

セメントにおけるエネルギーフロー

Energy Flow in Cement Sector

増永元彦*

Motohiko Masunaga

1. はじめに

セメントは原料塊を乾燥粉碎し、これを1,500℃前後の高温で焼成し、焼結塊（セメントクリンカー）を石膏とともに再度粉碎して製造される。二度の粉碎工程が入ること、焼成工程から排出される大量の燃焼排ガスを原料乾燥に有効利用するために、大容量のファンが必要なことから、電力の使用量が多く（94年度実績95億kWh）、また高熱を必要とする焼成工程では燃料の使用量も非常に多い（94年度実績石炭換算1,180万t）。セメント産業が典型的なエネルギー多消費産業と言われる由縁である。当然のことながら、製造コストに占めるエネルギー費の割合が高いためエネルギー使用量の節減は工場技術者に課せられた古くからの命題である。

本稿ではセメント製造設備における省エネルギーへの取り組みの歴史について述べるとともに、最近の省エネルギーの取り組みについても触れたい。

2. 生産、販売の概況

わが国のセメントの国内需要は（表1）、79年の第二次オイルショックを契機とした、公共投資の抑制や民需の低迷により、この年の8,300万tをピークに年々減少を続け、以後4年連続のマイナス成長を余儀なくされた。その後90年には、バブル期の需要増により過去最高の8,600万tを記録したものの、バブル崩壊後は再び減少を続け、94年に漸くプラスに転じた。今後もバブル期のような急速な需要の増加は期待できず、当面は8,000万t前後で推移するというのが大方の見方であろう。

この間、生産設備については、産構法（84～87年）、円滑化法（87～91年）の適用のもとに、合計4,100万t

表1 生産、輸出、国内需要の推移

年度	生産量 千 t	輸出品 千 t	国内需要 千 t
1970	57,582	2,086	56,077
1975	66,005	4,422	63,649
1980	85,883	8,273	80,296
81	83,605	10,044	76,892
82	80,056	11,958	72,386
83	79,402	13,723	69,740
84	77,403	10,920	70,241
85	72,213	8,320	67,990
86	70,416	4,859	69,531
87	74,244	4,346	73,528
88	77,262	5,133	77,509
89	80,077	6,964	78,761
1990	86,849	6,243	86,286
91	88,813	8,090	85,287
92	96,212	11,843	82,142
93	94,886	13,697	78,616
94	97,641	14,995	79,743

（出典）セメント協会（注）国内需要には輸入品を含む。

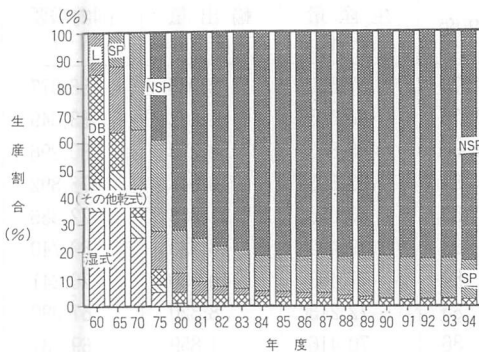
にも及ぶ、効率の悪い旧式タイプを中心とした過剰設備の処理を実行したため、生産設備はスリム化され、現在では各社とも高効率キルンでの生産体制が整っている。一方、生産量はバブル崩壊による内需の後退にもかかわらず、台湾、シンガポールなどの東アジア地域での需要逼迫による輸出需要に支えられて、最高水準で推移しており、94年度は9,760万tと史上最高を記録している。今後も東アジアの需要は拡大が続くことが確実視されており、海外品に対しても十分なコスト競争力を有する、臨海大規模工場を中心とした輸出が継続されものと思われる。

3. 省エネルギーの推移と最近の動向

セメント製造に必要なエネルギーの75%は燃料、残りの25%が電力であり、燃料の比重が圧倒的に

*三菱マテリアル(株)セメント・建材事業本部生産技術部
〒100 東京都千代田区丸の内1丁目5-1新丸ビル
(セメント協会 生産・環境幹事会委員長代行)

多い。したがって、燃料コスト低減に向けての対応は電力に比べ優先して行われており、セメント製造技術近代化の歴史は、燃料コスト低減の歴史といっても過言ではない。すなわち、セメントの需要増大に呼応した設備増設の過程でセメントクリンカー焼成設備は、順次省エネルギー効果の高い焼成方式に改められて行き(図-1)、80年には約90%が、更に本年度中には100%がサスペンションプレヒーター(SP)方式、またはニューサスペンションプレヒーター(NSP)方式と呼ばれる熱効率の最も高い設備になる予定である。



