

# 蒸気ドレン排除の改善による原子力発電所の蒸気システムの信頼性向上

Effective technology of preventive measures against piping damage on steam lines  
in nuclear power plants.

(株)ティエルブイ 高田 敏則 ・ 森井 高之 (非会員)  
TLV CO.,LTD., Toshinori TAKATA, Takayuki MORII, Nonmember

Nuclear power plants are required to have especially high reliability and increasingly longer service life. As a contribution to the solution of these issues, troubles unique to nuclear power plants caused by two-phase flow of steam/condensate were identified through analysis from a new perspective on problem areas and causes focusing on the steam field using a database that tracks troubles at nuclear power plants. Additionally, useful technology for prevention against the effects of these troubles that occur in steam/condensate piping, such as erosion-induced pipe wall thinning and potential water hammer, are reported under the categories of 1) steam lines, 2) condensate lines, 3) measurement, inspection or monitoring of equipment or piping.

**Key Words:** Nucia, Pipe wall Thinning, LDI, Water hammer, Steam trap

## 1. はじめに

原子力発電所は定修サイクルの延長、定修期間の短縮化、プラントの延命化などが課題とされている。この課題達成のためにはプラントの信頼性向上が不可欠であり、本稿は(社)日本機械学会の第15回動力・エネルギー技術シンポジウムで発表された内容<sup>(1)</sup>で、改めて原子力発電所の蒸気配管におけるトラッピング・エンジニアリングの改善による蒸気システムの安全性・信頼性の向上について報告する。

## 2. 日本原子力技術協会とニューシア

原子力発電所の安定・安全運転に寄与すべく、ニューシアに登録されている3,300件以上のトラブル情報の内、特に蒸気分野から見た原子力発電所のトラブル事象の発生部位やその原因を調査分析した。以下、その結果とともに対策として有用な最新の蒸気利用技術を報告する。

### 2.1 蒸気分野におけるトラブル事象の発生部位

ニューシアのトラブル情報総件数3,307件(2010年2月末現在)の内、今回のテーマである蒸気分野は234件と全体の約7%(図1)を占めている。そして制御関連が約11%、操作関連：約8%、電気関連：約7%、その他不明を含め約63%と推定している。これらは国への報告義務のある法令義務事象と共にそれ以外の比較的軽微の事象も含んでいる。

連絡先：高田敏則，〒675-8511 兵庫県加古川市野口町長砂 881，株式会社ティエルブイ，電話：079-422-8833，E-mail:ccc@tlv.com

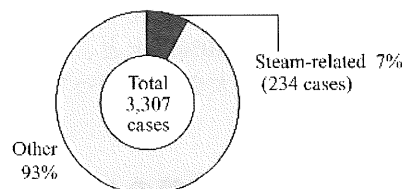


Fig.1 Breakdown of NUCIA steam-related information

蒸気分野で最も多いトラブル発生部位は図2に示すように『配管』である。それは蒸気分野の総件数234件中68件、その比率は29%である。それは配管曲り部やバルブ・オリフィス後の乱流が発生し易い箇所の穴あき事象であった。その他蒸気発生器チューブの破断による蒸気発生器内部の水漏れ、自動弁の作動不適や本体・接続部からの内部流体の外部漏れ、安全弁の内部漏れによる二次側配管温度の上昇による警報発信等が多い。

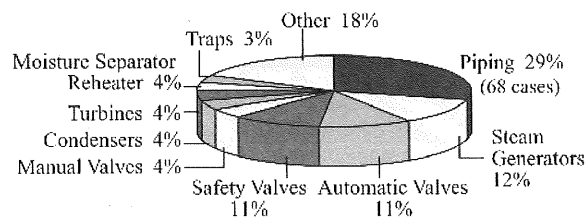


Fig.2 Locations having steam-related troubles (234 cases)

更に配管事象を蒸気・ドレン・給水の各系統に細分した結果を図3に示す。それは「蒸気配管」41%・「ドレン配管」40%・「給水配管」15%、そして「エアベント配管」4%となっている。

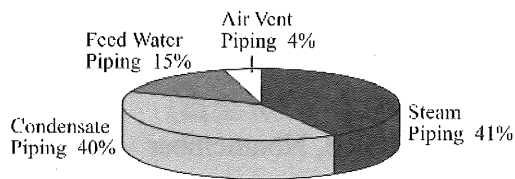


Fig.3 Detail of piping-related troubles (68 cases)

