

■ シリーズ特集 ■ 各部門における省エネルギー対策(5)

セメント工業における省エネルギー

菊 地 央*

Hiroshi Kikuchi

1. はじめに

基礎資材として欠かすことの出来ないセメントは、鉄と同じ様にエネルギー多消費産業と言われている。そのためセメント産業では、常にエネルギーコストの低減に力を入れて合理化が進められてきた。我が国のセメント生産量は現在年間約9千万tに達し、米国を抜いてソ連に次ぐ世界第2位となっており、四半世紀前の昭和30年頃と比較すると約8倍にも伸びている。しかし燃料消費量を見てみるとその間の合理化努力により、表1の様にセメントt当りの原単位としては約½に迄向上し進歩しているのである。

表1 最近の省エネルギー効果(昭和30年以降)

年度(昭和)	30	35	40	45	50	54
セメントt当り消費燃料 原単位(重油換算) (対30年度 比率%)	100	83	68	61	52	46

ところでセメントはどの様にして製造されるかを、以下簡単に述べてみる。

製造方式は乾式法と湿式法に大別されるが、工程で見ると原料工程・焼成工程・仕上げ工程に別けられ、乾式法と湿式法の違いは主に原料工程にある。乾式法は、石灰石・粘土・珪石・鉄原料等の原料を乾燥した後、適当な割合に調合し原料ミルで微粉碎して、エアブレンディングサイロ等によって均一に混合したものを次の焼成工程へ送る。湿式法は、前記の原料を乾燥しないで適当な割合に調合し、原料ミルで水を加えてスラリーの状態に微粉碎し、これをスラリータンク・ベーズン等で均一にまぜて次の焼成工程へ送る。焼成工程に送られてきた原料の粉末又は原料スラリーは、回転

窯の上端に入れられ、下端から重油や微粉炭などの燃料をバーナーで吹き込んで焼き固められる。回転窯は鋼鉄製の大円筒で、これが3~6%の傾斜で横たえてあり、ゆるい速度で回転させているので、原料は窯の回転と共に次第に移動し、焼成帯で1450°C前後に加熱されて半溶融状態となり、石灰と粘土類が固体反応を起して、 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, という様な人工鉱物を作る。(これがセメントの素である)この様に焼き固められたものをクリンカーと言うが、回転窯を出た後すぐに冷却機に入り、空気によって急冷されて次の仕上げ工程へ送られる。仕上げ工程に送られてきたクリンカーは、石膏を3~4%加えて仕上ミルに入れられ、微粉碎されてセメントの粉末となる。図-1にこの製造工程の一例を示してみた。

この様にセメント工業とは、粉碎と焼成の工業と言えるわけで、これにエネルギーの大部分が消費されるのである。この製造工程別のエネルギー消費の一例を表2に示すが、その内焼成工程で約79%、原料及び仕上の粉碎工程で約20%となっているのがわかる。

こゝで工程を追って、省エネルギーに如何に取組んできたかを述べてみたい。

2. 原料工程に於ける取組み

セメントの製造方式に乾式法と湿式法があると前述したが、昭和30年代には回転窯の大型化と原料仕調の容易さから湿式法を採用する向きが増加していった。しかし製造様式の進歩と燃料費の極端な高騰も加って、現在では湿式法は殆んど姿を消してしまった。そこでこの原料工程では乾式法について述べることにする。

