

本資料のうち、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。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-009 改16
提出年月日	2020年4月21日

工事計画に係る補足説明資料（計測制御系統施設）

2020年4月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

資料 No.	添付書類名称	補足説明資料（内容）	備考
1	計測装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書	1. 格納容器内酸素濃度及び水素濃度の監視	今回提出範囲
		2. 格納容器下部水位監視について	
		3. 原子炉圧力容器内の水位監視について	
		4. 可搬型計測器について	
		5. 安全保護装置の不正アクセス行為防止のための措置について	
		6. 主要パラメータの代替パラメータによる推定の誤差の影響について	
2	工学的安全施設等の起動（作動）信号の設定値の根拠に関する説明書	1. 原子炉圧力高設定値について	
		2. 代替自動減圧ロジック（代替自動減圧機能）の回路構成について	
		3. 計装誤差に含まれる余裕の考え方について	
		4. 原子炉圧力容器零レベルについて	
3	発電用原子炉の運転を管理するための制御装置に係る制御方法に関する説明書	1. 安全保護系及びその他の工学的安全施設等の応答時間	
4	中央制御室の機能に関する説明書		
5	通信連絡設備に関する説明書		

別紙 工認添付書類と設置許可まとめ資料との関係

工認添付書類と設置許可まとめ資料との関係  
(工事計画に係る補足説明資料 (計測制御系統施設))

工認添付資料	設置許可まとめ資料			引用内容
計測装置の構成に関する説明書並び	DB	第16条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	資料の一部を引用
に計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書	DB	第24条	安全保護回路	資料を概ね引用
	SA	第58条	計装設備	資料の一部を引用
工学的安全施設等の起動 (作動) 信号の設定値の根拠に関する説明書	SA	第44条	緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	資料の一部を引用
	SA	第46条	原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	資料の一部を引用
発電用原子炉の運転を管理するための制御装置に係る制御方法に関する説明書に係る補足説明資料	—	—	—	—

計測装置の構成に関する説明書並びに計測範囲  
及び警報動作範囲に関する説明書に係る補足説明資料

## 目 次

1. 格納容器内酸素濃度及び水素濃度の監視	1
1.1 格納容器水素・酸素濃度計測装置について	1
1.2 格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度の概要	2
1.3 格納容器内水素濃度 (SA) の概要	7
1.4 格納容器内水素濃度 (SA) の検出素子部の加温について	21
1.5 格納容器内水素濃度 (SA) の健全性について	25
1.6 水素燃焼の影響	28
1.7 被毒物質の影響	33
1.8 格納容器内水素濃度 (SA) の耐震性について	40
1.9 格納容器内水素濃度 (SA), 格納容器内水素濃度及び 格納容器内酸素濃度の電源供給について	40
2. 格納容器下部水位監視について	41
2.1 格納容器下部注水時の水位監視	41
2.2 格納容器下部水位計の計測機能	42
3. 原子炉圧力容器内の水位監視について	43
3.1 原子炉圧力容器内の水位監視について	43
3.2 原子炉水位 (広帯域), 原子炉水位 (燃料域) 及び原子炉水位 (SA) の概要	45
3.3 原子炉圧力容器への注水流量による原子炉圧力容器内の水位の推定手段	53
3.4 原子炉圧力, 原子炉圧力 (SA) 及び格納容器内圧力 (S/C) による水位の推定手段	55
4. 可搬型計測器について	56
4.1 可搬型計測器による監視パラメータの計測結果の換算概要	66
5. 安全保護装置の不正アクセス行為防止のための措置について	67
5.1 安全保護装置の概要	67
5.2 安全保護系の物理的な分離又は機能的な分離対策	69
5.3 想定脅威に対する対策について	72
5.4 耐ノイズ・サージ対策	72
5.5 ソフトウェアの検証と妥当性の確認	73
6. 主要パラメータの代替パラメータによる推定の誤差の影響について	74

## 1. 格納容器内酸素濃度及び水素濃度の監視

### 1.1 格納容器水素・酸素濃度計測装置について

格納容器水素・酸素濃度計測装置は、著しい炉心の損傷が発生した場合に、原子炉格納容器内に発生する水素及び酸素を監視する目的で、水素及び酸素濃度が変動する可能性のある範囲で測定できる設計とする。

原子炉格納容器内の酸素濃度は、解析上は事象発生から約168時間後まで酸素濃度が可燃限界である5vol%を超えることは無く、原子炉格納容器内での水素燃焼は生じない。しかしながら、徐々にではあるが、酸素濃度は上昇し続けることから、代替原子炉補機冷却系が使用可能となった時点で速やかに酸素濃度を測定できる設計としている（水素濃度については事故初期から継続して監視が可能）。

代替原子炉補機冷却系が復旧されない場合、炉心から発生する崩壊熱が原子炉格納容器内に蓄積され、それに伴い発生する蒸気の過圧によって格納容器内圧力は上昇し、原子炉格納容器の限界圧力（620kPa(gage)）に到達するまでに格納容器ベントを実施することとなる（有効性評価「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」では約38時間後に格納容器ベントを実施）。格納容器ベントを実施する約38時間までは、水の放射線分解によって発生する酸素ガスの濃度は緩やかに上昇することから、原子炉格納容器内の酸素濃度が可燃限界（5vol%）に到達するおそれはない。

このために、格納容器内水素・酸素濃度計測装置は、可燃限界に到達するまでに準備対応ができ、炉心損傷時の環境条件に対応できるものであることが求められ、中央制御室にて原子炉格納容器内水素濃度及び酸素濃度の傾向（トレンド）を監視できることが重要となる。柏崎刈羽原子力発電所7号機では、重大事故等時の原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度を格納容器内水素濃度（SA）、格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度によって監視することとしている。格納容器内水素濃度（SA）については代替電源設備からの給電により事故初期から原子炉格納容器内の水素濃度の監視が可能である。また、格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度においては代替原子炉補機冷却系が使用可能となった時点で使用可能となるが、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）」においては代替原子炉補機冷却系が使用可能となる時点では原子炉格納容器内の酸素濃度は5vol%に到達しない。

格納容器内水素濃度（SA）は、水素吸蔵材料である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た濃度計である。

格納容器内水素濃度は、水素の熱伝導率が空気、窒素、酸素等と大きく異なることを利用した、水素に着目した熱伝導方式の濃度計である。熱伝導方式は、事故時に酸素濃度等のガス成分に変動があっても熱伝導率が水素と大きく異なるため、水素濃度測定に対して大きな誤差にはならない。

格納容器内酸素濃度は、常磁性体である酸素分子が磁界内で、磁化された際に生じる吸引力を利用した熱磁気風式の濃度計である。酸素は強い磁化率を有しており、測定において水素や窒素のような弱い反磁性を有する他ガスの影響は受けない。

## 1.2 格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度の概要

### 1.2.1 測定原理

#### (1) 格納容器内水素濃度

原子炉格納容器内の水素濃度を測定するために用いる格納容器内水素濃度は、熱伝導式のものを用いる。熱伝導式の水素検出器は、図1-1「水素濃度計検出回路の概要図」に示すとおり、検知側サーミスタ素子（以下、検知素子）と補償側サーミスタ素子（以下、補償素子）、及び2つの固定抵抗でブリッジ回路が構成されている。検知素子の部分に、サンプリングされたガスが流れるようになっており、補償素子には基準となる標準空気が密閉されており測定対象ガスとは接触しない構造になっている。

水素濃度計指示部より電圧を印加して検知素子と補償素子の両方を約150℃に加熱した状態で、検知素子側に水素を含む測定ガスを流すと、測定ガスが熱を奪い、検知素子の温度が低下することにより抵抗が低下する。この検知素子の抵抗が低下するとブリッジ回路の平衡が失われ、図1-1のAB間に電位差が生じる。この電位差が水素濃度に比例する原理を用いて、水素濃度を測定する。

なお、格納容器内水素濃度の計測範囲0～20vol%/0～100vol%において、計器仕様は最大±0.4vol%/±2.0vol%の誤差を生じる可能性があるが、この誤差があることを理解した上で、原子炉格納容器内の水素濃度の推移、傾向（トレンド）を監視していくことができる。

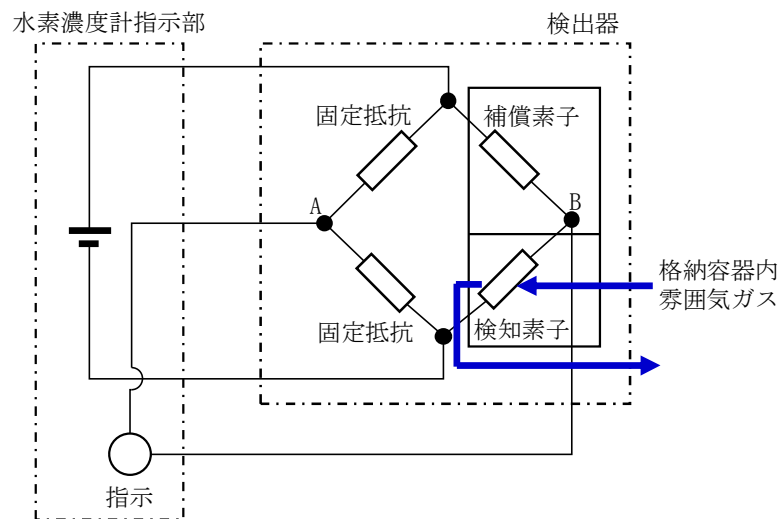


図1-1 水素濃度計検出回路の概要図

(2) 格納容器内酸素濃度

原子炉格納容器内の酸素濃度を測定するために用いる格納容器内酸素濃度は、熱磁気風式のものを用いる。熱磁気風式の酸素検出器は、図1-2「酸素濃度計検出回路の概要図」に示すとおり、発風側サーミスタ素子（以下、発風側素子）、受風側サーミスタ素子（以下、受風側素子）及び2つの固定抵抗でブリッジ回路が構成されており、発風側素子及び受風側素子は一定温度で保温されている。

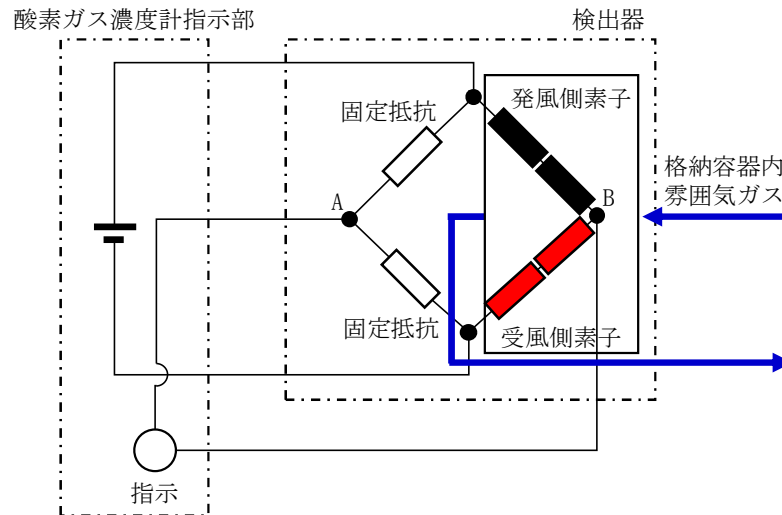


図1-2 酸素濃度計検出回路の概要図

酸素含有ガスの流れを図1-3「酸素含有ガスの流れ」に示す。酸素濃度計は2層構造のチャンバーで構成されており、サンプル入口より下部流入チャンバー内にサンプルガスが流入する。サンプルガスの大部分は下部流入チャンバーを通過しサンプル出口へ流出するが、少量のサンプルガスは上部測定チャンバー内に流入する。酸素は極めて強い常磁性体であることから、上部測定チャンバーに流入したサンプルガスは磁界中心部に引き寄せられ、加熱された発風側素子により温度が上昇する。磁化率は温度に反比例することから、後から流入してくる低温のサンプルガスにより、高温となったサンプルガスは磁界中心部から追い出されることとなる。発風側素子は低温のサンプルガスに熱を奪われることで冷やされることとなり、磁界外の受風側素子は発風側素子が奪われた熱を受け取り、暖められることとなる。