蒸気配管とは蒸気発生元から蒸気タービン入口までとタービン抽気ラインを言う。また、各蒸気関連機器から復水器へのラインと復水器から脱気器までをドレン配管とし、脱気器から蒸気発生元までを給水配管としている。

その結果、蒸気配管では湿分分離加熱器周りやタービン抽気ラインの比較的ドレンが多く混在する二相流領域における事象が多く、またドレン配管ではオリフィスによるドレン排除ラインや高温・高圧ドレンの復水器直前の負圧域、すなわちドレンのフラッシング部における事象が多い。すなわち蒸気とドレンが混在する二相流領域でのトラブル発生比率が80%以上と、給水・飽和蒸気の単相流域のそれを大きく上回っていることが明らかになった。

## 2.2 蒸気・ドレン配管のトラブル現象

蒸気やドレン配管のトラブル現象の多くは配管減肉による穴あき、配管ガスケット損傷や配管亀裂・破断による部位からの蒸気やドレンの外部漏れが54件(79%)を占めている(図4)。外部漏れに至っていない定期メンテナンスで発見された配管減肉の進行が26件(38%)となっている。なお、これらは複数の現象がある場合は重複してカウントしている。

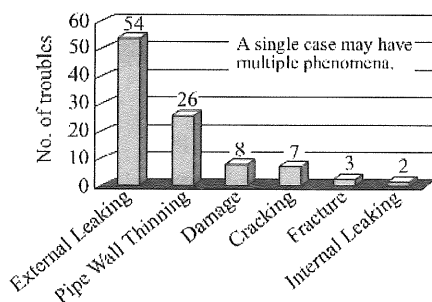


Fig.4 Piping-related troubles (68 cases) by type of phenomena

## 2.3 蒸気・ドレン配管のトラブル発生原因

蒸気配管やドレン配管の減肉・穴あきは、二相流、特に湿度の高いラインでの液滴衝撃エロージョン(Liquid droplet impingement erosion:LDI)<sup>(1)</sup>

~<sup>(5)</sup>によるものが多い(図5、27件)。それには蒸気供給系のドレン排除不足に起因するものとドレン配管中の高圧ドレンのフラッシングによるものの2種に大別できる。次いで、熱サイクルや振動による疲労損傷(10件)やウォーターハンマー(4件)となっている。なお、図4は配管トラブル(68件)中、明らかな人的要因事象(13件)を除いた55件の原因分析グラフであり、複数の現象は重複カウントしている。

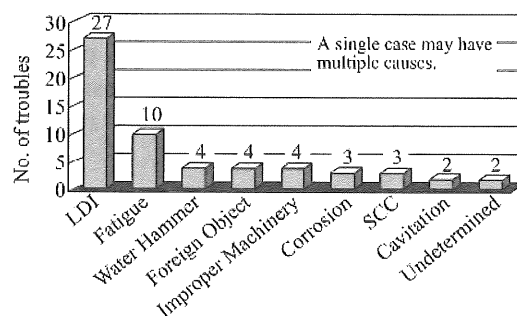


Fig.5 Piping-related troubles (55 cases) by type of cause ①

ウォーターハンマー事象は後述(節4.)するが、LDIと同様に蒸気の急凝縮、あるいはドレンの運動エネルギーによって生じた衝撃力による損傷であり、キャビテーションエロージョンを含めて『衝撃』による損傷と原因区分できる。一方、給水系に見られる流れ加速型腐食(Flow-accelerated corrosion:FAC)の原因を『流れ』による損傷と定義し、流れの少ない静的な『腐食』と区分する。そして熱サイクルや機械的振動による『疲労』、ステンレス鋼でよく観られる応力腐食割れ『Stress Corrosion Cracking:SCC』に区分できる。これらの原因を整理すると図6の割合となった。

これはFACの大口徑配管の破断など広範囲にわたる全面損傷に対し、LDIの部分的・局部的損傷である穴あき、そこからの蒸気・ドレン漏れであり、比較的軽微な事象として扱われがちであるが、その発生件数は配管トラブルの半数以上(51%)を占めていた。

