

資料 3 - 4

東電とNDFの爆轟評価手法の比較

2023年3月27日

原子力損害賠償・廃炉等支援機構

- 「BWR配管における混合ガス(水素・酸素)の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン第3版 (JANTI-NCG-01第三版)」(以下「水素損傷防止ガイドライン」)を準用した際の評価。

3.2.2 配管の構造強度評価 (2) 評価手順2(簡易評価(弾性))を準用強度の検討

評価用圧力 $P1 = \alpha \cdot \beta \cdot P$

ここで α : 動的応答効果であり、2.0とする。

β : 運転圧力に対する爆轟応答比 (解説表3.3-3による: 50)

P : 運転圧力 (配管内圧力)

許容圧力 $P2 = (2 \cdot t \cdot Sy \cdot \eta) / (d_0 - 0.8 \cdot t)$: 設計建設規格 PPC-3411

ここで t : 配管・容器の厚さ

Sy : 材料の使用温度における設計降伏点

η : 長手継ぎ手の効率 : 設計建設規格 PVC-3130

d_0 : 配管・容器の外径

配管・容器の健全性として、以下の成立を確認。

$$P1 \leq P2$$

解説表 3.3-3 運転圧力に対する爆轟の反射圧力比 β (圧力-温度の関係)

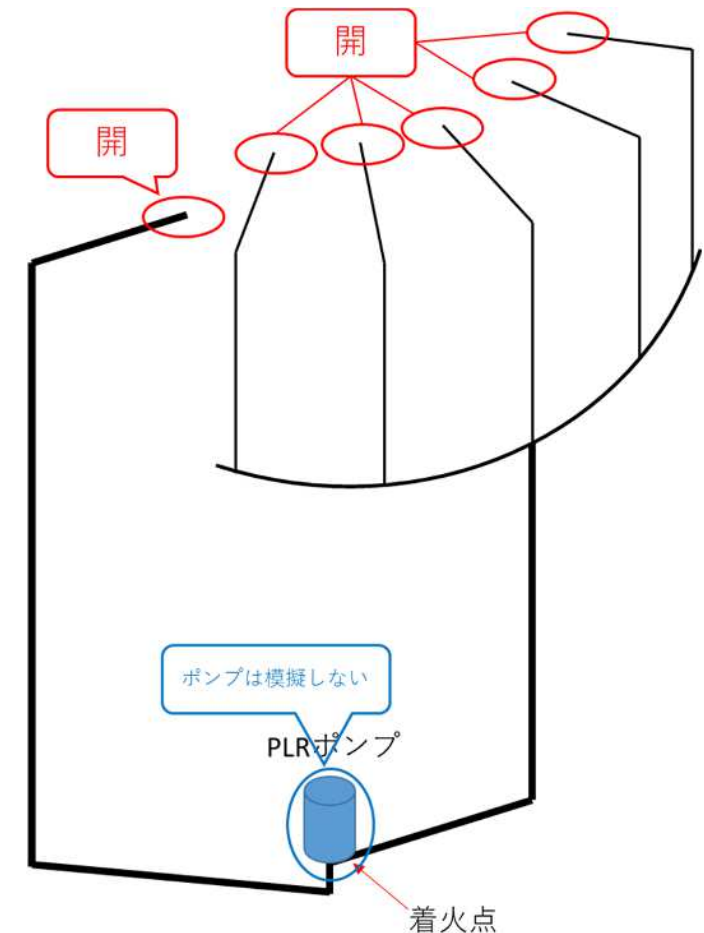
混合ガス 温度 (°C)	運転圧力 (MPa)			
	~0.4	0.4~1.3	1.3~3.0	3.0~7.0
20~39	50	52	54	55
40~59	46	48	50	51
60~79	43	45	47	48
80~99	39	42	44	45
100~119	34	39	41	42
120~139	27	35	38	40
140~159	—	31	35	37
160~179	—	25	31	34
180~199	—	—	27	32
200~219	—	—	22	29
220~239	—	—	—	25
240~259	—	—	—	21
260~279	—	—	—	14

