

JAERI-Review

2005-007



JP0550117



我が国のエネルギー消費構造動向調査
—産業部門編—

2005年3月

鈴木 孝昌

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

我が国のエネルギー消費構造動向調査
－産業部門編－

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
鈴木 孝昌*

(2005年1月28日受理)

産業部門のエネルギー消費は民生部門、運輸部門よりも多く、我が国の最終エネルギー消費の5割近くを占めている。産業部門では従来より経済性の観点から省エネルギーに取り組んできたが、最近では地球温暖化対策の観点からも一層の省エネルギーが求められている。

産業部門の中でエネルギー多消費産業といわれる鉄鋼、化学、紙・パルプ、セメント、ガラスの各産業について、エネルギー消費量、エネルギー原単位の推移、新しい省エネルギー技術の開発状況等について調査し、さらに産業共通の省エネルギー技術や廃棄物のリサイクル利用についても調査し、とりまとめた。どの産業でも省エネルギーに対して積極的かつ継続的に取り組んでおり、省エネルギーに係わる新しい技術、システムの開発があり、また廃プラスチック等、産業規模での廃棄物リサイクルも開始されている。

**An Investigation on Energy Consumption in Japan
- Industry Sector -**

Takayoshi SUZUKI*

**Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken**

(Received January 28, 2005)

Energy consumption in the industry sector, which is larger than that of the residential/commercial or transportation sector, occupies nearly 50% of final energy consumption in Japan. The industry sector has made an effort for energy conservation from an economical point of view. Now further effort is required also to cope with a global warning problem.

This report summarizes the results of investigation on energy consumption, changes in energy intensity and development of energy conservation technologies including those common to the industries and recycling of wastes, focusing on energy intensive industries such as iron & steel and chemicals. Advanced energy conservation technologies or systems are being developed with a large and continuous effort in all industries, and recycling of wastes, e.g. waste plastics, has started in industry scale.

**Keywords: Energy Consumption, Industry Sector, Energy Conservation,
Energy Intensity, Energy Conservation Technologies**

目 次

1. はじめに	1
2. 鉄鋼	2
2. 1 鉄鋼業の概況	2
2. 2 鉄鋼の生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位	3
2. 3 鉄鋼業の新しい技術	4
2. 4 廃プラスチックの利用	5
3. 化学	14
3. 1 化学工業の概況	14
3. 2 エチレンの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位	15
3. 3 化学工業の新しい技術	16
4. 紙・パルプ	24
4. 1 紙・パルプ産業の概況	24
4. 2 紙・パルプの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位	25
4. 3 紙・パルプ製造の新しい技術	25
5. セメント	33
5. 1 セメント産業の概況	33
5. 2 セメントの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位	33
5. 3 セメント焼成の新しい技術	34
6. ガラス	39
6. 1 ガラス産業の概況	39
6. 2 ガラスの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位	39
6. 3 板ガラス製造プラントのコストの例	40
6. 4 ガラス製造の新しい技術	40
7. 産業共通	46
7. 1 高性能工業炉	46
7. 2 高性能ボイラ	47
7. 3 プラスチックリサイクル	48
8. おわりに	55
参考文献	56

Contents

1. Introduction	1
2. Iron and Steel Industry.....	2
2.1 Overview	2
2.2 Steel Production, Energy Consumption and Energy Intensity.....	3
2.3 New Technology in Iron and Steel Industry	4
2.4 Waste Plastics Utilization	5
3. Chemical Industry.....	14
3.1 Overview	14
3.2 Ethylene Production, Energy Consumption and Energy Intensity.....	15
3.3 New Technology in Chemical Industry	16
4. Paper and Pulp Industry.....	24
4.1 Overview	24
4.2 Paper and Pulp Production, Energy Consumption and Energy Intensity ..	25
4.3 New Technology in Paper and Pulp Manufacturing.....	25
5. Cement Industry	33
5.1 Overview	33
5.2 Cement Production, Energy Consumption and Energy Intensity.....	33
5.3 New Technology in Cement Calcination	34
6. Glass Industry	39
6.1 Overview	39
6.2 Glass Production, Energy Consumption and Energy Intensity.....	39
6.3 Cost Example of Flat Glass Manufacturing	40
6.4 New Technology in Glass Manufacturing	40
7. Common Technologies	46
7.1 High-performance Industrial Furnace.....	46
7.2 High-performance Boiler	47
7.3 Waste Plastics Recycling	48
8. Concluding Remarks	55
References.....	56

表 一覧

- 表 2.1 粗鋼の年間生産量の推移
表 2.2 鉄鋼業におけるエネルギー消費
表 2.3 粗鋼当たりエネルギー原単位の推移
表 2.4 各工程におけるエネルギー原単位(1990年)
- 表 3.1 化学工業におけるエネルギー消費
表 3.2 化学工業におけるエネルギー消費量と主な原料用燃料消費量
表 3.3 我が国のエチレンプラントの能力・諸元
表 3.4 ガスタービン有無による分解炉燃料消費量比較
- 表 4.1 紙・パルプの生産量の推移
表 4.2 パルプ生産にかかる消費エネルギー
表 4.3 紙生産にかかる消費エネルギー
表 4.4 板紙生産にかかる消費エネルギー
- 表 5.1 セメント生産量の推移
表 5.2 セメント生産の消費エネルギー
表 5.3 エネルギー消費量のロータリキルン／流動床キルン比較
- 表 6.1 ガラスの生産量の推移
表 6.2 板ガラス生産にかかる消費エネルギー
表 6.3 ガラス製品生産にかかる消費エネルギー
表 6.4 板ガラス生産量／エネルギー使用の実績と今後の見通し
- 表 7.1 工業炉の種類、形式、規模別熱効率平均値
表 7.2 工業炉の使用エネルギー量と高性能工業炉適用による省エネルギー量
表 7.3 ボイラ熱勘定
表 7.4 燃焼・伝熱・環境特性関連の数値
表 7.5 プラスチックリサイクルの分類
表 7.6 廃プラスチックの有効利用量と有効利用率の推移
表 7.7 鉄鋼／セメントでの廃プラスチック利用量の推移

図 一覧

- 図 2.1 高炉製鉄所の工程フローと主な省エネルギー設備
- 図 2.2 一貫製鉄所のエネルギーバランスの例
- 図 2.3 電気炉の熱収支の例
- 図 2.4 粗鋼の年間生産量の推移
- 図 2.5 鉄鋼業のエネルギー消費量及び原単位の推移
- 図 2.6 鉄鋼業のエネルギー原単位の推移
- 図 2.7 DIOS プロセス概念図
- 図 2.8 ミドレックス法のプロセスフロー
- 図 2.9 連続装入式シャフト炉
- 図 2.10 高炉等への廃プラスチックの利用

- 図 3.1 石油化学製品製造の流れと製品別生産量(2002 年)
- 図 3.2 化学工業エネルギー消費の内訳 (2002 年度)
- 図 3.3 エチレンプラントの代表的プロセスフロー
- 図 3.4 エチレンの年間生産量の推移
- 図 3.5 エチレン生産エネルギー原単位
- 図 3.6 石油化学部門別のエネルギー使用量

- 図 4.1 パルプー紙製造工程
- 図 4.2 紙・パルプ産業エネルギー・フロー
- 図 4.3 製紙産業の使用エネルギー構成比(2002 年度)
- 図 4.4 紙・板紙の原料から製品までの流れ
- 図 4.5 古紙の年間消費量の推移
- 図 4.6 紙・板紙の年間生産量の推移
- 図 4.7 紙・板紙トン当たり化石エネルギー原単位の推移

- 図 5.1 セメント焼成システム (NSP キルン)
- 図 5.2 主な廃棄物・副産物の産業での利用状況(2002 年度)
- 図 5.3 セメントの年間生産量の推移
- 図 5.4 セメント製造用エネルギー原単位
- 図 5.5 流動床セメント焼成システム

- 図 6.1 フロート法製板法
- 図 6.2 代表的なガラス溶解窯
- 図 6.3 TVブラウン管ガラス製造時の酸素燃焼による効果
- 図 6.4 板ガラス炉における熱流れ図の例

- 図 7.1 空気高温化と希釈割合増加の燃焼範囲への影響
- 図 7.2 リジェネレイティブ燃焼
- 図 7.3 パイロットプラント熱流れ線図
- 図 7.4 プラスチック生産量・国内消費量・廃プラスチック排出量の推移

1. はじめに

エネルギーは現代社会の発展に欠かすことのできない必須の要素である。我が国のエネルギー確保に係わる課題としては、供給源の多様化などにより対応してきたエネルギーセキュリティに加え最近では、地球環境問題、特に地球温暖化問題が避けて通れない情勢となってきた。

1997年12月に開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3、京都会議）において、先進国の温室効果ガスの排出量削減目標が合意され、我が国としては2008年から2012年までの第1約束期間に温室効果ガス排出量の1990年比6%の削減を約束している。

この6%削減目標達成のため、地球温暖化対策推進大綱（平成14年3月19日地球温暖化対策推進本部決定）において具体的対策の全体像を明らかにしており、その中で我が国の温室効果ガス排出量の約8割を占めるエネルギー起源のCO₂については、2010年度において1990年度と同水準までに抑制することを目標とし、最終需要部門における省エネルギー対策、バイオマス、太陽光、燃料電池等の新エネルギー対策、天然ガスへの燃料転換等、原子力の推進という一連の対策によりこれを達成していくこととしている。産業部門の省エネルギー対策を更にみると、経団連自主行動計画の着実な実施に加え、省エネルギー技術の開発・普及・導入促進を強く求めている。

このような状況下、最終エネルギー消費の5割近くを占める産業部門は、従来より生産コスト低減の観点から強いインセンティブを持って省エネルギーに努めているが、特にエネルギー多消費産業といわれる鉄鋼業、化学工業等においては、最近更なる省エネルギーの追及、省エネルギーに繋がる技術開発、資源のリサイクル等に積極的に取り組んでいる。本調査においては、エネルギー多消費産業のエネルギー消費構造の調査分析、すなわち鉄鋼、化学、紙・パルプ、セメント、ガラスの各産業の動向、エネルギー消費に係わる特徴、エネルギー原単位の推移、新しい省エネルギー技術、設備、システムの開発状況、さらに産業全体に共通する省エネルギー技術開発や廃棄物のリサイクル利用についても調査し、とりまとめを行った。併せ、エネルギー市場最適配分モデルMARKALのエネルギー技術特性データベースに資することとした。

2. 鉄鋼

2. 1 鉄鋼業の概況

(1) 我が国の鉄鋼業

現在日本の鉄鋼業で使われている製鉄技術は大別して、高炉で鉄鉱石とコークスから銑鉄を製造し転炉で製鋼する方法と、電気炉で鉄スクラップから電炉鋼を製造する方法がある。これに対応して鉄鋼メーカーは、前者を採用し圧延工程までを行う一貫メーカーと後者の電炉メーカーがある。

高炉一貫製鋼法の典型的なフローシートを図 2. 1 に示す（図 2. 1 には省エネルギー設備も示してある）¹⁾。原料の鉄鉱石は、副原料の石灰石とともに焼結機で焼結され、高炉炉頂に投入される。還元剤のコークスは、コークス炉で原料炭から事前処理され、高炉炉頂に投入される。また羽口からはコークス節減のため微粉炭の吹き込みを行っている。投入された焼結鉱とコークスは、高炉内を下降するうちに、炉底からの空気とともに反応し、高炉炉底で溶銑とスラグに分かれ、取り出される。高炉で生産された銑鉄は転炉に移され、転炉で石灰石等の副原料を加えて成分調整し、酸素を吹き込んで銑鉄中の炭素を酸化し溶鋼とする。転炉において生産された溶鋼は、直ちに連続铸造設備により適当な大きさのスラブとされ、圧延設備により各種製品化される。

一方電気炉では、超高電圧のアーキにより鉄スクラップを溶解し、炉外精錬設備にて成分調整を行い、後は一貫製鉄法と同様に、連続铸造設備に送られ製品化される。一貫製鉄法と比べて複雑な反応がなくエネルギー消費は小さい。

(2) 鉄鋼業のエネルギー事情と主な省エネルギー技術

資源エネルギー庁エネルギーバランス表²⁾によれば、2002 年度における鉄鋼業のエネルギー消費は、 $1,733 \times 10^{15} \text{J}$ となっている。これは、我が国全体の最終エネルギー消費 $16,024 \times 10^{15} \text{J}$ の 10.8% に当たり、産業部門のエネルギー消費 $7,569 \times 10^{15} \text{J}$ の 22.9% を占め、また製造業のエネルギー消費 $6,763 \times 10^{15} \text{J}$ の 25.7% を占めている。鉄鋼業エネルギー消費 $1,733 \times 10^{15} \text{J}$ の内訳で多いものは、石炭製品の $1,018 \times 10^{15} \text{J}$ 、電力の $242 \times 10^{15} \text{J}$ 、また石炭が $228 \times 10^{15} \text{J}$ となっている。鉄鉱石の還元による鉄の製造では多量のエネルギーが必要であり、鉄鋼業は、単一産業としては我が国最大のエネルギー多消費産業である。

鉄鋼業においては、高度成長期の時代から品質向上のための生産設備の新鋭化とともにコストダウンの一貫として省エネルギーに努力が払われてきた。当初は、生産工程の合理化・連続化によるグロスの省エネルギーに取り組み、以降は排熱の回収等によりネットでエネルギー消費削減に努めてきた。現在、製鉄所は大規模なエネルギー循環系を成すようになっている。すなわち、コークス炉、高炉、転炉で多量のエネルギーを使用すると同時に、これらの炉から発生する副生ガス、排熱は自ら使用するとともに、余剰のガスは後段の加熱炉で使用したり、また外販している。

製鉄所の主な省エネルギー設備、技術を工程別フロー順に下記に幾つか挙げる（図 2. 1 参照）。

- ・コークス乾式消化設備 (CDQ)

コークス炉から排出される 1000°C を超える赤熱したコークスを不活性ガスで連

続的に消火処理する設備で、コークスの顕熱を排熱ボイラにより蒸気回収・電力回収する。

- ・炉頂圧発電(TRT)

高炉ガス(BFG)の圧力エネルギー及び顕熱を膨張タービンで電力として回収する設備・技術である。

- ・熱風炉排熱回収

熱風炉の排ガスから熱を回収する技術である。排ガスの温度レベルは低い、燃焼用空気又は燃料ガスの予熱に利用している。

- ・転炉OGボイラ

転炉の吹錬時に発生する転炉ガスを冷却して顕熱を回収する設備・技術である。

一貫製鉄所のエネルギーバランスの例を図 2.2 に示す³⁾。日本の製鉄所は石炭の購入でほぼ所要エネルギーを賄える体質となっており、図 2.2 の例では 8% 程度過剰に石炭を購入している。石炭から変換されたガスは、加熱炉などで使用されたり、電力に変換して利用されている。

また、電炉メーカー・電気炉においても省資源・省エネルギー化の努力が続けられている。80 年代の初め、炉内に大量の酸素とコークス粉を吹き込む酸素富化操業技術が確立され、またスクラップ予熱装置の開発があり、続く 80 年代の後半には、連鑄拡大により省エネルギーが進展するとともに直流電気炉(DC 炉)が実用化された。

現在の電気炉の熱収支の例を図 2.3 に示す³⁾。電力が総入熱の半分以上を占めている。

2. 2 鉄鋼の生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位

最近の粗鋼の年間生産量を炉別に表 2.1 及び図 2.4 に示す⁴⁾。粗鋼の生産量は、第一次エネルギー危機の 1973 年当時が 118,530 千トンでピークであり、その後は景気変動等による波はあるものの、概ね 1 億トン前後で推移し横ばい状態となっている。また、粗鋼生産に占める電炉の比率は、一時期 30% を越えていたが最近では再び 20% 台の後半となっている。

鉄鋼業のエネルギー消費量は、生産量ピークの 1973 年の $2,281 \times 10^{15} \text{J}$ から急激に低下し、90 年代はほぼ $1,700 \times 10^{15} \text{J}$ レベルで推移してきた。最近の鉄鋼業のエネルギー消費を表 2.2 に示す²⁾。

鉄鋼業エネルギー消費を粗鋼生産量で割れば、いわゆる鉄鋼業平均としての粗鋼エネルギー原単位となる。エネルギー原単位については、製鋼法、導入省エネルギー技術、スクラップ使用比率、製品の高付加価値化などの視点を含め、いろいろと分析がなされている。図 2.5 は、鉄鋼業の最近のエネルギー消費量とエネルギー原単位(73 年を 100 に規格化)の推移を示したものである⁵⁾。90 年代に入って、エネルギー消費原単位は、横ばい・下げ止まり傾向である。鉄鋼統計要覧によるエネルギー原単位を図 2.6 に示す⁴⁾。こちらは絶対値表示となっており、粗鋼 t 当たりのエネルギー原単位は 2000 年度で 4,497 千 kcal/t となっている。最近はやや上昇気味である。

鉄鋼生産を工程別(高炉・転炉/電気炉/圧延など)に分けたときの粗鋼当たりエネルギー原単位の推移を表 2.3 に示す⁶⁾。周知のように原単位は、高炉・転炉よりも電気炉の方がはるかに小さい。表 2.3 よりも細分化された各工程ごとの粗鋼当たりエネルギー原単位が鉄鋼連盟資料にある⁷⁾。1990 年時点における各工程のエネルギー原単

位を表 2.4 に示す。原単位は、高炉・転炉で 5,682 千 kcal/t、電気炉で 1,625 千 kcal/t、鉄鋼業全体で 4,424 千 kcal/t となっている。

2.3 鉄鋼業の新しい技術

(1) 溶融還元法

溶融還元製鉄法は、溶融還元炉内の約 1,500°C の高温の銑鉄に鉄鉱石を添加することで溶融状態で鉄鉱石を瞬時に炭素により還元し、銑鉄を製造するプロセスである⁸⁾。還元に必要な炭素は石炭で補い、また必要な熱量は主として還元反応の結果発生する CO を燃料として燃焼させることで賄っている。溶融状態で鉄鉱石を還元するという溶融還元法の原理から、①鉄鉱石は銘柄を問わず、石炭も安価で埋蔵量の多い一般炭を使用でき、②焼結機、コークス炉といった設備が不要で、③生産量の変更が容易な外、設備の運転/休止が容易、といった様々な利点がある。

我が国では DIOS (Direct Iron Ore Smelting Reduction Process) 法を開発している。DIOS 法は、図 2.7 に示すように、粉状の鉄鉱石を流動層により予熱・予備還元する工程と、還元された鉄鉱石を石炭フラックスとともに鉄浴炉に入れ溶融還元して銑鉄を作る工程から成る⁹⁾。予備還元炉と溶融還元炉が定常的に直結されて操業するという大きな特長がある。

DIOS 法は、要素開発を 1988 年度から 3 か年行った後 500t/d のパイロットプラントの建設に着手し、パイロットプラントの操業は 1993 年 10 月より 2 年半実施した。

パイロットプラント試験データに基づき、DIOS 法の概念設計・経済性評価を実施している。高炉法と比較した結果、次のことが明らかとなった⁹⁾。比較は、高炉法が 6000t/d、DIOS 法が 3000t/d×2 基のケースで行ったものである。

- ・エネルギー消費として 3~4% の節約が可能
- ・CO₂ 排出量を 4~5% 低減、SO_x、NO_x は大幅に低減
- ・製造コストとして、19% のコスト低減が期待できる

鉄鋼連盟では、2020 年頃には粗鋼生産量の 20% 程度の設備が導入されると試算している。なお、NKK では NKK の独自のエンジニアリング技術を加えた NKK-DIOS を開発している。

(2) 直接還元法

直接還元製鉄法も高炉によらない新しい製鉄法である。主に天然ガスを用いて鉄鉱石を還元し、鉄分を取り出す。主流は米国で開発されたミドレックス法¹⁰⁾ (プロセスフローを図 2.8 に示す) であり、直接還元法で最大のシェアを占める。

(3) 改良型新電気炉

電気炉の工程で最大の熱損失は、排ガス持ち去り熱で、全出熱の約 25% を占めている。酸素富化操業による排ガスの高温化を機会にして、この熱回収が試みられてきた。電気炉の排ガスは熱変動が極めて大きいため、結局のところ、スクラップの予熱回収が最も適切と考えられている。

1980 年代初めにスクラップ予熱装置が開発された。これは、煙道の排ガスでバケットに装入されたスクラップを予熱するものである (Scrap Preheater)。1990 年頃から電気炉に直結した予熱法、すなわちスクラップ予熱機能付き電気炉が開発されつつ

ある。その中で、スクラップ全量の高温予熱を意図した改良型電気炉があり、例として連続装入式シャフト炉の概念を図 2.9 に示す³⁾。これは、スクラップ充填シャフトから連装して熱回収を改善するものである (IHI 式)。

改良型電気炉では、電力の低減率 20%以上を目標としており、技術が確立されれば大幅な省エネルギーが期待される³⁾。

2. 4 廃プラスチックの利用

プラスチックは約 10,000kcal/kg の発熱量を有しており、高炉等の燃料に利用できれば省資源、省エネルギーに有効である。日本鉄鋼連盟においては地球温暖化防止対策の自主行動計画として、2010 年度を目標に 100 万 t / 年の廃プラスチック利用を掲げ、鉄鋼各社これに取り組んでいるところである¹¹⁾。2003 年度の利用実績は、図 2.10 に示すように 29 万 t であった。

高炉での廃プラスチック利用は、廃プラスチックを適当な粒径として羽口から吹き込んで利用する技術が開発・実用化されている。廃プラスチックの高炉利用に伴う省エネルギー効果は、還元剤として使用しているコークスの削減量であり、文献 12) の京浜製鉄所の事例では、年間約 4.5 万 t の廃プラスチック利用で年間約 5 万 t のコークス (3.633×10^5 Gcal/年) 削減が達成された。また、別文献 13) でも同様であるが、2002 年度の廃プラスチック処理量が約 12 万 t、省エネルギー量は約 9×10^5 Gcal/年 (重油換算で約 10 万 kl/年) である。

もう一つの利用方法は、コークス炉へのプラスチックリサイクルである (コークス炉化学原料化法)。廃プラスチックは、事前の処理工程で粒状に塊成化され、石炭と混合されてコークス炉に装入される。廃プラスチックは、平均的には炭化水素油 40%、ガス分 40%、コークス分 20% に分解され、全量が有効成分として利用される。文献 14) によれば、プラスチック配合比率 1wt% とした場合、回収された炭化水素油、ガス、コークスへの品質影響は特に顕在化していない。

