

解説記事

軽水炉炉内構造物の点検評価ガイドラインの体系化 (2)
 ーガイドライン開発上の技術的課題とその解決方法ー

Systematization of Inspection & Evaluation Guidelines
 for Light Water Reactor Internals

小山 幸司 (三菱重工業株式会社) 元良 裕一 (株式会社 東芝)
 藤森 治男 (株式会社 日立製作所)

Kouji KOYAMA
 Yuuichi MOTORA
 Haruo FUJIMORI

1 はじめに

どんな構造物も時間の経過とともに経年変化が生じるので、経年変化の発生・進展を前提とした維持管理が必要であり、その維持管理のためには技術的根拠が明確で合理的な技術基準が必要である。このため、(社)火力原子力発電技術協会に「炉内構造物点検評価ガイドライン検討会(委員長：朝田泰英東大名誉教授)」が設置され、我が国の軽水炉の炉内構造物を対象として経年変化を想定した点検評価ガイドラインが検討、提案された。¹⁾

前回は上記点検評価ガイドラインを開発するに至った経緯、必要性などについて述べるとともに、経年変化事象の発生・進展が想定される炉内構造物を合理的に維持管理するにはどのような技術的検討が必要か、

またどのような技術的課題があるか、などについて詳述した。

今回は、上記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をガイドラインの開発手順に沿って詳細に述べる。

2 経年変化事象が想定される炉内構造物のモデル化と技術的課題

炉内構造物に外力が作用し、その結果として炉内構造物が応答、変形する。この関係を図1に示す。ここで示すように、炉内構造物に経年変化事象(例えば、SCCのようなき裂)が発生・進展し、その後、外力が発生した時に炉内構造物がどう応答するかを解析評価し、応答の結果として炉内構造物の安全機能が

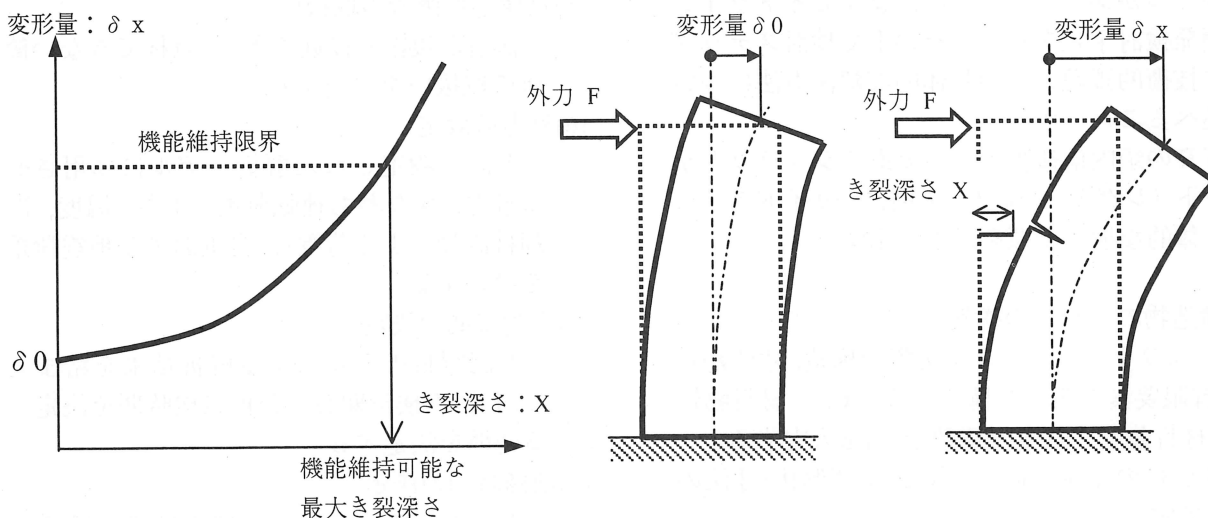


図1 経年変化による外力による応答の変化

維持できるのかを判定する必要がある。この時、本問題を有限要素法を用いてモデル化し、コンピュータ解析する上で何が問題となるであろうか。炉内構造物の構造、寸法、材料物性をモデル化するのは、従来の手法をそのまま踏襲すればよいことであるので、コンピュータ解析技術の発達した今日においては、それ程難しいことではない。また、外力のモデル化も、運転荷重や地震荷重の設定などは、従来の設計手法をそのまま踏襲すればよいことであるので、大きな問題は無い。それでは何が問題かと言えば、最初に浮上してくるのが経年変件事象の発生・進展をどのように考え、どう設定するかという問題である。また、経年変件事象の発生・進展解析結果を踏まえ、点検時期をどのように決定するか、炉内構造物の機能を維持するため、どの程度の安全裕度を確保して補修必要時期を決定すべきかなどの問題も解決しなければならない大きな技術的課題として取り上げられることになる。

