

# 海外原子力発電所における 2 次系配管減肉不具合の発生状況

## Situation of Secondary System Piping Wearing in Overseas Nuclear Power Plants

千葉 吾郎 (Goro Chiba)\*

**要約** 平成16年8月に発生した関西電力(株)美浜発電所3号機の2次系配管破損事故に鑑み、国内外の配管減肉管理手法の調査を行うとともに、(株)原子力安全システム研究所 (INSS) で入手している過去の海外における2次系配管減肉事象の発生状況を分析することにより、国内の管理手法の有効性を検証することとした。その結果、米国では2次系配管の減肉の報告件数ならびに貫通に到った事象件数が国内と比較して多く、昨今でも継続的に発生していることがわかった。

**キーワード** PWR, 2次系配管, エロージョン/コロージョン, 流れ加速腐食, 減肉

**Abstract** In consideration of secondary system piping rupture accident at Mihama Nuclear Power Station Unit 3 of Kansai Electric Power Company in August 2004, the management system of secondary pipe wall thickness of Japan and foreign countries were investigated. Moreover, the tendency of the secondary piping thinning events on overseas which the Institute of Nuclear Safety System, Inc. (INSS) obtained was analyzed in order to verify the validity of the Japanese management system. Consequently, it was shown that in the U.S., the fault phenomenon of secondary system piping was reported continuously, and there were also many cases of both degradation and penetration of pipe wall.

**Keywords** PWR, secondary piping, erosion/corrosion, flow accelerated corrosion, thinning

### 1. はじめに

平成16年8月、関西電力(株)美浜発電所3号機において2次系配管が破損し、高温水が流出し原子炉が自動停止した。破損箇所は復水系配管の流量計測用オリフィスの下流近傍であり、事故によりタービン建屋にいた作業員11名が死傷した。配管破損の原因は、いわゆるエロージョン/コロージョンにより配管が減肉した結果強度が不足し、運転時の荷重により破損したものとされている<sup>(1)</sup>。

いわゆるエロージョン/コロージョンとは、減肉への物理的な力の寄与は著しく小さいが、流体に接する金属表面が溶出する腐食現象が流れにより加速される状態を示し<sup>(2)</sup>、海外ではFAC (flow accelerated corrosion, 流れ加速腐食) とも呼ばれている<sup>(3)</sup>。

国内でPWRを保有する電力会社では、「原子力設備2次系配管肉厚の管理指針 (PWR)」(以下、管理指針)<sup>(1)</sup> を定め、これに基づき2次系炭素鋼配管の肉厚管理を実施してきたが、美浜発電所3号機において当該部位が当初の管理リストから欠落し、その

後修正できなかった保守管理の不適切がこの事故の直接的な原因であるとされている。

原子力安全委員会は、原因究明に当たっては管理指針自体の妥当性の確認が重要であるとし<sup>(4)</sup>、国は、管理指針の初期減肉率、点検対象、点検頻度について実測データに基づき分析し、管理指針の妥当性の確認と、検討課題の抽出を行った。本稿では管理指針の実質的な有効性を確認するため、配管減肉管理手法について、国内外の配管減肉管理状況を調査した。また、原子力安全システム研究所 (以下 INSS という) のデータベースをもとに、入手している過去の海外における2次系配管減肉事象の発生状況を分析し、国内の配管肉厚管理手法の有効性を検証した。

### 2. 米国の配管減肉事象の発生状況

EPRI (Electric Power Research Institute) は、米国の軽水型原子力発電所 (軽水炉) における1次系と2次系を含む配管の損傷事象 (1961~1997) を調査し、その結果を原因別に分類して報告している<sup>(5)</sup>。

