

講座

高温技術と高温度の測定講座を終えるにあたって

会誌編集委員会

最先端技術を専門外の読者にもわかり易く解説してほしいとの編集委員会の要望に応え、3名の専門家が執筆して下さった「高温技術と高温度の測定講座」は今回で終了する。

最近の風潮として入門講座的記事にはイラストが多用され、極端な場合は「漫画で見る〇〇学入門」などがベストセラーになっていると聞く。古くはガーネー著「図解量子力学」は評価が高かったと記憶する。しかしイラストや漫画のみによる解説は、一見理解できたように思えてもその理解度は底が浅いと言わざるを得ない。

今回の各執筆者は図を多用する反面、数式は必要最少限にとどめ、しかも格調高く解説していただいたので、読者諸賢には読みごたえのある「講座」になったと自負している。読後感をご投稿下されば幸である。

最後に「総説」とは異なり、書きにくい「講座」のためご尽力いただいた執筆者に深く御礼申上げる。

高温技術と高温度の測定講座 (V)

太陽炉

名古屋工業技術試験所 水野正雄

1. はじめに

最近の急速な科学技術の進歩に伴って高温工学の分野における高温材料に課せられる条件はますます厳しいものになっているが、一般に2000℃を越える領域では依然として温度測定、温度標準および炉壁を始めとする諸材料その他種々の分野で技術的な困難に直面しているといつて過言でない。これまでに各種の高温発生技術が開発され、ヒーターによる抵抗加熱、高周波加熱、電子ビーム加熱、イオン流加熱、アーク加熱、プラズマジェット炎、高周波プラズマ、マイケル波放電、太陽炉、イメージ炉、レーザー加熱および衝撃波加熱等による加熱手段が実験室や工業的にも広く用いられるようになってきている^{1) 2)}。しかしながら、これらの加熱手段において正確に温度計測を行うことは容易でなく、またそのための高温の温度標準も十分に確立されているとは言えない。加熱される材料や加熱手段の種類によっても温度の上昇するプロセスは異なるが、

多くの手段が放射加熱であることからこの場合の温度測定法をどのようにするかが重要である。ここでは太陽炉を例に話を進めよう。

太陽炉は、一般に高温発生に使われるガス炉、電気炉などとは、その高温発生メカニズムが本質的に異なり、一種の光学系を利用したイメージ炉であり、精度の非常に高い放物面鏡あるいはレンズを用いて太陽の放射エネルギーを焦点に集め、その焦平面で太陽像を結ばせて高温を得るものである。

太陽炉の特徴は、比較的短時間内(数秒)に焦平面内の太陽イメージ内で数千度の高温を発生でき、また逆に、入射エネルギーの遮蔽により急冷ができる。さらに試料容器、ルツボ、炉壁からの汚染のまったくないことや、加熱対象物のまわりの雰囲気制御、高温発生において電場、磁場からの解放といった諸点があり、とくに大気中、減圧あるいは各種ガス雰囲気下で高温加熱を行う場合は非常に有利である。その反面、大型の試料を均一に加熱すること、ならびに加圧下で

の加熱では問題があり、放射加熱であるための欠点もある。また入射エネルギーの間欠性により、夜間とか悪天候時には利用できない不利な点もある。

このような加熱特性を十分理解すれば、高温領域における合成、化学反応や物性解明等に有力な手段として用いられる。本稿では、太陽炉の高温発生の原理、温度の測定法および太陽炉利用による研究の概要などを紹介する。

2. 太陽炉の原理^{3)~6)}

2.1 光学系

太陽炉は、精度の非常に高い放物面鏡あるいはレンズを用いて太陽の放射エネルギーを焦点に集め、その焦平面上で太陽像を結ばせて高温を得るものである。この焦平面におかれた照射試料は、受けた放射エネルギーの一部を反射または透過により失うが、残りは試料表面で、光子が吸収され熱エネルギーに変化して数秒で高い温度に到達しうる。しかしながら光学系に入射する太陽光はまったくの平行ではなく、太陽に対する視角の値である $32'$ の拡がりを持って放物面鏡に入射する。このため、光線は放物面鏡あるいはレンズの焦点の一点には結像せず、一定の広がりをもつ像となり、焦平面上で、反射鏡の光軸に垂直方向で最大径を示す部分が加熱面積になる。正確に表現すれば次のようになる。

