、短期応答については破断直後からの現実的な二相放出を考慮したことで生じた傾向であり、炉心、燃料の仕様差やループ数の違いによらず期待できる。この効果は原子炉トリップが遅くなることで評価が厳しくなる影響を相殺する方向に働いて、加圧器安全弁の効果と相まって1次冷却材圧力を抑制している。代表プラントを含むいずれのプラントにおいても保守的に破断直後は液相放出を仮定している添付書類十解析では原子炉トリップ直後に1次冷却材圧力が最

大となっていることから、CCF 対策有効性評価で得られる原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力は、上記効果によりいずれのプラントにおいても添付書類十解析と同程度になることが推定できる。

また、短期応答において生じている出力上昇に関しては炉心、燃料の仕様差の影響を受けると考えられるが、1次冷却材圧力は加圧器安全弁の動作により十分抑制され、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力及び燃料被覆管温度のいずれも判断基準に対する余裕が大きいことから、炉心、燃料の仕様が異なる場合でも、本事象が発生した場合には今回の多様化設備により判断基準を下回ると推定できる。

一方、長期的な応答に関して、本事象は蒸気発生器1基の除熱能力が期待できなくなるため、ループ数の違いの影響を受ける。ループ数が少ないほど蒸気発生器1基の除熱能力喪失時の影響が相対的に大きく、代表プラントのCCF対策有効性評価の結果を比較しても3ループプラントの方が4ループプラントよりも厳しくなる傾向を示している(図4.5.4.1-2、図4.5.4.2-2)。長期的な圧力上昇に関して2ループプラントでは3ループプラントの結果よりもさらに大きくなる可能性があるが、短期的な圧力上昇のように急激な圧力上昇ではなく、その上昇は比較的緩やかであること、及び、代表3ループプラントのように蒸気発生器水位が相当に低下した場合でも加圧器安全弁で1次冷却材圧力を抑制できることから、圧力が過度に上昇することはなく、健全側蒸気発生器への補助給水開始によって事象終息が可能と言える。

以上のとおり、代表3、4ループプラントで有効性を確認した本事象に対するCCF対策は、同型3、4ループプラント及び2ループプラントに対してもその適用が有効である。

4.6.1.5 主蒸気管破断

代表3ループプラント及び代表4ループプラントを対象にCCF対策の有効性を評価した結果、以下の傾向があり、原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる最大圧力および燃料被覆管最高温度は判断基準を下回ることを確認した。

- ・ CCFを想定したことでECCSの作動及び主蒸気隔離が遅くなるものの、現実的な想定として制御棒の全挿入としたことで、燃料被覆管温度の過度な

上昇はない（図 4.5.5.1-5、図 4.5.5.2-5）。

- ・ 原子炉冷却材圧力バウンダリに係る圧力については、高圧注入系の注入により上昇するが、ポンプの締切圧力を加圧器逃がし弁の設定圧力以下に設計しているため、原子炉圧力が過度に上昇することはない。

上記の内、制御棒を全挿入とする想定は、炉心、燃料の仕様差やループ数の違いによらず期待できる。この想定は、制御棒の1本固着を想定している添付書類十解析と比べた場合に熱水路係数を緩和させるものであり、代表4ループプラントの評価において添付書類十解析よりも熱流束最大値が大幅に上昇しているものの、熱水路係数（燃料被覆管最高温度に係わるピーキング）が小さいことで熱点熱流束としては厳しくならず、燃料被覆管温度の上昇は大きくなる。そのため、CCF 想定により ECCS の作動及び主蒸気隔離が遅くなるものの、制御棒全挿入の想定と合わせることで燃料被覆管温度が判断基準を超えないことは、代表プラントを含むすべてのプラントに対して期待できる。

次に、本事象は主蒸気隔離以降に蒸気発生器1基の蒸気放出が過大になり1次系を過冷却状態にするため、ループ数の違いの影響を受ける。ループ数が少ないほど蒸気発生器1基による過冷却の影響が相対的に大きくなる。しかしながら、代表プラントの CCF 対策有効性評価は3ループプラントよりも4ループプラントの方が厳しい結果を示している（表 4.5.5.1-3、表 4.5.5.2-3）。これは、反応度停止余裕の違いと ECCS ほう素濃度の差（表 4.5.5.1-1、表 4.5.5.2-1）によるものである。反応度停止余裕については、CCF 対策有効性評価向けに現実的条件として制御棒全挿入状態を想定していることから、添付書類十解析で想定している制御棒1本固着を想定した値とは異なり、ループ数（炉心サイズ）や燃料仕様によってばらつきが生じ得る。ECCS ほう素濃度については、炉心に装荷を想定している燃料仕様に応じた設定の結果として違いが生じ得る。

ここで、ECCS ほう素濃度に関係するプラント間の設備仕様差として、ECCS にほう酸注入タンクを設置しているか否かの違いが挙げられる。ほう酸注入タンクは高濃度のほう酸水を早期に炉心に注入するための設備であり、ループ数（炉心サイズ）や燃料仕様に依らず早期に原子炉出力を低下させることが可能となっている。今回の CCF 対策有効性評価の代表プラントはいずれもほう酸注入タンク非設置プラントであり、ほう酸注入タンクを設置している同型3、4ループプラント

においては燃料仕様による反応度停止余裕への影響を考慮したとしても、高濃度のほう酸水の効果により過度に事象が厳しくなることはないと推定できる。代表プラントを除く同型3ループプラントはいずれもほう酸注入タンクを設置しているが、同型4ループプラントには、代表4ループプラントと同様にほう酸注入タンク非設置のプラントがある。この場合、炉心に装荷する燃料仕様の違いで反応度停止余裕に差があったとしても、燃料仕様に応じた ECCS ほう素濃度を設定していることから、事象進展としては代表プラントと同等となり、過度に厳しくなることはないと推定できる。また、2ループプラントについては、ほう酸注入タンクが設置されており、高濃度のほう酸水の効果により過度に事象が厳しくなることはないと推定できる。

このように、代表プラントはほう酸注入タンク非設置で、ほう酸注入タンク設置プラントより厳しい結果を示しているものであり、前述の制御棒を全挿入とする想定により熱水路係数が緩和され燃料被覆管温度は過度に上昇することはない結果と合わせて、本 CCF 対策によっていずれのプラントでも十分判断基準を満たすものと推定できる。

一方、原子炉冷却材圧力バウンダリに係る圧力については、代表プラントではポンプの締切圧力の設定が加圧器逃がし弁の設定圧力以下としていることで厳しくならないとしているが、ポンプの締切圧力が高いプラントにおいては加圧器安全弁の容量が注入流量を十分上回ることを確認している。1次冷却材圧力の上昇要因は高圧注入系による注入のみであるため、上記理由により代表プラント以外のプラントにおいても判断基準を超えることはない。

以上のとおり、代表3、4ループプラントで有効性を確認した本事象に対する CCF 対策は、同型3、4ループプラント及び2ループプラントに対してもその適用が有効である。

4.6.1.6 制御棒飛び出し

代表3ループプラント及び代表4ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、以下の傾向があり、判断基準を下回ることを確認した。

- ・ 原子炉容器頂部からの冷却材の漏えいによる減圧のため、1次冷却材圧力が有意に上昇することはない（図 4.5.6.1-3、図 4.5.6.1-10、図 4.5.6.2-

3、図 4.5.6.2-8)。

- CCF 対策有効性評価では最適評価コードにより出力分布及び反応度帰還効果を精緻に評価したことで、飛び出し直後の出力上昇が添付書類十解析よりも緩和され、燃料エンタルピ、ピーク出力部燃料エンタルピ、及び、燃料被覆管温度は添付書類十解析よりも低めとなる。また、燃料中心温度の最大値は原子炉トリップが遅れる効果もあり、添付書類十解析と同程度となる（表 4.5.6.1-4、表 4.5.6.1-5、表 4.5.6.2-4、表 4.5.6.2-5）。

上記は現実的な想定として、原子炉容器頂部からの冷却材の漏えい、出力分布及び反応度帰還効果の精緻化を取り込んだことで生じた傾向であり、炉心、燃料の仕様差やループ数の違いによらず期待できる。

原子炉圧力バウンダリにかかる圧力に関しては、原子炉容器頂部からの冷却材の漏えいを取り込むことで添付書類十解析の結果よりも低下することは代表プラント以外のプラントに対しても言える。

高温零出力からの制御棒飛び出しは反応度投入事象であり、反応度投入直後の出力急上昇時に燃料エンタルピ及びピーク出力部燃料エンタルピが厳しくなることから、原子炉トリップの遅れにかかわらず上記精緻化の効果で添付書類十解析のエンタルピを超えることがないことは、代表プラント以外のプラントに対しても言える。

高温全出力からの制御棒飛び出しについては、原子炉トリップ遅れによって燃料中心温度が添付書類十解析よりも高めとなる可能性があることが代表プラントの結果にて示されているが、原子炉トリップを待たずに出力変化が緩やかな低下に移行した時点で燃料中心温度も低下を始めていることから、炉心、燃料の違いによる出力分布及び反応度帰還効果に依存していると考えられる。この出力分布及び反応度帰還効果については、添付書類十解析と比べた場合には評価コード、解析モデルの精緻化が図られているものであり、炉心、燃料の条件に依存することはなく代表プラントの評価と同様に精緻化による緩和効果が期待できる。そのため、代表プラント以外のプラントにおいても、燃料中心温度は出力分布及び反応度帰還効果の精緻化によって代表プラントの結果と同じく添付書類十解析と同程度になるものと推定できる。

以上のとおり、代表 3，4 ループプラントで有効性を確認した本事象に対する

CCF 対策は、同型 3， 4 ループプラント及び 2 ループプラントに対してもその適用が有効である。

4.6.1.7 蒸気発生器伝熱管破損

代表 3 ループプラント及び代表 4 ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、添付書類十解析と比べて以下の傾向があり、1 次系から 2 次系への冷却材の漏えい量は添付書類十解析より減少し、破損側蒸気発生器の 2 次系弁からの蒸気放出量は添付書類十解析と同等であることを確認した。なお、本事象は伝熱管破損の発生により 1 次系圧力が減少するため、原子炉冷却材圧力バウンダリは初期から上昇せず、また、多様化設備による高圧注入系の自動作動により炉心露出に至ることはないため、燃料被覆管温度が厳しくなることはない。

- ・ CCF 対策有効性評価では原子炉トリップが遅れるため、1 次系から 2 次系への冷却材の漏えい量は増加する傾向であるが、自動起動する高圧注入系が 1 系列であるため、結果として、1 次系から 2 次系への冷却材の漏えい量は高圧注入系が 2 系列起動する添付書類十解析より減少する。
- ・ 原子炉トリップから事象収束までの操作に要する時間は添付書類十解析と同等であるため、破損側蒸気発生器の 2 次系弁からの蒸気放出量は、添付書類十解析と同等である。

上記の効果のうち、原子炉トリップが遅れることで漏えい量が増加する影響は、プラントの設備差により異なるが、自動起動する高圧注入系が 1 系列であることは漏えい量を減少させる効果があるため、高圧注入系が 2 系列起動する添付書類十解析の評価結果と比較して、漏えい量が過度に増加することはない。原子炉トリップから事象収束までの運転操作に要する時間はプラント設備差によらず添付書類十解析と同等であるため、破損側蒸気発生器の 2 次系弁からの蒸気放出量は添付書類十解析と同等である。これらの効果は、事象収束に用いる多様化設備や運転操作の想定により生じる傾向であるため、炉心、燃料の仕様差やループ数の違いによらず期待できる。

以上のとおり、代表プラント以外のプラントにおいて、1 次系から 2 次系への 1 次冷却材の漏えい量が代表プラントでの評価結果より増加する可能性はあるが、その影響は限定的である。4.6.3 節にて後述するように、添付書類十解析で

は保守的な燃料欠陥率を想定しているため、現実的には、1次系から2次系への1次冷却材の漏えい量が代表プラントより増大したとしても安全上の問題は無い。したがって、代表3, 4ループプラントで有効性を確認した本事象に対するCCF対策は、同型3, 4ループプラント及び2ループプラントに対してもその適用が有効である。

4.6.2 LOCA 解析の適用性

4.6.2.1 ECCS 性能評価

(1) 大破断 LOCA

代表 3 ループプラント及び代表 4 ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、添付書類十解析（基本ケース）に比べて以下の傾向があり、PCT および局所的最大ジルコニウム－水反応量は判断基準および添付書類十解析を下回ることを確認した。

- CCF 対策有効性評価では外部電源喪失を仮定しないことから、ブローダウン期間は RCP 運転が継続して炉心に冷却材が供給されるため、ブローダウンの全期間にわたり基本ケースに比べ炉心上昇流が大きい傾向となる（図 4.6.2-1、図 4.6.2-2）。この結果、ブローダウン期間前半の上昇流期間において炉心冷却が促進され、CCF 対策有効性評価ケースの燃料被覆管温度は基本ケースより低くなる（図 4.6.2-7、図 4.6.2-8）。
- 基本ケースでは「原子炉格納容器圧力高」信号の非常用炉心冷却設備作動限界値に破断発生の約 1 秒後に達することで高圧注入系及び低圧注入系が作動を開始するのに対し、CCF 対策有効性評価では多様化設備の「原子炉圧力（異常）低」信号の非常用炉心冷却設備作動限界値に破断発生の数秒後に達することで高圧注入系及び低圧注入系が作動を開始する。しかしながら、CCF 対策有効性評価では外部電源喪失を仮定しないことから、ディーゼル発電機の負荷投入シーケンスを介さずに高圧注入ポンプ及び余熱除去ポンプが起動するため、高圧注入系及び低圧注入系からの注入開始が基本ケースに比べ早くなり、炉心再冠水開始がわずかに早くなる（表 4.5.1-4、表 4.5.1-6）。
- CCF 対策有効性評価では解析期間中に原子炉格納容器スプレイが作動しないことから、基本ケースに比べ原子炉格納容器内圧が高く推移するため（図 4.6.2-3、図 4.6.2-4）、再冠水期間の炉心再冠水速度、ひいては炉心冷却性が向上する（図 4.6.2-5、図 4.6.2-6）。

上記の炉心冷却効果のうち、ブローダウン期間の RCP 運転継続による効果が最も支配的である。上記傾向はループ数、プラント設備差及び炉心、燃料の仕様差に依存しないと考えられるため、代表プラント以外のプラントに対しても適用可能であり、

想定事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも、判断基準を下回り安全上の問題とはならないと推定できる。