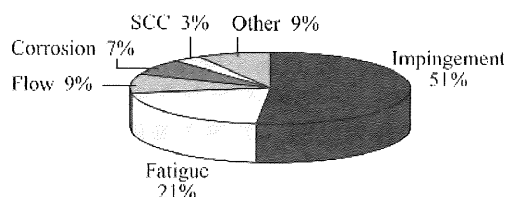


Fig.6 Piping-related troubles (55 cases) by type of cause ②

### 3. 蒸気・ドレン配管のLDI 事象

(財)電気中央研究所で『液滴衝撃エロージョンに関わる流動特性の解明』研究を長年行っている。その研究報告書によると、LDI 要因となる液滴流速・湿り度・衝突割合などと減肉との定量的な推定とともに減肉箇所をも特定することも今や可能となり、現在その評価システムの検証段階にある。(2)~(6)。

この理論解析および実証実験から、液滴衝撃による配管減肉速度は、疲労やFACのように比較的長時間での進行に対し、数時間から数十時間のオーダーで金属部を損傷させるとしている<sup>(6)</sup>。

### 4. 蒸気・ドレン配管のウォーターハンマー事象

ニューシアは顕在化したトラブルのデータベースであるが、各原子力発電所の現場ではトラブルの報告までには至らない事象も多々あり、蒸気システムに関する個別相談や現場の診断依頼などに基き独自に改善を進めている事例も多い。

例えば、ある原子力発電所のハウスボイラ系の蒸気配管では頻繁なウォーターハンマーが発生し、また別の発電所でも空調機器内のドレン滞留やドレン配管等の複数個所で常時、ウォーターハンマーが発生している。

原子力発電所の蒸気は火力発電所とは異なり、蒸気の過熱度(乾き度)が低いため、蒸気中からドレンを確実に排出する事が極めて重要である。しかし、ドレン排出のための機器・配管が小スペース内に収められている等の理由から、ドレン排出の機能が十分に発揮されず、ドレン排出を阻害したり、逆に蒸気漏れを起こしている例がよく見られる。その結果、ドレンの滞留やドレン配管への蒸気の流出が起こり、それらが原因となって蒸気・ドレン配管のLDIやウォーターハンマーを発生させている。

以下にこのLDIとウォーターハンマー対策ならびに配管・機器の計測/点検・監視の技術について報告する。

### 5. 原子力発電所に応用できる改善技術<sup>(7)</sup>

蒸気・ドレン配管でのLDIによる減肉ならびにウォーターハンマーの対策としてこれまでに効果を上げている改善技術をあげる。

#### 5.1 蒸気配管におけるLDIとウォーターハンマー対策

##### ①蒸気配管中のドレン分離の技術

##### ②蒸気配管中からのドレン連続排出の技術

#### 5.2 ドレン配管におけるLDIとウォーターハンマー対策

##### ①ドレン配管へ蒸気を漏らすことなく、ドレンを連続排出する技術

#### 5.3 計測/点検・監視

##### ①ドレン排出箇所の遠隔常時監視の技術

##### ②配管減肉箇所のスクリーニング技術

### 6. 対策技術の内容

#### 6.1 蒸気配管におけるLDIとウォーターハンマー対策

##### ①蒸気配管中のドレン分離の技術

これまでの原子力発電所の蒸気配管のドレン取り出し部は、一般に図7の通りで、大口径の蒸気配管の底部に小口径のドレンを取り出すためのドレン抜き配管が施工されているだけである。

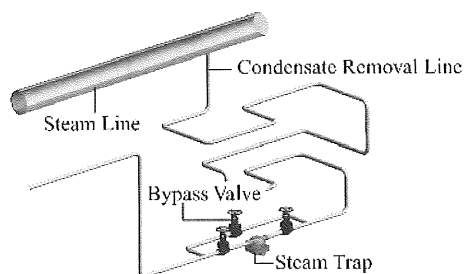


Fig.7 Condensate removal from steam piping (before improvement)

このような状態では、20~30m/sの高速で流れる蒸気配管の底部からごく僅かなドレンが小口径のドレン取り出し配管中に流れ込むだけで、大半のドレンはそのまま蒸気配管中を通過し排除されない。またドレン取り出し配管の口径が小さいため、この配管内でドレンと蒸気の置換がスムーズに行われず、スチームトラップの手前で蒸気がロックされた状態が発生し、その結果ドレンが蒸気配管まで滞留する。更に、スチームトラップの設置場所の制約上の理由から、ドレン抜き配管が図のように非常に長いケースも多く、逆勾配の施工になっている場合も見られる。これらによって、蒸気配管から分離・排出されなかったドレンが残留し、蒸気乾き度の低下や配管減肉、ウォーターハンマー発生の原因になる。