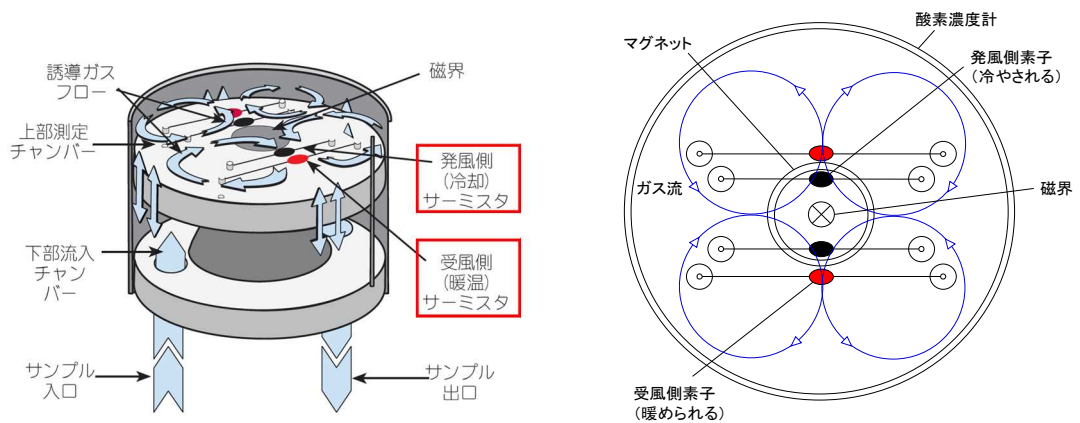


図 1-3 酸素含有ガスの流れ

チャンバー内に酸素を含む原子炉格納容器内雰囲気ガスを流すと、磁気風により発風側素子の温度が下がることで、発風側素子の抵抗は小さくなる。一方、受風側素子の温度が上がることで、受風側素子の抵抗は大きくなる。発風側素子と受風側素子の抵抗値が変化することで、ブリッジ回路の平衡が変化し、図 1-2 の AB 間に電位差（電流）が生じる。この電位差が酸素濃度に比例する原理を用いて、酸素濃度を測定する。

なお、格納容器内酸素濃度の計測範囲 0～10vol%/0～30vol%において、計器仕様は最大±0.2vol%/±0.6vol%の誤差を生じる可能性があるが、この誤差があることを理解した上で、原子炉格納容器内の酸素濃度の推移、傾向（トレンド）を監視していくことができる。

### 1.2.2 システム構成

格納容器内の水素及び酸素濃度の測定においては、格納容器内ガスサンプリング装置にて原子炉格納容器内の雰囲気ガスを原子炉建屋原子炉区域内へ導き、検出器で測定することで、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度を中央制御室より監視できる設計とする。格納容器内ガスサンプリング装置の構成を図1-4「格納容器内ガスサンプリング装置の構成」に示す。

#### (1) 配管ヒータ

配管ヒータはサンプルガスが配管途中での放熱による管内でのドレン発生を避けるため、加熱保温するために設置する。

#### (2) 格納容器内ガスサンプリング装置

格納容器内ガスサンプリング装置は水素濃度及び酸素濃度の測定を行うことを目的として設置している。格納容器内ガスサンプリング装置は、水素濃度検出器、酸素濃度検出器、冷却器、除湿器等で構成され、大きさは幅約4m、奥行き約0.6m、高さ約2.1mである。

各構成機器の概要について以下に示す。

##### a. 冷却器

冷却器はガス濃度を分析するための前処理としてサンプルガスを冷却するために設置する。

##### b. 除湿器

除湿器はガス濃度を分析するための前処理としてサンプルガスを除湿するために設置する。

##### c. ドレン計量部

ドレン計量部は冷却・除湿した際に発生するドレンを計測し湿分補正のパラメータとして用いるために設置する。

##### d. 減圧弁

減圧弁はサンプルガスを310kPa以下に減圧するために設置する。

##### e. 水素濃度検出器

水素濃度検出器はサンプルガス中の水素濃度を計測するために設置する。

##### f. 酸素濃度検出器

酸素濃度検出器はサンプルガス中の酸素濃度を計測するために設置する。

g. サンプルポンプ

サンプルポンプはサンプルガスを原子炉格納容器に戻す際に昇圧するために設置する。

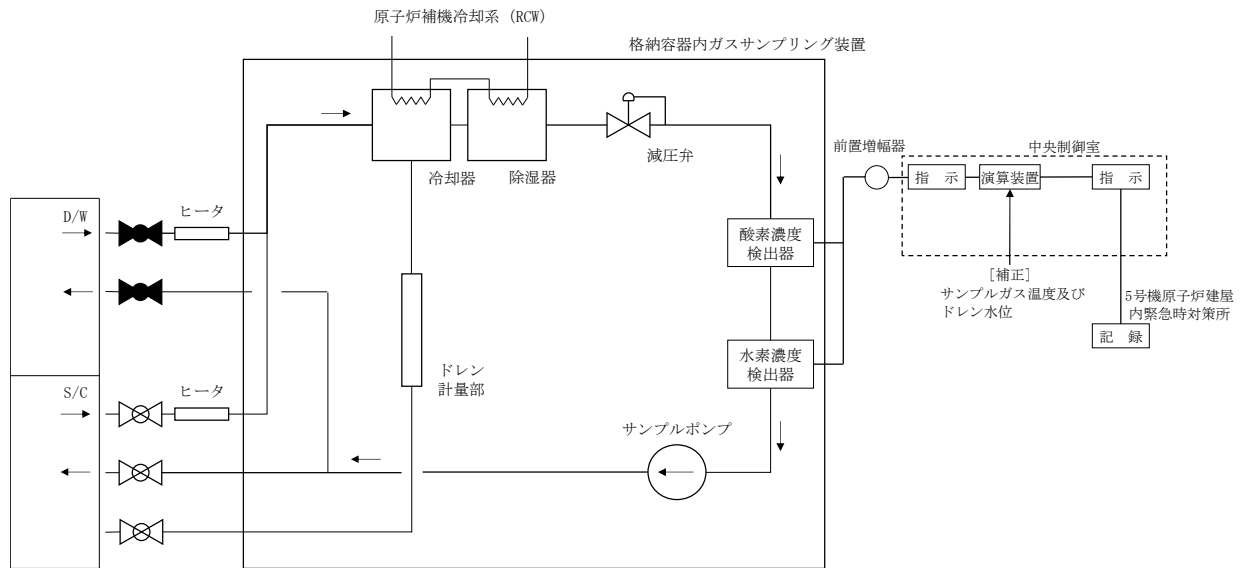


図 1-4 格納容器内ガスサンプリング装置の構成

### 1.3 格納容器内水素濃度 (SA) の概要

#### 1.3.1 測定原理

原子炉格納容器内の水素濃度を測定するために用いる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。

水素吸蔵材料式の測定原理は、図 1-5 「格納容器内水素濃度 (SA) の測定原理」のとおりである。パラジウムに水素分子が吸着すると水素分子は水素原子へと分離する。分離した水素原子はパラジウムの内部へと侵入し、パラジウムの格子の歪みと水素原子のポテンシャルの影響により、パラジウムの中で自由電子が散乱することにより、パラジウムの電気抵抗が増加する。

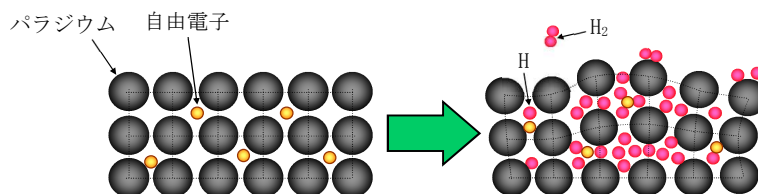


図 1-5 格納容器内水素濃度 (SA) の測定原理

水素吸蔵材料式の水素検出器の検出回路を図 1-6 「水素濃度計検出回路の概要図」に示す。水素検出器に内蔵しているパラジウムに水素を含む原子炉格納容器内ガスが接触すると、水素吸蔵によりパラジウムの電気抵抗が大きくなる。この時のパラジウムの電気抵抗の変化を直流電流計及び直流電圧計で構成される抵抗測定器にて測定し、水素濃度に換算する。

なお、格納容器内水素濃度 (SA) の計測範囲 0~100vol%において、計器仕様は最大±2.0vol%の誤差を生じる可能性があるが、この誤差があることを理解した上で、原子炉格納容器内の水素濃度の推移、傾向 (トレンド) を監視していくことができる。

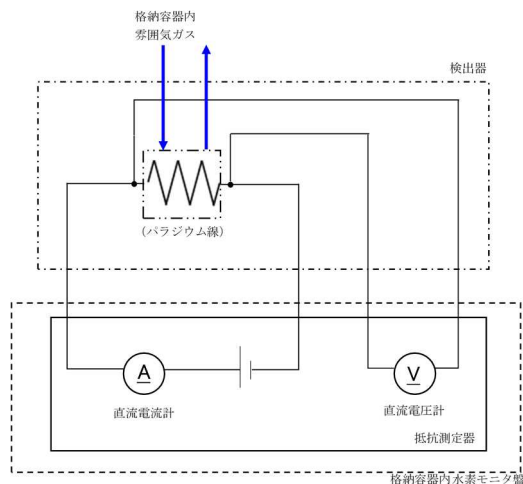


図 1-6 水素濃度計検出回路の概要図

ここで、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ります。水素検出器の検出素子部の概要図を図1-7「検出素子部の概要図」に示す。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。

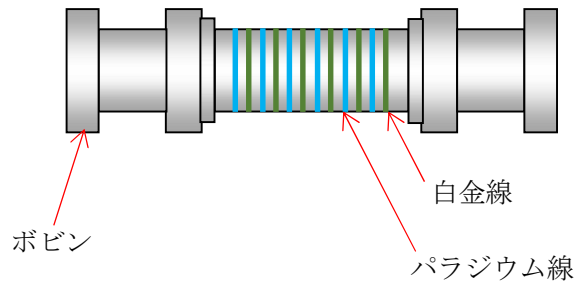


図1-7 検出素子部の概要図

水素検出器の信号は、中央制御室に設置される制御盤に収納されているパラジウム線及び白金線の抵抗値を測定する抵抗測定器に出力される。抵抗測定器の出力は演算装置に入力され、パラジウム線の抵抗変化量と白金線で計測された温度から水素分圧を計算し、さらにドライウエル及びサプレッションチェンバの圧力値を用いて圧力補正を行い、水素濃度を算出する。

以下に水素濃度演算手順を示す。

- a. 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1-8参照）
- b. 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1-9参照）
- c. 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。
- d. 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1-10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<sup>※1</sup>。
- e. 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<sup>※2</sup>、検出器設置場所（ドライウエル又はサ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。

※1 金属に吸収されるガス量は雰囲気ガス分圧の平方根に比例する（ジーベルツの法則）ことから、水素密度は水素分圧の平方根に比例する。さらに金属中の水素密度と電気抵抗の変化率も比例係数が実験で確認されていることから、パラジウム抵抗値増加量及び温度から水素分圧を求められる。（図1-10参照）なお、本実験では水素濃度を0～100vol%まで変化させた時の電気抵抗の変化率が直線性を有していることを確認している。

※2 混合気体の圧力（全圧）は各成分の分圧の和に等しい（ドルトンの分圧の法則）ことから、水素分圧を全圧で除算することにより水素濃度を算出できる。

[水素濃度計算例]

(白金の抵抗測定値：191.8Ω，パラジウムの抵抗測定値：187.7Ωを仮定した場合)

- a. 白金線の抵抗値 (191.8Ω) から検出素子部の温度 (260℃) を算出。(図1-8参照)
- b. 検出素子部の温度 (260℃) より、水素濃度0vol%におけるパラジウム抵抗値 (186.4Ω) を算出 (図1-9参照)
- c. 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 (187.7Ω) と水素濃度0vol%におけるパラジウム抵抗値 (186.4Ω) の差分より、パラジウム抵抗値増加量 (1.3Ω) を算出する。
- d. パラジウム抵抗値増加量 (1.3Ω) と0℃におけるパラジウムの抵抗値 (96.8Ω) からパラジウムの抵抗変化率 (  %) を算出し、図1-10のグラフから260℃、パラジウムの抵抗変化率が  %の時の水素分圧 (10kPa) をグラフから読み取る。(図1-10参照)
- e. 水素分圧 (10kPa) を全圧 (大気圧：101kPa) で除し水素濃度 (約 10vol%) を算出する。