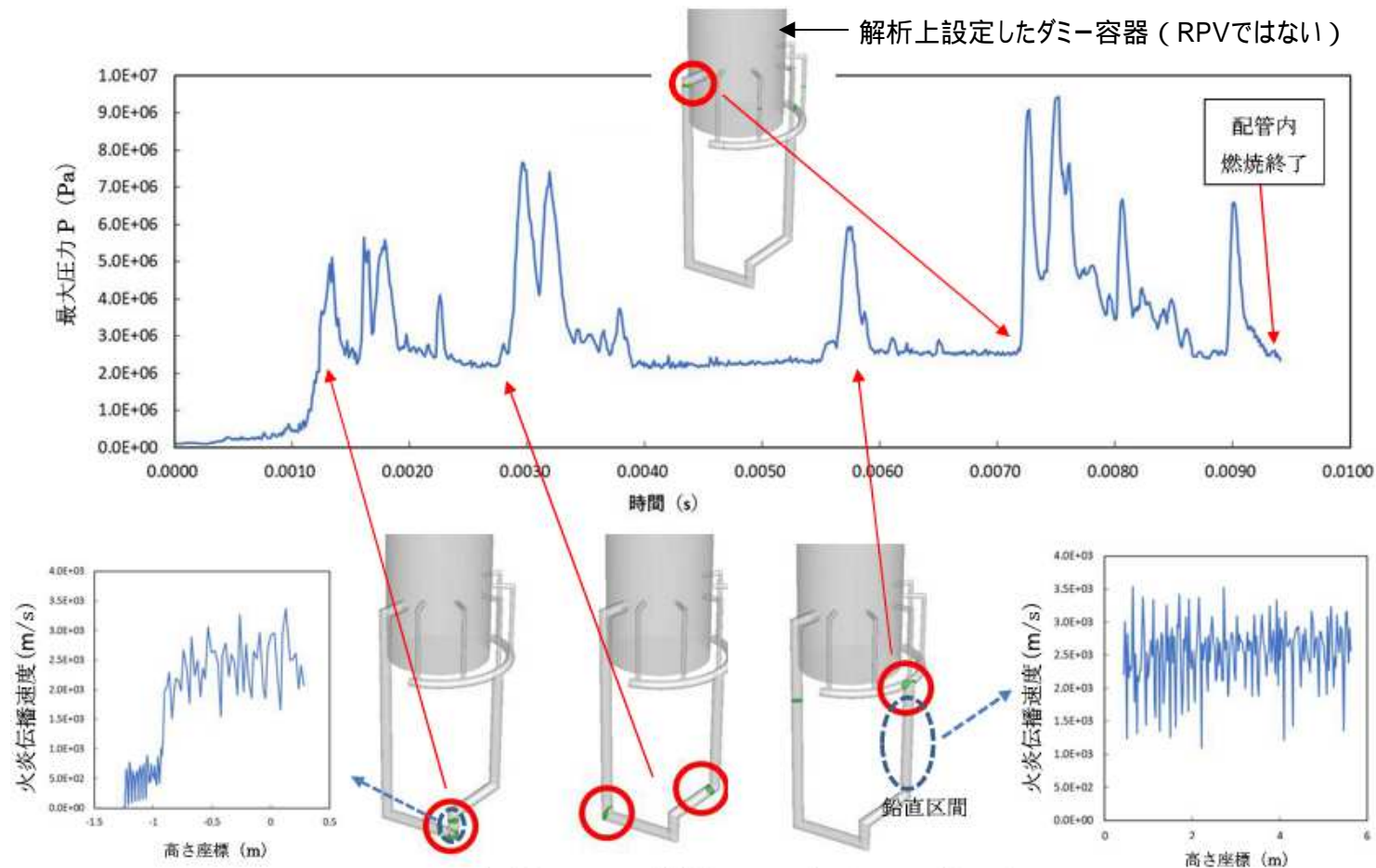
— : 不燃限界温度範囲であるため、記載していない。
表中の数値は、STANJAN コード⁽¹⁾で算出した反射圧力比である。

出典 : 第106回 特定原子力施設監視・評価検討会
(2023年3月20日) 資料2-1 16ページ

- ✓ 東電は上記のガイドラインを準用し発生する圧力を評価。 と が重要な因子 (ガイドライン248ページ、以下同じ)
 - (動的応答の効果) 静的負荷による変形に対する動的負荷による変形の比 (248ページ)
 - 立ち上がり時間ゼロの仮想的なステップ波を入力したときに最大値「2」をとるとの評価結果 (251ページ)
 - 東電は「2」を適用し保守的な評価としている
 - (爆轟の反射圧力比) 反射波による圧力と燃焼前のガス圧力との比 (252ページ)
 - ガスの温度、濃度をパラメータとして反射波の圧力を評価し表として整理 (29ページ = 上で東電が引用している表)
 - 爆轟による反射波がある前提での数値のため過度に保守的な評価となるおそれ (水素濃度が小さい場合や、爆轟に進展するための距離がない配管の場合などでは爆轟に至らない)

- ✓ 評価目的：不確かさの大きい水素燃焼や爆轟発生時の圧力等の変動の把握を試みたもの
- ✓ 評価内容：評価事例が多数ある汎用の流体解析ソフトを用い、水素の燃焼に伴う圧力等の経時変化を評価
- ✓ 評価対象：原子炉再循環系の吸込配管～吐出配管（右図）
 - 配管容積大・直管部長い・曲がり部有 燃焼の大きさ、爆轟への進展、圧力の変動などが生じやすい
 - 実機で水素蓄積が生じやすいか否かとは無関係
- ✓ 評価条件：保守的な設定としている
 - 配管内は水素と酸素で満たされ1気圧
 - 水素：酸素 = 2 : 1
 - 初期温度：298K（25℃）





- ✓ 配管内を時時刻刻移動する火炎面（緑色で例示）での圧力の時間変化をグラフ化（ミリ秒オーダー）
 - 配管曲がり部での圧力ピーク発生を再現
 - 圧力のピーク値は、数～10MPa（10～100気圧） 詳細には構造解析を要するが、パルス状の負荷であるため歪の増加は大きくなく配管は損傷しないと推測
 - 火炎伝播速度はばらつきが大きいですが、水平区間、鉛直区間とも爆轟域に入っていると考える

