

.....  
 論 文  
 .....

## 熔融金属および鉄合金の有効放射率\*

盛 利貞\*\*・藤村 侯夫\*\*\*・東 敏宏\*\*\*\*・吉本 宏\*\*\*\*

### On the Emissivities of Molten Metals and Iron Alloys

*Tsohisada MORI, Kimio FUJIMURA, Toshihiro HIGASHI,  
 and Hiroshi YOSHIMOTO*

#### Synopsis:

When we measure temperatures of molten metals and alloys by using a disappearing filament type optical pyrometer through the optical system, we have to make calibrations because the observed temperatures are always lower than the true temperatures.

These calibrations consist of the emissivity and transmissivity corrections, since the emissivity depends on temperature, melt composition and measuring conditions, and the transmissivity changes according to the optical system used.

The apparent optical temperatures of four kinds of pure metals, eight kinds of Fe-X molten alloys and seven kinds of Fe-C-X molten alloys were measured in the atmosphere of argon in the present investigation, and the emissivities were calculated by using the WIEN's equation:

$$\ln(\varepsilon \cdot \tau) = \frac{C_2}{\lambda} \cdot \left( \frac{1}{t+273} - \frac{1}{s'+273} \right)$$

where  $\varepsilon$  is the emissivity,  $\tau$  is the transmissivity,  $C_2$  is the PLANCK's second constant for the black body radiation formula, ( $14\,380\mu \cdot \text{deg}$ )  $\lambda$  is the effective wave length ( $0.65\mu$ ),  $t$  is the true temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and  $s'$  is the apparent optical temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ).

The true temperatures of the melts were obtained by measuring the apparent optical temperatures of a cylindrical cavity in the magnesia crucible.

The transmissivities of the optical systems (i. e. prism or sight glass+prism) were determined by the aid of the apparatus "Prismeter".

(Received May 20, 1970)

#### 1. 緒 言

実験室において比較的少量の熔融金属の温度を測定する際には、熱電対を用いた場合のような接触方式の測温法では保護管と被測温体（以下試料と呼ぶ）との接触による試料の汚染や保護管を通しての熱移動などの温度場への化学的物物理的影響に留意しなければならないが、非接触方式の光高温計を使用する場合には上記の影響などを考慮しなくてもよいという利点がある反面、試料が完全放射体でない場合には、その有効放射率また試料と光高温計の間の光路において吸収および反射による放射損失があれば光路の透過率をあらかじめ決定しておかねばならない。

従来熔融金属の有効放射率あるいは光路の透過率に関する実験室的な研究はあまり多くない上に、有効放射率はそれが測定される際の試料の形状や周囲の条件などに

影響されるため同一金属の有効放射率の値に差が生じる場合もあり、厳密に測定値を比較することはできないため、本研究ではできるだけ測定条件をそろえて各種の熔融金属および熔融鉄合金の有効放射率あるいは熔融鉄の有効放射率の温度による変化を測定し、さらには測定条件の光高温計読み温度（見かけの輝度温度）への影響について調査し従来の測定結果と比較検討を行なった。

