# 炭素鋼オーバーパックの性能保証に 関わる腐食挙動評価ツールの現状 (研究報告)

# 2005年3月

# 核燃料サイクル開発機構 東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49 核燃料サイクル開発機構 技術展開部 技術協力課

> 電話:029-282-1122(代表) ファックス :029-282-7980 電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Cooperation Section, Technology Management Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute 4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

#### 炭素鋼オーバーパックの性能保証に関わる腐食挙動評価ツールの現状 (研究報告)

谷口直樹, 川上進, 神徳敬, 油井三和

#### 要旨

国が策定するオーバーパックに関わる安全基準,指針等に資するため,これまでのオー バーパック腐食研究成果を基に,オーバーパック性能保証に関する評価ツールの検討を行 った。ここでは,処分環境で考慮すべき腐食現象を挙げ,それぞれの現象に対する評価手 法と評価例を現状の知見から整理した。

処分環境において考慮すべき現象として,不動態化,全面腐食,局部腐食(孔食,すき ま腐食,応力腐食割れ),水素脆化を挙げ,各現象の生起・進展挙動に関する実験的な評価 方法を提示した。また,「第2次取りまとめ」などの研究成果を基に評価事例を示した。

東海事業所 環境保全研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

#### Status of Assessment Tools of Corrosion Behavior for Performance Guarantee on Overpacks (Research Document)

N. Taniguchi, S. Kawakami, T. Jintoku, M. Yui

#### Abstract

In order to contribute to the safety standards and guidelines for overpacks on which the regulative authority decides, the tools for performance guarantee on overpacks were studied based on the present research products for overpack corrosion. The corrosion modes that should be considered in repository environments were extracted, and then the assessment methods and examples for each mode were summarized based on current understandings of corrosion behavior of overpacks.

The passivation, general corrosion, localized corrosion (pitting corrosion, crevice corrosion, and stress corrosion cracking) and hydrogen embrittlement were extracted and the experimental methods to evaluate the initiation and propagation behavior were presented. The assessment examples based on research products such as second progress report (H12 report) were given.

Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute

#### 目 次

1	はじ	じめに		• • • •							•••			•••	•••	•••		••		• •	• •	••			1
2	オー	ーノベー	パッ	クの	腐食	まに	関す	トる	評(	西内	]容	と評	平価	ツー	ール					•••					3
2 –	• 1	オー	バー	パッ	ク層	引囲	の現	霥境	条	牛・				•••	•••	•••		•••	•••	•••	•••	•••			3
2 -	· 2 評	設定 価項	され 目・・・	た環 	}境翁 	€件 	にす 	すす 	る 。 	炭素 	<del>[</del> 鋼]	才 	- ノベ 		ペッ 	・ク ・・・	の 	腐: · ·	食 <sup>実</sup>	見多	まの 	>抽 • •	1出。 · · · ·	لح 	4
2 –	- 3	評価	ツー	ルと	評伯	町例			•••	•••	•••			•••	•••					• •					6
3	おた	っりに							•••	•••				•••	•••		•••	•••		•••		•••	•••	•• 1	19
参考	文献	ŧ							•••	•••		• • •		•••			•••	•••		• •		•••		••• ]	19

図目次

図2-1 炭素鋼	オーバーパックに生起しうる腐食現象とその因果時系列5
図2-2 炭酸塩	水溶液中における炭素鋼のアノード分極挙動6
図 2-3 ベント	ナイト中における炭素鋼のアノード分極挙動6
図2-4 緩衝材	中における炭素鋼の不動態化条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
$\boxtimes 2-5$ Gumbel	分布による極値統計解析の模式図
図2-6 全面腐	食環境(人工海水,人工淡水系)における Gumbel 分布パラメータ
$\alpha$ , $\lambda \mathcal{O}^{\frac{1}{2}}$	平均腐食深さ依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
図2-7局部腐食	環境(アルカリ性炭酸塩溶液系)における Gumbel 分布パラメータ
$\alpha$ , $\lambda \mathcal{O}^{\frac{1}{2}}$	平均腐食深さ依存性・・・・・・12
図2-8 種々の	環境における平均腐食深さと孔食係数の関係13
図 2 - 9 「第 2	次取りまとめ」でのオーバーパック仕様(表面積 55129cm²), 信頼
率 0.99 の	条件に対する酸素による最大腐食深さ推定モデル・・・・・・13
図2-10 還元	性雰囲気下,緩衝材中(H3 仕様, H12 仕様)における炭素鋼の平均
腐食速度	
図2-11 還元	性雰囲気下,緩衝材中(H3 仕様,H12 仕様)における炭素鋼の平均
腐食深さ	
図2-12 電気	化学的透過法による拡散性水素測定方法の模式図17
図2-13 水素	濃度と強度に対する水素脆化の発生領域(松山, 1989) ・・・・・18

### 表 目 次

表1-1	オーバーパックの安全評価・基準に関する具体的な評価ツール・・・・・2
表 2 - 1	緩衝材間隙水中化学成分と pH······4
表 2 - 2	オーバーパック周囲の酸素量と腐食量(1体あたり)・・・・・・・・・8
表 2 - 3	酸素による全面腐食の最大腐食深さ評価結果・・・・・・・・・・・・・11
表 2 - 4	酸素による局部腐食の最大腐食深さ評価結果・・・・・・・・・・・・・・・・
表 2 - 5	平均腐食深さ経時変化の傾きより算出された平均腐食速度・・・・・・16

#### 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物処分に係る安全規制についての考え方が原子力委員会より 2000 年に第1次報告として示されている(原子力安全委員会, 2000)。これによると、実施主 体の行う処分事業の進展に合わせて安全の確認が適切に行われるよう、安全審査、安全確 認などに係る指針・技術基準を策定していくこととされている。この安全規制に係る指針・ 基準を策定するためには地層処分の長期的安全性に関する基盤的な技術情報が必要となる。

このような背景から,安全基準・指針策定の観点から人工バリア等の性能保証項目,保 証方法と個別の研究課題の位置づけが整理された(川上ほか,2003;杉田ほか,2003)。 また,処分場を構成する要素であるオーバーパック,緩衝材,埋め戻し材,プラグ,坑道, 処分孔などについて処分場の長期的安全性の観点から性能を保証するために必要な評価方 法,評価に必要なデータベース,今後の課題などの整理が行われた(川上ほか,2004)。

