予防保全工法ガイドライン

[水素注入による環境改善効果の評価方法]

平成24年 3月

一般社団法人 日本原子力技術協会

はじめに

我が国の原子力発電所では,安全・安定運転を確保するため,炉内構造物等の健全性を 確認あるいは保証することが、重要な課題となっています。本ガイドラインは,このよう な重要性に鑑み,損傷発生の可能性のある構造物について、点検・評価・補修等に関する 要領を提案するものです。

平成12年、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会が、(社)火力原子力発電技術 協会に設置され、これまでに各種のガイドラインを発行してまいりました。平成19年より 本検討会は、日本原子力技術協会に継承され、検討を継続しております。

本ガイドラインの策定にあたっては、常に最新知見を取り入れ、見直しを行っていくこ とを基本方針としております。この方針に則り、現行版の発行後も最新知見の調査および 収集に努めることと致します。本ガイドラインが原子力産業界で活用され、原子力発電 所の安全・安定運転の一助になることを期待しております。

最後に、本ガイドラインの制定にあたり、絶大なご助言を賜りました学識経験者、電 力会社、メーカの方々等、関係各位に深く感謝いたします。

平成24年3月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

委員長野本敏治

予防保全工法ガイドライン

改訂履歴

ガイドライン名:水素注入による環境改善効果の評価方法

| 改訂年月 | 版 | 改訂内容 | 備考 |
|-------------|------|------|----|
| 平成 14 年 3 月 | 初版発行 | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(平成24年3月現在,順不同,敬称略) rev.1

| 委員長 | 野本 | 敏治 | 東京大学名誉教授 |
|------|-----|-----|---------------------|
| 副委員長 | 関村 | 直人 | 東京大学教授 |
| 委員 | 安藤 | 柱 | 横浜国立大学名誉教授 |
| 委員 | 安藤 | 博 | 元(財)発電設備技術検査協会 |
| 委員 | 辻川 | 茂男 | 東京大学名誉教授 |
| 委員 | 西本 | 和俊 | 大阪大学教授 |
| 委員 | 橋爪 | 秀利 | 東北大学教授 |
| 委員 | 望月 | 正人 | 大阪大学教授 |
| 幹事 | 村井 | 荘太郎 | 東京電力 (株) |
| 幹事 | 平野 | 伸朗 | 関西電力 (株) |
| 幹事 | 堂崎 | 浩二 | 日本原子力発電(株) |
| 委員 | 舟根 | 俊一 | 北海道電力(株) |
| 委員 | 飯田 | 純 | 東北電力 (株) |
| 委員 | 松浦 | 英生 | 東京電力 (株) |
| 委員 | 鈴木 | 俊一 | 東京電力 (株) |
| 委員 | 市川 | 義浩 | 中部電力 (株) |
| 委員 | 手操 | 久吾 | 北陸電力(株) |
| 委員 | 野村 | 友典 | 関西電力(株) |
| 委員 | 谷 浦 | Ē | 中国電力(株) |
| 委員 | 黒川 | 肇一 | 四国電力 (株) |
| 委員 | 中牟田 | 日 康 | 九州電力(株) |
| 委員 | 江口 | 藤敏 | 日本原子力発電(株) |
| 委員 | 寺門 | 副日 | 日本原子力発電(株) |
| 委員 | 鞍本 | 貞之 | 電源開発 (株) |
| 委員 | 伊東 | 敬 | 日立GEニュークリア・エナジー (株) |
| 委員 | 元良 | 裕一 | (株)東芝 |
| 委員 | 小山 | 幸司 | 三菱重工業(株) |
| 委員 | 杉江 | 保彰 | 日本原子力技術協会 |
| 参加者 | 菊池 | 正明 | (独)原子力安全基盤機構 |
| 参加者 | 小澤 | 正義 | (独)原子力安全基盤機構 |
| 事務局 | 関 | 弘明 | 日本原子力技術協会 |

ガイドラインの責任範囲

このガイドラインは、一般社団法人 日本原子力技術協会 に設置された炉内構 造物等点検評価ガイドライン検討会において、常に最新知見が反映されるよう見直 しを行うという基本方針のもとに、本ガイドラインに関する専門知識と関心を持つ 委員により中立、公平、公正を原則とした運営規約に従う審議を経て、制定された ものである。また、ガイドライン検討会は、ガイドラインが許認可にも適用可能と なるよう別途、透明性、公開性、公平性のある手続きに従って学協会規格に取り入 れられるよう働きかける。なお、ここで「最新知見」とは、その時点で工学的に公 知化されていて、ガイドライン及びその「解説」「参考資料」に示し得る範囲の知見 であり、「工学的に公知化されている」とは、その分野の専門知識を有する者により 認められた工学的な客観事実のことである。

本ガイドラインは各規程事項の技術的根拠を明確にしており、その示した根拠の 範囲内においてガイドライン検討会はガイドラインの記載内容に対する説明責任を 持つが、これ以外の本ガイドラインを使用することによって生じる問題などに対し て一切の責任を持たない。また、このガイドラインに従って行われた点検、評価、 補修等の行為を承認・保証するものではない。従って、本ガイドラインの使用者は、 本ガイドラインに関連した活動の結果発生する問題や第三者の知的財産権の侵害に 対し補償する責任が使用者にあることを認識して、このガイドラインを使用する責 任を持つ。

なお、本ガイドラインの発行をもって、この規格が我が国の規制当局によって承認されたと考えてはならない。

| 第 | 1章 | Ē | 1的及び適用 | 1 |
|---|----|-----|--------------------------------|---|
| | 1. | 1 | 目的 | 1 |
| | 1. | 2 | 適用 | 1 |
| 第 | 2章 | 環 | 景境緩和技術の概要 ⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯ | 1 |
| | 2. | 1 | 水素注入 | 1 |
| 第 | 3章 | きき | 方法適用の条件 | 2 |
| | 3. | 1 | 水質条件 | 2 |
| | 3. | 2 | ECP 低減条件 ······ | 2 |
| 第 | 4章 | , i | 京検時期設定方法 | 8 |
| | 4. | 1 | 点検時期設定手順 | 8 |
| | 4. | 2 | 実際の HWC 稼働率に応じた点検時期見直し | 8 |

解説

| (解説1-1) | ガイドライン制定の目的 |
|----------|------------------------------|
| (解説1-2) | き裂進展速度低減効果の得られる範囲 |
| (解説 2-1) | HWC による環境緩和の原理 |
| (解説 3-1) | 水素注入環境でのき裂進展評価適用にあたっての水質条件14 |
| (解説 3-2) | ECP 低減に必要な水素量 |
| (解説4-1) | HWC 稼働率 |
| (解説 4-2) | HWC 稼働率に応じたき裂進展速度 |
| (解説4-3) | 各部位におけるき裂進展条件と機器の点検周期21 |
| (解説4-4) | 実際の HWC 稼働率に応じた点検時期見直し |

付録

- 付録 A 水素注入技術の実機への適用経緯
- 付録B 水素注入量と ECP の関係
- 付録 C 履歴効果
- 付録 D き裂進展速度内分ケーススタディ

第1章 目的及び適用

1.1 目的

本ガイドラインは、沸騰水型原子力発電所(BWR)用機器のうち、応力腐食割れ (SCC)に対する予防保全対策として水素注入等を適用したものについて、環境改善 に応じたき裂進展速度の適用により点検周期を設定する方法を示すことを目的とする。 (解説1-1)

1.2 適用

1.2.1 適用範囲

本ガイドラインは,水素注入等による環境改善効果によりき裂進展速度低減効果 が得られる BWR 用機器に適用する。(解説 1 – 2)

1.2.2 適用時期

本ガイドラインの適用時期は、商業運転開始後の供用期間中とする。

第2章 環境緩和技術の概要

2.1 水素注入

水素注入(HWC: Hydrogen Water Chemistry)は、沸騰水型原子炉(BWR)の給水 系から水素を添加し、炉内で水の放射線分解により生じた酸素や過酸化水素等の酸化性 化学種と水素との再結合反応を促進し、酸化性化学種濃度を低下させ、腐食環境を改善 する技術である。

水素注入の原理は、炉水への水素の添加により、水の放射線分解により生じた、酸素 や過酸化水素等の酸化性化学種と水素の再結合反応を促進し、酸化性化学種濃度を低下 するものである。見かけ上、水素注入の効果は、

 $0_2 + 2H_2 \rightarrow 2H_20$

 $H_2O_2 + H_2 \rightarrow 2H_2O$

のように表わすことができる。しかし、これらの反応は素反応ではなく、実際の再結合 反応は放射線分解によって生成した分解生成物が関与する 30 以上の反応の複合反応に よって説明される。

一次系構造材料の粒界応力腐食割れ(IGSCC: Intergranular Stress Corrosion Cracking) 抑制に対する水素注入の効果は、当該材料の腐食電位(ECP: Electrochemical Corrosion Potential) を指標にすることが一般的である。材料、応力、環境の SCC 発生 3 要因のうち、環境要因である ECP を標準水素電極(SHE: Standard Hydrogen Electrode) 換算で-230 mV_{SHE}以下に低減すれば、IGSCC の発生を抑制できるとされ ている。また、IGSCC の進展については、ECP 低減度合いに応じた抑制効果が期待で きると考えられている。

水素注入技術の原理の詳細を解説に、また、実機への適用経緯を付録Aに、それぞれ 示す。

(解説 2-1)

第3章 方法適用の条件

3.1 水質条件

き裂進展評価にあたっては、評価対象部位で以下の水質条件が満たされていること。

- (1) 電気伝導率 < 20µS/m
- (2) 硫酸イオン $(SO_{4^{2^{-}}})$ 濃度 \leq 5ppb
- (3) 塩化物イオン (Cl⁻) 濃度 ≦ 5ppb

(解説 3-1)