	東電評価	NDF評価	比較
評価目的	爆轟に伴う配管の健全性を評価。	不確かさの大きい水素燃焼や爆轟発生時の配管内圧の経時変化の把握を試みたもの。	評価目的が異なる。
評価ツール	JANTIガイドラインに準じ、配管内圧と許容圧力のふたつを簡易的に評価。経時変化は評価せず。	汎用の流体解析ソフトを用い、燃焼や爆轟に伴う配管内圧の経時変化を評価。	それぞれの評価目的に応じて評価ツールを選定。
評価モデル	爆轟圧力が配管内面に静的に負荷されたとの仮定での弾性計算。 配管内圧が、初期内圧の \times 倍になるとのモデル。 (動的応答の効果)、(爆轟の反射圧力比)は、保守的な条件での解析・試験に基づき設定し、ガイドラインに整備。、の説明は1ページ参照。	<ul style="list-style-type: none"> 質量・運動量・エネルギー輸送等の保存式 予混合(あらかじめ水素と酸素が均一に混合)での燃焼 乱流による燃焼の加速、燃焼面に先行する衝撃波面の形成、衝撃波面背後での自動着火による爆轟への遷移を評価ツール内でモデル化・計算 下段に示す評価対象の空間をメッシュ化し、現象の経時変化を再現 	<p>[東電評価] 混合ガスの燃焼が全て爆轟に至るとの仮定、爆轟圧力が静的に配管内面に負荷されるとの仮定は保守的だが、爆轟に伴う配管の健全性を評価するとの目的に照らすと妥当と考える。</p> <p>[NDF評価] 下段の評価対象や水素・酸素濃度といった前提条件的なものを除きノミナルな評価。前提条件も調査等に基づき柔軟に設定できる点で現実的な評価オプションとなり得る。 、に相当する考え方は以下。 <ul style="list-style-type: none"> に相当するもの：燃焼・爆轟に伴う圧力の経時変化を直接評価 に相当するもの：反射波として戻ってくる圧力も計算に含まれている </p>
評価対象	個別評価として水素蓄積のあったRCW熱交換器出口ヘッダ配管を選定(配管のルーティング等を再現しているわけではない)	配管容積やルーティング、エルボ部の存在等、爆轟に至りやすそうな系統として、実際の水素蓄積の有無とは関係なく、原子炉再循環系の吸込配管～吐出配管の範囲を選定。	それぞれの評価目的に応じて評価対象を選定。

	東電評価	NDF評価	比較
水素・酸素濃度	<p>爆轟が生じるとの前提で配管内圧が初期内圧の何倍になるかを評価しているため、これらの濃度は評価に用いない。</p> <p>ただし、評価モデルの項に示した係数の設定に際して保守的な水素・酸素濃度での試験・解析を行っている。</p>	<p>[初期条件] 評価目的に照らし、爆轟が生じ得る条件を保守的に設定。水素：酸素=2：1の混合ガスを配管内に均一分布させた。</p> <p>[経時変化] 燃焼に伴う水素の減少はソフトの内部変数として潜在的には存在していたが、評価目的に照らし取り出していない。</p>	<p>[東電評価] 東電評価では明示的に現れないが保守的な設定で固定している。</p> <p>[NDF評価] 調査等でガス組成が明らかになれば、それらを入力とすることで爆轟に至らないことを示すことができ、この点も現実的評価のオプションとなり得る。</p>
圧力・温度	<p>評価モデルの の値を選定する際に用いるが評価では用いない。</p> <p>圧力：～0.4MPa、温度：20～39として、 を設定。</p>	<p>[初期条件] 初期圧力：0.1MPa（大気圧） 初期温度：298K（25℃）</p> <p>[経時変化] 圧力は各時間ステップで発生する最大値（火炎面近傍）を表示。 温度は水素・酸素濃度と同じ扱い。</p>	<p>[NDF評価] 爆轟が生じることを前提としておらず、火炎伝播速度によって爆轟が生じるか否かの目安を得ることができる。</p> <p>爆轟時の圧力ピークの継続時間が基本的に短いことを示せるのが簡易評価との大きな相違。</p>
評価結果（配管内圧）	<p>評価用圧力（P1）は4.0MPaとの結果。別途評価した許容圧力を下回る。</p>	<p>配管内圧の経時変化は3ページ参照。火炎伝播速度の経時変化から爆轟が生じていると推測。</p>	<p>詳細には構造評価が必要ではあるが、パルス状の応力は歪の増加を大きくしないと推測できる。</p>
総合的な比較	<p>東電評価は比較的簡便な手法で保守性を確保した結果を得ることができる。発生する配管内圧が許容圧力を大きく下回るような結果であれば、さらなる詳細な検討は要しないと考える。（ガイドでは弾性域を超える場合に弾塑性域での評価も規定）一方、爆轟が生じる可能性をより現実的に検討することが必要な場合にはNDF評価は有用である。</p>		