

太陽エネルギー 1

11.2

太陽炉とその応用

桜井 武 磨*

〒980 仙台市八幡 4-13-6

(1980 年 11 月 6 日 受理)

Solar Furnaces and Their Applications

Takemaro SAKURAI

Hachiman 4-13-6, Sendai-shi 980

(Received November 6, 1980)

This review presents a survey of solar furnaces and their applications. After a brief historical overview, the optics of paraboloidal concentrator, concentration ratio and attainable temperature are theoretically treated. The design and construction of large solar furnaces in the world are introduced in some detail. The application to the high-temperature physics is exemplified by the investigations carried out in the Tohoku University. The applications to the energy conversion and high-temperature industry, expected in future, are described also.

1. 歴 史 的 展 望

太陽光線を標的に集中して高温を得ようとする試みは古くからあったものと推測される。紀元前3世紀頃、Archimedes は Siracusa の湾岸に光を反射する楯を持った兵士を並ばせ、太陽光線を艦船に集中してローマ軍を撃退したという話が伝わっている。降って 18 世紀には、フランスの化学者 Lavoisier がレンズ系を使って太陽光線を集め、白金その他の物質を溶かした事実が知られているが、これが太陽炉の始めとってよいであろう。このようなレンズ系による太陽炉は、1957 年、アメリカの California Institute of Technology でも試みられたが、素材の吸収や収差などのため高度の集中が達成できないうえに、大型の素材が得がたいので、その後ほとんど使われていない。

ドイツの Straubel¹⁾は、1921 年、放物面鏡とレンズとの組合せによる太陽炉をつくり、さらに 1933 年、放物面鏡を下へ向け、ヘリオスタットと呼ばれる方向可変の平面鏡で太陽光線を上方へ送り込む太陽炉を製作したが、当時、あまり人々の関心と呼ばなかった。第二次世

界大戦の後、フランスで軍用サーチライトの放物面鏡を使った太陽炉がつくられ、これが非常に高い温度を発生したので、その後、口径 1~2 m のサーチライト放物面鏡を集光器とする太陽炉が世界の各地でつくられるようになった。このブームは、当時、ジェット、ロケットなどの高温プロセスのため、新しい耐熱物質の研究が強く要求されていたためと考えられる。

これらの炉によって 3,000°C に近い高温が得られ、種々の研究が始められたが、ここで使われている放物面鏡は焦点距離が数十 cm で、高温になる部分が直径数 mm の円内にすぎず、しかも、その温度分布が均一でないため、研究上いちじるしい制約があった。そこで、少なくとも直径数 cm の高温部分が得られるような大型炉の建設が望まれるようになり、1952 年、最初的大型炉が Trombe²⁾によってピレネーの Mont Louis に建設された。この炉の集光器は口径 10 m、入射太陽エネルギーは 70 kW_s** におよんでいる。これを契機に入力数十 kW の炉がアルジェリア、アメリカなどに設置され³⁾、さらに、1964 年、きわめて高い性能を持った大型炉が東北大学に完成した⁴⁾。Trombe は太陽炉を高温工業の手

* 東北大学名誉教授

** kW_s の S は solar の意

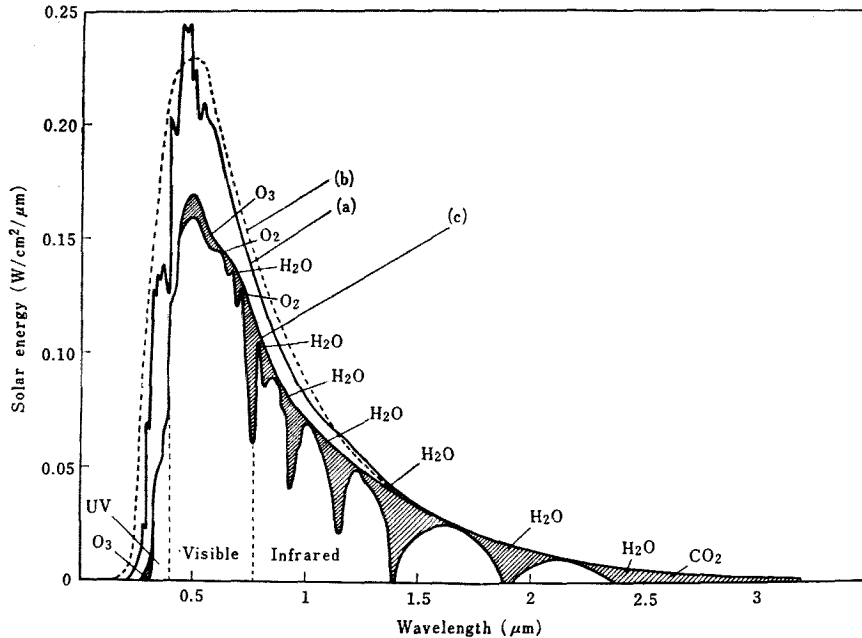


Fig. 1 Spectral distribution of solar radiation. (a) outside the atmosphere; (b) blackbody radiation at $6,000\text{ K}$; (c) sea level.

段にしようと考え続けてきた研究者で、1970年、さらに大きな炉を Odeillo に建設した。この集光器は $54 \times 40\text{ m}^2$ もあり、熱出力は $1,000\text{ kW}_t^*$ に達している⁵⁾。以上、太陽炉は歴史的にきわめて高い温度を得る装置として発達してきたものであるが、エネルギー危機の叫ばれている現在、より広い視野でこれをとらえる必要があるように思われる。

2. 太陽光線のエネルギー

太陽は直径 $1.40 \times 10^6\text{ km}$ の巨大な超高温の球体で、地球からの平均距離は $1.50 \times 10^8\text{ km}$ である。太陽円板の視直径 α は、この直径を距離で割った値 0.0093 rad で、角度にして約 $32'$ となる。したがって、焦点距離 f のレンズは直径 $\alpha f = f/100$ の太陽像を与える。

Fig. 1 において、(a) は大気圏外の太陽光線の分光分布を示し、 $6,000\text{ K}$ の黒体放射の理論的分布 (b) とよく一致している。大気圏外で光線に垂直な単位面積に単位時間に入射するエネルギーを太陽常数と呼び、その値は $2.0\text{ cal cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$ で、 1.4 kWm^{-2} に相当する。

太陽光線が大気圏を通過すると、水蒸気、炭酸ガス、オゾンなどの吸収や大気の散乱のため 30% 以上が失われ、地表の分光分布は (c) のようになる。地表において光線に垂直な単位面積に単位時間に入射するエネルギーを直達日射量 H_d と呼び、晴天のとき正午における値は

