

チタン-炭素鋼 複合オーバーパックの試作

(研 究 報 告)

1 9 9 9 年 1 1 月

核燃料サイクル開発機構

東海事業所

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

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Information Section,
Administration Division,
Tokai Works,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

チタン-炭素鋼 複合オーバーパックスの試作 (研究報告)

報告者：本間 信之, 千葉 恭彦*, 棚井 憲治

要 旨

本報は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における、人工バリアを構成する要素の一つであるオーバーパックスについて、構造強度層に炭素鋼を、耐食層にチタンを用いたチタン-炭素鋼複合オーバーパックスの、現有技術での製作可能性を確認するために、その設計および実規模大での試作を行った結果を報告するものである。

設計に当たっては、一般の原子力施設に適用される基準により必要な耐圧厚さを計算した。また有限要素法による解析を実施して、結果の妥当性を確認した。また、オーバーパックス内部に収納するガラス固化体から発せられる放射線の遮へいについて計算し、オーバーパックス遮へい機能の必要性を検討した。結果、オーバーパックスには輸送基準を満足するために必要な遮へい機能は与えず、別途搬送用機器等で遮へいする方式が合理的であることを示した。

以上の検討をもとに実規模大での複合オーバーパックスの試作を行った。耐食層の材質については、超長期の耐腐食性が期待できるチタン材のうちASTM Grade-2材を選択した。チタン耐食層の施工は、オーバーパックス円筒部と平面部に分けて実施した。円筒部については内層である炭素鋼容器に円筒形に成形したチタンの外層を焼きばめ挿入する方式を採用した。また蓋部、底部などの平面部については、チタン板材の爆発圧着法による被覆方法を採用した。本体と蓋の封入溶接については、電子ビーム溶接とMAG溶接とを組み合わせ実施した。いずれの工程においても不具合等は確認されず、チタン-炭素鋼複合オーバーパックスの現有技術での製作可能性が確認できた。

最後に今回の試作結果をふまえ今後検討されるべき課題をまとめた。

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究Gr.

*現在 石川島播磨重工業株式会社 原子力事業部 容器設計部

Trial Manufacturing of Titanium-Carbon Steel Composite Overpack

Nobuyuki HONMA, Takahiko CHIBA *, Kenji TANAI

Abstract

This paper reports the results of design analysis and trial manufacturing of full-scale titanium-carbon steel composite overpacks. The overpack is one of the key components of the engineered barrier system, hence, it is necessary to confirm the applicability of current technique in their manufacture.

The required thickness was calculated according to mechanical resistance analysis, based on models used in current nuclear facilities. The Adequacy of the calculated dimensions was confirmed by finite-element methods. To investigate the necessity of a radiation shielding function of the overpack, the irradiation from vitrified waste has been calculated. As a result, it was shown that shielding on handling and transport equipment is a more reasonable and practical approach than to increase thickness of overpack to attain a self-shielding capability.

After the above investigation, trial manufacturing of full-scale model of titanium-carbon steel composite overpack has been carried out. For corrosion-resistant material, ASTM Grade-2 titanium was selected. The titanium layer was bonded individually to a cylindrical shell and flat cover plates (top and bottom) made of carbon steel. For the cylindrical shell portion, a cylindrically formed titanium layer was fitted to the inner carbon steel vessel by shrinkage. For the flat cover plates (top and bottom), titanium plate material was coated by explosive bonding. Electron beam welding and gas metal arc welding were combined to weld of the cover plates to the body. No significant failure was evident from inspections of the fabrication process, and the applicability of current technology for manufacturing titanium-carbon steel composite overpack was confirmed.

Future research and development items regarding titanium-carbon steel composite overpacks are also discussed.

Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. オーバーパックの設計要件および複合オーバーパックの概念	2
2.1 オーバーパックの設計要件	2
2.2 複合オーバーパックの概念	3
3. 試作複合オーバーパックの仕様および製作方法の検討	4
3.1 オーバーパックの形状の検討	4
3.2 内層の材質および構造	6
3.2.1 内層の材質の検討	6
3.2.2 内層の構造検討	9
3.2.2.1 耐圧強度についての考え方	9
3.2.2.2 荷重条件の設定	10
3.2.2.3 板厚計算	10
3.3 外層の被覆方法と仕様設定	15
3.3.1 外層の被覆方法の検討	15
3.3.2 外層の材質の検討	19
3.3.3 外層の厚さの検討	20
3.3.4 溶接方法の検討	21
3.3.5 非破壊検査手法	25
3.3.5.1 溶接部の検査	25
3.3.5.2 その他の部位の検査	26
3.3.6 ハンドリング構造の検討	27
3.4 試作オーバーパックの構造	30
4. 応力解析	32
4.3.1 処分孔縦置き定置の場合	32
4.3.2 処分坑道横置き定置の場合	36
5. オーバーパックの遮へい解析	42
5.1 解析方法	42
5.2 解析結果	54
5.3 まとめ	55

6. 試作	65
6.1 試作容器の概要	65
6.2 製造工程概要	65
6.3 各製作工程	67
6.3.1 爆着施工	67
6.3.2 機械加工	68
6.3.3 円筒胴部へのチタンの焼きばめ施工	69
6.3.4 溶接	70
6.3.5 検査	71
7. 試作結果のまとめと今後の課題	77
参考文献	80
添付資料 製造工程写真集	82

目 次

図 2-1 人工バリアの概念	2
図 2-2 複合オーバーパックの概念	3
図 3-1 オーバーパック基本構造の比較	5
図 3-2 平板板厚計算モデル	11
図 3-3 円筒胴板厚計算モデル	12
図 3-4 溶接による被覆施工	15
図 3-5 肉盛溶接による被覆施工	15
図 3-6 ビス止めによる被覆施工	16
図 3-7 爆着法による被覆施工	16
図 3-8 チタン円筒板の溶接による被覆施工	17
図 3-9 焼きばめ挿入法による被覆施工	17
図 3-10 肉盛溶接による被覆施工	18
図 3-11 チタン円筒板のビス止めによる被覆施工	18
図 3-12 製作手順の概要	20
図 3-13 蓋溶接部の概要	22
図 3-14 蓋溶接部のチタン外層被覆方法	23
図 3-15 オーバーパックのハンドリング構造	27
図 3-16 脱着式ハンドリング治具の概念図	29
図 3-17 ハンドリングの概念	29
図 3-18 チタン-炭素鋼複合オーバーパック基本構造図	30
図 3-19 各部の構造概要	31
図 4-1 解析モデルと応力評価部位 (処分孔縦置き定置の場合)	33
図 4-2 応力分布図 (処分孔縦置き定置の場合)	34
図 4-3 偏圧の概念	37
図 4-4 解析モデルと応力評価部位 (処分坑道横置き定置の場合)	38
図 4-5 応力分布図 (処分坑道横置き定置の場合)	39
図 4-6 応力分布図 (処分坑道横置き定置の場合, $\theta = 90^\circ$ 面)	40
図 4-7 応力分布図 (処分坑道横置き定置の場合, $\theta = 0^\circ$ 面)	40
図 5-1 縦置き時の複合オーバーパック基本構造寸法	46
図 5-2 縦置き時の複合オーバーパック基本構造寸法	47
図 5-3 γ 線・直径方向・QAD用計算体系図	48
図 5-4 γ 線・軸方向・QAD用計算体系図	49
図 5-5 DORT用計算体系図	50

図 5-6 線量当量率等高線図 (DORT 解析結果, 基本構造寸法, 縦置き時) (炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm, 軸方向 15 cm)	57
図 5-7 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 縦置き時) (炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm)	58
図 5-8 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 縦置き時) (炭素鋼の厚さ: 軸方向 15 cm)	58
図 5-9 線量当量率等高線図 (DORT 解析結果, 基本構造寸法, 横置き時) (炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm, 軸方向 20.5 cm)	59
図 5-10 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 横置き時) (炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm)	60
図 5-11 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 横置き時) (炭素鋼の厚さ: 軸方向 20.5 cm)	60
図 5-12 線量当量率等高線図 (DORT 解析結果, 輸送基準準拠) (炭素鋼の厚さ: 径方向 75 cm, 軸方向 70 cm)	61
図 5-13 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠) (炭素鋼の厚さ: 径方向 75 cm)	62
図 5-14 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠) (炭素鋼の厚さ: 軸方向 70 cm)	62
図 5-15 線量当量率等高線図 (DORT 解析結果, 輸送基準準拠) (炭素鋼の厚さ: 径方向 85 cm, 軸方向 80 cm)	63
図 5-16 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠) (炭素鋼の厚さ: 径方向 85 cm)	64
図 5-17 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠) (炭素鋼の厚さ: 軸方向 80 cm)	64
図 6-1 製作手順フロー図	65
図 6-2 製作工程	72
図 6-3 全体製作図	73
図 6-4 A部詳細図	74
図 6-5 B部詳細図	74
図 6-6 C部詳細図	75
図 6-7 D部詳細図	75
図 6-8 E部詳細図	76
図 6-9 F部詳細図	76

表 目 次

表 2-1 オーバーパックに対する基本要件	2
表 3-1 オーバーパック形状の比較	4
表 3-2 構造強度層の材料の検討	6
表 3-3 構造強度層の材料比較	8
表 3-4 荷重条件	10
表 3-5 必要板厚計算結果（縦置き定置の場合）	12
表 3-6 必要板厚計算結果（横置き定置の場合）	14
表 3-7 上面および下面（平坦部）への被覆施工法	16
表 3-8 本体円筒胴部外面への被覆施工法	18
表 3-9 各種溶接法の比較	24
表 3-10 各ハンドリング機構の比較	28
表 4-1 縦置き定置の場合の応力評価結果	35
表 4-2 横置き定置の場合の応力評価結果	41
表 5-1 線源強度計算条件	43
表 5-2 中性子線量当量解析結果	44
表 5-3 γ 線エネルギースペクトル	51
表 5-4 中性子線エネルギースペクトル	51
表 5-5 γ 線空気吸収線量率変換係数（ORIGEN2 群構造）	52
表 5-6 中性子線 1cm 線量当量変換係数（DLC23-E 群構造）	52
表 5-7 各材料の原子個数密度	53
表 5-8 ガラス固化体組成	53
表 5-9 線量当量率評価結果まとめ（基本構造寸法，縦置き時）	56
表 5-10 線量当量率評価結果まとめ（基本構造寸法，横置き時）	56
表 5-11 線量当量率評価結果まとめ（輸送基準に準拠させた場合）	56
表 6-1 爆着施工制限値	67
表 6-2 焼きばめ温度と外層チタンの直径方向の伸びの関係	69
表 6-3 焼きばめ前後の寸法	69

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、深部地下の天然の地層と地質環境の条件を考慮に入れて適切に設計された工学的対策からなる多重の障壁（バリア）によって、処分された放射性廃棄物を人間環境から隔離するという多重バリアシステムの考え方が基本となっており、各国の地層処分概念に取り入れられている。このうち工学的に施された対策（人工の構造物）は人工バリアと呼ばれている。

人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパックについては、現状炭素鋼のみによる単一構造のもの他、内側に炭素鋼を、外側に耐食性金属（銅あるいはチタン等）を配した複合構造のオーバーパックが検討されている。複合オーバーパックは内側の炭素鋼に外圧に対する強度部材としての役割を、外側の耐食性金属に長期の耐食性を期待する。

本試作ではチタンと炭素鋼の複合オーバーパックの設計と、これらの結果に基づいた実規模大の複合オーバーパックの試作を実施し、その技術的成立性を明らかにするものである。

2. オーバーパックの設計要件および複合オーバーパックの概念

2.1 オーバーパックの設計要件

我が国では図 2-1 に示すように、放射性廃棄物自体を加工して安定な形態としたガラス固化体、ガラス固化体を格納し封入する堅固な容器（オーバーパック）、地下に埋設する際にオーバーパックと地層の間に充填される緩衝材から構成される人工バリアが検討されている。

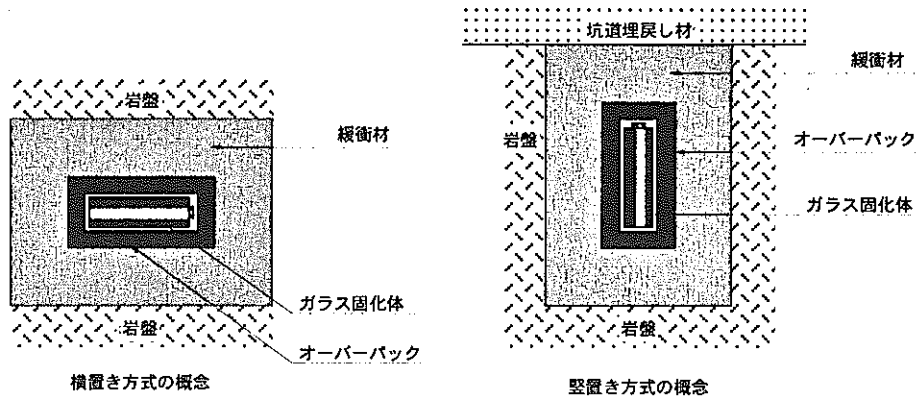


図 2-1 人工バリアの概念

現状の地層処分のコンセプトにおいては、オーバーパックには廃棄体の放射能がある程度減衰するとともに、周辺の環境が深部地下本来の還元性の条件に戻るまでの期間放射性核種をその内部に閉じ込め、地下環境から隔離することが求められている。具体的にはガラス固化体に地下水を所定の期間接触させない機能が要求される。また人工バリアはオーバーパックだけでなくガラス固化体及び緩衝材を含めた1つのシステムとして機能することから、ガラス固化体及び緩衝材に有意な影響を与えないことが人工バリアの成立のために必要と考えられる。

表 2-1 オーバーパックに対する基本要件

放射性核種隔離のための要件	放射性核種の閉じ込め（ガラス固化体に地下水を所定の期間接触させない）
人工バリアが成立するための要件	他の人工バリア（ガラス固化体及び緩衝材）に有意な影響を与えないこと
	製作・施工が技術的に可能であること

2.2. 複合オーバーパックの概念

複合オーバーパックとは、鋼製容器（現状炭素鋼が候補となっている）の外表面を、チタンや銅といった、ある条件下で極めて高い耐食性を示す材料によって被覆した複合構造のオーバーパックのことである。内側の炭素鋼には強度部材として、外側のチタンまたは銅には耐腐食性機能をそれぞれ分担させる。

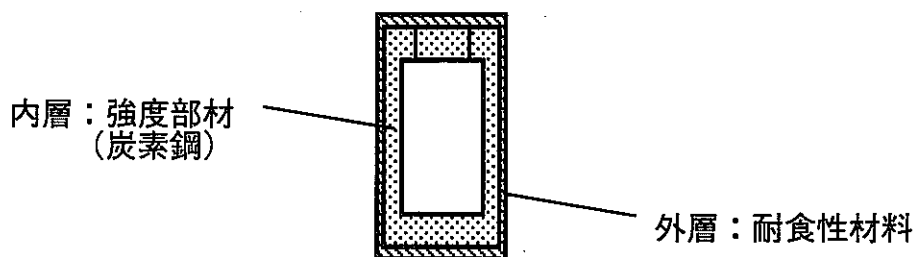


図 2-2 複合オーバーパックの概念

今回の試作では、外層の耐食性材料にチタンを用いた複合オーバーパックについて、その設計検討および実規模大での試作を行う。

図 2-2 (3)

図 2-2 (3)

3. 試作複合オーバーパックの仕様および製作方法の検討

3.1 オーバーパックの形状の検討

(1) 基本形状

オーバーパックの形状選定にあたっては以下の項目について考慮する必要がある。

- ①耐圧性に優れる
- ②製作性がよい
- ③製作コストが低い
- ④材料コストが低い（物量的に無駄のない形状）
- ⑤定置時の安定性が良い
- ⑥緩衝材（ベントナイトブロック）施工性に優れる

これらの観点から以下の表 3-1 に示す代表的な形状の比較を行った。

表 3-1 オーバーパック形状の比較

形状	
球形	球形のため耐圧性は良いが製作性および定置時の安定性に劣る
鏡板付き円柱形	上下面が鏡板かつ胴部が円柱のため耐圧性はよいが鏡板部の製作性、製作コストに劣る
円柱形	定置方式が横置きの場合安定性は角柱形に比較して劣るが他の全ての項目についてよい
角柱形	角柱の角部が無駄な部分となり材料コストがアップする。耐圧性は他に比べて劣る

検討から、オーバーパックの基本形状は円柱形とする。

(2) 基本構造

前述の通り、複合オーバーパックの形状は円柱形とする。ここでは基本的な蓋の形状、オーバーパック本体の部材分割形式の検討を行う。オーバーパックに想定される構造案を以下の図 3-1 に示す。

蓋の形状については、本体への取り付け溶接の方式によって定まると考えられる。ガラス固化体収納後に実施されるオーバーパック本体への取り付け溶接は、固化体から発せられる放射線環境下での作業であり、溶接性および溶接後の検査性を考慮すると、溶接線の長さはなるべく短くなる構造、すなわち以下の図の(c)、(d)に示す形状のとおり、オーバーパック本体の外径より小さい直径の蓋とすることが、(a)、(b)に比較して有利である。また、オーバーパック本体の円筒部、底部の部材分割については、溶接、検査のコストを考慮すると、なるべく溶接個所が少なくなるよう

にすることが望ましい。

これらを考慮し、以下の(d)に示すような、円筒部と底部を一体型とし、円筒部上部に段付部を設けて蓋と取り合う構造を採用する。なお、本構造は縦置き定置、横置き定置のいずれの定置方式にも対応しうると考えられる。

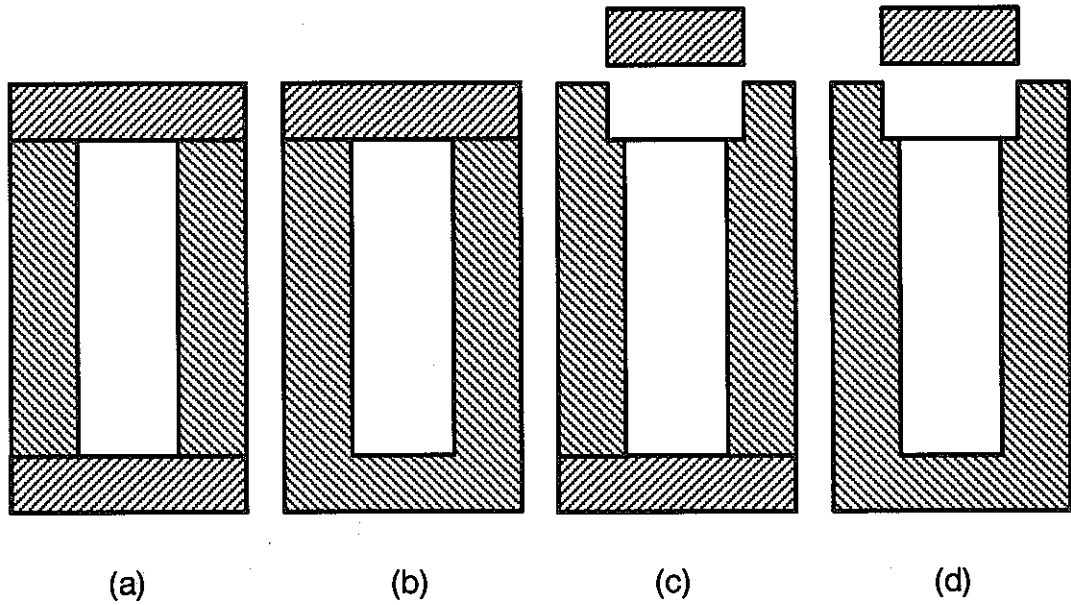


図 3-1 オーバーパック基本構造の比較

3.2 内層の材質および構造

3.2.1 内層の材質の検討

オーバーパック材料に要求される項目としては以下のものが挙げられる。

- ① 耐圧性・機械的強度に優れること
- ② 放射線遮へい性
- ③ 溶接性が良好であること
- ④ 成形・加工性が良好であること
- ⑤ 組成の均一性
- ⑥ 検査性
- ⑦ 資源量が多く低コストであること

以上の機能要求事項を満足する材料は、現状では炭素鋼が最も有力であると考えられる。炭素鋼にはその使用用途に応じて、鋳鉄、鋳鋼、鍛鋼、圧延鋼材と様々な加工形態が存在するが、これらを上記の要求内容について比較し、オーバーパック材料として最適な材質を選択する。これらの比較を表 3-2 に示す。

表 3-2 構造強度層の材料の検討

	耐圧性	遮へい性	溶接性	成形加工性	機械的強度	組成均一性	検査性	コスト	評価
鋳鉄	△	○	×	○	△	△	×	低い	×
鋳鋼	△	○	△	○	△	△	△	低い	×
鍛鋼	○	○	○	○	○	○	○	高い	○
圧延鋼材	○	○	○	×	○	○	△	中間	×

以上の検討から、鋳鉄、鋳鋼とも構造強度については材質の選択によって鍛鋼とほぼ同様であり、耐圧設計上の問題はない。しかし製作時（鋳造時）に引け巣や砂かみといった欠陥が介在しやすい。これに対して鍛鋼は製作時の鍛練工程によって金属組織中に内在するに欠陥をより少なくできる。したがって、コストは比較的高くなるものの、他の全ての項目に優れた特性を示す鍛鋼品を候補材料として考える。

鍛鋼品のうち、今回の試作に用いる具体的な材質については、JIS 規格に規定される各種の鍛鋼品から選択することとした。JIS に規定される鍛鋼品の中から、原子力関連製品などでも使用実績のある以下の鍛鋼品のうち、オーバーパックの材料として適する具体的な材質を選定する。

- ① JIS G 3201 炭素鋼鍛鋼品 (SF)
- ② JIS G 3202 圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 (SFVC)
- ③ JIS G 3206 高温圧力容器用 Cr-Mo 鋼鍛鋼品 (SFVCM)

これらの鍛鋼品について、前述と同様にオーバーパック材料に要求される項目を比較したものを表 3-3 に示す。いずれの鍛鋼品とも、耐圧性、遮へい性、成形性、加工性等は優れており差が見られない。したがって本検討においては、将来の量産を考慮し、強度とコストのバランスがとれた、炭素鋼鍛鋼品の SF490A を内層（構造強度層）の材料として採用した。ただし、従来知見から、溶接性の向上のために、炭素の含有量を 0.3wt%以下に成分調整するものとする。この成分調整を行うことによる機械的強度の低下はない。

表 3-3 構造強度層の材料比較

		耐圧性	遮へい性	溶接性	成形加工性	機械的強度 降伏点または耐力 (N/mm ²)	組成均一性	検査性	コスト	評価
JISG 3201	SF340A	○	○	△*	○	175 以上	○	○	比較的安い	—
	SF390A	○	○	△*	○	195 以上	○	○	比較的安い	—
	SF440A	○	○	△*	○	225 以上	○	○	比較的安い	—
	SF490A	○	○	△*	○	245 以上	○	○	比較的安い	◎
	SF540A	○	○	△*	○	275 以上	○	○	中間	—
	SF590A	○	○	△*	○	295 以上	○	○	中間	—
	SF540B	○	○	△*	○	295 以上	○	○	中間	—
	SF590B	○	○	△*	○	325 以上	○	○	中間	—
	SF640B	○	○	△*	○	345 以上	○	○	中間	—
JISG 3202	SFVC2	○	○	○	○	205 以上	○	○	中間	—
	SFVC2A	○	○	○	○	245 以上	○	○	中間	—
	SFVC2B	○	○	○	○	245 以上	○	○	中間	—
JISG 3206	SFVCMF22B	○	○	○	○	385 以上	○	○	高い	—
	SFVCMF22V	○	○	○	○	415 以上	○	○	高い	—
	SFVCMF3V	○	○	○	○	415 以上	○	○	高い	—

C量が0.3%を超えた場合には、溶接性が劣る。

3.2.2 内層の構造検討

3.2.2.1 耐圧強度についての考え方

現状オーバーパックの設計・解析に関する法規および技術基準は存在しない。したがって、現状では安全上の観点から、原子力プラント用に制定された「発電用原子力設備に関する技術基準」(通産省告示第 501 号:以下告示 501 号)に準じて設計・解析を行うことが妥当と考えられる。

告示 501 号では、容器に関しては、第 1 種容器から第 4 種容器まで区分される。告示 501 号に準じたオーバーパックの設計および解析にあたっては、オーバーパックの法規上の機器分類を明らかにする必要がある。

オーバーパックは原子炉のように加圧された液体やガスが充填されておらず、かつ原子炉そのものでもないため、第 1 種容器の要件である、原子炉圧力容器冷却材バウンダリを構成する機器には該当せず、第 2 種容器の要件である、原子炉格納容器およびこれに接続する容器にも該当しない。また第 3 種容器の要件である、原子炉を安全に停止するために必要な設備または非常時に安全を確保する設備にも該当しない。このように、厳密に告示 501 号を解釈すると、上記 3 つのいずれにも該当しないグループである第 4 種容器に区分されることになる。ただし、第 4 種容器は応力解析を実施する必要はなく、また、解析に必要な許容応力値などの規定も存在しない。高レベル放射性廃棄物を内包するオーバーパックの特殊性を考慮すれば、応力解析は無視できないと考えられ、今回の設計においては第 4 種容器には区分しないこととした。

一方、告示には第 2 種容器の機能として放射性物質等の有害な物質の漏えいを防止するためのものと規定されており、高レベル放射性廃棄物を内包するオーバーパックは、原子炉格納容器でないもののその機能は本要件に該当するため、これを踏まえて、オーバーパックを第 2 種容器と解釈することは可能である。第 2 種容器に対しては、特例として、応力解析を実施する規定が存在する。この場合の許容応力値の設定には、第 2 種容器のうち、解析を必要とする場合の規定に準拠して第 2 種容器用に規定された値を用いる方法と、第 2 種容器の特例事項を適用して第 1 種容器用に規定された値を用いる方法の 2 つが可能である。

以上の検討に基づいて、今回の試作では、告示 501 号の第 2 種容器の規定に準じた設計を実施する。

3.2.2.2 荷重条件の設定

地下深部に定置したオーバーパックには、緩衝材の膨潤圧、地圧（地下水圧を含む）が作用すると考えられる。ここでは今回の複合オーバーパックの試作において設定する荷重条件について検討する。

オーバーパックに作用する外荷重は緩衝材や岩盤との力学的相互作用から決定される。岩盤は堆積岩、結晶質岩を問わずクリープ変形するため、初期地圧（地上からオーバーパックまでの全岩盤の荷重）がすべて作用するわけではないが、ここでは保守的に初期地圧すべてが作用すると考える。このうち垂直圧力（ σ_v ）はオーバーパックに被さる岩盤の飽和密度（ ρ_s ）とオーバーパックから地上までの処分深度（H）の積（ $\sigma_v = \rho_s \times H$ ）として求めた。また、水平圧力（ σ_h ）は側圧係数を λ として垂直圧力の λ 倍の圧力がかかるものとした。（ $\sigma_h = \rho_s \times H \times \lambda$ ）

上記 ρ_s および λ の値については、本試作においては、第1次取りまとめ時に設定された外荷重条件を参考に、飽和密度 $\rho_s = 2.75 \text{ g/cm}^3$ 、側圧係数は保守的に $\lambda = 2$ を採用した。

表 3-4 荷重条件

側圧係数	2
垂直圧力	27.5 MPa
水平圧力	54.9 MPa

3.2.2.3 板厚計算

これまでの検討に基づき内層の板厚を計算する。計算は縦置き定置、横置き定置それぞれの場合について計算する。板厚計算にあたり、設定した条件を以下に示す。

① 処分条件

- ・岩盤飽和密度： 2.75 g/cm³
- ・側圧係数： 2
- ・処分深度： 1000 m
- ・設計温度： 150°C

② ガラス固化体仕様

- ・形状： $\phi 430 \times 1340 \text{ H}$
- ・熱膨張（150°C 時）
 - 直径方向： 0.91 mm
 - 軸方向： 2.82 mm

