

ロストワックス法による精密鑄造品の製造

Production of Large Sized Investment Castings — Production of Jet Pump Nozzle for Nuclear Plant —

Demands for investment castings are growing increasingly because of their superior characteristics such as precise dimensions, smooth surfaces, internal soundness, etc. However, no larger investment castings than several kilograms were not available because the wax and ceramics used in this casting method were not strong enough to form large wax patterns and ceramic shells required. Recently, an entirely new casting process was developed at the Katsuta Works, Hitachi, Ltd. which could produce far larger castings than before. By this new process the authors succeeded in producing an investment casting as heavy as 57 kilograms for a jet pump nozzle for nuclear plant use. This big casting satisfied the rigid specification requirements of this sort of products, including close tolerance, fine surface, and internal soundness.

蜂須幹雄* *Mikio Hachisu*

梅田忠司** *Tadashi Umeda*

1 緒 言

沸騰水型原子炉の炉心部には18-8系ステンレス鋼の鑄造品が多数使われるが、寸法精度および内部性状に関する仕様が満たすため大部分は高温鑄型による精密鑄造品が使われている。これらの精密鑄造はいずれも分割した鑄型を組み立てて用いる方式のもので、ショウプロセスやユニカスト法および日立製作所独自のHCプロセスなどである。

しかし本稿にて扱うジェットポンプノズルの寸法は、各部分の断面の中心と全体の中心線とのずれを規定値以下に押えることがきわめて重要であるが、分割型の組立て方式では型合せの作業において誤差が生ずるため製作が困難なものとなっている。

ロストワックス法による精密鑄造は非分割の高温鑄型を使うので寸法精度、内部性状ともにすぐれ、かつ鑄はだが滑らかで美しいことから最も望ましいものである。しかし、ワックス（ろう）の模型を使用することおよび鑄型強度に限度があるなどの理由で従来は最大数キログラムの鑄物にしか適用できなかった。ジェットポンプノズルは単重が57kgに及び大幅に適用範囲を越えている。これに対し現在国内外のロストワックスメーカーではこうした大形精鑄技術の開発や導入が盛んである。日立製作所でもかねてから調査と研究を行っていたが実用化の見通しが得られたためこのほどジェットポンプノズルの試作を行ない、その結果満足すべき良品の得られることが確認され製造を開始した。

2 製作仕様

原子炉内部構造物のジェットポンプノズル（図1）は圧力容器内の循環ポンプノズルとして炉の中心を構成する機器である。圧力容器内は一度運転されると点検、補修を行なうことは困難であるため炉内構造物の製作には材料から製造、検査まで万全の注意が払われており表1に示す品質が要求されている。

3 製造工程と大形品製造の特徴

製造工程の大要は小形のロストワックスと全く同様に図2に示すとおりである。

工程の諸段階で製品が大形化するために起こりうる問題として下記の諸点が予想されたが、結果的にも大形ロストワックス法の要点と考えられるので、以下にこれらを中心にして製造の経過を述べる。

- (1) ワックス模型が大形化する場合の変形を防ぐこと。
- (2) 鑄造系の設計において変形防止や補給などに関し小形品と異なる点を補償すること。
- (3) 耐火物層（すなわち、鑄型）は注湯のときに高い溶湯圧力に耐えるものであること。

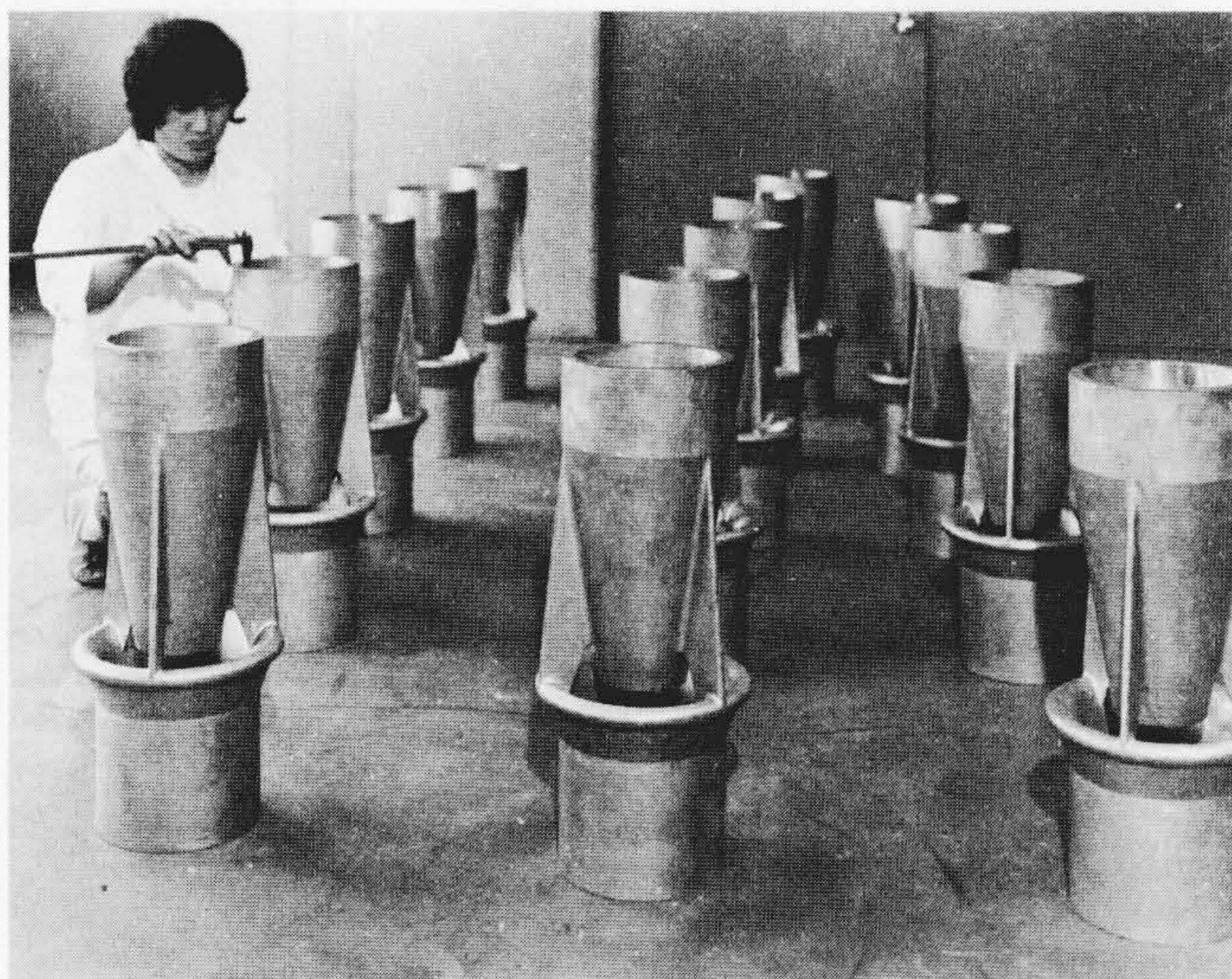


図1 原子炉用ジェットポンプノズル（ロストワックス法による精密鑄造品） 完成した精密鑄造品を示す。沸騰水型原子炉の炉心に使われるジェットポンプノズルは1個の重量が57kgあり、厳しい寸法精度と滑らかな鑄はだが要求される。

Fig. 1 Jet Pump Nozzle for Nuclear Plant

* 日立製作所鑄鍛事業部

** 日立製作所勝田工場

4 ワックス模型の製作

ジェットポンプノズルの形状は羽根部分で入りくんでいるため、金型だけの組合せでワックス模型を成形することができない。この解決法のひとつに水溶性ワックスの使用が有効である。水溶性ワックスは図3に示すとおり、あらかじめ別の金型にて成形しておき、あたかも主金型的一部分のように主金型に組み込んで模型用ワックスを射出成形する。これを水洗することにより水溶性ワックスは溶け去って目的とする模型ワックスだけが残る。金型だけでは成形できない形状のワックス模型を得るために用いるこのような方法はロストワックス法のひとつの長所である。

金型製作の際の伸尺は小形品の場合の経験が活用できた。ワックス模型が大形化すると、ワックスの凝固収縮と成形後の曲りや反りが問題となる。この両者に対して有効なのはワックスの選定であり、使用するワックスの材質を吟味し、収縮が少なく凝固後の剛性の高い銘柄を選定した。次に凝固収縮はワックスの射出圧力を高くすると著しく改善できるので、金型の耐圧を高く設計するとともに、型締め圧力が最大 100 t まで可能な大形ワックス射出成形機を装備し高い射出圧で成形した(図4)。