いま回転放物面鏡の焦点距離を f とし、焦平面における太陽像の直径を d とすると、

$$d = 2 \cdot \tan 16' \cdot f = 0.0093 \cdot f$$

となり、加熱面積はもっぱら光学系の焦点距離の影響を受け、反射鏡の口径の大きさとは無関係である。もっとも反射鏡を大型化すると焦点距離の絶対値も大きくなるため太陽像の径も増大する。また反射鏡の口径を D 、口径比を n とし、反射光と光軸のなす角を θ とすると、図1に示すように

$$n = D/f = 4 \{ (1 - \cos \theta) / (1 + \cos \theta) \}^{1/2}$$

なる関係が成立し、焦平面において直径 d なる円内に集中される最大放射束密度 Ed は次式によりあらわされる。

$$Ed = \{ 4 \cdot R \cdot Ca \cdot S / (0.0093)^2 \} \cdot \sin^2 \theta$$

ただし、それぞれの記号の意味は、

R : 放物面鏡の太陽光スペクトルに対する反射率 (%)

Ca : 大気の透過率(吸収係数) (%)

S : 太陽定数 (0.135 W/cm^2)

θ : 反射鏡と光軸のなす角

である。

放物面鏡の外側に入射した太陽光線による焦平面で

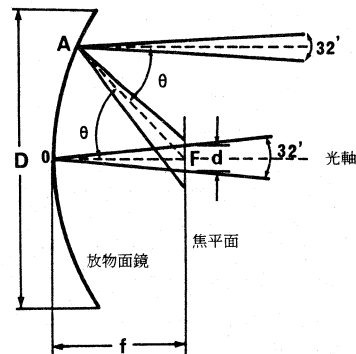


図1 太陽炉の集光原理

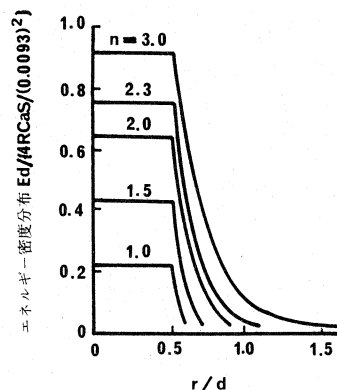


図2 太陽炉の焦平面におけるエネルギー分布
r: 太陽像の中心よりの距離 d: 太陽像の直径

の像は楕円形となり、一方、鏡の光軸の近くに入射した太陽光線によるそれは円形となるので、それを重ね合わせた鏡の全体からの反射光線による太陽像は、その中心部分が放射密度が高く、周辺部は低くなる。図2に口径比 n の変化によるエネルギー密度の関係を示した。口径比 n の比が一定であれば、放物面鏡の口径 D を大きくしても、加熱面積が大きくなるだけで、加熱面での放射束密度は規格化した距離が同一の点で変化しない。口径 D に対して焦点距離 f を小さくすると、口径比 n は大きくなり、 d は小さくなる。したがって、この場合は放射束密度は大きくなって、到達温度も高くなる。口径比 $n = 4$ になると反射鏡の両端を結ぶ線と光軸との交点に像を結び、これより n 値が大きくなると試料の前面はもちろんその背面より放射が集中することになる。実際に用いられている放物面鏡の口径比 n 値は2.3~2.4が大部分であり、 $n > 3$ となると放物面鏡の製作に伴う技術的困難が増大する。

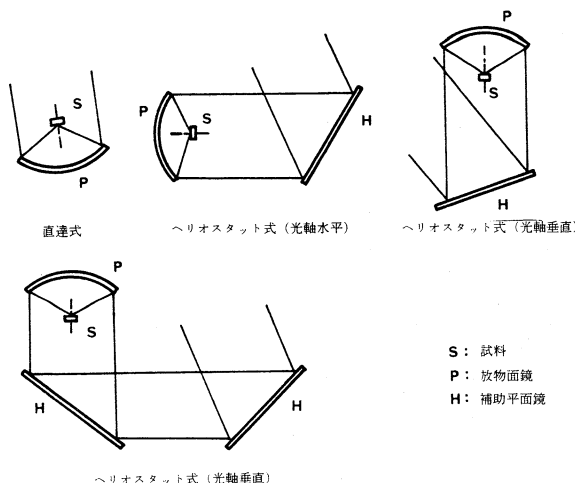


図3 太陽炉の形式

2.2 構造

太陽炉の構造は、太陽光を集光するレンズまたは放物面反射鏡の取り付け方、および補助平面鏡を使用するかそれぞれにその目的に応じて組み立てられるが、図3に示すような分類となる。

太陽炉は熱源をもっぱら太陽に依っているため、光学系の光軸が常に太陽入射光の中心に向くように、時々刻々その位置を変化させ、太陽の運動を追尾する必要がある。放物面鏡の口径が数m以内の小型太陽炉では、使用目的に応じ直達式や、光軸水平または垂直型のヘリオスタット式等、任意の構造を採用できる。一方、放物面鏡の口径が数10m以上の大型太陽炉では、機械的強度や剛性、風圧などの追尾制御に対する外乱などを最小にして高精度で追尾できることなどを考慮して、放物面鏡およびヘリオスタット共に多くのセグメント鏡を利用し、その構造も光軸水平式ヘリオスタット型とするものがほとんどである。いずれの場合も放射による表面加熱であることを考慮して試料の加熱形態より、それぞれの目的に応じた太陽炉の構造を選ばねばならない。

