

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

การสอบกลางภาค ประจำปีการศึกษาที่ 1

ปีการศึกษา 2548

วันพฤหัสบดีที่ 4 สิงหาคม 2548

เวลา : 9.00-12.00 น.

วิชา : 237-480 : Degradation of Materials

ห้อง : A400

**คำสั่ง**

1. อนุญาตให้นำ Short note กระดาษ A4 2 แผ่น (4 หน้า) เฉพาะลายมือเขียนเท่านั้น เข้าห้องสอบได้
2. อนุญาตให้นำเครื่องคิดเลขเข้าห้องสอบได้
3. ทำทุกข้อในพื้นที่ที่เว้นไว้ให้
4. มีกระดาษกราฟ Semi-log คนละ 1 แผ่น

ทุจริตในการสอบโทษขั้นต่ำ คือ ปรับตกในรายวิชาที่ทุจริต และพักการเรียน 1 ภาคการเรียน

ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

หน้า	คะแนนเต็ม	คะแนนที่ได้
2	18	
3	16	
4	18	
5	12	
6	7	
7	8	
8	15	
9	10	
รวม	104	

รศ.ดร.พิษณุ บุญवाल

ผู้ออกข้อสอบ



ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

3.2 ใช้ Ferritic stainless steel เชื่อมทำเครื่องมือผ่าตัดขนาดเล็กของแพทย์  
(8 คะแนน)

4. จากการตรวจวัดการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กชนิดหนึ่งตามข้อมูลข้างล่าง จงคำนวณ Corrosion rate ในหน่วยของ mils per year (mpy) แล้วจงประเมินว่าสมบัติ Corrosion resistance ของเหล็กชนิดนี้เป็นอย่างไร (8 คะแนน)

Density	6.72	g/cm <sup>3</sup>
ขนาดแผ่นเหล็ก (ก x ย x หนา)	2 x 3 x ¼	นิ้ว
Exposure time	72	ชั่วโมง
น้ำหนักที่หายไป	3,300	มิลลิกรัม

ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

5. จงอธิบายสั้น ๆ ว่ารูปประกอบด้วยหากจะช่วยให้เข้าใจง่ายขึ้น (ข้อละ 3 คะแนน)

5.1 Dew Point Corrosion

5.2 Sensitization

5.3 Graphitization

5.4 Two-metal corrosion

5.5 Hydrogen blistering

5.6 Corrosion fatigue

ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

5.7 Stress corrosion

5.8 Uniform attack

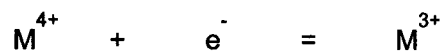
5.9 Activation polarization

5.10 Concentration polarization

ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

## 6. จงคำนวณ และตอบคำถาม

6.1 คำนวณ Standard EMF ของ Half cell reaction นี้ (4 คะแนน)



กำหนด

6.2 หากใช้ Cu-CuSO<sub>4</sub> electrode เป็น Reference ในการวัด Half-cell potential

ต่อไปนี้ จะอ่านค่าได้เท่าใด (3 คะแนน)



ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

6.3 Will Ni be corroded in a solution of 0.1 mol/l  $\text{NiCl}_2$  + 1.0 mol/l HCl at 25 °C ?

Support your answer with calculations of the relevant equilibrium potential and free energy change.

Calculate also the value of K, the equilibrium constant of the reaction.

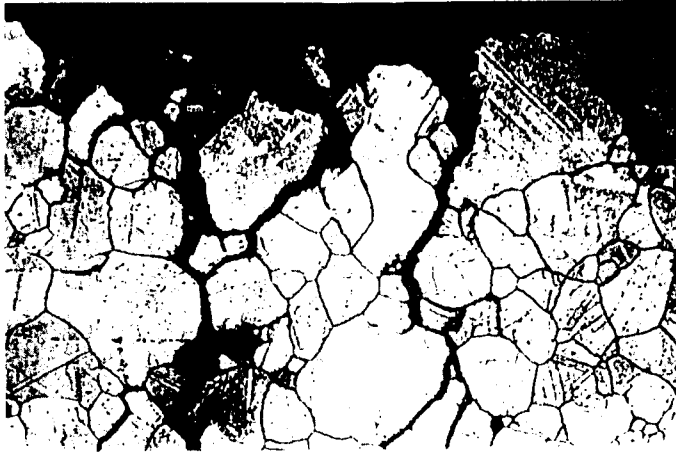
Given : R = 8.314 F = 96500 (8 คะแนน)

ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

7. จงเดาว่าภาพต่อไปนี้เป็น corrosion ชนิดใด และให้เหตุผลประกอบ (ข้อละ 5 คะแนน)

7.1 ท่อในระบบหล่อเย็นทำจากทองเหลือง (Aluminum brass) 76-79% Cu, 1.8-2.5%

Al อยู่ในบรรยากาศของแอมโมเนีย



7.2 ท่อส่งน้ำใต้ดินทำจากเหล็กหล่อเทา



7.3 หัวปั่น (Centrifuge head) ทำด้วย stainless steel เกรด 316 ใช้งานใน Calcium chloride solution





ชื่อ \_\_\_\_\_ รหัส \_\_\_\_\_

8. จากค่า Exchange current density ที่ให้ จงเขียน Polarization diagram ของโลหะ (M) ใน Dilute HCl ที่ไม่มี Oxygen ละลายอยู่ (มีเฉพาะ Hydrogen evolution เท่านั้นที่เป็นตัวรับ electron) แล้วอ่านและประเมิน

- 1) corrosion current density
- 2) corrosion rate (mpy) และประเมินความรุนแรงของปัญหา

$$E^\circ (M/M^{2+}) = -0.700 \text{ Volt(SHE)}$$

$$i_0 (H^+/H_2, M) = 10^{-6} \text{ A/cm}^2$$

$$i_0 (M/M^{2+}) = 10^{-7} \text{ A/cm}^2$$

(ทำในกระดาษกราฟที่ให้) (10 คะแนน)

