


メーカーの評価式の作成の考え方（2）



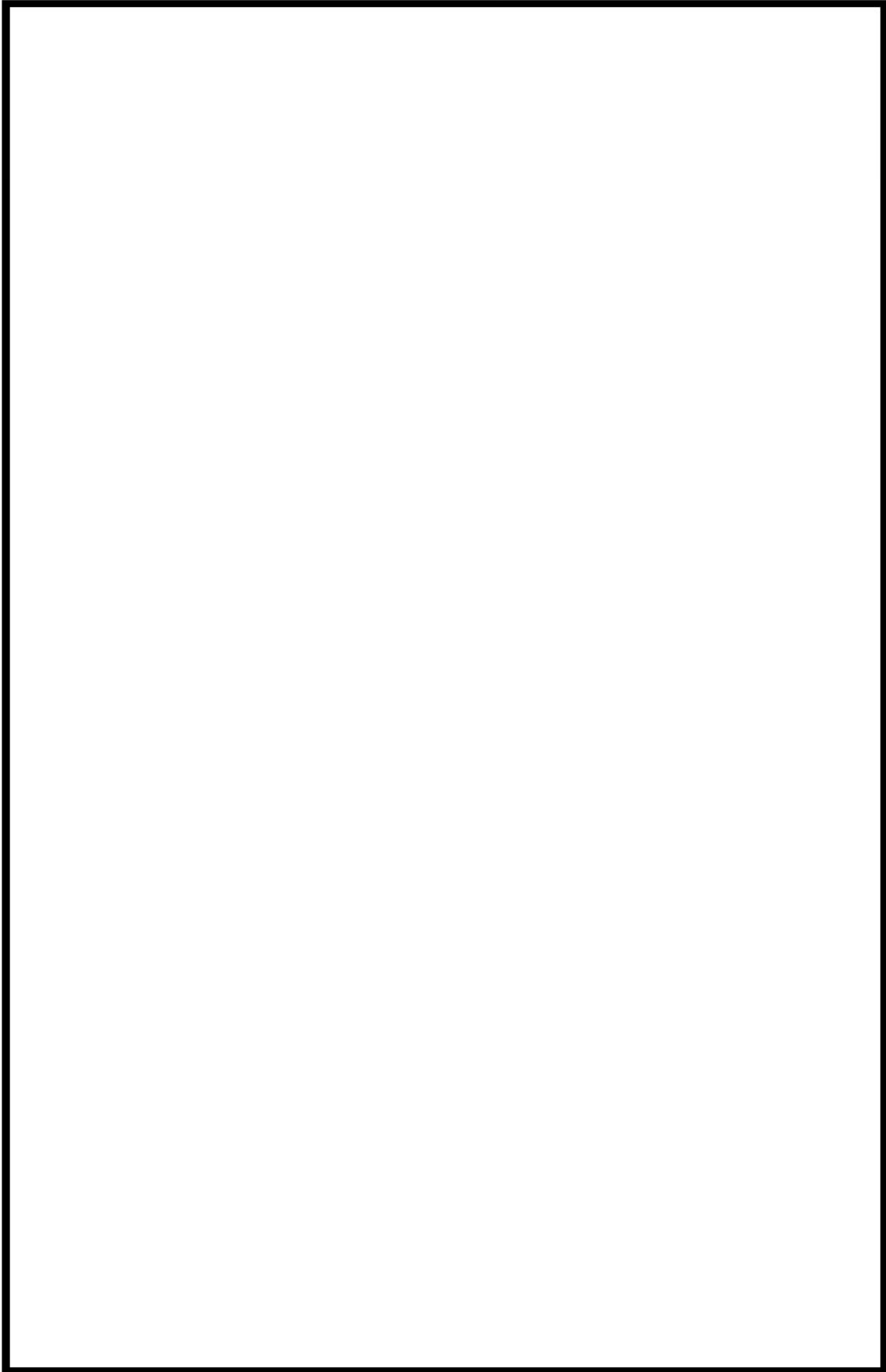
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

炉心損傷事故時に変化する環境条件と PAR の性能評価への影響

事故時 C/V 内環境条件等	事故時変化範囲 (泊 3 号炉)	試験範囲	評価式への影響考慮と評価
水素濃度 (PAR 入口水素濃度)	13vol%未満(トライ) (最大約 11.7vol%)	TUV [ ] vol%(トライ)	触媒部での反応が始まり PAR が起動しだすと拡散律速となり、 <u>水素濃度の上昇、水素供給量の増加に応じて水素除去割合 (g/s)が増加することから、PAR 周囲(入口)の水素濃度を評価式に考慮する。</u>
圧力	約 0.10~0.34MPa (MAAP 解析)	OECD/NEA THAI [ ] bar (約 [ ] MPa)	設計した PAR は、同じ水素濃度のとき、 <u>圧力の上昇に応じて、水素除去割合 (g/s)が増加することで確認されており、評価式に圧力を主変数として考慮する。</u> 水素分子供給量が増えるためと考えられる。
温度	約 36~171℃ (MAAP 解析)	OECD/NEA THAI 約 [ ]℃	周囲温度が上がるとガス密度が変化し、PAR 内上昇流(水素流量)へ影響するが、大規模炉心損傷後の C/V 温度が高温状態でほぼ推移すること、PAR 起動以降は PAR 内温度が C/V 温度に比べ大きく高温(200~300℃以上)になることから <u>C/V 内の温度範囲においては性能へ大きな影響を及ぼさないと評価(試験により確認)</u>
水蒸気濃度	0~86.1vol% (GOTHIC 解析)	OECD/NEA THAI [ ]%	開発時から高い水蒸気濃度での試験を実施、実機事故条件化では評価式に大きな影響を及ぼさないと評価 (THAI 試験等で水蒸気濃度 47%以上の場合、評価式の少し下回る水素除去割合となったが、実機ではほとんどの期間 25%以下で推移することから影響はないものと評価)
酸素濃度	約 0~20%	KALI : O <sub>2</sub> =約 [ ] vol% で試験	酸素濃度が欠乏するような場合には、水素除去割合 (g/s) が低下するため、試験に基づき酸素量が低いケースにも対応できるよう評価式を検討
毒物 (エアロゾル)	最大 約 1100mg/m <sup>3</sup>	OECD/NEA THAI [ ] mg/m <sup>3</sup> 程度	実機で想定されるエアロゾル濃度を踏まえ、評価式の基本特性には大きな影響のないことを試験により確認
スプレイ水	約 [ ] g/s/m <sup>3</sup>	約 [ ] g/s/m <sup>3</sup>	スプレイ水がかからない管体設計としており、試験により評価式の水素除去割合に大きな影響を及ぼさないと確認

[ ] 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

PAR の基本特性

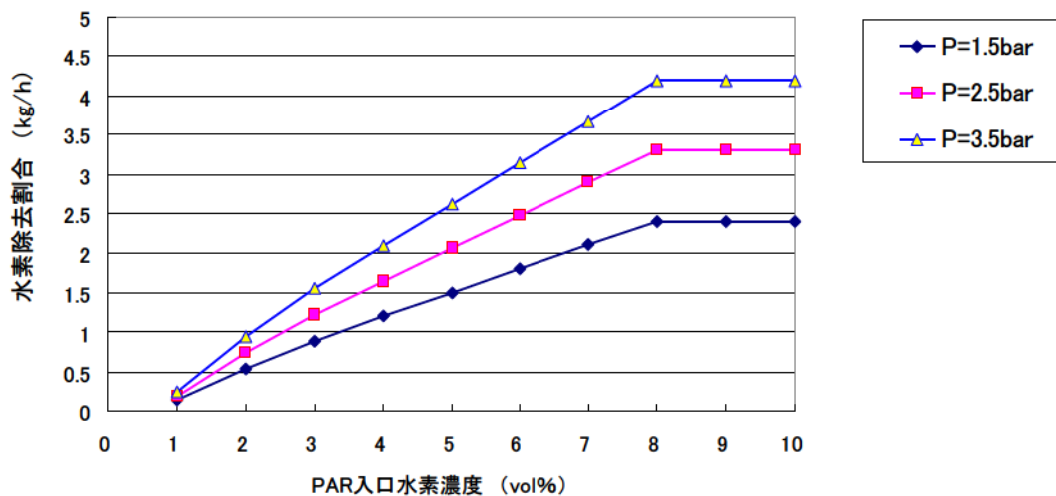


適用する PAR1 個の水素除去性能評価式

$$\gamma = \eta \cdot \min(X_{H_2}, 2 \cdot X_{O_2}, 8.0) \cdot (A \cdot P + B) \cdot \tanh(X_{H_2} - 0.5)$$

$\gamma$  : 水素処理割合(g/s)  
 $\eta$  :  $1.0(X_{O_2} > X_{H_2})$ ,  $\square(X_{O_2} < X_{H_2})$   
 $X_{H_2}$  : 水素体積比(%)  
 $X_{O_2}$  : 酸素体積比(%)  
 $P$  : 圧力(bar)  
 $A, B$  : 係数  $\square$

$\gamma$  は圧力に比例して増加する形としている。  
 $\gamma$  は水素濃度に比例して増加する形としている。  
 水素濃度 0.5vol%以降の立ち上がり部を滑らかにする補正  
 ・水素濃度 8vol%以上は、保守的に水素除去割合を 8vol%とした。(試験実施が難しいこと、水素燃焼発生等も考慮し保守的に設定)  
 $\eta$  : 酸素濃度が低い場合に、水素除去性能の低下分を補正 (事故時環境下では、1.0 が適用可能)  
 PAR 型式ごとにメーカーが設定している実験式の係数



水素濃度 1vol%以上における、圧力(1.5bar、2.5bar、3.5bar)のときの水素除去割合の例

参考 (他メーカーの PAR 評価式の例)

B 社 :  $\gamma(\text{kg/h}) = (A \cdot C_{H_2} + B \cdot C_{H_2}^2) \cdot (298/T)^C \cdot P^D$   
 C 社 :  $\gamma(\text{g/s}) = A \cdot C_{H_2}^B \cdot (P/RT)$   
 $C_{H_2}$  : PAR 入口の水素体積濃度、 $P$  : 絶対圧(bar)  
 $R$  : 8.31J/kg·K、 $T$  : 絶対温度、 $A, B, C, D$  : 各社ごとの係数

$\square$  枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 試験体系の比較


体系	メーカー試験 Karlstein Test Facility	国際的な検証試験		実機 (泊3号炉)
		KALI H2 Test	THAI	
適用 PAR				FR1-380T
容器 (体積等)				約 65500m <sup>3</sup>
圧力				約 0.10～0.34MPa
温度				約 36～171℃
水素濃度				C/V 平均 13vol%未満
蒸気濃度				0～86.1vol%
毒物影響				エアロゾル濃度＝ 最大約 1100mg/m <sup>3</sup>
スプレイ 水影響				<input type="checkbox"/> g/s/m <sup>3</sup> (ヒドラジン含む)

THAI 試験等で実機の炉心損傷事故時に想定される C/V 内環境条件を包含する範囲の試験が行われており、試験体系の容器内水素の混合状態からも、確認された性能評価式を適用できるものと考えられる。

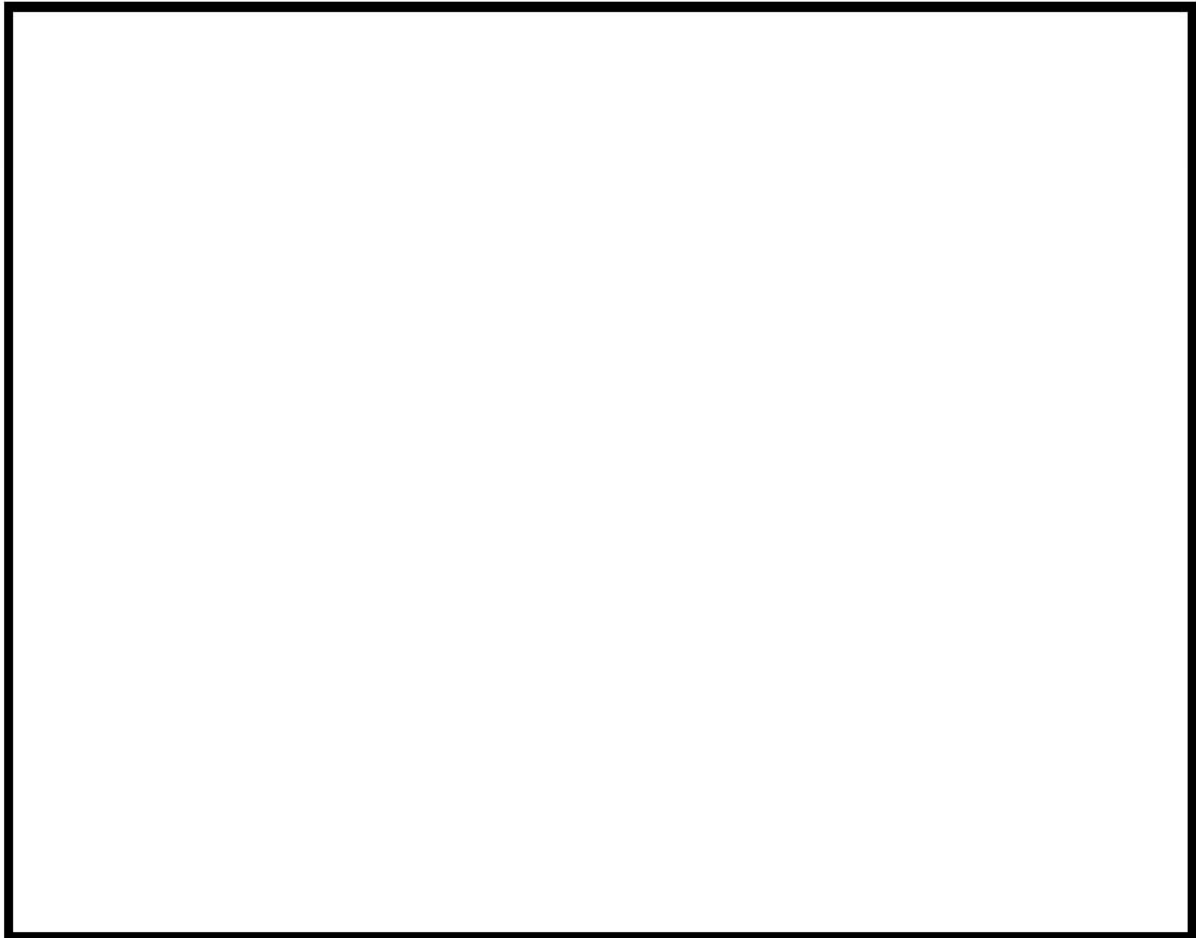
枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。


検証例：KALI 試験施設 (Cadarache)



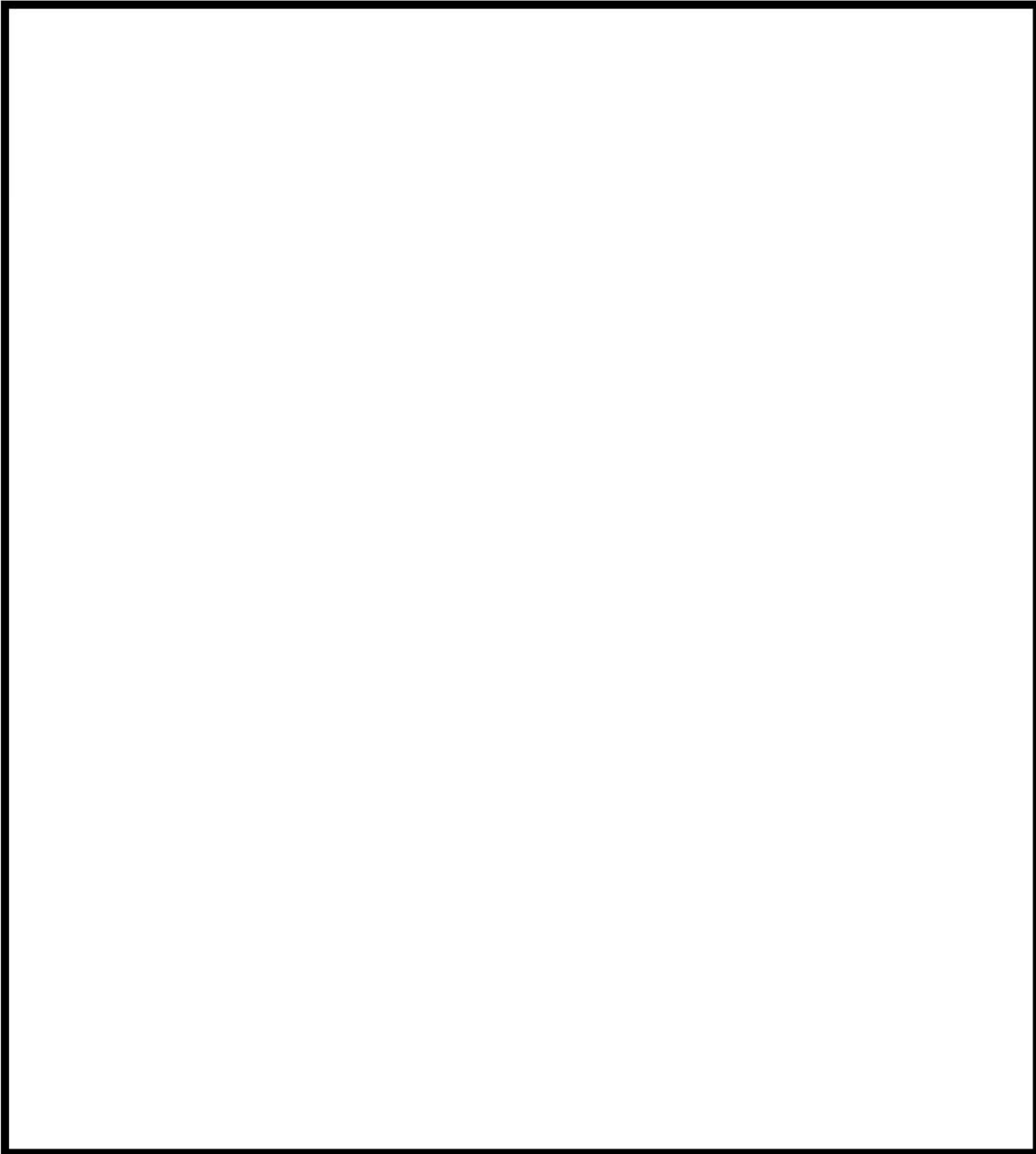
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

検証拠：メーカー試験結果について、KALI 試験施設で EPRI が検証を実施



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。


THAI 試験による試験値と性能評価式との比較 (1)



PAR 入口及び出口に設置した水素濃度計、及び PAR 入口部流速計等の測定パラメータから、次式により試験時の PAR 単体の水素除去割合 (g/s) を求め、試験時の試験容器内圧力を考慮した PAR 性能評価式による水素除去割合 (g/s、kg/h) との比較評価を行っている。

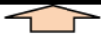
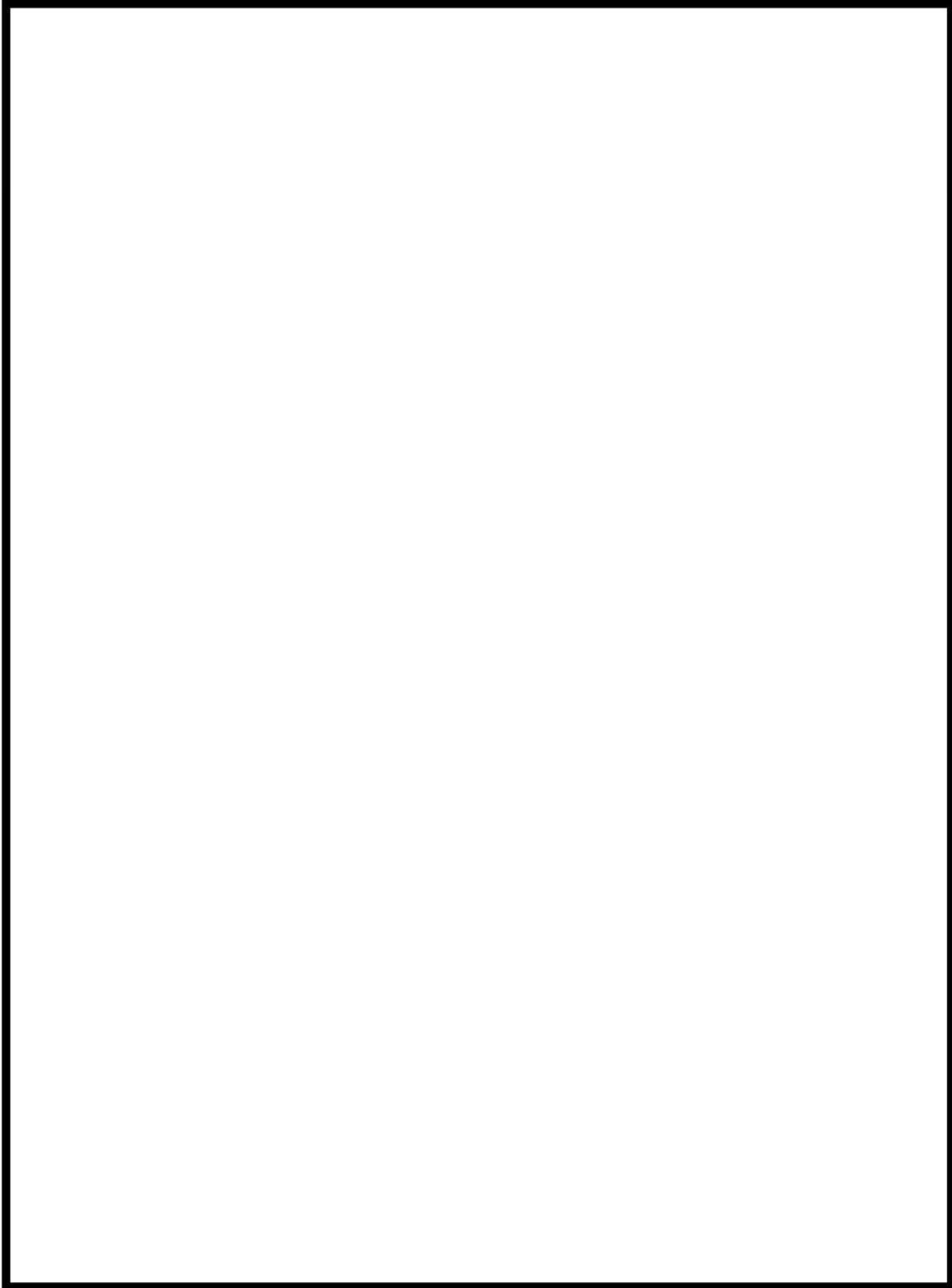
$$\gamma = (C_{H2in} - C_{H2out}) \cdot P \cdot V_{in} \cdot A_{in} / (R_{H2} \cdot T_{in})$$

- |             |                     |          |                                 |
|-------------|---------------------|----------|---------------------------------|
| $\gamma$    | : 水素処理速度 (g/s)      | $V_{in}$ | : PAR 入口流速 (m/s)                |
| $C_{H2in}$  | : PAR 入口水素濃度 (vol%) | $A_{in}$ | : PAR 入口流路断面積 (m <sup>2</sup> ) |
| $C_{H2out}$ | : PAR 出口水素濃度 (vol%) | $R_{H2}$ | : 水素ガス定数 (J/kgK)                |
| $P$         | : 圧力 (bar)          | $T_{in}$ | : PAR 入口温度 (K)                  |


 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



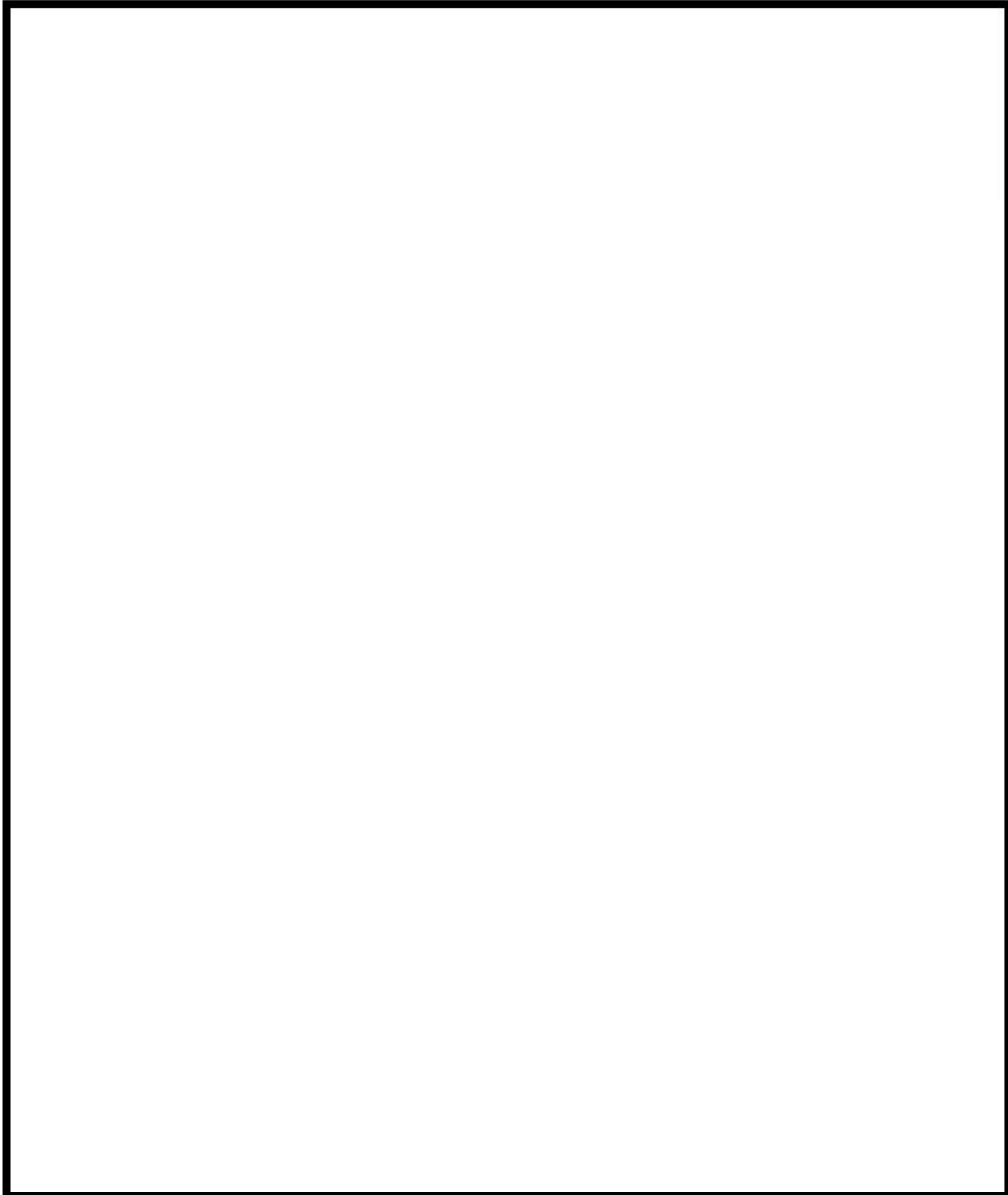
THAI 試験による試験値と性能評価式との比較 (2)



PAR 入口水素濃度に対する水素除去割合 (g/s) は、試験と評価式でほぼ一致していることを確認  
→水蒸気濃度等各種の条件を変えた試験、毒物注入条件等で、試験による水素除去割合と性能評価式との比較を行い、影響の程度を確認。

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## THAI 試験による試験値と性能評価式との比較 (3)

水蒸気濃度の水素除去割合 (g/s) への影響を確認

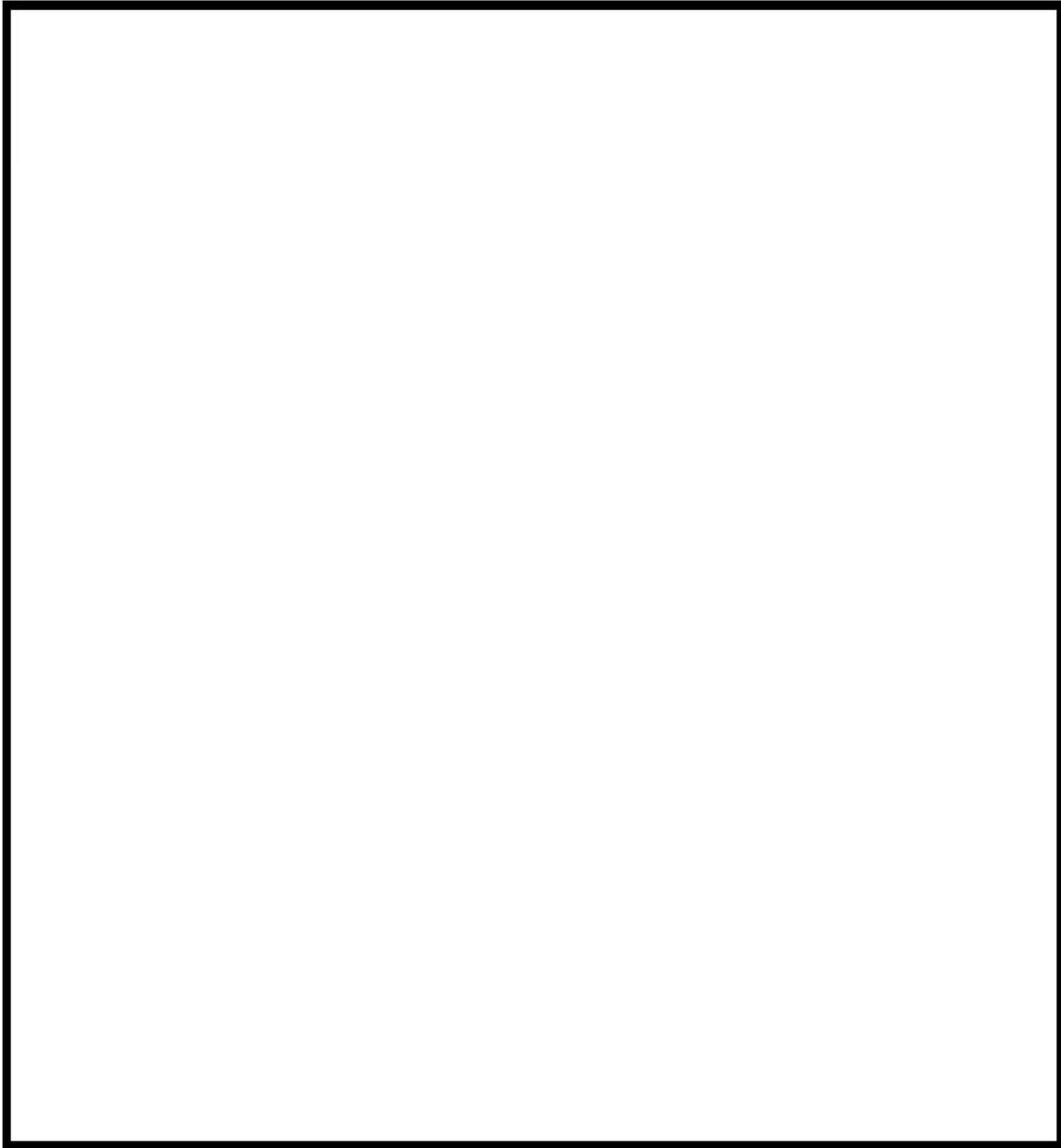
水蒸気濃度 25%以下の試験ではメーカー評価式とよい一致を示す。一方、それより高い水蒸気濃度の試験では、メーカー評価式よりも水素除去割合は低くなった。

これは、メーカー評価式は 1bar、25°C飽和蒸気の試験条件をベースとしたものであるため、高水蒸気濃度下では、PAR の効果がやや低下することに対応していないと考えられる。

しかしながら、実機の著しい炉心損傷時の水蒸気濃度はごく初期の放出時を除き 25%以下となることから、十分適用できるものと評価する。

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

THAI 試験による試験値と性能評価式との比較 (4)  
[エアロゾルによる影響確認試験]

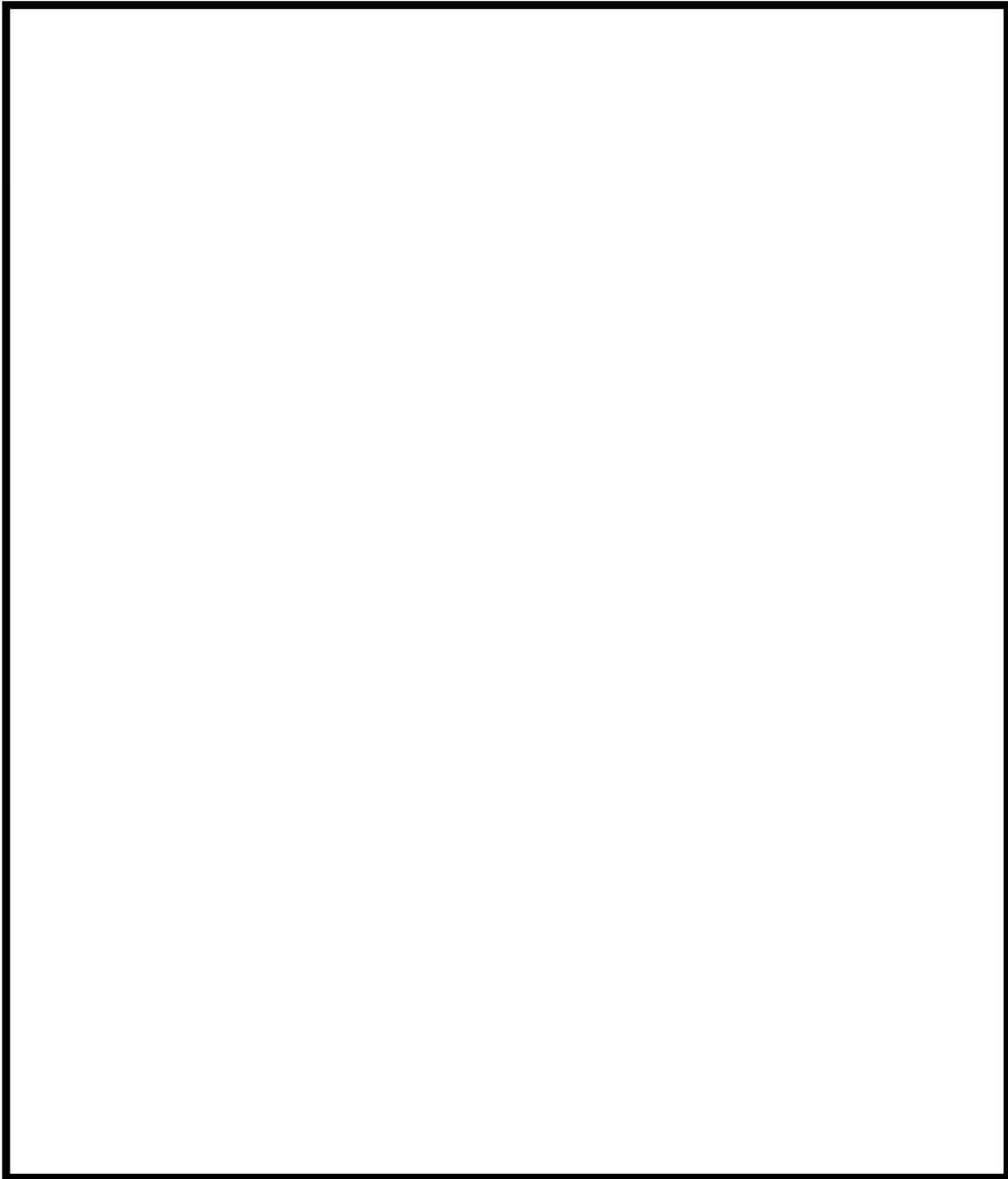


高濃度のエアロゾルが注入されている条件下においても、PAR の水素除去効果のあることが確認され、メーカー評価式とほぼ一致していることを確認している。

(試験条件のエアロゾル濃度  $\square$  g/m<sup>3</sup> 程度 (最大約  $\square$  g/m<sup>3</sup>) は実機で想定される範囲 (泊 3 号炉の場合、最大約 1100mg/m<sup>3</sup>) を十分超えるものとなっている。)

