

解説記事

規格基準動向

BWR 配管内の混合ガス燃焼に関するガイドラインの整備

中部電力(株)	稲垣 哲彦	Tetsuhiko INAGAKI
中部電力(株)	西川 覚	Akira NISHIKAWA
東京電力(株)	坂下 彰浩	Akihiro SAKASHITA
日本原子力発電(株)	堂崎 浩二	Koji DOZAKI
日立GEニュークリア・エナジー(株)	日高 章隆	Akitaka HIDAKA
(株)東芝	曾根 孝浩	Takahiro SONE

1. はじめに

沸騰水型原子炉 (BWR (Boiling Water Reactor)) における主蒸気には、冷却材である水の放射線分解によって生じる水素と酸素がわずかに存在し、水蒸気の凝縮により非凝縮性気体である水素と酸素 (混合ガス) が取り残され、機器の頂部で徐々にその濃度が上昇することが開発当初から知られていた。そこで、混合ガスが蓄積する可能性のある原子炉圧力容器、熱交換器等の頂部にはベント系を設置するとともに、復水器に集められた混合ガスについては、水素と酸素を結合させ水に戻すための再結合器を設置する設計対応を行ってきた。

しかし、国内への BWR 導入後約 40 年の運転を経た 2001 年に、混合ガスの燃焼による配管破断事故が発生し、この経験を今後活かすため、水素関連の技術指針の整備が求められた。

(社)火力原子力発電技術協会はこのニーズに応えるため、プラント配管設計または設計変更の際に基準とするべき水素燃焼に関する具体的な技術指針として、2005 年 10 月に「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」⁽¹⁾ をとりまとめ、2007 年 3 月には改訂版となる「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 2 版)」を発行した。これにより、BWR 配管内の混合ガスの蓄積を防止する配管配置設計のための指針が整備された。

その後も検討の場を(社)日本原子力技術協会に移し、混合ガスの急速燃焼時の配管健全性を評価する具体的な手法を明確にすべく、試験・研究を行い、その成果を反映した「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)」⁽²⁾ が 2010 年 3 月に発行されたので、ここで紹介する。

これにより、混合ガスの蓄積評価及び仮に混合ガスが蓄積・燃焼した際の配管健全性評価に関する知見が揃い、混合ガスの燃焼による配管損傷を防止する設計指針が完結した。

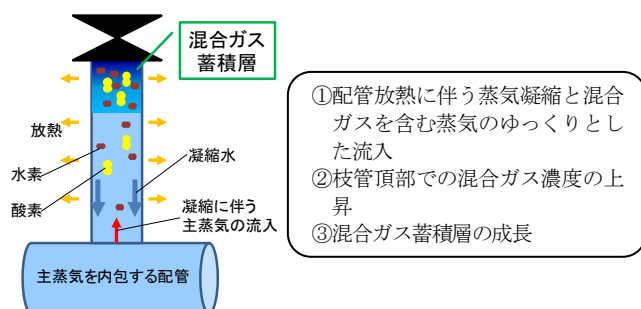
2. ガイドラインの知見

ここでは、ガイドライン発行の際に元となった研究成果や技術的知見について述べる。

2.1 混合ガスの蓄積に関する知見

2.1.1 混合ガスの蓄積メカニズム

BWR 原子炉では、中性子・ガンマ線の作用により水分子が分解し、最終的に水素、酸素の気体となって主蒸気中へ移行し、主蒸気の流れにより配管下流へ運ばれていく。図 1 に例示するように、主蒸気を内包する配管から分岐し他端が弁等で閉止された配管 (枝管) のうち母管から閉止端までの距離がある等の場合、放熱により蒸気が凝縮するため、微量に含まれている非凝縮性である混合ガスが枝管内に残る。



- ①配管放熱に伴う蒸気凝縮と混合ガスを含む蒸気のゆっくりとした流入
- ②枝管頂部での混合ガス濃度の上昇
- ③混合ガス蓄積層の成長

図 1 混合ガスの蓄積メカニズム

濃縮された混合ガスは、凝縮した蒸気を補う主蒸気の流れとガス濃度上昇（＝密度低下）に伴う浮力により、枝管頂部から次第に下方に向かって蓄積されていく可能性がある。

2.1.2 混合ガスが蓄積する可能性がある配管

原子炉圧力容器内で発生した混合ガスは主蒸気の流れにより配管下流側へ移行する。このとき、母管から閉止端まで距離があり、放熱により蒸気が凝縮する枝管内に非凝縮性である混合ガスが滞留する可能性がある。ただし、図2に示すように、下向きに取り出された枝管（下向き枝管）や下り勾配を持つ水平方向に取り出された枝管（水平枝管（下り勾配））内は、凝縮水により水封されるため蓄積しない。