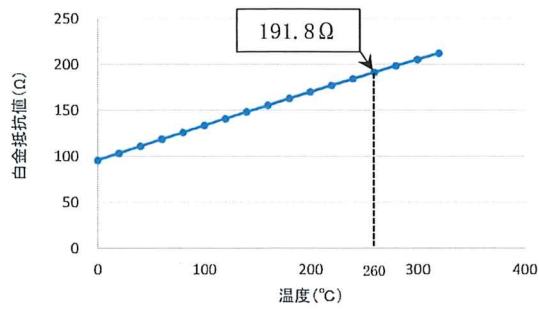


図 1-8 白金抵抗特性グラフ  
(水素濃度 : 0vol%時)

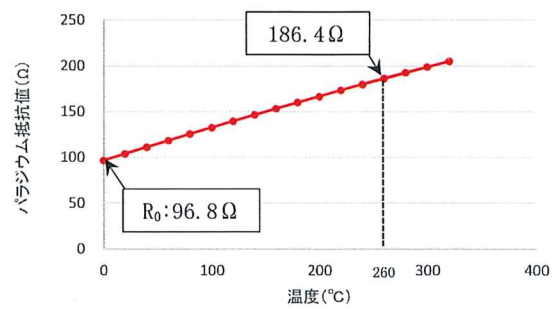


図 1-9 パラジウム抵抗特性グラフ  
(水素濃度 : 0vol%時)

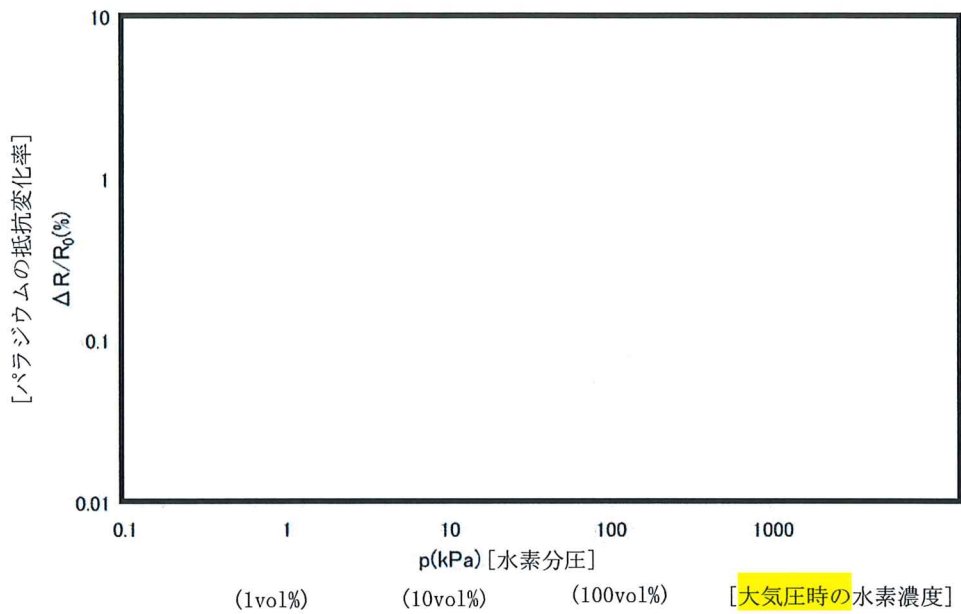


図 1-10 水素分圧と抵抗変化率の相関

### 1.3.2 計器精度

格納容器内水素濃度 (SA) の概略構成図を図 1-11 「格納容器内水素濃度 (SA) の概略構成図」に示す。

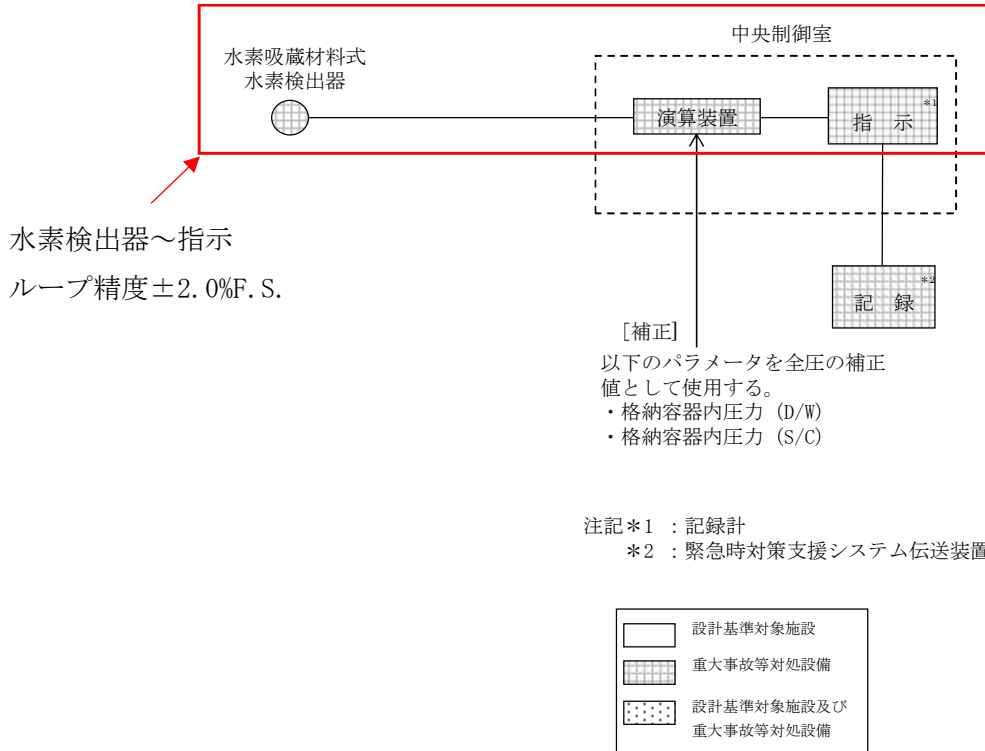


図 1-11 格納容器内水素濃度 (SA) の概略構成図

格納容器内水素濃度 (SA) のループ精度は、水素検出器～指示までが±2.0%F.S.として管理している。但し、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、実際の水素濃度を測定した誤差は以下に示す誤差伝播の式により求められる。

$$f(x_1, x_2) = \frac{x_1}{x_2} \quad (a)$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{m_2} \cdot \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{m_1}{m_2^2} \cdot \varepsilon_2\right)^2} \quad (b)$$

$$x_1 = m_1 \pm \varepsilon_1, \quad x_2 = m_2 \pm \varepsilon_2$$

$x_1, x_2$  : 入力値

$m_1, m_2$  : 測定値 ( $m_1$  = 水素分圧,  $m_2$  = 全圧)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  : 水素分圧, 全圧の誤差

$\sigma$  :  $f(x_1, x_2)$  の誤差 (水素濃度の誤差)

(b) に示す通り、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±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1-1「水素濃度40vol%におけるループ精度」に示す。

ここでは、水素濃度40vol%、全圧が大気圧（101kPa）の時ににおける計算の具体例を以下に記載する。

＜計算パラメータ＞	
$m_1$	=40.4[kPa]
$m_2$	=101[kPa]
$\varepsilon_1$	= <input type="text"/> [kPa]※1
$\varepsilon_2$	= <input type="text"/> [kPa]※2

※1 格納容器内水素濃度(SA)のループ精度は±2.0%F.S.であり、フルスケールは100vol%である。ここで、格納容器内圧力(全圧)が大気圧の場合、水素濃度計のフルスケール(100vol%)を水素分圧に換算するとkPa(abs)となり、この場合の水素分圧の誤差 $\varepsilon_1$ は、kPa(abs)×2.0%=kPa(abs)となる。

※2 格納容器内圧力(D/W)及び格納容器内圧力(S/C)のループ精度は%F.S.であり、フルスケールは1000kPa(abs)である。  
よって、全圧の誤差 $\varepsilon_2$ は、1000kPa(abs)×%=kPa(abs)となる。

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{m_2} \cdot \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{m_1}{m_2^2} \cdot \varepsilon_2\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{101} \times \text{input}\right)^2 + \left(\frac{40.4}{101^2} \times \text{input}\right)^2} \times 100 = \text{input} [\%]$$

表1-1 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)	<input type="text"/>
約125	
721 (2Pd)	

上記の通り、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±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。

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。試験装置を図1-12「水素濃度試験の試験装置概略図」に示す。試験装置は、検出器を収納するための圧力容器、検出器を加温するための恒温槽、検出器への水素ガスの供給並びに圧力容器を加圧するための水素ガスボンベ及び窒素ガスボンベ、圧力容器内の圧力を指示し演算装置へ入力するための圧力計、圧力容器内の気体を排気するための真空引用ポンプから構成される。



図1-12 水素濃度試験の試験装置概略図

試験条件を表1-2「水素濃度試験の試験条件」に示す。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。

なお、本水素濃度計は水素濃度の上昇（パラジウムによる水素ガスの吸蔵）と水素濃度の下降（パラジウムによる水素ガスの放出）の特性（図1-18参照）で差異が生じないことを確認していることから、水素濃度の上昇方向のみ試験を実施している。

表1-2 水素濃度試験の試験条件

圧力容器内温度[℃]	200
圧力容器内圧力[kPa(abs)]	721
検出素子部の温度	□℃±□℃
水素濃度[vol%] <sup>※</sup>	0.0, 4.0, 20.0, 40.0, 60.0, 80.0, 100.0

※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。

試験結果を表1-3「水素濃度試験の試験結果」、試験結果をグラフ化したものを図1-13「水素濃度試験の試験結果グラフ」に示す。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。

表 1-3 及び図 1-13 に示す通り、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 1-3 水素濃度試験の試験結果

水素濃度 [vol%]	基準ガス 濃度※1 [vol%]	判定基準 [vol%]※2	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※3			
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：判定基準は基準ガス濃度±2.0vol%とした。

※3：判定基準は 1.95vol%~5.95vol%となるが保守的に 2.0vol%~5.9vol%とした。

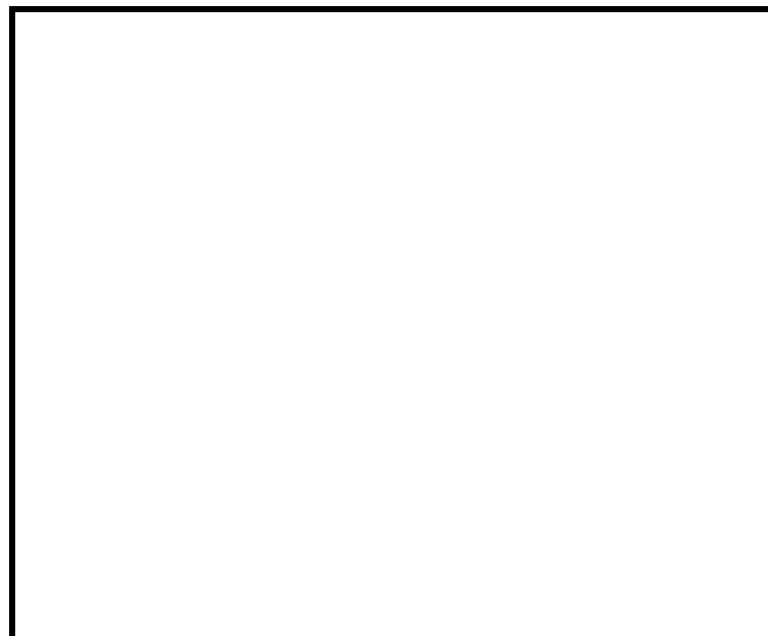


図 1-13 水素濃度試験の試験結果グラフ

### 1.3.3 格納容器内水素濃度 (SA) の応答性について

格納容器内水素濃度 (SA) の応答性を応答性確認試験により評価している。試験装置を図 1-14 「応答性確認試験の試験装置」に示す。試験装置は、検出素子部を収納するチェンバ、チェンバへ水素ガスを供給するための水素ガス供給部、チェンバへ水蒸気を供給するための水蒸気供給部、チェンバ内の気体を排気するための排気部、パラジウム線の抵抗と白金線の抵抗を測定する抵抗計から構成される。

