

オーバーパック溶接部の耐食性評価に関する研究  
(共同研究報告書)

2004年4月

核燃料サイクル開発機構  
財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

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)

原子力環境整備促進・資金管理センター

(Radioactive Waste Management Funding and Research Center)

2004

## オーバーパック溶接部の耐食性評価に関する研究 (共同研究報告書)

朝野英一\*、谷口直樹\*\*、川上進\*\*、油井三和\*\*

### 要 旨

オーバーパック溶接部の品質を確保し、オーバーパックの長期信頼性を向上させるうえで溶接部耐食性の確認が必要である。本研究では原環センター(RWMC)とサイクル機構(JNC)により、溶接部耐食性評価手法について検討を行った。

RWMCではオーバーパックの溶接技術と検査技術の開発を行っており、オーバーパックに適用可能な溶接技術についての情報を提供した。TIG溶接および電子ビーム溶接(EBW)がオーバーパックに適用可能な溶接方法として見通しが得られており、適切な溶接条件を確認するための試験の現状が示された。

JNCではオーバーパックの腐食挙動と腐食寿命に関する研究が行われており、処分環境における溶接材の腐食挙動に関する現状の情報が提供された。JNCにおける浸漬試験の結果、代表的な処分環境条件である還元性雰囲気において、EBWにより溶接された炭素鋼は母材と同等の腐食速度となったことが示された。

RWMCとJNCからの情報に基づいて溶接部耐食性に関する研究課題を抽出するとともに腐食試験概念を検討した。

---

\* (財)原子力環境整備促進・資金管理センター 事業環境整備研究プロジェクト  
\*\* 核燃料サイクル開発機構 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

JNC TY8400 2004-008  
April, 2004

## Study on the corrosion assessment of overpack welds (Document on Collaborative Study)

H. Asano\*, N. Taniguchi\*\*, S. Kawakami\*\* and M. Yui\*\*

### Abstract

It is necessary to understand the corrosion behavior of welds in overpack for ensuring the quality of welding, and improving the long term reliability of overpack. In this study, the method for evaluation of corrosion of welded joint was planned by Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC) and Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

RWMC has been developed the overpack welding techniques and the inspection techniques of welded joint. In this study, RWMC provided the information on current status of welding techniques for applying the overpacks. Electron Beam Welding (EBW) and Tungsten Inert Gas Welding (TIG) were prospected to be available for overpack and the results of the examinations to find adequate conditions for overpack welding were presented.

JNC has been studying the corrosion behavior and lifetime of overpack, and provided the information on corrosion of welded carbon steel under repository conditions. According to immersion tests by JNC, it was shown that corrosion rates of carbon steel welded by EBW were almost equal to those of base metal under anaerobic condition, which is representative condition in repository environment.

Based on the information provided by RWMC and JNC, the research subjects on the corrosion of welds were extracted and the concept of corrosion tests for overpack welds was given.

---

\* Advanced Waste Systems Research Project, Radioactive Waste Management Funding and Research Center

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

## 目 次

1	はじめに.....	1
2	溶接試験に関する情報の整理 .....	3
2.1	試験方法.....	3
2.2	試験結果.....	5
2.3	考察 .....	11
3	溶接部の耐食性に関する予備的検討 .....	12
3.1	試験方法.....	12
3.2	試験結果と考察.....	12
4	腐食試験計画の検討.....	19
5	おわりに.....	23
	参考文献.....	24

## 図目次

図 2.2.3-1 TIG 溶接試験供試体(図中寸法の単位は mm) .....	10
図 2.2.3-2 EBW 溶接試験供試体 .....	11
図 3.1 溶接材料の外観および形状・寸法 .....	15
図 3.2 緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験方法の模式図 .....	16
図 3.3 浸漬後試験片の外観 .....	17
図 3.4 溶接部付き試験片の腐食深さ分布 .....	17
図 3.5 還元性雰囲気下、緩衝材中における炭素鋼の腐食速度の経時変化 .....	18
図 3.6 還元性雰囲気下、緩衝材中における炭素鋼の平均腐食深さの経時変化 .....	18
図 4.1 炭素鋼オーバーパックの腐食シナリオの概略と評価項目 .....	22

## 表目次

表 2.2.1-1 母材(SF340)の化学成分値 .....	5
表 2.2.1-2 溶接材料(TGS-50)の化学成分値 .....	5
表 2.2.1-3 板厚 50mm 材に対する試験条件 .....	5
表 2.2.1-4 最適開先形状選定試験(板厚 50mm 材)の溶接施工条件 .....	6
表 2.2.1-5 開先深さ 100mm の溶接条件 .....	6
表 2.2.1-6 開先深さ 150mm の溶接条件 .....	6
表 2.2.1-7 開先深さ 190mm の溶接条件 .....	7
表 2.2.1-8 残留応力測定試験片の溶接条件 .....	7
表 2.2.2-1 EBW 供試母材 .....	8
表 2.2.2-2 EBW 溶接条件 .....	8
表 2.2.3-1 腐食試験に提供できる供試体 .....	9
表 3.1 炭素鋼試験片の化学組成 .....	14
表 3.2 溶接条件 .....	14
表 4.1 オーバーパック周囲の環境条件 .....	21

## 1 はじめに

### 1.1 研究の背景

第2次取りまとめ（サイクル機構、1999）では、オーバーパックの製作・施工に関する検討として、アーク溶接、高エネルギービーム溶接について封入方法としての適用性に関する比較評価を行った上で、今後の課題として「溶接部やその熱影響部に対する腐食試験、機械試験および残留応力の評価などを実施して、溶接部に要求される品質を定量化する必要がある」としている。

原環センターでは平成12年度より、技術の適用性、適用条件、適用範囲を定量的に調査し幅広い技術メニューを整備することを目指して「遠隔操作技術高度化調査(H12～H16年度を予定)」を開始した。その中で、「遠隔溶接・検査技術の開発」に焦点を当て、この技術メニュー整備の一環として各種の溶接法を用いたオーバーパックの溶接試験を実施している。

本遠隔操作技術高度化調査／遠隔溶接・検査技術の開発に関わる平成14年度までの活動を通して、オーバーパック溶接技術の適用性を評価するためには、その溶接方法、溶接条件でなされた溶接部の耐食性を評価する必要があることが明らかとなった。

そこで、サイクル機構と原環センターがオーバーパック溶接部の腐食評価を協力して実施することで、第2次取りまとめで指摘されている課題に答えると共に、その結果を持って溶接手法、溶接条件の妥当性を説明することで溶接技術に関する技術メニューの整備に資することを目指すものとした。

### 1.2 研究目的

オーバーパック腐食寿命評価の信頼性向上の観点から、母材と同様にオーバーパック溶接部の腐食挙動評価手法を確立し、腐食挙動を確認することが必要である。また、オーバーパックの溶接技術開発の観点から、溶接部の耐食性を確認し、溶接技術の妥当性を提示するとも必要となっている。本共同研究ではオーバーパックの溶接・検査技術開発に関する情報とオーバーパック溶接部の腐食研究に関する情報を整備、共有するとともに溶接部の耐食性、長期健全性評価のための試験方法を提案することを目的とする。