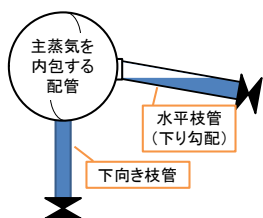


図2 下向き枝管及び水平枝管（下り勾配）

また、下端にドレントラップが設置された枝管においては、ヘンリーの法則に従い凝縮水に混合ガスが溶解し系外に排出されるが、図3に示す通り、運転圧力が0.8MPa以下の系統では、主蒸気を内包する配管からのドレン流入を考慮しない保守的な条件では、混合ガスが燃焼しない限界の濃度（不燃限界濃度）を超えて蓄積する可能性がある。

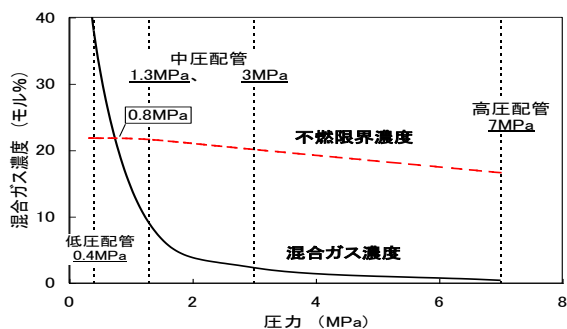


図3 混合ガス濃度と圧力の関係

この場合、主蒸気を内包する配管からのドレン流入量を評価し、枝管、ドレントラップでの発生ドレン量の2倍以上となることが確認できれば、混合ガスの濃度は不燃限界濃度以下と評価できる。

2.1.3 換気作用

図4に示すように、プラント運転中に主蒸気流れのある配管から上向き方向に分岐した枝管（上向き枝管）

の場合、配管の主蒸気流れに伴い枝管内に換気流れが生じ、混合ガスが主蒸気流れのある配管へと排出される。

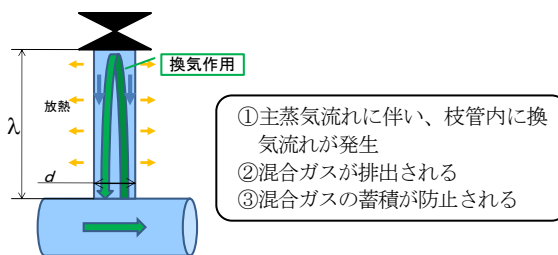


図4 混合ガスの換気作用

しかし、枝管が長く換気流れが枝管頂部まで侵入しない領域が存在すると、その領域には混合ガスが不燃限界濃度を超えて蓄積する可能性がある。

主蒸気渦の侵入深さを評価するにあたり、日本機械学会「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」JSME S 017-2003の主管に接続された分岐管内への渦の侵入深さに関する評価手法および水流動試験データが使用できる。図5は換気流れの侵入深さを求めた結果である。枝管の長さとの比がこの換気領域内であれば混合ガスの濃度は、換気流れにより枝管内から排出されるため、不燃限界濃度を超えて蓄積する可能性はない。

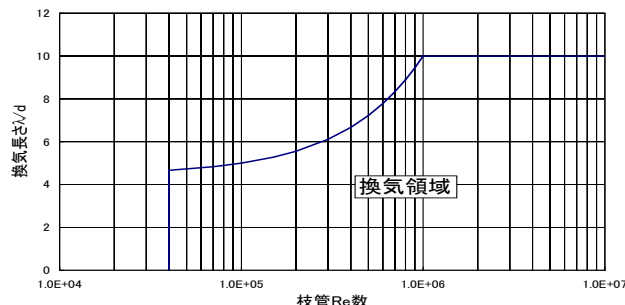


図5 換気限界長さ

なお、枝管内の流動は主蒸気の流れにより駆動されることから、枝管 Re 数を主蒸気流れのある配管の断面平均流速 U 、代表長さは枝管の径 d として式1で定義した。

