

技術解説

 Technical Review

プラントエンジニアリングの現状と展望

松井宏司*

Recent Progress and Prospect of Plant Engineering

Hiroshi Matsui

Synopsis

Recent turbulent economics has heavily changed quality and cost management mind on manufacturing industries, and demand for production system is also shifting to new stages, which are operation skill drop, inflexible production line, intensified cost reduction competition, and stronger environmental protection demand. Daido Steel Co, Ltd. Machinery Division, dealing with a wide range of industrial field, is concerning strongly and presenting several new ideas and countermeasures against abovementioned problems. The keywords to solve the problems are : skill-free, flexibility, energy-saving, and environmental friendly.

In this paper, recent progress and prospect of plant engineering will be described, including the examples such as a vacuum carburizing simulation software, an automatic meltdown timing judgment system and a scrap preheating system for electric arc furnaces, and a sewage sludge carbonizing system for renewable energy.

1. はじめに

大同特殊鋼(株) (以下当社) は創業以来溶解炉, 熱処理炉などの主要生産設備を自社製造してきた。現在は機械事業部として独立した組織を持ち, 製鋼設備プラントの設計, 施工をはじめとして金属熱処理, 真空熱処理, 環境事業などで特長ある設備を設計し販売している。

近年外部環境が大きく変化し, 御客様の工場, 設備への要求もこれまでとは異なってきている。当社もそれらの要求に対応すべく供給設備の技術革新に取り組んでいる。ここでは近年の外部環境の変化とそれに伴うプラントエンジニアリングに求められる将来展望, および当社の取り組みについて概説する。

2. 製造業を取り巻く外部環境の変化

ここ 10 年の間に, 製造業を取り巻く外部環境は大き

く変化し, 生産設備への要求も大きく変わりつつある。環境変化は地域別, 産業別に特徴を持っているが, 大枠では以下の 4 点に集約される。すなわち, ①現場スキルの低下, ②生産ラインの硬直化, ③コスト競争の激化, ④環境保護要求の高まりである。ここではまずそれぞれについてまとめる。

2. 1 現場スキルの低下

日本国内では直近の円高是正で国内生産の戻りがあるものの, 依然として人口減少という構造的な問題を抱えている。国内の労働人口は 2005 年の 6870 万人を頂点に年々減少し, 2025 年には 6260 万人にまで減少すると予想されている。さらに 30 ~ 59 歳の中心労働者が減少し, 生産現場では深刻な労働力不足が懸念される。さらに若年労働者層の減少によって, 現場でのベテラン技能者, 技術者から次世代の中心を担うであろう若手への技能, 技術伝承の機会が少なくなっており, 日本の製造業

2013 年 11 月 1 日受付

*大同特殊鋼(株)機械事業部 (Machinery Division, Daido Steel Co., Ltd.)

の要である現場技能の継承が危ぶまれている。こうしてこれまで日本の技術的優位の要であった現場のスキルが後世に引き継がれず、現場スキルの低下が起こっている。

一方、発展著しい新興国では、高い経済成長率と消費拡大が継続しており、中国、東南アジアを中心に今後も成長が見込まれている。またインドも世界第2位の人口の大部分を占める階層の所得上昇により、急激な経済発展を見せており、近い将来の消費大国と予想されている。そしてこれらの巨大市場獲得のため世界中から旺盛な設備投資があり、今後10年間は続くものと予想される。しかしそれらの国々での製造現場に目を向けると、海外メーカーの進出、またはローカル企業の市場参入による工場建設で現地労働者が雇用され、製造現場に投入されるが、経験の少なさなどにより先進国で確立した生産工程が守れず、技術スキルが不足しているため、要求される製品品質の到達が難しく、工場の生産性や製品品質上の問題が発生している。

2. 2 生産ラインの硬直化

これまで大量生産によって製造単価を削減する考えが浸透していたことから、生産規模の拡大を目指すとともに、生産設備は大型化されてきた。大量生産により製品の製造単価低減を達成したが、それには設備がフル生産することが前提であった。フル生産とならない場合は投入量を下げた連続操業するか、間引き操業となるが、いずれも単位コスト上昇につながる。また1回に生産もしくは処理する量が多くなるため、その前後工程との中間在庫もそれにつれて増える結果となり、ライン内の滞留在庫が膨らむ。