表 2.1 粗鋼の年間生産量の推移

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
粗鋼生産(1000t)	104,545	93,548	94,192	106,444	102,866	107,745	110,511
転炉鋼(1000t)	70,295	63,716	65,452	75,784	74,442	78,533	81,355
電炉鋼(1000t)	34,249	29,832	28,740	30,660	28,424	29,212	29,156
電炉比率(%)	32.8	31.9	30.5	28.8	27.6	27.1	26.4

表 2.2 鉄鋼業におけるエネルギー消費

単位：×10¹⁵J

	FY1997	FY1998	FY1999	FY2000	FY2001	FY2002
エネルギー消費	1,656	1,556	1,783	1,683	1,674	1,733
内訳 石炭	207	219	219	212	220	228
石炭製品	937	859	1,063	960	976	1,018
石油製品	116	105	107	104	87	88
天然ガス	30	24	21	23	20	21
都市ガス	21	22	37	32	32	34
電力	246	229	234	242	234	242
熱	98	98	102	110	104	103

表 2.3 粗鋼当たりエネルギー原単位の推移

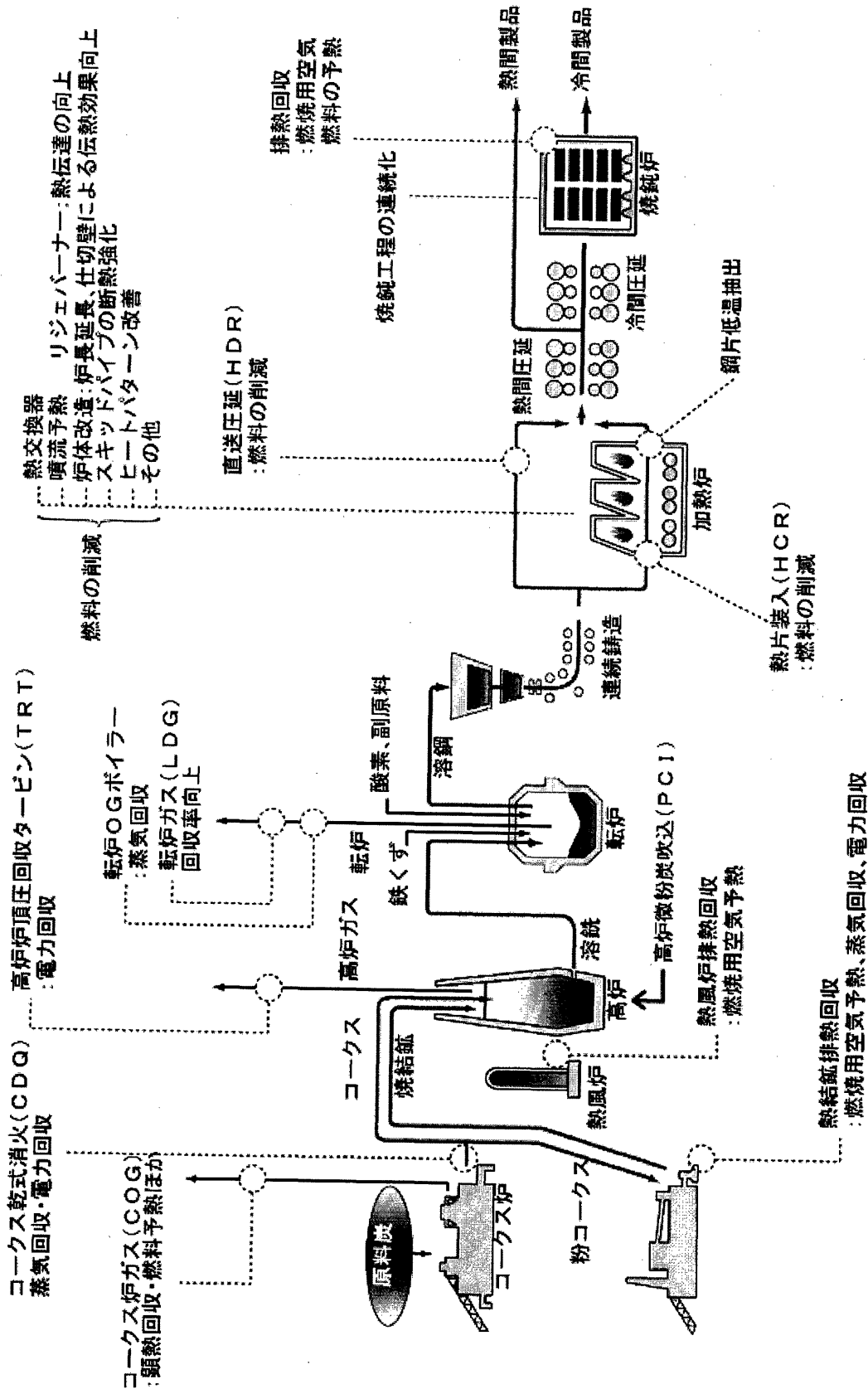
	エネルギー原単位(Gcal/t)			
	鉄鋼業平均 (圧延含む)	高炉・転炉 (圧延含まず)	電気炉 (圧延含まず)	圧延など
1970	5.30	3.68	1.41	1.99
1971	5.96	4.36	1.46	2.19
1972	5.51	4.02	1.44	2.06
1973	5.27	3.75	1.40	1.94
1974	5.36	3.92	1.44	1.89
1975	5.79	4.44	1.48	1.83
1976	5.59	4.32	1.43	1.82
1977	5.68	4.39	1.40	1.86
1978	5.19	4.05	1.37	1.72
1979	5.01	4.02	1.31	1.63
1980	5.08	4.06	1.30	1.59
1981	4.72	3.80	1.31	1.53
1982	4.60	3.78	1.26	1.49
1983	4.43	3.64	1.23	1.48
1984	4.40	3.61	1.22	1.45
1985	4.40	3.67	1.21	1.44
1986	4.36	3.62	1.18	1.47
1987	4.30	3.51	1.18	1.49
1988	4.33	3.57	1.17	1.47
1989	4.36	3.62	1.18	1.49
1990	4.32	3.58	1.16	1.50

出所：参考文献 7)

表 2.4 各工程におけるエネルギー原単位(1990年)

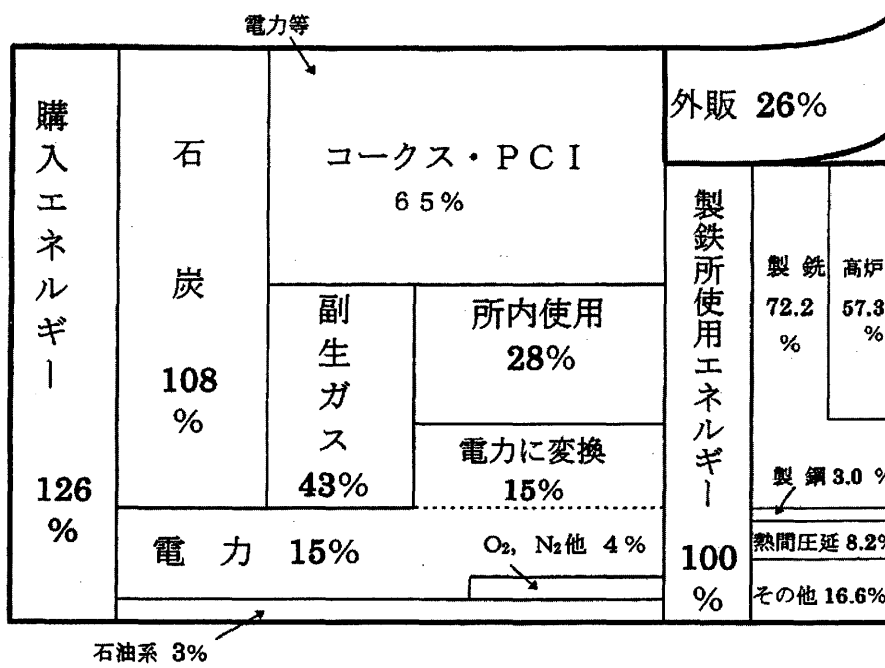
エネルギー原単位(Mcal/t)			
コークス工程	325	電気炉	1,625
焼結工程	559		
高炉工程	3,245		
転炉工程	160		
一次圧延	496		
二次圧延	353		
その他工程	544		
計	5,682		
鉄鋼業全体	4,424		
:電炉以外の工程の原単位の計×(1-電炉シェア) +電炉原単位×電炉シェア			

出所：参考文献8)



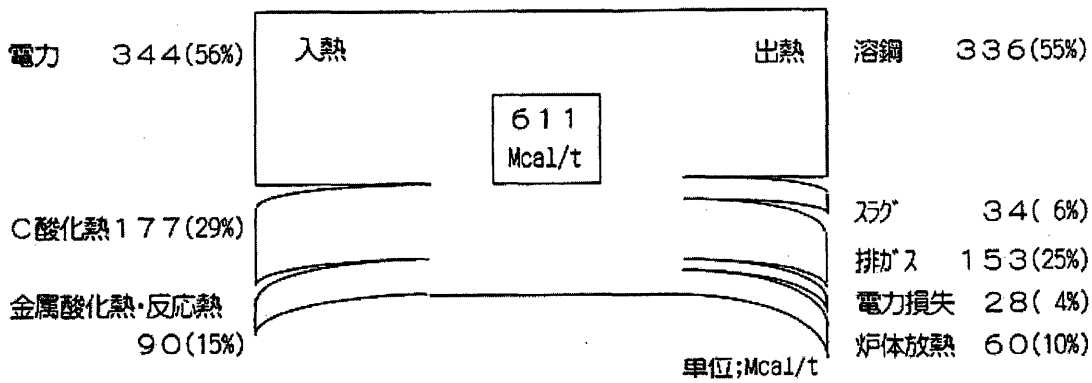
出所: 参考文献 1)

図 2.1 高炉製鉄所の工程フローと主な省エネルギー設備



出所：参考文献 3)

図 2.2 一貫製鉄所のエネルギーバランスの例



出所：参考文献 3)

図 2.3 電気炉の熱収支の例

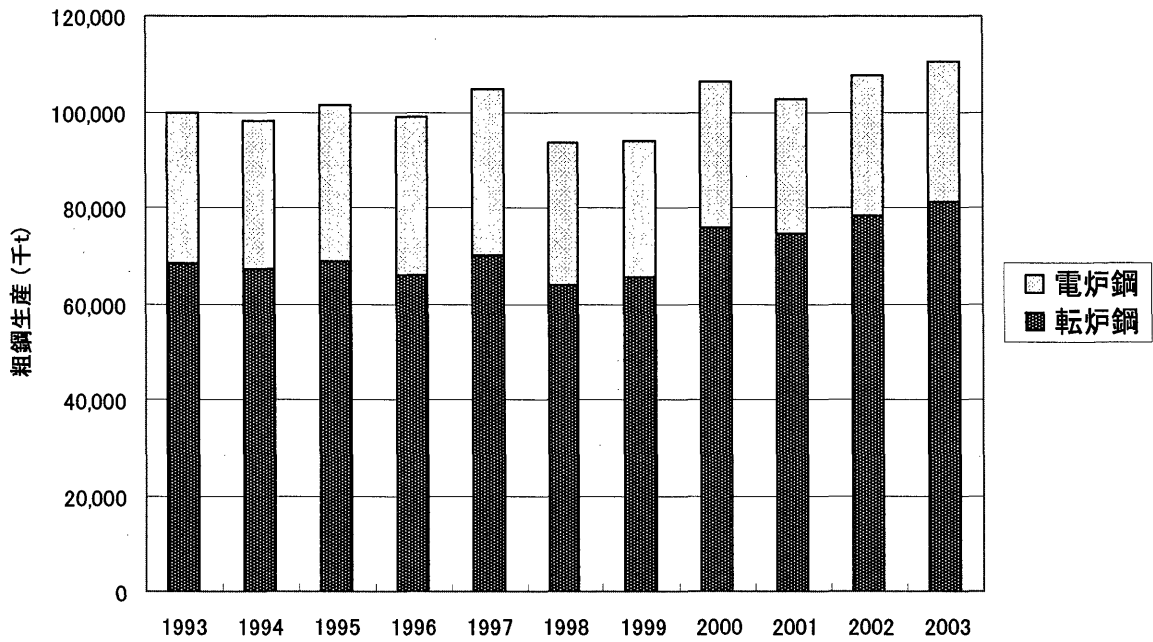
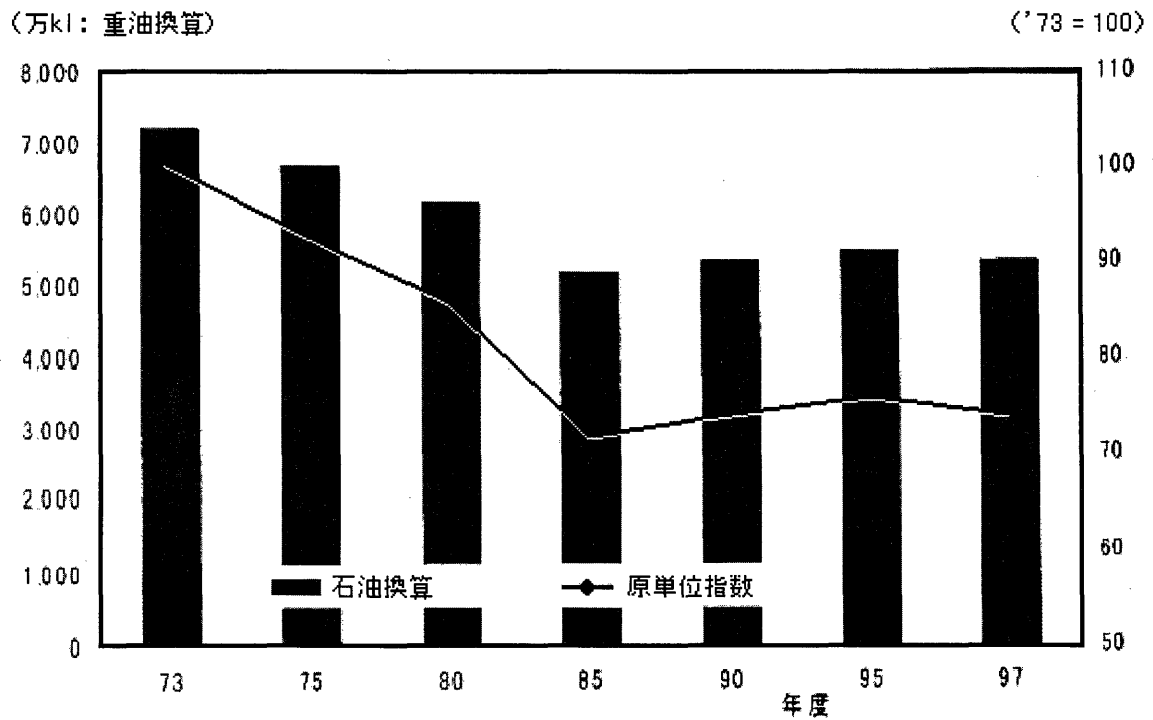


図 2.4 粗鋼の年間生産量の推移



出所：参考文献 5)

図 2.5 鉄鋼業のエネルギー消費量及び原単位の推移

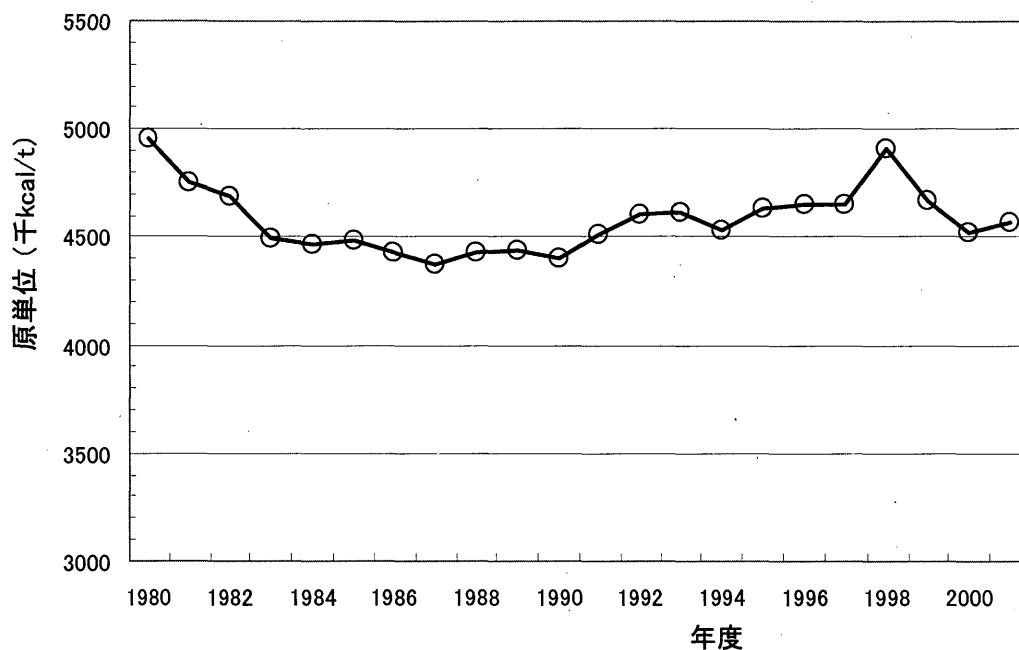
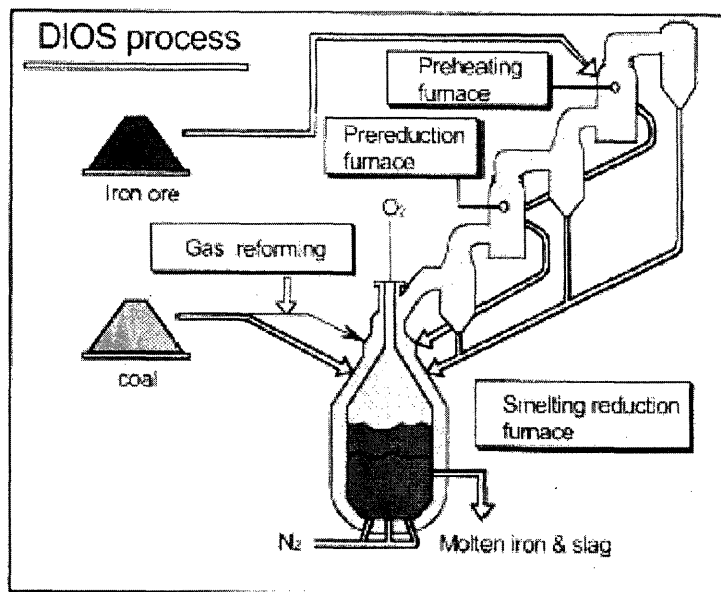
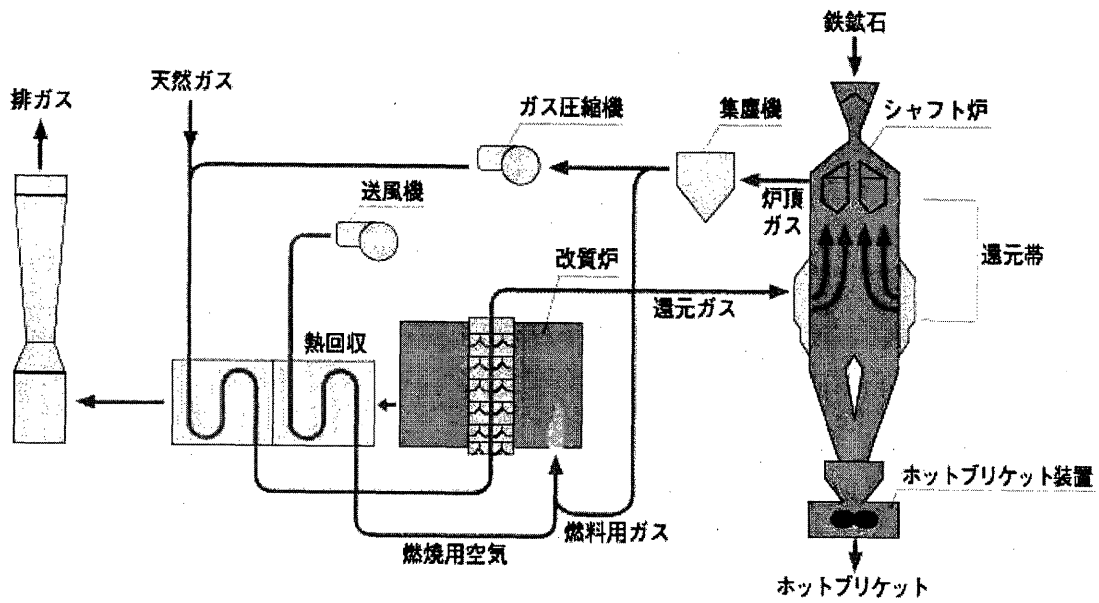


図 2.6 鉄鋼業のエネルギー原単位の推移



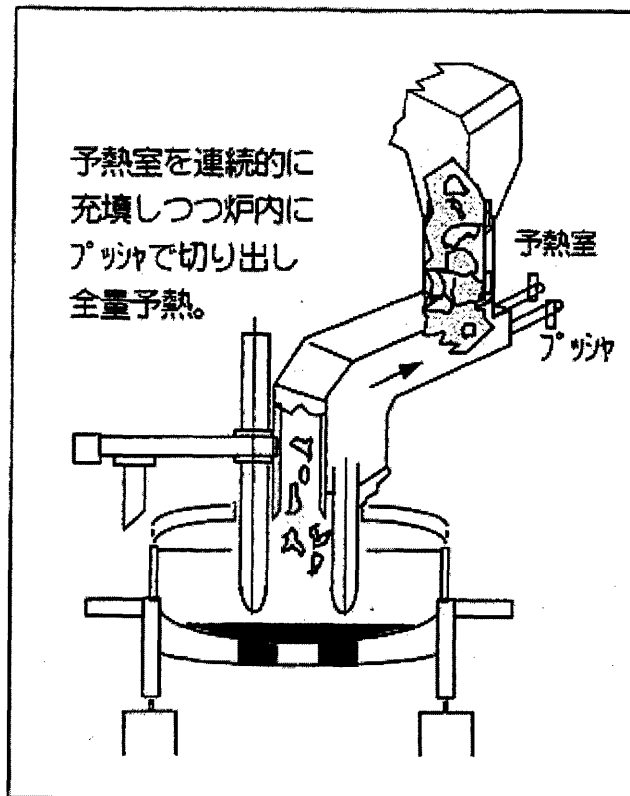
出所：参考文献 9)

