

女川原子力発電所2号炉  
使用済燃料貯蔵槽における  
燃料損傷防止対策の有効性評価について

---

東北電力株式会社  
平成29年12月

1. 想定事故1・2の特徴と主な対策
2. 審査会合での指摘事項に対する回答

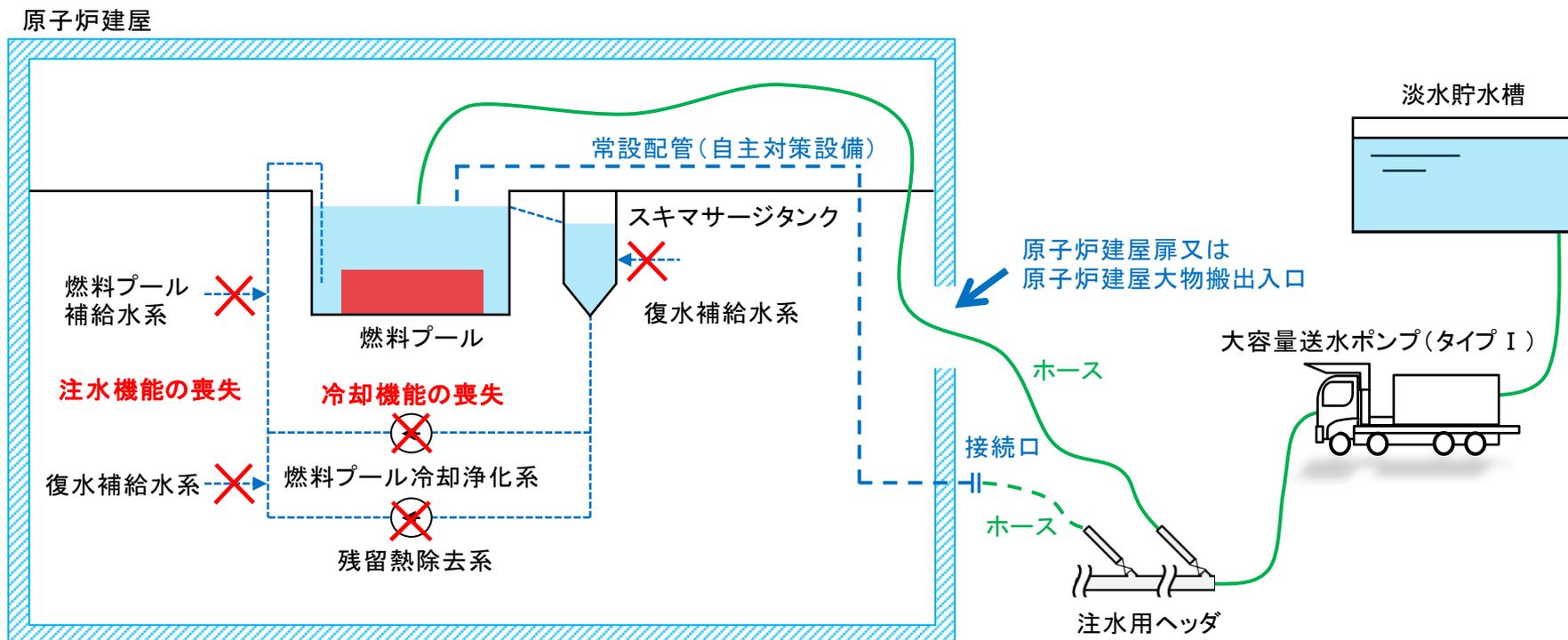
# 1. 想定事故1・2の特徴と主な対策(1/4)

## 想定事故1の特徴

燃料プールの冷却機能又は注水機能が喪失し、水温が上昇しやがて沸騰することにより、水位が低下し燃料が露出して損傷に至る事故

## 想定事故1の対策概要

・大容量送水ポンプ(タイプ I)による注水



# 1. 想定事故1・2の特徴と主な対策(2/4)

## 想定事故1における有効性評価の結果

想定事故1における燃料プール水位の推移及び燃料プール水位と線量率については、図1及び図2のとおり  
燃料有効長頂部が冠水していること、放射線の遮蔽が維持される水位を確保すること及び未臨界が維持されていることを確認している

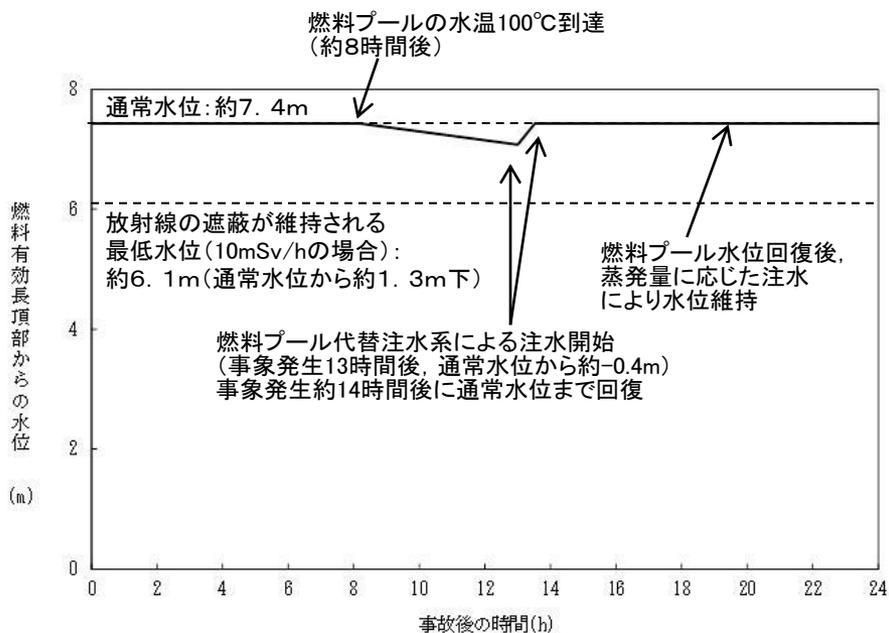


図1 燃料プール水位の推移(想定事故1)