なお透過率に関しては特に測温時に使用する光学系（プリズム、視野ガラスなど）の透過率を独立に直接測定した例はなく、標準電球を用いた間接的な測定の例と

\* 昭和44年10月本会講演大会

昭和44年7月溶鋼溶滓部会第6回シンポジウムにて発表

昭和45年5月20日受付

\*\* 京都大学工学部 工博

\*\*\* 京都大学工学部

\*\*\*\* (株)小松製作所

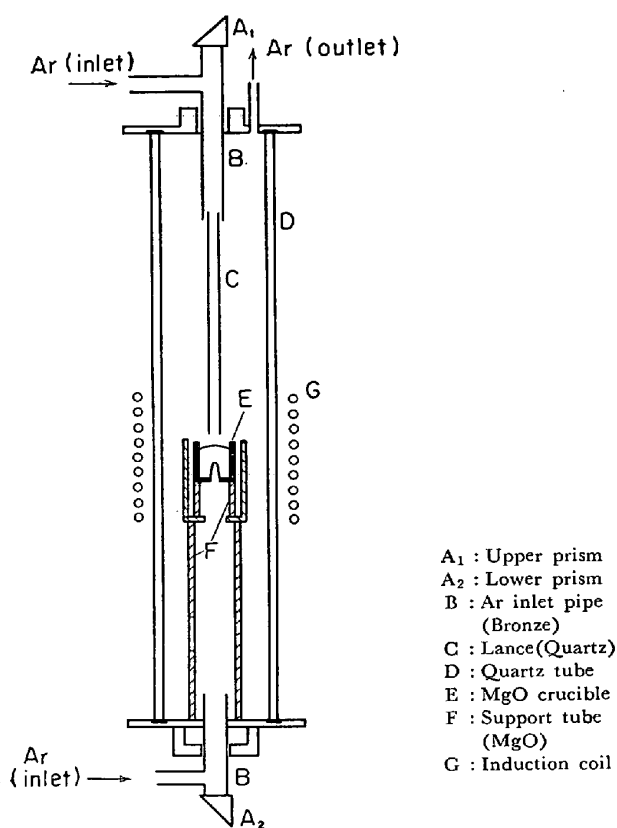
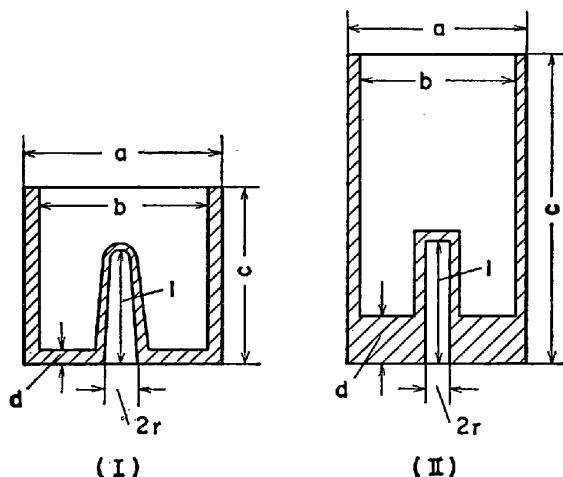


Fig. 1. Ensemble of experimental apparatus.

- A<sub>1</sub> : Upper prism
- A<sub>2</sub> : Lower prism
- B : Ar inlet pipe (Bronze)
- C : Lance(Quartz)
- D : Quartz tube
- E : MgO crucible
- F : Support tube (MgO)
- G : Induction coil



a. 25 $\phi$  b. 20 $\phi$  c. 28.5, 25(I), 50(II) d. 2.5(I), 10(II) 1.15(I), 18(II) 2r. 3.5 $\phi$  (I,II)

Fig. 3. Dimensions of MgO crucible.

(I) sintered (II) porous

しては *K. W. LANGE*<sup>1)</sup> の場合のみであり、そのほかの研究においては間接的な推定によつてゐるが本研究ではプリズムあるいはプリズム+視野ガラスの透過率を *prismeter*<sup>2)</sup> によつて直接測定した。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

有効放射率は試料の放射率および幾何学的形状ならびに試料の周囲の幾何学的および熱的状态によつて異なり、しかも放射率は試料の組成、温度および表面状態ならびに観測する方向および波長によつても異なるので実測された有効放射率の値についてはその測定条件を明確にしておかなければならない。

本研究では大別して3つの測定条件に分けられるので以下条件別にその内容の詳細を説明する。

まず実験装置の概略をFig. 1に、るつぼ付近の詳細をFig. 2に、またるつぼの寸法をFig. 3に示した。なお、Ar ガス導入管(黄銅)の寸法をFig. 4に示した。

#### (1) 共通条件

光高温計：一体型(北辰電機製作所, 201型) 2台, 灰色フィルター併用

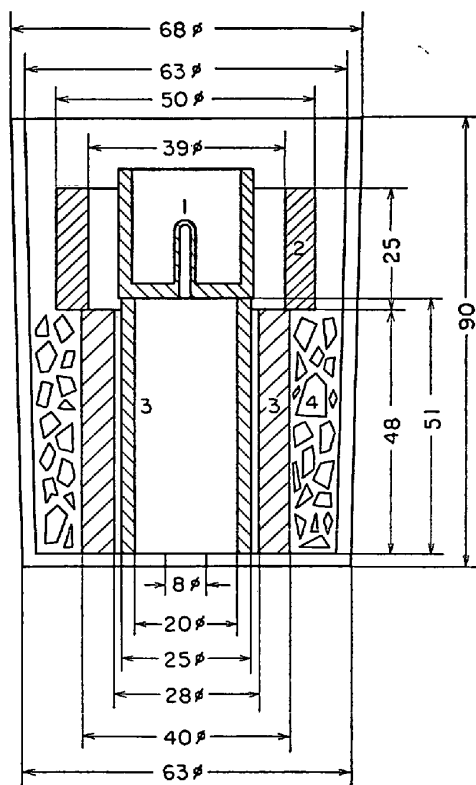
加熱装置：高周波誘導加熱装置(10 kW, 260 kHz, 高周波熱錬機)

