

(論文)

# アルミ専用HIP装置の開発

## HIP Equipment Development for Aluminum Products



真鍋康夫\*  
Yasuo Manabe



小舟恵生\*  
Shigeo Kofune



米田 慎\*  
Makoto Yoneda



藤川隆男\*\*\*(工博)  
Dr. Takao Fujikawa

In recent years, because of the growing demand for lighter vehicles in the automotive industry, the proportion of aluminum castings has steadily increased. In response to this demand, Kobe Steel has developed new HIP equipment for aluminum products. In the new equipment, the total cycle time was reduced to about 4 hours (from 7 hours). In order to reduce HIP processing costs, the pressure and processing time had to be reduced and shortened, respectively. Experimental results showed that aluminum casting tensile strength and fatigue strength can be improved by HIPping with the new equipment regardless of the pressure when the pressure is higher than 25MPa.

まえがき = HIP (Hot Isostatic Pressing, 熱間等方圧加圧) は、高温下で高圧ガスの圧力を作用させて焼結品や鋳造品の欠陥除去、粉末の加圧焼結、異種材料の拡散接合を行う技術である。高付加価値材料の分野を中心に着目され、精密鋳造の業界あるいは粉末冶金、セラミックス、複合材料の製造分野で必要不可欠な技術として使用されている。

現在、HIP が工業的にもっとも広く利用されているのが、鋳造品の欠陥除去である。米国において軍用ジェットエンジン用の Ni 基超合金鋳造品への適用から始まり、現在では、民間機レベルまで適用されるようになってきている。アルミ合金鋳物に対する HIP 処理の適用は、Alcoa 社の特許出願<sup>1)</sup>に見られるように長い歴史のある技術であるが、その後適用は進まなかった。近年、バス・トラック用ディーゼルエンジン排気ガスのクリーン化促進には、ターボチャージャが不可欠とされており、大形ターボチャージャに使用される Al 合金インペラには HIP 処理がスペック化されつつある。また、自動車の軽量化に伴いアルミ合金鋳造部品の採用が増えてきており、足回り部品等疲労強度や信頼性が重要な部品に HIP 処理を行う動きが見られる<sup>2)</sup>。通常、HIP 装置は、1 000 から 2 200 の温度仕様にて設計されており、Al 合金を対象とした場合、オーバースペックとなっている。専用装置とすることで効率化が図られるものと思われる。

この度、アルミ専用 HIP 装置を開発し、実用化したので紹介し、併せて、最近のアルミ合金鋳物に対する HIP 処理実験結果を説明して今後の動向を述べる。

### 1. アルミ専用 HIP 装置の概念

HIP 装置の内部構造は、通常図 1 に示すとおりである。処理品の周囲に加熱用ヒータと高圧容器内面との間に断

熱層を配し、さらにヒータ制御のために熱電対などの測温装置が用いられる。このように HIP 装置の炉構造は抵抗加熱式の電気炉と同じ構成となっている。ただし、HIP 装置の場合、圧力媒体として高圧の不活性ガスを用いるため、熱の 3 伝達形式の伝熱、対流、輻射の中で圧力媒体による対流熱伝達の効果が、大気圧程度の圧力下で操業される通常の電気炉に比較し格段に大きい。例えば HIP 処理によく用いられる Ar ガスの場合、100MPa、1 000 では、密度は常圧時の数百倍にもなり、液体のようになり、かつ粘性は 1.1 倍程度であるため、対流現象が激しく生じる。この対流現象は熱損失および処理室内温度分布に大きな影響を与えるため、ヒータおよび断熱層の設計には、常圧の加熱炉とは異なる設計概念が必