この検討結果に基づき,処分場構成各要素について,性能保証のための具体的な評価ツ ールの検討を行っている。オーバーパックについては,操業中〜埋め戻しまで,埋め戻し 後,オーバーパック破損後の3段階の時期の役割が整理されており,埋め戻し後の基準の ポイントは「腐食に対して所定の期間,水密性を維持するため,地下環境において必要な 腐食寿命を有すること」とされている(川上ほか,2004)。埋め戻し後のオーバーパック の性能を保証するための方法として,浸漬試験,電気化学試験などの腐食試験に基づいて, 期待される寿命の期間(1000年間)の腐食しろを評価する,または,破損が起こらないこ とを示すとされており,表1・1に評価の概要,評価項目を示した。本稿ではオーバーパッ クの基本材料である炭素鋼について,サイクル機構が実施してきた腐食研究成果に基づい て具体的な評価ツールおよび評価事例を示した。代替材料であるチタンと銅については, 炭素鋼に比較して実験データが少なく,信頼性の高い評価ツールとして整備できるほど検 討が十分ではないため,表1・1中に評価手法の概略のみ示した。 表 1-1 オーバーパックの安全評価・基準に関する具体的な評価ツール

準 食の維下い寿との に期持環て命 に期持環て命 が 計間す境必を イ し木る条要有 ト て密た体なす 所性、に腐る	法法法法 化丁乙二乙烯 化丁乙二乙烯 化丁乙二乙烯 化丁乙二乙二烯 法法律 医子子子 化化合金 医子子子子 化化子子子 化合金 医子子子 化化子子子 化化子子 化化子子 化化子子 化化子子 化化子子 化化	1)高食形態 7.7 ドノド分儀測定における分極曲線が活性溶解型か、不動態型かにより、酸化性雰囲気における弱食形態を推定 する。 2.9 腐食量 浸漬淀粉(酸化性および違元性)により平均腐食運度(深さ)、最大腐食速度(深さ)、1.4 肉系酸を推定 2.9 腐食量 浸渍砂酸(酸化性および違元性)により平均的食食剤や感受性、(深さ)、1.4 肉系酸を非応 意味能により評価する。 3.0 応力腐食剤た感受性 2.0 が高く割たの受性 2.0 が高く割たのの酸素 加速量の(二、2.5 年間) 2.0 が高く割たの(1.5 年間) 2.0 が高く割たの(1.5 年間) 2.0 が高く割たの(1.5 年間) 2.0 が高くし、(1.5 年間) 2.0 が高くたい) 2.0 が高いたいため, (1.5 年間) 2.0 がに、2.5 年間) 2.0 が高くし、(1.5 年間) 2.0 が高くし、(1.5 年間) 2.0 が高くによりたい) 2.0 が高いたいと判断する。 2.0 が高いたいと判断する。 2.0 未満発生速度、吸収 3.0 が素酸(生産) 2.0 が高くたい) 2.0 が高いたいと判断する。 3.0 が素酸(生産) 2.0 が高くたい) 3.0 が高いたい) 3.0 がの) 3.0 がには) 3.0 が高いたい) 3.0 がし) 3.0 が同じたい) 3.0 が高いたい) 3.0 が高いたい) 3.0 がはたい) 3.0 がの) 3.0 がの) 3.0 が高いたい) 3.0 がの) 3.0 が高いたい) 3.0 がの) 3.0 が高いたい) 3.0 がの) 3.0 が高いたい) 3.0 がの) 3.0 がの) 3.
	生起可能性を評価する。	水素濃度の異なるチタン試験片について機械特性、破壊靭性値などを測定し、脆化の起こる条件を評価する。水 素分布状態を変えた実験も行う。チタンの長期水素濃度、分布の推定結果と水素脆化生起条件の比較により脆化 の主が出すまたエナ
_		の可能性を評価する。

#### 2 オーバーパックの腐食に関する評価内容と評価ツール

オーバーパック候補材料(炭素鋼, チタン, 銅)のうち, 炭素鋼が基本材料として位置 づけられており,これまで優先的に検討が行われてきた(サイクル機構, 1999)。よって, 他の材料に比較して実験データが整備されており,評価ツールとして実験データに基づく 評価モデルが構築されている。よって,ここでは炭素鋼オーバーパックを対象にオーバー パックの基準に関する評価内容と評価ツールについて述べる。

炭素鋼オーバーパックの設計要件は、「処分環境条件に対する腐食しろを設定すること。 想定される応力、環境条件に対して炭素鋼が応力腐食割れを生じないこと」とされている。 また、評価内容は「浸漬試験、電気化学試験、応力腐食割れ試験などの腐食試験を実施し、 1000 年間の腐食量、応力腐食割れ感受性を評価する」「ナチュラルアナログ研究による確 証を行う」とされている(川上ほか、2004)。このような腐食挙動評価を行ううえで、オ ーバーパックの置かれる環境条件を設定することも不可欠である。以下にオーバーパック 周囲の環境条件について述べた後、その環境条件に対して炭素鋼オーバーパックについて 寿命評価上考慮すべき項目とその評価ツールおよび評価例の概要を示す。

#### 2-1 オーバーパック周囲の環境条件

(1) 地下水水質

地下水水質は処分サイトが決定されなければ設定することはできないが、日本における 幅広い地下水条件を想定して代表的な5種類の地下水が設定されている。腐食に寄与する 代表的な地下水成分について、緩衝材に浸潤後の濃度とpH範囲は表 2·1 のように考えら れている(小田ほか、1999)。また、地下水がセメントに接触するとpHが上昇することも 考えられる。セメント材料として普通ポルトランドセメントのほか、現在開発が進められ ている低アルカリ性セメントと接触した場合のpH範囲(実測値:谷口ほか、2002)も表 中に示した。

(2) 温度

ガラス固化体からの発熱によってオーバーパックの温度は初期に上昇し、放射能の減衰 とともに低下してやがては周囲の岩盤と同じ温度に近づくと予想されている。オーバーパ ック表面の最高温度は緩衝材の熱的変質などの観点から 100℃以下となるように処分場の 設計が行われる。オーバーパック表面温度の経時変化は処分深度、地質環境条件などに依 存するため、現時点で詳細な設定はできないが、1000 年間程度までは 40~50℃以上の温 度条件が維持されるものと考えられる(サイクル機構、1999)。

(3)酸化還元性

処分の行われる地下深部は本来酸素のほとんどない還元性雰囲気と考えられているが, 処分場の建設のため地上から酸素が持ち込まれ,埋め戻し後もある程度の期間は比較的酸 化性雰囲気になると想定される。しかし,オーバーパックの腐食や緩衝材中の鉱物との反 応によって酸素が消費され,やがて地下深部本来の還元性雰囲気に戻ると考えられる。そ の期間は地質環境条件や人工バリア仕様にも依存するが,最大約100年と推定されている (千葉ほか, 1999)。

