

## 技 術 資 料

### 精 密 鑄 造 法

#### PRECISION CASTING—A REVIEW

松 浦 次 義\*

#### I. は し が き

現在行われている精密鑄造法のうち、工業的に最も重要なものは、ダイキャストイング、インベストメント鑄造法及びシェルモールド法である。筆者はこのうち、我が国で工業化されて未だ日の浅いインベストメント鑄造法とシェルモールド法について概説する。此の2つの精密鑄造法については、既に多くの紹介と報告がなされているが、筆者は主として筆者の工場に於ける実際の経験にもとずき、更に内外の研究者の報告のうち主要なものを参考とした。

#### II. インベストメント鑄造法 (Investment Casting)

##### (1) 歴史と概要

インベストメント鑄造法は工業的に生産がはじめられてから未だ 30 年を経っていない。この方法の製造原理は“蠟型鑄物”と称する美術工芸鑄物及び歯科医の用いる“インレー鑄造法”と同じものである。

蠟型鑄物の歴史は古く、有史前のエジプト及び殷時代の中国<sup>1)</sup>に既に存在していたと考えられる。この古来の蠟型鑄物を近代的な精密鑄造法に発展させたのは、T. G. Jungersen である。工業的生産は 1930 年代に、Austen Laboratories (New York, U.S.A.) に於いて始められた。第2次大戦中、航空機の急速な発展に伴い、この方法がジェットエンジンのタービンパケットの量産に採用されるに至つて急速な発展をとげた。戦後は更に一般工業の各分野にその製品が使用されている。

現在インベストメント鑄造法は米国、英国、スイス及びヨーロッパの多くの国々に於いて広く行われている。我が国に於いては 1951 年 4 月に精密鑄造研究会が発足して、各社で試作研究が始められ、1953 年には工業化の段階に入り、現在数社に於いて生産が行われている。

インベストメント鑄造法とは一体の鑄型“Investment mold”を製作使用する鑄造法である。即ち、従来

の鑄造法のように上型・下型及び中子等を組立てて鑄型をつくらないで、可溶性材料で模型をつくり、これを鑄型材中に埋没した後、可溶性の模型を溶し去つて中空の一体の鑄型をつくる。

インベストメント鑄型法は、そのパターン材料によつて次の2つの方法に大別される。

i ロストワックス法 (Lost Wax Process)

ii マーキャスト法 (Mericast Process)

前者は可溶性模型材料として蠟又はプラスチックを使用し、後者は凍結水銀又は水銀アマルガムを使用する。現在行われているのは殆んどすべてロストワックス法であり、本稿ではロストワックス法のみについて述べる。

ロストワックス法の製造工程は Fig. 1 に示す如くである。即ち、

i パターンダイの製作

ii パターンダイによる蠟型の製作。

iii 蠟型の組立。

iv 蠟型を鑄型材中へ埋没。

v 鑄型中の蠟型の溶出除去。

vi 鑄型の焼成。

vii 注入。

の諸工程を経て鑄物がつくられる。

##### (2) マスターパターン及びパターンダイ

##### (Master Pattern and Pattern Die)の製作

パターンダイの製作は製品鑄物の良否を決定する最も重要な工程の一つである。パターンダイは製品の製作個数、寸法精度、形状及び可溶性模型材料の種類によつて次の如き方法によつて製作する。

i 低融合金又は亜鉛合金を用いてソフトメタルダイ法によつて製作する。

ii 快削鋼、工具鋼又は合金鋼より直接型彫りする。

iii 真鍮、砲金、Al 又は Mg 合金でダイの全部又は中子等の一部を製作する。

\* 株式会社 小松製作所

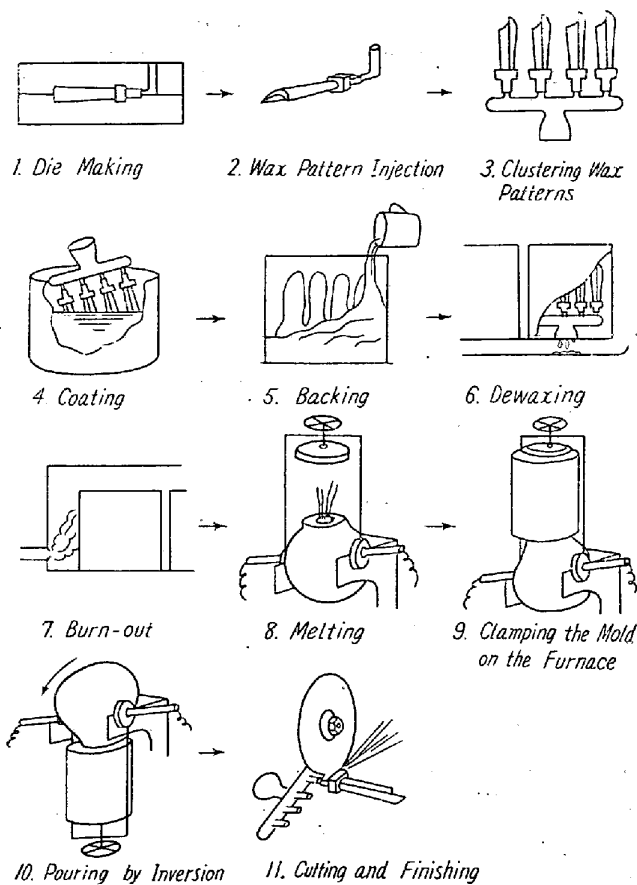


Fig. 1. Steps in the production of Investment castings (Lost wax process)

低融合金ダイは蠟型のみならず、他は蠟型及びプラスチック型の両方に使用することが出来る。ダイの寿命は Table 1 に示す如くである。合金鋼及び工具鋼のダイは寸法精度の特に厳密なもの又は製作個数の多い場合に使用する。

Table 1. Life of dies<sup>2)</sup>

Kinds of die	Pattern production times
Low melting alloy Cerro-tru die	10,000
Zinc alloy Kirksite die	100,000
Soft steel die	100,000
Alloy steel die Tool steel die	250,000~500,000

ソフトメタルダイ法によるダイの製作には Table 2 の如き低融合金又は Kirksite 等の亜鉛合金が使用される。ダイの製作法は大略次の順序による。

- i. 製品鑄物の寸法に適當な収縮率を見込んだ若干大きい金属製マスターパターン（原型）をつくる。
- ii. マスターパターンを石膏中に割肌まで埋める。

Table 2. Compositions of die materials<sup>3)4)</sup>

	Bi	Pb	Sn	Cd	Sb	Melting Pt.
Cerrosafe	40	40	11.5	8.5		138.5°C 100 68
Lipowitz	50	26.7	13.3	10		
Dee alloy	47.7	33.2	18.8		0.3	
Bi-Sn	58		42			
Bi-Sn-Pb	40	20	40			
Bi-Sn-Pb-Cd	50	25	12.5	12.5		

- iii. この上に熔融合金を鑄込み、上型をつくる。
- iv. 石膏を取除き、そこに熔融合金を鑄込んで下型をつくる。

熔融合金の鑄込方法には、圧力鑄造法、鑄込後凝固進行中にプレスで 5,000 乃至 10,000 psi で加圧する方法、又は熔融合金を噴きつける方法等がある。

一般にマスターパターン及びパターンダイの寸法公差は製品鑄物の寸法公差の 1/10 以内につくらなければならない<sup>5)</sup>。

(3) 蠟型 (Wax Pattern) の製作

蠟型及びプラスチック型の製作には各種のワックスインジェクションマシン及びプラスチックインジェクションマシンを使用して半熔融状態の型材をダイの中に加圧注入して製作する。両者のうち蠟型が最も一般的に使用されている。

蠟型に使用する蠟は次の如き諸性質を有することが必要である。

- i. 常温に於いて相當の強度と硬度を有すること。
- ii. 糊状で加圧注入出来るように凝固温度範囲の広いこと。
- iii. 非晶質であること。即ち凝固時の相変化が最小で且つ硬化収縮が少いこと。
- iv. 常温から軟化点までの熱膨脹率が小さいこと。
- v. 軟化点と硬化点（実用に堪える硬度をもつ温度）との温度差の小さいこと。通常軟化点は 65°C 以下、硬化点は 43°C 以上であることが望ましい。
- vi. 凝固冷却中に生ずる内部応力の小さいこと。
- vii. 成型後貯蔵中の寸法の安定大なること。
- viii. 低温に於ける揮発物の少いこと。
- ix. 鑄型の蠟出し時に於ける回収率の高いこと。
- x. 繰返し使用中に機械的、化学的及び物理的諸性質が変化しないこと。
- xi. 無機物その他の灰分が少いこと。
- xii. 廉価であること。

上記の諸条件を満足させるため、各種のワックス及びプラスチックを配合した混合物が使用されている。Table 3 は筆者の工場に於いて使用された代表的な鑄

Table 3. Properties of typical cating waxes used in author's company

Names of waxes	Properties	Flexural <sup>c)</sup> strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Thermal <sup>d)</sup> expansion (%)	Solidifying Pt. <sup>e)</sup> (°C)	Temp. range of solidification (°C)	Mushy range (°)
International casting wax	<sup>a)</sup>	42.4	0.7	60	85.5~57	28.5
D-44	<sup>b)</sup>	48.2	0.5			
H-0155	<sup>b)</sup>	45.0	0.3	56.5	80~51	29
D-8210	<sup>b)</sup>	65.3	0.8			
Inlay wax green		38.6	0.55	56	70~53	17
Inlay wax Blue		45.7	0.75			
Inlay wax Pink		22.2	0.82	56	71~53	18

a) Wax made in U.S.A., b) Wax made in England, c) Flexural strength test piece, 2×20×60mm, d) Thermal expansion from 20°C to softening point, e) Estimated from the cooling curve.

