

オーバーパックの製作技術の適用性と今後の展望

2026年3月
原子力発電環境整備機構

2026年3月 初版発行

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

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階

原子力発電環境整備機構 技術部

電話 03-6371-4004（技術部） FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2026

オーバーパックの製作技術の適用性と今後の展望

2026年3月
原子力発電環境整備機構

(空白ページ)

オーバーパックの製作技術の適用性と今後の展望

小川裕輔, 長田柁平, 市村哲大, 鈴木寛

要旨

NUMO では、将来選定される処分地の多様な地質環境条件に柔軟に対応し、地層処分の長期安全性及び工学的成立性を確保するため、設計オプションの体系的な整備を進めている。本報告書は、2016～2024 年度に実施した高レベル放射性廃棄物処分用オーバーパックの製作技術に関する設計オプションの技術開発成果を取りまとめたものである。

検討対象として、一般産業での実績が豊富な技術を取り入れた「炭素鋼オーバーパック」と、カナダ NWMO が開発した最新の技術を取り入れた「銅コーティングオーバーパック」を取り上げ、母材製作技術及び蓋接合技術の観点から適用性評価を行った。

炭素鋼オーバーパックについては、鍛鋼及び鋳鋼を対象に、実規模試験を含む検討を通じて、製作性、品質管理及び耐食性の観点から設計条件に応じた適用範囲を整理した。また、蓋接合技術としてアーク溶接及び電子ビーム溶接を対象に、残留応力低減や耐食性の観点から評価を行った。その結果、包括的技術報告書に示された厚さ 190 mm のオーバーパック設計例に対しては、母材製作技術として鍛鋼を選択することが、腐食寿命に影響を及ぼし得る鋳造欠陥を回避する観点から妥当であると判断された。一方、蓋接合技術については、全層溶接を行う場合、現時点ではアーク溶接に限定されるが、施工スループットの向上が運用上の課題であり、溶接時間短縮に資する技術開発が必要である。改良型 PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) に示された厚さ 70 mm の設計例に対しては、鍛鋼に加え、熱間押抜による継目無鋼管の適用が可能であり、蓋接合技術としては電子ビーム溶接が応力腐食割れや選択腐食の抑制に有効で、溶接時間も実機運用上の目標を満足し得る水準にあると考えられる。

銅コーティングオーバーパックについては、NWMO 方式及び NUMO 方式を中心に、銅電気メッキ、冷間溶射、摩擦攪拌接合等の要素技術について工学的成立性を検討した。NWMO 方式は、実規模での実証試験により、工学的成立性及び耐食性の両面で高い適用性を有することが示されている。NUMO 方式については、炭素鋼容器の機械的接合及び銅耐食層の摩擦攪拌接合といった要素技術の適用可能性を確認したが、今後は実規模での実証を通じて適用性を継続的に確認する必要がある。

今後は、ガラス固化体の封入、蓋接合（熱処理等の後工程を含む）及び接合部検査からなる一連の工程について、放射線環境下での実施を前提としたシステム化技術の開発が求められる。溶接（または摩擦攪拌接合）後の熱処理、表面加工、検査は遠隔操作で確実にを行う必要がある。銅コーティングオーバーパックでは、把持部を設けない構造を踏まえ、コーティング層を損傷せず高温・放射線下で安定作動する把持装置の開発が重要である。要求品質を安定的に満足する再現性の評価のため、実規模での実証試験を段階的に実施する。

Applicability of Overpack Fabrication Technologies and Future Perspectives

Yusuke Ogawa, Shuhei Nagata, Tetsuhiro Ichimura, Satoru Suzuki

Abstract

To ensure the long-term safety and engineering feasibility of geological disposal under a wide range of potential geological conditions in Japan, the Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) has been systematically developing design options for engineered barrier systems. This technical report compiles the outcomes of research and development conducted from fiscal years 2016 to 2024 on manufacturing technologies for overpacks used in the disposal of high-level radioactive waste.

Two types of overpacks are examined: carbon steel overpacks that incorporate manufacturing technologies with extensive industrial experience, and copper-coated overpacks that adopt advanced technologies developed by the Nuclear Waste Management Organization of Canada (NWMO). The applicability of these overpacks is evaluated from the perspectives of main body fabrication and lid joining and welding technologies.

For carbon steel overpacks, full-scale and component-scale investigations were carried out for forged and cast steel options. Based on evaluations of manufacturability, quality controllability, and corrosion performance, applicable ranges were identified in accordance with design conditions. Arc welding and electron beam welding were examined as lid joining technologies, with particular attention to residual stress reduction, corrosion resistance, and operational throughput. The results indicate that forged steel is an appropriate choice for thick-walled designs presented in the Comprehensive Technical Report, while alternative manufacturing and welding options may be applicable for reduced-thickness designs.

For copper-coating overpacks, the engineering feasibility of key technologies—including copper electroplating, cold spray coating, and friction stir welding—was examined, focusing on both the NWMO method and a NUMO-developed concept. While the NWMO method has demonstrated high applicability through full-scale trials, further large-scale verification is required for the NUMO method.

Finally, future challenges are identified, including the development of integrated, remotely operated systems for waste loading, lid joining, post-weld processing, and inspection under radiation environments. These findings provide a technical basis for selecting appropriate overpack manufacturing options as disposal concepts and safety assessments continue to evolve.

目 次

第1章 緒論.....	1
第2章 本報告書で対象とするオプション.....	3
第3章 炭素鋼オーバーパック製作技術の適用性評価.....	5
3.1 炭素鋼オーバーパックの設計例.....	5
3.2 設計例に適用可能な製作技術.....	5
3.2.1 母材製作技術.....	5
3.2.2 蓋接合技術.....	6
3.3 母材製作技術の適用性評価.....	7
3.3.1 鍛鋼.....	7
3.3.2 鋳鋼.....	8
3.4 蓋接合技術の適用性評価.....	15
3.4.1 アーク溶接.....	15
3.4.2 電子ビーム溶接.....	19
3.5 炭素鋼オーバーパックの製作技術の適用性評価まとめ.....	26
第4章 銅コーティングオーバーパック製作技術の適用性評価.....	28
4.1 銅コーティングオーバーパックの設計例.....	28
4.1.1 腐食代.....	28
4.1.2 耐圧代と容器の寸法・形状.....	29
4.2 設計例に適用可能な製作技術.....	30
4.2.1 NWMO による銅コーティングオーバーパックの製作方法.....	30
4.2.2 母材製作技術.....	32
4.2.3 蓋接合技術.....	32
4.3 母材製作技術の適用性評価.....	33
4.3.1 板巻鋼管の製作.....	33
4.3.2 板巻鋼管を対象とした銅コーティング試験.....	34
4.4 蓋接合技術の適用性評価.....	35
4.4.1 炭素鋼部の機械的接合.....	36
4.4.2 銅耐食層の摩擦攪拌接合.....	37
4.5 耐食性評価.....	39
4.6 銅コーティングオーバーパック製作技術の適用性評価.....	39
第5章 複数のガラス固化体を収納したオーバーパックの製作方法.....	40
5.1 設計例.....	40
5.2 設計例に適用可能な製作技術.....	43
5.3 母材製作技術及び蓋接合技術の適用性評価.....	43
第6章 今後の展望.....	44
第7章 結論.....	45

図目次

図 2-1	オーバーパックの製作オプションと本報告書で対象とするオプション（赤枠）	4
図 3-1	炭素鋼オーバーパックの設計例	5
図 3-2	オーバーパックの寸法（単位: mm）	8
図 3-3	鋳鋼製オーバーパックの試作の様子	9
図 3-4	MT で検出された欠陥の場所	10
図 3-5	UT で検出された欠陥の場所	10
図 3-6	補修対象の欠陥	10
図 3-7	MT 及び UT で検出された欠陥の領域	11
図 3-8	開口合成 UT 及び X 線 CT の結果の例	12
図 3-9	鋳造欠陥の断面観察結果の例	13
図 3-10	動電位分極試験結果	14
図 3-11	溶接試験体の形状及び開先形状（単位 mm）	16
図 3-12	TIG 溶接トーチ形状（単位 mm）	17
図 3-13	TIG 溶接試験状況及び TIG 溶接後の外観	17
図 3-14	TIG 溶接の断面マクロ組織写真の例	18
図 3-15	検討フロー図	20
図 3-16	溶接部周辺の容器の構造	20
図 3-17	溶接試験体の寸法	20
図 3-18	電子ビーム溶接の様子	21
図 3-19	溶接後の断面マクロ組織観察	22
図 3-20	解析モデル	22
図 3-21	入熱領域のモデル化	23
図 3-22	温度測定値と解析値の比較	23
図 3-23	残留応力解析により求めた溶接線方向の残留応力分布（単位：MPa）	24
図 3-24	溶接面表面における溶接線方向の最大残留応力値	24
図 3-25	残留応力の深さ方向分布（溶接金属中心の例）	25
図 3-26	コンター法による残留応力分布の測定結果と残留応力解析の結果（溶接線方向）	25
図 4-1	銅コーティングオーバーパックの寸法・形状	30
図 4-2	NWMO 方式による製作方法（NWMO, 2016 ; 2017 ; 2018 を編集）	30
図 4-3	NWMO における実規模銅コーティング容器の連続製作試験の様子（NWMO, 2022）	31
図 4-4	試作した銅コーティング容器の例	32
図 4-5	板巻鋼管の製作の様子	34
図 4-6	溶接部の断面マクロ組織写真（高炉材の板巻鋼管の例）	34
図 4-7	板巻鋼管を用いた NWMO 方式による製作方法と今回の試験部位	35
図 4-8	板巻鋼管を用いた NWMO 方式による製作試験	35
図 4-9	NUMO 方式による製作方法	36
図 4-10	試作したねじ込み接合部の締結試験	37
図 4-11	銅電気メッキ鋼板の 摩擦攪拌接合	38

図 4-12	銅クラッド鋼管に対する スターインプレート法による摩擦攪拌試験の様子.....	38
図 4-13	FSW における 引き抜き穴.....	38
図 4-14	エンドタブによる引抜き穴除去の概念図.....	38
図 4-15	エンドタブを用いた FSW 試験の様子 (写真手前側が接合始端)	38
図 5-1	複数のガラス固化体を収納したオーバーパックの設計例.....	41
図 5-2	3本のガラス固化体を収納したオーバーパックの PEM 配置模式図.....	41
図 5-3	3本のガラス固化体を収納したオーバーパックの定置密度に対する熱伝導解析結果	42

表目次

表 2-1	各国の対象廃棄物と処分容器 (使用済燃料またはガラス固化体)	3
表 3-1	母材円筒部の製作技術と適用可能厚さの関係.....	6
表 3-2	蓋接合技術と適用可能な接合深さの関係.....	6
表 3-3	母材製作技術の適用性評価項目.....	7
表 3-4	化学成分分析結果 (単位: wt%)	11
表 3-5	TIG 溶接条件 (狙い値)	16
表 3-6	溶接条件	21
表 3-7	炭素鋼オーバーパックの製作技術に関する適用性評価結果のまとめ.....	27
表 4-1	板巻鋼管の製作に用いた高炉材及び電炉材の化学成分 (単位: wt%)	34

第1章 緒論

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、放射性廃棄物を収納する処分容器は、ガラス固化体と地下水との接触を長期間にわたり防止し、放射性物質の溶出を抑制するという安全機能を担っている。この機能は、処分場閉鎖後の長期にわたって受動的に確保される必要があるため、材料選定、構造設計、製作及び接合に至る一連の技術について、高い信頼性を有することが不可欠である。

原子力発電環境整備機構（NUMO）は、将来選定される処分地の地質環境条件が未確定である段階においても、わが国の多様な地質環境に柔軟に対応可能な地層処分システムを構築するため、設計因子から導かれる要求事項を満足し得る複数の設計仕様をあらかじめ整備するという「設計オプション」の考え方にに基づき、技術開発を進めてきた（NUMO, 2021）。この枠組みは、適用可能な最善の技術（Best Available Technology : BAT）を段階的に整備・選択していくという国際的な安全確保の指針とも整合するものである（IAEA, 2012）。

諸外国においても、処分容器に関する技術開発は、各国の地質環境条件や処分概念に応じて進められてきた。材料選定の観点では、例えば、スウェーデンやフィンランドなど結晶質岩を母岩とする国々では銅を主要な耐食材料とした処分容器が検討されており、炭素鋼を構造材とし、その表面に銅を被覆する複合構造容器が採用されている。一方、フランスやスイスなど粘土層や堆積岩を対象とする場合には、炭素鋼製の単一材料型処分容器を基本とした設計が採用されている。

近年では、処分容器の長期安全性を確保しつつ、製作性や品質管理性の向上、さらには将来的な大量製作への適用を念頭に、材料そのものの選定に加えて製作方法や接合方法の合理化及び高度化に重点を置いた技術開発が進展している。特に、銅と炭素鋼を組み合わせた複合構造容器については、従来の二重容器構造に代わる選択肢として、銅コーティング技術や新たな接合技術の適用可能性が国際的にも検討されている。

本報告書では、高レベル放射性廃棄物処分用オーバーパックの材料として、炭素鋼製オーバーパック及び銅-炭素鋼複合オーバーパック（銅コーティングオーバーパック）を検討対象とする。これらを対象とした理由は、諸外国の地層処分計画において採用実績が多く、長期安全性評価に必要な腐食挙動や接合部の健全性等に関する研究データが比較的豊富に蓄積されているためである。加えて、これまで NUMO が実施してきた技術開発及び実規模試験の成果との連続性を有することも踏まえた。

一方で、チタンやセラミックス等の他材料を耐食層として用いる処分容器についても国際的に検討事例があるが、現時点では実規模での製作実績や長期挙動に関する知見が限定的である。本報告書は、将来の材料選定を否定または制約することを意図するものではなく、現時点で工学的成立性及び長期安全性の観点から合理的に評価可能な材料及び構造に対象を絞り、製作技術の適用性を整理することを主眼とする。

以上を踏まえ、本報告書は、地層処分の長期安全性及び工学的成立性を確保するために整備される設計オプションのうち、高レベル放射性廃棄物処分用オーバーパックの製作技術に着目し、その適用可能性を体系的に整理することを目的とする。具体的には、これまで NUMO が実施してきた技術開発及び実規模試験等により得られた知見に基づき、銅-炭素鋼母材製作技術及び蓋接合技術の観点から、各製作技術の成立性、適用範囲及び技術的課題を整理する。

なお、本報告書は、現時点において特定の製作技術や接合技術を最終的に選定することを目的とするものではない。処分事業や安全評価の進展に応じて合理的な判断を行うための技術的基盤を提

供することを主眼とし，評価結果は今後の追加的な技術開発や実証試験の成果を踏まえて更新され得る。

第2章 本報告書で対象とするオプション

地層処分対象の放射性廃棄物を収納する容器について、各国の実施主体はキャニスタ (canister)、コンテナ (container) あるいはオーバーパック (overpack) と呼称している。本報告書では、これらを総称して「処分容器」と定義する。なお、NUMO においては、ガラス固化体を収納する処分容器を「オーバーパック」、TRU 等廃棄物を収納する処分容器を「廃棄体パッケージ容器」と呼んでいる。

各国において、処分容器に収納される放射性廃棄物としては、使用済燃料及びガラス固化体に加え、ドラム缶やステンレス製容器、コンクリート製容器に収納した中低レベル放射性廃棄物等が挙げられる。表 2-1 には、使用済燃料及びガラス固化体を対象として、諸外国における処分容器の代表的な設計例をまとめた。処分容器は、構造材と耐食層が同一材料である単一材料型容器、または構造材と耐食層が異なる複合材料型容器として設計されてきた。単一材料型容器の代表例はガラス固化体用の炭素鋼製処分容器であり、複合材料型容器の代表例は使用済燃料用の銅-炭素鋼複合処分容器である。なお、これら以外にも、耐食層としてチタンやセラミックス等を用いる複合材料型容器が検討されている。

処分容器に収納される放射性廃棄物の数量は、対象廃棄物の形状・寸法や取扱い性等を踏まえて各国で設定されており、一律には定まっていない。例えば、使用済燃料では複数の燃料集合体を収納可能な処分容器が検討されている (例えば、SKB, 2010)。ガラス固化体については、従来は廃棄体を 1 体ずつ収納する処分容器の設計が示されてきたが、近年、Nagra はガラス固化体を 3 体収納する処分容器を考案し、その製作が実現可能であることを確認している (Nagra, 2024)。

表 2-1 各国の対象廃棄物と処分容器 (使用済燃料またはガラス固化体)

国	対象廃棄物	処分容器
フィンランド	使用済燃料集合体	銅-炭素鋼複合処分容器 (二重容器)
スウェーデン	使用済燃料集合体	銅-炭素鋼複合処分容器 (二重容器)
スイス	使用済燃料集合体 ガラス固化体	標準設計：炭素鋼製処分容器 代替設計：銅-炭素鋼複合処分容器 (銅コーティング容器)
ドイツ	使用済燃料集合体 ガラス固化体	岩塩：炭素鋼製処分容器 (または鋳鉄製) 粘土層：炭素鋼製処分容器 (またはステンレス鋼) 結晶質岩：銅-鋳鉄複合処分容器 (二重容器)
チェコ	使用済燃料集合体	炭素鋼-ステンレス鋼複合処分容器
英国	使用済燃料集合体 ガラス固化体	粘土層：炭素鋼製処分容器 (またはステンレス鋼) 結晶質岩：銅-炭素鋼複合処分容器 (二重容器)
ベルギー	使用済燃料集合体 ガラス固化体	炭素鋼製処分容器
カナダ	使用済燃料集合体	銅-炭素鋼複合処分容器 (銅コーティング容器)
米国	使用済燃料集合体	Alloy22-ステンレス鋼複合処分容器
中国	ガラス固化体	炭素鋼製処分容器
韓国	使用済燃料集合体	銅-炭素鋼複合処分容器 (銅コーティング容器)
日本	ガラス固化体	標準設計：炭素鋼製処分容器 代替設計：銅-炭素鋼複合処分容器 (銅コーティング容器)

以上のように、処分容器の形状や寸法は用途に応じて多様である一方、母材（円筒部及び蓋部）の製作技術と、円筒部と蓋部の接合技術という観点では共通する要素も多い。本報告書では、高レベル放射性廃棄物を対象とした処分容器（オーバーパック）に着目し、諸外国を含めて採用実績が多く、研究データが比較的豊富な炭素鋼製の単一材料型容器（以下、炭素鋼製処分容器）及び銅-炭素鋼複合材料型容器（以下、銅-炭素鋼複合処分容器）の製作技術を対象として整理する。炭素鋼製処分容器及び銅-炭素鋼複合処分容器の製作技術については、それぞれ第3章及び第4章に述べる。また、Nagraの検討例を参考に、ガラス固化体を3体収納するオーバーパックの製作方法について第5章に述べる。図2-1には、処分容器の製作技術を樹形図として整理した。処分容器の製作技術は、母材の製作技術と、円筒部と蓋部の接合技術の2つから成る。

