



UDC 621.762 : 62-822

熱間静水圧加圧処理 (HIP) 技術の現状

河合 伸泰*・高田 寿*²・湯河 透*³

Present Status of Hot Isostatic Pressing

Nobuyasu KAWAI, Hisashi TAKADA, and Toru YUKAWA

1. はじめに

熱間静水圧加圧処理 (Hot Isostatic Pressing) は、一般に HIP 処理として広く知られるようになった比較的新しい技術である。この方法は後に詳しく述べるように高圧容器内に被処理体を装入し、高温高圧処理を施すもので、たとえば、粉体の加圧焼結、焼結及び鑄造部品の空孔欠陥除去、拡散接合などによつて機械的性質の優れた部品を製造する技術である。これと類似の技術として古くから粉末冶金やセラミクス分野で用いられてきたものにホットプレスがあるが、HIP 処理はこれを改良した技術と考えられる。すなわち、ホットプレスは一軸加圧方式であるため、複雑形状部品の製造が困難であること、一般に型材としてグラファイトを用いるため、あまり高い圧力を使用できないこと、型壁との摩擦による拘束のため、均一な密度分布が得られにくいことなどの欠点を有している。HIP 処理ではガスや液体の静水圧を用いることにより、これらの欠点を改良したもので、1955年に米国の Battelle 研究所において核燃料集合体の拡散接合用として考案されたものである。その後、各分野でこの装置を用いた応用技術の開発が進められ、また、装置技術面でも研究用の小型装置から工業生産用大型装置に脱皮すべく研究開発が行われた結果、1970年頃から超硬合金、高速度工具鋼、耐熱超合金、Ti合金などの分野で工業生産用に使用されはじめ、今日、各方面から関心もたれる技術にまで成長している。この HIP 処理技術について最近、多くの解説^{2)~5)}がなされているので、詳しくはそれらを参照していただくことにし、ここでは、HIP 装置の応用技術と装置技術の現状および研究開発動向を中心に紹介する。

2. HIP 装置および処理技術の概要

Fig. 1 に示すように HIP 装置は (a) 高圧ガスを保持する圧力容器、(b) 圧力容器に内蔵されるヒータ、断熱層などの炉内構造物と加熱電源及び制御装置、(c) 圧力容器に高圧ガスを供給する圧縮機などの加圧装置、(d) 圧力媒体のガスを貯蔵するガス集合装置、(e) 安全装置などの付属装置から成立っている。

圧力容器本体の構造は高圧円筒の上下にネジ構造の蓋を設けたものまたは高圧円筒の上下蓋にネジを設けず、蓋に作用する軸力をプレス枠で支持するものの2種類が用いられている。一般に研究用の小型装置ではネジ式、工業生産用の大型装置ではプレス枠式が一般的である。

この圧力容器の内部にヒータと断熱層が配置されるが、一般の熱処理炉と異なり、高圧ガス中での激しい対流現象に対処するため、如何に均熱性を確保するか、またヒータと断熱層を小型化して、如何に処理室空間を拡げるかが装置設計上重要な点である。ヒータは通常、軸方向に複数段に分割され、独立に電力制御が可能となっており、ヒータ材料としては使用する温度と雰囲気に応

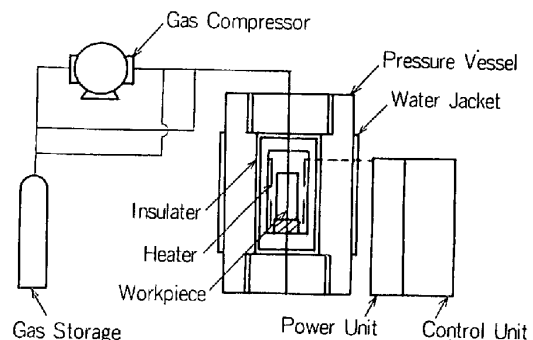


Fig. 1. Schematic diagram of HIP system.

昭和 55 年 12 月 10 日受付 (Received Dec. 10, 1980) (依頼解説)

* (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakino-hama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所本社 工博 (Kobe Steel, Ltd.)

じて Fe-Al-Cr 系合金, Mo などが用いられる. 高压下での断熱層の機能は極めて重要であり, 例えば 1000 kg/cm^2 , 1000°C の高压 Ar ガスの場合, 密度は大気圧の数百倍となるものの, その粘性は大気圧下とあまり変わらない. その結果, 単位体積あたりの熱容量がきわめて大きく, かつ流動性に富んだ流体となるため, 対流熱伝達を有効に抑制することが必要である.

加圧装置は圧力容器本体へのオイル混入による雰囲気ガス汚染や電気絶縁低下を避けるため, オイルフリー型の圧縮機が用いられている. 比較的効率であるにもかかわらず, 工業用装置においてもダイヤフラム型圧縮機が多用されているのはこのためである.

ガス集合装置は圧媒ガスを回収, 貯蔵するためのもので, 市販のガスボンベに相当するものと考えればよい.

その他, この装置は数百 kg/cm^2 から数千 kg/cm^2 の高压ガスを取扱うため, 高压ガス取締法の規制を受ける. このため, HIP 装置全体として安全性を重視した設計がなされ, 種々の安全装置が付属している.

