

特集：プラント圧力設備の供用適性評価技術の動向**供用適性評価に関する国内外規格の最新動向**住友化学株式会社
戒田 拓洋**1. はじめに**

石油精製、石油化学プラントの主要な設備である圧力設備では、経年化に伴ったきず又は損傷が顕在化しており、これらのきず又は損傷に対して、適切な処置方法を選択することは重要な課題である。きず又は損傷が発見された圧力設備を継続供用するか、又は補修、取替えなどが必要かを工学的に判断するための評価は、供用適性 (Fitness-For-Service, FFS) 評価と呼ばれ、損傷の種類に応じて評価の方法が提案され、欧米を中心に規格化がされてきた^{1) 2) 3)}。国内では、石油連盟、石油化学工業協会に設けられた供用適性評価基準委員会において、API 579-1/ASME FFS-1¹⁾を基にした圧力設備の供用適性評価基準が作成されたが、FFS 評価をより使いやすくするために、日本の実情に合致した公的な FFS 評価規格の発行が望まれていた。以上の背景から、(一社)日本溶接協会化学機械溶接研究委員会では、FFS 評価のうち、現在国内に規格のない、一般圧力設備を対象とした減肉評価法について、規格原案の作成検討を実施し、2015年6月に日本溶接協会規格 WES 2820 として制定された。

以上のように、近年、FFS 評価技術に関連する活動が活発化している。ここでは、FFS 評価技術及びその規格化に関する最近の動向を解説する。

2. 供用適性 (Fitness-For-Service, FFS) 評価とは**2.1 圧力設備診断の手順**

FFS 評価は、検査によってきず又は損傷が発見された圧力設備の次回検査までの継続供用、補修、取替えなどの対応策の決定に適用するものである。圧力設備のきず又は損傷に対する圧力設備診断の一般手順を次の a)~e) に示す (図 1 参照)。

a) きず又は損傷の検出

検査計画にしたがって、きず又は損傷の有無を確認する。

b) きず又は損傷の原因調査

きず又は損傷が認められた場合には、非破壊検査を行って状況を確認し、原因を調査する。原因調査では、メンテナンス履歴及び運転履歴を確認する。石油精製、石油化学設備に発生するきず又は損傷の特徴、対応をまとめた規格として API RP 571、JPI-8R-12 が挙げられる。

c) FFS 評価方法の選択

きず又は損傷の原因から FFS 評価方法を選択する。例えば、疲労による割れ、応力腐食割れなどの先端が鋭いきずには亀裂状欠陥評価が適用され、腐食、磨耗などには減肉評価が適用される。高温環境で運転される設備にはクリープ損傷評価が適用される。

d) きず又は損傷の特性化

きず又は損傷を工学的に評価可能となるように特性化を行う。

e) 判定

評価指標となる物理量（最高許容圧力、計算厚さ、応力拡大係数など）を算定し、きず又は損傷の合否判定を行う。合格の場合には、当該部位はきず又は損傷を残したまま次回検査までの継続供用が許容される。不合格の場合には、当該部位は適切な処置を行う必要がある。処置の例として、将来腐れ代の見直し、補修、取替え、再定格、有限要素法などの詳細解析による構造健全性評価の実施が挙げられる。

現在、発行されている一般的な FFS 評価規格では、手順 c)、d)、e) の具体的方法を規定している。a)、b) のきず又は損傷の検出、原因調査の結果は FFS 評価に大きく影響するため、圧力設備診断の専門家が検査、原因調査を実施することが重要である。

