

加圧水型原子力発電所における 流体流れによる配管減肉事象のデータ分析について

Analysis of Data on Pipe Wall Thinning Phenomena by Fluid Flow In Pressurized Water Reactor Plant

三菱重工業(株)	山上 勝彦	Katsuhiko YAMAKAMI	Non Member
関西電力(株)	平野 伸朗	Shinro HIRANO	Non Member
関西電力(株)	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Non Member

In August 2004, a pipe rupture accident occurred at The Kansai Electric Power Company Mihama Unit3. Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) recognized that it was an urgent problem to settle the rules on Pipe Wall Thinning Management by Fluid Flow. JSME enacted "rules on Pipe Wall Thinning" that stipulates the basic requirements of pipe wall thinning management, considering from these situations. In 2006, JSME enacted the "rules on Pipe Wall Thinning Management for PWR Power Plants" (JSME S NG1-2006, JSME rules for PWR) that satisfies the requirements of "rules on Pipe Wall Thinning". This JSME rules for PWR stipulates the process of inspection plan, measurement, evaluation and maintenance. This paper focuses on the technical grounds that specify the management systems, pipe components and initial FAC rate.

Keywords: Two-Phase Flow, Erosion, Cavitation, Fluid Dynamics

1. 緒言

日本機械学会は、2004年8月に関西電力美浜3号機で発生した配管破断事故を踏まえて、流体流れによる配管減肉事象の管理に関する規格を策定することが緊急の課題として挙げられた。(社)日本機械学会はこれらの状況を踏まえて発電用設備規格委員会の下に配管減肉対応特別タスクを設置し、配管減肉管理に関する基本的な要求事項を取りまとめる「配管減肉管理に関する規格」(以下、「機能性規格」という)の策定を行うとともに、この機能性規格に適合するよう加圧水型原子力発電所の配管減肉管理に対する技術的要求事項を取りまとめる「加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格」(JSME S NG1-2006, 以下、PWR規格という)の策定を行った。このPWR(加圧水型原子力発電所)規格は、新たな知見を踏まえて、超音波厚さ測定による管理手法、具体的には試験計画立案(試験対象系統の選定、試験実施時期の設定)、試験実施(通常測定、詳細測定)、評価(減肉率評価、余寿命評価)、措置(補修・取替)のプロセスを定めたものである。本論文では、

このPWR規格の規格化のうち、適切に配管管理を行う為に重要な、試験対象系統及び部位の選定、初期設定減肉率に関する検討内容と技術的根拠についてまとめたものである。

2. PWR規格の基本的考え方

2.1 PWR規格策定前の配管減肉管理

PWR事業者においては、昭和50年後半に一部プラントでエロージョン/コロージョンによる減肉が発生したことから、配管の肉厚調査が行われていたが、昭和61年12月の米國サリー原子力発電所二次系配管破損事故を契機として、PWR事業者は肉厚調査範囲を拡大し、得られたデータをもとに配管減肉に関する管理方法を検討し、平成2年に「原子力設備2次系配管の管理指針(PWR)」(以下PWR事業者指針)を策定した。PWR事業者指針には、当時の測定データや技術知見に基づき試験対象(系統及び部位)と試験頻度、判定基準及び対策が規定されている。以降、本指針に基づき、配管の肉厚管理が実施されてきた。

PWR事業者指針の試験対象範囲の考え方を表1に示す。温度、湿度、流速(以下、総称して「流体条件」という)に基づき試験対象系統を選定することとしており、この条件は平成2年当時に得られていた測定データに基づき、有

連絡先：山上勝彦、〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2丁目1番1号、三菱重工業株式会社高砂製作所 プラント技術部 原子力プラント設計課、電話：079-445-6335、
e-mail:katsuhiko_yamakami@mhi.co.jp

意な減肉の発生有無を分析して決定されたものである。当時の知見では、FACは一般的に温度150℃付近に減肉のピークが有り、流速が大きいほど減肉傾向が大きくなると考えられており、それらを反映した試験対象系統となっている。また、この条件で抽出された試験対象系統に対する初期設定減肉率については、当時の測定データを保守的に評価することにより得られた値が規定されている。