本ガイドラインの開発に当たり、これらの主要な課題をどのように解決してきたかについて、BWRの炉内構造物の一つであるシュラウドサポートを例にとって以下に説明する。

3 ガイドライン開発手順

炉内構造物の点検評価ガイドラインを開発する上で解決しなければならなかった技術的課題がいくつかある。ここでは、まずガイドラインの開発検討手順を示し、その上で検討ステップ毎に技術的課題とその具体的な解決方法について述べることにする。

BWRの炉内構造物の一つであるシュラウドサポート（レグ型）（図2）を例に、ガイドラインの具体的な検討手順を以下に示す。

(1) 構造物のモデルの構築

シュラウドサポートの実際の構造、寸法から有限要素モデルを構築する。また、材料物性（材料強度、線膨張係数など）を入力する。

(2) SCCの発生位置、方向および形状・寸法の設定

SCCの発生位置、方向および形状・寸法を設定する。

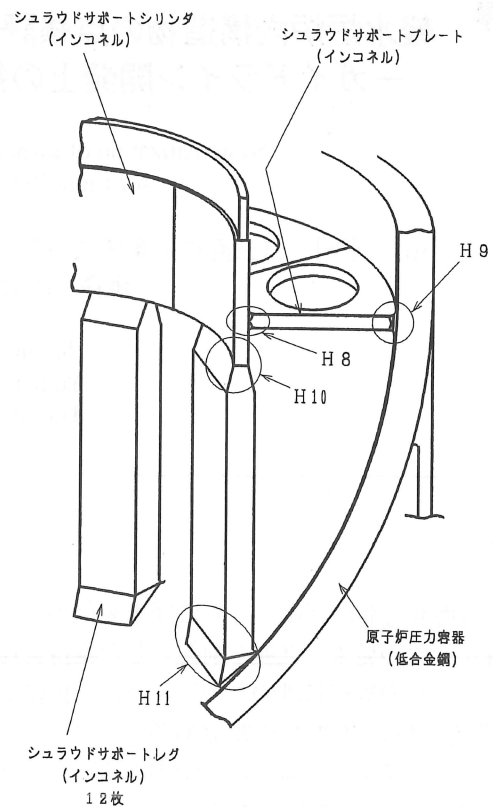


図2 シュラウドサポート（レグ型）

(3) SCCの発生時期モデル設定

SCCがいつ発生するか、その時期の予測方法を検討する。

(4) SCCの進展モデル設定

発生したSCCがどのように進展するか、その予測方法を設定する。

(5) 点検不可箇所への取扱い

構造が複雑で接近できず、点検できない箇所の取扱いを決定する。

(6) 外力の設定

上記で設定された解析モデルに作用させる外力、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。

(7) 点検時期の決定

上記解析モデルによる解析結果を踏まえて、初回点検時期および再点検時期を決定する基準を決定する。

(8) 補修時期の決定

上記解析モデルによる解析結果を踏まえて、機能維持に対する安全裕度を確保して補修が必要となる時期を決定する。

上記(1)から(8)の検討手順は、シュラウドサポートという構造物に生じる現象をシミュレートすること、すなわち時間の経過とともにSCCが発生・進展する過程に沿って現象を記述し、さらにその現象の進行に従って必要となる保全措置（点検、補修）を検討する時間的流れに沿ったものとなっている。

4 ガイドライン開発ステップ毎の技術的課題とその解決方法

さて、上記の検討手順に従って、検討ステップ毎にガイドライン開発上の技術的課題と、その具体的解決方法、すなわち各問題点に直面した時に考案した工学的工夫について以下に説明する。

(1) 構造物のモデルの構築

まず、この検討ステップでは、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た。ここで用いる材料物性値等は、材料強度を弾完全塑性体として入力するなど、保守的な設定としている。このステップにおける技術的検討は、前述のように、基本的に従来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はない。