ขอให้โชคดี  
รศ.ดร.พิษณุ บุญนวล

ELECTROMOTIVE, EMF, SERIES - Ranking of Standard Potentials<sup>†</sup>

	Metal Ion - Metal Equilibrium (unit activity)	E° vs. Standard Hydrogen Electrode @ 25°C Volts
NOBLE ↑	$(\text{Co}^{3+} + e^- = \text{Co}^{2+})^*$	1.82
	$(\text{Ce}^{4+} + e^- = \text{Ce}^{3+})^*$	1.55
	$\text{Au}^{3+} + 3e^- = \text{Au}$	1.498
	$(\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- = 2\text{H}_2\text{O})^*$	1.229
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^- = \text{Pt}$	1.2
	$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	0.799
	$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- = 2\text{Hg}$	0.788
	$(\text{Fe}^{3+} + e^- = \text{Fe}^{2+})^*$	0.771
	$(\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- = 4\text{OH}^-)^*$	0.401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	0.337
	$(\text{Sn}^{4+} + 2e^- = \text{Sn}^{2+})^*$	0.15
	$(\text{H}^+ + e^- = 1/2 \text{H}_2)^*$	0
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.136
	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^- = \text{Co}$	-0.277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.402
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.440
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.744
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.763
	$(\text{H}_2\text{O} + e^- = \text{OH}^- + 1/2\text{H}_2)^*$	-0.826
	$\text{Tl}^{2+} + 2e^- = \text{Tl}$	-1.63
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.363
	BASE	$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$

<sup>†</sup>All reactants and products are at unit activity, e.g.,  $a_{\text{M}^{n+}} = a_{\text{M}} = 1$  for the reaction  $\text{M} = \text{M}^{n+} + ne^-$ .

\*Reactions in parentheses function as cathodic reactions in corrosion processes; as such they proceed to the right.

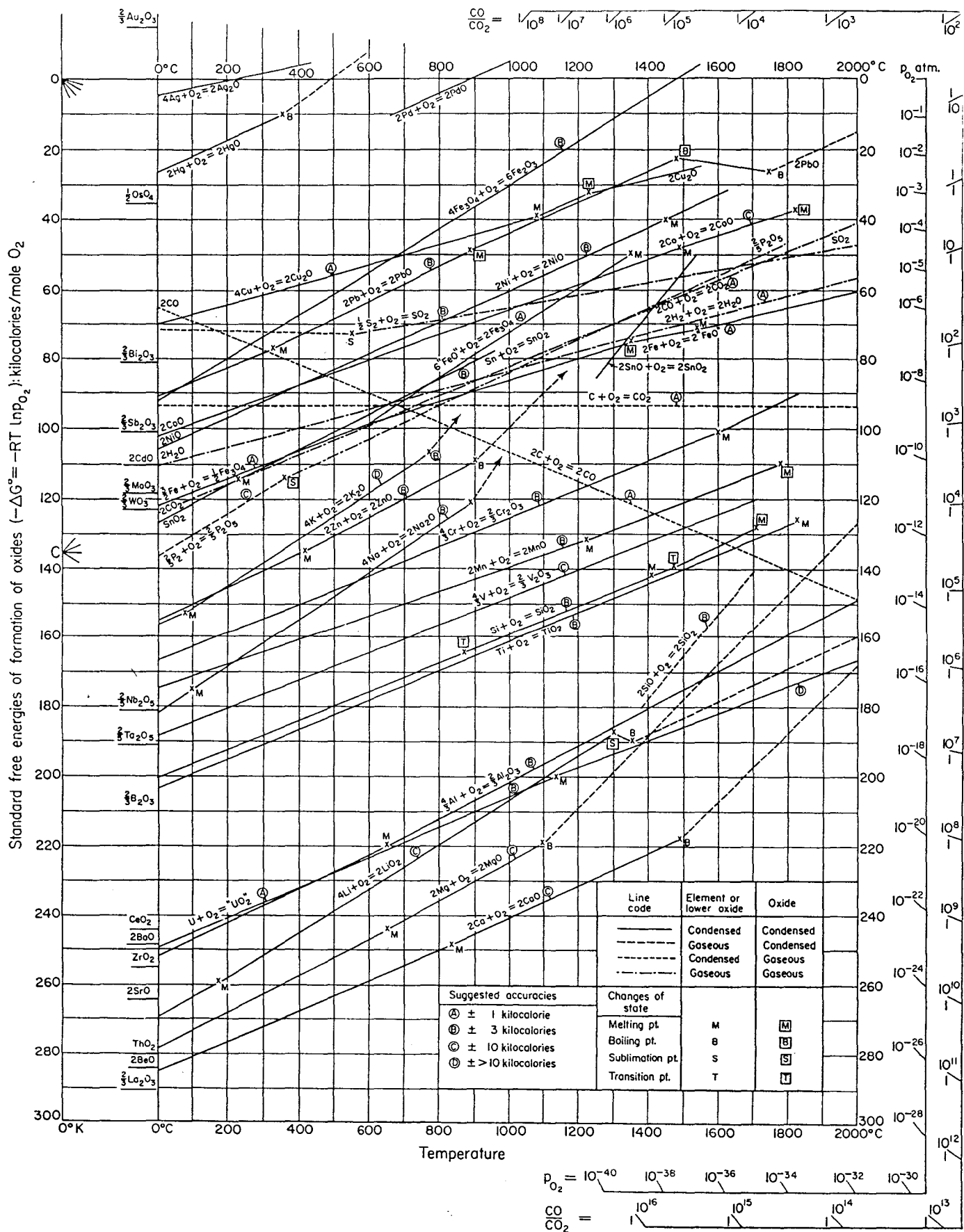
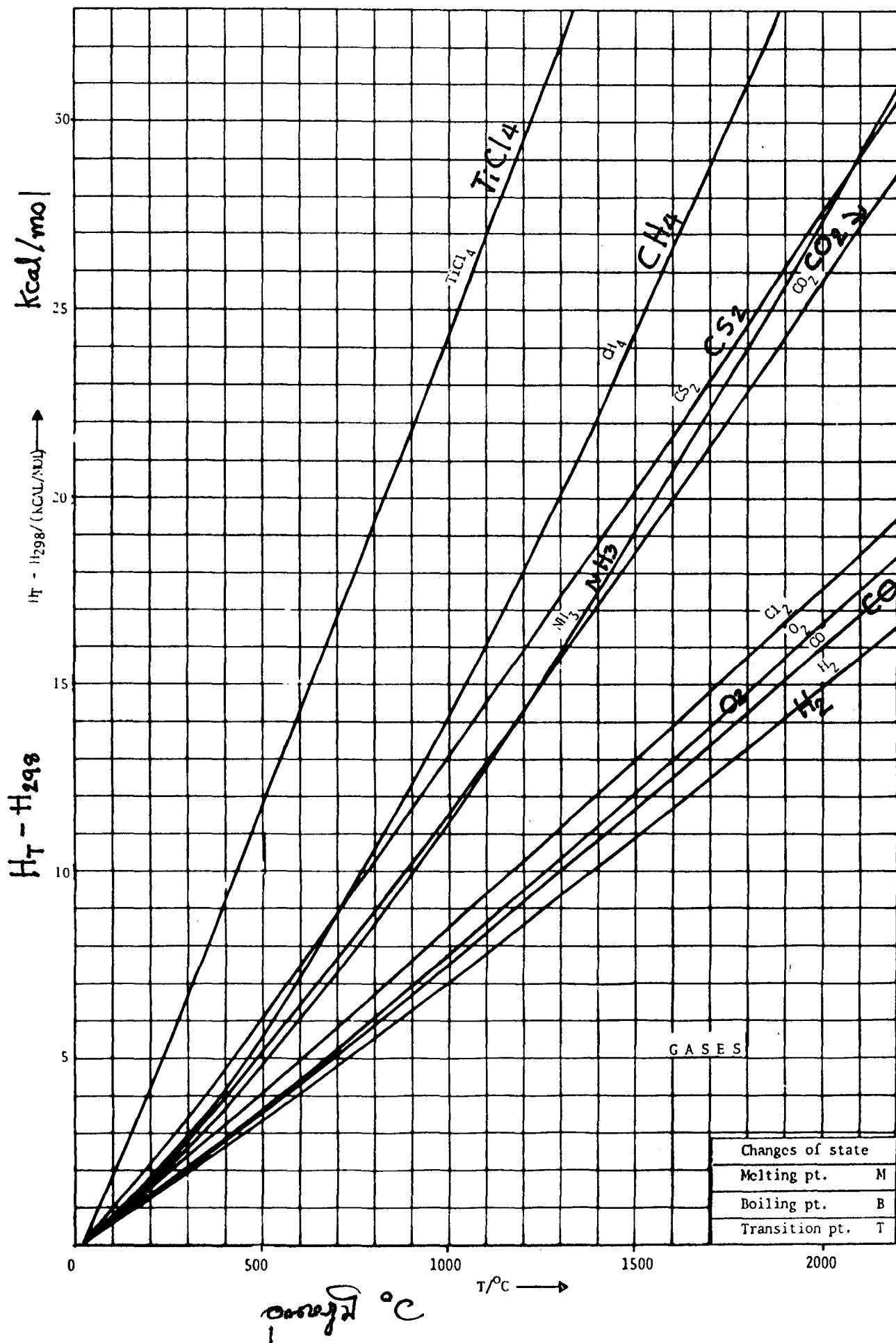


