

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

【論点2】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
①	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。	6～8	
②	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。	6	
③	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。	9～10	
④	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。	9～10	
⑤	CVスプレー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。	11	
⑥	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。	12	
⑦	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。	13	
⑧	格納容器内水素濃度計についてCVスプレー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。	14～15	

1. 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%

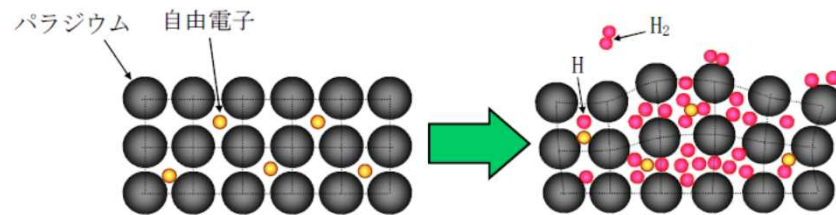


図1 格納容器内水素濃度 (SA) の測定原理

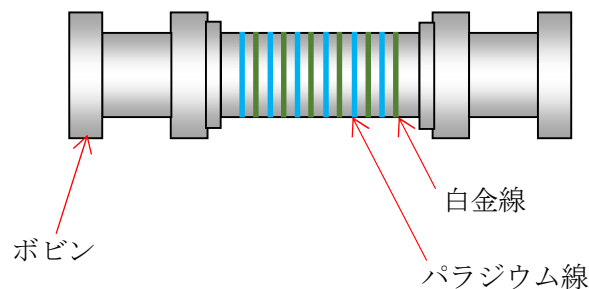


図2 検出素子部の概要図

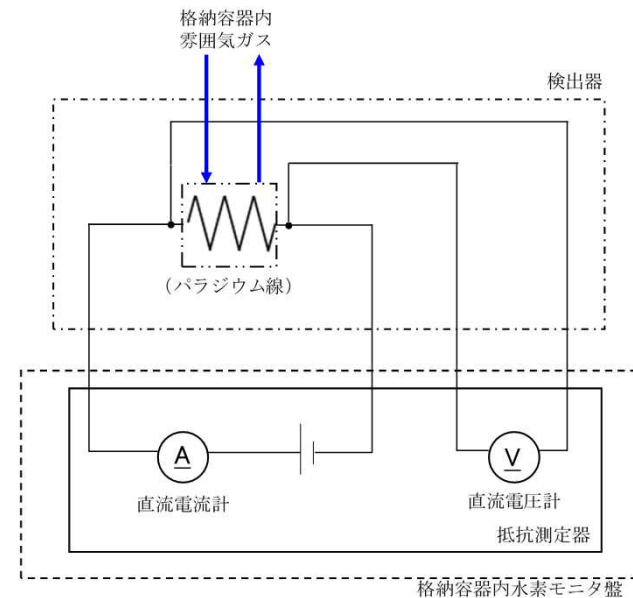


図3 水素濃度計検出回路の概要図

1. 格納容器内水素濃度（SA）の概要

【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る、パラジウム線を約300℃にするために設置する。

(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。

1. 格納容器内水素濃度 (SA) の概要

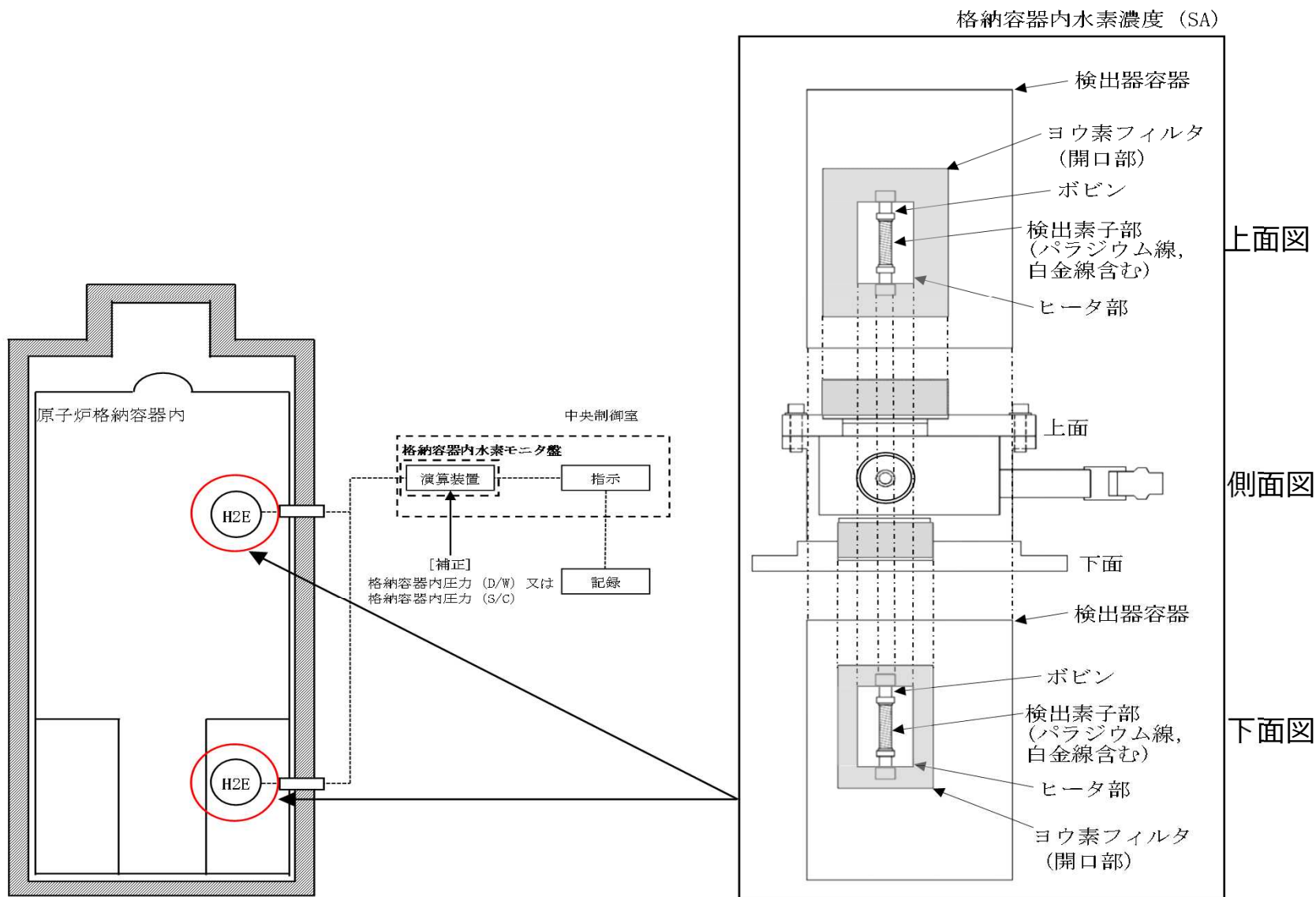


図4 格納容器内水素濃度 (SA) システム概要図および検出器概要図

2. 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($t^{\circ}\text{C}$)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レーションチェンバ)の圧力値を用い、水素濃度を算出する。

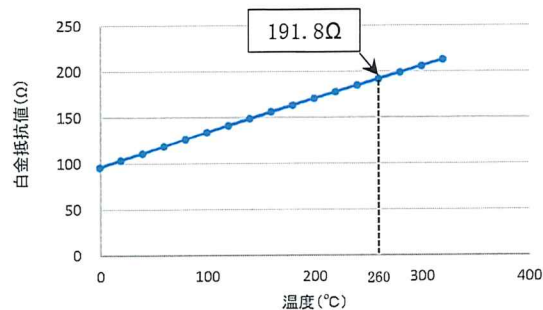


図5 白金抵抗特性グラフ(水素濃度: 0vol%時)

