

原子力発電所の配管減肉管理における 局所減肉許容基準導入の検討

Application of local thinning criteria
in pipe wall thinning management of nuclear power plant

大阪大学
大阪大学

中村 隆夫
茨 崇史

Takao Nakamura
Takashi Ibara

Member
Non Member

Pipe wall thinning caused by FAC (Flow Accelerated Corrosion) and LDI (Liquid Droplet Impingement) is managed through the measurement of pipe wall using UT (Ultrasonic Test) and the replacement of thinning element until reaching allowable limit in order to prevent pipe failure in Japan. Minimum wall thickness of design codes is applied to the allowable limit of pipe wall thinning management. On the other hand, the thinning area is localized in pipe wall caused by FAC and LDI, so the integrity of piping system is maintained even if pipe wall thickness becomes smaller than design requirement to some extent. This kind of concept is already introduced to overseas codes and a non-nuclear domestic code. This paper investigates these codes that introduce local thinning criteria and clarifies the difference among them, then studies how the introduction of local thinning criteria affects the pipe wall thinning management and addresses the issues to apply them to the codes in Japan.

Keywords: Pipe wall thinning management, Local wall thinning, FAC, ASME Code case N-597-2, RSE-M, BS-7900, API 597-1

1. はじめに

我が国の原子力発電所では、炭素鋼配管に発生する流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion、以下 FAC と言う) 及び配管材料の種類に限定されず発生する液滴衝撃エロージョン (Liquid Droplet Impingement、以下 LDI と言う) に対し、その発生の可能性のある偏流部位を主として超音波検査により肉厚測定を行い、許容基準に至るまでに取り替えることにより、配管の破損を防止する対応が取られている。

配管減肉管理における配管肉厚の許容基準は、1990 年に関西電力㈱と三菱重工工業㈱が PWR の配管減肉管理指針を策定して以来、技術基準に定められた設計基準に基づいて定められており、設計上で要求される必要最小厚さが使われてきた。すなわち、この基準を使用することにより配管が一様に減肉したと仮定しても、この板厚までは内圧に対し余裕を持って健全性が維持される。2006 年に日本機械学会が制定した配管減肉管理規格(PWR、BWR)^{[1][2]}は全て設計・建設規格^[3]を許容基準としており、一様減肉を想定した保守的な規定となっている。

一方、配管減肉事象は比較的広範囲に減肉が進む FAC を原因とする場合でも、減肉範囲は局所に限定されるた

め、設計・建設規格に定められた必要最小厚さを割ったとしてもある程度までは健全性が維持される。もともと、配管減肉は、機器が供用に入ってから生じる事象であり、き裂発生の場合と同様に運転段階での基準である維持規格^[4]にその判断基準が示されるのが望ましい。すなわち、維持規格ではき裂が検査で見つかった場合に対応できる様に、き裂の寸法と進展量を評価し運転可能な期間の評価と必要な検査の実施を行うための基準を定めている。これと同様に、配管減肉の場合にも設計時の必要最小厚さを割った場合に、その減肉面積と進展量に応じて、運転可能期間と必要な措置を定めることが可能である。この様な考え方は、海外の多くの規格において既に取り入れられており^[5]、国内においてもその考え方を取り入れた規格が原子力以外の分野で制定されている。

本稿では、これらの局所減肉許容基準が導入された規格について調査し、その違いを整理した。更にその違いが配管減肉管理においてどのような影響をもたらすかを分析すると共に、我が国の配管減肉管理に局所減肉許容基準を導入する場合の検討課題を明らかとした。

2. 我が国と海外の配管減肉管理の比較

2.1 我が国の原子力発電所の配管減肉管理規格

日本における原子力配管の減肉管理は、日本機械学会

連絡先: 中村 隆夫、〒565-0871 大阪府吹田市山田丘
2-1、大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学
専攻、E-mail: nakamura@see.eng.osaka-u.ac.jp

