

銅-炭素鋼オーバーパックの 製作技術に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託成果報告書)

1999年2月

三菱マテリアル株式会社

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。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

銅-炭素鋼オーバーパックスの製作技術に関する研究

大迫顕彦*, 田中宏和*, 高橋浩*, 下田收*

要 旨

高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発においては、人工バリアに要求される性能を確保し得る技術的方法を明らかにするため、人工バリアの設計、製作及び施工に関する工学的検討が行われている。

現在、人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパックスについては、炭素鋼単体構造からなる炭素鋼オーバーパックスと、構造強度を維持するための炭素鋼本体にチタン、銅などによる耐食層を設けた二重構造からなる複合オーバーパックスという二つの概念が示されており、それぞれに対してその機能性、施工性の面から検討が進められている。

本委託研究では、昨年度構築した銅-炭素鋼オーバーパックス概念に基づく銅製外容器について、製作候補技術の適用性に係る知見、データを取得することを目的に、実規模程度の製作試験を通じて各種評価を行うものである。

本報告書は、三菱マテリアル株式会社が核燃料サイクル開発機構殿の委託により実施した研究内容である。

契約番号 : 100D0229

核燃料サイクル開発機構担当部課室及び担当者 :

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター

処分研究部 処分バリア性能研究グループ 千葉恭彦殿

* : 三菱マテリアル株式会社 原燃サイクル事業センター 原子力技術部

Test Manufacturing Study of Copper Canisters for Composite Overpack

Akihiko Osako*

Hirokazu Tanaka*

Hiroshi Takahashi*

Osamu Simoda*

Abstract

In study and development of high-level radioactive waste geological disposal, engineering study is being carried out on design, manufacturing, and installation of the engineering barrier to clarify the engineering method that can ensure performances necessary for the engineering barrier.

For the overpack, which is one of composition elements of the engineering barrier, at present there are two conceptions; i.e. a carbon steel overpack (of simplex carbon steel construction) and a composite overpack (of two-layer construction having a carbon steel inside for strength and titanium, copper or others outside for corrosion resistant). Studies are being carried out on them from the viewpoints of their respective functions and manufacturing. With respect to the carbon steel overpack, development elements in manufacturing technology have already been extracted through manufacturing full-scale models.

In this entrusted study, we carried out some tests to obtain informations about applicability of some manufacturing method, through manufacturing of full-scale copper canister model which established in the manufacturing method study of last year.

Work performed by Mitsubishi Materials Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

Contract No. 100D0299

JNC Liaison: Barrier Performance Group

Waste Isolation Research Division

Waste Management and Fuel Cycle Research Center

Tokai Works

Takahiko Chiba

* : Mitsubishi Materials Corporation Nuclear Fuel Cycle Technology Center Nuclear Engineering Dept.

目 次

1. はじめに	1
2. 銅製外容器の製作試験	2
2.1 製造工程概要	4
2.2 鋳造	5
2.3 分解鍛造・切削加工	5
2.4 熱間後方押し出し・切削加工	7
2.5 溶接	15
3. 溶接部に対する超音波探傷試験	19
3.1 使用機器	19
3.2 試験方法	19
3.3 試験結果	22
3.3.1 リン入り無酸素銅エコー観察結果	25
3.3.2 無酸素銅エコー観察結果	27
4. 組織観察、結晶粒度測定及び材料強度試験	31
4.1 評価試験項目	31
4.2 試験片の採取	31
4.2.1 評価位置および試験片採取手順	31
4.2.2 ブロックの採取部	31
4.2.3 試験片の採取部と個数	33
4.3 試験方法と結果	33
4.3.1 組織観察	33
4.3.2 粒度測定	33
4.3.3 硬さ試験	44
4.3.4 引張試験	50
4.3.5 曲げ試験	53
4.4 評価試験結果まとめ	53
5. 製作試験結果の評価	56
5.1 熱間後方押し出しによる円筒／底板一体成形法の適用性	56
5.2 機械加工による成形性	56

5.3 電子ビーム溶接の適用性	56
5.4 溶接部に対する超音波探傷試験の適用性	57
5.5 銅製外容器の材質	57
5.6 銅-炭素鋼オーバーパック製作コスト	57
6. 腐食試験片の採取	59
7. 研究開発計画の作成	61
(参考文献)	62
(添付資料) 製作試験要領書	63

表 目 次

表 2.2-1	目標材料組成及び分析値	5
表 2.4-1	使用設備概要	7
表 2.4-2	熱間後方押し出し加工時の加工条件	7
表 2.5-1	電子ビーム溶接装置仕様	15
表 3.1-1	機器仕様	19
表 4.2-1	評価試験片採取個数	35
表 4.3-1	外容器評価試験結果：無酸素銅(OFC)	45
表 4.3-2	溶接部断面ビッカース硬さ測定結果：無酸素銅(OFC)	46
表 4.3-3	外容器評価試験結果：リン入り無酸素銅(XLP)	47
表 4.3-4	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)	48
表 5.6-1	銅-炭素鋼オーバーパック製作コスト	58
表 6-1	腐食試験片寸法測定結果	59

目 次

図 1-1 後方押し出し加工概念図	1
図 2-1 試作用外容器の概略形状	3
図 2.1-1 外容器製造工程	4
図 2.2-1 連続鋳造の概念図	6
図 2.4-1 銅製外容器本体加工図	13
図 2.4-2 銅製蓋加工図	14
図 3.2-1 対比試験片	19
図 3.2-2 探傷前のディスプレイの状態	20
図 3.2-3 位置Aにてゲイン調整後のエコー状態	20
図 3.2-4 位置Bでのエコー状態	21
図 3.2-5 位置Cでのエコー状態	21
図 3.3-1 エコー発生推定原因	22
図 3.3-2 リン入り無酸素銅スパイク部の探傷結果	25
図 3.3-3 リン入り無酸素銅ラップ部の探傷結果	25
図 3.3-4 リン入り無酸素銅クレータ部の探傷結果(エコー立ち上がり箇所)	26
図 3.3-5 リン入り無酸素銅クレータ部の探傷結果(通常部)	26
図 3.3-6 無酸素銅健全部の探傷結果	27
図 3.3-7 無酸素銅スパイク部の探傷結果	27
図 3.3-8 無酸素銅ラップ部の探傷結果	28
図 3.3-9 無酸素銅クレータ部の探傷結果	28
図 3.3-10 無酸素銅欠陥部の探傷結果の例(その1)	29
図 3.3-11 無酸素銅欠陥部の探傷結果の例(その2)	29
図 3.3-12 無酸素銅欠陥部の探傷結果の例(その3)	30
図 4.2-1 各ブロックの採取部	32
図 4.2-2 評価試験片採取箇所	34
図 4.3-1 引張り試験片	51
図 4.3-2 曲げ試験片	51
図 4.3-3 三点曲げ試験治具	54
図 6-1 腐食試験片の採取箇所	60

写 真 目 次

写真 2.4-1	加熱した銅を受け台にセット	8
写真 2.4-2	コンテナをセット	8
写真 2.4-3	押しポンチをセット	9
写真 2.4-4	後方押し出し加工中	9
写真 2.4-5	後方押し出し完了	10
写真 2.4-6	後方押し出し完了後	10
写真 2.4-7	切削加工前の状況	11
写真 2.4-8	外径及び端面加工中	11
写真 2.4-9	内径加工中	12
写真 2.5-1	溶接装置の外観	15
写真 2.5-2	治具取付け状況	16
写真 2.5-3	溶接装置へのセット時の状況	16
写真 2.5-4	溶接終了後の溶接部近傍の状態	16
写真 2.5-5	加工終了後の外容器外観	17
写真 2.5-6	展示品外観	18
写真 3.3-1	検査前容器及び検査機器	23
写真 3.3-2	対比試験片による確認作業	23
写真 3.3-3	容器検査	23
写真 3.3-4	溶接部断面写真	24
写真 4.3-1	FT11、FT7、FB1、FB2 の断面組織	36
写真 4.3-2	FT11 溶接部の断面組織	37
写真 4.3-3	FT4 溶接部の断面組織	38
写真 4.3-4	FT1 溶接部の断面組織	39
写真 4.3-5	XT11、XT7、XB1、XB2 の断面組織	40
写真 4.3-6	XT11 溶接部の断面組織	41
写真 4.3-7	XT4 溶接部の断面組織	42
写真 4.3-8	XT1 溶接部の断面組織	43
写真 4.3-9	ビッカース硬さ試験	49
写真 4.3-10	引張試験	52

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発においては、人工バリアに要求される性能を確保し得る技術的方法を明らかにするため、人工バリアの設計、製作及び施工に関する工学的検討が行われている。

現在、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、炭素鋼単体構造からなる炭素鋼オーバーパックと、構造強度を維持するための炭素鋼本体にチタン、銅などによる耐食層を設けた二重構造からなる複合オーバーパックという二つの概念が示されており、それぞれに対してその機能性、施工性の面から検討が進められている。

本委託研究では、第二次技術報告書に反映するため、昨年度構築した銅-炭素鋼オーバーパック概念に基づく銅製外容器について、製作候補技術の適用性に係る知見、データを取得することを目的に、実規模程度の製作試験を通じて各種評価を行った。

昨年度設計した銅-炭素鋼オーバーパックの特徴は、炭素鋼製内容器と銅製外容器を別構造としている点と銅製外容器の加工方法として後方押出し加工(図1-1に後方押出し加工の概念図を示す。)を選択している点である。それぞれの選定理由として、以下の項目が挙げられる。

(炭素鋼製内容器と銅製外容器を別構造とした根拠)

- ・ 内容器の重量を受けるための外容器肉厚の増分は、大幅なものにならない。
- ・ 製作工程の自動化、量産化が容易である。
- ・ 蓋接合部の構造を単純化できる。
- ・ 内容器の蓋固定方法にボルト締めを選択できる。

(銅製外容器の加工方法に後方押出し加工を選択した根拠)

- ・ 溶接箇所が少ない。また、溶接検査工数が少ない。
- ・ 加工数が少なくなる可能性がある。

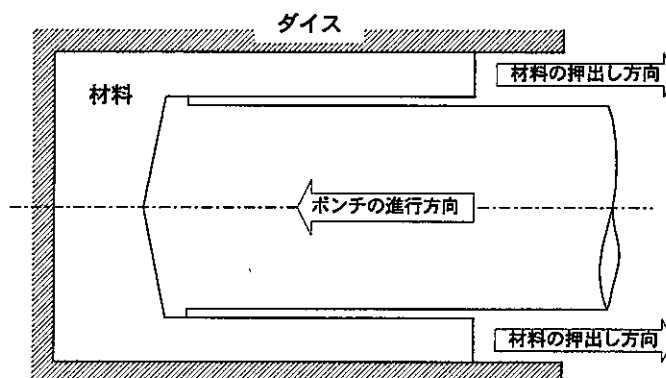


図1-1 後方押出し加工概念図

2. 銅製外容器の製作試験

昨年度の「複合オーバーパックの設計研究(Ⅱ)」(PNC ZJ1211 98-004)(以下、「昨年度研究」という。)で行なった、銅-炭素鋼オーバーパックの構造概念及び製作方法に基づき、銅製外容器の試作を行った。

試作する外容器の概略形状を図 2-1 に示す。銅の腐食代は、「人工バリアの信頼性向上及び高度化技術の研究(Ⅱ)」(PNC ZJ1150-96-001)で採用されている 12mm を切り上げて 20mm とした。昨年度研究の結果、外容器の肉厚は機械的強度を確保するために、腐食代以上の厚さとなった。

今回の試作品は、昨年度研究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 1,000mm(実規模容器高さ 1,955mm)とした。これは、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連続鑄造法で製作可能な最大断面の鑄塊により押し加工を行った場合、実規模容器の大きさまで加工が出来ない可能性があるため、十分製作可能と考えられる高さとして上記寸法としたためである。なお、径方向については実規模容器をそのまま摸した大きさとなっている。

試作用の材料は、組成の均一化を図るため連続鑄造により製作を行った。また、その組成については

【ケース1】 スウェーデンSKB仕様(あるいは準じた仕様)の無酸素銅。

【ケース2】 一般的な無酸素銅。

の2ケースについて実施し、試作数は、ケース1について2体、他方について1体の計3体とした。

またその後の加工は、円筒部を熱間後方押しにより底板一体で成形し、機械加工により最終寸法に仕上げた。また、蓋板の取付けは電子ビーム溶接にて行うこととした。蓋部取付部の外容器本体側に設ける段の幅(図2-1のA部詳細参照)は、溶接時に外容器本体側まで溶融して、蓋が下方にずれることがないように昨年度設計時の2mmから8mmに変更した。試作品のうち、ケース1、ケース2のそれぞれ1体は各種評価試験に供するものとし、残りのケース1の1体は納入対象とした。

A部詳細

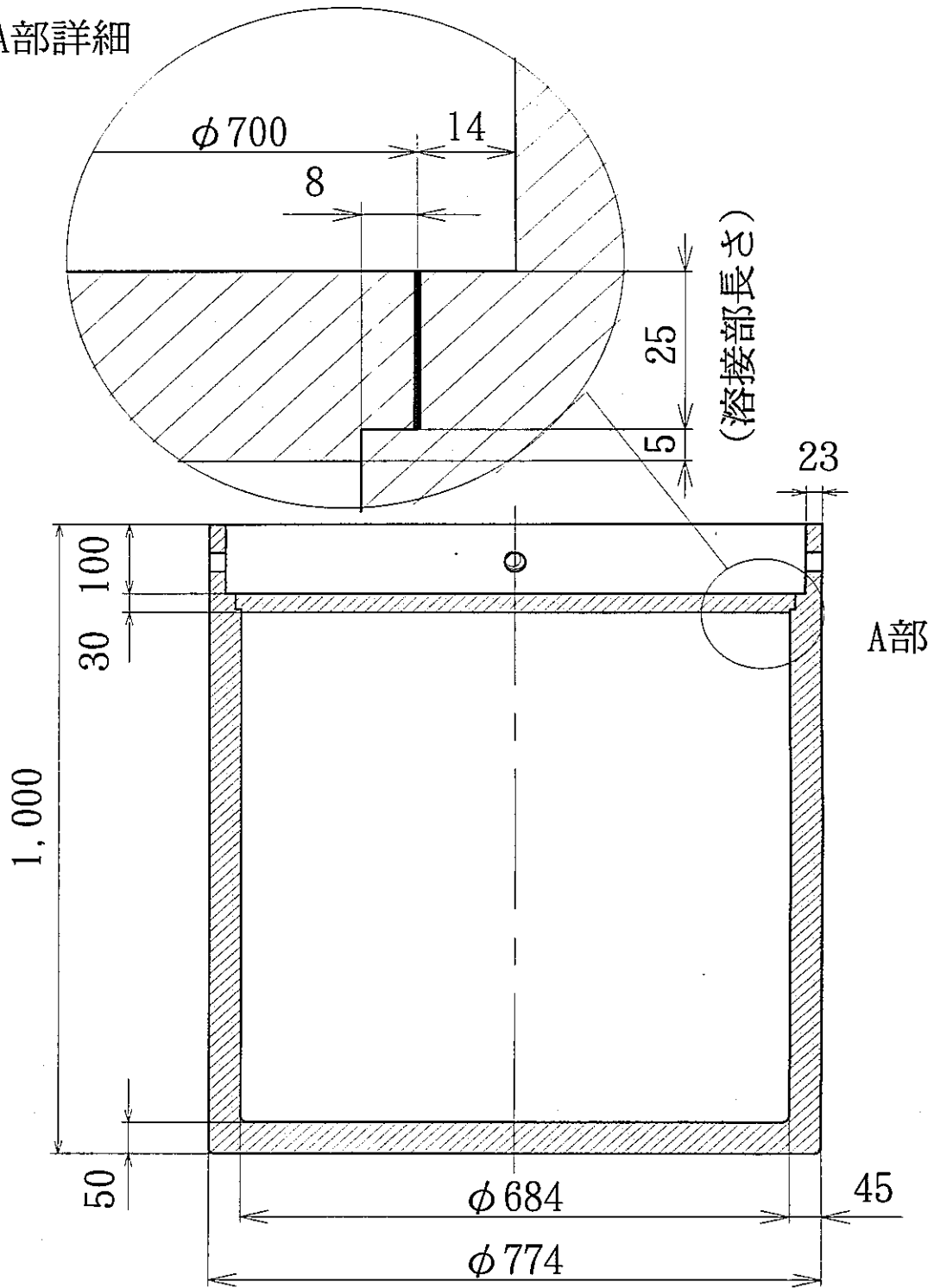


図 2-1 試作用外容器の概略形状

2.1 製造工程概要

本試作の製造工程を図 2.1-1 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。

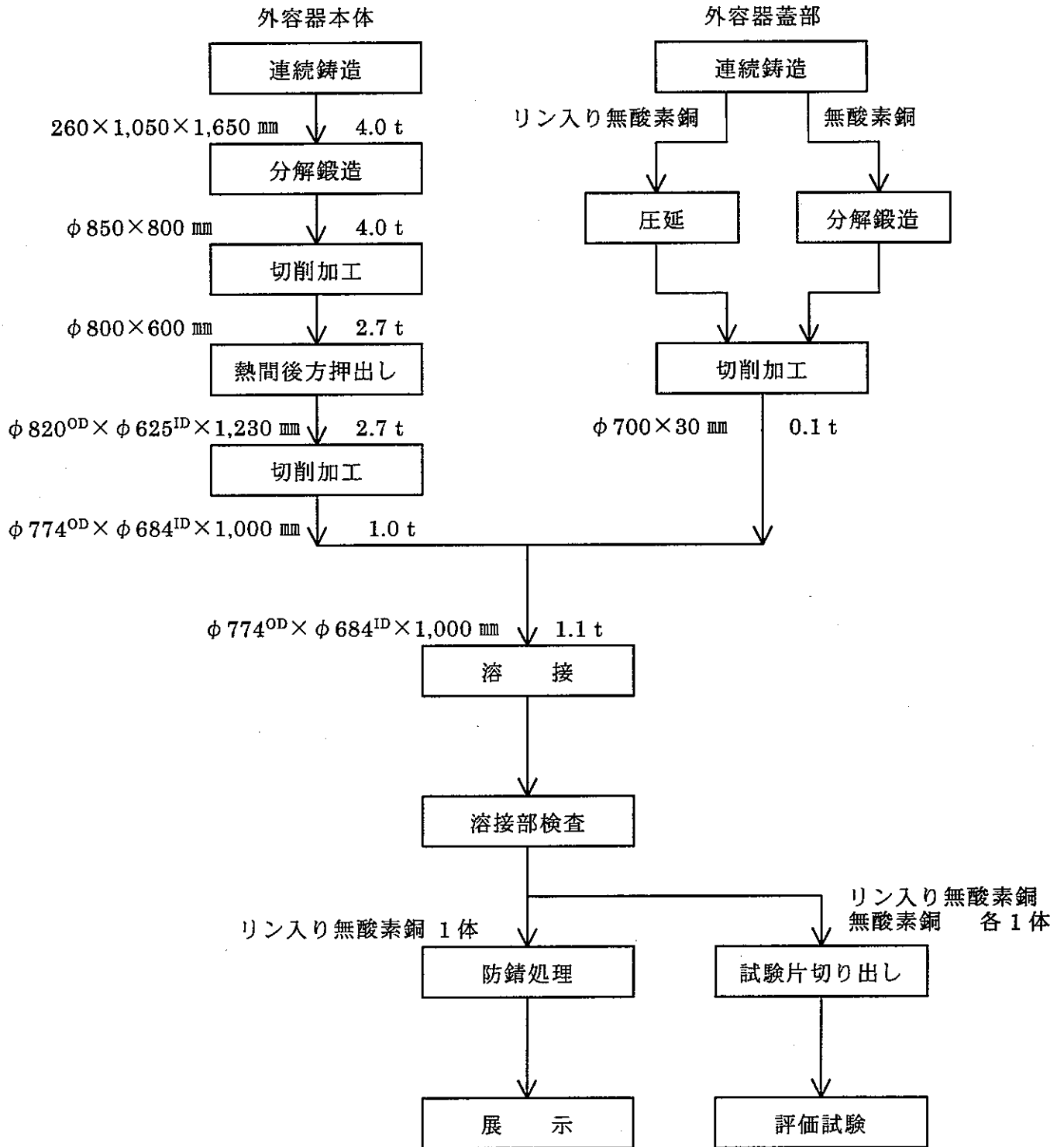


図 2.1-1 外容器製造工程

2.2 鋳造

前述の通り、組成の均一化を図るため連続鋳造法により材料の鋳造を行った。連続鋳造の概念を図 2.2-1 に示す。また、その組成については

【ケース1】 スウェーデンSKB仕様（あるいは準じた仕様）の無酸素銅。

【ケース2】 一般的な無酸素銅。

の2種の製作を行うものとした。その目標材料組成を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 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 (スウェーデンSKB仕様)			無酸素銅		
	目標値	鋳造後	溶接部	目標値	鋳造後	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。

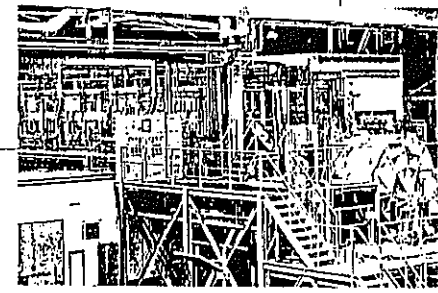
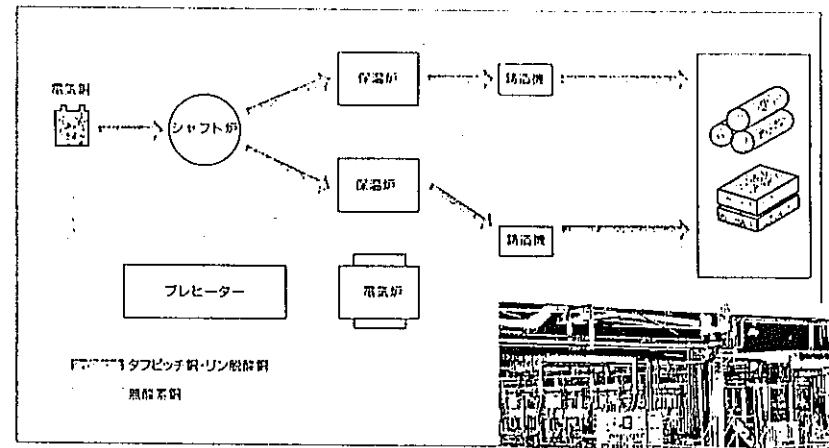
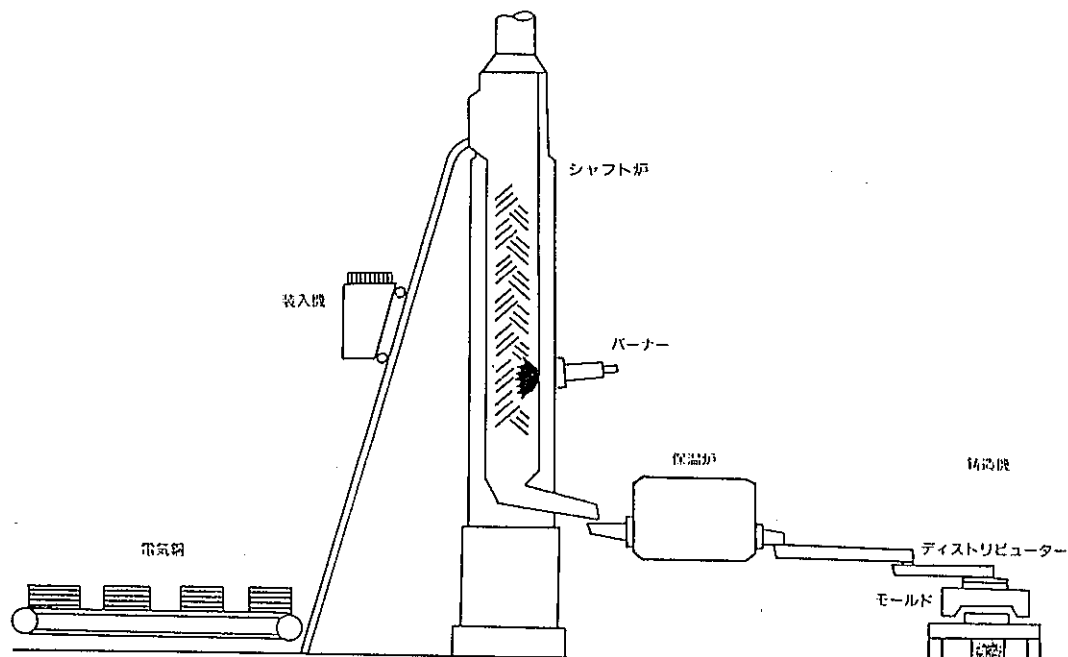
*2: SKB 仕様。(SKB, "SKB Annual Report 1996", SKB Technical Report 96-25, 1997)

本工程終了後に材料の成分分析を行い所定の仕様を満たしていることの確認を行った。

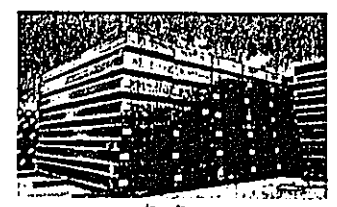
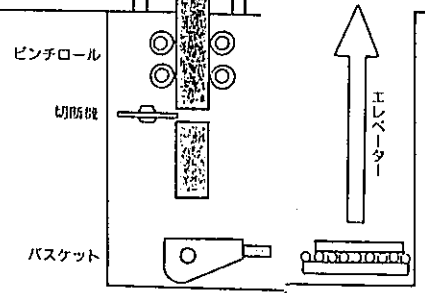
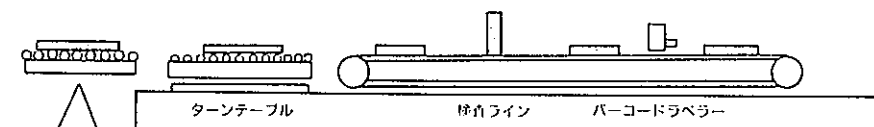
連続鋳造で製作した鋳塊の概略寸法は、260×1,050×1,650mm の四角柱とした。鋳塊重量は約 4.0t であった。円柱形状で鋳塊を製作すると分解鍛造工程が簡略化できるが、現在連続鋳造で製造可能な最大径はφ380mm であり、所定寸法(φ850mm×800mm)まで鍛造するためには素材が長くなりすぎて鍛造のストロークが確保出来ない。

2.3 分解鍛造・切削加工

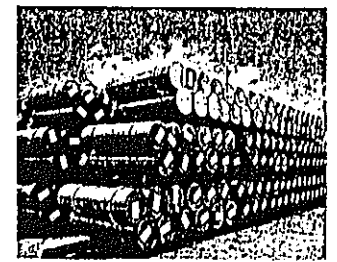
上記連続鋳造により製作した鋳塊を、熱間後方押し出し加工に供するよう円筒形に成形するため分解鍛造加工を行った。鍛造加工では、座屈、加熱による脆化・鍛造割れ等が発生しないよう数回に別けて加工するとともに、これらが表面近傍で発生した場合でも最終的には旋盤加工で所定の寸法に加工出来るよう十分な余裕を持った大きさとした。本工程終了後に材料の超音波探傷試験及び寸法検査を行い所定の仕様を満たしていることの確認を行った。分解鍛造(切削加工含む)後の寸法はφ800×600mm(重量: 約 2.7t)とした。



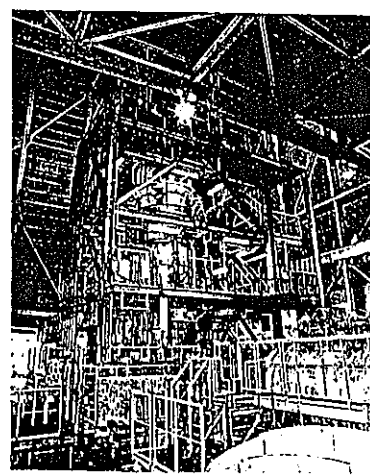
加酸銅製錬設備
Melting System for OFC



ケーキ
Cakes



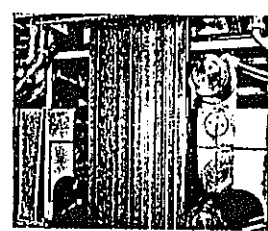
ビレット
Billets



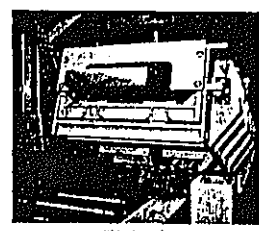
シャフト炉
Shaft Furnace



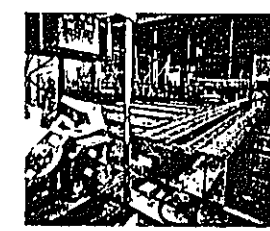
铸造
Casting



ピンチロール
Pinch-Rolls



バスケット
Tilting Basket



検査ライン
Inspection Conveyor Line

図 2.2-1 連続鑄造の概念図 (三菱マテリアル株式会社堺工場カタログより)

2.4 熱間後方押し・切削加工

熱間後方押しにより胴部及び蓋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 2.4-1 に記す。また、熱間後方押し加工時の加工条件を表 2.4-2 に記す。なお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 2.4-1 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 1,500mm 普通旋盤及び中ぐり盤

表 2.4-2 熱間後方押し加工時の加工条件

材料名		1 回目	2 回目	3 回目
		リン入り無酸素銅 (スウェーデンSKB仕様)	リン入り無酸素銅 (スウェーデンSKB仕様)	無酸素銅
加工条件	加熱温度	830℃	830℃	830℃
	圧下量	490mm	490mm	490mm
	圧下速度	11.3mm/sec	0.8mm/sec	4.9mm/sec

