

싸이크론 프리히터 시멘트 키른에서의 폐가스의 최적활용 방안

韓 邦 淵(譯)

(韓一시멘트株式會社 技術部長)

1. 서 론

시멘트 플랜트의 운전자들은 키른에서 배출되는 폐열의 활용가능성에 대한 문제를 자주 생각하곤 한다. 특히 이러한 문제는 원료, coal 또는 슬래그의 건조 등 熱的으로 매우 유리하거나 관계적으로 활용할 수 있는 방법이 없는 곳에 중요하게 대두되었다. 폐가스에 포함된 열량은 燃燒工程(burning process)의 열평형(heat balance)에서 비교적 중요한 열손실 항목의 구성요소가 된다. 이것은 또한 키른 입구(원료공급부분)에서 상당량의 가스를 by-pass 시키는 플랜트일지라도 키른 입구 가스온도가 특히 높기 때문에 예외는 아니다.

〈表-1〉은 시멘트 키른의 열평형의 일례로 프리히터 배출가스와 크링카 냉각기 배출공기에

크링카 소성에 필요한 열소비량 평균치

〈表-1〉

	kJ/kg	%
이론 열소요량	1,700	50
폐 열	640	19
쿨러 배열	400	12
바이패스 가스열(30% 바이패스)	260	8
현열손실(프리히터, 키른, 쿨러)	230	7
크링카 보유열	100	3
기 타	50	1
계	3,380	100

서 약 20~30%의 열손실이 있다는 것을 보여준다. 가스를 바이패스시키는 플랜트에서 가스인출방법에 따라 다르겠지만 열손실은 32%까지 변화할 수 있다. 이런 高單位熱이 새로운 활용가능성으로 대두된다. 이런 이유로 최근 몇년 동안 각각의 廢熱量에 따라 분리된 공정에 최적으로 활용할 수 있는 방법을 연구해 왔다. 이러한 개발은 수년 동안의 지속적인 유가 상승으로 한층 더 촉진되었다.

한편 폐열보일러에 의한 폐열회수는 두개의 공정으로 병행해서 운전해야만 한다. 키른이 정지될 때는 언제나 폐열보일러는 가동이 중지되어야 하는 결점이 있다. 이 점은 보일러를 설계하고 운전할 경우 고려해야 한다. 반면에 열회수 설비의 고장이나 운휴시에도 키른은 연소공정에 영향없이 운전을 계속할 수 있도록 해야 한다.

이 논문은 회수된 폐가스를 폐열보일러에 활용하는 방안을 중점적으로 논하였다. 만일 폐열활용의 다른 가능성이 없다면 오직 폐열보일러가 고려되어야만 한다는 것은 명백한 사실이다.

2. 폐가스의 熱活用 可能性

싸이크론 프리히터가 있는 키른 설비에서 채택된 방법 및 기계설비에 따라 배출가스 또는 廢熱量이 각기 다르게 발생할 수 있다. 〈그림-1〉은 precalcination 이 있는 로터리 키른 공정

활용 가능한 폐가스의 특성

<表-2>

抽出위치	명 칭	比 容 ¹⁾²⁾ (m ³ /kg)	温 度 (°C)	최저壓力 (mbar)	분진함량 ¹⁾ (g/m ³)	용 도
1	프리히터배가스	0.6 - 1.8	280-600	20-80	20-100	원료·슬래그·석탄· filter cake의 건조, 스팀보일러
2	중간 프리히터가스	0.1 - 0.4	500-800	30-70	50-150	filter cake·석탄 건 조, 스팀보일러
3	키른 배가스 (바이패스가스)	0.1 - 0.5	1,000-1,200	2-10	50-300	슬래그·원료 ³⁾ ·석탄 ³⁾ 건조·스팀보일러
4	쿨러 고온가스	0.1 - 0.3	700-900	0.1-0.5	5-200	filter cake의 건조
5	쿨러 배가스	0.4 - 1.8	150-400	0.1-0.5	5-20	원료·석탄건조, oil· 물 예열, ORC 공정

註 : 1) 표준온도 및 압력(0°C, 1.013 bar) 2) 크링카 보유 3) 집진후에만 가능

에서의 기본적인 가스배출상태를 나타낸다. 여기서 배출되는 폐가스는 배출량, 구성, 온도, 압력 그리고 분진함량이 각각 다르며 연소공정에 직접 사용할 수는 없을 것이다.