放物面反射鏡として用いられるものには、ガラス、金属、プラスチックなどの母体の裏面あるいは表面に銀またはアルミニウムなどメッキ、蒸着したものがある。ヘリオスタット平面鏡は、ガラス裏面鏡が多く使用されており、とくに反射率を高めるため表面にアルミニウムを蒸着し、SiO₂あるいは塩化ビニル樹脂系塗料を被覆して保護したものも使用されている。

太陽放射の損失をきわめて少なくする観点からは、放物面鏡を直接太陽光に向ける直達式が好ましい構造

ではあるが、放物面鏡の焦平面が鏡の上部空間に位置するため、被照射試料の保持などが不便となり、またそれに関連して実験器具の取り付けにも制限が生じるなどの欠点を有する。また多段式ヘリオスタット型では、補助平面鏡を用いるため反射回数が増加し焦平面のエネルギーが、仮に反射率80%の放物面鏡と70%のヘリオスタットを組み合わせたとした場合、単純計算では総合的な反射率は56%と低下し、その入力エネルギー損失が急激に増大する。放物面鏡の有効面積内に入射する放射束密度とその放物面鏡の焦平面における太陽像の放射束密度の比を集光比と言い、図4に光学系の集光比と到達温度を計算したものを示した。図の1～3のカーブは完全黒体を用い、反射鏡の反射率を変更した場合、4～6は照射試料の放射率を0.5と仮定した場合を示してあり、 ϵ の値は変

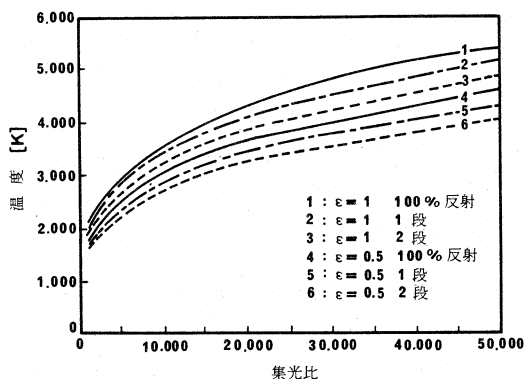


図4 太陽炉の集光比と到達温度の関係

換効率と読み換えてもよい。この図では光学系の幾何学的精度を100%と仮定しているが、実際にそのような光学系は存在しないので、到達温度はそれらの精度や太陽追尾精度に応じて低下する。なお一次熱源の太陽の黒体温度が約5800Kであるので、照射試料温度もこのレベルまでは到達できない。照射試料温度もその試料の全波長吸収率と放射率によって決まる。平易な表現をすれば白い物体や反射率の高い材料は温度上昇速度が遅いし、到達温度も抑えられる。例を挙げれば、融点2839℃のHfO₂を太陽炉で照射すると数秒以内に融解するのに対し、2054℃のAl₂O₃はほぼ同一の日射強度でも3～5分を要し、研磨した白金棒(m. p 1770℃)では約15分以上の照射時間を要する。これらの現象は試料面の反射率の高低のみならず試料の熱伝導度の値も影響を及ぼすのであって、一定の温度に

保たれた炉内に試料を挿入して加熱する普通の加熱方法とはまったく異なった様相を呈する。

一般に太陽炉は1955年頃より各国で急速に開発され、現在までに世界中で総数約200基以上にも達すると考えられる。わが国でも1955年に名古屋工業技術試験所(名工試)に口径2mの直達式第1号炉⁶⁾が、続いて1959年および1978年に口径1.5mの精巧なガラス製放物面鏡を用いたヘリオスタット式太陽炉(光軸水平式⁷⁾および垂直式⁸⁾)を建設してセラミック高温材料の開発研究に用いられている。また東北大学科学計測研究所⁹⁾に口径10m炉1基が建設されている。アメリカおよびソ連においても相当数建設され、宇宙工学の分野での動力源や発電、高温材料の開発等に用いられている。とくに、フランスのピレネー山中のオディヨに国立科学院(C.N.R.S.)により1970年に完成した1000kWヘリオスタット式太陽炉¹⁰⁾は異色のものであり、高温分野における太陽エネルギー開発に先鞭をつけた。この大型太陽炉は、セラミック材料の溶融合成、溶融耐火物の生産、熱衝撃試験や太陽熱発電用ボイラーの試験等に利用されている。