加工時の状況を写真 2.4-1～9 に示す。また、加工後の本体及び蓋の図面を図 2.4-1～2 に示す。

加工後の全高は 1,200mm～1,300mm となり、加工前に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、鋼製内容器あるいは複合オーバーパックだけでなく鋼製オーバーパックにも適応可能な技術であり、量産化においてこれら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。

以上に述べたように、今回の試作加工においては、各工程で考えられるリスクを考慮し約 4.0 t の铸塊から約 1.0 t の試作品を製作したが、今後量産化に向けてこれらのリスク評価とリスク低減方法について検討を行う必要がある。

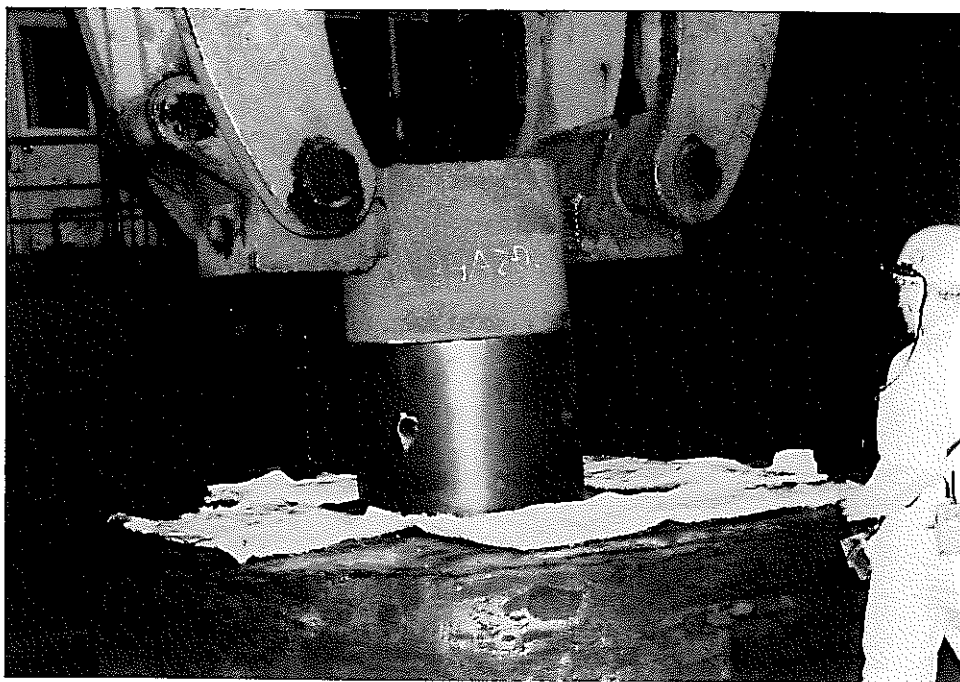


写真 2.4-1 加熱した銅を受け台にセット

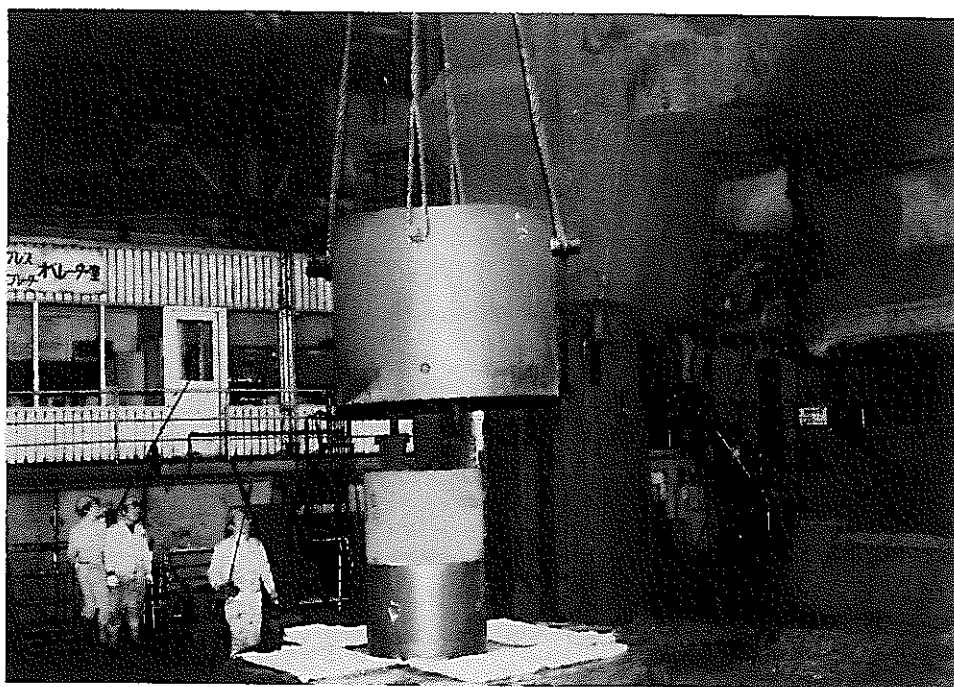


写真 2.4-2 コンテナをセット

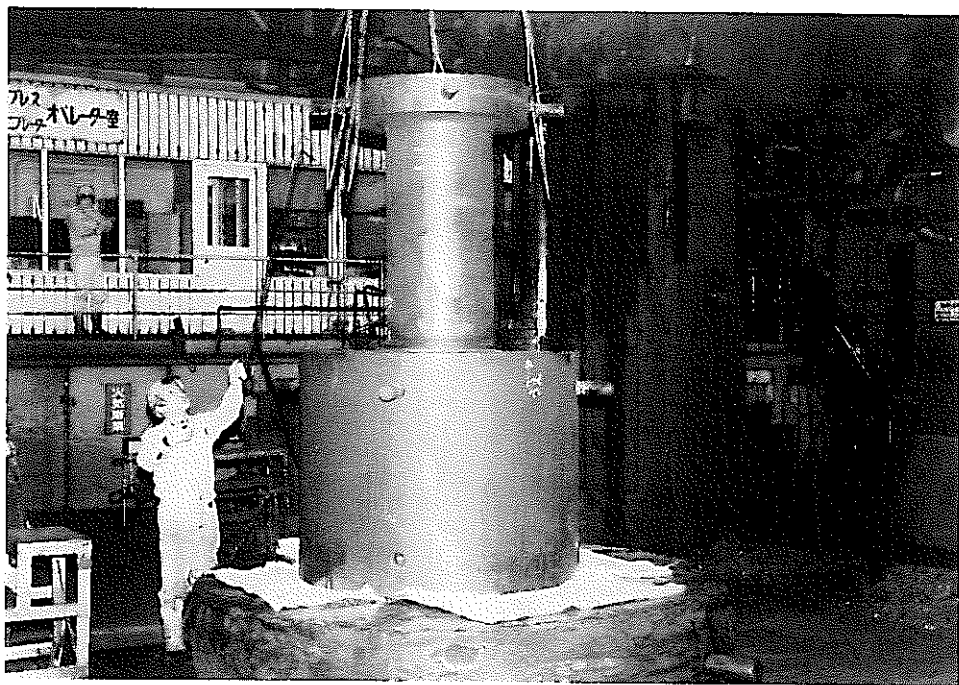


写真 2.4-3 押しポンチをセット

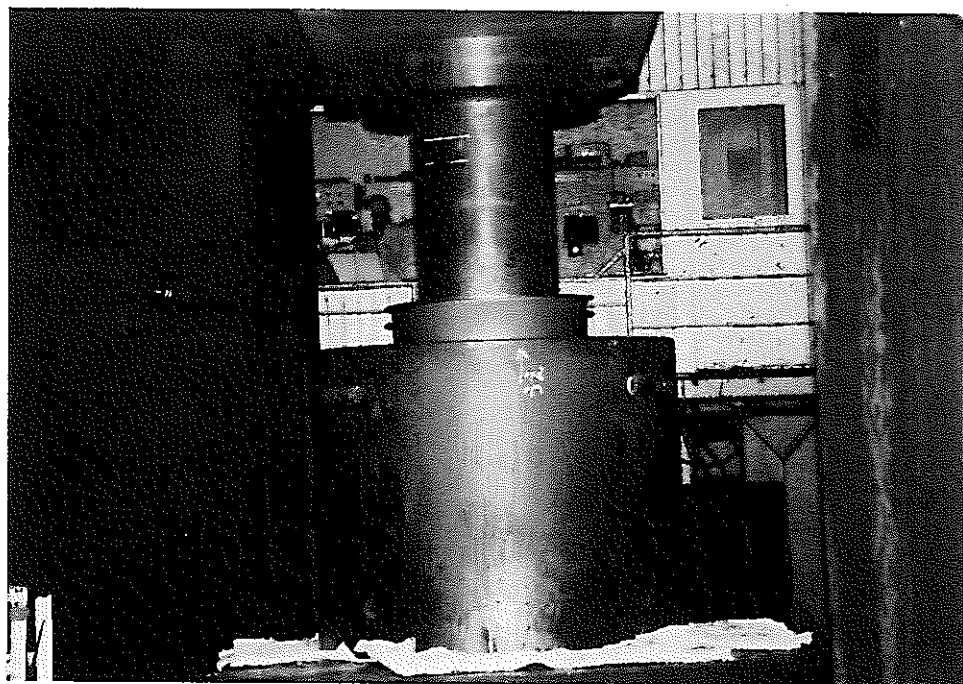


写真 2.4-4 後方押し出し加工中

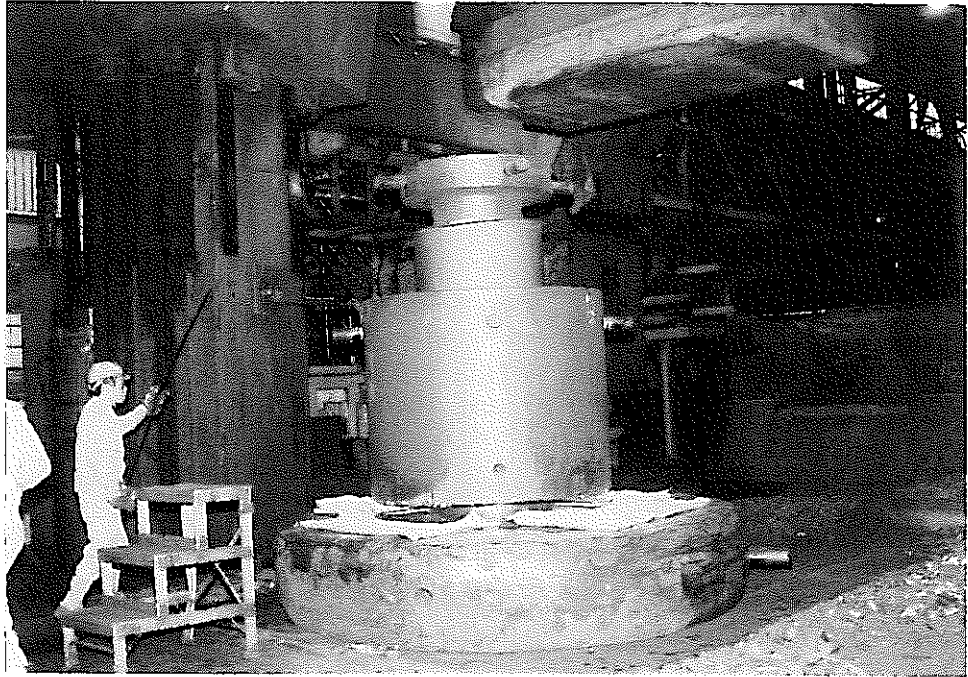


写真 2.4-5 後方押出し完了

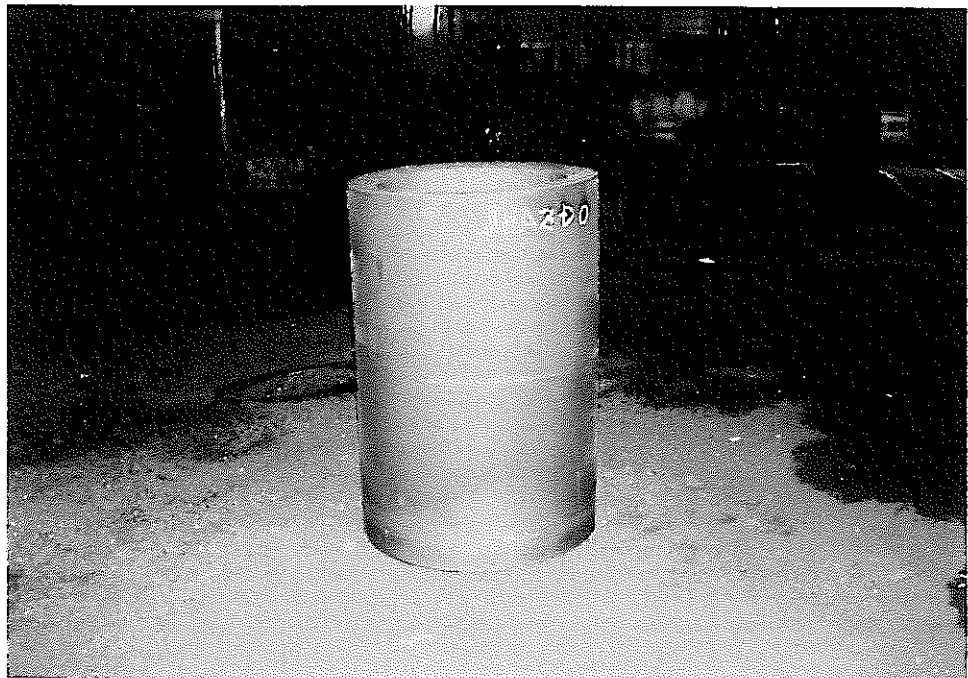


写真 2.4-6 後方押出し完了後

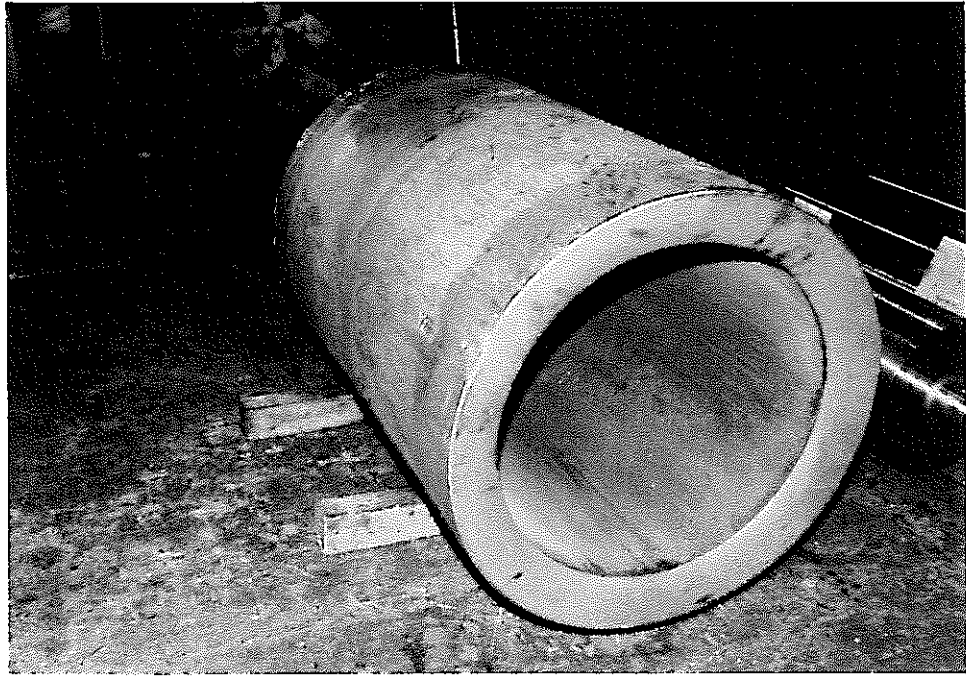


写真 2.4-7 切削加工前の状況

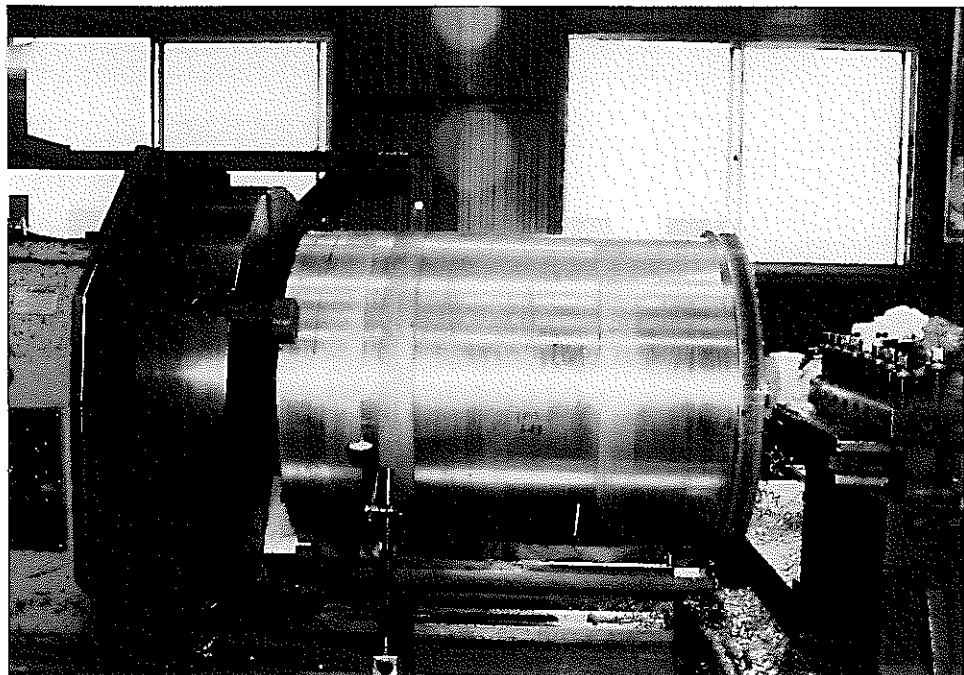


写真 2.4-8 外径及び端面加工中

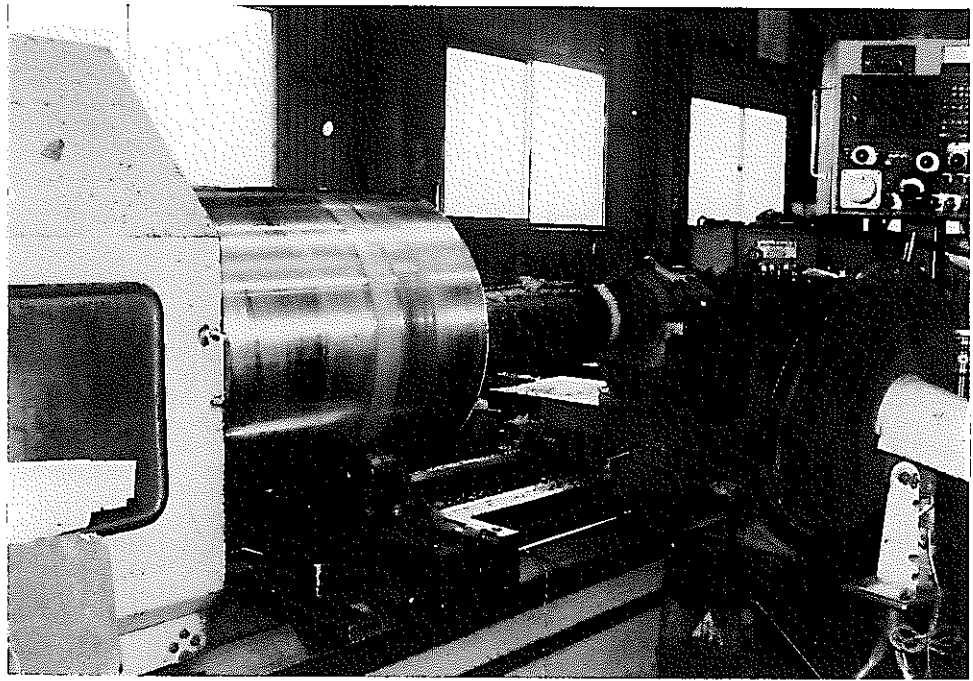
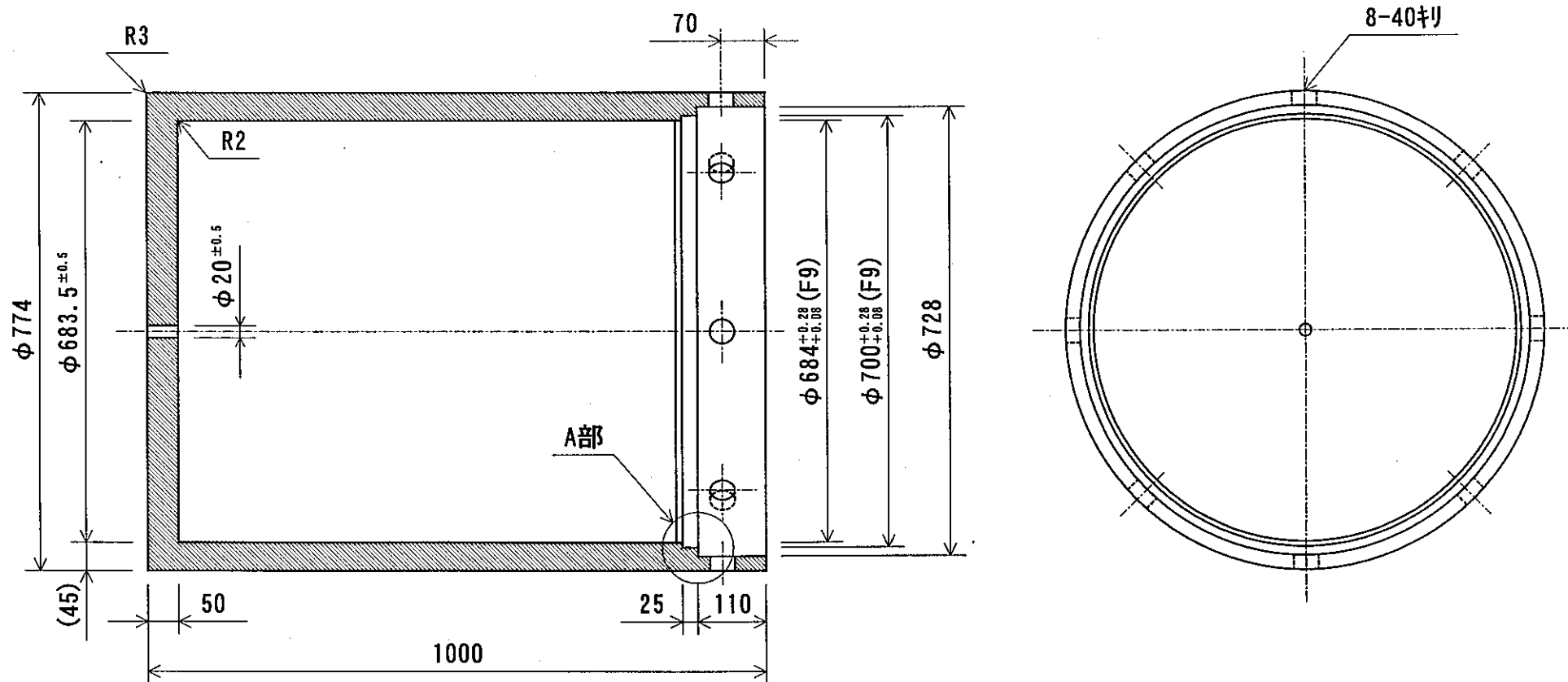
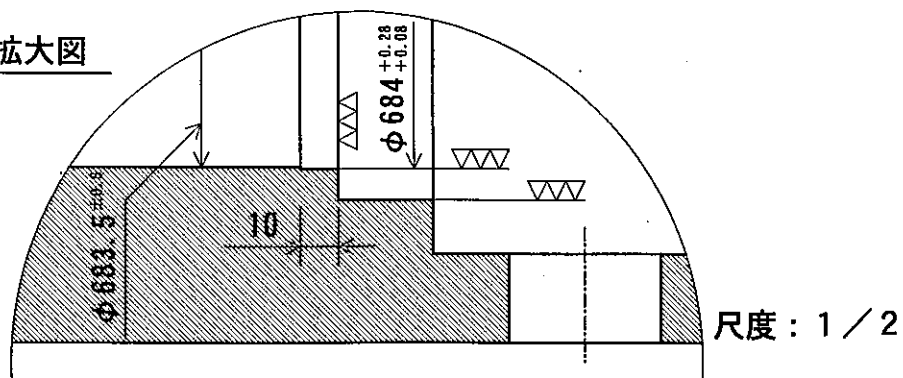


写真 2.4-9 内径加工中



A部拡大図

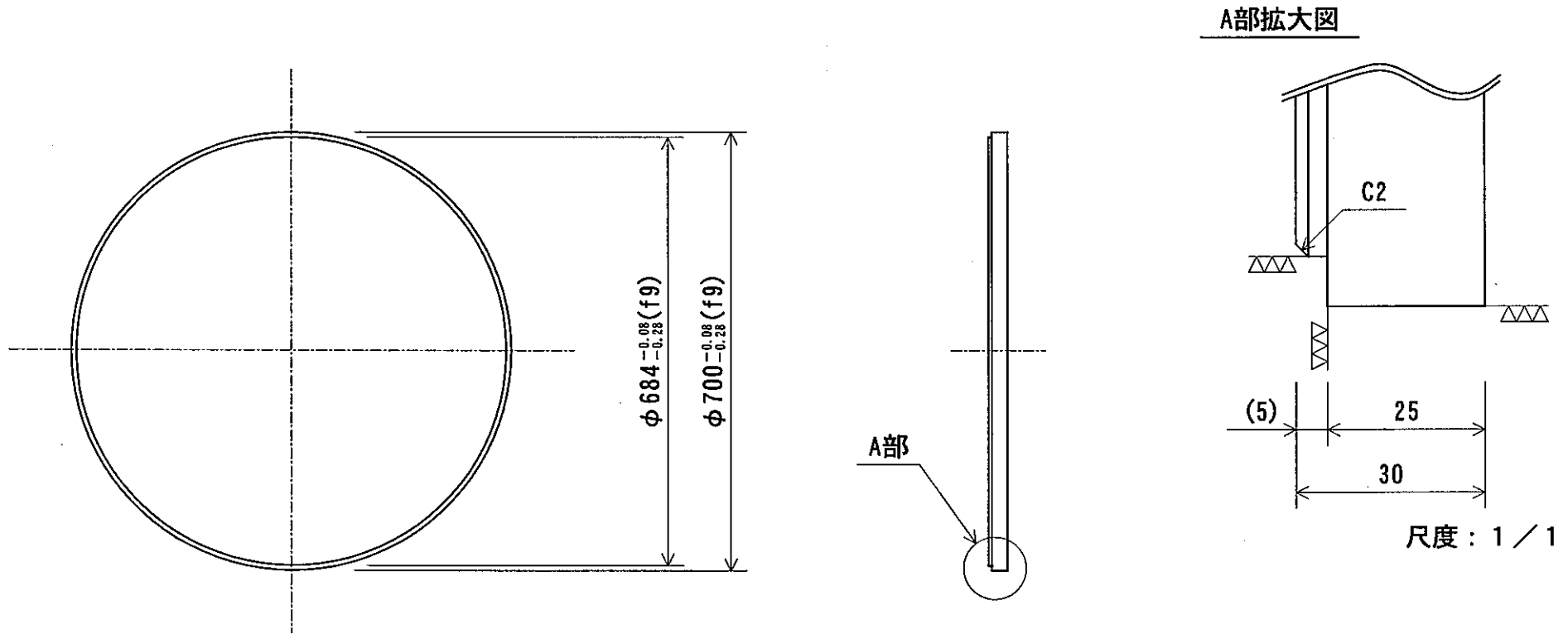


尺度：1/2

注記

1. 材質は、①無酸素銅又は②リン入り無酸素銅とする。
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、▽▽とする。

図 2.4-1 銅製外容器本体加工図



注記

1. 材質は、①無酸素銅又は②リン入り無酸素銅とする。
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、 ∇ とする。

図 2.4-2 銅製蓋加工図

2.5 溶接

本体と蓋を電子ビームにて溶接した。表 2.5-1 に使用した溶接装置の仕様を記す。また、写真 2.5-1 に使用した溶接装置の外観を示す。加工に先立ち、溶接による発熱による熱膨張を防ぐため容器周囲にリング状の治具を取付け加工した。

加工状況を写真 2.5-2～4 に示す。また以上の加工を終えた外容器外観を写真 2.5-5、展示品外観を写真 2.5-6 に示す。

表 2.5-1 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	6,400mmL×2,550mmH×2,450mmW
テーブル寸法	X テーブル : 2,800mm×2,000mm Y テーブル : 2,400mm×1,000mm
ストローク	X 軸 : 3,100mm[テーブル移動] Y 軸 : 1,000mm[テーブル移動],1,000mm[溶接銃移動] Z 軸 : 1,000mm[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, ITV 併用