2.2 PWR 規格における基本的な考え方

今回、流体流れによる配管減肉事象のうち流れ加速型腐食(FAC)に関する規格を定める事を基本方針とした。事業者指針自体については十分な運用実績を有しており、技術的な問題はなく管理されてきていることから、事業者指針の基本的な考え方の妥当性を再度確認し、規格を定めることとした。ただし、事業者指針が策定されてから現在に至るまで多くの試験データが得られていることから、それらの最新肉厚測定データを分析し、試験対象範囲を明確化することとした。

PWR 事業者指針は、FACのみを対象とした管理規格として策定されたものであったが、PWR 規格では、想定する流体流れによる減肉事象として、液滴衝撃エロージョンも



対象としている。液滴衝撃エロージョン(フラッシングエロージョン含む)は、高速二相流の系統で液滴が配管壁面に衝突し、発生する衝撃力により配管材料が減肉する事象であり、流れ加速型腐食(FAC)とは、減肉のメカニズムが異なり、顕著に減肉が発生する系統も FAC とは異なることから、本規格の策定にあたり、あらためて検討がなされた。


液滴衝撃エロージョンの他に、配管内を流体が流れることにより発生する減肉事象として、キャビテーション・エロージョンが考えられる。キャビテーション・エロージョンは、弁下流やオリフィス下流等の絞り部における急激な局所減圧により飽和蒸気圧を下回って蒸気気泡が発生し、配管壁面近傍で気泡が崩壊する際にきわめて大きな衝撃圧を発生させ、配管材料が減肉する事象であるが、PWR プラントの場合設計段階において、キャビテーション発生防止のための評価・確認を実施し、運手条件を適切に維持することによりその発生を防止させる事象であることから、本規格の対象外事象とした。

なお、本論文では以降、FAC 事象に関する PWR 規格の考え方を記す。

Table-1 The inspection fluid condition and initial FAC rate in PWR guideline
Numeric: Initial FAC rate (mm/10⁴hr)

Fluid	Wetness	Flow velocity	<100°C	≥100°C, <150°C	≥150°C, <200°C	≥200°C, <250°C	250°C	
Two-phase flow	<5% (Without drain)	<30 m/s						
		≥30 m/s, <50 m/s						
		≥50 m/s						
	<5% (With drain)	<30 m/s			0.35			
		≥30 m/s, <50 m/s			1.15			
		≥50 m/s						
	≥5%, <15%	<30 m/s			0.35			
		≥30 m/s, <50 m/s			1.15			
		≥50 m/s						
	≥15%	<30 m/s			Downstream of control valve only 0.30	0.35		
		≥30 m/s, <50 m/s				1.15		
		≥50 m/s						
Water Single-phase flow	-	<3 m/s		0.45	Downstream of control valve and ball check valve only 0.30			
		≥3 m/s, <6 m/s						
		≥6 m/s						

  The inspection fluid condition of PWR guideline

 For downstream of control valve, multiply five to listed number. For ball check valve, multiply two to listed number.

2.3 PWR規格の構成

PWR規格の流れ加速型腐食 (FAC) による配管減肉の管理プロセスを図1に示す。

【試験計画】 測定対象系統、部位を定義し、測定対象に対して、試験実施時期を定義している。本論文では、試験計画に関する技術的根拠を示す。

【試験】 測定方法、通常測定、詳細測定の判断基準・手法について定義している。

【評価】 測定データに関して、余寿命の評価手法を定義している。また、得られた余寿命評価結果より、次の測定時期を決定することを定義している。

【措置】 配管の取替・保守方法を定義している

3. 配管減肉管理における技術的根拠

配管減肉管理を行うためには、2.3項で示すような試験計画、試験、評価、措置を適切な技術的根拠に基づいて管理方法を定めることが必要となる。

本項では、配管減肉管理に重要な試験対象系統及び部位の選定、初回試験実施時期を決定する際に想定する減肉率（初期設定減肉率）について、PWR23プラントの配管減肉管理により得られたデータに基づく、技術