(JSME) が発行した「配管減肉に関する技術規格」(以下、JSME 規格と呼ぶ) に沿って行われている。対象設備は火力・PWR・BWR プラントである。Fig.1 に管理フローを示す。その特徴は以下の通りである。

- ・過去の試験データから有意な減肉傾向を示す配管系統と部位を選定して試験範囲を決定
- ・詳細測定をするか否かは判定基準厚さを元にスクリーニングを実施
- ・余寿命管理に基づいた運転継続可否の判断
- ・余寿命を、測定時最小残存厚さと必要最小厚さ t_{min} の差を減肉率で割った値として算出
- ・当該部の試験データから減肉率を算出

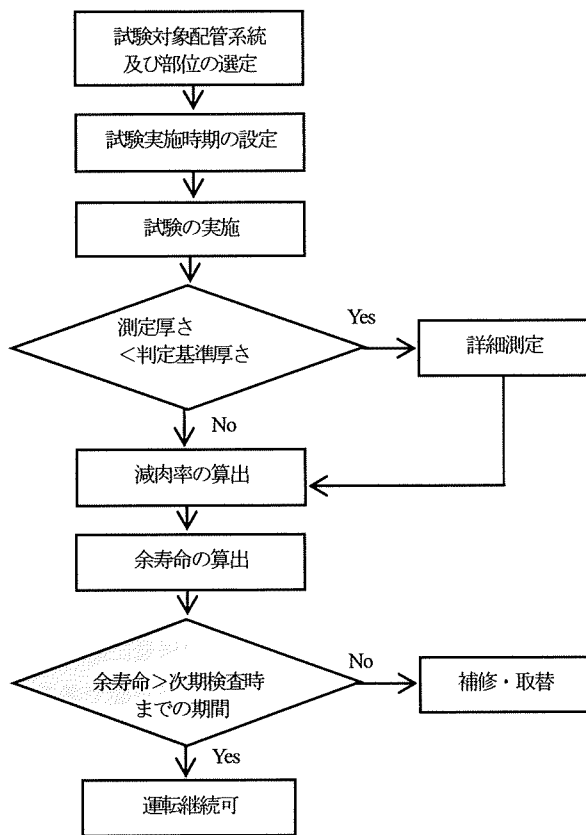


Fig.1 Flow sheet of pipe wall thinning management in JSME codes

2.2 我が国における局所減肉許容基準を採用した配管減肉管理規格

我が国の船舶用ボイラー配管の減肉管理は、日本海事協会が発行した「船用配管板厚減肉の設計、点検指針(2007年版)」^[6] (以下、海事協会規格と呼ぶ) に従って行われている。その特徴は次の通りであり、JSME の規格と米国

機械学会の ASME Sec.XI, Code Case N-597-2^[7]を組み合わせられた規格となっている。

- ・ JSME 規格に沿った試験
- ・ ASME Section XI, Code CaseN-597-2 を参考に、肉厚管理に基づいた運転継続の判断
- ・ 次期検査時までの期間を短縮した再評価の実施可
- ・ 次回検査時での状態を予想した評価
- ・ 局所減肉評価を実施するか否か、 については必要最小厚さ t_{min} に基づくスクリーニングの実施
- ・ 最低肉厚に対する要求あり
- ・ 試験データがない場合は実験式から減肉率を算出

2.3 海外の配管減肉規格

海外の配管減肉管理が我が国の管理と大きく異なる点としては、Table 1 に示す様に、検査箇所の選定法と減肉評価手法の2つが挙げられる。本稿では減肉評価手法、特に局所減肉許容基準に焦点を当てて比較を行った。

Table1 Comparison of pipe thinning management

	JSME 規格	海外規格
検査箇所の選定法	PWR : 全数測定 BWR : 過去のデータに基づく代表測定	予測コードに基づく代表測定
減肉評価手法	設計・建設規格に基づく一様減肉を仮定した必要最小厚さを適用	減肉面積に対応した局所減肉許容基準を使用

