

銅-炭素鋼 複合オーバーパックの試作

(研究報告)

1999年11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

銅-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

本報では、高レベル放射性廃棄物の地層処分の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、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実規模容器での試作を行った結果を報告するものである。

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無酸素銅を選択した。複合構造については、耐食層である銅の外容器と、強度部材となる炭素鋼の内容容器からなる2重容器構造とした。

試作は銅製外容器のみ実施した。無酸素銅およびリン入り無酸素銅を用いて両者の比較を行った。製作方法については、胴部および底部については後方押し出し加工による一体成形法とし、蓋部については本体との溶接を電子ビーム溶接法を用いて行うこととした。試作後、容器から採取した試験片を用いて各種機械試験を実施し、今回採用した銅製外容器の後方押し出し加工による製作方法は、現有技術で十分に対応可能であることを確認した。蓋の溶接部については超音波探傷試験を実施し、電子ビーム溶接の適用性を確認した。またオーバーパックス寿命期間中にガラス固化体から発せられる放射線による炭素鋼内容器の脆化の程度を検討した結果、無視できるレベルであることが分かった。

最後に今後検討されるべき課題をまとめた。

Trial Manufacturing of Copper-Carbon Steel Composite Overpack

Nobuyuki HONMA, Takahiko CHIBA *, Kenji TANAI

Abstract

This paper reports the results of design analysis and trial manufacturing of copper-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 Copper-Carbon steel composite overpack consists of a double container, an outer vessel made of oxygen-free, high-purity copper as the corrosion allowance material, and an inner vessel made of carbon steel as the pressure-resistant material.

The trial manufacturing in this time, only the copper outer vessel has been fabricated. Both oxygen-free copper and oxygen-free phosphorus copper were used as materials for the outer vessel. For the shell and bottom portion, these materials were formed integrally by a backward extrusion method. For sealing the top cover plate to the main body, an electron-beam welding method was applied.

After manufacturing, mechanical testing of specimens from the copper vessels were carried out. It was confirmed that current technique has sufficient feasibility to manufacture outer vessel.

In addition, potential for irradiation embrittlement of the inner carbon-steel vessel by irradiation from vitrified waste over the life time of the overpack has been analyzed. It was shown that the small degree of irradiation embrittlement gives no significant impact on the pressure resistance of the carbon-steel vessel.

Future research and development items regarding copper-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. 試作にあたっての予備検討事項	3
3.1 海外における検討事例	3
3.2 材質の選定	8
3.3 耐圧強度についての考え方	9
3.4 荷重条件の設定	10
4. 詳細設計	11
4.1 詳細構造の設定	11
4.1.1 外層の施工方法	11
4.1.2 銅製外容器の構造検討	13
4.1.3 炭素鋼製内容器の構造検討	18
4.2 詳細設計	20
4.2.1 炭素鋼製内容器の形状と材質	20
4.2.2 銅製外容器の形状	20
4.2.3 外容器と内容器のクリアランス	20
4.2.4 炭素鋼製内容器の寸法設定	20
4.2.4.1 前提条件	20
4.2.4.2 板厚の計算	21
4.2.5 銅製外容器の寸法設定	25
4.3 応力解析	29
4.3.1 縦置き定置の場合	29
4.3.2 横置き定置の場合	32
5. オーバーパックの放射線損傷に関する検討	35
5.1 炭素鋼の放射線損傷	35
5.2 オーバーパックの炭素鋼の dpa	36
5.2.1 フラックス計算	36
5.2.1.1 計算方法	36
5.2.1.2 計算結果	42
5.2.2 dpa 計算	47

5.2.2.1	γ線による dpa	47
5.2.2.2	中性子線による dpa	47
5.3	オーバーパックの炭素鋼の放射線損傷	48
5.4	まとめ	49
6.	試作	50
6.1	試作容器の概要	50
6.2	製造工程概要	52
6.3	銅素材の casting	53
6.4	分解鍛造・切削加工	53
6.5	熱間後方押し出し・切削加工工程	54
6.6	蓋部の溶接	55
7.	溶接部に対する超音波探傷試験	56
7.1	試験方法	56
7.1.1	使用機器	56
7.1.2	試験方法	56
7.2	試験結果とまとめ	56
8.	材料試験	58
8.1	試験項目	58
8.2	試験片の採取	58
8.2.1	評価位置および試験片採取要領	58
8.2.2	試験片採取部と個数	59
8.3	試験方法と結果	63
8.3.1	組織観察	63
8.3.2	粒径測定	63
8.3.3	硬さ試験	64
8.3.4	引張試験	65
8.3.5	曲げ試験	66
8.4	まとめ	67
9.	試作結果のまとめと今後の課題	71
	参考文献	73
	資料一 製造工程記録写真集	75
	資料二 試験・検査写真集	81

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 スウェーデンにおける 使用済み燃料処分容器の概念図 (BWR用)	4
図 3-2 カナダにおける使用済み燃料処分容器の概念図	5
図 3-3 アメリカにおける使用済み燃料処分容器の概念図 (二重壁コンテナ)	6
図 4-1 被膜加工概要	11
図 4-2 熱間等方圧加圧 (HIP) 加工概要	12
図 4-3 円筒部-底部一体押し出し加工の概念図	13
図 4-4 オーバーパックのハンドリング構造	14
図 4-5 スカート方式の概念図	14
図 4-6 底部脱着式ハンドリング治具の概念図	14
図 4-7 縦置き定置手順	16
図 4-8 横置き定置手順	16
図 4-9 内容器蓋部を溶接構造とした場合および ボルト止め構造とした場合の加工手順	18
図 4-10 内容器および外容器の概念	19
図 4-11 内容器板厚計算モデル	21
図 4-12 インロー部強度評価モデル	23
図 4-13 外容器上部強度評価モデル	23
図 4-14 インロー部圧縮応力評価モデル	24
図 4-15 外容器底部の応力評価	25
図 4-16 吊上げ部モデル	26
図 4-17 吊上げ穴部モデル	26
図 4-18 銅-炭素鋼 複合オーバーパック 詳細図	27
図 4-19 オーバーパック加工・組立・検査フロー図	28
図 4-20 解析モデル図 (縦置き定置の場合)	29
図 4-21 解析結果 (縦置き定置の場合)	30
図 4-22 解析モデル図 (横置き定置の場合)	32
図 4-23 解析結果 (横置き定置の場合)	33
図 5-1 γ 線に対する鉄のはじき出し断面積	37
図 5-2 中性子エネルギーの関数としてプロットされた 鉄のはじき出し断面積	37

図 5-3	フラックス計算モデル (円筒体系)	39
図 5-4	中性子放射線損傷によって起こる DBTT 変化	48
図 6-1	試作銅製外容器の概略	51
図 6-2	外容器製造工程概要	52
図 7-1	対比試験片概要	56
図 7-2	溶接部近傍断面概要図	57
図 8-1	各ブロックの採取部	60
図 8-2	評価試験片採取箇所	61
図 8-3	曲げ試験概要	66

表 目 次

表 2-1	オーバーパックに対する基本要件	2
表 4-1	外容器加工方法の比較	13
表 4-2	各ハンドリング機構の比較	15
表 4-3	各種溶接法の比較	17
表 4-4	縦置き定置の場合の応力評価結果	31
表 4-5	横置き定置の場合の応力評価結果	34
表 5-1	γ 線エネルギースペクトル	38
表 5-2	中性子線エネルギースペクトル	38
表 5-3	計算に使用した物質の組成および密度	40
表 5-4	γ 線源のフラックス計算結果	42
表 5-5	中性子線源の各計算ケースにおける全フラックス計算結果	43
表 5-6	中性子線源のフラックス計算結果	44
表 6-1	目標材料組成及び分析値	53
表 6-2	使用設備概要	54
表 6-3	熱間後方押し出し加工時の加工条件	54
表 6-4	電子ビーム溶接装置仕様	55
表 7-1	超音波探傷試験機器仕様	56
表 8-1	試験片採取ブロックの属性	58
表 8-2	評価試験片採取個数	62

表 8-3	ビッカース硬さ試験方法	64
表 8-4	引張試験方法	65
表 8-5	引張試験測定結果の比較	65
表 8-6	曲げ試験方法	66
表 8-7	銅製外容器材料試験結果：無酸素銅 (OFC)	68
表 8-8	銅製外容器材料試験結果：リン入り無酸素銅 (XLP)	69
表 8-9	溶接部断面ビッカース硬さ測定結果 ：無酸素銅 (OFC)	70
表 8-10	溶接部断面ビッカース硬さ測定結果 ：リン入り無酸素銅 (XLP)	70

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）を配置した複合構造のオーバーパック（複合オーバーパックという）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強度部材としての役割を、外側の耐食性金属に地中での長期の耐腐食性を期待する。

本試作では、耐食性金属として銅を用いた銅－炭素鋼複合オーバーパックの設計および試作を行い、現状技術での製作性、および実現可能性の検討を行った。

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。⁽¹⁾

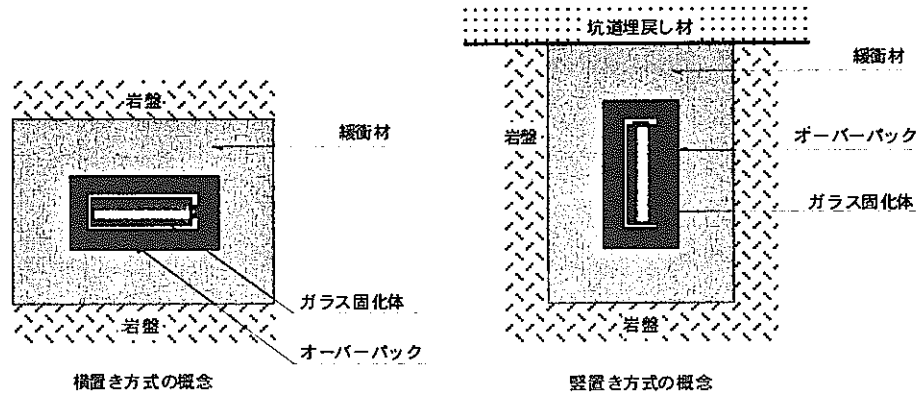


図 2-1 人工バリアの概念

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、炭素鋼製容器をチタン、銅といったある条件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。内層の炭素鋼に強度部材としての機能を、外層のチタンまたは銅に耐食機能をそれぞれ期待する。

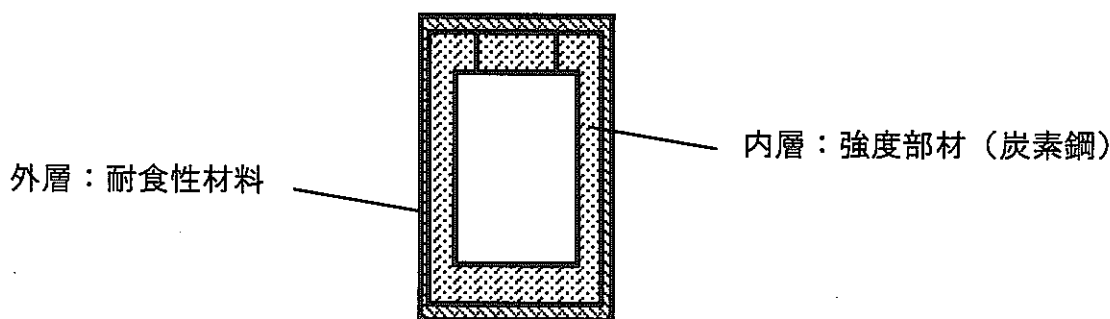


図 2-2 複合オーバーパックの概念

本検討では外層の耐食性材料に銅を用いた複合オーバーパックについて検討・試作を行うものとする。

3. 試作にあたっての予備検討事項

3.1 海外における検討事例

海外においても放射性廃棄物（使用済み燃料，ガラス固化体）の地層処分における種々の最終処分用容器が検討されている。そのうちスウェーデン，カナダ，アメリカにおける銅を用いた処分容器の検討事例について調査を実施した。

(1) スウェーデン⁽²⁾⁽³⁾

スウェーデンでは使用済み燃料の最終処分容器の材料として銅を最も有力な候補材料として研究が行われている。使用済み BWR 燃料用キャニスタの概念設計図を図 3-1 に示す。

材料の組成については P：40～60 ppm，H：<0.6 ppm，S：<6 ppm かつ粒径 180 ～ 360 μm の無酸素銅（UNS C10100）をベース材にした材料が候補材料として検討されている。この容器は強度部材としての鋳鋼または鋳鉄製のインサートと耐食性を目的とする銅製キャニスタから構成されている。インサートとキャニスタは密着しておらずこれらの間には 2 mm の隙間が存在する。この隙間による外側の銅キャニスタの歪みは最大で 4% と評価されている。

銅板材を圧延成形によって半円筒形状に加工し電子ビーム溶接により円筒形のキャニスタを製作している。フルスケールでの試作の結果実質的レベルで組織は条件を

満たしており実用化は可能としている。その他耐食層の加工法は熱間押し加工，熱間等方圧加圧法（高温高圧下での圧接），電着（銅メッキ），溶射（溶融した銅を吹き付ける）等も試験が行われている。

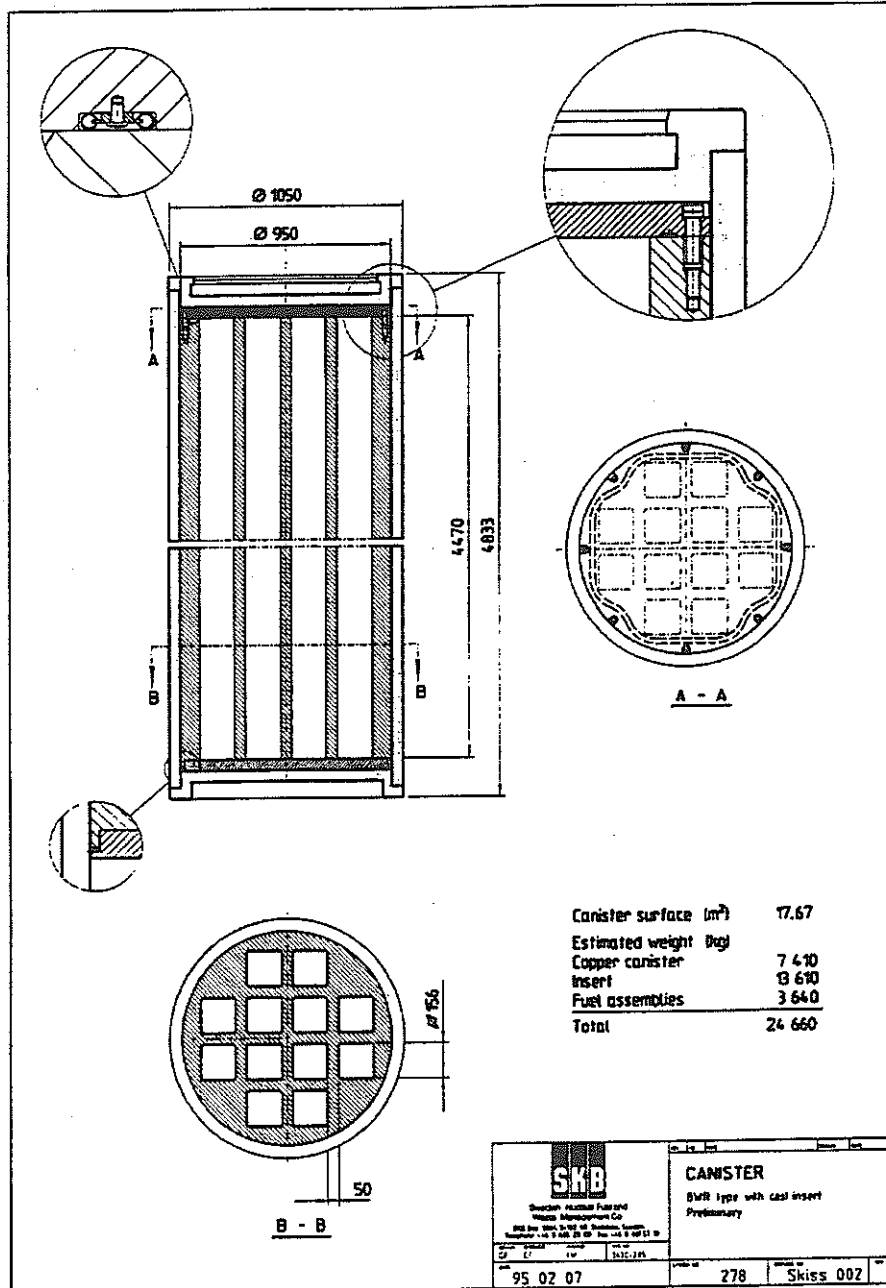


図 3-1 スウェーデンにおける使用済み燃料処分容器の概念図（BWR用）

(2) カナダ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

カナダにおいては、CANDU 炉（カナダ型重水炉）からの使用済み燃料を最終処分する銅製の容器を検討している。処分容器 1 個に対して 72 本の使用済み燃料を格納する。カナダにおいて検討されている最終処分容器の概念図を図 3-2 に示す。円筒部の材質には無酸素銅（UNS C10100）を採用している。銅製容器の板厚は 25 mm で、耐用年数は 3 万年としている。

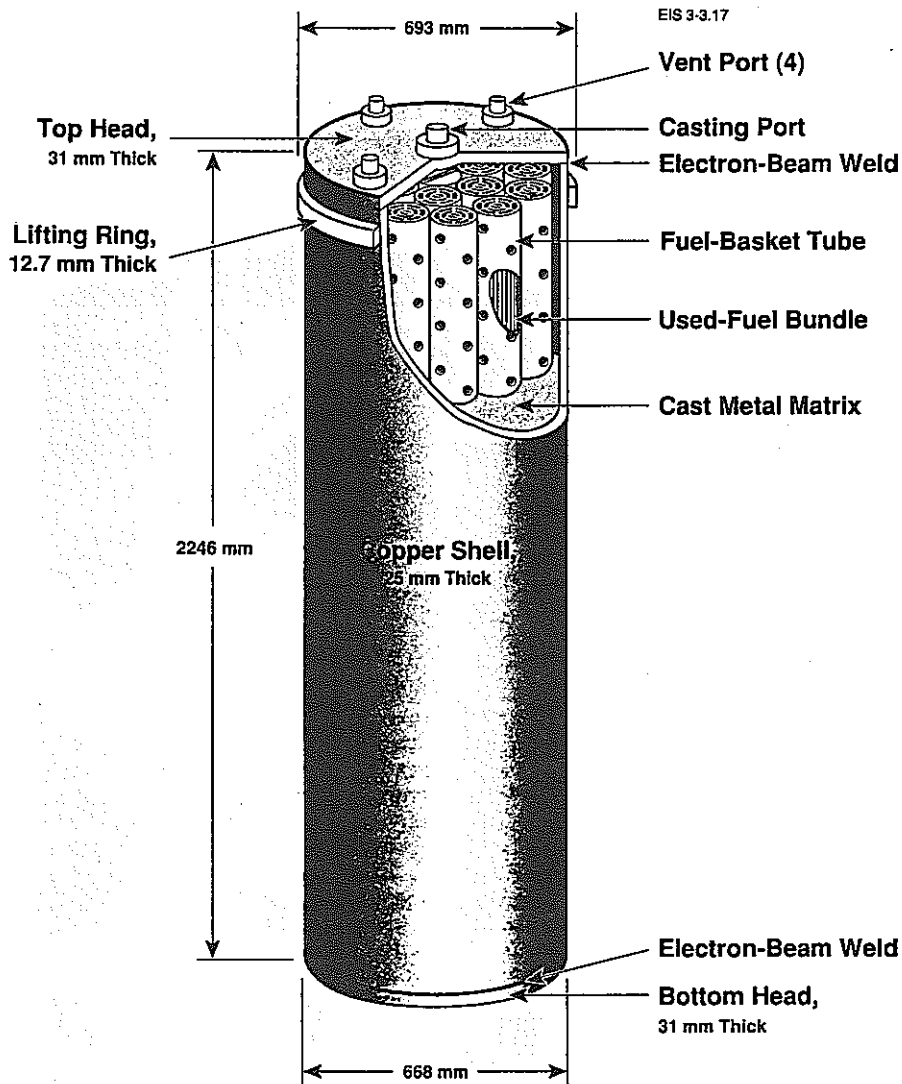


図 3-2 カナダにおける使用済み燃料処分容器の概念図

(3) アメリカの

アメリカにおける銅製最終処分容器は、二重壁コンテナと単壁バイメタルコンテナの2種類が検討されている。二重壁コンテナの概念図を図3-3に示す。

二重壁コンテナの場合の材質は内部コンテナがアルミニウムブロンズ（UNS C61300）、外部コンテナは純銅である。単壁バイメタルコンテナの場合は内側がニッケルアルミニウムブロンズ、外側が純銅である。銅シェルは板厚は50 mm以上としている。製作方法については、二重壁コンテナの場合圧延成形後に溶接、単壁バイメタルコンテナの場合は遠心铸造による。

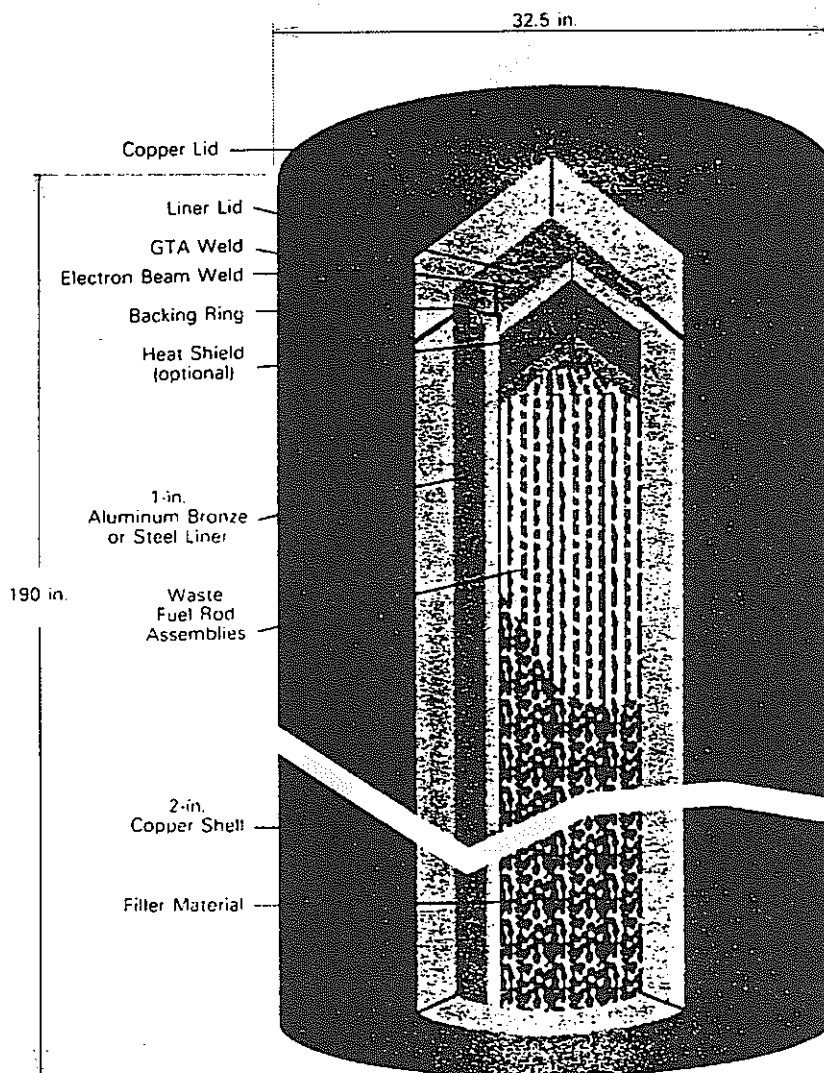


図 3-3 アメリカにおける使用済み燃料処分容器の概念図
(二重壁コンテナ)

(4) まとめ

耐食性を目的として銅材料の採用を検討する場合、3カ国とも純銅（無酸素銅）を中心に検討されている。これら純銅の耐食性に対する評価はスウェーデンでは10万年、カナダでは3万年という結果が得られている。

また、各国とも複数の加工方法が検討されており、実規模の試作では内層の構造部材と外層の銅材を独立させた二重構造の処分容器を検討している。これらの容器では内層と外層の間には挿入のため隙間が存在している。

容器各部の溶接方法については各国ともいくつかの候補を挙げている。それらの中で共通して挙げられているのは電子ビーム溶接法（EBW）である。これは電子ビーム溶接法がその他の溶接法、例えば被覆アーク溶接などと比較して溶接時のエネルギー密度が高く、そのため入熱量が低く結晶粒の粗大化を抑えることができるためであると考えられる。

3.2 材質の選定

オーバーパックスの耐食層として銅を選定する上では地下約 1000 m の高温高圧力下で 1000 年間の健全性を確保できることを想定する必要がある。製作を前提にした検討を行うにあたり、耐食層としての銅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 溶接性が良好なこと

溶接による脆化 (CuO の生成によると考えられる) を防止するため、銅中の酸素 (O) 含有量が低いこと

② 溶接時の水素脆化

銅中の水素 (H) , 酸素 (O) 含有量が低いこと

③ 脆化の原因となる金属間化合物の粒界析出がないこと

銅中の硫黄 (S) 含有量が低いこと

④ 熱間加工中または溶接時に結晶粒粗大化が起こらないこと

溶接後の非破壊試験に超音波探傷試験を実施する場合、結晶粒径が大きいと音波の透過に影響を及ぼし欠陥検出性が低下する。

工業的によく用いられる黄銅は一般に無酸素銅より強度が高く機械加工性に優れた合金である。しかし、150°C程度でも焼きなまし硬化現象を示すこと、応力腐食割れ感受性が高いなどの理由からオーバーパックス材料として選定することは適切ではないと考えられる。純銅は銅合金と比較して腐食電位が貴であるため、他の金属と接触した場合純銅自身が腐食する可能性は他の銅合金よりも低い。

本検討において採用する銅の材質は、脆化層となる可能性がある金属間化合物を生じず、また水素脆化を起こさない無酸素銅ベースの材料を選定した。

スウェーデンでは無酸素銅にリン (P) を 40~60 ppm 添加した材料を候補材として選定している。P の効果はクリープ特性に影響を及ぼすと考えられる S や O の効果を抑制し再結晶温度を上昇させることであると報告されている。P 以外にも無酸素銅のクリープ特性向上、再結晶温度上昇、機械的性質改善に寄与する可能性がある添加元素には Mg, Zr, Cr などがある。

オーバーパックスの耐食性材料として銅材料を考慮する場合、数ある銅材料の中からどの材料を採用するべきかは今後の検討課題であるが、本試作においては、無酸素銅およびリン入り無酸素銅 (スウェーデンでの仕様に基づく) を選定し検討を行う。

3.3 耐圧強度についての考え方

現状では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、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）に準拠して設計・解析を行うことが妥当な選択といえる。

これらに準拠したオーバーパックの設計および解析にあたっては、法規上の機器分類が必要となる。容器に関しては、告示 501 号では第 1 種から第 4 種まで区分される。

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バウンダリを構成する機器には該当しない。第 2 種容器は原子炉格納容器およびこれに接続する容器と規定されており、これも該当しない、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 種容器となる。ただし第 4 種容器は応力解析を実施しなくても良いこととなっており、また解析に必要な許容応力値等の規定もない。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、ここでは第 4 種容器に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、その機能はこの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ができる。第 2 種容器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。

ここで第 1 種容器用の許容値と第 2 種容器用の許容値を比較すると第 1 種容器用の方が考慮される安全率が小さい、すなわち第 1 種容器の方が板厚を薄くできる。第 1 種容器に準じて設計するほうが解析には時間を費やすものの板厚は薄くなることから、製造コスト、搬送、定置等の諸々のコストなどの面から有利である。しかも長期にわたる処分状況を考慮すれば、オーバーパックには所定の荷重に耐える強度と合理的な耐食層が備えられていればよく、板厚の余裕代分の大小は問題とはならないと考えられる。

以上の検討に基づいて、本検討では告示 501 号の第 1 種容器に準拠した設計、応力解析を実施する。

3.4 荷重条件の設定

オーバーパックに作用する荷重としては、従来から処分深度における岩盤の地圧のみを考慮している。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し、岩盤の初期地圧が人工バリアに作用する。したがってオーバーパックには地上からオーバーパックまでの全岩盤の荷重が作用し、このうち垂直成分 (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 ($\sigma_v = \rho_s \times H$) として求める。また、水平成分 (σ_h) は側圧係数を λ として垂直成分の λ 倍とする ($\sigma_h = \rho_s \times H \times \lambda$)。

側圧係数 λ は $\lambda = (148/H) + 1.02$ の式によって与えられる。処分深度は処分場が位置する岩盤の種類によって、硬岩系岩盤 (結晶質岩) の場合は 1000 m、軟岩系岩盤 (堆積岩) の場合は 500 m とするが、本検討では保守的に深度 1000 m に処分を想定した場合の垂直圧力を考慮し、側圧係数については、深度 500 m の場合の計算 $\lambda = 1.32$ を採用する。上記飽和密度 ρ_s の値については、 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ とする。

したがってオーバーパックに作用する荷重は、

$$\begin{aligned} \text{(垂直成分)} &= (2.65 \times 10^3) \times 1000 \times 10^3 \times 9.80665 \\ &= 25.987 \\ &= 26.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(水平成分)} &= 25.987 \times \{(148 / 500) + 1.02\} \\ &= 26.0 \times 1.32 \\ &= 34.3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

4. 詳細設計

4.1 詳細構造の設定

4.1.1 外層の施工方法

銅-炭素鋼複合オーバーパック構造は、主として外層（耐食層）である銅を内層の炭素鋼へいかに施工するかによって決定する。ここでは外層の施工方法についての検討を実施し、その結果に基づき試作複合オーバーパックの構造を検討する。

(1) 複合材料の曲げ加工

炭素鋼に銅を被覆した複合材料を曲げ加工する方法である。オーバーパックの厚さは 100 mm 以上となることが予想されるため曲げ加工自体が困難であり、本加工法の適用は困難である。