図 2.7 DIOS プロセス概念図



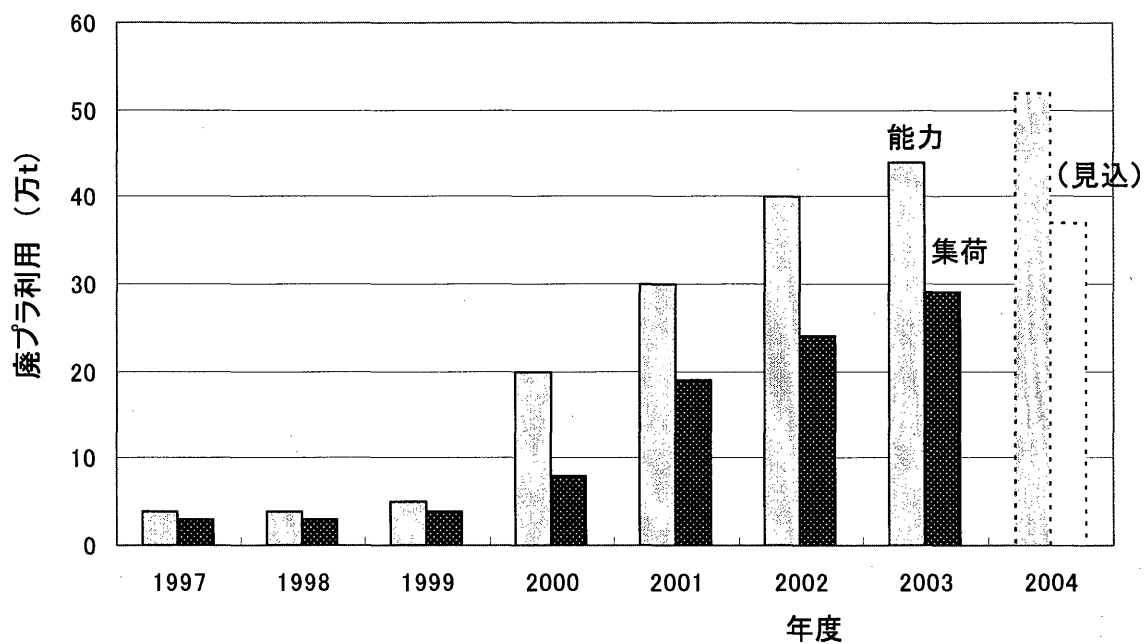
出所：参考文献 10)

図 2.8 ミドレックス法のプロセスフロー



出所：参考文献 3)

図 2.9 連続装入式シャフト炉



出所：参考文献 11)

図 2.10 高炉等への廃プラスチックの利用

3. 化学

3. 1 化学工業の概況

(1) 我が国の化学工業

化学工業は日本標準産業分類では、「化学的処理を主な製造過程とする事業所及びこれらの化学的処理によって得られた物質の混合、又は最終処理を行う事業所のうち他の中分類に特掲されないもの」と規定されている。化学工業はさらに、化学肥料製造業、無機化学工業製品製造業、有機化学工業製品製造業、化学繊維製造業、油脂加工製品・石けん・合成洗剤・界面活性剤・塗料製造業、医薬品製造業、化粧品・歯磨・その他の化粧用調製品製造業、その他の化学工業に小分類されている。化学工業は、素材型化学工業から加工型化学工業に至るまでの多種多様な業種に分化しており、化学工業品の基礎的素材から最終製品までを提供する、大変広範囲な産業となっている。

また、石油化学工業は、日本標準産業分類では概ね有機化学工業製品製造業に該当するが、ナフサや天然ガスを分解してエチレン、プロピレンなどを生産し、さらにそれらを基礎製品としてプラスチック、合成繊維原料、合成ゴムなどを生産する産業である。我が国では、昭和 30 年代以降ナフサを主原料に用い、各種石油化学製品の製造を複数の企業で行うコンビナートが発達・形成されている。石油化学工業は、我が国の化学工業全体の基幹プロセスの地位にあり、生産高あるいはエネルギー消費量からみても化学工業の主流を成している。

石油化学基礎製品等の製造の流れを図 3.1 に示す(数字は 2002 年実績)¹⁵⁾。

(2) 化学工業のエネルギー事情

資源エネルギー庁エネルギーバランス表²⁾より、化学工業におけるエネルギー消費を表 3.1 に示す。同表によれば、2002 年度における化学工業のエネルギー消費は、 $2,493 \times 10^{15} \text{J}$ となっている。これは、我が国全体の最終エネルギー消費 $16,024 \times 10^{15} \text{J}$ の 15.6% に当たり、産業部門のエネルギー消費 $7,569 \times 10^{15} \text{J}$ の 32.9% を占め、また製造業のエネルギー消費 $6,763 \times 10^{15} \text{J}$ の 36.9% を占めている。化学工業のエネルギー消費 $2,493 \times 10^{15} \text{J}$ の内訳は、図 3.2 に示すように、ナフサ等の原料油を含む石油製品が $1,974 \times 10^{15} \text{J}$ と約 8 割であり、大部分を占めている²⁾。次いで多いのは熱、電力である。

化学工業のエネルギー消費は製造業の中でも相当に大きくなっているが、その原因の一つは、統計上、石油化学工業で原料として使用するナフサ等を含めたエネルギー消費となっているためである。化学工業において原料用エネルギーの占める割合は、下記のように文献により異なるが、大雑把にいつて最近では化学工業全体のエネルギー消費の 6 割程度を占めているようである。

文献 16) 約 56% (1981 年)

文献 17) 石油化学の原料分として約 49% (1984 年)

文献 18) 石油化学の原料分として約 49% (1996 年度)

文献 19) 約 57% (2001 年)

文献 20) 約 65% (2001 年)

文献 21) ナフサの約 60% が製品に転化されるとして約 43% と評価 (2001 年度)

文献 2) 約 67% (2002 年度)

文献 19)の石油等消費構造統計調査では、原料用の燃料使用量の調査も行われており、公表されている(表 3.2)。原料用燃料の消費は、1996～2001年を通じて化学工業全体のエネルギー消費の約 57%となっている。

なお、原料用を除いた場合の化学工業のエネルギー消費において、石油化学工業エネルギー消費とその他の化学工業エネルギー消費はほぼ等しくなっている¹⁸⁾²¹⁾。[文献 18)によれば、我が国のエネルギー消費量に対して、石油化学が 3.5%、その他化学が 3.1%程度である。]

(3)エチレンプラント

石油化学工業では、主にナフサを熱分解して得られるエチレン、プロピレンなどの基礎製品から、低密度ポリエチレン、エチレンオキサイド、スチレンモノマーなどの誘導品を経て、プラスチック、合成ゴム、合成繊維等の最終製品の生産を行っている(図 3.1 参照)。

石油化学工業は、化学工業の中でメジャーなエネルギー消費産業であるが、その石油化学工業の中で最大のエネルギー消費はエチレンプラントであり、石油化学製品製造の工程で消費されるエネルギーの 40%近くを占めている¹⁶⁾¹⁸⁾²¹⁾。なお、これに次いで、スチレンモノマー、BTX(ベンゼン・トルエン・キシレン)の順となっている¹⁸⁾(図 3.6 参考)。

エチレンプラントの工程概念図を図 3.3 に示す²²⁾。エチレンプラントは、原料のナフサを高温により熱分解する熱分解炉の工程と、後段の、発生する分解ガスを冷却し、沸点の差によりエチレン、プロピレン、C4 留分などに分離・精製する工程とに分かれる。分解炉の工程でナフサは、温度条件 800～850℃、滞留時間 0.5 秒程度で熱分解される。プラントでは、エチレンの需給動向に応じて分解の過酷度(温度、時間等)を変えて収率の調整が行われている。分解ガスは、分解ガス急冷器で 400～450℃に冷却され、次いでクエンチオイルにより 110～120℃に冷却され、更にクエンチウォーターにより常温まで冷却される。これらの各段階で回収・副生される高温蒸気・熱は、圧縮機の動力用や、反応用、加熱用に有効利用される。常温まで冷却された分解ガスは圧縮機により 30～40kg/cm²に圧縮された後、脱メタン塔、脱エタン塔へと順次導かれ、沸点の差を利用してエチレン、プロピレン、その他の各製品に分離・精製が行われる。

以上の工程において、消費されるエネルギーの 90%は分解炉の加熱用燃料が占めている。また、この燃料には分解ガス中の副生成物であるメタンなどが用いられる。

3. 2 エチレンの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位

化学工業のエネルギー消費(資源エネルギー庁エネルギーバランス表による)は表 3.1 に示した²⁾。

エチレンの年間生産量は、経済産業省による統計がある。エチレン生産は、1999年に 769 万トンと過去最高を記録し、その後やや減少もみられるが、700 万トン台の前半で推移している(図 3.4)²³⁾。

分解炉の燃料には、副生ガスのメタン、水素などが用いられている。我が国には全国に 15 のエチレンプラントがあるが、そのすべてのプラントで副生ガスを使用している(ただし、1 プラントのみは燃料油との混焼)²¹⁾。実際に使用されている分解炉の燃料の組成を含め、エチレンプラントの能力・諸元を表 3.3 に示す。

エチレンプラントではほぼ全てのプラントでガスタービンを設置している。ガスタービンは発電だけでなく、排ガスを分解炉の燃焼空気に利用したり、ボイラに供給したりして蒸気利用を行っている。ガスタービンの燃料は、ほとんどのプラントで副生ガスである²¹⁾。また、ボイラも、エチレンプラントに必須であってすべてのプラントで設置されており、単独設置のものと上記ガスタービンと組み合わせているものがある。ボイラに供給する燃料は、重油もしくは副生燃料油であるが、一部にオリマルジョン燃料や石炭もみられる²¹⁾。

「エチレンプラント」のエチレン・エネルギー原単位は、文献 21)において、2002 年で精製系のエネルギー使用を含めかつ電力・蒸気の送出分の補正を加えて $6,135 \times 10^3$ kcal/t と評価されている。また、文献 18)より、1976～1996 年までのエチレン・エネルギー原単位の推移を図 3.5 に示す。原単位は、70 年台後半は顕著な低下を示したが、90 年前後から $6,000 \times 10^3$ kcal/t 程度で下げ止まっており、現状システムでは、省エネルギーが限界に来ている感がある。(なお、エチレン・エネルギー原単位で、分子を「石油化学工業」のエネルギー使用量とすることがある。この場合は原単位の値が約 3 倍大きくなる。)

最近のエチレンプラントでは廃熱の回収が徹底しており、ボイラでの回収蒸気がプラントの需要量を上回って、蒸気収支は払い出し超となっている。

石油化学工業協会調査による石油化学製品の製造部門別のエネルギー使用量¹⁸⁾を図 3.6 に示す。図 3.6 から、エネルギー使用量が多いのは、エチレン製造部門(ナフサ分解部門)であり、石油化学工業全体の 3 分の 1 以上を占めていることが分かる。

3. 3 化学工業の新しい技術

(1) 省エネルギー技術

エチレンプラントを中心とする石油化学工業においてこれまで取り組んできた主な省エネルギー技術は、

- ・エチレン分解炉廻りの熱回収強化、空気予熱器の設置、ガスタービンの設置(ボイラへの設置を含む)
- ・高効率機器の導入(コンプレッサー、ポンプ等の高効率化)

などがあり、その結果、エチレンプラントのエネルギー原単位は顕著な低下を示してきた(図 3.5)。エチレン分解炉の空気予熱にガスタービンの排ガスを利用すること、すなわちガスタービン併設は省エネルギーに大変効果的であり、表 3.4 の“エチレン生産量当りの燃料消費量”に示すようにエチレン・エネルギー原単位が約 9% 小さくなる。我が国では 5 プラントでガスタービンを設置しており、その内 3 プラントは省エネルギーを狙って追設されたもので、2 プラントは当初からの設置で大型ガスタービンを採用している²¹⁾。ただし、ガスタービン発電(もしくはボイラ汽力発電)の拡充は、電力の外販価格の上昇又は自由な電力小売制度がない限り、これ以上は無理とみられている²¹⁾。

米国のルーマス社は 2002 年、エチレンプロセスの新技术を発表している。これは、従来は分解ガスを 35～40 気圧まで圧縮しその後深冷分離工程に送って処理していたが、16 気圧の圧力で低压分離を可能とするプロセス技術を中心とするものである²¹⁾。ただし、詳細は発表されていない。

熱分解よりも低い反応温度で一定のエチレン、プロピレンの収率が期待できる触媒

を用いた接触分解法が検討されてきている。ゼオライト触媒を用いる接触分解法などが研究されている²⁴⁾。ただし当面は、接触分解の商業利用は無理なようである。

(2) 分解炉熱効率

分解炉の熱効率は、初期のエチレンプラントでは 80% 台であったが、最近では 95% の熱効率も達成されている²¹⁾。我が国のエチレンプラントの場合、30 年以上前に建設されたプラントでも、空気予熱器等の対策によって炉熱効率 90% 以上が達成されている²¹⁾。

表 3.1 化学工業におけるエネルギー消費

単位：×10¹⁵J

	FY1996	FY1997	FY1998	FY1999	FY2000	FY2001	FY2002
エネルギー消費	3,147	3,006	2,256	2,414	2,445	2,381	2,493
内 石炭	165	137	25	25	27	24	23
石炭製品	614	477	20	20	22	19	18
石油製品	1,770	1,808	1,726	1,868	1,899	1,860	1,974
天然ガス	33	30	19	21	23	21	26
都市ガス	9	9	4	4	4	4	5
電力	248	230	147	151	151	144	144
熱	308	314	314	324	319	307	304

表 3.2 化学工業におけるエネルギー消費量と主な原料用燃料消費量

	1996	1997	1998	1999	2000	2001
エネルギー消費量(原油換算千kℓ)	64,282	66,650	63,256	68,171	66,802	62,976
内 原料(原油換算千kℓ)	36,904	38,090	35,712	39,951	38,351	36,135
ナフサ(千kℓ)	30,826	32,510	29,933	35,396	33,743	32,508
改質生成油(千kℓ)	4,620	3,864	4,118	2,723	2,908	1,385
LPG(千t)	2,382	2,419	2,444	2,605	2,395	2,771
石油コークス(千t)	594	617	550	528	513	520
石炭(千t)	933	766	308	144	60	67

表 3.3 我が国のエチレンプラントの能力・諸元

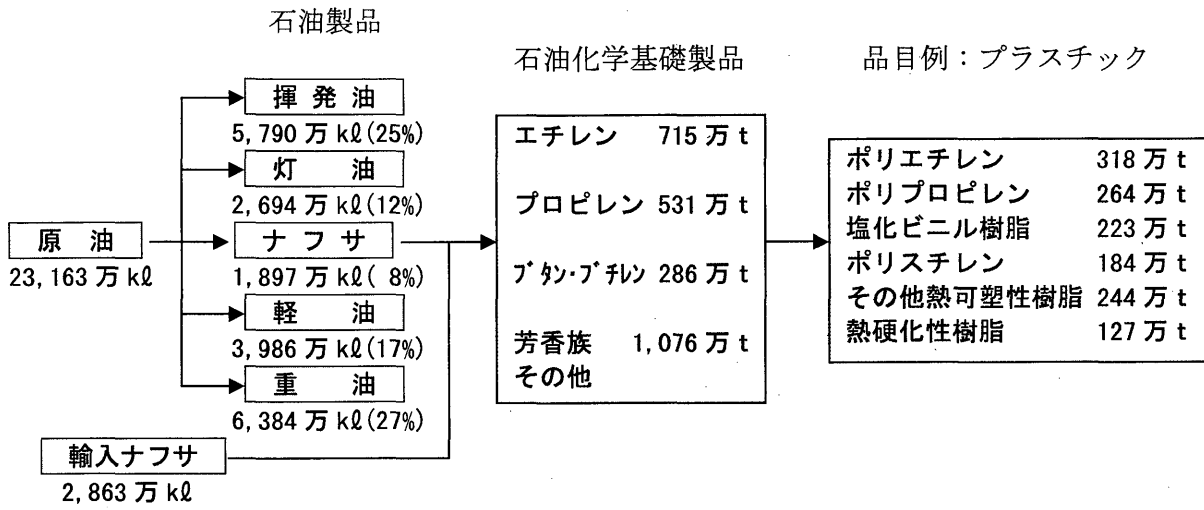
	全 15 プラント総計	1 プラント (平均)
エチレンプラント能力		
非定修年	7,960 千トン/年	530.6 千トン/年
定修年	7,232 千トン/年	482.1 千トン/年
エチレン分解炉基数	209 炉	13.9 炉
通常運転炉数	196 炉	13.1 炉
エチレン生産能力/分解炉 (8,000 時間)	37.1 千トン/年	
エチレン年産 6 万トン以上の炉	69 千トン/年 (38 炉)	2.5 炉
エチレン年産 6 万トン以下の炉	27.2 千トン/年 (171 炉)	11.4 炉
分解炉燃料 燃料組成	(容量%)	(kgmol/hr)
水素	14.97	254.7
メタン	70.90	1206.3
エタン	8.93	152.0
プロパン	1.12	19.1
C4's	3.21	54.7
C5's	0.82	13.9
C6's	0.05	0.8
計	100.00	1701.4
発熱量	9266 kcal/Nm ³	
燃料消費量	5296.9×10 ⁶ kcal/hr	353.1×10 ⁶ kcal/hr
蒸気独立過熱炉 (SSH)		
燃料総使用量	304.5×10 ⁶ kcal/hr	20.3×10 ⁶ kcal/hr
燃料ガス	216.5×10 ⁶ kcal/hr	14.4×10 ⁶ kcal/hr
燃料油	88.0×10 ⁶ kcal/hr	5.9×10 ⁶ kcal/hr
ガスタービン発電 (GTG)		
燃料総使用量	384.9×10 ⁶ kcal/hr	25.7×10 ⁶ kcal/hr
発電量	145.0 MW	9.7 MW
エチレンプラント燃料総使用量	5986.3×10 ⁶ kcal/hr	399.1×10 ⁶ kcal/hr
エチレン生産量当たりの燃料使用量	6588 kcal/kg エチレン	

出所：参考文献 21)

表 3.4 ガスタービン有無による分解炉燃料消費量比較

	ガスタービン未設置 10 プラント平均	ガスタービン設置 5 プラント平均
エチレンプラント能力 非定修年	530.9 千トン/年	530.2 千トン/年
エチレン分解炉基数	14.6 炉	12.5 炉
通常運転炉数	13.7 炉	11.7 炉
分解炉燃料 燃料組成	(容量%)	(容量%)
水素	16.4	11.7
メタン	69.0	75.3
エタン	9.9	6.7
プロパン	1.3	0.6
C4's	3.0	3.8
C5's	0.4	1.8
C6's	0.0	0.1
計	100.0	100.0
発熱量	9106 kcal/Nm ³	
燃料消費量	362.4×10 ⁶ kcal/hr	330.6×10 ⁶ kcal/hr
エチレン生産量当たりの燃料使用量	5980 kcal/kg エチレン	5462 kcal/kg エチレン
ガスタービン発電 (GTG)		
燃料総使用量		77.0×10 ⁶ kcal/hr
発電量		29.0 MW
エチレン生産量当たりの燃料使用量	5980 kcal/kg エチレン	6734 kcal/kg エチレン (発電込み)

出所：参考文献 21)



出所：参考文献 15)

図 3.1 石油化学製品製造の流れと製品別生産量(2002 年)

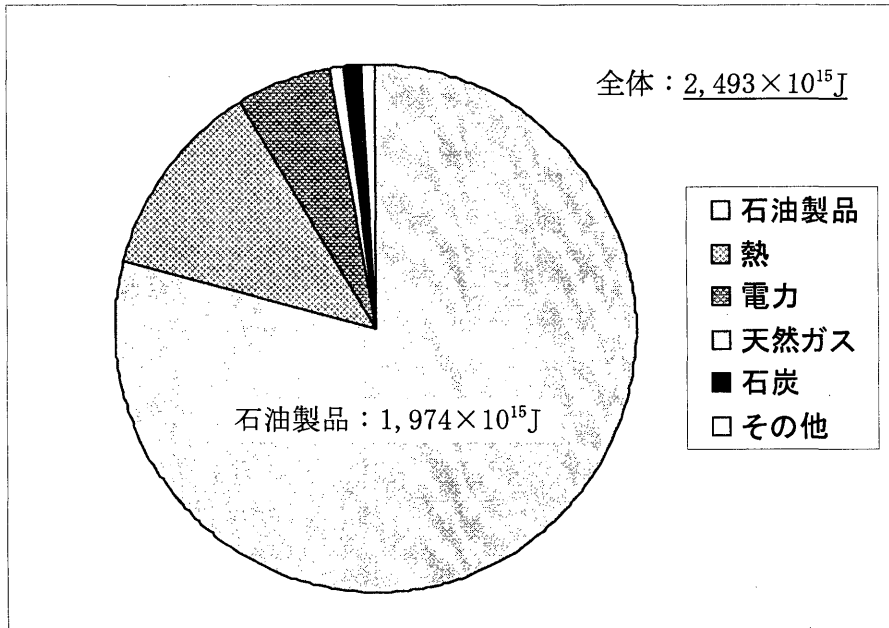
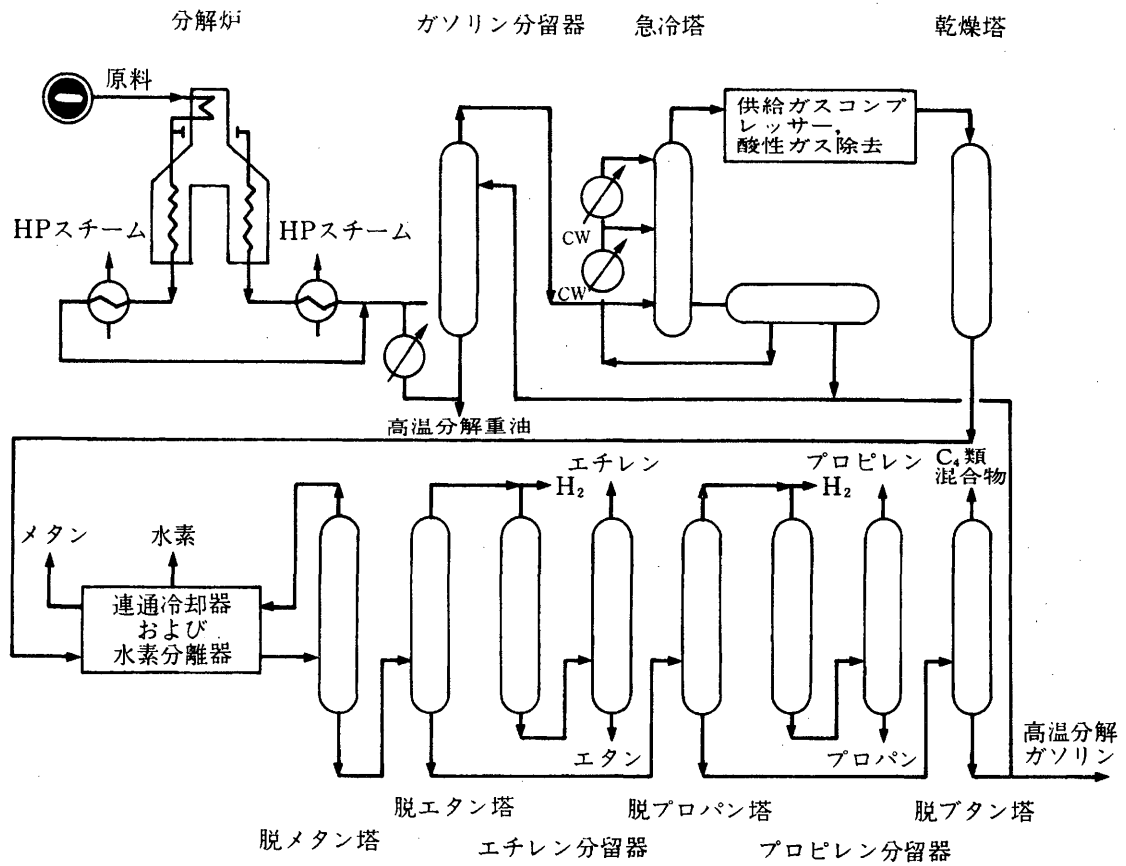


