

遮水鋼板を用いた新規最終処分場における鋼板の腐食因子に関する研究

廃棄物・有害物管理工学研究室 吉村有希子
 指導教官 小松俊哉、桃井清至、姫野修司

1. はじめに

廃棄物は、資源化または再利用される場合を除き、最終的には埋立処分されている。しかし、国土の狭い我が国において、最終処分場の確保は困難になってきている。加えて最終処分場の安全性への不信から、その建設に対して住民の同意が得られないといった問題がある。

そこで、安全性の確保された最終処分場が求められる中で、処分場に屋根等の覆いをかけ外部との環境から遮断するクロードシステム処分場が注目されている。このうち、従来遮水材に用いられてきたゴムシートに代わり、鋼板を用いた新しい管理型最終処分場（鋼板遮水システム）の開発が行われている。その概念図を図1に示す。しかし、鋼板

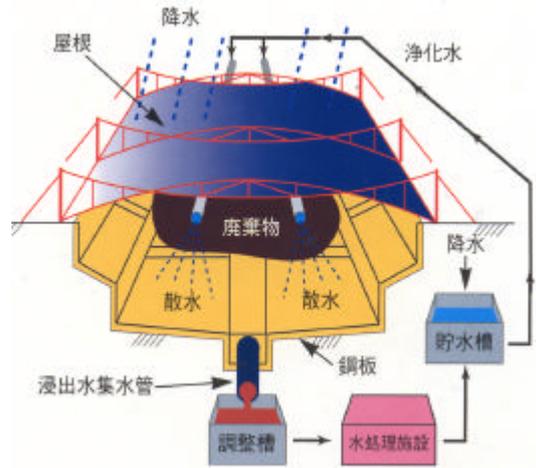


図1 鋼板遮水システム概念図¹⁾

を遮水材に用いた場合、ごみ、浸出水、地下水等による遮水鋼板の内外面の腐食が懸念される。そのため、土壌と接している遮水鋼板の外表面については、土壌中の腐食代で防食を行い、廃棄物と接する内面については塗装および腐食代により防食を行う必要がある。腐食代とは、使用中の腐食によって失われることを予想してその分だけ増しておく厚さ（JIS Z 0103 防食用語）と定義されている。一般に腐食代は炭素鋼や低合金鋼の全面平均腐食量を参考にして経験的に決められており、土中では 0.03 mm^2 ）である。しかし、廃棄物中における鋼板の腐食量についてはこれまで知見がない。

本研究では、廃棄物中における塗膜の性能確認と鋼板の腐食量を野外曝露実験により調査するとともに、腐食因子を考察した。さらに、その腐食因子が鋼板の腐食に与える影響を調べる室内実験を行い、実際に使用する鋼板の種類および必要板厚について検討した。

2. 野外曝露実験

2.1 実験方法

本実験では、工業用水腐食性試験方法（JIS K 0100）の一部改変した方法を用いて、試験片保持装置に埋立期間ごとに試験片を取り付け、各曝露試験場の地中深さ約1mの場所に埋設する方法で野外曝露実験を行った。試験片の材質はSS400であり、形状は平板と溶接板の2種類を用いた。図2に試験片の形状を示す。また、試験片には、未塗装片と各種表面処理を施した塗装片を用いた。その種類を表1に示す。なお、塗装片には、カッターで素地まで達する傷を対角線にいれ（クロスカット）、この部分からの腐食の状況を確認した。

