

高pH化した海水系地下水環境における 炭素鋼の局部腐食進展挙動

Localized Corrosion Behavior of Carbon Steel in High-pH Seawater-type
Groundwater Environment

谷口 直樹 鈴木 宏幸 内藤 守正

Naoki TANIGUCHI, Hiroyuki SUZUKI and Morimasa NAITO

地層処分研究開発部門

地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

高 pH 化した海水系地下水環境における炭素鋼の局部腐食進展挙動

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット

谷口 直樹, 鈴木 宏幸*, 内藤 守正

(2009年12月18日受理)

炭素鋼は高 pH 環境において不動態化し、条件によっては孔食、すきま腐食などの局部腐食を受けることが知られている。一般に局部腐食の進展速度は全面腐食の場合よりも大きく、炭素鋼オーバーパックに局部腐食が生じた場合には短期破損をもたらす可能性がある。孔食・すきま腐食は塩化物イオンに代表される不動態皮膜破壊型の化学種の共存下において発生することが知られている。処分環境では、海水系地下水のような塩化物イオンを含む地下水が人工バリア周辺に施工されるコンクリート構造物中のセメント材料と接触してその pH が上昇し、炭素鋼オーバーパックに孔食やすきま腐食をもたらす場合などが想定される。本研究では海水系地下水の一例として幌延の模擬地下水を用い、コンクリートと接触させて高 pH 化させた条件で孔食、すきま腐食の進展挙動を調べた。その結果、孔食係数（最大腐食深さと平均腐食深さの比）は中性～アルカリ性環境や種々の天然水環境で得られた過去のデータの範囲内にあることが確認された。実験データの極値統計解析によりオーバーパックにおける最大腐食深さを推定した結果、推定値はいずれの条件でも従来の孔食・すきま腐食進展に関する経験モデルにより算出される値を超えないことがわかった。

Localized Corrosion Behavior of Carbon Steel in High-pH Seawater-type Groundwater Environment

Naoki TANIGUCHI, Hiroyuki SUZUKI* and Morimasa NAITO

Geological Isolation Research Unit,
Geological Isolation Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 18, 2009)

It has been known that carbon steel can be passivated in high pH environment and sometimes be attacked by localized corrosion such as pitting corrosion and crevice corrosion. If carbon steel overpack is attacked by localized corrosion, it is possible that the overpack may be penetrated in a short term, since the propagation rate of localized corrosion is larger than that of general corrosion in general. It has been known that the pitting corrosion and crevice corrosion are initiated in the presence of aggressive species for passive film represented by chloride ion. In repository environment, it is possible that the pH in groundwater containing chloride ion such as seawater type groundwater is raised by a contact with the cement material in concrete structures constructed around the engineered barrier system and then pitting corrosion or crevice corrosion is caused on the carbon steel overpacks. In this study, the propagation behavior of pitting corrosion and crevice corrosion was examined by immersion tests under air equilibrium condition using artificial groundwater at Horonobe as an example of seawater-type groundwater. As the results, the pitting factor (ratio of the maximum corrosion depth and average corrosion depth) were within the literature data obtained in neutral and alkaline water and in various natural water environments. The maximum corrosion depth of carbon steel overpack was predicted by extreme value statistical analysis of the experimental data, and it was confirmed that the predicted corrosion depths were not over the values calculated from current empirical models for propagation of pitting corrosion and crevice corrosion in every cases.

Keywords: Overpack, Horonobe, Carbon Steel, Groundwater, Seawater, Cement, Localized Corrosion, Stress Corrosion Cracking

* Inspection Development Company Ltd.

目 次

1	はじめに	1
2	実験方法	2
3	実験結果と考察	5
4	おわりに	17
	参考文献	18

Contents

1.	Introduction	1
2.	Experimental Procedure	2
3.	Results and Discussions	5
4.	Conclusion	17
	References	18

This is a blank page.

1 はじめに

炭素鋼は一般に高 pH 環境において不動態化しやすく、条件によっては孔食、すきま腐食などの不動態皮膜の局所的破壊に起因する局部腐食を受けることが知られている¹⁾。一般に局部腐食の進展速度は全面腐食の場合よりも大きく²⁾、炭素鋼オーバーパックに局部腐食が生じた場合には短期破損をもたらす可能性がある。孔食、すきま腐食は塩化物イオンに代表される不動態皮膜破壊型の化学種の共存下において発生するといわれており²⁾、これまでも幅広い地下水環境を想定して生起条件^{1) 3)}や進展挙動⁴⁾の検討が行われてきた。しかし、実際に孔食やすきま腐食が生じる具体的な地質環境条件を想定した検討した例は見当たらない。現時点では処分サイトが決まっていないため、具体的な処分環境条件を想定した評価は不可能であるが、幌延において深地層研究計画が進められており、研究施設の建設が行われている。幌延深地層研究施設においては、オーバーパックを含む人工バリアの原位置試験が計画されており⁵⁾、幌延の地質環境条件を想定した腐食挙動評価、オーバーパック設計が今後必要と考えられる。現在までに幌延の模擬地下水および実際に採取された地下水を用いた炭素鋼の腐食試験が行われ⁶⁾、幌延の地下水条件における炭素鋼オーバーパックの腐食挙動について概略的な検討が行われた。それによると炭素鋼は緩衝材中において不動態化せず腐食形態はほぼ全面腐食であると推定された⁶⁾。また、全面腐食における腐食速度や腐食局在化の程度は既往のデータの範囲内であることが確認された。以上の結果より、幌延の地下水条件においても第2次取りまとめ⁷⁾における炭素鋼オーバーパックの腐食寿命評価は保守的であり、オーバーパック設計において設定された腐食しろも幌延の地下水条件に対して適用可能との見通しが得られた。一方、幌延の深部地質環境のような軟岩系岩盤での処分システムを想定すると、人工バリア周辺に支保工などのコンクリート製の構造物が施工されるため⁷⁾、緩衝材に浸潤する地下水はセメント材料との接触により高 pH 化する可能性がある。地下水の高 pH 化によって炭素鋼が不動態化した場合には局部腐食の評価が必要となる。そこで本研究では海水系地下水がセメント材料との接触によって高 pH 化する具体的な事例として、幌延における地下水組成に基づいて作製した模擬地下水とコンクリートを接触させた溶液を用いて炭素鋼の孔食・すきま腐食進展挙動を実験的に検討した。

2 実験方法

(1) 試験片

炭素鋼の材質として、従来の実験^{4) 6)} で用いられているものと同様に SM400B を用いた。試験片の化学成分を表 2-1 に示す。試験片の形状は、既報⁶⁾ にしたがって図 2-1 に示すように直径 80mm の円盤型とし、中央にはすきま形成材（ポリサルフォン製）を装着するための $\phi 8\text{mm}$ の孔を空けた。すきま形成材は外形 20mm、内径 8mm の円盤型とし、試験片中央部にステンレス製のボルト／ナットにより締め付けた。締め付けトルクは 20kgfcm とした。試験片表面は#800 エメリー紙による湿式研磨により仕上げ、アセトンによる脱脂を行った。1 条件あたりの試験片数は 15 とした。