### 1.3 研究内容

実際のオーバーパックに適用可能な溶接方法、溶接条件に対応した溶接部腐食試験のための試験計画策定を行う。そのため、原環センターでは現在実施中の溶接試験に関する情報を提供する。サイクル機構は既存の溶接試料（サイクル機構で作成したもの）を用いた腐食試験に関する情報を提供する。なお今年度策定された試験計画に基づく試験の実施は次年度以降とする。

#### (1) 試験計画の策定

サイクル機構と原環センター両機関によって提供された情報に基づいて、オーバーパックに適用可能な技術として見出された溶接方法、溶接条件が処分環境での長期耐食性に関して十分な品質を有するかどうかを評価のための試験項目、試験手法、試験条件などを検討する。また、これまでの研究経緯、残留応力による応力腐食割れなどに関する問題点

を整理し、両機関共同で試験計画を策定する。

(2) 溶接試験に関する情報提供

原環センターで行う TIG 溶接、EBW 溶接、MAG 溶接などの溶接試験に関して、実際のオーバーパックの溶接に適用可能な条件、溶接部の検査手法、残留応力、溶接部基礎物性などを（1）の試験計画の策定に必要な情報として提供する。

(3) 既存試料を用いた腐食試験

サイクル機構で行う既存の溶接試験片（主に電子ビーム溶接）を用いた腐食試験と評価に関して、（1）の試験計画の策定に必要な情報として提供する。

## 2 溶接試験に関する情報の整理

TIG、及びEBWの溶接条件、継手性能、残留応力評価の詳細については、原環センターによりまとめられている（原環センター、2002；原環センター、2003；原環センター、2004）。以下に概要を示す。

### 2.1 試験方法

原環センターの「遠隔操作技術高度化調査」ではアーク溶接、高エネルギービーム溶接のオーバーパック溶接への適用性評価を行っている。平成15年度までの溶接技術要素試験の実施状況を表3-1に示す。これまでアーク溶接についてはTIG、MAG、高エネルギービーム溶接についてはEBW(電子ビーム溶接)、LBW(レーザービーム溶接)の溶接試験に着手し、H15年度時点ではTIG、及びEBWの溶接条件確認、施工性評価等が終了している。

#### 2.1.1 TIG

オーバーパックの全肉厚溶接のため、開先深さ190mmを最終目標として横向き姿勢による溶接試験を行った。まず、板厚50mmの試験体を用いて最適施工条件(溶接条件、開先形状)を確認し、開先深さを100mm、150mm、190mmと段階的に深くし、施工性、及び継手性能を確認すると共に、継手性能試験を実施した。また、開先深さ190mmの狭開先に対応する溶接トーチの改良を行った。さらに溶接残留応力の測定、及び解析を実施した。

##### (1)供試体、及び溶接材料

供試体はSF340A(JIS G3201)を用いた。溶接材料は、TGS-50(株神戸製鋼所製、JIS Z3316-YGT50、AWS A5.18 ER70S-G)、径：φ1.2mmを用いた。

##### (2)溶接装置 (SEDAR-TIG<sup>®</sup> : Super Energetic Dual Arc - TIG)

1本の溶接トーチに2本の電極を組込み、それぞれの電極に溶接電源を接続する新しいTIG溶接装置を用いた。本溶接法の特徴は、1つのトーチから同時に2つのアークを発生させることで、アーク力を抑えながら大電流溶接を可能にしたことであり、TIG溶接法の特徴である高品質をそのままに、高能率化を可能とする溶接装置である。

##### (3)溶接試験

###### a. 開先深さ50mmでの溶接条件確認

板厚50mm、開先底部のルート形状を5Rおよび6Rの2種類、さらに開先角度を片側2°(両側4°)と片側4°(両側8°)の2種類、合計4種類の開先形状を持つ供試体を用いた溶接試験を行い、その施工性から最適な形状を選定した。また、任意の開先幅(ビード幅)に対して通常の溶接、及びウィービングを付加した場合の施工性を検討し、1パス溶接可能最大開先幅を確認した。

###### b. 開先深さ100mm

上記(3)aにて選定した基本溶接施工条件をベースに、開先深さ100mmにおける最適施工条件を確認した。供試体はオーバーパックの形状を模擬して円柱状とした。

c. 開先深さ 150mm

開先深さ 100mm と同様の円柱形状の供試体とした。

d. 開先深さ 190mm

開先深さ 150mm と同様の円柱形状の供試体とした。

e. 繰手性能試験

溶接施工した開先深さ 150mm、及び 190mm の供試体について、断面観察として X 線透過試験(RT)、および継手性能試験として断面マクロ観察、断面ミクロ観察、断面硬さ試験、継手引張試験、側曲げ試験、シャルピー衝撃試験を実施した。

f. 残留応力の評価

板厚 50mm の供試体について溶接時の溶接線近傍の温度変化、及び残留応力を測定した。この測定値を基に任意のオーバーパック蓋形状(190mm 貫通溶接)について温度分布解析、及び応力解析を実施した。

## 2. 1. 2 EBW

オーバーパックの全肉厚溶接への適用性評価のため、下向き、非貫通 80mm の部分溶け込み溶接と、横向き、貫通 100mm、及び 190mm のそれぞれについて最適な施工条件を確認し、施工性を確認した。また非貫通 80mm の溶接試験片について継手性能試験を実施すると共に、溶接残留応力の測定、及び解析を実施した。

### (1) 供試体、及び溶接材料

供試体は SF340A(JIS G3201) を用いた。高温割れ対策として C、P、S の濃度を、またガス欠陥対策として N、O の濃度を調整した。

### (2) 溶接装置

高真空型電子ビーム溶接装置(定格出力 100kW、ビーム加速電圧 100kV、定格電流 1A、真圧度  $5 \times 10^{-4}$  torr)を用いた。

### (3) 溶接試験

#### a. 80mm、部分溶け込み試験

下向き溶接において、溶接速度、溶接電流、ビームオシレーション幅／方向等をパラメータとして施工条件を確認した。

#### b. 100mm、貫通溶接

部分円筒、及び円筒供試体を用いて施工条件を確認した。始終端部の処理(溶融金属の垂れ落ち、及びビーム先端でのスパイク欠陥)条件把握に注力した。

## c. 190mm、貫通溶接

部分円筒、及び円筒供試体を用いて施工条件を確認した。始終端部の処理(溶融金属の垂れ落ち、及びビーム先端でのスパイク欠陥)条件把握に注力した。

## d. 継手性能試験

80mm、部分溶け込み供試体について、断面観察としてX線透過試験(RT)、および継手性能試験として断面マクロ観察、断面ミクロ観察、断面硬さ試験、継手引張試験、側曲げ試験、シャルピー衝撃試験を実施した。

## f. 残留応力の評価

板厚80mm貫通溶接供試体について溶接時の溶接線近傍の温度変化、及び残留応力を測定した。この測定値を基に任意のオーバーパック蓋形状(80mm部分溶け込み、及び190mm貫通溶接)について温度分布解析、及び応力解析を実施した。

## 2.2 試験結果

## 2.2.1 TIG

## (1) 溶接条件

表 2.2.1-1 母材(SF340)の化学成分値

材質	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ceq
規格値	≤0.6	0.15-0.50	0.30-1.20	≤0.03	≤0.03	—	—	—	—	≤0.30
SF340A	0.16	0.26	0.52	0.007	0.002	0.08	0.03	0.06	0.01	0.283

