

高圧蒸気配管における爆轟波の影響

Effect of Detonation Waves in Steam Pipelines of Boiling Water Reactor

内 田 正 宏	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士（工学）
藤 井 正	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 原子力計画部
稲 垣 哲 彦	中部電力株式会社 原子力部
須 田 俊 之	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 課長 博士（工学）
藤 森 俊 郎	技術開発本部基盤技術研究所 副所長 博士（工学）

高圧蒸気配管における爆轟波の影響を調べるため、爆轟試験を実施した。試験では、BWR型原子炉の高圧蒸気配管に蓄積するガスと同等の爆轟圧力・速度が得られる、常温・圧力 5 MPa の水素・酸素・窒素混合気を使用し、端部が閉止された直管とエルボでの爆轟波の圧力を計測した。試験の結果、直管では閉止端部で爆轟波の反射によって圧力が最大になった。エルボではエルボ外側とエルボ下流の内側で高い圧力が計測された。力積による破断リスクの評価を実施した結果、エルボよりも閉止端部における力積が大きくなりリスクが高いことが確認された。

Detonation experiments were conducted to investigate the effect of detonation waves in steam pipelines of boiling water reactor. The gases accumulated in steam pipelines are stoichiometric mixtures of hydrogen and oxygen diluted with steam at 7 MPa. In the experiment, a hydrogen oxygen and nitrogen gas mixture, at room temperature with a pressure of 5 MPa, was used to measure a pressure equivalent to detonation in closed straight and elbow pipes. The results of the experiment show that pressure was largest at the closed end of straight tube due to the reflection of the detonation wave. High pressure was also measured in 90-degree bend at the outward side of bend and the inward side of downstream bend. After evaluating the risks of fracture due to impulsive pressure, these results confirm that the impulse pressure risk at the closed end of a tube is higher than at a 90-degree bend.

1. 緒 言

原子力発電プラントの蒸気配管内では、微量の蒸気が放射線によって水素、酸素に分解されることが知られており、長い運転期間の間に配管内に蓄積する可能性がある。蓄積した水素、酸素混合ガスが、着火・燃焼した場合の挙動を明らかにすることは、BWR (Boiling Water Reactor) 型原子力発電所の安全運転、信頼性向上のためには、極めて重要な課題である。

水素、酸素混合ガスの燃焼による配管の損傷を防ぐためには、燃焼によって配管に作用する圧力に関する知見が必要である。しかし、試験的に圧力計測を行うには二つの課題がある。一つは、配管系の運転圧力が最大 7 MPa の高圧であり、水素・酸素混合気も同様の圧力で配管内に蓄積することである。このような高圧環境では、火炎の伝播速度が音速を超え圧力上昇が大きい爆轟波が発生することから、試験はより難しくなる。もう一つは、配管の破断が 90 度エルボで生じている点、破断部の下流が封止されていた点である。このような配管要素では、爆轟波の回折に

よって直管部よりも大きな圧力が配管に作用する可能性がある。これを確認するため、エルボや封止端を対象とした爆轟試験は過去にも行われているが、爆轟波の挙動を解明することに主たる焦点が当てられており、配管への圧力荷重を詳細に調べた試験結果はなかった^{(1),(2)}。このため、高圧の水素・酸素混合気の爆轟試験を実施し、エルボや封止端に作用する圧力を明らかにする必要がある。