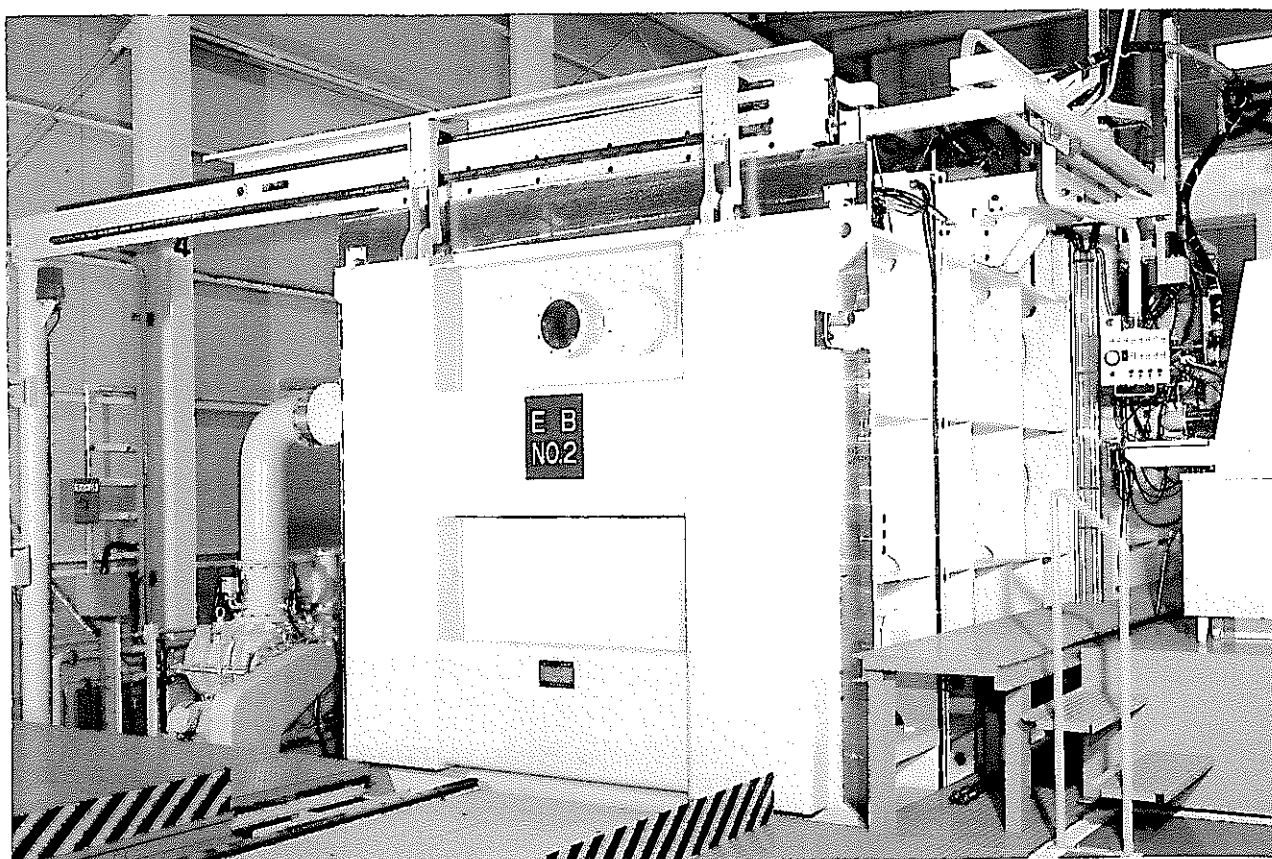


写真 2.5-1 溶接装置の外観

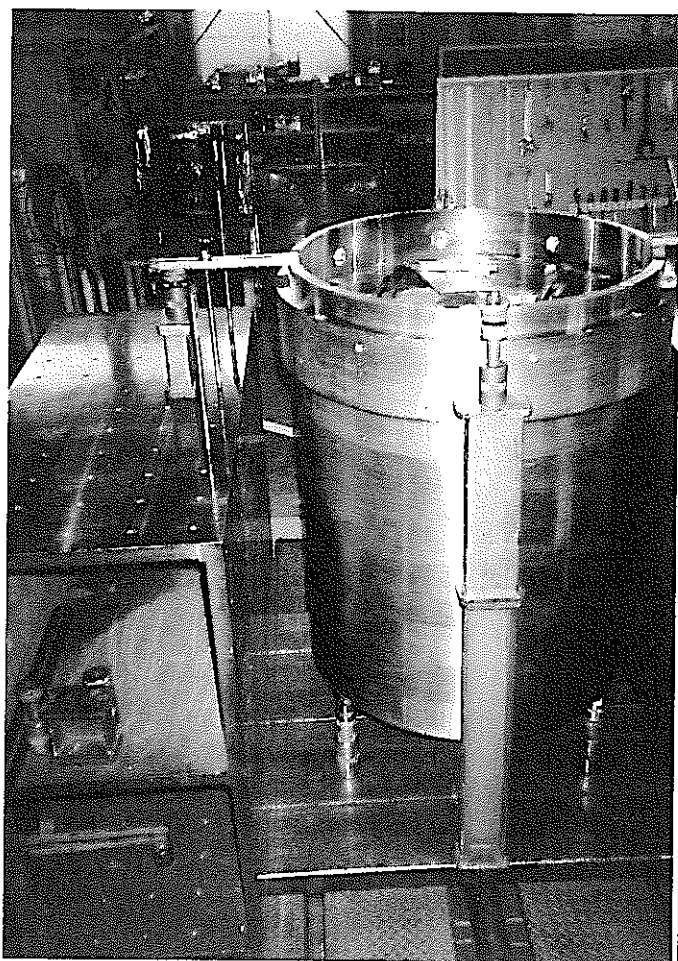


写真 2.5-2 治具取付け状況

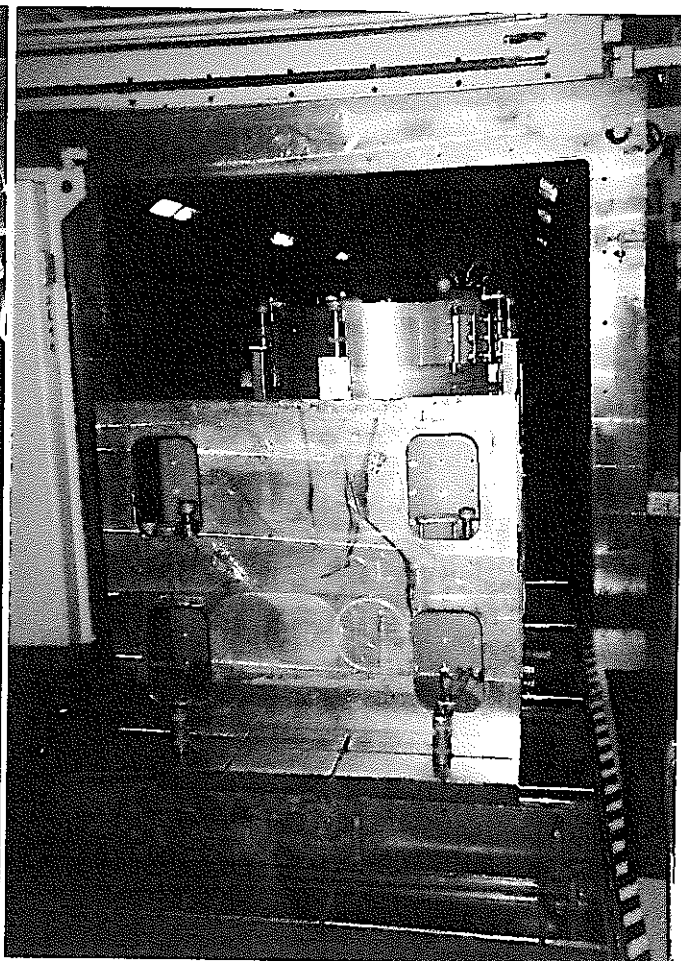


写真 2.5-3 溶接装置へのセット時の状況

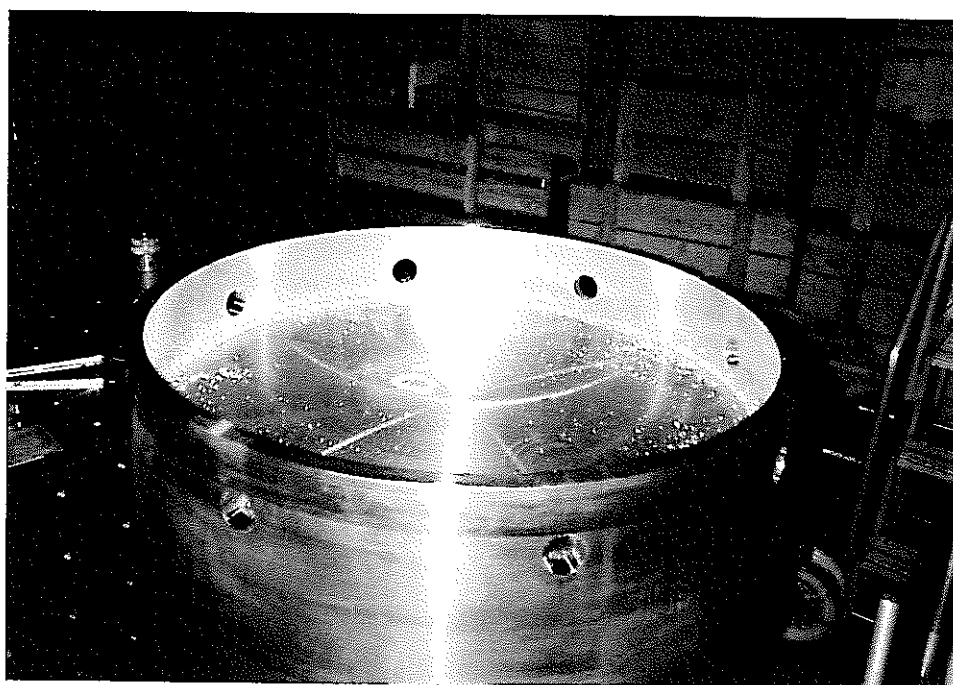
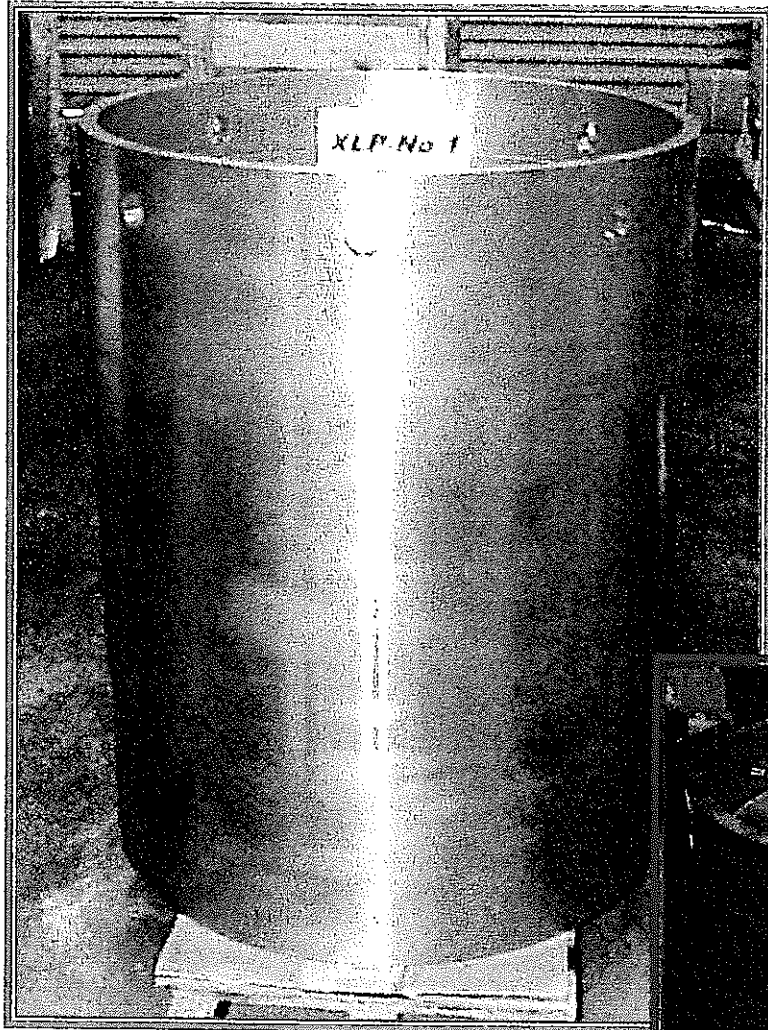


写真 2.5-4 溶接終了後の溶接部近傍の状態



←全体像

↓蓋部分



大きさ：774mm ϕ ×1000mmh
質量：1137kg

写真 2.5-5 加工終了後の外容器外観



写真 2.5-6 展示品外観

3. 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。

3.1 使用機器

本試験に使用した機器仕様を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 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φ12mm) 周波数：5MHz
対比試験片	無酸素銅製 (RB-4 相当品として取り扱う)
接 触 媒 体	ソニコート (グリセリンペースト)

3.2 試験方法

本試験の材料をRB-4相当品として取り扱い、図 3.2-1 に示すような対比試験片により振幅曲線を後記手順で作成し、L線に達した箇所を欠陥として記録した。なお、模擬欠陥の製作を目的に接合部とビーム位置を1mm, 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んでしまい欠陥を生じるに至らなかった。

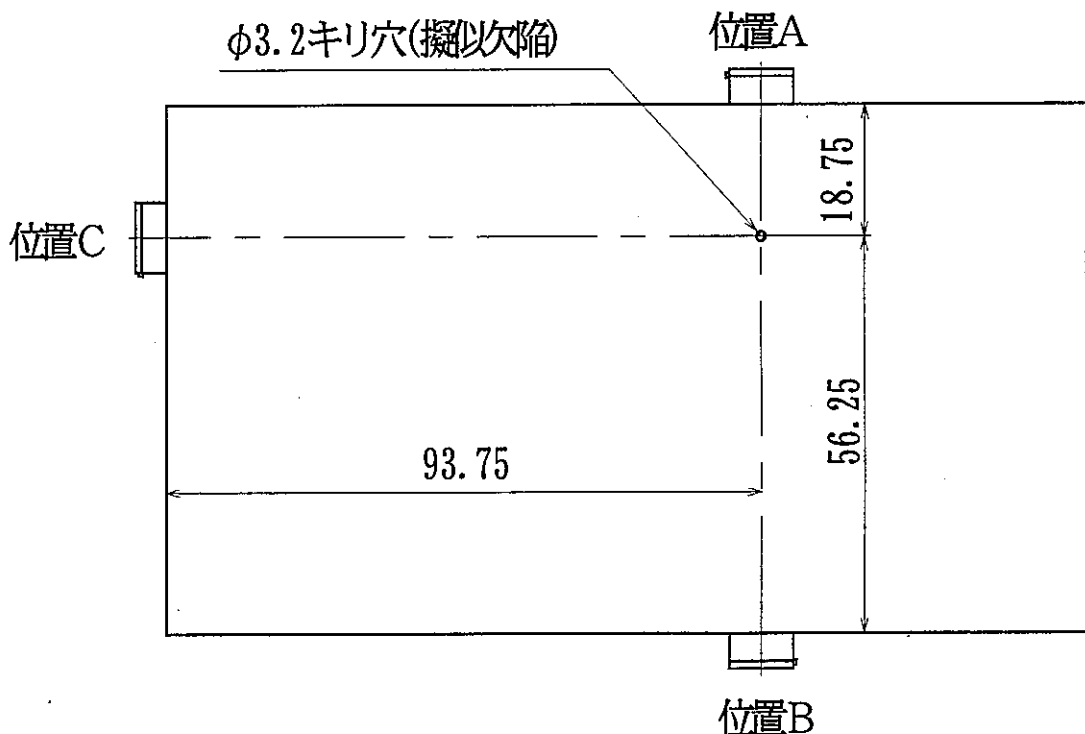


図 3.2-1 対比試験片

【振幅曲線作製手順】

① 探傷条件を下記のように設定した。

RANGE	100.0mm	THICK	0.00mm
DELAY	0.0mm	REJECT	0%
VELOCITY	4710m/s	REL.	+ 0.0dB
ANGLE	0.0°	ZERO	0.42μs
GAIN	44.2dB	P.WIDTH	100ns
REF.	44.2dB	R.RATE	FAST
PROBE	SINGLE	DETECT	VIDEO+-
ENERGY	HIGH	SMOOTH	OFF
DAMPING	50Ω	POL.	POSI
FREQ.	5MHz	CLICK	ON
FILTER	OFF	EXPAND	OFF
PEAK MEM	OFF	CURVE	CURVE 1
DC OUT	PEAK	CURRENT	101%
ALARM	OFF		
GATE SEL	DAcurve		
DA FUNC	COMPARE		
PEAK	103%		
w	18.00mm		
y	*** mm	d	*** mm

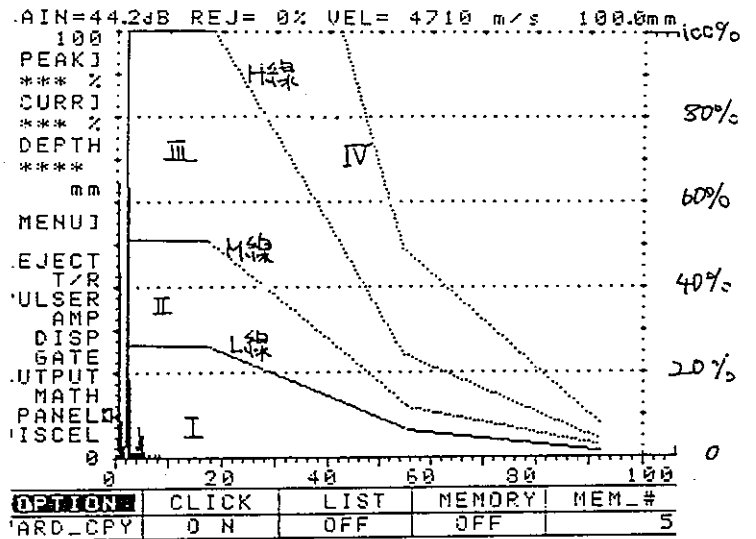


図 3.2-2 探傷前のディスプレイの状態

② 位置A付近において、エコー高さが最大になる位置にて深蝕子を停止させ、その状態でゲインを調整し、エコー高さが100%になるようにした(図 3.2-2 参照)。

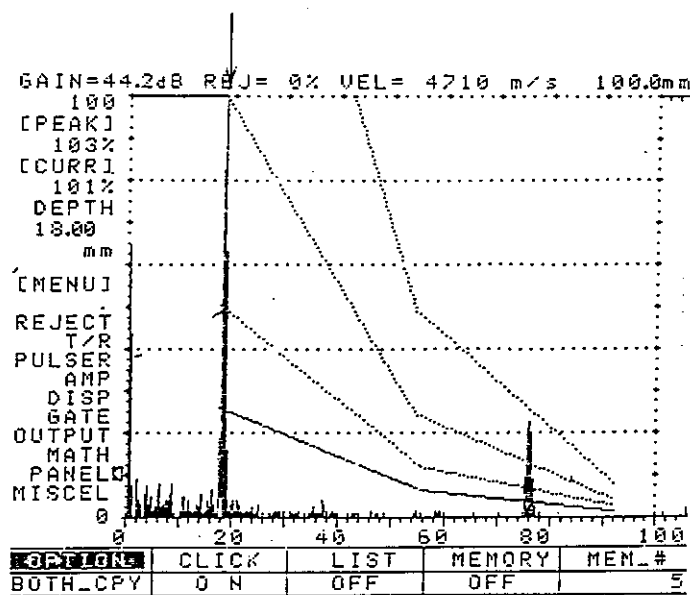


図 3.2-3 位置Aにてゲイン調整後のエコー状態

- ③ そのままの条件で位置Bにて最大エコーとなる位置で高さのプロットを行った(図 3.2-3 参照)。

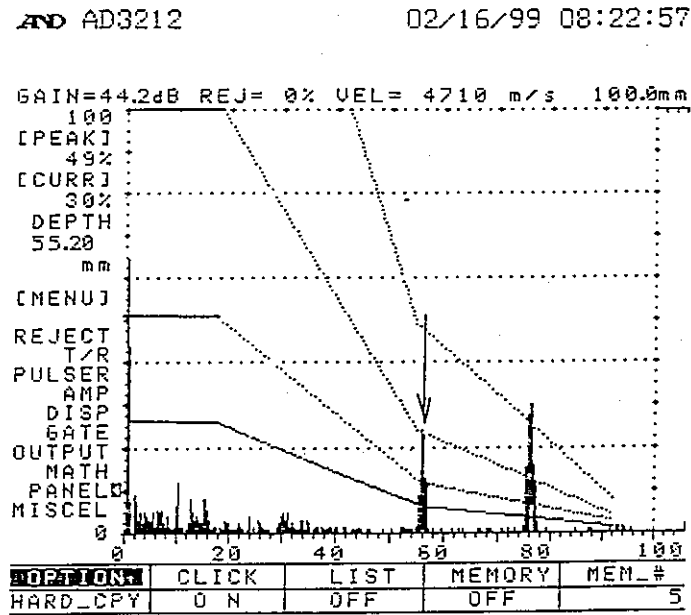


図 3.2-4 位置Bでのエコー状態

- ④ そのままの条件で位置Cにて最大エコーとなる位置で高さのプロットを行った(図 3.2-4 参照)。

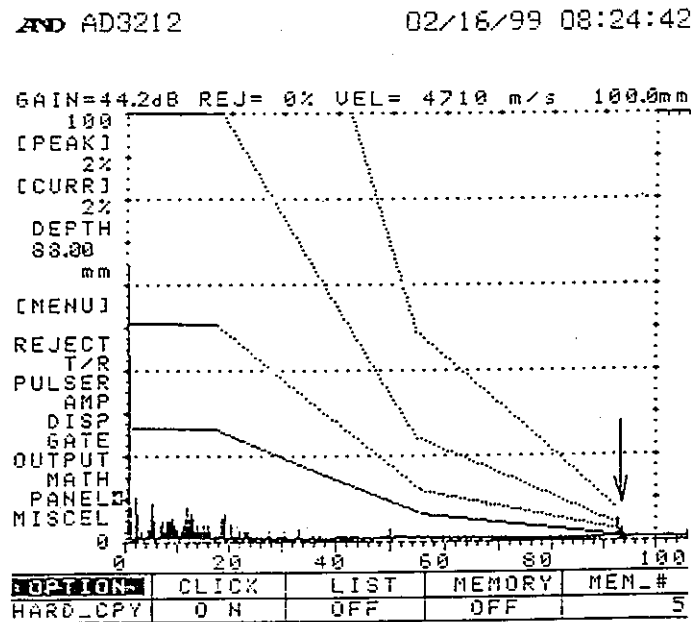


図 3.2-5 位置Cでのエコー状態

- ⑤ そのエコー最大高さの位置をディスプレイ上につなぎH線とし、ゲインを 50%とした線をM線、25%とした線をL線として作成した。

3.3 試験結果

設定腐食代が 20mm であることから、溶接深さ 20mm 以上と考え外容器上部から 130mm 下方に印を付けこれを目印として溶接部およびその近傍の調査を行った。検査の状況を写真 3.3-1～3 に示す。

検査の結果、リン入り無酸素銅及び無酸素銅共に容器上部より 140mm(溶接深さ 30mm) 下方、側面からの深さ 40mm 弱の箇所にエコーが発生する箇所が多数あった。蓋との継ぎ目の影響またはスパイクと呼ばれる電子ビーム先端部の不健全性部による影響と考えられる(図 3.3-1 参照)。

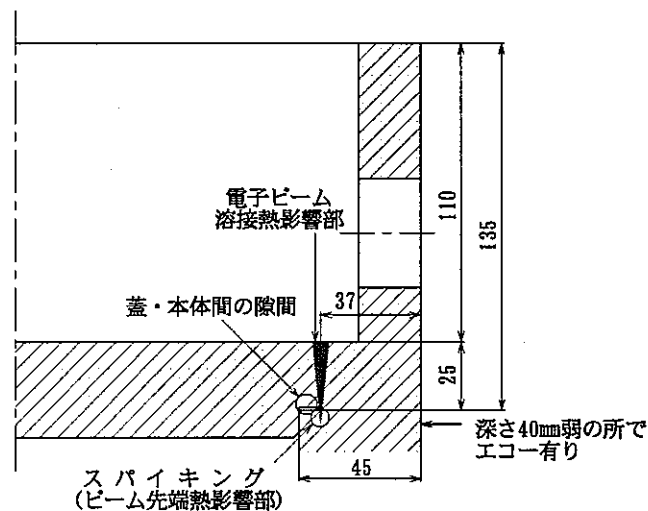


図 3.3-1 エコー発生推定原因 (容器上部断面図)

また、無酸素銅製容器では容器上部より 130mm (溶接深さ 20mm) 下方、側面からの深さ 40mm 弱の箇所にエコーが発生する箇所が 3 箇所あった

本検討における銅容器の腐食代は「人工バリアの信頼性向上及び高度化技術の研究(Ⅱ)」(PNC ZJ1150-96-001)で採用されている 12mm を切り上げて 20mm として設計したことから目標とする腐食代はほぼ確保できた。溶接部断面の観察結果から、溶接深さ約 30mm の部分に長さ約 1mm、幅約 0.5mm の欠陥が確認された。(写真 3.3-4 参照)

以上の結果から、比較的銅粒子の細かい電子ビーム先端部の欠陥は超音波探傷試験で対応し得るものと考えられる。但し、銅が粗粒となる溶接ビード部へ超音波探傷試験を適用するためには、今後更に研究・開発が必要である。また、さらに大きな腐食代を確保するためには、溶接条件の最適化(ビーム出力を増やす等)が必要となる。

超音波探傷試験におけるエコーの観察結果を以下に示す。



写真 3.3-1 検査前容器及び検査機器



写真 3.3-2 対比試験片による確認作業



写真 3.3-3 容器検査

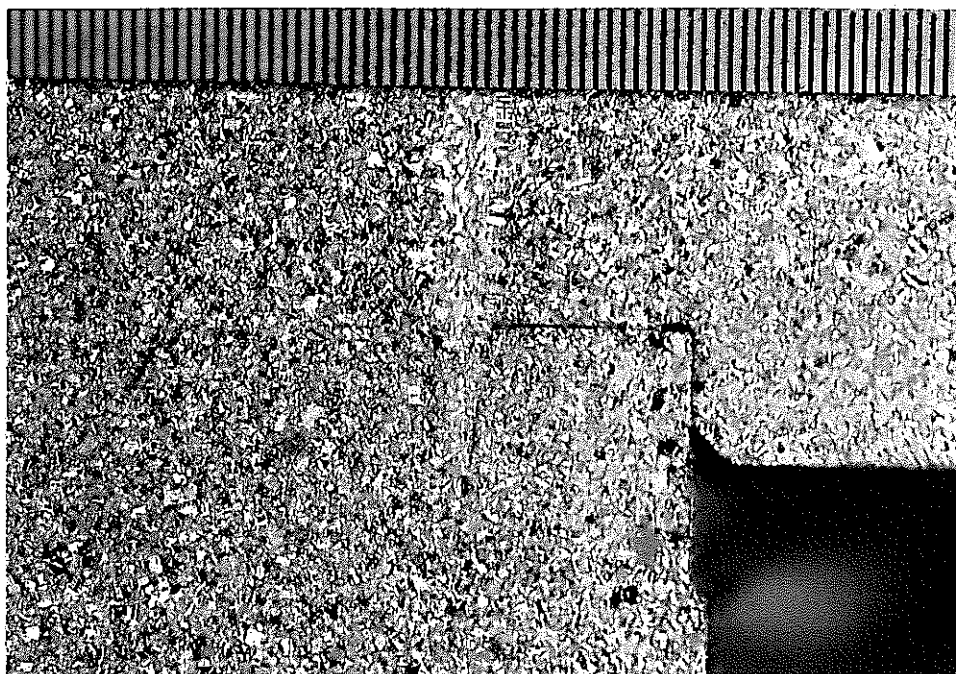
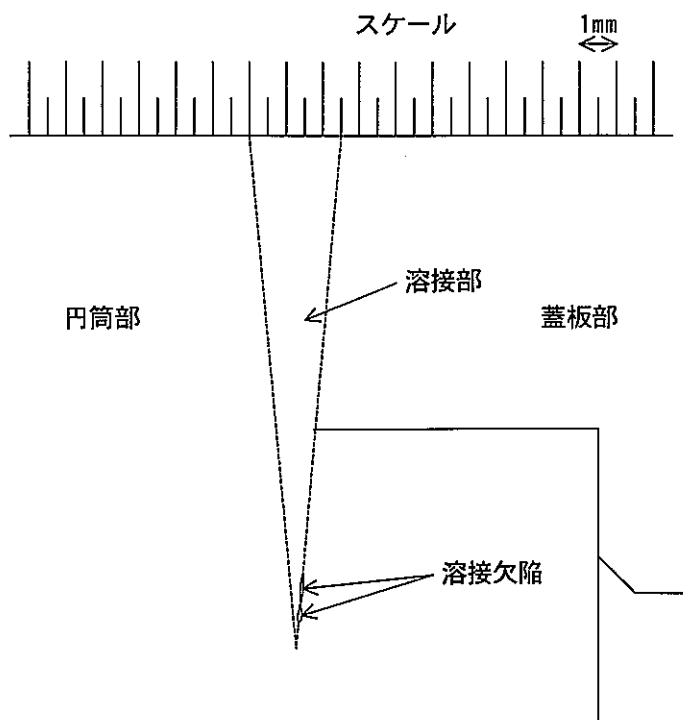