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

この調査結果に基づいて整理したものを図1に示す。

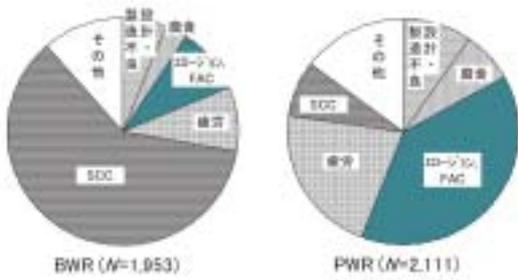


図1 米国の軽水炉配管損傷発生状況<sup>(5)</sup>

BWRにおいては「SCC」が総件数の半数以上を占めているのに対し、PWRでは「エロージョン、FAC」がもっとも多く、次に「疲労」による損傷が多く発生している。また、調査の対象とした軽水炉の延べ数は、BWRとPWRとでおよそ1:2であるが、それを考慮してもPWRの方が「エロージョン、FAC」が発生しやすいという結果になっており、材料の変更や溶存酸素を含む水質管理を行っているBWRの方がFACが起こりにくいことを裏付けている。

米国では1986年12月のSurry 2号機給水管破断事故の後、各電力はFAC監視プログラムを設定し運用している<sup>(6)</sup>。PWRとBWRのFACの発生件数を年度毎にそれぞれ折れ線グラフにして、図2に示す。

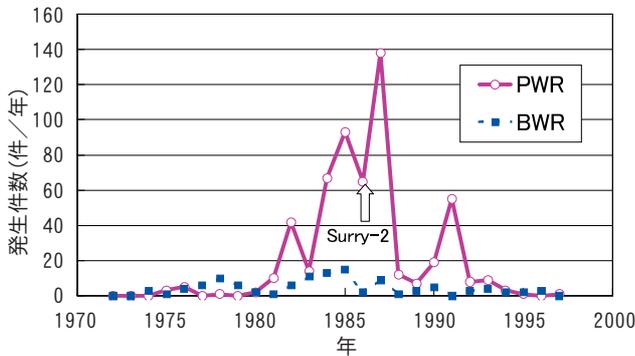


図2 米国における軽水炉2次系配管FACの年度毎発生状況<sup>(5)</sup>

特にPWRについて、Surry 2号機の事故以降、FACに関して効果的な対策がとられていることが発生件数からわかる。なお、1991年頃にFAC発生のおこしいピークがあるが、米国の減肉管理手法が任意の発電所における不具合を水平展開するシステムになっているため、一時的に報告が集中したものと考えられる。

### 3. 米,独,仏,露における配管減肉管理プログラムと我が国の状況

次に、各国における配管減肉管理プログラムの状況について表1に示す。

米国では、現在、EPRIが開発したCHECWORKSが使用され、ドイツではフラマトムのCOMSY、フランスではEDFのBRT-CICEROがPWR各電力に採用されている<sup>(3)</sup>。

それぞれに特徴があり、米国では、減肉予想に統計手法を適用しているとともに、実測データを入力することにより精度の向上を図っている。ドイツでは各パラメータを入力し、シミュレーションソフトで減肉評価を行っている。フランスにおいても、シミュレーションにより減肉評価を行っているが、全プラントへの適用は2001年と遅く、一方で、発電所においては1990年頃に計画的に大規模な配管取替えが行われている。ロシアは、適用範囲を広げたソフトを開発中である。

日本を除く各国が、実プラントや実験室で得た減肉データに基づき、当該ユニットの減肉予想をソフトウェアで計算して取替え箇所を決定しているのに対し、日本は、1990年に肉厚管理指針をPWR共通で作成し、自機の当該部位に対する肉厚の実測値に基づく減肉速度から余寿命を計算しているところに諸外国との大きな違いがある。

表1 米,独,仏,露の2次系配管減肉管理プログラムと我が国の管理指針

国名	ソフトウェア	年	内容
米国	CHEC	1989	減肉予想
	CHECWORKS	1995	実測値入力で精度向上, 点検計画策定等
ドイツ	WATHEC	1988	エロージョンも含み減肉予想
	COMSY	1998	点検計画策定等
フランス	BRT-CICERO	1994	PWRのFACをシミュレーション計算, 補修計画策定等
ロシア	TRIP-02	2002	単相FACの減肉予想
日本	[肉厚管理指針]	1990	対象部位, 点検頻度等を想定
	NIPS(KEPCO)	1996	検査データ管理, 点検計画策定等

