参 考 資 料

セメント焼成プロセスにおける省エネルギーシステム

福田 良 治*
Yoshiharu Fukuda

三 吉 哲 郎*
Teturo Miyoshi

1. 結 言

石油危機以降のエネルギーコストの上昇と構造的不況による採算性の低下とに対処すべく、セメント産業においてもセメント製造プロセスの近代化、集約化ならびに省エネルギー化に対し懸命の努力がなされている。この傾向は日本以外の先進諸国においても同様であるが、特にアメリカ合衆国においては政府のエネルギー政策にもとづく指導下に、燃料種類の転換をも含めて、省エネルギー対策が強く推進されている。

周知のように省エネルギーは単に直接的なエネルギー、すなわち燃料や電力の節減に関するもののみでなく自動化による労働生産性の向上による人件費の節減、装置の長期安定運転による修繕費の削減などの間接的なエネルギー消費をも含めた、Total エネルギーの観点から達成されなければならない。さらに、セメント産業においても公害防止に対する積極的な取組みが必要であり、大気汚染、騒音、振動などに対する公害防止技術との調和をはかりつつ省エネルギー対策を推進する必要がある。

2. セメントの製造プロセス

Fig.1 に代表的なセメント製造プロセスを示す¹⁾。セメントの製造プロセスは、原料工程、焼成工程、仕上げ工程の三工程に大別される。製造様式には乾式法と湿式法の二つの様式があるが、主として用いられている乾式法について説明する。

2.1 原料工程

セメントの主原料は石灰石と粘土であり、このほかに成分調整用として微量の珪石、鉄滓が副原料として使用される。これらの原料をロータリードライヤなどで乾燥した後、適正な配合比率となるように調合し、ミルで粉

砕する。粉碎された微粉末原料は原料貯蔵タンクに送られ、使用量に応じて貯蔵タンクからひき出されてエアーブレンディングタンクに移送され、エアーレーションされて原料成分の均斉化がなされ焼成工程へ送られる。

2.2 焼成工程

原料工程から送られてきた原料は焼成工程で回転窯（ロータリーキルン）の中で 1450°C 前後で加熱され、焼塊（クリンカ）となりクーラに入り空気によって急冷されてタンクに貯蔵される。セメント原料が焼成されクリンカとなるまでの主反応を Fig.2²⁾ に示す。クリンカ焼成反応は水分の蒸発に始まり、 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ で粘土の脱水、分解が始まる。さらに、 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ になって石灰石の分解 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) 反応が生じ、その後 1000°C 以上でクリンカ鉱物の生成が始まり、 1450°C 前後でクリンカ生成反応が完了する。以上の反応過程で石灰石の分解反応までが吸熱反応で特に石灰石の分解にはクリンカ焼成熱量の大半が費される。クリンカ鉱物生成反応は発熱反応である。

ロータリーキルンの様式はサスペンションプレヒーター付キルン (SPキルン)、NSP (New SP)キルン、湿式ロングキルン、レボルキルン、湿式フィルター付キルン、乾式ボイラー付キルンなどに分類される。

2.3 仕上げ工程

セメントクリンカは仕上げミルで石膏を $3\sim 4\%$ 加えて微粉碎されポルトランドセメントとなる。こうしてつくられたセメントはタンクに貯蔵され、検査ののち出荷される。

3. セメントの製造プロセスとエネルギー消費

セメント産業の消費するエネルギー量は全一次エネルギー消費量の約 3% に過ぎず³⁾、相対値としては小さいがセメントの製造コスト中に占める割合は大きい。

Fig.3⁴⁾ に原料の採掘から製品の包装出荷までのセメントの製造に要するエネルギーの内訳を示す。様式別には、SPキルンがもっとも消費エネルギーが少なく、ま

昭和53年5月24日受理

* 小野田セメント(株)中央研究所 (〒135 東京都江東区豊洲1-1-7)
TEL 03-531-4111

Fig. 1 セメント製造工程図

Fig. 2 クリンカ焼成過程

Fig. 3 工程別のエネルギー消費

た工程別ではエネルギーの約80%が焼成およびクリンカの冷却工程で消費される。Table 1⁵⁾ は最大のエネルギー消費工程の使用熱量の様式別の推移を示す。

各様式ともに企業努力の結果により使用熱量が低減してきているが、特にSPキルン、NSPキルンの使用熱量が少なく、現在では、新設キルンはもとより、他様式キルンのSP、NSP化もさかに行なわれている。