写真 3.3-4 溶接部断面写真

3.3.1 リン入り無酸素銅エコー観察結果

(1) スパイキング欠陥箇所の探傷結果

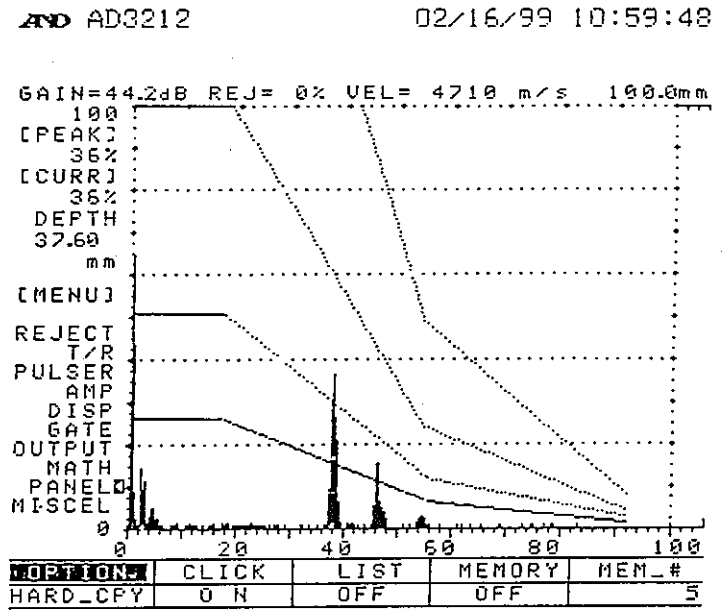
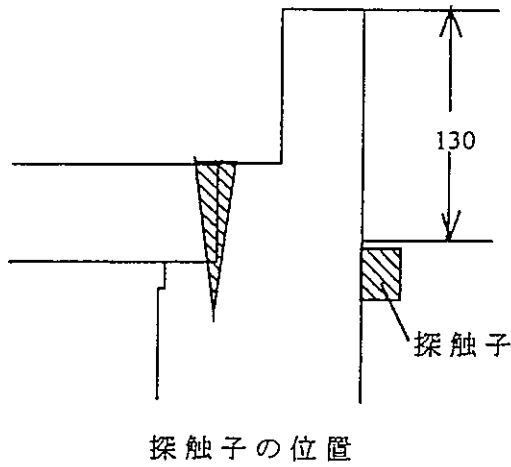


図 3.3-2 リン入り無酸素銅スパイキング部の探傷結果

(2) ラップ部の探傷結果

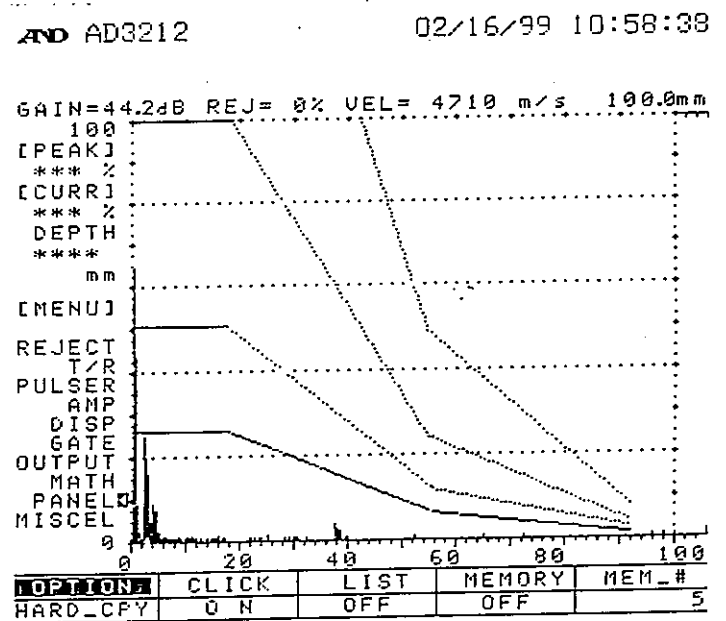
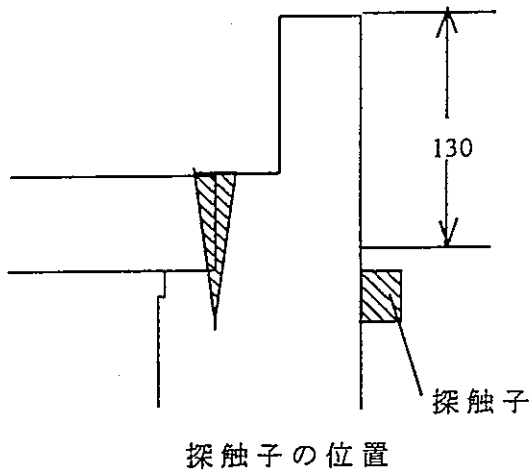


図 3.3-3 リン入り無酸素銅ラップ部の探傷結果

(3) クレータ部(エコー立ち上がり箇所)の探傷結果

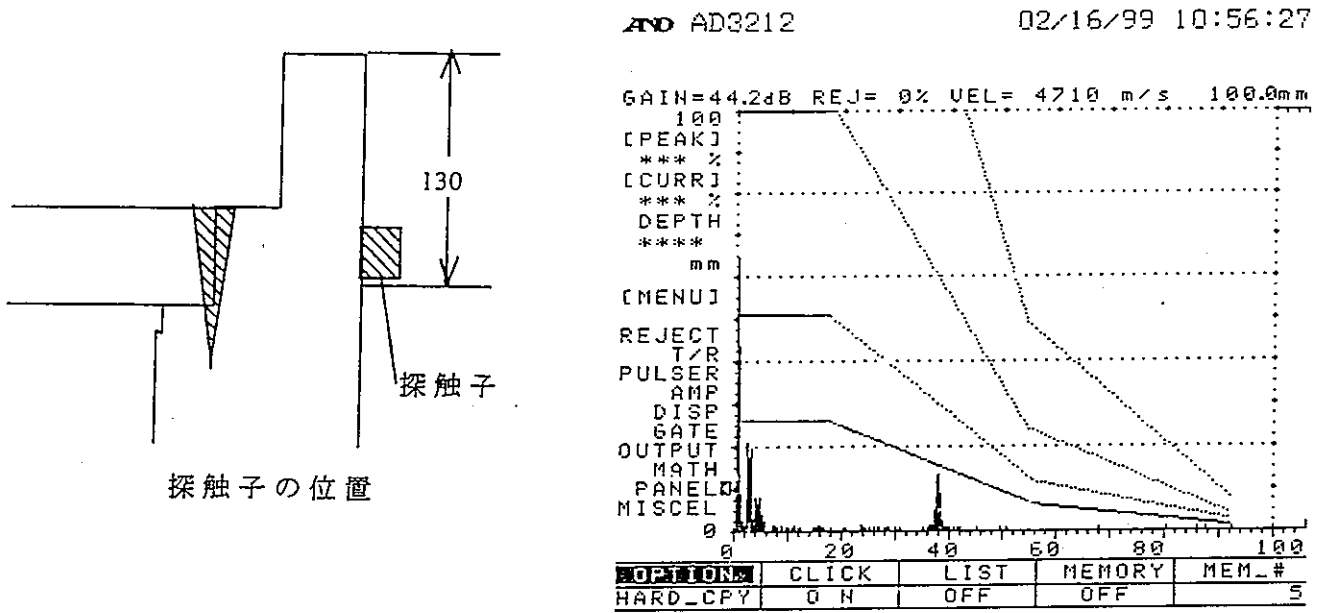


図 3.3-4 リン入り無酸素銅クレータ部の探傷結果(エコー立ち上がり箇所)

(4) クレータ部(通常部)の探傷結果

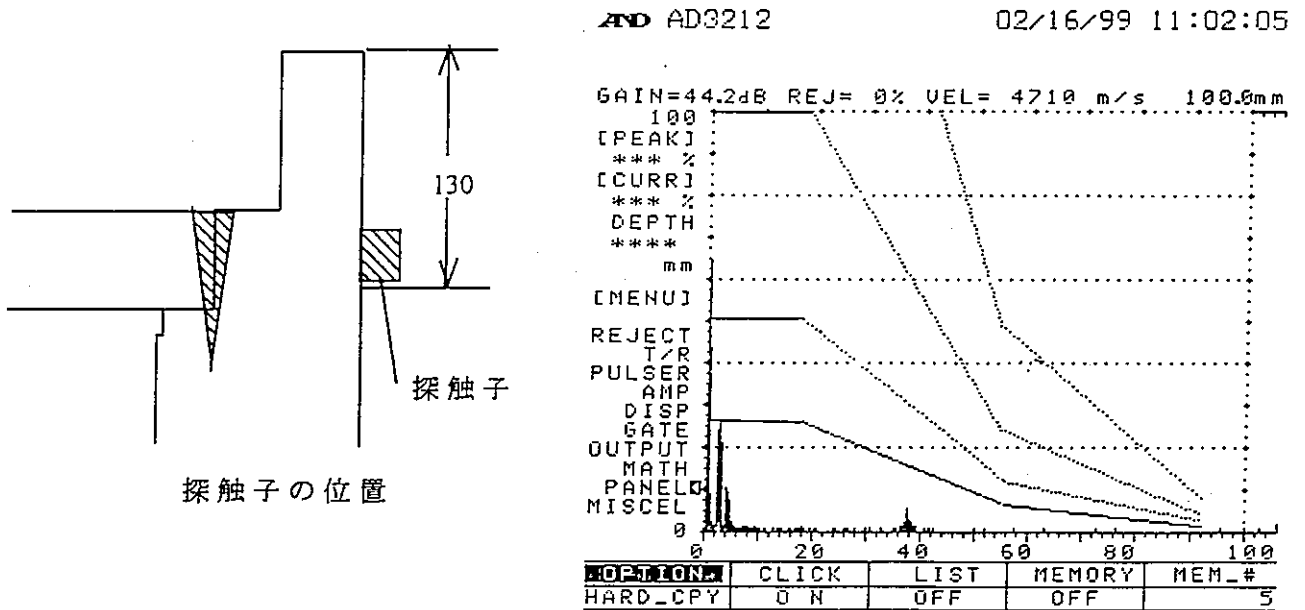


図 3.3-5 リン入り無酸素銅クレータ部の探傷結果(通常部)

3.3.2 無酸素銅エコー観察結果

(1) 健全部の探傷結果

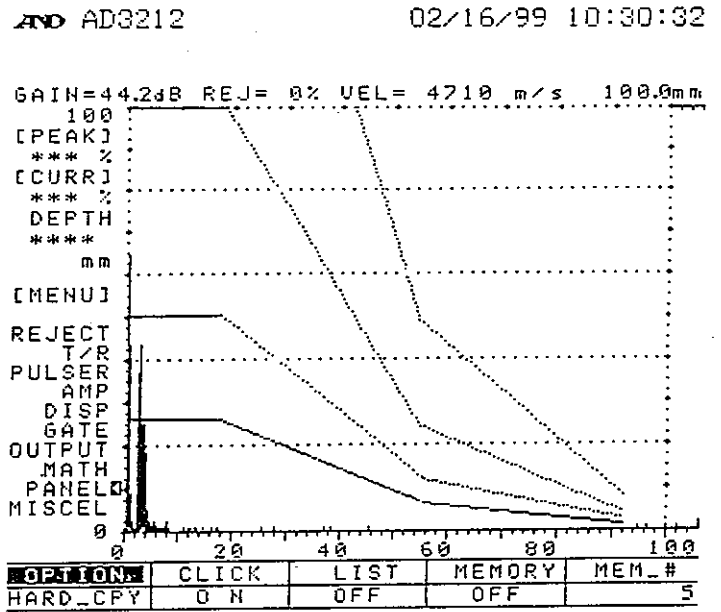
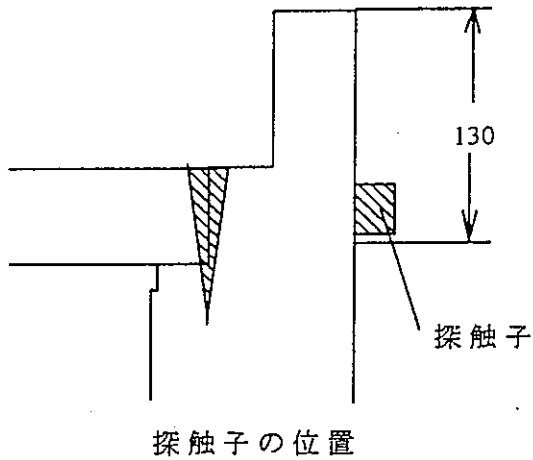


図 3.3-6 無酸素銅健全部の探傷結果

(2) スパイキング欠陥箇所の探傷結果

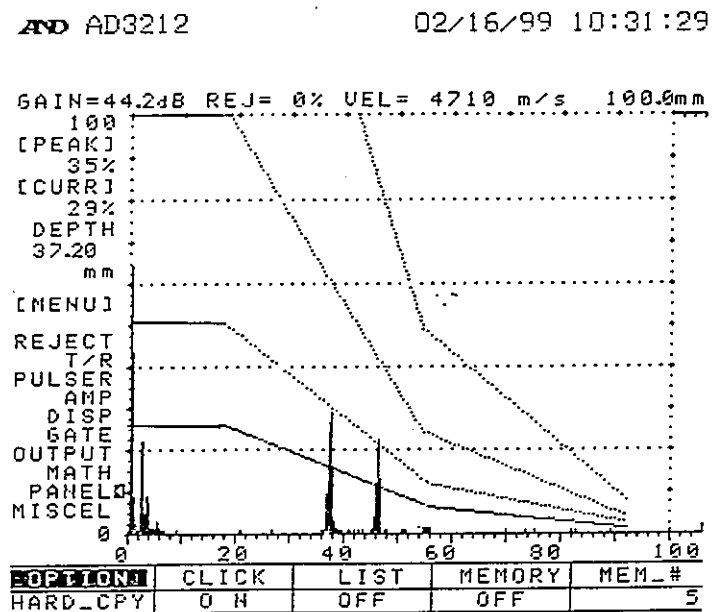
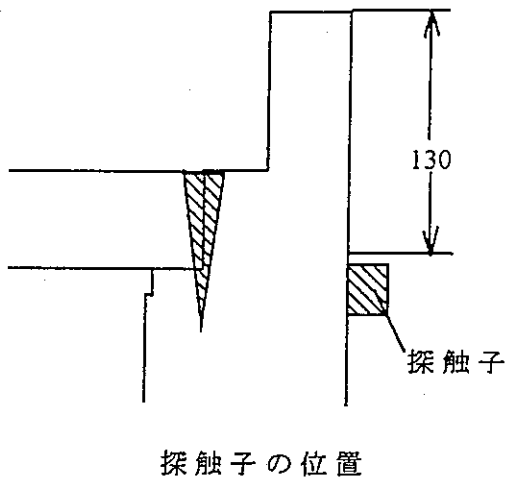


図 3.3-7 無酸素銅スパイキング部の探傷結果

(3) ラップ部の探傷結果

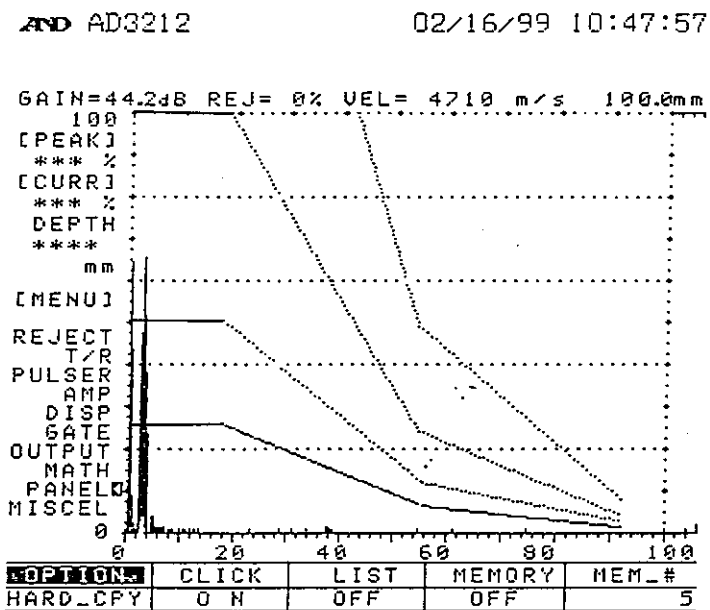
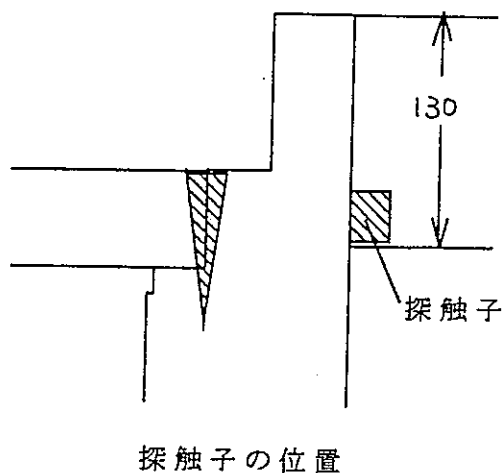


図 3.3-8 無酸素銅ラップ部の探傷結果

(4) クレータ部の探傷結果

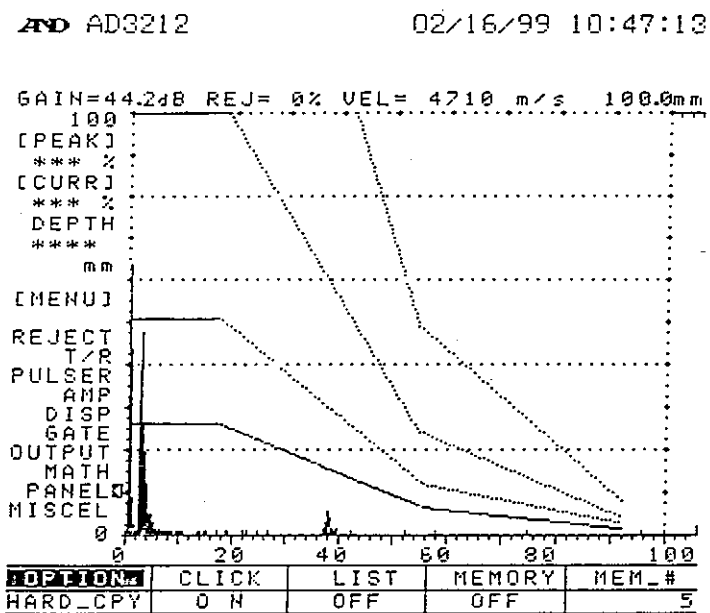
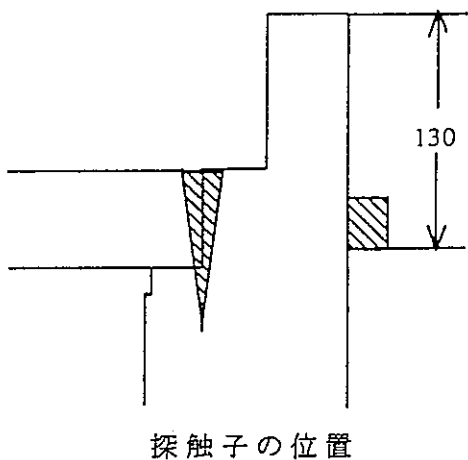


図 3.3-9 無酸素銅クレータ部の探傷結果

(5) 欠陥箇所の探傷結果の例(その1)

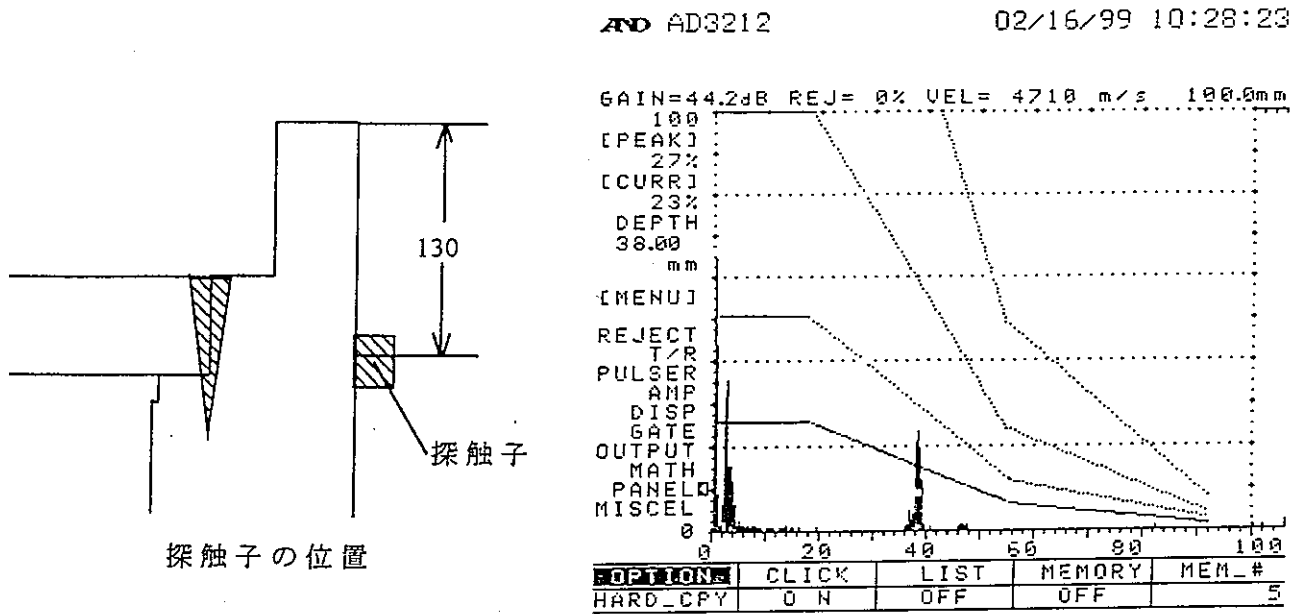


図 3.3-10 無酸素銅欠陥箇所の探傷結果の例(その1)

(6) 欠陥箇所の探傷結果の例(その2)

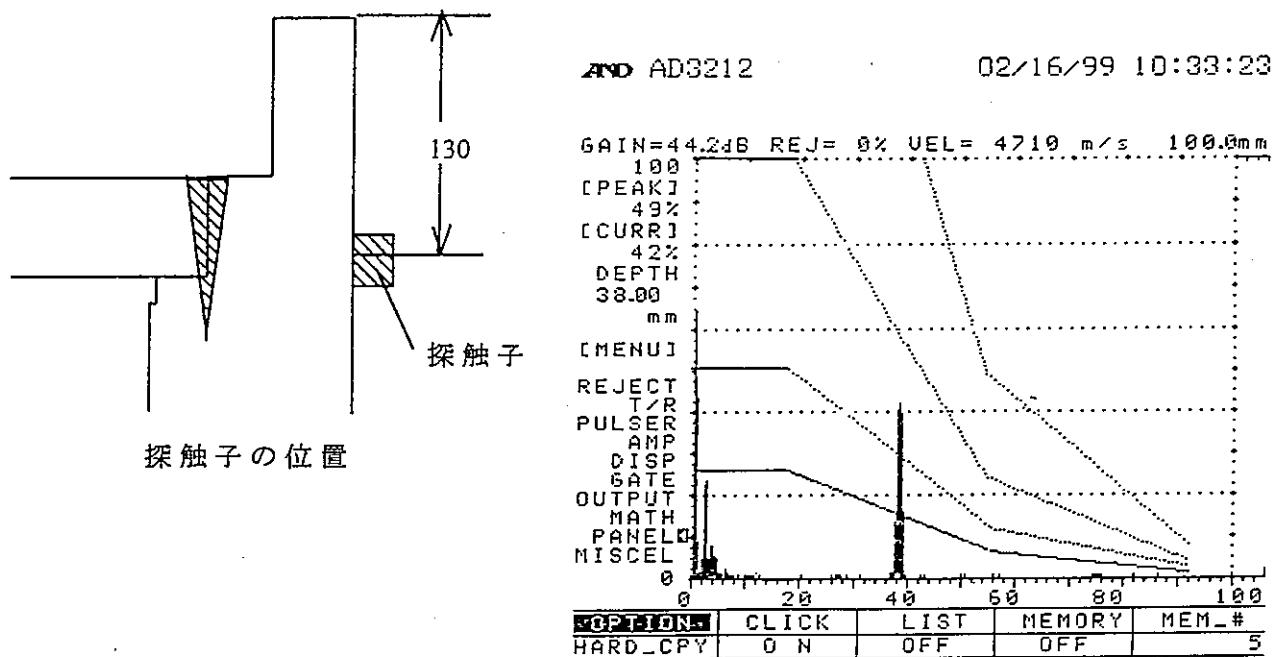


図 3.3-11 無酸素銅欠陥箇所の探傷結果の例(その2)

(7) 欠陥箇所の探傷結果の例(その3)

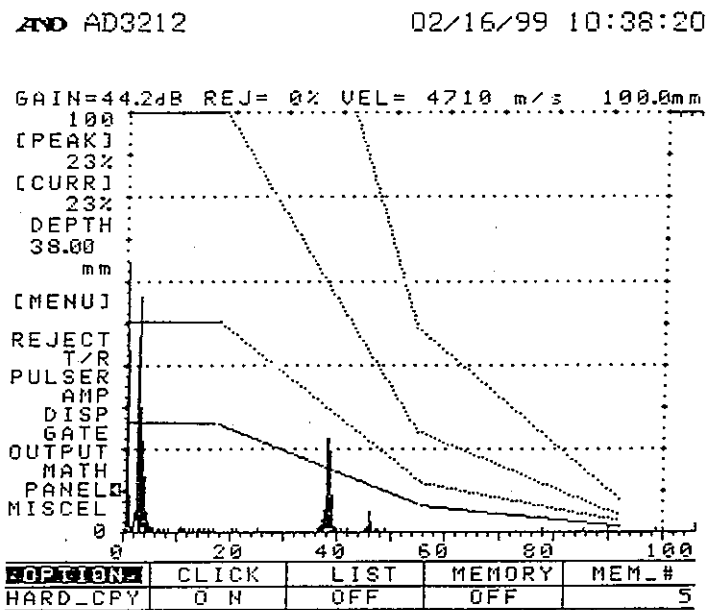
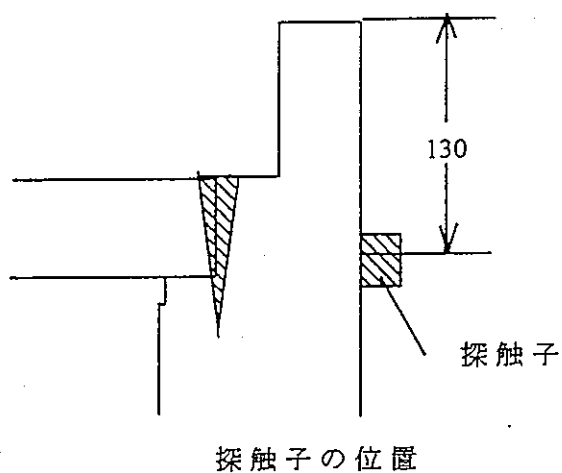


図 3.3-12 無酸素銅欠陥部の探傷結果の例(その3)

4. 組織観察、結晶粒度測定及び材料強度試験

4.1 評価試験項目

銅製外容器の組織や機械的特性が材質および部分により異なるかどうかを評価するために、無酸素銅、リン入り無酸素銅の各材質の外容器の各部分から切り出した試験片を用いて、組織観察および材料試験を行った。実施した評価は以下の5項目である。添付資料の製作試験要領書に各品質目標値及びこれらの根拠となった文献等を示す。

- * 組織観察
- * 粒度測定
- * 硬さ試験
- * 引張試験
- * 曲げ試験

4.2 試験片の採取

4.2.1 評価位置および試験片採取手順

銅製外容器の評価は、大別して円筒部上端部、蓋板及び底板の3箇所で行った。蓋板及び底板は、さらに中心部と端部（蓋板の場合は溶接部）において評価した。よって評価位置は、円筒部上端部、蓋板中心部、溶接部、底板中心部、底板端部の計5箇所である。

