

学術論文

運用・保守段階での機能向上を考慮した プラント保全モデルの基礎的検討

Basic study of the plant maintenance model considering plant improvement/modification

神戸大学大学院工学研究科 妻屋 彰 Akira TSUMAYA
 大阪大学大学院工学研究科 井上 和也 Kazuya INOUE
 大阪大学大学院工学研究科 望月 正人 Masahito MOCHIZUKI Member
 大阪大学大学院工学研究科 若松 栄史 Hidefumi WAKAMATSU
 大阪大学大学院工学研究科 荒井 栄司 Eiji ARAI

This paper proposes a maintenance activity model that considers not only routine maintenance activity but also functional maintenance including improvement/modification. Required maintenance types are categorized, and limitation of Activity Domain Integration Diagram (ADID) proposed by ISO18435 are discussed based on framework for life cycle maintenance management of manufacturing assets. Then, we proposed extension ADID model for plant maintenance activity model considering functional improvement/modification.

Keywords: Maintenance Activity Model, ISO18435, Plant Life, Improvement

1. 緒言

現在、各種プラントや工場設備におけるメンテナンスが非常に重要視されてきている。日本の経済発展と歩を合わせて建設された発電プラントや化学プラント等の産業施設・設備及び橋梁、港湾設備、トンネル等の社会資本構造物は、既に老朽化しているものも多く、近い将来での廃棄物の大量発生が予想されている。2000年時点で蓄積されている構造物のストックは金額にして約2000兆円に達し、これらの構造物がやがて設計寿命を迎えると、現在8000万トンの建設廃棄物が2035年には4億トンまで増加されるとの試算もある^[1]。

石油化学プラントを例にとると、プラントは大型構造物、タンク・反応塔、ボイラ、熱交換器類、配管・バルブ類、ポンプ・モータ・設備機械類、電気・計装類などから構成され、初期の設備投資額は数十億から

数千億、それら設備の寿命期間は一般に、計画・設計・調達・建設に1~3年、商業稼働は30~40年である。ここで運用時のオペレーション&メンテナンス費は、初期設備投資額の数倍と言う膨大な額がかかり、メンテナンス技術の優劣がその後の延命化に大きく影響を与えている。

原子力発電プラントにおいても、他のプラント設備と同様の特徴を持っているが、さらに安全性に対する社会的要求が極めて高いため、建設及びメンテナンスに関する状況はより厳しいものとなっている。現行の軽水炉型原子力発電プラントでは、基本的に設備は疲労・腐食などの経年変化によって所用の機能が全うできるように余裕を持たせて設計し、機器、設備の点検によって、劣化の進行が想定内であることを確認しつつ「適切に」補修・取り替えをすることによって、設計時の寿命を「維持」することを目標に、プラントの運転・保全がなされている。これに対し現在、科学的合理性を持った実効性の高い長期保全対策を推進することによって、建設時に想定した運転期間を大幅に上回る期間の利用を達成しようという活動が行われている。このような背景のもと、モニタリング技術や情報管理・提供技術を用いた信頼性や安全性を高度に維持

◆連絡先：妻屋 彰

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
 神戸大学大学院工学研究科
 Tel: 078-803-6135 Fax: 078-803-6155
 E-mail: tsumaya@mech.kobe-u.ac.jp

する運転・保守の支援システムの開発等が盛んに行われている^[2]。

しかしここで、その後の技術の進歩・進展により、より高機能・高性能な材料・部品などへの取り替えが行われても、そのままでは設計時に設定した寿命を短絡的に延長することは困難である。高機能・高性能な材料・部品をプラントに組み込んだときの影響を考える際には、設計時の理想状態ではなく、経年変化や保全活動による設計時の理想状態との差異も含めて考慮した上で、正確な全体評価を行ななければならない。

一方、原子力発電プラントの検査制度という観点では、より事業者に自由度と責任を持たせる方向へと進んでおり、将来点検間隔も柔軟に決められるようになる可能性も考えられる。そのため、保全活動で何をどのタイミングでどのように行うかが、極めて重要となってきた^[3]。