4. 省エネルギー形キルンへの指向

4.1 SPキルン

セメント原料の焼成にはロータリーキルンが用いられる。ロータリーキルン（以下キルンと略す）は高温反応容器であるとともに原料の輸送機であり、安定性の良い装置であるが、燃料燃焼熱の原料への伝達量は入熱の約50%に過ぎず効率が低い。これはキルン内の空間部分を10m/s以上の速度で流れる高温ガスからキルン底部をカスケード運動しながら移動する被焼成原料への熱伝達が原料と熱ガスの接触面および原料とキルン内壁との接触面においてのみ行なわれるからである。したがって焼成

Table 1 焼成工程使用熱量の推移

年別 様式	昭和36年	昭和40年	昭和45年	昭和46年	昭和47年	昭和48年	昭和49年	昭和50年	昭和51年
ボイラー付乾式 (DB)	1551	1455	1182	1473	1475	1482	1457	1440	1419
	—	—	955*	949*	950*	—	—	—	—
小野田改良焼成法 (NCB)	657	541	499	499	509	510	530	530	520
	—	—	—	—	1018**	—	—	—	—
レボール シャフト	971	937	922	932	942	961	958	943	943
SP・NSP	981	1015	1009	978	998	893	903	—	—
—	—	894	851	844	844	854	854	843	833
フィルター・ボイラ ー付湿式 WFB	1734	1718	1688	1704	1709	1678	1647	1666	1633
	—	—	1344*	1360*	1361*	—	—	—	—
フィルター付湿式 WF	—	—	1510	1544	1564	1575	1677	—	—
湿式 W	1404	1420	1345	1362	1365	1365	1352	1346	1371
湿式レボール WL	—	1021	1022	1023	1025	1077	1166	1203	1160
全ギルン平均	1413	1219	1080	1057	1049	1155	1229	1248	1195

単位: kcal/kg·cli

(セメント協会)

*: 回収電力修正済

**: 石灰窯燃料を含む, 47年のみ回収電力修正済

工程の省エネルギー化は投入熱量の有効な回収技術と密接な関連をもつことになる。

1950年に西独で開発されたSPキルンはキルン排ガスの顕熱の効率的な回収をはかるもので, 粉末原料をキルン排ガス中に浮遊懸濁させて原料の乾燥, 一部の分解を

行なわせるものである。Fig. 4⁶⁾に代表的なSPキルンの構造を示す。サスペンションプレヒーターは通常4段のサイクロンで構成され, 最上段のサイクロン入口に粉末原料が供給され, キルン排ガスと順次熱交換しながら830°C近くまで予熱され, 一部は分解しキルンに入る。サスペンションプレヒーター内の伝熱はキルン内の伝熱にくらべ高効率であり, したがってSPキルンは全体のエネルギー消費量をもっとも少なく, 焼成プロセスに新時代を築いたものといえる。SPキルンの特徴をエネルギー面からみると次のようになる。

(1) 直接のエネルギー消費が少ない。

Fig. 4 SPキルンの構造

Fig. 5 キルン能力とコスト低減

Table 2 焼成設備費用の比較

様式	費用割合(%)
湿式 ロングキルン	140~145
乾式 ロングキルン	140~150
1 段 S P キルン	145
2 段 S P キルン	120
4 段 S P キルン	100
4 段 S P キルン (15% バイパス)	110

(福田良治)

- (2) Fig. 5⁷⁾ に示すように、大型化に適し規模の利益を享受し得る。ただし製造コストは単純減少でなく、ある規模以上ではかえって増加してくる。
- (3) Table 2⁸⁾ に示すように、焼成プロセスの設備費用が他様式キルンに比較して少なく、間接的にみて建設資材の使用量の減少を可能とし、省エネルギーに有効である。

S P キルンが、日本に導入された当初、キルン焼成能力は1000t/d 程度であったが次第に大容量化し、現在では5000t/d 以上のキルンが出現し、キルン径も6mを超えるようになった。キルン径が6mを超えるようになるとキルン内でのアーチング作用が減少しコーチングが安定せずその着脱が多くなり、さらにキルンシェルのオーバリティが大きくなりキルン内レンガのメカニカルス