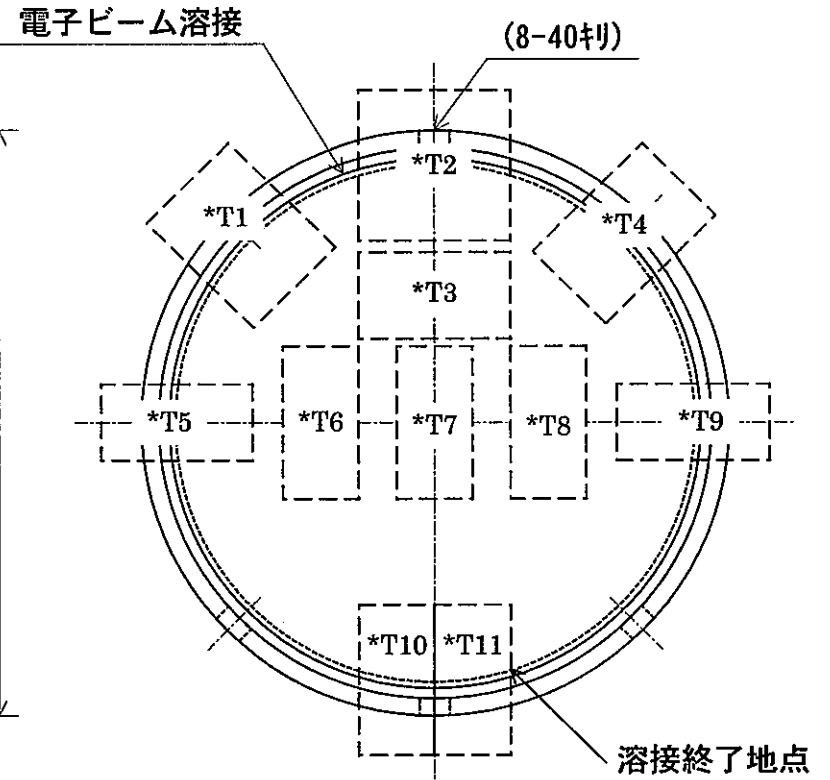
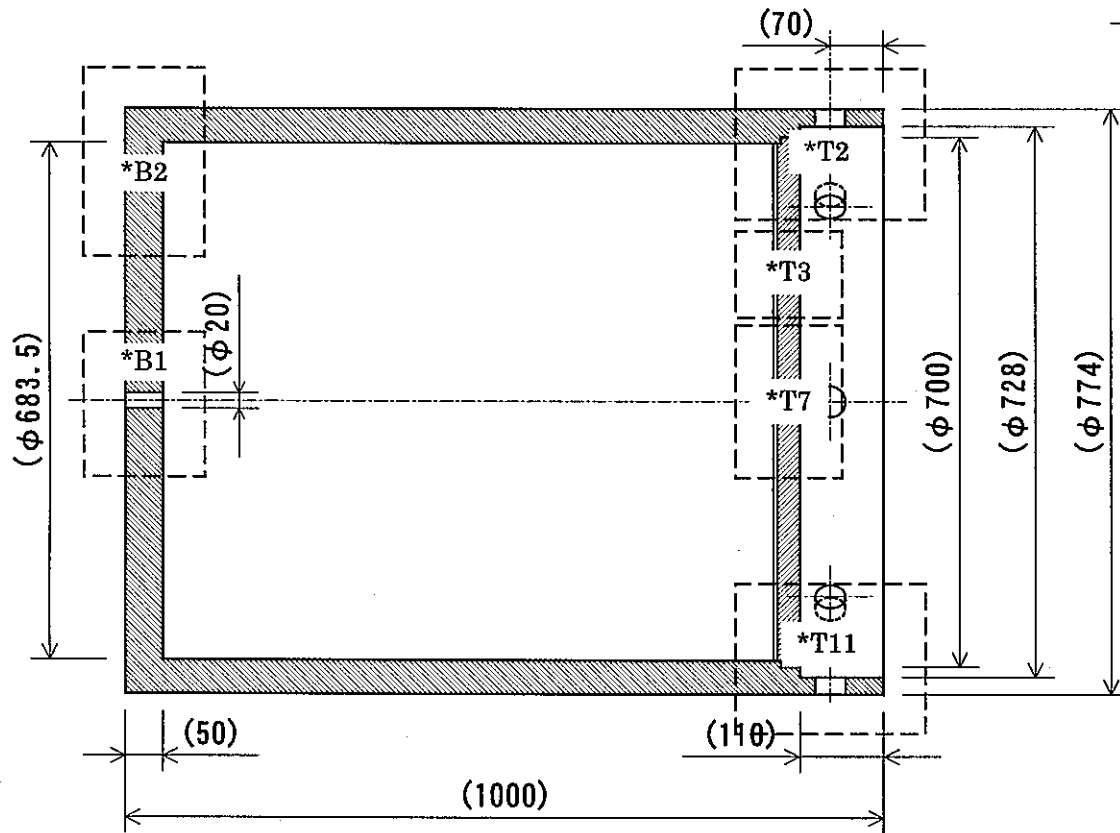
試験片採取手順としては、銅製外容器をまず1個15kg程度のブロックに切り分け、次に各ブロックより各評価項目の試験片を切り出した。

4.2.2. ブロックの採取部

各ブロックの採取部を図4.2-1に示す。採取した各ブロックの属性を示す記号を、次の様に定めた。

- ・材質：F（OFC：無酸素銅）、X（XLP：リン入り無酸素銅）
- ・採取面：T（蓋板、切り出しの便宜上円筒部上端部も含む）、B（底板）
- ・各採取面に置ける採取位置；番号1～11（蓋板）、番号1～2（底板）

例えば、無酸素銅の底板中心部は、FB1で表わされる。



切断片の用途と採取箇所との関係 (銅容器1本当たり)

用途	採取箇所
材料試験等	*T1、*T4、*T7、*T11、*B1、*B2
腐食試験片切出し	*T2、*T3、*T10、*B1、*B2
サイクル機構殿に納品	*T5、*T6、*T8、*T9、*B1、*B2

記号と材質との対応

*T	材質
FT	無酸素銅
XT	リン入り無酸素銅

図4.2-1 各ブロックの採取部

4.2.3 試験片の採取部と個数

各試験片採取部を図4.2-2に、試験片の採取個数を表4.2-1に示す。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、引張及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。

4.3 試験方法と結果

4.3.1 組織観察

切り出した試料を樹脂埋めし、以下手順で組織を現出させ、光学顕微鏡で観察・写真撮影した。

耐水研磨紙研磨 (#180→#2400) → ダイヤモンドペースト研磨 → エッチング (水 200cc + 重クロム酸カリウム2g + 塩化ナトリウム 1.5g + 硫酸 8cc)

無酸素銅の組織を写真4.3-1～4に、リン入り無酸素銅の組織を写真4.3-5～8に示す。無酸素銅では、底板端部が微細、盖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殆ど見られない。他の評価位置の組織と比べ、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おぼしき境界が認められる。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する。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判別できなかった。材質が同じ場合は溶接部組織の観察点による違いは見られないが、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。

4.3.2 粒度測定

組織観察部の平均粒径を、以下手順により測定した。ここで、FT7のみ組織が粗大なので25倍で取り直した写真を用いたが、それ以外は全て写真4.3-1～8に示した50倍の写真を用いた。

組織写真を紙にコピー → 写真中央に50mm角の領域を描く → この領域内の粒界を作業者が判別し鉛筆で記入 → 粒界の数を数える → 「JIS H 0501伸銅品結晶粒

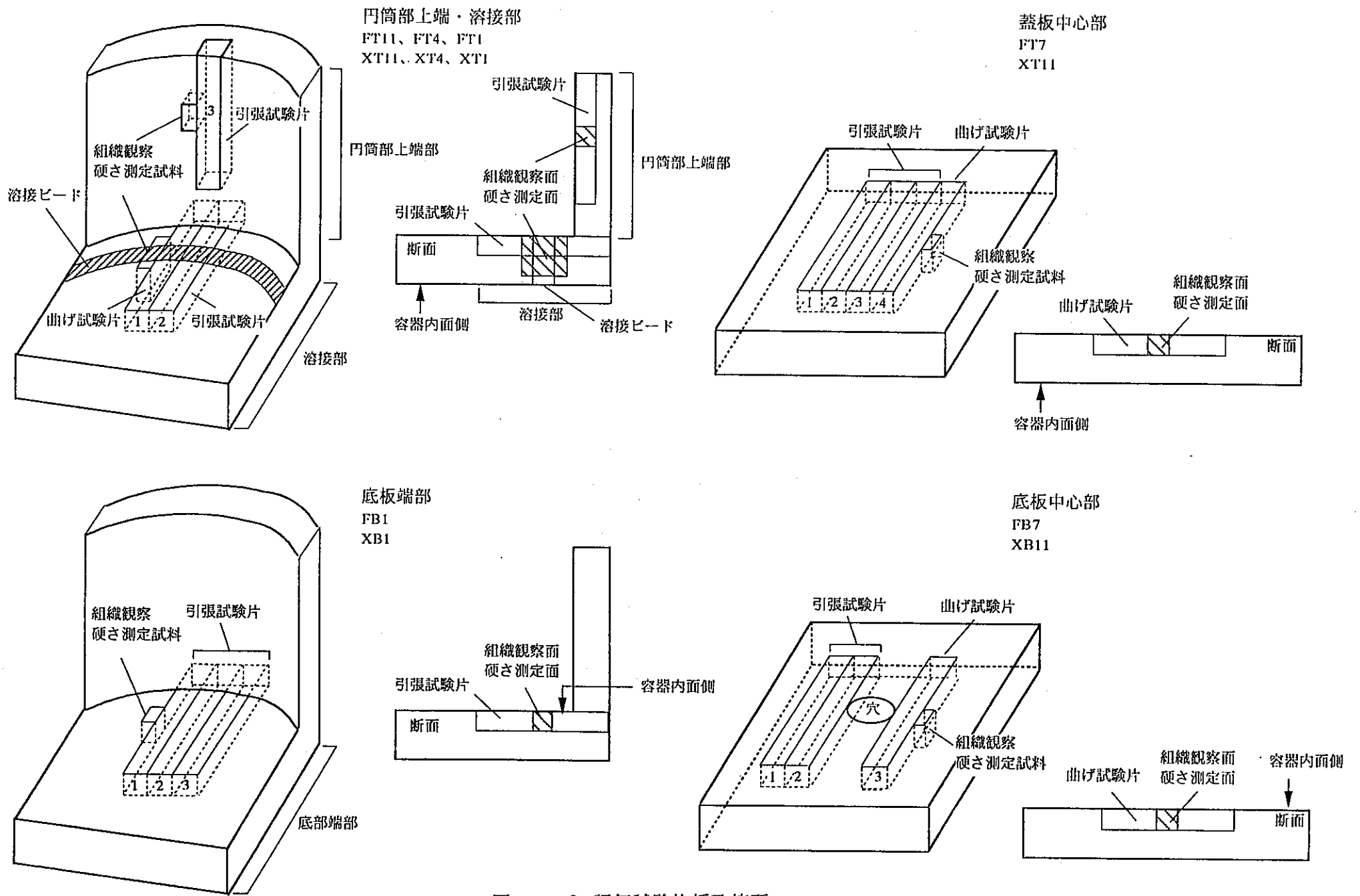


図 4.2-2 評価試験片採取箇所

表 4.2-1 評価試験片採取個数

無酸素銅 (OFC)

評価位置 ブロックNo.	円筒部上端部			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	FT11	FT4	FT1	
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

35

リン入り無酸素銅 (XLP)

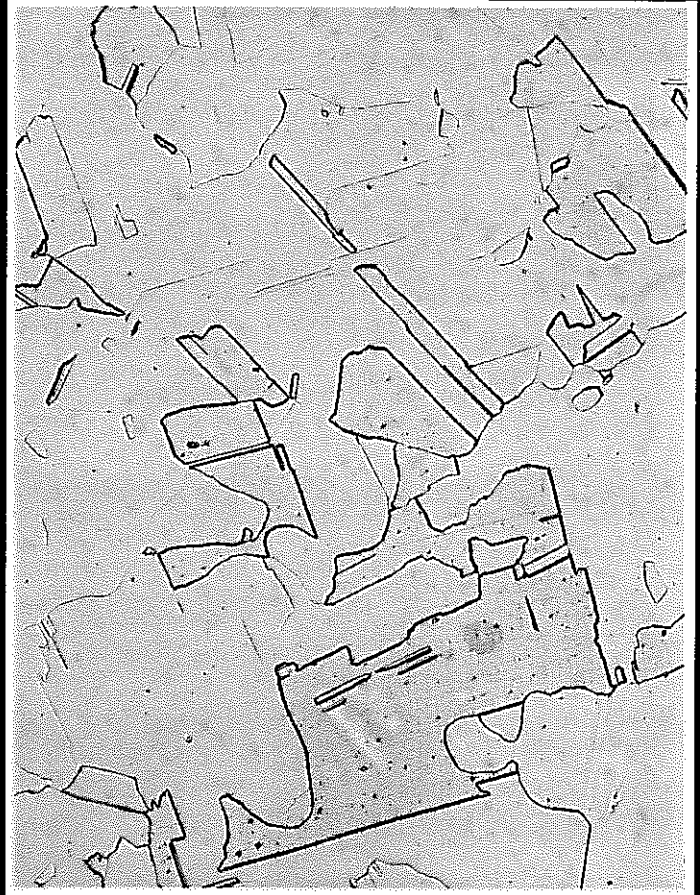
評価位置 ブロックNo.	円筒部上端部			底板中心部	底板端部	蓋板中心部	溶接部			合計
	XT11	XT4	XT1	XB1	XB2	XT7	XT11	XT4	XT1	
組織・粒度・硬さ試験	1	—	—	1	1	1	1	1	1	7
引張試験	1	1	1	3	3	3	1	1	1	15
曲げ試験	—	—	—	—	—	1	1	1	1	4

容器的縦方向



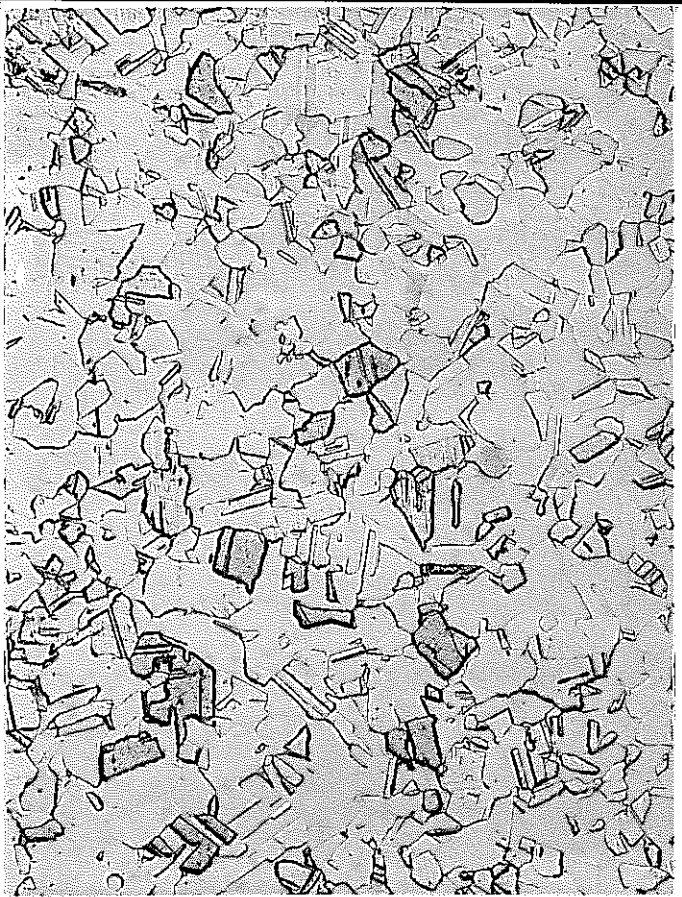
円筒部上端部 ; FT11

蓋板中心部 ; FT7



底板端部 ; FB2

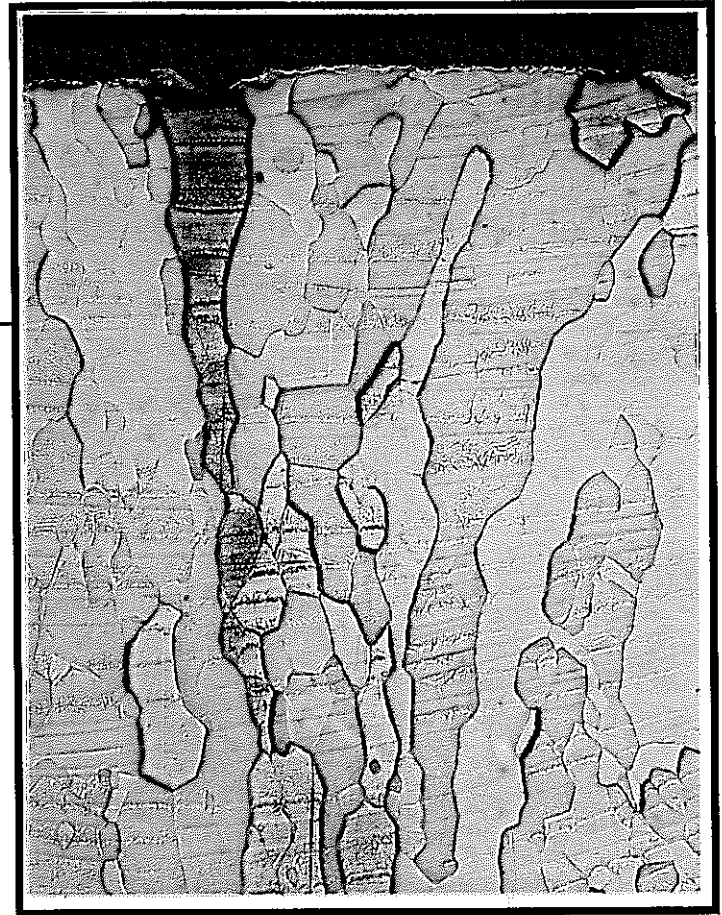
底板中心部 ; FB1



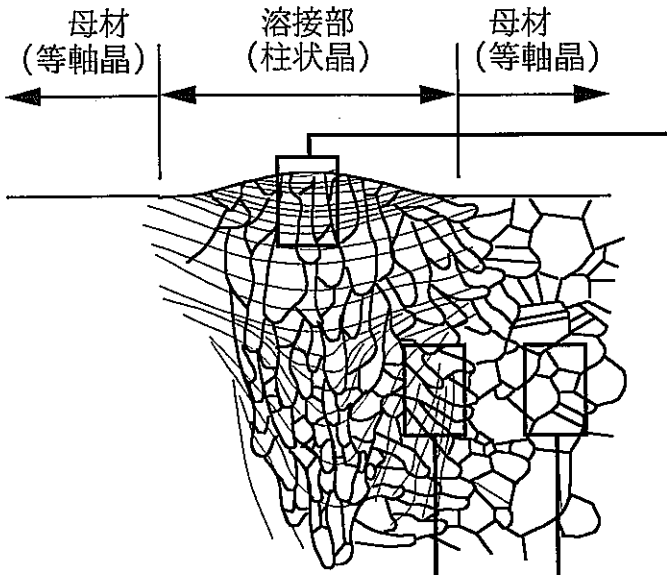
200 μ m

写真 4.3-1 FT11、FT7、FB1、FB2 の断面組織

溶接ビード表面近傍



溶接部断面の模式図



溶接熱影響部 - 母材境界



母材

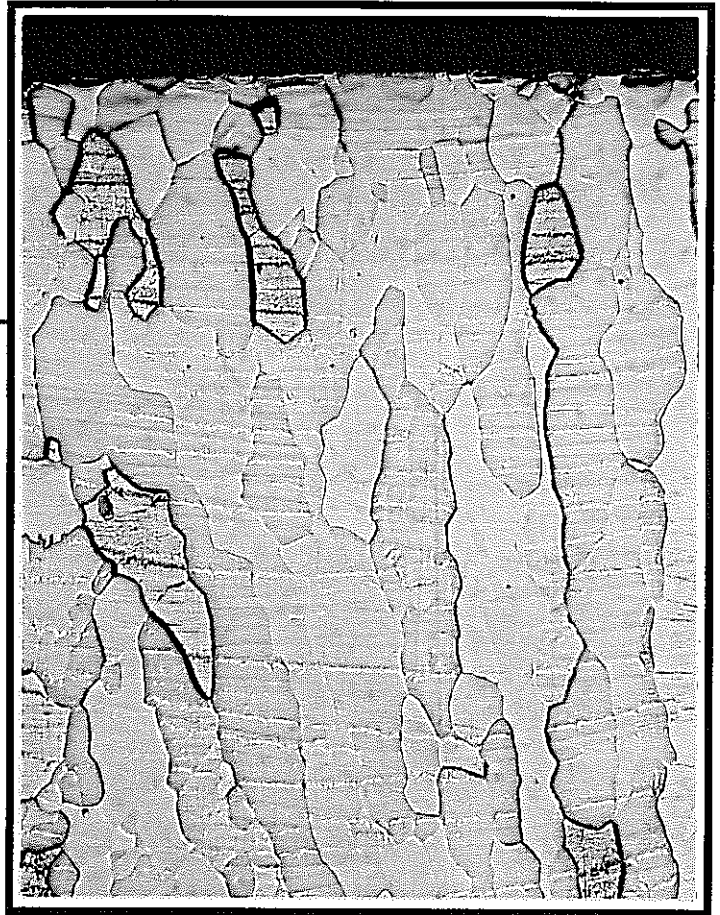
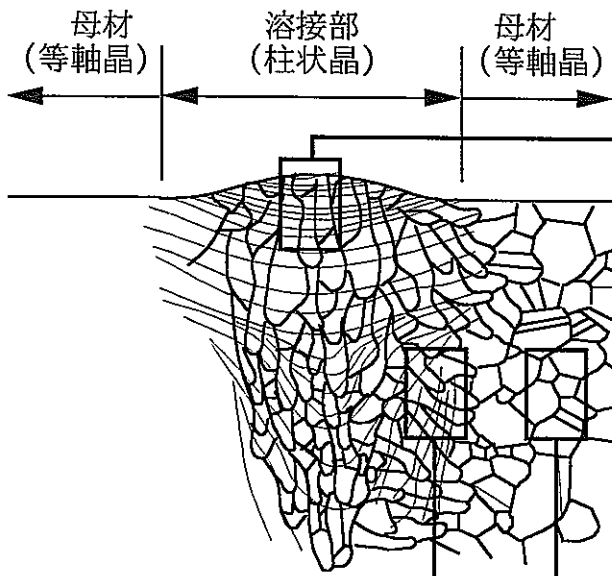


200 μ m

写真 4.3-2 FT11 溶接部の断面組織

溶接ビード表面近傍

溶接部断面の模式図



溶接熱影響部—母材境界



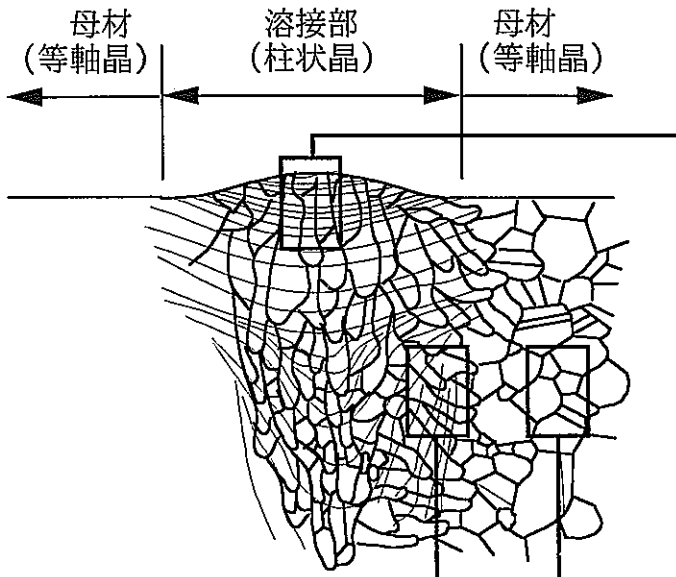
母材



200 μ m

写真 4.3-3 FT4 溶接部の断面組織

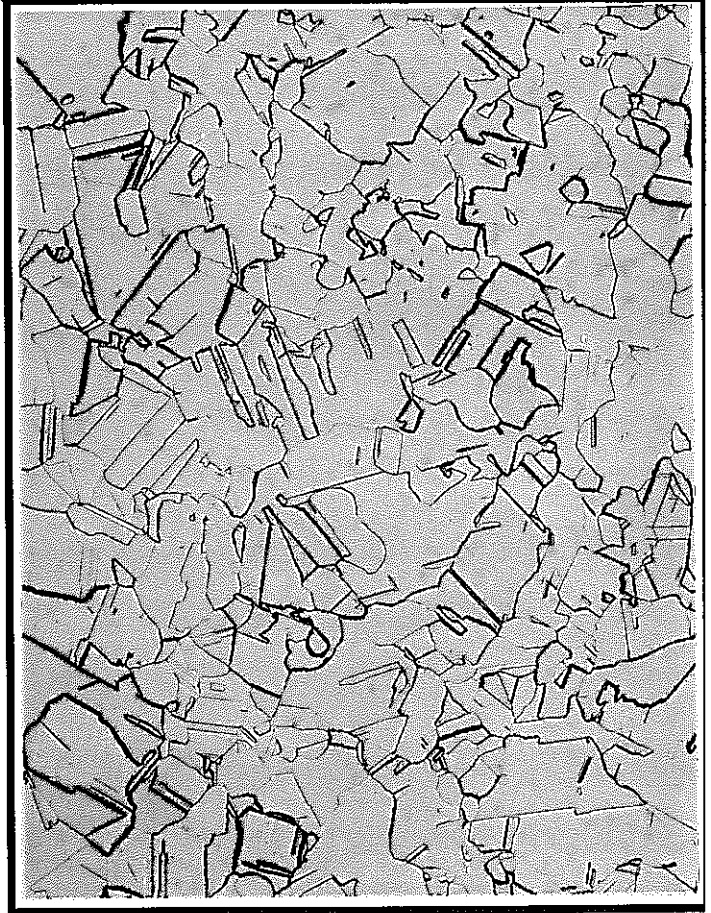
溶接部断面の模式図



溶接熱影響部—母材境界



母材



200 μ m

写真 4.3-4 FT1 溶接部の断面組織

容器的縦方向

円筒部上端部 ; XT11

蓋板中心部 ; XT7



底板端部 ; XB2

底板中心部 ; XB1

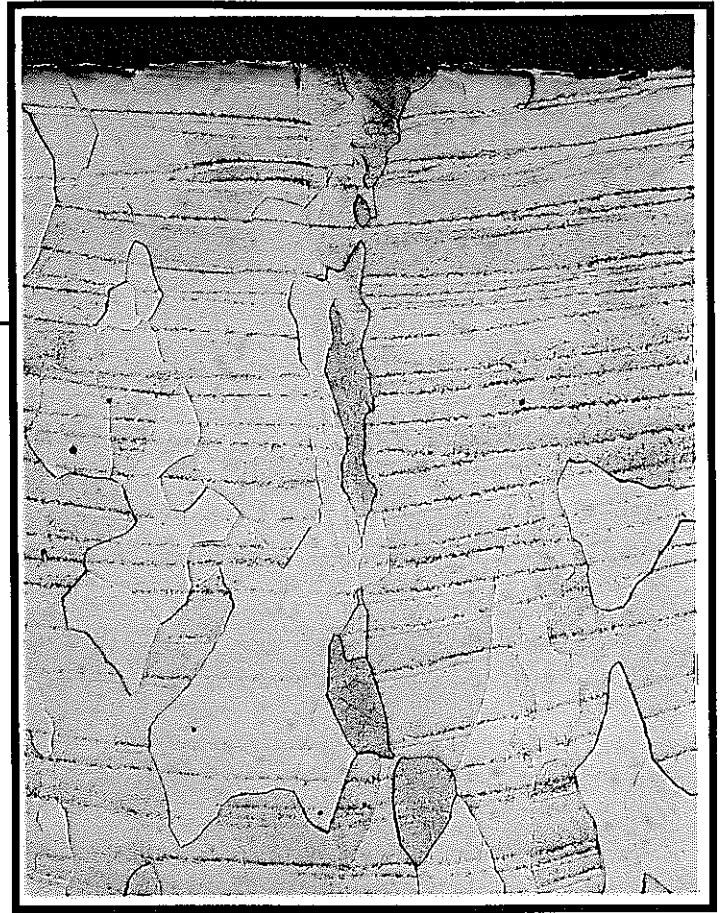
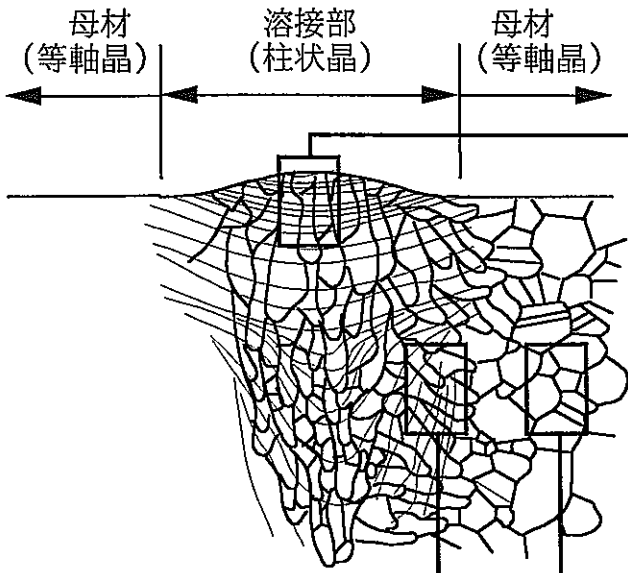