$\square$  枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## THAI 試験容器内の水素濃度の混合状況等



## 試験容器内の濃度、水素濃度の分布

- PAR による発熱の影響を受けても、PAR 出口から上方の各測定点において、温度は概ね均一な分布になっており、試験容器内の混合により、時間の経過とともに概ね均一な温度分布となっていることが確認される。
- 水素体積比については、PAR 出口から上方の各測定点において、概ね均一な分布となっていることが確認される。

■ 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。


## まとめ

- PAR の水素除去割合 (g/s) を評価する式は、PAR とその触媒の設計の効果を踏まえ、PAR 周囲 (入口) の水素濃度と周囲圧力を主要パラメータとし、メーカー社内試験結果より係数を設定した実験式作成
- メーカーは社内試験による検証と、温度や水蒸気濃度等の影響、スプレイ等の性能影響を確認するとともに、PAR 開発以降、EDF、EDF/CEA、EDF/EPRI、PHEBUS (FPT3)、THAI 等の国際的なプロジェクト試験に PAR を提供し、各種シビアアクシデント環境状況下での適用性について実証試験による確認を受けている。
- PAR 性能評価式は、これらの確認を経て、実機 PWR のシビアアクシデント条件の範囲において、適用が可能なものと評価される。  
(ただし、THAI-2 プロジェクト等試験は継続的に実施されており、今後も最新の知見を踏まえて必要な対応を図っていく必要がある。)

※泊発電所 3 号炉の事故時の C/V 内条件から、これらの確認された範囲にあることを確認しているため、PAR の性能評価式を適用できると評価する。

メーカーにおける PAR の開発・検証試験の経緯




 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

各社 PAR の構造概要

\*THAI の部分試験体



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## PAR の長時間運転時の性能について

PAR の性能実証試験においても、長期間に渡っての実証試験結果はないが、重大事故時における PAR の高温時の長期間運転時の性能への影響について以下のように考察した。

シビアアクシデント時の PAR 設置環境では、触媒プレートの発熱の影響及びその他影響因子については、PAR に以下のような設計上の考慮がなされている。

- シビアアクシデント時の PAR 設置環境では、PAR の発熱の影響を考慮しても、筐体の温度は最高でも 500℃程度であり、PAR 筐体に使われている材料は、最高使用温度 500℃においても Ss 地震動にて発生する応力を下回っており、地震発生時においても、PAR の構造健全性を損なうことはない。
- 触媒を耐熱性のある容器 [ ] を選定しており、触媒反応で高温となるようにして触媒阻害因子が剥離しやすい状態としている。
- PAR の触媒は、水素ガスと酸素ガスを反応させて水を生成する速度を高めているが、ここで起こる触媒反応は、触媒表面に吸着された水素分子及び酸素分子を解離させ、その後化学反応により水分子として結合させる反応のことで、この一連の反応で触媒そのものは反応前後で状態が変わらない（劣化しない）ものであり、再結合反応を起こしている間、触媒が劣化することは無く、水素処理性能は低下しない。

また、シビアアクシデント時の PAR 設置環境を模擬した多くの実証試験が行われており、THAI 試験などでのエアロゾルの付着影響試験、水蒸気環境での影響確認試験で、触媒反応が開始すること、及び再結合効率に大きな影響は無いことが確認されている。

以上より、PAR 運転状態における最高使用温度において、PAR の構造健全性は維持され、PAR 性能を阻害する因子についてもその影響が確認されているため、エアロゾル等発生する重大事故時における高温時の長期間運転に対しても、性能に有意な影響はないと考えられる。

[ ] 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



## PAR の使用前検査における性能確認方法

## 1. 検査内容

## (1) 機能検査

検査装置にて、白金系触媒の活性が劣化していないことを確認する。

## (2) 外観検査

PAR 筐体及び触媒プレートに異常がないこと及び PAR 本体のガス流路に異物、閉塞がないことを確認する。

## (3) 重量検査

PAR の触媒プレートについて初期の触媒付着量を確認する。

## 2. 検査による PAR 性能確認

PAR の再結合効率（性能）は、メーカ性能評価式で表される。この性能評価式は、パラメータである水素濃度及び圧力に加え、PAR の幾何学的な構造・配列等を考慮して試験等により係数（A 及び B）が設定されている。これらを含めた PAR の性能を決定する因子（流量、触媒反応速度）を整理すると、別表 1 のような影響因子があると整理できる。

流量については、PAR の構造に依存した熱バランスにより決まる触媒温度で決定される。

PAR は、雰囲気中の水素（水素濃度及び圧力に依存）によって触媒反応が起こり、発熱する。

PAR の構造は、触媒プレート（本体下端部）の発熱によって高温になることにより、筐体に沿って上昇流が発生し、PAR 本体上部より排気される構造となっている。ゆえに、触媒プレートからの輻射・伝熱は、PAR 本体の幾何学的な構造に関わり、発熱と輻射・伝熱の熱バランスで触媒温度が決まる。

従って、プレート収納引き出しが PAR 本体下端にあること、及び筐体が図面通り（直方体かつ板貼り構造）の外観であることを外観検査により確認し、メーカ設計通りの構造であることを確認することで、メーカ性能評価式に考慮される係数がそのまま適用できることを確認する。なお、PAR の発熱反応については、性能評価式の係数ではなく、パラメータとして水素濃度及び圧力に考慮されていることから別途検査不要と判断した。

触媒反応速度については、PAR の触媒プレートの触媒反応とその近傍の水素の拡散挙動により決定される。触媒プレート付近の拡散挙動は、触媒温度に依存する流れ（流量）と触媒プレート付近の幾何学的構造に依存するため、プレートが垂直配列であること及びガス流路に異物、閉塞が無いことを外観により確認する。

触媒反応は、白金系触媒の活性が劣化していない（触媒が活性する）ことを機能検査にて確認し、触媒プレートの触媒の付着状況を外観にて確認することにより、PAR の性能

が発揮される状態であることを確認する。

$$\gamma = \eta \cdot \min (X_{H_2}, 2 \cdot X_{O_2}, 8.0) \cdot (A \cdot P + B) \cdot \tanh (X_{H_2} - 0.5)$$

$\gamma$  : 再結合効率 (g/s)

$\eta$  : 1.0 ( $X_{O_2} > X_{H_2}$ )

$X_{H_2}$  : 水素濃度 (%)

$X_{O_2}$  : 酸素濃度 (%)

P : 圧力 (bar)

A, B : 係数

別表1 流量及び触媒反応速度の影響因子

決定因子	項目		影響因子	検査での確認方法
流量	触媒温度 (熱バランス)	発熱*2	水素濃度	検査対象外*1 (性能評価式パラメータ)
			圧力	検査対象外*1 (性能評価式パラメータ)
		輻射 ・伝熱	PAR 本体の幾何学的な構造*3 ・プレート位置が PAR 本体下端 ・管体構造	プレート収納引出しが PAR 本体下端にあることを確認することを目的として外観検査を行う。
触媒反応速度	拡散挙動		触媒近傍の幾何学的な配置 ・プレートが垂直配列*4 ・異物確認	プレートが垂直配列されていることを確認することを目的に外観検査を行う。
	触媒反応		触媒の反応性	検査装置で確認
			触媒の付着状況	触媒の外観検査により、触媒の表面に触媒の有意な欠落がないことを確認する。

- \*1：影響因子のうち、水素濃度及び圧力は性能評価式のパラメータであり、検査対象外とする。
- \*2：発熱は再結合する水素の量で決まる。再結合する水素量は、PAR に流入する水素分子量と「触媒反応速度」で決まる。「触媒反応速度」は別途確認するので、ここでは、PAR に流入する水素分子量を決める水素濃度と圧力が影響因子となる。
- \*3：輻射・伝熱は高温部と低温部の幾何学的な位置関係（輻射においては形態係数として扱われる）で決まる。高温部は触媒であり、低温部は管体である。触媒が収納されている引出し部が管体全体でどこに位置するかを確認すれば空間的な位置関係が確認できることになる。また、PAR 管体の形も当該位置関係に関与するので確認対象である。なお、水素再結合反応は PAR の代表的な寸法（例えば、高さ 1400 mm とか）に対し mm オーダで変わるものではなく、寸法検査までの必要性はないと評価した。
- \*4：拡散挙動は、環境水素濃度と触媒表面の流動境界層厚さで求まる濃度勾配で決まる。流動境界層厚さは、全体流れとの相対位置関係で決まり、性能実証した装置と同じ配列（垂直に差し込んである）であることを確認すればよい。

### 3. 検査装置

検査装置内に触媒プレートをセットし、水素を含む試験ガスを送り込み、検査装置出口部濃度が低下することで、触媒プレートの水素再結合反応の開始を確認し、白金系触媒の活性が劣化していない（触媒が活性する）ことを確認する。検査装置条件を別表2に示す。

別表2 検査装置条件

項目	検査装置条件	備考
水素濃度 (vol%)	3	水素濃度が高いほど水素再結合反応が生じやすいので、検査での水素濃度は運転条件水素濃度より低く設定している。
触媒プレート枚数 (枚)	3	触媒プレートは、どれか1枚の触媒プレートが反応すると連動して隣接した触媒プレートが反応を開始する「ドミノ効果」と呼ばれる現象が見られることから、検査で用いる触媒プレートの枚数が多いほど、どれか1枚の反応が発動しやすいため、検査枚数は、運転条件枚数より少なく設定している。
温度 (℃)	50	温度が高いほど水素再結合反応が生じやすいので、検査での温度は運転条件より低く設定している。
流量 (ℓ/h)	500	ガス中の水素は順次触媒反応で失われていくので、流れの後方ほど薄い水素濃度での触媒反応となる。流量が速いほど流れの後方でも高い水素濃度での触媒反応が期待できるため、検査での流量は運転条件流量より低く設定している。

#### 4. 判定基準

##### (1) 機能検査

- ・水素濃度約 3vol%の試験ガスで、検査装置入口濃度部を 100%として出口部濃度が 15 分以内に 75%以下になること。

##### 【理由】

触媒が活性することを確認するには、実際に水素を含むガスを流し、触媒反応が表れることを確認すればよい。

よって、濃度の低下に関する基準としては、出口の水素濃度がわずかでも低下すれば水素再結合反応が生じていると判断できる。

しかしながら、計測誤差（検査装置の水素濃度計の精度±5%）に十分余裕を見た上で、反応していると判断できる、初期値の 25%変化（低下）を判断基準としている。

また、この水素再結合反応が生じるまでの判定基準は、15 分以内としている。この時間については、触媒プレートを再生運転（加熱処理による反応させる）させるかどうかについての目安時間として設けているものであり、事故初期において、PAR 反応が遅れることによる C/V 内の水素濃度への影響は微小であることを PAR 性能に関する説明にて示していることから、問題ない。

なお、その影響評価については、KILI-H2 TEST において水素再結合反応開始が遅れた時間が最大約 10 分であった結果から性能評価式への影響が微小であることを別途確認しているが、KILI-H2 TEST は温度が約 100℃で試験されており、本検査の場合の試験条件（別表 2 に整理）が、触媒反応が生じにくい条件であること、及び初期値の水素濃度 25%変化を別途判定基準として定めていることから妥当と考えられる。

参考

参考に本機能検査の判定基準に基づく触媒反応（水素濃度の低減割合）が、THAI プロジェクト等により性能実証した PAR と同等か検証する。

THAI 試験の再結合効率及び触媒プレート温度は別図 1 及び別図 2 に示すとおり触媒プレート温度が約 50℃の場合、再結合効率は約

検査装置で初期水素濃度の 75%低下を想定すると初期水素濃度 3%、流量 500ℓ/h の場合、得られる再結合率は THAI 試験と同等の  となる。

従って、本機能検査の判断基準を満たせば、THAI プロジェクトの装置で実証した PAR の触媒反応と概ね同等と考えられる。



別図 1 触媒プレート温度



別図 2 再結合効率

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## (2) 外観検査

### a. PAR 本体 (全数)

- ・プレート収納引き出しが PAR 本体下端にあること、及び筐体が図面通り（直方体かつ板張り構造）の外観であること。
- ・PAR 本体のガス流路に異物、閉塞がないこと。
- ・プレートが概ね垂直に差し込まれていること。

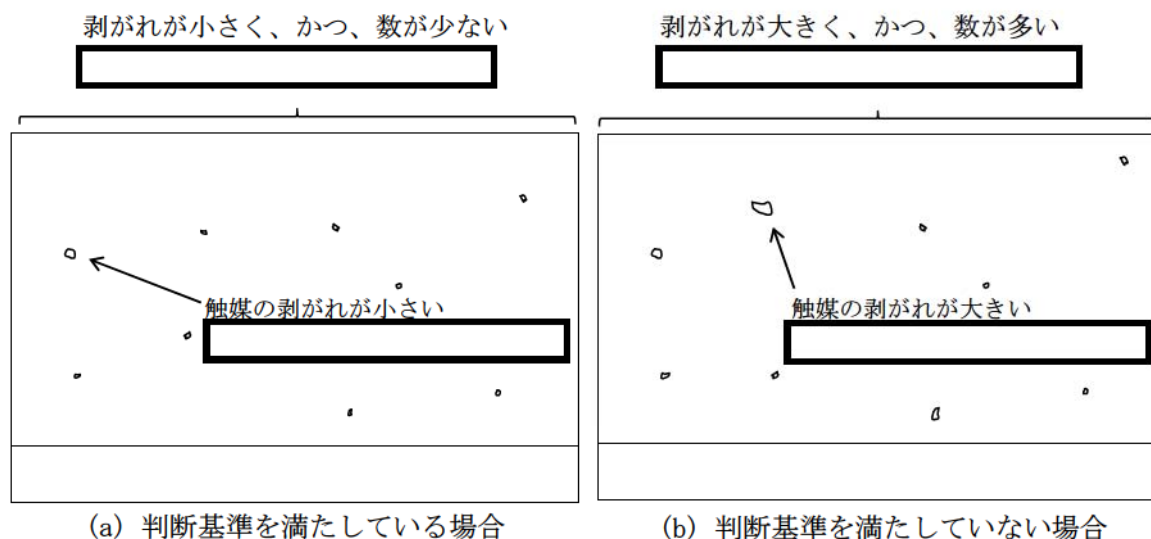
### b. 触媒プレート (機能検査を行う 3 枚のみ)

- ・触媒の表面に触媒の有意な欠落\*がないこと。

※ メーカー基準による。

メーカーは、メーカー性能評価式で求められる性能が得られる触媒面積以上の面積を持つ触媒プレートを装備させており、たとえ一部欠落していたとしてもメーカー基準（全体の約   欠落までを許容）を満たせば、メーカー性能評価式で求められる性能が確保されるとしている。

その根拠として、メーカーは、触媒面積に応じた性能を検証した試験を実施しており、導入する PAR の場合は、その性能を検証した必要触媒面積に対し、余裕を持った触媒面積を持つ触媒プレートを採用しているため、当該欠落が生じても性能が確保できるとしている。



別図3 判断基準のイメージ

  枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

(3) 重量検査

a. 触媒プレート

- ・触媒プレートに付着している触媒重量が基準値※以上であること。

※メーカー基準による。

触媒プレート製造時に母材重量を差し引いた触媒重量が、別表3に示す仕様を満たすこと。

別表3 触媒プレートの性能に係る仕様

触媒材質	触媒重量 (基準値)

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



## 原子炉格納容器内水素処理装置温度について

### 1. 目的

PAR は、C/V 内の水素濃度上昇に従い自動的に作動する装置であり、電源や運転員による操作の不要な装置である。

PAR は、触媒における再結合反応により水素を除去する装置であるので、水素濃度の上昇、水素処理割合の増加に従って装置内の温度が上昇する（別図 4）ことから、PAR に温度計を設置することにより、水素処理の状況を把握することができ、PAR による水素処理が行われていることを確認することができれば、事故対処時の有効な情報となると考えられる。

このことから、C/V 内に設置されている PAR（全 5 個）に、熱電対を取り付け、中央制御室にて PAR の温度を確認できるようし、重大事故対処時の監視情報の充実を図る。



別図 4 PAR の温度上昇

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 2. 設備概要

PAR 全 5 個に対し、熱電対を取り付け、事故時の PAR の測定温度を中央制御室に表示し監視できるようにする。

熱電対の設置位置は、PAR 筐体側面に熱電対シースを取り付け、触媒プレート上部のガス温度を測定できるようにする。泊 3 号炉の C/V 雰囲気温度の最高値は、C/V 過温破損シナリオ時において約 141℃であるので、4vol%程度以上の水素濃度で PAR による水素除去（触媒部での水素再結合反応）が起こっていることを確認することができる（別図 4 より、水素濃度 4vol%のとき PAR 内部のガス温度は 200℃～300℃程度となる）。

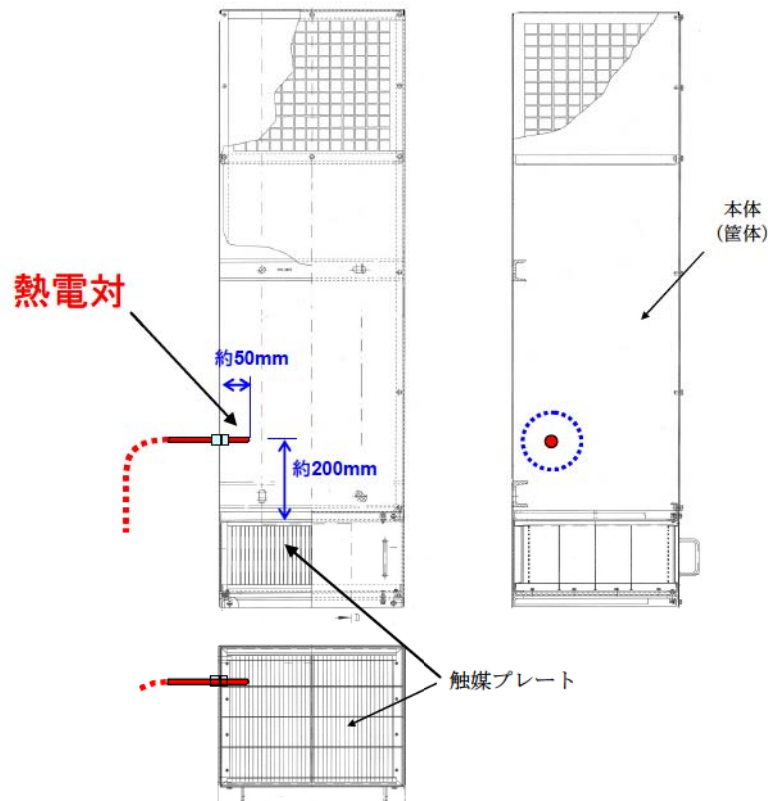
なお、PAR の再結合反応時の温度上昇の温度計による確認方法については、今後の国際的な試験状況等も踏まえて改善検討を行っていく。

PAR への熱電対取り付け位置は、サポートとの干渉を考慮した PAR 筐体への取り付け性・固定性、触媒プレートの保守性等を考慮して PAR 下部側面から挿入し、触媒プレート上部のガス温度が測れる位置としている。（別図 5）

熱電対シースは外径 3.2mm であり、筐体内への挿入長さも 50mm 程度とわずかなことから、PAR の筐体内流路影響の観点から水素除去性能へ影響を及ぼすものではない。

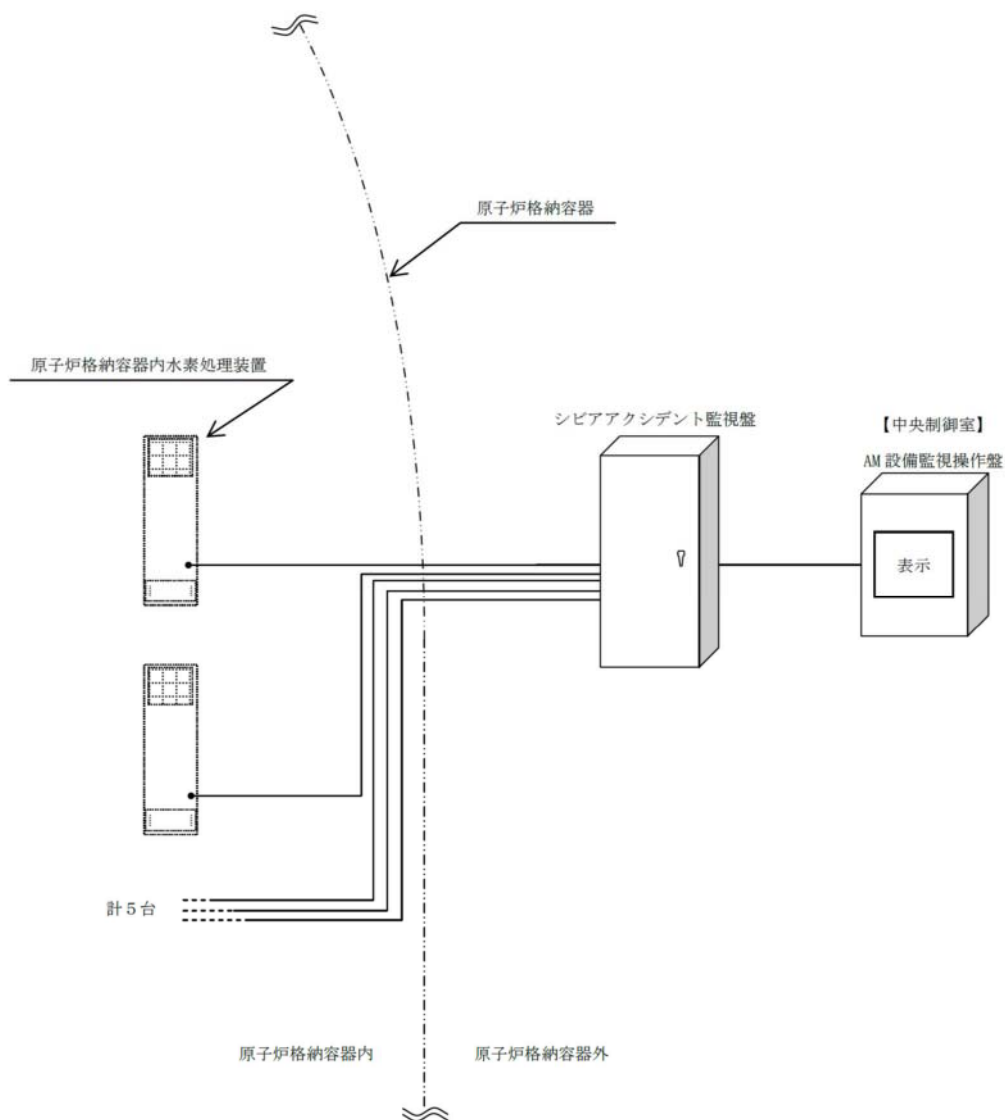
仕様：シース付き熱電対（シース外径 3.2mm）1 個/PAR1 個

熱電対は約 800℃の計測を可能とする。



別図 5 PAR への熱電対取り付け位置

測定温度は、シビアアクシデント監視盤に入力し、水素燃焼の状況を AM 設備監視操作盤の温度計（熱電対）のデジタル表示（トレンド確認可能）にて確認が可能である。（別図 6）。



別図 6 PARの動作監視装置

## PAR による水素処理の反応律速について

PAR による水素再結合の反応は、不均一系触媒反応であり、PAR の触媒プレートは多孔質金属触媒をプレート材にコーティングしているものであるため、流通相のプレート間流路から触媒外表面への外部拡散、触媒内粒子内表面への細孔内拡散がかかわっていることから、触媒反応による水素処理反応は拡散過程が総括反応速度を律していると考えられる。

試験結果（参考 1）において、水素濃度の上昇とともに再結合効率が上昇するが、反応率（(PAR 入口-出口の水素濃度差)/PAR 入口水素濃度:%）は、水素濃度の上昇に対して大きく変わっていないことが確認されている。温度上昇に対する再結合(kg/h)は、PAR の入口水素濃度の増加分に対応して増加する形となっていることから、PAR による水素再結合反応が進んでいる段階では拡散律速になっていると考えられる。

一方、反応開始時の状況では、触媒の温度が低く、アレニウスの式で示されるとおり、触媒反応が起こりにくい状態と考えられ、化学反応律速状態であると考えられる。

なお、THAI 等の試験で確認された PAR の起動遅れについては、反応開始時では試験前の水蒸気雰囲気下（触媒表面への水分吸着）の影響、直前の試験による触媒表面状態の影響等が PAR の起動（反応開始遅れ）に影響した可能性が考えられる。

- 参考 1 PAR の水素再結合反応の律速因子について
- 参考 2 触媒の反応速度について
- 参考 3 化学辞典第 2 版(森北出版)

PAR の水素再結合反応の律速因子について

PAR において、再結合反応が開始した後は、水素濃度の上昇に比例して、再結合性能(kg/h)が高くなり、これにより触媒プレートの温度も高くなる。(図 1)

THAI プロジェクトの試験結果では、反応率((PAR 入口ー出口の水素濃度差)/PAR の水素濃度:%)は、水素濃度に対してあまり変わっていない。(図 2)


温度上昇に対する再結合性能(kg/h)は、PAR の入口水素濃度の増加分に対応して増加する形となっていることから、この段階では拡散律速になっていると考えられる。

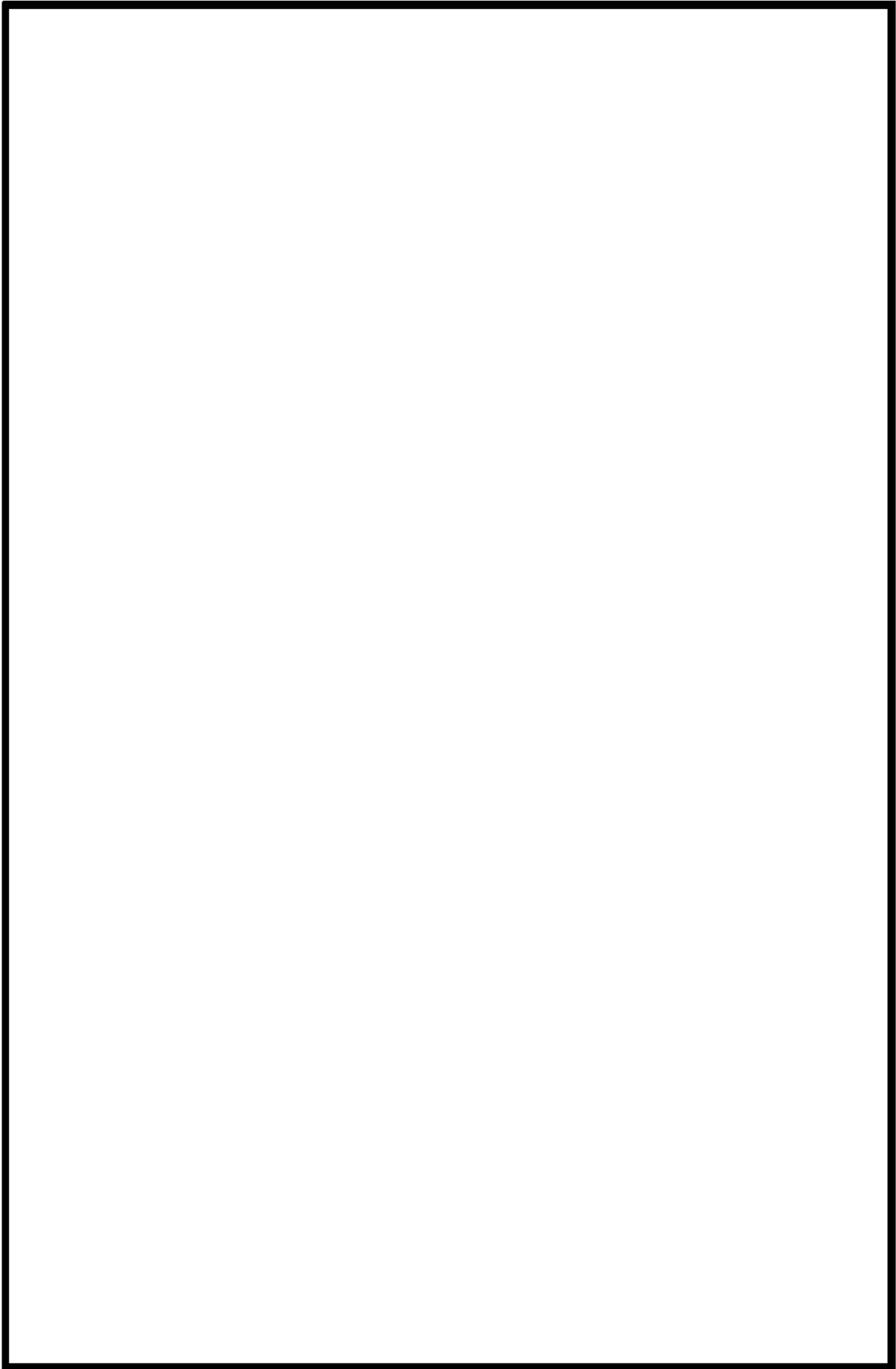



図 1 PAR の温度上昇



図 2 PAR の水素除去反応率

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 触媒の反応速度について

化学反応による濃度変化は、一般的に次の式で表される。濃度変化は、総括反応速度定数が大きいほど早いことが分かる。

$$C_{H_2}(t) = C_{H_2}^0 \times \exp(-k t)$$

ここで、 $C_{H_2}(t)$  : 時刻  $t$  の濃度  
 $C_{H_2}^0$  : 時刻 0 の濃度  
 $k$  : 総括反応速度定数  
 $t$  : 時刻

総括反応速度定数とは、複数の化学反応プロセスを含む場合に、個々の速度定数を考慮した全体としての速度定数のことである。触媒反応の場合、触媒化学反応を示す反応速度定数  $k_1$  と拡散現象を示す拡散定数  $k_2$  で決まるとされている。

式で表すと、以下のとおり。

$$1/k = 1/k_1 + 1/k_2$$

したがって、総括反応速度定数は、触媒化学反応速度定数と拡散定数の小さい方に依存する。このことから、この小さい方の定数を決める反応（現象）が律速条件となる。一般的に、温度が低いほど化学反応速度定数  $k_1$  が小さくなるので、化学反応が律速条件となり、温度が高いと拡散律速となる傾向にある。温度が低いほど化学反応速度定数  $k_1$  が小さくなることは、アレニウスの式で表されているとおり。

アレニウスの式  $k = A \times \exp(-E/RT)$

ここで、 $k$  : 反応速度定数  
 $A$  : 頻度因子（温度に関係しない係数）  
 $E$  : 活性化エネルギー（ほとんど温度に依存しない）  
 $R$  : 気体定数  
 $T$  : 温度

きる。選択性は、触媒物質の化学的性質にもとづく反応物の吸着の選択性や立体障害<sup>\*</sup>、表面の多孔性からくる拡散過程の影響や反応条件などの要因によって変化する。

**触媒の表面積** [surface area of catalyst] 固体触媒による反応の速度は、表面状態が一定であれば表面積に比例する。このことは活性点の分布状態は別として、単位表面積当たりの活性点密度が一定であることを意味する。固体触媒の表面積は、通常、物理吸着<sup>\*</sup>を利用して BET 吸着等温式<sup>\*</sup>から表面分子層に相当する吸着分子数を求め、これに吸着分子の断面積を乗じて算出される。1 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> 以上の表面積をもつ触媒については -196℃ における窒素の吸着がもっともよく利用される。特別な場合には二酸化炭素や種々の炭化水素も用いられる。これ以下の小表面積については、気相に残る気体量を減じて測定精度を上げるため、飽和蒸気圧<sup>\*</sup>の低いクリプトン、キセノンなどの希ガス<sup>\*</sup>が使われる。担体上に分散させた金属触媒などの表面積を測定する場合には、担体にも吸着する物理吸着は利用できないので、触媒物質の露出面にのみ吸着する化学吸着種を選んで、その飽和吸着量を測定する。この目的には水素および一酸化炭素がしばしば利用され、とくに水素は、金属触媒の表面をいったん酸化したのち、これを還元するのに必要な量から表面積を求める。酸素水素滴定法に用いられる。また、トリチウム<sup>3</sup>H による吸着水素のオートラジオグラフィ<sup>\*</sup>は、吸着点の表面分布を見いだすのに用いられる。