ポーリングなどに起因するレンガ損耗量の増大、レンガ脱落などによる運転期間の短縮などが大きな問題となってきた。

4.2 N S P キルン

N S P キルンは従来の S P キルンの大型化にともなう問題点および公害防止上の問題点に対処するために開発されたものである。

キルンの大径化に付随する前記のような問題の解決にはキルン内容積あたりのクリンカ焼成量を増大させれば良いことはあきらかである。

セメントクリンカの焼成プロセスの中で最大のエネルギー消費プロセスは石灰石の脱炭酸反応である。純粋な石灰石1kgを分解し生石灰(CaO)とするには約400kcalが必要である。クリンカ1kg中のCaOの量は0.63~0.67kg、石灰石として1.13~1.20kgであるから、クリンカ1kgあたりに必要な石灰石の分解熱は450~480kcalである。クリンカ焼成プロセスではこのほかに粘土の脱水、分解に熱が消費されるが、一方ではクリンカ生成時にクリンカ1kgあたり約100kcalの発熱があり、合計としてTable 3に示したように420~440kcalのクリンカ焼成用熱が必要となる。

前記のようにキルン内の伝熱効率は低く、したがって多量の熱を必要とする石灰石の脱炭酸反応をすべてキルン内で完了させることは得策でない。N S P キルンはキ

Table 3 様式別熱勘定表

項 目		NCB	S P	R S P	湿 式 法
		kcal/kg·cli	kcal/kg·cli	kcal/kg·cli	kcal/kg·cli
入 熱	燃 料 の 燃 焼 熱	447.0	789.0	740.6	1245.0
	燃 料 の 顕 熱	2.3	3.3	3.1	33.0
	原 料 の 顕 熱	11.9	17.7	12.8	
	キルン1次空気顕熱	0.3	1.5	1.4	
	計	491.5	811.5	757.9	1278
出 熱	ク リ ン カ 焼 成 用 熱	-20.7	430.0	429.2	420.0
	ク リ ン カ 持 去 熱	3.4	35.0	25.0	10.0
	ク ー ラ 排 ガ ス 損 失 熱	194.0	118.0	82.4	70.0
	プ レ ヒ ー タ 排 ガ ス 損 失 熱	203.0	140.0	136.8	*657.0
	ダ ス ト の 持 去 熱	111.8	88.5	4.0	
	放 散 損 失 熱 そ の 他			80.5	120.0
	計	491.5	811.5	757.9	1277.0
焼 成 効 率		- 6.8%	52.3%	56.2%	
キ ル ン 効 率		- 6.8%	52.3%	56.2%	

* 原料水分蒸発熱 438 kcal/kg·cli を含む

(三吉哲郎)

Table 4 NSPの種類 (小野田セメント)

名 称	仮焼炉	開発会社
S F {Suspension Preheater and Flash Furnace	気流式 + 渦室式	秩父セメント 石川島播磨重工
R S P {Reinforced Suspension Preheater	気流式 + 渦室式	小野田セメント 川崎重工
K S V {Kawasaki Spouted Bed and Vortex Chamber	渦室式 + 噴流式	川崎重工
M F C {Mitsubishi Fluidized Calciner System	流動層式	三菱鉱業セメント 三菱重工
D D {Dual Combustion & Denitration Process	—	日本セメント 神戸製鋼所

ルンとプレヒーターの間に別の仮焼炉を設置することにより石灰石の脱炭酸反応の大部分を完了させるようにしたものである。このプロセスの先駆的なものの一例として、小野田セメント機によって昭和35年頃開発された Quick Lime Process (以下NCB方式と略称する)がある。NCB方式ではセメントの主原料である石灰石を効率の高いシャフトキルンにより分解させ、生石灰として他の原料とともにキルンに送入されるもので、キルン内での脱炭酸反応がないために Table 3 の熱勘定表に示したようにクリンカ焼成用熱が負となり、使用熱量も約 500kcal/kg・cli と低くなる。この方式ではキルン内容積あたりのクリンカ焼成量が約160kg/m³h と SPキルンのメインファンへ

Fig. 6 RSPフローダイアグラム (小野田セメント)

約65kg/m³hと比較して飛躍的に高くなった。NSPキルンは従来のSPキルンとNCB方式の考え方を組み合わせたもので、キルン送入原料の脱炭酸率を従来のSPキルンのみかけの脱炭酸率の2倍以上に高くし、キルンを大型化することなくクリンカ焼成量を増加するようにしたものである。

NSPプロセスはわが国で最初に開発されたプロセスで Table 4 に示す種類のものがある。さらに後発として、ヨーロッパの大手セメント機械メーカーによって数種のNSPプロセスが開発されている。