(2) 被膜加工

炭素鋼オーバーパック外表面に銅を被覆加工する方法である。図 4-1 に本加工法の概要を示す。現行技術においては耐食層としての厚さの要求（数十 mm）に対して適用が困難であり、また健全な耐食層を生成するためには酸素混入を防止するという観点から窒素雰囲気中での加工を行う等の必要があり、新規開発が必要な要素が多い。したがって本加工法の適用は困難である。

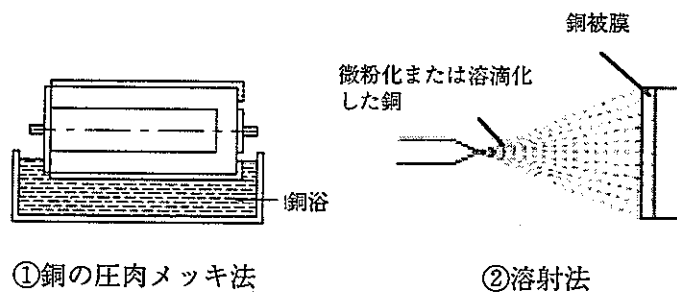


図 4-1 被膜加工概要

(3) 熱間等方圧加圧（HIP）加工

加圧・加熱により部材を接着する方法である。図 4-2 に本加工法の概要を示す。現行の国内の設備では円筒部への加工は不可能であり、加工後長時間の徐冷（約 800°C から常温まで 7~9 時間かけ冷却）が必要なため銅材料の粒径の粗大化が避けられず、加工後の超音波探傷等の検査性に劣ることが予想される。したがって本加工法の適用は困難である。

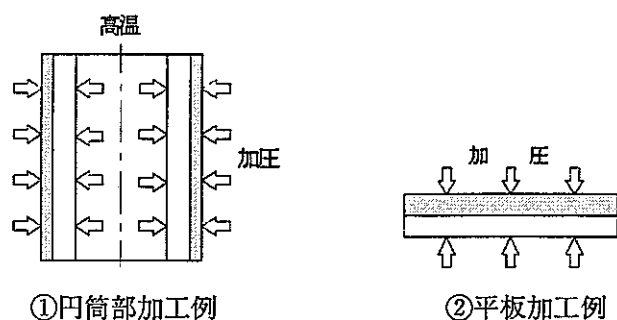


図 4-2 熱間等方圧加圧 (HIP) 加工概要

(4) 爆着加工

銅の爆着は技術的には不可能ではないもののほとんど実績が無く、適用にあたってはまず加工条件を求める必要がある。また円筒部の爆着などは他の金属においても実施されておらず、さらにガラス固化体収納後に外層を爆着することも現実性に乏しい。したがって本加工法の適用は困難である。

(5) 焼きばめ加工

焼きばめは一般に広く実施されている技術であり、複合オーバーパックの大きさを考慮した場合でも、量産時におけるコストダウンが図りにくい点があるものの適用可能な加工法である。

(6) 内層と外層を別構造とする

炭素鋼の内層に銅の外層を被覆せず、内容器と外容器に分けて別構造にする方法である。外容器を別構造とすることで、円筒部と底部、蓋部の加工法、溶接法などを別途検討する必要があるが、オーバーパックに適用可能な方式である。

以上、耐食層である銅外層の加工方法についての検討を行った結果、「焼きばめを用いた加工法」、「内層・外層を別構造とする」が銅-炭素鋼複合オーバーパックの製作法として適用性があると考えられる。しかし、オーバーパックの実機の製作においては遠隔自動化が不可欠となることが考えられ、自動化への適用性を考慮すると焼きばめ加工にはかなりの困難が伴うことが予想される。したがって本研究においては内層・外層を各々別々に製作し組み合わせる製作法を採用する。

以下では外容器、内容器それぞれの製作法、構造概念を検討する。

4.1.2 銅製外容器の構造検討

(1) 銅製外容器の製作方法

銅製外容器の製作は大きく分けて円筒部の加工，底部，蓋部の加工からなる。容器の製作方法としては一般によく用いられる板材の曲げ加工による方法や，鋼塊を押し出し加工する方法，鍛造による成形等が考えられる。どの製作法を選択すべきか，加工工程の数や検査性，設備投資の必要性などの観点で比較検討を行った。結果を表 4-1 に示す。

表 4-1 外容器加工方法の比較

	円筒曲げ -溶接	円筒押し出し加工 -溶接	円筒鍛造 -溶接	円筒部・底部 押し出し一体加工
加工数	×	△	△	○
溶接箇所数	×	△	△	○
被検査性	△	○	○	○
設備投資	○	△	△	△
総合評価	△	○	○	◎

以上の比較から，加工工程並びに溶接箇所が少なく検査箇所も少ないことなどを考慮し，「円筒部および底部の押し出し一体加工」を採用する。図 4-3 に本方式の概念を示す。

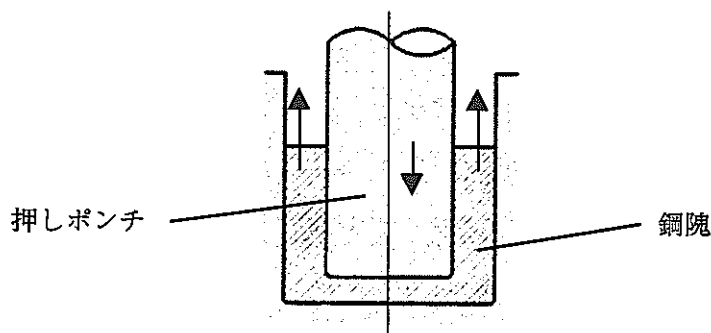


図 4-3 円筒部-底部一体押し出し加工の概念図

(3) ハンドリング構造の検討

外容器は処分後の耐腐食性のほか、ガラス固化体収容後の処分場での搬送・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形状が考えられる。

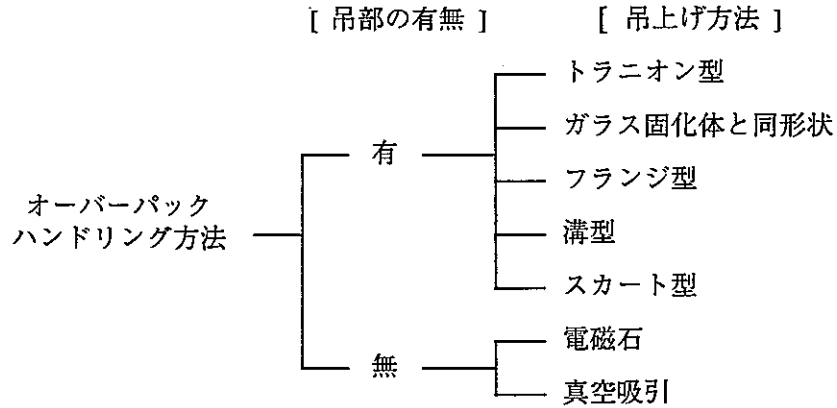


図 4-4 オーバーパックのハンドリング構造

各ハンドリング構造の概念図と比較を表 4-2 に示す。比較から、本検討においては処分時に竖置きで定置する場合には、緩衝材の施工性の観点から図 4-5 に示すような容器蓋側にスカートを設置する方式を採用する。横置きで定置する場合には、蓋側のみにハンドリング構造を設けるだけでは対応できないため、例えばスカート方式をベースとして図 4-6 に示すような脱着治具を取付ける方式が考えられる。それぞれの場合の定置手順を図 4-7, 4-8 に示す。竖置き、横置きいずれの場合においても、容器の蓋側については外容器に直接スカート部を設け、ハンドリング可能な形状とする。

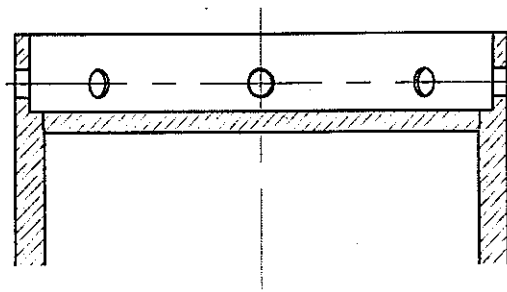


図 4-5 スカート方式の概念図

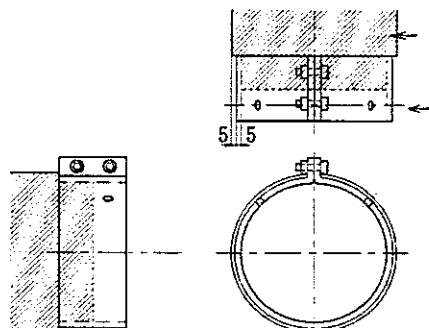
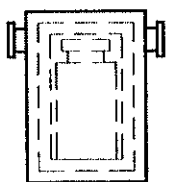
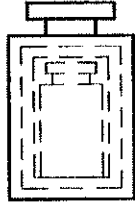
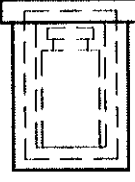
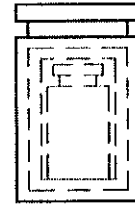
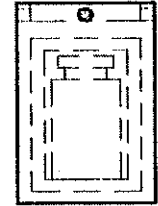
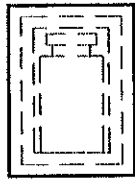
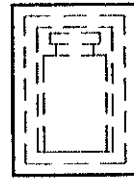


図 4-6 底部脱着式ハンドリング治具の概念図

表 4-2 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	トラニオン型	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		本体胴部にトラニオンを設ける →トラニ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る →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る →フランジ下方から吊具を固定し吊上げる	胴部に溝を設ける →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る →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る →吊部に吊具を固定し吊上げる	吊り部無し →上部を真空で吸引して吊上げる
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
	緩衝材施行性	トラニオン周囲の施工に課題	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	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 着脱機構の検討要	容易	

これらハンドリング治具の今後の検討課題としては

- ① 横置き定置時における治具の着脱性および治具着脱後の隙間への緩衝材施工性
- ② 治具の脱落防止策（本体に溝加工を行う等）

が考えられるが、実機におけるハンドリング構造については、処分坑道の大きさや、定置機器等の詳細な仕様、遠隔自動化への対応等総合的に検討を行ったうえで決定される内容であると考えられる。

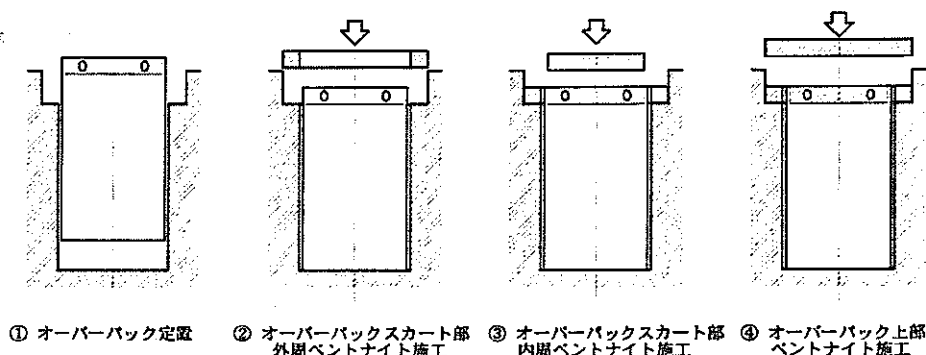


図 4-7 縦置き定置手順

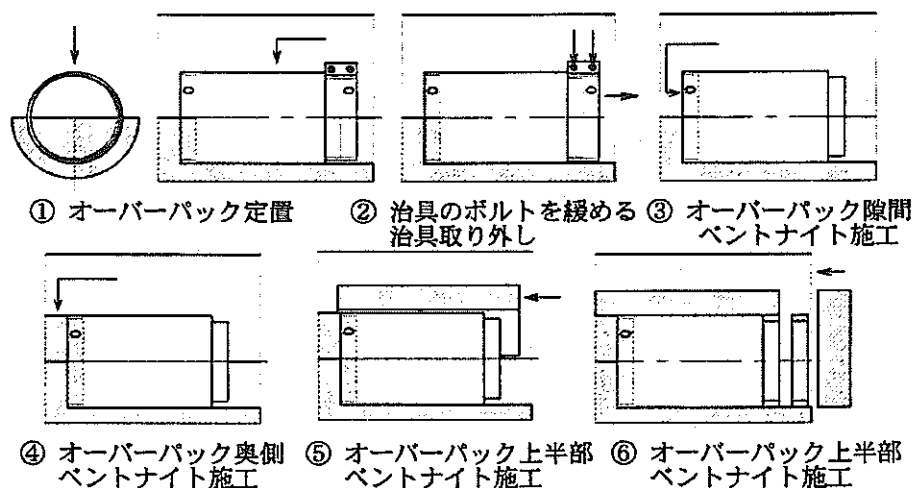


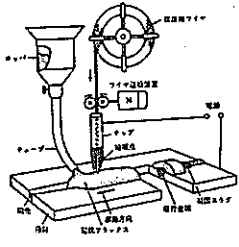
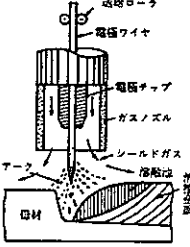
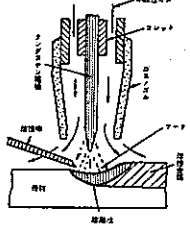
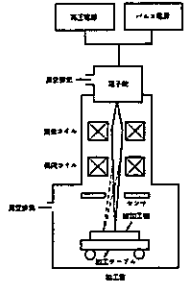
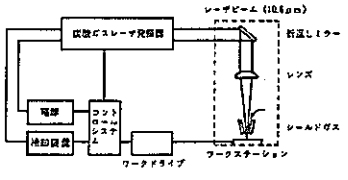
図 4-8 横置き定置手順

(2) 外容器蓋部の封入溶接

外容器の蓋部の封入溶接は内容器およびガラス固化体の挿入後に行われる。溶接方法の検討にあたり一般に用いられる代表的な溶接方法の比較を表 4-3 にまとめた。

蓋部の溶接には耐食層としての長期の健全性が求められる。表に示した各溶接方法のうち、電子ビーム溶接は真空中で溶材を使用せず施工するため不純物の混入の可能性が低く、かつ入熱密度が高く熱影響部の少ない溶接が可能であることから、外容器蓋部の溶接には適した方法と考えられる。本研究では電子ビーム溶接を適用する。

表 4-3 各種溶接法の比較

溶接方法	長 所	短 所
<p>サブマージアーク溶接</p> 	<p>母材上に溶材を置き、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>溶材に含まれる不純物が溶け込む</p>
<p>MIG 溶接</p> 	<p>不活性ガスアーク溶接法の一つで溶材は電極を兼ねる。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>溶材に含まれる不純物が溶け込む</p>
<p>TIG 溶接</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。不活性ガスアーク溶接法の一つ</p>	<p>入熱集中性は MIG 溶接に劣る 溶材に含まれる不純物が溶け込む</p>
<p>ろう付け</p>	<p>溶材を直接加熱し溶かして接合する</p>	<p>溶材に含まれる不純物が溶け込む</p>
<p>電子ビーム溶接</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。溶材を用いず真空中での加工のため不純物の溶け込みが無い。入熱密度も高く銅材料など熱伝導率の高い材料でも対応が容易</p>	<p>大規模な真空容器が必要 開先精度が要求される</p>
<p>レーザービーム溶接</p> 	<p>レーザーにより被溶接物を直接溶融させ接合する。溶材を用いないため不純物の溶け込みが少ない。</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く、数十 mm 厚さの銅材料の溶接には対応不可</p>

4.1.3 炭素鋼製内容器の構造検討

オーバーパックは地下約 1000 m の深さの地圧および側圧に十分耐える構造強度が必要であり、強度部材の役割を担う炭素鋼製内容器の板厚はかなり厚くなることが予想される。その製作方法については、製作段階において内部に巣の発生等が少なく、健全な組織を得られる鍛造法を採用することが望ましいと考えられる。また溶接線を極力少なくし検査箇所を減らすという観点から、本検討においては容器の底部と胴部を一体で鍛造成形した後、機械加工で最終寸法に仕上げる方法を採用する。

内容器の本体と蓋部の接合方法については、内容器は外容器と別構造とするため内容器に密閉性は求められない点から、溶接による方法とボルトによる方法の 2 通りが考えられる。溶接による接合はボルトによる接合に比較して、ボルト埋め込みに必要な余肉を持たせる必要がなく蓋接合部周辺の構造を小型化できる可能性があり、ボルトによる接合は工程の自動化が図りやすい利点がある。ボルトによる接合部の肉厚増加を検討した結果溶接構造の場合と大きな差は無く、ボルトによる接合が合理的であるといえる。

以下の図 4-9 に両者のガラス固化体封入までの加工手順の比較を示す。内容器の接合部の検査が少ない分ボルト止めの方が工程が少ない。

したがって本研究では炭素鋼製内容器の蓋の接合はボルトによる方法を採用する。

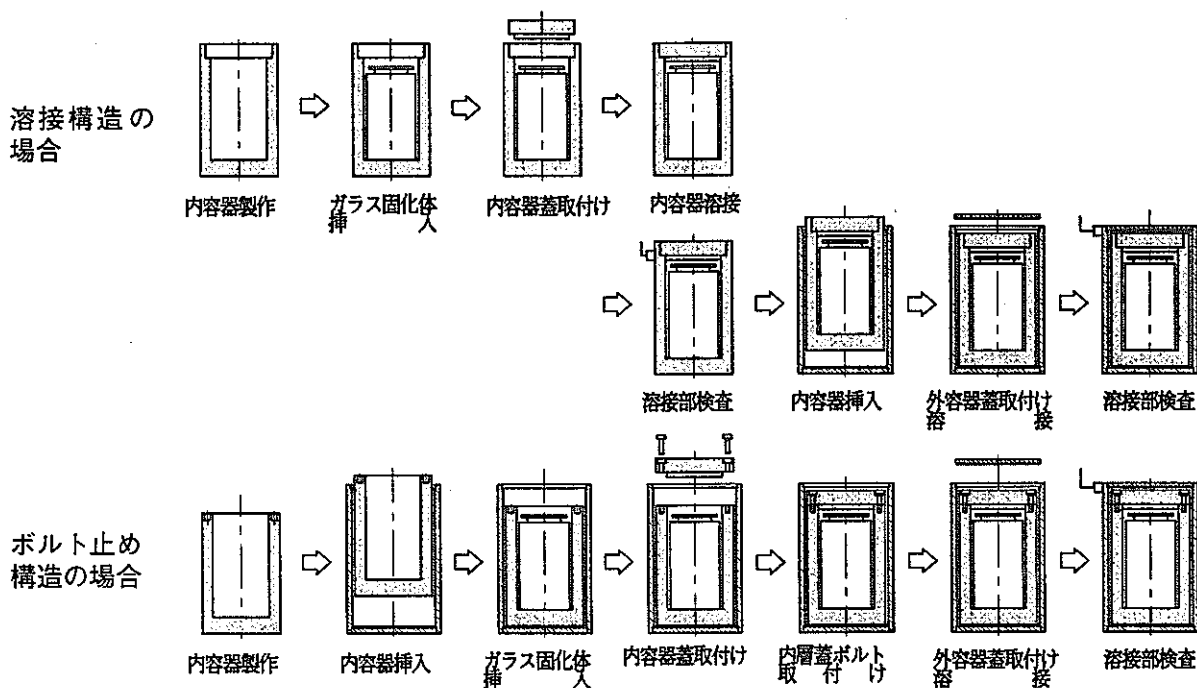
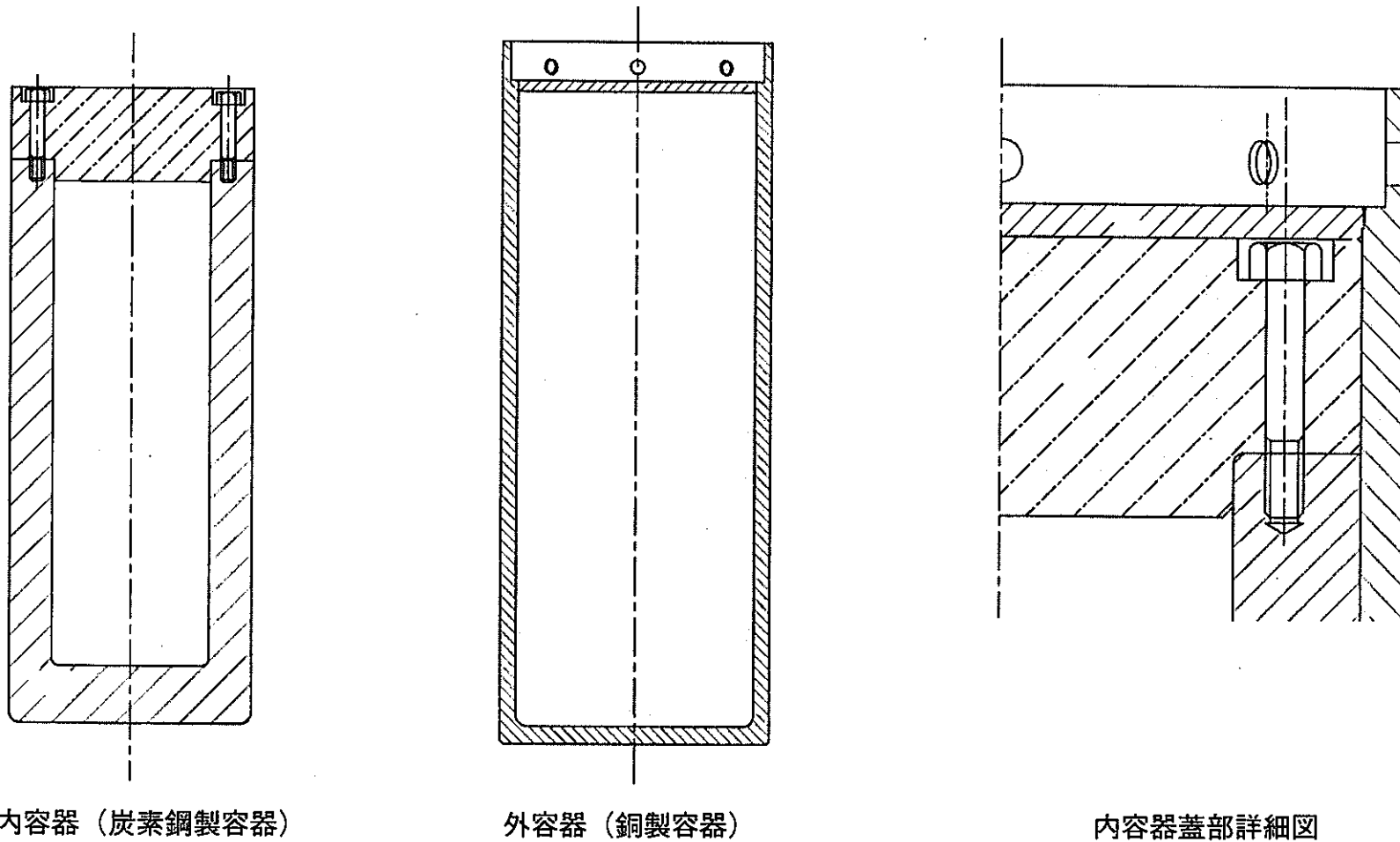


図 4-9 内容器蓋部を溶接構造とした場合およびボルト止め構造とした場合の加工手順

以上の検討に基づく複合オーバーパックの銅製外容器および炭素鋼製内容器の構造概念を縦置き定置の場合を例に図 4-10 に示す。



内容器 (炭素鋼製容器)

外容器 (銅製容器)

内容器蓋部詳細図

図 4-10 内容器および外容器の概念

4.2 詳細設計

以上の外容器内容器の構造概念検討結果に基づき詳細構造の検討を行う。

4.2.1 炭素鋼製内容器の形状と材質

炭素鋼製内容器は胴部と底部を一体鍛造により製作する。内容器の蓋についてはボルトにより本体と締結しガスケットは使用しないこととする。材質に関しては、耐熱性、耐食性耐放射線性、製作性等を有すると同時に、前章の検討結果をふまえて告示 501 号第 1 種容器として同告示別表第 1 に規定されている圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 SFVC2B (JIS G 3202) とする。

4.2.2 銅製外容器の形状

銅製外容器は前述の通り押出し加工によって底部と胴部を一体成形した後、機械加工により所定の寸法に仕上げる。炭素鋼製の内容器を挿入の後、蓋と外容器本体を電子ビーム溶接により接合する。溶接部開先形状はビーム突き抜けを防止をするためフラット部を備える構造とする。また、オーバーパック最終組立品として搬送・定置する際には外容器を把持することとなるため、吊上げ部（スカート部）に必要な板厚を確保する必要がある。この際に銅の腐食代については軟岩系堅置き定置の場合の検討結果である 1000 年間で 14 mm⁽⁸⁾ をもとに、丸めて 20 mm と設定した。

4.2.3 外容器と内容器のクリアランス

炭素鋼製内容器と銅製内容器とのクリアランスはスウェーデン SKB 使用済み燃料用キャニスタ (3.1 項参照) を参考に、片側 2 mm と設定する。

4.2.4 炭素鋼製内容器の寸法設定

4.2.4.1 前提条件

内容器の板厚計算にあたり、前提条件を以下に示す。

(1) 処分条件

- ①岩盤湿潤密度： 2.65 kg/cm³
- ②側圧係数： 1.32
- ③処分深度： 1000 m
- ④オーバーパックが曝される温度： 150°C

(2) ガラス固化体仕様

- ①形状：φ 430×1340 H
- ②熱膨張 (150°C 時)：直径方向 0.91 mm
軸方向 2.82 mm

(3) 外荷重値 (外圧値)

- ①垂直方向圧力： 26.0 MPa
- ②水平方向圧力： 34.3 MPa

4.2.4.2 板厚の計算

(1) 胴部の板厚

告示 501 号第 13 条第 2 項第 1 号イ (ロ) に示す P_a の式より板厚 t を求める。最大外圧には水平方向の 34.3 MPa を用い、これを内容器が受ける。外容器の強度寄与は安全側に無視する。

$$P_a = \left(\frac{2.167t}{D_o} - 0.833 \right) B \quad \text{より,} \quad t = \frac{D_o \left(\frac{P_a}{B} + 0.833 \right)}{2.167} \quad \text{①}$$

または

$$P_a = \frac{2St}{D_o} \left(1 - \frac{t}{D_o} \right) \quad \text{より,} \quad t = \frac{D_o}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2P_a}{S}} \right) \quad \text{②}$$

のうち、 t の大きい方を選ぶ。ここに、 S は 1.5×別表 2 または 0.9×別表 9 のいずれか小さい方の値をとる。(ここでは 0.9×別表 9)

①式において、 $D_o = 440 + 2t$ を代入すると、

$$t = \frac{440 + 2t}{2.167} \left(\frac{P_a}{B} + 0.833 \right) \quad \text{③}$$

ここに、 $P_a = 34.3$ 、 B は t 、 D_o 、 L から決まる係数である。使用材料は SFVC2B (JIS G 3202 圧力容器用炭素鋼鍛鋼品) であるから、告示 501 号別表第 9 より 150°C における設計降伏点は 220 N/mm² となる。一方、 $L/D_o = 2.56$ 、 $D_o/t = 5.67$ (ここで $L = 1505$ 、 $t = 120$ と仮定) であるから、告示 501 号別図第 5 より $A \approx 0.04$ となり、別図第 7 より $B \approx 120$ となる。

したがって③式は

$$t = \frac{440 + 2t}{2.167} \left(\frac{34.3}{120} + 0.833 \right)$$

$$t = 113.6 \text{ mm}$$

したがって胴部板厚はこれを丸めて

$t = 120 \text{ mm}$ とする。

$$\text{ちなみに②式からは,} \quad t = \frac{440 + 2t}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 34.3}{0.9 \times 220}} \right)$$

より $t = 52.1$ を得るが、前述の $t = 113.6$ より

小さい値のため採用しない。

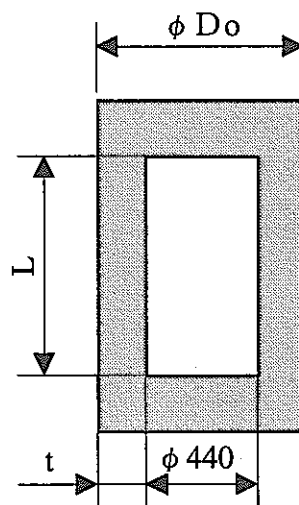


図 4-11 内容器板厚計算モデル

以上の計算から、内容器の外径 D_o は、ガラス固化体外径 $\phi 430$ に胴部板厚 120×2 を加え、隙間を片側 5 mm ずつ考慮した $\phi 680 \text{ mm}$ とする。

(2) 底部の板厚

告示 501 号第 1 種容器の規定には平板の式が無いため、第 2 種容器に規定される平板の式 (第 24 条) を用いる。

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

ここに、 d : 内径 440 mm

P : 最高使用圧力、ここでは 34.3 MPa (=34.3 N/mm²) を用いる。

K : 0.5 (第 24 条より)

S : 132 N/mm² (別表第 4 より)

よって

$$t = 440 \sqrt{\frac{0.5 \times 34.3}{132}} = 158.6$$

したがって底部板厚はこれを丸めて 160 mm とする。

(3) 蓋部の板厚

(2)と同様に、

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

において $d = 440$ mm とすると、 $t = 158.6$ となり、蓋部板厚はこれを丸めて 160 mm となる。 d を締付け用ボルトのピッチサークルダイア (予備検討から 536 mm) とすると (第 24 条(a)) ,

$$t = 536 \sqrt{\frac{0.5 \times 34.3}{132}} = 193.2 \text{ となる。}$$

したがって、ボルト座ぐり下面より蓋底面までの厚さを 160 mm、座ぐり部を除いた蓋の厚さは 193.2 を丸めて 200 mm とする。

(4) 内容器蓋インロー部の強度評価

内容器蓋はインロー部（段付部）がオーバーパック内面に入り込んでいるため、蓋が外圧によって水平に移動しようとする場合、図 4-12 に示す内容器 A 部および蓋本体にせん断力が作用する。

$$\begin{aligned} \text{水平外力は } & 34.3 \text{ N/mm}^2 \times 200 \times 680 \\ & = 4.665 \times 10^6 \text{ N} \text{ とする。} \end{aligned}$$