(4) 緩衝材中飽和度

緩衝材は乾燥状態で施工されるため、埋め戻し後初期には緩衝材は不飽和状態にある。 緩衝材中に地下水が浸潤し、飽和するまでの期間は現実的な系では、最大約50年と評価されている(サイクル機構、1999)

表 2-1 緩衝材間隙水中化学成分と pH (小田ほか, 1999; 谷口ほか, 2002)

化学成分	濃度
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /CO <sub>3</sub> <sup>2</sup> <sup>-</sup> /H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$<7.3 \times 10^{-2}$
$\mathrm{SO}_4{}^{2}$	$< 6.1 \times 10^{-2}$
Cl.	$< 5.9 \times 10^{-1}$
$\mathrm{HS}^{-}/\mathrm{H}_{2}\mathrm{S}$	$< 9.2 \times 10^{-2}$
P(Total)	$<\!2.9\! imes\!10^{-6}$
$ m NH_3$	<1.6×10 <sup>-4</sup>
$\mathrm{NH}_{4}^+$	$< 5.1 \times 10^{-3}$
B(Total)	<1.7×10 <sup>-3</sup>
pН	非セメント系: 5.8~8.4
	低アルカリセメント系 : 約9以下(実測値)
	普通セメント系 : 約 12.5 以下(実測値)

#### 2-2 設定された環境条件に対する炭素鋼オーバーパックの腐食現象の抽出と評価項目

2-1で示された環境条件においてオーバーパックに生起しうる腐食形態とその因果時 系列を図 2-1に示す(サイクル機構, 1999)。オーバーパック埋設直後は地上から持ち込 まれた酸素がオーバーパック周辺に存在するため、比較的酸化性雰囲気がもたらされ、酸 素の還元反応(O<sub>2</sub>+2H<sub>2</sub>O+4e→4OH)をカソード反応とする腐食が進展する。このような 環境では炭素鋼の腐食形態は全面腐食型と局部腐食型に分類される。炭素鋼が不動態化し ない場合にはある程度の不均一化は伴うが、金属表面が全面にわたって腐食し、顕著な腐 食局在化は生じにくい。一方、不動態化した場合には不動態皮膜の局所的破壊に起因する 局部腐食が生起・進展する場合がある。不動態皮膜の局所的破壊に起因する局部腐食とし て、孔食、すきま腐食、応力腐食割れが挙げられ、一般に腐食の進展は全面腐食よりも激 しく(腐食防食協会、1993)、特に応力腐食割れは短期破損の原因となる場合がある。基 本的に炭素鋼をオーバーパック材料として適用する場合は全面腐食領域での使用が望まし い。ただし、ここでは局部腐食型のシナリオの場合にもオーバーパック材料としての適用 を検討することを想定し、酸化性雰囲気において評価すべき項目を以下のように挙げた。

- 1) 不動態化挙動(全面腐食型か局部腐食型か)
- 2) 全面腐食型の場合:酸素による全面腐食量(最大腐食深さ)の評価
- 3) 局部腐食型の場合1:酸素による孔食・すきま腐食量(最大腐食深さ)の評価

4) 局部腐食型の場合・2:応力腐食割れ生起可能性の評価

オーバーパックの腐食や緩衝材構成鉱物によって酸素が消費された後は水の還元反応 (2H<sub>2</sub>O+2e→2OH+H<sub>2</sub>)をカソード反応とする腐食が進展する。酸素のない環境での腐食 形態はほぼ均一な全面腐食であり、顕著な腐食局在化は生じにくい。しかし、水の還元反 応によって生じた水素の一部が金属中に吸収され、吸収量によっては水素脆化を起こす可 能性がある。以上のことから、還元性雰囲気において評価すべき項目は以下のように挙げ られる。

- 5) 水の還元による全面腐食量(最大腐食深さ)の評価
- 6) 水素脆化生起可能性の評価

最終的に,以下の項目に挙げるように炭素鋼オーバーパックにおける 1000 年間の腐食 量を評価し,長期事例により検証する。

7)酸素による腐食量と水の還元による腐食量の合算

8) ナチュラルアナログによる検証



その因果時系列

#### 2-3 評価ツールと評価例

(1) 腐食形態の評価ツールと評価例

炭素鋼の腐食形態を評価する方法として、アノード分極測定による検討が行われている (Taniguchi et al., 1998)。炭素鋼の不動態化を促進する代表的な地下水成分は炭酸塩であ り(Marsh et al, 1983)、炭酸塩水溶液中でのアノード分極測定結果を図 2・2 に示す。炭酸 塩水溶液中で炭素鋼をアノード分極すると、活性態の電流ピークを示したあと、電流値は 急激に減少し、不動態化することがわかる。一方、同様の水溶液を用い、ベントナイト中 で炭素鋼をアノード分極した結果の一例を図 2・3 に示す。水溶液中とは異なり、電流値は 電位とともに単調に増加し、不動態化による電流値の減少は観察されない。このことから ベントナイト中で炭素鋼は不動態化しにくいことがわかる。このようなアノード分極測定 を実際の処分環境条件を模擬した条件で行うことにより、腐食形態を概ね推定することが できると考えられる。



一例として炭酸塩濃度 0.1M 以下の水溶液を用いて pH をパラメータとして「第 2 次取り まとめ」で提示された緩衝材仕様における炭素鋼の不動態化条件を検討した結果を図 2・4 に示す(谷口ほか,2002)。緩衝材に浸潤させる水溶液の pH が約 13 以上に達した場合に 炭素鋼が不動態化することがわかる。日本における地下水の炭酸塩濃度は 0.1M 以下, pH は約 10 以下であり(Yui et al., 1999),地下水が直接緩衝材に浸潤した場合には不動態化 はしないと考えられる。一方,支保工などのコンクリートが緩衝材周辺に施工された場合 には地下水の pH が上昇する可能性がある。コンクリート材料として低アルカリ性セメン ト(大和田ほか,2000)を用いた場合には炭素鋼が不動態化するほど pH は上昇しないが, 普通セメントを使用し,地下水の pH が約 13 以上に上昇する場合には不動態化の可能性が ある。図 2・4 より,緩衝材中では浸潤前に比較して pH が低下していることがわかる。緩 衝材浸潤後の値に着目すると, pH 約 10.5 以上の場合に不動態化することがわかる。