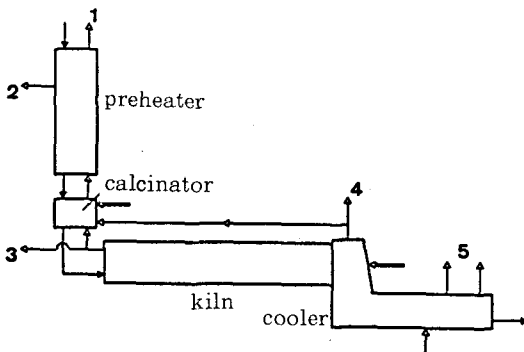
<表-2>는 이들 폐가스의 활용가능성을 평가하는데 참고가 될 것이다. 流動폐가스의 활용가능성은 온도에 따라 비례적으로 증가하므로 항상 고온의 가스를 최우선적으로 활용하려고 노력할 것이다. 100°C 이하의 가스는 일반적으로 경제성이 없다.

폐가스에 분진이 많으면 건조시 유입되거나 침전물형성 또는 폐열보일러 설비에서 스케일(scale) 부착 등 역효과가 발생되어 이들 부착물을 제거하기 위한 보조설비가 필요하게 되므로 우선 가스의 분진을 제거시키는 것이 좋다. 비

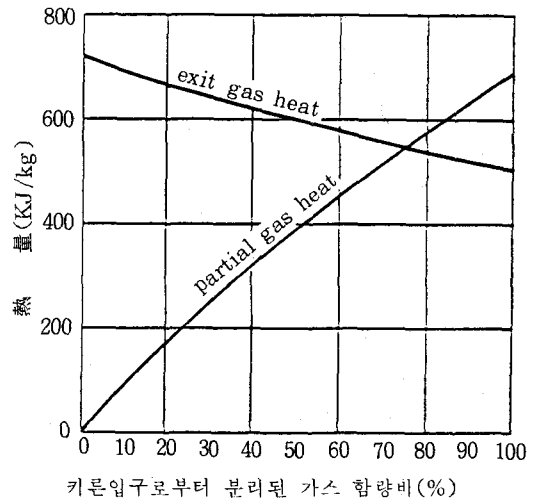
록 이런 先處理가 압력강하의 원인이 될지라도 분진이 포집되어 처리됨으로써 폐가스를 수송하는 fan의 마모와 동력소비가 감소하기 때문에 유리하다.

流動폐가스의 質量流動率, 온도 그리고 熱容量 등이 고려되어야 할 요소이다.

<表-3>은 1,000톤/일의 크링카 생산키른에서 배출되는 폐가스 중 세 종류의 폐가스에 포함될 열량을 나타내며 출력은 마지막항에 표시하였다. 이 表에서 보듯이 모든 동력 전부를 얻



<그림-1> 排熱의 흐름 및 抽出위치



<그림-2> 프리히터 排熱과 키른 入口로부터 분리된 가스의 熱量과의 관계

1,000 톤/日 級 키른에서 추출된 排가스의 含有熱

<表-3>

	溫 度 (°C)	比 容 ¹⁾ (m ³ /kg)	比熱容量 (kj/m ³ K)	熱 量 (kj/kg)	發 電 量 (kWh/t)	出 力 (MW)
프리히터 바이패스가 없을 때	350	1.5	1.5	740	206	8.6
배가스 100% 바이패스	280	1.1	1.4	400	110	4.6
100% 바이패스시 키른 배가스	1,250	0.45	1.7	940	262	10.9
쿨러 배열	250	1.4	1.3	420	116	4.8

註: 1) 크링카 보유

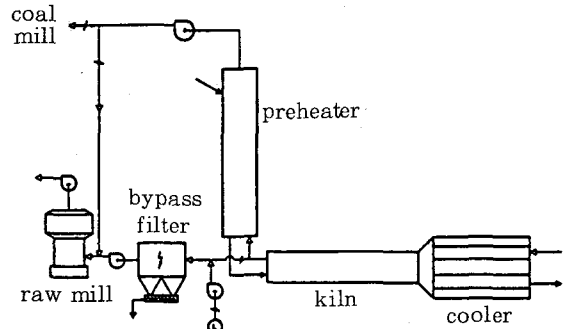
을 수 없다는 점을 주목하여야 한다. 바이패스 운전을 하면 프리히터로 배출되는 폐가스량은 감소하는 반면에 가스의 온도는 낮아진다.