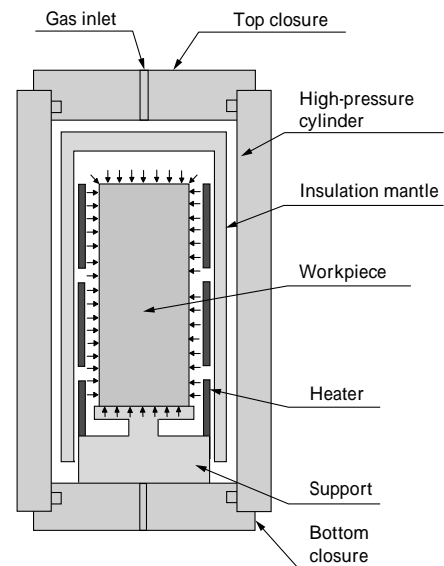


図 1 HIP 装置の概念図  
Fig. 1 Schematic view of HIP equipment

\*機械エンジニアリングカンパニー 高機能商品部 \*\*コベルコ産機サービス㈱

要である。加熱用ヒータは抵抗加熱式であり、前述の対流熱伝達への考慮のため、垂直方向に複数段分割され、それぞれ独立制御可能となっている。

アルミ専用 HIP 装置では、最高温度が 550 程度であり、従来の HIP 装置に比べ温度が低く、これまでのヒータ設計とは違った概念が適用できる。構造の一例を図 2 に示す。加熱用ヒータを下蓋上側に配置し、炉内温度の均一化のため、均熱ファンを設けている。処理品の周囲に加熱用ヒータがなく、断熱層近傍まで処理品の設置スペースとしており、炉内を有効に使用できる構造となっている。また、加熱用ヒータは、下蓋上側にまとめられているため、下蓋構造が簡素化されている。本構造では、高压ガス下における自然対流に加え、均熱ファンの攪拌による強制対流で炉内の均熱化を図っている。2次

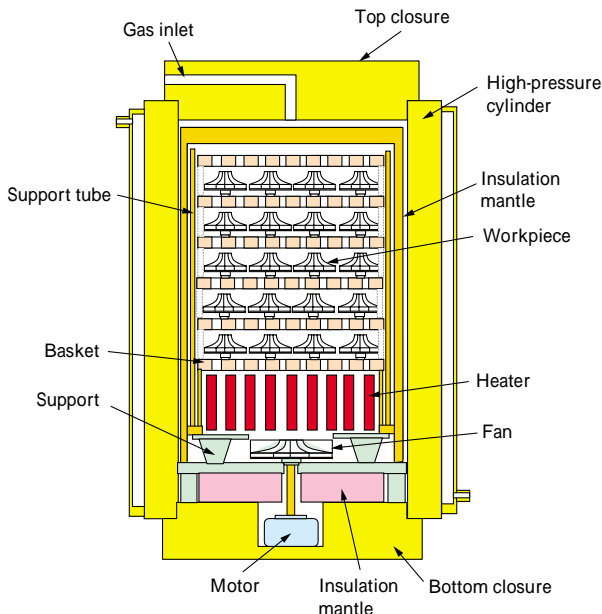


図 2 アルミ専用 HIP 装置の概念図

Fig. 2 Schematic view of HIP equipment for aluminum products

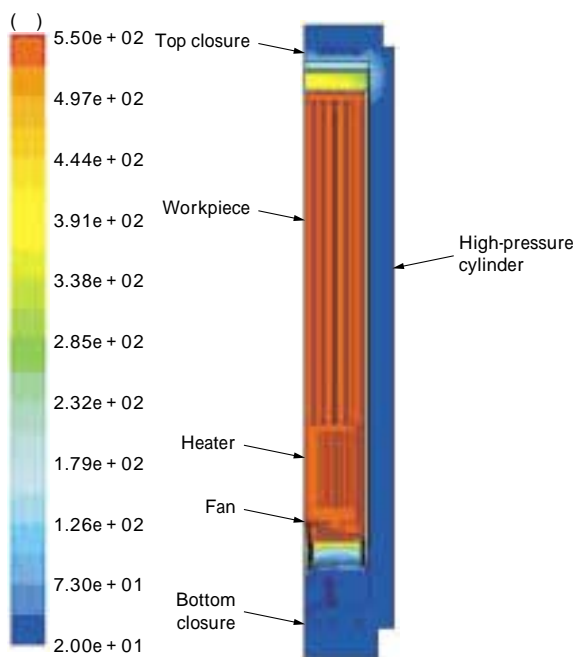


図 3 炉内熱解析結果

Fig. 3 Temperature distribution inside HIP furnace

元軸対象要素モデルにて炉内熱解析を実施した結果を図 3 に示す。均熱ファンにて攪拌することにより、温度・圧力保持の状態における処理品設置スペース内の温度ばらつきは、 $\pm 2.5$  以下の結果が得られた。

## 2. アルミ専用 HIP 装置

図 2 に示す構造を採用し、アルミ専用 HIP 装置の設計・製作を行った。装置仕様を表 1 に示す。特長としては、最高温度を 550 としてアルミ専用としている点、圧媒ガスとしてアルゴンガスに加え窒素ガスの使用を可能としており、ランニング費を下げられる点、および加熱用ヒータが均熱ファン付ベースヒータのみの構造としている点である。装置外観写真を写真 1 に示す。アルミ専用 HIP 装置とすることで、従来の HIP 装置に比べ、圧力容器内径方向を 20% 程度有効利用できている。左手前に見えているのは、増圧機および油圧ユニットである。昇圧時間短縮によるサイクルタイム短縮のため、大型タイプを採用している。