試験中はチェンバ内の水素濃度分布を均一かつ変化しないようにするため、チェンバ内にガスを流し続けた。また、チェンバ内の水素濃度はマスフローコントローラで調整した。

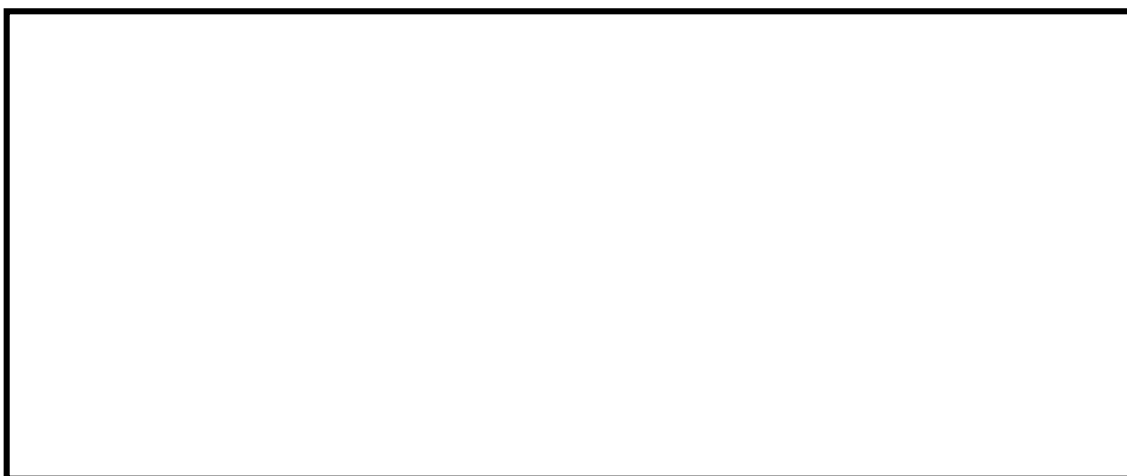


図 1-14 応答性確認試験の試験装置

試験条件を表 1-4 「応答性確認試験の試験条件」に示す。水素濃度を 0.0vol%, 4.0vol%に変化させ、出力値の応答性を確認した。

表 1-4 応答性確認試験の試験条件

チェンバ内環境	320°C, 大気圧, 水蒸気
水素濃度 [vol%]	0.0, 4.0

#### <試験条件の設定根拠>

320°C : 過去の文献\*を基にパラジウムを水素検出器として使用できる温度として 320°Cとした。

大気圧 : 圧力変動がなく一定であれば問題ないため本試験では大気圧とした。

水蒸気 : 応答性の確認に合わせて水蒸気の影響評価を実施するため水蒸気とした。

水素濃度 : 試験場及び試験設備の制約から可燃限界である 4.0vol%とした。

\*E. Wicke, et. al., "Hydrogen in Metals II," G. Alefeld and J. Volkl, eds., Springer, pp. 81 (1978)

試験結果を図 1-15 「応答性確認試験結果」に示す。本試験では水素ガスの応答性の判

定基準は 40 秒以下とし、出力値の誤差が 2.0vol%以下として評価を行っている。

図 1-15 に示す通り、応答性は判定基準の 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。また、出力値の誤差が 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。

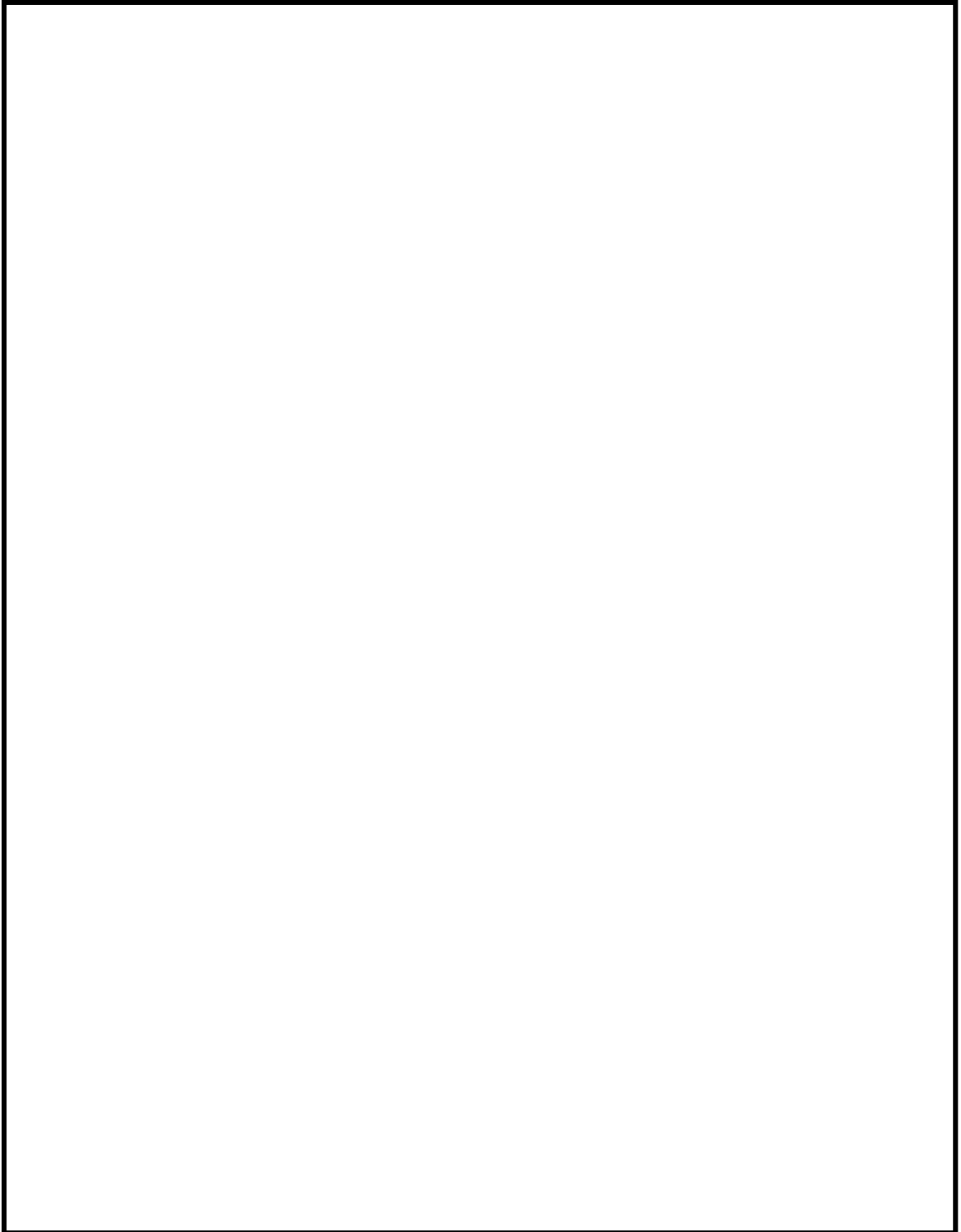


図 1-15 応答性確認試験結果

### 1.3.4 システム構成

原子炉格納容器内の水素の測定において、原子炉格納容器内の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。

格納容器内水素濃度 (SA) の概要について図 1-16 「格納容器内水素濃度 (SA) 系統概要図及び検出器概要図」に示す。

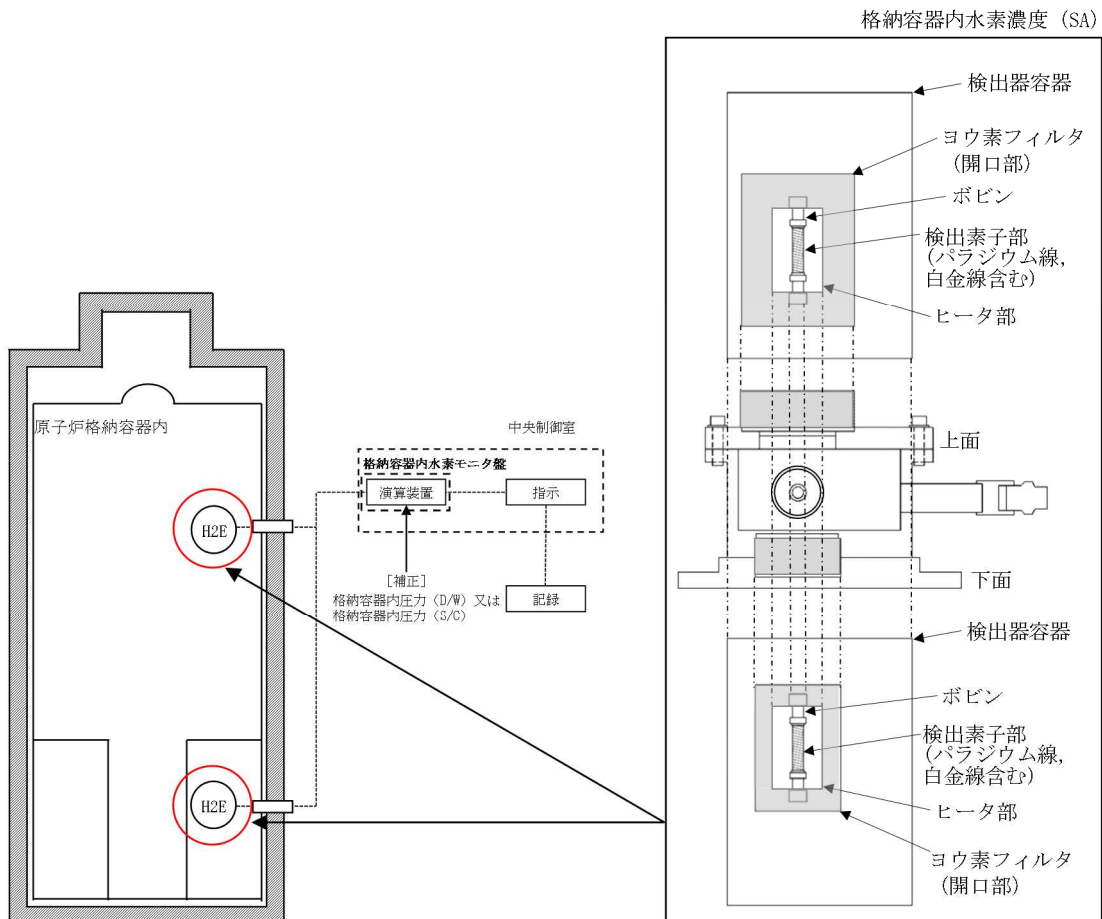


図 1-16 格納容器内水素濃度 (SA) 系統概要図及び検出器概要図

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。

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。

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ボックス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。

### 1.3.5 設置位置

格納容器内水素濃度 (SA) の設置位置を図 1-17「格納容器内水素濃度 (SA) の設置位置」に示す。

図 1-17 に示す通り、格納容器内水素濃度 (SA) の設置高さは格納容器スプレイによる原子炉格納容器の水位上昇を考慮しても水没しない高さ、かつ格納容器内水素濃度と同等の高さとしている。また、格納容器内水素濃度 (SA) の周囲に原子炉格納容器内の気体が滞留するような構造物がなく、開口部が閉塞しない位置に設置している。