200 μ m



写真 4.3-5 XT11、XT7、XB1、XB2 の断面組織

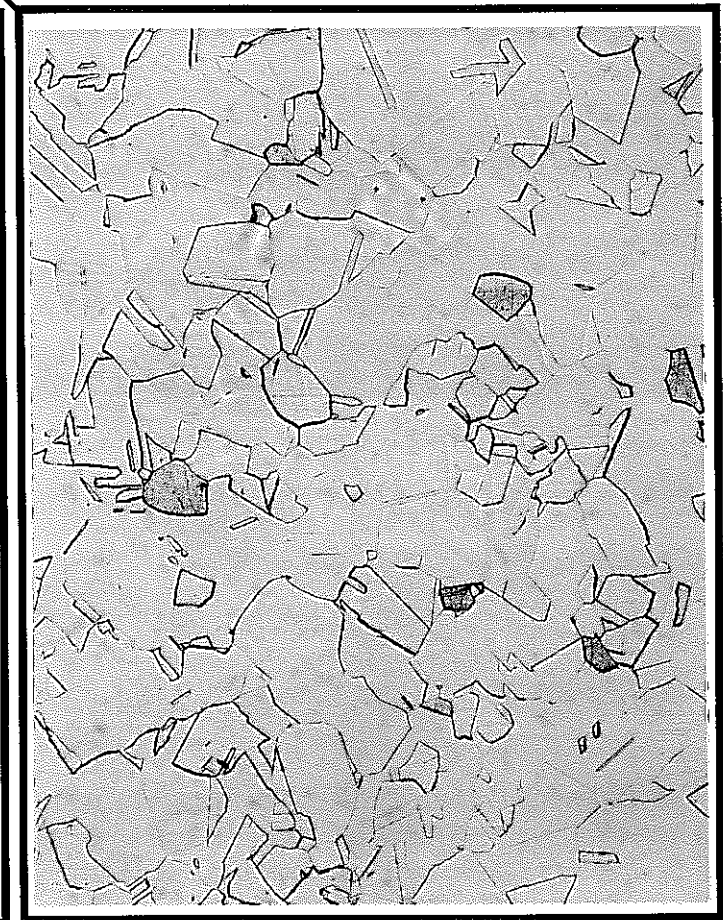
溶接部断面の模式図



溶接熱影響部 - 母材境界



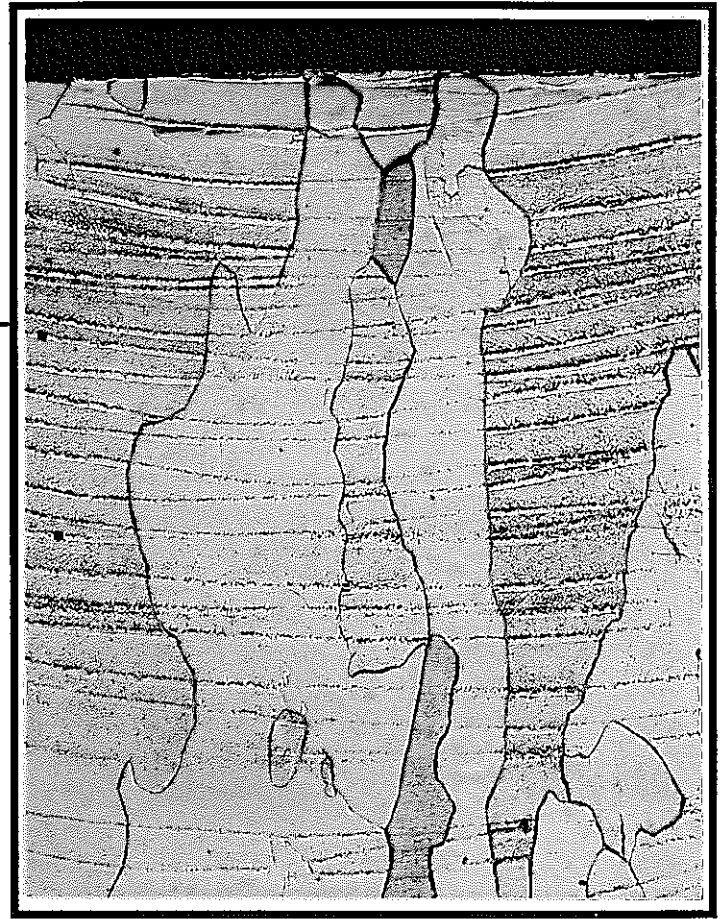
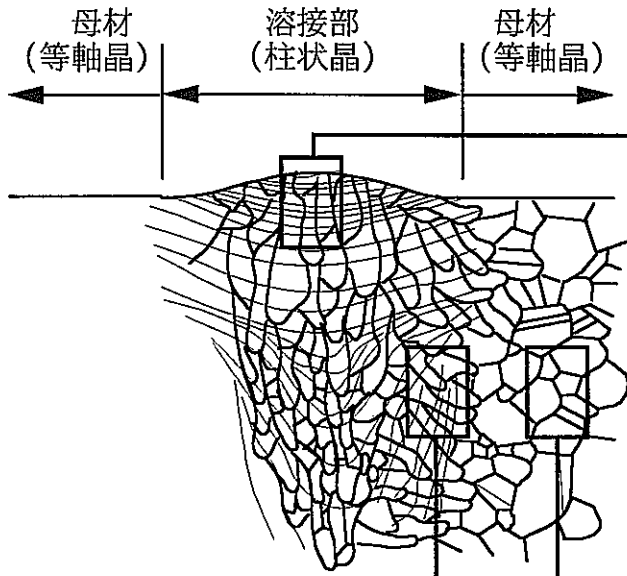
母材



200 μ m

写真 4.3-6 XT11 溶接部の断面組織

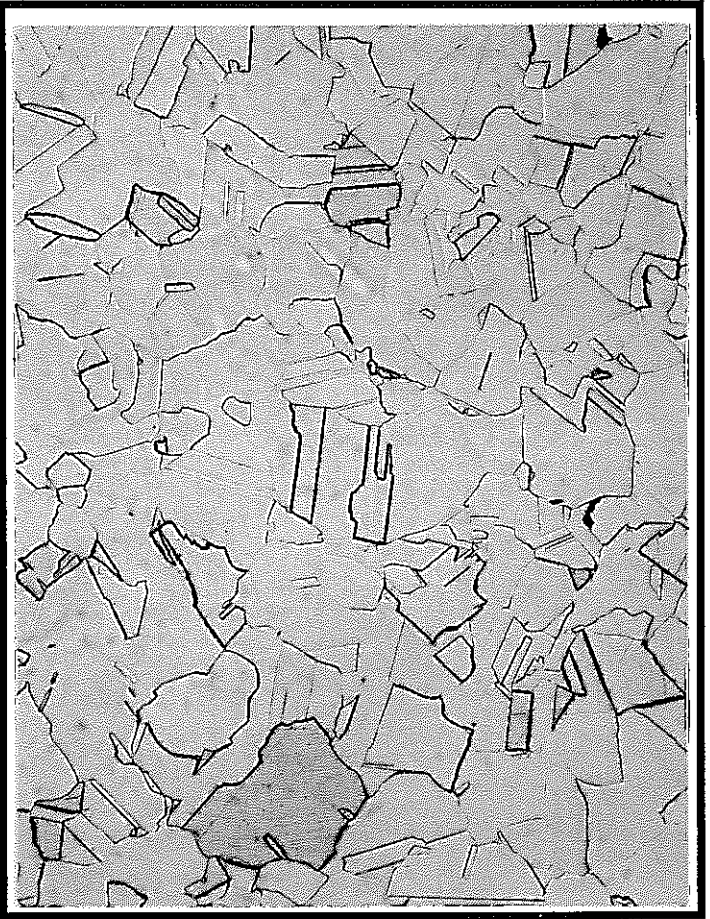
溶接部断面の模式図



溶接熱影響部－母材境界



母材



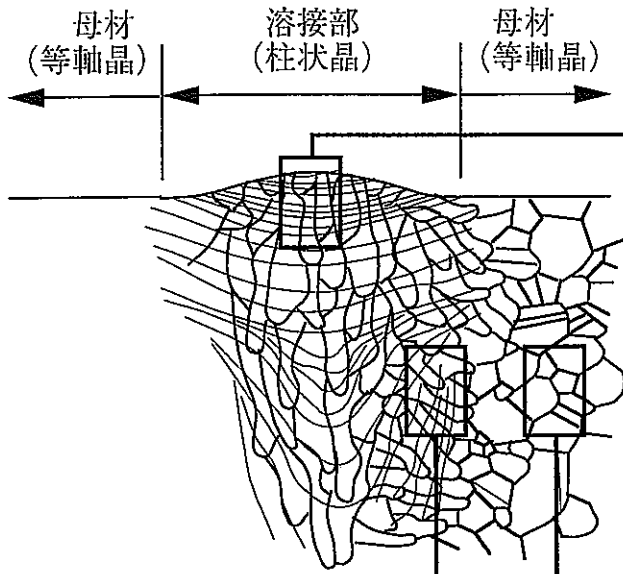
200 μm

写真 4.3-7 XT4 溶接部の断面組織

溶接ビード表面近傍



溶接部断面の模式図



溶接熱影響部 - 母材境界



母材



200 μ m

写真 4.3-8 XT1 溶接部の断面組織

度測定試験方法」規定の求積法に従い、平均粒径を算出した。

結果を表4.3-1、表4.3-3に示す。ここで、溶接部については、先述の理由により粒界の判別が困難なので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倍大きな値となっている。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。

無酸素銅の蓋板部は一次鍛造後の部材から切出して製作した。そのため、後方押出し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 μm ～360 μm)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。

4.3.3 硬さ試験

ビッカース硬さHvを、以下のように測定した。

*測定装置：(株)井谷衡機製作所製・硬さ試験機H-75T7

*測定条件：荷重5kg、保持時間15sec.、5点測定の平均値を採用。その他、詳細は「JIS Z 2244ビッカース硬さ試験方法」に準じた。

測定の状況を写真4.3-9に、結果を表4.3-1～4に示す。溶接部の測定法は、以下の通りである。

*表4.3-1、4.3-3：断面組織の溶接部中心に沿って測定した5点の平均値

*表4.3-2、4.3-4：蓋の外側より10mm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。圧痕を打った位置の模式図、および試験片切り出し位置によるHvの違いを棒グラフで比較した図も合わせて示した。

表4.3-1、4.3-3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Hv=45～57の範囲に納まっており、溶接部が母材より硬さに劣るということはないかった。

表4.3-2、4.3-4より、何れの試料においてもa～gの各点において組織に対応した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。

表 4.3-1 外容器評価試験結果：無酸素銅(OFC)

評価位置 No.	円筒部上端部			底板中心部	底板端部	蓋板中心部	溶接部			目標値
	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 (kgf/mm^2)	21.3	21.0	—	20.9	21.0	20.2	21.0	20.6	—	
0.2%耐力 (N/mm^2)	70	—	—	76	63	67	98	—	—	
	—	68	—	61	64	61	—	86	—	
	—	—	69	68	61	58	—	—	89	
平均 (kgf/mm^2)	7.2	6.9	—	7.8	6.4	6.8	10.0	—	—	
伸び (%)	63	—	—	59	67	63	56	—	—	
	—	61	—	59	68	58	—	56	—	
	—	—	60	62	68	63	—	—	55	
平均	61	61	—	60	68	61	56	56	—	

* 溶接部は組織的に粒径が定義しづらいので測定不可とした。

表 4.3-2 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	h
FT11	58	57	57	56	54	55	58
FT4	50	51	47	49	50	48	48
FT1	49	50	48	47	46	47	47

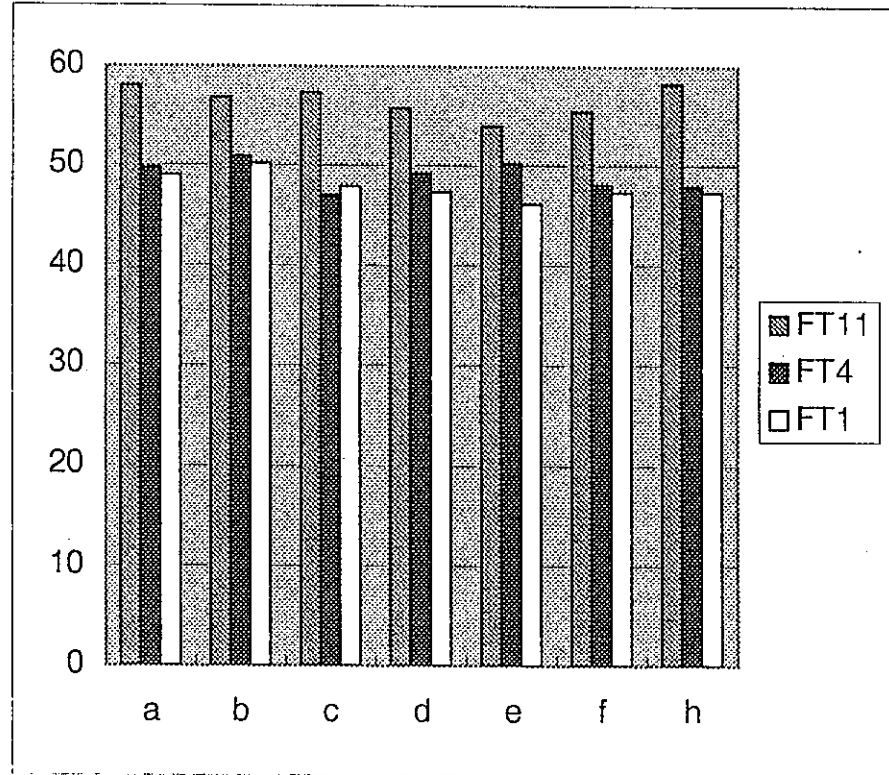
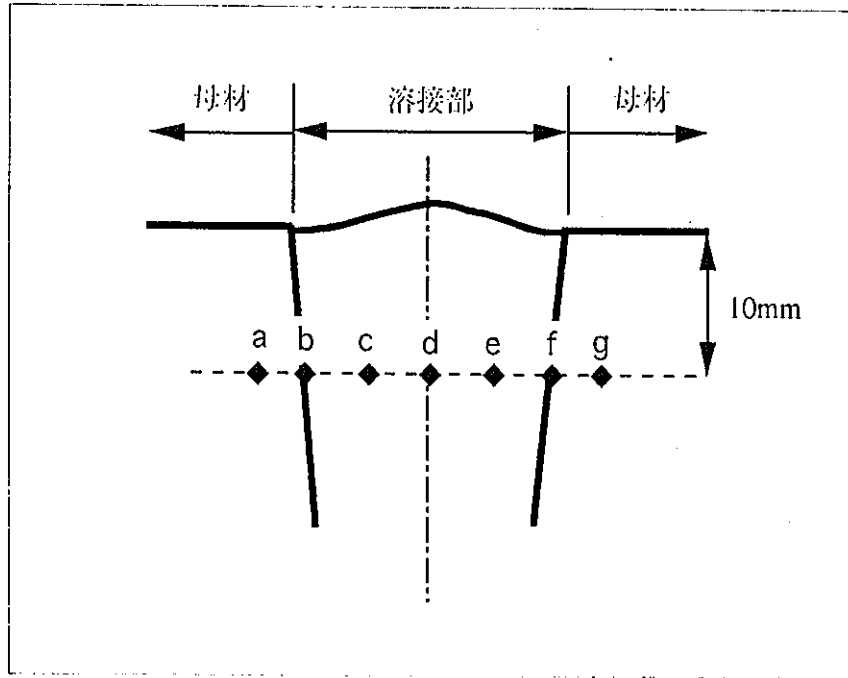


表 4.3-3 外容器評価試験結果：リン入り無酸素銅(XLP)

評価位置 No.	円筒部上端部			底板中心部	底板端部	蓋板中心部	溶接部			目標値	
	XT11	XT4	XT1	XB1	XB2	XT7	XT11	XT4	XT1		
平均粒径 (μm)	129	—	—	113	105	128	測定不可	測定不可	測定不可	180~360	
硬さ Hv	51	—	—	47	55	50	50	57	52	≥ 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	208		204	207	208	202				
	(kgf/mm^2)	21.2	—	—	21.0	21.2	21.3	20.5	—		—
0.2%耐力 (kgf/mm^2)	—	21.3	—	20.8	21.1	21.2	—	20.7	—		
	—	—	21.3	20.7	21.1	21.3	—	—	20.6		
	平均	21.2		20.8	21.1	21.3	20.6				
	(N/mm^2)	66	—	—	66	77	65	101	—		—
	—	73	—	61	76	63	—	86	—		
伸び (%)	—	—	66	64	67	76	—	—	87		
	平均	68		64	73	68	92				
	(kgf/mm^2)	6.8	—	—	6.8	7.9	6.6	10.3	—		—
	—	7.5	—	6.3	7.7	6.4	—	8.8	—		
	—	—	6.7	6.6	6.9	7.8	—	—	8.9		
平均	7.0		6.5	7.5	6.9	9.3					
伸び (%)	60	—	—	62	67	59	38	—	—		
	—	62	—	62	63	59	—	46	—		
	—	—	61	60	65	58	—	—	44		
	平均	61		61	65	59	43				

* 溶接部は組織的に粒径が定義しづらいので測定不可とした。

表 4.3-4 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	h
XT11	54	54	50	51	49	52	50
XT4	56	53	55	57	58	56	58
XT1	54	53	54	53	58	53	50

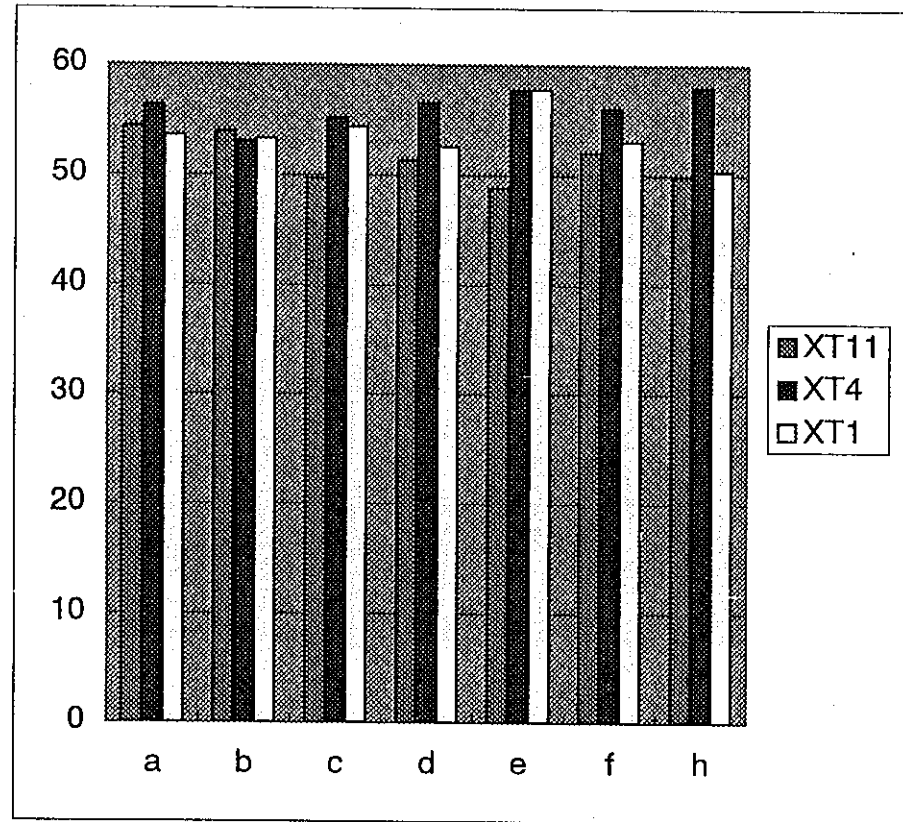
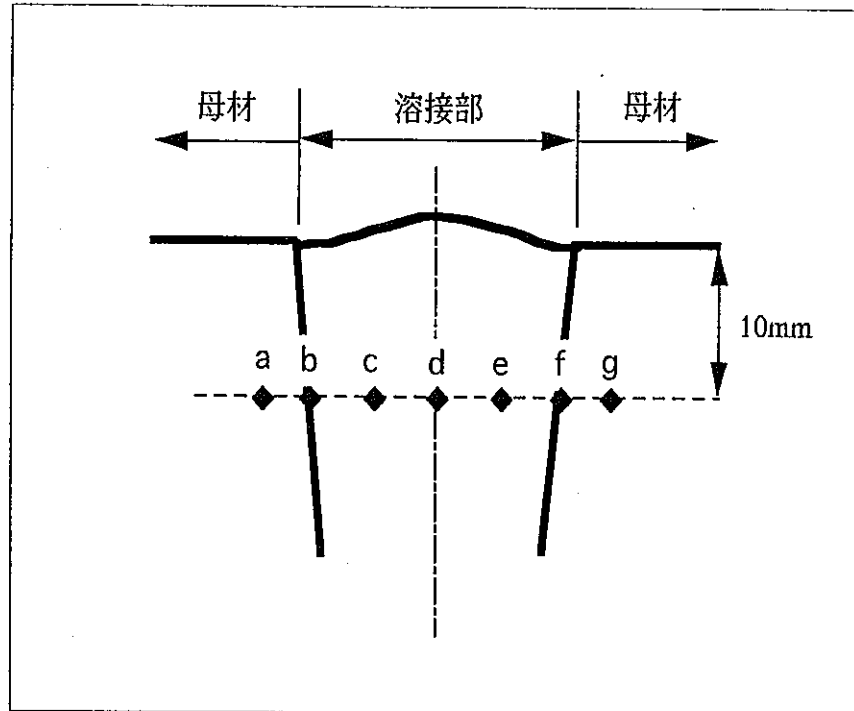




写真 4.3-9 ビッカース硬さ試験

4.3.4 引張試験

引張強さ、0.2%耐力、伸びを、以下のように測定した。

*測定装置：インストロン・ジャパン（株）製・引張試験機インストロン式5583縦型

*試験片形状：図4.3-1に示す。ASTM E8試験片を用いた。

*測定条件：クロスヘッドスピード=10mm/min。伸びは試験片にけがいた標点距離の試験前後の値を読取り顕微鏡で測定し、それらの値から求めた。その他、詳細は「JIS Z 2241金属材料引張試験方法」に準じた。

試験片及び測定状況を写真4.3-10に、結果を表4.3-1、表4.3-3に示す。無酸素銅とリン入り無酸素銅のいずれの材質でも、溶接部とそれ以外の部分（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次のようになる。

*引張強さ：無酸素銅、リン入り無酸素銅ともに殆ど変わらない。

*0.2%耐力：無酸素銅と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。

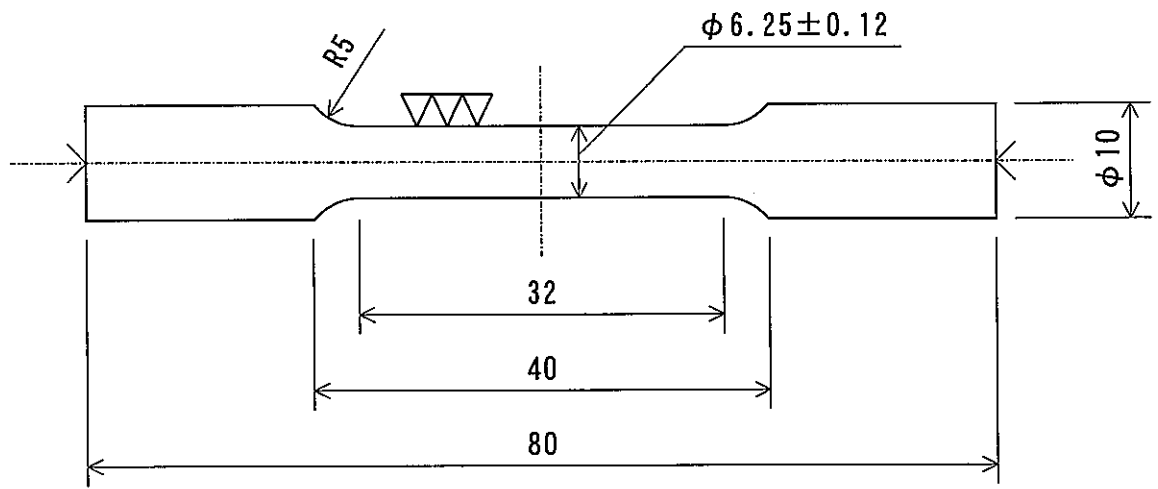
*伸び：無酸素銅とリン入り無酸素銅のいずれも、溶接部の方が蓋板中心部より低い。

0.2%耐力と伸びで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のでこのような違いが生じたものと思われる。

以上のように、伸びの値は溶接部がそれ以外の部分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いる。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）の結果を比較すれば分かるように、平均粒径による引張特性の違いは殆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。



標点距離：25mm

図4.3-1 引張試験片 (単位：mm)

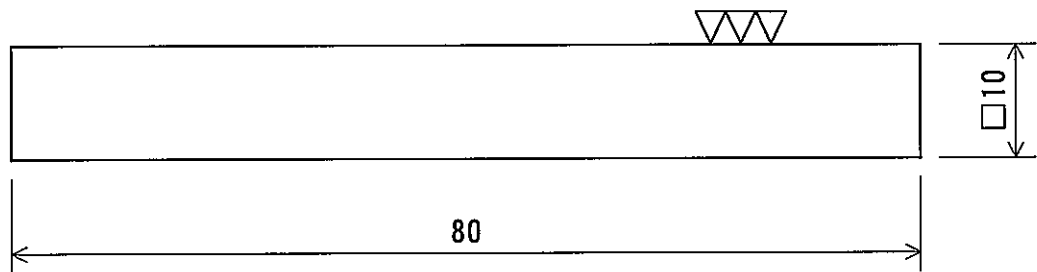
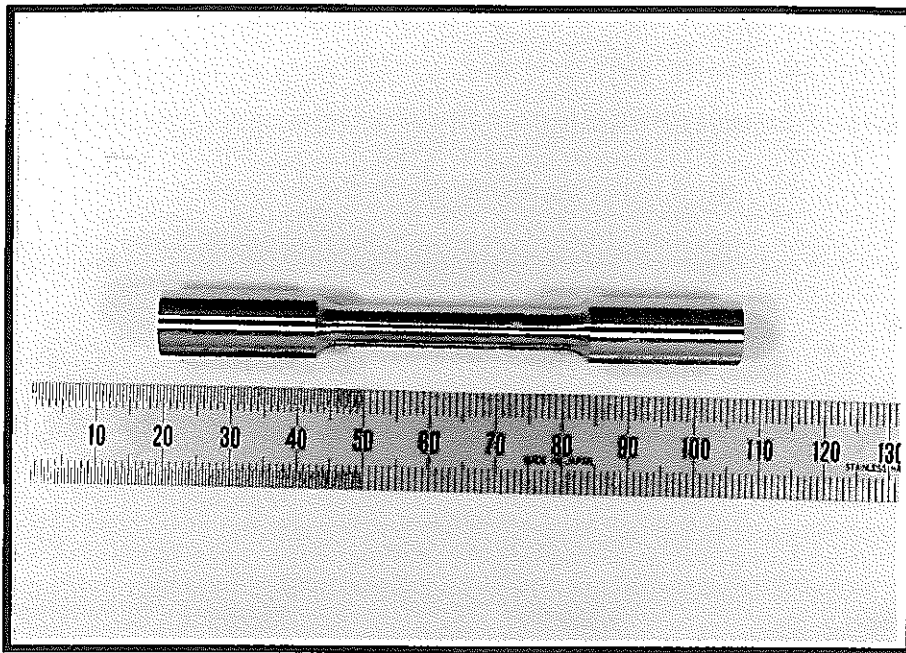
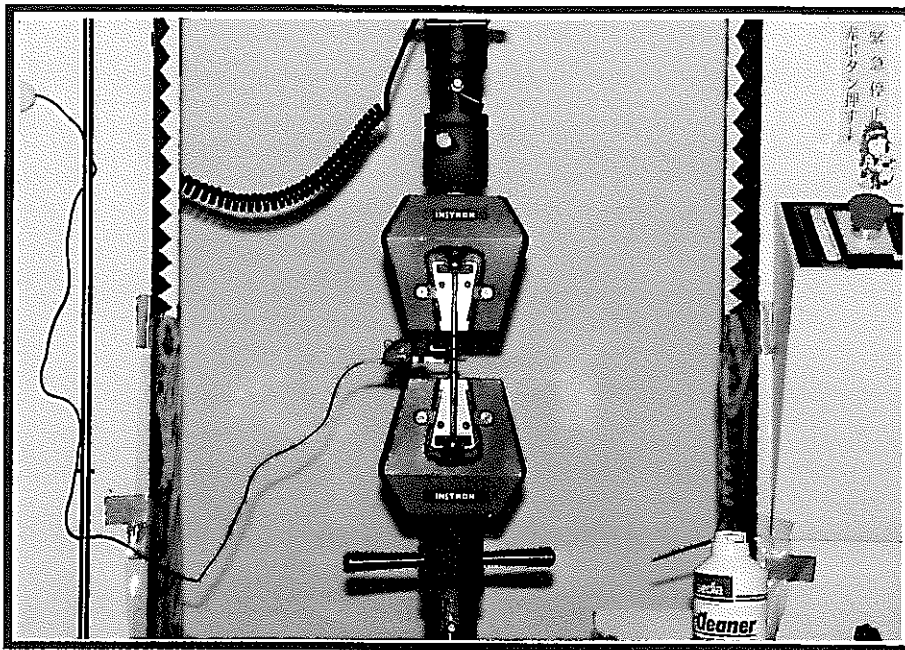


図4.3-2 曲げ試験片 (単位：mm)

引張試験片



試験前



試験後
(試験破断)

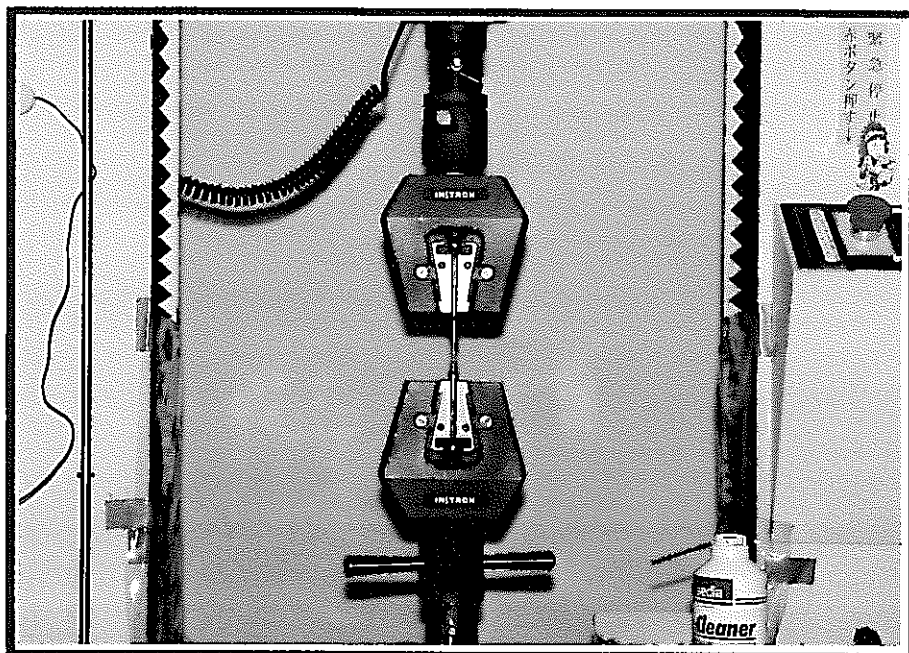


写真 4.3-10 引張試験

4.3.5 曲げ試験

以下のように測定した。

*測定装置：引張試験と同じ

*試験片形状：図4.3-2に示す。

*測定条件：クロスヘッドスピード=10mm/min。治具は、図4.3-3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ように荷重をかけた。