**触媒反応** [catalytic reaction] 触媒<sup>\*</sup>の作用によって進行する反応。反応系と触媒の状態の違いから、気相、溶液相についての均一系<sup>\*</sup>触媒反応と、固体触媒表面での気体分子や溶質分子の反応が行われる不均一系<sup>\*</sup>触媒反応とに分類される。コロイド状触媒や酵素のあずかる反応は、これらの中間領域に属する。不均一系触媒反応の過程は、一般に、(1)触媒作用が行われる部分(活性点)への反応分子の拡散などによる接近、(2)活性点への吸着あるいは配位、(3)活性点上の反応、(4)生成物分子の触媒からの脱離、から成り立っている。高圧気体、高濃度溶液や多孔質触媒の場合、反応速度はしばしば拡散過程に支配されるが、通常、反応過程の活性化エネルギー<sup>\*</sup>がほかの過程に比べていちじるしく大きいので、これが律速段階<sup>\*</sup>となる。このとき、反応速度は活性点の数に比例するから、反応が均一系であれば速度は均一触媒の濃度に、あるいは不均一系であれば固体触媒の表面積に比例することになる。しかし、固体触媒では反応速度が反応分子の吸着量に関係するため、速度式は必ずしも単純ではない。触媒により反応が促進されるのは、主として吸着、配位など反応物と活性点との反応により、無触媒の場合より活性化エネルギーが低く、より起こりやすい反応経路<sup>\*</sup>ができるためと考えられる。

**触媒部位** [catalytic site] 一 活性中心(酵素の)

**触媒有効係数** [effectiveness factor] 触媒反応の速度に及ぼす拡散過程の影響を表す一つの尺度である。固体触媒は、普通、粒子外部の表面積より細孔内部の表面積のほうがはるかに大きい。このような多孔質触媒においては、反応にあずかる気体成分は拡散によって触媒内部に移動して反応が起こる。いま、拡散速度が化学反応速度に比べて十分速ければ(化学反応律速)、触媒粒子内部にまで反応気体がいきわたり、粒子内で均一に反応が起こる。ところが、化学反応速度が拡散速度に比べて速くなると(拡散律速)、反応原料ガスが触媒内部へと拡散していくうちに反応してしまい、粒子の中心部では反応原料の濃度はほぼ0となって、中心部分の表面にある活性点は反応に関与しなくなる。そこで、実際の反応速度と、全表面積が有効にはたらいっているときに得られる反応速度との比を触媒有効係数という。拡散過程の影響がないときの触媒有効係数は1で、拡散過程の影響が増すにつれて触媒有効係数は1より小さくなる。



52-8 原子炉格納容器の水素濃度測定について

## 原子炉格納容器の水素濃度測定について

重大事故時の原子炉格納容器内の水素濃度の状況を監視するために、以下により水素濃度の測定を実施する。

### 1. 水素濃度監視設備

#### (1) 設備概要

炉心損傷事故時に、事故の初期段階から、水素濃度が変動する可能性のある範囲で原子炉格納容器内の水素濃度を連続測定ができるよう、可搬型の格納容器内水素濃度計を、格納容器雰囲気ガス試料採取設備に接続し、事故時の原子炉格納容器内の水素濃度を中央制御室において連続監視できるようにする。

可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット

検出器 : 熱伝導式

計測範囲 : 水素濃度 0~20vol%

また、サンプリングガスから原子炉格納容器内の水素濃度を測定するための後備設備としてガス分析計（ガスクロマトグラフ）も有している。

ガス分析計

検出器 : 熱伝導式

計測範囲 : 水素濃度 0~100vol%

なお、格納容器雰囲気ガス試料採取設備については、S s 地震動に対し耐震性を有していることを確認している。また、有効性評価において確認している格納容器最高圧力(約 0.360 MPa)・温度(約 141℃)での当該設備の健全性を確認している。

#### (2) 代替電源の確保

原子炉格納容器内の水素濃度を測定するために必要な電動弁や可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置などの電源は、非常用電源から給電可能となっており、全交流動力電源喪失の場合にも、代替非常用発電機から給電可能としている。

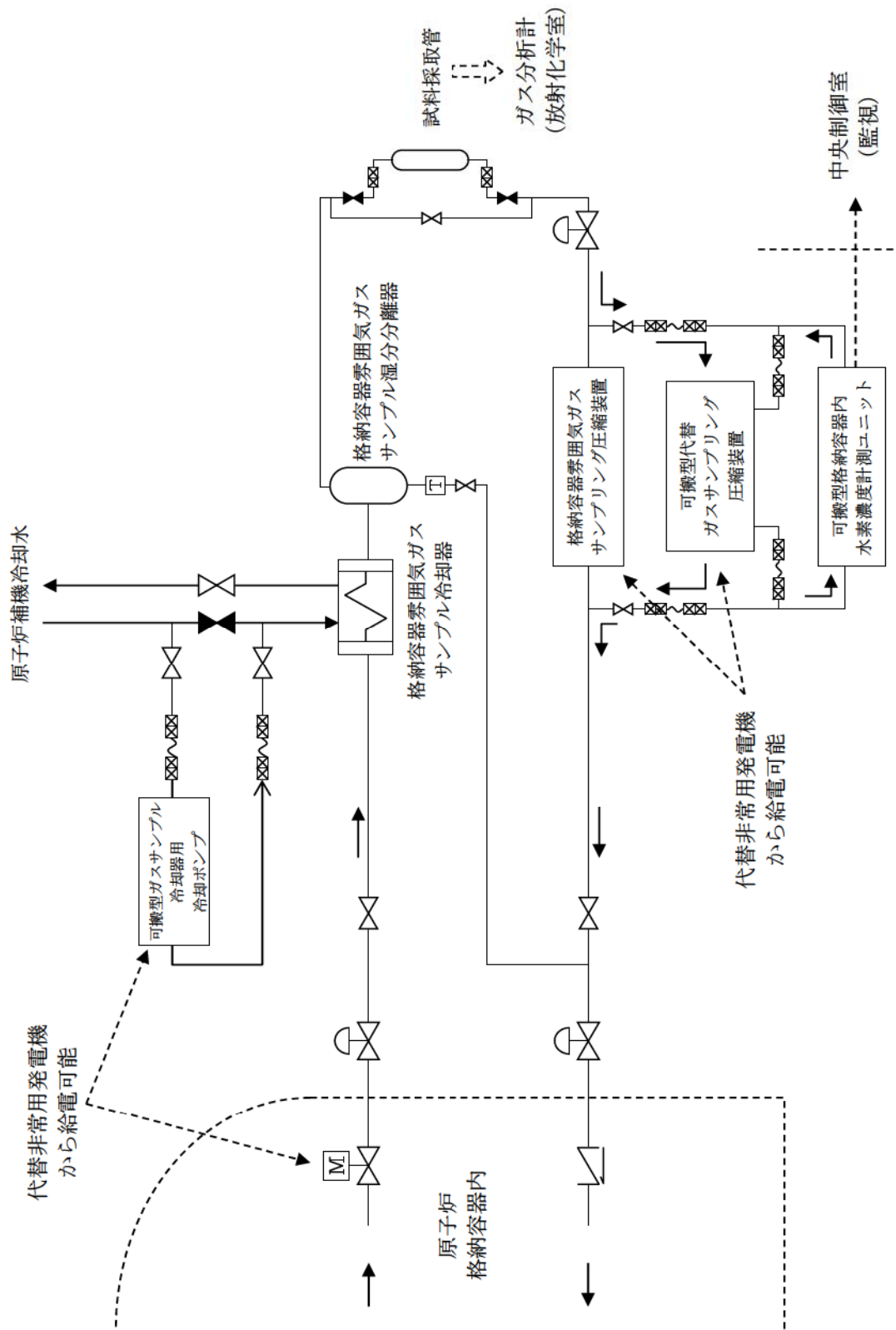


図1 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットを使用した格納容器水素濃度測定

## 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの測定原理と適用性について

## 1. 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットについて

可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットは、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を監視する目的で、水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している。

PWRプラントでは、炉心損傷時に原子炉格納容器内に発生する水素濃度を制御し、原子炉格納容器外へ排出する等の操作はないことから、可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットは、事故時に想定する水素濃度範囲内（13vol%未満）であることやPARや格納容器水素イグナイタ（以下、「イグナイタ」という。）による水素濃度低減等を格納容器内水素濃度の推移（トレンド）として連続的に監視できることが主な役割である。

このために、可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットは、事故初期に容易に準備対応ができ、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、プロセス計器として、中央制御室にて格納容器内水素濃度の推移（トレンド）を連続的に監視できることが必要であり重要となる。水素濃度レベルの程度や推移の監視ができる計測精度としては、概ね1vol%以下の計測精度を有する必要がある。

一方、ガス分析器（ガスクロマトグラフ）は、詳細なガス成分割合の分析を高精度で測定することができるが、分析員の手分析測定による間欠的な試料採取のため、被ばく等の観点から炉心損傷事故初期の対応が困難であり、中央制御室でのリアルタイムでの連続的な水素濃度監視については可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットでの監視測定が適している。

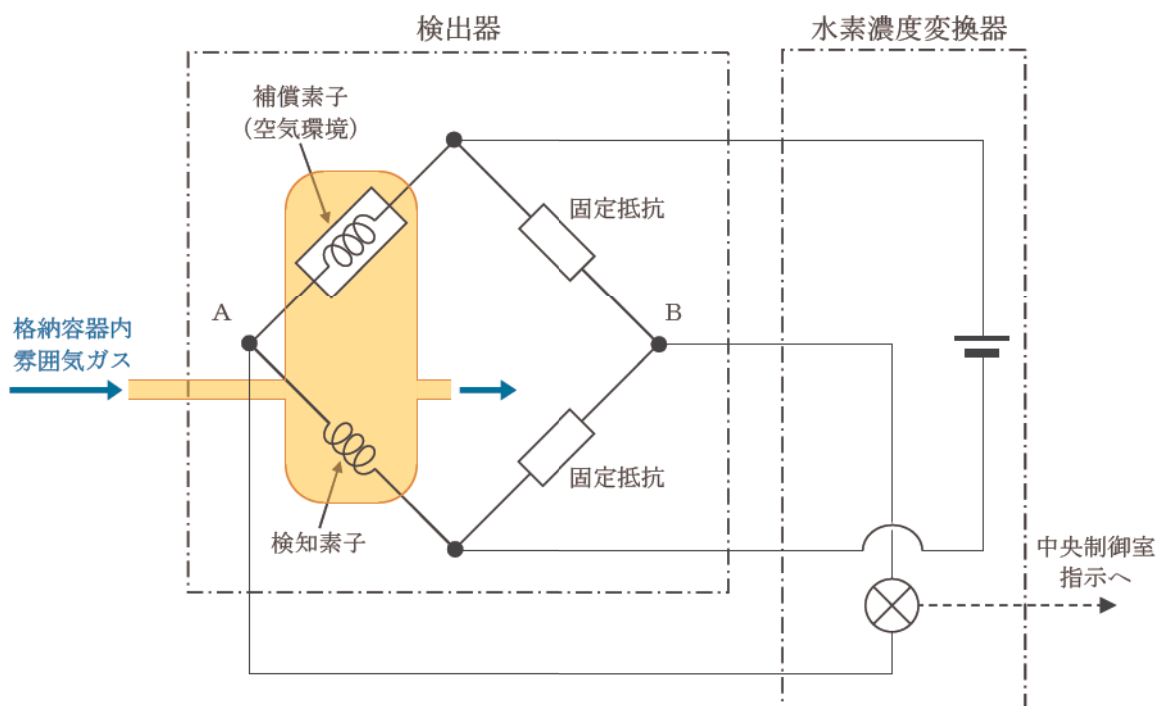
可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットは、水素の熱伝導率が空気、窒素、酸素等と大きく異なることを利用した、水素に着目した熱伝導式の濃度計であり、事故時に酸素濃度等のガス成分に変動があっても熱伝導率に大きな変化がなく、また、キセノン等の不活性ガスはバックグラウンドとなる空気と比較してモル分率が十分小さいためサンプルガスの熱伝導率への影響は十分小さいことから、水素濃度測定に対する大きな誤差にはならない利点がある。したがって、後述するシステムとしての計測精度を認識した上で、重大事故対処時の原子炉格納容器内の水素濃度の推移、傾向（トレンド）の監視のために対応できるものとしている。

## 2. 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの測定原理

### (1) 測定原理

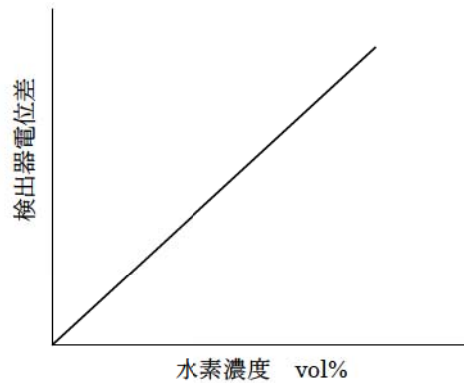
熱伝導式の水素検出器は、別図-1 に示すとおり、白金線のフィラメントで構成する検知素子と補償素子、及び2つの固定抵抗でブリッジ回路を構成している。検知素子の部分に、サンプリングされた格納容器内雰囲気ガスが流れるようになっている。補償素子側は基準となる標準空気が密閉されており、サンプリングガスは直接接触しない構造になっている。

(補償素子の標準空気容器の外側にはサンプリングガスが同様に流れ、温度補償が考慮された構造である。)



別図-1 水素検出回路概要図

水素濃度変換器により電圧を印加して検知素子と補償素子の両方の白金線を約 200℃に加熱した状態で、水素を含む測定ガスを流すと、検知素子側は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、別図-1 のA B間に電位差（電流）が生じる。この電位差が水素濃度に比例する（別図-2）原理を用いて、水素濃度を測定する。



別図－２ 水素濃度と検出器電位差の関係

水素検出器は、酸素、窒素などの空気中のガスに対し、水素ガスの熱伝導率の差が大きいことを利用し、標準空気に対するサンプリングガスの熱伝導率の差を検出する方式のものである。

水素の熱伝導率は、 $0.18\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  at  $25^\circ\text{C}$ , 1atm である一方、酸素、窒素は、約  $0.026\sim 0.027\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  at  $25^\circ\text{C}$ , 1atm で基準となる空気 (約  $0.026\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  at  $25^\circ\text{C}$ , 1atm) と熱伝導率がほぼ同じであり、空気内主要成分は窒素が 78vol%程度、酸素が 21vol%程度であることから、PARやイグナイトによる水素除去が進み、酸素濃度等のサンプルガス成分に変動があっても熱伝導率に大きな変化がなく、水素濃度測定に対する大きな誤差にはならない利点があり、格納容器内雰囲気ガスにおける水素濃度に着目したプロセス計器として適用できるものである。

また、燃料損傷時に発生するキセノン等の不活性ガスはバックグラウンドとなる空気に対して熱伝導率は低いが、水素や空気と比較してモル分率が十分小さい (約 1000 分の 1 以下) ため、サンプルガスの熱伝導率への影響は十分小さく、水素濃度測定に対する大きな誤差にはならない。

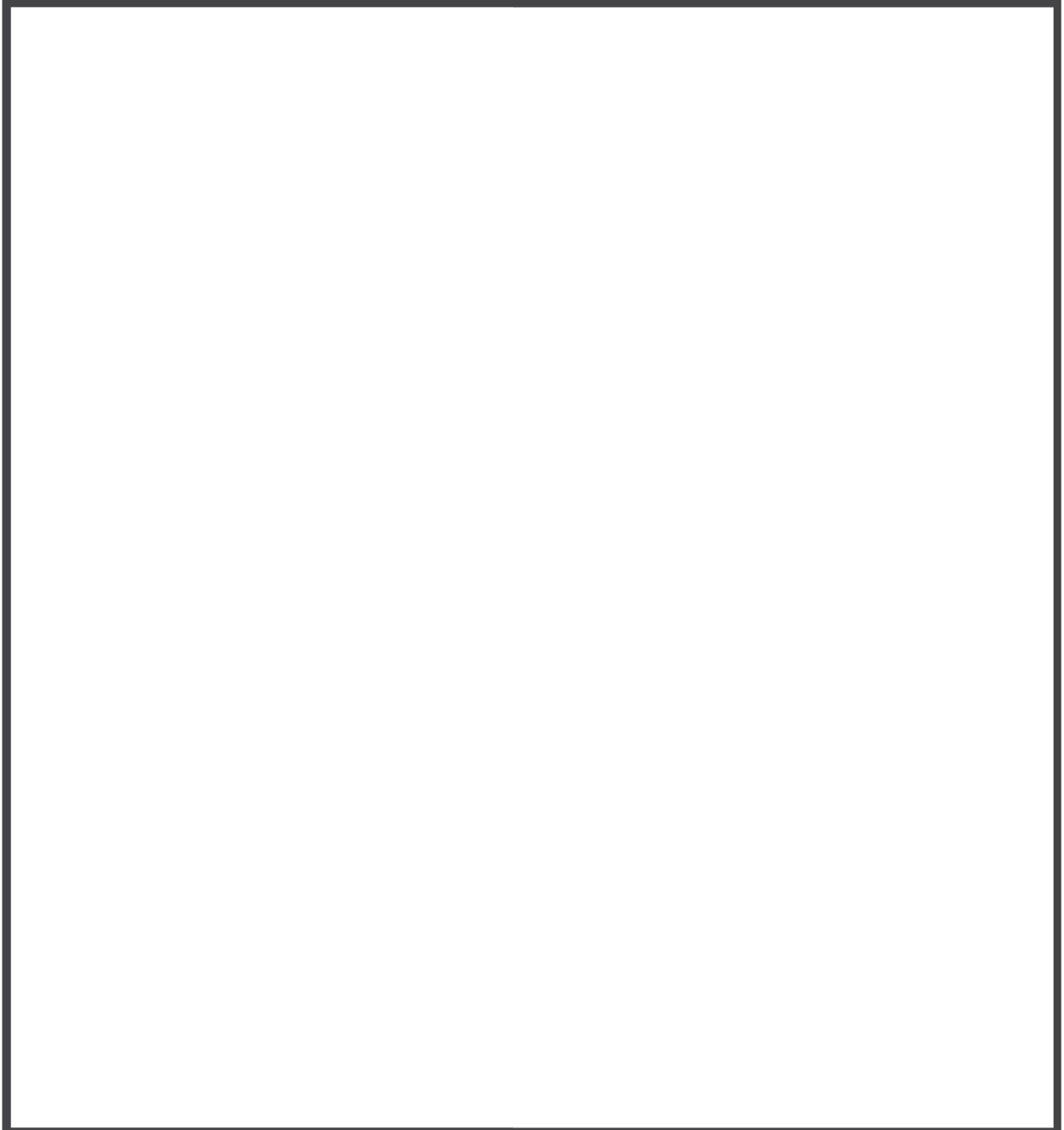
なお、事故時仮に一酸化炭素が発生した場合においても、一酸化炭素の熱伝導率は、 $0.025\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  at  $25^\circ\text{C}$ , 1atm であり、空気に近い値であるため、水素濃度測定に対する大きな誤差にはならない。

以上より、格納容器内雰囲気ガスを測定する場合でも、水素濃度計が持つ計測誤差 ( $\pm 5\%$  span、 $0\sim 20\text{vol}\%$ レンジで $\pm 1\text{vol}\%$ ) を大きく逸脱しない範囲で水素濃度の測定が可能と考えられる。

ガスの種類	熱伝導率 (mW/m・K) at25°C, 1atm
水素	180.6 (0.18W/(m・K))
窒素	25.84
酸素	26.59
空気	25.9 (約 0.026W/(m・K))
キセノン	5.59
一酸化炭素	25.0

(2) 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの構造

可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの構造概要は別図-3 のとおりである。



別図－3 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット 基本構造図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



### 3. 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの仕様と水素濃度測定システムの構成

#### (1) 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの基本仕様

測定レンジ：水素濃度 0～20vol%に設定

測定精度：±5%F.S.

上記測定レンジの空气中水素濃度に対して±1vol%

使用温度範囲：-10～70℃

使用圧力範囲：大気圧（±10kPa）

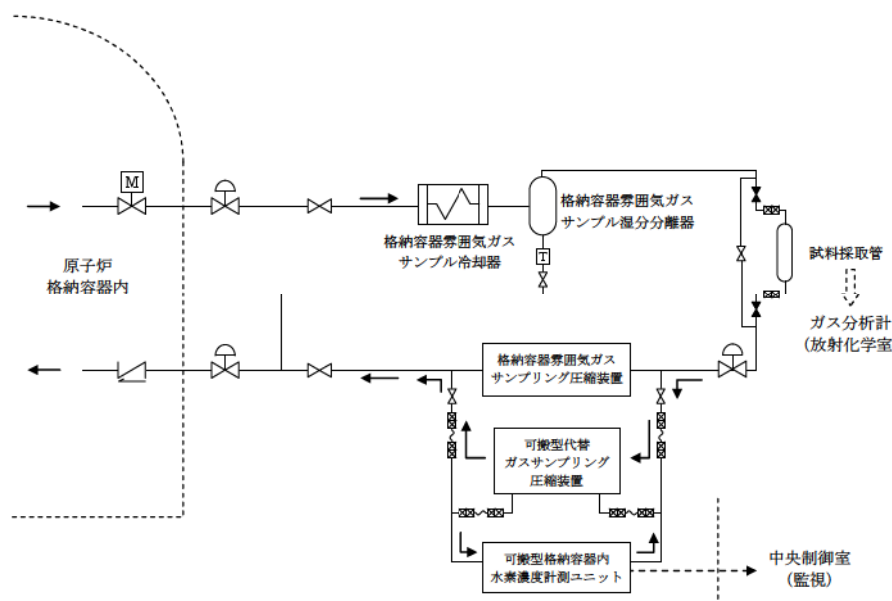
測定ガス流量：約 1ℓ/min

水素濃度計測装置の計測範囲 0～20vol%において、計器仕様上は最大±1vol%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、十分に事故対処時の水素濃度の推移、傾向（トレンド）を監視することができる。

#### (2) 水素濃度測定システムの構成

可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットによる格納容器雰囲気ガス試料採取設備の構成を、別図-4に示す。

原子炉格納容器からのサンプリングガスは、格納容器雰囲気ガスサンプル冷却器で冷却凝縮し、湿分分離器で水分を除去する。そして、ほぼドライ状態となったサンプリングガスを可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットに送り測定する。可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの検出器からの信号は、水素濃度変換器を経て中央制御室のAM設備監視操作盤に表示されるため、中央制御室での水素濃度監視が可能である。



別図-4 格納容器雰囲気ガス試料採取設備

### (3) 測定ガス条件の水素濃度測定精度への影響評価


#### a. 温度

サンプリングされた格納容器内雰囲気ガスは、十分な除熱性能を有している格納容器雰囲気ガスサンプル冷却器により、原子炉補機冷却水（以下「CCW」という。）と熱交換することで約 45℃以下まで冷却することができ※、その後の検出器までの配管での放熱もあることから十分に検出器の適用温度範囲内まで冷却され、ほぼ一定温度で検出器にサンプリングガスを供給することが可能である。また、標準空気が密封された補償素子の周囲にもサンプリングガスが流れることで、標準空気の温度がサンプリングガスに追従するように温度補償される検出器構造となっている。したがって、サンプリングガスの温度は一定温度で検出器に供給され、検出器内で温度補償されることから、使用する条件下において水素濃度測定への影響は十分小さい設計としている。なお、水素濃度 4vol%の試料ガスについて、温度を 20℃～60℃の範囲で変化させて試験を行い、有意な水素濃度の変化が認められないことを確認している。（別図-5）

※：重大事故時の原子炉格納容器内温度を 141℃とし、CCWの温度を夏場の 35℃とした場合でも、冷却器により約 45℃以下に冷却できる。



別図-5 各温度条件での水素濃度出力値

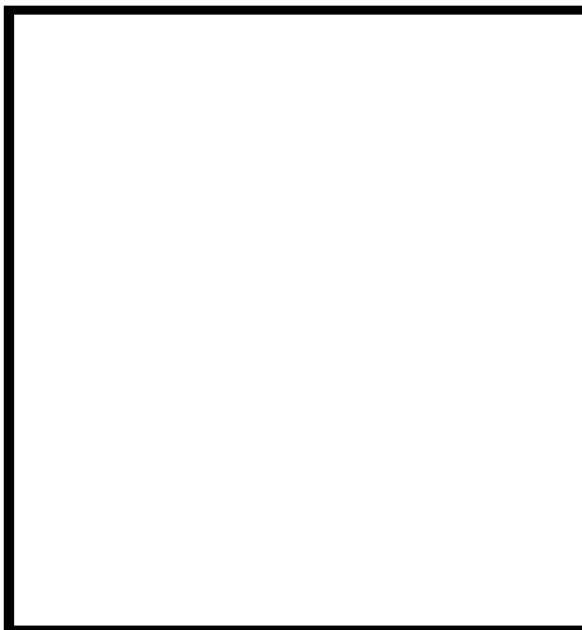
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

b. 流量

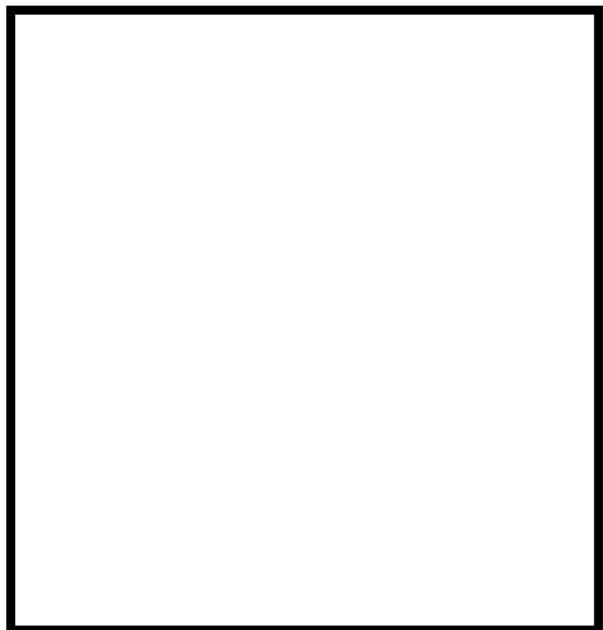
検出器へ流れるサンプリングガスの流量は、10/min 程度の小流量としており、流量の変動がないよう流量制御することとしている。なお、検出器へ流れるサンプリングガス流量を約 0.6~1.20/min の範囲で変化させた試験を行い、水素濃度測定値に有意な変化は認められないことを確認している。

c. 湿分


検出器へ流れるサンプリングガスの水蒸気が除去されていない場合は、水素濃度測定値へ影響することが考えられるが、サンプリングする原子炉格納容器内雰囲気ガスは格納容器雰囲気ガスサンプル冷却器により CCW と熱交換することで約 45℃ 以下まで冷却され、下流の湿分分離器によりサンプリングガス中の湿分を除去するよう設計しており、水素濃度計測装置の検出器に水分が付着するような状態となることはない。また、湿度が変動する要因としては、CCW 温度（冷却性能）、雰囲気温度が考えられるが、いずれも急激な変動は考えられないため、検出器での湿度はほぼ一定であり、水素濃度測定へ影響を及ぼすことはない。なお、水素濃度 0~20vol%、温度 20℃ の試料ガスについて、相対湿度を 30~90%RH の範囲で変化させた試験を行った。その結果、水素濃度 20vol% において 0.5vol% 程度の変化は見られるものの、相対湿度の変化に対して、水素濃度計指示に有意な変化はないことを確認している。（別図-6, -7）



別図-6 20℃における湿度依存性



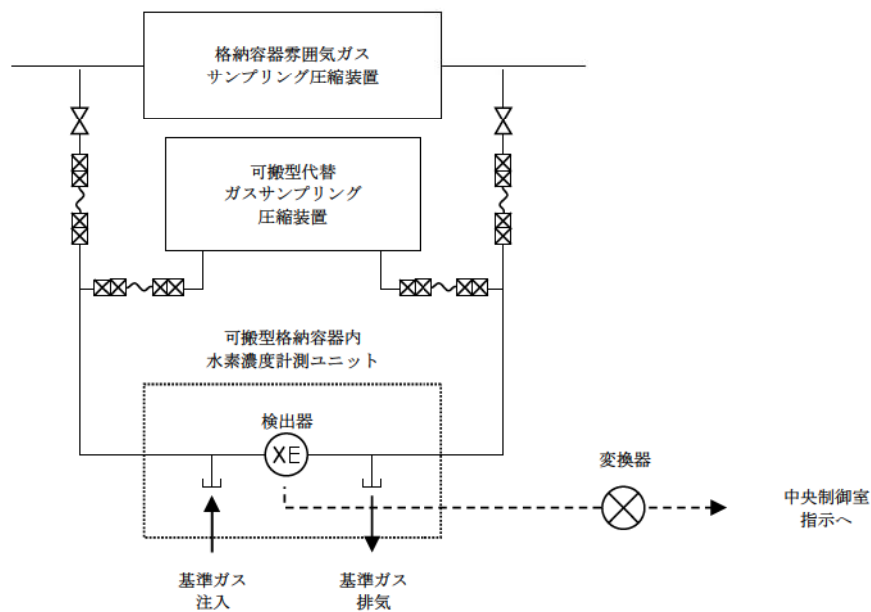
別図-7 20℃における各湿度条件での感度特性

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

d. 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの校正方法

可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの校正は、熱伝導式の検出器と変換器にて変換される水素濃度に比例した電流信号の調整（ゼロ点調整、スパン調整）を行うものである。使用する検出器と変換器による水素濃度 0～20vol%の校正は事前実施しておき、現場設置後には以下の手順により校正の確認を行う計画である。（詳細要領は現在検討中）

- (1) 試料容器に雰囲気空気と必要な体積分の高純度の水素を混ぜ合わせた校正用の水素混入空気（基準ガス）を作成する。
- (2) 校正された基準水素濃度計を用いて基準ガスの水素濃度を計測しておく。
- (3) 基準ガスを可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの検出器に供給し、中央制御室の水素濃度指示が基準ガスの水素濃度値と許容誤差内で合致しているか確認する。相違がある場合は、変換器にて調整を行う。
- (4) 水素濃度の異なる基準ガスを数点用いて(1)～(3)を繰り返し、調整を行う。



別図-8 可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットの校正

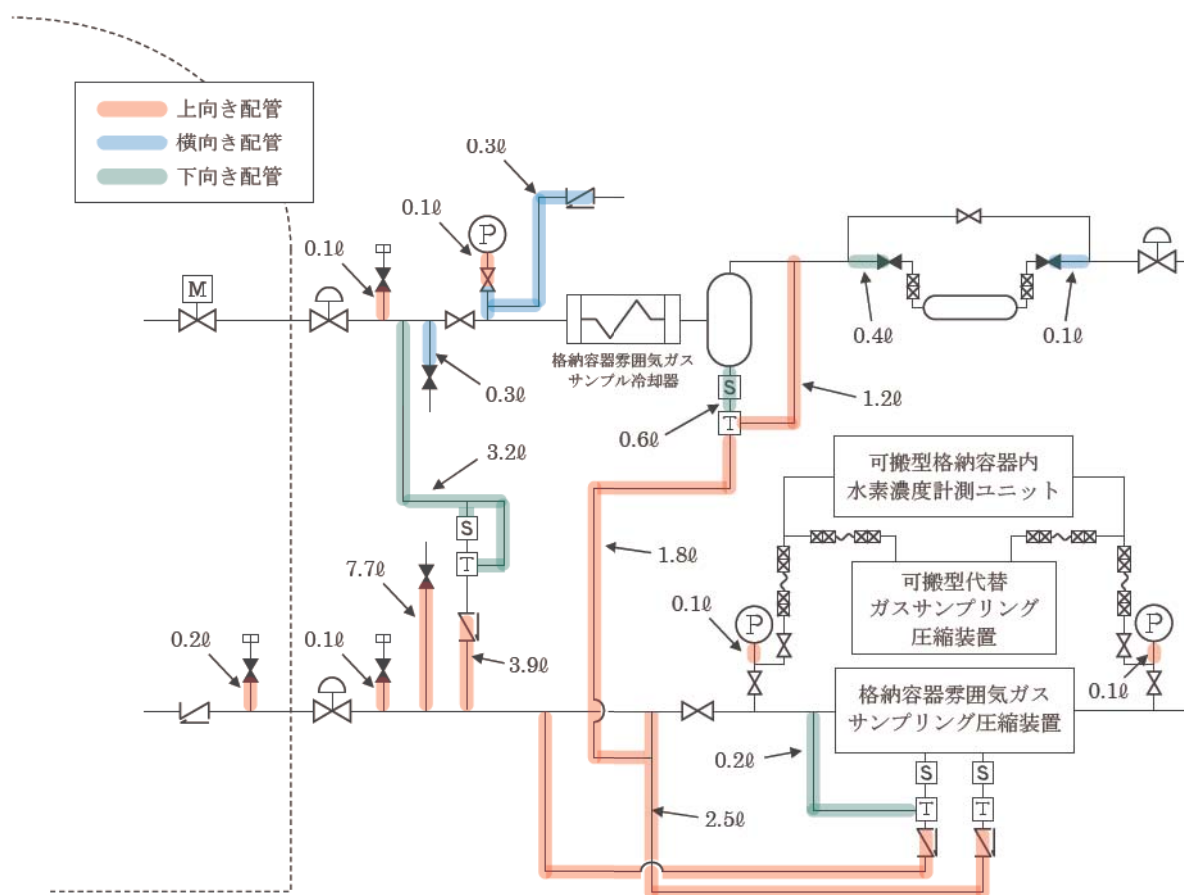
## 格納容器雰囲気ガス試料採取設備内での水素の滞留について

## 1. 格納容器雰囲気ガス試料採取設備の分岐管

格納容器雰囲気ガス試料採取設備は、別図-9 に示す通り分岐管が存在し、それぞれ同図に示す配管容量を有している。

図中、緑で着色しているラインは下向き分岐管であり、分岐管内に水素が流入したとしても比重差により系統に戻ることを期待できることから滞留の可能性はないと考えられる。

一方、図中、赤及び青で着色している分岐管については、上向き分岐管及び横向き分岐管であり、一部分岐管長が長く、系統の流れによる換気作用が期待できないことが考えられるため、格納容器雰囲気ガス試料採取設備内で水素燃焼が発生した場合においても重大事故等に対処するために必要な機能を損なうことがないことを強度評価により検証した。



別図-9 格納容器雰囲気ガス試料採取設備の分岐管概略図

## 2. 爆轟が生じる可能性について

格納容器雰囲気ガス試料採取設備内の水素は、ジルコニウム-水反応等によって発生した濃度 13vol%未満（ドライ換算）の原子炉格納容器内の水素であり、凝縮により濃度 13vol%以上の爆轟が生じる可能性がある領域に達することはない。

爆轟に至る条件は、空間形状や長さにも依存するため、水素濃度が 13vol%未満であっても燃焼から爆轟へ転ずる可能性があるが、格納容器雰囲気ガス試料採取設備は以下の理由から爆轟は生じないと考えられる。