以下、代表的な海外規格として次の4つについて調査を行った。

- ・ ASME Section XI, Code case N-597-2
- ・ 原子力プラント機器設計・建設基準協会(AFCEN)の RSE-M 規格^[8]
- ・ 英国規格協会(BSI)の BS 7910 規格^[9]
- ・ 米国石油協会(API)の 579-1 規格^[10]

まず、JSME 規格をもとに、上記の4つの海外の減肉評価規格を比較し主な相違点を抽出した。比較に際し、減肉評価を行う上で重要となる次の6項目を選定した。

- ① 適用範囲
- ② 肉厚 (応力) 評価
- ③ 複数減肉の取扱い
- ④ 減肉率の取扱い

- ⑤ 余寿命評価の取扱い
- ⑥ 運転継続の判断基準

比較した結果を Table 2 にまとめた。

Table2 Comparison of requirement in overseas codes

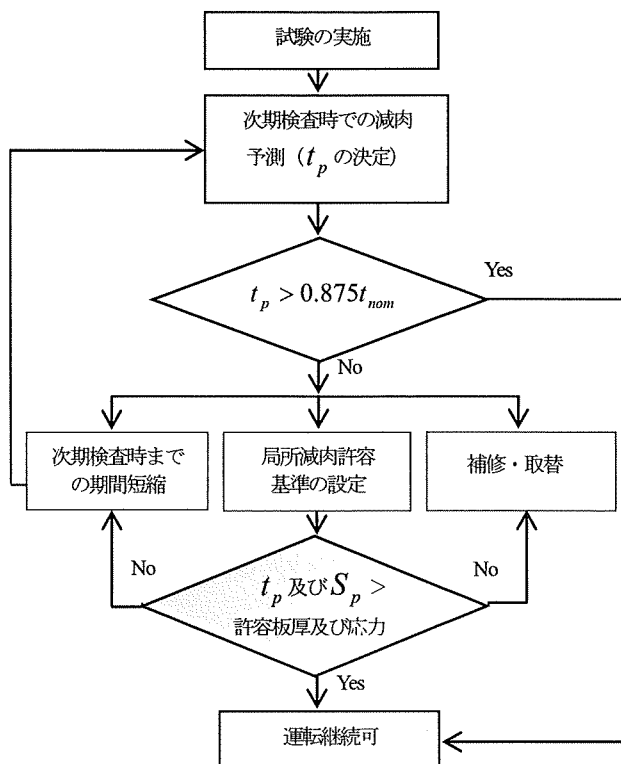
規格名	ASME N-597-2	RSE-M	BS 7910	API 579-1
国名	米国	フランス	英国	米国
適用範囲	・PWR/BWR プラントのクラス 1,2,3 配管 ・直管 (突合せ溶接部含む)・エルボ・レデューサ・分岐管継手	・PWR プラントのクラス 2,3 配管 ・直管・90° 曲げ管	鋼構造物の配管、圧力容器 (円筒型、球型)	圧力機器 (圧力容器、大型開放タンク)
最低肉厚要求	最低肉厚要求 (クラス別あり)	最低肉厚要求あり	最低肉厚要求あり	最低肉厚要求 (評価レベル別あり)
局所許容基準	許容肉厚及び許容応力	許容肉厚	許容応力	許容応力及び余寿命
複数減肉	複数個の減肉の相関性を評価	単一の減肉のみ	複数個の減肉の相関性を評価	レベル1の評価以外は複数個の減肉の相関性を評価
減肉率	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし
余寿命評価	記載なし	記載なし	記載なし	記載あり
運転継続判断	許容基準を満足すれば運転継続可 運転期間を短縮することも可	許容基準を満足すれば運転継続可	許容基準を満足すれば運転継続可	許容基準及び余寿命評価を満足すれば運転継続可 圧力を下げて運転することも可