$$Re = \frac{U \times d}{\nu} \quad (式1)$$

2.1.4 不燃限界長さ

図6に示すように、水平枝管内では、水平方向に混合ガス濃度差に起因する自然対流と、枝管の放熱に伴う蒸気の凝縮により、主蒸気の枝管内への流入を生じている。

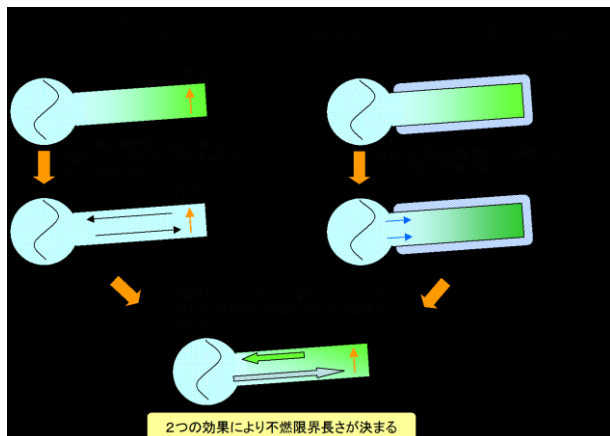


図6 水平枝管内の流動現象

表1に示す水平枝管（上り勾配）の先端の濃度が不燃限界濃度を超える長さ（不燃限界長さ（ l' ））はこの2つの流れのバランスにより決まり、圧力が高く口径が大きくなるにしたがい長くなる傾向にある。水平枝管（上り勾配）の長さが表1の長さ以下の場合、蓄積する混合ガス濃度は不燃限界濃度を超えない。

表1 不燃限界長さの判定値

圧力 (MPa)	口径	不燃限界長さ (l') / 枝管内径 (d)	圧力 (MPa)	口径	不燃限界長さ (l') / 枝管内径 (d)
0.4	20A	10	3	20A	40
	25A	10		25A	60
	40A	20		40A	80
	50A	30		50A	90
	100A	50		100A	100
1.3未満	350A	80	7未満	350A	100
	650A	70		650A	100
1.3	20A	20	7以上	20A	70
	25A	30		25A	90
	40A	50		40A	100
	50A	60		50A	120
	100A	90		100A	120
3未満	350A	90		350A	100
	650A	80		650A	100

(注) : 本表は、1/50以下の勾配、配管肉厚 Sch80 以下および保温材表面からの平均放散熱量 209W/m^2 以下の水平枝管に適用する。
: 配管口径あるいは肉厚が異なる場合は保守的になる不燃限界長さを採用する。

2.2 混合ガスの燃焼に関する知見

2.2.1 不燃限界濃度

配管中に不燃限界濃度を超えて蓄積した混合ガスと水蒸気の混合気体は、エネルギーが付与される場合等に燃焼に至ることがある。枝管内の混合ガス濃度は、初期においては低く、蒸気が凝縮することにより徐々に濃度が上昇して不燃限界濃度を超え、燃焼範囲内の濃度となる。表2は、欧州規定 EN1839「気体および蒸気の爆発限界に関する規定」に準じて実施された BWR 通常運転環境を模擬した試験により、代表的な条件における不燃限界濃度を求めた結果である。

表2 BWR配管の代表圧力における不燃限界濃

圧力 (MPa)	0.4	1.3	3.0	7.0
不燃限界濃度 (モル%)	21.8	21.6	20.1	16.6

可燃性ガスが燃焼を開始した場合には、火炎面が形成され、ガス中を伝ばする。火炎伝ばの形態には、燃焼波と爆轟波がある。爆轟波は衝撃波と化学反応が組み合わさったもので、伝ば速度は音速を超え、発生する圧力も高くなるため、枝管の健全性を評価する場合に重要となる。爆轟の発生する濃度下限は一般に燃焼下限よりも大きい。爆轟の発生は枝管の内径や各種の継手等を含む配管ルート形状に影響する。実機枝管の口径や配管ルート形状は多岐にわたるため爆轟に遷移する濃度を設定するには不確かさが残る。そこで本ガイドラインでは表2の不燃限界濃度を混合ガスの許容濃度とした。

