む す び

本稿では主として最近の宇宙開発と関連して発達した高速飛翔体を対称としたセラミック材料その他複合材料の特性および用途の概要について紹介したがここ10年間にわたる高温工学とくに超高温材料の新しい開発と物性に関する論文がすでに数十冊の多数の国際シンポジウムの刊行物としてまとめられている点からも米ソのみならず

諸外国での関心の深さをうかがい知ることができる。

このような新しい分野の開発は単に限られた専門分野のみならず理工学部門を専攻する多くの方々の協力をまたねばならぬところがきわめて多いが、本稿が宇宙技術、原子力および電子工業などに関連して飛躍的進展を遂げたセラミックスを中心とした新しい無機材料工学への認識と今後のわが国での高温工学の発展に対する一つの手掛りともなれば誠に幸いである。

文 献

- Collins: Metal Progress, Jan. (1953)
- 河嶋: 窯協誌, 69, 1, 62 (1961); 工業と製品, No. 8, 12月号 (1963), 毛利・河嶋: 耐火物および特殊耐熱材料 (1964), 誠文堂新光社, 他, 提案: 超高温研究, 1, 2, 3 (1964)
- 防衛庁 黒田泰弘氏資料による
- 今井勇之進, 河嶋千尋編: 耐熱材料ハンドブック, (1955) 朝倉書店, 河嶋千尋: 耐熱材料, 工業物理学講座, 日刊工業(1956), 河嶋千尋: 特殊窯業品, 日刊工業 (1960), 島貫良一他訳: "高温工学" (1963) コロナ社 (I. Campbell 編, High Temp. Technology)
- ASTM Special Techn. Pub. No. 153 (1953), 田代仁: 玻璃工業, 8 [1], 1 (1953), 田中広吉: 大工試報告: 材料試験, 4 [20] 22 (1955)
- 河嶋千尋・村田順弘: 生産研究, 8, 6 (1956); 日本航空学会, 8 [77], [79] (1960)
- 河嶋千尋: 日本機械学会, 88, 458 (1957), 河嶋千尋, 村田順弘: 窯協誌, 65 [735] (1957), 河嶋千尋・村田順弘, 工化誌, 63 [7] (1960), 河嶋千尋・村田順弘: 金属表面技術, 11 [4] (1960), 河嶋千尋・村田順弘: 窯協誌, 68 [8] (1960), 河嶋千尋・瀬高信雄: 金属表面技術, 14, 8 (1963)
- W. Lozier & M. Manofsky: Mech. Properties of Eng. Ceramics (1961), Materials in Design Eng., April 147 (1958)
- 河嶋・瀬高: OHM, 31, 7 (1964), 同: 工業と製品 No. 13 (1964), 河嶋千尋・村田順弘: 窯協誌 31, 690, (1953); 62, 691, (1954); 62, 694, (1954); 63, 706, (1955); 63, 706, (1955); 63, 707, (1955); 63, 707, (1955); 窯業の研究 II, 89~179, (1961) 窯協誌, 61, 1, (1961)
- 河嶋千尋: 窯協誌, 68 [1] (1960), 金属 31, 17 (1961), 河嶋千尋・村田順弘・瀬高信雄: 窯協誌, 68 [12] 281, (1958), 河嶋千尋: 日陶化工機ニュース, 3 (1962), D. Bennett: Jour. Amer. Ceram. Soc., 30, 10 (1947)
- 遠藤宏二編: ロケット工学, 日刊工業, (1960)
- 岡田実: 超高温研究, 1, 2, 26 (1964) 他, 中村武三: 機械の研究, 1 [4] 1, 1 (1962); 14 [1] 1 (1962); 14 [2] 273 (1962), 蓮井淳: 溶接学会誌, 31 [12] 10; 日本機械学会誌, 65 [523] 55 (1962); 機械の研究, 15, 5, (1963)
- D. Moore 他: Nat. Bureau of Std. ARL 59, August (1961) Thermal Dynamic Corp., U. S. A., 渡辺孝幸他: 粉体および粉末冶金, 11, 3, 23 (1964)
- Campbell 他: Vapor-Plating (1955), 河嶋・瀬高・中川: 窯協学会講演会予稿 (1963, 4月), 河嶋・瀬高: 窯協関西支部学術講演会予稿 (1964, 6月)
- J. Pentecost: High Temp. Inorgani, Coating (1963) J. Bloche and J. Oxley: Am. Ceram. Bull. c 41, 2, 81 (1962)
- 河嶋・瀬高: 第3回窯業基礎討論会 (1965), 同: 人工鉱物討論会 (1965)
- Proceedings of an International Symposium on High Temp. Techn. Oct. (1959) F. Wolff: Special Ceramics, 427 (1962)
- 関口忠他: 電気学会四学会連合大会シンポジウム予稿 (1964), 河嶋千尋: 工業と製品, [5], 16 (1964)
- 河嶋千尋・齊藤道六: 粉体および粉末冶金, 5, 1, (1958), 窯協誌 68, 9, (1958), 68, 10 (1958), 化学と工業, 13, [12] (1960), 工業と製品, No. 1, 5月, 1963