図 2-4 緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件

(2)全面腐食型の場合:酸素による全面腐食量(最大腐食深さ)の評価ツールと評価例 一般に金属の腐食寿命評価では最大腐食深さの経時変化から,

#### P=k t<sup>n</sup>

P:最大腐食深さ, t:時間, k, n:定数

などの経験式を求め、期間 t に進展する腐食深さまたは肉厚相当の厚さ貫通に必要な時間 が求められる(腐食防食協会, 1984; Romanoff, 1989)。オーバーパックに対してこの手 法を適用する場合には進展式を求め、酸素の存在する酸化性期間を推定する必要がある。 しかし、この腐食進展式の形や定数 k,n は環境条件に大きく依存する(Romanoff, 1989)。 また、酸化性の期間も地質環境条件に大きく依存すると考えられる(千葉ほか, 1999)。 そこでオーバーパック周囲に存在する酸素量から平均腐食深さを求め、この平均腐食深さ に対する最大腐食深さを実験データに基づいて評価する手法が適用されている。その概要 を以下に示す。

#### a) 酸素量と平均腐食深さの算出

処分の行われる地下深部は本来酸素のほとんどない還元性雰囲気であるが、処分場 の建設時に地上から持ち込まれる。埋め戻し後は緩衝材空隙や埋め戻し材空隙にトラ ップされた大気中の酸素が腐食に寄与すると考えられる。したがって緩衝材と埋め戻 し材の形状・寸法、密度(空隙率)から酸素量が求められる。「第2次取りまとめ」で はこの他にベントナイト中に吸着された酸素量(ベントナイトの 0.02wt%)も考慮し ている。この酸素量に対する腐食量は以下のアノード反応とカソード反応のバランス から算出できる。

## アノード反応:Fe→Fe<sup>2+</sup>+2e<sup>-</sup>

#### カソード反応:1/2O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+2e<sup>-</sup>→2OH<sup>-</sup>

すなわち,酸素1モルに対して鉄が2モル腐食することになる。なお,3価鉄としての腐食も考えられるが,その場合酸素1モルに対して鉄の腐食量は4/3モルであり, すべて2価鉄としての腐食を仮定したほうが保守的な評価となる。「第2次取りまとめ」 において提示された人工バリア仕様における酸素量と平均腐食深さの算出結果を表 2・2に示す(サイクル機構,1999)。

+ <i>*</i>		酸素量(mol)	反応する鉄	平均腐食	
刀氏	緩衝材中	埋め戻し材中	合計	の量(mol)	深さ(mm)
横置き (硬岩, 軟岩)	116	0	116	231	0.3
硬岩竪置き	156	435	590	1181	1.5
軟岩竪置き	156	542	697	1395	1.8

表 2-2 オーバーパック周囲の酸素量と腐食量(1体あたり)\*1

\*1:小数点以下1桁(平均腐食深さは小数点以下2桁)で四捨五入した値を記したため,合計や反応量計算値が必ずしも完全には一致しない。

#### b) 平均腐食深さから最大腐食深さの推定

炭素鋼が全面腐食を生じる代表的な環境として人工海水(ASTM 規格)および人工 淡水(2.5mM NaCl+2.5mM NaHCO<sub>3</sub>)を用いた浸漬試験が行われており(石川ほか, 1992),平均腐食深さと最大腐食深さが測定されている。このデータを例に平均腐食深 さから最大腐食深さを評価する手順を以下に示す(腐食防食協会,1984)。

浸漬試験で得られた最大腐食深さデータに対して Gumbel 分布関数を適用する。各 試験片の最大腐食深さを確率変数 x とすると, Gumbel 分布の累積分布関数 F(x)は以下 の式で与えられる。

$$F(x) = \exp[-\exp\{-(x-\lambda)/\alpha\}]$$
 (2-1)

ここで, λは位置パラメータ(最頻値), αは尺度パラメータと呼ばれる。基準化変数 y を(2-2)式で定義すると, その累積分布関数は(2-3)式で表される。

$$y=(x-\lambda)/\alpha$$
 (2-2)  
F(y) = exp[-exp(-y)] (2-3)

基準化変数 y とこれに対応する累積確率 F(y)を縦軸に, x を横軸にとると図 2-5 に示 すような Gumbel 確率紙が得られる。確率紙上の直線が Gumbel 分布を表し, y=0 に対 応する x 座標が位置パラメータ $\lambda$ となる。直線の勾配の逆数より尺度パラメータ $\alpha$ が得 られる。図 2-5 中の右側の縦軸 T は再帰期間と呼ばれ,対象とする実機の表面積 S と腐 食深さ測定におけるサンプリング面積 s の比であり,累積確率 F(y)とは次の関係がある。



図 2-5 Gumbel 分布による極値統計解析の模式図

例えば「第2次取りまとめ」におけるオーバーパックの表面積は S=55129cm<sup>2</sup>であり, 試験片の表面積(s=131.0 cm<sup>2</sup>)より再帰期間は T=55129/131.0=421 となる。

解析手順は次のとおりである。まず各試験片の最大腐食深さ x<sub>max</sub> を大きい順に並べ, 各順位 i に対応する累積確率 F(y)を以下の式の平均ランク法により決定する(腐食防食 協会, 1984)。

$$F(y) = 1 - i/(N+1)$$
 (2-6)

これを Gumbel 確率紙にプロットしてこのプロットに MVLUE 法により(腐食防食協

会, 1984) Gumbel 分布の直線をあてはめ,パラメータλおよびαを求める。この直線 を再帰期間 T まで外挿することによってオーバーパックおける最大腐食深さの推定値 X<sub>max</sub>を求める。T が十分に大きいとき,X<sub>max</sub>は以下の式で近似される。

$$X_{max} = \lambda + \alpha \ln T = \lambda + \alpha \ln(S / s)$$
 (2-7)

この推定値は最大腐食深さの最頻値であり、実際のオーバーパックにおける累積分布 関数は Gumbel 分布の直線を $\alpha \ln T$  だけ右にずらした直線で表現できる。ここで、信頼 率 a を指定し、F(y)=a における x の値を  $P_{max}$  とすると、以下の式で与えられる。

$$P_{\max} = X_{\max} - \alpha \ln(-\ln \alpha) = \lambda + \alpha \ln(S / s) - \alpha \ln(-\ln \alpha)$$
(2-8)

