

# 柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画認可申請に係る論点整理について

**TEPCO**

---

2020年4月28日  
東京電力ホールディングス株式会社

枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

## 【説明内容】

- 下記の第830回審査会合での指摘について対応状況を説明する。

### 機械設計に関する論点整理・コメント回答（2件）

分類	No.	説明項目（論点/コメント回答）	関連する 主な説明事項
機械設計	1	格納容器内水素濃度計の機能・構造と耐環境性【コメント回答】	-
	2	重大事故等時の格納容器評価における評価条件【コメント回答】	[2]-2

- なお、今後の審査にて論点として抽出されたものについても審査会合にて説明する。

機械設計に関する論点 コメント回答  
【論点1】格納容器内水素濃度計の  
機能・構造と耐環境性

# 【論点1】第830回審査会合での指摘（格納容器内水素濃度（SA））



NO	コメント内容	回答	ページ番号	備考
	格納容器内水素濃度計の指示値は、格納容器圧力を用いて分圧を計測し、補正していることを示した上で、計測誤差（±2%）の根拠を整理して説明すること。	パラジウム及び白金の抵抗値を基に水素濃度を演算する手順を追記しました。また、格納容器内圧力を考慮した場合の計器誤差の根拠を追記しました。	8～10	
	格納容器内水素濃度計について圧力と抵抗値の実験結果を示すこと。	格納容器内水素濃度（SA）の水素分圧と抵抗変化率の実験結果をまとめました。	8	
	格納容器内水素濃度計について計測器の時定数を示すこと。	応答性確認試験を行い、判定基準の40秒以内で応答していることをまとめました。	11～12	
	格納容器内水素濃度計について水素を吸い込んではいませんが、水素濃度が上下した場合の追従性を示すこと。	応答性確認試験を行い、水素ガスの導入及び排出を繰り返した場合にも、水素濃度の測定値が精度内であることをまとめました。	11～12	
	CVスプレイに対する水素濃度計の機能（ヒータ昇温等）への影響について整理して説明すること。	被水による格納容器内水素濃度（SA）の温度制御への影響はないことをまとめました。	13	
	耐環境試験の評価結果で「機能維持を確認している」としているが試験前後の抵抗値の特性変化等による機能への具体的な影響を説明すること。	試験前後のパラジウム抵抗値と白金抵抗値を記載し、「機能維持を確認している」とした根拠を評価結果欄にまとめました。	14	
	格納容器内水素濃度計について圧力、温度、湿度、放射線等の環境試験やパラジウムの温度特性のバックデータを整理して本水素濃度計の信頼性を説明すること。	環境試験やパラジウムの温度特性等のバックデータをまとめました。 上記に加え、酸素による水素濃度測定への影響と対策をまとめました。	15	
	格納容器内水素濃度計についてCVスプレイにより水がかかるとはならず、炉心損傷後も使うのであればセシウムやヨウ素が表面に付着した場合の影響を示すこと。	被毒物質の影響及び対策についてまとめました。	16～17	

# 格納容器内水素濃度（SA）の概要

## 1. 格納容器内水素濃度（SA）の概要

### 【測定原理】

- 格納容器内水素濃度（SA）は、水素吸蔵材料式のものを用いる。
- 水素吸蔵材料式の水素検出器は、水素吸蔵材としてパラジウムを用いており、パラジウムが水素を吸蔵すると電気抵抗が増加する性質を利用している。この時のパラジウム電気抵抗の変化を抵抗測定器にて測定し、水素濃度に換算する。
- パラジウムの抵抗値は温度によっても変化するため、温度を測定し補正する必要がある。検出素子部はパラジウム線と白金線を交互にボビンに巻いた形となっており、パラジウムの温度は白金の抵抗変化により測定している。

### 【計測範囲】

- 0～100vol%

### 【計器精度】

- ±2.0%

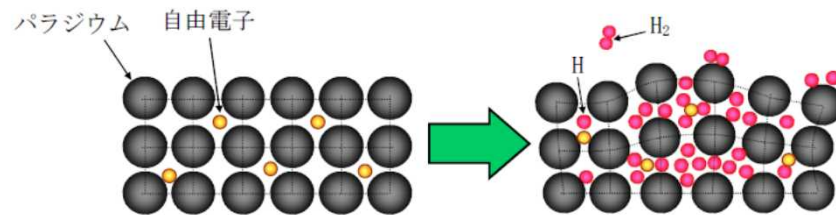


図1 格納容器内水素濃度（SA）の測定原理

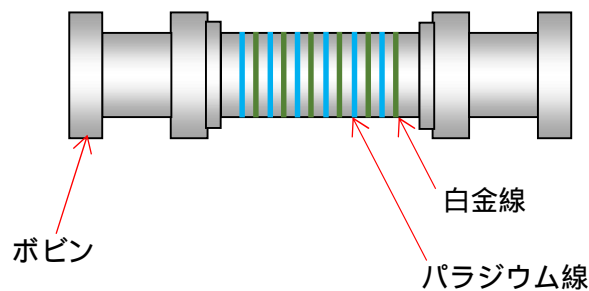


図2 検出素子部の概要図

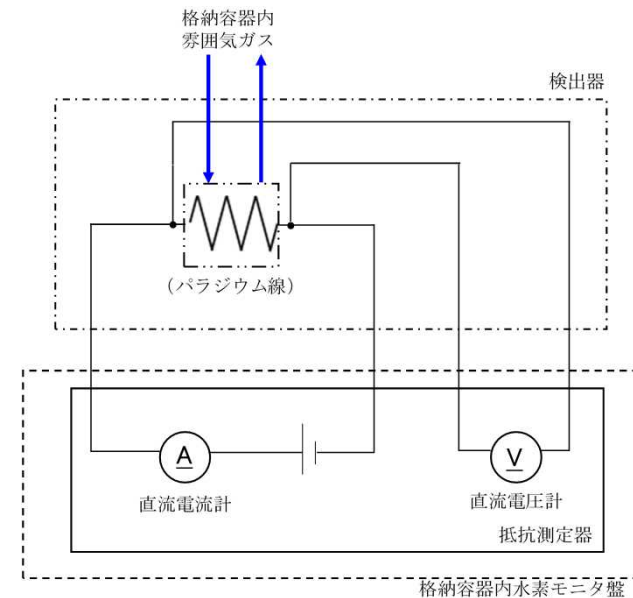


図3 水素濃度計検出回路の概要図

## 【構成】

- 原子炉格納容器内のD/W及びS/Cそれぞれの雰囲気ガスを検出器で測定することで、原子炉格納容器内の水素濃度を中央制御室より監視できる設計とする。
- 常設代替直流電源設備であるAM用直流125V蓄電池又は可搬型直流電源設備である電源車及びAM用直流125V充電器から給電が可能である。

## 【構造】

- 格納容器内水素濃度（SA）は、パラジウム線、白金線をボビンに巻き付けた検出素子部、ヒータ部等で構成され、検出器容器に収納されている。
- 検出器容器の上部及び下部の2ヶ所に開口部があり、この開口部から雰囲気に含まれる水素ガスが流入する構造としている。この開口部の大きさは検出素子部より大きくなるよう設計しており、上部の開口部は下部の開口部に比べて、余裕を持たせた大きさとしている。
- 各構成機器の概要について以下に示す。

### (1) 水素検出器

#### a. パラジウム線

パラジウム線は水素を吸蔵すると抵抗値が増加する。この抵抗値の増加量を測定するために設置する。

#### b. 白金線

白金線によりパラジウム線の温度を正確に測定し、水素濃度算出時に温度補正をするために設置する。

#### c. ヒータ部

パラジウム線は、低温領域では水素濃度のばらつきが大きいことから、水素濃度が安定する高温領域とするため、パラジウム線をヒータで260 以上に加温する必要があり、パラジウム線を約300 にするために設置する。

#### d. ヨウ素フィルタ

重大事故等時に原子炉格納容器内で発生するヨウ素による検出素子部への影響を低減するため、ヨウ素吸着剤を入れたフィルタを検出器の上下開口部に設置している。

### (2) 格納容器内水素モニタ盤

格納容器内水素モニタ盤は、水素検出器で測定されたパラジウムの抵抗値を水素濃度へ換算することを目的として、中央制御室に設置している。格納容器内水素モニタ盤は、抵抗測定器、演算装置等で構成されている。