(2) 試験条件

試験溶液には、既報⁶⁾ にしたがって、幌延深地層研究所設置地区付近の地下水を模擬した水溶液（以下、「模擬地下水」）を用いた。模擬地下水は、幌延の地下水成分のうち、炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼすと考えられる炭酸塩と塩化物に着目してその成分のみを含む単純化した溶液として作成した。その組成は、炭酸カルシウムの飽和した 0.28M-NaCl 水溶液とした。

これに粉砕したコンクリート（粒径 1mm アンダー）を混合し、10 日間以上静置後の上澄み液を試験に用いた。コンクリートと溶液の混合比は 10g/l とした。コンクリートは普通ポルトランドセメント（Ordinary Portland Cement, OPC）および低アルカリ性セメント（High Flyash contained Silicafume Cement, HFSC）⁸⁾ を用いたものをそれぞれ作成した。試験温度は処分後初期の比較的酸化性雰囲気を代表する温度として既往の例^{3) 4) 6)} にしたがって 80°C とした。また、試験溶液には試験期間を通じて大気を通気し、大気平衡の雰囲気とした。試験期間は 90 日、180 日とした。以上の実験条件を表 2-2 に示す。

(3) 試験手順

試験前試験片の重量を測定したのち、ガラス容器に試験片、試験溶液を入れ、ヒータで試験溶液を 80°C まで加熱した。試験溶液中には大気を通気した。試験状況の模式図を図 2-2 に示す。所定期間（90 日、180 日）経過後、試験片を取り出し、試験片の外観を観察した。次に 10% クエン酸水素 2 アンモニウム水溶液中でカソード分極（10mA/cm²）下にて腐食生成物を除去し、試験片の重量測定を行った。最後に、レーザープローブ式の形状測定装置（三鷹光機製 AMS-5）により、最大腐食深さを測定した。

(4) データの解析

試験前後の重量変化より、平均腐食深さを算出した。また、各試験片の最大腐食深さと平均腐食深さの比により孔食係数を算出した。更に、最大腐食深さのデータについて Gumbel 分布による極値統計解析を行い、Gumbel 分布関数のパラメータ（位置パラメータ、尺度パラメータ）を求めるとともに実際のオーバーパック表面積における最大腐食深さを推定した。

表 2-1 試験片の化学成分 (単位 : mass%)

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.22	1.12	0.016	0.004

表 2-2 浸漬試験条件

試験溶液	コンクリート	pH	期間 (days)
0.28M-NaCl + 飽和 CaCO ₃	OPC	12.7	90
	OPC	12.7	180
	HFSC	10.4	90
	HFSC	10.4	180