<그림-2>는 프리히터 배출가스의 열손실량과 키른 입구로부터 분리되는 바이패스 가스의 비율관계를 나타낸다. 이 그림에서 calciner 에서 연소된 연료의 비율을 50~65% 사이를 변화시켰고 가스의 바이패스 비율이 증가하면 상대적으로 프리히터에서 배출되는 가스량은 감소하여 배출가스의 온도는 낮아진다. 이 두 가지 효과는 배출가스의 열손실을 비례적인 감소 이상으로 줄일 수 있다. 만일 推氣(tertiary air) 또는 프리히터 중간에서 가스를 인출한다면 배출가스량 및 온도는 같이 감소할 것이다.

1) 키른입구에서 가스의 바이패스

<表-3>에 나타나듯이 키른으로부터 인출되는 바이패스率을 높일 경우 바이패스 가스의 열손실은 배출가스의 열손실의 대부분을 차지하게 되며 또한 만일 키른가스를 완전히 바이패스시키면 그 손실은 보다 증가할 것이다. 키른 배출가스의 온도가 고온인 즉 많은 열을 함유하고 있는 것을 고려할 때 이 고온의 키른 배출가스에서 열회수의 가능성이 가장 크다는 것은 명백하다. 크링카 생산량이 1,000 톤/日인 플랜트에서 100% 가스를 바이패스시키면 10 MW 이상의 출력이 가능하다.

보통의 바이패스 시스템으로는 바이패스 가스와 함께 공정에 유입되는 부적합한 물질 때문에 원료와 coal 건조에 폐열을 직접 활용할 수 없고 집진시킨 후 원료의 건조 등에 사용될 수 있다. 독일 시멘트 플랜트의 경우 원료의 수분함

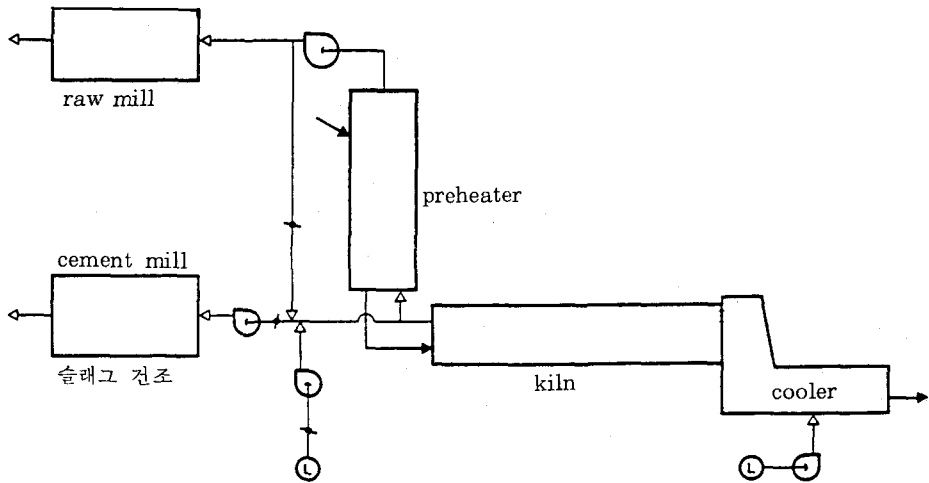


<그림-3> 원료의 건조를 위해 프리히터 排熱에 키른 排熱을 연결시켜 이용하기 위한 공정도

량이 때때로 많아서 프리히터 배출가스의 열량만으로는 건조에 충분치 않은 곳에 이 방법을 사용하고 있다. 키른입구에서 10%의 가스를 인출하여 350°C로 공냉시켜 전기집진기로 集塵시킨 후 淸淨가스를 프리히터 배출가스와 함께 건조 및 분쇄공정에 보낸다. 이 시설의 흐름도를 <그림-3>에 나타낸다.

高爐슬래그의 건조를 위해서는 除塵시키지 않은 바이패스 가스나 프리히터 배출가스를 공냉시킨 후 직접 사용할 수 있다.