高温における流体の熱物性*

蒔 田 董**

はじめに

高温を利用する各種近代工業における温度の限界は、最適条件の存在する化学平衡の場合を除くと、高温を発

生し保持する技術的・経済的問題、高温に耐える装置材料、ならびに高温における物性に関する知識の欠如によることが多い。最近の高温に関する工学的興味は、原子力の平和利用と、人工衛星で代表される宇宙空間技術に集中している感がある。前者については、言うまでもなく熱エネルギー変換サイクルでは高温ほど熱効率がよ

* 昭和41年9月5日受理

** Tadashi Makita 京都工芸繊維大学 工学部化学教室

く、後者では高速エンジンとその周囲は高温となり、各種の耐熱材料・伝熱流体・燃焼ガスや雰囲気物の性に關する知識が要求される。従って、この方面に關する多数の研究が発表されている。耐熱材料を主とした固体物性に關しては、全世界の研究を網羅した文献集¹⁾も定期的に刊行されているので、本稿では比較的紹介されていない流体について、高温工学に必要な基礎的性質の一般的傾向を概説し、新しいターラントとして注目されている融解金属とその蒸気の性質について記述する。ここで熱物性とは伝熱・流動・物質移動などの操作に必要な基礎物性の総称で、熱力学性質・輸送現象性質および熱放射性質を含むものである。また温度範囲は、信頼できる物性値の存在する工学的高温の範囲にとどめ、超高温におけるプラズマ状態などには触れないこととした。

熱物性研究の最近の動向

最近の研究の動向を知る上で、アメリカ機械工学会の伝熱部門が主催して3年毎に開かれる熱物性シンポジウムには、多数の興味ある研究が発表されている。過去3回の会合に発表された研究を便宜的に分類して下表に示す。論文数こそ少ないが、研究内容は気・液・固の三態

		第 1 回	第 2 回	第 3 回
開催時期		1959年2月	1962年1月	1965年3月
開催場所		Purdue 大学	Princeton 大学	Purdue 大学
研究論文数	統計力学理論	2	5	5
	P-V-T 関係	5	6	10
	熱力学性質	14	18	8
	輸送現象性質	17	33	16
	熱放射性質	2	6	4
数値処理		2	—	—

にわたり、温度・圧力の広い範囲をカバーしている。過去の研究に關する総説・統計力学と分子物理に基づく理論・新しい測定技術・実測値と理論値の關連・經驗的推算方法など、物理・化学・材料化学・化学工学・機械工学などの広い分野にわたっている。第1回²⁾には、ホウ素化合物の熱力学的性質と、解離または電離した気体の熱物性に關する研究が集められ、第2回³⁾では、電離気体・非ニュートン流体の性質が特集されている。第3回⁴⁾では、高温高压における熱物性の最も進歩した局面を表わす論文を集め、理論と実験の關連に努力が払われ、特に高温における測定技術や耐熱材料に關する研究が多い。しかし、すべての研究が温度や圧力の極限にいとむものではなく、比較的標準状態に近い領域で精度の高い地味な測定も継続的に行なわれている。これらの結果の集積は、現存する理論の検討や新しい理論の形成に貢献し、やがて実測不可能な高温範囲での物性値の計算にも役立つものである。最近の高速電子計算機の進歩に伴ない複

