

# 液滴衝撃エロージョンによる配管減肉事象とその対策

## Pipe Wall wastage by Liquid Droplet Erosion and It's Countermeasure

|       |       |                     |        |
|-------|-------|---------------------|--------|
| 北海道大学 | 奈良林 直 | Tadashi Narabayashi | Member |
| 北海道大学 | 東 侑麻  | Yuma Higashi        |        |
| 東京電力  | 大森 修一 | Syuichi Ohmori      |        |
| 東京電力  | 手塚 健一 | Kenichi Tezuka      |        |
| 東京電力  | 森 治嗣  | Michitsugu Mori     |        |

The high level maintenance technology has become necessary to increase a capacity factor of nuclear power plants. In a nuclear power plant, There are various kinds of troubles concerning with pipes. One of them is a small leak from a small hole by liquid drop impingement erosion (LDIE). Even such a small leak, it was sometimes a cause of the plant trip and an economical losses about 200M\$ during several month outage, by operating a 1000MWe fossil power plant. We conducted a LDIE test by using a test specimen fixed on a circumference of a rotating disc, and obtained erosion rate of various liquid impingement speed. By using the TRAC code, a downstream orifice is effective to suppress LDIE by decreasing velocity in a pipe.

**Keywords:** Nuclear Power Plant Operation, Liquid Drop Impingement Erosion, Plant Trip, Outage loss, TRAC code, Two-phase flow, Flow pattern, Mist flow, Annular mist flow

### 1. 緒言

「配管減肉」事象は、これまで原子力プラントの高経年化対策において重要な経年劣化事象として位置づけられている[1]。原子力安全・保安院の「実用発電用原子炉施設における高経年化対策の充実」(2005.8.31)では、配管減肉事象に係る高経年化対策がまとめられていたものの、高経年化対策として必要な技術開発の位置付けは曖昧なものとなっていた。2007年10月の保安部会において、高経年化と新検査制度の関連付けが明確に定義され、劣化事象を経時的に体系化することで、「配管減肉」事象の位置付けが明確にされた。

2008年には新しい検査制度の諸制度が整い、2009年1月1日より施行となった。具体的には、運転中のポンプの振動測定等による追加的な検査を義務付け、機器の分解点検時の部品の劣化状態に関するデータを科学的に取得・蓄積し、以降の点検方法・頻度に反映させることを求めるなど、事業者による保全の充実に促すとともに、その実施計画や実施状況を国が確認する仕組みを導入するものである。この運用には、日本電気協会の原子力規格委員会にて、JEAC4209-2007「原子力発電所の保守管理規程」およびJEAG4210-2007「原

発電所の保守管理指針」が制定され、運転管理に適用されるものとなった。特にその中の高経年化対策の部分は、日本原子力学会の標準 AESJ-SC-P005:2008「原子力発電所の高経年化対策実施基準：2008」にて定められる基準で運用される仕組みとなった。

配管の減肉管理は、その現象の特性から運転初期から管理が求められているものであり、特に高経年化対策として取り組むものではない。しかし、耐震安全性評価については、高経年化対策評価として配管の減肉に対する評価を求めている。

中越沖地震に伴い経年劣化が進んだ減肉配管の健全性評価が重要な課題となった。発電プラントには多くの配管があり、重要度の高いものから一般の配管まで、適切な手順で評価を行うための基準化が求められている。配管の劣化事象として減肉事象は重要な要素であり、早急に基準化に密接な連携が必要である。配管の設計においては、耐震設計評価は、日本電気協会のJEAG4601「原子力発電所の耐震設計技術指針」にて規定されており、その手順を適用している。基本的には運用後のプラントの配管の耐震評価においてもこの手法・手順を適用するとして評価を行なっている[2]。

本研究では、液滴衝撃エロージョンのメカニズムの究明と金属材料別のエロージョン速度の定量的評価、および発生防止や抑制に向けた検討を行った。

連絡先:奈良林 直、〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目、  
電話: 011-706-6682、tnaraba@eng.hokudai.ac.jp