このとき、オーバーパックにおける最大腐食深さが P<sub>max</sub>を超える確率は 1-a と見なされる。

Gumbel 分布関数のパラメータαおよびλと平均腐食深さの関係式が求められれば, 2·8 式から最大腐食が平均腐食深さから求められる。人工海水および人工淡水系で得ら れたα, λの平均腐食深さ依存性を図 2·6 に示す。αおよびλの上限の分布は平均腐食 深さ Xm を用いて以下の式で近似されている。

$$\alpha = 0.54 X_m^{0.5}$$
 (2.9)  
 $\lambda = X_m + 1.8 X_m^{0.5}$  (2.10)

これを 2-8 式に代入すると

$$P_{max}(mm) = X_m + 1.8X_m^{0.5} + 0.54X_m^{0.5} \ln(S/131.0) - 0.54 X_m^{0.5} \ln(-\ln a)$$
  
= X<sub>m</sub> + {1.8+0.54 (ln S/131.0)-0.54ln(-ln a)} X<sub>m</sub>^{0.5} (2-11)

すなわち,信頼率 a,オーバーパック表面積 S(cm<sup>2</sup>)および平均腐食深さ X<sub>m</sub>(mm)を設定すれば(2-11)式によりオーバーパックの最大腐食深さを保守的に推定することができる。

ここで、「第2次取りまとめ」におけるオーバーパック仕様から S=55129cm<sup>2</sup>とし、信頼 率を a=0.99、とすると、以下の式が得られる。

$$P_{max}(mm) = X_m + 7.5 X_m^{0.5}$$
 (2-12)

c)最大腐食深さの推定

表 2·2 で求められた平均腐食深さを 2·12 式に代入して得られた最大腐食深さを表 2·3 に示す(サイクル機構, 1999)。最大約 12mm の腐食深さが見積もられている。



図 2-6 全面腐食環境(人工海水,人工淡水系)に おける Gumbel 分布パラメータα,λの平均腐食深 さ依存性

IN O HA		
方式	平均腐食深さ(mm)	最大腐食深さ(mm)
横置き	0.3	4.4
硬岩竪置き	1.5	10.7
軟岩竪置き	1.8	11.8

表 2-3 酸素による全面腐食の最大腐食深さ評価結果

(3)局部腐食型の場合-1:酸素による孔食・すきま腐食量(最大腐食深さ)の評価ツー ルと評価例

孔食・すきま腐食についても(2)と同様の評価手法が適用できる。炭素鋼が不動態化 して局部腐食を生じる炭酸塩-塩化物水溶液系でのすきま付試験片(表面積 104.6cm<sup>2</sup>)の 浸漬試験が行われており、平均腐食深さと最大腐食深さが測定されている(Taniguchi et al., 2003)。最大腐食深さデータについて Gumbel 分布関数を用いた解析より求められた、  $\alpha$ ,  $\lambda$ の平均腐食深さ依存性を図 2-7 に示す。 $\alpha$ および $\lambda$ のおよその上限は平均腐食深 さ  $X_m$ を用いて以下の式で近似できる。

$$\alpha = 0.45 X_m^{0.25}$$
(2-13)  
$$\lambda = X_m + 1.5 X_m^{0.25}$$
(2-14)

これらを(2-8)式に代入すると

$$P_{max}(mm) = X_m + 1.5X_m^{0.25} + 0.45X_m^{0.25} \ln(S/104.6) - 0.45X_m^{0.25} \ln(-\ln a)$$
  
= X<sub>m</sub> + {1.5+0.45 (ln S/104.6)-0.45ln(-ln a)} X<sub>m</sub>^{0.25} (2-15)

ここで,信頼率 a=0.99, S=55129cm<sup>2</sup>とすると,以下の式が得られる。



 $P_{max}(mm) = X_m + 6.4 X_m^{0.25}$  (2-16)

図 2-7 局部腐食環境(アルカリ性炭酸塩溶液系) における Gumbel 分布パラメータα, λの平均腐 食深さ依存性

表 2・2 で求められた平均腐食深さを 2・16 式に代入して得られた最大腐食深さを表 2・4 に 示す。最大約 9.2mm の腐食深さが見積もられている。この値は全面腐食における最大腐 食深さ推定値よりも小さい。実際には孔食・すきま腐食が全面腐食よりも局在化の程度が 小さくなるのではなく,ある平均腐食深さ以上では見かけ上同程度になると見なすべきで ある。図 2・8 に全面腐食,局部腐食の孔食係数と種々の天然環境における孔食係数を示す (石川ほか,1992; Taniguchi et al., 2003; Romanoff, 1989)。局部腐食の孔食係数は腐 食量の小さいときには 10<sup>2</sup>以上の値を示すが,腐食の進展とともに低下し,10<sup>-1</sup>mm のオー ダー以上では全面腐食での値や種々の天然環境での値と同程度になる。図中にはアルカリ 性環境の水溶液を浸潤させた緩衝材中のデータも示されており(Taniguchi et al., 2003),全 面腐食と局部腐食で観察される孔食係数の範囲にあることがわかる。したがって,2・11 式 と 2・15 式で計算し,いずれか大きい値を用いることにより保守的な評価が可能と考えられ る。

方式	平均腐食深さ(mm)	最大腐食深さ(mm)
横置き	0.3	5.0
硬岩竪置き	1.5	8.6
軟岩竪置き	1.8	9.2

表 2-4 酸素による局部腐食の最大腐食深さ評価結果

ここで、オーバーパック表面積が 55129cm<sup>2</sup>, 信頼率 0.99 に対する 2-12 式と 2-16 式を 用いた評価として、図 2-9 に酸素による最大腐食深さの推定曲線を示す。平均腐食深さ約 0.5mm 以下の場合は局部腐食の式, 0.5mm 以上の場合は全面腐食の式が保守側となる。 ただし,局部腐食については限られた範囲の条件での実験データであり,局部腐食型の腐 食シナリオに対して炭素鋼をオーバーパックとして適用する場合には,より顕著な腐食の 局在化の可能性について更に詳細な検討が必要と考えられる。



(4)局部腐食型の場合-2:応力腐食割れ生起可能性の評価ツールと評価例

炭素鋼が応力腐食割れを生じる環境として、炭酸塩環境、硝酸塩環境、リン酸塩環境、 CO·CO<sub>2</sub> 環境、高温水(100℃以上)、苛性アルカリ環境、アンモニア環境が挙げられる

