

## 技術解説

## Technical Review

## 最近の自由鍛造に関わる技術進歩

益永敦郎\*

## Recent Technological Progress of Free Forging

Atsuo Masunaga

## Synopsis

This review describes:

- 1) the new burner system, a regenerative burner system for a forging furnace which has replaced the conventional burner system since 1996, and reduced energy consumption,
  - 2) newly developed process for a fine grain-used recrystallization (static and dynamic recrystallization of austenite),
  - 3) unique equipment removing defects named "HEG (Hot Ecological Grinder)",
  - 4) improved process modelling on INCONEL alloy 718 using FE analysis, (microstructural prediction system) for free forging,
- and
- 5) installation of an 70 MN open die forging press which will meet the needs for higher product quality and higher performance.

## 1. はじめに

この10年間で、世界のボーダーレス化の進行、地球環境問題のクローズアップなど、特殊鋼を取り巻く環境も大きく変化してきた。市場の国際化は、厳しいコスト競争と、その中で、製品の差別化を要求しており、自由鍛造の分野でも市場の変化や新しいニーズに応えるため、さまざまな開発・改善がなされてきた。

コスト削減、品質改善、納期改善を目的とした製造プロセスの改善は、従来プロセスではできない高機能材へも用途が拡大しつつあり、最近の加熱技術やシミュレーション技術などの進歩が大いに活かされ、工業化に向けて迅速に展開され効果を上げてきたことも特徴である。また近年、高合金化や高品質化をはじめとする難加工材の需要が増加していることから、優れた基盤技術の構築、お客様のニーズを満たす製品開発を今後も絶えず続けていく必要がある。

本稿では、大同特殊鋼(株) (以下、当社という)、渋川

工場において、ここ10年にとりくんできた自由鍛造に関わる主な技術成果について具体例を交えて紹介する。

## 2. 省エネ技術／リジェネレーティブバーナ燃焼技術の導入

当社渋川工場は、電気炉および特殊溶解炉を有する特殊鋼の鍛鋼品を主製品とした工場であるため、エネルギー使用量も原油換算 85 ML/年であり、エネルギー削減はコスト低減と CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が大きい。これまで当工場ではレキュペレータの廃熱回収率は高くなく、排ガス温度が高いことおよび燃料中の硫黄分などによるアタックを受けることなどでレキュペレータの寿命が短く、投下資本の回収が困難なため積極的な補修はなされていなかった。そこで、省エネに向けた主活動のひとつとして廃熱回収率が高く省エネ率の期待できるリジェネレーティブバーナの導入を開始した。1996年からほぼ1基/年のペースで改造を行ってきたが、計画を

推進する上で NEDO のフィールドテスト事業にも一部参画し、約 40 % / 基の燃料削減効果も得られた。一方、燃焼効率の弊害となる「蓄熱体」の目詰まりや、重油に含まれる硫黄分による「腐食トラブル」など、解決すべき設備的課題も多く、これまでに工場独自の改善を実施し実用化してきた。

## 2. 1 リジェネバーナの概要

Fig.1 に、鍛造加熱炉に導入したリジェネレーティブバーナの概念図を示す<sup>1)</sup>。リジェネレーティブバーナは蓄熱体を持った2本のバーナを一对とし、燃料・空気・排ガスの切替弁、燃焼空気ブロワ、排気ファンおよびそれらを制御する制御装置などで構成される。ひとつのバーナが燃焼中に、他のバーナは排気孔となり蓄熱する

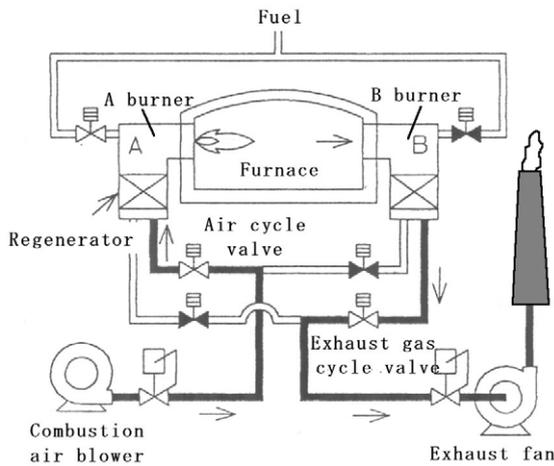


Fig.1. Regenerative burner system.