乾式法の場合は原料を乾燥して粉碎するので、先づ乾燥に使用する燃料の節減を考える必要がある。そこで焼成工程で排出される熱ガスを利用する様になった。

* 小野田セメント(株)中央研究所所長

〒135 東京都江東区豊州1-1-7

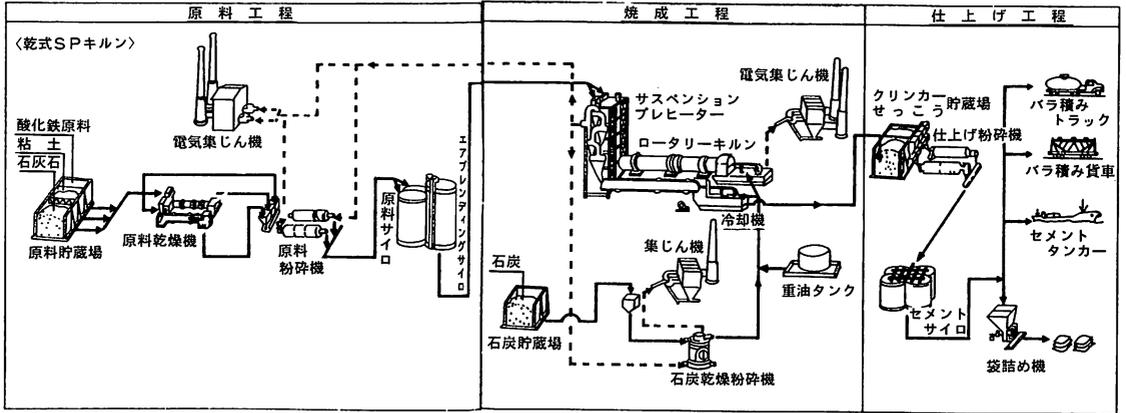


図-1 セメント製造工程図 (一例)

表 2 工程別生産エネルギー消費実績(年間)の一例

工程別	種別 単位	重油		石炭		電力		計		セメントt当り 所要cal 10 ³ × kcal
		kl	10 ⁹ × kcal	t	10 ⁹ × kcal	10 ⁹ × kWh	10 ⁹ × kcal	10 ⁹ × kcal	%	
原料工程 (含乾燥)		114,384	1,121	—	—	2,821	6,911	8,032	10.1	125
焼成工程		5,757,556	56,441	264,768	1,670	1,953	4,785	62,896	78.8	978
仕上げ工程 (含混合材乾燥)		12,591	123	9,955	63	3,097	7,588	7,774	9.7	121
その他		56,334	552	121	1	221	541	1,094	1.4	17
計		5,940,865	58,237	274,844	1,734	8,092	19,825	79,796	100	1,241

注) 1) 本表にはセメント協会会員外を含まず発電用重油を除く
 2) 本表対象のセメント生産高は64,316千t
 3) kcal換算は重油: 9,803 kcal/l, 石炭: 6,308 kcal/kg, 電力: 2,450 kcal/kWh

排熱利用の場合は工場全体の機械類の配置に大きく影響され、工場レイアウトが大切になってくる。排ガスを送るのにあまり長い配管をすれば、ガス温度の低下を来して意味が無くなってしまふからである。現在では殆んど乾燥機単独で燃料を使用することは無く排熱が有効に利用されているが、時々熱量不足で補助的に燃料を使用している場合もある。この乾燥された原料はボールミルで微粉碎されるが、原料のサイズによって粉碎の効率が変わってくる。そこでインパクトクラッシャーやハンマクラッシャーを使用してミルに送入する原料サイズを10m/m程度に迄予備粉碎し、ミルでは大径のボールを少くし小径のボールを多くして粉碎する様にして、使用動力が1~2割程度低減出来る様になった。一方最近ではボールミルの代りに大型の堅型ローラーミルを使用して、乾燥・粉碎を同時にする方式も開発されてきた。この場合350℃程度の排ガスを使用すれば、原料の付着水分は8~10%あっても乾燥・粉碎出来るものであり、又粉碎動力原単位はボールミルに較べて2~3割程度低減出来る様である。

又石炭ボタを粘土原料の一部代替品として原料中に

混ぜ、それに含まれる熱量を低質エネルギーとして利用し、焼成用燃料の節減に役立たせているところもある。

3. 焼成工程に於ける取組み

エネルギー消費量の最も多い焼成工程は常にその低減の努力が集中されたところであり、如何にして熱エネルギーを有効に使い又熱ロス無くすかが、過去から将来にわたっての大きな課題として継続しているものである。

セメントの焼成窯は当初徳利窯と呼ばれる不連続生産方式の堅窯から出発したが、熱効率を上げるためこれを連続式にして、ホフマンの輪窯とかディーチュ窯が使われた。現在焼成に使われている回転窯は約100年前に英国のクラプトンが発明したものであるが、我が国で最初に使われたのは約80年前のことであり、大量生産に適するものとして、それ以後急速にこの回転窯による方式に変わってしまった。しかしこの回転窯は、セメントの製造方法や製品の品質等あらゆる点で優れてはいたが、熱効率の面では堅窯より悪いという