造用蠟の諸性質を示す。

プラスチック型には、ポリスチレンが最も普通に使用されており、その他ポリエチレン、塩化ビニール、ナイロン樹脂等が使用されている。

蠟型とプラスチック型とでは、機械的性質、物理的性質及び寸法精度等すべてプラスチックの方がすぐれている。しかしプラスチックは注入成型温度が高く、且つ注入圧力が高いために設備費が高い。価格はプラスチックの方が安い、回収率はプラスチックの型では皆無であるに対して蠟型では 50 乃至 90% であつて、結局コストは蠟型の方が安くなる。

寸法精度は、蠟型ではよく設計製作されたダイを正しく使用した場合、0.001in<sup>3</sup>) 以内にすることが出来る。しかし一般には蠟型の寸法精度は ±0.002in 以内である。

#### (4) 蠟型の組立

湯口、湯道はすべて蠟でつくられ、これに蠟型をとりつける。この作業にはコテが使用される。組立の終わった蠟型はその表面に附着したダイの離型剤等を除去するために、アルコール、アセトン又はエーテル等の中に浸けられる。Photo. 1 は蠟型を組立てたクラスターを示す。



Photo. 1. Clusters of wax patterns

#### (5) 造型作業

鑄型製造方法には次の 2 種類がある。

##### i シングルコートプロセス (Single Coat Process)

この方法は溶融点の低い非鉄合金鑄物にのみ使用される。耐火材としては珪砂、石英、クリストパライト及び

トリジマイト等が使用される。粘結剤には焼石膏又は硬石膏が使用され、溶剤は水である。これらの混合物である泥漿は鑄型中におさめられた蠟型の周囲に注入される。石膏インベストメントに於いて最も大切な条件は、粉末に対する水の配合比 W/P と、インベストメントの温度である。W/P が大になると、凝固膨脹が大になり、湿態強度、乾燥強度及び高温強度は減少し、通気度は増加する。又鑄型の熱膨脹量が減少し、熱伝導率は湿態では増加し、乾態では減少する。インベストメントの温度が変化すると蠟型は膨脹或いは収縮し、製品の寸法に影響する。従つてインベストメントの温度は厳密にコントロールする必要がある。

ii ダブルコートプロセス (Double Coat Process)  
この方法は鉄系合金及び高融点合金鑄物に使用される。この方法はプレコート又はコーティング作業とバックング作業とからなつている。コーティングは微粉末の耐火材と粘結剤とからなる泥漿に蠟型を浸漬するか、又は泥漿を蠟型にスプレーして後、直ちに稍々粗い同種の耐火材粉をふりかける作業であつて、蠟型表面に薄い耐火材のコーティングをつくるために行う。バックングはコーティングの終わった蠟型を鑄型中におさめ、コーティング材と同種の比較的粗い耐火材と粘結剤とよりなる泥漿を注入する作業である。この泥漿は 1 時間乃至数時間にしてセメント状に凝固し、強固な鑄型がつけられる。造型作業の適否はインベストメント鑄造法による製品の寸法精度及び鑄肌を左右する最も重要な作業であり、厳密な作業管理が必要である。

現在インベストメント鑄造法に於ける造型作業は殆んどダブルコートプロセスである。次にダブルコートプロセス用インベストメント材について稍々詳細に述べることにする。

##### (6) ダブルコートプロセス用インベストメン

ト材

この方法による鑄型は前述の如く、鑄型表面を形成する薄いコート層と、それを支えるバックアップ材とから出来ている。次にこれらのインベストメント材をつくる耐火材、粘結剤及び溶剤について述べる。

(A) 耐火材

インベストメント用耐火材に望ましい諸性質は次の如きものである。

- i 熱膨脹率が小さく、加熱冷却曲線に不規則な変化がなく、温度の急変によつてスポーリングを起さないこと。
- ii 少くとも SK 32 (1710°C) 以上の耐火度を有すること。
- iii 熔融金属と反応しないこと。
- iv 鑄込時に熱分解等によりガスを発生しないこと。
- v 鑄込時に於ける高温強度の大なること。
- vi 適度の通気度を有すること。
- vii 焼成後の表面が極めて緻密且つ滑らかなこと。
- viii コーティング用及びバックアップ耐火材の熱膨脹率が大差ないこと。
- ix 蠟型への附着性のよいこと。

現在使用されている耐火材は、珪砂、石英、クリストパライト、シリマナイト、ムライト、シヤモット、アルミナ、ジルコンサンド及び酸化ジルコニウム等である。米国では珪石質のものを多く使用し、英国ではシリマナイト系耐火物を多く使用しているようである。

各種耐火物の熱膨脹曲線を Fig. 2 に示す。珪石質耐火物はいずれも転移点附近に於いて、急激な膨脹、収縮を示すが、それ以上の温度では熱膨脹率は非常に小さい。それ故転移点附近の加熱に注意すれば、それ以上の温度では十分使用出来る。シリマナイト、シヤモット及びアルミナ等はいずれも熱膨脹率小さく、且つ直線的に

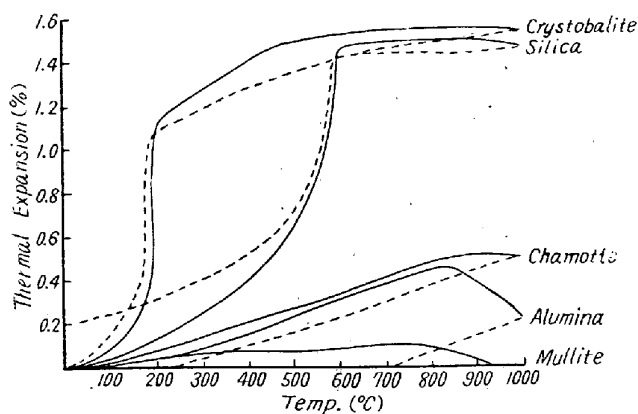


Fig. 2. The expansion-contraction curve for the refractories.

膨脹する。

鑄型の高温強度を増し、又熔湯との反応を阻止するために少量の酸化鉄、酸化クロム、酸化チタン又は酸化ジルコニウムを添加することがある。

耐火材の粒度は、コーティング材とバックアップインベストメント材とは自ら異なる。コーティング用耐火材の粒度は 200 メッシュより微細なもの、通常 325 メッシュ程度のものが使用される。粒度は細かい方が鑄肌は滑かとなるが、通気度は低下する。バックアップインベストメント用耐火材は数十メッシュから微粒に至る広い粒度分布を有する。この粒度分布は次の条件を満足させなければならない。

- i インベストメント材の注入が容易なように泥漿中に粒子が浮遊すること。
- ii 乾燥時の収縮が小さいこと。
- iii 適当な通気度を有すること。
- iv 乾態強度の大なること。

Fig. 3 はバックアップインベストメントの粒度分布の例を示す。

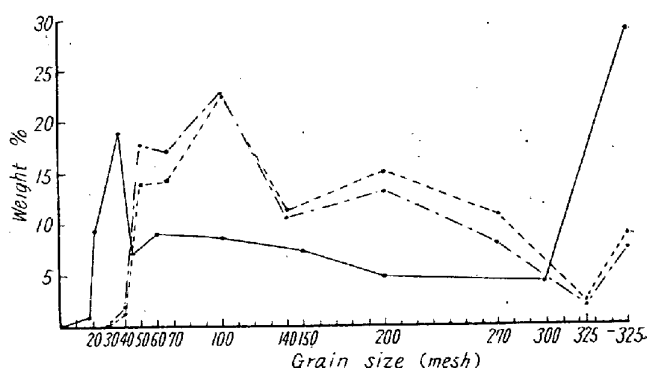
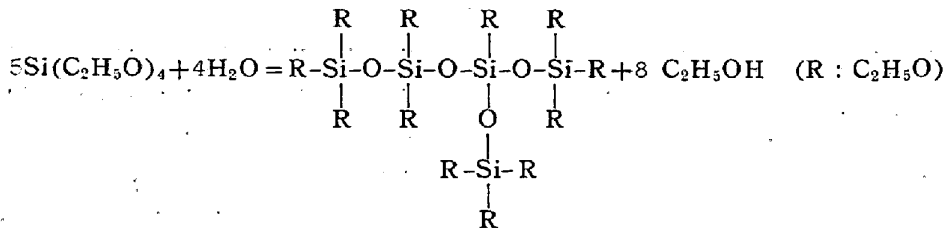


Fig. 3. Typical sieve analysis of back up investment<sup>(6)(7)</sup>

(B) 粘結剤及び溶剤

コーティング用粘結剤にはオルソエチルシリケート、エチルシリケート 40、ヒドロゾル及び珪酸ソーダ等が使用される。又バックアップインベストメント用粘結剤としては上記のもの他に磷酸塩、アルミナセメント、ポートルランドセメント及び石膏等が使用される。

オルソエチルシリケートは  $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2$  なる化学式を有しオルソ珪酸のエチルエステルである。オルソエチルシリケートに水を加えると、逐次加水分解を起して縮合し遂にはゼリー状に凝固する。この性質を利用して粘結剤として使用する。



上式で示される加水分解速度は中性溶液では非常に遅い。しかし酸の存在により此の反応速度を適宜に調節することが出来る。pH の変化は一般に塩酸によつて行う。酸性のエチルシリケート加水分解溶液は、微量のMgO の添加によりゼリイ状に凝固する。

エチルシリケート 40 とはオルソエチルシリケートを一部縮合せしめたものであつて、上式右辺に示す構造式をもつものと考えられている。その組成がSiO<sub>2</sub> 約40% であり、そのためエチルシリケート40と呼ばれている。Table 4 は米国の Carbide and Carbon Chemicals Co. のエチルシリケート及びその縮合物の規格である。次に示すのはインベストメント材の実例である。

Table 4. Grade of ethyl silicate and its polymers at Carbide and Carbon Chemicals Co.