試料雰囲気：Ar ガス気流中, 150~200cc/min 光高温計からプリズムまでの距離：約 50 cm

#### (a) 条件A

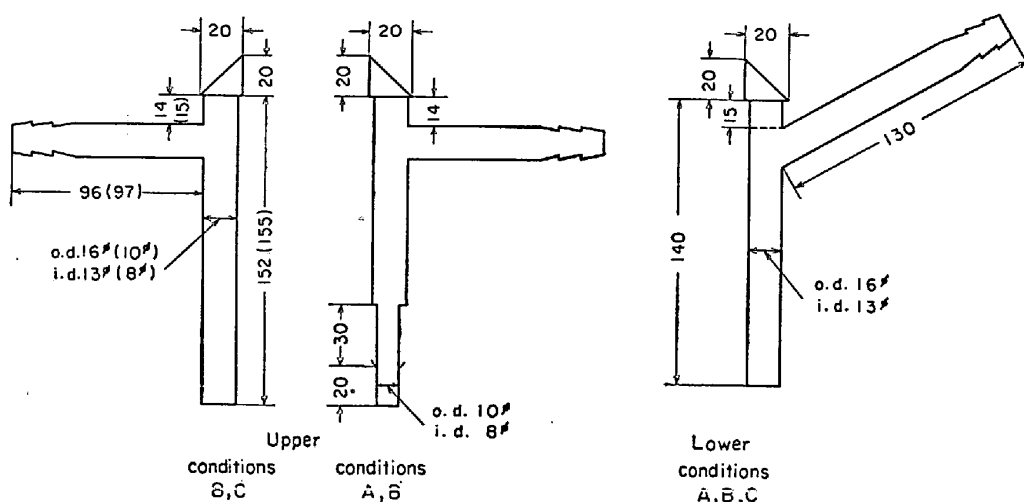
るつぼ：多孔質 MgO るつぼ, 寸法はFig. 3 (II) に示した。

外殻石英管：75 mm (内径) × 90 mm (外径) × 500 mm



- 1. MgO crucible
- 2. Radiation shield (MgO)
- 3. Support tube (MgO)
- 4. MgO blocks

Fig. 2. Details of surroundings of crucible.



Dimensions in parentheses are those for condition C which are different from that for conditions A and B

Fig. 4. Dimensions of Ar inlet pipe.

(長さ)

Ar ガス導入管 (黄銅)

Ar ガス導入用ランス (不透明石英): 使用していない。

光学系: プリズム+視野ガラス (写真乾板)

プリズムと視野ガラスの接着剤にはカナダバルサムを使用

光学系から金属面までの距離: 約 35 cm

Ar ガス導入管 (黄銅) の先端から金属面までの距離: 約 20 cm

(b) 条件 B

るつぼ: 焼結 MgO るつぼ, 寸法は Fig. 3 (I) に示した。

外殻石英管: 75φ×90φ×500

Ar ガス導入管 (黄銅): Fig. 4

Ar ガス導入用ランス (不透明石英): 5.7φ (内径), 7.4φ (外径) あるいは 10.0φ (内径), 11.9φ (外径)

光学系: プリズム

光学系から金属面までの距離: 約 35 cm

Ar ガス導入用ランス (不透明石英) の先端から金属面までの距離: Table 5

(c) 条件 C

るつぼ: 焼結 MgO るつぼ, 寸法は Fig. 3 (I) に示した。

外殻石英管: 55φ×65φ×500

Ar ガス導入管 (黄銅): Fig. 4

Ar ガス導入用ランス (不透明石英): 5.7~6.3φ (内径), 7.5φ (外径)

光学系: プリズム

光学系から金属面までの距離: 約 35 cm

Ar ガス導入用ランス (不透明石英) の先端から金属面までの距離: Table 5

(2) 光学系の透過率

使用した光学系はプリズム+視野ガラスあるいはプリズムのみであるが, それらの透過率は Prismeter<sup>2)</sup> を用いて測定した。

プリズム+視野ガラスの透過率としては盛ら<sup>3)</sup> は 0.85 またプリズムでは 0.90~0.91 を与えているが本研究で使用したものの例でも前者は平均的には 0.85, 後者の場合はほぼ 0.91 であつた。なお光学系は使用の前後でその透過率の変化は認められなかつた。

炉内雰囲気については K. W. LANGE<sup>1)</sup> は空気, 水素および窒素では透過率に差が生じないことを報告しており, 盛ら<sup>3)</sup> も空気に対する種々の気体の相互屈折率の値から炉内雰囲気 (真空も含む) としての気体の種類は特別の場合を除いて考慮しなくてもよいことを指摘しており, 本研究の Ar 気流も透過率には影響を与えないものとした。

## 2.2 実験原理

### 2.2.1 試料の真温度および有効放射率の決定法

試料の有効放射率を決定する方法として (1) 式で示される WIEN の放射式を用いた。

$$\frac{1}{(t+273)} - \frac{1}{(s'+273)} = (\lambda/C_2) \cdot \ln(\epsilon \cdot \tau) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$t$ : 試料の真温度 (°C)

$s'$ : 光高温計で読み取った見かけの輝度温度 (°C)

$\lambda$ : 光高温計の実効波長 0.65  $\mu$

$C_2$ : PLANCK の黒体放射公式の第 2 定数 14 380  $\mu \cdot \text{deg}$

Table 1. Emissivities of cylindrical cavity.

