

軽水炉炉内構造物の点検評価ガイドラインの体系化 — 将来の技術課題とその改善、高度化の方向性 — Systematization of Inspection & Evaluation Guidelines for Light Water Reactor Internals

山下裕宣 Hironobu YAMASHITA
東京電力株式会社

青木孝行 Takayuki AOKI
日本原子力発電株式会社

元良裕一 Yuuichi MOTORA
株式会社東芝

千種直樹 Naoki CHIGUSA
関西電力株式会社

小山幸司 Koji KOYAMA
三菱重工業株式会社

藤森治男 Haruo FUJIMORI
株式会社日立製作所

1. はじめに

今回が全4回にわたる連載の最終回である。

これまで第一回⁽¹⁾で炉内構造物点検評価ガイドライン(以下、ガイドラインという)を開発するに至った経緯、必要性などについて、第二回⁽²⁾で本ガイドラインを開発するに当たって浮び上がった技術的課題とその解決方法について、更に第三回⁽³⁾ではガイドラインの開発意義や技術的完成度、ガイドラインの構造と体系について述べた。

これらの解説内容から、経年変化の発生・進展を考慮して開発された本ガイドラインは、一つの安全確保基準として完結しており、これに従って炉内構造物を維持管理すれば、安全性が十分確保されることが理解できる。しかしながら、このようにして開発されたガイドラインの適用により、炉内構造物の維持管理は十分可能であると考えられるものの、技術的には必要以上とも考えられる保守性をガイドラインの一部に取り入れるなど、改善あるいは精緻化の余地のある部分、高度化又は合理化できる可能性のある部分などが幾つかある。

今回はそれら将来の技術課題やその改善、高度化の方向性について詳述するとともに、これまで4回に分けて述べてきたガイドラインの全体まとめを行なう。

2. 将来の技術課題と改善・高度化の方向性

これまで述べてきたように、ガイドラインは

- ①対象とする炉内構造物の経年変化事象の発生・進展を予測し、
- ②炉内構造物の要求性能を確保するために必要な構造強度等に大きな余裕のあることを利用して検査時期を決め、
- ③検査結果を評価方法にフィードバックすることに

よって、安全性の維持と合理的な点検計画を両立させている。

これらの具体的な内容はそれぞれの炉内構造物で異なり、その条件に応じて決定されている。

ここでは、今回開発されたガイドラインの内容を踏まえ、検討ステップ毎に将来解決することが望ましい技術課題とその改善・高度化の方向性について述べる。これらの技術課題は主に応力解析等評価手法の精緻化、材料特性等のデータ拡充などであるが、前述のように、解決が必要不可欠ではないものの、ガイドラインの高度化、合理化のため、解決することが望ましい課題であり、今後とも関係者の更なる努力が期待される。

2-1) 有限要素モデルの構築

検討対象(たとえば、シュラウドサポート⁽⁴⁾)の実際の構造、寸法から構造強度解析等を実施するための有限要素モデルを構築し、材料物性値等を入力した。このステップは基本的に従来の手法をそのまま踏襲すればよいので、ガイドライン開発上の特別な問題あるいは課題は無い。しかし、シュラウドサポート等に用いられているインコネル材⁽⁵⁾の極限荷重評価法に用いる材料データ(特に、流動応力⁽⁶⁾)はオーステナイト系ステンレス鋼⁽⁵⁾と比較して少ないのでデータの拡充が望まれる。

2-2) 対象部周りの応力分布の決定

SCCのき裂進展は、溶接残留応力に大きく影響されるので、溶接残留応力を正確に求めることが重要である。このため、ガイドライン開発に当たっては、実物と同じ溶接条件で実物大モデルを製作し歪みゲージ⁽⁷⁾で残留応力を実測する方法や図-1に示すように、有限要素モデルを用いた熱弾塑性解析⁽⁸⁾を実施して溶接残留応力を求める方法⁽⁸⁾を採用している。図で1~22は溶接の手順を表している。今後は、溶接残留応力の