この HIP 装置を用いて処理する場合には, まず被処理体の圧力容器中への装入, つづいて圧力容器内の脱気とガス置換, 昇温昇圧, 保持, 降温降圧, 取出しの順序で行われる. この場合の昇温昇圧の代表的パターンは Fig. 2⁹⁾ に示すように被処理体の種類に応じて 4 種類が用いられる. (a) の昇圧先行型ではコンプレッサーの能力が小さくてすむ利点があり, 鑄造や焼結部品中の空孔除去にはこの方法を用いるのが最も経済的である. (b) の昇温先行型は被処理体中に圧媒ガスが浸入することをきらう粉末の加圧焼結や拡散接合などで用いられる. (c) の同時昇温昇圧型では比較的サイクルタイムが短かく, また (d) の高温開放型 (予熱方式) ではさらにサイクルタイムが短縮できる. 以上述べたようにそれぞれの用途に応じた装置仕様と昇温昇圧パターンを採用することが重要である.

3. HIP の応用技術

3.1 粉末の加圧焼結

粉末を HIP 処理して高密度成形体を製造する場合には, HIP 処理に先だつて粉末を適当なカプセル (容器) に充填後, 脱気密封することが必要である. このカプセル

は, 充填された粉末粒子の空隙に圧媒ガスである Ar が浸入して, 粉末の高密度化を阻害するのを防止する隔壁の役割をするものである. このカプセルは所定の製品形状に応じて, 円筒から複雑異形状まで種々のものが使用されている. この場合, 粉末に要求される特性として不純物が少ないことは当然のことながら, 他に, 粒子が球状でかつ適当な粒度分布をもっていることが重要である. すなわち, カプセル中の粉末の充填密度が低く, 空隙が多い場合には HIP 時の体積収縮が大きく, カプセルの大変形と破壊が起りうるので, 粉末の充填密度はできるだけ高く, HIP 時の体積収縮が少ないことが望ましい.

この粉末の加圧焼結分野の最初の応用例は Be である⁶⁾⁷⁾が, 1960 年代半ばになると高純度でかつ球形粉末を製造するガスアトマイズ技術が実用段階に入り, この方法で製造された高速度鋼粉末の加圧焼結に HIP 処理が利用され, 現在ではスウェーデンの Uddeholm 社^{8)~11)}, 米国の Colt Industries 社^{12)~15)}, 日本の神戸製鋼所^{16)~19)}が企業化を行つている. この方法による材料の特徴は急冷凝固された微粉末を原料に用いて加圧焼結するため, 従来製法のような粗大炭化物や偏析が存在せず, 組織が非常に均質であるため, 熱処理時の変形が少なく, 被研削性, 靱性, 切削性能が良好である. 参考までに高速度鋼粉末を軟鋼カプセルに充填し, 真空脱気, 密封後 HIP 処理を行う場合の HIP 処理圧力, 温度と密度の関係を Fig. 3²⁰⁾ に示す. この図からわかるように同じ密度比が得られる条件は温度, 圧力, 時間の組み合わせで多数存在する. 同じ密度比の場合でも, 高温低压と低温高压の極端に異なる条件のものでは粒子間の拡散状態が異なるため, 機械的性質に差が認められる.

この HIP 処理技術は後述するように大型化, 高能率化のための装置開発が行われ, 応用範囲は今後ますます拡大するものと予想されているが, 現状では生産性は必ずしも高くないため, HIP 処理コストが高価につき, 上記の高速度鋼を除くと鋼系では一部の工具鋼¹⁵⁾²¹⁾が実用化されているにすぎない.

非鉄系の材料分野では Ni, Co 基の耐熱超合金^{22)~36)}, Ti 合金^{37)~41)}, セラミクス^{42)~46)}などの加圧焼結に HIP 処理が利用されている. この中で耐熱超合金は戦闘機を

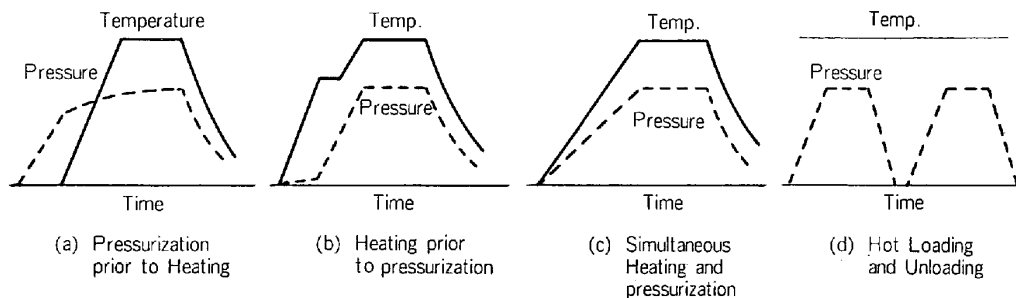


Fig. 2. Operation cycles for HIP processing.