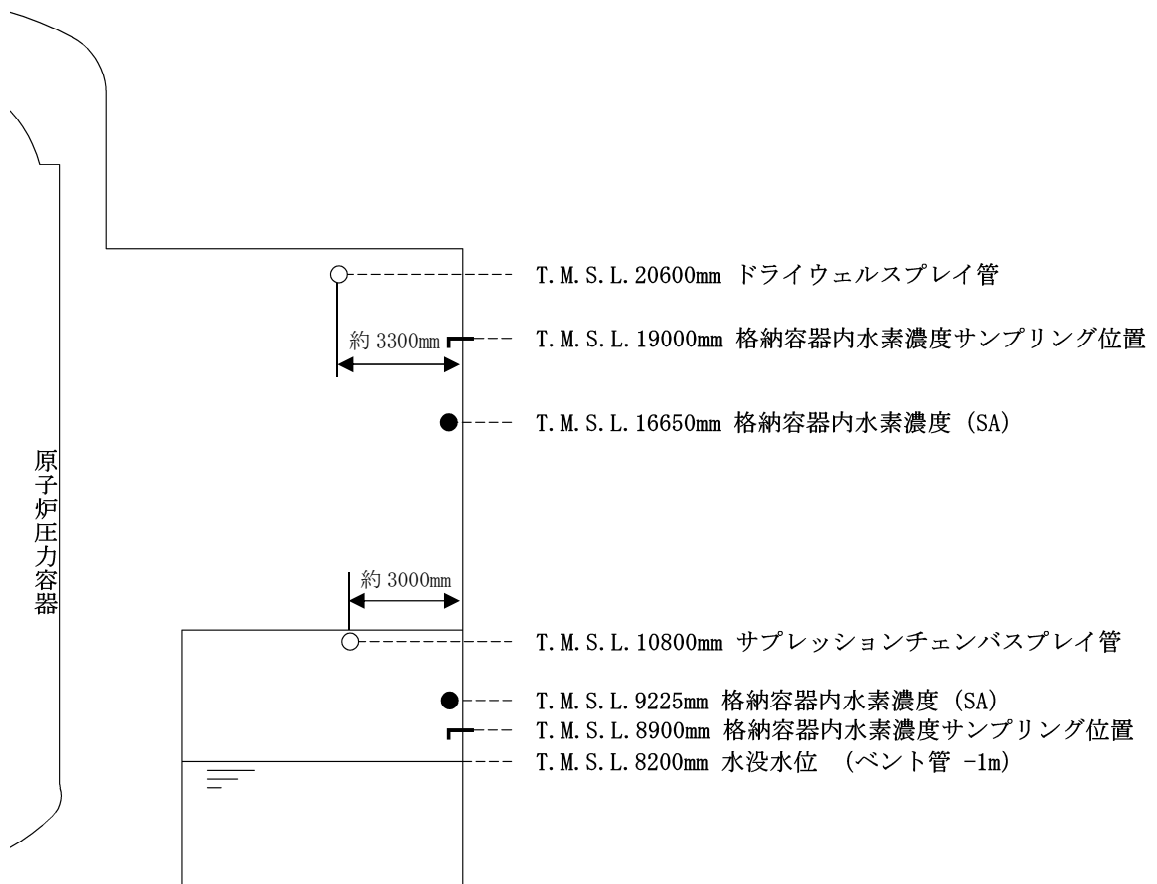


図 1-17 格納容器内水素濃度 (SA) の設置位置



### 1.3.6 格納容器内における気体のミキシングについて

格納容器内水素濃度（SA）の設置位置は1.3.5の通りであるが，原子炉格納容器全体の水素濃度を測定している根拠について以下に示す。詳細については「重大事故等対策の有効性評価について（補足説明資料） 4. 格納容器内における気体のミキシングについて」を参照。

BWRの原子炉格納容器内の気体のミキシング効果については，電力共同研究等<sup>[1][2]</sup>によって確認している。その結果として，原子炉格納容器内は格納容器スプレイや温度差による自然対流に伴う攪拌効果がある場合には十分なミキシング効果が短時間に得られることを確認している。また，PWRを模擬した体系においても同様にミキシング効果が得られることが確認されている。<sup>[3]</sup>

有効性評価「水素燃焼」のシナリオでは，間欠的なスプレイの実施及び原子炉格納容器内の温度差により，原子炉格納容器内は十分にミキシングされるものと考えられる。事象発生から約 22.5 時間後の代替循環冷却の運転開始前に復水移送ポンプを停止しないと実施できない系統構成があるため，数十分間復水移送ポンプの運転を停止するが，この間についても原子炉格納容器内の温度差によってミキシングされるものと考えられる。

[1]社内研究「触媒式FCS導入に向けた格納容器内熱流動特性の評価(フェーズ2)」(平成19年3月)

[2]電力共同研究「格納容器内ミキシング確認試験に関する研究」(昭和58年3月)

[3]重要構造物安全評価(原子炉格納容器信頼性実証事業)に関する総括報告書(平成15年3月)

#### 1.4 格納容器内水素濃度 (SA) の検出素子部の加温について

##### (1) 加温温度

パラジウムを水素検出器として使用できる温度範囲を確認するため、温度条件を 20℃、100℃、260℃、300℃とした時の、雰囲気圧力とパラジウムの重量増加量を測定した。測定結果を図 1-18「パラジウム中の水素原子の密度」に示す。

温度が一定の条件で雰囲気圧力を徐々に増減していくとパラジウム中の水素密度も徐々に増減していくが、ある圧力で直線性を有しなくなり、検出の再現性が悪くなる。

図 1-18 に示す通り、格納容器内水素濃度 (SA) はパラジウム線が 260℃以上であれば、水素圧力 961kPa までの検出器の直線性を有することが確認されていることから、ヒータによりパラジウム線を約 300℃にする。

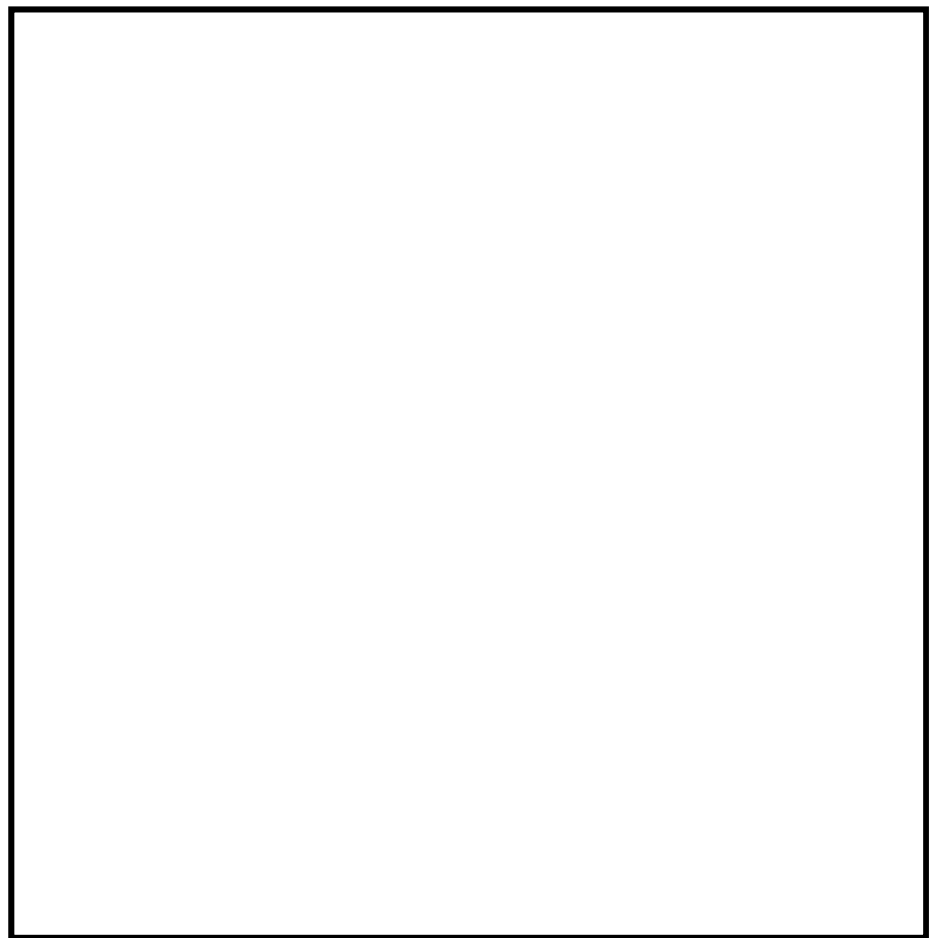


図 1-18 パラジウム中の水素原子の密度

(2) ヒータ温度制御について

格納容器内水素濃度 (SA) のパラジウム線の加温温度は(1)の通り約 300°Cにする必要があることから、ヒータにて検出素子部を  $\square$ °C ±  $\square$ °C の範囲で温度制御している。

検出素子部とヒータ部の概要を図 1-19「ヒータ部の概要図」、保温材を巻いた検出素子部の外観を図 1-20「保温材を巻いた検出素子部」に示す。図 1-19 に示す通り、ヒータはボビンの周囲に設置した金属円筒にヒータケーブルを巻き付けた構造となっている。また、ヒータの周囲には図 1-20 に示す通り保温材を巻き付けている。さらに、保温材を巻いた検出素子部は検出器容器に収納されており、周囲温度の変化による検出素子部の温度変化が発生しにくい構造となっている。

ヒータは隙間を設けて金属円筒に巻き付けており、水素ガスの流入を阻害することはない。また、ヒータを巻き付けている金属円筒には無数の穴を設けている。

保温材は繊維状の材料を使用しており、保温材がボビンへの水素ガスの流入を阻害することはない。また、保温材の周囲に設けている保温材固定用の金属円筒には水素ガスの流入を阻害することのないよう無数の穴を設けている。



図 1-19 ヒータ部の概要図



図 1-20 保温材を巻いた検出素子部

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。試験結果を表1-5「ヒータ温度制御試験の結果」に示す。表1-5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□℃±□℃の範囲内で制御できることを確認している。

表1-5 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℃) □	□℃±□℃	良 最小値: □℃ 最大値: □℃
200℃ □		良 最小値: □℃ 最大値: □℃

(3) 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。

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。(ヒータ温度制御については1.4(2)参照)

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。(図1-17参照)

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。

被水防止カバーの設置例を図1-21「被水防止カバー設置例」に示す。

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。(表1-6, 1-7参照)

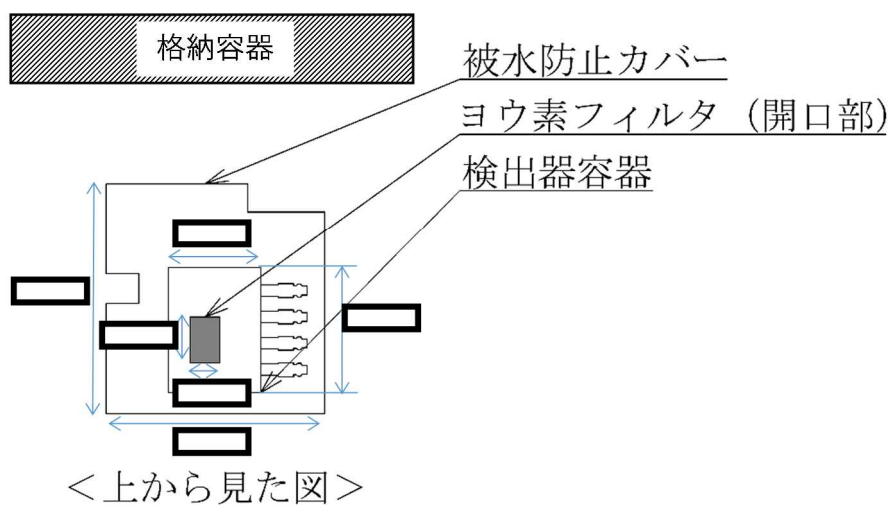
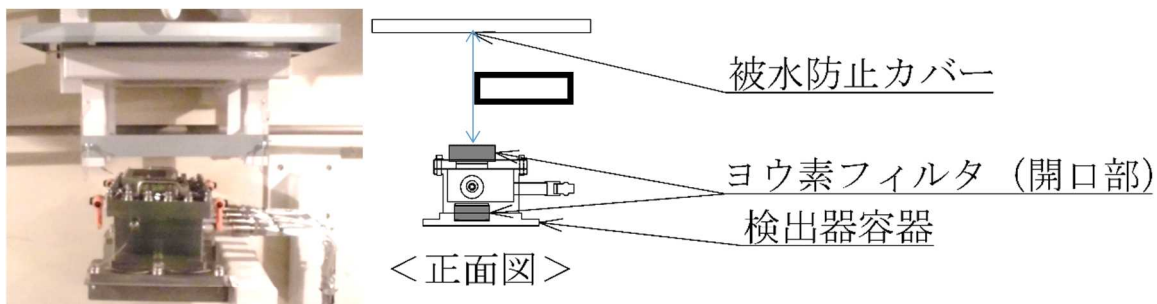


図 1-21 被水防止カバー設置例

## 1.5 格納容器内水素濃度 (SA) の健全性について

### (1) 使用環境

格納容器内水素濃度 (SA) の環境条件は、表 1-6「格納容器内水素濃度 (SA) の耐環境試験の評価結果」に示す通り、**全ての**有効性評価で想定される環境条件を包絡する環境条件を設定する。