이 방법은 1985년부터 오스트리아와 독일의 시멘트 플랜트에서 사용되어 왔다. 그 흐름도는 <그림-4>이다. 슬래그는 시멘트분쇄기로 공급되어 공기와 혼합된 바이패스 가스에 의해 건조된다. 이 방법의 장점은 적은 비율로 가스를 바이패스시킴으로써 이들 키른플랜트에는 유해한 물질을 포함한 폐연료를 연소시킬 수가 있으며 바이패스 가스는 분진을 제거하지 않아도 된다는 점이다. 그 분진은 시멘트와 직접 혼합되고 분진함량이 적어서 제품의 품질에는 하등의 영

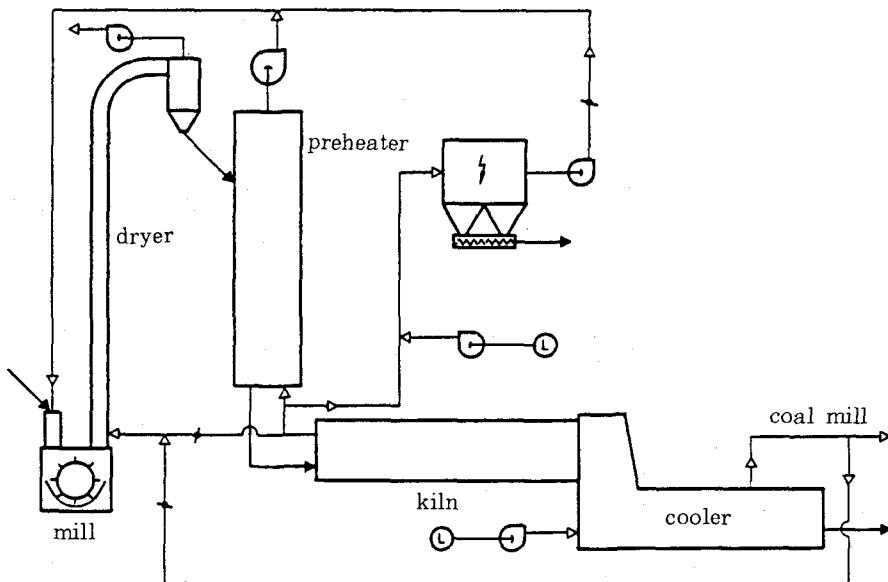


〈그림-4〉 슬래그의 건조를 위해 프리히터 排熱에 키른 排熱을 연결시켜 이용하기 위한 공정도

향을 주지 않는다. 한편 별도로 운전하는 熱風爐가 필요 없을 수도 있다.

또한 원료의 수분함량이 매우 많아 프리히터 배출가스열과 크링카 냉각기의 배출공기열 모두가 건조에 충분치 못할 경우 키른입구에서 가스를 바이패스시키는 방법을 활용할 수도 있다. 이런 방법이 영국에서 19%의 수분을 함유한 여과된 폐기물(raw slurry)을 급속건조기(flash dryer)가 있는 총저햄머분쇄기로 잔존수분이 2%가 되게 분쇄하는 공정설계에 활용될 예정이

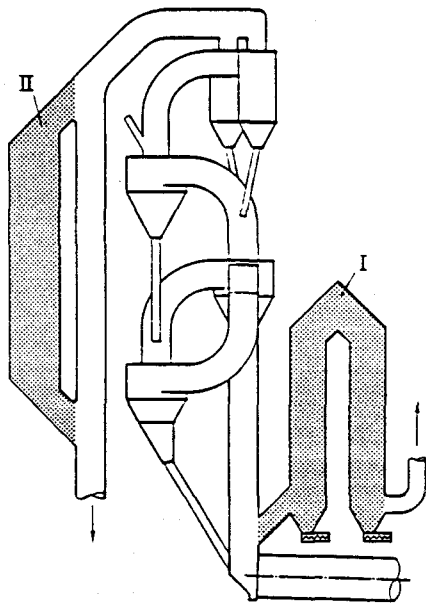
다. 그 흐름도는 〈그림-5〉이다. 이 그림에서는 低알칼리 크링카를 생산하기 위해서 이와 같은 바이패스 운전이 필요하다. 키른입구에서 인출한 바이패스 가스는 외부공기로 400℃까지 냉각시키고 분진 및 유해물을 제거한 후 프리히터 배출가스와 함께 원료건조에 활용한다. 이 바이패스 가스와 프리히터 배출가스의 총열량이 건조에 충분하지 않을 경우는 키른입구에서 인출한 추가가스와 크링카 냉각기의 배출공기를 함께 건조기에 공급한다. 이러한 설비로 건조용