はじめ旅客機やヘリコプター用ガスタービンエンジンの部品として実用化されており、航空機業界ではこの HIP 処理技術に対する関心がとくに高い。一例として超合金粉末からタービンディスクを製造する工程を Fig. 4 に示した。この方法によれば従来鍛造法に較べて、最終製品形状に近い“Near net shape”に直接 HIP 成形ができるため、材料歩留りがよいこと、難削材である超合金の切削コストが大幅に節減できること、高価な大型鍛造プレスを必要としないことなどの利点を有している。この“Near net shape”製造技術は耐熱超合金ばかりでなく、高速度鋼、Ti 合金、セラミクスなどへの応用が広く、その成形型材料として金属薄板成形体^{24)~26)}、ガラス成形体^{27)~30)}、金属セグメント²⁴⁾²⁵⁾³¹⁾、セラミクス型^{32)~34)}、など種々の材料を用いた成形方法が開発されつつある。

このほか、省資源省エネルギーと戦略的見地から耐熱超

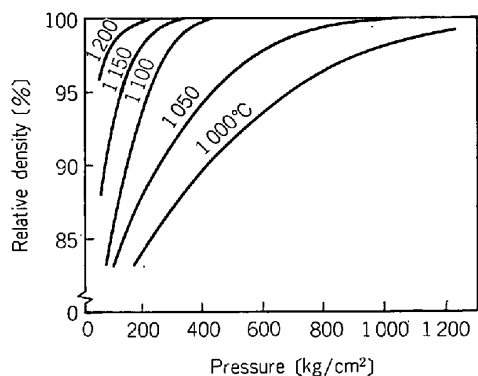


Fig. 3. Effect of HIP temperature and pressure on densification of high-speed tool steel powder. (Holding time : 30 min)

合金に代わって Si_3N_4 や SiC のような非酸化物系耐熱セラミクスが大々的に開発されつつあるが、これらのセラミクスは金属材料とは異なり、後加工による成形が困難であるため、“Near net shape”技術がより一層重要であり、 SiO_2 系のガラスカプセルを用いて、HIP 処理の研究開発^{47)~49)}が行われている。この方法によれば、ホットプレスよりも成形圧力が高いため、焼結助剤が少量ですむ可能性があり、耐熱強度のより高い材料が得られるものと期待されている⁴⁷⁾。

3.2 焼結部品の高密度化、欠陥除去

焼結部品中に存在する空孔を HIP 処理により圧潰消滅させようという研究は相当古くから行われており、その中で工業的に広く行われているのは超硬合金の HIP 処理である。この超硬合金は WC, Co 等の混合粉末を成形し、真空または H_2 中で液相焼結をすれば、99% 以上の密度が得られ、従来はこの状態で用いられるのが普通であった。しかし、冷間圧延ロールをはじめ高負荷部品あるいは被加工材の表面状態が問題となる型等の治工具に使用する場合、残留する微量の空孔が悪影響を及ぼすため世界のほとんどの主要超硬メーカーがこの HIP 処理を行つている。この HIP 処理による効果は残留空孔消滅による廃却率の減少⁵⁰⁾及び強度の向上とばらつきの減少等の品質向上である^{51)~59)} (Fig. 5⁵¹⁾)。この超硬合金の場合は大部分の残留空孔が表面に連通していないため、粉末の加圧焼結の場合のようなカプセルは不要であり、プロセスが簡単となる。このようにカプセルを用いないで HIP 処理による高密度化が可能となるのは一般に焼結体が理論密度の 92~95% 以上の場合⁶⁰⁾で、この密度以下で表面連通空孔が存在する場合にはこの空孔を閉塞する処理が HIP 処理前に必要となる。

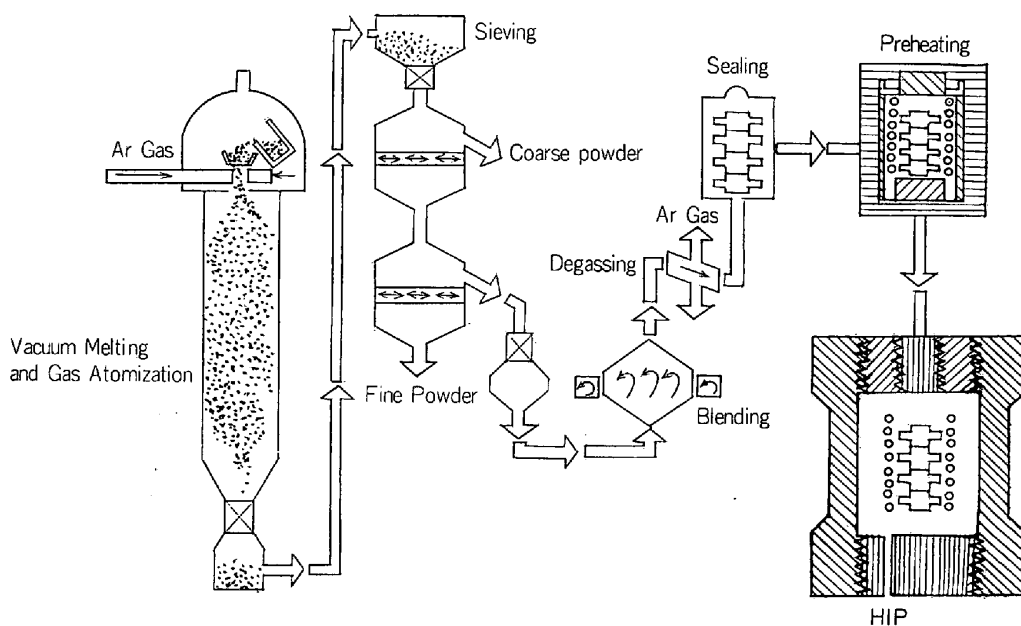


Fig. 4. Manufacturing process for “Near Net Shape” turbine disk of superalloy through HIP.

