

JAERI-Tech

94-009



核融合実験炉ブランケット部分
縮小モデル試作開発

1994年7月

橋本俊行・高津英幸・佐藤 聰・倉沢利昌・森 清治
多田栄介・黒田敏公*・毛利憲介・佐藤瓊介*・関 昌弘

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division,
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

核融合実験炉ブランケット部分縮小モデル試作開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

橋本 俊行⁺・高津 英幸・佐藤 聰・倉沢 利昌
森 清治⁺・多田 栄介・黒田 敏公*・毛利 憲介⁺
佐藤 瓊介*・関 昌弘

(1994年6月21日受理)

国際熱核融合実験炉（ITER）に関する設計検討が概念設計活動（CDA）において実施され、炉概念と共に増殖ブランケットについても基本的な構造概念が構築された。

増殖ブランケットの筐体構造に関しては、筐体が内部に増殖域、遮蔽域及び3系統の冷却構造を持つ大型構造で、電磁力、内圧、プラズマからの熱流束及び放射線といった過酷な環境下で使用されることから、強度条件を満たすために構造的に複雑な設計となっている。従って、その製作性に関しては、部分試作及びモックアップ試作等を通して着実に進めていく必要がある。

本報告書では、ブランケット製作に適用できる製作技術を確立しその妥当性を実証するために実施した1/2スケール箱型容器モックアップの製作について述べる。

増殖ブランケット筐体の製作性については、重要な検討課題の1つである第1壁の製作において、先進的製作手法であるHIP (Hot Isostatic Pressing) を用いた場合、要素技術としての成立性は確認されてはいるが、実機大の大型パネル構造に適用した場合、全体としての変形が増加することが考えられる。このため筐体要素のHIP試作試験により加工変形の機構を検討するとともに、製作性に関する基礎データを取得し大型パネルの製作精度向上のための知見を得た。また、HIPによる大型の第1壁パネルの製作について、拘束治具を最適に配置することにより、変形量が大幅に低減できる見通しを得た。

EBW (Electron Beam Welding)による遮蔽構造の製作では、幾層もの厚板溶接構造であることから、溶接歪・残留応力を小さく抑えるための製作手順を確立することが重要である。ここでは各構造部材の最適形状及び接合位置、製作手順・溶接手順について検討した。また、遮蔽構造製作に必要な接合条件を選定するため、EBW特性試験を実施し、製作性に関する基礎データを取得した。特に第1壁パネルとの接合では、薄肉構造である第1壁側に変形が集中する懸念があるため製

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

* ITER開発室

* 川崎重工業（株）

作時の変形データを取得し、全変形量が2mm以下であることを確認した。

一方、本筐体試作により明かとなった実機大型構造製作に関する課題についても整理した。

Development and Trial Manufacturing of 1/2-scale Partial Mock-up of
Blanket Box Structure for Fusion Experimental Reactor

Toshiyuki HASHIMOTO⁺, Hideyuki TAKATSU, Satoshi SATO

Toshimasa KURASAWA, Seiji MORI⁺, Eisuke TADA, Toshimasa KURODA*

Kensuke MOHRI⁺, Keisuke SATO* and Masahiro SEKI

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 21, 1994)

Conceptual design of breeding blanket has been discussed during the CDA (Conceptual Design Activities) of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

Structural concept of breeding blanket is based on box structure integrated with first wall and shield, which consists of three coolant manifolds for first wall, breeding and shield regions. The first wall must have cooling channels to remove surface heat flux and nuclear heating. The box structure includes plates to form the manifolds and stiffening ribs to withstand enormous electromagnetic load, coolant pressure and blanket internal (purge gas) pressure.

A 1/2-scale partial model of the blanket box structure for the outboard side module near midplane is manufactured to estimate the fabrication technology, i.e. diffusion bonding by HIP (Hot Isostatic Pressing) and EBW (Electron Beam Welding) procedure. Fabrication accuracy is a key issue to manufacture first wall panel because bending deformation during HIP may not be small for a large size structure. Data on bending deformation during HIP was obtained by preliminary manufacturing of HIP elements.

+ Department of ITER Project

* Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

For the shield structure, it is necessary to reduce the welding strain and residual stress of the weldment to establish the fabrication procedure. Optimal shape of the parts forming the manifolds, welding locations and welding sequence have been investigated. In addition, preliminary EBW tests have been performed in order to select the EBW conditions, and fundamental data on built-up shield have been obtained.

Especially, welding deformation by joining the first wall panel to the shield has been measured, and total deformation to build-up shield by EBW has been found to be smaller than 2mm.

Consequently, the feasibility of fabrication technologies has been successfully demonstrated for a 1m-scaled box structure including the first wall with cooling channels by means of HIP, EBW and TIG (Tungsten Inert Gas arc)-welding.

Keywords : ITER, Blanket, Fabricability, HIP (Hot Isostatic Pressing), First Wall, EB(Electron Beam) Welding, Shielding.

目 次

1.はじめに	1
2.筐体の設計	2
2.1 筐体の特徴と設計条件	2
2.2 構造設計	3
3.筐体の試作	13
3.1 部材加工とH I P前処理	15
3.2 H I P処理と加工変形測定	16
3.3 H I P後加工と遮蔽構造組立	17
3.4 最終加工	19
3.5 接合率の測定	20
3.6 筐体製作における今後の課題	20
4.筐体製作における溶接性及び加工性	45
4.1 溶接性	45
4.2 加工性	45
5.実機ブランケット筐体の製作性における課題	46
6.まとめ	47
謝 辞	47
参考文献	48
付録A ブランケット筐体要素のH I P試作試験	49

Contents

1. Introduction	1
2. Design of 1/2-scale Partial Mock-up for the Blanket Box Structure	2
2.1 Structural Features and Requirement for Structural Design	2
2.2 Structural Design	3
3. Trial Manufacturing of 1/2-scale Partial Mock-up	13
3.1 Working and Pre-processing before HIP	15
3.2 HIP Processing and Measurement of Deformation	16
3.3 Working after HIP and Shield Assembly	17
3.4 Finishing and Joining of the Lids	19
3.5 Measurement of Bonding Ratio	20
3.6 Issues on Fabricability	20
4. Weldability and Workability for the Blanket Box Structure	45
4.1 Weldability	45
4.2 Workability	45
5. Issues on Fabricability of the Blanket Box Structure	46
6. Summary	47
Acknowledgment	47
References	48
Appendix A Manufacturing of the Elements by HIP Processing	49

1. はじめに

国際熱核融合実験炉（ITER）が工学設計段階へ移行する中、ITER概念設計（CDA）において構築された増殖ブランケットに関する構造概念について、さらに増殖域構造の簡素化等の設計検討が実施されている^{[1], [2]}。

ITER-CDAにおける増殖ブランケットとしては、分解保守を円滑に行うためトロイダル方向に16分割したモジュール構造が採用されており、トロイダル長さ（約1m）×ポロイダル高さ（約1.6m）×半径方向長さ（約0.7m：赤道面）となる大型構造物である。この増殖ブランケットは構造材に316SS、冷却材に低温低圧水を用いたもので、第一壁・増殖域・遮蔽域を一体化した箱型構造となっている。その内部構造は第一壁の後方に増殖域を設置し、トリチウム(T)を生産するための増殖材（リチウム化合物）、中性子利用効率を高めるための中性子増倍材（ベリリウム(Be)）を収納し、その背後に遮蔽体を兼ねた3系統の冷却系マニホールドを設置している^[3]。

増殖ブランケットは真空容器内に設置され、遮蔽機能を満足するために各モジュール間の隙間をできるだけ小さくすること及び遠隔保守時に隣接モジュールとの干渉を避けること、内部には寸法精度を必要とする増殖域をできるだけ大きく確保すること等のため厳しい製作精度が要求される。加えて、この構造物には巨大な電磁力（約10MN/m）が作用するため十分な構造強度を必要とし、また、プラズマからの表面熱負荷（約0.2MW/m²）及び中性子壁負荷（約0.2MW/m²）による内部発熱を除熱するため冷却構造を持たせる必要がある。特に、プラズマ側表面の第一壁は熱負荷が厳しく、CDAにおける核融合出力の条件では、15mm厚さの壁内部に除熱のための冷却チャンネル（日本設計では5×10mm）を配置する必要がある。ブランケット筐体は内部に補強構造を持つ大型構造であり、また、第一壁についても大面積を持つ薄肉形状の耐熱構造である。従って、これらの大型構造物を精度良く製作する技術が要求されるため、製作法・製作手順及び溶接施工方法等について十分検討しなければならない。^[4]

本報告書では、ブランケットモジュールの筐体開発の一環として平成4年度に実施し

た1/2スケールの核融合実験炉外側プランケット部分縮小モデル（筐体）に関する試作検討結果を示す。2章では、試作筐体の設計検討について、3章では試作筐体の製作状況についてそれぞれ述べる。4章では、本製作作業における溶接性及び加工性についての検討結果、5章では、プランケット容器（筐体）構造体製作に関する今後の課題を述べる。また、付録Aでは第一壁に代表される冷却チャンネル構造の製作に有用と考えられるH I Pを用いた筐体要素の試作試験について述べる。

2. 筐体の設計

2.1 筐体の特徴と設計条件

試作する筐体の基本構造は、CDAで検討が進められた概念に基づくものでトーラス全体をトロイダル方向に48分割するモジュール構造である。各モジュールは第一壁・増殖域・遮蔽域を一体型で箱型に成形する。Fig. 2.1-1にITER-CDA外側プランケットモジュールの全体構造概念を、また、Fig. 2.1-2に赤道面の断面図を示す。

今回試作した筐体の特徴と設計条件を次に示す。

- ・プランケットモジュールの赤道面を中心に上下1m範囲（合計2m）を対象とした部分モデルである。
- ・断面形状は赤道面のみを対象とし、ポロイダル方向に一様とした箱型構造とする。
- ・スケールは全体スケールのみ約1/2とする。筐体の全長は1mとする。
- ・1/2スケールに設定することにより1/1スケールよりも製作がより困難となる箇所、例えば第一壁及び側壁の板厚・流路幅・流路ピッチ等については1/1スケールのままとした。ただし、遮蔽域の縦方向仕切板は実機での仕切板間隔を考慮して1枚のみとする。
- ・増殖域内の収納物（Li₂Oキャン、冷却パネル他）は対象から外す。
- ・CDA設計条件を考慮して、次の一般使用圧力に耐えることとする。

た1/2スケールの核融合実験炉外側プランケット部分縮小モデル（筐体）に関する試作検討結果を示す。2章では、試作筐体の設計検討について、3章では試作筐体の製作状況についてそれぞれ述べる。4章では、本製作作業における溶接性及び加工性についての検討結果、5章では、プランケット容器（筐体）構造体製作に関する今後の課題を述べる。また、付録Aでは第一壁に代表される冷却チャンネル構造の製作に有用と考えられるH I Pを用いた筐体要素の試作試験について述べる。

2. 筐体の設計

2.1 筐体の特徴と設計条件

試作する筐体の基本構造は、CDAで検討が進められた概念に基づくものでトーラス全体をトロイダル方向に48分割するモジュール構造である。各モジュールは第一壁・増殖域・遮蔽域を一体型で箱型に成形する。Fig. 2.1-1にITER-CDA外側プランケットモジュールの全体構造概念を、また、Fig. 2.1-2に赤道面の断面図を示す。

今回試作した筐体の特徴と設計条件を次に示す。

- ・プランケットモジュールの赤道面を中心に上下1m範囲（合計2m）を対象とした部分モデルである。
- ・断面形状は赤道面のみを対象とし、ポロイダル方向に一様とした箱型構造とする。
- ・スケールは全体スケールのみ約1/2とする。筐体の全長は1mとする。
- ・1/2スケールに設定することにより1/1スケールよりも製作がより困難となる箇所、例えば第一壁及び側壁の板厚・流路幅・流路ピッチ等については1/1スケールのままとした。ただし、遮蔽域の縦方向仕切板は実機での仕切板間隔を考慮して1枚のみとする。
- ・増殖域内の収納物（Li₂Oキャン、冷却パネル他）は対象から外す。
- ・CDA設計条件を考慮して、次の一般使用圧力に耐えることとする。

増殖域 : $1\text{kg}/\text{cm}^2$ (耐圧試験: $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 、漏洩試験: $1.1\text{kg}/\text{cm}^2$, 20分)

遮蔽域 : $15\text{kg}/\text{cm}^2$ (耐圧試験: $25\text{kg}/\text{cm}^2$ 、漏洩試験: $16.5\text{kg}/\text{cm}^2$, 20分)

・支持構造（架台）は全体の重量に対する剛性、設置性を有するものとする。

なお、本筐体は今後試験が計画されている熱・機械試験の試験体として用いることを考慮するものとした。

主要諸元を、次に示す。

- ①全体スケール : $1/2$ 、ただし第一壁板厚等については $1/1$
- ②筐体全長 : 1160mm (架台 160mm を含む)
- ③筐体幅 : 480mm (第一壁側)、 525mm (後壁側)
- ④筐体奥行き : 352mm (16 (第一壁)+ 149 (増殖域)+ 187 (遮蔽域))
- ⑤第一壁厚さ : 16mm
- ⑥側壁厚さ : 30mm
- ⑦第一壁冷却流路 : $6\text{mm} \times 10\text{mm}$
- ⑧増殖域 : 1層 (左右対)
- ⑨遮蔽域* : 3層 (左右対)

* : 遮蔽構造を兼ねた冷却系マニホールドから成る。

以上のような観点から設計された筐体全体の構造概念をFig. 2.1-3 に示す。また、筐体の中央断面図を、Fig. 2.1-4 に示す。

2.2 構造設計

前項2.1に示した構造概念及び基本条件を基に筐体各部の構造設計（製作設計）を行った。

(1) 第一壁及び側壁

製作検討を行う筐体の第一壁及び側壁の形状は、ITER外側ブランケットモジュールに採用されている第一壁及び側壁の形状を考慮して、第一壁厚さ 16mm (外面 3mm +冷却流路 6mm +内面 7mm)、側壁厚さ 30mm (外面 10mm +冷却流路 6mm +内面 14mm)とした。Fig. 2.2-1 に

形状を示す。なお、第一壁及び側壁は板厚・流路幅・流路ピッチ等とも 1/1スケールとした。また、第一壁／側壁間を構成するコーナーの形状は、Fig. 2. 2-2 に示す形状とし、製作性を考慮して比較的小さな曲率による構成とした。

(2)増殖域

本年度の筐体の製作設計においては、増殖域内の収納物 (Li_2O キャン、冷却パネル他) を対象から外したため増殖域はボイドとした。

今後、実施することが考えられる特性試験を考慮して、増殖域への冷却材（ガスか水）の注入が可能なように、また増殖域の内面観察が可能となるように上蓋箇所に Fig. 2. 2-3 に示すフランジ方式を採用し、増殖域の中央リブにはスリットを設ける設計とした。

(3)遮蔽域

遮蔽構造の製作性を検討するため、仕切板、遮蔽域側壁の板厚は 1/1 スケールとし側壁厚さ 50mm、仕切板厚さ 20mm とした。従って、筐体全体を 1/2 スケールとしているため、マニホールド間隔が実機以上に狭くなり製作上の問題が新たに生じる。ここではこの問題を避けるためトロイダル方向の仕切板（補強材）を 1 枚削減した 3 層構成とした。また、縦方向仕切板についても同様の理由で 1 枚とした。後壁の板厚は 1/2スケール、分離壁の板厚は遮蔽域(15kg/cm^2)と増殖域(1kg/cm^2) の圧力差を考慮して、25mm とした。

3 層の内訳は、Fig. 2. 1-3 に示したように第一壁冷却系マニホールド 1 層、増殖域冷却系マニホールド 1 層及び遮蔽域冷却系マニホールド 1 層とし、増殖域の後より順に位置させた。

第一壁冷却系マニホールドでは、第一壁及び側壁内流路への冷却材流量配分、耐圧及び製作性を考慮して Fig. 2. 2-2 に示すように第一壁冷却材用ヘッダを側壁内に設け、8 Φ の穴群を介して第一壁冷却系マニホールドと通じる設計とした。

なお、製作に際しては、このヘッダ部で第一壁構造体と遮蔽域側壁を溶接接続するため、作業空間が必要である。ヘッダ部における外壁（以下側帶と称す。：Fig. 2. 1-4 参照）はあらかじめ側壁本体から切り離しておき、第一壁構造体と遮蔽域側壁の接続後に取り付けるものとする。

増殖域及び遮蔽域の冷却系マニホールドに関しては、遮蔽域にある左右の層を冷却系出入口マニホールドに割当、遮蔽域中央リブに貫通穴を設けて冷却水が入口マニホールドから出口マニホールドへ流れる設計とした。

(4)蓋

筐体の上下蓋の形状は、実機におけるプレナム壁を想定して、増殖域及び遮蔽域の各マニホールドについて個々に蓋を設ける形状とした。板厚は耐圧試験圧力（増殖域で $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 、遮蔽域で $25\text{kg}/\text{cm}^2$ ）を考慮して 7mm とした。

また、上下の各蓋にはFig. 2. 2-3 に示すように冷却水の注入・排出用ケージョン及びドレーン弁を設ける設計とした。各備品は、耐圧試験圧力に十分耐える強度を有するものを採用した。

(5)架台

架台は、転倒防止等の安全性を考慮して一般安全耐震基準値である1.3Gに耐える構造及び強度を有するものとした。

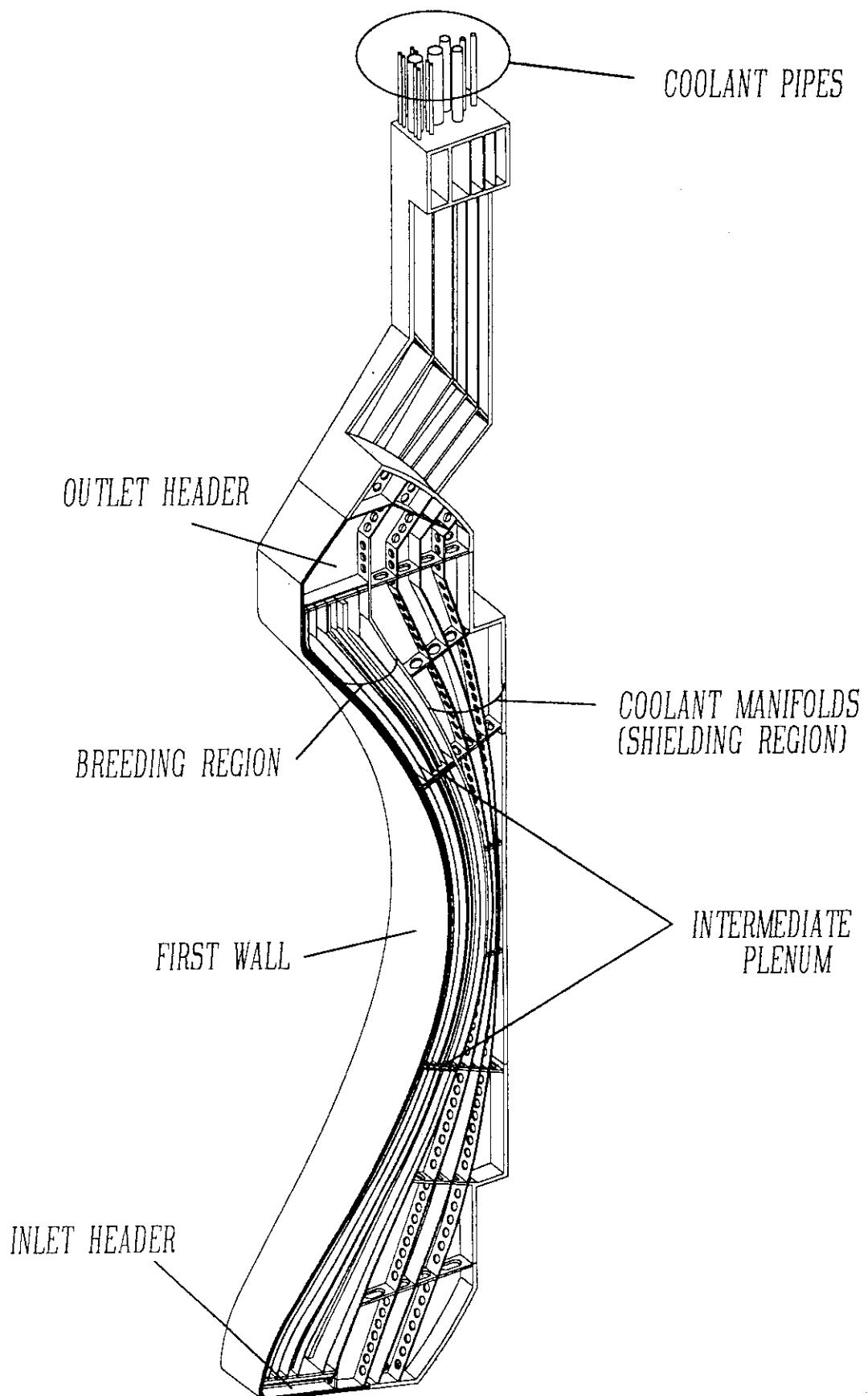


Fig. 2.1-1 ITER BLANKET OUTBOARD SIDE MODULE

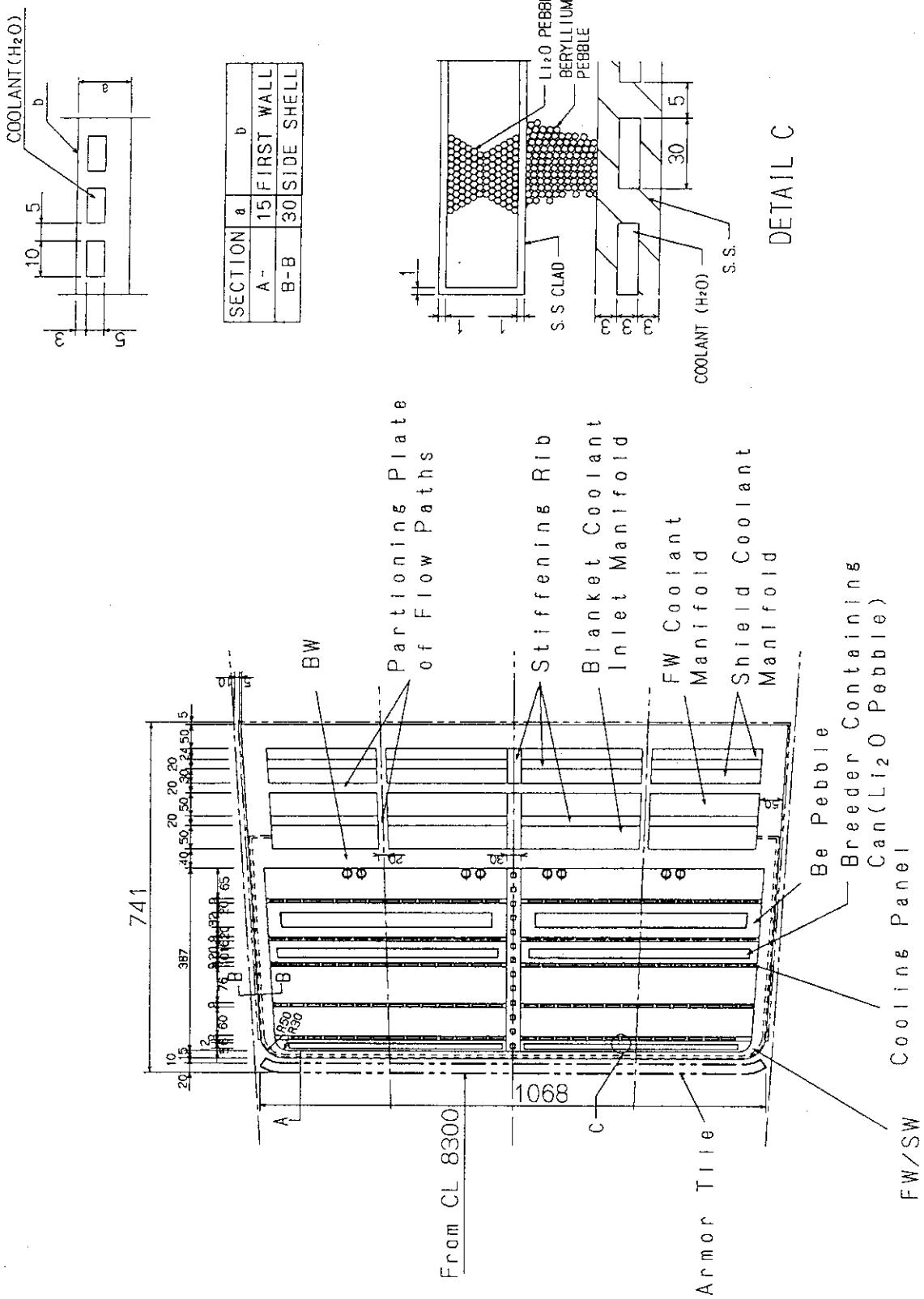


Fig. 2.1-2 Cross-sectional view of ITER blanket outboard size Module

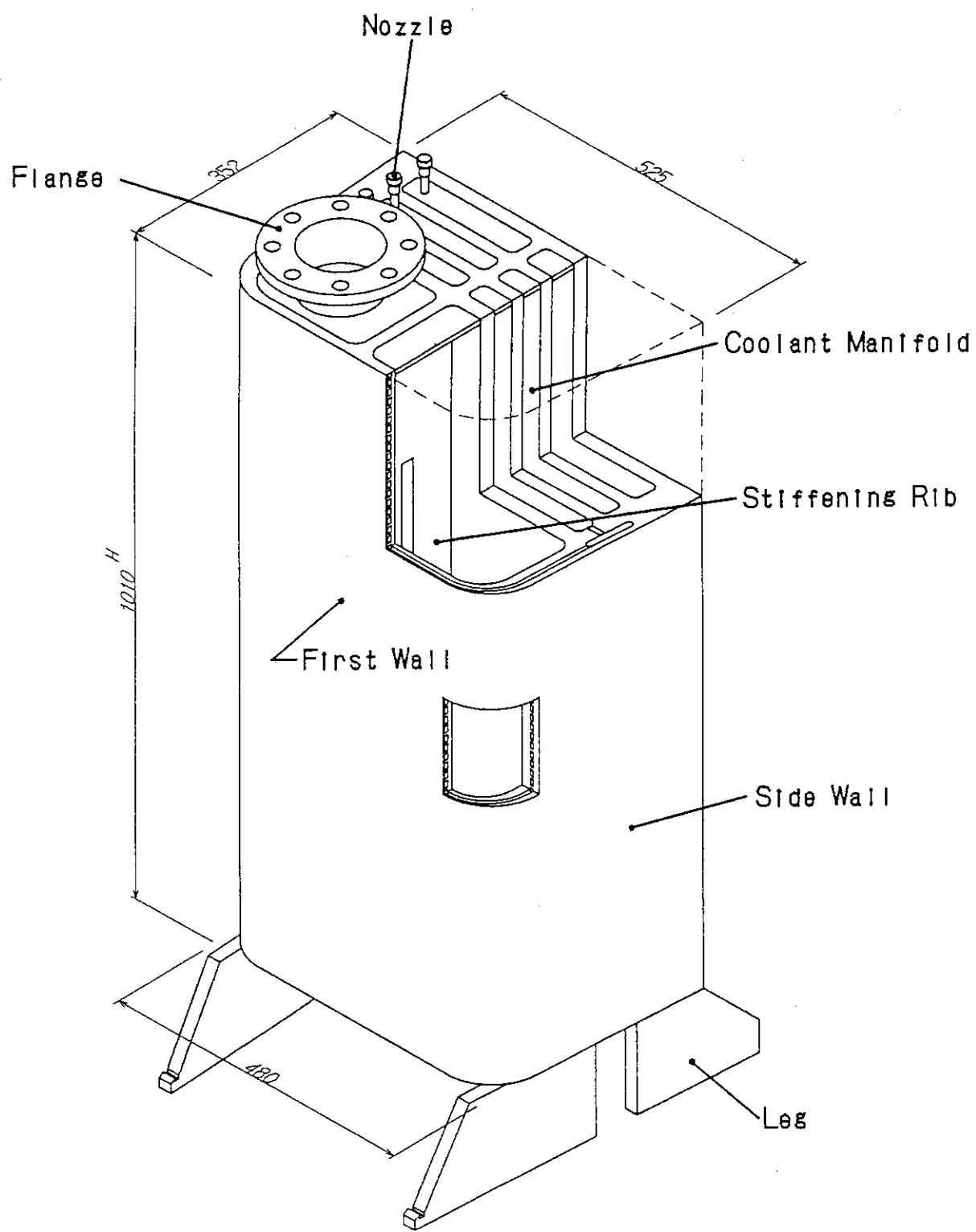


Fig. 2.1-3 Isometric view of 1/2-scale partial mock-up for the blanket box structure