③ オーバーパック内孔寸法

ガラス固化体の大きさ、クレーンによる搬入性、固化体の膨張等を考慮し、直径方向に片側 5 mm、高さ方向に 5 mm のクリアランスを設定する。

・内寸法：φ440×1345 H

④ 外荷重値（外圧値）

・垂直方向圧力：27.5 MPa

・水平方向圧力：54.9 MPa

(1) 縦置き定置の場合の板厚計算

① 平板の板厚（底板，蓋板）

告示 501 号第 条より，平板の板は以下の式による。

$$t = d \sqrt{\frac{KP}{S}}$$

ここに，

t ：必要板厚

d ：底板直径（オーバーパック内径） d_1 ；φ440 mm

蓋板直径 d_2 ；φ460 mm

P ：最高使用圧力（垂直方向圧力）；27.5 MPa

S ：許容応力（告示別表第 4 「SF490A」 150℃の値）

132 N/mm²

K ：係数（第 24 条より）0.5

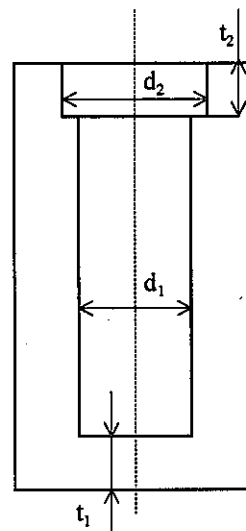


図 3-2 平板板厚計算モデル

なお，蓋板直径 φ460 mm は，底板直径（オーバーパック内径） φ440 mm に対して段差 10 mm を考慮して決定した。また，係数 K は蓋板と胴本体との接合状態によって決定するが，代表的な形状に当てはまらない「その他」の場合の 0.5 とした。この値は最も安全側の値であるが，計算された板厚の妥当性は後述の応力解析にて確認する。

以上より底板，蓋板の必要板厚は以下の通りである。

必要底板厚さ：142.0 mm

必要蓋板厚さ：148.5 mm

②円筒胴の板厚

告示 501 号第 22 条より、円筒胴部の板厚は、試計算の結果から板厚が外径の 10% 以上の場合の計算として、以下の計算式により求まる板厚 t_1 と t_2 のいずれか大きい方の値以上出なければならない。

$$t_1 = \frac{D \left(\frac{P}{B} + 0.0833 \right)}{2.167}$$

$$t_2 = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2P}{S}} \right)$$

ここに、

t : 円筒胴板厚

D : 円筒胴外径 ; $(440+2t)$

L : 円筒胴高さ ; $1345+142+148.5=1635.5$

P : 最高使用圧力 (水平方向圧力) ; 54.9 MPa

S : 許容応力 (告示別表第 9×0.9) ; 198 N/mm²

B : 係数 (t , D , L から決まる係数) ; 120

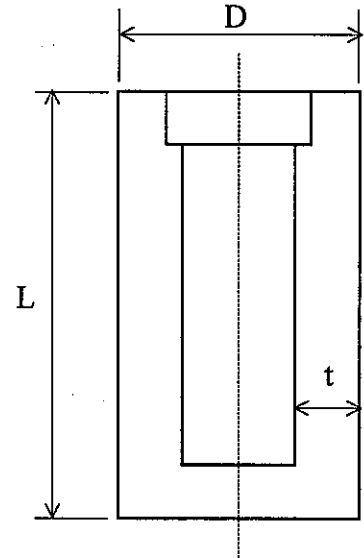


図 3-3 円筒胴板厚計算モデル

計算の結果、 $t_1=219.2$ 、 $t_2=109.6$ となった。したがって円筒胴の必要板厚は $t=219.2$ mm となる。

以上の板厚計算の結果を以下の表 3-5 にまとめる。

表 3-5 必要板厚計算結果 (縦置き定置の場合)

外圧 (MPa)	27.5		54.9
必要板厚 (mm)	蓋部	底部	円筒胴
	148.5	142.0	219.2

(2) 横置き定置の場合の板厚計算

横置き定置の場合は、平板については前項と同様の計算により求めることができるが、円筒胴については外圧条件が偏圧条件となるため、規格計算式が適用できない。したがって、外圧条件として最大荷重である水平方向荷重 54.9 MPa を均一な外圧と仮定して計算を行う。

①平板の板厚（底板，蓋板）

縦置き定置の場合と同様に、

$$t = d \sqrt{\frac{KP}{S}}$$

ここに、

t ：必要板厚

d ：底板直径（オーバーパック内径） ϕ 440 mm

蓋板直径 ϕ 460 mm

P ：最高使用圧力（水平方向圧力）54.9 MPa

S ：許容応力（告示別表第4「SF490A」150°Cの値）132 N/mm²

K ：係数（第24条より）0.5

以上より底板，蓋板の必要板厚は以下の通りである。

必要底板厚さ：200.6 mm

必要蓋板厚さ：209.8 mm

②円筒胴の板厚

縦置き定置の場合と同様に、

$$t_1 = \frac{D \left(\frac{P}{B} + 0.0833 \right)}{2.167}$$

$$t_2 = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2P}{S}} \right)$$

ここに、

t : 円筒胴板厚

D : 円筒胴外径 (440+2 t)

L : 円筒胴高さ 1345+142+148.5 = 1635.5

P : 最高使用圧力 54.9 MPa

S : 許容応力 (告示別表第9×0.9) 198 N/mm²

B : 係数 (t , D , L から決まる係数) 120

計算の結果、 $t_1=219.2$, $t_2=109.6$ となった。したがって円筒胴の必要板厚は $t=219.2\text{mm}$ となる。

以上の板厚計算の結果を以下の表 3-6 にまとめる。

表 3-6 必要板厚計算結果 (横置き定置の場合)

外圧 (MPa)	54.9		
必要板厚 (mm)	蓋部	底部	円筒胴
	209.8	200.6	219.2

3.3 外層の被覆方法と仕様設定

3.3.1 外層の被覆方法の検討

耐食層（チタン外層）の炭素鋼内層への被覆施工方法の選定に当たり、現状技術で考えられる施工方法をあげ、それらの適用性を比較する。被覆法の検討はオーバパックの形状を踏まえ、円柱形の上面および下面の平坦部への被覆方法と、側面の円筒部への被覆方法を分けて行う。

(1) 平坦部への被覆方法

①チタン板材を溶接で貼り付ける方法

平板状のチタンの端部を隅肉溶接して本体に貼り付ける方法である。層の板厚設定には自由度があり、また低コストで施工が可能である。内層との全面的な接着でないため、外層と内層の間には隙間が存在する。

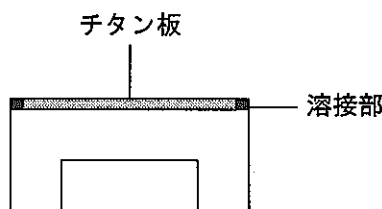


図 3-4 溶接による被覆施工

②肉盛溶接による方法

施工対象とする平面へチタンを肉盛溶接して被覆する方法である。溶接による被覆のため、密着性、剥離強さに優れるが、コストは高めとなる。ここで、チタンは鉄鋼材料成分が溶け込むと脆弱な金属間化合物を生じ、割れが発生する可能性があるため、炭素鋼への直接溶接は困難である。したがって、本方式を採用する場合には、溶接時におけるチタンと炭素鋼の希釈をできる限り少なくするような溶接施工方法を別途検討する必要がある。

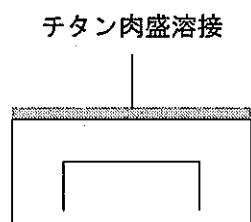


図 3-5 肉盛溶接による被覆施工

③ビス止めによる方法

平板状のチタンをビスにより本体へ機械的に固定する方法である。最も簡易な方法であり、コストも低く押さえることが出来る。しかし、ビス用に穴を開ける必要があること、穴の部分でのチタン層の厚さが他の部分より薄くなることなど、耐腐食性の面で課題が残る。本体とチタン層の間には隙間が存在する。

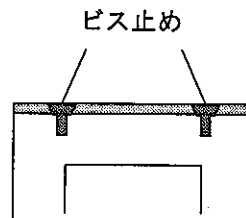


図 3-6 ビス止めによる施工

④爆発圧着法（爆着法）による方法

一般産業において、鋼板にチタンを貼り付けた複合材料（クラッド鋼板）を製作する際に用いられる方法である。図に示すように火薬の爆発力によってチタンを母材に密着させる方式である。密着性、剥離強さに優れたチタン層の被覆施工が可能である。現状の技術で対応は可能である。

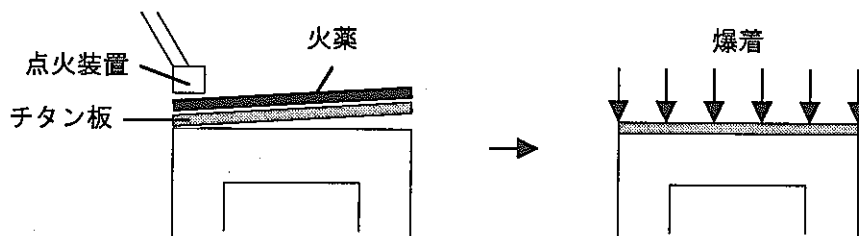


図 3-7 爆着法による被覆施工

以上の検討結果を次の表 3-7 にまとめる。

表 3-7 上面および下面（平坦部）への被覆施工法

	チタン板 貼付け溶接	溶接による 肉盛	ビス止め	爆着法
密着性	×	○	×	○
チタン層 保証厚さ	○	○	×	○
剥離強さ	△	○	×	○
コスト	○	×	◎	△
現状技術での 成立性	◎	△	◎	○

複合オーバーパックの炭素鋼内層とチタン外層の間の隙間に関しては、現状では明らかでないため、本試作では密着性を重視した被覆法を採用することとした。したがって、オーバーパック上部、底部の平坦部については爆発圧着法（爆着法）を採用する。

(2) 本体円筒部外面への被覆方法

①チタン板材を溶接で貼り付ける方法

円筒状に加工したチタン板を本体に溶接で貼り付ける方法である。層の板厚設定には自由度がある。またコストも抑えることが出来る。内層との全面的な接着でないため、外層と内層の間には隙間が存在する。

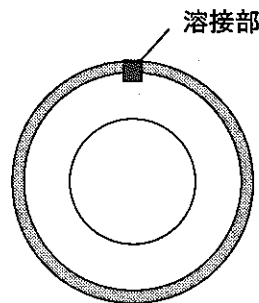


図 3-8 チタン円筒板の溶接による被覆施工

②焼きばめ挿入法

チタン外層を本体円筒部の外径より小さい内径をもつ円筒形に成形し、このチタン円筒を加熱することによる熱膨張によって、その内径が本体外径より大きくなった時点で、炭素鋼本体を挿入する。その後自然冷却させることにより外層が収縮し、内層に密着させる方法である。

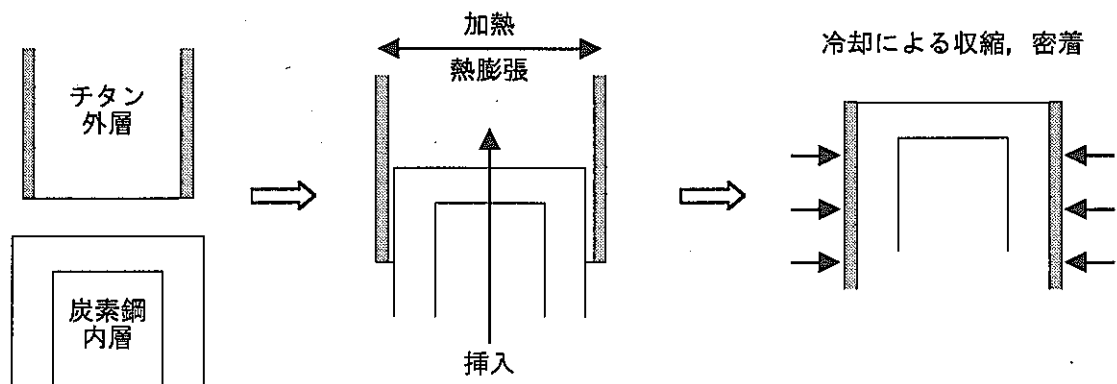


図 3-9 焼きばめ挿入法による被覆施工

③肉盛溶接による方法

本体円筒面へチタンを肉盛溶接して被覆施工する方法である。密着性、剥離強さに優れるが、コストは高めとなる。上述の通りチタンの炭素鋼への直接溶接は困難であることから、本方式を採用する場合には、溶接時に炭素鋼への希積を少なくする施工法を検討する必要がある。

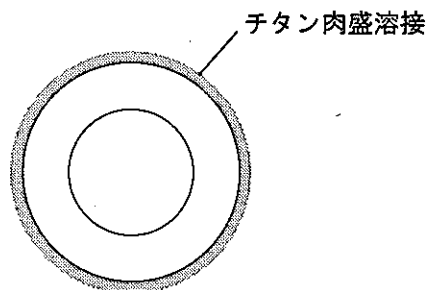


図 3-10 肉盛溶接による被覆施工

④ビス止めによる方法

円筒状のチタンをビスにより機械的に固定する方法である。最も簡易な方法でありコストも低く押さえることが出来る。しかし、全面接着でないため密着性に劣り、またビス用に穴を開ける必要があること、穴の部分でのチタン層の厚さが他の部分より薄くなることなど耐腐食性の面で課題が残る。

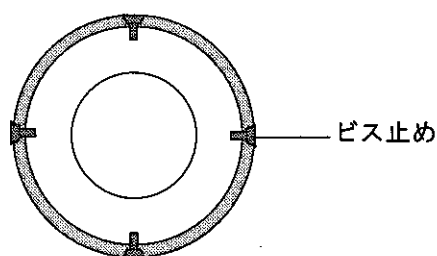


図 3-11 チタン円筒板のビス止めによる被覆施工

以上の検討結果を次の表 3-8 にまとめる。

表 3-8 本体円筒胴外面への被覆施工法

	チタン板 貼付け溶接	焼きばめ法	溶接による 肉盛	ビス止め
密着性	×	○	◎	×
チタン層 保証厚さ	◎	◎	○	×
剥離強さ	△	△	◎	○
コスト	○	△	×	◎
現状技術での 成立性	◎	○	△	◎

本体円筒部外面へのチタン被覆法については、前述の平坦部への被覆法と同様、内層と外層の密着性を出来るかぎり確保する方針として施工方法を選択した。したがって、焼きばめ挿入法（焼きばめ法）を採用する。

3.3.2 外層の材質の検討

チタン材の規格には日本の JIS 規格として JIS H 4600 などのほか、アメリカの ASTM 規格に ASTM B265 がある。

同じくチタン材をオーバーパックスの候補材料として選定しているカナダでは、長年 ASTM Grade-2, Grade-7, Grade-12 および 16 を対象としたすき間腐食進展評価を行っている。また、サイクル機構におけるチタン材腐食研究においても、ASTM 規格材を候補材料として選定しており、オーバーパックス製作技術開発においてもこれと整合を図る必要があると考えられる。したがって今回の試作においては、外層（耐食層）のチタン材料として、ASTM 規格の中から選定することとした。

チタンの腐食で問題となるのはすき間腐食である。ASTM チタン材のうち、耐すき間腐食性に優れるものとしては、その順に Grade-7, Grade-12, Grade-16, Grade-2 材があげられる。しかしながら、Grade-7 は水素脆化の感受性が高く、一方、Grade-2 は耐すき間腐食性は他のチタン材料に比べて落ちるが、成形加工性、コストパフォーマンスは他に優れる。

耐腐食性については、腐食を生起させない地質条件となるよう、処分サイト選定を適切に実施することで回避が可能であり、サイトが決定していない現在にあつては、耐腐食性能からの選定より、オーバーパックス製作時の成形加工性、被覆施工性からの材質検討を行うべきと考えられる。

前項までの検討の通り、オーバーパックス外面へのチタンの被覆方法は、上面および下面の平坦部には爆着法を、側面の円筒部外面には焼きばめ挿入法をそれぞれ採用した。爆着法の適用可否の検討に当たり考慮すべき特性は合わせ材（爆着する材料）の「伸び」である。これが小さいと施工後にひび割れが生じる。ASTM チタン材のうち、爆着法に適するものには、ASTM Grade-1, Grade-11, Grade-17 などがある。Grade-2 はこれらに比べ伸びの値が若干低い、十分施工可能な範囲にある。

また、焼きばめ法については全てのチタン材でも適合すると考えられる。

以上の検討から、成形加工性、被覆施工性、材料コストそれぞれのバランスを総合的に判断して、ASTM Grade-2 を外層の材料として採用した。

以上の検討から決まるチタン-炭素鋼複合オーバーパックの製作手順の概略を図3-12に示す。焼きばめ施工用の外層は2枚のチタン平板を曲げ加工した後、溶接して円筒とし、内面を機械加工する。円筒部長手（縦）継手の溶接は、電子ビーム溶接によることとする。炭素鋼内層は、上面と下面にチタンを爆着で被覆施工した後、外面を機械加工する。製作した炭素鋼内層にチタン外層を焼きばめ法によって施工する。その後内面を機械加工する。蓋部については上面にチタンを爆着施工した後、内外層が一体となった本体へ溶接によって取り付ける。

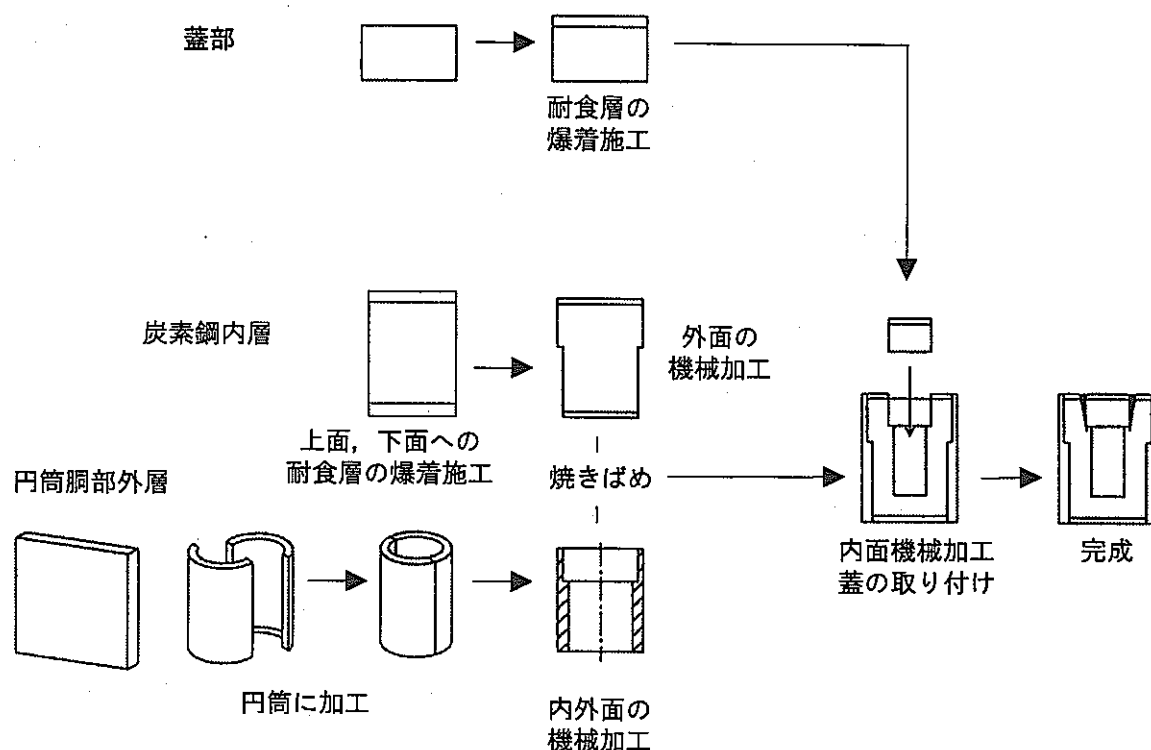


図 3-12 製作手順の概要

3.3.3 外層の厚さの検討

チタン-炭素鋼複合オーバーパックは、内層である炭素鋼に強度部材としての役割を持たせ、チタンの外層は耐食性を担う。

チタンの全面腐食速度は $0.1 \mu\text{m/y}$ 以下であることから、オーバーパックの健全性期待年数である 1000 年間での必要厚さは 0.1 mm 以下となる。実機のチタン層の厚さは、この必要厚さ以上であれば寿命期間中の健全性は維持されることになる。しかしながら、 0.1 mm では薄すぎて実際の施工が困難となることから、製作性の観点から、円筒胴部については、焼きばめ挿入法での成形・加工を考慮して 12 mm とし、爆着法で施工する上面および下面については、後述する円筒胴部チタンとの隅肉溶接を考慮し 6 mm とした。

3.3.4 溶接方法の検討

ここでは複合オーバーパックの製作に用いる溶接法について検討する。各種溶接法の比較を表 3-9 に示す。

(1) オーバーパック蓋部の封入溶接方法

オーバーパックの蓋部は、ガラス固化体挿入後に封入溶接される。封入溶接方法の検討にあたり、一般的に用いられている代表的な溶接方法について比較を行う。

オーバーパックの蓋部の溶接方法選定に当たっては、以下に示す項目を考慮する必要がある。

- ① 本体内にガラス固化体を収納後の放射線環境下での作業であり、遠隔操作への対応が容易であること。
- ② 蓋の溶接部の板厚は極厚であり、溶接後発生する熱応力が大きくなる傾向があること。
- ③ 本体および蓋は炭素鋼であり、一般の溶接では溶接前または溶接後に溶着金属の急冷による割れを防止するため予熱、後熱処理を行うが、オーバーパック溶接部の場合、内部に収納するガラス固化体への熱影響を考慮すると、これらの熱処理が不可能となること。

オーバーパック蓋部の封入溶接には長期の健全性が求められる。表 3-8 に示した各溶接方法のうち、電子ビーム溶接は、真空チャンバー内で溶材を使用せず施工することにより、その他の溶接法に比較して溶材や空間からの不純物の混入の可能性が低く、かつ入熱密度が高く溶接に要する時間を短縮できるため熱影響部の少ない溶接が可能である。また、遠隔自動化への対応についても他の溶接法に比べ容易である。したがって、本試作ではオーバーパック蓋部の第一の溶接方法として電子ビーム溶接を採用する。

ここで、電子ビーム溶接での 1 パス（一回の溶接）で溶接可能な深さは、ビームの出力にもよるが、おおむね 100 mm 位であり、一方、蓋部の板厚は、先に示した板厚検討で 200 mm 以上（横置きの場合）であることから、本試作においては、開先底部から 80 mm の高さまでの溶接を、電子ビーム溶接法により 1 パス（1 回の溶接）で溶接し、残る部分については多層盛溶接にて実施することとする。多層盛溶接法については、MAG 溶接法で施工することとする。

電子ビーム溶接では、溶接対象の部材同士の幅は少ないほうが望ましいため、胴本体と蓋の突き合わせの隙間の幅は、0~0.3 mm に制限するものとする。

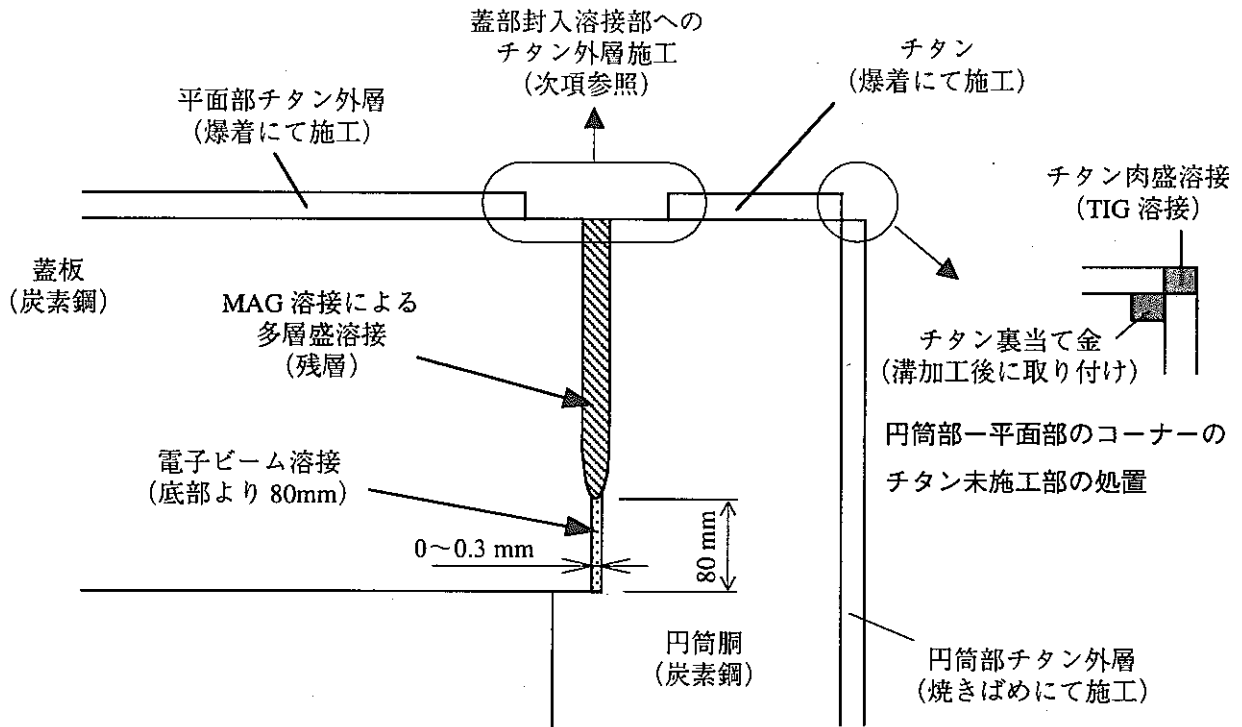


図 3-13 蓋溶接部の概要

(2) 円筒部と平面部のコーナー部の施工方法

チタンの外層の施工では、円筒胴の外表面については焼きばめ挿入法、上面・下面の平面部については爆着法によって施工するが、組み立て後それらのコーナー部には図 3-13 に示すような未施工の部分が残る。この部分へのチタン外層施工方法について検討する。

3.3.1 項でも検討した通り、板材等を溶接で貼り付ける方法や溶接による肉盛溶接による方法等が考えられるが、今回の試作では外層の内層への密着性を優先させ、肉盛溶接による被覆方法を採用する。

いかなる溶接法を採用するかは、表 3-9 の比較にも示した通りそれぞれの溶接法の特質を考慮して決定する。本溶接部は、実機においてはガラス固化体の封入前に施工される部分であり、今回の試作においては、蓋部の封入溶接のように遠隔自動化への適用性を考えないこととした。

したがって、表 3-9 に示した溶接法のうち、TIG 溶接による肉盛によって被覆する方法を採用する。この場合、先に示した通り、チタンの炭素鋼への直接溶接は溶接後の健全性の面で問題があるため、胴本体への外層焼きばめ施工前に本体側に溝を加工し、図に示すような外層のチタン材と同材で製作した「裏当て金」と呼ばれる部材を溝に全周にわたりはめ込み、炭素鋼への直接溶接とならないよう対策する。