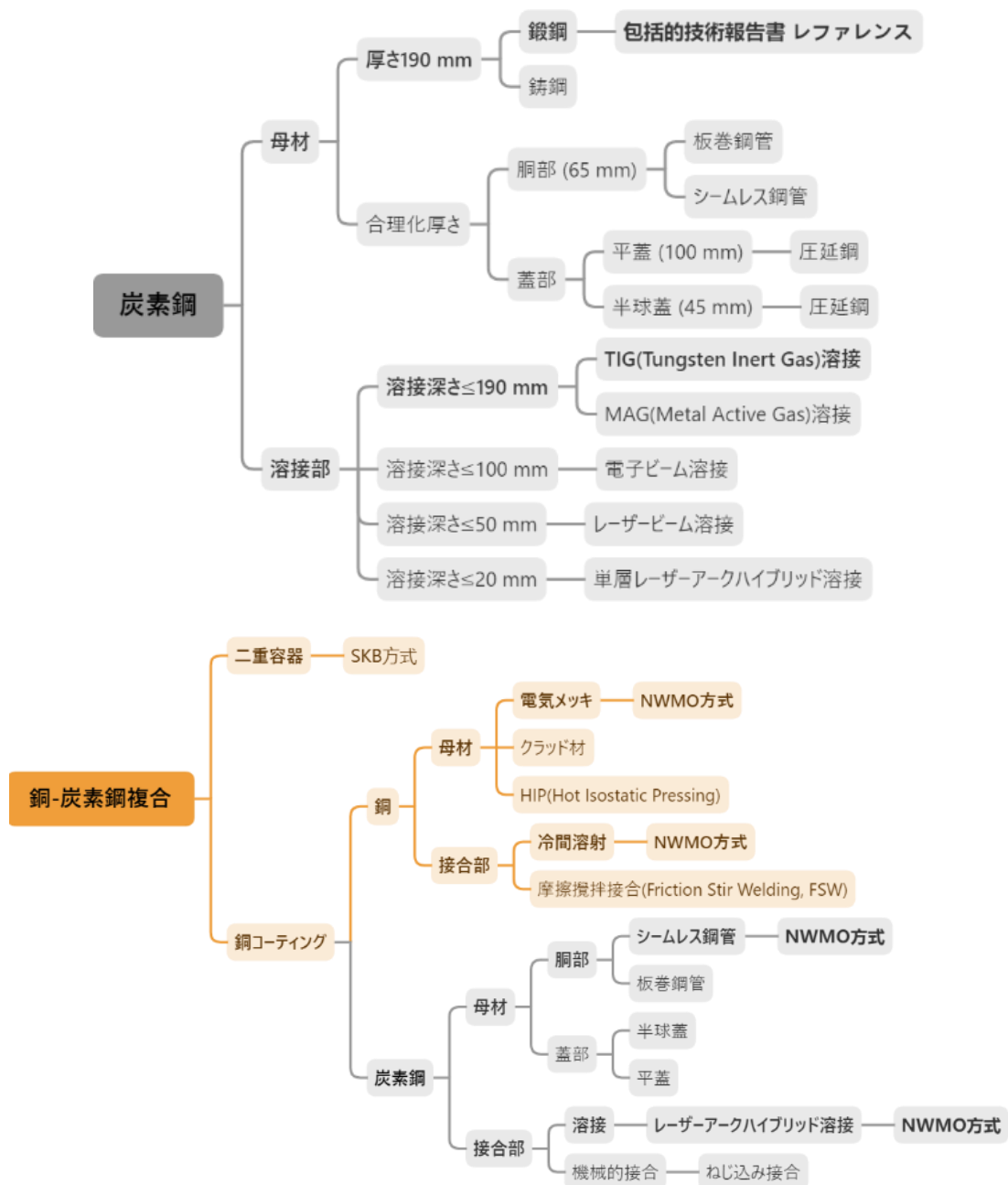
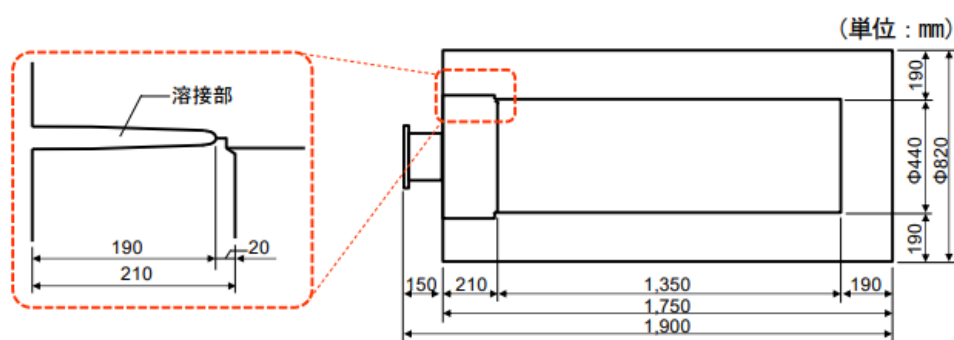


図 2-1 オーバーパックの製作オプション

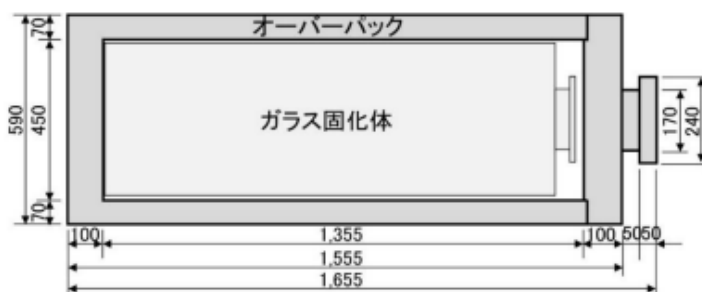
第3章 炭素鋼オーバーパック製作技術の適用性評価

3.1 炭素鋼オーバーパックの設計例

NUMOは、図3-1に示すように、炭素鋼オーバーパックについて2種類の設計例を示している。包括的技術報告書(NUMO, 2021)における設計例は、円筒部及び蓋部の厚さを190mmとし、落とし蓋構造を採用したうえで、全層溶接により蓋接合を行うものである。一方、改良型PEM(Prefabricated Engineered barrier system Module)の技術報告書(NUMO, 2025)における設計例は、円筒部と蓋部で必要となる耐圧代が異なる点に着目し、それぞれに必要な厚さ(70mm及び100mm)を設定したうえで、平蓋構造を採用し、全層溶接により蓋接合を行うものである。これらの設計例はいずれも、埋設後少なくとも1000年間にわたりガラス固化体と地下水の接触を防止し、放射性物質の溶出を抑制するという安全機能を確保することを目的としている。



(a) 包括的技術報告書の設計例



(b) 改良型PEM報告書の設計例

図3-1 炭素鋼オーバーパックの設計例

3.2 設計例に適用可能な製作技術

図3-1に示した炭素鋼オーバーパックの設計例は、鋼塊をプレス鍛造して得られる鍛鋼を想定して検討したものである。一方、設計で要求される厚さを満足し、かつ所定の蓋接合が成立する場合には、鍛鋼以外の母材製作技術も適用可能である。このため本節では、設計例に対して候補となる母材製作技術及び蓋接合技術を整理する。

3.2.1 母材製作技術

オーバーパック母材(円筒部)の製作技術としては、鍛造、鋳造、熱間押抜並びに曲げ加工(熱間/冷間)が考えられるが、オーバーパックの厚さによって適用可能な技術が異なる。表3-1に示すように、鍛造及び鋳造は厚さによらず適用可能である。一方、熱間押抜法による継目無鋼管は160

mm 以下（日本製鉄，2025），圧延鋼の熱間成形による板巻鋼管は 115 mm 以下（大阪特殊鋼管製造所，2025），圧延鋼の冷間成形による板巻鋼管は 55 mm 以下（JFE スチール，2025）の条件で適用可能である。なお，これらの適用厚さの限界値は工場能力に依存し得るが，本報告書では上記の値を基準として製作技術を検討する。

表 3-1 母材円筒部の製作技術と適用可能厚さの関係

適用厚さ	鍛造	鋳造	熱間押抜	熱間曲げ加工	冷間曲げ加工
55	A	A	A	A	A
115	A	A	A	A	
160	A	A	A		
190	A	A			

A：適用可能（Applicable），“空白”：適用不可能（not applicable）

包括的技術報告書に示したオーバーパックの施工例に対しては，鍛造または鋳造が適用可能である。改良型 PEM 報告書に示したオーバーパックに対しては，鍛造（鍛鋼）及び鋳造（鋳鋼）に加え，熱間押抜による継目無鋼管，並びに圧延鋼の熱間曲げ加工による板巻鋼管の適用が可能である。蓋部については，平板形状の場合，厚さによらず鍛鋼，鋳鋼及び圧延鋼のいずれも適用可能である。

3.2.2 蓋接合技術

産業界で適用実績の多い厚板炭素鋼の溶接方法としては，タングステン不活性ガス溶接（GTAW：Gas Tungsten Arc Welding），メタル活性ガス溶接（GMAW：Gas Metal Arc Welding），電子ビーム溶接（EBW：Electron Beam Welding），レーザー予熱ガスメタルアーク溶接（LP-GMAW：Laser-Preheated Gas Metal Arc Welding）及びサブマージアーク溶接（SMAW：Submerged Arc Welding）が挙げられる。これらの溶接方法の適用性は，必要となる蓋接合深さ（溶け込み深さ）に依存する。表 3-2 に，各溶接方法と適用可能な接合深さの関係を示す。

表 3-2 蓋接合技術と適用可能な接合深さの関係

接合深さ	TIG 溶接	MAG 溶接	EBW	LP-GMAW
20	A	A	A	A
100	A	A	A	
190	A	A		

A：適用可能（Applicable），“空白”：適用不可能（not applicable）

TIG 溶接（原環センター，2011a）及び MAG 溶接（原環センター，2008）は，アーク熱により溶加材及び母材を溶融して接合する方法であり，多層盛りにより厚板の溶接が可能である。このため原理的には接合深さの制限はないが，全層溶接する板厚が厚くなるほどパス数が増加し，施工時間の増大や熱入力に起因する変形（ひずみ）の管理が課題となる点に留意が必要である。EBW は，真空中で母材を溶かし込み，原則として 1 パスで溶接する方法である。溶加材を使用せず母材を溶融して接合するため，接合部の隙間を可能な限り小さくする必要があり，開先には高い加工精度が求

められる。LP-GMAW は、レーザーによる高エネルギー密度に基づく深い溶け込みと、アーク溶接による溶加材供給を組み合わせた方法である (NWMO, 2015)。SMAW は、フラックスを供給しながらその内部でアークを発生させて溶接する方法である。多層盛りにより溶接深さを大きくすることも可能とされているが、フラックスの供給・回収及びビード清掃が必要となる。このため、放射線環境下で遠隔操作を伴う施工を想定した場合、適用性に課題があることから、本報告書では蓋接合技術の検討対象から除外した。なお、接合深さの限界値は設備能力に依存し得るが、本報告書では表 3-2 に示す範囲を基準として検討する。

包括的技術報告書に示したオーバーパックの施工例に対しては、TIG 溶接あるいは MAG 溶接が適用可能であり、改良型 PEM 報告書に示したオーバーパックであれば、TIG 溶接あるいは MAG 溶接に加えて EBW も適用可能である。LP-GMAW は溶接深さが不十分となるため、本検討では対象としない。なお、同じく炭素鋼をオーバーパック材料としている Andra 及び Nagra では電子ビーム溶接を採用している (Andra, 2025 ; Nagra, 2024)。

3.3 母材製作技術の適用性評価

製作技術の適用性を検討する際には、製作できるか否かという評価に加えて、製品が所要の安全機能あるいは要求品質を満足することが必須である。適用性評価の内容を表 3-3 に示す。閉鎖後長期安全性については、NUMO (2021) において、鍛鋼をリファレンスとして示していることから、耐食性の評価においては、鍛鋼の耐食性と相対比較することを求めた。工学的成立性については、実証的に製作と品質管理が可能であることの確認が必要となるため、実規模での製作と欠陥評価を求めた。

表 3-3 母材製作技術の適用性評価項目

設計因子	評価指標	評価方法
閉鎖後長期 安全性	鍛鋼と比較して耐食性が著しく劣らないこと	腐食減量法, 応力腐食割れ評価 (分極曲線, 残留応力)
工学的成立性	(製作性) 実機スケールで製作が可能であること	製作実証試験
	(品質管理) 欠陥が許容範囲内であること	欠陥評価

設計因子については、NUMO (2021) を参

照

3.3.1 鍛鋼

(1) 工学的成立性の評価

包括的技術報告書に示した炭素鋼オーバーパックに対する鍛鋼の製作性については、NUMO (2021) 第 4 章 pp. 4-35~4-36 に記載のとおりであり、実規模で製作から蓋接合までの一連の工程が成立することが実証的に確認されている。品質管理の観点については、包括的技術報告書において鍛鋼の欠陥発生率等を直接評価したものではないが、規格に基づき適切に製作・検査された鍛鋼では、一般に内部欠陥の発生が抑制され、組織の均一性も比較的高いとされる。これらの知見は改良型 PEM のオーバーパックにも適用可能と考えられるが、対象とする寸法・形状に対する実規模での製作・検査を通じて確認することが望ましい。

(2) 耐食性評価

平均腐食速度の評価，応力腐食割れの評価等の耐食性評価については，包括的技術報告書第4章 pp. 4-29～4-31 に記載のとおりであり，本報告書では鍛鋼を基準として鋳鋼の耐食性を相対評価する。

(3) 適用性評価

鍛鋼は，工学的成立性及び閉鎖後長期安全性の観点から適用性が高い材料として整理されており，海外の実施主体においても採用事例がある。

3.3.2 鋳鋼

(1) 工学的成立性の評価

鋳鋼オーバーパックについては，第2次取りまとめ以降，実規模での製作実績が限られていたことから，実規模での試作を行い，工学的成立性を実証的に確認した（小川ほか，2017；Ogawa et al., 2017；Ogawa et al., 2021）。

包括的技術報告書（NUMO，2021）で示した内径440 mm，厚さ190 mm，高さ1,750 mmのオーバーパックを対象に，蓋部を除く構造（図3-2）を鋳鋼により試作し，製作性を評価した。オーバーパックはガラス固化体封入後に蓋を溶接する必要があるため，包括的技術報告書でレファレンス材料として位置付けている炭素鋼鍛鋼品 SF340A（JIS G 3201）に引張強さが近く，溶接も可能な溶接構造用鋳鋼品 SCW410（JIS G 5102）を鋼種として選定した。

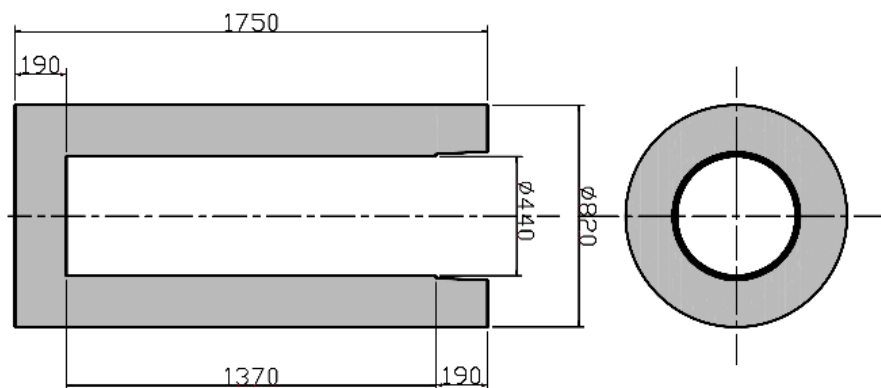


図 3-2 オーバーパックの寸法(単位: mm)

鋳造方法には砂型鋳造と金型鋳造があるが，鋳鋼は融点が高く，かつオーバーパックは中空構造・大型製品であることから，金型鋳造は適用が難しい。

- ・ 高融点：鋳鋼（融点 1450～1500℃）は鋳鉄（融点 1150～1250℃）よりも融点が高いため金型への熱負荷が大きく，金型の寿命が短くなりメンテナンスや金型の更新に係る費用が高くなる。
- ・ 中空構造：オーバーパックのような中空構造に対して金型を適用するには，金型の構造や冷却制御の設計が複雑化する。

- ・ 大型：オーバーパックのような大型製品であると、溶鋼量が多く金型への熱負荷が増大するため金型の寿命がさらに短くなる。また、大型であるため金型の製作費も膨大となる。さらに、金型は熱伝導率が高く冷却が速くなるため、肉厚部では外側と内側の温度差が大きくなり、熱ひずみによる割れや引け巣が発生しやすくなる。

以上より、本試作では砂型鑄造を選択した。鑄型（砂型）の外観、鑄造の様子、鑄造後に機械加工を行った完成品の写真を図 3-3 に示す。



図 3-3 鑄鋼製オーバーパックの試作の様子

完成した鑄鋼製オーバーパックを対象に、表面欠陥については JIS G 0565 に基づく磁粉探傷試験（MT : Magnetic Particle Testing）を、内部欠陥については JIS Z 2344 に基づく超音波探傷試験（UT : Ultrasonic Testing）を実施し、鑄造欠陥の分布を調査した。これらの結果に基づき、工学的成立性のうち品質管理の観点からの適用性を評価した。

MT で検出された欠陥の場所を図 3-4 に、UT で検出された欠陥の場所を図 3-5 に示す。欠陥はオーバーパックの底部から中央部の高さにかけて、円筒外周に近い領域に多く分布していた。MT で検出された欠陥のうち、JCSS I3-1983 に基づく欠陥判定基準（通常の機械加工面：割れ不可，その他（鑄巣，ブローホール，砂かみ）：最大 5 mm まで）を超えたものは 2 か所あり、側面部の底面近傍における 10 mm の線状の欠陥（欠陥①）と、底面部の外縁近傍における複数の球状の欠陥が集まった 5 mm の欠陥（欠陥②）であった（図 3-6 参照）。欠陥の種類は割れではなく鑄造欠陥（鑄巣）であり、欠陥①のような線状欠陥は後述する逆 V 偏析帯に沿ったもの、欠陥②やその他検出された球状の欠陥はミクロ的に凝固が遅い部分に発生したものと考えられる。UT で検出された欠陥は最大で円形平底穴（FBH） $\phi 3.6$ mm 相当であり、JCSS I4-1984 R3 等級に基づく UT の欠陥判定基準（FBH $\phi 6.35$ mm を超えるエコーで最大検出面積 20 cm^2 または最大検出長さ 7 cm）を超える欠陥は検出されなかった。MT で欠陥判定基準を超えた 2 か所の欠陥は、グラインダーで除去後、TIG 溶接により溶接金属を充填することで補修した。