(出典：セメント協会)

図-1 キルン焼成方式別生産割合推移

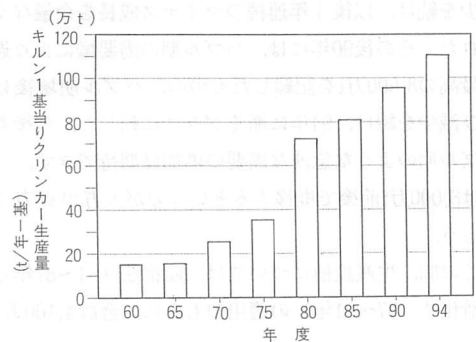
また、第2次オイルショックによる重油価格高騰を契機に、79年度から82年度にかけて石炭への転換を迅速に完了させるとともに、石油コークスや廃油、廃タイヤ等の産廃燃料の使用を始めるなど燃料の多様化も進めている。94年度における焼成用燃料(発熱量基準)の構成は、石炭86.2%、石油コークス10.2%、重油1.1%、その他産廃燃料2.5%となっているが、産業廃棄物・副産物有効利用の観点から今後更に多様化を図って行く必要がある。一方、電力消費を原単位でみた場合、焼成工程におけるSP方式の出現と比類できるような画期的な改善はみられていない。これはセメント製造工程で電力消費の最も大きな破碎、粉碎、分級といった操作が、原理的には古来からの方法と大きな違いがないことに起因すると思われる。とは言え80年代に入り、後述するような小さな改善の積み重ねにより、着実に成果を挙げてきた。

また、94年度では総電力消費量の約45%を工場の自家発電で補っているが、その内、焼成工程の廃熱を利用した廃熱発電の総電力消費量に占める割合は約15%に達しており、総エネルギー量の節減に大きく貢献している。

3.1 燃料原単位

セメント産業は典型的なエネルギー多消費産業であるが、一方典型的な装置型産業でもある。したがって設備を大型にし、生産性を向上させれば、それだけ固定費の屯当り費用が軽減されるため、設備の大型化にも常に力を注いできた(図-2)。セメント製造においては、キルンの数ヶ月にわたる長期間連続運転が必須条件であり、運転期間は主にキルン内張り耐火煉瓦の耐用時間で決まる。従って、ある程度の連続運転を維持するためには、キルン焼成帯断面積あたりの熱負荷(kcal/m²・h)に上限値を設定し、耐火煉瓦の損耗を防止する必要がある。このことは言換えれば、燃料原単位(kcal/t)を少なくすればするほど、同一サイズのキルンでの生産量が増大することを意味しており、設備の大型化による生産性向上も省エネルギーと深く関わっている。その意味で、1963年に操業を開始したSP方式は画期的な新方式であった。それまでの方式に比べ熱効率、生産性の点で格段に優れていることから(表2)、その後の焼成方式の主流は遂次この方式に移行していき、それに伴って燃料原単位も急速に低下していった(図-3)。

SP方式の出現後、能力増強と生産性の向上を目的とした設備の大型化が盛んに行われ、直径6mを越えるキルンが設置されるに至った。しかしながらキルンの大型化に伴い、上述の焼成帯熱負荷の上昇が原理的に避けられないことに加えて、耐火煉瓦に加わる機械的応力の影響も大きくなる等の原因から、大型キルンほど焼成帯耐火煉瓦の損耗がはなはだしく、1回あたりの運転期間が短くなる傾向が現れはじめた。キルンが休転すると、耐火物その他の補修に多大の費用を要し、またその間の減産損失、熱損失など経済的な負担が大きく、これはキルンが大型化するほど深刻であっ

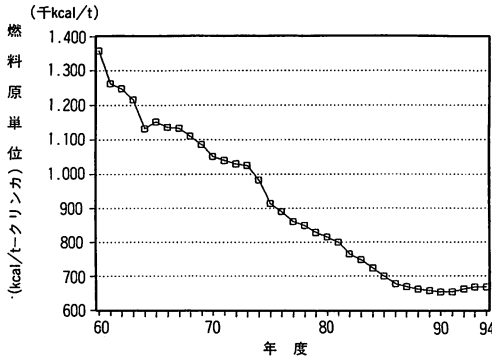


(出典：セメント協会)

