

法規・規格

プラント圧力設備の供用適性 (Fitness-For-Service) 評価技術の動向

Status of Fitness-For-Service Assessment Technologies for Pressure Vessels

3次元計測・FFS評価システムの紹介と共に

(株)セイコーウェーブ 田原 隆康

1. はじめに

石油精製・石油化学産業などの設備保全に必要な規格Post Construction Codes、PCCは、ASME、APIが率先して作成してきたが、最近では、さらに大幅な改正を行ない適用手法や内容の充実を進めている。その中核をなす圧力設備の供用適性 (Fitness-For-Service、以下、FFS) 評価を示すAPI579-1/ASMEFFS-1は、世界的にも広く採用されているが、内容を一新してその第2版が2016年に発行された。この規格による圧力設備のFFS評価法の概要を減肉評価における3次元光計測・FFS評価システムと共に紹介する。

2. ASME PCC開発の経緯

1993年ASMEは、産業界のニーズに応えて供用中の圧力設備の検査・保全に適用できるエンジニアリング標準の作成に着手する臨時専門グループを結成し、その推奨に基づき圧力設備の製作・設置後の活動の共通事項と技術に関連した標準の開発と維持のためPost Construction Committee (PCC) を1995年に設立した。現在、ASME/API Joint Fitness-For-Service Standards Committee (FFSJC)、Subcommittee (SC) on Inspection Planning、

TG on Guideline for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly、SC on Repair and Testingにおいて第1表のような規格を作成している。

第1表 ASME PCC関連規格の発行状況

規格番号	規格名	最新版発行年
PCC-1	Guideline for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly	2013
PCC-2	Repair of Pressure Equipment and Piping	2015
PCC-3	Inspection Planning Using Risk Risk-Based Methods Standards	2007
API579-1/ASME FFS-1	Fitness-For-Service	2016
API579-2/ASME FFS-2	Fitness-For-Service Example Problem Manual	2009 2018 準備中
PTB-2	Guideline to Life Cycle Management of Pressure Equipment Integrity	2009

これらの規格はCodesではないが、API510、API570及びNB-23のようなPCC Codes及び法律規定と共に使用でき、一般的に認められ、受容されているGood Practice (適切な実用手法) として扱われている。又、ASME PCC規格はい

いずれも American National Standard (アメリカ国家規格) として承認されている。

3. API579-1/ASMEFFS-1 Fitness-For-Service⁽¹⁾

(1) API579-1/ASMEFFS-1, 2016における変更概要

API579-1/ASMEFFS-1 Fitness-For-Service は、2000年の初版としてのAPI579を含め、2007年版に続いて、2016年度版で3度目の発行となり、FFS評価法の充実と技術的向上を図った。

今回は、次のような点について大幅改正を行っている。

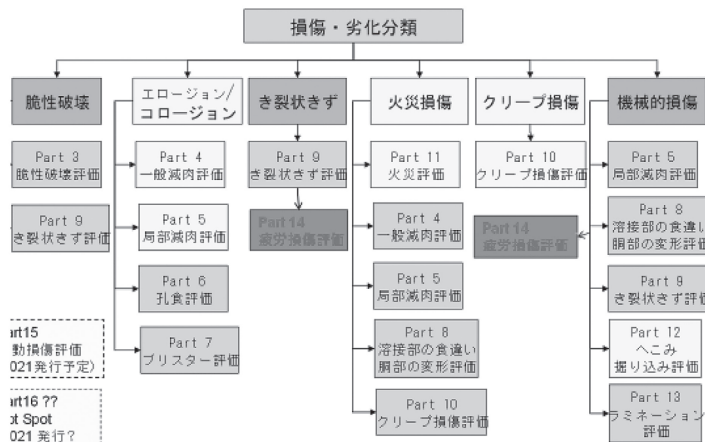
- 使用と更新を促進させるため規格構成の刷新

新 (関連Annexの各Partへの分散など) 第2表にPart 9での事例を示す。

- 適用機器設計規格の拡大
 - 許容残存強度係数 (RSF) 決定のAnnex追加
 - 局部減肉評価の新しい溝状キズの評価方法の追加と周方向のレベル2規定の簡素化
 - 亀裂状きず評価のきず形状合成方法及び溶接残留応力式、材料靱性決定方法の改良
 - クリーブ損傷評価の評価手順の改良
 - 火災評価の金属学的調査と機械的性質評価方法のAnnex追加
 - 疲労損傷評価のための新しいPart 14の開発
- その結果、2016年度版は、第1図に示すようにPart 3~Part 14までの12種類のFFS評価

