태양로의 현황과 전망

김창규, 김무길

The Current Status and Prospects of Solar Furnace

C. G. Kim and M. G. Kim

1. 태양로의 원리

최근 고온공학과 밀접한 고온발생기술 중에서 전자빔 가열, 플라즈마 등과 함께 태양로 및 아크 이메이지로라고 불려지는 가열로가 있다.

이 두가지를 열 이메이지로(爐)라고 부르지만 보통의 노(爐)와는 달리 직접 가열법은 아니다. 결국 일종의 광학계로 렌즈 또는 반사경을 이용해서 다른 열원으로부터 방사에너지를 집중하는 시스템이다.

태양로라고 하는 말은 기발한 인상을 줄지 모르지만 열원은 태양으로부터 얻어 광학계를 이용하여 그 에너지를 집중하고 그 초점에서 고온을 얻으려는 것으로 더욱 쉽게 말하면 돋보기를 사용하여 태양광을 집중시키면 검은 종이가 타기 시작하는 것과 같은 원리라고 말할 수 있는 것이다.

열원으로서 태양은 약 6000K의 고온으로 흑체방사를 하는 것으로 간주하지만 지구표면에서 이 에너지를 이용할 경우에는 대기권을 통과할 때의 수증기, 탄산가스 등에 의해 흡수·부유하는 먼지, 스모그, 구름 등으로 감쇄하기 때문에 이상적인 반사경을 이용해도 최고 도달온도는 약 4000K라고 생각할 수 있다. 태양로로서 지금까지 건설된 것 중에서 직경 약 50cm 렌즈를 19장 이용한 렌즈식 외에는 전부 방물면 반사경을 사용하고 있다. 이 반사경의 구경도 1.5m에서 최대 54m 직경의 대형 반사경이 있다.

이상적인 방물면경은 평행광선이 입사되면 그 상은 초점의 한점으로 되어 연결되지만 태양광선은 실제로는 평행광선이 아니다.

결국 지상에서 태양을 바라보면 한점이지 않고 각도로 32분의 격차가 있고, 이 때문에 방물면경의 초평면을 포함하는 초점에서는 태양의 상이 어떤 영역을 가지게 된다. 따라서 방물면경의 초점거리를 f라고 하면 태양상 즉, 가열면적의 직경 d는 $d=2\tan 16' = 0.0093f$로 되고, 가열면경의 범위는 오로지 방물면경의 초점거리의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

이 때문에 직경 1.5m의 반사경과 15m의 반사경의 어느 쪽이 고온으로 얻을 수 있을까 하면 큰 쪽이 고온을 얻을 수 있을 것으로 생각되지만, 초점거리가 늘어남에 따라 가열면경이 크게 되는 것 뿐이다.

보다 고온을 얻으려고 하면 방물면경의 구경과 초점거리의 비(D/f, 구경비)가 크지 않으면 않된다. 그림 1에 방물면경의 단면도를 나타내었으며 보통의 방물면 반사경의 D/f값은 2.2~2.4로

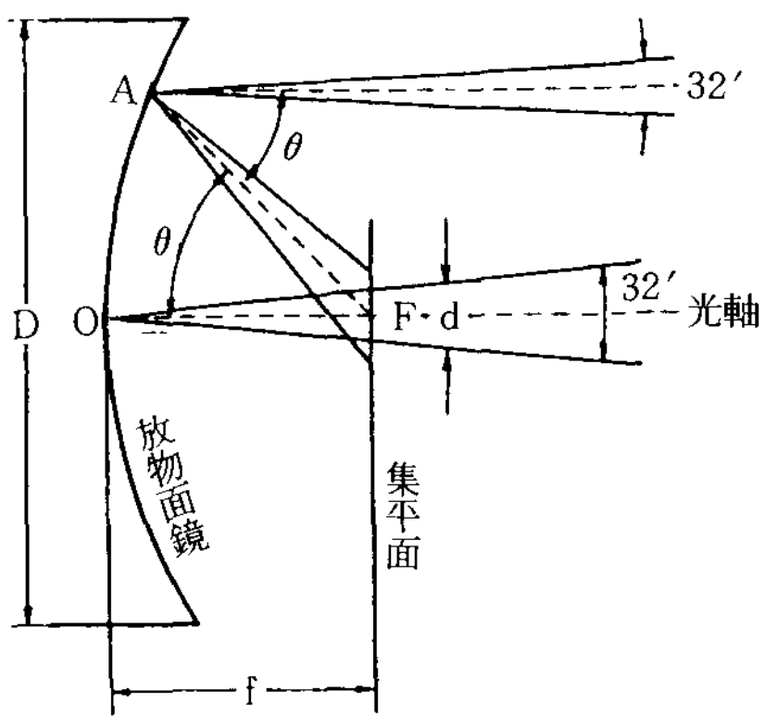

그림 1. 회전방물면 반사경의 단면도

부산공업대학교 금속공학과

이 값이 4가 되면 반사경의 상하의 끝을 연결한 선과 광축의 교점에 초점이 온다. 더욱이 D/f값이 크게 되면 초점은 반사경 안으로 들어간다.