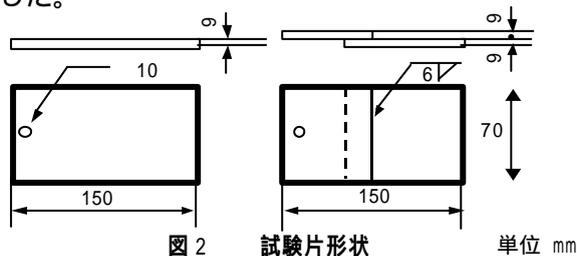


図2 試験片形状 単位 mm

表1 試験片の種類

塗装タイプ	仕様番号	工程	塗装系	膜厚 (μm)
未塗装片 (プラスト片)	B			
ショッププライマー	Z	第1層	無機シリクリッチプライマー	15
タールエポ200μm	E2	第1層	無機シリクリッチプライマー	15
		第2層	タールエポキシ樹脂塗料	200 (100×2)
		第3層	樹脂塗料	
タールエポ300μm	E3	第1層	無機シリクリッチ	15
		第2層	タールエポキシ樹脂塗料	300 (100×3)
		第3層	樹脂塗料	
		第4層	樹脂塗料	
ガラスフレーク	G	第1層	有機シリクリッチプライマー	15
		第2層	ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料	350

2.2 実験条件

産業廃棄物最終処分場内（実験場 A）と、同一の焼却灰の埋立を行った鋼板遮水システムの実証プラント（実験場 B）と最終処分場（実験場 C）の計 3 ヶ所に未塗装片及び各種塗装片を埋設し、最長 2 年間の野外曝露実験を行った。各実験場の詳細を表 2 に示す。

表 2 実験場の概要

	産業廃棄物最終処分場			実証プラント	一般産業廃棄物最終処分場	
実験場名	A			B	C	
設置地点	A-a	A-b	A-c			
埋設方向	鉛直			鉛直	鉛直	水平
試片数	3	3	3	3	3	3
埋立内容物	燃え殻(30%)、鋸屑(30%) 汚泥(60%)、煤(5%未満)			焼却灰	焼却灰	
評価年数	6、12、24ヵ月後			4、8ヵ月後	3、6、12ヵ月後	

2.3 評価方法

2.3.1 外観観察

本研究では、塗装片および未塗装片について、試験前と試験後の外観観察写真を比較する方法で外観観察を行い、さび、ふくれ、傷の発生を確認した。

2.3.2 塗装片の評価

・付着力（アドヒージョン）測定

端子（ドーリー）を塗膜面に接着剤で接着し、垂直引張力のみによる引張試験を行い、塗膜を剥離させることにより、塗膜の付着力を求めた。

・インピーダンス測定

ポータブル形インピーダンスブリッジを用いた測定器により、各周波数（通常 0.2、0.5、1.0 kHz）における交流抵抗値と電気容量値を測定し、周波数に対する抵抗値や電気容量値の変化もしくは抵抗値の経時変化から塗膜の劣化度を評価した。

・膜厚測定

塗膜厚は塗料の性質や対象物の用途に合わせて設定されているが、塗膜厚の不足や過剰は腐食の原因となる。本実験では、付着力測定、インピーダンス測定による塗膜評価結果の検証のため膜厚測定を行った。

2.3.3 未塗装片の評価

・腐食量測定

試験片を試験片保持器から取り外した後、酸洗浄法により腐食生成物を除去し、試験片重量を 0.1 mg まで測定した。酸洗浄は、試験片を腐食抑制剤（インヒビター）を 0.5% 加えた塩酸溶液 15% に浸漬しながら、ナイロンたわしで 10 分間ブラッシングした後、蒸留水で洗浄し、アセトンで脱脂する方法で行った。同時に空試験を行い、除去操作による試験片減量を補正した。なお、未塗装片の空試験（評価枚数 n=3）において重量減少はなかった。ジンクリッチプライマー塗装片では、酸洗浄による塗装分の重量減少量が 1.1g であった。（試験片の全重量は約 720g である。）腐食量は次式により計算し、mm 又は mm/year で表した。

$$\text{腐食量 } W(\text{mm}) = \frac{(M_0 - M_1) \times 10}{S \times d}$$

M_0 : 試験片の試験前の質量 (g) M_1 : 試験片の試験後の質量 (g)

S : 試験片の表面積 (cm²) d : 試験片の密度 (g/cm³)