### (2) 健全性

格納容器内水素濃度 (SA) の検出器及び検出器に付属する無機物で構成されている MI ケーブルを試験装置内に設置し耐環境試験を実施している。図 1-22 に絶縁抵抗及び抵抗測定箇所を示す。

格納容器内水素濃度 (SA) は、表 1-6 及び表 1-7「格納容器内水素濃度 (SA) の耐環境試験の評価結果(詳細)」に示す通り、環境条件を満足する試験条件で耐環境試験を実施して、健全性を維持できることを確認している。

なお、パラジウムは無機材であり、事故時に想定される環境による劣化を考慮する必要がない。さらに、耐環境試験後に検出素子部の外観に異常は認められていないため、検出器一式で蒸気暴露による故障モードとして、水蒸気による絶縁低下及び検出器信号の短絡・断線、ヒータ故障を想定し、絶縁抵抗測定及び連続的な抵抗測定、ヒータの昇温確認を実施している。

表 1-6 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。

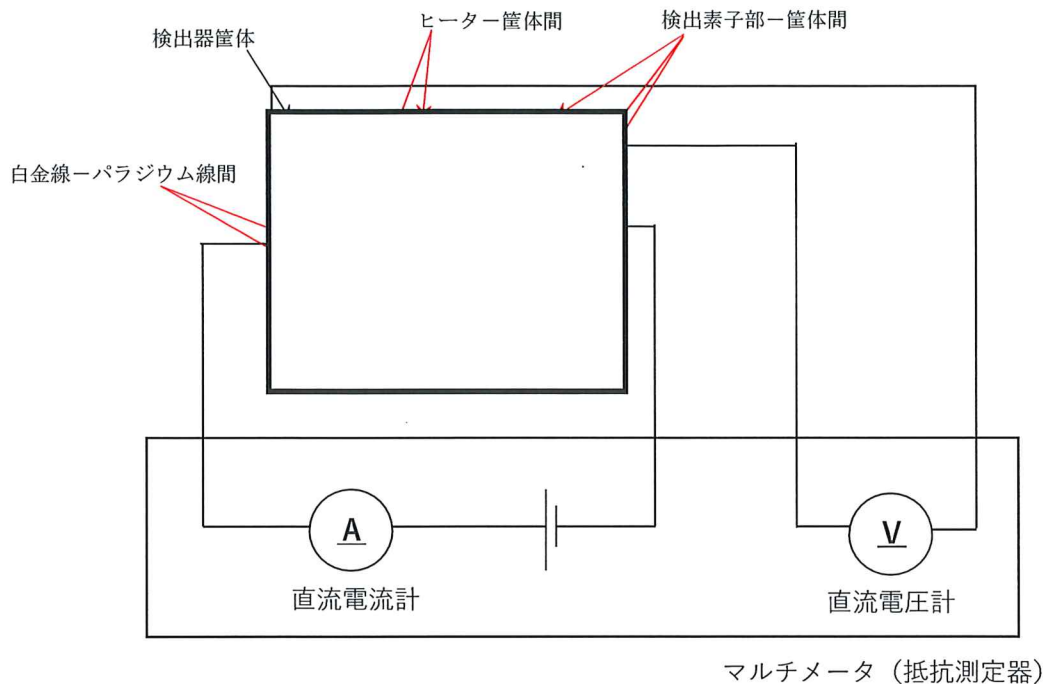


図 1-22 絶縁抵抗及び抵抗測定箇所

表 1-7 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)	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。
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。

(3) パラジウムの劣化について

水素吸蔵材であるパラジウムの想定される劣化因子と評価結果を表 1-8「パラジウムの劣化評価結果」に示す。

パラジウムは無機材であり，事故時に想定される環境による劣化を考慮する必要がない。念のため，熱・湿分/水蒸気・圧力・放射線について確認した結果，パラジウムは想定される劣化因子によって劣化しないことを確認した。

表 1-8 パラジウムの劣化評価結果

劣化因子	評価結果
熱	200℃以上の温度で耐環境試験を実施し，検出素子部の外観に異常はなく耐熱性を有することを確認した。
湿分／水蒸気	蒸気環境下において試験を実施し，検出素子部の外観に異常はなく耐湿性を有することを確認した。
圧力	620kPa (gage) 以上の圧力で耐環境試験を実施し，検出素子部の外観に異常はなく耐圧性を有することを確認した。
放射線	無機物であり，放射線による劣化を考慮する必要はないことを確認した。



## 1.6 水素燃焼の影響

### (1) 酸素対策について

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し、水素濃度測定に影響を及ぼす可能性がある。

検出器への酸素の影響を確認するため、図1-23に示す試験構成にて検出器に水素、酸素、窒素の混合ガスを流し、水素濃度の計測精度を確認した。



図1-23 酸素特性試験の試験構成 (酸素対策前)

試験条件を表1-9「酸素特性試験の試験条件 (酸素対策前)」に示す。水素濃度 3.5vol%の時に、酸素濃度を 1.0vol%, 3.0vol%, 4.5vol%の各濃度に変化させて計測精度を評価した。

表1-9 酸素特性試験の試験条件 (酸素対策前)

検出素子部温度[°C]	300
サンプルホルダ内圧力	大気圧
水素濃度[vol%]	3.5
酸素濃度[vol%]	1.0, 3.0, 4.5

#### <試験条件の設定根拠>

300°C：検出素子部の加熱温度である 300°Cとした。

大気圧：圧力変動がなく一定であれば問題ないため本試験では大気圧とした。

水素濃度：酸素特性試験は水素と酸素が反応し爆発する恐れがあるため、可燃限界である 4.0vol%に安全を考慮して、3.5vol%とした。

酸素濃度：酸素特性試験は水素と酸素が反応し爆発する恐れがあるため、可燃限界である 5.0vol%に安全を考慮して、4.5vol%とした。

酸素特性試験の試験結果を図 1-24 「酸素特性試験の試験結果 (酸素対策前)」に示す。  
 図 1-24 に示す通り、水素を導入した状態でさらに酸素を導入すると、酸素導入と同時に検出素子部表面での水素燃焼により白金温度が上昇している。また、パラジウムと白金の抵抗値が上昇することを確認している。このことから酸素は水素濃度測定に影響を及ぼすことが分かる。

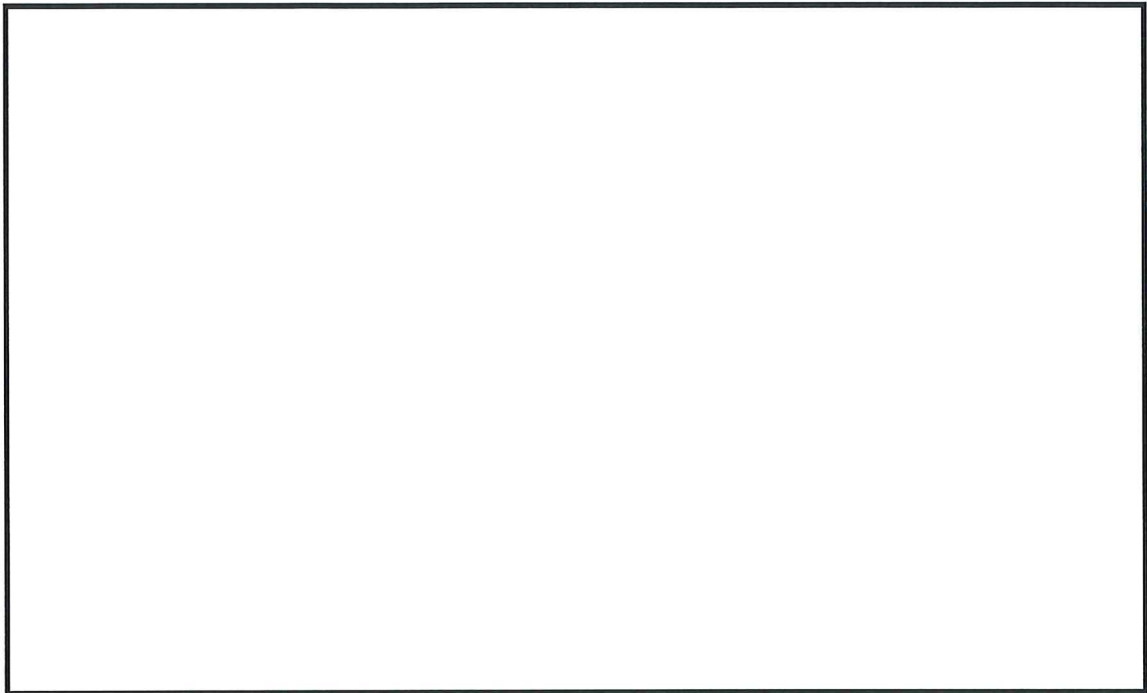


図 1-24 酸素特性試験の試験結果 (酸素対策前)

検出素子部表面での水素燃焼を防止するため、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 1-25 「分子ふるい効果のイメージ図」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。

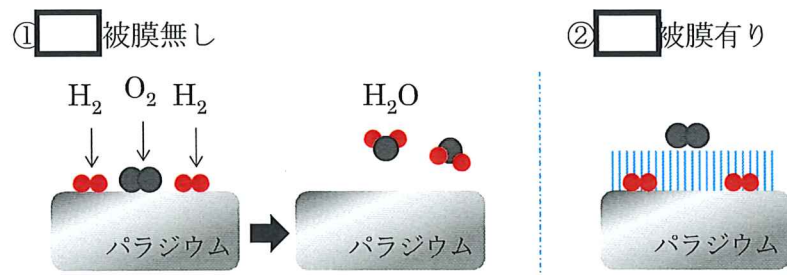


図 1-25 分子ふるい効果のイメージ図

□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、図1-26「酸素特性試験の試験構成（酸素対策後）」に示す試験体系で□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。試験構成を図1-26に示す。



図1-26 酸素特性試験の試験構成（酸素対策後）

酸素特性試験の試験条件は表1-10「酸素特性試験の試験条件（酸素対策後）」に示す通り、2種類の試験条件にて計測精度を評価した。

表1-10 酸素特性試験の試験条件（酸素対策後）

検出素子部温度[°C]	300	
サンプルホルダ内圧力	大気圧	
水素濃度[vol%]	条件1	3.5
	条件2	10.0
酸素濃度[vol%]	5.0	

<試験条件の設定根拠>

300°C：検出素子部の加熱温度である300°Cとした。

大気圧：圧力変動がなく一定であれば問題ないため本試験では大気圧とした。

水素濃度（条件1）：酸素特性試験は水素と酸素が反応し爆発する恐れがあるため、可燃限界である4.0vol%に安全を考慮して、3.5vol%とした。

水素濃度（条件2）：水素燃焼が起きやすい濃度として、酸素濃度5.0vol%の2倍の10vol%とした。

酸素濃度：可燃限界である5.0vol%とした。

試験結果を表 1-11「酸素特性試験の試験結果（酸素対策後）」、図 1-27「酸素特性試験（条件 1）の試験結果（酸素対策後）」、図 1-28「酸素特性試験（条件 2）の試験結果（酸素対策後）」に示す。本試験では直接的に水素濃度は測定しておらず、パラジウム及び白金の抵抗値を測定している。このため、パラジウム及び白金の抵抗値を基に 1.3.1 に示す演算手順と同じ手順で水素濃度を算出した。表 1-11 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。また、図 1-24 及び図 1-25 に示す通り、酸素ガスの導入と停止を繰り返し行った時にも、酸素の影響を抑制しており、被膜の有効性を確認できた。

なお、は無機物であり、放射線による劣化を考慮する必要がない。は原子炉格納容器内に設置されている起動領域モニタの MI ケーブルにも使用されており、原子炉格納容器内の環境下での使用実績がある。また、は融点が 1650°C の安定な物質で耐熱性に優れている。さらに、は本水素検出器の保温材としても使用されており、重大事故等時を模擬した環境条件で耐環境試験を行い、健全性を維持できることを確認している。