が、数十秒後には燃焼バーナは切替えられ蓄熱エネルギーを燃焼空気として回収させるシステムである<sup>2)</sup>。

## 2. 2 リジェネバーナの効果

リジェネバーナは、高温予熱空気燃焼を行うシステムであり、従来のレキュペレータと比較して大幅な熱回収効率の向上が達成されている。Fig.2 に 60 t の材料を積載して常温から 1220 °C に均熱した場合の改造前後の熱精算の比較を示す。従来のレキュペレータシステムに対し、リジェネレーティブバーナシステム導入後、熱回収(予熱空気顕熱)が約 4 倍、排ガス損失も約 60 % 低減され、廃熱回収率および原単位は大幅に改善されている。リジェネバーナ導入後の実稼働時の重油使用量も 40 % 以上の省エネルギーが達成された。

## 2. 3 リジェネバーナシステムの改善事例

1996年3月にリジェネバーナシステムを導入して以来、さまざまな問題点が発生し、それを独自に解消しながら新規導入を実施しており、2006年3月には7機目の導入が完了している。

### (1) 蓄熱帯の目詰まりおよびメンテナンス作業性改善

当工場の鍛造加熱炉では、鋼塊を加熱しているためにその付着物(酸化膜防止材、保温材、スケールなど)が蓄熱体(アルミナボール)の間に堆積して目詰まりが起こってしまう。蓄熱体が目詰まりを起こすと、燃焼空気量の低下による黒煙の発生および排ガス吸引量低下による原単位の悪化が生じる。そこで、『ブロワのINV(インバータ)化』と『空気流量・燃焼量のリミット制御』を

System	Regenerative burner	Recuperator
balance		
Energy consumption rate (litter/ton)	78.2	114.3
Waste heat recovery (%)	68.0	17.7

Fig.2. Effect of regeneburner (heat balance diagram).

実施することで黒煙発生を抑制し、かつ清掃周期の延長を図ってきた。ブロワのINV化は、蓄熱体がある程度目詰まりしても最大燃焼時に必要な空気量を確保できるようにブロワの容量を上げ、INV化することで必要かつ適切な風量を供給することを可能にしている (Fig.3)。ブロワの容量の考え方として、蓄熱体が詰まった状態「①→②:風量 $q_2$ 」でも「必要風量 $q_1$ 」が確保できるように、状態③を想定し「定格出力」を選定している。さらにINV化することで、目詰まりが進行しても段階的に周波数を上昇させ「必要風量 $q_1$ 」を確保する。さらに周波数の変更時はアラームを出すことで、余裕を持って清掃計画が立てられる工夫がなされた。また、目詰まりが進行し、ブロワの容量を最大で使用しても燃焼空気が不足する場合は、最終の延命策として、燃焼量にリミットを掛けることで黒煙発生を抑制してきたが、最近では各流量制御 (Air-Oilのダブルクロスリミット制御、排ガス流量制御)を採用し、燃焼効率との最適化を図っている。

蓄熱体の清掃を含めたメンテナンス作業は、1号機設置当初は、蓄熱体の清掃に冷却・昇温を含めて7日の稼働停止が必要であり、また限られたスペースでの作業も伴い作業負荷が高かった。そこで2号機以降はバーナの構造をバーナ本体と蓄熱器の分離タイプにすることで清掃・充填作業時間短縮と作業負荷軽減を実現し清掃日数は4日以内で可能となった (Fig.4)。これまでに清掃周期は最大で2倍 (6か月)に延長可能となり、清掃費用も最大△50%改善され安定稼働を実現している。

(2) 排ガス切替弁の改善

1号機の排気切替弁には、弁板をエアシリンダーで駆

動するタイプを採用したが排ガス (Max200℃) 通過範囲内でロッドが作動するため、熱負荷によりロッドが変形し易く作動不良が頻繁に発生した。また、弁板取付けボルトの脱落・溶損も発生し、弁板のシール性悪化による蓄熱器の出側温度異常 ( $\geq 250^\circ\text{C}$ ) などのトラブルを経験した。そこで、2号機以降は、排ガス通過範囲に回転軸が露出しない軸回転式ディスク弁を採用し熱負荷による故障要素の削減を図った。当初ディスクシール部にSUS316のリングを使用したところ、重油中に含まれた硫酸の結露により腐食し動作異常が発生したので、現在は、強化テフロン製シートリング (耐熱  $250^\circ\text{C}$ ) に切替え、トラブルは解消した (Fig.5)。