建設期間が長いという原子力プラントの特徴から、その期間中の技術革新や設計変更を考慮し、設計変更手順の厳格なルール化や設計情報の徹底的な図書化の必要性、また、安全確保のための設計図書間や申請図書と設計図書間の整合性確認の必要性などが重要とされているが^[4]、これらをさらに運用・保全時にまで拡張し、設計時の状態を「維持」するだけでなく、技術革新やそれによる変更を可能とする枠組みが必要であると考える。すなわち、プラントの設計段階から建設、運用、保守、さらには廃炉まで、高機能・材料部品の投入や経年変化等によるプラント要素・構成・環境の変化をも含めた情報管理を一貫して行うとともに、変化に即応する寿命の評価及びメンテナンス計画の立案を行う枠組みである。これは、一貫管理による情報整合性の確保に伴う安全性の向上を目指すだけでなく、原子力プラントを機能向上により長寿命化するという発想に基づいた新しい情報管理・情報活用の方法を提

案することになる。

2. ライフサイクル・メンテナンス

2.2 ライフサイクル・メンテナンスの考え方

メンテナンスの目的は、一般に安全の確保、ライフサイクルコストの低減、消費資源・環境負荷の低減といった条件を満たしながら、設備の寿命期間を通して設備の能力を最大限に引き出すことによって、ユーザーのニーズに応えることにある^[1]。このため、少なくとも設備の寿命期間を通して有する機能レベルがユーザーの求める機能レベルを満足していることが必要である。このような条件が満たされなくなる状況は大別すると以下の4種類のいずれかとなる。

(1) 使用環境・ニーズの変化

設備そのものの物理的な劣化は生じていないが、使用環境や要求機能の変化により、設備が要求される機能を果たさなくなる。陳腐化のような相対的な機能劣化などもここに含まれる。

(2) 設備に作り込まれた欠陥

設備不良、製造/施工不良、あるいは材料/部品/機器の不良等により、設備に不具合が発生する。

(3) 強制劣化

運転条件、使用条件が不適切であるために、設備の劣化が加速され、不具合が発生する。

(4) 自然劣化

使用に伴い不可避免的に生じる劣化により不具合が発生する。

これらの問題への対処がメンテナンス活動であり、主として(1)に対しては要求される機能に対応する設備改良、(2)(3)に対しては欠陥や不適切な使用などの問題に対応する設備改善、(4)に対しては設備維持となる。

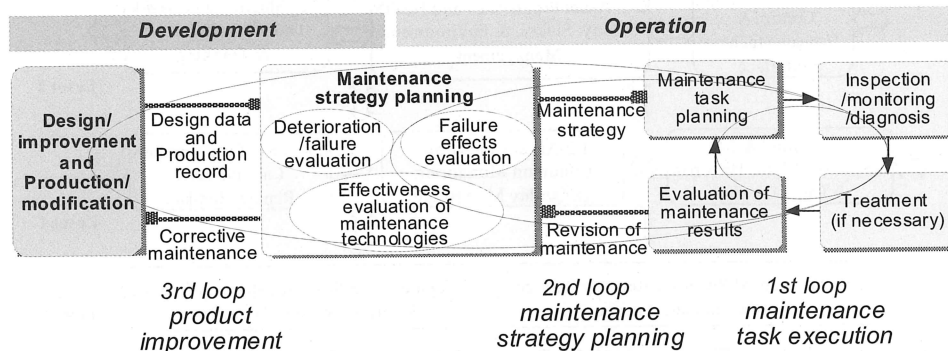


Fig. 1 Framework for life cycle maintenance management of manufacturing

このようにメンテナンスの種類は大別してもいくつかあり、プラントの大規模であるという特徴も考慮すると、合理的なメンテナンスを実現するためには、設備各部毎に適切なメンテナンスを設定・実施する必要がある。

そこでここでは、Fig.1 に示す生産設備のライフサイクル・メンテナンスのフレームワーク^[5]に基づいて議論する。メンテナンスでは、状態把握のための検査・診断のタイミングと方法、処置の実施の基準、処置方法などを予め決定して行っているが、この図ではこの基本的なメンテナンス計画を中心に3つの管理ループが示されている。最も内側の1st loopは、使用段階におけるメンテナンス作業実施のためのループである。ここでは、予め設定した基本的なメンテナンス計画・方式に基づいてメンテナンス作業計画が立案され実施される。作業の結果はその都度評価され、想定範囲であれば、そのまま次のメンテナンス作業計画に移る。評価の結果、選択されたメンテナンス方式に不都合が認められたり、予想していなかった問題が現れたりした場合には2nd loopに移り、当初設定した基本的なメンテナンス計画・方式を得られた結果データに基づいて修正が行われる。さらに、メンテナンス計画作成時に改良保全が適当と判断された場合には、3rd loopに従い開発段階に戻って改良を行う必要がある。

