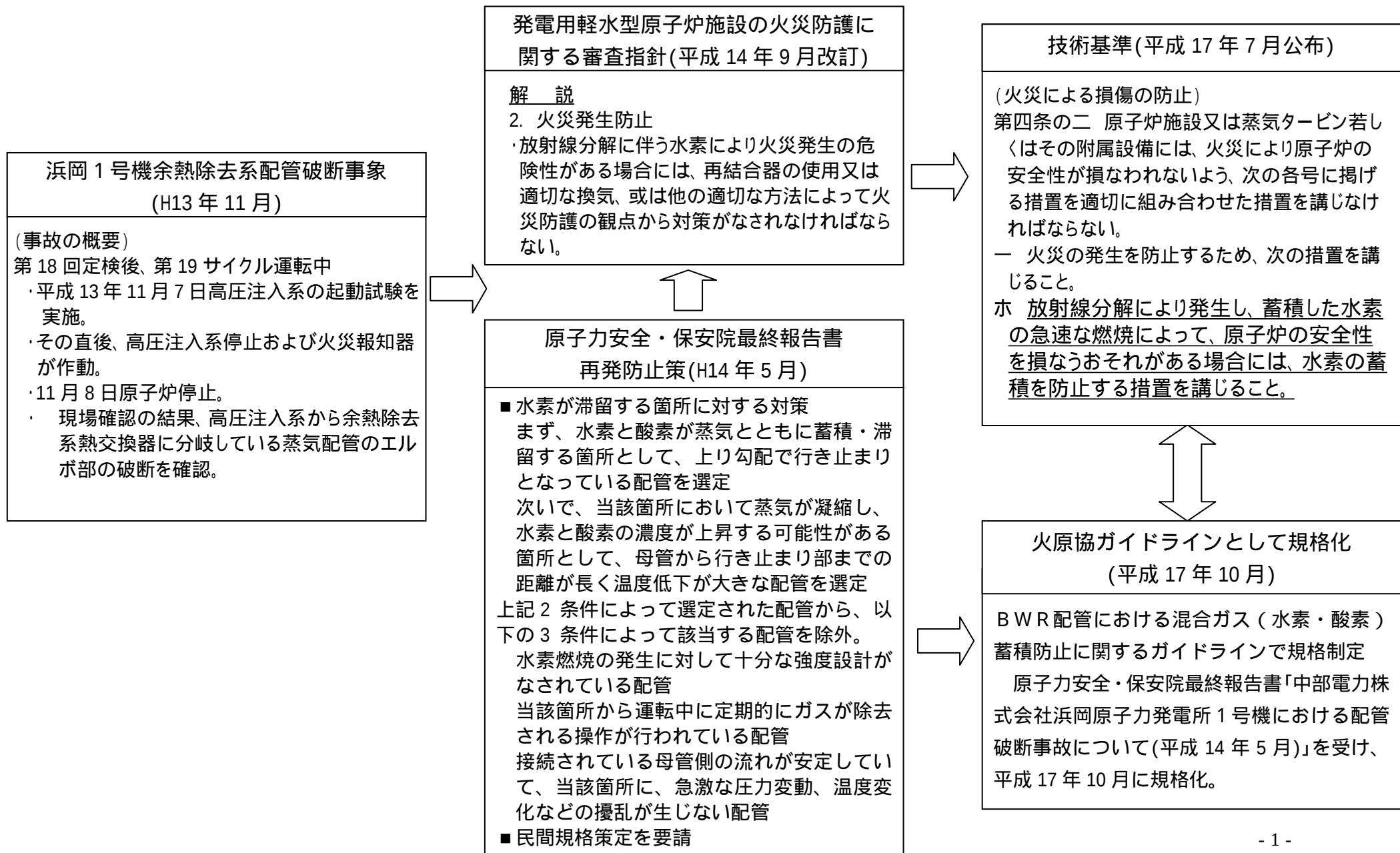


社団法人火力原子力発電技術協会
「BWR配管における混合ガス(水素・酸素)蓄積防止
に関するガイドライン(平成17年10月)」
に関する技術評価について

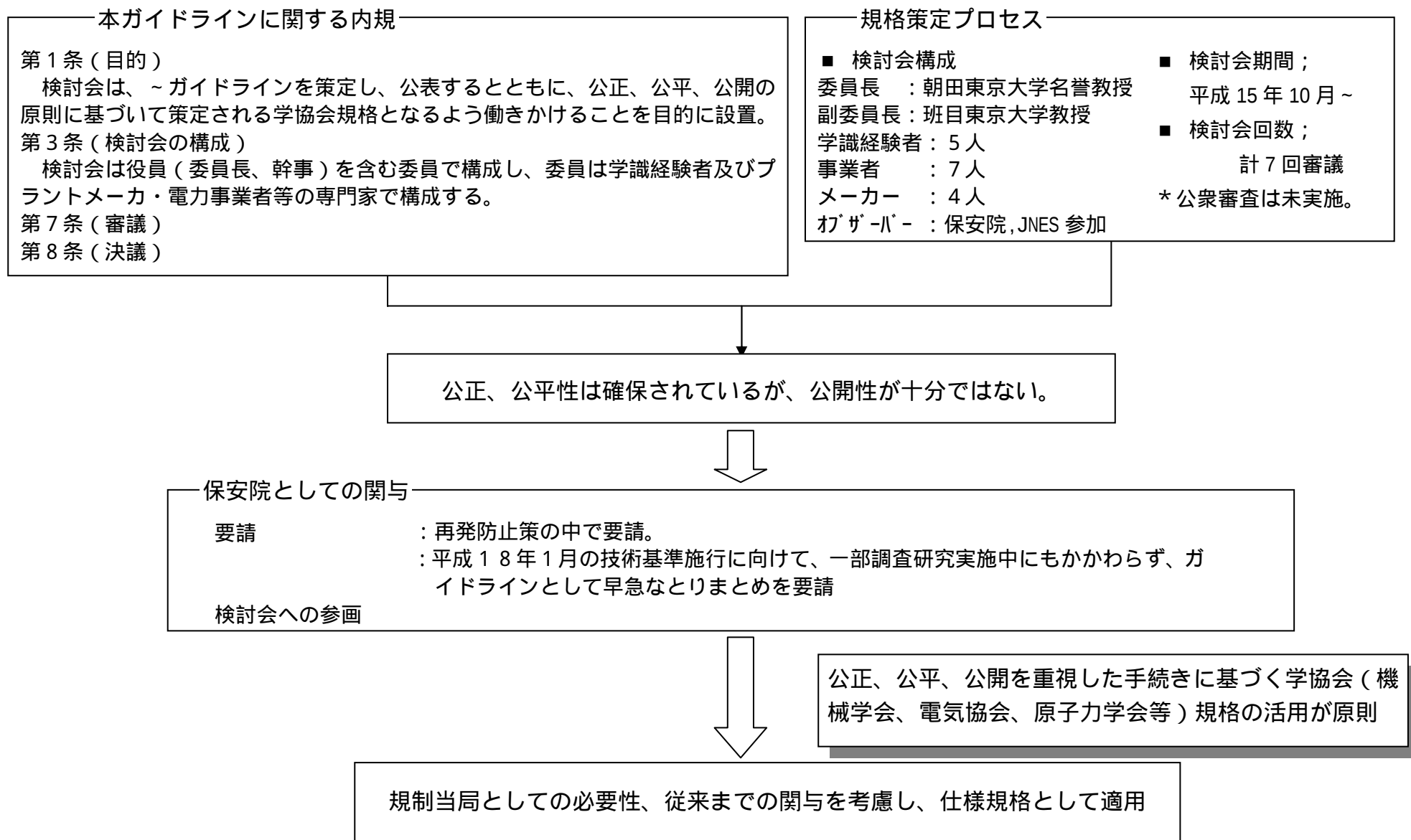
平成17年11月16日

原子力安全・保安院
原子力安全基盤機構

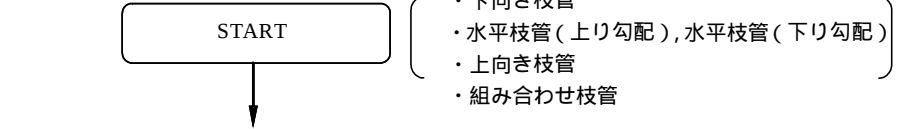
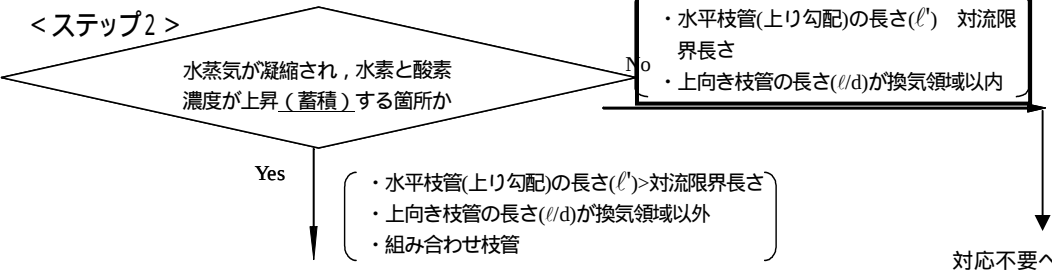
1 . BWR 配管における混合ガス蓄積防止に関する経緯



２．火原協における規格策定プロセス



3 . 保安院最終報告書再発防止策との対応（ 1 ）

保安院最終報告書	ガイドライン	技術的妥当性