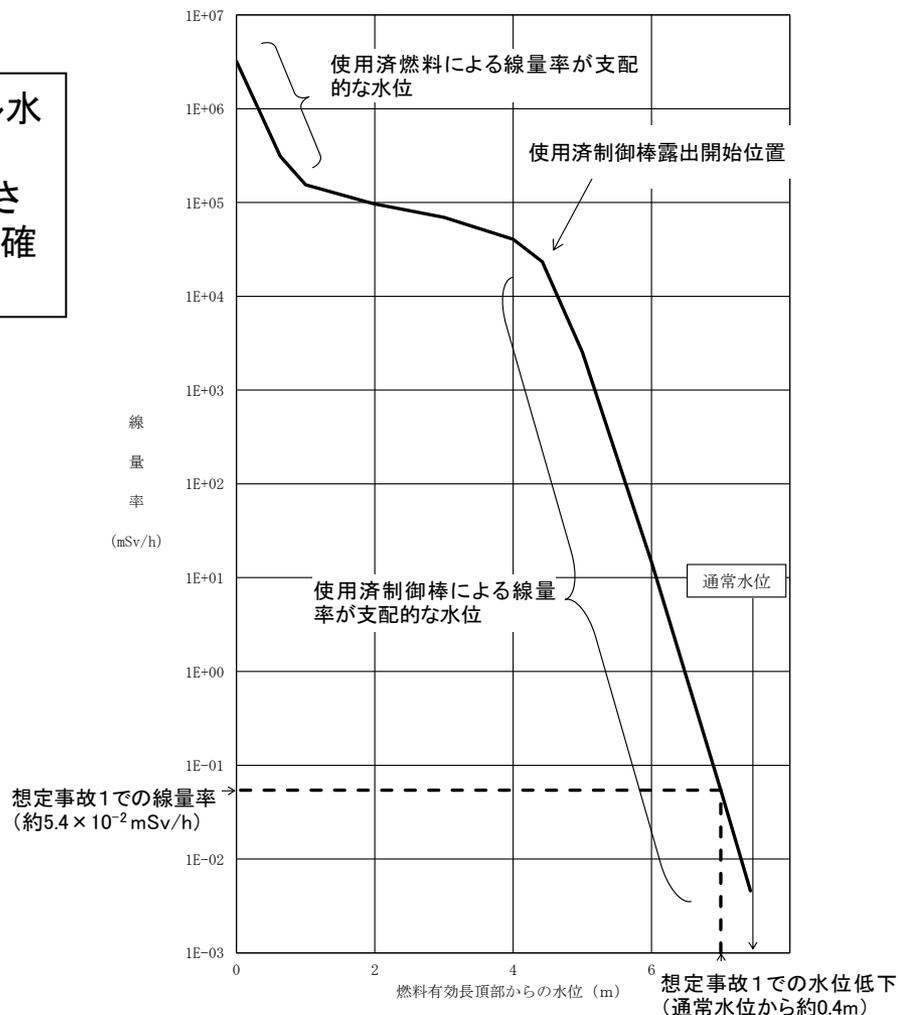


図2 燃料プール水位と線量率(想定事故1)

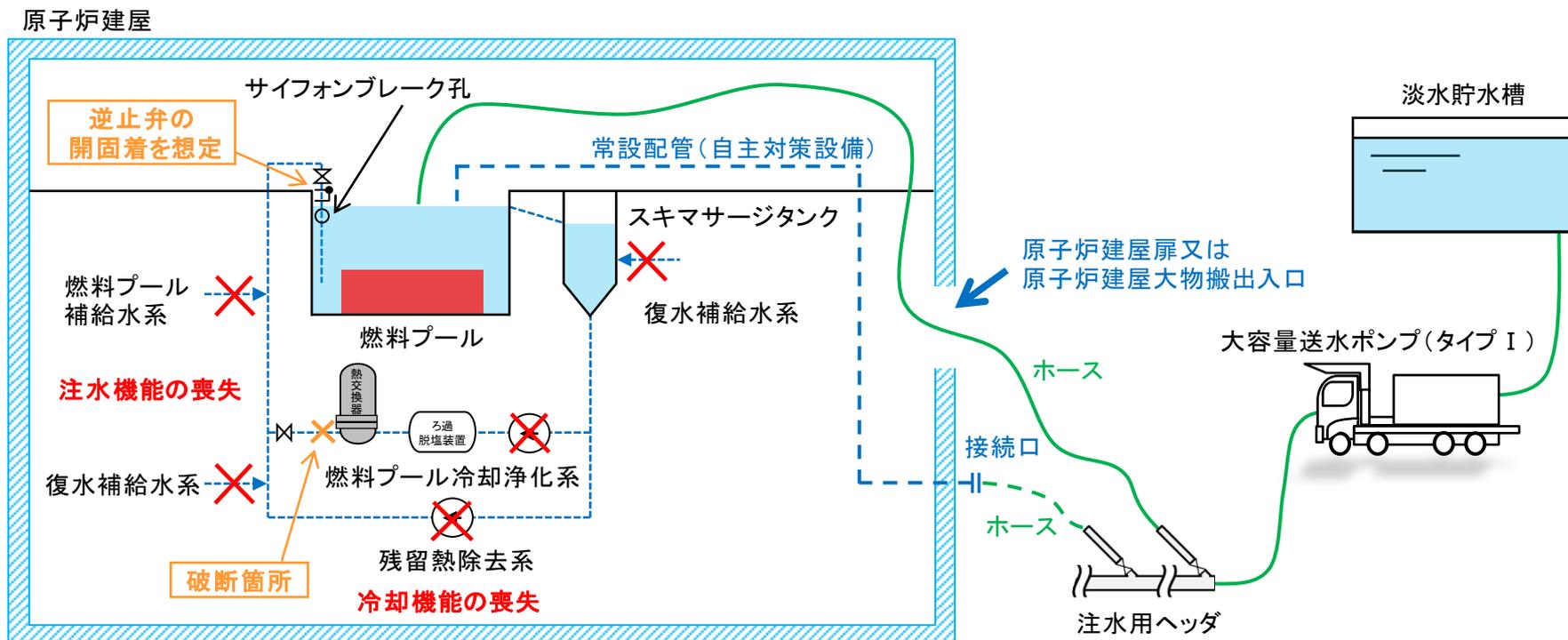
# 1. 想定事故1・2の特徴と主な対策(3/4)