表 2.2.1-2 溶接材料(TGS-50)の化学成分値

材質	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	Zr
TGS-50	0.10	0.73	1.40	0.011	0.014	0.24	0.03	—	0.01	<0.01	<0.01	<0.01

表 2.2.1-3 板厚50mm材に対する試験条件

検討項目	パラメータ	試験条件	備考
開先形状	ルート形状	5R、6R	—
	開先角度	2°、4°	—
1パス溶接可能最大開先幅	開先幅	14、16、18、20、22、24	—
	ウェーピング	なし、あり(1、2、3mm)	—

表 2.2.1-4 最適開先形状選定試験(板厚 50mm 材)の溶接施工条件

開先形 状	電流		電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	ワイヤ供給量 (m/min)	パス数 (パス)				
	(A)									
	ベース	ピーク								
5R4°	50~300	150~400	10.5	8~13	1~4	14				
5R8°	50~300	150~400	10.5~ 11.5	8~13	1~4	13				
6R4°	50~300	150~400	10.2~11	8~13	1~4	14				
6R8°	50~300	150~400	10.5~11	8~13	1~4	14				

表 2.2.1-5 開先深さ 100mm の溶接条件

開先形狀	電流		電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	ワイヤ供給 量 (m/min)	層數 (層)	パス數 (パス)					
	(A)											
	ベース	ピーク										
初層	100~250	200~350	11.5	7.3	2	1	1					
中間層	200~300	300~400	12.5	7.6~9.3	3.5~4	2~23	2~23					
化粧盛り	50~200	150~300	11.5	8.8~ 11.8	4	24	24~26					

表 2.2.1-6 開先深さ 150mm の溶接条件

開先形狀	電流		電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	ワイヤ供給 量 (m/min)	層數 (層)	パス數 (パス)					
	(A)											
	ベース	ピーク										
初層	100~250	200~350	12	7.6	2	1	1					
中間層	200~300	300~400	12.5	6.6~9.3	3~4	2~30	2~42					
化粧盛り	100~300	200~400	11.5	11	2~3	31	43~45					

表 2.2.1-7 開先深さ 190mm の溶接条件

開先形状	電流		電圧	溶接速度	ワイヤ供給量	層数	パス数
	(A)		(V)	(cm/min)	(m/min)	(層)	(パス)
	ベース	ピーク					
初層	100～250	200～350	12.5	6.4	2	1	1
中間層	150～300	250～400	11.5～13.5	5.7～11.7	2.5～3.5	2～37	2～51
化粧盛り	100～250	200～350	11.0～11.5	9.3～9.9	2～3.5	38	52～54

表 2.2.1-8 残留応力測定試験片の溶接条件

開先形状	電流		電圧	溶接速度	ワイヤ供給量	パス数
	(A)		(V)	(cm/min)	(m/min)	(パス)
	ベース	ピーク				
5R4°	150～220	250～220	10.5～11.0	6.3～8.7	2～2.3	12

## (2) 継手性能試験

溶接深さ 150 mm 供試体の溶接部に対する継手性能試験結果は、「電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令」（平成 12 年通商産業省省令第 123 号：旧第 81 号）に基づき設定した判定基準を全て合格した。また溶接深さ 190mm の供試体についても同様の試験結果を得た。

## (3) 残留応力評価

板厚 50mm の供試体の溶接部近傍の残留応力測定では、溶接部上面における周方向成分には引張残留応力、半径方向成分には圧縮残留応力が発生していた。一方、溶接部下面では周方向、半径方向成分ともに引張残留応力が発生していた。また、溶接部断面では、周方向成分には引張残留応力が発生している一方、半径方向成分には引張及び圧縮残留応力が発生していた。引張応力の最大値は供試体の降伏点を上回る値を示した。

また、溶接時温度分布測定、及び残留応力測定に基づく板厚 190mm 溶接時の応力解析では、溶接部近傍の応力分布は基本的には、周方向で引張り、径方向で圧縮となることが確かめられた。さらに溶接後の溶接部の加熱、急冷により残留応力が低減できることを確かめた。

## 2.2.2 EBW

## (1) 溶接条件

表 2.2.2-1 EBW 供試母材

	化学成分 (mass%)								機械的性質					備考
	C	Si	Mn	P	S	P+S	N	O	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	絞り %	硬さ HB	
									≥ 175	340～ 440	≥ 27	≥ 50	≥ 90	
規格値	≤ 0.60 ≤ 0.20*	0.15 ～ 0.50	0.30 ～ 1.20	≤ 0.030	≤ 0.035	≤ 0.030*	≤ 0.0070*	≤ 0.0020*						* 本調査における追加仕様
厚板材	0.12	0.25	0.65	0.012	0.004	0.016	0.0039	0.0019	274	406	37	74	149	熱処理条件 900°C * 10.5h AC + 600°C * 5h FC
部分円筒材	0.12	0.25	0.65	0.012	0.004	0.016	0.0039	0.0019	239	383	39	75	134	

AC : 空冷      FC : 炉冷

表 2.2.2-2 EBW溶接条件

溶接条件		80mm部分 溶け込み	100mm 貫通	190mm 貫通	190mm 貫通 (開先付き)	80mm 残留応力測定
姿勢		下向き	横向き	横向き	横向き	横向き
溶接電流 (mA)		350	600	650	650	350
加速電圧 (kV)		100	100	100	100	100
溶接速度 (mm/min)		200	250	100	100	200
加工距離 (mm)		400	400	400	400	400
焦点距離 (mm)		660	800	850	850	550
オシレート幅 (mm) ・溶接方向						
	1	1	2	2	—	
・垂直方向	1	0.5	—	—	—	
オシレート回数 (回/sec)		500	500	500	500	0
スロープアップ時間 (sec)		20	20	0	0	20
スロープダウン時間 (sec)		30	20～60	20～60	20、40	30

## (2) 継手性能試験

80mm部分溶け込み供試体の溶接部に対する継手性能試験結果は、「電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令」（平成12年通商産業省省令第123号：旧第81号）に基づき設定した判定基準を全て合格した。

## (3) 残留応力評価

板厚80mm貫通溶接供試体の残留応力測定では、溶接部表面における周方向成分は引張、半径方向は圧縮の残留応力が認められた。また溶接線を挟む溶接部近傍では周方向、半径方向とも引張応力が認められた。引張応力の最大値は供試体の降伏点付近を上回る値を示した。

また、溶接時温度分布測定、及び残留応力測定に基づく80mm部分溶け込み(下向き)、及び190mm貫通(横向き)溶接時の応力解析では、溶接部近傍の応力分布は基本的には、周方向で引張り、径方向で圧縮となることが確かめられた。

## 2.2.3 腐食試験に提供できる供試体

表2.2.3-1 腐食試験に提供できる供試体

溶接方法	供試体	形状、寸法	個数	備考
TIG	開先深さ100mm試験体 (円柱形)	マクロ観察用に分割	1 体 分	全面に発錆あり 図2.2.3-1(a)参照
	開先深さ150mm試験体 (円柱形)	約90° 分	1 個	全面に発錆あり 図2.2.3-1(b)参照
	開先深さ190mm試験体 (円柱形)	・約40° 分 ・詳細RT用試験体	2 個 1 個	2.2.3-1(c)参照 図2.2.3-1(d)
EBW	80mm部分溶け込み	—	—	代替品 240L*148*93 t 条件だしテストの残材 図2.2.3-2(a)参照
	100mm貫通	φ 660*100 t *300 h 円周継手	1 個	図2.2.3-1(b)参照
	190mm貫通	—	—	残材なし
	190mm貫通(開先付き)	160*190*78 h	1 個	図2.2.3-2(c)参照
	80mm貫通 (残留応力測定)	≈80° 相当分	1 個	図2.2.3-2(d)参照