① 側圧による胴部の A 部のせん断応力評価

A 部の断面積は

$$\begin{aligned} S_A &= \frac{\pi}{4} (680^2 - 440^2) \times \frac{1}{2} \\ &= 1.06 \times 10^5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

したがって A 部のせん断応力 τ は

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{4.665 \times 10^6}{1.06 \times 10^5} \\ &= 44.43 \text{ N/mm}^2 \text{ となる。} \end{aligned}$$

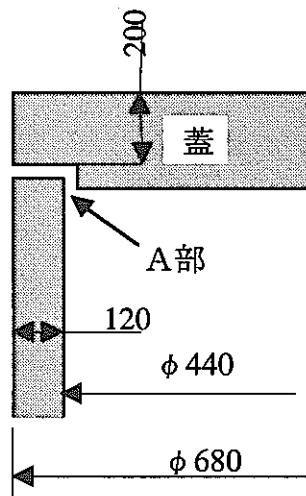


図 4-12 インロー部強度評価モデル

一方 SFVC2B の許容せん断応力は告示 501 号第 13 条第 1 項第 1 号チより $\tau_a = 0.6 \times 147 = 88.2 \text{ N/mm}^2$ であるから $\tau_a > \tau$ となる。したがって A 部がせん断により降伏することはない。

② 側圧による胴部 B 面のせん断応力評価

B 部の断面積は

$$\begin{aligned} S_B &= \frac{\pi}{4} (440^2) \times \frac{1}{2} \\ &= 7.6 \times 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

したがって B 部のせん断応力 τ は

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{4.665 \times 10^6}{7.6 \times 10^4} \\ &= 61.38 \text{ N/mm}^2 \text{ となる。} \end{aligned}$$

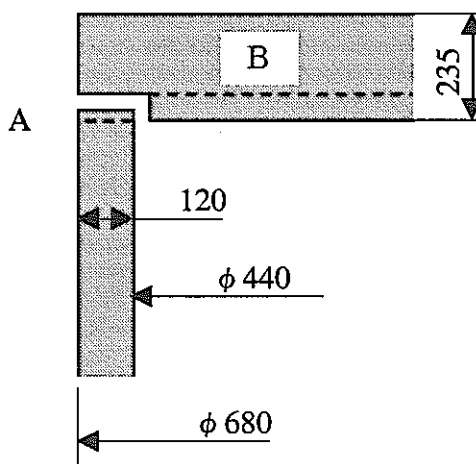


図 4-13 外容器上部強度評価モデル

一方 SFVC2B の許容せん断応力は①と同様に $\tau_a = 0.6 \times 147 = 88.2 \text{ N/mm}^2$ であるから $\tau_a > \tau$ となる。したがって B 部がせん断により降伏することはない。

③ インロー部圧縮応力評価

受圧面積はインロー部高さを 60 mm とすれば

$$S_c = \pi \times 440 \times 50 = 6.91 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

したがって圧縮応力 σ は

$$\sigma = \frac{4.665 \times 10^6}{6.91 \times 10^4}$$

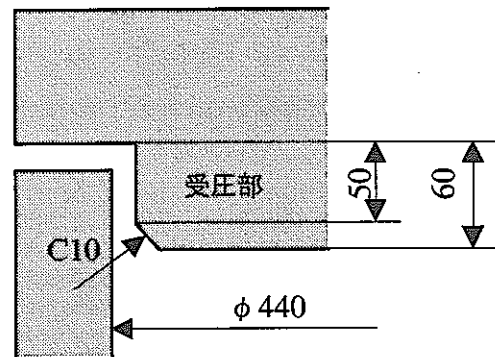


図 4-14 インロー部圧縮応力評価モデル

一方 SFVC2B の設計降伏応力は告示 501 号別表第 9 より $\sigma_y = 220 \text{ N/mm}^2$ であるから $\sigma_y > \sigma$ となる。したがってインロー部が圧縮により降伏することはない。

(5) ボルトのサイズと本数

オーバーパック上蓋は閉止フランジと見なせるので JIS に規定される閉止フランジを参考にボルトの太さと本数を求める。構造的には蓋インロー部で水平および垂直方向の外力を受けるため、ボルトに直接外力が作用することはない。想定外力から JIS B 2220 30K 閉止フランジ（外径 $\phi 630$ ）を参考とすれば、ボルトのサイズは M36×3、本数は 16 本となっておりこれを採用する。材質については、インロー部が無く、全外力をボルトで受ける場合について計算して決定する。

M36×3 のボルトの有効径は $\phi 32.752$ であることからボルト 1 本あたりに作用するせん断応力は

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{4.665 \times 10^6}{\frac{\pi}{4} \times 32.752 \times 16} \\ &= 346 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

上記の値を考慮し、ボルトの材質は Ni-Cr 合金鋼（高張力鋼：JIS G 4108）の SNB24-1 とする。告示 501 号別表第 3 より SNB24-1 の許容引張応力は

$$\sigma_y = 1030 \text{ N/mm}^2$$

一般にせん断応力 $\tau = 0.6 \times$ 許容引張応力の関係となるため、許容せん断応力は $\tau_a = 0.6 \times 1030 = 618 \text{ N/mm}^2$ である。したがって $\tau_a > \tau$ となり、インロー部が無く全外力をボルトで受ける場合でもボルトがせん断により破壊することはない。

以上の結果から、内容器の高さは、ガラス固化体高さ 1340 mm + 底部板厚 160 mm + 蓋部板厚 200 mm + インロー部 60 mm に隙間 5 mm を考慮した 1765 mm とする。

4.2.5 銅製外容器の寸法設定

外容器は内容器と異なり強度部材でないため外圧に対する強度は必要ない。したがってハンドリングに対する強度を考慮し底部および吊上げ部について応力評価を実施する。

(1) 外容器底部の板厚と応力評価

胴の許容曲げ応力の計算は使用温度を 150°C として行う。降伏応力は $\sigma_y = 50 \text{ N/mm}^2$ を用いる。⁽³⁾

したがって許容せん断応力は、
 $\tau_a = 0.6 \times 50 = 30 \text{ N/mm}^2$ である。

ここで外容器の寸法を図 4-15 に示すとおり設定する。底部の板厚を 50 と仮定する。

廃棄体全荷重（余裕を考慮し 6000 kgf とする）が底部に作用すると仮定すると、底板の付根に作用するせん断応力は、

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{6000 \times 9.8066}{\pi \times 684 \times 50} \\ &= 0.55 \text{ N/mm}^2 < \tau_a \end{aligned}$$

曲げ応力 σ_b は、

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 0.75 \frac{Pa^2}{h^2} \\ &= 0.75 \frac{(6000 - 1648.4) \times 9.8066}{\frac{1}{4} \pi \times (684)^2} \times (342)^2 \\ &= 4.08 \text{ N/mm}^2 < \sigma_y \end{aligned}$$

以上の結果より、最も厳しい条件である両端単純支持で廃棄体全重量を受ける場合でも上記で設定した寸法であれば外容器の底部が降伏することはない。

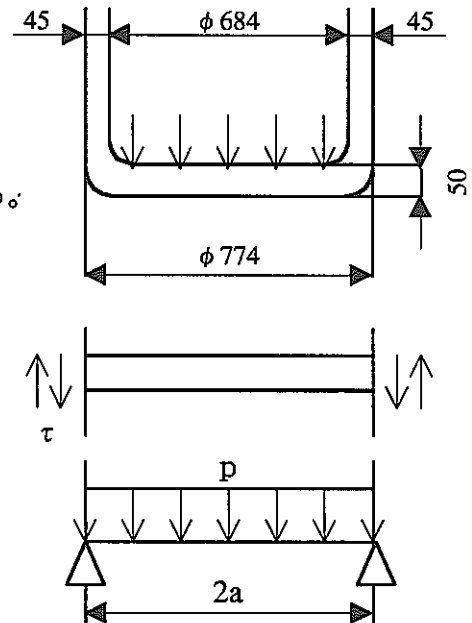


図 4-15 外容器底部の応力評価

- (2) 吊上げ部（スカート部）の引張応力評価
吊上げ部の寸法を図 4-16 のように設定する。

吊上げ部に作用する引張応力は、

$$\sigma = \frac{6000 \times 9.8066}{\frac{\pi}{4} \times (774^2 - 728^2) - 4 \times (40 \times 23)}$$

$$= 1.16 \text{ N/mm}^2 < \sigma_y$$

したがって、吊上げ部が引張応力で破断することはない。

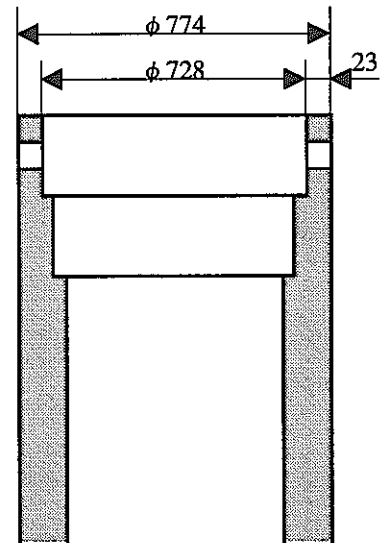


図 4-16 吊上げ部モデル

- (3) 吊上げ部（スカート部）穴の応力評価

スカート部には図 4-17 に示す寸法にて吊上げ用の穴を合計 8 個の $\phi 40$ の穴を開けることとするが、実作業時は 4 箇所の穴でハンドリングすることとして、穴に作用するせん断応力は

$$\tau = \frac{6000 \times 9.8066}{4 \times 50 \times 23}$$

$$= 12.8 \text{ N/mm}^2 < \tau_a$$

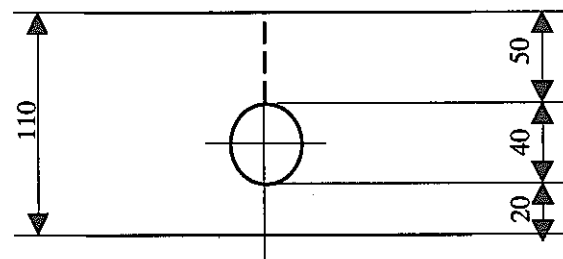
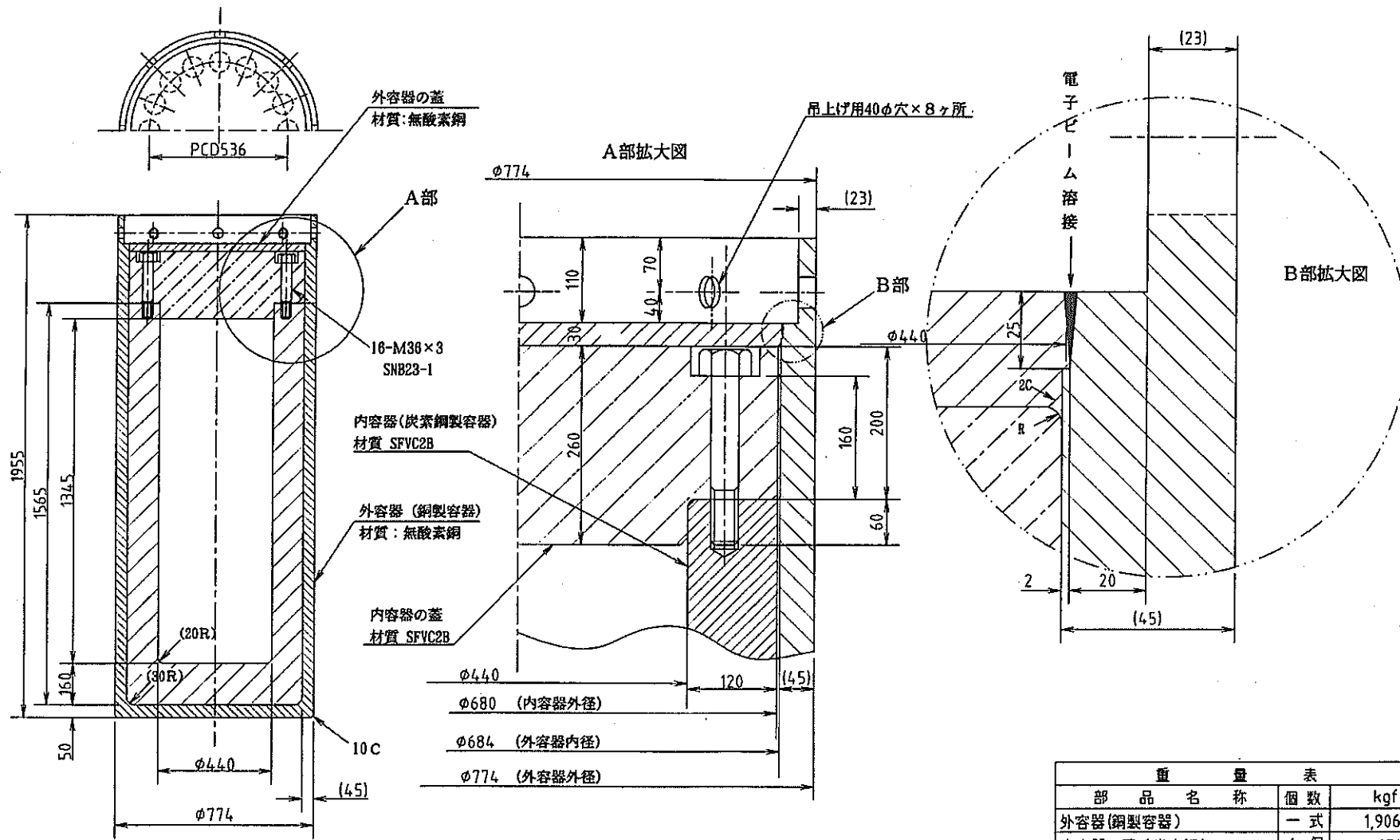


図 4-17 吊上げ穴部モデル

したがって吊上げ部（スカート部）の穴はせん断が作用しても破断しない。

以上、内容器、外容器の各寸法の計算結果を踏まえ設計したオーバーパックの詳細図を図 4-18 に示す。また 4.1 項で検討した結果を考慮した製作、組み立て、検査のフローを図 4-19 に示す。



重量表		
部品名称	個数	kgf
外容器(鋼製容器)	一式	1,906
内容器の蓋(炭素鋼)	1個	671
内容器(炭素鋼製容器蓋除く)	一式	2,689
小計(オーバーパック合計)	一式	5,266
ガラス固化体	一式	約 500
総合計(廃棄体全重量)	一式	約5,800

図 4-18 銅-炭素鋼 複合オーバーパック 詳細図

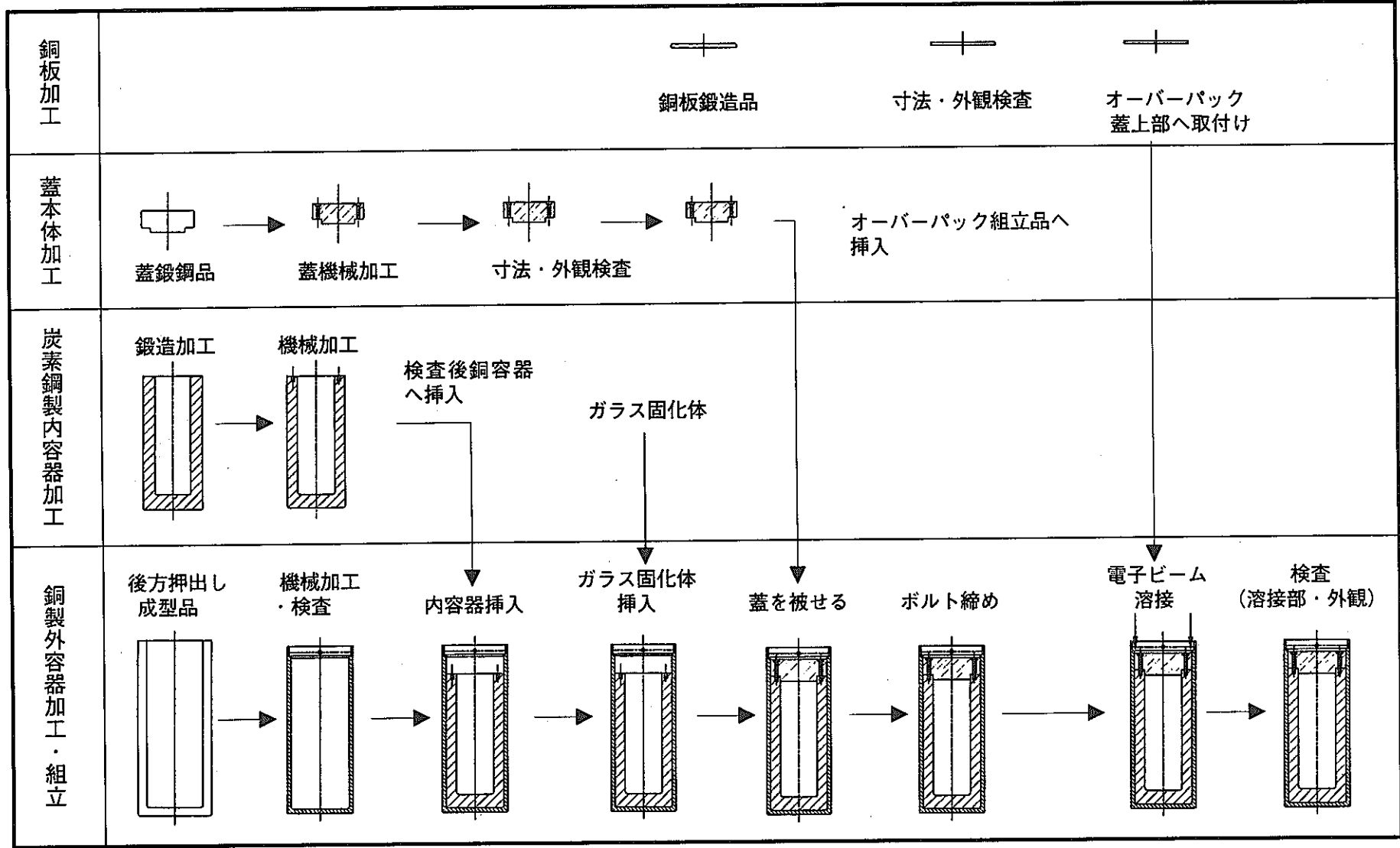


図 4-19 オーバーパック加工・組立・検査フロー図

4.3 応力解析

以上のとおり設計したオーバーパックに生じる応力解析を処分時に豎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 豎置き定置の場合

(1) 解析条件

- ① 計算コード : NASTRAN
- ② 解析モデル : 軸対象 (90°) 1/4 ソリッドモデル
- ③ 炭素鋼物性値: ヤング率 $1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (告示 501 号 別表第 11)
炭素含有量 0.3% 以下
ポアソン比 0.3
設計応力強さ 147 N/mm^2 (150°C) (告示 501 号 別表第 2)
- ④ 外荷重 : 垂直荷重 26.0 MPa 水平荷重 34.3 MPa

(2) 解析結果

図 4-20 に解析モデルを、図 4-21 に解析結果をそれぞれ示す。解析結果には変形を同時に示すが、実際の変形量を 5 倍に拡大して表示している。

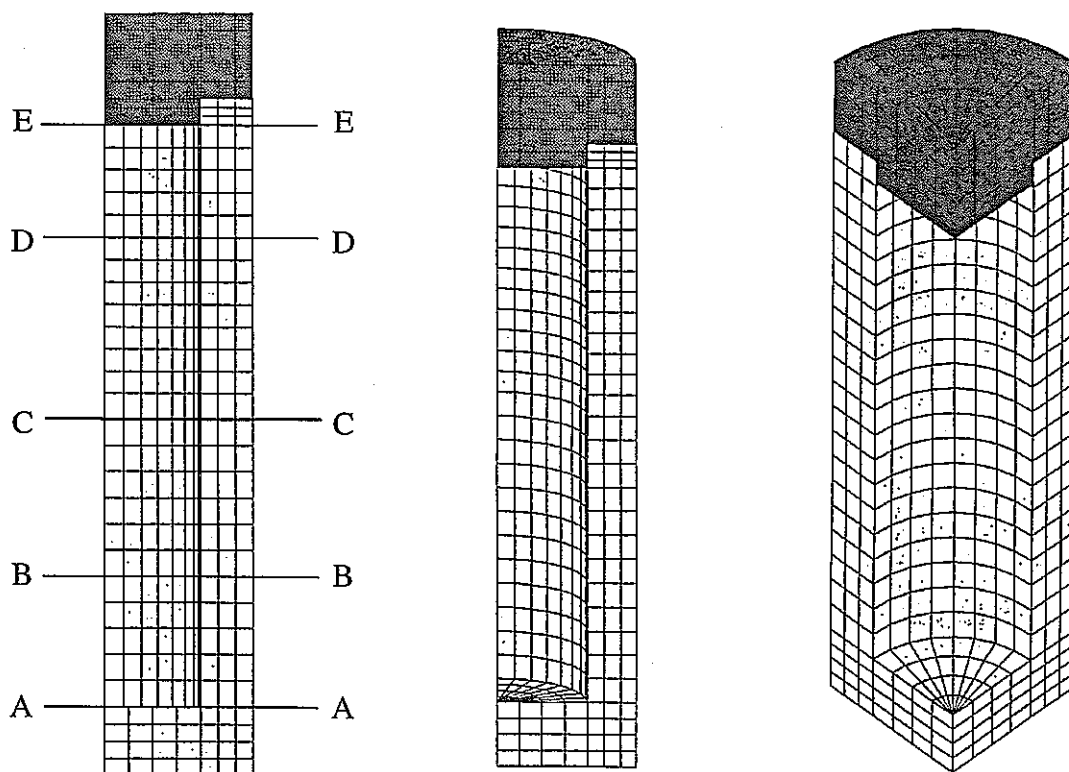


図 4-20 解析モデル図 (豎置き定置の場合)

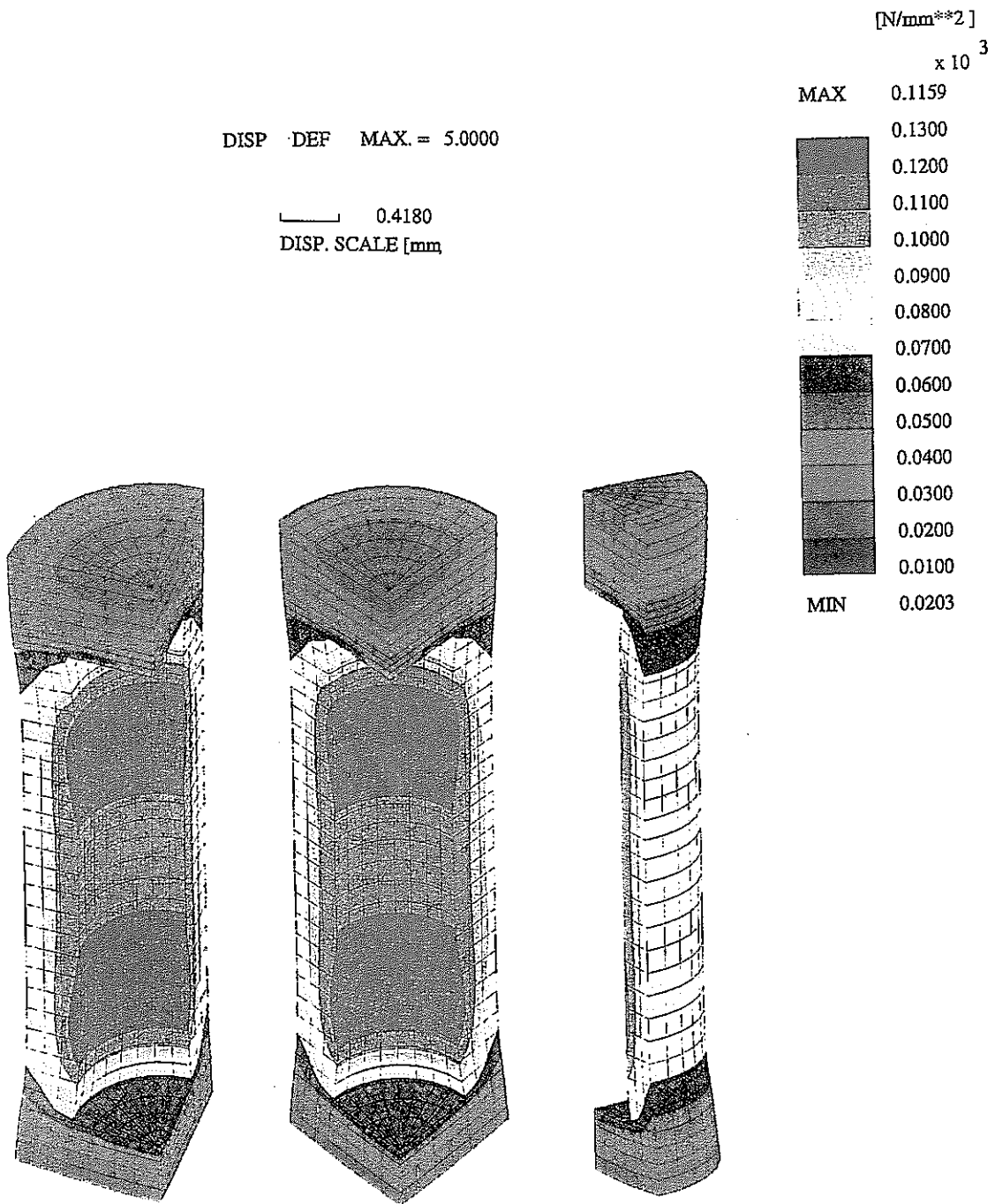


図 4-21 解析結果 (豎置き定置の場合)

(3) 評価

応力評価は告示 501 号第 13 条に基づいて行う。

① 一次一般膜応力強さ P_m については $P_m \leq S_m$ 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 一次局部膜応力強さ P_l については $P_l \leq 1.5 S_m$ であること

③ 一次膜応力と一次曲げ応力を加えた応力強さ ($P_m + P_b$) については $(P_m + P_b) \leq 1.5 S_m$ であること

解析結果よりどの要素の膜応力も $1.1S_m$ 以下であるため告示 501 号で定義されている局部膜応力は発生していない。したがって上記②は該当しない。評価位置は図に示す解析モデル図の通り、底部と胴部の付け根付近 (A-A 断面)、中央よりやや下方の位置で応力が最大となっている付近 (B-B 断面)、中央付近 (C-C 断面)、これらと対称形になっている中央よりやや上方の位置で応力が最大となっている付近 (D-D 断面) および蓋と胴体の付け根付近 (E-E 断面) の 5 箇所とした。応力評価結果を表 4-4 に示す。

表 4-4 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 P_l	許容値 $1.5S_m$
A-A	64.4	147	75.3	220.5
B-B	98.5	147	116.4	220.5
C-C	96.9	147	108.8	220.5
D-D	98.2	147	115.6	220.5
E-E	60.7	147	69.4	220.5

以上の応力評価の結果、一次一般膜応力強さは設計応力強さ未満であり、一次一般膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さも設計応力強さの 1.5 倍未満であるので、オーバパックの健全性は維持される。

4.3.2 横置き定置の場合

(1) 解析条件

- ① 計算コード : NASTRAN
- ② 解析モデル : 軸対象 (90°) 1/8 ソリッドモデル
- ③ 炭素鋼物性値 : ヤング率 $1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (告示 501 号 別表第 11)
炭素含有量 0.3%以下
ポアソン比 0.3
設計応力強さ 147 N/mm^2 (150°C) (告示 501 号 別表第 2)
- ④ 外荷重 : 垂直荷重および水平荷重ともに 34.3 MPa

(2) 解析結果

図 4-22 に解析モデルを、図 4-23 に解析結果をそれぞれ示す。解析結果には変形を同時に示すが、実際の変形量を 5 倍に拡大して表示している。

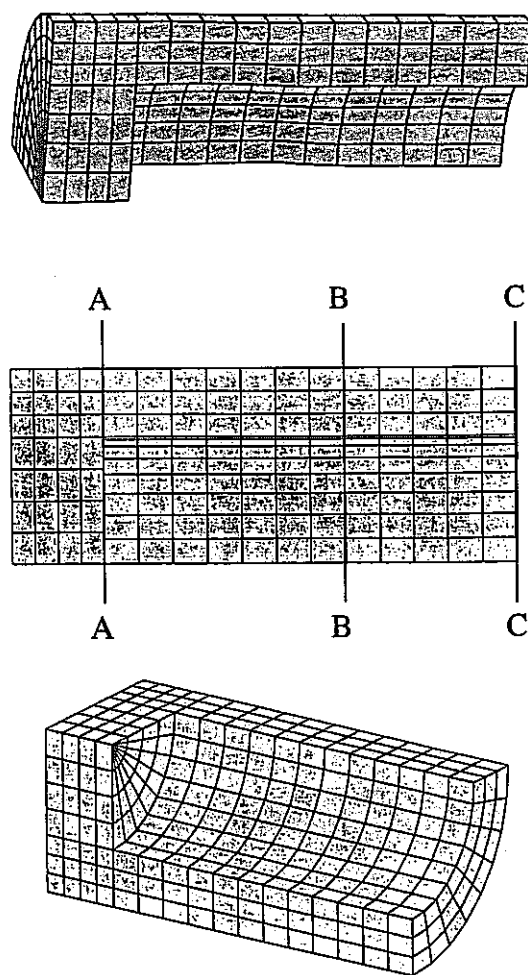


図 4-22 解析モデル図 (横置き定置の場合)