## 想定事故2の特徴

燃料プールの小規模な流出が発生するとともに、注水機能が喪失することにより、水位が低下し燃料が露出して損傷に至る事故

## 想定事故2の対策概要

- ・サイフォンブレイク孔による燃料プール水の小規模な流出の停止
- ・大容量送水ポンプ(タイプI)による注水



# 1. 想定事故1・2の特徴と主な対策(4/4)

## 想定事故2における有効性評価の結果

想定事故2における燃料プール水位の推移及び燃料プール水位と線量率については、図3及び図4のとおり  
燃料有効長頂部が冠水していること、放射線の遮蔽が維持される水位を確保すること及び未臨界が維持されていることを確認している

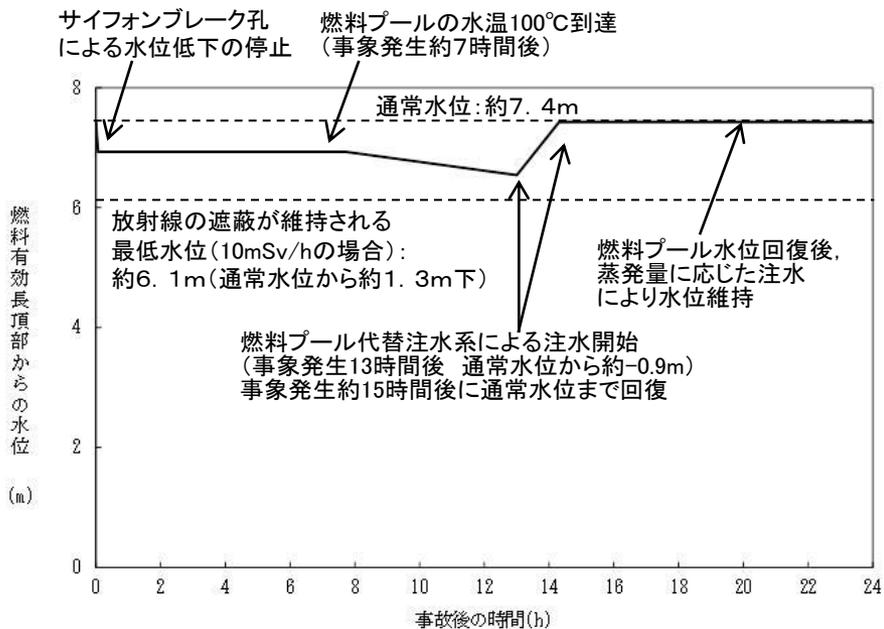


図3 燃料プール水位の推移(想定事故2)