なお、高圧／低圧注入系（1 系列）の自動起動化に係る CCF 追加対策工事により、プラントによっては高圧／低圧注入系の作動遅れ時間が CCF 対策有効性評価条件より長くなる（遅くなる）可能性があるが、上述のとおり RCP 運転継続による炉心冷却効果が支配的であるため、基本ケース（本設）と同程度の作動遅れ時間であれば炉心冷却性に問題ない。

(2) 小破断 LOCA

代表 3 ループプラント及び代表 4 ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、添付書類十解析（基本ケース）に比べて以下の傾向があり、PCT および局所的最大ジルコニウム－水反応量は判断基準および添付書類十解析を下回ることを確認した。

- 基本ケースに比べ、CCF 対策有効性評価では多様化設備の「原子炉圧力低」信号のトリップ限界値到達時刻がわずかに遅くなるとともに、作動遅延タイマが 10 秒あることから、制御棒クラスタ落下開始時刻が約 10 秒遅くなる（表 4.5.1-5、表 4.5.1-7）。このため、基本ケースに比べ事象発生直後は原子炉出力が高めに推移するが、過渡応答への影響は軽微である（図 4.6.2-9、図 4.6.2-10）。
- CCF 対策有効性評価では外部電源喪失を仮定しないことから、運転員が手動停止する事故発生後約 20 分まで RCP 運転が継続するため、炉心に冷却材が供給される結果、炉心上昇流傾向が強くなり（図 4.6.2-11、図 4.6.2-12）、炉心の冠水が概ね維持される（図 4.6.2-13、図 4.6.2-14）。
- 基本ケースに比べ、CCF 対策有効性評価では多様化設備の「原子炉圧力（異常）低」信号の非常用炉心冷却設備作動限界値到達時刻がわずかに遅くなる。しかしながら、CCF 対策有効性評価では外部電源喪失を仮定しないことから、ディーゼル発電機の負荷投入シーケンスを介さずに高圧注入ポンプ及び余熱除去ポンプが起動するため、高圧注入系及び低圧注入系からの注入開始が基本ケースに比べ早くなるが、その差は小さい（表 4.5.1-5、表 4.5.1-7）。
- CCF 対策有効性評価では、RCP 手動停止後も高圧/低圧注入流量が破断流量を上回る

ことから（図 4.5.1-11、図 4.5.1-23）、炉心の冠水が維持される（図 4.6.2-13、図 4.6.2-14）。

上記の炉心冠水維持に寄与する効果のうち、RCP 運転継続による効果が最も支配的である。上記傾向はループ数、プラント設備差及び炉心、燃料の仕様差に依存しないと考えられるため、代表プラント以外のプラントに対しても適用可能であり、想定事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも、判断基準を下回り安全上の問題とはならないと推定できる。

なお、事故時状況によっては、RCP 手動停止開始が事故発生後約 20 分より遅くなる、あるいは早くなる可能性があるが、基本ケース（原子炉トリップと同時の外部電源喪失の仮定により RCP コーストダウン開始）に包絡されるため炉心冷却性に問題ない。また、高圧／低圧注入系（1 系列）の自動起動化に係る CCF 追加対策工事により、プラントによっては高圧／低圧注入系の作動遅れ時間が CCF 対策有効性評価条件より長くなる（遅くなる）可能性があるが、上述のとおり RCP 運転継続による炉心冠水維持効果が最も支配的であるため、基本ケース（本設）と同程度の作動遅れ時間であれば炉心冷却性に問題ない。

4.6.2.2 原子炉格納容器健全性評価

代表 3 ループプラントを対象に CCF 対策の有効性を評価した結果、添付書類十解析（基本ケース）に比べて以下の傾向があり、判断基準を下回ることを確認した。

- ・ CCF 対策有効性評価ではブローダウン中は RCP 運転が継続するものの、ブローダウン中の原子炉格納容器内への放出エネルギーは 1 次冷却系の初期保有エネルギーが支配的であるため、第 1 次ピーク圧力までの応答は基本ケースと同様となる（表 4.5.8-3、図 4.6.2-15、図 4.6.2-16）。
- ・ CCF 対策有効性評価では、再冠水期間は高圧／低圧注入系は 1 系列のみが作動し、基本ケースの 2 系列作動に比べ半減することから炉心注入流量が減少して炉心再冠水が遅くなる結果、炉心再冠水終了に伴い発生する第 2 次ピーク圧力の発生時刻が遅くなる（表 4.5.8-3）。
- ・ 炉心再冠水終了に伴い原子炉格納容器内への放出エネルギーが減少するため原子

炉格納容器内圧は低下に転じるが、この時点で CCF 対策有効性評価では原子炉格納容器スプレイが作動していないため、ヒートシンク除熱効果の減少により再び原子炉格納容器内圧が上昇する。その後、事故発生後約 30 分から運転員により原子炉格納容器スプレイが開始され、原子炉格納容器内圧が低下に転じることで第 3 次ピークが現れ、これが最高圧力／最高温度となる。しかしながら、その上昇は第 2 次ピークに比べわずかであり、判断基準である最高使用圧力／温度を下回るとともに、原子炉格納容器の健全性が確認されている原子炉格納容器限界圧力（最高使用圧力の 2 倍（0.566MPa[gage]））及び限界温度（200℃）に対し十分な余裕を有する（表 4.5.8-3、図 4.6.2-15、図 4.6.2-16）。

上記傾向はループ数、プラント設備差及び炉心、燃料の仕様差に依存しないと考えられるため、代表プラント以外のプラントに対しても適用可能であり、想定事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも、安全上の問題とはならない。

なお、2ループプラントの添付書類十解析の破断条件は「高温側配管スプリット破断」であり、ブローダウン中に発生する第 1 次ピークが最高圧力／最高温度となる。代表 3ループプラントを対象とした CCF 対策有効性評価の破断条件（蒸気発生器出口側配管両端破断）と異なるが、上述のとおりブローダウン中の原子炉格納容器内への放出エネルギーは 1 次冷却系の初期保有エネルギーが支配的であるため、破断位置や破断体様によらず第 1 次ピークは同等となる。以降の過渡応答も代表 3ループプラントを対象とした CCF 対策有効性評価ケースと同様となり、想定事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも、安全上の問題とはならない。

また、事故時状況によっては原子炉格納容器スプレイ手動開始が事故発生後約 30 分より遅くなり、最高使用圧力／温度を超過する可能性があるが、図 4.6.2-15 及び図 4.6.2-16 に示すとおり、原子炉格納容器スプレイが作動しない場合でも原子炉格納容器限界圧力（0.566MPa[gage]）及び限界温度（200℃）に到達するまでには十分な時間余裕があるため、原子炉格納容器の健全性に問題ない。同様の理由により、代表プラントに比べ最高使用圧力／温度が低いプラントや、添付書類十解析結果の余裕が少ないプラントについても、原子炉格納容器限界圧力及び

限界温度を下回ることから原子炉格納容器の健全性に問題ない。なお、高圧／低圧注入系（1 系列）の自動起動化に係る CCF 追加対策工事により、プラントによっては高圧／低圧注入系の作動遅れ時間が CCF 対策有効性評価条件より長くなる（遅くなる）可能性があるが、原子炉格納容器内圧／温度を低下させる方向であるため、原子炉格納容器の健全性に問題ない。

4.6.2.3 可燃性ガスの発生

可燃性ガスの発生では、原子炉冷却材喪失時に、ジルコニウム-水反応、水の放射線分解、金属腐食及びヒドラジンの放射線分解（よう素除去薬品としてヒドラジンを採用しているプラントのみ）により発生する水素の蓄積を想定している。

ジルコニウム-水反応については、4.5.1 項に示すジルコニウム-水反応量から、ソフトウェア CCF との重畳時においても添付書類十解析と同等以下になると考えられる。水の放射線分解は、炉心内の残存放射線エネルギーやサンプル水中の放射線エネルギーに依存する。添付書類十解析では炉内の全燃料の破損を想定しているため、ソフトウェア CCF との重畳により格納容器に放出される放射線エネルギーが増加するものではない。ヒドラジンの放射線分解についても、水の放射線分解と同様、全燃料の破損を想定しているため、ソフトウェア CCF との重畳により放射線分解に寄与する放射線エネルギーが増加するものではない。一方、ソフトウェア CCF との重畳により、格納容器スプレー作動までの時間が遅くなり、格納容器スプレー作動までは格納容器内温度が高く推移する。腐食を想定する金属のうち、図 4.6.2-17 に示すように、アルミニウムは高温ほど腐食が進むため、格納容器スプレー作動までの間、金属腐食による水素発生量が増加する可能性がある。図 4.6.2-18 に示すように、格納容器スプレー作動後は雰囲気温度が低下する。格納容器スプレー作動系列数は、ソフトウェア CCF との重畳を想定した場合と添付書類十解析のどちらも 1 系列であるため、格納容器スプレー作動後の雰囲気温度は添付書類十解析に近づき、長期的には添付書類十解析と同程度となると考えられる。

添付書類十解析^{*1}において、30 日時点での水素濃度が最も高くなっているのは 4 ループプラントの約 3.5% である。判断基準 4% に対する余裕は約 0.5% 程度であり、水素発生量のうち、ジルコニウム-水反応による生成が 10% 程度、水の

放射線分解による生成が 80%程度、金属腐食による生成が 10%程度を占めている。ここで、水素濃度は格納容器内ガス成分のうち水素が占める割合であり、格納容器内には事象発生前に存在する空気などが存在するため、格納容器自由体積の 0.5%の体積の水素が生成した場合においても、水素濃度の上昇幅は 0.5%に至らない。

図 4.6.2-18 に示すように、CCF 対策有効性評価における格納容器内雰囲気温度は、1000～3300 秒の約 40 分間、添付書類十解析における水素生成量評価使用値よりも高く推移している。ここでは、保守的に 40 分間、約 140℃の格納容器内雰囲気温度であると仮定する。4 ループプラントでのアルミニウム使用量を想定する場合、添付書類十解析における水素生成量評価使用値よりも格納容器内雰囲気温度が高い期間中にアルミニウムの腐食により生成する水素は 10m³ 程度である。格納容器自由体積は 2 ループプラントが最も小さく、約 41,900m³ である。同じ水素生成量であれば、格納容器自由体積が小さいほど水素濃度は高くなる。仮に、2 ループプラントにおいて 10m³ の水素が生成された場合においても、水素濃度の上昇幅は 0.03%に至らない。

よって、ソフトウェア CCF との重畳により増加する水素生成量が添付書類十解析における水素生成量に加わったとしても、水素濃度の上昇幅は判断基準 4%までの余裕である 0.5%に比べ小さく、水素濃度が 4%を超過することはない。

以上のことから、可燃性ガスの発生の評価において、ソフトウェア CCF との重畳を想定した場合においても、判定基準に対して影響が軽微であり、判断基準を超過するものではないと考えられる。

* 1 : 本検討は、2022 年 1 月時点の設置変更許可申請書記載の評価に基づいている。

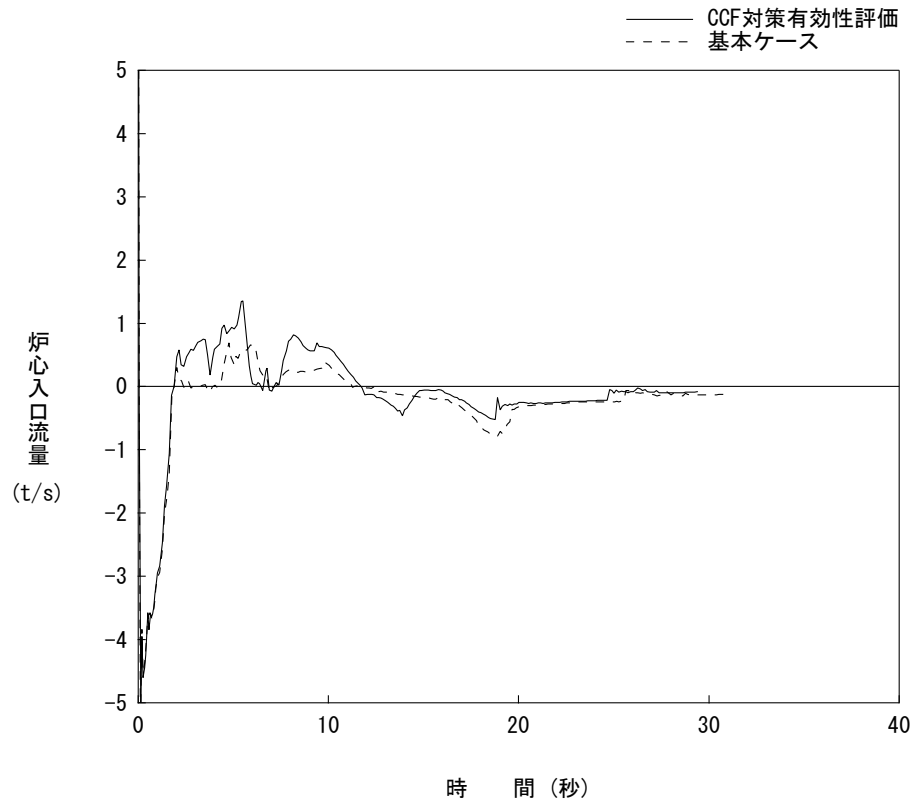


図4.6.2-1 代表3ループプラント 炉心入口流量
(低温側配管両端破断 CD=0.4)