바꾸어 말하면 반사경의 집중률은 구경비의 값이 크게 됨에 따라 높게 되고 보다 고온을 얻을 수 있게 된다. 그렇지만 방물면경의 제작은 실제로 상당히 까다로운 것으로 보통 사용되고 있는 태양로의 값은 2.3 전후가 많다. 실제로 태양로에서 얻을 수 있는 최고 도달온도는 3500℃~3800℃로 생각해도 좋다. 그림 2에 광학계의 형식, 표 1에는 대표적인 태양로의 제원을 각각 나타내었다. 앞에서 돋보기의 원리라고 하였지만 고온 태양로의 집중률은 월등히 높은 약 3만배 이상으로 면경의 기하학적 정밀도도 상당히 높은 것이 요구된다. 수cm 각의 평면경을 많이 준비하여 이들의 각 반사경으로부터 반사광이 같은 일정한 면적내에 모아지도록 한장한장의 렌즈를 조절하면 천 수백도의 온도에 도달하는 것은 가능하지만 2000℃ 이상의 고온은 얻을 수 없다.

그림 2에 나타낸 형식에서 직달식은 방물면경을 직접 태양의 움직임에 따라 회전시키지만 헤리오스타트 보조 평면경을 사용할 경우에는 이 평면경을 움직여서 태양의 움직임을 자동적으로 추적하는 형태로 되어 있다.

반사경은 유리표면 혹은 뒷면에 은과 알루미늄 등의 반사재료를 도금하기도 하고 증착한 것이 많고 경우에 따라서는 로듐을 코팅한 동경 등이 사용된다.

어느것이든지 이들 반사경의 반사율은 70~85% 정도이기 때문에 보조 평면경의 수가 늘어남에 따라 에너지 손실은 크게 된다.

지금까지 각국에서 만든 태양로의 수는 수백기

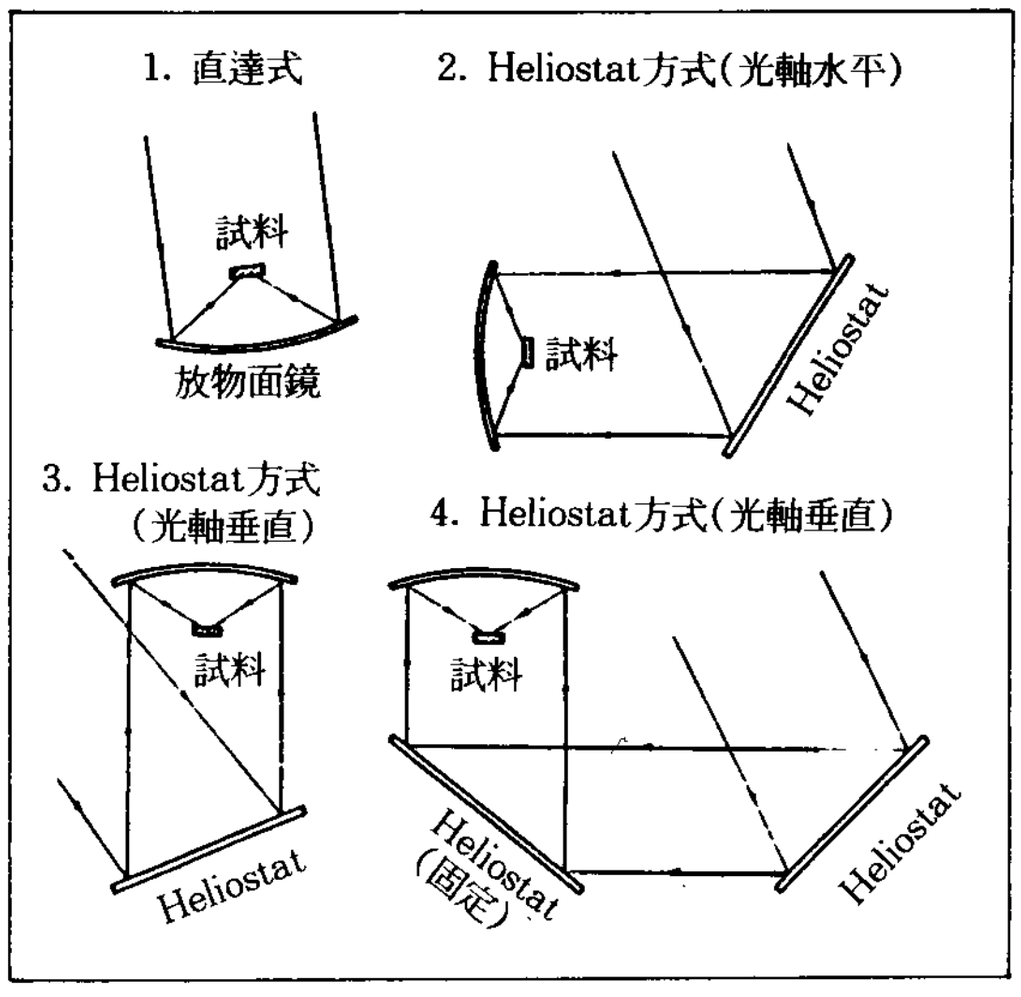

그림 2. 태양로의 형식

이상이며 대표적인 것을 표 1에 나타내었다. 군사용의 태양로는 고온을 목적으로 하는 것이 아니고 핵병기의 열방사 영향을 조사하기 위한 것으로 방물면경이 아닌 구면경을 사용하여 가능한 한 넓은 면적안에 같은 모양의 열방사를 받을 수 있도록 설계된 특수한 목적용 태양로이다.