第2表 規格構成の刷新 (Part 9 Assessment of cracklike flawの例)

9.1 General 一般
9.2 Applicability 適用範囲
9.3 Data requirements データ要求事項
9.4 Assessment techniques 評価技術
9.5 Remaining life assessment 余寿命評価
9.6 Remediation 処置
9.7 In-service monitoring 供用中モニター
9.8 Documentation 文書化
9.9 Nomenclature 用語
9.10 References 参考文献
9.11 Tables 表
9.12 Figures 図
Annex 9A - Technical basis and validation – assessment of cracklike flaws (Annex-H, H-7) 技術的基盤及び検証
Annex 9B - Compendium of stress intensity factor solutions (Annex-C) 応力拡大係数解
Annex 9C - Compendium of reference stress solutions for crack-like flaws (Annex-D) 参照応力解
Annex 9D - Residual stress in a fitness-for service evaluation (Annex-E) 溶接残留応力
Annex 9E - Crack opening areas (Annex K) 亀裂開口面積
Annex 9F - Material properties for crack-like flaws (Annex F) 材料特性
Annex 9G – Stress analysis for crack-like flaws (Annex B1,B1.7) 応力解析 (): 2007年度版



第1図 API579-1/ASME FFS-1, 2016 FFS評価手法

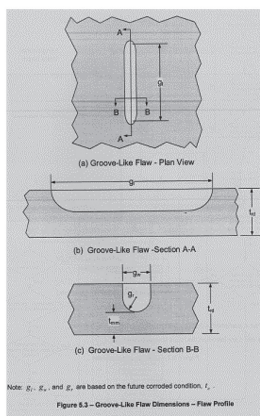
方法が規定されている。なお、Part 15 Piping Vibration Assessmentも現在作成中で次版に追加される見込みである。

2016年度版での改正では、Part 5 Assessment of Local Metal Lossにおける溝状きずの評価法の溝底半径の規定が保守的であった点を第2図のように見直し、亀裂状きず (Part 9) との適用区分を明確にした。

Part 5 Local Metal Loss
Groovelike LTA
(溝状減肉の評価)

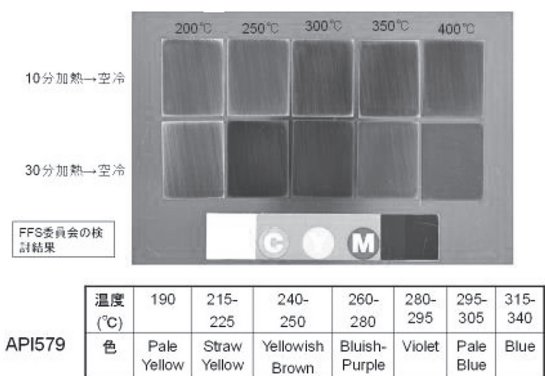
Step 6 Groove Alternatives to Equations for groove rules
これまでのGrooveの評価法が保守的だったことを修正

- $gr/(1-Rt)tc \dots Eq.5.11$
- ① 0.1以下
Part9 (cracklike flaw)で評価
 - ② 0.1-0.5
Table 5.3又はPart9で評価,
 - ③ 0.5以上
(Eq5.11) LTA (Not groove)としてMAWPの計算



第2図 溝状減肉の新しい評価方法

Part 14 Assessment of Fire Damagesに対しては、日本からこの規格の作成に協力してきた石連／石化協FFS基準委員会で作成した高温暴露材のカラー写真による色見本や、顕微鏡組織写真、材料特性が採用され、より実用的な火災損傷評価法にすることができた (第3図)。