約 $1.3 \sim 1.4\text{ cal cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$ で、 $0.91 \sim 0.98\text{ kWm}^{-2}$ に相当する。この値は緯度や季節によってあまり変らない。このことは、太陽炉の効率が緯度や季節に左右されないことを意味している。

3. 集光器とヘリオスタット

太陽光線は広い分光分布をもち、平行度が高いので、集光器としては放物面鏡が広く使われている。放物面鏡の形状は二つのパラメーター、たとえば口径 D と焦点距離 f 、あるいは口径と口径比 $n = D/f$ によって決定される。 D は炉の入力を、 f と n は太陽像の大きさと強さを支配する。 D を一定にしたとき、放物面鏡は n とともに深くなり、 $n=4$ で鏡の縁が焦平面と一致する。円柱面や球面の試料に対しては n を 4 より大きくとることもありうるが、実際には平面試料がもっとも多いので、 n を 2~3 にとっているものが多い。

放物面鏡は正しい幾何学的形状を備え、光学的に平滑で、高い反射率をもつことが望ましい。面の一部に $\Delta\theta$ の変差があると、反射光は $2\Delta\theta$ だけ変差するから、錯乱円を太陽像の $1/5$ にとどめようとするならば、面の変差は $\alpha/10 \approx 1/1000\text{ rad}$ 以内、放物面鏡とヘリオスタットとで変差をわかつものとすれば、それらの変差を $1/2000\text{ rad}$ 以内にとどめなければならない。放物面鏡としては、ガラス素材を正しい形状に光学研磨し、アルミニウムを真空蒸着して適当なコーティングをほどこした

* kW_t の t は thermal の意

表面鏡がもっともよく、太陽光線に対して約 90% の反射率を期待できる。しかし、表面鏡の保守には細心の注意が必要なので、板ガラスの裏面をめっきした裏面鏡もかなり使われている。市販の板ガラスで厚さ 6 mm のものをめっきして裏面鏡とした場合、反射による太陽光線の損失は、垂直入射のときでも、ガラスの吸収による損失が往復で 17%, 裏面の反射損失が 8% で、計 25% となる。裏面鏡を使うのであれば、鉄分の少ない薄い板ガラスをめっきし、厚いガラスに接着して強度を保つのがよい。かつて、アルミニウムの鏡が使われたこともあるが、表面を光学的に平滑にすることが困難なため、いずれもよい成績を得ていない。

太陽光線は時間とともに方向を変えるので、これをたえず放物面鏡の光軸に平行に送り込む対策が必要である。Fig. 2 (a) は放物面鏡自体の方向を変えるもので、直達型と呼んでいる。(b), (c), (d) は、放物面鏡を固定し、ヘリオスタット (heliostat) を使って太陽光線を放物面鏡に送り込むもので、ヘリオスタット型と呼んでいる。直達型は、反射損失が少ないが、試料が溶融すると流れ落ちる危険性がある。(b) は試料が溶けても溶けない部分がらつとるので都合がよいが、炉が高くなる。また、(c) は反射損失が大きいの、大型炉はほとんど (d) の方式を採用している。

ヘリオスタット平面鏡は放物面鏡と同等の光学的精度を持つことが必要である。市販の板ガラスから部分的変差が 1/2000 rad 以下のものを選択することができる。方向変化は普通方位角と仰角との二つのパラメーターに

よって行なわれるが、仰角が変わると、自重分布の変化によるたわみを生ずるので、大型炉では多段式ヘリオスタットあるいは多数のヘリオスタットによるのがよい。太陽追尾の方法としては、プログラムによる時間方式、反射光の偏向を光電的に見出して修正するサーボ方式および手動方式があるが、これらを並用するのが便利である。

4. 集中比と到達温度^{6,7)}

放物面鏡で、焦平面上の平面試料に集中する太陽光線の強さは、太陽円板の輝度分布が一様であると仮定すると簡単に求めることができる。Fig. 3 において、鏡の一点で反射した光は、太陽円板の視直径 α を頂角とする円すいをなして広がり、その軸が焦点 F を通る。放物面の頂点 A からの反射円すいは焦平面上に直径 αf の太陽像をつくり、光軸外の一点 B からの反射円すいは $\alpha \rho / \cos \theta$, $\alpha \rho$ を長軸および短軸とする楕円像をつくる。放物面では $\rho = f + x$ なる関係があるから、近軸太陽像は常に軸外からの反射円すいの楕円像の中に含まれる。そこで、焦平面に集中される光の強さ E は、近軸太陽像の内部でもっとも強くしかも均一で、その外側で弱くなり、集中比 $C = E/H_s$ は Fig. 4 のような分布をとることになる。近軸太陽像内の集中比 C_m の値は、 θ の最大値いわゆる縁角を θ_m 、鏡の反射率を γ とすると、次の式で与えられる。

$$C_m = \frac{4\gamma}{\alpha^2} \sin^2 \theta_m = \frac{4\gamma}{\alpha^2} \left[1 - \left(\frac{16-n^2}{16+n^2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

このように、 C_m は n のみに依存し、 D や f には依存しない。

太陽円板の輝度は実際には一様なものではなく、Fig. 5 に示すように、中心からの距離 q とともに減少する。

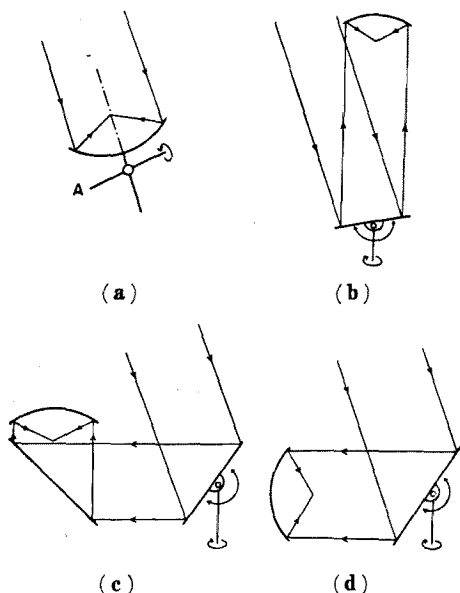


Fig. 2 Various types of solar furnace.