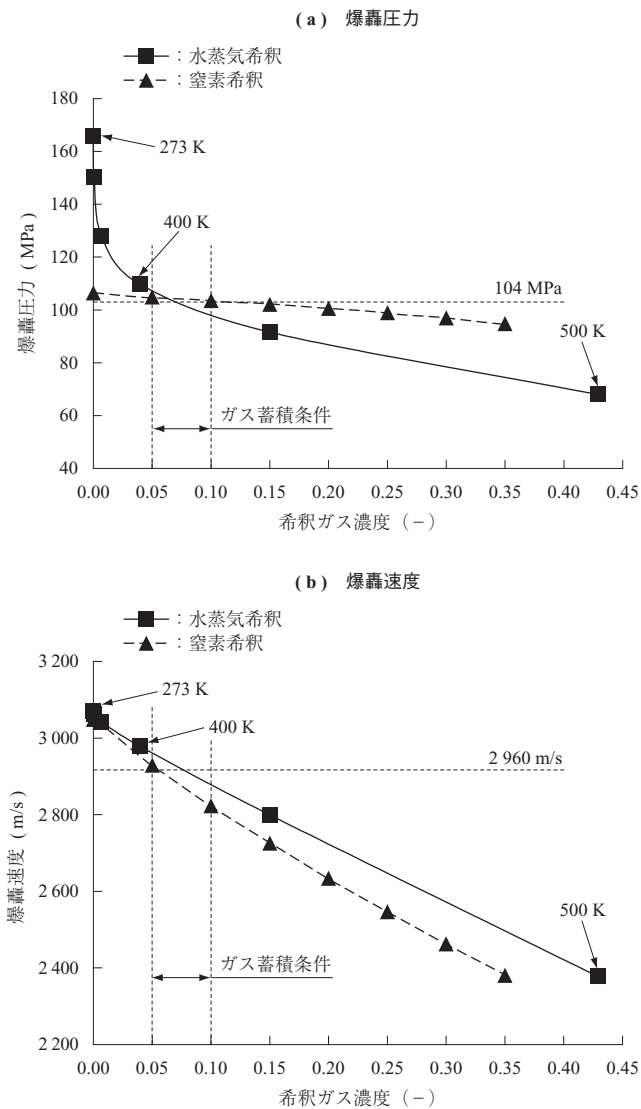
本稿では、端部が閉止された直管試験体と 90 度エルボ試験体の二つを使用し、BWR 作動条件での爆轟試験を実施した結果について報告する。また圧力計測結果を基に配管へのダメージを評価した結果について報告する。

2. 試験方法

BWR の高圧蒸気配管の運転条件は、おおむね圧力 7 MPa・温度 550 K の高圧・高温条件であり、この条件での試験の実施はさまざまな困難を伴う。特に、この温度では圧力計測を実施するためのピエゾ素子型圧力センサの使用温度範囲を上回る。このため、この作動条件の混合気と爆轟圧力・速度が一致する混合気を使用して試験を実施

することにした。

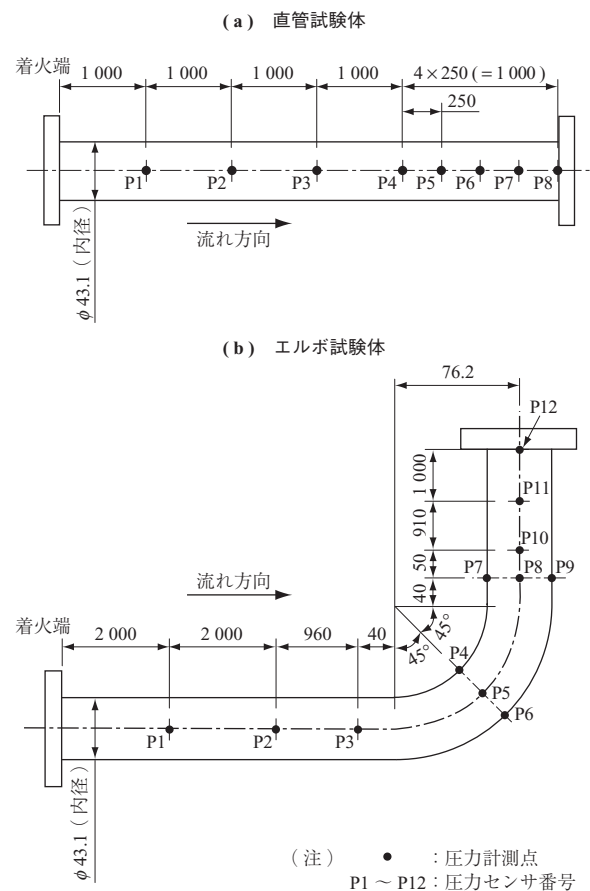
BWRの主蒸気配管内には水の放射線分解によって生じる水素と酸素が存在する。この水素・酸素の濃度は数ppm程度であり、火炎伝播が生じることはない。しかし、蒸気配管の一部の枝管では、以下のようなメカニズムによって水素・酸素の滞留が起こる場合がある。枝管では外部への放熱による冷却で水蒸気が凝縮する。凝縮が起こると圧力が低下するため、水蒸気が流入して再び冷却される。しかし、水素・酸素混合気は凝縮せずに枝管内に滞留するため、水蒸気の流入によって枝管内の水素・酸素濃度は少しずつ上昇する。この過程を繰り返して、枝管内には水素・酸素が滞留するが、同時に枝管の温度を飽和蒸気圧とする水蒸気も存在する。この滞留ガスの爆轟による圧力および速度の計算結果を第1図に示す。計算にはGordon, McBrideのChemical Equilibrium