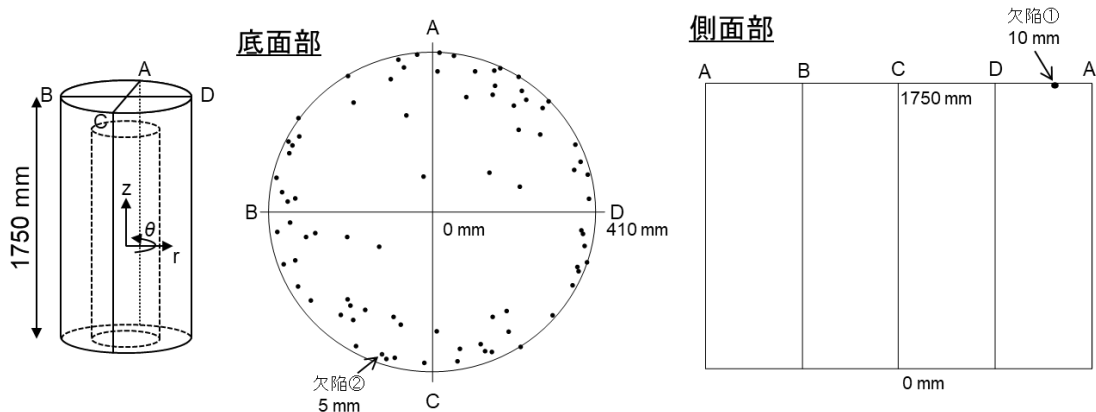


図 3-4 MT で検出された欠陥の場所

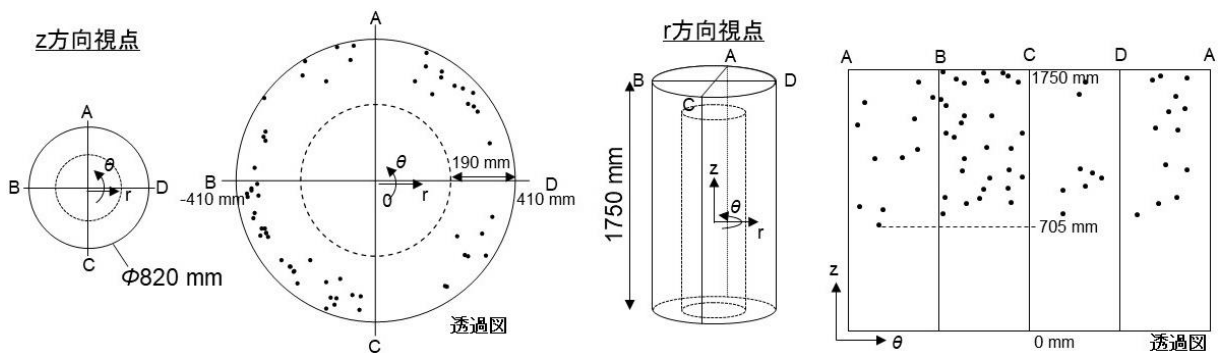
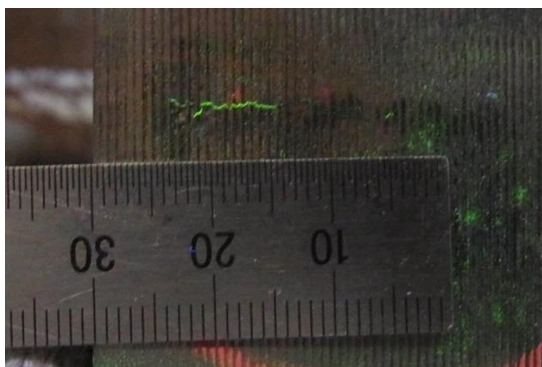
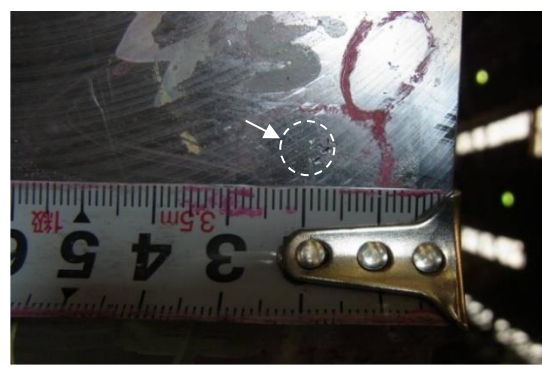


図 3-5 UT で検出された欠陥の場所



(a) 欠陥① 10 mm



(b) 欠陥② 5 mm

図 3-6 補修対象の欠陥

MT 及び UT で検出された欠陥の領域と铸造法案の検討時に行った凝固解析結果を併せて図 3-7 に示す。欠陥は、押湯に近い領域に発生しているが、最終凝固部に近い中心付近には検出されていない。大型鋼塊には逆 V 偏析と呼ばれる特徴的な偏析帯があり、逆 V 偏析帯は鋼塊トップ側（押湯側）の中心より外側にかけて現出する（串田，2015）。この逆 V 偏析にはマイクロシュリンケージ（微小な巣）が発生する。製作したオーバーパックで検出された欠陥の大きさは比較的小さく、最終凝固部に近い中心ではなく外側に位置していることから、大型铸鋼品特有の逆 V 偏析が起因したものと考えられる。これらの微小な巣は铸造製品には必ず発生するものであり、铸造条件の最適化を行っても完全に除去することは困難である。

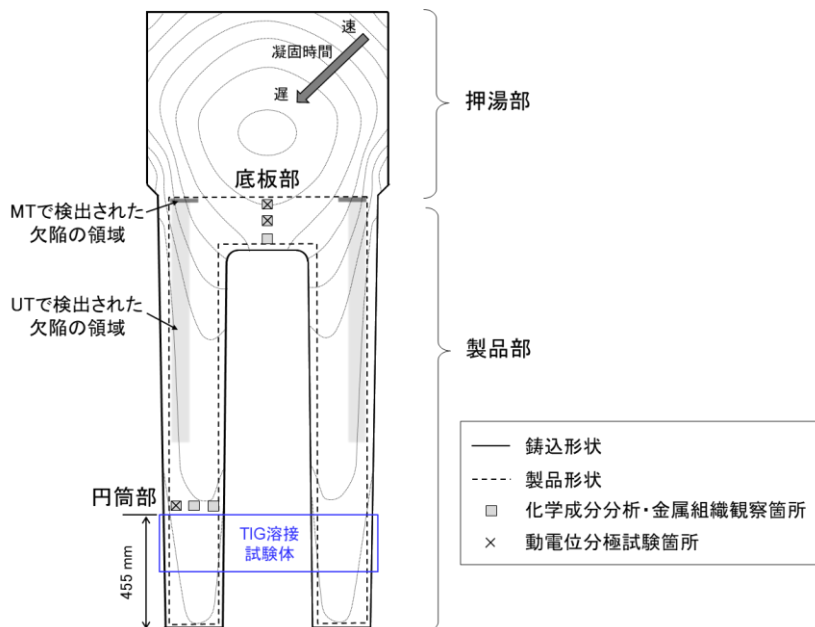


図 3-7 MT 及び UT で検出された欠陥の領域

このように欠陥の非破壊検査では、多くの鑄造欠陥を検出したが、UT については JCSS I4-1984 R3 等級に基づく欠陥判定基準を上回る欠陥はなく、MT については JCSS I4-1984 に基づく欠陥判定基準を上回る欠陥が 2 か所検出されたものの、表面欠陥であったため補修を行うことで基準を上回る欠陥を除去することができた。

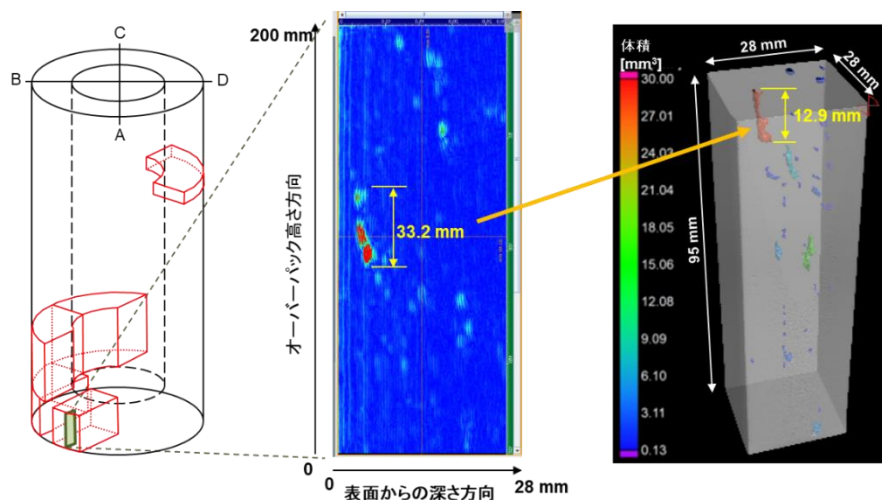
図 3-7 に示した位置を対象に、化学成分、金属組織、機械的強度を調べた。顕微鏡組織については、いずれもフェライト・パーライト組織を呈しており、板厚中心位置は内・外面と比べてフェライトの部位が若干大きい様相を呈していたものの、顕著な差ではなかった。化学成分分析結果を表 3-4 に示す。底板部の内面側で溶鋼に対して若干の成分濃化が確認され、特に炭素 (C) 及び硫黄 (S) 元素濃度が高い結果となったが、いずれも規格値以内であり顕著な差は見られなかった。機械的性質 (降伏点、引張強さ、伸び、絞り、シャルピー吸収エネルギー) についても、板厚中心位置では若干の強度の低下があったが、いずれも規格値内であった。

表 3-4 化学成分分析結果 (単位 : wt%)

		C	Si	Mn	P	S
JIS G 5102 SCW410		0.22 以下	0.80 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下
溶鋼分析値		0.16	0.42	0.80	0.009	0.001
試験体 1 (底板部)	外面側	0.16	0.42	0.80	0.006	0.002
	中心	0.15	0.42	0.80	0.008	0.001
	内面側	0.19	0.43	0.83	0.010	0.006
試験体 2 (円筒部)	外面側	0.17	0.44	0.84	0.011	0.002
	中心	0.15	0.42	0.80	0.008	0.001
	内面側	0.16	0.42	0.81	0.009	0.001

非破壊検査法として実施した UT はパルス反射法であり、欠陥から反射するエコーの大きさによって、欠陥の相対的な大きさは分かるものの、欠陥の形状によってはエコーと寸法が異なるため、実際の欠陥の大きさを評価するには異なる方法が必要である。このため、実際の欠陥に近い大きさを評価可能な開口合成法による超音波探傷（以下、開口合成 UT という）と X 線 CT を適用するとともに、鑄造欠陥の断面を光学顕微鏡で観察することにより、鑄造欠陥の寸法及び形状に関する詳細調査を行った。

(a) の赤枠に示す鑄鋼ブロックに対して、開口合成 UT と X 線 CT を実施した。結果の例として、最も大きな欠陥が検出された箇所の開口合成 UT 画像を (b) に、X 線 CT 画像を (c) に示す。同一箇所にある欠陥が、開口合成 UT では 33.2 mm、X 線 CT では 12.9 mm と評価されている。開口合成 UT は、探触子の進行方向に欠陥が伸びているように映るため、実際の欠陥よりも大きく評価される傾向にある。X 線 CT 画像を見ると、十数 mm 以下の大小様々な欠陥が検出されていること、比較的大きな欠陥は細長い形状であり、それらはいずれも、オーバーパックの高さ方向を向いていることが分かる。(c) において 12.9 mm と評価された欠陥を狙って切断した断面を、光学顕微鏡により観察した結果を図 3-9 に示す。欠陥は複雑な形状をした空洞であり、鑄造欠陥の一つである引け巣と考えられる。観察断面には大小様々な空洞が観察され、大きさは数 μm ～十数 mm であった。25 倍の視野で点状に見える微小サイズの欠陥は、ほぼすべての視野において観察された。



(a) 探傷対象ブロック (b) 開口合成 UT 画像 (c) X 線 CT 画像

図 3-8 開口合成 UT 及び X 線 CT の結果の例

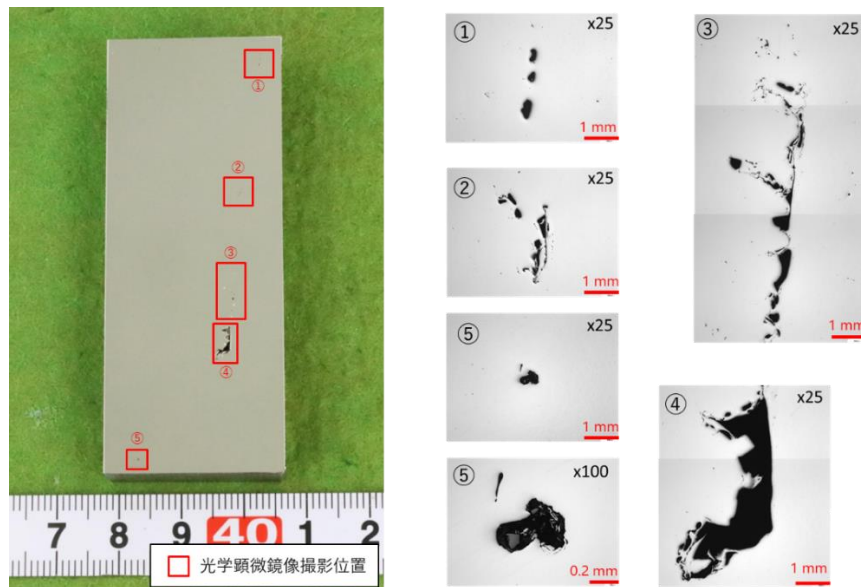


図 3-9 鑄造欠陥の断面観察結果の例

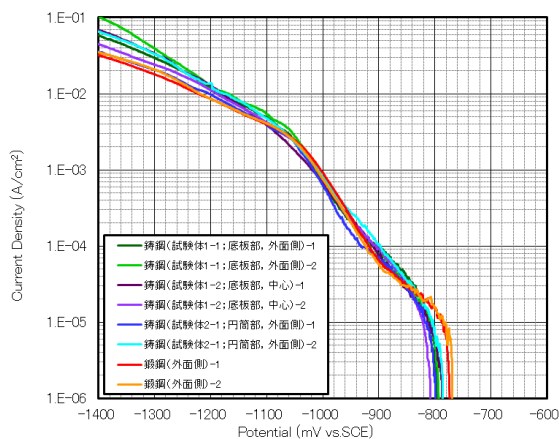
(2) 耐食性の評価

実規模で試作した鑄鋼オーバーパックの代表部位から試験片を採取し、腐食試験により耐食性を評価した。あわせて同一条件で鍛鋼の腐食試験を実施し、鑄鋼と鍛鋼の耐食性を比較した。腐食試験は、材料間の特性差が反映されやすい動電位分極試験により実施した。

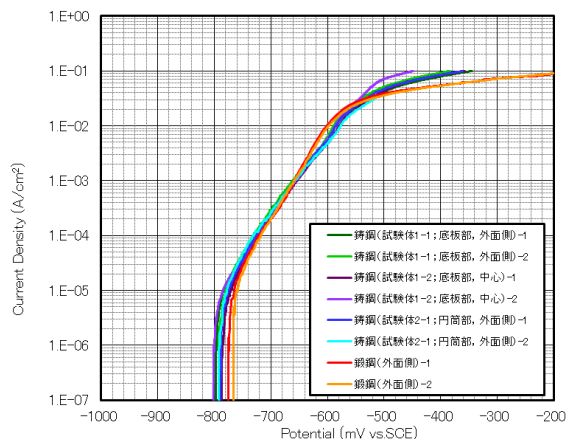
図 3-7 に示したとおり 3 箇所から試験片を採取した。腐食代に相当する表面付近の代表的部位として円筒部と底板部の表面付近を選定し、最終凝固部に近く化学成分や組織が異なる可能性のある底板部については板厚中心部も選定することとした。鍛鋼については、厚さ約 190 mm、幅約 190 mm、長さ約 340 mm の SF340A (JIS G 3201) の鍛鋼ブロックを製作し、当該ブロックから試験片を採取した。それぞれ腐食試験の繰り返し数は 2 とした。

動電位分極試験は、試料として鑄鋼または鍛鋼の試験片、対極として白金電極、参照電極として飽和カロメル電極を用いて行った。試験溶液には、これまでオーバーパックを対象とした多くの腐食試験で使用されている ASTM D1141 に準拠した人工海水を用いた。試験温度は 80°C とし、試験中は溶液に雰囲気ガスとしてアルゴン (Ar) ガスを吹込み脱気した。

図 3-10 に、人工海水中におけるアノード分極及びカソード分極試験結果を示す。鑄鋼と鍛鋼、また鑄鋼の部位による差は認められなかった。また、カソード分極曲線の Tafel 線の内挿から得られた自然電位での腐食電流密度についても、明確な差異は認められなかった。



(a) カソード分極曲線



(b) アノード分極曲線

図 3-10 動電位分極試験結果

人工海水中における動電位分極試験の結果、鋳鋼と鍛鋼、並びに鋳鋼の採取部位による腐食挙動に明確な差は認められなかった。これは、化学成分分析及び金属組織観察において顕著な差が確認されなかったこととも整合する。

図 3-4 及び図 3-5 にも示したように、表面近傍（腐食代相当部）に鋳造欠陥が分布していることから、鋳造欠陥による有効厚さの減少が耐食性（腐食寿命）に与える影響を評価する必要がある。図 3-8 に示したように X 線 CT を行った範囲では、大きなもので長さ十数 mm の空洞が存在していることが示唆された。このような空洞が存在する箇所は有効厚さがその分薄くなることになる。ただし、鋳造欠陥による有効厚さの減少が、オーバーパックの余剰厚さに収まっていれば、必要な腐食代は確保できる。

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) では、オーバーパックの厚さは平板部及び円筒部ともに 190 mm と設定していたが、オーバーパックの必要厚さは、設置深度 1,000 m を想定した深成岩類及び先新第三紀堆積岩類の堅置き・ブロック方式の場合を例にすると、平板部で 121 mm, 円筒部で 91 mm と評価していた。したがって、オーバーパックには平板部で 69 mm, 円筒部で 99 mm の余剰厚さがあるため、鍛鋼オーバーパックと比較すると寿命は短くなる可能性はあるが、少なくとも 1,000 年以上という耐食性の確保は可能と考えられる。

改良型 PEM 報告書 (NUMO, 2025) のオーバーパックに対しても、同様に余剰厚さを見積もった。設置深度 1,000 m を想定するとオーバーパックの必要厚さは平板部で 98 mm, 円筒部 64 mm と評価なる。これに対して、オーバーパックの厚さは平板部で 100 mm, 円筒部で 70 mm であるため余剰厚さは、平板部で 2 mm, 円筒部で 6 mm となる。このため、十数 mm の鋳造欠陥が表面付近に存在していた場合には、余剰厚さを上回るため、鋳造欠陥によりオーバーパックの寿命が設計値を下回る可能性がある。このように包括的技術報告書のオーバーパックに対しては、鋳造欠陥の影響は許容可能であるが、改良型 PEM のオーバーパックに対しては耐食性を著しく低下させる要因となり得る。

(3) 適用性評価

鋳鋼オーバーパックは実規模での試作に成功しており、製作性の観点からは適用可能である。品質管理の観点では鋳造欠陥が確認されるものの、表面欠陥については補修により基準を満足させ得

る。耐圧性に関しては、観測された欠陥の形状や大きさを考慮しても強度の低下への影響は限定的と考えられる。また、遮蔽代については、欠陥は連続性に乏しいため、その影響も限定的と考えられる。一方、鑄造欠陥の寸法や分布によっては有効厚さが減少し、鍛鋼と比較して腐食寿命が短くなる可能性がある。特に余剰厚さが薄い設計条件（改良型 PEM のオーバーパック等）では、鑄造欠陥が設計成立性に与える影響が相対的に大きくなり得るため、適用に際しては欠陥寸法を踏まえた評価と、非破壊検査による管理方法の具体化が必要である。

鑄鋼オーバーパックを採用する場合には、鑄造欠陥が長期健全性に影響がないことをより詳細に評価する必要があると考えられる。例えば、鑄造欠陥による有効厚さの減少が余剰厚さの範囲内であることを 1 体ずつ非破壊検査により確認することが不可欠である。今回の鑄造欠陥の詳細調査においては X 線 CT も用いたが、実際のオーバーパックの非破壊検査としてこれを用いることは不可能である。したがって、開口合成 UT などを用いる必要があるが、X 線 CT よりも鑄造欠陥の大きさを過大評価する傾向にある。このことから、開口合成 UT を用いて鑄造欠陥の非破壊検査を行う場合、鑄造欠陥による有効厚さの減少が余剰厚さを上回る評価となる可能性はさらに高まる。仮にそのような可能性を定量的に示そうとする場合には、鑄鋼製オーバーパックを複数体試作し、全部位を対象に開口合成 UT を行い、統計的にデータを収集する必要がある。

さらに、開口合成 UT は、通常の UT で用いられるパルス反射法よりも使用する機器が高価となる。パルス反射法を用いた鑄造欠陥の判定基準では不合格とならないような小さな欠陥まで、全て寸法を評価する必要があり、そのような鑄造欠陥はオーバーパックの広い範囲に数多く分布しているため、検査時間も大幅に増加することになる。これらのことにより、鑄鋼オーバーパックは製作可能であるものの、鍛鋼と比較すると品質管理に多くのリソースを割く必要があることがわかった。