- ・主配管は、配管長と配管口径の比は大きいものの、両端が解放されており、かつオリフィスのような障害物により火炎が加速する可能性がある構造ではない。また水素濃度が 13vol%未満であることから、爆轟は生じないと考えられる。
- ・分岐管については、配管長と配管口径の比は大きいですが、水素濃度は 13vol%未満である。また片側は閉塞されているが、障害物は存在しない\*ため爆轟は生じないと考えられる。
- ・過去、BWR プラントで配管破断事故が起こった事例があるが、原子炉水の放射線水分解により発生した水素：酸素＝2：1、つまりドライ換算で水素 66vol%と非常に高濃度の水素濃度であったと報告されている。一方、格納容器雰囲気ガス試料採取設備内の水素は、有効性評価で示している通り、ドライ換算で 13vol%未満の原子炉格納容器内の水素であるため、水蒸気凝縮を考慮しても爆轟は生じないと考えられる。

※：過去の細長い体系（管路、ダクト）での水素燃焼試験を調査した結果では、水素濃度 13vol%未満の場合は、片側閉塞構造の流路であっても、障害物がない場合は爆轟が発生している事例はない。

## 3. 水素燃焼が発生した場合の強度評価

「2. 爆轟が生じる可能性について」で記載の通り、格納容器雰囲気ガス試料採取設備内で爆轟が生じる恐れはないことから、水素の燃焼が起きた場合を想定し、配管強度が十分であることを評価した。評価の結果を以下に示す。

### (1) 評価条件

水素燃焼時の初期条件を、事故時の原子炉格納容器内の条件を考慮し、以下の通り設定した。

- ・水素濃度：13vol%（ドライ換算）  
（根拠）有効性評価において原子炉格納容器内水素濃度の最高値は 13vol%未満（ドラ

イ換算)であることが示されていることから、これを上回る 13vol% (ドライ換算) で評価を行う。

- ・最高圧力：0.36MPa

(根拠) 重大事故発生時の原子炉格納容器内最高圧力で設定している。

申請書添付書類十(原子炉格納容器の除熱機能喪失シナリオ及び格納容器過圧破損シナリオ) 記載値。

- ・最高温度：141℃ (配管の許容応力の計算に使用)

(根拠) 重大事故発生時の原子炉格納容器内最高温度で設定している。

申請書添付書類十(格納容器過温破損シナリオ) 記載値。

- ・最低温度：40℃ (燃焼圧力の計算に使用：温度が低い方が燃焼圧力が高くなる。)

(根拠) 代替格納容器雰囲気ガスサンプリング圧縮装置の吸込み温度条件(50℃以下)に余裕を見て、ガス冷却器出口側の配管内温度として設定している。

#### (2) 燃焼圧力と配管強度の評価

上記の条件にて評価した結果、燃焼圧力は保守的に見ても約 2.2MPa となった。なお、これは完全閉空間での計算結果であるため、開口がある場合には、これより小さな圧力上昇になると考えられる。

これに対して配管許容圧力は 1B で約 17.0MPa (又は 3/4B で約 23.0MPa) であることから十分余裕を有している。

#### 4. まとめ

- ・格納容器雰囲気ガス試料採取設備の分岐管で一部系統の流れによる換気効果が期待できない箇所があるものの、格納容器雰囲気ガス試料採取設備内の水素濃度はジルコニウム-水反応等によって発生した濃度 13vol%未満(ドライ換算)の原子炉格納容器内の水素であり、水蒸気がすべて凝縮した場合でも水素濃度は 13vol%未満である。
- ・格納容器雰囲気ガス試料採取設備の構造を考慮しても爆轟は生じない。
- ・水素の燃焼が起きた場合においても配管強度は十分な余裕を有している。

## 格納容器内水素濃度計測に伴うサンプリングガスの冷却について

泊発電所3号機の重大事故等対策の有効性評価における原子炉格納容器雰囲気温度は、最大で約141℃まで上昇する。一方、重大事故時の格納容器水素濃度計測では、可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置を使用するが、その吸込み温度条件は、50℃以下の制限を受ける。したがって、格納容器水素濃度計測のためには、サンプリングガスを冷却する必要があり、その冷却は基本的に原子炉補機冷却水ポンプにて行われる。

ただし、全交流電源喪失時においては、原子炉補機冷却水ポンプを復旧する手順を見込んでいないため、サンプリングガスの冷却は、可搬型大型送水ポンプ車に頼る必要があり、さらに、可搬型大型送水ポンプ車が到着するまでの約24時間以前は可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプによる冷却で対処を行うこととしている。

ここでは、以上の冷却水供給ポンプのうち、冷却性能評価が最も厳しい、最も流量が低い可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプの冷却性能の評価について以下にまとめる。

## 1. 評価条件

- ・ サンプル側入口温度：141℃
- ・ サンプル側出口温度：45℃
- ・ サンプル側流量：6.8kg/h
- ・ 冷却水入口温度：40℃
- ・ 冷却水出口温度：制約なし
- ・ 冷却水流量：1000kg/h(可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプの容量約1m<sup>3</sup>/hより)
- ・ 可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプ自体の入熱：入熱なし

## 2. 評価条件の根拠

- ・ サンプル側入口温度：141℃  
(根拠) 重大事故発生時の原子炉格納容器内最高温度で設定している。  
申請書添付十(格納容器過温破損シナリオ)記載値。
- ・ サンプル側出口温度：45℃  
(根拠) 可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置の吸込み温度条件(50℃以下)に余裕を見込んだ値を設定している。



- ・ サンプル側流量：6.8kg/h

(根拠) 事故前のCV内条件として、0.1MPa(a)、49℃とすると、事故時のCV内の空気および蒸気の場合は、

$$\text{空気分圧 } 0.1 \times (273+141) / (273+49) \approx 0.13\text{MPa(a)}$$

$$\text{蒸気分圧 } 0.46 - 0.13 = 0.33\text{MPa(a)}$$

から、空気 28%、蒸気 72%となる。

ガスサンプル流量を定格の 2Nm<sup>3</sup>/h(2000Nℓ/h)とした場合、蒸気(72%)が全て凝縮すれば、その時の凝縮液量 Wst は次の通りとなる。

$$\begin{aligned} Wst &= (2000[\text{Nℓ/h}] / 22.4[\text{Nℓ}]) \times (0.72 \times 18[\text{g/mol}] / 0.28) \\ &= 4132.7[\text{g/h}] \rightarrow \text{蒸気分としての凝縮液量 } Wst = 4.2[\text{kg/h}] \end{aligned}$$

また、この時の空気量 Wai は次の通りとなる。

$$\begin{aligned} Wai &= (2000[\text{Nℓ/h}] / 22.4[\text{Nℓ}]) \times 29[\text{g/mol}] \\ &= 2589.3[\text{g/h}] \rightarrow \text{空気量 } Wai = 2.6[\text{kg/h}] \end{aligned}$$

従って、サンプル側流量は 4.2+2.6=6.8kg/h としている。

- ・ 冷却水入口温度：40℃

(根拠) SA 時直後の原子炉補機冷却水温度として、通常時の原子炉補機冷却水温度 32℃に余裕を見込み 40℃に設定している。

- ・ 冷却水出口温度：制約なし

(根拠) 原子炉補機冷却水通水量は 1m<sup>3</sup>/h×24Hr=24m<sup>3</sup>のみのため、原子炉補機冷却水系統側のヒートシンクは期待しておらず、原子炉補機冷却水系統の循環による温度上昇は考慮する必要がないため。

- ・ 冷却水流量：1000kg/h

(根拠) 可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプの定格流量(1m<sup>3</sup>/h)(1ℓ≒1kgで換算)

- ・ 可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプ入熱：入熱なし

(根拠) ポンプメーカー見解。(メーカー試験結果による。)

### 3. 冷却性能の評価

以上の条件においてサンプルガス出口温度を 45℃へ冷却するために必要な伝熱面積を評価した結果、必要伝熱面積 0.21m<sup>2</sup>を上回る冷却器伝熱面積 0.53m<sup>2</sup>を有することを確認した。

## 格納容器水素濃度の計測に係る設備からの水素漏えい防止対策

格納容器雰囲気ガス試料採取設備を用いた格納容器水素濃度の計測は、計測後のガスを格納容器内へ戻す構成となっており、外部に対して閉じた系となっている。

格納容器雰囲気ガス試料採取設備の系統内の設備は、系外への漏えいが発生しないよう別表 1 に示すとおり漏えい防止対策が取られている。

よって、格納容器水素濃度の計測に係る設備からの水素漏えいの可能性は低い。

別表 1 格納容器水素濃度の計測に係る設備の漏えい防止対策について

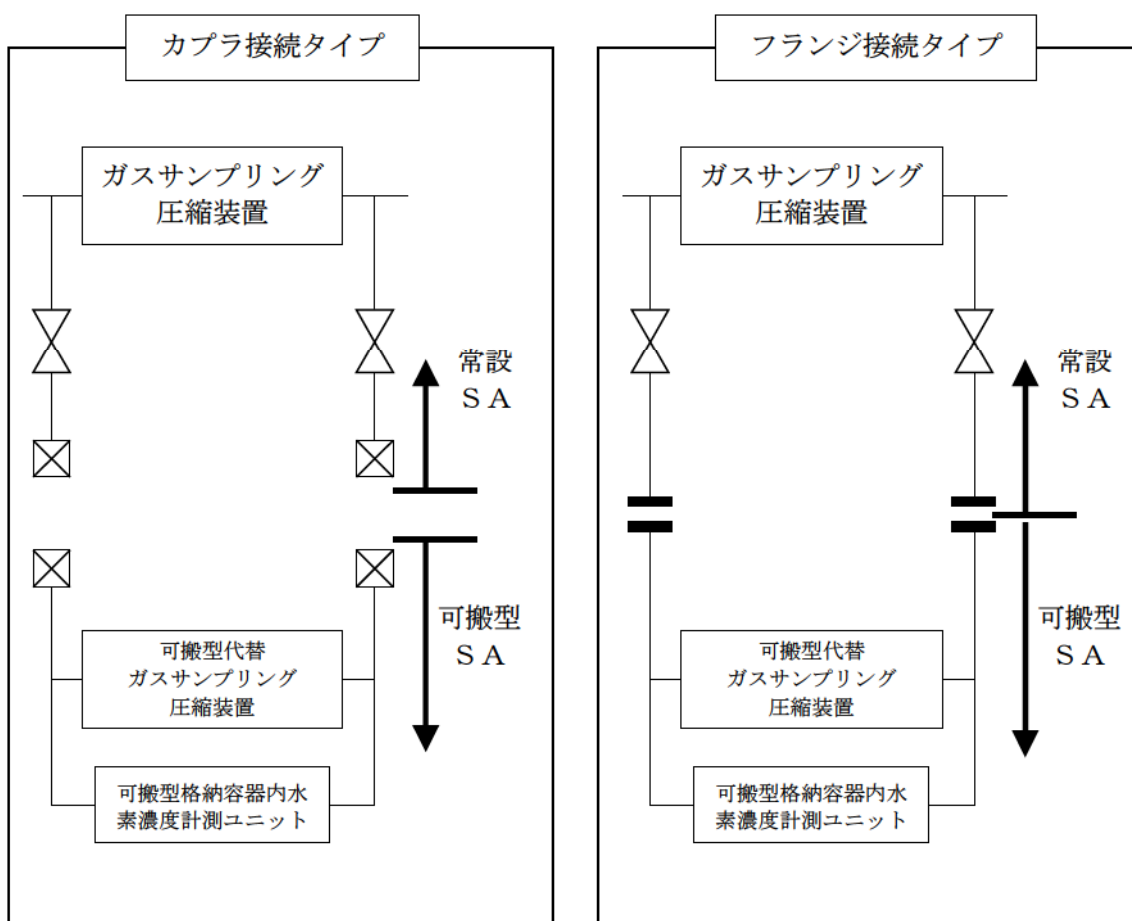
No.	機器	漏えい防止対策
1	配管、弁（既設）	格納容器雰囲気ガス試料採取設備の既設の配管、弁は、C V内の放射線濃度を測定するため設計された系統であり、被ばく低減の観点からも系外へガスが漏えいするような設計ではない。 配管および弁は基本的に溶接構造であり、さらに、弁は、ベローズ構造等によりシールすることで、漏えい防止対策がとられている。
2	試料採取管	試料採取管の接続部は手分析時に取り外すクイックカップラを採用している。 クイックカップラはシール構造とすることで、漏えい防止対策がとられている。 クイックカップラは、事故時に想定される温度、圧力を包絡した仕様である。
3	格納容器雰囲気ガスサンプリング圧縮装置（既設）	上述の通り、漏えいし難い構造を採用している。 圧縮装置内部の取り合い部などはフランジ接続であるが、パッキンでシールされているため、漏えいが発生する可能性は十分に低い。 また、ピストンロッドとピストンロッド穴にもパッキンが取り付けられており、圧縮空気の漏えいを防いでいる。 接続部を含む当該圧縮装置は、事故時に想定される温度、圧力を包絡した仕様である。
4	可搬型設備との接続部	接続部は上述の試料採取管と同様のクイックカップラを採用している。 クイックカップラは、事故時に想定される温度、圧力を包絡した仕様である。
5	可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置	ピストンにはピストンリングが取り付けられ、内部ガスの気密が保持されている。配管接続部はいずれもシール構造となっているため、内部ガスの気密は保持されている。ピストンリングおよびシール構造部を含む当該圧縮装置は、事故時に想定される温度、圧力を包絡した仕様である。

No.	機器	漏えい防止対策
6	後置冷却器配管	接続部はいずれもシール構造となっているため、内部ガスの気密は保持されている。ドレントラップはバルブ部でシールされており、ドレン排水の際にも内部ガスが排出されずドレン水のみ排出することで漏えい防止対策が取られている。シール構造部を含む当該冷却器は、事故時に想定される温度、圧力を包絡した仕様である。
7	自力式減圧弁	配管接続部はシール構造となっており、漏えい防止対策がとられている。シール構造を含む当該減圧弁は、事故時に想定される温度、圧力を包絡した仕様である。
8	背圧弁	配管接続部はシール構造となっており、漏えい防止対策がとられている。シール構造を含む当該弁は、事故時に想定される温度、圧力を包絡した仕様である。
9	フレキシブルホース	ホースは密閉構造のため系外への水素の漏えいは発生しない。
10	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニットのラック内の配管と機器の接続部などは基本的にシール構造となっており、漏えい防止対策がとられている。また、ラック内は、自力式減圧弁によりほぼ大気圧(10kPa程度)に減圧しており、系内外の圧力差で系外へ大きな漏えいが発生する可能性は十分に低い。 減圧弁の上流側については、その条件を包絡した仕様である。

## 水素濃度監視に係る系統切替えに伴う接続方法

可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット等を使用した原子炉格納容器内の水素濃度の監視を行う系統への切り替えに伴う接続方法については、フランジ接続タイプとカプラ接続タイプ（フランジよりも簡便な接続方法）がある。

泊発電所3号機においては、よりメリットの大きいカプラ接続タイプを採用することとする。



## (検討内容)

取り合い部については、別表2のメリット・デメリットを踏まえ、カプラ型のメリットが大きいと判断した。

別表2 カプラ接続タイプとフランジ接続タイプのメリット・デメリット

	カプラ接続タイプ	フランジ接続タイプ
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・限られた時間の中での接続が必要となる中、より簡便な接続方法であり、より短時間での接続が可能</li> <li>・接続部の信頼性が高い（作業員の技量によらない）</li> <li>・現場作業員の作業性・環境性（作業時被ばく等）を考慮した設備設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・常設重大事故等対処設備側は全てJSMEクラス2に適合させることができる。</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・常設重大事故等対処設備側の接合部（カプラ部）が機械接合となり、また配管とカプラ部の接続がねじ込みとなり、いずれもJSMEクラス2に規定がない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・限られた時間の中での接続が必要となる中、カプラ接続タイプより接続に時間がかかる。その分貴重な対応要員が本作業にとられることになる。</li> <li>・接続部の信頼性が作業員の技量によることとなり、不適切な接続を行った場合、水素が漏えいすることとなる。</li> </ul>

52-9 格納容器水素イグナイタについて

## 格納容器水素イグナイタについて

### 1. 設置目的

格納容器水素イグナイタ（以下、「イグナイタ」という。）は、格納容器（以下、「C/V」という。）内に適切に配置することで、炉心損傷時のジルコニウム（Zr）－水反応により短期間に C/V 内に発生する水素を計画的に燃焼させることにより初期の水素生成量のピークを抑える目的で設置するものであり、原子炉格納容器内水素処理装置（以下、「PAR」という）による水素除去とあいまって、より一層の C/V 内の水素低減に有効なため、さらなる対策設備として設置するものである。

### 2. イグナイタの仕様

イグナイタは、通電することによりヒータ部を加熱（約 900℃）させ、発生した水素を強制的に燃焼させることで C/V 内の水素低減を図る装置であり、既設プラントで実績のあるヒーティングコイル式を採用する。

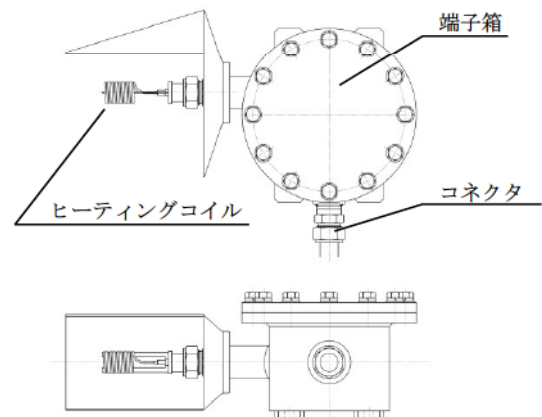
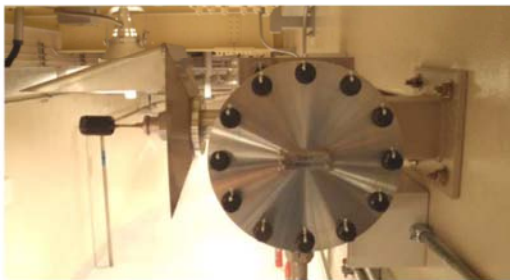
なお、イグナイタの効果は解析上考慮していない。

#### 【動作原理】

- ①イグナイタに通電し、ヒータ部を加熱する。
- ②水素濃度が上昇し、可燃範囲に入ると水素が燃焼し、水蒸気となることで水素濃度を低減する。

方式	ヒーティングコイル方式
容量	約 550W（1 個当たり）
主要寸法	幅 約 200mm 奥行 約 500mm 高さ 約 300mm
燃焼開始水素濃度	8vol%以下（ウェット濃度）
個数	12 個（予備 1 個（ドーム部））

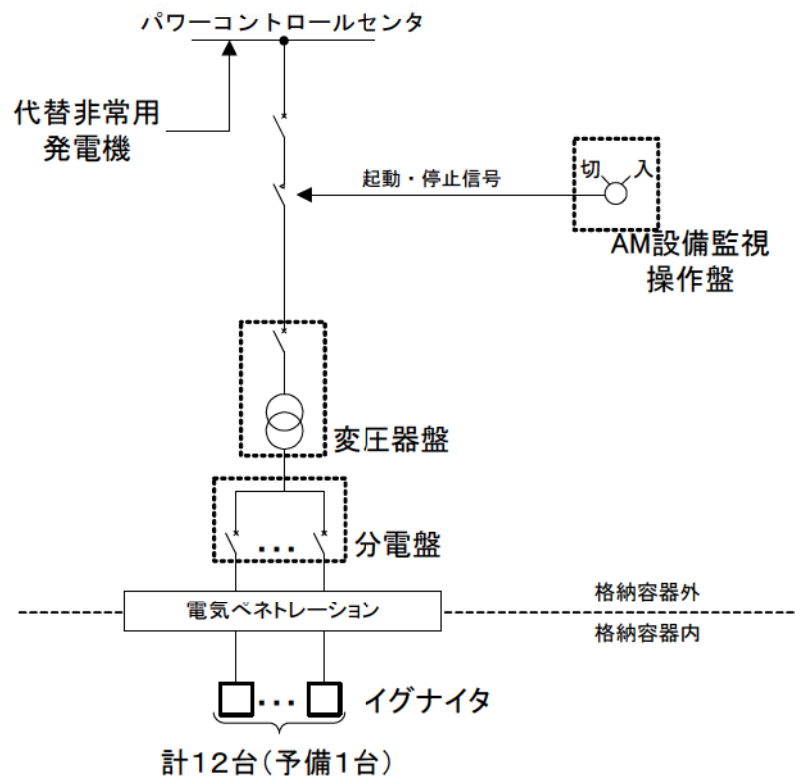
※イグナイタの構成材料は、ヒータシースにインコネル、専用ケーブルに無機絶縁物と金属シース、端子台に磁器、端子箱にステンレス等、耐熱性に優れた材料を使用しており、水素燃焼によるイグナイタ本体への熱的影響や蒸気環境による気密性を考慮した設計としている。



### 3. イグナイタの電源構成

イグナイタは全交流動力電源喪失（以下「SBO」という。）時においても、代替電源設備（代替非常用発電機）からの給電を可能としている。

代替非常用発電機は、イグナイタの接続される所内低圧母線に接続でき、中央制御室より遠隔起動を可能としており、SBO 後、約 25 分で給電可能である。



### 4. SBO 時のイグナイタ起動条件について

全交流動力電源喪失時においては、電源回復までの遅れ時間があることを考慮した上で、格納容器水素イグナイタ（以下「イグナイタ」という。）による水素濃度制御機能を最大限活用し、格納容器内水素濃度を低下させるために、確実にイグナイタを起動できるよう全交流動力電源喪失時のイグナイタ起動条件は以下のとおりとする。

#### (1) 全交流動力電源喪失時のイグナイタ起動条件について

- 電源回復が炉心出口温度 350℃到達後 60 分以内であれば速やかに起動する。

なお、炉心出口温度が 350℃到達後 60 分以内に起動できなかった場合は、イグナイタ起動に伴う実効性と悪影響を考慮し、発電所対策本部と協議の上、イグナイタを起動する。

目安：炉心出口温度 350℃到達から R/V 破損まで最短シーケンス（大 LOCA+ECCS 注入失敗+C/V スプレイ失敗）で約 80 分である。



(2) 全交流動力電源喪失時のイグナイタ起動条件の検討内容について

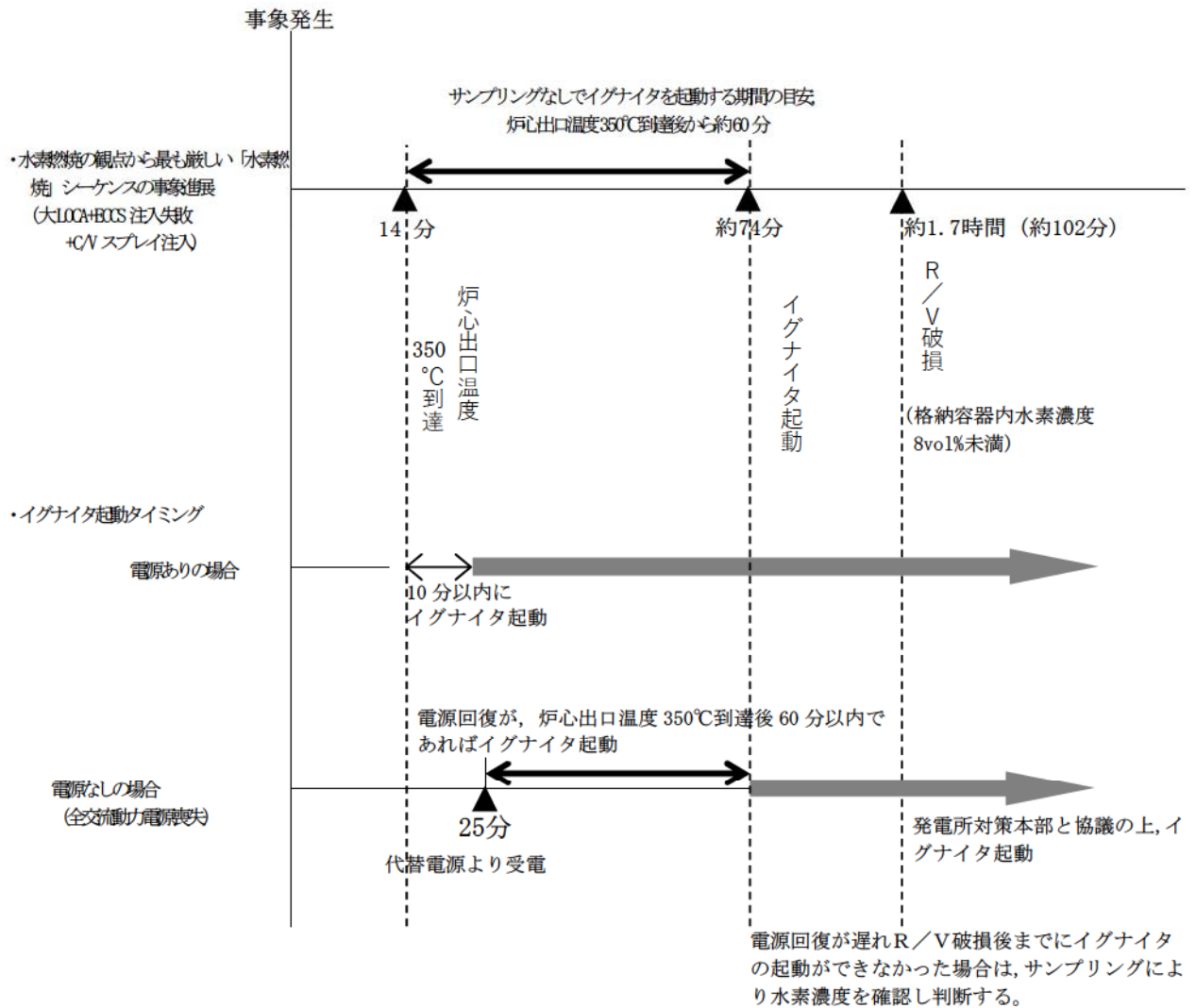
全交流動力電源喪失時において、R/V破損をイグナイタの起動条件の目安とし、R/V破損により放出される水素及び万一ではあるが、MCCIにより発生する水素に対応する。

水素濃度制御を確実に実施するため、水素燃焼の観点から厳しいシーケンスとして、「水素燃焼」シーケンス（大LOCA+ECCS注入失敗+C/Vスプレイ注入）の解析結果（図2）を元に、全交流動力電源喪失時のイグナイタ起動条件について検討した。

- ・解析結果から、事象発生からR/V破損までは約1.7時間（約102分）であり、R/V破損時の格納容器水素濃度（ウェット）は8vol%未満である。
- ・炉心出口温度350℃到達からR/V破損までの時間は約90分である。また、R/V破損に至る時間が最も早い「格納容器過圧破損」シーケンス（大LOCA+ECCS注入失敗+C/Vスプレイ失敗）においては、事象発生後約1.6時間（約95分）でR/V破損に至ることから、炉心出口温度350℃到達からR/V破損までの時間は約80分となる。
- ・全交流動力電源喪失発生時においても、事象発生後約25分で代替電源設備から受電し、速やかにイグナイタが起動可能となることから、炉心出口温度350℃到達後60分以内にイグナイタを起動することで、R/V破損までに十分な余裕を持って起動が可能である。  
なお、R/V破損に至る時間が最も早い「格納容器過圧破損」シーケンスだったと仮定しても、炉心出口温度350℃到達後60分以内にイグナイタが起動でき、格納容器内水素濃度が8vol%に到達する前に十分起動可能である。
- ・格納容器自由体積が大きいいため、ジルコニウム-水反応によって発生する水素の濃度は限定され、事象発生約2.9時間後に11.7vol%まで上昇するが、水素爆轟の目安となる格納容器内ドライ換算水素濃度が13vol%に到達することはない。また、水の放射線分解等によって長期的に発生する水素については、原子炉格納容器内水素処理装置の効果により減少する。

以上の解析結果から、全交流動力電源喪失時においては、電源復旧後、炉心出口温度350℃到達から60分以内であれば、格納容器内水素濃度を確認することなく、速やかにイグナイタを起動することで、格納容器内水素濃度の低減を図る。

(3) SBO 時のイグナイタ起動イメージ



(4) 泊3号炉 水素燃焼シーケンス (大LOCA+ECCS注入失敗+C/Vスプレイ注入) 解析結果

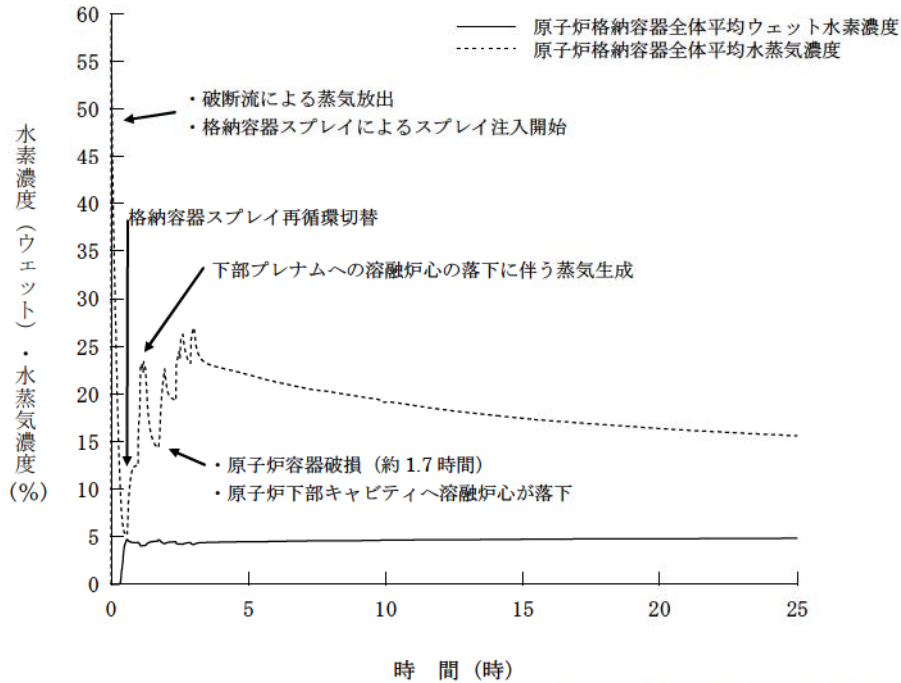
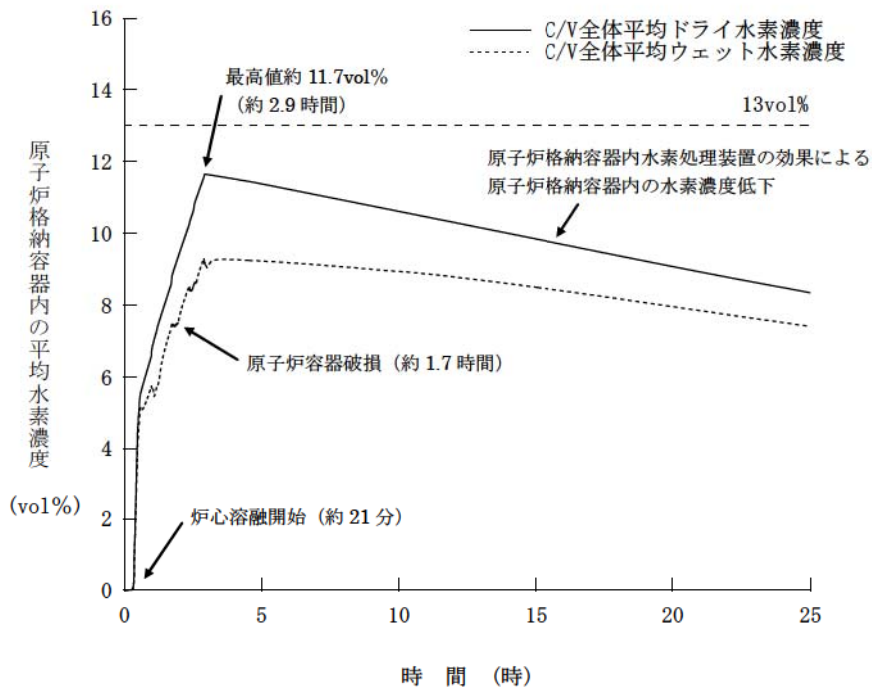


図1 格納容器内の水素・水蒸気濃度の推移 (MAAP)



評価の結果、格納容器自由体積が大きいため、Zr-水反応によって発生する水素の濃度は限定され、水素爆轟の目安となる格納容器内ドライ換算水素濃度が 13vol% に到達することはない。また、水の放射線分解等によって長期的に発生する水素を含め、原子炉格納容器内水素処理装置の効果により減少している。

図2 格納容器内の平均水素濃度の推移 (GOTHIC)

## 5. イグナイタの設置個数及び設置場所について

### (1) 設置場所及び個数の基本的考え方

イグナイタは、生成した水素が C/V 内に拡散して蓄積する前に、水素を強制的に燃焼することができるよう、水素放出が想定される箇所に加え、その隣接区画あるいは水素の主要な通過経路及び上部ドーム部に設置する。具体的な設置位置は以下のとおり。

### (2) イグナイタの C/V 上部への追加設置

#### a. C/V の水素混合について

重大事故時に発生する水素の混合挙動については、C/V スプレー等により C/V 全体で大きな循環流が形成され、濃度は均一化すると考えられている。

また、C/V スプレーが機能喪失した場合でも、C/V 内での水素の混合促進に寄与する対策として①代替格納容器スプレーポンプによる代替スプレーや②自然対流冷却を整備 (NUPEC 報告書<sup>※1</sup>でも提言) しており、上下区画に濃度差が生じるという濃度成層化が起こる可能性は十分低い。さらに、③PAR 発熱による流体の上昇流、④溶融炉心の下部キャビティ落下後の発生蒸気による上昇流、⑤蒸気発生器 (以下「S/G」という) からの放熱等による上昇流により C/V 内全体での大きな循環流が形成されることにより、濃度成層化が起こることはないとする (表 1)。

表 1 成層化に対する混合の効果

混合の要素	効果	備考
①スプレー	スプレー又は自然対流冷却の単独で CV 全体が混合	NUPEC 報告 (H15) <sup>※1</sup> 、有効性評価
②自然対流冷却		JNES 解析 (H18) <sup>※2</sup>
③PAR	混合に寄与	
④蒸気流	加圧器気相部破断以外のケースでは、蒸気流によって CV 全体が混合	NUPEC 報告 (H15) <sup>※1</sup>
⑤S/G からの放熱等	混合に寄与	

※1 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)

※2 アクシデントマネジメント知識ベース整備に関する報告書 (平成 18 年 8 月)