雑な理論式の解決も容易となり、個々の物性値を電子計算機に掛け得る半經驗式の形に整理することも重要な問題となり、計算結果を直接技術的に利用できる数表の形で発表されているのも新しい傾向である。

熱物性に対する温度の影響

一般に物質の熱物性は、外部変数としての温度と圧力(または密度)の関数として取り扱われる。したがって、もし分子の内部構造に変化がなければ、一定圧力における熱物性は温度に關して連続的な挙動を示すはずである。しかし、温度の上昇に伴い解離あるいはイオン化が進行し、また分子内のエネルギーの持ち方——回転・振動あるいは電子状態——に変化が起これば、内部構造に敏感性性質には異常な温度の影響が表わされる。

一般に熱物性は、巨視的に系の平衡状態で表われる熱力学性質と、系内に何らかの勾配が存在するときに表われる輸送現象性質に大別される。また別の分類法として分子内性質と分子間性質に分けることも便利である。前者は主として分子の内部構造に基因し、後者では二個以上の分子間の相互作用が重要である。理想気体の熱力学性質のごとく完全に分子の内部構造を表わす数値より計算できる性質は前者の代表的な例であり、実在気体のP-V-T 関係や輸送定数は後者の例である。もちろん、すべての性質は内部構造に關係し、構造は分子間力の大きさと型式に影響するので、この分類は便宜的であり、すべての性質は両者の要素を持つはずである。たとえば、粘度は分子間性質であるが、液体の沸点付近の粘度には分子の回転が重大となり、高温における多原子分子気体の熱伝導率には内部構造の影響が大きい。

熱物性を温度と圧力の関数として一般性のある相関を得ることは、実測値の整理や未知の領域での推算方法として重要である。分子内性質に關しては、個々の物質についての理論は多いが、多数の分子種に適用できる一般化を用いるべきであり、球形分子に対する Lennard-Jones 式、非球形分子に対する Kihara 式、極性分子に対する Stockmayer 式が試みられたが、特によい結果は得られていない。また式(1)の左辺の J_c の決定が難しく、同じ温度における低压の値や、臨界温度における低压の値に置き換える工夫もあり、後述のごとく次元解析による方法もある。推算法の詳細に關しては、よくまとめられた著書^{6,7)}を参照されたい。

理論や相関の基礎となる実験的測定では、高温における厳密な温度の測定・均一性・制御が困難となり、材料による試料の汚染や、高温における材料の物理化学的性質の不正確さのため、1,000°K 以上の測定例は少なく、一般に精度も良くない。従って高温で工学的に使用され

る値は理論値か、または経験的方法により延長された値である。以下主な熱物性の温度効果について例を挙げて一般的傾向を概説する。

P-V-T 関係： 最も基本的な熱力学性質で、すべての物性に対する温度効果の根本的原因となる。密度・比容積・圧縮率など実用上の要求も多く、また他の熱力学性質の計算にも使用されるため、実測値も比較的豊富であり、各種の状態式に関する研究も多い。特に分子間ポテンシャルを用いた統計力学によるビリアル係数の決定や係数と他の物性との関連など興味ある問題を含んでいる。対応状態原理に基づく推算法も多く、たとえば、式の方法は見出されていない。一方、分子間性質に関しては、分子間ポテンシャルに基づく種々の理論的取り扱い⁵⁾が進歩し、常圧気体の輸送定数などでは、ほぼ満足な結果が得られている。また分子間性質のみに適用できる「対応状態の原理」は一般的相関を得る手段としてかなりの成功をおさめている。元来この原理は「同じ対臨界温度 $T_r (= T/T_c)$ ・圧力 $P_r (= P/P_c)$ にあるすべての物質は同じ対臨界容積 $V_r (= V/V_c)$ を持つ」と表現されたが、容積のみでなく種々の分子間性質に適用できる。たとえば、定圧分子熱と定容分子熱の差 $C_p - C_v$ は P-V-T 関係から熱力学的に導びかれるのでこの原理を適用できるが、分子内性質である C_p , C_v やその比には適用を試みることは無駄であり、理想気体との差 $C_p - C_p^0$ には、状態式を用いて不完全気体補正が行なえるので、この原理が適用できる。いま分子間性質を J とし、添字 c で臨界点の値を示すと、