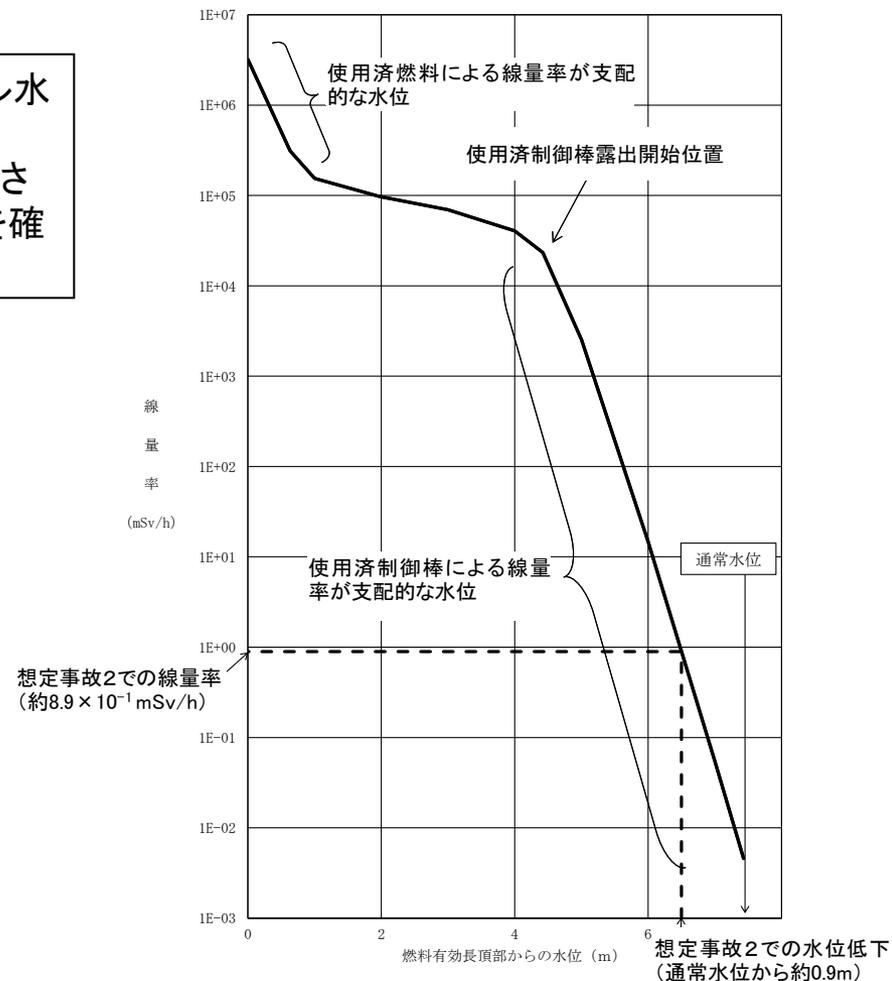


図4 燃料プール水位と線量率(想定事故2)

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.1)

### (1) 指摘事項

- ・初期水位について、スロッシングを考慮して説明すること

### (2) 回答

- ・スロッシング評価を行い、スロッシングが発生した場合の水位低下量は通常水位から約0.1m<sup>※1</sup>であることを確認

※1 新Ssによる評価の実施に伴い、必要に応じて見直しを実施

- ・初期水位が水位低警報レベル(通常水位から0.165m下)とした場合について、遮蔽が維持される最低水位(通常水位から約1.3m下)及び燃料ハンドル上部<sup>※2</sup>(通常水位から約6.9m下)に到達するまでの時間を評価

※2 保守的な取り扱いとして、燃料有効長頂部より到達時間が早い燃料ハンドル上部にて評価を実施

想定事象	遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間(10mSv/hの場合)	燃料ハンドル上部に到達するまでの時間
想定事故1	約23.4時間	約4.1日
想定事故2	約18.6時間	約3.9日

- ・燃料プール代替注水系による注水は、事象発生から13時間後より可能であることから、初期に地震起因のスロッシングが発生した場合においても燃料損傷の防止が可能である

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.2)

### (1) 指摘事項

- ・有効性評価方法の説明については、関連する補足説明資料を適切にひも付けするとともに、水位評価の保守性を説明すること

### (2) 回答

- ・水位評価では、以下の仮定に基づく評価を行っているが、総合的に燃料プールの水面や壁面からの放熱を考慮していないことの影響が大きく、保守的な評価であると考えられる

#### < 保守的な仮定 >

- ・燃料プール水温の温度変化に対する密度の評価にて、最も厳しくなる値を想定
- ・燃料プールの水面、壁面等からの放熱を考慮しない

#### < 非保守的な仮定 >

- ・燃料プール水温を全て均一の温度とし、燃料プール全体が100°Cに到達した時間を沸騰開始としている

- ・事象発生直後から、燃料プール全体の水温が100°Cとし、沸騰による燃料プール水位が低下する条件で評価を実施(評価結果)

想定事故2において、遮蔽が維持される最低水位に到達する時間は、燃料プール代替注水系による注水開始時間として設定した時間(事象発生13時間後)より早いものの、燃料プール代替注水系による注水は、実態的には事象発生10時間後より可能であるため注水可能であることを確認

想定事象	遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間(10mSv/hの場合)	燃料ハンドル上部※に到達するまでの時間
想定事故1	約17.6時間	約3.8日
想定事故2	約10.8時間	約3.6日

※保守的な取り扱いとして、燃料有効長頂部より到達時間が早い燃料ハンドル上部にて評価を実施

有効性評価4.1 想定事故1 添付資料4.1.1 燃料プールの水位低下と遮蔽水位に関する評価について  
 添付資料4.1.5 評価条件の不確かさの影響評価について  
 有効性評価4.2 想定事故2 添付資料4.2.5 評価条件の不確かさの影響評価について

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.3)

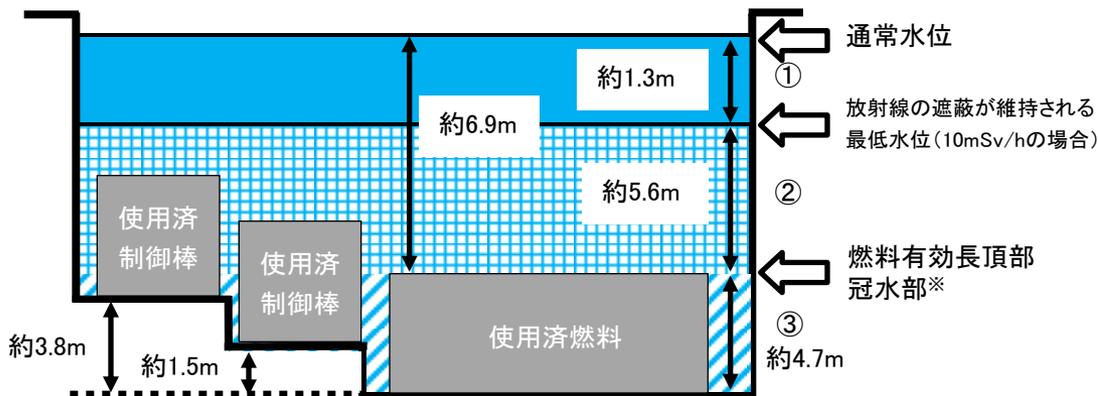
### (1) 指摘事項

- ・保有水量に関して、高さと断面積との関係を説明すること

### (2) 回答

- ・燃料プールの各領域の高さは図1のとおり

また、各領域における断面積と保有水容積との関係は表1のとおり



※ 保守的な取り扱いとして、燃料ハンドル上部を燃料有効長頂部冠水部として取り扱う

図1 燃料プール 領域毎の高さ

表1 燃料プールの断面積及び保有水の容積

領域	断面積[m <sup>2</sup> ]	保有水の容積[m <sup>3</sup> ]
①	約152	約197
②	約152	約843
③	約77	約360
合計		約1,400