Designation	Ortho ethyl silicate	Ethyl silicate polymer	Ethyl silicate 40
Specific gravity (20/20°C)	0.933~0.938	0.920~0.950	1.050~1.070
Boiling Pt. range (760mm Hg °C)	<100°C (> 5%) <170°C (> 27.9%)	>90°C (> 5%) <210°C (> 15%)	>80°C (Not) >110°C (> 5%)
Effective SiO <sub>2</sub> (%)	<27.9%	<30%	38—42%
Max acidity (Calculated HCl)	0.05%	0.20%	0.10%

コーティングインベストメント材<sup>9)</sup> (スプレー用)  
 シリカ, シリマナイト又はジルコン粉末  
 (200×メッシュ) .....100 g  
 エチルシリケート溶液.....17cc

Table 6. Mixing ratio of coating investment <sup>4)</sup>

	Silica flour	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> extra fine	Silica sand 40-mesh	Sodium silicate 33% by weight meta-sodium silicate	Polyvinyl alcohol solution (20% in water)	
Solution "A"	392.5 g		98.5 g	164cc		Solution "B" is added to solution "A" while stirring
Solution "B"		236 g	59 g		235.5cc	

{ エチルシリケート 40 75% }  
 { 水 7% }  
 { エチルアルコール 18% }

塩酸 (10%メタノール溶液) .....5cc  
 工業用メタノール.....29cc  
 バックアップインベストメント材<sup>9)</sup>  
 粗粒のシリマナイト 80lbs }  
 微粉のシリマナイト 20lbs } .....1 lb  
 酸化マグネシウム 1/2 O<sub>2</sub> }  
 スピリットソリュション  
 "B" (Table 5 参照) .....200cc

Table 5. Mixing ratio of ethyl silicate binders<sup>9)</sup>

	Ortho ethyl silicate	HCl ag		Alcohol (methylated spirit)	Water
		0.5%	5%		
Water solution "A"	500cc	100cc			1,400cc
Spirit solution "B"	500cc	100cc		400cc	
Spirit solution "C"	750cc		75cc	750cc	675cc

Table 5 はエチルシリケートバインダーの配合例を示す。オルソエチルシリケート及びエチルシリケート40はいずれも凝固時の強度高く、高温でSiO<sub>2</sub> となり鑄型の耐火度を低下せしめないのですぐれた粘結剤であるが価格が非常に高い。それ故近時低廉な他の粘結剤が使用されるようになった。Table 6 及び Table 7 はコーティングインベストメント材及びバックアップインベスト

Table 7. Typical mixing ratio of back-up investment<sup>7)</sup>

	Silica sand. Lake	silica sand. Albany	Silica sand. Juniata	Amount	Alumium cement	Ammonium phosphate primary	MgO (fused 300mesh)	Water
Alumina cement Investment	80 g	80 g	80 g	240 g 95%	12.6 g 5%			73cc
Ammonium phosphate Investment	60 g	60 g	120 g	240 g 91.2%		17.1 g 6.5%	6 g 2.3%	89cc

メント材の配合例を示す。

(7) 蠟出し及び焼成(Dewaxing and Burn Out)

インベストメントが終り凝固が完了した後に埋没された蠟型を熔し去つて回収する。蠟出しには次の如き方法がとられている。

i. 電気炉又はガス炉による方法: 炉温は蠟の熔ける最低温度に保ち、蠟型の膨脹により鑄型のクラックを生じないようにゆつくりと蠟を抜く。加熱時間は5乃至24時間である。鑄型内の蠟は大部分除去され、回収率は50~90%である。この方法が最も広く行われている。

ii. 蒸気により急速に蠟出しを行う方法: 湯口に 100°C の水蒸気を直接ふきつけて 1~2 時間で完了する。

iii. 減圧蠟出し装置による方法: これは湯口を、加熱板の中心にとりつけられた真空オリフィスに連結して蠟出しする方法で、湯口、湯道の蠟は除去出来るが、蠟型の蠟は除去出来ない。

iv. 蠟出しと焼成を同時に行う方法: 焼成の目的は鑄型中の水分、残留せる蠟及びその他の有機物を完全に除去することである。焼成炉にはバッチタイプ及び連続式の電気加熱炉、ガス又は重油燃焼炉が使用されている。

加熱法は、シングルコートの場合、加熱速度100~200°C/h, 最高加熱温度 650°C, ダブルコートの場合、加熱速度 100~200°C/h, 最高加熱温度 1000°C, 保持時間 2~6h, 全加熱時間 12~24h である。

焼成に際しては次の諸点に注意しなければならない。

i. 低温では水分の蒸発による収縮が起るから加熱速度を小さくする。

ii. 鑄型材の転移点の附近は、出来るだけ徐々に温度をあげ、膨脹収縮による鑄型の破損を防止する。

(8) 熔解

インベストメント鑄造品の熔解には現在次の如き方法が行われている。

i. 反転式アーク炉による 熔解鑄造法: この方法は、A. W. Merrick の設計した 180° 反転出来る間接弧光炉を使用して熔解し、鑄型は湯口を下にして炉の出鋼口上にてのせてクランプし、鑄型と一諸に炉体を反転させて

注入する。この時 15~30 psi. の空気で加圧することもある。従つて此の熔解炉の熔解量は1ケの鑄型の注入重量とひとしく、1 ヒート1 モールドの注入を行う。この炉で熔解する材料は銅合金より熔融点の高い合金である。熔解量は 6~20lbs のものが多く、熔解時間は 10~20分のもが多い。

ii. 誘導電気炉による熔解。

iii. 固定式アーク炉及びティルティング式アーク炉による方法: 最近の例では1 ヒートの熔解量 250lbs, 75 kw, 熔解時間 35 分のもが使用されている。

iv. ガス及び重油燃焼炉による熔解: これは主として Al 合金, Mg 合金及び銅合金の熔解に用いられる。

(9) 注 入

製品の重量、肉厚及び形状によつて最も適した注入法がとられねばならない。次の如き注入法が行われている。

i. 重力注入法: これは普通の砂型鑄物の注入に用いられる注入法であつて、比較的大型の精密鑄造品に使用される。

ii. 減圧鑄造法: 真空オリフィスの取付けられた鉄板のテーブル上にアスベストガスケットを置き、その上に鑄型をのせ減圧しつつ注入する。この方法は現在広く使用されており、複雑な肉薄鑄物の細部まで湯をまわすのに有効である。この方法はまた非金属介在物の少い優れた冶金的性質をもつ鑄物をつくる事が出来る。

iii. 遠心鑄造法: 大気中で堅型又は横型の遠心鑄造機に、鑄型をセットし、回転開始後に注入する。この方法は精度の高い密度の高い鑄物をつくる事が出来るが、注意しないと鑄物に介在物が多くなりやすい。これを防止するために、熔融金属を注入後回転を開始する方法がとられている。この方法によれば湯は鑄造機の回転数がかかるに従つて加速されて堰をこえて鑄型に注入される。それ故前述の場合に比して注入時の湯の攪乱が少く非金属介在物の混入が少い。

iv. コントロールされた雰囲気中での重力鑄造及び遠心鑄造: この方法によれば酸化物の介入は少くなる。

v. Merrick 反転アーク炉による注入法: これは熔解

の項に述べた通りである。

一般に注入時の鑄型温度は 1000°C から常温に至る各種の温度で注入される。この温度は鑄型材の種類、鑄込金属の種類、鑄込方法及び製品の肉厚、形状等によつて適当にえらばれる。高温の鑄型に注入する主な理由は、薄肉部の細部まで湯をまわらせるためである。珪石質耐火材を使用した鑄型ではその転移点以下で鑄込むと、鑄型にクラックを生じ鑄物の欠陥を生ずることがある。通気度の点から言うと、低温の鑄型に注入した方がよく、又高温の鑄型に注入した鑄物は結晶粒度が大きい。この点については次節でふれる。

(10) インベストメント精密鑄造品の機械的性質

i. 結晶粒度と機械的性質との関係

高温の鑄型に注入したインベストメント鑄造品の結晶粒度は低温の鑄型に注入した場合より大きくなることは前述の通りである。従つて機械的性質も変化するものと思われるが、その程度は合金の種類によつて異なる。

Table 8 はアルミニウム合金 356 (7%Si, 0.3%Mg) に於ける機械的性質と鑄型温度との関係を示す。結晶粒度の粗大は明らかに悪影響を及ぼしている。Table 9 に示すのは SAE 4140 (0.40% C, 0.95% Cr, 0.85% Mn, 0.20% Mo) の例である。鑄型温度 1400, 1600, 1800°F の場合について常温及び高温に於ける機械的性質を比較すると、鑄型温度の影響は殆んど見られない。一般に鉄系合金に於いては、鑄型温度の高低は結晶粒度を変化さ

Table 8. Average mechanical properties aluminum 356 as modified by mold temperature <sup>2)</sup>

Metal condition	Room temperature mold			700°F mold temperature		
	Tensile (psi)	Elong (%)	Rockwell	Tensile (psi)	Elong (%)	Rockwell
As-cast	24,500	5	50F	23,000	4	48F
356-T-4*	34,000	12	63F	31,000	7	63F
356-T-6	38,750	5	82F	26,350	3	82F

Notes \* T-4 condition indicates as water quenched from 1000°F

T-6 indicates as-quenched and aged for 3 hours at 320°F.

Table 9. Data averages of tests on SAE 4140 steel to determine influence of mold temperature on mechanical properties <sup>2)</sup>

Metal condition	Flask temperatures															
	Room temp.				1400°F				1600°F				1800°F			
	Tensile psi X 1000	Elong. (%)	Red. area (%)	Rockwell C	Tensile psi X 1000	Elong. (%)	Red. area (%)	Rockwell C	Tensile psi X 1000	Elong. (%)	Red. area (%)	Rockwell C	Tensile psi X 1000	Elong. (%)	Red. area (%)	Rockwell C
As cast	147	3	33	125	3	34	126	3	34	124	3	34	124	3	34	
Dbl. Norm.	120	3	31				120	2	32			120	2	32		
Quenched †	150	—	53	—	—	54	160	—	55	—	—	160	—	55	—	
Temp. 400°F	210	—	53				215	—	52			215	—	52		
Temp. 600	200	2	50				210	7	48			210	7	48		
Temp. 700	250	4	47	252	2	47	258	4	47			258	4	47		
Temp. 800	190	2	45				185	8	44			185	8	44		
Temp. 900	195	6	42	197	5	42	195	5	42	191	4	42	191	4	42	
Temp. 1000	180	3	38				170	6	37			170	6	37		
Temp. 1100	174	10	35	169	9	35	169	8	35	164	9	35	164	9	35	
Temp. 1200	120	16	25				125	16	25			125	16	25		
Temp. 1250	135	14	29	135	13	29				130	14	29				
Temp. 1400	110	23	20				107	16	20			107	16	20		
Temp. 1450	118	19	33				145	5	36			145	5	36		
Temp. 1525 ††	134	10	25				135	12	25			135	12	25		

\* Double normalized at 1600° and 1700°F with still air quenching.