最新の蒸気配管中のドレンの分離技術は、図8のようなサイクロン式セパレーターを使用す

るのが理想で、連続排出型のスチームトラップとの相乗効果によって 98% のドレンが強制的に分離・排除されることが実験で確認されている。

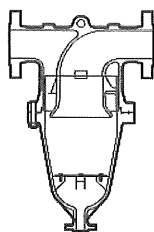


Fig.8 Cyclone-type Separator

このようなセパレーターが使用できないケースは、図 9 のように蒸気配管にドレンポットを設けることが望ましく、この方式でもかなりのドレンを分離できることが実験で確認されている。

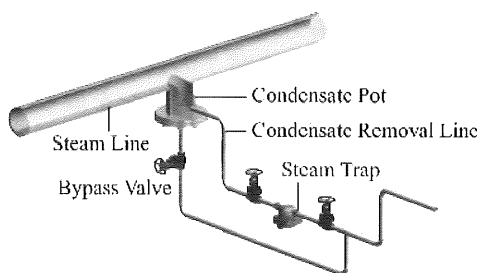


Fig.9 Condensate removal from steam line (after improvement)

但し、ドレンポットからスチームトラップまでのドレン抜き配管はドレン量に対して適正な口径で、短く、そしてスチームトラップに対して下り勾配に施工しなければならない。

## ②蒸気配管中からのドレン連続排出の技術

蒸気配管内には原子炉や蒸気発生器からキャリーオーバーした給水や蒸気配管の放熱によって生じたドレンが常に存在しており、これを排出するためにスチームトラップが設置される。

スチームトラップにはその作動原理上からドレンを間欠的に排出するものと連続的に排出する二種類があり、発電所では間欠排出型のものが使用されているケースも多い。このような場合には、図 10 のように閉弁中にドレンが滞留し、蒸気配管までオーバーフローし、ドレンの滞留ならびにウォーターハンマー発生の危険性がある。

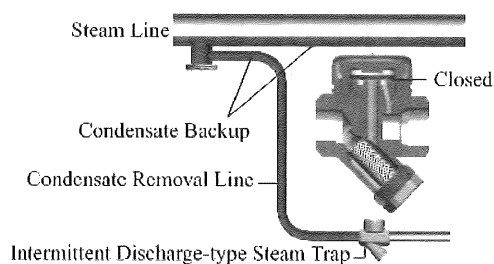


Fig.10 Condensate backup in intermittent discharge-type steam traps

従って、ドレンを滞留させないためには、連続排出型でしかも作動時に蒸気漏れがないスチームトラップが理想であり、作動原理に蒸気とドレンとの比重量の差を利用し、かつドレン量に応じて連続的に弁口の開度を調整する機構を持った図 11 のようなフロート式スチームトラップが適している。

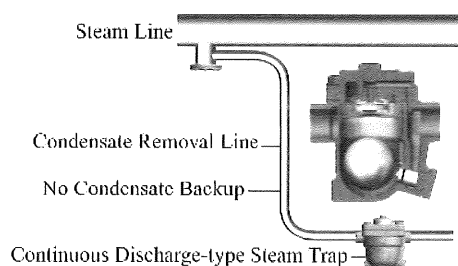


Fig.11 Continuous discharge-type steam trap

## 6.2 ドレン配管における LDI とウォーターハンマー対策

### ①ドレン配管へ蒸気を漏らすことなく、ドレンを連続排出する技術

ドレン水滴による配管減肉は、ドレン水滴の流速・大きさが影響する。従って、図 12 のように間欠排出型のスチームトラップからドレンを間欠的に排出することは配管減肉を促進し、また間欠作動による脈動ならびに再蒸発蒸気とドレンとの混合による蒸気の急凝縮はドレン配管内でのウォーターハンマー発生の要因となる。(図 13)