3.2 ECP低減条件

評価対象部位におけるき裂進展速度を低減できる ECP が確保できる水素注入量が満 足されていること。各部位で、ECP 値が-100mVsHE、及び-200mVsHE を与える給 水系での必要水素注入量を表 3-1 と表 3-2 に示す。ここで、評価対象の温度条件は通常 運転温度とする。評価対象部について図 3-1~3-8 に示す。

なお、ECPの実測値がある場合については、その値に基づいた管理が可能である。

(解説 3-2)

| 解析部位 | 対象部 | 必要約 | 必要給水水素注入量(ppm) | | | | |
|---------|--|-------|----------------|-------|--|--|--|
| | | BWR3 | BWR4 | BWR5 | | | |
| シュラウド | H1 外 | 2.0< | 2.0< | 2.0< | | | |
| | H1,2内 (レストレイント/ホールドダウン部, 炉心スプレイスパージャ) | 2.0< | 2.0< | 2.0< | | | |
| | H2,3 外 | 2.0< | 2.0< | 2.0< | | | |
| | H3 内 | 1.0 | 0.8 | 0.5 | | | |
| | H4 外 | 1.3 | 1.3 | 1.1 | | | |
| | H4 内 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | | | |
| | H6a,b 外 | 0.7 | 0.7 | 0.6 | | | |
| | H6a,b 内 | 0.6 | 1.0 | 0.8 | | | |
| | H7a,b 外 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | | | |
| | H7a,b 内 | 0.8 | 1.5 | 1.5 | | | |
| 再循環系配管 | 内面 | 0.6 | 0.5 | 0.7 | | | |
| ジェットポンプ | 内面 (インレットミキサ) | 2.0 < | 2.0 < | 2.0 < | | | |
| | 外面 (JP ビーム~ライザブレース) | 2.0 < | 2.0 < | 2.0 < | | | |
| 下部プレナム | H8内 H10,H11 ICM/CRD ハウジング, DP/LC 配管ノズル取付 溶接部 | 1.0 | 1.5 | 1.8 | | | |

表 3-1 目標電位となる水素注入量の評価値(-100mVsHE)

水素注入量はメーカー2社の解析結果の高い側の値。

| 解析部位 | 対象部 | 必要約 | 给水水素注入量(| ppm) |
|---------|--|-------|----------|-------|
| | | BWR3 | BWR4 | BWR5 |
| シュラウド | H1 外 | 2.0< | 2.0< | 2.0< |
| | H1,2内 (レストレイント/ホールドダウン部, 炉心スプレイスパージャ) | 2.0< | 2.0< | 2.0< |
| | H2,3 外 | 2.0< | 2.0< | 2.0< |
| | H3 内 | 1.1 | 0.9 | 0.6 |
| | H4 外 | 1.4 | 1.5 | 1.3 |
| | H4 内 | 0.9 | 0.7 | 0.9 |
| | H6a,b 外 | 0.7 | 0.7 | 0.6 |
| | H6a,b 内 | 0.7 | 1.0 | 0.8 |
| | H7a,b 外 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| | H7a,b 内 | 0.8 | 1.5 | 1.5 |
| 再循環系配管 | 内面 | 0.6 | 0.5 | 0.7 |
| ジェットポンプ | 内面 (インレットミキサ) | 2.0 < | 2.0 < | 2.0 < |
| | 外面 (JP ビーム~ライザブレース) | 2.0 < | 2.0 < | 2.0 < |
| 下部プレナム | H8内 H10,H11 ICM/CRD ハウジング, DP/LC 配管ノズル取付 溶接部 | 1.0 | 1.5 | 1.8 |

表 3-2 目標電位となる水素注入量の評価値(-200mVsHE)

水素注入量はメーカー2社の解析結果の高い側の値。



図 3-1 シュラウドの構造



図 3-2 シュラウドサポートの構造



図 3-3 上部格子板点検対象部の構造



図 3-4 CRD ハウジングの構造

図 3-5 ICM ハウジングの構造

図 3-6 ジェットポンプの構造





図 3-7 差圧検出/ほう酸注入配管の構造 図 3-8 炉心スプレイ/スパージャの構造

第4章 点検時期設定方法

4.1 点検時期設定手順

BWR 各機器を対象とするガイドラインにおいて定める点検時期の設定において、水素 注入条件でのき裂進展速度線図を適用するに際しては、以下の手順で行う。

4.1.1 水素注入条件稼働率の設定

水素注入条件稼働率(以下「HWC稼働率」という。)を、HWC稼働実績をもとに 設定する。HWC稼働率は、3.1項の水質条件を満足し、且つ原子炉起動~停止ま での時間に対する目標とする腐食電位の低減効果を確保する水素注入量(もしくは必 要水素注入量)以上を注入した時間の割合とする。(解説4-1)

HWC稼働率 = 水質条件&必要水素注入量を満足する期間 運転時間

4.1.2 設定した HWC 稼働率に応じたき裂進展評価

設定した HWC 稼働率に応じ、き裂進展評価を行う。基本的な評価方法は各機器を 対象とするガイドラインに定める方法によるが、SCC き裂進展速度について、水素 注入条件における SCC き裂進展速度線図および通常水質条件における SCC き裂進展 速度線図を考慮し、HWC 稼働率に応じてそれらを内分した SCC き裂進展速度線図 を設定して用いる。HWC 稼働範囲に応じて表 4-1 に示す SCC き裂進展速度を用い てもよい。なお、1 サイクル以上連続して水素注入を稼動しない状況が生じた場合は、 別途き裂進展評価を行う。(解説 4 – 2)

4.1.3 点検時期設定

上記のき裂進展評価結果に基づき、点検時期の設定を行う。(解説4-3)

4.2 実際の HWC 稼働率に応じた点検時期見直し

実際の HWC 稼働率に応じ、必要に応じ以下のとおり点検時期の見直しを行う。

(解説 4-4)

4.2.1 実際の HWC 稼働率 < 設定 HWC 稼働率 の場合

点検予定時期より前の、評価期間に余裕をみた適切な時期に設定 HWC 稼働率を実際の HWC 稼働率よりも低く設定し直し、点検周期を再設定しなければならない。

4.2.2 実際の HWC 稼働率 ≧ 設定 HWC 稼働率 の場合

点検予定時期までに、設定 HWC 稼働率を実際の HWC 稼働率に余裕をみた範囲で 高く設定し直し、点検周期を再設定しても良い。

| HWC稼働率 | 金 | 兑敏化SUS304 | SCCき裂進展速度 (da/dt [m/s] ,K [MPa√m]) | | | | | |
|------------|---------|------------|------------------------------------|---|----------------------|---|----------------|--------|
| | da∕dt = | 2.00E-12 | | | | (| K ≦ | 3.4) |
| 50%未満 | da∕dt = | 0.00E+00 + | 1.43E-13 | × | K^ 2.161 | (| 3.4 < K ≦ | 12.9) |
| ⇒NWC進展速度適用 | da∕dt = | | 1.43E-13 | × | K [^] 2.161 | (| 12.9 < K < | 57.9) |
| | da/dt = | 9.20E-10 | | | | (| 57.9 ≦ K |) |
| | da/dt = | 2.00E-12 | | | | (| K ≦ | 3.4) |
| 50%以上70%未満 | da/dt = | 1.00E-12 + | 7.15E-14 | × | K^ 2.161 | (| $3.4 < K \leq$ | 12.9) |
| ⇒50%進展速度適用 | da/dt = | | 7.55E-14 | × | K^ 2.161 | (| 12.9 < K < | 57.9) |
| | da/dt = | 4.86E-10 | | | | (| 57.9 ≦ K |) |
| | da/dt = | 2.00E-12 | | | | (| K ≦ | 3.4) |
| 70%以上90%未満 | da/dt = | 1.40E-12 + | 4.29E-14 | × | K^ 2.161 | (| $3.4 < K \leq$ | 12.9) |
| ⇒70%進展速度適用 | da∕dt = | | 4.85E-14 | × | K [^] 2.161 | (| 12.9 < K < | 57.9) |
| | da/dt = | 3.12E-10 | | | | (| 57.9 ≦ K |) |
| | da/dt = | 2.00E-12 | | | | (| K ≦ | 3.4) |
| 90%以上 | da/dt = | 1.80E-12 + | 1.43E-14 | × | K^ 2.161 | (| 3.4 < K ≦ | 12.9) |
| ⇒90%進展速度適用 | da/dt = | | 2.14E-14 | × | K^ 2.161 | (| 12.9 < K < | 57.9) |
| | da/dt = | 1.38E-10 | | | | (| 57.9 ≦ K |) |
| | da/dt = | 2.00E-12 | | | | (| K ≦ | 3.4) |
| [参考] | da/dt = | 2.00E-12 + | 0.00E+00 | × | K^ 2.161 | (| 3.4 < K ≦ | 12.9) |
| HWC進展速度 | da∕dt = | | 7.94E-15 | × | K^ 2.161 | (| 12.9 < K < | 57.9) |
| | da∕dt = | 5.10E-11 | | | | (| 57.9 ≦ K |) |