† Oil quenched from 1525°F.

†† Tempered at 1525°F for 2 hours, furnace cooled to 1400°F, then air cooled.





3. Stress-to-Rupture and Elongation Values.

(a) Cast alloy

Treatment	Temp (°C)	10h		100h		1000h	
		Strees (psi)	Elong. in 2'' (%)	Stress (psi)	Elong. in 2'' (%)	Stress (psi)	Elong. in 2'' (%)
(1)	650	72,000	—	58,000	—	46,000	—
(1)	732	54,000	—	40,000	16	29,000	—
(2)	815	35,500	15	28,500	3	22,000	1
(1)	871	24,500	19	18,000	17	13,000*	11
(1)	926	18,000	7	14,800	6	12,000*	2*
(1)	982	14,000	16	10,500	10	8,000	6

Treatment

(1) As cast (2) 1260°C, 1h, water-quenched; aged 16~50h, 732~815°C \* Estimated

(b) Forged, heat-treated alloy

Hours	Stress to rupture in time indicated (psi)		
	650°C	732°C	815°C
100	63,000	41,500	25,500
1,000	51,000	32,500	19,400
10,000	40,000	25,500	14,500
100,000*	31,500	19,700	10,900

\* Extrapolated

Table 11. Blades of Conventional Analysis Tested under Thermal Shock<sup>(16)</sup>

Element	Forged* S 816	Forged nimonic 80	Cast stellite 31 (×40)
C	0.40	0.05	0.50
Ni	20	75	10
Cr	20	20	25
Co	43	1.5	55
Mo	4	—	—
W	4	—	7
Cb	4	—	—
Ti	—	2.5	—
Al	—	1.0	—

\* Prior to testing these blades were heated to 1230°C for 15 mn. and quenched in oil.

レードについて熱衝撃試験を行つた。供試材は Table 11 に示す 3 種類で S816 及び Nimonic 80 は鍛造品、Stellite 31 (×40) はインベストメント鑄造品である。第 1 の試験は加熱温度 900°C, 加熱時間 90 秒, 冷却時間 10 秒, 水焼入 (スプレイ), 70 回繰返した結果は 3 者ともクラックを生じた。第 2 の試験は冷空気を吹付けて冷却し, 500 回繰返した結果は S816 はクラックを生せず, 他 2 者はクラックを生じたが, 鑄造 Stellite 31 は鍛造 Nimonic 80 に比してクラックは軽微であつた。これらの結果から Siegfried 等は, 鑄造品が鍛造品よりサーマルショックに弱いという説はあやまりであると

結論している。

以上いくつかの実験結果を引用したが, 精密鑄造タービンブレードは完全に管理された作業によつて製造され且つインベストメントキャストにに適した耐熱合金をえらぶならば, 鍛造品にまさる多くの長所を有している。将来ガスタービンの性能の向上に伴つて, 精密鑄造タービンブレードはますます多く使用されるようになるであろう。

(11) インベストメント精密鑄造品の寸法精度  
インベストメント精密鑄造品の寸法精度は, 注入される金属の種類, 鑄物の形状及び大きさによつて異なり, 同一の製品でも位置によつて異つている。従つて精密鑄造品の寸法精度については個々のケースについて詳細に検討を行わねばならない。しかし一般にインベストメント鑄造品の寸法精度は次にのべる程度と考えてよい。

- 非鉄合金..... ±0.002in/in
- 鉄系合金..... ±0.005in/in
- 面の平滑度<sup>(17)</sup>..... ±0.001in/in
- 孔の寸法精度<sup>(17)</sup>(1/4"φ 以下, 深さ約 1/2" の小孔の場合)..... ±0.003in/in
- 角度の精度<sup>(17)</sup>..... ±0.5°
- 表面粗さ..... 5~20μ

Fig. 4 に示すのはよく設計された合金鑄鋼品の寸法のばらつきを示す。

インベストメント精密鑄造品は上述のやうに良好な寸法精度を有するから, 機械加工代を極度に少なくすることが出来, 特に高度の精度を要しない部分は鑄放しで十分使用することが出来る。

(12) インベストメント精密鑄造品の使途

前述した如くインベストメント鑄造法は第二次大戦中殊に米国に於いてタービンブレードの精密鑄造に盛に使用され大きな成果をあげた。一般にタービンブレードは

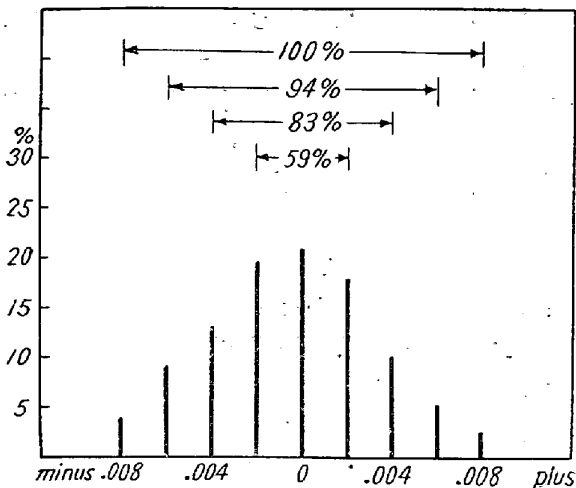


Fig. 4. Tolerance deviation spread for ferrous casting<sup>2)</sup>

複雑な曲面を有し機械加工に時間がかかり、又ある種の super alloy は硬くて切削が困難であり、或いは鍛造の困難なものもあるので精密鑄造は最も適当な製造法である。

戦後インベストメント精密鑄造品は、一般機械器具部品としても盛んに使用されるようになった。この場合最も問題となるのは、従来の機械器具部品は鍛造品又は鋼材からの削出しでつくられていたため、鑄造に不適當な形状のものが多いことである。従つて鑄造に適するように設計を変更することが望ましい。部品の製作コストを切下げるために使用者が協力を惜まないならば、これは多くの場合可能であり、精密鑄造による効果を十分発揮することが出来る。筆者の経験によつても、このような設計者の協力が得られた場合は殆んどすべて良好な結果を得ている。

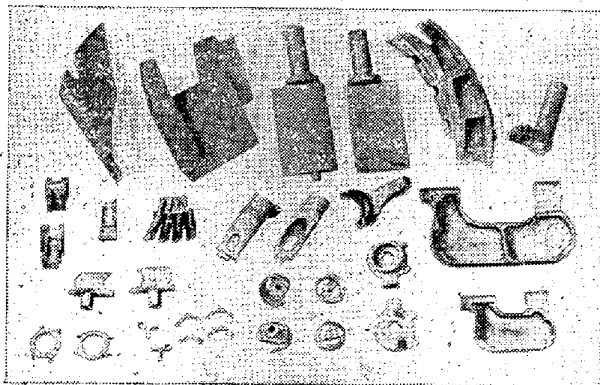


Photo. 2. Some parts produced by investment casting.

インベストメント精密鑄造品の用途は極めて広い。筆者の工場の製品例を Photo. 2 に示す。インベストメント精密鑄造品は、タービンブレードの他に、マシン部品（ボビンケース）、計測器部品（インディケーション

グマイクロメータプレート、フィルター、アングル等）オートバイ部品（カム軸、シフターフォーク、駆動ペダル、駆動レバー、カムレバー等）、エンジン部品（ラチェット、L型槓桿、バルブシート等）、ショットプラスト部品（フォードインペラー）、ステンレススチールウォッチケース等に使用されはじめている。又装飾品や歯科及び外科用充填合金、接骨合金等特殊な目的にもこの方法が使用されている。

製品の大きさは約 20 乃至 70mm のものが最も経済的に有利である、製品の形状は出来るだけ複雑な曲面を有し、機械加工の困難なもの、又厚肉の品物より比較的薄肉で肉厚均一なものが適している。製作個数の多いことはコスト低減の重要な条件となる。

### III. シェルモールド法 (Shell Molding Process)

#### (1) シェルモールド法の歴史<sup>18 19)</sup>

シェルモールド法は、第2次大戦中、ドイツ人 Johannes Croning によつて発明された新しい鑄造法である。この方法は“C”プロセスとも呼ばれているが、これは発明者の頭文字をとつたものである。Croning は此の方法によつて、8cm 手榴弾の中子を製作し、日 6000 ケの量産に成功したと言われている。ドイツ政府は此の方法を秘密にしていたが、終戦後シェルモールド法に関する資料はマイクロフィルムに収められ、ワシントン国会図書館に PB-83891 として分類保管された。この方法に関する最初の詳細な報告は、Field Information Agency, Technical, U.S. Dept. of Commerce によつて発行された F. I. A. T. Final Report No. 1168, May 30, 1947 であり、“The ‘C’ Process of Making Mold and Cores” と題されている。しかし此の方法が米国に於いて広く応用されはじめたのは1951年以降であつて、未だわずか4年の歴史を有するに過ぎない。

我が国に於いては、1952年2、3の工場に於いてこの方法の研究、試作が始められ、現在では多くの工場がこの方法を採用して生産を行つている。

#### (2) シェルモールド法の概要

シェルモールド法とは、その名の示す如く、厚さ数ミリメートルの殻状の鑄型に、熔湯を注入して鑄物をつくる方法である。鑄型材料は普通の鑄型と同様に珪砂であるが、100乃至200メッシュの微細な砂を使用する。砂粒は合成樹脂によつて結合される。現在では専らフェノールレジンが使用されている。これは代表的な熱硬化性

樹脂であつて、微細な白色、又は淡黄色の粉末として市販されている。

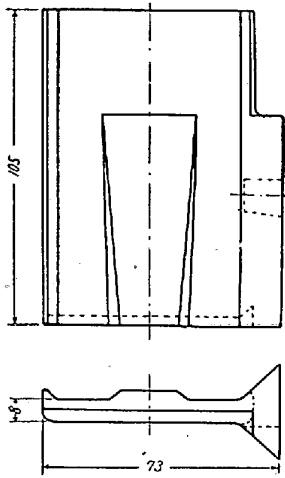


Fig. 5. Blade for shot blast

模型は普通アルミニウム又は鋳鉄でつくられ適当な parting line によつて分割され、同一種類のメタルプレート上に、湯道、押湯とともに固定される。これをパターンプレート (Pattern plate) と呼んでいる。パターンプレートには形成されたシェルを剝離するための剝離ピン (Lifting pin) 及び2枚のシェルを組立てるための合せピン (Alignment pin) がとり