第3図 火災損傷評価におけるテンパーカラー色見本

4. 疲労損傷評価

圧力容器の疲労設計法は、ASME Sect. VIII, Div. 2, Part 5, 5.5 Protection Against Failure from Cyclic Loadingで規定しているが、FFS評価における疲労損傷評価法Part 14は ASME Sect. VIII, Div. 2の規定手法も採用して、Damage Tolerance Approachにより供用中の対象機器の連続運転が許容されるかを決定するのに次のような場合に使うことができる。

- 製作時の設計条件と比較して、将来運転の荷重の大きさとサイクル数の増加が可能か？
- 連続運転が可能かを決定するために、過去の荷重・時間経歴に計画される将来荷重・時間履歴が評価される合計時間に対して適切か？
- 疲労損傷のFFS評価は、元の設計の機械的・熱的サイクルを受ける部材、激しい又は予知しない振動を受ける部材、又は脈流動などを受ける場合等に採用できる
- この疲労損傷評価法は、Level 1からLevel 3において多くの評価方法が適用可能適用範囲としては、以下のとおり。
 - 温度 (クリープ領域外クリープ領域はPart 10による)
 - きずタイプ
 - (1) 全面減肉、局部減肉、孔食などの体積をもつ損傷、溶接部の食い違い等を有する部材に適用可能
 - ① Level 1: 残存強度係数RSFによる
 - ② Level 2: 体積を持つ損傷は、応力解析必要
 - (2) 以下のキズは適用外
 - ① 亀裂状キズ (Cracklike Flaw, Part 9 参照)
 - ② Level 1, Level 2: dent, gouge, dent-gouge combination
 - ③ HIC、階段状きず又はSOHIC損傷

• 評価レベル

疲労損傷評価のレベルと方法を第3表に示す。その概要は、以下のとおり。

• Level 1 – Fatigue Screening Criterion

詳細疲労解析の要否判断に適用でき評価判定法は、ASME Sect. VIII, Div.2, Part 5に基づき、運転中の機器部材用に行っている。第4表にレベル1のFatigue Screening

Criteriaを示す。

- Level 2 評価法は、ASME Sect. VIII, Div.2, Part 5に基づき、運転中の機器部材用に改良されている。過去・将来の荷重・時間履歴は、温度勾配を含んだ荷重の繰り返し特性で示される。