2.3 試料加熱方法

太陽炉の焦点におかれた試料は大気中、真空あるいは任意の雰囲気で照射加熱できる。大気中では粉末および成形試料をそのまま加熱しうが、雰囲気制御のためには透明石英フラスコ、バイレックスフラスコや半球容器などが用いられる。光軸垂直のヘリオスタット式太陽炉では、棒状試料を用いるか、あるいはベルヌイ型の粉末試料供給装置を組み合わせて結晶育成も可能である。名工試では、連続真空溶解装置¹¹⁾により金属酸化物試料を 10^{-6} torrの真空中で溶融したり、さらにガス雰囲気溶融装置、蒸発速度測定装置¹²⁾や超急冷装置を試作し各種金属酸化物の溶融、温度測定、蒸発速度測定等を行っている。変った試料加熱方法として遠心空洞炉¹³⁾があり、水冷した金属容器内に試料粉末を入れ、高速回転して遠心力により試料を炉壁に押しながら溶解加熱を行うもので、この加熱方法は試料を比較的均一温度に保つことができる。とくに大型太陽炉の場合、溶融耐火物の製造用として遠心空洞炉を用いるのが一般的である。また高温試験、熱衝撃試験のために材料を焦点付近に置き急激な熱ショックを与えるようなものもある。この他に試料を焦平面内で平行移動するか、回転させながら移動することにより溶融部を移動させ帯溶融を行うこともでき、単結晶の育成も可能である。いずれの場合にも試料の位置の3次元的な微動調整装置が必要で、上下、左右、前後に

移動せしめて正確に焦点に設置しなければならない。試料の温度調節は放物面鏡への入射光量を加減して行うので、ベネシアンブラインド型シャッター、幕、扉、およびカーテン等を用いる。ベネシアンブラインド型シャッターで行った手動による実験例では3000K \pm 10K¹⁴⁾の精度で調節でき、天候条件が許せば一定の温度で1時間以上試料の温度を保つことも可能である。

2.4 到達温度

太陽炉によって得られる最高温度は、2.2の項でも述べたが試料の加熱面における熱伝導、対流などの熱損失や物質の放射率で異なり、その決定は困難である。理論的に完全黒体を用いたとしても理想的な条件のもとでも大気層による吸収すなわち水蒸気、炭酸ガス、塵埃、大気汚染などによる減衰があり、太陽の黒体温度約6000K \approx 5727℃以上にはなり得ない。したがって太陽炉による到達温度は、大気の透過率、反射鏡の幾何学的精度、反射面の不均質性および被加熱体の吸収能などを考慮に入れてこれより低い値となることは当然である。名工試のヘリオスタット式太陽炉において黒体試料に照射したと仮定して試算した場合、理論到達温度は4220Kと推定された。実際の最高到達温度は、日照の強さにもよるが、約3500℃であり、この数字は各国の太陽炉のそれによっても立証されている。

3. 温度測定法

3.1 太陽炉の温度測定の問題点

太陽炉を高温炉として使用するためには、その温度を正確に測定することが重要である。この場合の主要な問題点は、高温測定における一般共通の問題と太陽炉特有の問題とに分けられる。前者の一般共通の問題として重要なことは、被測定物からの放射エネルギー(輝度)と真温度との関係である。真温度を求めるためには、その被測定物の測温時の放射率を測定して、その値と輝度温度とにより真温度を得るか、あるいは測定時の被測定物を黒体条件をみたす状態で測定するかしなければならない。太陽炉においてもまったく同様なことが言え、なんらかの方法で放射率を測定するか、あるいは黒体条件にするかを考えなくてはならないため、真温度の決定は一般的には非常に困難である。

太陽炉特有の問題として、被測定物は太陽光によって放射加熱されているから、照射加熱面で太陽光が反射され、さらに他の光が屈折、散乱等によって温度測定系に混入し、温度の正確な測定を妨げ誤差を与える。そのため、なんらかの方法によって照射加熱面に入射する太陽放射の反射成分等の温度測定系への混入を除去する必要がある。このような試料表面から反射され

る太陽放射が温度計へ直接入射するものを防ぐのが不可欠であり、かつ真温度を求めるには試料のその温度における放射率の値が必要になる。この目的で種々の方法が考案されているが、その主なものを次に掲げる。

3.2 太陽炉における各種の温度測定法

試料表面から反射される太陽エネルギーが温度計へ直接入射するのを防ぐには次の4種類の方法が利用されている。言うまでもなく測温領域が2000～3500℃であるため接触法による測定は不可能であり、放射を利用した非接触法が適用される。