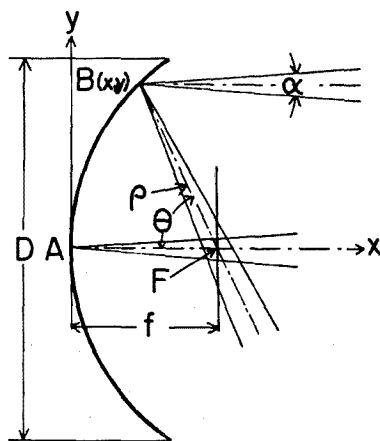


Fig. 3 Reflection of solar radiation by a paraboloidal mirror.

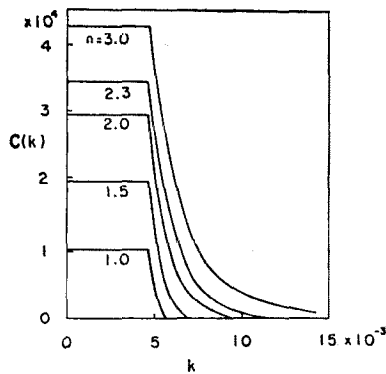


Fig. 4 Distribution of concentration ratio $C(k)$ for a flat target calculated by assuming the uniform brightness of the solar disk. ($\gamma=1$; $\alpha=0.0093$.) k is a distance from the focal point in unit of f .

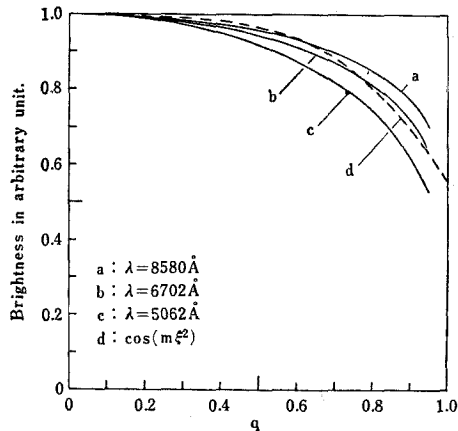


Fig. 5 Brightness distribution of the solar disk and approximated distribution function.

これを実験式で近似して計算すると、集中比は Fig. 6 のようになり、極大値は(1)式で与えられるものより 18% 大きい^{6,8)}。この図からわかる通り、集中比は n とともに増し、 $n=4$ で最大となる。したがって、焦点における到達温度を高くするだけならば、 n を 4 に近づけることが望ましいが、この場合、縁からの反射円すいは大きく広がり、一部が試料に当たることなく失われることを覚悟しなければならない。いっぽう、エネルギーを利用する場合には、全入射光線ができるだけ小さい面積にもれなく集中することが望ましく、この条件は $n=4(\sqrt{2}-1) \approx 1.66$ で満足される。このように放物面鏡の形状は炉の用途によって異なってくる。

集中された光が試料表面に当たると一部が吸収され、表面の温度が上昇する。この上昇は試料の光学および熱的性質に支配されるので、到達温度を計算することは

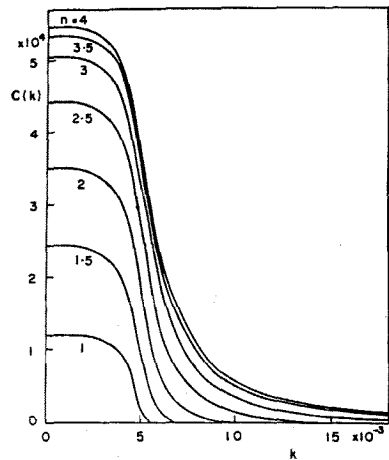


Fig. 6 Distribution of concentration ratio $C(k)$ for a flat target calculated by taking the brightness distribution of the solar disk into account. ($\gamma=1$; $\alpha=0.0093$.) k is a distance from the focal point in unit of f .

決して容易ではない。しかし、もし(1)吸収されたエネルギーが放射によってのみ失われ、(2)放射、吸収ともに Lambert の余弦法則に従うものと仮定するならば到達温度が計算でき、太陽円板が一樣な輝度をもつ場合には、近軸太陽像内でも均一でしかも最高となり、その値 T_m は次の式で与えられる。

$$T_m^4 - T_0^4 = \frac{4\gamma\kappa_n H_a}{\varepsilon_n \sigma^2} \left[1 - \left(\frac{16-n^2}{16+n^2} \right)^3 \right] \quad (2)$$

ここで、 T_0 : 周囲の温度、 κ_n : 垂直吸収率、 ε_n : 垂直放射率、 σ : Stefan-Boltzmann 常数である。太陽円板の輝度分布を考慮して計算すると到達温度は Fig. 7 のようになり⁸⁾、その極大値は(2)式で得られるものより約 4.3% 大きい。実際に酸化物を照射した場合、この値の 70% 程度の到達温度が得られると思えばよい。円柱面および球面試料の集中比と到達温度^{7,8)}については割愛することにしよう。

5. 大型炉の設計と製作

大型炉の最初のものは、1952 年 Trombe が Mont Louis につくったヘリオスタット型の炉である²⁾。この集光器は $D=10\text{m}$ 、 $n=1.67$ で、Fig. 8 のように裏面めっきした平面鏡 3,500 枚を放物面状に配列したものである。結像をよくするため、各平面鏡を枠で機械的にたわめているのが特長である。ヘリオスタットは $10.5 \times 13\text{m}^2$ で、540 枚の裏面鏡を一平面上に配列している。この炉は、到達温度が約 $2,700^\circ\text{C}$ で、初期の高温研究に成果をあげたが、すでに廃棄されてしまった。

Fig. 9 は、1955 年、フランスが Alger の郊外

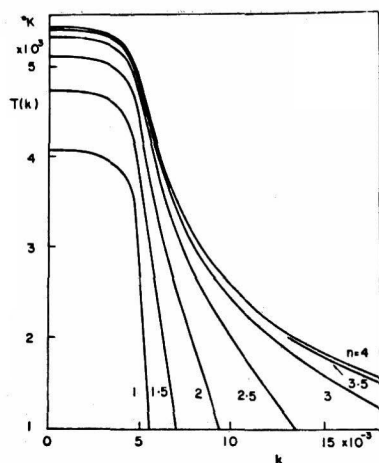


Fig. 7 Distribution of attainable temperature $T(k)$ for a flat target calculated by taking the brightness distribution of the solar disk into account. ($\gamma=1$; $\varepsilon_n=\kappa_n$; $\alpha=0.0093$; $T_0=0$; $H_0=1.3 \text{ cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$) k is a distance from the focal point in unit of f .