このように基本的なメンテナンス計画を軸とした管

理により、設備の使用条件の変化等にも柔軟に対応しながら、設備状態の維持・改善というメンテナンス目標が達成できる。このような設備の改良・改善も含めた広義のメンテナンスは日本の製造業においては経験的ではあるが普通に行われているが、大型のプラントはその大規模性から全体を見渡した上での改良・改善を行うことは極めて難しい。特に原子力プラントでは安全性に対する社会的要求が高いこともあって、大規模な改良・改善を行うためには、厳しいレベルでの総合的な評価・判断が要求されている。一方で、原子力プラント等の大型プラントにおいても、機能向上も含めたメンテナンスを行うことにより大幅な長寿命化を実現出来ると見込まれるため、経験的な手法ではなく、システムティックに機能向上・開発を含めたメンテナンスを行う手法の開発が大幅な長寿命化への鍵となる。

2. 2 ISO18435

前述の通り、メンテナンスの重要性は原子力プラントのみならず、工場内の生産設備・機器・ソフトウェアにおいても近年ますます重要視されている。そこで、プラントの設計段階から建設、運用、保守、廃炉までの寿命期間全体に渡る情報管理手法の検討にあたり、ISO で進められている生産設備・機器・ソフトウェアにおけるメンテナンスのモデル化を取り上げ、概要と機能向上型のメンテナンスを考慮する場合の問題点を

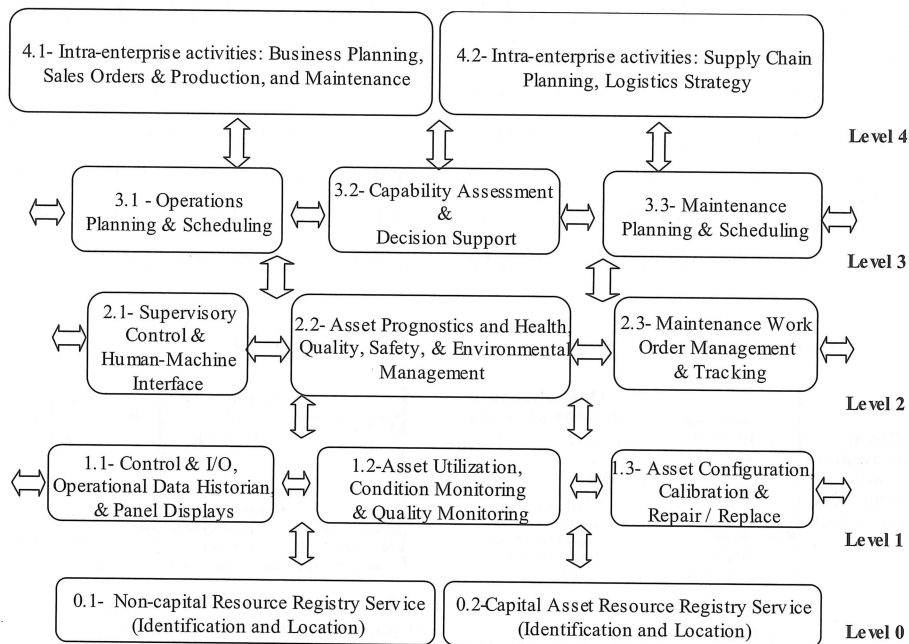


Fig. 2 Activity Domain Integration Diagram.