RSPプロセスはNSPプロセスの一種で、セメントプロデューサーの立場から開発したもので、海外にも数ヶ国にその技術を導出している。

5. RSPプロセス

5.1 RSPプロセスの機能

RSPプロセスの機能についてはすでにいくつかの報告がなされているのでここでは簡単に説明する。

Fig. 6 にRSPプロセスのフローダイアグラムを示す。

RSPプロセスはサスペンションプレヒーターの架構内にスワルバーナおよびスワルカルサイナの2室からなる旋廻燃焼式の仮焼炉と、この炉からの原料を浮遊懸濁した熱ガスとキルン排ガスとの効率的な混合と熱伝達をはかるための混合室からなるサスペンションプレヒーターである。第2段サイクロンから仮焼炉へ落下した原料はスワルカルサイナに入り、クリンカクーラで高温のクリンカと熱交換し仮焼炉へ吸引された 650~750°C の高

Table 5 RSPキルン焼成のクリンカー品質

品 種	容 重 (kg/l)	F-CaO (%)	圧 縮 強 度 (kg/cm ²)				粉 末 度 (cm ² /g) ブレン
			1 日	3 日	7 日	28 日	
普通セメント	1.20	0.3	—	145	239	420	3200
早強セメント	—	—	123	243	353	475	4250
超早強セメント	—	—	210	320	402	470	5950

(小野田セメント)

温の燃焼用空気により均一に分散させられるとともに炉内で旋廻運動をおこなう。この炉にはバーナが付設されており全系で使用する燃料の約55～60%を燃焼させる。仮焼炉内では燃焼ガスと原料は懸濁状態で旋廻運動による大きな相対速度差のため急速に熱交換し脱炭酸反応を生じ炉内温度は約950℃に低下する。原料を浮遊懸濁した熱ガスはダクト内を下降して混合室内で950～1000℃の高温のキルン排ガスと衝突混合して、さらに脱炭酸した後に最下段サイクロンに入り、原料のみ捕集されてキルンに入る。最下段サイクロンを出た熱ガスは各サイクロンを通り上段のダクト、サイクロン内で原料粉末と熱交換しながら全サイクロンを通りプレヒーターの誘引ファンで系外に排出される。この排ガスはさらにドライヤおよびローラミルなどに導かれ原料の乾燥に用いられた後に電気集じん器に入り除じんされて大気に放出される。

最下段サイクロンからキルンに入る原料の脱炭酸率は85～95%と通常のSPキルンのみかけの脱炭酸率の2倍以上であり、これによってキルン内での原料のフラッ

ングがなくなり原料の滞留時間が安定し、結果としてキルン内の温度分布が安定しキルンの比焼成能力が高くなり、またキルンセルからの放散熱が少なくなり使用熱量の低減に有効に働いている。

Table 5にRSPキルンで焼成された、三種の品種のクリンカ品質を示す。

5.2 RSPプロセスの設計上の配慮

1. 装置の据付空間を小さくするため仮焼炉を小型化し、そのうえで燃焼を完了させるため高熱負荷炉に適する旋廻式燃焼炉であるスワルカルサイナを採用し、炉の出口に適比の絞りを設けて旋廻、伝熱および燃焼の効率を高くしている。
2. 炉内の燃焼用空気としてクリンカークラで回収した高温空気をを用い、さらにキルン排ガスと仮焼炉ガスが混合する前の酸素分圧が高い条件で燃料を燃焼させ反応の促進をはかった。
3. 上部サイクロンから落下する原料を高温空気によって旋廻、浮遊懸濁させ、燃焼伝熱の向上をはかるとともに炉内レンガの損耗防止をはかっている。

Fig. 7 RSPキルンの運転データ (小野田セメント)

4. キルン排ガスと原料粉末が懸濁したスワルカルサイナからの熱ガスとの熱交換を良くするために両方のガスを十分な角度で衝突するように設計し、さらに混合室を設置して伝熱の完了を期した。

5.3 RSPプロセスの運転実績

運転の代表的なデータをFig. 7に示したが、このデータからRSPプロセスの特長を知ることができる。

サスペンションプレヒーターは全体として向流の熱交換器として作用する。すなわちプレヒーター上部から送入される温度40～60℃の原料はキルン排ガスの顕熱および仮焼炉で発生した燃焼熱によって、Fig. 2に示した原料の乾燥、予熱、粘土の脱水分解、石灰石の分解のプロセスによって順次プレヒーターを下降してロータリーキルンに入るが、系が平衡状態にある場合はプレヒーターに加えられる熱量は一定であるから、プレヒーターでの熱交換の良否はプレヒーター排ガス温度の高低で判断できる。Fig. 7の運転データにおいて、プレヒーター排ガ