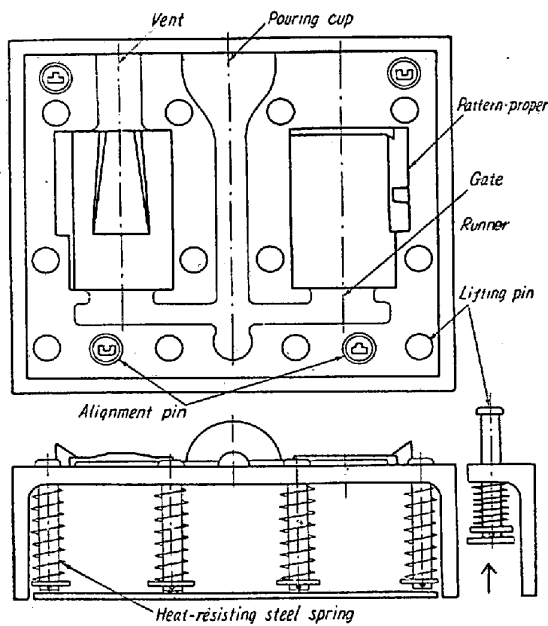


Fig. 6. Pattern plate for shell Molding

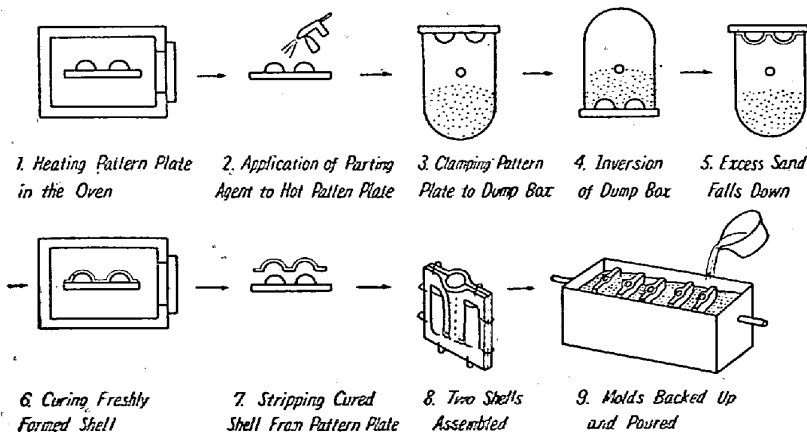


Fig. 7. Steps in the shell molding process

つけられる。Fig. 5 及び Fig 6 はショットブラストプレートとそれをつくるためのパターンプレートを示す。

レジン通常 5 乃至 8% 砂中に配合され、適当なミキサーによつて十分混合される。この際レジン粉末が均一に砂粒に附着するように少量の wetting agent が添加される。wetting agent としてはケロシンが普通用いられる。

レジン混合砂は普通ダンプボックス (Dump box) と呼ばれる深さ 500~700mm の鉄板製の箱の中に入れられる。シェルの造型及び組立、注入の過程は Fig. 7 に示す如くである。次に簡単な説明を加えよう。この図はわかりやすくするために最もプリミティブな設備について説明したものである。

先ずパターンプレートは、加熱炉によつて 200°C 乃至 280°C に加熱される。この場合パターンプレートは各部が均一な温度に加熱されることが望ましい。パターンプレートの温度はレジンの種類により適当にえらぶ必要があるが、作業速度と加熱炉温度によつて容易にコントロールすることが出来る。

加熱されたパターンプレートには、シェルの剝離を容易にするために parting agent が塗布される。普通使用される方法はシリコンの 2~4% エマルジョンをスプレーガンによつて吹付ける方法である。これは素晴らしい離型効果を示す。

次にパターンプレートはダンプボックスに取付けられる。ダンプボックスの取付フランジは水冷ジャケットにするか、又はシリコンラバーを接着して断熱する。

ダンプボックスを転倒するとレジン混合砂がパターンプレート上に落下してその表面を覆うと、砂中に混合されたレジンは一且熔融し、直ちに硬化を始める。7~15秒後ダンプボックスを旧位置に復すると、余剰の砂は再びダンプボックスの底に落下し、パターンプレートの面

には未硬化のシェルが附着する。パターンプレートを取外し、約 300~380°C の炉中で 30~80秒加熱すると、シェルは完全に硬化して黄色又は淡褐色を呈する。この過程をキュアリング (Curing) と呼ぶ。硬化したシェルはリフティングピンを下から押上げることにより容易にパターンプレートから剝離される。リフティングピンのメカニズムは Fig. 6 に示す如くである。

かくて造型の終つたシェルは鋳型の半分 (mold half) をなすわけであるが、普通 30~60kg/cm<sup>2</sup> の抗析力を有し、模型金型の細

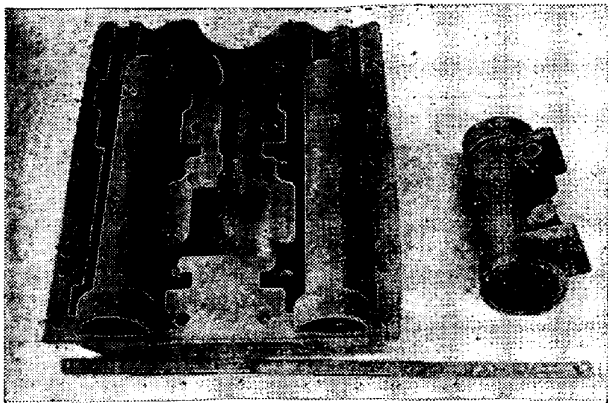


Photo. 3. Shell mold and its product.  
(steel casting)

部まで忠実に再現しており、表面は極めて滑かである。又大きな通気度を有する。

2枚のシェルは合せピンによつて正確に組立てられる。シェルを固着する方法は、簡単なU字型クリップによる方法、ボルト止め等いろいろ考えられているが、最も完全な方法は合成樹脂の接着剤を用いる方法である。普通液状又は粉末状の熱硬化性のベークライト樹脂が接着剤として使用されている。

組立てられたシェルモールドは、鉄板製の注入ケースに入れ、背後を径3mm程度のスチールシヨット又は砂でバックアップし、或いは全然バックアップなしに裸で熔湯を注入する。

鋼又は鑄鉄の如き高融点のメタルを注入すると、シェルは熔を上げて燃え、シェルは崩壊してばらばらの砂になる。アルミニウム合金の如き低温のメタルを注入した場合は、シェルは大部分その形を保っている。いずれの場合にせよ、鑄物は容易に裸になるから、砂落しの工程は極めて簡単である。

### (3) パターンプレート

シェルモールド用パターンプレートは200°C乃至300°Cに於いて相当の強度と硬度を有することが必要である。最も多く使用される材料は鑄鉄とAl合金である。

鑄鉄はAl合金に比して熱容量が大で、造型作業中に冷却し難く、機械加工及び表面仕上も比較的容易であり焼鈍して使用すれば繰返し加熱によつて歪を生ずるおそれも殆んどない。又適当な強度と硬度を有し10,000回以上使用しても磨耗によつて製品の寸法精度を損うことはない。Al合金は鑄鉄に比して熱容量が小さく、磨耗しやすく、4000回以上使用することは困難であるが、加工仕上は甚だ容易であり、製作費は鑄鉄よりずっと低廉である。

パターンプレートは表面を研磨又は摺合せされた厚さ

10~18mmのメタルプレートと、その上にとりつけられた同種類のメタルのパターン本体 (Pattern Proper) 及び湯道、注入口並びに押湯等から成立っている。これらはすべて正確に且つ表面を滑かに仕上げられる。わずかのアンダーカットもシェルの破損の原因となる。

パターン本体は適当な収縮代を見込んで製品の寸法より1~2.5%大きく製作し、適当な割肌で2分割して、メタルプレート上に固定され、夫々鑄型の半分 (mold halves) を造型するために使用される。多くの場合Fig. 6に示すように中心の湯道 (Sprue) に対してパターン本体を左右対照にとりつける方法がとられている。こうすれば一枚のパターンプレートで造型された同型のシェルを2枚合わせることによつて、1モールドに2ヶの鑄物が湯道を中心として相互に180°回転した位置で鑄造される。又1枚のパターンプレートをいくつかの区割に分割して何枚分かのシェルを同時に造型し、あとでそれを折つて数ヶの小型のシェルを得る方法もある。

パターン本体には、造型されたシェルの剝離を容易にするために適当な抜勾配をつける必要がある。この抜勾配は製品の要求する寸法精度によつて1/200~1/300にすることも可能であるが、精度を要しない面には1°程度の大きな勾配をつける方がよい。

シェルモールド鑄造品の寸法精度はパターンプレートの正確さによつて決定的に左右されるから、その製作は出来るだけ機械加工により、手仕上を最小限にとどめることが大切である。剝離ピンの形式はいくつかの種類があるが、現在ではFig. 6に示すタイプのものが最も多く用いられている。スパイラルスプリングは耐熱鋼でつくられる。

### (4) 原材料

i 砂：珪砂は高純度の100乃至200メッシュのものを使用する。Table 12及びTable 13に我が国のシェルモールド用珪砂及びオーストラリア産シルコン砂の化学成分と粒度分布の例を示す。

シェルモールド用珪砂の粒度分布に関しては、多くの議論がある。粒度分布はシェルモールドの強度に影響し従つてレジンの配合量を左右する。微粉の存在は、レジンの結合力を阻害し、シェルの強度を著しく低下させる。一般的傾向としては微粉の少ない比較的粒度分布の広いものが、シェルモールドに適当とされている。例えば米国では5-screen distribution sandが推奨されている。粒度と同時に重要なのは粒形と表面状態である。ラウンドな表面の滑かな砂は、アンギュラーな粗い表面の砂に比して同一レジジン配合量でもシェルの強度は著し

Table 12. Chemical analysis of some shell-molding sands (%)