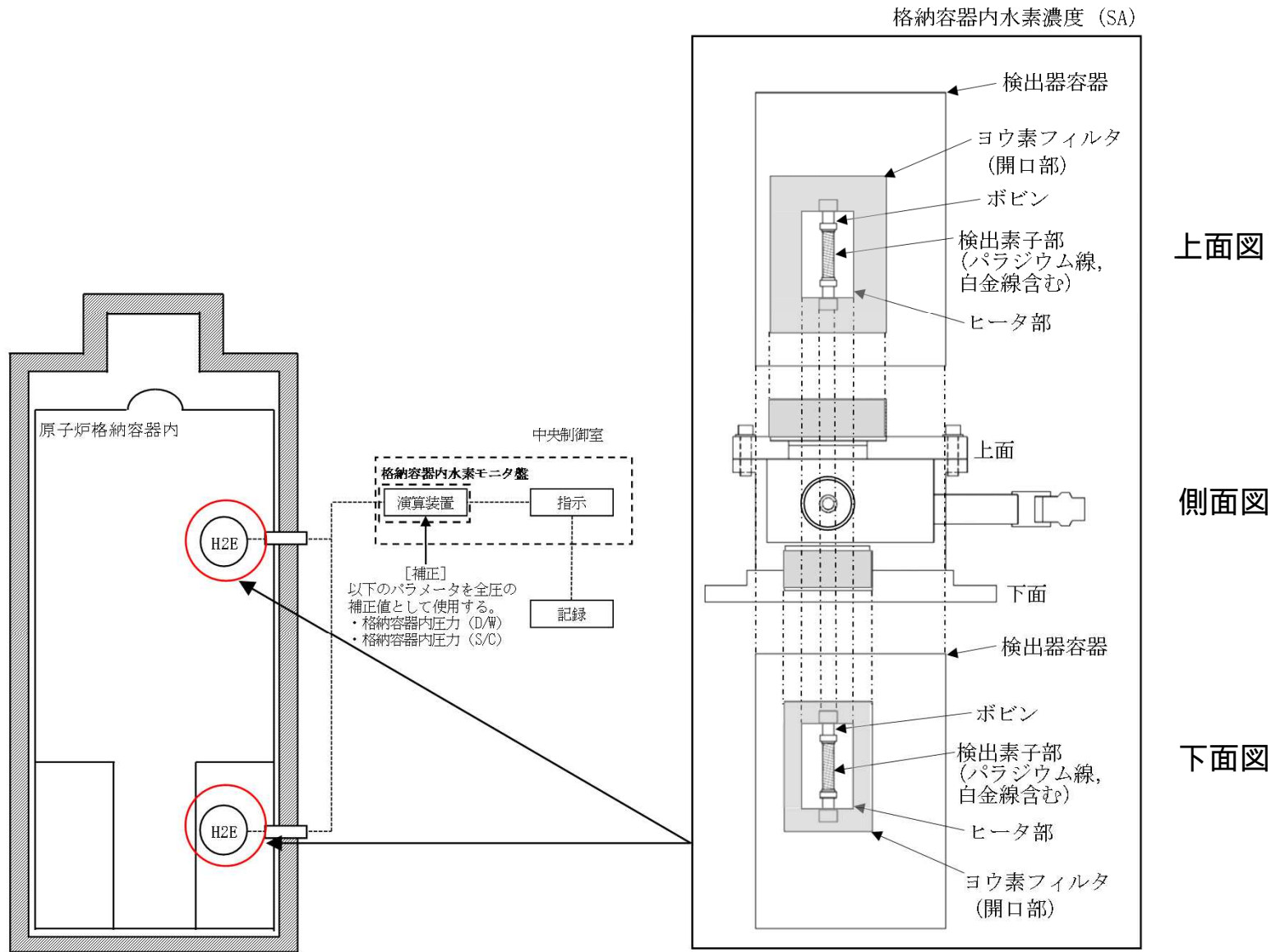


図4 格納容器内水素濃度 (SA) 系統概要図および検出器概要図

### 1. 水素濃度演算手順

以下a～eに水素濃度演算手順を示す。また、水素分圧と抵抗変化率の実験結果を図7に示す。

[水素濃度演算手順]

- 白金線の抵抗値を抵抗測定器で計測し、その抵抗値から検出素子部の温度を算出する。(図5参照)
- 検出素子部の温度より、水素濃度0vol%におけるパラジウム抵抗値を計算する。(図6参照)
- 抵抗測定器で計測された水素を吸蔵した時のパラジウム線の抵抗値と水素濃度0vol%におけるパラジウム抵抗値の差分より、パラジウム抵抗値増加量を算出する。
- パラジウムの抵抗値増加量と温度(t)におけるパラジウムの抵抗値( $R_t$ )よりパラジウムの抵抗変化率を算出し、図7に示す水素分圧と抵抗変化率の試験データのグラフから、パラジウムの抵抗変化率に対応する水素分圧を求める。
- 水素濃度(体積濃度)は水素分圧を全圧で除す必要があることから、検出器設置場所(ドライウェル又はサブプレッションチェンバ)の圧力値を用い、水素濃度を算出する。

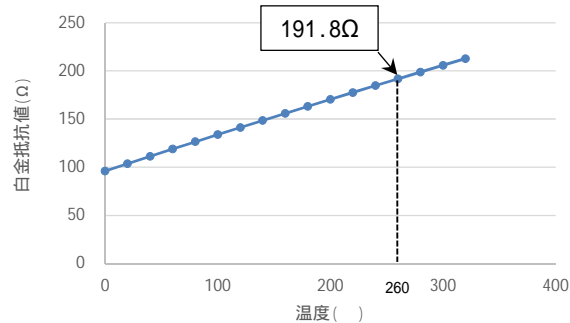


図5 白金抵抗特性グラフ (水素濃度: 0vol%時)

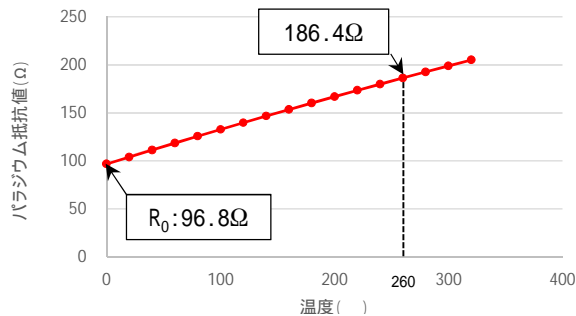


図6 パラジウム抵抗特性グラフ (水素濃度: 0vol%時)

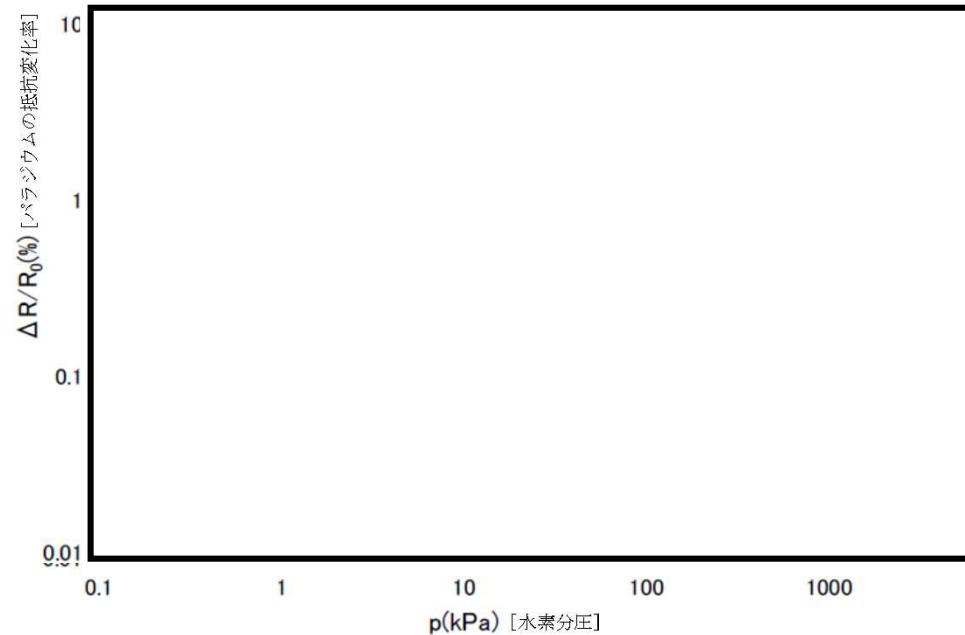
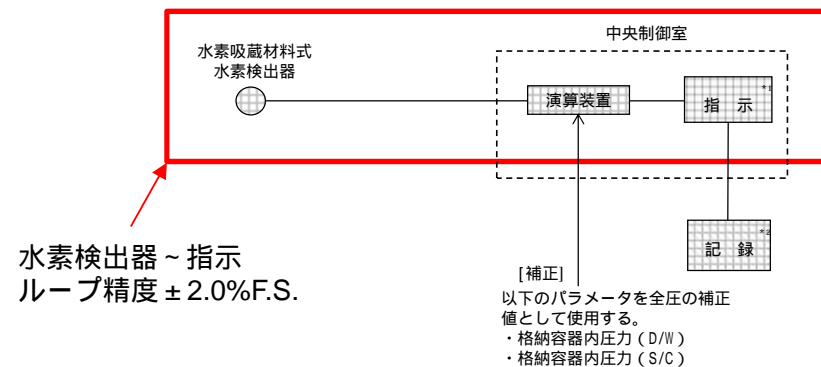