例えば自動車の変速機用ギアを製造する場合、従来の大量生産用のガス浸炭炉はフル生産を前提として昼夜連続運転されており、それはライン生産が休止する時間帯や休日も同様である。また設備への投入単位が数百個単位で、かつ機械加工ラインの停止する時間帯でも連続操業するための投入在庫を常に炉前に準備しておく必要がある。従って浸炭炉の前後に大量の在庫が積み上がることになる。さらに、ガス浸炭炉は炉壁が比較的高温となるため作業環境が厳しく、また爆発性ガスを扱うことから、通常機械加工ラインとは別棟に設置されるので、加工ラインからの部品搬送の手間も増える。さらに一度設置した後の工場のレイアウト変更などを考えた場合、移設に相応のコストがかかる。このように大量生産用設備はフル生産ではコストメリットが大きい反面、生産ラインの硬直化を引き起こしており、例えば海外生産展開を

検討する際に初期の生産量が最大期待生産量の半分程度では採算ベースに乗らず、海外生産拠点作りを躊躇する要因になっている。

2. 3 コスト競争の激化

先進国の生産現場では、急成長する新興国との生産コスト競争が熾烈さを増している。生産の自動化やエネルギー回収などにより製造コスト削減に取り組んでいるが、生産設備の標準化と最新設備の新興国への移転により、新興国での労働生産性は瞬く間に先進国に追いつき、かつ低い労務コストにより新興国でのコスト競争力はさらに強力になっていく。先進国はこの状況を克服するため、製品の高機能化・コスト削減によって生き残る戦略が必要になっている。

2. 4 環境保護要求の高まり

一方、炭酸ガスやフロンなどによる地球温暖化の懸念や石油や天然ガスなどエネルギー資源、ニッケルや銅、クロム、ネオジムなど産業用資源の枯渇が懸念されており、持続的社会的形成と資源保護、環境保護の必要性が指摘されている。こうした中、産業界では化石燃料を使用しない再生可能エネルギーの利用や、使用済みの廃棄物からの資源回収に対する要求がますます強くなっている。

3. 生産設備へ求められるもの

こうした外部環境の状況に対し、生産設備へは以下の対応が求められている。

3. 1 スキルフリー化

先進国の労働力不足、技術技能伝承の断絶を補うため、スキルフリーな設備が必要とされる。勤と経験に頼っていた技能部分を理論と経験値を有機的に結合させたスキルフリー自動化により補うことで製品品質と生産性を確保する。また新興国での製造ラインの垂直立ち上げのため、経験の少ない現地操業者にも日本国内と同じ操作性、同じ工程での製造品質を提供できるスキルフリーな設備があれば、スタッフは安心して現場を立ち上げられる。

3. 2 機動性

コスト競争力を究極まで突き詰めると、必要なモノを、必要なときに、必要な量だけ供給する、機動性の高い生産設備が必要である。これにより最短のリードタイ

ム、最小の工程内在庫、そして機敏な生産変動への対応が可能となる。このような機動性の高い生産設備を1ユニットとして考え、生産拠点構築の場合にも現地での生産量拡大に合わせ、段階的な設備投資により、常に現地での最適生産量の実現と短期間での生産量増強が可能となる。

3. 3 省エネルギー

先進国において新興国とのコスト競争にうち勝つためには、製造のコスト競争力を持たせるしかない。先進国での製造コストの改善は自動化による省人化によって労務コストを削減する方法と、省エネルギーおよびエネルギー回収によって操業コストを削減する方法がある。しかし原子力発電存続への懸念が議論されている現在、日本国内でのエネルギーコストの上昇は必至と考えざるを得ない。特に鉄鋼関連の生産設備はエネルギー消費量も大きい。これまで省エネルギーに向けた取り組みが行われてきたが、昨今の国内電気料金および石油などの値上げにより、さらに一段の省エネルギーが求められている。

3. 4 環境対応

環境対応として、温暖化ガスを排出することなく再生可能エネルギーを造り出す設備や、廃棄物から希少金属を効率的に回収・再利用する設備が求められている。再生可能エネルギーとしては太陽光や風力による発電が多く稼働しているが、さらにこれまでエネルギーとして捉えられていなかった資源を利用しての再生可能エネルギー創成の必要もある。廃棄物からの資源回収では、他の産業で培われた技術を使用して、高効率で資源を回収し、生産現場で再利用していくことも循環型社会の形成の面で重要である。