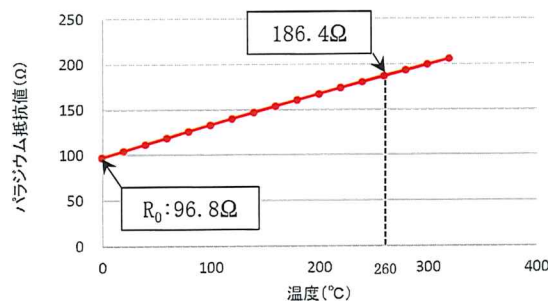


図6 パラジウム抵抗特性グラフ(水素濃度: 0vol%時)

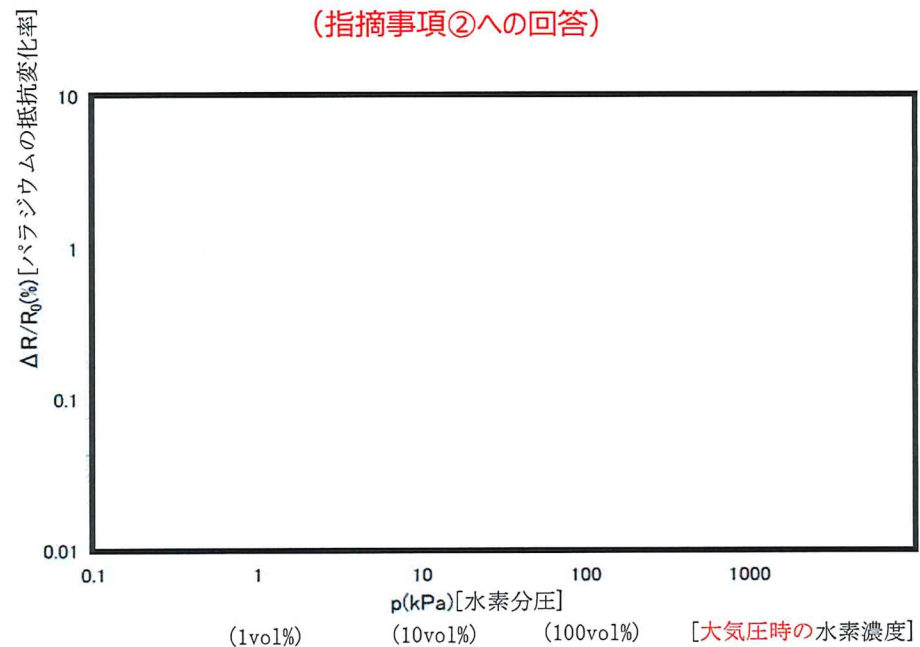


図7 水素分圧と抵抗変化率の相関

3. 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 $\pm 2.0\%F.S.$ 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 $\pm 2.0\%F.S.$ 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「水素濃度40vol%におけるループ精度」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 $\pm 2.0\%F.S.$ より小さくなる。
- なお、格納容器ベントの判断に用いるパラメータは原子炉格納容器内の酸素濃度であり、格納容器内水素濃度 (SA) は格納容器ベントの判断に使用しない。格納容器内水素濃度 (SA) は、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していくことができる。

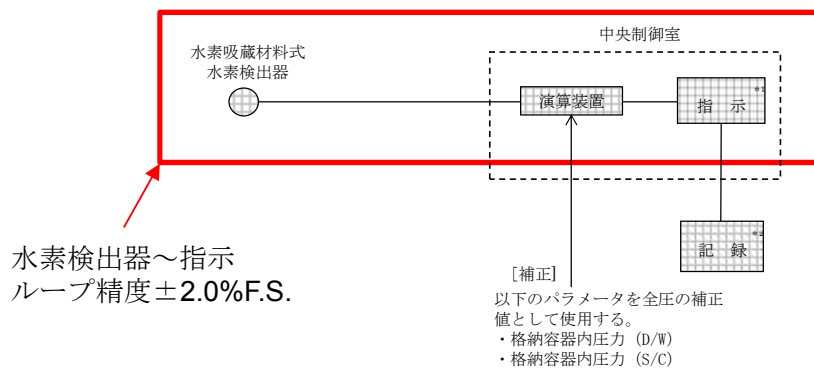
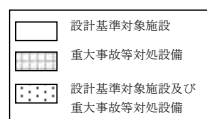