〈그림-5〉 건조를 위해 소성공정의 모든 배열을 이용하기 위한 공정도

가스의 온도 및 열용량이 증가되어 21%의 수분이 함유된 원료를 열풍기에 의한 추가열공급 없이 건조시킬 수 있다. 약 1,250℃에 달하는 바이패스 가스는 급속건조기(flash dryer) 뒤에 설치되어 있는 fan에 의해 조절된다. 냉각기 배출공기의 일부는 coal 분쇄기의 건조에 자주 활용된다. 키른배출가스를 폐열보일러에 이용할 경우는 분진함량이 약 30 g/m³인 것을 염두에 두어야 한다. 이러한 먼지와 기체상태의 유체는 보통 상당량의 유황과 염소화합물을 포함하고 있어 냉각표면적에 비례하여 부착물을 형성, 제거하기 어려운 단단한 코팅이 된다. 때문에 1,250℃의 키른배출가스가 열회수장치에 적절히 공급될 수 있는지와 冷空氣의 혼합 또는 다른 가스에 의한 냉각기 또는 물살포에 의해 충분히 냉각하여 코팅생성을 확실히 조절할 수 있도록 먼저 냉각시켜야 되는지를 검토해야 한다.

이러한 기술을 엄밀히 시험해 볼 목적으로 KHD Humboldt Wedag, Cologne 社は 보일러 엔지니어링 회사인 L. C. Steinmüller, Gummer-sbach 社와 기술제휴하여 현재 폐열보일러를 feed end housing에 직접 연결하는 설계를 개발하고



<그림-6> 키른 입구에 연결된 폐열보일러(I) 및 프리히터 배기 duct에 연결된 폐열보일러(II)

있다. 이런 폭넓은 시험으로 운전조작에 필요한 정보를 얻을 수 있고 최대의 열회수를 가능케 할 것이다. 또한 속도조절이 가능한 피스톤 조작기계에 發生蒸氣를 직접 사용하여 전기적 에너지로의 전환에 따른 손실을 배제할 수 있도록 노력하고 있다.

가존 플랜트의 이러한 보일러시설이 <그림-6>의 I에 나타나 있다. 이 설비의 매우 중요한 설계사항은 空氣力學的 래핑(rapping) 설비에 의한 적절한 청소 및 분진의 제거와 코팅제거 등이 가능한 방법이다. 2패스(pass)보일러에서 각 pass의 함유분진은 다르며 분리해서 처리할 수 있다. 상상하건데 설비의 양자택일에 따라서 바이패스 가스는 단지 350℃까지 폐열보일러에 사용된 다음 원료건조에 더 많이 활용될 수 있으며 따라서 보일러 용량은 충분히 적게 될 것이고 어느 상황에서는 가스의 분진을 제거하지 않고 사용 가능할지도 모른다.

2) 프리히터의 배출가스

프리히터에서 배출되는 가스는 다량의 열을 함유하고 있다. 1,000톤/日-시멘트 생산플랜트에서 출력은 8.6MW로 계산되며 가스온도는 350℃이고 분진함유량은 약 25 g/m³ 정도이다. 일반적으로 그 분진은 점도가 높지는 않지만 화학성분에 따라 코팅을 형성하거나 고온의 표면에 부착되는 경향이 있다. 그러므로 이 경우 사용될 보일러는 효과적인 청소설비를 갖추어야 한다.

만일 원료의 수분함량이 적어서 단지 건조에 프리히터 배출가스 중 제한된 양이 필요하다면 <그림-6>의 II와 같이 350℃에서 200℃ 이상의 온도범위의 배출가스를 활용하여 폐열보일러를 설치할 수 있다.

200℃에서 100℃까지의 폐열은 물 대신 有機的作用매체를 사용하는 ORC 공정을 추가로 설치하여 發電할 수 있다.

熱併合發電을 위한 재래식의 폐열보일러는 이미 수많은 플랜트의 프리히터 출구 duct에 직접 설치되어 왔다.

1MW 용량의 경우 수직형의 단순압력 보일러로 7 bar와 290℃의 증기를 발생하고 압력

손실은 80 mmWG가 되며 시멘트 플랜트 중앙조정실에서 동시에 운전된다. 이 보일러의 운전이 아직까지는 시멘트 생산에 방해가 되거나 생산량을 감소시키는 원인이 되지는 않는다. 반대로 시멘트 키른이 가동 중지되면 모든 열회수 시스템은 가동 중지되어야 한다. 그러나 바로 push button control에 의해 간단히 재가동할 수 있다. 이 시스템의 發電效率은 17.8%이고 正味發電量은 10.8 kwh/톤-cl'이다.