4. 今後の展望

前節で記した生産設備への多岐にわたる要請に対し、今後実現されて行くであろう技術について展望し、いくつかの当社取り組みについても述べる。

4. 1 スキルフリー

4. 1. 1 製鋼現場でのスキルフリー

現在の電気炉操業では、プロセスコンピュータシステムを利用した自動制御が広く普及している。当社も製鋼

メーカーとして蓄積した知見を活かし、電気炉最適電力制御装置（商品名：“DAIDO・ARMS[®]” Automatic Rapid Melting System 以下 ARMS[®]という）を開発、自社のみならず国内外のユーザーに提供している。しかし製鋼現場では熟練作業者の高齢化に対して後継者となる中堅・若年層の不足により、世代間の技術や技能の伝承がままならないのが現状である。操業技術レベルを維持するため、さらなる自動化やスキルフリーの要求が高まっており、さまざまな開発が進められている^{1), 2)}。

当社も電気炉の自動制御機能の一つとして、ユニークな方法で炉内原料スクラップの溶け落ち時期を自動的に判定する技術を開発し、商品化した。（商品名：E-adjust[®]）ここではその概要について記述する。

一般的な交流電気炉の操業では通常2～3回の原料スクラップ投入が想定され、各操業時期に効率的に電力投入できるように電圧、電流パターンが設定される。Fig. 1に電気炉の通電パターン例を示す。しかし装入スクラップの性状や溶解状態は常に変化するため、予め設定した通電パターンでは効率的に溶解できないこともある。特に通電パターンを決定する上で重要な要素となる原料スクラップの追加装入時期や、溶解期から昇温期に移行する溶け落ち時期はスクラップ性状の影響が大きい。

通常スクラップの追加装入は炉内スクラップが全量溶解する前に行われるが、そのタイミングが遅すぎると、露出する炉内耐火物の損耗を早めると同時に溶鋼面やアークの露出により熱ロスが増加する。逆にそのタイミングが早すぎた場合は追加スクラップが炉内に収まらず炉蓋を閉められない状況に陥るため、炉からはみ出したスクラップをスクラップバケットの底などで無理に炉内に押し込む、いわゆる“山押し”作業が必要になる。山押し作業は秒刻みで管理される電気炉操業の生産性を著しく阻害するだけでなく、無理に押し込むことによる炉殻や炉内耐火物の損傷の危険性もある。

一方、溶解期から昇温期への移行タイミングとしての溶け落ち時期では、高電圧低電流パターンから低電圧大電流パターンへ変更して効率的な昇温を行う。従って溶け落ち時期の判定が遅い場合は非効率な電力投入を続け、早い場合はまだ溶けていない原料を溶解するのに余分に時間と電力がかかる。

このようにスクラップ溶け落ち時期の見極めは電気炉操業時間やコストに大きな影響を与えるが、既存の自動制御システムでは定量的な判定が不可能であり、これまででは作業者の経験に基づいて判断され、その経験差によりばらつきも大きかった。