3.2.1 特定の波長またはフィルタを使用する方法

太陽は約5800Kの黒体放射を示し、加熱試料もほとんど固体であるからそれぞれの温度に応じた連続スペクトルを放射する。したがって試料の温度放射は太陽のそれと重なるためその分離はできないが特殊のフィルタを用いて入射エネルギーの分光特性を変え、それらを利用する方法¹⁵⁾がある。しかしながら、太陽炉の場合の光学系は口径が非常に大きいため均質で面積の大きなフィルタの製作は困難である。さらに、大気圏の吸収により地上には到達しない太陽光の波長領域の光を用いる方法がある。(図5参照)たとえば水蒸気あるいは炭酸ガスの吸収帯である $1.38\mu\text{m}$ ¹⁶⁾および $2.62\mu\text{m}$ ¹⁷⁾などの利用もあるが、何れも特殊な方法で他の方法が利用できない時に用いるものである。この場合は放射温度のみの測定となり、管理温度としての利用に限られる。

3.2.2 回転セクタまたはチョップを用いる方法¹⁸⁾¹⁹⁾

放物面鏡の光軸と平行に、チョップあるいはセクタを回転させて試料への入射光を周期的に遮断し、遮断した瞬間に回転体の中心の孔を通して試料の温度放射のみを取り出し、回転体が試料面から遠ざかると温度放射に太陽放射が反射した成分が加わって観測される。この方法は定常状態の測定に適し、二色温度計を使用すれば真温度測定も可能となる。しかし、この場合には、温度測定時に測定試料の測定二波長での分光放射率が等しくなければならない。(図6参照)

3.2.3 黒体空洞を利用する方法¹³⁾²⁰⁾

太陽炉の焦点に試料ホルダを設置し、試料の溶融した状態で、試料ホルダを高速回転させて遠心作用により近似的に黒体空洞を作り、その空洞の中心を測定点として測定を行う方法で、直接に真温度が得られる利点はある。しかし、黒体となる条件には炉の内面形状の問題があり、いったん溶融した試料を任意の形状には制御できないため、実効放射率の値に変動が生じ、

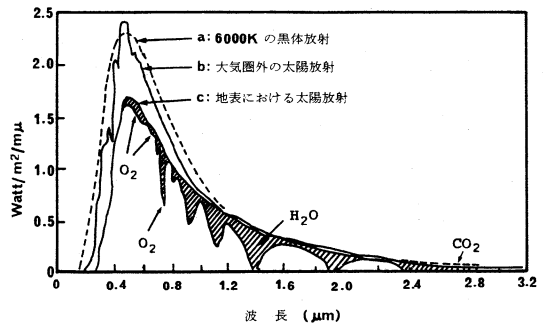


図5 太陽放射の分光分布

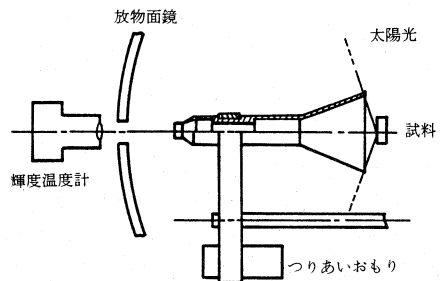


図6 回転セクタ

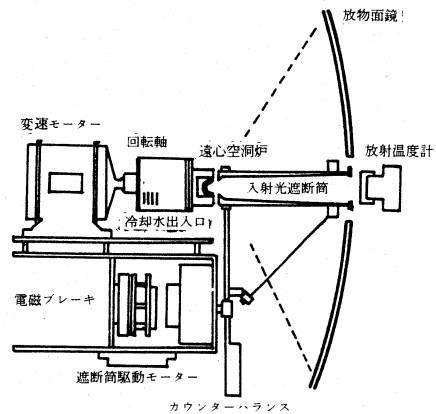
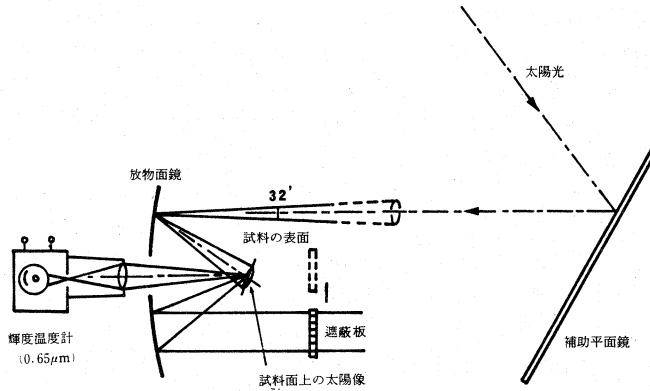


図7 遠心空洞炉による温度測定

測温精度が悪くなる欠点がある。さらに校正標準用にどんな材料を選ぶかにより精度が左右される。(図7参照)