欠点があった。すなわち回転窯では、窯内の底部を原料が移動し、その上側を燃焼ガスが通っている状態で、熱傳達の大部分は輻射によるものである。したがってガス温度の下がった窯の奥では熱交換率が悪く、窯から出る排ガスの温度はどうしても高くなってしまい、熱損失が大きくなる。更に窯から焼き出されるクリンカーは高温であり、放冷するだけではその熱損失も大きい。そこでまず考えられたのが回転窯を長くすることによって、窯内の熱ガスを出来るだけ原料の熱交換に利用することと、窯の下に円筒型の回転冷却機（アンダークーラー）を設けて、クリンカーの冷却と燃焼用空気を予熱することであり、これ等によって熱効率は大いに向上した。更に排ガスの有効利用を図るため、これをボイラーに導いて余熱発電を行い、電力を自給することが考案され、これによって排ガス熱量の60%が回収されるようになった。又同じく排ガスの利用のために、レポール法というものも考案された。これは原料の粉末を造粒機に送り、水を10~15%添加して粒状化した後、窯尻に設けた移動グレート上に導いて、窯からの排ガスで熱交換させ、原料の予熱と同時に一部仮焼を行って窯に送入するというものである。一方、クリンカー熱利用の面では、アンダークーラーより更に効率のよい多筒式クーラーやグレート式クーラー等が考案された。多筒式クーラーとは窯の下端に多数の小型円筒冷却機を取付けたものであり、グレート式クーラーとはクリンカーをグレートの上に乗せて徐々に移動させ乍ら、下から空気を吹き込んで急冷させる装置であり、クリンカーと空気の熱交換が充分行われるものである。

前述したが湿式法というのは、調合原料をスラリー状にするため化学成分の調整が極めて容易であり、その均斉性を向上させて良い品質のセメントを製造するために考案されたものである。この場合は回転窯の中で乾燥と焼成を行わせ、水分の蒸発に熱ガスを使ったが、乾式法の技術の進歩によってその必要性が薄れ、水分蒸発のための熱量の消費はエネルギー的に損であるので、我が国では現在殆んど用いられなくなってしまった。又乾式法の改良したものとして、縦窯と回転窯を組合せた方法も考案された。これはセメント原料のうち約8割を占める石灰石だけをまず熱効率が最もよい縦窯で焼き、そこで出来た生石灰を石灰原料として使って後は全て乾式法と同じという方法である。この改良焼成法では回転窯内で石灰石の分解のための熱量を必要とせず、石灰と粘土分を反応させるために熱

量を集中して使えるため、回転窯でのクリンカーの生産能力が約4~5倍に向上した。

以上の様に、セメント生産量の増大に対応し乍ら、省エネルギーのために色々な努力がなされていたが、今から27~28年前にドイツでSP窯（Suspension Preheater Kiln）というものが考案された。これは乾式法での排ガス利用の決定版の様なもので、回転窯尻にサイクロンを何段か積み重ねて設置し（プレヒーター部分となる）その中に粉末原料を送入して浮遊させ乍ら、窯からの排ガスを通過させて原料との熱交換を充分行わせるという方法である。この方法では使用熱量が湿式法の約半分であり、設備は単純で運転も容易であり建設費も廉いので、昭和38年に我が国に導入されてから急速に普及して行った。このSP窯では、プレヒーター出口での原料中の石灰石の分解の程度は40%位であり、更に改良焼成法の様石灰石の分解の程度を上げれば生産能力の向上が可能であると考えられた。そこでプレヒーター部分に補助燃焼装置を付けたNSP窯（New SP Kiln）が昭和48年頃から実用化された。これは生産能力の増強と熱効率の向上と更には低公害化を目指して集大成した我が国独自の技術として開発されたものである。それには補助燃焼装置の違いにより表3の様な型式があり、現在世界で最も進歩した焼成方式として主流の座を占めた。

こゝでNSP法の代表的なものとしてRSPのフローダイヤグラムを図-2に、又最近10年余りの間の製造様式別クリンカー生産構成比の推移を図-3に示す。

図-3の様に最近の状況は、湿式窯・乾式窯・レポール窯のSPへの転換、更にNSPへの転換が盛んに行われ、クリンカーの85%程度はこの方式で生産される様になってしまった。これは前述した様な熱効率の最も良い方式への指向であり、表4に示した様にその設備生産性と熱効率の大きな違いに現われている。

一方クリンカー熱利用の面を見ると、前述のグレー

表3 NSPの種類

略称	名称	仮焼炉	開発会社
MFC	Mitsubishi Fluidized Calcinater System	流動層式	三菱鉱業セメント 三菱重工
SF	Suspension Preheater and Flash Furnace	気流式+ 渦室式	秩父セメント 石川島播磨重工
RSP	Reinforced Suspension Preheater	気流式+ 渦室式	小野田セメント 川崎重工
KSV	Kawasaki Spouted Bed and Vortex Chamber	渦室式+ 噴流式	川崎重工
DD	Dual Combustion & Denitration Process	—	日本セメント 神戸製鋼所