2.4 実験結果

図 3 に A 実験の各地点における E2 の付着力測定結果を示す。この結果より、6、12、24 ヶ月後の付着力は、初期の付着力より上昇している。これは、塗膜が十分に硬化する前に初期値の測定を行ったためであると考えられる。充分硬化していないまま埋設を行ったものの、周囲の環境は塗膜を劣化させるものではなかったため、5 ヶ月後の付着力は初期値より上昇したと考えられる。

なお、付着力は 2 Mpa 以上を示し、塗膜に異常はなかった。また、他の実験場に埋設したいずれの塗装片についても同様の結果であった。

図 4 に A-c 地点における E2 のインピーダンス測定結果を示す。評価方法として、抵抗値は斜線より上、容量値は 0.03 nF 以下の値であれば、塗膜は防食性能を保っているとされていることから、廃棄物中においても塗膜は劣化していないことがわかった。また、他の実験場に埋設したいずれの塗装片についても同様の結果であった。

また、膜厚測定を行った結果、すべての試験片において設定膜厚を保っていた。

以上の結果より、いずれの塗装片についても試験期間を通して塗膜は劣化しておらず防食効果が確認された。しかし、外観観察の結果(図 5) 塗膜上のクロスカット部、傷の発生地点からは、ふくれおよび腐食が確認された。塗装の防食性能が低下した場合は腐食代による防食を行うことから、未塗装片(プラスチック)およびジンクリッチプライマー塗装片の腐食量を調査する必要がある。

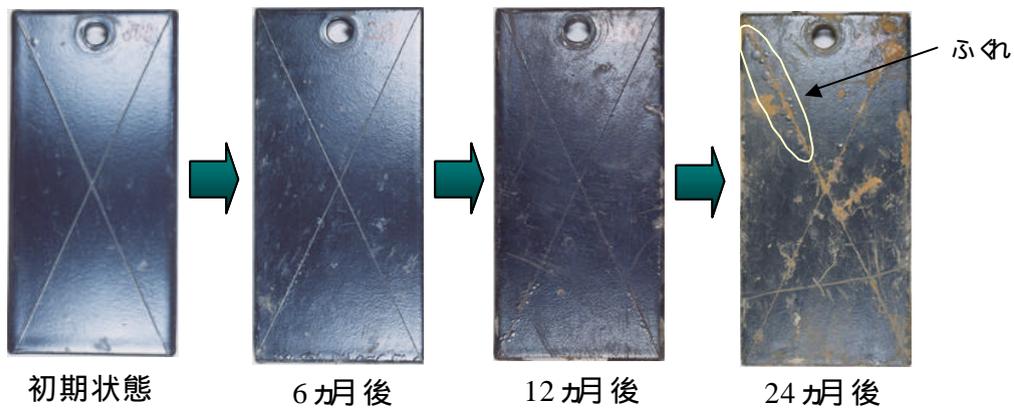


図 5 A - c 地点におけるタールエポキシ 200 μm 塗装片の外観変化

図 6 に各実験場における未塗装片およびジンクリッチプライマー塗装片の腐食量測定を行った結果を、表 3 に図の傾きより求めた年間腐食量を示す。なお n 数は 3 で、結果には平均値を示した。この結果より産業廃棄物中に埋設した鋼板より、焼却灰中に埋設した試験片の腐食量が増加しており、年間腐食量は最大で 0.15 mm/year であった。一方、初期の防食効果(屋外曝露期間 6 ヶ月程度)³⁾があるジンクリッチプライマー塗装片の腐食量は、未塗装片に比べ少なく、ほとんど腐食していないか、腐食していても、最大で 0.06 mm/year であった。このことから、ジンクリッチプライマーの防食効果が確認された。