(2) SCCの発生位置、方向および形状・寸法の設定

次に、この検討ステップでは、SCCの発生位置、方向および形状・寸法について検討した。シュラウドサポートはニッケル基合金製で、インコネル600²⁾の板材とインコネル182²⁾とインコネル82²⁾の溶接部から成っており、このうちSCC発生ポテンシャルの比較的高い部位はインコネル182溶接金属部であるので、この溶接線に沿った部位を点検対象とすればよいと考えた。また、シュラウドサポートのうち、サポートプレートとサポートシリンダとの溶接部（図2：H8）およびサポートプレートと原子炉压力容器との溶接部（H9）に仮想的なき裂を入れて解析した結果、構造物全体の強度への影響はあるものの、シュラウドサポートの炉心支持機能、延いては原子炉安全機能への影響はなく、これに対してサポートレグ溶接部（H10、H11）は比較的大きな影響を与えることが分かった。（図3）

このため、シュラウドサポートの点検はレグ溶接部を中心に実施するのが合理的であることがわかった。想定するSCCき裂の形状・寸法については、後述する。

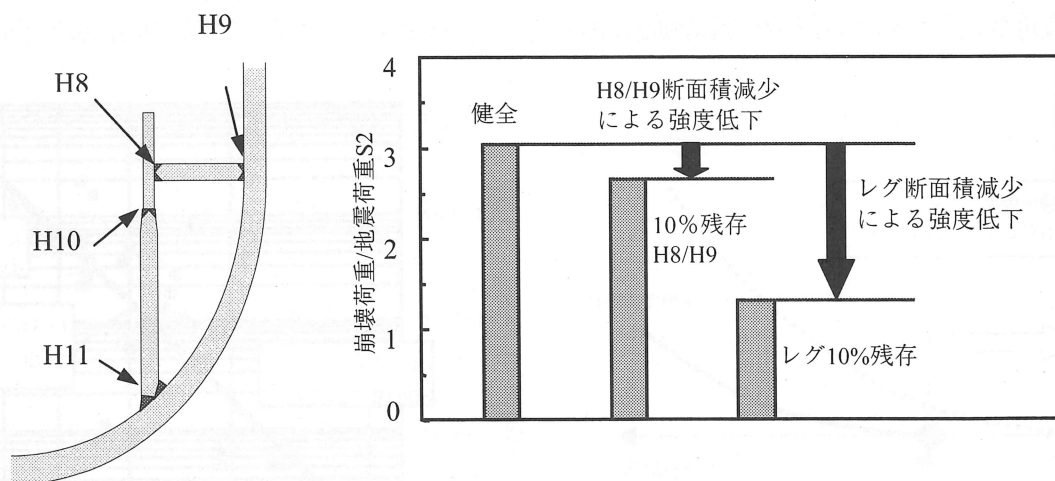


図3 溶接線に欠陥を想定した場合の構造強度への影響

(3) SCCの発生時期モデルの設定

次に、この検討ステップでは、SCCの発生時期について検討した。この検討に際してはSCC発生ポテンシャルの比較的高いインコネル182材のSCC発生時期に関するデータが必ずしも十分に無いことから、正確な予測ができないという問題が浮上した。運転開始からSCCが発生するまでの期間は、過去の事例から見て短寿命のものでも数年以上の長期間を要するが、バラツキの多い現象でもある。これを正確に予測する技術は現状では十分でないというガイドライン検討会では評価し、運転開始からSCC発生までの時間をゼロ、すなわち運転開始からSCC発生までの時間を無視するという大胆な保守的仮定を採用することとした。

(図4) この方法は運転開始時点でシュラウドサポート溶接部に初期き裂を仮定し、運転開始と同時にそのSCCが進展するというモデルの採用を意味する。これによって、この問題は克服されることとなった。これは過度に保守的な仮定ではないかとの懸念もあったが、ガイドライン全体の一般への説明性を重視し、この仮定を採用した。この技術的問題はSCC発生機構に関する研究やSCC発生データの蓄積などによって徐々に解消されて行くことが望まれる。

(4) SCCの進展モデル設定

次に、この検討ステップでは、初期き裂の形状・寸法の設定方法とSCCの進展予測方法について検討した。まず、初期き裂の位置及び方向は上記(2)のとおり、位置は溶接線上、方向は溶接線に沿った方向とし(溶接線に直角な方向のき裂はほとんど構造強度に影響し