運転チャート例を図 4 に示す。昇温・昇圧から運転終了まで約 4 時間となっており、従来の HIP 装置での同様の処理の 7 時間程度と比較して、大幅な効率アップが図られている。炉内の温度分布については、 $\pm 4$  程度であり、問題ないレベルである。

自動車軽量化に伴い、アルミ鋳物部品の採用が増えてきているが、HIP 処理が採用されるためには、処理コストの低減が最大の課題となっている。米国では、HIP 処理と HIP 処理後の熱処理 (T6 熱処理) を組み合わせるこ

表 1 アルミ専用 HIP 装置の主仕様

Table 1 Specifications of HIP equipment for aluminum products

Maximum temperature	550
Maximum working pressure	105MPa
Work container diameter	650mm
Work container height	2 000mm
Press type	Press frame type (Multiple steel plate yoke type)
Loading style	Bottom loading style
Pressure medium	Argon, Nitrogen
Heater material	Fe-Al-Cr alloy
Furnace type	Bottom heater with forced convection



写真 1 アルミ専用 HIP 装置の外観

Photo 1 Appearance of HIP equipment for aluminum products

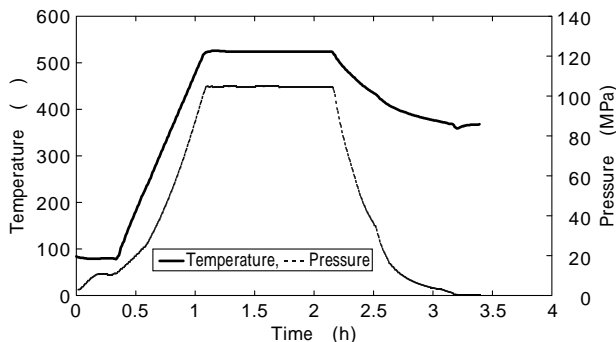


図4 運転チャート

Fig. 4 Chart of test run of HIP equipment for aluminum products

とによる処理コストの低減が検討されている。当社においても、HIP装置とT6熱処理炉を組合わせたシステムを検討している。一例を図5に示す。この例では、HIP装置に用いる断熱層とT6処理炉に用いる断熱層を兼用としている。HIP装置からT6熱処理炉への搬送は断熱層を用いて行っており、処理品を熱間状態のまま搬送することで、サイクルタイムの短縮を図ろうとしている。T6熱処理炉の温度均一化はHIP装置と同様に均熱ファン付ベースヒータを用いている。これらのシステムは基本計画段階である。近い将来、実現できるようにシステムの最適化を図るつもりである。

### 3. アルミ鋳物 HIP 処理材の評価

先に述べたようにアルミ鋳物に対するHIP処理の適用は歴史のある技術である。しかし、以前より、HIP処理条件は、温度500~530℃、圧力100MPa、保持時間1~2hの処理が必要とされてきており<sup>3)</sup>、あまり見直しがされていない。処理コストに特に影響を及ぼす保持圧力、保持時間について検討するため、アルミ鋳物を用いてHIP処理実験を実施し、機械的特性評価を行った。

本実験では、ASTM 354合金およびA356合金を供試材として用いた。化学成分は表2に示すとおりである。鋳型には、舟形状金型(20×40×長さ200mm)を用いた。HIP処理圧力および保持時間を変え、HIP処理を実施した。HIP処理後、機械的性質を改善するために、T6処理

表2 供試材の化学成分

Table 2 Chemical composition of test specimen

Alloy	(wt%)					
	Cu	Si	Mg	Fe	Ti	Al
354	1.71	9.01	0.53	0.13	0.14	Bal.
A356	0.01	6.90	0.35	0.11	0.16	Bal.

(溶体化: 520℃ × 10h, 冷却: 70℃湯中, 時効硬化: 155℃ × 5~10h)を施し、引張試験片ならびに疲労試験片を採取した。疲労試験は、繰返し速度50Hzの条件で小野式回転曲げ疲労試験機を用いて行った。疲労試験データの整理に当たっては、一般にアルミニウム合金には、鉄鋼材料特有の疲労限度の存在が認められないので<sup>4)</sup>、JSME基準<sup>5)</sup>の手順に従ってそれぞれのS-Nの関係を片対数実験式で表し、この式により、N=10<sup>7</sup>回の応力を疲労強度として評価した。