一次、二次、ピーク応力はVIII, Div.2に基づき計算され、応力又はひずみ振幅に対す

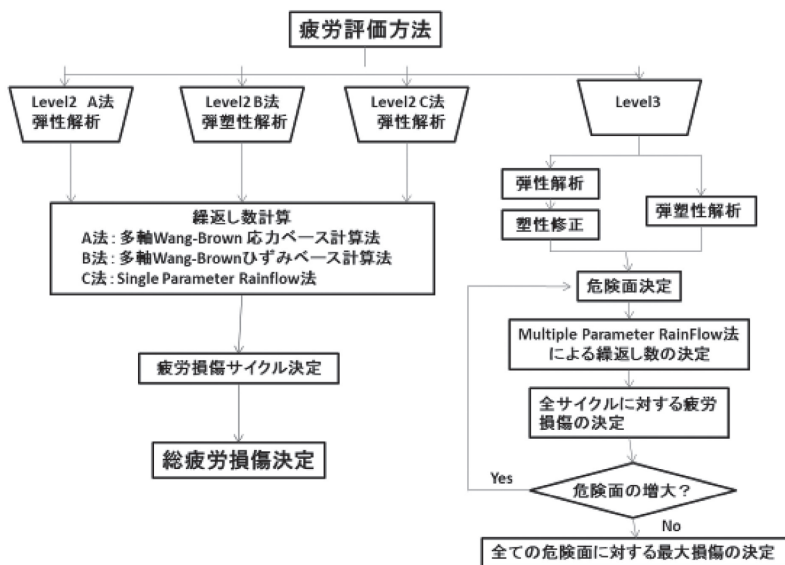
第3表 疲労損傷評価のレベルと方法

レベル	方法	評価手法
1	A	疲労スクリーニング(同様の機器の経験による)
	B	疲労スクリーニング(平滑材疲労曲線データなどによる)
	C	疲労スクリーニング(平滑材疲労曲線データなどによる)
	D	疲労スクリーニング(溶接継手疲労曲線データによる)
2	A	疲労評価(弾性応力解析及び相当応力による)
	B	疲労評価(弾塑性応力解析及び相当応力による)
	C	疲労評価(溶接部、相当構造応力による)
	—	ラチェット評価-弾性応力解析
—	ラチェット評価-弾塑性応力解析	
—	ラチェット評価-ねじ接手など本体と非一体型継手	
3	A	弾性解析と限界面手法(Critical Plane Approach)
	B	弾塑性解析と限界面手法
	C	一般に認められている規格・基準による方法

第4表 Level 1 Fatigue Assessment Screening Criteria

- より詳細な疲労評価法の必要性を検討するためのFatigue Screening Criterion。
- どれかの疲労スクリーニング法を満足すればLevel 2又はLevel 3による評価は不要。

区分	評価評価
A	Fatigue Screening Based on Experience with Comparable Equipment 同様な条件下運転される同等の機器の経験による方法 (疲労損傷と余寿命は、線形弾性応力解析から得られた有効相当応力範囲をもとに計算)
B	Fatigue Screening 構造材料 (限定された適用性)、構造詳細、荷重履歴及び平滑試験片による疲労曲線データによる方法 (疲労損傷と余寿命は、弾塑性解析から得られた有効相当ひずみをもとに計算される)
C	Fatigue Screening 構造材料 (限定された適用)、構造詳細、荷重履歴、及び平滑試験片による疲労曲線データによる方法 (疲労損傷と余寿命は、線形弾性解析と溶接継手疲労曲線から得られた相当構造応力範囲をもとに計算される)
D	Fatigue Screening, Welded joint 構造材料 (限定された適用)、構造詳細、荷重履歴、及び溶接継手疲労曲線データによる方法 (溶接継手のScreening Procedureは、開発中。とりあえず Method Bを使うことを薦めている)



第4図 レベル2及びレベル3一般手順

る許容繰返し数は、疲労曲線から決められる。

- Level 3 市販のFEMソフトをともなったPost processing softwareを使った最新の評価技術を含んでいる。

第4図にレベル2及びレベル3の一般手順を示す。

Part 14の疲労損傷評価法の理解には以下のような文献を参照するとよい。

- A.Stenta, E.Gassama, D.Sprimg, C.Panzarella, and J.Cochran, Standardization of Fatigue Methods for Use in API579-1/ASME FFS-1 Welding Research Council Bulletin 550
- A.Senta, E.Gassama, D.Spring, J.Cochran, C.Panzarella, D.Osage Summary and Application of the New Rules in Part 14 of API579-1/ASME FFS-1 and WRC 550, PVP2016-63678