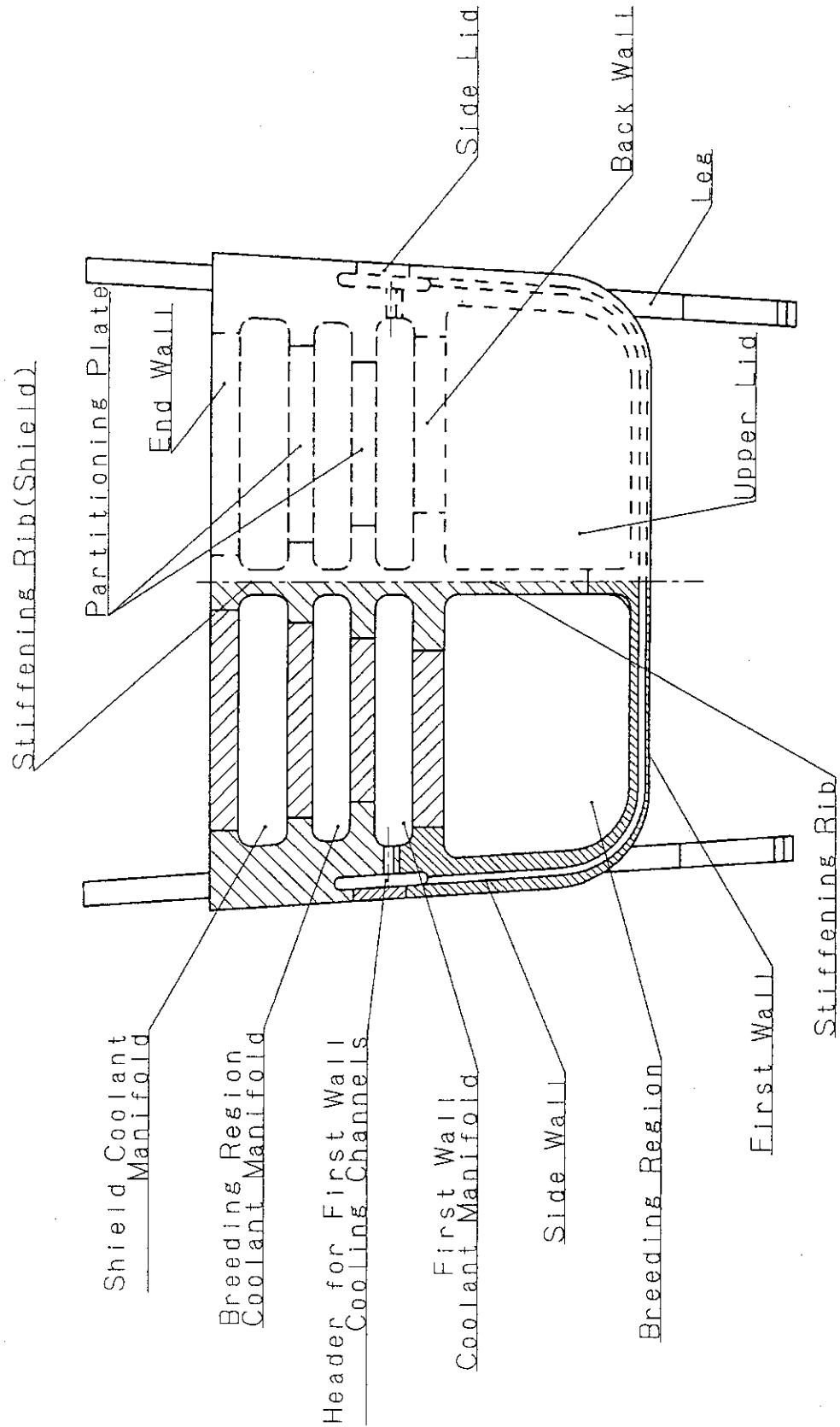


Fig. 2.1-4 Cross-sectional view of mock-up

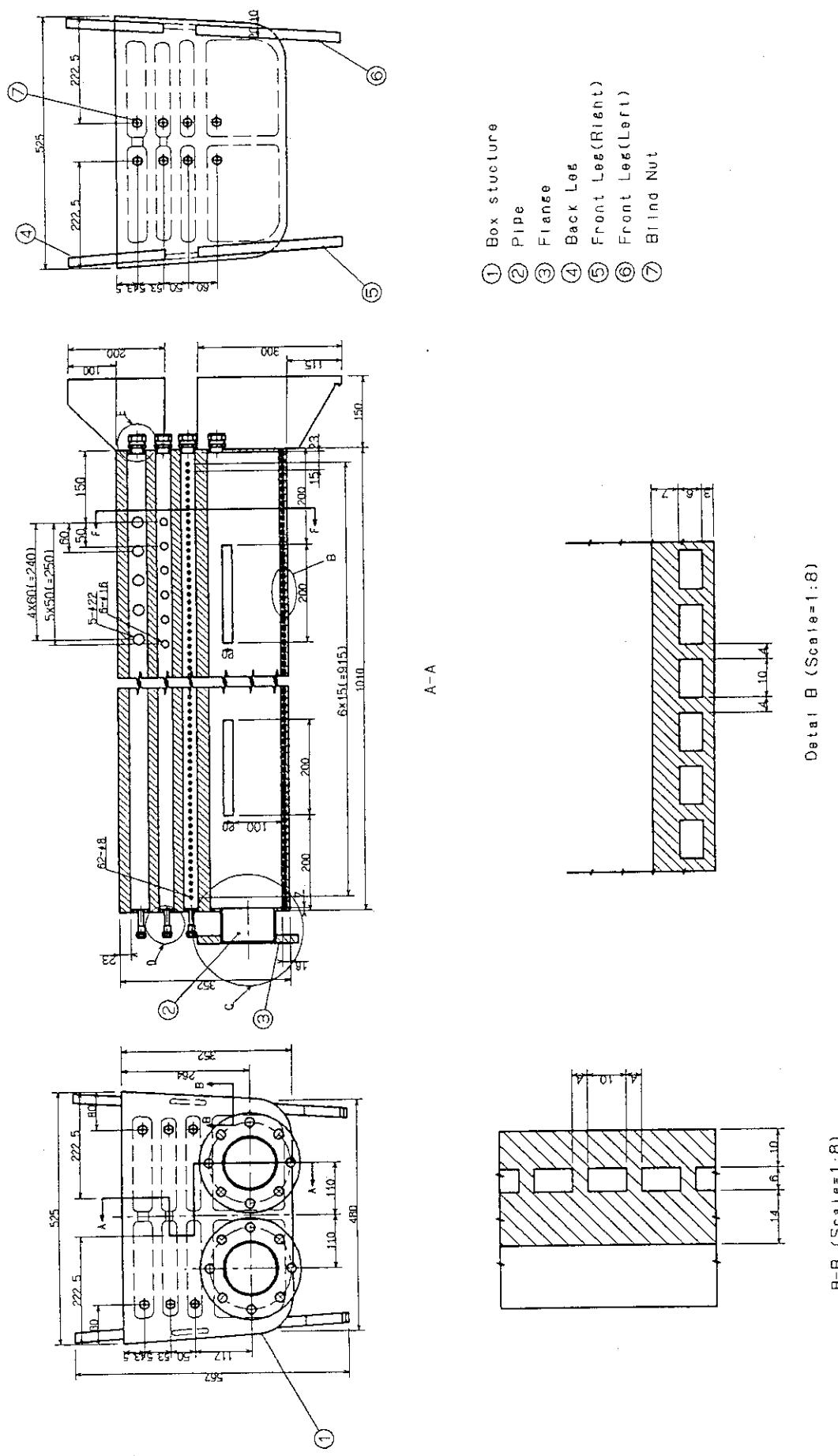
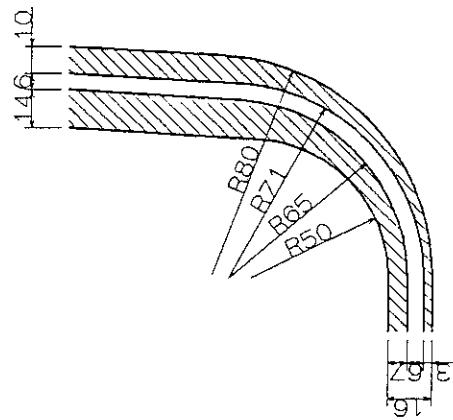
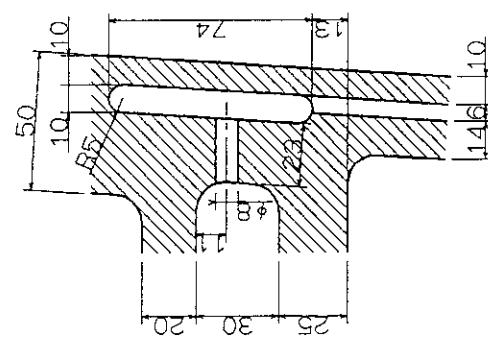


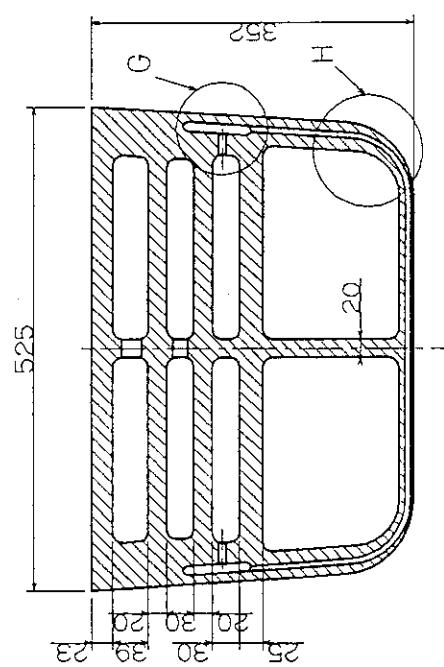
Fig. 2.2-1 1/2 scale blanket mock-up



Detail H



Detail G



F-E

Fig. 2.2-2 Detail drawing on the corner and the header of first wall-panel

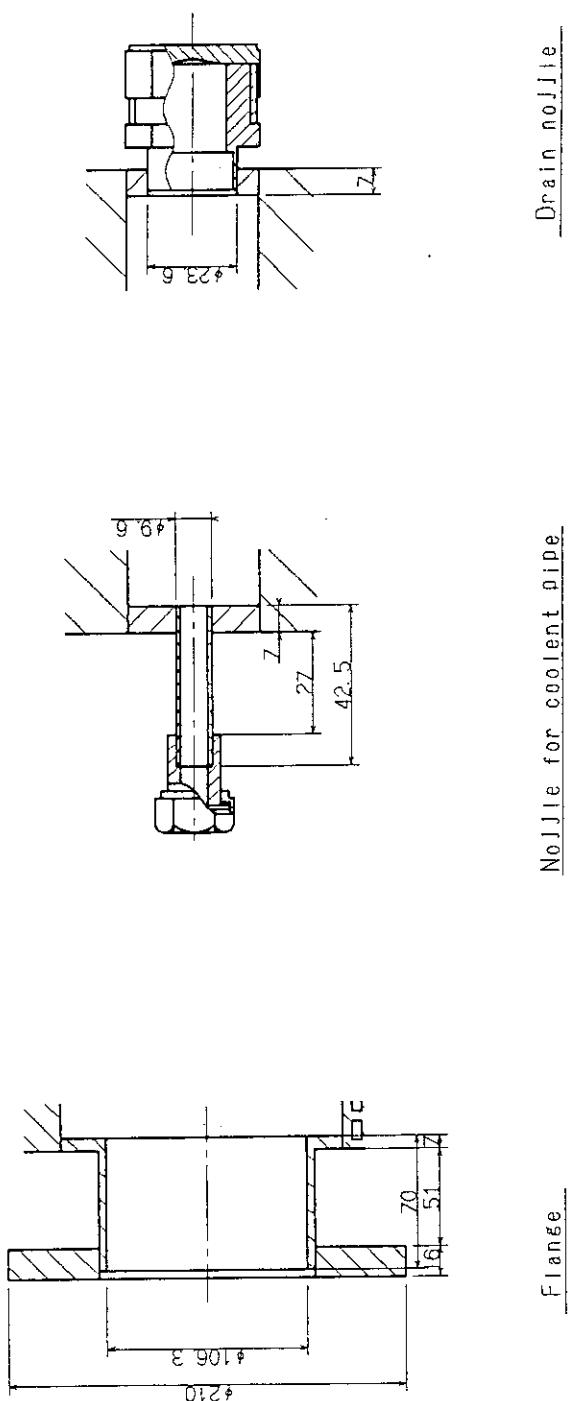


Fig. 2.2-3 Flange and Nozzles on lids

3. 筐体の試作

2章で設計検討を行ったブランケット筐体を製作するに当つて、留意すべき点を以下に示す。

- ①冷却流路を有する第一壁及び側壁の製作法
- ②実機製作を考慮した製作法の適用
- ③変形の低減方法

上記①の冷却流路を有する第一壁及び側壁の製作に対しては、現段階で有力な接合手段の一つと考えられているH I P（拡散接合の一種）装置を用いた製作手法を採用し、第一壁方式としては矩形管方式を採用した^[5]。

H I P 装置とは金属間接合が可能となる高温高圧の環境を設定できる装置のことで、一般的な拡散接合装置（一軸圧接法）とは異なり、静水圧（ガス圧）によるため三次元的接合が比較的容易に可能となる。このため、冷却流路を有する第一壁及び側壁の製作には適した装置と考えられる。また、矩形管方式とはH I P処理を基本に考案された方式で、2枚の鋼板の間に金属性の角パイプを挟み、シール用溶接後H I P処理を施す方式で、H I P処理において角パイプが拡管するため冷却流路が押しつぶされることなく容易に製作可能なため、H I Pの条件を最大限（最大圧力）に利用できるので、接合強度を高められるという長所を有する。本手法によれば、第一壁及び側壁はコ型のパネル形状（第一壁構造体）として一体型で成形される。

上記②及び③に関しては、従来技術の溶接法であるT I G溶接や大幅に変形量を軽減可能なレーザ溶接及びE B溶接等の融接手法の適用を考えられるが、T I G溶接では変形量が大きく製作精度上の問題があり、レーザ溶接では現状装置は出力が低く、溶け込み深さが浅いため（20mm以下）側壁（30mm）を1パスで施工出来ない。また、E B溶接では全真空型の場合、真空容器容量（16m×2m×3m以上）が必要であるが、国内装置の最大規模は約7～8m程度である。部分真空型の場合、真空度の維持が難しく、溶接施工が著しく困難になるといった使用上の制約がある。従つて、各部位の要求事項及び適用環境を考慮して各部位に合った手法での適用を考える必要がある。

本施工においては、遮蔽構造の第一壁構造体への取付は、変形量軽減の観点から E B 溶接の適用を基本に考え、上下蓋及び側帯等の実機においても溶接後の裏面処理が不可能と思われる箇所には T I G 溶接の適用を図った。

筐体の製作は、次に示す製作工程順に進めた。なお、製作途中で筐体各部の加工変形量を測定した。

①部材加工と H I P 前処理：

- a) 部材加工
- b) 第一壁構造体の組立及びシーム溶接
- c) 漏洩試験
- d) 真空脱気処理

②H I P 処理と加工変形測定：

- a) H I P 処理による第一壁構造体の製作
- b) H I P 加工変形の測定

③H I P 後加工と遮蔽構造組立：

- a) 上下端部及び拘束治具の削除
- b) 中央リブの取付と E B 溶接用開先加工
- c) E B 溶接施工による遮蔽構造の組立
- d) E B 溶接変形の測定

④最終加工：

- a) 第一壁面の部分加工及び酸洗い
- b) T I G 施工による側帯及び上下蓋の取付
- c) 仕上げ加工及び寸法検査
- d) 備品類の取付
- e) 耐圧漏洩試験

⑤接合率の測定：

残材による接合率の測定

以下に、各工程における製作検討概要を示す。参考までにFig. 3-1に筐体の製作フローを示す。

3.1 部材加工とH I P前処理

(1) 部材加工

筐体を構成する第一壁、側壁及び遮蔽構造等の供試材としては、核融合実験炉の第一壁構造材料として考えられているオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316鋼) を用いた。

第一壁及び側壁の製作には厚さ40mm(内板用) 及び厚さ10mm(外板用) に加工したSUS316鋼材と内面対辺距離10mm×8mm、厚さ2mmに加工した矩形管を用いた。Fig. 3.1-1 に、本工程で製作した第一壁構造体形状を示す。

Fig. 3.1-2, Fig. 3.1-3 に切削加工後の外板及び内板の外観状況をそれぞれ示す。内板には、中央リブ及び分離壁の取付を考慮して、内面中央部分及び両端部にそれぞれボス(突起)を設けた。

切削加工後、プレスによる曲げ加工を施した。また、矩形管に対しても同様の曲げ加工を施した後、矩形管の外表面にバフ研磨施工を施した。

(2) 第一壁構造体の組立及びシーム溶接

次に、これらの外板、内板及び矩形管を組合せ、TIG溶接により外板、内板及び矩形管の各境界を全周シーム溶接し、第一壁構造体を組立てた。Fig. 3.1-4 に、全周シーム溶接後の一壁構造体の外観状況を示す。なお、第一壁構造体にはHIP処理時における加工変形により捩れや反り等が生じるのを防止する目的で、変形防止用治具を設置した。

(3) 漏洩試験

シーム溶接後、シーム溶接部の健全性を確認するために漏洩試験を実施した。漏洩試験は、水圧により試験圧力1kg/cm²、保持時間30分で実施し、溶接部分において漏洩がなく健全であることを確認した。

(4) 真空脱気処理

漏洩試験後、構造体内部の接合境界面の不純物除去を目的とした真空脱気処理を実施した。

3.2 HIP処理と加工変形測定

(1) HIP処理による第一壁構造体の製作

本工程では、真空脱気処理を施した第一壁構造体を拡散接合の一一種であるHIP法により接合処理を実施した。

使用したHIP装置は、最高加熱温度1400°C、最高加圧力1500kgf/cm²の能力を有するHIP装置である。本施工では、温度1100°C、圧力1500kgf/cm²、保持時間120分のHIP接合条件で処理を実施した。Fig.3.2-1にHIP装置より取り出した第一壁構造体の外観状況を示す。

(2) HIP加工変形の測定

HIP処理における試験体の変形量を取得する目的で、第一壁構造体の上下端部に圧痕を施し、HIP処理の前後における圧痕位置での相対的变化を計測した。Fig.3.2-2に、筐体横断面端部での圧痕位置（図中記号①～⑨）及び変形量の計測結果を示す。

変形としては、変形防止用治具により（図中記号①、⑨）間の変形はなく、側壁面（図中記号②、⑧）では外側に2mm～3mm、第一壁面（図中記号③～⑦）では全体的に第一壁内面側に変形を生じており、特に中央部分（図中記号⑤）では12mm（HIP後の側壁③⑦との比較では7mm）もの変形量であった。上下方向の変形は微少で、上下両端方向に定規を置き中央面での隙間を計測した結果、最大でも1mm以下の値(0.5～0.8mm)であった。また、筐体の上下端部以外の第一壁中央部分の変形量は、前述の上下端部の変形量(12mm)より少ない9mm程度で、軸方向にほぼ均一な状態であった。

これらの変形の主因としては、以下のものが考えられる。

a) 第一壁構造体ギャップの影響：

HIP処理前の段階で第一壁構造体を構成する矩形管と内外板との間に僅かに

存在するギャップがH I P処理時において消滅することにより生じるものと推察される。

b) 第一壁コーナにおける内外壁・矩形管のバランスによる影響：

第一壁構造体横断面のコーナ部分において、内外板及び矩形管の曲率の相異によりH I P処理時の圧力により各部位が圧力バランスが釣り合うように当初の位置より移動し、側壁の一端部が変形防止用治具により固定されていること及び側壁が強度的に剛性があること等の理由により剛性の劣る第一壁部分、特に左右対称であるため中央部分に大きな変形(9~12mm)を生じたものと推察される。

3.3 H I P後加工と遮蔽構造組立

本工程では、拘束治具等を切除した後、H I P処理により生じた第一壁面の変形を矯正し、T I G溶接により中央リブ（遮蔽域中央リブ含む）を取付た。また、E B溶接による遮蔽構造の組立等を実施し、Fig. 3.3-1に示す構造体の形状に組上げた。

(1) 上下端部及び拘束治具の切除と第一壁面の矯正

H I P処理後の第一壁構造体に対して、構造体の上下端部及び変形防止用の治具類を含む側壁端部を切除後、プレスにより第一壁面中央の変形量を2mm以下まで矯正した。

(2) 中央リブの取付とE B溶接用開先加工

変形矯正施工後、Fig. 3.3-1に示す中央リブ（図中記号⑥）をT I G溶接により取付た。施工後、側壁端面に表面加工を施しE B溶接用の開先形状を加工した。

(3) E B溶接施工による遮蔽構造の組立

次に、Fig. 3.3-2に示すE B溶接の溶接手順（表中記号①～⑩）に従い、分離壁（E B溶接線：表中記号③～⑥）、側壁構造体（表中記号⑨、⑩）、仕切板（表中記号⑦、⑧、⑪～⑭）及び後壁（表中記号⑮～⑯）の順に組立てた。なお、表中記号①と②の仕切板と側壁構造体との各施工は事前に実施した。本E B W施工においては、作業効率及びビードの健全性を考慮して、仮付は下向き姿勢、本施工は水平姿勢で実施した。なお、本試験に先立ちE B

溶接の特性試験を行い、適正なEB溶接条件の選定及びEB溶接施工における変形量等を取得した。

各部位のEB溶接施工終了毎に、X線による非破壊検査を実施し、欠陥の有無の確認を行った。非破壊検査において、全結果が無欠陥であることを確認した。Fig. 3.3-3 にEB溶接施工後の構造体の外観状況を、また、Fig. 3.3-4 に後壁のビード外観状況を示す。

本施工における溶接ビードは、ビード幅 1.6~2.1mm の健全なビードであった。EB溶接ビードの表裏面の後処理（成形加工）は、EB溶接施工の表面については全施工面に施したが、裏面については施工可能な空間的余裕がないため（現有機器では最低10cmは必要と考える）実施しなかった。