3. 海外の局所減肉許容基準の比較

3.1 海外規格における局所減肉許容基準の比較

海外規格における局所減肉許容基準は、Table 2 に示す通り判断するパラメータがそれぞれ異なるため、規格の許容値をそのまま比較することは難しい。

Fig.2 に一例として ASME N-597-2 に基づく配管減肉評価のフローを示す。ASME 規格では、次回検査時の予測減肉厚さ t_p と減肉部に加わる軸方向応力 S_p を用いて、配管のクラス分類、配管要素の種類、減肉箇所の数と面積に応じた許容肉厚と許容応力に関する基準が設定されており、それを満足するかどうかで運転継続の判断がなされる。



(t_{nom} : 公称板厚、 S_p : 減肉部に加わる軸方向応力)

Fig.2 Flow sheet of pipe wall thinning management in ASME Code case N597-2

3.2 海外規格における余寿命評価法の比較

Table3 に国内外規格における余寿命評価法を比較した。この図に示すように、JSME 規格と API 579-1 には、余寿命評価に関する規定がある。しかし、ASME N-597-2、RSE-M、BS 7910 においては、減肉率に基づく寿命予測に関する規定はない。

Table 3 Comparison of residual life evaluation in overseas codes

	規定	余寿命
ASME N-597-2	なし	$\frac{t_p - t_{abc}}{k} \times 1.14 + 1$ 或いは $\frac{t_{resid} - t_a}{k} \times 1.14$
RSE-M	なし	$\frac{t_{resid} - t_a}{k} \times 1.14$
BS 7910	なし	該当する式なし
API 579-1	あり	$\frac{1}{k} (t_{resid} - RSF_a \cdot t_{min} \frac{M_f - 1}{M_f - RSF_a}) \times 1.14$

(M_f : Folias 係数、 RSF_a : 許容残存強度係数)

*最大減肉率 k の単位が mm/hr のため、時間のパラメータを算出する際、単位を hr から year に変換するため 1.14 を掛けた。

海外規格の局所減肉許容基準の配管減肉管理に対する影響を評価するため、JSME 規格の余寿命の算出法を参考として、ASME N-597-2、RSE-M における、測定時最小残存厚さ t_{resid} と局所許容基準値 t_{alloc} (または t_a) との差を最大減肉率 k で割って余寿命を算出し、余寿命評価の定量的な比較を試みた。

BS 7910 においては、許容応力が定められているものの、どの応力の値と比較すれば良いかに関する記載がない。このため、余寿命を算出できないので比較対象に入れていない。

4. 国内外規格における余寿命評価の比較

4.1 評価対象系統の選定

代表的な国内 PWR 原子力発電所の主要系統として、次の配管系統 (仕様) を選定した。

- ① 給水系統
 - ・最高使用圧力 12Mpa
 - ・最高使用温度 200°C
 - ・公称寸法 大口径 812.8mm×56.0mm
中口径 609.6mm×54.0mm
小口径 406.4mm×21.4mm
 - ・材料 SB410(小口径は STPT370)
- ② 復水系統
 - ・最高使用圧力 1.4Mpa
 - ・最高使用温度 200°C
 - ・公称寸法 大口径 711.2mm×12.0mm
中口径 508.0mm×12.0mm
小口径 318.5mm×10.3mm
 - ・材料 SB410(小口径は STPT480)

4.2 評価手順

4.2.1 減肉条件の設定

- ・減肉形状：半楕円体を仮定し、かつ公称板厚の厚さでの減肉面積の時間変化は考慮しない
- ・円周方向の減肉幅：角度 10°、20°、30°
- ・軸方向の減肉幅：50mm、100mm、150mm
- ・最大減肉率：JSME 規格の PWR 初期設定減肉率 (復水管 0.77mm/hr、給水管 0.94mm/hr)
- ・周辺に補強必要領域や溶接部の無い直管部で単一箇