的根拠を示す。

3.1 FACの影響因子

一般に、FACは、図2、3に示すような温度、流速、その他に湿度、pH、溶存酸素、材料（主にCr含有量）の各因子に依存することが知られているが、PWRにおいては、これら因子のうち、pHについてはごく一部を除きどの系統も同等に管理されていること、溶存酸素については5ppb以下に管理されていることから、PWR事業者指針ではこれら因子に基づき主要点検系統を絞り込む手法を採用していない。また、材料（主にCr含有量）については配管要素ごとに違いがあるものの、上記流体条件は当時の測定データに基づき材料の違いがFACに及ぼす影響を包絡するよう定められたものである。

図4に温度と減肉率の相関を示す。これはPWR事業者指針に基づき採取された、PWR23プラントの配管肉厚測定結果を、流速、相流がほぼ同一のグループに分類し、温度と平均減肉率の相関を示したものである。

比較的流速が早い復・給水、ヒータ水位制御弁下流配管は150℃付近に明確な減肉率のピークが見られ、流速が遅い系統（ヒータ水位制御弁上流など）でも、同

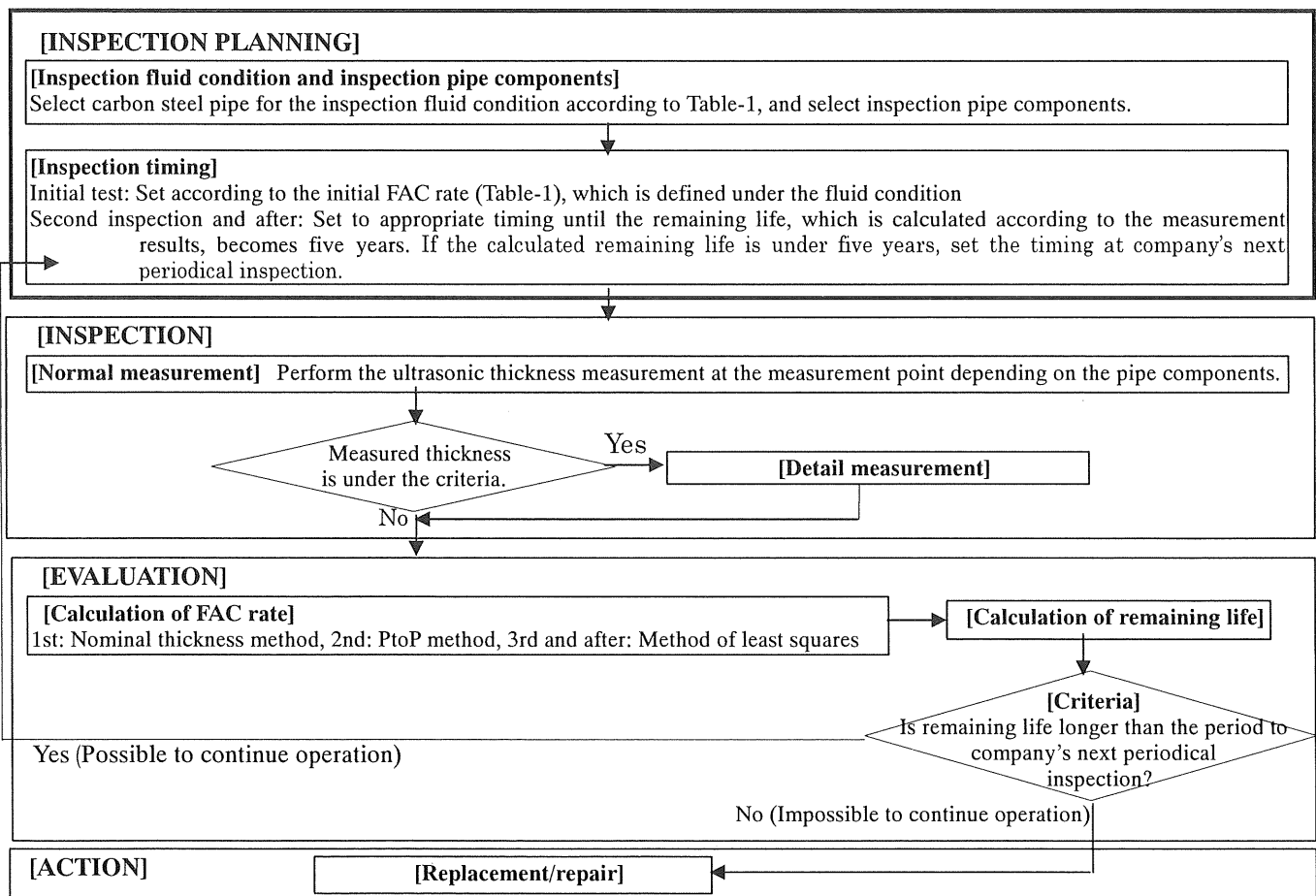


Fig.1 The process of pipe wall thinning management for FAC⁵⁾

