

地球環境特集 特集記事2

環境・エネルギー

柳 謙一 三菱重工業(株)技術本部 広島研究所 所長
Ken-ichi Yanagi

Environment and Energy

1 はじめに

20世紀初頭からの電気製品と自動車などの普及に伴い、世界的にエネルギー需要が急増したため、 SO_x 、 NO_x など、発電プラントや自動車からの排ガスなどに含まれる汚染物質の大気放散が増大した。その結果、環境汚染が進み、人体や動・植物への悪影響が指摘され、先進国を中心にいろいろな環境規制が進められてきている。

また、石油、石炭、LNGなど化石燃料を燃やしてエネルギーとして利用する方法では、必然的に CO_2 が発生する。近年では世界で毎年220億トンもの CO_2 を大気中に発生しているため、このために地球が温暖化されているとの説も出ている。また、世界で70億トン(石油換算)もの化石燃料を毎年消費し、今後も消費量が急増し続けることが予測されているために、化石燃料の枯渇が懸念されている。

このようなエネルギー需要の急増とこれに伴う環境の急速な汚染に対しては、

- (1) 地熱発電、風力発電、太陽熱発電など、クリーンな新エネルギー源の開発
- (2) エネルギー利用効率の向上(省エネルギープロセス)など、エネルギー源と利用技術の研究開発に加えて
- (3) 排煙・排ガスの脱硫(SO_x 除去)、脱硝(NO_x 除去)技術
- (4) CO_2 を大気中に放散しない、 CO_2 固定化などが進められている。

以上は、我々の生活の基盤となるエネルギーを得るために直面している地球規模の課題であるが、もう一つの課題は、産業廃棄物や都市ゴミなどの急増に伴う環境汚染であり、工場排水、都市ゴミ、都市排水、建設汚泥、等々大量の廃棄物による種々の問題が過去に多数発生し、「廃棄物処理法」や「リサイクル法」などで規制が進められて来ている。

これらに対しては、

- (1) 排水、廃液など放散型廃棄物の中の環境汚染物質の無害化技術
- (2) フロンなど特定用途、有害物質の無害化技術
- (3) 都市ゴミなど、大量廃棄物の減容化、無害化技術

に加えて、

- (4) 廃棄物のリサイクル利用技術などの研究開発が進められている。

「ふえらむ」の読者の皆さんに関係の深そうなところを概して言えば、

- 1) 化石燃料をエネルギーとして利用しようとする、 CO_2 に加えて SO_x 、 NO_x が発生し、この為に脱硫・脱硝・脱炭技術が必要となる。
- 2) コスト競争力維持のためにも、また、次世代のエネルギー源確保のためにも、物を作るエネルギーをミニマムにする省エネルギープロセスは今後もますます重要となる。
- 3) 寿命が来て捨てられる製品の処理責任がメーカに問われるので、都市ゴミ処理に加え廃棄物処理・リサイクル技術が必要になる。

このような観点から、以下に関連する技術を紹介したい。

2 環境保全

2.1 排煙脱硫

事業用火力発電所向け排煙脱硫に20年の運転実績を持つわが国の技術は完成度が高く、世界最高レベルにある。

排煙脱硫装置に望まれる基本的な具備条件としては、(1) 脱硫性能がよい、(2) 装置の信頼性が高い、(3) 運転保守が容易で人手がかからない、(4) 二次公害がない、(5) 吸収剤

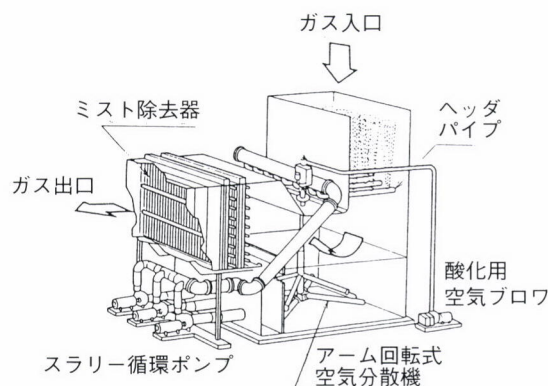


図1 液柱式吸収塔

が入手しやすく副製品の市場性がよい、(6) 建設費と運転費が安い、などが挙げられるが、これら条件に適合した技術として湿式石灰石石膏法が現在広く採用されている。この方法は吸収塔で石灰石スラリーと排ガスを接触させ、液中に溶解した亜硫酸ガスと石灰石を反応させ、更に空気酸化で石膏を生成させる方法である。

図1に最近実用化された液柱式吸収塔を示す²⁾。ノズルから高速で噴き上げた吸収液は、液柱頂部で分散しさらに降下液と噴出液の衝突による微細液滴の発生等によってガス-液接触面積の高い濃密な液滴層が形成される。石炭焚ボイラーの排ガス30万 m^3/h の実証試験結果を図2、3に示す。液柱高さ10mで97%の高脱硫率及び出口ばいじん濃度

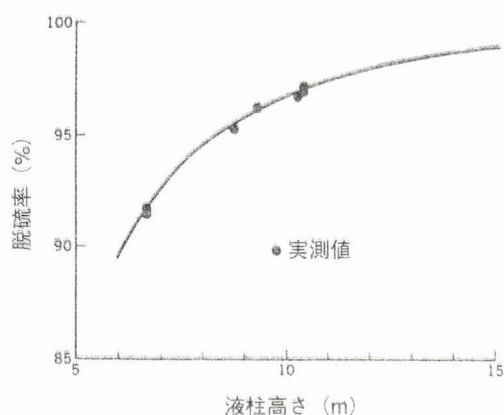


図2 実証試験装置における液柱高さとの脱硫率の相関

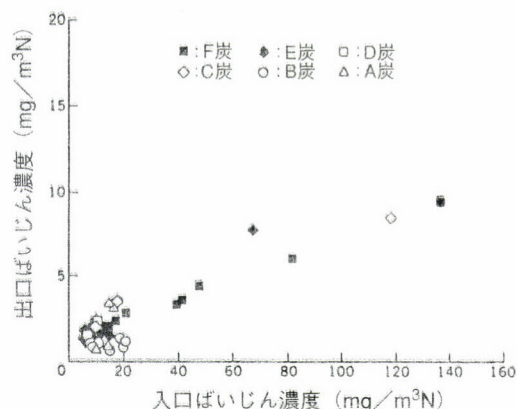


図3 実証試験装置における除じん性能

10 $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ が得られている。

硫酸化合物と同様にばいじん排出濃度の低減が求められており、従来の20~30 $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ から10 $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ を求められる都市近郊型石炭火力のケースもある。図4は高除じんシステムを示す²⁾。本システムの特徴は、ガスガスヒータ (GGH) で排ガスを低温化した後、電気集じん器 (EP) を設けることで集じん性能を向上させた点と、吸収塔での除じん性能を上げた点にある。