- ・容積は、燃料プール容積から燃料プール内の機器の容積を差し引くことで算出し、燃料プールの各領域の断面積は、求めた各領域の容積から高さを除して算出
- ・燃料プール内に設置されている機器の多くは②、③の領域(燃料プール下部)にあるため、断面積の平均化により燃料プール上部の断面積は実際より狭く評価される
- ・水位の低下という観点では断面積が小さいほど水位低下速度は速くなることから、保守的な評価となっている

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.4)

### (1) 指摘事項

- ・異物の混入について、手すりに養生シートをつけているケースがないことを説明すること

### (2) 回答

- ・燃料プール周辺は、異物混入防止強化エリアとして設定しており、持ち込み物品への落下防止措置の実施、破損の可能性のある物品の持ち込みの禁止等を実施している
- ・燃料プール付近への物品持ち込みが避けられない場合において、エリア内での作業時に地震が発生した場合、持ち込んだ物品がスロッシング等により燃料プール内に流れ込む可能性が考えられる  
しかし、燃料プール周辺で使用する養生シート及びビニール類については、水中へ落下した場合でも発見の容易さを考慮し、色付きのものを使用することとしており、地震後の巡視により、浮遊物を発見した場合、除去が可能である

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.5)

### (1) 指摘事項

- ・プール水の小規模な喪失としてサイフォン現象を説明しているが、サイフォン現象以外についてもSFPからの水の流出の可能性を整理した上で想定事故2の想定を説明すること(大規模損壊との関係を含む)

### (2) 回答

- ・燃料プールからの漏えいを引き起こす可能性のある事象を複数想定した上で、事象発生の可能性及び事象の影響(漏えい停止時におけるSFP水位)の観点から、「③サイフォン現象による漏えい」を選定

想定事象	発生の可能性	事象の影響(漏えい停止時におけるSFP水位)
①燃料プールゲートの破損	①, ②は基準地震動の影響を考慮しても発生のおそれは小さい	燃料プールゲート下端 (燃料は冠水された状態で漏えい停止)
②燃料プールライナー部の破損		破損想定による※
③サイフォン現象による漏えい		燃料プール底部付近
④燃料プールゲート開放時の原子炉ウェル及びD/Sピット側のライナー部の損傷		燃料プールゲート下端 (燃料が冠水された状態で漏えい停止)
⑤地震発生に伴うスロッシングによる漏えい		通常水位より約0.1m下 (燃料が冠水された状態で漏えい停止)

※ 注水実施によっても燃料プール水位の低下が継続する場合、大規模損壊としての対応を実施

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.6)

### (1) 指摘事項

- ・配管破断箇所をRHRではなくFPCSとした理由を詳細に説明すること

### (2) 回答

- ・破断箇所の想定にあたり、燃料プール冷却浄化系(FPC)及び残留熱除去系(RHR)について、耐震性及び隔離操作の容易性の観点から整理を実施

#### ・(耐震性の観点)

FPCは十分な耐震性を有しているものの、ろ過脱塩装置廻りの耐震クラスはRHR配管の耐震クラスより低く、破断の発生可能性が相対的に高いと考えられる。このため、耐震性の観点から、破断が発生する系統はFPCを選定

#### ・(隔離の容易性)

RHRで破断が発生した場合、その大部分はRHR熱交換器廻りの電動弁を中央制御室からの遠隔操作により閉止することで、流出箇所の隔離が可能である。一方、FPC熱交換器廻りの破断を想定する場合、破断箇所の隔離には現場での手動弁の閉止操作が必要であり、流出が継続する可能性が相対的に高いと考えられる。このため、隔離の容易性の観点からも、破断が発生する系統はFPCを選定

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.7)

### (1) 指摘事項

- ・未臨界性について、ラックの種類等を整理して説明すること

### (2) 回答

- ・女川2号炉では、燃料間距離の確保等の設計により未臨界を確保するボロン添加ステンレス鋼製ラックに燃料を貯蔵している
- ・燃料プール水の沸騰など水密度が変化する場合において、未臨界が維持できることの確認を実施
  - (評価条件) 水密度を $1.0 \sim 0.0 \text{g/cm}^3$ と変化させた場合における実効増倍率を評価
  - (評価結果) 水密度の減少に伴い、実効増倍率は単調に減少することから、水密度が減少する事象が生じた場合でも未臨界が維持されることを確認

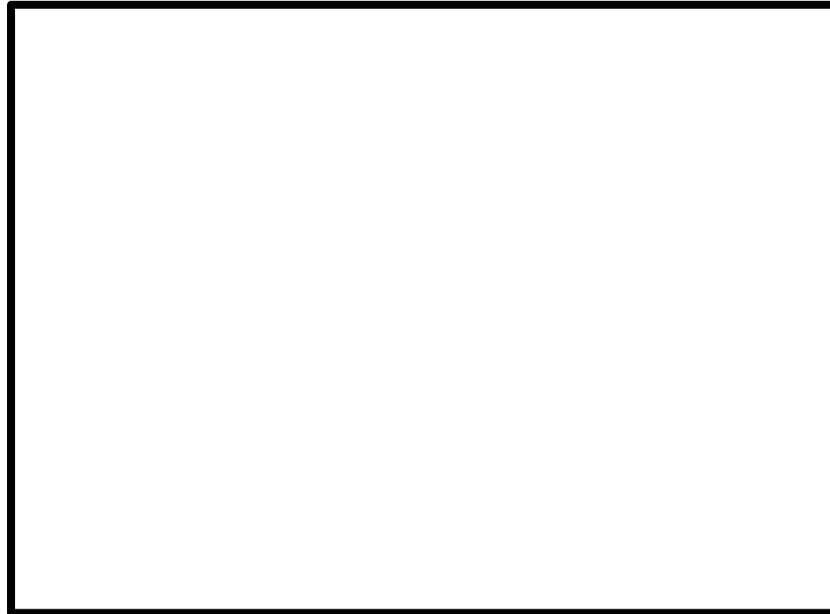


図1 実効増倍率の水密度依存性

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.8)