第1図 爆轟圧力および速度に及ぼす希釈ガス量の影響
Fig. 1 Effect of inert gas concentration on detonation pressure and velocity

with Application (CEA)⁽³⁾を使用した。水蒸気希釈の計算条件は、圧力7 MPa、温度は横軸の水蒸気濃度に対応する温度である。窒素希釈の計算条件は圧力5 MPa、温度300 Kである。温度変化によって水蒸気濃度が変化するため、混合気中の水素・酸素濃度も変化し、爆轟圧力・速度が変化することが分かる。配管破断が生じた事故での水蒸気濃度は5~10%程度と推測されることから、この混合気の爆轟圧力は100 MPa程度、爆轟速度は2900 m/s程度と推測される。これと同様の爆轟圧力・温度を常温の窒素希釈混合気で得ようとする、初期圧力5 MPa・窒素濃度5%となることから、これを試験条件にした。

第2図に試験体の概略を示す。試験体に使用した配管はすべてJIS規格に基づくものである。直管試験体は、長さ5000 mm、内径43.1 mmであり、着火端の逆側を閉じた。圧力計測用のセンサは1 m間隔に設置し、閉止端付近では爆轟波の反射による圧力を計測するために250 mm間隔で設置した。エルボ試験体は、安定な爆轟波を得るための助走区間である5 mの直管部とエルボから構成される。エルボの曲率半径は内側54.65 mm、外側97.75 mmである。圧力計測用のセンサはエルボ付近に8



第2図 試験体概略 (単位: mm)
Fig. 2 Schematics of the experimental set-up (unit: mm)

点を集中させた。直管試験体・エルボ試験体ともに、閉止端部を除く圧力センサは管の中心軸に垂直に取り付けた。計測に使用した圧力センサは高圧対応のピエゾ素子型圧力センサ（最大計測圧力 552 MPa）であり、試験における計測レートは 2 MHz にした。

各試験の実施前に試験体内を真空吸引してから、ガスの充てんを実施した。ガスの充てんでは、水素・酸素・窒素のそれぞれの流量をマスフローコントローラで所定の流量に制御し、あらかじめ混合してから試験体に充てんした。充てんした混合気の濃度は、試験体から抜き取ったサンプルをガスクロマトグラフで分析して確認した。混合気にグロープラグを使用して着火し、爆轟波を発生させた。