(3) 蓋部溶接部上面へのチタン外層の施工

蓋部の封入溶接後、その溶接線に沿って残される外層の未施工部への被覆方法について検討する。

考えられる被覆施工方法は、

- ①チタン板を隅肉溶接して貼り付ける
- ②チタン板ビス止め
- ③溶接によるチタンの肉盛

があげられる。

①, ②のようにチタン板材の固定による被覆方法は、低コストである反面、チタン層の炭素鋼内層への密着性は低い。今回の試作においてはチタン層の密着性が得られる被覆方式を採用することとし、肉盛溶接による被覆を採用する。その場合、先の検討に示した通り、チタンの炭素鋼への直接溶接は、溶接時に炭素鋼成分のチタンへの溶け込みにより生成される化合物が原因となり溶接部内部に割れが発生するため、困難と考えられる。したがって、溶接時の炭素鋼のチタンへの溶け込みを減少させるため、炭素鋼とチタンの中間層として銅を施工したうえで、あらためてチタンを施工する方法を採用した。

銅の中間層の肉盛溶接には MAG 溶接法、最終層のチタンの肉盛溶接には TIG 溶接法によってそれぞれ施工することとした。

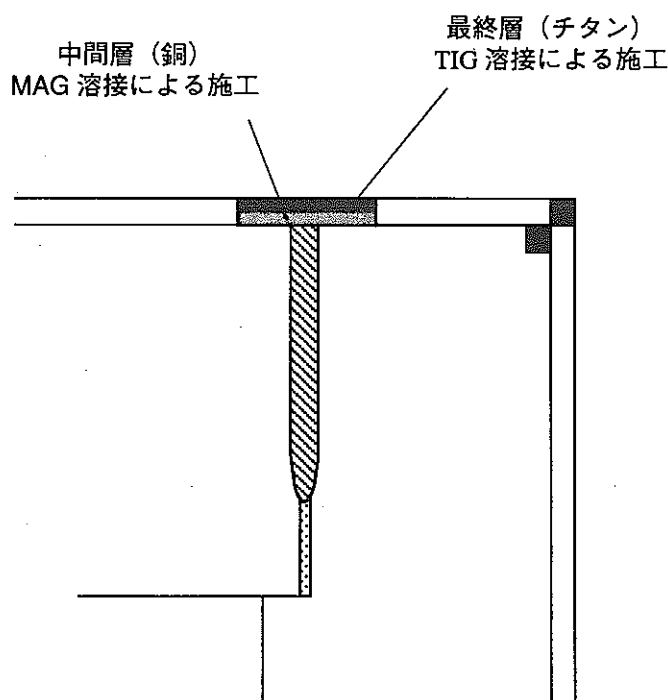
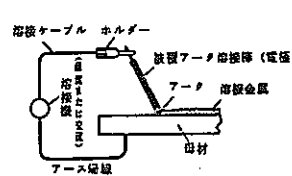
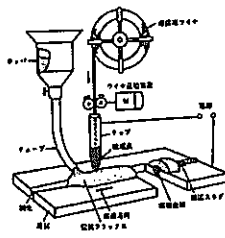
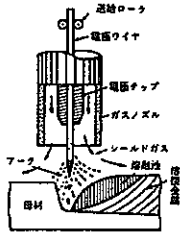
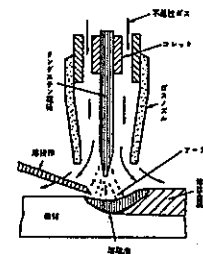
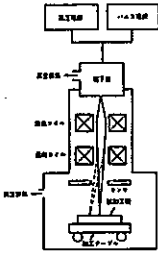
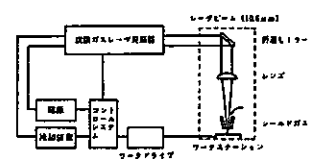


図 3-14 蓋溶接部のチタン外層被覆方法

表 3-9 各種溶接法の比較

溶接方法	被覆アーク溶接	サブマージアーク溶接	MIG, MAG溶接	TIG溶接	電子ビーム溶接	レーザービーム溶接
概要						
	<p>フラックスで被覆された溶接棒から発生するアークにより溶接棒と母材が溶融する。</p>	<p>母材上にフラックスを置き、これに心線を潜らせてアークを発生させそのアーク熱によって心線および母材が溶融する。</p>	<p>ガスアーク溶接法の一種で溶材は電極を兼ねる。</p>	<p>不活性ガス中で電極からのアークにより外部から供給される溶材を溶融する。</p>	<p>電子ビームを収束させ、被溶接物を直接溶融させ接合する。</p>	<p>レーザーにより被溶接物を直接溶融させ接合する。</p>
長所	<p>作業者が溶接棒を操作するため、自由度が大きい</p>	<p>最も一般的な自動溶接法</p>	<p>入熱の集中性が高く深い溶け込みが得られ高速、高能率溶接が可能</p> <p>自動化はサブマージアーク溶接法より容易である</p>	<p>溶材は電極と分かれており、スパッタの発生はない</p>	<p>自動化が容易であり、溶材を用いず真空中で加工するため不純物の溶け込みが無い。</p> <p>入熱密度も高く 100mm 程度の開先深さであれば 1 回で溶接が可能である。</p> <p>予熱が不要である</p>	<p>溶材を用いないため不純物の溶け込みが少ない。</p>
短所	<p>予熱約 150℃を必要とする。</p> <p>作業員の被曝を考慮すると採用は困難</p>	<p>溶接後スラッグの除去が必要</p> <p>溶材に含まれる不純物が溶け込む可能性あり</p> <p>予熱約 150℃を必要とする</p>	<p>溶材に含まれる不純物が溶け込む可能性あり。スパッタ発生時は除去が必要。</p> <p>予熱約 100℃を必要とする</p>	<p>入熱集中性は MIG 溶接に劣る</p> <p>溶材に含まれる不純物が溶け込む可能性あり</p> <p>予熱約 100℃を必要とする</p>	<p>大規模な真空容器が必要</p> <p>開先精度が要求される</p>	<p>電子ビーム溶接と比較してエネルギー変換効率が悪い</p> <p>厚板への適用不可</p>
評価	×	×	○	○	◎	×

3.3.5 非破壊検査手法

一般に金属材料の溶接部に対する非破壊検査として、また総理府令73号（加工施設，再処理施設および使用施設等の溶接の技術基準に関する総理府令）等の法規によって以下の方法が採用／規定されている。

- ①放射線透過試験（RT）
- ②超音波探傷試験（UT）
- ③磁粉探傷試験（MT）
- ④浸透探傷試験（PT）

これら4種類の非破壊検査法のうち、①と②は体積検査（対象物の内部の検査）であり、③と④は表面検査に分類される。

以上の非破壊検査法のオーバーパック各溶接部への適合性について検討し、本試作で用いる方式を選定する。

3.3.5.1 溶接部の検査

(1) 蓋部溶接部

蓋部と胴本体との溶接部については、放射性核種の閉じこめ性および構造健全性の確認の観点から、体積検査（溶接部内部にわたる検査）が必要であり、UTおよびRTが適する。しかしながら、実機においては、内部に放射線源であるガラス固化体を封入した後の検査となるため、放射線透過試験は適用できない（透過写真撮影用フィルムが感光する）。

超音波探傷試験は、現在一般に溶接部に対して行われている検査方法であり、遠隔検査への対応も現状技術の延長で可能であると考えられるが、今回の複合オーバーパックについては炭素鋼内層と外層（耐食層）の境界部において、超音波の反射に影響を及ぼすため正しい検査が出来ない可能性があり、したがって、本溶接部には溶接の途中で段階的に磁粉探傷試験および浸透探傷試験を実施する方法を採用する。

(2) 外層縦継ぎ手 円筒部と平面部のコーナー部

外層のチタン円筒部の縦継ぎ手や、円筒部と平面部のコーナー部のチタン肉盛溶接部の検査については、実機ではガラス固化体封入前に行われる検査であり、かつチタンが非磁性体である（磁粉探傷試験は実施できない）などの理由から、放射線透過試験および浸透探傷試験を採用する。

(3) 最終肉盛部

蓋部封入溶接部のチタン最終肉盛部については、銅の中間層とチタンの外層から構成される。実機ではガラス固化体封入後に行われる検査であり、放射線透過試験は実施できない。また銅、チタンとも非磁性体であるため、磁粉探傷試験は実施できない。したがって浸透探傷試験を採用する。

3.3.5.2 その他の部位の検査

(2) 爆着面

炭素鋼素材にチタンを爆着施工した後、爆着層及び素材との合わせ面を JIS の規定に準拠した超音波探傷試験により検査する。

(3) 機械加工面

炭素鋼内層、チタン外層の機械加工面および溶接開先面については磁粉探傷試験または浸透探傷試験を実施する。

3.3.6 ハンドリング構造の検討

オーバーパックの外層には処分場での搬送・定置時におけるハンドリング構造を備えることが必要となる。ハンドリング構造としては以下の図 3-15 に示す形状が考えられる。また各ハンドリング構造の概念図と比較を表 3-10 に示す。

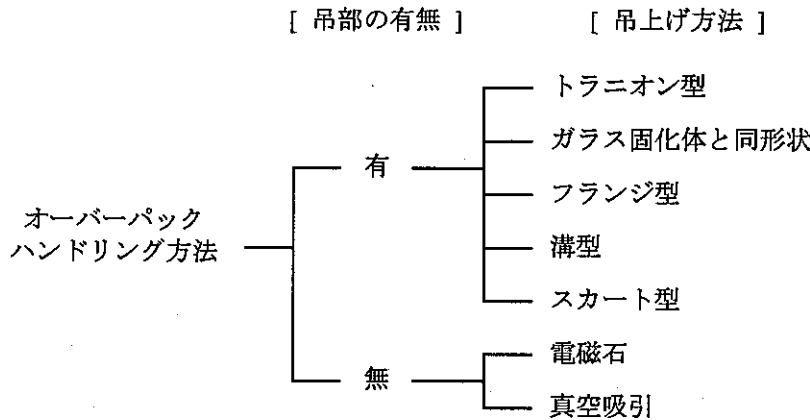


図 3-15 オーバーパックのハンドリング構造

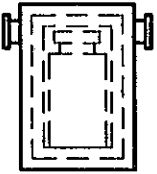
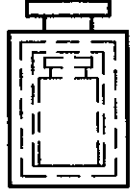
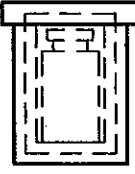
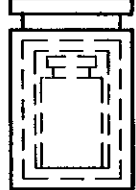
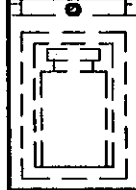
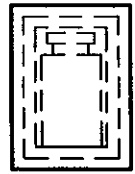
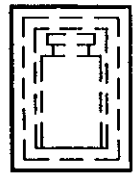
実際の搬送・定置作業を考慮すると、吊部を設ける方が作業性は良い。その反面、吊部が無い場合に比べて吊部への耐食層の施工に考慮が必要となる。また吊部を設けない場合は、処分孔および緩衝材の施工には影響を及ぼさないが、電磁石などの付帯設備が必要となり、その分だけ不具合発生の可能性が増える。

各ハンドリング方法の比較を表 3-10 に示す。比較から総合的に判断し、今回の試作オーバーパックのハンドリング方法は、本体に吊部を設けず、ハンドリング時に脱着式の専用治具を用いて行う方式を採用した。

本ハンドリング方法を選定するにあたり、本体構造および専用治具の構造を検討した結果、本体胴部側面に溝部を設け、この溝に噛み合うようなバンド方式の治具を採用することとする。オーバーパックの重量は、予備検討の結果約 6~7t となったため、吊上げ時の垂直荷重を考慮し、オーバーパック本体に設けた溝部に垂直荷重をもたせ、バンドの締め付け力を緩和するものとした。図 3-16 に脱着式ハンドリング治具の構造の概念を示す。本治具は側面にトランニオン方式の把持部を設けることとした。本方式は定置方式として処分孔縦置き方式、処分坑道横置き方式のいずれの定置方式にも対応する。また、図 3-17 にハンドリングの概念図を示す。

本方式を実機に適用する場合の課題としては、定置時の遠隔操作を考慮した治具の締め付け部の脱着方式および構造の検討と、着脱装置の開発が考えられる。

表 3-10 各ハンドリング機構の比較

吊り部の有無		有					無	
ハンドリング機構	トランオン型	ガラス固化体と同形状	フランジ型	溝型	スカート型	着脱型	真空吸引	
								
構造概念		本体胴部にトランオンを設け、トランオンに吊具を固定し吊上げる	上部に固化体と同形状の吊部を設け、吊部に吊具を固定し吊上げる	上部にフランジ型の吊部を設け、フランジ下方から吊具を固定し吊上げる	胴部に溝を設け、溝部に吊具を固定し吊上げる	上部にスカート型の吊部を設け、スカートの穴に吊具を固定し吊上げる	胴部に着脱可能な吊部を設け、吊部に吊具を固定し吊上げる	吊り部無し 上部を電磁石で吊上げる
ハンドリング性	問題点	特になし	横置き定置の場合は強度の問題で吊部が大型化する	定置後の吊具開放機構等の検討が必要	定置後の吊具開放機構等の検討が必要	横置き定置の場合はハンドリング方法の検討が必要	定置時支障の無い形状の検討、吊部取り外し方式の検討が必要	特になし
	処分孔への影響	吊具開放スペース必要 →処分孔が拡大する	特になし	特になし	吊具開放スペース必要 →処分孔が拡大する	吊具開放スペース必要 →処分孔が拡大する	吊具開放スペース必要 →処分孔が拡大する	特になし
	緩衝材への影響	・緩衝材の形状検討必要 ・溝部及び吊具取り外しスペースへの施工に課題	吊部周囲の施工に課題	吊具取り外しスペースへの施工に課題	・緩衝材の形状検討必要 ・溝部及び吊具取り外しスペースへの施工に課題	吊具周囲の施工に工夫が必要	吊具取り外しスペースへの施工に課題	特になし
停電時等の対応の要否		機械的構造によりフェイルセーフ	機械的構造によりフェイルセーフ	機械的構造によりフェイルセーフ	機械的構造によりフェイルセーフ	機械的構造によりフェイルセーフ	機械的構造によりフェイルセーフ	電源喪失時のオーバーバック落下防止の検討必要
製作性		困難	容易 吊り部は大型化	容易	容易	容易	容易 着脱機構の検討要	容易

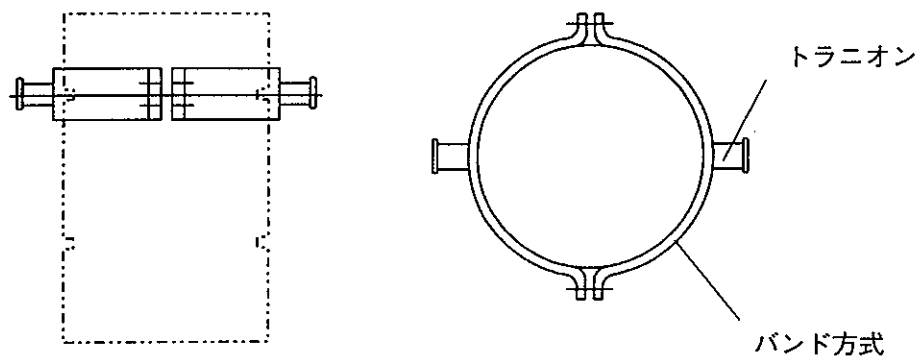
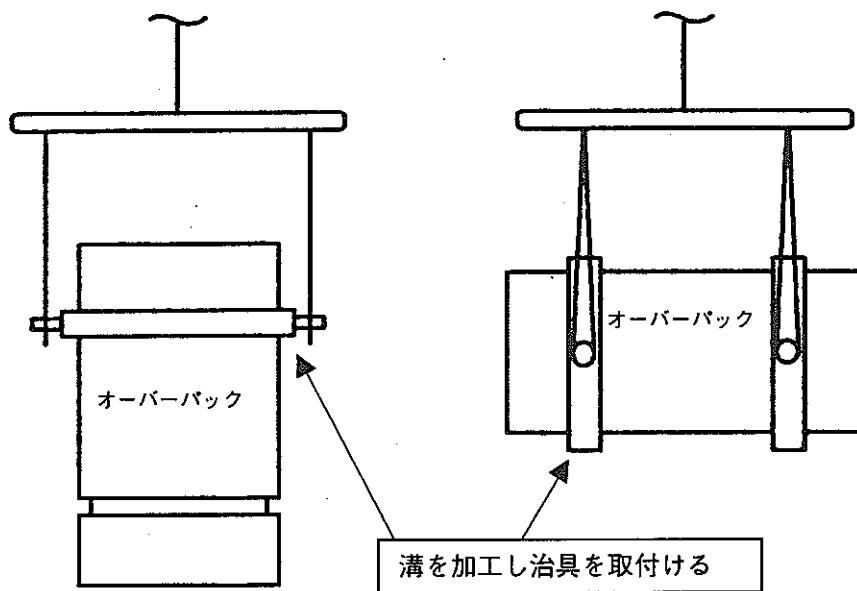


図 3-16 脱着式ハンドリング治具の概念図



縦吊りの場合
(治具は1個)

横吊りの場合
(治具は2個)

図 3-17 ハンドリングの概念

3.4 試作オーバーパックの構造

これまでの検討結果に基づき決定した試作オーバーパックの基本構造寸法を以下の図 3-18 に示す。また、各部の構造と施工法等の説明を図 3-19 に示す。基本構造の寸法は縦置き、横置きの両者を包絡する横置き定置方式の場合の寸法を採用した。なお、本寸法は必要板厚の計算結果に余裕代 5 mm を考慮したものである。

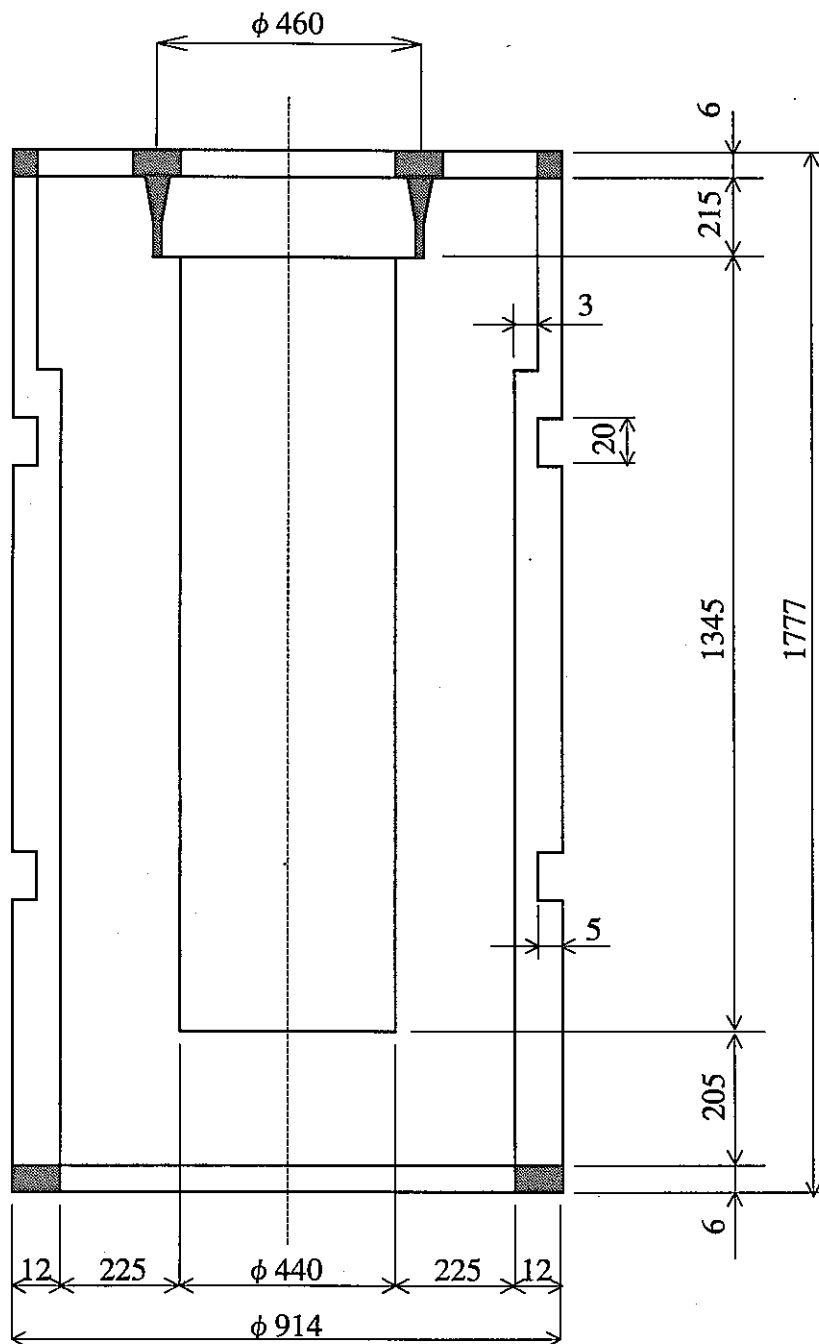


図 3-18 チタン-炭素鋼 複合オーバーパック基本構造図

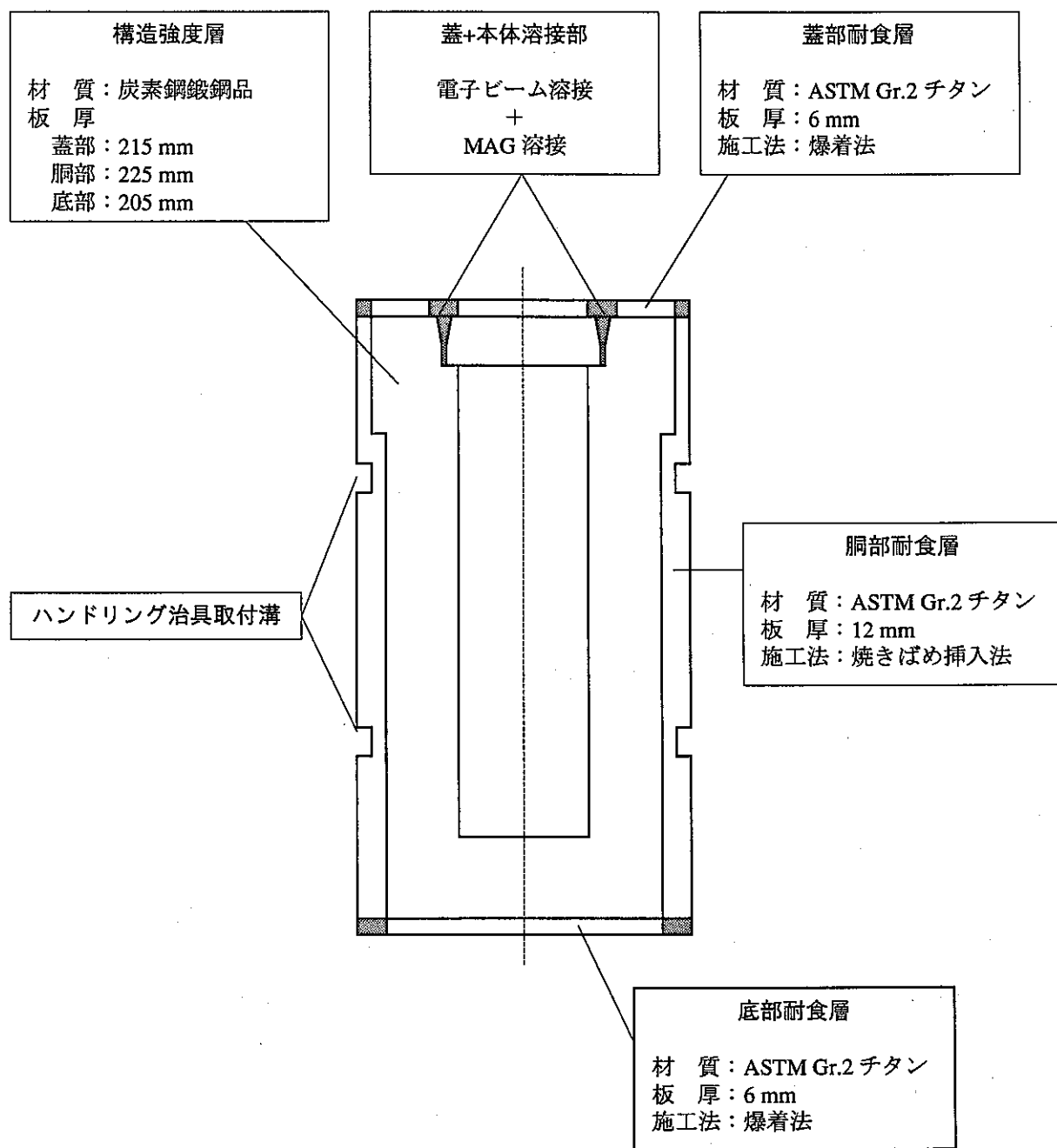


図 3-19 各部の構造概要

4. 応力解析

以上のとおり設定した構造に対して弾性応力解析を実施し、構造健全性の確認を行った。解析は、地層処分時に縦置き定置する場合と、横置き定置する場合のそれぞれについて実施した。

4.3.1 処分孔縦置き定置の場合

(1) 解析条件

- ① 計算コード : ABAQUS
- ② 解析モデル : 4 節点軸対象ソリッドモデル
- ③ 炭素鋼物性値 : ヤング率 $E = 1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
(告示 501 号 別表第 11 「炭素量 $\leq 0.3\%$ の炭素鋼」)
炭素含有量 0.3%以下とする
ポアソン比 $\nu = 0.3$
設計応力強さ $S_m = 147 \text{ N/mm}^2$ (150°C)
(告示 501 号 別表第 2 「SF490A」)
- ④ 外荷重 : 垂直荷重 27.5 MPa 水平荷重 54.9 MPa

なお、規格計算により求めた以下の必要厚さを構造寸法として解析に用いる。

- 蓋部板厚 : 148.5 mm
- 底部板厚 : 142.0 mm
- 円筒胴部板厚 : 219.2 mm

(2) 解析結果

図 4-1 に解析モデルを、各部に発生する応力分布を図 4-2 にそれぞれ示す。ただし、各節点で算出した応力値は強度設計の破壊基準として一般に用いられているトレスカ評価応力である。

解析結果より円筒部内面にて大きな応力が発生することが確認された。

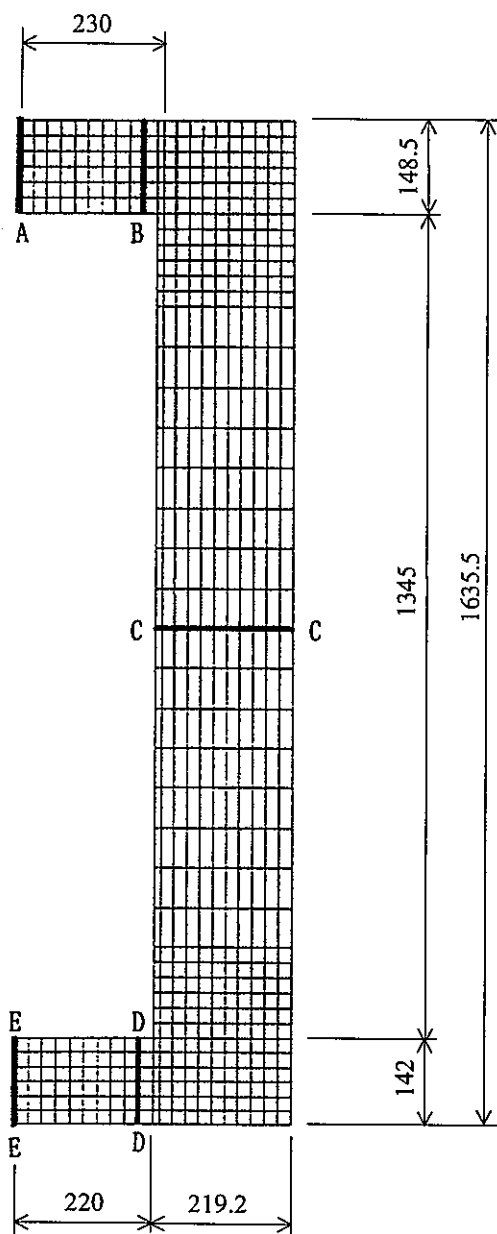


図 4-1 解析モデルと応力評価部位 (処分孔縦置き定置の場合)