ないため、き裂方向は溶接線方向とした。) 寸法については、き裂深さを材料の結晶粒寸法程度の $50\mu\text{m}$ とした。この初期欠陥は運転開始とともに進展することになる。き裂進展挙動の模擬方法は、初期き裂深さ $50\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ の半楕円状き裂(アスペクト比0.1)の進展解析結果を用いることで、き裂進展を模擬した。このき裂進展解析に用いるインコネル182材のSCC進展速度データは既にある程度蓄積されていたので、これを利用してき裂進展解析することとした。SCC進展速度データはき裂の応力拡大係数に対するき裂進展速度の形でプロットし、これらのデータの最適曲線を引いて、き裂進展解析に用いた。(図5) これらのデータは、CT試験片³⁾を用いて応力拡大係数増加条件下で採取されたデータであり、実機の溶接残留応力支配の応力条件下におけるSCC進展速度と比較すると、力学的には保守側の進展速度となっているものと予測している。水質環境は、実機の炉水環境(通常水質環境および水素注入環境)を模擬した条件としている。これらのSCC進展速度データは現状で必ずしも十分とは言えないため、今後ともデータ蓄積に努め、必要に応じてこれらを反映して最適線の見直しを行う必要がある。

応力拡大係数分布は、溶接残留応力と運転応力とを加算した応力分布により決定した。このうち応力分布を支配する溶接残留応力は、従来からある有限要素モデルによる解析手法により求めた。これは、溶接金属(モデル)を実際の溶接施工手順どおりに

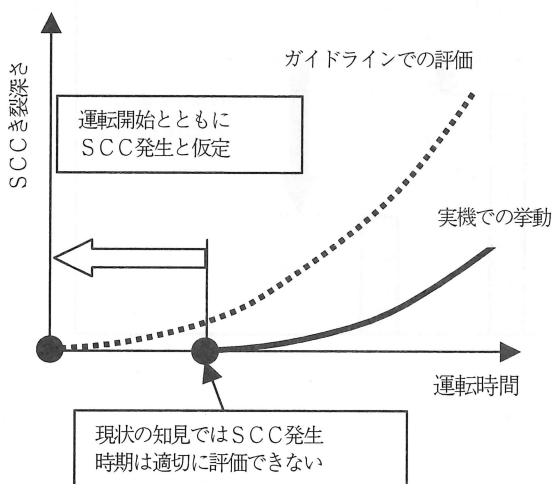


図4 SCC発生時期のモデルの設定

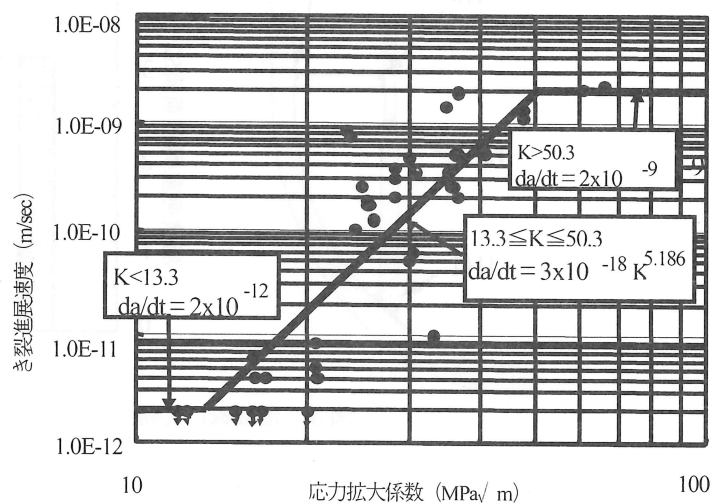


図5 SCCき裂進展解析に用いたき裂進展速度線図 (インコネル182, 通常水質環境)

母材（モデル）に順次積層し、各積層毎に実際の溶接条件を模擬した温度分布時刻歴変化を与えて、この温度分布により生じる変形を弾塑性解析により求めるものである。運転荷重については、プラント製作時に設計用に定められた荷重を適用し、実機では起動・停止等の過渡運転はあるものの定格運転に比べ時間的に遥かに短い時間であることから、定格運転時の荷重が一様に働くものとした。