태양로의 집접에 있어서 온도분포를 측정한 예를 그림 3에 나타냈으며, 태양의 중심과 테두리이 온도차는 종류에 따라 다르지만 3000K인 경우 50~80K 정도의 차는 인정된다.

그렇지만 이 경우는 방사가열이기 때문에 전기로 속에 시료를 장입해서 가열할 경우와는 다른 양상을 나타낸다. 즉 태양에너지가 집중되는 태양상 내에서는 상당히 고온이 되지만 그 주변 조사시료의 측면 혹은 뒷면에 수백도에서 수천도 정도밖에 되지 않는다.

표 1. 태양로의 제원예(헬리오스태토 광축수평식)

	명 공 시	동북대계측연	프랑스 피레네 Font-Romeu	미 육 군 QMRC Natick
반사경구경(m)	1.5	10.0	45.0	9.1×9.1
집 점 거 리(m)	0.64	3.2	18.0	10.7
구 경 북	2.3	3.1	2.2	1.0
태 양 상 경(mm)	6.0	33.0	180.0	124.0
반 사 율(%)	75	90	—	87
최대방사속밀도(cal/cm²sec)	500	(3400℃<)	—	100
비 고				

따라서 어느 일정한 온도를 유지하고 있는 전기로 안에 장입한 시료 전부가 가열된 노의 온도에 가깝다고 하는 것과는 다르고 태양로의 경우는 조사시료의 표면이 광자를 받아 열 에너지로 변환해서 온도가 상승한다. 그 때문에 반사율이 상당히 높게 연마된 금속면 등은 용융점이 낮음에도 불구하고 용해하기 어렵다(정확하게 말하면 용융을 하는데 비교적 긴 조사시간이 필요하게 된다)라고 말할 수 있다.

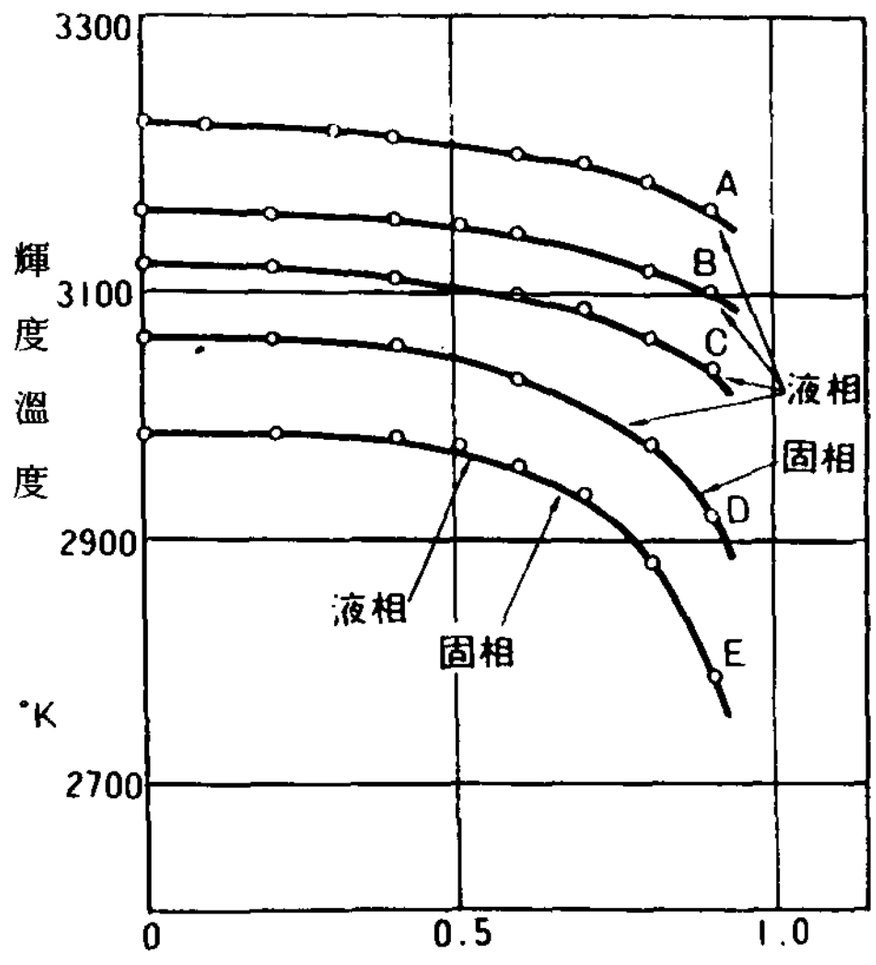

그림 3. ZrO_2시료표면의 휘도온도 분포

A : 셔터개각도 90°, B : 80°(98%)
C : 85°(93%), D : 70°(67%) E : 66°(61%)

원래 태양상의 직경에 가까운 얇은 시료로서 동시에 용융점이 약 2000℃보다 낮은 것이면 시료 전체가 용이하게 녹아 둥근 모양으로 되어 버린다.