ス温度は従来のSPキルンの排ガス温度とほぼ等しく熱交換性能の良いことを示している。キルンに入る原料の温度は約830℃で脱炭酸率は85～95%である。この温度は原料の分解平衡温度であり仮焼炉の熱負荷が 1.6×10^6 kcal/m³hと非常に高いにもかかわらず、仮焼炉内の燃焼および仮焼炉から混合室までの伝熱が良いことに示している。仮焼炉は通常、空気比を1.05で自動運転しているが燃焼は炉内で完了している。空気比が1.0以下になると当然ながら化学量論的に未燃分が残存するが、この条件化でも高温の炉内に噴霧された油滴はただちにガス化し旋廻空気中の酸素ときわめて短時間で反応を終了している。

Fig. 8はRSPプロセスの温度分布であるが、温度降下の状況からも脱炭酸反応が急速に平衡状態に達することが理解できる。この急速な温度降下によって高熱負荷の仮焼炉にもかかわらず仮焼炉のレンガ寿命が非常に長くなっている。

6. RSPプロセスと省エネルギー

6.1 放散損失熱の低減

Table 3に示した熱勘定表にみられるようにRSPキルンおよび大型SPキルンの放散熱量は他様式のキルンに比較しかなり少なくなっている。同一様式のキルンでも大型化とともに放散損失熱が減少する。これはプレヒーターやキルンセル表面からの単位クリンカ焼成量あたりの放散熱量が減少するからである。放散損失熱の大部分はキルンセルからの放散熱が占めているが、Fig. 9に示すセル表面積と放散熱の関係からわかるように、ある表面積で平衡する。したがって、さらに放散損失熱を減少させるには焼成帯以外の位置に断熱性の高いレンガを巻くことも考えられる。

Fig. 8 RSPプロセスの温度分布(小野田セメント)

Fig. 9 セル表面積と放散熱の関係(小野田セメント)

Fig. 10 SPキルン電力原単位の内訳(セメント協会)

6.2 使用動力の低減

Fig.10⁹⁾ にSPキルンの使用動力の内訳を示す。

SP, NSPキルンの主な動力負荷設備はキルン駆動モータとSP排ガスファンおよびクーラ吹込ファン、クーラ排気ファンである。

RSPプロセスではキルンサイズが小型化できるためキルン駆動タ力が少なくて済み、したがって通常のSPキルンに比較しキルン駆動タ力原単位が小となる。

SP排ガスファンの使用動力はファン吐出側に原料乾燥用ロータリドライヤ、集じん器などがありそれぞれガスのフローが設備によって異なるため焼成プロセスの様式間の比較は困難であるが、サスペンションプレヒーターとキルンのみについて比較するとRSPプロセスとSPプロセスの差はない。外国では一般にサイクロンおよびダクトのサイズを日本よりやや大きくしてサスペンションプレヒーターの圧力損失を減少させ使用動力の低減を図っているが、わが国においても今後は設備投資額の低減と動力コストの低減のいずれにウェイトをおくべきか再検討の必要があろう。

クーラ吹込ファンはキルンからクーラに入る高温のクリンカを冷却する空気を送るもので、クーラの型式によって使用動力が異なるが一般的なグレート式クーラにおいてはクーラ常用能力と冷却設備風量の間にはFig.11¹⁰⁾に示す関係がある。冷却風量、風圧はグレートの過熱保護およびクリンカの冷却の面から相当の量、圧力が必要でありクーラの型式を変えない限り現状から使用動力を低減することは困難である。グレート式クーラ以外のクーラ型式の代表的なものとして遊星式クーラがある。グレート式クーラがグレートの上を層状で移動するクリンカをグレートの下から冷却空気を吹込みグレートの風穴を通過させ、さらにクリンカ層を通過させることによって冷却するのに対し、遊星式クーラはキルンと一体と

Fig.11 クーラ常用能力と冷却設備風量 (セメント協会)

なって回転する円筒型クーラでキルン周囲に通常6本程度設置されている。

遊星式クーラは構造がキルンと類似していて簡単でありグレート式クーラのような高圧力のファンを必要としないなどの長所があるが、クーラ内部でクリンカが転動する際の発生騒音が非常に大きく、クリンカが徐冷され品質面へ悪影響を及ぼすこと、まNSPたキルンの場合、仮焼炉の燃焼用空気を取り出すことが非常に困難であるなどの欠点を有し、動力コストの低減とのかね合いでこの型式のクーラの採用の可否が決められよう。

6.3 クーラ排ガス損失熱の減少

損失熱のなかの大きなものとして前記のもののほかにクーラ排ガス損失熱がある。クーラの熱効率率はキルンからクリンカの持込む熱量に対する回収熱量の割合で示される。RSPキルンでは大部分をキルンの2次空気および仮焼炉の2次空気として回収しており、一部を自家発電の給水の予熱として回収し、その他はダスト分離装置を通して大気へ放出したり原料の乾燥熱源として利用している。