述べる。

ISO (International Organization for Standardization) の TC184 (Industrial Automation Systems and Integration) は産業オートメーション分野の標準化を目的に 1982 年に設立され、標準化をすすめている。ここでは、現在、産業オートメーション分野を対象とした診断、能力評価、メンテナンスにおけるアプリケーション統合のための標準である ISO18435 (Industrial automation systems and integration – Diagnostics, Capability assessment, and maintenance applications integration) の策定が進められている。著者らの一人がこの策定に携わっているので、まず、このモデルを簡単に紹介する。Fig.2 は ISO18435 で提案されているメンテナンス活動モデルである Activity Domain Integration Diagram (ADID) である。この図は、企業における工場やプラント等の運用・保守活動をシステムの大きさ (Enterprise, Area, Work Center, Work Unit, Asset の各レベル) と活動の種類 (Operation, Assessment, Maintenance) によって分けられた活動ブロックに分類し、活動ブロックの機能とブロック間を流れる情報をモデル化したものである。現在、このモデルを基本に標準の全体像を定義する ISO18435-1 (Part1: Overview and general requirements) のワーキングドラフトの作成が進められている⁶⁾。原子力プラントのような大型プラントでも、メンテナンス活動の種類は基本的に生産設備と同様であるとみなして差し支えないので、システムサイズのレベルを Enterprise, Site, Area, System, Asset とすることによって同様のモデルが使用できる。

しかし、ISO18435 では、取り扱うメンテナンスの範囲を主に Fig.1 における 1st loop を対象とすると規定しており、2nd loop の一部や 3rd loop に相当する機能向上を含む広義のメンテナンスはその対象とされていない。筆者等は、ISO18435 で定義されている ADID を用いていくつかの USECASE の作成・検討を行ったが、例えば設計レベルの変更を含むような「法令や技術基準改訂に伴う設備改良、保全方法の変更要求に対応するメンテナンス」の場合、法令や技術基準改訂をエンタープライズレベルで受けてから、これによって具体的にどのように各レベルで対策を行う必要があるのか、現場と情報をやり取りしながら計画決定・検証するフェーズを記述することが困難である。また、部材レベルでの改良案が出てきた場合、その効果や影響範囲をどこまで考える必要があるか、また実際にどのようにな

るのかを事前に検証するフェーズも ADID には含まれていない。

このように考えると ISO18435 で標準化が進められているモデルでは、主に新規・追加の計画や検証について対応するには不十分であると言える。

3. 新しいメンテナンス活動のモデル化

3. 1 拡張 ADID の提案

前述のように現在策定中の ISO18435 の枠組みでは、今後大型プラントにおいても必要になると考えられる機能向上を目的としたメンテナンス活動を明確にモデル記述することは難しい。典型的なメンテナンス活動のケースについて適用を試みた結果、ADID で不足している機能は、メンテナンス活動における最初の段階によく現れる「機能向上のための新たなメンテナンスプランの作成・評価」とメンテナンス後の「作成したプランにより目的の機能向上が果たしているかどうかの評価」であることがわかった。すなわち、計画・評価系が不足していることが明確になった。

これらの解決方法の一つとしては、ADID モデル内の各活動ブロックの機能をそれぞれ追加・拡張する方法が考えられるが、この場合、既に多くの機能を担っている 3.2、2.2 の活動ブロックに対して更なる大きな機能追加が必要だと予想され、得策ではないと判断し、ここでは、ADID に対して新たに計画・検証を行う活動ブロックを追加することによってこれらを解決することにする。提案する拡張 ADID を Fig.3 に示す。

ここで、新たに追加した Validation に関する活動ブロックは、それぞれが含まれる Site, Area, System の各レベルの枠内で、新たなメンテナンスプランの作成機能

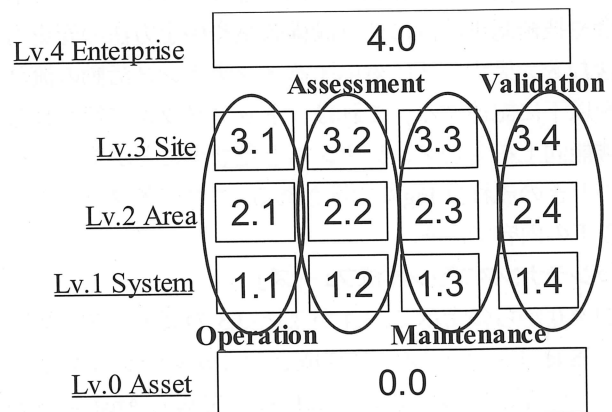


Fig. 3 Extended Activity Domain Integration Diagram.