表 4-1 HWC 稼働率毎の SCC き裂進展速度 (1/3)



| HWC稼働率 | 低炭 | は素ステンレス鎁 | 」 SCCき裂 | 進展 | 速度 (da/dt | [m/s] | , K [MPa√m]) |
|------------|---------|------------|------------|----|-----------|-------|------------------------|
| | da∕dt = | 2.00E-12 | | | | (| K ≦ 6.7) |
| 50%未満 | da∕dt = | 0.00E+00 + | 3.33E-14 | × | K^2.161 | (| $6.7 < K \leqq$ 19.3) |
| ⇒NWC進展速度適用 | da∕dt = | | 3.33E-14 | × | K^2.161 | (| 19.3 < K < 57.9) |
| | da∕dt = | 2.10E-10 | | | | (| 57.9 ≦ K) |
| | da∕dt = | 2.00E-12 | | | | (| $K \leq 6.7$) |
| 50%以上70%未満 | da∕dt = | 1.00E-12 + | 1.67E-14 | × | K^2.161 | (| $6.7 < K \leqq$ 19.3) |
| ⇒50%進展速度適用 | da∕dt = | | 1.83E-14 | × | K^2.161 | (| 19.3 < K < 57.9) |
| | da∕dt = | 1.16E-10 | | | | (| 57.9 ≦ K) |
| | da∕dt = | 2.00E-12 | | | | (| $K \leq 6.7$) |
| 70%以上90%未満 | da∕dt = | 1.40E-12 + | 9.99E-15 | × | K^2.161 | (| $6.7 < K \leqq$ 19.3) |
| ⇒70%進展速度適用 | da∕dt = | | 1.23E-14 | × | K^2.161 | (| 19.3 < K < 57.9) |
| | da∕dt = | 7.77E-11 | | | | (| 57.9 ≦ K) |
| | da∕dt = | 2.00E-12 | | | | (| $K \leq 6.7$) |
| 90%以上 | da∕dt = | 1.80E-12 + | 3.33E-15 | × | K^2.161 | (| $6.7 < K \leqq$ 19.3) |
| ⇒90%進展速度適用 | da∕dt = | | 6.33E-15 | × | K^2.161 | (| 19.3 < K < 57.9) |
| | da∕dt = | 3.99E-11 | | | | (| 57.9 ≦ K) |
| | da∕dt = | 2.00E-12 | | | | (| $K \leq 6.7$) |
| [参考] | da∕dt = | 2.00E-12 + | 0.00E+00 | × | K^2.161 | (| $6.7 < K \leq$ 19.3) |
| HWC進展速度 | da∕dt = | | 3.33E-15 | × | K^2.161 | (| 19.3 < K < 57.9) |
| | da∕dt = | 2.10E-11 | | | | (| 57.9 ≦ K) |

表 4-1 HWC 稼働率毎の SCC き裂進展速度 (2/3)



| HWC稼働率 | ニッケル基領 | 合金 | SCCき裂進 | 展透 | 速度 (da∕dt | [m/s] , | K [MPa√m]) | |
|------------|------------------|----|----------|----|-----------|---------|------------|-------|
| | da/dt = 2.00E-12 | | | | | (| K ≦ | 12.1) |
| 50%未満 | da/dt = 0.00E+00 | + | 2.70E-17 | × | K^ 4.5 | (| 12.1 < K ≦ | 19) |
| ⇒NWC進展速度適用 | da∕dt = | | 2.70E-17 | × | K^ 4.5 | (| 19 < К < | 56) |
| | da/dt = 2.00E-09 | | | | | (| 56 ≦ K |) |
| | da/dt = 2.00E-12 | | | | | (| K ≦ | 12.1) |
| 50%以上70%未満 | da/dt = 1.00E-12 | + | 1.35E-17 | × | K^ 4.5 | (| 12.1 < K ≦ | 19) |
| ⇒50%進展速度適用 | da∕dt = | | 1.53E-17 | × | K^ 4.5 | (| 19 < K < | 56) |
| | da/dt = 1.13E-09 | | | | | (| 56 ≦ K |) |
| | da/dt = 2.00E-12 | | | | | (| K ≦ | 12.1) |
| 70%以上90%未満 | da/dt = 1.40E-12 | + | 8.10E-18 | × | K^ 4.5 | (| 12.1 < K ≦ | 19) |
| ⇒70%進展速度適用 | da∕dt = | | 1.06E-17 | × | K^ 4.5 | (| 19 < K < | 56) |
| | da/dt = 7.81E-10 | | | | | (| 56 ≦ K |) |
| | da/dt = 2.00E-12 | | | | | (| K ≦ | 12.1) |
| 90%以上 | da/dt = 1.80E-12 | + | 2.70E-18 | × | K^ 4.5 | (| 12.1 < K ≦ | 19) |
| ⇒90%進展速度適用 | da∕dt = | | 5.85E-18 | × | K^ 4.5 | (| 19 < K < | 56) |
| | da/dt = 4.32E-10 | | | | | (| 56 ≦ K |) |
| | da/dt = 2.00E-12 | | | | | (| K ≦ | 12.1) |
| [参考] | da/dt = 2.00E-12 | + | 0.00E+00 | × | K^ 4.5 | (| 12.1 < K ≦ | 19) |
| HWC進展速度 | da∕dt = | | 3.50E-18 | × | K^ 4.5 | (| 19 < K < | 56) |
| | da/dt = 2.58E-10 | | | | | (| 56 ≦ K |) |

表 4-1 HWC 稼働率毎の SCC き裂進展速度 (3/3)



(解説1-1) ガイドライン制定の目的

BWR では水素注入等により炉内構造物等の腐食環境改善を図っているプラントがある。 各機器個別の点検評価ガイドラインにおいて,水素注入等による環境改善の効果を考慮し た点検周期の設定が可能となっており,水素注入環境での SCC き裂進展速度線図も与え られている。しかし,水素注入環境は腐食電位(ECP)により定義されており, ECP の 評価,水素注入の稼働率の扱い等が明確でなく,基本的に実機適用はなされていない。

本ガイドラインは、水素注入等による環境改善効果を点検計画に反映するために、水素 注入環境での SCC き裂進展速度線図を用いた点検周期設定の適用要領をまとめたもので ある。

(解説1-2) き裂進展速度低減効果の得られる範囲

ステンレス鋼に関しては、(社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格(2008 年版)」(以下、「維持規格」という。)に ECP 値が-100mVsHE以下の範囲、またニッケ ル基合金溶接金属に関しては、「(社)日本機械学会 論文集(A編)、76巻 764号(2010-4)、 p81」に-200mVsHE 以下の範囲についてき裂進展速度低減効果が反映されているき裂進 展速度線図がある。このため、これらのき裂進展速度を利用できる BWR 機器を対象とす る。

(解説2-1) HWCによる環境緩和の原理

(1) 水の放射線分解

炉心は高放射線場であり、多量のエネルギーが発生している。このエネルギーの大部分 は熱エネルギーとなるが、一部(数%)は直接水に吸収され、水分子の分解を促す。

 $H_2O \rightarrow H^+$, e_{aq}^- , H, OH, H_2 , H_2O_2 , HO_2

中性子、ガンマ線

この右辺の化学種を一般に水の放射線分解生成物と呼ぶ。このうち、e_{aq}-は水和電子と呼ばれ、水分子から叩き出された電子に周囲の水分子が配位して一時的に安定化したものである。H原子、OHラジカルと合わせ、これらの化学種は短寿命で反応性が高い。

*ラジカル:分解生成物のうち、不対電子を有し、化学的に活性な化学種を指す。

(2) 水の放射線分解G値

放射線化学の分野では、放射線が入射した時に生成する化学種の収量をG値によって定 義する。水の放射線分解の場合、G値は以下で示される。

G値=分解生成物(個)/水の吸収エネルギー(100eV)

通常、水の分解のG値は上述の初期過程が終了した時点での化学種の濃度で与えられ、 以降の反応の初期値を与えるものである。したがって、モデル評価においても初期条件を 与えるパラメータとして重要である。 (3) 反応式および反応速度定数

これらの分解生成物は相互に反応しあい、最終的には酸素、水素、過酸化水素等の安定 化学種に変化していくが、炉内の放射線場では、中間活性種もある平衡濃度で定常的に存 在している。今、系を簡略化するため、H原子およびOHラジカルのみに着目すると、以 下のような二次反応が引き続いて起こると考えられる。

①H、OH同士の反応

| H + H | =] | H_2 | | | (1) | |
|----------------------|----------------|----------|--------------------|------|-----|----|
| H + OH | =] | H_2O | | | (2) | |
| OH + OH | =] | H_2O_2 | | | (3) | |
| ②Н、ОНとН | H_2 , H_2O | o2との反 | え応 | | | |
| $H + H_2C$ | $D_2 =$ | ОH | + H ₂ O | | (4) | |
| $OH + H_2$ | = | Н | $+ H_2O$ | | (5) | |
| $OH + H_2C$ | $D_2 = 2$ | HO_2 + | - H ₂ O | | (6) | |
| ③HO ₂ ラジカ | ルとの反 | 応 | | | | |
| さらに、HO | 。は酸化 | 性ラジオ | カルの一種であるが、 | これは、 | 酸素 | ((|

сок、пО₂ は酸化性フシカルの一種であるが、これは、酸素(O₂)の前駆体として 重要である。すなわち、以下の反応を経てO を生ます

$$HO_{2} + H = H_{2}O_{2}$$
(7)

$$HO_{2} + OH = O_{2} + H_{2}O$$
(8)

$$HO_{2} + HO_{2} = O_{2} + H_{2}O_{2}$$
(9)

このような反応を経て系は動的な平衡状態に向かっていくが、炉内の各部位におけるこ れら化学種の濃度はそれぞれの反応の反応速度で決まってくる。現在、モデル評価におい ては、30以上の反応式および反応速度定数を使用している。

(7)

(4) 水素注入のメカニズム

水素注入を行った場合、炉内に注入された分子状の水素(H₂)が最初に行う反応は、 (5)式のOHラジカルとの反応であり、H原子を生成する。このH原子は、(4)式でH₂O₂ と反応し、OHラジカルを生成する。この(4)式と(5)式とは、連鎖反応となり、結果的に 水(H₂O)の分解を抑制し、過酸化水素や酸素の生成を抑制することにつながる。すな わち、水素を注入することにより、下記(10)式の動的な化学平衡を再結合側に維持するこ とになる。

| | n, γ | | ΟН | | ΟН | | ΟН | | |
|--------|-------------------|------|-------------------|--------------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------|
| H_2O | \Leftrightarrow | ОН | \Leftrightarrow | $H_{2}O_{2}$ | \Leftrightarrow | HO_2 | \Leftrightarrow | O 2 | (10) |
| | Η | | Н | | Н | | Н | | |
| これが放 | 女射線場 | での水素 | ぼ注入に | よる水の分 | 解の抑制 | 制メカニフ | ズムであ | ると考えられ | っている。 |