7. 再発防止対策 7.1 水素が滞留する箇所に対する対策	解説 3 . 3 評価の実施＜解説図 3.3-1 評価フロー＞  <pre> graph TD START([START]) --> L1[・ 下向き枝管 ・ 水平枝管（上り勾配）, 水平枝管（下り勾配） ・ 上向き枝管 ・ 組み合わせ枝管] L1 --> D1{＜ステップ1＞ 原子炉内で水の放射線分解によって 生成される水素と酸素が滞留する 可能性があるか} D1 -- Yes --> L2[・ 水平枝管（上り勾配） ・ 上向き枝管 ・ 組み合わせ枝管] D1 -- No --> L3[・ 下向き枝管 ・ 水平枝管（下り勾配）] L3 --> E1[対応不要へ] </pre>	
水素と酸素が蒸気とともに蓄積・滞留する箇所として、<u>上り勾配で行き止まりとなっている配管</u>を選定	「上り勾配で行き止まりとなっている配管」として、水平枝管（上り勾配）上向き枝管、組み合わせ枝管を具体化している。 （下向き枝管及び下り勾配の水平枝管を除外） → 同等	
当該箇所において蒸気が凝縮し、水素と酸素の濃度が上昇する可能性がある箇所として、<u>母管から行き止まり部までの距離が長く温度低下が大きな配管</u>を選定	「温度低下が大きな配管」として水平枝管（上り勾配）上向き枝管に対して換気領域でない配管部分を選定 → 同等  <pre> graph TD D1 -- Yes --> L4[・ 水平枝管（上り勾配）の長さ(ℓ') > 対流限界長さ ・ 上向き枝管の長さ(ℓ/d)が換気領域以外 ・ 組み合わせ枝管] D1 -- No --> L5[・ 水平枝管（上り勾配）の長さ(ℓ') 対流限界長さ ・ 上向き枝管の長さ(ℓ/d)が換気領域以内] L5 --> E2[対応不要へ] </pre>	