試験条件は以下のとおりである。

直管試験体

初期圧力	5 MPa
初期温度	282 K
水素濃度	64.7%
酸素濃度	30.3%
窒素濃度	7.1%

エルボ試験体

初期圧力	5 MPa
初期温度	280 K
水素濃度	67.6%
酸素濃度	28.9%
窒素濃度	3.5%

混合気の濃度についてはガスクロマトグラフの分析結果である。

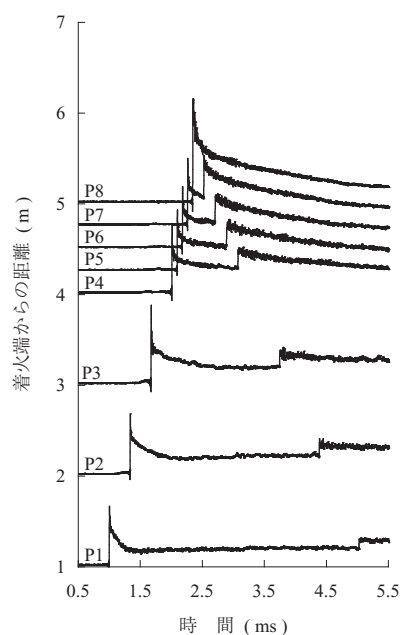
3. 試験結果

3.1 直管試験体の試験結果

第 3 図に圧力計測結果を示す。図の縦軸は着火端からの距離、横軸は時間に対応し、縦軸の 1 m は圧力に換算すると 200 MPa に相当する。

火炎がセンサ P1 に達した時点で急激な圧力上昇が確認できる。このことから燃焼波が P1 に達する前に、燃焼波が亜音速の爆燃波から超音速の爆轟波へ遷移していることが分かる。その後、爆轟波はセンサ P2 から P7 まで順番に到達し、閉止端である P8 に達する。P8 で反射した衝撃波はセンサ P7 から P1 へと順次到達するが、反射端からの距離が離れるほど反射波の圧力が低下する。

爆轟波の到達時刻から算出した速度を比較すると、P1-P2 区間と P2-P3 区間の速度差は 0.2% 以下であり、



(注) P1 ~ P8 : 圧力センサ番号

第 3 図 直管試験における圧力の計測結果
Fig. 3 Measurement results of pressure in the straight tube test
(One division of vertical axis corresponds to 200 MPa)

極めて小さい。したがって、爆轟波はセンサ P1 に到達した時点で十分に発達し、定常伝播状態にあると判断できる。よって本試験において、試験体の長さは定常伝播する爆轟波を得るのに十分な長さであり、閉止端への爆轟波の影響を調べるのに問題がないことが確認できた。

センサ P1 から P8 の圧力を比較すると、センサ P8 で最大圧力が計測されている。これは閉止端部では爆轟波の反射が起こるためである。最大圧力を比較すると、センサ P1 から P7 の爆轟波による最大圧力が 187.5 MPa であるのに対し、センサ P8 の最大圧力は 360.5 MPa に達する。反射波の圧力は反射端から着火端に向かって伝播するとともに低下する。反射波の最大圧力が爆轟波の最大圧力よりも低くなるのはセンサ P6 の地点である。したがって 5 m の直管の場合、反射波による影響が爆轟波による影響よりも大きいのは反射端から 500 mm から 1 000 mm の範囲である。

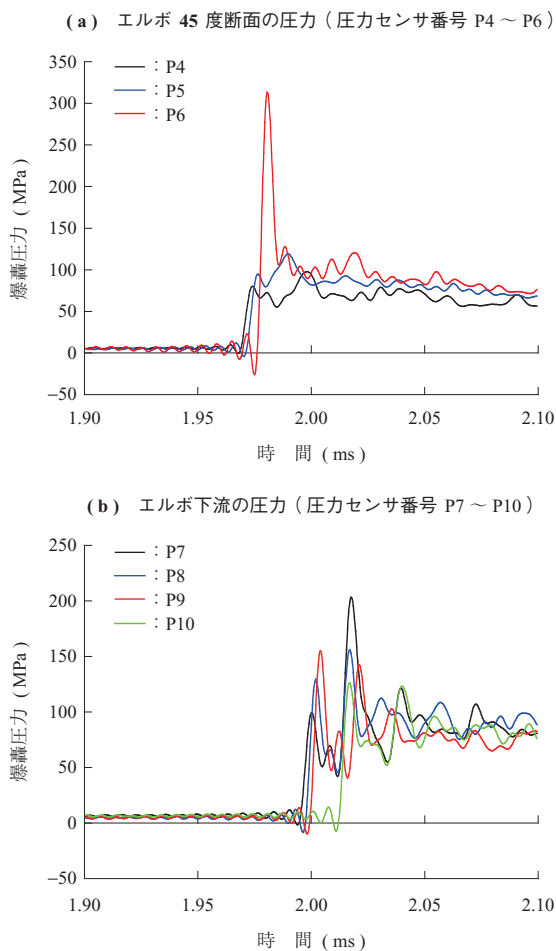
各センサへの爆轟波の到達時刻から伝播速度を算出した。各センサ間の伝播速度の平均値は 2 966 m/s であり、誤差は 0.95% 以内であった。この伝播速度は試験条件における CEA による計算値 2 910 m/s よりも 1.9% 大きい。爆轟試験における伝播速度は、壁面との摩擦などさまざまな損失によって理論値より小さくなる傾向にあるが、本試験では逆の傾向が示された。これは、石井ら⁽⁴⁾によって示されているように、高圧の爆轟波では実在気体