$$J/J_c = f(T_r, P_r) \quad (1)$$

にてこの原理に基づく相関を表わすことができる。この関係は非極性球形分子には満足な結果を与えるが、非球形分子や極性分子に対しては、 T_r , P_r のほかに第3パラメーターとして臨界圧縮因子 $z_c (= P_c V_c / RT_c)$ を用いると適合がよくなる。また蒸気圧偏差や沸点を用いる工夫もあり、極性分子では分極率や双極子能率を加える提案もある。式(1)の T , P はそれぞれ臨界値を用いて無次元値に還元されているが、本質的には分子間力パラメーター(1)の J に圧縮因子 $z (= PV/RT)$ を用いたチャート²⁾や、第3パラメーターを入れた数表³⁾によると、 $T_r = 15$, $P_r = 40$ までの推算が5%以内の誤差で可能である。しかし、あくまで分子構造に变化のない場合に限られる。温度の上昇に伴い解離の起こる場合には、その影響が大きく表われる。図1は空気の圧縮因子¹⁰⁾を種々の圧力について温度に対してプロットしたものであるが、2,000°K以上の温度では低圧の場合に解離の影響が見られる。一般に解離やイオン化は、温度と圧力の関数であるが、多くの二原子分子について、解離は常圧下¹¹⁾ 2,000°K、イオン化¹²⁾ は5,000°K以上で重大とな

図1 空気の圧縮因子¹⁰⁾

図2 N_2 の分子熱 C_p/R (R は気体定数)¹⁰⁾

る。

熱力学性質： 理想気体状態における分子熱 C_p^0 , エンタルピー $H^0 - H_0^0$ または $H^0 - E_0^0$ (H_0^0 , E_0^0 は 0°K の値), エントロピー S^0 , 自由エネルギー $F^0 - H_0^0$ または $F^0 - E_0^0$ などは厳密に分子内性質であり、分子構造データを用いて統計力学により計算される¹¹⁾。1950年前後にほとんどすべての気体につき、新しい物理定数・分光学的数値・同位元素組成を用いて再計算され、詳細な数表¹⁰⁻¹⁴⁾として発表されている。実在気体の値を求めるには、状態式を用いて不完全気体補正が行なわれる。図2は種々の圧力における N_2 の分子熱¹⁰⁾の温度による変化を示したもので、温度の上昇に伴い圧力効果は少なくなり、高温では理想気体の値に接近する。この図では解離の影響は考慮されていないが、図3には H_2 のエンタルピー¹⁰⁾に対する解離の影響を示した。図中の点線で示された PV/RT の値により、圧力と温度による解離の模様がよく示されている。

輸送定数： 粘性係数・熱伝導率・拡散係数はそれぞれ系内の速度・温度・濃度の勾配による運動量・熱量・質量の輸送に基因する。これらの理論的解析から適当な分子間ポテンシャルを仮定すると、低圧の気体の値が計算できる。また対応状態の原理による相関も高温高圧まで

図3 H₂のエンタルピー(無次元値で表わす)¹⁰⁾

図4 高温における拡散係数の一般相関図²⁰⁾

多数の試みがある^{38,15)}。粘度の実測値は1,800°Cまで得られている¹⁶⁾が、高温では理論または経験的な方法により算出される。最近数種の気体の分子間ポテンシャルが分子線を用いて1,000~10,000°Kにて決定され¹⁷⁾、衝

