

水素注入による環境改善効果の評価方法ガイドライン

The Guideline of evaluating the effectiveness of environmental improvement
by Hydrogen Water Chemistry

日本原子力発電株式会社	寺門 剛	Takeshi TERAKADO
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	伊東 敬	Takashi ITO
東京電力株式会社	小野 昇一	Shoichi ONO
株式会社東芝	高木 純一	Junichi TAKAGI
一般社団法人日本原子力技術協会	関 弘明	Hiroaki SEKI
株式会社日立製作所	和田 陽一	Yoichi WADA

Water environment improvement (ex. Hydrogen Water Chemistry (HWC)) is carried out for Stress Corrosion Cracking (SCC) mitigation in some of BWR plants. Japan Nuclear Technology Institute (JANTI) has the guideline on the inspection programs based on effectiveness of environmental SCC mitigation technique for BWR core internals. The guideline provides the crack growth rate (CGR) under HWC. Although CGR is defined by ECP (electrochemical corrosion potential), a dealing of evaluation of ECP and the HWC availability is unclear. For these reason, the guideline of inspection program is not applied. The new JANTI guideline enables to reflect the effect of environmental improvement in the inspection program. This guideline defines the water condition and the relationship between ECP and rate of hydrogen injection, and CGR can be decided by the HWC availability.

Keywords: JANTI Guideline, HWC, ECP, SCC, BWR

1. 緒言

多くの沸騰水型軽水炉 (BWR) では、一次系構造材料の応力腐食割れ (SCC) を抑制させるために、原子炉給水系から水素を添加し、炉水中の酸素等との再結合を促進させ腐食環境改善を図る「水素注入」(HWC: Hydrogen Water Chemistry) が適用されている。

炉内構造物等の点検時期の設定に際しては、水素注入による環境改善の効果を考慮した設定が可能とされており、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格[1] (以下、「維持規格」という) 等において水素注入環境での応力腐食割れ (SCC) き裂進展速度線図も与えられている。

しかしながら、腐食電位 (ECP) で定義される環境改善効果が炉内の各部位で異なること、水化学の解析条件の違い等により ECP の評価結果に幅があること、出力運転期間中の水素注入時間や注入量が必ずしも一定でないことなど、現場適用に向け整理すべき課題があった。

このため、HWC 環境中の SCC き裂進展速度線図を活用した点検周期設定を可能にする実施要領を検討し、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」[2]に定めた。本稿では、その概要につい

連絡先：寺門 剛、〒101-0053 東京都千代田区神田
美土代町 1-1、日本原子力発電 (株) 発電管理室
E-mail: takeshi-terakado@japc.co.jp

て報告する。

2. ガイドラインの概要

2.1 目的及び適用

本ガイドラインは、炉心シュラウド等の炉内構造物や原子炉再循環系配管などの BWR 機器のうち、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し、商業運転開始後の供用期間中に適用できる。維持規格では、ECP 値が $-100\text{mV}_{\text{SHE}}$ 以下についてのオーステナイト系ステンレス鋼の SCC のき裂進展速度が定められており、また、ニッケル基合金溶接金属についても $-200\text{mV}_{\text{SHE}}$ 以下の範囲について日本機械学会論文集 (A 編) 76 巻 764 号に公表されていることから、これらの線図を利用できる BWR 機器を対象としている。

2.2 方法適用の条件

2.2.1 水質条件

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及びその目安としての電気伝導率の影響を受け、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。また、維持規格等に規定されているき裂進展速度線図も水質条件が定められている。このため、水素注入環境でのき裂進展評価の適用に当たっては電気伝導率、硫酸イオン濃度、塩化物イオン濃度を表1に定める規定値以下とした。