の影響が無視できなくなるためである。石井らの解析で示されている実在気体の影響は、初期圧力 5 MPa の場合で 4% であり、本試験結果では 1.9% である。したがって、初期圧力 5 MPa の本爆轟試験において、実在気体の影響は限定的であり、CEA による予測は依然として有効である。

3.2 エルボ試験体の試験結果

第 4 図にエルボ試験体の試験結果を示す。第 4 図 - (a) はエルボの 45 度断面における計測結果であり、- (b) はエルボ出口下流における計測結果である。45 度断面においては、エルボ外側のセンサ P6 で最も圧力が高く、直管部における爆轟波最大圧力の 2 倍程度に達した。しかし、この圧力ピークは短時間であり、ほかの圧力計測点と同程度の圧力まで低下する。

一方、エルボ内側のセンサ P4、エルボ側面の P5 では最大圧力が直管部における爆轟波最大圧力よりも 5% 以上小さくなる。エルボ出口下流に設置されたセンサ P7 から P10 では、エルボ内部とは異なり、二つのピークをもつ

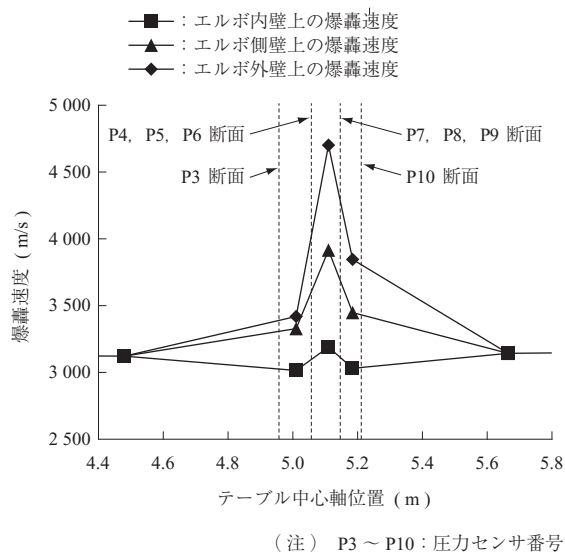


第 4 図 エルボ試験における圧力の計測結果
Fig. 4 Measurement results of pressure in 90-degree bend tube test

圧力履歴が確認された。一つ目のピークに着目すると、エルボ内側に位置するセンサ P7 で最も低く、外側の P9 が最も高くなっており、P8 はその中間の値になる。これらの傾向はエルボの 45 度断面における計測結果と傾向が一致する。二つ目のピークに着目すると、一つ目のピークとは逆に、センサ P7 が最も大きく、P9 で最も小さくなっている。センサ P7 では二つ目のピーク圧力が一つ目のピーク圧力の 2 倍程度に達している。この二つのピーク圧力の到達順序にも特徴がある。一つ目のピークは P7 から P9 の順番に到達しており、エルボ内側が先であるのに対し、二つ目のピークは P9 から P7 の順でエルボ外側が先に到達している。

これらのエルボを通過するときの爆轟波の挙動は次のようなものであると考えることができる。爆轟波がエルボに進入すると、エルボ内側では流路の広がりによって膨張が起き、外側では流路の狭まりによって圧縮が起きる。このため、エルボ 45 度断面のセンサ P4 から P6 では、最大圧力が内側では低下し、外側では上昇する。この圧縮と膨張の効果によって、爆轟波の背後にエルボ外側から内側に向かう横波が発生する。エルボ出口下流に設置されたセンサ P7 から P10 で二つのピークが確認されたのは、この横波の影響である。すなわち、一つ目のピークは爆轟波による圧力であり、二つ目のピークは横波による圧力である。また、横波のピーク圧力が内側のセンサ P7 で特に大きくなっているのは、エルボ外側から内側に伝播する横波が壁面に衝突したためである。