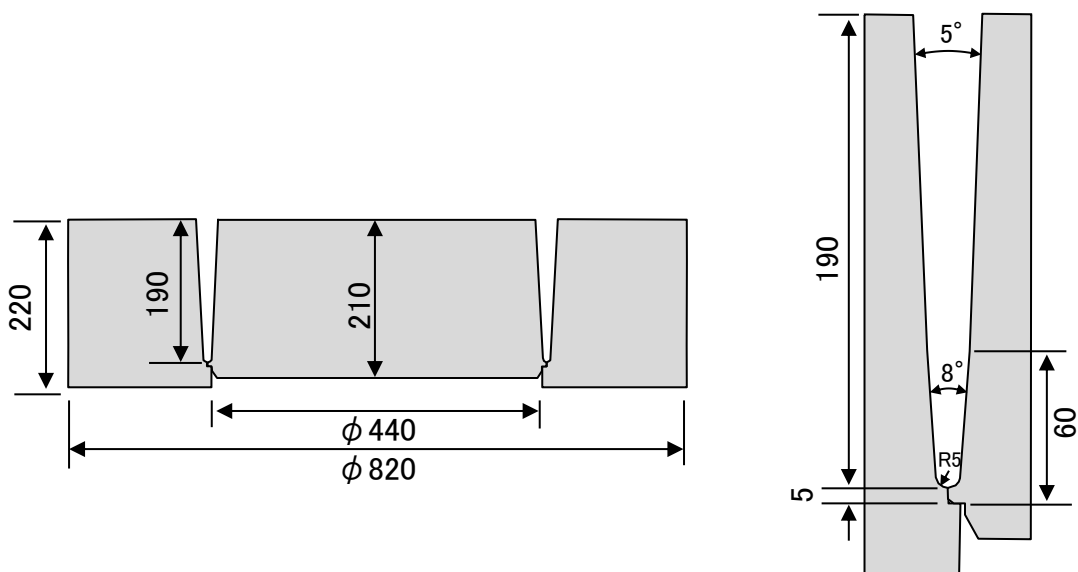
3.4 蓋接合技術の適用性評価

蓋接合技術についても、アーク溶接（TIG 及び MAG）と電子ビーム溶接について、表 3-3 の評価項目を用いて、包括的技術報告書及び改良型 PEM のオーバーパックへの適用性を評価する。

3.4.1 アーク溶接

(1) 工学的成立性の評価

鍛鋼オーバーパックに対するアーク溶接の適用性については、TIG 溶接（原環センター、2011a）及び MAG 溶接（原環センター、2008）について製作性が実規模の溶接試験を実施することで評価されている。これらの評価によれば、TIG 溶接により深さ 190 mm の落とし蓋構造の鍛鋼に対して無欠陥の溶接に成功している（原環センター、2011a）。NUMO が作成した鑄鋼オーバーパックに対しても TIG 溶接が適用できるかについて評価するため、蓋構造を模擬した試験体を製作して溶接試験を実施した。蓋材は炭素鋼鍛鋼品の中でも SCW410 の化学成分、機械的性質が同等程度のグレードである SF440A を選定した。試験体及び開先形状を(b)及び(c)に示す。また、TIG 溶接条件と溶接形状を表 3-5 及び図 3-12 に示す。



(a) TIG 溶接

(b) TIG 溶接 開先形状

図 3-11 溶接試験体の形状及び開先形状 (単位 mm)

表 3-5 TIG 溶接条件 (狙い値)

溶接姿勢	下向き
溶接材料	JIS Z3316 W 49 A 3U 16 ϕ 1.2 mm
電源極性	直流電極マイナス (DCEN : Direct Current Electrode Negative)
電流	250~350 A
電圧	11~20 V
溶接速度	3~10 cm/min
溶加材供給速度	100~200 cm/min
予熱・パス間温度	予熱なし, パス間温度 150 °C以下
シールドガス	Ar 60~100 L/min
ウィービング	あり
拘束	裏面に約 20 mm の仮付溶接を等間隔で施工

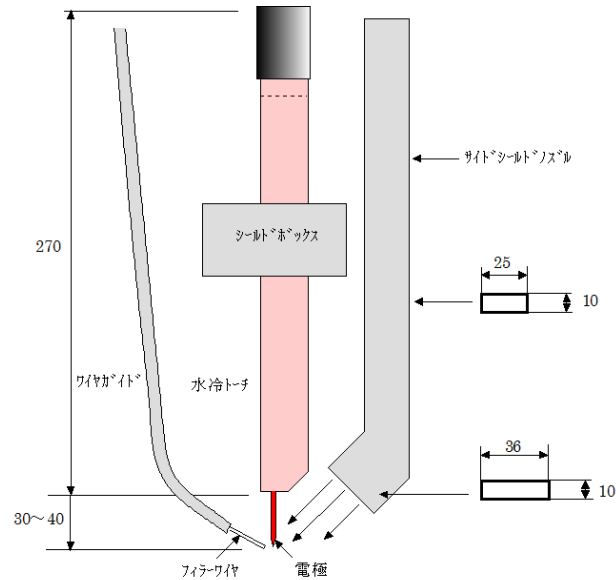


図 3-12 TIG 溶接トーチ形状 (単位 mm)

試験状況及び溶接後の外観を図 3-13 に、溶接後の断面マクロ組織の例を図 3-14 に示す。溶接金属中にはブローホールとみられる多数の欠陥が観察され、初層付近には高温割れとみられる欠陥も確認された。また、開先インロー部の隙間が大きい場合には欠陥が生じやすい傾向が示唆された。さらに、UT 及び放射線透過試験 (RT : Radiographic Testing) による非破壊検査でも、全周にわたりブローホールに相当するシグナルが、また一部に初層付近の高温割れとみられるシグナルが確認された。UT の結果は JIS Z 3060 の 4 類相当、RT の結果は JIS Z 3104 の 4 類相当であった。オーバーパックの溶接規格は整備されていないが、参考として中深度処分の廃棄体容器に対する溶接規格 (WES 7901) で定められた欠陥判定基準と比較すると、基準を満足しない結果であった。多数の欠陥を有することから、継手性能試験の結果も不良であった。

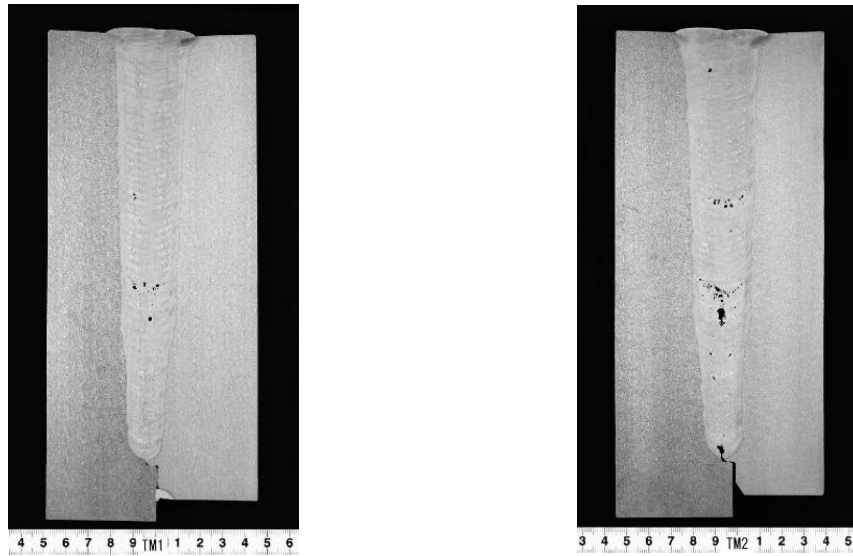


(a) TIG 溶接の様子



(b) TIG 溶接後の外観

図 3-13 TIG 溶接試験状況及び TIG 溶接後の外観



(a) 非破壊検査において欠陥が少ない箇所 (b) 非破壊検査において欠陥が多い箇所

図 3-14 TIG 溶接の断面マクロ組織写真の例

鋳鋼オーバーパックに対する TIG 溶接の試験結果では、溶接金属中にブローホールとみられる多数の欠陥が観察されたほか、初層付近では高温割れも確認された。これらの発生要因として、初層については溶接に伴う変形によりルート部に隙間が生じたこと、中層のピットについては開先とサイドシールドノズルの隙間から外気を巻き込んだことが一因と推定される。中層以降にピットの発生が認められなかった条件においても、サイドシールドノズルを取り外した後の深さで UT によりブローホールとみられる反応が確認されている。したがって、シールド不良はサイドシールドノズルの有無のみで説明できず、開先深さに応じたシールド条件（シールドボックスの流量等）を適切に管理する必要がある。流量を一定とした場合、開先が浅くなるにつれて乱流を生じやすく、シールド性が低下する可能性がある。

初層割れの対策としては、初層～数層においてのど厚が確保される溶接条件を選定することが挙げられる。具体的には、電流及び溶接速度を抑えつつワイヤ送給速度を高める施工条件が考えられる。加えて、蓋の変位に起因するルート部の隙間拡大を抑制するため、焼きばめ等による開先フィッティングの改善が有効である。ブローホール及びピットの抑制に対しては、開先幅及び積層高さに応じたガスノズルの選定、シールドボックスの大型化によるシールド範囲の拡大、並びにシールドガス流量の調整が考えられる。さらに、本試験結果を踏まえ、開先形状の見直し（狭開先化を含む）を検討することが望ましい。

残留応力は応力腐食割れの要因となるものであり、蓋溶接時の過熱に伴って、溶接部及び熱影響部に高い引っ張り残留応力が発生する。本試験でも残留応力測定を予察的に実施したが、上述のように残留応力以外の溶接欠陥が発生したこともあり、詳細な分析には至っていない。溶接部の残留応力の詳細な測定と評価については、上記の課題が解決できる見通しを得てから実施する予定である。

(2) 耐食性の評価

アーク溶接部の耐食性については、酸素濃度が高い環境では溶接部が母材に対して選択的に腐食する傾向が報告されている（横山他，2008；Taniguchi et al., 2011）。一方，低酸素環境下では，母材と溶接部の耐食性は概ね同等である（原環センター，2017；Kobayashi et al., 2011）。本検討では，非破壊検査により溶接欠陥は検出されていないものの，検出限界寸法（2～3 mm）を踏まえ，検出限界程度の欠陥が残存する可能性を保守的に仮定して腐食深さを見積もる必要がある。以上より，溶接部に必要な腐食代は14～21 mm と評価され，母材の必要腐食代（11～18 mm）と比較して著しく大きい値ではない。

(3) 適用性評価

包括的技術報告書で示した全層溶接深さ 190 mm を成立させ得る溶接方法は，これまでの検討範囲ではアーク溶接（TIG/MAG）に限られる。鋳鋼オーバーパックに適用したところ，多数のブローホールが発生し，また，欠陥も残存するなど，十分な品質が得られなかった。試験数が少ないため，鋳鋼を使用したことの影響なのか，深さ 190 mm の全層溶接の難しさに起因する問題なのかについては，得られた結果からは評価ができなかった。アーク溶接を実施するのであれば，実規模スケールでの実証的な試験を繰り返し，再現性についても評価する必要がある。

3.4.2 電子ビーム溶接

(1) 工学的成立性の評価

電子ビーム溶接は，包括的技術報告書のオーバーパック（全層溶接深さ 190 mm）には適用できないが，改良型 PEM のオーバーパックに対しては適用可能である。EBW は，アーク溶接と比較して入熱を抑制でき，溶接残留応力を低減できる可能性があることから，改良型 PEM のオーバーパック接合部を模擬した試験体を製作し，溶接試験を実施した。あわせて，溶接試験体を対象に残留応力の測定及び解析を行い，残留応力低減効果を評価した。本検討の進め方を図 3-15 に示す（小川ほか，2023）。

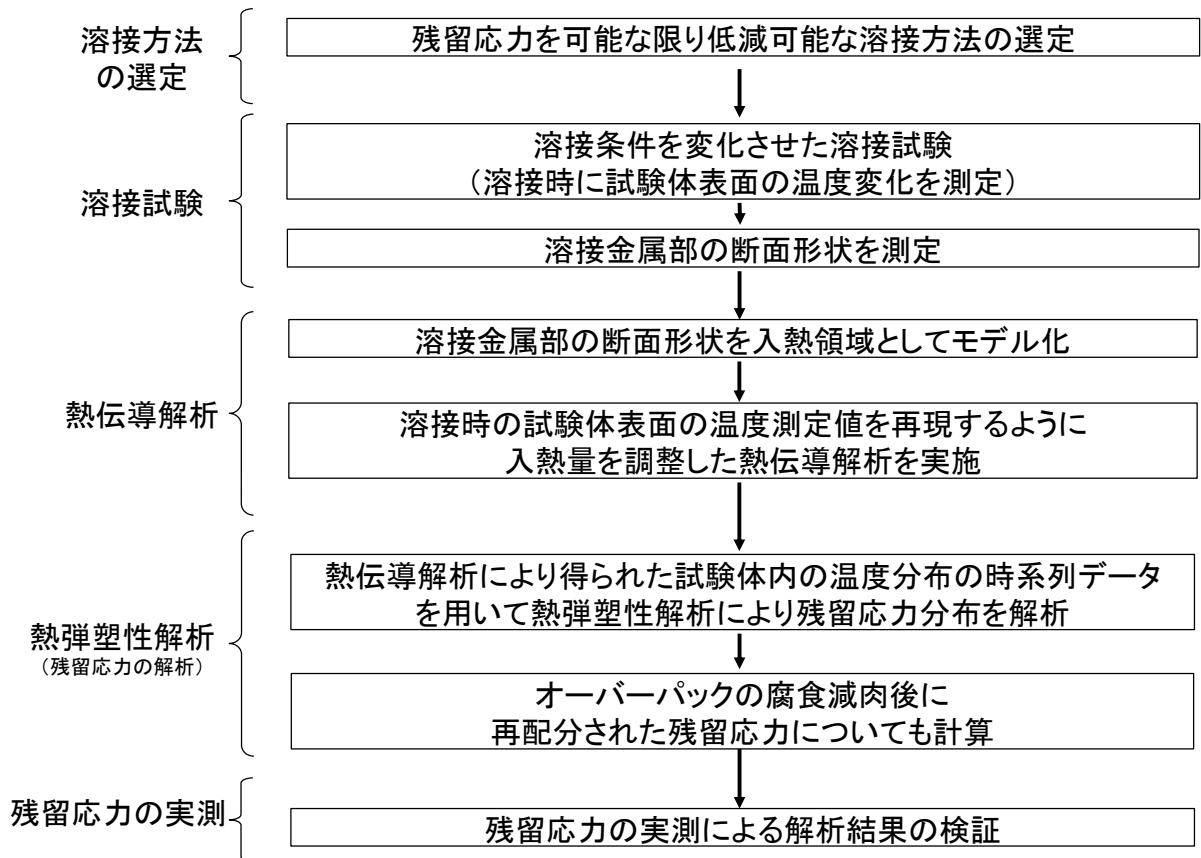


図 3-15 検討フロー図

改良型 PEM 報告書では、オーバーパックの必要厚さを円筒部 64 mm，平板部 99 mm と評価している (NUMO, 2025)。これに基づき、円筒部 65 mm，平板部 100 mm のオーバーパックへの適用を想定した。蓋構造としては落とし蓋構造と平蓋構造が考えられるが、本検討では、溶接時の拘束度が比較的小さく、残留応力の低減が期待できる平蓋構造を対象とした。溶接試験体は、実機構造の溶接部近傍を模擬した矩形の炭素鋼ブロックの突合せ継手とした (図 3-16, 図 3-17)。また、実機では周溶接となることを踏まえ、溶接終盤における既溶接部の拘束の影響を模擬するため、溶接線端部を鋼板のすみ肉溶接により拘束した。さらに、残留応力解析に必要な温度履歴を取得するため、溶接面及び裏面の計 3 か所に温度計を設置した。

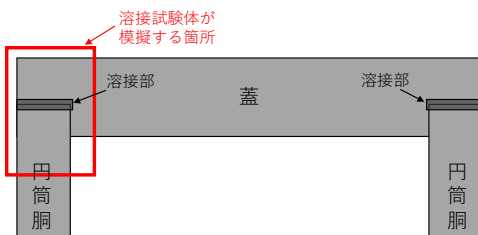


図 3-16 溶接部周辺の容器の構造

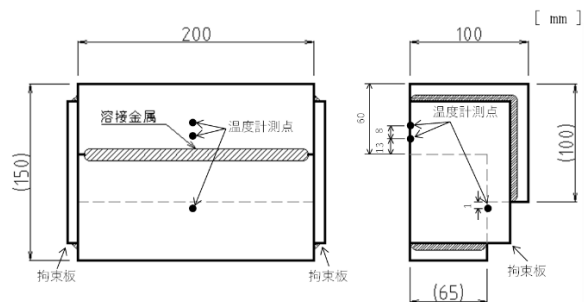


図 3-17 溶接試験体の寸法

残留応力に影響を与え得るパラメータとして、入熱量、溶接能率及び溶接深さに着目し、これらを変化させた7条件でEBWを実施した(表3-6)。

表 3-6 溶接条件

Case		1	2	3	4	5	6	7
説明		標準	高入熱*1	低入熱*1	高溶接能率*2	低溶接能率*2	部分溶接	全厚溶接
溶接深さ (狙い値)	[mm]	約50					約28	約65
加速電圧	[kV]	150						
ビーム電流	[mA]	150	190	120	170	120	50	190
ビーム出力	[kW]	22.5	28.5	18.0	25.5	18.0	7.5	28.5
溶接速度	[mm/min]	400			460	320	400	
理論入熱値 (ビーム出力/溶接速度)	[W/(mm/min)]	56	71	45	55	56	19	71

*1 溶接速度を一定にして、理論入熱値を変化させる。*2 理論入熱値を同程度にして、溶接速度を変化させる。

溶接時の状況及び溶接部の断面マクロ組織の例を図3-18及び図3-19に示す。全ての条件において、RTにより溶接欠陥がないことを確認した。また、断面マクロ組織観察により、各条件で狙い通りの溶け込み深さが得られていることを確認した。



(a) 電子ビーム溶接機



(b) 溶接中の写真

図 3-18 電子ビーム溶接の様子

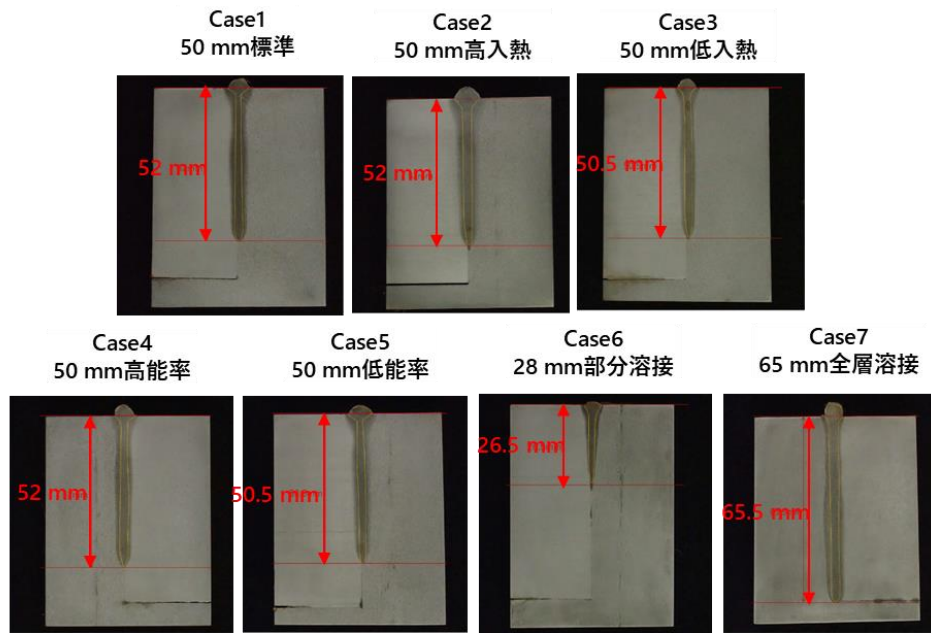


図 3-19 溶接後の断面マクロ組織観察

溶接試験体を対象として、残留応力解析を実施し、溶接線に沿った残留応力の分布状況を推定した。解析モデルを図 3-20 に示す。熱伝導解析については、溶接後の断面マクロ組織観察 (図 3-19) により測定した溶接部の形状を入熱領域としてモデル化し (図 3-21)、溶接線方向に長さ 5 mm (2 要素分) の入熱領域を表 3-6 の溶接速度に従って溶接線方向に移動させ、その後 1 時間放置する解析をした。溶接試験体の初期温度は室温とし、電子ビーム溶接は真空チャンバー内で行うため、試験体表面の対流熱伝達条件は設定せず、試験体表面から真空チャンバー内の空間への放射を考慮した。入熱領域への入熱量については、溶接時に測定した温度変化に近い結果となるように、実際のビーム出力に対して入熱効率を設定した (図 3-22 参照)。次に、熱伝導解析結果から得られた温度分布の時系列データを用いて、材料内での熱変形の拘束により発生する残留応力を熱弾塑性解析により計算した。また、長期にわたる応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) の発生過程を検討する上では、全面腐食の進展後における材料表面の残留応力についても重要であるため、全面腐食による腐食減肉を模擬して溶接面近傍の要素を削除した際の応力再配分についても解析した。