また、吸収塔からの排水についても電気透析膜を用いた濃縮と蒸発を組み合わせた無排水化システムが開発されている³⁾。

2.2 排煙脱硝

乾式脱硝装置は、1977年にボイラ用脱硝装置の初号機が運転を開始して以来、現在までに事業用及び産業用ボイラ向けとしてあるいはコージェネプラント向けとして350基以上が稼働中とみられ、そのうち事業用火力発電所を中心とした大型プラントは120基以上である。

ボイラ及びガスタービン排ガスの脱硝プロセスを図5に示

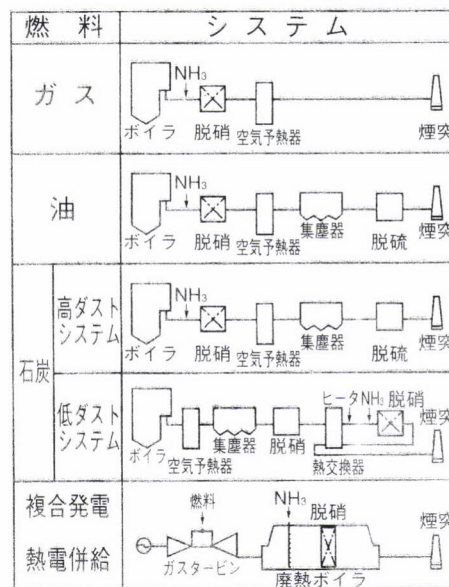


図5 脱硝プロセス

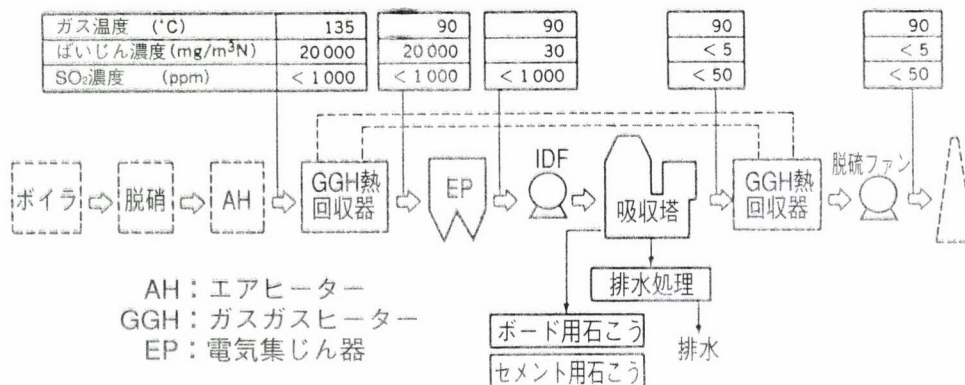


図4 高除じんシステム

した⁹⁾。脱硝装置は一般的に排ガス温度が200～450℃の範囲に入る場所に設置される。石炭燃の低ダストシステムの配置は、排ガス中に触媒被毒物質となる重金属が含まれる場合に採用されている。日本国内ではこのような例はほとんどなく、海外の劣悪な石炭を用いるプラントにみられる。

固定発生源の脱硝はNH₃を添加する選択接触還元法が殆どであり、その反応機構を図6に示す⁵⁾。

触媒劣化の原因としては

- (1) 担体チタニアの熱シタリング
- (2) アルカリ金属等による触媒活性点の被毒
- (3) カルシウム化合物の触媒表面への蓄積による細孔閉塞

であり、ガス燃プラントでは(1)が、重油燃プラントでは(2)が、石炭燃プラントでは(3)が主な劣化要因となっている。触媒の耐久性は、実績から、ガス燃の場合50,000時間、あるいはそれ以上、重油燃の場合30,000～50,000時間、石炭燃の場合20,000～40,000時間程度である。

2.3 CO₂の分離・回収及び隔離

火力発電所など大量のCO₂を集中して発生する施設でCO₂を回収し、長期にわたって安定的に大気から隔離する方策、いわゆるCO₂の回収・隔離策には次のような特徴がある。現在のエネルギー供給体系を大きく改変する必要がない点、排出されるCO₂の大半を大気に排出せず、発生源で処理できる可能性を有する点、技術的実現性の展望が得られやすい点、及びCO₂削減が必要と決断された場合に速やかに対応が可能である点などである。

燃焼排ガスからCO₂を分離・回収する技術については化学吸収法、物理吸着法などの開発が進められている。化学吸収法では図7に示す様にアミン化合物を吸収液とし、CO₂と吸収液を反応させて排ガス中のCO₂を分離した後、吸収液を加熱し再生塔でCO₂を放散させ、回収する。排ガス600m³N/hのパイロットプラント試験でCO₂回収率90%