## 2. 柏崎刈羽原子力発電所の地震被災時の減肉配管の微視的影響評価

本研究の目標は、原子炉用配管の従来の配管損傷事例を整理し、部分的な損傷や欠陥のある配管が万一、地震荷重を受けた場合にその影響が配管健全性に与える影響を最小限にするための技術開発をサポートするとともに、その成果を将来的に規格化につなげるための方法を策定することにある。日本機械学会や原子力学会などの学協会との連携を強化し、柏崎刈羽原子力発電所の耐震補強工事などの進捗を調査しながら、規格化を見据えた研究を推進している。

### 1) 配管設計に用いる地震動の指針を提案

#### a. 減衰率に対する考え方：

支持部の評価→解析に導入

実際の配管構造に基づき、モデル配管の形状、支持方法を設定。

#### b. 地震評価指標の提案

地震応答⇔配管機器に対する標準負荷波形の相関  
従来の「加速度応答評価」との比較

### 2) 配管設計に用いる尤度の考え方を提案

#### a. 材料損傷を確率事象として捉える手法

#### b. 従来の決定論的設計手法との比較

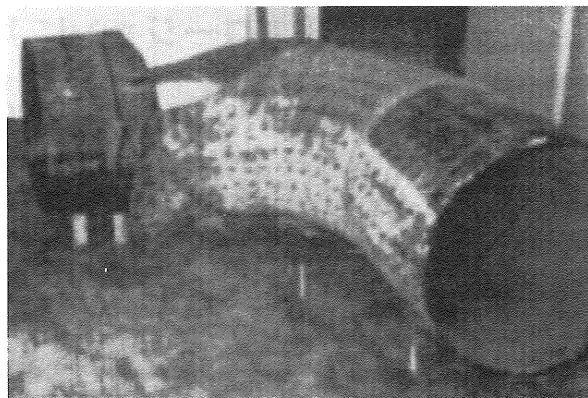
例えばLRFDの採用  
(Load & Resistance Factor Design)

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i S_{ni}$$

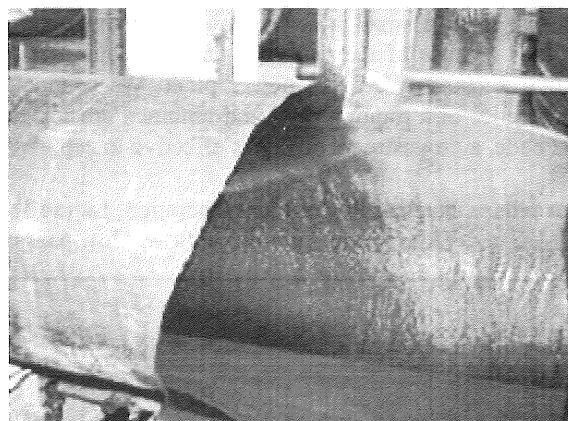
R:材料強度とS:荷重に  
安全係数を分配する手法

## 3. 原子炉用配管の従来の配管損傷事例調査

原子力用配管の従来の損傷事例としては、応力腐食割れ (SCC) や、Fig.1 に示す 1986 年の米サリー 2 号機や 2002 年の美浜 3 号で死傷事故が発生した流れ加速型腐食 (FAC)、および液滴衝撃 (LDI) エロージョンがある。Fig.2 は米国の PWR プラントで発生した低圧タービン抽気ラインの止め弁下流のエルボ部での液滴衝撃(LDI)エロージョンの事例である。FAC はオリフィス下流などの配管が広範囲に腐食減肉 (前面腐食) することが特徴で、主に PWR の給復水系の配管で発生する。習指導要領 (平成 24 年度全面実施) では、



(a) FAC Accident in Surry 2 (1986)



(b) FAC Accident in Mihama 3 (2002)

Fig.1 Typical Pipe Ruptures by Flow Accelerated Corrosion (FAC)