図 3.2 化学工業エネルギー消費の内訳 (2002 年度)



出所：参考文献 22)

図 3.3 エチレンプラントの代表的プロセスフロー

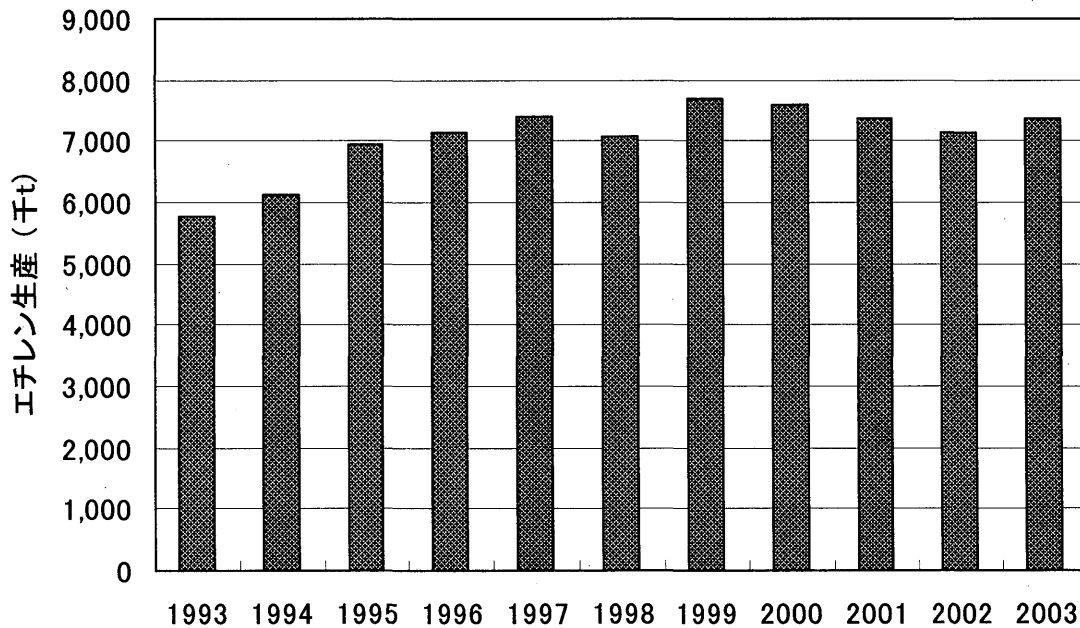
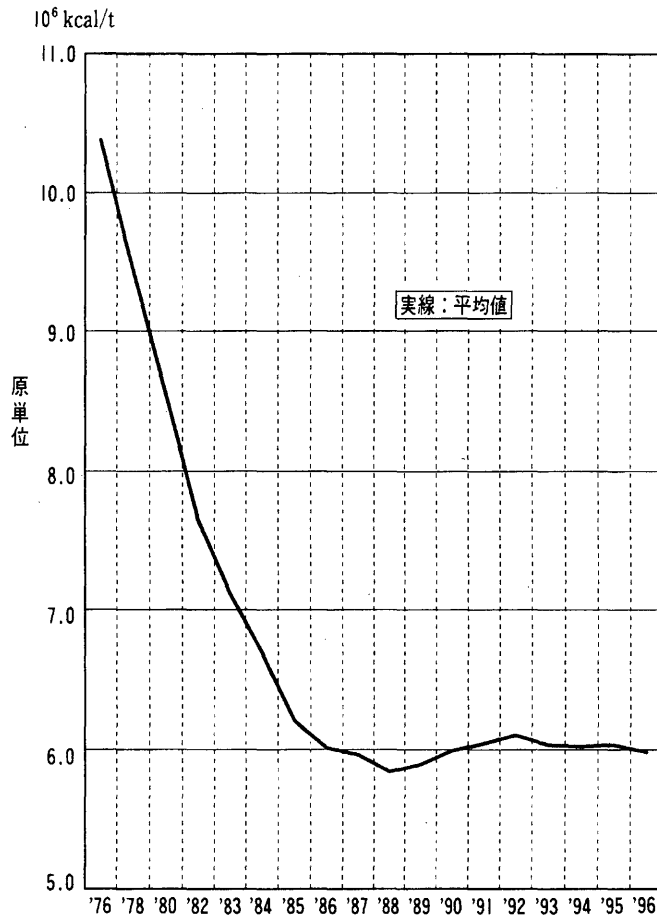
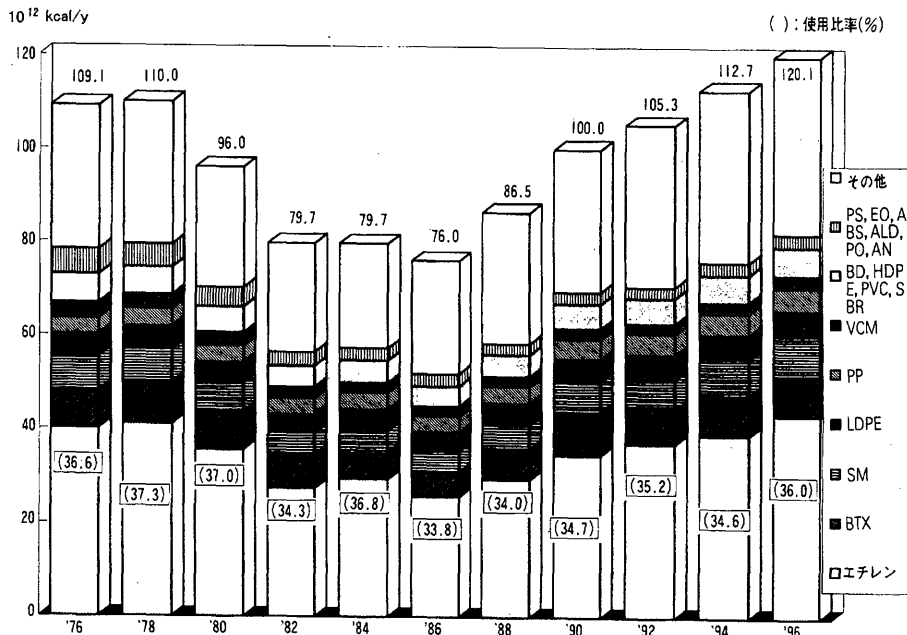


図 3.4 エチレンの年間生産量の推移



出所：参考文献 18)

図 3.5 エチレン生産エネルギー原単位



出所：参考文献 18)

図 3.6 石油化学部門別のエネルギー使用量

4. 紙・パルプ

4. 1 紙・パルプ産業の概況

(1)概況

紙・パルプの製造工程は、パルプを製造する工程と紙・板紙を製造する工程とに分かれる。紙・パルプ業界には、パルプの製造のみを行うパルプ専門メーカーとパルプを含め紙・板紙までを製造する一貫メーカーがある。紙・パルプの製造工程は製法、製品等により種々のバリエーションがあるが、概括的なパルプ・紙製造工程²⁵⁾を図4.1に例示する。紙・パルプ産業は、エネルギー多消費産業の一つであり、パルプ製造時の加熱蒸気、抄紙工程での駆動用電力、乾燥用蒸気等に多量のエネルギーを使用する。

パルプは種々の方法により製造されるが、代表的なものに機械パルプと化学パルプがある。現在生産量は、化学パルプによるものが多く、製紙パルプ全体の約9割を占める。

機械パルプは、チップを加熱後、機械的に磨砕して細かい繊維状にしパルプとする方式である。針葉樹しかパルプにできない。白色度は低く、新聞紙などに使われる。

化学パルプ(クラフトパルプ)は、NaOHとNa₂Sの混合液でチップを蒸解し、洗浄工程でリグニンと蒸解薬品を洗浄除去した後、精選、漂白してパルプを得る方式である。ここで、リグニンを抽出したパルプ廃液(黒液)は濃縮の後、薬品回収と熱回収を兼ねた回収ボイラで燃焼し、蒸気の発生と発電を行う。このシステムがクラフトパルプ法の大きな特徴となっている。回収ボイラで得られる蒸気と電力は、パルプ・紙一貫メーカーの必要とするエネルギーの約3分の1を賄う。これはパルプの製造に要するエネルギーすべてを賄って、更に後段の抄紙工程のかなりの部分を賄うことのできる量である。

抄紙工程では、薄められたパルプがワイヤーパートにより金網上に紙層として抄きとられ脱水され、その後更に機械的に脱水が行われ、乾燥後、表面処理が行われ紙となる。本工程では、乾燥用蒸気、駆動用動力等に多量のエネルギーが消費される。

最近、古紙パルプが環境意識の高まりの中で利用が拡大している。古紙パルプは一度パルプ化工程を経ているので、製紙時のトータルエネルギーが少なく済むという利点もあり、省エネルギーに寄与している。

(2)紙・パルプ産業のエネルギー事情

紙・パルプ産業においても石油危機以降、積極的に省エネルギー対策に取り組んできている。紙・パルプ産業のエネルギー事情の特徴として以下が挙げられる。

- ①黒液をボイラに活用し、エネルギーの3割以上をバイオマスにより自給
- ②コジェネレーションを積極的に導入し、エネルギーを有効的に使用
(自家発電力量は所要電力量の75%をカバーする²⁶⁾)
- ③省エネルギー型製造設備の導入、古紙の利用

紙・パルプ産業における直接的なエネルギー消費は、ボイラ(燃料は、黒液、石炭等)でのコジェネレーションによるものが大部分で、全体の9割を占める。コジェネレーションで発生する蒸気はパルプの蒸解や紙の乾燥等に用い、電力は機械の駆動用動力として使用する。ボイラ・コジェネレーション以外のエネルギー消費には、キル

ン用の燃料重油、購入電力がある。

紙・パルプ産業の全体的なエネルギー・フロー(全投入熱量を100に規格化、1994年)²⁵⁾を図4.2に示す。また、紙・パルプ産業の使用エネルギーの構成比(2002年度)²⁷⁾を図4.3に示す。

紙・パルプ産業では、黒液の活用が目立ち、これに木屑などを含めたバイオマスエネルギーが全使用エネルギーの約3分の1を占めている。最近は、温暖化対策を見据え、化石燃料代替としてバイオマス燃料や廃棄物燃料への転換を進めており、RDF、RPF(紙・プラスチック固形化燃料)、廃油、廃タイヤ、ペーパースラッジ等も利用するようになってきた。また、購入燃料は、重油から石炭へ転換を図ってきている。

(3)原料から製品までのマテリアルの流れ

国産/輸入パルプ材の消費量から紙・板紙の消費量に至るまでの物量的な流れを、2002年のデータについて図4.4に示す²⁸⁾。

パルプ材の消費量は、国産材よりも輸入材の方が多く、輸入材が約70%を占めている。

古紙・その他繊維原料の消費量は、製紙用パルプ消費量の1.5倍近い値となっている。すなわち、利用率でみて全体の60%近くとなっている。日本製紙連合会は、「環境に関する自主行動計画」において循環型経済社会の構築として、2005年度までに古紙の利用率60%という目標を置いており²⁹⁾、図4.5に示すとおり2002年の古紙の消費量(調達量)は約1816万トンに達し、古紙の利用率としては既に56.9%となっている²⁷⁾³⁰⁾。

4.2 紙・パルプの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位

紙・パルプの年間生産量は、経済産業省による生産動態統計で調査・公表されている。製紙パルプ、紙、板紙の年間生産量の推移を表4.1、図4.6に示す³¹⁾。

紙・パルプの生産のために消費したエネルギー量(出所:「石油等消費動態統計年報」指定生産品目別エネルギー消費(一次投入燃料換算))を表4.2~4.4に示す。

また、日本製紙連合会評価による化石エネルギー原単位を図4.7に示す²⁷⁾。連合会は、「環境に関する自主行動計画」において地球温暖化対策として、2010年度までに製品当たり化石エネルギー原単位を90年度比で10%削減する²⁹⁾と掲げており、図4.7に示したように原単位は90年度以降概ね低下を続け、2002年度には90年度比93.4%となっている。

4.3 紙・パルプ製造の新しい技術

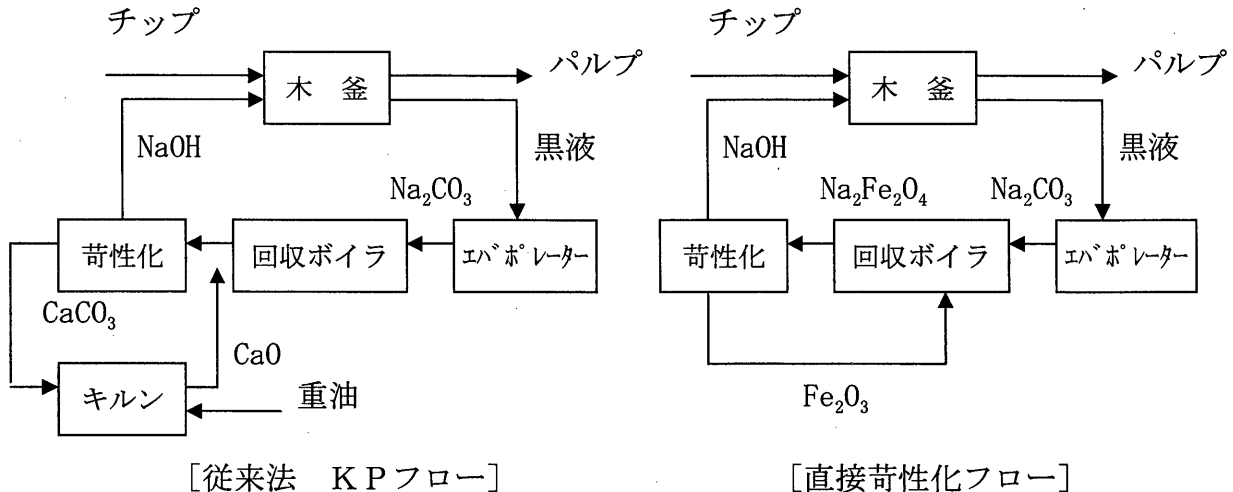
(1)省エネルギー技術

①直接苛性化技術³²⁾

従来のクラフト法では、回収ボイラで生成した炭酸ナトリウムを生石灰で苛性化し、その過程でできる炭酸カルシウムをキルンで焼成して生石灰を再生している(下図左)。

これに対し直接苛性化では、燃焼炉内に苛性化剤として酸化鉄を投入し、炉内の反応によって鉄酸ナトリウムができるが、これは加水分解するだけで、水酸化ナトリウ

ムと酸化鉄に戻すことができる（下図右）。したがって、キルンが不要になり、重油も節約できる。あわせて燃焼炉に供給する黒液の濃度を高め、回収ボイラの効率を向上させる。従来のクラフト法に比べて、25%の省エネルギーが期待できる。



直接苛性化は、技術的にはほぼ完成されているが、在来プラントと併設の場合、黒液等のやりとりができないので、新設又はスクラップ&ビルドに限定される。投資額は従来方式の90~95%である。

②高濃度抄紙技術³²⁾

ワイヤーパート上で紙層を形成するときの原料濃度は、従来の抄紙法では1%以下である。これに対し、3%程度の高濃度原料で抄紙ができる技術を開発し、大量の水の移送に必要な動力を節減する。このため、3%の原料に有効な繊維分散を与える流路の開発と、この原料で良好な地合の紙層を形成する機構を開発する。併せて高濃度抄紙に対応して、乾燥方式の改善を図る技術を開発する。

(2)ボイラ効率のまとめ

発生蒸気の高温・高圧化等により回収ボイラの効率が改善してきている。下表にボイラ効率の数値例を示す。

ボイラ効率			出 所
重油ボイラ	回収ボイラ	廃棄物ボイラ	
84.4 %	65.0 %		33)エネルギー経済(1983)
	70-72 %		32)NEDO 報告書(1996)
	75 %		34)NEDO 報告書(2001)
	70.1 %		35)エネルギー学会誌(2002)
87 %		62 %	36)自主行動計画(2003)

なお、文献 34)で、高温無臭型回収ボイラ（ボイラ能力 150t/h、有効蒸気発生量 112.5t/h）は、価格：約 10 億円、建設費：約 3 億円と概算されている。

表 4.1 紙・パルプの生産量の推移

	1998	1999	2000	2001	2002	2003
製紙パルプ (1000t)	10,834	10,910	11,319	10,735	10,589	10,520
紙 (1000t)	17,855	18,394	19,037	18,385	18,528	18,396
板紙 (1000t)	12,031	12,238	12,791	12,332	12,158	12,061

表 4.2 パルプ生産にかかる消費エネルギー

		1998	1999	2000	2001	2002	2003
パルプ生産量 (1000t) ³¹⁾		10,834	10,910	11,319	10,735	10,589	10,520
エネルギー消費	重油等石油系 (原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	1,528	1,523	1,519	1,420	1,337	1,308
	〃 (PJ)	59.2	59.0	58.8	55.0	51.8	50.6
	[重油 (1000kℓ) ²⁰⁾]	1,348	1,349	1,321	1,224	1,115	1,109
	[〃 (PJ)]	52.2	52.2	51.2	47.4	43.2	42.9
	石炭等非石油系 (原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	3,085	3,046	3,131	3,092	3,149	3,116
	〃 (PJ)	119.5	117.9	121.2	119.7	121.9	120.7
	[石炭 (1000t) ²⁰⁾]	1,698	1,659	1,765	1,894	1,837	1,815
	[〃 (PJ)]	43.2	42.2	44.9	48.2	46.7	46.2
	[黒液 (1000 絶乾 t) ²⁰⁾]	5,956	5,907	5,934	5,538	5,478	5,435
	[〃 (PJ)]	75.0	74.4	74.8	69.8	69.0	68.5
	電力 (10 ⁶ kWh) ²⁰⁾	1,745	1,635	1,767	1,745	1,669	1,705
	〃 (PJ)	6.3	5.9	6.4	6.3	6.0	6.1
合計 (PJ)	185	183	186	181	180	178	

[]内は内数を示す

表 4.3 紙生産にかかる消費エネルギー

		1998	1999	2000	2001	2002	2003
紙生産量 (1000t) ³¹⁾		17,855	18,394	19,037	18,385	18,528	18,396
エネルギー消費	重油等石油系 (原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	2,383	2,449	2,372	2,183	2,141	2,016
	〃 (PJ)	92.3	94.8	91.6	84.5	82.9	78.1
	[重油 (1000kℓ) ²⁰⁾]	2,045	2,118	1,999	1,811	1,729	1,668
	[〃 (PJ)]	79.2	82.0	77.4	70.1	66.9	64.6
	石炭等非石油系 (原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	3,671	3,785	4,155	4,066	4,308	4,239
	〃 (PJ)	142.1	146.6	160.9	157.4	166.8	164.1
	[石炭 (1000t) ²⁰⁾]	1,894	1,937	2,048	2,214	2,220	2,226
	[〃 (PJ)]	48.2	49.3	52.1	56.3	56.4	56.6
	[黒液 (1000 絶乾 t) ²⁰⁾]	6,935	7,146	7,899	7,256	7,522	7,293
	[〃 (PJ)]	87.4	90.0	99.5	91.4	94.8	91.9
	電力 (10 ⁶ kWh) ²⁰⁾	4,172	4,040	4,219	4,000	3,997	3,992
	〃 (PJ)	15.0	14.5	15.2	14.4	14.4	14.4
合計 (PJ)	249	256	268	256	264	257	

[]内は内数を示す

表 4.4 板紙生産にかかる消費エネルギー

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
板紙生産量 (1000t) ³¹⁾	12,031	12,238	12,791	12,332	12,158	12,061	
エネルギー消費	重油等石油系(原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	1,234	1,248	1,242	1,243	1,220	1,165
	〃 (PJ)	47.8	48.3	48.1	48.1	47.2	45.1
	[重油 (1000kℓ) ²⁰⁾]	1,129	1,142	1,137	1,141	1,085	1,036
	[〃 (PJ)]	43.7	44.2	44.0	44.2	42.0	40.1
	石炭等非石油系(原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	1,159	1,151	1,197	1,145	1,124	1,071
	〃 (PJ)	44.9	44.6	46.4	44.3	43.5	41.5
	[石炭 (1000t) ²⁰⁾]	616	612	637	601	575	526
	[〃 (PJ)]	15.7	15.6	16.2	15.3	14.6	13.4
	[黒液 (1000 絶乾 t) ²⁰⁾]	721	734	762	709	664	628
	[〃 (PJ)]	9.1	9.2	9.6	8.9	8.4	7.9
	電力 (10 ⁶ kWh) ²⁰⁾	2,368	2,378	2,352	2,220	2,229	2,274
	〃 (PJ)	8.5	8.6	8.5	8.0	8.0	8.2
	合計 (PJ)	101	101	103	100	99	95