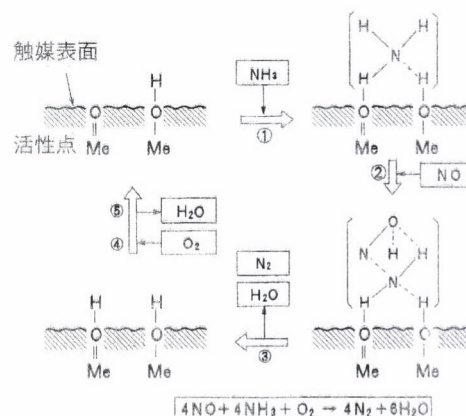


図6 脱硝反応機構

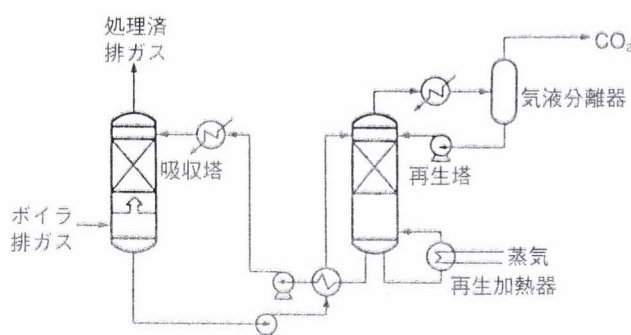


図7 化学吸収法によるCO₂分離・回収プロセス

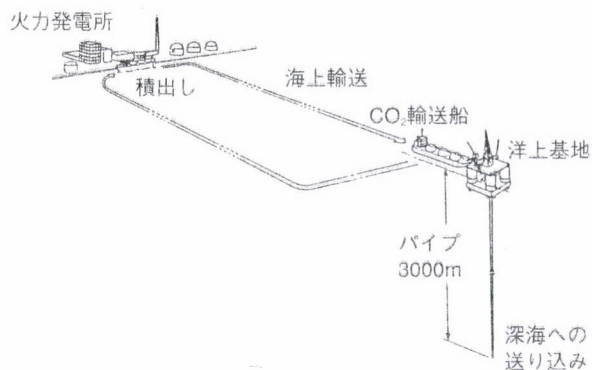


図8 CO₂の深海への送り込みシステムの概念

- ①投入ステージ ②ごみビット ③ごみクレーン ④三菱マルチン型ストーカ
- ⑤灰押出装置 ⑥灰コンベヤ ⑦灰ビット ⑧灰クレーン ⑨排熱ボイラ ⑩減温塔
- ⑪バグフィルタ ⑫触媒脱硝 ⑬IDF ⑭湿式洗煙 ⑮煙突 ⑯低圧蒸気コンデンサ
- ⑰灰処理ヤード ⑱変電室 ⑲配電盤室 ⑳排水処理ヤード

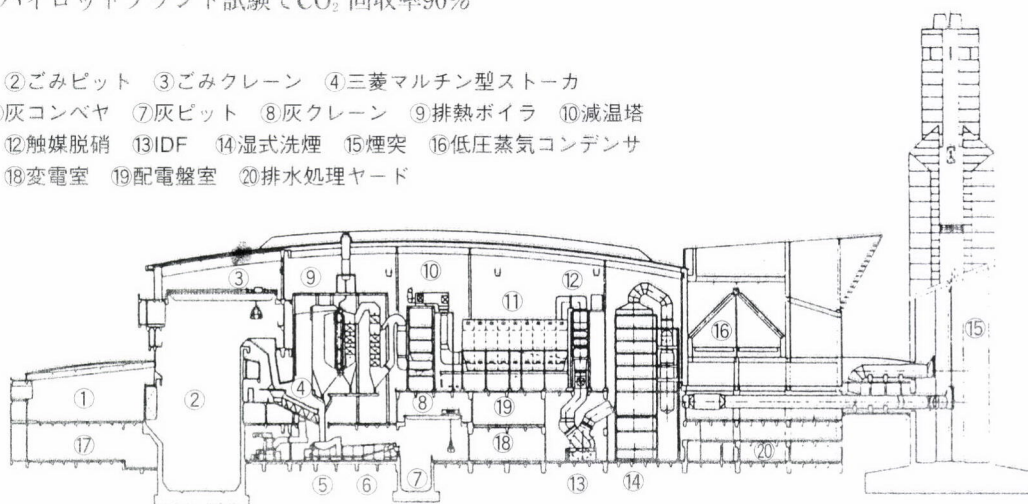


図9 ごみ焼却プラント

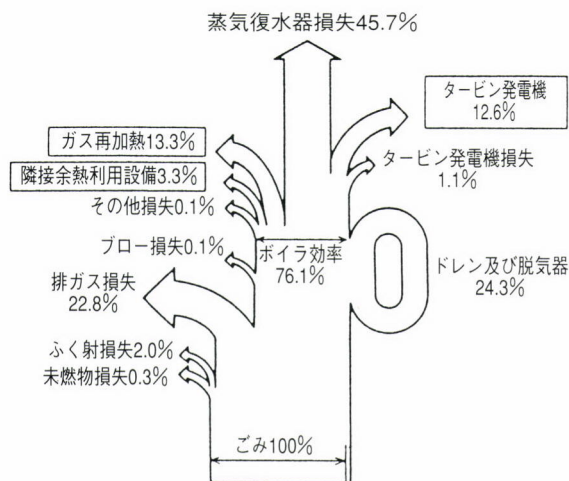


図10 熱収支

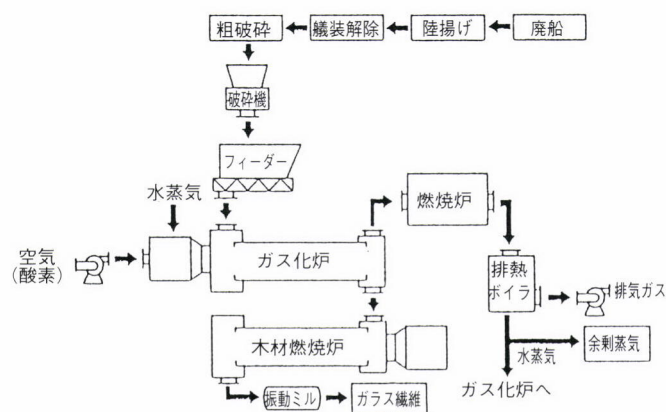


図11 FRP廃船ガス化プロセス

以上の結果が得られている⁹⁾。

CO₂の分離・回収と並行して回収したCO₂を再び大気に戻さないための、大量のCO₂を地中または海洋に隔離する技術の開発が国内外で検討されている。

図8は深海への送り込みシステムの概念であり、送り込み後のCO₂挙動等の研究がなされている⁷⁾。

また、CO₂固定化技術として、微細藻類の光合成機能を利用する方法も研究されている⁸⁾。

2.4 ごみ焼却

都市ごみ焼却プラントに求められる機能は、従来の単にごみを効率良く焼却処理するだけでなく、周辺環境との調和を考慮した建築デザインを有し、ダイオキシンをはじめとする各種有害物質の抑制処理、高効率エネルギー回収を可能とする等、非常に多様化している。図9に横浜市環境事業局向けのごみ焼却プラントを示す。1炉当りのごみ焼却能力が400t/dの3基で構成され、1日最大1200tのごみ焼却処理、並びに22000kWの発電能力を有する⁹⁾。