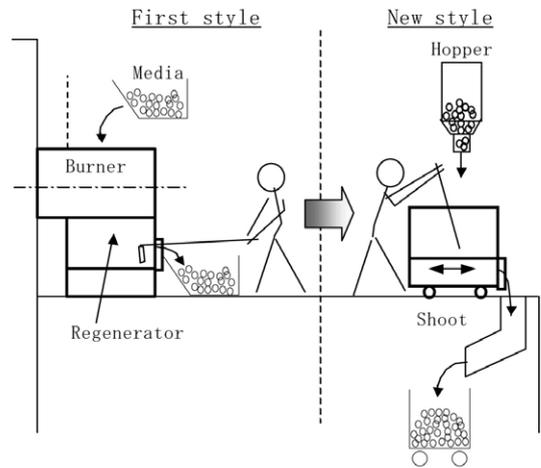


Fig.4. The way of media changing.

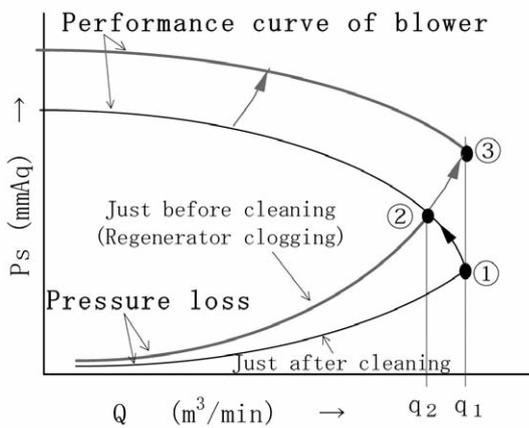


Fig.3. Selection of blower.

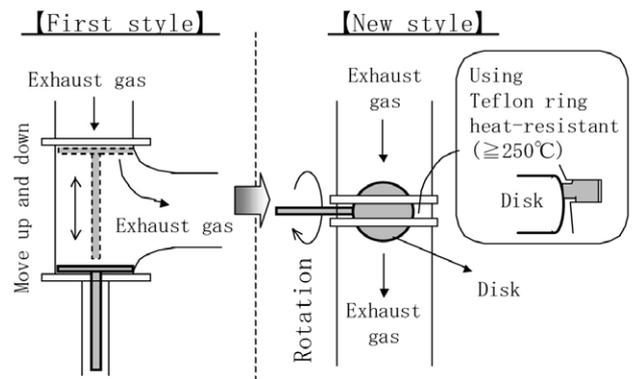


Fig.5. Exhaust gas valve.

## 2. 4 今後の展開

過去10年間で7基のリジェネバーナシステムを導入してきたことにより、燃料使用量の削減については期待どおりの効果が得られている。一方メンテナンス性についても種々の改善を行ったことによりかなり安定操作が可能となっており、最近では、省エネとメンテナンス性を兼ね備えた新しい加熱炉下部シール装置を開発し効果を上げている (Fig.6)。また、新たな試みとして燃焼 (予熱空気吐出) と蓄熱 (排ガス吸引) が1台のバーナで同時に実施可能で、なおかつ小スペース化が期待できるセルフリジェネバーナシステムを油焚タイプでは初めて小型加熱炉に試験導入し、一定の効果が得られており、今後の進展が期待される。

## 3. 大型鍛鋼品の整細粒化技術

近年、高 [N] SUS304N2 など大型鍛造品の難加工材の鍛造において、再結晶の促進による細粒化を活用した新たな鍛造方法を確立した。従来、細粒化のためには粒成長を抑制するための低温加熱が一般的な概念とされていたが、温度を高め、圧下率 (歪み) を増加させると再結晶が生じ易くなることを利用した<sup>3),4)</sup> (Fig.7)。具体的には変形抵抗を下げ、絞り低下直前の最高温度を精度よく狙う加熱と1ヒート内の累積加工量を増加させる高歪化による再結晶促進 (動的+静的再結晶) を組み合わせ