所の減肉を仮定する

- ・一様減肉と組み合わせて考慮しない
- ・荷重は内圧のみとする
- ・定期検査は 1 年ごとに実施するものとする

4.2.2 比較評価の手順

- ① 配管仕様、減肉条件、材料強度の設定
国内外規格共通に設定した
最小引張強さは JSME 規格の値を使用し、安全係数は 4 とした
- ③ 運転開始からの経過時間 t (年) は 1 年毎に最大 58 年分の減肉進展を計算した
- ④ 各規格の局所減肉許容基準に基づいて、減肉面積に応じた局所減肉許容厚さを計算し、余寿命を評価した
- ⑤ ASME 規格の場合は、Fig.3 に示すように最小必要厚さを下回る範囲の面積を減肉面積としている

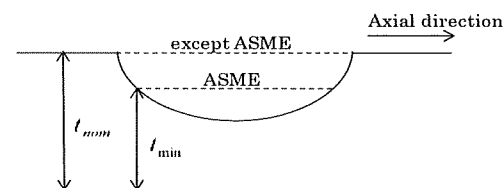


Fig.3 Definition of thinning area

4.3 評価結果

4.3.1 配管系統による余寿命の相違

給水系統と復水系統 (いずれも大口径) の余寿命の推移を Fig.4 及び Fig.5 に示す。

いずれも減肉面積が小さい (10°, 50mm) 場合である。

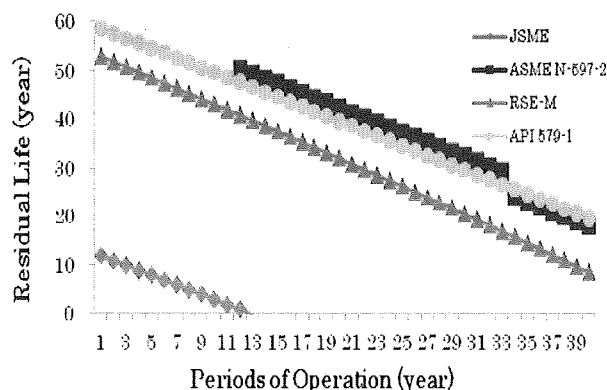


Fig.4 Residual life evaluation by JSME and overseas codes in Feed water system (Large size pipe)

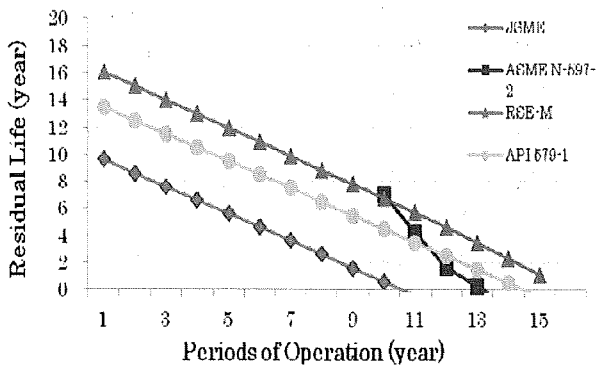


Fig.5 Residual life evaluation by JSME and overseas codes in Condensate water system (Large size pipe)

この結果から、高圧で肉厚の大きな給水系統では低圧の復水系統と比べ、局所減肉許容基準の導入により余寿命が大幅に長くなることが示された。また、海外の規格同士の余寿命の相違は比較的小さいことが示された。

ここで、ASME 規格の余寿命の傾向が他の規格と異なるのは、Fig.3 に示した減肉面積の定義の違いによるものである。

4.3.2 配管口径による余寿命の相違

給水系統において小口径の場合の余寿命の推移を Fig.6 に示す。この場合も減肉面積が小さい(10°,50mm) 場合である。

Fig.4 と Fig.6 を比較することにより、給水系統においては小口径でも局所減肉許容基準の導入により余寿命が大幅に長くなることが示された。また、同様に海外の規格同士の余寿命の相違は比較的小さいことが示された。