じようなピークが得られた。

減肉率の温度依存性について文献(図2)と比較すると、ほぼ同じ150℃付近にピーク位置を示しており傾向は類似している。

減肉率の流速依存性については文献(図3)同様に比較的流速の遅いヒータドレン制御弁上流よりも流速の速い復・給水管の減肉率が2~3倍になる等、高流速側で減肉率が増加する傾向を示している。

以上の結果から、PWR事業者指針で規定した温度、湿度、流速による試験対象範囲の選定(表1)は概ね妥当と判断できることから、PWR規格においても、流体条件マトリックスによる、試験対象範囲を選定することとした。

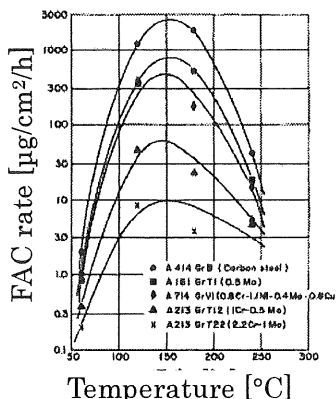


Fig.2 The relation between temperature and FAC rate¹⁾

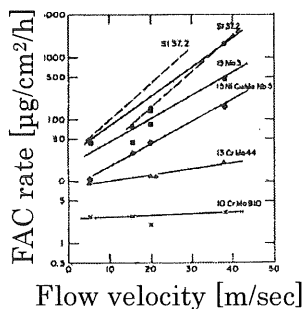


Fig.3 The relation between flow velocity and FAC rate¹⁾

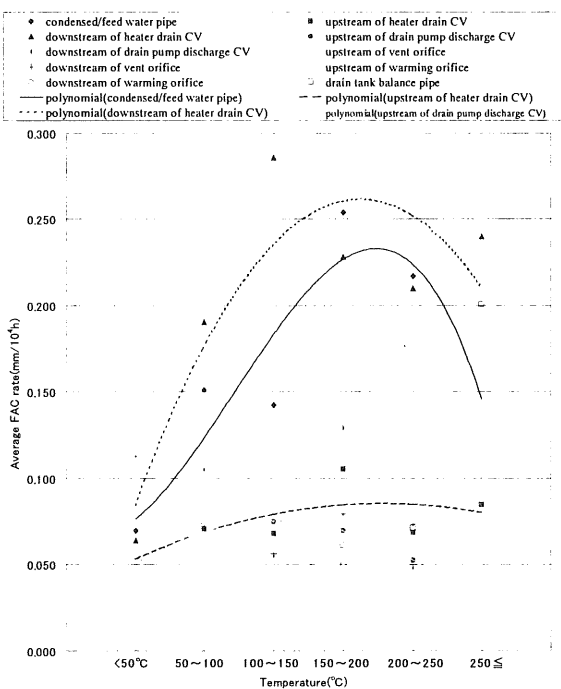


Fig.4 The relation between temperature and FAC rate in plants (90° elbow)