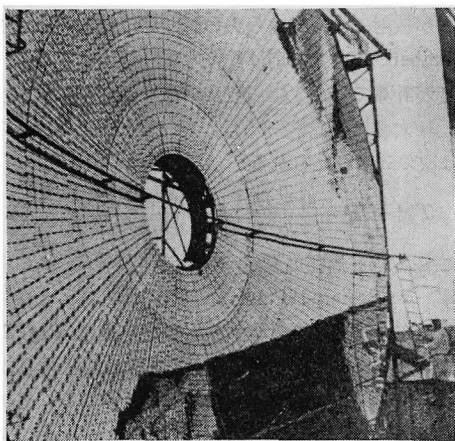


Fig. 8 Concentrator of the furnace in Mont Louis, France.

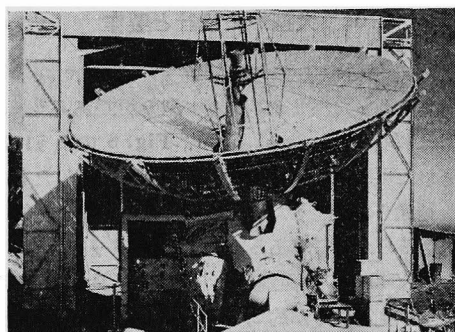


Fig. 9 Direct-incidence type furnace in Bouzareah, Algeria.

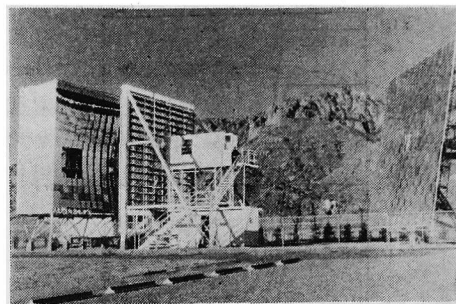


Fig. 10 Furnace in White Sands Missile Range, New Mexico, U. S. A.

Bouzareah につくった直達型の炉である。放物面鏡は $D=8.4\text{m}$, $n=2.5$ で、アルミニウム板をプレスし、表面を電解研磨してつくった 108 枚のセグメントから成り立っている。これは、完成直後見学の機会を得たが、反射面は光学的に平滑とはいえなかった。そして、この事実が著者に東北大学の炉を計画させる動機となった。アルジェリア独立後は全然使われていない。

Fig. 10 は、1957 年、アメリカ陸軍によって Massachusetts の Natick に建設され、その後 New Mexico の White Sands ミサイル基地に移された炉である³⁾。集光器は 8.5m 平方で、アルミニウムを真空蒸着し、 SiO のコーティングをした 108 枚の球面鏡から成り立ち、非点収差を少なくするため球面上に鏡を配列しているのが特長である。ヘリオスタットは 356 枚の裏面鏡を一平面上に配列したもので、集光器との間にベネチアンブラインド式の減光器がある。有効口径比は 1 でかなり小さく、到達温度も約 $2,000^\circ\text{C}$ である。

東北大学の炉は、1964 年、高温物理研究用として科学計測研究所に建設されたもので⁴⁾、平面試料に対して最高の到達温度が得られるよう設計された。形式は **Fig. 2(d)** のヘリオスタット型とし、放物面鏡は $D=10\text{m}$, $n=3.1$ で、これを 7 輪帯 181 のセグメントに分割した。セグメントの素材は、厚さ 10mm の板ガラスを耐火物の型にのせ、電気炉中で熱して沈下させてつくった。素材の表面を正しく放物面の一部に研磨するため、まず、**Fig. 11** のような研削装置をつくった。この図で、 T は光軸 X を軸とする円筒で、これに円弧 A が固定され、 X のまわりに回転する。ビーム B は O を中心として A の上を移動し、その先端にダイヤモンド工具 W をつけた高速モーター M があって、素材 G を研削する。ビームが円弧上を移動すると、工具は円軌道を描くわけであるが、それと同時に円弧上のカム C が棒 R を動かし、その変位がレバーで縮小されてモーターを微動し、工具が放物線軌道をとるようになっている。この装置で研削した表面を砂かけした後、セリアとフレキシブルピッチ面とで研磨

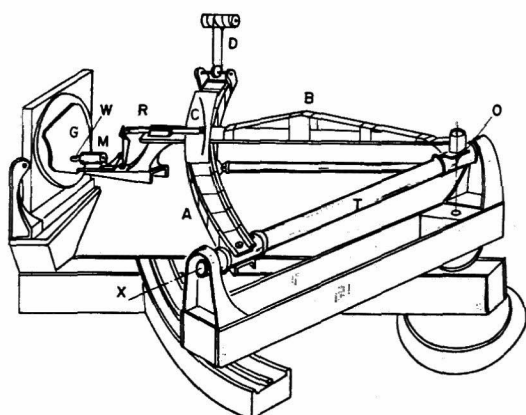


Fig. 11 Diagrammatic representation of the paraboloidal surface grinder.

し、仕上げ面にアルミニウムを真空蒸着して表面鏡とした。このような方法で、精度 $1/2000 \text{ rad}$ の面を得ることができた。しかし、もしも現在、セグメントをつくるのであれば、トロイダル面を採用したい。これでじゅうぶんよい近似が得られるのみならず、正確な面がたやすくつくれるからである。これらのセグメントは、後に、塩化ビニールのシンナー溶液中に浸した後引き上げて乾燥することによって、厚さ $1 \sim 2 \mu\text{m}$ のプラスチックコーティングを施したが、10年以上経過した現在でも良好な反射面を維持している。放物面鏡は、Fig. 12 のように、コンクリートの建物の中に納められ、前面にV字型の減光器があって、上下から光軸に近づき入射光量を加減する。

それまでの大型炉では、ヘリオスタット平面鏡が一平面上に配列されていたが、これでは、仰角が変わるとたわみを生じ、結像に影響を与えるおそれがあるので、Fig. 13 のように、円形軌道上を鉄骨が回転して方位角を変え、その上に7段の鏡帯が配列されていて、これらが同

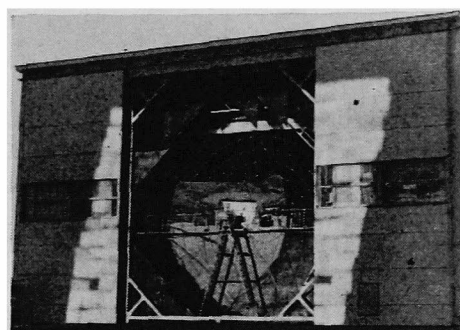


Fig. 12 Concentrator of the Tohoku University furnace, Sendai, Japan.