3 . 保安院最終報告書再発防止策との対応（ 2 ）

保安院最終報告書	ガイドライン	技術的妥当性
上記 2 条件によって選定された配管から、以下の 3 条件によって該当する配管を除外した。 水素燃焼の発生に対して<u>十分な強度設計</u>がなされている配管	<ステップ3>	・健全性が確保されている配管を除外 → 同等
当該箇所から運転中に定期的にガスが除去される操作が行われている配管(注)	解説 3 . 3 評価の実施<解説図 3.3-1 評価フロー(前頁より続く)> 解説 3 . 4 ステップ 1 ~ 3 を満足しない場合の対応措置 (1) 定期的に混合ガスを抜く操作等による対応措置	・定期的なガス抜き操作に関して、対応措置として明記されている。 → 同等
接続されている母管側の流れが安定していて、当該箇所に、急激な圧力変動、温度変化などの擾乱が生じない配管	規定なし	・急激な圧力変動、温度変化などの擾乱の有無にかかわらず、ステップ 1 及びステップ 2 の要件で配管を保守的に選定し、を適用していない。 → 保守性を持たせている。

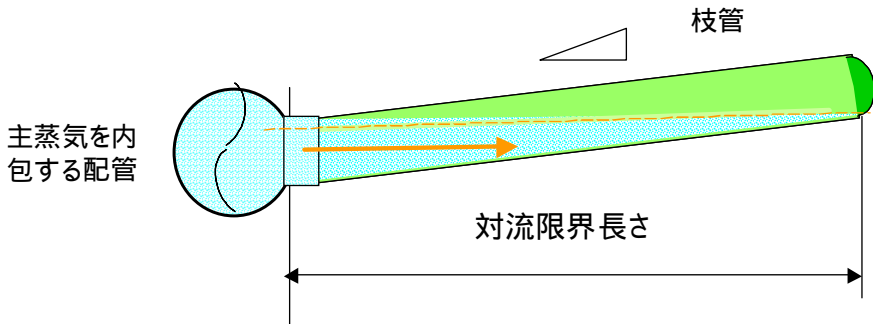
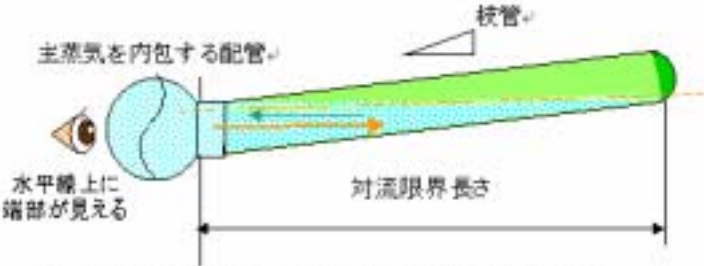
注記>

計装系の配管については、配管内の容積が 1～30 リットル程度と小さいため、仮に水素燃焼が生じたとしても破断する可能性は低く、さらに破断対策として元弁を閉じて破断部を隔離できることなどから、選定対象から除外。

PWR については、水素や酸素の濃度が高い状態で滞留、蓄積しうる可能性のある箇所はない。

運転面による対応のほか、蓄積を防止するための設計変更例として、イ)混合ガスを連続して排出させるベントラインの設置、ロ)混合ガスを再結合させ水に戻すための触媒の設置（枝管内の最頂部）を解説に規定

4 . 定量的評価手法の技術的妥当性 (1)

水平枝管 (ガイドライン)	技術的妥当性
< ステップ 2 > 混合ガスが主蒸気とともに、蓄積・滞留する箇所として、水平枝管(上り勾配)および上向き枝管を評価対象として抽出する。 (1) 解説図 3.3.-4 に示すように、主蒸気を内包する配管から分岐している水平枝管(上り勾配)のうち、その長さ(l)が対流限界以内の長さのものについては混合ガスが蓄積しないと判定する。  解説図 3.3-4 水平枝管(上り勾配)の対流限界長さ	<u>水平配管に対する水素・酸素の対流限界について、明確化されており、妥当と判断した。</u> ・ 枝管内で水平方向に温度差がある場合には浮力で生じる対流によりガスが主蒸気を内包した配管に戻ることが期待できることから、主蒸気を内包する配管からみて水平線上に端部が見える範囲では水平方向に温度差が生じ対流が起きると期待し、当該配管部分を対流限界長さとしている。また、上り勾配水平配管のうち、対流が期待される部分の上部についても、上部に蓄積したガスが下層を対流する主蒸気で加熱され、ガス濃度が上がりにくいことと判断している。 ・ 換気作用が期待される部分を温度差対流によるものに限定し、温度差が生じうる部分を高低差に着目し主蒸気内包配管との接続面積の投影部分に限定していることを確認した。 ・ 対流限界長さであって、温度差対流が生じる部分の上層のガス濃縮についても、加熱により濃度上昇は生じにくいと判断していることを確認した。  付録図 22-1 水平枝管内の対流による混合ガスの排出 枝管内で水平方向に温度差がある場合には浮力で生じる対流によりガスが主蒸気を内包した配管に戻る。