試験片及び測定の状況を写真4.3-11に示す。ここに示したように、いずれ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）は測定できなかったが、このことは曲げ荷重に対して十分な延性を示すということの意味している。この時点でのせん断応力は 60N/mm^2 以上、試料の曲がった角度は約 80° （片側約 40° ずつ）であった。

4.4. 評価試験結果まとめ

材質によらず、溶接部以外でも試験片採取箇所により結晶粒径が異なったが、機械的性質は同等であった。溶接部は、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%の大きな伸びを示した。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全試料破断しなかった。これより、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の検討によると無酸素銅にリンを添加することによりクリープ特性を向上させるとの結果が得られている。材質によるクリープ特性の差は今後評価を行なう必要がある。

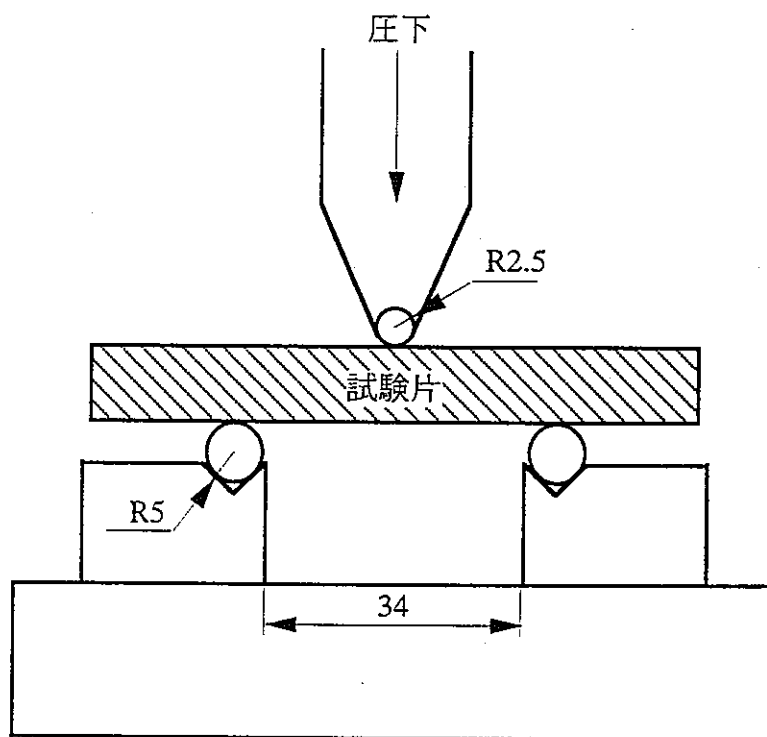
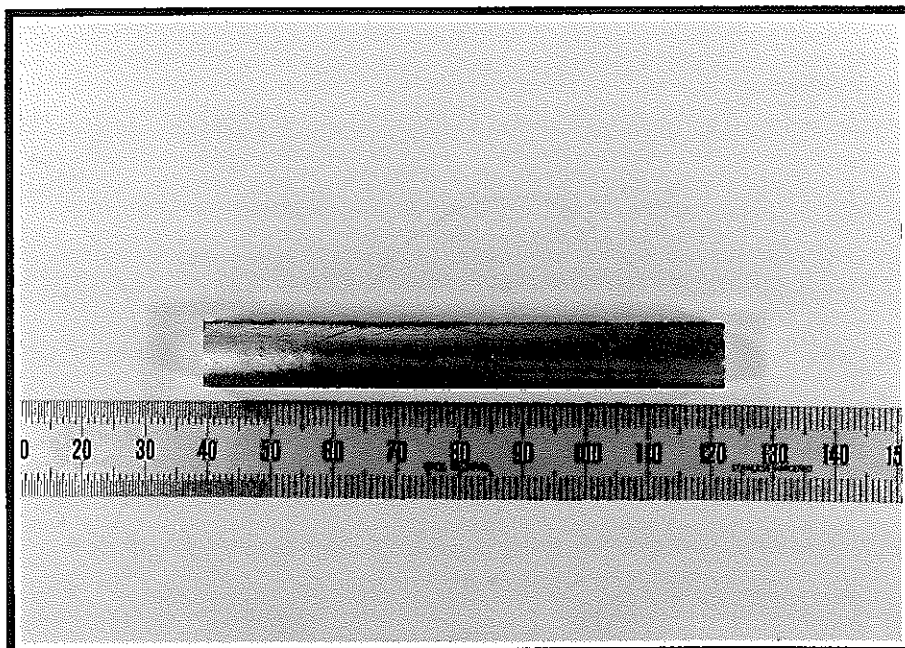
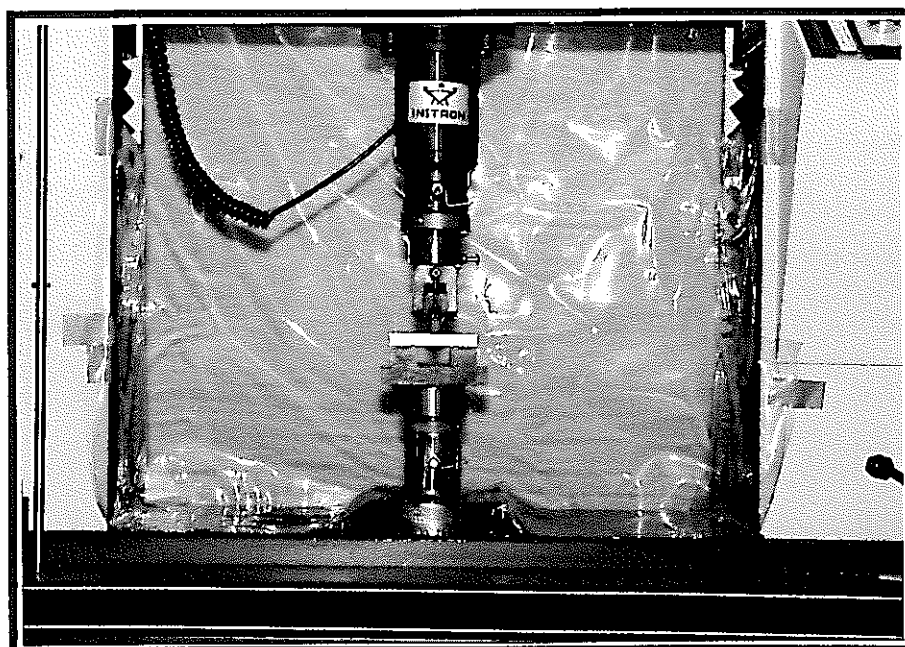


図 4.8-3 三点曲げ試験治具 (単位: mm)

曲げ試験片



試験前



試験後

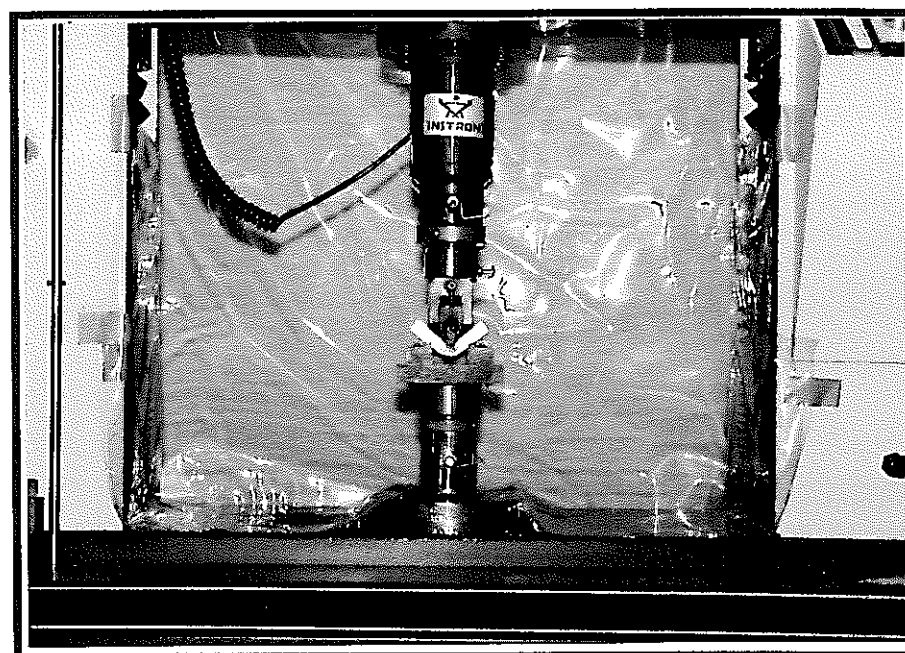


写真 4.3-11 曲げ試験

5. 製作試験結果の評価

5.1 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、銅外容器製作において熱間後方押し出し加工が実規模にも適用可能な技術であることが証明された。また、本加工方法が銅製外容器だけでなく鋼製内容器ないし鋼製オーバーパックの製造技術への転用も可能であり、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。

今後は、銅製外容器の実規模モデルの製作を行い本技術が適用可能であることを確認するとともに、鋼製内容器ないし鋼製オーバーパックへの本技術の適用性評価を行う必要がある。

今回の試作では、熱間後方押し出しで円筒／底板一体成形ができることを確認することに主眼を置いたため、分解鍛造時の欠陥発生や熱間後方押し出し時の変形・軸ずれ等を十分見込んだ設計とした。試作の結果、熱間後方押し出しで仕上寸法に近い形状にすることが可能であることが分かった。次のステップとして、量産化に向けて分解鍛造工程や押し出し工程における効率化を行い、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。この際には、熱間加工前に行う熱処理(大気雰囲気、830℃)等によって、大気中から銅材料内部への酸素の拡散によって銅材料表面付近の酸素含有量が多くなる³⁾ことが無視できなくなる可能性がある。そのため、この部分を機械加工で取り除くなどの対策が必要となると思われる。

5.2 機械加工による成形性

熱間後方押し出し後の加工等に機械加工を用いた。無酸素銅は、炭素鋼と比較して柔らかく展伸性が良く、また熱膨張率が大きいいため機械加工性は劣る。しかし、今回の試作の結果、適当な加工条件の下では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。

5.3 電子ビーム溶接の適用性

試作の結果、電子ビーム溶接は銅製外容器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、開先の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1.5mm程度ずれても欠陥なく溶接ができることが分かった。

量産化に向けて、スパイキング等の微細欠陥部を減らすための加工条件やスパッタ*除去の遠隔自動化等の検討が必要になる可能性がある。

*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。

5.4 溶接部に対する超音波探傷試験の適用性

超音波探傷試験では、結晶粒径が細かい領域において、直径 1mm 程度の欠陥を検出できることが分かった。超音波探傷では、銅の結晶粒径が大きく変化する部分を欠陥部分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必要がある。また、銅の結晶粒径が粗くな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。

5.5 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、引張り試験・硬さ試験・曲げ試験の結果からでは、両者に有為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。

銅製外容器の材質には、長期間の品質を保証するために無酸素銅ベースのものを使わざるを得ないが、リン以外の添加元素を用いても無酸素銅の特性を向上できる可能性がある。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。

5.6 銅-炭素鋼オーバーパックの製作コスト

年間製作本数 1,000 本として銅-炭素鋼オーバーパックの製作コストを算出した。結果を表 5.6-1 に示す。

表 5.6-1 銅-炭素鋼オーバーパック製作コスト

項 目		単 位	単 価	金 額 (千円)		
外 容 器	本 体	材 料 費	3,000kg	250 円/kg	750	
		連 続 鑄 造 費	3,000kg	75 円/kg	225	
		鍛造・後方押し出し費	3,000kg	300 円/kg	900	
		切 削 加 工 費	32hr	8,000 円/hr	256	
		材 料 回 収 費	1,000kg	250 円/kg	-250	
	(小 計)				2,131	
	蓋	材 料 費	160kg	250 円/kg	40	
		連 続 鑄 造 費	160kg	75 円/kg	12	
		圧延/切断/切削費	160kg	250 円/kg	40	
		材 料 回 収 分	60kg	250 円/kg	-15	
		(小 計)				92
	(外容器 計)				2,223	
	内 容 器	本 体	材 料 費	4,800kg	100 円/ kg	480
			鍛造・後方押し出し費	4,800kg	250 円/ kg	1,200
切 削 加 工 費			24hr	8,000 円/hr	192	
(小 計)				1,680		
蓋		材 料 費	1,140kg	100 円/ kg	114	
		圧延/切断/切削費	1,140kg	200 円/ kg	228	
(小 計)				342		
(内容器 計)				2,022		
溶 接 費				300		
検 査 費				150		
合 計				4,737		

* 前提条件：年間製作本数…1,000 本

複合オ-パ'-パ'ックの寸法は平成9年度「複合オ-パ'-パ'ックの設計研究(II)」による

6. 腐食試験片の採取

サイクル機構殿のご指示により腐食試験片の採取を行なった。採取個数はリン入り無酸素銅及び無酸素銅から各 50 枚ずつとし、採取箇所および寸法は下記の通りとした。図 6-1 に具体的な採取箇所を示す。腐食試験片寸法測定結果を表 6-1 に示す。

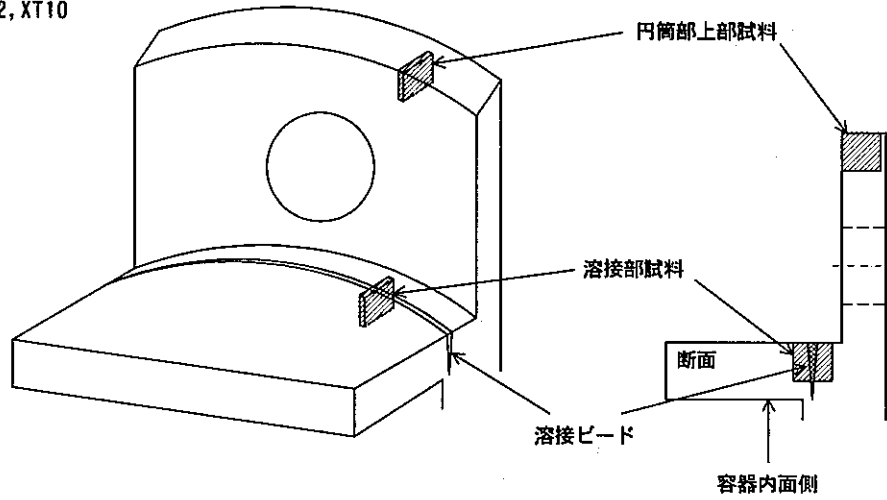
- ・ 寸 法：20mm×20mm×3mm^t
- ・ 採取箇所：円筒上端部 10 枚(*T10、*T2 各 5 枚)
 底板中心部 10 枚(*B1)
 底板端部 10 枚(*B2)
 蓋板中心部 10 枚(*T3)
 溶 接 部 10 枚(*T10W、*T2W 各 5 枚)

*：無酸素銅…F、リン入り無酸素銅…X

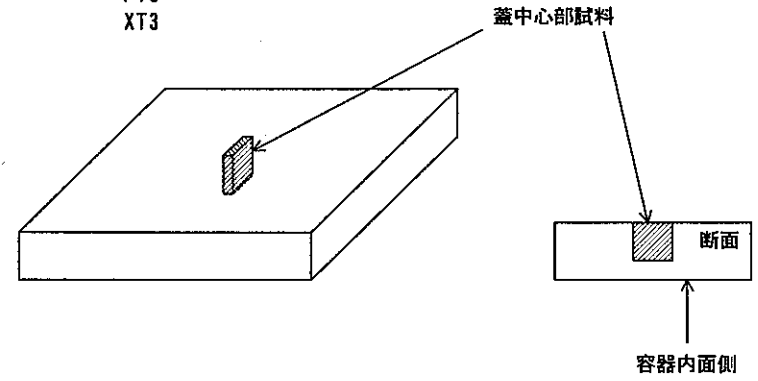
表 6-1 腐食試験片寸法測定結果

素材名	試料名	枚数(枚)	縦(mm)	横(mm)	厚さ(mm)
無酸素銅	FT10	5	19.96	19.99	2.98
	FT2	5	19.97	19.99	2.97
	FT10W	5	20.00	20.01	3.09
	FT2W	5	20.04	20.05	2.97
	FT3	10	19.96	19.96	2.96
	FB1	10	19.93	20.01	3.01
	FB2	10	19.95	20.00	3.00
リン入り無酸素銅	XT10	5	19.96	19.98	2.97
	XT2	5	20.01	20.04	2.94
	XT10W	5	19.95	19.98	2.97
	XT2W	5	19.94	19.94	2.85
	XT3	10	20.02	19.98	2.99
	XB1	10	19.92	19.96	2.98
	XB2	10	20.03	20.03	3.00

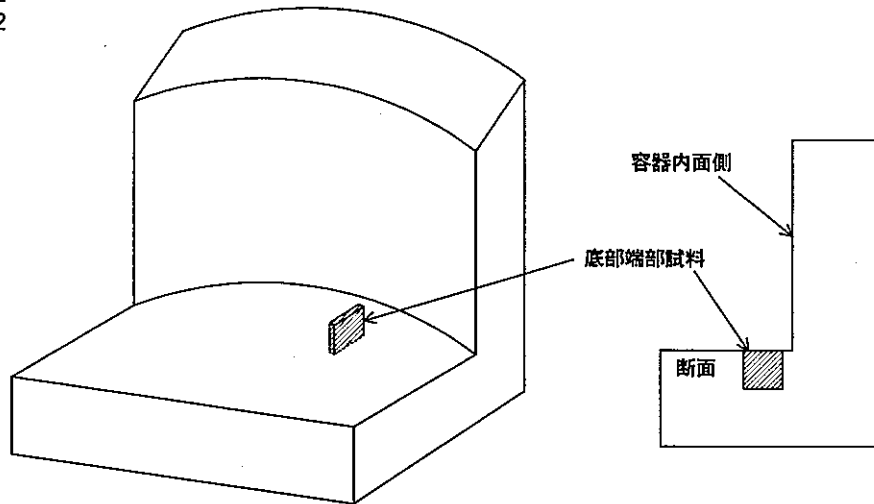
円筒部上部・溶接部
FT2, FT10
XT2, XT10



蓋板中心部
FT3
XT3



底板端部
FB2
XB2



底板中心部
FB1
XB1

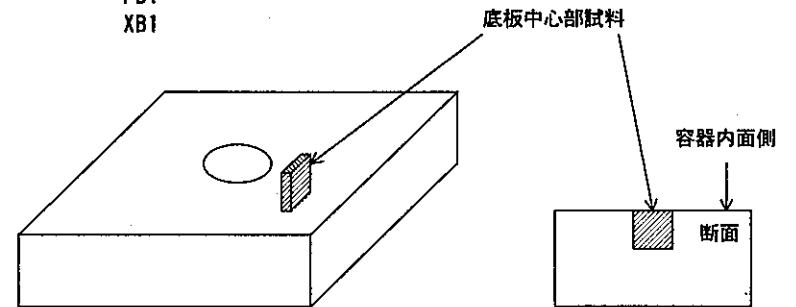


図 6 - 1 腐食試験片の採取箇所

7. 研究開発計画の作成

今回の検討を受け、銅製複合オーバーパック製作へ向けての研究開発課題としては下記のようなものが上げられる。

- ・銅製外容器実規模容器の製作(期間約1年)
- ・銅製容器への熱間押し出し加工技術の適用性研究(期間約1年)
- ・量産化に向けた効率化の検討(期間約3～4年)
- ・電子ビーム溶接の量産化技術検討(期間約2年)
- ・超音波探傷の適用性評価(期間約1年)
- ・種々の無酸素銅ベース材料を用いたクリープ特性及び腐食特性評価

(短期の評価で期間約2年)

参考文献

- 1) 大川睦、「無酸素銅およびりん脱酸銅の酸化還元加熱による水素ぜい化とそれによ
ぼす加熱温度・加熱時間およびりん含有量の影響」、住友軽金属技報、Vol.13、No.4、
1972

(添付資料)

動力炉・核燃料開発事業団 殿

銅－炭素鋼オーバーパックの製作技術に関する研究

製 作 試 験 要 領 書

平成 10 年 9 月

三菱マテリアル株式会社

1. 件名

「銅－炭素鋼オーバーパックの製作技術に関する研究」製作試験要領書

2. 適用の範囲

本製作試験要領書は、平成 10 年度委託研究「銅－炭素鋼オーバーパックの製作技術に関する研究」において試製作する銅製外容器の詳細な構造・寸法、材料製法・仕様、製作手順・要領、品質目標値、各種評価試験の具体的要領及びその他の評価項目等について適用する。

3. 銅製外容器の詳細な構造・寸法

図面（図番：COP 001）の通りとする。

今回の試製作では炭素鋼製内容器を銅製外容器内に収納しないことから、電子ビーム溶接時の真空引き時間短縮のため、底板に穴を設ける。

4. 材料の製法及び仕様

付図－1 に銅鑄塊の製造工程を示す。付表－1 に目標材料組成を示す。

5. 製作手順・要領

付図－2 に銅鑄塊から銅製外容器完成までの製作手順を示す。

6. 品質目標値

付表－2 に品質目標値を示す。

7. 評価試験及び材料組成分析の要領

銅製外容器の評価試験として、以下の 5 項目を行う。

- ・ 溶接部の超音波探傷試験
- ・ 結晶粒度測定
- ・ 引張り試験
- ・ 曲げ試験
- ・ 硬さ試験

付表－3 に各評価試験及び材料組成分析の要領を示す。付図－3 に各試料採取位置を示す。付図－4 に引張り試験片、付図－5 に曲げ試験片の形状を示す。

8. その他

今回の試製作で行う評価試験片の他に腐食試験用試験片を採取する。ただし、本検討では腐食試験を実施しない。付図－3に腐食試験片採取位置を示す。付図－6に腐食試験片の形状を示す。

本製作試験要領書は、今後の製作要領詳細事項の決定に伴い、随時改正するものとする。

以上

付表-1 目標材料組成

材料名	組成(ppm)					
	Cu	Pb	Zn	Bi	Cd	Hg
リン入り無酸素銅	残	$\leq 10^{*1}$	$\leq 1^{*1}$	$\leq 10^{*1}$	$\leq 1^{*1}$	$\leq 1^{*1}$
無酸素銅	残	$\leq 10^{*1}$	$\leq 1^{*1}$	$\leq 10^{*1}$	$\leq 1^{*1}$	$\leq 1^{*1}$

材料名	組成(ppm)					
	O	P	S	Se	Te	H
リン入り無酸素銅	$\leq 10^{*1*2}$	40~60 ^{*2}	$\leq 6^{*2}$	$\leq 10^{*1}$	$\leq 10^{*1}$	$\leq 0.6^{*2}$
無酸素銅	$\leq 10^{*1*2}$	$\leq 3^{*1}$	$\leq 6^{*2}$	$\leq 10^{*1}$	$\leq 10^{*1}$	$\leq 0.6^{*2}$

* 1 : SKB 仕様。(SKB, "SKB Annual Report 1996", SKB Technical Report 96-25, 1997)

* 2 : JIS H 3510 (C1011: 電子管用無酸素銅)の仕様。

付表-2 品質目標値

項目	目標値
超音波探傷検査性	直径 0.5mm 以上の欠陥を検出できること。 ^{*1}
結晶粒度	180~360 μm^{*2}
引張り強さ	195 N/mm ² 以上 ^{*3}
硬さ(Hv)	45 以上 ^{*4}

* 1 : L.H. Johnson et al, "The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineered Barriers Alternatives", AECL-10718 COG-93-8, 1994 を参考とした。

* 2 : SKB, "SKB Annual Report 1996", SKB Technical Report 96-25, 1997 での規格値。

* 3 : 現行 JIS 規格値 (JIS H 3100 及び JIS H 3510)

* 4 : 日本伸銅協会、「伸銅品データブック」、P50、1997 に記載の無酸素銅及びリン脱酸銅の各社実績値を参考にした。

付表-3 評価試験及び材料組成分析の要領

項目	要領
超音波探傷試験	JIS Z 2344 (金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則) 等に準じて行う。
結晶粒度測定	JIS Z 0501 (伸銅品結晶粒度試験方法) に準じて測定する。
引張り試験	JIS Z 2241 (金属材料引張り試験方法) に準じて測定する。
曲げ試験	JIS Z 2248 (金属材料曲げ試験方法) に準じて行う。
硬さ試験	JIS Z 2244 (ビッカース硬さ試験方法) に準じて測定する。
材料組成分析	JIS H 1202 (電子管用無酸素銅の分析方法) に準じて測定する。

* 結晶粒度測定、引張り試験、硬さ試験の各試験片の採取箇所と試験片数は以下の通り。

・採取箇所(5ヶ所、図-3参照)

円筒部上端部・底板中心部・底板端部・蓋板中心部・蓋板取付溶接部

・試験片数

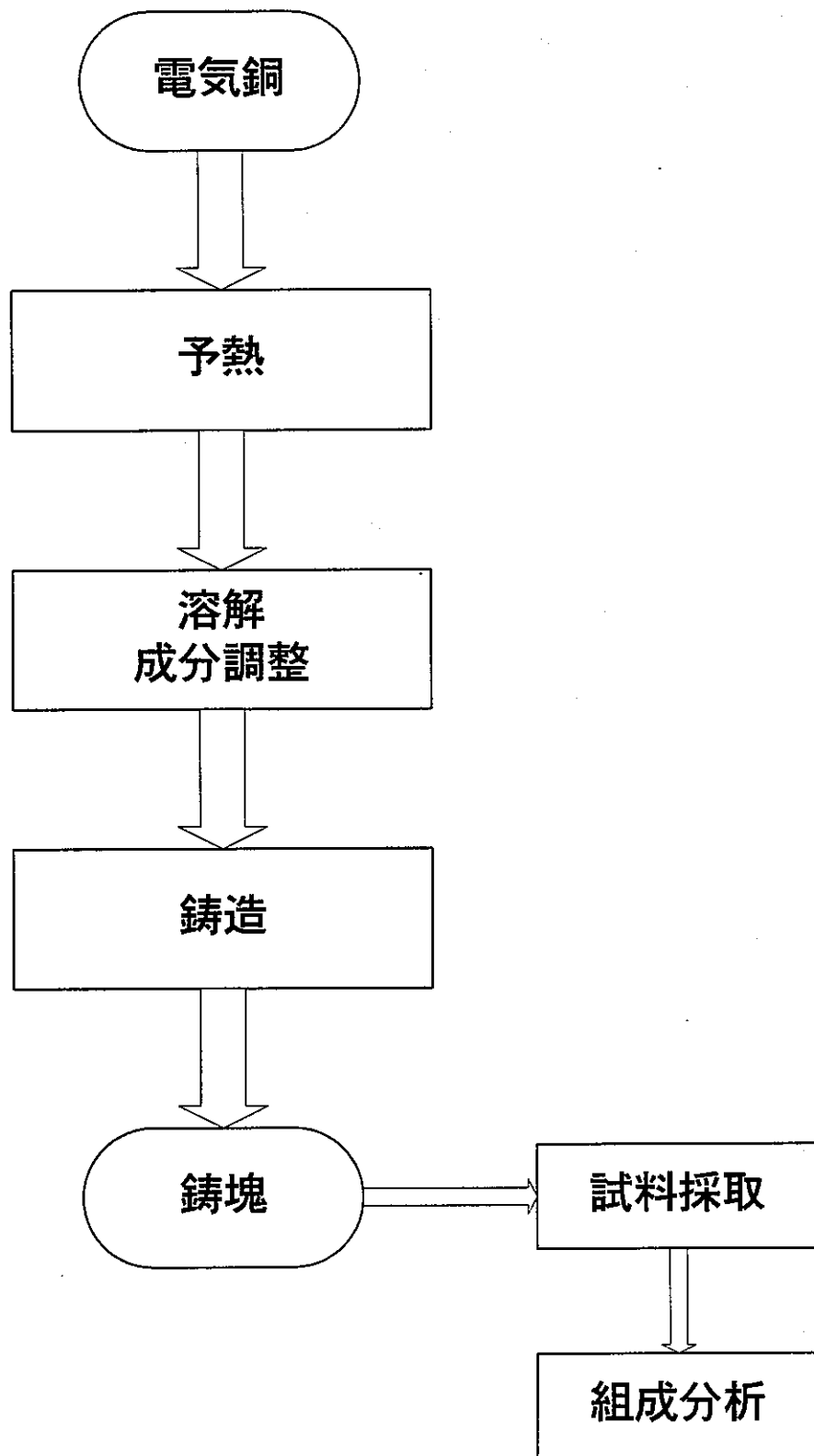
結晶粒度測定：蓋板取付溶接部から 3 個、その他から各 1 個採取する。試験片総数 $(3+4) \times 2 = 14$ 個