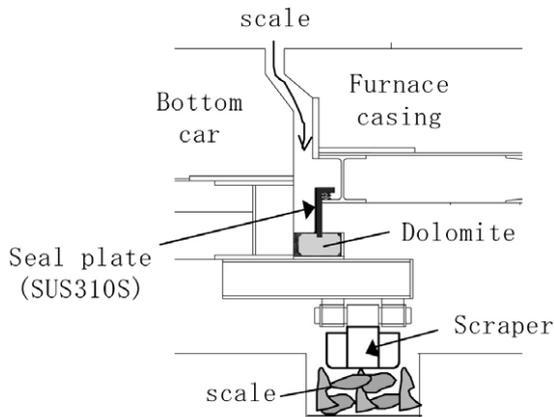


Fig.6. Non water-cooled seal unit.

ることで、軽圧下・リヒート加熱の繰返しが低減され粗粒問題が解消した。Table 1には高 [N] SUS304N2 大型鍛造品の品質改善事例を示す。また圧延時の再結晶挙動 (Fig.7) の概念をベースに、鍛造用として材質ごとのシミュレーションによる結晶粒度予測式を開発し、大型プレス導入後の高品質化に向けた要素技術として活用している。

## 4. 鍛造キズ取り技術/熱間グラインダの実用化

当社渋川工場では、これまで鍛造工程のキズ取りは主にスカーフで行っていた。スカーフバーナは人が持って移動できるため、オンラインでの少量キズ取りにはフレキシブルに対応でき有効な手段である。しかし、広範囲のキズ取りを行う場合には、長時間の高熱作業を強いられると同時に大量の粉塵も発生する。さらに、熟練技術も必要となるため、作業による品質のバラツキが発生する上、作業者育成にも時間が必要であり、多能職化推進の障壁ともなっていた。当工場では、2002年にスカーフ作業の削減による効果を目論み、鑄鍛鋼業界で初めて熱間で研削が可能なグラインダー (HEG: Hot Ecological Grinder) を導入した (Fig.8)。これまで熱間研削は国内の極一部の鋼板製造ラインでのみ実用化されており、被研削材はサイズ形状が均一なスラブの表面キズ取り作業

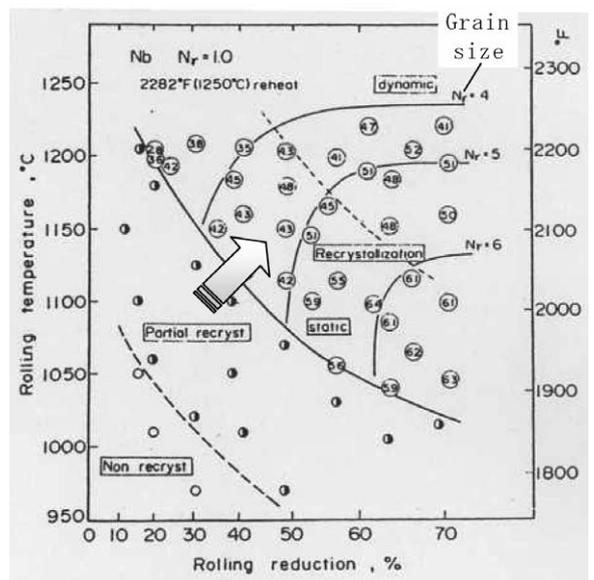


Fig.7. Austenite recrystallization and resulting grain size as a function of rolling temperature and reduction (one pass) in Nb steel.

であった<sup>5)</sup>。導入した熱間グラインダーは、自由鍛造品の仕上形状を造り込む工程でタイムリーに表面キズ取り作業ができ、さまざまな材質および寸法サイズに対応可能（丸、角、八角、偏平、鋼塊 etc）であることが特徴であり、熱間材料（600℃～900℃）の重研削作業に耐えうるハードの改良（研削装置、反転装置など）を施し実用化することができた。熱間疵取り装置を導入したことにより、高熱負荷作業でかつ熟練技能を要するスカーフ作業を減らすことができ、スカーフキズ残りなどの不良率の低減ならびにスカーフ作業時のプレス休転時間削

減や粉塵の抑制も実現している。また、超合金などのスカーフが困難な材質についても熱間でキズ取りが可能となり、リードタイムの短縮による物流改革をもたらせ、競争力強化にも結びついている。最近2号機の導入も完了し、今後、熱間研削量の更なる拡大により品質・歩留り改善および環境改善が期待されている。

### 5. プロセスモデリング技術

近年、FE解析を用いた塑性加工の工程設計などの実用的な取組が盛んに行われるようになり、多くの実績

Table 1. Comparison of conventional process to new process (SUS304N2 Round bar).