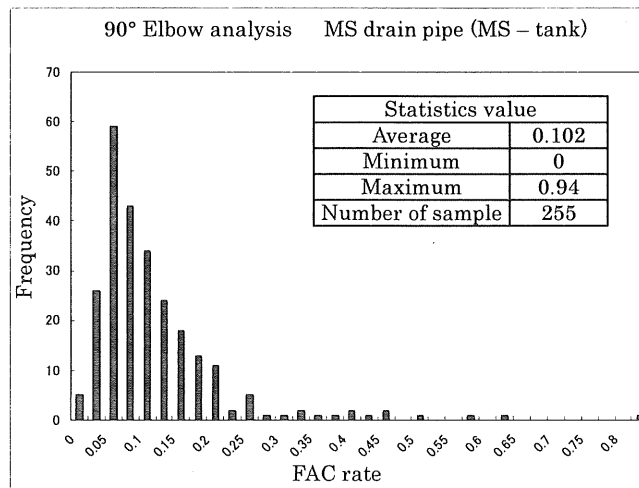


Fig.5 The relation between temperature and FAC rate in plants (90° elbow)

3.1.1 有効な実機データの選定

PWR23プラントの肉厚測定結果から、減肉が発生する範囲(系統)の設定を実施した。

図5に湿水分離器ドレン系統の各減肉率の頻度分布を一例に示す。この分布状況は平均減肉率0.102mm/10⁴hに対して左右対称の正規分布を示さず、大きな減肉率側に偏った形が特徴となっている。これらの傾向は、本系統以外でも認められており、特異な減肉率を有する部位について詳細な検討を行った。

図6に特異な減肉率を有する部位の肉厚測定実績の一例を示す。本事例では、過去に4回の計測実績が有り、最大減肉率を示すポイントの肉厚変化は比較的直線的である。最新計測結果の計測肉厚及び減肉率から求めた製造時予想肉厚分布を示すが、最大減肉率(0.50mm/10⁴h)の部位(A-2)の製造時予想肉厚は他の予想肉厚に比べて3mm程度厚くなっており、不連続部分となっている。更に、最大減肉率点(A-2)は開先加工部分であり、他の部分(例えばB断面)より厚肉になることは考え難い。A-2部位は開先部分の計測であり、計測点が徐々に溶接線側に移動したことが考えられ、データの信頼性は低いと考えられる。

このように、過去の測定データには、信頼性の低いものも含まれている可能性があることから、統計的手法も用いて、有効なデータの抽出評価を行うこととした。

3.1.2 減肉が発生する範囲の設定

過去の測定データには、信頼性の低いものも含まれている可能性が有り、真に有意な減肉部位を選定する為、以下の通りのプロセスを設定した。

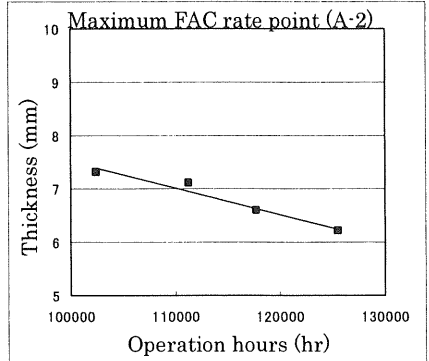
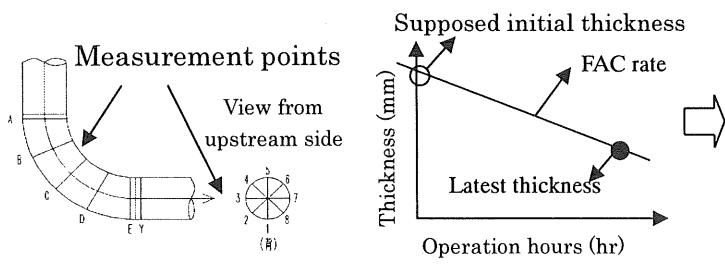