図7 水素分圧と抵抗変化率の相関



## 2. 計器精度

- 格納容器内水素濃度 (SA) のループ精度は, 図8に示す通り, 水素検出器 ~ 指示までが  $\pm 2.0\% \text{F.S.}$  として管理している。
- 上記の精度には, 格納容器内圧力 (D/W) 又は格納容器内圧力 (S/C) の誤差は含まれておらず, 水素濃度を測定した誤差は, 水素分圧 (水素濃度) と全圧 (格納容器内圧力 (D/W) 又は格納容器内圧力 (S/C)) の値により異なり, 原子炉格納容器の圧力は高い方が誤差は小さくなり, 水素分圧は低い方が誤差は小さくなる。
- 水素検出器 ~ 指示までの誤差を  $\pm 2.0\% \text{F.S.}$  として, 圧力計の誤差も考慮した場合のループ精度を計算した。なお, 上記の通り, 水素分圧と全圧によってループ精度は変化する。ここでは代表として, 有効性評価シナリオ「雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損)」における水素濃度の最大値 (約38vol%) を考慮し, 水素濃度40vol%におけるループ精度を表1に示す。
- 表1に示す通り, 重大事故等時の原子炉格納容器圧力においては, 水素濃度計の誤差より圧力計の誤差の影響が大きくなるため, 全体の誤差は  $\pm 2.0\% \text{F.S.}$  より小さくなる。
- なお, 格納容器内水素濃度 (SA) は制御や判断に使用するパラメータではなく, 原子炉格納容器内の水素濃度の推移, 傾向 (トレンド) を監視することが目的であり, 全圧に応じてループ誤差が変化することを理解した上で監視する。



水素検出器 ~ 指示  
ループ精度  $\pm 2.0\% \text{F.S.}$

注記\*1 : 記録計  
\*2 : 緊急時対策支援システム伝送装置

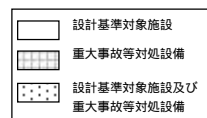


表1 水素濃度40vol%におけるループ精度

全圧[kPa(abs)]	誤差 [ vol% ]
101 (大気圧)	[ ]
約125	
721 (2Pd)	

## 2. 計器精度

### 【水素濃度試験】

- 水素検出器～指示で水素濃度を精度内で測定できることを確認するため、水素濃度試験を実施している。
- 本試験では重大事故等時の環境条件を想定し、200 - 620kPa ( gage ) ( 原子炉格納容器の限界温度及び限界圧力 ) の環境条件にて水素濃度を0.0～100.0vol%までの7点に変化させ、検出器のループ精度を確認した。
- 本試験では全圧の補正値を一定としているため全圧の誤差は考慮せず、水素検出器～指示のループ精度に着目し、±2.0%F.S.とし評価している。

### 【試験結果】

- 表2に示す通り、水素濃度を0.0～100.0vol%に変化させた時に検出器の指示値が判定基準内であることから、重大事故等時の環境条件を想定しても精度内で水素ガスを測定することができることを確認している。

表2 水素濃度試験の試験結果

水素濃度 <sup>2</sup> [vol%]	基準ガス濃度 <sup>1</sup> [vol%]	判定基準 [vol%]	指示値 [vol%]	誤差 [vol%]	判定
0.0	0.0	0.0～2.0			良
4.0	3.95	2.0～5.9			
20.0	20.1	18.1～22.1			
40.0	40.0	38.0～42.0			
60.0	60.2	58.2～62.2			
80.0	80.2	78.2～82.2			
100.0	100.0	98.0～100.0			

1：水素ガスボンベの検査成績書の値

2：一般的な工業計器の精度（直線性確認）は3点もしくは5点校正を標準としており、本水素濃度計は5点校正を基本として20vol%毎に水素濃度測定をすることとし、さらに水素濃度計の使用目的を考慮し、可燃限界として重要な4vol%を測定点に追加した。

## 1. 応答性確認試験

### 【応答性確認試験】

- 水素検出器の応答性を確認するため、応答性確認試験を実施している。
- 本試験では水素濃度を0.0vol%、4.0vol%にステップ状に5回変化させ、応答時間と出力値の誤差を確認した。

### 【試験結果】

- 表3及び図9に示す通り、応答性確認試験の結果、応答時間及び出力値の誤差が判定基準内であることを確認している。

#### < 応答性 >

判定基準の40秒以下に対し、水素ガス導入時及び排出時に  秒以下で応答しており、応答性が良好であることを確認している。

#### < 出力値の誤差 >

出力値の誤差が水素濃度 $\pm 2.0\text{vol}\%$ 以内に対し、 vol%以下の誤差であり、良好であることを確認している。

- なお、格納容器内水素濃度（SA）は制御や判断に使用するパラメータではないことから、当該機器の時定数の大小により、他の制御や判断への影響はない。

表3 応答性確認試験の試験結果

確認項目	判定基準	試験結果
応答時間	40秒以下	<input type="text"/> 秒以下
出力値の誤差	水素濃度 $\pm 2.0\text{vol}\%$ 以内	<input type="text"/> vol%以下