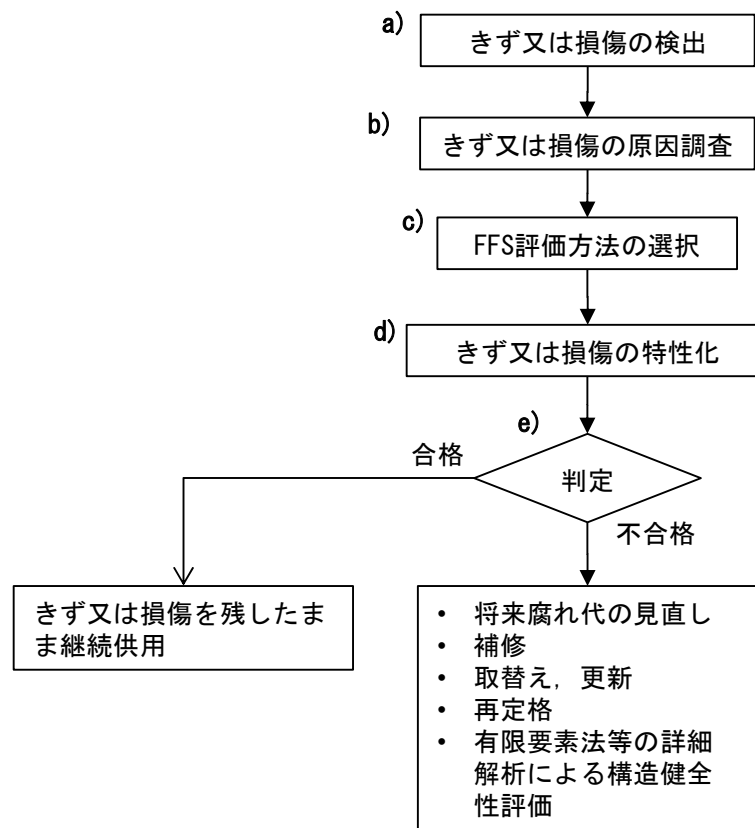


図1 きず又は損傷に対する圧力設備診断の一般的手順

2.2 FFS 評価規格の変遷

欠陥評価としての FFS 評価規格の変遷を図 2 に示す。FFS 評価規格の開発は、大きく次のような流れを経て進められてきた。

a) 1970 年代～

非破壊検査技術と破壊力学の発展とともに、溶接欠陥を含む構造物の健全性を評価するための欠陥評価規格が発行された。

b) 1990 年代後半～

欧米を中心に様々なきず又は損傷を取り扱う総合的な規格開発が進んだ。

c) 2000年代～現在

欧米での規格開発が一段落する一方、日本国内での FFS 規格開発が進んだ。

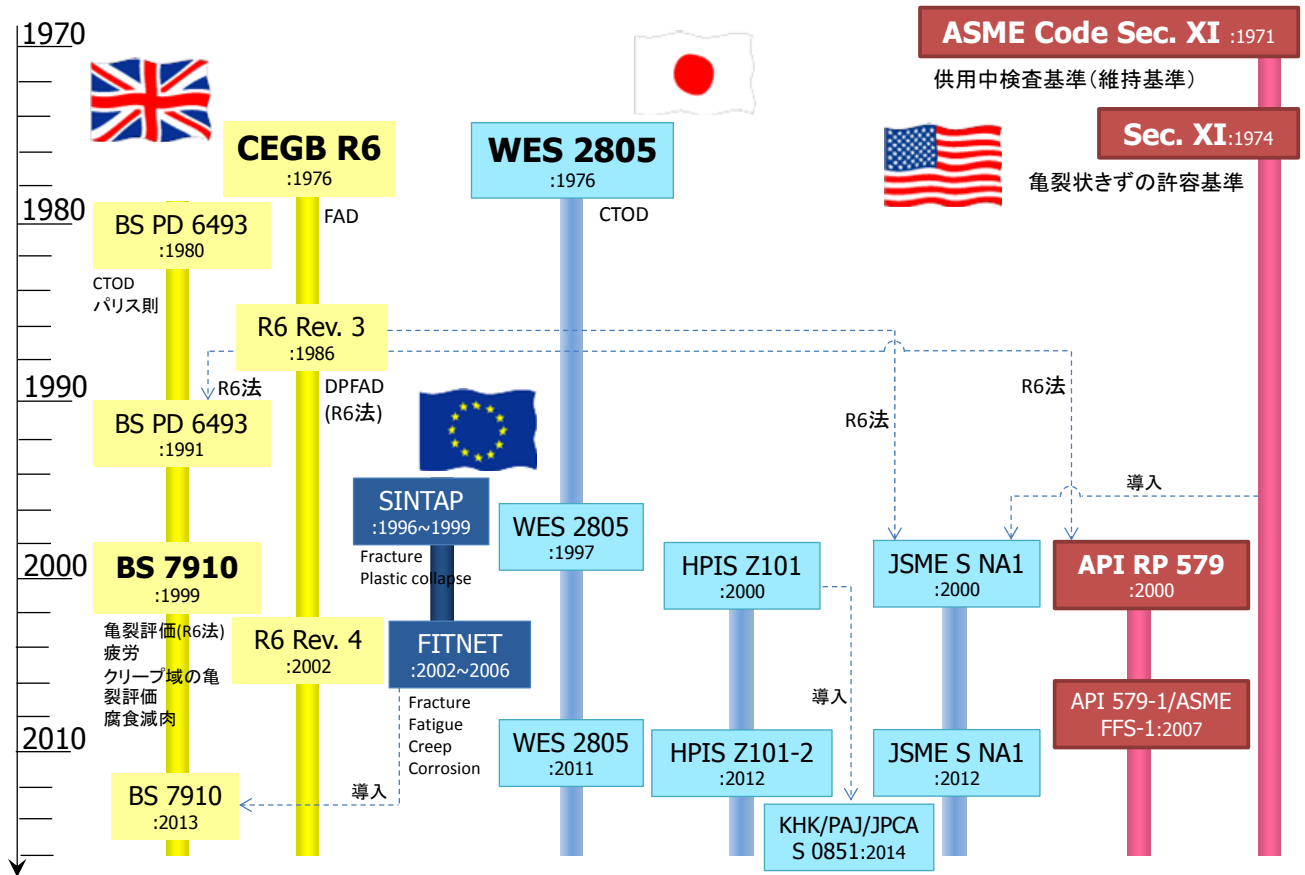


図 2 欠陥評価規格としての FFS 評価規格の変遷

3. 一般圧力設備を対象とした FFS 評価関連の国内外規格の動向

3.1 米国の動向

a) 米国石油協会 (American Petroleum Institute, API) 規格

API では石油精製設備に関連する各種の規格を制定している。代表的な規格を次に示す。

- API 510 Pressure Vessel Inspection Code
- API 530 Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refinery
- API 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry
- API 579 Fitness-For-Service
- API 580 Risk-Based Inspection
- API 941 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures

この中で、API RP 579 (2000 年初版発行) は、主に石油精製、石油化学設備で経験される 9 種類のきず又は損傷に対して継続供用性を評価する方法を規定したものである。API RP 579 は、発行後、国際的なデファクトスタンダードの一つとして発展した。英国の研究機関の調査⁴⁾では、FFS 評価技術の適用経験がある石油化学事業者の 40%が、API RP 579 を利用していると報告されている。