(Beavers et al., 1987)。このうち,処分環境と最も類似した環境は炭酸塩環境と考えられる。一般に炭酸塩環境において応力腐食割れが生じるのは 0.5M を超える高濃度の炭酸塩環境に限定され、(笠原・佐藤、1983;春名ほか、1997)通常の地下水環境で生じること

- 13 -

は考えにくいが、炭素鋼が不動態化する条件では発生可能性の確認が必要である。

炭素鋼の応力腐食割れ感受性を評価する手法として,低歪速度試験が挙げられる(腐食 防食協会,2000)。これは腐食環境におかれた炭素鋼試料を一定の速度で引っ張り,引張 強さ,伸びなどの機械特性を非腐食環境での値と比較したり,試験片破面や側面の観察に よって亀裂の有無を確認したりすることによって割れ感受性を評価する方法である。応力 腐食割れ感受性が高いのはアノード分極曲線において活性態から不動態への遷移領域の電 位条件と言われており(Sutcliffe et al., 1972),その電位条件を適切に設定する必要があ る。例えばあらかじめ掃引速度を変えてアノード分極測定を行い(例えば 0.1mV/s と 10mV/s)両者の電流比の大きい電位条件を決定する。その電位に保持した状態で低歪速度 試験を行う(柴田ほか,1999)。応力腐食割れは歪み速度による影響も受けるため(Leis and Walsh, 1990),歪み速度を変えた試験も行い,最も感受性の大きくなる速度を求める。通 常は10<sup>-6</sup>~10<sup>-7</sup>/sのオーダーの速度で行われている。低歪速度試験による炭酸塩環境中の応 力腐食割れ感受性の検討例として,春名ほか(1997),笠原・佐藤(1983)などの研究が 挙げられる。これらの研究より,日本における地下水中の炭酸塩濃度範囲(0.1M以下)に おいて炭素鋼に応力腐食割れは生じないと考えられる。

- (5) 水の還元による全面腐食量(最大腐食深さ)の評価ツールと評価例
- a) 平均腐食深さの評価

酸素による腐食量の評価(2)および(3)では酸素量から平均腐食深さを見積もる 方法を提示した。一方,水は地下水としてほぼ無限に存在すると考えられ,水の還元に よる腐食については同様の手法を適用するのは困難である。したがって腐食速度を実験 的に求め,その値から対象期間の腐食量を求めることが現実的と考えられる。一例とし て緩衝材中での炭素鋼の浸漬試験により,試験片の重量減少法から求められた腐食速度 を図 2·10 に示す(Taniguchi et al., 2004)。緩衝材には,「第1次取りまとめ(動燃事業 団, 1992)」での緩衝材仕様(H3 仕様)と,「第2次取りまとめ(サイクル機構, 1999)」 での緩衝材仕様(H12 仕様)に準じたベントナイトまたはベントナイトケイ砂混合体 を用いた。腐食速度は時間とともに低下し,数年間の試験では 10 $\mu$  m/y 以下の値が得 られている。「第2次取りまとめ」ではこのような実験データに基づき保守的に 10 $\mu$ m/y の値を設定し, 1000 年間の腐食量を 10mm と評価している。

この評価は非常に保守的であり、現実的な腐食量は更に小さいと考えられる。図 2-10 に示された腐食速度は試験期間を通じての平均値であり、浸漬初期の腐食速度の大きい 期間の影響が含まれている。したがって、浸漬期間終了時点での現実的な腐食速度は平 均化された値よりも小さい。そこで図 2-11 に平均腐食深さの経時変化を示す。この腐 食深さ変化の勾配が現実的な腐食速度と考えられる。浸漬1年までは腐食速度が大きく、  $10 \mu m/y$ 以上の値を示す場合もあるが、浸漬1年以降の腐食深さ増加は極めて小さくな り、2~3年で数 $\mu$ m 以下の増加量である。浸漬1年までおよび1年以降の腐食深さ 経時変化の傾きから算出された腐食速度を表 2-5 に示す。ほとんどの試験で1 $\mu$ m/y 以 下の値が示されており、最も腐食速度の大きいケースでも現実的な腐食速度は  $2\mu$ m/y 以下と求められている。したがって「第2次取りまとめ」における設定値  $10\mu$ m/y が 十分に保守的であることがわかる。



図 2·10 還元性雰囲気下,緩衝材中(H3 仕様, H12 仕様)における炭素鋼の平均腐食速度



図 2-11 還元性雰囲気下,緩衝材中(H3 仕様, H12 仕様)における炭素鋼の平均腐食深さ

現時点では処分サイトが決まっていないため,種々の環境での試験結果から総合的に 判断して保守的な腐食速度を設定している。処分環境条件が絞り込まれた場合には,限 定された条件の試験をより多数の繰り返し数で行い,統計的な解析によって腐食速度と そのばらつきを評価することが望まれる。

b) 平均腐食深さから最大腐食深さの推定

酸素による腐食量の評価では、大気など酸化性雰囲気での浸漬試験結果から、最大腐 食深さデータに極値統計解析を適用することによって実機での腐食深さを算出する方 法を提示した。一方、還元性雰囲気では腐食速度が遅く、1000年間の腐食量に相当す る平均腐食深さ(10mm)での推定を行うためには加速実験による手法が現実的と考えられる。例えば、谷口ほか(1999)は炭素鋼試験片をベントナイト中に埋め込み、定 電流保持することによって腐食を加速した実験を行い、平均腐食深さ数 mm 以上での 孔食係数を約2以下と推定した。

なお,水の還元による腐食についても酸素による腐食評価の場合と同様に十分な実験 データを取得した上で(2·11)式や(2·15)式のような形で最大腐食深さを表現すること が望ましい。しかし,現時点では保守的な近似式を得るほど十分なデータがないため, ここでは孔食係数を概略的に評価した例を示した。

平均腐食速度 平均腐食速度 試験条件 (~1年) (1~3年) H3 仕様,人工海水,80℃ 7.0  $\mu$  m/y 0.99  $\mu$  m/y H3 仕様、人工海水、50℃ 4.0  $\mu$  m/y 1.9  $\mu$  m/y H3 仕様, [HCO3<sup>-</sup>]=0.1M, [C1<sup>-</sup>]=0.5M, 80℃ 4.2  $\mu$  m/y 0.  $18 \,\mu \, m/y$ H3 仕様, [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]=2.5mM, [C1<sup>-</sup>]=2.5mM, 80℃, 7.4  $\mu$  m/v 0.62  $\mu$  m/y 8.7  $\mu$  m/y H3 仕様 (クニピアF), 人工海水, 80℃, 0.36  $\mu$  m/y H12 仕様,人工海水,80℃,  $18 \,\mu$  m/y 0.54  $\mu$  m/y H12 仕様,人工海水,80℃,溶接材  $18 \,\mu$  m/y 0.76  $\mu$  m/y