指摘事項 への回答 時定数について  
指摘事項 への回答 追従性について

1. 応答性確認試験

【試験結果】

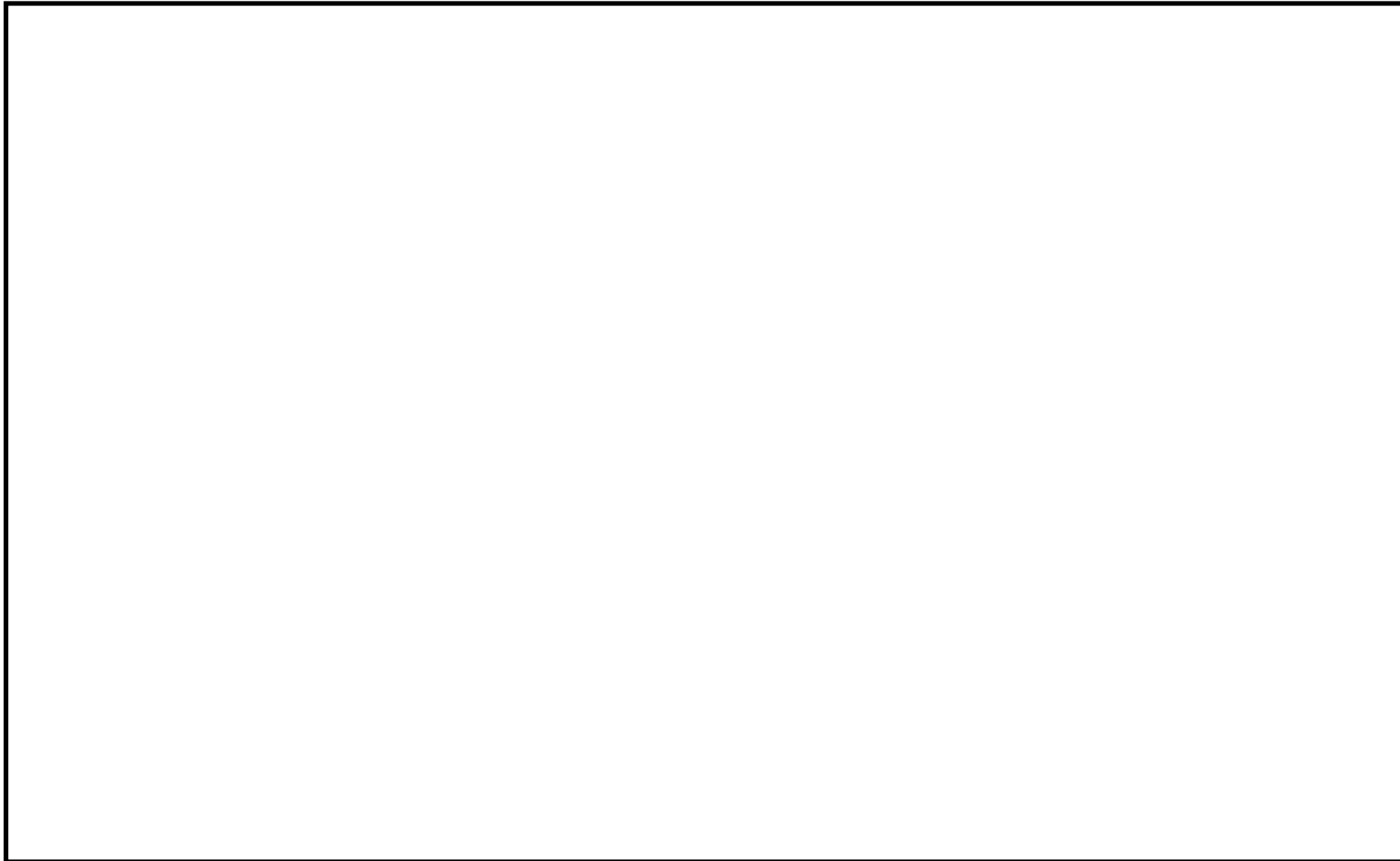


図9 応答性確認試験結果

## 1. ヒータ温度制御試験

- 検出素子部の温度を判定基準内に制御できることを確認するため、常温及び200 の環境条件下において、ヒータ温度制御試験を実施している。
- 表4に示す通り、周囲温度に依存することなく検出素子部（白金線温度）を判定基準の範囲内で制御できることを確認している。

表4. ヒータ温度制御試験の結果

雰囲気温度	判定基準	評価結果
常温(約25 ) <input type="text"/>	<input type="text"/> ± <input type="text"/>	良 最小値： <input type="text"/> 最大値： <input type="text"/>
200 <input type="text"/>		良 最小値： <input type="text"/> 最大値： <input type="text"/>

## 2. 格納容器内水素濃度（SA）の検出素子部への温度影響について

- 格納容器内水素濃度（SA）の検出素子部へ温度影響を与える可能性のある事象を抽出し、評価を行った。
- 評価の結果、検出素子部の温度に対して大きな温度変化を起こす影響は小さいと考えられる。

### 【事象と評価】

#### a. 雰囲気温度の影響

- 検出素子部はヒータ、保温材に囲われており約300 に加温されている。検出素子部は検出器容器に収納されていることから検出素子部は雰囲気温度の影響を受けにくい構造となっている。

#### b. 水位上昇による水没

- 検出器の設置高さは、原子炉格納容器の水没水位より上部としており検出器は水没しない。

#### c. 検出器の被水

- 格納容器スプレイによる被水及び格納容器スプレイの際に検出器上部にあるケーブルトレイ等の構造物からの跳ね返りによる被水を防止するため、ドライウェル及びサブプレッションチェンバに設置している検出器上部に被水防止カバーを設置する。
- 被水防止カバーは検出器容器を覆える大きさとする事で検出器容器への被水を防止する。
- なお、検出器について蒸気環境を含む環境試験を実施しており、健全性を維持していることを確認している。

# 指摘事項 への回答 格納容器内水素濃度 ( SA ) の使用環境での健全性 **TEPCO**

## 1. 格納容器内水素濃度 ( SA ) の健全性

- 格納容器内水素濃度 ( SA ) は、全ての有効性評価で想定される環境条件を満足する試験条件で耐環境試験を行い、表5、表6に示す通り、健全性を維持できることを確認している。

表5 格納容器内水素濃度 ( SA ) の耐環境試験の評価結果

項目	環境条件 ( 包絡条件 )	試験条件	評価結果
温度	200 ( 168時間 )	220 以上 ( 5分以上 ) / 200 以上 ( 168時間以上 )	想定される環境温度での機能維持を確認しており、健全性を維持できる。
湿度	蒸気 ( 168時間 )	蒸気 ( 168時間以上 )	想定される環境湿度での機能維持を確認しており、健全性を維持できる。
圧力	620kPa(gage) ( 168時間 )	620kPa(gage)以上 ( 168時間以上 )	想定される環境圧力での機能維持を確認しており、健全性を維持できる。
放射線	800kGy / 168時間		当該設備は全て無機物で構成されるため、放射線劣化を考慮する必要がなく、健全性を維持できる。

表6 格納容器内水素濃度 ( SA ) の耐環境試験の評価結果 ( 詳細 )

試験項目	判定基準	試験前	試験後	評価結果
絶縁抵抗	[検出素子部 - 筐体間] ・20M 以上であること [ヒータ - 筐体間] ・5M 以上であること [白金線 - パラジウム線間] ( 参考 ) ・20M 以上であること	[検出素子部 - 筐体間] ・20M 以上 [ヒータ - 筐体間] ・5M 以上 [白金線 - パラジウム線間] ( 参考 ) ・20M 以上	[検出素子部 - 筐体間] ・20M 以上 [ヒータ - 筐体間] ・5M 以上 [白金線 - パラジウム線間] ( 参考 ) ・20M 以上	絶縁抵抗は判定基準を満足しており、健全性を維持できる。
パラジウム抵抗値	短絡，断線がないこと	異常なし ( 参考値：198 )	異常なし ( 参考値：201 )	試験前後で抵抗値のオーダーは変化しておらず、白金線 - パラジウム線間の絶縁抵抗も判定基準を満足していることから、短絡，断線がないことを確認しており、健全性を維持できる。
白金抵抗値	短絡，断線がないこと	異常なし ( 参考値：203 )	異常なし ( 参考値：204 )	
ヒータ機能	300 まで昇温できること	昇温可能	昇温可能	ヒータ機能は昇温可能であることを確認しており、健全性を維持できる。

1. 水素燃焼の影響

- 検出素子部に使用しているパラジウム及び白金は、水素と酸素を反応させる触媒作用があるため、水素に加え酸素が存在する環境では、検出素子部表面で水素燃焼を促進することから、酸素バリア材、水素透過膜として知られている [ ] を酸素バリア材として選定した。
- [ ] には図10に示す分子ふるい効果があり、水素の透過性を維持したまま酸素の透過を阻害することができることが確認されており、この特性を利用し水素燃焼を防止する。
- [ ] は化学蒸着によって、検出器のパラジウム線及び白金線の表面に被膜を施している。

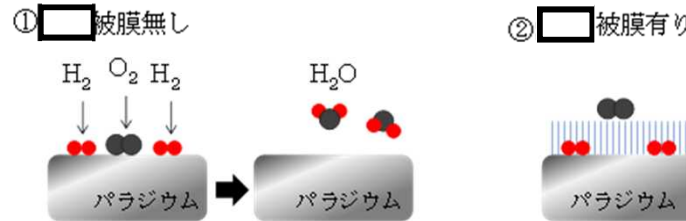


図10 分子ふるい効果のイメージ図

2. 酸素対策の有効性について

- [ ] の被膜が水素燃焼の対策として有効であることを確認するため [ ] 被膜を施した検出素子部に対し水素，酸素，窒素の混合ガスを導入し、水素濃度の計測精度を確認した。
- 試験条件は検出素子部を300 とし、水素濃度3.5vol%，10.0vol%の時に酸素濃度5.0vol%のガスを導入し、計測精度を評価した。
- 試験の結果を表7に示す。表7に示す通り、酸素導入時にも水素濃度を精度内で測定できることを確認できたことから、[ ] 被膜の有効性を確認できた。

表7 酸素特性試験の試験結果（酸素対策後）

試験条件	水素濃度[vol%]	判定基準[vol%]	測定値[vol%]	誤差[vol%]	評価結果
1	3.5	1.5 ~ 5.5	最大値： [ ] 最小値： [ ]	最大値： [ ] 最小値： [ ]	良
2	10.0	8.0 ~ 12.0	最大値： [ ] 最小値： [ ]	最大値： [ ] 最小値： [ ]	良