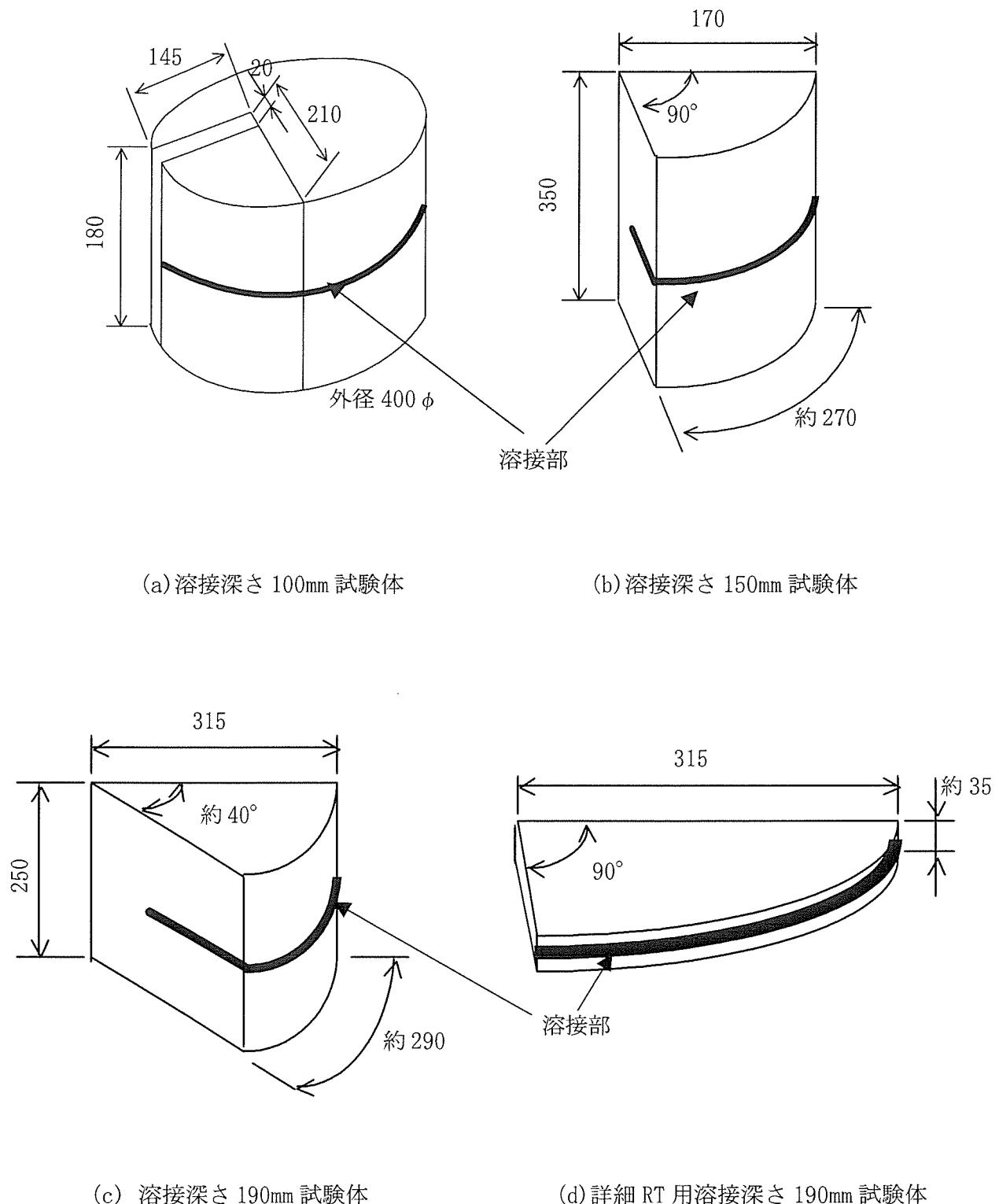


図 2.2.3-1 TIG 溶接試験供試体(図中寸法の単位は mm)