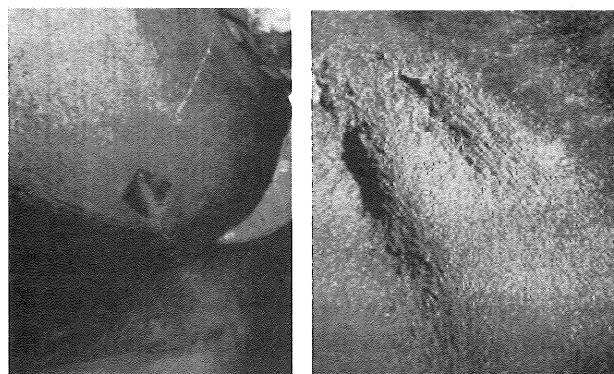


Fig.2 Typical LDI leak in a PWR in USA

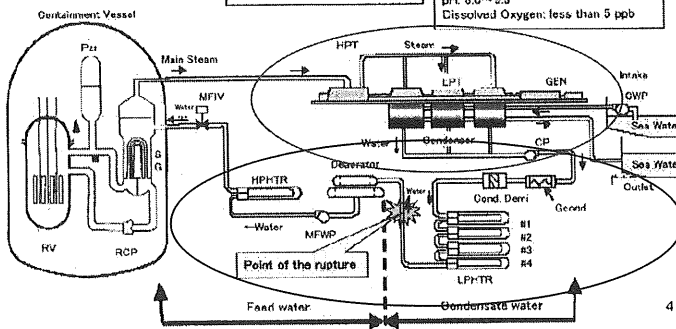
一方、液滴衝撃エロージョンは、PWR および BWR の主蒸気配管およびドレン管、タービンのクロスアラウンド管や抽気配管など液滴を含む蒸気が流れる配管系統で過去に発生しており、オリフィスの下流やエルボ部の背側に局所的に発生する。BWR では、原子炉内に設置された主蒸気乾燥器の高性能化による水分除去により湿度が 1.5%以下に管理されるようにな

って、その発生はドレン管などの小口径配管に限定されるようになった。ただし、微小リークであってもプラント停止に至ることがあるため、地震被災後の点検が必要である。発生箇所が限定されるため、点検の重点化が可能である。

PWR では、海外で主蒸気系およびタービン系抽気配管に液滴衝撃エロージョン(LDI)の発生事例が報告されている。

### Flow Diagram

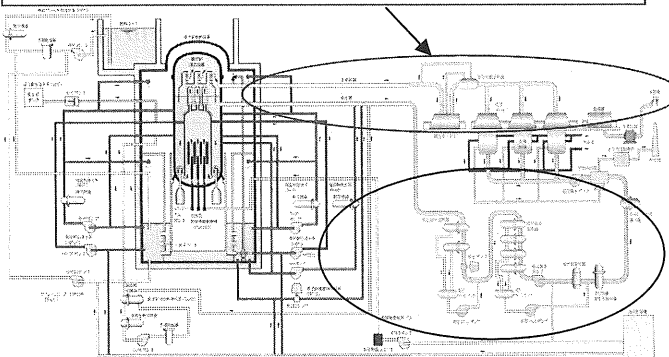
| Pipe Specs   | Operating Condition of the Pipe  |
|--|--|
| OD 568.8 mm<br>Thickness: 10 mm<br>Max. Design Press.: 13kg/cm <sup>2</sup> G<br>Max. Design Temp: 195 deg C<br>Material Carbon Steel (SB42) | Temp at normal Ope.: App. 140 deg C<br>Press at normal Ope.: App.0.93MPa<br>Flow rate: 1700m <sup>3</sup> /h/loop<br>Flow Speed: App. 2.2m/s<br>Operation time: App. 185,700 hrs<br>pH: 8.6~9.3<br>Dissolved Oxygen: less than 5 ppb |



PWR では、蒸気発生器(SG)の細管の健全性維持の観点から管板への腐食生成物の蓄積を防止するため、給復水の溶存酸素濃度を下げて強アルカリの水質にしているが、オリフィス下流などで、流れ加速型腐食(FAC)が発生しやすく、定期的な点検が必要である。