#### b. 炉心損傷時に発生する水素への対応

泊 3 号炉は、水素濃度制御設備として PAR 及びイグナイタの両者を C/V 内に設置し、著しい炉心損傷時の C/V 内水素濃度の効果的な低減を図ることとしている。

イグナイタについては、炉心損傷時に発生する水素は C/V 内で均一に混合するというこれまでの実証試験や解析の結果等も踏まえて、水素が放出される位置とその後の通過経路を推定して設置し、発生した水素を確実に処理することとしている (表 2)。

しかしながら、仮にこれらイグナイタによっても処理できず、C/V ドーム部に流入し頂部付近に滞留もしくは成層化した水素に対しても早期段階から確実に処理できるよう、今

回、さらなる安全性の向上を目的にイグナイタを C/V ドーム部頂部付近に 2 個（うち 1 個予備）追加設置する。追加設置に伴う施工方法及びイグナイタ着火の熱影響については別紙 2, 3 を参照。

(3) イグナイタの追加設置による効果について

C/V 内の水素成層化の可能性に対応するため、C/V ドーム部頂部付近に 2 個（うち 1 個予備）のイグナイタを追加設置する（図 3）。

イグナイタはウェット水素濃度 8vol%以下で水素を着火させる性能を有しており<sup>※3</sup>、一般的に水素の火炎伝播は、水素濃度が約 4vol%から可燃領域に入り、約 4vol%から 6vol%では火炎は上方伝播のみ、約 6vol%から 8vol%では上方と水平方向に伝播、約 8vol%以上で下方伝播が起きる。

水素の成層化が生じる状況において水素成層の位置及び厚さには不確かさがあると考えますが、C/V 上部ドーム部頂部に水素成層化が生じたとしても、イグナイタを C/V ドーム部の最頂部から少し低い位置に設置することで、ウェット水素濃度 8vol%以下の低い水素濃度での着火による火炎の上方伝播により成層化した水素を処理できるものと考えられる。

なお、C/V の健全性に影響を及ぼす水素爆発の防止に対しては、今後も解析方法の不確定性や海外の技術動向も踏まえて、さらなる安全性向上のための継続的な改善検討に取り組んでいく。

※3 イグナイタの着火性能について

イグナイタについては、着火要求条件を満足していることの確認のため、試験を行い着火要求条件を満足していることを確認している（表 2）。

表 2 イグナイタの着火性能

着火要求条件	試験結果
水蒸気濃度：0～55vol% 流速：[ ] m/s 電圧：AC120V（ヒータ容量 556W） 水素濃度：8vol%（ウェット）以下	イグナイタの着火において過酷な下記の条件において、水素濃度 6.6vol%（ウェット）以上で着火を確認 <試験条件> 水蒸気濃度：55vol% 流速：[ ] m/s 電圧：AC120V

[ ] 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

表3 イグナイタの設置場所と水素放出の想定

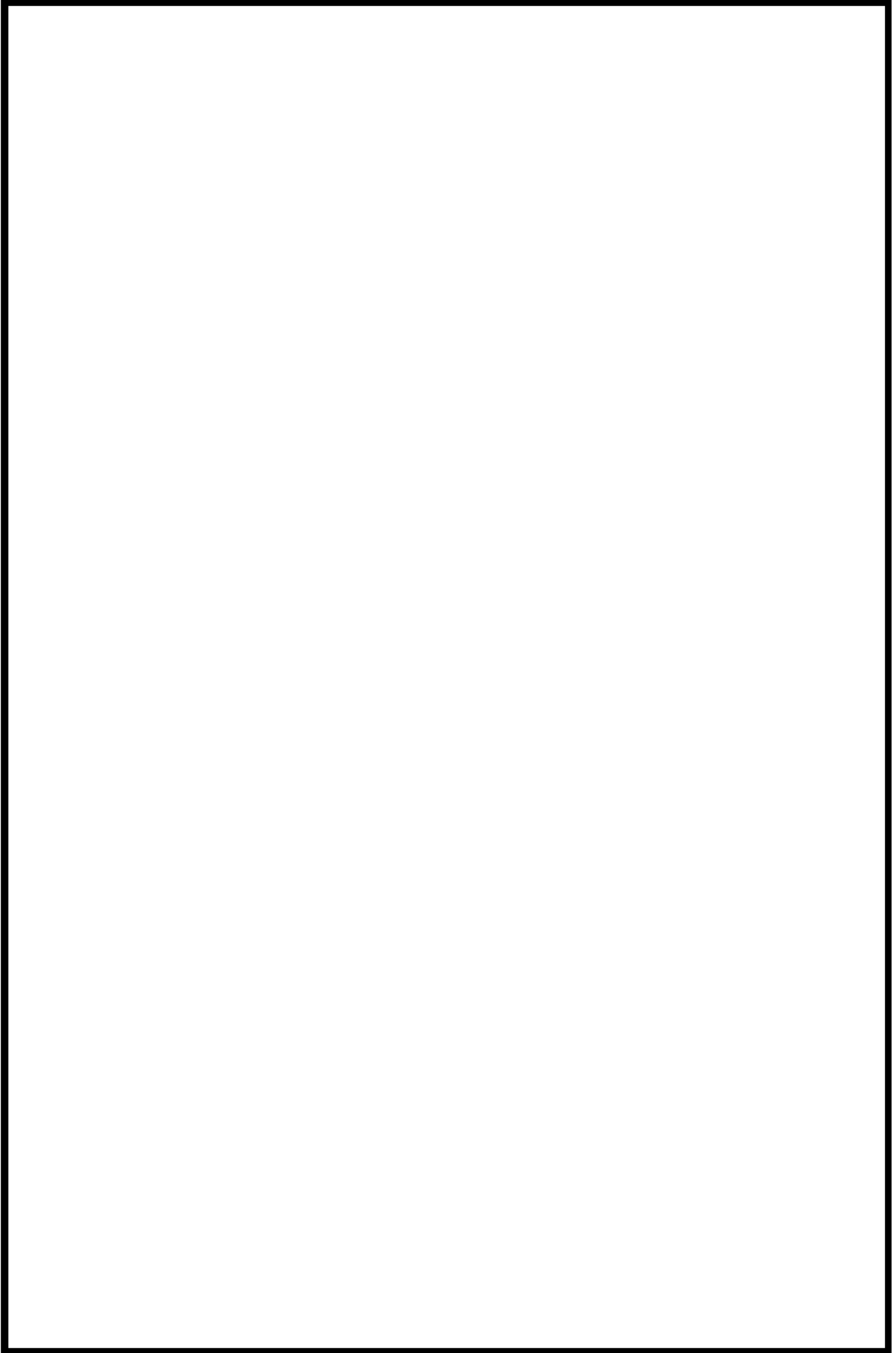
イグナイタ設置場所	水素放出等の想定			設置 個数
	放出	隣接部又は 通過経路	想定事項	
加圧器逃がしタンク近傍	○		加圧器逃がしタンクラブチャーデ ィスクからの水素放出	1
ループ基礎室及びループ基 礎室外周部		○	加圧器逃がしタンク近傍からの水 素の流入	3
加圧器室	○		加圧器室内の破断口からの水素放 出	1
加圧器室外上部		○	加圧器室からの水素の流入 上部ドーム部への万一の水素蓄積	1
各ループ室	○		RCS 配管の破断口からの水素放出	3
ICIS シンプル配管室入口扉 近傍	○	○	ICIS シンプル配管室入口扉からの 水素放出 加圧器逃がしタンク近傍からの水 素の流入	1
ICIS シンプル配管の C/V 一 般部から ICIS シンプル配 管室への床貫通近傍	○		ICIS コンジット床面貫通部からの 水素放出	1
C/V ドーム部の頂部付近			仮にこれらイグナイタにより処理できず、C/V ドーム部に 流入し頂部に滞留もしくは成層化した水素	2※4


※4 うち1個予備



図3 イグナイタ配置図

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

#### (4) 計器・機器への影響を考慮した配置

イグナイタによる水素燃焼による悪影響がないよう、重大事故等の対処に重要な計器や再循環ユニット(ダクト)等から離隔距離をとった位置に設置するようにしている。念のため、これら以外の重大事故等の対処に必要な計器についても、イグナイタから離隔距離を確保するよう配慮している。

具体的には、NUPECでのイグナイタによる水素燃焼試験<sup>※5</sup>での燃焼影響範囲に余裕を考慮しイグナイタの上方には重要な計器等がないようにし、イグナイタ側方に3m以上、下方には1m以上の離隔距離をとるよう配慮している。

※5 NUPECの小規模燃焼試験<sup>※6</sup>において、水素濃度7vol%でのイグナイタによる火炎面伝播影響範囲として、上方と側方0.3m(下方には火炎伝播なし)が確認されている。適用するイグナイタについては、メーカーにおける着火性能試験により水蒸気濃度55vol%等の着火しにくい条件においても水素濃度7vol%以下で燃焼させることが可能なことを確認しているので、上記の影響範囲に余裕を考慮した範囲設計としている。

※6 財団法人 原子力発電技術機構 平成4年度 溶接部等熱影響部信頼性実証試験(原子炉格納容器)に関する報告書

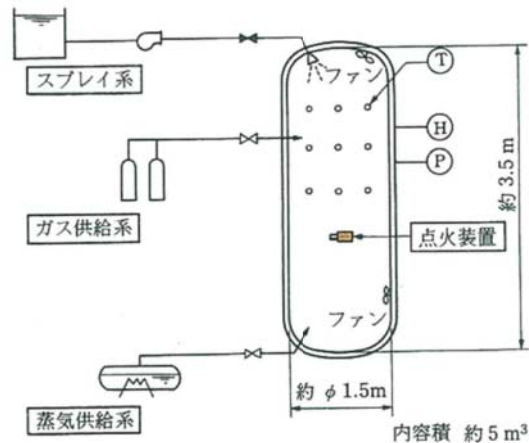


図4 試験装置



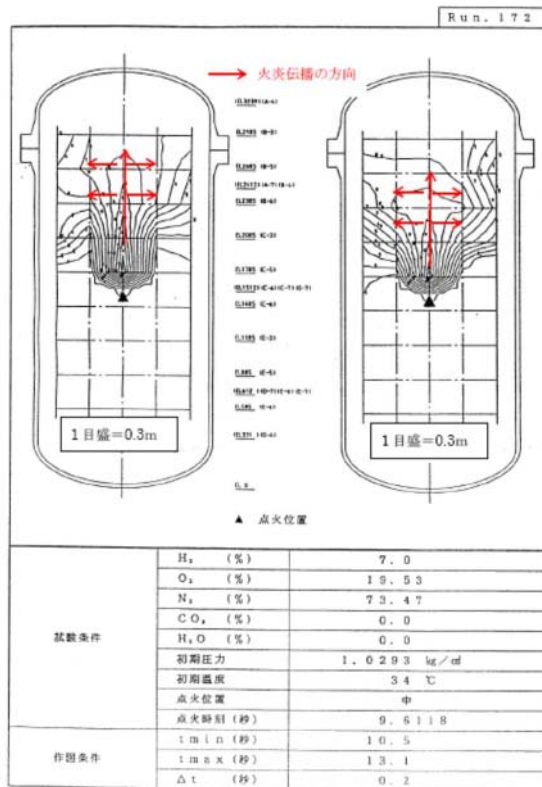


図4.2.1.2-17 火炎面分布図 (水素濃度7vol%)

図5 NUPEC 小規模燃焼試験結果  
水素濃度 7vol%での火炎伝播挙動

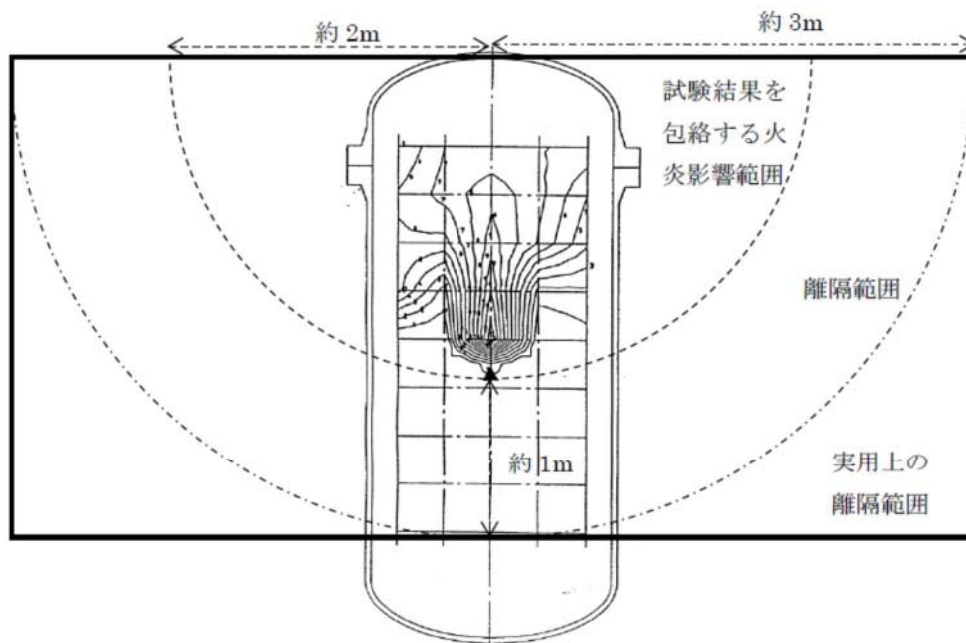


図6 イグナイタによる火炎影響範囲と離隔範囲の設定  
(イグナイタ設置工事において設定)

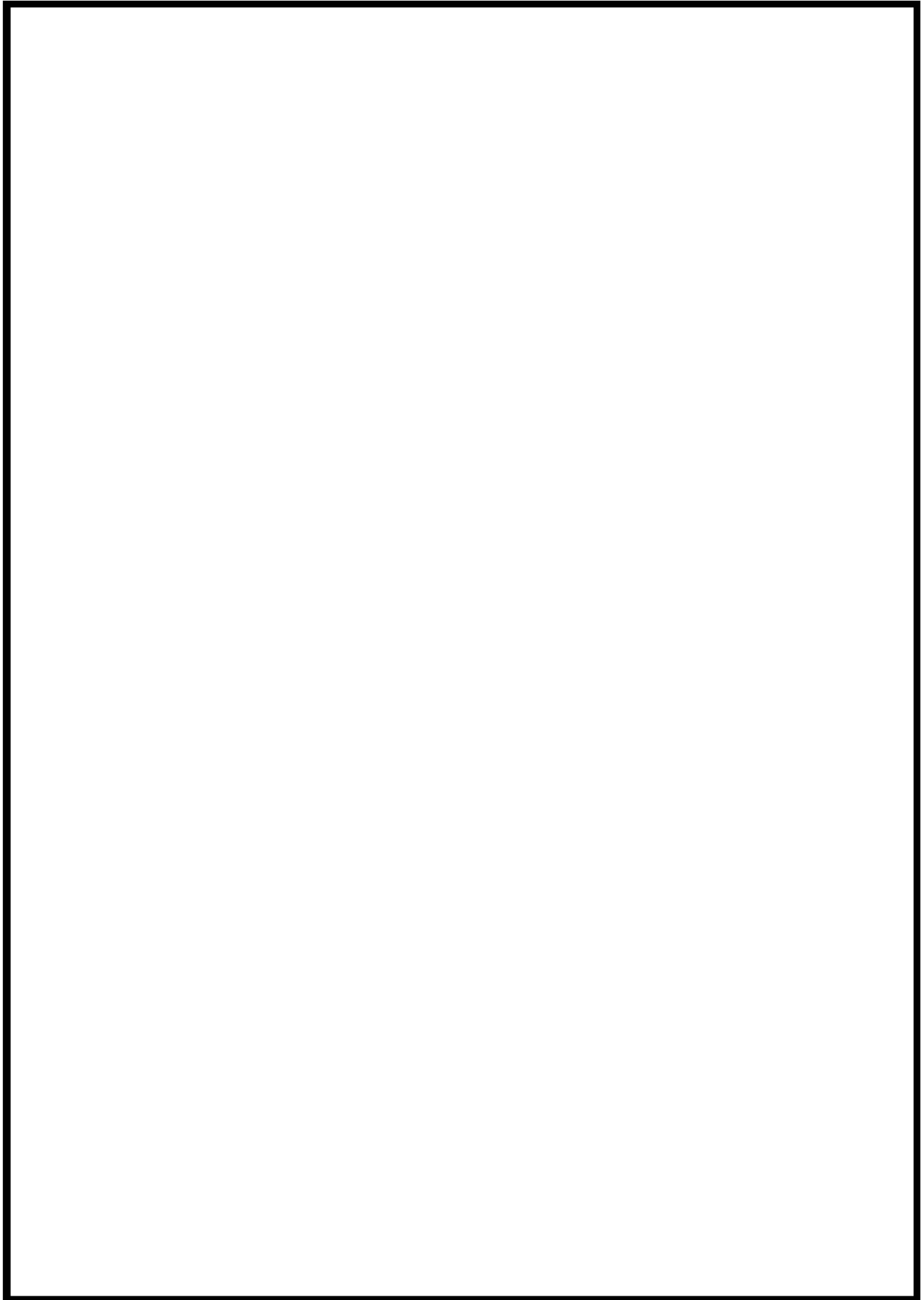



図 7 (1/3) 泊 3 号炉の離隔範囲と重要機器の配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

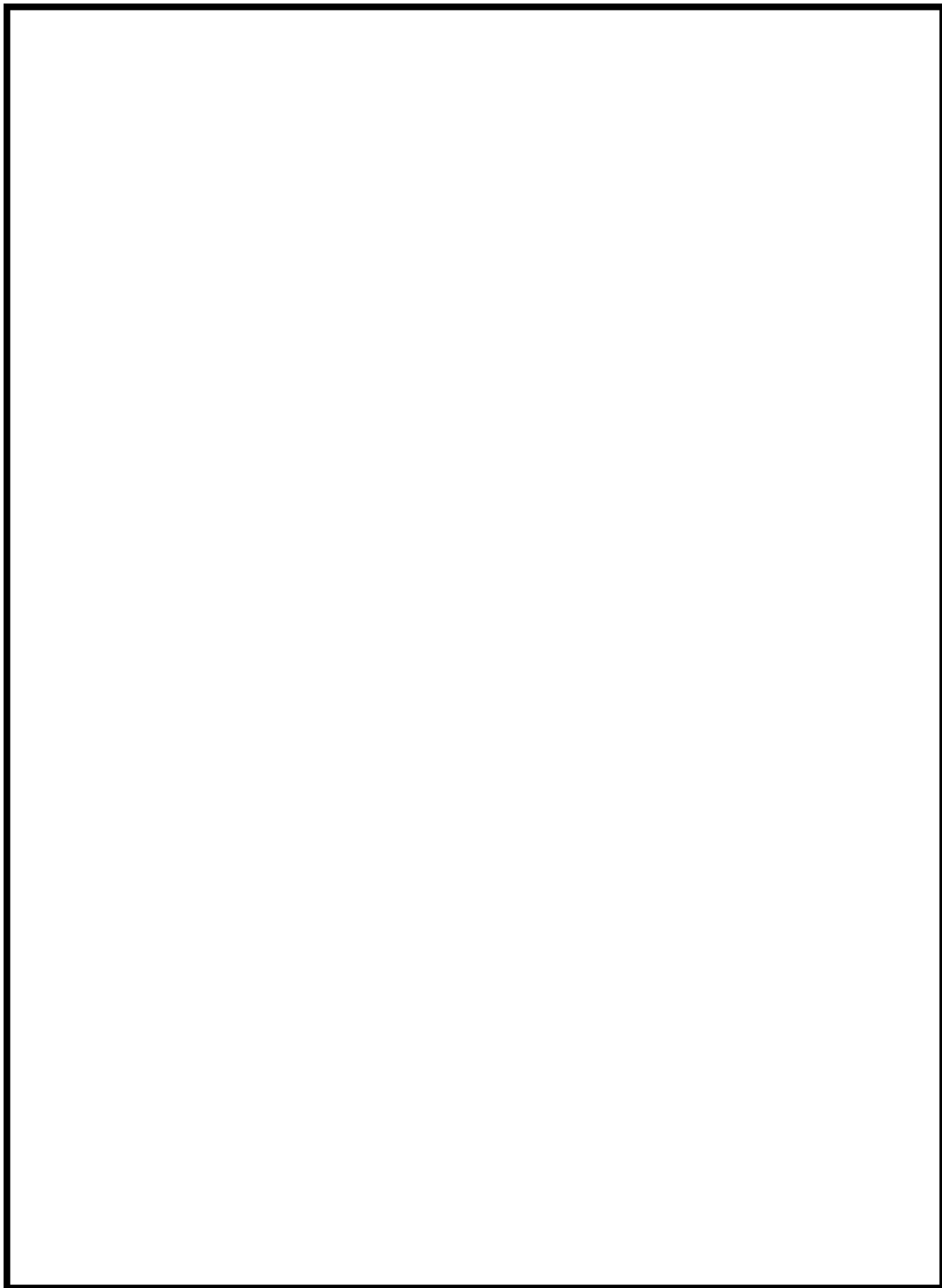



図 7 (2/3) 泊 3 号炉の離隔範囲と重要機器の配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

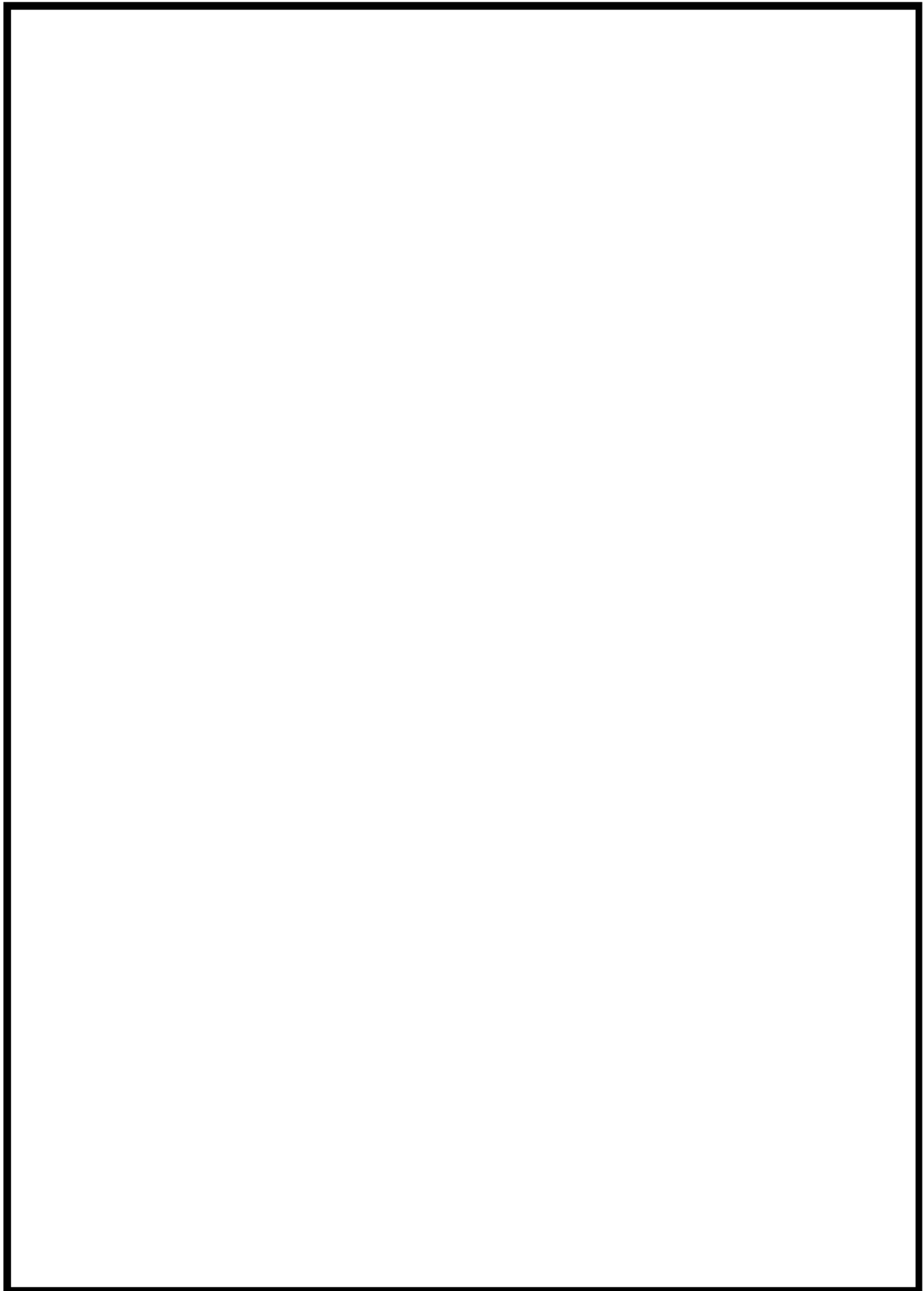



図 7 (3/3) 泊 3 号炉の離隔範囲と重要機器の配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 6. 格納容器水素イグナイタ温度の概要

### (1) 設置目的

イグナイタによる水素燃焼時には周囲温度が上昇（NUPEC の小規模燃焼試験\*の結果では、水素濃度 8vol%時、イグナイタ周囲で燃焼が起こった場合の周囲温度は 300℃～500℃程度であることが確認されている）する。

一方、C/V 破損モードでの有効性評価において、事象進展に伴う温度変化は常温から約 141℃までであり、鋭いピークを持つ水素燃焼と比べて変動が緩やかであることを考慮すると、水素燃焼による温度上昇との識別は可能である。

このため、イグナイタの近傍（火炎伝播の方向である上方）に温度計（熱電対）を設置して中央制御室にて温度を監視することで、イグナイタの動作により水素燃焼していることが確認可能であることから、事故対処時の状態監視機能の向上を目的に温度監視装置を設置する。

※：財団法人 原子力発電技術機構 平成 4 年度 原子力発電施設 信頼性実証試験の現状に関する報告書

### (2) 設備概要

イグナイタ全数に対し、熱電対を取り付け、事故時のイグナイタコイル近傍の測定温度を中央制御室で表示し監視可能である。

熱電対は、イグナイタヒーティングコイルの直上部（被水防止用の傘の下）に熱電対シース先端が位置するように固定して取り付ける。（図 8）

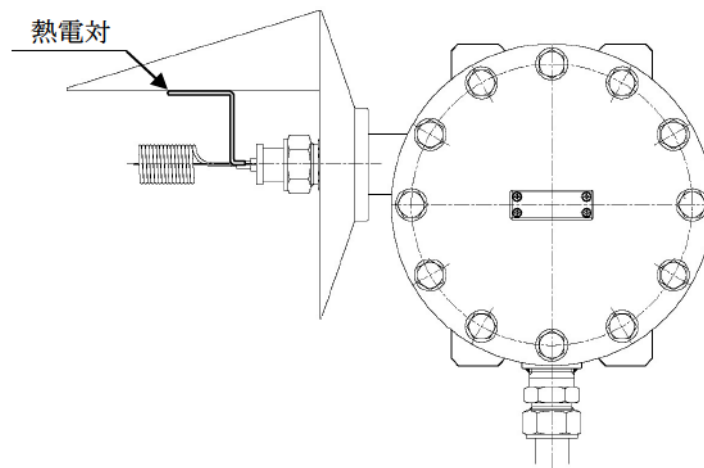


図 8 イグナイタへの熱電対取り付け位置

測定温度は、中央制御室の AM 設備監視操作盤にて表示する設計とする。（図 9）

なお、イグナイタが起動したことについても AM 設備監視操作盤の表示ランプにて確認できる。

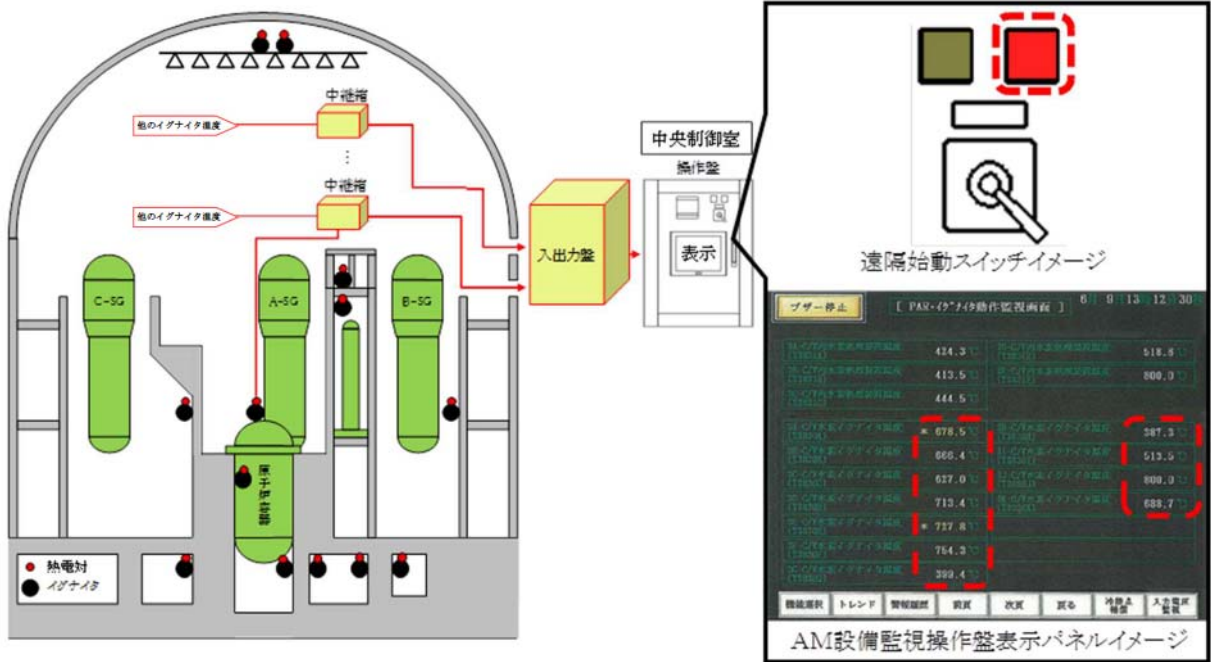


図9 格納容器水素イグナイタ温度 概略図

(3) イグナイタ動作状況監視用温度計（熱電対）の性能試験について

イグナイタによる水素燃焼時の温度変化を監視できることの確認のために、試験設備を用い、コイル近傍に複数の熱電対を設置し、性能試験を行っている。

試験例1（水素濃度 7vol%（ウェット）、水蒸気濃度 55vol%）



試験例2（水素なし、水蒸気なし）

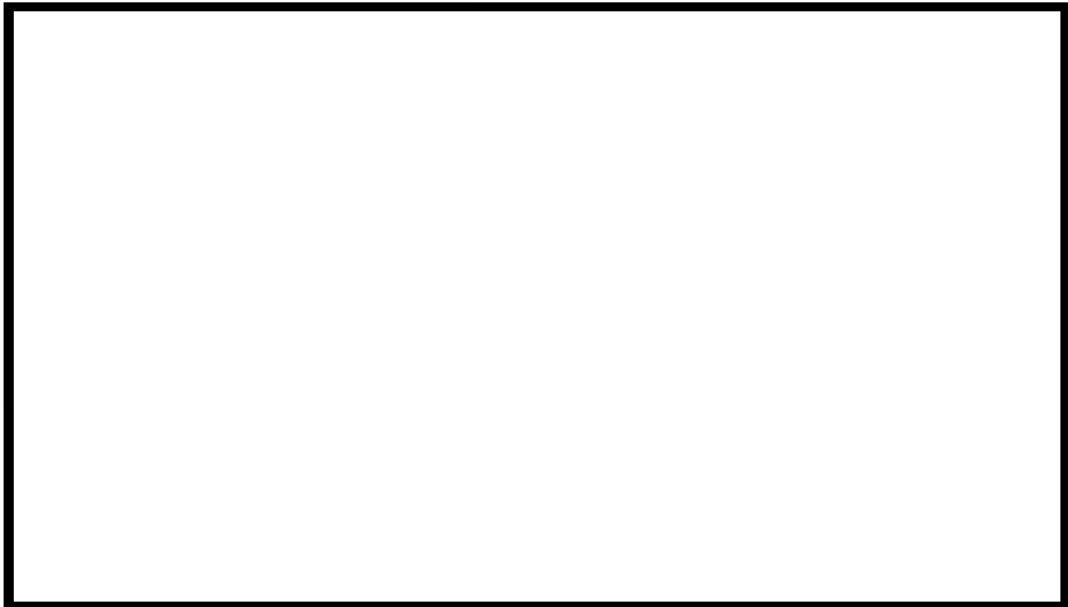



図 10 イグナイタの燃焼時温度検知に関する確認結果概要

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 7. イグナイタの解析結果について

水素燃焼の観点から厳しいシーケンスとして「大 LOCA+ECCS 注入失敗」を想定し、全炉心内の Zr 量 81%が水と反応する等の条件を仮定した、長期的な水素生成も考慮して解析を実施した。主な結果は以下の通り、イグナイタによって、水素のより一層の低減が可能である。

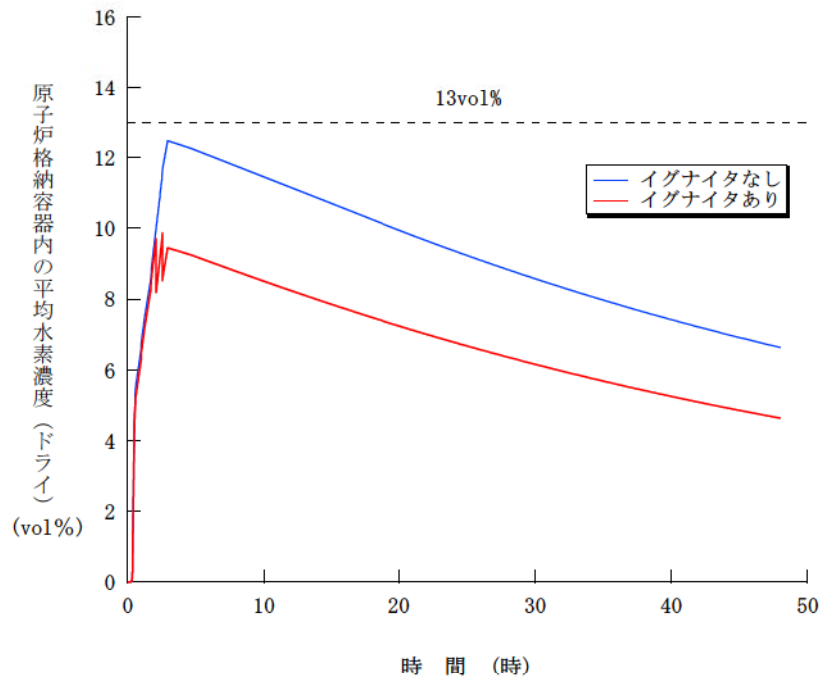


図 11 C/V 内の全体平均水素濃度（ドライ条件換算）の推移（GOTHIC）

### 【主要条件】

- PAR あり
- 全炉心内の Zr 量の 81%が水と反応
- 放射線水分解、金属腐食、ヒドラジンによる放射線分解による水素生成を考慮
- イグナイタ着火下限水素濃度：ウェット 8vol%  
水蒸気濃度：～55 vol%