태양로에서 조사가열할 경우 가장 유리한 점은 보통 요로의 경우와 달리 도가니나 노벽으로부터의 오염이 전혀 없는 점, 결국 시료 자체의 면적 부분만이 가열할 수 있는 점과 전장이나 자장 등의 소요없이 상당히 독특한 가열수단이라고 말할 수 있다.

2. 태양로의 용도

이상과 같은 가열특성을 가진 태양로가 지금까지 재료의 연구에 어떤 역할을 해 왔는지 살펴보면 1936년에 캘리포니아공과대학에서 렌즈식의 것이 최초로 만들어졌지만 세계적으로 고온발생 기술의 한가지로서 주목을 받게 되었던 것은 1955년 이후라고 말해도 좋다. 현재에는 미국, 러시아, 프랑스, 독일, 일본 등 각국에서 가동되고 있고 크기도 직경 1m에서 최대 54m 구경의 공업용 태양로가 있다. 태양로의 초점에서 조사가열된 시료의 온도측정이 어렵기 때문에 처음에는 단지 가열수단으로 밖에 이용되지 않았지만, 고온내열재료의 용융 및 인조광물의 합성에도 이용되고 있다.

프랑스의 태양에너지연구소에서는 지르콘 알카리 용융에 의해 산화지르코늄의 제조 및 스피텔($Al_2O \cdot MgO$), 크로마이트($Cr_2O_3 \cdot MgO$) 등의 합성이 행하여지고, 나고야공업기술시험소에서는 위레마이트($2ZnO \cdot SiO_2$), 감람석군($2CdO \cdot SiO_2$, $2SrO \cdot SiO_2$) 등의 합성이 행하여졌다. 그 외에 B_4C와 EuO, EuB_5의 합성에 관한 보고도 있다. 그러나 태양로가 고온도로서 사용되기 위해서는 어떻게 해서든지 시료의 온도를 아는 것이 필요하고 이 연구가 1962년부터 시작되었다. 처음에는 시료표면의 에너지 밀도를 표준으로 사용한다고 생각하여 칼로리미터가 여러 종류 고안되었지만 시료온도는 그 에너지 흡수열에 의해 좌우되어 시료표면의 조도, 색조, 형상 등에 의해 도달온도와 가열시간이 다르게 되기 때문에 에너지 밀도로는 충분치 못한 것을 알 수 있었다. 따라서 1700℃ 이하의 온도영역에서는 열전대의 사용이 가능하였고, 이 온도 이상에서는 보통의 광고온계와 같은 방사를 이용한 비접촉 측온법은 적용되지 않았다.

그 이유는 태양로의 초점에서 조사가열된 시료는 고온에서 시료자체의 온도방사(보통로에서는 이 에너지를 측정하여 그 휘도온도를 알 수 있다)에 더하여 시료표면에서 반사된 태양에너지가 온도계에 들어온다.

이 반사성분을 제거하지 않으면 시료의 온도에 관한 것을 얻을 수 없다. 단적인 예를 들어보면 초점위치에 거울을 놓았다고 가정해보면 온도계로 측정하고 있는 것은 거울에 비친 태양온도를 측정하고 있는 것이지, 거울 자체의 온도는 알 수 없다. 이와같은 현상은 태양로 뿐만 아니라 아크이메이지로, 플라즈마 젯트가열, 전자빔로

등의 가열때에 일어나고 있고, 시료에서 방사된 에너지만을 얻는 것이 필요하다.

태양로의 경우는 1960년경부터 각국에서 이 문제를 연구하기 시작하여 여러 방법이 고안되었다.

그 방법으로는

1) 특수한 필터 또는 특별한 파장역을 이용하는 온도 측정법

2) 회전섹터 또는 쵸파를 이용하는 방법

3) 용융시료 표면의 경면반사(규칙반사면)을 이용하는 방법

4) 흑체 공동을 이용하는 방법

이상의 4종류로 대별되며 시료의 실제온도를 알기 위해서는 2)~4)방법 뿐이다.

2)의 방법은 미국에서 많이 이용하는 방법으로 시료전면에 섹터 혹은 쵸파를 회전시켜 반사경에서 부터 시료로 입사광을 차단한 순간 중앙의 구멍을 통하여 온도방사를 측정하고(따라서 휘도온도에 상당하는 에너지에 관한 것을 알 수 있다) 계속해서 섹터 혹은 쵸파가 시료전면에서 회전하여 이동하였을 때에는 온도방사와 반사성분의 양쪽을 관측가능하다.