まず、保持温度520℃、保持時間2時間とし、保持圧力と機械的特性の関係について調査を行ったA356合金に対する結果を図6に示す。引張強度、疲労強度とも保持圧力25MPa以上でほぼ一定となっている。伸び、絞りについては、保持圧力25MPaに比べ、保持圧力50、100MPaの方が低くなる傾向が見られる。保持圧力を下げることによって、伸び、絞りが改善できる可能性がある。354

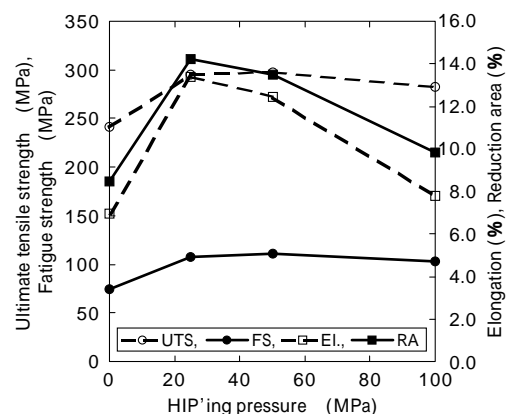


図6 引張強度および疲労強度に対するHIP処理圧力の影響(A356)  
Fig. 6 Effect of HIP'ing pressure on tensile strength and fatigue strength for A356 alloy

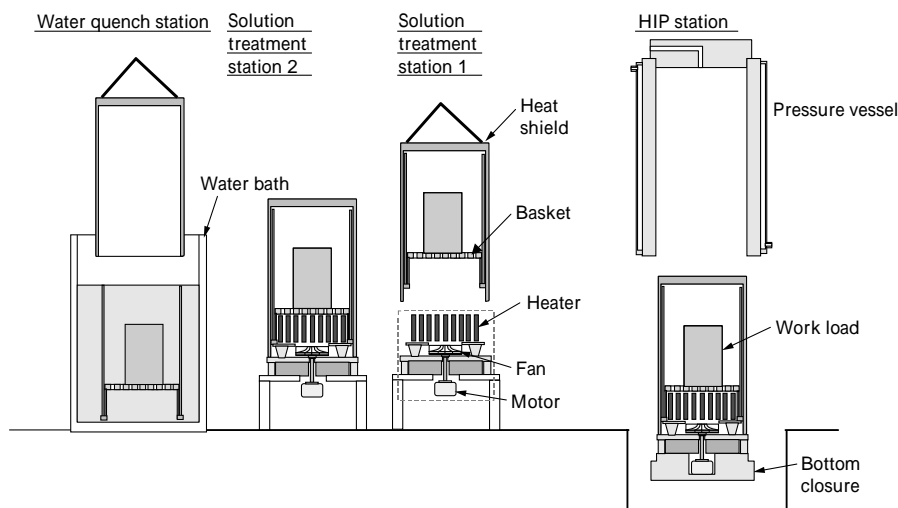


図5 高生産性アルミ専用HIPシステム概念

Fig. 5 Conceptual view of high productivity HIP system for aluminum products

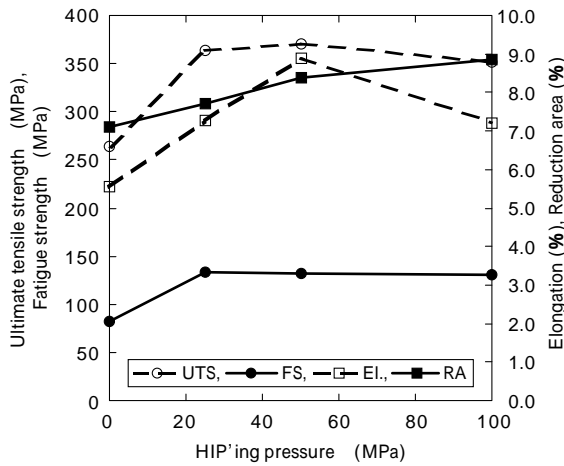


図7 引張強度および疲労強度に対する HIP 処理圧力の影響(354)  
Fig. 7 Effect of HIP'ing pressure on tensile strength and fatigue strength for 354 alloy

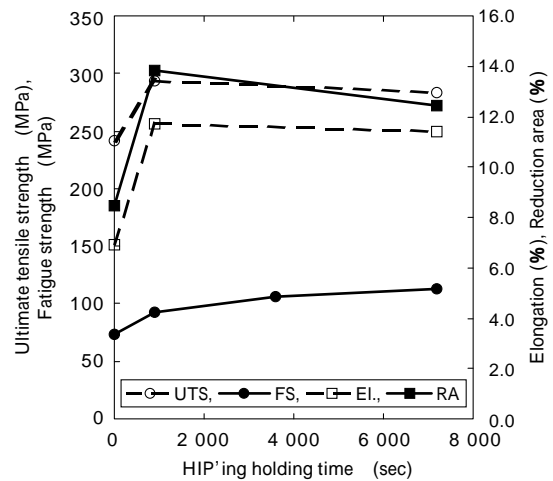


図8 引張強度および疲労強度に対する HIP 処理保持時間の影響 (A356)  
Fig. 8 Effect of HIP'ing holding time on tensile strength and fatigue strength for A356 alloy