FIG. 42. The standard free energies of formation of oxides, the standard states being the pure condensed phases and gases at 1 atm pressure. Grids for  $p_{O_2}$  and  $CO/CO_2$  values are indicated by scales round the right margin and radiate from foci marked on the temperature axis. Where values are not known accurately or where inclusion would lead to confusion the oxide is indicated by its formula at the approximate value of  $\Delta G^\circ$  at  $0^\circ C$ . (Based on diagrams by Ellingham<sup>(27)</sup> and Richardson and Jeffes<sup>(23)</sup>).





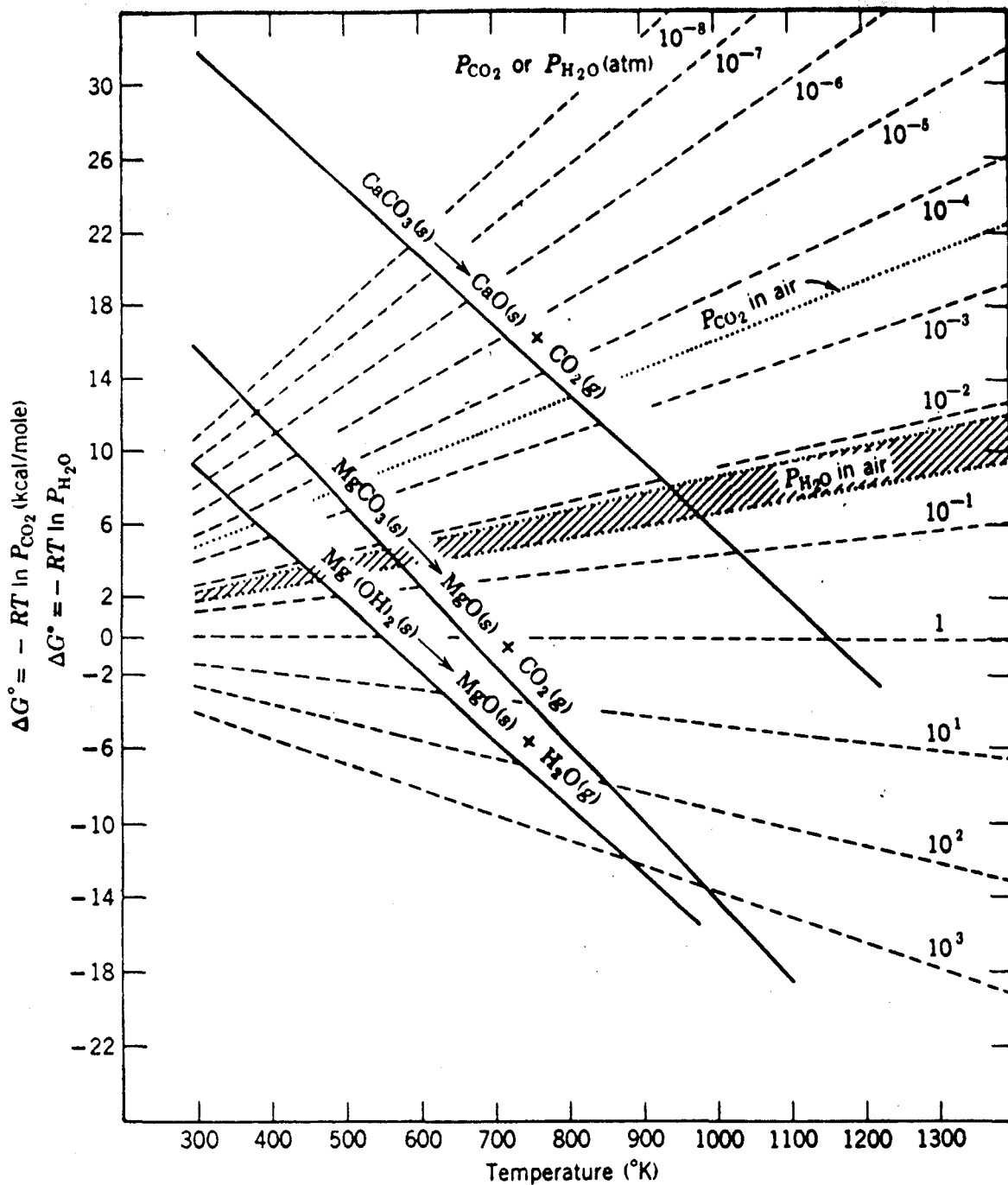
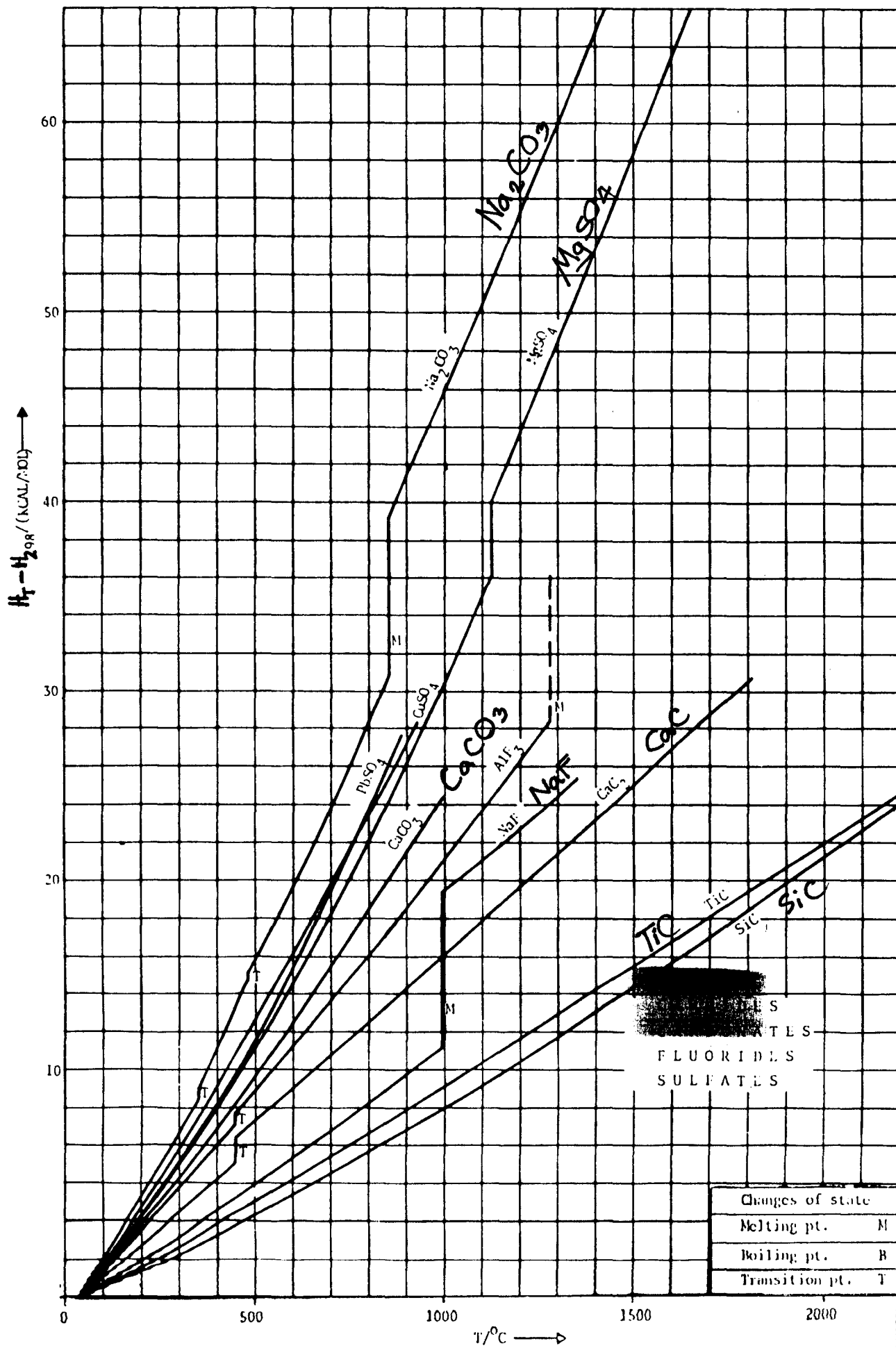
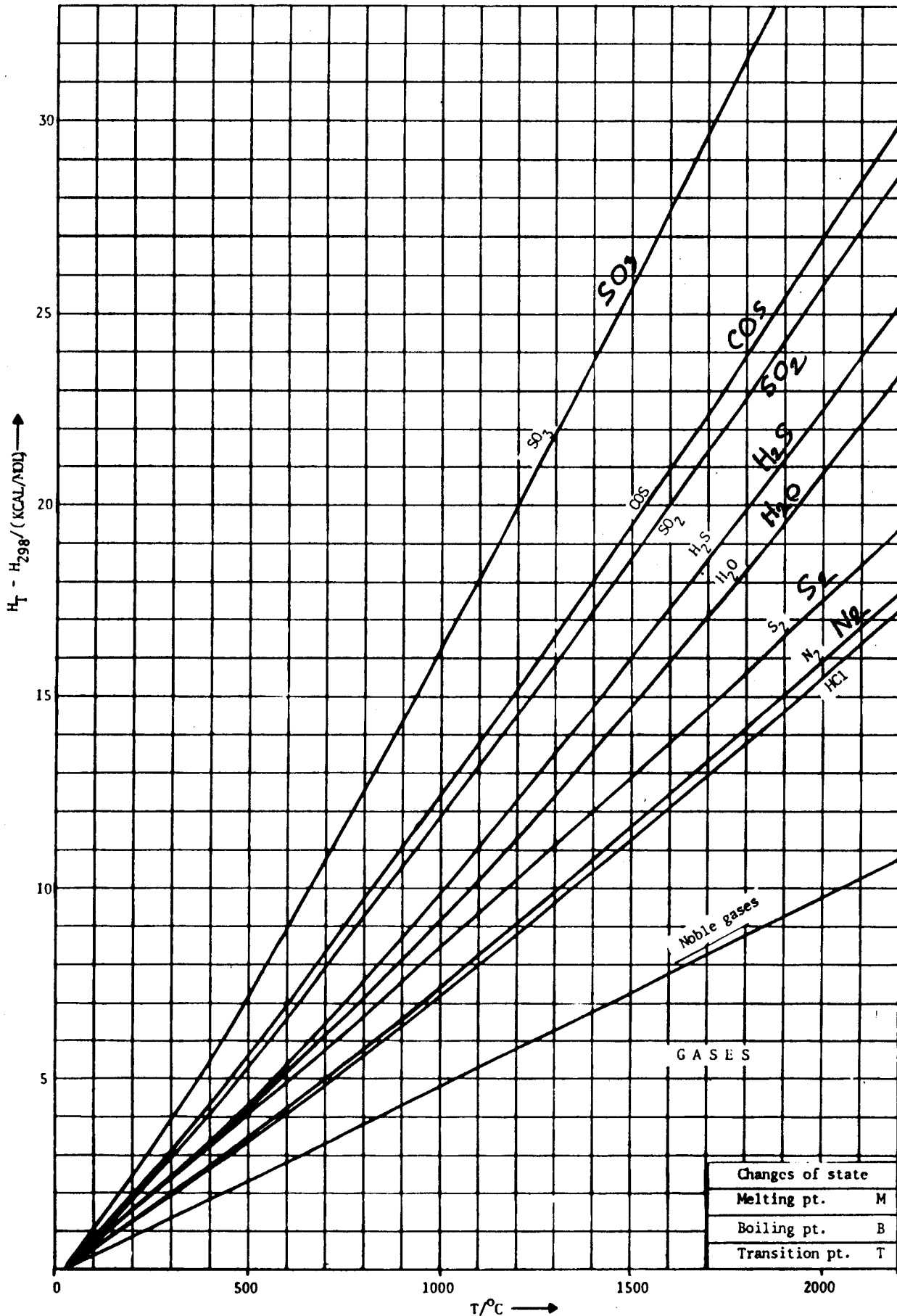