クーラの熱効率の向上が焼成使用熱量の低減に有効なことはすでに多くの研究者によって報告されている。その一例をFig.12¹¹⁾に示した。しかし現在多用されているクーラの熱効率率は60~70%で十分とはいえず、余剰空気が多く廃ガス損失熱が大きく、余剰空気の脱じんにも多大な費用がかかるなどの欠点があり、これに対処するため各国で種々のクーラが研究されている。

Fig.13¹²⁾は余剰空気として大気へ放出する空気を再びグレート下より吹き込んでキルンおよび仮焼炉用の2次空気温度を上げてクーラ効率の上昇と排出空気量の減少を図るものである。Table 6¹³⁾に通常のグレートクーラとの熱効率の比較の一例を示す。

次に考えられているのは1段目のクーラでクリンカを

Fig.12 クーラ効率と使用熱量 (K.H.Hayatz)

Fig.13 空気循環式グレートクーラ (望月 明)

約400°Cまで冷却し、これを粉碎して、充てん層を形成させるいわゆるgクーラと呼ばれるものに入れて、クリンカ自身の持つ膨大な伝熱面を利用し、2～3時間かけて100°C以下まで冷却する方式である。この方式のクーラをFig.14⁽⁴⁾に示す。

Table 6 クーラ効率の比較

項 目	通常グレートクーラ		空気循環式クーラ	
	kcal/kg·cl	%	kcal/kg·cl	%
キ ル ン 行	131.7	34.53	137.2	36.96
仮 焼 炉 行	135.2	35.43	156.6	42.19
重 油 加 熱	—	—	3.5	0.94
合 計	266.9	69.96	297.3	80.09

(望月 明)

Table 7 キルン様式別のレンガ原単位

キルン様式	項目	熱消費量 (kcal/kg·cl)	キルン内容積当り生産量 (kg/m³·h)	耐火物原単位 (kg/t·cl)
乾式	DB	1,398	37.0	0.961
	L	828	62.6	0.662
	SP	806	63.9	0.847
湿式	W	1,289	22.5	1.071
RSP		764	163.0	0.200

DB：乾式ボイラ付キルン

L：レボル式キルン

SP：サスペンションプレヒータ付キルン

(小野田セメント)

ラをFig.14⁽⁴⁾に示す。

6.4 資材の節減

SPキルンの建設コストが他の様式のキルンに比較して低いことはTable 2に示したとおりである。RSPキルンはSPキルンに比較しキルン内容積あたりのクリンカ焼成量が約2.5倍と大きいためにキルンサイズが小さくなり、建設コストはSPキルンよりさらに低くなる。

キルン用耐火レンガの寿命については同一焼成能力キルンで比較すると、RSPキルンはSPキルンに比較しレンガ内断面積あたりの熱負荷が減少し、また脱炭酸率の高い原料がキルンに供給されるためにキルンの運転状態はさわめて安定しており、コーティングの付着が一樣でしかも脱着が少ない。さらにキルンが小径であるのでアーチング効果がより大きく、キルンセルのオーバーリィティが小となる。以上の理由により、Table 7に示すようにRSPキルンはSPキルンに比較してレンガ原単位が小さくこの点でも省エネルギー型キルンといえる。

Fig.14 前、後段クーラ組合せクリンカクーラ

6.5 長期安定運転の達成

RSPキルンではキルン内部では5~15%の脱炭酸がおこなわれるのみであるから脱炭酸反応時の原料のエアスライド効果によるフラッシュ現象(キルン内を未分解原料が走る現象)がなく、したがって原料への熱伝達が均一であり、キルン内の軸方向の温度分布が安定する。このためにキルン運転上の最大の障害であるコーチングの着脱が少なく、自動制御の導入が容易となる。また前記のようにレンガトラブルも減少することから、休止損失が減少し、労働生産性の向上、修繕費の減少につながる。

6.6 燃料の多様化

低質燃料の使用が検討され、実施に移されている。

ヨーロッパではオイルシェルを粘土質原料として用いている例もあり、日本でもボタを粘土質原料として使用し、50~80kcal/kg・cliの燃料の節約も行なわれている。イギリスでは都市ゴミを乾燥粉碎してキルンに吹き込んでいる例もある。最近では種々の産業からの廃油を使用することも考えており、従来の石油、石炭、天然ガス以外の低質エネルギー源の有効活用について種々の努力がなされている。