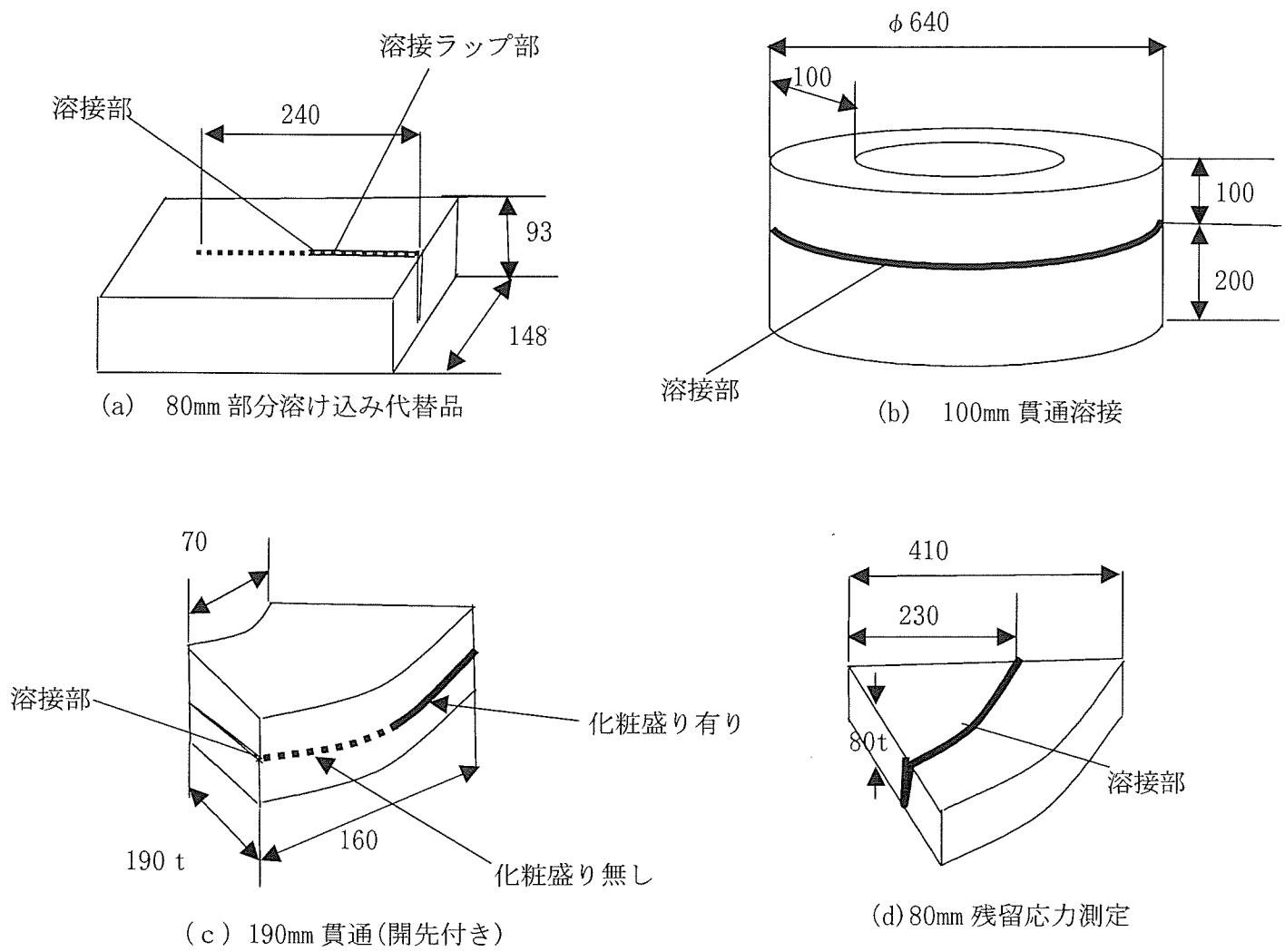


図2.2.3-2 EBW溶接試験供試体

### 2.3 考察

耐食性を含めたオーバーパックの溶接部の品質については次の点に留意する必要がある。

(1) 溶接部には入熱、組織変化、残留応力などの影響があることから、その腐食挙動については、母材と溶接金属との間の合金成分の差、水素に起因する割れ、あるいは応力腐食割れなどが懸念される。

(2) 溶接部の耐食性に影響を及ぼすと考えられる項目として以下のものが考えられる。

- ・金属組織(含、結晶粒サイズ)
- ・化学成分
- ・硬さ
- ・残留応力
- ・熱処理の有無
- ・ピーニングの有無
- ・表面状態(きず、粗さ、清浄度、as weld、あるいは機械加工)

### 3 溶接部の耐食性に関する予備的検討

サイクル機構にて作成したEBWによる溶接材より試験片を切り出し、還元性雰囲気における緩衝材中の浸漬試験を行い、母材と比較した。実験の詳細は谷口ほか（2003）に示す。

#### 3.1 試験方法

##### (1) 試験片

溶接材の化学成分を表3.1に、溶接条件を表3.2に示す。また、溶接材の外観および形状・寸法を図3.1に示す。本試料は両面より溶接したものであり、溶け込み深さは35～38mmであった。浸透探傷試験、超音波探傷試験、放射線透過試験による検査の結果、欠陥は認められなかった。この試験体より中央部に溶接部を含むように $30 \times 30 \times 2\text{mm}$ に切り出した。試験片表面はエメリー#800により仕上げた。また、アセトンにより脱脂した。溶接部を含まない母材からも同一形状の試験片を切り出した。

##### (2) 試験溶液、緩衝材

試験溶液として人工海水を用いた。その組成を表3.2に示す。また、緩衝材にはベントナイト（クニミネ工業製クニゲルV1®）にケイ砂を30%混合したものを用いた。ケイ砂は3号ケイ砂と5号ケイ砂を1:1で混合したものを用いた。緩衝材の乾燥密度は $1.6\text{g/cm}^3$ とした。試験温度は $80^\circ\text{C}$ とした。

##### (3) 浸漬期間

浸漬期間は1年、3年、5年とした。本稿では3年までの試験結果を報告する。5年の試験は浸漬継続中である。

##### (4) 実験手順

試験前試験片の重量を測定後、試験片を緩衝材中に図3.2に示すようにチタンカラム内に埋め込んだのち、真空引きと窒素ガス置換を3回以上繰り返した。更に24時間以上真空中に静置したのち、窒素置換し、酸素ガス濃度 $1\text{ppm}$ 以下のグローブボックス中に搬入した。試験溶液についてもグローブボックス内の窒素ガスを吹き込み脱気した。次に試験溶液とチタンカラムを $500\text{ml}$ のテフロン製容器に入れて蓋を閉め、グローブボックスの恒温槽内（ $80^\circ\text{C}$ に設定）に置いた。

所定期間経過後にカラムを取り出し、解体して試験片を取り出した。試験片の腐食生成物はカソード分極下（ $10\text{mA/cm}^2$ ）、10%クエン酸水素2アンモニウム水溶液中で除去した。次に試験片を蒸留水で洗浄、乾燥後に重量を測定した。試験前の重量との差から重量減少量を求め、平均腐食速度、深さを算出した。溶接試験片については溶接部付近の腐食深さ分布をレーザープローブ式の形状測定装置により測定した。

#### 3.2 試験結果と考察

試験後および腐食生成物除去後の試験片表面の外観を図3.3に示す。母材、溶接材とともに黒色の皮膜が形成されており、試験片に密着していた。この腐食生成物は同一条件での炭素

鋼 (SM400B) 試験片の XRD による分析結果から、 $\text{FeCO}_3$  が含まれると考えられる。外観上は溶接材、母材ともに均一な全面腐食が観察された。次に溶接材の溶接部近傍における腐食深さ分布を図 3.4 に示す。溶着部でやや腐食が抑制されており、熱影響部は母材と同程度の腐食を受けていた。このように溶接部付近でわずかに凹凸はあったが、顕著な腐食局在化の形跡は観察されなかった。次に平均腐食速度の経時変化を図 3.5 に示す。平均腐食速度は経時に低下して 3 年経過後は  $7 \mu\text{m}/\text{y}$  以下の値となり、溶接の有無による違いは観察されなかった。この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と考えられる。そこで図 3.6 に示すように、平均腐食深さの変化より、腐食速度を見積もった。浸漬 1 年までは溶接の有無に関わらず  $18 \mu\text{m}/\text{y}$  の速度であるが、1 年以降は急激に腐食の進展が抑制され、1~3 年の 2 年間の腐食速度はいずれも  $1 \mu\text{m}/\text{y}$  以下となった。以上のように、本試験の範囲では溶接 (EBW) による腐食への影響は認められなかった。和田ほか (2002) も MAG 溶接された試料について還元性雰囲気での腐食挙動およびアノード分極挙動を調査し、溶接材と母材が同等の腐食特性をもつと報告している。また、Marsh et al (1988) は地下水の飽和した花崗岩およびベントナイト中で錆鋼、鍛鋼の違いや溶接 (電子ビーム) による影響を調査している。その結果、材質や溶接によって電位や腐食速度がやや異なることを示しているが、顕著な違いは認められていない。以上のことから、適切な溶接が行われれば、還元性雰囲気において溶接部は母材と同等の耐食性を有するものと考えられる。