突積分の値¹⁸⁾も得られているので、Mathurら^{19,20)}はその結果を用い、非解離および解離分子に適用できる一般関係に対応状態の原理に基づき求めている。輸送定数の無次元化には次元解析の結果次の量を得た。

$$\text{粘性係数: } \eta \varepsilon = \eta \cdot T_c^{1/6} / M^{1/2} P_c^{2/3} \quad (2)$$

$$\text{熱伝導率: } k_t \lambda = k_t \cdot T_c^{1/6} M^{1/2} / P_c^{2/3} \quad (3)$$

$$\text{拡散係数: } \pi D \delta = \pi D \cdot M^{1/2} / P_c^{2/3} T_c^{5/6} \quad (4)$$

式中の M は分子量、 k_t は熱伝導率の併進運動による部分である。これらの値を T_r に対してプロットすると各定数とも単一な曲線を得る。この関係は単原子および二原子分子気体とともに、原子状 H, N, O についても成り立ち、解離平衡系に対しても適用できる。図4には拡散係数の一般相関図²⁰⁾を引用した。これは自己拡散係数とともに、解離平衡にある分子状と原子状の気体の相互拡散係数の推算に使用できる。なお、式(3)を用いた熱伝導率の相関の場合には、分子の併進運動による部分のみに適用でき、内部自由度による部分や解離エネルギーの影響については別に経験式が与えられている。

融解金属とその蒸気の性質

従来より熱機関の作動体や冷却媒体として水が広く用いられてきたが、原子力工学や宇宙空間技術における高温での伝熱流体として、化学的に安定な融解金属が重要である。現在知られている約80種の金属のうち、伝熱サイクルに使用できるものは、融点と比較的低く、しかも臨界温度までの液体範囲の広い金属に限られる。通常、融点が340°C以下で、常圧下の液体領域が沸点の絶対温度の60%以上にわたることが望ましく、凝固が起こったり、高い蒸気圧を生ずるものは操作上不便である。同時に、長時間の運転中に、熱勾配や流動の存在する状態で装置材料の腐食が起こらないことも重要である。これらの点から、伝熱流体として適当な金属を、その使用温度範囲と適当な装置材料とともに下表に示した。表中

使用温度範囲	伝熱流体	装置材料
320°C以下	Hg	軟鋼
320~650°C	Hg, Cs, Rb, K, Na	特殊鋼
650~980°C	Cs, Rb, K, Na, Li	Fe, Co, Ni, Cr ベースの特殊合金
980~1320°C	Cs, Rb, K, Na, Li, Bi, Pb	Mo, Nb, Ta, W の耐熱金属合金
1320°C以上	Li, Bi, Pb	耐熱金属合金、セラミック、サーメット

の材料は一般的に挙げたもので、耐食性は個々の金属によりかなり異なるので注意を要する。これらの金属のうち、密度が小さく熱伝導率と比熱の大きいアルカリ金属は効率の高い伝熱流体として注目されている。しかも粘度は通常の液体に近く、循環の動力は少なく済み、循環

図5 Hgの液体および蒸気の粘性係数²⁶⁾

図6 Naの動粘度²⁷⁾

図7 Arの動粘度²⁷⁾

図8 水および水蒸気の動粘度²⁷⁾

中の圧力降下も少ない。しかし、反応性に富むため危険防止には充分考慮する必要がある。

融解金属とその蒸気の熱物性に関しては、実験・理論ならびに経験的方法による結果が、工学的目的のため整理されている²¹⁾が、最近の研究はデータ不足の領域を補う方向とともに、より正確な実測値の決定や推算法の確立に努力が集中されている。紙面の都合上系統的な解説ができないので、最近の数報を引用して研究の動向を知る便に供したい。