따라서 이들의 펄스상의 자료를 산출하면 반사성분에 해당하는 에너지를 구할 수 있고 이것과 반사경에 들어오는 태양광과의 강도비를 구할 수 있다면 분광반사율이 산출되고 이 값으로부터 분광방사율을 구할 수 있기 때문에 실제온도가 계산된다.

4)의 방법은 프랑스 태양에너지연구소에서 이용하는 방법으로 흑체공동상의 용기를 이용하므로 처음부터 실제온도만을 얻을 수 있다.

이처럼 온도측정이 가능하게 되면서 고융점 내열재료의 고온물성의 연구가 가능하게 되고, 각종 산화물의 응고점 측정, 열팽창, 비열, 열전도율 측정장치의 개발, 열확산율의 측정, 고온 X선 회절 등 각종 연구가 활발하게 행하여 왔다. 이외에 마그네시아를 매체로 한 공기로부터의 산화질소의 합성 등 고온기상의 응용도 시도되고 있다.

3. 태양로에 의한 고온재료의 연구

태양로에서 조사가열된 재료는 수초동안에 2000~3500℃의 고온에 도달하며 수초동안에

표 2. 각종 금속산화물의 응고점

	T_{48}K	ΔTK	T_{68}K	T_{68}℃
ZrO_2	2979	28	3007	2734
HfO_2	3026	29	3055	2782
Al_2O_3	2325	16	2341	2068
CaO	2858	26	2884	2611
SrO	2872	27	2899	2626
Sc_2O_3	2676	23	2699	2426
Y_2O_3	2649	23	2672	2399
La_2O_3	2529	21	2550	2277
Pr_6O_{11}	2456	19	2475	2202
Nd_2O_3	2506	20	2526	2253
Sm_2O_3	2542	21	2563	2290
Eu_2O_3	2564	21	2585	2312
Gd_2O_3	2603	22	2625	2352
Tb_4O_7	2576	21	2597	2324
Dy_2O_3	2601	22	2623	2350
Ho_2O_3	2603	22	2625	2352
Er_2O_3	2617	22	2639	2362
Tm_2O_3	2614	22	2636	2359
Yb_2O_3	2628	22	2650	2377
Lu_2O_3	2700	23	2723	2450

균일한 온도분포를 나타낸다.

또한 대기중에서 입사광을 급격히 차단 또는 입사시켜서 급랭 및 급열이 가능하므로 고융점재료의 응고점 측정, 고온내화재료의 기초연구에 없어서는 안될 고온 평형상태도 작성과 고온상의 구성, 안정상의 연구 등이 행하여 왔다. 태양로의 온도조절에는 방물면 방사경에 입사하는 태양반사의 빛의 양을 조절하므로 가능하고 문, 커튼 등을 이용한 빛의 양 조절은 쉽다.

그림 4에 용융가열한 시료의 냉각곡선을 얻어 응고점, 고상에서의 전이점을 측정한 예를 들었다. 지르코니아의 경우는 과냉각이 일어난 후 응고에 의한 발열, 고상에서의 입방 즉 정방정으로 전이(2350℃)가 확실히 나타나고 있다. 또한 냉각속도는 약 2300℃/sec임을 알 수 있다.

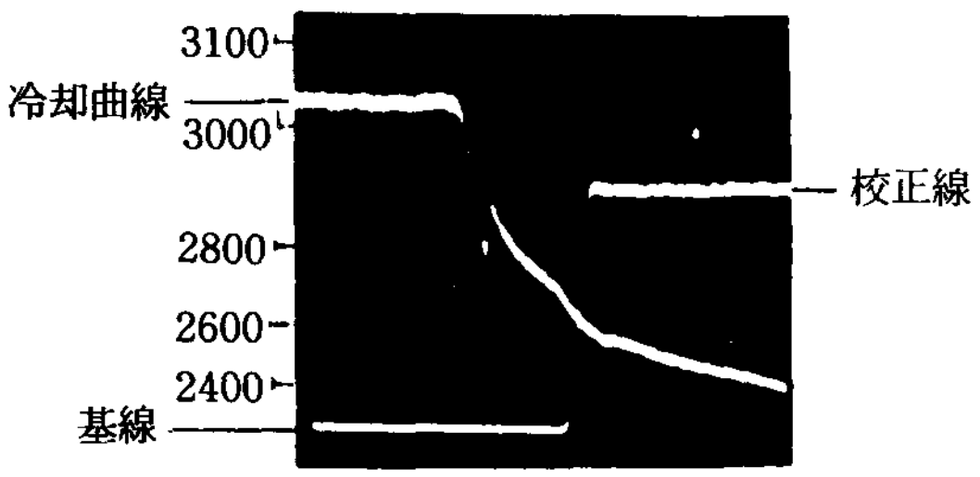

그림 4. 냉각곡선의 오실로그로프

알루미나의 경우는 전형적인 평탄부분을 나타내고 응고 때문에 발열이 일어남을 알 수 있다. 이 처럼하여 측정한 고융점 금속산화물을 표 3에 나타냈다.