(a) PWR

BWR では、主蒸気系およびタービン系配管に過去に液滴衝撃エロージョン(LDI)が発生した。蒸気乾燥機の性能向上によって湿度を低下させてから大口径配管での発生はみられなくなったが、ドレン配管や抽気配管などの小口径配管で蒸気リークが近年も発生している。



BWR では、給復水系配管の水質は配管内面に酸化皮膜が維持・形成されるような溶存酸素濃度に管理されているため、一部の復水を水源とする溶存酸素濃度が低いCRDポンプの吸い込み側を除いて流れ加速型腐食(FAC)の発生事例は無い。

(b) BWR

Fig.3 Hazard map of pipe degradation

原子力発電プラントにおいては、系統配管の肉厚が時間の経過と共に徐々に減少する配管減肉現象が見られ、人災を伴う大規模破断に至る場合もあるため、プラント事業者としては定期的な配管肉厚測定や予防・保全対策を講ずることが必要である。

このため日本機械学会では2004年9月に減肉対応特別タスクを設置し、2005年3月には配管減肉管理を定める指針が満足すべき要件を規定した「発電用設備規格配管減肉管理に関する規格(JSME S CA1-2005)」を制定した。またその下部組織として、現象・データベース等の技術的検討を行う技術サブタスクを設置し、2005年9月に配管減肉管理に係わる技術的な参考事項の調査結果を規格 JSME S CA1-2005 としてとりまとめた。応力腐食割れ(SCC)き裂については、過去に膨大な研究が成され、日本機械学会発電用原子力設備規格等にまとめられている。配管減肉技術サブタスクでとりまとめた配管減肉管理指針を作成する際に配慮すべき現象はFACとLDIであるが、キャビテーションエロージョンについても過去に膨大な研究が成され、キャビテーション係数に基づくキャビテーション防止対策が確立されている。また、流れ加速型腐食(FAC)については、米国サリーおよび美浜において死傷事故が発生したことから、広範な研究が実施されている。このため、本研究では液滴衝撃エロージョンの規格化に注力することとし、SCCやFACについては他の研究成果を参考にして配管健全性維持評価を行うこととした。

## 4. 柏崎刈羽原子力発電所の耐震補強工事

平成21年3月に、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所の耐震補強工事を見学した。耐震補強工事は主に配管サポートを強化しており、熱膨張がある配管は、メカニカルスナッパ(制震装置)を取り付け、熱膨張を吸収しつつ、地震のように速い現象には、メカニカルスナッパ内部のドラムブレーキがボールネジを軸方向に移動する際の回転の遠心力により作動し、しっかりと配管をサポートする。配管のサポートとしてはFig.4に示すように、主蒸気逃がし安全弁の排気管にスナッパが多数取り付けられていた。その他、排気筒のサポート補強のオイルスナッパ(油圧制震器)や原子炉建屋の天井クレーンの走行レールの脱線防止金具などの耐震性向上対策が完了していた。

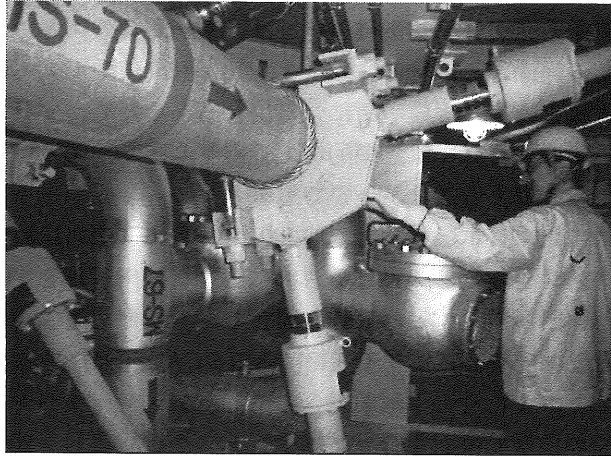


Fig.4 Pipe support by using mechanical sunubbers

## 5. 液滴衝撃エロージョン試験結果

Fig.5 に高速回転円盤を用いた液滴衝撃エロージョン試験装置の外観写真を示す。液滴衝撃エロージョンを発生させるためには、高速の液滴を目的の箇所へ長時間衝突させる必要がある。高速回転円盤の外周部に2つの試験片を取り付け、内径2mmφのノズルから落下する水流が液滴化する状況で、試験片が高速で横切り、試験片表面で液滴衝撃エロージョンが発生する。