融解金属の密度や蒸気圧は装置の設計に重要である。Hochman ら⁴⁴⁾はCsの液体と蒸気の密度を320~1,650

°Cにて測定し、Mathias-Cailletetの規圧密度の法則を用いて臨界値($T_c=2,028^\circ\text{K}$, $P_c=130.8$ 気圧, $d_c=0.451\text{g/cc}$)を決定した。Bowles ら²²⁾は融解Naの蒸気圧を1,000~2,200°K, 0.5~120 気圧の範囲で静的に測定し、通常の液体のごとくClapeyron-Clausius型の経験式を与えている。Kim ら²³⁾はPbとSiの蒸気圧を850~970°Kで測定し、Pbの蒸気は単原子分子であるが、Biではその65%がBi₂になっていることを指摘した。温度の上昇に伴い解離が進むが、蒸気の熱物性に通常の気体の理論式を適用するとき、その分子量や会合・解離に伴うエネルギーを考慮する必要がある。

一般に液体金属の輸送定数は金属結合のため複雑となり、粘度はすべての金属につき温度により減少するが、熱伝導度の温度係数はNa, K, Rb, Csでは負、Li, Hg, Pb, Biでは正であり、その理論的説明はない。Hochman らは高温で精度の高い電気抵抗の測定から、Wiedemann-Franz-Lorenzの法則を用いて320~1650°CのCsの熱伝導率を算出し²⁴⁾、また320~540°CにおけるK-Hg系の拡散係数を定めた⁴⁵⁾。GrosseはNa, K²⁵⁾およびHg²⁶⁾につき、実測値を用いてAndrade式の係数を定め、融点から臨界点までの飽和液体の粘度を推算した。図5にHgの結果を示すが、蒸気の数もプロットして規圧密度の法則と類似の方法で臨界粘度 η_c を定めた。NaおよびKの η_c は、それぞれ0.072, 0.055cpである。これらの結果は動粘度 ν の計算²⁷⁾に使用され、図6にNaの例を示すごとく、液体の動粘度 ν_l には極小値であり、液体範囲の ν_l の値の大部分は ν_c より低い。非金属液体の代表的な例を図7、図8に示すが、これらより金属液体の特異性がよく見られる。一方、蒸気の ν_v に関しては特別の差異は認められず、蒸気になれば金属の特性を失ない通常の気体と類似した挙動をするものと考えられる。

以上の数報からも明らかなごとく、しばしば古典的経験律が用いられていることは、液体金属に関する理論の困難さによるもので、新しい理論の出現が待たれ、同時に精度の高い実測値が望まれている。

おわりに

高温における流体のもう一つの重要な熱物性は熱放射性質であり、また水蒸気・融解塩類や電離気体の性質も今後的高温工学の発展に重要なものであるが、紙面の都合上割愛した。