表 3.1 炭素鋼試験片の化学組成

材料	C	Mn	Si	S	P
SM400B (JIS G3202)	0.13	0.69	0.19	0.007	0.011
SFVC1 (JIS G.3106)	0.19	0.91	0.18	0.007	0.024

表 3.2 溶接条件

溶接姿勢	溶接電流	溶接電圧	溶接速度	真空度
下向き	140mA	70kV	200mm/min	$2.2 \times 10^{-4}$ Torr

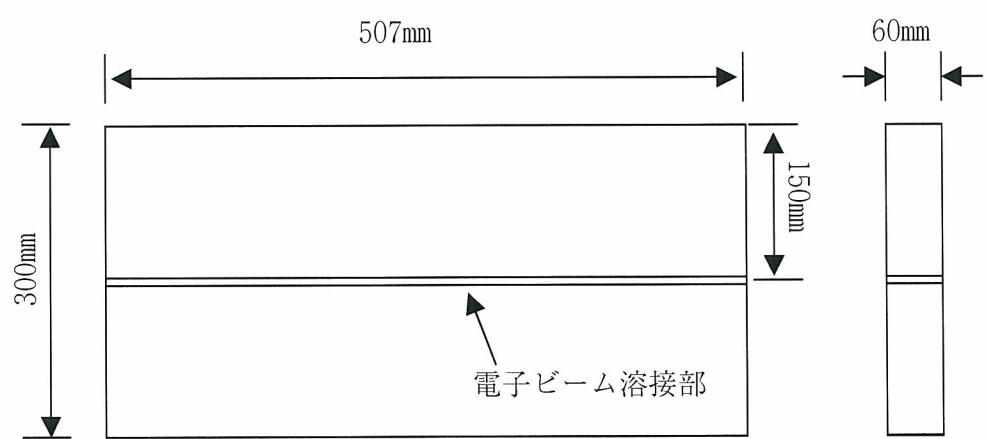
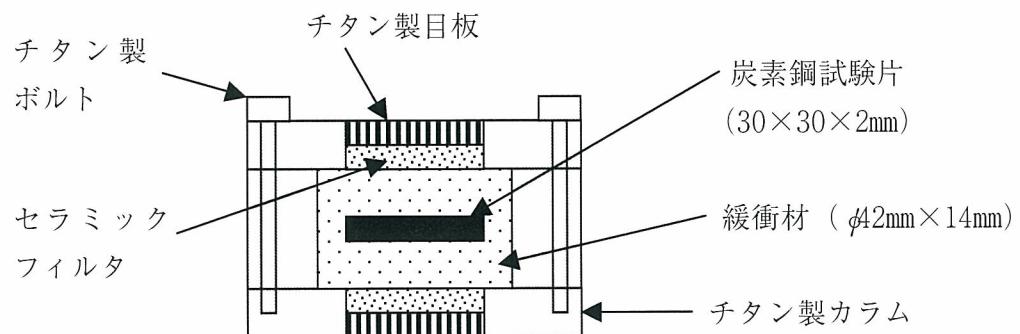


図 3.1 溶接材料の外観および形状・寸法



試験カラムの模式図

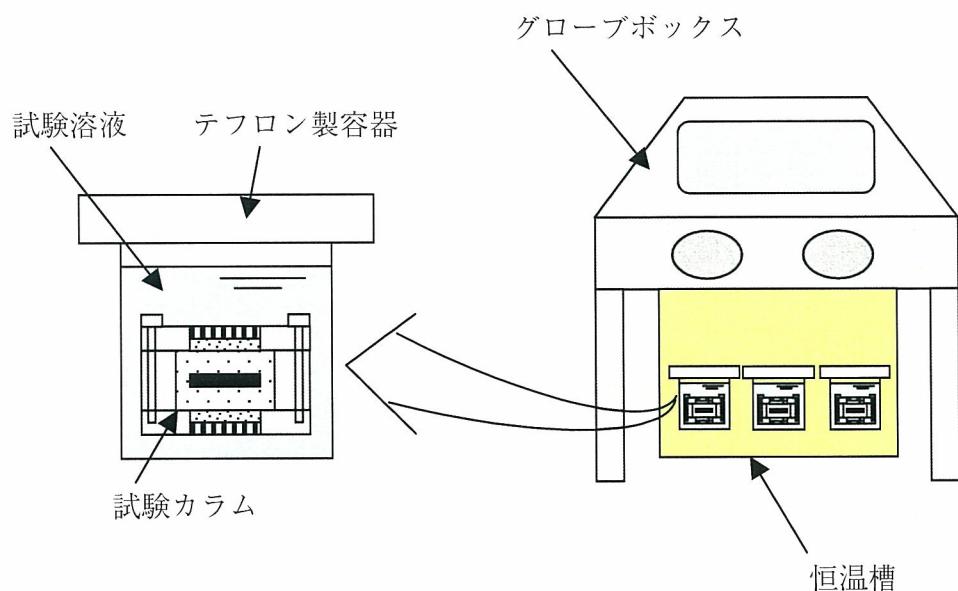


図 3.2 緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験方法の模式図

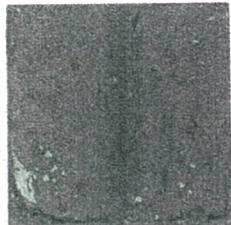
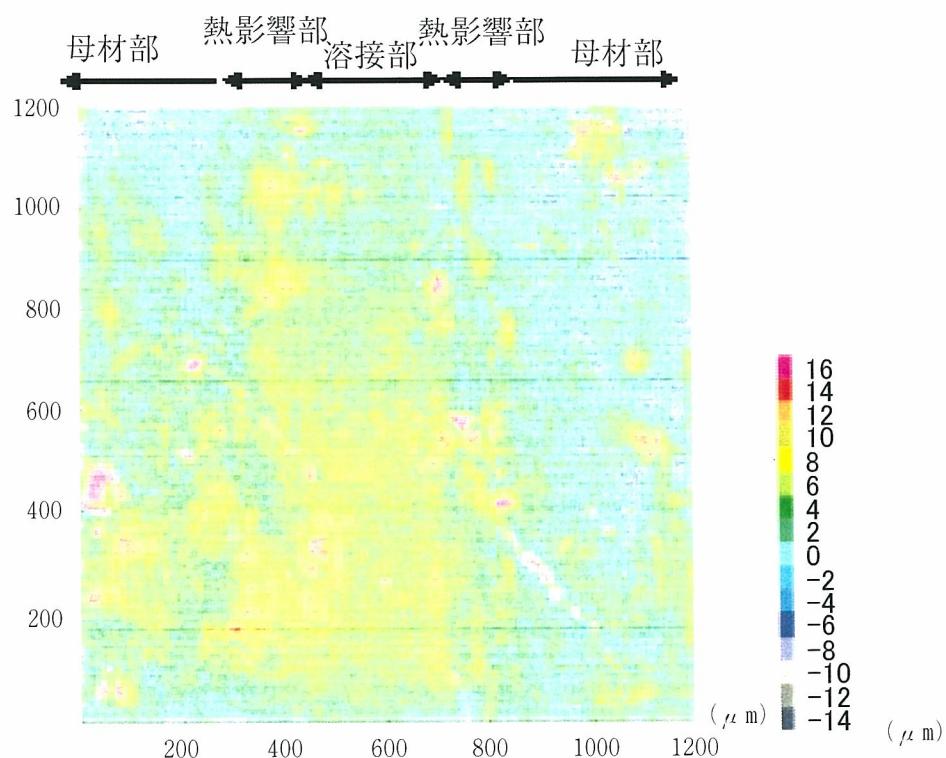
試験番号、条件	取り出し後	脱スケール後
材質：SFVC1（母材） 溶液：人工海水 温度：80°C 緩衝材：クニゲルV1+ケイ砂 30%-1.6g/cm <sup>3</sup> 期間：3年		
材質：SFVC1（溶接材） 溶液：人工海水 温度：80°C 緩衝材：クニゲルV1+ケイ砂 30%-1.6g/cm <sup>3</sup> 期間：3年		 ↑ 溶接部

図 3.3 浸漬後試験片の外観

図 3.4 溶接部付き試験片の腐食深さ分布  
(中央付近 12×12mm の領域)