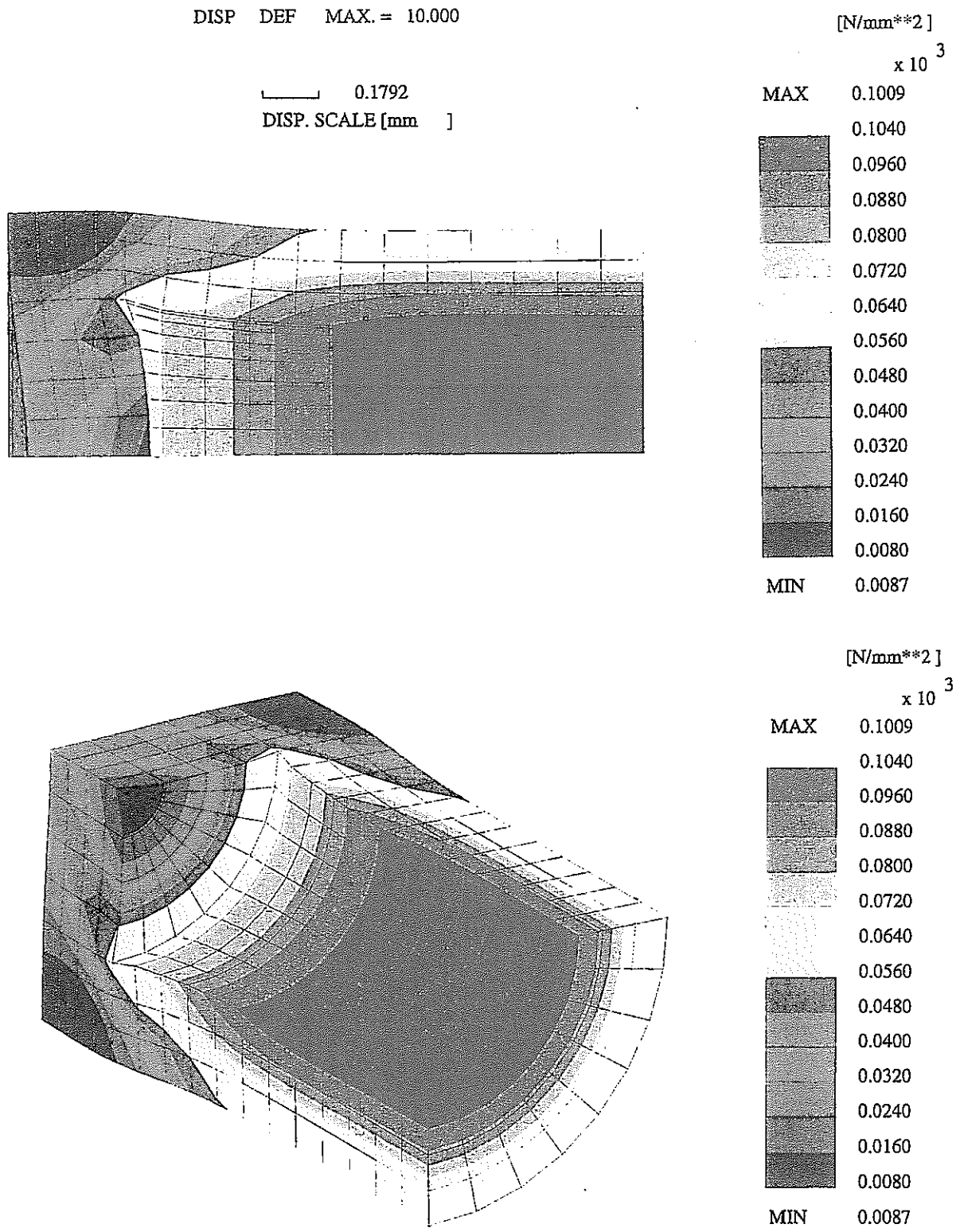


図 4-23 解析結果（横置き定置の場合）

(3) 評価

縦置き定置の場合と同様に評価を行う。解析結果よりどの要素の膜応力も $1.1S_m$ 以下であるため告示 501 号で定義されている局部膜応力は発生していない。したがって②は該当しない。評価位置は図 に示す解析モデル図の通り、底部と胴部の付け根付近 (A-A 断面)、中央付近 (B-B 断面)、対称境界面 (C-C 断面)、の 3 箇所とした。応力評価結果を表 4-5 に示す。

表 4-5 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 P_m	許容値 S_m	(膜+曲げ) 応力強さ P_l	許容値 $1.5S_m$
A-A	26.9	147	75.4	220.5
B-B	76.2	147	101.0	220.5
C-C	74.9	147	100.0	220.5

以上の応力評価の結果、一次一般膜応力強さは設計応力強さ未満であり、一次一般膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さも設計応力強さの 1.5 倍未満であるので、オーバーパックの健全性は維持される。

5. オーバーパックの放射線損傷に関する検討

複合オーバーパックはガラス固化体と接する内層を炭素鋼、外層をチタンあるいは銅などの耐食性金属とし、構造強度は炭素鋼の内層で確保する。したがって、オーバーパックの設計には炭素鋼の特性値を設定する必要がある。

ガラス固化体からは、主に α 線、 β 線、 γ 線、中性子線が放出され、オーバーパック材料への照射により原子をはじき出し機械的性質に影響を及ぼす。このうち α 線と β 線は飛程が短くその大部分がガラス固化体中で吸収され、ガラス固化体表面近傍からの炭素鋼中への飛程は数 μm 以下と考えられるため構造材としての炭素鋼への影響はほとんど無視できる。残る γ 線、中性子線については炭素鋼の機械的性質に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

ここでは処分中にオーバーパックの炭素鋼が受ける放射線損傷について検討した。

5.1 炭素鋼の放射線損傷⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

放射線による原子のはじき出しに起因する炭素鋼（フェライト鋼）の機械的性質の変化として、一般に照射脆化と照射硬化が挙げられる。前者は延性－脆性遷移温度（DBTT：Ductile-Brittle Transition Temperature）の上昇として、後者は強度の上昇として検出される。特に DBTT の変化は炭素鋼の放射線損傷に対する抵抗性を判断する代表的な機械的性質と考えられている。⁽¹⁰⁾

材料の DBTT 変化は放射線の種類、エネルギー、照射量と関係が深い材料原子あたりのはじき出し数（dpa）の概念を導入することにより、これらの異なる放射線環境下での DBTT 変化を比較することができる。

dpa は以下の式で表される。⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾

$$dpa = \int_0^{tr} \int_0^{\infty} \sigma_d(E) \phi(E, t) dE dt$$

ここで、

- $\sigma_d(E)$: はじき出し断面積
- $\phi(E, t) dE$: 時刻 t におけるエネルギー E と $E+dE$ の間の入射粒子のフラックス
- tr : 照射時間

もし $\phi(E, t)$ が時間に依存せず $\phi(E)$ で一定で、エネルギーがいくつかの群に離散化されていると、dpa は以下のように記述される。

$$dpa = tr \int_0^{\infty} \sigma_d(E) \phi(E) dE \approx tr \sum_{i=1}^N (\sigma_d)_i \phi_i \Delta E_i = tr \sum_{i=1}^N (\sigma_d)_i (\phi_{tot})_i$$

ここで、

- $(\sigma_d)_i, \phi_i$: エネルギー $E_i < E < E_{i+1}$ の i 群の平均値
 ΔE_i : i 群のエネルギー幅 ($E_{i+1} - E_i$)
 $(\phi_{tot})_i$: i 群の全フラックス
 N : 群の総数

γ 線に対する鉄のはじき出し断面積⁽¹⁴⁾を図 5-1 に示す。ここでははじき出し断面積は鉄の電子当たりの値となっている。はじき出し断面積は γ 線のエネルギー上昇とともに増加する傾向がある。また中性子線に対する鉄のはじき出し断面積を図 5-2 に示す⁽¹³⁾。中性子の場合には γ 線と比較してかなり傾向は異なっている。

5.2 オーバーパックの炭素鋼の dpa

5.2.1 フラックス計算

5.2.1.1 計算方法

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み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。

②線源強度

線源強度は以下の値を使用した。

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 5-1 および表 5-2 に示す値⁽¹⁵⁾を使用した。

(2) 計算コードおよび核データ

γ 線源および中性子線源の計算は、ともに2次元輸送計算コード DOT-3.5 を使用し、核データとして DLC-23E ライブラリを使用した。

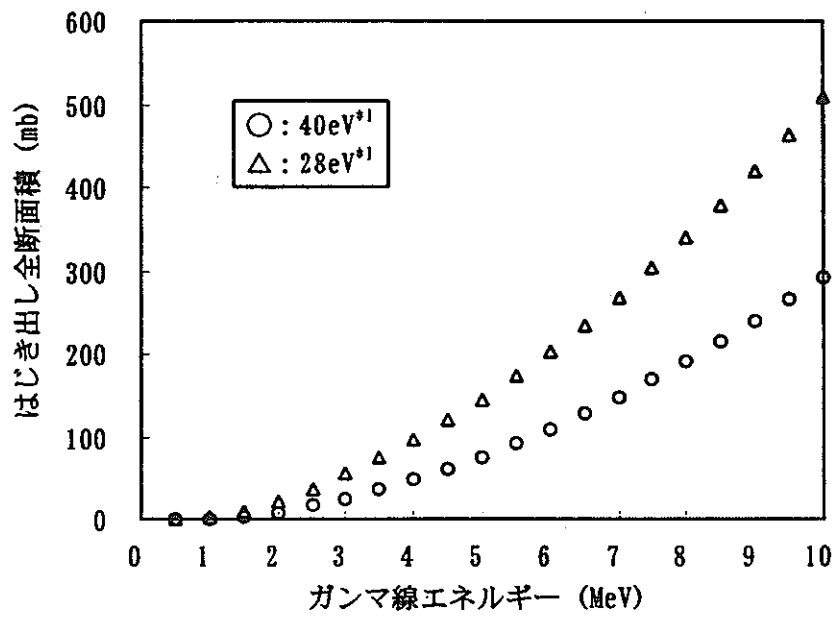


図 5-1 γ 線に対する鉄のはじき出し断面積
(*1: はじき出しエネルギーのしきい値)

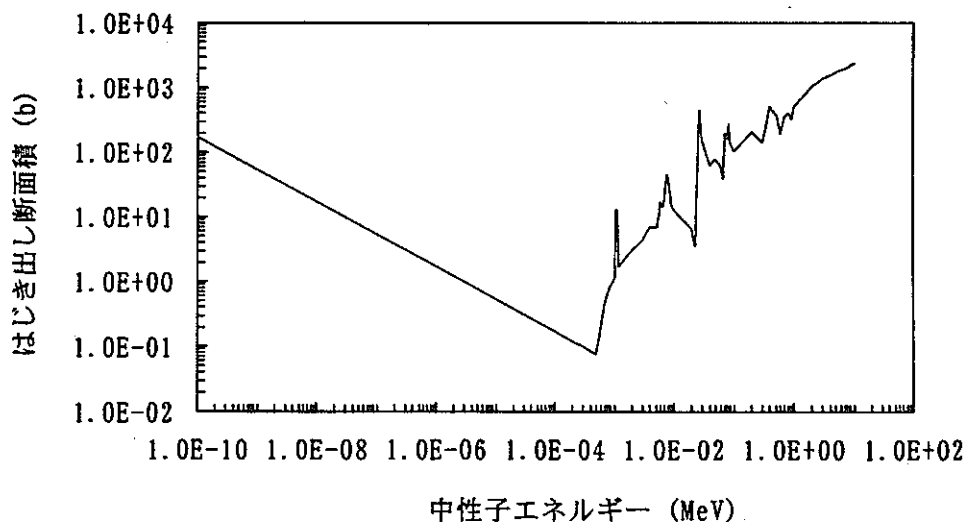


図 5-2 中性子エネルギーの関数としてプロットされた鉄のはじき出し断面積⁽¹³⁾

表 5-1 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 ($\gamma/\text{sec}/\text{本}$)
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 ORIGEN2 構造である。

表 5-2 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 ($\text{n}/\text{sec}/\text{本}$)
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、 $\text{Cm-242} (\alpha, \text{n})$ 反応のエネルギースペクトルである。

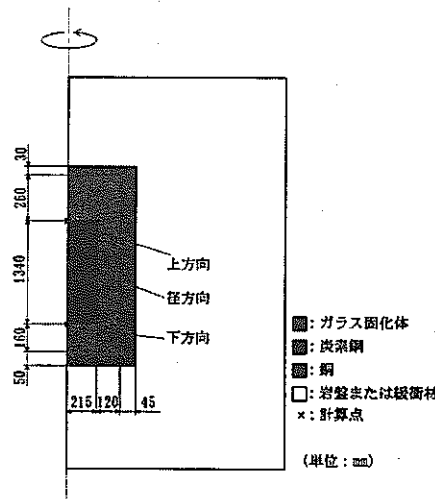
(3) 計算モデル

地層処分後のオーバーパックを模擬し、円筒形として計算のモデル化を行った。ガラス固化体の形状および寸法については、六ヶ所高レベル廃液固化貯蔵施設のガラス固化体キャニスタにおける外形寸法とし、キャニスタの厚さは考慮しない。腐食を想定しオーバーパックの銅容器部分を考慮する場合と考慮しない場合の2条件設定した。フラックスの計算点としては、 γ 線源の場合炭素鋼の周囲を銅さらにその周囲を岩盤と設定する。

以上による計算モデルを図 5-3 に示す。

(4) 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 5-3 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。またオーバーパックの材料については現実的な値を設定し、岩盤については火成岩平均組成を使用した。緩衝材としては100%ベントナイト（クニゲルV1）とし圧縮密度を 1.8g/cm^3 （乾燥密度）⁽¹⁾、含水比は放射線に対する反射材としての保守性の観点から18.5%（飽和状態）とした。



計算ケース		
線源	岩盤または緩衝材の選択	オーバーパックの銅の有無
γ 線	岩盤	有
中性子	岩盤	有
	緩衝材	有
	岩盤	無
	緩衝材	無

図 5-3 フラックス計算モデル（円筒体系）

表 5-3 (1/2) 計算に使用した物質の組成および密度
ガラス固化体 (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	1.26E-03
O	47.7	1.24	4.66E-02
Na	7.42	0.193	5.05E-03
Al	2.65	0.0689	1.54E-03
Si	21.8	0.566	1.21E-02
Ca	2.14	0.0556	8.35E-04
Zn *1	2.40	—	—
Mo *3	10.2	0.265	1.66E-03

*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 およびアクチノイド酸化物を Mo で代用する。

炭素鋼 (密度: 7.85 g/cm³)

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm ³)	原子個数密度 (atoms / b·cm)
Fe	100	7.85	8.465E-02

注: SFVC2B (JIS G 3202) 密度の出典: JIS G 3193

銅 (密度: 8.94 g/cm³)

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm ³)	原子個数密度 (atoms / b·cm)
Cu	100	8.94	8.472E-02

注: C1011 (JIS H 3510) 密度の出典: 日本伸銅協会「伸銅品データブック」

表 5-3 (2/2) 計算に使用した物質の組成および密度

岩盤 (平均火成岩組成) (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)
H	1.29E-01	3.35E-03	2.00E-03
C	2.73E-02	7.10E-04	3.56E-05
O	4.69E+01	1.22E+00	4.59E-02
Na	2.85E+00	7.41E-02	1.94E-03
Mg	2.10E+00	5.46E-02	1.35E-03
Al	8.12E+00	2.11E-01	4.71E-03
Si	2.76E+01	7.18E-01	1.54E-02
P *1	1.31E-01	3.41E-03	6.62E-05
K	2.60E+00	6.76E-02	1.04E-03
Ca	3.63E+00	9.44E-02	1.42E-03
Ti	6.29E-01	1.64E-02	2.06E-04
Mn	9.29E-02	2.42E-03	2.65E-05
Fe	5.11E+00	1.33E-01	1.43E-03

出典: 無機地球化学 (培風館)

*1: DLC-23E ライブラリにない P は計算上考慮しない。

緩衝材 (ベントナイト: クニゲル V 1) (密度: 2.13 g/cm³)

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm ³)	原子個数密度 (atoms / b·cm)
H	1.75E+00	3.73E-02	2.23E-02
O	5.61E+01	1.20E+00	4.50E-02
Na	1.66E+00	3.53E-02	9.25E-04
Mg	1.17E+00	2.50E-02	6.19E-04
Al	6.76E+00	1.44E-01	3.22E-03
Si	2.95E+01	6.30E-01	1.35E-02
K	1.79E-01	3.82E-03	5.89E-05
Ca	1.31E+00	2.80E-02	4.20E-04
Fe	1.56E+00	3.33E-02	3.59E-04

出典: 製品カタログ記載値 密度は圧縮密度 1.8 g/cm³ (乾燥密度) 含水比 18.5% (飽和状態) として算出

5.2.1.2 計算結果

(1) γ 線源

フラックスの計算結果を表 5-4 に示す。

(2) 中性子線源

各計算ケースの全フラックスを表 5-5 に示す。また全フラックスが最大となる [岩盤+銅] のケースについて、そのフラックスのエネルギースペクトルを表 5-6 に示す。

表 5-4 γ 線源のフラックス計算結果

上限エネルギー (MeV)	径方向		上方向		下方向	
	フラックス (γ /s/cm ²)	dpa (1000年)	フラックス (γ /s/cm ²)	dpa (1000年)	フラックス (γ /s/cm ²)	dpa (1000年)
1.00E+01	2.18E+00	5.24E-13	2.14E+00	5.14E-13	2.14E+00	5.14E-13
8.00E+00	1.39E+01	2.18E-12	1.37E+01	2.15E-12	1.37E+01	2.15E-12
6.50E+00	8.17E+01	8.55E-12	8.10E+01	8.48E-12	8.10E+01	8.48E-12
5.00E+00	7.70E+01	4.76E-12	7.65E+01	4.73E-12	7.65E+01	4.73E-12
4.00E+00	3.26E+02	1.26E-11	3.26E+02	1.26E-11	3.26E+02	1.26E-11
3.00E+00	3.85E+02	7.82E-12	3.87E+02	7.85E-12	3.87E+02	7.85E-12
2.50E+00	1.04E+03	1.35E-11	1.05E+03	1.36E-11	1.05E+03	1.36E-11
2.00E+00	9.37E+06	6.40E-08	9.48E+06	6.47E-08	9.48E+06	6.47E-08
1.66E+00	1.26E+08	4.82E-07	1.28E+08	4.88E-07	1.28E+08	4.88E-07
1.33E+00	2.44E+08	4.02E-07	2.48E+08	4.08E-07	2.48E+08	4.08E-07
1.00E+00	2.83E+08	5.10E-08	2.87E+08	5.17E-08	2.87E+08	5.17E-08
8.00E-01	1.18E+10	1.27E-06	1.18E+10	1.27E-06	1.18E+10	1.27E-06
6.00E-01	2.17E+10	7.82E-07	2.21E+10	7.97E-07	2.21E+10	7.97E-07
4.00E-01	8.89E+09	0.00E+00	9.33E+09	0.00E+00	9.33E+09	0.00E+00
3.00E-01	1.54E+10	0.00E+00	1.62E+10	0.00E+00	1.62E+10	0.00E+00
2.00E-01	2.06E+10	0.00E+00	2.17E+10	0.00E+00	2.17E+10	0.00E+00
1.00E-01	2.20E+09	0.00E+00	2.27E+09	0.00E+00	2.27E+09	0.00E+00
5.00E-02	3.54E+08	0.00E+00	3.53E+08	0.00E+00	3.53E+08	0.00E+00
合計	8.15E+10	3.05E-06	8.43E+10	3.08E-06	8.43E+10	3.08E-06

表 5-5 中性子線源の各計算ケースにおける全フラックス計算結果

岩盤または 緩衝材	オーバーパッ クの銅有無	計算点	全フラックス (n/s/cm ²)		dpa (1000年)		
			中性子	2次γ線	中性子	2次γ線	合計
岩盤	有	径方向	7.89E+04	1.07E+04	1.24E-06	5.93E-11	1.24E-06
		上方向	6.86E+04	9.48E+03	1.08E-06	4.89E-11	1.08E-06
		下方向	6.84E+04	9.45E+03	1.08E-06	4.84E-11	1.08E-06
緩衝材	有	径方向	7.54E+04	1.04E+04	1.19E-06	5.54E-11	1.19E-06
		上方向	6.72E+04	9.31E+03	1.06E-06	4.69E-11	1.06E-06
		下方向	6.66E+04	9.25E+03	1.05E-06	4.61E-11	1.05E-06
岩盤	無	径方向	7.63E+04	1.08E+04	1.20E-06	6.15E-11	1.20E-06
		上方向	6.75E+04	9.39E+03	1.07E-06	4.83E-11	1.07E-06
		下方向	6.68E+04	9.37E+03	1.05E-06	4.81E-11	1.05E-06
緩衝材	無	径方向	6.91E+04	1.01E+04	1.09E-06	5.44E-11	1.09E-06
		上方向	6.47E+04	9.06E+03	1.02E-06	4.46E-11	1.02E-06
		下方向	6.30E+04	8.97E+03	9.93E-07	4.37E-11	9.93E-07

表 5-6(1) 中性子線源のフラックス計算結果 *1

径方向					
中性子			2次 γ 線		
上限エネルギー (MeV)	フラックス (γ /s/cm ²)	dpa (1000年)	上限エネルギー (MeV)	フラックス (γ /s/cm ²)	dpa (1000年)
1.50E+01	0.00E+00		1.00E+01	3.04E+01	7.28E-12
1.22E+01	0.00E+00		8.00E+00	1.41E+02	2.20E-11
1.00E+01	0.00E+00		6.50E+00	8.37E+01	8.76E-12
8.18E+00	0.00E+00		5.00E+00	7.04E+01	4.35E-12
6.36E+00	0.00E+00		4.00E+00	1.39E+02	5.39E-12
4.96E+00	3.55E+02		3.00E+00	1.52E+02	3.09E-12
4.06E+00	2.91E+03		2.50E+00	2.09E+02	2.70E-12
3.01E+00	4.01E+03		2.00E+00	5.03E+02	3.44E-12
2.46E+00	1.31E+03		1.66E+00	2.92E+02	1.12E-12
2.35E+00	4.01E+03		1.33E+00	5.29E+02	8.70E-13
1.83E+00	6.56E+03		1.00E+00	4.60E+02	8.29E-14
1.11E+00	9.46E+03		8.00E-01	6.08E+02	6.58E-14
5.50E-01	2.63E+04		6.00E-01	2.33E+03	8.42E-14
1.11E-01	1.76E+04		4.00E-01	1.08E+03	0.00E+00
3.35E-03	4.18E+03		3.00E-01	1.76E+03	0.00E+00
5.83E-04	1.51E+03		2.00E-01	2.13E+03	0.00E+00
1.01E-04	3.93E+02		1.00E-01	1.54E+02	0.00E+00
2.90E-05	1.30E+02		5.00E-02	6.80E-01	0.00E+00
1.07E-05	7.01E+01		合計	1.07E+04	5.93E-11
3.06E-06	2.46E+01				
1.12E-06	9.08E+00				
4.14E-07	1.15E+00				
合計	7.89E+04	1.24E-06			

*1：表 5-5 から、全フラックスが最大となる「岩盤+銅」のケース

表 5-6(2) 中性子線源のフラックス計算結果 *1

上方向					
中性子			2次γ線		
上限エネルギー (MeV)	フラックス ($\gamma/s/cm^2$)	dpa (1000年)	上限エネルギー (MeV)	フラックス ($\gamma/s/cm^2$)	dpa (1000年)
1.50E+01	0.00E+00		1.00E+01	2.47E+01	5.93E-12
1.22E+01	0.00E+00		8.00E+00	1.10E+02	1.73E-11
1.00E+01	0.00E+00		6.50E+00	6.63E+01	6.93E-12
8.18E+00	0.00E+00		5.00E+00	5.58E+01	3.45E-12
6.36E+00	0.00E+00		4.00E+00	1.19E+02	4.62E-12
4.96E+00	3.52E+02		3.00E+00	1.38E+02	2.80E-12
4.06E+00	2.97E+03		2.50E+00	1.93E+02	2.50E-12
3.01E+00	3.99E+03		2.00E+00	4.85E+02	3.31E-12
2.46E+00	1.26E+03		1.66E+00	2.73E+02	1.04E-12
2.35E+00	3.94E+03		1.33E+00	4.90E+02	8.06E-13
1.83E+00	6.33E+03		1.00E+00	4.19E+02	7.57E-14
1.11E+00	8.59E+03		8.00E-01	5.53E+02	5.99E-14
5.50E-01	2.19E+04		6.00E-01	2.01E+03	7.24E-14
1.11E-01	1.42E+04		4.00E-01	9.55E+02	0.00E+00
3.35E-03	3.42E+03		3.00E-01	1.57E+03	0.00E+00
5.83E-04	1.22E+03		2.00E-01	1.89E+03	0.00E+00
1.01E-04	3.13E+02		1.00E-01	1.39E+02	0.00E+00
2.90E-05	1.03E+02		5.00E-02	6.20E-01	0.00E+00
1.07E-05	5.47E+01		合計	9.48E+03	4.89E-11
3.06E-06	1.87E+01				
1.12E-06	6.75E+00				
4.14E-07	9.25E-01				
合計	6.86E+04	1.08E-06			

*1: 表 5-5 から, 全フラックスが最大となる「岩盤+銅」のケース

表 5-6(3) 中性子線源のフラックス計算結果 *1

下方向					
中性子			2次 γ 線		
上限エネルギー (MeV)	フラックス (γ /s/cm ²)	dpa (1000年)	上限エネルギー (MeV)	フラックス (γ /s/cm ²)	dpa (1000年)
1.50E+01	0.00E+00		1.00E+01	2.44E+01	5.84E-12
1.22E+01	0.00E+00		8.00E+00	1.09E+02	1.70E-11
1.00E+01	0.00E+00		6.50E+00	6.54E+01	6.85E-12
8.18E+00	0.00E+00		5.00E+00	5.52E+01	3.41E-12
6.36E+00	0.00E+00		4.00E+00	1.19E+02	4.59E-12
4.96E+00	3.52E+02		3.00E+00	1.37E+02	2.79E-12
4.06E+00	2.97E+03		2.50E+00	1.93E+02	2.49E-12
3.01E+00	3.99E+03		2.00E+00	4.84E+02	3.31E-12
2.46E+00	1.26E+03		1.66E+00	2.73E+02	1.04E-12
2.35E+00	3.94E+03		1.33E+00	4.89E+02	8.06E-13
1.83E+00	6.33E+03		1.00E+00	4.19E+02	7.56E-14
1.11E+00	8.60E+03		8.00E-01	5.52E+02	5.98E-14
5.50E-01	2.18E+04		6.00E-01	1.99E+03	7.20E-14
1.11E-01	1.41E+04		4.00E-01	9.51E+02	0.00E+00
3.35E-03	3.38E+03		3.00E-01	1.56E+03	0.00E+00
5.83E-04	1.20E+03		2.00E-01	1.88E+03	0.00E+00
1.01E-04	3.02E+02		1.00E-01	1.38E+02	0.00E+00
2.90E-05	9.69E+01		5.00E-02	6.17E-01	0.00E+00
1.07E-05	5.02E+01		合計	9.45E+03	4.84E-11
3.06E-06	1.69E+01				
1.12E-06	6.00E+00				
4.14E-07	8.19E-01				
合計	6.84E+04	1.08E-06			

*1: 表 5-5 から, 全フラックスが最大となる「岩盤+銅」のケース

5.2.2 dpa 計算

5.2.2.1 γ 線による dpa

γ 線に対する鉄のはじき出し断面積は γ 線のエネルギーの上昇とともに上昇するため、各エネルギー群のはじき出し断面積は過小評価を避けるため群の上限エネルギーに対応するはじき出し断面積として図 5-1 から内挿もしくは外挿することにより求めた。前述のフラックスとはじき出し断面積から算出した炭素鋼の dpa を表 5-4、表 5-6 に示した。ここで、放射線の照射時間は、オーバーパックによる核種閉じ込め期間である 1000 年間とした。表 5-4 では γ 線源からの γ 線フラックスを、表 5-7 では中性子線源から (n, γ) 反応によって生じる γ 線のフラックスと分けて示すが、後者は前者に比べて非常に小さく無視でき、炭素鋼が地層処分後 1000 年間で γ 線より受ける dpa の最大値は、上方向あるいは下方向で 3.08E-06 dpa と見積もられる。

5.2.2.2 中性子線による dpa

図 5-2 から中性子に対する鉄のはじき出し断面積は、中性子のエネルギーが 5E-04Mev 以上においてかなりバラツキが見られる。したがって計算により求めた表 5-7 の中性子の平均エネルギーが 1Mev となることからこのエネルギーに対応するはじき出し断面積 500b をすべてのエネルギー群のはじき出し断面積として適用し、照射時間を 1000 年として dpa を計算し表 5-6 に示した。表 5-6 から炭素鋼が地層処分後 1000 年間で中性子より受ける dpa の最大値は、径方向で 1.24E-06 dpa と見積もられる。

以上により炭素鋼が地層処分後 1000 年間で γ 線および中性子より受ける dpa の最大値は、4.32E-06 dpa 以下と見積もられる。ただし、これには 1000 年間におけるガラス固化体中の放射性核種の減衰、および炭素鋼中で γ 線によって生じる電子（陽電子）の減衰を考慮しておらず、実際にはこれよりずっと低い照射レベルであると考えられる。

5.3 オーバーパックの炭素鋼の放射線損傷

炭素鋼 (ASTM A212, A285, A537) について、照射レベルが $1.0\text{E-}05$ から $1.0\text{E-}02$ dpa の範囲における DBTT 変化を図 5-4⁽¹⁰⁾に示す。図中の PORTER と注記のあるプロットは多くの炭素鋼の中性子照射データに関する傾向線⁽¹⁶⁾を表している。

傾向線は次式で表される。

$$T_F = 31.084 \left(\frac{\phi}{10^{17}} \right)^{\frac{1}{3}} + 2.087$$

$$\approx 31.084 \left(\frac{dpa}{1.5 \times 10^{-4}} \right)^{\frac{1}{3}} + 2.087$$

ここで、

T_F : DBTT 変化 ($^{\circ}\text{F}$)

ϕ : 中性子フルエンス ($>1\text{MeV}$) (nvt)