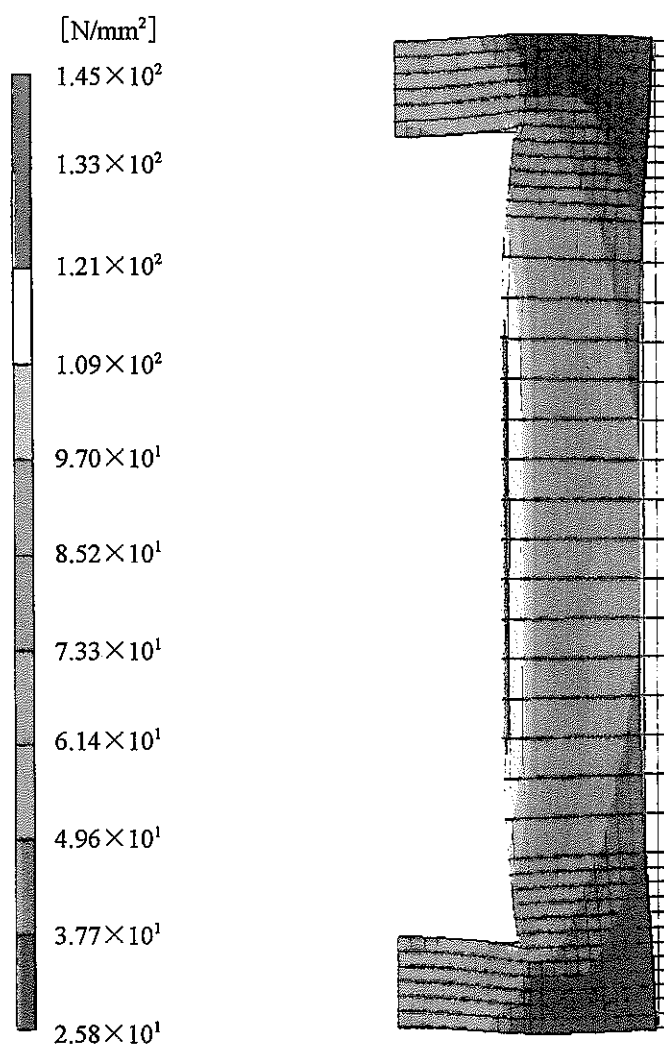


図 4-2 応力分布図 (処分孔縦置き定置の場合)

(3) 評価

オーバーパックの健全性を評価するために発生応力の大きい箇所を応力評価部位（評価断面）に選び、応力評価を行う。評価部位は解析結果をもとに図 4-1 に示す箇所とした。

応力評価については算出したトレスカ応力をもとに各評価部位での膜応力 σ_m および曲げ応力 σ_b を求め、以下に示す要領で行う。

①膜応力強さ σ_m については $\sigma_m \leq S_m$ であること

ここに S_m は材料ごとに定める設計応力強さで、告示 501 号別表第 2 より 147 N/mm^2 (150°Cの時の値)

② 膜応力と曲げ応力を加えた応力強さ ($\sigma_m + \sigma_b$) については

$(\sigma_m + \sigma_b) \leq 1.5 S_m$ (220.5 N/mm^2) であること

これらを設計条件とし健全性を確認する。

これらの考え方は、構造物の各部位で発生する一次応力を制限するものである。すなわち引張応力（曲げがない状態）が降伏点 (S_y) に達すると崩壊するため、設計応力強さ $S_m (= 2/3 S_y)$ で制限するのが①である。また、曲げを考慮した場合に十分安全側に限界を定めるのが②である。

各評価位置における応力評価結果を表 4-4 に示す。

表 4-1 縦置き定置の場合の応力評価結果

単位 (N/mm^2)

評価断面	一次一般 膜応力強さ P_m	許容値 S_m	(膜+曲げ) 応力強さ	許容値 $1.5S_m$	健全性
A-A	59.1	147	65.3	220.5	○
B-B	63.0		81.6		○
C-C	81.3		121.4		○
D-D	65.2		82.6		○
E-E	60.1		67.6		○

以上の応力評価の結果、発生応力の最も大きい評価断面 C-C においても問題はなく、オーバーパックの健全性は維持されることを確認した。

また、外圧による変形量は最大で 0.16 mm であった。オーバーパック内面の寸法 ($\phi 440 \times 1345L$) と収納するガラス固化体の外径寸法 ($\phi 430 \times 1340L$) との間には 5 mm の隙間を設定しており、この値に対して十分小さいことから、外圧によるオーバーパックの変形により、ガラス固化体の健全性を損なうような機械的外力は作用しないと考えられる。

4.3.2 処分坑道横置き定置の場合

(1) 解析条件

- ① 計算コード : ABAQUS
- ② 解析モデル : 8 節点 3 次元ソリッドモデル
- ③ 炭素鋼物性値 : ヤング率 $E = 1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
(告示 501 号 別表第 11 「炭素量 $\leq 0.3\%$ の炭素鋼」)
炭素含有量 0.3%以下とする
ポアソン比 $\nu = 0.3$
設計応力強さ $S_m = 147 \text{ N/mm}^2$ (150°C)
(告示 501 号 別表第 2 「SF490A」)

3 章にて示したとおり、処分坑道横置き定置の場合は、平板部は規格計算により板厚を求めることができるが、円筒胴部については上側から下側まで偏圧 (27.5~54.9MPa) となるため規格計算は適用できない (規格計算は均圧で用いる)。したがって、円筒胴部については安全側に 54.9MPa の均一な圧力がかかるものとした場合の規格計算の結果を構造寸法として用い、解析においては偏圧荷重条件を与えて健全性を確認する。

平板部板厚 : 200.6 mm

円筒胴部板厚 : 219.2 mm

また、解析モデルは円筒胴部への偏圧荷重条件を考慮し3次元ソリッドモデルとした。外面に垂直な圧力として以下の荷重を与えた。

平板部：54.9 MPa

$$\text{円筒胴部： } P(\theta) = P_0 \left(\frac{\theta}{\pi/2 + 1} \right) \quad \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right)$$

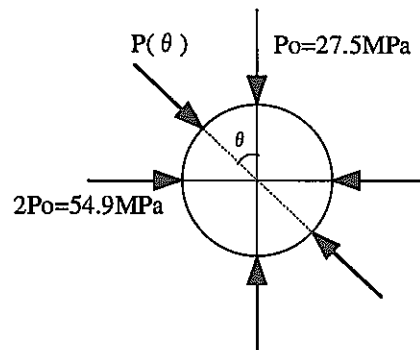


図 4-3 偏圧の概念

(2) 解析結果

図 4-4 に解析モデルを、各部に発生する応力分布を図 4-5 に示す。また、 $\theta = 90^\circ$ 、 0° 面での応力分布を図 4-6、4-7 にそれぞれ示す。

解析結果より $\theta = 0^\circ$ 面の円筒胴部内面および $\theta = 90^\circ$ 面の円筒胴部と平板部の境界部において応力が集中することが確認された。

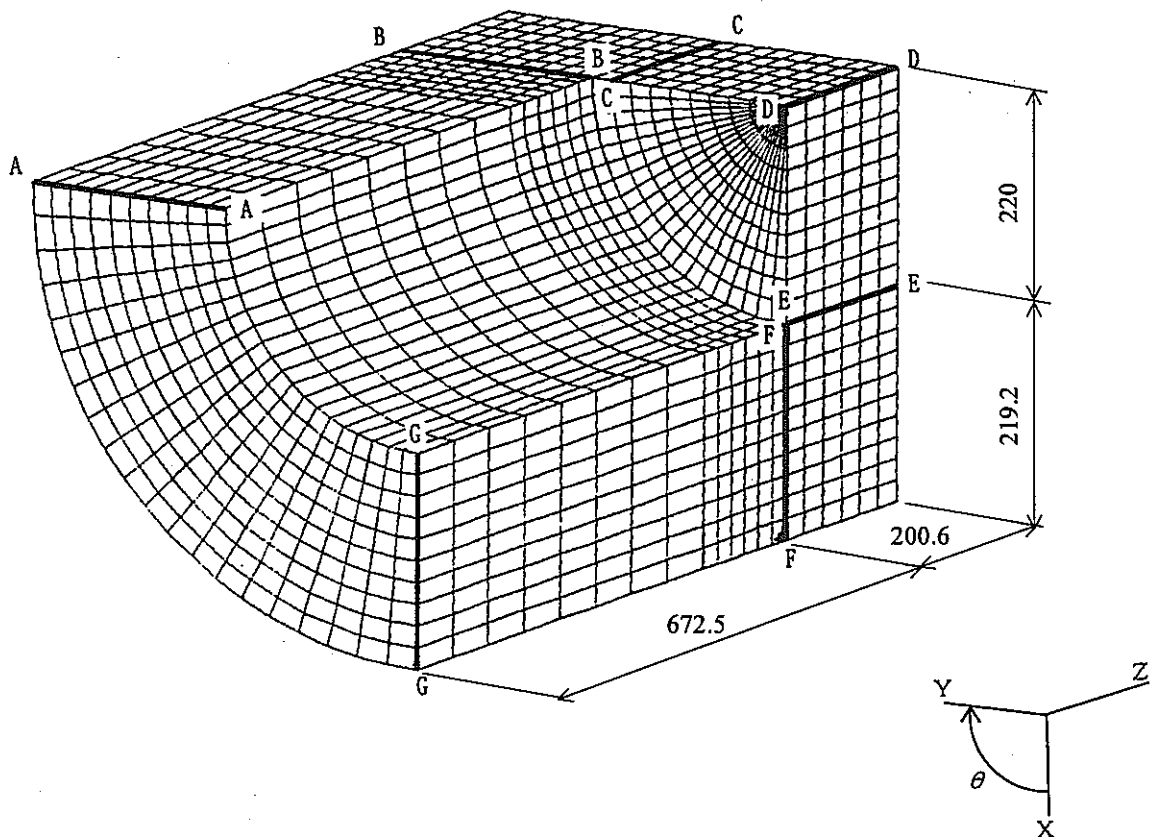


図 4-4 解析モデルと応力評価部位（処分坑道横置き定置の場合）

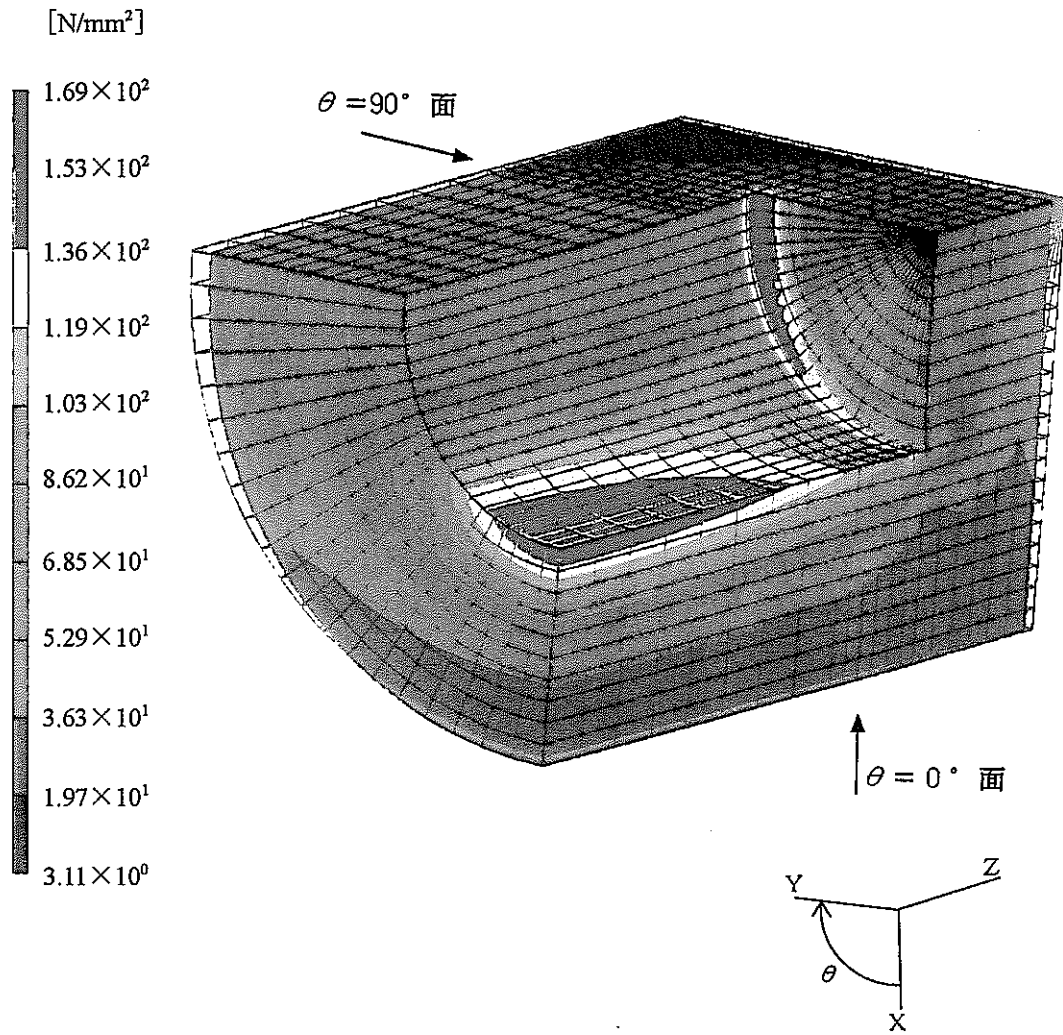


図 4-5 応力分布図（処分坑道横置き定置の場合）

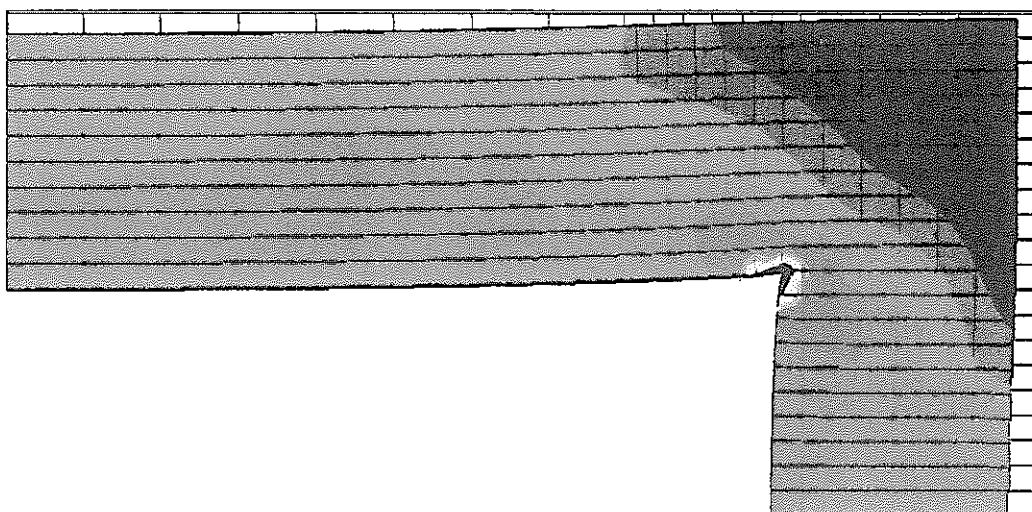


図 4-6 応力分布図（処分坑道横置き定置の場合、 $\theta = 90^\circ$ 面）

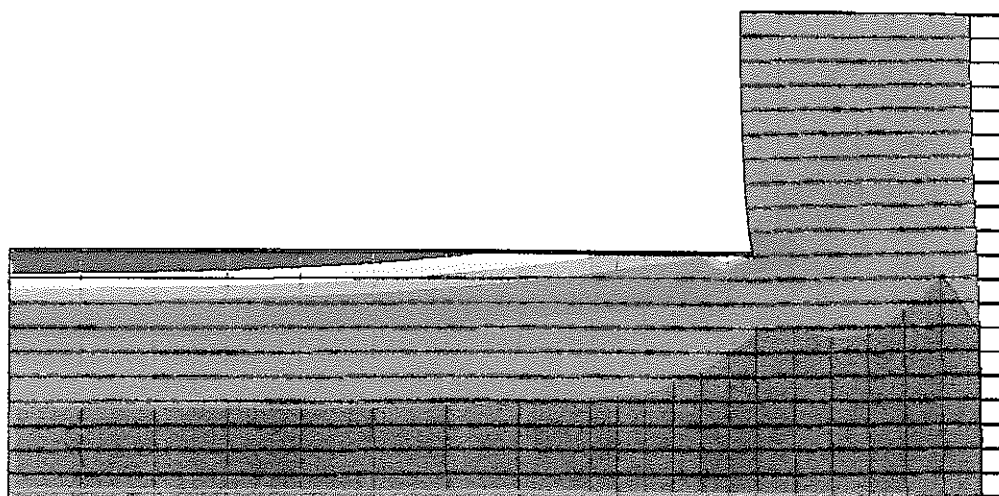


図 4-7 応力分布図（処分坑道横置き定置の場合、 $\theta = 0^\circ$ 面）

(3) 評価

処分坑道横置き定置の場合の応力評価結果を表 4-2 に示す。

表 4-2 横置き定置の場合の応力評価結果

単位 (N/mm²)

評価断面	一次一般 膜応力強さ Pm	許容値 Sm	(膜+曲げ) 応力強さ Pl	許容値 1.5Sm	健全性
A-A	51.2	147	58.3	220.5	○
B-B	46.8		100.9		○
C-C	65.1		117.4		○
D-D	52.2		59.6		○
E-E	52.2		59.6		○
F-F	39.3		69.8		○
G-G	70.9		149.8		○

以上の応力評価の結果、発生応力の最も大きい評価断面 C-C においても問題はなく、オーバーパックの健全性は維持されることを確認した。

また、外圧による変形量は最大で 0.16 mm であった。オーバーパック内面の寸法 (φ440×1345L) と収納するガラス固化体の外径寸法 (φ430×1340L) との間には 5 mm の隙間を設定しており、この値に対して十分小さいことから、外圧によるオーバーパックの変形により、ガラス固化体の健全性を損なうような機械的外力は作用しないと考えられる。

5. オーバーパックの遮へい解析

オーバーパックはガラス固化体を封入後、廃棄体として地下処分場まで搬送される。この際、内部のガラス固化体から発せられる放射線量によっては、関連施設を放射線管理区域とする必要がある。したがって、複合オーバーパックの放射線遮へい能力を把握することを目的として遮へい計算を実施した。

チタン-炭素鋼複合オーバーパックは、放射線遮へいには主として炭素鋼の内層が寄与する。炭素鋼は γ 線に対して良好な遮へいを示すが、中性子に対してはさほど効果はない。そこでオーバーパックの表面線量当量率制限値として輸送基準を満足させようとするすると炭素鋼の厚さが非常に厚くなると考えられる。

そこで本検討では、表面線量当量率制限値として輸送基準を満足させる場合と制限値を設定しない場合の 2 通りの解析を行った。制限値を設定しない場合は、前述の耐圧強度計算にもとづく寸法（「基本構造寸法」とする）に対して遮へい解析を実施した。

なお、輸送基準とは、搬送物または搬送車両の表面において 2mSv/h 以下、および表面から 1m の位置において 100 μ Sv/h 以下（「核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律」第 51 条の 16 第 1 項および第 2 項）とする。

5.1 解析方法

ガラス固化体の線源条件およびその他の条件を以下に示す。

(1) 線源

① 線源の仕様

線源として想定する使用済燃料初期濃度及び燃焼量は 4.5wt%、45000MWd/t とし、炉からの取出し後、再処理までの冷却期間は 4 年とする。また再処理後の中間貯蔵期間は 30 年とする。表 5-1 にこれら仕様を示す。

② 線源強度

表 5-1 に示す線源仕様をもとに、線源強度を以下の通り設定した。

γ 線源強度： 4.117×10^{15} (γ /sec/本)

中性子線源強度： 1.93×10^8 (n/sec/本)

③ エネルギースペクトル

γ 線と中性子のエネルギースペクトルは、表 5-3 および表 5-4 に示す値⁽¹⁵⁾を使用した。 γ 線エネルギースペクトルとしては ORIGEN 2 解析結果を使用した。中性子エネルギースペクトルとしては、自発核分裂よりもスペクトルが硬い (α , n) 反応によるものを使用した。具体的には Cm-242 の (α , n) 反応による中性子のエネルギースペクトルを使用し DLC23-E 群構造に変換した。

表 5-1 線源強度計算条件

燃料条件	炉型	PWR
	燃烧度	45000MW/t
	比出力	38 MW/t
	初期濃縮度	4.5 Wt%
再処理条件	再処理前冷却期間	4 年
	移行率	U : 0.3% Pu : 0.3% 希ガス, ハロゲン 0.0% 100%
照射前 UO ₂ 燃料条件 (ウラン金属 1ton あたりの重量 (g))	U-235	4.50×10^4
	Pu-239	9.55×10^5

(2) 計算コードおよび核データ

γ線の計算には、点減衰核積分法による QAD コードを使用した。中性子線の計算には、2次元輸送計算コード DORT を使用し、核データとして DLC-23E ライブラリを使用した。

(3) 計算モデル

まず基本構造寸法に対する計算を実施する。耐圧強度計算に基づく基本構造寸法を、縦置き定置の場合は図 5-1 に、横置き定置の場合は図 5-2 にそれぞれ示す。いずれも強度計算結果に公差等を考慮した寸法である。また、縦置き定置時、横置き定置時の基本構造を QAD コードおよび DORT コードの解析用にモデル化した計算体系図を図 5-3、5-4、5-5 に示す。

なお、基本構造寸法の場合、オーバーパックの上下方向に対して炭素鋼厚さが比較的薄く、中性子の影響は少ないため、中性子に関しては保守的に下方向のみに対して計算を実施し、この結果を上および下方向の計算結果とした。一方、γ線に関してはオーバーパック上方向および下方向の両方に対して計算を実施した。

次に輸送基準を満足する寸法に対する計算を実施した。この場合、DORT による中性子遮へい評価の解析モデルを図 5-5 に示す。

なお、輸送基準を満足するためには中性子線を減衰させる必要がある。このような容器の厚さでは、γ線は中性子線にくらべ無視できるほど減衰するため、γ線に対する解析は省略した。

(4) 変換係数

γ 線に関しては QAD コードを使用したため、線量当量率換算係数を使用することが出来ず、空気吸収線量率変換係数を使用する。ICRP pub.51 で与えられている数値を基に ORIGEN2 群構造に対して内挿することにより、各群エネルギー範囲の中での平均値として設定した値を表 5-5 に示す。

中性子に関しては、線量当量率換算係数を使用する。ICRP pub.51 で与えられている数値を基に ORIGEN2 群構造に対して内挿することにより各群エネルギー範囲の中での最大値として設定した中性子線 1 cm 線量当量率変換係数 (DLC23-E 群構造) を表 5-6 に示す。なお、中性子線量当量を算出する際には表 5-6 の数値を 2 倍して使用する。

(5) 物質の組成および密度

計算に使用した物質の組成および密度を表 5-7 に示す。ガラス固化体の組成および密度については六ヶ所再処理工場で発生すると想定されているガラス固化体標準仕様に従うものとした。固化体の組成を表 5-8 に示す。

(6) DLC23-E ライブラリの非保守性に関する検討

今回使用した断面積ライブラリは DLC23-E であるが、DLC23-E は中性子の線量当量を実際より低めに評価する傾向がある。ライブラリの違いによってどのような差が出るか検証した。以下の表 5-2 に解析結果を示す。

- ・ 遮へい体：鉄
- ・ 計算コードおよびライブラリ：ANISIN+DLC23-E
MCNP+FSXLIB-J3(JENDL-3)
を比較

表 5-2 中性子線量当量解析結果

鉄 遮へい体厚さ(cm)	25	50	75	100
DLC23-E と FSXLIB-J3 との比 *	1.5 倍	2.6 倍	4.8 倍	9.0 倍
同上 線量当量率換算係数の 現実的な考慮 **	1.2 倍	1.7 倍	2.6 倍	4.3 倍

*) (FSXLIB-J3 ライブラリを用いた MCNP コードの解析結果) / (DLC23-E ライブラリを用いた ANISIN コードの解析結果)

**) 上記において MCNP コードの解析においては、現実的な線量当量換算係数として、各エネルギー範囲の中で最大の値ではなく、コード内で log-log 内挿した値を使用した。

上表においてはライブラリを変更する際解析コードも変更しているが、コード間の差異はほとんど無くライブラリ間の差異が支配的となることが別途解析によって示されている。したがって、中性子線量当量の解析に関して DLC23-E ライブラリは遮へい体の厚さには依存するが 2~10 倍程度非保守的な評価結果を与えることが分かる。しかしながら、DLC23-E を使用する場合の線量当量率換算係数は ICRP pub.51 記載値を DLC23-E のエネルギー群構造に変換する際に、各群エネルギー範囲での換算係数の最大値を各群の換算係数としているところに余裕を含むこの余裕を考慮すれば上表下段の解析結果により DLC23-E 解析結果に対して鉄の厚さで 20~30 cm では 1.5 倍、70~80 cm 程度では約 3 倍の補正を行えばよいと考えられる。