[]内は内数を示す

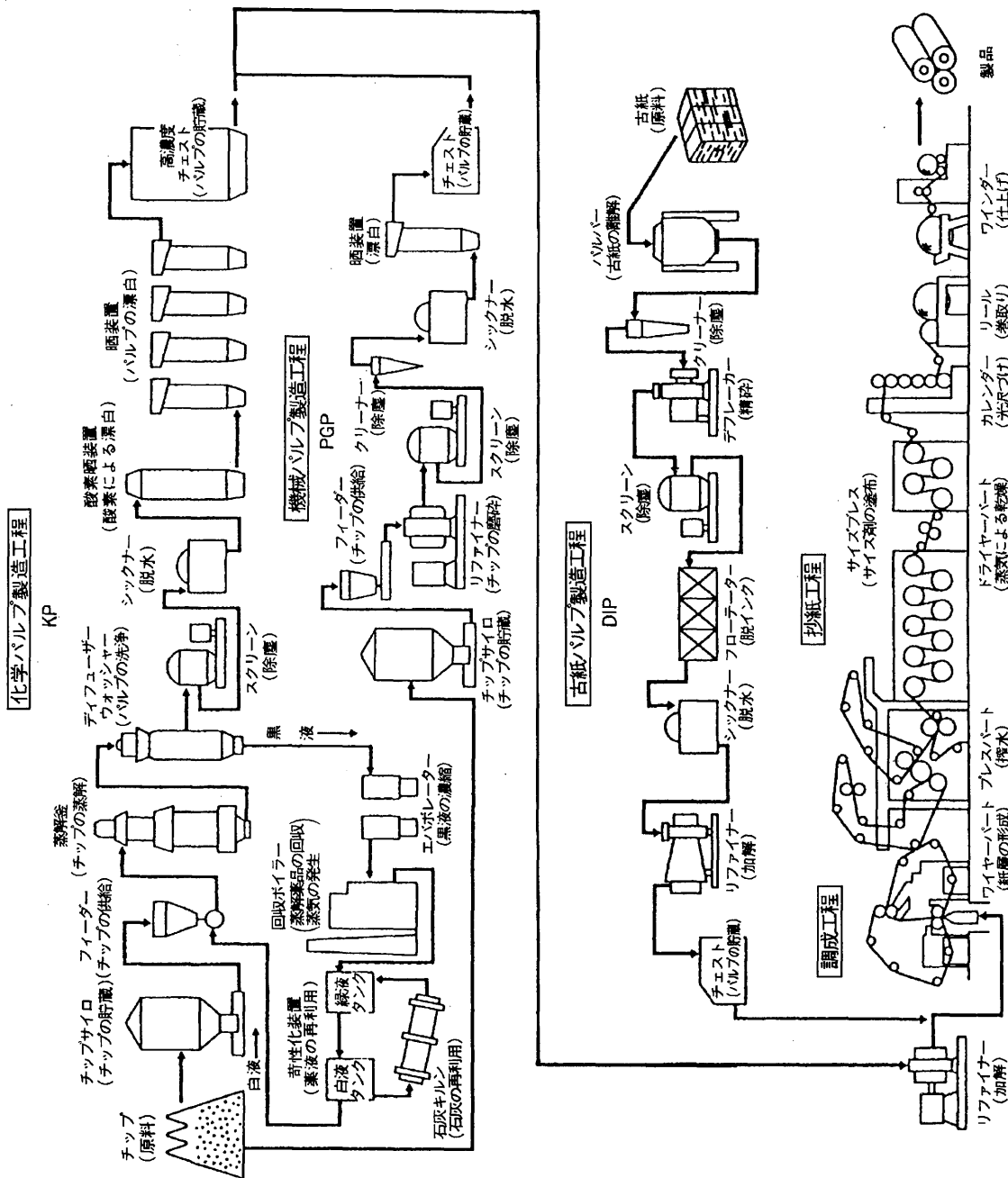
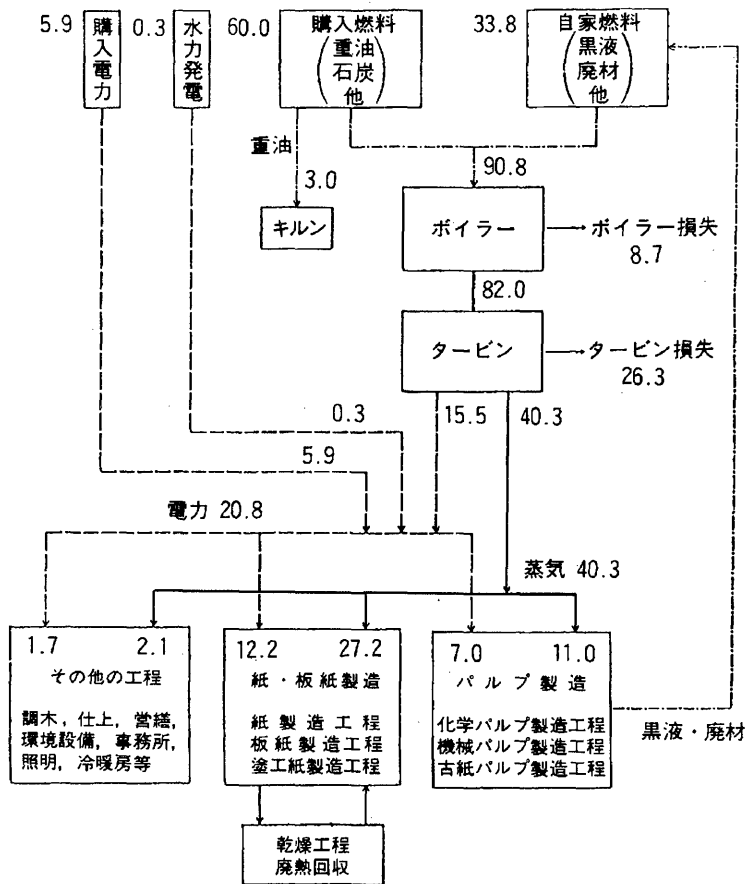


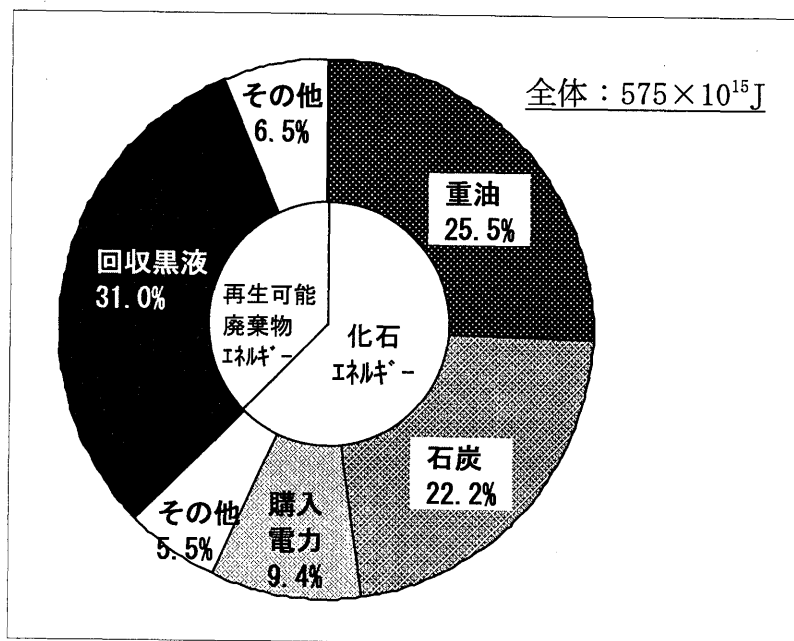
図 4.1 パルプー紙製造工程

出所：参考文献 25)



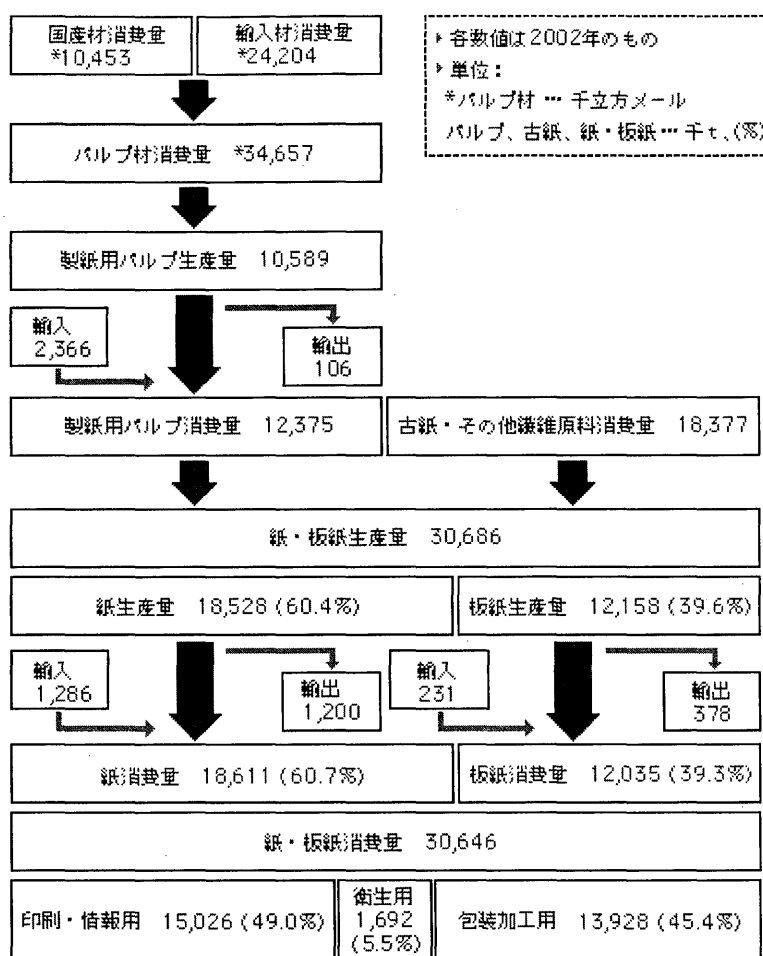
出所：参考文献 25)

図 4.2 紙・パルプ産業エネルギー・フロー



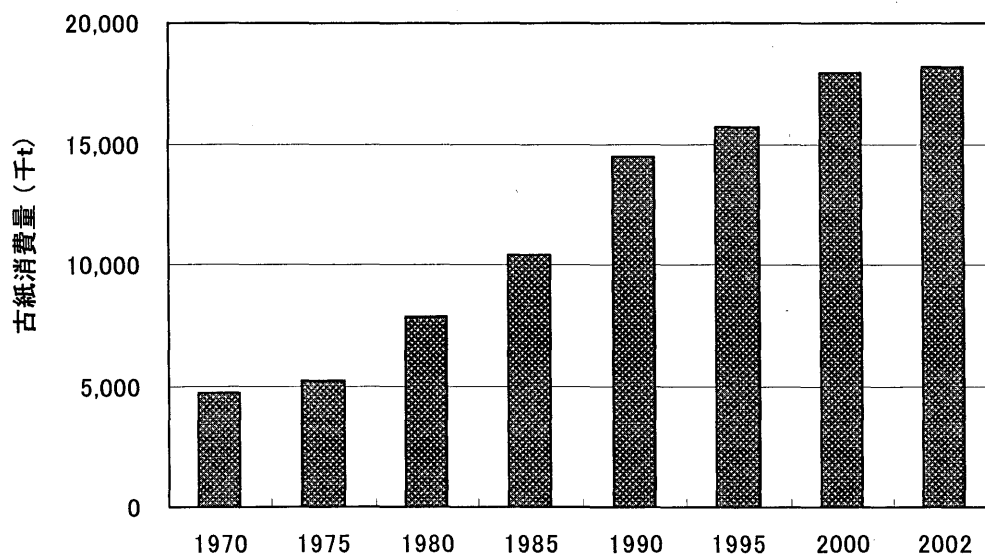
出所：参考文献 27)

図 4.3 製紙産業の使用エネルギー構成比 (2002 年度)



出所：参考文献 28)

図 4.4 紙・板紙の原料から製品までの流れ



出所：参考文献 27)

図 4.5 古紙の年間消費量の推移

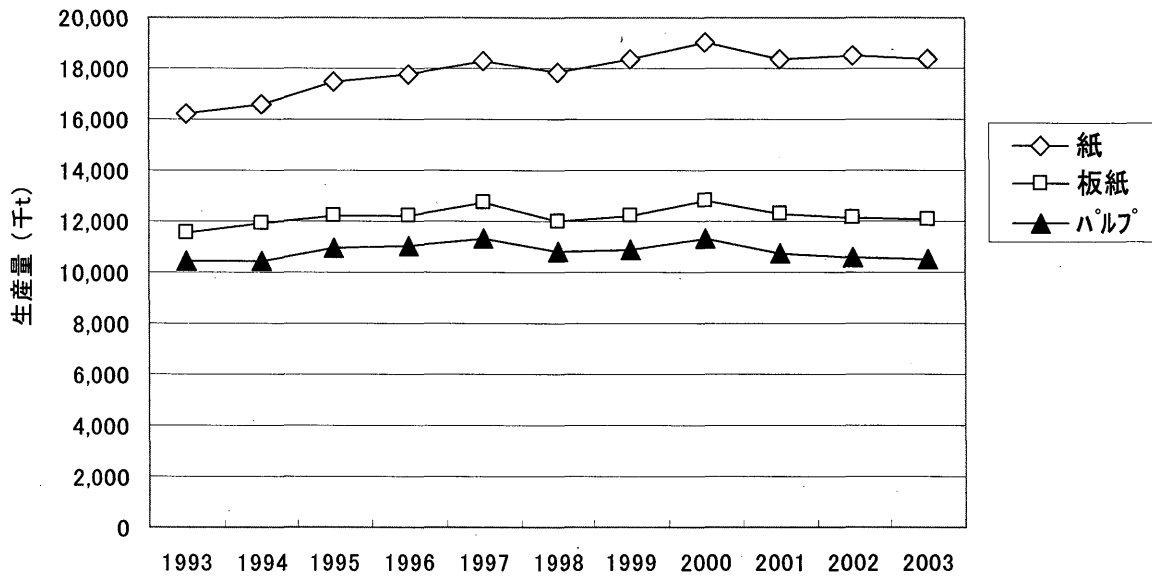
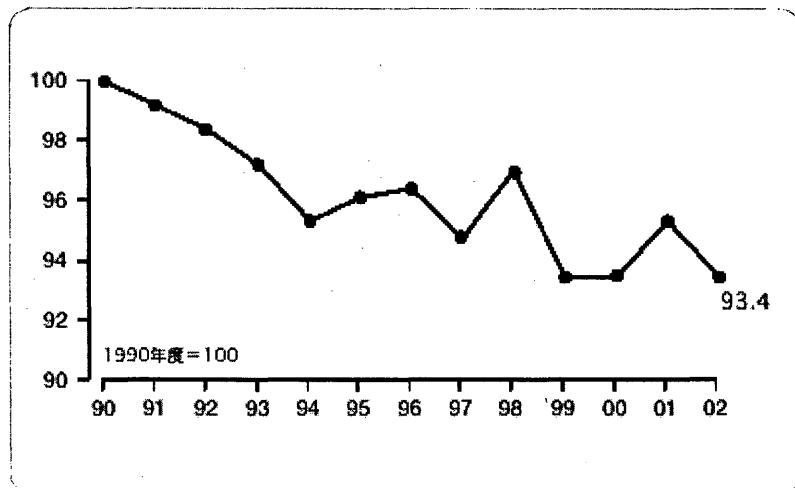


図 4.6 紙・板紙の年間生産量の推移



出所：参考文献 27)

図 4.7 紙・板紙トン当たり化石エネルギー原単位の推移

5. セメント

5. 1 セメント産業の概況

セメント(ポルトランドセメント)の製造工程は次の3工程に分かれる。

- ①原料工程：石灰石、粘土、けい石、酸化鉄等の原料を適当な割合で調合して、原料ミルで微粉碎する。
- ②焼成工程：キルンで1500℃前後で焼成し、クリンカーとする。
- ③仕上げ工程：これにせっこうを加えて微粉碎、製品とする。

今日セメント焼成炉の主流は、ロータリキルンの入り口側に浮遊状態で原料を予熱するプレヒーターを備えたSPキルンないしこれを一層改良した仮焼炉付きNSPキルンとなっている。NSPロータリキルンによる焼成システム³⁷⁾を図5.1に示す。セメント産業は、代表的なエネルギー多消費産業であるため従来より積極的に省エネルギー対策に取り組んできており、様々な技術を開発・導入してきた。これまで開発・導入してきた省エネルギーに係わる設備改善の代表的なものは、NSPキルン・SPキルン、堅型ローラーミル、風車の高効率化、廃熱発電などである。

セメント産業で使用する燃料は、その多くが焼成工程のキルンで使われるが、第2次石油危機を契機として石油から石炭へ転換が進み、現在では石炭の利用が大部分となっている。また最近は、廃タイヤなどの廃棄物燃料も使用している。これら以外の消費エネルギーは、動力用の電力である。

また、セメント産業では従来より、他の産業から排出される廃棄物や副産物の活用を積極的に行っており、社会全体として資源の節約・再利用、環境負荷の低減に寄与している。これらの活用例として、高炉スラグの利用(高炉セメント)、石炭灰の利用(フライアッシュセメント)、更に廃タイヤ、廃プラスチック類の燃料利用がある。高炉スラグ、石炭灰、廃タイヤの産業における利用状況を図5.2に示す³⁸⁾。いずれも、セメント向けの利用が多くなっていることが分かる。

セメント産業は、産業から排出される廃棄物量を減少させる“静脈産業”としても重要な役割を担っている。

5. 2 セメントの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位

セメントの年間生産量は、セメント協会による統計と経済産業省による統計がある(表5.1)。セメント協会統計による93年以降のセメント生産量の推移を図5.3に示す。

また、セメント生産のために消費したエネルギー量(出所：「石油等消費動態統計年報」指定生産品目別エネルギー消費(一次投入燃料換算))を経済産業省調べセメント生産量と合わせて表5.2に示す。

セメント製造時のエネルギー消費を工程別にみると、全消費エネルギーの約1割が原料加工工程で使われ(主に電力)、約8割が焼成工程で使われ(主に石炭)、残りの約1割が仕上げ工程で使われている(主に電力)³²⁾。焼成工程では、熱効率の良いNSPキルン・SPキルンの実用化・導入が行われ、更に電力回収設備(キルン排熱及びクリンカークーラー排熱による発電)の導入に伴い、現在、焼成工程の熱効率は83%程度まで上昇している³²⁾。

セメント協会は地球温暖化対策の取り組みとして、2010年度におけるセメント製造

用エネルギー原単位(セメント製造用+自家発電用+購入電力)を1990年度比3%程度低減させることを目標にしている⁴¹⁾(図5.4参照)。セメント産業では原料起源のCO₂が多く排出され、我が国のCO₂全排出量の約5%を占めている。

5.3 セメント焼成の新しい技術

(1) 流動床セメント焼成システム⁴²⁾

セメント焼成は、70年代に開発されたNSPロータリキルンが主流となっている。これに対して、流動床技術をベースにして開発された流動床セメント焼成システムがあり、資源の有効利用、省エネルギー、経済性の観点から優れている。本技術は、まず川崎重工業/住友大阪セメントにより基礎的な研究が実施され、更に1986年より資源エネルギー庁の石炭生産・利用技術振興補助事業として推進され、その後セメント協会と石炭利用総合センターによって日産20トン規模パイロット試験・日産200トン規模スケールアップ試験を経て1998年3月に完了した。

流動床セメント焼成システムは図5.5に示すように、仮焼炉付予熱装置、流動床造粒焼成炉、流動床クーラー、移動床クーラーで構成され、これらの設備が合理的な流れを形成するように縦型に配置されている。

流動床セメント焼成システムでは、熱回収率が向上し、放熱面積も減少するため、ロータリキルン方式と比べて熱消費率が10~25%減少する。対応して燃焼系CO₂排出量が10~25%減少する。また、設備費も、10~30%減少する。表5.3に、ロータリキルン方式と流動床方式を比較して燃料消費量と電力消費量の比較を示す。流動床方式はエネルギー消費量の比較で約10%の省エネルギーとなっている。

なお、文献32)では流動床システムについてももう少し控えめの評価をしており、流動床燃焼方式はスケールアップ時に流動が安定しにくいという課題があり、現状では大型炉としてよりもむしろ多品種少量生産やFA化に適しているとしている。また、省エネルギー効果は最大10%程度を期待としている。

表 5.1 セメント生産量の推移

単位：1000 t

	1998	1999	2000	2001	2002	2003
セメント生産量 ³⁹⁾	83,299	81,701	83,339	79,455	76,364	73,803
セメント生産量 ⁴⁰⁾	81,328	80,120	81,097	76,550	71,828	68,766

39) セメント協会調べ

40) 経済産業省調べ

表 5.2 セメント生産の消費エネルギー

		1998	1999	2000	2001	2002	2003
セメント生産量 ⁴⁰⁾ (1000t)		81,328	80,120	81,097	76,550	71,828	68,766
エネルギー消費	重油等石油系(原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	1,495	1,561	1,471	1,532	1,467	1,296
	〃 (PJ)	57.9	60.4	57.0	59.3	56.8	50.2
	[重油 (1000kℓ) ²⁰⁾]	338	317	257	247	220	181
	[〃 (PJ)]	13.1	12.3	10.0	9.6	8.5	7.0
	石炭等非石油系(原油換算 1000kℓ) ²⁰⁾	5,467	5,245	5,496	5,118	5,166	5,148
	〃 (PJ)	211.7	203.1	212.8	198.2	200.0	199.3
	[石炭 (1000t) ²⁰⁾]	8,085	7,741	8,078	7,535	7,204	7,198
	[〃 (PJ)]	205.6	196.8	205.4	191.6	183.2	183.0
	[廃タイヤ (1000t) ²⁰⁾]	241	265	330	291	260	236
	[〃 (PJ)]	5.0	5.5	6.9	6.1	5.4	4.9
	電力 (10 ⁶ kWh) ²⁰⁾	3,795	3,701	3,616	3,368	3,239	3,079
	〃 (PJ)	13.7	13.3	13.0	12.1	11.7	11.1
	合計 (PJ)	283.2	276.9	282.8	269.6	268.5	260.6