(4) EB溶接変形の測定

各接続部位の組立て時における構造体の変形を把握するため、構造体の外面に圧痕を施し、EB溶接施工前後における圧痕位置の相対的变化をデジタルノギス等により計測した。

変形量の計測結果として上下端面における変形例をFig. 3.3-5 に、また軸方向の側壁面における変形例をFig. 3.3-6 に示す。図中の変形量は、各溶接後の計測結果を圧痕番号⑥またはBで0補正した値であり、後述する変形量の評価としては、図中の左右の値を平均したものとした。また各図の(1/2) 及び(2/2) では、溶接前の時点及び第2段溶接後の形状をそれぞれ基本としてその後の変形量を図示している。

上下端面における変形量としては、第一壁コーナ近傍で 0.81mm(圧痕番号⑤, ⑦) 側帯近傍で 1.38mm(圧痕番号③, ④) 後壁で 1.61mm(圧痕番号⑧, ⑨) の変形であった。軸方向の側壁面における変形としては、側帯近傍で 0.72mm(圧痕番号A B C) 後壁面で 0.60mm(圧痕番号D E F) の第一壁面中央部が凸後壁面中央部が凹となる若干の反りが生じていたが、捩れもなく総じて微小な変形であった。なお、EB溶接による溶接面に対する横収縮量は約 0.60mm/2ビードであった。全体を通して、16か所の電子ビーム溶接施工による溶接変形は 2mm以下の微小な変形であった。

3.4 最終加工

本工程では、EB溶接後の構造体に対して以下の項目を実施した。

- ①第一壁面の部分加工及び酸洗い
- ②TIG施工による側帯及び上下蓋の取付
- ③仕上げ加工及び寸法検査
- ④備品類の取付
- ⑤耐圧漏洩試験

(1) 第一壁面の部分加工及び酸洗い

第一壁における表面から冷却流路までの板厚を測定しつつこの板厚が所定の値となるように第一壁外表面を加工した。この時、次のTIG施工（上記②項）による上下蓋の取付けの際に生じると思われる変形を考慮して、上下端部近傍については未加工のままとした。なお、この上下端部については上下蓋取付後、仕上げ加工を施した。表面施工後、酸洗い処理を施し構造体内表面及び外表面の洗浄を行った。

(2) TIG施工による側帯及び上下蓋の取付

本筐体における上下蓋のTIG溶接施工では、限られた面内に8か所もの溶接が必要となることから、面拘束による高温溶接割れの可能性がある。このため、事前に溶接変形、割れ特性を調べ、溶接条件及び手順等を決定するためのTIG溶接施工試験を実施した。その結果を受け、本施工では両側帯、第一壁冷却系マニホールド上下蓋、遮蔽冷却系マニホールド上下蓋、増殖域冷却系マニホールド上下蓋及び増殖域上下蓋の順でTIG溶接施工を実施した。Fig.3.4-1に側帯施工状況を、また上下蓋に取付ける部品に関する外観状況をFig.3.4-2にそれぞれ示す。施工後、側帯部のRTによる非破壊検査を実施し、無欠陥であることを確認した。

TIGにおける変形量（収縮量、角変形量）はEB溶接に比べ大きい。本筐体の上下蓋施工では板厚7mmであったため変形はわずかであったが、実機のプレナム構造では板厚20mmの溶接施工となり、さらに、増殖域に設置される冷却パネルも組み込まれることから、溶接箇所も増して変形が大幅に増大することが考えられる。従って、溶接施工法、部材形状（開先形状を含む）等の見直しが必要となる。

(3) 仕上げ加工及び寸法検査

仕上げ加工では、Fig. 2.2-1 に示した寸法を基本に最終の外面加工を施した。施工後、超音波板厚計測計により各部位の板厚計測を実施した。Table 3.4-1 に、各部位の計測位置及び板厚計測結果を示す。計測の結果、寸法許容値を満足することを確認した。

(4) 備品類の取付

備品類（フランジ、上蓋用ケージョン、下蓋用ドレーン弁及び架台）を TIG 溶接により構造体に取付た。

(5) 耐圧漏洩試験

備品類取付け施工後、耐圧漏洩試験を実施した。試験は、耐圧漏洩試験条件を十分満たすように遮蔽域 $25\text{kg}/\text{cm}^2$ 、増殖域 $2.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 、保持時間30分の条件で実施し、漏洩箇所がなく耐圧的に健全であることを確認した。Fig. 3.4-3 に、耐圧漏洩試験の状況を示す。試験後、筐体の寸法計測を実施し、計測の結果寸法許容値を満足することを確認した。

完成した筐体の外観を Fig. 3.4-4 及び Fig. 3.4-5 に示す。

3.5 接合率の測定

Fig. 3.5-1 に筐体製作時の残材より採取した HIP 接合面のミクロ組織を示す。接合率の測定結果は 93.1% と別途実施した要素試験結果 (93.3~95.4% : 付録A 参照) より若干低い値であったが、健全な継手強度を有するものと推定される。

3.6 筐体製作における今後の課題

(1) 第一壁構造体の製作精度の向上

第一壁構造体の製作における今後の課題としては、HIP 施工における第一壁面の変形量を軽減するために第一壁構造体組立時ギャップの低減方法の検討（矩形管の製造及び成形方法の検討）及び変形防止用治具設置方法の改善等を図る必要がある。また、溶接拘束域の縮小を目的としてシーム溶接における溶着金属量の低減方法も検討する必要がある。

(2) 遮蔽域溶接施工における溶接ビード処理

マニホールド仕切板の E B 溶接における溶接ビードの表裏面の後処理（成形加工）の必要性の検討及び狭空間用施工機器の開発が上げられる。

(3) 遮蔽構造組立における製作精度の向上

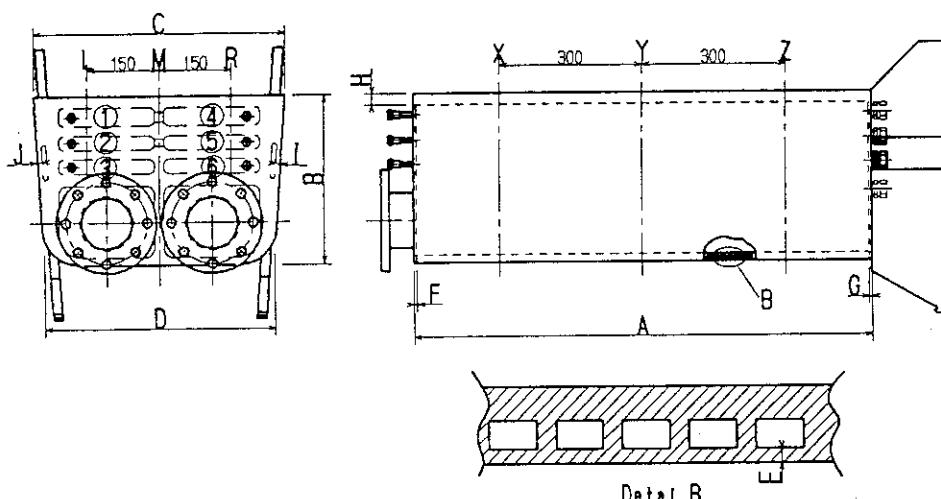
実機形状を考慮した固定治具の改善及び施工手順の最適化等の実施により、本規模の筐体に関しては 0.5mm 以下の変形に十分抑えることが可能と考えられる。

(4) プレナム構造組立と非破壊検査

実機のプレナム構造では、蓋部に増殖域に設置される冷却パネルが組み込まれ、蓋の板厚も増加することから、溶接変形の増大が予想され、溶接施工法、部材形状（開先形状を含む）等の見直しが必要となる。また、本筐体も含めブランケット筐体は箱型構造となるため、最終施工位置に関して線源やフィルムを挿入できる空間が無く、非破壊検査の実施が難しい等の問題がある。

Table 3.4-1 Measurement of length and thickness on each parts (mm)

Location	size	variation of tolerance	measured value	Location	size	variation of tolerance	measured value
AR	1006	>1000	1008	FL①	7	±1.0	6.6
AL	1006	>1000	1009	FL②	7	±1.0	6.7
BRX	352	±5.0	351	FL③	7	±1.0	6.6
BRY	352	±5.0	351	FR④	7	±1.0	6.5
BRZ	352	±5.0	351	FR⑤	7	±1.0	7.4
BLX	352	±5.0	351	FR⑥	7	±1.0	6.4
BLY	352	±5.0	351	GL①	7	±1.0	7.5
BLZ	352	±5.0	351	GL②	7	±1.0	7.9
CX	525	±5.0	527	GL③	7	±1.0	7.3
CY	525	±5.0	527	GR④	7	±1.0	7.1
CZ	525	±5.0	527	GR⑤	7	±1.0	8.0
DX	480	±5.0	480	GR⑥	7	±1.0	7.0
DY	480	±5.0	480	HLX	23	±1.5	23.1
DZ	480	±5.0	480	HLY	23	±1.5	22.5
EXL	3	+2.5, -0	4.1	HLZ	23	±1.5	22.0
EXM	3	+2.5, -0	3.5	HRX	23	±1.5	21.6
EXR	3	+2.5, -0	4.3	HRY	23	±1.5	22.1
EYL	3	+2.5, -0	5.1	HRZ	23	±1.5	21.8
EYM	3	+2.5, -0	4.0	IX	10	±1.0	9.6
EYR	3	+2.5, -0	4.3	IY	10	±1.0	9.6
EZL	3	+2.5, -0	4.8	IZ	10	±1.0	10.0
EZM	3	+2.5, -0	4.0	JX	10	±1.0	10.3
EZR	3	+2.5, -0	3.6	JY	10	±1.0	10.0
				JZ	10	±1.0	10.3



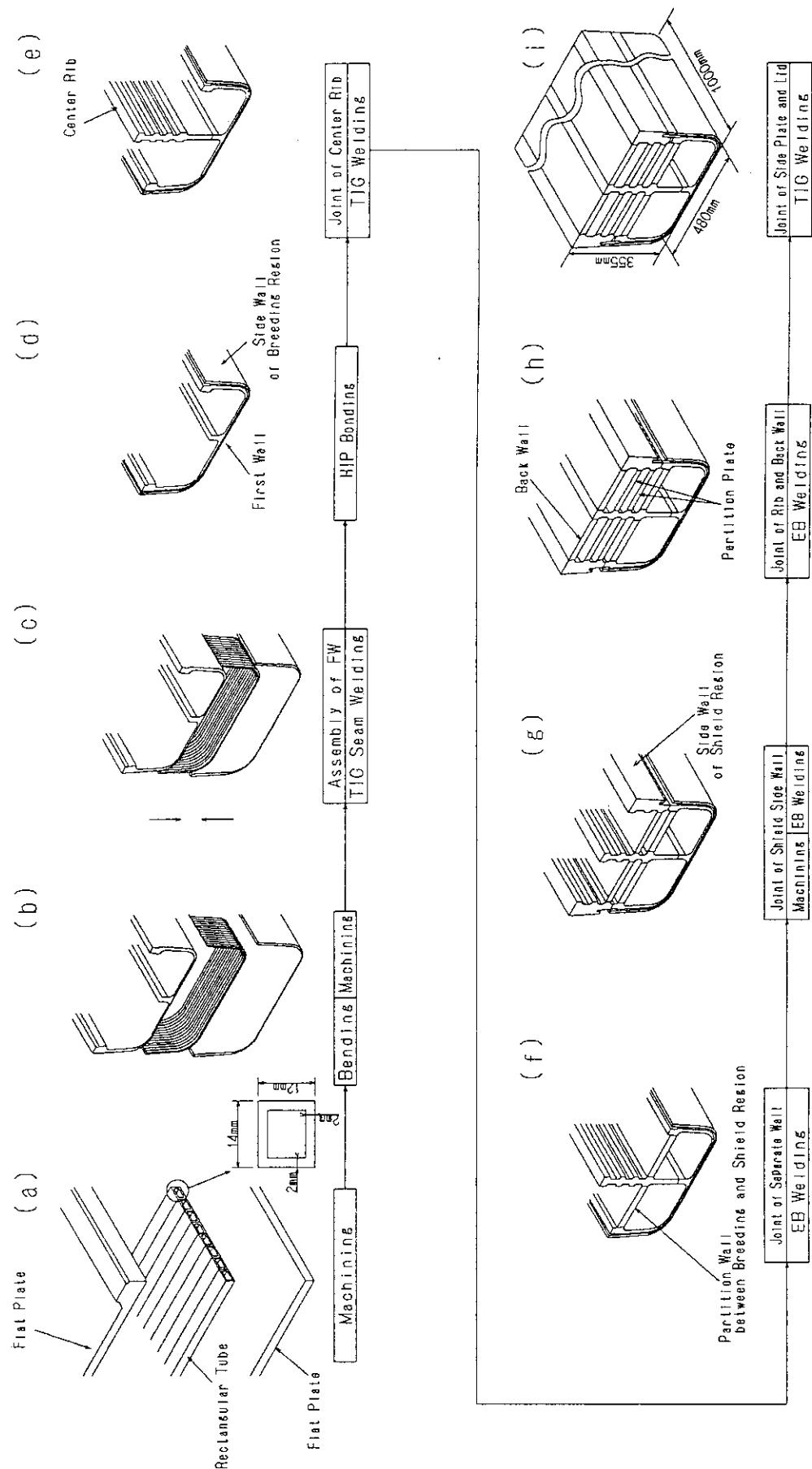


Fig. 3-1 Fabrication Procedure of the Blanket Box Structure

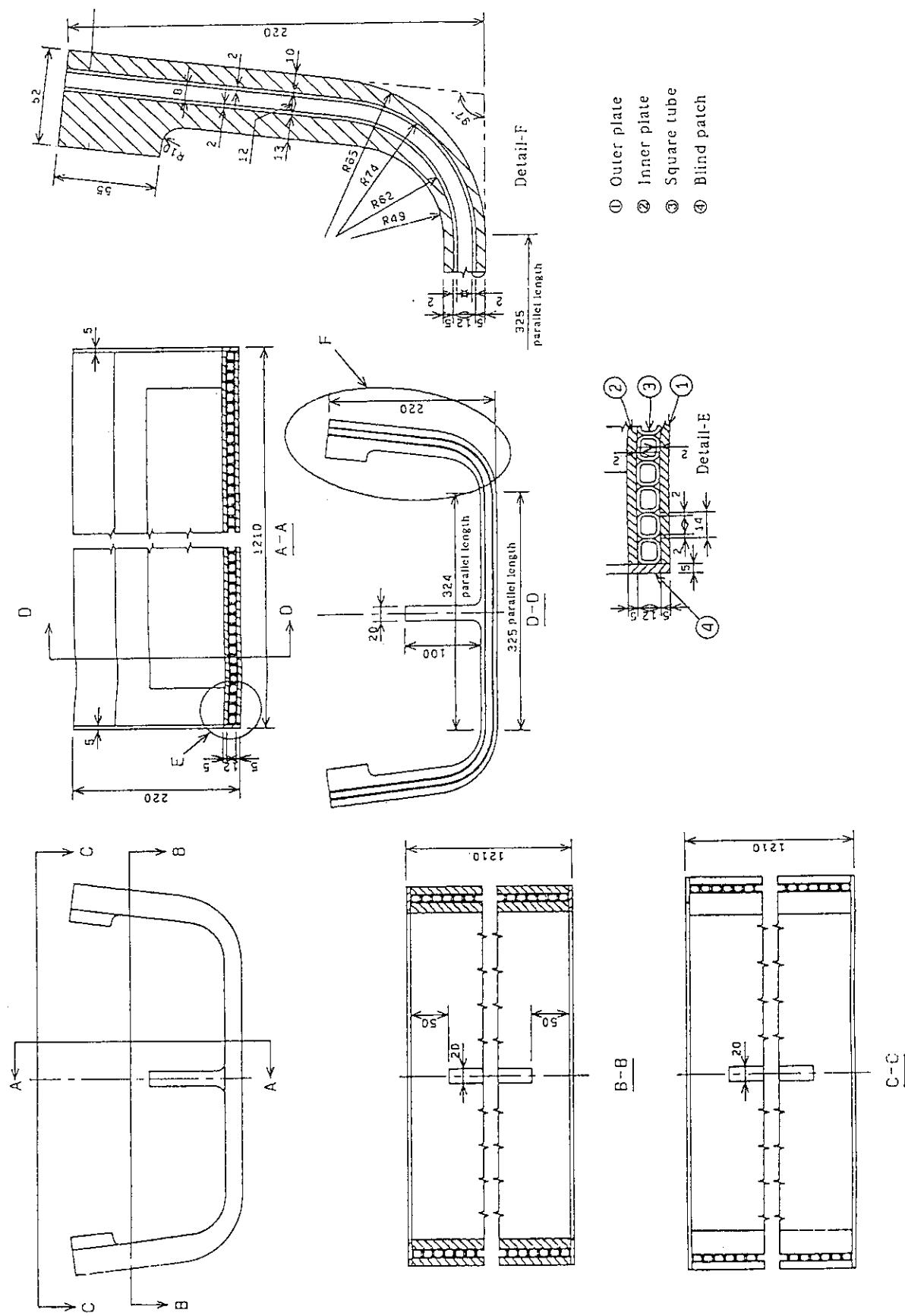


Fig. 3.1-1 First wall-panel for HIP processing

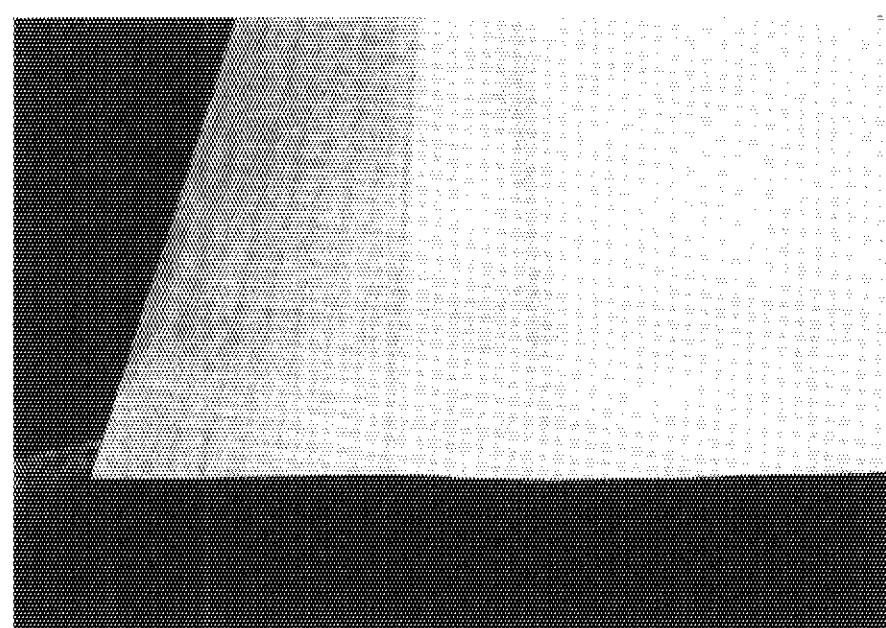
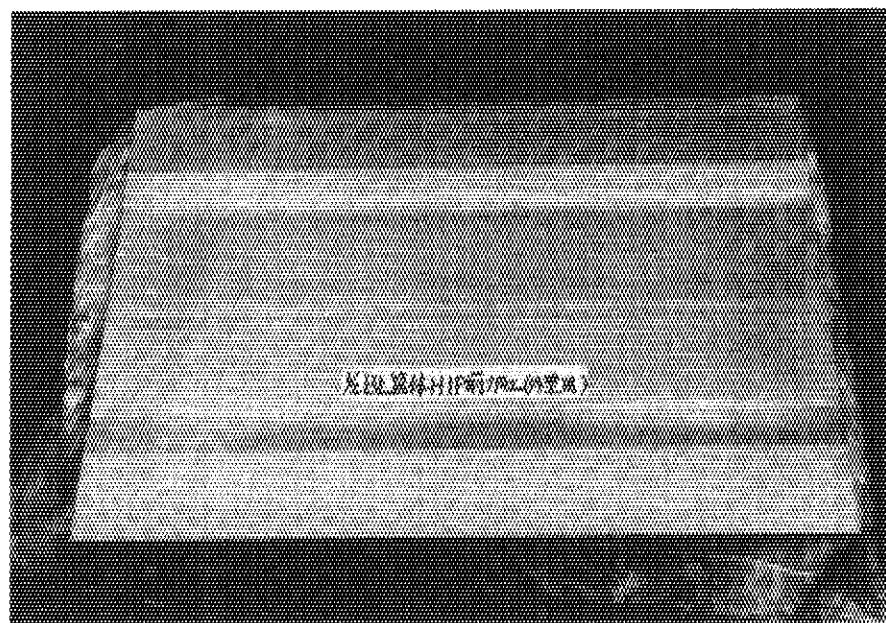


Fig. 3.1-2 Appearance of the outer plate of first wall panel after machining

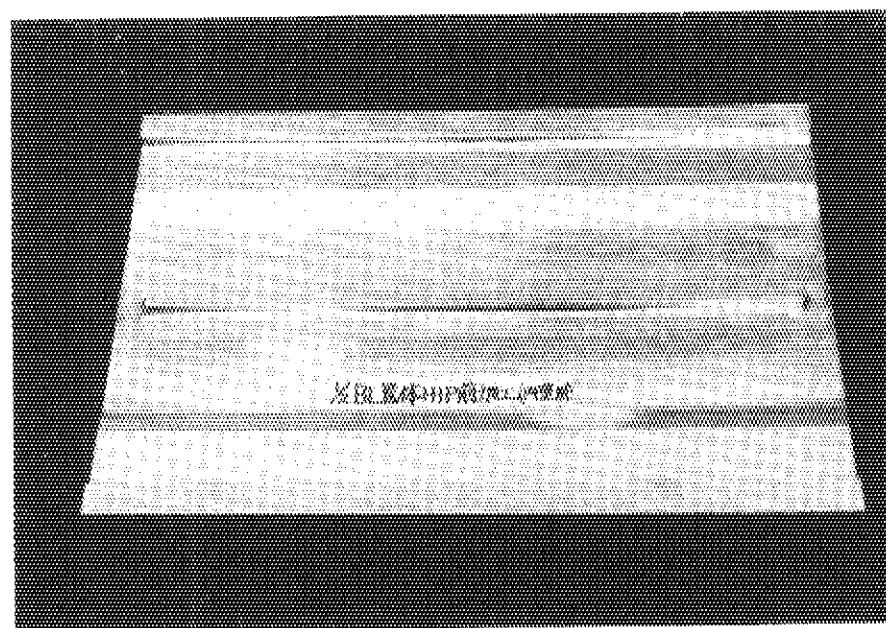
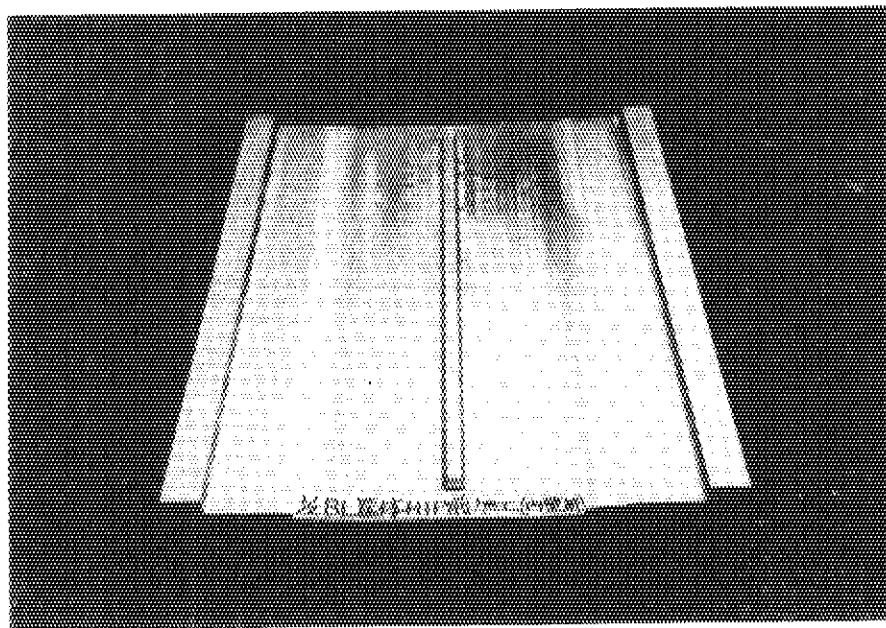