Fig.6 にアルミ、真鍮、ステンレス (SUS304) の試験片を用いた試験結果を示す。減肉速度が測定可能な2mm/year以上でLDIによる配管減肉が生じているとした。高速回転円盤の周速度を変えて測定した結果をFig.7に示す。Sanchezの式からは液滴速度の5乗に比例すると予測されるが、ほぼ5乗の曲線にのっていることがわかる。

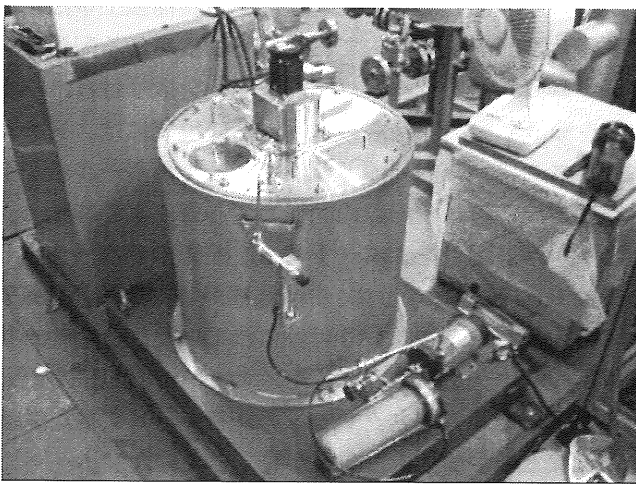


Fig.5 LDI test by using a high-speed rotating disc

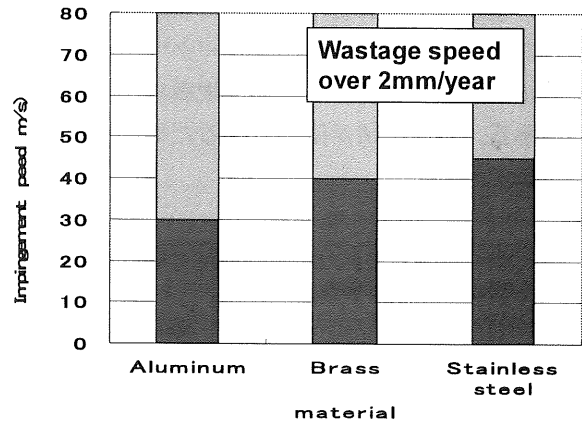


Fig.6 LDI Test results by using the high-speed rotating disc.

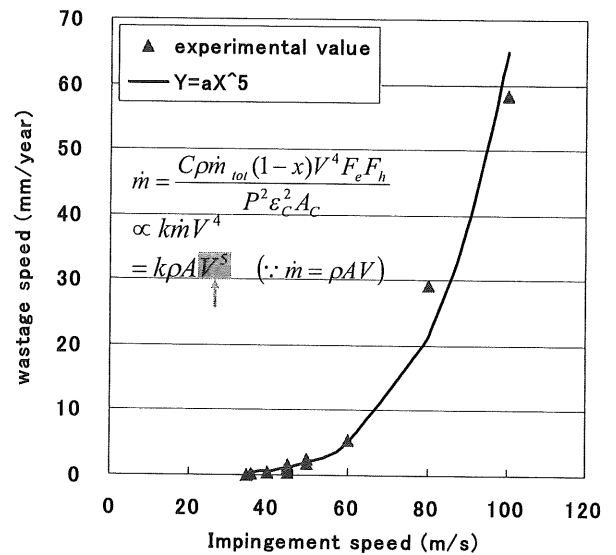
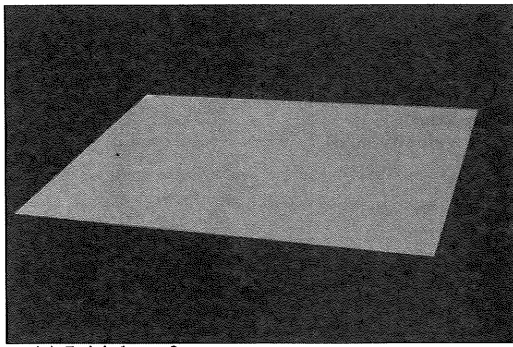
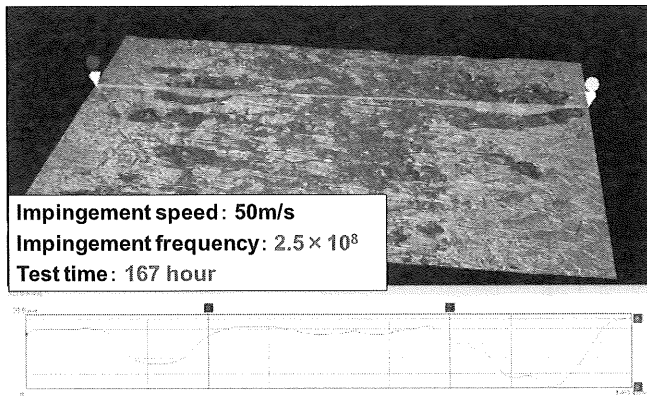