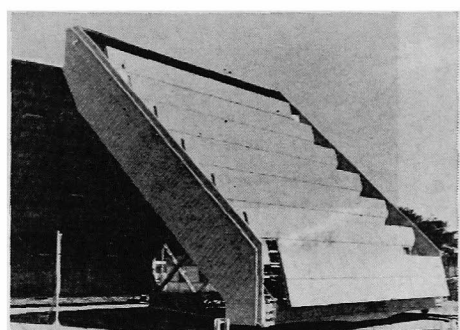


Fig. 13 Heliostat of the Tohoku University furnace, Sendai, Japan.

時に仰角を変える構造をとった。鏡帯は幅 2 m 、長さ 15.5 m で、板ガラスを真空蒸着し、プラスチックコーティングした 34 枚のセグメントで構成されている。板ガラスは市販のものから平面度 $1/2000 \text{ rad}$ 以上のものを選んだ。太陽追尾は時間方式、サーボ方式、手動方式を併用した。この炉は、グラファイトに対し $4,000 \text{ K}$ の到達温度を記録し、現在においても最高の性能を維持している。

Trombe が建設した Odeillo の炉は⁵⁾、Fig. 14 に示

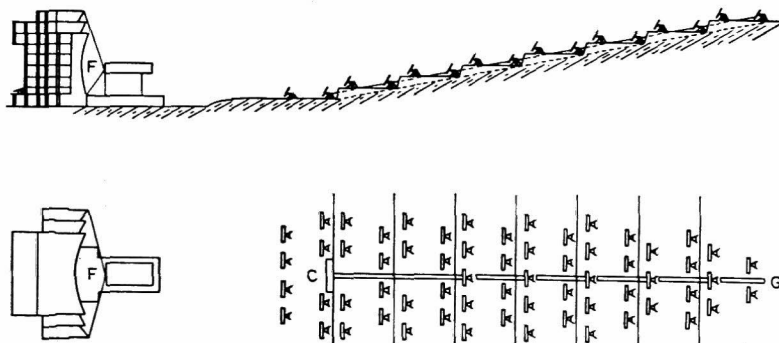


Fig. 14 Optical system of the furnace in Odeillo, France. F, focal point; C, oil station for heliostat driving; G, tunnel for oil-piping.

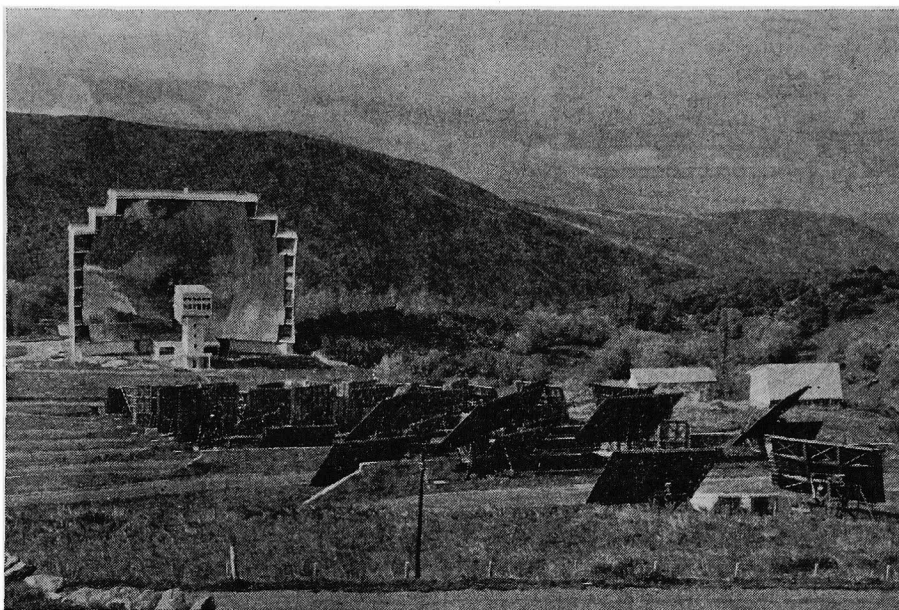


Fig. 15 Whole view of the furnace in Odeillo, France. (photo by Takebe)

すように、南斜面に配列された 63 のヘリオスタットで太陽光線を集光器に送り込んでいる。ヘリオスタット平面鏡は $6 \times 7.5 \text{ m}^2$ で、50 cm 平方のガラス裏面鏡 180 枚のモザイクである。各ヘリオスタットの前に反射光の偏向検出器をおき、ヘリオスタットを油圧で制御している。集光器は幅 54m、高さ 40 m、 $f=18 \text{ m}$ 、有効口径比が 2.8 で、45 cm 平方のガラスの裏面鏡を 9,500 枚コンクリートの建物の側面に放物面状に取り付けたものである。結像をよくするため、おのおの裏面鏡の中央を裏側から引いている。入射太陽エネルギーは 1,800 kW、熱出力は約 1,000 kW_t で、4,000 K に近い温度が得られると称している。Fig. 15 はその全景である。

6. 太陽炉による高温物理の研究

太陽炉を使ってどのような高温物理の研究ができるかということ、東北大学の炉の実例によって示してみたい。この炉は、 $n=3.1$ 、 $f=3.2 \text{ m}$ で、平面試料に対しては直径 3 cm の円内が最高の温度になり、Fig. 7 のような温度分布をとる。Fig. 16 は耐火レンガ SK 35 を照射してできた火口である。この炉を使い、 CaO 、 Y_2O_3 、 ZrO_2 、 ThO_2 などの高融点酸化物を溶かして結晶をつくったが、小さい試料の場合には、原料粉末を角柱にプレスして焦点に立て、上部だけを照射すると、流れ落ちて照射しない部分で固化し、Fig. 17 のような球状結晶が得られる。急冷を望むときは、照射中の試料を水中に落せばよい。大きな試料は、Fig. 18 のように二段の円板



Fig. 16 Irradiated refractory brick SK 35.