表 1-11 酸素特性試験の試験結果（酸素対策後）

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： <input type="checkbox"/> 最小値： <input type="checkbox"/>	最大値： <input type="checkbox"/> 最小値： <input type="checkbox"/>	良
2	10.0	8.0~12.0	最大値： <input type="checkbox"/> 最小値： <input type="checkbox"/>	最大値： <input type="checkbox"/> 最小値： <input type="checkbox"/>	良

※：判定基準は水素濃度±2.0vol%とした。

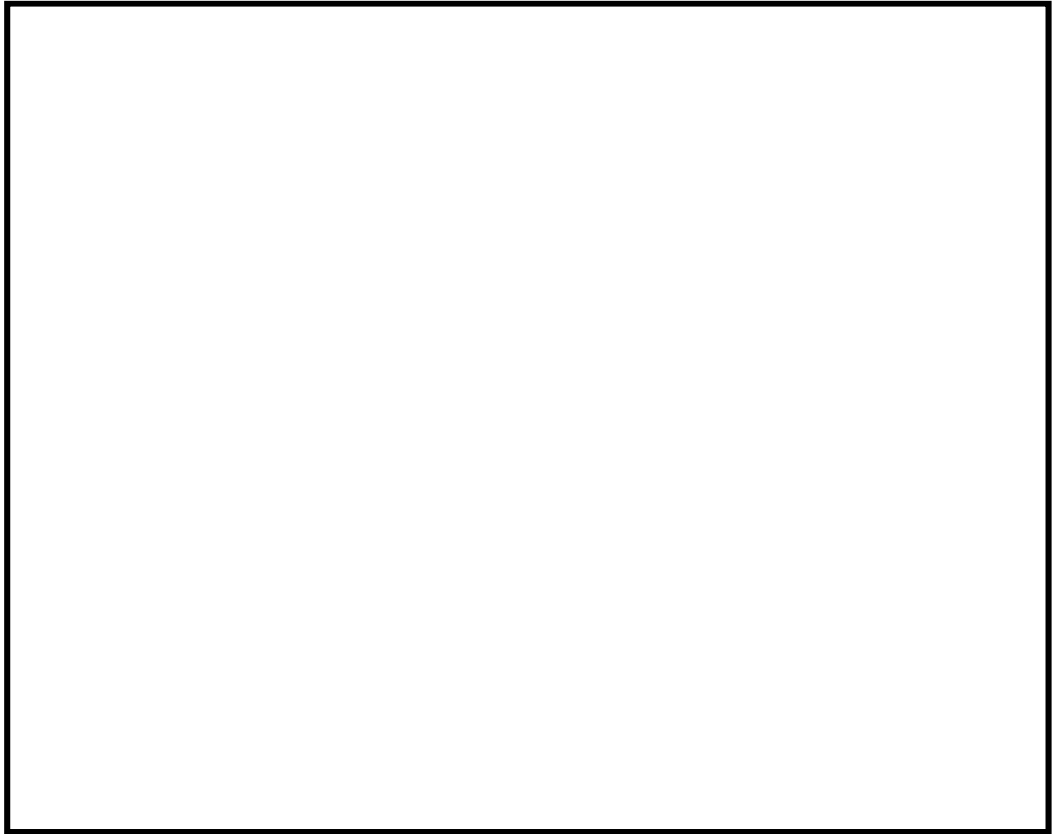


図 1-27 酸素特性試験（条件 1）の試験結果（酸素対策後）

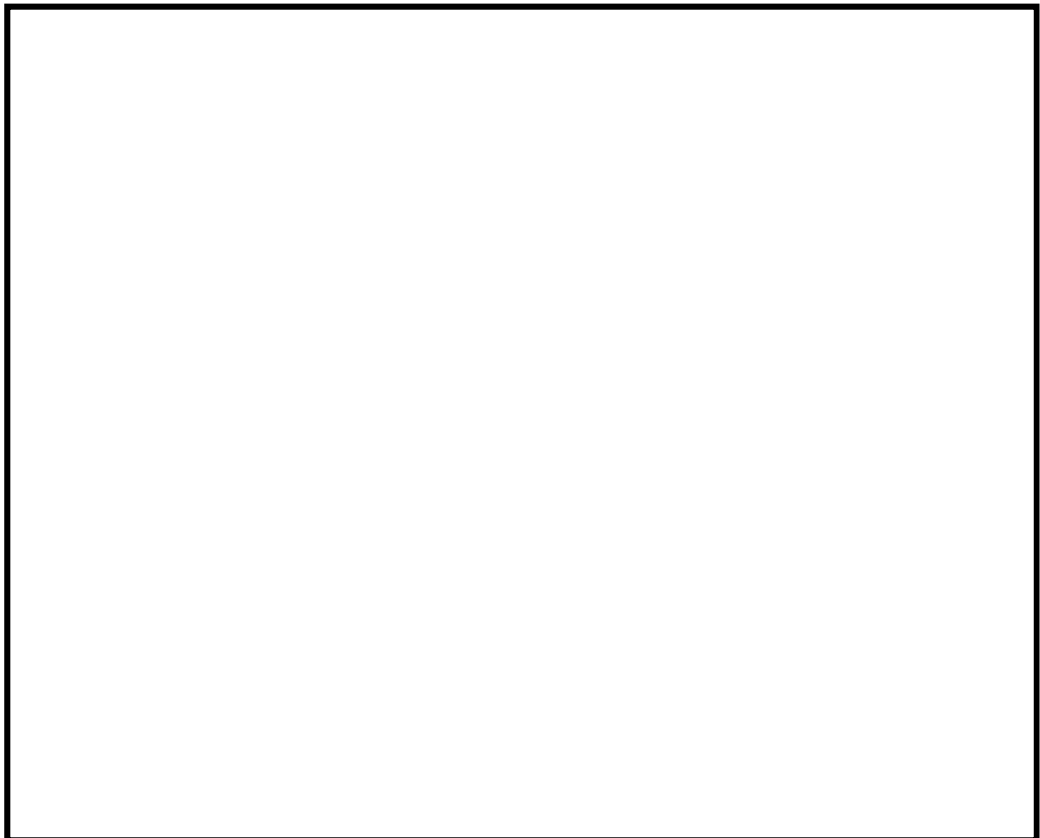


図 1-28 酸素特性試験（条件 2）の試験結果（酸素対策後）

## 1.7 被毒物質の影響

### (1) 被毒物質の抽出

重大事故等時の原子炉格納容器内には、窒素、水素、水蒸気のほかに、酸素、核分裂生成物（ヨウ素等）の物質が含まれると考えられており、これらの物質が被毒として検出器の性能に与える影響を評価する必要がある。

これら原子炉格納容器内で想定される物質のうち、格納容器内水素濃度（SA）に用いるパラジウムのような貴金属触媒に対する被毒物質には、一酸化炭素、硫黄、ハロゲン、重金属、水、ダスト（粉塵）、エアロゾルがある。各々の被毒物質の影響について確認した。

#### a. 一酸化炭素

熔融炉心とコンクリートの反応により発生し、可燃性ガスの一部としてある程度存在していると考えられる。濃度や温度域によっては水素吸蔵に対する被毒性を有する。

従って、一酸化炭素を被毒物質として考慮し試験対象とした。

#### b. 硫黄

通常運転時においては、格納容器内は窒素置換され、かつ、密閉されていることから、これらの被毒物質が格納容器外より流入することは考えられない。

被毒物のうち、火災の際に発生しうる硫黄成分は、格納容器内に可燃性物質を極力使用しないこと及び通常運転中窒素置換されていることから発生の可能性はないとしている。

従って、硫黄は被毒物質として考慮しない。

#### c. ハロゲン、重金属

格納容器内に放出される核分裂生成物としては、ヨウ素（I）、臭素（Br）、クリプトン（Kr）、キセノン（Xe）、ウラン（U）、プルトニウム（Pu）等がある。これらのうち、パラジウム表面に吸着して被毒物質となるものは、ハロゲンであるヨウ素、臭素である。これらハロゲンについては、炉内内蔵量のうちハロゲンの50%が放出されると仮定しているため、そのうち約90%を占めるヨウ素と約10%を占める臭素による触媒への影響を考慮する必要がある。このうち、臭素はヨウ素より反応性が高いため化合物を作りやすく、粒子状の形態になると考えられ、格納容器スプレイ水によって水中に捕捉されるため、臭素の被毒物としての影響はヨウ素を想定することで包絡される。

従って、ヨウ素を被毒物質として考慮し試験対象とした。

#### d. 水

異物のうち、水に対しては、検出器上部に被水防止カバーを設置しており、検出器は被水の影響を受けない設計としている。

従って、水は被毒物質として考慮し、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。

e. ダスト（粉塵）

ダスト（粉塵）に関してはLOCA発生時に、破断配管からのジェット流によって保温材が破損し、ダスト（粉塵）が発生する可能性がある。原則、金属反射保温材を使用することから、ダスト（粉塵）の発生量は少量と考えられることから、固体粒子が一様にパラジウム表面を覆うことは考えられない。また、ダスト（粉塵）は格納容器スプレイによって水中に捕捉されることから、影響は少ないと考えられる。

従って、ダスト（粉塵）は被毒物質として考慮しない。

f. エアロゾル

核分裂生成物のうち、エアロゾル（セシウム化合物他）として原子炉格納容器内に存在する物質は、格納容器スプレイによって水中に捕捉され、スプレイ作動後は速やかに濃度が低下するが、原子炉格納容器内の存在量の観点からその影響を考慮し、エアロゾルを試験対象とした。

以上より一酸化炭素及びヨウ素、エアロゾルを反応阻害物質とし被毒影響を検討することとした。

(2) 被毒物質の影響評価

(1)の通り、一酸化炭素及びヨウ素、エアロゾルを被毒物質として選定した。なお、ヨウ素については、NUREG-1465\*や文献等を参考に、ヨウ素の形態から派生する物質についても影響評価を実施する。

パラジウムの被毒影響を評価する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I<sub>2</sub>であることが分かったので、I<sub>2</sub>について対策を実施することとした。評価結果を表1-12「被毒物質の抽出結果」に示す。

※Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants,  
NUREG-1465, February 1995

表 1-12 被毒物質の抽出結果

形態	抽出理由	試験対象	影響の有無 (試験結果)
CsI	代表的な白金触媒に対する被毒物質とは考えられないが、ヨウ素の大部分はCsIの形態で存在しているとされており、存在量の観点からその影響が無視できない可能性があると考え、被毒物質として選定した。	対象	影響少ない
I <sub>2</sub>	CsI+H <sub>2</sub> O⇌CsOH+I+1/2H <sub>2</sub> の反応により生成され、スプレイ水のpH調整が行われた場合は、格納容器内のヨウ素の1~5%程度がこの形態と評価されている。一方、pH調整が行えない場合は、元素状ヨウ素(I <sub>2</sub> やHI)が多数を占めると評価されている。白金触媒に対して被毒性を有することが知られており、被毒物質として選定した。	対象	影響有り ⇒対策実施
CH <sub>3</sub> I	格納容器内の有機物と反応し、この物質が生成され、ヨウ素の4%程度がこの形態と評価されている。被毒影響のあるヨウ素より派生する化学形態であり、被毒物質として選定した。	対象	影響無し
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> I, CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> Iよりも発生量が少ないため(CH <sub>3</sub> I, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> I, CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub> は約80%, 約5%, 約15%の形態で存在するとされている), CH <sub>3</sub> Iの試験により代表化することで対象外とした。	対象外	—
HI	CsI+H <sub>2</sub> O⇌CsOH+HIの反応により生成され、スプレイ水のpH調整が行われた場合は、格納容器内のヨウ素の1~5%程度がこの形態と評価されている。一方、pH調整が行えない場合は、元素状ヨウ素(I <sub>2</sub> やHI)が多数を占めると評価されていることから被毒物質として選定した。 なお、揮発性であり、毒性を有することから取り扱いの観点からも、揮発させたI <sub>2</sub> をサンプルガス(水素含む)に混合させることでI <sub>2</sub> の試験により代表化した。	(対象)※	—
CO	熔融炉心とコンクリートの反応により発生し、可燃性ガスの一部としてある程度存在していると考えられる。濃度や温度域によっては白金触媒に対する被毒性を有することから被毒物質として選定した。	対象	影響無し