## 1. 被毒物質の影響評価について

- 共同研究報告書「過酷事故用計装システムに関する研究（フェーズ1）」において被毒物質としてヨウ化セシウム，ヨウ素，ヨウ化メチル，一酸化炭素が抽出されている。
- パラジウムの影響評価を行うため抽出した物質による浸漬又は暴露による評価を行い，水素濃度測定及び応答性を確認した結果，検出性能に与える影響が最も大きいものはヨウ素であることが分かったので，ヨウ素について対策を実施することとした。

## 2. ヨウ素対策について

- パラジウムがヨウ素環境下にあるとヨウ素と反応してヨウ化パラジウムに変化し，水素の吸蔵性能が低下し，格納容器内水素濃度（SA）の水素計測に影響を与えることを確認したことから，対策として検出器容器の開口部にヨウ素を補集するヨウ素フィルタを設置した。
- ヨウ素フィルタを設置することによる悪影響については，ダストによるヨウ素フィルタの目詰まりが想定されるが，水素などの気体を完全に遮断するものではないと考えられる。なお，ダストは格納容器スプレイによって捕捉されるため，格納容器内水素濃度（SA）はダストの影響は受けないが，仮にダストが大量に発生し，検出器上部の開口部に堆積した場合でも，開口部は上下にあることから計測に悪影響を与えるものではない。

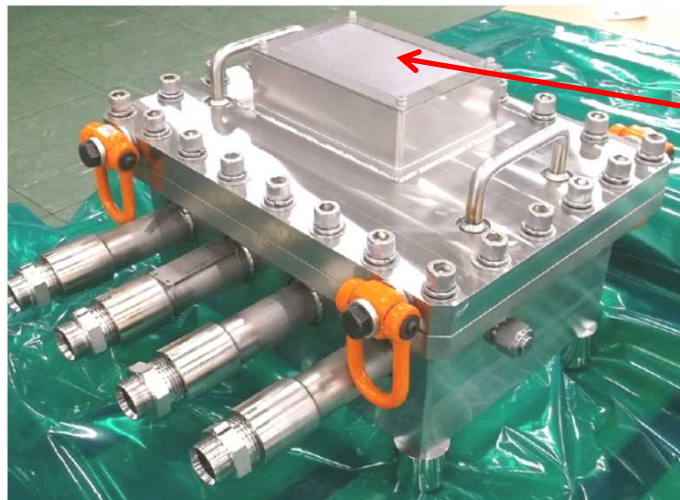


図11 ヨウ素フィルタ付き検出器写真

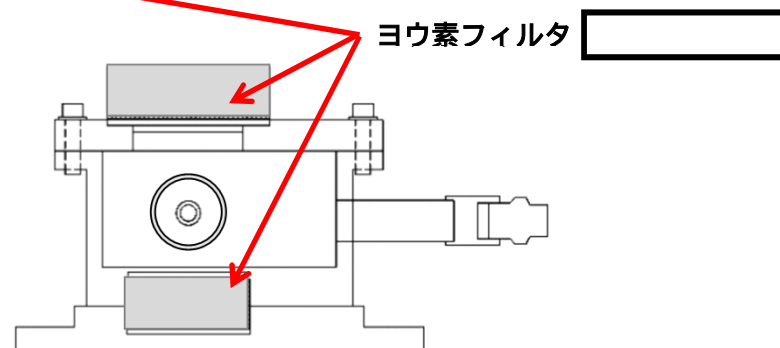


図12 検出器側面図



3. ヨウ素試験について

- ヨウ素フィルタの有効性を評価するためヨウ素試験を実施している。
- 表8に示す試験条件にて，ヨウ素を流した状態で水素ガスの導入と停止を繰り返し，計測精度を評価した。
- 試験の結果，表9に示す通り，ヨウ素環境下においても精度内で測定可能であることを確認した。

表8 ヨウ素試験の試験条件

試験環境	200 ，大気圧，水蒸気
検出素子部の温度	□ ± □
ヨウ素積算流入量[mg/m <sup>3</sup> ・時間]	□
連続時間[時間]	72
水素濃度[vol%]	0.0，4.0

72時間で重大事故等時に想定されるヨウ素の7日間の積算流入量を包絡する流入量とした。

表9 ヨウ素試験結果

水素濃度[vol%]	判定基準[vol%]	測定値[vol%]	誤差[vol%]	評価結果
4.0	2.0 ~ 6.0	最大値：□ 最小値：□	最大値：□ 最小値：□	良

# [参考]格納容器内水素濃度 (SA) の試験一覧



試験名称	試験目的	試験条件	試験結果	ページ番号
1 水素分圧と抵抗変化率の 相関	水素分圧に対する抵抗変化率の傾きが直線性を有する温度範囲を確認する。	温度：110 ~ 700 圧力：大気圧 水素濃度：0.0vol% ~ 100.0vol%	210 以上であれば101kPaまでの直線性を有することを確認している。	指摘事項 , P.6
2 水素濃度試験	水素検出器に水素ガスを供給し、水素濃度を判定基準内、で測定できることを確認する。	圧力容器温度：200 圧力容器内圧力：721kPa[abs] 検出素子部の温度：□ ± □ 水素濃度：0.0vol% ~ 100.0vol%	水素濃度を0.0vol% ~ 100.0vol%に変化させた時に検出器の指示値が判定基準内であることを確認している。	指摘事項 P.8
3 応答性確認試験	水素検出器に水素ガスを供給し、応答時間と出力値の誤差が判定基準内であることを確認する。	チェンバ内環境：320 , 大気圧, 水蒸気 水素濃度：0.0vol% , 4.0vol%	応答時間及び出力値の誤差が判定基準内であることを確認している。	指摘事項 , P.9 10
4 ヒータ温度制御試験	検出素子部の温度をヒータにて判定基準内に制御できることを確認する。	雰囲気温度：常温及び200	雰囲気温度に依存することなく検出素子部を判定基準内に制御できることを確認している。	指摘事項 P.11
5 耐環境試験	重大事項等時の使用環境で健全性を維持できることを確認する。	温度：220 以上 (5分以上) / 200 以上 (168時間以上) 湿度：蒸気 (168時間以上) 圧力：620kPa(gage)以上 (168時間以上)	絶縁抵抗, バラジウム抵抗値, 白金抵抗値, ヒータ機能に異常が認められないことから, 健全性を維持できることを確認している。	指摘事項 P.12
6 酸素特性試験 (酸素対策後)	酸素バリア材が水素燃焼の対策に有効であることを確認する	検出素子部温度：300 サンプルホルダ内圧力：大気圧 水素濃度：3.5vol% (条件1) 10.0vol% (条件2) 酸素濃度：5.0vol%	酸素導入時にも水素濃度を判定基準内で測定できることを確認している。	指摘事項 P.13
7 ヨウ素試験	高湿度環境下におけるヨウ素供給時に, ヨウ素フィルタ及びセンサ素子の影響を確認する。	試験環境：200 , 大気圧, 水蒸気 検出素子部の温度：□ ± □ ヨウ素積算流入量：□ [mg/m <sup>3</sup> ・時間] 水素濃度：0.0vol% , 4.0vol%	ヨウ素環境下においても水素濃度を判定基準内に測定できることを確認している。	指摘事項 P.14 ~ 15

機械設計に関する論点整理 コメント回答  
【論点2】重大事故等時の格納容器評価  
における評価条件

## 【論点2】第830回審査会合での指摘（重大事故等時の格納容器評価における評価条件）

NO	コメント内容	ページ番号	備考
	ABWR水平ベント試験の範囲を超える高蒸気流束下においても，発生する凝縮振動（CO）荷重は設計基準事故時に設定した荷重に包絡されることを示すこと。	21～27	
	ABWRのベント管の吹き出し口が3本であることの影響について示すこと。	28	

: ABWR水平ベント試験の範囲を超える高蒸気流束下においても、発生する凝縮振動（CO）荷重は設計基準事故時に設定した荷重に包絡されることを示すこと。

**【コメント に関する議論】**

- ABWR水平ベント確認試験の範囲を超える高蒸気流束下での荷重について、実機と体系の異なる試験の結果を参照して、高蒸気流束では蒸気流束の増加に伴い荷重は横ばい又は低下することをお示した。  
例) SRVストレートパイプの試験において、高蒸気流束では流束の増加に伴い横ばい又は低下する（下図）。
- 以下の2つの理由により、水平ベント確認試験の蒸気流束の上限～FCI時に想定される蒸気流束の最大値（約595kg/s/m<sup>2</sup>）の全ての範囲において、荷重が増えないことの説明が必要とのコメントを受けたもの。
  - ✓ 水平ベントのトピカルレポートでは、蒸気流束の低い範囲に対する記載であると推測されるものの、蒸気流束の増加に伴い荷重は増加するとしていること
  - ✓ 蒸気流束の増加に伴い荷重が横ばい又は低下する傾向を示す蒸気流束の値は体系に依存すると考えられること