(解説3-1) 水素注入環境でのき裂進展評価適用にあたっての水質条件

応力腐食割れ(SCC)のき裂進展速度は、ECPのみでなく炉水中の不純物イオン、および その目安としての電気伝導率(導電率)の影響を受けるため、水素注入環境でのき裂進展 評価の適用にあたっては電気伝導率、硫酸イオン濃度、塩化物イオン濃度が規定値以下と なっていなければならない(機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格(2008年版)」)。 この規定値に関しては、ステンレス鋼とニッケル基合金溶接金属に共通の値を適用する。 なお、現状の ECP 評価ならびにき裂進展速度線図は通常運転温度条件が前提となるため、 この温度条件が満たされる運転領域が評価対象となる。

電気伝導率は炉水に含まれる不純物イオンの総和として監視される値である。SCC への影響は不純物イオン個別に強さが異なる。一般に電気伝導率が高いとSCCの発生・進展が加速される。

き裂進展速度への影響は、図 3-1-1、図 3-1-2 および図 3-1-3 に示すように、硫酸イオン 並びに塩化物イオンは他の不純物イオンと比較してき裂進展速度を著しく加速する。

硫酸イオンの発生源は、イオン交換樹脂の再生薬品として使用する硫酸や、硫酸基を持つ樹脂の炉水への漏えい、あるいは樹脂の劣化により樹脂基材に含まれる硫黄分の溶出によるものが発生源となっている。BWRの炉水に最も存在しやすい不純物の一つである。

塩化物イオンは、BWRのSCC加速因子として初期から制御対象として考えられてきた。 古くから、ステンレス鋼のIGSCCおよびTGSCC、孔食、あるいは隙間腐食を生じさせ る不純物として知られている。復水器からの漏えいや塩素を含む試薬の混入によって炉水 に持ち込まれる。

電気伝導率あるいは不純物イオン濃度が高くなると SCC の進展速度を目標値以下に低下させるために必要な ECP の値がより低くなり、より多くの水素注入量が必要となる。

(図 3-1-4)したがって、水素注入環境でのき裂進展評価の適用にあたっては維持規格が 前提としている水質条件を満たしていなければならない。

14



Figure 2-5 SCC Damage Acceleration of Furnace Sensitized Type 304 Stainless Steel due to Sulfate as Sulfuric Acid and Sodium Sulfate in 200 ppb Oxygenated Water at 550°F (288°C) (Provided by GE Nuclear Energy)



(出典) EPRI、BWR Water Chemistry Guidelines -2004 Revision (2004)



図 3-1-2 酸化環境下での鋭敏化ステンレス鋼のき裂進展速度に及ぼす化学元素添加の影響 (出典) M.Sambongi, K.Takamori, S.Suzuki, N.Ichikawa, M.Itow, H.Takahashi, T.Kato, Y.Wada, K.Akamine, T.Takiguchi, G.Nakayama and K.Yamauchi, "Effects of Reactor Water Impurities on ECP and SCC", 1998 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, 343-348(1998).



図 3-1-3 酸化環境下の最大き裂長さと添加不純物濃度の関係:(左) 鋭敏化 600 ニッケル基 合金、(右) 鋭敏化 182 ニッケル基合金溶接金属

(出典) M.Sambongi, K.Takamori, S.Suzuki, N.Ichikawa, M.Itow, H.Takahashi, T.Kato, Y.Wada, K.Akamine, T.Takiguchi, G.Nakayama and K.Yamauchi, "Effects of Reactor Water Impurities on ECP and SCC", 1998 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, 343-348(1998).



PLEDGE Crack Growth Prediction as a Function of Sulfate and Chloride Concentration (Provided by GE Nuclear Energy)

図 3-1-4 GE-PLEDGE モデルによる硫酸イオンの SCC 進展速度への影響評価 (出典) EPRI、BWR Water Chemistry Guidelines -2004 Revision (2004)

(解説3-2) ECP 低減に必要な水素量

水素注入による腐食電位低減効果は、炉内の部位・機器、プラント設計条件および水素 注入量によって異なる。したがって、腐食電位センサによる ECP の実測並びに水質解析 モデルを用いた炉内の対象部位ごとの水素注入効果の解析結果を組み合わせた評価が必 要である。炉内での ECP の実測値が得られている部位は、現状、限られているが、実測 値がある場合は、それを基礎に他部位での ECP 値を解析により内外挿することで求めて いる。

本ガイドラインでは、点検対象部位で水素注入時のき裂進展速度線図を用いるための必要水素注入量を水質解析コードを用いて計算し、表 3-1 および表 3-2 に示した。

必要水素注入量は対象とする鋼種に対して目標 ECP 以下にするために必要な給水での 水素濃度とした。目標 ECP と対象鋼種は以下のようにした。

- -100mV_{SHE} ステンレス鋼
- -200mV_{SHE} ニッケル基合金溶接金属

また、各代表炉型を次のように設定した。

- BWR3 (46 万 kWe)
- BWR4 (80 万 kWe)
- BWR5 (110 万 kWe)

(付録 B 参照)

ところで、水素注入効果が炉型ごとに異なるのは、ダウンカマのγ線の平均線量率が設 計諸元毎に異なるためである。炉心の燃料とシュラウドまでの平均距離、シュラウド肉厚、 ダウンカマ幅が異なるためにγ線の減衰率が炉型毎に異なり、各機器への水素の効果は炉 型で異なる。そのため、水素注入効果は各炉型に応じた設計毎に評価することが必要とな る。また、一般に、ダウンカマ上部領域では、水素と酸素の結合は促進されないため、水 素注入の効果は少ない。さらに、炉底部は、ジェットポンプで炉心からの酸化剤を多く含 んだ冷却水とダウンカマで再結合を受けた冷却水が混合されて流れ込むため、ECP低下 度合いは、ダウンカマ領域に比べ小さい。なお、炉内に持ち込まれた水素は二相流領域で 気相に抜けるため、炉心部より上部の領域では水素の効果は期待できない。

図 3-2-1 にダウンカマでの γ線の平均線量率と水素注入時の再結合効率との関係を示す。 ダウンカマでの γ線の平均線量率に比例して水素と酸素の再結合効率が大きくなること がわかる。なお、炉底部での水素注入効果の違いは、再結合効率の差の他に、ジェットポ ンプによるダウンカマでの再結合が進行したダウンカマ下部の水と再結合があまり進行 していないダウンカマ上部の水の混合の影響を受ける。このとき混合比は、ジェットポン プの有無およびジェットポンプの効率(M比)で決まる。

プラント毎の炉底部での ECP の下がり方の違いを図 3-2-2 に示す。プラント諸元が異 なるために水素注入量に対する ECP の応答も異なっている。ここでは BWR5 は 110 万 kW であり炉が大きいために BWR2 や BWR3 より ECP が下がりにくい。BWR2 は小さ くまたジェットポンプが無いために ECP が下がりやすい。また ABWR は炉が最も大きい がジェットポンプが無いため ECP が BWR5 などのジェットポンププラントより下がり易 い。

なお、解説3-1で記載したように、ECP評価はデータが通常運転温度領域に限られ るため、これ以下の温度領域での評価を行う場合には個々の入力パラメータの温度依存性 が必要である。

さらに、現在の維持規格では、ステンレス鋼のき裂進展線図は NWC(+150 mVsHE)並び に HWC(-100mVsHE)の2つの状態のみが規定されている。しかしながら、図 3-2-3、 図 3-2-4 に示すように ECP が-100mV sHE以上でき裂進展速度は ECP の関数となってお り、ECP が低下すればき裂進展速度も低下することが知られている。したがって、-100m VsHE 以上でも HWC による改善効果を個別に評価して HWC 稼働率に応じたき裂進展速 度の改善度合いを評価し、運転計画立案の参考とすることができる。





(出典) Y. Wada et al, J. Nucl. Sci. Technol., 36, 169 (1999)



図 3-2-2 原子炉ボトムドレンでの ECP 測定値

(出典)和田陽一、原子力学会軽水炉燃料・材料・水化学夏季セミナー予稿集 (2009)



図 3-2-3 腐食電位とステンレス鋼のき裂進展速度との関係(1)

(出典) P. L. Andresen et al., Tenth International conference on environmental degradation of materials in nuclear power systems⁻ water reactors, August 5 to 9, 2001, Lake Tahoe, Nevada, NACE, (2001)



図 3-2-4 腐食電位とステンレス鋼のき裂進展速度との関係(2) (出典) 高守謙郎他, "高温純水中における低炭素ステンレス鋼の SCC の発生と進展",保 全学, Vol.3, 52(2004)

(解説4-1) HWC 稼働率

必要水素注入量は対象部位毎に異なるため、HWC 稼働率も部位毎に異なる場合がある。 例えば、原子炉再循環(PLR)配管の必要水素注入量を注入し、PLR 配管の HWC 稼働 率が 100%であったとしても、その注入量が炉底部の必要水素注入量を満足していない場 合、炉底部の HWC 稼働率は 0%となる。

また、水素注入時は、安定した水素の連続注入に努めるとともに、HWC 稼働率の実績 管理については、1 運転サイクル終了後に前回点検からの実績稼働率を確認することが望 ましい。

(解説4-2) HWC 稼働率に応じたき裂進展速度

BWR プラントにおける通常炉内水質環境(NWC)から BWR 水素注入水質環境(HWC) への切り替え、または HWC から NWC への切り替え時における SCC き裂進展速度に及 ぼす履歴効果については、付録 C に基づき無視できる。

また付録 D に示すように、HWC 条件における SCC き裂進展速度線図及び NWC 条件 における SCC き裂進展速度線図について、その中間に稼働率に応じ、内分(稼働時間に よる比率を NWC 及び HWC 条件の SCC き裂進展速度に線形的に考慮して設定)した SCC き裂進展速度線図による評価結果は、NWC 及び HWC の稼働率に応じて1サイクル毎に その稼働率に応じた SCC き裂進展評価結果と同等の評価となることから、稼働率に応じ 内分した SCC き裂進展速度線図を用いることとする。