図-2 キルン1基当りのクリンカー生産量推移

表2 代表的焼成方式の熱効率と設備生産性 (出典)セメント協会, 1980年当時の年間平均値

方式の名称	キルン単位容積当り生産量kg/h-m ³	熱量原単位kcal/kg-クリンカ
S P	68.1	814
NSP	100.8	797
D B (乾式ボイラー付)	31.5	1,354
L (レポール)	57.6	905
W (湿式ロング)	49.1	1,336



(出典:セメント協会)

図-3 燃料原単位推移 (高位発熱量換算)

た。NSP方式はこの問題を解決するため、すなわちキルンの径を大きくすることなく、能力の大幅な増大と長期の連続運転を可能にすべく開発された方式である。セメントクリンカーを生成させるに必要な、理論所要熱量のかなりの部分は、原料中に約75%含まれる石灰石の熱分解 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) に費やされる。SP方式では予熱器 (サスペンションプレヒーター) でキルン排ガスと原料とが効率の良い熱交換を行うものの、この分解反応は40%程度しか進まず、残りはキルン内で行われていた。NSP方式ではSP方式の予熱

器に、仮焼炉と呼ばれる燃焼炉を組み込み、ここに分解すべき原料を取り込み、キルン側供給燃料の1~1.5倍の燃料を燃焼させるため、原料の分解率を90%以上に高めてキルンに投入できる (図-4)。この方式では、それまでのキルンのみでの燃焼に比べ、キルン熱負荷を上昇させることなく2~2.5倍の燃料を燃焼できるため、大幅な生産量の増大が可能になった。この方式の出現により、キルン1基あたりの最大可能生産量がそれまでの3,000~4,000トン/日から7,000~10,000トン/日へと飛躍的に増大し、その後の低効率キルンの廃棄に多大な貢献をした。

余談ではあるが、それまでの焼成方式のほとんどは、ドイツを主とした西欧で開発され、日本に導入されたものであるが、NSP方式は世界に先駆けて日本で開発普及されたものであり、現在では大型設備には欠かせないものとして世界各地で採用されている。特に韓国をはじめとする、アジア各国で本方式が採用されており、それらの国々での省エネルギーにも大きく貢献している。