	Conventional Process	New Process
Forging process	<p>&lt;1220℃ → &lt;1150℃</p> <p>upsetting 11t 1.5U 800F 1.5U 850F 650F φ568</p> <p>Reduction amount: 30~50mm/blow</p>	<p>&gt;1250℃ →</p> <p>upsetting 11t 1/2U-750F φ512</p> <p>Reduction amount: 100mm/blow</p>
Frequency of heating	6	2
Macro structure	<p>Coarse grain</p>	<p>Fine grain</p>
Grain size	Outside GS: 1.0 ~ 3.0 Center GS: -2.0 ~ 0.0	Outside GS: 3.0 ~ 7.0 Center GS: 0.0 ~ 3.0

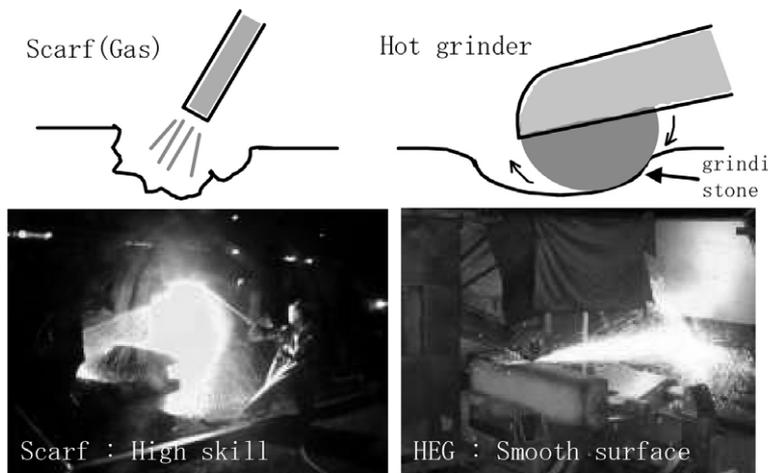


Fig.8. Remove defects.

が報告されるようになってきた。その背景に、近年のコンピューターの発達、特に汎用解析コードの進歩が挙げられ、FE解析を使ったプロセスモデリングは、自由鍛造品の高品質化を図るための最適な工程をデザインする上で非常に有効であり、新製品の迅速な工業化ならびに試作期間の短縮による原価低減などが期待できる。当社ではこれまでに、独自の材質予測システム(DAINUS: DAIdo NUMerical process engineering System)を開発してきた。DAINUSは、当社で独自に開発した数値演算型デジタルエンジニアリングシステムであり、一般のFE解析ソフト(MSC software/Superform2005, or SFTC/Deform)に独自開発の各種予測モジュールをコーディングしたものである<sup>6,7)</sup>。

DAINUSは、鍛造時の連続的な繰返し加工に追従した、精度の高い組織と機械的特性の予測が可能である。これまでに、Ni基合金やオーステナイト系ステンレス鋼への材質予測技術を構築し、ガスタービンディスクの回転鍛造や航空機エンジンシャフトの鍛伸プロセスの最適化に活用してきた。実績として、加熱温度、加熱時間、加工温度、パススケジュールなどをコントロールすることで整細粒を得ることが可能となってきた<sup>8)</sup>。

一例として、最近の発電設備の高効率化により、ガスタービンディスクへの高品質化に向けた要求特性も高まっている背景から、Ni基耐熱合金INCONEL alloy 718の高品質化(結晶粒微細化)の手法の一つとして、多パスを要する逐次自由鍛造から熱処理までの極めて複雑な工程設計において本システムを活用し(Fig.9)、プロセスの最適化に成果を上げてきた。材質予測データベースの構築から工場での実寸モデルの鍛造による検証において非常に高い予測精度が得られ(Fig.10)、材質予測が