したがって以下の解析では中性子線量当量率の解析結果に対して上記の補正を行うものとした。

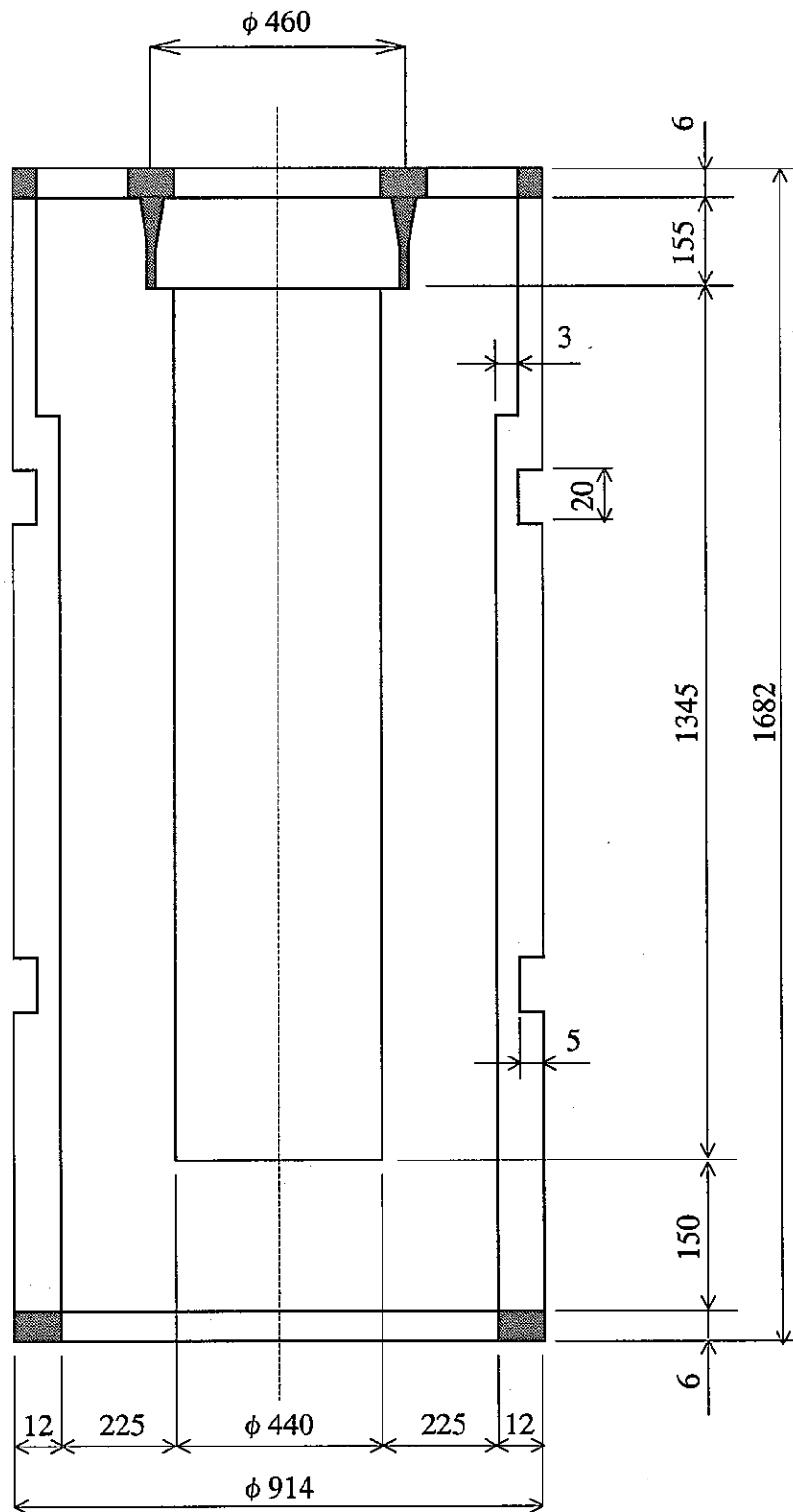


図 5-1 縦置き時の複合オーバーパック基本構造寸法

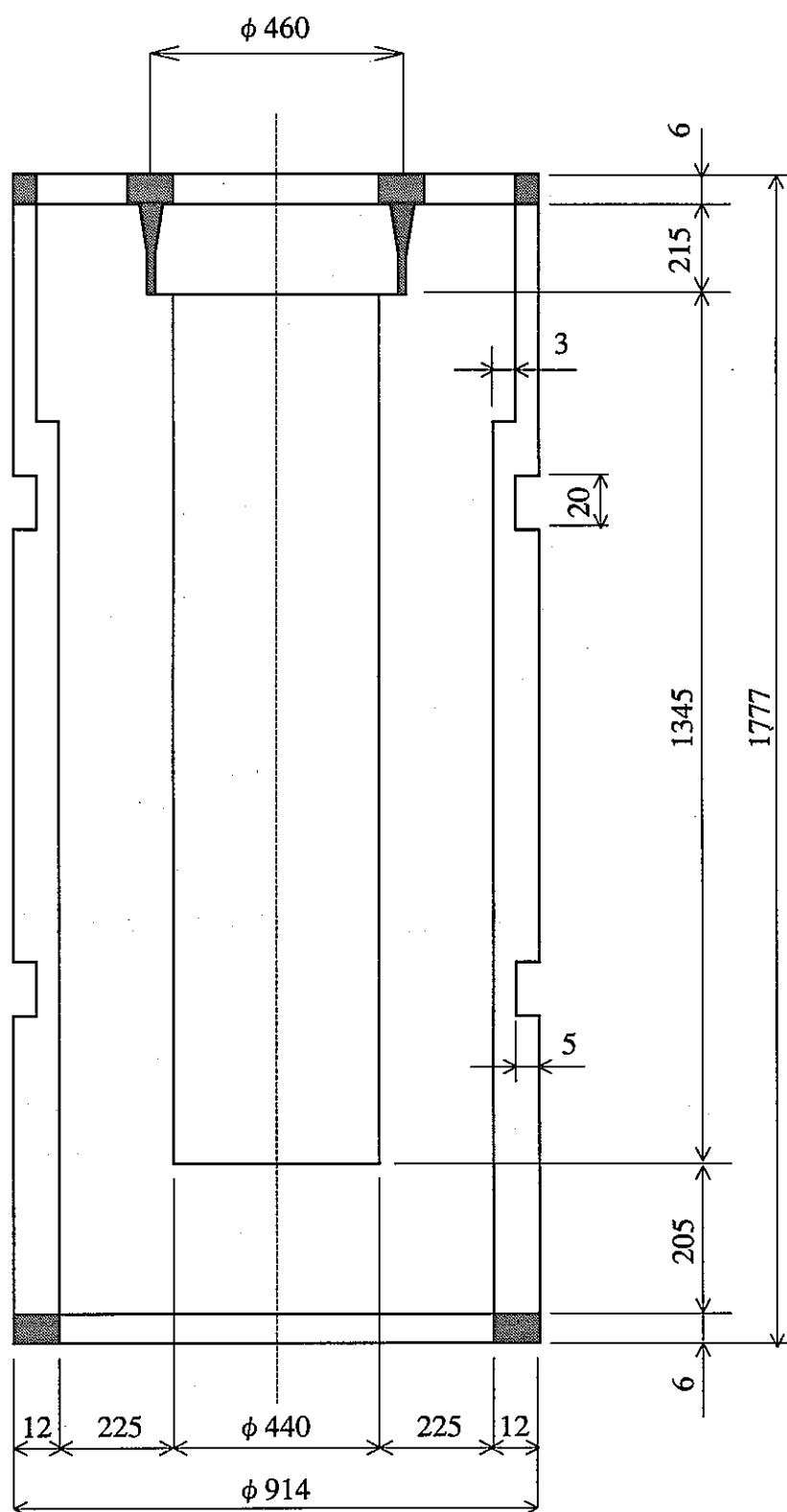
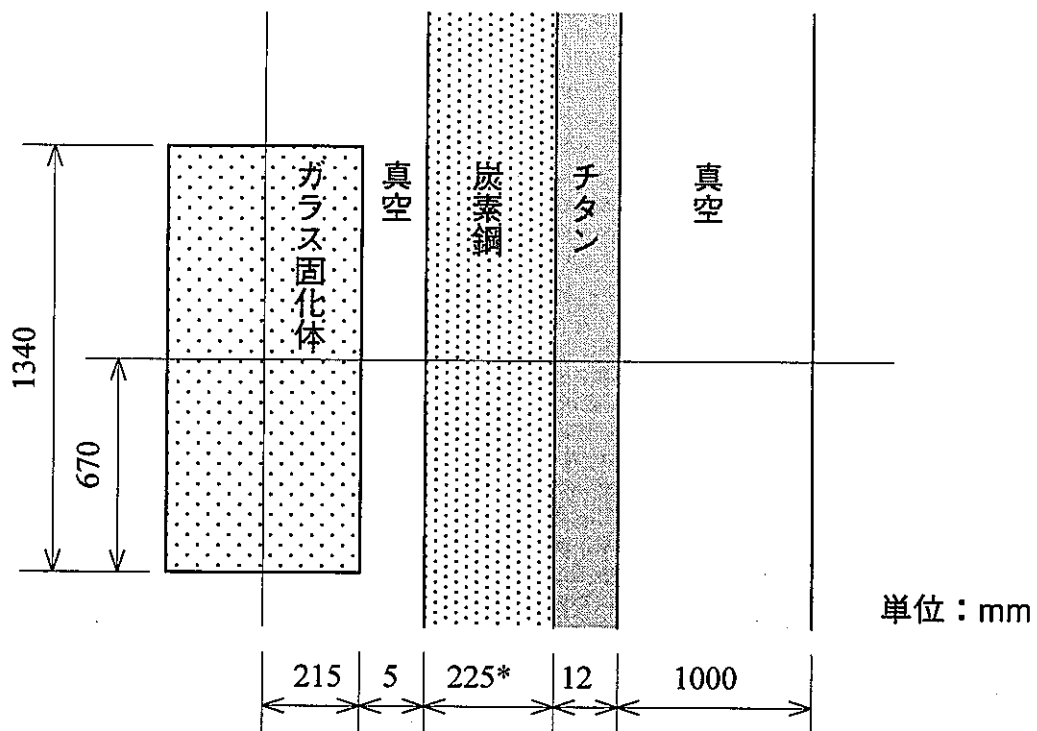
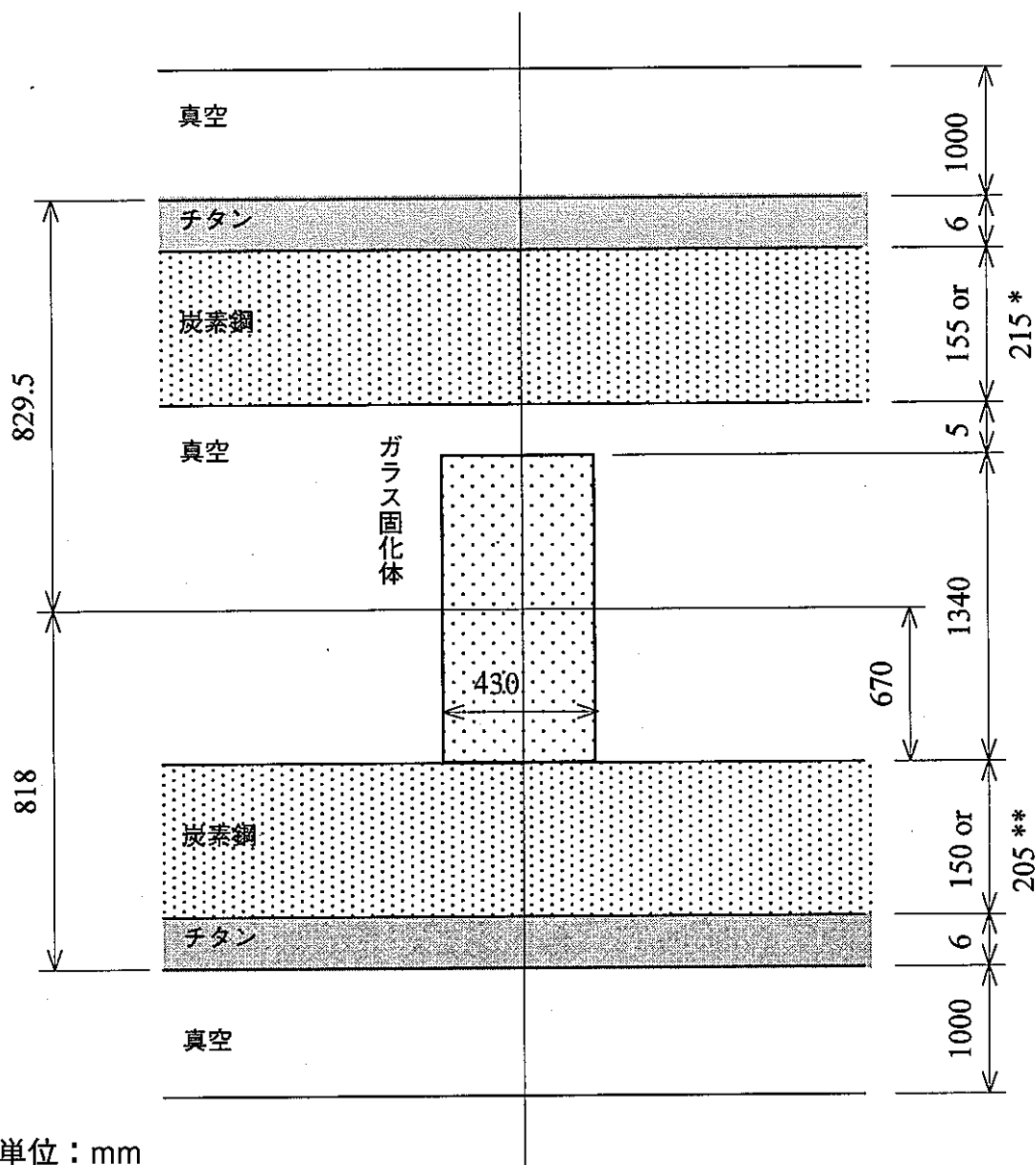


図 5-2 横置き時の複合オーバーパック基本構造寸法



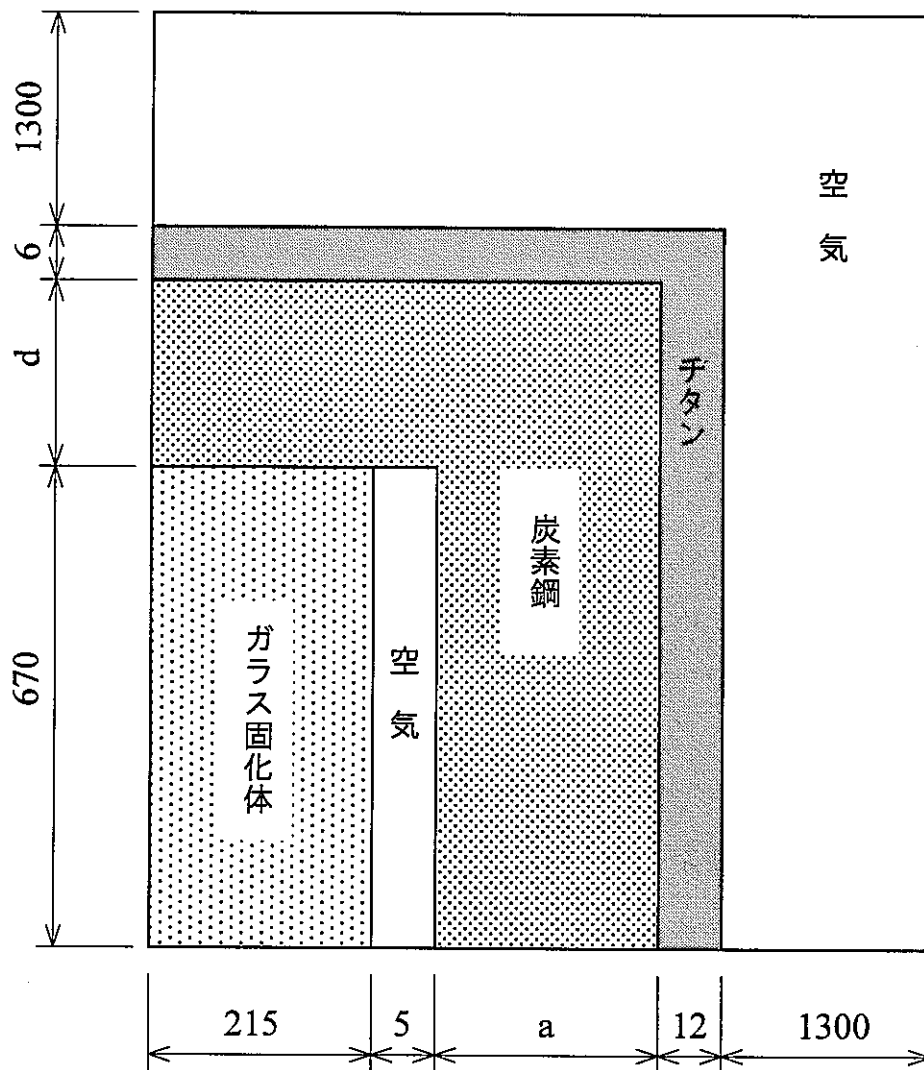
*) 炭素鋼の厚さ 225 mm は
基本構造寸法に基づく値

図 5-3 γ 線・直径方向・QAD 用計算体系図



- *) 炭素鋼の厚さ 155 mm：縦置き定置時の基本寸法
215 mm：横置き定置時の基本寸法
- **）炭素鋼の厚さ 150 mm：縦置き定置時の基本寸法
205 mm：横置き定置時の基本寸法

図 5-4 γ 線・軸方向・QAD 用計算体系図



$a = 225 \text{ mm}, 225 \text{ mm}, 750 \text{ mm}, 850 \text{ mm}$ の 4 ケース
 $d = 150 \text{ mm}, 205 \text{ mm}, 700 \text{ mm}, 800 \text{ mm}$ の 4 ケース

単位 : mm

図 5-5 DORT 用計算体系図

表 5-3 γ 線エネルギースペクトル

平均エネルギー (MeV)	γ 線エネルギースペクトル (γ /sec/本)
0.0100	1.116×10^{15}
0.0250	2.273×10^{14}
0.0375	2.711×10^{14}
0.0575	2.217×10^{14}
0.0850	1.249×10^{14}
0.125	9.174×10^{13}
0.225	1.055×10^{14}
0.375	4.419×10^{13}
0.575	1.874×10^{15}
0.850	2.111×10^{13}
1.25	1.782×10^{13}
1.75	6.443×10^{11}
2.25	4.124×10^7
2.75	1.413×10^7
3.50	1.116×10^7
5.00	4.776×10^6
7.00	5.507×10^5
9.50	6.327×10^4
TOTAL	4.117×10^{15}

上記エネルギー群構造は ORIGEN 2 構造である。

表 5-4 中性子線エネルギースペクトル

上限エネルギー (MeV)	中性子線エネルギースペクトル (n/sec/本)
15.0	0.0
12.2	0.0
10.0	0.0
8.18	0.0
6.36	0.0
4.96	1.011×10^7
4.06	7.608×10^7
3.01	5.402×10^7
2.46	8.994×10^6
2.35	2.909×10^7
1.83	1.320×10^7
1.11	1.293×10^6
0.550	2.123×10^5
0.111	0.0
3.35×10^{-3}	0.0
5.83×10^{-4}	0.0
1.01×10^{-4}	0.0
2.90×10^{-5}	0.0
1.07×10^{-7}	0.0
3.06×10^{-6}	0.0
4.14×10^{-7}	0.0
TOTAL	1.930×10^8

上記上限エネルギーは、DLC23-E 群構造である。また、スペクトルは O-ターゲット、Cm-242 (α , n) 反応のエネルギースペクトルである。

表 5-5 γ 線空気吸収線量率変換係数 (ORIGEN2 群構造)

平均エネルギー (MeV)	変換係数 ($\mu\text{Gy/h}$) / ($\gamma/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$)
0.0100	2.67×10^{-2}
0.0250	6.05×10^{-3}
0.0375	2.60×10^{-3}
0.0575	1.33×10^{-3}
0.0850	1.34×10^{-3}
0.125	2.16×10^{-3}
0.225	4.97×10^{-3}
0.375	7.68×10^{-3}
0.575	1.18×10^{-2}
0.850	1.61×10^{-2}
1.25	2.20×10^{-2}
1.75	2.70×10^{-2}
2.25	3.14×10^{-2}
2.75	3.55×10^{-2}
3.50	4.32×10^{-2}
5.00	5.69×10^{-2}
7.00	7.02×10^{-2}
9.50	8.95×10^{-2}

ICRP Pub.51 に与えられている数値を基に、ORIGEN2 群構造に対応して内層により求めた。

表 5-6 中性子線 1cm 線量当量変換係数 (DLC23-E 群構造)

平均エネルギー (MeV)	変換係数 ($\mu\text{Sv/h}$) / ($\gamma/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$)
15.0	1.98
12.2	1.76
10.0	1.61
8.18	1.51
6.36	1.41
4.96	1.46
4.06	1.47
3.01	1.37
2.46	1.32
2.35	1.31
1.83	1.30
1.11	1.24
0.550	0.965
0.111	0.272
3.35×10^{-3}	0.0283
5.83×10^{-4}	0.0256
1.01×10^{-4}	0.0294
2.90×10^{-5}	0.0329
1.07×10^{-7}	0.0366
3.06×10^{-6}	0.0399
1.12×10^{-6}	0.0403
4.14×10^{-7}	0.0392

ICRP Pub.51 に与えられている数値を基に、ORIGEN2 群構造に対応して内層により求めた。評価には本表の数値を 2 倍した値を使用する。

表 5-7 各材料の原子個数密度

(単位 : atoms/b·cm)

材量	空気	炭素鋼	チタン
密度 (g/mm ³)	1.20×10^{-3}	7.80	4.4
H	7.20×10^{-9}		
C	7.58×10^{-9}		
N	3.90×10^{-5}		
O	1.05×10^{-5}		
Fe		8.41×10^{-2}	
Ti			5.53×10^{-2}

表 5-8 ガラス固化体組成

(密度 : 2.6 g/cm³)

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm ³)	原子個数密度 (atoms / b·cm)
Li *1	1.39	—	—
B *2	4.44	0.115	1.26×10^{-3}
O	47.7	1.24	4.66×10^{-2}
Na	7.42	0.193	5.05×10^{-3}
Al	2.65	0.0689	1.54×10^{-3}
Si	21.8	0.566	1.21×10^{-2}
Ca	2.14	0.0556	8.35×10^{-4}
Zn *1	2.40	—	—
Mo *3	10.2	0.265	1.66×10^{-3}

*1 : DLC-23E ライブラリにない Li, Zn は考慮しない。

*2 : B は DLC-23E ライブラリには B-10 しかないため計算上では 100% B-10 とする。

*3 : FP およびアクチニド酸化物を Mo で代用する。

5.2 解析結果

(1) 基本構造寸法に対する解析

1) 縦置き定置の場合

① γ 線評価

QAD コードによる解析結果を図 5-7, 5-8 に示す。

② 中性子線評価

DORT コードによる解析結果として、等高線図を図 5-6 に示す。径方向および軸方向の線量当量減衰係数を QAD コードの解析結果とともに図 5-7, 5-8 に示す。

③ 線量評価のまとめ

以上によりオーバーパック表面および表面から外側に 1 m の点での線量等量率は表 5-9 に示す値となり、輸送基準の制限値を大きく超える結果となった。ただし、ここで使用している断面積ライブラリは DLC23-E であるが、前述の通り中性子の線量当量率を低めに評価する傾向があるため、鉄厚さ 20~30 cm に対して解析結果を 1.5 倍に補正している。つまり表 5-9 に示した解析結果は図 5-6, 5-7, 5-8 に示した中性子線量当量率解析結果に 1.5 倍の補正を行っている。また ICRP の 1985 年パリ会議の声明を受け中性子線量当量率換算係数は表 5-6 に示した値の 2 倍を使用している。

2) 横置き定置の場合

① γ 線評価

QAD コードによる解析結果を図 5-10, 5-11 に示す。

② 中性子線評価

DORT コードによる解析結果として、等高線図を図 5-9 に示す。径方向および軸方向の線量当量減衰係数を QAD コードの解析結果とともに図 5-10, 5-11 に示す。

③ 線量評価のまとめ

以上によりオーバーパック表面および表面から外側に 1 m の点での線量等量率は表 5-10 に示す値となり輸送基準の制限値を大きく超える結果となった。縦置き時の解析と同様、表 5-10 に示した解析結果は図 5-9, 5-10, 5-11 に示した中性子線量当量率解析結果に 1.5 倍の補正を、中性子線量当量率換算係数は表 5-6 に示した値の 2 倍を使用している。

(2) 輸送基準を満足させるような寸法に対する解析

① γ 線評価

前述の通り炭素鋼厚さが 70~80 cm の場合には、中性子と比較して γ 線は無視できるため γ 線に対する解析は実施していない。

② 中性子線評価

DORT コードによる解析結果を図 5-12~17 に示す。

③ 線量評価のまとめ

オーバーパック表面および表面から外側に 1 m の点での線量等量率は表 5-11 に示す。ここから、径方向に関しては、炭素鋼厚さ 75 cm と 85 cm の 2 ケースの計算をしているが、この 2 ケースの解析結果により、厚さが 80 cm であれば輸送基準制限値を満足できると考えられる。したがって、輸送基準を満足するためには径方向に 80 cm、軸方向に 70 cm という非現実的な板厚が必要となる。

5.3 まとめ

地下深部へ埋設するオーバーパックの表面線量当量率を輸送基準を満足させるような値とすることは、過剰に保守的な設計と考えられる。オーバーパック自身の炭素鋼厚さは耐圧性能を満足する厚さとし、輸送およびハンドリング時には専用の遮へい体に格納して取り扱うことが合理的であると考えられる。

表 5-9 線量当量率評価結果まとめ（基本構造寸法，縦置き時）

単位：mSv/h

	炭素鋼厚さ		γ 線	中性子線	合計	輸送基準
径方向	22.5 cm	表面	1.15	8.62	9.77	2
		表面から 1 m	0.33	1.12	1.45	0.1
上方向	21.5 cm	表面	68.8	16.1	84.9	2
		表面から 1 m	9.59	0.69	10.28	0.1
軸方向	20.5 cm	表面	90.2	16.1	106.3	2
		表面から 1 m	12.4	0.69	13.09	0.1

表 5-10 線量当量率評価結果まとめ（基本構造寸法，横置き時）

単位：mSv/h

	炭素鋼厚さ		γ 線	中性子線	合計	輸送基準
径方向	22.5 cm	表面	1.15	8.62	9.77	2
		表面から 1 m	0.33	1.12	1.45	0.1
上方向	21.5 cm	表面	3.14	10.07	13.21	2
		表面から 1 m	0.50	0.56	1.06	0.1
軸方向	20.5 cm	表面	5.17	10.07	15.24	2
		表面から 1 m	0.82	0.56	1.38	0.1

表 5-11 線量当量率評価結果まとめ（輸送基準に準拠させた場合）

単位：mSv/h

	炭素鋼厚さ		γ 線	中性子線	合計	輸送基準
径方向	75 cm	表面	—	0.660	0.660	2
		表面から 1 m	—	0.117	0.117	0.1
	85 cm	表面	—	0.336	0.336	2
		表面から 1 m	—	0.0621	0.0621	0.1
軸方向	70 cm	表面	—	0.566	0.566	2
		表面から 1 m	—	0.0773	0.0773	0.1
	80 cm	表面	—	0.273	0.273	2
		表面から 1 m	—	0.0395	0.0395	0.1