(解説4-3) 各部位におけるき裂進展条件と機器の点検周期

同一の水素注入条件における各部位毎の ECP は異なることから、同一機器であっても 溶接線毎に SCC き裂進展速度も異なる場合がある。従って、機器全体の構造健全性を担 保する点検周期は、溶接線毎に、所定の水素注入条件での SCC き裂展速度による進展量 を算定して、構造健全性が担保される健全範囲(許容残存面積)が確保される期間を評価 した上で、それらの期間のうち最も短い期間を元にして設定する必要がある。従って、機 器全体の点検周期を決定する部位(溶接継手)は、通常水質条件と水素注入条件では異な る可能性がある。

水素注入条件での機器全体の点検周期の設定方法を以下に示す。

- ①各機器毎の点検評価ガイドラインで点検周期を決定するための検討対象としている部位(溶接継手)毎に、HWC稼働率に基づいて算出された SCC き裂進展速度により許容残存面積に至る期間を算定する。
- ②これらの期間が最短となる部位(溶接継手)及びその期間を決定する。
- ③上記で決定された期間に、通常水質条件における点検周期で設定されている裕度と同等 な裕度を加えて、当該水素注入条件の点検周期とする。

④初回点検時期については、③で決められた点検時期が 30 年を超える場合は、高経年化 評価時期に合わせて暦年で 30 年後を初回点検時期とする。

通常水質条件で機器全体の点検周期を決定している部位(溶接継手)について,HWC 稼働率毎に初回点検時期及び次回点検時期(当該点検で欠陥が検出されない場合)を設定 した例を表 4-3-1 に示す。HWC 稼働率は表中の範囲の下限(例:50~70%の場合は 50%) を用い,機器の点検評価ガイドラインに示されている応力拡大係数分布と通常水質条件で の SCC き裂進展評価結果と,SCC き裂進展速度の通常水質条件に対する比率を保守側に 算定した値を用いて算出しており,当該部位(溶接継手)の点検時期は本表の値を用いて よい。

| | 炉心シュラウド H7 溶接継手 | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|--------|---------|---------|--|--|--|--|
| HWC 稼働率 | 従来 | 型① | 従来型①以外 | | | | | |
| | 初回点検時期 | 再点検時期 | 初回点検時期 | 再点検時期 | | | | |
| $0{\sim}50\%$ (注 2) | 11年(注3) | 7年(注4) | 20年(注5) | 10年(注6) | | | | |
| $50{\sim}70\%$ | 15 年 | 11 年 | 27 年 | 12 年 | | | | |
| $70 \sim 90\%$ | 19 年 | 15 年 | 30年(暦年) | 15 年 | | | | |
| 90% ~ | 30年(暦年) | 26 年 | 30年(暦年) | 22 年 | | | | |

表 4-3-1 各機器の HWC 稼働率毎の点検時期設定例(1/4)

注1:表中の点検時期は、特記以外は実運転期間を示す。

注2: HWC 稼働率0~50%の点検時期は、通常水質条件での点検時期として炉心シュラウ ドガイドライン(第4版)で定められている点検時期を示す。

注3:全周き裂深さが板厚の50%に至らない期間として実運転期間11年を設定。

注4:深さ1mmの想定欠陥が板厚の50%に至らない期間として実運転期間7年を設定。

注 5:30 年経過後の H7 のき裂深さは 18mm 程度で構造健全性に影響しないが、シュラウ ドの SCC 事例があることから、保守的に実運転期間 20 年に設定。

注6: 深さ1mmの想定欠陥が深さ10mm程度となる期間として実運転期間10年を設定。

| | シュラウドサポート H11 溶接継手 | | | |
|------------------|--------------------|--------|----------------------|--------|
| HWC 稼働率 | インコネル 182 | | 改良インコネル 182、インコネル 82 | |
| | 初回点検時期 | 再点検時期 | 初回点検時期 | 再点検時期 |
| $0\sim50\%$ (注2) | 25年(注3) | (規定なし) | 30年(暦年) (注4) | (規定なし) |
| $50{\sim}70\%$ | 30年(暦年) | — | 30年(暦年) | — |
| $70{\sim}90\%$ | 30年(暦年) | _ | 30年(暦年) | |
| $90\%\sim$ | 30年(暦年) | _ | 30年(暦年) | _ |

表 4-3-1 各機器の HWC 稼働率毎の点検時期設定例(2/4)

注1:表中の点検時期は、特記以外は実運転期間を示す。

- 注2: HWC 稼働率 0~50%の点検時期は,通常水質条件での点検時期としてシュラウドサポートガイドライン(第3版)で定められている点検時期を示す。
- 注3:シュラウドサポートレグのき裂進展速度が顕著となる時期(30年~40年)に余裕を もたせて実運転期間25年に設定
- 注4:インコネル 182 に比べ SCC に対する裕度が大きいことから高経年化技術評価時期に 合わせて暦年で 30 年と設定

| | 炉心スプレイ配管/スパージャ T·BOX と管の溶接継手 | | | |
|---------------------|------------------------------|----------|-----------|---------|
| HWC 稼働率 | SUS304 鋼 | | 低炭素ステンレス鋼 | |
| | 初回点検時期 | 再点検時期 | 初回点検時期 | 再点検時期 |
| $0{\sim}50\%$ (注 2) | 10年(注3) | 2.4年(注4) | 27年(注5) | 9年(注6) |
| $50{\sim}70\%$ | 16 年 | 4.5 年 | 30年(暦年) | 16 年 |
| $70{\sim}90\%$ | 26 年 | 7年 | 30年(暦年) | 24 年 |
| $90\%{\sim}$ | 30年(暦年) | 15 年 | 30年(暦年) | 30年(暦年) |

表 4-3-1 各機器の HWC 稼働率毎の点検時期設定例(3/4)

注1:表中の点検時期は、特記以外は実運転期間を示す。

注2: HWC 稼働率 0~50%の点検時期は,通常水質条件での点検時期として炉心スプレイ 配管/スパージャガイドライン(初版)で定められている点検時期を示す。

注3:板厚を貫通し,貫通欠陥の周方向進展により貫通欠陥角度が140°となる時期11.4年 に,裕度を考慮して実運転期間10年を設定。

注4:貫通欠陥を想定し,貫通欠陥角度が140°となる時期として実運転期間2.4年を設定。

注5:板厚を貫通し,貫通欠陥の周方向進展により貫通欠陥角度が130°となる時期32年に,

裕度を考慮して実運転期間 27 年を設定。

注 6: 貫通欠陥を想定し, 貫通欠陥角度が 130°となる時期として実運転期間 9 年を設定。 表 4-3-1 各機器の HWC 稼働率毎の点検時期設定例(4/4)

| | ジェットポンプ 管の周溶接継手 | | | | |
|--------------------|-----------------|----------|--------------|---------|--|
| HWC 稼働率 | SUS304 鋼 | | 低炭素ステンレス鋼 | | |
| | 初回点検時期 | 再点検時期 | 初回点検時期 | 再点検時期 | |
| $0{\sim}50\%$ (注2) | 16年(注3) | 2.7年(注4) | 30年(暦年) (注5) | 12年(注6) | |
| $50{\sim}70\%$ | 28 年 | 5年 | 30年(暦年) | 21 年 | |
| $70 \sim 90\%$ | 30年(暦年) | 7年 | 30年(暦年) | 30年(暦年) | |
| 90% \sim | 30年(暦年) | 17 年 | 30年(暦年) | 30年(暦年) | |

注1:表中の点検時期は、特記以外は実運転期間を示す。

- 注2: HWC 稼働率 0~50%の点検時期は,通常水質条件での点検時期としてジェットポ ンプガイドライン(初版)で定められている点検時期を示す。
- 注3:板厚を貫通し,貫通欠陥の周方向進展により貫通欠陥角度が180°となる時期19年 に,裕度を考慮して実運転期間16年を設定。
- 注4:貫通欠陥を想定し、貫通欠陥角度が180°となる時期を実運転期間2.7年と評価。
- 注 5: 板厚を貫通し,貫通欠陥の周方向進展により貫通欠陥角度が 180° となる時期は 50 年以上だが,高経年化技術評価時期に合わせて暦年で 30 年を設定。
- 注6:貫通欠陥を想定し、貫通欠陥角度が180°となる時期を実運転期間12年と評価。

(解説4-4)実際のHWC稼働率に応じた点検時期見直し

点検時期設定に用いた HWC 稼動率(設定稼働率)に対し,実際の HWC 稼働率(実績 稼働率)に応じた点検時期の見直し方法について,例を以下に示す。

なお,実際の点検時期設定等の運用は,各プラントの定検計画との関連や,点検時期見 直しの柔軟性を考慮の上,実施されるものである。

<適用の考え方(例)>

1サイクル終了毎*1に,前回点検時からの平均の実績稼働率*2を確認する。

遅くとも,実績稼働率が設定稼働率を下回る前の時点(次サイクルの稼働率を0%と想定)*³までに,設定稼働率を見直し点検時期の再評価を行う。なお,NWC(稼働率0%)で要求される時点までは再評価不要*⁴。

また, 点検予定時点にて実績稼働率が設定稼働率を上回った場合, 設定稼働率を見直し, 点検時期の再評価を行い延長することができる。

(注釈)

- *1:実績稼働率の確認を1サイクル終了毎としたのは、1サイクル停止していても速度 内分線図を使えるため1サイクルより細かい実績は考慮不要と考えられること、点 検時期の再評価を行えるのは点検予定時期の1サイクル前程度までと考えられるこ とによる。
- *2:点検周期は,前回点検から次回点検までの平均稼働率で評価されるため,実績稼働 率は前回点検時からの平均とした。なお,サイクル毎の運転日数の違いも想定され るため,実績稼働率としては各サイクルの稼働率の平均を求めるのではなく,前回 点検時からの水素注入稼動期間/原子炉運転期間で求める(サイクル毎の運転日数 に応じた重み付けを考慮する)必要がある。
- *3:あるサイクル終了時点で実績稼働率を確認した結果,設定稼働率を下回っており予 定していなかった点検が必要であった,といった事態を避けるため,次サイクルの 稼働率を0%と想定しても実績稼働率が設定稼働率を下回らないことの確認が必要 で,もし下回る場合は設定稼働率を低く見直し,点検時期の再評価が必要となる。 なお,次サイクルの運転日数についても実績が想定と異なる可能性はあるが,一般 に短くなることはあっても長くなることは考え難く,問題ないと考えられる。
- *4:次サイクルの稼働率を0%と想定して実績稼働率を設定稼働率と比較する場合,初 期サイクルでは有意な設定稼働率が設定できない(例:初回は0%)こととなって しまうが,NWC(稼働率0%)で要求される点検時期までの間は水素注入稼働率に 関わらず点検は不要なため,設定稼働率の見直し及び点検時期の再評価は不要であ る。

