

海外原子力発電所における2次系配管の減肉管理状況と国内との比較

Comparison of Secondary-piping Wear Management at Nuclear Power Plants in Japan and Other Countries

千葉 吾郎 (Goro Chiba) *

要約 加圧水型原子力発電所 (PWR) の2次系配管減肉管理に関し、わが国ではPWRを保有する電力会社が減肉管理手順を定めて運用しているが、本研究では国内外の2次系減肉の発生状況と点検保守状況を比較し、国内減肉管理手法の妥当性を検討した。その結果、減肉発生件数は海外の方がわが国よりも数倍多いことがわかった。また、米国では、電力会社によって減肉配管の保守状況が大きく異なり、わが国の取替箇所数は米国における取替箇所数の幅の上限と同等以上であった。以上のことから、国内の減肉管理手法そのものは妥当であったと考えられる。しかし、平成16年8月に関西電力(株)美浜発電所3号機で2次系配管破損事故が発生したことから、改めて肉厚測定点の見落としの防止策などが必要とされる。

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 Japan, power companies owning pressurized water reactors (PWR) follow a secondary-piping wear management manual they have established themselves. The present paper examines the adequacy of wear management techniques used in Japan, by comparing wearing events in the secondary circuit, and inspection/maintenance procedures, in Japan and other countries. The results revealed that the number of wearing events in other countries is several times greater than in Japan. In the United States, pipe maintenance procedures differ substantially among power companies. The number of replacement pipes varies accordingly, the largest number in the United States being the smallest number in Japan. Consequently, the wear management techniques used in Japan are considered adequate. However, the secondary piping rupture accident that occurred in Mihama 3 of the Kansai Electric Power Co. in August 2004 necessitates additional preventive measures against the omission of wall thickness measurement points.

Keywords PWR, secondary piping, erosion/corrosion, flow accelerated corrosion, wear

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次系の復水系配管が破損し、高温水が流出し原子炉が自動停止した⁽¹⁾。この事故によりタービン建屋にいた作業員11名が死傷した。原因は、いわゆるエロージョン/コロージョン⁽²⁾により減肉した配管が破損したものであった。

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、海外ではFAC (flow accelerated corrosion, 流れ加速腐食) とも呼ばれている。

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)⁽¹⁾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た。

前報⁽³⁾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 (INSS) 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。

本稿では、前報以降に報告された海外不具合事象を含めて発生状況の分析を行った。また、米国の原子力発電事業者の2次系減肉管理状況の調査を行い、

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

点検保守状況の日米比較により国内の減肉管理手法の妥当性を検討する。

2. 2次系減肉の発生状況

2.1 2次系減肉管理手法の日米比較

日米の減肉管理手法の比較を図1に示す。

米国の事業者は、FAC監視プログラムを設定し、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 (American Society of Mechanical Engineers) 規格等に従って補修・交換時期を決定する。現在、全米の原子力発電所でEPRI (Electric Power Research Institute) 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等により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。