に原料をプレスし、水平面から多少傾けて、上面だけを溶かす。Fig. 19 はこのようにして得られた安定化ジルコニア結晶（融点 $2,677^\circ\text{C}$ ）である。いずれの場合も、溶けた試料が溶けない試料に支えられているので、るつぽによる汚染がない。酸化物は高温で常に安定とはいいがたく、化学量論的組成を保つためには酸化雰囲気中に置く必要がある場合が多い。この点で、太陽炉は酸化物の加熱に適したものといつてよい。

金属のように酸化をきらう試料は、グラファイト棒の上に乗せ、石英バルブをかぶせて稀ガスを流しながら照射する。Fig. 20 で、(a)と(b)は L 字型のタンタル

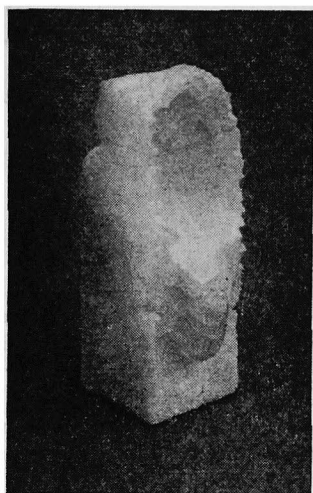


Fig. 17 Irradiated ThO₂90%-ZrO₂10% specimen (m. p. 3080°C).

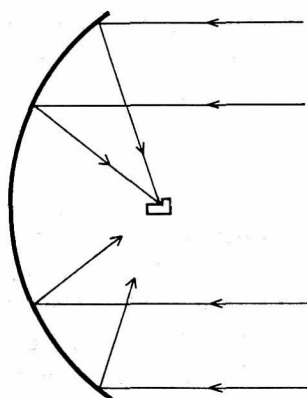


Fig. 18 Irradiation of a specimen shaped into stepped disk.

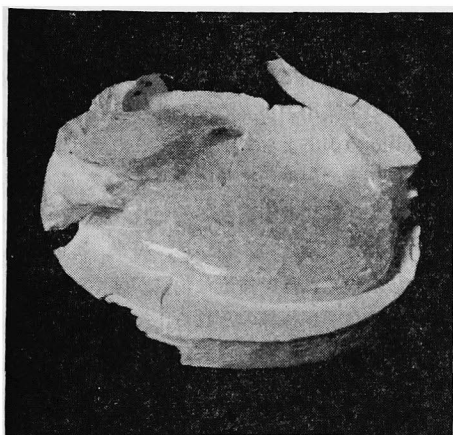


Fig. 19 Stabilized ZrO₂ specimen fused by irradiation.

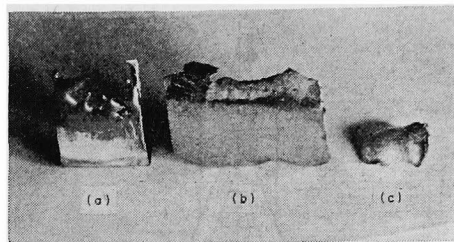


Fig. 20 Tantalum (a) and tungsten (b) plate irradiated at their upper portion. (c) is a tungsten specimen fused completely.

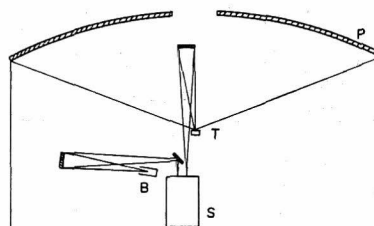


Fig. 21 Optical arrangement for infrared pyrometry. P, paraboloidal concentrator; T, target; B, reference source; S, double-beam spectrophotometer.

(融点 3,030°C) およびタングステン (融点 3,400°C) の上部だけを溶かしたものの、(c)はタングステン粉末を溶融したものである。

試料温度の計測は高温の研究に必要欠くべからざるものであるが、太陽炉の場合には試料が光線によって加熱されるため、光高温計をそのまま使用するわけにはゆかない。そこで、円筒セクターによって集中太陽光線をしゃ断し、その瞬間だけ高温計を作動させるような不便な方法がとられてきた⁹⁾。われわれの研究室では、Fig. 1 に見るように、地表において波長 1.38 μm の光が太陽光線に欠けている事実に着目し、この波長を使った赤外高温計をつくり¹⁰⁾、グラファイトや遷移金属酸化物試料の温度を照射しながら計測することができた。しかし、多くの酸化物はこの波長の光を透過するので、その後、8~15 μm の波長による赤外高温計がつけられた¹¹⁾。Fig. 21 がそれで、太陽炉で加熱された試料と電気炉で加熱された試料との熱放射を比較するものである。酸化物結晶の多くは、格子振動のため、この領域に反射も透過もほとんどない波長があるうえに、反射太陽光線もこの領域では無視できるからである。この方法で、照射中の試料表面の温度を $\pm 0.5\%$ の精度で計測できるようになった。

Fig. 22 は太陽炉を使った高温 X 線回折装置で、試料を焦点位置に固定し、X 線源と検出器とが対称的に同一軸のまわりに回転するものである。この装置を使って、

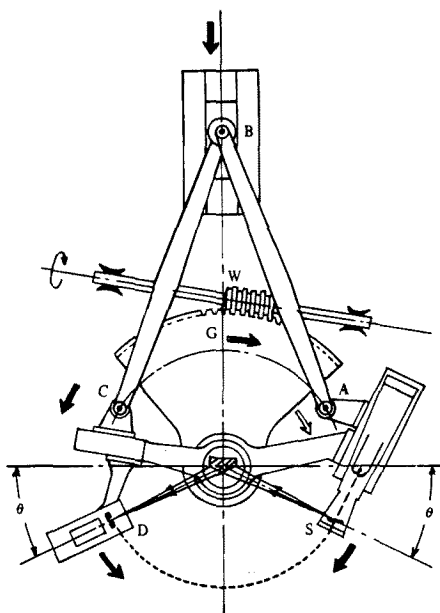


Fig. 22 Schematic diagram of the goniometer. S, X-ray source; D, detector; A-B-C, link system; W, worm; G, gear.

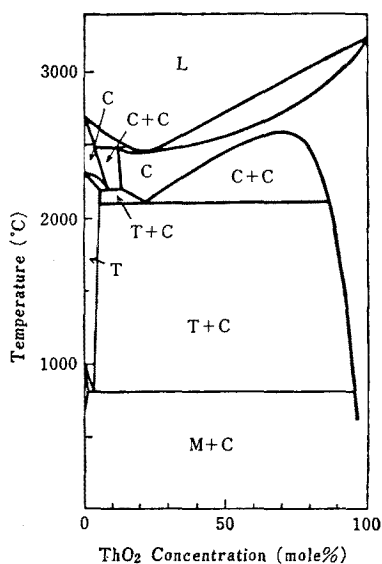


Fig. 23 Phase diagram for the system $\text{ZrO}_2\text{-ThO}_2$. C, cubic solid solution; T, tetragonal solid solution; M, monoclinic solid solution.