Fig. 3.1-3 Appearance of the inner plate of first wall panel after machining

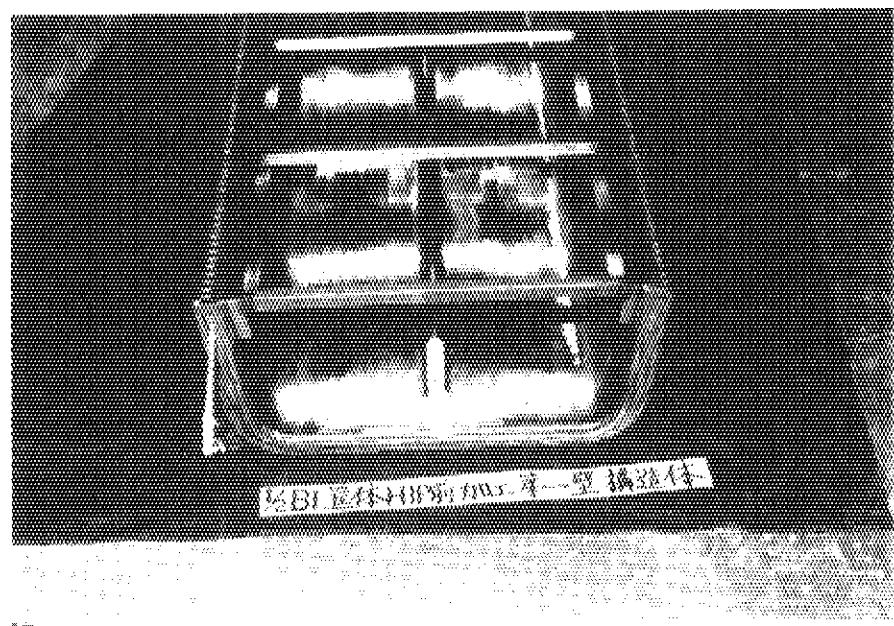
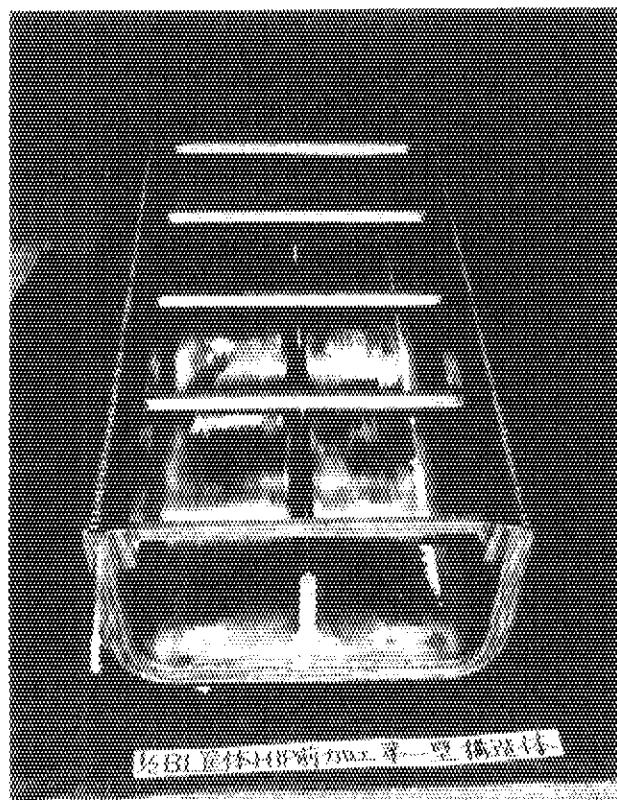


Fig. 3.1-4 Appearance of the first wall panel after Assembling

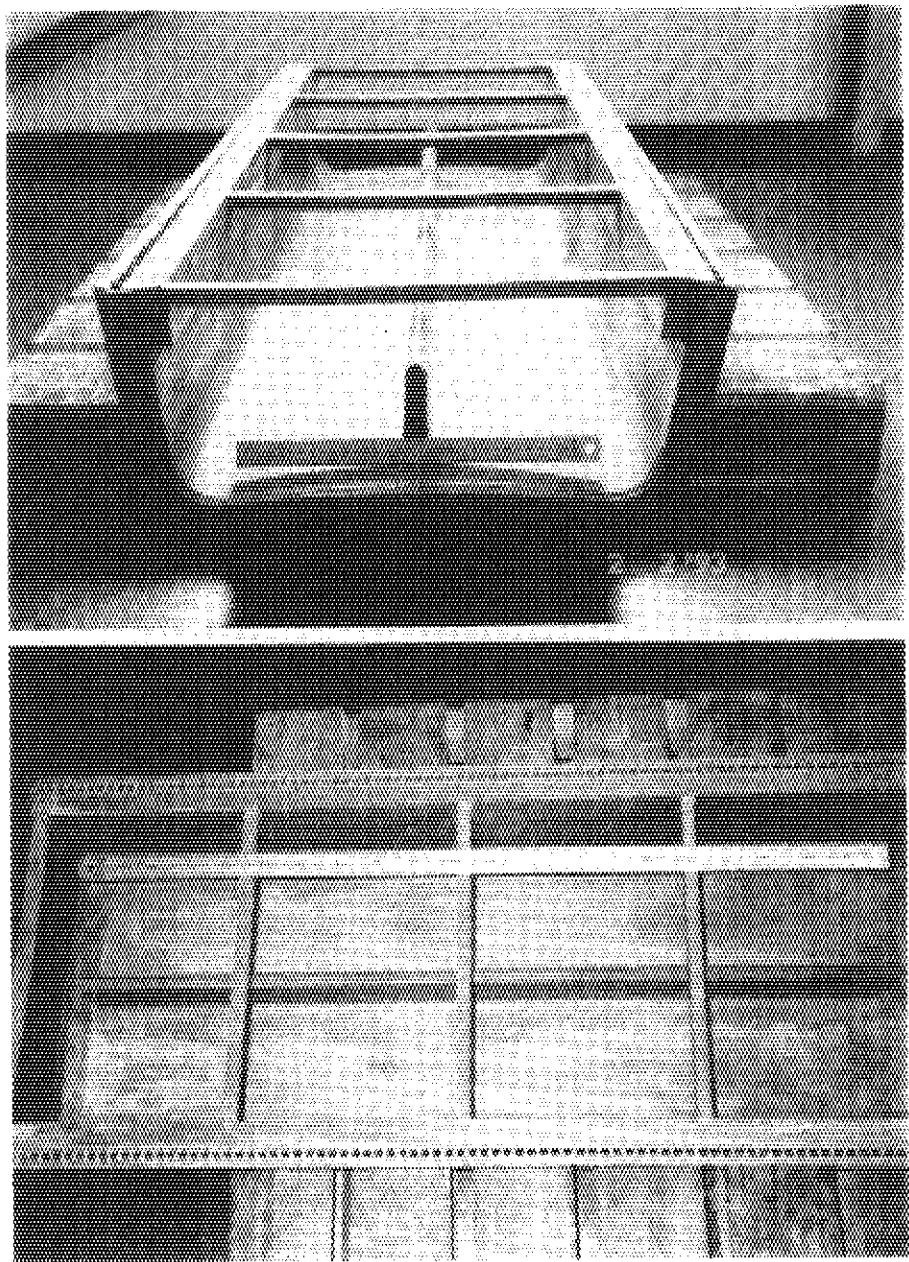


Fig. 3.2-1 Appearance of the first wall panel after HIP processing (1/2)

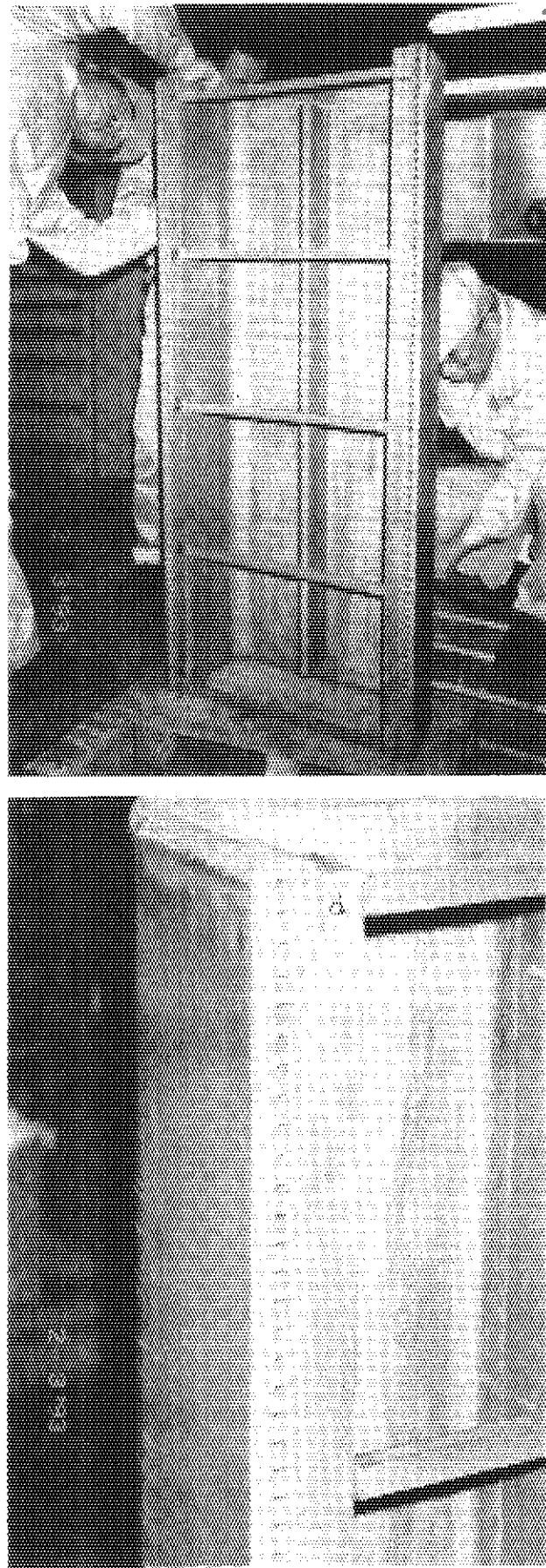


Fig. 3.2-1 Appearance of the first wall-panel after HIP processing (2/2)

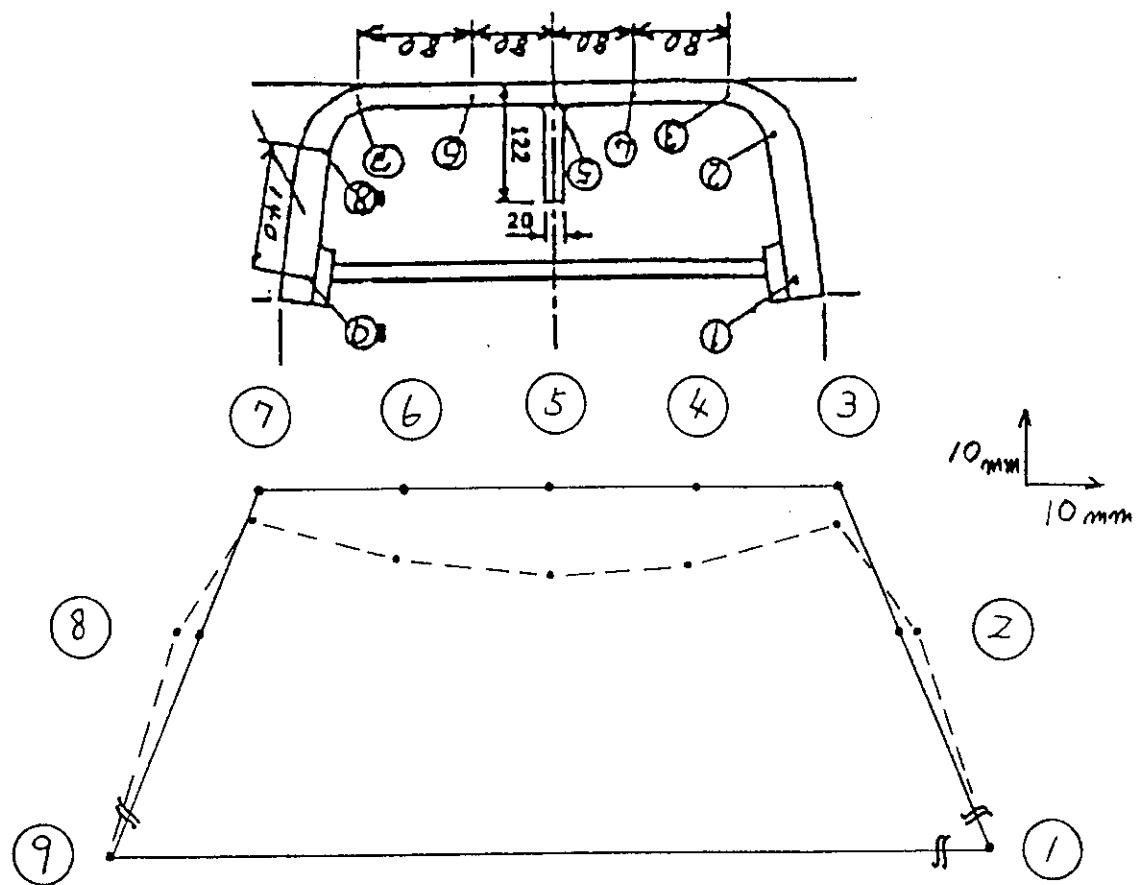


Fig. 3.2-2 Deformation of cross section for the first wall panel during HIP processing

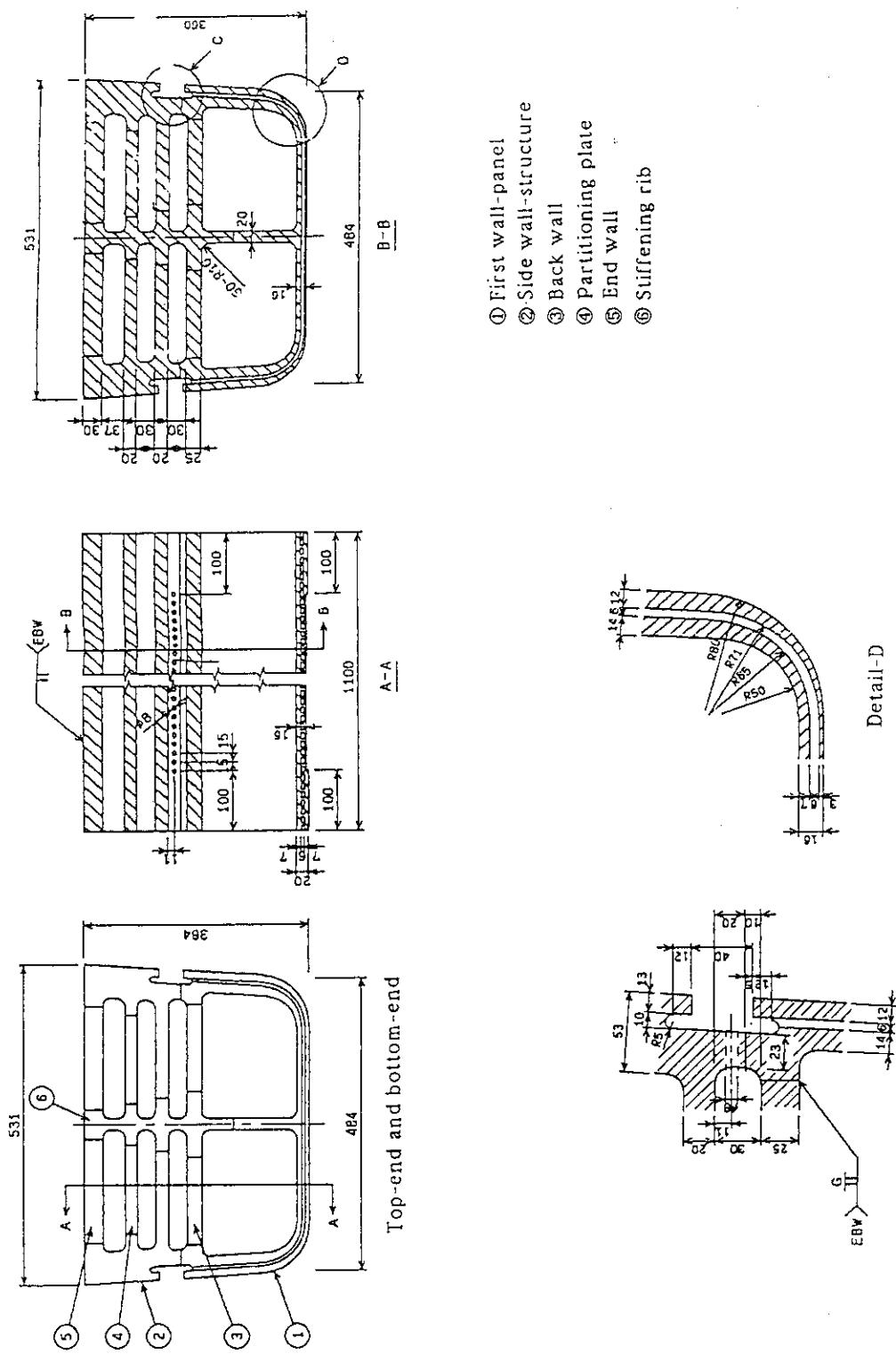
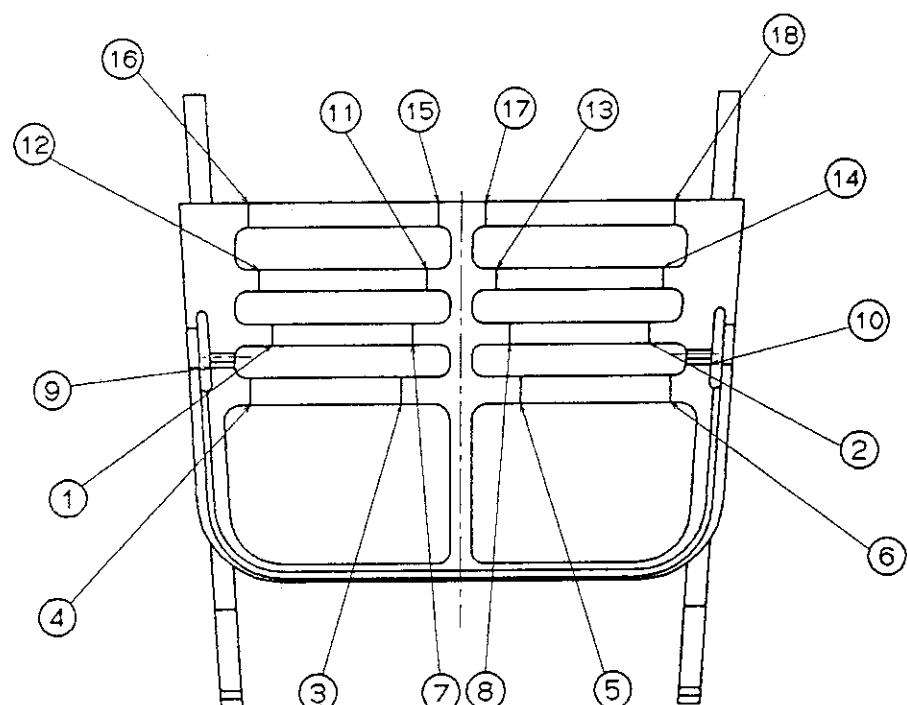


Fig. 3.3-1 Working drawing of the shield structure for EBW processing



The Number shows the electron beam welding sequence

Fig. 3.3- 2 Elevation Beam Welding sequence

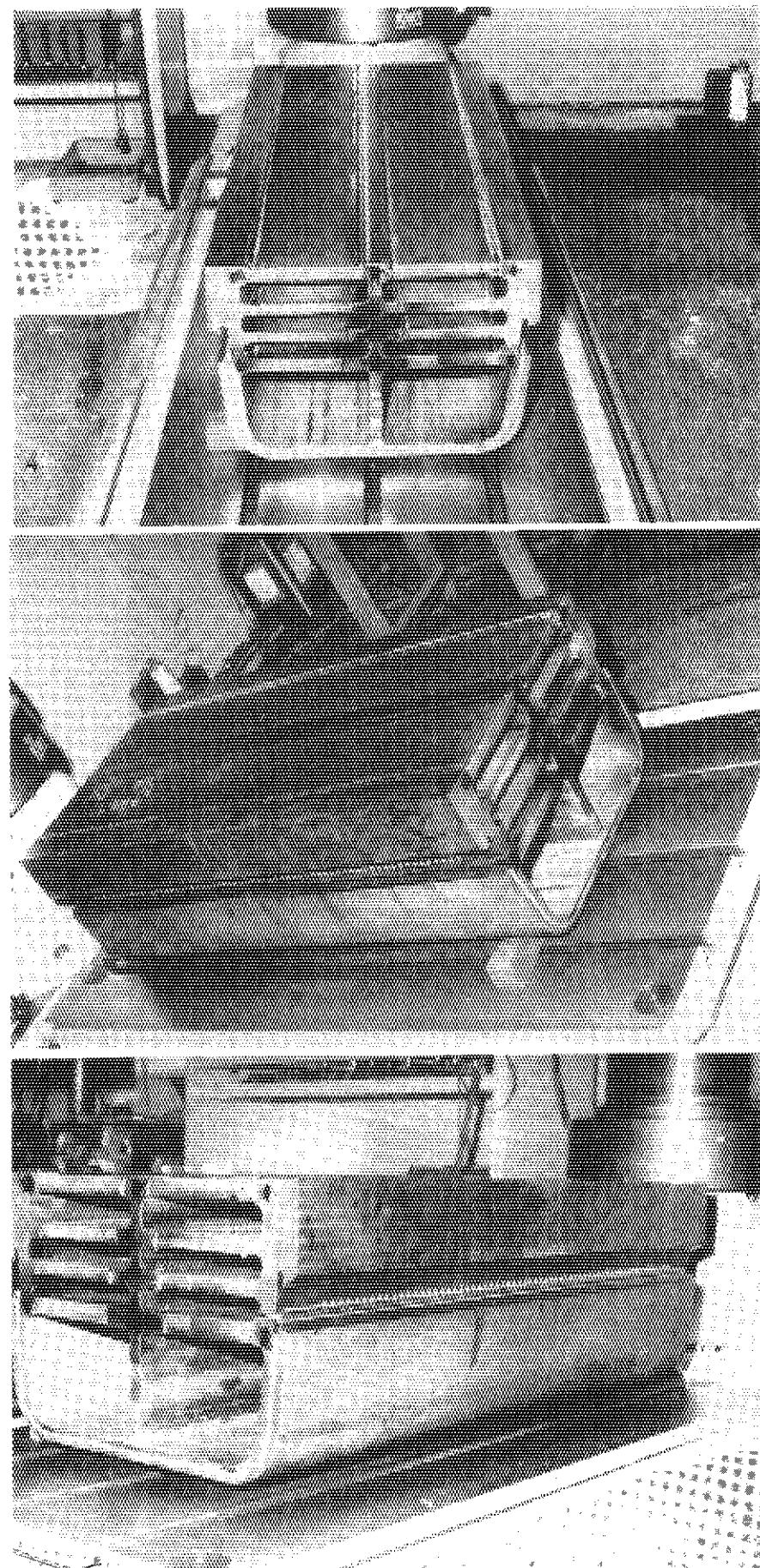


Fig. 3.3-3 Appearance of the blanket box structure after EBW

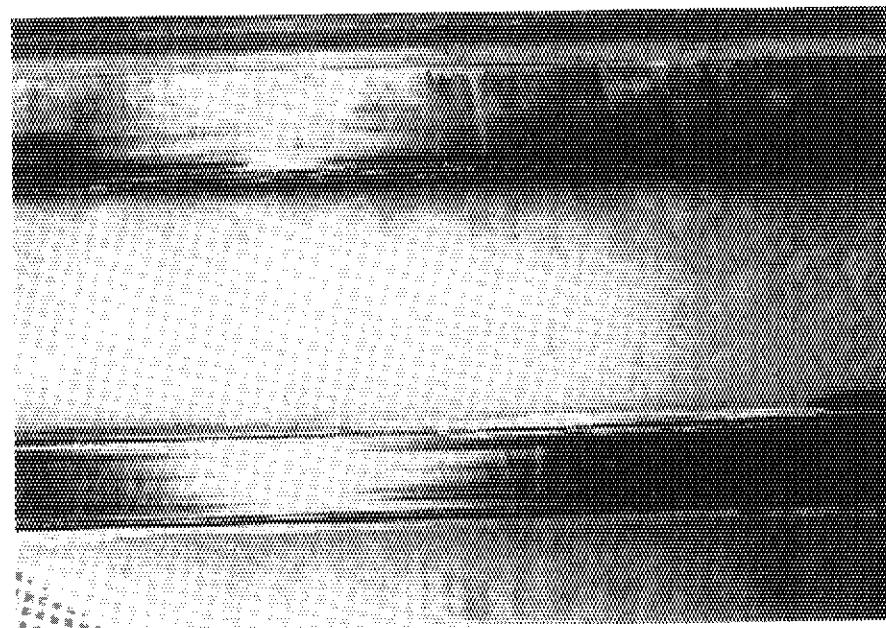
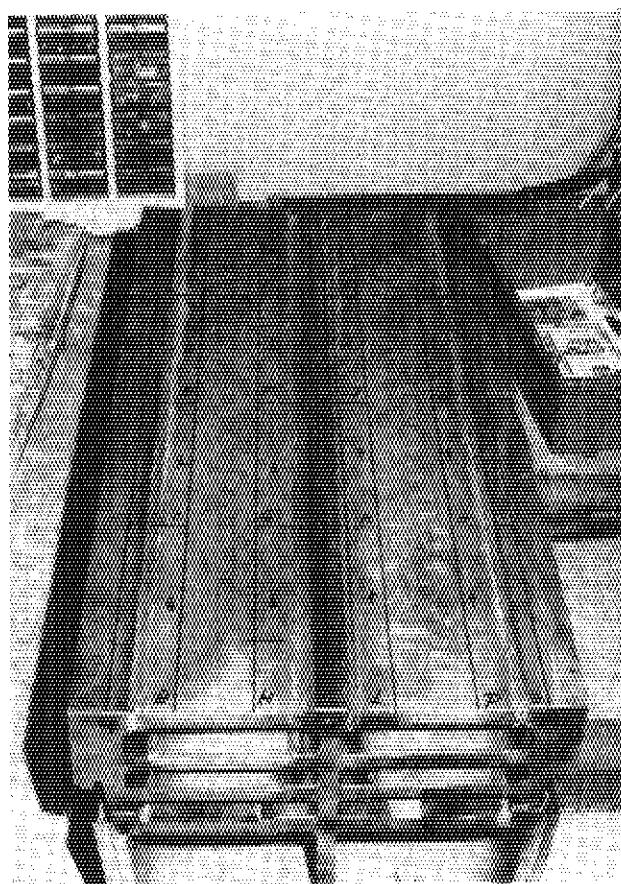