보일러 가열표면을 청소하기 위해 空氣力學的 音波청소기(140 dBA, 200~300 Hz)가 설치되었으나 이것은 단지 표면이 많이 오염되었을 때 대처할 수 있고 지속적인 가동하의 어떤 일정량의 오염은 피할 수 없다.

각각의 생산능력이 3,800 톤/日, 5,400 톤/日, 6,500 톤/日인 대형 로터리 키른을 가동하는 일본의 시멘트 플랜트에 發電을 하기 위해 다단터빈을 설치하였다. 이 터빈의 운전매개물질인 물은 크링카 쿨러의 배기가스에 의해 증기가 된 후 열용량이 더 많이 냉각기배기와 프리히터 배출가스에 의해 과열된다. 일정량의 중간증기와 과열증기를 20.4 MW 용량의 터빈으로 공급하며 크링카 생산량과 비교해 볼 때 31.1 kwh/톤-cl'의 출력을 얻는다.

이렇게 복잡한 설비에 최대한의 운전효율을 기하고 생산능력을 얻기 위해서는 폭넓은 자동 제어 시스템에 의존해야 한다.

일본에서 발간된 보고서에 의하면 일본은 1981년까지 이미 6개의 키른에 열병합발전 시설을 하였고 또다른 4개의 키른에 이 시설을 할 예정이다.

3) 냉각기 排氣

그레이트 쿨러에서는 독특한 운전조건 때문에 150℃~400℃의 넓은 온도범위의 공기가 다량으로 배출되는데 일반적으로 이 공기는 분진이 제거되어야 한다. 함유분진량은 크링카의 粒狀性質에 크게 의존할 것이다. 특별한 활용목적을 위해서 두 지점의 다른 위치에서 공기를 인출하여 고온부분과 저온부분으로 나누어 공급할 수 있다.

몇년 전에는 크링카 냉각기의 배기를 때때로

물을 가열, thermal oil의 열전도용 건조에 사용했다. 그 결과 크링카 분진에 의해 배기를 이용한 열교환 장치에 마모현상을 심하게 일으키지 않는다는 경험을 얻었다. 따라서 열효율은 배기의 先處理 즉 집진을 하지 않고 안전하게 증가시킬 수 있으며 열교환기 뒤에 설치하는 집진기의 처리용량 및 크기를 축소시킬 수 있다.

크링카 냉각기배기에 함유된 열은 이미 언급하였듯이 증기를 발생시키는데 250℃에서 150℃의 온도범위에서 활용하고 병행하는 ORC 공정에 2단계로 70℃까지 사용한다. 이 온도는 배기가 아직 충분히 露點보다 높기 때문에 가능하다. 생산능력이 1,000 톤/日인 시멘트 플랜트 키른에서 이러한 공정으로 1단계에서 약 0.6 MW, 2단계에서 0.3 MW의 출력을 얻을 수 있다.

<참 고 문 헌>

- 1) Pat.-Anm. KHD AG et al. (Steinmüller) Europa Pat.-Anm. Nr. 84113750, 9. Feb. 1985.
- 2) Mohrenstecher, H.: Nutzung des Wärmepotentials von Teilgasabzügen an Zementdrehrohröfen. VDZ Kongreß, Düsseldorf. Sept. 1985.
- 3) Lang, Th. A., und Mosimann, P.: Energierückgewinnung in einem Zementwerk. TIZ-Fachberichte. Vol. 107, Nr. 11. 1983. S. 816-821.
- 4) Noguchi, K.: The Japanese Cement Industry Today-New Ideas and Developments, ICS Proceedings, USA. 1982.
- 5) Chevalley, B.: Possibilities of Waste Heat Utilization. Fourth Techn. Meeting Arab Union, Tripoli, Libya, Oct. 1984.
- 6) Bornschein, G.: Wechselbeziehungen zwischen der Entwicklung der Zementproduktionstechnik und der Nutzung von Sekundärenergie. Silikattechnik 35 (1984) H. 12, S. 355-357.
- 7) Gardeik, H. O., und Schwertmann, T.: Rückgewinnung der Abgasenergie beim Prozeß zum Brennen von Zementklinker. Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, 1982.

<資料 : ZKG 2/86 > ♣