5 鋳造方案

2本の厚肉パイプを3枚の薄い羽根でつないだ形のジェットポンプノズルは鋳造時の応力などで起こる羽根部の曲りを防ぐことおよび厚肉パイプ部への効果的な押湯効果を与えることを主眼に鋳造方案を作成した。また、曲りを防ぐために縦位置鋳込みを行なうとともに3枚の羽根に対応させて、3本の湯道を立てて鋳造系全体の平衡を保った。なおこの3本の湯道はたたき出しの後も一部を切り離さずに残し、溶体化熱処理時の曲り変形を防ぐ支柱としても利用した。湯道系の組立てが完成したワックス模型は、図5に示すとおりである。

表1 原子炉用ジェットポンプノズルのおもな製作および検査仕様 製作仕様と検査仕様の要点を抜粋したものを示す。

Table 1 The Specifications of the Jet Pump Nozzle	
(a) 製作仕様	
項 目	仕 様
成 分 規 格	ASTM A351 CF-8(18-8ステンレス鋼)を基準とし Cr/Ni≧1.9%, Co≦0.25%, Nb+Ta+Ti≦0.1が追加仕様となる。
鋳 は だ	50S以下(ただし、部分的に流路などは25S以下)
寸 法 精 度	最大外径: 205φ±1.5, 羽根の付け根: 1.5R±0.7 心のずれ: 1.5R以下
寸 法	205φ±1.5(最大外径)×625±2(長さ)
完 成 重 量	57kg
(b) 検査仕様	
項 目	仕 様
化 学 成 分	とりへ分析と本体からのチェック分析を併用する。
機 械 的 性 質	ASTM規格に基づく。
外 観 検 査	形状, 表面状態
液体浸透探傷試験	全面検査
ミ ク ロ 組 織	1. 熱処理後のミクロ組織は完全なオーステナイト組織, またはオーステナイト地と不連続なδフェライトの粒子で構成される二相組織 2. 非金属介在物を含まないこと。
放 射 線 検 査	ASTM E-71により判定する。 羽根部は2級以上, その他は3級以上とする。

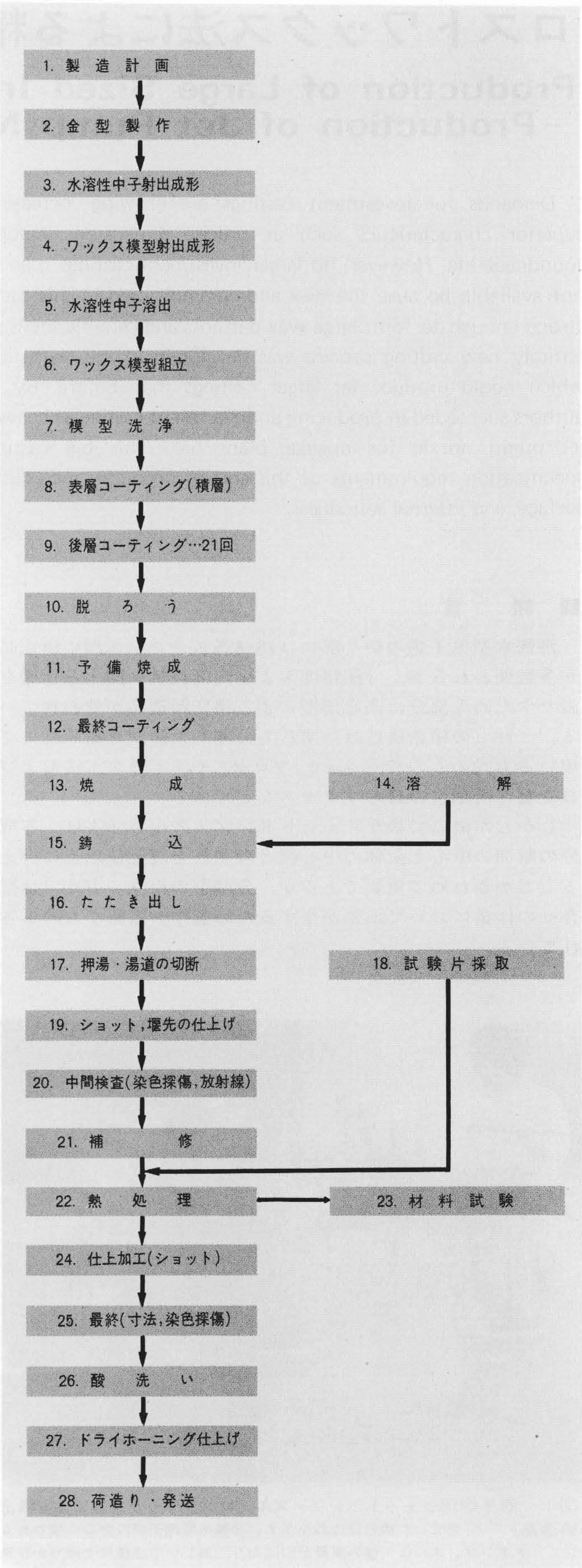


図2 ロストワックス法によるジェットポンプノズルの製造工程 ロストワックス法による精密鋳造法の一般的な工程を基準としつつ大形化による特殊な作業などを組み込んだ工程を示す。

Fig. 2 The Flow Chart for Investment Casting of Jet Pump Nozzle

6 鑄型製作

ワックス模型に耐火物の層を塗り付ける作業は、ワックスや耐火物の室温変化による膨張収縮を避け、かつ塗付した耐火物の乾燥条件を制御するため恒温・恒湿室で行なわねばならない。特に大形品はわずかな変化であっても影響が大きく現われるため、温度管理を慎重に行なった。また表面積が広いので各部分に均等な乾燥をさせるため湿度の均等化に苦心した。

作業自体は小形のロストワックスと同じで、泥漿(しょう)状の耐火物(スラリー)を入れたタンクにワックス模型を浸せきした後、耐火物の微粒(スタッコ)を振りかけこれを乾燥させる。これをくり返して所定の厚さの耐火物層を得た。最

終の厚さは15～20mmで、これを得るための積層回数は計24回になったが、これは小形品の3～4倍に相当する。耐火物層の強度はロストワックス法の主要な管理項目のひとつで毎週1回以上確認する。図6は単位厚さあたりの強度管理図の一部を示すものである。

ワックス模型が約25kgあり、耐火物層が最終的には60kg以上になるため、作業の取扱いは小形品のように人力で扱う限度を超える。これに対し図7に示す平衡式ホイストを用いて微妙な積層作業を人力同様に行なうことができた。

耐火物層が形成されればワックスは役目が終わり、蒸気加熱にてワックスを溶かし出した。圧力容器(オートクレーブ)に入れ、圧力7 kg/cm²(約150℃)にて30分間の加熱を行なった。大形品はこの脱ろう中に鑄はだ割れを起こしやすいので