### 4. 分析結果と考察

#### 4.1 海外における2次系減肉の発生状況

INSSでは、海外の不具合情報を分析し、PWRを保有する電力会社に対して提言活動を行っており<sup>(7)</sup>,

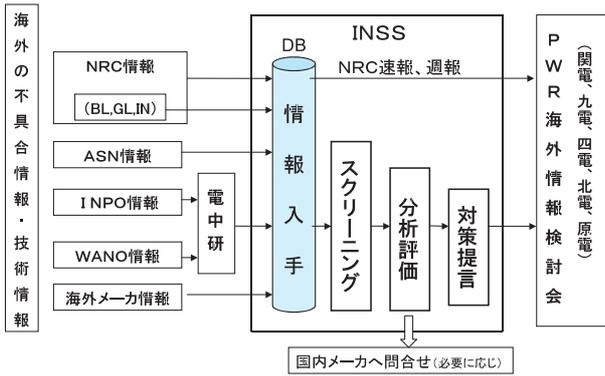


図3 INSSにおける海外情報分析の流れ

その流れを図3に示す。

今回の分析に使用したデータベース (DB) には、米国の原子力規制委員会 (NRC) と、原子力発電運転協会 (INPO)、世界原子力発電事業者協会 (WANO) などから入手した情報を蓄積している。このDBには、2004年1年間で約2,800件の情報を入力している。DBの不具合情報は米国が中心であるが、ドイツ、フランスではFACプログラム導入以降の配管損傷はほとんど発生していない<sup>(8)(9)</sup>。

INSSのDBから給水系、主蒸気系、復水系、抽気系、ドレン系、グランド蒸気系、SGブローダウン系の減肉に関する事象を抽出し、2003年度までの発生件数を整理した。その結果を図4に示す。

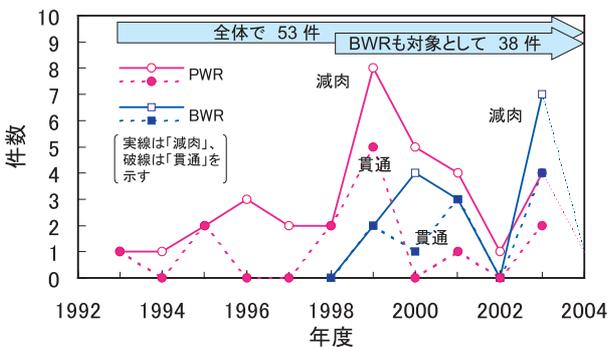


図4 年度毎の海外の軽水炉2次系配管減肉発生件数

INSSで分析を開始したのは1993年で、当初PWRのみ扱っていたが、1998年からBWRの不具合も取り扱うこととした。その結果、抽出された配管減肉不具合は全体で53件で、BWRも併せて検討をし始めてからは38件抽出された。

各年度における減肉発生件数は、10件以内で推移しているが、貫通に到った件数が約半数を占めている。

次に、減肉発生部位を系統毎に整理し、図5に示す。抽出された53件を系統毎に分類し、棒グラフは

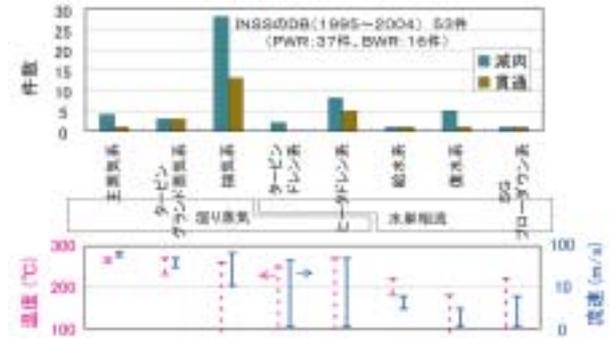


図5 海外の軽水炉2次系配管減肉の発生した系統

系統毎の減肉件数と、そのうち貫通した件数を並べて示した。調査した結果から、多くの系統で減肉が報告されており、特に抽気系統で減肉が多く報告されていることがわかる。抽気系統は、1999年頃を中心に給水加熱器の減肉が多く報告されたことと、流体の条件が多岐にわたっているため、想定外の減肉等の報告が多くなされてきたことによるものと考えられる。