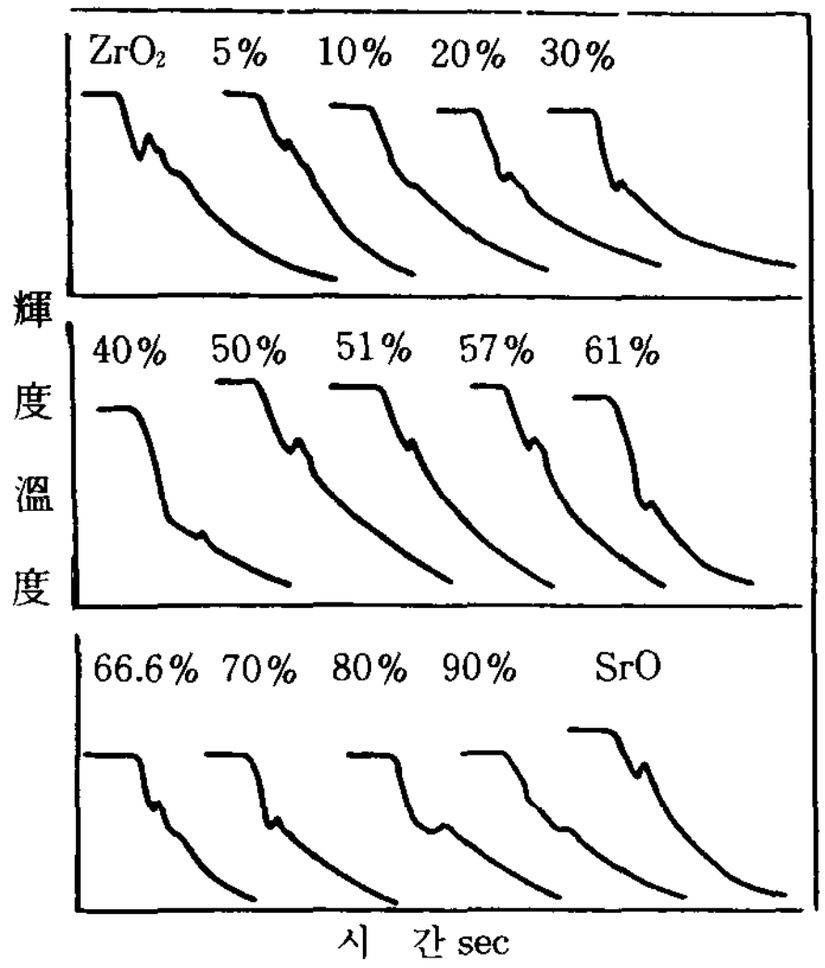

그림 5. ZrO_2 -SrO계의 냉각곡선

또한 단일화합물 뿐만 아니라 그 성분계의 금속산화물에 관해서도 액상선을 측정하여 그들의 고온평형상태도 작성을 하였다.

그림 5에서 7에 $SrZrO_3$ SrO와 ZrO_2계의 냉각곡선, 응고점 측정 및 상태도이다. 각 조성의 고온에서의 구조 열성상 및 화합물의 상태를 알수 있다.

지금까지 태양로를 이용하여 측정한 각종 2성분계의 액상선을 그림 8에 나타내었으며 ZrO_2-CaO, ZrO_2-TiO_2, Y_2O_3-Al_2O_3계 등의 고온 평행상

표 3. 각종 금속산화물의 융점에서의 증발률

	중 량 감		융 점
	(g/cm^2 min)	(mol/cm^2 min)	(±20℃)
ZrO_2	5.3×10^{-4}	4.3×10^{-6}	2706
SrO	1.7×10^{-2}	1.6×10^{-4}	2599
Al_2O_3	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-6}	2065
Y_2O_3	4.2×10^{-4}	1.9×10^{-6}	2376
MgO	9.0×10^{-3}	2.2×10^{-4}	(2800)
$SrZrO_3$	3.4×10^{-3}	1.5×10^{-5}	2646
$MgO\cdot ZrO_2$	2.3×10^{-3}	1.4×10^{-5}	2121