### (1) 解析条件

「大 LOCA+ECCS 注入失敗」の事故シーケンスでは、「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」において要求される通り、全炉心内の Zr 量の 81%が水と反応するものとした場合の有効性評価を行っている。この場合には、水素爆轟の防止の目安となる C/V 内ドライ換算水素濃度が 13vol%以下であることを確認している。



### 【解析条件】

- ・ PAR5 基、イグナイタ 12 個設置
- ・ 全炉心内の Zr 量の 81%が水と反応
- ・ 放射線水分解、金属腐食、ヒドラジンの放射線分解による水素生成を考慮

### (2) 解析内容

#### a. 解析コード

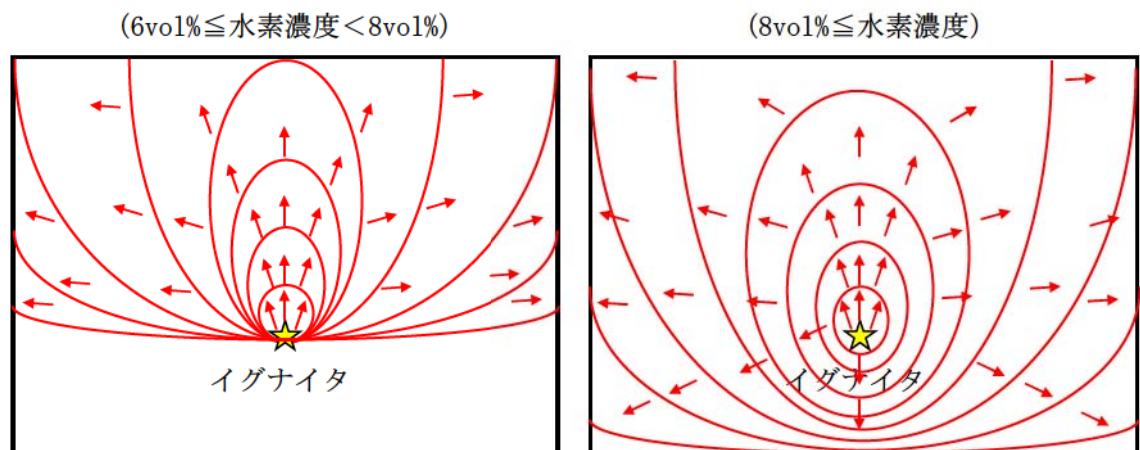
解析コードは GOTHIC を用い、イグナイタを考慮しない場合の解析と同じ条件でノード分割を行っている (図 13)。

#### b. イグナイタによる燃焼状況と解析における扱い

イグナイタへ通電されると、ヒータ表面部が 900℃まで加熱する。表面温度を 900℃まで上げることで、イグナイタの周囲空気温度を水素の自己発火温度である約 560℃まで上昇させ、イグナイタ周囲の水素が自己燃焼する。

イグナイタ周囲の水素が燃焼する際に、周辺の水素も火炎伝播によって燃焼し、瞬時に C/V 内の水素濃度を低下させる効果が期待できる。

一般的に水素の火炎伝播は、水素濃度が約 4vol%から可燃領域に入り、約 4vol%から 6 vol%では火炎は上方伝播のみ、約 6vol%から 8vol%では上方と水平方向に伝播、約 8vol%以上で下方伝播が起きる (図 12)。



#### [補足] 火炎伝播の方向

- ・ 4vol% ≤ 水素濃度 < 6vol% : 上方のみ
- ・ 6vol% ≤ 水素濃度 < 8vol% : 上方・水平
- ・ 8vol% ≤ 水素濃度 : 上方・水平・下方

図 12 イグナイタによる火炎伝播挙動

GOTHIC では、イグナイタが設置されている区画において各気体濃度が表 4 に示す条件を満たした場合に燃焼が生じる。さらに、燃焼している区画の隣接区画が、表 5 に示す条件を満たした場合に水素の通過経路を通して燃焼が伝播するものとする。また、米国 NRC 及び国立研究所で実施された水素燃焼実験や理論式から求められた燃焼モデルが GOTHIC に組み込まれており、イグナイタ設置区画等の燃焼開始時の水素濃度が 8vol% 以上の場合には、その区画での燃え残りはゼロとし、燃焼の伝播先（隣接区画）等、水素濃度が 8vol% より低い場合は、実験相関式を使って区画内での燃え残り量を計算している。（定性的には水素濃度が高い方が燃え残りは少なくなる。）

表 4 イグナイタ着火条件

--

表 4 に示す GOTHIC での着火条件の設定の考え方は以下のとおりである。

- ・水素濃度 8vol%  
イグナイタの着火試験結果で得られている水素濃度（約 7vol%）に余裕を見て、解析における水素燃焼時の温度・圧力が高くなるように高めの値として設定した。
- ・酸素濃度 5vol%  
可燃限界に係る試験結果や格納容器民間ガイドライン<sup>※8</sup>の記載を踏まえて設定した。NUPEC の可燃限界に係る試験<sup>※9</sup>では可燃限界は酸素濃度 > 5vol% とされている。また、格納容器民間ガイドラインでは可燃限界の酸素濃度 5vol% とされており、NUPEC の試験の報告書<sup>※9</sup>において格納容器民間ガイドラインの記載は妥当とされている。これらを総合的に考慮して着火可能な酸素濃度として 5vol% を設定した。
- ・水蒸気濃度 55vol%  
可燃限界に係る試験結果や格納容器民間ガイドライン<sup>※8</sup>の記載を踏まえて設定した。NUPEC の可燃限界に係る試験<sup>※9</sup>では可燃限界は水蒸気濃度 < 60vol% とされている。一方、格納容器民間ガイドライン<sup>※8</sup>では可燃限界の水蒸気濃度 55vol% とされており、NUPEC の試験の報告書<sup>※9</sup>において格納容器民間ガイドラインの記載は妥当とされている。これらを総合的に考慮して着火可能な水蒸気濃度として 55vol% を設定した。

※ 8 次世代型軽水炉の原子炉格納容器設計におけるシビアアクシデントの考慮に関するガイドライン、財団法人 原子力安全研究協会 1999 年 4 月

※ 9 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、（財）原子力発電技術機構、平成 15 年 3 月

■ 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

表 5 燃焼伝播の条件

--

また、表 5 に示す GOTHIC での燃焼伝播条件は、コード内の水素燃焼モデルにおけるデフォルト設定値である。

学会等<sup>※10</sup>では、NUPEC の小規模燃焼試験結果や海外研究から、火炎を伝播させるのに必要な水素の最小の濃度として以下が示されている。

上方伝播 約 4vol%

水平伝播 約 6vol%

下方伝播 約 8vol%

これらと比較して、GOTHIC での燃焼伝播条件は妥当な設定であると判断した。

なお、ドーム部はサブボリュームとしてモデル化されており、この部分は水素濃度が可燃限界以上に達し、かつ乱流条件がある一定の状態になった際に伝播が生じるよう設定されている。

※10 シビアアクシデント熱流動現象評価 平成 13 年 3 月 原子力学会

以上より、GOTHIC では、イグナイタによる燃焼後、当該区画内の水素濃度は大きく低下する。燃焼終了条件を満たす、あるいは酸素が枯渇するなど区画内での燃焼終了後は、隣接区画より水素が区画内に再流入し区画内の水素濃度が上昇する。また、着火後に水素の燃焼による反応熱で区画内の圧力・温度の上昇が生じることも模擬している。

実際の水素燃焼は水素濃度 4vol%から可燃範囲となり、イグナイタを投入することにより水素は燃焼すると考えられるが、解析では、イグナイタ設置区画（図 13 参照）の水素濃度が 8vol%以上となった時点をイグナイタによる着火開始条件としている。水素濃度が 8vol%に到達した後、水素が一気に燃焼すると想定することで、C/V 内の圧力・温度を高め

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

### (3) 解析結果

解析結果を図 14、図 15 に示す。図 14、図 15 に示す通り、全炉心内の Zr 量の 81%が反応すると仮定した場合、イグナイタを設置することにより、C/V 内平均ウェット水素濃度の最大値は約 8vol%、C/V 内平均ドライ水素濃度の最大値は約 10vol%に抑制できることを確認した。

なお、GOTHIC では、C/V 内部を図 13 に示す内部構造に合わせて数 10 の区画に分割し、質量・運動量・エネルギーの 3 保存則及び各種構成式等により、各区画内で発生した水素の C/V 内における分布の推移を計算している。

以下にドライ条件に換算した C/V 内平均水素濃度の算出方法を示す。

ドライ条件に換算した C/V 内平均水素濃度とは、C/V 内の空気量と、解析結果から得られた時々刻々の水素量から求めた、水蒸気を考慮しない水素濃度である。具体的には以下のとおり算出する。

$$n_{H_2} = \frac{M_{H_2} \times 1000}{M_{WH_2}}$$

$$C_{H_2,dry} = \frac{n_{H_2}}{n_{air} + n_{H_2}}$$

$n_{air}$  : C/V 内空気モル数 (mol)

$M_{H_2}$  : 解析から得られる時々刻々の C/V 内水素質量 (kg)

$M_{WH_2}$  : 水素 ( $H_2$ ) の分子量 (g/mol)

$n_{H_2}$  : 水素モル数 (mol)

$C_{H_2,dry}$  : ドライ条件に換算した C/V 内平均水素濃度

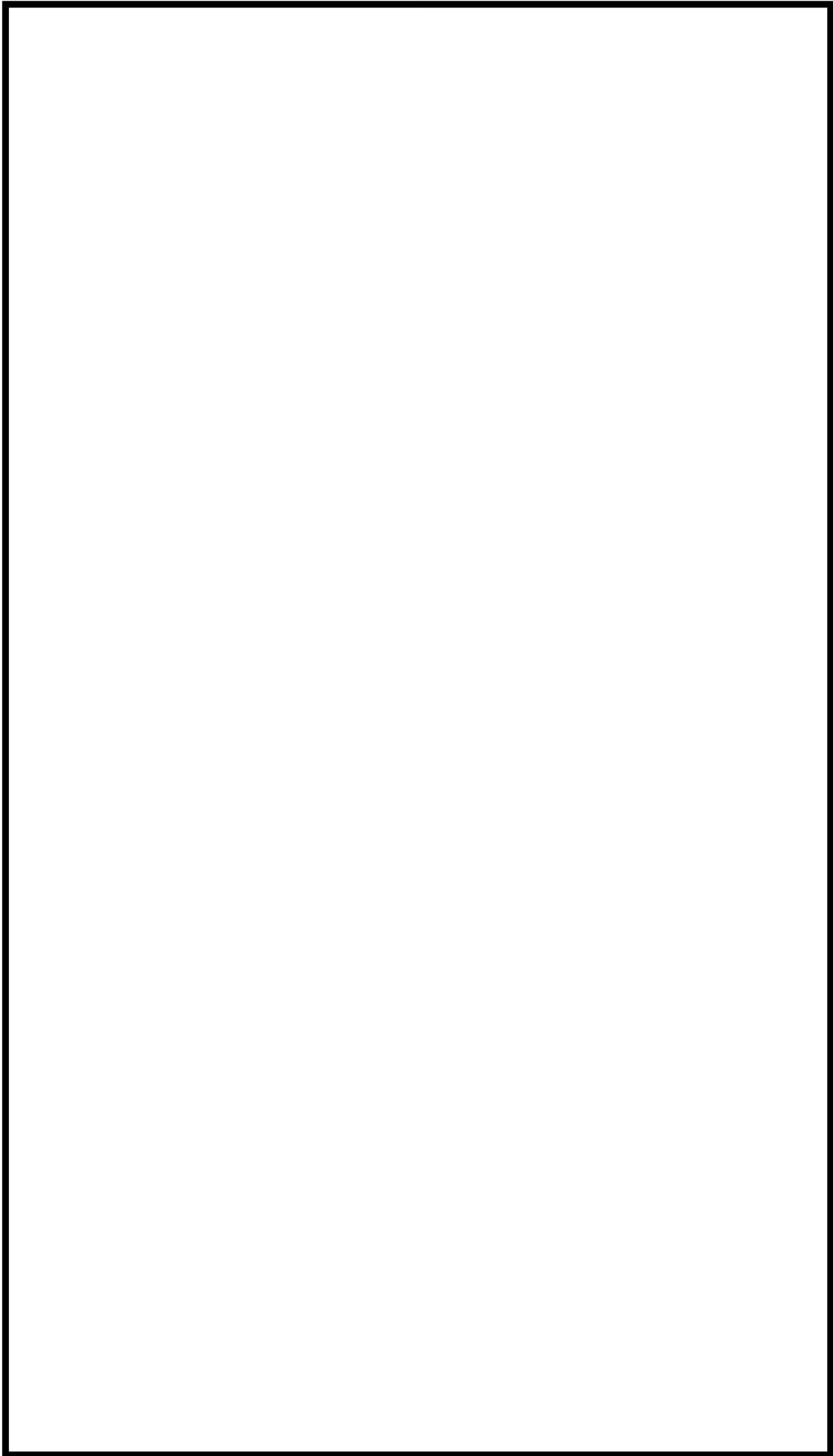


図13 GOTHICコードによる格納容器のノード分割

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

水素濃度が8vol%に到達した区画から順次燃焼することで水素濃度のピークは抑えられている。

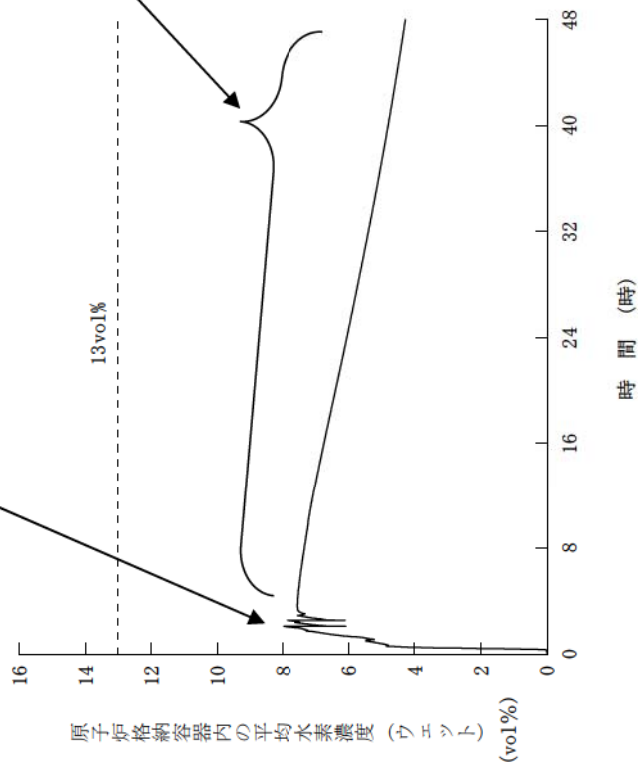


図14 C/V内平均ウェット水素濃度

長期的にはPARでの再結合により水素濃度が低下している。

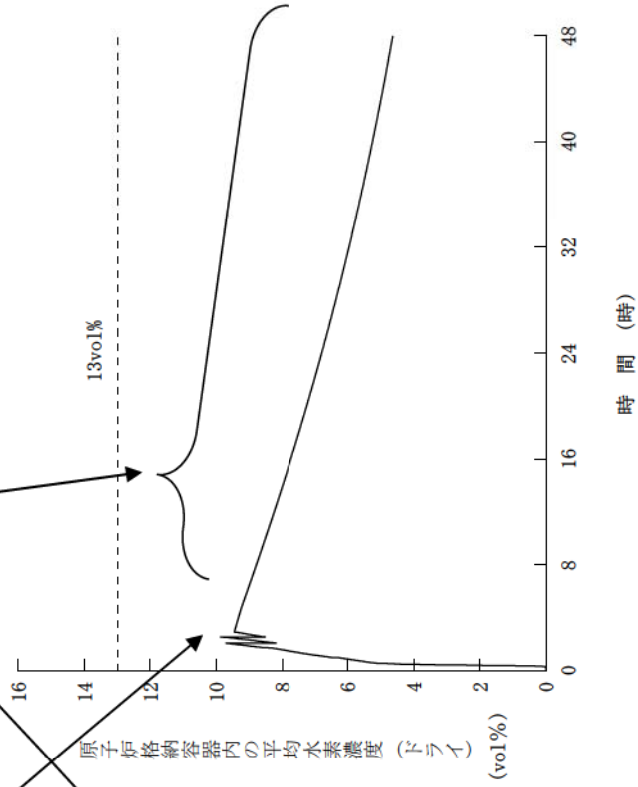


図15 C/V内平均ドライ水素濃度

## イグナイタ着火による再循環ダクト等周辺機器への影響評価について

## 1. はじめに

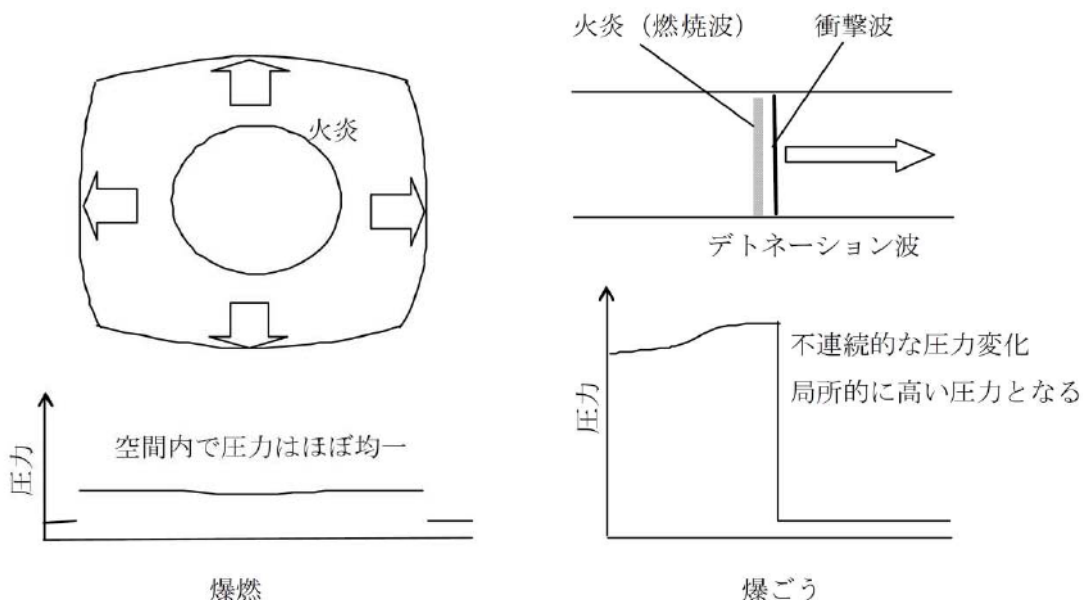
本資料は、イグナイタ着火による周辺機器への影響についてまとめたものである。なお、イグナイタの設置にあたっては、水素燃焼時あるいは水素燃焼後に C/V 健全性維持及び緩和操作に係る機器に対して適切な離隔距離を考慮しており、イグナイタ着火に伴う火炎伝播の影響はなく、イグナイタが着火する水素濃度範囲では、圧力上昇は緩慢であるが、念のために周辺機器への影響を確認する。

## 2. 爆轟と爆燃による圧力伝播と圧力分布の違い

爆轟では、火炎は音速を超えた速度で伝播するため、火炎の直前に衝撃波が形成され、火炎からのエネルギー放出により衝撃波が減衰することなく伝播し続けるものとなる。

別図 1 に示す通り、空間内の圧力分布を考えると、爆轟では火炎伝播は圧力の伝わる速度より速く局所的に圧力が大きく上昇するため、非常に大きな被害が出やすいが、爆燃では圧力変化は火炎伝播より十分速く空間内に音速で伝わる。このため、燃焼による圧力上昇は閉空間全体で平均化される。

イグナイタが着火する 8vol% 程度の水素濃度では、火炎伝播速度は小さく爆轟には至らないため、区画内で着火・伝播しても、周辺機器に有意な圧力差は生じない。



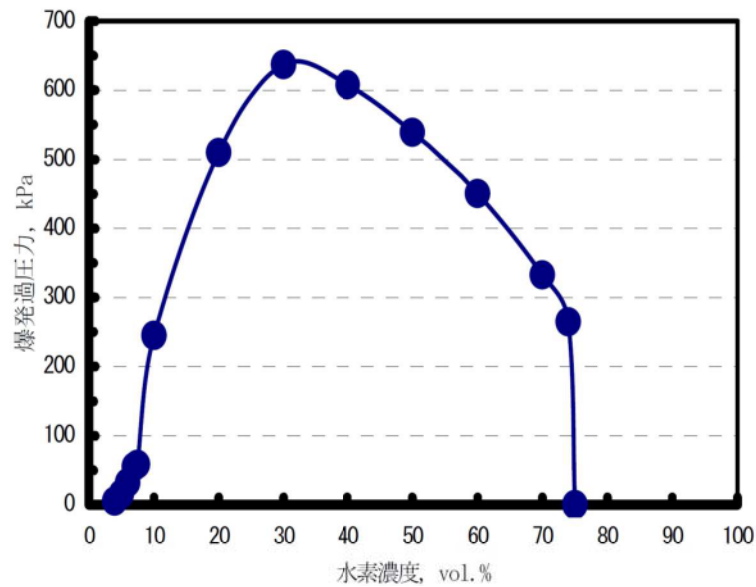
別図 1 爆燃と爆轟での圧力分布 (参考文献[1]より引用)

### 3. 単純な体系での評価

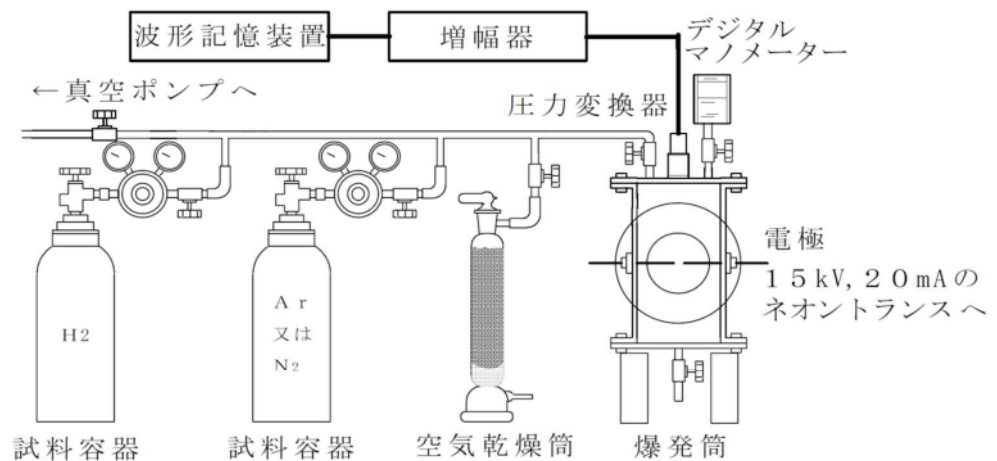
#### (1) 一般的な知見

内容積 2ℓ のステンレス製円筒容器 (φ102mm×210H 観測窓付) を用い、着火は容器中心部において、電気スパーク (15kV のネオントランス) を用いて室温、大気圧下で行われた水素 / 空気混合ガスの爆発圧力特性の測定結果を別図 2 に、測定装置の概略を別図 3 に示す。

8vol%程度では、爆発過圧力は、100kPa~200kPa の間にある。



別図 2 水素 / 空気混合ガスの爆発圧力 (参考文献 [1] より引用)



別図 3 水素の爆発特性測定装置 (参考文献 [1] より引用)



(2) 火炎伝播解析による評価

1m<sup>3</sup>、8m<sup>3</sup>及び64m<sup>3</sup>の立方体（閉空間）に一様濃度の水素と空気との予混合気が形成されている場合の最大過圧（燃焼終了時）を水素の燃焼解析で求め、その計算結果を別表1に示す。理論的には以下の式が成り立ち、水素濃度20vol%の計算結果は文献値より少し低めではあるが、8vol%及び30vol%を含めて、凡そ文献値とほぼ同じ値を示している。水素濃度8vol%程度の場合、計算では最大過圧は160kPaであった。

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{n_2 T_2}{n_1 T_1} \quad \left[ \begin{array}{l} 1 : \text{燃焼前} \\ 2 : \text{燃焼後} \end{array} \right]$$

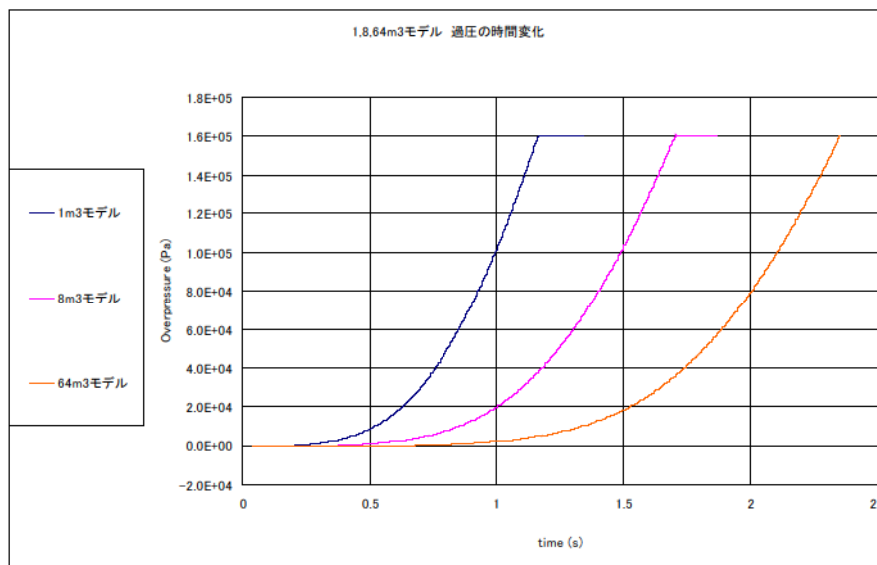
8vol%の水素が全て燃焼した時の到達圧力は、別図4に示す通り、容積（1m<sup>3</sup>、8m<sup>3</sup>及び64m<sup>3</sup>）が異なっても最大で160kPaであり、到達圧力が同じであることを確認した。なお、圧力の時間に伴う上昇は、体系内のどの地点でもほぼ同じ圧力のまま上昇していく結果となっている。このことは、別図1に示した爆燃までの燃焼では、燃焼に伴う局所的な圧力の増加は体系内に速やかに均一化されることを裏付けている。

以上より、8vol%の水素濃度で水素が全て燃焼しても、区画内の設置されている機器の表面で圧力差は小さく、健全性が脅かされることはない。

別表1 最大過圧

H <sub>2</sub> 濃度	文献値(*)	計算結果
8vol%	100～200kPa	160kPa
20vol%	500kPa	400kPa
30vol%	640kPa	600kPa

(\*)：参考文献1より引用



別図4 1m<sup>3</sup>、8m<sup>3</sup>及び64m<sup>3</sup>での圧力変化（H<sub>2</sub>濃度8vol%）

#### 4. ダクト体系での評価

これまでの知見では、配管類で爆轟が生じたのは、片端又は両端が閉ざされた閉空間で水素濃度が高濃度に蓄積したもので起こっているため、PWR のユニット・ダクトのような開放箇所が複数ある構造、水素濃度が高くない（ドライ水素濃度 13vol%未満）条件では爆轟は発生しないと考えられる。

しかしながら、ダクト内では、火炎の伝播方向が限定され、火炎加速が比較的起こりやすいと考えられること及びダクト内で水蒸気が凝縮して水素濃度が高濃度になる可能性を想定し、

- ダクト外 8vol%均一
- ダクト内 13vol%濃度均一（保守的に水蒸気凝縮による水素濃度増加を考慮し、GOTHIC 解析の C/V 内平均水素濃度の最大値を包絡する値を設定）
- イグナイタによる着火

の条件で火炎伝播及び圧力伝播解析により、爆燃の範囲でもダクトの健全性に影響するような内外圧力差が生じないことを評価した。

##### (1) 解析体系

解析体系を別図 5 に示す。なお、着火点は実機の離隔距離を踏まえ、ダクトから 3m とした。

##### (2) 解析結果

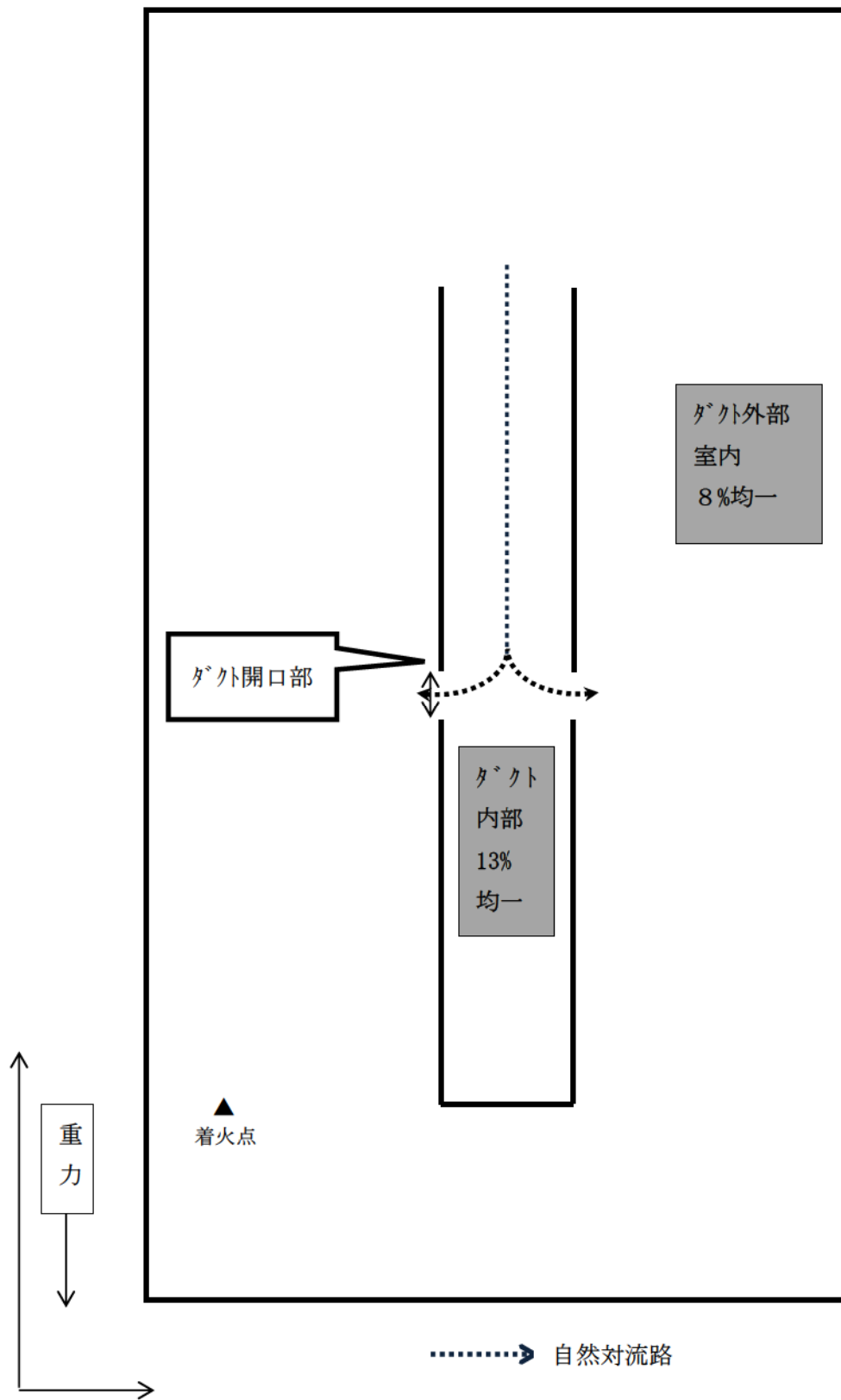
別図 6 の燃焼率コンター図に示す通り、1 秒程度で系内すべての水素が燃焼する結果となった。

ダクト下端部が閉口であるため、火炎はダクトの外側を取り囲むように進む。火炎がダクト中央部に到達すると、ダクト中央部からダクト内部にも広がり、ダクト内においても上下方向に進むが、ダクト内の下方への火炎伝播は、上方と比べ、下端が閉構造のため、閉端部での圧力が次第に高くなることからダクト内下端方向への燃焼ガス膨張が妨げられ、火炎はダクト外側よりも緩やかに伝播している。その後、火炎はダクト上部を抜け、火炎は消失している。火炎伝播の時間差によりダクト内外の圧力差が生じるが、自然対流路（ダクト開口部より上側）の内外差圧は最大でも別表 2 及び別図 7 に示す通りであり、過渡的にも再循環ダクトの許容圧力内に収まる結果となった。