4 . 定量的評価手法の技術的妥当性 (2)

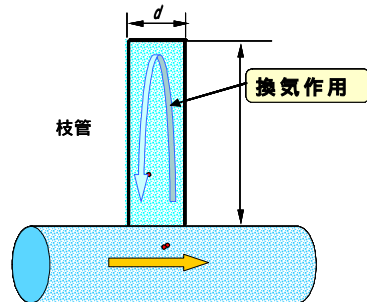
垂直枝管 (ガイドライン)

< ステップ 2 >

混合ガスが主蒸気とともに、蓄積・滞留する箇所として、水平枝管(上り勾配)および上向き枝管を評価対象として抽出する。

(2) 主蒸気流れがある配管から分岐されている上向き枝管、斜め上向き枝管

枝管内に換気流が発生するため、解説図 3.3-5、解説図 3.3-6 を満足する場合、混合ガスが蓄積しないと判定する。なお、換気領域は枝管に接続する主蒸気流れのある配管の流体の乱れが影響することから、評価の際、上流に乱れを発生させる配管要素があることについて留意する必要がある。

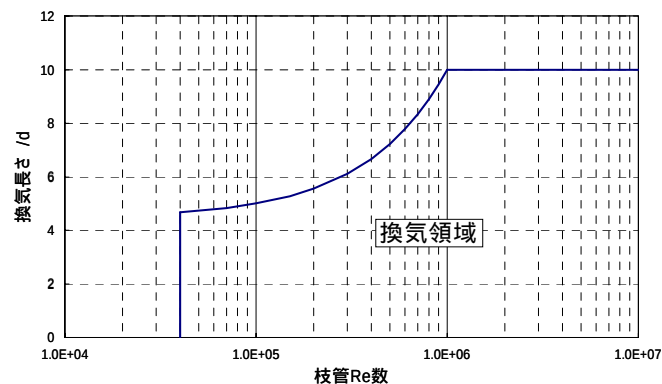


解説図3.3-5 主蒸気流れのある配管から分岐している枝管内の換気流

主管内主蒸気流れの乱れの影響を水流動試験データで検証した汎用流動解析コードを用いて解析した結果を、次式の枝管 Re 数（横軸）と換気長さ l/d で整理して、保守的に換気領域を設定。