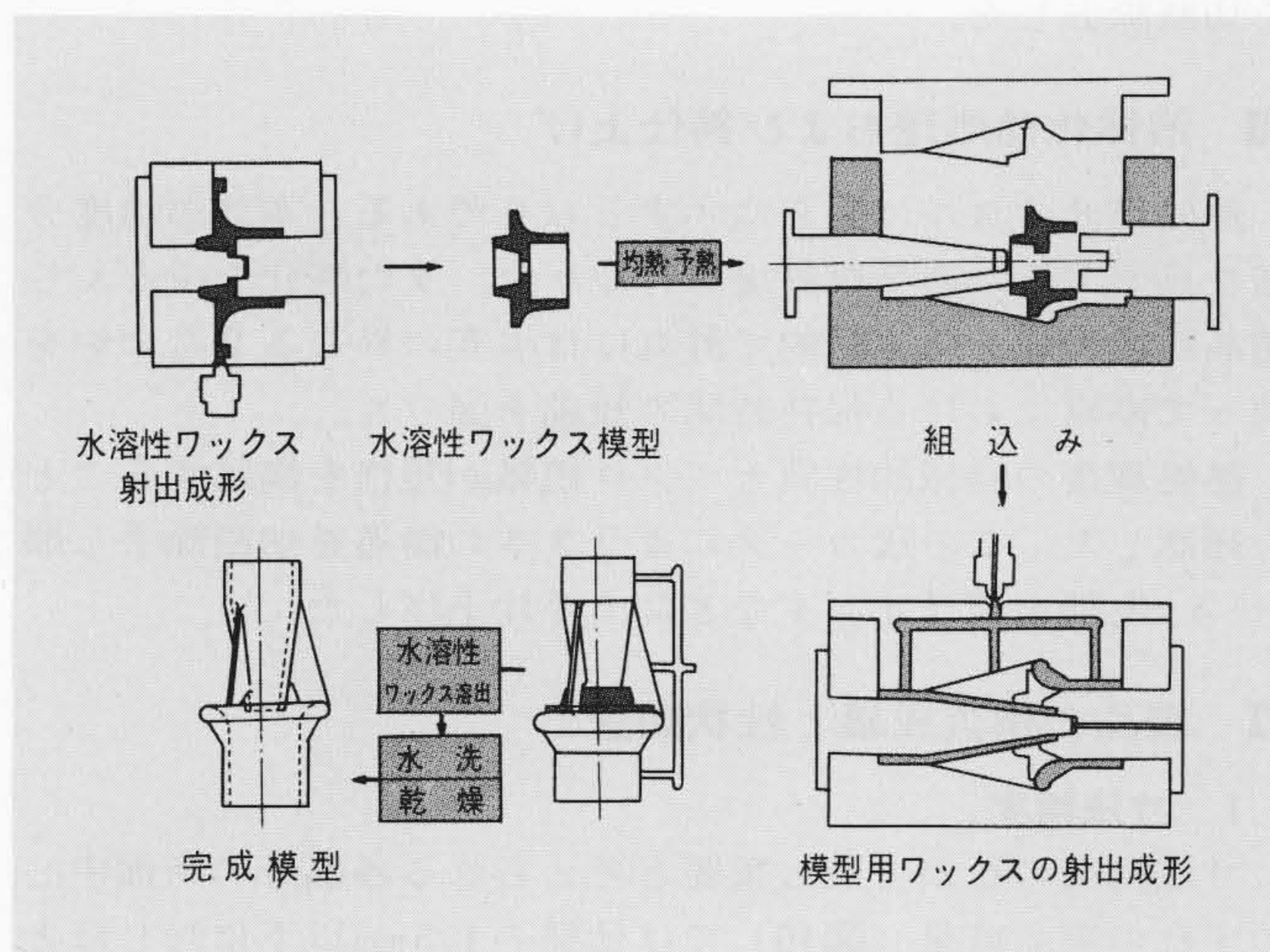


図3 ジェットポンプノズルのワックス模型成形法 ロストワックス法は、まずワックス模型を製作することから始まるが、水溶性中子の効果的な適用により金型では成型できない形状の模型も作ることができる。

Fig. 3 Wax Pattern Making for Jet Pump Nozzle



図5 完成したワックス模型 金型にて成形したワックス模型のほか、湯道もワックスにて作り、組み合わせて完成したものを示す。

Fig. 5 Wax Pattern, Jointed to Wax Runners as the Casting System

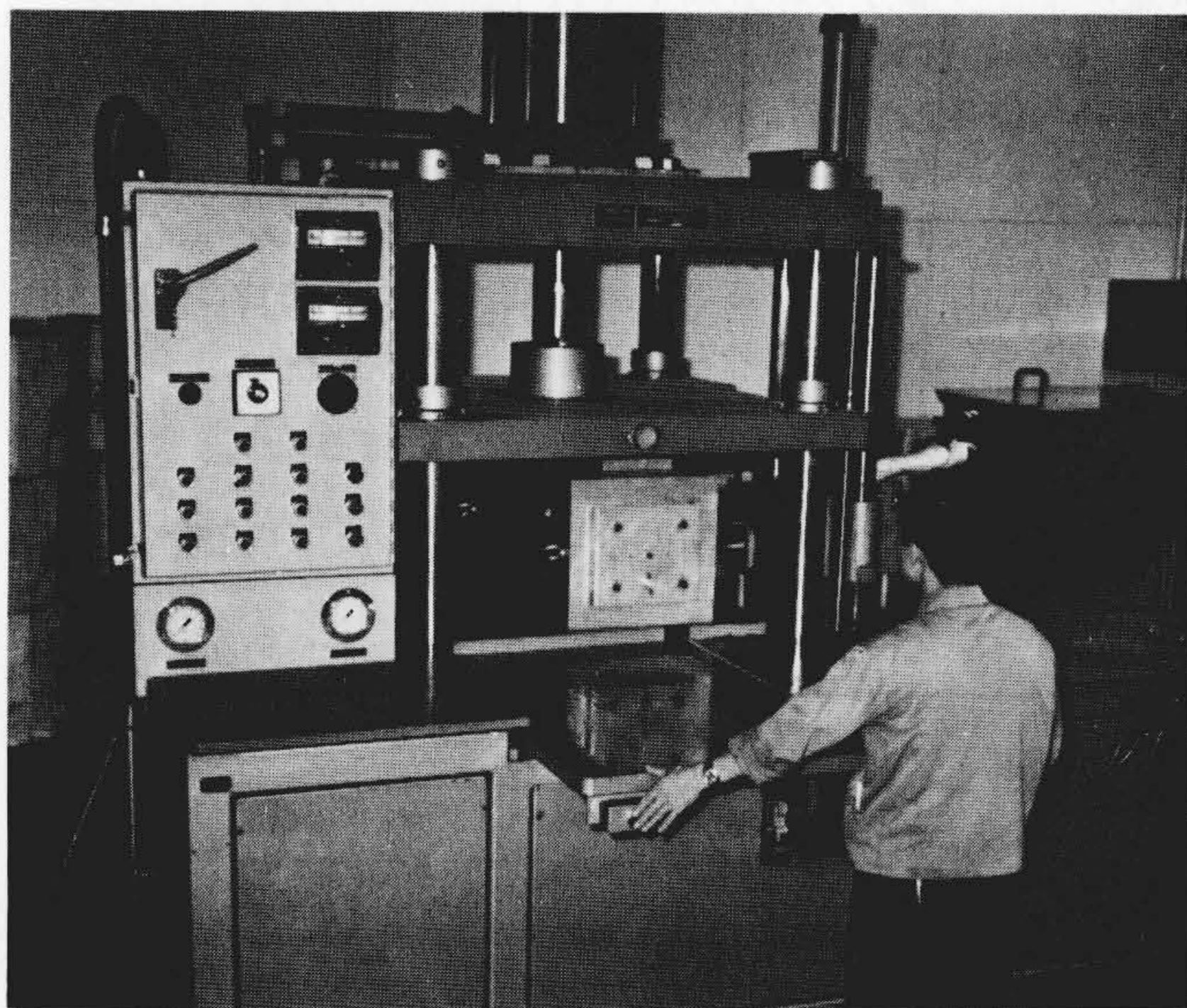


図4 大形ワックス射出成形機によるワックス模型の成形(形締め圧力100t) 金型をセットして、射出成形中の状態を示す。

Fig. 4 Wax Pattern Injection by the Large Sized Injection Machine (Clamping Pressure: 100ton)