第 5 図に 90 度エルボを通過する爆轟波の速度を示す。



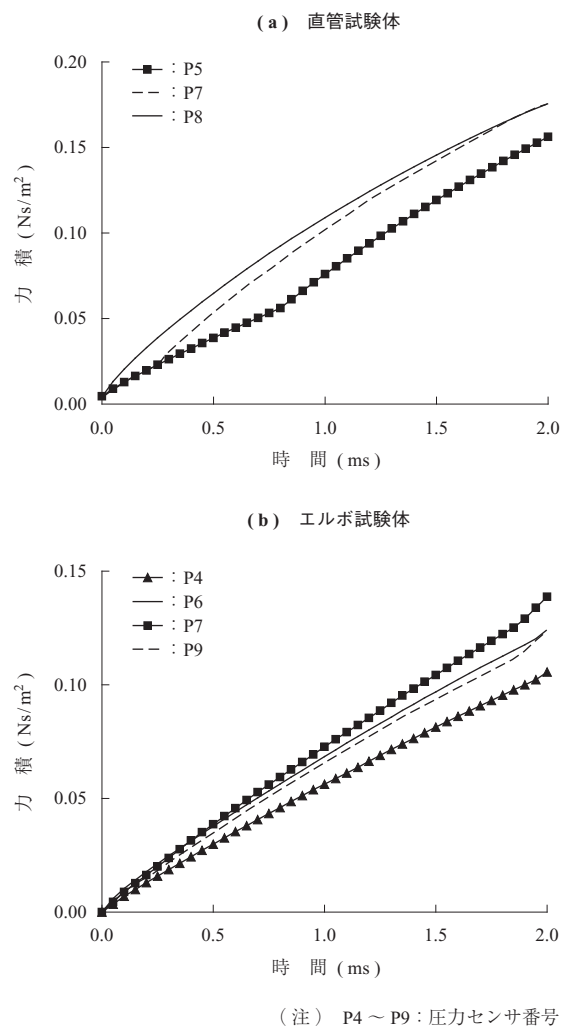
第 5 図 エルボを通過する爆轟波の速度
Fig. 5 Detonation velocity through 90-degree bend

爆轟波の速度はエルボの内側・側面・外側に設置されたセンサへの到達時刻と円弧の長さから算出した。算出に当たって、P3・P10 センサの断面においては爆轟波が平面であると仮定した。エルボ外側と側面に沿った爆轟速度は直管部を定常伝播する爆轟速度よりも大きい。また、エルボ内側に沿った爆轟速度はわずかであるが定常爆轟速度よりも小さくなる。これらは、エルボによる圧縮と膨張の効果であると考えられる。また、爆轟速度はエルボの後半部分で速くなる傾向があり、特にエルボの内側では45度から90度の区間で加速されている。この傾向も爆轟波背後に生じた横波による圧力変化の影響であると考えられる。

3.3 爆轟波による圧力荷重

爆轟波による配管へのダメージを予測する指標としては、最大圧力・最大圧力の持続時間・力積などがある。最も重要な指標は、圧力を入力だけではなく、配管の形状や固有振動を考慮して検討する必要がある。ここでは原子炉の配管破断事故時⁽⁵⁾に弾塑性変形による破断が生じていることから、爆轟波到達後の1～2 msの間に作用する力積に着目する。第6図に爆轟波到達後2 msの力積の変化を示す。直管試験体では閉止端での力積が最も大きい。ほかの計測点では、爆轟波による力積の上昇の後に、反射波による急激な力積の上昇が生じている。したがって、閉止端の近傍では爆轟波よりも反射波による影響が大きいと考えられる。エルボ試験体の試験結果では、エルボ45度断面と比較すると外側(P6)の力積が内側(P4)よりも大きい。これはセンサP6で確認された圧力ピークによる影響であると考えられる。一方、エルボ下流では内側(P7)の力積が外側(P9)よりも大きい。これは、エルボ下流では圧力計測で確認された二つ目のピークの影響のためであり、爆轟波による影響よりも横波による影響の方が大きいことを示している。このことはエルボ下流内側(P7)の力積がエルボ外側(P6)の力積よりも大きいことから確認できる。したがって、エルボ単体であれば、エルボ下流の内側で配管が破断する可能性が高い。