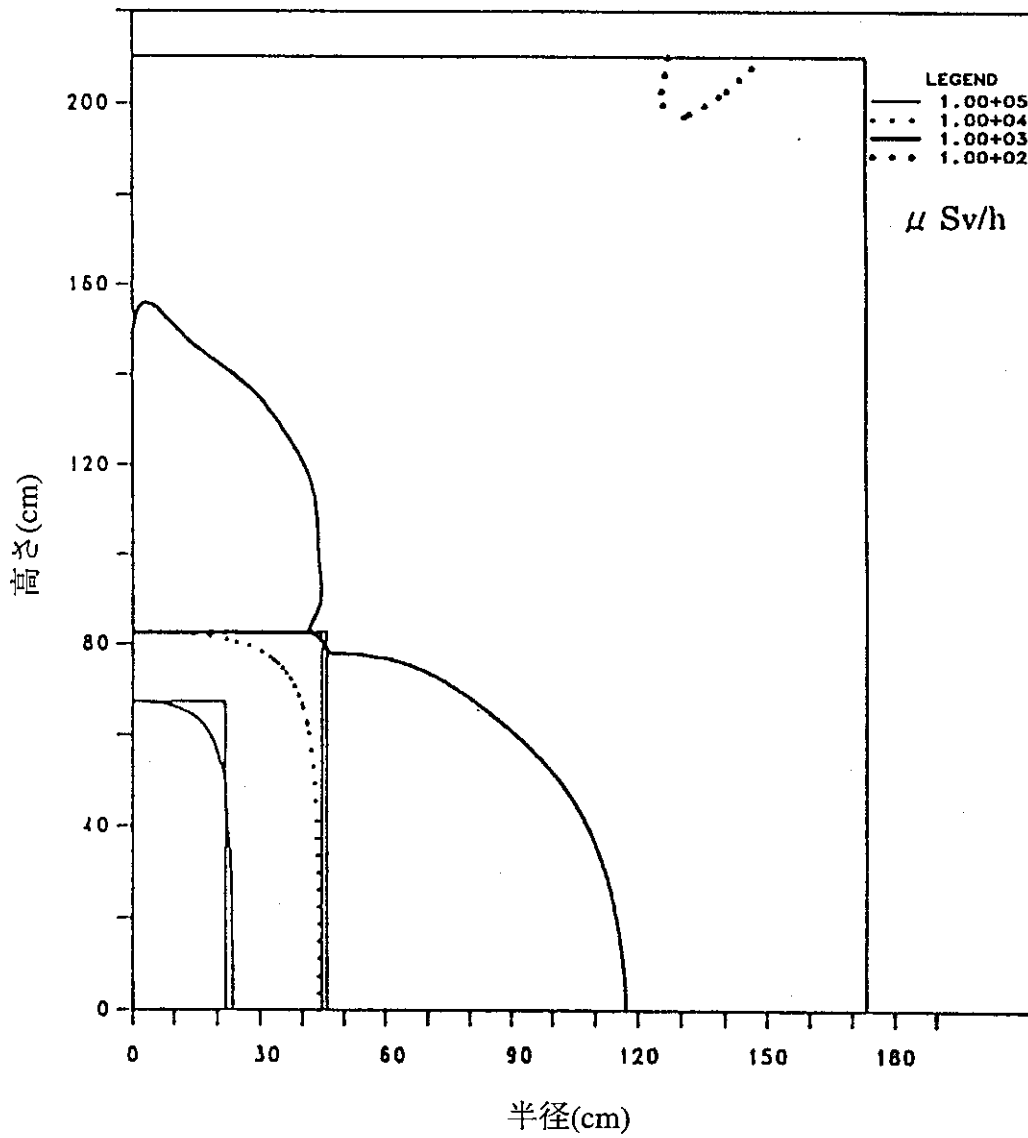


図 5-6 線量当量率等高線図
 (DORT 解析結果, 基本構造寸法, 豎置き時)
 (炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm, 軸方向 15 cm)

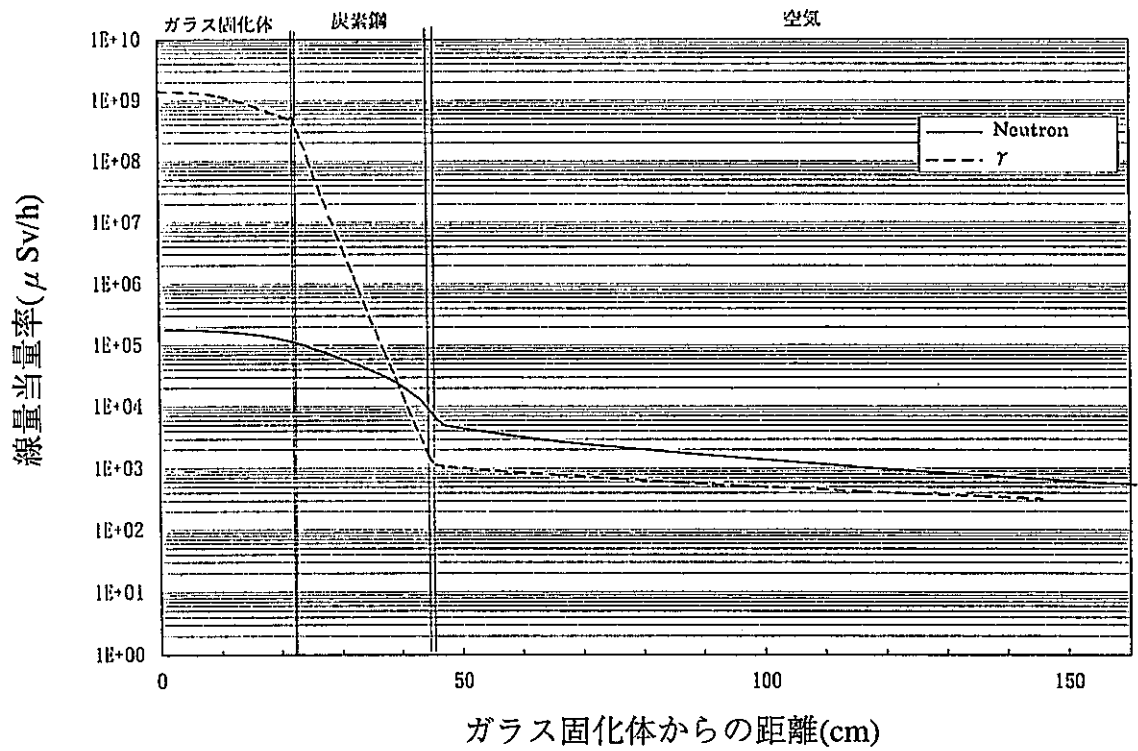


図 5-7 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 縦置き時)
(炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm)

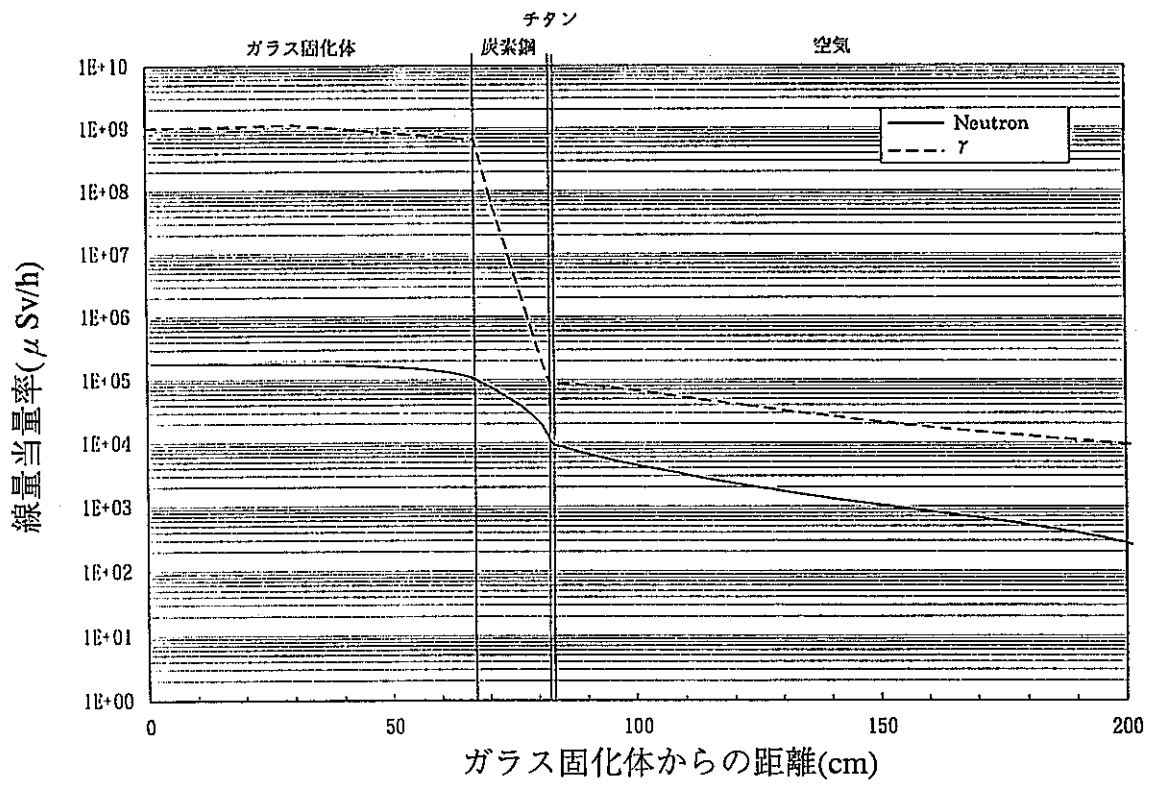


図 5-8 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 縦置き時)
(炭素鋼の厚さ: 軸方向 15 cm)

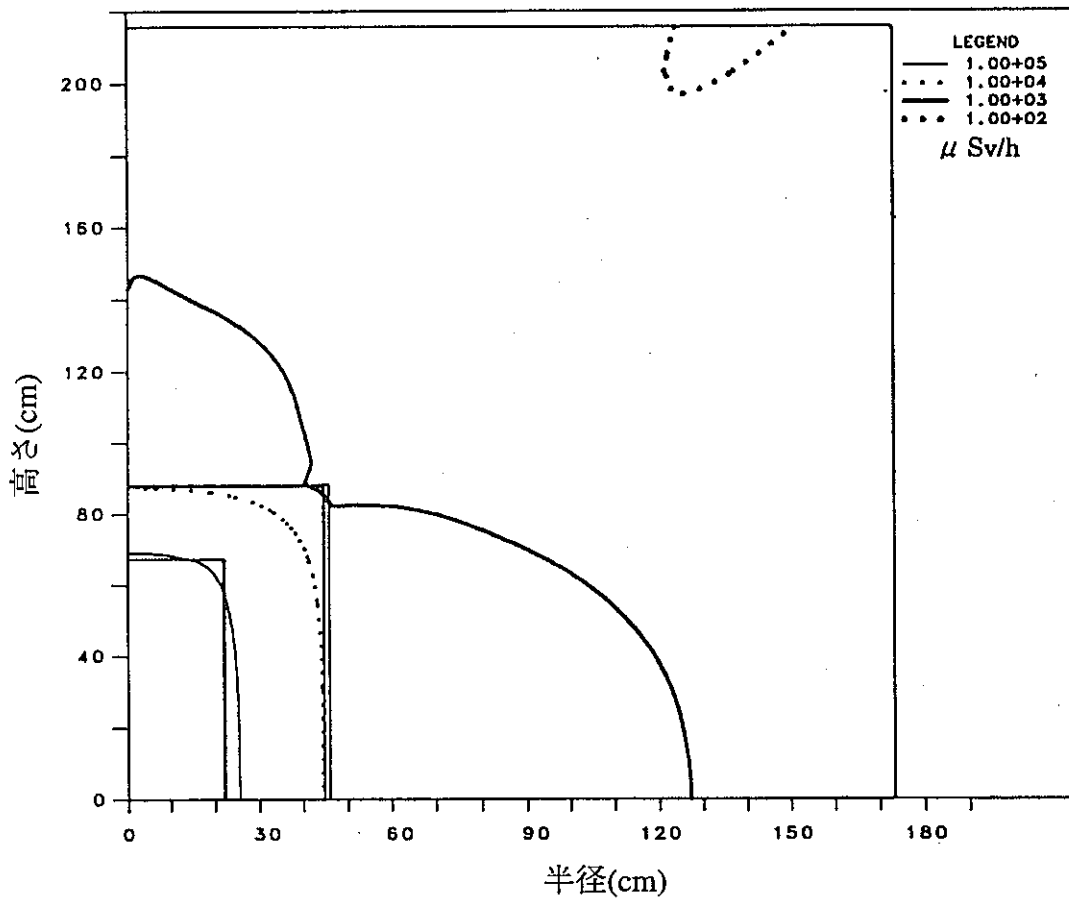


図 5-9 線量当量率等高線図 (DORT 解析結果, 基本構造寸法, 横置き時)
 (炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm, 軸方向 20.5 cm)

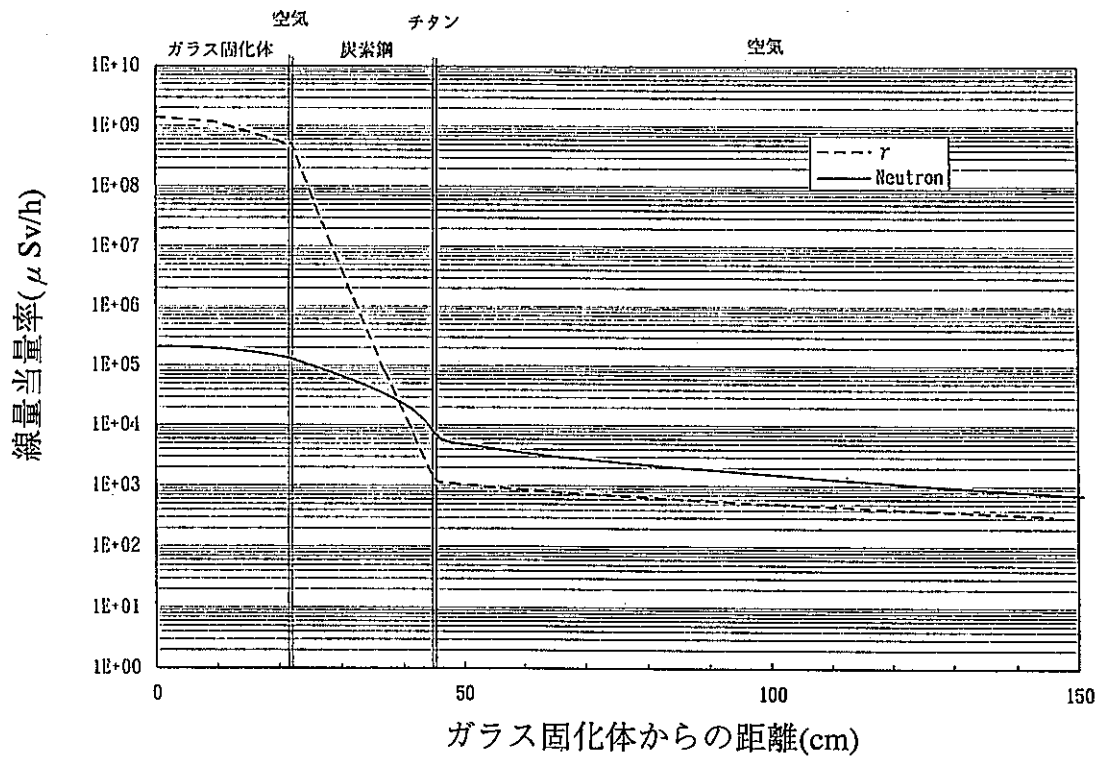


図 5-10 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 横置き時)
(炭素鋼の厚さ: 径方向 22.5 cm)

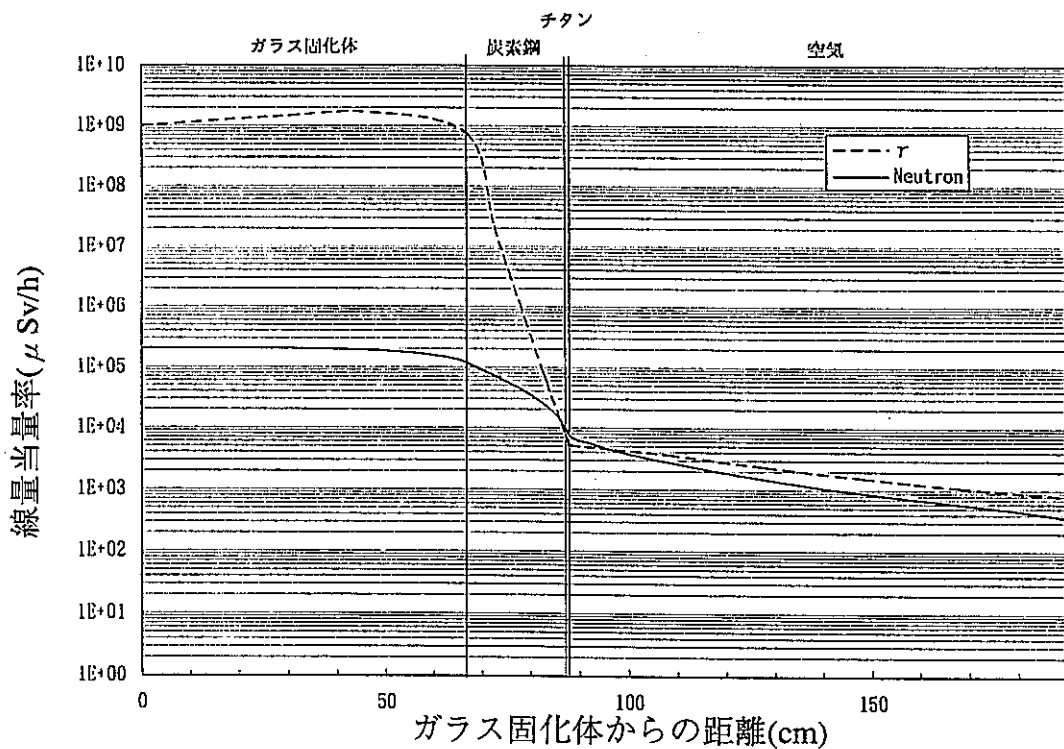


図 5-11 線量当量率減衰率曲線 (基本構造寸法, 横置き時)
(炭素鋼の厚さ: 軸方向 20.5 cm)

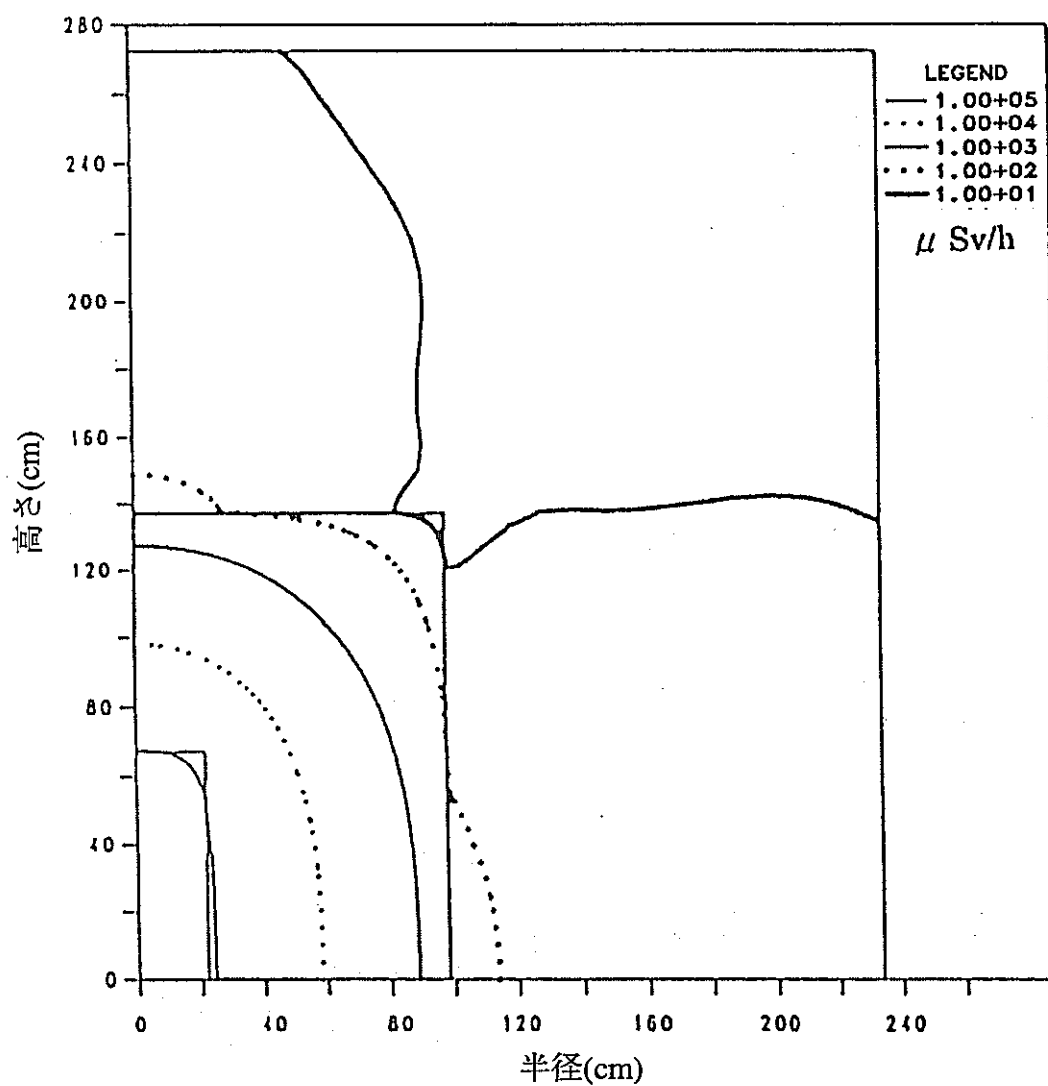


図 5-12 線量当量率等高線図 (DORT 解析結果, 輸送基準準拠)
 (炭素鋼の厚さ: 径方向 75 cm, 軸方向 70 cm)

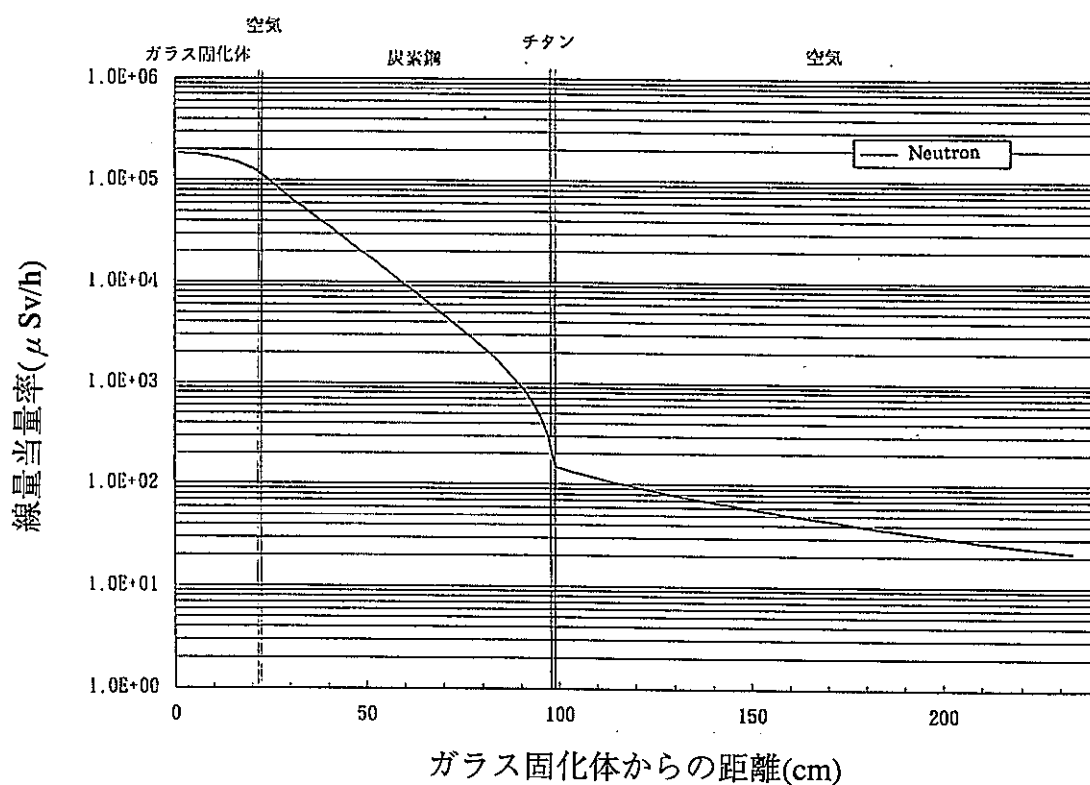


図 5-13 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠)
(炭素鋼の厚さ：径方向 75 cm)

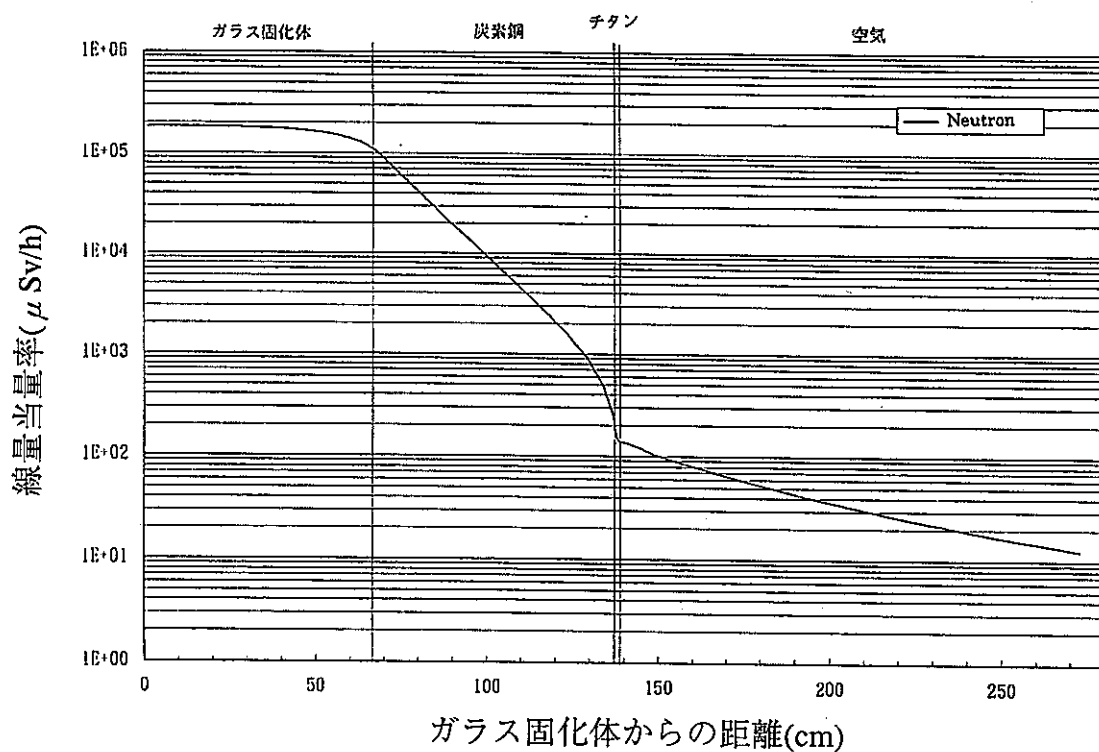


図 5-14 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠)
(炭素鋼の厚さ：軸方向 70 cm)