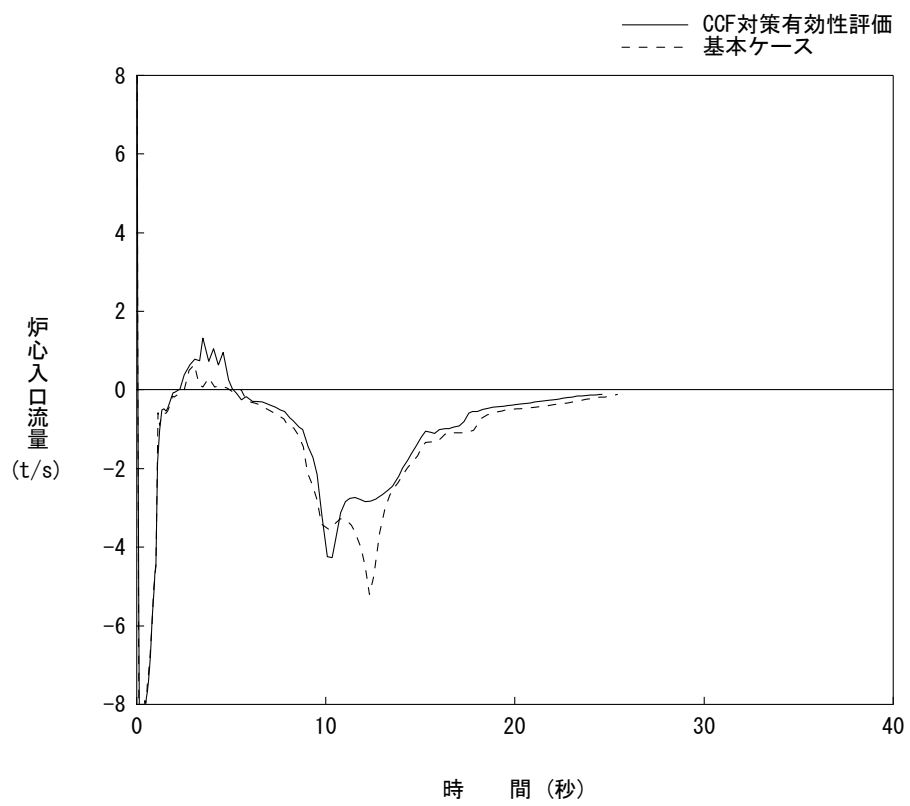


図4.6.2-2 代表4ループプラント 炉心入口流量
(低温側配管スプリット破断 CD=0.6)

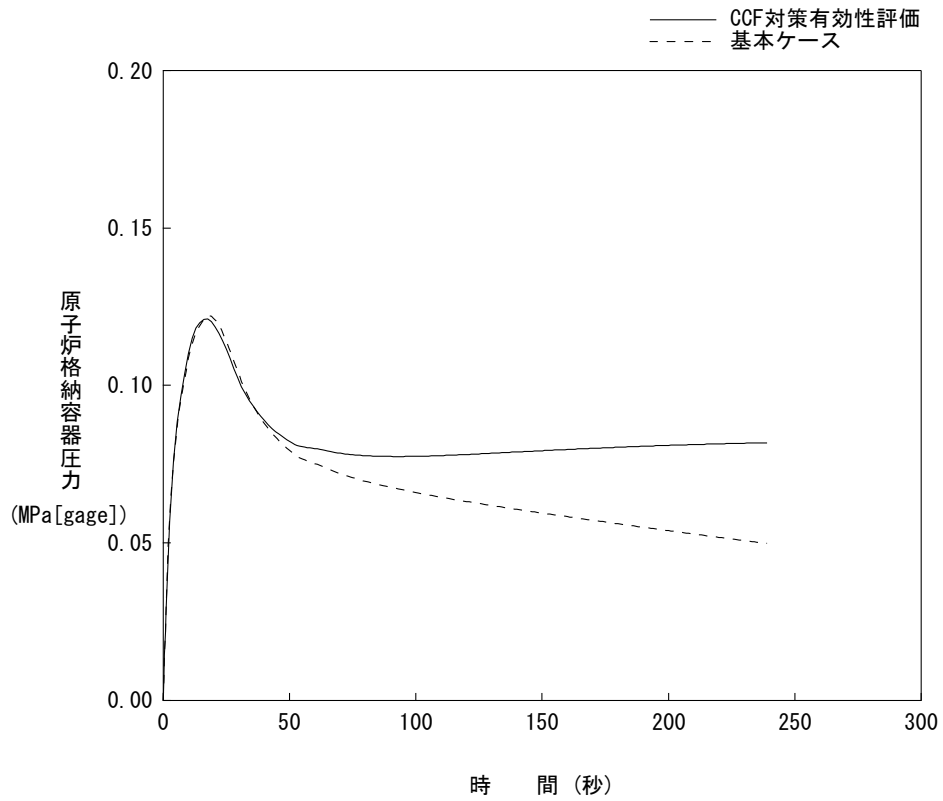


図4.6.2-3 代表3ループプラント 原子炉格納容器圧力
(低温側配管両端破断 CD=0.4)

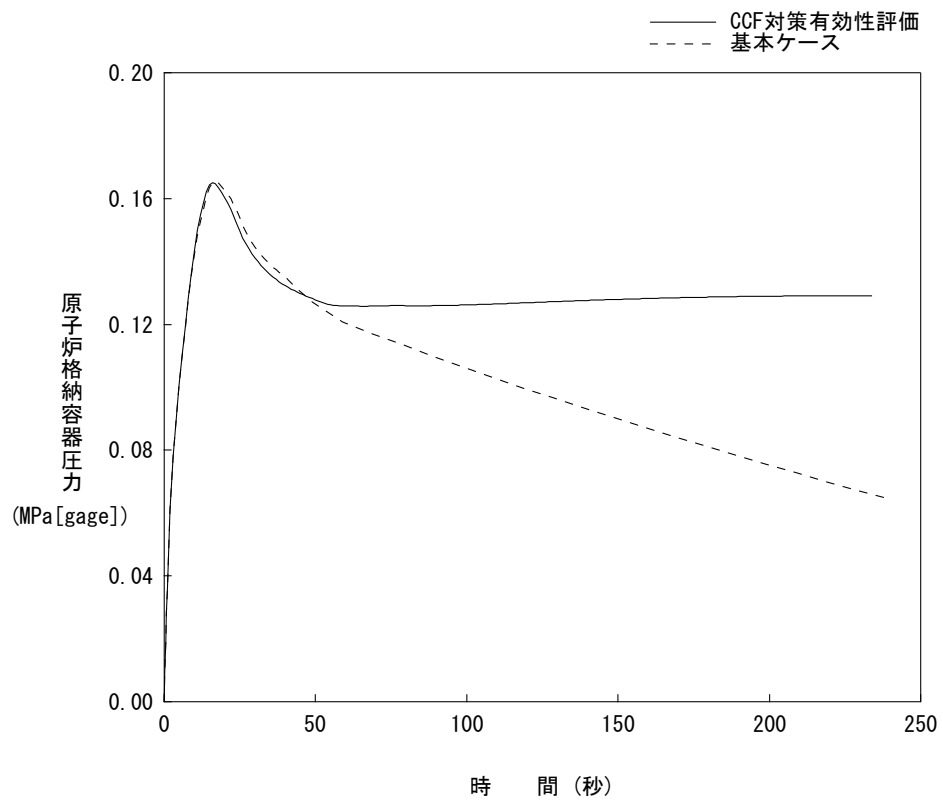


図4.6.2-4 代表4ループプラント 原子炉格納容器圧力
(低温側配管スプリット破断 CD=0.6)

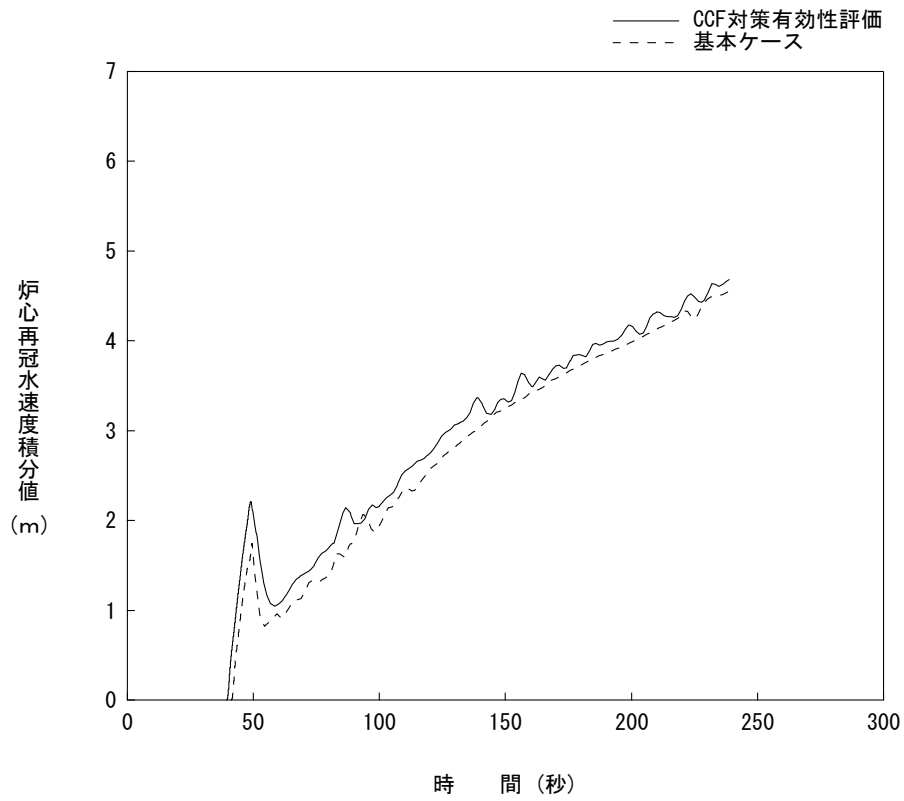


図4.6.2-5 代表3ループプラント 炉心再冠水速度積分値
(低温側配管両端破断 $CD=0.4$)

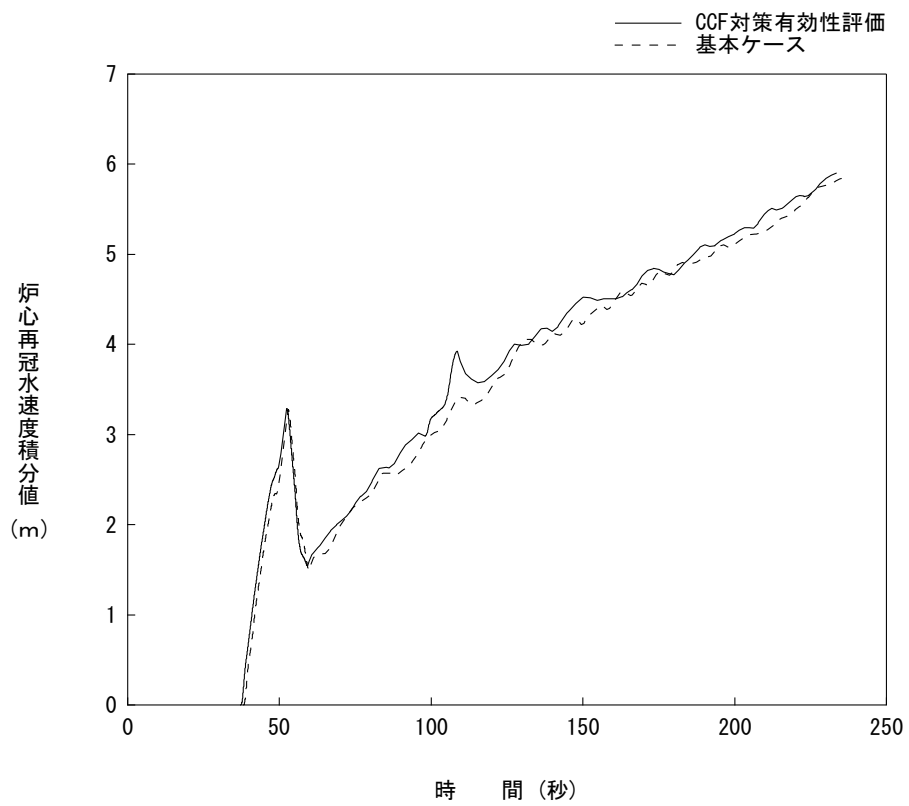


図4.6.2-6 代表4ループプラント 炉心再冠水速度積分値
(低温側配管スプリット破断 $CD=0.6$)

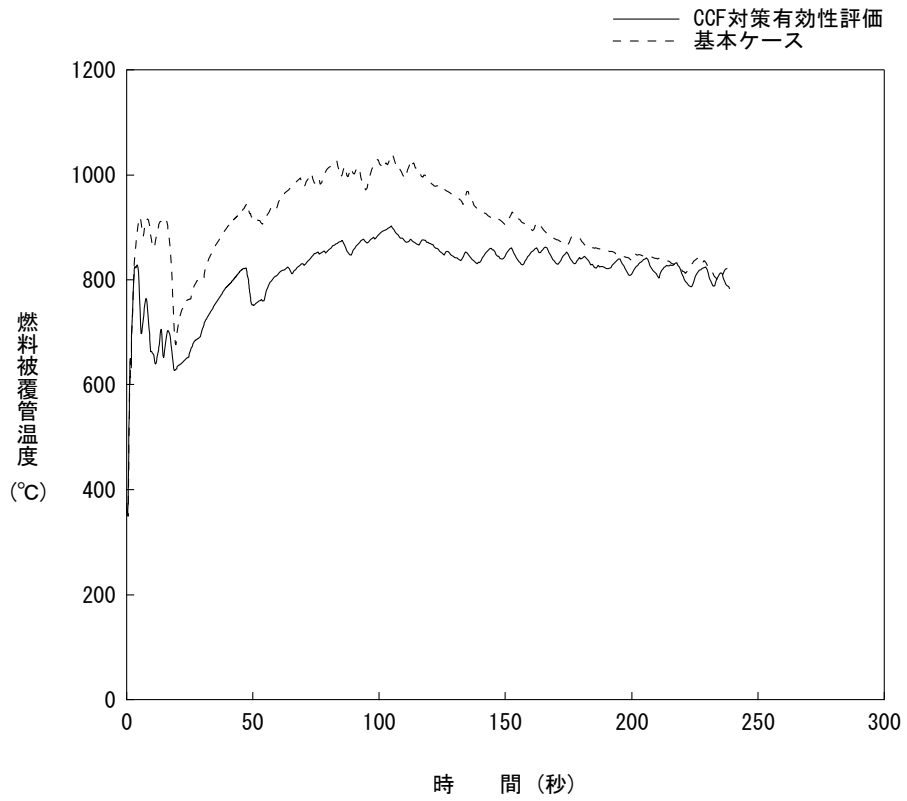


図4.6.2-7 代表3ループプラント 燃料被覆管温度
(低温側配管両端破断 CD=0.4)