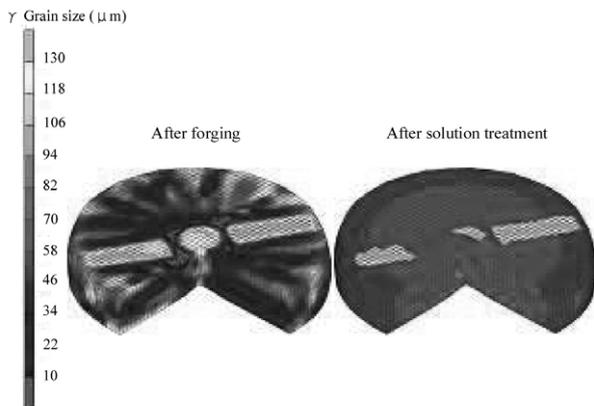


Fig.9. Distribution of  $\gamma$  grain size before and after solution treatment( $\phi 900 \times 160$  H) INCONEL alloy 718.

難しいとされる大型の逐次鍛造においても有用性が確認され活用範囲はますます拡大している。現在も材料データベースの拡充や、予測式の改良にとりくんでおり、より精度の高いシステムを目指している。さらに新たに導入した7000トン自由鍛造プレスにおける大型の高合金などの高品質化、工程の最適化にも展開しており大いに進展すると確信している。

## 6. 7000トン自由鍛造プレス導入

当社渋川工場では、航空機・発電機用途に代表される高級鋼自由鍛造品および工具鋼の鍛造品や圧延向けピレットについて、溶解から鍛造・熱処理・機械加工・検査まで一貫して製造している。この内、鍛造工程については油圧式自由鍛造プレス2基および機械式4面高速鍛造機1基の主要3基で鍛造しており、月間の鍛造量は7600tである。近年、高合金化や高品質化をはじめとする難加工材の市場ニーズの高まりや、顧客の更なる高品質化要求により、最大3500トンの加圧力では造り込み困難なアイテムが増えていた。一方で、1976年に設置した3500トンプレスは30年間のフル生産により老朽化してきているので、今回設備の危機管理という要素も含めて7000トンプレスを導入し、2008年4月から営業運転を開始した。

### 6. 1 設備仕様

7000トンプレスの概観をFig.11に、設備仕様を

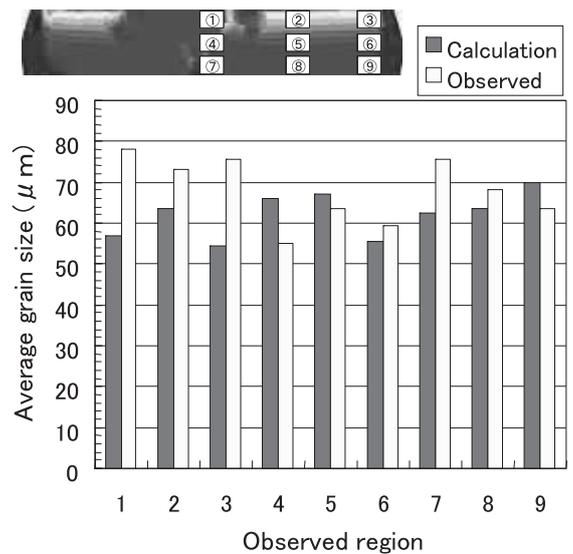


Fig.10. Comparison of FE analysis results to experimental results( after solution treatment ), INCONEL alloy 718.

Table 2 に示す。今回の新プレス導入の目的は、既存 3500 トンプレスの代替という側面と難加工材への対応や高品質化であり、製品重量を大きくすることは考えておらず、最大鋼塊も現状と同様 21 t のままとした。従って、既存 3500 トンプレスと同等以上の動作速度を確保することができなければ、加圧力を増加した効果が半減してしまう。しかし加圧力を上げるためには、プレス本体の剛性を高めることが必須なので部材が重くなってしまい、またシリンダ径は大きくなり大量の作動油をコントロールする必要が生じるので、動作速度が遅くなってしまふのが一般的である。そこで今回、可動部重量の軽いプッシュダウン型を選択し、また大容量のサーボバル