	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	ZrO <sub>2</sub>	Ig. Loss
A-1	99.34	0.24	0.54	—	—	—	0.28
A-2	97.84	0.16	1.10	0.34	0.17	—	0.28
B	99.18	0.06	0.34	tr	tr	—	0.21
C	98.12	0.67	0.74	tr	0.22	—	0.15
Zircon* sand	35.36	0.15	0.09	—	—	61.91	0.20

\* Produced in Australia

Table 13. Grain distribution of shell molding sands in Table 12 (% Retention)

mesh No.	Sands						
	48	65	100	150	200	270	Pan
A-1	—	0.2	1.6	38.4	36.4	19.0	4.4
A-2	—	0.2	22.0	61.8	13.0	2.8	0.2
B	0.4	2.0	23.2	52.2	16.8	4.4	1.0
C	—	5.2	28.4	36.2	16.4	11.2	2.6
Zircon sand	—	—	3.8	64.2	31.4	0.6	—

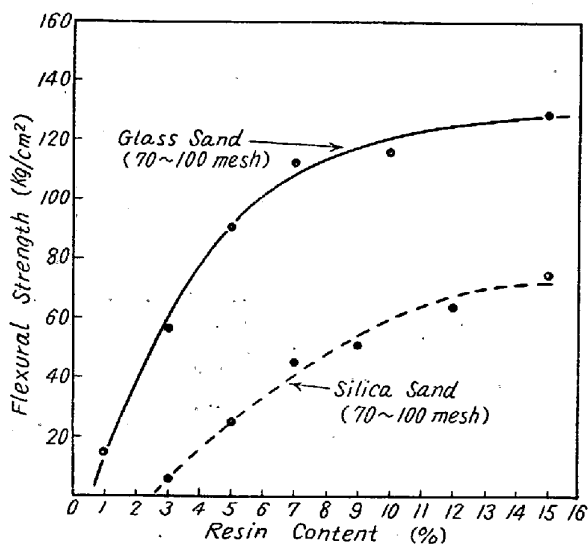


Fig. 8. Flexural strength of shells at varying resin contents 20)

く大である。 Fig. 8 は同一量のレジンを配合の場合、国産の珪砂及びそれとほぼ等しい粒度のガラス球で造型したシェルの強度の比較を示す。このガラス球はほぼ理想的な球形であり、且つ極めて滑かな表面を有している。

我が国には有名なオッタワサンドのように、ラウンドな粒形と滑かな表面を有する珪砂を殆んど産出しない。

Photo. 4, 5 及び 6 に国産珪砂と米国の珪砂の一例及びオーストラリア産ジルコンサンドを示す。ジルコンサンドの主成分は  $ZrSiO_4$  であつて、ラウンドな粒形と滑かな表面を有し又珪砂の約 2 倍の密度と熱伝導度を有しており、後述する如くすぐれたシェルモールド造型材



Photo. 4 Japanese angular silica sand x50 (2/5contracted)

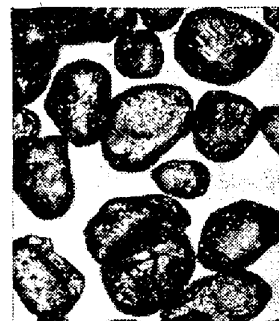


Photo. 5. American round silica sand x50 (2/5contracted)



Photo. 6. Australian zircon sand x50 (2/5contracted)

である。ジルコンサンドは 3% のレジンを配合 (容積にして珪砂の場合の 6% のレジンを配合量に相当する) で、珪砂に 6% レジンを配合した場合より大きなシェルの強度を示す。

ii. フェノールレジン (Phenolic Resin)

シェルモールドの結合剤としては、現在では専ら 2 ステージのフェノールフォルムアルデヒドレジンを (novolac) が使用されている。シングルステージレジン (resole) は常温で重合反応をおこし貯蔵に不便であるから使用されない。

フェノールレジンは代表的な熱硬化性樹脂であつて、約 100°C 以上に於いて重合反応をおこし、一旦熔融して直ちに硬化をはじめ。通常約 10% 以下のヘキサメチレンテトラミンが硬化促進剤として添加されている。ヘキサメチレンテトラミンは水分を吸収しやすく、この含有量によつてレジンの吸湿度に大きな差を生ずる。

シェルモールド用に製造されたレジンは通常 200 メッシュより微細な粉末であつて、wetting agent によつてわずかに湿らされた砂粒の周囲に附着する。レジン混合砂が熱せられたパターンプレートに接すると、接触面に近い砂粒の周囲のレジンは直ちに熔融して砂粒をコートし、同時に熱プレート面に向つて流動する。この現象をレジンの流動 (flow) と呼んでいる。ついでレジンはすみやかに硬化をはじめ。かくて砂粒と砂粒の接触点に於いて強固な結合が形成される。 Fig. 9 は加熱によるレジンの性質変化の有様を定性的に図示したものである。ライン AB はレジンの熔融過程を示し、レジンは急速に solid から plastic の状態を通つて viscosity を失う。B 点に於いてレジンは流動を止め、ついで rigi-

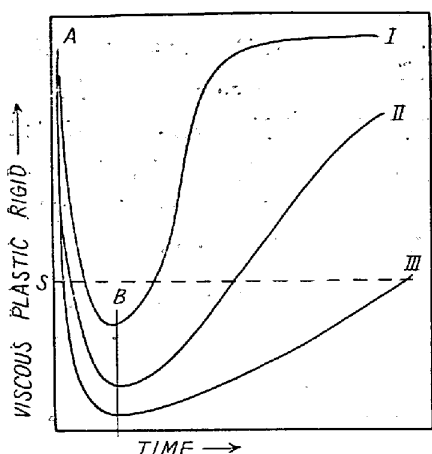


Fig. 9. Physical changes during process of a thermosetting resin.<sup>21)</sup>

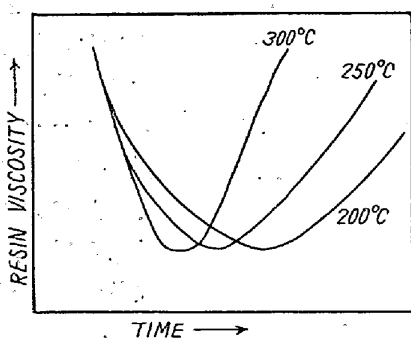


Fig. 10. Effect of heating time and temperature of heat source on resin viscosity.<sup>22)</sup>

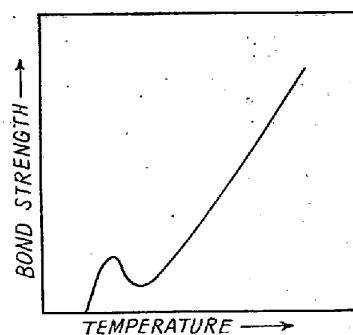


Fig. 11. Variation of bond strength of resin/sand mixture with temperature<sup>22)</sup>

viscosity を増して硬化の過程を辿る。この曲線はレジンの種類によつてその形状を変化するであろう。シェルモールドの造型速度をあげるためには、図中 I 及び II の如き硬化のすみやかなレジンが望ましい。III の如き長く viscous 及び plastic の状態にとどまるレジンにはシェルモールドには不適當である。この曲線の形状は加熱温度(パターン温度)によつても変化する。Fig. 10 はパターン温度がレジン viscosity 変化に及ぼす影響を示している。当然予想される如く加熱温度が高くなるにつれてレジンが融解、凝縮速度は大となる。Fig. 11 は熱プレートからある距離の砂レジン混合物が温度上昇とともに結合力を増してゆく状態を示している。途中のピークはレジンが完全に融けた点を示し、ついでレジンが極く短時間の間大きな流動性を示すから結合力は暫時低下し、硬化開始とともに再び上昇する。

シェルの造型上特に重要なレジン性質は、その軟化点、熔融点、及びゲル化時間である。Table 14 は国産及び外国産レジン諸性質の測定結果を示す。試験法は

すべて精密鑄造研究会仮規格シェルモールド用粉末樹脂試験法(1954)によつた。一般に流動度の小さいレジンにはシェルの強度が劣るようである。しかし流動度の大きなレジンでは未硬化シェルがパターンプレートより peel back をおこしやすい。peel back とは未硬化シェルが反転時にパターンプレート面より層状に剝げ落ちる現象であつて、造型作業を甚しく阻害する。

現在では多くの国産レジンが外国品に劣らぬ優れた性質をもっている。唯その価格は外国品に比して甚だ高価である。例えば米国に於いてはレジン混合砂のコストは 14.3円/kg<sup>23)</sup> であるが、国産レジンを使用すれば、6% レジン配合で 30~33円/kg になる。しかもこのレジンコストの問題は早急に解決されさうでない。

iii. レジンコーテッドサンド (Resin-coated sand)

レジンコーテッドサンドとは砂粒のまわりをうすいレジン膜で被覆したシェルモールド用の砂であつて、粉末レジン配合せずそのままシェルの造型に使用される。レジンコーテッドサンドは米国に於いて工業的に

Table 14. Properties of some shell molding resins

Properties	Moisture (%)	Ash (%)	Grain retention (%) on 150 mesh sieve	Softening point (°C)	Melting point (°C)	Flow at 125°C (mm)	Gel time (sec)	Maximum moisture absorption (%)	Flexural ** strength of shell (kg/cm <sup>2</sup> )
Resins*									
A	0.07	0.04	1.0	75-78	91-95	29.3	63.0	2.43	41.2
B	0.49	0.26	1.4	83-85	92-97	31.5	72.3	4.17	40.5
C	0.33	0.05	12.3	88-91	99-103	29.8	50.1	1.39	34.5
D	1.67	2.19	10.5	92-93	108-112	24.3	61.9	3.07	18.0
E	0.02	0.23	2.2	90-93	103-105	32.3	56.5	2.53	42.0
F	0.81	1.04	0.5	90-91	105-108	30.3	88.3	4.90	31.5

\* A, B, C: Japanese Resins, D, E, F: U.S.A. Resins

\*\* B sand in Tab. 13 was used. Resin content; 5% of sand.