<適用の具体例>

NWCでの点検周期が7年(5サイクル),各サイクルの実績稼働率が75%(運転日数は同一)の場合の具体例を以下に示す。

○点検終了時

設定稼働率を70%とし、次回点検時期を第15サイクル終了時に設定。

○第1~3 サイクル

NWCでの点検時期以前であり、評価不要。

○第4サイクル終了時

NWC での点検時期を次回に控えているため、実績稼働率の確認を実施。

第1~4 サイクルの平均実績稼働率75%

→次回第5サイクルの稼働率を0%とすると、第1~5サイクル平均稼働率60%

→60%<現状の設定稼働率70%より、設定稼働率を60%に見直し

→次回点検時期を第12サイクル終了時に見直し

○第5サイクル終了時

実績稼働率の確認を実施。

第1~5 サイクルの平均実績稼働率75%

→次回第6サイクルの稼働率を0%とすると,第1~6サイクル平均稼働率63%

→63%>現状の設定稼働率 60%

→設定稼働率を見直してもよいが,再設定はせず,設定稼働率を上回っていることの 確認のみ

○第6~10 サイクル

第5サイクル終了時と同様,実績稼働率が設定稼働率を上回っていることの確認のみ。 ○第11サイクル終了時

点検予定時期を次回に控えているため、設定稼働率の見直し実施。

第1~11 サイクルの平均実績稼働率75%

→次回第12サイクルの稼働率を0%とすると、第1~12サイクル平均稼働率69%

→69%>現状の設定稼働率 60%より、設定稼働率を 69%に見直し

→次回点検時期を第14 サイクル終了時に見直し

○第12 サイクル終了時

第5サイクル終了時と同様,実績稼働率が設定稼働率を上回っていることの確認のみ。 ○第13サイクル終了時

点検予定時期を次回に控えているため、設定稼働率の見直し実施。

第1~13 サイクルの平均実績稼働率75%

→次回第14サイクルの稼働率を0%とすると,第1~14サイクル平均稼働率70% →70%>現状の設定稼働率69%より,設定稼働率を70%に見直し

→次回点検時期を第15サイクル終了時に見直し

○第14 サイクル終了時

点検予定時期を次回に控えているため、設定稼働率の見直し実施。

第1~14 サイクルの実績平均稼働率75%

→次回第15サイクルの稼働率を0%とすると,第1~15サイクル平均稼働率70% →設定稼働率,次回点検時期の変更なし

○第15 サイクル終了時

点検実施。

新たに稼働率設定,およびそれに基づく次回点検時期設定を行い,次回点検時期評価の ための平均稼働率算出の始期とする。

水素注入技術の実機への適用経緯

- 1 水素注入
- (1) 水素注入の基本的考え方

水素注入は、加圧水型原子炉(PWR)では初期から水素を炉水に添加し水の放射線 分解を抑制していたが、沸騰水型原子炉(BWR)では炉心で沸騰が生じ、添加した水素 が蒸気相に抜けるために効果がないと考えられていた。1979年にスウェーデンの BWRにおいて初めて水素注入が実施され、溶存酸素濃度の低下に効果があることが 実証されてから欧米を中心に採用され、水素注入適用プラントは国内外を含めて多数 に上る。

原子炉冷却材に水を使用する軽水炉では水の放射線分解により、BWR の場合、通 常運転時の炉水中では約200ppbの溶存酸素濃度と約10ppbの溶存水素濃度とが測定 されている。

水素注入の原理は、炉水への水素の添加により、水の放射線分解により生じた酸素 や過酸化水素等の酸化性化学種と水素との再結合反応を促進し、酸化性化学種濃度を 低下させるものである。見かけ上、水素注入の効果は、

 $O_2 + 2 H_2 \rightarrow 2 H_2 O$

 $H_2O_2 + H_2 \rightarrow 2H_2O$

のように表わすことができる。しかし、これらの反応は素反応ではなく、実際の再結 合反応は放射線分解生成物が関与する30以上の反応の複合反応によって説明される。 従って、線量率が弱く活性な分解生成物が存在しない給水配管やサンプリング配管等 では水素と酸素が存在しても再結合反応の寄与は小さい。

BWR では水素注入により、炉心での放射線分解が抑制されると同時にダウンカマ 部での再結合が生じるために、炉水中の酸化性化学種濃度が低下する。その効果は、 炉心での放射線分解の抑制よりも、ダウンカマ部での再結合反応の寄与の方が大きい ことが知られている。すなわち、ダウンカマ線量率が比較的高いプラントでは、再結 合効率が高く、水素注入の効果が高いとされる。

近年、水素注入効果を表す指標として、材料の電気化学的腐食電位(ECP: Electrochemical Corrosion Potential)が用いられるようになり、炉水中の溶存酸素 濃度のみではなく、過酸化水素等も含めた酸化性化学種の寄与を総合的に評価するこ とが一般的である。これによれば、BWRの運転条件で、ECPを標準水素電極(SHE: Standard Hydrogen Electrode)換算電位で-230mV_{SHE}以下に低減することにより、 IGSCCの発生を抑制できるとされている。 (2) 水素注入設備

水素注入の実施方法は概ね給水系から水素をガス状で注入し、かつ、化学量論的に 1/2 の酸素をオフガス系に注入するという点でほぼ共通している。水素注入点は復水 浄化系の下流側で給水ポンプの上流側が選ばれることが多い。注入した水素は給水中 に溶存した形で原子炉内に注入される。

この注入した水素は、炉心での水の放射線分解を抑制する働きをするが、マスバラ ンス上は自身は消費されないため、全量がオフガス系に移行することとなる。そこで、 オフガス再結合器の上流側で酸素注入を行い、水素・酸素再結合反応により水に戻し ている。

水素ガスの供給方法にはいくつかあるが、もっとも簡便な方法はボンベ法であり、 高圧のガスボンベから所定の圧力に減圧して注入する。ただし、トレーラー等による 供給頻度が多くなる難点がある。米国では安価なことから液体水素も利用されている。 一方、酸素は注入点圧力も低く、国内でも安価な液体酸素を気化して利用するのが有 利であり、供給頻度も低減できる。

これに対し、水の電気分解により、サイトで水素・酸素を同時に製造・供給する方式 もある。この利点としては、サイトで常時安定に供給できること、必要な分だけ供給 すれば良いので貯蔵の必要がないこと、高圧ガスの取り扱いがないこと等が挙げられ る。

- (3) 実機での水素注入実績
- (a) 国内外での水素注入実績

1979年にスウェーデンのオスカーシャム-2で BWR で初めて水素注入が実施さ れて以来、スウェーデン、米国、等で数多くの BWR に短期および長期の水素注入 が実施されている。欧米の BWR は再循環系配管の応力腐食割れ抑制を目的として 水素注入を採用し、近年では炉内構造物(炉心シュラウド、炉心支持板等)の保護も視 野に入れている。

国内では、1984年にATR であるふげんで水素注入が実施されて以来、1992年に 短期注入試験が実施されるまで、BWR での水素注入は行われていない。これは再 循環系配管の応力腐食割れ抑制を目的として水素注入が実施された欧米と異なり、 我が国では耐 SCC 材の適用や、溶接時残留応力の改善工法の適用が採用されていた ためである。しかしながら、近年では注入効果が大きく、かつ補修・交換の困難な 下部プレナム内構造物への予防保全工法として採用するプラントが増加している。 今後さらに適用が拡大する方向である。

(b)酸素濃度低減効果

水素注入の効果はまず、炉水中の溶存酸素濃度の低下に現れる。図A1に米国BWR プラントでの再循環系溶存酸素濃度の測定結果を示す¹⁾。給水中の溶存水素濃度 の増加とともに炉水中の溶存酸素濃度が低下して行く傾向がわかる。プラント間の 効果の差異は、再結合反応に大きく影響するダウンカマ部の放射線線量率が炉型に より異なるためとされている。

国内 BWR での測定例としては、800MWe 級 BWR-4 における炉水中溶存酸素濃 度の低減効果を図 A2 に示す²⁾。通常、BWR の炉水中には 200ppb 程度の溶存酸素 が存在するが、給水中の水素濃度の増加とともに 10ppb 以下程度まで低減されるこ とがわかる。特にダウンカマ下部の濃度を直接反映している再循環系の溶存酸素濃 度はその低下傾向が大きく、逆に原子炉底部の炉水中の溶存酸素濃度はやや高い。 これは、ダウンカマ部では再結合効率が高いのに対し、原子炉底部には炉心出口の 比較的溶存酸素濃度の高い炉水がジェットポンプを経由して直接流入するためと考 えられる。



図 A1 米国 BWR プラントでの再循環 系溶存酸素濃度の測定結果

図 A2 800MWe 級 BWR-4 における炉 水中溶存酸素濃度の低減効果

(c)腐食電位低減効果

水素注入の材料に対する効果をより直接的に把握する指標として材料表面の腐食 電位を測定することが行われており、SCC 感受性と腐食電位の相関について多くの 実験室試験がなされている。この観点から実機プラントでもいわゆるインプラント 試験として腐食電位測定が行われている。近年、BWR プラントでは、より構造材 料に近い部位で直接腐食電位を測定する観点から、炉心部、炉底部等での直接測定 が国内外で試みられている。図 A3 には原子炉底部のドレンラインにて腐食電位を 実測した例を示す²⁾。図中には、主蒸気中の放射線線量率増加割合も記されており、 効果と影響とが相反することがわかる。