硬さ試験：蓋板取付溶接部から 3 個、その他から各 1 個採取する。試験片総数 $(3+4) \times 2 = 14$ 個

引張り試験：各採取箇所から 3 個採取する。試験片総数 $5 \times 3 \times 2 = 30$ 個

曲げ試験：蓋板取付溶接部とそれ以外の 1ヶ所(比較用)から各 3 個採取する。試験片総数 $3 \times 2 \times 2 = 12$ 個

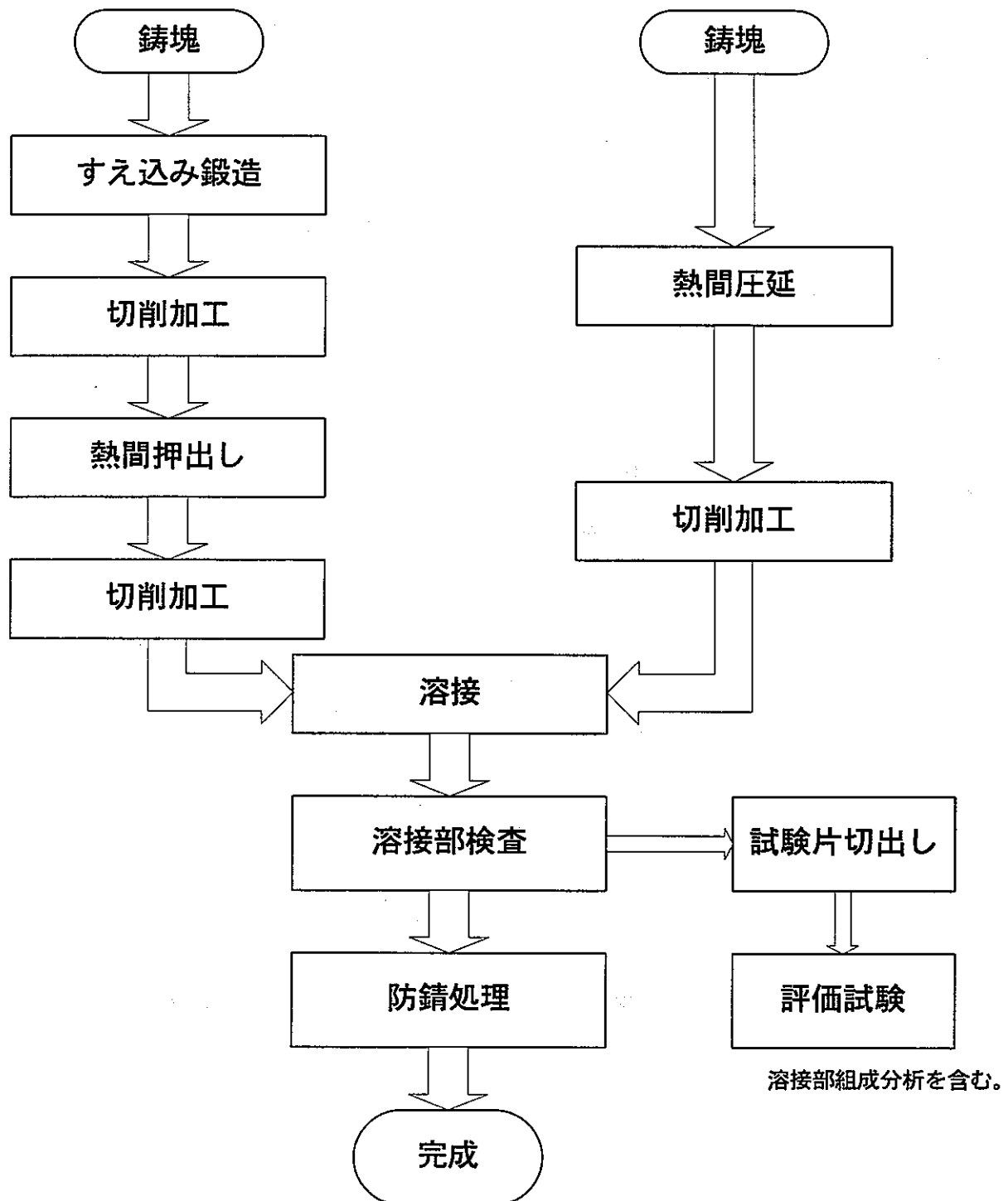
材料組成分析：铸造後の各素材から 1 個、容器完成後の蓋板取付溶接部から素材ごとに各 1 個の計 4 個採取する。



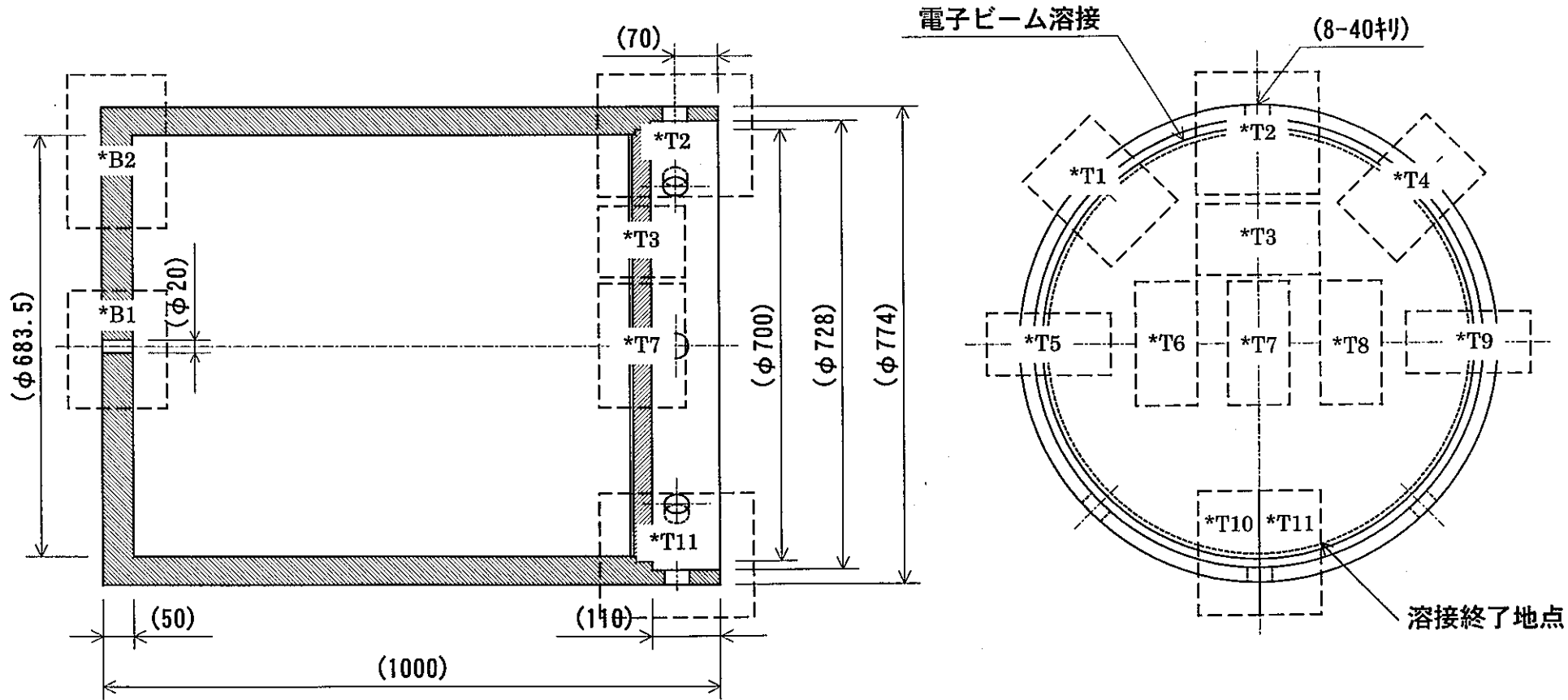
付図-1 銅鑄塊の製造工程

銅製外容器本体

銅製外容器蓋部



付図-2 銅鑄塊から銅製外容器完成までの製作手順



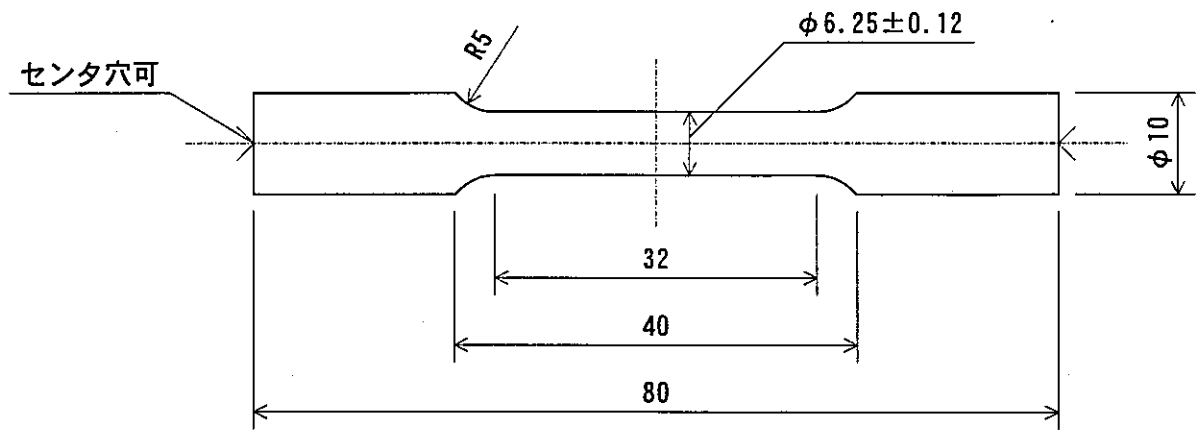
切断片の用途と採取箇所との関係 (銅容器1本当たり)

用途	採取箇所
材料試験等	*T1、*T4、*T7、*T11、*B1、*B2
腐食試験片切出し	*T2、*T3、*T10、*B1、*B2
サイクル機構殿に納品	*T5、*T6、*T8、*T9、*B1、*B2

記号と材質との対応

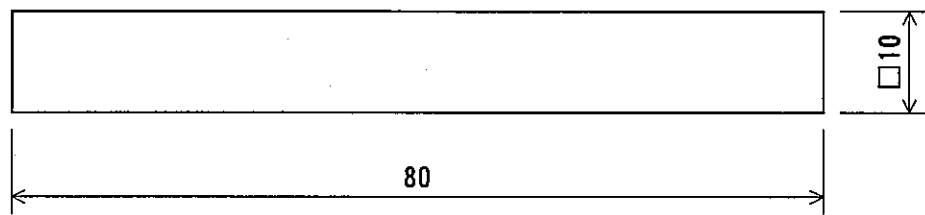
*T	材質
FT	無酸素銅
XT	リン入り無酸素銅

付図-3 各試料採取位置



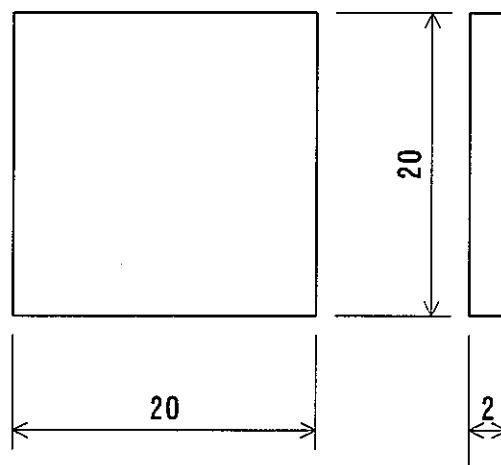
単位：mm

付図－4 引張り試験片の形状



単位：mm

付図－5 曲げ試験片の形状

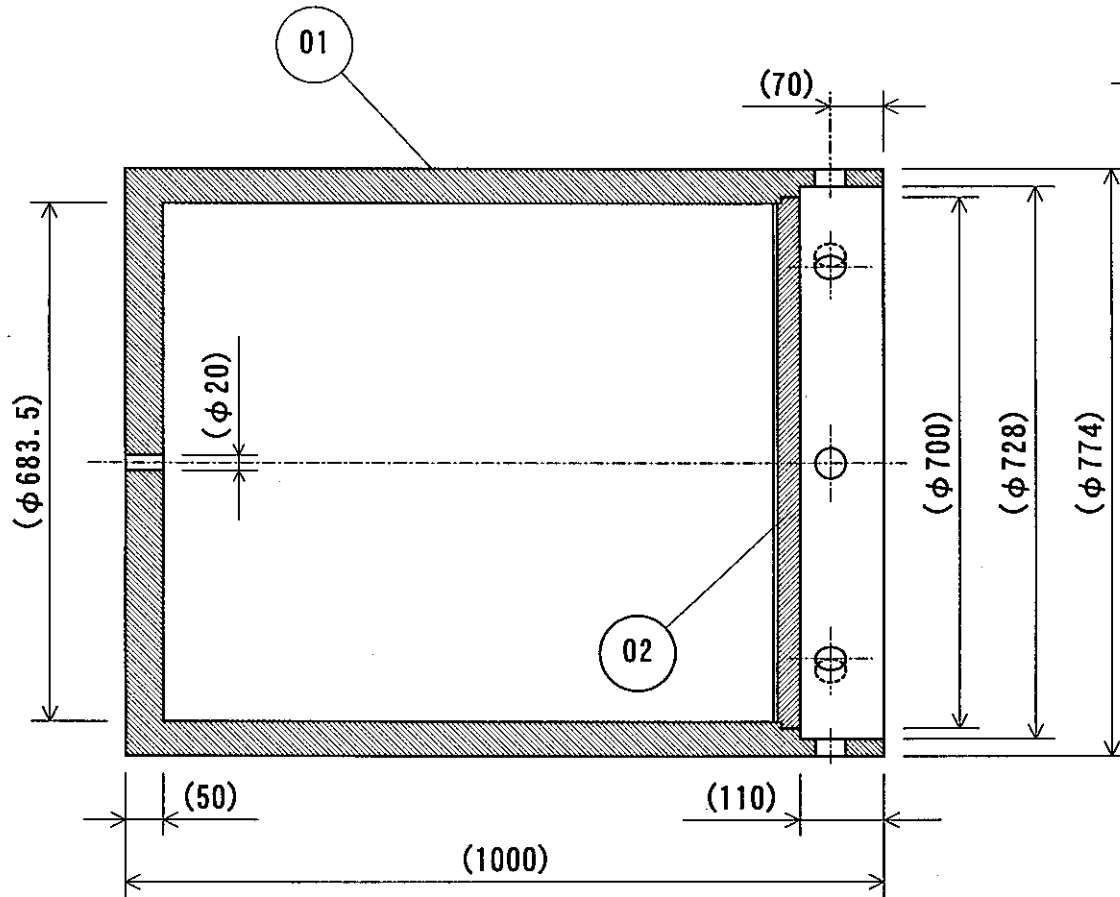


単位：mm

付図－6 腐食試験片の形状

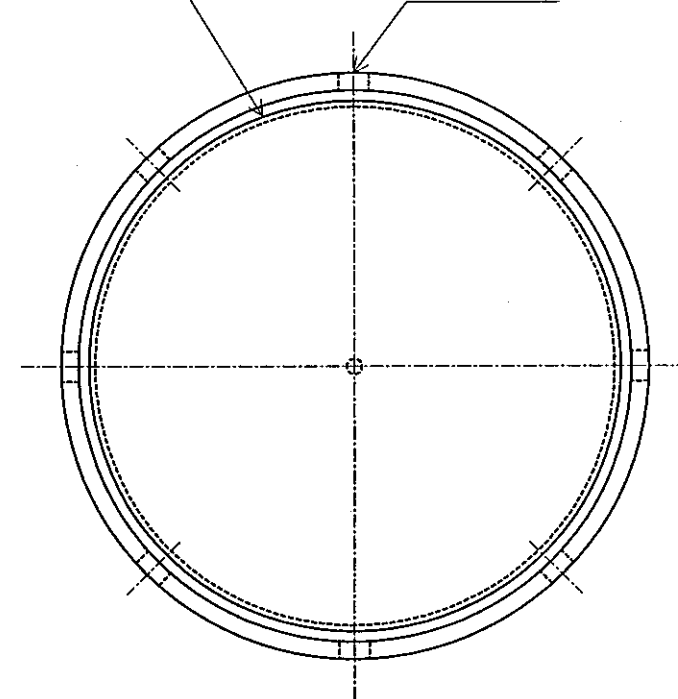
部番	名称	材質	個数	図面番号
01	銅製外容器本体	無酸素銅又は リン入り無酸素銅	3	COP 001-01-02
02	銅製外容器蓋部	無酸素銅又は リン入り無酸素銅	3	COP 001-02-01

品名		銅製外容器(部品表)		図番		COP 001					
作成年月日				1998.11.5				尺度			
作成		田中		検図		承認		三菱マテリアル株式会社			



電子ビーム溶接

(8-40枚)

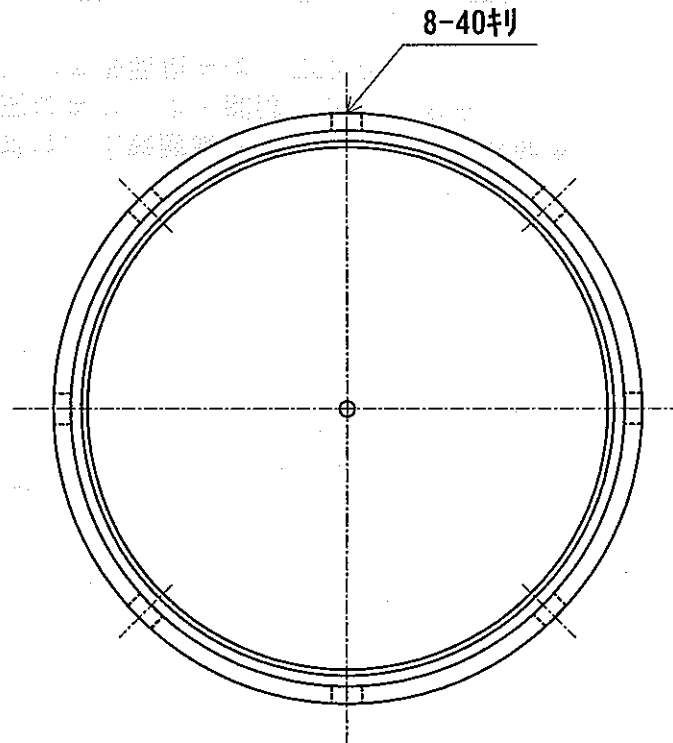
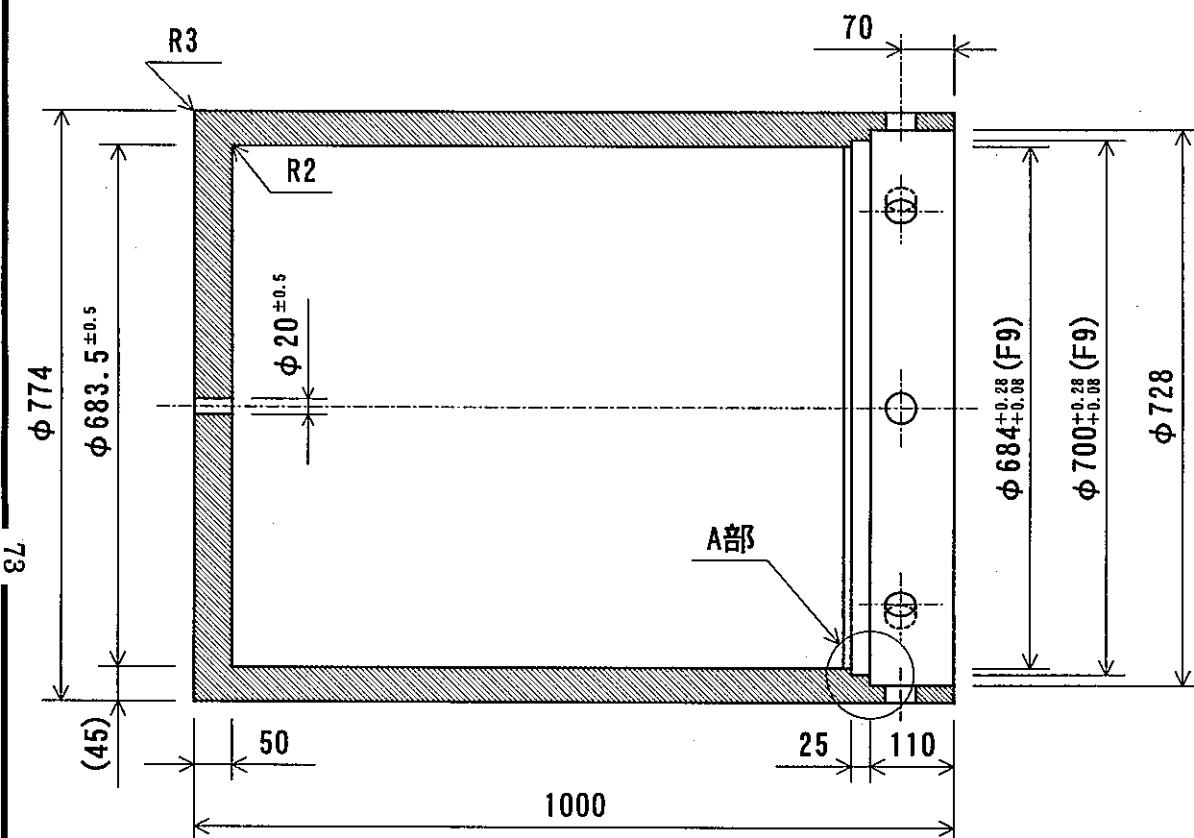


注記

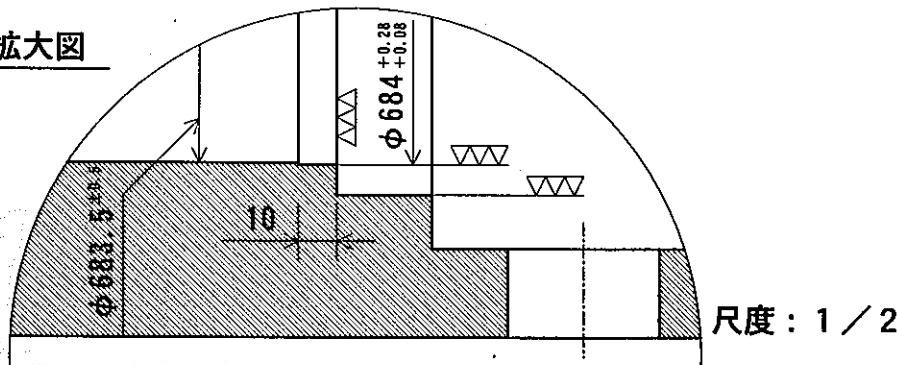
1. 材質は、①無酸素銅又は②リン入り無酸素銅とする。

品名 銅製外容器(組立図)		図番 COP 001-00-02	
作成年月日 1998.11.5		尺度 1/10	三角法
作成 田中	検図	承認	三菱マテリアル株式会社

等級	精級	中級	粗級
寸法の区分			
0.5以上 3以下			
3をこえ 6以下	±0.05	±0.1	±0.2
6をこえ 30以下	±0.1	±0.2	±0.5
30をこえ 120以下	±0.15	±0.3	±0.8
120をこえ 315以下	±0.2	±0.5	±1.2
315をこえ 1000以下	±0.3	±0.8	±2
1000をこえ 2000以下	±0.5	±1.2	±3



A部拡大図

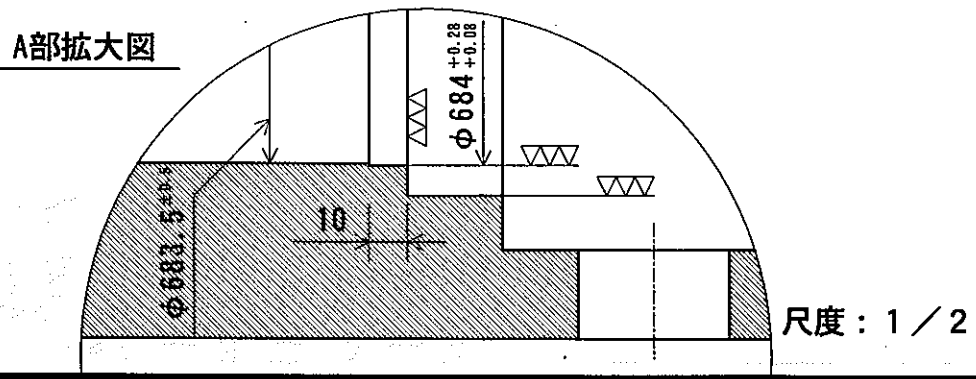
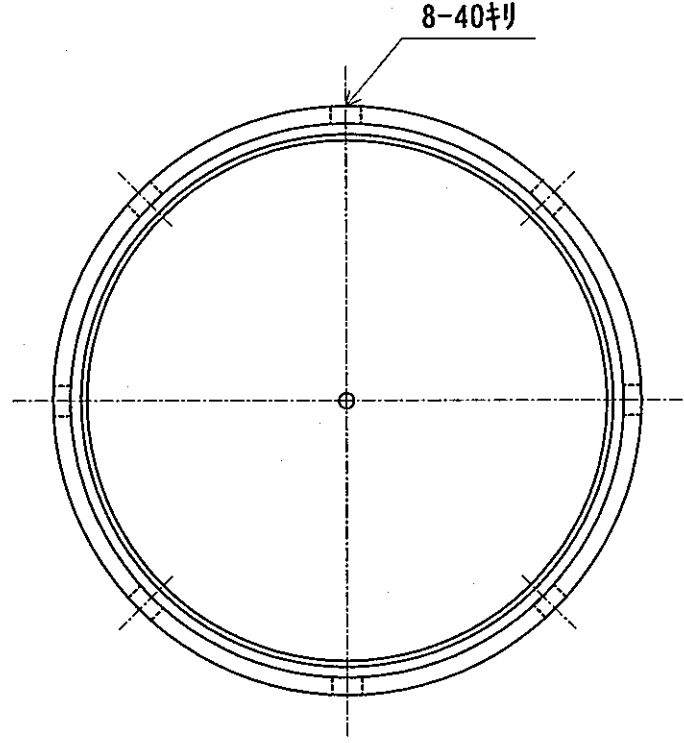
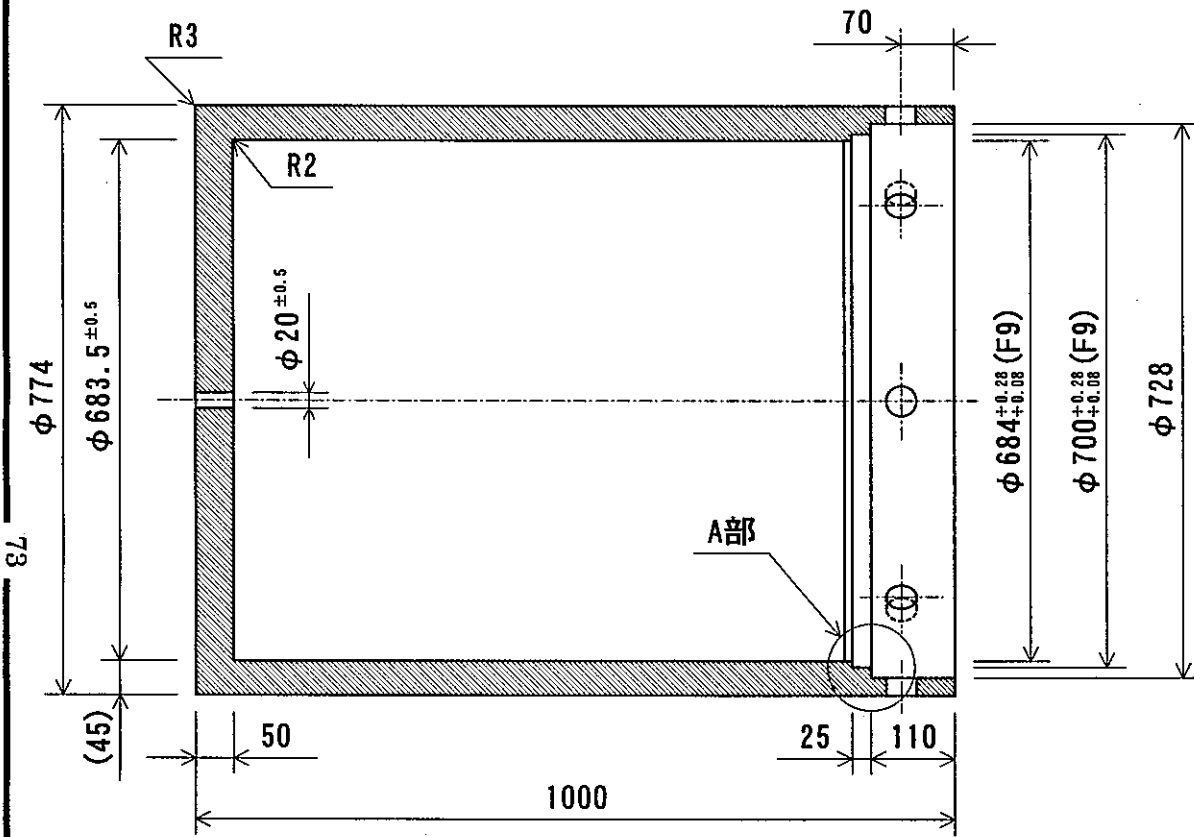


注記

1. 材質は、①無酸素銅又は②リン入り無酸素銅とする。
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、▽▽とする。

品名	銅製外容器本体	図番	COP 001-01-02
作成年月日	1998. 11. 5	尺度	1 / 10
作成	田中	検図	承認
三菱マテリアル株式会社			

寸法の区分		等級	精級	中級	粗級
0.5以上	3以下		±0.05	±0.1	—
3をこえ	6以下		±0.1	±0.2	±0.2
6をこえ	30以下		±0.1	±0.2	±0.5
30をこえ	120以下		±0.15	±0.3	±0.8
120をこえ	315以下		±0.2	±0.5	±1.2
315をこえ	1000以下		±0.3	±0.8	±2
1000をこえ	2000以下		±0.5	±1.2	±3



注記

1. 材質は、①無酸素銅又は②リン入り無酸素銅とする。
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、▽▽とする。

品名 銅製外容器本体		図番 COP 001-01-02	
作成年月日 1998.11.5		尺度 1/10	三角法
作成 田中	検図	承認	三菱マテリアル株式会社