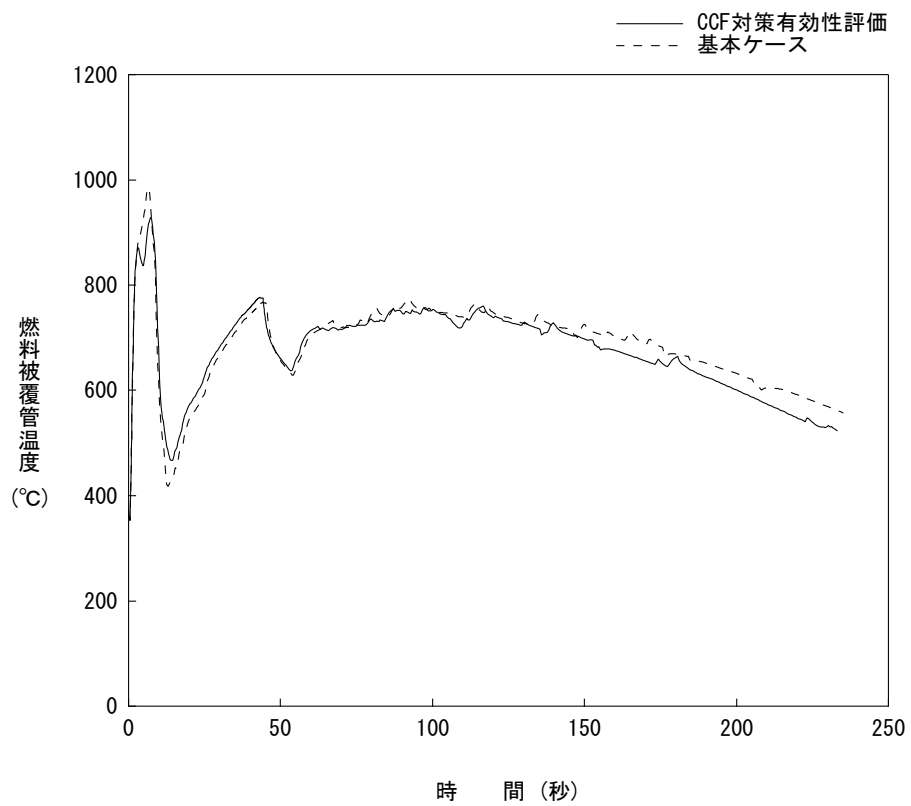


図4.6.2-8 代表4ループプラント 燃料被覆管温度
(低温側配管スプリット破断 CD=0.6)

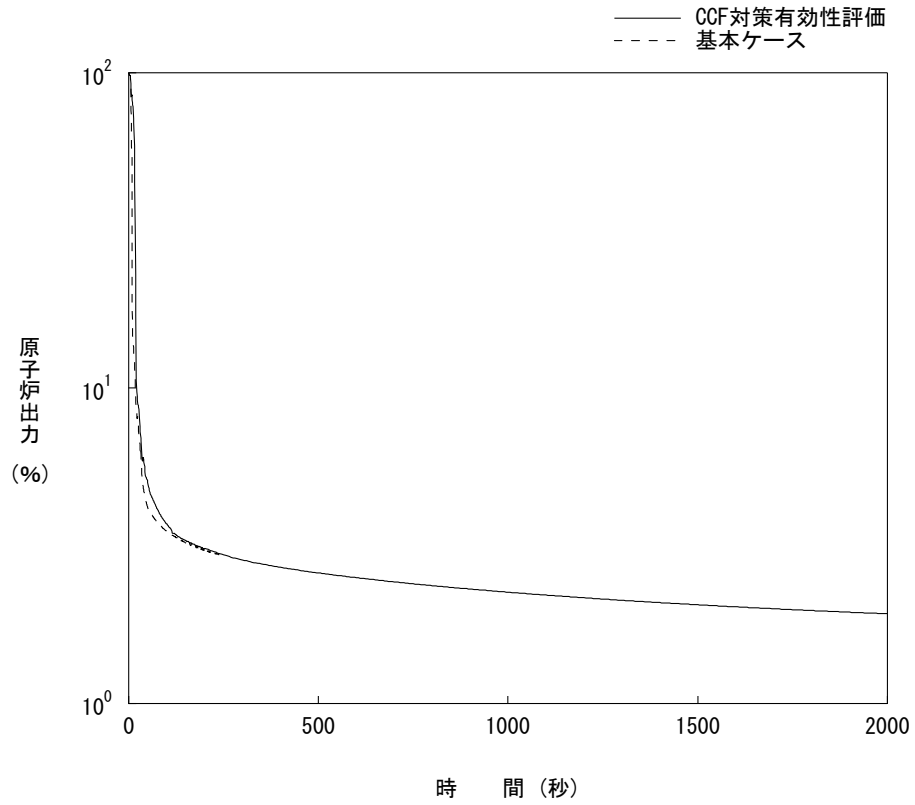


図4.6.2-9 代表3ループプラント 原子炉出力
 (低温側配管破断 破断口径約25.4cm)

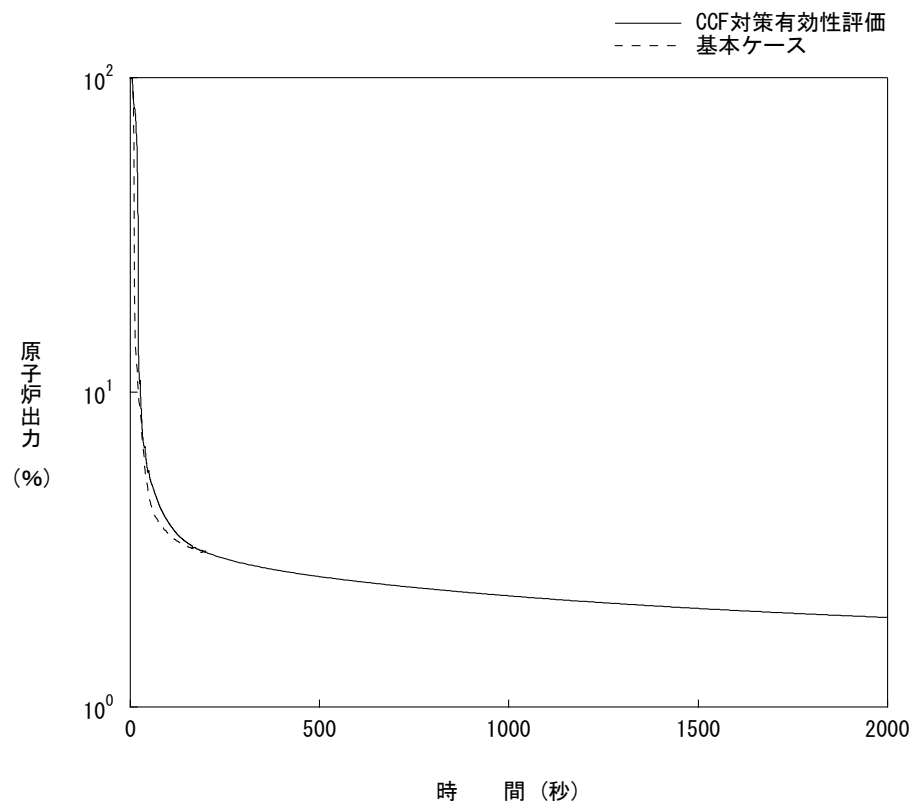


図4.6.2-10 代表4ループプラント 原子炉出力
 (低温側配管破断 破断口径約25.4cm)

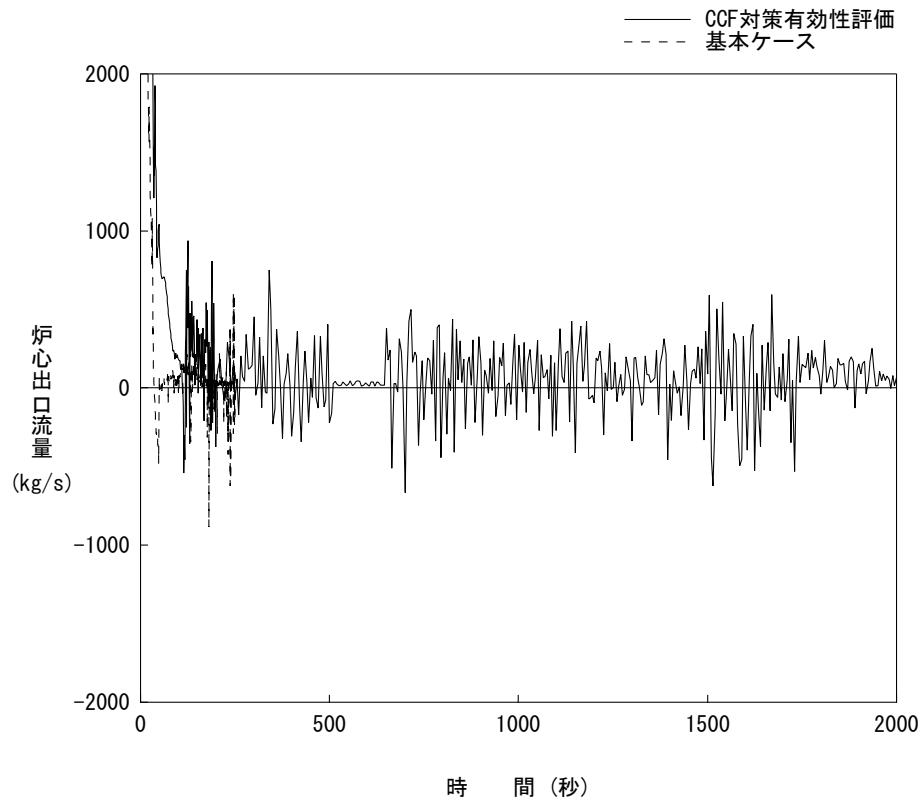


図4.6.2-11 代表3ループプラント 炉心出口流量
(低温側配管破断 破断口径約25.4cm)

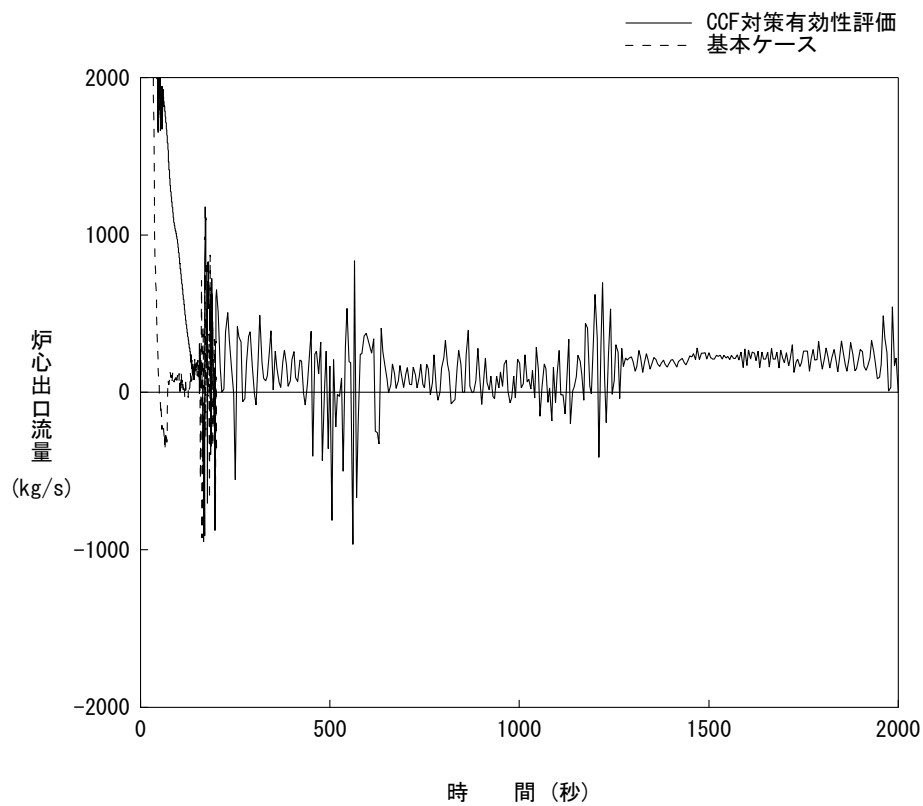


図4.6.2-12 代表4ループプラント 炉心出口流量
(低温側配管破断 破断口径約25.4cm)

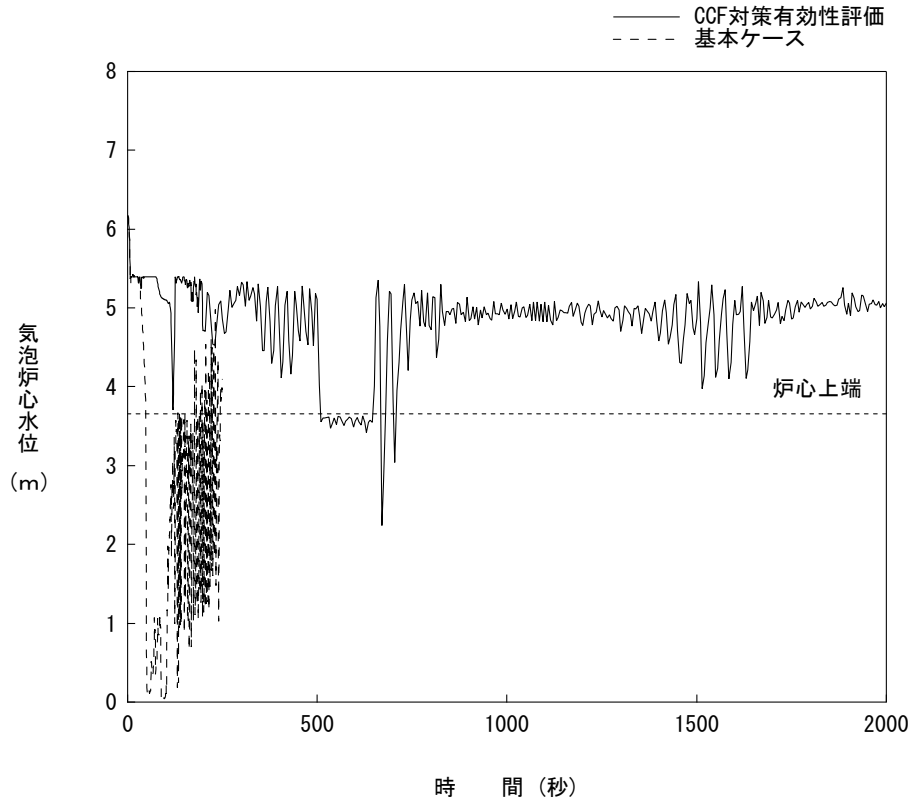


図4.6.2-13 代表3ループプラント 気泡炉心水位
(低温側配管破断 破断口径約25.4cm)