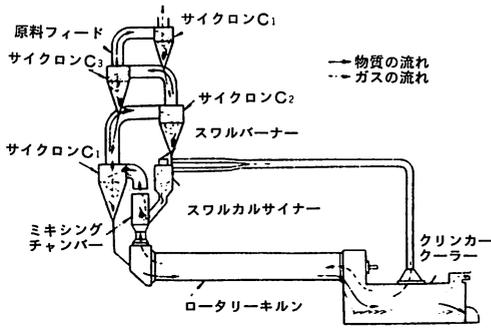


図-2 RSP フローダイヤグラム

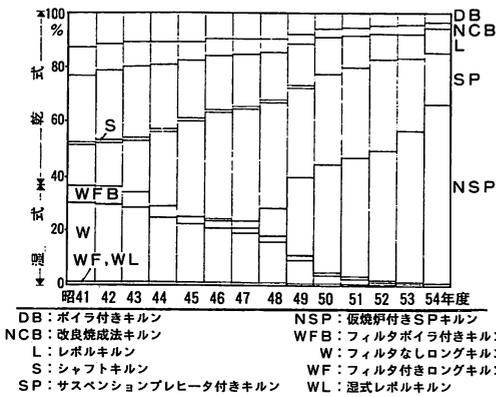


図-3 製造様式別のクリンカー生産構成比の推移

表4 焼成様式別の熱効率と設備生産性

様式	設備生産性 (kg/h・m ³ (キルン))	焼成用熱量 (kcal/kg・cl)
SP (NSP) 方式	64.5 (97.9)	816
乾式、ボイラ付き方式	32.4	1,405
レポル方式	58.5	931
湿式ロング方式	21.9	1,304

注: 1. セメント協会調べ
2. 熱量は高発熱量基準

ト式クーラーが主流を占めているが、熱効率は60~70%の間で必ずしも充分と言えない状況にある。クーラーからの熱ガス(高温の空気)は窯やNSP助燃炉の燃焼用や原料・石炭等の乾燥用として使用されているが、クリンカーと熱交換した空気は出来るだけ高温のものを取出して、これを窯に送って燃焼用の空気として使用するのが有利であり、余剰空気を出来るだけ出さない工夫が必要である。そこで図-4の様な余剰空気を回収してリサイクルさせる方式が考えられた。クリンカーの冷却の仕方はセメントの品質に大きな影響を與えるため、特に急冷する必要がありその工夫も

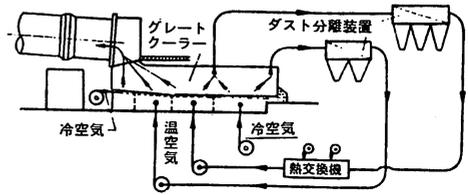


図-4 空気循環式グレートクーラー

なされている。その他、2段式グレートクーラーや中間粉砕機付き多段クーラー等色々な方式が考えられている。

この様に焼成工程での省エネルギーは着々と効果を挙げて、前掲の表1の様に使用燃料原単位は昭和30年当時の約半分に向上したが、燃料としては重油から石炭への転換や、補助燃料として廃タイヤ類の利用等、コスト低減に対して更に懸命な努力を続けている実情にある。

4. 仕上工程に於ける取組み

焼成工程で造られたクリンカーに石膏を3~4%加えてボールミルで微粉砕すると、最終製品としてのセメント粉末が得られる。この工程で考えられるのは、よい性質のセメントとするにはどのような粒子組成のものにするか、そのためにどのような粉砕のやり方が最も動力を使わずに出来る方法なのかということである。粉砕機には色々なタイプのものがあるが、セメントの様に大量のものを微粉砕するにはボールミルが適していた。そして粉砕の効率を上げるためには、被粉砕物の粒度に応じてボールの大きさを調整する必要があった。そこでボールミルを長くし、ミル内に仕切りをつけて区分し、クリンカーの粉砕程度に応ずる様各区毎に大きさの違うボールを順次配置して入れた。又最後の区分には磨砕に都合のよいシルベップと称する円筒形状のものも使用した。これがチューブミルであるが、これでは中々思う様な粒子組成のセメントが得られず、又粉砕の効率も良くないのでエアセパレーター(空気分級機)を組合せる方法が考えられた。これはボールミルで或る程度迄粉砕したものをセパレーターに送り、粉末を分散浮遊させて各粒子の重さと上昇気流とのバランスから粗い粒子は沈降させて又ミルに戻し、細かい粒子だけを選り別けて取り出すという方法である。このミルとセパレーターの組合せでは、粉末の循環率の最適化を計ってゆくと、一般にセパレーターの能力が小さく、更に粉砕効率を向上させ動力を低減