(5)点検不可箇所の取扱い

この検討ステップではSCC発生が懸念され、かつ点検が出来ない箇所の取扱いについて検討した。従来と比較すると現状の点検技術は格段に改善され、相当狭隘な箇所でも点検ができるようになってきたが、それでも依然として点検の難しい箇所が一部存在する。現状の技術ではこのような箇所の健全性を確認する術が無い。ここで、このような箇所の取扱いをどのようにしたらよいかという問題が生じた。点検ができない箇所とはいえ、必ずしもSCCが発生するわけではないので点検不可範囲をすべて既にSCCが発生している状態であると仮定する必要はない。しかし、これを技術的に適切に取扱うには、現状では既にSCCが発生している状態、すなわち当該部全体の引張り荷重伝達を無視するという、これも大胆な保守的仮定を採用する以外にはないと判断した。これも過度に保守的な仮定となる危険性はあったが、一般への説明性を重視し、当該部分はあたかもき裂であるかのように取扱う、

すなわち、当該部分は分離しており、引張り荷重が伝達できないものと仮定して解析することとした。

(図6)

(6)外力の設定

この検討ステップでは、シュラウドサポートに運転中に作用する外力で構造強度上最も厳しい条件について検討した。その結果、運転中に地震荷重が作用する条件が最も厳しい条件であることが分かり、これを前述の解析モデルに作用させて解析することとした。このステップにおける技術的検討は基本的に従来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の問題はない。

前述の(1)から(6)までで経年変化事象を記述でき、許容できる範囲も明確になったら、次はどのようなタイミングで点検・補修するルールとするかである。一般に、原子力発電所は個々の発電所で運転保守に関する中長期計画を持っているなど、発電所毎に固有の事情があるので、技術的に意味が無かったり、無闇に過大な負荷をガイドラインの使用者に掛けたりするようなルールでは、却って健全な保全活動を阻害することにもなり兼ねない。したがって、できるだけフレキシブルなルールとすることが望ましい。この課題に対しては、技術的に合理性のある範囲で、点検・補修の時期をガイドラインの使用者が自ら決定できるルールにすることが適切であるとの考えに至った。すなわち、一度に点検範囲を広くし、その健全性が確認されたら、その健全性が確認された範囲の広さに応じて、次回点検までの運転時間を長くすることが出来る。逆に、点検範囲が狭いと次回点検までの運転時間が短くなる。このような考え方を取り入れて、以下(7)、(8)の各検討ステップにおいて点検時期と補修時期の決定方法について検討した。

(7)点検時期の決定

この検討ステップでは、まず初回点検時期の決定方法について検討した。これは前述の初期き裂が運転開始とともに進展し、目視検査で発見できる大きさに成長した時点以降で、かつシュラウドサポートの安全機能を喪失するき裂サイズに対して十分な裕度（この場合、運転中に想定される最大荷重は地震荷重が作用する時点であるので、設計用限界地震