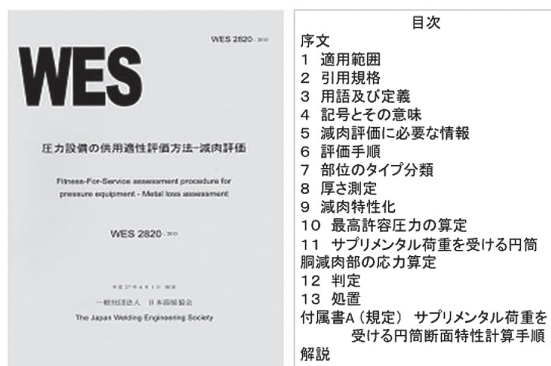
5. 減肉部のFFS評価

圧力設備の減肉に対するFFS評価は、日本溶

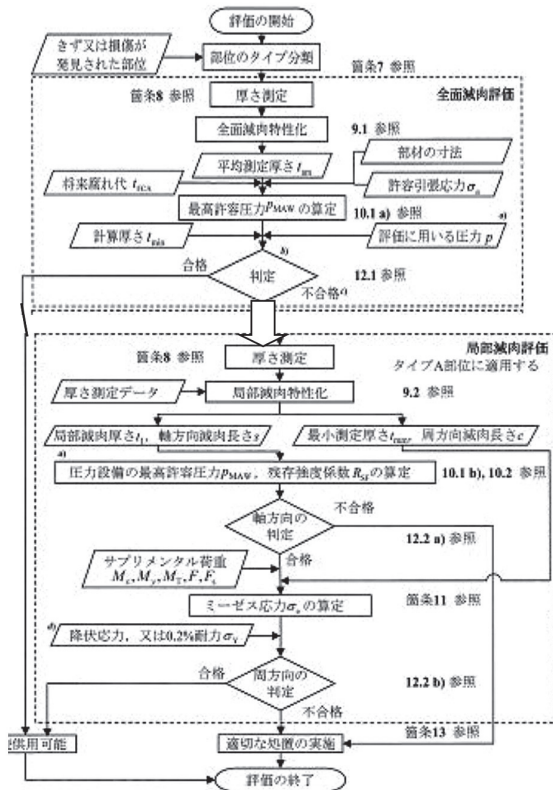
接協会化学機械溶接研究委員会において、石油連盟・石油化学工業協会供用適性評価基準委員会がAPI579-1/ASME FFS-1規格に基づいて作成した原案をもとに作成したWES2820-2015「圧力設備の供用適性評価方法－減肉評価」として発行されている（第5図）⁽²⁾。

この規格に規定する圧力設備の減肉部の評価法には、全面減肉評価法と局部減肉評価法があり第6図に示すような手順により行われる。

減肉部のFFS評価には以下のような残存強度係数を元にして評価され、最高許容圧力又は、許容応力による判定が採用できる（第7図）。



第5図 WES2820-2015 圧力設備の供用適性評価－減肉評価



第6図 減肉評価手順 (WES2820-2015)

残存強度係数 = $\frac{\text{減肉を有する圧力設備の塑性崩壊荷重}}{\text{健全な圧力設備の塑性崩壊荷重}}$

- 残存強度係数は減肉による強度の残存度合いを示す
- (RSF=0.9なら、元の形状の90%の強度が残存している。言い換えると減肉によって10強度が低下している)
- 局部減肉評価の判定に利用
- 減肉形状から残存強度係数を算定

$$R_{SF} = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)}$$

残存強度係数

減肉部の厚さの無次元値

フォリアスファクター(軸方向減肉長さの無次元値の関数)

— 最高許容圧力による判定 (軸方向断面)

— 許容応力による判定 (周方向断面)

$$p \leq p_{MAW}$$

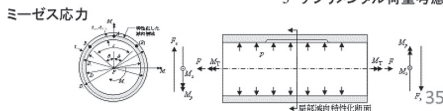
$$p \leq \min \left[\frac{R_{SF}}{0.9} p_{MAW}, p_{MAW} \right]$$

きず、又は損傷の無い箇所
の測定厚さを用いて算定した
最高許容圧力

$$\max[\sigma_c^A, \sigma_c^B] \leq H_f \left(\frac{\sigma_a}{0.9} \right)$$

許容引張応力

H_f 定数 : 1 サプリメンタル荷重~0
3 サプリメンタル荷重考慮



第7図

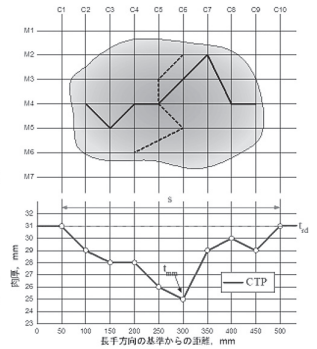
(1) 減肉部の3次元計測とFFS評価

減肉部の形状、厚さの詳細計測は、第8図のような詳細厚さ測定法が採用され、これまで超音波パルス反射法の利用などが一般的であるが、腐食部全体を的確に測定するには、深さのばらつきなどから事前の表面手入れ、測定法の設定、測定精度の確保に時間と技術を要する。写真1に示すように光3次元計測法を使うことで、従来、手作業で行っていた詳細厚さ測定(第8図参照)において、最小厚さ部を確実に含む最適なグリッド間隔によるCTPが即座に得られ、CSVデータをFFS評価プログラムに取り込むことにより、測定現場でFFS評価と処置の判断が迅速に行えるようになった⁽⁴⁾。