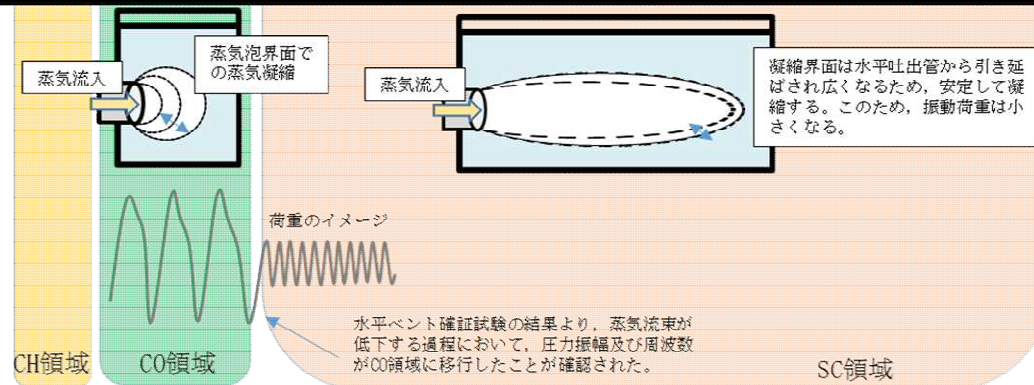
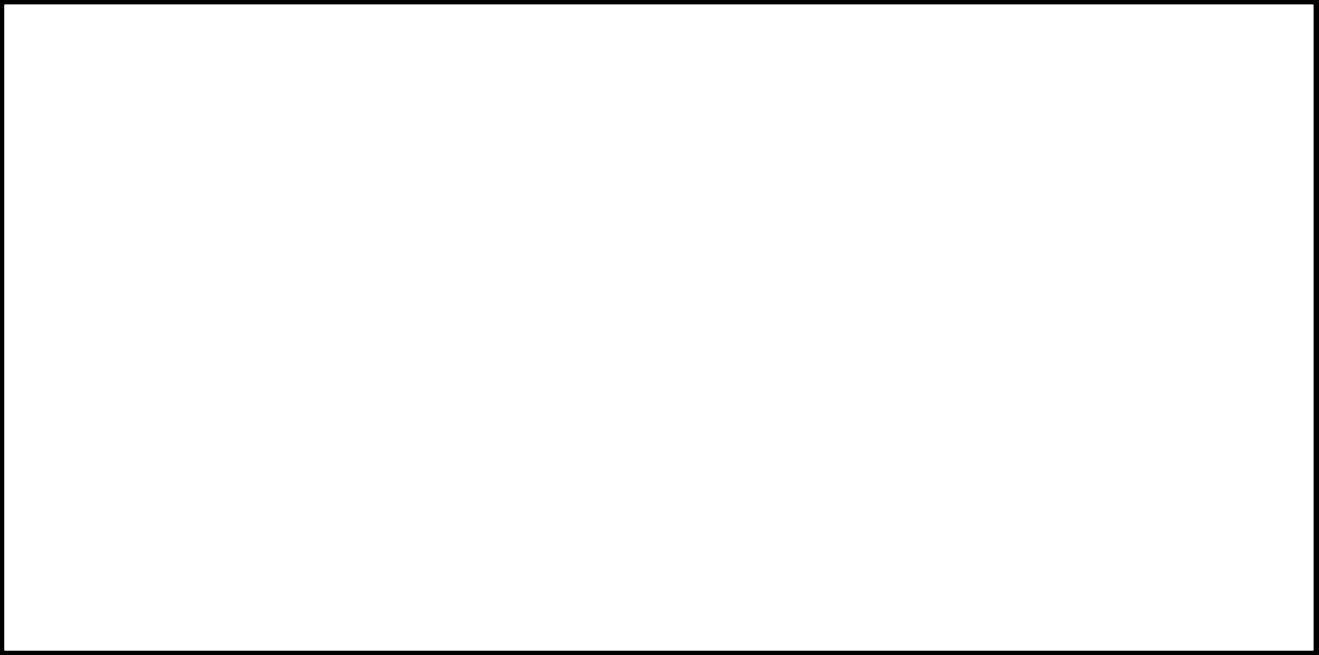
2/4審査会合資料

図3-2 プール水温毎の蒸気流束と圧力振幅の関係

: ABWR水平ベント試験の範囲を超える高蒸気流束下においても、発生する凝縮振動（CO）荷重は設計基準事故時に設定した荷重に包絡されることを示すこと。

【回答の流れ】

- 一般的な傾向として、凝縮モードが凝縮振動（CO）モードの時に蒸気流束が増加すると凝縮モードは凝縮振動（CO）から安定凝縮（SC）に遷移し、水力的動荷重は小さくなることを示す（1.～3.）。
- ABWR水平ベント試験を参照し、蒸気流束の試験条件の上限付近で凝縮振動の振幅（荷重）が弱まる傾向が確認されていることを示す（4.）。
- 以上により、蒸気流束が試験条件の上限より増加しても荷重は増大しないこと、従ってFCI時の荷重はDBA条件に包絡されることを説明する。
- 上記に加え、DBA荷重そのものも十分な保守性を有していることを述べる（5.）。



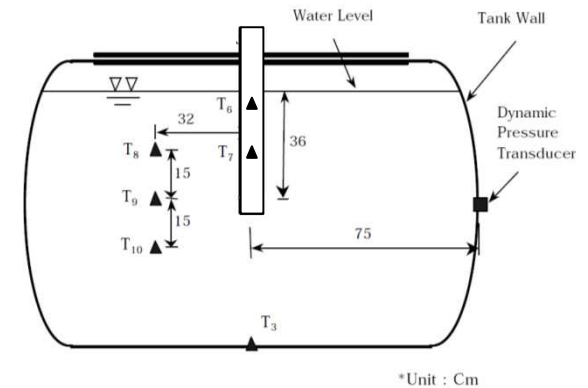
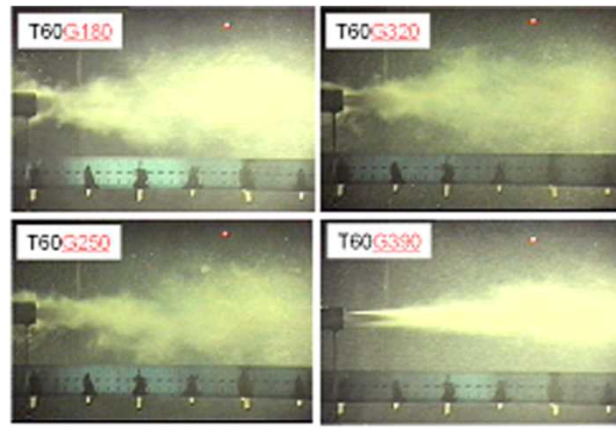
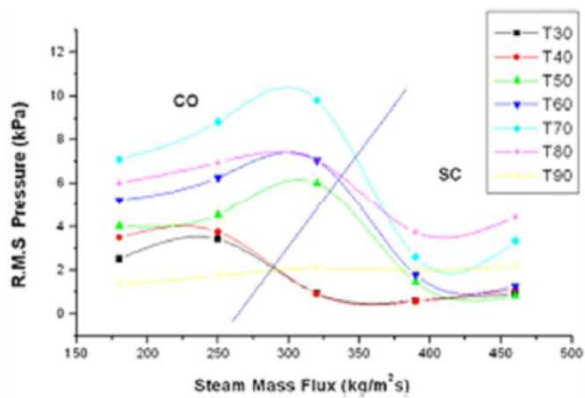
今回の回答内容の概念図を右に示す。

: ABWR水平ベント試験の範囲を超える高蒸気流束下においても、発生する凝縮振動（CO）荷重は設計基準事故時に設定した荷重に包絡されることを示すこと。

【回答】

1. 蒸気凝縮モードと水力的荷重の関係

プール水中での蒸気の凝縮モードは蒸気流束の増加に伴い、凝縮振動（CO; Condensation oscillation）から安定凝縮（SC; Stable condensation）に遷移し、安定凝縮（SC）モードでは発生する水力的荷重は凝縮振動（CO）モードに比べ小さくなる。



注) Tの後ろの数字はプール水温 ( ), Gの後ろの数字は蒸気流束 (kg/s/m<sup>2</sup>) を表す。

図 1 圧力振幅の蒸気流束依存性 (Songらの実験<sup>[1]</sup>)

[1] Song et al, "Steam Jet Condensation in a Pool: From Fundamental Understanding to Engineering Scale Analysis," Journal of Heat Transfer, 2012.