とそれに対するシミュレーション評価機能を持つものと定義している。また、レベル0のリソースについては、原子力プラントに関しては区別する必要がないと判断して一つにまとめ、レベル4については、主に物流に関する機能ブロックは必要ないと判断し、4.2を削除して一つにまとめている。

Validationに関する活動ブロックで新たに加えたメンテナンスプラン作成機能とは、現状維持を目的とするメンテナンスで予め用意されているメンテナンスマニュアルに相当するものを新規に作成する活動であり、「目的を達成するために、どのアセットに対してどのようなメンテナンス作業内容を行うか」を決定する。このとき、このメンテナンス作業内容には、メンテナンスの手順も含まれる。また、作成したメンテナンスプランに対するシミュレーション評価機能には、以下の内容が含まれる。

- メンテナンスプラン実行による効果測定
- 他のレベルへの影響度の測定
- 可能であるかの判断
- コスト面での対投資効果の判断

シミュレーションはヴァーチャルファクトリ上のシミュレーション（各活動ブロックに対応するようなシミュレーション用アプリケーション）と、実際に実機を用いたリアルファクトリ上のシミュレーションの両方を指している。

3.2 拡張ADIDを用いたメンテナンス活動モデル

提案したモデルを用いると、ISO18435のADIDでは明確に記述出来なかったUSECASEについても記述可能となる。メンテナンス活動の流れは大きく数種類にまとめられることが調査の結果わかっているが、本報ではISO18435の枠組みでは記述できない例として法令や技術基準改訂に伴う設備改良や保全方法の変更も含むメンテナンスに対応するメンテナンス活動の流れを以下に記述する。これは、トップダウンで行われる機能向上を含むメンテナンスと見なすことができ、そのときの流れはFig.4で示される。ここで各フェーズは以下の内容である。

「メンテナンスプラン作成フェーズ」

- (1) 4.0からの指示で、3.4が3.1~3.3の実データを基にSiteレベルのプラン作成とシミュレーションを行う。次に2.4において2.1~2.3を基にAreaレベルで作成する。同様に1.4においてSystemレベルで

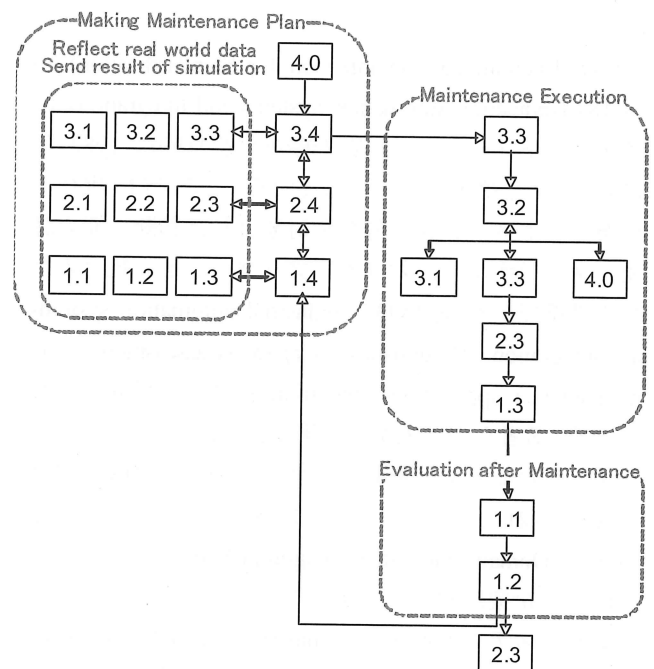


Fig. 4 Maintenance activity model.

作成する。この際 1.4⇒2.4 や 2.4⇒3.4 等フィードバックも行う。

- (2) 作成されたプランは再度各レベルの Operation, Assessment, Maintenance の各活動にメンテナンス後の理想状態としてシミュレーション結果を伝達する。

「メンテナンス実行フェーズ」

- (3) 作成されたプラン(具体的な作業内容)を基に、通常のISO18435で提案されているADIDの枠内で、運転スケジュール、アセット能力、メンテナンススケジュールを参照しながら、いつ、誰が、どのようにメンテナンスを行うかについて決定し、実行する。

「メンテナンス後評価フェーズ」

- (4) メンテナンス後出力を1.2において(2)で伝達した理想状態と比較する。理想状態達成が出来ていない場合は再度プラン作成フェーズ(1)へ戻る。

ここで、具体例として軽水型原子力プラントの二次系配管の保全活動^{[7][8]}を取り上げ上記の活動モデルに提供したところ、以下の通り記述することができた。

「モニタリング・診断フェーズ」

- (1) 1.2の点検データで収集されたモニタリングデータより、2.2で診断が行われ、配管交換の必要性を検知。
- (2) 3.2で通常の部品交換に必要な設備・人材・材