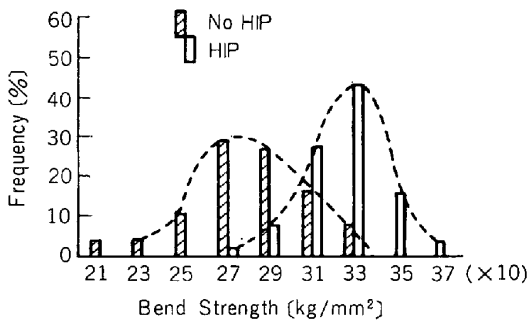


Fig. 5. Effect of HIP on bend strength of cemented carbide.

この分野の他の例としてはセラミクス焼結体への応用があり、近年、セラミクス切削工具⁶¹⁾やフェライト⁶²⁾⁶³⁾に HIP 処理を施し、顕著な改善が認められている。このほかに PZT⁶⁴⁾、PLZT⁶⁵⁾、YIG⁶⁵⁾、BaTiO₃⁶⁶⁾ などのセラミクスへの応用が研究されている。

3.3 鑄造部品の欠陥除去

鑄造品は通常、その内部に凝固時の収縮孔やガス空孔などの欠陥を有しており、このために靱性の低さや信頼性の低さはある程度宿命的なものと考えられてきた。ところが 1965 年頃から Alcoa 社によつて HIP 処理による鑄造欠陥除去の研究が開始され⁶⁷⁾、その結果、HIP 処理が Al 合金鑄物の疲労寿命改善に著しく効果のあることが判明⁶⁸⁾し、この分野の研究促進に重要な役割を演じた。これに引き続いて Ti 合金や超合金の精密鑄造品の HIP 処理が研究され、一部実用化が行われている。このように HIP 処理技術は Al 合金、Ti 合金、超合金といった航空機関連の精密鑄造業界で広く関心を呼び、発展してきた技術であるが、これら以外に鋼や銅などでも研究がなされている。以下に各合金への HIP 処理の適用状況を述べる。

Al 合金鑄物はこの分野で最初の研究となつたにもかかわらず、その後はあまり活発な研究開発は行われていないようであり、Kawecki Berylco 社が一部実用化を行つている程度である。Al 合金は HIP 処理により、その特性が著しく改善され、C 355、A 356、142 等の合金鑄物において疲労寿命が 10 倍以上となり、引張強さ、耐力、伸びなどの特性も向上するとともにばらつきが減少する⁶⁸⁾。

Mg 合金鑄物では Al 合金鑄物よりも高価で、かつ健全な鑄造品の製造が困難なため、HIP 処理の対象としては適当なものである。しかし、この合金では、Al の場合と異なり、表面連通空孔が多数存在するため、焼結部品の場合と同様に HIP 処理に先だち表面に封孔処理が必要である。Mg 合金に関する研究報告⁶⁹⁾は少ないが、現状技術ではわずかに HIP 処理の効果が認められているにすぎない。この理由は表面連通空孔の存在、空孔内面の酸化あるいはスカムの巻込みや合金元素偏析等のた

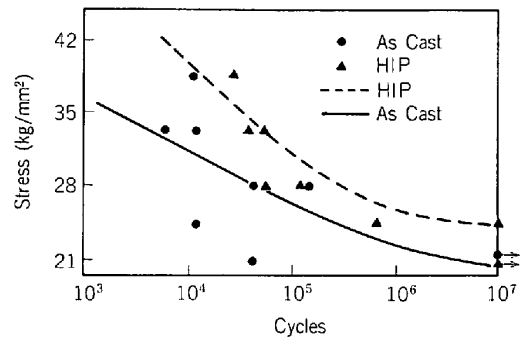


Fig. 6. Fatigue property Ti-6Al-4V castings at 317°C.

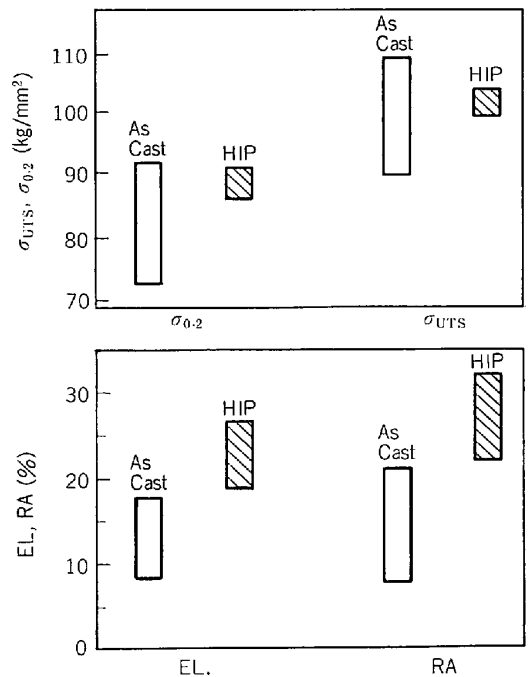


Fig. 7. Effect of HIP on tensile test results at room temperature for Inconel 718.