また、C 実験場において、試験片を鉛直、水平の 2 方向に埋設したが、埋設方向による腐食量に差はなかった。

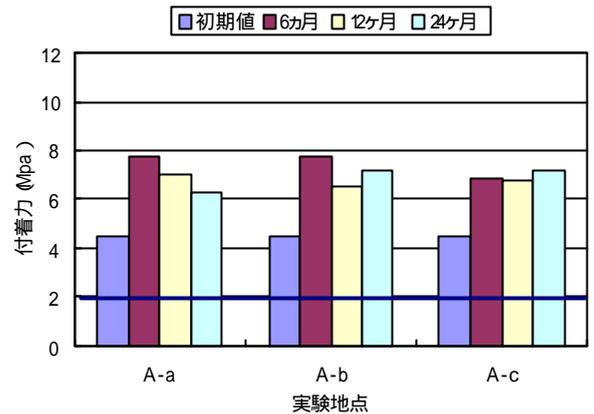


図 3 付着力測定結果 (A 実験場, E 2)

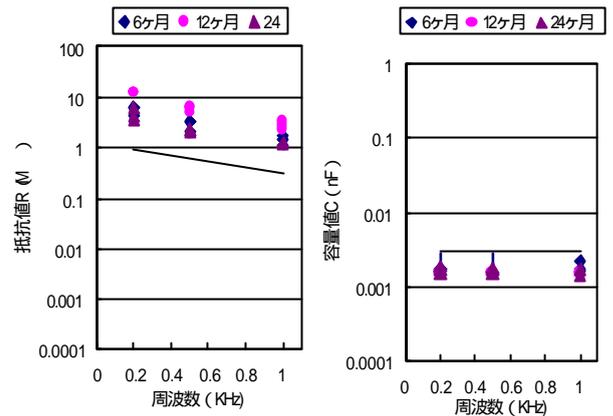


図 4 インピーダンス測定結果 (A - c 地点, E 2)

表 3 各実験場における年間腐食量 (mm/year)

	埋設地点および方向					
	A-a	A-b	A-c	B	C鉛直	C水平
プラスチック	0.04	0.01	0.06	0.15	0.12	0.11
ジンクリッチ プライマー塗装	0.01	0	0.02	0.05	0.06	0.06