3.2.4 鏡面反射を利用する方法²¹⁾

太陽炉で照射加熱した試料が溶融すると、溶融面は規則反射すなわち鏡面反射を示す。この場合に溶融面には太陽像が見られるが、入射光の一部を遮蔽板で遮断すると溶融面上にその遮蔽板の陰影が認められる。



試料表面が規則反射するとき反射光をささぎる方法

図 8 鏡面反射による温度測定

その陰影上を测温点とすれば、加熱源の反射成分は除去される。また、人為的に遮蔽板を移動させ、加熱源の反射成分を混入させて測定を行い反射成分のみを得ることにより分光放射率を求め、この値と輝度温度とから真温度が算出できる。この方法は規則反射面が得られる場合にしか適用できないので、一般の乱反射面に対しては、3.2.2の方法によらなければならない。(図8参照)

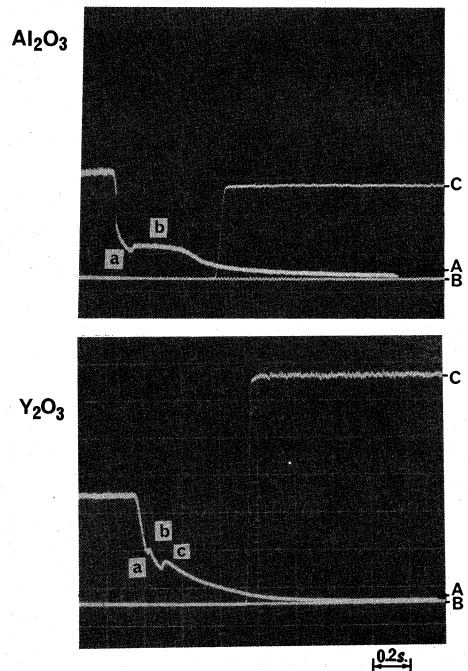
以上各測定法の特徴をそれぞれ述べたが、これらの温度測定法で温度計の特性のみで測定できるのは3.2.3項の黒体空洞を利用する方法および3.2.4項の鏡面反射を利用する方法である。したがって黒体空洞法は、放射温度計、輝度温度計および色温度計を利用しても真温度を求めることはできるが、その黒体状態によって温度に誤差を生じ、常に一定の誤差値にすることは困難であり、温度計の特性のみでその温度を評価することはできない。また鏡面反射法では、各温度計の測定波長における放射率を求める必要がある。この方法では、太陽光を利用して分光放射率の測定が可能であるため、これらの温度計のうちで一般的に取扱いが簡単で、かつその放射率の誤差が真温度の算定に及ぼす影響が比較的小さいのは輝度温度計であり、太陽炉の温度測定には最も適している。

4. 太陽炉の応用

太陽炉の応用については既に多方面にわたって研究論文が発表されているので詳細な説明は省略して、ここでは特にセラミック高温材料の分野と、最近のトピックスについて紹介する。

4.1 高融点金属酸化物の凝固点の測定²²⁾

太陽炉の焦点で加熱溶融した試料は、太陽入射光を



A: 冷却曲線 a=過冷却現象 b=凝固点
c=固相における発熱現象(結晶転移点)

B: 基線, C: 校正曲線

写真 1 Al_2O_3 および Y_2O_3 の冷却曲線

急速に遮断すれば太陽像の周辺より中心に向かって放射状に凝固が進む。この冷却過程を観察すればその凝固点は求められる。测温用に試作した光電子増倍管を用いる輝度温度計の出力をオシロスコープにより記録し

た冷却曲線の測定例を写真1に示す。一般に純粋な酸化物は過冷却に続いて凝固のための発熱を示し、さらに固相における変化も現われる。 Al_2O_3 の冷却曲線は、冷却の進行に伴い過冷却現象(a)があらわれ、続いて凝固による平坦な発熱現象(b)が認められている。 Y_2O_3 の冷却曲線は、 Al_2O_3 で認められたような平坦な発熱現象が見られず、過冷却に続いて発熱現象(b)を示し、凝固後も微弱な第2次(c)の発熱現象を観測した。これらの冷却速度は約 $1800\sim 2300^\circ\text{C}/\text{s}$ であり、このような急冷では凝固が非平衡で進むものと推定されるので、試料は冷却開始前に十分平衡状態に達せしめておくことが肝要である。ただし、結晶化速度の遅いケイ酸塩等にこの方法を適用するのは問題がある。