CTP: Critical Thickness Profile (限界断面厚さ形状)

CTPの作成およびsの決定

- 検査グリッド設定
・グリッド間隔を決定
- グリッド交点の厚さ測定
- 長手方向・周方向毎に厚さの最小値をプロットし、折線でつなぐ
- 全測定のうち最小厚さ t_{min} を求める
- 評価時における健全部の厚さ t_{id} より低い長手方向の減肉長さを測定



第8図 減肉厚さ測定法 - 詳細厚さ測定法

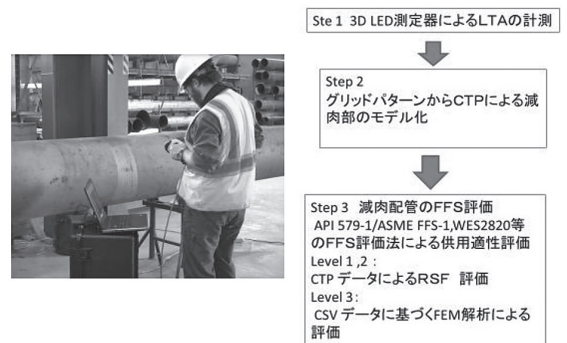
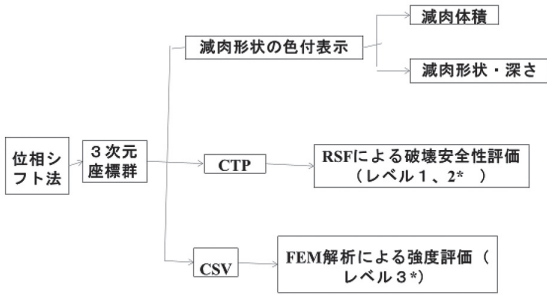


写真1 3次元減肉測定とFFS評価ステップ

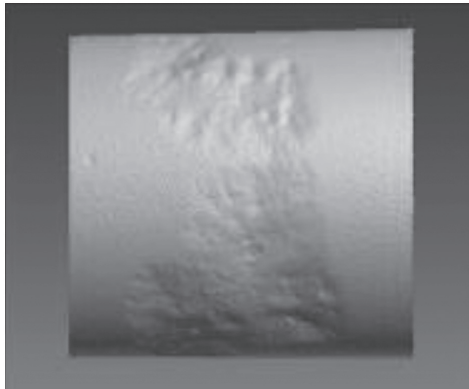
又、第9図に示すように3次元計測データから、減肉形状に関する多くのデータを迅速に入手できるので、FFS評価のみならず、その後の



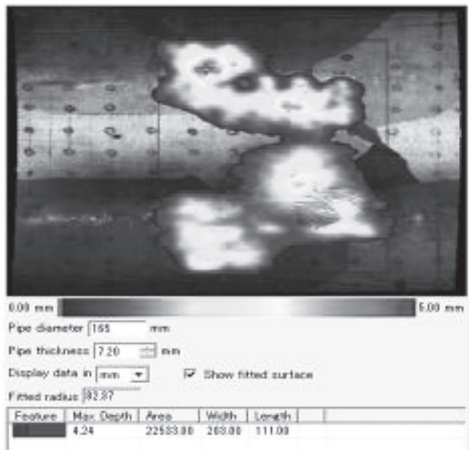
*: API 579-1/ASME FFS-1, 2007, Part2 及び WES2820-2015