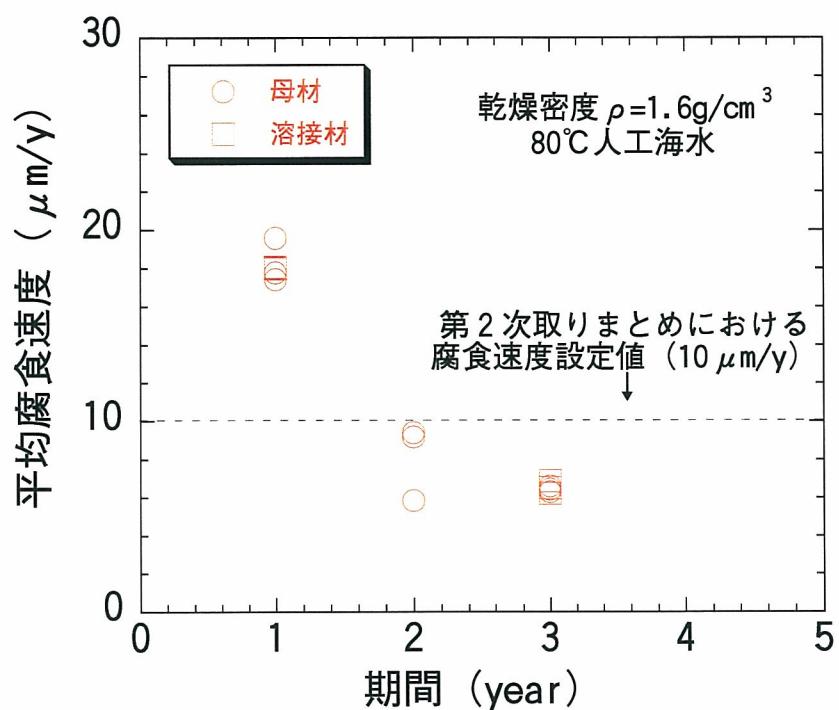


図3.5 還元性雰囲気下、緩衝材中における炭素鋼の腐食速度の経時変化

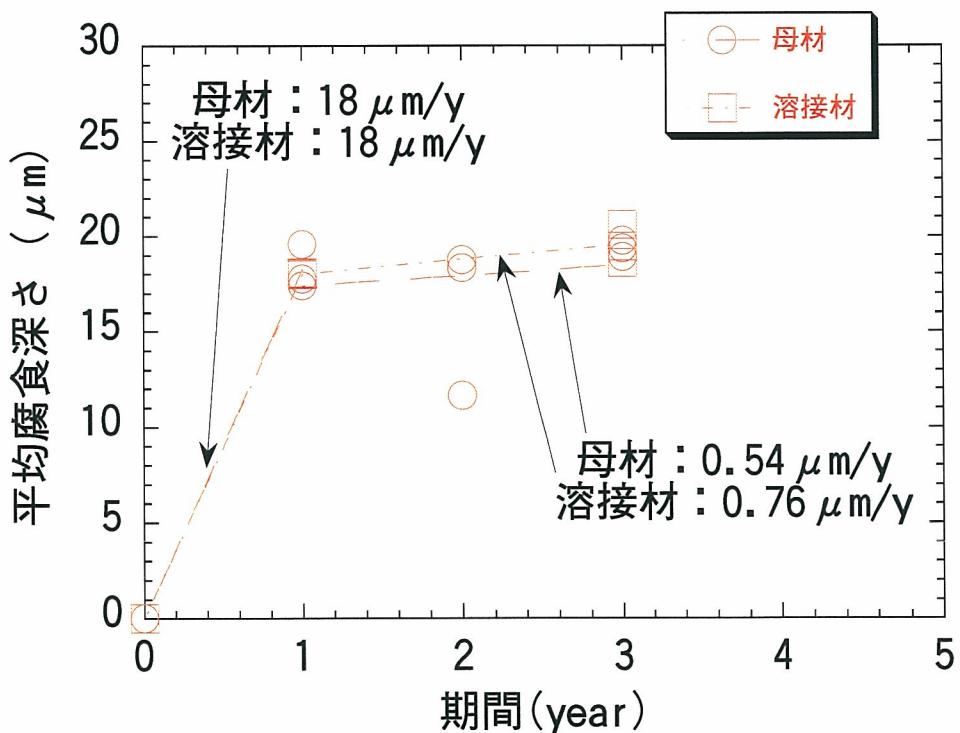


図3.6 還元性雰囲気下、緩衝材中における炭素鋼の  
平均腐食深さの経時変化

#### 4 腐食試験計画の検討

##### 4.1 オーバーパックの腐食シナリオと評価項目

第3章ではオーバーパックの置かれる代表的な環境である還元性雰囲気での全面腐食挙動についてEBWによる溶接材を対象に予備的な検討を行い、母材と同等の耐食性を有することを確認した。一方、オーバーパック周囲の環境は埋設後から変化し、それに伴って腐食挙動も変化すると推定される。現時点で推定されるオーバーパック周辺環境とその変化を表4.1に示す。また、第2次取りまとめにおいて検討されたオーバーパックの腐食シナリオを簡略化したものを図4.1に示す。図中には評価すべき課題も示した。これらの課題については第2次取りまとめにおいて網羅的に評価が行われているが、母材に関する検討が主であり、溶接部についても以下の事項を評価し、母材との比較をする必要がある。

- (1) 不動態化挙動と腐食形態
- (2) 酸化性雰囲気での全面腐食、局部腐食（孔食・すきま腐食）進展挙動
- (3) 応力腐食割れ感受性（水素脆化を含む）
- (4) 還元性雰囲気における全面腐食進展挙動

##### 4.2 供試材料

第2章表2.2.3-1に示す試験体から試験片を切り出し、試験に用いる。応力腐食割れの試験では、応力分布を考慮し、引っ張り方向の応力に着目して試験片を切り出す。ただし、同一の試験体で下記に示す試験すべてを実施することは困難と考えられることから、各試験体における試験の種類などは別途検討する。

##### 4.3 試験の概要

###### (1) 不動態化挙動と腐食形態評価

母材および溶接材から試験片を切り出し、アノード分極測定を行い、分極曲線が活性溶解型か不動態型かを調べる。不動態型の場合には皮膜破壊に伴う電流値の上昇の観察される電位を求める。試験溶液として炭素鋼の不動態化を促進する炭酸塩を含む水溶液を用い、濃度は地下水中濃度上限の0.1M程度とする。実験は溶液単独系および緩衝材中で行う。

###### (2) 酸化性雰囲気での全面腐食、孔食・すきま腐食進展挙動

母材および溶接材から試験片を切り出し、大気吹き込み下で浸漬試験を行う。試験片には人工すきまを付与する。全面腐食型の試験溶液として、中性の海水系溶液、局部腐食型の試験溶液としてアルカリ性炭酸塩-塩化物水溶液を用いる。試験期間終了後、試験片を取り出し、腐食減量、腐食深さ分布を測定する。

###### (3) 応力腐食割れ感受性

母材および溶接材から引っ張り試験片を切り出し、定歪速度試験（SSRT）を行う。最大応力、最大歪みなど評価するとともに、試験片の破面観察、断面組織観察などにより、亀裂発