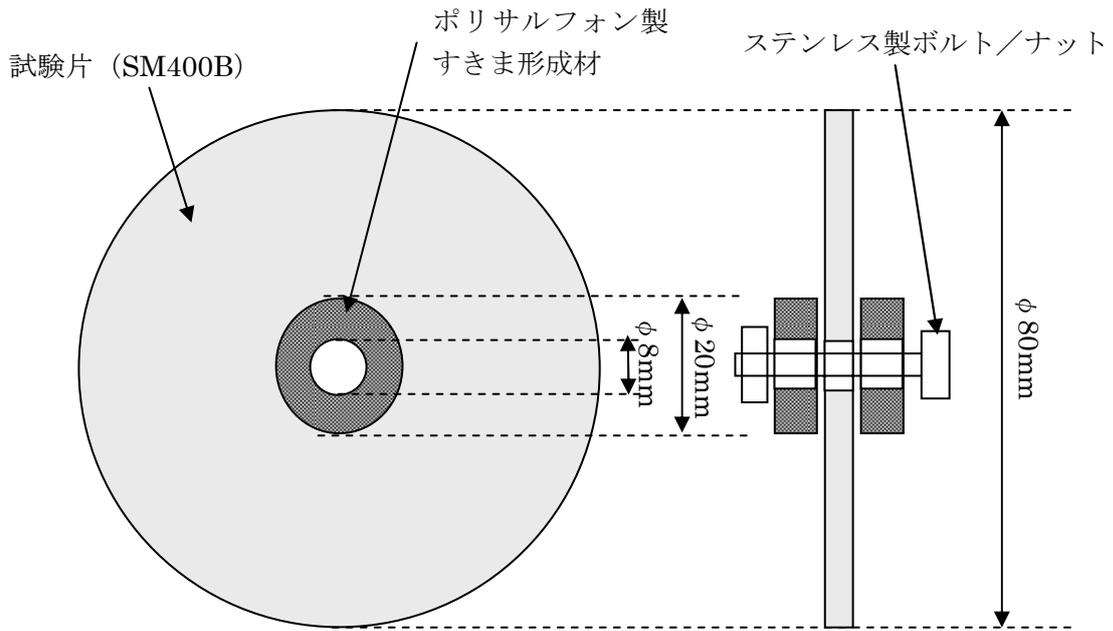


図 2-1 大気雰囲気における浸漬試験で用いた試験片の形状・寸法

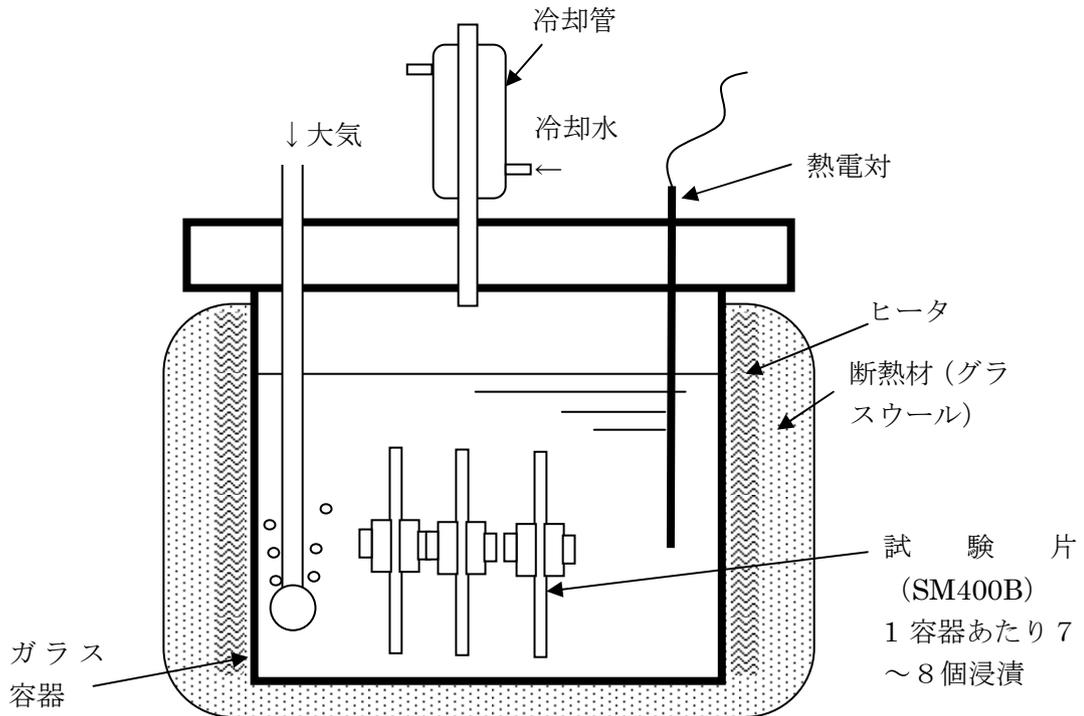


図 2-2 浸漬試験状況の模式図

3 実験結果と考察

(1) 外観状況と腐食生成物

取り出し後と脱スケール後の試験片の外観状況および腐食深さ分布の代表例を図 3-1、図 3-2 に示す。各条件で以下のような結果が得られた。

1) OPC+模擬地下水

図 3-1 に示すように、黒色の腐食生成物が堆積した部分と黒色の腐食生成物の上に茶褐色の腐食生成物が覆った状態の部分が見られた。また、うっすらと茶褐色の腐食生成物が付着しているのみでほとんど腐食が進展していない部分も見られた。腐食生成物を除去すると、腐食生成物の堆積した部分の下で腐食が進展していたが、ピット状に深くえぐれた部分は見られなかった。ほとんど腐食していない部分は不動態皮膜が健全な状態が維持されていると考えられ、腐食した部分では孔食、すきま腐食など皮膜破壊による局部腐食が進展したと考えられる。90日と180日を比較すると、180日のほうが腐食の進展した領域が広がっており、深さ方向への進展と併せて面状に広がる方向に進展していたことが示唆された。

2) HFSC+模擬地下水

図 3-2 に示すように、OPC+模擬地下水の場合と同様に、黒色の腐食生成物または茶褐色の腐食生成物で覆われた部分とほとんど腐食が進展していない部分が見られた。腐食生成物を除去すると腐食生成物が堆積した部分の下で腐食の進展が観察された。OPC+模擬地下水の場合と比較して腐食の進展した領域は広がっており、皮膜破壊がより広い領域で進展していたことが推察される。

(2) 腐食量と最大腐食深さ、孔食係数

試験片の重量減少量から計算した平均腐食深さ、最大腐食深さおよび、最大腐食深さと平均腐食深さの比として求めた孔食係数を表3-1と表3-2に示す。また、平均腐食深さ、最大腐食深さ、孔食係数の経時変化を図3-3～図3-5に示す。平均腐食深さはOPC+模擬地下水よりもHFSC+模擬地下水のほうが大きいものの、最大腐食深さはほぼ同程度となった。孔食係数はOPC+模擬地下水の場合には時間とともに低下していく傾向が見られたものの、HFSC+模擬地下水では90日と180日で明瞭な変化はなかった。次に、平均腐食深さと孔食係数の関係を図3-6に示す。全体的には平均腐食深さが大きくなるほど孔食係数は小さくなる傾向が認められるものの、HFSC+模擬地下水の場合には平均腐食深さに対する明瞭な依存性はみられなかった。ここで、平均腐食深さと孔食係数の関係を既往のデータ^{4) 6) 9) 10) 11) 12)}と比較した。その結果を図3-7に示す。今回得られた、いずれの結果とも、土壌中など天然環境での孔食係数や従来室内試験で観察された孔食係数の分布上にあり、既往のデータの範囲を超えるような腐食局在化は生じていないことが確認された。また、コンクリートと混合しない場合の幌延地下水環境での値⁶⁾と比較すると、同じ平均腐食深さに対してやや高い値の領域に分布していることがわかる。コンクリートと混合しない場合のアノード分極挙動は活性溶解型であり⁶⁾、ほぼ全面腐食における孔食係数に対応する。これに対し、コンクリートと混合した場合にはアノード分極によって不動態化することが確認されており⁶⁾、本試験でのデータは孔食・すきま腐食に対応する孔食係数とみなしうる。既報の孔食・すきま腐食(炭酸塩溶液系、セメント+NaCl系)における孔食係数⁴⁾と比較すると、これらのデータの範囲または延長上に今回のデータが分布していることがわかる。したがって、孔食、すきま腐食の孔食係数は、環境条件によらず平均腐食深さから値の範囲を概略的に推定可能と考えられる。

(3) 極値統計解析によるオーバーパック最大腐食深さの推定

本実験で得られた最大腐食深さのデータに対して極値統計解析を行い、Gumbel分布の位置パラメータ λ 、尺度パラメータ α およびオーバーパックにおける最大腐食深さを推定した。実際の解析は市販のソフトウェアEVAN-IIを用い、 λ および α の推定は、MVLUE法¹³⁾により行った。オーバーパック表面積は第2次取りまとめでの仕様⁷⁾に準じ、55129cm²とし、試験片の面積は104.6cm² (再帰期間：527) とした。その結果を表3-3に示す。

一般に、孔食などの局部腐食の進展は、最大腐食深さ P と時間 t について、べき乗則 ($P=k \cdot t^n$: k, n は定数) を適用して予測されている^{13) 14) 15)}。ここで、最大腐食深さの極値統計解析結果得られた信頼率0.99におけるオーバーパックの最大腐食深さ推定値(P_{max})の経時変化を図3-8に示す。データは十分ではないが、緩衝材なしの条件について、最小自乗法により上記のべき乗則で近似すると、以下の式が得られた。

$$\text{OPC+模擬地下水} : P_{max} = 0.016 t^{0.95} \quad (3-1)$$

$$\text{HFSC+模擬地下水} : P_{max} = 0.841 t^{0.22} \quad (3-2)$$

P_{max} : 最大腐食深さ推定値(mm)

t : 時間 (days)