料の利用可能性をチェック。同時に2.2の診断結果より緊急性の予測を行い、それらの結果、緊急に交換する必要がないことがわかったため、その結果を4.0に伝達。4.0からの指示で新技術・新材料導入の検討を行うことに決定。(この時、通常の部品交換を行う場合には、直ちにメンテナンス実行フェーズとなり、ISO18435のモデルで説明可能である。)

「メンテナンスプラン作成フェーズ」

- (3) 3.4において、流れ特性と配管形状に起因するエラーを防止する新構造・新材料への修正を提案。
- (4) 2.4で2.3からの過去の他の実績を参考に適性を確認。
- (5) 1.4で模擬入力を使って動作の確認を行った。
- (6) 3.1~3.3においてヴァーチャルプラントを使った試験運転日時の調整を行った。
- (7) 2.4、1.4において起動運転時の評価プランを作成した。
- (8) 1.3においてメンテナンス実行と起動運転を行った。
- (9) 1.2の状態監視により健全性向上を定量的に確認した。

「メンテナンス実行フェーズ」

- (10) 作成されたメンテナンスプランが3.3に送られ、3.1、3.2と相互にやり取りをし、実際のメンテナンス計画を練った結果、今回は緊急性がないことから次回の定期点検時に新構造・新材料を用いた配管への交換を行うことになった。2.3においてより詳細の作業分担を行い、1.3においてメンテナンスが実行された。このフェーズはISO18435のモデルで記述できるものと同様である。

「メンテナンス後評価フェーズ」

- (11) 1.2において、実際のプロセスを通して当初の目的である健全性の向上が実現できていることを確認した。

ここでは、紙面の関係上、USECASEについては一例のみを示したが、他の分類に属するケースについても、提案したモデルによってメンテナンス活動の流れを記述できることを確認している。

4. 結言

原子力プラントの長寿命化のため、プラントの寿命期間全体に渡り機能向上可能なものとして取り扱える情報管理・活用システム開発の第一歩として、メンテナンス活動をモデル化・体系化することを目的とした。本報での成果は以下の通りである。

- 1) メンテナンス活動のモデルの調査を行い、不十分な

点を明らかにした。現在の原子力プラントでのメンテナンス活動は設計時の状態を維持することを目的としているが、プラントの物理的・機能的長寿命化のためには、機能向上をも含むメンテナンス活動を考慮する必要があることを述べた。また、生産設備のメンテナンス活動モデル化の動きを調査し、現在策定中のISO18435のモデルでは、このようなメンテナンス活動を扱うには不十分であることを示した。

- 2) 新しいメンテナンス活動モデルを提案した。ISO18435のモデルで不足していた検証プロセスに関する新しい活動ブロックを定義し、それらを追加した拡張ADIDを提案した。このモデルを用いて、ISO18435のモデルでは記述困難であるメンテナンスケースについて記述を試み、記述可能であることを示した。

参考文献

- [1] ”平成16年度 産業・社会資本構造物におけるメンテナンス情報の活用に関する調査研究 報告書”、財団法人エンジニアリング振興協会、2005
- [2] 若林二郎、大賀孝治、永井哲郎、今瀬正博、園田幸夫 “原子力発電プラント・セーフティサポートシステムの開発”、日本原子力学会誌、Vol.43, №4, 2001, pp.331-341
- [3] 日本保全学会、第3回学術講演会特別セッション資料集、2006
- [4] 「原子力システム設計」研究専門委員会、“原子力システム開発の将来像”、日本原子力学会誌、Vol.43, №3, 2001, pp.194-205
- [5] 高田祥三、“ライフサイクルメンテナンス”、精密工学会誌、Vol.65, No.3, 1999, pp.349-355
- [6] “ISO 18435-1 Draft-03 Industrial automation systems and integration – Diagnostics, capability assessment, and maintenance applications integration – Part1: Overview and general requirements”, 2005
- [7] 日本保全学会、原子力発電所の保全方式の妥当性に関する調査・検討報告書、(独)原子力安全基盤機構委託事業、2006
- [8] 日本溶接協会、原子力発電設備構造材料の経年変化に関する国内シンポジウム(軽水炉環境における経年変化研究と予測技術)資料、2006

(平成18年8月23日)