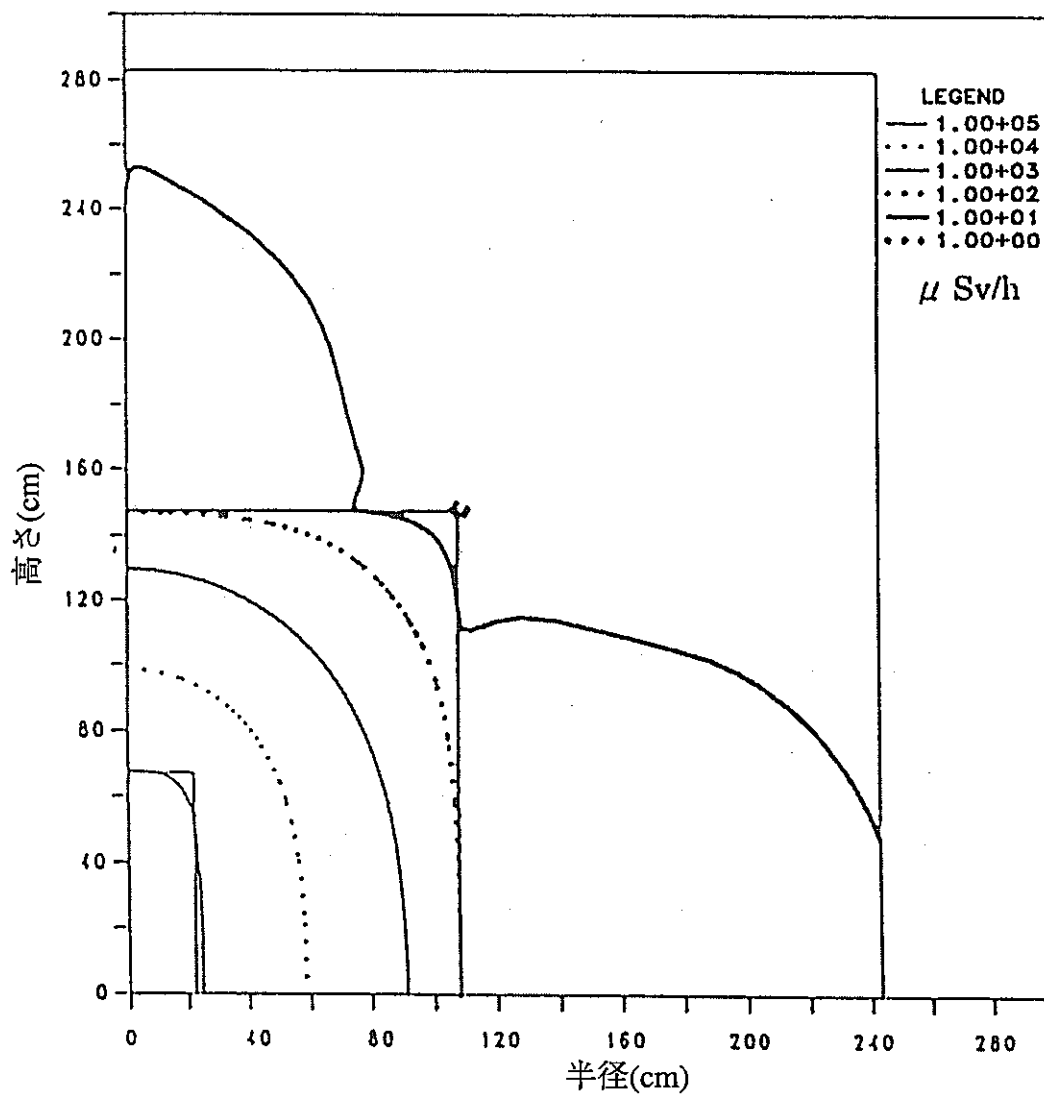


図 5-15 線量当量率等高線図 (DORT 解析結果, 輸送基準準拠)
 (炭素鋼の厚さ: 径方向 85 cm, 軸方向 80 cm)

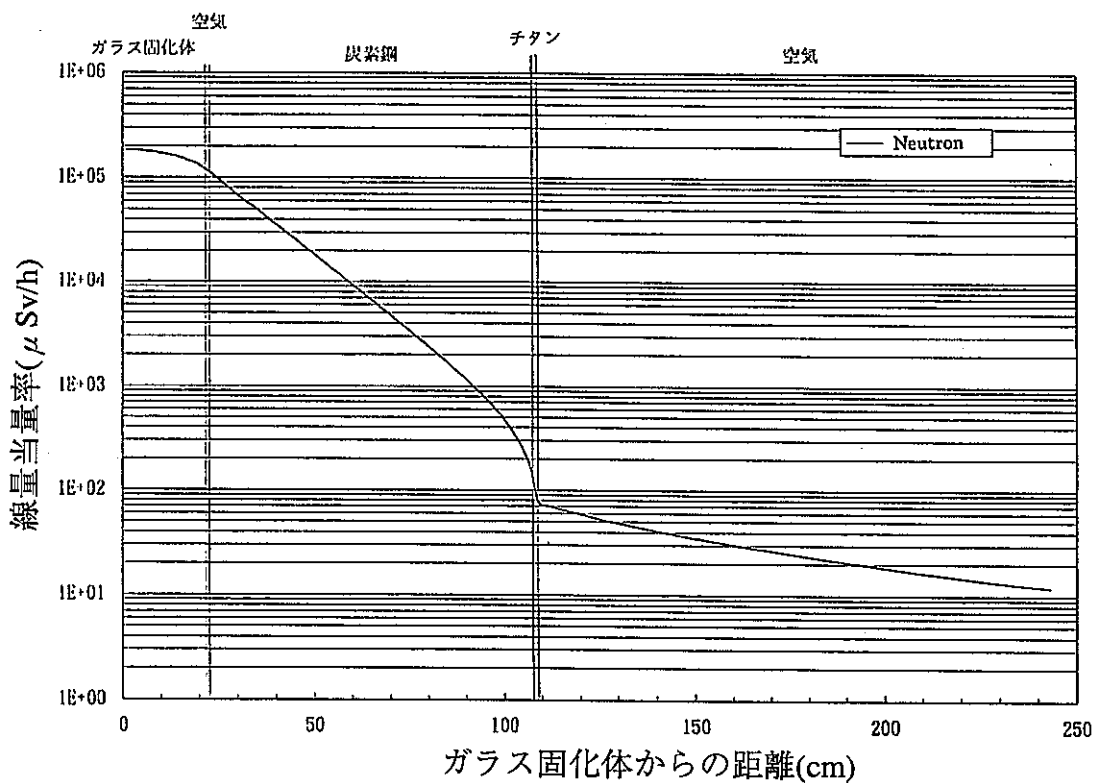


図 5-16 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠)
(炭素鋼の厚さ：径方向 85 cm)

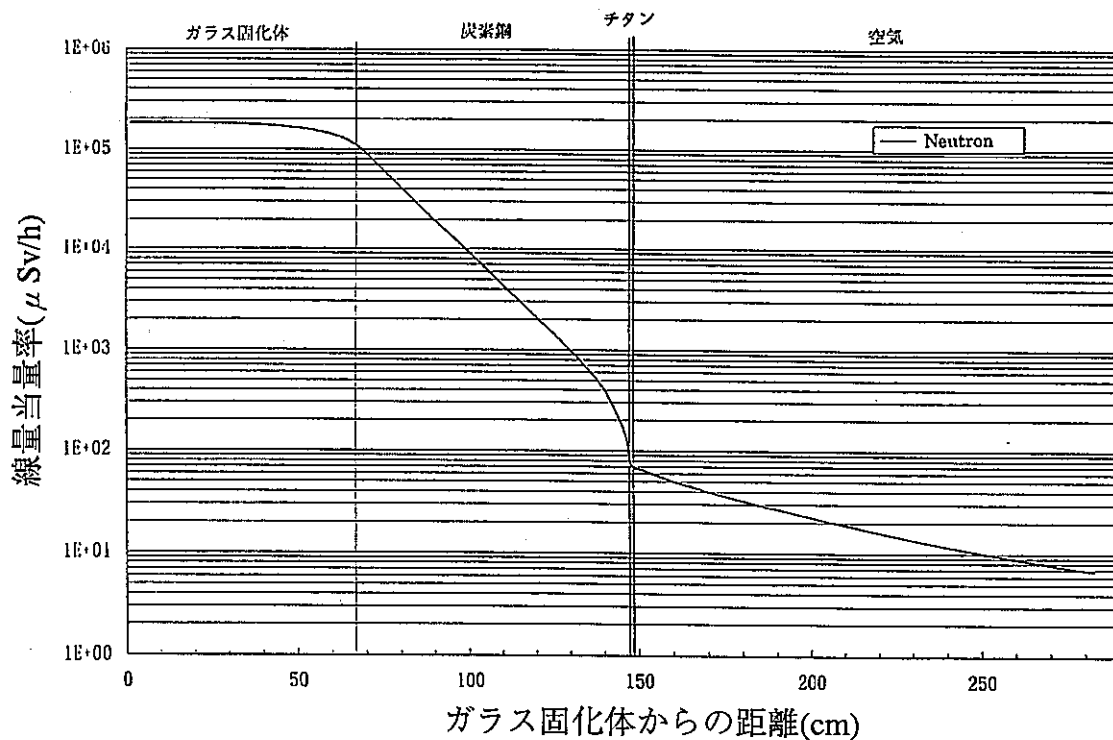


図 5-17 線量当量率減衰率曲線 (輸送基準準拠)
(炭素鋼の厚さ：軸方向 80 cm)

6. 試作

前項までに実施した設計検討に基づき、実規模大のチタン-炭素鋼複合オーバーパットの試作を行った。

6.1 試作容器の概要

試作したチタン-炭素鋼複合オーバーパットの製作図を図 6-3～図 6-9 に示す。

6.2 製作工程概要

チタン-炭素鋼 複合オーバーパットの主な製作手順を以下の図 6-1 に示す。また製作工程図を図 6-2 に示す。

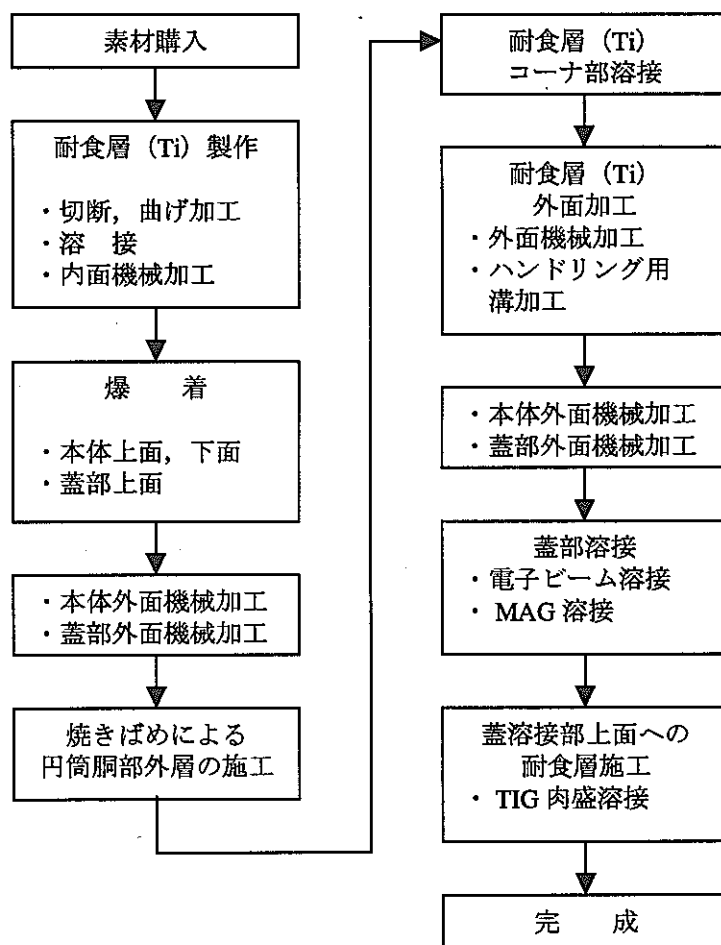


図 6-1 製作手順フロー図

製作手順の各工程における施工要領を以下に示す。

(1) 耐食層 (Ti) の製作 (円筒胴外層用)

- ① チタン板材を切断, 曲げ加工 (円筒胴部は2分割)
- ② 溶接開先加工, 電子ビーム溶接 (真空チャンバー内で実施)
- ③ 内面機械加工 (堅型旋盤にて実施)

(2) 爆着 (円筒胴の上面, 下面および蓋部上面)

- ① 素材の検査
- ② 加工前処理 (研磨機による材料表面清浄化)
- ③ 爆発圧着実施
- ④ 軟化熱処理 (540℃, 3時間)

(3) 本体・蓋部 外面機械加工

- ① 本体外面コーナー部にチタン肉盛用裏当て金の取り付け溝を加工
- ② チタンの裏当て金を取り付け
- ③ 焼きばめ用に表面仕上げ (堅型旋盤による)

(4) 焼きばめによる円筒胴外層の施工

- ① チタン円筒をインダクションヒータにて450℃に加熱する
- ② 加熱後, 炭素鋼の本体を挿入
- ③ 自然冷却させ, 密着させる

(5) 耐食層コーナー部溶接

円筒胴外面の耐食層と, 上下平面部のコーナー部へ TIG 溶接にてチタンの肉盛溶接を実施

(6) 耐食層外面機械加工

- ① 外面機械加工 (堅型旋盤による)
- ② ハンドリング治具取付け用の溝を加工 (堅型旋盤による)

(7) 本体内孔機械加工 蓋溶接部機械加工

- ① 本体内面の機械加工 (切粉の除去を考慮し, 横中ぐり盤により加工)
- ② 蓋溶接部の開先加工 (横中ぐり盤により加工)

(8) 蓋部溶接

- ①初層は電子ビーム溶接にて実施
- ②残層は MAG 溶接にて実施

(9) 蓋部溶接上面への耐食層施工

銅の中間層を MAG 溶接にて肉盛溶接し，続いて電子ビーム溶接によりチタンを肉盛溶接する

6.3 各製作工程

6.3.1 爆着施工

円筒胴および蓋の材料の上面および下面の平坦部に爆着法によりチタン板材を施工した。爆着施工を適用するに当たっては，チタン板の機械的性質（引張強さ，耐力，伸び）の値には以下の通り制限値がある。

表 6-1 爆着施工制限値

	引張強さ[MPa]	耐力[MPa]	伸び[%]
爆着に必要な 要求値	343 ~ 441	215 ~ 323	33 以上
ASTM-Gr.2	345 以上	275 ~ 450	20 以上

ここで爆着に必要な伸びの値 33% は JIS 規格によるものであり，ASTM に換算すると約 26% になる。

炭素鋼内層の素材の外径寸法は，チタン板の爆着端部に発生する割れ等の接合不良部を考慮に入れ，径方向に片側に約 80 mm の余裕代を取った。現状，爆着加工メーカーにおける板材での施工実績では，端部の余裕代は約 30 mm としているが，これは JIS 材料を使用した場合の実績であり，今回使用した ASTM 材では施工実績がなく，材料の「伸び」の値も通常用いる JIS 材に比べて低いため，余裕代を大きく取ることとした。また，こうした爆着適合性を高めるため，材料メーカーでのチタン材の製造は単独にインゴットからの製造となり，コストアップとなった。

爆着施工では対象となる爆着面に開口部を設けることができない。したがって，内層の炭素鋼容器の製作は内孔を機械加工する前に上下面にチタンを爆着施工する必要があり，結果として炭素鋼材料の物量が増え，コストアップにつながった。

爆着施工の結果の写真を添付資料 写真-1 に示す。

6.3.2 機械加工

今回の試作における機械加工は、材料の切断、切削、曲げ、仕上げ、開先加工等からなる。各機械加工工程において実施した内容をまとめる。

(1) コーナー部裏当て金の加工

オーバーパックコーナー部にチタンを肉盛溶接する際に必要となる裏当て金はチタンの板材の切断、曲げ加工からなる。裏当て金は細く、単体での精密加工は困難であるが、炭素鋼内層への取り付け時に借り止め溶接を行うことで問題なく取り付けが出来た。取り付けの様子を添付資料 写真-2 に示す。

(2) 外層チタン円筒の内面機械加工

円筒部外面への焼きばめ施工のため、外層チタンの内面を機械加工し、寸法出しを行った。筒形状の外層チタンは、直径寸法に比較して薄肉の構造となっており、加工に伴う熱の発生により材料の伸びが発生したため、精密な機械加工には時間を要したものの現状技術で問題なく製作できることが確認できた。

(3) 炭素鋼内層の外面機械加工

炭素鋼内層（胴本体）と蓋部は、上下面にチタンを爆着後の素材は必要な製品寸法（ $\phi 890$ mm）に対して爆着の余裕代（30 mm）を有している。この部分の切削を含め焼きばめ施工用の外面の寸法出しを行った。全周 80 mm の爆着余裕代を切削する工程で時間を要したが、現状技術で問題なく製作できることを確認できた。

(4) 焼きばめ加工後の機械加工

円筒部チタン外層の焼きばめ加工後に、3章で検討したハンドリング用の溝を外層の外面に加工した。現状技術で問題なく製作できることを確認できた。

6.3.3 円筒胴部へのチタンの焼きばめ施工

オーバーパック炭素鋼内層の円筒胴部外面にチタン外層を焼きばめにより施工した。焼きばめ施工時に特に注意すべき管理ポイントとしては、外層の加熱温度、外層の内径および内層の外径の寸法の管理等があるが、今回用いた ASTM Gr.2 チタンは約 850°C に変態点を持っており、一般に 600~700°C で加工している。本試作では 500°C までの昇温を目安とし、加熱温度を 450°C に設定した。

以下に今回の試作における加熱温度と寸法の間関係をまとめる。

表 6-2 焼きばめ温度と外層チタンの直径方向の伸びの関係

設定温度 [°C]	室温との温度差 [°C]	直径方向伸び [mm]
400	380	2.8
450	430	3.1

注) 計算には準チタンの熱膨張係数 8.2×10^{-6} [1/°C] を用いた。

表 6-3 焼きばめ前後の寸法

	内層の外径	外層の内径
加熱前の寸法 [mm]	φ 890 mm +0.5/-0	φ 890 mm +0/-0.5
焼きばめ時の寸法 [mm]	同上	φ 893.1 mm +0/-0.5

以上の条件により焼きばめを実施した。外層の加熱には電気炉を用い、外層に取り付けた熱電対（合計 4 箇所）により加熱温度が一様に 450°C になっていることを確認し、内層を挿入した。挿入作業はスムーズに行うことができた。焼きばめ工程の状況を添付資料 写真-3 に示す。

内層の挿入後空冷し内層と外層に隙間のないことを目視により確認した。

6.3.4 溶接

(1) 外層用チタン円筒の製作

円筒胴部外層用のチタン円筒は、板材を曲げ加工した後、電子ビーム溶接により縦継手を溶接して製作した。作業の結果問題なく溶接できることを確認した。

(2) 上下面爆着チタン部と胴部焼きばめチタンとのコーナー部

本体の焼きばめ後 TIG 溶接により、隅肉溶接を実施した。その結果問題なく溶接できることを確認した。

(3) 蓋と本体の溶接

①炭素鋼部分の溶接

蓋部と本体の溶接のうち炭素鋼部分は底部から 80 mm までを電子ビーム溶接、残り 135 mm を MAG 溶接の多層盛り溶接で実施した。その結果、問題なく溶接できることを確認した。

電子ビーム溶接の溶接深さは部分溶け込みを考慮し 80 mm としたため、MAG 溶接継手の溶接深さは 135 mm の深い開先となった。多層盛り溶接であるため、作業中の層間の手入れが必要となるが、深い開先であるため作業は容易ではなかった。

②蓋部溶接部へのチタン肉盛

蓋部の炭素鋼部分の溶接終了後、その部分のチタンの被覆のため、TIG 溶接による肉盛溶接を実施した。前述の通り炭素鋼へのチタンの直接溶接は行えないため、銅の中間層を施工することによってチタンの肉盛溶接を実施した。溶接施工法としては遠隔操作性を考慮して銅中間層には MAG 溶接を、チタンには TIG 溶接を採用したが、純銅の MAG 溶接はスパッタが発生しやすいため、他のチタン部へのスパッタの付着を防止する保護作業が必要であった。

蓋部の溶接部の断面写真を添付資料 写真-6 に示す。

6.3.5 検査

(1) 円筒胴部チタン外層

焼きばめ施工前の円筒加工時に、電子ビーム溶接にて溶接した縦継手に対して、放射線透過試験を実施した。試験の実施は問題なく、欠陥も検出されなかった。

(2) 内層、外層の機械加工面

炭素鋼内層の内外面、チタン外層の内外面、蓋部開先加工、等の機械加工面については磁粉探傷試験または浸透探傷試験を実施した。試験の実施は問題なく、欠陥も検出されなかった。

(3) 上下面爆着チタン部と胴部焼きばめチタンとのコーナー部

TIG 溶接で肉盛を実施した後、浸透探傷試験を実施した。試験の実施は問題なく、欠陥も検出されなかった。

(4) 蓋と本体の溶接部

①炭素鋼部

蓋部の溶接では、炭素鋼部分のうち、開先底部から 80 mm を電子ビーム溶接にて、残りの 135 mm を MAG 溶接によって溶接した。

EBW 溶接部は、当初チタン外層の上からの超音波探傷検査を実施する計画であったが、入射した超音波の伝播がチタンと炭素鋼の境界面により妨げられ、正確な検査が実施できない可能性が有り、本溶接部には超音波探傷試験を適用しなかった。今回の試作では、フルスケールモデルに加えて、蓋溶接部周辺部のカットモデルを別途製作しており、カットモデルにおける電子ビーム溶接部について磁粉探傷試験を実施し、欠陥のないことを確認した。

残りの MAG の多層盛り溶接部については、磁粉探傷試験と浸透探傷試験によって層ごとに検査した。

②最終肉盛 銅+チタン

銅、チタンとも非磁性体であり、浸透探傷試験を実施した。試験の実施は問題なく、欠陥も検出されなかった。

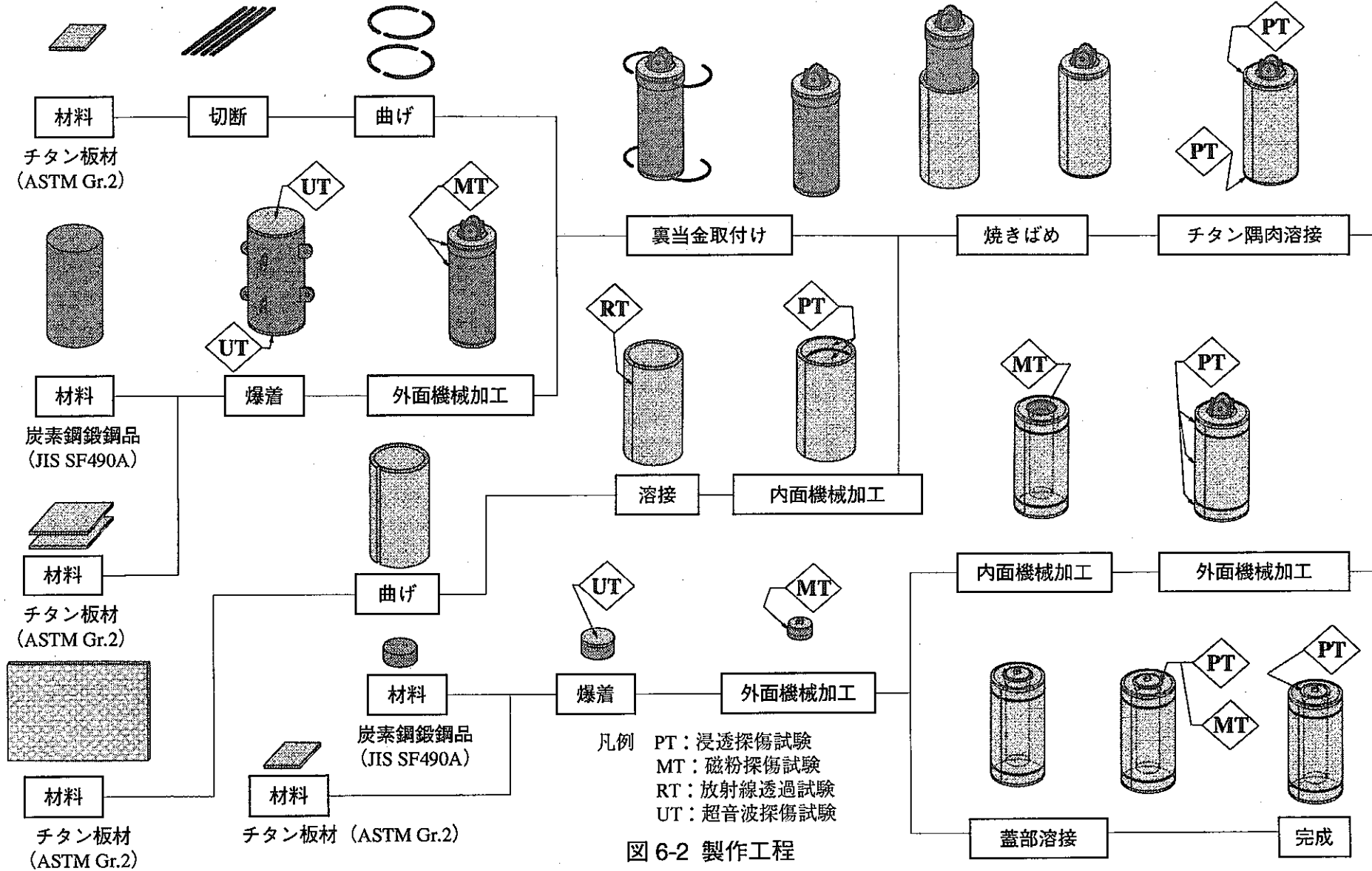
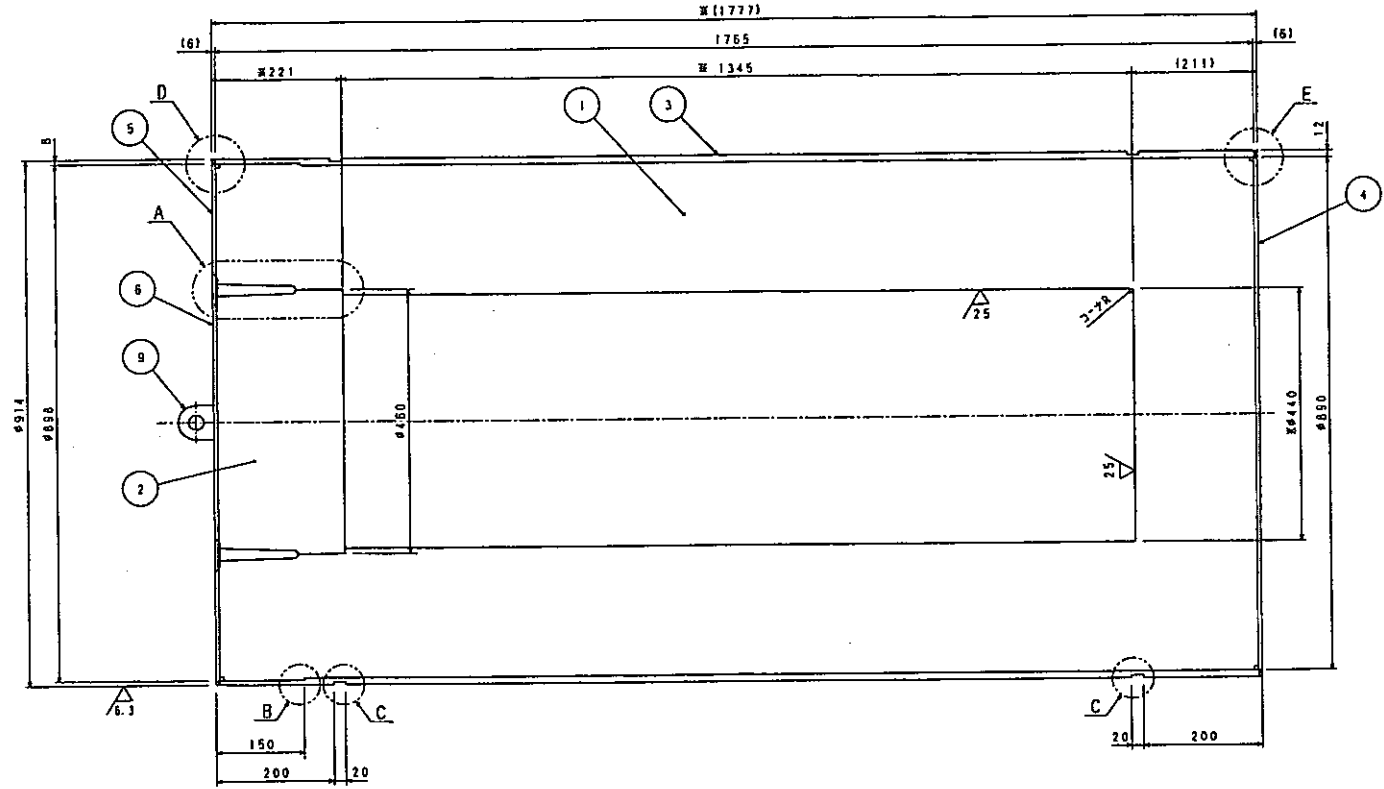
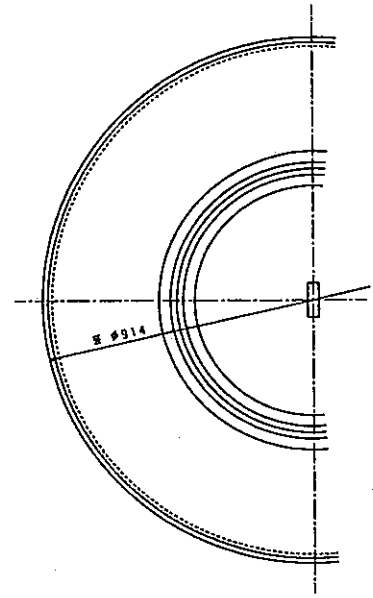