ブを採用して複数のバルブを適切なタイミングで切り替えることにより、切替え時のショックや寸法精度を悪化させることなく高速動作を実現することができた。また、高精度の小型加熱炉や金型交換装置など周辺設備を充実することで、従来製造することができなかった難加工材の鍛造あるいは大型の高合金などの鍛造を実現する可能性が広がった<sup>9)</sup>。

## 6. 2 新機能および新技術

7000 トンプレスには、従来のプレスに装備できなかった機能や力不足で実現しなかった技術を織り込み、より再現性の高い品質の造り込みを可能としている。

### 6. 2. 1 パススケジュールの自動表示

今回新プレス導入に合わせて、二つのパススケジュールシステムを開発／導入した。

①平角自動パススケジュール、②ディスクパススケジュールで、これまで他社では、正方形／円形の断面形状（偏平比=1）の棒鋼のみに対応できるパターン化された自動パススケジュールは前例がみられるが、今回任意の偏平比の断面形状に対応できる新しいシステムを構築した。新パススケジュールシステムの計算パラメータは鋼種に応じた幅広がり率など品質を決定付ける重要な係数である。この計算パラメータは、熟練オペレータのこれまでの経験をベースとしているが、さらにシステムの品質再現性を向上させるために、FEM 解析シミュレーションで内部の塑性ひずみ分布やコーナー部の変形挙動などを検証し、その結果をパススケジュールへ反映させた。また、新たな試みとして内部組織制御が難しいディスクのばらつき低減を目論み、ディスクパススケジュー

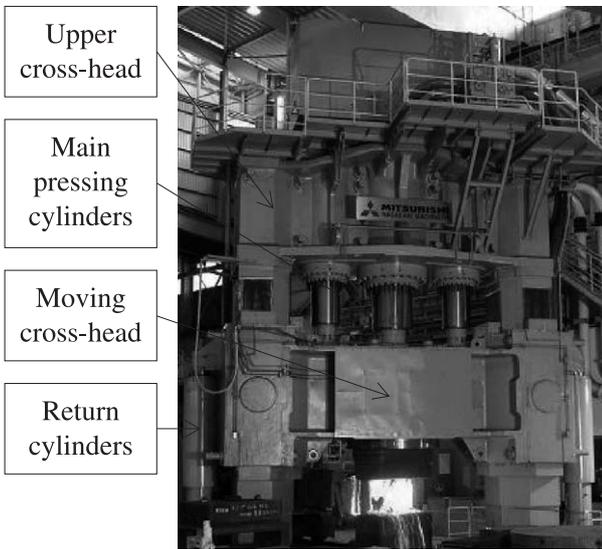


Fig.11. External view of new press main body.

Table 2. Comparison of specifications between new and old presses.

	New 7000 t Press	Existing 3500 t Press
Structure	2 columns Push down type	2 columns Pull down type
Capacity	High speed: 30 MN Nomal use: 60 MN Maximum: 70 MN	Nomal use: 30 MN Maximum: 35 MN
Daylight	4100 mm	3700 mm
Stroke	2500 mm	2000 mm
Distance between columns inside	3800 mm × 1600 mm	2500 mm × 1600 mm
Speed	Usual :120 mm/s High speed:240 mm/s	Usual:120 mm/s
Stroke number	Maximum:82 spm	Maximum:72 spm

ルを導入し、より再現性の高い品質の造り込みを目指している。

### 6. 2. 2 鍛造実績の自動収集

自由鍛造における実績収集は、技術改善、技能伝承および品質保証の点から非常に重要である。7000 トンプレスでは、鍛造時間/パススケジュールの実績/加圧力/プレス現在位置などの主要定量データは、各測定機器からシーケンサ、プロセスコンピュータを通して数値データで連続自動収集し、データベースとして保存している。また定量化できない視覚的な情報収集と分析を目的としてVTRで一連の作業を連続録画した動画映像を視覚的データとして保存しており、製品番号で任意の作業の検索/分析を可能としている。また、新たに鍛造終了時の材料温度分布をサーモグラフィによる熱画像データとして集積するシステムを開発/導入し、測定および管理が難しい鍛造終了温度の定量的な管理を可能とした(Fig.12)。



Fig.12. Heat image data for collecting records.