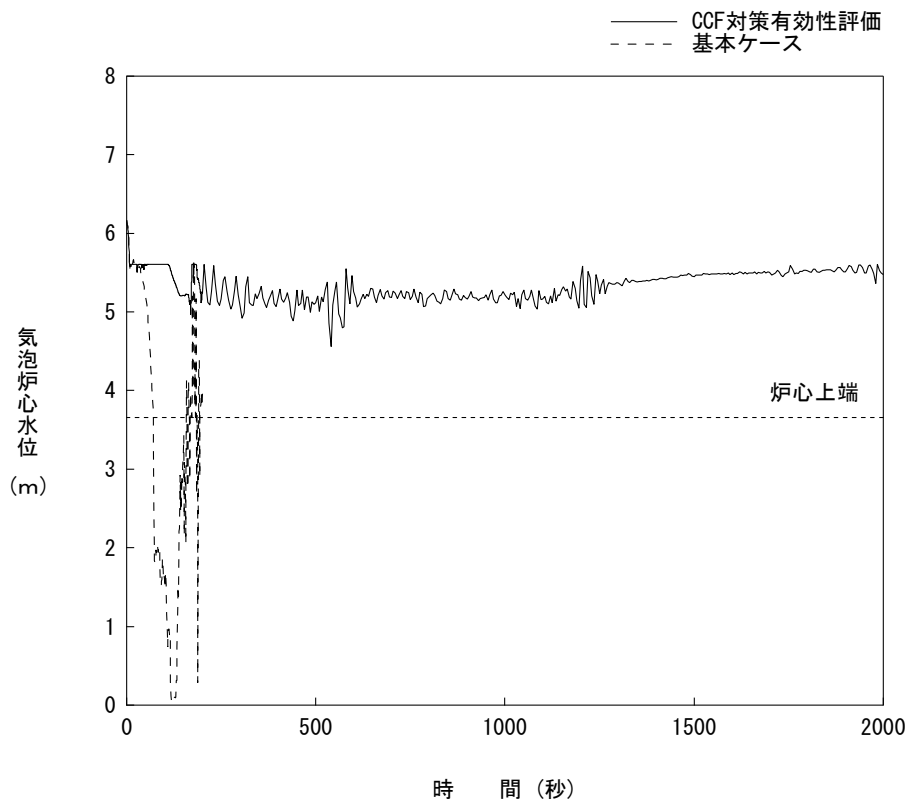


図4.6.2-14 代表4ループプラント 気泡炉心水位
(低温側配管破断 破断口径約25.4cm)

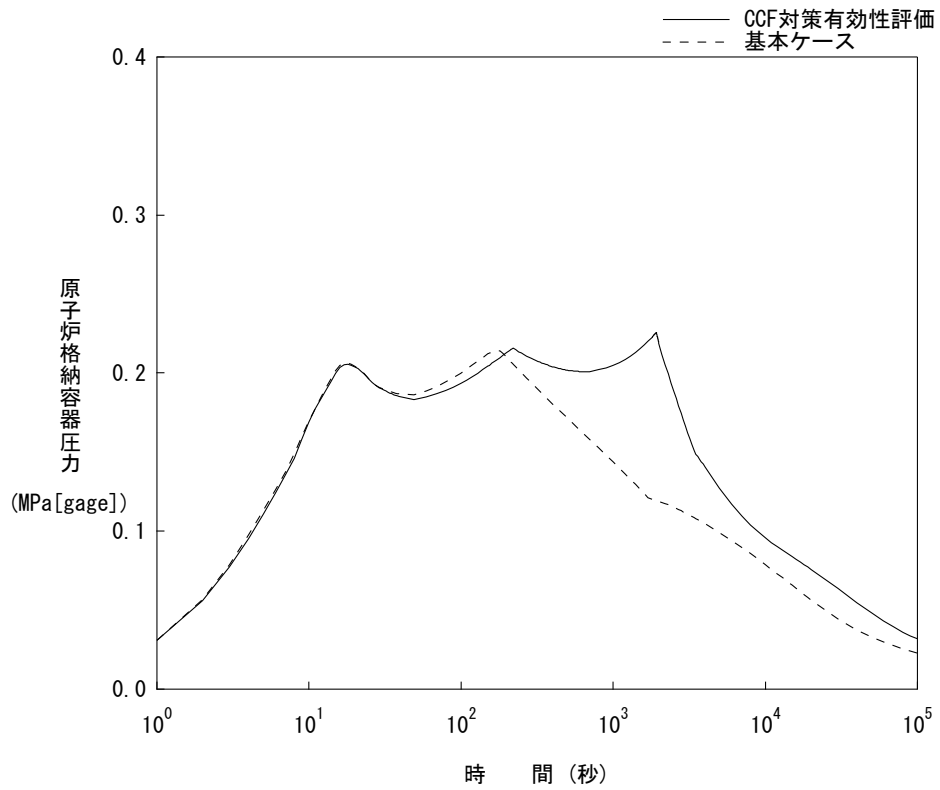


図4.6.2-15 代表3ループプラント 原子炉格納容器圧力
(蒸気発生器出口側配管両端破断 CD=1.0)

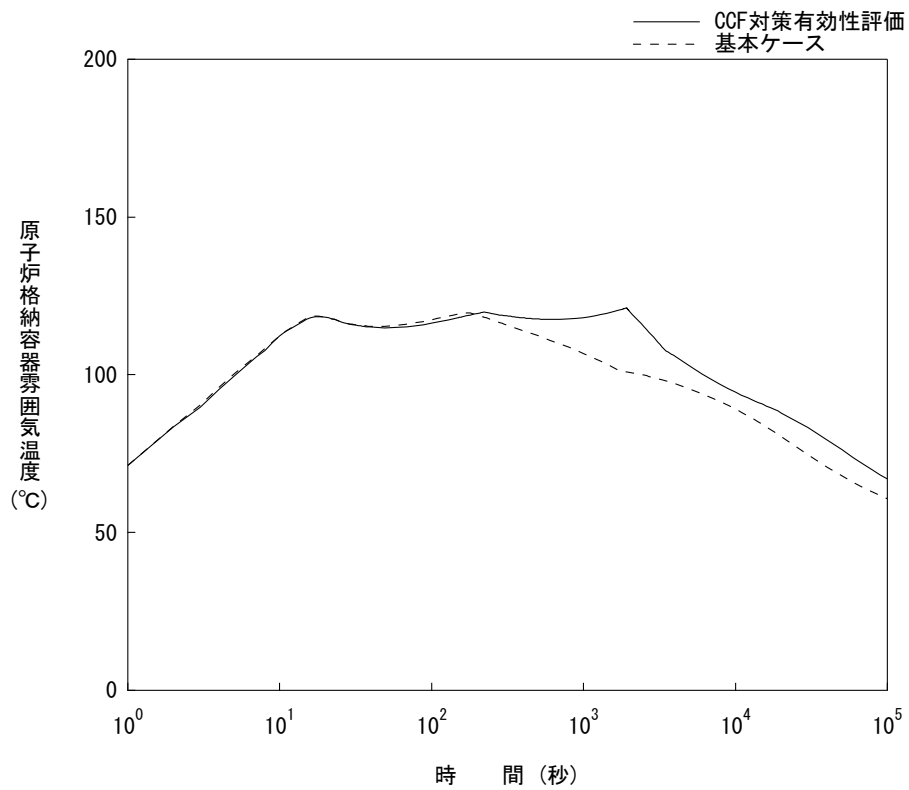
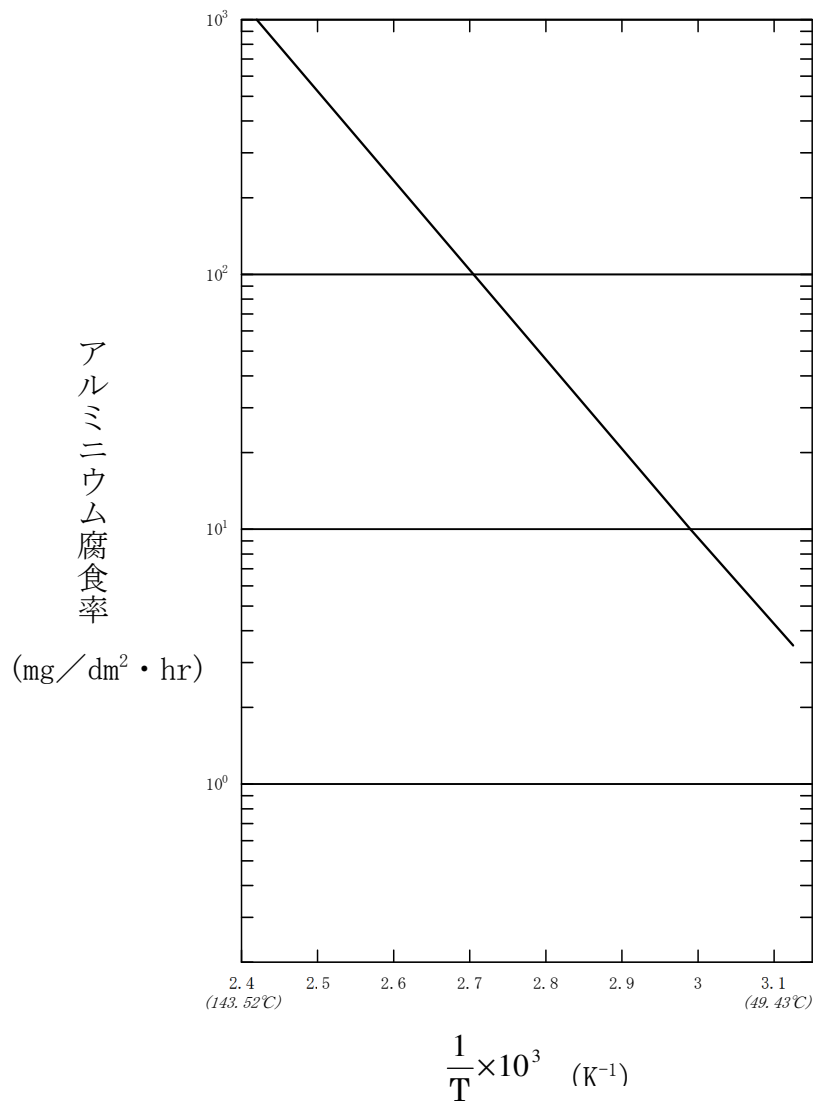


図4.6.2-16 代表3ループプラント 原子炉格納容器雰囲気温度
(蒸気発生器出口側配管両端破断 CD=1.0)



[RESAR-414, Figure15. 4-17より引用]

図 4. 6. 2-17 アルミニウム腐食率

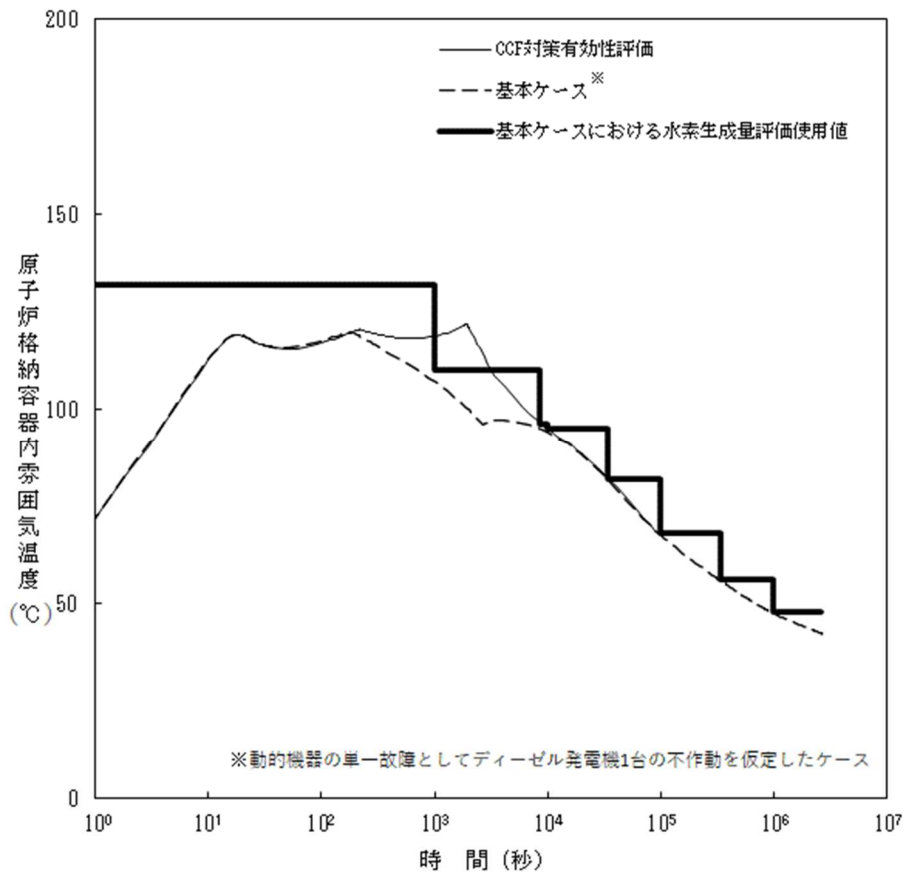


図 4.6.2-18 代表 3 ループプラント 原子炉格納容器雰囲気温度
 (動的機器の単一故障としてディーゼル発電機 1 台の不作動を仮定したケースとの比較)

4.6.3 被ばく評価への影響

設計基準事故とデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳する場合でも、新たに放射性物質の放出経路が形成される事象はない。そのため、設計基準事故として被ばく評価対象としている (1) 放射性気体廃棄物処理施設の破損、(2) 蒸気発生器伝熱管破損、(3) 燃料集合体の落下、(4) 原子炉冷却材喪失および (5) 制御棒飛び出しの 5 事象について、ソフトウェア CCF との重畳時の影響を以下に述べる。

ソフトウェア CCF との重畳を想定した場合の判断基準は、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」に基づき、周辺公衆の実効線量が 5mSv を超えないことである。また、本検討は、2022 年 1 月時点の設置変更許可申請書記載の評価に基づいている。

ここで、炉心内蓄積量は事象発生前に蓄積したものであり、ソフトウェア CCF の影響を受けない。なお、希ガス (γ 線エネルギー 0.5MeV 換算) やよう素 (I-131 等価量) の炉心内蓄積量は、燃焼度 48GWd/t と 55GWd/t ではほぼ同程度であり、MOX 炉心は「発電用軽水型原子炉施設に用いる混合酸化燃料について (平成 7 年 6 月 19 原子炉安全委員会了承)」に基づき U-235 の核分裂収率で炉心内蓄積量を求めるため、ウラン炉心と同等である。