### (1) 指摘事項

- ・事象検知の観点からSFPの常時監視項目等を整理して説明すること

### (2) 回答

- ・通常時の燃料プールの関連パラメータについて監視設備、監視方法及び確認頻度を下表に示す  
表に示す監視項目について、運転員による中央制御室での定期的なパラメータ確認及び現場での状態確認を行うことにより、燃料プールの冷却機能喪失や水位低下(漏えい)を認知することが可能である

項目	監視対象 (下線:重大事故等対処設備)	監視方法	確認頻度	異常発生に伴う警報確認	備考
スキマサージタンクの水位	・スキマサージタンク水位	・パラメータ確認	1回/時間(定期検査時) 1回/時間(原子炉運転時)	・水位高/低の警報発生時(スキマサージタンク水位)	水位低低によるFPCポンプ自動停止のインターロック有
燃料プール水位	・燃料貯蔵プール水位 ・使用済燃料プール水位/温度 (ガイドパルス式)	・パラメータ確認  ・現場状態確認	1回/時間(定期検査時) 1回/時間(原子炉運転時)  現場パトロール時(1回/日)	・水位高/低の警報発生時(燃料貯蔵プール水位) ・水位低又は水位低低の警報発生(使用済燃料プール水位/温度(ガイドパルス式))	使用済燃料プール監視カメラによる状態確認も可能
燃料プール水温度	・FPCポンプ入口温度 ・燃料貯蔵プール水温度 ・RHR熱交換器入口温度 ・使用済燃料プール水位/温度 (ガイドパルス式)	・パラメータ確認	1回/時間(定期検査時) 1回/時間(原子炉運転時)	・FPCポンプ入口温度高の警報発生時(FPCポンプ入口温度) ・温度高の警報発生時(使用済燃料プール水位/温度(ガイドパルス式))	—
燃料プールエリアの線量率	・燃料取替エリア放射線モニタ ・使用済燃料プール上部空間放射線モニタ(高線量, 低線量)	・パラメータ確認	1回/時間(定期検査時) 1回/時間(原子炉運転時)	・燃料取替エリア放射能高, 使用済燃料プール上部空間放射線モニタ放射能高の警報発生時	—

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.9)

### (1) 指摘事項

・熱電対式水位計について、気相部分の熱電対が蒸気に覆われた場合でも信頼性があることを説明すること。

### (2) 回答

- ・使用済燃料プール水位(ヒートサーモ式)は、熱電対とヒータが一体となったヒータ付熱電対を使用した検出器であり、気中と水中の熱伝達率の違いを利用し、ヒータ加熱開始前後の熱電対の温度変化を確認することにより水位が監視可能
- ・燃料プール水の沸騰により、水位計の気相部分が蒸気に覆われた場合を想定した模擬試験を実施し、蒸気環境下においても計測可能であることを確認(試験結果は下図のとおり)