## 2. 凝縮振動の荷重について

ストレートパイプ型SRV試験結果（左図）<sup>[2]</sup>のうち，FCI時にS/Pサブクール度を取る範囲を抜き出し，蒸気流束と荷重値をプール水温毎にプロットすると，高蒸気流束において，蒸気流束の増大に伴い荷重が横ばいに推移又は低下する傾向が認められる（右図）。

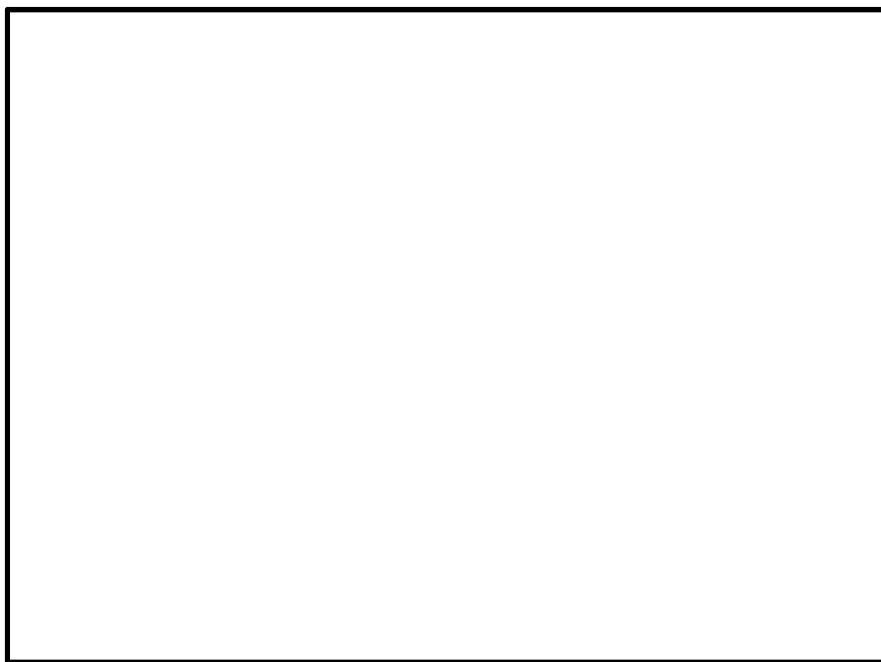


図2 ストレートパイプ型SRV作動時の圧力振動  
（横軸：プール水温，縦軸：圧力振幅）

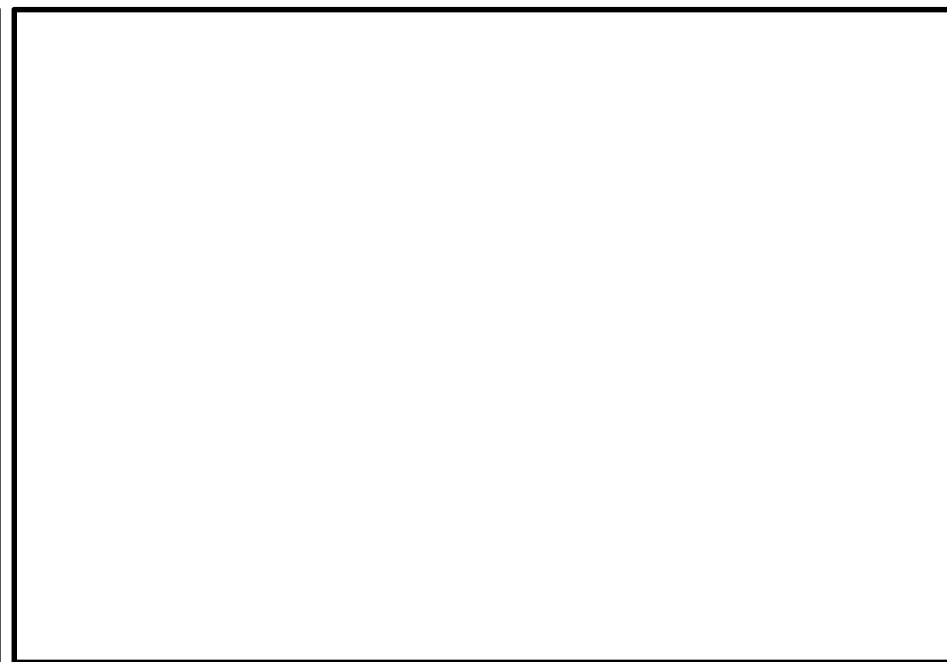


図3 プール水温毎の蒸気流束と圧力振幅の関係  
（横軸：蒸気流束，縦軸：圧力振幅）

[2] NEDO-21061, “MARK II CONTAINMENT DYNAMIC FORCING FUNCTIONS INFORMATION REPORT” (proprietary), General Electric Company and Sargent & Lundy Engineers, June 1978



### 3. 実機で想定される凝縮モードについて

小規模試験<sup>[3]</sup>で高蒸気流束における凝縮振動（CO）と安定凝縮（SC）の遷移点が確認されており（図4），以下の傾向がある。

- 蒸気流束が大きい領域では安定凝縮（SC）モードをとる。
- 管径の大きい体系ではSC領域が拡大する傾向。

従って，実機（ベント管径700mm）でも蒸気凝縮モードは安定凝縮モードとなり，高蒸気流束で荷重が大きくなることはないと考えられる。

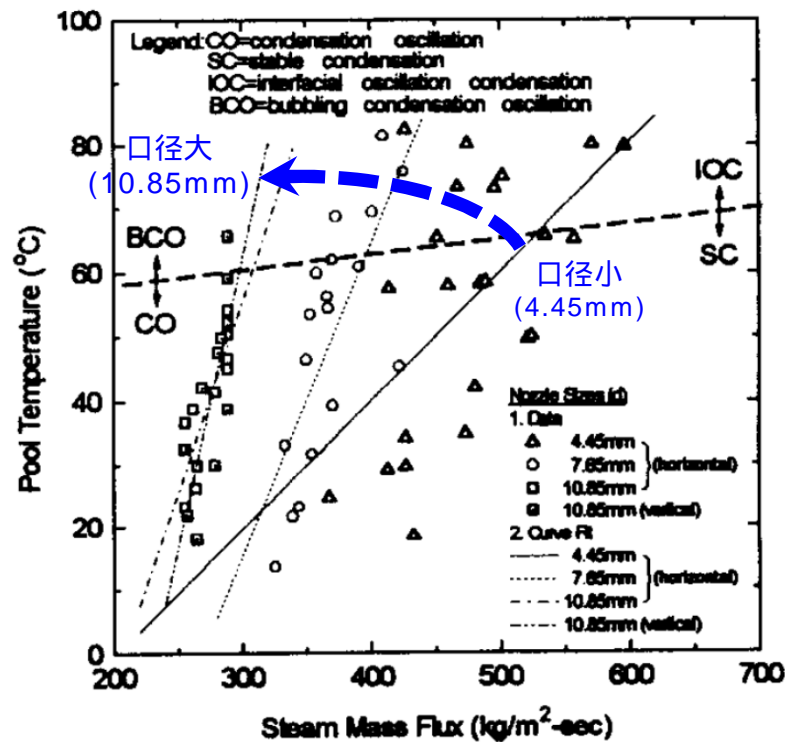


図4 CO/SC遷移領域

[3] Chun, M. H. et al., An Investigation of Direct Condensation of Steam Jet in Subcooled Water, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.23 (1996)

#### 4. ABWR水平ベント確認試験

- ABWR水平ベント確認試験<sup>[4]</sup>では試験開始後、ベント管蒸気流束は単調減少（図5）。
- プール床面圧力（荷重）は、ベント管蒸気流束が最も高い初期ではなく、若干低下した□秒後程度でCO振巾が増大を開始（図6）。蒸気流束の試験範囲上限近くでは、すでに蒸気流束の増加に伴い荷重が弱まる傾向が確認されており、蒸気流束がこれより大きい領域においても荷重は増大することはない。したがってFCI時の荷重も既往のDBA条件に包絡される。