都市ごみからのエネルギーを排熱ボイラにより蒸気として回収し、隣接する余熱利用設備へ供給するとともに、煙突からの白煙防止のための排ガス再加熱源として使用する。

また、22000kWの発電システムが採用され、場内消費電力を除いた14000kWを東京電力等へ逆送電するなど、外部でも有効利用される。プラント全体の熱利用状況を図10に示す。

また、ごみにCaを添加、ペレット化したRDF(Refuse Derived Fuel)の燃焼発電や従来のごみ焼却炉にガスタービンを付設し発電効率を上げるスーパーごみ発電も開発中である。

2.5 廃プラスチックのガス化

廃プラスチックの処理及びフューエルリサイクルの手段としてガス化がある。図11はFRP廃船を対象とした処理システムで、蒸気とガラス繊維が回収される。長崎県で実証プラントが稼働中である¹⁰⁾。

また、都市ごみ中の廃プラスチックを水蒸気、酸素の共存下でガス化、CO、H₂に転換し、それからメタノールを合成するプロセスが開発中であり、図12に示す2t/dの実証プラントの試験中である¹¹⁾。

3 エネルギー関連設備

3.1 省エネルギー製鉄プロセス

製鉄—製鋼—圧延工程に至る製鉄プロセスにおける省エ

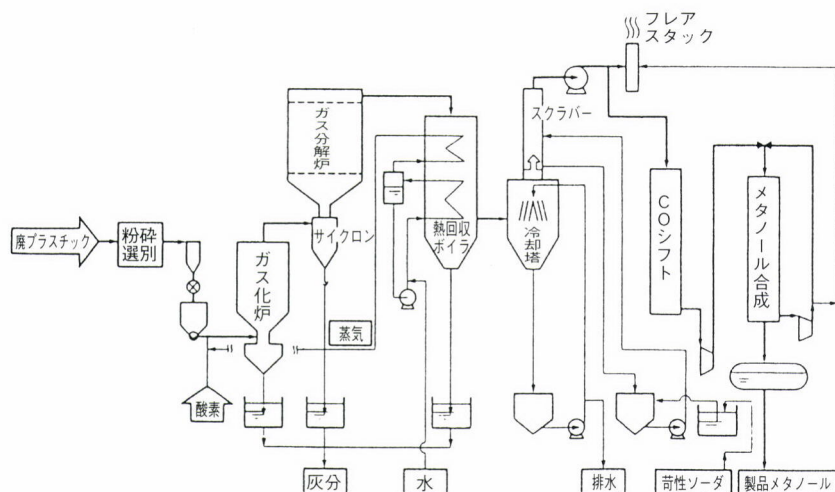


図12 廃プラスチックのガス化メタノール変換プロセスフロー

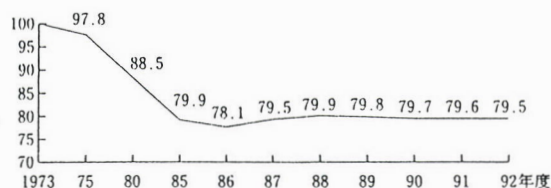


図13 粗鋼トン当りエネルギー消費原単位推移（1973年基準）

表1 高付加価値化による増エネルギー量

	増エネルギー要因	増エネルギー量		
		Mcal/t粗鋼	Mcal/t製品	×10^6Kcal/年
製鋼	高純度化	58.0	58.0	4,470
冷延・ 表面処理	軽量化	9.4	28.4	720
	★表面処理鋼板	93.9	560.0	7,230
厚板	★高張力化鋼	6.6	54.0	510
形鋼	★外形一定H形鋼	0.2	30.0	18
線材	★熱処理比率材	0.5	22.0	40
鋼管	形状高精度化等	9.6	160.0	740
	★継ぎ目無鋼管	8.4	860.0	650
電磁鋼板	★電磁鋼板	21.2	1,108.8	1,630
ステンレス	★オーステナイト・フェライト	4.8	140.0	370

注：★品種構成の変化

エネルギープロセスは熱の有効利用と設備の低減に他ならない。図13¹²⁾に粗鋼トン当りのエネルギー消費原単位の推移を示した。第1次石油危機以降1986年までに操業改善、エネルギー回収等の施策により約20%の省エネルギーを達成できたが、それ以降今日まで、これ以上の省エネルギー化が進んでいないことから大幅なプロセス変革は行われていないのが現状である。

最近の製鉄メーカにおいては鉄鋼材料の高級化、多品種化により表1¹³⁾のようにむしろエネルギー増となる傾向にあり、よりいっそうの省エネルギープロセスの開発が求められてきている。コールドコイルまでの製鉄プロセスを図14に示す。

省エネルギー化は、後述の廃熱回収技術の向上とともに、生産管理技術の向上としての冷間スラブを温間スラブ（①

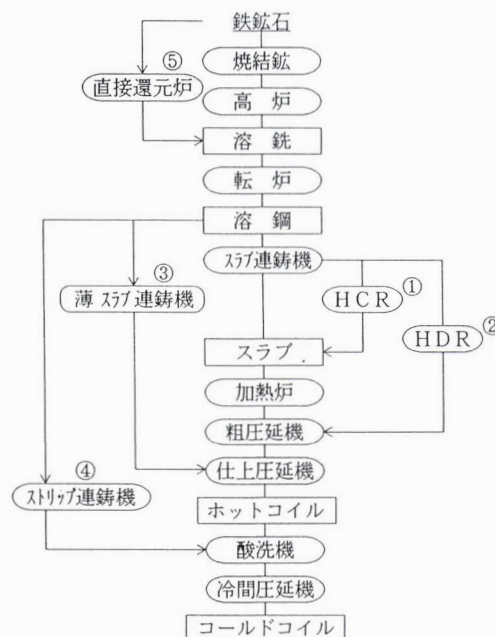


図14 圧延材までのプロセス流れ

HCR : Hot Charge Rolling) へ、さらに熱間スラブ（②HDR : Hot Direct Rolling) へと連铸機スラブの熱を有効に利用することから始まった。しかし、よりいっそうの省エネルギー化を図るためには粗圧延工程を省く③薄スラブ連铸^{14,15)}や、熱間圧延工程全てを省く④ストリップ連铸の開発が行われ、ストリップ連铸^{16,17)}については装置の製作精度や制御性能の向上が図られ1997年実機稼働が予定¹⁸⁾されるまでに至っている。その設備概要を図15¹⁹⁾に示す。この設備を使用すると、連铸機のなかで4工程を一挙に消化することとなり、環境改善とともに大幅な工数省略と省エネルギー効果が生まれる。