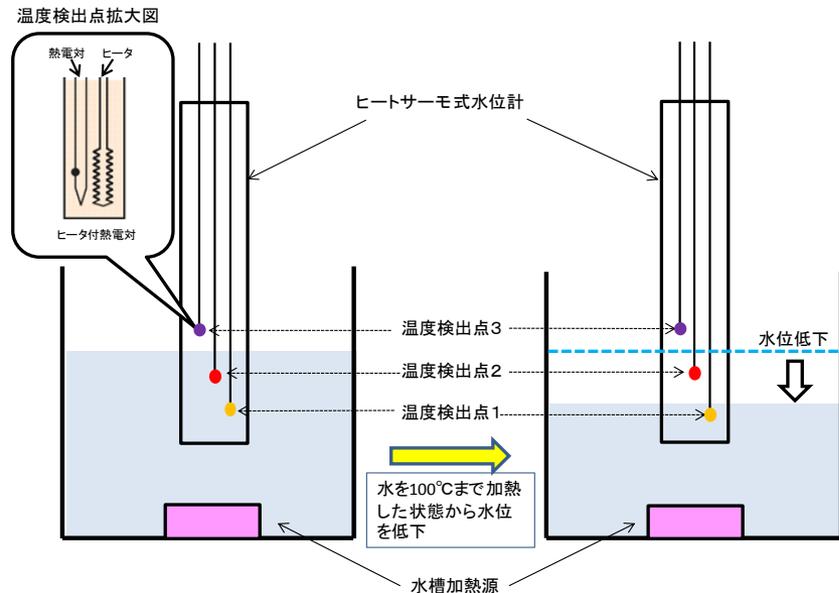


図1 試験イメージ

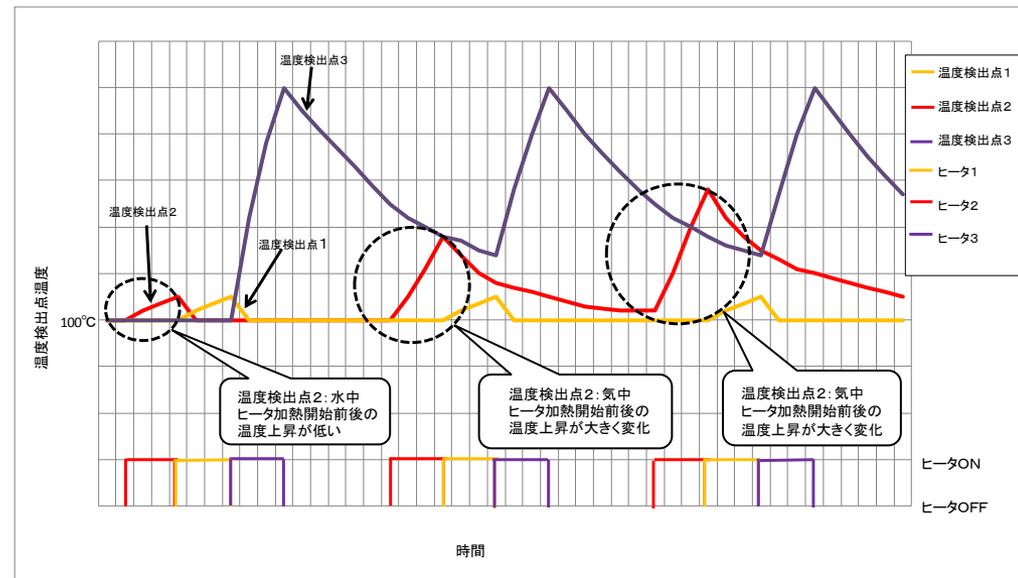


図2 試験結果イメージ

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.10)

### (1) 指摘事項

・プールゲートの健全性について説明すること

### (2) 回答

#### a. 強度上の健全性の確保

- ① プールゲートを設置するゲート取付用ラグ及びゲート押え金具は、基準地震動 $S_s$ による地震荷重に対して強度上問題ない設計
- ② プールゲートは、基準地震動 $S_s$ による地震荷重及びスロッシング荷重に対して強度上問題ない設計

#### b. シール性能の確保

- ① プールゲートは、燃料プールと原子炉ウエルの流路に二重に設置された設計(図1, 2参照)
- ② プールゲートのパッキンは、二重構造とすることで信頼性の向上を図った設計(図3参照)
- ③ プールゲートのパッキンは、高温環境における材料健全性を確認しており、プール水が沸騰した場合でもシール性を確保

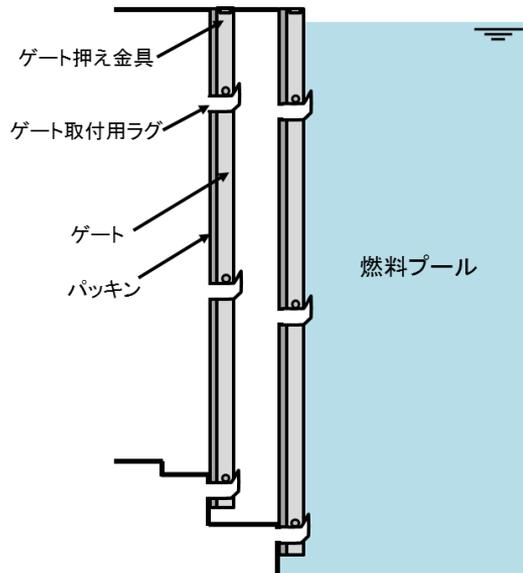


図1 断面図

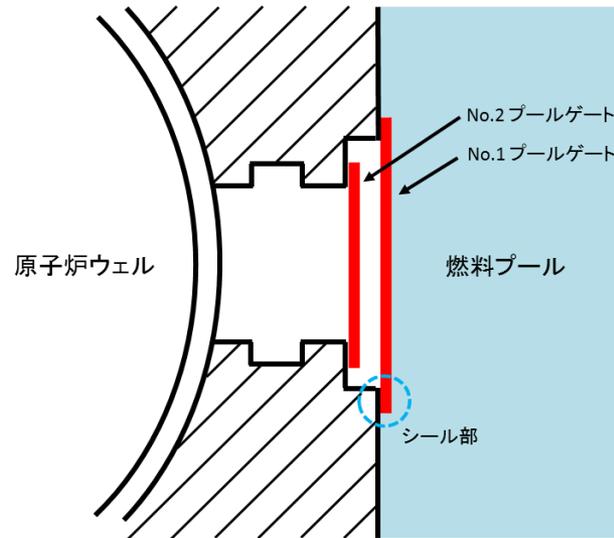


図2 平面図

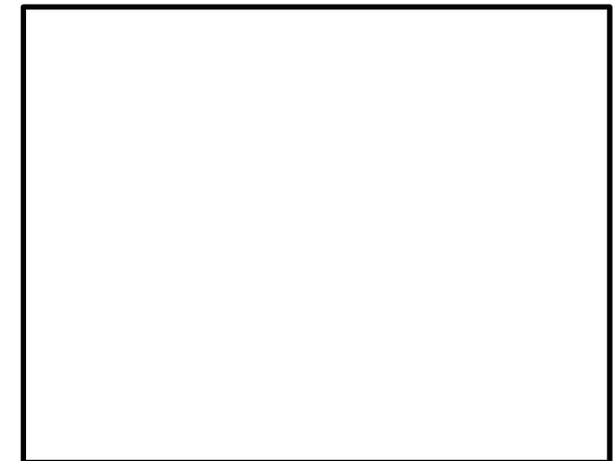


図3 シール部詳細

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.11)(1/2)

### (1) 指摘事項

・大容量送水ポンプ車を注水用ヘッドにより各系統の注水設備及び水の供給設備を自主対策設備への供給を含めて兼用しているが、自主対策設備の損傷等による重大事故等対処設備への悪影響の防止についてどのような検討がなされているか提示すること。また、各々が誤接続されないような対策がなされているか提示すること