めと思われる。

Ti 合金鑄物の HIP 処理技術の研究^{70)~73)}は盛んであり、Al、超合金の場合と同様に引張、疲労、クリープ特性が改善される。その一例を Fig. 6⁷²⁾に示す。Ti 合金の場合も一部表面連通空孔があり、封孔処理法としてイオンプレATING、電子ビーム溶接、TIG 溶接、キャニングなどが検討されている。Ti 合金では Pratt & Whitney 社の F 100 エンジン部品を Howmet 社が HIP 処理しており、Precision Castparts 社も Toll Service で処理を行つている。

Ni や Co 基の耐熱超合金では古くから精力的に研究開発^{69)71)~76)}が行われ、GE 社の CF 6-6、F 101、Pratt & Whitney 社の F 100、Avco Lycoming 社の LTS 101 の各エンジンに HIP 処理部品が搭載されている。この分野の研究報告は非常に多く、合金の種類も Rene 77⁷⁴⁾、Rene 80⁷³⁾、Rene 120⁷²⁾⁷³⁾、Inconel 718⁷²⁾⁷³⁾、

Table 1. Comparison of properties of As-cast and HIP'ed superalloys.

Alloy	Temperature (°C)	Rupture strength	Average life (h)	El. (%)	RA (%)
IN-738, As-cast	982	15.2	19.0	11.8	20.0
IN-738, HIP	982	15.2	52.5	20.5	20.6
René 77, As-cast	816	15.2	77.0	10.0	20.0
René 77, HIP	816	15.2	165.0	9.0	18.0
IN-792, As-cast	871	31.0	175.0	9.2	6.5
IN-792, HIP	871	31.0	283.0	12.1	22.0
René 80, As-cast	871	31.0	41.5	2.5	2.5
René 80, HIP	871	31.0	141.0	11.5	17.0

IN 100⁷²⁾, IN 738⁷²⁾⁷⁴⁾⁷⁶⁾, IN 792⁷⁴⁾, IN 792Hf⁷¹⁾⁷⁶⁾, B 1900⁷²⁾, B 1900Hf⁷¹⁾など多岐にわたっている。Fig. 7⁷²⁾は常温での引張試験結果であり、伸び、絞りが大幅に向上し、ばらつきが減少することがわかる。Table 1⁶⁹⁾は各合金のクリープ破断に及ぼす HIP 処理の効果を示したものであり、破断寿命の向上が著しい。また低サイクル疲労寿命の向上とばらつき減少も報告されている。

Ti 合金や耐熱超合金鋳物を HIP 処理する場合、被処理体に直接圧媒ガスが接触するため、圧媒ガス中の不純物による被処理材表面の汚染が問題となる。この汚染を防止するには表面コーティング後 HIP 処理を行う⁷⁰⁾とか、ガス浄化装置を HIP 装置に設ける⁷¹⁾とか、ゲッターを HIP 装置内に入れるなどの方法が提案されている。

以上のほかに外科用 Co 基合金、高級ステンレス鋼、マルエージ鋼などでも特性の向上することが報告されている。以上のように鋳造品を HIP 処理することにより、

- (1) 廃却品の再生ができ、歩留りが向上する。
- (2) 特性が向上し、ばらつきが減少するので、信頼性が向上する。
- (3) 静水圧を用いるので、局所的な大変形を生じさせることなく、空孔を閉塞除去できる。
- (4) 複雑な鋳造方案にたよらずに高品質の鋳造品が得られる。

等の利点を有する。

3.4 疲労・クリープ損傷部品の再生

航空機用エンジンや発電用ガスタービンなどの高温で高い応力を受ける部品は有限の寿命で設計されており、これらの寿命を支配する因子として、外力による表面損傷を除けば、組織的な変化と粒界での空孔の形成と成長である。この後者の空孔形成と成長にともなつて劣化した特性を HIP 処理により再生しようという考えは前記の鋳造あるいは焼結品の欠陥除去と同様のものであり、定期的にこのような部品の HIP 処理を行うことにより、新品と同等レベルまでクリープ破断寿命等の高温材料特性を回復させることができる⁶⁸⁾⁷⁸⁾。この技術は省資源の見地からも重要な技術であり、航空機エンジンや発

電用ガスタービン部品の再生に実用化が期待されている⁷⁹⁾。

また疲労損傷においては部品表面に亀裂が生じる場合が多く、HIP 処理による再生には表面亀裂内面の浄化や封孔のためのコーティングの研究⁸⁰⁾⁸¹⁾が課題である。

3.5 拡散接合

はじめにも述べたように HIP 装置は核燃料集合体の拡散接合のために開発されたものであるが、当時は接合部の健全性を検査するための非破壊検査法が確立されていなかったことや、装置が小型で処理費用が高価なため、実用化された例はきわめて少なかった。しかし、近年、比強度の高い材料の要請が強まり、また、省資源の見地からこの方法による複合材の製法が見直されつつある。HIP 処理により拡散接合を行う場合には接合面を圧媒ガスからシールするため、カプセルに封入するか、接合面の外縁部を溶接等で密封することが必要である。この方法では溶接のように熔融接合ではないため、接合部およびその近傍の材質変化はなく、また、異種材料同志の接合も可能であるなどの特徴がある。実用化例としてはガンマ線遮蔽体 (W-Ti)⁸²⁾、発電用ロータ (4340-Inconel 718)⁸³⁾、スペースシャトル用部品 (Al-B)⁸⁴⁾、複合圧延ロール (低合金鋼-工具鋼)¹⁵⁾ 等で、原子力廃棄物封入のためのアルミナ容器接合の研究⁸⁵⁾⁸⁶⁾も行われている。