表1 水素濃度40vol%におけるループ精度

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

注記*1 : 記録計
*2 : 緊急時対策支援システム伝送装置



3. 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、検出器の計測精度を確認した。
- 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**、水素検出器の計装ループに着目し、計器精度は±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※2 [vol%]	基準ガス 濃度※1 [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±2.0vol%以下に対し、□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）は格納容器ベント等の判断に用いるパラメータではないことから、時定数については応答性により評価している。

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	□秒以下
出力値の誤差	水素濃度±2.0vol%以内	□vol%以下

指摘事項③への回答 時定数について
指摘事項④への回答 追従性について

1. 応答性確認試験

【試験結果】

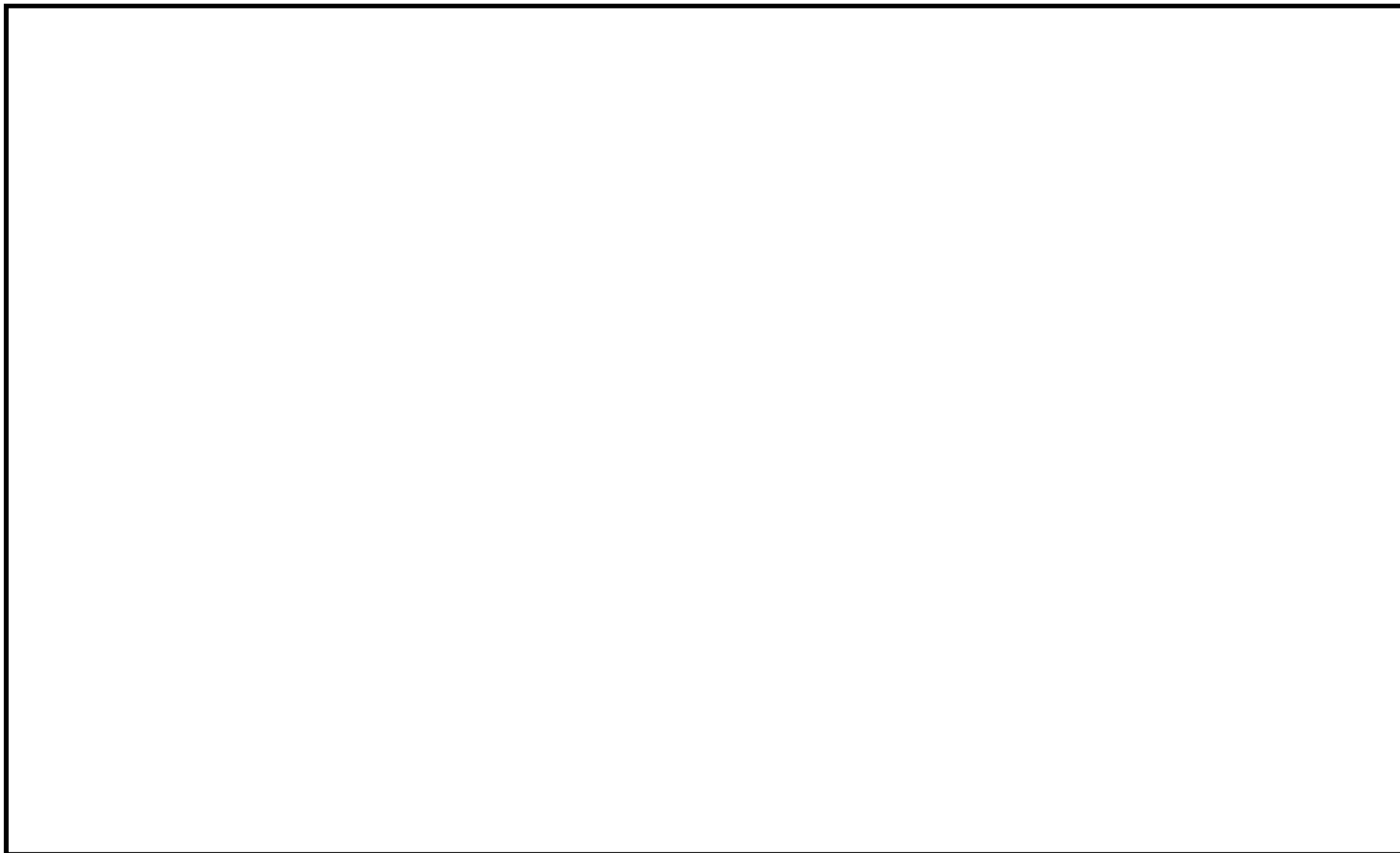


図9 応答性確認試験結果

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）を参考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	参考判定基準	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して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⑥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] ・20MΩ以上であること [ヒーター－筐体間] ・5MΩ以上であること [白金線－パラジウム線間](参考) ・20MΩ以上であること	[検出素子部－筐体間] ・20MΩ以上 [ヒーター－筐体間] ・5MΩ以上 [白金線－パラジウム線間](参考) ・20MΩ以上	[検出素子部－筐体間] ・20MΩ以上 [ヒーター－筐体間] ・5MΩ以上 [白金線－パラジウム線間](参考) ・20MΩ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：198Ω)	異常なし (参考値：201Ω)	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：203Ω)	異常なし (参考値：204Ω)	
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。