SP, NSP方式への転換がほぼ完了した後は、大幅な原単位の低減は期待できないものの、サスペンションプレヒーターの熱交換段数の増加 (4段→5段)、

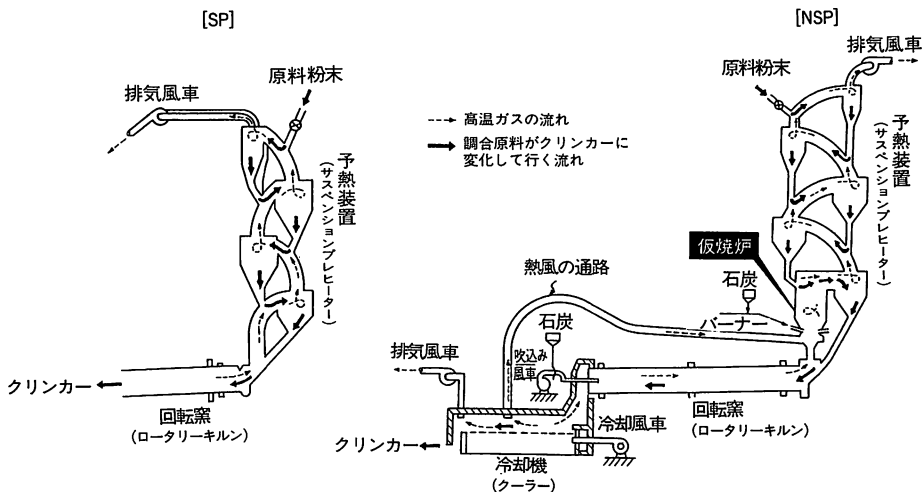


図-4 SP方式とNSP方式の比較

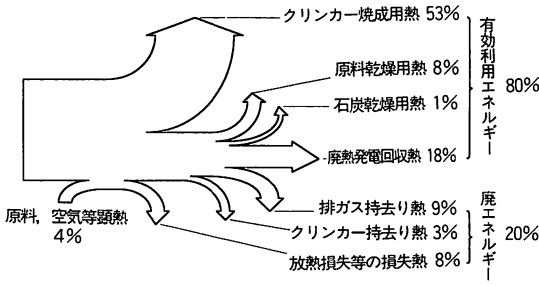


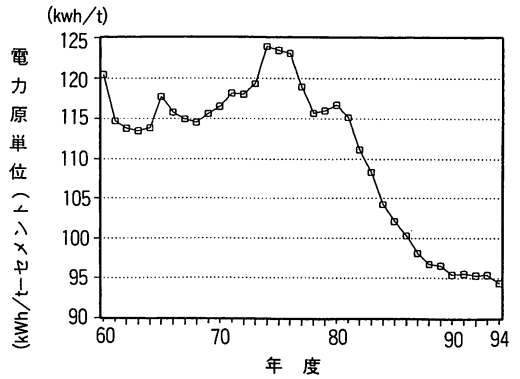
図-5 焼成工程の熱収支図 (例)

助燃炉改良, クリンカークーラーから回収されるキルンバーナー燃焼用二次空気の回収効率改善, キルン内張断熱煉瓦の採用等により熱効率は更に改善されてきた。また廃熱発電設備を各所で導入し, 廃熱の有効利用も達成した。焼成工程の熱収支を試算すると全出熱に占める廃エネルギーの割合は廃熱発電のあるケースで20%まで低減されている (図-5)。従来から焼成工程の廃熱は原料, 石炭, スラッグの乾燥に有効利用してきたが, 最近では多くの工場で予熱器の熱交換段数を増加したり, 廃熱発電を新設したため原料工程へ送られる排ガス顕熱が減少してきた。このため廃熱回収の進んだこれらの工場では, 原料工程出口の排ガス温度が, 80℃~100℃まで低下しており, 電気集塵装置等の集塵機の正常な運転を考慮すると, これ以上の熱回収は望めない状況にある。ここ数年燃料原単位の低下が見られない一因は, これらの工場での省エネルギー対策がほぼ限界に近づいていることにある。

3.2 電力

セメント製造に必要とされるエネルギーに占める電力の割合は約25%であり, 燃料に比べると少ないこともあり, 80年までは目立った進歩が見られなかった。80年代に入り, それまでなされてきた研究開発の成果が実用化されてきたことにより, 徐々に改善されてきた。具体的に主な改善事例を工程別に示すと, 以下のとおりとなる。

- (a)原料粉砕工程
 - ・ 堅型ローラーミルの開発と大型化
- (b)クリンカー焼成工程
 - ・ サスペンションプレヒーターの低圧損化
- (c)クリンカー粉砕工程
 - ・ 予備粉砕機と従来型チューブミルの組み合わせによる能力増強と粉砕効率の改善
 - ・ 各種高効率分級機の開発
 - ・ 高炉セメント用スラッグ粉砕機としての堅型ローラーミルの開発



(出典:セメント協会)
図-6 電力原単位推移

その他, 各所に多数設備されているファンやモーターの効率改善等, 細部にわたる小さな改善の積み重ねにより, 80年から90年にかけては燃料と同程度の大きな改善成果を挙げている (図-6)。その後低減傾向が鈍っているのは, 不況による投資の手控えだと考えられる。92年度のセメント協会の調査によると, 電力原単位低減に特に効果の大きい原料粉砕工程への堅型ローラーミルの普及割合は34%, クリンカー粉砕工程への予備粉砕機の普及割合は9%, 高効率分級機の普及割合は45%であり, 大きな投資を必要とするが, これらの設備改善による原単位の低減余地は, 今後に残されているといえる。

4. おわりに

セメント業界では激しいコスト競争の結果ではあるが, 設備の近代化への努力を積み重ね, 生産, 品質, 省エネルギーに関する技術や労働生産性など, あらゆる分野で世界のトップを占めている。特に, 省エネルギー対策は二度にわたるオイルショックを契機として細部にわたるまで実施された結果, 最近では有効な対策もほぼ限界に近づいた感さえある。セメントは装置産業であるため, エネルギーの利用効率は使用する装置の性能に拠るところが大きい。したがって将来へ向けて, 流動床を焼成炉としたキルンレスの省エネ型セメントクリンカー焼成システムを開発中ではあるが, これの実用化には未だ多くの時間を要し, 他に大幅に効率を改善できるような, 新規プロセスの実用化も今のところ期待できない。こうしたことから, 当面の省エネルギー対策は既存の省エネルギー技術の普及を促進して行くことが主になると考えられる。