図A3 原子炉底部ドレンラインにおける腐食電位測定例

(d) 最近の SCC 予防保全技術

BWR プラントで水素注入を実施すると主蒸気系線量率が上昇することから、それを回避するために、触媒機能を有する貴金属を炉内に注入し、低濃度の水素注入でも十分に腐食電位を低減させる技術として、貴金属注入技術が開発された。すでに米国を中心に多数実機適用されており、国内でも3プラントの実施例がある。従来、ブラントの停止操作時の中間温度で注入を行っていたが、近年では、プラント運転中にオンラインで注入することも検討されている。

また、光半導体である酸化チタンを用い、炉内チェレンコフ光による光励起電流 を利用して腐食電位を低下させる技術開発が行われてきており、すでに国内で適用 が開始されている。今後、効果の持続性、耐久性、等を確認しつつ、オンラインで の注入が検討されている。

参考文献

- R.L. Cowan, M.E. Indig, J.N. Kass, R.J. Law and L.L. Sundberg: "Experience with hydrogen water chemistry in boiling water reactors", Water chemistry of nuclear reactor systems 4, vol.1, pp.29-36, BNES, London (1986).
- 2) J. Takagi, Y. Morikawa, H. Sakamoto, N. Ichikawa, M. Itow, S. Kawamura and K. Takamori: "Long term verification program on hydrogen water chemistry at a Japanese BWR", Water chemistry of nuclear reactor systems 7, Vol.2, pp.489-495, BNES, London (1996).

水素注入量と ECP の関係

水素注入による炉内各部位での ECP の低減効果は炉型によって異なる。メーカー2 社に よる水質解析によって得られた BWR3,BWR4,並びに BWR5 での水素注入量と ECP の関係 を図 B1~B12 に示す。解析の対象炉型は、

- BWR3 (46 万 kWe)
- BWR4 (80 万 kWe)
- BWR5 (110 万 kWe)

である。

得られた ECP の水素注入量依存性のグラフから、目標 ECP (-100、及び-200mVsHE) となる給水水素濃度を決定した。

また、国内外の BWR で測定された ECP を図 B13~B15 にまとめた。水質解析の幅は解 析を行った機関の違いで生じる。反応式の違いによって酸素や過酸化水素濃度が異なるた めに同一の水素注入量に対して腐食電位の評価値が少しずつ異なるためである。

なお、水素注入によって ECP を低下させる場合、水素注入量が 0.4ppm を越えると図 B16 に示すように主蒸気系の線量率が急激に上昇し始め、未注入に対して 4~5 倍になる。 このため、敷地境界や管理区域境界の線量率に影響を与えるため水素注入の実施に当たっ ては各発電所ごとに注入量の上限を設定する必要がある。

また、水素注入と未注入の状態を繰り返すと構造材料表面の酸化皮膜が不安定になり、 Co-60の取り込みが増え再循環系配管などで配管付着放射能が増加する。したがって、水素 注入の断続的な実施を避けるべきである。

a)BWR3ーシュラウドH1内面



図 B1 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H1 内面の腐食電位

付録 B-2

a)BWR3ーシュラウドH1外面



図 B2 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H1 外面の腐食電位

付録 B-3



a)BWR3ーシュラウドH3内面

図 B3 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H3 内面の腐食電位

付録 B-4

a)BWR3ーシュラウドH3外面



図 B4 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H3 外面の腐食電位

付録 B-5

a)BWR3ーシュラウドH4内面



図 B5 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H4 内面の腐食電位

付録 B-6



a)BWR3ーシュラウドH4外面

図 B6 BWR3, BWR4, 並びに BWR5 でのシュラウド H4 外面の腐食電位

付録 B-7



図 B7 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H6 内面の腐食電位

付録 B-8

a)BWR3ーシュラウドH6外面



図 B8 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H6 外面の腐食電位

付録 B-9





図 B9 BWR3,BWR4,並びに BWR5 でのシュラウド H7 内面の腐食電位



a)BWR3ーシュラウドH7外面

図 B10 BWR3, BWR4, 並びに BWR5 でのシュラウド H7 外面の腐食電位

付録 B-11



図 B11 BWR3,BWR4,並びに BWR5 での再循環系配管内の腐食電位

付録 B-12



a)BWR3一炉底部(下鏡部)

図 B12 BWR3,BWR4,並びに BWR5 での炉底部(下鏡部)の腐食電位



図 B13 BWR3,BWR4,並びに BWR5 での ECP 実測値 (ボトムドレン、下部プレナム混在) (出典) H. Goto, et al., The 13th Chino-Japanese Seminar on Nuclear Safety, Taipei, ROC, JAIF (1999); J. Takagi, et al., Proc. of Water Chemistry 7, BNES, 196 (1996); H. Takiguchi, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 36, 179 (1999); K. Koyabu et al., Proc. of Symposium on Water Chemistry and Corrosion in NPP in Asia 2009, Nagoya, p117, AESJ (2009).



図 B14 820MWe-BWR5 の PLR サンプリングラインでの ECP 実測値

(出典) K. Ishida, et al., Proc. of NPC'08 - International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems - September 14 -18, 2008, L04-3, Berlin, Germany (2008)



図 B15 炉心バイパスでの ECP 実測値

(出典) M. E. Indig and J. L. Nelson, Corrosion, 47, 203 (1991); M.E. Indig, et al., Proc. of Sixth Int'l Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems- Water Reactors, August 1 -5, 1993 San Diego, USA, p. 897, TMS (1993).; M. Sekiguchi, et al., Proc. of Seventh International Conference of Water Chemistry of Nuclear Systems, October 13-17, 1996, Bournemouth, UK, paper No. 59, BNES (1996); S. Ashida, et al., Proc. of Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 6, October 12-15, 1992, Bournemouth, UK, p 103, BNES (1992)



図 B16 水素注入量と主蒸気系線量率の上昇の関係 (出典) C.C Lin, Proc. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7, p 135, BNES (1996)

<付録 C>

履歴効果

1. はじめに

BWR プラントにおける通常炉内水質環境 (NWC) から BWR 水素注入水質環境 (HWC) への切り替え、または HWC から NWC への切り替え時における SCC き裂進展速度に及ぼ す履歴効果について検討を行う。

2. SCC き裂進展速度に及ぼす履歴効果について

図 C1 は、CT 試験片を用いた SCC き裂進展試験における 182 合金のき裂長さの経時変 化¹⁾ を示すものである。NWC から HWC への切り替え時には、SCC き裂進展速度は、時 間遅れなく直ちに SCC き裂進展速度の低下が認められ、同様に HWC から NWC への切り 替え時には、SCC き裂進展速度は、時間遅れなく直ちに SCC き裂進展速度の増加が認めら れており、SCC き裂進展速度に及ぼす履歴効果は認められていない。

図 C2 は、CT 試験片において深いき裂先端を模擬するため、試験片両側面に側板を設け て 182 合金の SCC き裂進展試験を行ったときに用いた試験片形状²⁾ である。図 C3 は、そ の試験片を用いた SCC き裂進展試験における 182 合金のき裂長さの経時変化²⁾を示すもの である。図 C4 は、図 C3 において、腐食電位切り替え時のき裂長さの経時変化を拡大した ものである²⁾。腐食電位低下時(NWC から HWC への切り替え時)には時間遅れなく直ち に SCC き裂進展速度の低下が認められており、SCC き裂進展速度に及ぼす履歴効果は認め られていない。一方、腐食電位上昇時(HWC から NWC への切り替え時)には 50 時間程 度の遅れをもって SCC き裂進展速度の上昇が認められている。深いき裂の場合、HWC か ら NWC への切り替え時に HWC による履歴が初期に残る可能性が示唆されているが、そ れはプラント1サイクル(13 ヶ月)全体においてわずかな時間(0.5%程度)であること、 またその履歴効果によって NWC 初期の SCC き裂進展速度が低めに作用することから、 SCC き裂進展評価上の保守性への影響はなく、履歴効果は無視できるものと考えられる。

3. まとめ

試験データより、NWC から HWC への切り替え時には、SCC き裂進展速度は、時間遅 れなく直ちに SCC き裂進展速度の低下が認められる。なお、HWC から NWC への切り替 え時には、SCC き裂進展速度は、深いき裂を想定した場合に、HWC による履歴が初期に 残る可能性が示唆されているが、それはわずかな時間(プラント1サイクル(13ヶ月)全 体の 0.5%程度)であること、またその履歴効果によって NWC 初期の SCC き裂進展速度 が低めに作用することから、SCC き裂進展評価上の保守性への影響はなく、履歴効果は無 視できるものとする。 (参考文献)

- M. Itow et al., "The Effect of Corrosion Potential on Alloy 182 Crack Growth Rate in High Temperature Water," Proceedings of the Eighth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, Volume 2, pp.712-719 (1997).
- 2) M. Itow et al., "The Influence of Corrosion Potential on SCC Growth Behavior of a Deep Crack in Alloy 182 in Simulated BWR Environment," 11th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, pp.1192-1199 (2003).