燃料の多様化についてもNSPキルンの存在価値は大きい。キルンに吹き込まれる燃料はクリンカ焼成のために高い発熱量を必要とし、低質燃料を100%使用することはできないがNSPキルンでは仮焼炉に低質燃料を吹き込むことにより、その発熱量に応じて原料の乾燥、粘土質原料の脱水、石灰石の分解などに利用できる。

6.7 易焼成原料の利用

現在、もっとも注目されているものに鉱滓がある。

鉱滓は、すでに脱炭酸したカルシウム分の他にアルミナ分も含有するので、粘土質原料としての利用だけでなく使用熱量の低減効果もある。鉱滓の有効活用は鉄鋼産業を含めた省エネルギー対策という観点でとらえる必要がある。

このほかに脱炭酸原料であるカーバイト残渣をカルシウム原料として利用している例もある。

7. 公害防止対策

セメント産業において公害防止対策をとるべきものに粉じん、騒音、振動、SOxの発生、NOxの発生があり、各セメントメーカーはこれらの公害防止にTable 8⁽⁵⁾に示すように相当の投資をしている。

粉じん発生に対しては高効率の集じん機の採用、騒音に対してはファンへのサイレンサーの取付などの騒音発生機械の遮音、吸音対策、工場周囲への植樹など、また

振動については機械の据付け方法の改善などで対処している。しかし、もっとも広域に影響をおよぼすSOx、NOxのうち、SOxに対してはセメントキルンが高性能の脱硫装置として働け、問題は少なかったが、その後SPキルン、NSPキルンが多くなるにつれてSOxに対してこれらのキルンがすぐれた脱硫装置としての機能を有することから大気へ放出されるSOxはごく微量となりほとんど問題がなくなった。

NOxに対してはNSP以外のセメント焼成設備は、その発生防止に対し、宿命的な困難さを持っている。前記のようにクリンカ焼成工程では原料を1450°C程度の高温に加熱して一定時間維持する必要がある、このためにキルンに吹き込まれる重油あるいは石炭のフレーム温度は2000°C以上に達し、ここで発生するNOxは600~1000ppm(10%O₂換算で350~580ppm)の高濃度になる。発生するNOxはバーナの一次空気の減少やキルンの空気比を減少することによりある程度の低減はできる、しかしその効果はわずかで、逆にクリンカの品質上の問題を生じることもあり、本質的な解決とはならない。

RSPキルンではキルンのほかにサスペンションプレヒーターの仮焼炉で燃焼が行なわれるが、Fig. 8に示した温度分布からわかるように仮焼炉内の温度は原料の急激な脱炭酸吸熱反応により950~1000°Cの低温であり、空気比が1.05ともっともNOx生成の激しい酸素濃度領域でありながら、発生NOxは50~80ppm以下と非常に低い。RSPキルンでは全系の燃料の55~60%を仮焼炉で燃焼させ、原料の85~95%を分解する。したがってキルンで発生する燃焼ガスおよび若干の脱炭酸ガスの総量に対しプレヒーターで発生するガス量は1.7倍以上になり、キルン排ガスに含まれるNOxは当然希釈される。さらにRSPキルンで特徴的なことはキルン発生NOxが仮焼炉の排ガスによって脱硝されて希釈効果を増大させ得ることである。すなわちRSPプロセスは使用熱量を最低に抑えつつ低NOx化を達成することが可能であり、その意味ではフレキシビリティの高いプロセスといえる。

現在、わが国のセメント製造設備に対するNOx排出規制値は既設に対しては昭和56年度より480ppm(10%O₂換算値)以下、新設に対しては250ppm(10%O₂換算値)以下であることが決められている。RSPプロセスはこれらの規制値のいずれもクリアしており、低公害、省エネルギー型プロセスとして社会的要請に答えている。

Table 8 セメント工業設備投資実績

	生 産 投 資							流 通 投 資			維持 補修 工事	合 計			
	原 開	石 発	焼 成	原 粉	料 砕	仕 粉	上 砕	そ の 他 製 造 出 荷	(公 害)	計		関 連 事 業	管 理 部 門	計	
42		23	109	8	15			出荷流通 70			17	その他 50	57	397	
43		44	178	75	55			出荷流通 182			55	その他 20	14	623	
44														553	
		60	136	128				出荷流通 194			76	その他 23	17	634	
45		76	115	58	31	60	(一)	340	56	167	223	18	580		
		53	129	83	48	67	(一)	380	55	177	232	16	626		
46		69	62	35	17	79	(42)	262	69	118	187	13	462	79.7	
		61	116	57	27	75	(43)	336	58	128	186	12	535	85.5	
47		85	168	149	54	167	(100)	623	122	164	286	11	922	199.6	
		79	132	94	37	141	(80)	483	98	170	268	15	766	143.2	
48		168	261	264	134	342	(159)	1,169	109	182	291	13	1,472	159.7	
		156	182	193	94	239	(114)	864	119	173	292	11	1,168	152.5	
49		154	187	175	114	361	(216)	991	52	167	219	21	1,232	93.1	
		125	231	225	120	358	(205)	1,069	73	178	251	16	1,325	84.2	
50		139	148	139	91	256	(156)	773	57	160	217	10	1,001	81.3	
		133	149	136	91	284	(152)	793	49	155	204	17	1,013	76.5	
51		214	147	112	55	156	(89)	684	93	194	287	8	929	92.8	
見込		185	145	104	67	207	(121)	708	64	202	266	8	982	96.9	