合金に対する結果を図7に示す。この材料においても引張強度、疲労強度は、保持圧力25MPa以上でほぼ一定となっている。伸びの結果を見ると、保持圧力50MPaが望ましいとの結果である。これらの結果は、従来保持圧力は100MPaが必要とされていたが、下げることが可能で、かつ材料ごとに最適範囲は異なることを示している。

次に保持時間と機械的特性の関係について調査を行った。保持温度を520℃、保持圧力を100MPaとし、保持時間を変化させ、HIP処理を行った。ただし、保持時間が短い場合、処理品内部まで保持温度に到達しない可能性があるため、あらかじめ処理品を予熱し、その後圧力を上げる処理パターンを用いた。A356合金の結果を図8に、354合金の結果を図9に示す。引張強度については、保持時間900sec以上でほぼ一定の結果が得られている。しかし、疲労強度については、保持時間が長いほど向上する傾向が見られている。文献6)によると、354合金のHIP材は共晶Si粒子群を破壊起点としていると考えられるが、今回の実験において、保持時間が短い場合には、残留気孔を起点とするものと共晶Si粒子群を起点とするものが混在したため、疲労強度がばらつき、その結果低下したものと思われる。欧州において、アルミ鋳物の加圧処理を数分のオーダで行う液圧HIP処理が提案されている<sup>7)</sup>。このようなサイクルで処理することは大幅な処理コストダウンにつながる。ただ、今回の実験結果では、疲労強度が十分に向上しないため、保持時間を短くすることは、現状採用できない結果となっている。この点については、今後ともHIP処理条件(温度、圧力、保持時間など)と機械的特性の関係を継続調査し、最適なHIP処理条件を見出す所存である。

むすび = この度、上市を行ったアルミ専用HIP装置の紹介、ならびに最近のHIP処理テスト結果について解説した。当社におけるHIPの開発は1960年代にスタートしており、欧米と異なり、民需向けの装置技術、プロセス技術が一体となって進展してきた<sup>8)</sup>。アルミニウム材料に対するHIP処理の適用は液晶パネル用ターゲット材料

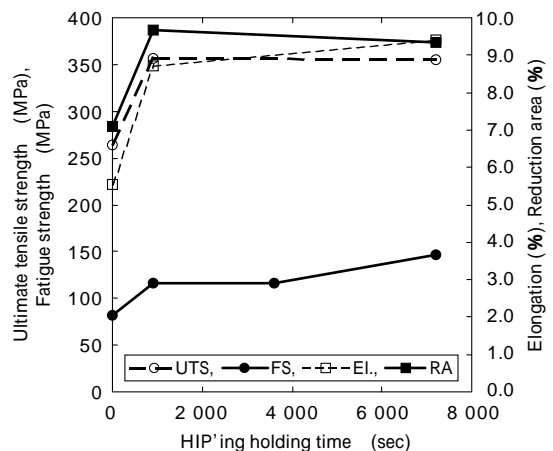


図9 引張強度および疲労強度に対する HIP 処理保持時間の影響 (354)  
Fig. 9 Effect of HIP'ing holding time on tensile strength and fatigue strength for 354 alloy

の製造のように<sup>9)</sup>、新たな分野が生まれてきているが、まだまだ、範囲は限定されている。本装置の開発が契機となってさらに広がるよう、装置およびプロセス開発に取り組む所存である。

参考文献

- 1) 米国特許第3496624号。
- 2) John C. Hebeisen et al.: SAE Technical Paper, No.2004-01-1027 (2004)。
- 3) 例えば、黒木康徳ほか：軽金属, Vol.50, No.3 (2000) p.116。
- 4) 伊藤金彌ほか：日本機械学会論文集, Vol.62, No.598 (1996) p.1316。
- 5) 統計的疲労試験方法, S002, (1981), 日本機械学会。
- 6) 杉山好弘ほか：鑄造工学, Vol.68, No.2 (1996) p.118。
- 7) 長部 茂：Al ある, No.12 (2001) p.24。
- 8) 石井孝彦ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3 (2000) p.104。
- 9) 吉川一男ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3 (2002) p.2。