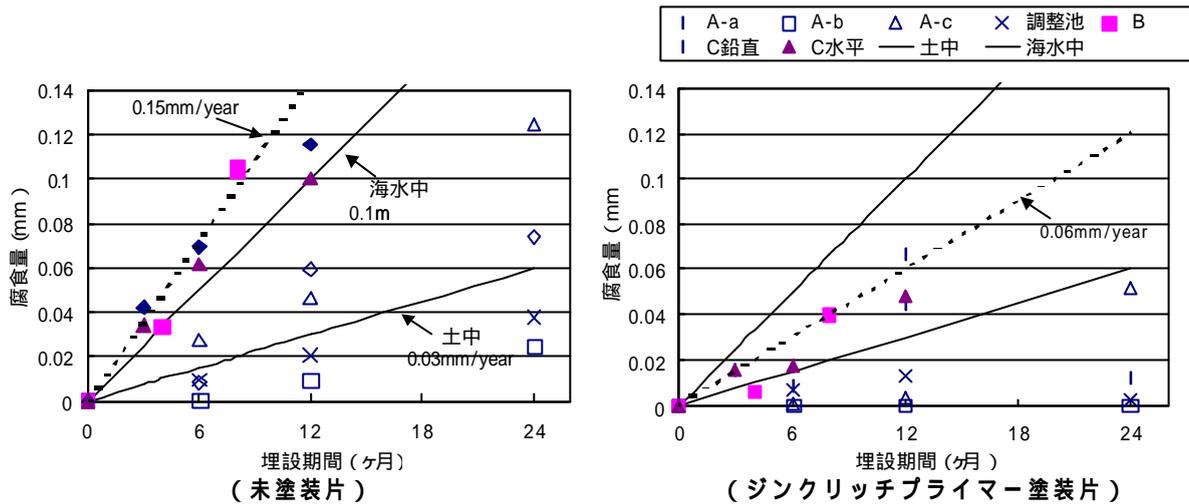


図6 各実験場における腐食量の経時変化

表4に試験片埋設地点の埋立廃棄物を採取し、環告13号法により溶出試験を行った結果を示す。これより、実験場Aの異なる地点に埋設した鋼板腐食量はpHが低いほど増加していることがわかった。また、焼却灰中に埋設した試験片の腐食量測定結果から、pH以外にも金属の不導体膜に侵入して皮膜を破壊することでさびの発生の原因となる塩化物イオンと、溶存酸素が低いと考えられるA実験場で腐食量が小さいことから、腐食反応には不可欠な溶存酸素が影響していると考えられる。

表4 試験片埋設環境(塩化物イオン濃度、pH)

	A実験場			B,C実験場
	A-a地点	A-b地点	A-c地点	焼却灰
Cl ⁻ (mg/l)	0	0	0	1495
pH	9.7	11.2	8.1	8.2

3. 腐食因子が鋼板に与える影響

3.1 実験方法

野外曝露実験における鋼板の腐食因子と考えられる、pH、塩化物イオン、溶存酸素、および焼却灰について条件を設定し、室内において浸漬腐食試験を行った。試験片には、野外曝露実験と同様の材質であるSS400に、プラスト処理を施した50×70×9(mm)の大きさの未塗装試験片を用いた。

試験水は図7のように調節した。塩化物イオン濃度の調節には塩化ナトリウムを、pHの調整は、各試験水の状況に合わせて行い、酸性側にはHNO₃、アルカリ側にはNaOHを用いた。

現在の埋立廃棄物は焼却灰中心であることから、本実験では、埋立地環境を焼却灰で代表させることとし、塩化物イオン濃度影響試験の試験水のpHは、焼却灰影響試験の試験水と同様になるよう調節した。また、pH影響試験の試験水の塩化物イオン濃度は、焼却灰影響試験の試験水と同様になるよう調節した。

試験は静置状態で行い、準好気状態にするため蓋を一日ごとに開けた結果、溶存酸素濃度は0~2mg/lであった。一方、曝気を行い所定の溶存酸素濃度(4~5mg/l)に調節し、溶存酸素による鋼板腐食の影響を調べた。試験水は性状が変化しないように、一月毎に換水した。

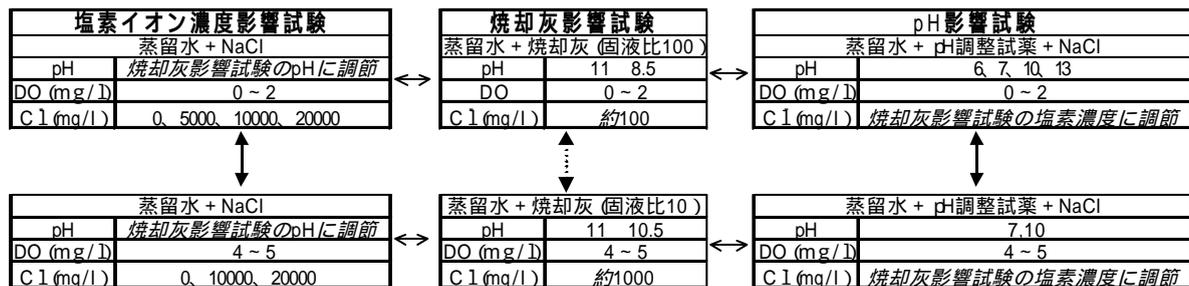


図7 試験水条件

図8に試験片保持装置を示す。溶存酸素量影響が高い系(4~5 mg/l)には、大気と触れる面をより大きくするため、溶存酸素が低い系(0~2 mg/l)に使用した装置(Aタイプ)の約10倍の大きさの装置(Bタイプ)を用いた。試験片の引き上げは当初3枚ずつ行っていたが、測定値にばらつきがなかったため、2枚ずつとした。