製鉄プロセスの省エネルギー化は、下流のプロセスの連続化から始まり、製鋼・圧延を一体化するように上流へと

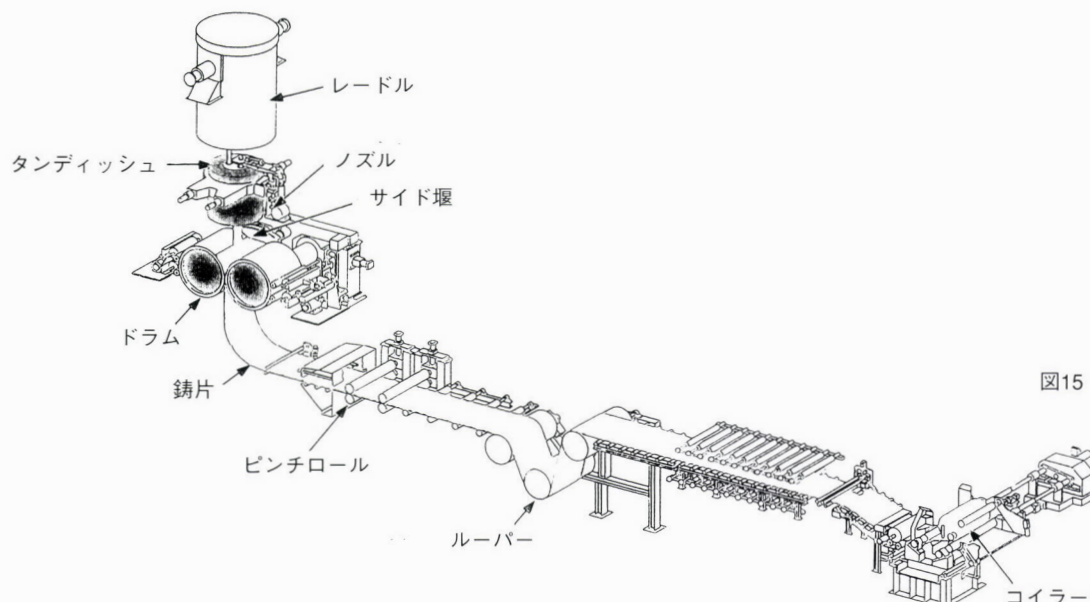


図15 実機化決定のストリップ連铸設備鳥瞰図

表2 溶銑を得るまでのエクセルギー解析例

(MJ/thm)

高炉法				溶融還元法			
	流入熱	放出熱	正味熱ロス		流入熱	放出熱	正味熱ロス
高炉	17054	15175	1879 (20.8%)	予備処理	42	0	42 (0.5%)
コークス炉	22657	18580	4077 (45.1%)	生石灰製造	362	172	190 (2.2%)
熱風炉	1983	1276	707 (7.8%)	ロータリーキルン	1945	468	1477 (17.3%)
焼結機	3014	764	2250 (24.9%)	シャフト炉	20393	20092	301 (3.5%)
ロータリーキルン	138	33	105 (1.2%)	酸素製造	2971	632	2339 (27.4%)
非焼成ペレット	190	170	20 (0.2%)	ガス冷却改質	21125	20389	736 (8.6%)
				溶融還元炉	23678	20314	3364 (39.4%)
合計	45036	35998	9038 (100%)	合計	70516	62067	8449 (100%)

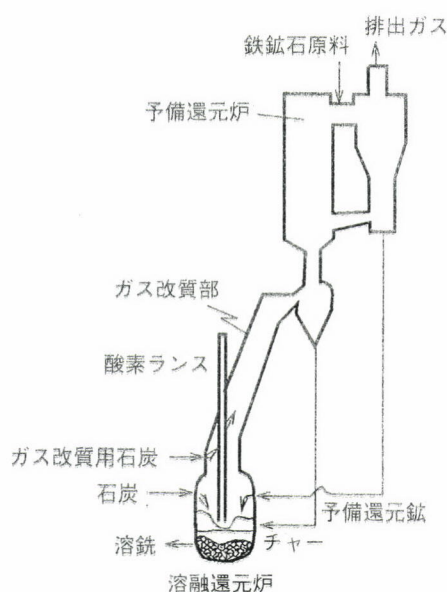


図16 溶融還元製鉄プラント(DIOS:Direct Iron Ore Smelting reduction)の概念図

移ってきている。特に高炉法を基本とする製鉄プロセス全エネルギーの1/2以上²⁰⁾を占める製銑分野は今後の省エネルギー設備開発の対象と言える。このため高炉法では、PCI(Pulverized Cool Injection)技術²¹⁾の導入による省エネルギーと環境改善が図られている。従来の高炉法と直接還元法のエクセルギーロス解析も行われ、表2²²⁾のように高炉法より直接還元法は省エネルギー化が期待されている。このため、国家プロジェクトでも図16²³⁾の環境にも配慮した溶融還元製鉄法の開発が進められている。

製鉄プロセス革新技術設備の開発は、従来設備の削減と同時に省エネルギー化が図られるため、環境順応型製鉄プロセス(エコ製鉄)を念頭に置きながら、今後とも間断なく進められるであろう。

3.2 廃熱回収

48年の第1次石油危機を契機に、各製鉄所では、エネルギー消費の節減と排エネルギーの回収を積極的に推進し、図13に示した様な省エネルギー化を達成している。製鉄所に設置されている生産設備は多岐にわたっており、これら諸設備から排出される排エネルギーは、その温度レベルが

数十度の冷却水から千数百度の高炉、転炉スラグまで非常に広範囲に広がっているうえ、排出の形態も冷却水顕熱、製品半製品顕熱、燃焼排ガス及び副生ガスの顕熱(圧力も含む)、それに高炉、転炉スラグなど高温溶融物体顕熱に及ぶなど多種多様である。したがって、これら排エネルギーを有効に回収するためには、熱源に適した廃熱回収設備が必要となってくる。