$l/r$	$\epsilon$	0.04	0.16	0.36	0.64	0.81
0		0.040	0.160	0.360	0.640	0.810
2		0.202	0.544	0.787	0.925	0.968
4		0.400	0.786	0.935	0.985	0.9948
6		0.575	0.903	0.980	0.9969	0.99914
8		0.707	0.956	0.9941	0.99938	0.99986
10		0.801	0.980	0.9982	0.99988	0.99998

$\epsilon$  : Emissivity of the material of cylindrical cavity  
 $l/r$  : Length of cylindrical cavity/its radius

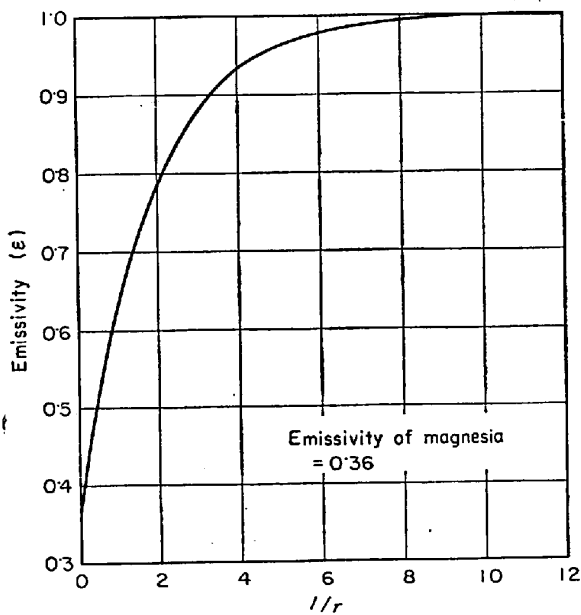


Fig. 5. Relation between the emissivity and the ratio  $l/r$  of cylindrical cavity.

$\epsilon$  : 有効放射率

$\tau$  : 透過率 (試料と光高温計間の光路における放射損失がある場合)

(1)式において真温度および透過率が既知であれば見かけの輝度温度を測定することによってその状態の有効放射率を求めることができる。

真温度の決定には光高温計を用いて次のような方法を採用した。すなわちFig. 3に示したような黒体に近い状態の測温用空洞を持つ MgO りつぽを用い、その内底の有効放射率 (既知) および見かけの輝度温度から (1) 式によって真温度を算出した。測温用空洞の内底の有効放射率については空洞が試料中に挿入されその内壁が試料と同一温度で一樣な温度に保たれ、内壁における放射の反射が完全拡散性である場合の空洞の内底の有効放射率は Table 1<sup>4)</sup> によって与えられる。

使用した MgO りつぽは 2 種類であるが酸化マグネシウムの放射率は 0.10~0.43<sup>5)</sup> であるから本研究においてはいずれの場合も 0.36 とみなして Table 1 の第 4 欄

の値を用いた。なお実際のりつぽの  $l/r$  の値に対する空洞の内底の有効放射率は Table 1 に基づく Fig. 5 によった。

したがって真温度決定のための測温と同時に試料表面の見かけの輝度温度を測定すれば (1) 式を用いて有効放射率を算出することができる。

### 2.2.2 真温度決定法の検討

前項で述べた真温度決定法の確かさを調べるため Fe の凝固点の測定を行なった。すなわち Fig. 1 の上側光学系を通して溶融 Fe の凝固状態を観察しながら下側からりつぽの測温用空洞の内底の見かけの輝度温度を測定した。下側光学系 (プリズム) の透過率 0.911, りつぽの空洞の有効放射率 0.999 の場合凝固点の見かけの輝度温度として 1521°C, またそれぞれ 0.910, 0.994 の場合に 1520°C が得られ、これらを真温度に換算すればいずれも 1535°C となり、ほぼ Fe の凝固点と一致した。以上の結果から Fe の凝固点以上の温度についても前述の真温度決定法には大きな誤まりはないものとみなした。

### 2.3 測定方法

試料を Fig. 3 に示す MgO りつぽに入れ Fig. 1 のように炉を組んだ後ロータリーポンプで排気し清浄化した Ar ガスを炉内に導入して昇温を始めた。なお測定中の Ar ガスの流速は 150~200cc/min で上下両側の Ar ガス導入管を通して炉内に導き光学系の測定中のくもりを防ぐようにした。試料の温度が目標温度に達したところ

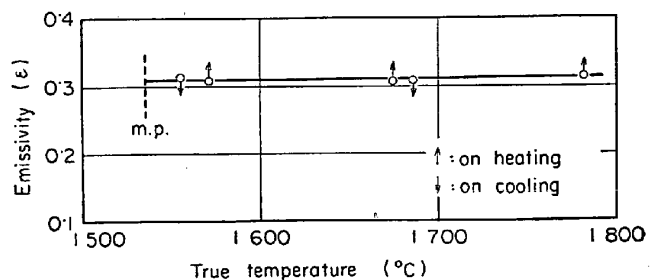


Fig. 6. Temperature dependence of emissivity of pure iron (condition B, series 3).