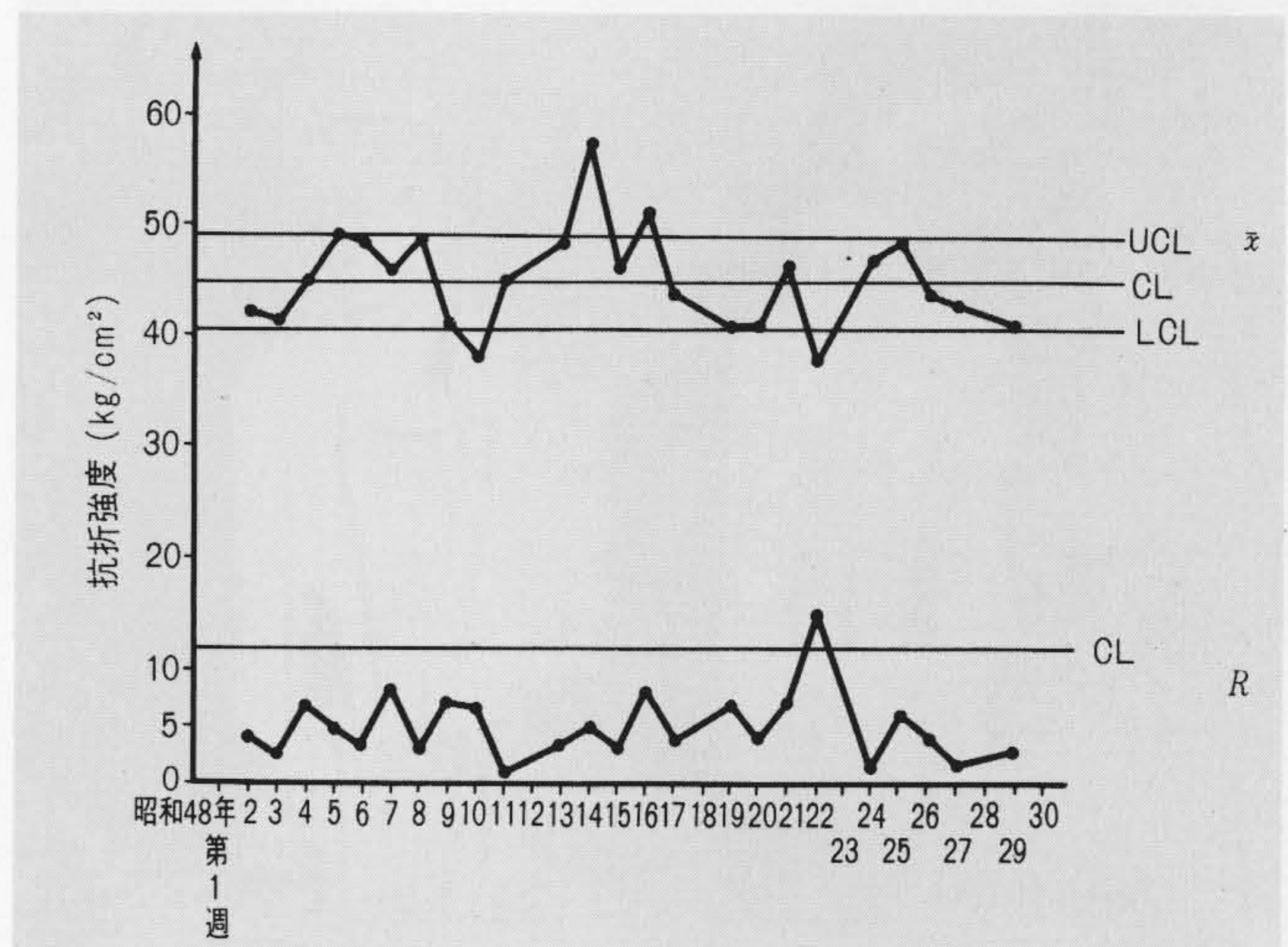


図6 週別鑄型強度 $\bar{x}$ -R管理図 鑄型の品質管理として、鑄型強さなどを定期的に検査し、図のように管理する。

Fig. 6 $\bar{x}$ -R Control Chart for Strength of the Ceramics

特に割れ防止の配慮をした。

脱ろう後、残った耐火物層は鋳型になり、残留しているワックスを予備焼成により燃焼除去させた。冷却した鋳型に最終積層を施して造型が完成する。

図8は調査のために縦断した鋳型を示すものである。

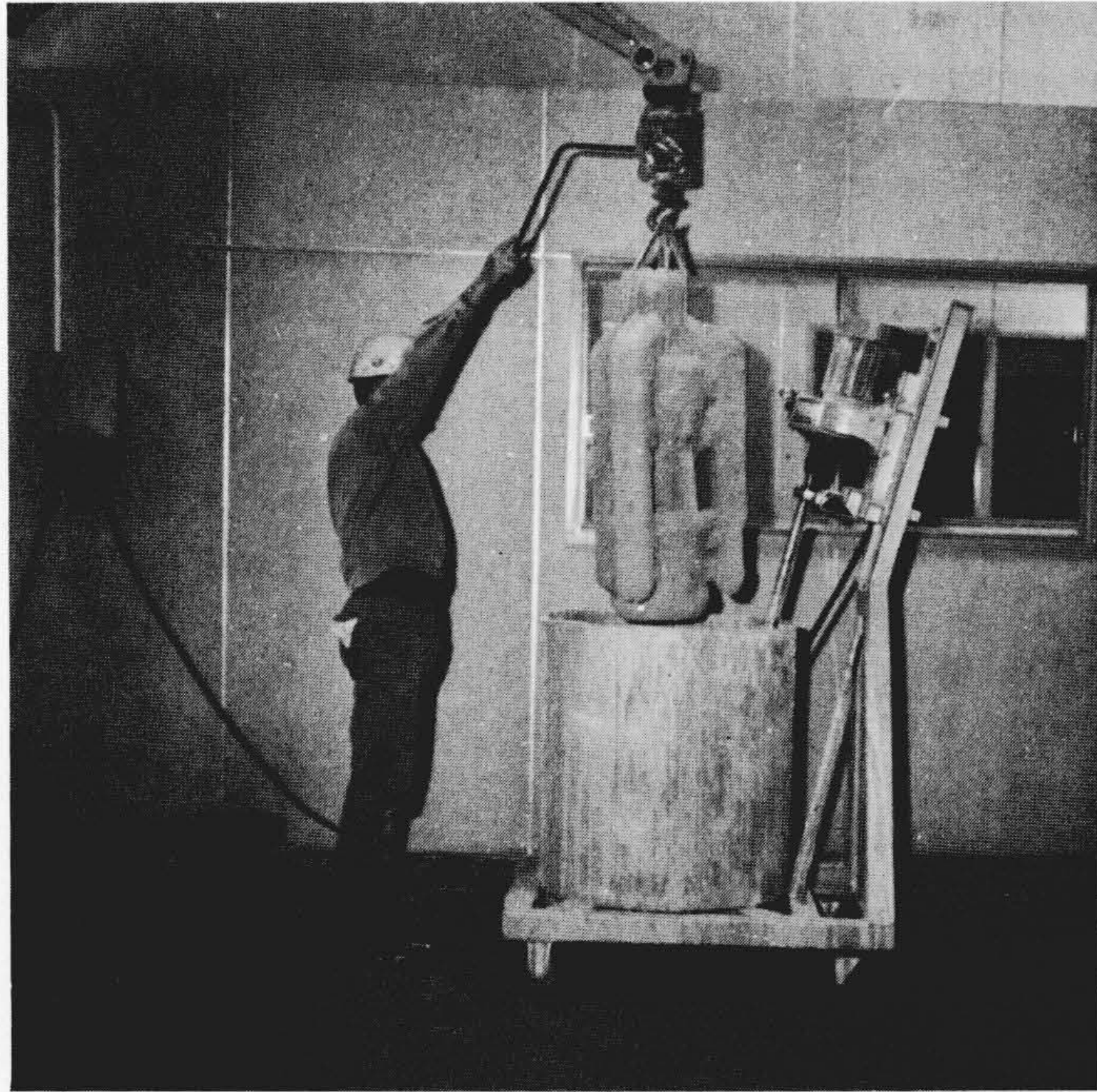


図7 平衡式ホイストを利用した大形品の積層作業 ワックスと耐火物の重量が合わせて60kg近くになる大形品は、平衡式ホイストなどの機械力を用いて取り扱う。

Fig. 7 Dipping Into the Slurry with the Aid of the Balanced Hoist

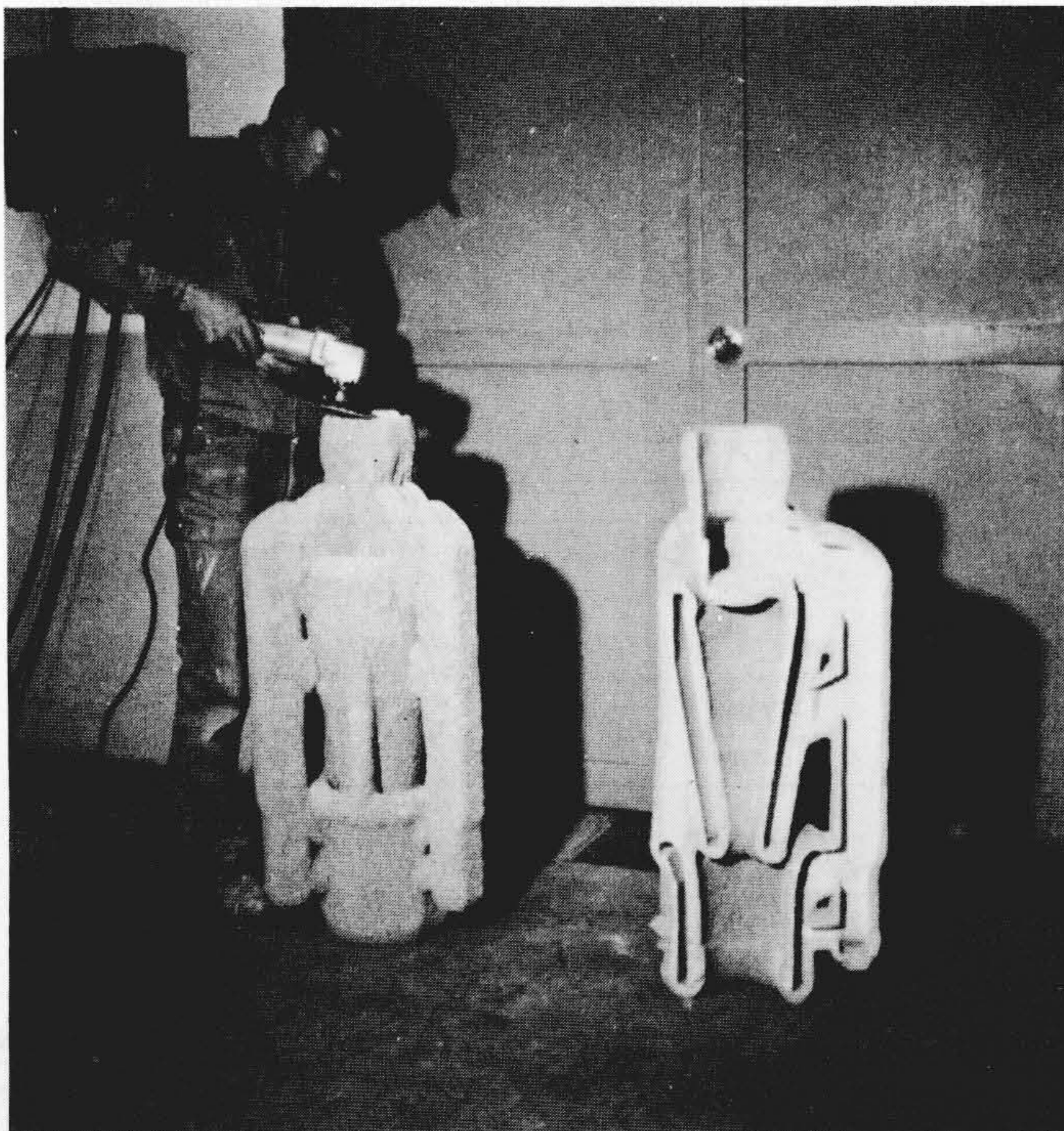


図8 完成した鋳型の縦断面 調査のために縦断したものを示す。

Fig. 8 Vertical Section of the Ceramics

7 溶解および鋳造

溶解は容量600kgの高周波誘導炉にて大気中溶解をした。装入材料は特にCoの含有量を規格値以下に押えるため十分に吟味した。脱酸用として炉中にAlを0.3kg/t添加した。

とりべから採取した試料の化学分析値の一例は表2に示すとおりである。

溶湯をストッパ付きの下注とりべに受鋼し、あらかじめ焼成し昇熱させておいた鋳型に鋳込んだが鋳込温度は1,540°C、鋳型は750~780°Cである。鋳込時間は本体と押湯を含めて約8秒である。

鋳型は注湯時の動圧、静圧のいずれにも十分に耐え、張られやき裂などの異常は皆無できわめて満足すべき状況であった。たたき出しは鋳込後18~20時間にて完全に冷却してから行ない変形を防いだ。たたき出しの後、3本湯道を残し押湯を切断除去した。