Virginia Power社のSurry 1/2号, North Anna 1/2号の4ユニットにおける年度毎の減肉補修状況を図6に示す<sup>(10)</sup>。Surry 2号機の事故後の2年間は、点検結果を基に取替えられた配管が多くあったが、その後はほとんどの配管が計画的に取替えられている。

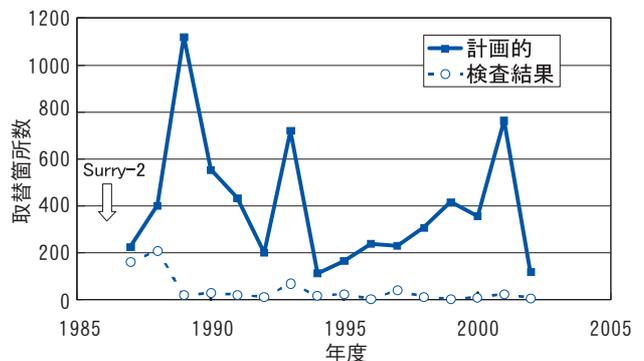


図6 海外の軽水炉における2次系配管取替の例(4ユニット分)

取替え箇所の累計は4ユニット全体で約6,000箇所、1ユニットあたり1,500箇所程度となる。これは、美浜3号機でステンレス鋼や低合金鋼等に取り替えられた箇所数約1,600と同程度である。

## 4.2 2次系減肉管理手法の国内外比較

図7に、日米で報告された減肉事象を時系列的に比較する。NRCが発行したInformation Notice 2001-

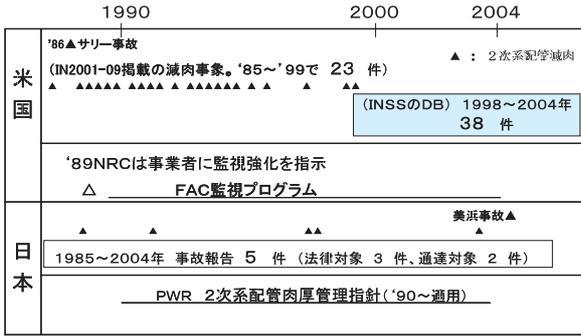


図7 軽水炉 2次系配管減肉発生の日米比較

09によると、1985年から1999年で23件あり、また、INSSのDBから抽出した件数が1998年から2004年までで38件あり、1985年から2004年までに61件の減肉事象が発生している。一方、国内で1985年から2004年までに報告された減肉事象は5件のみであり、米国と比較して極めて少ない。

日米の減肉管理手法の比較を図8に示す。

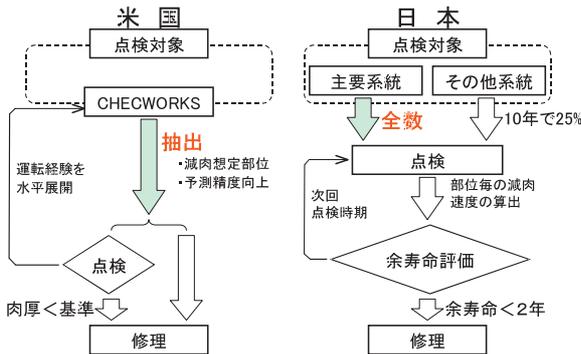


図8 軽水炉 2次系配管減肉管理手法の日米比較

米国NRCは、10CFR50.65（原子力発電所の保守有効性の監視要件）でFAC監視プログラムの実施を事業者者に要求し、IP 49001（FAC監視プログラムの検査手順）等により活動状況を継続して監視している。

各事業者はEPRI/NSAC-202L-R2（FAC監視プログラムに関する勧告）に基づきFAC監視プログラムを設定し<sup>(1)</sup>、検査部位の抽出、検査の実施、監視及び傾向分析を行うとともに、検査の結果によりASMEコードに従って補修・交換時期を決定する。現在、全米の原子力発電所でEPRIのCHECWORKSソフトウェアが導入されており、材料、流況、水化学、減肉速度、超音波探傷データから解析を行い、配管の減肉状況を予測し、次回の交換・点検部位を決定している。