第9図 3次元計測データからFFS評価への展開

補修などの処置にも必要なデータが得られる。
 第10図は、3次元計測により得られた配管減肉部の合成データ及び減肉深さのカラーマップ



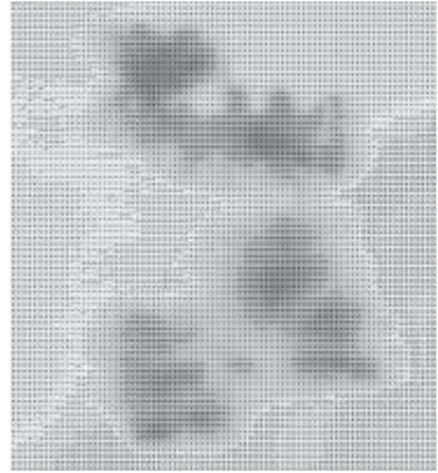
(a) 3D測定データ



(b) 減肉深さのカラーマップ

第10図 腐食配管の3D測定データと腐食深さのカラーマップ

を示す。又第11図に3次元計測結果のCSV表示を示す。



第11図 腐食カラーマップのCSVデータ

(2) 配管外面腐食の3次元計測とFFS評価例
 長期間使われ保温材下腐食 (CUI) による外面減肉を有する配管材の諸元を第5表に示す。

第5表 配管材の諸元

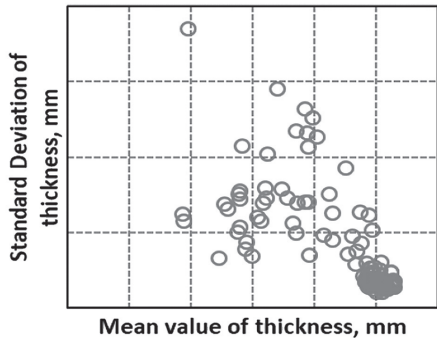
外径 (mm)	厚さ (mm)	供用期間 (年)	設計圧力/温度 (MPa/℃)	材料の引張許容応力 (N/mm ²)
165	7.2	37	5.0/85	118
CUI 減肉配管外観		減肉部に長手方向11、周方向13、計143 点のグリッドポイントで超音波厚さ測定を22 名の検査員によりラウンドロビンテストを事 前に実施		

この試験では、事前に計測グリッドを設定して、22人の検査員が同じ測定点を測定したにも係わらず、減肉が深くなるにつれてばらつきが大きくなり、深い減肉部ほど測定が難しくなることが分かる (第12図、第13図)⁽³⁾。

一方この結果から、減肉部の残存強度係数RSFを計算すると、平均値 $0.709 < \mu_m < 0.729$ 、標準偏差 $0.018 < \sigma_m < 0.033$ となり、減肉により配管の破壊強度が30%程度低下していることが分かる。RSF値のばらつきは、破壊安全性に差

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
M1	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.9
M2	7.1	7.1	7.1	7.1	6.1	4.9	5.1	7.0	7.0	7.0	7.0
M3	7.0	6.5	5.4	5.4	5.6	4.8	5.0	6.9	6.9	6.9	6.9
M4	6.9	6.6	4.9	4.9	5.7	5.2	5.1	6.7	6.8	6.9	6.8
M5	6.9	6.7	4.6	4.3	5.6	6.0	6.0	6.7	6.8	6.8	6.8
M6	7.0	6.9	5.6	3.9	5.2	6.7	6.9	6.9	6.9	6.9	7.0
M7	6.9	6.9	6.1	4.9	5.8	6.9	6.9	6.9	7.0	7.0	7.0
M8	6.8	6.8	7.0	5.8	6.5	6.8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.9
M9	6.9	6.9	5.7	4.4	4.8	5.3	5.9	7.0	6.9	7.0	7.0
M10	7.0	6.9	6.5	6.2	6.4	7.0	5.5	7.0	7.0	7.0	7.1
M11	7.0	7.0	7.1	7.1	7.2	4.5	4.3	7.1	7.1	7.2	7.2
M12	7.1	7.2	7.2	7.1	7.2	6.1	5.9	7.2	7.2	7.2	7.3
M13	7.3	7.2	7.3	7.2	7.2	7.3	7.4	7.3	7.3	7.2	7.3