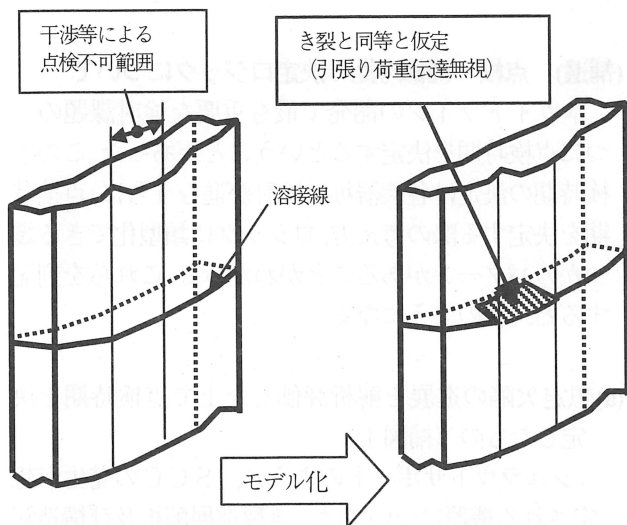


図6 点検不可範囲の取扱い

S₂⁴⁾に1.5倍の安全率を考慮。)を確保した時点までの間に初回点検を実施するようルールを規定した。また、再点検時期は、初回点検で異常がなかった場合、その異常がなかった範囲の全域に目視検査で発見できないき裂が存在すると保守的に仮定してき裂進展解析および構造強度解析することとした。目視検査では長さ10mm程度のき裂を検出できることから、初期き裂の大きさは長さを10mm、深さをアスペクト比0.1に相当する1mmとした。き裂進展挙動は、初期き裂深さ1mm、長さ10mmの半楕円状き裂(アスペクト比0.1)の進展解析を実施することで模擬した。初回点検でき裂が発見された場合は、その当該き裂は言うまでもなく、き裂が発見されなかった溶接部にも初期欠陥を仮定し、その両者が運転再開とともに進展すると仮定してき裂進展解析および構造強度解析し、その結果に基づき点検時期を定めるルールとした。(補遺参照)この際、前述のように点検範囲と点検時期をある程度フレキシブルに決定できるルールとするため、初回点検および再点検でき裂が認められず健全性が確認された部位については、仮想的な解析上のき裂進展をリセットし初期状態に戻してそれ以降のき裂進展解析を実施することとした。(後述 補図1)なお、点検時期を決定する主要因子は運転条件下において作用する「地震荷重」であり、この時の構造強度が十分、すなわち、地震荷重によって座屈または崩壊に至るほどの変形が生じない範囲のき裂の大きさであれば、結果的にシュラウドサポートの安全機能(炉心支持機能、制御棒挿入性確保、必要冷却材流量の確保および再冠水能力の維持)は維持できる解析結果となった。

(8)補修時期の決定

次に、この検討ステップでは、補修が必要となる時期の決定方法について検討した。これは点検時期の決定方法と同様の手法を用いた。補修が実施されるのは、当然のことながら、点検によってき裂が発見され、それが次回点検時あるいは次回プラント定検時まで安全機能を十分な余裕を持って維持できないと評価された場合である。この場合、プラントの運転再開前に必要な補修を実施しなければならないルールとした。また、補修時期をある程度フレキシブルに決定できるルールとするため、点検時期の決定方法と同様の手法を採用した。

5 まとめ

前項で説明したように、ガイドライン開発に当たって現状技術、知見が必ずしも十分でない点もあったが、その都度、工学的な工夫、すなわち、現状技術、知見の不足を包含するほどの保守的な仮定を行うことによって問題を克服してきた。これらが可能であったのは、偏に炉内構造物が構造強度的に極めて裕度の高い構造物であったためである。この構造強度裕度があったからこそ、保守的過ぎるのではないと思われるほどの仮定を取り入れても、現実的な炉内構造物の保全計画(点検、補修)が立案可能なガイドラインを規定できたのである。

このような現状技術に見合った工学的な仮定は技術的に正当なものではあるものの、将来に向かって改善が望ましく、可能な限り現実に近いシミュレーションができるようにしていく努力を続け、将来、これらが適正なレベルに改善されていくことが期待される。従って、今後はガイドラインの合理性を高め、高度化していくために、き裂発生・進展に関する材料データの充実や検査技術の改善による検査不可箇所削減など、不断の努力を重ねて行く必要がある。

今回はガイドラインの技術的内容の全貌について詳述したが、このガイドラインをできるだけ客観的な立場から評価するため、ガイドライン開発の意義やガイドラインの体系と構造、さらにはガイドラインの技術的完成度などについても検討・評価してみた。次回はその内容について述べる予定である。

(補遺) 点検・補修時期の決定ロジックについて

本ガイドラインの開発で最も重要な検討課題の一つに点検時期を決定するということがあった。この点検時期の決定は各機器毎に検討が進むうちに、点検時期を決定する際の考え方、ロジックに類型化できる幾つかのパターンがあることがわかった。これらを列記すると、次のようになる。

(a)想定欠陥の進展を解析評価した上で点検時期を決定したもの(補図1)

シュラウドサポートのように、SCCの発生が想定される機器については、き裂進展解析及び構造解析を実施し、その結果に基づき当該機器の構造強度と機能が常に維持できるように点検時期を定めた。

- i) SCC発生の潜伏期間を無視して初期欠陥を想定
 - ii)点検で欠陥が検出された場合は、その欠陥を考慮
 - iii)上記 i), ii) の欠陥が運転荷重と溶接残留応力を受けて進展すると想定して解析評価
 - iv)上記解析結果に基づき、当該機器の構造強度と機能が常に十分維持できるような時点で点検するよう、その時期を定める。
- (b)試験データと運転実績を踏まえて点検時期を決定したもの(補図2)