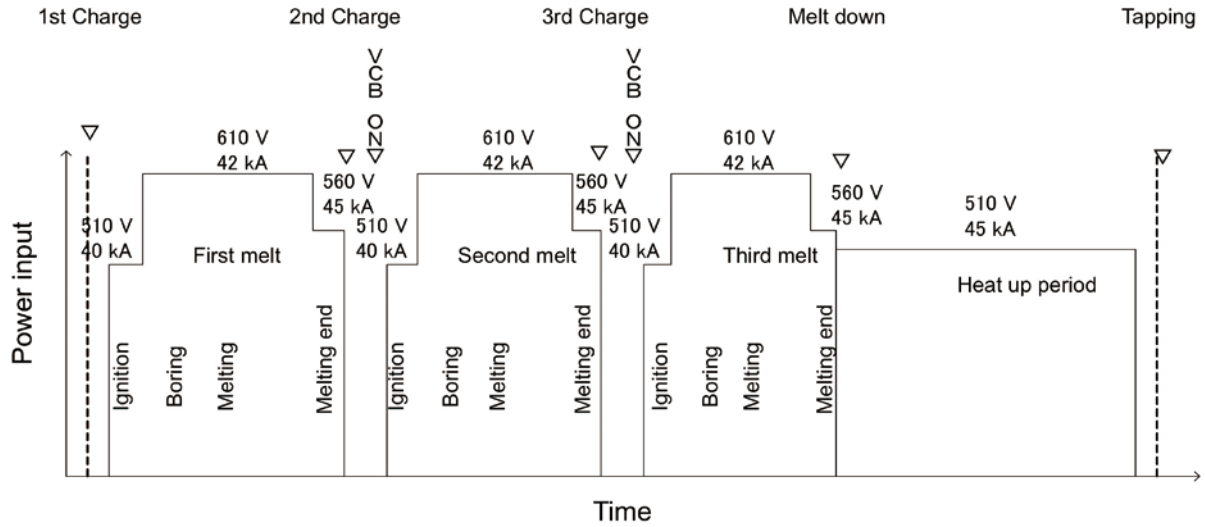


Fig. 1. Power input pattern example of EAF.

当社は溶け落ち時期前後の炉の状態を詳細に調査した結果、電気炉から発生する高調波電流（もしくは高調波電圧）と炉内から発生する音の二つの要素が正確な溶け落ち時期を示すことに着目した。高調波電流がスクラップ溶解の進行と共に減少することはこれまでも知られていたが、従来は電気系統へ与える“ノイズ”として扱われスクラップの溶解状態を示す指標とは認識されていなかった。また経験ある作業者はスクラップの溶解状態をアーク炉からの発生音によって推定する技能を身に着けていたが、これを定量的に解析してはいなかった。当社は独自のアルゴリズムを用いて計測・解析し、スクラップの溶け落ち時期を定量的に判定するシステム（E-adjust[®]）を構築した。

Fig. 2にE-adjust[®]のシステム構成を示す。本システムは高調波の計測、炉内発生音の計測および計測した高調波と炉内発生音を解析し、解析結果からスクラップの溶解状態を判定する装置から構成されている。高調波は炉用変圧器1次側の計器用変流器で計測し、本体で演算処理して高調波成分を取り出す。炉内発生音は騒音計を炉体近くに設置し、本体で周波数解析を行う。このふたつの信号から、独自アルゴリズムに基づいて判定閾値を下回ったとき、溶け落ちの判定を下す。

E-adjust[®]の特長として、

- 1) 溶け落ち時期を定量的に自動判定することにより、電気炉操業のスキルフリー化が可能
- 2) スクラップの溶け落ち時期の自動判定により電力原単位の低減、通電時間のばらつき低減と短縮が可能
- 3) 既設電気炉にも簡単に取付可能。またチューニ

ングも容易で早期立ち上げが可能

- 4) 当社電気炉操業システム ARMS[®]との組み合わせで一層の自動化の実現が挙げられる。

さらに今後は、電気炉操業の次工程である取鋼精練や真空脱ガスなどの製錬工程においても、成分調整や温度補償、脱ガス時間などのスキルフリー化を図る操業支援システムの構築に取り組んでいきたい。

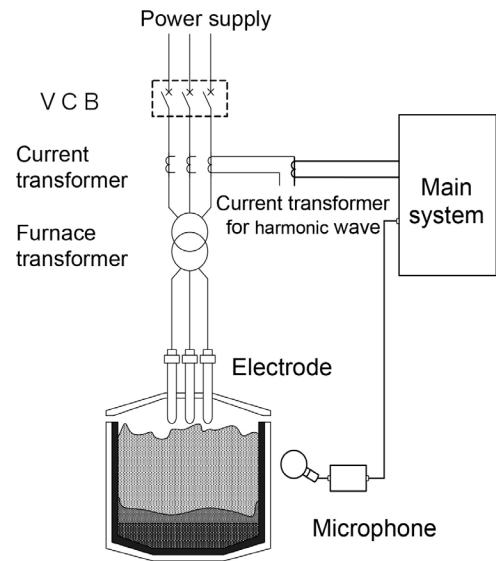


Fig. 2. E-adjust[®] system configuration.