### 6. 2. 3 高加圧力を活用した新鍛造プロセス

新プレスの高加圧力を利用し、従来から鍛造している材料の作り方を変化させることで新たな付加価値を創出している。「強圧下鍛造」「低温鍛造」による内部品質の造り込みや、あるいは型入れ鍛造を用いた「ニアネットシェイブ鍛造」による外観品質の造り込みを試作中である。Fig.13 および Table 3 に高 [N] SUS304N2 大型ディスクの低温強圧下鍛造による造り込みの事例を示す。新プレス導入に伴い圧下量と送りを増大させ、既存 3500 トンプレスではできなかった品質と生産性を最大化させたパススケジュールの設計が可能となった。同時に、加熱温度を低下させて歪みを増大させることにより、内部

品質の向上につなげることができた。プレスパワー向上により、結晶粒の微細化による機械特性向上やヒート数削減による生産性向上効果が認められた。

Table 3. Forging process for SUS304N2 disks.

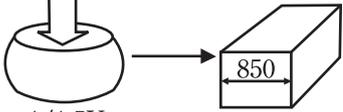
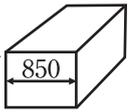
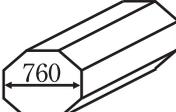
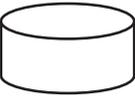
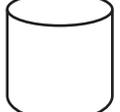
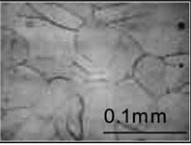
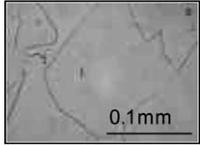
Process	Process of new 70MN press	Process of old 35MN press
Heating	<1250°C	<1250°C
1 <sup>st</sup> upsetting Conversion	 1/1.5U	
Heating	<1250°C	<1250°C
Another conversion		
Heating	<1250°C	<1250°C
2 <sup>nd</sup> upsetting	 φ1720×H390	 φ1200×H800 ⇒ Grinding
Heating	<1150°C	<1250°C
3 <sup>rd</sup> upsetting	 φ2100×H260 (Finish)	 φ1250×H750 ⇒ Grinding
Heating	/	<1250°C
4 <sup>th</sup> upsetting		 φ1380×H600
Heating		<1250°C
Final upsetting		 φ2200×H240 (Finish)
Frequency of heating	4	6
Heat treatment	Solution Treatment	
Grain size rating	 Grain size number #4.6	 Grain size number #2.2



Fig.13. SUS304N2 disk under forging.

## 7. おわりに

市場の国際化が急速に進む中、例えば発電分野での高温・高圧・高効率に対応した超合金の普及など、高級材の需要増加・生産拡大が今後も期待されている。当社渋川工場では、これまでに培った鍛造技術・技能および周辺設備を活かした上で、今回導入した7000トンプレスや4面高速鍛造機などを駆使し、今後もユーザーの要求を満足させる高級自由鍛造品を世界に供給してゆく所存である。更なる素形材事業の基盤構築・高収益体質への革新に向けて、将来にも通用する技術を確認するものとするべく、一層精進したいと考えている。

(文献)

- 1) 南 省次：電気製鋼，70（1999），90.
- 2) 稲守宏夫：電気製鋼，70（1999），32.
- 3) 鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会編：鉄鋼の高温変形挙動－進歩総説－シンポジウムテキスト（1979.2.14），41.
- 4) 稲守宏夫，市田 豊：鉄鋼技術の流れ① 棒鋼・線材圧延（日本式棒線ミルの誕生と発展），日本鉄鋼協会発行 183.
- 5) 新日鐵文献「ホットグラインダーによる普通鋼スラブきず手入れについて」（Cat.No.EC 126.47.10）.
- 6) 河野正道：電気製鋼，73（2002），162.
- 7) 吉田広明，岡島琢磨，八田武士，藤原正尚，伊藤樹一：電気製鋼，78（2007），267.
- 8) 吉田広明，岡島琢磨，八田武士，古瀬泰輔，五十川幸宏，益永敦郎：IFM2006 International Forgemasters Meeting（Simulation and Modelling），571.
- 9) 電気製鋼，79（2008），265.