4.2 高温二次定点の設定

高熔点耐熱材料や金属酸化物の凝固点はいまだ充分高い精度で測定されたものが少ない。近年高温材料の重要性が高まるに伴い、 2000°C を越える超高温領域での温度標準の確立の必要性が急務であるとして、国際純粋および応用化学連合(IUPAC)の無機化学部門の高温固体化学委員会の主催で高温二次定点の設定について国際協同研究(9ヶ国14機関)が進められている。現在高温での温度定点は、金属の凝固点(IPTS-68)が利用されている。しかし、 2000°C 以上になると空气中で安定な金属はほとんどなくなる点と高温領域における二次定点は非常に少ないため、酸化物定点を開発することが必要とされた。まず温度定点として蒸気圧が小さく、 H_2 、ハロゲン、 CO 、また金属等に対して融点近くまで割合安定な酸化物としてアルミナ(Al_2O_3)が選ばれ、同一試料(スイス製純度99.999%の Al_2O_3 について、フランスC.N.R.S.超耐火物研究所で溶融したもの)について共同測定が行われ、国際実用温度目盛(IPTS-68)の高温二次基準点として $2054\pm 6^\circ\text{C}^{23)}$ (JIS Z-8710)と決定された。これらの温度設定にあたり、太陽炉利用による研究では日本の当該研究室およびフランスC.N.R.S.超耐火物研究所が参加した。他の機関での測定は、タングステンセルに Al_2O_3 を入れ、外部加熱や高周波および電子ビーム加熱をしたもの、少量の Al_2O_3 を加熱して融点付近で 1°C ごとに溶融を確かめたもので、いずれも光高温計で測温され、さらにW-Re熱電対先端に Al_2O_3 を懸架してその溶融を観測したものなどである。

さらに高温の定点として、 Al_2O_3 と同じ理由でイットリア(Y_2O_3)が選ばれ、同様に共同測定が行われ、 $2439\pm 12^\circ\text{C}^{24)}$ が推せんされ確定した。現在、 Al_2O_3 および Y_2O_3 の他に高熔点物質である Gd_2O_3 (2414°C)、

HfO_2 (2839°C)および CaO (2931°C)についても測定が進行している。また、一連の希土類金属酸化物も高温二次定点の基準点として提案される動きがあるが、著者らはそれにさきがけて大気中および不活性ガス中で測定している³⁾。このように、太陽炉は雰囲気制御の容易な点と汚染の少ない点からも、この温度標準設定の研究に期待される所が大きい。

4.3 高温相平衡状態図の研究

4.1の項で述べた冷却曲線を測定することにより、高熔点材料の多成分系の液相線および固相線が得られる。またこの際の冷却速度は $1800\sim 2300^\circ\text{C}/\text{s}$ であるので、太陽炉を急冷に用い、冷却試料の組成をX線回折、顕微鏡観察および化学分析などにより検討して高温状態図の作成が可能である。この分野では著者ら²⁵⁾により、 $\text{ZrO}_2\text{--MO}$ ($\text{M}=\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Sr}$), $\text{ZrO}_2\text{--MO}_2$ ($\text{M}=\text{Ti}$), $\text{ZrO}_2\text{--M}_2\text{O}_3$ ($\text{M}=\text{Y}, \text{Sc}, \text{La}$), $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--La}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3$ の2成分系, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ および $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ ($\text{Ln}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Yb}, \text{Lu}$)の2成分系や $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$ の3成分系の高温状態図の研究が行われ、作成した高温状態図はセラミック高温材料の基礎研究に数多く利用されている。

またフランスC.N.R.S.超耐火物研究所でも、太陽炉を用いて $\text{ZrO}_2\text{--Ln}_2\text{O}_3$ 系, $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ 系および $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ 系の状態図の研究が進められている²⁶⁾。

4.4 結晶成長

高熔点のセラミック材料の結晶成長には、Thermal Imaging Techniques が用いられてきたが、これらの高温発生技術は光学系であるため、試料支持方法に制約が加わる。したがって、比較的均一な温度が得られやすい集光鏡のヘリオスタット式システムが用いられている場合が多い。現在まで、太陽炉により TiO_2 , NiO , Y_2O_3 , UO_2 , ThO_2 , MnFeO や NiFeO 等の単結晶の育成の研究が試みられている。また、著者らは光軸垂直式太陽炉を用いて $\text{Gd}_{2.97}\text{Nd}_{0.03}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ の単結晶の育成²⁷⁾を行った。

4.5 高温物性の測定

太陽炉の温度計測技術の確立により高熔点セラミック材料の熱伝導、比熱、熱膨張、蒸発速度などの測定をはじめ、高温電導度、熱拡散率、高温結晶構造の決定および分光放射率の測定が行われている。