図5 SST-4の蒸気流束の変化

プール底面圧力はCO荷重の設定に使われている圧力であり、ほとんどの試験ケースで圧力の最大値が観測されている圧力である。

[4] NEDC-31393, “CONTAINMENT HORIZONTAL VENT CONFIRMATORY TEST, PART I FINAL REPORT”, GENERAL ELECTRIC COMPANY, March, 1987 共同研究報告書



図6 SST-4の圧力変化

5. ABWRのDBA荷重の保守性

- ABWR水平ベント試験の実規模試験と1/2.5サブスケール試験の比較から蒸気流束が同程度であれば荷重の大きさは同程度となる。
- しかしながら，ABWRのDBA荷重の設定では，1/2.5サブスケール試験で得られたソース荷重の大きさに保守的に2.5倍を乗じている。
- 結果として，ABWRのCO荷重は，フルスケール試験に基づき設定されたMark 型格納容器の荷重値に比べ相対的に厳しい荷重値。  
4.までにFCI時の荷重がDBA荷重に包絡されることを示したが，これに加えDBA荷重そのものも十分な保守性を有している。

表1 DBAの水力学的荷重の比較

型式	試験及びスケール	設計評価荷重値
Mark 改	旧原研CRT（フルスケール）	
ABWR	水平ベント確認試験（サブスケール） （フルスケール）	

: ABWRのベント管の吹き出し口が3本であることの影響について示すこと。

**【回答】**

Mark-III型格納容器のための水平ベント管試験（Pressure Suppression Test Facility : PSTF）では図7のような3列（各列3段）のベント管を有する体系でプール内に隔壁を設けた時（1セル+2セル），2セルの荷重は1セル領域を概ね下回った<sup>[5]</sup>。

複数のベント管の振動が非同期性により打ち消しあうことが原因であり，実機においても発生する荷重は1本相当以下となる。

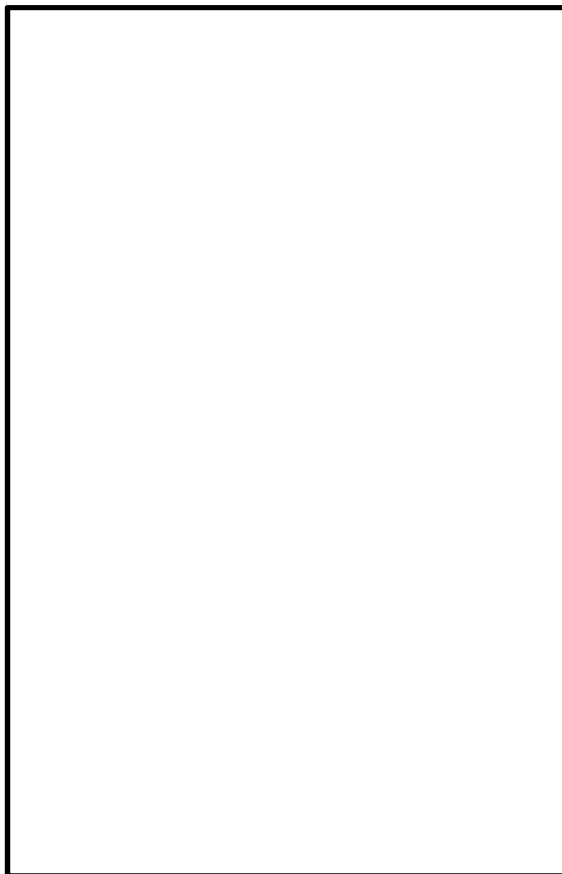


図7 PSTF試験体系



図8 単一ベント管と他ベント管の荷重の比較

[5] 1/9 Area Scale Multicell Condensation and Stratification, General Electric, 1980.

**補足. SST-4の初期の圧力振動について**

- SST-4では、試験開始 [ ] sの間で比較的大きな圧力振動が観察されている。
- このような試験初期の振動はプリパーシケースのみで観察されており、特有の振動と考える。
- MarkII体系の試験である旧原研のCRTにおいても、同様にプリパーシケースのみで試験初期の振動が観察されている。
- BWRの格納容器は窒素置換により不活性化されており、プリパーシケースのような状態にはならないことから実機で生じるものではない。

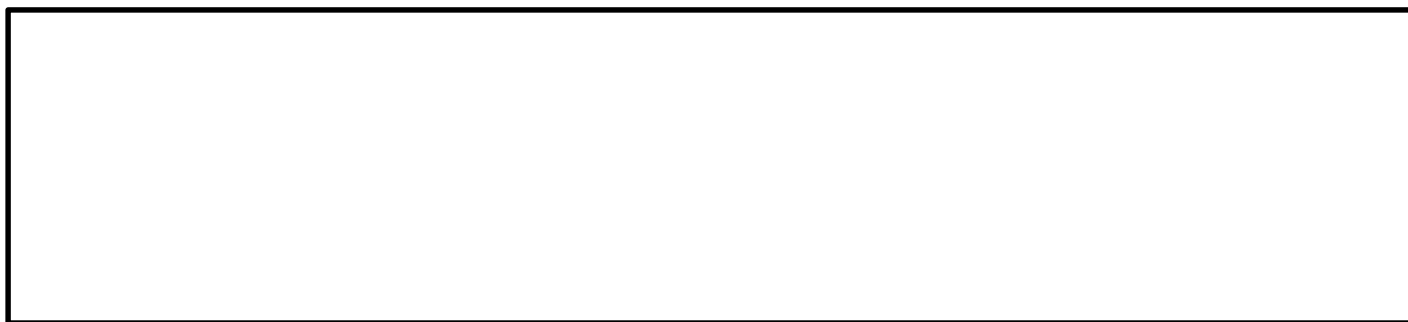


図6 SST-4の圧力変化（再掲）



補足図 SST-1の圧力変化

表 SSTの試験ケース

試験ケース	破断の種類	ベンチュリ径 (インチ)	プリパージ *	PCV圧力 (psig)	プール温度 (F°)	目的	
SST-1	液相	2.5	なし	0	120	CO荷重の設定	
SST-2					70	プール水温の影響確認	
SST-3			あり		20	120	背圧の影響確認
SST-4					33		
SST-5		1.75	20	120	スケール則の確認		
SST-6							
SST-7		気相	2.125	なし	0	130	気相破断
SST-8							
SST-9	液相	2.5	なし	0	120	下部D/Wなしの影響確認	
SST-10		1.75		0		中規模破断	
SST-11		2.125		0		70	プール水温の影響確認
SST-12	気相	2.125	あり	20	130	空気の影響確認	
SST-14							

\* : 試験開始前にPCV内を蒸気置換すること

# < 参考 > 第769回審査会合にて説明した主な説明事項



主な説明事項		
[ 1 ] 詳細設計段階における設置変更 許可審査時からの設計変更	1	中央制御室待避室の遮蔽設計の見直し
	2	5号機原子炉建屋内緊急時対策所の遮蔽設計の見直し
	3	5号機原子炉建屋内緊急時対策所可搬型電源設備の保管方法の変更
	4	復水移送ポンプ周りの手動弁の電動弁化及び屋内アクセスルートの見直し
[ 2 ] 設計方針に関する説明事項	1	使用済燃料貯蔵プール水位の監視
	2	重大事故等時の格納容器評価における評価条件
	3	火災感知器の配置
	4	地下水に対する浸水防護対策
	5	竜巻設計飛来物の感度解析
	6	ブローアウトパネル及びブローアウトパネル閉止装置
[ 3 ] 耐震・強度評価に関する説明事項	1	津波漂流物の衝撃荷重（海水貯留堰）
	2	地盤物性の設定
	3	基礎地盤傾斜による建物・構築物及び機器の耐震性への影響
	4	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点
	5	原子炉本体基礎の復元力特性
	6	建物・構築物の応力解析における弾塑性解析の採用
	7	格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答解析モデルのモデル化方針
	8	屋外重要土木建造物のモデル化方針
	9	耐震評価における等価繰返し回数
	10	加振試験に基づく使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の設定
	11	弁の動的機能維持評価（一定の余裕の確保）
	12	燃料集合体の耐震性
	13	制御棒・破損燃料貯蔵ラックにおける排除水体積質量減算の適用
	14	ECCSストレナーの耐震・強度評価への流動解析の適用