8 溶体化熱処理および鋳仕上げ

熱処理サイクルは図9に示すとおりである。本体の温度分布を良くするため2段昇温を行なった。また酸化を少なくし結晶粒粗大化を防ぐ目的で昇温には温度の異なる2台の炉を使って高温における保持時間の短縮を図った。

熱処理後の機械的性質とミクロ組織が規格を満足することを確認した。この後カットにより3本の湯道を切断除去し堰(せき)先部をグラインダなどにて手仕上げした。

9 製品の検査成績と性状調査

9.1 寸法精度

寸法精度のなかで最も重要と考えられる各部分の断面中心のずれの実測結果(図10)では仕様の1.5mm以下に対しほとんどが±0で最大でも0.5mmであり満足すべき結果が得られた。他の寸法についてもほぼ同様で寸法精度はすべて良好であった。

9.2 鋳はだの粗さ

完成品の鋳はだ粗さの触針法による測定結果例は図11に示すとおりであるが、熱処理後ショットブラスト処理を施した状態にてどの部分も25S以下であり仕様を満足している。

9.3 機械的性質

製品の機械的性質は本体に付属させて一体に鋳造した試験片を同一熱処理の後試験したのであるが、いずれも仕様を満足した。また製品を切断して行なった各部分の機械的性質はいずれも仕様を満足することが確認された。図12は試験片の採取位置を、表3はその結果を示すものである。

表2 ジェットポンプノズルの化学成分例 化学成分規格と実績例を対比させて示す。

Table 2 The Chemical Composition of the Jet Pump Nozzle

成分 項目	C	Si	Mn	P	S	Ni
規 格	≤0.08	≤2.00	≤1.50	≤0.040	≤0.040	8.0 ~11.0
実 績	0.04	0.97	1.49	0.012	0.009	9.34
成分 項目	Cr	Cr/Ni	N	O	H	
規 格	18.0 ~21.0	≤1.9	(規 格 な し)			
実 績	20.08	2.15	2.71×10^{-4}	142×10^{-4}	1.0×10^{-4}	