その代表例として、コークスの乾式消火設備(CDQ)とその循環ガス熱回収ボイラ、焼結銑の顕熱回収による熱水タービン発電システム、転炉スラグ風砕及び顕熱回収装置、あるいは溶融塩による熱延鋼材顕熱回収装置などがある。製鉄所主要設備から排出される廃熱の状態と、それに適用される熱回収技術を表3に示す。

表に示す設備のうち代表的なものについて、以下に述べる。

3.2.1 焼結設備

第1次石油危機以来、エネルギー価格の高騰により焼結工程においても省エネルギー技術の開発に力が注がれた。焼結機クーラの廃熱を低圧の熱水として回収し、熱水タービンにより発電する廃熱回収技術が実用化されている。また焼結機本体の排ガス中の顕熱を回収する技術も開発されている。更にグレートバー及びパレットフレームの加熱に費やされた熱はリターン側で大気に散逸していたが、この熱を回収し、焼結反応に利用することを目的とした通風切替式焼結機²⁴⁾が開発されている。焼結終期に通風方向を下向きから上向きに切替え、パレットフレーム及びグレートバーの熱によって

表3 製鉄所における生産設備と廃熱の種類及び熱回収設備

熱設備	製品または固体(C°)	溶融物体(C°)	排ガス(C°)	熱回収適用技術
焼結機	500~600	-	300~350	排熱ボイラ
焼結機クーラ	-	-	200~450	排熱ボイラ 排熱回収熱水タービン発電装置 有機媒体発電システム(ORC)
コークス製造炉及び冷却装置	900~1200	-	800~950	CDQ循環ガス熱回収ボイラ
高炉	-	銑鉄1300	120~140	炉頂圧回収タービン 高炉ガスタービンコンバインドプラント
高炉用熱風炉	-	溶さい1300	200~250	スラグ顕熱回収ボイラ
転炉	-	溶鋼1300	1000~1300	空気予熱装置 転炉ガス排熱ボイラ
加熱炉	1100~1200	溶さい1300	-	OG冷却水熱回収発電装置(ORC)
均熱炉	-	-	550~700	スラグ顕熱回収ボイラ 熱延鋼材(線材)顕熱回収ボイラ 排熱ボイラ

冷風を予熱し、この予熱空気を焼結前半部に導き焼結反応に寄与する方法である。図17にその概要を示す。

3.2.2 コークス乾式消火設備 (CDQ)

製鉄は多エネルギー消費型反応の代表的産業である。廃熱回収を考える場合、廃熱の温度レベルが高くしかも熱量が多ければ、より経済的な回収利用が可能である。コークス炉から排出される消火後約200℃まで冷却されたコークスは排鉱部でグレート上から排出される。

本CDQの特徴は移動グレート上でコークスとガスの熱交換を行わせる固定床プロセスにある。グレート面積が自由に取れる利点から、コークス層厚を薄くでき、冷却むらが少なくなる。固定床ではコークス自身は全く動かないので、粉化が少なく、歩溜りが向上する。また、鋳物用コークスのように、多銘柄のコークスを処理する場合、各銘柄の混合を防止できる利点がある。サーキュラグレート式CDQシステム³⁰⁾を図18に示す。

本CDQに利用されているサーキュラグレートは、コークスの冷却のみならず、固体一般の反応及び熱交換装置として幅広く活用可能な装置である。

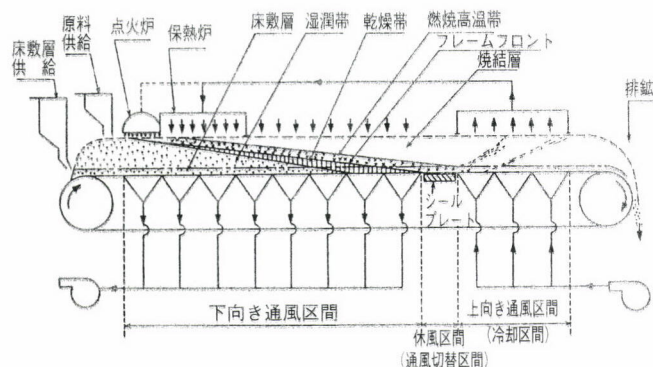


図17 通風切替式焼結法の概要

3.2.3 発電設備

高効率化ニーズに対する一つの動きとして、高炉ガス焚ガスタービン発電設備がある。高炉ガスは低カロリーであるため、標準形ガスタービンをそのまま適用できず我が国では余り顧みられなかったが、低カロリー燃料の有効利用の観点から、33年に我が国初の高炉ガス焚800kWガスタービンが実用化された。更に40年には本格的実用機として17000kWガスタービンが完成した。その後、57年には高効率高炉ガス焚ガスタービン (16MW) が完成した。この設備は、世界でも初めてのタービン入口温度1000℃を超える高炉ガス焚きガスタービンとして注目を集めたものである。図19にコンバインド発電設備新設による効果の一例²⁵⁾を示す。

3.2.4 転炉スラグ風碎システム

製鉄所で発生するスラグの代表的なものとして、製鉄工程から排出される高炉スラグ、製鋼工程から排出される転炉スラグがある。いずれのスラグも1400～1600℃と高温で、その顕熱の回収は製鋼業の省エネルギー対策の中で残された最大のテーマとなっているが、再資源化との両立が難しかったこともあり、従来は専ら、スラグの再資源化が優先されていた。特に転炉スラグは、風化崩壊しやすい性質の