API RP 579 (2000)の目次を抜粋して次に示す。

- 3 章 ぜい性破壊
- 4 章 全面減肉

- 5章 局部減肉
- 6章 孔食
- 7章 ブリスター、水素誘起割れ (HIC)、応力支配水素誘起割れ (SOHIC)
- 8章 溶接目違い、シエルのゆがみ
- 9章 亀裂状欠陥
- 10章 クリープ損傷
- 11章 火災損傷

API RP 579 の特徴は、設計時に許容されないきず又は損傷（亀裂、設計時の最小必要厚さを下回る減肉、設計温度を上回る）を評価対象としていることである。また、それぞれのきず又は損傷に対して、API RP 579 では、3つの評価レベルを提供している。各レベルの評価の特徴を次に示す。

- レベル1 評価 最低限の情報による簡易評価
- レベル2 評価 レベル1 評価よりも多くの情報を利用した詳細評価
- レベル3 評価 有限要素法を用いた応力解析を前提とした最も詳細な評価

API RP 579 では、レベル1 評価からレベル3 評価のうち、いずれかの一つに合格すれば、次回検査時期まで、きず又は損傷を残したまま継続供用が可能としている。高いレベルになるほど、適用範囲が広く、より大きなサイズのきずを許容できる傾向がある一方で、評価にかかるコストが大きくなる傾向がある。

b) 米国機械学会 (American Society of Mechanical Engineers, ASME) 規格

供用適性評価技術に関連して、ASME では、1995 年に Post Construction Committee (PCC)を設立し、圧力設備建設後のメンテナンスに関する規格作成に取り組んでいる。ASME からは、これまで次の3つの PCC 規格が発行されている。

- PCC-1 Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly
- PCC-2 Repair of Pressure Equipment and Piping
- PCC-3 Inspection Planning Using Risk-Based Methods