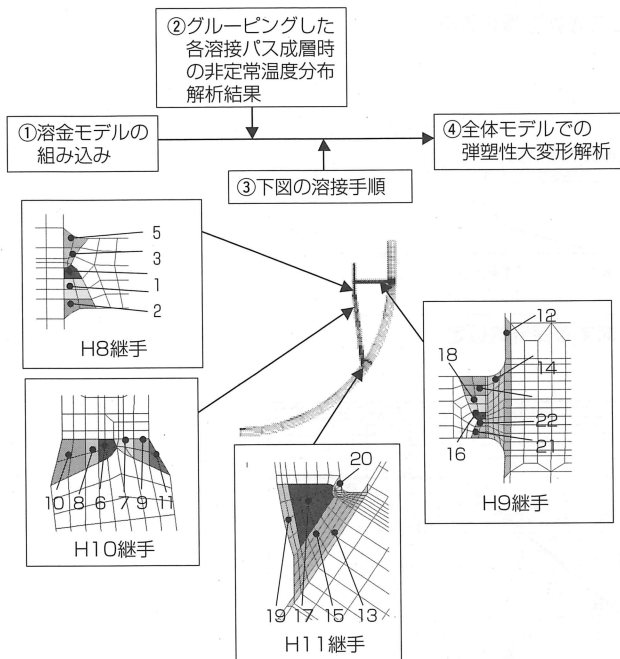


図-1 レグ型シュラウドサポートの溶接手順と解析モデル

解析手法を標準化したり、データブック化したりして容易に溶接残留応力を求められるようにすることが望まれる。

また、解析技術が飛躍的に発展した今日、実機と同一設計の実物大モデルを製作して必要データを実測するような、多大の労力と時間を要する従来手法を乗り越え、コンピュータ等による解析手法を用いて対処できるようにすることが強く望まれる。

2-3) SCCの発生位置、方向および形状・寸法の設定
 想定するSCCの発生位置、方向および形状・寸法

は、非破壊検査 (VT、UT、ECTなど) による検査データ (欠陥の寸法、位置、方向のデータ) に基づき評価が保守的になるようにモデル化される。従って、この検討ステップでは、検査精度が注目すべき重要な対象となるが、前回で述べたように、検査手法は必ずしも常に高い検査精度が要求されるとは限らない。特に、冷却材の圧力障壁でない炉内構造物は構造強度余裕が大きいので、検査精度が高くなくても、その誤差を加味して欠陥寸法を保守的に見積もり、それを用いて構造強度評価を実施すれば、安全側の評価となり問題無い。(図-2) しかし、検査精度の高い検査手法は、構造物の健全性を確実に把握でき、その結果として次回検査の範囲や時期を正確に決定するのに役立つため、今後とも検査手法の改善に努力することが望まれる。

2-4) SCC発生時期モデルの設定

BWRのガイドラインを開発するに当たって、SCCがいつ発生するか、その時期の特定方法を定めようと試みたが、そのためのデータや知見が現状では十分でなく、具体的な方法を定めるには至らなかった。このため、SCCが発生するまでの時間は保守的にゼロ、すなわち無視することとした。(図-3) しかし、この仮定は一方で保守的過ぎるとの見方もあり、今後、SCC発生時期に関するデータを拡充し、予測手法を開発することが望まれる。