2.2.2 自己着火

可燃性混合気を容器内に満たし、温度や圧力を変化させると、着火エネルギーを付与しなくても、ある温度・圧力条件で燃焼反応が起こる（自己着火）。図7は、BWR 運転温度、圧力条件下で枝管内に蓄積した混合ガスが自己着火する条件を測定した結果である。BWR 運転条件である主蒸気温度約 286°C 以下且つ圧力約 7MPa 以下では、混合ガスが不燃限界濃度を超えて蓄積しても自己着火しない。

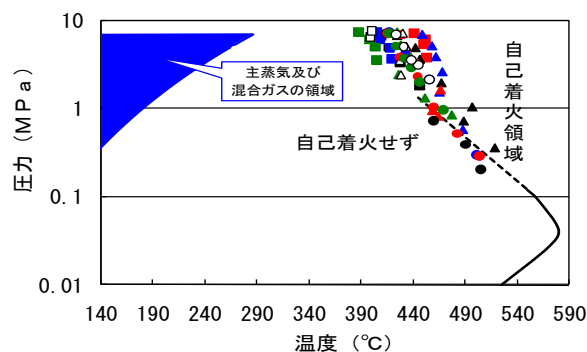


図7 自己着火温度に関する試験結果

2.3 配管強度に関する知見

2.3.1 配管構成要素による爆轟圧力の影響

γ を比熱比(= C_p/C_v)、 C_p を定圧比熱、 C_v を定容比熱、 Q を混合ガス単位質量当たりの発熱量、 V_0 を比容積(= $1/\rho$ 、 ρ : 密度)、 P_0 を初期圧力、 T_0 を初期温度とするとき、爆轟波のピーク圧力 P_{cj} は式2で与えられる。

$$P_{cj} = 2 \cdot (\gamma - 1) \cdot Q / V_0 = 2 \cdot Q \left(\frac{P_0}{T_0} \right) / C_v \quad (式2)$$

ピーク圧力 P_{cj} は、混合ガスが蓄積している配管内の初期圧力 P_0 、初期温度 T_0 が決まれば、一定の圧力で伝ばする。枝管内を一定圧力で伝ばする爆轟波は、閉止端での反射波との重畳やエルボ、ティー等の配管構成要素

での干渉により圧力が上昇する。表3は、BWRプラントに想定される配管構成要素（エルボ、ティー、レギュレーサ、閉止端）を含んだ試験体を作成し、配管内に爆轟波を発生させ、配管構成要素に到達した時の圧力の影響を確認した結果である。閉止端部では進行波と反射波の重畳により、最も高い圧力となり、通常爆轟波の圧力を超え、初期圧力の約50倍程度まで上昇する。

表3 配管構成要素における爆轟圧力の影響 (0.4MPaの例)

配管構成要素	爆轟圧力(最大位置)	圧力比
閉止端	18.8MPa(閉止端)	47
エルボ	19.6MPa(エルボ背側)	49※
ティー	12.3MPa(ティー付根)	31
レギュレーサ(縮管)	13.3MPa(レギュレーサ中央)	33

※: エルボ背側の圧力比が閉止端より高くなるが、持続時間が短く、配管強度に影響しない。

2.3.2 配管構成要素による爆轟圧力の影響範囲

例えば、図8に示すように、爆轟波が閉止端で反射する場合、進行波と反射波の重畳により一旦反射圧力が上昇するが、ある距離以上で進行波の圧力以下になる。

エルボ、ティー、レギュレーサ等の配管構成要素を通過する場合も同様に、衝撃波の干渉により一旦圧力が上昇するが、一定の距離を伝ばした後に、減衰によりPcjに近づく。

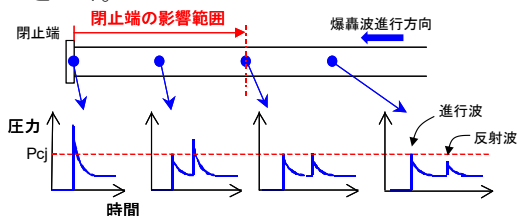


図8 配管構成要素による圧力への影響 (閉止端)

表4は、実機で想定される配管構成要素毎に圧力がPcjまで減衰する距離を試験および解析により求めた結果である。配管構成要素が互いに近接し、この距離より短い場合には、下流側の配管構成要素を通過する爆轟波の圧力への影響が無視できなくなり、閉止端よりも圧力が高くなる可能性がある。