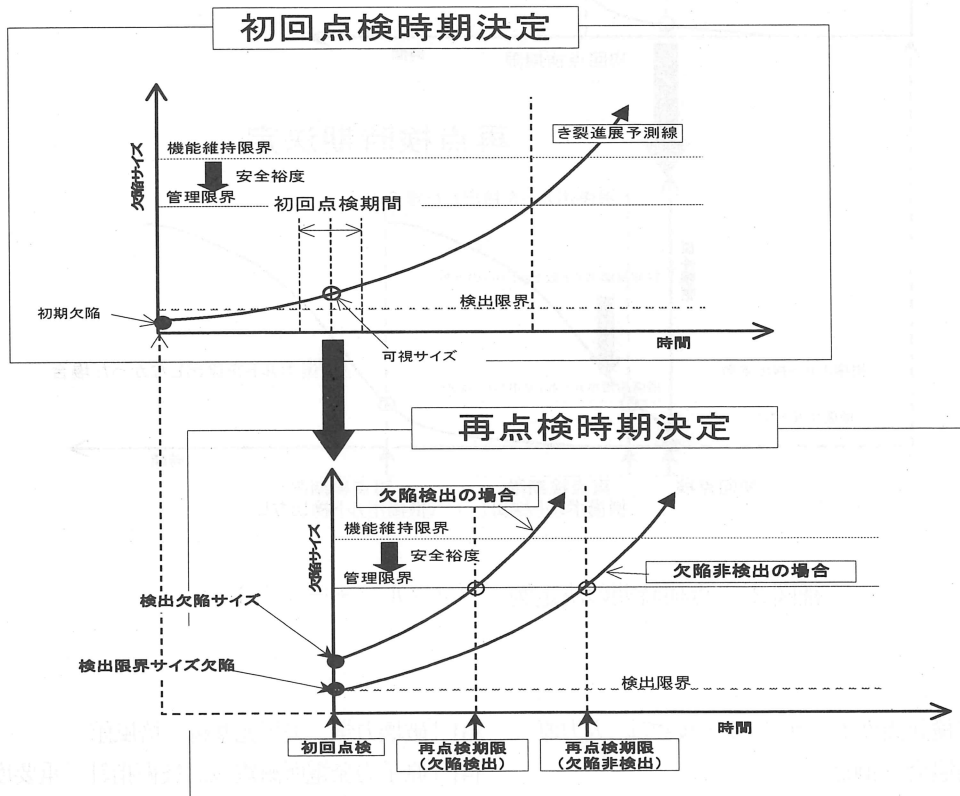
ジェットポンプピームのように、その材料のSCCのき裂進展データが十分に採取されていない機器は、上記シュラウドサポートのようなき裂進展解析ができない。そこで、以下の考え方で点検時期を定めた。

- i)既に改良材に取替えが完了しているジェットポンプピームは、SCCの発生を完全に否定することはできないものの、試験データから十分な耐SCC性があることを証明できる。
- ii)このため、長期間の運転に耐えられると考えられるが、念のため、点検を実施する。

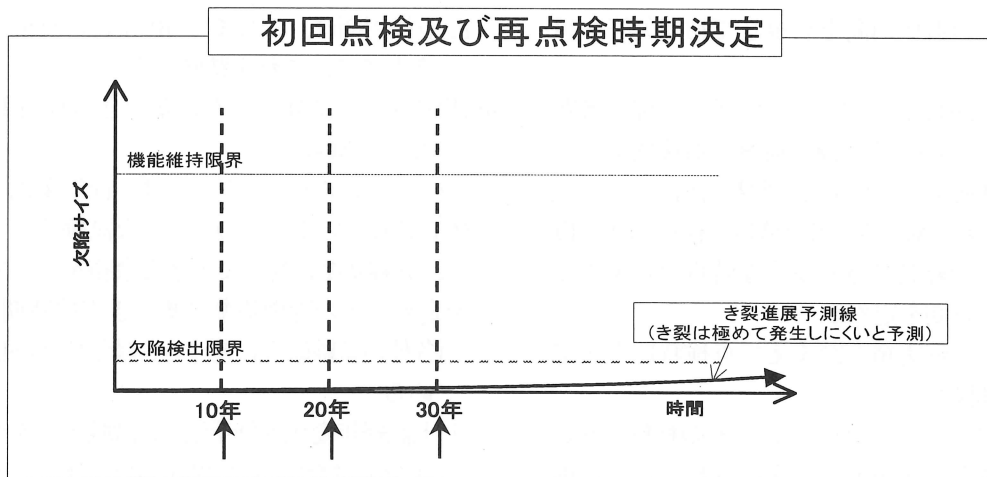
- iii)点検周期は、これまで10年毎に点検を実施してきたので、これを踏襲する。
- (c)限定された試験データに基づき点検時期を決定したもの(補図3)