Fig.6 Abnormality FAC rate case (Case2)

(i) 厚さ測定値による減肉系統の抽出 配管の厚さ測定値が t_n を下回ったデータについて測定値の経時変化や文献を確認するなどして、FACにより有意な減肉が発生した系統を抽出した。有意な減肉の有無を判断するための基準としては、下式で定義される判定基準厚さ t_m を用いた。

$$t_m = t_{sr} + \frac{2}{3}(t_n - t_{sr}) \quad (1)$$

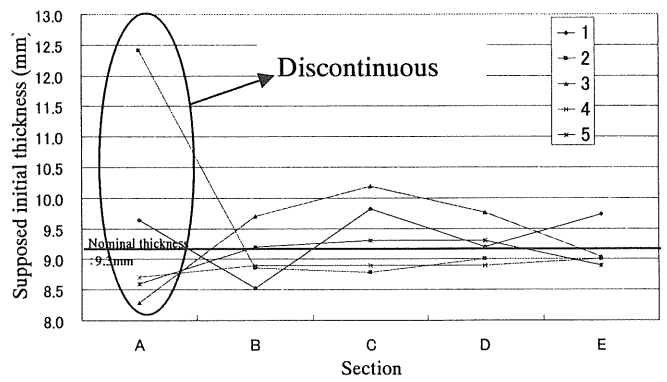
t_n : 管の製造上の最小厚さ
 t_{sr} : 技術基準で定められた必要最小厚さ

(ii) トラブル事例による系統の抽出 原子力施設情報公開ライブラリー (NUCIA) からPWRトラブル事例を調査し、FACにより有意な減肉が発生した系統を抽出した。

(iii) サンプルングによる確認 判定基準厚さ t_m やトラブルの観点から抽出されなかった系統についても、念のため比較的大きな減肉率を示した測定データを抽出した。信頼性にかけるデータも含まれていることから、肉厚変化の直線性確認、減肉率分布の確認、初期肉厚分布の確認を、統計的手法を用いることにより有効なデータを抽出した。

3.2 試験実施時期

試験実施時期は、それぞれの試験対象部位の減肉率を用いて必要最小厚さに至る期間(余寿命)を予測し、



この中に於いて決定することとなる。1回以上の測定を実施している部位であれば、測定実測値を元に配管の余寿命を算出することは可能であるが、測定を実施していない部位については、減肉率が不明の為、何らかの減肉率を想定し余寿命を算出する必要がある。PWR規格では、流体条件毎に過去の測定実績の最大減肉率を初期設定減肉率(表2)として与え、初回測定時期を設定することとした。

初期設定減肉率は過去の測定実績最大値を設定した。しかしながら3.1.1に示すような、信頼性の低いデータも含まれていることから、3.1.2と同様の手法で、信頼性の高いデータ抽出し、その最大減肉率を初期設定減肉率として設定した。また、図7に示すように、同一系統内においても、特に減肉傾向が大きい部位が存在することから、特定の部位で減肉率が著しく高い場合には、当該部位に対して個別に初期設定減肉率を設定した。

Order	FAC rate	Specificity
①	1.27	Downstream elbow of ball check valve
②	0.92	Downstream elbow of ball check valve
③	0.69	Normal elbow

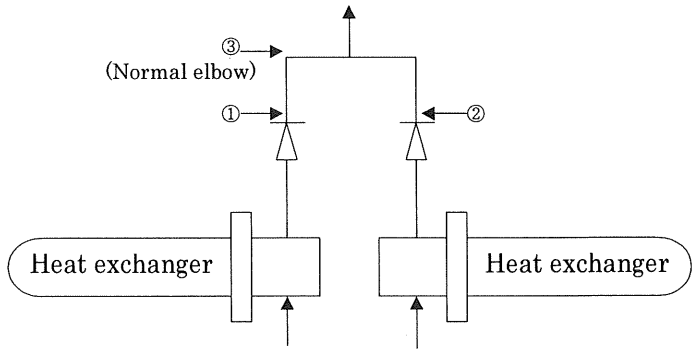


Fig.7 Difference of FAC rate in same fluid condition (Example)