この式を用い、処分環境で酸素の存在する期間を100年 ($t=36500\text{days}$)¹⁶⁾としてオーバーパックにおける最大腐食深さを算出すると、以下のとおりとなった。

$$\text{OPC+模擬地下水} : P = 371.88\text{mm}$$

$$\text{HFSC+模擬地下水} : P = 8.78\text{mm}$$

上記のとおり、OPC+模擬地下水のほうが著しく大きな値が算出された。今回の試験期間の範囲では、HFSC+模擬地下水のほうが最大腐食深さ推定値は大きいものの、90日と180日で腐食深さの増加が小さく、腐食進展が時間とともに抑制される式が得られている。一方、OPC+模擬地下水ではHFSCに比べて腐食深さは小さいものの、180日間ではほぼ直線的に増加しているため、長期的な計算ではより大きな値が算出される。OPC+模擬地下水で算出された最大腐食深さは炭素鋼オーバーパックの腐食代を大きく超える値であるが、この値は、環境条件が変化せず、大気雰囲気は100年間維持された場合の推定値であるため、酸素濃度が経時的に低下していく処分環境での評価に適用するには過度に保守的であると考えられる。Brossia et al.¹⁷⁾もパラメータ k, n の値は条件によって幅があり、評価式によって数桁以上の寿命の違いが生じることや、このモデルでは腐食の進展停止は考慮されないことを指摘している。一方、図3-7に示すとおり、孔食係数、すなわち最大腐食深さ(実測値)は平均腐食深さの値により範囲が概ね限定されると考えられる。したがって、第2次取りまとめ⁷⁾にて行われたように、酸素による平均腐食深さの上限を酸素量に基づいて求め、その腐食量での腐食局在化の程度を評価して最大腐食深さを推定する方法が合理的と考えられる。これまで、全面腐食と局部腐食(孔食・すきま腐食)について、平均腐食深さから最大腐食深さを保守的に評価するモデルが提案されており^{4) 18)}、ここでもそのモデルの適用性を確認する。表3-3に示されている信頼率0.99での最大腐食深さ推定値を平均腐食深さに対してプロットし、以下の式に示す評価式と比較した。この式は、平均腐食深さ X_m (mm)とオーバーパック表面積55129cm²、信頼率0.99における最大腐食深さ P_{max} (mm)の上限値の評価式である。

$$\text{不均一全面腐食}^{7)} : P_{\max} = X_m + 7.5X_m^{0.50} \quad (3-3)$$

$$\text{孔食, すきま腐食}^{4)} : P_{\max} = X_m + 6.4X_m^{0.25} \quad (3-4)$$

その結果、図3-9に示すようにいずれの条件も不均一全面腐食の(3-3)式から得られた値よりも大きくなったが、孔食・すきま腐食の(3-4)式から得られた値より小さくなった。今回のデータは炭素鋼が不動態化する条件での孔食、すきま腐食に対する値とみなしうることから、(3-4)式との比較が妥当と考えられ、セメントと接触した幌延の地下水条件に対しても従来の経験モデルにより、保守的な評価が可能であることが確認された。

ここで、(3-3)式と(3-4)式を比較すると、今回の実験で得られたような平均腐食深さ X_m が約0.1mm以下の場合には後者のほうが十分に大きな値が算出される。しかし、 X_m が大きくなるとともに P_{\max} の差は小さくなり、 X_m が約0.5mmを超えると(3-4)式よりも(3-3)式のほうが P_{\max} は大きな値となる。実際には不均一全面腐食のほうが孔食・すきま腐食よりも腐食局在化が激しくなることは考えにくく、平均腐食深さが大きくなるにつれて、全面腐食と孔食・すきま腐食は見かけ上区別が困難となり、腐食局在化の程度は腐食形態によらずほぼ同程度になると考えられる。すなわち、 X_m が約0.5mm以上では(3-3)式によって不均一全面腐食、孔食・すきま腐食のいずれの評価も可能と考えられる。

表3-1 90日間浸漬試験における平均腐食深さと最大腐食深さ

試験溶液	期間 (days)	温度 (°C)	pH(室温)	平均腐食深さ(μm)		最大腐食深さ (μm)	孔食係数
OPC+模 擬地下水	90	80	12.1	27.57	19.64 ± 11.08	288.07	10.45
				30.34		290.32	9.57
				32.35		424.88	13.14
				31.46		357.49	11.36
				30.95		308.06	9.95
				27.78		881.81	31.74
				27.93		390.21	13.97
				27.56		253.55	9.20
				12.62		370.09	29.34
				9.80		349.2	35.63
				7.73		324.18	41.96
				7.98		430.9	53.96
				6.06		323.23	53.34
				8.31		452.35	54.42
6.22	385.69	62.00					
HFSC+模 擬地下水	90	80	10.4	50.51	57.13 ± 7.28	325.5	6.44
				53.23		684.6	12.86
				50.52		309.44	6.12
				48.65		303.74	6.24
				51.37		296.46	5.77
				52.31		272.98	5.22
				53.73		295.05	5.49
				54.69		534.7	9.78
				54.75		705.56	12.89
				67.15		724.64	10.79
				61.47		650.77	10.59
				67.97		770.41	11.33
				58.33		763.84	13.10
				72.78		773.47	10.63
59.52	471.81	7.93					

表3-2 180日間浸漬試験における平均腐食深さと最大腐食深さ

試験溶液	期間 (days)	温度 (°C)	pH(室温)	平均腐食深さ(μm)		最大腐食深さ (μm)	孔食係数
OPC+模 擬地下水	180	80	12.1	58.24	74.85± 18.04	771.47	13.25
				74.65		441.56	5.92
				99.80		535.37	5.36
				73.41		1244.38	16.95
				52.41		1015.7	19.38
				96.47		864.35	8.96
				83.90		553.46	6.60
				80.73		490.64	6.08
				77.91		405.27	5.20
				72.22		487.9	6.76
				39.73		544.74	13.71
				90.80		853.83	9.40
				84.24		509.38	6.05
				90.41		480.26	5.31
47.80	715.93	14.98					
HFSC+ 模 擬地下 水	180	80	10.4	104.80	106.05 ±19.72	995.09	9.49
				121.54		928.49	7.64
				104.59		1118.02	10.69
				143.79		1100.65	7.65
				118.71		921.02	7.76
				138.69		846.65	6.10
				102.15		686.64	6.72
				119.53		649.59	5.43
				82.29		777.68	9.45
				90.17		1120.75	12.43
				79.28		746.72	9.42
				79.74		620.84	7.79
				96.52		661.97	6.86
				100.45		1079.62	10.75
108.45	1136.58	10.48					

表 3-3 極値統計解析により得られた位置パラメータ α ，尺度パラメータ λ およびオーバーパック最大腐食深さ推定値

溶液	期間	α (μm)	λ (μm)	オーバーパックにおける最大腐食深さ推定値 (μm)	
				最頻値	信頼率 0.99
OPC+模擬地下水	90 日	80.09	336.32	838.24	1206.70
OPC+模擬地下水	180 日	164.07	555.34	1583.45	2338.34
HFSC+模擬地下水	90 日	172.25	426.91	1506.31	2298.87
HFSC+模擬地下水	180 日	173.62	796.79	1884.74	2683.57