4. 1. 2 真空浸炭炉でのスキルフリー化

浸炭法は金属材料表面の炭素濃度を高めることで鋼表面の強度を上げ、耐久性や耐摩耗性を向上させる手法である。従来はガス浸炭と呼ばれる、大気圧下で炭素含有ガスにより部品表面の浸炭を行っていた。近年真空中でこのプロセスを行う手法が開発され、環境面、操業コス

ト面の優位性から導入が進んでいる。

真空浸炭は炭化水素系ガスを真空にした炉内に導入して分解し、炭素を表面に浸炭させるが、適時・適量のガスを投入することが重要である。ガス量が足りないと浸炭不足につながり、過剰では炉内に余剰のガスが充満して、煤やタールを析出させ、操業に支障をきたす。当社はこの浸炭過程を理論的に解明し³⁾、適時・適量のガス導入を自動計算するシステム（商品名：浸炭くん）を開発した。これによりこれまで試行錯誤に頼り、膨大な時間を要していた操業パターンを簡単な設定値の入力のみで最適なガス導入パターン（これをレシピと呼ぶ）を作成できるようになり、実務者の負担軽減とスキルフリーに大きく貢献している。

そして今後は、真空中での浸炭に続いて窒化も行うことで、表面強度だけでなく曲げ強度も向上させることで材料の機能性を高める、真空浸炭窒化の技術も進むと考えられる。Fig. 3に従来の浸炭法に対する真空浸炭窒化処理の位置づけを示す。浸炭と窒化の組み合わせは複雑なプロセスになるが、現在当社ではこの研究を続けており、浸炭窒化プロセスを理論的に解明し、安定した浸炭窒化処理技術が完成しつつある。近い将来真空浸炭窒化においても、最適な導入パターンをガイドできるシミュレーションシステムを提供できるよう取り組んでいく。一方真空浸炭窒化用の設備にはこれまでの真空浸炭用とは異なる配慮が必要である。導入ガスとの反応や排ガス処理、経年変化に伴う品質の確保などの課題があるが、より安定した設備を提供できるようこれらの解決に向けて取り組んでいく。

• Combine the improvement of bending fatigue by vacuum carburizing and surface fatigue by nitriding.

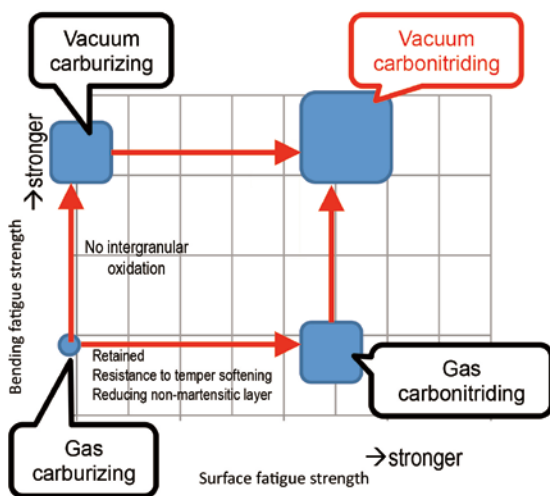


Fig. 3. Fatigue improvement with vacuum carbo-nitriding.

4. 2 機動性

必要なモノを、必要なときに、必要な量だけ、という機動性を突き詰めると、製品最小単位での個別製造、いわゆる「一個流し」が理想である。既に一部の業界ではこの取り組みが現実のものになってきている。国内から海外への生産展開を考え、現地での生産規模に見合った設備能力を考えるユーザーからの要求はますます強くなると予想される。

当社も真空浸炭炉の新しいカテゴリーとしてコンパクト真空浸炭炉（商品名：シンクロサーモ[®]）を新たに投入し、ユーザーの要望に答えている^{4)、5)}。Fig. 4にシンクロサーモ[®]の外形を示す。これまでのバスケットに大量の部品を詰め込んで処理する方法と異なり、トレイの上に部品を並べ、この個数を1単位として処理する。シンクロサーモ[®]は非常にコンパクトに出来ているので、従来の大規模な集合型設備設置ではなく、機械加工ライン数に合わせたスリムな製造ラインが構築できる。Fig. 5にライン構築の概念図を示す。1回の処理量は従来の1/10～1/15となるが、従来に比べて昇温、冷却時間が短く、タクトタイムが早いので、生産規模は1/4～1/5となる。このラインを1単位として段階的な投資を考慮することができ、生産変動に合わせた機動的な生産を可能にする。単位あたりの処理数を少なくすることで、工程間在庫を大幅に削減でき、棚卸し資産圧縮やリードタイム短縮に効果がある。

すなわち、シンクロサーモ[®]では高品質な浸炭処理が行えることはもちろん、高い機動性を提供することができる。



Fig. 4. SyncroTherm[®].