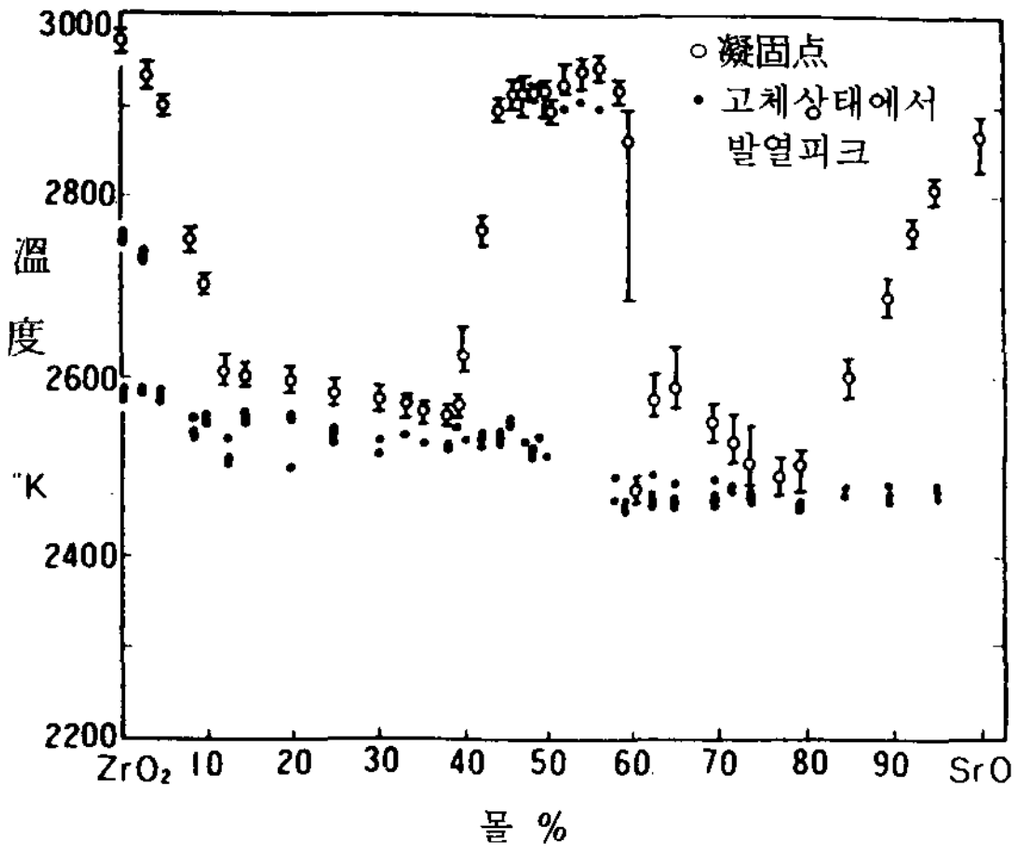

그림 6. ZrO_2-SrO계의 응고점측정 데이타

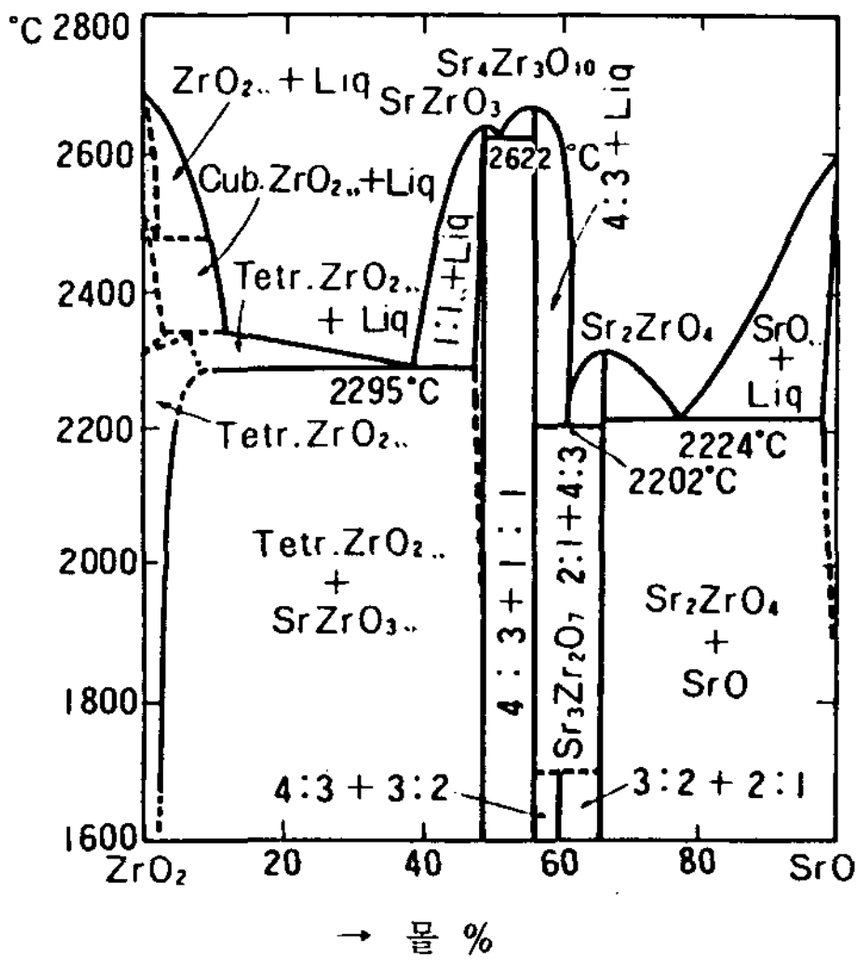

그림 7. ZrO_2-SrO계의 평형상태도

태도가 발표되고 있다.

이와같은 연구는 일본의 나고야공업기술시험소와 프랑스의 초내화물연구소에서 주로 실시하고 있으며 이에는 고온발생기술과 고정밀도의 온도측정기술의 개발이 전제되어야 한다. 고온재료의 내열성에는 구조, 전이 및 증발률이 문제가 된다. 표 3은 나고야공업기술시험소에서 측정한 금속산화물의 융점에 있어서 증발률이다. 이상에서 서술한 것 이외에 단결정의 육성, 고온 광화학 반응 및 광합성 등에도 이용되고 있다.