また、図 5-4 からこの傾向線は下限として約 $2.0\text{E-}05$ dpa までは代表点として適用できると考えられる⁽¹⁰⁾。

オーバーパックの炭素鋼について、地層処分後 1000 年間における DBTT 変化をこの傾向線の外挿により推測した。1000 年間で炭素鋼の受ける放射線照射は最大 $3.42\text{E-}06$ dpa でありこれに対応する炭素鋼の DBTT 変化は 10.9°F (6.1°C) となった。dpa を非常に保守的に評価したことも考えると、実際の変化量はもっと小さいものと推測される。

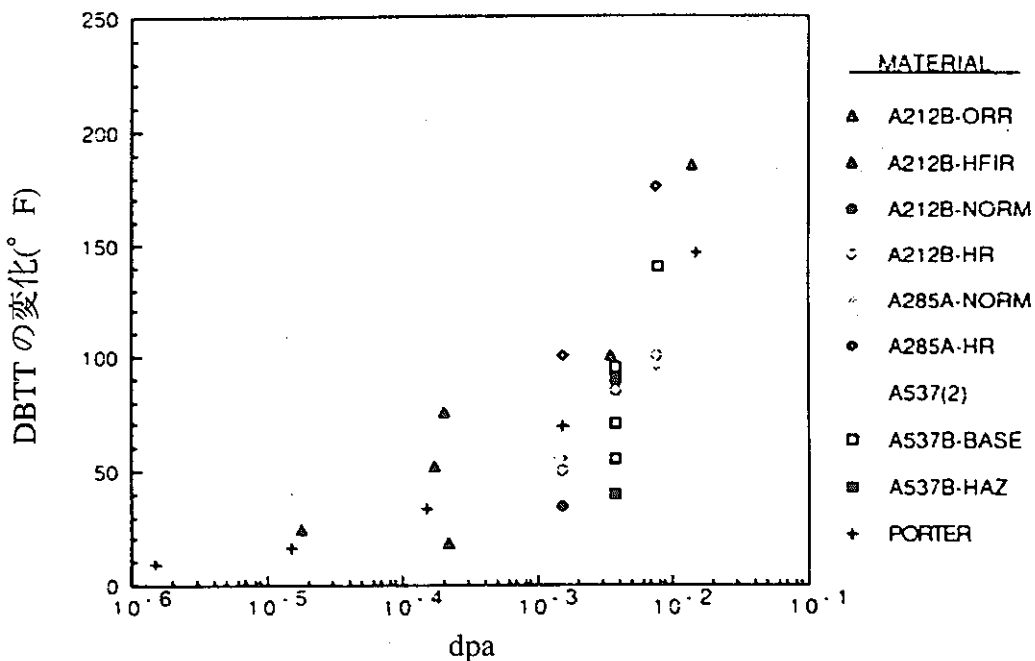


図 5-4 中性子放射線損傷によって起こる DBTT 変化

5.4 まとめ

オーバーパックの炭素鋼が、処分後 1000 年間にガラス固化体から放出される放射線により受ける損傷は最大で $3.42\text{E-}06$ dpa と見積もられた。ただし、この結果は 1000 年間におけるガラス固化体中の放射性核種の減衰および炭素鋼中での γ 線により生じる電子（陽電子）の減衰は考慮していないため、実際はこれより低い照射レベルであると考えられる。

鋼についての多くの中性子照射データから統計的解析によって導出された傾向線の外挿により、 $3.42\text{E-}06$ dpa に対する炭素鋼の DBTT 変化量は 6.1°C と算出された。この結果については dpa を非常に保守的に評価したことも考え合わせ、実際の炭素鋼の DBTT 変化量はもっと小さく、十分無視できるレベルであると推測される。

したがってオーバーパックに使用する炭素鋼の機械的性質に関する特性値については、処分後の放射線の影響はほとんど無視できると推測されることから、処分後の温度の影響のみを考慮すればよいと考えられる。

6. 試作

以上の銅-炭素鋼複合オーバーパックの構造，製作法の検討結果をもとに，実規模大での試作を行った。

試作は銅製外容器の円筒本体と蓋の製作，および電子ビーム溶接での蓋の取り付けまでを実施した。炭素鋼製内容器の製作は実施していない。

6.1 試作容器の概要

試作する銅製外容器の概略形状を図 6-1 に示す。詳細設計の結果，銅製外容器の肉厚は機械的強度を確保するために，4 章にて設定した腐食代以上の厚さとなっている。

試作外容器は，4 章の製作法検討において有望な製作候補とされた熱間後方押し加工の実証を行うとの観点から，高さについては 1000 mm（詳細設計の結果は 1955 mm）とした。これは連続鋳造法（組成均一化のため素材製作の工程において必要と考えられる）で製作可能な最大断面の鋳塊により押し加工を行った場合，現有設備では実規模容器の高さまで加工が出来ない可能性があり，十分製作可能と考えられる高さとしたためである。なお，直径方向については詳細設計通りとした。

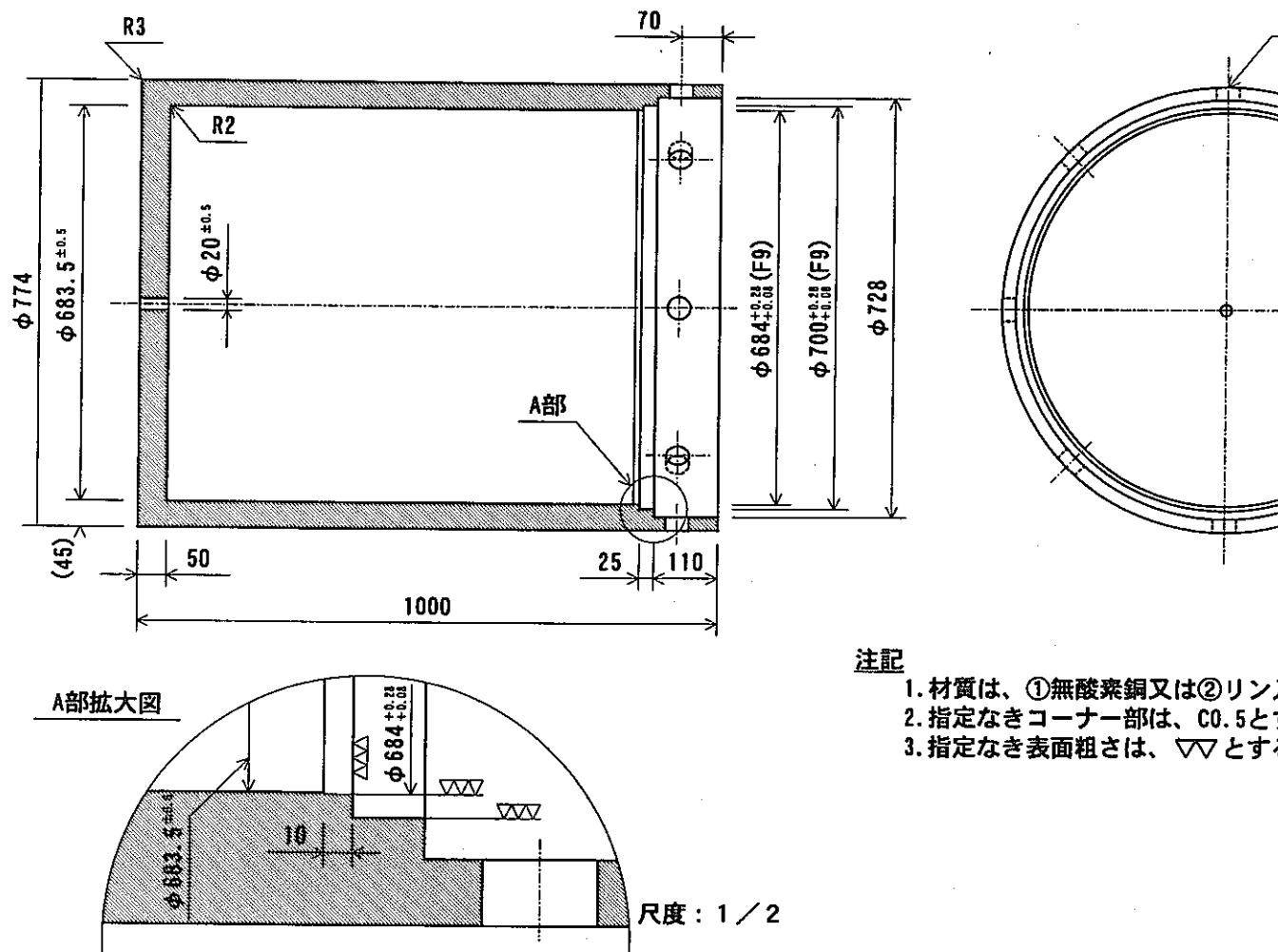
試作用容器の銅素材については，組成の均一化を図る観点から連続鋳造により製作した。またその組成については 3 章の検討より無酸素銅を選択するが，ここで，

ケース 1：スウェーデン SKB 等でも用いられているリンを添加した無酸素銅

ケース 2：一般的な無酸素銅

の 2 種類の組成の銅を用意した。試作数は，ケース 1 について 2 体（評価用および展示用），他方について 1 体の計 3 体とした。

円筒部および底板については，熱間後方押し加工により素材を一体成形とし，機械加工にて最終寸法に仕上げる。蓋については鍛造又は圧延した銅板を機械加工で最終寸法に仕上げ，電子ビーム溶接にて容器本体へ取り付ける。



- 注記
1. 材質は、①無酸素銅又は②リンフ
 2. 指定なきコーナー部は、C0.5とする
 3. 指定なき表面粗さは、 $\nabla\nabla$ とする

図 6-1 試作銅製外容器の概略

6.2 製造工程概要

本試作の製造工程を図 6-2 に示す。外容器蓋部の加工についてはすでに確立した技術であるため外容器本体の加工を主体として以下に記す。

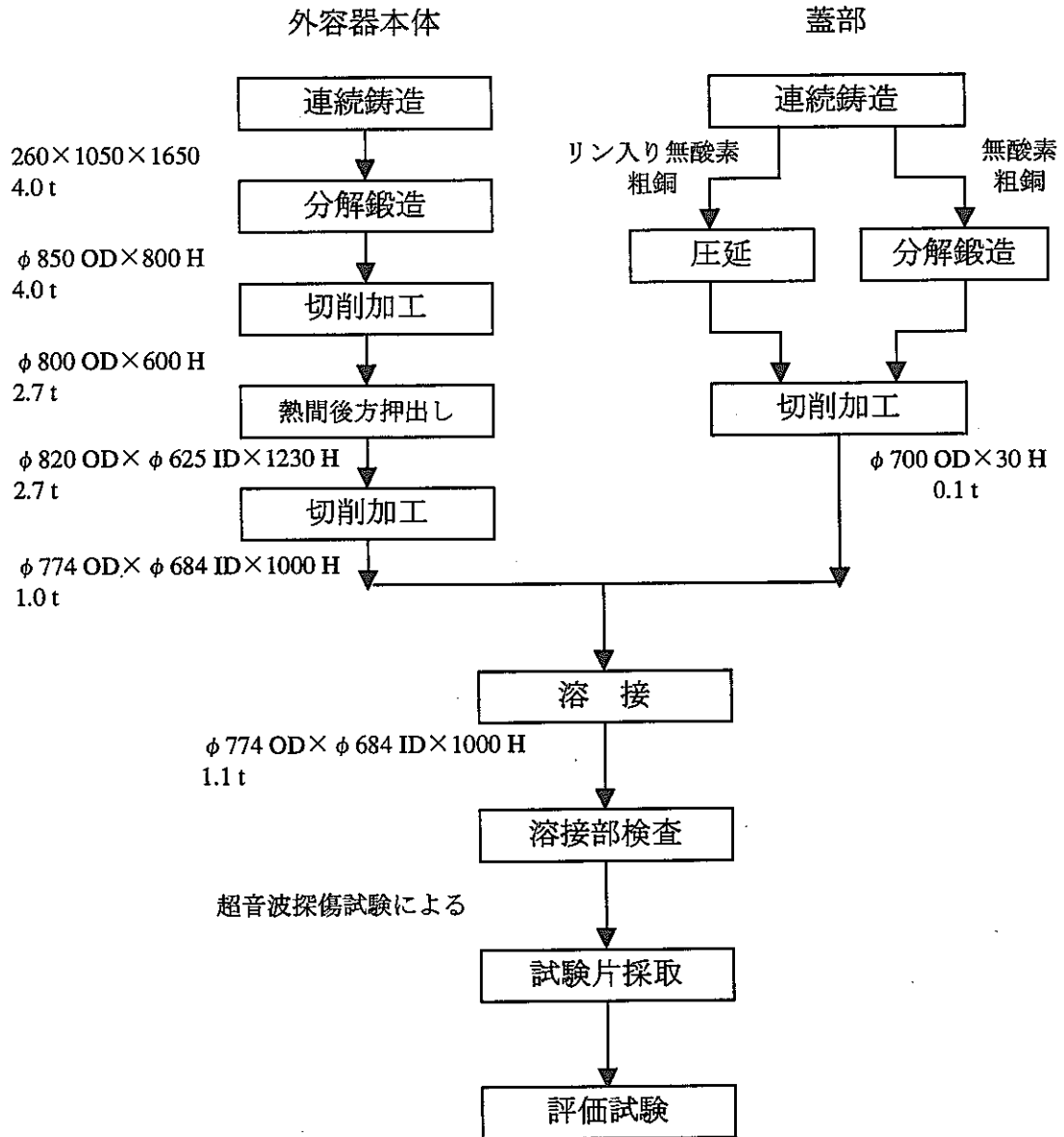


図 6-2 外容器製造工程概要

6.3 銅素材の鑄造

前述の通り、組成の均一化を図るため連続鑄造法により試作容器材料を製作した。また、試作容器材料の目標材料組成を表 6-1 に示す。

表 6-1 目標材料組成及び分析値（単位：ppm）

材料名	リン入り無酸素銅			無酸素銅		
	目標値	鑄造後	溶接部	目標値	鑄造後	溶接部
Cu	残	残	残	残	残	残
Pb	$\leq 10^{*1}$	1.9	1.6	$\leq 10^{*1}$	2.0	2.0
Zn	$\leq 1^{*1}$	<1	<1	$\leq 1^{*1}$	<1	<1
Bi	$\leq 10^{*1}$	<1	<1	$\leq 10^{*1}$	<1	<1
Cd	$\leq 1^{*1}$	<1	<1	$\leq 1^{*1}$	<1	<1
Hg	$\leq 1^{*1}$	<1	<1	$\leq 1^{*1}$	<1	<1
O	$\leq 10^{*1}$	3.0	2.1	$\leq 10^{*1}$	1.7	1.7
P	40~60 ^{*2}	45	44	$\leq 3^{*1}$	<0.5	<0.5
S	<6 ^{*2}	3	3	$\leq 18^{*1}$	3	3
Se	$\leq 10^{*1}$	<1	<1	$\leq 10^{*1}$	<1	<1
Te	$\leq 10^{*1}$	<1	<1	$\leq 10^{*1}$	<1	<1
H	<0.6 ^{*2}	0.4	0.4	—	0.4	0.3

*1：JIS H 3510（C1011：電子管用無酸素銅）の仕様

*2：SKB 仕様（SKB, “SKB Annual Report 1996”, SKB Technical Report 96-25, 1997）

本工程終了後に材料の成分分析および外観検査を実施し、所定の仕様を満足していることを確認した。鑄塊の概略寸法・形状は、260×1050×1650 mm の四角柱で、重量は約 4.0 t であった。四角柱とした理由は製造機器の製造限界寸法による。その他の形状、例えば円柱の場合では、現在連続鑄造で製造可能な最大径は $\phi 380$ mm であり、所定寸法まで鍛造するためには素材が長くなりすぎ鍛練に必要となるストロークが確保出来ないためである。

6.4 分解鍛造・切削加工工程

上記連続鑄造により製作した鑄塊は熱間後方押出し加工を行うために円柱形に成形する。円柱形への成形には分解鍛造加工を実施した。分解鍛造加工では、座屈、加熱による脆化、鍛造割れ等が発生しないよう数回に別けて鍛練加工するとともに、鍛造後の寸法はこれらの不具合が鍛造後の素材表面近傍で発生した場合でも機械加工で削除が可能なように、十分な余裕代を持った大きさ（ $\phi 800 \times 600$ mm, 重量：

約 2.7 t) とした。本工程終了後に材料の超音波探傷検査及び寸法検査を行い、鍛造後の健全性および所定の仕様を満足していることの確認を行った。

6.5 熱間後方押し・切削加工工程

熱間後方押しにより胴部及び底部の一体加工を行った後、切削加工により所定寸法に仕上げた。使用設備の概要を表 6-2 に、熱間後方押し加工時の加工条件を表 6-3 にそれぞれ示す。なお熱間後方押し前の素材形状は、後方押し加工における押しポンチの芯ずれ、熱間後方押し・切削加工中及び加工後の変形を考慮し決定した。

表 6-2 使用設備概要

設備名	設備仕様
加熱炉	台車式加熱炉 (積載能力: 100 t)
鍛造プレス	8,000 t 鍛造プレス (最大 10,500 t)
機械加工設備	φ 1,500 mm 普通旋盤及び中ぐり盤

表 6-3 熱間後方押し加工時の加工条件

		1回目	2回目	3回目
材料名		リン入り無酸素銅	リン入り無酸素銅	無酸素銅
加工条件	加熱温度	830 °C	830 °C	830 °C
	圧下量	490 mm	490 mm	490 mm
	圧下速度	11.3 mm/sec	0.8 mm/sec	4.9 mm/sec

作業の状況を資料-1 写真 1-1~1-9 に示す。

加工後の全高は 1200 mm ~ 1300 mm となり、懸念された加工中及び加工後の変形も発生しなかった。今回の試作の状況から、本加工方法による実規模容器の製作も十分に対応可能と考えられる。また、本加工に先立って行った炭素鋼による同様の試作も良好な結果を得られたことから、本加工方法は銅製外容器だけでなく炭素鋼製内容器、あるいは複合オーバーパックだけでなく炭素鋼製オーバーパックにも適応可能な技術であり、量産化にあたってこれら炭素鋼製容器についても従来の加工方法よりコストダウンを図る可能性があると考えられる。

以上のように、今回の試作においては各工程で考えられるリスクを考慮し修正加工代を確保できるよう約 4.0 t の鋳塊から約 1.0 t の試作品を製作した。将来の量産化に際してはコスト低減の観点から各工程の設計最適化による素材歩留りの向上を検討する必要があると考えられる。

6.6 蓋部の溶接

外容器本体と蓋を電子ビームにて溶接した。表 6-4 に使用した溶接装置の仕様を記す。溶接に先立って変形防止の治具を取り付けた。溶接の状況および終了後の外観を資料-1 写真 1-10~1-12 に示す。

表 6-4 電子ビーム溶接装置仕様

項目	仕様
定格出力	30kW(加速電圧 70kV)
溶接室寸法	6,400 mmL×2,550 mmH×2,450 mmW
テーブル寸法	X テーブル : 2,800 mm×2,000 mm Y テーブル : 2,400 mm×1,000 mm
ストローク	X 軸 : 3,100 mm[テーブル移動] Y 軸 : 1,000 mm[テーブル移動], 1,000 mm[溶接銃移動] Z 軸 : 1,000 mm[溶接銃移動] C/A 軸 : 0~5 r.p.m. 以上4軸 CNC プレイバック制御
溶接姿勢	横向き, 下向き
溶接線の検出	X 線センサー, モニタカメラ併用

7. 溶接部に対する超音波探傷試験

超音波探傷により溶接部の健全性の確認を行なった。

7.1 試験方法

7.1.1 使用機器

本試験に使用した機器仕様を表 7-1 に示す。

表 7-1 超音波探傷試験機器仕様

項目	仕様
探触子	AD社製 AD-3212A
垂直探触子	AD社製 AD-1264 大きさ：φ0.5 inch(約φ12 mm) 周波数：5 MHz
対比試験片	無酸素銅製
接触媒体	ソニコート (グリセリンペースト)

7.1.2 試験方法

試験に先立ち図 7-1 に示すような対比試験片により振幅曲線を作成し機器の校正を実施した。対比試験片の写真を資料-2 写真 2-1 に、作業の状況を写真 2-2 に示す。なお、模擬欠陥の製作を目的に接合部とビーム位置を 1 mm, 1.5mm, 1.8mm ずらしたモデルの製作を行ったが、いずれも接合部が完全に溶け込み欠陥を生じるに至らなかった。

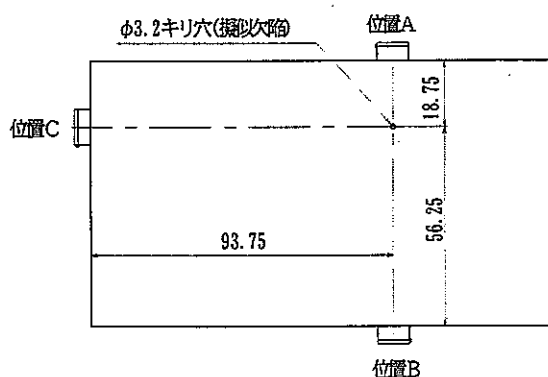


図 7-1 対比試験片概要

7.2 試験結果とまとめ

設定腐食代を 20 mm としたことから、本試作では少なくとも蓋の表面から 20 mm 以上の深さまで健全性が確認される必要がある。外容器上端部から 130 mm 下方（蓋表面から 20 mm）の位置を中心として溶接部およびその近傍の探傷検査を実施した。図 7-2 に本溶接部近傍の断面図を示す。また検査の状況を資料-2 の写真 2-4 に示す。

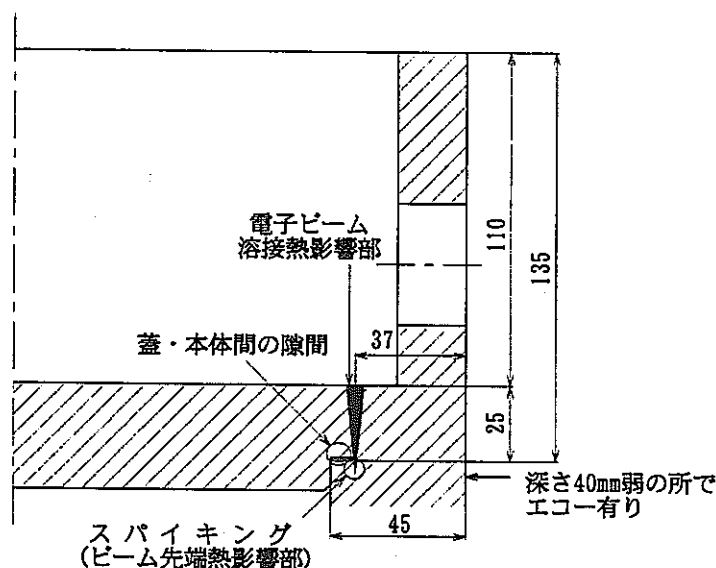


図 7-2 溶接部近傍断面概要図

検査の結果、容器上部より 140 mm (溶接深さ 30 mm) 下方、側面からの深さ 40 mm 弱の箇所にエコー (欠陥の存在を示す超音波の反射波形) が発生する箇所が確認された。蓋部と胴部の継目の影響か、あるいはスパイクキングと呼ばれる電子ビーム先端部に生じる不健全部による影響と考えられる。しかしながら銅製外容器は強度部材でないこと、また銅の腐食代は 20 mm と設定していることなどから、今回の結果のように腐食代以上の深さにおける欠陥の存在は問題にならないと考えられ、電子ビーム溶接による蓋部の溶接は銅製外容器の溶接部に求められる品質を満足するものであるといえる。

本溶接部の断面の目視観察の結果、溶接深さ約 30 mm の部分に長さ約 1 mm、幅約 0.5 mm の欠陥が確認された。断面の写真を資料-2 の写真 2-5 に示す。

以上の結果から、比較的銅粒子が微細であると考えられる電子ビーム先端部の欠陥については超音波探傷法で対応し得るものと考えられる。ただし、一般に結晶粒子が粗大化する溶接ビード部の欠陥検出に対する超音波探傷法の適用には今後さらに研究・開発が必要であると考えられる。

溶接部ではそのほかの部位に比べると結晶粒が成長する傾向が見られたが、本検査においては欠陥検出性には特に影響は見られなかった。しかしながら溶接条件、溶接部形状によっては欠陥検出性に影響を及ぼすことが考えられることから、超音波探傷法の適用については今後さらに検討が必要と考えられる。

8. 材料試験

8.1 試験項目

試作した銅製外容器の各部の金属組織や機械的特性が、材質および部位によりどのような変化を示すかを確認するため、無酸素銅製、リン入り無酸素銅製それぞれの試作外容器から試験片を採取し、以下に示す5項目の試験を実施した。

- ①組織観察
- ②粒度測定
- ③硬さ試験
- ④引張試験
- ⑤曲げ試験

8.2 試験片の採取

8.2.1 評価位置および試験片採取要領

銅製外容器の試験は、円筒上端部、蓋板部および底板部の3箇所から採取した試験片を用いて実施した。蓋板部および底板部については、さらに中心部と端部（蓋板の場合は溶接部）より試験片を採取し試験を実施した。したがって評価位置は、①円筒上端部、②蓋板中心部、③溶接部、④底板中心部、⑤底板端部の計5箇所となった。

試験片採取の手順は、まず銅製外容器を評価部位ごとに1個15kg程度のブロックに切断し、次に各ブロックより各評価項目の試験片を採取した。

各ブロックの試験片採取部を図8-1に示す。採取元の各ブロックの属性を示す記号を以下の表8-1の通り定めた。

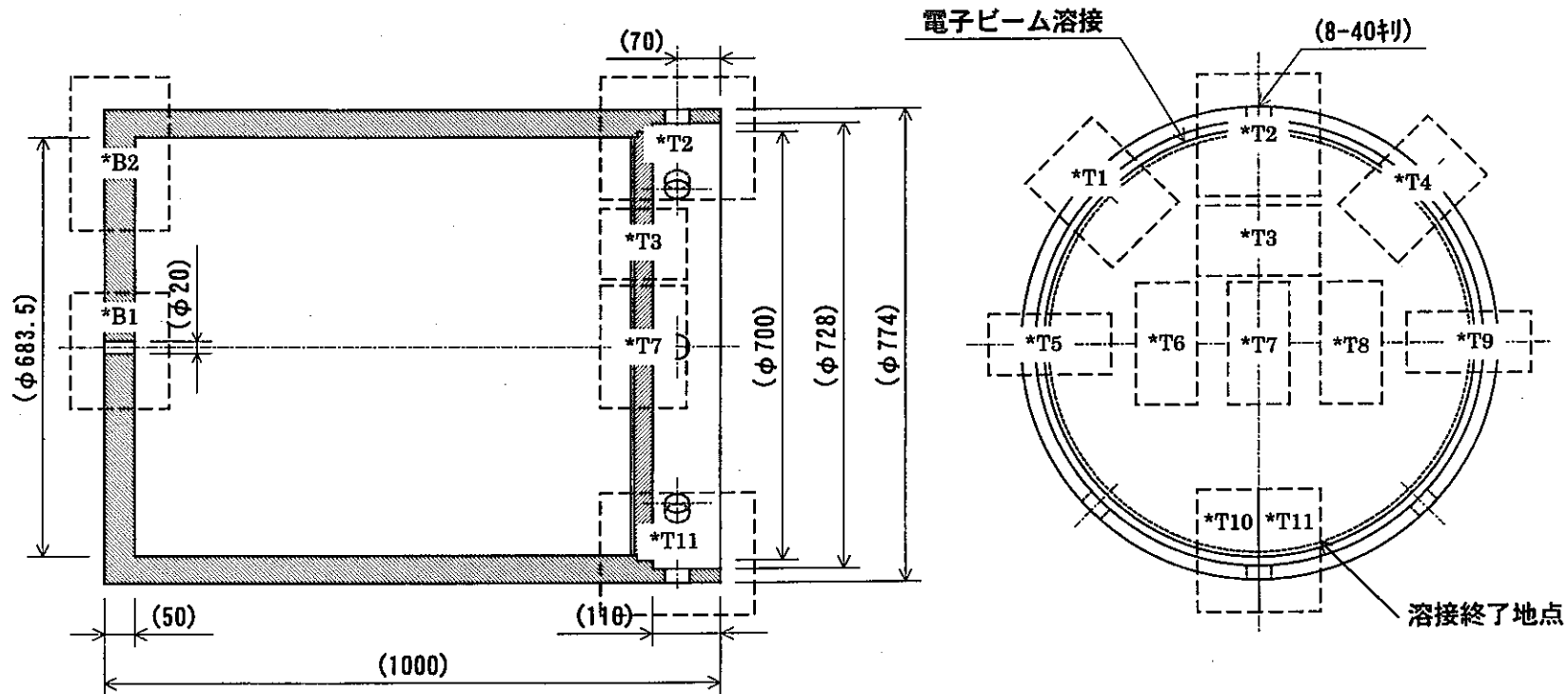
表 8-1 試験片採取ブロックの属性

	区分	記号・番号
材 質	OFC：無酸素銅	F
	XLP：リン入り無酸素銅	X
採取面	蓋板，円筒上端部含む	T
	底板	B
各採取面における 採取位置	蓋板	番号 1～11
	底板	番号 1～2

例えば、無酸素銅の底板中心部は、FB1 で表わされる。

8.2.2 試験片採取部と個数

各試験片採取部を図 8-2 に、試験片の採取個数を表 8-2 にそれぞれ示す。各評価位置において 3 点とした。円筒部上端部および溶接部のみ 3 つの異なるブロックから 1 点ずつの採取とし、それ以外は 1 つのブロックから 3 点の採取とした。これらのうち、粒度測定と硬さ試験には組織観察用試験片を用いた。組織観察用試験片は、引張および曲げ試験片の中心部に相当する位置より採取した。溶接部の引張及び曲げ試験片は、溶接ビードが試験片の中心に位置するように採取した。



ブロックの用途と採取箇所（銅容器 1 体あたり）

用途	採取箇所
材料試験	*T1, *T4, *T7, *T11, *B1, *B2
腐食試験	*T2, *T3, *T10, *B1, *B2
サイクル機構への納入	*T5, *T6, *T8, *B1, *B2