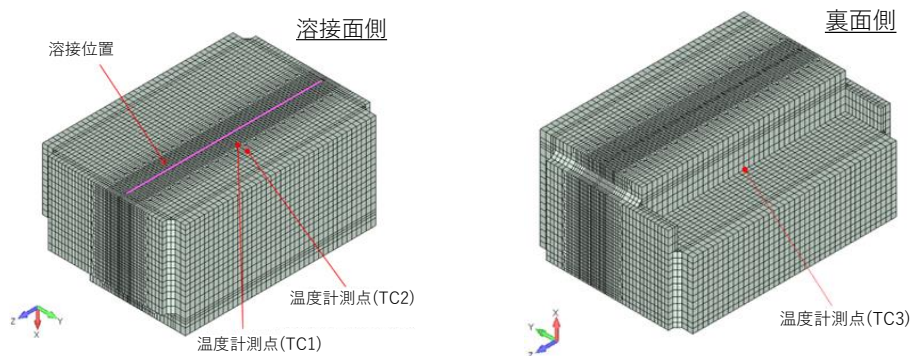


図 3-20 解析モデル

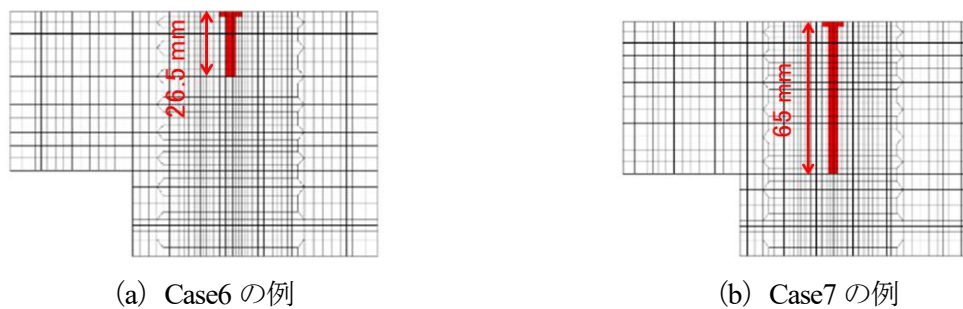


図 3-21 入熱領域のモデル化

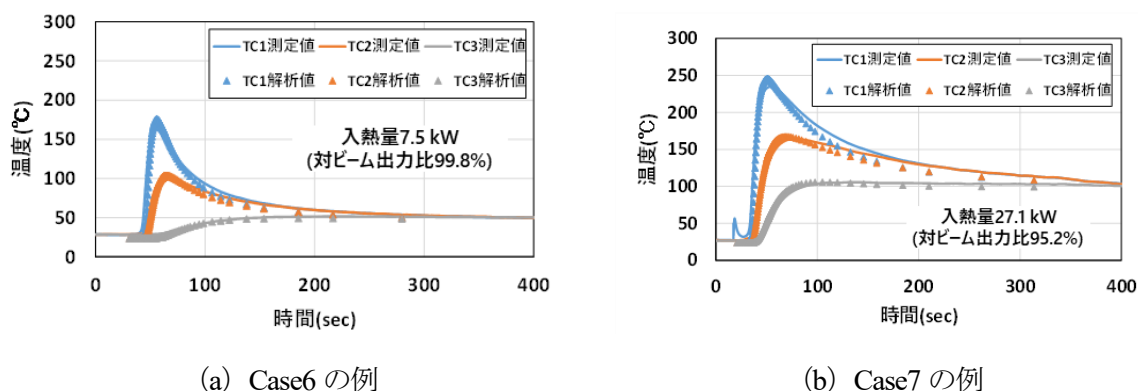


図 3-22 温度測定値と解析値の比較

部分溶接（深さ 28 mm）と全層溶接（深さ 65 mm）で溶接深さが残留応力の分布に与える影響を評価するため、Case6 及び Case7 の腐食減肉前後の残留応力解析結果を図 3-23 に比較して示す。ここでは、溶接線直交方向よりも残留応力が高かった溶接線方向の残留応力分布を示している。各 Case の溶接面の表面における溶接線方向の残留応力の最大値を図 3-24 に示す。図 3-24 に示すとおり、入熱量（Case1,2,3）と溶接能率（Case1,4,5）については、腐食減肉前後ともに表面の残留応力の最大値にあまり感がなかった。一方で溶接深さ（Case1,6,7）については、腐食減肉前はあまり感がないが、腐食減肉後は部分溶接（Case6）よりも全厚溶接（Case7）とした方が表面の残留応力の最大値が約 50%低下することが分かった。このような結果となった要因としては、図 3-24 の Case6 と Case7 を比較すると分かるように、溶接深さが浅いと残留応力のピーク箇所も浅くなり、腐食減肉すると溶接面の表面がピーク箇所に接近したためと考えられる。残留応力解析の結果、長期にわたる腐食減肉を考慮した材料表面の最大残留応力を低減するには、入熱量や溶接能率を制御するよりも、溶接深さを深く設定することが効果的であるとの知見が得られた。

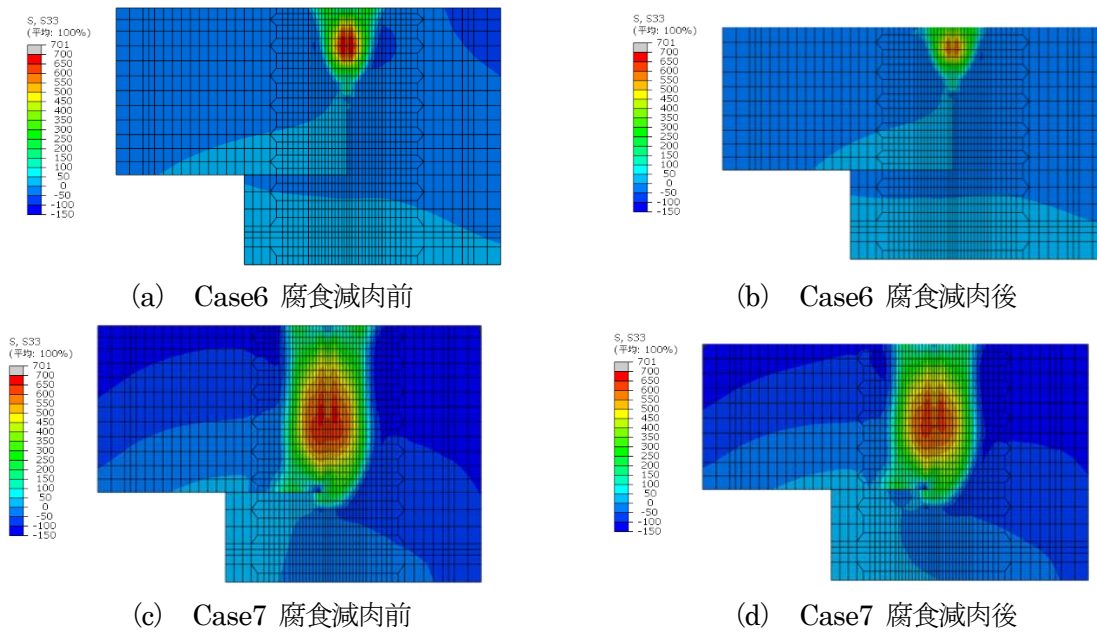


図 3-23 残留応力解析により求めた溶接線方向の残留応力分布 (単位: MPa)

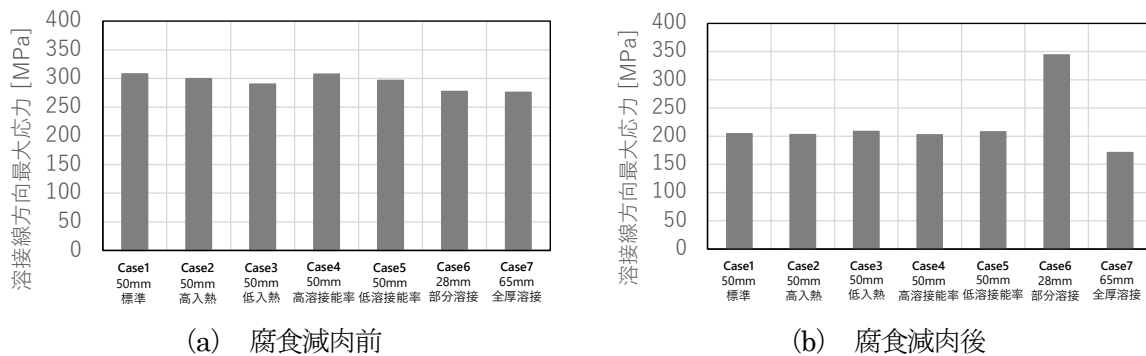


図 3-24 溶接面表面における溶接線方向の最大残留応力値

残留応力の解析結果を検証するため、Case7 の溶接試験体を対象に残留応力を実測した (高倉, 2024)。測定方法は、空間分解能が比較的高い方法である iDHD (incremental Deep Hole Drilling) 法とコンター法を適用した。

iDHD 法は、深穴穿孔法 (DHD 法) の一種であり、DHD 法は、測定対象物の測定位置に「参照穴」を開け、その参照穴の周りを円筒形にくり抜くこと (トレパニング) で生じる参照穴の寸法変化から残留応力を算出するものである (高倉, 2023)。溶接部のような高応力部の測定では、測定プロセスにおいて塑性ひずみが生じる可能性があるため、トレパニングを少しずつ進める度に参照穴径を計測することで塑性ひずみの影響を可能な限り小さくすることができる iDHD 法 (高倉, 2023) を選定した。測定箇所は、溶接金属中心、溶接金属中心から 10 mm 及び 20 mm の 3 か所とした。

コンター法は、以下の手順で残留応力を測定する方法であり、部材内部の残留応力が断面の 2 次元マップとして得られることが特徴である (高倉, 2024)。

- ・ 対象物をワイヤ放電加工により切断
- ・ 応力解放により切断面の両面に生じた微小な面外変形を三次元座標測定機で精密に計測
- ・ 切断面の変形形状を模した有限要素解析モデルを作成

- ・ 切断面を平面に戻す強制変位を与えることで切断前の残留応力分布（切断面直交方向）を再現

切断面（＝測定面）は、溶接試験体の中央部における溶接線を直交する面とし、溶接線方向の残留応力分布を測定することとした。

測定結果の例として、溶接金属中心における残留応力の溶接深さ方向の分布を図 3-25 に示す。図には、iDHD の測定結果、コンター法の測定結果及び残留応力解析の結果を示している。また、図 3-26 にはコンター法と実施した残留応力解析による 2 次元マップを並べて示している。

溶接線方向応力の熱弾塑性解析結果と iDHD 法及びコンター法の測定結果はよく一致しており、溶接線方向の熱弾塑性解析結果は妥当であったといえる。一方で、溶接線直交方向の熱弾塑性解析結果は、溶接深さ中心部において iDHD 法による測定結果を下回る部分が見られた。熱弾塑性解析においては、入熱領域に均一の入熱量を与えていたが、実際には均一ではなく溶接深さ中心部において入熱量が高い分布となっていた可能性がある。溶接時の温度履歴データの取得において、今回は試験体表面のみを測定したが、今後、より正確な入熱分布を模擬する場合には、溶接部近傍の試験体内部の温度についても測定を行い、入熱の設定に反映することが望ましいと考えられる。

いずれにせよ、最も残留応力を低減可能な溶接条件を検討する上では、より残留応力の高い溶接線方向の解析結果が重要であり、溶接条件に応じた溶接線方向の残留応力の変化を見る目的においては、今回の熱弾塑性解析結果は妥当であったといえる。

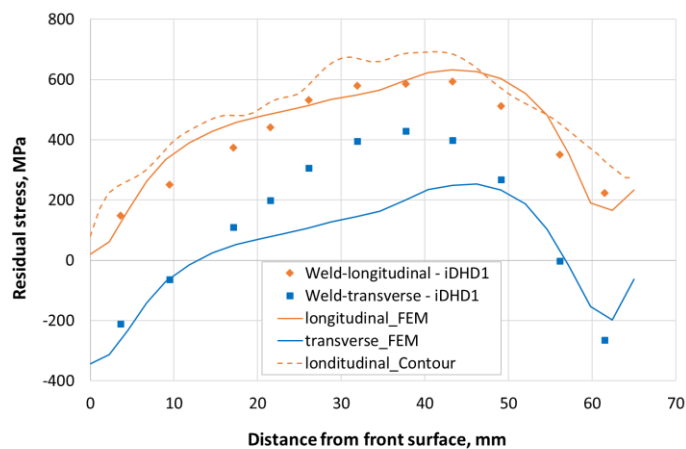
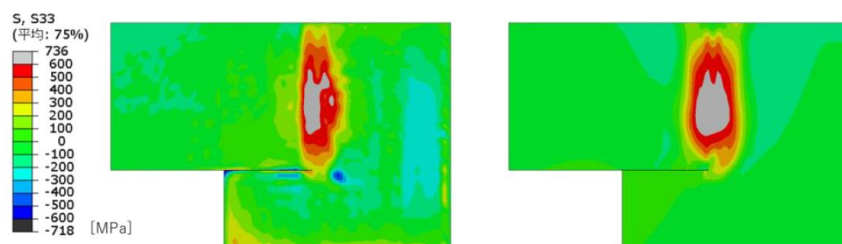


図 3-25 残留応力の深さ方向分布（溶接金属中心の例）



(a) コンター法による測定

(b) 残留応力解析

図 3-26 コンター法による残留応力分布の測定結果と残留応力解析の結果（溶接線方向）

(2) 耐食性評価

電子ビーム溶接では溶加材を用いず、母材を溶け込ませて接合する。このため、全面腐食、孔食及びすきま腐食に対して、接合部は母材と同程度の耐食性を有することが確認されている(横山他, 2008)。

(3) 適用性評価

電子ビーム溶接は、短時間で溶接が可能であり、多層盛りを要するアーク溶接と比較して施工性に優れる。また、溶接欠陥及び溶接残留応力が発生しにくいという特徴を有する。さらに、母材の溶け込み溶接であることから、耐食性は母材と同程度であることが確認されている(横山他, 2008)。以上より、改良型 PEM のオーバーパックに対して、電子ビーム溶接は適用性が高い蓋接合技術である。

3.5 炭素鋼オーバーパックの製作技術の適用性評価まとめ

表 3-7 に炭素鋼オーバーパックの製作技術の適用性評価結果をまとめる。評価基準を以下のように設定した。

- A：(適用可能) 適用可能であることが実規模の実証試験で確認されている
- B：(条件付き適用可能) 類似条件での適用事例がある
- C：(適用範囲外) 技術の適用条件範囲外である

包括的技術報告書のオーバーパックについては、母材製作技術として鍛造が適用可能であり、蓋接合技術として全層溶接深さ 190 mm を成立させ得る溶接方法は、これまでの検討範囲ではアーク溶接 (TIG/MAG) に限られる。一方で、多層盛り溶接となることから溶接に要する時間が 24~33 時間と長時間に及ぶ点が課題であり、運用上の要求 (例：施工スループット) を満足するためには溶接時間の短縮に向けた技術開発が必要である。なお、100 mm 程度の部分溶け込み溶接を設計上許容できる場合には、電子ビーム溶接の適用も候補となる。部分溶け込み溶接であっても耐食性及び構造健全性を確保できる見通しが示されていることから (NUMO, 2021)、当該条件に限り「条件付き適用可能」と評価した。熱間押抜、熱間曲げ加工、冷間曲げ加工については、厚さ条件等の観点から包括的技術報告書のオーバーパックには適用範囲外であると評価した。

改良型 PEM のオーバーパックについては、母材製作技術として鍛造が適用可能であり、蓋接合技術として電子ビーム溶接が適用可能である。電子ビーム溶接はアーク溶接と比較して施工性に優れ、溶接残留応力を低減できる可能性があること、並びに母材の溶け込み溶接であるため耐食性が母材と同程度であることが確認されている (横山他, 2008)。以上より、改良型 PEM のオーバーパックに対して電子ビーム溶接は有力な蓋接合技術である。なお、熱間押抜による継目無鋼管及び熱間曲げ加工については、適用厚さの観点から製作が可能である一方、実規模での製作実証や品質管理性の確認が必要であることから、「条件付き適用可能」と評価した。鋳造については、実規模での製作性は確認されているものの、鋳造欠陥の寸法・分布によって有効厚さが減少し、設計条件によっては腐食寿命に影響を与え得るため、適用に際しては欠陥寸法を踏まえた評価と非破壊検査による管理方法の具体化が必要である。冷間曲げ加工及び LP-GMAW については、いずれの設計例に対しても適用範囲外であると評価した。

表 3-7 炭素鋼オーバーパックスの製作技術に関する適用性評価結果のまとめ

		包括的技術報告書		改良型 PEM 報告書	
		閉鎖後長期 安全性	工学的成立性	閉鎖後 長期安全性	工学的成立性
製 作 法	鍛造	A	A	A	B
	鋳造	B	A	C	B
	熱間押抜	-	C	-	B
	熱間曲げ加工	-	C	-	B
	冷間曲げ加工	-	C	-	C
溶 接 技 術	アーク溶接 (TIG, MAG)	A	B	A	C
	電子ビーム溶接	A	B	A	B
	LP-GMAW	-	C	-	C

A: 適用可能, B: 条件付き適用可能, C: 適用範囲外, -: 未評価

第4章 銅コーティングオーバーパック製作技術の適用性評価

4.1 銅コーティングオーバーパックの設計例

スウェーデンやフィンランドで検討されてきた銅-炭素鋼複合処分容器については、これまで、厚さ約 50 mm（製作性及びハンドリング性の確保のために必要な厚さ）の銅製容器内に炭素鋼容器を挿入する二重容器の製作方法が開発されてきた（SKB, 2010）。一方、2011 年頃からカナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）において、炭素鋼容器に厚さ 3 mm の銅をコーティングすることで銅の使用量を削減した製作技術の開発も進められている（NWMO, 2012）。この処分容器は、力学的な構造健全性を炭素鋼製容器により確保し、炭素鋼製容器の表面にコーティングした銅層により耐食性を確保するものである。この銅層を本書では「銅耐食層」と呼ぶ。

NUMO は、日本の地層処分における銅コーティング技術の適用性を評価するため、銅コーティングオーバーパックの開発に取り組んでいる。以下では、日本の地質環境における必要腐食代と炭素鋼製容器の設計例について述べる。