生の有無を調べる。炭素鋼が応力腐食割れを生じる代表的な環境である炭酸塩環境 (Beavers et al., 1987) を想定し、試験溶液として、炭酸塩-塩化物水溶液を用い、活性態—不動態遷移域での電位条件、局部腐食生起領域での電位条件に設定する。

水素脆化については還元性雰囲気に試験片を浸漬させ、鋼中の吸収水素量を測定する。測定方法として、電気化学的水素透過法、昇温による抽出法などが挙げられる(櫛田、2000)。また、水素脆化感受性は強度が高いほど発生しやすいと言われており(椿野・西村、2000)、溶接部付近の硬さの測定も行う。水素濃度と強度、割れの関係は経験的に整理されており(椿野・西村、2000)、このようなデータを用いて割れの可能性を評価する。

#### (4) 還元性雰囲気における全面腐食進展挙動

母材および溶接材から試験片を切り出し、第3章の実験方法に準じて緩衝材中、低酸素濃度雰囲気において浸漬試験を行う。

表 4.1 オーバーパック周囲の環境条件

因子	想定される条件
オーバーパック 表面温度	処分後～10年：周辺岩盤温度→100°C 10年～100年：100°C→80°C 100年～1000年：80°C→60°C
緩衝材中 酸化還元性	大気平衡→還元性雰囲気（過渡期間：最大約100年）
緩衝材飽和度	不飽和→飽和（再冠水期間：最大約50年）
緩衝材間隙水中 化学成分	$\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}/\text{H}_2\text{CO}_3 < 7.3 \times 10^{-2}\text{M}$ $\text{SO}_4^{2-} : 6.1 \times 10^{-2}\text{M}$ $\text{HS}^-/\text{H}_2\text{S} : 9.2 \times 10^{-2}\text{M}$ $\text{Cl}^- : 5.9 \times 10^{-1}\text{M}$
緩衝材間隙水中 pH	非セメント系：5.8～8.4 低アルカリセメント系：約9以下 普通セメント系：約12.5以下

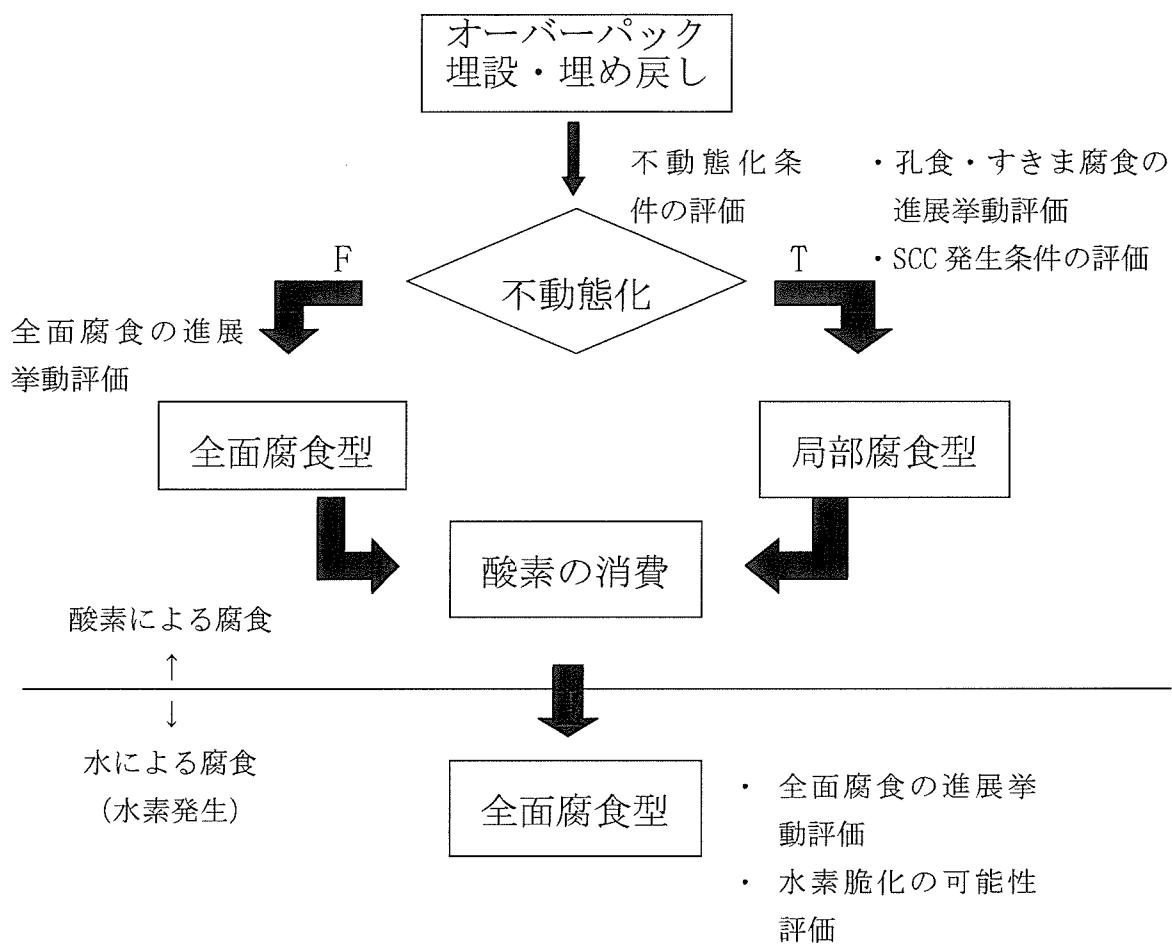


図 4.1 炭素鋼オーバーパックの腐食シナリオの概略と評価項目

## 5 おわりに

本共同研究ではオーバーパックの溶接・検査技術開発に関する情報とオーバーパック溶接部の腐食研究に関する情報を整備、共有するとともに溶接部の耐食性、長期健全性評価のための試験方法を検討した。原環センターでは現在実施中の溶接試験に関する情報を提供した。サイクル機構は既存の溶接試料（サイクル機構で作成したもの）を用いた腐食試験に関する情報を提供した。これらの情報に基づいて評価すべき課題を抽出し、腐食試験の概念を検討した。なお平成15年度概念検討された試験の実施は平成16年度以降とする。

## 参考文献

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、地層処分研究第2次取りまとめ、分冊2、JNC TN1400 99-022 (1999).

原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成13年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査 遠隔操作技術高度化調査(1/2) (2002)

原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成14年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査(1/2) (2003)

原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成15年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査(1/2) (2004)

谷口直樹、川崎学、川上進、久保田満：“還元性雰囲気における緩衝材中の炭素鋼の腐食挙動、JNC TN8400 2003-040 (2004).

和田隆太郎、中西智明、西村務、藤原和雄、池沢正行、建石剛：“オーバーパック等処分容器蓋接合技術の開発（2）低酸素環境下における炭素鋼溶接部の耐食性評価”日本原子力学年会秋の大会予稿集第3分冊 p. 593 (2003).

Marsh, G. P. and Taylor, K. J. : “An assessment of carbon steel containers for radioactive waste disposal”, Corrosion Science, vol. 28, No. 3, p. 289. (1988)

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).

Beavers, J. A., Thompson, N. G. and Parkins, R. N. : “Stress Corrosion Cracking of Low-Strength Carbon Steels in Candidate High-Level Waste Repository Environment, NUREG/CR-3861 (1987).

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).