記号と材質の関係

記号	材質
FT	無酸素銅
XT	リン入り無酸素銅

図 8-1 各ブロックの採取部

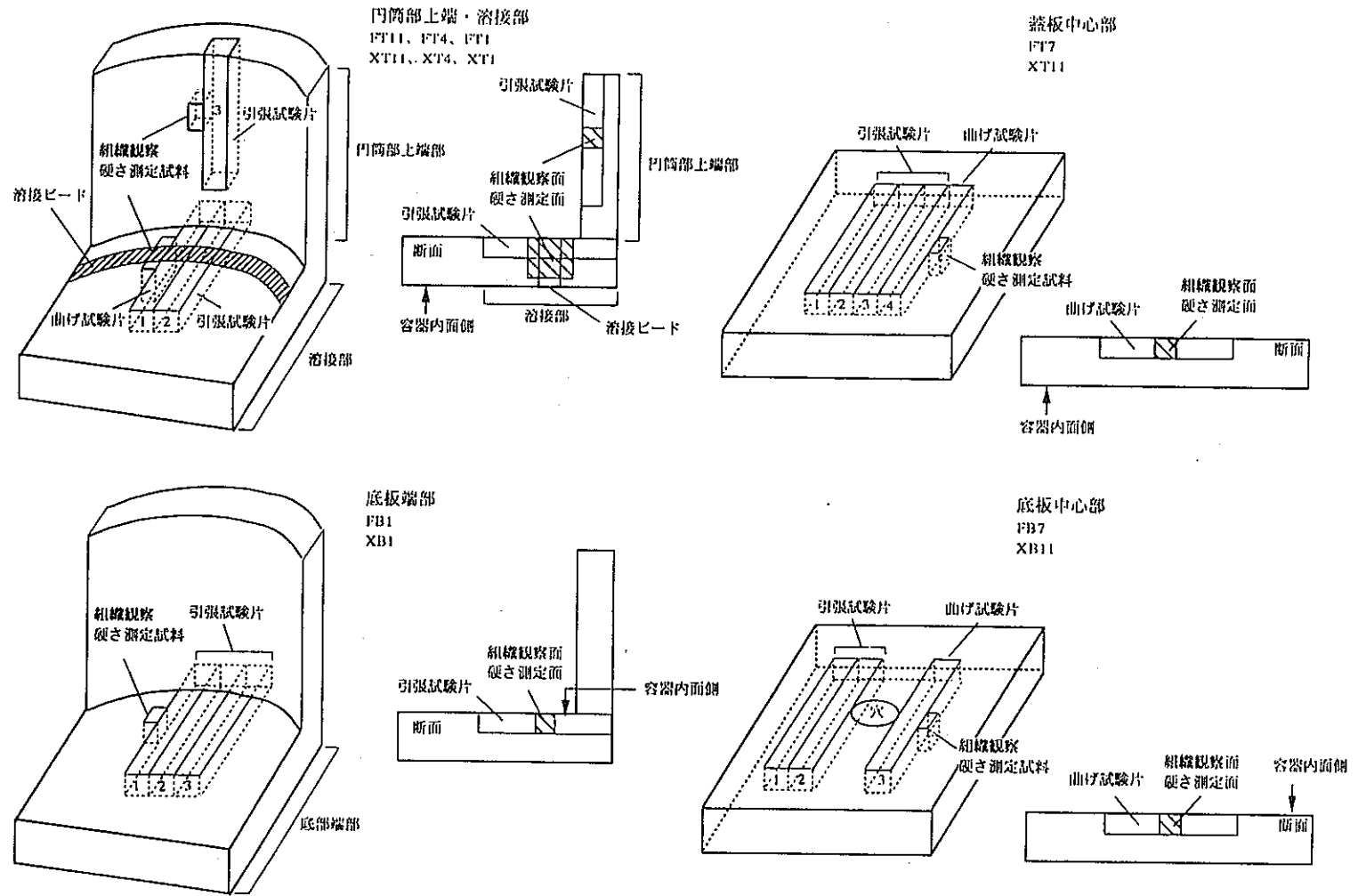


図 8-2 評価試験片採取箇所

表 8-2 評価試験片採取個数

無酸素銅 (OFC)

評価位置	円筒上端部			底板中心部	底板端部	蓋板中心部	溶接部			合計
	FT11	FT4	FT1				FB1	FB2	FT7	
組織・粒度・硬さ試験	1	—	—	1	1	1	1	1	1	7
引張試験	1	1	1	3	3	3	1	1	1	15
曲げ試験	—	—	—	—	—	1	1	1	1	4

リン入り無酸素銅 (XLP)

評価位置	円筒上端部			底板中心部	底板端部	蓋板中心部	溶接部			合計
	XT11	XT4	XT1				XB1	XB2	XT7	
組織・粒度・硬さ試験	1	—	—	1	1	1	1	1	1	7
引張試験	1	1	1	3	3	3	1	1	1	15
曲げ試験	—	—	—	—	—	1	1	1	1	4

8.3 試験方法と結果

8.3.1 組織観察

前述の方法で採取した試験片の周囲を樹脂を使用して被覆し、以下の手順で組織を露出させ、光学顕微鏡で観察・写真撮影を実施した。

①耐水ペーパーによる研磨（#180 → #2400）

②ダイヤモンドペーストによる研磨

③エッチング処理

（水 200 cc+重クロム酸カリウム 2 g+塩化ナトリウム 1.5 g+硫酸 8 cc）

無酸素銅の組織写真を資料-2 写真 2-6~2-9 に、リン入り無酸素銅の組織写真を写真 2-10~2-13 に示す。無酸素銅では、底板端部が微細、蓋板中心部が粗大な組織となっている。リン入り無酸素銅では評価位置による違いはほとんど確認できない。他の評価位置の組織写真と比較して、溶接部断面では、結晶粒が溶接時の入熱方向に伸びるように成長した特徴的な組織となっている。細長く見える結晶粒の内部には更に亜粒界と思われる境界が認められる。また結晶粒界とは別に、凝固界面の痕跡と思われるしま模様が結晶粒を横切るように多数存在している。これらのしま模様のためかなりの部分において粒界が明確に定義できなかった。材質が同じ場合は溶接部組織の観察点による違いは確認できないが、全体的に無酸素銅よりもリン入り無酸素銅の方が粗大な組織となっている。

8.3.2 粒径測定

組織観察部の平均粒径を以下の手順により測定した。ここで、FT7 のみ組織が粗大なので25倍で撮影した写真を用いた。それ以外の部位については全て資料-2に示した50倍の写真を用いた。

①組織写真を紙にコピー

②写真中央に50mm角の領域を描く

③この領域内に存在する粒界を判別し鉛筆で記入

④記入した粒界をもとに結晶粒を数える

⑤JIS H 0501 伸銅品結晶粒度測定試験方法」規定の求積法により平均粒径を算出

無酸素銅の測定結果を表 8-7 に、リン入り無酸素銅の測定結果を表 8-8 にそれぞれ示す。ここで、溶接部については前述の理由により粒界の判別が困難なため測定不可能であった。無酸素銅では、最も粗大な蓋板中心部（FT7）は最も微細な底板端部（FB2）より約 2.8 倍の値となっている。リン入り無酸素銅ではこれほど大きな違いは見られず、105~129 μm の範囲に納まっている。

無酸素銅の蓋板部については一次鍛造後の部材から試験片を採取した。そのため後方押しにより加工した円筒部や圧延加工したリン入り無酸素銅の蓋板部と比較して加工度が小さく、結晶粒径に差が生じたと考えられる。無酸素銅の蓋板部を除くと結晶粒径は目標値 ($180\mu\text{m} \sim 360\mu\text{m}$) よりも小さいが、バラツキが小さい ($\pm 20\%$ 程度) ため、熱処理によって結晶粒径を目標値にすることが可能と思われる。

8.3.3 硬さ試験

ビッカース硬さ H_v を、以下に示す方法で測定した。

表 8-3 ビッカース硬さ試験方法

測定装置	井谷衡機製作所製 硬さ試験機 H-75T7	
測定条件	荷重：5 kg 保持時間：15 sec	5点測定の平均値を採用する。 その他詳細は「JIS Z 2244 ビッカース硬さ試験方法」に準じた。

測定の状況を資料-2 写真 2-14 に、結果を表 8-7～8-10 に示す。溶接部の測定方法は以下の通りである。

- (1) 表 8-7, 8-8：断面組織の溶接部中心に沿って測定した 5 点の平均値
- (2) 表 8-9, 8-10：蓋の外側より 10 mm の深さにおいて、蓋板の母材側から溶接部を横切り本体の母材側へと到るほぼ等間隔の a ～ g の 7 点で測定。

表 8-7, 8-8 より、無酸素銅とリン入り無酸素銅のいずれの材質においても測定値は $H_v = 45 \sim 57$ の範囲に納まっており、溶接部が母材より硬度が高いことが確認できた。また表 8-9, 8-10 より、いずれの試験片においても a ～ g の各点において硬さの違いは認められなかった。無酸素銅では、FT11 が FT4, FT1 よりも高くなる傾向が見られた。

8.3.4 引張試験

引張強さ、0.2%耐力、伸びそれぞれを以下の表 8-4 に示す方法で測定した。

表 8-4 引張試験方法

測定装置	インストロン式 5583 縦型	
試験片形状	ASTM E8 試験片	図 4.3-1 に示す。
測定条件	クロスヘッドスピード 10 mm/min	伸び：試験片に標点を罫書き 試験前後の値を顕微鏡 にて測定 その他：「JIS Z 2241 金属材料 引張試験方法」に 準じた

試験片及び測定の状態を資料-2 写真 2-15～2-17 に、結果を表 8-7、表 8-8 に示す。無酸素銅とリン入り無酸素銅のいずれの場合も溶接部と母材とで若干の違いが見られた。

溶接部と蓋板中心部を測定値の平均で比較すると以下の表 8-5 のようになる。

表 8-5 引張試験測定結果の比較

引張強さ	無酸素銅，リン入り無酸素銅ともにほとんど変わらない。
0.2%耐力	無酸素銅，リン入り無酸素銅のいずれも溶接部の方が蓋板中心部より高い。
伸び	無酸素銅，リン入り無酸素銅のいずれも溶接部の方が蓋板中心部より低い。

0.2%耐力と伸びの結果に見られた違いについては、溶接部は母材と比べ組織に異方性が存在するため生じたものと思われる。

表 8-5 に示すとおり、伸びの値は溶接部が母材と比べて低下している。しかし、低下がより顕著なリン入り無酸素銅でも、約 40%の高い値を維持しており、通常の構造材料の伸びの値と比較しても十分な数値であるといえる。また、溶接部以外では無酸素銅の蓋板中心部 (FT7) と底板端部 (FB2) の結果を比較すると、平均粒径による引張特性の違いはほとんど認められなかった。材質間での比較では、溶接部における違いを除けば無酸素銅とリン入り無酸素銅とで有意差は見られなかった。

8.3.5 曲げ試験

曲げ試験を以下に示す方法で実施した。

表 8-6 曲げ試験方法

測定装置	インストロン式 5583 堅型	
試験片形状	図に示す	
測定条件	クロスヘッドスピード 10 mm/min	治具は、図に示す三点曲げ試験用のものを用いた。溶接部については、蓋板の上側に相当する面から溶接ビードの部分を押す方向で荷重をかけた。

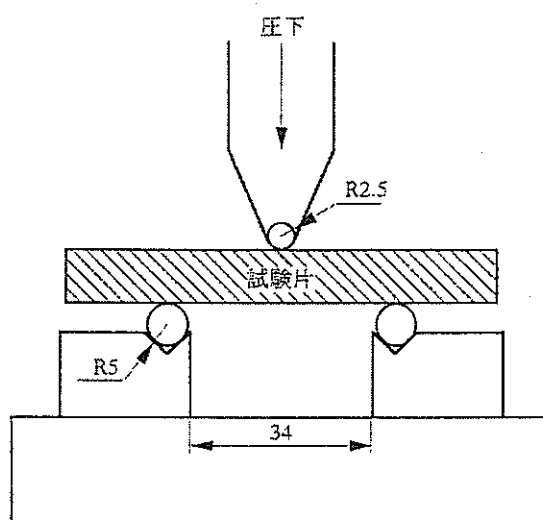


図 8-3 曲げ試験概要

試験片及び測定の状況を資料-2 写真 2-18~2-20 に示す。いずれの材料の試験片においても、試験片が治具に挟まれ試験続行不可能な状態になるまで試験機のクロスヘッドを下げて亀裂は発生しなかったため、この時点で試験を終了した。このため曲げ強度（試験片の破断までの最大応力）は測定不可能であった。しかしながらこの結果は曲げ荷重に対して十分な延性を示すことを意味する。終了時でのせん断応力は 60 N/mm^2 以上、終了後の試験片角度は約 80° （片側約 40° ）であった。

8.4 まとめ

溶接部以外でも場所により結晶粒径が違いが見られたが、機械的性質は同等であった。溶接部については、それ以外の部分と比べ 0.2%耐力では勝るものの伸びの値は低下する結果となった。しかし、低下がより顕著なリン入り無酸素銅でも約 40%の伸びを示した。これは通常の構造材料の伸びの値としては十分な数値であると言え、なおかつ約 80° 曲げ変形を加えても破断は見られなかった。このことから溶接部は十分な延性を有していると考えられる。

材質間での比較では、溶接部における違いを除けば無酸素銅とリン入り無酸素銅とで有意差は見られなかった。

スウェーデン SKB の検討によれば無酸素銅にリン入を添加することでクリープ特性を向上させるとの結果が得られている。これらリン添加の有無によるクリープ特性の差については今後評価を行なう必要があると考えられる。

表 8-7 銅製外容器材料試験結果：無酸素銅（OFC）

評価位置		円筒上端部			底板中心部	底板端部	蓋板中心部	溶接部			目標値
No.		FT11	FT4	FT1	FB1	FB2	FT7	FT11	FT4	FT1	
平均粒径 (μm)		107	—	—	112	96	267	測定不可	測定不可	測定不可	180~360
硬さ (Hv)		52	—	—	49	56	50	55	46	45	≥ 45
引張強さ	N/mm ²	209	—	—	209	210	202	206	—	—	≥ 195
		—	210	—	208	210	201	—	207	—	
		—	—	210	210	210	201	—	—	204	
平均		210			209	210	202	206			
0.2%耐力	N/mm ²	70	—	—	76	63	67	98	—	—	
		—	68	—	61	64	61	—	86	—	
		—	—	69	68	61	58	—	—	89	
平均		69			69	63	62	91			
伸び	%	63	—	—	59	67	63	56	—	—	
		—	61	—	59	68	58	—	56	—	
		—	—	60	62	68	63	—	—	55	
平均		61			60	68	61	56			

溶接部は粒界が定義できず測定不可とした。

表 8-8 銅製外容器材料試験結果：リン入り無酸素銅（XLP）

評価位置		円筒上端部			底板中心部	底板端部	蓋板中心部	溶接部			目標値
No.		XT11	XT4	XT1	XB1	XB2	XT7	XT11	XT4	XT1	
平均粒径 (μm)		129	—	—	113	96	267	測定不可	測定不可	測定不可	180~360
硬さ (Hv)		51	—	—	47	56	50	55	46	45	≥ 45
引張強さ	N/mm ²	208	—	—	206	208	208	201	—	—	≥ 195
		—	208	—	204	207	208	—	203	—	
		—	—	208	202	207	209	—	—	202	
平均		209			204	207	208	202			
0.2%耐力	N/mm ²	66	—	—	66	77	65	101	—	—	
		—	73	—	61	76	63	—	86	—	
		—	—	66	64	67	76	—	—	87	
平均		68			64	73	68	92			
伸び	%	60	—	—	62	67	59	38	—	—	
		—	62	—	62	63	59	—	46	—	
		—	—	61	60	65	58	—	—	44	
平均		61			61	65	59	43			

溶接部は粒界が定義できず測定不可とした。

表 8-9 溶接部断面ビッカース硬さ測定結果：無酸素銅（OFC）

	a	b	c	d	e	f	g
FT11	58	57	57	56	54	55	58
FT4	50	51	47	49	50	48	48
FT1	49	50	48	47	46	47	47

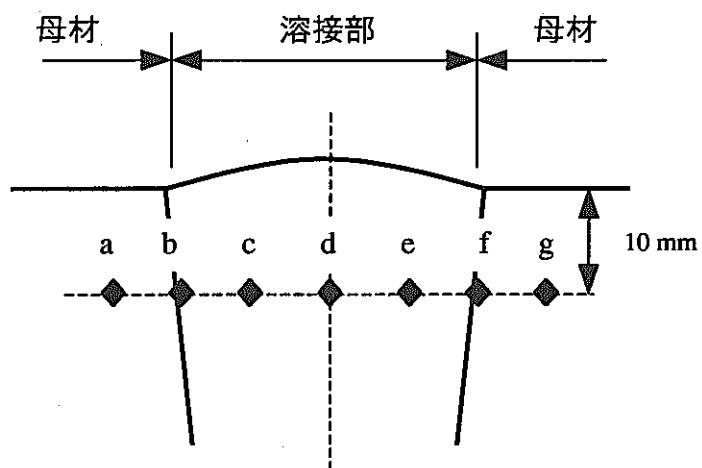


表 8-10 溶接部断面ビッカース硬さ測定結果：リン入り無酸素銅（XLP）

	a	b	c	d	e	f	g
XT11	54	54	50	51	49	52	50
XT4	56	53	55	57	58	56	58
XT1	54	53	54	53	58	53	50

9. 試作結果のまとめと今後の課題

(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) 熱間後方押し出しによる円筒/底板一体成形法の適用性

今回の製作技術検討の結果、熱間後方押し出し加工は実規模大の銅製外容器製作において適用可能な技術であることが証明された。また、本加工方法は銅製外容器だけでなく炭素鋼製内容器ないし炭素鋼製オーバーパックの製造技術への転用も可能であり、実機量産化の際のコストダウンに結びつく可能性のある技術と考えられる。

本試作では直径方向の寸法を実規模に合わせ、高さ方向については短いモデルを試作した。今後は、全寸法を実規模とした試作を行い本製作技術が適用可能であることを確認するとともに、炭素鋼製内容器ないし炭素鋼製オーバーパックへの本製作技術の適用性評価を行う必要がある。

本試作では、熱間後方押し出しで円筒/底板一体成形が可能であることを確認することに主眼を置いた。したがって、分解鍛造時の欠陥発生や熱間後方押し出し時の変形・軸ずれ等を十分に考慮した設計とした結果、素材の歩留まりは悪化した。量産化に際しては分解鍛造工程や押し出し工程における設計の最適化による素材歩留まり向上を図る必要がある。ただし歩留まりが向上し加工代が少なくなる場合には、熱間加工前に行う熱処理(大気雰囲気, 830 °C)等によって銅材料表面の酸素含有量が多くなることが無視できなくなり、当該箇所を機械加工等で削除するなどの対策が必要となる。

(3) 無酸素銅の機械加工性

熱間後方押し出し後の仕上げ加工等には機械加工を用いた。無酸素銅は、炭素鋼と比較して展伸性が良く熱膨張率が大きいいため機械加工性は劣るが、本試作の結果、適切な加工条件のもとで加工を行えば十分な寸法精度を得ることが可能であることが分かった。

(4) 電子ビーム溶接の適用性

本試作の結果、電子ビーム溶接は銅製外容器蓋部の溶接に十分適用し得る技術であることが確認された。溶接時の容器の変形によって開先位置がずれることが懸念されたが、容器の熱容量が大きいためほとんど変形しないことが分かった。また、開先からビームが 1.5 mm 程度ずれても欠陥なく溶接ができることが分かった。

量産化に際しては、開先ルート部付近のスパイク等々の微細欠陥部を減少させる加工条件やスパッタ（溶接時に溶接部周辺へ飛び散った溶銅が固まった銅粒）の除去作業の遠隔自動化等の検討が必要になる。

(5) 溶接部に対する超音波探傷試験の適用性

超音波探傷試験の結果、結晶粒径が細かい領域においては直径 1 mm 程度の欠陥を検出可能であることが分かった。超音波探傷では銅の結晶粒径が大きく変化する部位を欠陥として検出する可能性があるため、今後検出結果の信頼性を確認する試験を実施する必要がある。また、銅の結晶粒径が粗大化する溶接部における欠陥の検出限界を確認することが今後の課題と考えられる。

(6) 銅製外容器の材質

本検討では、銅製外容器の材質としてリン入り無酸素銅と無酸素銅を選択したが、引張試験・硬さ試験・曲げ試験の結果からでは、両者に有意な差は見られなかった。スウェーデン SKB による検討では、リン入り無酸素銅はクリープ特性の点で無酸素銅よりも優れていると報告されている。材質の違いによるクリープ特性の差については今後評価を行なう必要がある。

銅製外容器の材料には、長期間の品質を保証する観点から無酸素銅ベースのものを使用せざるを得ないが、リン以外の元素を添加した場合でも無酸素銅の特性を向上できる可能性がある。今後は調査範囲を広げて腐食試験やクリープ試験を行い、銅製外容器に最適な材質の検討・評価を行う必要がある。

謝 辞

本報告書における銅-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、三菱マテリアル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. SKB (1997) : Assessment of a Spent Fuel Disposal Canister Assessment Studies for a Copper Canister with Cast Steel Inner Component, SKB TECHNICAL REPORT 97-19
3. SKB (1997) : SKB ANNUAL REPORT 1996, SKB TECHNICAL REPORT 96-25
4. L.H.Johnson, et. al., (1992) : Life times of Titanium and Copper Containers for The Disposal of Used Nuclear Fuel, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 257
5. H.Y.S. Ko, et. al., (1987) : Conceptual Design of Copper Metal Matrix Fuel Waste Container, ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED TR-380
6. L.H.Johnson, et. al., (1992) : The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste : Engineered Barriers Alternatives, AECL-10718 COG-93-8
7. D.T.Peters, et. al., (1993) : Multibarrier Copper-Base Containers for High Level Waste Disposal, NUCLEAR TECHNOLOGY Vol. 104
8. 本田 明・谷口直樹 (1999) : 銅オーバーパックスの寿命評価, サイクル機構技術資料, JNC TN 8400 99-028
9. 日本伸銅協会 (1997) : 伸銅品データブック
10. G.R.Caskey, et.al., (1994) : Potential for Radiation Damage to Carbon Steel Storage Tanks for High Level Radioactive Waste, NACE International Annual Conference (Corrosion'94), WSRC-MS-93-300
11. 日本金属学会 (1989) : 原子力材料, 講座・現代の金属学 材料編 8
12. 石野 葉 (1979) : 照射損傷, 原子力工学シリーズ 8, 東京大学出版会

13. ASTM (1992) : Standard Practice for Characterizing Neutron Exposures in Iron and Low Alloy Steels in Terms of Displacements Per Atom (DPA), E706(ID), ASTM Designation E 693-94 (reapproved 1985), Annual Book of ASTM Standards, Vol 12.02
14. N.P.Baumann (1988) : Gamma Ray Irradiation Damage to SRP Reactor Tank Walls, DPST-88-781
15. 本田明, 鶴留浩二, 野高昌之, 井上邦博, 石川博久, 佐々木憲明 (1992) : 炭素鋼オーバーパックスの試作, PNC TN 1410 92-059
16. L.F.Porter (1960) : Radiation Effects in Steel, ASTM Special Publication No.276, Materials Nuclear Applications, American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pa
17. 本間信之, 千葉恭彦, 棚井憲治 (1999) : オーバーパックス設計の考え方, サイクル機構技術資料, JNC TN 8400 99-047