4.1.1 腐食代

銅コーティングオーバーパックの耐食性評価にあたり、埋設後の環境条件の変遷に応じて想定される腐食形態を整理する。埋設後初期は、地上から持ち込まれた酸素が残存するため、残存酸素による腐食が生じ得る。また、同時期はオーバーパック表面の放射線量が高いことから、地下水の放射線分解により生成する酸化性化学種により腐食が促進される可能性がある。埋設後長期には残存酸素が消費され、低酸素環境となる。一般に、銅は酸素を含まない天然水環境で熱力学的に安定であり、水の還元による腐食は生じない。一方、硫化物を含む環境では硫化銅として腐食が進行する。これらの腐食現象を考慮して、期待する耐用年数と腐食深さを評価した（鈴木ほか, 2020 ; Suzuki et al., 2021）。

埋設後初期の残存酸素による腐食については、緩衝材中に残存している酸素が、保守的に、すべて銅コーティングオーバーパックの腐食によって消費されると仮定して平均腐食深さを算出し、さらに腐食の不均一化を考慮して最大腐食深さを見積もった。その結果、平均腐食深さは 0.07 mm と算出され、腐食の不均一化を考慮して最大腐食深さと平均腐食深さの比を保守的に 3（Bresle et al., 1983）とすると、最大腐食深さは 0.21 mm と見積もられた。

埋設後長期の低酸素環境における硫化物イオンによる腐食については、国内の地下水の HS^-/H_2S 濃度に基づいて、硫化物イオンの緩衝材中の拡散律速により腐食反応が進むものとしてモデル化を行い、腐食量を見積もった。国内に広く存在する地下水の HS^-/H_2S 濃度は 1×10^{-7} mol/L 未満であると評価されている（NUMO, 2021）。これに保守的に硫酸塩還元菌が影響する可能性を考慮し、地下水中の硫酸イオンがすべて硫化物イオンに還元されると仮定した場合には、 HS^-/H_2S 濃度は最大 1×10^{-4} mol/L と想定される（NUMO, 2021）。緩衝材中の HS^- の実効拡散係数 1×10^{-11} m²/s（Bengtsson, 2015）を用いて、 HS^-/H_2S 濃度が $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-4}$ mol/L のときの 1000 年間の銅コーティングオーバーパックの平均腐食深さを算出し、最大腐食深さと平均腐食深さの比 3（Bresle et al., 1983）を考慮すると、最大腐食深さは 0.009 ~ 9 μm (= 0.000009 ~ 0.009 mm) と見積もられた。

これらの結果に基づけば、1000 年間の最大腐食深さは 0.22 mm となり、低酸素環境下における腐食深さの増分は最大腐食深さの 4% 未満であり、残存酸素による腐食が支配的である。また、期待する寿命が 10 万年の場合では、低酸素環境下の腐食深さの増分は、0.009 ~ 0.9 mm (= 9 ~ 900 μm) 程度であり、残存酸素による腐食分と合算しても、最大腐食深さは 0.21 ~ 1.1 mm 程度と推定される。

この結果を踏まえると、銅コーティング層の厚さは NWMO と同じ 3 mm で 10 万年程度、また、HS/Hs 濃度が低い条件では、100 万年近い腐食寿命を見積ることができる。

ガラス固化体からの放射線による腐食の加速の可能性、応力腐食割れの可能性についても検討している。放射線による腐食の加速については、銅コーティングオーバーパックの初期の表面の吸収線量率は約 10 Gy/h であり、100 年後には 1 Gy/h 以下にまで低下する。最新の科学的知見に基づけば、100 Gy/h 以上の放射線照射下でなければ銅の腐食に顕著な加速はないとされている (King and Behazin, 2021) ため、放射線による腐食影響はわずかであると言える。また、銅の応力腐食割れについては、純銅は SCC 感受性を有さないこと、銅は金属組織上も水素脆化を起こさないことが知られており、地層処分環境下で銅の SCC 発生は起こりにくいと考えられる (King et al., 2010)。

4.1.2 耐圧代と容器の寸法・形状

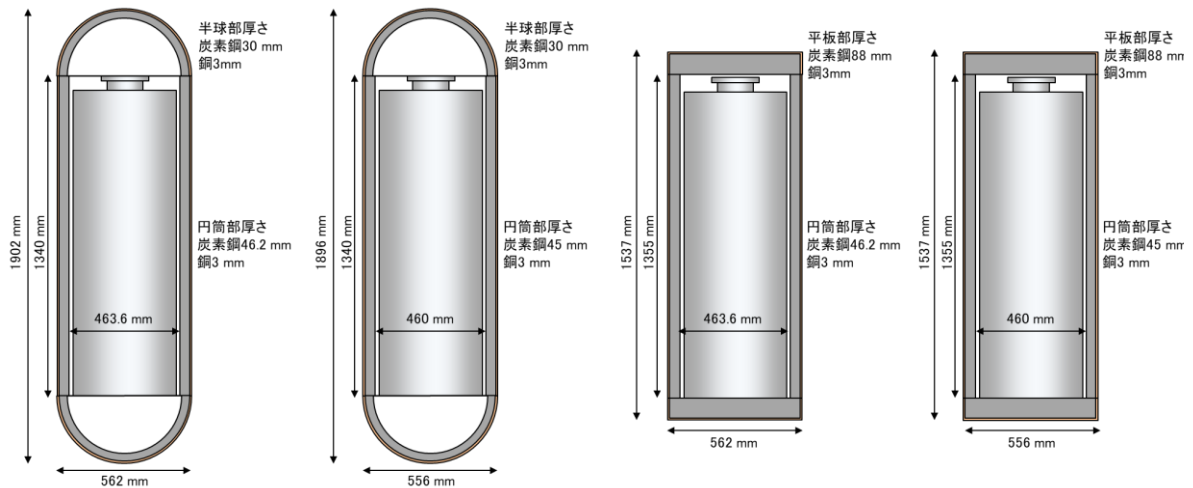
埋設後のオーバーパックには、緩衝材の再冠水に伴う膨潤圧及び地下水の静水圧が作用する。さらに、オーバーパックの腐食膨張や岩盤のクリープ変形により緩衝材が圧密されると、その反力がオーバーパックに作用する。以上を踏まえ、最大 11 MPa の外圧 (膨潤圧・静水圧等を考慮した外圧条件の包絡値) (NUMO, 2021) を想定し、構造材である炭素鋼部の必要耐圧厚さを、発電用原子力設備規格における容器の設計方法を準用して算定した。その結果、必要耐圧厚さは円筒部で 38 mm となった。蓋部については、NWMO と同様に、応力腐食割れリスク低減の観点から半球形状を想定した場合、必要耐圧厚さは 25 mm となった。4.1.1 項で述べたとおり、地層処分環境では応力腐食割れ感受性は基本的に低い。

なお、半球形状に加え、NUMO は独自に平板形状の蓋についても適用性を検討した。上記と同様の方法で必要耐圧厚さを算定した結果、88 mm となった。このように適切に厚さを設計することにより、外圧が作用した場合にも、オーバーパック表面に生じる引張応力は低くできると考えられる。したがって、平板形状であっても応力腐食割れリスクを抑制することは可能である。

NWMO が開発した銅コーティング容器では、円筒部に内径 463.6 mm、厚さ 46.2 mm の規格品の継目無鋼管 (JIS G 3456 STPT480 A550 Sch.140 相当) を用い、半球部には厚さ 30 mm の厚板を曲げ加工した部材を用いている (NWMO, 2018)。ガラス固化体の外径は 428~440 mm であるため、同規格の継目無鋼管に挿入可能である。また、円筒部及び半球部の厚さはいずれも必要耐圧厚さを上回ることから、日本の処分概念で想定される外圧条件に対しても適用可能である。

円筒部材を規格品の継目無鋼管ではなく、後述する板巻鋼管 (4.3 参照) とする場合は、内径及び厚さを任意に設定できる。板巻鋼管の内径は、ガラス固化体の外径公差、板巻鋼管の内径公差、及び溶接部の余盛高さを考慮し、460 mm と設定した (図 4-1 参照)。板巻鋼管の厚さは、必要耐圧厚さ (38 mm) を上回ればよいが、NWMO が使用する継目無鋼管に近い厚さとすることで、製作技術及び各種評価において共通の考え方を適用しやすい。このため、厚さは 45 mm と設定した。円筒部材に板巻鋼管を用いる場合の半球部材の厚さについても同様に、必要耐圧厚さ (25 mm) を上回り、かつ NWMO の半球部と同じ厚さである 30 mm と設定した。

NWMO と同様に円筒部材に規格品の継目無鋼管を用いる場合と、円筒部材に板巻鋼管を用いる場合、並びに半球形状の蓋と平板形状の蓋を組み合わせた銅コーティングオーバーパックの寸法・形状を図 4-1 に示す。NWMO の銅コーティング容器は、外径 564 mm、長さ 2514 mm であり、NUMO の銅コーティングオーバーパックと比較して若干大きいものの、概ね同等のサイズである。



(a) 継目無鋼管半球蓋 (b) 板巻鋼管半球蓋 (c) 継目無鋼管平板蓋 (d) 板巻鋼管平板蓋

図 4-1 銅コーティングオーバーパックの寸法・形状

4.2 設計例に適用可能な製作技術

4.2.1 NWMO による銅コーティングオーバーパックの製作方法

図 4-2 に NWMO における放射性廃棄物を封入する容器の製作方法と工程を示す (NWMO, 2016 ; 2017 ; 2018 を基に和訳・編集)。この方法では、以下の工程により処分容器を製作する。

- ① 炭素鋼製の容器部と蓋部の表面を電気メッキにより銅コーティングする。
- ② 放射性廃棄物を容器に挿入後、蓋接合部の炭素鋼部分を溶接する。
- ③ 溶接部の上部を冷間溶射により銅コーティングする。

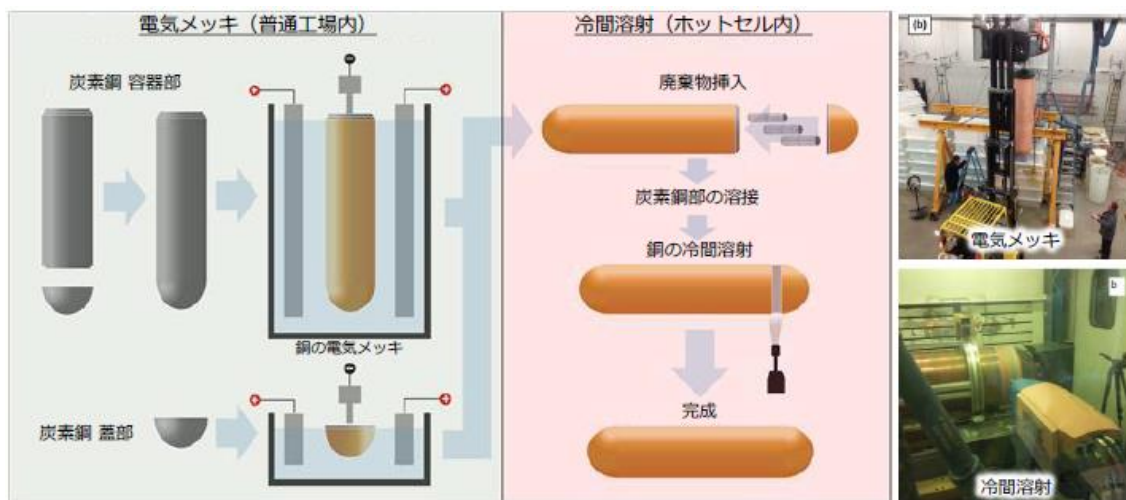


図 4-2 NWMO 方式による製作方法 (NWMO, 2016 ; 2017 ; 2018 を編集)

NWMO では、この方式による製作技術の実証及び各種製作条件の最適化を目的として、複数体の実規模銅コーティング容器の連続製作試験が 2018 年度から 2023 年度にかけて実施され、合計で 17 体の銅コーティングオーバーパックが試作されている。試作を通じて、電気メッキや冷間溶射の密着性 (付着強度を含む)、銅の純度、機械的性質等を向上させ、それらの品質を確保するための管

理すべき製作条件の許容範囲（管理幅）が特定されている（NWMO, 2024）。連続製作試験の様子を図 4-3 に、試作された銅コーティング容器の例を図 4-4 に示す。なお、上述のように NWMO では外圧作用時に容器表面に引張応力が生じにくい形状とする観点から、蓋部を半球形状としている（Boyle, C. H., Meguid, 2015）。

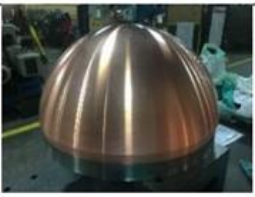
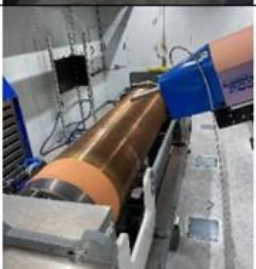

UFC Component	Copper Coating Stages		
	Steel	Bulk Copper	Machined Copper
<u>Hemi-head</u>			
<u>Shell</u>			
<u>Lower Assembly</u>			
<u>Closure Zone</u>			

図 4-3 NWMO における実規模銅コーティング容器の連続製作試験の様子（NWMO, 2022）



(a) 蓋接合前 (NWMO, 2025)



(b) 蓋接合後 (NWMO, 2025)

図 4-4 試作した銅コーティング容器の例

4.2.2 母材製作技術

母材の製作方法としては、以下の2種類が考えられる。

- ・ 炭素鋼円筒容器を製作し、その表面に銅コーティングを施工する方法
- ・ 銅-炭素鋼クラッド鋼板を曲げ加工し、接合線に沿って炭素鋼部及び銅耐食層を接合することで処分容器を製作する方法

NWMO の電気メッキ法と接合部を銅冷間溶射する方法は前者の代表的な方法である。類似の方法として、廃棄物を封入した炭素鋼容器の全表面に銅冷間溶射により銅コーティングを施工する方法が報告されている (Choi et al., 2010)。

クラッド鋼板を用いて円筒容器を製作するためには、外表面が銅耐食層となるように銅-炭素鋼クラッド鋼板を曲げ加工し、接合線に沿って炭素鋼部及び銅耐食層を溶接することにより製作する。クラッド鋼板の製作方法としては、熱間圧延クラッド鋼板や爆着クラッド鋼板が候補として考えられる。しかし、これらの方法を処分容器へ適用した事例は、これまで確認されていない。

半球形状の蓋については、NWMO の方法のように鋼板を熱間成形して表面に銅を電気メッキする方法に加え、銅-炭素鋼クラッド鋼板を成形して半球形状に加工する方法も考えられる。平板形状の蓋については、蓋形状に加工した後に表面を銅メッキする方法のほか、熱間圧延あるいは爆着により蓋表面に銅板を圧着する方法が考えられる。ただし、いずれの代替方法についても、処分容器の蓋への適用事例は現時点では確認されていない。

以上より、NWMO の方法以外にも母材製作の選択肢は存在する。しかし、処分容器への適用事例が限られることから、適用にあたっては実規模での製作実証により、(1) 銅耐食層の密着性、(2) 接合部の健全性、(3) 検査性・品質管理手順、を確認する必要がある。

4.2.3 蓋接合技術

蓋接合技術としては、NWMO が開発した、炭素鋼接合部を溶接し、その表面に銅冷間溶射法により銅耐食層を形成するという方法がある。炭素鋼部の溶接法としては、設計で要求される接合厚さ（継手強度・荷重条件に基づく）を確保できる場合には、アーク溶接、電子ビーム溶接に加え LP-GMAW も適用可能である。

また、銅炭素鋼二重容器に適用されている技術として、銅層を摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）により接合する方法（SKB,2010）やEBWにより接合する方法（Aalto,1998）がある。EBWは銅の特性上、ルート欠陥やポロシティ（気泡）が発生しやすく、非破壊検査での検出も困難である。一方、FSWは固相接合であるため、熔融に伴う複雑な現象（蒸発や凝固割れ）を回避でき、再現性及び品質管理性の観点から、現在では基本の接合方法とされている。

銅コーティングにより形成した銅耐食層に対してもFSWの適用は可能と考えられる。しかし、厚さ3mmの銅耐食層の接合部に構造健全性（外圧に対する継手強度等）まで担保させる設計とすることは難しく、必要な健全性が確保できないおそれがある。このため、NUMOは炭素鋼製容器をねじ込み接合として構造健全性を確保し、銅耐食層のみをFSWで接合する方法を考案した。この方法については、4.4に後述する。

4.3 母材製作技術の適用性評価

銅コーティング容器の炭素鋼胴部材として、NWMOは継目無鋼管を採用しているが、肉厚・大口径であるため製作可能な工場数が限られる。これに対して、圧延鋼板を曲げ加工して継目部を溶接して製作される板巻鋼管は、調達性が相対的に高く、経済的合理性を向上できる可能性がある。そこで本節では、板巻鋼管の継目部が銅コーティング（メッキ）品質及び蓋接合（溶接）品質に与える影響を確認するため、メッキ試験及び蓋溶接試験を実施した。

4.3.1 板巻鋼管の製作

板巻鋼管は、溶接構造用圧延鋼材であるSM490A（JIS G 3106）を用い、内径460mm、板厚45mmの仕様で製作した。内径の設定にあたっては、ガラス固化体の最大外径（440mm）に対し、板巻鋼管の寸法公差（JIS G 3444等）及び溶接部の余盛高さ（最大3mm）を考慮し、内表面の機械加工を実施しないケースを想定して必要内径を450mmとした。さらに、製作・取扱い時の裕度として10mmを見込み、内径を460mmに設定した。

溶接には、肉厚長尺部材の量産に適したSMAWを採用した。板巻鋼管の製造製作中の様子を図4-5に示す。製造製作後、溶接部を対象にRTを実施した結果、JIS Z 3104の2類判定に合格していることを確認した。また、寸法検査ではJIS G 3444の規格を満足し、あわせて溶接部の余盛高さが3mm以下であることを確認した。

板巻鋼管の製作に用いた高炉材及び電炉材の化学成分を表4-1に示す。製造製作後、溶接部の外観検査により、溶接ビード及びその近傍に割れ、溶け込み不足、スラグ巻き込み、ピット等がないことを確認した。さらに寸法検査では、一般構造用炭素鋼鋼管（JIS G 3444）の2号区分を満たすこと、及び溶接部の余盛高さが3mm以下であることを確認した。溶接部の断面マクロ組織写真の例を図4-6に示す。

表 4-1 板巻鋼管の製作に用いた高炉材及び電炉材の化学成分（単位：wt%）

	C	Si	Mn	P	S				
JIS 規定	0.20 以下	0.55 以下	1.6 5 以下	0.035 以下	0.035 以下				
高炉材	0.16	0.27	1.46	0.011	0.003				
電炉材	0.14	0.25	1.47	0.015	0.002				
	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Sn	B	
JIS 規定	-	-	-	-	-	-	-	-	
高炉材	-	-	-	-	-	-	-	-	
電炉材	0.16	0.08	0.10	0.03	0.012	0.005	0.010	0.0007	



(a) 曲げ加工

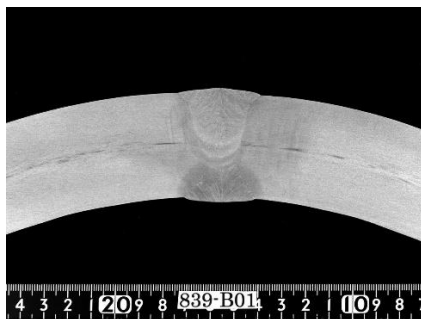


(b) 溶接

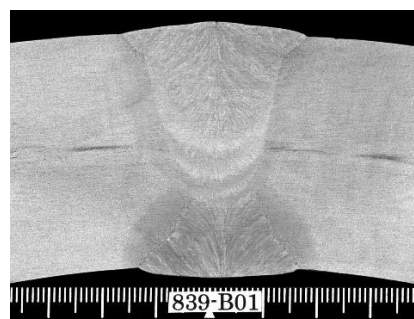


(c) 矯正

図 4-5 板巻鋼管の製作の様子



(a) 溶接部周辺



(b) 溶接部拡大

図 4-6 溶接部の断面マクロ組織写真（高炉材の板巻鋼管の例）

4.3.2 板巻鋼管を対象とした銅コーティング試験

板巻鋼管に対する銅コーティング試験では、図 4-7 の赤枠に示すように、鋼管継目部を含む領域を対象として電気メッキ試験を実施した。なお、溶接試験及び溶接部への冷間溶射試験の結果については 4.4 に述べる。