Fig. 9.22. Standard free energy of reaction as a function of temperature. The dashed lines are the equilibrium gas pressure above the oxide and carbonate (hydroxide).



Part II - Enthalpy Increments Above 298K\*



\* The sources for the data in this part are as follows: Kelley, K.K.: Bureau of Mines Bulletin, 584, 1960. Wicks, C.E. and Block, F.E.: Bureau of Mines Bulletin, 605, 1963. JANAF Thermochemical Tables, 1965-68. Reproduced from Principles of Extractive Metallurgy by T. W. van Arman.



Substance	Mole weight	$-\Delta H_{298}^{\circ}$ kcal/ mole	Accuracy $\pm$ kcal		Substance	Mole weight	$-\Delta H_{298}^{\circ}$ kcal/ mole	Accuracy $\pm$ kcal	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	159.7	196.3	0.8		MnSiO <sub>3</sub> (s)	131.0	5.9*	0.4	*From oxides.
FeS(s)	87.9	22.8	0.3		Mn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	202.0	11.8*	0.7	
FeS <sub>2</sub> (s)	120.0	42.4	1.5		Mo(s)	95.9	0		
FeSO <sub>4</sub> (s)	151.9	220.5	6.0		MoO <sub>2</sub> (s)	127.9	140.0	0.9	
Fe <sub>4</sub> N(s)	237.4	2.6	2.0		MoO <sub>3</sub> (s)	143.9	178.2	0.5	
Fe <sub>2</sub> N(s)	125.7	0.9	2.0		Mo <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (s)	288.1	92.5	4.0	
Fe <sub>3</sub> P(s)	198.5	39.0	2.0		MoS <sub>2</sub> (s)	160.1	60.4	3.0	
Fe <sub>3</sub> C(s)	179.6	-5.4	1.5		Mo <sub>2</sub> N(s)	205.9	16.6	0.5	
FeCO <sub>3</sub> (s)	115.9	178.7	3.0		Mo <sub>2</sub> C(s)	203.9	-4.2	5.0	
FeSi(s)	83.9	19.2	1.5		N <sub>2</sub> (g)	28.0	0		
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	203.8	2.6 <sup>  </sup>	2.5	From	NH <sub>3</sub> (g)	17.0	11.0	0.2	
FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (s)	223.9	1.3*	2.5	0.1 Fe + 2 Fe <sub>11/14</sub> O + SiO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O(g)	44.0	-19.6	0.4	
				*From oxides.	NO(g)	30.0	-21.6	0.4	
H <sub>2</sub> (g)	2.016	0			NO <sub>2</sub> (g)	46.0	-8.0	0.2	
HF(g)	20.0	64.8	0.5		Na(s)	23.0	0		
HCl(g)	36.5	22.0	0.1		NaF(s)	42.0	137.3	1.0	
H <sub>2</sub> O(g)	18.0	57.80	0.01		NaCl(s)	58.5	98.6	0.2	
H <sub>2</sub> O(l)	18.0	68.32	0.01		Na <sub>2</sub> O(s)	62.0	100.7	1.2	
H <sub>2</sub> S(g)	34.1	4.9	0.1		NaOH(s)	40.0	102.3	1.2	
					Na <sub>2</sub> S(s)	78.1	92.4	2.0	
Hg(l)	200.6	0			Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	142.1	333.5	2.0	
HgCl <sub>2</sub> (s)	236.0	31.5	0.3		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (s)	106.0	271.6	2.5	
HgCl <sub>2</sub> (l)	271.5	55.0	1.5		Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (s)	122.1	55.5*	3.5	*From oxides.
HgO(s, red)	216.6	21.7	0.2		Na <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s, α)	182.2	60.5*	3.5	
HgS(s, red)	232.7	13.9	1.5		Nb(s)	92.9	0		
					NbO(s)	108.9	98.5	2.0	
K(s)	39.1	0			NbO <sub>2</sub> (s)	124.9	190.4	1.5	
KF(s)	58.1	134.5	1.0		Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	265.8	455.0	2.0	
KCl(s)	74.6	104.2	0.2		NbC(s)	104.9	33.7	1.5	
K <sub>2</sub> O(s)	94.2	86.4	2.0		Ni(s)	58.7	0		
KOH(s)	56.1	101.8	0.5		NiCl(g)	129.6	-55.0	9.0	
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	174.3	342.6	1.0		NiCl <sub>2</sub> (s)	129.6	73.0	0.5	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (s)	138.2	188.55	1.5		NiO(s)	74.7	57.5	0.5	
K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (s)	154.3	62.5*	7.0	*From oxides.	Ni <sub>3</sub> S <sub>2</sub> (s)	240.3	47.5	2.5	
					NiS(s)	90.8	22.2	1.4	
Mg(s)	24.3	0			NiS <sub>2</sub> (s)	122.8	34.0	4.0	
MgCl <sub>2</sub> (s)	95.2	153.4	0.2		NiSO <sub>4</sub> (s)	154.8	212.5	5.0	
MgO(s)	40.3	143.7	0.2		Ni <sub>3</sub> C(s)	188.1	-9.0	1.5	
MgS(s)	56.4	83.0	2.0		NiCO <sub>3</sub> (s)	118.7	162.7	3.0	
MgSO <sub>4</sub> (s)	120.4	305.5	5.0		Ni(CO) <sub>4</sub> (g)	170.8	36.4 <sup>¶</sup>	1.0	¶From Ni + 4CO.
Mg <sub>2</sub> C <sub>3</sub> (s)	84.7	-19.0	8.0		P(s, white)	31.0	0		
MgC <sub>2</sub> (s)	48.3	-21.0	5.0		P(s, red)	31.0	4.4	0.4	
MgCO <sub>3</sub> (s)	84.3	262.0	3.0		PCl <sub>3</sub> (g)	137.3	66.4	1.0	
Mg <sub>2</sub> Si(s)	76.7	19.0	1.0		PCl <sub>3</sub> (l)	137.3	74.3	0.8	
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	140.7	15.1*	1.0	*From oxides.	PCl <sub>3</sub> (g)	208.2	87.3	3.0	
MgSiO <sub>3</sub> (s)	100.4	8.7*	0.7		PCl <sub>3</sub> (s)	208.2	106.0	3.0	
					P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	141.9	356.6	2.5	
Mn(s)	54.9	0			Pb(s)	207.2	0		
MnCl <sub>2</sub> (s)	125.8	115.2	0.5		PbCl <sub>2</sub> (s)	278.1	85.8	0.5	
MnO(s)	70.9	92.0	0.5		PbO(s, red)	223.2	52.4	0.2	
Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (s)	228.8	331.4	1.0		Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	685.6	175.6	4.0	
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	157.9	228.7	1.2		PbO <sub>2</sub> (s)	239.2	66.1	1.0	
MnO <sub>2</sub> (s)	86.9	124.3	0.5		PbS(s)	239.3	22.5	0.5	
Mn <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (s)	221.9	174.1	2.5		PbSO <sub>4</sub> (s)	303.3	219.5	0.8	
MnS(s)	87.0	49.0	0.5		PbCO <sub>3</sub> (s)	267.2	167.3	2.5	
MnS <sub>2</sub> (s)	119.1	49.5	2.5		Pb <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	506.5	7.0*	3.5	*From oxides.
MnSO <sub>4</sub> (s)	151.0	254.2	1.0		PbSiO <sub>3</sub> (s)	283.3	2.5*	2.0	
Mn <sub>3</sub> C(s)	176.8	3.6	3.0						
MnCO <sub>3</sub> (s)	115.0	213.9	1.2						