3.6 その他

このほかにミサイルのノーズチップやロケットノズル、航空機のブレーキシューなどに用いる高密度炭素複合材が米国で研究開発されているが、軍の機密に属する問題ゆえ、研究発表⁸⁷⁾は少ない。また、高密度炭素成形体に関する報告⁸⁸⁾もあり、炭素分野での HIP の利用が今後進むものと期待されている。

4. HIP 装置技術

以上、述べたように HIP 処理法は非常に広範囲に使用されつつあり、そのため、HIP 装置は小型の研究用を含めて世界で 160 台以上が現在設置されている。今後、HIP 装置は大型化、高能率化、高温化をはじめとして、対象材料と目的に応じて種々の機能が要求され、多様化することが予想される。

Table 2. Large size HIP units installed at present.

Working volume (l)	Diameter (mm)	Height (mm)	Temperature (°C)	Pressure (kg/cm ²)	Company
3 555	1 219	3 048	1 315	1 050	Colt Industries
2 235	1 170	2 080	1 260	2 000	Pratt & Whitney A.
2 215	1 235	1 850	1 260	1 050	Wyman Gordon
1 133	680	3 120	1 400	1 600	ASEA
785	690	2 100	1 400	1 000	Sandvik

4.1 大型化

大型部品を HIP 処理したいという要求とともに、現在の装置の生産性の低さをカバーするため、小型の量産部品を一度に処理したいという要求に答えるため、装置は逐次大型化する方向にある。現在では Table 2 に示すように処理室直径で 1m を超える大型装置が 3 台稼動している。装置の製造技術の点からは処理室直径が 3 m、高さが 10 m 程度の装置まで製作が可能であろうといわれている⁶⁸⁾。このような大型装置になると、Ar ガスをダイヤフラム圧縮機で、従来のように加圧していたのでは昇圧に時間がかかり、生産性を著しく阻害するので、液化 Ar ガスを圧力容器に圧送する方式が検討^{89)~91)}されている。

4.2 高能率化

大型化とともに生産性を向上させるため、HIP 処理サイクルを短縮する試みが以前からなされている。当初の装置では被処理体を装入し、昇温昇圧して HIP 処理を行つたあと、自然放冷で十分に冷却して被処理体を取り出していたため、一回の HIP 処理に 24 時間近い時間を必要としていた。これを短サイクル化する方法として、圧力容器内での加熱冷却方式や断熱構造にくふうを加える考え方と Fig. 8 に示すような予熱方式に大別される。大型装置では後者の予熱方式が有利であり、この方式が高速度鋼や超合金の粉末部品製造に利用されている。すなわち、被処理体を予熱炉で所定温度まで昇温し、高温に保持された HIP 装置の圧力容器下部まで搬送装置により移動後、圧力容器内に高温で装入するものであり、処理後は高温で取り出しを行う方式である (Fig. 2(d))。この方式では大型装置でも現在 4~5 時間のサイクルで操業が可能であり、さらに、他の加圧降

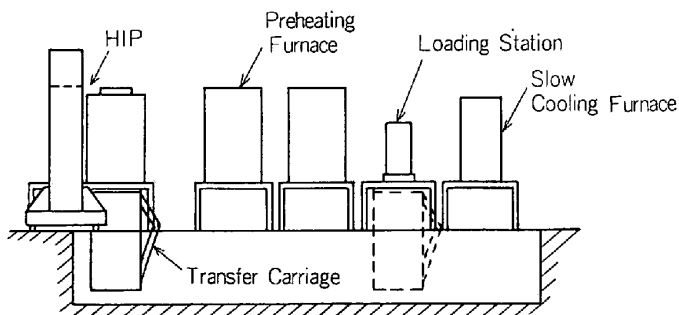


Fig. 8. Hot loading and unloading system.

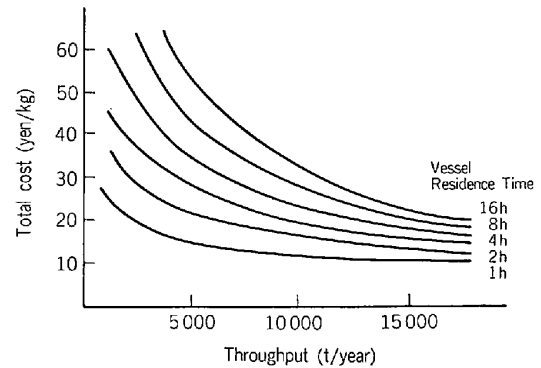


Fig. 9. Relationship between total cost and cycle time. (24h operation, 65% loading density, 1977)