表4 配管構成要素の圧力影響範囲

配管構成要素	圧力影響範囲	
エルボ	エルボ出口より配管外径の3倍以内	
ティー	ティー出口より配管外径の2倍以内	
レギュレーサ(縮管)	上流側	混合ガス蓄積開始位置からレギュレーサ入口までの長さの1/10以内
	下流側	レギュレーサ出口より配管外径の15倍以内
閉止端	混合ガス蓄積部長さの1/10以内	

2.3.3 許容ひずみ

爆轟のピーク圧力は瞬時に立ち上がり、配管内圧力

応答は追従しないため、配管の変形は、ピーク圧力による荷重制御型ではない。爆轟による圧力は、配管変形の初速度を与えるのみで、運動エネルギーを全て消費するまで配管が変形するエネルギー制御型となる。この場合、ひずみの限界が配管健全性の限界となる。許容ひずみは表5に示すように、材料毎に、材料試験の伸び最小値、多軸度による延性低下係数、加工度・溶接部の影響を考慮した安全係数に、材料のばらつきを考慮し、8.0%とした。

表5 許容ひずみの設定

	STPT410	STPA23	備考
材料の伸び(平均値)	30%		材料試験結果より
材料の伸び(最小値)	25.8%	24.2%	
延性低下係数	0.67		推定破断ひずみから逆算
安全係数	2.0		加工度・溶接部の影響を考慮
伸び最小値に基づく許容ひずみ	8.6%	8.1%	材料試験の伸び最小値に延性低下係数と加工・溶接部の安全係数を考慮
許容ひずみ	8.0%		炭素鋼・低合金鋼を包含した許容値

これらの研究成果および知見を取り入れ、ガイドラインとして纏めた。

3. ガイドラインの概要

ここでは、これまで得られた研究成果および知見を取り入れ取りまとめたガイドラインの概要について述べる。

3.1 目的

本ガイドラインは、BWR 新規プラントの設置や既設プラントの改造等に係わる配管設計の際に基準とする主蒸気中の混合ガスの燃焼に伴う内圧上昇による配管損傷を防止する方法を定めたものである。このための具体的な方法として、混合ガスが不燃限界濃度を超えて蓄積することを防止する設計評価の方法や混合ガス燃焼時の配管構造強度を評価する方法及び対応措置の方法を定めている。

3.2 適用範囲

3.2.1 評価対象とする現象

BWR 原子炉では、中性子・ガンマ線の作用により水分子が分解され、水素と酸素が生成され、生成された水素と酸素は主蒸気中に移行する。本ガイドラインでは、この主蒸気中の混合ガスの不燃限界濃度を超える蓄積および燃焼現象を対象とする。

3.2.2 評価対象とする範囲

BWR 原子力発電設備の配管のうち、枝管を対象とす

る。枝管は、主に、原子炉压力容器、主蒸気系、自動減圧系（主蒸気安全弁）、原子炉隔離時冷却系（高压注入系含む）、残留熱除去系（蒸気凝縮モード）、抽気系、主タービン、タービン補助蒸気系及びタービングランド蒸気系に属する。