直管試験体とエルボ試験体での試験結果を比較すると、全体で最も力積が大きいのは直管の閉止端部である。最大圧力に着目すると、エルボの外側や下流内側で閉止端よりも大きな圧力が記録されている。一方、持続時間に関しては閉止端部が最も長くなっている。このため、最大圧力は大きい持続時間が短いエルボよりも、持続時間が長い閉止端部で力積が大きくなったと考えられる。したがって、



第6図 配管に作用する力積の時間変化
Fig. 6 Time variation of impulsive pressure on tube

エルボと閉止端の比較では、閉止端部のリスクが大きいことが確認された。

原子炉の配管破断事故⁽⁵⁾では、エルボの下流に閉止端が位置するレイアウトで、エルボ下流の内側から破断が開始したことが確認されている。本試験の結果とこの配管レイアウトを比較すると、エルボによる横波と反射波の両方の影響を受ける状況であったことが分かる。このような場合には、さらに破断リスクが増大すると考えられる。破断リスクを低減するためには、特に閉止端のレイアウトへの注意が必要である。

4. 結 言

直管試験体とエルボ試験体を使用して、高圧の爆轟試験を実施し、爆轟波の挙動や配管に作用する力積について調べ、以下の事項が確認された。

直管試験体では、閉止端部で爆轟波の反射によって圧力が最大になる。反射波の影響は閉止端部からの距離が大

きくなると小さくなる傾向にあるが、閉止端から 500 ～ 1 000 mm の範囲では、爆轟波の圧力よりも反射波の圧力が大きい。

エルボ試験体では、エルボ内部ではエルボによる圧縮の影響で外側に高い圧力が作用する。一方、エルボ下流では横波の影響によって二つのピーク圧力が確認され、エルボ内側で高い圧力になる。

配管への力積の比較から、エルボでは横波の影響が大きく、エルボ下流の内側が最も破断リスクが高い。しかし、直管の閉止端部の力積はエルボ下流よりもさらに大きく、閉止端部では破断リスクが最も高い。

本稿は 33rd International Symposium on Combustion において発表した内容⁽⁶⁾の抜粋である。また、本稿の内容を含む電力共同研究の成果は「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）」にまとめられ、社団法人日本原子力技術協会のホームページで公開されている。詳細はそちらを参照願いたい。

— 謝 辞 —

本研究は電力共同研究の一部として、中部電力株式会社、東北電力株式会社、東京電力株式会社、北陸電力株式会社、中国電力株式会社、日本原子力発電株式会社、電源開発株式会社、日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社、株式会社東芝のご協力のもとに実施されました。また、試験の実施に当たって、横浜国立大学の石井一洋教授

にはさまざまなご助言をいただきました。ここに記し、深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) M. A. Nettleton : Gaseous Detonation : Their Nature, Effects and Control Chapman and Hall London-New York (1987. 1)
- (2) M. A. Nettleton : Recent work on gaseous detonations Shock Waves Vol. 12 No. 1 (2002. 7) pp. 3 - 12
- (3) S. Gordon and B. J. McBride : Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition and Applications NASA Reference Publication Vol. 1 311 (1994. 10)
- (4) 石井一洋, 内田正宏, 藤森俊郎 : 高圧力下における水素-酸素-水蒸気混合気の爆轟特性 平成 20 年度衝撃波シンポジウム 2009 年 3 月 pp. 425 - 426
- (5) 原子力安全・保安院 : 中部電力株式会社浜岡原子力発電所 1 号機における配管破断事故について (最終報告書) 2002 年 5 月
- (6) M. Uchida, T. Suda, T. Fujimori, T. Fuiji and T. Inagaki : Pressure loading of detonation waves through 90-degree bend in high pressure H₂-O₂-N₂ mixtures Proceedings of Combustion Institute Vol. 33 Issue 2 (2011. 1) pp. 2 327 - 2 333