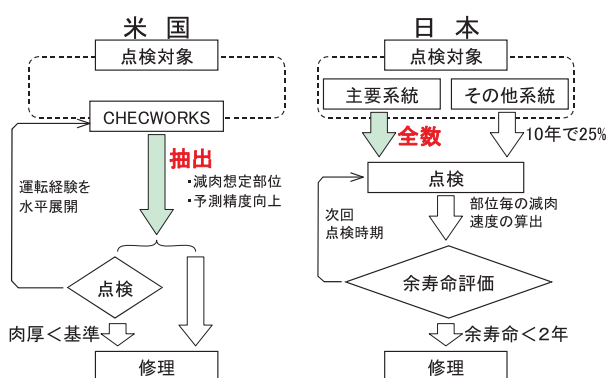


図1 軽水炉2次系配管減肉管理手法の日米比較

2.2 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⁽⁴⁾、その流れを図2に示す。

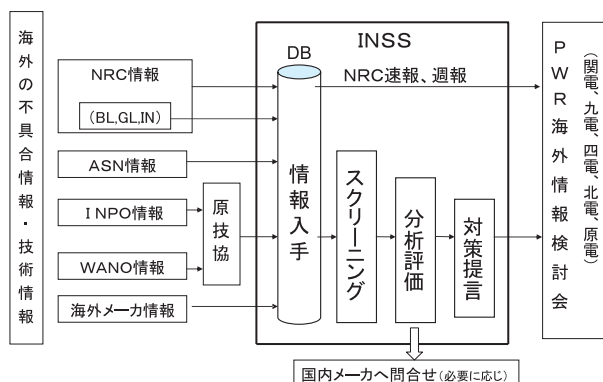


図2 INSSにおける海外情報分析の流れ

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 : Institute of Nuclear Power Operations), 世界原子力発電事業者協会 (WANO: World Associations of Nuclear Operators) などから入手した情報を蓄積している。このDBには、2005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⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

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、2005年末までの発生件数を整理した。その結果を図3に示す。

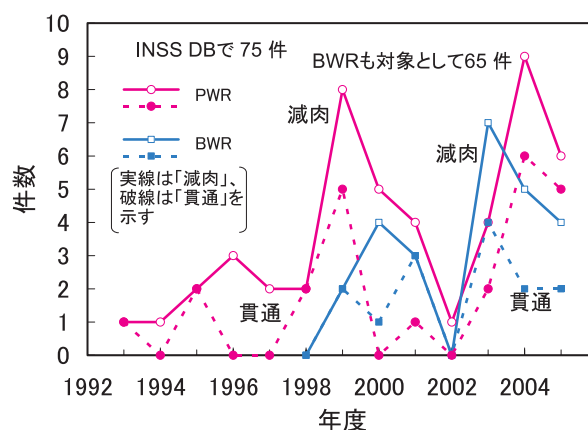


図3 年度毎の海外の軽水炉2次系配管減肉発生件数

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75件で、BWRも併せて検討をし始めてからは65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

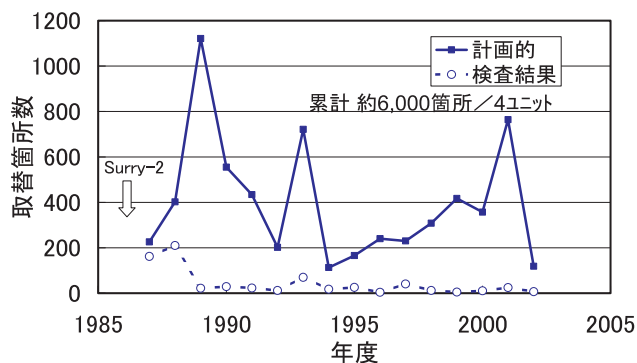


図7 海外の軽水炉における2次系配管取替の例 (4ユニット分)

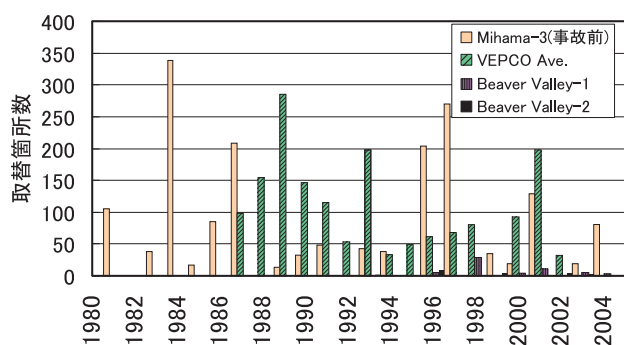


図8 軽水炉2次系配管取替状況の日米比較

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。

今回新たに First Energy 社の Beaver Valley 発電所の調査を行い、米国の減肉管理に係る情報を入手した。

Beaver Valley 発電所 1/2 号機はいずれも Westinghouse 社製 3 ループ PWR で、1 号機は 1976 年 10 月の運開で美浜 3 号機と同時期、2 号機は 1987 年 11 月運開のプラントである。