枝管 Re 数 = $U \cdot d / \mu$ 、ここで U : 主管主蒸気流速、 d : 枝管の径、

換気長さ = l/d 、ここで l : 枝管の高さ、 μ : 流体の粘度

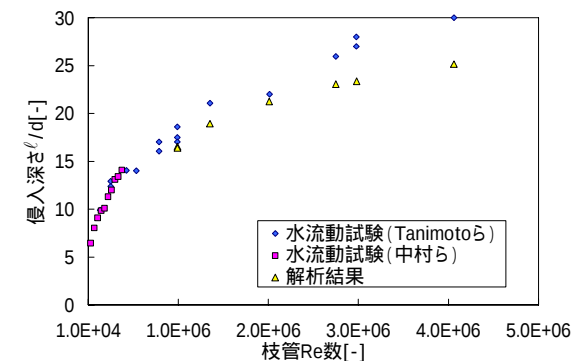


解説図3.3-6 換気可能な枝管長さ

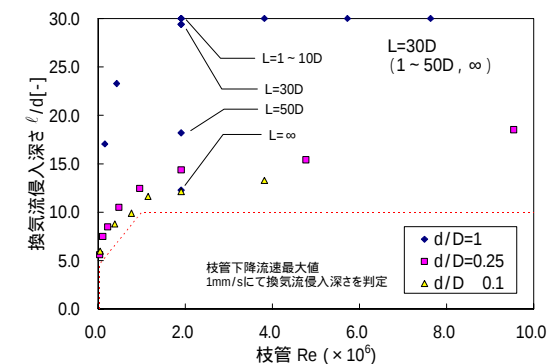
技術的妥当性

主蒸気流れに伴う換気作用（渦の進入深さ）について、換気長さ（進入深さ）を設定しており妥当と判断した。

・適用された汎用流動解析コードが公開されている実験データに基づき検証されていること、解析結果について包含する値を保守的に換気流侵入深さとしていることを確認した。



付録図 2.3-2 水流動試験による検証解析結果



付録図 2.3-5 枝管 Re 数と枝管内への流動渦の侵入長さの関係

4 . 定量的評価手法の技術的妥当性 (3)