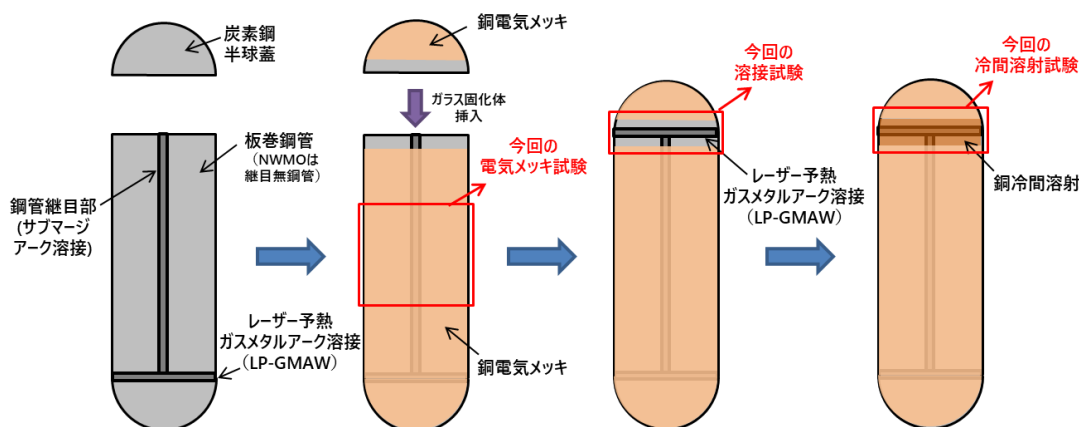
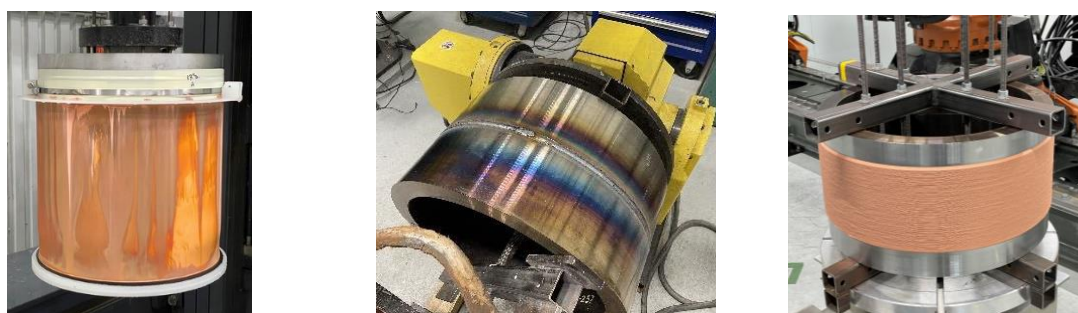


図 4-7 板巻鋼管を用いた NWMO 方式による製作方法と今回の試験部位

NWMO が採用している条件を適用して、図 4-8 に示すとおり、板巻鋼管を用いた試験体に対し、電気メッキ、LP-GMAW、及び銅冷間溶射の各試験を実施した。非破壊検査（UT 及び渦電流探傷試験（ET : Eddy Current Testing））の結果、電気メッキ部（継目部を含む領域）において非密着部は検出されず、板巻鋼管に対するメッキの適用性を確認できた。



(a) 銅電気メッキ試験体

(b) 溶接試験体

(c) 銅冷間溶射試験体

図 4-8 板巻鋼管を用いた NWMO 方式による製作試験

4.4 蓋接合技術の適用性評価

4.2 に述べたように蓋接合技術としては、炭素鋼容器を LP-GMAW により溶接し、その表面を銅冷間溶射する「NWMO 方式」と、炭素鋼容器をねじ込み接合し、銅耐食層の突合せ部を FSW で接合する「NUMO 方式」の検討を進めている。また、韓国原子力研究院（KAERI）の方式のように炭素鋼容器を溶接してから、容器全体に銅冷間溶射による耐食層を施工する方法も考えられる。KAERI 方式は接合部に限れば NWMO 方式と類似であることから、本節では代表として NWMO 方式を板巻鋼管に適用した結果について述べる。図 4-8 に示した試験のうち、NWMO 方式での蓋接合部の炭素鋼の LP-GMAW 試験及び溶接部への銅冷間溶射試験を板巻鋼管に対して実施した。その結果、LP-GMAW 溶接部（図 4-8 (b)）及び溶接部への冷間溶射（図 4-8 (c)）ともに外観上の問題はなかったものの、非破壊検査では溶接線に沿って部分的に密着不良部が検出された。また、LP-GMAW の溶接部にも一部に溶接欠陥が検出された。これらは、NWMO が継目無鋼管向けに設定した試験条件を変更せずに板巻鋼管へ適用したことが一因と考えられる。今後、板巻鋼管に適した溶

接条件及び冷間溶射条件を検討することで、密着不良部や溶接欠陥の発生を低減できる可能性がある。

NUMO 方式による蓋接合技術の開発は、現時点では要素試験により適用性を評価する段階にある。図 4-9 に NUMO 方式の概念図を示す。本方式では、NWMO 方式で必要となる接合部の予熱、余盛除去、非破壊検査を含む炭素鋼接合部の溶接工程を省略できる。また、冷間溶射は耐食層の形成に時間を要するのに対し、FSW は比較的短時間で銅接合部を形成できる可能性がある。これらにより、接合時間の短縮及び品質管理の容易化が期待される。以下では、炭素鋼部の機械的接合と銅耐食層の FSW の結果について述べる。

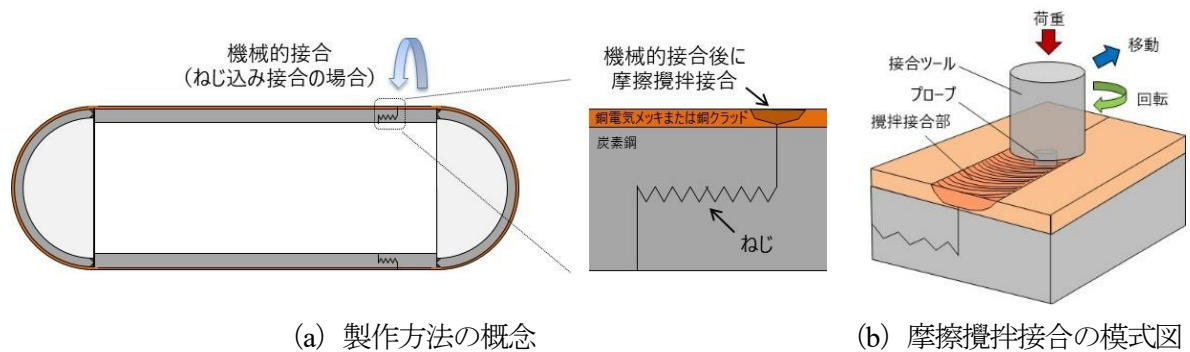


図 4-9 NUMO 方式による製作方法

4.4.1 炭素鋼部の機械的接合

(1) 機械的接合方法の選定

産業界で適用実績のある機械的接合方法（ねじ込み接合、焼きばめ、冷やしばめ、ピン、ボルト、リベット等）を候補として整理し、後工程の摩擦攪拌接合を含めた接合部構造の単純さ、遠隔による接合作業の容易性、並びに締結後の再現性（所要の軸力を管理しやすいこと）を重視して検討した。その結果、ねじ込み接合を機械的接合方法の検討対象として選定した。

(2) ねじ込み接合部の設計

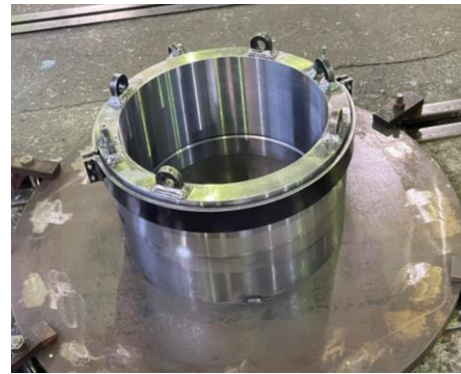
4.3.1 で製作した板巻鋼管（炭素鋼）を対象に、オーバーパック周辺の外圧（最大深度 1,000 m を想定）に耐え、緩みにくさや締結容易性等を考慮したねじ込み接合部を設計した。接合部の設計にあたっては、発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1）を参照し、有限要素法による構造解析結果を踏まえて設計した。

(3) ねじ込み接合試験

設計したねじ込み接合部を試作し、鋼管の外面を摩擦力で把持するゴムシート付回転バンドを用いて締結試験（図 4-10）を行った。その結果、締結時のかじり（焼付き）が生じず、締結後の接合部にギャップが認められないことを確認した。また、必要な軸力を確保した締結が可能であることを確認した。さらに、核種移行評価に影響を与えない無機系潤滑剤（グラファイト）を適用できる見通しが得られた。



(a) 締結前



(b) 締結後

図 4-10 試作したねじ込み接合部の締結試験

4.4.2 銅耐食層の摩擦攪拌接合

銅耐食層接合部の FSW に関しては、2020 年度から NUMO・大阪大学・秋田大学の三者共同研究により技術開発を進めている。2022 年度までに、平板状の銅クラッド鋼板及び電気メッキ鋼板を用いた FSW 試験を実施し、銅耐食層の剥離や空洞状の接合欠陥等の発生なく接合可能な条件を確認した（図 4-11）。また、接合部の機械的特性及び耐食性は母材部と同等かそれ以上となることを確認した（宮野ほか，2024）。

2023 年度からは、実機の円筒形状を想定した円筒形の銅クラッド鋼管を用いた摩擦攪拌接合試験を実施中である。これまでに、銅クラッド鋼管を用いてスターインプレート法¹により摩擦攪拌試験を行い、この方法が円筒形状にも適用可能であることを確認している。例えば、接合ツールの回転速度や接合速度、荷重条件を適切に制御することで、銅耐食層の剥離や空洞状の接合欠陥の発生がなく、均一なビード形状でほぼバリのない摩擦攪拌が可能であることを確認した（図 4-12）。現在は、円筒形試験体の突合せ接合試験に向けて、試験装置の設計や、接合時における突合せ部の隙間や段差の許容値の確認を行っている。また、摩擦攪拌接合部の終端部には、接合ツールの引抜き穴が形成されるが（図 4-13）、これを銅コーティングオーバーパックに残さないように、エンドタブに引抜き穴を逃がして除去する方法（図 4-14）（JLWA, 2008）の検討にも取り組んでいる（図 4-15）。

¹ スターインプレート法は、部材間の接合ではなく、単一部材を攪拌（Stir）する方法である。2つの部材をほぼ隙間なく突き合わせていれば、摩擦攪拌接合にあたって、突合せ接合とスターインプレートで条件はそれほど変わらないため、適切な接合条件の探索を行う初期段階でよく用いられる手法である。鋼管部材の突合せ接合を適切な品質で行うには、摩擦攪拌接合技術の開発だけでなく、部材の突合せ自体を精度良く行う必要があるため、これについては次フェーズの試験で対応する。

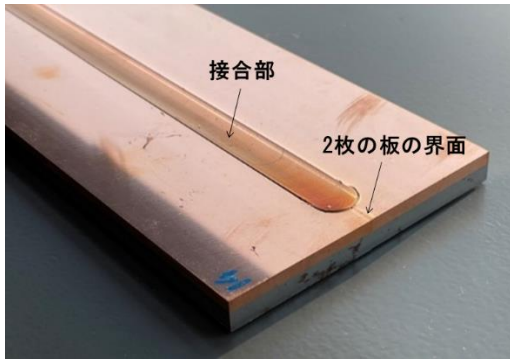


図 4-11 銅電気メッキ鋼板の
摩擦攪拌接合



図 4-12 銅クラッド鋼管に対する
スターインプレート法による摩擦攪拌試験の様子

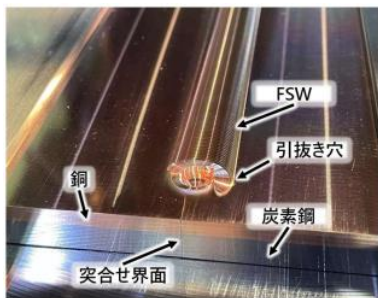


図 4-13 FSWにおける
引き抜き穴

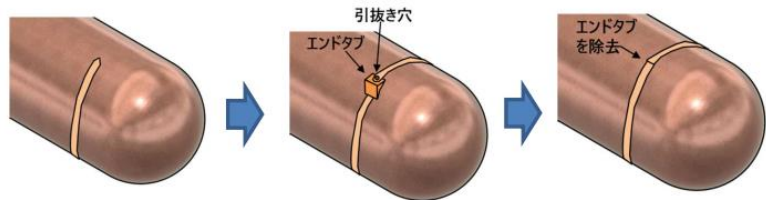


図 4-14 エンドタブによる引抜き穴除去の概念図



図 4-15 エンドタブを用いた FSW 試験の様子 (写真手前側が接合始端)

上記の機械的接合試験及び摩擦攪拌接合試験により、NUMO 方式による銅コーティングオーバーパックの接合に係る一連の要素技術が成立する見通しが得られつつある。今後は、より実際の蓋接合工程に近い条件を模擬した銅コーティング部の突合せ接合を実証するため、炭素鋼部のねじ込み接合と銅コーティング部の FSW を一連の作業として組み合わせて行い、蓋接合に係る作業工程全体の成立性を確認する。

4.5 耐食性評価

本節では、銅電気メッキ層、NWMO方式の冷間溶射部、並びにNUMO方式で想定するFSWによる固相接合部の耐食性に関する既報の知見を整理する。Guo et al. (2022)は、銅電気メッキ層の腐食挙動を電気化学インピーダンス測定や分極測定により評価しており、SKBなどが採用している伸銅品と比較して、腐食挙動は同等としている。また、銅冷間溶射部については、溶射後に熱処理を施すことで延性が向上し、耐食性も伸銅材や銅電気メッキ層と同程度となる一方、熱処理を行わない（吹付けたままの）場合には腐食速度が高くなる傾向が報告されている。

固相接合部の耐食性については、無酸素銅について母材部と固相接合部から試験片を取り出し、それぞれ分極測定により評価した（宮野ほか, 2023）。その結果、塩化物イオンや硫酸イオンを含まない条件では、母材部及び固相接合部の双方で明瞭な不働態域が確認された。一方、これらのイオンを含む条件では、いずれも遷移型の挙動を示すなど同様の傾向が確認されており、両者の耐食性に大きな差はないと考えられる。

なお、接合条件によっては、耐食性に変化があるという測定例もあり（宮野ほか, 2024）、電気化学試験等のさらなる試験を実施して、耐食性に対する金属組織の影響などについて検討する必要がある。

4.6 銅コーティングオーバーパック製作技術の適用性評価

継目無鋼管を対象としたNWMO方式による製作技術については、実規模での連続製作試験が実施されており、工学的成立性が示されている。板巻鋼管では蓋接合部（溶接線近傍）の冷間溶射部で密着不良などが確認されており、溶射条件の最適化が必要である。

NUMO方式による製作技術については、銅電気メッキ層は板巻鋼管に対しても有効であった。機械的接合についても、部分模型ではあるが、実機と同じ直径にて接合が可能であることを確認している。銅耐食層のFSWについては、板及び円筒形状で、それぞれ適用可能であるとの見通しを得つつあるが、今後、実規模で評価する必要がある。

銅電気メッキ層及び熱処理後の冷間溶射部の耐食性については、SKBなどで適用されている伸銅材と同程度と報告されている。また、NUMO方式の固相接合部についても、電気化学的な差はないといった結果が得られているが、接合条件にも依存する傾向も報告されており、評価を継続する計画である。

以上のことから、NWMO方式による製作技術は、閉鎖後長期安全性及び工学的成立性の観点から、適用性を見通しを有している。NUMO方式については、要素技術レベルでは適用性を確認できたが、工学的成立性の観点からは、今後、小規模から実規模での実証試験を重ね、適用性を評価していく必要がある。

第5章 複数のガラス固化体を収納したオーバーパックの製作方法

わが国の地層処分概念では、ガラス固化体を1体ずつオーバーパックに収納する設計が基本として検討されてきた。一方、処分事業の具体化に伴い、将来の操業段階における製作・封入・検査・搬送・定置等の一連の作業を、所要の安全性を確保しつつ安定的かつ効率的に実施する観点からは、処分容器の形状・寸法や収納本数に関する設計オプションをあらかじめ整備しておくことも重要となる（NUMO, 2004）。複数本のガラス固化体を1容器に収納するオーバーパックは、(1) 処分孔・坑道等の施工量や緩衝材等の周辺資材量の低減を通じた操作性・経済性の向上、(2) 容器本数の削減による製作・溶接・非破壊検査等の工程数の低減とスループット向上、(3) 設置レイアウトや搬送・定置設備の設計自由度の拡大、といった利点を有し得る。また、諸外国で検討が進められている複数体収納設計の成立性確認結果（Nagra, 2024）を参照することは、設計オプションの国際的整合性を確保しつつ、国内の処分概念に対する技術的基盤を拡充する上でも有用である。他方で、収納本数の増加により容器寸法・重量が増大し、遠隔操作を含む取扱い性、蓋接合時の施工性、並びに外圧に対する構造健全性等に影響を与える可能性があることから、製作技術の成立性を含めた工学的観点での整理が必要である。以上を踏まえ、本章では、ガラス固化体を複数体収納するオーバーパックの設計例を設定し、当該設計例に対して適用可能な母材製作技術及び蓋接合技術を整理する。

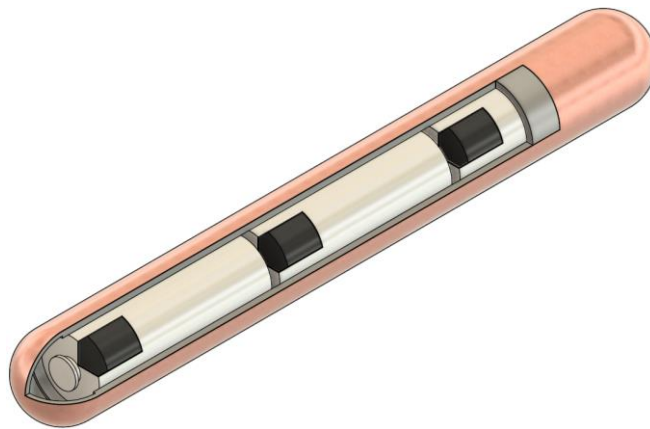
5.1 設計例

オーバーパック内のガラス固化体の収納数にかかわらず、オーバーパックの安全機能及び設計要件は共通のものである。このため、Nagra（2024）及び改良型 PEM 報告書に示した炭素鋼オーバーパックの設計を参照して、ガラス固化体を3本収納したオーバーパックを設計した例を図 5-1 に示す。炭素鋼製の鍛鋼管（JIS SF490A）に上下に平蓋を接合した構造である。オーバーパック胴部の内径及び胴部、蓋の肉厚は、ガラス固化体1本を収納したものと同一である。

なお、図 5-1 (a) には、炭素鋼オーバーパックについて設計例を示したが、銅コーティングオーバーパックについても、同様にガラス固化体を3本収納したオーバーパックの設計は可能である（図 5-1 (b)）。