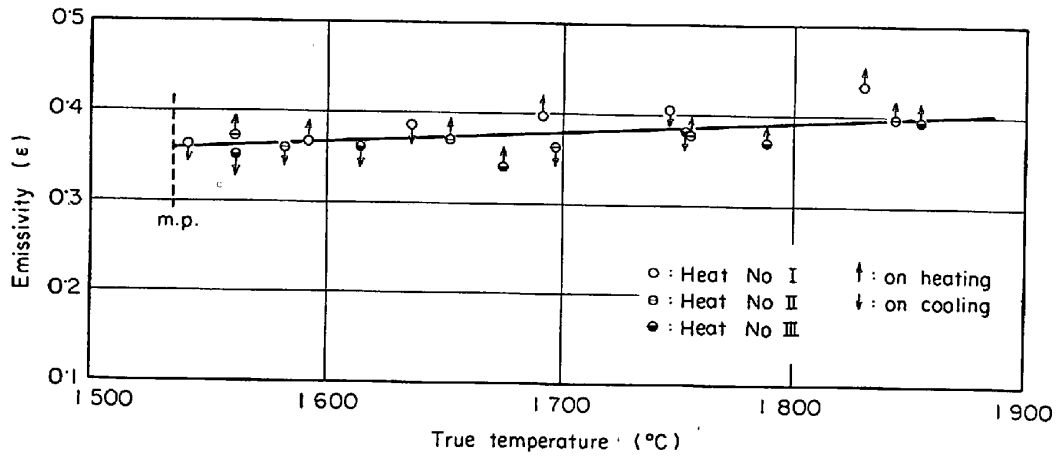


Fig. 7. Temperature dependence of emissivity of pure iron (condition C, series 4).

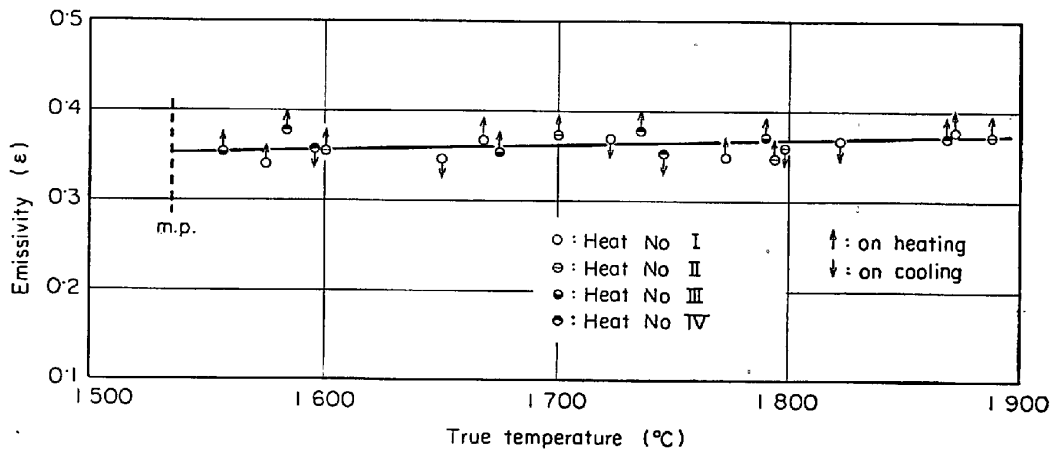
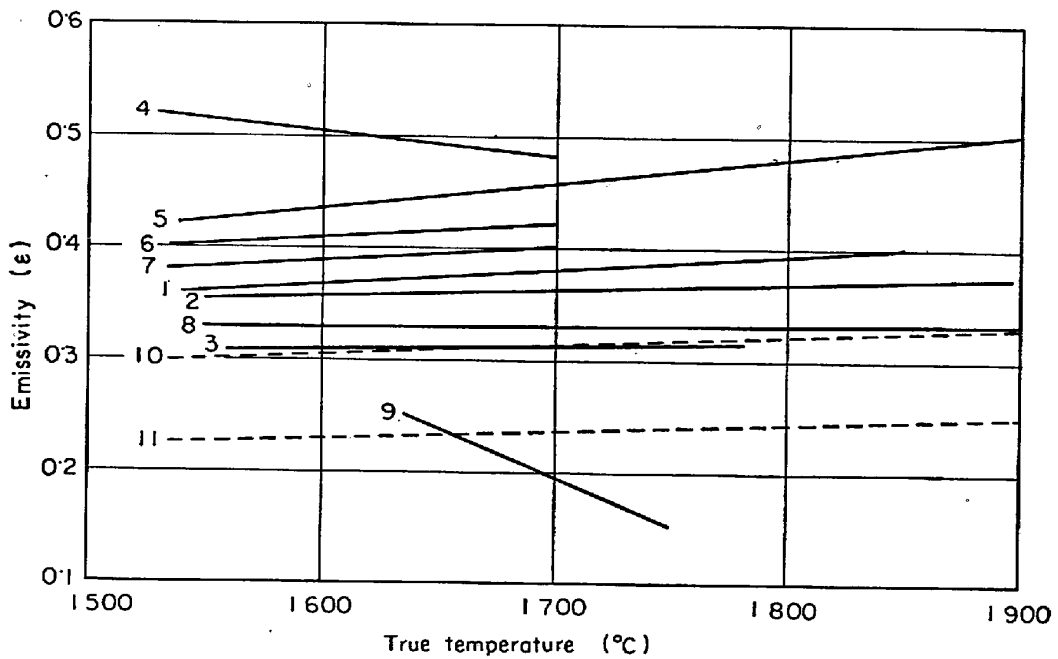