2-5) SCC進展モデルの設定

SCCの進展モデルは、き裂先端の応力拡大係数に対する進展速度として与えている。(図-4) オーステナ

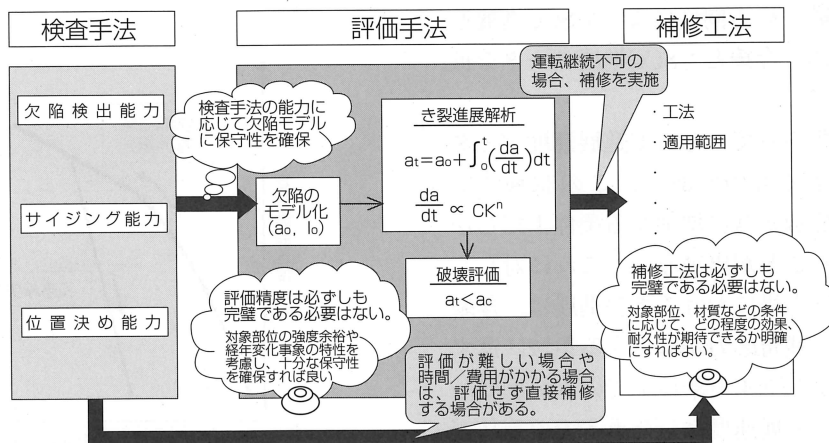


図-2 検査、評価、補修の関係

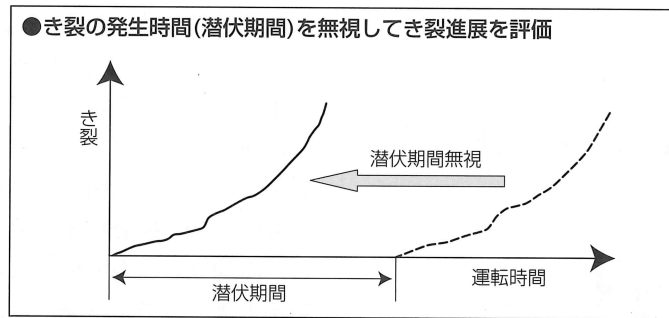


図-3 SCC発生時間に対する保守的仮定

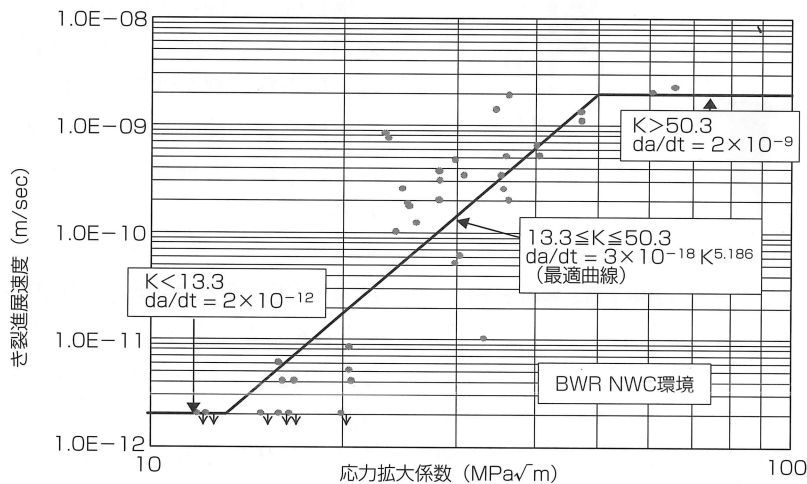


図-4 応力拡大係数とき裂進展速度の関係 (インコネル182の例)

イト系ステンレス鋼の場合、SCCは溶接熱影響部に発生、進展する。これに対し、インコネル材はBWRおよびPWR環境で母材（インコネル600など）よりも溶接金属（インコネル182）内の方がSCCが発生しやすい場合がある。このような場合は、溶接金属内に発生するSCCの進展速度データを採取して、これを用いて解析評価する。また、インコネル溶接部は異方性が高く、デンドライト組織⁹⁾の方向性によってSCC進展速度が異なる。このため、今後ともSCC進展データを拡充することが望まれる。

また、これまでに得られているSCC進展速度データは定荷重試験¹⁰⁾によるものであり、この試験法では、き裂の応力拡大係数が常に増加する条件下でしかSCC進展データを取ることが出来ない。これに対し、溶接残留応力支配の応力場におけるき裂進展は、き裂がある程度、進展し、残留応力が低下する領域に達すると、応力拡大係数が低下する条件下でのき裂進展となる。この場合、き裂進展速度は定荷重下でのそれよりも小さい値となると考えられる。(図-5) 定荷重試

験データを用いてき裂進展解析を実施すれば、保守的評価となり安全上の問題は無いが、もし応力拡大係数の減少下で得られたき裂進展データを採取できれば、点検頻度を少なくしたり、補修時期を合理的に遅らせたりすることが可能となる。(図-6) このため、応力拡大係数の減少下でのき裂進展データを採取するニーズは高い。