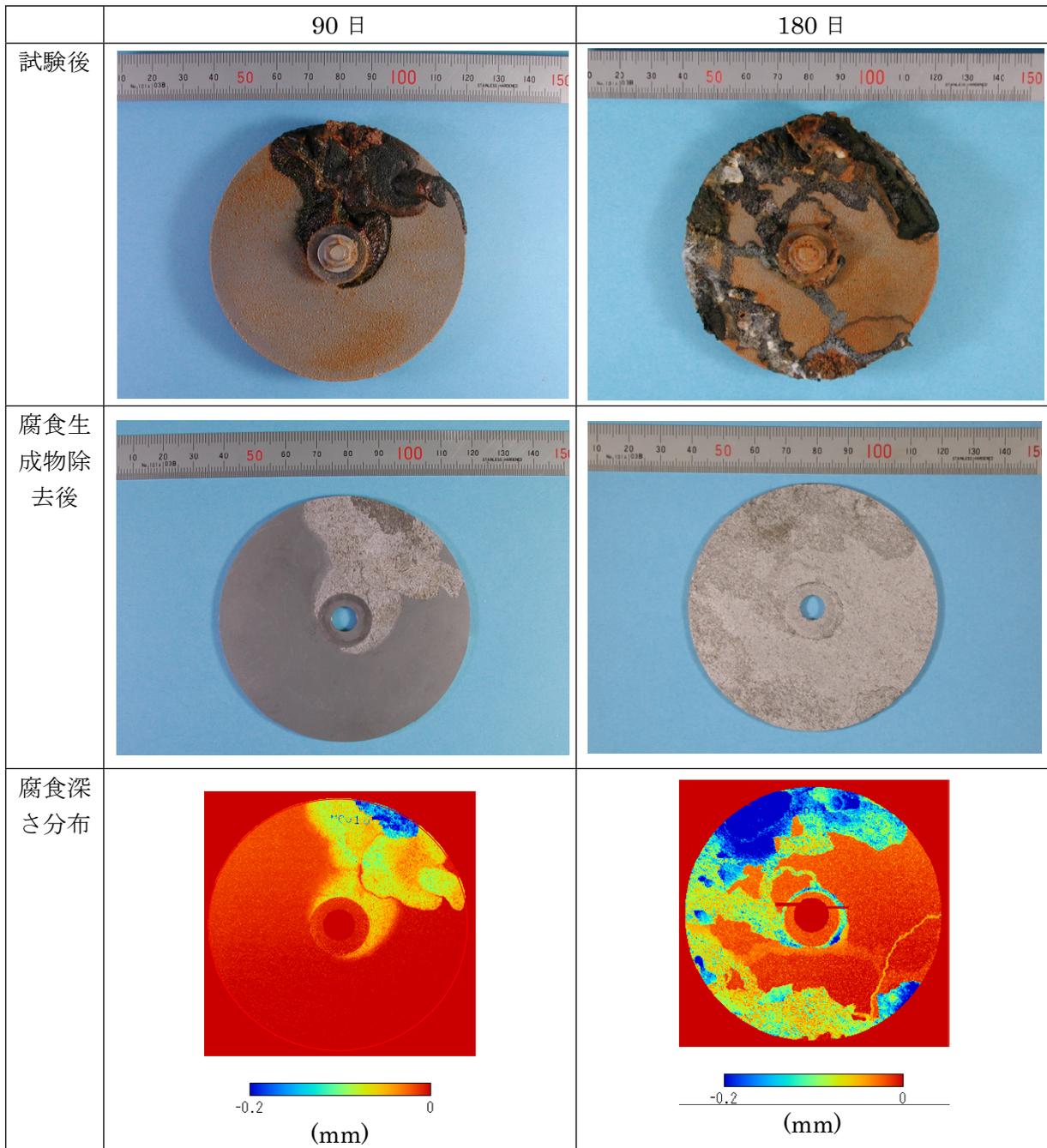


図 3-1 OPC+模擬地下水における試験後試験片，腐食生成物除去後の外観（代表例）および腐食深さ分布測定結果

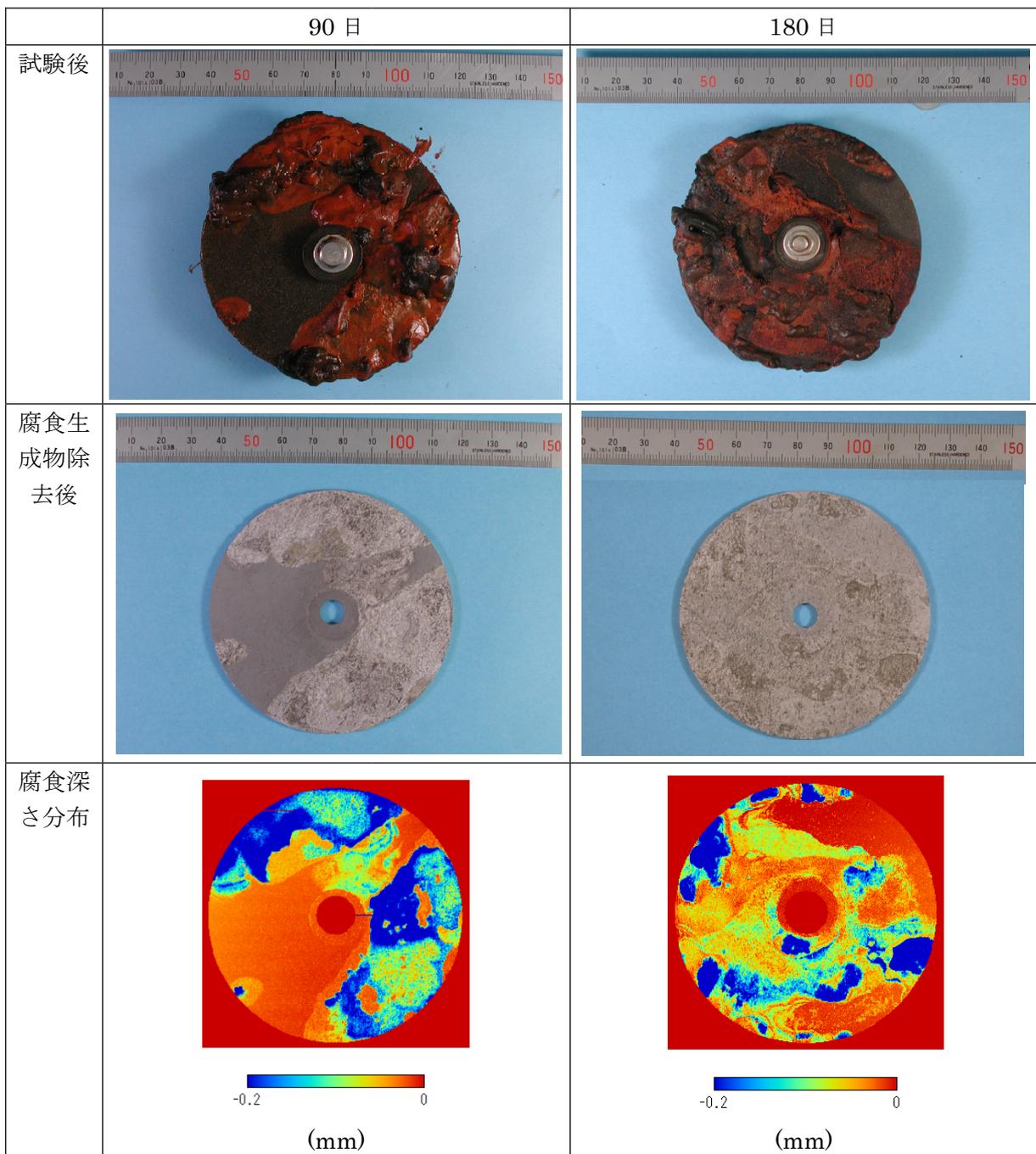


図 3-2 HFSC+模擬地下水における試験後試験片，腐食生成物除去後の外観（代表例）
および腐食深さ分布測定結果

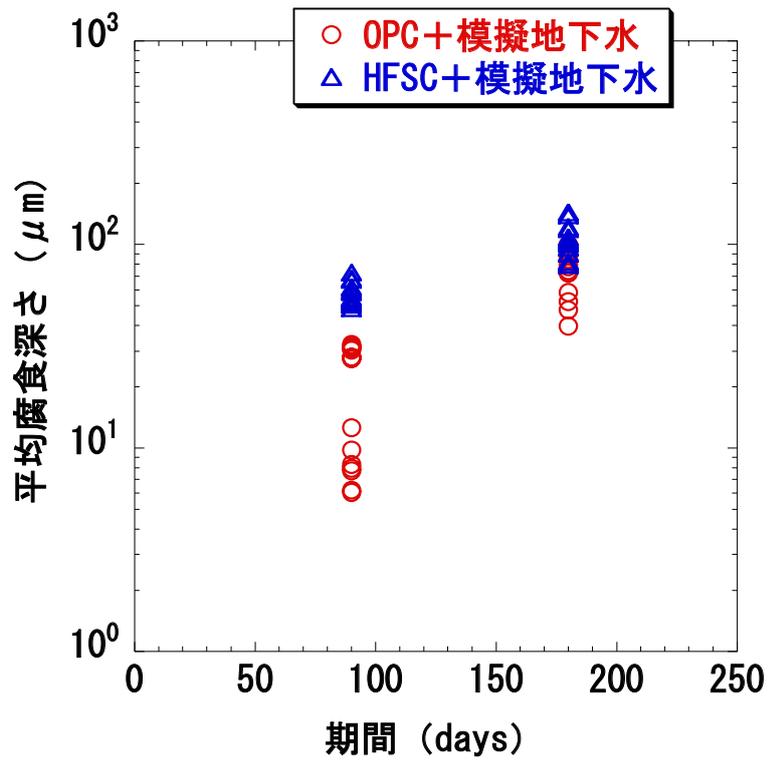


図 3-3 OPC+模擬地下水およびHFSC+模擬地下水中における炭素鋼の平均腐食深さの経時変化

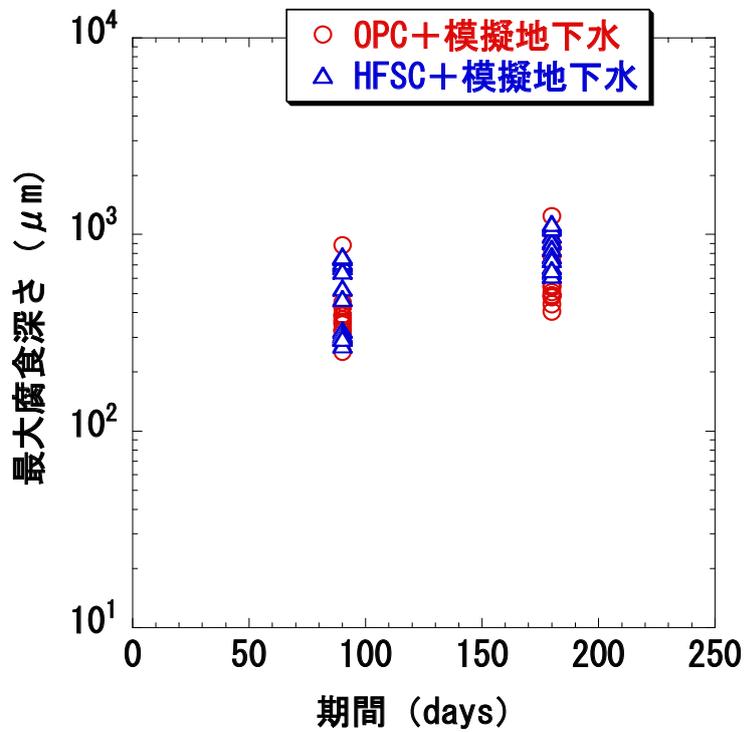


図 3-4 OPC+模擬地下水およびHFSC+模擬地下水中における炭素鋼の最大腐食深さの経時変化

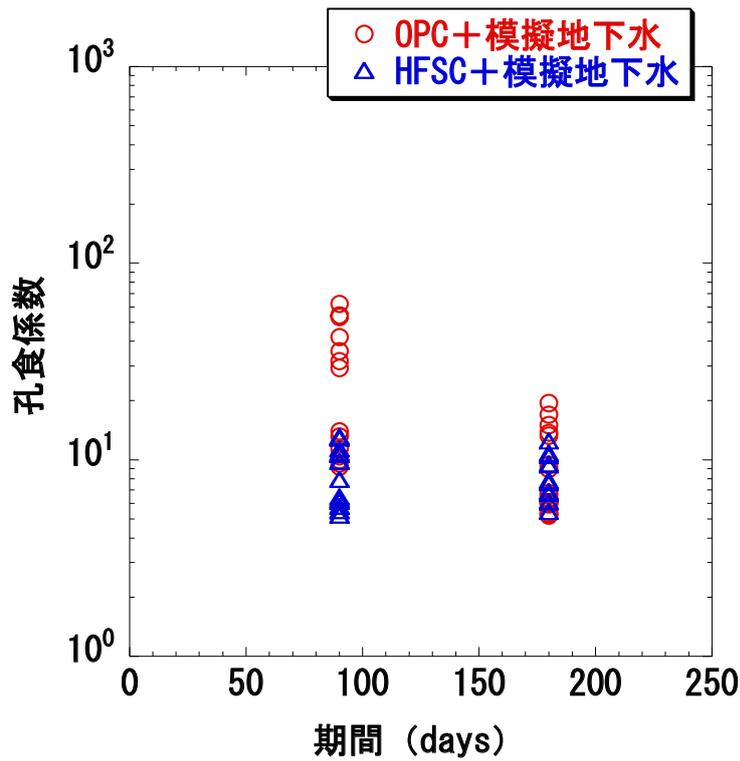


図 3-5 OPC+模擬地下水および HFSC+模擬地下水中における炭素鋼の孔食係数の経時変化

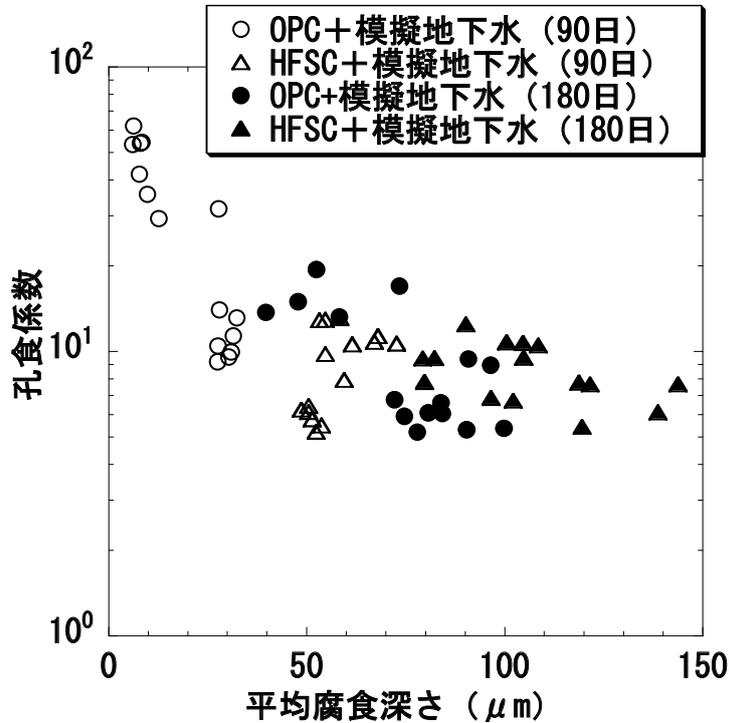


図 3-6 OPC+模擬地下水および HFSC+模擬地下水中における炭素鋼の平均腐食深さと孔食係数の関係

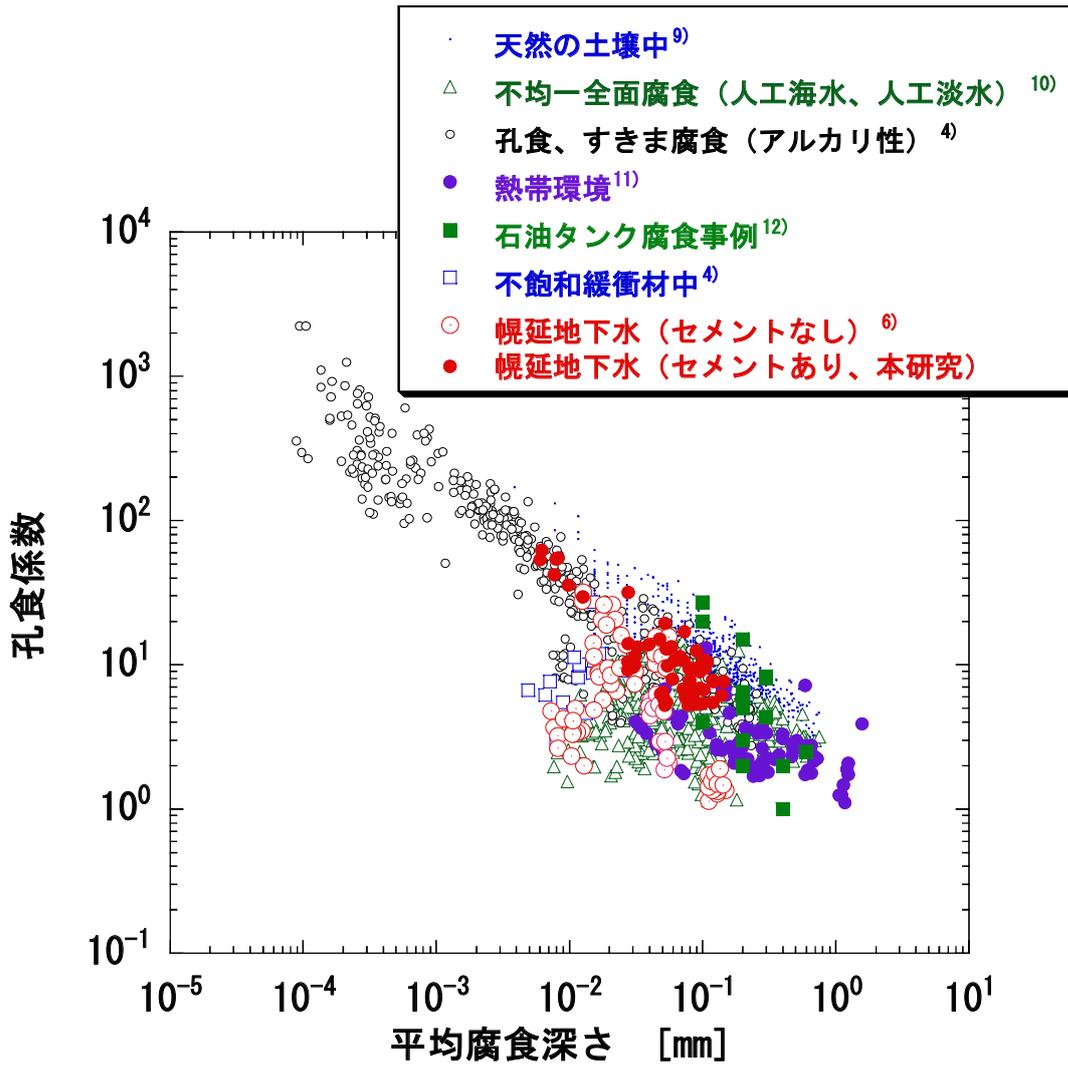


図 3-7 種々の環境における孔食係数^{4) 6) 9) 10) 11) 12)}と本試験で得られた孔食係数の比較

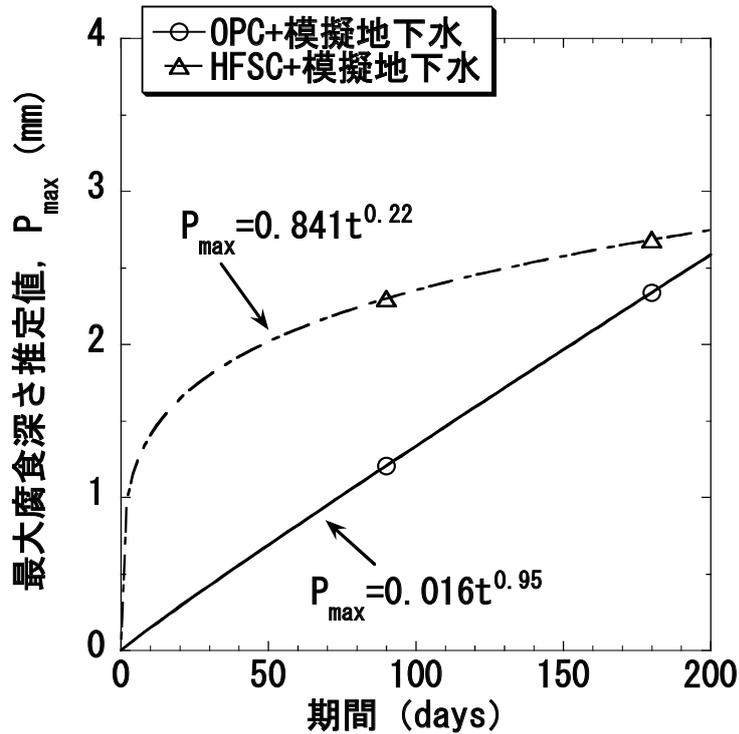


図 3-8 信頼率 0.99 での最大腐食深さ推定値の経時変化

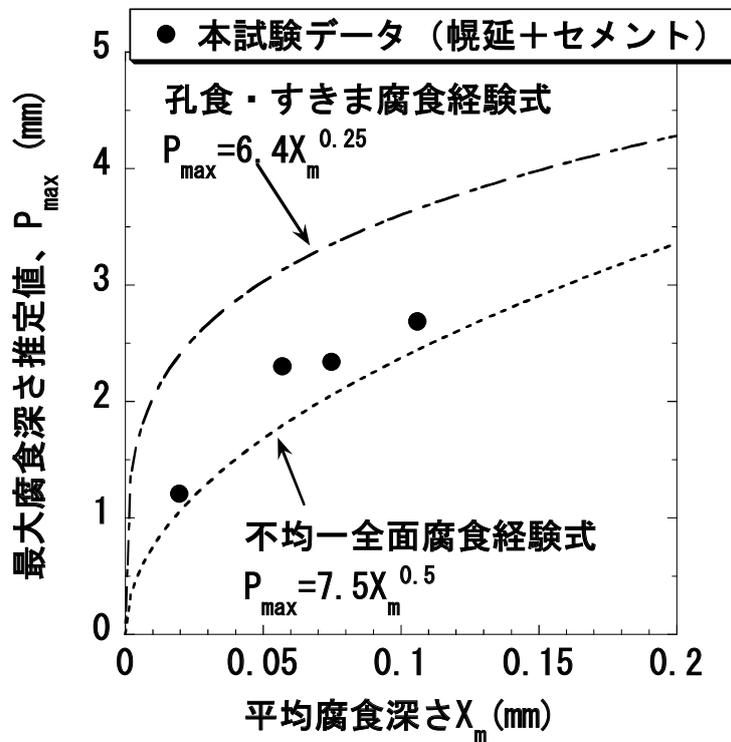


図 3-9 平均腐食深さと信頼率 0.99 での最大腐食深さ推定値の関係および既往の経験的モデルから得られる値との比較

4 おわりに