資料-1 製造工程写真集

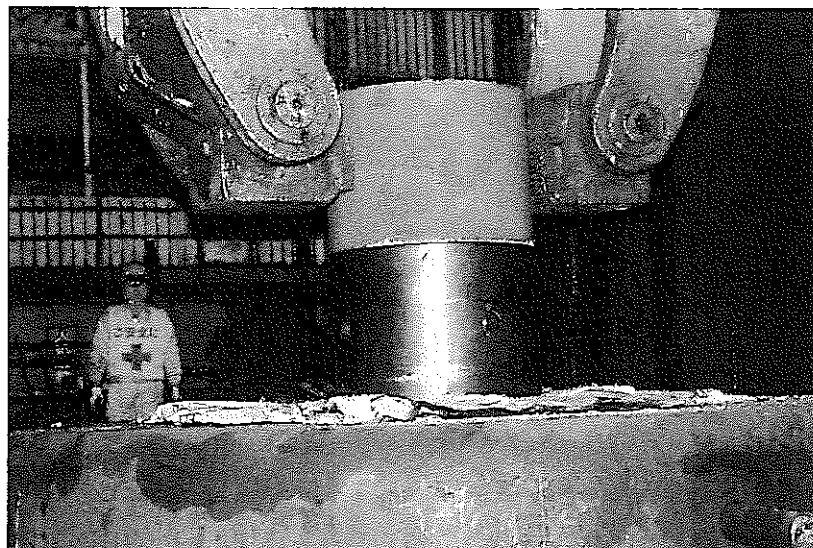


写真 1-1 加熱した銅素材の押出し加工受け台へのセット

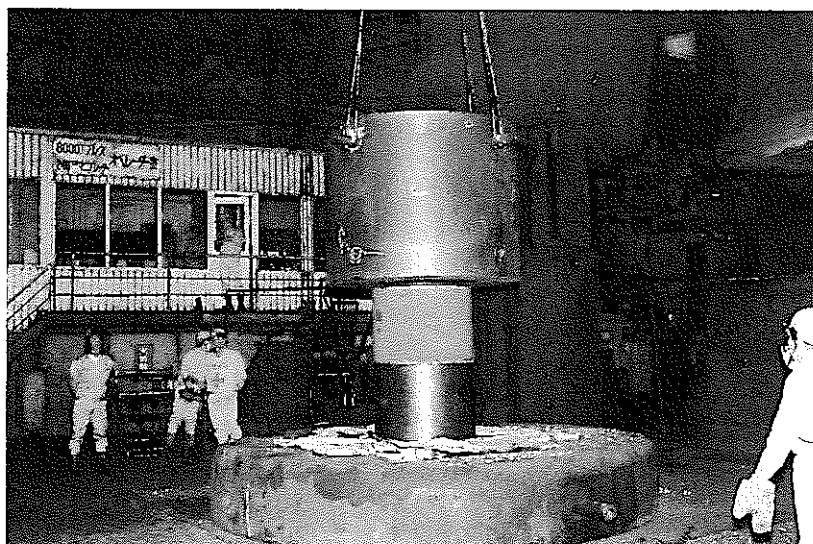


写真 1-2 コンテナ（押出し加工外側容器）のセット

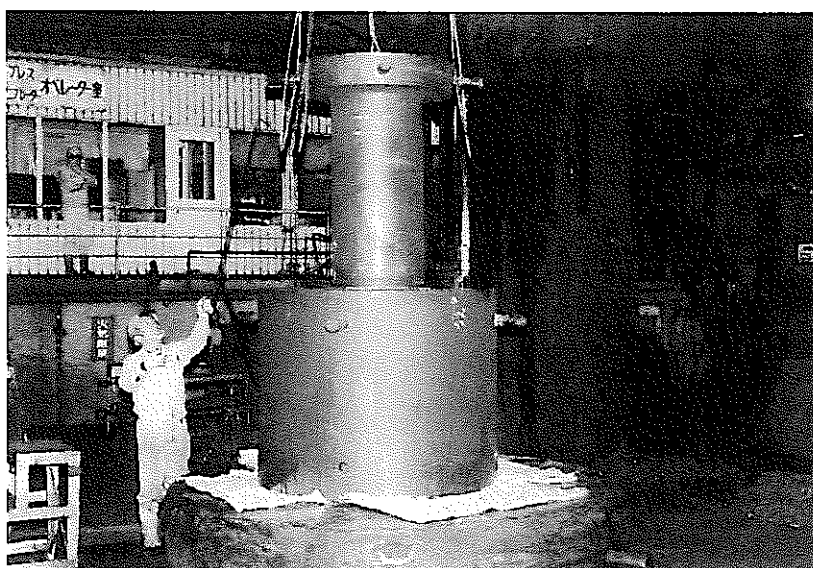


写真 1-3 押出しポンチのセット

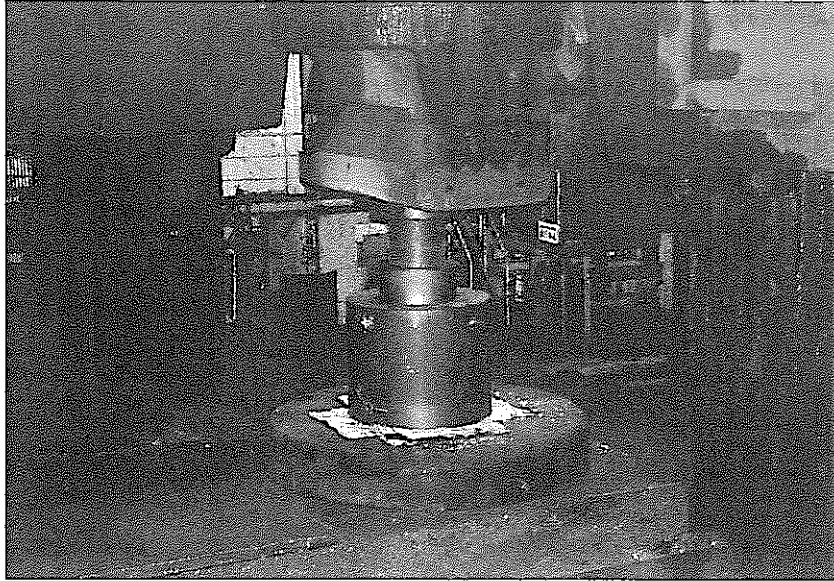


写真 1-4 押出し加工中

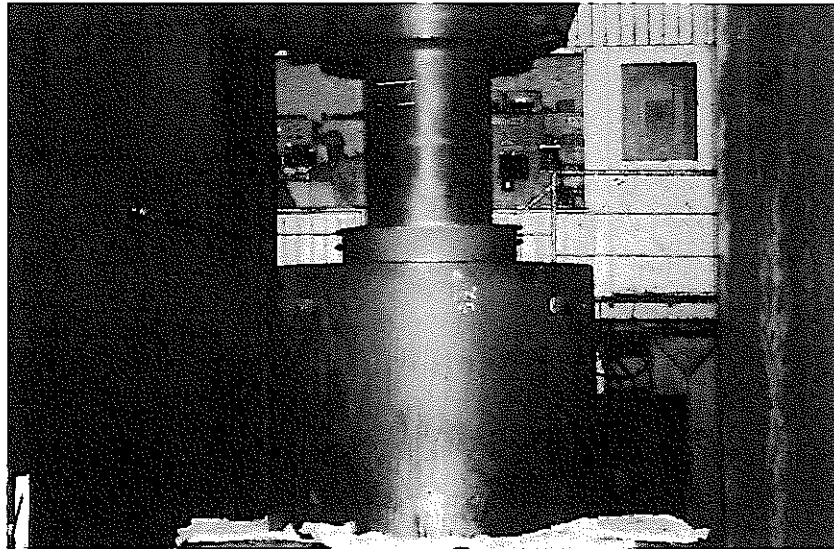


写真 1-5 押出し加工中



写真 1-6 押出し加工完了後

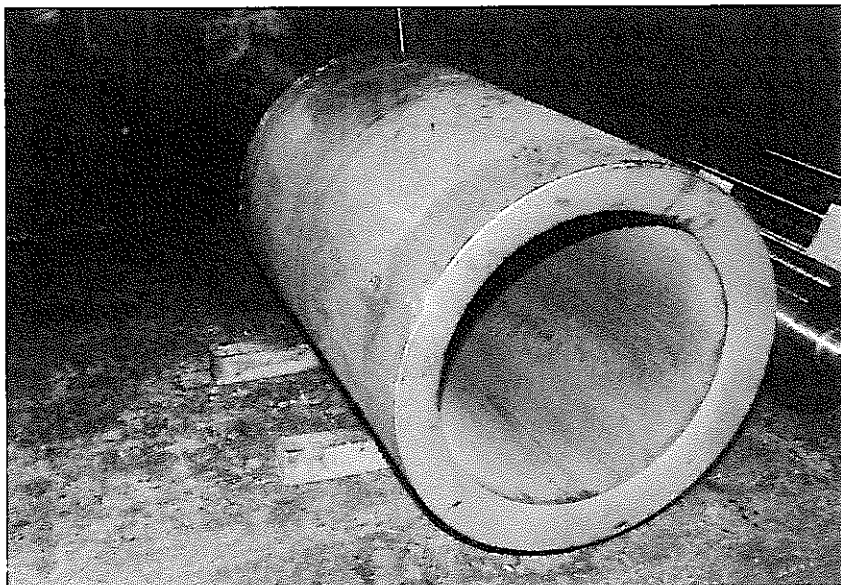


写真 1-7 切削加工前

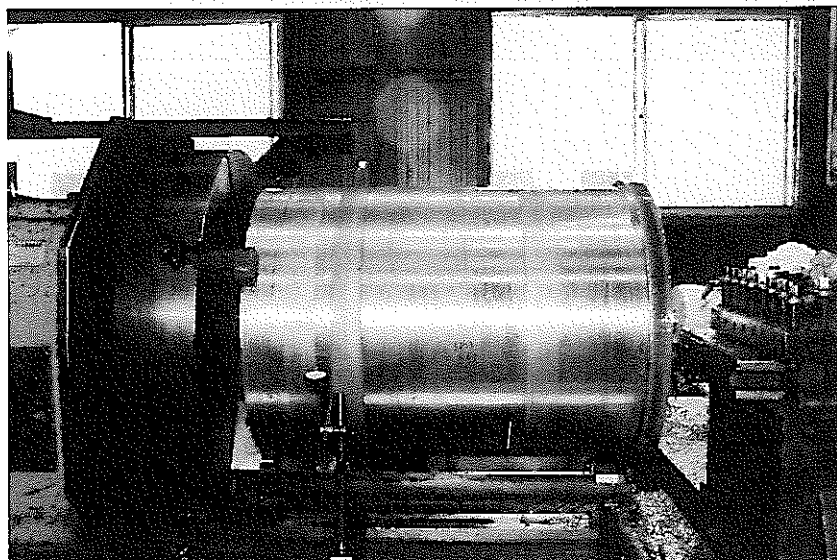


写真 1-8 外径および端面加工

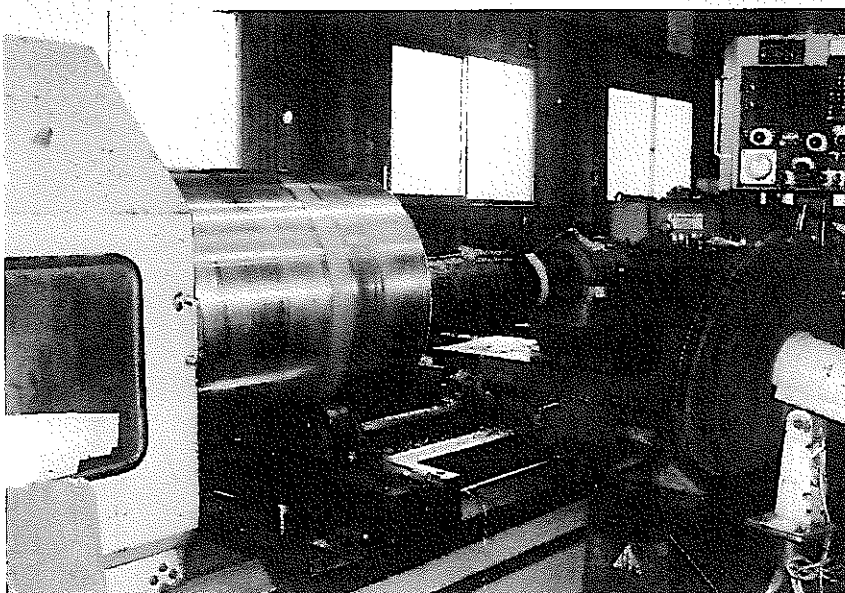


写真 1-9 内径加工

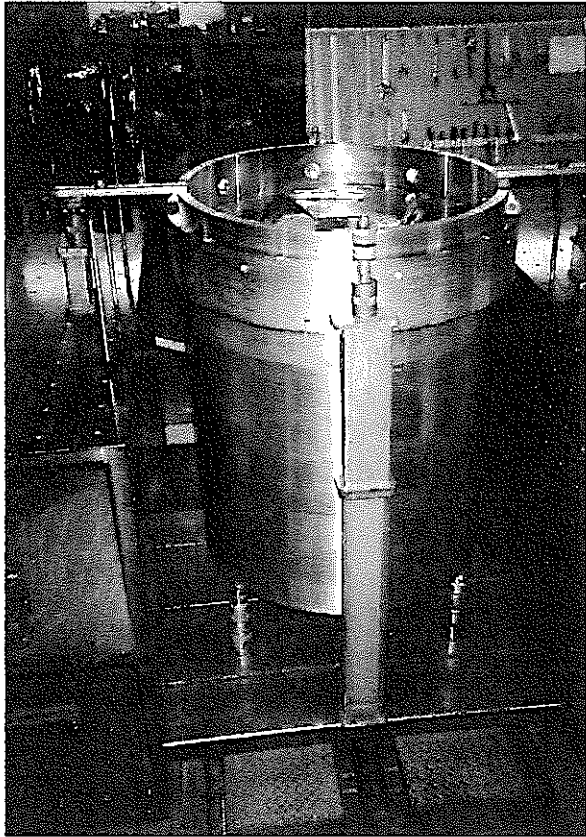


写真-10 電子ビーム溶接 治具のセット

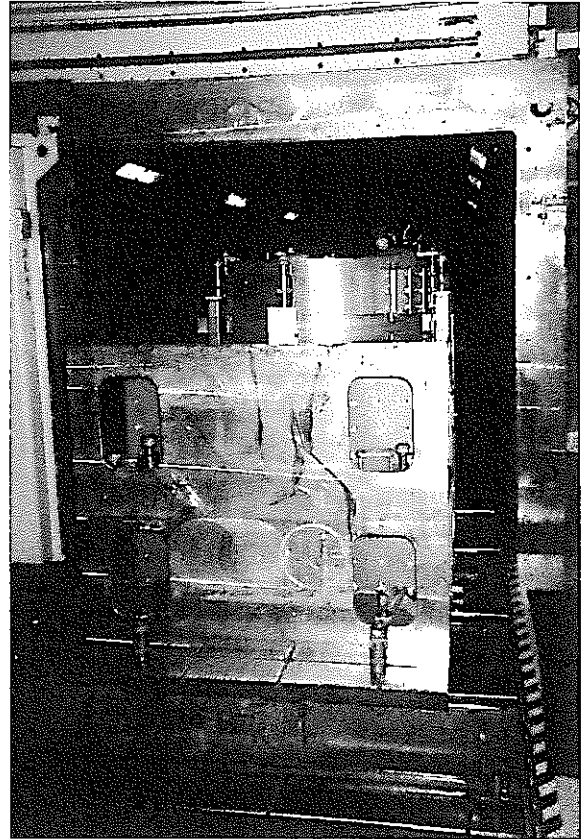


写真-11 容器を溶接機に収納

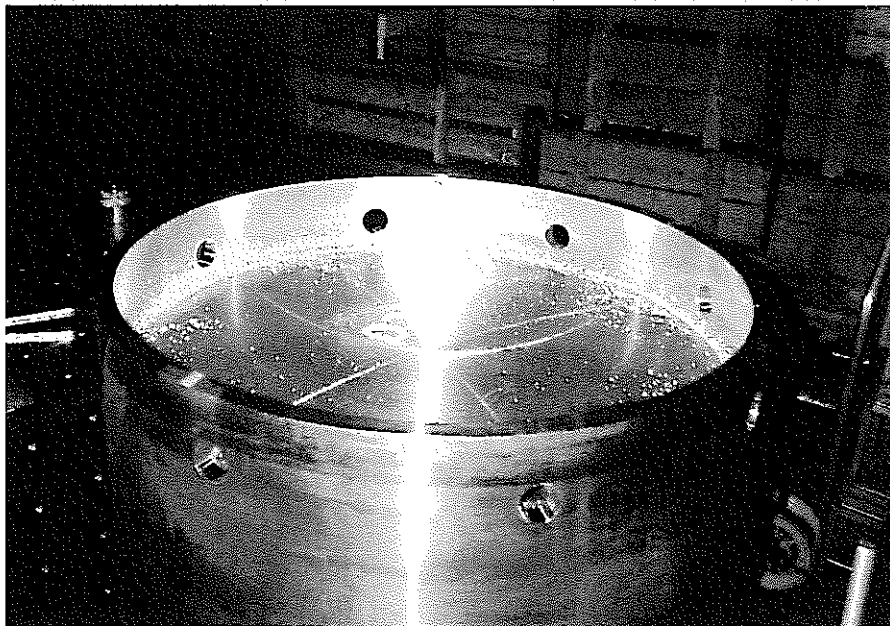


写真-12 溶接後 溶接部の状況

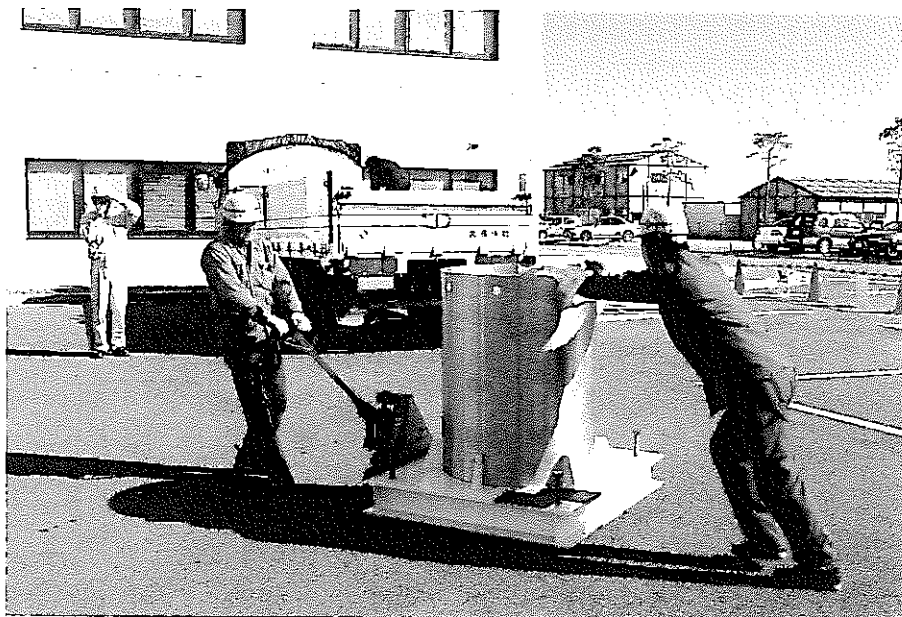


写真-13 搬入

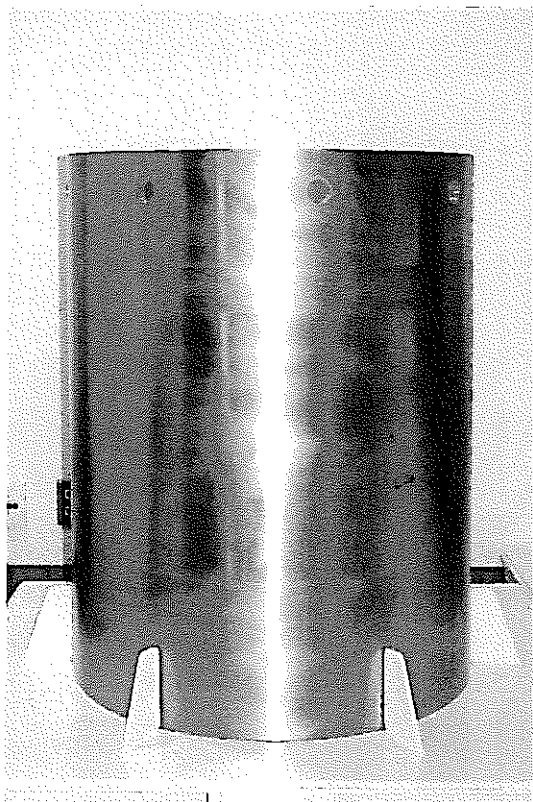


写真-14 完成

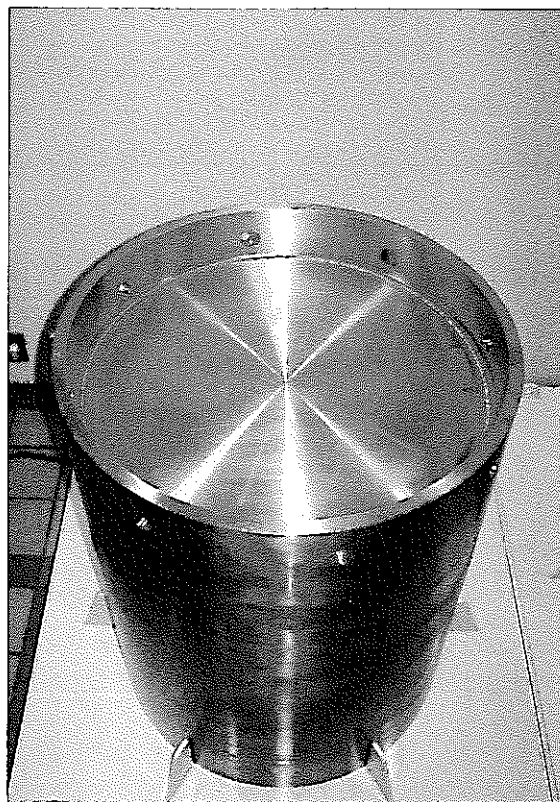


写真-15 完成

資料-2 試験・検査写真集

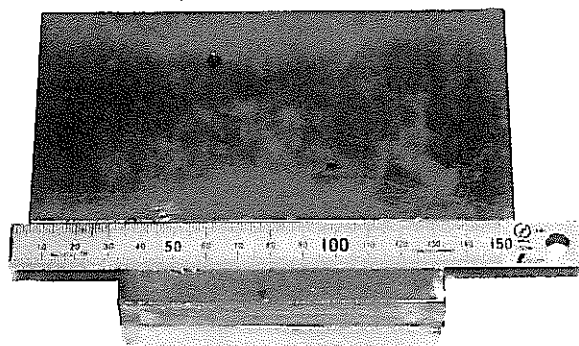


写真 2-1 対比試験片

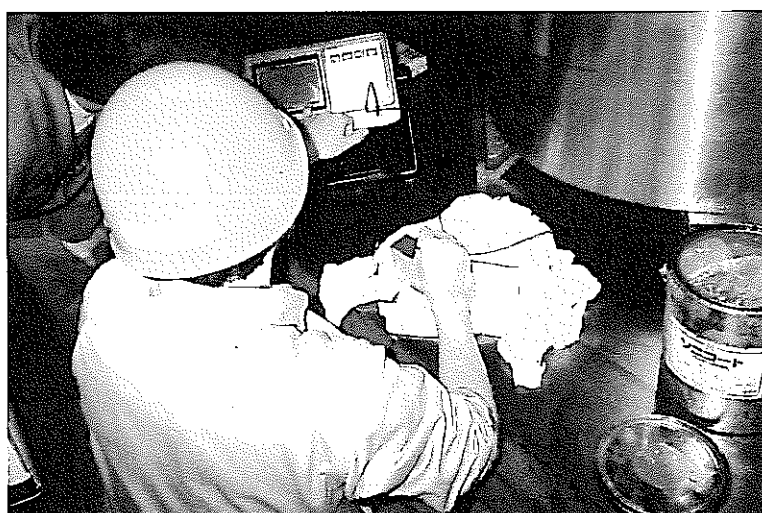


写真 2-2 対比試験片を用いた校正作業

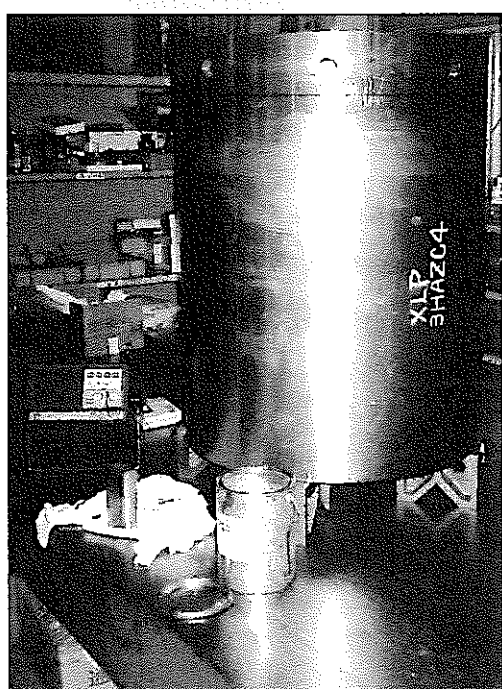


写真 2-3 検査前容器および検査機器

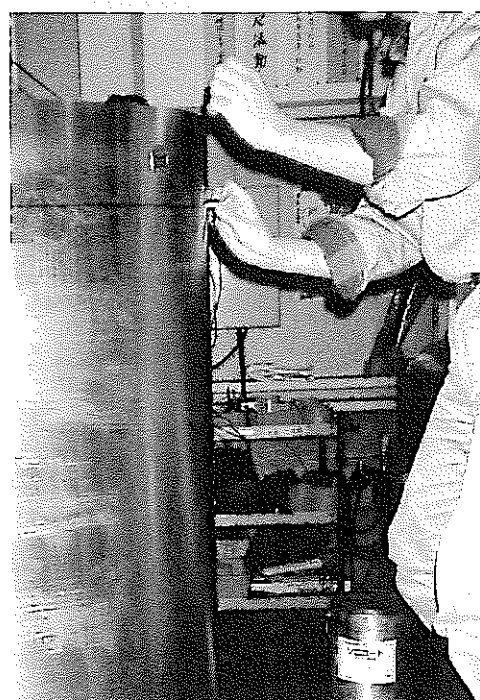


写真 2-4 溶接部の超音波探傷検査

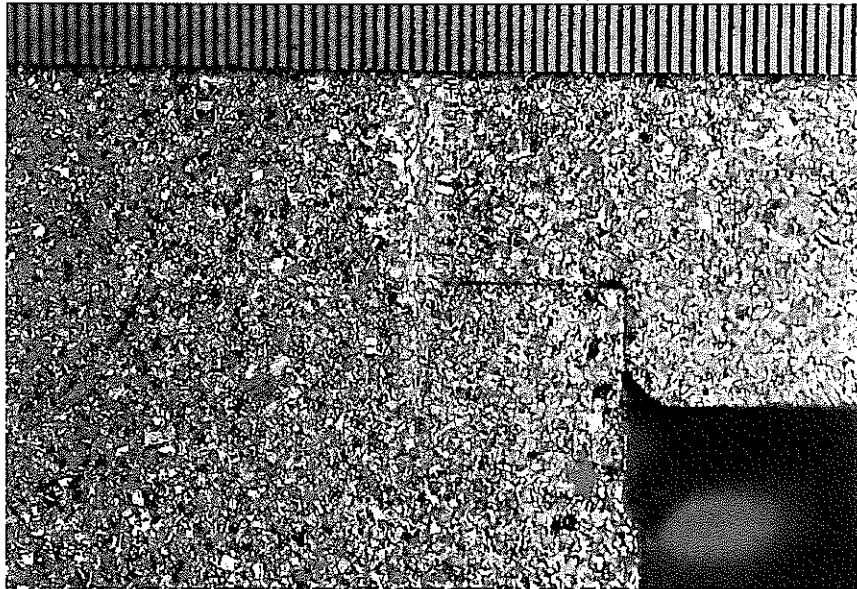
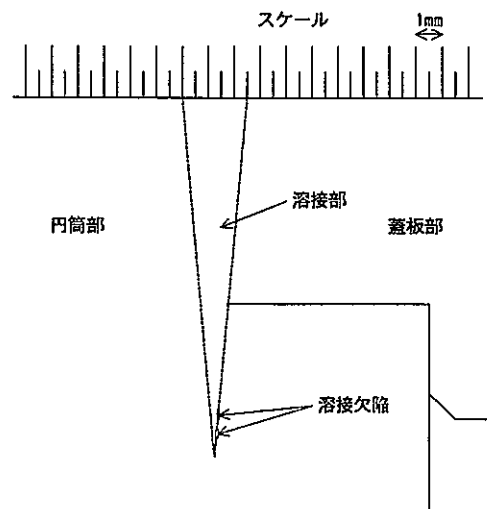
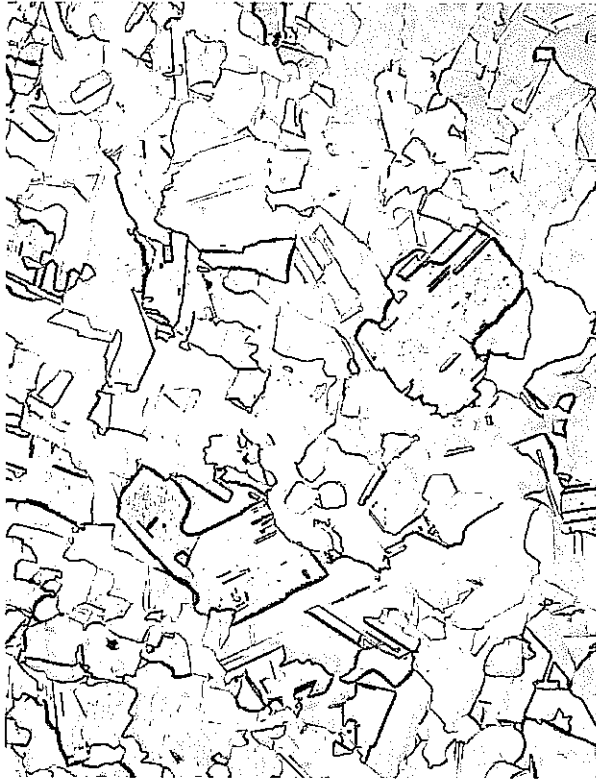
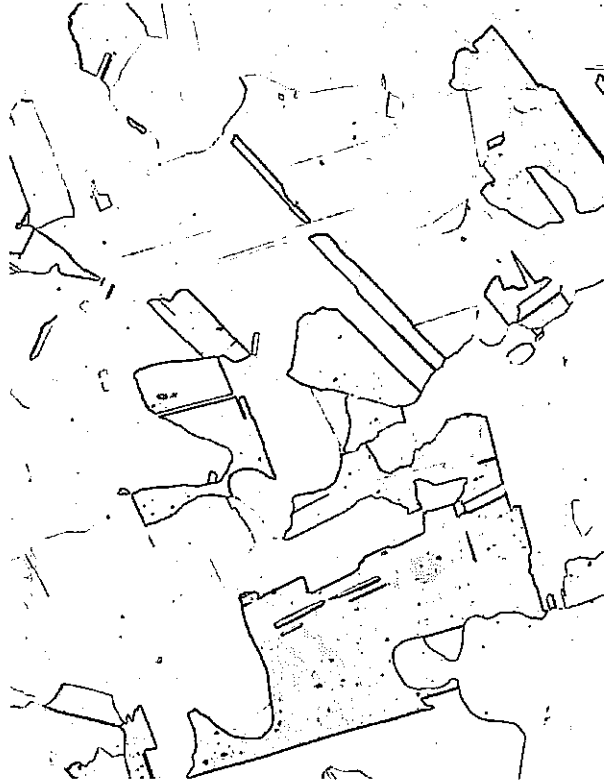


写真 2-5 溶接部断面写真

円筒上端部 (FT11)



蓋板中心部 (FT7)



底板端部 (FB2)



底板中心部 (FB1)



200 μ m

写真 2-6 組織観察写真 (FT11, FT7, FB1, FB2)