一方、国内の管理指針では、炭素鋼配管に関して湿度、流速、温度等の条件から「主要系統」とさ

れた部位は、その全数について点検時期を計算し、点検結果により部位毎の減肉速度と余寿命を算出し、次の点検時期の決定または修理が行われる。

対象としている系統は日米で大きな違いは認められず、米国ではCHECWORKSが抽出した部位を点検・修理しているのに対し、国内では対象箇所全数の肉厚を測定し、修理箇所を決定しているところに大きな違いがある。

米国では、NRCがGL（Generic Letter）89-01で事業者者に2次系配管の厳重な検査を行うように要求し、事業者者はFAC監視プログラムで配管減肉管理を実施しているが、それでも図4に示すように年に数件程度の減肉による配管の貫通が発生しているのが現状である。一方国内では、図7に示すように減肉事故（法律・通達報告）は1985年以降20年間で5件（うち貫通4件）であり、米国（1998年以降7年間で38件うち貫通18件）に較べてずっと少ない。日本の検査対象範囲は抜取りではなくほぼ全数であり、そのため、米国と比較して国内の貫通に到った不具合発生件数は圧倒的に少なく、国内の減肉管理手法は米国と比較してそんな色が無いものと言える。美浜3号機2次系配管損傷事故は、管理指針が不十分で発生したものではなく、管理指針に則った保守管理・品質保証活動が不適切であったためとされている。従って、基本的に管理指針に基づく国内の2次系減肉管理手法は有効であったと確認される。

### 5. まとめ

国内外の2次系配管減肉の管理状況を調査し、また、INSSで入手した過去の海外原子力発電所不具合情報から2次系配管減肉事象の発生状況を分析し、米国と国内の減肉発生状況を比較した。

その結果、減肉の報告件数ならびに貫通に到った事象件数は米国の方が日本よりも数倍多く、国内の減肉管理手法は米国と比較してそんな色は無いものであったと考える。

### 文献

- (1) 原子力安全・保安院，美浜発電所3号機二次系配管破損事故調査委員会，「関西電力株式会社美浜発電所3号機二次系配管破損事故について（最終報告書）」，(2005)。
- (2) 腐食防食協会編，“腐食・防食ハンドブック”，

- 93, 丸善, (2000).
- (3) R. B. Dooley and V. K. Chexal, "Flow-Accelerated Corrosion", Paper No.347, Corrosion'99, NACE, (1999).
  - (4) 原子力安全委員会, 美浜発電所3号機2次系配管事故検討分科会, 「美浜発電所3号機2次系配管事故に係る論点の緊急取りまとめ」, (2004).
  - (5) EPRI TR-110102, "Nuclear Reactor Piping Failures at US Commercial LWRs: 1961-1997", (1998).
  - (6) NRC IP-49001, "Inspection of Erosion Corrosion / Flow Accelerated Corrosion Monitoring Programs", (1998).
  - (7) 宮崎孝正, 西岡弘雅, 佐藤正啓, 千葉吾郎, 高川健一, 島田宏樹, 「海外原子力発電所における不具合事象の傾向分析 (2004年)」, INSS Journal, vol.12, (2005).
  - (8) H. P. Berg and Schlicht-Szesny, "Operational experience in Germany regarding corrosion mechanisms and their consequences for pressurized water reactors", Fontevraud V, Fontevraud, France, (2002).
  - (9) M. Bouchacourt, H. Boyelle, J. P. Gauchet, A. Lenormand, and B. Spsychala, "The BRT-CICERO code, an exhaustive approach to predict the flow accelerated corrosion", Fontevraud IV, Fontevraud, France, (1998).
  - (10) NRC Staff's handout for 08/08/2002 Meeting With Dominion VEPCO.
  - (11) NUREG-1766, "Safety Evaluation Report Related to the License Renewal of North Anna Power Station, Units 1 and 2, and Surry Power Station, Units 1 and 2", Virginia Electric and Power Co. (2002).