海水系地下水の一例として幌延の模擬地下水を用い、コンクリートと接触させて高 pH 化させた条件で炭素鋼の孔食、すきま腐食の進展挙動を調べた。その結果、孔食係数は中性～アルカリ性環境や種々の天然水環境で得られた過去のデータの範囲内にあり、平均腐食深さが同じであれば過去の孔食、すきま腐食に関するデータとほぼ同程度の値を示すことが確認された。また、実験データの極値統計解析によりオーバーパックにおける最大腐食深さを推定した結果、推定値はいずれの条件でも従来の孔食・すきま腐食進展に関する経験モデルにより算出される値を超えないことが確認された。

参考文献

- 1) G.P. Marsh, I.W. Balnd, K.J. Taylor, S. Sharland and P. Tasker: An assessment of carbon steel overpacks for radioactive waste disposal, EUR10437(1986).
- 2) 腐食防食協会編：環境材料学入門，丸善（1993）.
- 3) 谷口直樹，本田明，川崎学，石川博久：オーバーパック候補材料の局部腐食発生臨界条件の検討，動燃技報，No.93, pp.109-113(1995).
- 4) N. Taniguchi, M. Kawasaki, S. Kawakami and H. Suzuki: Propagation behavior of localized corrosion of carbon steel in alkaline environment, Proc. Of 13th APCCC, H-06(2003).
- 5) 栗原雄二，油井三和，棚井憲治，杉田裕，川上進，谷口直樹，平井卓，小川豊和，三原守弘，松井裕哉，藤島敦，盛口洋，宮野前俊一，本間信之：幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討，JNC TN8400 2004-002(2004).