3.3 評価方法

混合ガスの蓄積箇所を抽出し、対策の要否を評価するため、図9に示す評価フローに従い、以下の手順で評価を行う。

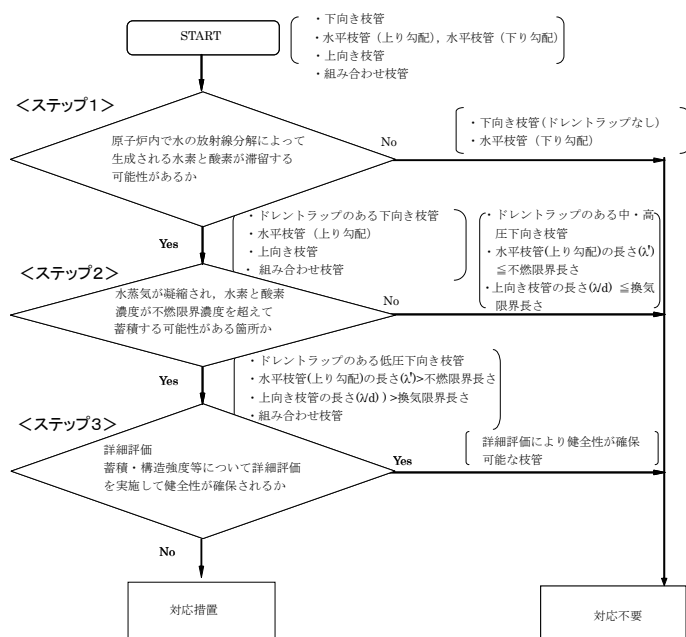


図9 評価フロー

<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混合ガスが蓄積する箇所として、主蒸気を内包する配管から枝管端部まで距離があり、放熱による混合ガスの蓄積が懸念される枝管を選定する。図2に示すように、下向き枝管及び水平枝管（下り勾配）は水封されるので、混合ガスが蓄積しないと判断し、配管配置を許容できる。

<ステップ2>

混合ガスの濃度が不燃限界濃度を超過して蓄積する箇所として、ドレントラップのある下向き枝管、水平枝管（上り勾配）および上向き枝管、斜め上向き枝管を評価対象として抽出する。

- (1) 主蒸気を内包する枝管から分岐しているドレントラップのある中・高圧の下向き枝管

図3に示すように、ドレントラップのある0.8MPa以上の下向き枝管は混合ガスがドレン水に溶解し排出され不燃限界濃度以下となるため、混合ガスが不燃限界濃度を超過して蓄積しないと判定する。

- (2) 水平枝管（上り勾配）

水平枝管（上り勾配）のうち、その長さが表1に示す不燃限界長さ以内の長さのものについては混合ガスが表2に示す不燃限界濃度以下となるため、混合ガスが不燃限界濃度を超過して蓄積しないと判定する。

- (3) 上向き枝管、斜め上向き枝管

主蒸気流れがある配管から分岐されている上向き枝管および斜め上向き枝管は換気流が発生するため、図5を満足する場合、混合ガスが蓄積しないと判定する。

<ステップ3>

ステップ2において、混合ガスが不燃限界濃度を超過して蓄積すると判定された枝管であっても、個別評価による蓄積の可能性を評価したり、配管の構造強度評価を行い、対策の要否を判断することができる。

- (1) 個別評価による蓄積の可能性の評価

a. 蓄積濃度

評価が必要な個別の枝管条件で、蓄積濃度を評価することができる。蓄積濃度は、ガイドライン付録2.2に記載の方法により求めることができ、表2に示す不燃限界濃度を判定値とする。ドレントラップのある低压下向き枝管では2.1.2項に記載のとおり、母管からのドレン流入量を考慮する。

b. 換気限界長さ

図5に示す換気領域は、BWRの口径比の影響を包絡した判定値であることから、ガイドライン付録4に記載の方法で、評価が必要な個別の枝管条件で、枝管断面内の下降流速をもとに換気作用の有無を判定する。

- (2) 配管の構造強度評価

ステップ2またはステップ3の蓄積評価において、混合ガスが不燃限界濃度を超過して蓄積すると判定された枝管であっても、混合ガスの急速燃焼時において強度評価により枝管の健全性を確認することができる。評価にあたっては、表5に示す許容ひずみを健全性の判断基準とする。

<評価手順1> 配管構成要素が近接しない枝管を抽出する。抽出にあたっては、各配管構成要素間距離が表4に示す圧力影響範囲外に有ることを確認する。表4の範囲外に有る場合は、閉止端部の反射圧力をもとに枝管の健全性を評価可能である。

なお、圧力影響範囲内に各配管構成要素がある枝管であっても、評価手順4でFEM解析を用いて、個別の条件で配管健全性を評価することができる。

<評価手順2> 配管構成要素が近接しない枝管は、爆轟圧力（反射圧力含む）が枝管に静的に負荷さ

れたと仮定した弾性計算により強度評価を行い、式3を満足するときには、混合ガスの燃焼による影響は無いと判定する。

$$\alpha \cdot \beta \cdot P \leq \frac{2 \cdot t \cdot S_y \cdot \eta}{d_o - 0.8t} \quad \text{(式3)}$$

ここで、 α は動的応答効果(2.0)、 β は運転圧力に
応じた混合ガス濃度に対する爆轟の反射圧力比
(図10)、 P は運転中の系統圧力(MPa)、 d_o は枝管
の外径(mm)、 t は枝管の配管厚さ(mm)、 S_y は運転温
度における設計降伏点(MPa)、 η は長手継手の効果
である。 S_y と η 値は、日本機械学会「設計・建設規
格」(軽水炉)に従う。