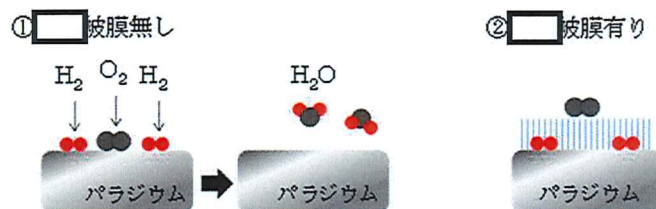


図10 分子ふるい効果のイメージ図

2. 酸素防止膜の有効性について

- [] 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%ガスを流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のため抽出した物質による浸漬又は暴露試験を行い、試験前後の抵抗値測定を行った結果、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、粒子状物質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、粒子状物質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）は粒子状物質の影響は受けないが、仮に粒子状物質が大量に発生し、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

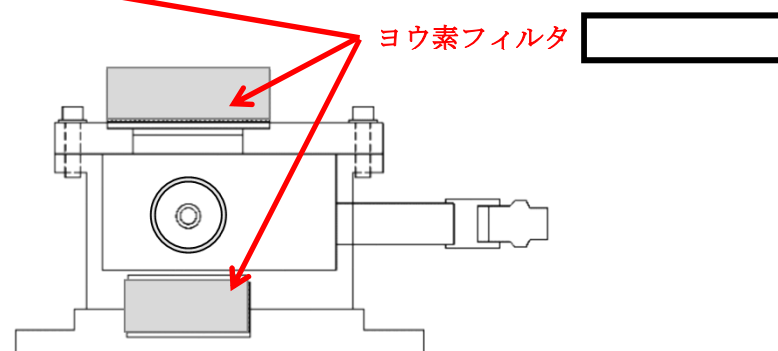


図12 検出器側面図

3. ヨウ素試験について

- ヨウ素フィルタの有効性を確認するためヨウ素フィルタ付き検出器に対しヨウ素試験を実施している。
- 表8に示す試験条件にて，ヨウ素を一定の流量で流した状態で水素ガスの導入と停止を繰り返し，検出器の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水素導入時にパラジウムの抵抗値が変化しており，指示値が精度内であることから，ヨウ素環境下でも水素検出が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 ³ ・時間]	□
連続時間[時間]	72
水素濃度[vol%]	0.0, 4.0

表9 ヨウ素試験結果

水素濃度[vol%]	判定基準[vol%]	測定値[vol%]	評価結果
4.0	2.0～6.0	□	良

[参考]格納容器内水素濃度 (SA) の試験一覧

No.	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①,② 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① 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③,④ 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⑤ 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⑥ 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⑦ P.13
7	ヨウ素試験	高温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 ³ ・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⑧ P.14～15