図 C1 CT 試験片を用いた SCC き裂進展試験における 182 合金のき裂長さの経時変化1)



図 C2 CT 試験片において深いき裂先端を模擬するため試験片両側面に側板を設けて 182 合金の SCC き裂進展試験を行ったときに用いた試験片形状²⁾



図 C3 図 C2 の試験片を用いた SCC き裂進展試験における 182 合金のき裂長さの経時変 化²⁾

き裂進展速度内分ケーススタディ

1. はじめに

水素注入による環境改善に応じた SCC き裂進展速度の適用による合理的な点検実施時期 設定に資するため、稼働率に応じた簡易的な SCC き裂進展評価手法を検討する。

- 2. SCC き裂進展解析条件
- (1)評価対象1100MWe 級プラントの炉心シュラウド H7a リング
- (2) 初期き裂

内表面全周き裂:初期き裂深さ 0.1mm

(3) 荷重条件

図 D1 に評価に用いた残留応力を示す¹⁾。

周方向溶接部に垂直に作用する運転応力はほぼ 0 であるので、ここでは運転応力は 0 とした¹⁾。

(4) 応力拡大係数算出式

(社)日本機械学会 維持規格(2008 年版)²⁾ 添付 E-5 5.3(6)円筒周方向半だ円形 状の表面欠陥の応力拡大係数 b.全周表面欠陥の応力拡大係数に規定されている算出式

(5) き裂進展速度

維持規格²⁾ に規定されている低炭素ステンレス鋼の速度線図を使用する。通常炉内 水質環境中およびBWR水素注入水質環境中におけるSCCき裂進展速度線図を下記に示 す。

a.通常炉内水質環境中(電気伝導率<20μS/m, ECP≧150mV_{SHE})のSCCき裂進展速 度線図

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-12} \qquad (K \le 6.7) \qquad (1)$$

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-14} K^{2.161} \qquad (6.7 < K \le 57.9)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-10} \qquad (K > 57.9)$$

$$\stackrel{\text{``}}{=} \frac{da}{dt} (\text{m/s}), K (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

b.BWR水素注入水質環境中(電気伝導率<20 μ S/m, ECP \leq -100mV_{SHE})のSCCき裂 進展速度線図

(6) 水素注入の稼働率の設定

1 サイクル(13 ヶ月)運転における BWR 水素注入水質環境中(HWC)の稼働率を 50%、80%および 90%とする。

なお、全期間にわたり、通常炉内水質環境中(NWC)あるいは BWR 水素注入水質環 境中(HWC)とする場合の評価も行う。

3. SCC き裂進展評価結果

1サイクル(13ヶ月)運転における通常炉内水質環境中(NWC)および BWR 水素注入 水質環境中(HWC)の稼働率に応じて、1サイクル毎にその稼働率に応じた SCC き裂進 展評価を行う。本評価では、1サイクル中の初期に稼働率に応じた時間に対応する NWC の SCC き裂進展評価を行い、引き続き HWC の SCC き裂進展評価を行う。

図 D2 は、SCC き裂進展挙動に及ぼす水素注入の稼働率の影響を評価した結果である。 HWC の稼働率の向上とともに SCC き裂進展は遅くなる。表 D1 は、SCC き裂進展評価結 果のまとめであり、内表面全周き裂深さと時間の概要を示す。

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン[炉心シュラウド]¹⁾ では、従来型①のプラントは プラント供用開始時点からの実運転年数が 11 年経過するまでに初回点検を実施するよう規 定されている。これは、深さ 0.1mm の表面全周き裂を初期き裂として想定したき裂進展挙 動評価結果から、プラント供用開始から運転期間で 11 年以内ではシュラウドサポートリン グの厚さの 50% (約 35mm) に及ぶような深さに進展することはないとの考えによる。

また、初回点検でき裂が検出されなかった場合は、従来型①のプラントの場合、実運転 年数が初回点検から7年を超えない時期で再点検を実施するよう規定されている。これは、 想定した初期き裂(深さ1mm)が厚さの50%(約35mm)に及ぶような大きさに成長する ことはないことによる。

いずれも通常炉内水質環境中(NWC)における SCC き裂進展評価結果に基づいている。 同様の考え方に基づいて、初回点検時期を設定すると、HWC 稼働率が 50%では約 19 年、 HWC 稼働率が 80%以上では約 34 年となる。また、初回点検でき裂が検出されなかった場 合の再点検時期は、HWC 稼働率が 50%では約 13 年、HWC 稼働率が 80%では約 26 年と なる。表 D2 に HWC 稼働率に応じた初回点検時期と再点検時期を示す。

4. 稼働率の簡易的評価

HWC、NWCの稼働率に応じた SCC き裂進展速度を設定する。以下に HWC の稼働率に 応じて設定した SCC き裂進展速度線図を示す。ここでは、時間による比率を SCC き裂進 展速度に線形的に考慮して設定する。

a. HWC 稼働率 50%の場合

$$\begin{aligned} da/dt &= 2.0 \times 10^{-12} & (K \leq 8.4) \\ da/dt &= 2.00 \times 10^{-14} \ K^{2.161} & (8.4 < K \leq 57.9) \\ da/dt &= 1.26 \times 10^{-10} & (K > 57.9) \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\$$

b. HWC 稼働率 80%の場合

| $da/dt = 2.0 \times 10^{-12}$ | $(K \le 11.6)$ | (4) |
|--|-----------------------|-----|
| $da/dt = 9.99 \times 10^{-15} K^{2.161}$ | $(11.6 < K \le 57.9)$ | |
| $da/dt = 6.3 \times 10^{-11}$ | (K > 57.9) | |
| 単位: da/dt (m/s), K(MPa√n | m) | |

c. HWC 稼働率 90%の場合

| $da/dt = 2.0 \times 10^{-12}$ | $(K \le 14.0)$ | (5) |
|--|-----------------------|-----|
| $da/dt = 6.66 \times 10^{-15} K^{2.161}$ | $(14.0 < K \le 57.9)$ | |
| $da/dt = 4.2 \times 10^{-11}$ | (K > 57.9) | |
| 単位: da/dt (m/s), K(MPa \sqrt{n} | n) | |

図 D3 は、HWC の稼働率に応じて設定した SCC き裂進展速度線図であり、NWC および HWC 環境中の SCC き裂進展速度線図も示す。

図 D4 は、HWC の稼働率を稼働率に応じた SCC 進展速度に置き換えて評価した結果で ある。稼働率に応じて、HWC 環境中、NWC 環境中の SCC き裂進展速度を設定した評価 結果は、1 サイクル(13 ヶ月)運転における通常炉内水質環境中(NWC)および BWR 水 素注入水質環境中(HWC)の稼働率に応じて1 サイクル毎にその稼働率に応じた SCC き 裂進展評価と同等の評価である。このように、SCC き裂進展評価において、HWC と NWC 環境を不連続的に評価する手法の他、稼働率に応じた SCC き裂進展速度線図を設定するこ とにより、簡易的に評価が可能である。

また、HWCの稼働率 50%の評価について、1 サイクル(13 ヶ月)運転における BWR

水素注入水質環境中(HWC)の稼働率を 50%とした場合、および1サイクル(13 ヶ月) 毎にNWCとHWCが繰り返されるケースについての比較を行う。図D5にその結果を示す。 NWCとHWCの切り替えの時期を 0.5 サイクルおよび1サイクルとしても、SCC き裂進 展挙動に差はない。また、稼働率に応じた SCC き裂進展速度線図を設定することにより、 評価が可能である。

6. まとめ

水素注入により炉内の環境を改善することにより進展挙動が緩やかになることから、よ り合理的な点検実施時期が設定できる。このとき、稼働率に応じた簡易的な SCC き裂進展 速度を設定することにより簡易的な評価結果を得ることができる。

(参考文献)

- 日本原子力技術協会 BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン[炉心シュラウド](第4 版) 平成 20 年 6 月.
- 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2008 年版)、JSME S NA1-2008, 2008 年 10 月.

| 内表面全周き裂 | NWC(100%) | NWC(50%) + | NWC(20%) + | NWC(10%) + | HWC(100%) |
|----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| 「孤田上向と衣 | | HWC(50%) | HWC(80%) | HWC(90%) | |
| 休さ(mm) | | | 時間(年) | | |
| 1 | 4.1 | 5.6 | 8.4 | 10.1 | 14.3 |
| 2 | 5.2 | 7.6 | 12.0 | 15.7 | 24.8 |
| 5 | 6.5 | 9.9 | 16.5 | 22.8 | 38.2 |
| 10 | 7.6 | 12.0 | 20.6 | 28.2 | 48.7 |
| 15 | 8.3 | 13.2 | 23.0 | 32.5 | 56.4 |
| 20 | 9.1 | 14.5 | 26.0 | 36.3 | 64.0 |
| 25 | 9.8 | 16.0 | 28.4 | >36.3 | 71.5 |
| 30 | 10.6 | 17.5 | 31.4 | >36.3 | 79.1 |
| 35 | 11.4 | 18.7 | 33.9 | >36.3 | 86.7 |
| (板厚さの半分) | | | | | |

表 D1 SCC き裂進展評価結果のまとめ(内表面全周き裂深さと時間)

表 D2 初回点検時期と再点検時期

| 内表面全周き裂 | NWC(100%) | NWC(50%) + | NWC(20%) + | NWC(10%) + | HWC(100%) |
|---------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| | | HWC(50%) | HWC(80%) | HWC(90%) | |
| (木さ(mm) | | | 時間(年) | | |
| 初回点検時期 | 11.4 | 18.7 | 33.9 | >40 | >40 |
| 再点検時期 | 7.3 | 13.1 | 25.5 | >30 | >40 |

図 E-6 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (リング有り:H7a リング側)

図 D1 評価に用いた残留応力分布¹⁾

図 D2 SCC き裂進展解析結果(き裂深さと時間の関係)

図 D3 HWC の稼働率に応じて設定した SCC き裂進展速度線図

図 D4 SCC き裂進展速度を HWC 稼働率に応じて簡易的に設定した場合の き裂深さと時間の関係

(NWC と HWC の切り替え時期の影響)

予防保全工法ガイドライン [水素注入による環境改善効果の評価方法]

| 編集者 | 一般社団法人 日本原子力技術協会 |
|-----|--------------------------------|
| | 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 |
| 発行者 | 一般社団法人 日本原子力技術協会 |
| | 〒108-0014 東京都港区芝4-2-3 NOF芝ビル7階 |
| | 電 話 03 (5440) 3603 (代) |
| | FAX 03 (5440) 3606 |
| | |

©日本原子力技術協会,2012 本書ご掲載されたすべての記事内容は、日本原子力技術協会の許可なく、 転載・複写することはできません。