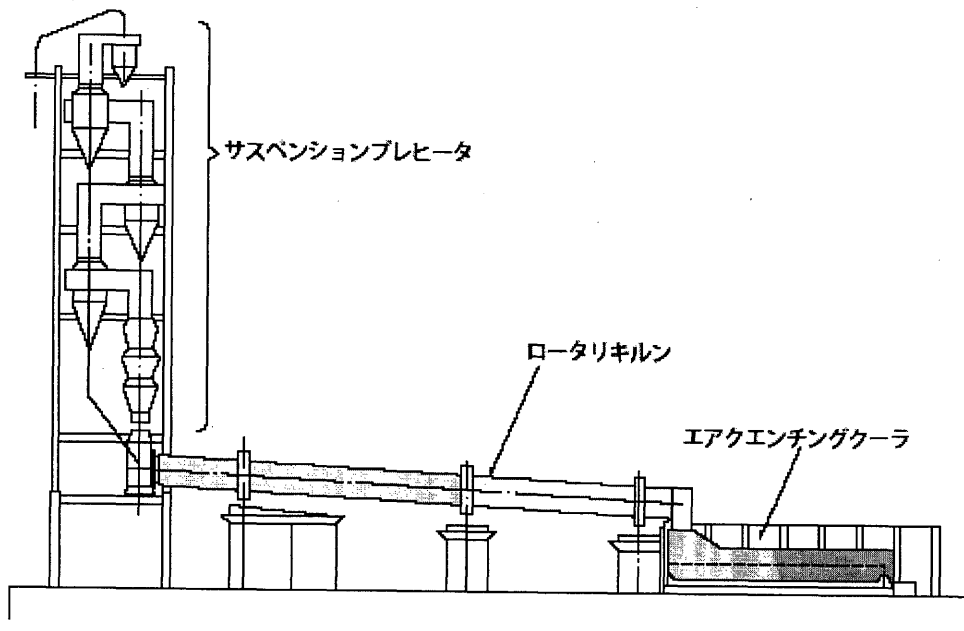
[]内は内数を示す

表 5.3 エネルギー消費量のロータリキルン／流動床キルン比較

生産能力 (t・cl/d)		300	600	1000
燃料消費量 (kcal/kg・cl)	ロータリキルン	850	830	815
	流動床キルン	743	725	715
電力消費量 (kWh/kg・cl)	ロータリキルン	27.8	27.3	26.8
	流動床キルン	36.7	36.2	35.7
エネルギー消費量 (kcal/kg・cl)	ロータリキルン	924	902	886
	流動床キルン	840	821	809

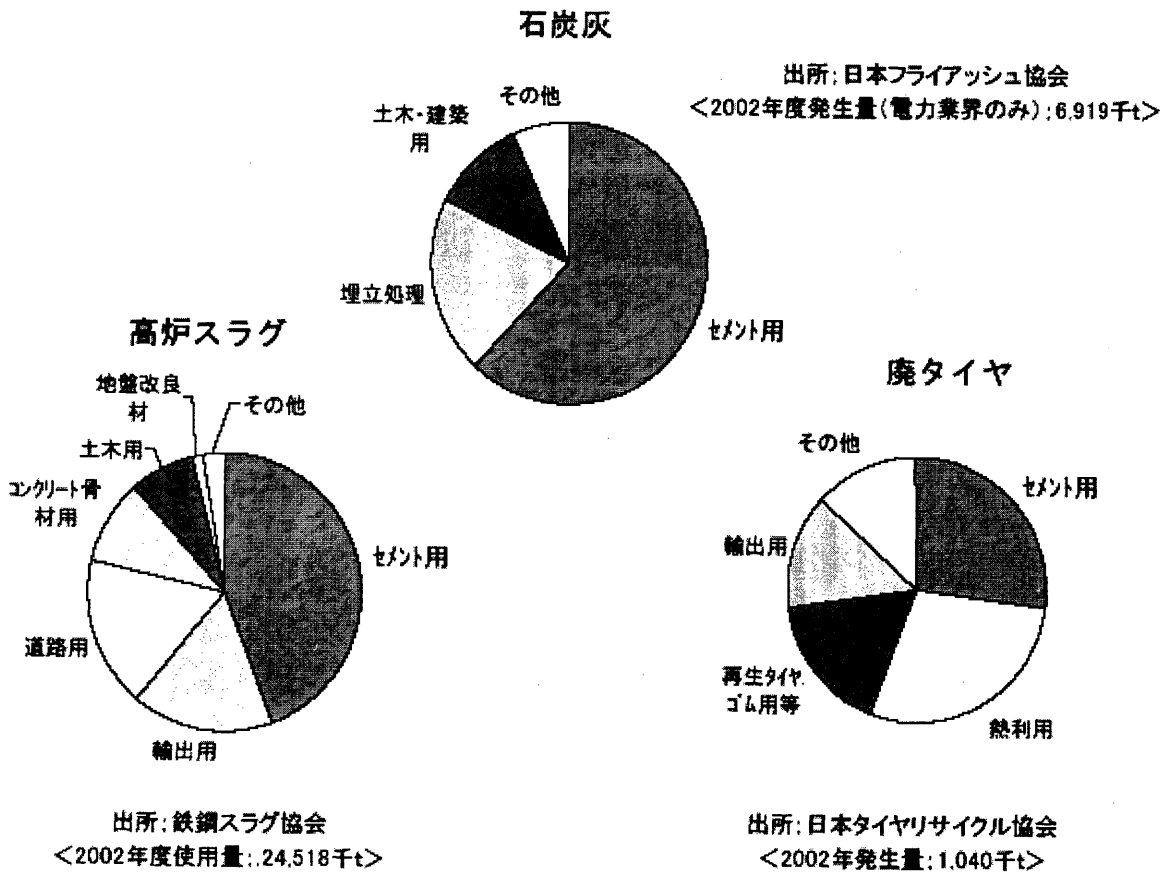
エネルギー消費量 = 燃料消費量 + 電力消費量 / 1000 × 860kcal/kWh ÷ 0.325

出所：参考文献 42)



出所：参考文献 37)

図 5.1 セメント焼成システム (NSP キルン)



出所：参考文献 38)

図 5.2 主な廃棄物・副産物の産業での利用状況 (2002 年度)

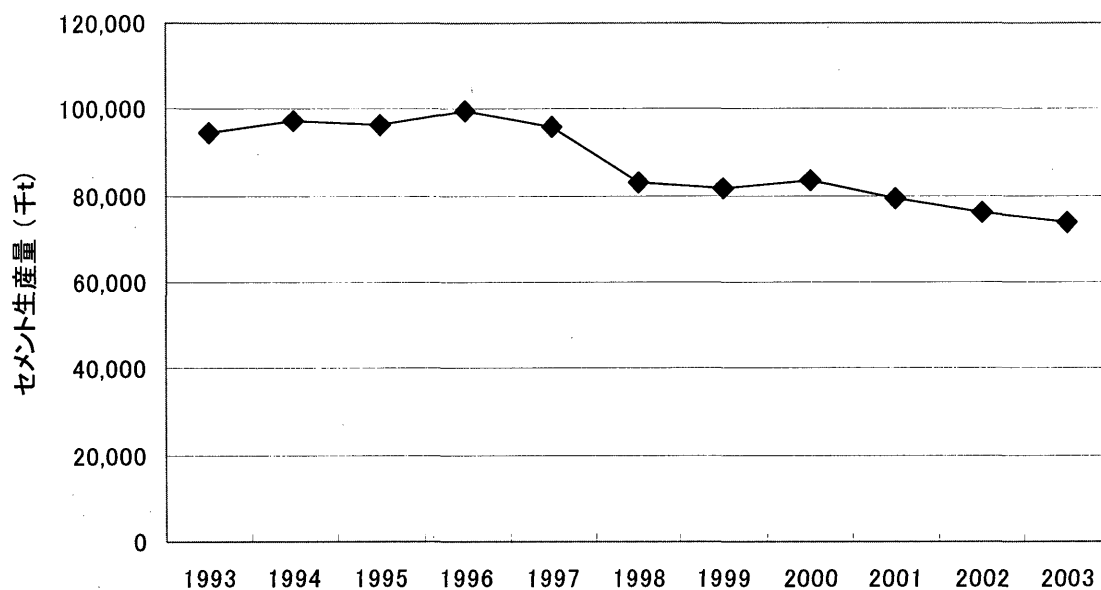
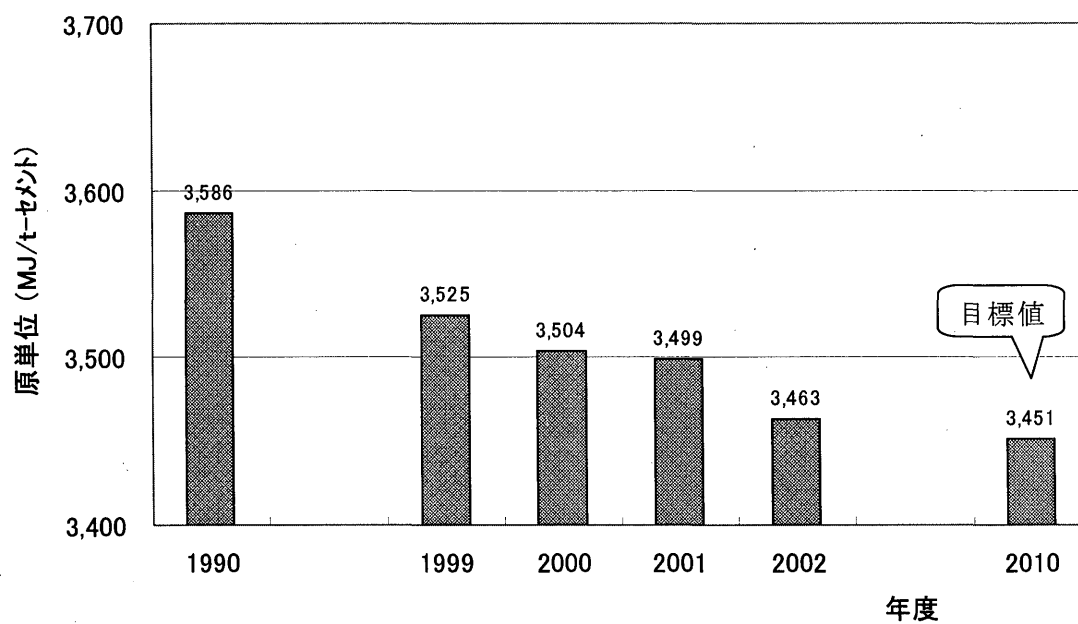
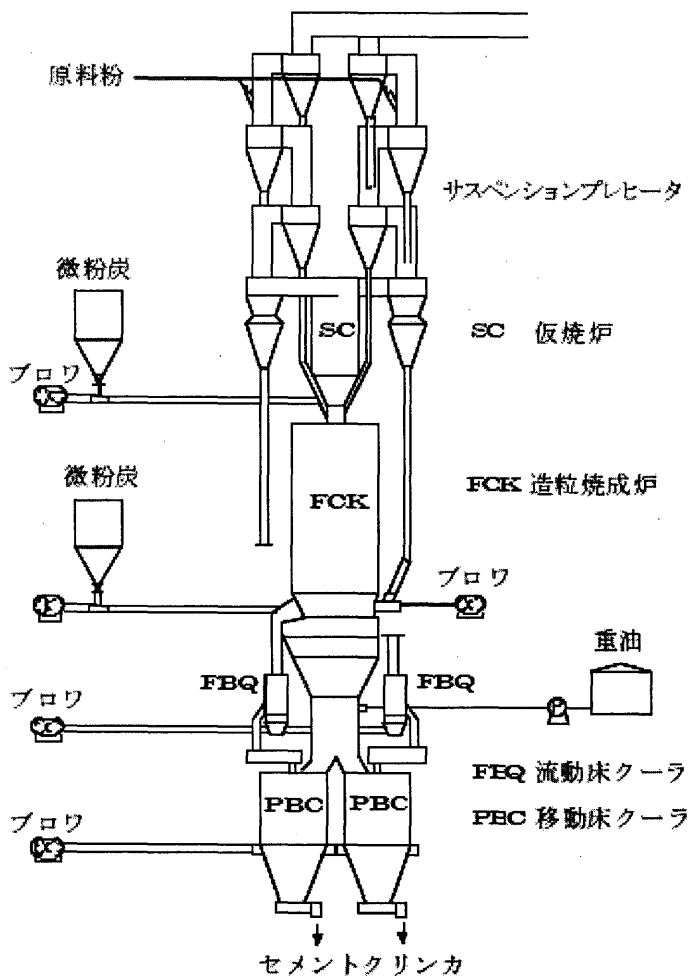


図 5.3 セメントの年間生産量の推移



出所：参考文献 41)

図 5.4 セメント製造用エネルギー原単位



出所：参考文献 42)

図 5.5 流動床セメント焼成システム

6. ガラス

6. 1 ガラス産業の概況

ガラス製品は多種多様であり、板ガラス、ガラス繊維、ガラス製品などのように分類されることが多い。経済産業省の生産動態統計調査では、板ガラス、安全ガラス、ガラス繊維製品、ガラス製品について、生産量、販売金額が調査・公表されている⁴⁰⁾。

ガラス産業は、原料の溶解を 1500℃以上の高温で行っており、エネルギー多消費産業の一つである。ガラスの原料は、けい砂、ソーダ灰、石灰石、苦灰石などである。これらの主原料を一定の割合で調合し、ガラス屑(カレット)を配合して、溶解窯へ送り込む。溶解窯内は 1500～1600℃の高温であり、完全に溶解され澄み切った均質のガラス素地となる。ガラス素地は溶解窯から取り出され、例えば板ガラスでは一定の厚さの板状のガラスに整形され、徐冷されて、洗浄・検査の後、所要サイズに切断・製品化される。板ガラスの製造は今日ではほとんどすべてフロート法で行われている。フロート法では表面張力と比重の差を利用して、溶解したガラスを溶融した金属(スズ)の上に浮かべて製板する。フロート法による板ガラス製板の流れを図 6.1 に示す。

工業的にはガラスの溶融は、下半分が溶けたガラスで上半分が炎で充満しているいわゆる「タンク窯」で行われる。代表的な板ガラス溶解窯は蓄熱室を左右に持ったシーメンス炉である(図 6.2 参照)。溶解窯ではガラスによごれを生じさせないため上部からの輻射加熱を採用しており、適当に炭素を含有していて輻射熱を十分利用できる C 重油が使用される。溶解窯は常に高温状態に保っておかなければならず、必然的に昼夜連続操業となる。溶解窯の実使用期間は例えば 30 年で、7～8 年程度ごとに窯の作り直しを主とした定期修繕を実施するとしている⁴⁴⁾。

板ガラス製造において、所要全エネルギーの 80%が溶解工程で消費されている(「石油等消費動態統計年報 2002」による。板ガラス消費エネルギーにおいて重油の占める割合が 80%である。)²⁰⁾。溶解工程前後の原料調合工程や成型工程などでは動力として電力が使用され、徐冷工程では都市ガス、LPG、電力が使用される。

ガラス産業の省エネルギーは、溶解窯を中心に取り組んできた。すなわち、溶解窯の大型化・集約化、熱効率の改善(耐火レンガの材質改善、複数の断熱層、シールなど)、熱回収率の改善(蓄熱室の規模、れんがの材質・積み方の改善など)、燃焼技術の改善などに取り組んできた。また、カレットの配合は、溶解に要するエネルギーが少なく済むため、配合率を徐々に高めてきて、現在約 40%となっている⁴⁵⁾。カレットのリサイクルは省資源の面からも重要である。

なお、ガラス製品(理化学用、医療用、耐熱ガラス食器等)工業では中小規模の工場が多く、ガラス製品の製造における溶解工程で旧式の溶融ルツボ炉から電気溶融炉に転換することにより省エネルギーを図ることも行われている³⁴⁾。電気溶融炉は、溶融量が数トン/日程度の小型窯に普及している⁴⁶⁾。

6. 2 ガラスの生産量・エネルギー消費量・エネルギー原単位

ガラスの年間生産量は、経済産業省や業界団体による統計がある。板ガラス、安全ガラス、ガラス繊維、ガラス製品の年間生産量の推移を表 6.1 に示す。

また、板ガラス、ガラス製品生産のために消費したエネルギー量(出所:「石油等消

「費動態統計年報」指定生産品目別エネルギー消費)を表 6.2、表 6.3 に示す。

板ガラス協会では環境自主行動計画として、板ガラス製造工程におけるエネルギー使用削減目標を下記のように掲げている⁴⁸⁾。

- ・ 2005 年度の製造工程におけるエネルギー総使用量を 90 年度比 9%削減
- ・ 2010 年度の // 90 年度比 10%削減

板ガラス協会によれば、この目標に対して、板ガラス生産量とエネルギー使用量の実績及び見通しは表 6.4 の通りとなっている。これによると、対 90 年度比エネルギー使用削減目標は達成されるが、エネルギー使用量の減少は生産量の低下によるものであり、原単位でみると、生産量減少と生産品種増加による生産効率悪化のため⁴⁸⁾むしろ悪化している。

6. 3 板ガラス製造プラントのコストの例

代表的な板ガラス製造プラントの設計評価例⁴⁴⁾がある。プラントの規模として下表右欄の板ガラス等生産量を想定している。これは、板ガラスの生産量では我が国の総生産量の約 14%を占めるものである。エネルギー・インプット、板ガラス等生産量に対応させて下表に示す。

	エネルギー・インプット	生産量
板ガラス 製造工程	重油： 69 千 t LPG： 1.6 千 t 電力： 50 10 ⁶ kWh 蒸気(ボイラ重油)：0.4 千 t	フロート板・型板ガラス：3,500 千換算箱 (157.5 千 t)
二次処理 工程	LPG： 2.2 千 t 電力： 79 10 ⁶ kWh 蒸気(ボイラ重油)：0.3 千 t	磨き板ガラス： 800 千換算箱 (36 千 t) 強化・合せ板ガラス： 5,000 千 m ² (45 千 t)

このプラント設備の建設費等は、機械設備及び建造物の使用期間 30 年、ガラス溶解窯(3 基)は 15 年(ただし、炉材の一部は 8 年)として、土地代を除く総建設費が 900 億円(生産設備 670 億円、建屋・倉庫 230 億円)、また、設備補修費は 22 億円/年である。

6. 4 ガラス製造の新しい技術

(1)省エネルギー技術

①減圧脱泡技術

減圧下(0.6~0.8 気圧)でガラス熔融液の気泡を成長・浮上させて脱泡させる技術である。従来から行われている 1600℃程度までの昇温が 1500℃程度で済むため、消費エネルギーを 30%程度も削減できる可能性がある⁴⁶⁾。2000 年に実用化試験の段階に来ている⁴⁶⁾⁴⁹⁾。

②酸素燃焼法

溶解窯で重油を燃焼させる際に、従来からの空気に替えて酸素ガスを供給する方式

である。火炎温度が高くなり、燃焼排ガスの量を大幅に減少させることができるので、重油の使用量を 20～40%削減することができる⁵⁰⁾。ただし、酸素燃焼法は酸素の製造に多くの電力を要し、省エネルギーのメリットが薄れるという点もある。この所要エネルギー増分を考慮しても 10～20%の省エネルギーが図られると試算されている⁵¹⁾。

我が国の CRT 用ガラスの製造(中規模のガラス窯に相当)では、酸素燃焼方式に順次置き換わってきており、既に過半数を占めるに至っている。一方、数 100 t/日の大型窯では、酸素燃焼の問題点(火炎の大きさ、温度調整、ガラス品質への影響、バーナーのメンテナンスなど)が残っており、実用化が鋭意進められている段階である⁴⁶⁾。会社によっては、板ガラス用溶解窯への適用も既に一部なされている⁵⁰⁾。TVブラウン管ガラス製造時の酸素燃焼による省エネルギー効果を図 6.3 に示す⁵¹⁾。この場合、消費エネルギーが 43%削減されている。

(2) 熱効率のまとめ

板ガラス溶解窯の熱効率及び新技術に伴う熱効率改善について下表に整理した。減圧脱泡技術で 30%程度、酸素燃焼法で 20%近くの熱効率向上が見込まれる。(なお、熱効率改善の値が資料によって、窯の熱効率改善であったり、システム全体の省エネルギー効果であったりするが、溶解窯のエネルギー消費が全体の 8 割を占めるため、大勢に影響はない。)

	溶解窯の熱効率	出 所
1980 年代末の状況	30～40%	44)NEDO 報告書
93 年頃の例	28.5%	52)ガラス工学ハンドブック
減圧脱泡技術	消費エネルギーを 30%程度削減 燃料消費量を 30%程度削減	46)NEDO 報告書 49)A 社環境報告書
酸素燃焼法	10～20%の改善 20%近くの改善 (上記は何れも酸素製造用電力考慮済み)	44)NEDO 報告書 53)N 社ホームページ
両者の組み合わせ	重油使用量 20～40%削減 50%の可能性	49)A 社環境報告書 53)N 社ホームページ

表 6.1 ガラスの生産量の推移

	1998	1999	2000	2001	2002	2003
板ガラス (1000 換算箱) ⁴⁰⁾	26,028	27,336	25,965	26,479	25,002	28,316
〃 (1000t)	1,171	1,230	1,168	1,192	1,125	1,274
安全ガラス (1000m ²) ⁴⁰⁾	41,214	43,069	45,230	44,446	47,003	49,605
〃 (1000t)	371	388	407	400	423	446
ガラス繊維 (1000t) ⁴⁰⁾	624	636	674	646	636	692
ガラス製品 (1000t) ⁴⁷⁾	2,958	2,843	2,856	2,580	2,547	2,309