Part I - Heats of formation at 298K and molecular weights of many compounds\*

Substance	Mole weight	$-\Delta H_{298}^{\circ}$ kcal/mole	Accuracy $\pm$ kcal		Substance	Mole weight	$-\Delta H_{298}^{\circ}$ kcal/mole	Accuracy $\pm$ kcal	
Ag(s)	107.9	0			Ca <sub>3</sub> P <sub>2</sub> (s)	182.2	120.0	6.0	
AgCl(s)	143.3	30.3	0.2		CaC <sub>2</sub> (s)	64.1	14.1	2.0	
Ag <sub>2</sub> O(s)	231.7	7.3	0.1		CaCO <sub>3</sub> (s)	100.1	288.4	0.7	
Ag <sub>2</sub> S(s)	247.8	7.6	0.2		CaSi(s)	68.2	36.0	2.0	
Al(s)	27.0	0			CaSi <sub>2</sub> (s)	96.3	36.0	3.0	
AlF(g)	46.0	61.0	2.0		Ca <sub>2</sub> Si(s)	108.3	50.0	3.0	
AlF <sub>3</sub> (s)	84.0	356.0	1.0		CaSiO <sub>3</sub> (s)	116.2	21.5*	0.3	
AlCl(g)	62.4	11.6	0.8		Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	172.3	30.2*	1.5	*From oxides
AlCl <sub>3</sub> (s)	133.3	168.6	0.5		Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> (s)	228.3	27.0*	1.5	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	102.0	400.0	1.5		CaAl <sub>2</sub> (s)	94.0	54.0	3.0	
AlN(s)	41.0	76.5	1.0		CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (s)	158.0	3.7*	0.4	*From oxides
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> (s)	144.0	51.5	2.0		Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (s)	270.2	1.6*	0.4	*From oxides
Andalusite	162.1	1.3†	0.5	†Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	Cd(s)	112.4	0		
Kyanite	162.1	1.9†	0.5	from oxides.	CdCl <sub>2</sub> (s)	183.3	93.0	0.5	
Sillimanite	162.1	0.6†	0.5		CdO(s)	128.4	61.1	0.7	
Mullite	426.0	-7.0†	0.5	‡Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	CdS(s)	144.5	34.5	0.5	
				from oxides.	CdSO <sub>4</sub> (s)	208.5	221.4	1.0	
As(s)	74.9	0			Ce(s)	140.1	0		
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	197.8	156.6	1.0		CeO <sub>2</sub> (s)	172.1	260.2	2.5	
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	229.8	218.5	1.5		Co(s)	58.9	0		
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (s)	246.0	30.0	3.0		CoCl <sub>2</sub> (s)	129.8	77.8	4.0	
As <sub>2</sub> S <sub>5</sub> (s)	310.1	35.0	3.0		CoO(s)	74.9	57.1	0.5	
B(s)	10.8	0			CoS(s)	91.0	21.1	1.0	
BN(s)	24.8	60.5	0.8		Co <sub>3</sub> S <sub>4</sub> (s)	305.0	75.0	3.0	
Ba(s)	137.3	0			CoS <sub>2</sub> (s)	123.1	33.5	4.0	
BaCl <sub>2</sub> (s)	208.2	205.4	0.6		CoSO <sub>4</sub> (s)	155.0	207.5	6.0	
BaO(s)	153.3	139.0	2.0		Cr(s)	52.0	0		
BaO <sub>2</sub> (s)	169.3	152.5	3.0		CrCl <sub>2</sub> (s)	122.9	97.0	3.5	
BaSO <sub>4</sub> (s)	233.4	350.2	5.0		CrCl <sub>3</sub> (s)	158.4	132.0	5.0	
BaCO <sub>3</sub> (s)	197.3	290.0	7.5		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	152.0	270.0	2.5	
C(graphite)	12.0	0			CrO <sub>3</sub> (s)	100.0	138.5	2.5	
C(diamond)	12.0	-0.454	0.03		Cr <sub>4</sub> C(s)	220.0	16.4	1.5	
C(coke etc.)	12.0	-3.0	1.5		Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> (s)	400.0	42.5	2.5	
CH <sub>4</sub> (g)	16.0	17.89	0.1		Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (s)	180.0	21.0	2.0	
CCl <sub>4</sub> (l)	153.8	33.3	0.5		Cu(s)	63.5	0		
CCl <sub>4</sub> (g)	153.8	25.5	0.4		CuCl(s)	99.0	32.2	0.7	
COCl <sub>2</sub> (g)	98.9	53.3	1.5		CuCl <sub>2</sub> (s)	134.4	49.2	2.5	
CO(g)	28.0	26.40	0.03		Cu <sub>2</sub> O(s)	143.1	40.0	0.7	
CO <sub>2</sub> (g)	44.0	94.05	0.01		CuO(s)	79.5	37.1	0.8	
CS <sub>2</sub> (l)	76.1	-21.0	1.0		Cu <sub>2</sub> S(s)	159.1	19.6	0.4	
CS <sub>2</sub> (g)	76.1	-27.7	1.0		CuS(s)	95.6	12.1	0.5	
COS(g)	60.1	33.9	1.0		CuSO <sub>4</sub> (s)	159.6	184.0	2.5	
Ca(s)	40.1	0			Fe	55.8	0		
CaF <sub>2</sub> (s)	78.1	292.0	3.5		FeCl <sub>2</sub> (s)	126.8	81.8	0.2	
CaCl <sub>2</sub> (s)	111.0	191.4	1.0		FeCl <sub>3</sub> (s)	162.2	81.8	0.2	
CaO(s)	56.1	151.6	0.4		FeO(s)	71.9	63.2§	0.3	§Fe <sub>0.95</sub> O
CaS(s)	72.1	110.0	2.5		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	231.6	266.9	1.0	
CaSO <sub>4</sub> (s)	136.1	342.4	3.5						