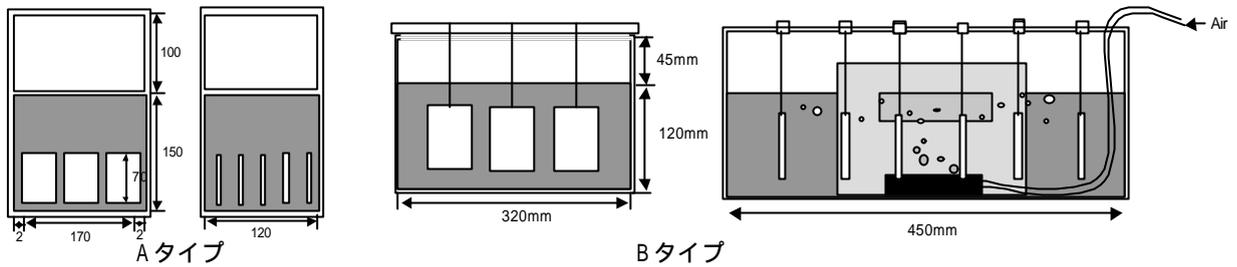


図8 試験装置

3.2 実験結果

図9に各pHにおける鋼板腐食量の変化を示す。溶存酸素濃度0~2 mg/lの場合、pHが高くなるにしたがって腐食量は減少している。これは、pH値の上昇とともに鋼表面に耐食性の良い不導体膜が形成され、鋼板の腐食は腐食が抑制されるためと考えられる⁴⁾。pH7、10の試験水において溶存酸素濃度が0~2 mg/lよりも溶存酸素濃度が4~5 mg/lの試験水中における鋼板腐食量が増加している。

また、図10に各塩化物イオン濃度における鋼板腐食量の変化を示す。溶存酸素濃度の0~2 mg/lにおいて、試験水中の塩化物イオン濃度が増加するにしたがって、鋼板腐食量は低下した。実験は、静置状態で行っていることから、溶液中に酸素がほとんど取り込まれない。しかし、腐食反応により溶液中の酸素の消費は進むため、溶液中は常に、酸素の供給不足状態となる。さらに、塩化物イオン濃度が高くなると酸素の溶解度が減少することから⁵⁾、試験水中の塩化物イオン濃度が増加するにしたがって、鋼板腐食量は低下すると考えられる。

溶存酸素濃度が高い場合は、塩化物イオン濃度が存在すると腐食量は増加していることから、鋼板腐食には、溶存酸素及び塩化物イオンが腐食に影響を与えることが明らかになった。

なお、焼却灰を含む試験水中と、近似する塩化物イオン濃度およびpHの試験水中の鋼板腐食量を比較した結果、ほぼ同程度の値であった。このことから焼却灰影響試験において焼却灰の溶出成分のうちpH、塩化物イオン以外の成分の鋼板腐食への影響がないことが確認された。