Fig. 3.3-4 Appearance of the bead in the end wall

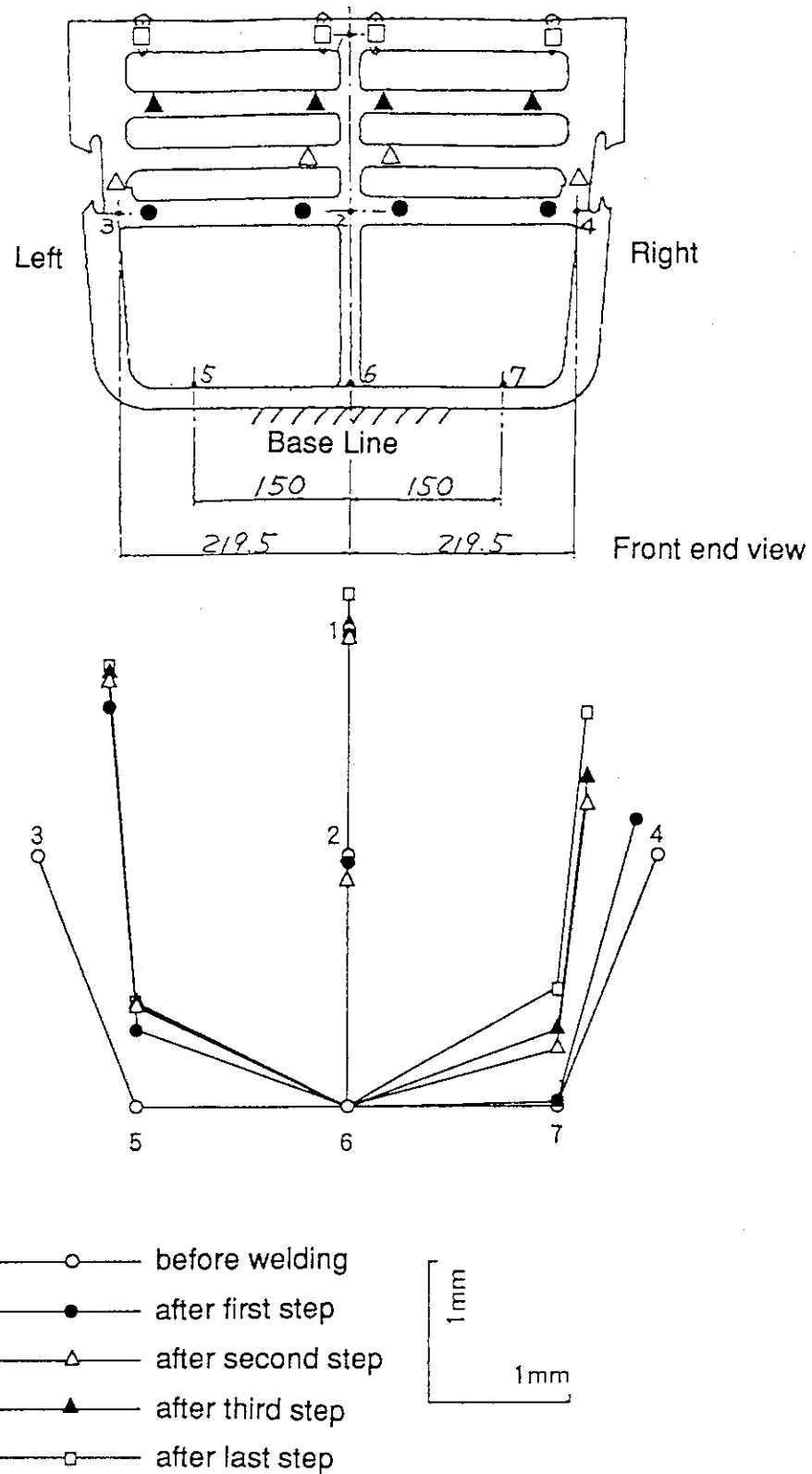


Fig. 3.3-5 Deformation at the end of the box structure due to EBW (1/2)

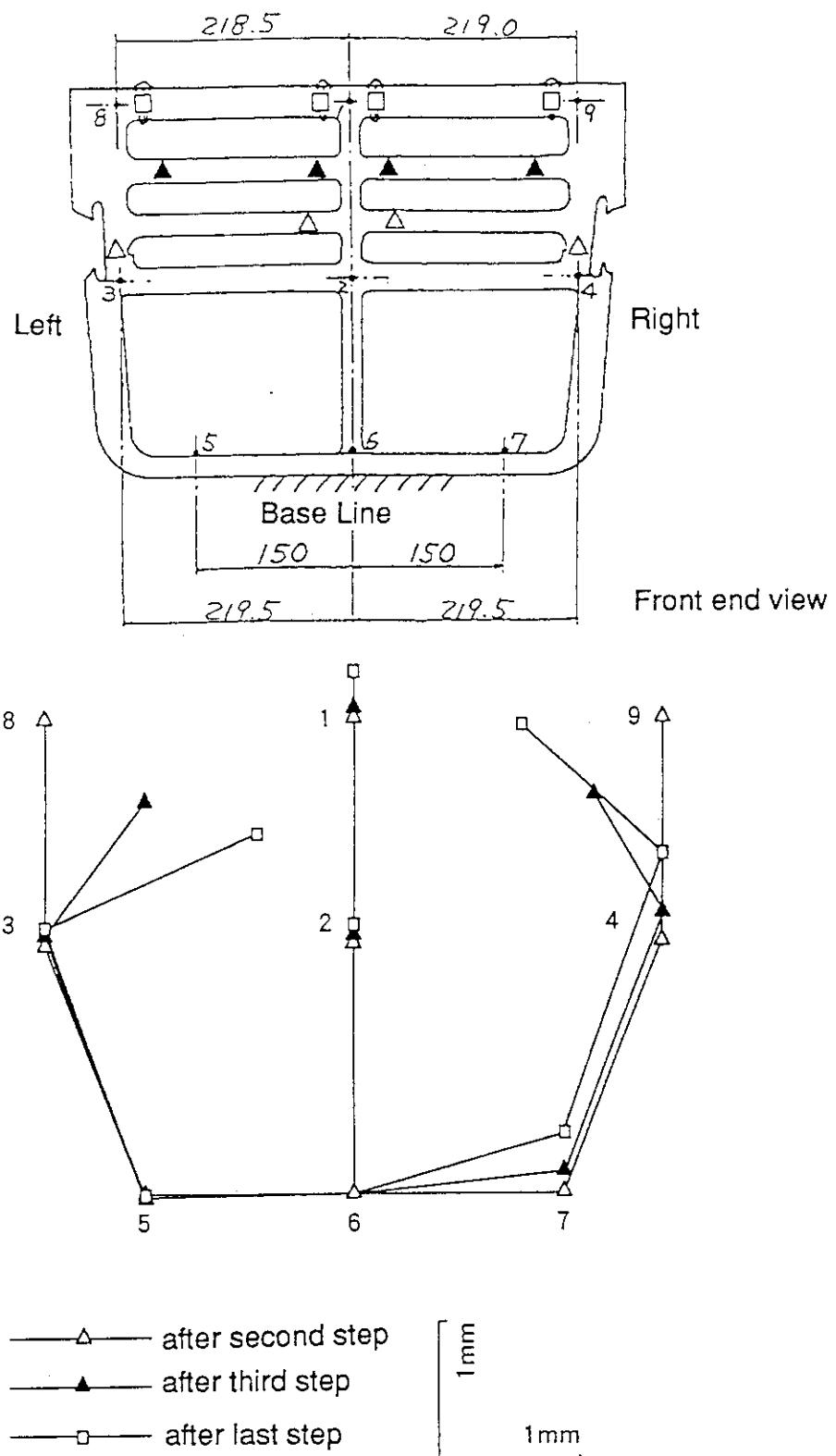


Fig. 3.3-5 Deformation at the end of the box structure due to EBW (2/2)

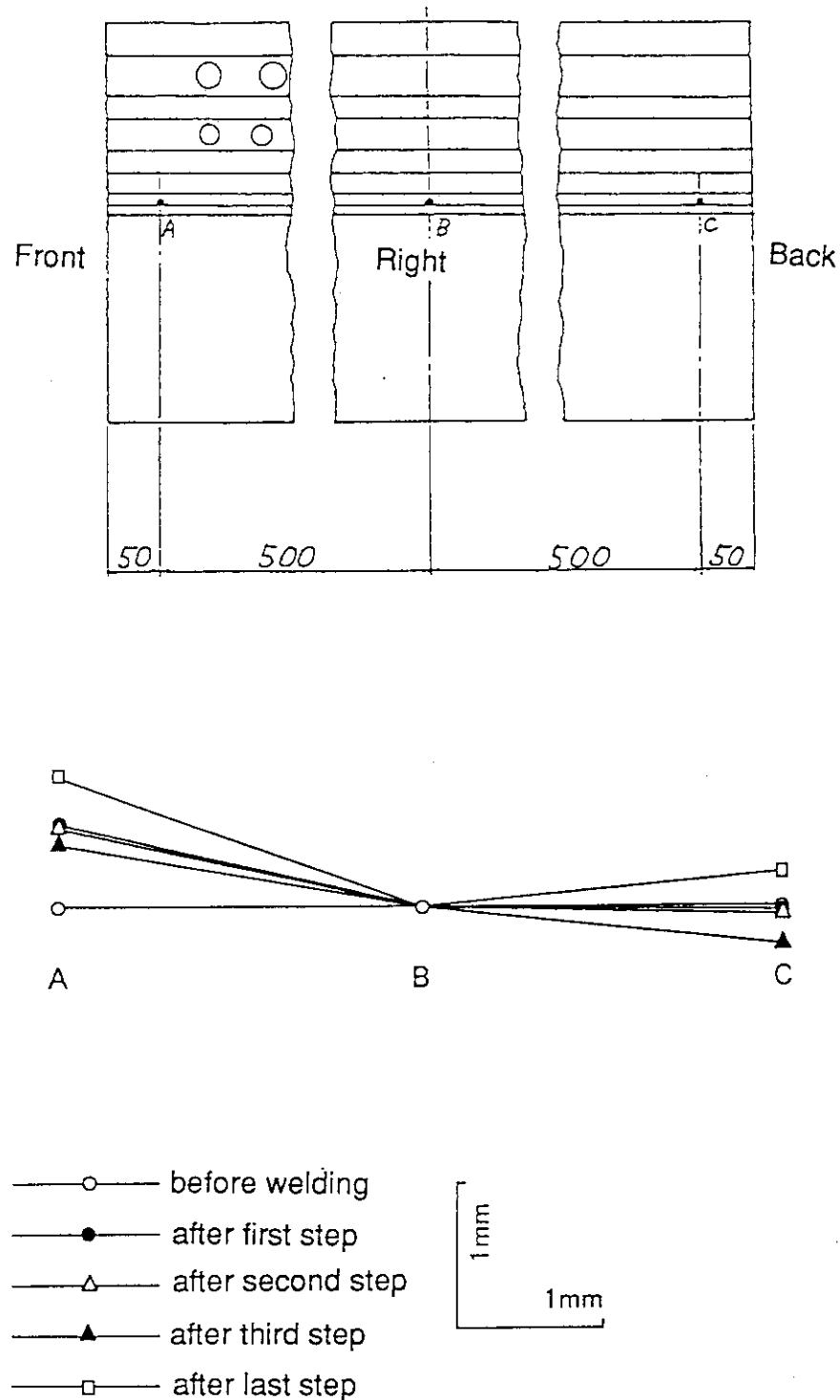


Fig. 3.3-6 Deformation at the side wall due to EBW (1/2)

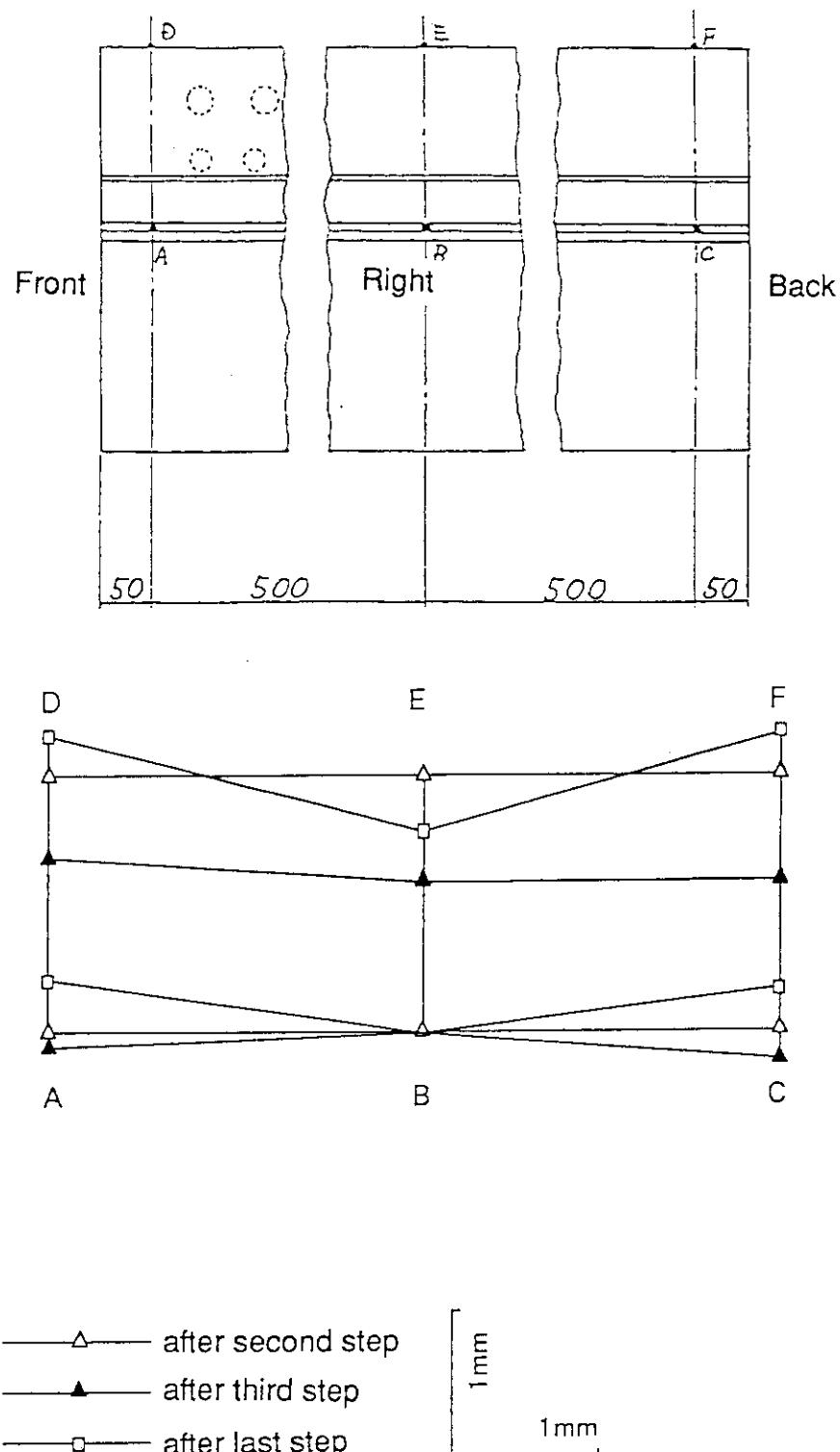


Fig. 3.3-6 Deformation at the side wall due to EBW (2/2)

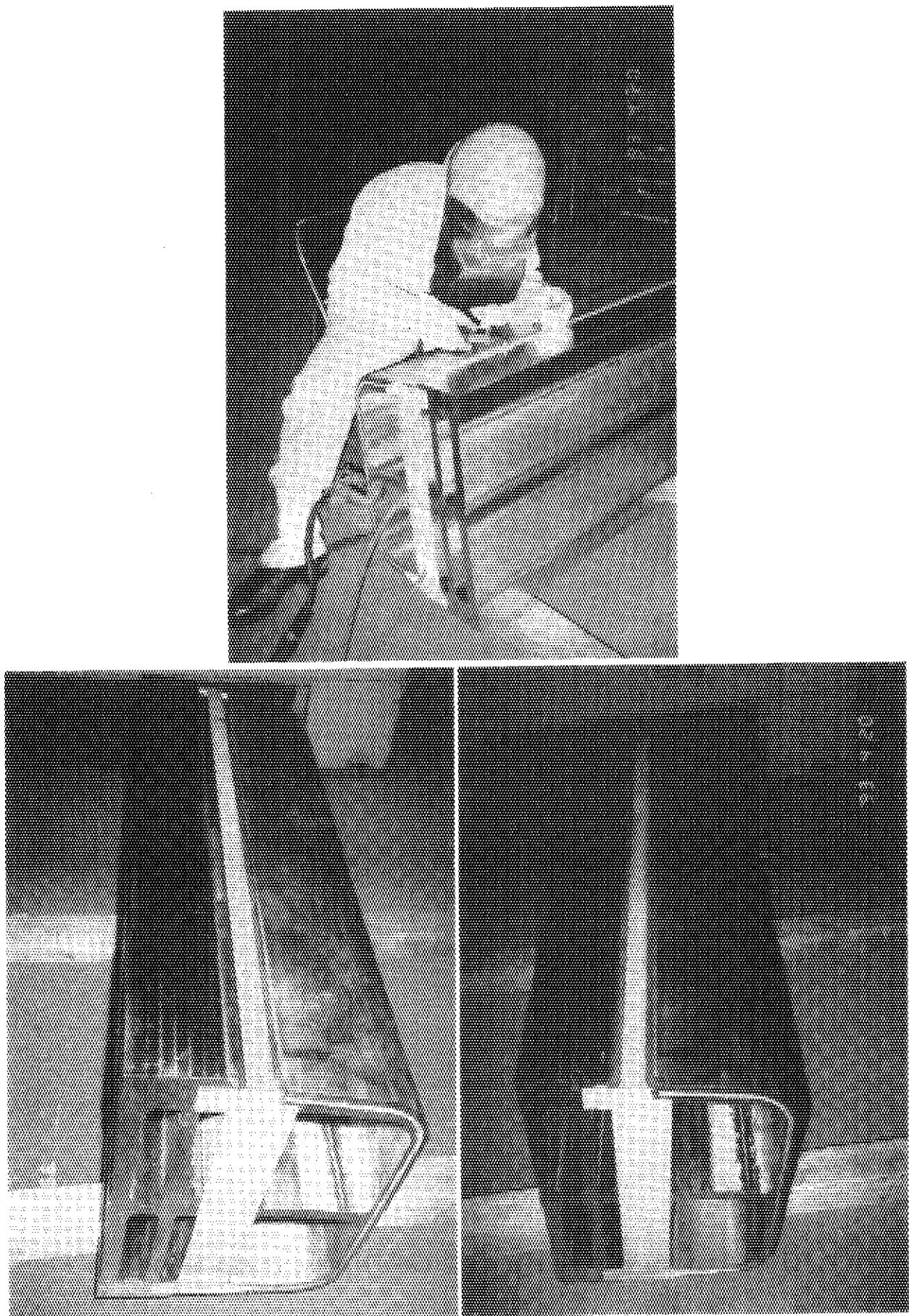


Fig. 3.4-1 Joining of the side lids to the blanket box structure.

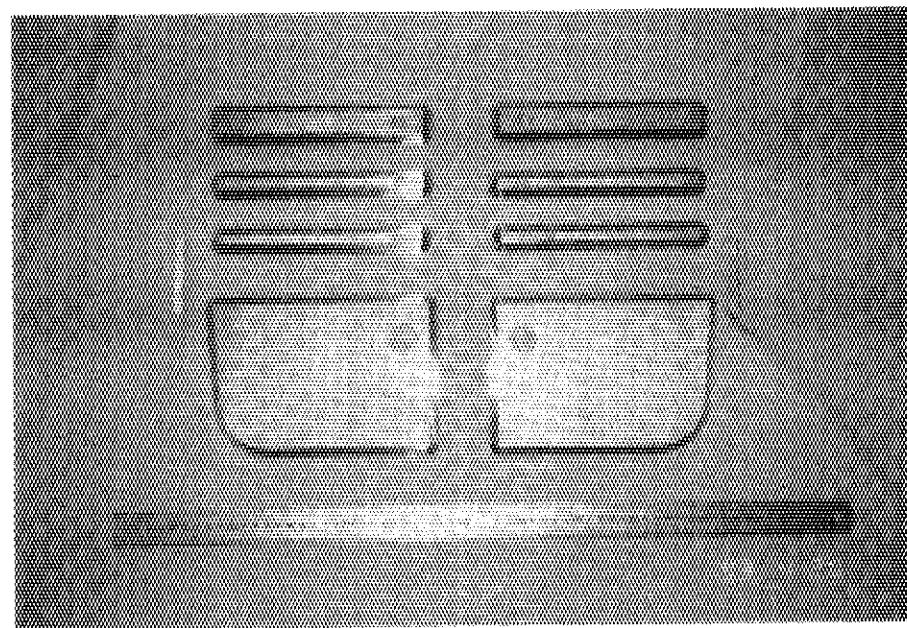
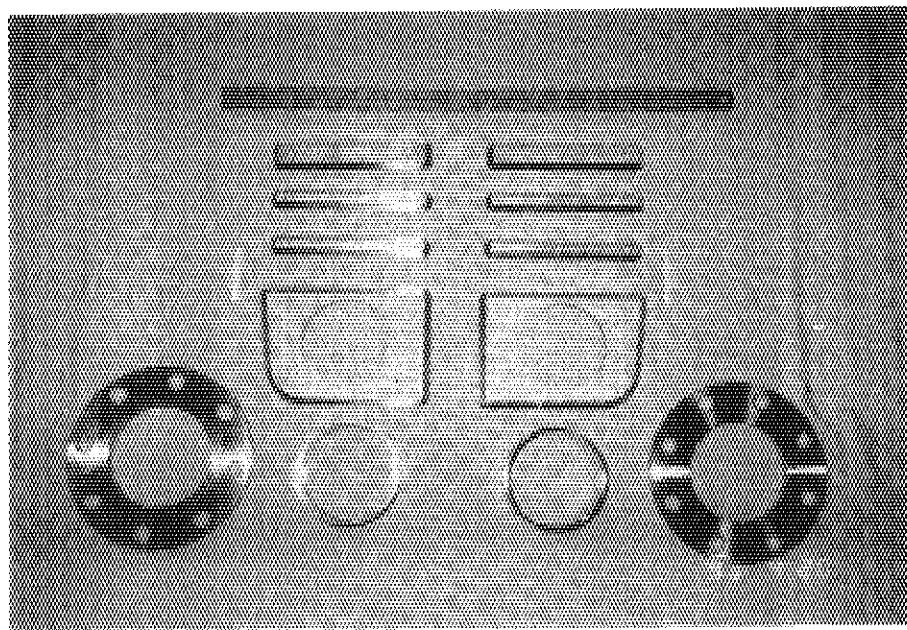


Fig. 3.4-2 Appearance of upper lids, lower lids and flanges on the lids.