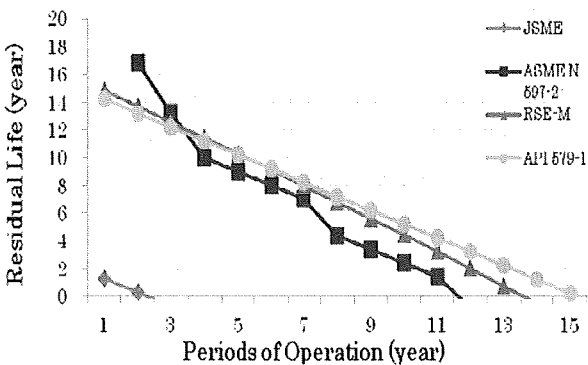


Fig.6 Residual life evaluation by JSME and overseas codes in Feed water system (Small size pipe)

復水系統における小口径の場合の余寿命の推移を Fig.7 に示す。この場合も減肉面積が小さい(10°,50mm) 場合である。

Fig.5 と Fig.7 を比較することにより、復水系統においては配管口径に関わらず局所減肉許容基準の導入による余寿命の延長は給水系統に比べて小さいことが示された。また、同様に海外の規格同士の余寿命の相違は比較的小さいことが示された。

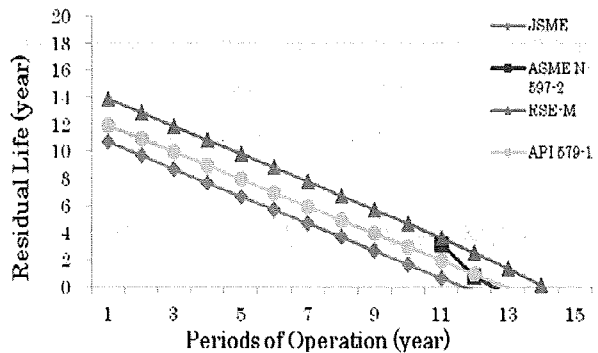


Fig.7 Residual life evaluation by JSME and overseas codes in Condensate water system (Small size pipe)

4.3.3 減肉面積による余寿命の相違

給水系統において減肉面積が大きい(30°,150mm) 場合の余寿命の推移を Fig.8 と Fig.9 に示す。

Fig.8 と Fig.9 を前述の Fig.4 及び Fig.6 と比較することにより、減肉面積が大きくなると配管口径に関わらず、海外規格の余寿命評価結果は JSME 規格の値に近づくことが示された。また、同様に海外の規格同士の余寿命の相違は比較的小さいことが示された。

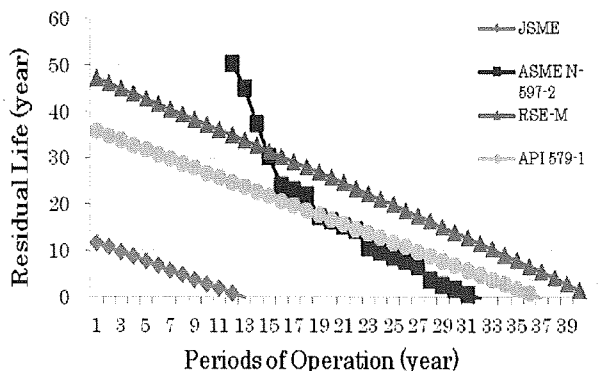


Fig.8 Residual life evaluation by JSME and overseas codes in Feed water system (Large size pipe and Large thinning area)