注：単位は%

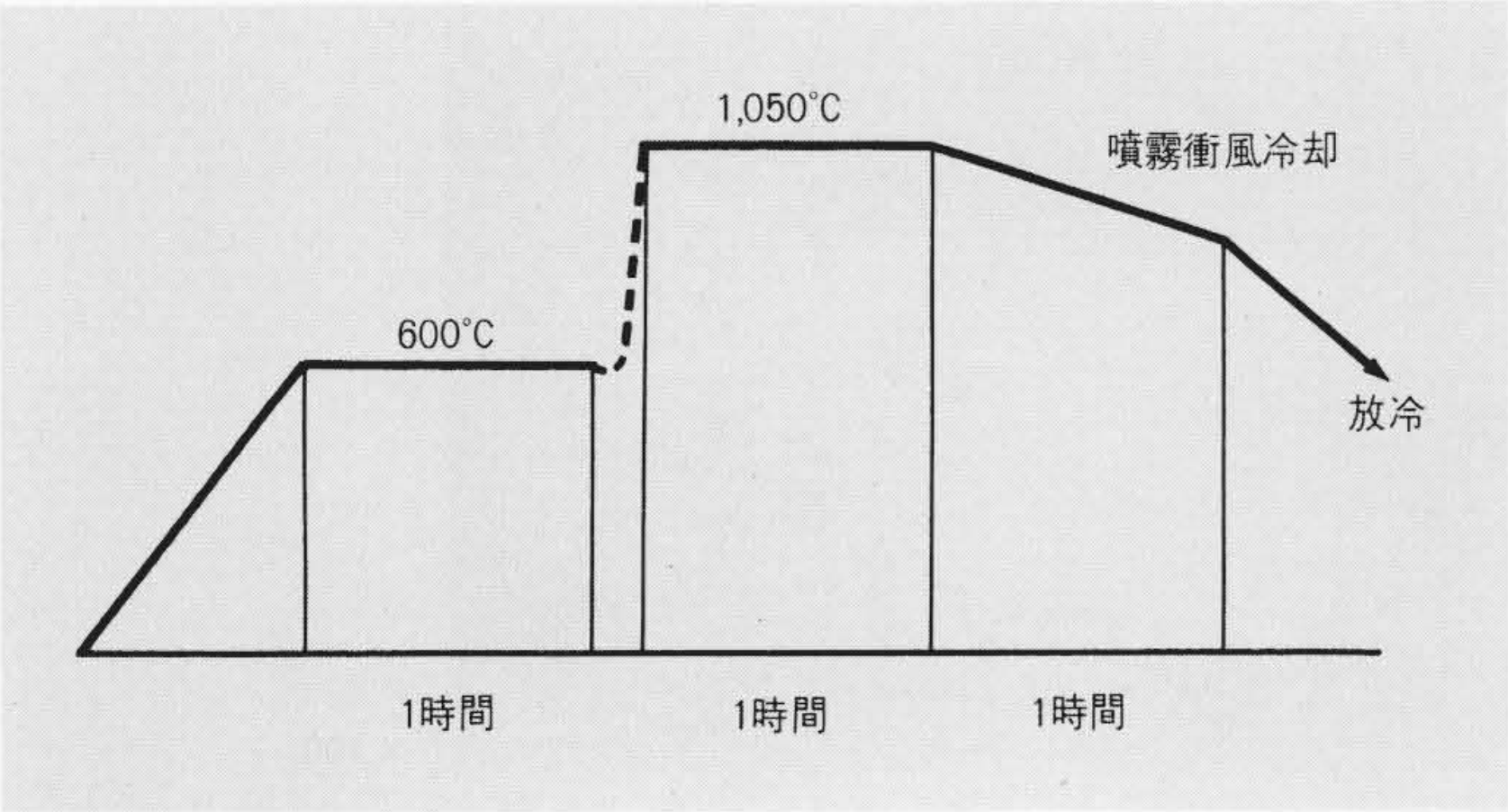


図9 溶体化熱処理サイクル ジェットポンプノズルに施した熱処理温度と時間を示す。

Fig. 9 Solution Quenching Cycle

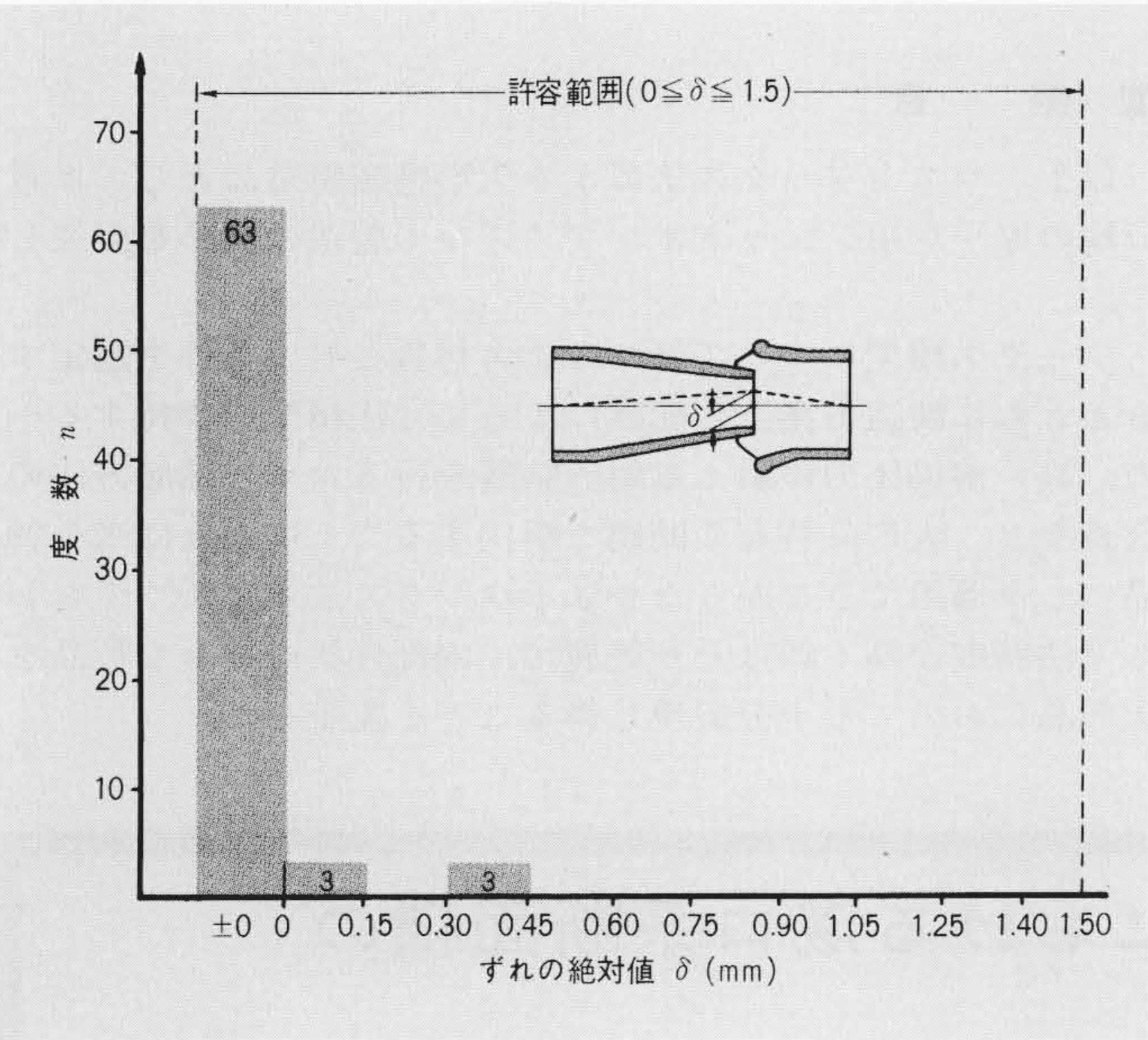


図10 中心度のずれの実績のヒストグラム 最も重要と考えられる寸法規準の一つに、「中心度のずれ」がある。本図は「ずれ」のヒストグラムを示す。

Fig. 10 The Histogram of the Deviation of the Casting Centre from the Drawing Centre Line

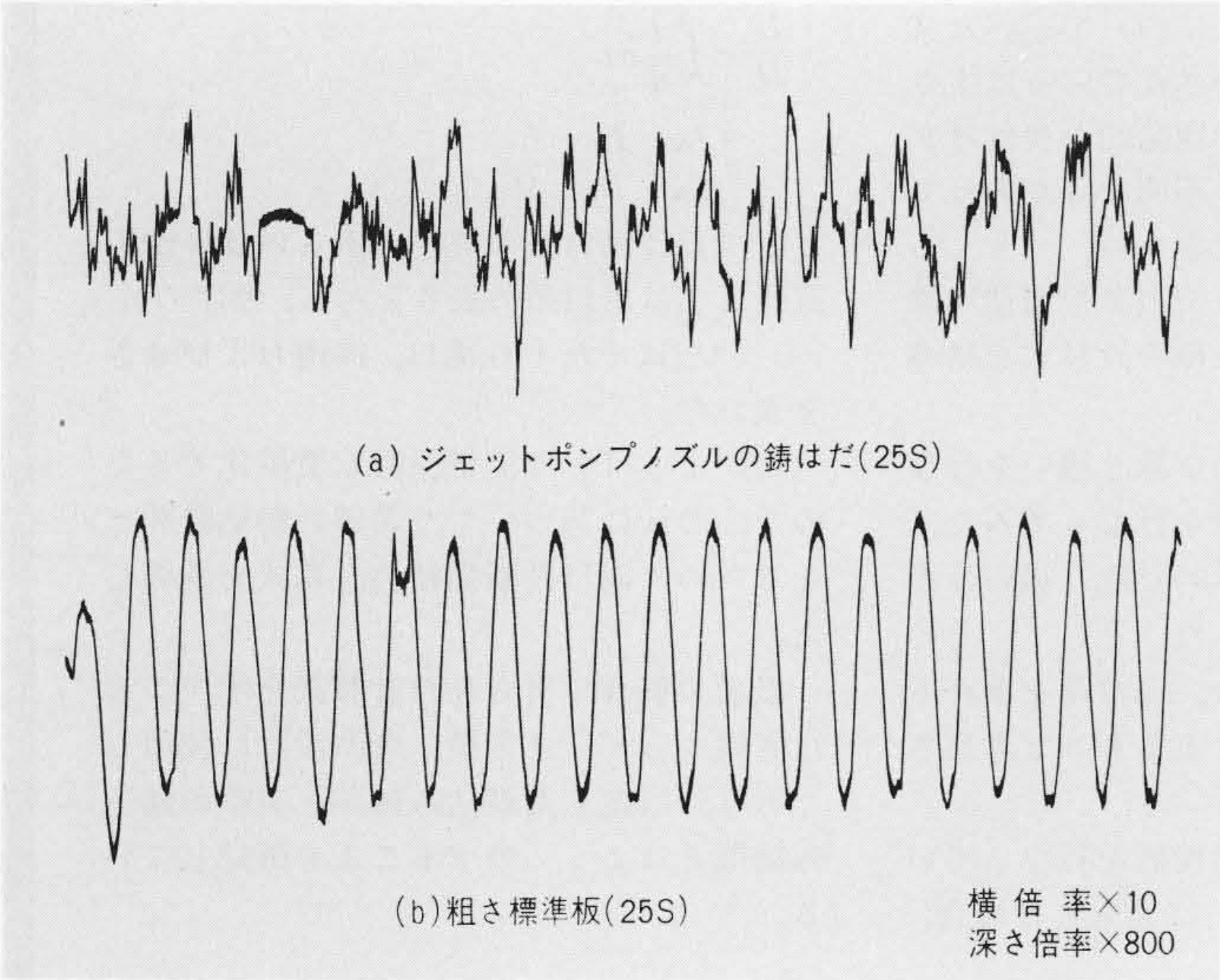


図11 完成品の鋳はだ平滑度 触針式粗さ計による測定を示す。

Fig. 11 The Smoothness of the Casting Surface

表3 ジェットポンプノズル本体の機械的性質引張試験結果 (実体) 実際の製品から試験片を切り出して、機械的性質を調査した結果を示す。

Table 3 The Mechanical Properties of the Jet Pump Nozzle

項目 試験片番号	降伏強さ (psi)	引張強さ (psi)	伸び (%)	試験片寸法(mm)		切断位置
				直径	標点距離	
規格	≥30,000	≥70,000	≥35.0	—	—	—
A 1	33,700	74,000	57.6	7.0	25.0	A
B 1	"	75,800	60.8	"	"	"
A 2	32,100	72,100	56.0	"	"	B
B 2	32,600	74,700	68.8	"	"	"
A 3	32,700	73,400	63.8	14.0	50.0	A
B 3	33,300	75,200	63.0	"	"	B
A 4	33,900	72,100	53.2	7.0	25.0	A
B 4	31,700	70,300	56.8	"	"	B