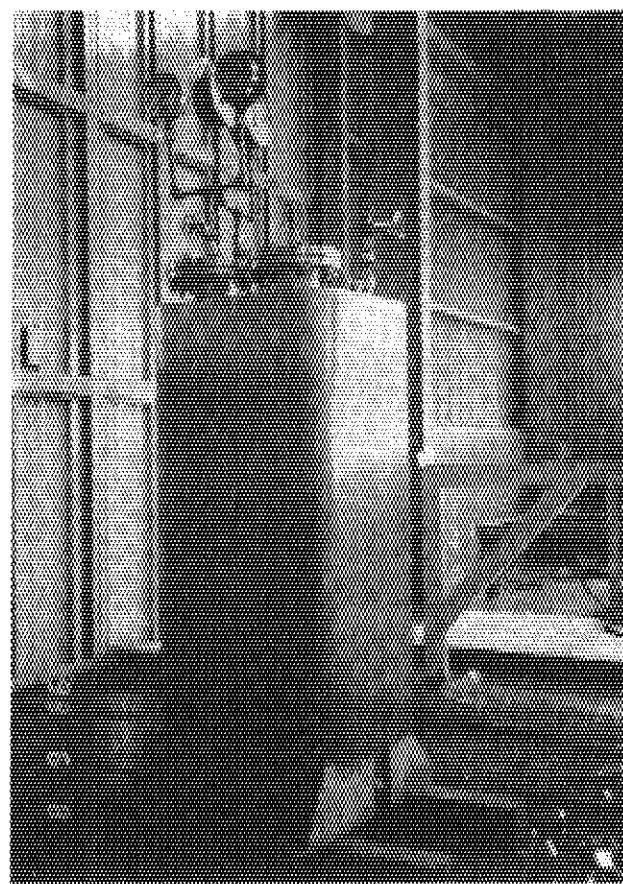
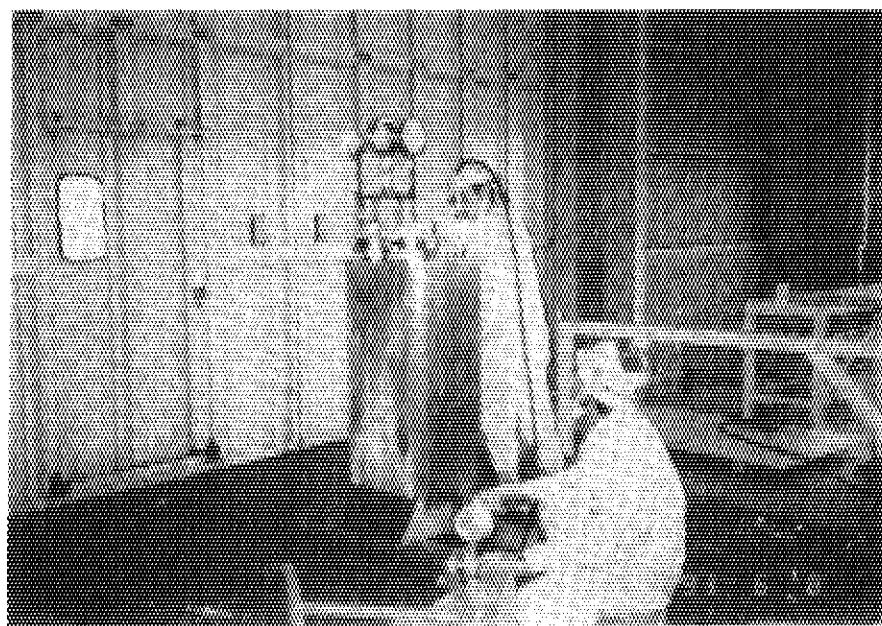


Fig. 3.4-3 Pressure and leak test.

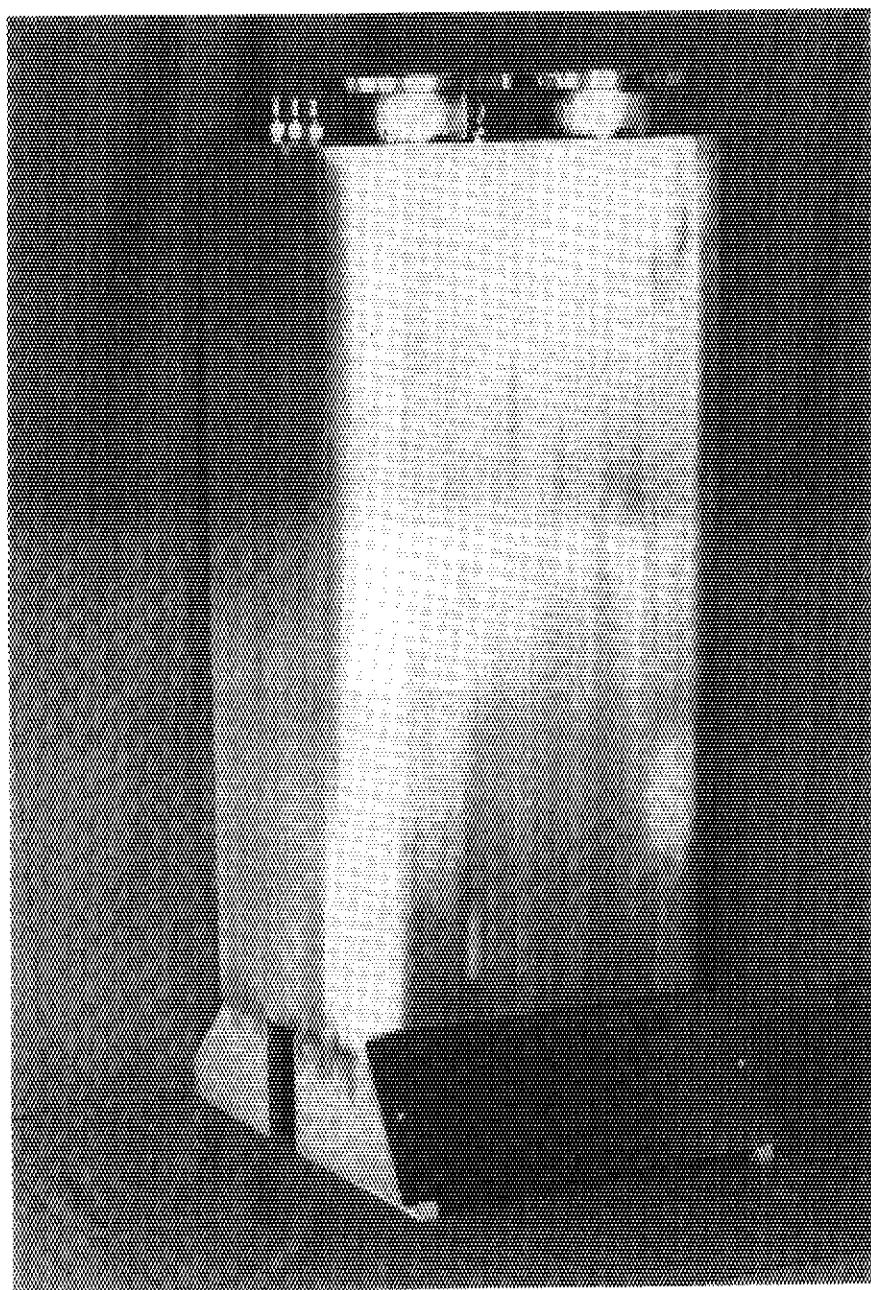


Fig. 3.4-4 Appearance of 1/2-scale partial mock-up of the blanket box structure.

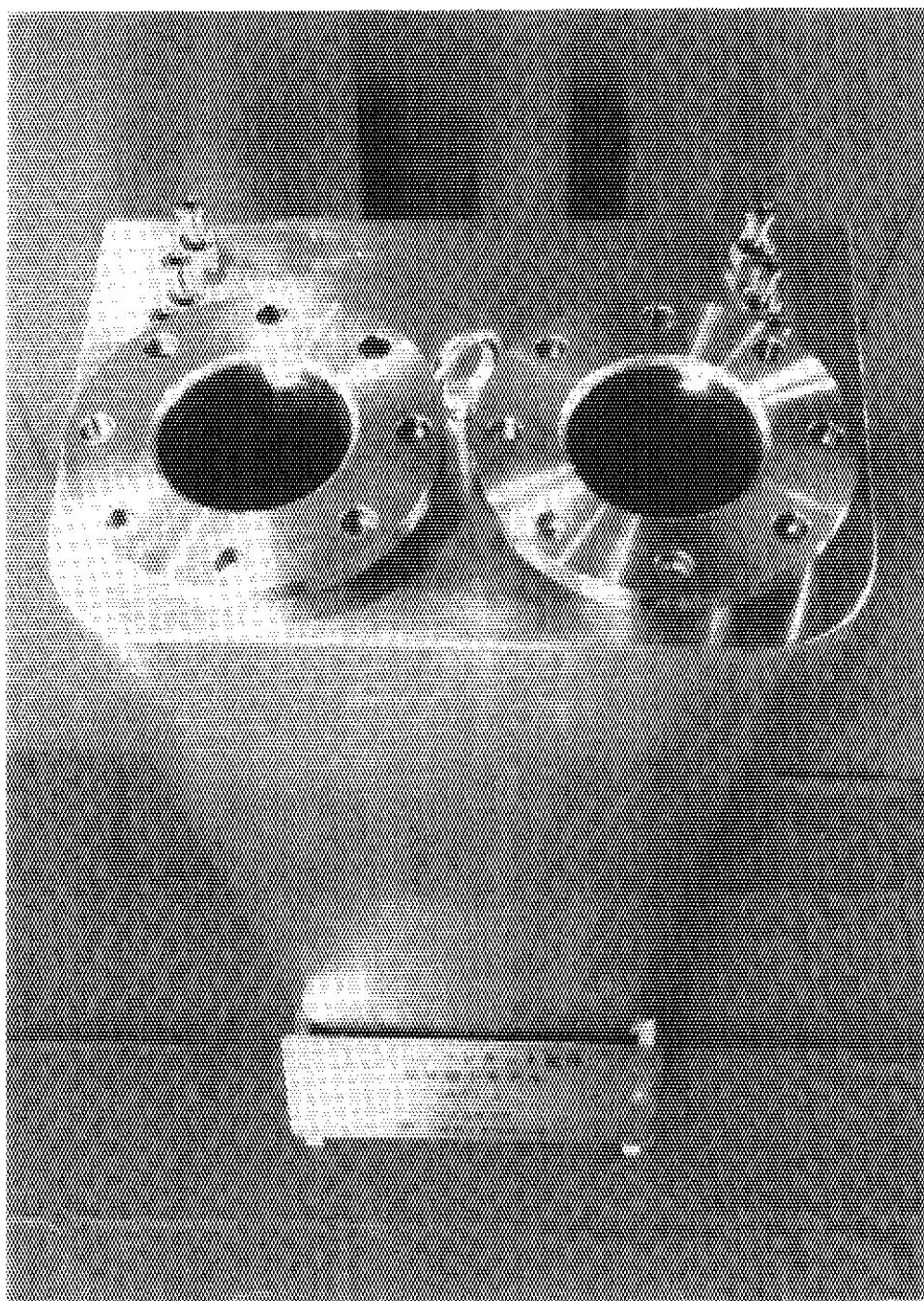


Fig. 3.4-5 External view from the top of 1/2-scale partial mock-up
of the blanket box structure.

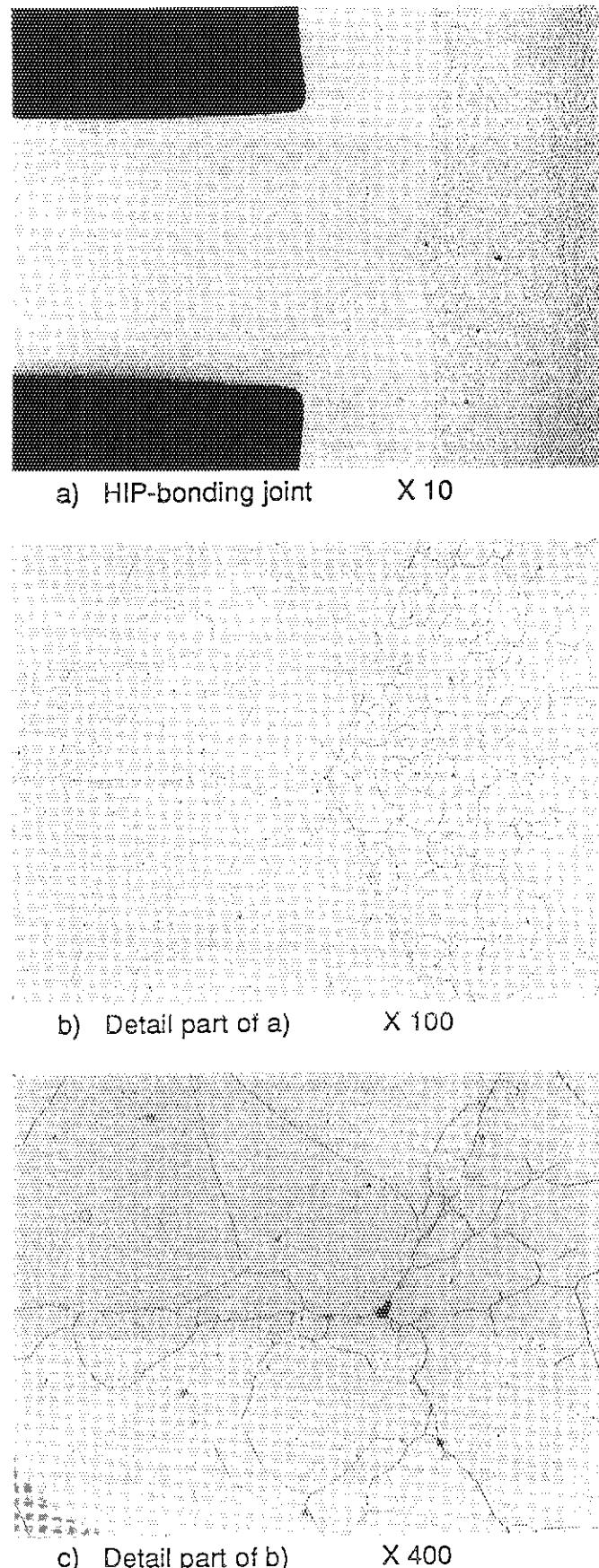


Fig. 3.5-1 Sectional micro-structure of joint formed by HIP with two rectangular tubes and a plate.

4. 筐体製作における溶接性及び加工性

4.1 溶接性

3章に記述したように、今回の筐体製作では各構造部材を次の施工方法により実施した。

- | | |
|--------------|------------|
| ①第一壁・側壁 | H I P 处理 |
| ②分離壁・仕切り板 | E B 溶接施工 |
| ③側帯・上下蓋・中央リブ | T I G 溶接施工 |

使用した溶接機器は一般溶接で使用しているものであり従来技術であること、また対象部材も構造部材として一般に用いられているオーステナイトステンレス鋼であることから、今回の1/2スケールの筐体の溶接性に関しては、特別な技術的問題はなかった。ただし、使用環境によってはき裂発生因子となる可能性があるE B溶接ビードの表裏面のビード処理（成形処理）については、特に、E B溶接施工裏面において一般的施工技術で処理可能な空間的余裕がないことから実施しなかった。実機においても現設計では赤道面近傍の遮蔽域における空間的余裕が少なく一般的施工技術による処理は難しいと考えられる。従って、実機における裏ビード処理の必要性の検討及び狭空間用処理機器の開発等を行う必要がある。

4.2 加工性

構造材として使用したオーステナイトステンレス鋼は以下に示す問題があるため切削に多少時間を要するが、加工性は一般に良好な部類に入る。

- ①熱伝導率が他の一般構造部材である炭素鋼より悪く切削において熱がこもりやすい。
- ②靭性値が高いため粘りがあり、切削治具（バイト等）に絡みやすい。

今回の筐体製作では、H I P 处理前の工程における第一壁の内板の加工で、第一壁、側壁、分離壁用溶接ボス（端部）及び中央リブ用溶接ボス（端部）等を一括切出し製作することにしたため平滑材40mmから最大で5mm（第一壁面）まで切削する必要が生じ、機械加工に時間を要した。今後は、製作・組立て方法を見直し、加工工程の効率化を図る必要がある。

5. 実機プランケット筐体の製作性における課題

プランケット筐体の製作技術については、プランケット容器を構成する第1壁、後壁、冷却材マニホールド部ヘッダー、内部リブ板及びシェル導体等の部位に関する個々の製作技術と共にこれらを組合わせたプランケット・モジュール構造体としての製作技術を確立する必要がある。今回の1/2スケール筐体試作によりこのプランケット・モジュール製作に対しシェル導体を除く基本的製作技術の確認と実証が得られた。今後は製作技術・手順の最適化を図ると共に大型構造物製作に向けた技術開発が必要である。その主なものを以下に示す。

a) 第1壁パネル製造技術の開発

冷却流路を有するリブパネル方式の第1壁について、HIP法による平板部接合試験、コーナー部接合試験を通じた変形防止（軽減）方法の検討と接合部健全性（強度）評価試験等により第1壁パネルの製造技術を確立する。

b) ユニット間接合技術の開発

a)のHIP装置の容量に限界があることから、第一壁部分を分割して製作する必要がある。これらの分割ユニットを接合してプランケット・モジュールとするためにEBW等によるユニット間接合技術を確立する。

c) 後壁、冷却材マニホールド部、内部リブ板およびシェル導体の接合技術の開発

プランケット容器（筐体）を構成する後壁、冷却材マニホールド部、内部リブ板及びシェル導体を対象にして、自動TIG、EBW、レーザ等により圧力境界としての健全性を保ちつつ施工時の変形を最小とする接合構造及び接合技術を確立する。

d) 接合部の非破壊検査技術の開発

a)～c)の部位を対象にして、接合部（特にHIPによる接合部）の非破壊検査技術（超音波探傷試験装置等）を確立する^[6]。

6. まとめ

核融合実験炉の重要な工学的課題の一つに、高精度で大型の構造物の製作・検査技術の開発が挙げられており、第一壁を含むブランケット構造体（筐体）についても、これら技術の開発が急務となっている。

本研究では、上記開発の一環として、全体スケール1/2 の筐体に関する設計及び製作検討を行った。実施内容は、ITER外側ブランケットモジュールの赤道面近傍を対象とした全体スケール1/2 の筐体に関する設計及び、その設計検討結果を基とした本筐体の試作である。試作に際しては、HIP及びEBW、TIG等の接合方法による各部変形を測定すると共に、非破壊検査による接合部健全性の確認を行った。これら結果より、筐体の総合的な製作性（製作技術の実証）、要求機能確保の可能性と健全性の確保に関する見通し及び設計・製作に反映すべき数多くの知見を得た。また、実機第一壁及びブランケット構造体の製作性に関する課題を明らかにした。

今後は、これら課題に対する研究開発の推進と共に製作性の観点からの設計見直し及び製作技術の詳細化・最適化が必要である。

謝辞

本研究及び試作開発については、炉構造研究室及びITER開発室の方々から多くの有意義な助言を頂き、深く感謝します。また、CADグループの方々には構造設計及び製作検討図面で多大な協力を頂きましたことに深く感謝致します。

筐体モデルの製作設計及び試作試験の実施につきましては、川崎重工業（株）の担当の方々に深く謝意を表します。

最後に本研究開発を進めるにあたり、多くの御支援を頂いた島本進核融合工学部長、松田慎三郎ITER開発室長に深く感謝致します。

6. まとめ

核融合実験炉の重要な工学的課題の一つに、高精度で大型の構造物の製作・検査技術の開発が挙げられており、第一壁を含むブランケット構造体（筐体）についても、これら技術の開発が急務となっている。

本研究では、上記開発の一環として、全体スケール1/2 の筐体に関する設計及び製作検討を行った。実施内容は、ITER外側ブランケットモジュールの赤道面近傍を対象とした全体スケール1/2 の筐体に関する設計及び、その設計検討結果を基とした本筐体の試作である。試作に際しては、HIP及びEBW、TIG等の接合方法による各部変形を測定すると共に、非破壊検査による接合部健全性の確認を行った。これら結果より、筐体の総合的な製作性（製作技術の実証）、要求機能確保の可能性と健全性の確保に関する見通し及び設計・製作に反映すべき数多くの知見を得た。また、実機第一壁及びブランケット構造体の製作性に関する課題を明らかにした。

今後は、これら課題に対する研究開発の推進と共に製作性の観点からの設計見直し及び製作技術の詳細化・最適化が必要である。

謝辞

本研究及び試作開発については、炉構造研究室及びITER開発室の方々から多くの有意義な助言を頂き、深く感謝します。また、CADグループの方々には構造設計及び製作検討図面で多大な協力を頂きましたことに深く感謝致します。

筐体モデルの製作設計及び試作試験の実施につきましては、川崎重工業（株）の担当の方々に深く謝意を表します。

最後に本研究開発を進めるにあたり、多くの御支援を頂いた島本進核融合工学部長、松田慎三郎ITER開発室長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- [1] H.Takatsu et al., to be published in JAERI-M.
- [2] H.Takatsu et al., Layered pebble bed concept for ITER breeding blanket ,Fusion technology(1992)
- [3] ITER Documentation Series, No.29, (IAEA, Vienna, 1989)
- [4] ITER Documentation Series, No.30, (IAEA, Vienna, 1989)
- [5] K.Mohri et al.,First wall/blanket fabrication technology-HIP, FAPIG 114
(In Japanese)(1986)
- [6] K.Mohri et al.,Study on fabrication features of in-vessel components for
fusion nuclear reactor - soundness of hot isostatic pressuring joint, K.H.I.
Technical Review 98 (In Japanese)(1987)
- [7] K.Mohri et al.,First wall/blanket fabrication technology-Radiative cooled
armor tile first wall, FAPIG 127 (In Japanese)(1991)

付録A ブランケット筐体要素のH I P試作試験

A.1 目的

現在、核融合炉研究開発の一環としてブランケットの製作性検討が精力的に進められている。壁内部に冷却流路を有する第一壁の製作性においては、H I P装置を用いた製作手法が有力な手段の一つと考えられ研究開発が進められて来た。

H I P装置を用いた第一壁製作方法の一つとして矩形管方式と称されるものがある。これは2枚の平板の間に矩形管を組み込み、これを拡散接合（H I P接合）することによって冷却流路を有するパネルを成形するものである。本方式により第一壁を製作する上で重要な検討課題の1つに、H I P処理時の変形があげられる。H I P処理時に生じる変形は捩れ・曲げ等を伴う場合が多く、変形によっては後加工に多大な影響を与え、場合によっては第一壁構造体としての精度を満たさない可能性もある。この変形の主因としては、拡散接合前の構造体組立の際に僅かに存在するギャップ（矩形管方式の場合、拡散接合前の組立て段階において平板と矩形管との間に存在する隙間）が、拡散接合時において消滅することにより3次元的な変形を生じさせること、また、平板及び矩形管の肉厚の不均一性に起因すると思われるH I P処理後の構造体各部位の冷却速度の相違による熱応力が考えられる。

本研究は、精度を要求される第一壁及び筐体の製作性検討の一環として、矩形管方式におけるH I P接合時に構造体内部に存在するギャップの有無による変形の差異及び矩形管を挟む2枚の平板の肉厚差による変形の差異を要素試験レベルで検証すると共に筐体製作における基礎データに資することを目的とする。

A.2 製作方法及び検査方法

(1) 試験体製作方法

要素試験体の供試材は、核融合実験炉の第一壁構造材料として考えられているSUS316鋼とし、平板は厚さ3mm, 7mm及び22mm、矩形管は内面对辺距離10mm×8mm、厚さ2mmのものとした。

試験体の製作工程は、次下の通りである。

①試験体ブロックの加工及び組立

②H I P処理

③試験体の採取及び最終加工

まず、製作する試験体ブロックは冷却流路付きの約 $200^{\text{L}} \times 300^{\text{W}} \times 20\sim37^{\text{T}}$ 規模の平板型とし、ギャップの差異による影響を検討するため、平板材を波板状に加工したもの（削り出しによる一体型：コルゲート型）及び平面状のままのもの（平板型）の2種類を作製した。コルゲート型のギャップ部分のボイド率は、平板型のボイド率に対し約35%程度となる。また、矩形管を挟む2枚の平板の板厚差による影響を検討するため、一方の平板を3mmに固定し他方のみ7mm及び22mmの2種類の板厚のものを用いた。矩形管及び鋼板の各接合面の表面加工精度は▽▽▽で行った。Fig.A-1に、試験体ブロックの形状図（組立溶接図）を示す。また、試験体内部に存在するギャップの様子をコルゲート型についてはDetail-A、平板型についてはDetail-Bに示す。試験体ブロックの員数は1条件2体とし、合計8体製作した。Table A-1に、試験体ブロックの製作条件をまとめて示す。

試験体ブロックの組立・溶接においては、TIG溶接により矩形管及び2枚の平板の各境界を全周シーム溶接し、漏洩試験後、真空脱気処理を実施した。

②の工程では、組み上げた試験体ブロックを拡散接合の一種であるHIP法により接合処理を行った。使用したHIP装置は、最高加熱温度 1400°C 、最高加圧力 1500kgf/cm^2 の能力を有する装置である。本試験では、温度 1100°C 、圧力 1500kgf/cm^2 、保持時間 120分のHIP接合条件で処理を行った。

③の工程では、試験体ブロックより横断面形状及び冷却流路の断面形状を測定するための試験体（ $140^{\text{L}} \times 240^{\text{W}} \times \text{約}20\sim37^{\text{T}}$ ）及び接合率測定とマクロ観察のための金相試験用試験片を採取した。最終加工では採取した4条件8体の試験体の中から各条件1体（試験体No-2のもの）に対して、プレス装置による変形矯正施工を実施した。残りの試験体はHIP処理後の変形のままとした。なお、HIP処理における変形の状況が確認できるように、試験体の両外壁面には加工を施さず酸洗いのみ実施した。

(2) 検査項目

H I P 接合時に構造体内部に存在するギャップの有無による変形及び矩形管を挟む 2 枚の平板の肉厚差による変形の差異を確認すべく、試験体ブロック及び採取した試験体寸法計測を実施した。また、各試験体の接合状況を確認するために金相試験用試験片を用いて接合率の計測も行った。次に、検査要領の概要を示す。

a) 試験体ブロック外観寸法計測

計測対象 : 試験体ブロック

計測時期 : H I P 処理の前後

計測箇所 : 縦 (1 箇所)、横 (1 箇所)、厚さ (8 箇所) : Table A-2 参照

計測器具 : ノギス及びマイクロメーター

計測方法 : 厚さの計測は、試験体ブロックに圧痕を 8 箇所 (①~⑧) 施し、その箇所の肉厚をマイクロメーターにより計測した。

b) 試験体ブロック変形計測

計測対象 : 試験体ブロック

計測時期 : H I P 処理の後

計測箇所 : 外壁の薄板側 6 箇所 : Table A-3 参照

一般に変形は薄板側が凹となるため薄板側の面上を対象にした。

計測器具 : 金型定規 2 本

計測方法 : 金型定規を a) で施した圧痕上を通り尚且冷却流路方向と平行或は垂直方向にセットし、この金型定規と中間に位置する圧痕或は中央箇所との隙間を別の金型定規により計測した。

c) 試験体寸法計測

計測対象 : 試験体

計測時期 : 最終加工 (プレス) の前後

計測箇所 : 縦、横 (各 1 箇所)、

冷却流路の幅、高さ、支柱幅 (各 6 箇所) : Table A-4 参照

計測器具 : ノギス

d) 試験体接合率計測

計測対象 : 金相試験用試験片、試験体ブロックの残材より 1 片採取。

採取位置は、最外冷却流路に隣接する支柱（外面より 2 番目の支柱）の中央部。

計測時期 : 最終加工の後

計測箇所 : 板 - 管、管 - 管、管コーナ : Table A-5 参照

計測器具 : 画像解析装置

計測方法 : 1 画素 $0.42 \mu\text{m}$ に対して、2 値評価 [50% (累計 $0.21 \mu\text{m}$) を基準に未接合部の有無を判断し、もし 50% を越える場合はその 1 画素分を未接合部と判断する。] を行う方法で行った。