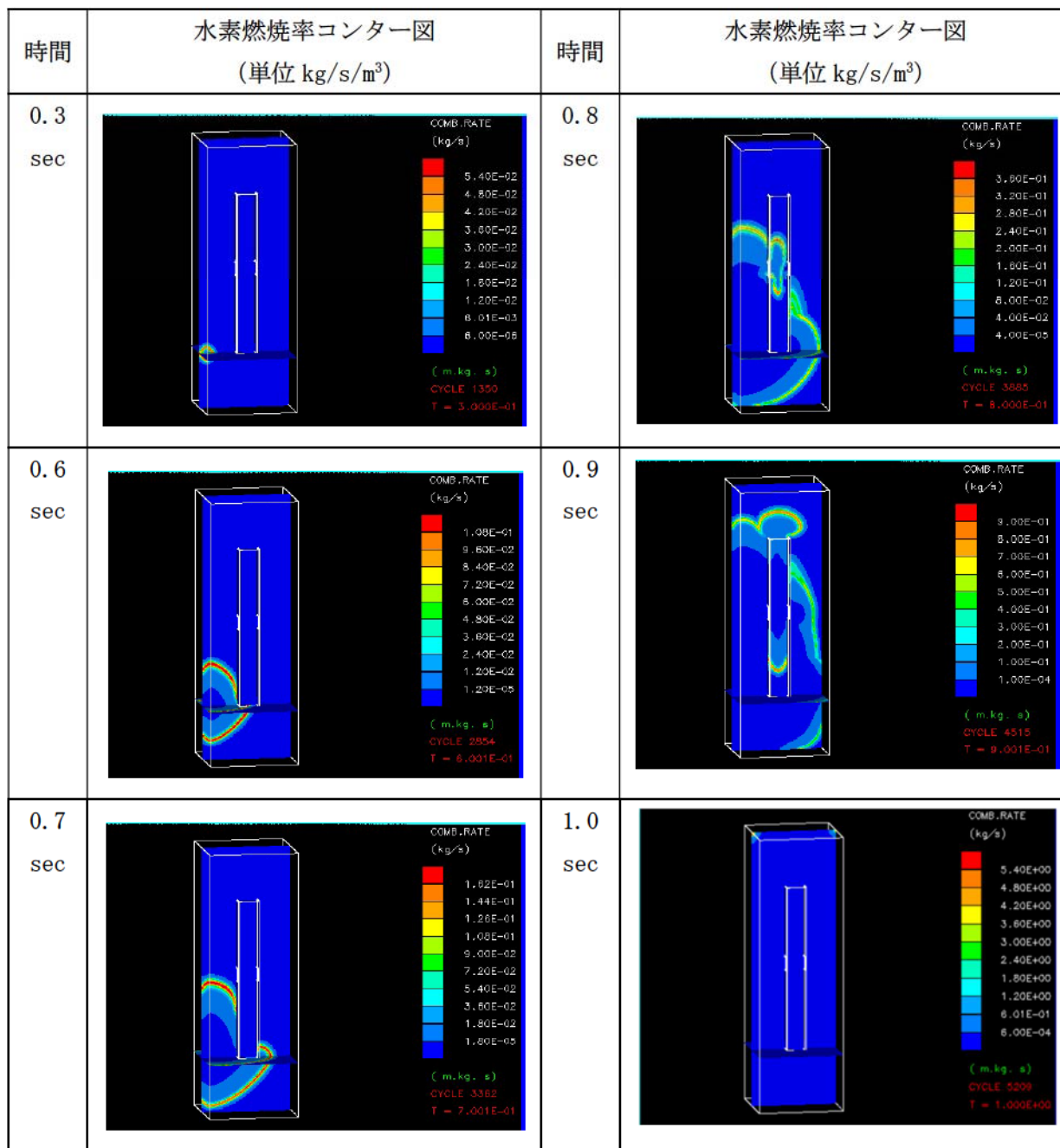
別表 2 自然対流路の内外圧力差評価結果

自然対流路の内外圧力差最大値	再循環ダクトの許容圧力
約 4.4kPa	約 19.6kPa <sup>※11</sup>

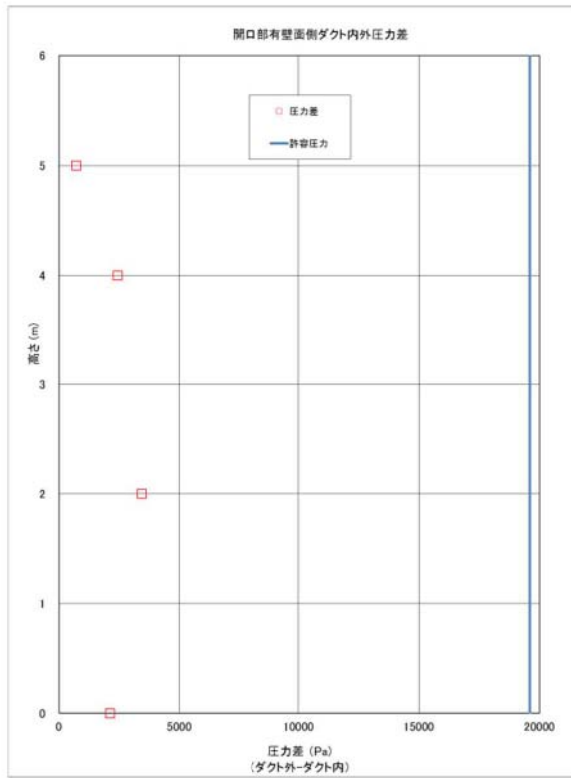
※11 カタログ記載値



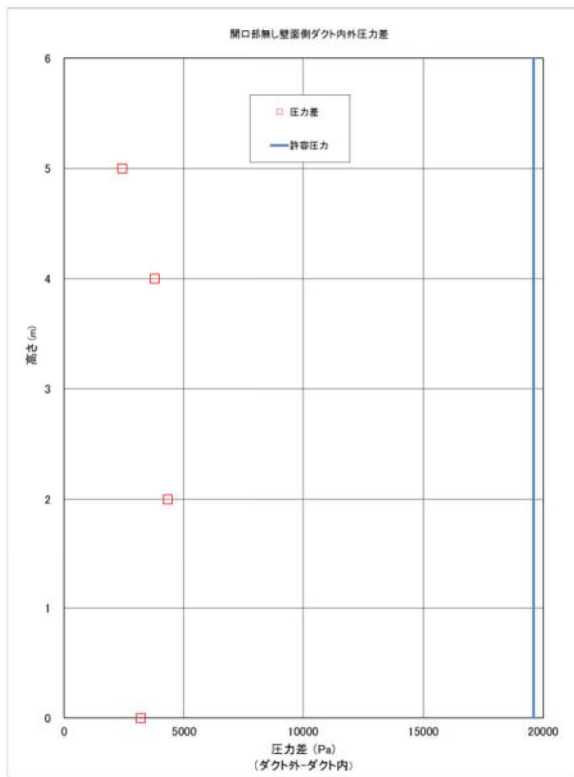
別図5 ダクト内外火炎伝播解析体系図 X-Y断面 (Y-Z断面も同様)



別図6 水素燃焼率コンター図



(1) 中央開口部のある面



(2) 中央開口部のない面

別図7 軸方向位置におけるダクト内外圧力差(1.006s)

## 5. まとめ

解析によるダクト体系等での確認により、最も厳しいと考えられる水素濃度が高い条件で燃焼したとしても、ダクトに損傷を与える程度の圧力差は生じないことを確認した。

また、温度の面については、燃焼時に雰囲気温度は上昇するが、周囲への放熱（主に輻射熱伝達）により低下する。この雰囲気温度変化に対して、機器は雰囲気より大きな熱容量を持つため、温度の上昇は緩やかとなる。例として、8vol%水素濃度均一区画内での燃焼を解析した結果、ダクトのような薄板の機器であっても燃焼時の表面温度の上昇は40℃程度となり、ダクト構造に影響を及ぼすことは考えられない。

以上より、イグナイタの着火に伴う水素燃焼は、周辺機器の機能に影響を及ぼすことはないと考ええる。

なお、PARもイグナイタと同様にいずれの重要機器からも一定の離隔距離を置いて設置されており（別紙）、仮に8vol%程度で発火し、PAR周辺の水素が燃焼したとしても、圧力及び温度上昇による影響はイグナイタの燃焼による影響に包絡される。

## 参考文献

水素の有効利用ガイドブック 平成20年3月 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

## 過去の燃焼試験の整理からの考察

過去の水素燃焼に関する試験等の知見を別表3に整理した。上表に開放空間又は x、y、z の寸法が同等の閉囲空間での水素燃焼試験の条件を、下表に細長い閉囲空間（管路、ダクト系）での水素燃焼試験の条件を示している。爆轟が発生するのは、過去の試験等では、下表のような細長い配管類に水素と支燃性ガスがドライに近い条件で閉じ込められた場合であり、ダクト・配管以外の広い空間での火炎伝播試験の体系では、水素濃度が 13～15vol%（ドライ水素濃度）でも、爆轟は発生していない。ウェット条件になるとさらに高濃度の水素でも発生していない。

また、過去の細長い体系（管路、ダクト）での水素燃焼試験結果と再循環ダクトの体系の比較を別表4に示す。

RUT 試験から、約 11vol%未満の水素濃度では、障害物の有無に係らず、爆燃止まりであるのに対して、12.5vol%以上の水素濃度では障害物がある場合にのみ爆轟が発生している。

労働省 産業安全研究所の試験では、両端又は片端が閉の場合には、障害物の有無に係らず爆轟が発生している。この結果から、両端又は片端が閉の場合では、障害物がなくても配管の長さ と径の比 (L/D) が大きく、30vol%程度の高水素濃度の場合は爆轟に転移する可能性が高いことが分かる。

SRI の試験結果においては、両端が開放の場合でも水素濃度 30vol%の水素濃度で障害物がある場合に爆轟が発生している。この結果から、配管の両端が開口の場合でも、L/D が大きく、30vol%程度の高水素濃度で障害物がある場合には、爆轟が発生する可能性があることが分かる。

NUPEC の大規模試験は、内径 8m の球体系 (270m<sup>3</sup>) で多区画 (11 区画) である特徴があり、この球体系の中に円周約 16m、口径 1m のドーナツ状 8 角形空間があるが、15vol%（ドライ）大気圧の条件でも爆轟は発生していない。この結果から、複数の開口部があり、L/D が 20 未満と比較的小さい体系では、15vol%程度の水素濃度でも爆轟は発生しない傾向にあることが分かる。

以上を整理すると、爆轟発生条件として、以下の条件が挙げられる。

- 水素濃度が 12.5vol%未満では障害物の存在に依存しないが、12.5vol%以上では水素濃度とともに障害物が存在したほうが爆轟の可能性が高まる。
- 配管の両端が開口の場合でも、L/D が大きく、30vol%程度の高水素濃度で障害物がある場合には、爆轟が発生する可能性がある。
- 両端又は片端が閉の場合では、障害物がなくても L/D が大きく、30vol%程度の高水素濃度の場合は爆轟に転移する可能性が高い。
- L/D が 20 未満と比較的小さい体系では、15vol%程度の水素濃度でも爆轟は発生していない。

実機での細長い体系である再循環ダクトでは、保守的に水蒸気凝縮による水素濃度増加を考慮し、GOTHIC 解析の C/V ドライ平均水素濃度の最大値を包絡する値として、ダクト内の水素濃度を保守的に 13vol%とした場合においても、開放された系であり、ダクト内には障害物がない。また、L/D も 10 未満であり、過去の爆轟事例のいずれの条件にも当てはまらない。

別表3 過去の水素燃焼に関する試験等の知見

■ 開放空間またはX, Y, Zの寸法が同等の閉鎖空間での水素燃焼試験の条件の整理 (爆轟が生じなかった試験結果のみ) :

試験	試験体系	障害物の有無	水素濃度等	配管の長さ (L) と径 (D) の比 (L/D)	爆轟の発生の有無	備考
NTS 試験 (米) EPRI	半径 16m の球体系 (2100m <sup>3</sup> )、特徴：広い自由空間	なし	5~13vol% (水蒸気濃度 4~40vol%)	該当なし	なし	
BMC (独)	640m <sup>3</sup> 特徴：多区画	なし	5.5~14vol% (水蒸気濃度 0~60vol%)	該当なし	なし	
NUPEC 小規模試験	閉空間 (5m <sup>3</sup> の小体系)	なし	6, 8, 10 vol% (ドライ) 5.50vol% (ウエット 20%) 30vol% (ウエット 40%)	約 2.3	なし	
NUPEC 大規模試験	内径 8m の球体系 (270m <sup>3</sup> ) 特徴：多区画 (11 区画)	手すり状の細長いものがある	5~15vol% (ドライ) 5.6~12.7vol% (ウエット)	該当なし	なし	
NEDO 試験	円周約 16m、口径 1m のドーナツ状 8 角形空間 100% 水素高圧 (40MPa~) 貯蔵タンクに漏えい孔を設置し、大気への放出後に着火	オリフィス 4 箇所 なし	8~15 vol% (ドライ)	約 16 該当なし	なし	2 箇所の上部区画への開口部あり 100% 水素高圧 (40MPa~) 貯蔵タンクに漏えい孔を設置し、大気への放出後に着火。

・爆轟が発生するのは、過去の試験等では、下表のような長い配管類に水素と支燃性ガスがドライに近い条件で閉じ込められた場合であり、上表のようなそれ以外の体系では、ドライ濃度 13, 14, 15% でもそれぞれ爆轟の発生は認められていない。ウエット条件になるとさらに高濃度の水素でも生じていない。

■ 細長い閉鎖空間 (管路、ダクト系) での水素燃焼試験の条件の整理 (爆轟が発生した (生じさせた) 結果を含む) :

試験、他	試験体系	障害物の有無	水素濃度等	配管の長さ (L) と径 (D) の比 (L/D)	爆轟の発生時の条件等	爆轟が発生しなかった条件等
RUT 試験 (露) OECD/EU	70m の閉鎖空間 (480m <sup>3</sup> ) (2.3mW × 2.5mH × 70m)	12 設置	~60vol% (ドライ) (ウエット条件でも実施)	約 28		爆轟が発生しなかった条件等 水蒸気 15vol% のウエット条件では、同一体系でも爆轟は発生せず。
NUPEC (& 米 NRC) 高温燃焼試験	爆轟管：2 体系。両端部とも閉端構造。 ・10cm 内径 × 6.1m (SSDA 試験) ・27cm 内径 × 21.3m (HTCF 試験)	障害物 (パイプ) を多数設置。	約 5~約 50vol% (水素-空気系、水蒸気-水素-空気系)	SSDA 試験：約 60 HTCF 試験：約 78	あり 300K 条件では 15% (ドライ) から、650K 条件では 11% (ドライ) から、それぞれ爆轟発生。	同一体系に、ベントによる開放のパスを追加した試験では爆轟は発生せず。
SRI (NEDO We-Net)	約 10m の爆轟管。一端は閉構造。	障害物 有 (7, 13, 25 個)・無の両ケース	20~57vol%	約 26	あり 障害物設置時に爆轟発生。	障害物無しでは爆轟発生せず。
労働省 産業安全研究所 試験	爆轟管： ・28mm 内径 × 管全長 2.1m~9.1m 特徴：端部の開/閉組み合わせ	障害物 (パイプ) の有無	30vol% (ドライ)	約 75~325	あり	管の両端部とも開の場合は爆轟は発生せず。(障害物設置の場合も)



別表4 細長い体系(管路、ダクト)での水素燃焼試験結果の分析

主な試験条件、体系	水素濃度(ドライ)	障害物、閉塞率	端部構造	L/D(長さ/径)	爆轟発生の有無	
RUT 試験	水素濃度：9.8～14% (ドライ)  長さ：65m 断面：2.5m×2.2m 【実機ダクトハブ寸法】 障害物：12ヶ固定	●：13%より上 ○：13%以下	●あり(サバ、カ、行ル) ○なし	●20以上 ○20未満	●発生 ○未発生	
		○：9.8	○	●：28	○	
		○：11	●：30%(閉塞率)	●↑	●：↑	○
		○：11.2	●：60%	●↑	●：↑	○
		○：12.5	○	●↑	●：↑	○
		○：12.5	●：30%	●↑	●：↑	●
		○：12.5	●：60%	●↑	●：↑	○
		●：14	○	●↑	●：↑	○
		●：14	●：60%	●↑	●：↑	●
		●：30	○	○	●：75～325	○
労働省 産業安全研究所 試験	水素濃度：30% (ドライ) L：2.1～9.1m D：0.028m 【爆轟試験管サバ*】 障害物：多数	●：30	●：30%	○	●	
		●：30	○	●片端閉(反点火側)	●：↑	●
		●：30	●：30%	●↑	●：↑	●
		●：30	○	●片端閉(点火側)	●：↑	●
		●：30	●：30%	●↑	●：↑	●
		●：30	○	●同端閉	●：↑	●
		●：30	●：30%	●↑	●：↑	●
		●：17	●：57%	●：同端閉	●：78	●
		●：20	●：↑	●：↑	●：↑	●
		●：30	●：↑	●：↑	●：↑	●
SRI プロジェクト試験	水素濃度：20～57% 長さ：9.9m 断面：0.381m×0.381m 【爆轟試験管サバ*】 (全13ケース) 障害物：最大25個	●：20	●：32%	●：片端閉(点火側)	●：26	●
		●：57	●：↑	●：↑	●：↑	●
		●：30	●：↑	○	●：↑	●
		●：20	○	●：片端閉(反点火側)	●：↑	○
		●：20	●：65%	●：↑	●：↑	●
		●：30	○	●：↑	●：↑	○
		●：57	○	●：↑	●：↑	○
		●：30	●：65%	●：↑	●：↑	●
		●：57	●：↑	●：↑	●：↑	●
		●：57	●：32%	●：↑	●：↑	●
NUPEC 大規模試験	一般部 ドーナツ八角形状 D：1m、全周：16m 【実機ダクトハブ寸法】 水素濃度：5～15%	●：30	●：↑	●：↑	●	
		●：30	●：47%	●：↑	●	
		○：8	○	○：複数個所に開口部	○：16	○
		○：12	○	○：↑	○：↑	○
CV再循環ダクトの条件		●：15	○	○：↑	○	
		●：13*	○	○：開放箇所複数	○：7～8	

\* 水蒸気の凝縮効果を保守的に考慮。

水素濃度 13%より上の試験で 爆轟が発生しなかった試験 --- 障害物なしの条件がすべてに共通。水素濃度は14～57%。  
上記以外の障害物なしの試験 ----- 他の条件がすべて厳しい場合(30%、端部閉、L/D大)にのみ爆轟



## イグナイタ着火の熱影響について

C/V 頂部のスプレイリング付近にイグナイタを追設するに当たり、イグナイタ着火による C/V スプレイシステム及びC/V 本体（鋼板）への熱影響についてまとめる。



## 1. 評価条件等

主な評価条件等は以下のとおり。

- 全炉心 100%Zr-水反応を仮定、放射線水分解、金属腐食を考慮
- 大 LOCA+ECCS 注入失敗のケース
- PAR、イグナイタを考慮
- イグナイタ設置区画において、水素濃度 8vol% (wet) になれば着火



GOTHIC では、イグナイタにより区画内水素濃度 8vol%(wet)で燃焼後、当該区画内の水素濃度は大きく低下する。区画内での燃焼終了後は、隣接区画より水素が区画内に再流入し区画内の水素濃度が上昇し、水素濃度 8vol%(wet)となれば再度燃焼することで水素濃度は大きく低下する。以上のように、イグナイタによる水素燃焼は水素濃度が 8vol%(wet)となれば断続的に繰り返されるが、連続的に燃焼が続くものではない。従って、着火後に水素の燃焼による反応熱で区画内の温度上昇が生じるが、C/V 内構造材等への輻射熱伝達等により速やかに低下する。



図1 区画内の着火等模擬イメージ

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 2. 中実構造機器に対する温度影響評価

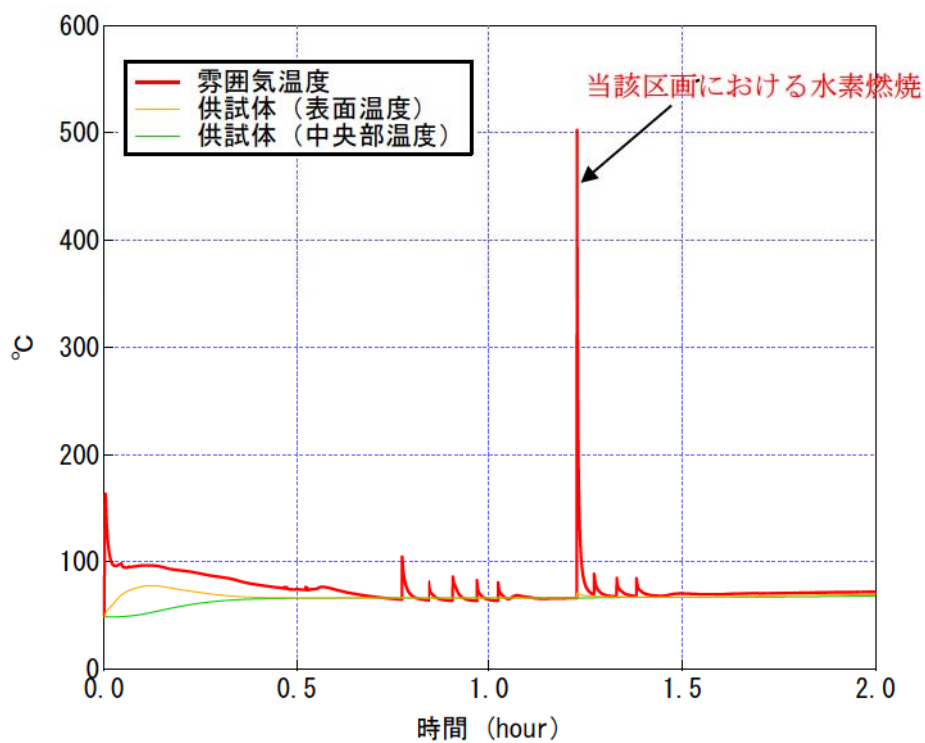
区画の中に中実構造の機器を模擬し、区画内の雰囲気温度変化とそれに伴う機器の温度変化を評価した。仮定した機器の寸法等を別表5に示す。

解析の結果として、別図8及び別図9に水素燃焼に伴う区画内雰囲気及び機器の温度の時間/変化を示す。

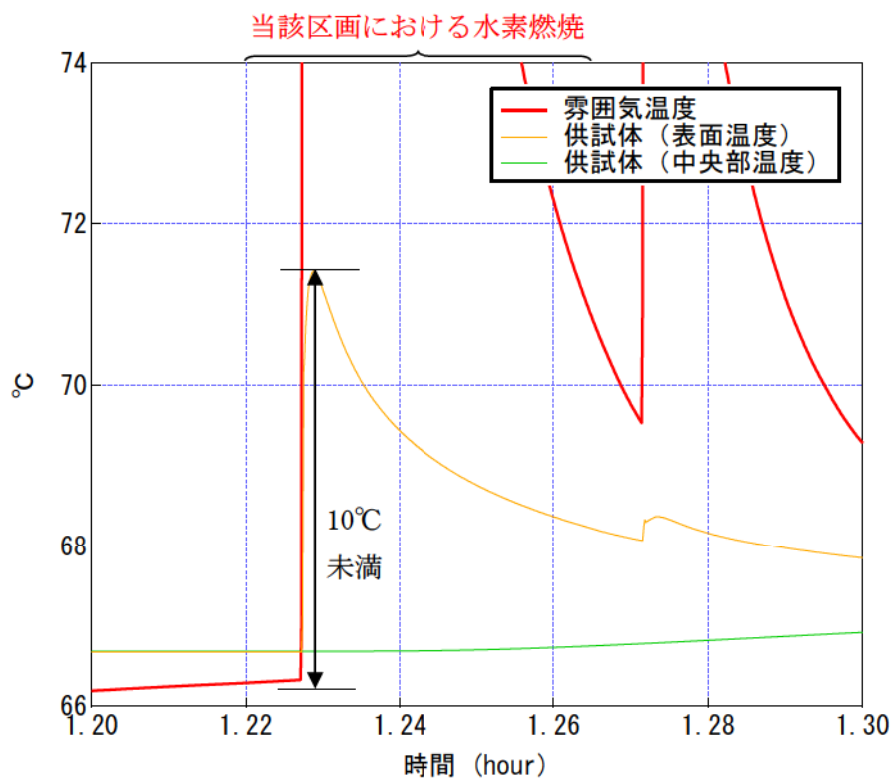
雰囲気温度は、水素の燃焼に相当する反応熱の生成で上昇するが、周囲の金属及びコンクリート等のヒートシンクへの熱放射及び対流熱伝達により、速やかに低下する。この雰囲気温度の過渡応答の中に置かれた機器の表面温度は、熱伝導により上昇するが、温度上昇は10℃未満であり、内部の温度はほとんど上がらないことを確認した。

別表5 中実機器を模擬した供試体の寸法等

形状	中実機器
寸法	200mm×200mm×400mm



別図8 雰囲気温度及び供試体の温度の時間変化



別図9 雰囲気温度及び供試体の温度の時間変化 (1.2h~1.3h 拡大)

### 3. 薄板構造機器に対する温度影響評価

区画の中に薄板構造の機器（再循環ユニットのダクト等）を模擬し、区画内の雰囲気温度変化とそれに伴う機器の温度変化を評価した。仮定した機器の寸法等を別表6に示す。

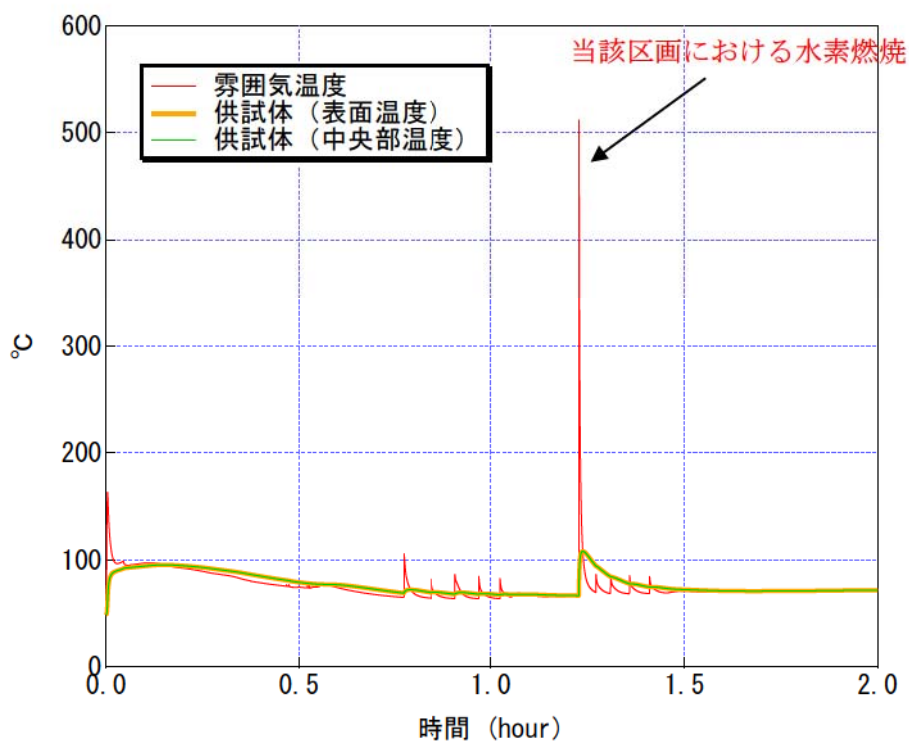
解析の結果として、別図10及び別図11に水素燃焼に伴う区画内雰囲気及び機器の温度の時間変化を示す。

再循環ユニットのダクトのような薄板構造の機器については、薄い板材がほぼ一様に熱容量に応じて温度上昇するため、温度は上昇しやすくなるが、温度増加は40℃程度に収まる。

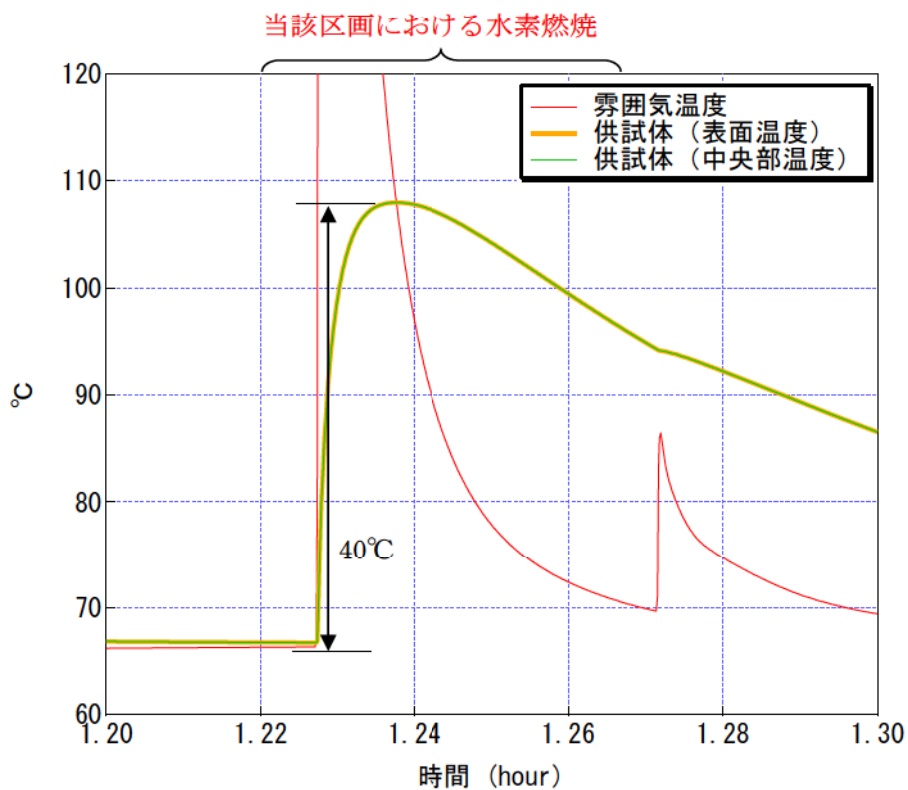
薄板構造の機器としては、その他にPARのケーシング、各種の計装器類のケーブルを保護する金属製カバーが該当する。

別表6 薄板構造機器（再循環ユニットのダクト）を模擬した供試体の寸法等

形状	パイプ
口径	1,700mm
長さ	2.2m
板厚	1.6mm



別図 1 0 雰囲気温度及び供試体の温度



別図 1 1 雰囲気温度及び供試体の温度 (1. 2h~1. 3h 拡大)

#### 4. イグナイタ着火後の熱影響の考察

泊3号炉におけるGOTHIC解析「大破断LOCA+ECCS注入失敗(Zr-水反応割合81%)」のドーム部頂部でのイグナイタ着火時の雰囲気温度とC/V本体壁面温度を別図12及び別図13に示す。

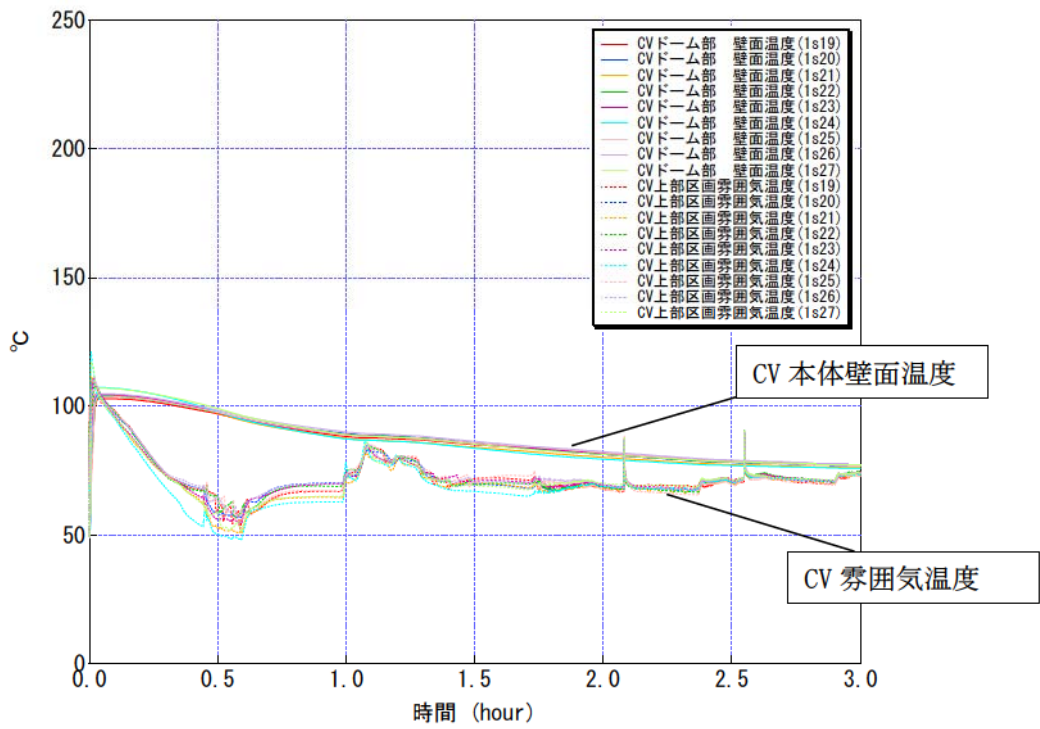
別図12に示す通り約2時間から約3時間にかけてイグナイタ着火による水素処理が行われている。イグナイタ作動時のドーム部頂部の雰囲気温度は、およそ70℃から90℃まで変化している。これは、C/V下部区画のイグナイタによる燃焼が影響しているものであり、ドーム部のC/V本体壁面温度にほとんど変化はなく80℃程度である。

別図8～別図11と同様に、仮にドーム部に設置したイグナイタが作動し、その周囲の雰囲気温度が500℃以上に上昇したとしても、周囲への熱放射及び対流熱伝達により、数分程度で着火前の温度に低下すると考えられ、さらに、この雰囲気温度変化に対して、C/V本体及びC/Vスプレイ配管は雰囲気より大きな熱容量を持つため、温度の上昇は緩やかとなると考えられるため、その温度上昇度合いは、先に述べた影響評価結果と同程度(10～40℃程度)と考えられる。