(注) 重量への換算係数：0.045 t / 換算箱⁴⁴⁾ を使用
 9.0 kg / m²⁴⁴⁾

表 6.2 板ガラス生産にかかる消費エネルギー

	1998	1999	2000	2001	2002	2003
板ガラス生産量 (1000 換算箱) ⁴⁰⁾	26,028	27,336	25,965	26,479	25,002	28,316
板ガラス生産量 (1000t)	1,171	1,230	1,168	1,192	1,125	1,274
エネルギー消費 (PJ)	19.9	19.4	18.1	18.2	17.8	17.6
内 重油 (1000k ℓ) ²⁰⁾	427.4	418.6	388.5	389.8	371.8	368.2
〃 (PJ)	17.52	17.16	15.93	15.98	15.24	15.09
LPG (kt) ²⁰⁾	7.0	6.9	7.3	8.2	6.9	6.2
〃 (PJ)	0.35	0.35	0.37	0.41	0.35	0.31
都市ガス (10 ⁶ m ³) ²⁰⁾	10.9	8.3	7.6	5.8	4.2	3.6
〃 (PJ)	0.45	0.34	0.31	0.24	0.17	0.15
電力 (10 ⁶ kWh) ²⁰⁾	477	455	440	439	434	418
〃 (PJ)	1.72	1.64	1.58	1.58	1.56	1.50

表 6.3 ガラス製品生産にかかる消費エネルギー

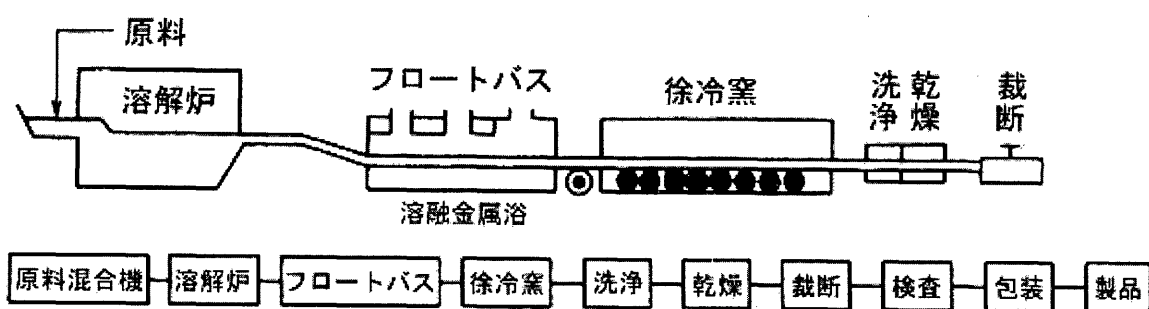
	1998	1999	2000	2001	2002	2003
ガラス製品生産量 (1000t) ⁴⁷⁾	2,958	2,843	2,856	2,580	2,547	2,309
エネルギー消費 (PJ)	37.7	35.7	35.7	34.2	33.3	31.5
内 重油 (1000k ℓ) ²⁰⁾	533.0	502.3	486.7	471.4	449.5	400.7
〃 (PJ)	21.36	20.18	19.56	18.95	18.05	16.09
LPG (kt) ²⁰⁾	83.7	73.3	70.8	64.8	57.1	55.2
〃 (PJ)	4.20	3.68	3.55	3.25	2.87	2.77
都市ガス* (10 ⁶ m ³) ²⁰⁾	82.3	83.0	94.2	93.3	98.0	110.7
〃 (PJ)	3.38	3.41	3.87	3.83	4.03	4.55
電力 (10 ⁶ kWh) ²⁰⁾	1,726	1,690	1,712	1,589	1,438	1,376
〃 (PJ)	6.21	6.08	6.12	5.72	5.18	4.95

*天然ガスを含む(98年、99年)

表 6.4 板ガラス生産量／エネルギー使用の実績と今後の見通し

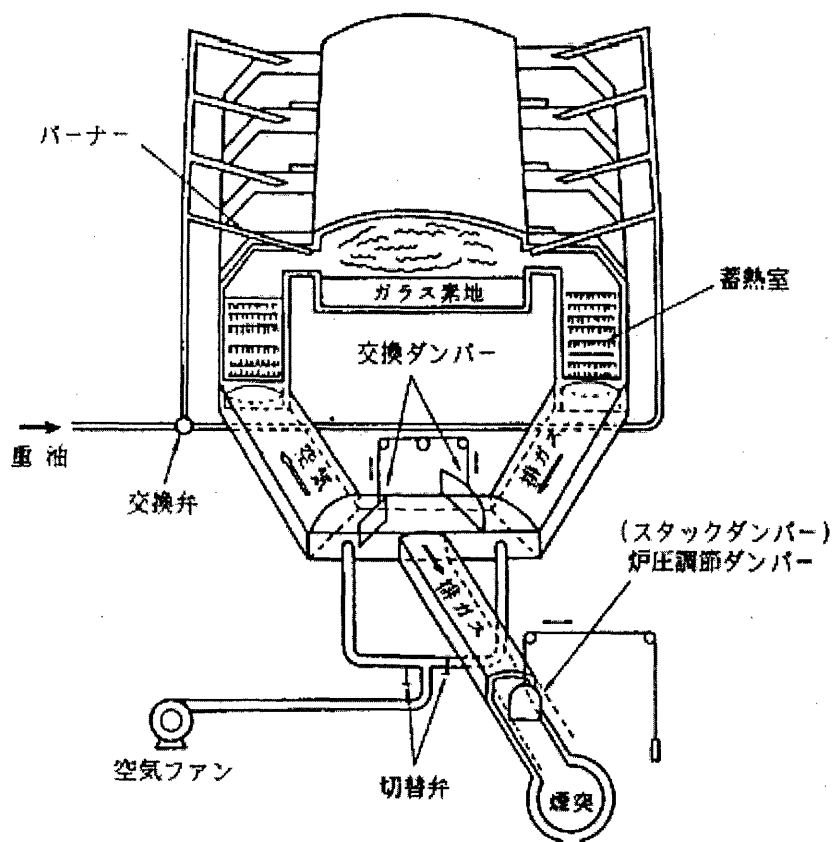
		FY1990	FY1997	FY1998	FY2005	FY2010
板ガラス生産量	1000 換算箱	37,964	30,338	26,480	30,103	30,103
C重油	原油換算 1000kℓ	536	519	448	495	490
電力	〃	161	152	125	147	145
その他	〃	31	22	26	20	20
エネルギー使用合計	〃	728	693	599	662	655
対 1990 年度比	%	100	95.2	82.3	90.9	90.0
原 単 位	kℓ／換算箱	19.2	22.8	22.6	22.0	21.8

出所：参考文献 48)



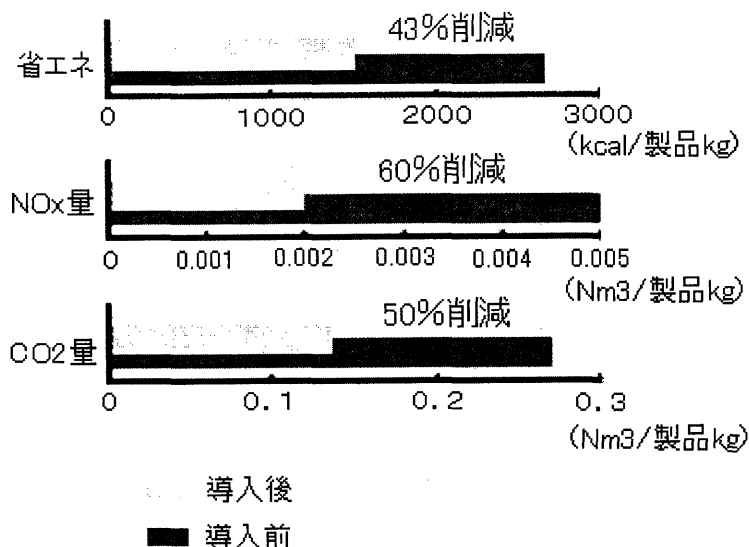
出所：参考文献 43)

図 6.1 フロート法製板法



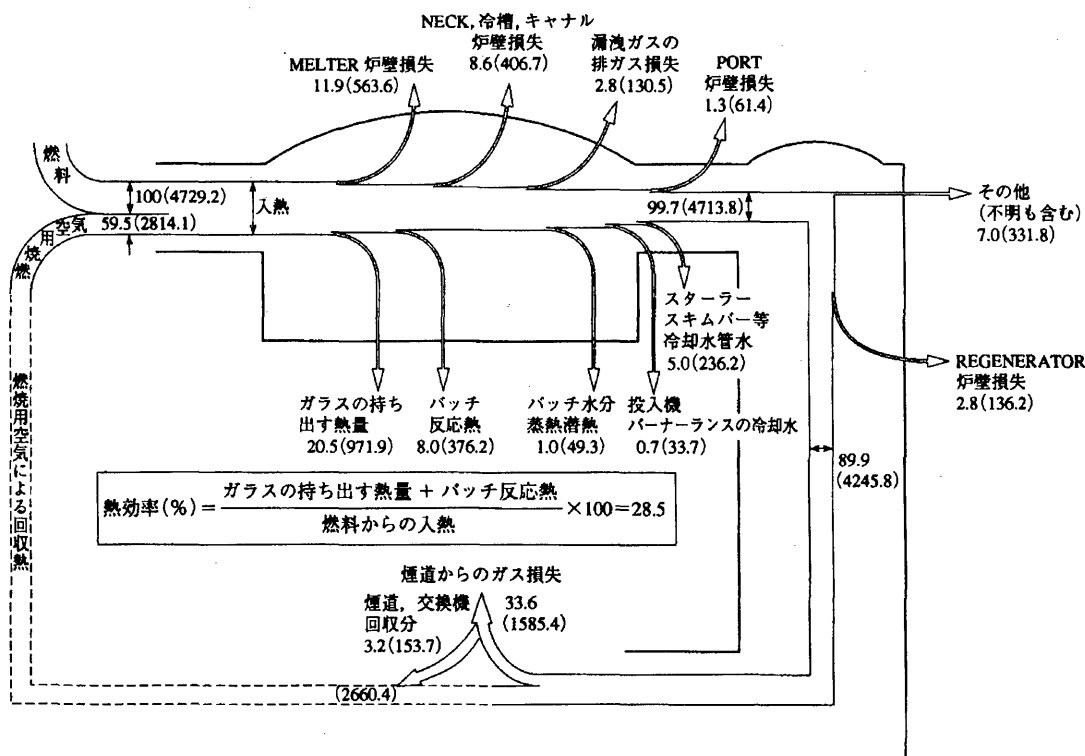
出所：参考文献 44)

図 6.2 代表的なガラス溶解窯



出所：参考文献 51)

図 6.3 TVブラウン管ガラス製造時の酸素燃焼による効果



出所：参考文献 52)

図 6.4 板ガラス炉における熱流れ図の例

7. 産業共通

7. 1 高性能工業炉

(1) 高性能工業炉とは

工業炉は、材料その他を加熱する装置として重要な役割を担っており、鉄鋼業、金属用熱処理、化学工業用、窯業用など各産業分野において幅広く使用されている。

我が国の従業員規模 30 人以上の事業者における工業炉(燃焼炉)の施設数及び年間エネルギー消費量は 28,300 基、741Pcal と推計されている⁵⁴⁾。また、その中で「高性能工業炉」導入の対象として大型の燃焼炉(500Mcal/h 以上)を想定した場合は、18,700 基、710Pcal と推計されている⁵⁴⁾。

このように工業炉で消費されるエネルギーは多量で、我が国産業分野の消費エネルギーの約 40%を、製造業分野消費エネルギーの約 44%を占め、このため工業炉の熱効率改善は、省エネルギー・経済的な観点から重要な課題である。しかし、各種工業炉の熱効率は表 7.1 に示すように、平均で約 35%⁵⁵⁾と低い値に留まっている。これは、エネルギー効率向上のため炉温の高温化や廃熱回収を徹底してきているものの、従来の燃焼方式では局所的な温度上昇に伴う NO_x 生成の問題があつて炉内温度は 700℃程度が上限とされ、エネルギー効率向上に限界があつたためである⁵⁵⁾。

ところが昨今、1000℃以上の高温に予熱した空気を高速で噴出させつつ燃焼させること(高温空気燃焼)で、増大するとみられていた NO_x 発生量がむしろ低減するという現象が見出され、エネルギー効率改善と NO_x 低減を両立させる、技術的なブレイクスルーが現実的なものとなった。高温空気燃焼域を、在来の燃焼域と比較して第Ⅲの燃焼域として、図 7.1 に示す。高性能工業炉は、この燃焼域を利用するものである。高性能工業炉においては、蓄熱型熱交換器を内蔵したバーナーを交互に燃焼させて高温蓄熱回収を行い(リジェネレイティブ式⁵⁶⁾、図 7.2)、炉に吹き込む空気を 1000℃以上の高温に予熱して高速で噴出させつつ低酸素濃度で燃焼させるという方式である。この燃焼方式により、局所高温がなく温度分布均一で容積の大きな火炎が得られ、NO_x の生成は低減する。リジェネレイティブ式での燃焼切替時間は 30 秒から 1 分程度と短く、これにより蓄熱器の容積を小さくして一般の燃焼炉にも適用可能としている。

高性能工業炉に特徴付けられる技術をまとめると以下である。

- ・系内限界廃熱回収技術(省エネルギー)
- ・温度場制御技術(炉温平均化、低 NO_x 化)
- ・高エクセルギー伝熱技術(高効率伝熱・ダウンサイジング)

(2) 熱効率改善等

高性能工業炉の開発プロジェクトは平成 5 年度から開始され、平成 10～12 年度にかけては事業者の各種工業炉に適用するフィールドテストが行われた。その結果、高性能工業炉は各種炉形式・規模に適用可能であると実証され、また当初の目的である省エネルギー 30%、ダウンサイジング 20%、NO_x 大幅低減を達成している。

高性能工業炉適用による熱効率向上割合等を表 7.2 に示す⁵⁵⁾。表 7.2 の 1.～6. の工業炉は、表 7.1 に対応するもので、熱効率は平均で 35%から 53%に向上する。ただし、焼成炉(4.)で、セメント用キルンは既に熱効率が大きく大幅な熱効率向上は期待できないので評価対象から外している。石油加熱炉(7.)でも、大型のものは熱効率が

高いので除外し中小規模で比較的熱効率の低い石油加熱炉についてのみ対象とし、この場合に石油加熱炉の熱効率は78%から90%に向上としている。また、産業用ボイラ(8.)についても適用可能とし、産業用ボイラの熱効率は85%から90%に向上としている。

また、工業炉の耐用年数は、工業炉協会からのヒアリングによると一般に15年程度である⁵⁵⁾。

(3) 普及見通し

高性能工業炉の設備費は、新規設置の場合で従来炉の1.2倍、改修の場合で2倍程度としている⁵⁷⁾(平成12年度報告書取りまとめ時点)。

高性能工業炉の導入実績は、平成10～12年度「高性能工業炉導入フィールドテスト」において167件、その後の「エネルギー使用合理化支援事業」等において43件、更にこれらとは別に既に159基が実用化されており、合計369基が実用化・稼動となっている(出所は、文献58)で、出版時期は2003年5月)。

また、環境省による「温室効果ガス削減技術シナリオ策定調査検討会」では、高性能工業炉の普及として、次のようにシナリオを仮定している⁵⁹⁾。

- ① 既存代替量：既存炉は、毎年1/15ずつ高性能工業炉に置き換わる。
- ② 新規導入量：増加分は高性能工業炉が導入される。

7. 2 高性能ボイラ

(1) 高性能ボイラの開発

我が国の産業用・業務用ボイラの設置台数は、労働省統計によるものだけでも約67,000台(平成10年末)⁶⁰⁾と多く、また、産業用ボイラのエネルギー消費量は、製造業分野の消費エネルギーの約21%(平成10年度実績)を占めている。また、ボイラ効率をみると、約86～90%(低発熱量基準、以下同じ)と既にかなり高いレベルとなっている⁶⁰⁾。このような状況下、一層の省エネルギー実現を目指した高性能ボイラの開発においては、従来の技術の延長線上にあるのではなく、より新しく革新的な省エネルギー技術に基づいて、エネルギー効率の高いボイラが開発が求められている。

高性能ボイラの開発における主要な要素技術として次がある。

① 「酸素燃焼(酸素富加燃焼)」

空気燃焼の従来形のボイラでは、空気中の体積比79%を占める窒素は、火炎温度を低下させ、ガスとして大気へ放出されるのみで、エネルギー損失の大きな原因となっている⁶¹⁾。このため、酸素燃焼として排ガス量を減らし、省エネルギー性を高める。

② 「凝縮形排ガス熱交換器」

排ガス温度を排ガス中の水蒸気の凝縮温度以下まで低下させ、その凝縮潜熱を含めて熱回収することで、排ガスによる熱損失を低減する⁶²⁾。

これらの要素技術をベースとして、ベンチスケール及び実規模パイロットプラントの試験を実施した。高性能ボイラ開発事業は成功裡に終了している。

次いで実施した実規模パイロットプラント試験の結果から、ボイラ熱勘定を表7.3に示す。また、燃焼・伝熱・環境特性関連の数値を表7.4に示す。両表より、従来の空気燃焼の場合とはかなり違った諸特性となっていることが分かる。すなわち、ボイ

ラ総合熱効率は、従来形空気燃焼ボイラの場合の90%レベルに比し、105.73%という非常に高い値となっている。この値は、高発熱量基準で見ると98.90%であり、実にその熱損失はわずか1.10%に過ぎず、ほとんど限界ともいえる効率である。とくに、排ガスの温度についてみると大気温度に近い13.7℃まで低下しており、排ガスの持っている凝縮潜熱を含め、大部分の熱を回収している。また、排ガス中のCO₂成分比率は、酸素燃焼ボイラの場合、空気燃焼と比較して約7倍と非常に大きくなっている⁶⁰⁾。現在、地球温暖化対策としてCO₂の分離・回収技術が国内外で研究開発されているが、高性能ボイラの場合、固定化方法によっては分離・回収装置を設置しなくてもよいので、この点有利性があるといえる。

(2) 酸素供給を含めたプラント総合熱効率

酸素燃焼により、ボイラ効率が向上し、また、ボイラの小型化にも寄与している。ただし、酸素供給装置まで含めたプラント総合熱効率が問題であり、従来形の酸素供給装置を使用すると電力消費が大きく、高性能ボイラのメリットが薄れる。そこで、オンサイト形PSA(Pressure Swing Adsorption)酸素供給装置を用い、高性能ボイラから発生する蒸気で酸素供給装置の真空ポンプを駆動させ、その背圧蒸気をプロセス加熱に使用する、いわゆる熱のカスケード利用により省エネルギー効果を高めるプラントを構築した。その結果、従来の空気燃焼ボイラのプラント総合熱効率85%程度に比し、ここでは93.74%のプラント総合熱効率が得られる結果となった⁶⁰⁾。この酸素供給装置を含むパイロットプラントの熱流れ線図を図7.3に示す。

(3) 普及状況

文献63)によれば、高性能ボイラの普及状況は、2002年の実績で大企業が189基、中小企業が441基となっている。今後の普及予測としては、2010年度で普及率約3割、約16,000基(中小企業分は11,000基で内数)を見込んでいる。

7.3 プラスチックリサイクル

(1) プラスチックリサイクルとは

我が国では「持続可能な発展」を目標に掲げ、循環型社会形成に向けて各界で取り組みが行われている。すなわち各産業とも、再生可能な原材料を優先的に使い、生産から流通までの工程を見直し、リサイクル(再利用)、リユース(再使用)、リデュース(発生抑制)という3つのRへの取り組みを進めている。その中で、プラスチックは限りある石油資源からつくられていることから、廃プラスチックについてはこれをリサイクルして再利用・有効活用していくこととしており、廃プラスチックに係るリサイクル技術が大きく進展している。

プラスチックリサイクルは、表7.5に示すように、大きく3つの手法に分けられる⁶⁴⁾。マテリアルリサイクルとは、廃プラスチックをプラスチックのまま原料にして新しい製品をつくる技術である。ケミカルリサイクルとは、廃プラスチックに熱や圧力を加えて元の石油や基礎化学原料に戻してから再生利用することをいう。また、サーマルリサイクルとは、廃プラスチックから熱エネルギーを回収・利用することをいう。

(2) 廃プラスチック排出量と有効利用量⁶⁵⁾

プラスチックの生産量自体は1997年をピークにここ数年やや減少気味であり、2002年には1,385万tが生産された。これに対して、国内消費量はほぼ横ばいで推移しており、2002年は1,057万tであった(図7.4の折れ線グラフ)。同じく廃プラスチックの総排出量もほぼ横ばいで推移しており、2002年は990万tであった(図7.4の棒グラフ)。

一方、有効利用された廃プラスチックは2002年に542万tで、利用率は55%であった(表7.6)。利用率はここ数年、着実に上昇している。これは、主に高炉向けの用途が増加したためであり、また、セメント産業での原材料としての有効利用や自治体等の廃棄物発電への利用も増えている。

(3)鉄鋼業の廃プラスチック利用

鉄鋼業の廃プラスチック利用には下記の2つの方法がある(2.4章参照)。

- ・高炉に吹き込み、還元剤として再利用(高炉還元剤)
- ・コークス炉で熱分解して、コークス、炭化水素油、コークス炉ガスとして再利用(コークス炉化学原料化)

これらはいずれもケミカルリサイクルであり、容器包装リサイクル法で再商品化(リサイクル手法)と認められた手法である。

日本鉄鋼連盟においては地球温暖化防止対策の自主行動計画として、2010年度を目標に100万t/年の廃プラスチック利用を掲げている。これに対して、2002年度における廃プラスチック利用実績は24万tであった⁶⁶⁾。廃プラスチック利用量の推移を表7.7に示す。

(4)セメント産業の廃プラスチック利用⁶⁷⁾

セメント産業では、高炉スラグ、石炭灰、廃タイヤなどの産業廃棄物を積極的に受け入れ、リサイクルしてきた。これに加え、最近では廃プラスチックの受け入れ・利用も増えてきている(表7.7)。廃プラスチックの発熱量は代表的なもので8,000kcal/kgあり、その使用量に見合う化石燃料の削減が可能である。

表 7.1 工業炉の種類、形式、規模別熱効率平均値

単位：%

種類	形式	規模			
		小	中	大	平均
金属加熱炉	連続	38	45	55	46
	バッチ	10	33	42	28
金属熱処理炉	連続	27	37	52	39
	バッチ	18	24	26	23
アルミ溶解炉	バッチ	27	34	40	34
平均	連続	33	41	54	43
	バッチ	18	30	36	28
連続とバッチの平均		26	35	43	36
全平均		35			

出所：参考文献 55)