当初、PCC の下には、PCC-1 から PCC-3 のほか、新しい FFS 規格作成のための委員会が設立された。その後、API RP 579 (2000)が発行されたことを契機に、API と ASME は、FFS 規格開発の効率化、資金の共同出資、規格のさらなる普及を目的として、FFS 規格作成のための Joint Committee を設立した。同委員会で規格開発が進められ、API 579-1/ASME FFS-1:2007 として発行された。これにより、ASME との共同規格となった API 579-1/ASME FFS-1 は、API RP 579 2nd edition の位置づけに加え、ASME の圧力設備設計規格と対をなす維持規格としても位置付けられた。API RP 579:2000 で適用対象となっていた9種類のきず又は損傷に加えて、新たに次の2種類のきず又は損傷が評価方法に加えられた。

- 12章 デント、デントーガウジ
- 13章 ラミネーション

3.2 欧州の動向

a) FITNET プロジェクト

欧州における最近の供用適性評価技術関連の動向として、FITNET プロジェクト (<http://www.eurofitnet.org>) が挙げられる。このプロジェクトは、ヨーロッパの FFS 技術を集約したものとして 2002 年に開始したもので、16 か国、41 の企業、研究機関、大学が共同参画した。2008 年1月に規格の最終版 (MK8) が発行された後、プロジェクトを終了している。FITNET プロジェクトの成果は、英国規格 BS 7910 の改正の際に取り込まれた。

API 579-1/ASME FFS-1 が石油精製、石油化学協会に特化したきず又は損傷ごとに評価手法を準備しているのに対し、FITNET はさまざまな工業分野を対象に、プリミティブな評価モジュールを提供しているものである。API 579-1/ASME FFS-1 及び FITNET の技術的背景には、共通事項も多い。

b) 英国規格 (British Standard, BS)

BS では、溶接欠陥を含む構造物の健全性を評価する規格作成に取り組んでおり、規格の前段階の公式文書 (Published Document, PD) として、BS PD 6493 が 1980 年に発行された。BS PD 6493 をベースに、英国規格 BS 7910 が 1999 年に発行されている。BS 7910 には評価方法として、破壊評価だけでなく、疲労、クリープ亀裂進展、減肉評価等が含まれている。3.2 a) に示したように、BS 7910 は 2013 年の改定で、FITNET の成果を大幅に取り入れた。BS 7910 の主な構成を次に示す。

- Assessment for fracture resistance
- Assessment for fatigue
- Assessment of flaws under creep and creep/fatigue conditions
- Assessment for other modes of failure

なお、"Assessment for other mode of failure"の一つに減肉評価が記載されている。(Annex G The assessment of locally thinned areas)

3.3 日本の動向

3.3.1 亀裂状欠陥評価規格

日本の供用適性評価の分野では、溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法を示した規格である WES 2805 が、日本溶接協会から 1976 年に発行されている。1990 年代には、特定の産業に特化した亀裂状欠陥評価規格の開発が進められ、日本高圧力技術協会から、一般圧力設備の亀裂状欠陥評価方法を示した規格である HPIS Z 101 が、日本機械学会からは、発電用原子力設備を対象とした維持規格である JSME S NA1 が共に 2000 年に発行された。2003 年には、日本溶接協会から、動的繰返し大変形を受ける溶接鋼構造物ぜい性破壊性能評価方法を示した WES 2808 が発行されている。

これらの欠陥評価規格の内、HPIS Z 101 及び JSME S NA1 は当該設備のメンテナンス時に適用されるものであり、設備の設計規格と対をなす維持規格の範疇にある。学協会が自主的に発行するこれらの技術規格に対し、法規制を受ける設備に対して利用しやすくするように検討された仕組みが、法規制の性能規定化である。以下に、高圧ガス設備における保安検査の方法の性能規定化について概説する。

3.3.2 高圧ガス設備における保安検査の方法の性能規定化⁵⁾

日本における高圧ガス製造事業所は、都道府県知事等第三者による保安検査を年 1 回受ける義務がある。ただし、経済産業省から認定を受けた事業所は、自主保安検査を行い、その結果を都道府県知事に届け出れば足りる。従来、この保安検査の方法は、経済産業省令において詳細方法を規定していた (仕様規定)。また、高圧ガス設備は多種多様で、様々なきず又は損傷が発生するのにも関わらず、検査方法、検査周期が一律に定められてきた。このように、国が一律に仕様規定を定めると、その仕様規定が技術の進歩に柔軟に対応することが困難になる。さらに、検査の合理化のためには、一律の規制を機械的に当てはめるのではなく、きず又は損傷に応じて柔軟な検査方法が認められるべきである。