美浜 3 号機、Virginia Power 社 (Surry, North Anna) ユニット平均、および Beaver Valley 1/2 号機の年度毎の配管取替状況を図 8 に示す。

美浜 3 号機の約 1,600 箇所、および、Virginia Power 社平均約 1,500 箇所、いずれも継続的に修理が行われている。それに対し、今回調査した Beaver Valley 発電所は、1 号機が累計 54 箇所、2 号機が累計 28 箇所と、極めて少ないことがわかった。

Beaver Valley-2 号機の系統毎の減肉管理状況を美浜 3 号機のデータと合わせ表 1 に示す。

平均減肉速度について、Beaver Valley-2 号機の実

表1 Beaver Valley 2号機と美浜3号機の減肉管理状況

	Beaver Valley 2		美浜 3 号機	
	平均減肉速度 ($\times 10^{-4}$ mm/hr)		取替箇所数 (累計)	点検対象箇所数
	実測値	CHECWOKS		
復水系	0.23	0.21	3	594
給水系	0.25	0.26	1	542
主蒸気系	0.28	0.23	0	825
抽気系	0.19	0.23	6	351
ドレン系	0.17	0.23	18	1,533
その他	0.13	0.23	0	403
合計	0.20 (平均)	0.23 (平均)	28	386
美浜 3 号機	約 0.24 ^{*1}		約 1,600	4,248 ^{*2}

*1 美浜 3 号機減肉速度は、第 11~15 回定検の累積測定回数 3 回以上のデータの平均値

*2 美浜 3 号点検対象箇所数は、事故後測定計画時 (H16.11.25) における指針該当箇所数
今回点検部位 6,260 箇所には、知見拡充等のための点検箇所が含まれる

表2 Beaver Valley 2号機と美浜3号機の運転パラメータの比較

		Beaver Valley - 1/2	美浜 3 号機
系統条件	温度 流速 湿度	両者共に WH 社製 3 ループプラントで、系統構成、運転条件、使用材料等に大きな差異はない。 Beaver Valley 発電所は 2001 年 9 月 24 日付で 1.4% の熱出力増加が承認されているが、出力増加による FAC 感受性への寄与は問題とならないとしている。	
材料		また、今後の 8% までの出力増強を申請中。 運転認可更新は、近く申請の予定。	
水化学	pH	≥ 9.3	8.8~9.7
	溶存酸素濃度	低	≤ 10 ppb
	水処理	アンモニア+モルフォリン (ヒドラジン低減)	全揮発性薬品処理 (AVT) +エタノールアミン (ETA)