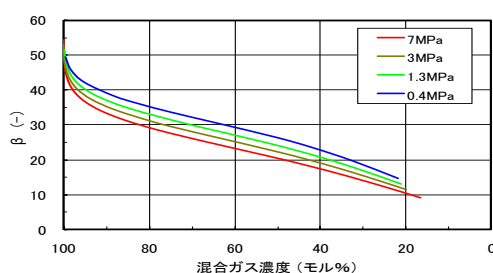


図10 爆轟による反射圧力比 (β)

<評価手順3> 評価手順2において混合ガスの燃
焼による影響があると評価された枝管であっても、
爆轟時の配管ひずみが許容ひずみ(8.0%)以下であ
れば健全性は確保できる。表6は、爆轟圧力(反射
圧力含む)が枝管に動的に負荷された状態での弾塑
性計算結果の一例である。この表を満足するとき
には、混合ガスの燃焼による影響がないと判定する。

表6 簡易評価表(弾塑性)(sch80の例)

系統圧力 (MPa)	口径 (sch80の場合)								
	20A	25A	40A	50A	80A	100A	150A	350A	650A
$P \leq 0.4$	—	—	—	—	—	—	○	○	○
$0.4 < P \leq 1.3$	○	○	○	○	○	○	○	○	○
$1.3 < P \leq 3.0$	○	○	○	△	△	△	△	△	△
$3.0 < P \leq 7.0$	△	△	△	△	△	△	△	△	△

凡例 ○:許容ひずみ以下 △:詳細評価要 —:弾性範囲
適用 混合ガス温度:60℃以上 枝管全長:7m以下
配管材質:STPT410・STS410・STPG410

<評価手順4> 評価手順1で評価ができないと判定
された枝管、あるいは評価手順3で混合ガスの燃焼
による影響があると判定された枝管であっても、ガ
イドラインの付録6.11に示す手法を用いて、個別に
配管強度評価を実施することができる。

3.4 対応措置

混合ガスが不燃限界濃度を超えて蓄積することによ
る影響があると評価された場合、運転操作又は設備変
更等による対応措置を講ずる。

- (1)混合ガスを燃焼させないための対応措置
 - a. 定期的に混合ガスを抜く操作等による対応措置
 - b. 不燃限界濃度を超える蓄積を防止する設計変更
 - c. 着火を防止する等による対応措置
- (2)混合ガスの燃焼による配管損傷を防止する対応措置
 - a. 配管の厚肉化による補強
 - b. 許容応力が高い材質への変更
 - c. 発生圧力による配管強度への影響低減を目的と
した、閉止端や各構成要素の位置変更

4. 今後の課題

本ガイドラインの初版は、総合資源エネルギー調査
会原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会の下に設
置された基準評価ワーキングにおいて技術評価が行わ
れ、発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令
の解釈として適用されている。その際、今後の課題の
一つとして、公開性を考慮した学協会規格化に向けて
取り組むことが望まれており、現在、(社)日本機械学会
において第3版をもとに規格化の検討を行っている。

5. おわりに

本ガイドラインは、(社)火力原子力発電技術協会
(2003年10月から2006年3月)及び(社)日本原子力
技術協会(2007年4月以降)の非凝縮性ガス対応技術
検討会で、専門知識を持つ参加委員による審議を経て
制定された。これにより、混合ガス燃焼時の配管健全
性評価が可能となった。

謝辞

本ガイドラインの制定にご協力頂きました学識経験
者、電力会社、メーカ、(社)火力原子力発電技術協会、
(社)日本原子力技術協会の方々等、関係各位に深く感謝
いたします。

参考文献

- [1] JBWR-NCG-01「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」(社)火力
原子力発電技術協会(平成17年10月)
- [2] JANTI-NCG-01-第3版「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)」(社)日本原子力技術協会
(平成22年3月)
[http://www.gengikyo.jp/KikakuKijun/HiGyosyukuGas/
NCG-01.pdf](http://www.gengikyo.jp/KikakuKijun/HiGyosyukuGas/NCG-01.pdf)

(平成23年2月9日)