(a) ガラス固化体3本を収納した炭素鋼オーバーパックの設計例



(b) ガラス固化体3本を収納した銅コーティングオーバーパックの設計例

図 5-1 複数のガラス固化体を収納したオーバーパックの設計例

このように、複数のガラス固化体を収納したオーバーパックを適用する場合には、発熱性を有するガラス固化体の定置密度が高まるため、オーバーパック表面の温度が高くなりやすい点に留意する必要がある。Nagata et al. (2025) では、炭素鋼オーバーパックを対象に改良型 PEM の緩衝材仕様、PEM 容器仕様及び処分坑道断面の仕様に基づき、図 5-2 に示す通り、処分坑道中心間距離及び PEM 定置間隔 (PEM 全長+PEM 間の離隔距離) をパラメータとして、オーバーパック表面温度を予察的に評価した。

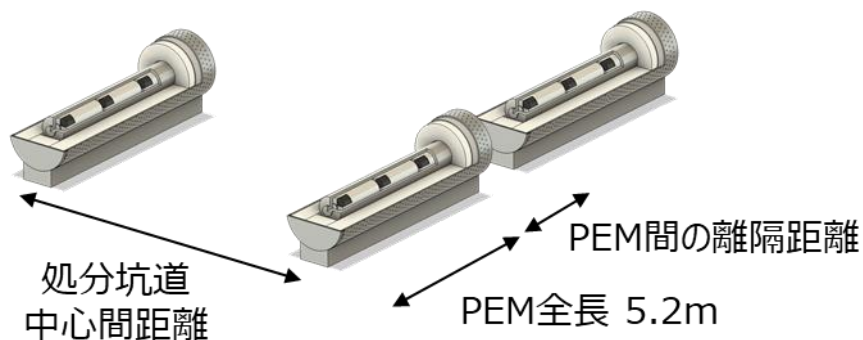


図 5-2 3本のガラス固化体を収納したオーバーパックの PEM 配置模式図

その結果を図 5-3 に示す。処分坑道中心間距離 (8.2 m) と PEM 定置間隔 (4.0 m) を改良型 PEM と同じ設定とすると、オーバーパック表面の最高温度は約 80°C から約 110°C に上昇する。また、PEM 同士の隙間を 0 m に設定すると最高温度は約 155°C まで上昇する。なお、オーバーパックの表面温度が 100°C を超える期間は数十年から 100 年程度であると推定されている。

包括的技術報告書 (NUMO, 2021) においては、オーバーパックの表面温度を 100°C 未満となるように処分坑道離間距離と PEM 定置間隔を設定しているが、この温度制限は、緩衝材として用いるベントナイト中のスメクタイトが高温条件下でイライト化 (スメクタイトからイライト/混合層鉱物への変化) し、膨潤性・低透水性等の重要特性が低下する可能性に配慮したものである (Pusch et al., 2011; Sellin and Leupin, 2013)。一方で、近年の研究では、イライト化反応は温度のみで一義的に定まるものではなく、間隙水中のカリウム供給 (カリウム活量) 及び高温曝露期間に強く依存し、カリウム濃度が低い条件や高温の継続期間が短い条件では反応進行量が限定的となり得ることが指摘されている (Kaufhold et al., 2023)。すなわち、温度上限の設定にあたっては、温度そのものに加えて、緩衝材—母岩—地下水系におけるカリウム供給源の有無や輸送制約、並びに温度履歴 (ピーク温度とその継続時間) を併せて考慮することが重要である。実際、海外の地層処分計画においても、緩衝材温度を概ね 100°C 程度以下に抑える設計上の考え方を採用しつつ、イライト化を含む変質反応がカリウム供給と反応速度の制約を受ける点を踏まえた評価・整理が行われている (Sellin and Leupin, 2013)。このように、100°C の温度制限はイライト化等に対して保守的に余裕を持たせるための設計上の目安として位置付けられる。以上の考察は、銅コーティングオーバーパックに対しても同様に考慮すべき事項である。今後は、想定される地質環境におけるカリウム供給条件及び温度履歴を明示した上で、イライト化の進行量と緩衝材性能への影響をより定量的に評価し、温度制限の妥当性・保守性を検討することが重要である。

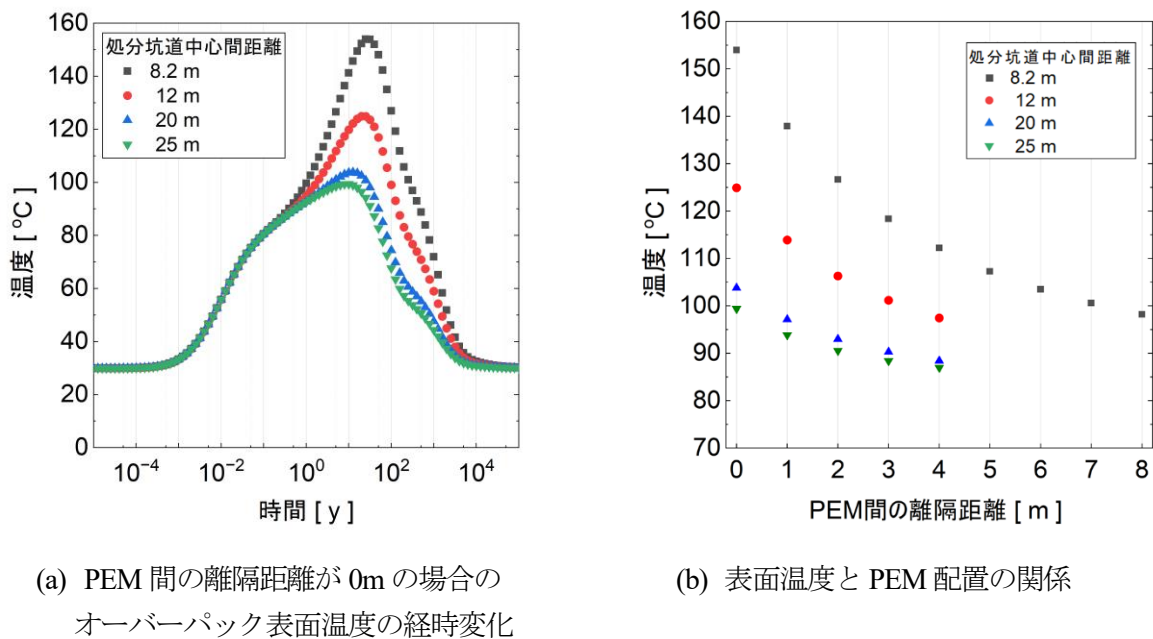


図 5-3 3 本のガラス固化体を収納したオーバーパックの定置密度に対する熱伝導解析結果

5.2 設計例に適用可能な製作技術

炭素鋼オーバーパックの胴部については、表 3-1 に示す適用範囲より、鍛鋼あるいは熱間押抜により製作された継目無鋼管が適用可能である。蓋の製作技術は、ガラス固化体 1 本を収納したオーバーパックと変わりはない。蓋接合技術（平板蓋／半球蓋，鍛鋼・鋳鋼・圧延材等）についても、アーク溶接及び電子ビーム溶接が適用可能と考えられる。

銅コーティングオーバーパックについては、炭素鋼構造容器の製作は鍛鋼，熱間押抜による継目無鋼管，熱間及び冷間曲げ加工による板巻鋼管が適用可能である。銅耐食層については銅電気メッキが適用可能である。蓋接合技術については、NWMO 方式及び NUMO 方式ともに適用可能と考えられる。

5.3 母材製作技術及び蓋接合技術の適用性評価

炭素鋼オーバーパックの胴部については、Nagra (2024) によれば鍛鋼の工学的成立性が高いが、継目無鋼管についても実規模での製作・検査の実証を前提として「条件付きで適用可能」と考えられる。蓋接合技術については電子ビーム溶接が適用可能であるが、オーバーパックの全長が長くなるため、大型の真空室の整備が課題である。

銅コーティングオーバーパックについては、胴部と下蓋を取り付けた状態の長尺容器を浸漬して電気メッキする NWMO 方式では、長尺の容器を浸漬して電気メッキ可能な設備の準備が課題となる。蓋接合技術は NWMO 方式及び NUMO 方式のどちらでも適用可能と考えられるが、ただし、長尺の容器を取り扱えるような装置の設計が必要となる。

なお、ガラス固化体の定置密度の上昇に伴いオーバーパック表面温度が高くなる場合、緩衝材特性への影響に留意が必要である。一般的な地下水中のカリウムイオン濃度を前提とし、高温となる期間が短い場合には影響は大きくないと考えられるが、今後も材料特性に関するデータを充実させ、評価を継続する必要がある。

第6章 今後の展望

炭素鋼オーバーパック及び銅コーティングオーバーパックについては、胴部及び蓋の製作や蓋接合に関して、一般産業で実用化された技術を適用することが可能であり、その意味で、オーバーパックの製作に関する技術的基盤を構築できたといえる。なお、複数本のガラス固化体を封入する場合においても、これらの技術は基本的に適用可能と考えられるが、長尺容器の取扱いに関しては、実機条件を想定した実証的な確認が引き続き必要である。

今後は、ガラス固化体の封入、蓋接合（熱処理等の後工程を含む）及び接合部検査からなる一連の工程について、放射線環境下での実施を前提としたシステム化技術の開発が求められる。これらの工程では、溶接（または摩擦攪拌接合）及びその後の熱処理、表面加工、検査作業を遠隔操作により確実に実施する必要がある。

また、銅コーティングオーバーパックについては、把持部を設けない構造となることから、銅コーティング層を物理的に損傷することなく、放射線環境下かつ高温条件下でも安定して作動可能な把持装置の開発が重要な課題となる。これらの技術開発にあたっては、要求品質を満足するオーバーパックを安定的に製作できるかという観点から、技術の再現性を評価することが不可欠であり、そのため、実証試験を段階的に実施する計画である。

本報告書で整理した技術的知見を踏まえ、NUMO は今後も技術開発を段階的に進めるとともに、処分事業の進捗及び安全評価の深化に応じて、総合的な判断に基づき、実際の製作及び建設の対象とする設計オプションを適切な時期に選定する方針である。

第7章 結論

本報告書では、高レベル放射性廃棄物処分用オーバーパックを対象として、炭素鋼オーバーパック及び銅コーティングオーバーパックの製作技術について、母材製作技術及び蓋接合技術の観点から体系的な整理と適用性評価を行った。

その結果、炭素鋼オーバーパック及び銅コーティングオーバーパックのいずれについても、一般産業で実用化されている製作・接合技術を基盤として、オーバーパックの製作に必要となる技術的基盤を構築できた。このように、設計条件に応じて選択可能な複数の製作・接合技術が整理され、それぞれの成立性及び適用条件を整理した。

炭素鋼オーバーパックについては、鍛鋼を中心とした母材製作技術及びアーク溶接や電子ビーム溶接による蓋接合技術について、実規模での検討結果に基づき、設計条件に応じた適用の考え方を示した。また、銅コーティングオーバーパックについては、NWMO方式及びNUMO方式を含む複数の製作・接合概念を対象に、銅電気メッキ、冷間溶射、摩擦攪拌接合といった要素技術の成立性を確認し、将来の適用に向けた技術的選択肢を提示した。

さらに、ガラス固化体を複数体収納するオーバーパックについても、既存の製作技術及び接合技術を基本として適用可能であることを示し、将来の処分事業の効率化や設計オプションの拡張に資する技術的知見を整理した。

以上のとおり、本報告書で整理した成果は、処分事業や安全評価の進展に応じて、合理的に設計仕様及び製作技術を選定していくための技術的基盤を提供するものである。NUMOは、これらの成果を踏まえ、今後、処分事業の具体化に向けた段階的な技術開発及び実証を進めるとともに、総合的な判断に基づき、実際の製作及び建設の対象とする設計オプションを適切な時期に選定していく方針である。

参考文献

- Aalto, H. (1998): EB-welding of the copper canister for the nuclear waste disposal., Posiva Report 98-03.
- Andra (2025) : Dossier d'autorisation de creation de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo, Pièce 7: Version préliminaire du rapport de sûreté, Partie II : Description de l'INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture, Volume 5 : Les installations, ouvrages et équipements.
- Boyle, C. H., Meguid, S. A. (2015) : Mechanical performance of integrally bonded copper coatings for the long term disposal of used nuclear fuel, Nuclear Engineering and Design, Vol. 293, pp. 403-412.
- Bresle, Å., Saers, J., Arrhenius, B. (1983) : Studies in pitting corrosion on archaeological bronzes. Copper. SKB TR-83-05.
- Bengtsson, A., Edlund, J., Hallbeck, B., Heed, C., Pedersen, K. (2015) : Microbial sulphide-producing activity in MX-80 bentonite at 1750 and 2000 kg m⁻³ wet density, SKB R-15-05.
- Choi, H.-J. Choi, J.-W. and Kim, H.-J. (2010): Application of a cold spray technique to the fabrication of a copper canister for the geological disposal of CANDU spent fuels., Nuclear Engineering and Design, 240, 10, 2714-2720.
- 原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2008）：平成 19 年地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（1/2）。
- 原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2011a）：平成 22 年地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（1/2）。
- 原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2017）：平成 28 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第 1 分冊)人工バリア品質／健全性評価 手法の構築－オーバーパック。
- Guo, M., Daub, K., Dong, Q., Long, F., Binns, J., Daymond, M. R., Shoesmith, D. W., Noël, J. J., Persaud, dan S. Y. (2022): The Early-Stage Corrosion of Copper Materials in Chloride and Sulfide Solutions., Journal of The Electrochemical Society, 169, 031509.
- IAEA (2012) : The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series, No. SSG-23.
- JFE スチール (2025) : JFE スチール株式会社 パンフレット 一般構造用鋼管, <https://www.jfe-steel.co.jp/products/koukan/catalog/e1j-004.pdf> (2025 年 12 月 22 日閲覧)

JLWA (軽金属溶接協会) (2008) : 軽金属の溶接 Q&A(12), 軽金属溶接, Vol. 46, No. 4, p. 28.

Kaufhold, S., Dohrmann, R., Walis, I. and Weber, C. (2023): Chemical and mineralogical reactions of bentonites in geotechnical barriers at elevated temperatures – review of experimental evidence and modelling progress., Clay Minerals, 58, 3, 280-300.

King F, Lilja C, Pedersen K, Pitkänen P, Vähänen M. (2010) : an update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository, SKB TR-10-67.

King, F., Behazin, M. (2021) : A Review of the Effect of Irradiation on the Corrosion of Copper-Coated Used Fuel Containers, Corrosion and Materials Degradation, Vol. 2, No. 4, pp. 678-707.

Kobayashi, M., Yokoyama, Y., Takahashi, R., Asano, H., Taniguchi, N., Naito, M. (2011) : Long term integrity of overpack closure weld for HLW geological disposal Part 2 - corrosion properties under anaerobic conditions, Corrosion Engineering Science and Technology, Vol. 46, No. 2, pp. 212-216.

串田裕紀 (2015) : 鍛鋼品の製造・熱処理技術の現状と伝承について, マリンエンジニアリング, Vol. 50, No. 5, pp. 569-573.

宮野泰征, 鈴木覚, 小川祐輔 (2023) : 銅複合オーバーパックへの摩擦攪拌接合適用に向けた検討, 2022 年度大阪大学接合科学研究所 共同研究成果報告書, pp.108-109.

宮野泰征, 中道萌, 野崎海斗, 小川裕輔, 鈴木覚 (2024) : 爆発圧着法によって製造した銅クラッド鋼版を対象とした摩擦攪拌接合, 2023 年度 大阪大学接合科学研究所 共同研究成果報告書, pp. 128-129.

Nagata, S., Ichimura, T., Suzuki, S., Umeki, H., MaKinley, I. (2025) : Corrosion aspect of repository design optimisation, The abstract of 9th International Workshop on Long Term Prediction of Corrosion in Nuclear Waste Systems, 9931, p.84.

Nagra (2024) : Design and Performance Assessment of HLW Disposal Canisters, NAGRA NTB 24-20.

日本製鉄 (2025) : 日本製鉄株式会社 パンフレット 日本製鉄の鋼管,
https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/_icsFiles/afieldfile/2025/09/10/P001.pdf
(2025 年 12 月 22 日閲覧)

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現 –適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築–, NUMO-TR-20-03.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2025) : 高レベル放射性廃棄物処分における横置き・PEM 方式の高度化, NUMO-TR-24-04.

NWMO (2012) : Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2011, NWMO TR-2012-01.

NWMO (2015) : Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2014, NWMO TR-2015-01.

NWMO (2016) : Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2015, NWMO TR-2016-01.

NWMO (2017) : Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2016, NWMO TR-2017-01.

NWMO (2018) : Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock, NWMO TR-2018-08.

NWMO (2022) : Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2021, NWMO TR-2022-01.

NWMO (2024) : Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2023, NWMO TR-2024-01.

NWMO (2025) : Technical Program for the Long-Term Management of Canada's Used Nuclear Fuel – Annual Report 2024, NWMO TR-2025-01.

小川裕輔, 鈴木寛, 山品和久, 窪田茂, 篠崎智也, 加藤修 (2017) : 鋳鋼製オーバーパックスの適用性に関する実証的検討～実規模での試作による製作性の評価～, 日本原子力学会 2017 年春の年会予稿, 1H03.

Ogawa, Y., Suzuki, S., Yamashina, K., Kubota, S. (2017) : Study on the applicability of cast steel overpack - Evaluation of casting defects and corrosion resistance using full-scale prototype-, Proc. of the 6th East Asia Forum on Radwaste Management Conference.

Ogawa, Y., Suzuki, S., Taniguchi, N., Kawasaki, M., Suzuki, H., Takahashi, R. (2021) : Corrosion resistance of a cast steel overpack for high-level radioactive waste disposal in Japan, Materials and Corrosion, Vol. 72, No. 1-2, pp. 52–66.

小川裕輔, 鈴木寛, 根本脩平, 藤社進, 本間信之, 田辺祥大, 高倉大典 (2023) : 炭素鋼オーバーパックスの電子ビーム溶接部における残留応力の溶接条件依存性, 溶接学会全国大会講演概要, 2023 年度秋季全国大会, pp. 254-255.

大阪特殊鋼管製造所 (2025) : 製品情報 製造可能範囲, <https://www.otk.ne.jp/ja/product/#range> (2025 年 12 月 22 日閲覧)

Pusch, R., Karland, O., Lajudie, A., and Decarreau, A. (2011): Physical and chemical stability of the bentonite buffer, SKB TR-11-07.

SKB (2010) : Design, production and initial state of the canister, SKB TR-10-14.

Sellin, P., and Leupin, O. X. (2013): The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management – a review, *Clays and Clay Minerals*, 61(6) pp. 477–498.

鈴木寛, 小川裕輔, 北川義人, Keech, P. G., Giallonardo, J (2020) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における銅-炭素鋼複合容器の技術開発について, 銅と銅合金, Vol. 59, No. 1, pp. 173-177.

Suzuki, S., Ogawa, Y., Giallonardo, J., Keech, P. G. (2021) : The design of copper-coating overpack for the high-level radioactive waste disposal concept in Japan, *Materials and Corrosion*, Vol. 72, No.1-2, pp.94-106.

高倉大典 (2023) : 残留応力測定概論 (その1: 残留応力の発生原因と種々の測定法), *IIC REVIEW*, No. 70.

高倉大典 (2024) : 残留応力測定概論 (その2: コンター法による残留応力測定), *IIC REVIEW*, No. 71.

Taniguchi, N., Suzuki, H., Kawasaki, M., Naito, M., Kobayashi, M., Takahashi, R., Asano, H. (2011) : Propagation behaviour of general and localised corrosion of carbon steel in simulated groundwater under aerobic conditions, *Corrosion Engineering Science and Technology*, Vol. 46, No. 2, pp. 117-123.

横山裕, 三井裕之, 高橋里栄子, 谷口直樹, 朝野英一, 内藤守正, 油井三和 (2008) : オーバーパックス溶接部の耐食性評価に関する研究-IV, *JAEA-Research2008-072*, *RWMC-JRJ-08002*.

原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)