表 2-5 平均腐食深さ経時変化の傾きより算出された平均腐食速度

c) 最大腐食深さの推定

平均腐食深さを 10mm, 孔食係数を 2 とすると, 最大腐食深さは 20mm と求められる。

(6) 水素脆化生起可能性の評価

酸素のない環境でのカソード反応は、2H<sub>2</sub>O+2e→2OH+2H であり、水素原子の一部 が鋼中に浸入して水素脆化を起こす。鋼中の水素のうち、水素脆化に関与する水素は拡 散性水素といわれている。この拡散性水素量と脆化を起こす臨界水素量の比較から水素 脆化の可能性が評価できる(椿野・西村,2000)。したがって、拡散性水素量の測定と 臨界水素量の評価が主な評価項目となる。

a) 拡散性水素量の測定

代表的な水素濃度の分析方法として試験片中の水素を昇温により追い出し、その水素 量を分析する方法と、電気化学的手法によって水素吸収の起こっている面と反対側の面 から水素を引き抜き、水素透過速度より水素濃度を求める方法がある(櫛田、2000)。い ずれも 0.01ppm 以下の感度があり(椿野・西村、2000)、炭素鋼オーバーパックの水 素脆化評価に十分適用可能と考えられる。

前者の適用例として、水素ガス環境における炭素鋼中の水素濃度を大気圧イオン化質 量分析によって評価した例があり、約250℃以下の温度で放出される水素を拡散性水素、 それ以上の温度で放出される水素を鋼中に強くトラップされた非拡散性水素とし、拡散 性水素量を求めている。その結果、0.02~0.03ppmの拡散性水素濃度が得られている (谷口・市川、1999)。この方法を参考に、例えば緩衝材中に炭素鋼を埋め込み、所定 期間経過後に試験片を取り出して過熱し,水素分析を行うことにより,水素濃度の評価 が可能と考えられる。

後者の方法の模式図を図 2-12 に示す。二つの試験セルの一方を腐食環境(水素供給 側)として試験片の片面を接触させる。もう一方は水素引き抜き側のセルとして 1MNaOH 溶液を入れ,試験片の面をニッケルメッキし,水素をイオン化(H→H++e<sup>-</sup>) するのに十分な電位に保持する。水素供給側の腐食環境に面した試験片表面から浸入し た水素は鋼中を拡散し,引き抜き側の試験片表面でイオン化される。この時,イオン化 による電流を測定することによって試験片中の拡散性水素量の経時変化をモニタリン グできる。定常状態での水素透過電流密度, $J_{\infty}$ ( $\mu$  A/cm<sup>2</sup>)は Fick の第一法則より以 下の式で表される。

#### $J_{\infty} = (FDd/L)C_0 \qquad (2-17)$

ここで、F:ファラデー定数、L:試験片厚さ(cm)、D:鋼中水素拡散係数(cm<sup>2</sup>/s)、 d:鋼の密度、である。この式を用いて水素供給側の水素濃度 C<sub>0</sub>が求められる。鋼中の 水素拡散係数 D はあらかじめ求めておく。求め方は、水素供給側のカソード電流を電 気化学装置により制御し、電流を増加させたときの透過電流の経時変化と電流を減少さ せたときの透過電流の経時変化をそれぞれ Fick の第 2 法則の理論式にあてはめて算出 する。



この電気化学的水素透過法による拡散性水素濃度の評価例として, CO2環境での炭素 鋼の水素吸収について Nishimura et al.(1996)の研究, ベントナイト中での炭素鋼の水 素吸収について和田ほか(2003)の報告がある。いずれも中性〜弱アルカリ性での拡 散性水素濃度として 0.05ppm 以下の値が得られている。 鋼中水素濃度と割れ発生の関係は図 2-13 のように経験的に整理されている(松山, 1989)。オーバーパック材料として検討されている炭素鋼の引っ張り強さは約550MPa であり(圧力容器用鍛鋼品 SFVC1 の場合),約 1ppm 以上の水素濃度の場合に水素脆化の可能性がある。



c) 水素脆化の可能性

a)および b) に例示したとおり, 拡散性水素量を 0.05ppm, 水素脆化臨界水素量を 約 1ppm と仮定すると, 前者のほうが十分小さい。よって水素脆化による破損は起こ らないと判定される。

ただし,溶接部における水素吸収促進の可能性,硬さの変化などを考慮した検討も 必要である。

(7)酸素による腐食量と水の還元による腐食量の合算

酸素による最大腐食深さと水の還元による最大腐食深さを合算すると、腐食量が評価される。例えば、酸素による最大腐食深さを表 2·3 および表 2·4 中で最も大きな値である 12mm とし、水の還元による最大腐食深さを(5)-c)より 20mm とすると、これらを合算し、32mmと評価される。この値以上の腐食しろを設定することによって 1000 年間以上の腐食寿命を達成することができる。

(8) ナチュラルアナログによる検証

炭素鋼オーバーパックの腐食に関するナチュラルアナログ研究として,淡水性粘土中の 鋳鉄管の腐食調査が行われており(炭山ほか,1997),最大腐食深さ P(mm)と時間 t(year) について以下の経験式が得られている。

#### $P=0.808 t^{0.411} (2-18)$

この式に t=1000 を代入すると,約 15mm と求められる。また,考古学的鉄製品に関する 腐食調査では,還元性雰囲気に約 700 年間埋設されていた試料の腐食量は 0.5~2mm と見 積もられている(Honda et al., 2003)。これは表 2·5 に例示した還元性雰囲気での現実的 な腐食速度(約 0.2~2 μ m/y) と整合する。

3 おわりに

オーバーパックに関する安全基準・指針の策定に資することを目的として,炭素鋼オー バーパックを対象にして,オーバーパックの役割(性能保証項目)のひとつである耐食性 に着目して具体的な評価ツールと評価事例を示した。オーバーパック周囲の環境条件を整 理し,その条件に対して考慮すべき現象として,不動態化,全面腐食,局部腐食(孔食, すきま腐食,応力腐食割れ),水素脆化を挙げ,各現象についての実験データに基づく評価 手法および評価事例を示した。

ただし,現時点では処分サイトが決まっていないため,処分事業の進展によって,環境 条件が絞り込まれた場合には,より具体的な環境条件に対する腐食データを詳細に取得し て処分サイト条件に対応した評価を行う必要がある。現時点では幅広い環境条件を想定し た検討が主となるが,炭素鋼以外の材料についても基準・指針策定の基盤となる腐食デー タ,評価手法の整備が望まれる。また,個々の評価手法についても、より合理的な手法や より信頼性の高い手法が提示されることが望まれる。更に,実際の処分場では,ある程度 の期間,腐食挙動に関するモニタリングが必要と考えられ,それに関する基準・指針策定 に向けた検討も必要である。

#### 参考文献

千葉保, 笹本広, 三木崇史, 稲垣学, 油井三和: "ニアフィールドにおける酸化還元状態の 変遷に関する予察的考察", JNC TN8400 99-027 (1999).