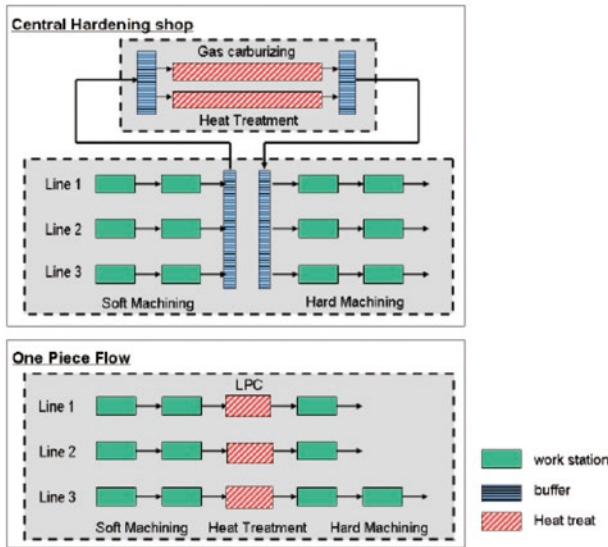


Fig. 5. Central hardening shop and one piece flow.

4. 3 省エネルギーへの取り組み

工業炉への最大の要求は生産コストを最小にすることである。良い製品を安く作れてこそ、その装置の価値が認められる。コスト低減には、省エネルギー、生産性向上などがある。ここでは製鋼プラントの省エネルギーへの将来展望と当社のいくつかの取り組みについて述べる。

電気炉製鋼工場では大量の電気を使用し、アーク熱でスクラップを溶解して鋼を生産する。投入した電力の内、溶解に寄与するのはその約半分にすぎない。残りの投入エネルギーは設備を保護するための冷却、溶解時に発生する排ガスの潜熱および顕熱となって放出されている。これらの放出エネルギーを回収し再利用することで省エネルギーを図る取り組みが行われている。

4. 3. 1 スクラップ予熱

電気炉でスクラップを溶解する場合、事前にスクラップを加熱しておけば溶解する投入エネルギーを少なくできる。上述した電気炉からの排ガスが持つ顕熱でスクラップを予熱できれば大幅な省エネルギーになる。このため従来から様々な構造でスクラップと排ガスを接触させ、スクラップを予熱するシステムが考案され、実用化されてきた。特に近年はシャフト型の予熱装置が開発され^{6), 7)}、大きな効果が生まれている。当社もシャフト型の予熱装置（商品名：MSP[®]）⁷⁾を3基納入し、ユーザーの省エネルギーに貢献している。しかし、日常のメ

ンテナンス項目が増えること、炉を設置する建屋が高くなり、初期投資コストがかさむことなどの理由により導入は限定的であった。そこで当社は建屋高さを上げずにスクラップを予熱できるシステムを開発し、好評を得ている（商品名：SPH-mk II）。その全体図を Fig. 6 に示す。電気炉の排ガスは煙道に導かれて隣接する予熱装置を通り排気される。予熱装置はスクラップを収納するバケットになっており、加熱された後、炉蓋を回転させバケットが横に移動してクレーンを使わずに全自動でスクラップを投入できる。シャフト型予熱装置に比べ、着熱効率はやや劣るものの、建屋高層化の必要が無い、スクラップの形状制約が無い、メンテナンスも容易で安定性が高いという特長を持つ。今後さらに導入が進むと予想される。

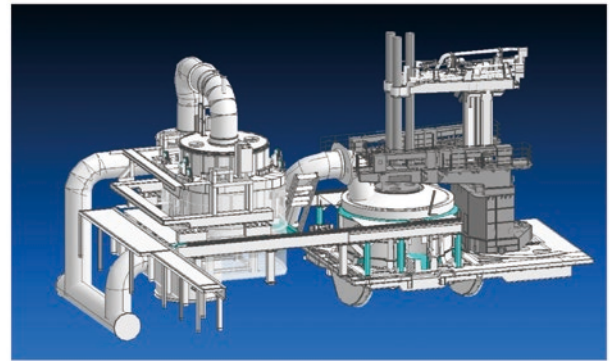


Fig. 6. SPH-mk II outline drawing.