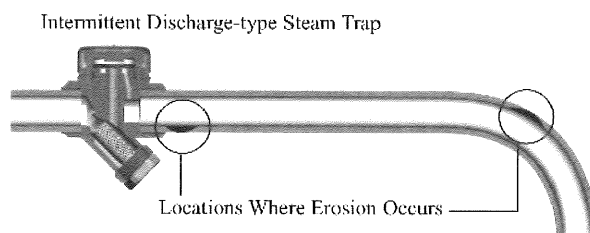


Fig.12 Progression of pipe wall thinning due to intermittent operation

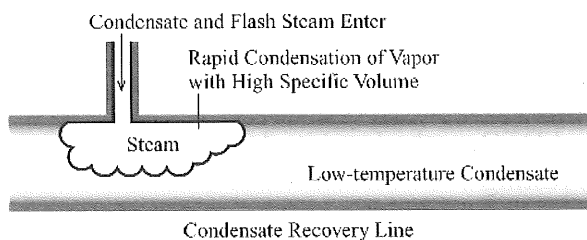


Fig.13 Cause of water hammer

一方、ドレンを連続して排出することで、ドレン回収配管内はドレンと再蒸発蒸気との安定した二相流が形成され、ドレン水滴による配管エロージョンが著しく軽減されるとともにウォーターハンマー防止に繋がる。

### 6.3 計測/点検・監視

#### ① ドレン排出箇所の遠隔常時監視の技術

ドレン排出箇所では、確実なドレン排除とともに蒸気を漏らさないことが長期間維持されなければならない。しかし、ドレン排出のために用いられるスチームトラップは使用年数と共に劣化し、ついには寿命となる。

従って、スチームトラップがその機能を維持できているか、またどれだけ劣化が進行しているかを管理するためには、定期的な診断が不可欠である。

最新のスチームトラップの診断技術は、スチームトラップから発せられる超音波と表面温度によって、作動の良否の自動判定をするとともに蒸気漏洩量も推定することができる。図 14 はこの技術を使って、スチームトラップの機能を遠隔で常時監視している石油精製プラントの事例である。

#### ② 配管減肉の常時監視やスクリーニングの技術

これまでの配管の肉厚測定に用いられてきた UT(超音波探傷検査)はバルク波で、狭い範囲内での直進性は高いが、減衰が大きいいため長い配管には適さなかった。

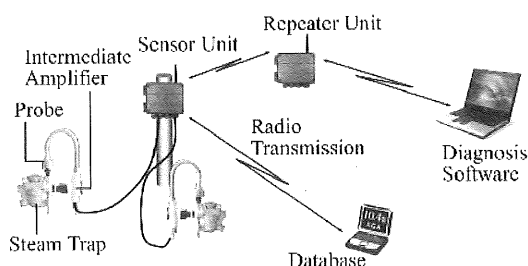


Fig.14 Remote-controlled constant steam trap monitoring system

最新の診断技術では、パルス渦流やガイド波を利用し減肉箇所の常時監視や定検時にスクリーニングを行うことができ、既に一部の産業界で活用されている。

### 7. おわりに

原子力発電所は、安全・信頼性確保を前提に既設プラントの最大活用とともに、地球温暖化対策として世界的にも新規の原子力発電所の必要性は高まっている。

今回発表した蒸気・ドレン配管の LDI やウォーターハンマー対策の諸技術は、既設・新設の原子力発電所の信頼性向上と長寿命化に大きく貢献できるものであり、今後もこれらの技術の開発・向上に取り組んでいく必要がある。

#### 参考文献

- (1) 有富正憲 他、「原子力発電所の蒸気系配管損傷に対する効果的な予防対策技術」、(社)日本機械学会、第 15 回動力・エネルギー技術シンポジウム(2010.6)
- (2) 森田良、「液滴衝撃エロージョンに関わる流動特性の解明(その 1)」、電力中央研究所 報告書番号:L06008 (2007.6).
- (3) 森田良、「液滴衝撃エロージョンに関わる流動特性の解明(その 2)」、電力中央研究所 報告書番号:L07016 (2008.6).
- (4) 森田良、「液滴衝撃エロージョン評価システムの構築」、電力中央研究所 報告書番号:L07017 (2008.6).
- (5) 森田良、「液滴衝撃エロージョン評価システムの実用性の向上」、電力中央研究所 報告書番号:L08019 (2009.7).
- (6) 稲田文夫、「寿命予測を活用したプラント配管減肉管理の現状と改善への取り組み」、日本機械学会誌, Vol. 113, No.1094 (2010) pp.39-42.
- (7) 藤井照重監修、「トラッピング・エンジニアリング」、(財)省エネルギーセンター (2005.7).