これらの問題点に対応するために、高圧ガス保安法が 2005 年に改正された。新しい制度では、保安検査の方法は性能規定化され、検査方法の仕様は、民間規格を採用することとなった。新しい制度

の模式図を図 3 に示す。新しい保安検査制度では、民間の学協会からの積極的な保安検査の方法の提案が促されており、提案された民間規格を国が評価した上で活用する仕組みとなっている。

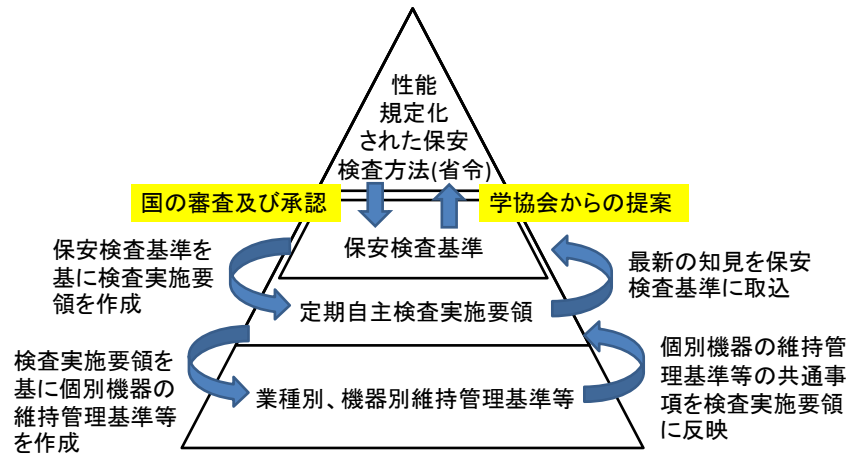


図 3 保安検査の方法の性能規定化に関する概念図

3.3.3 民間規格の採用と供用適性評価規格

保安検査の方法の性能規定化に伴って、高圧ガス保安協会では、次の規格群を作成、発行した。

- KHK-S 0850-1 一般高圧ガス保安規則
- KHK-S 0850-2 液化石油ガス保安規則
- KHK-S 0850-3 コンビナート等保安規則
- KHK-S 0850-4 冷凍保安規則
- KHK-S 0850-5 天然ガススタンド関係
- KHK-S 0850-6 液化石油ガススタンド関係

これらの規格は、国の審査を経て、高圧ガス保安法に引用されている。ただし、ここで採用された規格群は、高圧ガスの余寿命評価及び次回検査時期の設定方法が規定されていなかったことから、高圧ガス保安協会、石油連盟、石油化学工業協会は共同で、高圧ガスの供用適性評価の供用適性評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準の開発に着手した。この規格は 2014 年に KHK/PAJ/JPCA S 0851 として発行され、経済産業省が定める「認定完成実施者及び認定保安検査実施者の認定について（内規）」に引用されている⁶⁾。KHK/PAJ/JPCA S 0851 の内容について抜粋して次に示す。

- ・減肉の供用適性評価
- ・減肉以外の損傷に対する供用適性評価
 - クリープ損傷
 - 水素侵食
 - 亀裂状欠陥
- ・次回検査時期の設定

なお、同規格においては、設計時の計算厚さを部分的にでも下回る減肉は評価の対象外である。

4 「WES 2820 圧力設備の供用適性評価方法－減肉評価」の概要

4.1 規格の構成

WES 2820 の本文構成を次に示す。このほか、解説では各箇条の規定内容の根拠に加え、減肉評価の検証結果及び例題を記載している。

序文

- 1 適用範囲
- 2 引用規格
- 3 用語及び定義
- 4 記号とその意味
- 5 減肉評価に必要な情報
- 6 評価手順
- 7 部位のタイプ分類
- 8 厚さ測定
- 9 減肉特性化
- 10 最高許容圧力及び残存強度係数の算定
- 11 サプリメンタル荷重を受ける円筒胴及び円すい胴減肉部の応力算定
- 12 判定
- 13 処置

附属書 A (規定) サプリメンタル荷重を受ける円筒胴の断面特性計算手順

4.2 適用範囲

WES 2820 は、一般に認められた設計・構造規格によって製作された圧力設備の耐圧部に適用する。対象とするきず又は損傷は、腐食、摩耗、エロージョン・コロージョンに加え、検査によって発見されたきず又は損傷をグラインダなどを用いて滑らかにしたものとしている。ただし、次の圧力設備は適用範囲外である。