Fig.7 Wastage rate data for various speed of the disc

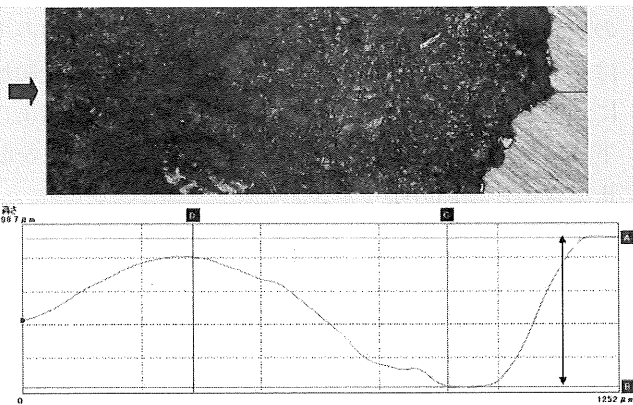
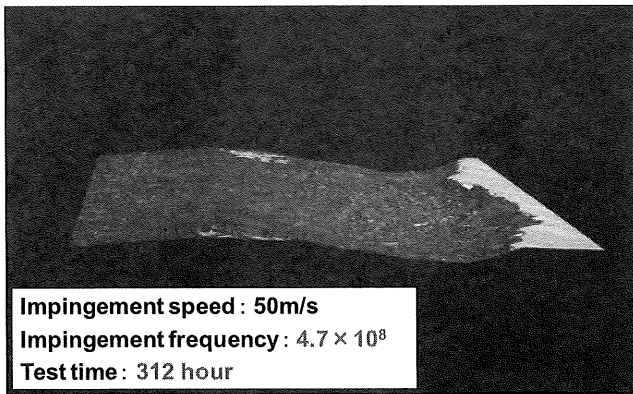
Fig.8 にデジタル顕微鏡で測定した LDI 発生部位の表面形状を示す写真である。(a)の平滑な金属表面は液滴1つずつの弾痕が付く訳ではなく、 $10^8$ 回程度の液滴の衝突による繰り返し応力が作用して、はじめて次第に表面があばた状になって、(b)のように表面剥離が発生して減肉が進行するようになることから、LDIは腐食ではなく、金属疲労が主要なメカニズムであると考えられる。(c)は50m/sの液滴衝撃速度で312時間後の試験片の表面形状である。ノズルからの落下水流の中心の液滴よりも水流の外側の液滴の方がエロージョン速度が大きく、W形の表面プロファイルとなっている。今後は、表面を加熱酸化した試験片を用いてデータを取り、腐食の影響などを明らかにする。