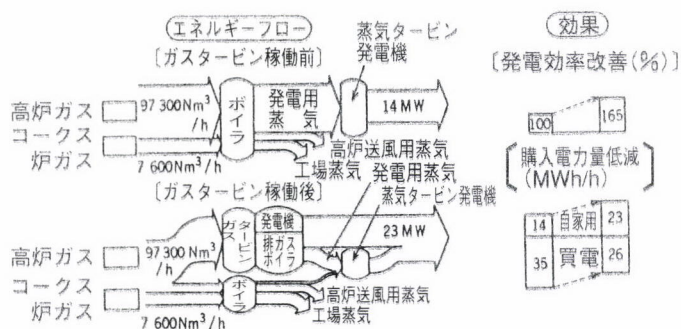


図19 コンバインド発電設備新設による効果

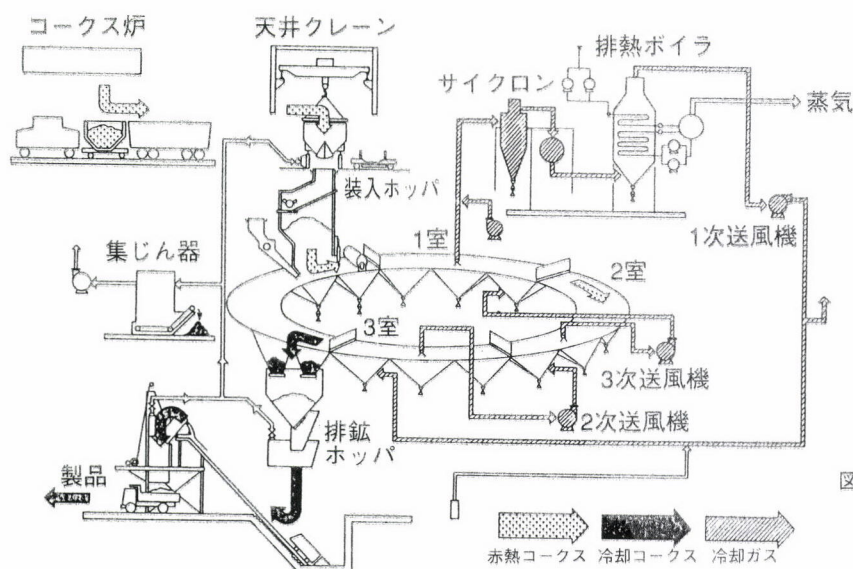


図18 サーキュラグレート式CDQシステムの構成

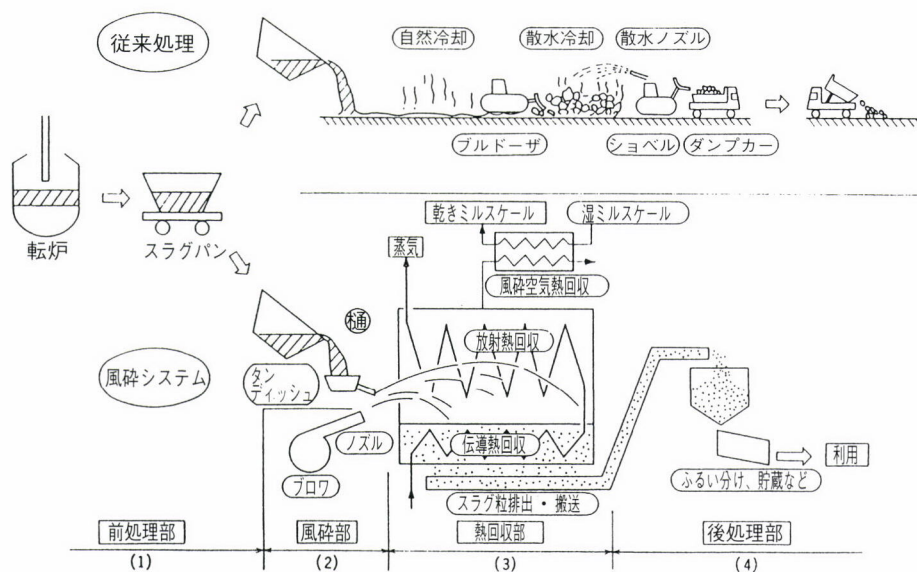


図20 転炉スラグの従来处理方法と風砕システムの流れ

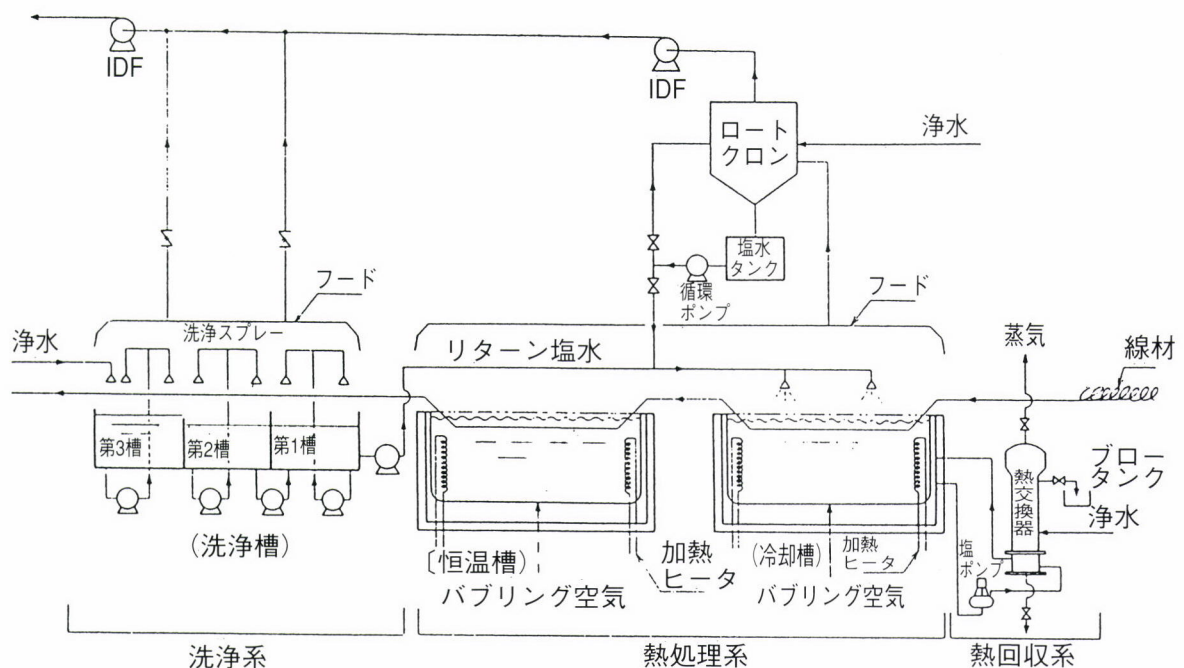


図21 線材オンラインパテンティング装置フロー

ために再資源化が阻害され、そのほとんどは徐冷固化し、ブルドーザ等で破碎されたのち埋立て投棄されていた。このような背景の下に、転炉スラグを風砕し、熱回収する新処理技術の開発が進められ、56年に月間スラグ処理能力20,000トンのプラントが完成した。