- ・クリープ温度域で運転される圧力設備
- ・繰返し荷重を受ける圧力設備で設計時に疲労設計がされるもの
- ・外圧を受ける圧力設備
- ・残存厚さが公称厚さの 20%未満、又は 2.5mm 未満となる圧力設備
- ・先端の鋭いきずが発見された圧力設備

4.3 評価手順

WES 2820 では、きず又は損傷が発見された部位のタイプ分類の後、全面減肉評価、局部減肉評価を行う (図 4 参照)。タイプ分類、全面減肉評価、局部減肉評価の概要を次に示す。

a) タイプ分類

きず又は損傷が発見された部位を、タイプ A 又はタイプ B に分類する。

タイプ A は、荷重と計算厚さが明確に関連付けられている計算式を持つ部位である。タイプ A の代表例として圧力容器の円筒胴が挙げられる。タイプ A では全面減肉評価と局部減肉評価を適用することができる。局部減肉評価は、全面減肉評価の結果、不合格となった場合に適用する。

タイプ B は、荷重と計算厚さが明確に関連付けられている計算式を持たない部位で、設計規格によって許容される構造が定められている部位である。タイプ B の代表例としてノズル接続部が挙げられる。タイプ B では全面減肉評価のみ適用することができる。

b) 全面減肉評価

一様な全面減肉に特性化 (全面減肉特性化) し、計算厚さ、又は圧力設備の最高許容圧力による当該設備の次回検査までの継続供用可否の判定を行う。

c) 局部減肉評価

局所的な矩形減肉に特性化 (局部減肉特性化) して当該設備の次回検査までの継続供用可否の判定

を行う。局部減肉評価では、まず、軸方向断面について、残存強度係数を求めた結果から最高許容圧力による判定を行う。次に、周方向断面について、ミーゼス応力を求めた結果から許容引張応力による判定を行う。ここで、残存強度係数(Remaining Strength Factor)とは、減肉を有する胴の崩壊圧力と減肉の無い胴の崩壊圧力との比であり、API 579-1/ASME FFS-1¹⁾で利用されている概念である。

全面減肉評価、局部減肉評価の結果、不合格となった場合には処置を行う。処置の具体例として、次回開放検査時期の前倒し検討や防食処置などによる将来腐れ代の見直し、減肉部の補修、当該部材又は機器の取替、再定格、有限要素法 (FEM) 等の詳細解析が挙げられる。