(a) Initial surface



(b) 167 hour with 50m/s disc speed



(c) 312 hours with 50m/s speed

Fig.8 Wastage surface results by digital microscope

## 5. TRACコードによる管内液滴流速評価

二流体モデルを用いた二相流解析が可能な原子炉過渡解析コード TRAC (Transient Reactor Analysis Code) を用いて主蒸気管に接続されたドレン配管内の蒸気および液滴の流速を解析した。オリフィスは、(a)柏崎1号の実機で配管からのリークが発生した当初の上流に5mmφの限流オリフィスを入れた場合と、(b)ドレン管の下流の復水器手前に入れた場合、および(c)恒久対策とした上流に加えて下流にも設置した場合の3ケースの解析を実施した。なお、配管形状は傾向を把握するために実機よりも簡略化して解析を行った。

析結果を Fig.10 に示すが、上流のオリフィスのみでは配管断面内の速度分布を仮定すると下流側のエルボでは液滴速度が 45m/s に達する箇所も出るが、オリフィスを下流のみ、もしくは、上流と下流の両方に設置した場合は、管内流速は低く抑えられてエロージョンは防止可能となる。このときの管内圧力分布を Fig.11 に示すが、下流側にオリフィスを設置することで、ドレン管内の蒸気圧力が高くなり、比体積が小さくなることから流速が低下する。

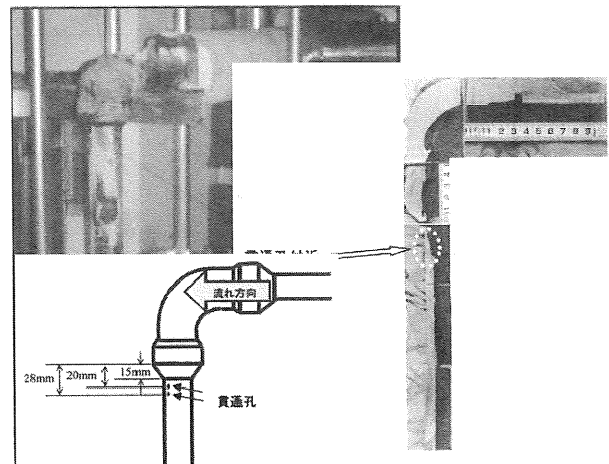
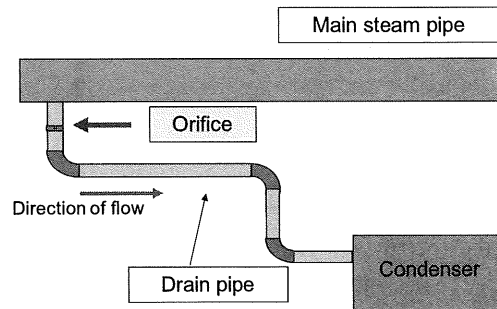
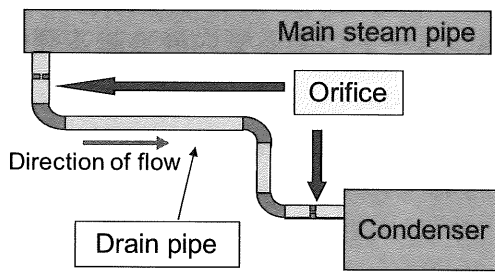


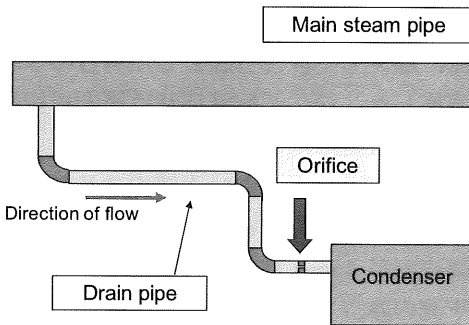
Fig.9 LDI leak from a drain pipe at KK-1 Plant