Table-2 The inspection fluid condition and initial FAC rate of PWR standard

Numeric: Initial FAC rate (mm/10⁴h) (): specific pipe components such as downstream straight pipe of control valve

Fluid	Wetness	Fluid velocity	<50°C	≥50°C, <100°C	≥100°C <150°C	≥150°C <200°C	≥200°C <250°C	≥250°C
Two-phase flow	<5% (Without drain)	<30 m/s						
		≥30 m/s, <50 m/s						
		≥50 m/s						
	<5% (With drain)	<30 m/s			0.23	0.23	0.18 (0.71)	0.26
		≥30 m/s, <50 m/s			—	—	—	—
		≥50 m/s			—	—	—	—
	≥5%, <15%	<30 m/s			0.24	0.8	1.25	
		≥30 m/s, <50 m/s			—	—	0.39	
		≥50 m/s			0.13	0.8	1.13	
	≥15%	<30 m/s		0.44	0.76	0.64 (1.41)	0.51 (0.85)	
		≥30 m/s, <50 m/s		0.44	0.76	—	—	
		≥50 m/s		—	—	—	—	
Water Single-phase flow	—	<3 m/s	0.82	0.27	0.3	0.58	0.31	
		≥3 m/s, <6 m/s	—	0.52	0.4	0.77 (1.13)	0.94 (1.28)	
		≥6 m/s	—	—	—	—	—	

□ Inspection needs all system in the fluid condition

▨ Inspection needs only the specific system in the fluid condition

— Fluid condition without corresponding system in PWR plant

(only the condition which defines that fluid condition of slower flow velocity is the inspections condition)

4. 結言

PWR規格の策定では、PWR事業者指針が策定されてから現在に至るまで得られた多くの肉厚測定データを分析することにより、試験対象範囲及び初期設定減肉率等について、最新の知見の反映を行った。その結果、試験対象範囲については、最新の測定データを反映することにより、より安全側に50°C～100°Cの水単相流や100°C～150°Cの二相流において試験対象範囲を広げることとした。また、初期設定減肉率については、蓄積されたデータの最大値で再設定することにより、より安全側に設定するとともに、流速区分を細分化することで管理精度を向上させることができた。

上記内容の規格化検討にあたっては、製作時の溶接線近傍での開先加工の要因等により、一部のデータに有効でないデータが含まれていたことから、統計的手法を活用し、多くの実機データの中から有効なデータを抽出することにより、より信頼性の高いデータ分析となるよう考慮した。

本規格では、現時点の可能な限りの最新の知見に基づき検討を行ったが、配管減肉事象については、今後、本規格に基づく測定により、今後もデータが蓄

積されていくことから、定期的に規格の見直しを検

討することが適切と考えられる。

参考文献

- (1) H. G. Heitmann and P. Schub, Proc. of the 3rd meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, BNES, London, p.243, 1983
- (2) H. G. Heitmann and W. Kastner, VGB Kraftwerkstechnik, Vol.62, No.3, p.211, 1982
- (3) 日本原子力学会編, 原子炉水化学ハンドブック, コロナ社, p.225, 2000
- (4) The Japan Society of Mechanical Engineers, Codes for Nuclear Power Generation Facilities, JSME S CA1-2005, Rules on Pipe Wall Thinning Management(2005)
- (5) The Japan Society of Mechanical Engineers, Codes for Nuclear Power Generation Facilities, JSME S NG1-2006, Rules on Pipe Wall Thinning Management for PWR Power Plants (2006)
- (6) Japanese PWR utilities, Guideline for Management of Pipe Wall Thinning in PWR Secondary System(1990)