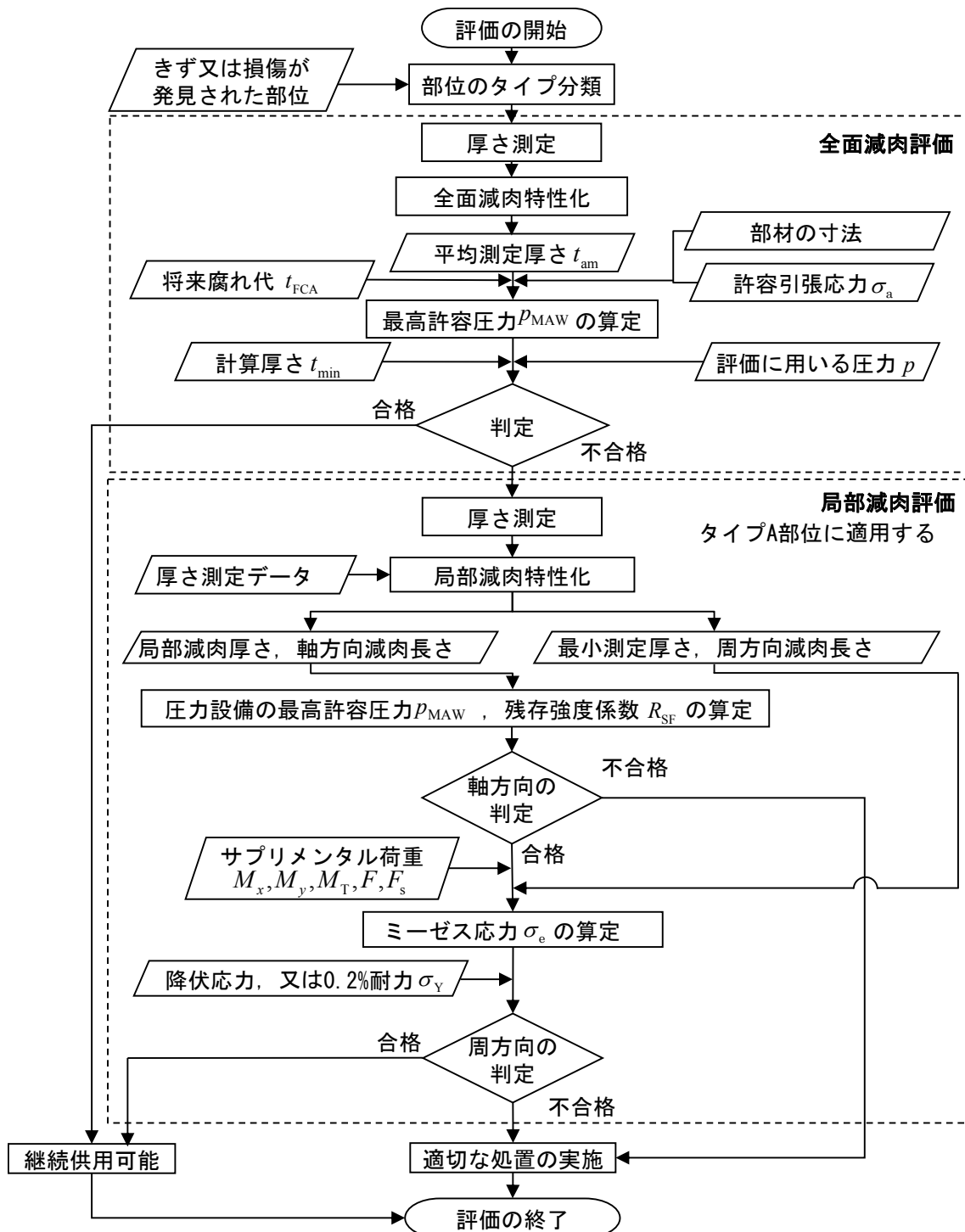


図4 減肉評価の手順

5. おわりに

検査によってきず又は損傷が発見された構造物において、当該設備の次回検査までの継続供用可否の判定を行い、適切な処置の方法を選択する方法である供用適性 (Fitness-For-Service, FFS) 評価について、その最新動向に関する解説を行った。欧米では、FFS 評価技術の規格化が進み、運用されている一方で、日本ではその普及が十分ではなかったことから、事業者から日本の実情に合致した FFS 評価規格の作成が望まれてきた。以上の背景の元、(一社) 日本溶接協会化学機械溶接研究委員会では、FFS 評価のうち、現在国内に規格のない、一般圧力設備を対象とした減肉評価法について、規格原案の作成検討を実施し、2015 年 6 月に日本溶接協会規格 WES 2820 として制定された。今後は、経年化の進む圧力設備のメンテナンスにおいて、WES 2820 を有効に活用いただきたい。

参考文献

- 1) API/ASME: Fitness-For-Service, API 579-1/ASME FFS-1 (2007).
- 2) European Fitness-For-Service Network: FITNET MK8 (2008).
- 3) BSI: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, BS7910 (2013).
- 4) Holtam, CM et al., A Survey of Fitness-For-Service trends in industry, PVP2008-61236(2008)
- 5) 経済産業省総合エネルギー調査会, 「認定保安検査実施者等の認定基準」及び「保安検査の方法」に係る制度の見直しについて, <http://www.meti.go.jp/committee/downloadfiles/g40915a10j.pdf>, (2004)
- 6) 経済産業省, 認定完成検査実施者及び認定保安検査実施者の認定について (内規), https://www.khk.or.jp/activities/technical_standards/sc_ffs/dl/nintainaiki_20151005.pdf, (2015)

<略歴>

戒田 拓洋 (かいだ たくよう)

2002 年 大阪大学大学院 工学研究科 船舶海洋工学専攻 修了
2002 年 住友化学工業株式会社 入社 生産技術センター配属
2013 年 住友化学株式会社 生産安全基盤センター配属 主任研究員
2014 年 東京大学大学院 博士 (工学) 学位取得
2016 年 Rabigh Refining and Petrochemical Company 出向
現在に至る