させるためにはこれ等のバランスをよくする様に、設備の見直しをする必要があることが多い。最近高効率で大容量処理のコンパクトなシステムのセパレーターが開発され、動力低減の効果が期待されている。又粉碎効率向上のために粉碎助剤の使用が認められて居り、現在主としてジエチレングリコールやトリエタノールアミン等が使用されている。

一方、一昨年にセメントのJIS改正が行われ、セメント中に混合材を5%まで加えてよいことになった。この混合材は何でもよいというわけではなく、セメントの性能を悪くしないものを特に限定して決めたものである。これは仕上工程でクリンカーと一緒に粉碎するか、或いは出来たセメントに微粉の混合材を加えるかどちらでもよいが、こゝで言うことは5%までとしてもその分だけは原料工程・焼成工程が省けるわけで、大きなエネルギー節減が出来るということである。これは樹脂の中にフィラーを入れて節減を図っていることと似ているが、混合材を加えて従来のセメントと変わらないものを造るため、成分の調整や粒子組成の最適化等色々工夫をして達成させたもので、現在まで使用上で殆んど問題はない。

5. 今後の問題と夢

現在迄の省エネルギーに関しては以上述べた様なものであるが、今後どの様なことが考えられるか、問題としてとり上げてみたい。それは、NSPの改良、回転窯を用いない焼成方法、原子力エネルギーの利用、ミルを用いない粉碎方法等、新しい技術の開発であり、一方、セメント品質を変えずに混合材をもっと多量に使用出来る様にするにはどうしたらよいかの研究であると考えられる。

こゝで省エネルギーの命題とは離れるが、筆者が約25年前に考えていた夢を紹介してみたい。それは、セメント工業とは衣・食・住をまかなえる工業ではないかということである。「住」の方はもちろんセメントでコンクリート建造物を造るということであるが、「衣」と「食」の方はセメントの主原料として使われる石灰石(CaCO_3)の中に炭素が含まれていることに注目したものである。ソーダ工業では石灰窯を使って石灰石を分解させ、その際出てくる濃度の高い炭酸ガス(CO_2)を炭酸ソーダの製造に使い石灰分(CaO)は副産物として処理していた。当時改良焼成法では大量の石灰分を得るために大型の石灰窯の検討を行って居り、相当に濃い炭酸ガスが大量に捨てられる状況にあった。自

然界では植物が葉緑素を媒介とし太陽エネルギーを使って炭酸ガスを分解し、澱粉を作り出すと共に酸素を大気中に放出させている(光化学反応)。この作用を人工的に作り出すことが出来れば大量の食料が得られるのではないかということであり、これが「食」の考え方である。現在既にクロレラ等が出来ているので、これは夢ではなくなってきた様に思われる。更に欲張れば、こゝで出来た酸素をセメント焼成に使えば、省エネルギーにもつながるもっと効率のよい焼成が出来るのではなかろうか。最後の「衣」の方であるが、この考え方は出て来た CO_2 を何らかの方法で還元してCOに変えることが出来れば、有機物の合成につながれそうなので有機セインが出来るとは思わないかというものである。現在C1化学と称してCOが注目されて居り、現実にそれから有機物が合成されているので考え方としては間違っていない様であるが、 CO_2 を還元してCOにするには相当のエネルギーと還元剤を要し、これは中々むづかしい様である。たゞ将来原子力開発が進み、廃棄されるエネルギーが多く使える様にでもなれば、ものになるかも知れないとひそかに思っている。

セメント工業では現在でも多量の炭酸ガスを大気中に放出している。この廃棄物が何らかの形で利用される将来を夢みて締めくくりとしたい。

文 献

- 1) 森茂二郎：セラミックス13 (1978) No. 3
- 2) 竹本國博：セラミックス14 (1979) No. 2
- 3) 菊地 央：セメント・コンクリートNo. 403 (1980)
- 4) 近藤希賢：セメント・コンクリートNo. 403 (1980)
- 5) セメント協会資料