\*Reproduced from Principles of Extractive Metallurgy by T. Rosenqvist.

Substance	Mole weight	$-\Delta H_{298}^{\circ}$ kcal/ mole	Accuracy $\pm$ kcal	Substance	Mole weight	$-\Delta H_{298}^{\circ}$ kcal/ mole	Accuracy $\pm$ kcal
S(s, rh.)	32.1	0		SnO <sub>2</sub> (s)	150.7	138.7	0.2
S(s, monocl.)	32.1	-0.07	0.01	SnS(s)	150.8	25.1	1.2
S(g)	32.1	-56.8	1.5	SnS <sub>2</sub> (s)	182.8	40.0	4.0
S <sub>2</sub> (g)	64.1	-31.0	1.0	Ti(s)	47.9	0	
SCl <sub>4</sub> (l)	173.9	13.6	3.0	TiCl <sub>3</sub> (s)	118.8	122.8	3.0
SO <sub>2</sub> (g)	64.1	70.95	0.1	TiCl <sub>4</sub> (g)	189.7	181.7	0.8
SO <sub>3</sub> (g)	80.1	94.4	0.3	TiCl <sub>4</sub> (l)	189.7	191.6	0.6
Sb(s)	121.8	0		TiO(s)	63.9	123.9	0.8
SbCl <sub>3</sub> (s)	228.1	91.4	0.5	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	143.8	362.9	0.8
SbCl <sub>3</sub> (l)	299.0	104.8	3.0	Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (s)	223.7	586.9	1.5
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	291.5	169.4	1.0	TiO <sub>2</sub> (s)	79.9	225.5	1.0
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (s, black)	339.7	40.5	5.0	TiC(s)	59.9	43.9	1.5
Sb <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (s)	531.7	575.3	8.0	V(s)	50.9	0	
Si(s)	28.1	0		V <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	149.9	293.0	7.0
SiF <sub>4</sub> (g)	104.1	385.0	3.0	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	181.9	372.3	4.5
SiCl <sub>4</sub> (l)	169.9	164.0	1.5	Zn(s)	65.4	0	
SiO(g)	44.1	23.2	2.5	ZnCl <sub>2</sub> (s)	136.3	99.5	0.3
SiO <sub>2</sub> (s)**	60.1	217.0	1.0	ZnO(s)	81.4	83.2	0.3
SiO <sub>2</sub> (s)††	60.1	216.1	1.0	ZnS(s)	97.4	48.2	2.0
SiS <sub>2</sub> (s)	92.2	49.0	6.0	ZnSO <sub>4</sub> (s)	161.4	233.9	2.0
SiS(g)	60.2	-28.0	10.0	ZnCO <sub>3</sub> (s)	125.4	194.2	0.3
SiC(s)	40.1	15.0	1.0	Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	222.8	7.0*	1.5
Sn(s, white)	118.7	0		Zr(s)	91.2	0	
Sn(s, gray)	118.7	0.50	0.05	ZrO <sub>2</sub> (s)	123.2	259.5	1.5
SnCl <sub>2</sub> (s)	189.6	83.6	1.5	ZrN(s)	105.2	87.3	0.5
SnCl <sub>4</sub> (l)	260.5	130.3	1.5	ZrC(s)	103.2	44.1	1.6

\*\* $\alpha$ -quartz.

†† $\beta$ -cristobalite.

\*From oxides.