$\text{CaO}_2^{12)}$ や $\text{SnO}_2^{13)}$ の熱膨張を測定することができた。

Fig. 23 は太陽炉によって明らかにされた $\text{ZrO}_2\text{-ThO}_2$ の相図である¹⁴⁾。

酸化雰囲気中で高温に耐える電極が得がたいため、酸化物の電気的性質を高温において、化学量論的組成を保

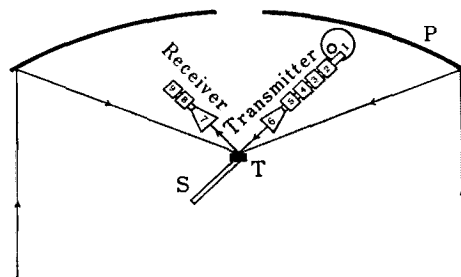


Fig. 24 Microwave ellipsometer for solar furnace use. P, paraboloidal concentrator; T, target; S, target support; 1, klystron; 2, isolator; 3, frequency meter; 4, attenuator; 5, 45° twist wave guide; 6, transmitting horn; 7, receiving horn; 8, quarter-wave plate; 9, analyzer.

たせながら計測することはきわめて困難とされていた。

Fig. 24 は、この問題を解決するために開発された 50 GHz のマイクロ波楕円偏光解析装置で、これを使い、 MgO の電気伝導度を融点まで測定することができた¹⁵⁾。

以上、著者が東北大学の太陽炉を使って行なった研究について述べたが、その頃が研究用太陽炉にとってもっともよき時代であったとも思われる。なぜならば、その後、アーキメデス炉や赤外レーザーなどの出現によって、太陽炉のユニークな特性のいくつかが太陽炉だけのものではなくなってきたからである。しかし、大型炉の魅力は色あせたとは考えられず、小型炉といえども、今後、宇宙空間における役割のあることを忘れてはならない。高真空、無重力、そして超高温が一体となったとき、結晶成長などに予測できない新しい世界が開かれてくるものと期待される。

7. 太陽炉と高温工業

Trombe は、他の炉では達成できない温度領域における高温工業を太陽炉によって実現しようと意図し、熱出力 1 MW_t の工業用炉が実際に作りうるものであることを Odeillo の炉によって示した。この炉は国立科学研究センター所属の研究所に設置されていることもあって、現在は太陽熱発電の実験に使われ、実際の生産を行っているわけではない。しかし、将来、3,000 K 以上の温度でしかつくれない貴重な物質が強く要求されたとき、このような炉が採算のとれる工業施設として建設されることもじゅうぶん考えられる。

この炉が完成してから 10 年、この間世界のエネルギー事情はきわめてきびしいものとなってきた。この結果、従来化石燃料や電力で行なってきた 3,000 K 以下の高温プロセスを太陽エネルギーで代替することを真剣に

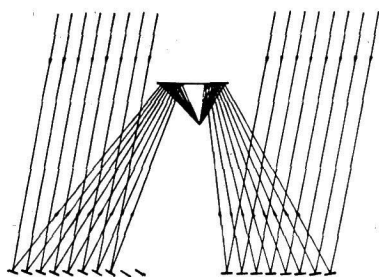


Fig. 25 Cassegrain-type solar furnace by central receiver system.

考えなければならない時がきているように思われる。そのためには、さらに大きな出力を必要とする場合もあるであろう。これを満足するには、従来の集光器とヘリオスタットとによる太陽炉よりも、太陽熱発電で試みられている中央受光器方式による太陽炉の方が容易であり、経済的であるように考えられる。この方式は、多数のヘリオスタットを地上に配列して高いところにある標的に太陽光線を集中するもので、タワー方式とも呼ばれている。著者は、最近、この方式による集光を理論的に取り扱ったが、その結果、ヘリオスタットをすき間なく配列し、適当なトロイダル面鏡を使うならば、同じ縁角の放物面鏡と同等の集中比と到達温度が得られることを知った¹⁶⁾。この方式を、Fig. 25 のように、カセグレン式に使うならば、るつばなしの熔融も可能であろうし、また、あまり温度の高くないプロセスに対しては、岩石や砂を熔融し、その潜熱によって安定した熱エネルギーを供給することもできよう。世界中で日照時間の長い地域に、このような計画が試みられてもよいと思われる。

8. エネルギー変換への応用

太陽炉の応用の一つは、その高温を利用して、太陽エネルギーを電気や燃料などの定常的エネルギーへ変換することである。太陽-電気変換の高温プロセスとしては、かなり以前から、熱電子放出と熱機関とが考えられてきた。熱電子変換については、かつて、アメリカ航空宇宙局が惑星探査機の電源として出力約 90 W の変換器をつくったことがあるが、変換効率が 6% 程度で太陽電池に及ばなかったため、使われずに終わった。この方法では、高温のエミッターと低温のコレクターとを数分の一 mm 程度のせまい間隔に保ち、この間を真空にしなければならないので、大出力の装置が作りにくく、地上の発電用としては、現在、ほとんど手がけられていない。

熱機関による発電はもっとも着実な考え方で、その方法としては、多くの直達型太陽炉を使った点集光分散方

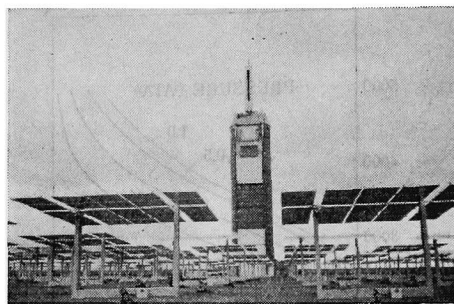


Fig. 26 5-MW_e solar thermal test facility in Sandia Laboratories, Albuquerque, U. S. A. (photo by Kimura)