腐食防食協会:腐食防食ハンドブック,丸善(2000)

腐食防食協会:装置材料の寿命予測入門,丸善(1984).

腐食防食協会:材料環境学入門, p. 273, 丸善(1993).

原子力安全委員会: "高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について (第1次報告)",原子力安全委員会,平成12年11月6日(2000).

春名匠,朱列紅,柴田俊夫:"塩化物イオンを含む炭酸塩重炭酸塩水溶液中における炭素鋼

JNC TN 8400 2005-002

の環境強度劣化",材料と環境, Vol. 47, pp. 771-776 (1998).

Honda, T. Yamaguchi, S., Yoshikawa, H., Ueno, K. and Yui, M.: X-RAY CT ANALYSIS OF IRON-BASED ARCHAEOLOGICAL REMAINS BURIED IN SOIL, Proceedings of 13th Asian-Pacific Corrosion Control Conference, Paper No. H-05(2003).

石川博久,本田明,鶴留浩二,井上邦博,小畑政道,佐々木憲明:"オーバーパックの候補 材料選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評価", PNC TN8410 92-139(1992).

核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ"分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022 (1999).

笠原晃明,佐藤秦作:"ラインパイプ用鋼の応力腐食割れ感受性に及ぼす環境因子の影響", 鉄と鋼, Vol. 69, No. 11 (1983).

川上進,杉田裕,栗原雄二,神徳敬,谷口直樹,油井三和,棚井憲治,柴田雅博,本間信 之:"高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進 め方と反映先", JNC TN8400 2002-026 (2003).

川上進,油井三和,栗原雄二,神徳敬,杉田裕:"人ロバリア等の性能保証に関わる研究の サイクル機構における取り組み", JNC TN8400 2003-037 (2004).

櫛田隆弘:"電気化学的水素透過法を用いた水素脆化の研究について"材料と環境, Vol. 49, pp. 195-200 (2000).

Leis, B. N. and Walsh, W. J.: "A Mechanics-Based Analysis of Stress Corrosion Cracking of Line-Pipe Steel in a Carbonate-Bicarbonate Envuronment", ASTM STP 1049, pp. 243-265 (1990).

Marsh, G. P., Bland, I. W., Desport, J. A., Naish, C., Westcott, C. and Taylor, K. J.: Corrosion assessment of metal overpacks for radioactive waste disposal, European Appl. Res. Rept-Nucl. Sci. Technol., vol. 5, No. 2 pp. 223-252(1983).

Nishimura, R., Yagi, M. and Yamakawa, K.: "Corrosion Behavior and Hydrogen Content of Carbon Steels in  $CO_2$  Environment", Materials Science Research International, Vol. 2, No. 4, pp. 254-260 (1996).

小田治恵,柴田雅博,油井三和:"地層処分研究開発第2次取りまとめにおける緩衝材間隙 水化学の評価"JNC TN8400 99-078 (1999). 大和田仁,三原守弘,入矢桂史郎,松井淳:"フライアッシュ高含シリカフュームセメントの実用性の検討",サイクル機構技報 No. 6, pp. 43-52 (2000).

Romanoff, M. : "Underground Corrosion", originally issued by NBS in 1957, reprinted by NACE (1989).

柴田俊夫,春名匠,朱列紅,村上真:"重炭酸塩環境中における熱処理された炭素鋼の応力 腐食割れ発生条件"オーバーパック候補材料の腐食に関する個別現象解析モデルの研究, JNC TJ8400 99-047, p.43 (1999).

杉田裕,栗原雄二,川上進,神徳敬,油井三和:"高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア性能等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先(その 2)", JNC TN8400 2003-015 (2003).

炭山守男,玉田明弘,三ツ井誠一郎,本田明:"ベントナイト中の炭素鋼オーバーパックの 腐食挙動に関するナチュラルアナログ研究"第 44 回材料と環境討論会講演集, p.417 (1997).

Sutcliffe, J.M., Fessler, R.R., Boyd, W.K. and Parkins, R.N.: "Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel in Carbonate Solutions", Corrosion, Vol. 28, No. 8 (1972).

谷口直樹, 市川史郎: "水素ガス環境下における炭素鋼の水素吸収量の測定", JNC TN8400 99-056 (1999).

Taniguchi, N., Honda, A. and Ishikawa, H.: "Experimental investigation of passivation behavior and corrosion rate of carbon steel in compacted bentonite", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 506, pp. 495-501 (1998).

谷口直樹,本田明,川崎学,森田光男,森本昌孝,油井三和: "炭素鋼オーバーパックにおける腐食の局在化の検討" JNC TN8400 99-067 (1999).

谷口直樹,川上進,森田光男:"ベントナイト/ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件", JNC TN8400 2001-025 (2002).

Taniguchi, N., Kawasaki, M., Kawakami, S. and Kubota, M.: "Corrosion Behaviour of Carbon Steel in Contact with Bentonite under Anaerobic Condition", Proc. of EUROCORR 2004, 04-083(2004).

Taniguchi, N., Kawasaki, M., Kawakami, S. and Suzuki, H.: Propagation behavior of

localized corrosion of carbon steel in alkaline environment, Proc. of 13th APCCC, H-06 (2003).

椿野晴繁,西村六郎: "鋼中水素のモニタリングへの電気化学的水素透過法の適用"材料と 環境, Vol. 49, pp. 188-194 (2000).

和田隆太郎,山口憲治,西村務,藤原和雄,建石剛: "炭素鋼オーバーパックの超長期試験研究", JNC TJ8400 2003-007 (2003).

Yui,M., Sasamoto, H. and Arther, R.C.: "Groundwater evolution modeling for the second progress performance assessment(PA) report", JNC TN8400 99-030(1999). 松山晋作:"遅れ破壊"日刊工業新聞, p.70 (1989).