

高温研究とその工業化研究 に対する太陽炉の使用

昭和 28 年 10 月 10 日、東京都中央区横町の
燃料協会講堂で行った講演である。

Willi M. Conn

(アメリカ合衆国ミズリー州キャンキスシティー)

岩 切 一 良・黒 柳 彰 正 共訳

(旭硝子株式会社)



写真は著者コーン氏

摘要：高温度を得る他の方法と比較した太陽炉の主要な利点と欠点とを論じた。小形の試料を極めて純粋な状態で、最高温度まで急速に加熱することが絶対必要である定性的研究のため、最初の大形太陽炉装置が設備された。資料は加熱熔融され坩堝に集められた。例えば二成分系の液相曲線決定等の定量的研究用の太陽炉は最近発達したものである。予め定められた加熱予定表にしたがって、試料を加熱・冷却または所望の温度に維持（日照時間に制限される故）したり、空気による急冷等を行ったりする装置について述べた。表面の状態と関係なく、試料を黒体状態に近似せしめて温度を測定する方法について述べた。実験太陽炉の設計に入って来る種々のファクターを一覧表にまとめて評価してみた。半工業用途として、多数の小形の曲面反射鏡をもって、1個の反射鏡に置き換えた太陽炉について述べた。

I. 緒 論

探照灯では、凹面反射鏡の焦点に位置した弧光は空中に平行線を放出する。太陽炉では、太陽からの平行光線は反射鏡の焦点附近の小面積に集中される。試料、すなわち被加熱体は、太陽の像の位置に置かれ調節された状態で、太陽放射熱により加熱される。試料が加熱または熱処理を加えられている間、最近の太陽炉では定性的と定量的な測定の両方を行うことができる。

太陽の平均見掛表面温度は絶対温度 6000 度に達するものと考えられる。太陽炉内で到着できる温度はこの 6000°K よりも低い。その理由は、大気中を通る間のエネルギー損失、反射鏡の球面が制限されていること、光学装置における太陽よりの放射熱の吸収と反射による損失等々のためである。

アメリカカリフォルニア州サンディゴの J. Farber 博士の計算では、直径 120 in 焦点距離 34 in の太陽炉では、到達できる最高温度はターゲットが平面の場合に大約 4800°K、半球面の場合に 4200°K であった。高温度を得る他の手段に比較した太陽炉の主な利点と

欠点とは
次のよう
である。

利点と
しては

- 1) 太陽熱により試料を加熱する時には、最高温度に到るまで酸化状態である大気中で、極めて純粋な状態の下に実験を行い得る。
- 2) 電場・磁場等からの干渉もないし、燃焼生成物からの、また試験される試料と異なった材料からできている、加熱された炉壁からの干渉もない。
- 3) 試料は予め定められたサイクルで、加熱または熱処理ができる。
- 4) 試料中に生じている形状変化が、加熱・冷却の途上に最高温度に到るまで直接に観察できる。

欠点としては

- 1) ガス・重油・石炭または電気的エネルギーによる加熱炉は 24 時間稼働できるが、一方太陽炉は日照時間にのみしか使用できない。
- 2) 太陽熱による加熱は良好な大気状態に左右される。
- 3) 加熱面積は、主反応鏡の焦点距離と、太陽の像の明確度とにより定まる、限定された面積である。

もし、加熱試験が試料の熔融を要する場合には、熔融された試料と同じ材料で作られたか、あるいは内張りされた耐火物製坩堝中に熔融試料を集め得る。シリカまたはジルコニアを含有する試料の熔融物を、粘度と表面張力とを減少させて、坩堝の中に流体として流し込み、冷却後結晶状または硝子状の生成物を作るには、試料を熔融温度以上に加熱する必要がある。

本報告は実験用の近代的太陽炉について論じ、さらに太陽炉設計用の資料を提供するものである。最近設備された半工業的太陽炉についても簡単に言及する。

II. 温度の測定

太陽からの放射熱を集める反射鏡の寸法や光学的特

性が、太陽の像に置かれた試料の単位面積当りに到着できる温度を決定する。試料中で到達される平衡温度は、試料に投射され吸収される輻射エネルギーの量と、試料からの放射、対流および伝導等により失われるエネルギーによって決定される。