4.6.3.1 放射性気体廃棄物処理施設の破損

放射性気体廃棄物処理施設の破損時の被ばく評価では、1 次冷却材中に含まれる希ガスを気体廃棄物処理設備に貯留した状態で当該設備の破損を想定し、原子炉補助建屋に放出された希ガスが地上高さから全量環境へ放出されることを想定している。

一部のプラントを除き、放射性気体廃棄物処理施設の破損時において、緩和操作や緩和設備の起動に期待していない。そのため、緩和操作/設備に期待しないプラントにおいては、ソフトウェア CCF による添付書類十解析への影響はない。例外的に緩和操作に期待しているプラントとしては、気体廃棄物処理設備を、ガスサージタンク、活性炭式希ガスホールドアップ装置などで構成するツインプラント (大飯 3, 4 号炉、玄海 3, 4 号炉) である。

大飯 3, 4 号炉や玄海 3, 4 号炉の被ばく評価においては、図 4.6.3-1 に示すように、排気筒ガスモニタ等により気体廃棄物処理設備の破損を検知後、弁操作

による系統隔離に期待し、系統隔離まで破損箇所から原子炉補助建屋への希ガス放出を想定している。ツインプラントにおいては気体廃棄物処理設備を共用しており、片号炉の1次冷却材中希ガスをガスサージタンクへの貯留が完了し、もう片号炉の1次冷却材中希ガスを活性炭式希ガスホールドアップ装置へ移行中に事象が生じることを想定しており、ガスサージタンク内の希ガス全量、活性炭式希ガスホールドアップ装置及び体積制御タンク脱ガスラインからの隔離までの放出を想定している。ソフトウェア CCF との重畳時は、検知及び系統隔離に期待できないため、活性炭式希ガスホールドアップ装置及び体積制御タンク脱ガスラインからの希ガス放出量が増加する。

運転中プラントの1次冷却材中希ガス量はガスサージタンク貯留量の2倍程度である。そのため、系統隔離できず、運転中プラントの1次冷却材中希ガスの全量が追加で放出されたとしても、希ガス放出量の増加は数倍程度である。一方、被ばく評価で想定している燃料欠陥率は1%であるが、現実的には0.1%よりも低いと考えられる。そのため、気体廃棄物処理設備に貯留される希ガスは被ばく評価よりも少なく、漏えいが継続した場合でも大幅な希ガス放出量の増加とならない。さらに、原子炉補助建屋に放出された希ガスは排気筒から放出されると考えられ、敷地境界外での放射能濃度はより低くなる。

以上のことから、大飯3、4号炉や玄海3、4号炉の放射性気体廃棄物処理施設の破損時の被ばく評価において、ソフトウェア CCF との重畳を想定した場合においても、判定基準に対して影響が軽微であり、判断基準を超過するものではないと考えられる。

4.6.3.2 蒸気発生器伝熱管破損

蒸気発生器伝熱管破損時の被ばく評価では、伝熱管破損箇所から蒸気発生器2次側に漏えいした1次冷却材中の希ガス・よう素が蒸気に移行し、主蒸気安全弁・逃がし弁等から環境へ放出されることを想定している。ソフトウェア CCF との重畳時には、4.5.7節に示されるように、破損側蒸気発生器の隔離時間は若干延びるものの、起動する高圧注入系は1系列のみであることから1次冷却材の漏えい量は添付書類十解析に含まれる。原子炉トリップ以降の事象進展に大きな差異はないことから、大気蒸気放出量は添付書類十解析と同等である。また、被ばく

評価で想定している燃料欠陥率は 1%であるが、現実的には 0.1%よりも低いと考えられる。

そのため、現実的には環境へ放出される希ガス・よう素放出量は添付書類十解析に包含され、蒸気発生器伝熱管破損時の被ばく評価においてソフトウェア CCF との重畳を想定した場合においても、判断基準に対して影響が軽微であり、判断基準を超過するものではないと考えられる。

4.6.3.3 燃料集合体の落下

燃料集合体の落下時の被ばく評価では、使用済燃料ピットで取扱い中の使用済燃料が落下・破損し、破損燃料棒の燃料ギャップ中の希ガス・よう素が使用済燃料ピット水中に放出され、燃料取扱室内に移行したものが環境へ放出されることを想定している。

一部のプラントを除き、燃料集合体の落下時において、緩和操作や緩和設備の起動に期待していない。そのため、緩和操作/設備に期待しないプラントにおいては、ソフトウェア CCF による添付書類十解析への影響はない。

例外的に緩和操作に期待しているプラントとしては、補助建屋排気設備により補助建屋排気筒から放出することに期待する高浜 1, 2 号炉、アニュラス空気浄化設備によりよう素フィルタを通して格納容器排気筒から放出することに期待する高浜 3, 4 号炉、伊方 3 号炉及び敦賀 2 号炉である (図 4.6.3-3 参照)。これらのプラントにおいては、燃料集合体落下信号を受け、上記空調設備を介した放出に期待しているが、ソフトウェア CCF との重畳時は、検知及び空調切替に期待できず、地上高さからの漏えいとなり、高浜 3, 4 号炉、伊方 3 号炉及び敦賀 2 号炉においてはよう素放出量が 20 倍増加する。放出高さが排気筒放出から地上放出となることで相対濃度 (χ/Q) や相対線量 (D/Q) が 10 倍程度大きくなると予想される。添付書類十解析では希ガスの寄与が大きく、線量の 7, 8 割程度を占めているため、ソフトウェア CCF との重畳時に被ばく線量が 1 桁程度厳しくなる可能性がある。しかしながら、添付書類十解析での被ばく評価結果の判断基準に対する余裕は十分大きく、およそ 2 桁ある。

そのため、燃料取扱棟内に放出された希ガス・よう素が地上高さから全量放出された場合においても、判断基準を超過するものではない。また、燃料集合体の

落下時は、燃料取扱操作を実施する作業員が目視にて確認できるため、速やかに対処操作に移行できると考えられる。さらに、燃料集合体取扱時には補助建屋換気空調設備が作動しているため、全てが地上高さから漏えいせず、排気筒からの放出もあると考えられ、敷地境界外での放射能濃度はより低くなる。また、海外燃料を採用し、落下時の燃料棒破損本数を燃料集合体1体分としているプラントについては、試験等により落下時の燃料棒破損本数データを拡充できれば、さらなる精緻化も考えられる。

以上のことから、高浜1, 2号炉、高浜3, 4号炉、伊方3号炉及び敦賀2号炉の燃料集合体の落下時の被ばく評価において、ソフトウェアCCFとの重畳を想定した場合においても、判断基準に対して影響が軽微であり、判断基準を超過するものではないと考えられる。

4.6.3.4 原子炉冷却材喪失

原子炉冷却材喪失時の被ばく評価では、格納容器スプレイによる格納容器雰囲気中のよう素除去、アニュラス空気浄化設備による格納容器からの漏えい雰囲気の浄化、安全補機室空気浄化設備による安全補機室雰囲気中よう素（漏えいした再循環水から雰囲気中へ移行したよう素）の浄化に期待している。

図4.6.3-3に示すように、ソフトウェアCCFとの重畳時には、これら設備の自動起動には期待できず、現場操作を伴う手動による起動となり、起動に要する時間が長くなる。しかしながら、ソフトウェアCCFとの重畳時においても、図4.6.3-4に示すように、格納容器スプレイ作動後は格納容器圧力や雰囲気温度が低下していくため、格納容器漏えい率は添付書類十解析と同程度となると考えられる。

ここでは、ソフトウェアCCFとの重畳時に、格納容器スプレイやアニュラス空気浄化設備が作動せず、事象発生直後の状態が30分間継続し、その間格納容器から漏えいしたものは全て地上高さから放出されるものとする。対象を4ループプラントとし、格納容器漏えい率が0.15%/dで30分間継続した場合、放出放射量は、添付書類十解析に対し、希ガスが約0.3倍、よう素が約2倍増加する。このとき、PWRプラントにおける最大 α/Q とD/Qを想定しても、ソフトウェアCCFとの重畳により増加する線量は判断基準の半分程度と見込まれる。添付書類十解析において被ばく評価が最大となるプラントにおいても、判断基準に対する余裕

は1桁以上あるため、ソフトウェア CCF との重畳により増加する線量を合算しても判断基準を超過するものではない。

原子炉冷却材喪失時には、放出放射エネルギーによる影響に加え、直接線及びスカイシャイン線による影響を受ける。プレストレストコンクリート製格納容器プラントでは放出放射エネルギーによる影響が支配的であるが、鋼製格納容器プラントでは、直接線及びスカイシャイン線による影響が大きい傾向がある。添付書類十解析では炉内の全燃料の破損を想定しているため、ソフトウェア CCF との重畳により格納容器に放出される放射エネルギーが増加するものではない。

現実的には炉心の全燃料被覆管は破損せず、格納容器内へ放出される希ガス・イオン素は添付書類十解析よりも少ないと考えられるため、放出放射エネルギー及び格納容器内線源強度は上記想定よりも小さくなる。

以上のことから、原子炉冷却材喪失時の被ばく評価において、ソフトウェア CCF との重畳を想定した場合においても、判断基準に対して影響が軽微であり、判断基準を超過するものではないと考えられる。

4.6.3.5 制御棒飛び出し

制御棒飛び出し時の被ばく評価では、原子炉冷却材喪失時と同様、格納容器スプレイによる格納容器雰囲気中のイオン素除去、アナユラス空気浄化設備による格納容器からの漏えい雰囲気の浄化、安全補機室空気浄化設備による安全補機室雰囲気中イオン素の浄化に期待している。ただし、格納容器スプレイは手動による起動を想定しており、アナユラス空気浄化設備が起動する非常用炉心冷却設備作動信号の発信までの時間が原子炉冷却材喪失よりも長くなる。そのため、原子炉冷却材喪失に比べ、これら設備による低減効果が有効になるまで時間は長い。

ソフトウェア CCF との重畳時には、これら設備の自動起動には期待できず、現場操作を伴う手動による起動となり、起動に要する時間が長くなる。しかしながら、添付書類十解析でも原子炉冷却材喪失に比べ、これら設備の低減効果有効までの時間が長いこと、ソフトウェア CCF との重畳時の起動遅れの影響は、原子炉冷却材喪失に比べ、相対的に小さくなる。

原子炉冷却材喪失と同様、ソフトウェア CCF との重畳時に、格納容器スプレイやアナユラス空気浄化設備が作動せず、事象発生直後の状態が30分継続し、その

間格納容器から漏えいしたものは全て地上高さから放出されるものとする。ここで、炉心の全燃料被覆管破損を想定する原子炉冷却材喪失時よりも、制御棒飛び出しでは燃料被覆管破損本数が少ない。そのため、格納容器内に放出される希ガス及びヨウ素は少なく、原子炉冷却材喪失とソフトウェア CCF との重畳時の数分 1 程度の放出である。また、添付書類十解析での被ばく評価結果の判断基準に対する余裕は原子炉冷却材喪失時より大きい。

格納容器漏えい率は十分な保守性を有しているため、ソフトウェア CCF との重畳時においても大きな影響はないと考えられる。また、DNB 破損すると考えられる燃料棒本数は、現実的には添付書類十解析に比べ少なくなると考えられ、添付書類十解析での被ばく評価結果の判断基準に対する余裕は十分大きい。

以上のことから、制御棒飛び出し時の被ばく評価において、ソフトウェア CCF との重畳を想定した場合においても、判定基準に対して影響が軽微であり、判断基準を超過するものではないと考えられる。