生産されており、近く我が国に於いても生産されると聞く。その製法は特許となつているが、先ず液状のフェノールレジンと砂を混練し、ついで液状レジンを硬化させて、砂粒の周囲に薄いレジンの皮膜をつくるものと考えられる。レジンコーテッドサンドは次のようなすぐれた特徴を有している。

- a) 砂の flowability が極めて良好である。
- b) レジンと砂の分離、偏析をおこさない。
- c) 粉末レジンの場合の  $1/2 \sim 3/4$  のレジン配合量で同等のシェル強度をあらわす。

d) 従つて鑄込時のガス発生量が非常に少くなる。

これらの諸特徴は現在の粉末レジンを使用する場合の多くの困難を解決するであろう。

### (5) 造型の方式及びシェル中子の製造

現在シェルモールド法に於ける造型作業には、極めてプリミティブな手動の造型機から高度に機械化された自動造型機に至るまで、さまざまなタイプ及び能力のシェルモルディングマシンが製作、使用されている。その殆んどすべてがダンプボックスの転倒の方式をとつている。この場合問題となるのは垂直面の砂のつまり方が不完全なことである。ダンプボックスの転倒に伴つて砂は完全に垂直に金型面上に落下せず必ずかげを生ずるから、この部分の垂直面は特に砂の充填が不完全となりそこに熔湯のペネトレーションを起す。これを防止するために、ダンプボックスに錠戸をつける方法がある。ダンプボックスが完全に転倒してから錠戸が開いて砂は垂直に落下するから砂づまりは改善される。

又砂のフロウアビリティは砂づまりに影響する大きなファクターであるが、砂にはレジンの分離を防止するために wetting agent (通常砂の  $0.2 \sim 0.4\%$  のケロシン) が添加されて砂粒が湿らされ、その上に微細な粉末レジンが附着しているから、粉末レジン混合砂はフロウアビリティに乏しい。前述したレジンコーテッドサンドはこの問題を解決する有力な手段である。

H.W. Dietert の発明した“D”プロセス<sup>24)</sup>は、バインダーとして特殊な植物油を用いた湿態の砂を、パターンプレートと contoured dryer の間の厚さ数ミリメートルの間隙に吹き込んで後、パターンプレートを取り去り、砂をそのままドライヤーの上で乾燥してうすい shell mold をつくる方法である。これも一種の shell molding process である。この方法の最大の特徴は均一な砂づまりのシェルがつくられることである。又シェルの裏面も正確な形状をしているのでクランプに便利である。“D”プロセスは常温のパターンプレートを用い

るのであるが、このアイデアを“C”プロセスにとりいれ、熱したパターンプレートにレジンコーテッドサンドを吹込み、均一な砂づまりのシェルを迅速に造型するマシンが昨年米国に於いて製造された。又ドイツに於いては、パターンプレートの上に枠を置き、上から砂の噴射口のついた板をかぶせて、枠一ぱいに砂を吹込み余分な砂は、パターンプレートの転倒によつて落下させて均一な砂づまりのシェルをつくるマシンが試作されている。

R.K. Jackson<sup>25)</sup> は Double Investment によるレジン使用量の節減を報告している。即ち先ず微細な珪砂で厚さ約  $1.5 \text{ mm}$  のうすいシェルを金型面につくりつづいて今度はレジン配合量の少い粗い砂で第2回目の Investment を行う。従つて出来たシェルは細粒の肌砂の層と粗粒のバックサンドの層との2層から出来ておりトータルのレジン使用量は微細な砂のみ使用した場合に比して少なくてすみ、しかも鑄物の肌は細粒のみの場合と同様に滑かである。

中空のシェル中子は砂の落下及び吹込の両方法でつくられる。簡単な形状の中子は落し込みで容易につくることが出来るが、少し複雑な形状のものは中子吹込機によつてつくられる。吹込の場合にはやはり前述の如き砂のフロウアビリティ及びレジンと砂の分離が問題となり、又中子ボックスの vent が問題になる。砂は空気の流れによつてはこぼれるから、vent が適当でないボックス内に空気の渦流を生じ砂づまりの不均一を生じやすい。レジンコーテッドサンドを使用すると、均一に充填された良好なシェル中子が得られる。シェル中子は製作が迅速であり、金型からとり出した時には既に完全に硬化しているので焼成中の変形のおそれがなく、寸法は極めて正確であり且つ中空であるから通気度が良好である。Photo. 7 はシェル中子の例を示す。

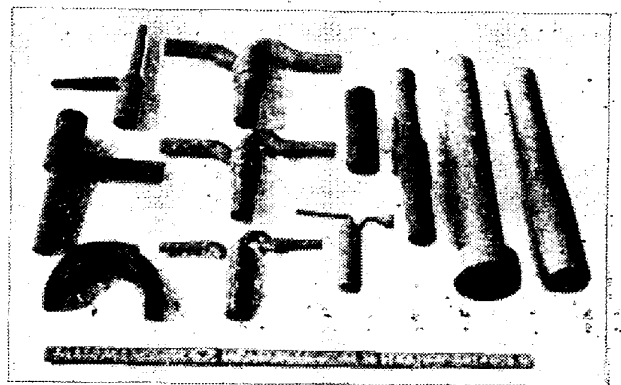


Photo. 7. Shell cores made by dumping and blowing.

(6) シェルモールドに鑄込まれた熔湯の冷却凝固

シェルモールドに鑄込まれた熔湯の冷却速度に関しては、いくつかの実験が行われている。R.E. Morey等<sup>26)</sup>は、鋼、ノデューラー鑄鉄、ブロンズ及びアルミニウム合金の種々の厚さの板をシェルモールドに鑄込んで、その中心の温度の変化を測定した。Fig. 12 は 0.24% C 鑄鋼の 1.5" 厚さの板の中心の冷却曲線である。1/16" φ スチールショット及び AFS No. 52 の粗い砂でバックアップしたシェルでは、凝固の開始から完了に至る時間は、砂型の場合より短く、バックアップしないシェルでは砂型の場合より長い。ショットは最も冷却を促進するがその効果は薄いシェルの場合程著しい。これらの関係は他の合金及び板の厚さの場合にも見られる。Fig. 13 は横軸に鑄物の厚さに対するシェルの厚さの比をとり、縦軸に砂型鑄物に対する凝固時間の短縮率をとつている。種々のメタル及び板の厚さの場合についてプロットされた点は、ショット及び砂のバックアップの両方の場合それぞれ一定の関係を示すことがわかる。即ち鑄物の厚さに比してシェルの厚さがうすくなるにつれてバックアップの影響は大きくなる。例えばシェルの厚さが鑄物の厚さの 20% の場合、ショットバックアップを行うと凝固時間は砂型の場合より 25% 短縮される。バックア

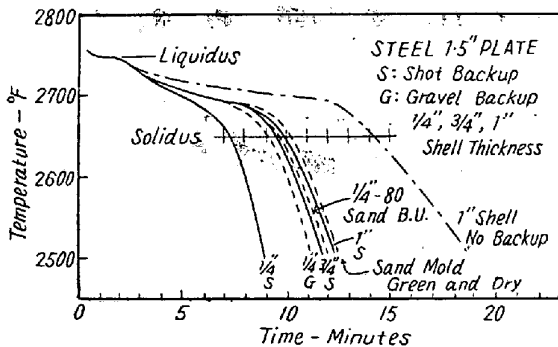


Fig. 12. Solidification and cooling curves for steel cast in shells of varying thickness <sup>26)</sup>

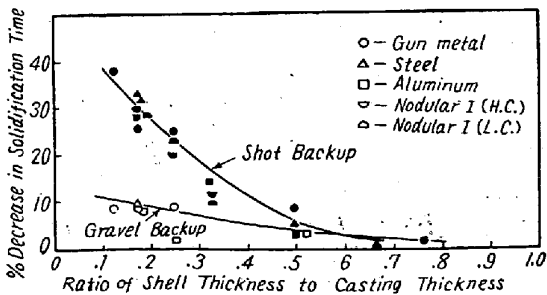


Fig. 13. Solidification time of shell mold castings in relation to sand mold casting solidification time <sup>26)</sup>

ップしないシェルに於いては凝固時間はショットバックアップの場合より非常に長くなり、厚さの比が 0.25 の場合 3~4 倍、0.75 の場合 1.5~2 倍となる。

B. N. Ames<sup>18)</sup> は種々のバックアップ材でバックアップした 1/8" 厚さのシェル及び生砂型に種々のメタルを鑄込んでくさび型の鑄物をつくり、断面をマクロエッチしてグレインサイズを比較した。その結果、生型に鑄込んだ鑄物は如何なるバックアップのシェルの鑄物よりグレインサイズが小さく、シェルは大きな熱の遮断効果を有することがわかつた。又シェルの厚さが大になるにつれてグレインサイズは大きくなる傾向がある。

鈴木氏<sup>27)</sup>はシェルモールドのバックアップ及びシェルの厚さが鑄物の冷却に及ぼす影響を調査したが、その結果によると、冷却速度は水冷のシェル、ショットバックアップ、砂バックアップ及びバックアップなしの順序に小となり、その差はシェルがうすいほど顕著である。ショットバックアップした 5mm のシェルでは砂型の場合より早く冷却するが、10mm のシェルになるとショットバックアップしても砂型の場合より冷却は大分おそくなる。

Morey の結果は、Ames 及び鈴木氏の結果と異つている。筆者の経験では砂バックアップのシェルモールドに注入した熔鋼及び熔鉄の冷却、凝固は生型の場合より緩徐である。殊にシェル中子を用いた場合此の傾向は著しいように思われる。従つて急激な肉厚変化のある鑄物及び小さな R の内隅角の存在する鑄鋼品は、シェルモールドに鑄込んだ場合ホットポイントの発生は生型の場合に比して極めて敏感である。

(7) シェルモールド鑄造品の鑄肌と寸法精度

シェルモールドに鑄込まれた鑄物の肌は、砂の粒度が細かいほど一般に滑かである。数パーセントのシリカフラワー又はジルコニアフラワーの混合は、熔湯のペネトレーションに対して良い効果を示す。又砂の充填度がペネトレーションに甚しく影響することは前述した通りである。注入するメタルの種類も鑄肌に大きく影響し、アルミニウム合金、銅合金及び鑄鉄は良好な肌の鑄物をつくる。鑄鋼品の鑄肌は一般に上述のメタルの場合より劣る。殊に低炭素鑄鋼はシェルに鑄込むと鑄肌がよくない。高合金鋼及び高炭素鋼の鑄肌は低炭素鋼に比べるとすぐれている。