バッフルフォーマボルトは、経年変化評価手法は確立されているものの、十分な試験データが無いため、許容基準に対して大きな余裕をとって管理基準を定め、その管理基準に基づき点検時期を定めた。

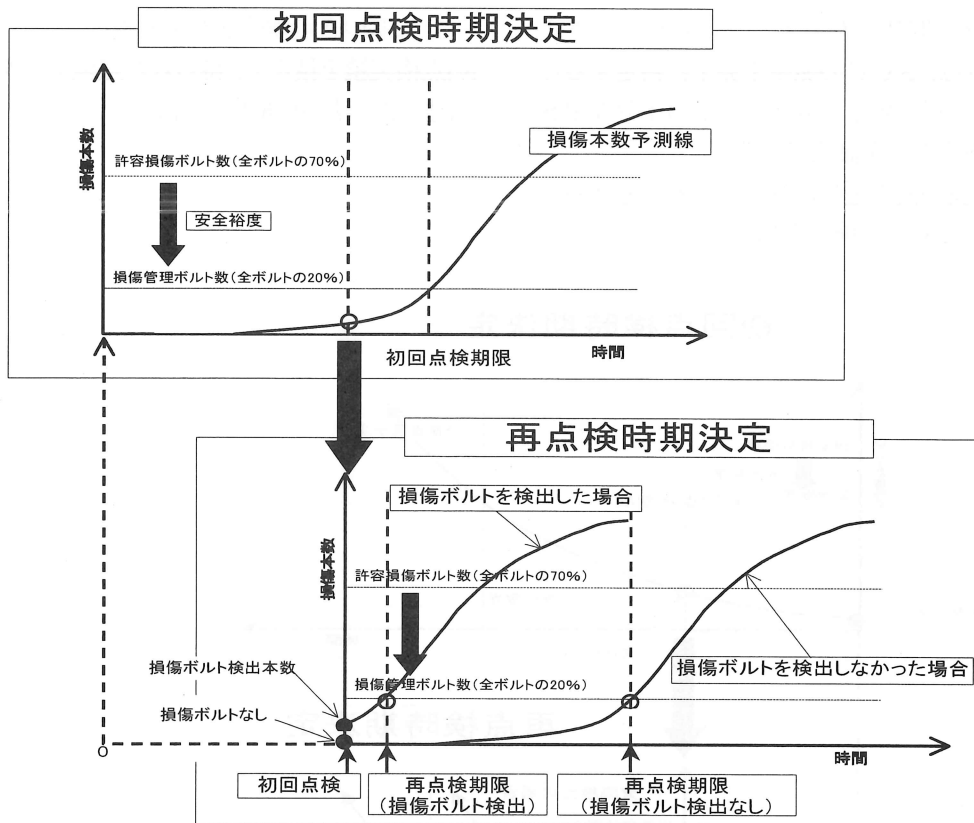
- i)各種の試験研究に基づき、経年変化評価手法を定める。
- ii)上記経年変化評価手法は、試験データが必ずしも十分ではないので、保守的な評価となるように評価式を定める。
- iii)評価手法の不確実性があるため、許容基準に対して大きな余裕をとった管理基準を設け、その基準に基づき点検時期を定める。
- iv)点検実績を積んで、得られた点検データを反映して、上記評価手法の精緻化を図る。



補図1 点検時期の決定例(シュラウドサポート)



補図2 点検時期の決定例 (ジェットポンプビーム)



補図3 点検時期の決定例 (バッフルフォーマボルト)

参考文献

- [1] 「炉内構造物点検評価ガイドラインについて」, 火力原子力発電技術協会 (2002)
- [2] 「BWR炉内構造物点検評価ガイドライン [シュラウドサポート]」, 火力原子力発電技術協会 (2001)
- [3] 「破壊力学 矢川元基編」培風館
- [4] 「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 (JEAG 4601・補-1984)」 社団法人日本電気協会