MATERIAL AND ENERGY BALANCE CALCULATIONS IN METALLURGICAL PROCESSES

Table 2.1-1

Table of Atomic Weights of the More Common Elements

Element	Symbol	Atomic Weight
Aluminum	Al	26.9815
Antimony	Sb	121.75
Argon	Ar	39.948
Arsenic	As	74.9216
Barium	Ba	173.34
Beryllium	Be	9.0122
Bismuth	Bi	208.980
Boron	B	10.811
Bromine	Br	79.909
Cadmium	Cd	112.40
Calcium	Ca	40.08
Carbon	C	12.01115
Chlorine	Cl	35.453
Chromium	Cr	51.996
Cobalt	Co	58.9332
Copper	Cu	63.54
Fluorine	F	18.9984
Gold	Au	196.967
Helium	He	4.0026
Hydrogen	H	1.00797
Iodine	I	126.9044
Iron	Fe	55.847
Krypton	Kr	83.80
Lead	Pb	207.19
Lithium	Li	6.939
Magnesium	Mg	24.312
Manganese	Mn	54.9380
Mercury	Hg	200.59
Molybdenum	Mo	95.94
Neon	Ne	20.183
Nickel	Ni	58.71
Nitrogen	N	14.0067
Oxygen	O	15.9994
Palladium	Pd	106.4
Phosphorus	P	30.9738
Platinum	Pt	195.09
Potassium	K	39.102
Rhodium	Rh	102.905
Selenium	Se	78.96
Silicon	Si	28.086
Silver	Ag	107.870
Sodium	Na	22.9898
Strontium	Sr	87.62
Sulfur	S	32.064
Tantalum	Ta	180.948
Tin	Sn	118.69

(continued)

222 APPENDIX 3

<> Solid, ( ) Liquid, [ ] Gas.

Element or compound	Heat of formation $-\Delta H_{298}$ kcal mole <sup>-1</sup>	Entropy of formation $S_{298}$ cal deg <sup>-1</sup> mole <sup>-1</sup>	Transformation or fusion		$L_1$ or $L_2$ kcal mole <sup>-1</sup>
			Reaction	°C	
<H <sub>2</sub> O>			S→L	0	1.436
(H <sub>2</sub> O)	68.32	16.75			
[H <sub>2</sub> O]	57.80	45.1			
<Mn>	0	7.6	S <sub>α</sub> →S <sub>β</sub>	720	0.48
			S <sub>β</sub> →S <sub>γ</sub>	1,100	0.55
			S <sub>γ</sub> →S <sub>δ</sub>	1,136	0.43
			S→L	97.8	0.63
<Na>	0	12.3			
<NaCl>	98.6	17.4			
<Na <sub>2</sub> O>	100.7	17.0			
<Ni>	0	7.12	S→L	1,455	4.22
[O <sub>2</sub> ]	0	49.02			
<Pb>	0	15.5	S→L	327	1.15
<PbO>	52.4	16.2			
<Si>	0	4.5	S→L	1,420	12.1
<Ti>	0	7.3	S <sub>α</sub> →S <sub>β</sub>	882	0.83
			S <sub>β</sub> →L	1,660	4.5
			S <sub>α</sub> →S <sub>α</sub>	234	0.09
			S <sub>β</sub> →L	304	1.03
<V>	0	7.0	S→L	1,860	4.5
<Zn>	0	9.95	S→L	419.5	1.74
<ZnCl <sub>2</sub> >	99.5	25.9			

Heat capacities

$C_p = a + bT + cT^{-2}$ , cal deg<sup>-1</sup> mole<sup>-1</sup>

Element or compound	$C \times 10^{-5}$			Temperature range, °K
	a	$b \times 10^3$ b × 10 <sup>3</sup>	c × 10 <sup>-5</sup>	
<Al>	4.44	2.96	-	298-932
(Al)	7.00	-	-	932-1,273
<Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >	27.38	3.03	-8.20	298-1,800
<Au>	5.66	1.24	-	298-1,336
(Au)	7.00	-	-	1,336-1,600
<C>	4.10	1.02	-2.10	298-2,300
[CO]	6.79	0.98	-0.11	298-2,500
[CO <sub>2</sub> ]	10.55	2.16	-2.04	298-2,500
<Ca>	5.31	3.33	-	273-713

THERMOCHEMICAL DATA

Element or compound	a	b × 10 <sup>3</sup>	c × 10 <sup>-5</sup>	Temperature range, °K
<Ca> <sub>β</sub>	1.50	7.74	2.5	713-1,123
(Ca)	7.4	-	-	1,123-1,720
<CaO>	11.86	1.08	-1.66	298-1,177
<Cr>	5.84	2.36	-0.88	298-2,123
(Cr)	9.40	-	-	2,123-
<Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >	28.53	2.20	-3.74	350-1,800
<Cu>	5.41	1.50	-	298-1,356
(Cu)	7.50	-	-	1,356-1,600
<Cu <sub>2</sub> O>	14.90	5.70	-	298-1,200
<Fe> <sub>α, mag.</sub>	4.18	5.92	-	273-1,033
<Fe> <sub>α, non-mag.</sub>	9.0	-	-	1,033-1,183
<Fe> <sub>γ</sub>	1.84	4.66	-	1,183-1,674
<Fe> <sub>δ</sub>	10.5	-	-	1,674-1,812
(Fe)	10.0	-	-	1,812-1,873
<FeO>	11.66	2.00	-0.67	298-1,651
(FeO)	16.30	-	-	1,651-1,800
<Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> > <sub>α</sub>	21.88	48.2	-	298-900
<Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> > <sub>β</sub>	48.0	-	-	900-1,800
[H <sub>2</sub> ]	6.52	0.78	0.12	298-3,000
[H <sub>2</sub> O]	7.17	2.56	0.08	298-2,500
<Mn> <sub>α</sub>	5.16	3.81	-	298-993
<Mn> <sub>β</sub>	8.33	0.66	-	993-1,373
<Mn> <sub>γ</sub>	10.70	-	-	1,373-1,410
<Mn> <sub>δ</sub>	11.30	-	-	1,410-1,517
[N <sub>2</sub> ]	6.66	1.02	-	298-2,500
[NH <sub>3</sub> ]	7.11	6.00	-0.37	298-1,800
[O <sub>2</sub> ]	7.16	1.00	-0.40	298-3,000
<Pb>	5.63	2.33	-	298-600
<Ti> <sub>α</sub>	5.28	2.4	-	298-1,155
<Ti> <sub>β</sub>	6.91	-	-	1,155-1,933
(Ti)	8.00	-	-	1,933-
<Ti> <sub>α</sub>	5.26	3.40	-	298-505
<Ti> <sub>β</sub>	7.30	-	-	505-577
(Ti)	7.50	-	-	577-800
<Zn>	5.35	2.40	-	298-693
(Zn)	7.50	-	-	693-1,200
[Zn]	4.97	-	-	298-1,200