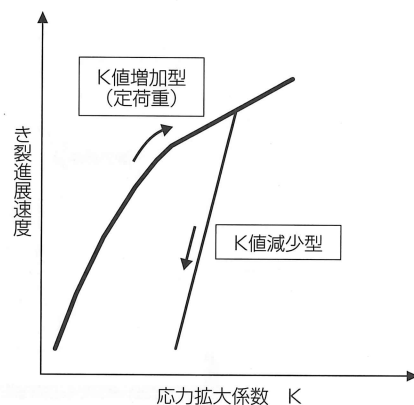


図-5 K値増加条件下およびK値減少条件下のき裂進展速度

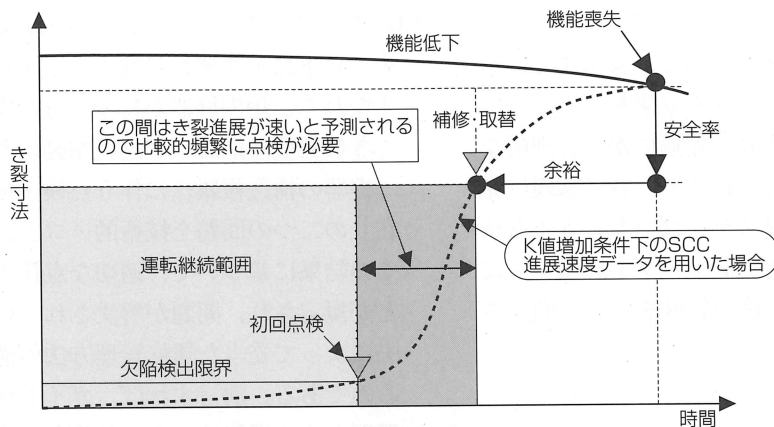


図-6(1) K値増加条件下のSCC進展速度データを用いたき裂進展予測と点検間隔

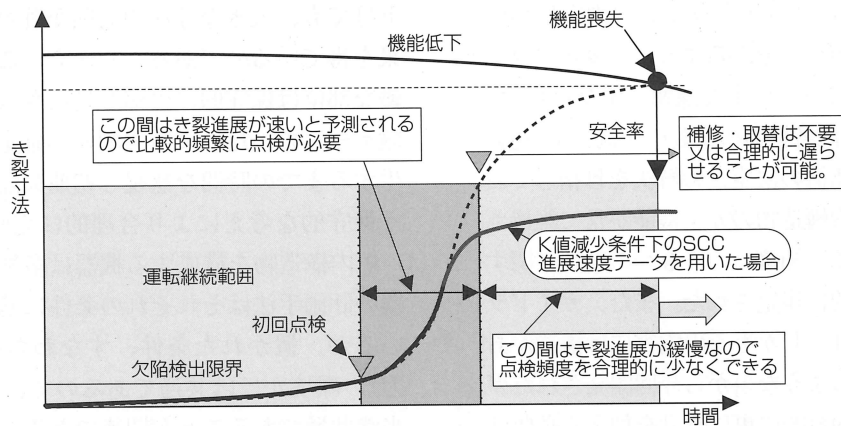


図-6(2) K値減少条件下のSCC進展速度データを用いたき裂進展予測と点検間隔

2-6) 点検不可箇所の取扱い

炉内構造物は、原子炉キャビティの深い水面下であり構造が複雑であるため、遠隔操作による点検が難しく、検査できない箇所が一部にある。ガイドラインでは、これらの箇所は、既にかき裂が発生しているものと保守的に仮定して解析評価することとしている。(図-7) しかし、この仮定は一方で保守的過ぎるとの見方もあり、今後、その取扱いを改善する努力が望まれる。

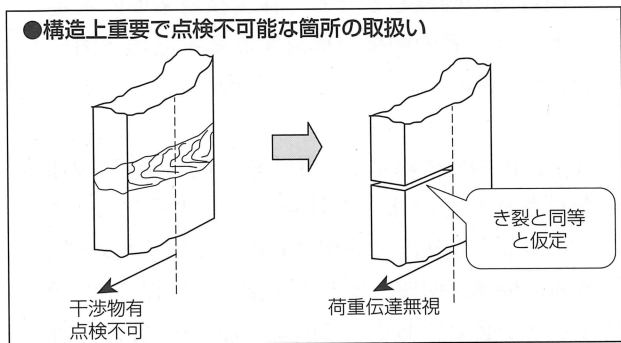


図-7 点検不可部の取扱い

当面の課題は、遠隔検査装置を小型化して狭隘部の点検不可範囲を極力無くす努力をすることである。

2-7) 外力の設定

この検討ステップでは、外力、すなわち運転荷重(圧力、温度、冷却材流動による荷重)、自重および地震荷重を設定することになるが、ここで特に問題となる課題は見当たらない。

2-8) 点検時期の決定

この検討ステップでは、前項までに示した技術課題が解決されれば、その成果を評価手法に反映させることによって、より一層適切かつ合理的な点検時期の決定が可能となる。従って、特に課題は見当たらない。なお、ガイドラインに基づく点検で多くの実機データが得られるので、それらを評価手法にフィードバックすれば評価手法の精度をさらに向上させることも可能である。