表1 水質条件

水質条件	値
電気伝導率	<20 μ S/m
硫酸イオン濃度(SO ₄ ²⁻)	≤5ppb
塩化物イオン濃度(Cl ⁻)	≤5ppb

2.2.2 ECP 低減条件

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り ECP を実測するか、実測値と水質解析モデルを用いた、炉内の対象部位ごとの評価が必要である。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目標電位（例えば、オーステナイト系ステンレス鋼においては -100mV_{SHE}）に必要な水素注入量を炉型ごとに水質解析コードを用いてあらかじめ計算し、ECP の実測値がない場合でも給水での水素濃度を確認することにより、容易に保守性をもった評価が行えるようにした。点検対象部位の例を図1に、点検対象部位における目標電位（-100mV_{SHE}）となる給水での必要水素注入量の評価値を表2に示す。必要水素注入量は解析を行った機関の違いで値に幅があった。これらは、反応式の違いによって酸素や過酸化水素濃度が異なり、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。ガイドラインでは保守側の値を設定した。

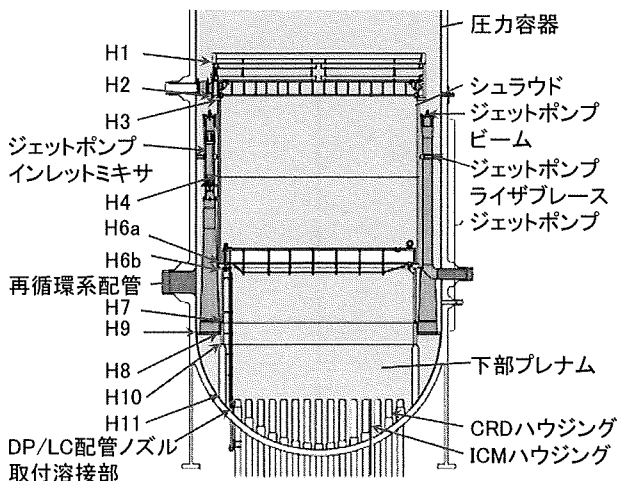


図1 点検対象部位の例

表2 目標電位 (-100mV_{SHE}) となる水素注入量の評価値

解析部位	対象部	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 (レストレイク・シフト・グランド部、 炉心スプレッド)	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)	2.0<	2.0<	2.0<
	外面 (JPベームハウジングブレース)	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

2.3 点検時期の設定方法

2.3.1 水素注入条件稼働率の設定

BWR 各機器を対象とする各ガイドラインにおける点検時期の設定にあたり、水素注入での稼働率の定義が問題となる。水素注入されている状態であっても、水質を満足していない、または点検評価部位毎に必要な水素注入量が異なるために、水素注入設備の稼働率が水素注入の稼働率とはできないことから、本ガイドラインでは水素注入条件稼働率（以下「HWC稼働率」という）として以下のように定義した。

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)

2.3.2 設定した HWC 稼働率に応じたき裂進展評価

き裂進展速度線図は、水素注入条件及び通常水質条件 (NWC) それぞれの線図が用意されているため、水素注入の履歴に応じてそれぞれの線図を使用してき裂進展評価を行えば問題ないが、それでは点検計画をたてるだけのために労力をかけて進展評価を行わなければならない。そこで、HWC 稼働率に応じて内分した SCC き裂進展速度を用いて簡便に評価が行えるようにした。

HWC 稼働率に応じて内分した SCC き裂進展速度式及

ひ線図の低炭素ステンレス鋼の例を、表3に示す。

この評価の適用にあたっては、NWCからHWCへの切り替え、又はその逆のときにき裂進展速度に及ぼす履歴効果を考慮しなくても影響がないことを確認した。また、HWC稼働率50%の場合には、1サイクル中のHWC稼働率が50%で数サイクル運転するケースと、1サイクルごとにNWCとHWCが交互に繰り返して数サイクル運転するケースを比較しても、図2に示すように進展挙動に有意差がないことを確認した。