Fig. 8. Temperature dependence of emissivity of pure iron (condition C, series 5).



1, 2, 3: This study 4: J. C. d'ENTREMONT<sup>7)</sup> 5: DASTUR, GOKCEN<sup>8)</sup> 6: KNOWLES, SARJANT<sup>9)</sup> 7: SANO, SAKAO<sup>10)</sup> 8: LANGE<sup>11)</sup> 9: GUTHMANN<sup>11)</sup> 10, 11: Estimated value ( $n_{eff}=1.0, 0.4$ )

Fig. 9. Temperature dependence of emissivity of pure iron.

Table 2. Emissivities of pure iron.

Authors	Year of publication	$\tau$	$\epsilon$	Temp. range (°C)	Measuring method of true temp.	Atmosphere of sample	Weight of sample
K. GUTHMANN <sup>11)</sup>	1937		0.25 ~ 0.15	1 635~1 750		Open hearth fur. (Armco iron)	
S. UMINO <sup>12)</sup>	1938		0.40	1 500~1 620	Thermocouple	air	
D. KNOWLES, R. J. SARJANT <sup>9)</sup>	1947		0.40 ~ 0.42	1 535~1 700	Thermocouple		9 kg
M. N. DASTUR, N. A. GOKCEN <sup>8)</sup>	1949	0.65	0.42 ~ 0.50	1 540~1 900	Thermocouple or optical pyrometer	Ar + H <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	90 g
K. SANO, H. SAKAO <sup>10)</sup>	1960	0.80	0.38 ~ 0.40	1 535~1 700	Optical pyrometer (cylindrical cavity of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Ar + H <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	70~90 g
T. MORI, K. FUJITA, S. IWASAKI <sup>13)</sup>	1961	0.90	0.35 ~ 0.36	1 535~1 630	Thermocouple or optical pyrometer	Ar + H <sub>2</sub> (15%)	100~300 g
J. C. d'ENTREMONT <sup>7)</sup>	1963	0.67	0.52 ~ 0.48	1 530~1 700	Thermocouple	Ar or H <sub>2</sub>	150 g
K. W. LANGE <sup>1)</sup>	1965	0.89	0.326~0.329	1 550~1 900	Thermocouple	H <sub>2</sub>	ca.120 g
This study	1967*	0.91	0.30 ~ 0.32	1 550~1 780	Optical pyrometer (cylindrical cavity of MgO)	Ar	30~35 g
This study	1968*	0.91	0.36 ~ 0.41	1 540~1 850	"	Ar	30~35 g
This study	1969*	0.91	0.35 ~ 0.37	1 550~1 900	"	Ar	30~35 g

\* Year of investigation

で一定に保持して上側光学系を通して試料表面の、下側光学系を通して空洞内底の見かけの輝度温度を同時に測定した。試料の重量はほぼ 30~50 g とした。

ランスの先端と試料表面との距離は測定終了後試料の冷却を待つて外殻石英管をとりはずして測定したが距離の影響を調べる場合にはランスの先端が試料面に接触する位置を基点として Ar ガス導入管を所定の距離だけ上方へ移動させて測定した。

使用した 2 台の光高温計についてタングステンリボン繊維条の光高温計用標準電球を用いて示度検査を行ないその補正表に基づいて読み温度を補正した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 溶融 Fe の有効放射率とその温度依存性