4.6 その他

太陽炉の計測機器の開発も重要な課題で、名工試においては、太陽炉と組み合わせた超高温領域におけるガス雰囲気溶融装置、超急冷装置、蒸発速度測定装置お

よび超微粒子作成装置等の試作を行い、超高温セラミック材料の温度測定、蒸発速度測定、無定形材料の合成、超微粒子物質の生成、高融点ガラスの合成等の研究を進めている。

また、太陽電池向けシリコンの製造研究($\text{SiO}_2 \rightarrow$ 粗製シリコン、太陽光による多結晶シリコンの製造)等の高温化学反応への利用やフランスCNRSの太陽エネルギー研究所では、水中で ZrO_2 を太陽炉により高温加熱し、水の熱分解による水素発生の実験が行われている。

この他に、金属、ホウ化物、炭化物、窒化物等の気相法による蒸着や高融点材料、特に酸化物や硫酸塩による化学的エネルギー貯蔵、太陽光直接励起レーザーの実験等が進められている。

変わったトピックスとしては、無重力場における超高温発生装置ならびに高密度光源装置として太陽炉の利用が検討されている。地上の環境と異なる宇宙空間における太陽炉の光学計の利用は、他の高温発生手段と異なり、ほとんど制約を受けずかつ長期間にわたり安定した高温領域の熱源として非常に有効であると考えられ、新材料開発研究としても有望である。

5. おわりに

高温化学における太陽炉の利用動向および応用について紹介したが、太陽炉は短時間に高温が得られる利点と温度測定技術の確立と相まって、高温物性の解明と測定に重要な役割りを果たしつつあり、高温材料の研究において高温相平衡、合成、熱的測定など、利用の方法も開発の余地が十分あると考えられる。

以上簡単に太陽炉の構造、特性、利用現況についてまとめてみたが、これらを含め高温工学上の直面する問題について諸賢のご批判をいただければ幸いである。

文 献

- 野口哲男, セラミックス, 19, (8), 629 (1984)
- 佐多敏之, セラミックス超高温利用技術(シーエムシー), p.1 (1985)
- 水野正雄, 同上, p.174 (1985)
- 水野正雄, 日仏工業技術, 17, (2), 18 (1971)
- 福尾新平, 三井寿雄, 名工試報告, 6, 1 (1957)
- 久田太郎, 野口哲男, 西田修三, 杉原 浩, 大宮 勇三, 名工試報告, 6, 1 (1957)
- 福尾新平らの一連の研究, たとえば, 名工試報告, 8, (2), 99 (1959)
- 水野正雄らの一連の研究, たとえば, 名工試研究発表会予稿集, 29, 49 (1980)
- Sakurai, T., Kamada, O., Shishido, K. and Ishigame, K., *J. Solar Energy*, 8, 105 (1964)
- Trombe, F., *Rev. Hautes Temp. et Réfract.*, 1, 5 (1964)
- 野口哲男, 水野正雄ら, 名工試報告, 10, (9), 571 (1961)
- 水野正雄, 山田 豊章ら, 窯業協会誌, 89, (9), 488 (1981)
- Foex, M., *Solar Energy*, 9, (1), 61 (1965)
- 野口哲男, 水野正雄, 小塚 健, 吉田昌家, 名工試報告, 14, (1), 28 (1965)
- Glaser, P. E., Merrera, S., Sepetoski, W. K., Comstock, D. F. and Emslie, A. G., *Rev. Sci. Instr.*, 33, (1), 57 (1962)
- Kamada, O., *Appl. Opt.*, 3, (12), 1397 (1964)
- Noguchi, T., *Colloques Internationaux du C. N. R. S.*, 205, 347 (1971)
- Coon, W. M. and Braught, G., *J. Opt. Soc. Am.*, 44, (1), 45 (1954)
- Laszlo, T. S., Gannon, R. E. and Sheehan, P. J., *J. Solar Energy*, 8, (4), 105 (1964)
- 山田豊章, 水野正雄ら, 窯業協会誌, 92, (1), 50 (1984)
- 福尾新平, 小塚 健, 藤城郁哉, 吉田昌家, 名工試報告, 11, (2), 70 (1962); 12, (1), 7 (1963)
- 水野正雄, 山田豊章, 野口哲男, 窯業協会誌, 85, (6), 374 (1977)
- Schneider, S. J., *Pure Appl. Chem.*, 21, 117 (1970)
- Foex, M., *High Temp. & High Pres.*, 9, 269 (1977)
- 水野正雄, 名古屋工業技術協会, 59—3, 41 (1985)
- たとえば, Rouanet, A., *Rev. Int. Hautes Temp. et Réfract.*, 8, 161 (1971)ほか
- Pasichny, V., Machida, M., Mizuno, M., Yamada, T., Noguchi, T. and Tabata, H., *Gelioteknika*, 4, 57 (1985)