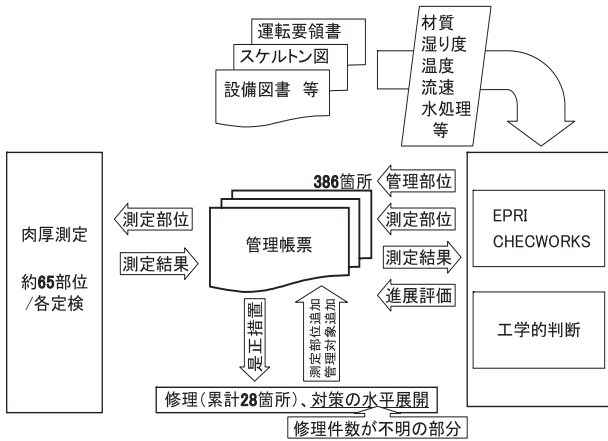


図9 Beaver Valley 2号機減肉管理の概念図

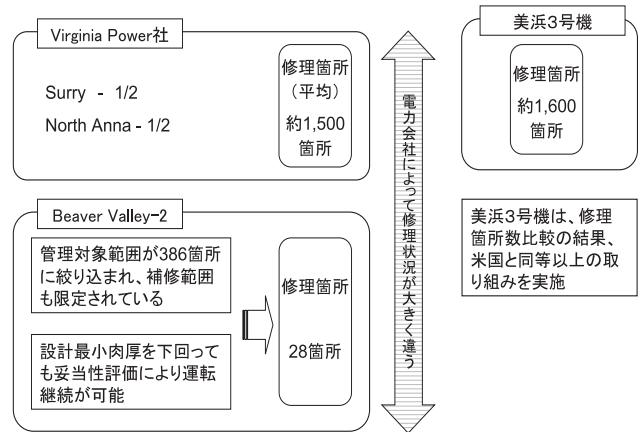


図12 軽水炉2次系配管修理状況の日米比較結果

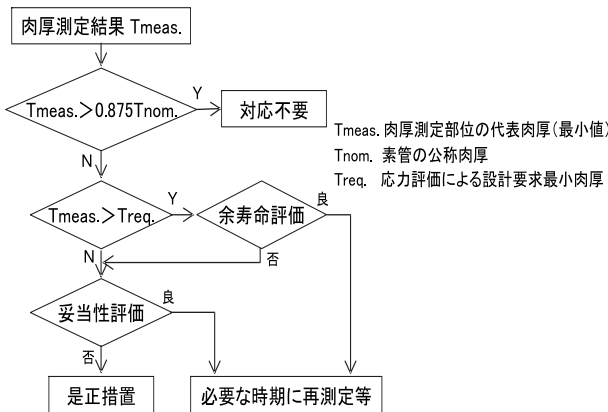


図10 Beaver Valley 2号機の修理判定の流れ

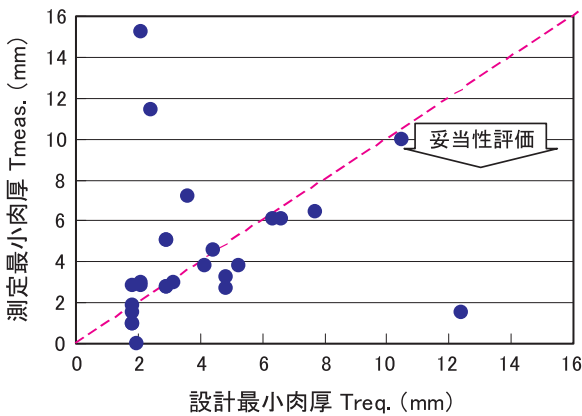


図11 Beaver Valley 2号機配管取替時の肉厚

測値が 0.20×10^{-4} mm/hr, 予測値が 0.23×10^{-4} mm/hr であるのに対し, 美浜3号機の平均(実測値) 0.24×10^{-4} mm/hr であり, 両者は同程度の減肉速度を持っている。それにもかかわらず, 肉厚管理対象箇所数は, Beaver Valley-2号機が386箇所であるのに対し美浜3号機が4,248箇所(事故後計画値), 累計取替箇所数が28箇所に対して約1,600箇所と, 大きな差がある。

Beaver Valley 発電所と美浜3号機の運転パラメータの比較状況を表2に示す。系統構成と使用材料に大きな差はない。水処理について, Beaver Valley 発電所ではヒドラジンを低減させることを意図しているが, 180の単相流環境においてヒドラジン量がFAC感受性に影響しないと示すデータもある⁽⁹⁾。運転条件に大きな違いはないとともに, 平均の減肉速度が同等であることから, 両発電所でFAC感受性に大きな差はないものと考えられる。

次に, Beaver Valley 2号機の減肉管理の概念を図9に示す。対象の全系統のなかからEPRIのCHECWORKSと工学的判断から管理対象部位386箇所が選ばれ, 管理帳票に基づいた管理が行われる。その結果, 定期検査毎に平均65箇所の点検と, 判定基準を下回った部位への是正措置として, これまで累計28箇所の補修と対策の水平展開が行われている。ここで, 28箇所の補修部位は386箇所の内数で, 水平展開により修理された部位の数は分からないが, 調査した範囲では情報はなく, それほど多くはないものと思われる。