第12図 超音波による減肉部の厚さ測定の場合



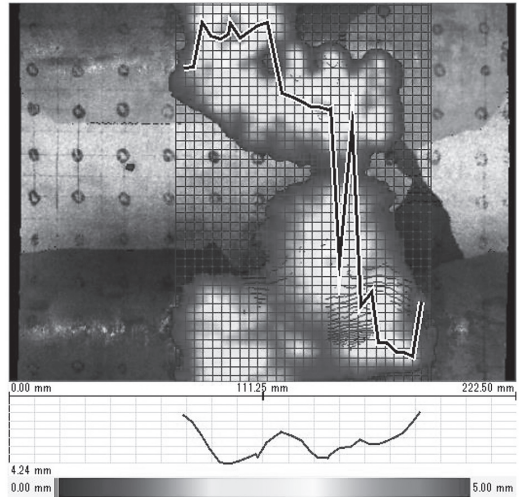
第13図 RRTによる厚さ測定にばらつき例

が出ることになるが、測定前の表面手入れ、グリッドサイズ・位置の決定、検査員の経験、探触子の選定などの標準化と経験が必要である。

一方、同じ試験材の腐食減肉部を3次元計測装置で測定した例を写真2に示す。第14図に示すように3次元計測結果は、減肉深さを色表示でき、又測定値のグリッドも任意に選べるので、

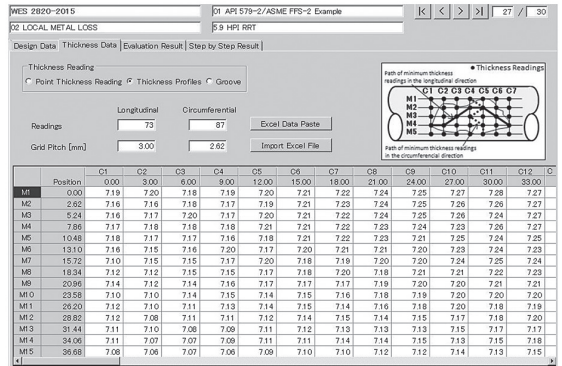


写真2 試験配管の計測状況

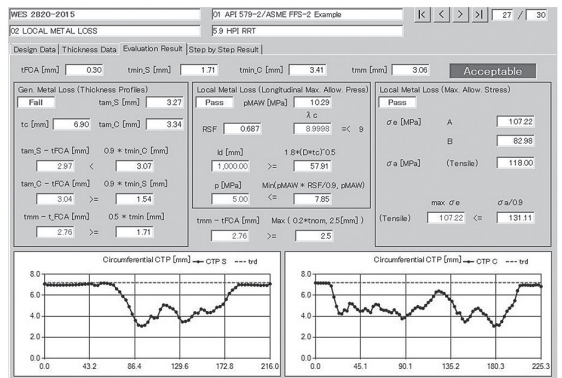


第14図 カラーマップとCTP

測定誤差を最小限にできる。第15図、第16図に減肉配管のFFS評価プログラム⁽⁵⁾による評価例を示す。



第15図 減肉形状のCSV表示



第16図 FFS評価結果

6. おわりに

圧力設備の設備保全では、光3次元計測技術などの測定技術の急速な進歩や、FFS評価技術の改良が進み、迅速に的確な判断と将来予測が行えるようになった。

現在進められている設備保全のスマート化においても、事業所認定などに必要なRBI、AI、IoTなどの技術を進化させるうえでもFFS評価技術は重要なツールとなろう。

<参考文献>

- (1) API579-1/ASME FFS-1, 2016
- (2) WES2820-2015 圧力設備の供用適性評価方法－減肉評価
- (3) HPS Z109TR : 2016 信頼性に基づく圧力設備の減肉評価方法
- (4) 構造化光3次元計測装置 3DSL-Rhino-DAS™
- (5) 供用適性評価ソフトウェア Uni-Fitness™

【筆者紹介】

田原 隆康

(株)セイコーウェブ

圧力設備技術顧問

<主なる業務歴および資格>

(株)日本製鋼所：大型圧力容器の材料、設計、製作、QA、保全業務。

(一社)日本高圧力技術協会：圧力容器技術開発、標準化業務。石連連盟：圧力設備の供用適性評価技術の普及、規格化業務。(現在)(株)セイコーウェブ：3次元形状計測機器の拡販、供用中機器の欠陥測定・FFS評価システムの開発。

工学博士（東京工業大学）、ASMEフェロー
<会社の主な事業内容>

LED構造化光法による3次元形状計測機器の開発及び販売。