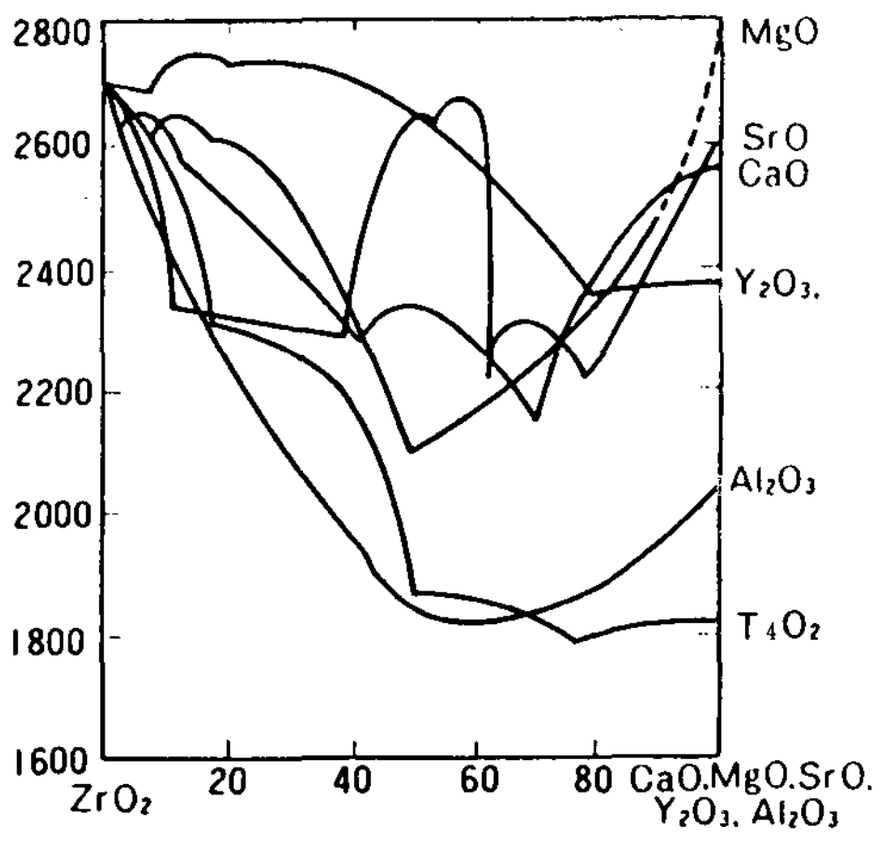

그림 8. ZrO_2-SrO계 포함 2성분계 산화물의 액상선

4. 결 론

고온공학에서 태양로의 역할에 대하여 지금까지 대략 소개하였으며 이후에는 고온열전도율, 전도도 등의 고온물성 측정과 열역학데이터 정리 등에 상당한 역할을 할 것으로 기대된다. 그러나 2000℃ 이상 고온에 도달하기 위해서는 고온태양로는 태양에너지 집광장치로의 설계와 광학계에서의 고도의 기하학적 정밀도가 요구된다. 또 태양열발전을 위한 집관은 저배율로도 좋다. 경제적인 면에서도 고온용 태양로는 사용될 것 같지 않지만 다만 열전자 방사 발전용의 집광목적으로는 고온일수록 변환효율이 높기 때문에 발전재료의 소자의 성능은 가능한한 고온이 바람직하여 정밀도가 높은 태양로가 사용될 것이다. 또한 우주공간의 실험에 태양로를 이용하기도 하며, 고진공중에서 용융하여 무중력하의 결함이 없는 단결정의 육성과 융융에 의한 고순도물질의 제조도 가능할 것이다.

태양로를 고온발생기술로서 정착시키기 위해서는 경제성 및 고정밀도의 반사경제작이 요구된다. 10m 이상의 대구경 태양으로의 경우는 평면경을 기계적으로 변형시켜 방물면을 형성하고 있다.

현재 세계 최대의 태양로는 프랑스와 스페인 국경에 접한 피레네산 중 오디요에 있는 54m 경

의 방물변경을 가지고 있는 것이데 이것은 지르코니아, 염기성 내화물, 알루미나 등의 용융내화물을 일일 약 3T 제조능력을 가지고 있으며, 또 로켓 탄주의 대기권 진입 때의 모의실험을 행하고 있다. 인류 장래의 에너지자원으로서 오일시대가 끝난뒤에 고온 열원으로서 태양로가 각광을 받는 시대가 곧 올 것으로 믿어 의심치 않는다.

참 고 문 헌

1. 今井：耐熱材料 Hand Book, (1980) 1005
2. 野口：新しい工業材料の科學一超高壓·高溫の物性と應用－“太陽爐” (1967) 268
3. 野口：日本金屬學會會報, 12 (1973) 99
4. T. S. Laszlo : Imaging Furance Techniques, Wiley, New York (1970)
5. 吉田, 篠木：日本太陽energy學會 第8回 研究論文集, (1982) 89
7. ソーラーシステム進興協會：規格 SSS-1002 (1983)