圧の短縮化技術を組み合わせれば、圧力媒体にガスを用いる方式でも 1 時間程度のサイクルタイムまで短縮が可能である。この大型装置の高能率化は通産省大型プロジェクト「複合生産システム」の中でとり上げられ、神戸製鋼所がこの研究開発を受託している。これ以上の短サイクル化のためにはガスを圧力媒体として用いることは不利であり、従来から熱間静水圧押し出技術で用いられている耐熱性の液体や固体粒子を用いることが必要である。

高能率化による HIP 処理コストの低減効果は非常に大きく、Fig. 9⁹²⁾に示すように 1 時間サイクルによる処理コストは現状の 1/5 程度に低下する。

5. おわりに

HIP 処理の応用分野と装置の現状および研究開発の動向について紹介したが、装置が今後大型化、高能率化するとともに高級材料の処理技術として使用範囲が限定されていた HIP 処理技術が急速に低級材料たとえば低合金鋼程度の材料まで使用されることが夢ではなくなりつつあり、鉄鋼をはじめとする金属の生産技術に少なからず影響を及ぼすことは近い将来、十分に考えられることである。

文 献

- 1) E. S. HODGE: Metals Eng. Quart., 1 (1961), p. 3
- 2) 河合伸泰, 滝川 博: 塑性と加工, 20(1979), p. 971

- 3) 守時正人, 藤川隆男: 高温学会誌, 6 (1980), p. 130
- 4) 福田 保, 河合伸泰: 金属, (1980) 8, p. 93
- 5) H. D. HANES: High Pressure Science and Technology, ed. by K. D. TIMMERHAUS and M. S. BARBER, 2 (1977), p. 633 [Plenum Press]
- 6) I. SHEINHARTZ: USAEC Report, SCNC-332 (1961)
- 7) M. R. JOHNSON, H. D. HANES, and G. B. PINKERTON: Preprint for ASTM Annual Meeting June (1968)
- 8) P. HELLMAN: Iron & Steel, Special Issue, (1970), p. 49
- 9) M. ATKEY: Metalworking Product. (1974) Nov. p. 85
- 10) K. ZANDER: Powder Met. Intern. 2 (1970), p. 129
- 11) I. STROMBLAD: Proc. ICSTIS, suppl. Tran. ISIJ. 11 (1971), p. 319
- 12) E. J. DULIS and T. A. NEUMEYER: Proc. of the conference on "Materials for metal cutting, (1970), p. 112
- 13) J. J. OBRZUT: Iron Age, 14 (1971). p. 51
- 14) S. B. LASDAY: Indust. Heat. (1977) May, p. 12
- 15) A. KAZAK and E. J. DULIS: Powder Met., 21 (1978), p. 114
- 16) 万戸博宗, 藤本弘文: 特殊鋼, 28 (1979) 6, p. 17
- 17) 湯河 透, 河合伸泰: 鉄と鋼, 65(1979), p. 121
- 18) M. MORITOKI, H. TAKIGAWA, and Y. INOUE: Preprint for the 1st Intern. Conference on Isostatic Pressing, (1978), p. 29-1
- 19) H. TAKIGAWA, H. MANTO, N. KAWAI, and K. HOMMA: Preprint for 1980 Powder Met. Group Meeting of Metals Soc., (1980), p. 25-1
- 20) 河合伸泰, 滝川 博, 石井 勝, 古田誠矢, 井上陽一: 25(1978), p. 254
- 21) Metals & Mat., (1978) Feb, p. 38
- 22) Machinery & Production Eng., (1975) Nov. p. 517
- 23) Machine Design, (1977) Feb., p. 70
- 24) P. B. MOORE and R. E. YOUNT: Proc. 22nd National SAMPE Symp., (1977), p. 86
- 25) M. M. ALLEN, R. L. ATHEY, and J. B. MOORE: Proc. Amer. National Powder Met. Conference, (1975), p. 243
- 26) A. COTTA and A. BANNANT: Preprint for 1st Intern. Conference on Isostatic Pressing, (1978), p. 7-1
- 27) C. J. HAVEL: Proc. 3rd Intern. Symposium on Electroslag & other Special Technology, 3 (1971), p. 43
- 28) C. J. HAVEL: Preprint for SAE Congress (1972)
- 29) Manufacturing Eng. (1975) Dec., p. 44
- 30) Product. Eng. (1974) Jan., p. 41
- 31) H. D. HANES and P. J. GRISPSHOVER: Proc. AIAA/ASME 11th Structure, Structural Dynamics & Mat. Conference, (1970), p. 81
- 32) R. H. WITT and J. MAGNUSON: NTIS Report, AD-AO 14130 (1975)
- 33) R. H. WITT: AGARD Conference Proc. 200 (1976), p. 12
- 34) J. N. FLECK, V. K. CHANDHOK, and L. P. CLARK: Proc. 3rd Intern. Symposium on Superalloy, (1976), p. 509
- 35) P. WILDGOOSE, N. G. TURNER, H. F. DAVIES, B. J. HELLIWELL, R. UBANK, and H. HARRISON: Preprint for 1980 Powder Met. Group Meeting of Metals Soc. (1980), p.15-1
- 36) Preprints for Powder Met. Superalloy Conference of Metal Powder Report, (1980)
- 37) J. N. FLECK and L. P. CLERK: SAMPE Quart. (1976) Oct, p. 10
- 38) W. E. HERMAN and H. KESSLER: 同上 (1977) Oct. p. 40
- 39) Light Metal Age, (1976) Apr., p. 17
- 40) F. H. FROES, D. EYLON, G. E. EICHELMAN, and H. M. BURTE: J. Metals, (1980) Feb., p. 47
- 41) C. A. KELTO, B. A. KOSMAL, D. EYLON, and F. H. FROES: J. Metals, (1980) Aug., p. 17
- 42) H. LARKER, J. ADLERBORN, and H. BOHMAN: Preprint for SAE Congress, (1977)
- 43) Metal Powder Report, 32 (1977), p. 393
- 44) 同上, p. 142
- 45) Gas Turbine World, (1977) May, p. 50
- 46) 本間克彦, 藤川隆男: 学振セラミクス委員会資料 (1980) Oct.
- 47) H. LARKER: Engineering, 217 (1977), p. 718
- 48) J. C. UY and E. R. HERMANN: Ceramics for High Performance Applications-II ed. by J. J. BURKE, E. N. LENOE, and R. N. KATZ
- 49) H. C. YEH and D. F. SIKORA: Ceram. Bulletin, 58 (1979), p. 444
- 50) M. NILSSON: Interceram, 1 (1974), p. 55
- 51) E. LARDNER: Mining Magazine, (1974) Jan., p. 35
- 52) J. Metals, (1971) Oct., p. 40
- 53) R. A. WILSON: Iron Age (1971) Sep., p. 9
- 54) K. J. A. BROOKES: Metalworking Product, (1972) Jan., p. 76
- 55) E. LARDNER and D. J. BETTLE: Metals Mat. (1973), p. 540
- 56) Tooling: (1974) Apr. p. 13
- 57) Met. and Metal Form. (1974) Jan., p. 8
- 58) S. AMBERG, E. A. NYLANDER, and B. UHRENIUS: Powder Met. Intern., 6 (1974), p. 178
- 59) U. ENGEL and H. HUBNER: J. Mat. Sci., 13 (1978), p. 2003