その熔融温度以下に加熱された試料の温度を測るには、もし試料が均一温度に到着できる位の小形のものである時には、太陽よりの輻射の反対側の面においてか、あるいは投入輻射と直角方向に用いた光学高温計、または輻射高温計によって測定する。しかしながら、小形の試料は大抵急速に熔融してしまう。さらに形状の大きい試料の温度は、輻射エネルギーを受ける側で測定する。その結果として、凹面反射鏡により反射された太陽からの輻射と、高温度の試料から放射される輻射とは重なることになる。試料の光輝温度を測定するためには、この二つの輻射を分離しなくてはならない。ここで起って来る困難は粗い不均一な表面の試料とか、高温度における輻射率の不明な物質の真の温度を得るということである。

試料の温度を正確に調節し、測定することのできるように、下記の方法が採られた。

(1) 反射鏡の光軸に沿って移動するアルミニウム円筒を取付けた。こうすると、アルミニウム円筒は試料に達する太陽熱輻射の量を、種々加減することにより試料の温度が調節できる。こうすると、丁度反射鏡の有効径を変化させると同じことになる。

第1図は120in 径の太陽炉に用いた調節円筒を示している。試料の温度は 2000°C までは $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内の精度で、高温度における光学高温計の精度内で調節できる。

(2) 太陽よりの輻射と、加熱される試料よりの温度輻射とを分離させるために、回転セクターが考案された。第2図(骨子図)参照。セクターの回転軸は鏡の軸と平行している。試料に接近している第一のセクターは伸ばされた球の形である。図に示された位置では試料を太陽よりの輻射からおおう。この第一のセクターにある小さな開口は鏡の光軸と一致し、一方光学高温計の望遠鏡に近い円盤形の、第二のセクターにある他の一つの開口もまた光軸上にある。このようにして、初めて試料の見掛けの光輝温度を測定することができる。次に第一、第二のセクターが回転すると、試料は太陽からの輻射に曝され、一方光学高温計の視野は遮られる。観察者の眼にちらつきをなくすために、セクターは毎分 2500 回転の速さで廻る。

(3) もし、高温特に熔融温度附近における試料の輻射能が不明である場合には、深い穴を穿孔するか小口径の穴を熔かしてあける。例えば、口径 4 mm で深さ 40 mm 位の穴にする。細い棒の形をした試料は、

輻射エネルギーが入れるような、小さな開口を備えた耐火物密閉容器の中に入れる。このような配置にすると、円筒または円錐形の灰色体、あるいは黒色体に近似した状態の下に、試料の温度を測定することが可能となる。温度は耐火物密閉容器の開口の内部で測定できる。試料の温度は、もし必要ならば、温度調節用円筒を操作して、所望の時間一定に維持できる。

III. 太陽炉の研究によると利益 になる研究分野

高温における諸試験や工業化研究に、実験的太陽炉が使用されている。太陽炉が利用されているか、あるいは利用すれば特に興味が深いと思われる研究領域中には、例えば

- 1) 珪酸塩・硼化物・炭化物・窒化物の高温化学および物理研究
- 2) 高温において、固体またはガス状の物質の熱的諸性質
- 3) 液相線の決定
- 4) 高屈折率を持った硝子の製造
- 5) 単一結晶体の成長
- 6) 耐熱合金の改良
- 7) 凹面反射鏡の焦点における熱輻射で到達できる最高温度
- 8) 種々の反射鏡の組合せによる熱の移動の割合
- 9) 熱原子反応研究と分光写真研究へのてだて

IV. 最近の太陽炉関係の諸データ

高温実験研究や工業化研究に実際に使用されている最近の太陽炉の諸特性上のデータを一覧にしたものを掲げておく(第1表)。この表のデータは主(凹面)反射鏡の口径と、太陽炉設備の所在地にしたがって配列したものである。

表中イエナにある太陽炉は、ドイツ国イエナ在のツァイス社の R. Straubel 博士とその共同研究者によって設計され、使用されている。

フランス国ミュドルとモンルイにある太陽炉は、Trombe とその共同研究者によるものであり、アメリカ合衆国ミゾリー州キャンサス・シティーの太陽炉は、著者とその共同研究者によるものである(キャンサス・シティーの一番大きな太陽炉は、最近カリフォルニア州サンディゴに移転した)。本稿末の参考文献表は太陽炉に関する主要な刊行物を示している。60 in 以下の口径の小形太陽炉は、特に低いか、中間的な温度範囲が、かなり望ましい生物学的・化学的・工学的研究に使用されている。