4. 3. 2 排ガス熱回収

スクラップ予熱とは別に、排ガスの顕熱を直接取り出す試みも提案されている⁸⁾。排ガス煙道中にボイラや熱交換器を設置し、水や油などの熱媒体を加熱して蒸気を製造し、タービンを回して発電する。

理論的には高効率な発電が可能だが、電気炉の場合、使用するスクラップから亜鉛や鉛などの重金属が排ガスとともに排出される場合があり、これらの金属や炉内からのダストが熱交換器に付着して、効率が低下したり最悪の場合閉塞を引き起こす。また電気炉は基本的に間欠操業のため排ガス熱量が変動し、交換熱量が脈動して発電が不安定になる。これを解消するため一部のシステムでは蒸気溜めを作って変動を吸収するようにしているが、これにより設備コストがかさみ、投資回収が長くなる。今後さらに高効率かつ変動を吸収するシステムが提案できるよう当社も積極的に取り組んでいく。

4. 3. 3 ビレットなどからの放熱電気変換

製鋼工場では溶けた鋼をある一定の形の製品に鋳込んだ後、製品寸法にまで圧延し、冷却する。現状では製品が持つ熱は単純に放散されているだけであり、再利用が検討されている。例えば熱電素子を用いて、製品からの輻射熱を直接電気に変換する試みが行われている⁹⁾。現在、連続鋳造機の搬送ラインや圧延設備、圧延後の冷却ゾーンなどでの利用が検討されている。環境温度 300℃でも使用可能な熱電素子は現在開発が進んでいるが、まだ変換効率が温度差 250℃で7%程度と低いこと、素子の単価が高いことなどから研究の段階であるが、今後高効率で安価な素子が開発されれば、実用化が早まる可能性もある。将来に向けた開発を期待したい。

4. 4 再生可能エネルギー

我が国の下水道普及が進むにつれ発生する汚泥の埋立処分地の確保が問題となり、地方自治体ではその処分について難しい対応を迫られている。これまでは堆肥として農地へ戻す、あるいは焼却・熔融処分してスラグ化し、レンガや透水性ブロックなどへ利用されてきたが、汚泥中の炭素分のリサイクルという観点からは改善の余地を残していた。そこで当社では汚泥を無酸素もしくは

低酸素状態で熱分解（炭化）させることで炭素分を残留させ、「炭素+無機質」という新しい組成をもつ炭化製品として利用することを考えた¹⁰⁾。この炭化製品は木炭や活性炭とよく似た性質を持つことから、下水汚泥の新たな利用分野として注目されている。この炭化製品は火力発電や石炭ボイラー用の補助燃料などへの応用が期待されている。当社炭化設備は炭化炉本体に独自の構造を持つ、外熱式ロータリーキルンを採用し、下水汚泥からの乾留ガスを炉内で自燃させ、直接加熱源として利用するため、極めて低燃費のシステムとなっている。さらに、炭化炉からの排ガスを下水汚泥の予備乾燥に利用することで、さらにシステム全体としてのランニングコスト低減を果たしている。Fig. 7に当社下水炭化システムのシステムフロー図を示す。汚泥乾燥系、炭化炉系、排ガス処理系からなり、それぞれが連動して動作することで、燃料消費を最小限に抑さえつつ、16000 kJ/kgを越えるエネルギーを持つ炭化物を安定して製造可能である。さらにプラントとしての設備機能維持、監視、メンテナンスなどさまざまなノウハウを持ち、自治体や企業に総合的な運用の提案を行っている。現在、大型量産化設備の1号機を立ち上げ中であるが、今後先進的な汚泥炭化プラントとして普及が進むと予想される。