### (2) 回答

・大容量送水ポンプ(タイプ I)は、可搬型設備の設置作業の効率化・被ばく低減を目的に注水用ヘッドを介して、1台のポンプにより各系統及び機器に水を供給する設計としている(図1参照)

注水用ヘッド接続部	接続先の系統又は機器	分類	備考
接続部1	復水貯蔵タンク	重大事故等対処設備	—
接続部2	燃料プール代替注水系 又は 燃料プールのスプレイ系	重大事故等対処設備	同時使用は考慮しない
接続部3	原子炉格納容器頂部注水系(可搬型)	自主対策設備	—
接続部4	低圧代替注水系(可搬型) 及び 原子炉格納容器下部注水系(可搬型)	重大事故等対処設備	—
接続部5	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系	重大事故等対処設備	—
接続部6	燃料プール代替注水系(常設配管) 又は 燃料プールのスプレイ系(常設配管)	自主対策設備	同時使用は考慮しない
接続部7	原子炉格納容器フィルタベント系フィルタ装置	重大事故等対処設備	—

#### a. 自主対策設備の損傷等による重大事故等対処設備への悪影響防止対策

- ①注水用ヘッド付属の隔離弁により使用しない接続部を隔離可能な設計
- ②接続先の系統に隔離弁(遠隔手動弁操作設備付き)を設けることにより隔離可能な設計
- ③注水用ヘッドと接続口を接続するホースを取り外すことで物理的に隔離可能な設計

#### b. 誤接続防止対策

- ①注水用ヘッドの接続部、付属の隔離弁及び接続口の名称を一对一の関係とし、それぞれ銘板により識別可能な設計
- ②注水用ヘッドの接続部と接続口に同色の塗装を施す等により、識別性を高めた設計

なお、有効性評価における事故シーケンスにおいて、同時に使用する接続口は最大2つであり、上記対策により誤接続の可能性は低い

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.11)(2/2)

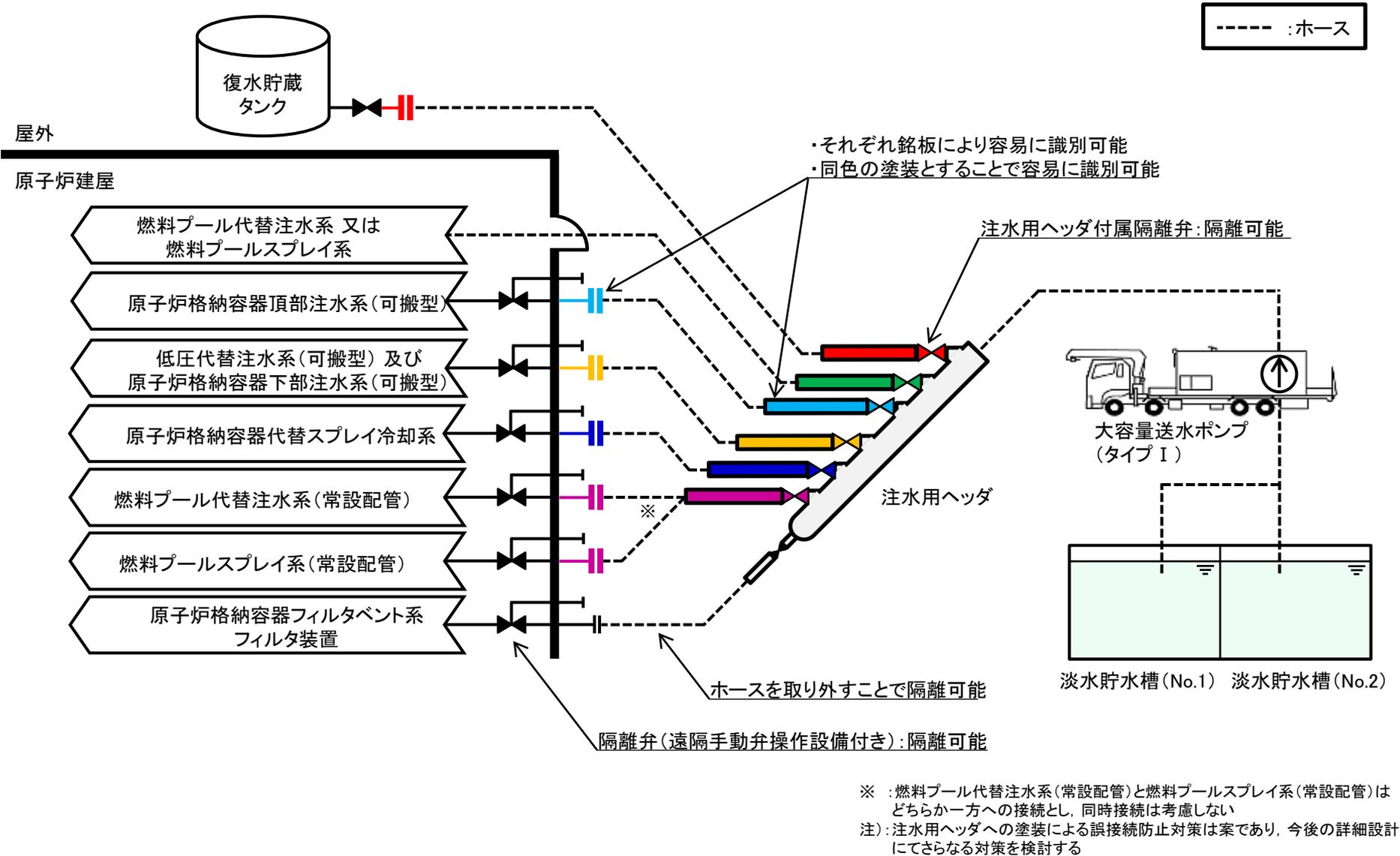


図1 注水用ヘッド接続状態の概要図