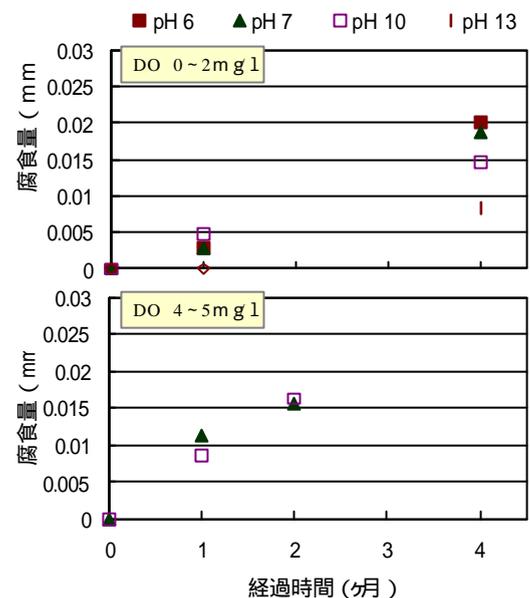


図9 pHによる腐食量の変化

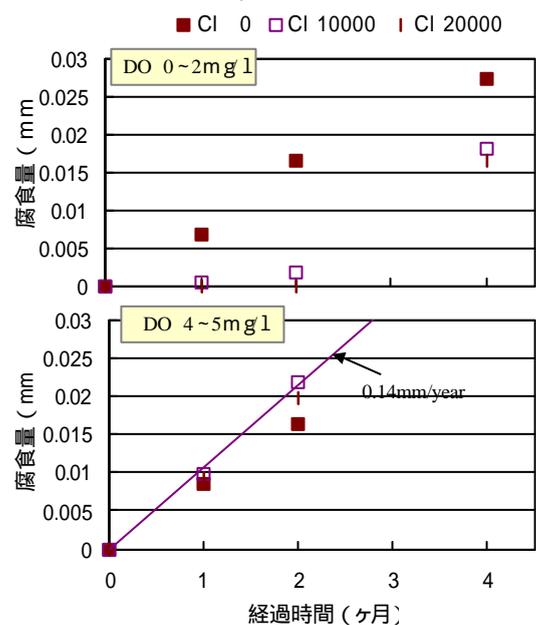


図10 塩化物イオンによる腐食量の変化

溶存酸素濃度が 4～5 mg/l、塩化物イオン濃度が 10000 mg/l の試験水中における鋼板の年間腐食量は最大で 0.14 mm/year であり、野外暴露実験の焼却灰中における鋼板腐食量と同程度であった。

4. 必要板厚の設定

以上の結果から、より安全側な鋼板の設計を考え、焼却灰中における未塗装片の年間腐食量を用いて遮水鋼板の必要板厚を決定した。

$$\begin{aligned} \text{必要板厚 } T &= t_1 + t_2 + t_3 \\ &= 2.3 + (0.03 + 0.15 \quad) \end{aligned}$$

$$\left(\begin{array}{l} t_1 : \text{構造上必要な板厚} = 2.3 \text{ mm} \\ t_2 (\text{外面}) : \text{土壌に対する腐食代} (0.03 \text{ mm}) \times \text{安定化年数} (X) \\ t_3 (\text{内面}) : (\text{埋立廃棄物に対する腐食代} (0.15 \text{ mm}) \times \text{安全係数} \quad) \times \text{安定化年数} (X) \end{array} \right)$$

なお、一般に最終処分場の安定化年数は 20 年から 30 年とされている。そこで $X = 30$ 、 $\quad = 1.5$ とした場合の必要板厚は、9.95mm となる。

5. 結論

- 1) 廃棄物中においても、塗装の防食性能が確認された。
- 2) 塗膜は劣化していなかったが、塗膜に傷がついた場合腐食が確認されたため、未塗装片の腐食量を求める必要がある。
- 3) 野外曝露実験および室内における浸漬試験の結果より、廃棄物中の未塗装片の最大腐食量は 0.15 mm/year 程度であると考えられる。
- 4) 鋼板の腐食には溶存酸素と塩化物イオンの影響が大きいと考えられる。
- 5) 鋼板の必要板厚は焼却灰中に埋設した未塗装片の最大腐食量を使用して算出した結果、処分場の安定化年数 30 年の場合 9.95 mm 程度であった。

今後、遮水鋼板システムの必要板厚をより安全で確実に設計するためには、処分場の安定化年数および腐食環境の調査が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 鋼板遮水システム研究会：鋼板遮水システム技術検討会報告書 - 設計・施工マニュアル(案) - (2001)
- 2) 鋼管杭協会：鋼管杭 - その設計と施工 -、p468 (1990)
- 3) 社団法人 日本橋梁建設協会：橋梁技術者のための塗装ガイドブック、p24
- 4) 三本木次貢治：鉄鋼工学講座 鉄鋼腐食科学、朝倉書店、p112 (1973)
- 5) 腐食防食協会：金属防食技術便覧、p552 (1977)