このプラントのシステムフローは図20に示すとおりで、風砕されたスラグ粒を回収するフードをボイラチューブで構成し、飛しょう中のスラグ粒からの放射熱回収を行い、その下部に飛しょう後のスラグを滞留させる部分を設け、ここにフィン付きチューブを配置し、高温スラグ粒との直接接触により伝導熱回収を行わせる方式としたのが、熱回収用ボイラの大きな特徴である²⁴⁾。

3.2.5 高炭素鋼線材のオンラインパテンティング

高炭素鋼線材のオンラインパテンティング装置のフローを図21に示す。従来は、オフラインでいったん冷却された線材を再加熱して鉛浴中で急冷、保持するが一般的方法であった。図21の方法は、熱間圧延直後の赤熱線材の保有熱を利用して、オンラインでのパテンティングするものである。

熱間圧延直後の線材を保持炉でいったん温度保持し、冷却槽で所定の温度まで急冷後、この温度とほぼ等しい恒温槽で温度保持し、熱処理の終わった線材を洗浄槽で水洗し、塩除去するものである。恒温槽における保持温度が高い場合には、恒温槽と洗浄槽の間に第2の熱回収槽を入れることも可能である。本装置²⁶⁾は処理量が60t/hと小規模であ

るため、熱回収効率が若干低いものの、800℃から550℃までの鋼材保有熱 $4 \times 10^6 \text{kcal/h}$ の78%を回収し、プロセス蒸気として実用に供している。

この装置の熱回収系は、蒸気発生器が別置となっており、冷却槽との間に溶融塩ポンプを置き、溶融塩を90t/h程度循環している。また、冷却槽及び恒温槽は溶融塩と線材の熱伝達率を高めるため、前述の空気気泡による攪拌を行っており、1200～1400kcal/m²・h・℃程度の熱伝達率を得ている。

4 おわりに

2010年までに日本を除く東アジア7ヶ国（中国、インドネシア、マレーシア、フィリッピン、韓国、台湾、タイ）だけで約2兆7000億kWhの電力エネルギー需要増が予測されている。

現在、日本国内のエネルギー需要は約7500億kWhであり、東アジアだけで日本の約3倍強の需要増となる。

また、セメント、鉄鋼、化学製品など基盤材料の生産増強が進み、日本と同様の環境問題が顕在化することが懸念される。

幸い、日本では戦後の急成長期にエネルギー需要増と産業廃棄物増に伴う環境問題を経験し、世界に先駆けて排煙、排ガス、排水処理など、いろいろな環境維持のための技術や設備を研究開発してきた。

また、第1次、第2次石油ショックの経験により、省エネルギーと省エネルギー製造プロセスの大切さを実感し、これらの技術を開発実用化して来た経験をもっている。

さらに、現在、膨大な都市ゴミ処理の問題やCO₂対策、フロン対策などにも取組んでいる。

これらの経験を通して得られた貴重な知識と、蓄積された独自の技術は、日本固有の特色技術として今後世界各国のエネルギーと環境問題に対して役立て得るものと考えられる。

引用文献

- 1) 鶴川直彦, 高品徹, 沖野進, 木村和明, 岩下浩一郎:
三菱重工技報, Vol.32, No.5(1995), p.318
- 2) 藤島英勝, 清水拓, 土屋喜重, 西田定二, 田中雅: 同上,
Vol.31, No.4(1994), p.247
- 3) 鶴川直彦, 中村積, 小竹進一郎, 山本文明, 坪内貞夫,
三輪田達典: 同上, Vol.30, No.3(1993), p.264
- 4) 飯田耕三: 触媒, Vol.35, No.5(1993), p.273

- 5) 縄田秀夫, 飯嶋正樹, 泉順, 松本曠世, 光岡薫明:
三菱重工技報, Vol.29, No.4(1992), p.296
- 6) 尾崎雅彦, 藤岡祐一, 竹内和久, 園田圭介, Gilbert R. Stegen:
同上, Vol.31, No.4(1994), p.262
- 7) 根来正明, 塩地則夫, 金子雅人, 生田義明, 福田義則,
牧田武紀, 平山孝平, 松崎裕之: 同上, Vol.29, No.4(1992), p.304
- 8) 吉良雅治, 高橋和義, 石井清治, 魚屋和夫: 同上, Vol.31,
No.4(1994), p.255
- 9) 魚屋和夫, 西川進, 川原雄三, 徳田君代, 高塚汎, 伊部治重:
同上, Vol.32, No.5(1995), p.300
- 10) KAZI, No.10, p.122 (1995)
- 11) 橋本律夫, 金子雅人, 福島丈雄, 伊藤義文, 坂井正康,
河野眞司, 島田裕: 三菱重工技報, Vol.32, No.5(1995),
p.306
- 12) 大関彰一郎: 鉄鋼界, 9(1995), p.9
- 13) 篠原慶章: 同上, p.40
- 14) 樫尾茂樹, 岡田力美, 片平圭一, 大野剛正, 山本利樹,
長田修次, 米田順吉, 平田耕一: 材料とプロセス, 7(1994),
p.1187
- 15) G.Flemming, F.Hofmann, W.Rohde, D.Rosenthal:
Stahl u. Eisen, 113(1993), p.37
- 16) K.Yanagi, K.Yamamoto, H.Takatani, K.Sasaki,
Y.Wakiyama, H.Takeuchi, H.Nakashima, S.Tanaka,
M.Yamada, Y.Yamakami: 2nd European Continuous
Casting Conference Proceedings, (1994), p.423
- 17) 佐々木均, 中谷孝司, 天野景博, 峠竹弥, 丸山哲男,
松井正之: 材料とプロセス, 6(1993), p.1139
- 18) たとえば日本経済新聞, 1/24/1996
- 19) 新日鐵(株)私信
- 20) Yin RuiYu: 鉄鋼界, 3(1994), p.43
- 21) 小指軍夫: 鉄と鋼, 4(1995), p.271
- 22) 八木順一郎: 第146・147回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協
会, (1993), p.289
- 23) 徳田昌則: 金属, 1(1991), p.8
- 24) 古屋慎一: 三菱重工技報, Vol.21, No.6(1984), p.5
- 25) 森義孝, 皆沢勝司, 三賢憲治, 沖汐正悦, 室野光男,
福江一郎: 同上, Vol.21, No.6(1984), p.34
- 26) 柳 謙一, 三原一正, 瀬々新二, 花咲幹: 同上, Vol.21,
No.3(1984), p.1

(1996年4月24日受付)