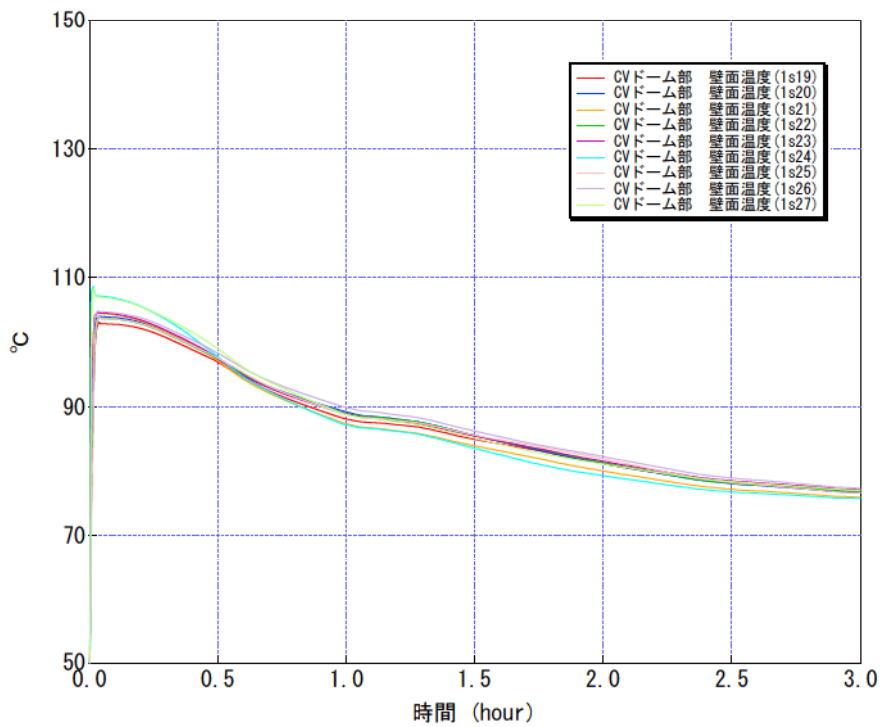
別表7にC/V本体及びC/Vスプレイ配管の許容温度を示す。

C/V本体及びC/Vスプレイ配管の板厚は、それぞれ約22.5mm、4.0mmであり、共に中実機器と薄板構造機器の中間的な温度上昇になると考えられる。そこで、保守的に薄板構造機器の温度上昇度合いで推測すると、120℃程度(80℃+40℃)まで上昇すると考えられるが、許容値である200℃<sup>\*12, 13</sup>に対して十分な余裕がある。また、スプレイ配管の材質は、ステンレス(融点は約1,400℃程度)であり、十分な熱容量を有する。C/V本体についても鋼製であり同様である。なお、有効性評価における過温破損シーケンス「全交流動力電源喪失+補助給水失敗」の最高値約141℃から40℃上昇するとしても、許容値である200℃<sup>\*12, 13</sup>を下回る。

以上より、追設するイグナイタの着火に伴う水素燃焼の温度影響は、C/V本体及びC/Vスプレイ配管に対しても問題とならないと考えられる。



別図1 2 イグナイタ着火時のドーム部頂部の温度変化  
 泊3号炉 GOTHIC 解析「大判断 LOCA+ECCS 注入失敗 (Zr-水反応割合 81%)」



別図1 3 イグナイタ着火時のドーム部頂部の壁面温度変化 (拡大)  
 泊3号炉 GOTHIC 解析「大判断 LOCA+ECCS 注入失敗 (Zr-水反応割合 81%)」



別表7 C/V 本体及びC/V スプレイ配管の許容温度

機 器	許容温度
C/V 本体	200℃ <sup>*1 2</sup>
C/V スプレイ配管	200℃ <sup>*1 3</sup>

※1 2 イグナイタを設置する C/V 頂部には、貫通部等の温度影響部の厳しい箇所はないが、C/V 健全性評価を行い問題ないことを確認している限界温度 200℃を許容温度としている。

※1 3 C/V スプレイ配管の材質は、ステンレスであり、実力的にはステンレスの融点は約 1,400℃まではもつと考えられる。

## 5. まとめ

代表プラントのイグナイタ着火による過渡応答結果から、追設するイグナイタ着火による C/V スプレイシステム及び C/V 本体（鋼板）への熱影響について考察した。

その結果、ダクトのような薄板の機器であっても燃焼時の表面温度の上昇は 40℃程度であることから、いずれの機器の温度上昇も同程度以下であると推測され、これらの機器に影響を及ぼすことはないと考えられる。

## C/V ドーム部頂部付近への施工方法について

イグナイタ本体は、C/V ドーム部スプレイ配管付近に耐震性を確保した新設パッドを設け、剛構造の取付用架台を溶接して設置する。

イグナイタ専用ケーブル及び温度計測用の熱電対は、スプレイ配管に抱き合わせて敷設し、固定は SUS バンドと固定金具を用いて地震時の反力に対する耐震性を確保する。ここで、イグナイタ専用ケーブル及び熱電対は配管質量と比較して軽量であるため、敷設に伴うスプレイ配管への影響はない。

なお、C/V 内から C/V 外へは、電気ペネトレーションの予備を利用してケーブル敷設する。



格納容器ドーム部頂部付近への据付状態概略図

イグナイタによる水素燃焼の影響を考慮する評価対象機器について

(1) 評価対象機器の選定について

イグナイタによる水素燃焼に伴う周辺機器・計器への影響評価を行うにあたり、評価対象機器を選定した。対象とする機器・計器は、イグナイタ着火時に、C/V 損傷を防止するための安全機能を有する機器・計器とし、機能と作動時期の観点から、以下の考え方に従って選定した。下表に選定した機器の一覧及び温度・圧力の許容値を示す。

○C/V 損傷の防止のための以下の機能を有する機器

- ・ 隔離機能
- ・ 除熱機能
- ・ 緩和機能
- ・ 状態監視・計測

○原子炉出口温度が 350℃を超過した以降に機能が要求される機器

(イグナイタは 350℃超過を検知後 10 分以内で起動させることに基づく)

泊 3 号炉イグナイタ着火に伴う影響評価対象機器

機能分類	機器	許容値	
		温度	圧力
隔離機能関連機器	C/V 本体	200℃	2Pd (566kPaG)
	C/V 大開口部 (機器搬入口、エアロック)	200℃	2Pd (566kPaG)
	C/V 隔離弁	200℃	2Pd (566kPaG)
	C/V ペネ	200℃	2Pd (566kPaG)
除熱機能関連機器	再循環ユニット	200℃	63kPaG
	再循環ダクト	200℃	19.6kPaG
	C/V スプレー (含、代替スプレー)	200℃	2Pd (566kPaG)
緩和操作関連機器	イグナイタ		
	PAR	500℃	—
監視機能関連機器 (重要計器)	1 次冷却材圧力計		
	1 次冷却材高温側温度計		
	C/V 内温度計		
	C/V 圧力計		
	C/V 内高レンジエリアモニタ		
	S/G 水位計 (狭域)		
	C/V 再循環サンプル水位計		
	原子炉下部キャビティ水位計		
C/V 水位計			

(\*1) 5 分間。

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

52-10 可搬型重大事故等対処設備の接続口について

可搬型重大事故等対処設備の接続口について

設置許可基準 第43条 (重大事故等対処設備)

新規制基準の該当項目	適合状況						
<p>重大事故等対処設備は、次に掲げるものでなければならぬ。</p> <p>3 可搬型重大事故等対処設備に関しては、第一項に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならぬ。</p> <p>三 常設設備と接続するものにあつては、共通要因によつて接続することができなくなること防止するため、可搬型重大事故等対処設備（原子炉建屋の外から水又は電力を供給するものに限る。）の接続口をそれぞれ互いに異なる複数の箇所に設けるものであること。</p> <p>【解釈】 6 第3項第3号について、複数の機能でひとつの接続口を使用する場合は、それぞれの機能に必要な容量（同時に使用する可能性がある場合は、合計の容量）を確保することができるように接続口を設けること。</p>	<p>以下の可搬型重大事故等対処設備を常設設備に接続する場合、共通要因によつて接続できなくなること防止するため、位置的分散を考慮し、それぞれ建屋の異なる面の隣接しない位置に適切な離隔距離をもつて複数箇所に、また原子炉建屋内に設置の場合は建屋内の異なる区画に複数箇所設置し異なる建屋面から接続できるように、複数の接続口を設けている。</p> <p>以下に、可搬型重大事故等対処設備の接続箇所を示す。</p> <table border="1" data-bbox="609 280 1059 1281"> <thead> <tr> <th>設備及び用途</th> <th>接続箇所</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>・可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系への海水送水</td> <td>① Bトレン側原子炉補機冷却水配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）又は西側からアクセスし、接続） ② Aトレン側原子炉補機冷却水配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）又は西側からアクセスし、接続）</td> </tr> <tr> <td>・可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット及び燃料取替水ピットへの補給</td> <td>① 補助給水系配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）からアクセスし、接続） ② 燃料取替水系配管（屋内） （原子炉補助建屋 上屋（ECTトラックアクセスエリア内）にて接続）</td> </tr> </tbody> </table> <p>追而理由【3号炉原子炉建屋西側を経由したルートの設定変更】 以降の追而 標記の追而理由は、上記と同様であることから省略する。</p> <p>可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット及び燃料取替水ピットへの補給は、ひとつの接続口を使用するが、それぞれの機能に必要な容量を確保できる接続口を設置している。（別紙）</p> <p>（屋内）：ホースの接続はシャッター・扉を経由して行い、接続口自体は屋内であることを示す。</p>	設備及び用途	接続箇所	・可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系への海水送水	① Bトレン側原子炉補機冷却水配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）又は西側からアクセスし、接続） ② Aトレン側原子炉補機冷却水配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）又は西側からアクセスし、接続）	・可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット及び燃料取替水ピットへの補給	① 補助給水系配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）からアクセスし、接続） ② 燃料取替水系配管（屋内） （原子炉補助建屋 上屋（ECTトラックアクセスエリア内）にて接続）
設備及び用途	接続箇所						
・可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系への海水送水	① Bトレン側原子炉補機冷却水配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）又は西側からアクセスし、接続） ② Aトレン側原子炉補機冷却水配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）又は西側からアクセスし、接続）						
・可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット及び燃料取替水ピットへの補給	① 補助給水系配管（屋内） （原子炉建屋 東側（デューセル発電機建屋）からアクセスし、接続） ② 燃料取替水系配管（屋内） （原子炉補助建屋 上屋（ECTトラックアクセスエリア内）にて接続）						

第43条第3項



可搬型重大事故等対処設備の接続箇所を左図に示す。  
 各接続口については、共通要因によって接続できなくなることを防止するため、位置的分散を考慮し、それぞれ建屋の異なる壁面近傍に、また原子炉建屋内に設置の場合は異なる区画に、複数の接続口を設置し、それぞれに必要な容量を給水することとしている。

接続箇所		追而
1	設備及び用途 <ul style="list-style-type: none"> <li>可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系統への海水送水</li> </ul>	<p>① Bトレン側原子炉補機冷却水配管(屋内)            (原子炉建屋 東側(ディーゼル発電機建屋)又は西側からアクセスし、接続)            (原子炉建屋内：T.P. 2.3m)</p> <p>② Aトレン側原子炉補機冷却水配管(屋内)            (原子炉建屋 東側(ディーゼル発電機建屋)又は西側からアクセスし、接続)            (原子炉建屋内：T.P. 2.3m)</p>
	2	<p>① 補給注水系配管(屋内)            (原子炉建屋 東側(ディーゼル発電機建屋)からアクセスし、接続)            (原子炉建屋内：T.P. 10.3m)</p> <p>② 補給注水系配管(屋内)            (原子炉補助建屋 上屋(ECTトラックアクセスエリア内)にて接続)            (原子炉補助建屋内：T.P. 33.1m)</p>

1. 可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系統への海水送水の接続口（1／3）

可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系統への海水送水の接続口は、頑健な原子炉建屋内の異なる区画に配置することにより位置的分散を図った2箇所（Aトレイン及びBトレインの原子炉補機冷却水配管への接続）を設けており、共通の要因により同時に被災することはなく、接続することができなくなること防止している。

追而

【共通要因について】

- ・**地震**：接続先である原子炉補機冷却水配管及び設置場所である原子炉建屋は耐震重要度分類Sクラスであることから、地震時においても使用可能であり、問題なく接続作業が可能である。
- ・**津波**：基準津波によりT.P.10mの敷地は浸水しないこと、及び接続口は2つとも水密化した建屋内であり、津波により同時に接続不能とはならない。
- ・**火災**：接続口と屋内ホース敷設ルート周囲には可燃物がないこと、及び接続口と屋内ホース敷設ルート近傍の油内包回転機器も基準地震動に対して耐震性を有し、地震により損壊し火災が発生するおそれはないことから、火災により接続不能とはならない。また、火災防護上の別区画に設置していることから、同時に接続不能とはならない。
- ・**放射線**：事故環境下においてもポンプ車の設置、接続や運転など必要な作業は実施可能である。
- ・**その他**：ホースと常設配管の接続はJIS規格のフランジ継手、及び各ホースの接続は同一規格の専用金具により、容易かつ確実に接続することが可能である。また、手順を確立しており、確実に常設設備との接続が可能である。

図1-1-1 接続口の設置場所

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

1. 可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系統への海水送水の接続口 (2 / 3)

追而

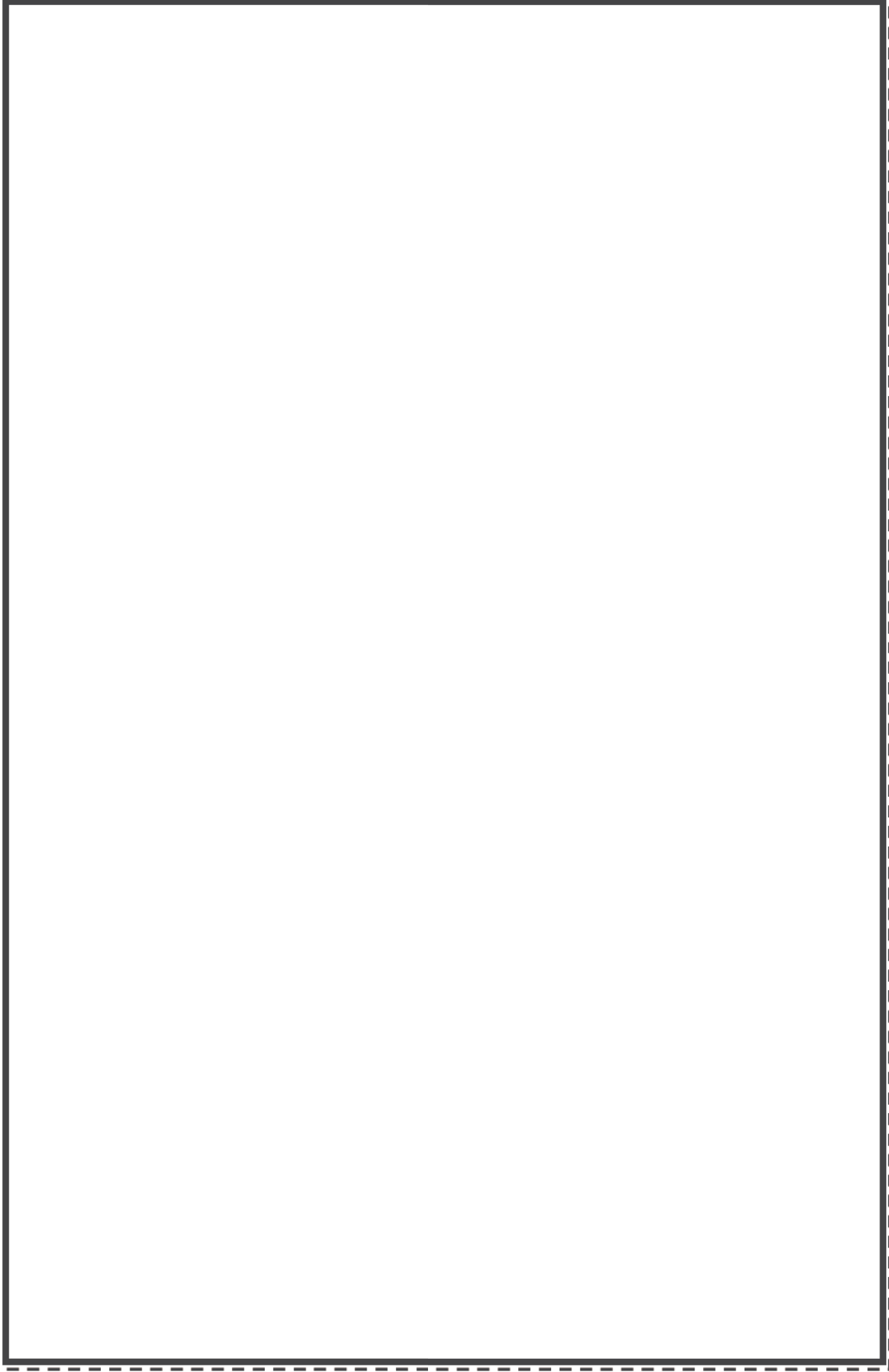
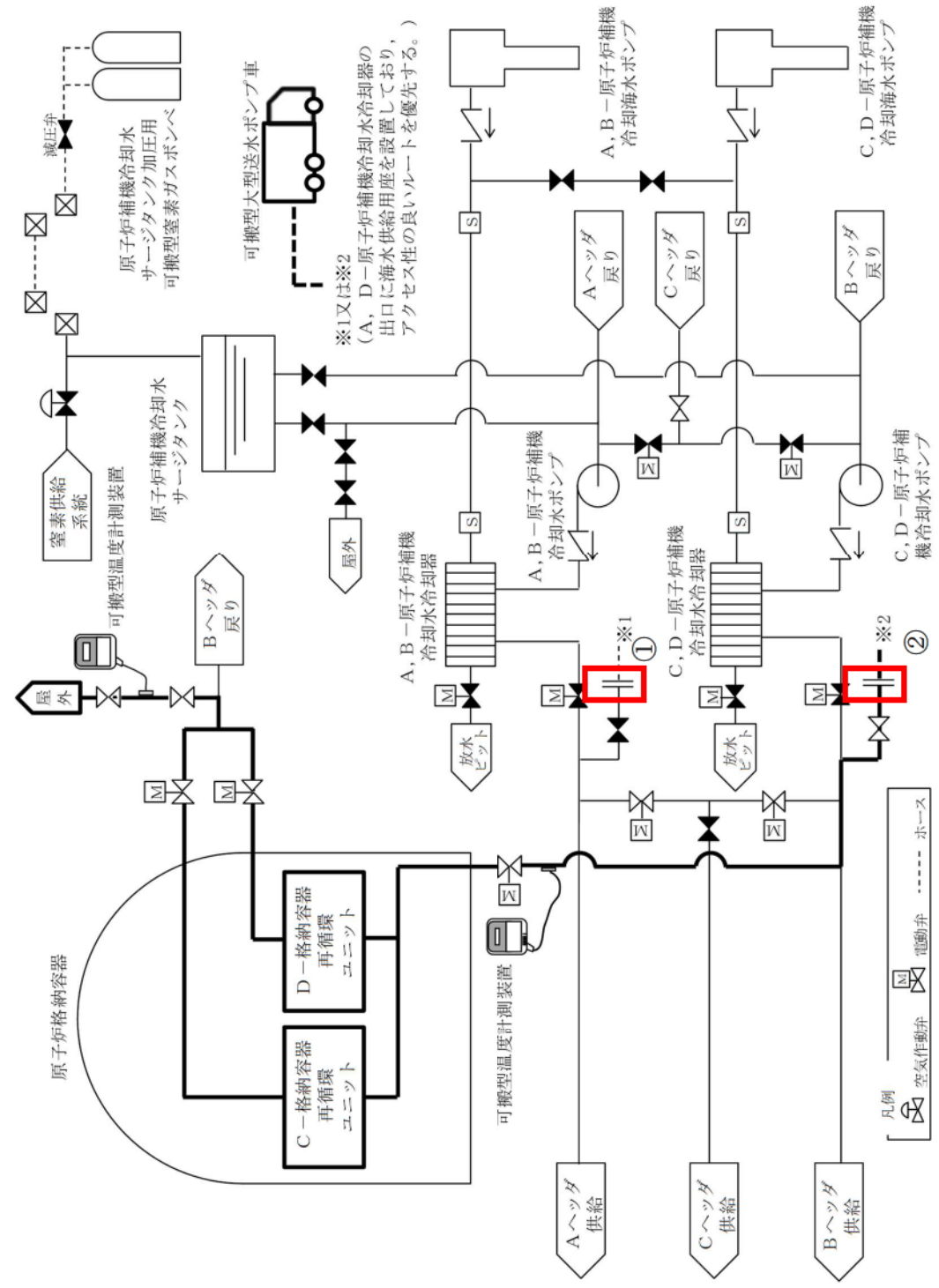


図 1-2 取水場所及びボース敷設ルート

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



1. 可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系統への海水送水の接続口 (3 / 3)



- ①原子炉建屋内 B トレン側 接続口 (T.P. 2.3m)
- ②原子炉建屋内 A トレン側 接続口 (T.P. 2.3m)

図 1-3 概略系統図

2. 可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット／燃料取替用水ピットへの補給の接続口（1／3）

可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット／燃料取替用水ピットへの補給の接続口は、原子炉建屋の異なる壁面近傍に配置することにより位置的分散を図った2箇所（原子炉建屋の東側と西側）を設けており、共通の要因により同時に被災することはなく、接続することができなくなること防止している。  
上記は複数の機能でひとつの接続口を使用するが、それぞれの機能に必要な容量を確保できる接続口を設置している。（別紙）

【共通要因について】

- ・**地震**：接続口及び接続配管は耐震性を有する設計としており、設置場所の原子炉建屋、及び原子炉補助建屋は耐震重要度分類Sクラスであることから、地震時においても使用可能であり、問題なく接続作業が可能である。
- ・**津波**：基準津波によりT.P.10mの敷地は浸水しないこと、及び接続口の1つは水密化した建屋内に、もう1つはT.P.33.1mの高所にあることから、津波により同時に接続不能とはならない。
- ・**火災**：接続口と屋内ホース敷設ルート周囲には可燃物がなく、及び接続口と屋内ホース敷設ルート近傍の油内包回転機器も基準地震動に対し耐震性を有し、地震により損壊し火災が発生するおそれはないことから、火災により接続不能とはならない。
- ・**放射線**：事故環境下にあってもポンプ車の設置、接続や運転など必要な作業は実施可能である。
- ・**その他**：ホースと常設配管の接続はJISまたはANSI規格のフランジ継手、及び各ホースの接続はポンプの種類に応じた同一規格の専用金具により、容易かつ確実に接続することが可能である。また、手順を確立しており確実に常設設備との接続が可能である。

図2-1 接続口の設置場所

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

2. 可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット／燃料取替用水ピットへの補給の接続口 (2 / 3)

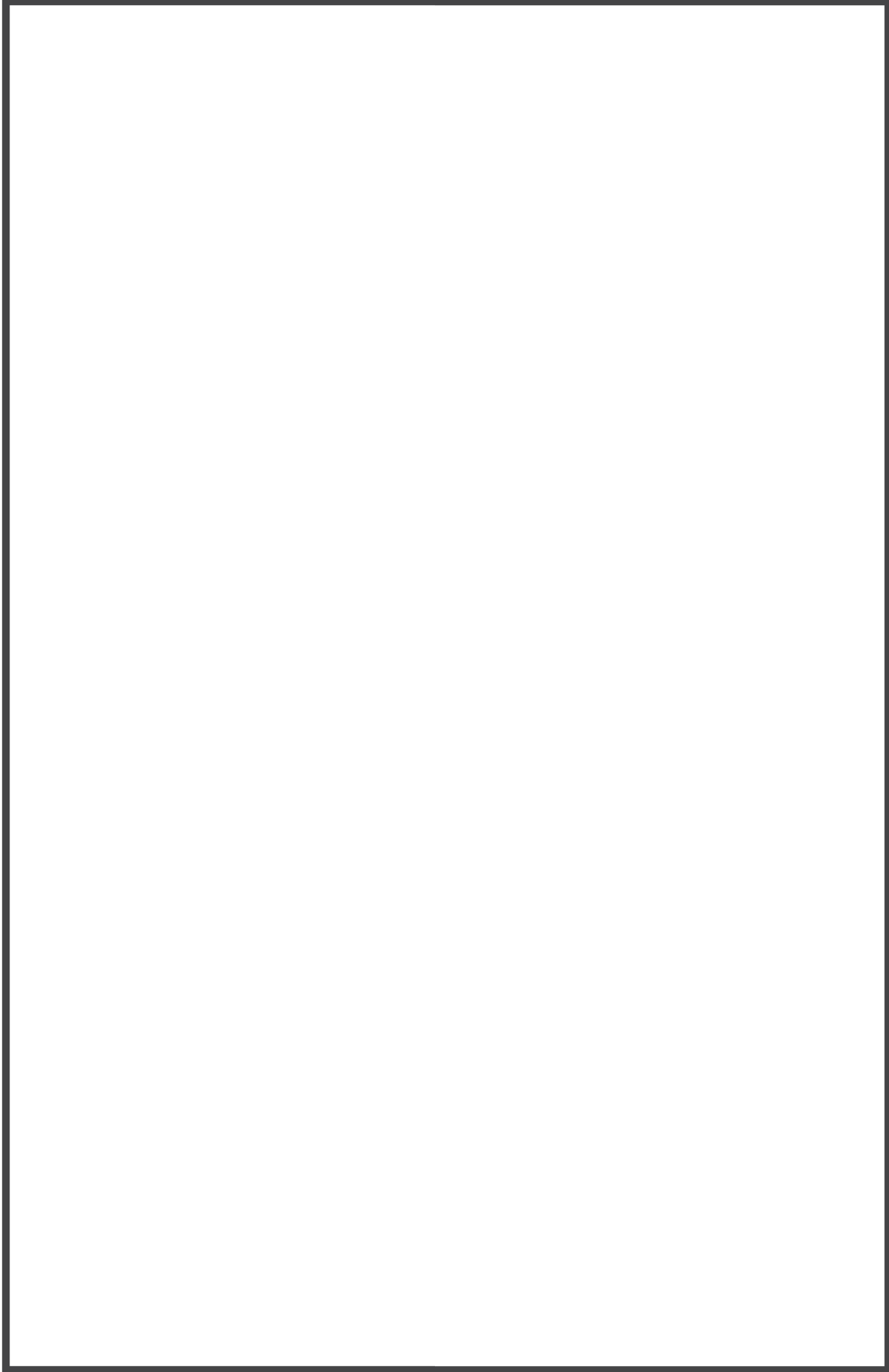


図 2-2 取水場所及びホース敷設ルート

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

2. 可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピットへの補給の接続口 (3/3)

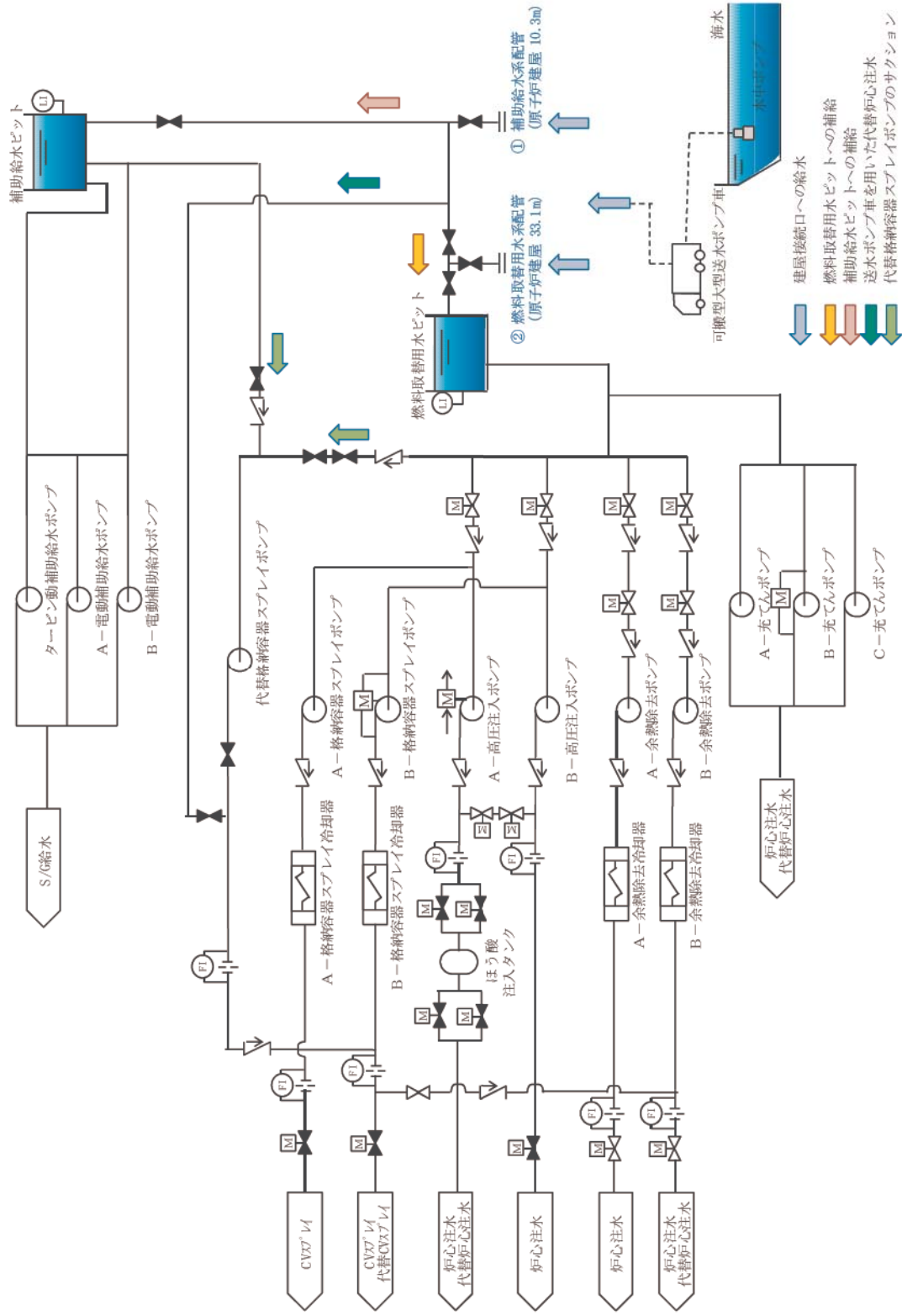


図 2-3 概略系統図

【まとめ】

	取水場所	ホース敷設ルート	接続口配置
<ul style="list-style-type: none"> <li>可搬型大型送水ポンプ車による原子炉補機冷却水系統への海水送水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3号スクリーン室</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>合計2ルートを確保。</li> <li>建屋の東側廻り、西側廻りの両方のルートを確保。</li> <li>建屋内にて、一部重複ルートあり。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bトレン側原子炉補機冷却水配管 (原子炉建屋内：T.P.2.3m) (原子炉建屋 東側(ディゼンブル発電機建屋)又は西側からアクセスし、接続)</li> <li>Aトレン側原子炉補機冷却水配管 (原子炉建屋内：T.P.2.3m) (原子炉建屋 東側(ディゼンブル発電機建屋)又は西側からアクセスし、接続)</li> <li>頑健な原子炉建屋内の異なる区画に配置している</li> <li>補助給水系配管 (原子炉建屋内：T.P.10.3m) (原子炉建屋 東側(ディゼンブル発電機建屋)からアクセスし、接続)</li> <li>燃料取替用水系配管 (原子炉補助建屋内：T.P.33.1m) (原子炉補助建屋 上屋(ECTトラックアクセスエリア内)にて接続)</li> <li>原子炉建屋の異なる壁面近傍に配置している。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット及び燃料取替用水ピットへの補給</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3号スクリーン室</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>合計2ルートを確保。</li> <li>建屋の東側廻り、西側廻りの両方のルートを確保。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>位置的分散を図った複数の接続口(屋内)を設置しており、問題ない。</li> </ul>
<p>まとめ (評価)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>防潮堤内に取水口を確保しており、問題ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>独立した2ルート以上を確保しており、問題ない。</li> <li>ホースは任意の場所に敷設できる機動性があるため、一部重複ルートに対しても問題ない。</li> </ul>	<p>設置許可基準第43条第3項(接続口)に関する対応については、共通要因(地震、津波他)により接続できなくなることを防止するため、位置的分散を図った複数の接続口の設置とともに、ホース敷設ルートについても同様に対応しており、確実な取水・注水が可能となるよう配慮している。</p>

可搬型大型送水ポンプ車による代替炉心注水、補助給水ピット／燃料取替用水ピットへの補給の接続口の兼用について

標記の接続口は3つの機能を1つの接続口で兼用している。

一方、設置許可基準規則第43条における接続口の兼用に係る要求事項は下記のとおりである。

(設置許可基準規則第43条 解釈第6項)

第3項第3号について、複数の機能で一つの接続口を使用する場合は、それぞれの機能に必要な容量（同時に使用する可能性がある場合は、合計の容量）を確保できるように接続口を設けること。

本資料においては以下のとおり、標記の接続口が設置許可基準規則の接続口の兼用に係る要求事項に適合していることを確認した。

標記の接続口を使用する重大事故等の有効性評価のシナリオは表1のとおりであるが、複数の機能を同時に使用することはない。また、③の機能を使用する状況においては常設SA設備による炉心冷却機能は喪失している、及び炉心が既に損傷していると考えられ、①及び②の機能との同時使用の可能性はない。従って、それぞれの機能に必要な容量を確保していることにより、上記の基準要求事項に適合している。なお、表1の①、②及び③の機能が関連する設置許可基準規則の条文は第56条と第47条であるが、これらの条文に接続口に係る要求事項はない。

(表1)

(○:使用する)

有効性評価シナリオ	接続口の機能 (関連する設置許可基準規則 条文: 第43条以外)	① 可搬型大型送水ポンプ車による 補助給水ピットへの補給			② 可搬型大型送水ポンプ車による 燃料取替用水ピットへの補給		③ 可搬型大型送水ポンプ車による 代替炉心注水		評価
		第56条(重大事故等の収束に必要なとなる水の供給設備)	第56条(重大事故等の収束に必要なとなる水の供給設備)	第56条(重大事故等の収束に必要なとなる水の供給設備)	第47条(原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)				
全交流動力電源喪失 + RCPシールド LOCA)	全交流動力電源喪失 + 原子炉補機冷却機能喪失	○	○	○	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 複数の機能の同時使用はない</li> <li>• それぞれの機能に必要な容量を確保している</li> </ul>
全交流動力電源喪失 (全交流動力電源喪失 + 原子炉補機冷却機能喪失 (RCPシールド LOCA なし))	全交流動力電源喪失 + 原子炉補機冷却機能喪失	○	○	○	○	○	○	○	
格納容器過圧破損、原子炉容器外の溶融燃料-冷却材相互作用、溶融炉心・コンクリート相互作用 (大 LOCA + ECCS 注水機能喪失 + 格納容器レベル機能喪失)	格納容器過圧破損、原子炉容器外の溶融燃料-冷却材相互作用、溶融炉心・コンクリート相互作用 (大 LOCA + ECCS 注水機能喪失 + 格納容器レベル機能喪失)	-	-	-	○	○	-	-	
格納容器過温破損、高圧溶融物放出 / 格納容器雰囲気直接加熱 (全交流動力電源喪失 + 補助給水機能喪失)	格納容器過温破損、高圧溶融物放出 / 格納容器雰囲気直接加熱 (全交流動力電源喪失 + 補助給水機能喪失)	-	-	-	○	○	-	-	