シェルモールドに鑄込んだ鑄物の寸法精度は、インベストメント精密鑄造品と砂型鑄物の中間にある。クリティカルディメンジョンが片側のシェルにふくまれている場合には、精度は良好であり、例えば長さ 100mm のバーではその長さの公差は ±0.2mm 程度である。しか



シクリテイカルディメンジョンが接合面に直角にまたがっている場合には、注入時のシエルの張りのために寸法のばらつきは前の場合に比して大となる。例えば、100mmφの円筒の外径の公差は割肌と直角方向では±0.4~0.5mm程度となる。内径の精度はシエル中子を使用すれば極めて良好である。

シエルモールド鑄造品の寸法精度は注入するメタルの種類により、品物の形状により又上述の如く同一製品の中でもその測定位置によつて一率に言いあらわすことは困難であり、個々の種類の製品について詳細に検討する必要がある。

#### (8) シエルモールド法の特徴とその製品の用途について

シエルモールド法による鑄造品は、その寸法が普通砂型鑄物に比して格段と正確で且つ鑄肌が滑かですぐれた外観を有している。従つて機械仕上代を大巾に節減することが出来、加工コストを切下げることが出来る。筆者の工場に於いては重量 20kg 程度までの鑄鋼品及び鑄鉄品を多数シエルモールド法によつて製作しているが、機械加工代は 0.5~2mm である。又形状の正確なためにチャッキング及び治具へとりつける時間が普通鑄物の場合よりずつと短くて済み、又工具の損耗も少い。これらのことも加工費の減少に役立つ。しかし従来機械加工していた精度を要する面は鑄放しで使用することは一般に不可能である。

シエルモールドに於いては注入された熔湯の湯廻りが極めて良好であるから、薄肉鑄物の製造に適している。例えば Photo. 10 に示したフレームは長さ約 500mm 肉厚 4mm のパイプ状鑄鋼品であるが、砂型では製作困難なこのような薄肉鑄鋼品もシエルモールドでは容易に湯が廻る。又シリンダーの肉厚 2mm の空冷フィンも殆んど湯廻り不良は見られない。

シエルモールド法は本質的に大量生産に適した造型方式であつて、手作業にたよらない。又砂型鑄物の場合より造型、注入作業場の面積は狭くてよく、砂の使用量も普通砂型の場合の 1/10~1/20 ですみ、作業は清潔である。従つて資材及び作業管理を完全に実施することが出来る。完全に管理されたシエルモールド鑄造品は品質が極めて均一であり、従つて製品の信頼性が大である。

上述の如くシエルモールド鑄造品は多くのすぐれた特徴を有するので、従来鑄造でつくられていた製品をより正確に美しく且つ薄肉につくることが出来るだけでなく従来砂型鑄物ではつくることの出来なかつた薄肉物、複雑な形状のもの、小さな品物も細部まで忠実に再現する

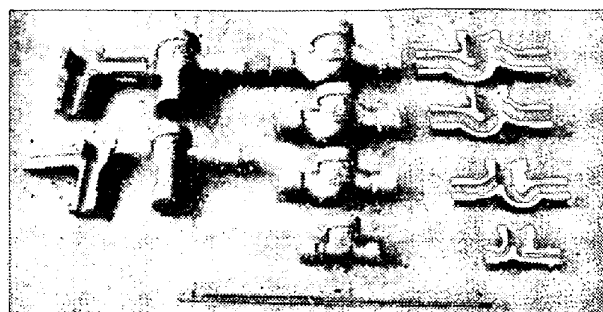


Photo. 8. Small steel casting valves made by shell molding process.

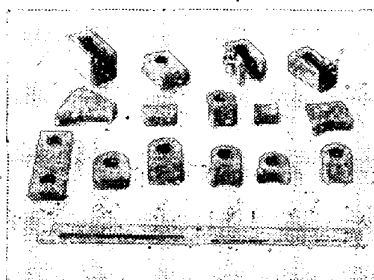


Photo. 9. Spacers and supports for boiler tubes made by shell molding process.

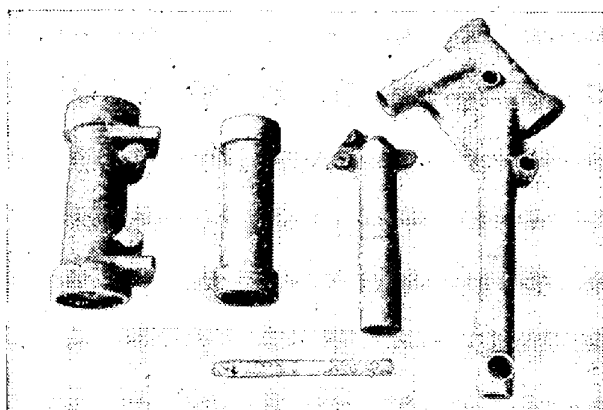


Photo. 10. Steel castings made by shell molding process.

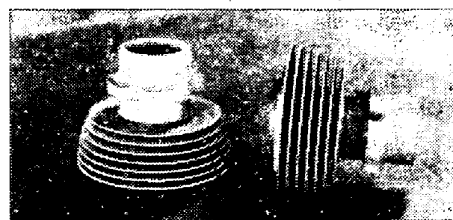


Photo. 11. Cylinder casting made by shell molding process.

ことが出来る。しかもコストは普通砂型鑄物に比して最終仕上工程まで考慮に入れると一般に割安となる。

品物の重量には本質的な制限はないが、20kg 程度以下のものが適している。肉厚は均一で薄肉物が適している。又製作個数は多くないと採算が困難である。

現在我が国に於いても多くのシエルモールド鑄造品が

各方面に盛んに使用されている。自動車、オートバイ部品、家庭電気器具部品、織機部品、パルプ類、ボイラー用チューブサポート、車輛部品、ポンプ部品等工業のあらゆる分野に使用され、それぞれすぐれた特徴を發揮し且つコスト低減に寄与している。その用途は今後ますますひろげられるであろう。

しかし勿論シェルモールド法は決して万能の鑄造法ではなく、その特徴を生かす部品の製造に應用されるべきである。

#### IV. む す び

インベストメント鑄造法及びシェルモールド法は現在行われている最も重要な精密鑄造法であり、インベストメント鑄造法の中ではロストワックス法が最も広く行われている。そこで本稿に於いてはロストワックス法及びシェルモールド法についてその歴史、作業の概要、模型、原材料、造型上の諸問題、方法の特徴及び製品の用途について概要をのべた。

インベストメント鑄造品の機械的性質は特にタービンブレード等のシビアな使用目的に対して重要な問題であり、結晶粒度の影響、再現性、鍛造品との比較について現在までの結論を概述した。

これらの精密鑄造法は工業的に生産が行われるようになってから未だ比較的歴史が浅く、多くの技術的問題が残されている。その発展のためには各専門分野の科学技術者の示唆と助言に俟つた所が多い。

又これらの鑄造法は本質的に大量生産に適した製造法であり、厳密な管理の下に生産が行われなければならない。

精密鑄造品の用途は将来ますますひろくなつてゆくであらうが、それには機械設計者の協力が要望される。

(昭和 30 年 3 月寄稿)

#### 文 献

- 1) 鹿取一男: 金属, 1 月, 1952 年, Vol 22, No 1.
- 2) R. L. Wood & D. Von Ludwig: "Investment Casting for Engineers." 1952.
- 3) 金属, 4 月, 1951 年, Vol 21 No. 4
- 4) W. F. Davenport & A. Stoff: The Iron Age, April, 19, 1951
- 5) R. L. Wood & D. Von Ludwig: The Iron Age, July, 6, 1950.
- 6) D. F. B. Tedds: Foundry Trade Journal,

March, 20, 1950.

- 7) W. F. Davenport & A. Stoff: Foundry, July, 1952, Vol. 80, No. 2.
- 8) F. Hudson: Iron & Steel, 21, 1948. pp. 427~430.
- 9) D.F.B. Tedds: Engineering, July, 29, 1949.
- 10) N. N. J. Grant: Metal Progress, July, 1946.
- 11) G. T. Harris & H. C. Child: Journal of the Iron and Steel Institute, Nov., 1954, pp. 284~290.
- 12) N. J. Grant: Trans. American Society for Metals, 1948, Vol. 40, pp. 586~610.
- 13) F. S. Badger and W. O. Sweeney: "Metallurgy of High-Temperature alloys used on Current Gas Turbine Designs," A.S.T.M. Symposium on Materials for Gas Turbines (June, 1946)
- 14) H. C. Cross and W. F. Simmons: "Heat-resisting Metals for Gas Turbine Parts", A.S.T.M. Symposium on Materials for Gas Turbines (June, 1946)
- 15) T. Y. Wilson: Materials and Methods, Oct., 1946.
- 16) W. Siegfried and F. Eisermann: Metal Progress, Jan., 1955 pp. 141~146.
- 17) J. R. Burns: Product Engineering, April, 1953.
- 18) B. N. Ames: Foundry Trade Journal, July 2, pp. 7~14, July 9, pp. 53~59, July 16, pp. 87~95; 1953.
- 19) Monsanto Production Bulletin No. 77.
- 20) 鹿島次郎: 精密鑄造研究会 レジン分科会資料 (1954)
- 21) M. F. Drumm: Trans. American Foundrymen's Society, 1953, pp. 367~377.
- 22) P. G. Pentz: Foundry Trade Journal, March, 25, 1954, pp. 323~328.
- 23) E. I. Valryi: American Foundryman, May, 1954, pp. 138~143.
- 24) H. W. Dietert: American Foundryman, Aug. 1954, pp. 56~65.
- 25) R. K. Jackson: Foundry Trade Journal, Nov., 18, 1954, pp. 597~601.
- 26) R. E. Morey, H. F. Bishop & W. S. Pellini: American Foundryman, April, 1954, pp. 46~50.
- 27) 鈴木和郎: "シェルモールドのバックアップとその影響" May, 14, 1954 精密鑄造研究会に於ける発表