なお、本試験では測定長さは 1 mm で実施した。

A.3 試験結果及び考察

(1) 寸法検査結果及び外観検査結果

Table A-2 に試験体ブロックの外観寸法計測結果を示す。冷却流路方向 (L) の変形は、殆ど発生しておらず、ギャップの有無、鋼板の肉厚の差による影響は見られなかった。冷却流路と垂直な方向 (W) の変形は、全体的に板幅が圧縮する変形を生じており、変形量は第一壁相当（板厚 3mm/7mm : 平板型 S-22、コルゲート型 R-22）でギャップ有りの場合平均 5.8mm、ギャップ無しの場合 2.1mm、また、側壁相当（板厚 3mm/22mm : 平板型 S-35、コルゲート型 R-35）でギャップ有りの場合平均 2.5mm、ギャップ無しの場合 1.6mm であった。この結果より、ギャップをなくすことによりそれぞれ変形を 50% 及び 70% 以下に減少させることが可能なことが分かる。また、板厚 (T) に関しては、矩形管両側の平板の肉厚の差による有意差は見られなかつたが、ギャップの有無による変形量はギャップ有の平板型の場合で 1.2 ~ 1.3mm の圧縮変形、ギャップ無のコルゲート型の場合で 0.4 ~ 0.5mm の圧縮変形と明らかな有意差を生じた。

Table A-3 に試験体ブロックの変形量計測結果を示す。冷却流路と垂直な方向 (W) の反り変形に関しては、第一壁相当 (S-22, R-22) でギャップ有りの場合平均 6.5mm、ギャップ無しの場合 2.7mm、また、側壁相当 (S-35, R-35) でギャップ有りの場合 1.4mm、ギャップ無しの場合 0.7mm とギャップをなくす（あるいは低減する）ことにより変形量は共に半分以下に軽減できている。また、側壁相当 (S-35, R-35) の変形量は第一壁相当 (S-22, R-22) の変形量の 30%以下に軽減されており、矩形管両側の平板の肉厚の差による有意差もかなりあることが分かる。一方、冷却流路方向 (L) の変形は、0.2mm 以下と僅かに発生している程度で、ギャップの有無、鋼板の肉厚の差等による有意差は見られなかった。

試験体ブロックより採取した試験体の外観状況を、Fig. A-2 に示す。図には、薄板側の外壁面及び冷却流路横断面の状況を示した。平板型の場合、ギャップを埋めるべく外壁が変形しギャップに沿う形で外壁面に溝が形成されたのに対して、コルゲート型の場合ボイド率が低いため部分的な変形に留まっている。

Table A-4 に、試験体ブロックより採取した試験体の冷却流路の寸法計測結果を示す。なお表中には矯正施工前（プレス前）の寸法も併記した。表より、平板の肉厚の差による有意差及び冷却流路の幅、支柱幅に対するギャップの有無による有意差は見られないが、冷却流路の高さに関してギャップの有無による差は顕著に見られ、8mm の使用矩形管高さに対して平板型は 6.8mm と 1mm 以上もの圧縮変形（変形率約 15%）を生じたのに対してコルゲート型は約 7.8mm と僅かに圧縮変形（変形率約 3%）を生じている程度であることが分かった。

Fig. A-3 に、冷却流路横断面の外観写真を示す。コルゲート型と平板型を比較すると、冷却流路のコーナ部の形状が平板型は矩形に近い形状なのに対して、コルゲート型は幾分丸みを帯びた形状となっている。

以上の検査結果から以下のことが推察される。

- ① H I P における変形は、全体圧縮変形で、特に顕著な変形は板厚方向の変形及び冷却流路と直角方向 (W) の反り変形である。他の変形は、微少である。
- ②ギャップの影響に関しては、平板型では板厚方向の変形及び反り変形が 1.2mm (変形率 15%) 及び 6.5mm* とかなり大きな変形であるのに対して、ボイド率を下げたコルゲート型 (ボイド率 35%) は、板厚方向の変形 0.2mm (変形率 3%) 反り変形

2.7mm*と変形が大幅に軽減されており、ギャップのボイド率を下げるによることによる変形の大幅な改善が期待できることを示している。後加工の難度を考慮すると、ギャップのボイド率を下げた方式での製作が好ましい。

* : 第一壁相当

③鋼板の板厚の増加により、大幅に反り変形は軽減されるが、板厚方向の変形には余り効果は見られない。

(2) 金相試験結果

Fig. A-4 に、冷却流路のマクロ写真を示す。図中の試験片は、10% シュウ酸電解エッチング処理を施したもので倍率7倍で撮影した。冷却流路を形成する矩形管の外面（管-外壁及び管-管との接合部）の形状は、平板型の場合ギャップを埋めるべく大きく変形しているのに対して、コルゲート型は殆ど変形せず矩形管の原形をとどめているのが観察できる。また、冷却流路を形成する矩形管の内面の形状は、Fig. A-3 において観察された形状（平板型は矩形、コルゲート型は丸みを帯びた形状）とほぼ同じ状況では有るが、平板型の場合矩形管の変形が大きいことによるものかコーナ部分において部分的に鋭角を成す箇所が観察された。このような箇所は使用条件にもよるが、応力集中を生じやすいため健全性の観点からは避けることが望ましい。

(3) 接合率の測定結果

Table A-5 に画像解析装置による未接合率の測定結果を示す。また、Table A-6 に矩形管の外周比率と Table A-5 の結果を基に算出した各要素試験体の接合率（全体平均値）を示す。接合率は平板型で93～94% コルゲート型で94～95% とコルゲート型が多少高い結果であった。また、鋼板の板厚の差による有意差は見られなかった。

過去のデータ（接合率約97%）^[7]と比較すると本接合率の結果は幾分低い値であった。この原因として、金相用試験片を試験体ブロックのシーム溶接部近傍より採取したことが主因と考えられる。また、プランケットモジュールの製作を考慮して HIP 处理圧力を国内における現有最大容量の HIP 装置の圧力である 1500 kgf/cm^2 に設定したことも影響しているものと考えられる。今後は、接合率向上に向けた接合面の表面粗度の改善検討及び試験体ブロック中央部分の接合率評価を実施する必要がある。

A.4 まとめ

本試験により、次に示す結果を得た。

- ①H I Pにおける変形は、全体圧縮変形で、特に顕著な変形は板厚方向の変形及び冷却流路と直角方向の反り変形である。
- ②ギャップのボイド率を下げるにより、H I P処理において発生する変形が大幅に軽減される。
- ③鋼板の板厚を厚くすることにより、反り変形は軽減するが、板厚方向の変形には余り効果はない。
- ④接合率は、平板型で93～94% コルゲート型で94～95% であった。

今後は、次のような製作検討を実施する必要がある。

- ①製作性を考慮したギャップのボイド率低減のための技術的検討
- ②高接合率継手を得るための製作検討。
- ③H I P処理済継手要素の高温強度特性試験（引張、疲労、クリープ試験、他）
- ④H I P処理済継手構造物の構造健全性試験（内圧疲労、熱疲労、他）
- ⑤接合率評価用非破壊検査方法の検討

Table A-1 Fabricating-test condition.

Shape of plate	T-gap ¹⁾	Number of test -blocks	Thickness of test-block (mm)				Remarks
			Flat plate	Rectangular tube	Flat plate	Summa -tion	
Corrugated plate	Small	2	3	$12^{2)} \times 2^t$	7	22	as first wall
		2	3	$12^{2)} \times 2^t$	22	37	as side wall
Flat plate	Large	2	3	$12^{2)} \times 2^t$	7	22	as first wall
		2	3	$12^{2)} \times 2^t$	22	37	as side wall

1):T-gap which is formed by two rectangular tubes and a plate.

2):Outer size

Table A-2 Measurement of test-block dimension.

Num.	HIP pro- cess	Length (mm)		Thickness ¹⁾ (mm)								
		L	W	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	ave.
R-22-1	before	199.9	301.9	22.5	22.6	22.5	22.6	22.5	22.5	22.5	22.4	22.5
		after	299.4	22.5	21.9	21.8	22.1	22.0	22.1	22.1	22.1	22.0
Small	diff.	0.0	-2.5									-0.5
R-22-2	before	199.8	301.9	22.2	22.2	22.1	22.5	22.2	22.6	22.5	22.2	22.3
		after	300.2	21.8	21.8	21.7	22.0	21.9	21.6	21.9	21.9	21.8
Small	diff.	0.1	-1.7									-0.5
S-22-1	before	199.9	301.7	22.2	22.2	22.0	22.1	22.1	22.1	22.2	22.2	22.1
		after	295.9	20.9	20.8	20.8	20.9	20.8	21.0	20.9	21.1	20.9
Large	diff.	-0.1	-5.8									-1.2
S-22-2	before	200.0	301.8	22.2	22.3	22.2	22.2	22.2	22.2	22.3	22.2	22.2
		after	296.1	21.0	20.8	20.8	21.0	21.0	20.9	20.8	20.8	20.9
Large	diff.	-0.1	-5.7									-1.3
R-35-1	before	200.0	301.8	37.1	37.3	37.2	37.1	37.2	37.3	37.3	37.1	37.2
		after	300.4	36.7	36.8	36.8	36.7	36.8	36.9	36.8	36.8	36.8
Small	diff.	-0.1	-1.5									-0.4
R-35-2	before	199.8	302.0	37.6	37.8	37.6	37.6	37.7	37.8	37.7	37.7	37.7
		after	300.4	37.2	37.3	37.3	37.3	37.4	37.4	37.4	37.3	37.3
Small	diff.	0.1	-1.6									-0.4
S-35-1	before	200.0	301.8	37.2	37.2	37.1	37.2	37.1	37.1	37.2	37.1	37.2
		after	299.1	35.9	35.7	35.9	36.0	35.8	36.0	35.8	36.0	35.9
Large	diff.	-0.1	-2.7									-1.3
S-35-2	before	199.9	301.7	37.2	37.2	37.1	37.3	37.2	37.2	37.4	37.2	37.2
		after	299.4	35.9	35.7	35.9	36.0	36.0	35.9	35.8	36.0	35.9
Large	diff.	-0.1	-2.4									-1.3

1):Clearance gauge was used.

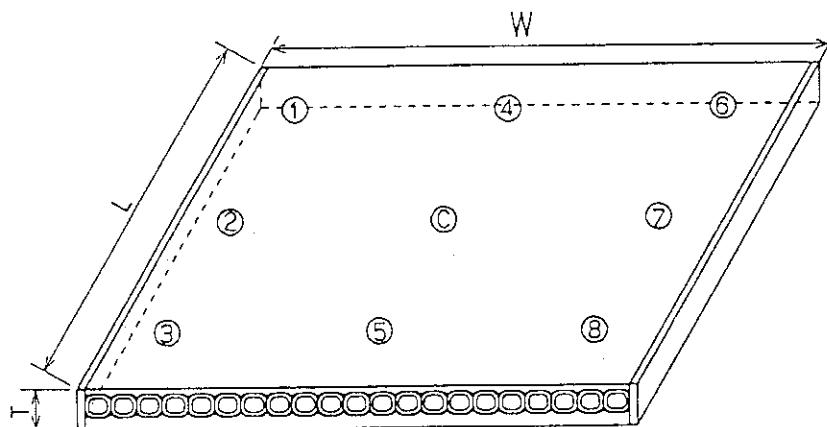


Table A-3 Deformation of test-block.

Direction of ruler	Location of meas- urement	Measured value ¹⁾ (mm)							
		R-22-1	R-22-2	S-22-1	S-22-2	R-35-1	R-35-2	S-35-1	S-35-2
①-⑥	④	2.60	2.72	6.83	6.20	0.87	0.62	1.11	1.50
②-⑦	c	2.71	2.68	6.82	6.28	0.87	0.58	1.35	1.53
③-⑧	⑤	2.65	2.62	6.70	6.18	0.81	0.50	1.38	1.22
average		2.65	2.67	6.78	6.22	0.85	0.57	1.28	1.42
⑥-⑧	⑦	0.17	0.04	0.19	0.08	0.18	0.15	0.12	0.13
④-⑤	c	0.21	0.11	0.13	0.10	0.24	0.21	0.15	0.17
①-③	②	0.20	0.18	0.23	0.13	0.10	0.18	0.18	0.20
average		0.19	0.11	0.18	0.10	0.17	0.18	0.15	0.17

1):Clearance gauge was used.

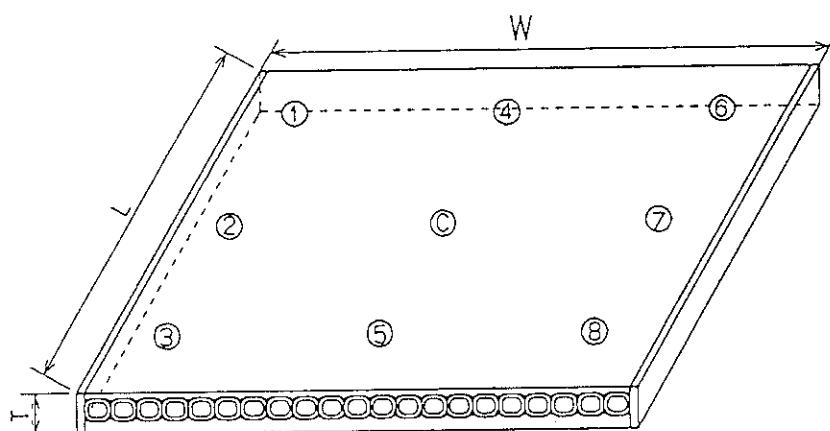


Table A-4 Measurement of cooling channel size in the test-blocks.

(mm)

Test-block No.	R-22-1	R-22-2	S-22-1	S-22-2	R-35-1	R-35-2	S-35-1	S-35-2
press working	—	before after	—	before after	—	before after	—	before after
H (10mm)	① 10.25	10.15	10.18	9.90	10.27	10.30	10.10	10.05
	② 10.20	10.15	10.15	10.10	10.15	10.20	10.15	10.13
	③ 10.15	10.13	10.18	9.90	10.25	10.23	10.05	10.00
	④ 10.30	10.10	10.15	9.95	10.05	10.13	10.05	10.25
	⑤ 10.13	10.23	10.22	9.90	10.25	10.30	10.25	10.25
	⑥ 10.05	10.02	10.00	9.80	10.20	10.25	10.15	10.15
average	10.18	10.13	10.15	9.92	10.20	10.24	10.13	10.10
a (8mm)	① 7.90	7.75	7.63	6.80	6.85	6.65	7.80	7.85
	② 7.90	7.77	7.73	6.80	6.85	6.65	7.70	7.75
	③ 7.95	7.85	7.75	6.95	6.90	6.65	7.85	7.90
	④ 7.82	7.75	7.55	6.90	6.90	6.60	7.88	7.88
	⑤ 7.87	7.75	7.73	6.87	6.73	6.58	7.67	7.85
	⑥ 7.85	7.84	7.82	6.93	6.83	6.73	7.80	7.80
average	7.88	7.79	7.70	6.88	6.84	6.64	7.78	7.82
t (4mm)	① 3.85	3.85	3.83	3.80	3.75	3.80	3.78	3.75
	② 3.75	3.87	3.95	3.90	3.73	3.75	3.85	3.80
	③ 3.80	3.85	3.85	3.90	3.70	3.70	3.83	3.85
	④ 3.85	3.80	3.83	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80
	⑤ 3.75	3.90	3.93	3.90	3.83	3.83	3.90	3.90
	⑥ 3.85	3.80	3.85	3.85	3.70	3.75	3.80	3.85
average	3.80	3.85	3.87	3.86	3.75	3.77	3.83	3.84

(): Standard value

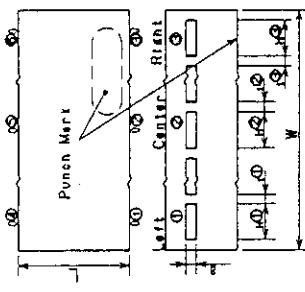


Table A-5 Measurement of non-bonding ratio.

Location	Non-bonding ratio (%)								Remarks
	R-22-1	R-22-2	S-22-1	S-22-2	R-35-1	R-35-2	S-35-1	S-35-2	
①	5.9	5.7	4.5	6.8	4.6	5.3	4.0	6.9	
②	4.7	4.4	5.6	6.7	2.3	5.2	6.3	6.7	
③-1	5.7	4.9	4.9	5.9	4.4	4.9	7.1	5.5	
③-2	1.9	4.6	4.8	4.8	7.0	5.6	6.4	7.1	
④	5.0	8.1	8.2	7.9	4.5	4.7	6.9	7.5	
⑤-1	4.1	7.6	5.3	6.3	5.9	5.6	4.6	6.7	
⑤-2	5.1	3.0	4.5	4.5	5.3	5.5	5.3	5.7	
⑥	5.2	4.4	5.8	5.1	7.5	6.0	6.3	4.9	
⑦	2.9	5.4	8.1	6.0	3.2	4.5	8.7	7.5	

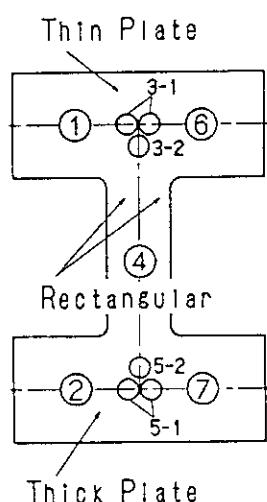
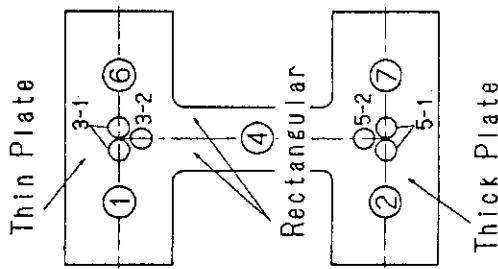


Table A-6 Average bonding ratio of test-block.

Location	Expression	Bonding ratio (%)					
		R-22-1	R-22-2	S-22-1	S-22-2	R-35-1	R-35-2
thin plate/tube :A	$\{1-n^1\}$	94.4	94.4	94.8	94.3	93.9	94.3
corner of tube ²⁾ :B	$\{\textcircled{1}+\textcircled{6}\}/2$	96.2	95.2	95.1	94.6	94.3	94.7
tube/tube :C	$\textcircled{4}$	95.0	91.9	91.8	92.1	95.5	95.3
corner of tube ³⁾ :D	$\{\textcircled{5}-1+\textcircled{5}-2\}/2$	95.4	94.7	95.1	94.6	93.7	94.2
thick plate/tube:E	$\{\textcircled{2}+\textcircled{7}\}/2$	96.2	95.1	93.1	93.6	97.2	95.1
average of total values ⁴⁾		95.4	94.1	93.7	93.6	95.0	94.8

1) :see Table 5, 2) :thin plate side, 3) :thick plate side, 4) : $A \times 20\% + B \times 20\% + C \times 20\% + D \times 20\% + E \times 20\%$ 