太陽炉に使用される反射鏡は、硝子または金属で作られる。大抵の硝子反射鏡の裏面は鍍銀してあり、「反

最近の太陽炉の例

Column No. 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
所在地	Kansas City I	Kansas City II	Jena I (X)	Jena II	Jena III	Meudon	Mont Louis I	Kansas City III	Kansas City IV	Mont Louis II
単一鏡	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
複合鏡								Three Zones		3500 Plates
鏡の主材料	Cu	Cu	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Al	Al	Glass
反射材料	Rh	Rh	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Al	Al	Ag
反射面	Ist	Ist	IIInd	IIInd	IIInd	IIInd	IIInd	Ist	Ist	IIInd
主鏡の径	60.0"	60.0"	69.0"	78.7"	78.7"	78.7"	78.7"	120.0"	120.0"	35.0 ft.
主鏡の焦点距離	25.75"	26.0"	35.4"	33.9"	33.9"	33.5"	34.0"	34.0"	34.0"	19.7 ft.
主鏡の口径比 f/	0.43	0.43	0.51	0.43	0.43	0.43	0.43	0.28	0.28	0.56
太陽像の直径 (m/mm)	0.24	0.24	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	4×0.32	0.32	0.20
主鏡中央の開き (in)	6.1	6.2	8.4	8.0	8.0	7.9	7.9	3×8.1	8.1	55.8
副鏡	—	8.3	—	12.0	7.9	—	—	22	22	66 (××)
ヘリオスタット式										
寸法					98.4" diameter					43 ft×34 ft.
主鏡からの距離					33.1 ft					80 ft.
ニュートン式			×			×	×			
直径						17.7"	17.7"			
焦点からの距離						3.9"	3.9"			
カセグレン式				×						
台										
経緯儀	×					×	×			
赤道儀		×	×	×				×	×	
静止					×					×
手動	×					×	×	×		
バイメタルと抵抗管			×	×	×					×
光電管										
天文学的調節器		×							×	
真空の有無		×		×	×				×	
温度調節										
シールドまたは隔膜	×			×	×					
アルミニウム円筒		×							×	
温度測定	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
回転セクター		×							×	
(×) 紹介したもの										(××) 推定

射鏡レンズ」とも呼ばれている。反射鏡の表面をアルミニウム鍍銀をした、拋物線形の硝子製反射鏡を予備的試験をしてみたところ、化学的また物理的な変化がほとんど無かった。このアルミニウム鍍装反射鏡は、反射鏡レンズに較べて吸収と反射による損失が軽減されるため、太陽炉用反射鏡として実用的である。

一覧表中の太陽炉の口径は、1枚鏡(1枚の硝子または金属板で出来ている鏡)のときは 60~120 in の範囲である。太陽炉の反射鏡口径は、それを使用して行う研究実験の計画や、太陽炉装置の所在地、大形反射鏡購入、あるいは製造の困難さによって定められる。例えば、行わんとする研究実験が 60 in の反射鏡で行える場合には、100 in の反射鏡をわざわざ設備する必要はない。

反射鏡の焦点距離は、加熱のため試料を持って来る位置にできる太陽像(反射鏡の焦点面積の附近)の直径の如何による。一定の反射鏡口径に対して、焦点距離を短縮させるとできる太陽像の直径は小さくなり、試料の単位面積当りの温度は高くなる。

焦点距離を増すとできる太陽像は大きくなり、ある種の実験には極めて肝要な定温度面積を増大することになる。しかし、それと同時に試料の単位面積当りの温度は低くなる。

一覧表中の凹面反射鏡には、中央に開口のあるものがある。この中央開口は反射鏡を機械仕上、または研磨するのに使用され、また加熱中試料を観察したり、光学高温計により温度を測ったり、熔融した試料を集める坩堝を操作したりする時に使われる。また、カセグレン(Cassegrainian)式組立の反射鏡(下記参照)の場合には、太陽よりの輻射と、試料より反射される輻射とを別々に主反射鏡の外に導くのに使われる。