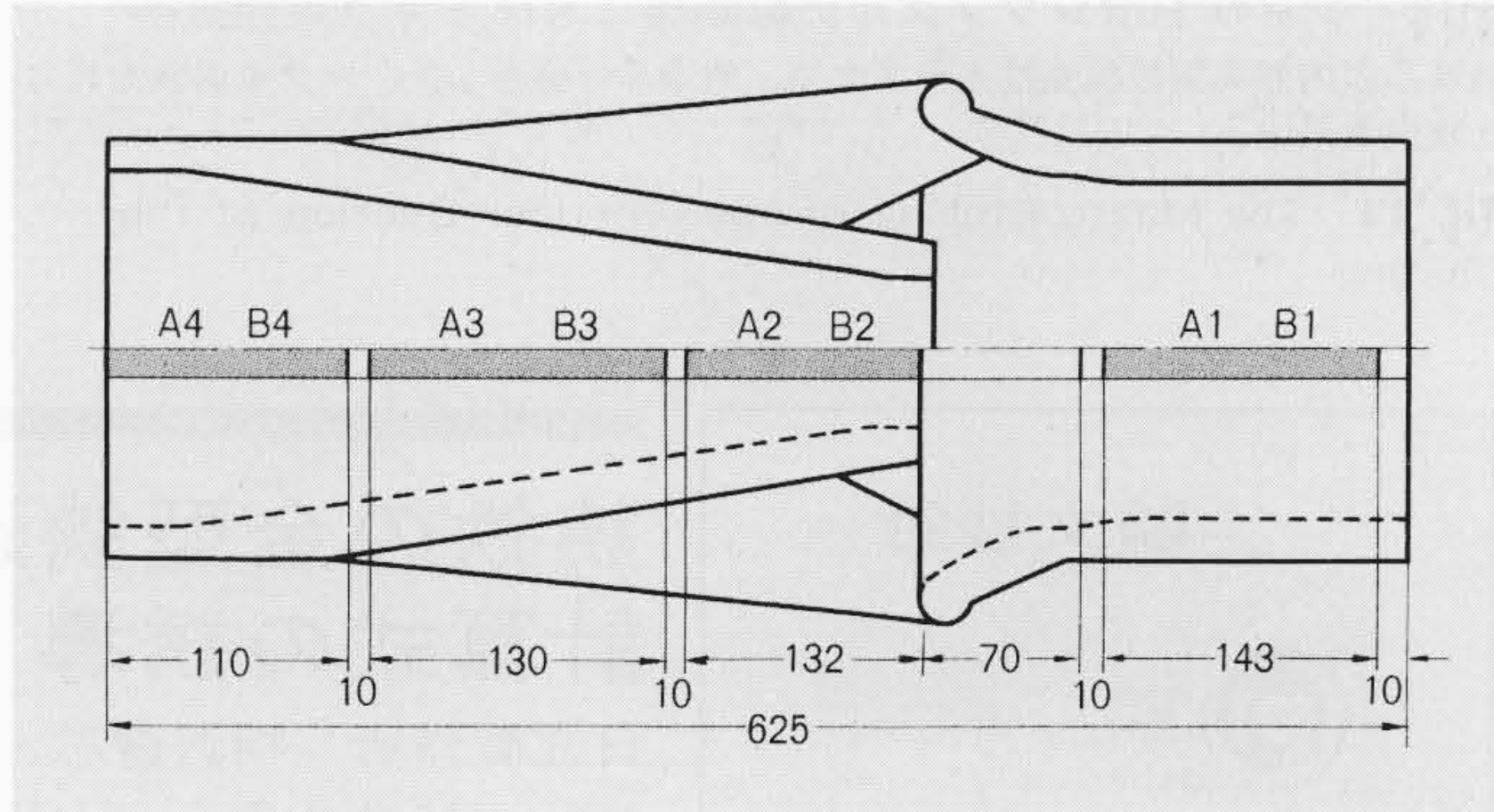


図12 本体試験片採取位置 機械的性質を調査するために、鋳物から試験片を切り出した位置を示す。

Fig. 12 The Position of the Test Pieces for Mechanical Properties Test

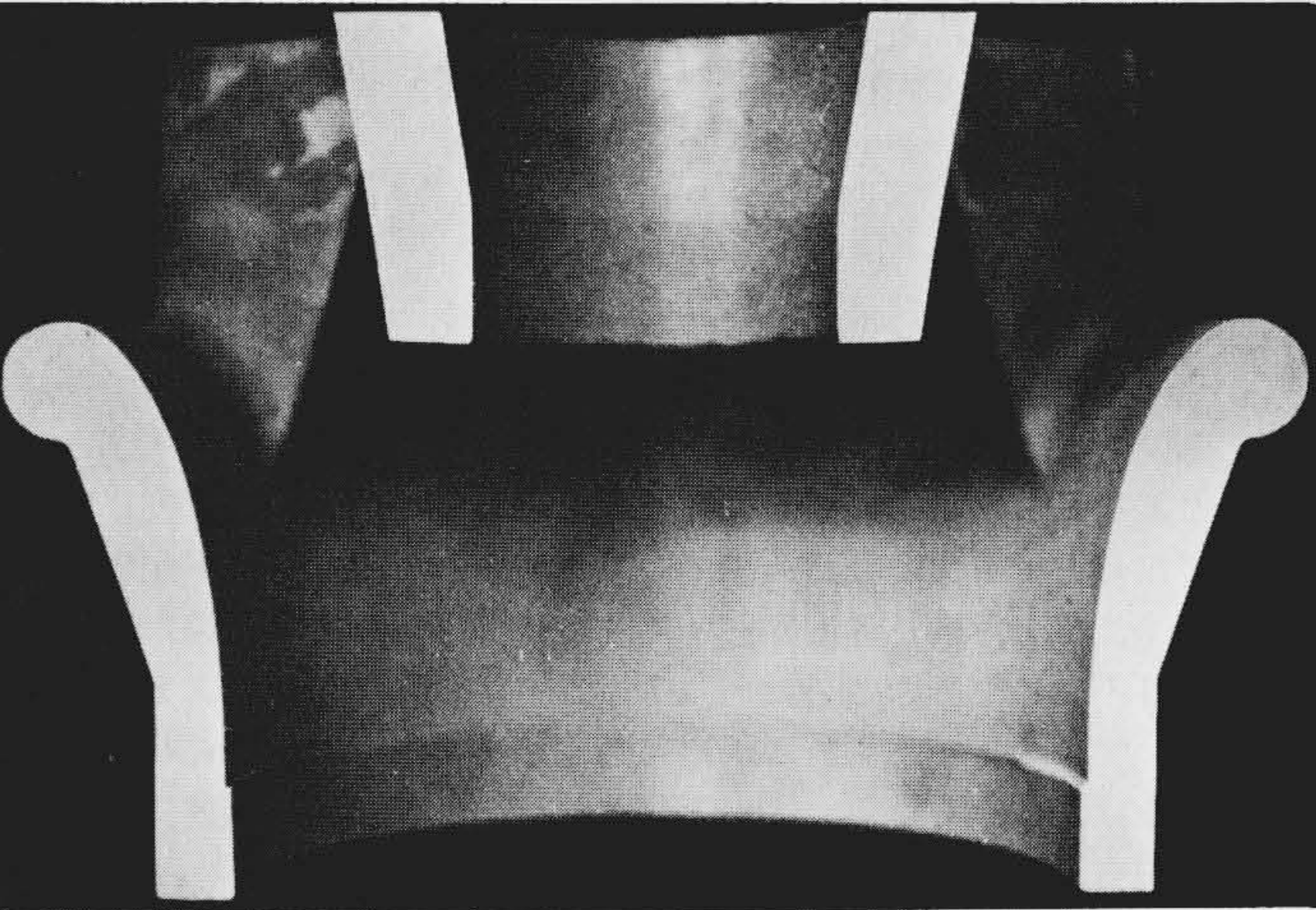


図13 ジェットポンプノズルの縦断面における染色探傷試験結果例 鋳造品の内部の健全性を示すため、鋳造品を縦断して染色探傷試験を施した結果を示す。

Fig. 13 Liquid Penetrant Test of the Vertical Section of the Casting

9.4 内部性状

内部性状は放射線試験にて確認することが規定されているが、結果はすべて要求仕様（羽根部はASTM (American Society of Testing Material) 2級以上、その他は3級以上）に対し、1～2級と良好であった。製品断面の染色探傷試験とマクロ組織の例は図13、14に、またミクロ組織の一例は図15に示すとおりである。