- 60) 山本孝春, 土居 陽: 粉体粉末冶金協会, 春季大会講演概要集, (1978), p. 60
- 61) K. OGAWA, M. FURUKAWA, Y. HARA, and T. KITAHIRA: *Nippon Tungsten Review*, 9(1976), p. 45
- 62) 高間栄三: 粉体および粉末冶金, 25 (1978) 8, p. 47
- 63) 篠原 肇, 村上志郎, 飯村 勉: 粉体および粉末冶金, 25 (1978) 8, p. 50
- 64) 高田光裕: 粉体および粉末冶金, 25 (1978) 8, p. 44
- 65) K. H. HARDTL: *Ceram. Bull*, 54 (1975) 2, p. 201
- 66) 特開昭 53-53514
- 67) U. S. Patent 3, 496, 624 (1970)
- 68) H. D. HANES, D. A. SEIFERT, and C. R. WATTS: MCIC Report, MCIC-77-34 (1977)
- 69) E. S. HODGE: Proc. 22nd National SAMPE Symposium (1977), p. 146
- 70) J. C. BITTENCE: *Mat. Eng.* (1978) Oct., p. 54
- 71) *Metal Progress* (1977) Aug., p. 33
- 72) G. M. GLENN: *SAMPE Quart.* (1976) Oct. p. 1
- 73) ASM Technical Report System No. 76-38 (1976)
- 74) G. E. WASIELEWSKI and N. R. LINDBLAD: Preprint for 2nd Intern. Conference on Superalloy (1972), D-1
- 75) R. WIDMER: Preprint for 1st Intern. Conference on Isostatic Pressing (1978), p. 30-1
- 76) D. J. KENTON: *Diesel & Gas Turbine Progr.* (1976) Mar. (Reprint)
- 77) *Powder Met. Intern.* 9 (1977) 4, p. 197
- 78) G. VANDRUNEN: Proc. 6th Turbomachinery Symposium, (1977), p. 55
- 79) *Gas Turbine World*, (1978) Mar., p. 66
- 80) A. H. CLAUER: NTIS Report, AD-AO 53289 (1977)
- 81) A. H. CLAUER: 同上 AD-AO 68333 (1978)
- 82) J. J. MUELLER: 同上 PB-250952 (1975)
- 83) G. G. LESSMAN and W. A. BRYANT: *Welding J.* 51 (1972) 12, p. 606-s
- 84) M. D. WEISINGER: *Metal Progr.* (1978) May, p. 60
- 85) *Metal Powder Report* 32 (1977) 3, p. 98
- 86) *ASEA J.* 50 (1977) 5, p. 122
- 87) W. CHARD, M. CONAWAY, and D. NIESZ: Proc. Symposium on Petroleum Derived Carbon, (1975), p. 385
- 88) S. HIRANO, F. DACHILLE, and P. L. WALKER Jr.: *High Temp. High Press.*, 5 (1973), p. 207
- 89) C. B. BOYER, D. S. WOESSNER, and T. C. RHODES: Preprint for 6th AIRAPT Intern. High Pressure Conference (1977), p-1
- 90) A. CRUM: Preprint for 1st Intern. Conference on Isostatic Pressing, (1978), p. 18-1
- 91) U. S. Patent 4, 032, 337 (1977)
- 92) R. M. CONAWAY: *Precision Metals*, (1977) Apr. p. 39