補助反射鏡は、日光回照鏡またはニュートン式およびカセグレン式反射鏡の場合に使用される。簡単な日光回照鏡は、太陽の既定軌道を追うように設備されている。日光回照鏡を用いると、1日の作業の間固定か、またはほとんどわずしか動かない主凹面反射鏡(球状または拋物線状)に入る輻射を、この日光回照鏡で反射する。ニュートン式反射鏡とは、エネルギー蒐集装置と加熱する試料との間に置かれる平面鏡である。ニュートン反射鏡では、第一次に収斂光線を使わずに、試料の位置まで光線を導くようにしてあるので、材料(例えば粉末状の材料の試験など)を手にとって実験するのに、はるかに容易で調節し易くなる。

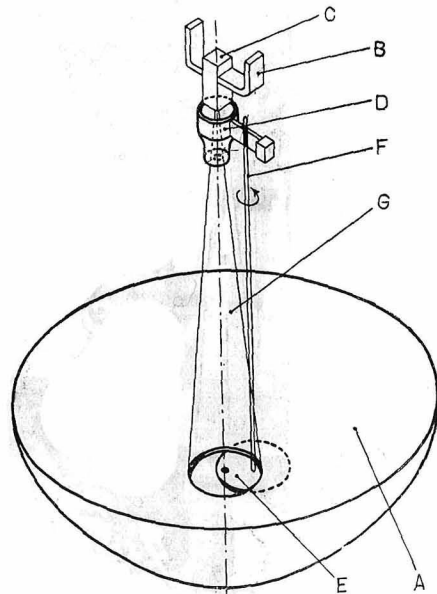
拋物線形反射鏡と試料との間にある双曲線状の凸面反射鏡は、カセグレン式の太陽炉で使用される。太陽

からの輻射は遮ぎられて平行となり、レンズにより凹面反射鏡の外部にある焦点まで持ち来される。この装置の相当焦点距離はかなり増大されて、収差による損失のほとんどが無くなる。

彎曲や振動のないように、太陽炉を安定に据付けることは、太陽炉が大形の場合は特に重要なことである。太陽炉の主反射鏡あるいはその炉の日光回照鏡は、太陽の既定軌道を厳密に追ってゆかなくてはならない。このためには太陽炉を経緯儀据付の要領でやるが、または赤道儀据付の要領でやればできる。経緯儀の場合には1日中傾きを変化しないで、単に極軸の回転のみにより太陽を追跡する。短時間の試験では太陽炉を移動させずに行う。

60 in と 120 in の太陽炉で実験をしたところによると、約 60 秒間までは人手による移動が可能であった。他のすべての実験では、太陽炉を自動式に移動すべきである。移動装置にはバイメタルの細片、熱に敏感な抵抗装置、光電管や天文儀の調整装置等がある。

太陽炉を用いる実験では、最高温度に到るまで酸化槽で仕事ができる。試料を試料と保持器とを気密の硝



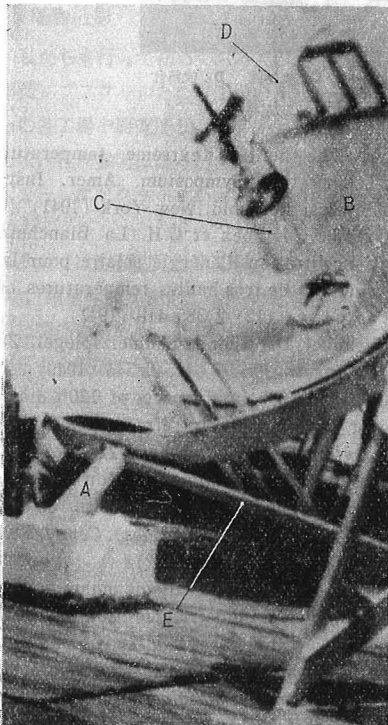
- A-中央に窓を有する凹面鏡
- B-試料保持器
- C-試料
- D-カウンター・ウェイトを有する試料附近の回転セクター
- E-光学高温計附近の回転セクター
- F-両セクターの共通軸
- G-凹面鏡の中央窓によつて生ずる錐形影