測定結果を Fig. 6 ~ Fig. 8 に示した。図中の点は測定点の平均値を示す (以下同様)。条件は前述の条件を示し、系列は実験順序による分類を示す。なお測定条件の詳細は一括して本論文最後の Table 5 に示した。Fig. 7 では融点から 1 800°C の範囲でほとんど温度の影響は認められないが Fig. 8 および Fig. 9 では 1 900°C までの範囲で温度の上昇とともに有効放射率はやや増加する傾向にあることがわかる。この両図についてすべての

測定点<sup>9)</sup>を用い最小 2 乗法によつて有効放射率と温度との関係を求めると、

$$\epsilon = 0.11 + 1.6 \cdot 10^{-4} \cdot t (\text{°C}) \dots\dots\dots (2)$$

$$t : \text{m. p.} \sim 1 860 \text{°C}$$

および

$$\epsilon = 2.27 + 5.0 \cdot 10^{-5} \cdot t (\text{°C}) \dots\dots\dots (3)$$

$$t : \text{m. p.} \sim 1 900 \text{°C}$$

が得られた。

溶融 Fe の有効放射率の温度依存性に関する、これまでの測定のいくつかのものとの比較を Fig. 9 に示し、これらの測定条件を Table 2 にまとめた。

Fig. 9 の鎖線で示した推定値は金属の抵抗率を用いて放射率を推定する菅野の式<sup>14)</sup>によつて近似的に計算したものである。

$$\epsilon = \frac{2Y}{\{[(X^2 + Y^2)^{1/2} - X]/2\}^{1/2} \cdot \{1 + (X^2 + Y^2)^{1/2}\} + Y} \dots\dots\dots (4)$$

$$X = 1 - (4\pi m / N_{\text{eff}} \cdot e^2) / \{(\omega \cdot m / N_{\text{eff}} \cdot e^2)^2 + \rho^2_M + 2a\rho\rho_M\} \dots\dots\dots (5)$$

$$Y = 4\pi (\rho_M + a\rho) / [\omega \{(\omega \cdot m / N_{\text{eff}} \cdot e^2)^2 + \rho^2_M + 2a\rho\rho_M\}] \dots\dots\dots (6)$$

m : 電子の質量

Table 3. Estimated values of emissivity of pure iron and Fe-C alloys at various temperatures.

°C	%C		0	0.22	1.19	3.8
	$n_{eff}$					
1500	0.4		(0.22)	0.22	0.25	0.25
	1.0		(0.30)	0.30	0.32	0.33
1600	0.4		0.23	0.23	0.25	0.25
	1.0		0.30	0.31	0.33	0.33
1700	0.4		0.23	0.24	0.25	0.25
	1.0		0.31	0.31	0.33	0.34
1800	0.4		0.24	0.24	0.26	0.26
	1.0		0.32	0.32	0.34	0.34
1900	0.4		0.25	0.25	0.26	0.26
	1.0		0.33	0.33	0.34	0.34

- 1) ( ) : estimated like others although they are in solid
- 2) Values at 0%C are extrapolated from those at 0.22 and 1.19%C
- 3) Fe-C (0.22%C) alloy is in solid at 1500°C

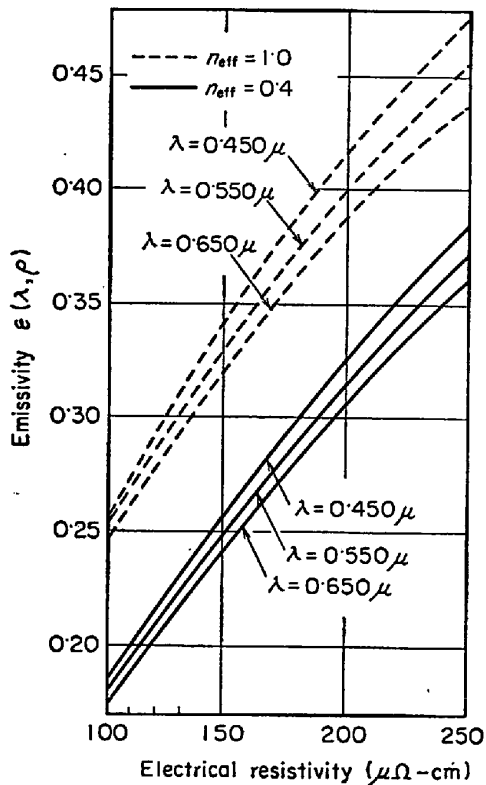


Fig. 10. Relation between emissivity and electrical resistivity.