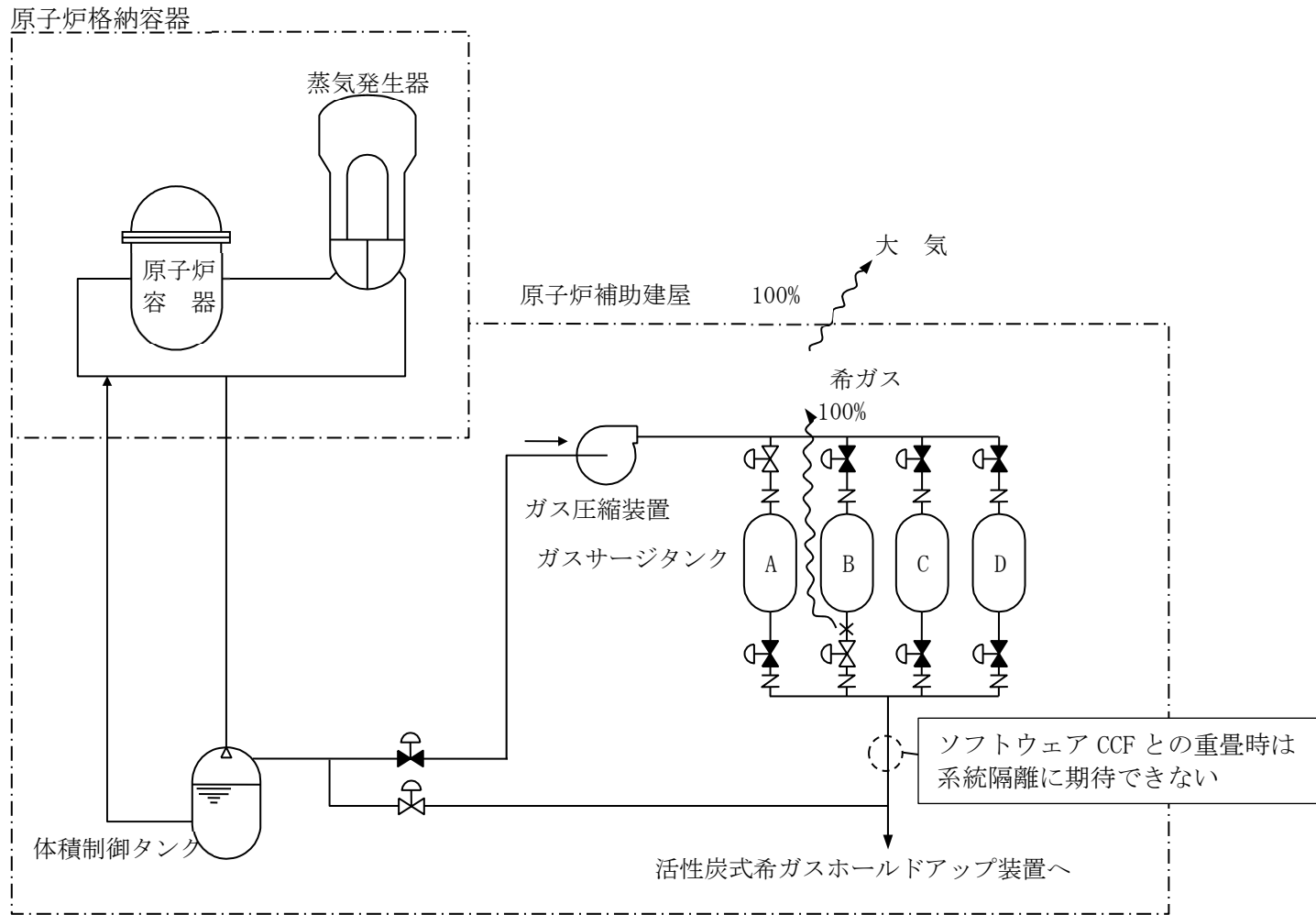


図 4. 6. 3-1 放射性気体廃棄物処理施設の破損時の放射能放出経路

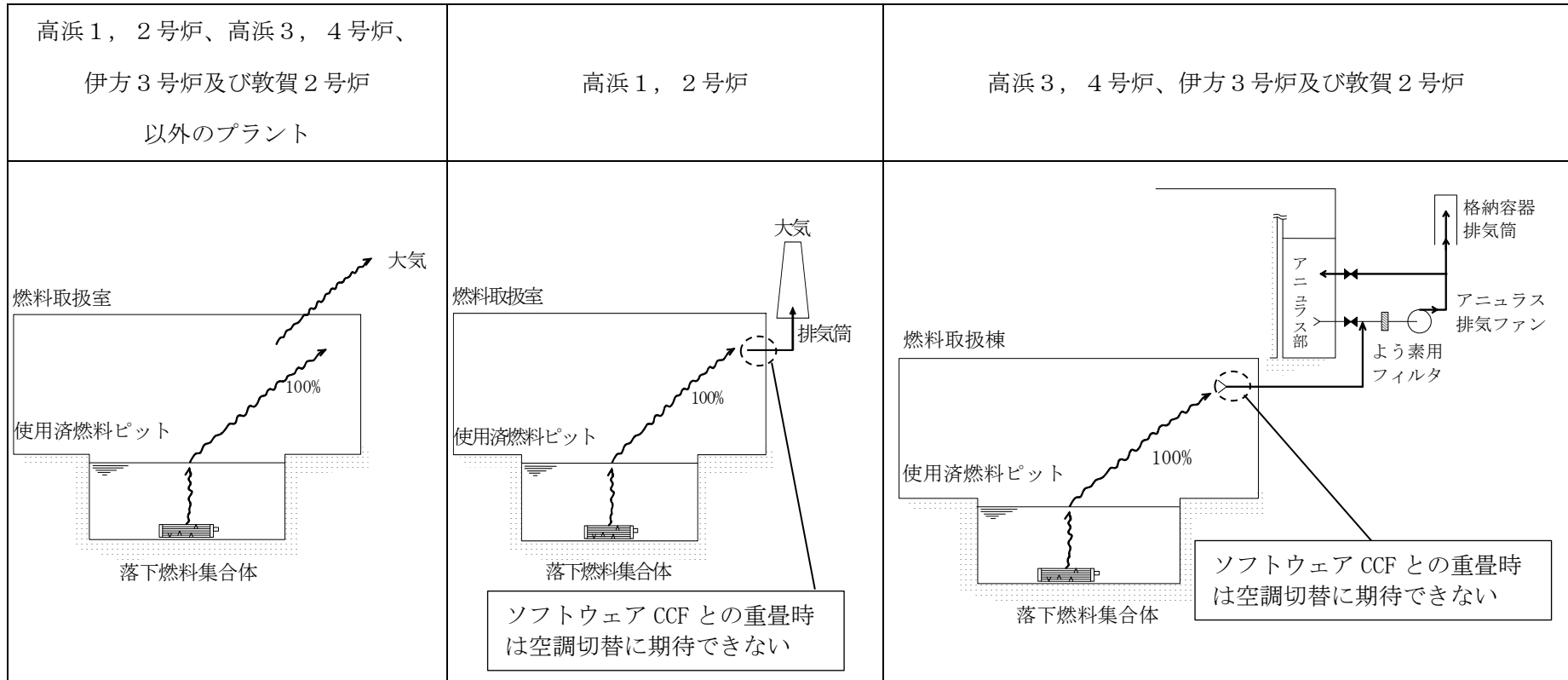


図 4.6.3-2 燃料集合体の落下時の放射能放出経路

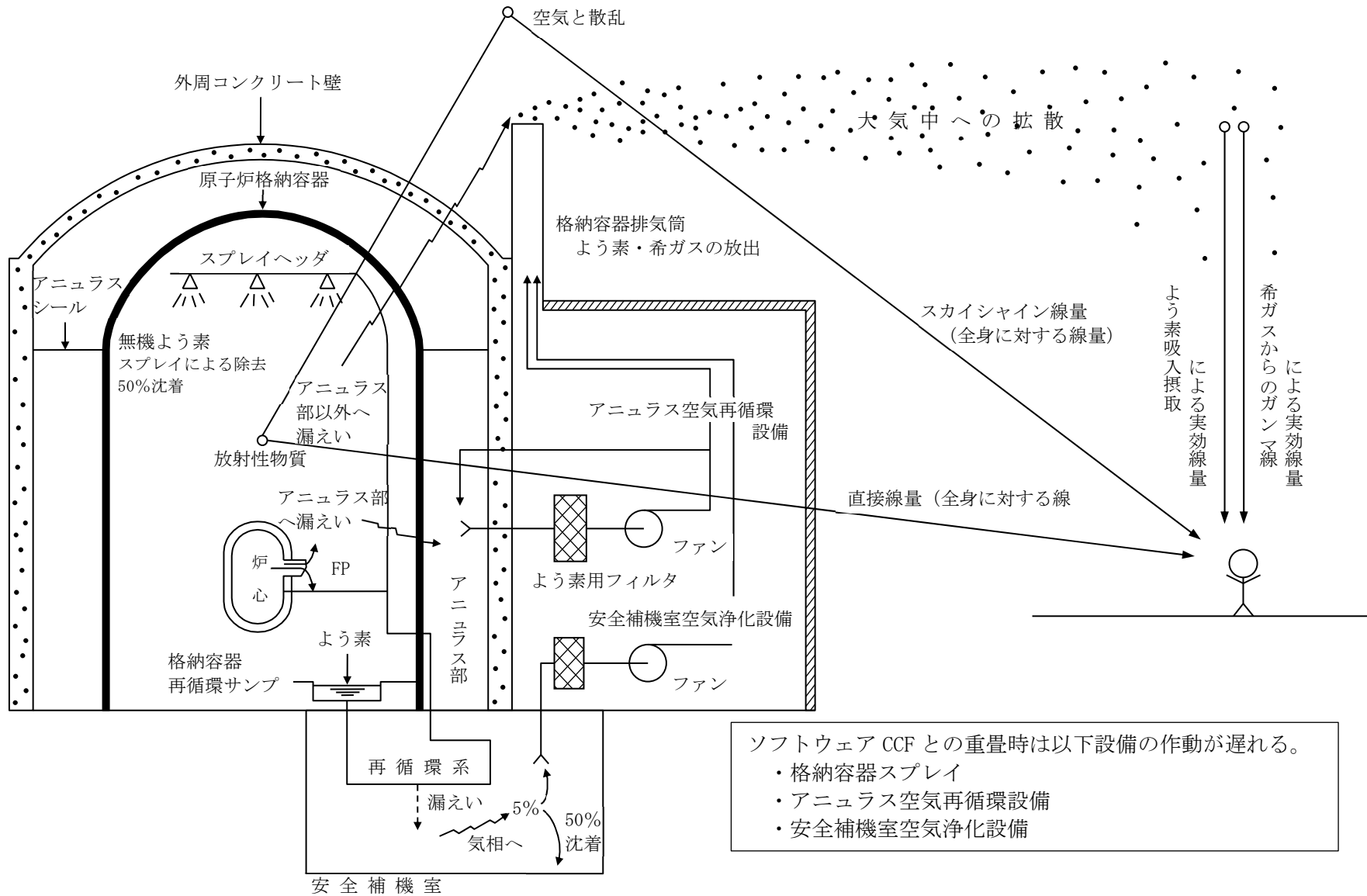


図 4. 6. 3-3 (1/2) 原子炉冷却材喪失時の放射能放出経路及び被ばく経路 (鋼製格納容器の例)

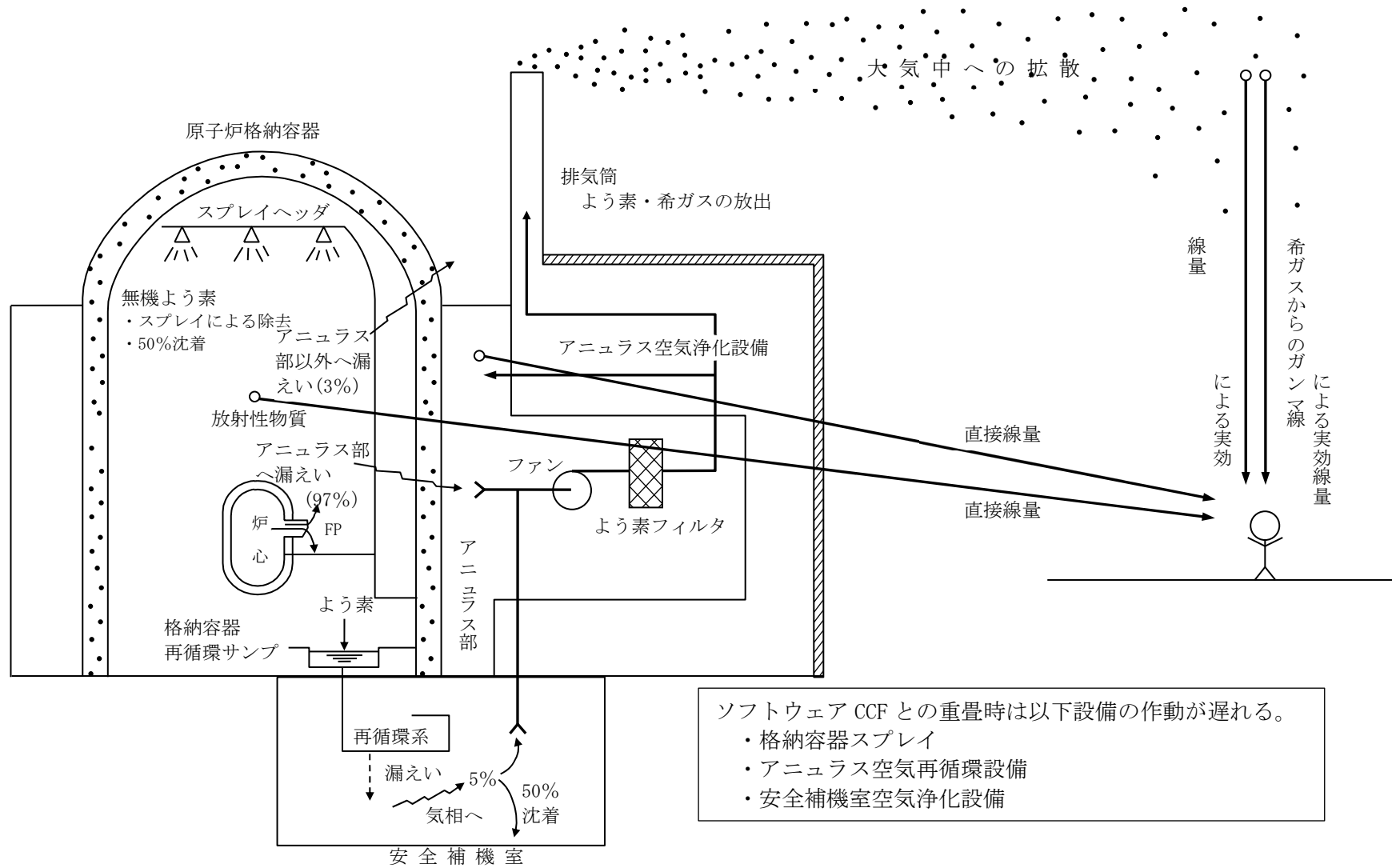


図 4. 6. 3-3 (2/2) 原子炉冷却材喪失時の放射能放出経路及び被ばく経路 (プレストレストコンクリート製格納容器の例)

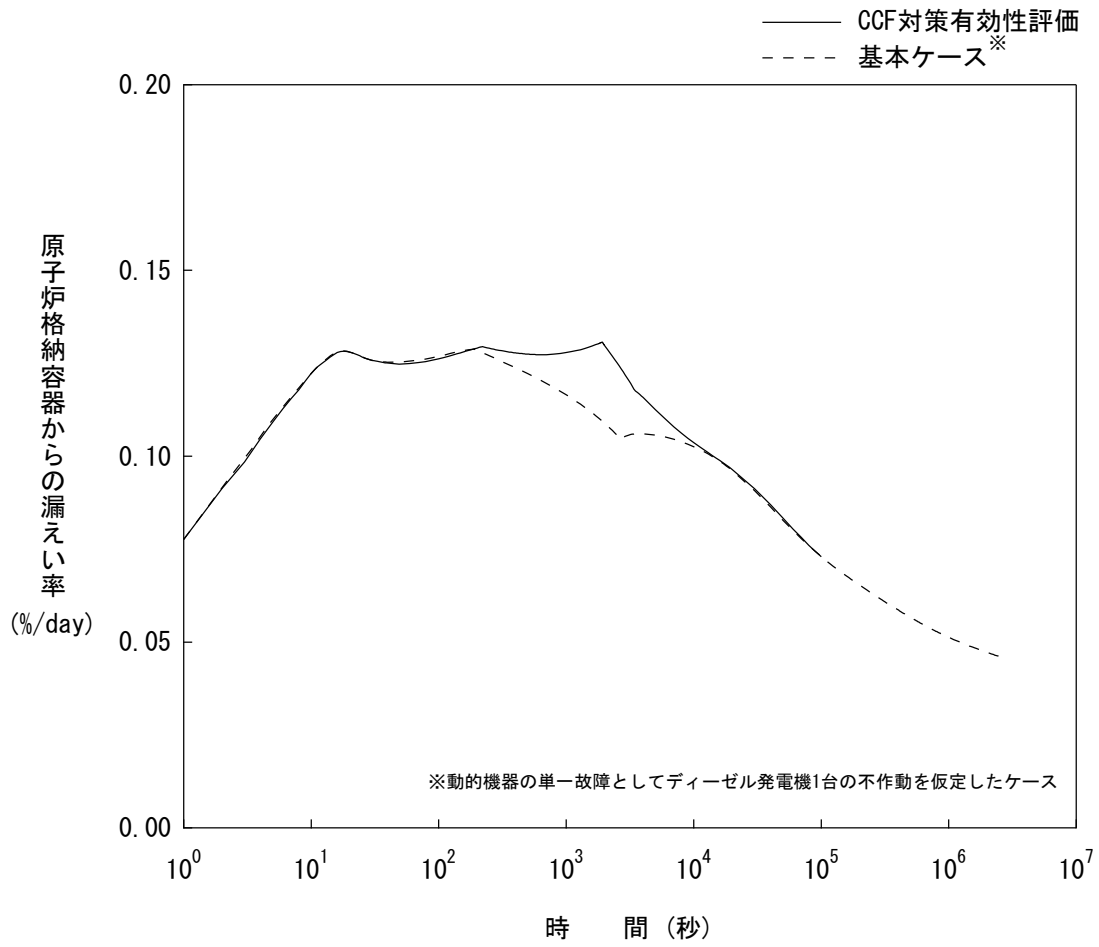


図 4.6.3-4 代表 3 ループプラント 原子炉格納容器からの漏えい率
 (動的機器の単一故障としてディーゼル発電機 1 台の不作動を仮定したケースとの比較)