第2図 入射光線の輻射と反射光線の輻射とを分離する回転セクター

子容器中に封入しておくことは、保護ガスを入れ、あるいは入れないで真空中で、あるいは高圧下で加熱をする場合望ましい方法である。

実験用の最近の太陽炉の一例を第1図に示した。この炉は一覧表中の第10番目のキャンサス・シティーにある著者らの太陽炉と同一のものである。第3図は表中の第2番目の著者らの60 in 炉を示すものである。太陽炉装置は手動による移動装置を装備され、短時間用のものである。もう一つの形の太陽炉は、表中第11番目に述べられている。この炉は半工業的研究のために設計されたものである。日光回照鏡の反射鏡と拋物線形の集光装置は、小さな裏面鍍銀の鏡を多数はり合わせたものである。この炉では焦点距離は19.7 ft にもおよぶが、この形式の炉は多数の小形平面鏡を曲げて作ってあるので、太陽の像の明瞭度のよいのを得るのは難かしい。

似たような複数の鏡をはり合わせた反射鏡が、高温研究に利用され得るかどうかは今後に俟たなくてはならない。この炉では中間温度でかなり大きい熔解能力がある。例えばパイロット・プラント操業では、1時間当たり 132 lbs の鋼が作られる。この炉の設計者は焦点距離を増すことにより、さらに良い太陽炉の明瞭度と、さらに多い熔解能力を出したいと云っている。



- A: 極軸
- B: 120 in 鏡
- C: 鏡のアルミニウムの円筒。有効径を変化させることによつて温度を調節する。
- D: 試料台を支える棒
- E: 天文学的調整器につけた回転軸に対する標子

第1図 キャンサス・シティー・ロックバルト大学の丘上にある太陽炉。120 in 温度調節用アルミニウム反射鏡とアルミニウム円筒を有す。



A: 鏡の台, 胴体, 経緯儀 B: 銅製凸面鏡, 表面はロジウム C: 支持脚 D: 試料台

第3図 キャンサス・シティにある 60 in の太陽炉

結 言

表で判るように, 現在高温研究用の太陽炉には三つの主要な形式がある。

- 1) 多くの研究分野に使用できるが, かなり取扱いが面倒で, 高価な部品からなる大形のもの
- 2) 特に良好な天候状態の下で, 多くの応用に適した中間形の装置
- 3) 構造が簡単で, 短時間のテストに使用が限定されている装置

太陽炉発達の傾向は特定の研究分野へこれを応用せんとする傾向にある。装置と技術とをどういうふうを選択するかは, 高温研究の問題に入ってくるすべてのファクターを慎重に検討調査して決めるべきである。われわれは, 現在使用されている従来の燃料を用いた炉と並んで, しかるべき地位を占め, また従来の炉を補うようになることを予期している。

文 献

- A. Sonnefeld, Die Hohlspiegel. Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin. (1926)
- W.M. Conn, Ueber die Herstellung von Zirkondioxydglas mit Hilfe des Straubelschen Sonnenspiegels. *Berichte der Deutsch. Keramischen Gesellschaft*, **12**, 118-122 (1931)
- Same, The crystal modifications of zirconia. *Trans. Electrochem. Soc.*, **68**, 65-71 (1935)

- Same, The field of extreme temperatures. Temperature Symposium, Amer. Inst. of Physics. Reinhold, New York (1941)
- F. Trombe, M. Foex et C.H. La Blanchetais, Concentration d'énergie solaire pour la réalisation de très hautes températures. *Ann. de Chim.*, (12) **2** 385-419 (1947)
- H. Straubel, Dsr Sonnen-Schmelzspiegel. *Zeits. f. Angew. Physik*, **1** 542-545 (1949)
- W.M. Conn, A solar furnace of 120" diameter for studying highly refractory substances. *Review of Sci. Instruments*, **22** 945-951 (1951)
- F. Trombe, Sur la réalisation d'un four solaire semi-industriel au Laboratoire de Mont-Louis (Pyrénées-Orientales). *Comptes Rend. Paris*, **235** 704-705 (1952)
- Same, Sur quelques détails de montage du four solaire semi-industriel de Montlouis. *Ibid.* p. 1211-1213
- W.M. Conn and G. Braught, The separation of incident and emitted radiations in a solar furnace by means of rotating sectors. In print-*Journal of the Optical Society of America*
- W.M. Conn, Use of Solar furnaces in research for the silicate industries. Studies in the system alumina-silica. In print-*Bull. of the American Ceramic Society*
- W.M. Conn, Publication on extreme temperature-*Japanese Ceramic Society Journal*.