図 6-2 製作工程



- 部品番号：①容器本体（炭素鋼 SF490A） ④底面耐食層 ⑦溶接用裏当て金（蓋側）
 ②蓋（炭素鋼 SF490A） ⑤上面耐食層 ⑧溶接用裏当て金（底側）
 ③側面耐食層（ASTMGr.2） ⑥蓋部耐食層 ⑨蓋用吊り上げ治具

（AからF部の詳細図は次ページ以降に示す。）

図 6-3 全体製作図

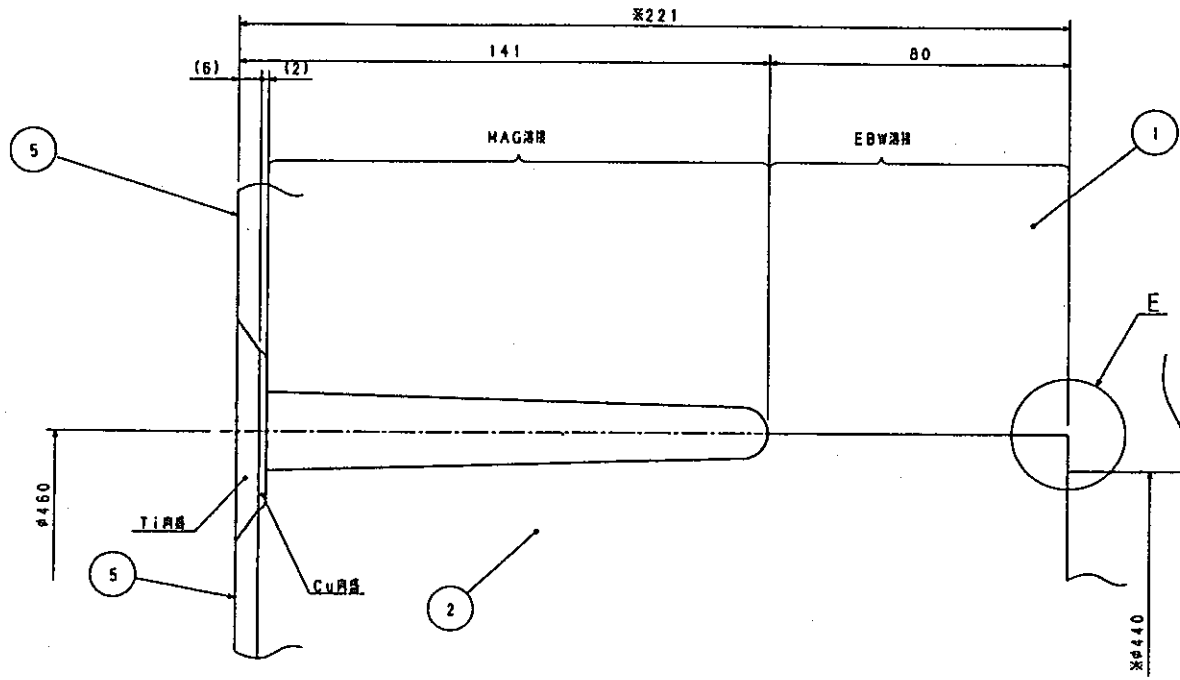


図 6-4 A部詳細図

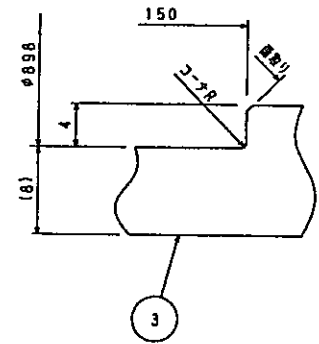


図 6-5 B部詳細図

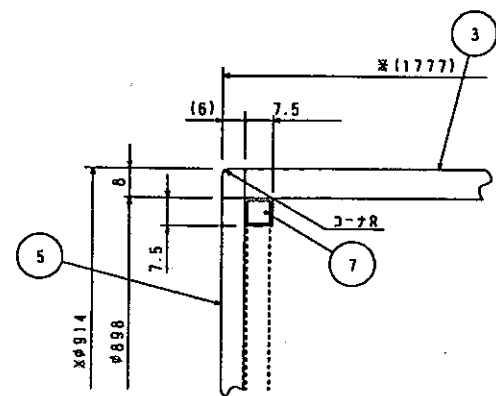


図 6-7 D部詳細図

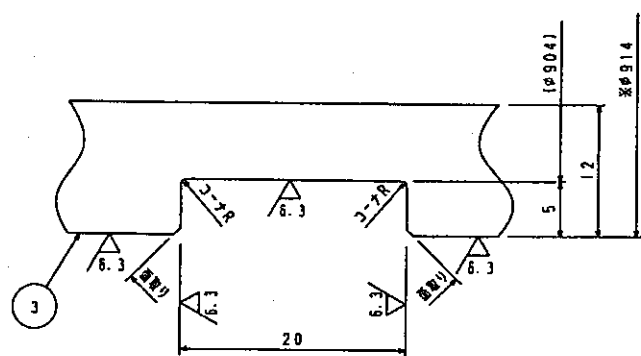


図 6-6 C部詳細図

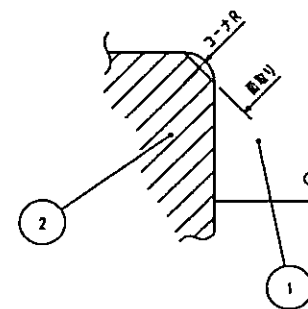


図 6-9 F部詳細図

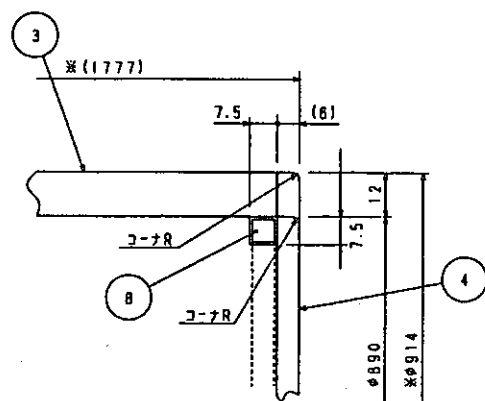


図 6-8 E部詳細図

7. 試作結果のまとめと今後の課題

チタン-炭素鋼複合オーバーパックの設計・試作を実施した。この中で挙げた課題を以下にまとめる。

(1) 板厚低減と設計最適化

本検討におけるオーバーパックの板厚設定に関しては、現状基準が存在しないため、原子力発電設備用に制定された「発電用原子力設備に関する技術基準」(告示 501号)に準じた設計を行った。告示 501号の対象とする発電用原子力設備に比べて荷重の変動が少なく、また内圧ではなく一定の外圧荷重を受ける圧肉構造物であるオーバーパックにとっては、告示に基づく従来の設計方法は過剰に保守的になっている可能性がある。今後は、オーバーパックに適用される基準・法律の整備とともに、解析結果や各種試験の十分な裏付けに基づいた合理的な許容値設定によって、必要板厚の低減を図ることが必要と考えられる。

(2) チタンの被覆施工

平面部への爆着によるチタンの被覆施工は、通常 JIS 材を用いて施工される場所、現在まで実績の無い ASTM Grade-2 チタンを用いた初めての爆着施工であったが、施工後の爆着面に対する超音波探傷試験により、適切な接合面が得られていることを確認した。また、円筒胴外面への焼きばめ挿入によるチタンの被覆施工についても、チタン円筒の製作における素材の曲げ加工、切削、溶接、および焼きばめ作業とも、とくに施工上の問題は生じず、現状技術で十分対応可能であった。

爆着を実施する場合、対象面に開口部が設けられないことから、オーバーパック内孔の機械加工を爆着施工後に行うことになった。また、爆着の余裕代を付加したことも有り、結果、物量が増えコストアップとなっている。

今回の試作において、チタンの被覆施工法の選択にあたっては、内層(炭素鋼)と外層(耐食性金属)の密着性を優先させ行った。これは、現状では内外層の密着性がオーバーパック寿命期間中の健全性へ及ぼす影響が明確になっていないためである。

耐食性の観点からは、チタンが耐腐食性を有し、設計上も炭素鋼に耐腐食性を考慮しないことから、チタン外層と炭素鋼内層は密着する必要性はないと考えられ、一方、耐圧性の観点からは、外圧による変形時にチタンと炭素鋼に応力が発生することを考慮すると密着した接合を行わないほうが自由度があると考えられる。

今後、外層の施工の検討について内層(炭素鋼)と外層(耐食性金属)が密着する必要が有るか否かを明確にする必要がある。その上で、密着性が要求される場合には爆着法や焼きばめ法以外の施工法についても検討する必要があると考えられる。

また、密着性が不必要なことが明らかになれば、たとえば、板材の部分溶接による貼り付け、あるいは耐食層を外容器として内容器と分けること等の施工の合理化が可能となる。

(3) 蓋部封入溶接

内部炭素鋼製容器の蓋の溶接では、初層を電子ビーム溶接法、残りの厚さを MAG 溶接法により実施した。この結果、電子ビーム溶接により、裏当て部が存在する周継手に対して 80 mm 厚さまで溶接が可能であることを確認した。本溶接部に対して詳細な継手性能評価は行っていないため、実機適用に当たっては、今後同様の施工による確認試験が必要である。また、残層の溶接は MAG 溶接によって実施したが、開先は 135 mm の深い挟開先となり、かつ小径の円周状であるため層間の手入れ作業にかなり労力を費やした。実機施工においては、本溶接部は放射線下の作業となり、全て遠隔操作で行う必要が有ると考えられるため、溶接方法も含めた、十分な改善、見直しが必要である。

溶接部の非破壊検査については、今回の試作では、浸透探傷試験や磁粉探傷試験を実施し欠陥の有無を確認した。実機での封入溶接では、遠隔自動化の対応などから超音波探傷試験の適用が望まれるが、複合オーバーパックでは入射した超音波の伝播がチタンと炭素鋼の境界面により妨げられ、正確な検査ができないことが懸念されたため、本試作での封入溶接部に対しては超音波探傷試験を適用しなかった。オーバーパック蓋部の溶接部の検査としては、長期健全性確保の観点から、その内部にわたる体積検査が不可欠であると考えられることから、この点において今回の溶接部形状は課題を残している。

今後は、炭素鋼とチタンの間の隙間が、耐食層としてのチタンの健全性に及ぼす影響について定量的な評価を行うとともに、この結果を踏まえたうえで、検査性の面においても最適となり得るチタン被覆の方法と、蓋溶接継手の形状および位置の組み合わせについて検討していく必要がある。また、全体的な製作手順や製作に要する時間、コストなどの点でも合理化を図るためには、たとえば、機械的な蓋の締結構造や全厚溶接を行わなくても強度上問題とならない蓋と本体の取り合いの構造などの代替案についても、必要に応じて検討していくことが肝要と考えられる。

謝 辞

本報告書におけるチタン炭素鋼複合オーバーパックの設計検討ならびに試作にあたっては、三菱重工業株式会社の諸賢の協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

1. 動力炉・核燃料開発事業団 (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 —平成3年度—, PNC TN1410 92-081
2. 石川博久, 本田明, 井上邦博, 小畑政道, 佐々木憲明 (1992) : オーバーパックスの候補材料選定と炭素鋼オーバーパックスの寿命評価, PNC TN8410 92-139
3. 石川博久, 本田明, 小畑政道, 谷口直樹 (1993) : オーバーパックスの腐食に関する研究, 動燃技報 No.85 p23~p33
4. 石川博久, 武田誠一郎 (1994) : 核燃料再処理及び高レベル放射性廃棄物処理・処分における材料と腐食挙動, 材料と環境 vol.43 No.7 p388~p395
5. 石川博久, 本田明, 井上邦博, 小畑政道, 佐々木憲明 (1992) : 海外におけるオーバーパックスの検討例について, PNC TN8420 92-010
6. 石川博久, 本田明 (1993) : 海外における高レベル放射性廃棄物処分のオーバーパックスに関する研究例について, 腐食防食講演集 vol.1993 p419~p422
7. 武田和夫, 谷内広明, 寺田進, 深田利明, 松田文夫 (1991) : オーバーパックスの設計・製作と性能解析, 神戸製鋼技報 vol.41 No.3 p115~p118
8. 石川博久, 手蔦孝弥, 鶴留浩二, 湯左泰久, 佐々木憲明 (1991) : オーバーパックス材料に関する研究開発の現状, 動燃技報 No.77 p103~p111
9. 谷口直樹, 本田明, 川崎学, 石川博久 (1995) : オーバーパックス候補材料の局部腐食発生臨界条件の評価, 動燃技報 No.93 p109~p113
10. 豊田正敏, (1995) : 高レベル放射性廃棄物深地層処分場のニアフィールド挙動及びレイアウトに関する考察, 日本原子力学会誌 vol.37 No.4 p291~p302
11. Debruyne W. (1990) : Corrosion of Container Materials Under Clay Repository Conditions, At. Energy Can. Ltd. p175~p186

12. Knecht B., McCombie C. (1990) : Development of an Overpack for the Storage of High Level Waste in Swiss Granitic Bedrock : Material Selection, Design and Characteristics, At. Energy Can. Ltd. p109~p118
13. Simpson J. P., Schenk R., (1989) : Corrosion Induced Hydrogen Evolution on High Level Waste Overpack Materials in Synthetic Ground Waters and Chloride Solutions, Sci. Basis Nucl. Waste Manage 12 p381~p396
14. Debruyne W., Tas H. Dresselaers J., (1989) : Corrosion Resistance of Candidate Overpack Materials in Deep Argillaceous Disposal Environments, Sci. Basis Nucl. Waste Manage 12, p381~p388
15. McCoy H. E., Griess J. C., (1981) : Materials Consideration Relative to Multibarrier Waste Isolation, US DOE Rep., No. ORNL-TM-7770 (1981)

添付資料 製造工程写真集

製造工程記録写真

チタン-炭素鋼複合オーバーパックの製造工程中の様子を以下の写真-1～8に示す。今回の試作では実機模擬のフルスケールモデルと蓋溶接部周辺のみのカットモデルを製作した。一部工程はカットモデルの写真にて示す。

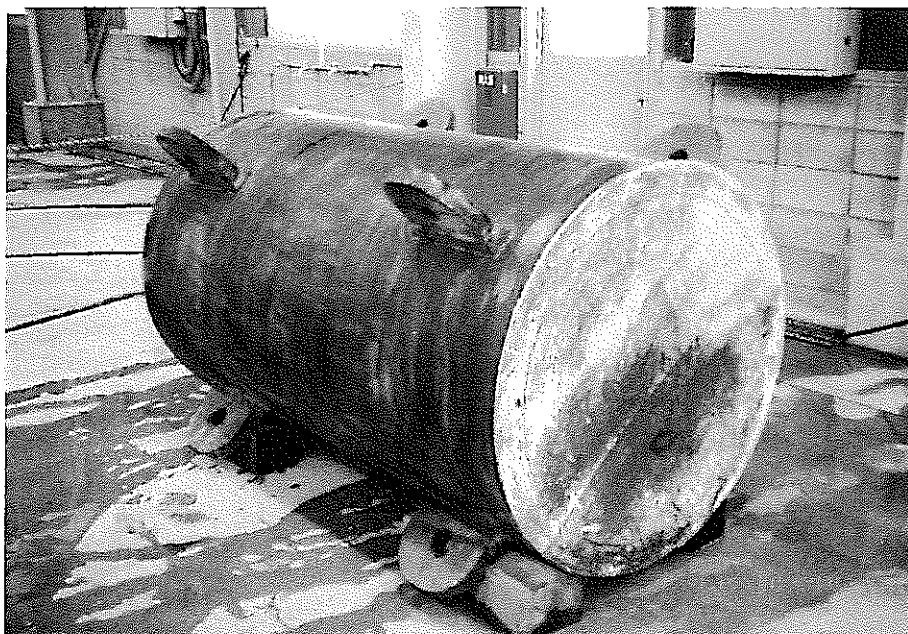


写真-1 平面部へのチタン爆着終了後（上面、下面）



写真-2 平坦部円筒部のコーナー部へのチタン肉盛溶接用裏当て金取り付け状態（円筒部焼きばめ施工前）

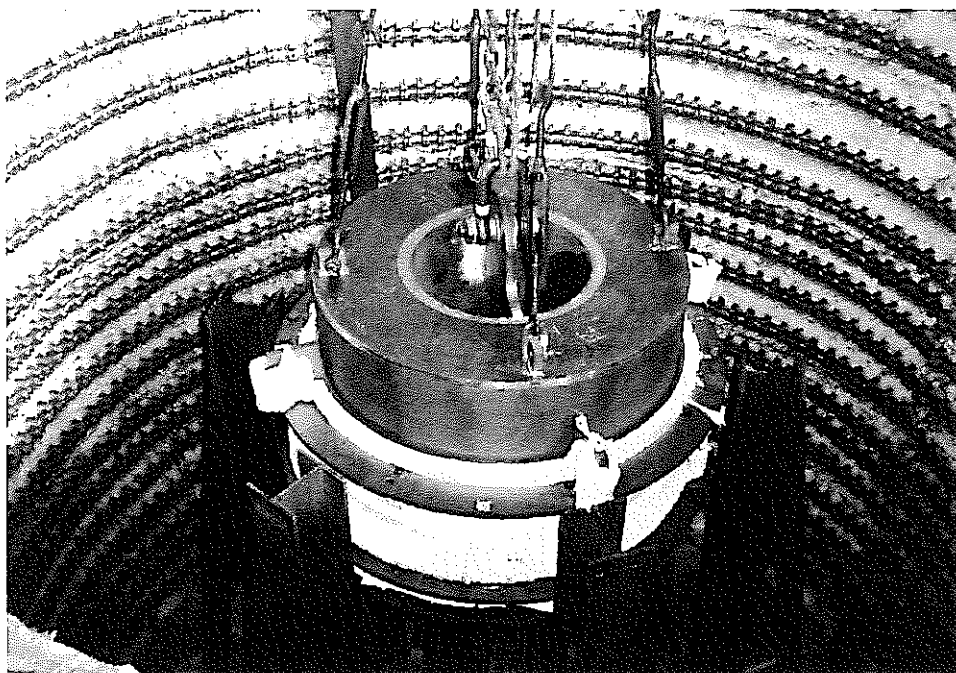


写真-3 円筒部チタン外層の本体への焼きばめ工程

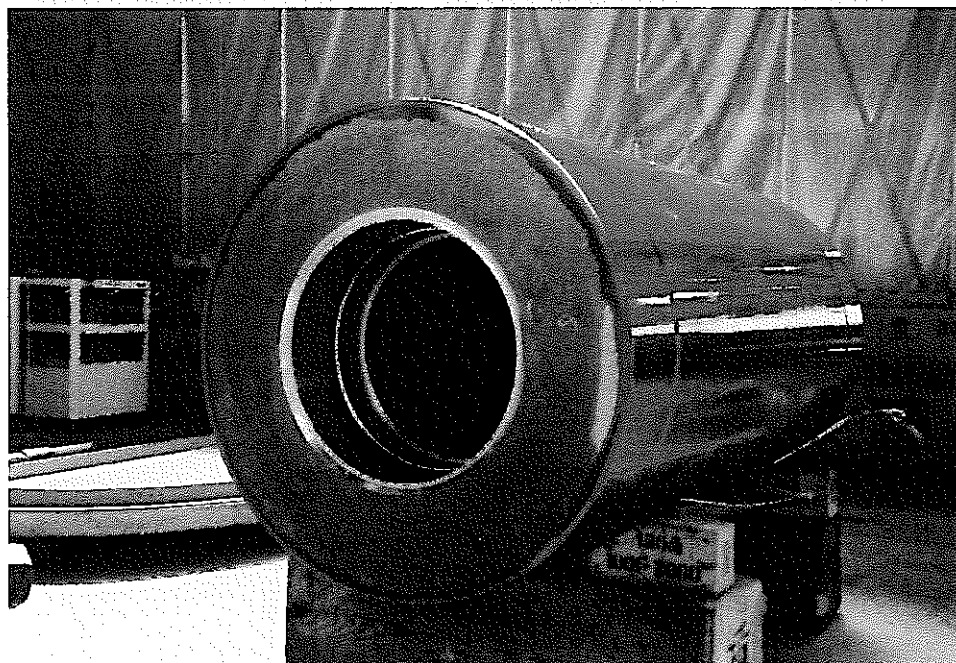


写真-4 焼きばめ終了後 表面検査

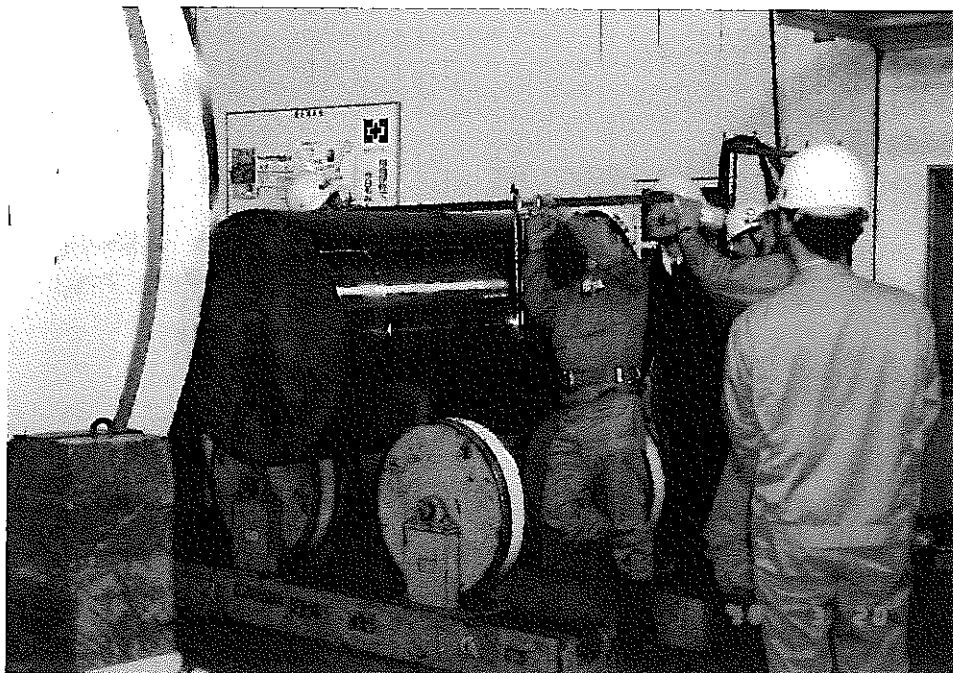


写真-5 機械加工後の寸法検査

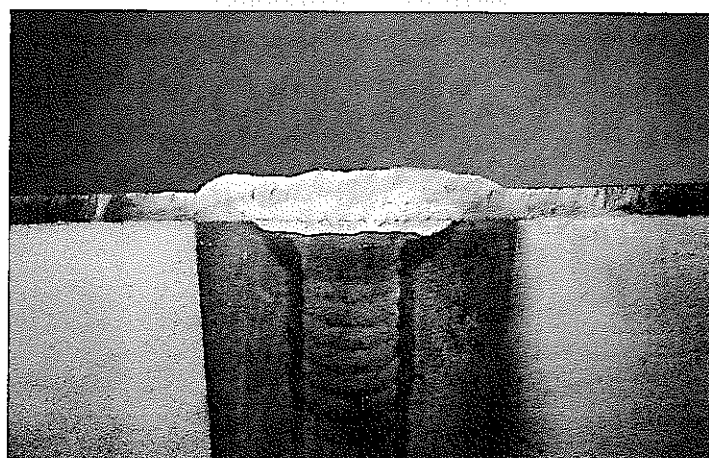


写真-6 蓋部溶接部への最終チタン被覆施工
(銅の中間層+TIG 溶接によるチタンの肉盛)

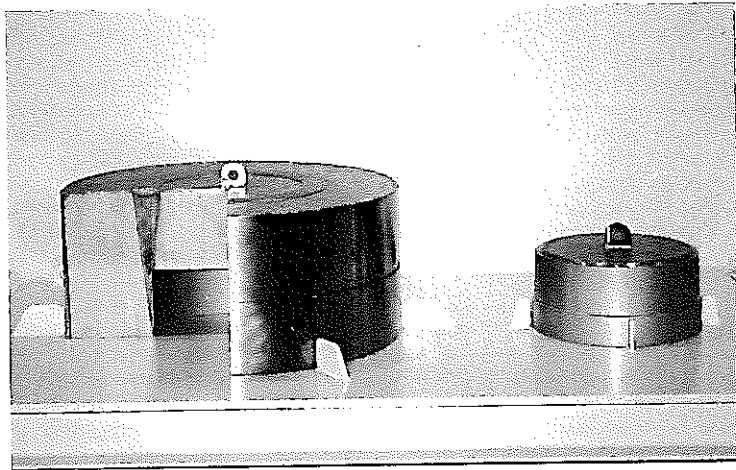


写真-7 完成（蓋部カットモデル）

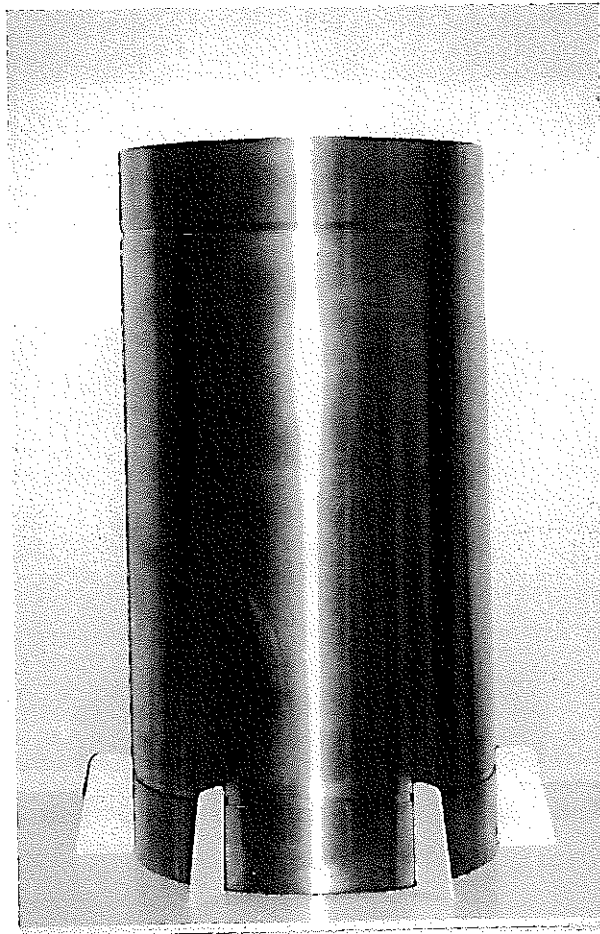


写真-8 完成（フルスケールモデル）