2-9) 補修時期の決定

この補修時期を決定するステップで、前項までに示した技術課題が解決されれば、その成果を評価手法に反映させることによって、より一層適切かつ合理的な補修時期の決定が可能となる。従って、特に課題は見当たらない。なお、この検討ステップでも、ガイドラインに基づく点検で得られた実記データを評価手法にフィードバックすれば評価手法の精度をさらに向上させることが可能である。

3. まとめ

これまで、4回にわたりガイドラインの内容について述べてきた。その内容から分かるように、ガイドラインの策定作業は基本的に三つの主要課題、すなわち1) 炉内現象の解明、2) 炉内各機器の挙動の予測、3) 運転管理上の合理的な保全措置の決定、の解決を目指しており、その結果として炉内構造物の安全機能が常に維持されるように、点検、評価、補修という3つの事項に関するガイドラインが合理的に規定された。また、ガイドラインは体系的に整備され、しかもその内容には構造があることが分かった。このような事から今回開発されたガイドラインは、今後、内容的に更に改良を加える必要はあるが、炉内構造物の合理的な運転管理方法を開発するという所期の目標を十分に達成したと評価される。

今回揚げられたガイドラインの成果を具体的に述べれば、次のようにまとめられる。

- (1) 炉内構造物の各機器が置かれている環境下での経年変化について、き裂発生・進展に焦点を当てて解析評価し、その状況を明らかにした。その結果、予想されていたこととは言え、構造強度の観点からみて各機器は十分な構造強度余裕を保有している事が明らかとなった。
- (2) しかしながら、材料と環境との相互作用によるき裂の発生・進展は現在科学的に十分に解明されておらず、き裂の挙動を精度良く予測できない面がある。このため、本ガイドラインでは、処々に保守性を考慮した仮定を導入することによって、この課題を克服している。しかし、き裂の発生・進展挙動の予測精度を向上させ、この保守的仮定に基づく方法を将来に向けて更に精緻化、合理化することが必要である。このような技術開発は、現在国の技術開発プロジェクト⁽¹⁾などで研究されつつある。

- (3) 本ガイドラインでは、前述の課題を克服するため、以下に示す運転管理上の工夫がなされている。すなわち、炉内機器が持つ十分な構造強度余裕が、「き裂発生時期および進展挙動の不確定性」および「機器の構造複雑性に伴う点検・検査困難個所の存在」の二つの問題を技術的・ロジック的に克服し、その結果に基づいて、適切な点検方法や点検頻度などが規定され、問題が解決されている。これらの工夫によって妥当な運転管理方法の構築に成功しているのである。別言すれば、ガイドラインという運転管理方法の構築は、その基盤を十分な余裕のある構造強度に置き、負荷として最も厳しい地震力を取り上げても、大きな寸法の欠陥が許容できるという結果を得ているのである。しかも、このとき、点検困難な部位は保守的に欠陥と見なされている。また実験データの不足による予測の不確定性は、欠陥が発生するまでの時間を無視し初期欠陥を仮定するという保守的な考えにより合理的に克服されている。

- (4) 炉内構造物を構成する機器は多種にわたる。各機器の評価手法はそれぞれの条件に基づき検討されているが、置かれた条件、すなわち材料、負荷（応力）、環境がほぼ共通であるので、運転管理方法は当然共通であることが期待できる。このことを運転管理に反映させれば、各機器の管理は基本形式とそのバリエーションで表現されることになる。バリエーションはパラメータで表示される。

- (5) このように考えれば、炉内機器の運転管理方法には構造が存在し、

- 1) まず損傷想定機器があり、次いで損傷に対する技術評価があり、最後に保全措置の決定、という三者の階層構造（図-8）と
- 2) 誰が考えても同じ構造・関係となる「保全計画立案の流れ」と「適用工学理論等の選択」、この両者間の橋渡しとなる「保全技術基準の策定」、という三者の関係を構成する基本原理（図-9）の二つから成っていることが分かる。

近年、国内外の軽水炉で炉内構造物にSCC等の損傷が発見されたとの報告が散見されるようになっていく。このような状況に適切に対応していくためには、技術的に根拠が明確で安全性を確実に確保できる標準的な基準が必要である。このようなニーズに、これまで詳述してきた炉内構造物点検評価ガイドラインは十