Corrugated Plate-Type

Flat Plate-Type

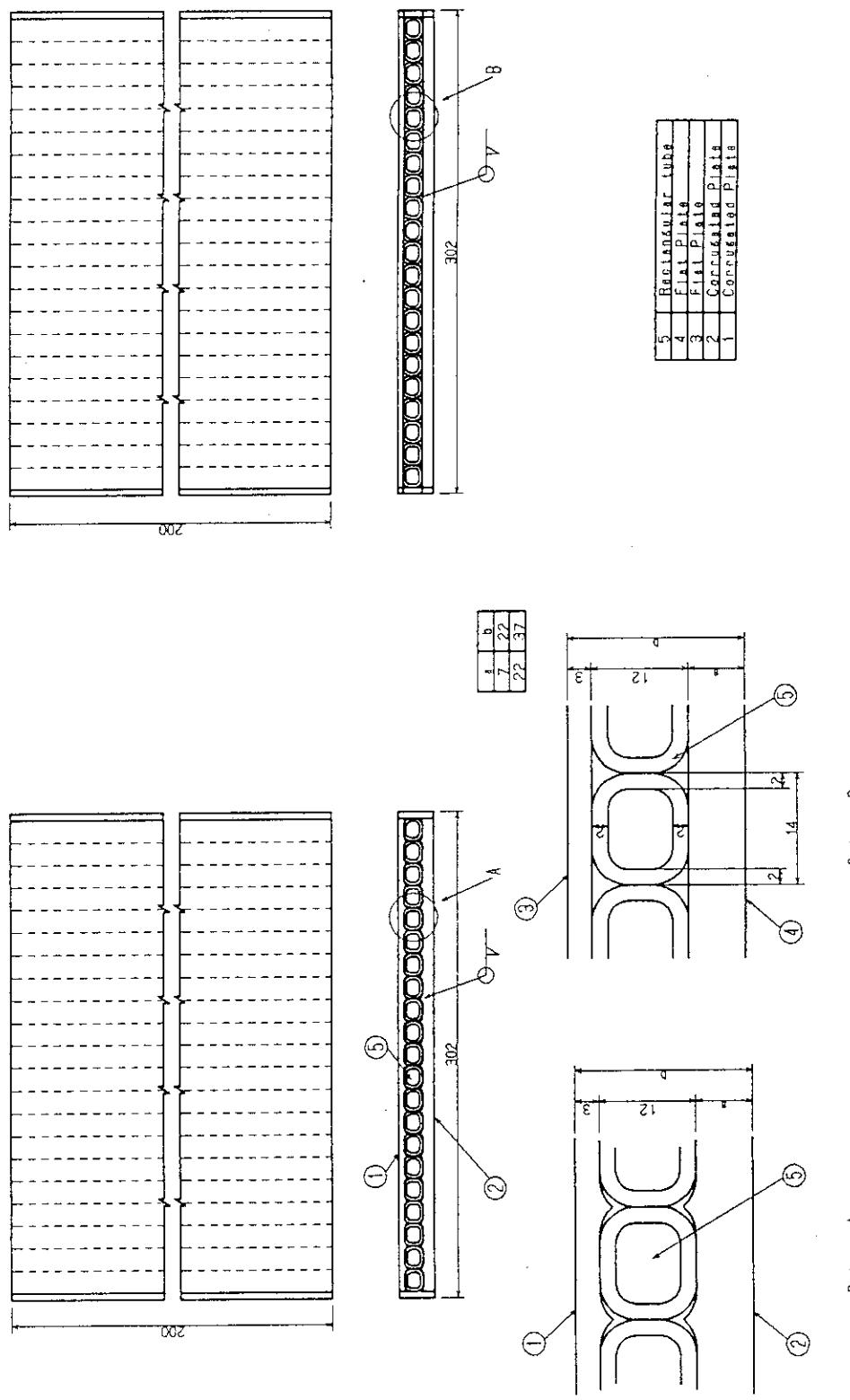
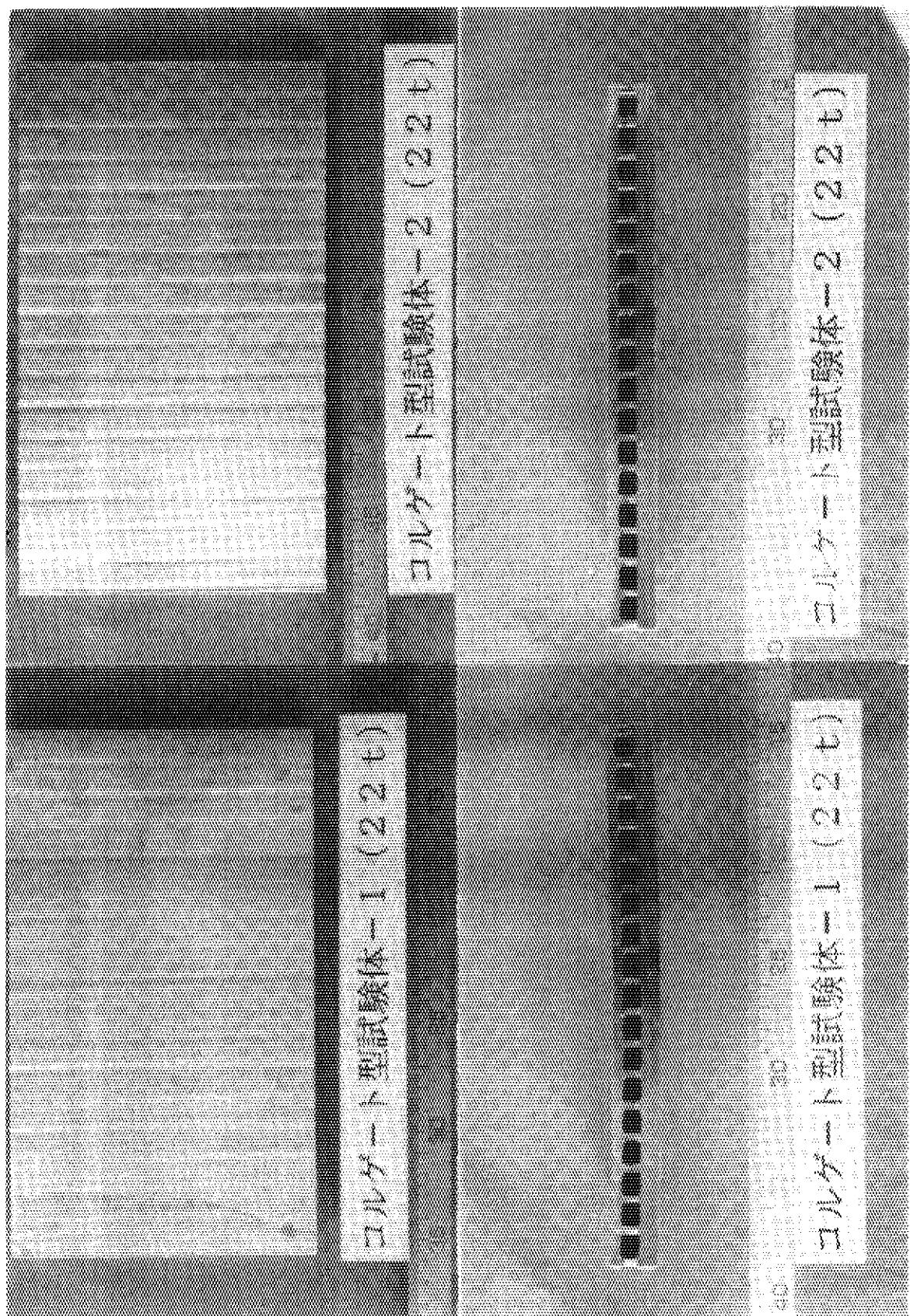
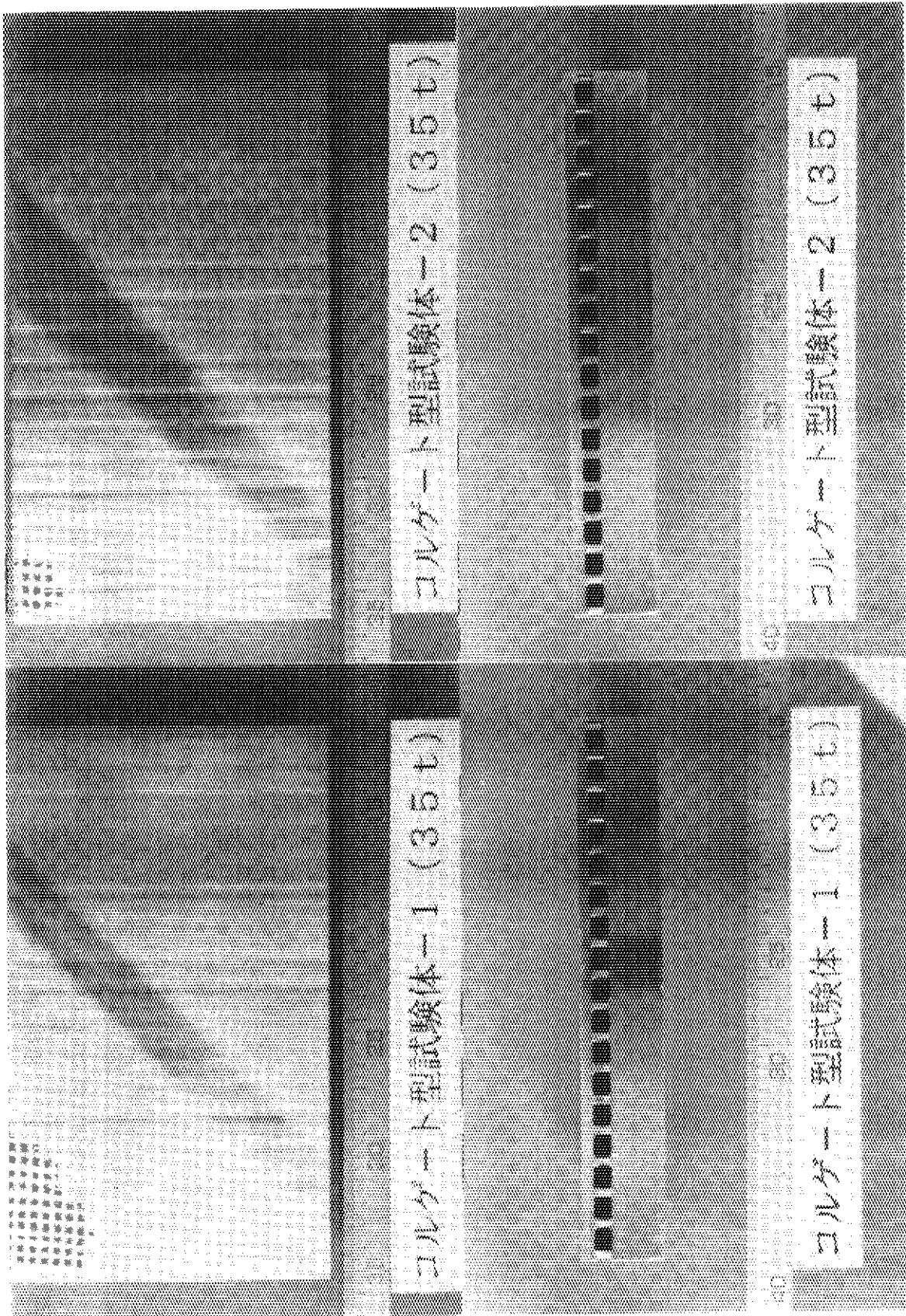


Fig. A-1 Test-block for HIP Processing.



(a) Test-block of corrugated plate-type R-22-1 (b) Test-block of corrugated plate-type R-22-2

Fig. A-2 Appearance of the test-block (1/4)-with corrugated plate-type.



(a) Test-block of corrugated plate-type R-35-1 (b) Test-block of corrugated plate-type R-35-2

Fig. A-2 Appearance of the test-block (2/4)-with corrugated plate-type.

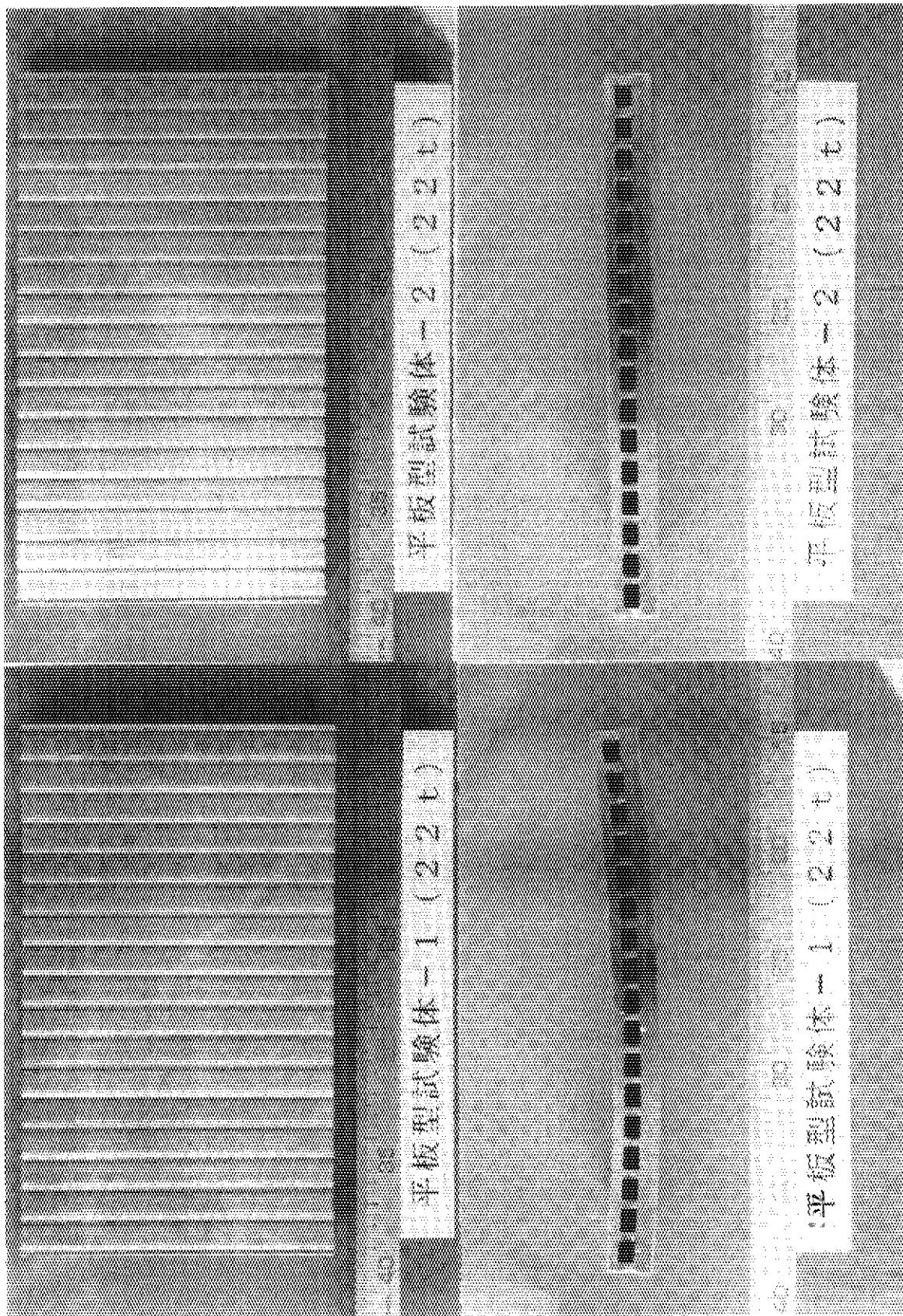


Fig. A-2 Appearance of the test-block(3/4)-with flat plate-type

(a) Test-block of flat plate-type S-22-1

(b) Test-block of flat plate-type S-22-2

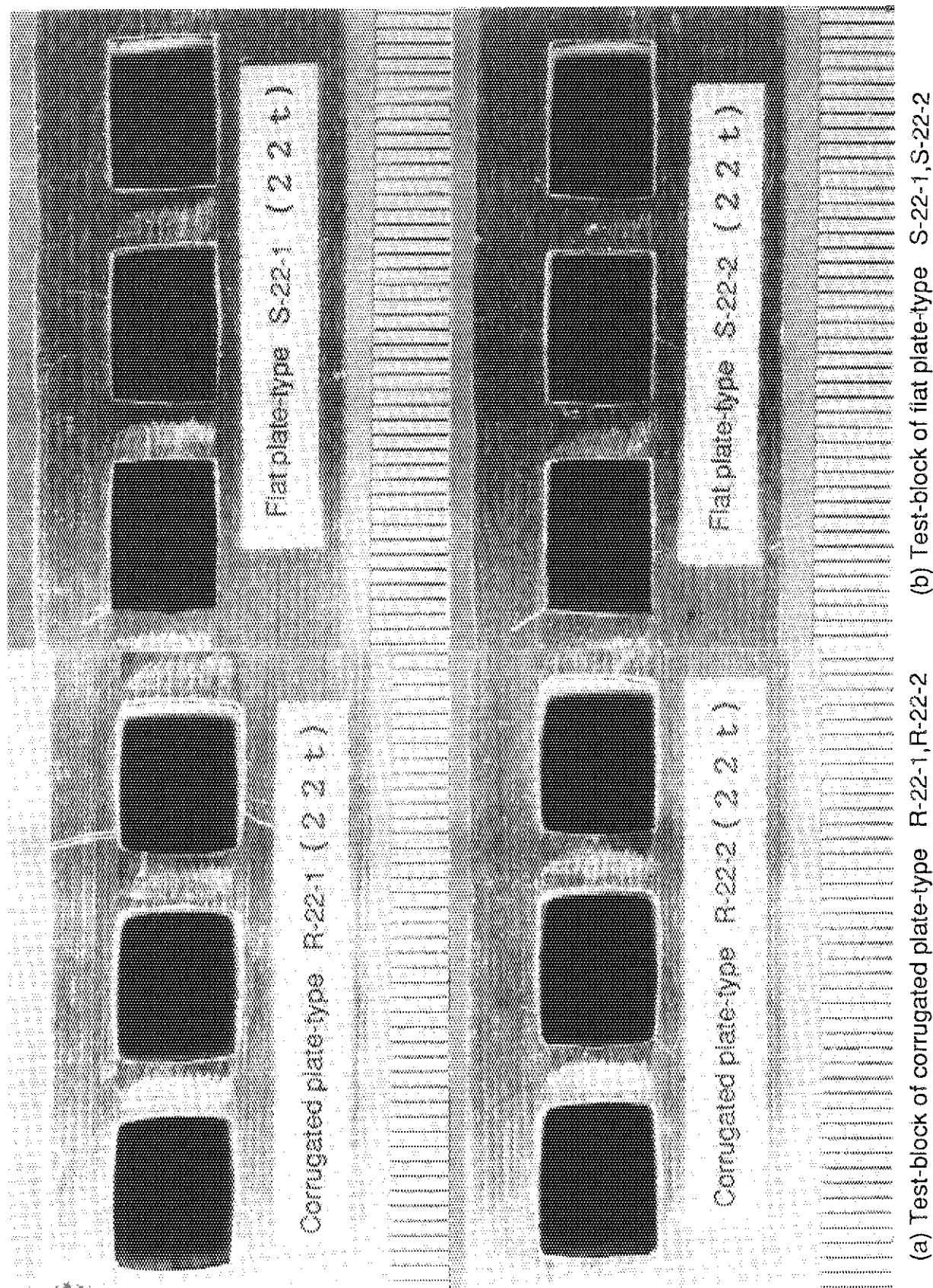


Fig. A-3 Appearance of the cooling channel in the test-block (1/2).

(a) Test-block of corrugated plate-type R-22.2 (b) Test-block of flat plate-type S-22.1,S-22.2

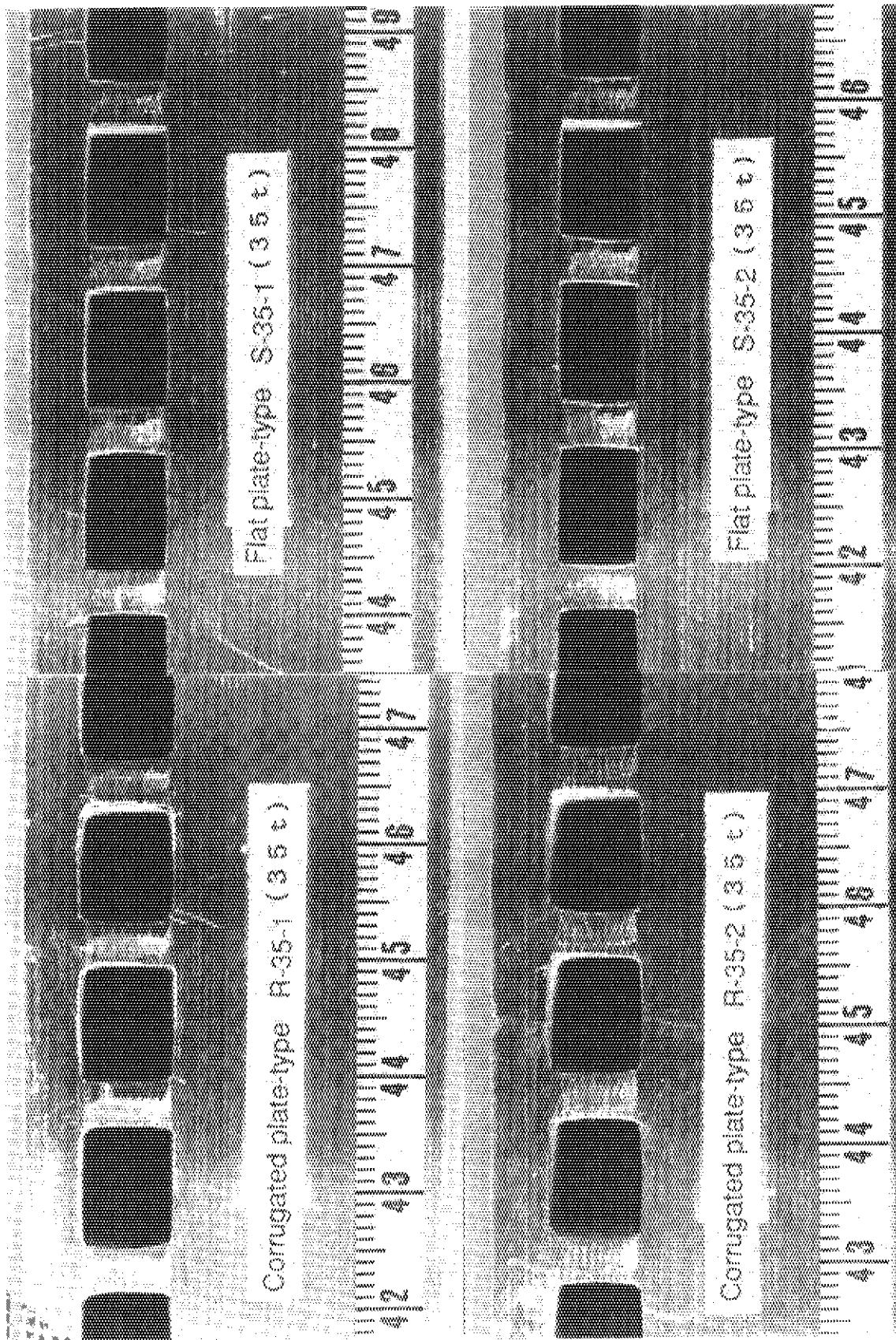
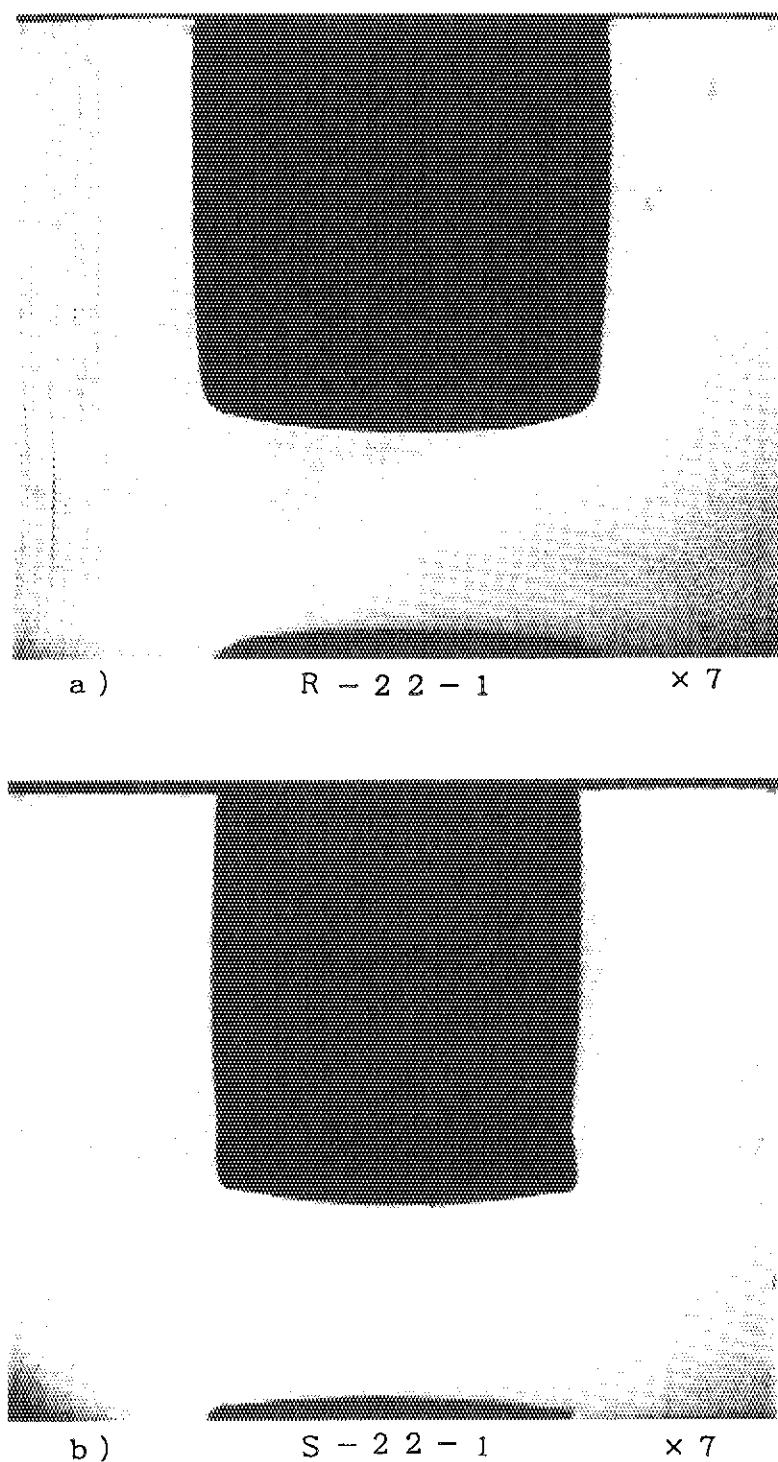
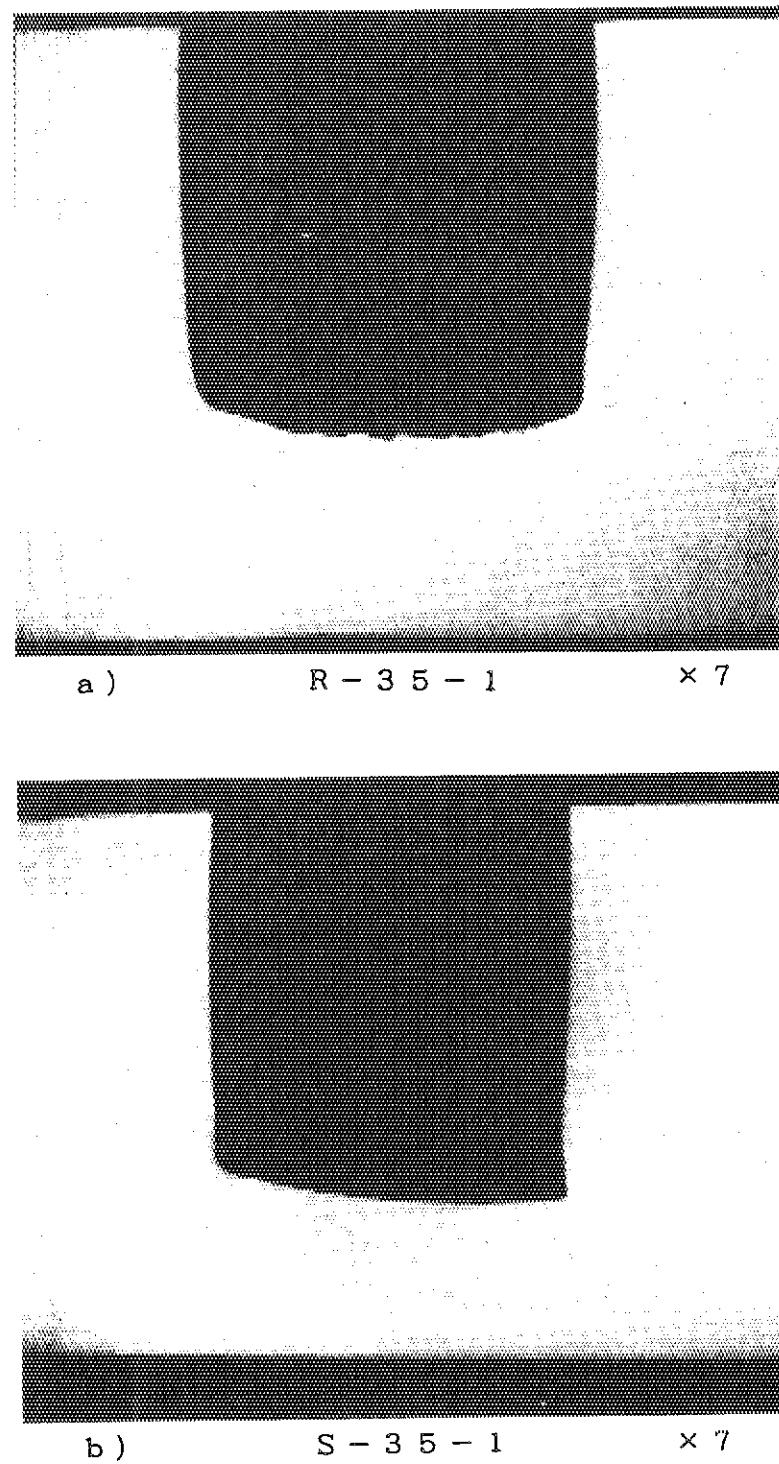


Fig. A-3 Appearance of the cooling channel in the test-block (2/2).



(etching by 10% oxalic acid electrolytic solution)

Fig. A-4 Sectional macro-structure of bonded part by HIP (1/2).



(etching by 10% oxalic acid electrolytic solution)

Fig. A-4 Sectional macro-structure of bonded part by HIP (2/2).