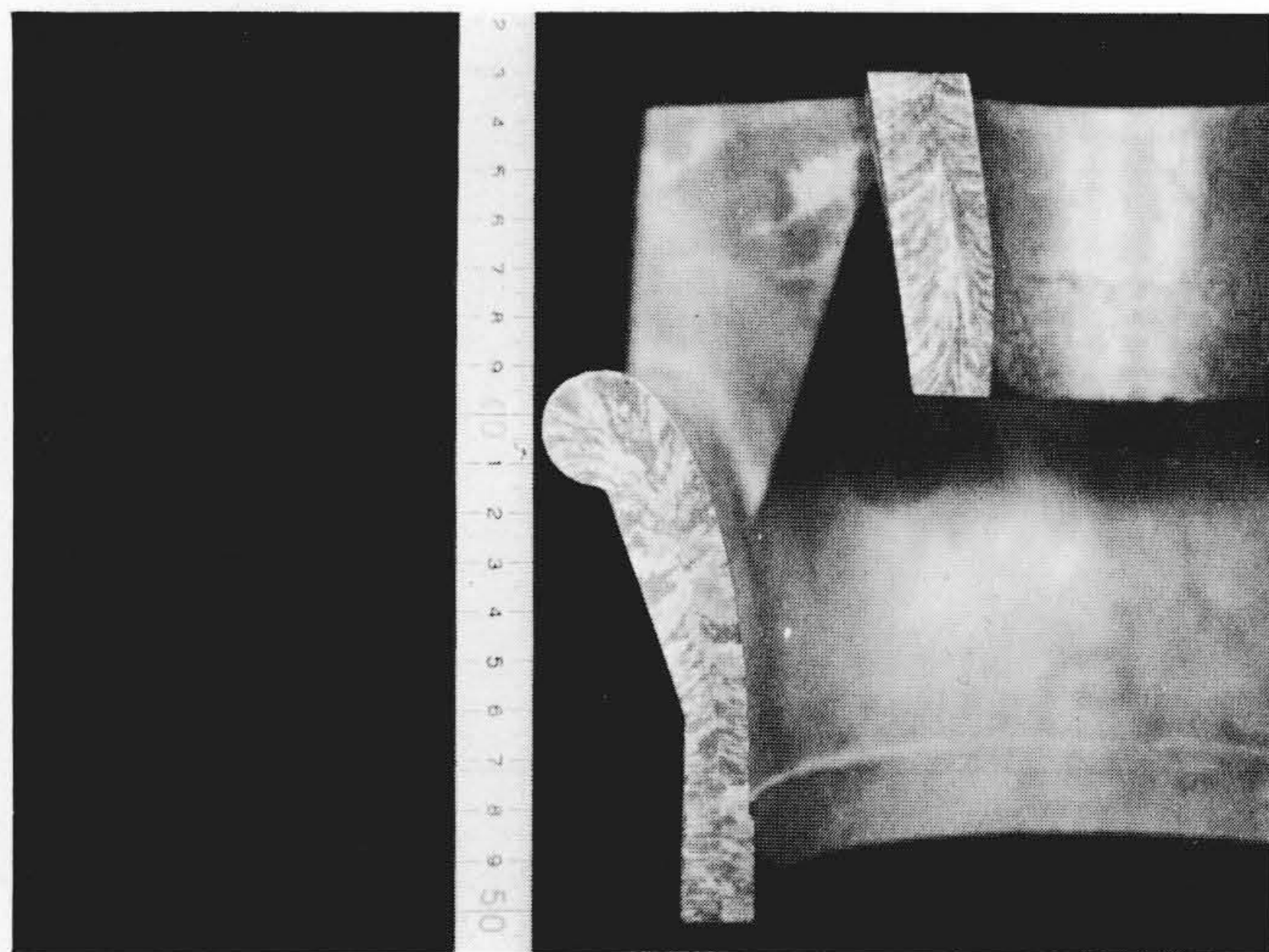


図14 ジェットポンプノズルの縦断面におけるマクロ組織例
鑄造品の内部凝固の健全性を示すため、鑄造品を縦断して、マクロ腐食を施した状況を示す。

Fig. 14 The Macro Etching of the Vertical Section of the Casting



図15 ミクロ組織の一例 ジェットポンプノズルの代表的なミクロ組織例を示す。

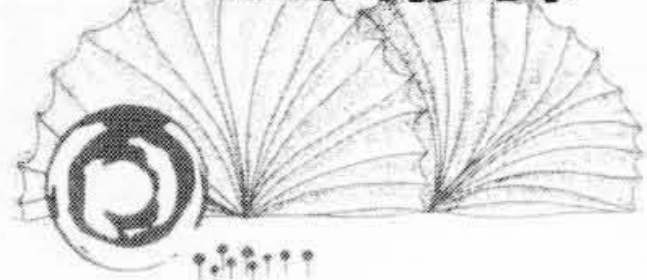
Fig. 15 The Micro Structure of the Casting

10 結 言

以上、ロストワックス法による大形精密鑄造品として単重57kgの原子炉用ジェットポンプノズルの製造の概略を記述した。

ワックス模型についてはワックス材質と射出条件を選定するとともに鑄造方案上の配慮によって寸法精度を維持する一方、高い溶湯圧力に耐える耐火物層を得るための積層方法の改良など、大形品特有の問題を解決することにより従来小物品にしか適用できなかったロストワックス法の長所、すなわち寸法精度が高く鑄はだが美しく、内部性状の健全な製品を大形品においても十分実現し得ることを実証した。

論文抄録



鑄鉄の金型鑄造における湯口系断面積の計算式の誘導

日立製作所 相沢達志・岡田千里・他1名
鑄物 45巻6号 p. 3 (昭48-6)

鑄鉄の金型鑄造法は古くから知られた鑄造技術であるが、最近脚光を浴びるようになった鑄造法である。在来の砂型鑄造法では、一度鑄込みを行なうと、鑄型は使用不可能となるが、金型鑄造法では金属製の鑄型に鑄込み、しかも同一の鑄型を何回も使用する。

さて金型は、砂型に比べて熱伝導率が高く、通気性がない点で本質的に相違している。したがって、たとえば砂型鑄造法と同じ湯口系（湯口、湯道およびせきを総称して湯口系と称する）断面積の金型に鑄鉄溶湯を注ぐと、鑄込速度が遅く、一般には湯回り不良となる。このため、金型鑄造法においては、方案上独特の湯口系断面積を考えなければならない。

一方、金型は製作費が高く、しかも一度製作してしまうと、砂型鑄造法のように簡単に修正できない。したがって金型の設計

の段階で適正な湯口系断面積を決定しておく必要がある。しかし金型鑄造法における湯口系断面積の算出方法について述べた文献は少なく、二、三紹介されているにすぎない。しかし、これらも理論的な裏付けが乏しいことや、利用上に不明な点があって直ちに使用することができない。

そこで、われわれは9例の金型鑄造実験例を整理し、湯口系断面積の計算式を誘導することを試みた。

まず最初に、水力学的な取り扱いを行なって、上記実験例の解析を行なってみた。その結果、一般の水力学的な取扱いは不可能であることがわかった。そして、その理由としては溶湯の場合、湯口系を流れる間に温度低下することによるものと考察された。

ところが、この水力学検討を行なっている間に、 L/D を次式のように定義した場合、

流量係数が L/D の一次関数で示されることが明らかになった。

$$\frac{L}{D} = \int \frac{l}{d} dl \\ = \frac{L_s}{D_s} + \frac{L_r}{D_r} + \frac{L_i}{D_i}$$

ここで D は湯口系の直径（あるいは等価円直径）、 L は湯口系の長さを示し、添字の s 、 r および i はそれぞれ湯口、湯道およびせきを表わす。

このようにして流量係数が数値化できたので、これに基づいて、希望の鑄込時間となるための湯口系断面積の計算式を誘導した。

紙面の都合で得られた計算式を示すことは省略するが、その後、金型設計に使用しており、設定した鑄込み時間と実際の鑄込み時間とはよく一致することを確認している。