(a) Upstream Orifice Case

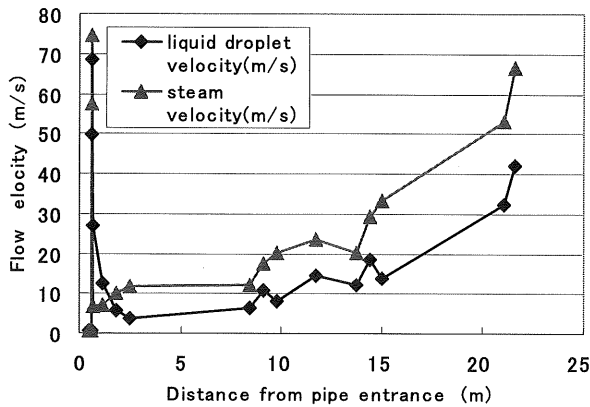


(b) Downstream Orifice Case

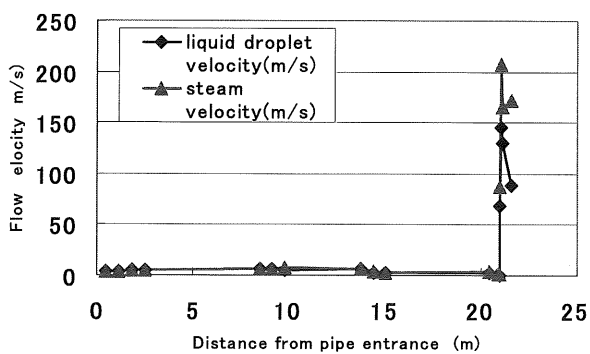


(c) Upstream and Downstream Case

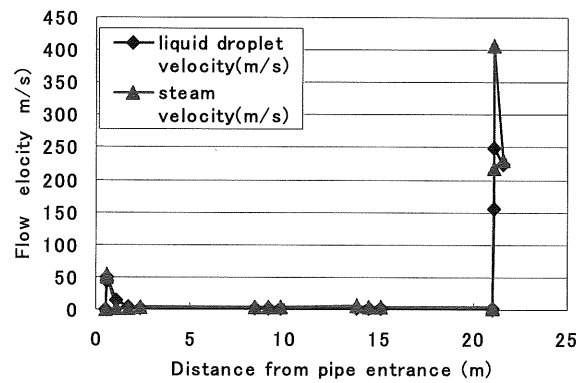
Fig.10 TRAC analysis model for Orifice effect



(a) Analytical result for upstream orifice case



(b) Analytical result for upstream orifice case



(c) Analytical result for upstream and downstream orifices

Fig.11 TRAC analytical results of orifice effect

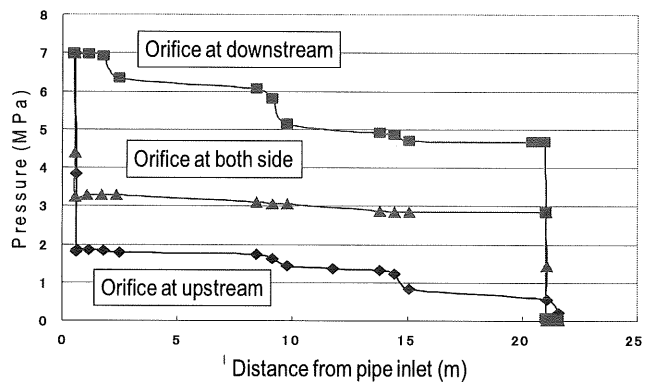


Fig.12 Pressure distribution for orifice position

## 5. 結言

本研究では、液滴衝撃エロージョンのメカニズムの究明と金属材料別のエロージョン速度の定量的評価、および発生防止や抑制に向けた検討を行った。

速回転円盤を用いた液滴衝撃エロージョン試験の結果、減肉速度が液滴速度の5乗に比例することが分かった。TRACコードを用いたドレン配管内の蒸気中の液滴速度を解析した結果、上流のオリフィスのみでは、ドレン配管内の流速がエロージョン発生可能領域に到達する可能性があるが、下流あるいは上流および下流にオリフィスを設置することでエロージョンを防止できることが分かった。

## 参考文献

- [1] 森田、奈良林、JSME 講習会「配管減肉管理に関する性能規定化規格と技術的知見」(2006)。
- [2] 宮野廣「高経年化プラントにおける配管減肉」、平成21年度高経年化対策強化基盤整備事業方針、(2009)。