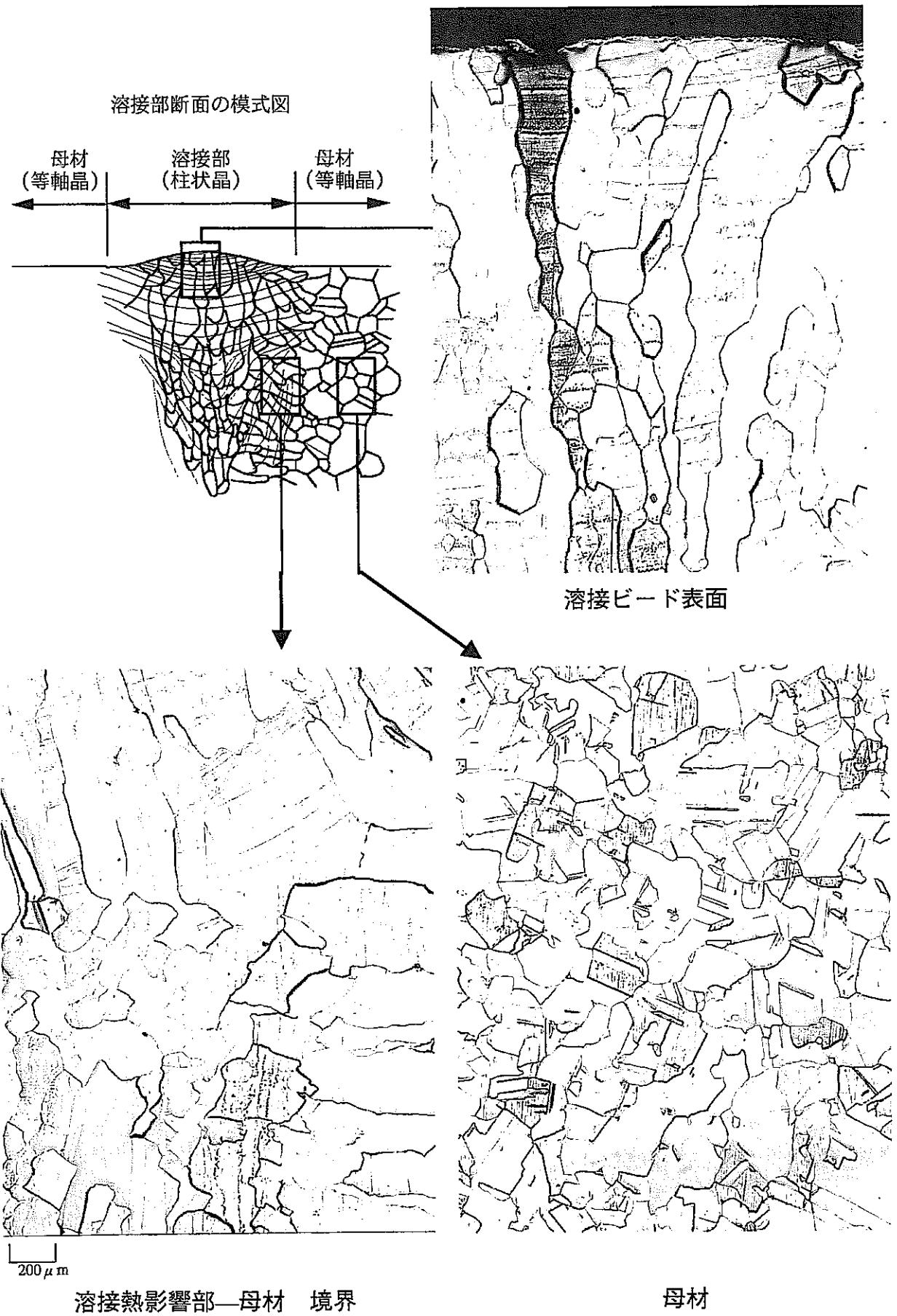


写真 2-7 FT11 溶接部の断面写真

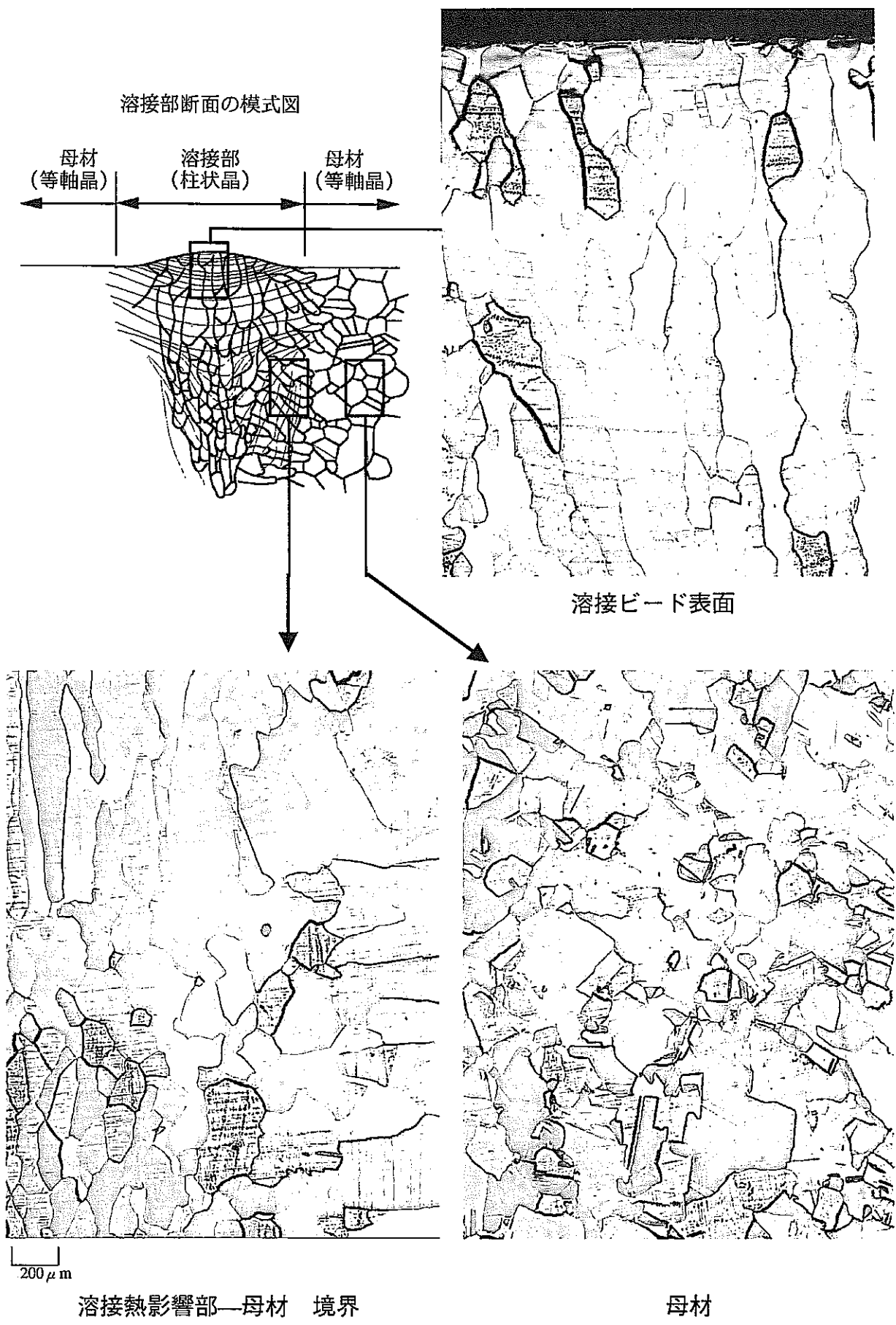


写真 2-8 FT4 溶接部の断面写真

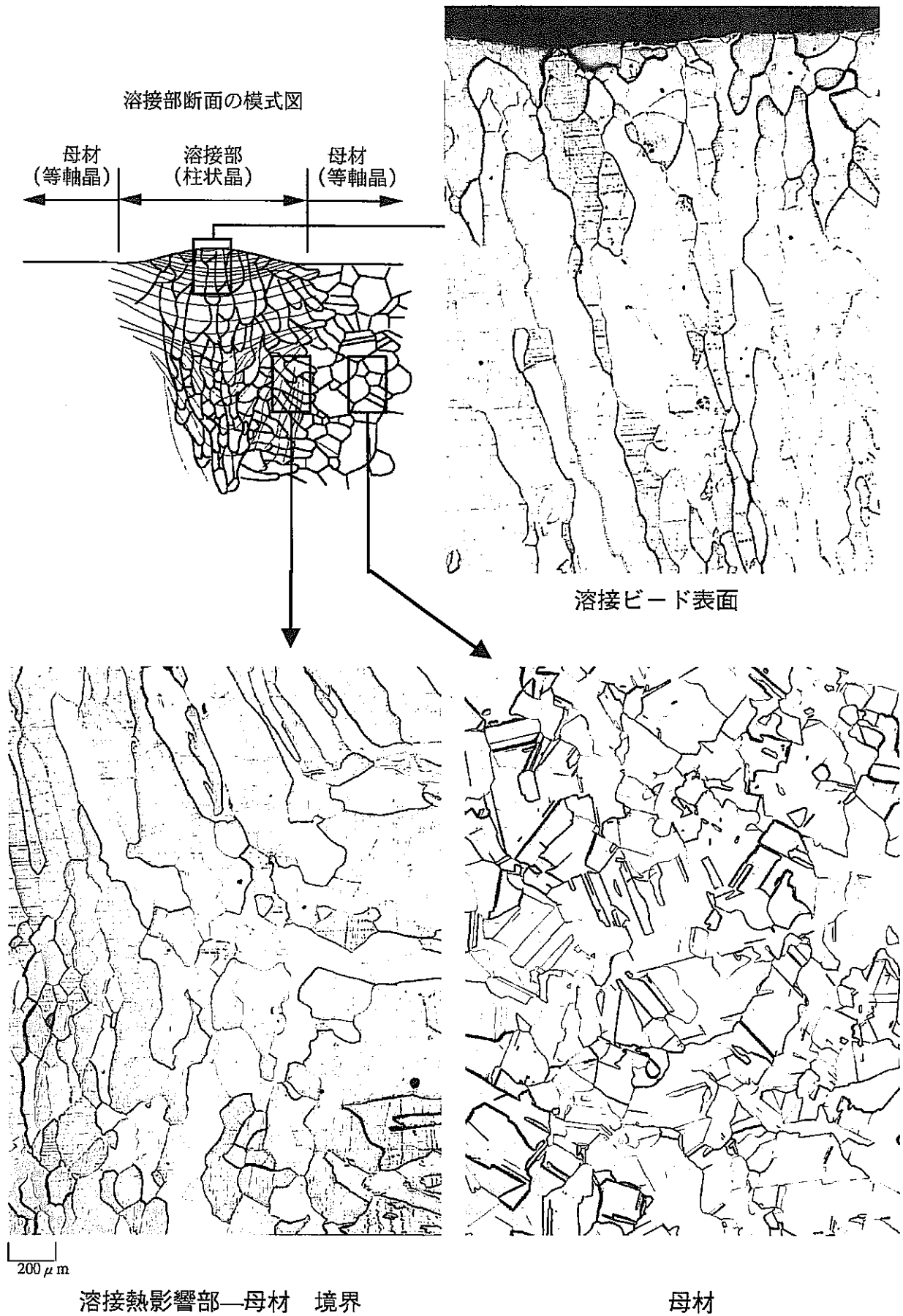
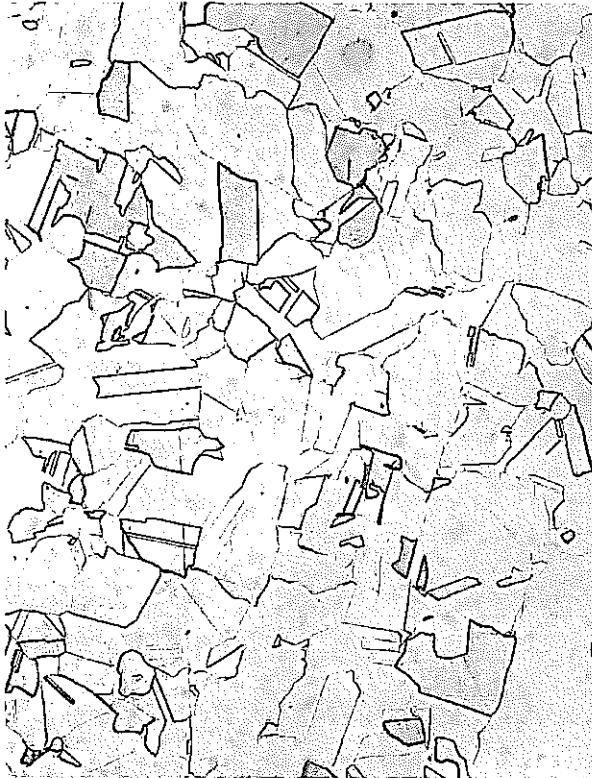
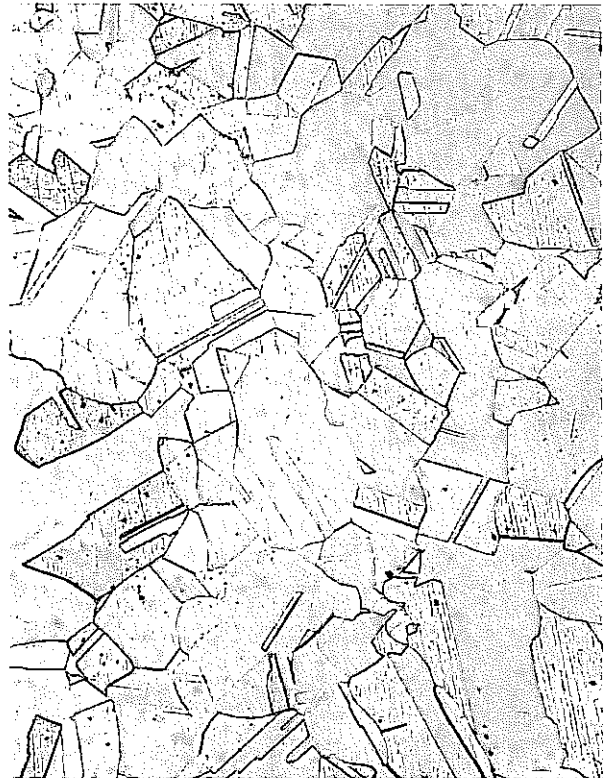


写真 2-9 FT1 溶接部の断面写真

円筒上端部 (XT11)



蓋板中心部 (XT7)



円筒上端部 (XB2)



蓋板中心部 (XB1)



200 μ m

写真 2-10 組織観察写真 (XT11, XT7, XB1, XB2)

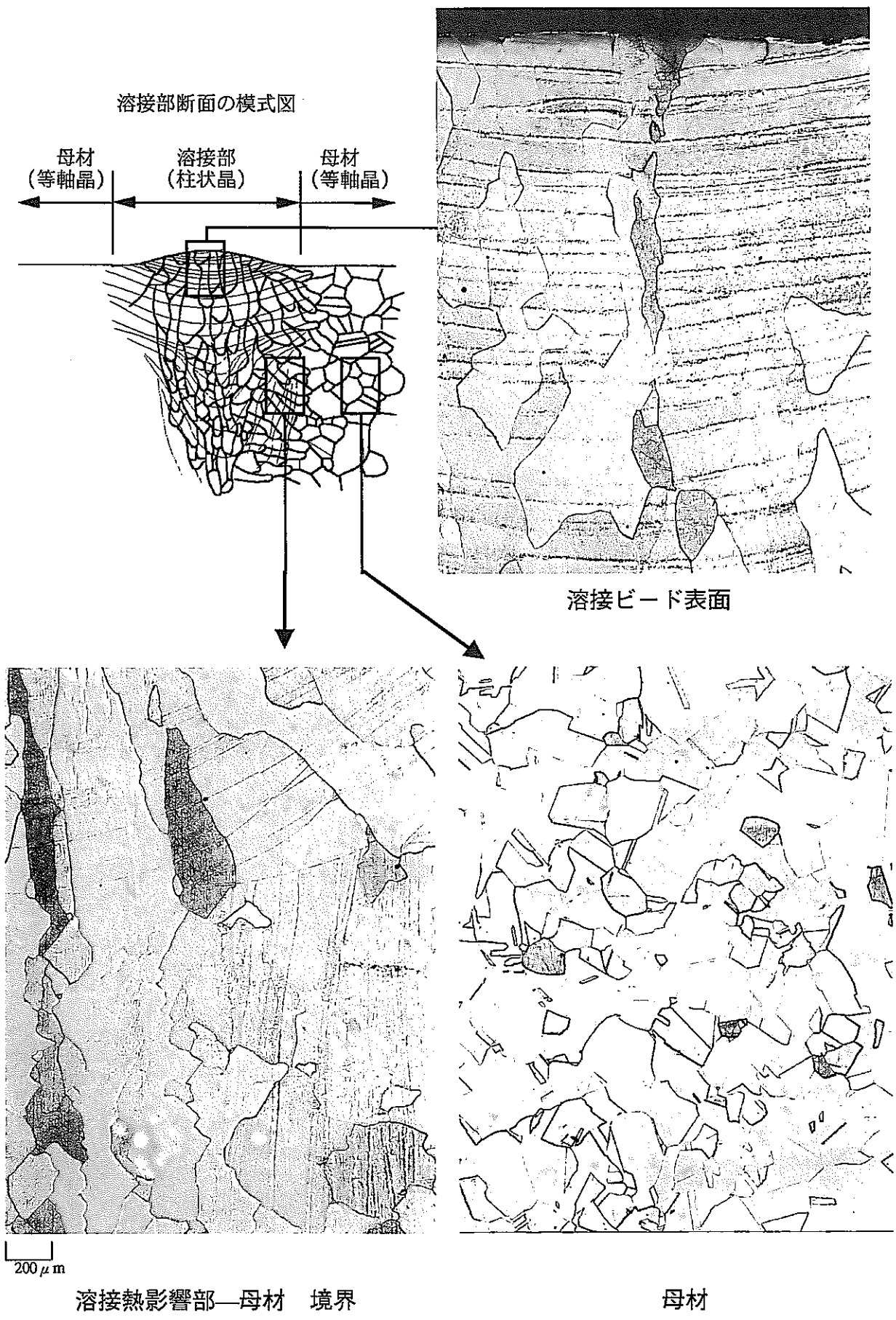


写真 2-11 XT11 溶接部の断面写真

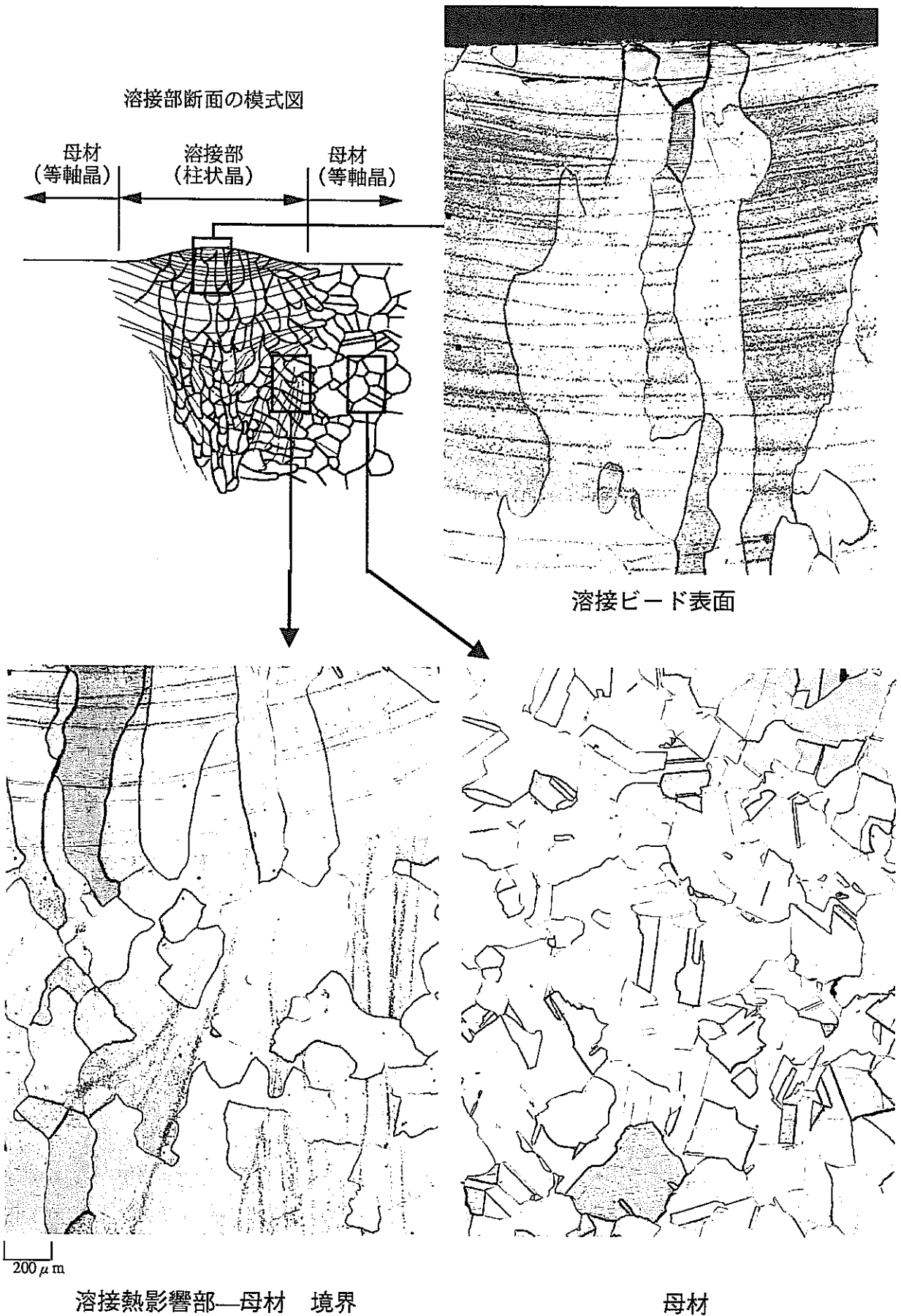


写真 2-12 XT4 溶接部の断面写真

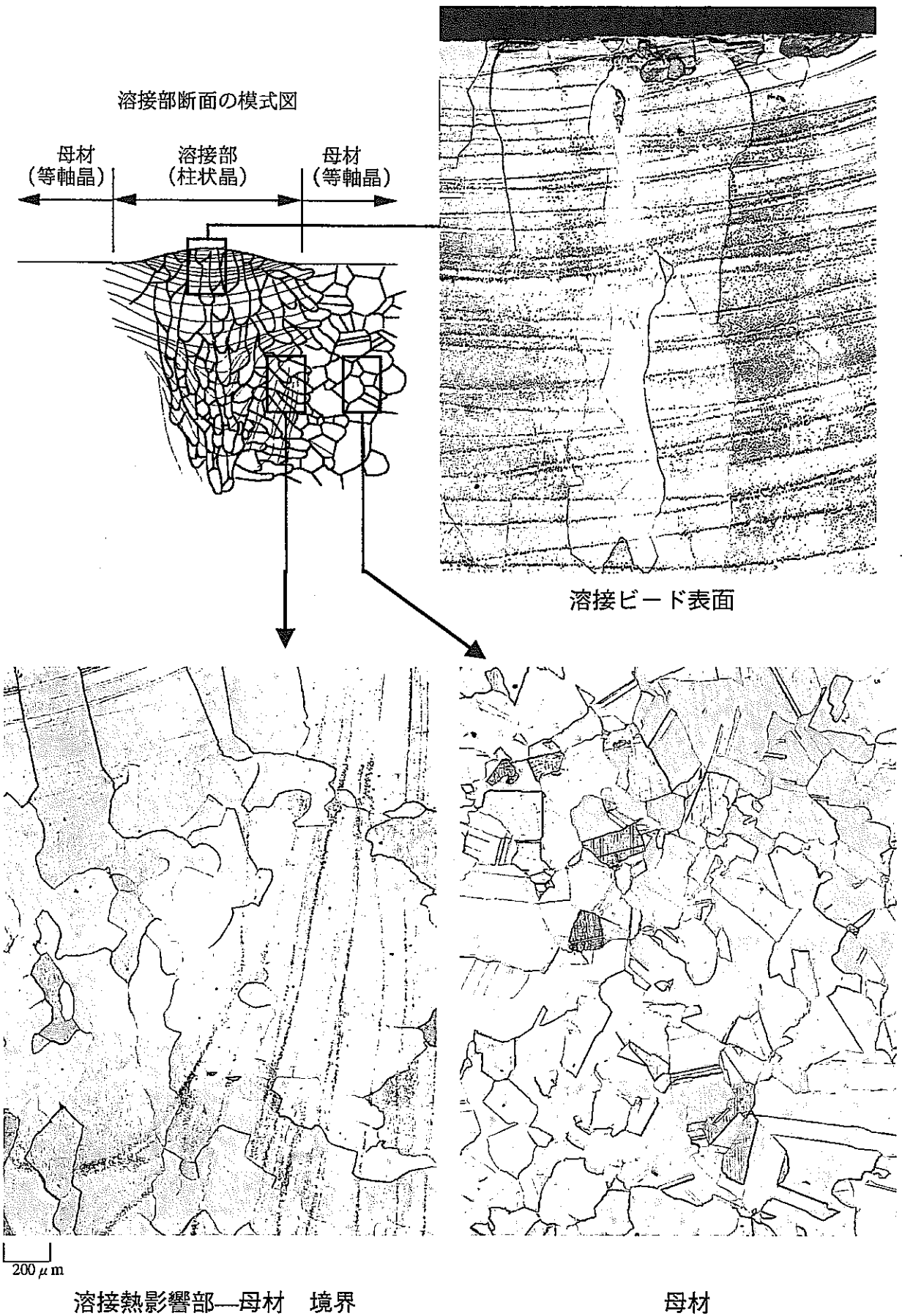


写真 2-13 XT1 溶接部の断面写真



写真 2-14 ビッカース硬さ試験

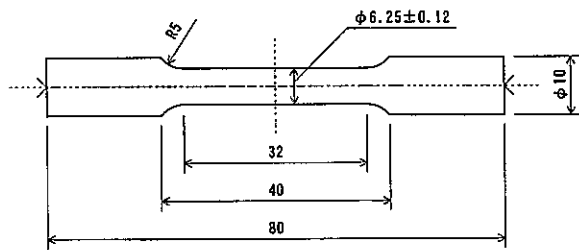


写真 2-15 引張試験片

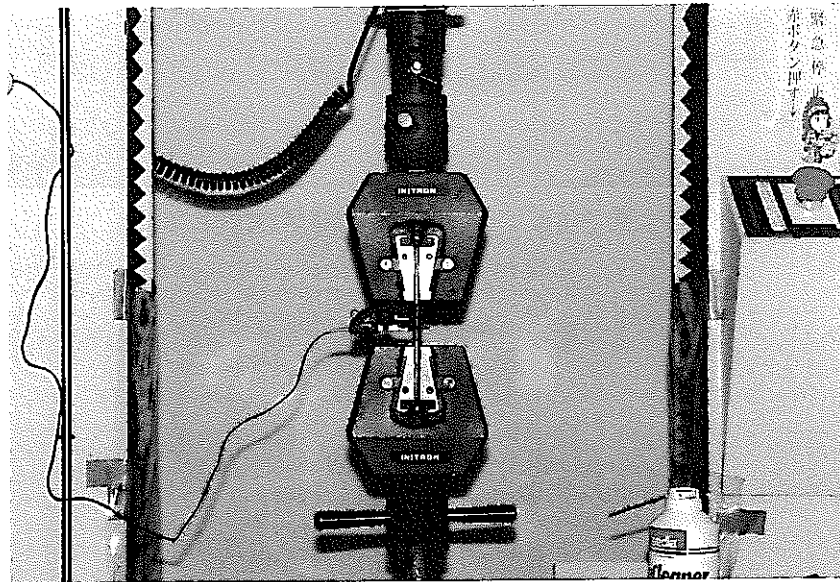


写真 2-16 引張試験装置 (試験前)

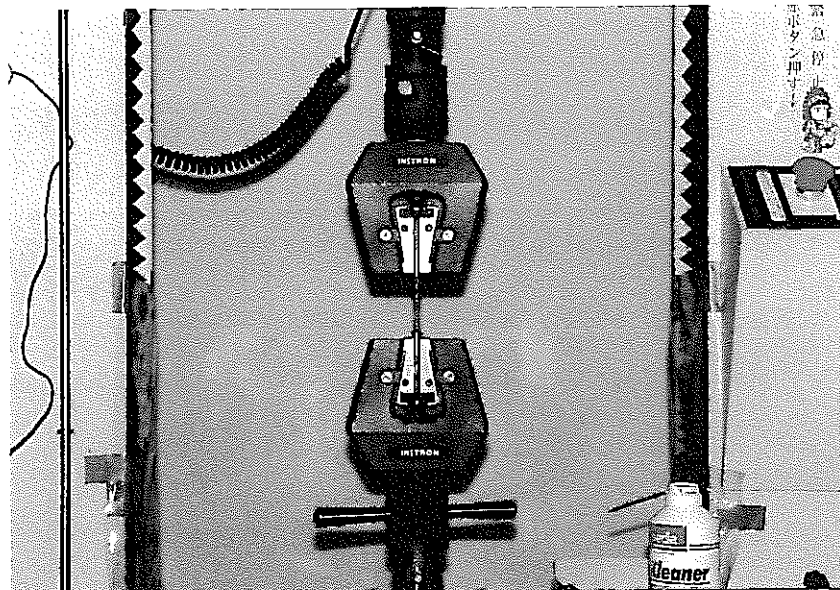


写真 2-17 引張試験装置 (試験後)

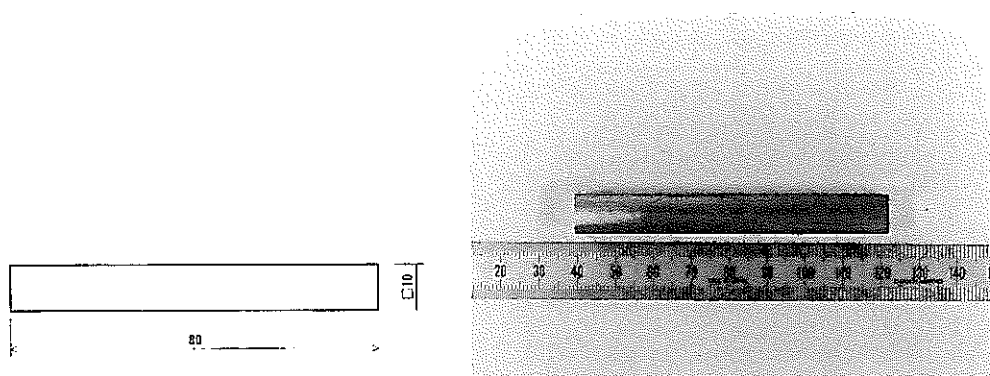


写真 2-18 曲げ試験片

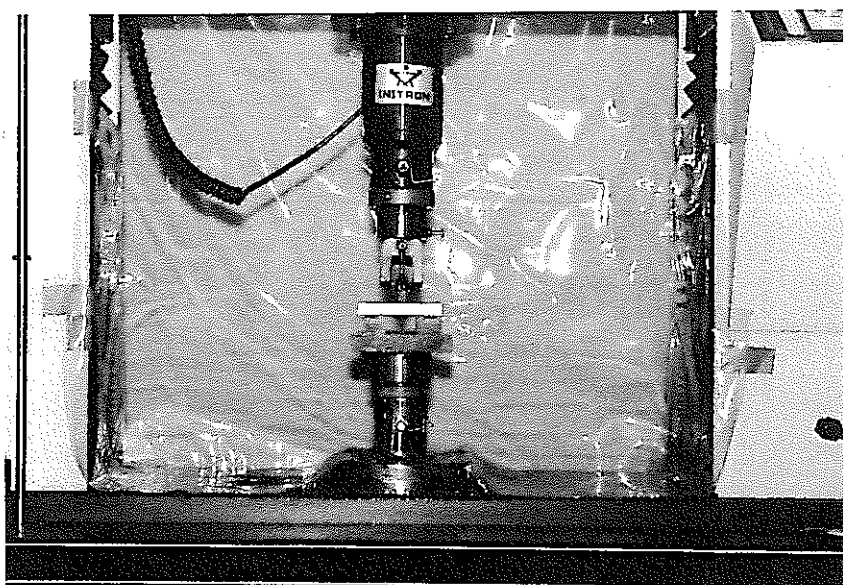


写真 2-19 曲げ試験装置 (試験前)

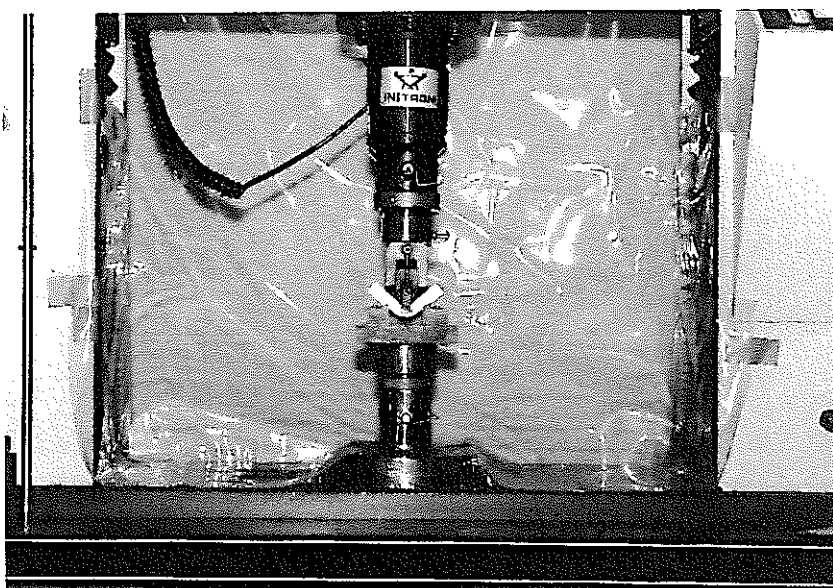


写真 2-20 曲げ試験装置 (試験後)