引用文献

- 1) Diamond, J. J. (Ed.): "Bibliography on the High Temperature Chemistry and Physics of Materials in the Condensed State", Commission on High Temperatures and Refractories, International Union of Pure and Applied Chemistry (配布希望者は National Bureau of Standards, Washington, D. C., 20234, U. S. A. へて編集者に連絡すればよい)
- 2) Touloukian, Y. S. (Ed.): "Thermodynamic and Transport Properties of Gases, Liquids and Solids", ASME-McGraw-Hill Book Co., Inc., New York (1959)
- 2a) Martinek, F.: *Ibid.*, p. 130
- 3) Masi, J. F. and D. H. Tsai (Ed.): "Progress in International Research on Thermodynamic and Transport Properties", ASME-Academic Press, New York (1962)
- 3a) Stiel, L. I. and G. Thodos: *Ibid.*, p. 352
- 4) Gratch, S. (Ed.): "Advances in Thermophysical Properties at Extreme Temperatures and Pressures", The American Society of Mechanical Engineers, New York (1965)
- 4a) Hochman, J. M. and C. F. Bonilla: *Ibid.*, p. 122
- 4b) Bonilla, C. F., D. I. Lee and P. J. Foley: *Ibid.*, p. 207
- 5) Hirschfelder, J. O., C. F. Curtiss and R. B. Bird: "Molecular Theory of Gases and Liquids", John Wiley & Sons, New York (1954)
- 6) Reid, R. C. and D. K. Sherwood: "Properties of Gases and Liquids", McGraw-Hill, New York (1958) 近く改訂版が出る予定である。
- 7) 佐藤一雄: "物性定数推算法" 丸善 (1954)
- 8) Nelson, L. C. and E. F. Obert: *Mech. Eng.*, **76**, 280 (1954); Obert, E. F.: "Concepts of Thermodynamics", McGraw-Hill Book Co., New York (1960)
- 9) Lydersen, A. L., R. A. Greenkorn and O. A. Hougen: Univ. of Wisc. Eng. Expt. Sta. Report 4, (1955); Comings, E. W.: "High Pressure Technology", McGraw-Hill Book Co., New York (1956)
- 10) Hilsenrath, J., C. W. Beckett, W. S. Benedict, L. Fano, H. J. Hodge, J. F. Masi, R. L. Nuttall, Y. S. Touloukian and H. W. Wooley: "Tables of Thermal Properties of Gases", National Bureau of Standards Circ. 564 (1955)
- 11) Mayer, J. E., M. G. Mayer: "Statistical Mechanics", John Wiley & Sons, New York (1940)
- 12) Rossini, F. D., K. S. Pitzer, R. L. Arnett, R. M. Braun and G. C. Pimental: "Selected Values of Physical and Thermodynamic Properties of Hydrocarbons and Related Compounds", Carnegie Press, Pittsburgh, Pa. (1953); American Petroleum Institute Research Project 44, Chem. Thermo. Properties Center, College of Texas, College Station, Texas (1953)
- 13) Stull, D. R., et al.: "JANAF Thermochemical Tables", Thermal Research Lab., The Dow Chem. Co., Midland, Mich. (1960-2)
- 14) McBride, B. J., S. Heime, J. G. Ehlers and S. Gordon: "Thermodynamic Properties to 6000°K for 210 Substances Involving the First 13 Elements", NASA SP-3001, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C. (1963)
- 15) 蒔田重: 高圧ガス協会誌, **23**, 367, 489, 588 (1959)
- 16) Bonilla, C. F., S. J. Wang and H. Weiner: *Trans. ASME*, **78**, 1285 (1956)
- 17) Amdur, I., et al.: *J. Chem. Phys.*, **22**, 664, 670 (1954); **23**, 415, 2268 (1955); **25**, 624 (1956); **27**, 527 (1957)
- 18) Amdur, I. and E. A. Mason: *Phys. Fluids*, **1**, 370 (1958) Vanderal ice, J. T., S. Weissman, F. A. Mason and R. J. Fallon: *Ibid.*, **5**, 155 (1962) Yun, Kwang-sik, S. Weissman and E. A. Mason: *Ibid.*, **672** (1962)
- 19) Mathur, G. P. and G. Thodos: *A. I. Ch. E. J.*, **9**, 596 (1963)
- 20) Mathur, G. P. and G. Thodos: *A. I. Ch. E. J.*, **11**, 164 (1965)
- 21) Weatherford, W. D., Jr., J. C. Tyler and P. M. Ku: "Properties of Inorganic Energy-Conversion and Heat-Transfer Fluids for Space Applications", WADD Tech. Rept., 61-96 (1961)
- 22) Bowles, K. J. and L. Rosenblum: *J. Chem. Eng. Data*, **10**, 321 (1965)
- 23) Kim, J. H. and A. Coegarea, Jr.: *J. Chem. Phys.*, **44**, 806 (1966)
- 24) Hochmann, J. M. and C. F. Bonilla: *Nucl. Sci. Eng.*, **22**, 434 (1965)
- 25) Grose, A. V.: *Science*, **147**, 1438 (1965)
- 26) Grose, A. V.: *J. Phys. Chem.*, **68**, 3419 (1964)
- 27) Grose, A. V.: *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **28**, 31 (1966)

[特集終わり]