- 6) 谷口直樹，甲川憲隆；前田一人：幌延地下水環境における炭素鋼の腐食挙動の予察的検討，JAEA-Research 2006-051(2006).
- 7) 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).
- 8) 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ェ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).
- 9) M. Romanoff: Underground Corrosion, originally issued by NBS in 1957, reprinted by NACE(1989).
- 1 0) 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).
- 1 1) C.R. Southwell, J.D. Bultman and A.L. Alexander: Corrosion of Metals in Tropical Environments, Final Report of 16-Year Exposures, Materials Performance, July pp.9-26 (1976).
- 1 2) 亀井浅道：石油タンクの腐食の傾向と問題点，ケミカル・エンジニアリング，3, pp.9-17 (1980).
- 1 3) 腐食防食協会編：装置材料の寿命予測入門，丸善（1984）
- 1 4) G.P. Marsh and K.J. Taylor: An assessment of carbon steel containers for radioactive waste disposal, Corrosion Science, vol. 28, No.3, pp.289-320(1983).
- 1 5) A. Hoch, A. Honda, H. Ishikawa, F. Porter, S. Sharland and N. Taniguchi: A modeling and Experimental study for long term prediction of localized corrosion in carbon steel overpacks for high-level radioactive waste, Mat. Res. Soc. Proc. Symp., 353, pp.703-710(1995).
- 1 6) 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解析，JNC TN8400 99-027(1999).
- 1 7) C.S. Brossia and G.A. Cragolino: Effect of environmental variables on localized corrosion of carbon steel, Corrosion, vol. 56, No.5, pp.505-514 (2000).
- 1 8) 谷口直樹，川上進，神徳敬，油井三和：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，JNC TN8400 2005-002(2005).

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	レントゲン	R	lm/m ²	m ⁻² cd
放射線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨクタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バロン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻¹² cm ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