5. まとめ

「運転時の異常な過渡変化」または「設計基準事故」とソフトウェア CCF が重畳する可能性は極めて低いものの、ソフトウェア CCF 影響緩和対策としてさらなる自主対策を検討した結果、「設計基準事故」の大中破断 LOCA 対策として高圧／低圧注入系（1 系列）の自動起動機能、及び原子炉圧力（異常）低の警報機能を追加設置することとした。

また、ATENA ガイドの「解析に当たって考慮すべき事項」に従って、「運転時の異常な過渡変化」および「設計基準事故」を対象として、想定した事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも、バックアップとして設けた多様化設備等により、判断基準を概ね満足し、かつ、事象が収束することを確認した。

6. 参考文献

- (1) 「原子力発電所におけるデジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因故障緩和対策に関する技術要件書」 ATENA20-ME05, 原子力エネルギー協議会, 2020年
- (2) 「三菱 PWR 設計基準事象への SPARKLE-2 コードの適用性について (解析モデル、検証・妥当性確認編)」 MHI-NES-1072, 三菱重工業, 令和2年
- (3) 「三菱 PWR 設計基準事象への SPARKLE-2 コードの適用性について (解析適用例編)」 MHI-NES-1073, 三菱重工業, 令和2年
- (4) 「三菱 PWR 炉心損傷に係る重要事故シーケンスへの SPARKLE-2 コードの適用性について」 MHI-NES-1055, 三菱重工業, 平成25年
- (5) 「三菱 PWR 非常用炉心冷却系性能評価解析方法 (大破断時)」 MAPI-1035 改8, 三菱重工業, 平成11年
- (6) 「三菱 PWR 非常用炉心冷却系性能評価解析方法 (小破断時)」 MAPI-1041 改7, 三菱重工業, 平成11年
- (7) 「三菱 PWR 原子炉格納容器内圧評価解析手法」 MHI-NES-1016, 三菱重工業, 平成12年
- (8) 「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」平成2年8月30日原子力安全委員会決定 (一部改訂 平成13年3月29日)
- (9) 「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」昭和56年7月20日原子力安全委員会決定 (一部改訂 平成4年6月11日)
- (10) 「PWRの安全解析用崩壊熱について」 MHI-NES-1010 改4, 三菱重工業, 平成25年

ソフトウェア CCF 対策の有効性評価 基本データ

添付 1-1 代表 3 ループプラント 基本データ

添付 1-2 代表 4 ループプラント 基本データ

添付 1-3 ソフトウェア CCF 対策有効性評価で仮定する運転員操作条件

表 1-1 代表 3 ループプラント 基本データ (1/2)

項	目	数値	数値根拠
一	般		
熱出力	(MWt)	2,652×1.02	設計値×定常誤差
ループ数		3	設計値
ループ全流量	(kg/h)	45.7×10 ⁶	設計値
1次冷却系圧力	(MPa [gage])	15.41±0.21	設計値±定常誤差
1次冷却系温度	(°C)	302.3±2.2	設計値±定常誤差
1次冷却材体積 (含加圧器)	(m ³)		設計値
SG伝熱管0%プラグ時		271	
SG伝熱管10%プラグ時		264	
ループ流路面積			
低温側配管	(m ²)	0.383	設計値
ポンプ吸込側配管	(m ²)	0.487	設計値
高温側配管	(m ²)	0.426	設計値
炉	心		
熱流束熱水路係数		2.32	設計値
高温炉心半径方向 β -キック係数		1.52	解析使用値
高温燃料棒半径方向 β -キック係数		1.68	解析使用値
最大線出力密度	(kW/m)	39.6×1.02	設計値×定常誤差
冷却材炉心流量	(kg/h)	45.4×10 ⁶	解析使用値
炉心熱伝達面積	(m ²)	4.52×10 ³	設計値
即発中性子寿命	(s)	2.1×10 ⁻⁵ /0.5×10 ⁻⁵	最大/最小評価値
遅発中性子割合	(%)	0.75/0.4	最大/最小評価値
燃	料		
燃料集合体数		157	設計値
集合体当りの燃料棒数		264	設計値
燃料棒配列		17×17	設計値
燃料棒ピッチ	(cm)	1.260	設計値
燃料棒発熱長	(cm)	366	設計値
被覆管外径	(cm)	0.950	設計値
被覆管肉厚	(cm)	0.057	設計値
ペレット直径	(cm)	0.819	設計値

表1-1 代表3ループプラント 基本データ (2/2)

項 目	数 値	数 値 根 拠
蒸気発生器 (1基あたり)		
伝熱管本数		設計値
SG伝熱管0%プラグ時	3,382	
SG伝熱管10%プラグ時	3,044	
伝熱面積 (m ²)		設計値
SG伝熱管0%プラグ時	4.87×10 ³	
SG伝熱管10%プラグ時	4.38×10 ³	
伝熱管内径 (cm)	1.97	設計値
1次冷却材ポンプ		
ポンプ回転数 (rpm)	1.19×10 ³	設計値
ポンプ慣性モーメント (kg-m ²)	3.46×10 ³	設計値
加 圧 器		
全 容 量 (m ³)	39.6	設計値
原子炉格納容器		
原子炉格納容器自由体積 (m ³)	68,400/67,400	最大/最小評価値
原子炉格納容器初期圧力 (MPa[gage])	0.0	最小値 (大気圧)
非常用炉心冷却設備		
蓄圧タンク全基数 (基)	3	設計値
蓄圧タンク全容量 (m ³ /基)	41.1	設計値
蓄圧タンク保有水量 (m ³ /基)	29.0	最低保有水量
蓄圧タンク圧力 (MPa[gage])	4.04	最低保持圧力
高圧注入ポンプ運転台数	1	CCF時:1系列起動
余熱除去ポンプ運転台数	1	CCF時:1系列起動

表 1-1 代表 4 ループプラント 基本データ (1/2)

項	目	数値	数値根拠
一	般		
熱出力	(MWt)	3,411×1.02	設計値×1.02
ループ数		4	設計値
ループ全流量	(kg/h)	60.1×10 ⁶	設計値
1次冷却系圧力	(MPa [gage])	15.41±0.21	設計値±定常誤差
1次冷却系温度	(°C)	307.1±2.2	設計値±定常誤差
1次冷却材体積 (含加圧器)	(m ³)		
SG伝熱管0%プラグ時		351	設計値
ループ流路面積			
低温側配管	(m ²)	0.383	設計値
ポンプ吸込側配管	(m ²)	0.487	設計値
高温側配管	(m ²)	0.426	設計値
炉	心		
熱流束熱水路係数		2.32	設計値
高温炉心半径方向ヒートンク係数		1.52	解析使用値
高温燃料棒半径方向ヒートンク係数		1.68	解析使用値
最大線出力密度	(kW/m)	41.5×1.02	設計値×定常誤差
冷却材炉心流量	(kg/h)	59.1×10 ⁶	解析使用値
炉心熱伝達面積	(m ²)	5.55×10 ³	設計値
即発中性子寿命	(s)	2.0×10 ⁻⁵ /0.9×10 ⁻⁵	最大/最小評価値
遅発中性子割合	(%)	0.75/0.44	最大/最小評価値
燃	料		
燃料集合体数		193	設計値
集合体当りの燃料棒数		264	設計値
燃料棒配列		17×17	設計値
燃料棒ピッチ	(cm)	1.260	設計値
燃料棒発熱長	(cm)	366	設計値
被覆管外径	(cm)	0.950	設計値
被覆管肉厚	(cm)	0.057	設計値
ペレット直径	(cm)	0.819	設計値

表1-1 代表4ループプラント 基本データ (2/2)

項	目	数値	数値根拠
蒸気発生器 (1基あたり)			
伝熱管本数		3,382	設計値
SG伝熱管0%プラグ時			
伝熱面積	(m ²)	4.87×10 ³	設計値
SG伝熱管0%プラグ時			
伝熱管内径	(cm)	1.97	設計値
1次冷却材ポンプ			
ポンプ回転数	(rpm)	1.19×10 ³	設計値
ポンプ慣性モーメント	(kg-m ²)	3.46×10 ³	設計値
加 圧 器			
全 容 量	(m ³)	51	設計値
原子炉格納容器			
原子炉格納容器自由体積	(m ³)	74,500	最大評価値
原子炉格納容器初期圧力 (MPa[gage])		0.0	最小値 (大気圧)
非常用炉心冷却設備			
蓄圧タンク全基数	(基)	4	設計値
蓄圧タンク全容量	(m ³ /基)	38.2	設計値
蓄圧タンク保有水量	(m ³ /基)	26.9	最低保有水量
蓄圧タンク圧力	(MPa[gage])	4.04	最低保持圧力
高圧注入ポンプ運転台数		1	CCF時:1系列起動
余熱除去ポンプ運転台数		1	CCF時:1系列起動

ソフトウェア CCF 対策有効性評価で仮定する運転員操作条件

ソフトウェア CCF 対策有効性評価のうち、「原子炉冷却材喪失」を対象とした評価においては、以下に示す運転員操作及び操作所要時間を仮定している。

- RCP 手動停止操作（ECCS 性能評価[小破断 LOCA]で使用）
- CV スプレー手動起動操作（原子炉格納容器健全性評価で使用）

上記の各操作の所要時間は以下のように算定している。

- ソフトウェア CCF 対策として整備される手順書に基づき、事象認知から機器操作に必要な項目として、多様化設備作動確認、計器確認、事象判断、操作する場所までの移動等を選定する。
- 各事業者の原子力プラントにおいて、各操作に必要な項目に対して、運転員による模擬操作時間を計測する。
- 各計測結果をもとに、全 PWR プラントを包絡させる時間として算定する。

1. RCP 手動停止操作（ECCS 性能評価[小破断 LOCA]で使用）

操作内容	所要時間	備考
(1) 多様化設備作動～事象判断	10 分 ^{※1}	異常検知含む
(2) 中央制御室から移動～現場操作	10 分	
合計	20 分^{※2}	全 PWR プラントを包絡する値

2. CV スプレー手動起動操作（原子炉格納容器健全性評価で使用）

操作内容	所要時間	備考
(1) 多様化設備作動～事象判断	10 分 ^{※1}	異常検知含む
(2) 中央制御室から移動～現場操作	20 分	CV スプレー弁開操作時間を含む
合計	30 分	全 PWR プラントを包絡する値

※1：ソフトウェア CCF 対策有効性評価では、計測結果をもとに事象判断までの所要時間を安全側に切り上げた 10 分を設定。

※2：国内 PWR は、外部電源が利用可能で RCP 運転を継続できる場合においても、原子炉トリップし、かつ、S 信号が発信した場合には、RCP が自動停止する設計としている。この設計を踏まえ、ソフトウェア CCF 発生時においても「原子炉トリップ+S 信号発信」の条件を満たした場合には速やかに RCP を停止することが望ましく、全プラントを包絡する 20 分程度の RCP 停止が望ましい。

多様化設備が作動させる設備に対するサポート系の有効性

ソフトウェア CCF 対策有効性評価においては、多様化設備が作動させる設備についてはそのサポート系が使用できない場合には利用できないものとして扱っている。サポート系が使用可能とは、起因事象との従属性がなくソフトウェア CCF の影響を受けない場合であり、特定の起因事象を除けば、いずれの事象においても必要なサポート系は期待できる。また、特定のサポート系が期待できなくなる起因事象についても、事象収束に必要な対処設備は確保される。

以下に、CCF 状態におけるサポート系の状態を示す。

サポート系	説明
電源系	<p>起因事象として外部電源の喪失が生じる事象以外は、外部電源は利用可能である。そのため、多様化設備により作動させる工学的安全施設等の各設備のサポート系に必要な電源が供給可能であり、期待できる。</p> <p>起因事象として外部電源の喪失が生じる事象については、電源系が期待できなくなるものの、対処設備となる原子炉停止系統、タービン動補助給水、及び、主蒸気安全弁は、電源系に依らずその動作が期待できるものであり、事象収束の機能を果たすことができる。</p>
冷却系、空調系	<p>添付書類十解析では、起因事象との従属性がなく起因事象の影響を受けないサポート系が利用可能であることに基づき、安全保護系により作動する原子炉停止系、工学的安全施設等の各設備に期待している。CCF 対策有効性評価においてソフトウェア CCF による安全保護系の機能喪失を想定するものの、起因事象発生前に作動していたサポート系はソフトウェア CCF の影響を受けることはない。したがって、添付書類十解析が対象とする事象にソフトウェア CCF が重畳しても、添付書類十解析と同じく、各々の起因事象との従属性がなく起因事象の影響を受けないサポート系は、各々の起因事象においても利用可能であり、期待できる。</p> <p>なお、工学的安全施設の誤作動を起因とする事象（非常用炉心冷却系の誤起動）については、対処設備となる原子炉停止系統は冷却系、空調系に依らずその動作が期待できるものであり、事象収束の機能を果たすことができる。</p> <p>また、起因事象としての外部電源の喪失が生じた場合については、対処設備となる原子炉停止系統、タービン動補助給水、及び、主蒸気安全弁は、冷却系、空調系等に依らず期待できるものであり、事象収束の機能を果たすことができる。</p>