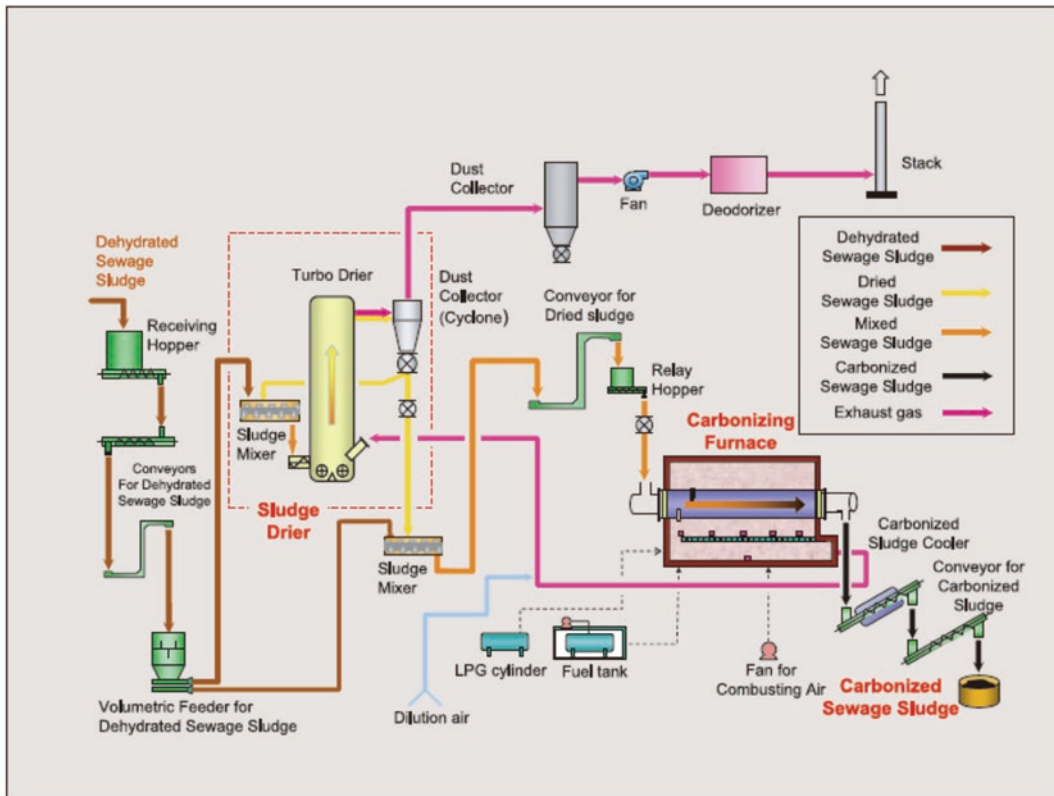


Fig. 7. System flow of sewage sludge carbonizing system.

5. おわりに

工業炉が使用される環境が大きく変化し、これまでベテラン作業者の経験と知恵に頼ってきた生産設備の効率的な運転をどうやって引き継いでいくか、そしてさらに生産性を向上させていくかが現場の課題となっている。また激変する世界の中で成長するため、設備投資をどう実現するのもユーザーから設備メーカーに投げかけられた課題である。本報ではそれらに対応するキーワードとして、①スキルフリーと機動性、②循環型社会形成のための省エネと再生可能エネルギー利用を挙げて将来を展望した。今後こうした課題はメーカーからの地道な提案とユーザーからの要望や助言により、一つずつ解決されていくであろう。

当社としても、今後これらのユーザーからの要望に応え、新しい提案をしていくことで持続的な社会の発展に積極的に寄与していく所存である。

(文 献)

- 1) C. Mathy, P. Nyssen, M. Bremmeyer, D. Gualitieri, D. Rigoni and J. C. Baumert: *Archives of Metallurgy and Material*, **53**(2008) , Issue, 2, 469.
- 2) T. Matschullat, D. Reger, K. Krueger and A. Doebbeber: *Archives of Metallurgy and Material*, **53**(2008) , Issue, 2, 399.
- 3) 森田雅之, 井上幸一郎, 羽生田智紀: *電気製鋼*, **77** (2006) , 5.
- 4) V. Heuer, K. Loeser, T. Leist, D. Bolton: *AGMA Technical Paper 12FTM23*.
- 5) 大同特殊鋼 ホームページ 製品紹介 <http://www.daido.co.jp/products/machinery/index.html>
- 6) *JFE技報*, No.3(2004), 67.
- 7) 本庄則夫, 森高司: *電気製鋼*, **68**(1997), 1, 13.
- 8) A. Hmpel, A. Fleischanderl, G. Enickl, F. Zauner and T. Steinparrzer: *METEC Insteel Con 2011 Program Press Session 13*.
- 9) 八馬広邦: *工業加熱*, Vol.50(2013), 4, 27.
- 10) 梅田義浩: *環境浄化技術*, 8月号, 日本工業出版, 2003.