式も試みられてはいるが、大出力と経済性という点からタワー方式がもっとも有利で、現在、太陽熱発電の主流をなしている。タワー方式による発電について前駆的研究を行なったのはイタリアの Francia で、彼は、すでに 1960 年代、直径 80 cm の平面鏡 271 を独特の太陽追尾機構で連動し、太陽光線を空洞受光器に集めて蒸気の発生を試みた¹⁷⁾。彼の一連の業績は EC によって取り上げられ、もっか、1 MW_e* の発電プラントがシンシリー島に建設されつつある。いっぽう、アメリカは、1977 年、Francia 型の 400 kW_e 太陽熱試験施設を Georgia Institute of Technology に、さらに、Fig. 26 のような 5 MW_e の施設を Albuquerque の Sandia Laboratories につくり、これらによる予備実験をもとに、10 MW_e の発電プラントをカリフォルニアの Barstow に建設中である。また、日本においても、1 MW_e プラントの建設が進められている。これらのプラントでは、Rankine cycle 熱機関、いいかえれば、蒸気タービンを予定しているが、その変換効率は 20% 台にとどまるものと考えられる。そこで、Brayton cycle、すなわち、ガスタービン導入の研究が盛んになってきた。この場合には、排気ガスでさらに蒸気タービンを作動させることもでき、50% 程度の変換効率が可能といわれている。集光器はプラントのうちで最も建設費のかかる部分で、この高低が発電コストを左右する。太陽熱発電のコストを現在の火力発電のコストに近づけるためには、ヘリオスタットの製作費が入射太陽エネルギー 1 kW につき 2 万円程度であることが望ましいが、現段階では遠くこれに及ばない。なお、東北大学と Odeillo の太陽炉では、建物の費用を含めて、100 万円台であったと記憶している。

このようにして太陽熱発電が実現したとしても、得られる電力は当然間欠的なものとなるので、太陽エネルギーを燃料のような化学的エネルギーに変換することがきわめて重要な課題となってくる。そのうちで、もっとも

* MW_e の e は electric の意。

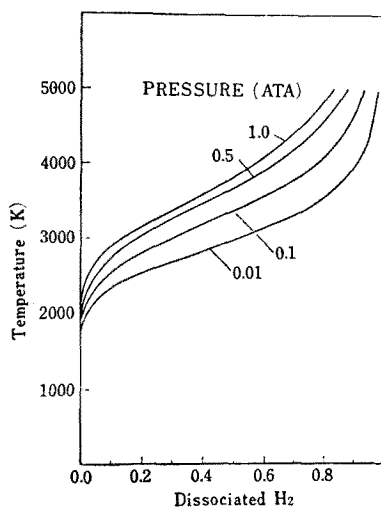


Fig. 27 Water decomposition temperature versus mole fraction of dissociated hydrogen.

着目されているのが水の分解による水素の発生で、高温プロセスで水を分解する方法として、直接熱分解と熱化学反応とが考えられている。Fig. 27 は、直接熱分解すると予想される水素のモル分率を温度に対して示したものである¹⁸⁾。この図に見るように、水素を効率よく得るためには、きわめて高い温度の発生とその温度における水素と酸素との分離が必要で、東北大学の炉といえども快晴でなければ 4,000 K の温度が得られないことを考え合わせれば、直接熱分解方式が容易なものでないことを理解することができる。

熱化学反応は、金属酸化物などの媒体を使い、2,000 K 以下のいくつかの熱反応によって水を分解し、媒体の反応生成物をもとの媒体にもどすもので、太陽炉によってじゅうぶん達成できる温度範囲にある点が良い。しかし、現在まで多くのプロセスが提案されていながら¹⁹⁾、一つとして実用につながったものがない。このプロセスの開発は、太陽エネルギー利用におけるもっとも大きな問題点と考えられる。

以上、太陽エネルギーを、いつでも、どこでも利用できる定常的エネルギーに変換するには、現在のテクノロジーだけでは不十分で、なんらかの科学的飛躍が必要であるように考えられる。物理ならびに応用物理を専門とされる方々がこの飛躍を試みてくださることを心から念

願して、この解説を終わることとする。なお、執筆にあたり、早稲田大学理工学部木村建一教授および朝日新聞武部俊一氏から貴重な写真 (Figs. 26, 15) の提供を仰いだ。ここにしるし、感謝の意を表する。

文 献

- 1) H. Straubel: *Z. Angew. Phys.* **1** (1949) 542.
- 2) F. Trombe: *CR Acad. Sci.* **235** (1952) 704, 1211.
- 3) J. M. Davies and E. S. Cotten: *J. Solar Energy Sci. Eng.* **1** (1957) No. 2, 3 16.
- 4) T. Sakurai, O. Kamada, K. Shishido and K. Inagaki: *Solar Energy* **8** (1964) 117.
- 5) F. Trombe and A. Le Phat Vinh: *Solar Energy* **15** (1973) 57.
- 6) T. Sakurai: *Solar furnaces in Solar Energy Engineering*, ed. A. A. M. Sayigh (Academic Press, New York, 1977) p. 233.
- 7) 桜井武麿: 太陽エネルギーの基礎と応用 (日本太陽エネルギー学会編, オーム社, 1978) p. 267.
- 8) O. Kamada: *Solar Energy* **9** (1965) 39.
- 9) W. M. Conn and G. Braught: *J. Opt. Soc. Am.* **44** (1954) 45.
- 10) O. Kamada: *Appl. Opt.* **3** (1964) 1397.
- 11) H. Arashi and T. Sakurai: *High Temp.-High Press.* **8** (1976) 349.
- 12) O. Kamada, T. Takizawa and T. Sakurai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **10** (1971) 485.
- 13) T. Sakurai and T. Takizawa: *High Temp.-High Press.* **3** (1971) 325.
- 14) T. Sakurai and H. Arashi: *Rev. Int. Hautes Temp. & Refract.* **12** (1975) 74; H. Arashi, T. Sakurai, J. M. Badie, A. Rouanet and M. Foex: *Rev. Int. Hautes Temp. & Refract.* **15** (1978) 73.
- 15) T. Sakurai, S. Mochizuki and M. Ishigame: *High Temp.-High Press.* **7** (1975) 411; S. Mochizuki and T. Sakurai: *Phys. Status Solidi a* **41** (1977) 411.
- 16) T. Sakurai: *Proc. Int. Solar Energy Society Silver Jubilee Congress* (Pergamon Press, New York, 1979) p. 1248; 桜井武麿, 柴田行男: 太陽エネルギー **6** (1980) 17.
- 17) G. Francia: *Solar Energy* **12** (1968) 51.
- 18) T. N. Veziroglu and S. Kakac: *Solar production of Hydrogen in Solar Energy Engineering* ed. A. A. M. Sayigh (Academic Press, New York, 1977) p. 389.
- 19) T. N. Veziroglu: *Hydrogen Energy*, Part A (Plenum Press, New York, 1975).