表3 HWC稼働率ごとのSCCき裂進展速度

HWC稼働率	低炭素ステンレス鋼 SCCき裂進展速度 (da/dt [m/s], K [MPa√m])
50%未満 ⇒NWC進展速度適用	da/dt = 2.00E-12 (K ≤ 6.7)
	da/dt = 0.00E+00 + 3.33E-14 × K ^{2.161} (6.7 < K ≤ 19.3)
	da/dt = 3.33E-14 × K ^{2.161} (19.3 < K < 57.9)
	da/dt = 2.10E-10 (57.9 ≤ K)
50%以上70%未満 ⇒50%進展速度適用	da/dt = 2.00E-12 (K ≤ 6.7)
	da/dt = 1.00E-12 + 1.67E-14 × K ^{2.161} (6.7 < K ≤ 19.3)
	da/dt = 1.83E-14 × K ^{2.161} (19.3 < K < 57.9)
	da/dt = 1.16E-10 (57.9 ≤ K)
70%以上90%未満 ⇒70%進展速度適用	da/dt = 2.00E-12 (K ≤ 6.7)
	da/dt = 1.40E-12 + 9.98E-15 × K ^{2.161} (6.7 < K ≤ 19.3)
	da/dt = 1.23E-14 × K ^{2.161} (19.3 < K < 57.9)
	da/dt = 7.77E-11 (57.9 ≤ K)
90%以上 ⇒90%進展速度適用	da/dt = 2.00E-12 (K ≤ 6.7)
	da/dt = 1.80E-12 + 3.33E-15 × K ^{2.161} (6.7 < K ≤ 19.3)
	da/dt = 6.33E-15 × K ^{2.161} (19.3 < K < 57.9)
	da/dt = 3.99E-11 (57.9 ≤ K)
【参考】 HWC進展速度	da/dt = 2.00E-12 (K ≤ 6.7)
	da/dt = 2.00E-12 + 0.00E+00 × K ^{2.161} (6.7 < K ≤ 19.3)
	da/dt = 3.33E-15 × K ^{2.161} (19.3 < K < 57.9)
	da/dt = 2.10E-11 (57.9 ≤ K)

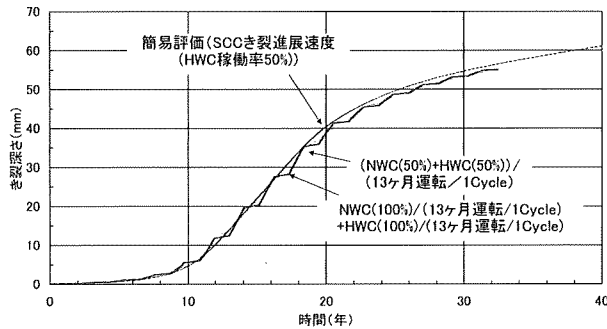
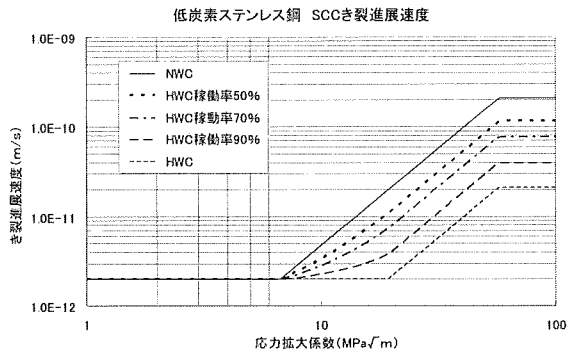


図2 HWC稼働率が50%におけるき裂深さと時間の関係

3. 結言

水素注入等による環境改善効果を点検計画へ反映できるように、目標電位となる水素注用量を設定したことや内分したき裂進展速度線図等を作成し、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ガイドラインとして整備することにより、水素注入による環境改善効果を反映して容易に点検周期を設定することが可能となった。

謝辞

本報告は、日本原子力技術協会の「炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会」の下にHWC-WGを設置し、日本原子力学会のHWC標準作業会とも協調しつつ、平成24年3月に制定されたガイドラインを紹介したものである。

ここに、ご支援・ご協力いただきましたガイドライン検討会委員、WG委員、BWR電力・メーカー等の関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 日本機械学会発電用原子力設備規格 維持規格(2008年版)
- [2] 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]、一般社団法人日本原子力技術協会 <http://www.gengikyo.jp/archive/pdf/ronaiguide/VIP-13.pdf>