※( )は直接的に当該物質を対象とした試験を行わないが、I<sub>2</sub>の試験により代表化することで対象とした物質を意味する。

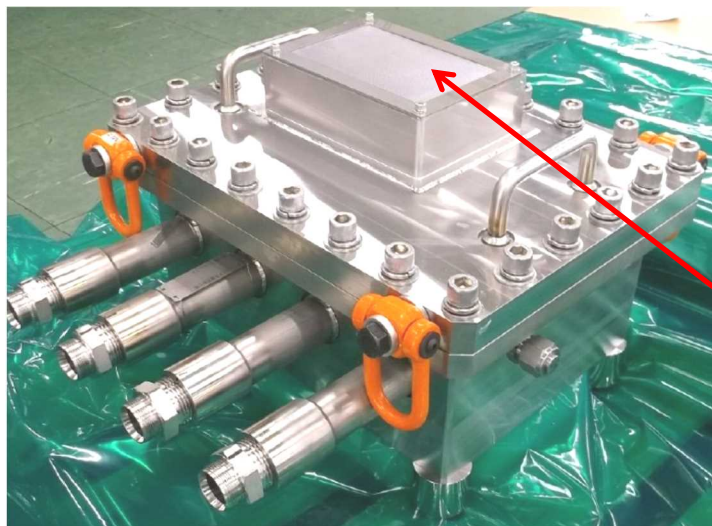


(3) 格納容器内水素濃度 (SA) のヨウ素対策について

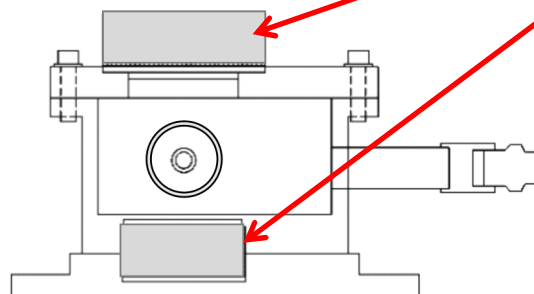
パラジウムがヨウ素環境下にあるとヨウ素と反応してヨウ化パラジウムに変化し、水素の吸蔵性能が低下し、格納容器内水素濃度 (SA) の水素計測に影響を与えることを確認したことから、対策として検出器容器の開口部にヨウ素を補集するヨウ素フィルタを設置した。ヨウ素フィルタ付き検出器の外観を図1-29「ヨウ素フィルタ付き検出器外観」に示す。

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。



ヨウ素フィルタ



(側面図)

図1-29 ヨウ素フィルタ付き検出器写真

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。試験条件を表 1-13「ヨウ素試験の試験条件」、試験構成を図 1-30「ヨウ素試験の試験構成」に示す。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。

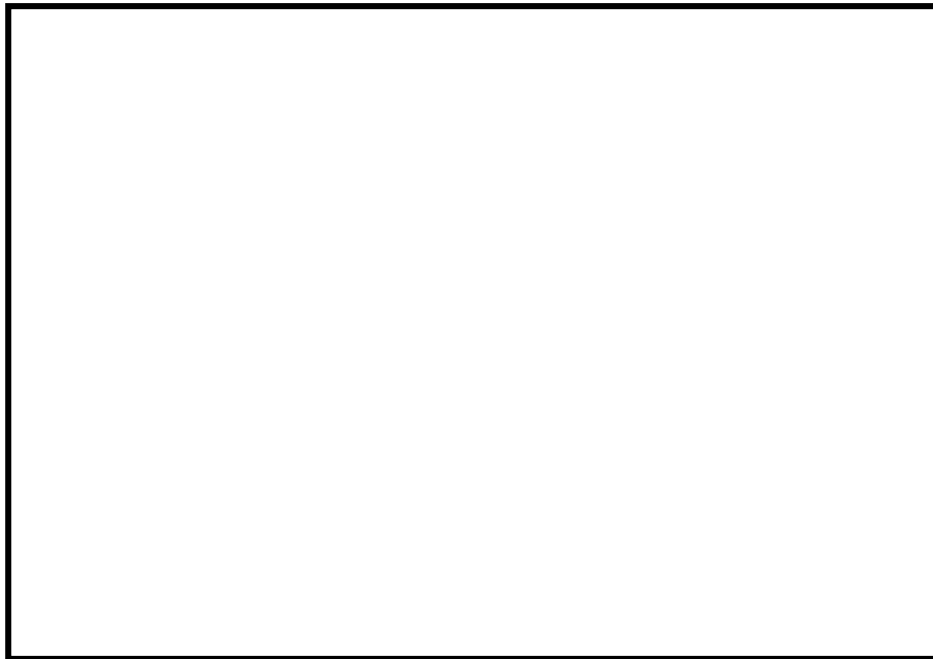


図 1-30 ヨウ素試験の試験構成

表 1-13 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

※：「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」審査資料（第五十条：原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備，第五十九条：運転員が原子炉制御室にとどまるための設備）の記載値を考慮して設定しており，重大事故等時の条件を包絡。

<試験条件の設定根拠>

200℃：原子炉格納容器の限界温度である 200℃とした。

大気圧：圧力変動がなく一定であれば問題ないため本試験では大気圧とした。

水蒸気：重大事故等時の環境条件を模擬するため水蒸気とした。

ヨウ素積算流入量：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。

水素濃度：可燃限界である 4.0vol%とした。

試験結果を図 1-31「ヨウ素試験結果」に示す。図 1-28 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。

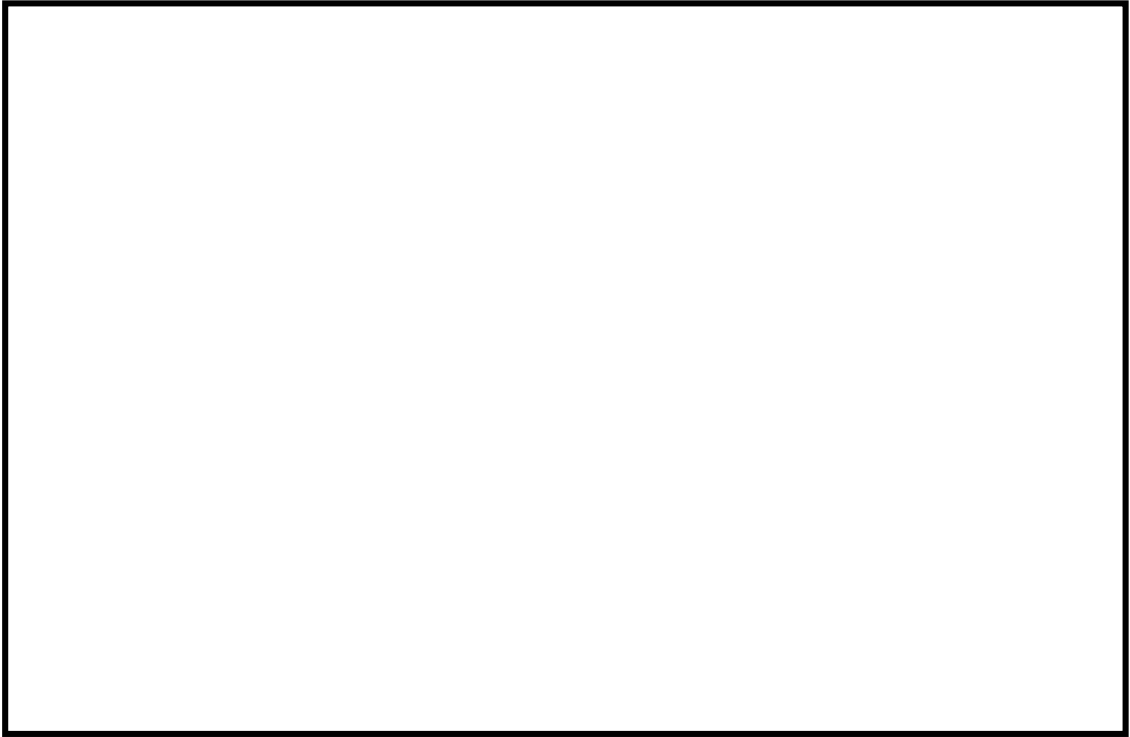


図 1-31 ヨウ素試験結果

### 1.8 格納容器内水素濃度 (SA) の耐震性について

加振試験において、格納容器内水素濃度 (SA) を加振台に設置し、表 1-14 「格納容器内水素濃度 (SA) の加振試験の結果」に示す加速度を加えた後で格納容器内水素濃度 (SA) が機能的な健全性が確保されていることを確認している。

表 1-14 格納容器内水素濃度 (SA) の加振試験の結果

方向	格納容器内水素濃度 (SA)
X 方向	4G
Y 方向	4G
Z 方向	2G

### 1.9 格納容器内水素濃度 (SA)、格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度の電源供給について

格納容器内水素濃度 (SA) は、常設代替直流電源設備又は可搬型直流電源設備から給電できる設計とする。

格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度は、常設代替交流電源設備又は可搬型代替交流電源設備から給電できる設計とする。

電源供給については図 1-32 「格納容器内水素濃度 (SA)、格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度の電源概略構成図」に示す。

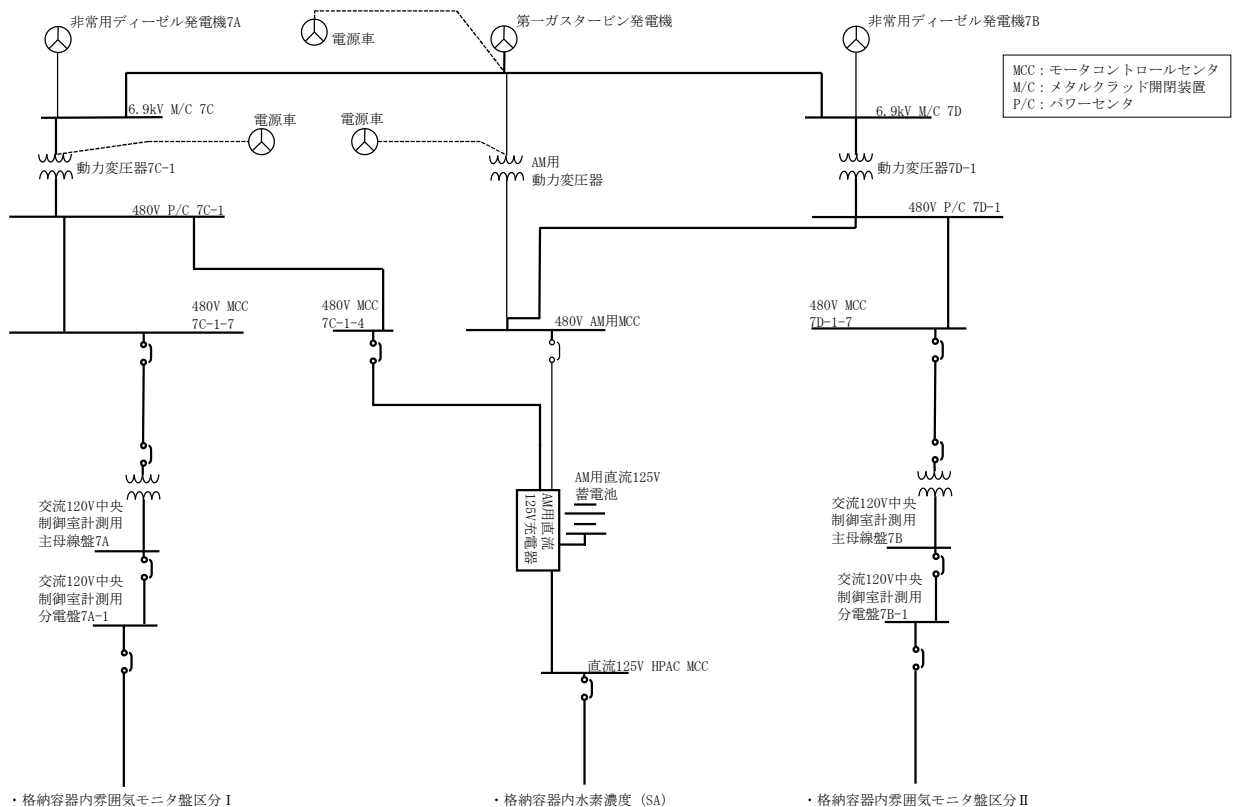


図 1-32 格納容器内水素濃度 (SA)、格納容器内水素濃度及び格納容器内酸素濃度の電源概略構成