表 7.2 工業炉の使用エネルギー量と高性能工業炉適用による省エネルギー量

施設名	施設適用割合 (%)	適用施設数 (基)	エネルギー消費量 (原油換算 k ℓ /年)	熱効率向上割合 (%)	省エネルギー率 (%)	省エネルギー量 (k ℓ /年)
1. 溶解炉	100%	3,717	4.13 $\times 10^6$	50% (平均) (35 \rightarrow 53%)	34%	15.24 $\times 10^6$
2. 加熱炉		4,157	3.58 $\times 10^6$			
3. 熱処理炉		11,614	7.03 $\times 10^6$			
4. 焼成炉		6512-81(セメント) = 6,431	17.01-9.47(セメント) = 7.54 $\times 10^6$			
5. 乾燥炉		4,591	4.20 $\times 10^6$			
6. 化学工業用炉		2527-832(石油) = 1,695	26.14-7.74(石油) = 18.40 $\times 10^6$			
小計		32,351	44.88 $\times 10^6$			15.24 $\times 10^6$
7. 石油加熱炉	50%	832/2=416	7.74/2=3.87 $\times 10^6$	15% (78 \rightarrow 90%)	13.3%	0.52 $\times 10^6$
8. 産業用ボイラ	100%	32,350	38.02 $\times 10^6$	6% (85 \rightarrow 90%)	5.6%	2.11 $\times 10^6$
小計		32,776	41.89 $\times 10^6$			2.63 $\times 10^6$
合計		65,117	86.77 $\times 10^6$			17.87 $\times 10^6$

熱効率 = (加熱処理材料の顕熱 / 燃料の燃焼熱) $\times 100\%$ 省エネルギー率 = (1 - 改善前の熱効率 / 改善後の熱効率) $\times 100\%$ 省エネルギー量 = エネルギー消費量 \times 省エネルギー率

出所：参考文献 55)

表 7.3 ボイラ熱勘定

	kJ/h (kcal/h)	H _l (%)	H _n (%)
燃料の発生熱量	43260730 (10334599)	99.92	99.92
燃料の顕熱	4860 (1160)	0.01	0.01
酸素の顕熱	30060 (7180)	0.07	0.07
入熱合計	43295650 (10342840)	100.00	100.00
有効熱	45775170 (10935170)	105.73	98.90
(ボイラ本体)	40993910 (9792980)	(94.68)	(88.57)
(乾式エコノマイザ)	1469720 (351100)	(3.40)	(3.18)
(凝縮型エコノマイザ)	3311540 (791090)	(7.65)	(7.15)
排ガスの保有熱損失	140650 (33600)	0.32	0.31
放散・その他熱損失	367070 (87690)	0.85	0.79
出熱合計	46282890 (11056460)	106.90	100.00
ボイラ総合熱効率		105.73	98.90

出所：参考文献 62)

表 7.4 燃焼・伝熱・環境特性関連の数値

		酸素燃焼	空気燃焼
断熱火炎温度 (°C)		2820	1850
火炎の放射率		0.75	0.25
火炉吸収熱量比 (%)		82.42	61.1
バンク水管吸収熱量比 (%)		12.26	23.6
排ガス温度 (°C)		13.7	200
排 ガ ス	乾き排ガス量 (m _n ³ /kg・燃料)	1.82	12.71
	NO _x 排出量 (mg/kg・燃料)	309	2557
	CO ₂ 成分比率	86.11	11.45

出所：参考文献 62)

表 7.5 プラスチックリサイクルの分類

分 類	リサイクルの手法
マテリアルリサイクル (材料リサイクル)	再生利用 ・ プラ原料化 ・ プラ製品化
ケミカルリサイクル	原料・モノマー化
	高炉還元剤
	コークス炉化学原料化
サーマルリサイクル (エネルギー回収)	ガス化 化学原料化
	油化 燃 料
	セメントキルン ごみ発電 R D F

出所：参考文献 64)

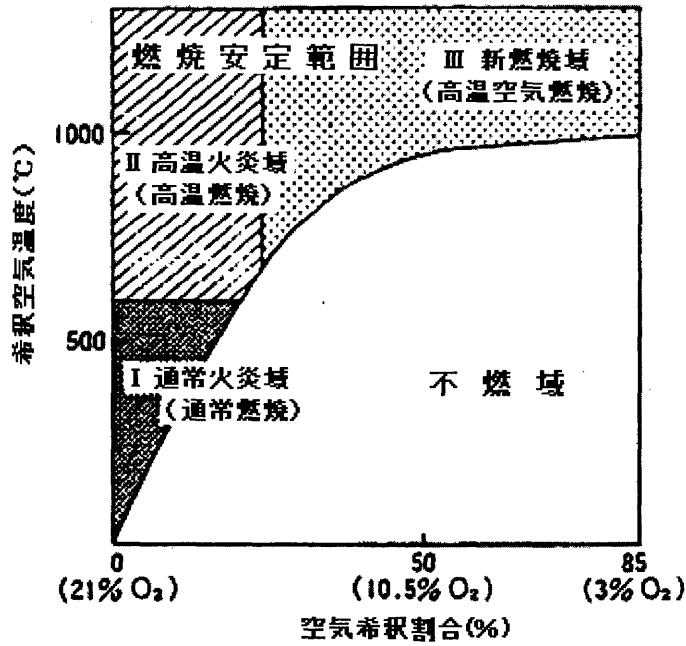
表 7.6 廃プラスチックの有効利用量と有効利用率の推移

	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
有効利用量(万 t)	144	221	358	399	435	452	494	535	542
有効利用率 (%)	26	25	39	42	44	46	50	53	55

表 7.7 鉄鋼/セメントでの廃プラスチック利用量の推移

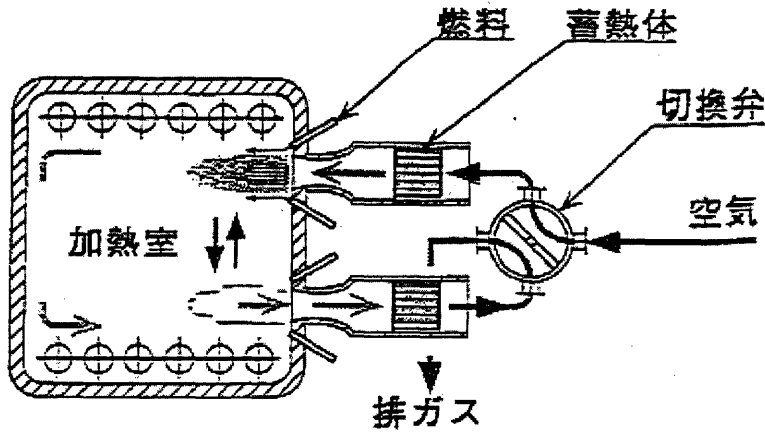
単位：万 t

	FY1997	FY1998	FY1999	FY2000	FY2001	FY2002	FY2003
鉄 鋼 業	3	3	4	8	19	24	29
セメント産業	2.1	2.9	5.8	10.2	17.1	21.1	25.5



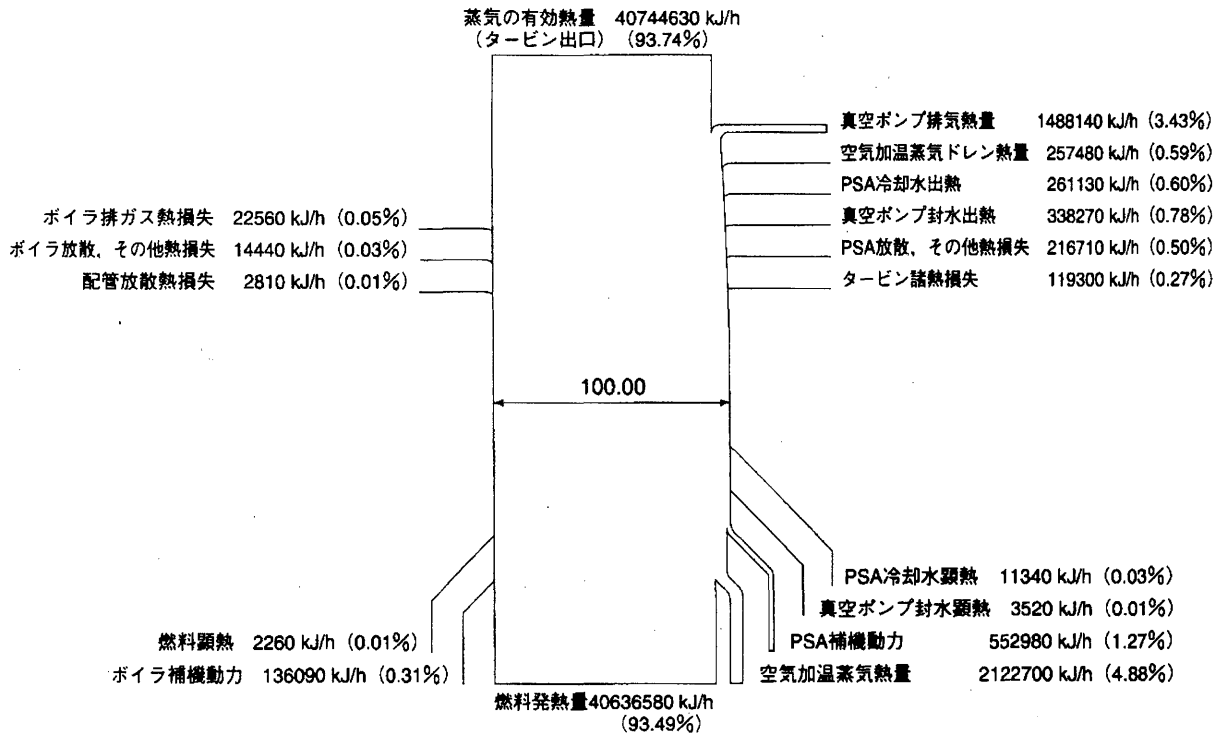
出所：参考文献 55)

図 7.1 空気高温化と希釈割合増加の燃焼範囲への影響



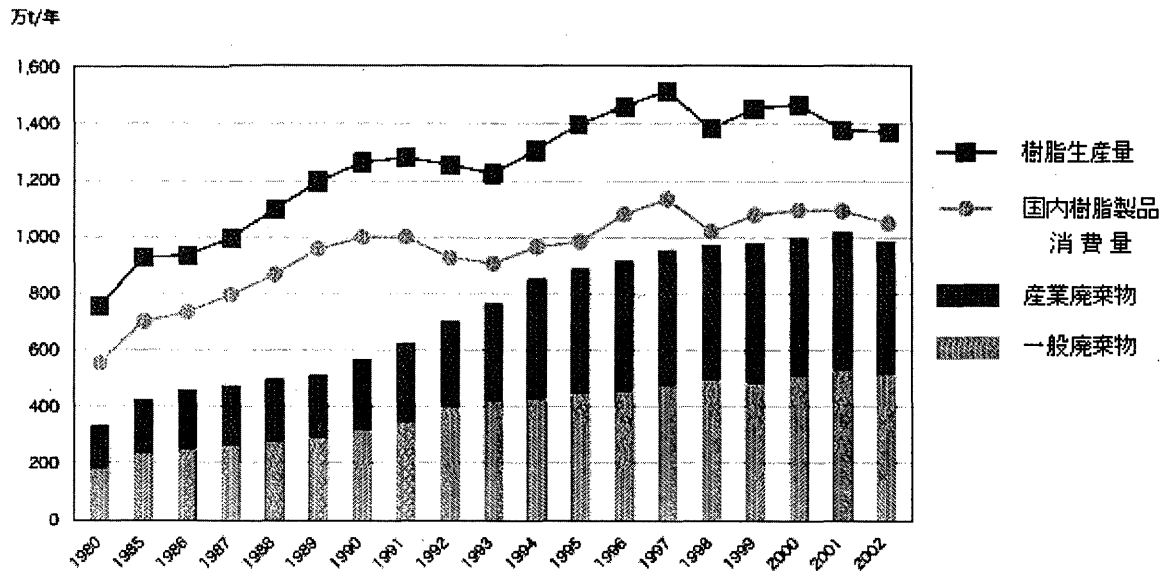
出所：参考文献 56)

図 7.2 リジェネレイティブ燃焼



出所：参考文献 62)

図 7.3 パイロットプラント熱流れ線図



出所：参考文献 65)

図 7.4 プラスチック生産量・国内消費量・廃プラスチック排出量の推移

8. おわりに

エネルギー多消費産業である鉄鋼、化学、紙・パルプ、セメント、ガラスにおけるエネルギー消費の特徴、エネルギー原単位の推移、新しい省エネルギー技術、システムの開発状況、更に産業共通の省エネルギー技術開発について調査した。一般に素材産業は成熟産業であって最近技術の進歩はあまりないようにも受け止められ勝ちであるが、省エネルギーの観点からみればやはり強い技術開発インセンティブがあり、例えば鉄鋼の DIOS 法、化学工業のエチレンプラント廻りの省エネルギー技術、紙・パルプの直接苛性化技術、セメントの流動床焼成システム、ガラスの減圧脱泡技術や酸素燃焼法など、それぞれの産業分野で数多くの省エネルギー技術、システムが開発されている。これらに加え最近、廃プラスチックなどの資源リサイクルが鉄鋼、セメントで鋭意行われており、我が国全体として石油資源の節約・省エネルギーに寄与している。

総合資源エネルギー調査会 省エネルギー部会 中間とりまとめ「今後の省エネルギー対策のあり方について」(2004年7月)によれば、今後の対策の一つとして、“コンビナート等の産業集積地において工場排熱を複数主体間で融通して省エネルギーとする気運が高まっており今後こうした取組を促進していく”とあり、石油化学のエチレンプラントでのガスタービン設置の場合でも同様に考えることができる。今後は企業間、産業間でエネルギーを連携することにより一層の省エネルギーに繋げられる余地があるものと考えられる。

なお、エネルギーに関する問題は国民すべてに係わる問題であって、国民一人ひとりに絶えずエネルギーに関する正確な情報提供が求められているところである。本調査報告もエネルギーに関する情報提供の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟 ホームページ (環境エネルギー対策)
<http://www.jisf.or.jp/kankyo/index.htm>
- 2) 資源エネルギー庁 ホームページ (エネルギー需給関連)
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/index4.htm>
- 3) 日本鉄鋼協会：第4版 鉄鋼便覧
- 4) 日本鉄鋼連盟：鉄鋼統計要覧
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：鉄鋼産業の技術開発動向等に関する調査研究 (平成11年3月)
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：発展途上国(インド)における石油化学工業・鉄鋼業のエネルギー消費効率化に関する調査 (平成8年3月)
- 7) 日本鉄鋼連盟：一貫製鉄所の省エネルギー対策とその成果 (平成5年4月)
- 8) 北川融：DIOS 溶融還元製鉄法の開発, 日本エネルギー学会誌 第75巻 第10号 (1996)
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発 エネルギー高度利用と鉄資源リサイクル促進のためのアイアンカーバイド利用技術開発 (平成14年3月)
- 10) J F E 21 世紀財団 ホームページ (鉄鋼プロセス工学入門)
http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_2/2g_1.html
- 11) 日本鉄鋼連盟 ホームページ (廃プラ利用の現状と今後の課題)
<http://www.jisf.or.jp/kankyo/index.htm>
- 12) 日本鋼管京浜製鉄所 製鉄部・製鉄研究部・総合リサイクル推進部 合同グループ：高炉への使用済みプラスチック利用技術の開発と適用, 省エネルギー Vol.53 No.2 (2001)
- 13) 浅沼稔, 有山達郎：高炉を利用した使用済みプラスチックの高効率リサイクル技術, 日本エネルギー学会誌 第83巻 第4号 (2004)
- 14) 近藤博俊, 鋏取英宏, 祖山薫：コークス炉化学原料化法によるプラスチックリサイクル, 日本エネルギー学会誌 第81巻 第2号 (2002)

- 15) 石油化学工業協会：石油化学工業の現状 2003 年
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：わが国における産業構造の変化と産業部門エネルギー消費構造（1984 年 5 月）
- 17) 石油化学工業協会：石油化学工業協会の省エネルギーについて [内部資料]（昭和 60 年 12 月）
- 18) 岩永清志：石油化学，省エネルギー Vol. 50 No. 1（1998）
- 19) 経済産業省：平成 13 年 石油等消費構造統計調査
- 20) 経済産業省：石油等消費動態統計年報
- 21) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：地球温暖化対策技術開発に関する調査／我が国基幹産業における実効的な二酸化炭素等削減可能性に関する調査研究／石油化学産業（平成 15 年 3 月）
- 22) 森田裕二：石油化学工業の現状とエネルギー消費の動向，エネルギー経済 第 11 巻 第 7 号（1985）
- 23) 経済産業省：生産動態統計 化学工業統計年報
- 24) 産業技術総合研究所 ホームページ（知的財産権公開システム）
<http://www.aist.go.jp/aist-idea/>
- 25) 高橋確：紙パルプ産業のエネルギーフロー，エネルギー・資源 Vol. 17 No. 4（1996）
- 26) 堀定男：紙・パルプ，省エネルギー Vol. 50 No. 1（1998）
- 27) 日本製紙連合会 ホームページ（エコプラザ）
http://www.jpa.gr.jp/eco/eco_f.html
- 28) 日本紙パルプ商事 ホームページ（紙の知識とデータ集）
http://www.kamipa.co.jp/data/kokunai_01.html
- 29) 日本製紙連合会：環境に関する自主行動計画（平成 9 年 1 月、平成 13 年 1 月一部改定）
- 30) 三井トラスト・ホールディングス：紙・パルプ業界の現状と展望，調査報告 2004 年 4 月
- 31) 経済産業省：生産動態統計 紙・パルプ統計年報

- 32) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：地球環境対策技術の体系的整理(Ⅱ) (平成8年3月)
- 33) 佐川直人：主要産業における省エネルギー・燃料転換の動向－Ⅱ 紙・パルプ産業，エネルギー経済 第9巻 第5号 (1983)
- 34) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：国内の省エネルギー技術に関する調査 成果報告書 (平成13年3月)
- 35) 福島義和：製紙業における薬品リサイクルおよびバイオエネルギー回収，日本エネルギー学会誌 第81巻 第2号 (2002)
- 36) 日本製紙連合会：第6回 (2003年)「環境に関する自主行動計画(温暖化)」フォローアップ調査結果 (平成15年10月)
- 37) 住友大阪セメント：環境報告書 2000
- 38) セメント協会：セメント産業における地球温暖化対策の取り組み
http://www.jcassoc.or.jp/Jca/Image/Uj_03_011.pdf
- 39) セメント協会：セメント需給実績 2004年2月度
http://www.jcassoc.or.jp/Jca/Image/Uj_a_0402.pdf
- 40) 経済産業省：生産動態統計 窯業・建材統計年報
- 41) 経済産業省 産業構造審議会・総合資源エネルギー調査会 自主行動計画フォローアップ合同小委員会：第3回製紙・板硝子・セメント等WG資料 セメント産業における地球温暖化対策の取り組み (平成16年2月)
- 42) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：案件形成のための技術普及可能性検証に関する調査 成果報告書 (平成15年3月)
- 43) 山根正之他：ニューガラスーその機能と応用ー，日本規格協会 (1989)
- 44) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：化石燃料多消費型産業分野における CO₂ 対策技術評価法の調査(Ⅱ) (平成5年3月)
- 45) 宮本武司：「板ガラスのリサイクル」 第5回「建材情報交流会」
<http://www.kenzai.or.jp/osirase/file2/05.htm>
- 46) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成11年度長期エネルギー技術戦略等に関する調査 (平成12年3月)

- 47) 日本硝子製品工業会 ホームページ (データ)
<http://www.glassman.or.jp/data/index.html>
- 48) 板硝子協会 ホームページ (調査研究)
http://www.itakyo.or.jp/kenkyu/fr_kenkyu.html
- 49) 旭硝子：環境報告書 2001
- 50) 旭硝子：環境報告書 2002
- 51) ガラス産業連合会 ホームページ (ガラスは地球に優しい)
<http://www.gic.jp/contents/P12.html>
- 52) 山根正之他：ガラス工学ハンドブック，朝倉書店 (1999)
- 53) 日本板硝子テクノロジーサーチ ホームページ (ガラスをめぐる冒険)
<http://www.nsg.co.jp/ntr/GLASS/glass14.htm>
- 54) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高性能工業炉導入フィールドテスト事業における事業促進のための実態調査 (平成 11 年 3 月)
- 55) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 12 年度 分野別戦略調査(省エネルギーグループ：高性能工業炉の開発とその導入普及状況に関する調査) (平成 13 年 3 月)
- 56) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高性能工業炉の開発に関する研究成果報告書 (高性能工業炉等に関する研究開発) (平成 12 年 3 月)
- 57) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 12 年度 高性能工業炉導入フィールド事業 収集データ解析評価 (平成 13 年 3 月)
- 58) 森田光宣，須藤淳：高性能工業炉技術とリジェネバーナの最新動向，エレクトロヒート No. 130 (2003)
- 59) 環境省地球環境局：平成 12 年度温室効果ガス削減技術シナリオ策定調査検討会報告書 (平成 13 年 3 月)
- 60) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高性能ボイラーの開発に関する研究成果報告書概要 (平成 12 年 3 月)
- 61) 日本産業機械工業会 ホームページ (高性能ボイラー開発推進センター)
<http://www.jsim.or.jp/honbu/senta/hpb.htm>

- 62) 越智淑之：高性能ボイラの開発，省エネルギー Vol. 53 No. 1 (2001)
- 63) 総合資源エネルギー調査会 需給部会 (第8回)：配布資料 資料1-④ 2010年のエネルギー需給見通し(修正暫定版) (平成16年6月)
- 64) プラスチック処理促進協会 ホームページ (情報ファイル)
http://www.pwmi.or.jp/public/plastics_recycle.html
- 65) プラスチック処理促進協会：プラスチックリサイクルの基礎知識 2004
- 66) 日本鉄鋼連盟 ホームページ (自主行動計画の取組み状況)
<http://www.jisf.or.jp/kankyo/index.htm>
- 67) セメント協会 ホームページ (廃棄物・副産物の活用)
http://www.jcassoc.or.jp/Jca/Image/Uj_03_020.pdf

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光量	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガール	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁰	1

1 cal= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15°C)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

我が国のエネルギー消費構造動向調査―産業部門編―



古紙配合率100%再生紙を使用しています