耐圧（ガイドライン）	技術的妥当性																																																																																										
（２）配管の構造強度評価 有効性が確認された構造強度評価手法により、混合ガスの急速燃焼時においても枝管の健全性が確保できる場合は許容できるものとする。 付録５ 枝管の構造強度評価 浜岡１号機における配管破断事故の水平展開では、混合ガスが滞留する箇所に対する対策の検討において、混合ガスの燃焼の発生に対して十分な強度設計がなされている配管は対象から除外した。ここで、混合ガスの燃焼の発生に対して十分な強度設計がなされている場合としては、運転中の系統圧力の２５倍＊の圧力を考慮しても、発生応力が材料の設計引張り強さ（Su）以下を満足できる場合とされていた。 ＊爆轟時の圧力上昇を系統圧力の２５倍とした理由 爆発防止実用便覧(サイエンスフォーラム)に記載されている爆轟特性の計算値によると爆轟圧力と初期圧力の比(下表)は、初期圧力が１MPa(１０atm)以下の範囲では最大２０．７８となっている。同便覧に記載された方法で初期圧力が７MPaでの爆轟圧力と初期圧力の比を算出した結果、２２．０であり、構造強度評価には２５倍を用いることとした。 付録表 5-1 ２H₂＋O₂(２９３K)の爆ごう特性計算値 <table><tr><td>P₀(atm)</td><td>0.5</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>10</td></tr><tr><td>V_D(cm³/g)</td><td>4006</td><td>2003</td><td>1001</td><td>401</td><td>200</td></tr><tr><td>爆ごう速度(m/sec)</td><td>2805</td><td>2843</td><td>2882</td><td>2932</td><td>2969</td></tr><tr><td>爆ごう圧力(P_D/P₀)</td><td>18.76</td><td>19.18</td><td>19.62</td><td>20.32</td><td>20.78</td></tr><tr><td>爆ごう温度(K)</td><td>3557</td><td>3685</td><td>3819</td><td>4006</td><td>4152</td></tr><tr><td>γ</td><td>1.18</td><td>1.19</td><td>1.20</td><td>1.19</td><td>1.20</td></tr><tr><td>爆発熱(cal/g)</td><td>1451</td><td>1529</td><td>1611</td><td>1723</td><td>1814</td></tr><tr><td>H(mole%)</td><td>8.9</td><td>8.1</td><td>7.3</td><td>6.3</td><td>5.5</td></tr><tr><td>H₂O₂</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.02</td><td>0.02</td><td>0.03</td></tr><tr><td>H₂</td><td>16.7</td><td>16.5</td><td>16.2</td><td>15.7</td><td>15.3</td></tr><tr><td>H₂O</td><td>51.8</td><td>43.1</td><td>54.6</td><td>56.8</td><td>58.6</td></tr><tr><td>H₂O₂</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td></tr><tr><td>O</td><td>4.2</td><td>3.9</td><td>3.6</td><td>3.1</td><td>2.79</td></tr><tr><td>O₂H</td><td>13.3</td><td>13.5</td><td>13.6</td><td>13.7</td><td>13.6</td></tr><tr><td>O₂</td><td>5.1</td><td>4.9</td><td>4.7</td><td>4.4</td><td>4.2</td></tr></table>	P ₀ (atm)	0.5	1	2	5	10	V _D (cm ³ /g)	4006	2003	1001	401	200	爆ごう速度(m/sec)	2805	2843	2882	2932	2969	爆ごう圧力(P _D /P ₀)	18.76	19.18	19.62	20.32	20.78	爆ごう温度(K)	3557	3685	3819	4006	4152	γ	1.18	1.19	1.20	1.19	1.20	爆発熱(cal/g)	1451	1529	1611	1723	1814	H(mole%)	8.9	8.1	7.3	6.3	5.5	H ₂ O ₂	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	H ₂	16.7	16.5	16.2	15.7	15.3	H ₂ O	51.8	43.1	54.6	56.8	58.6	H ₂ O ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	O	4.2	3.9	3.6	3.1	2.79	O ₂ H	13.3	13.5	13.6	13.7	13.6	O ₂	5.1	4.9	4.7	4.4	4.2	・ 「混合ガスの急速燃焼時においても枝管の健全性が確保できる場合は許容できる」としているが、その具体的要件は記載しておらず、浜岡１号機の適用例を付録の中で紹介している。 ・ 浜岡１号機においては、爆発防止実用便覧(サイエンスフォーラム)に記載されている爆轟特性の計算値による爆轟圧力と初期圧力の比２５倍で安全率を加味し、当該安全率を考慮した発生応力が材料の引張強さ（Su）を下回ることをもって、急速燃焼時においても枝管の健全性が確保できると判断している。 ・ 急速燃焼時における健全性評価の例についても、今後本ガイドラインに盛りこんでいくべきと考える。
P ₀ (atm)	0.5	1	2	5	10																																																																																						
V _D (cm ³ /g)	4006	2003	1001	401	200																																																																																						
爆ごう速度(m/sec)	2805	2843	2882	2932	2969																																																																																						
爆ごう圧力(P _D /P ₀)	18.76	19.18	19.62	20.32	20.78																																																																																						
爆ごう温度(K)	3557	3685	3819	4006	4152																																																																																						
γ	1.18	1.19	1.20	1.19	1.20																																																																																						
爆発熱(cal/g)	1451	1529	1611	1723	1814																																																																																						
H(mole%)	8.9	8.1	7.3	6.3	5.5																																																																																						
H ₂ O ₂	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03																																																																																						
H ₂	16.7	16.5	16.2	15.7	15.3																																																																																						
H ₂ O	51.8	43.1	54.6	56.8	58.6																																																																																						
H ₂ O ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01																																																																																						
O	4.2	3.9	3.6	3.1	2.79																																																																																						
O ₂ H	13.3	13.5	13.6	13.7	13.6																																																																																						
O ₂	5.1	4.9	4.7	4.4	4.2																																																																																						

5 . 技術評価のまとめ

(技術的妥当性)

- 本ガイドラインは、技術基準第4条の2（火災による損傷の防止）に対応し、BWR配管における混合ガス（水素・酸素）の蓄積防止に関する具体的考え方並びに評価フローを示したものであり、仕様規定としての適切性を確認した。
- また、本ガイドラインに規定されている内容は、浜岡1号機に関する原子力安全・保安院最終報告書の内容を反映していること、定量評価を行っている事項については、その技術的妥当性を確認した。

(本ガイドライン適用にあたっての条件と課題)

- 規制の明確化のために、技術基準の審査基準の中で明確に位置付ける。
- 公開性を考慮した学協会規格化に向けて取組むことが望まれる。
- 今後の研究成果を踏まえ、可能な事項について適切な規格化が期待される。
 - 混合ガスの急速燃焼時の枝管の健全性評価
 - 混合ガス蓄積濃度の上限としての爆轟限界限度の適用