注 ①単位：億円，50年実績見込み，会計年度，②関連事業は主として生コン，2次製品，③管理部門は主として輸送関連，④上段工事ベース，下段支払ベース，⑤（公害）は内数，45年以前は統計なし

（産業構造審議会）

8. お わ り に

以上，NSPプロセスの一種であるRSPプロセスを例に，セメント焼成プロセスの省エネルギー技術，公害防止技術に対して，現況および今後の課題についてセメントメーカーの立場から述べた。

セメント産業における技術革新の方向は省エネルギー，省力，省資源，環境との調和にある。セメント製造装置は，装置が決まると大幅な改造をとまなわないうざり，運転操作技術のみで省エネルギー化をはかることは非常に困難である。したがって装置の選択は重要な要素である。現在設置されている製造装置は，かなり近代化。合理化された装置であり，これが今後開発される新

技術により置き換えられる可能性は少ない。たとえば焼成プロセスについていえば，現在の消費エネルギーからさらに低減できるエネルギー量は設備投資に見合う量にはなりがたいと考えられる。しかし，現在の装置についても残された課題は皆無ではなく，これらの課題には積極的に取り組んでいく必要があり，さらには米国，ソ連をはじめとする諸外国の省エネルギー化への転換とセメント需要の伸びを考えると世界的な規模での製造技術開発は着々と進められていると考えられ，われわれ製造技術の研究に携わるものとしても，内外の技術開発の状況を調査，推測しつつ効率的研究をすすめていく必要がある。

引用文献

- 1) 2) セメント協会：セメントの常識 (1975)
- 3) 総合エネルギー統計：資源エネルギー庁 (昭和48年度)
- 4) 福田良治：熱管理と公害, 27[3], 24 (1975)
- 5) セメント協会統計資料
- 6) セメント協会：燃料専門委員会報告 (T-12) (昭和51年)
- 7) 福田良治, 三吉哲郎：粉体工学研究会第13回夏期シンポジウム講演要旨集 (昭和52年)
- 8) 福田良治：熱管理と公害, 27[3], 24 (1975)
- 9) 10) セメント協会：燃料専門委員会報告 (T-12) (昭和51年)
- 11) Kayatz, K.H. : Z-K-G (Zement-Kark-Gips), 24 [12], 574 (1971)
- 12) 13) 14) 望月明：第34回セメント製造シンポジウム
- 15) 産業構造審議会資料

粉体関係の国際会議情報

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON

IN-STREAM MEASUREMENTS OF

PARTICULATE SOLID PROPERTIES.

本年8月22日, 23日に, 上記のような国際会議がノルウェーにおいて開催されます。

内容をかんたんに御紹介しますと,

INVITED PAPER:

AUTOMATIC CONTROL AND ITS INSTRUMENTATION IN PARTICULATE SOLID PROCESSES, A SURVEY.

SESSION A

COMPLETE CONTROL SYSTEMS (4編)

SESSION B

FULLY DEVELOPED MEASUREMENT SYSTEMS (9編)

INVITED PAPER:

MONITORING PARTICULATE SOLID PROPERTIES IN AUTOMATIC CONTROL LOOPS: PAST, PRESENT AND FUTURE.

SESSION C

METHODS UNDER DEVELOPMENT (13編)

PANEL DISCUSSION:

Chairmen: R. K. Eckhoff and P. G. Leversen, The Chr. Michelsen Institute, Bergen, Norway. THE FULLY AUTOMATED PARTICULATE SOLID INDUSTRY. FICTION OR REALISTIC GOAL?

WHAT ARE THE MAJOR CHALLENGES AND WHAT WILL BE THE PRICE TO PAY?

以上のようになっています。

なお, 日本からは SESSION C において, 京都大学の井伊谷先生, 増田先生が発表されます。

プログラムの詳細については, 編集事務局までお問合せください。