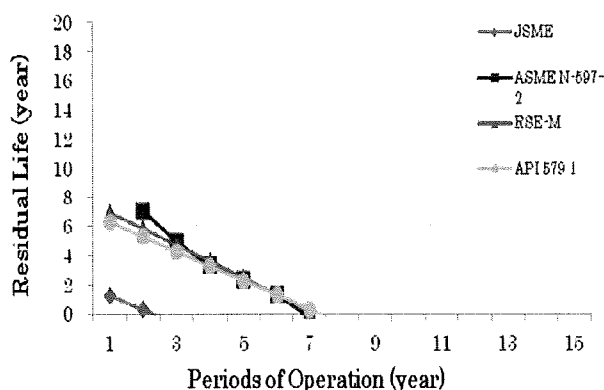


Fig.9 Residual life evaluation by JSME and overseas codes in Feed water system (Small size pipe and Large thinning area)

5. 局所減肉許容基準導入時の検討課題

局所減肉評価基準の導入は、配管減肉管理における詳細測定で得られた減肉面積測定記録を活用することにより、余寿命評価において大きな余裕が得られるため、海外の多くの規格に取り入れられている。また、評価対象とする配管のクラス分類、配管要素（直管、エルボ、レデューサ、T字管）や荷重（内圧、曲げ荷重）の種類、複数減肉の場合の相関性などを考慮した、より詳細な規格から比較的簡便な規格まで、用途に応じた様々な規格が作られている。その主な相違については、第2章のTable 2に整理した。

我が国の原子力発電所の配管減肉管理において局所減肉許容基準の導入を検討する際には、我が国独自の新たな規格を作成するという道もあるが、全ての項目を検証して規格を策定するには多くの労力と時間が必要となる。また、構造基準体系の整合性や国際統一化を考慮すれば、原子力発電所やボイラー設備などに適用する場合には、ASME規格を、石油関係の配管設備に適用する場合にはAPI規格の導入について検討するのが、今後の選択すべき方向であると考えられる。

6. まとめ

本稿では、海外の配管減肉管理規格を調査し、導入されている局所減肉許容基準の相違点を整理した。更にその違いが配管減肉管理においてどのような影響をもたらすかを余寿命評価の結果を比較することにより分析した。

その結果、局所減肉許容基準の導入は、配管肉厚の大きな高圧の系統（例えばPWRでは給水系統など）において余寿命が大きく延長されることが示された。また、これら局所減肉許容基準を導入している海外の規格間の余寿命評価結果の差は比較的小さいことが示された。

今回の比較は直管部における内圧荷重に限定した単一箇所の半楕円形状の減肉を仮定した板厚評価に対するものであり、限定された評価である。海外規格の要求には、応力評価や最低肉厚要求、複数減肉の相関など大きな相違があることも明らかとなった。

今後我が国の原子力発電所の設備の保全管理を適切に行い、原子力発電所のシステム安全を確保していく上で、これら海外の局所減肉許容基準を詳細に比較検討してその導入を図ることが重要な課題である。

参考文献

- [1] 日本機械学会「発電用原子力設備規格 沸騰水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格(2006年版) JSME S NH1-2006」
- [2] 日本機械学会「発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格(2006年版) JSME S NG1-2006」
- [3] 日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2011年版) JSME S NC1-2011」
- [4] 日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格(2011年版) JSME S NA1-2011」
- [5] 稲田文夫, 日本機械学会 2011年度年次大会 DVD-ROM 論文集(2011.9.11-14) F082005 減肉配管強度評価/判断基準に関する知見適用化の取り組み
- [6] 日本海事協会「船用配管板厚減肉の設計、点検指針(2007年版)」
- [7] ASME Section XI, Case N-597-2「Requirements for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning(2003年版)」
- [8] RSE-M Appendix 5.3 III.2「IN-SERVICE INSPECTION RULES FOR THE MECHANICAL COMPONENTS OF PWR NUCLEAR ISLANDS(2005年版)」
- [9] BS-7900 Annex G「The assessment of corrosion in pipes and pressure vessels(2005年版)」
- [10] API 579-1/ASME Fitness for service-1 PART 5「ASSESSMENT OF LOCAL METAL LOSS (2007年版)」

(平成24年6月25日)