次に, 減肉修理の判定の考え方を図10に示す。肉厚測定の結果, 減肉が公称肉厚の12.5%以下であれば対応の必要はない。減肉が認められ, 測定値が最小肉厚を満たしている場合は, 寿命評価を行い, 次回点検まで問題なければ是正措置の必要はない。最小肉厚を下回る場合は, EPRI 指針またはASME 規格に従い妥当性評価を行い, 不適のものについては是正措置が行われる。

図11に, 設計最小肉厚に対する取替時の測定肉厚をプロットした。多くが設計最小肉厚を下回って運転継続されているが, 日本では技術基準不適合となり許されていない。このことが, Beaver Valley 発電所の修理件数が少ない要因のひとつと考える。

配管補修状況の日米比較結果を図12に示す。対象と

したユニットはすべて Westinghouse 社製 3 ループユニットで, Beaver Valley 2 号と美浜 3 号では減肉速度が同程度であった。

修理箇所数に関して, Beaver Valley 2 号機では, 抜き取り検査と運転継続の考え方から修理された配管は 28 箇所, 一方で, Virginia Power 社は 1 ユニット平均で約 1,500 箇所が修理されており, 米国では電力会社によって修理状況が大きく違うことが分かった。また, 美浜 3 号機は事故前の段階で約 1,600 箇所の修理が行なわれており, その結果, 国内は米国と同等以上の取り組みを行っていることが分かった。なお, 美浜 3 号機では事故後の 6,260 箇所の点検の結果により, 計算必要厚さを下回る部位および余寿命が原則 5 年未満の部位 86 箇所が修理された。

4. まとめ

2 次系配管減肉事象の発生状況の分析と, 海外減肉管理調査結果に基づく点検保守状況の比較検討を行い, 以下のような成果を得た。

1. 減肉の発生および貫通に至った事象の件数は米国の方がわが国よりも数倍多いことがわかった。その理由の一つとして抜き取り検査と全数検査の違いが考えられる。
2. 米国では, 電力会社によって減肉配管の保守状況が大きく違い, わが国での取替箇所数は, 米国における取替箇所数の幅の上限と同等以上であった。
3. 以上のことから, 国内の減肉管理手法そのものは妥当であったと考えられる。しかしながら, 美浜発電所 3 号機の事故から考えると, 改めて肉厚測定点の見落としの防止策などが必要である。

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) 千葉吾郎, 「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」, INSS Journal, Vol.12, pp.87, (2005).
- (4) 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, pp.82, (2005).
- (5) H. P. Berg and Schlicht-Szesny, "Operational experience in Germany regarding corrosion mechanisms and their consequences for pressurized water reactors", Proceedings of International Symposium Fontevraud, SFDN, pp.1007-1017, (2002).
- (6) M. Bouchacourt, H. Boyelle, J. P. Gauchet, A. Lenormand, and B. Sychala, "The BRT-CICERO code, an exhaustive approach to predict the flow accelerated corrosion", Proceedings of International Symposium Fontevraud (CD-ROM), SFDN, (1998).
- (7) 原子力安全・保安院, 高経年化対策検討委員会 (第 4 回), 「電気事業者における配管減肉データの分析結果について」, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g50406a43j.pdf>, (2005), (2006.5 確認).
- (8) NRC Staff's handout for 08/08/2002 Meeting With Dominion VEPCO, (NRC ADAMS Accession Number: ML022470274), (2006.5 確認).
- (9) E. M. Pavageau, O. Bouvier, and K. Fruzzetti, "Of the Role of Temperature and pH on the Hydrazine Effect on Flow Accelerated Corrosion", International Conference Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, San Francisco, 11-14 Oct., (2004).

関西電力(株)では厳しい再発防止策を打ち出し, 監督官庁である経済産業省原子力安全・保安院も厳重な検査の方針を示している。また, 日本機械学会では, 発電用設備配管減肉管理に関する規格を策定中である。