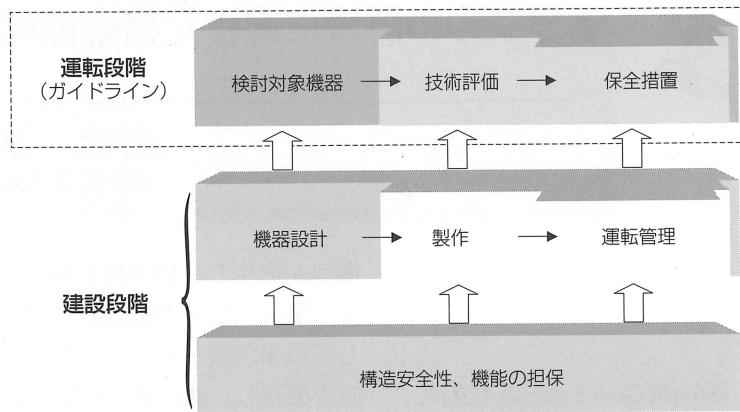


図-8 ガイドラインの階層構造

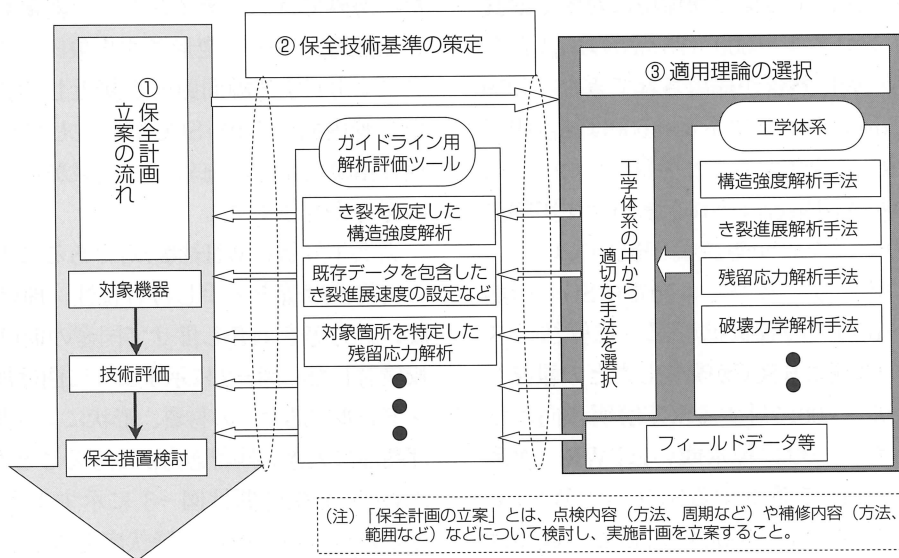


図-9 ガイドラインを構成する基本原理

分応えられるものである。今後とも、本ガイドラインは常に最新知見を取り入れ、より一層、高度化・合理化されるように継続的に見直しがなされる。

参考文献

1. 山下裕宜、酒井和夫、青木孝行、軽水炉炉内構造物の点検評価ガイドラインの体系化、フォーラム保全学、Vol.1, No.1 (2002), pp.10-18
2. 小山幸司、藤森治男、元良裕一、軽水炉炉内構造物の点検評価ガイドラインの体系化(2)、フォーラム保全学、Vol.1, No.2 (2002), pp.27-34
3. 山下裕宜、酒井和夫、青木孝行、軽水炉炉内構造物の点検評価ガイドラインの体系化、フォーラム保全学、Vol.1, No.3 (2003), pp.34-41
4. 秋山 守、「軽水炉」、同文書院 (1988)、pp.56
5. 矢川元基、一宮正和、「原子炉構造設計」、培風館

- (1989)、pp.71-75
6. 町田 進、「延性破壊力学」、日刊工業新聞社(1984)、pp.193-194
7. 米山 猛、「機械設計の基礎知識」、日刊工業新聞社 (1996)、pp.290-292
8. 望月正人、榎本邦夫、岡本紀明、斉藤英世、林 英策、板厚を貫通する配管の溶接による残留応力発生機構の検討、溶接学会論文集 第12巻 第4号 (1994)、pp.561-567
9. 金属材料研究所編、「図解 金属材料技術用語辞典」、日刊工業新聞社 (1997)、pp.238
10. 三澤忠則、「改訂 防食技術ハンドブック」、化学工業社 (1990)、pp.136-138
11. 「発電技検レビュー」、No.28、(財)発電設備技術検査協会 (2002)、pp.58-62

(平成15年 4月 2日)