- $e$  : 電子の電荷
- $\omega$  : 光の角振動数  $2\pi(c/\lambda)$
- $c$  : 光速
- $\lambda$  : 波長
- $\pi$  : 円周率
- $N_{eff}$  :  $1 \text{ cm}^3$  中の有効電子数  $= N_a \cdot n_{eff}$
- $N_a$  :  $1 \text{ cm}^3$  中の原子数
- $n_{eff}$  : 原子 1 個当たりの有効電子数

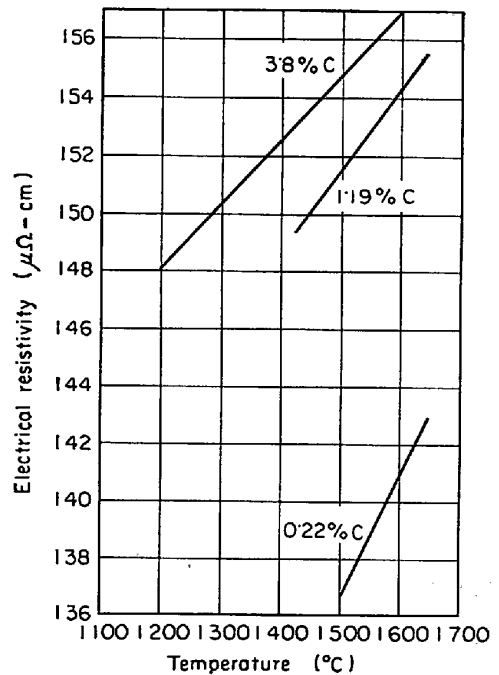


Fig. 11. Electrical resistivities of Fe-C alloys.

$\rho_M$  : 母金属のある温度における抵抗率

$$\rho = \rho_M + ap + bp^2 + \dots$$

$\rho$  : 希薄溶体の抵抗率,  $b$  : 定数で (5),

(6) 式では  $bp^2$  の項以下は省略

$a$  : 定数 (温度に無関係)

$p$  : 溶質金属の原子パーセント

(5), (6) 式および (4) 式を用いて藤田ら<sup>15)</sup>は Fig. 10 に示したような抵抗率  $\rho$  と放射率  $e$  との関係を  $n_{eff} = 1.0$  および  $0.4$  の場合について与えている. この場合 (5), (6) 式の  $p$  は  $p = 0$  とおき  $\rho_M = \rho$  の形で計算しており, これは後述するように溶融 Fe および溶融

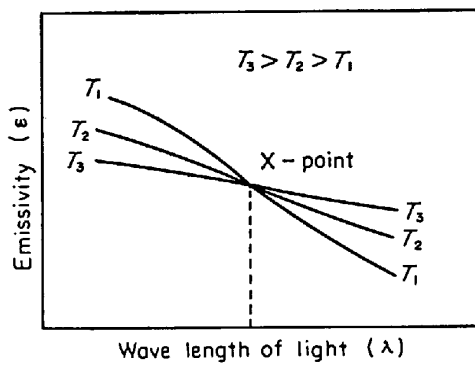


Fig. 12. X-point

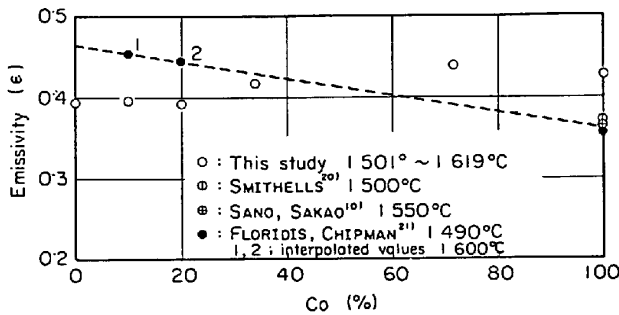


Fig. 13. Emissivities of Fe, Co and Fe-Co alloys (condition A, series 1).

Fe合金の信頼すべき  $\rho_M$  および  $a$  などの値が見当たらないため合金の  $\rho$  を  $\rho_M$  として計算することを意味する。

次に具体的に Fe の融点以上での放射率を (4) 式によって求めてみるが溶融 Fe の  $\rho$  と温度との関係が明確でないので Fig. 11 に示した Fe-C 合金の抵抗率<sup>10)</sup>を用いて Fe の放射率と温度との関係を推定した。その方法は Fig. 11 において各 %C に対応する直線から 1500°~1900°C の範囲で  $\rho$  の値を読み取り (高温の値は外挿によつた) Fig. 10 から各 %C での  $\epsilon_{0.65\mu}$  の値を  $n_{eff} = 1.0$  および  $0.4$  の場合について読み取つた。さらにこれらの値を用いて %C と  $\epsilon_{0.65\mu}$  との関係を図示し外挿によつて Fe の各温度での  $\epsilon$  を求め Table 3 に一括して示した。

以上の推定によれば Fig. 9 でも明らかなように Fe の有効放射率の温度係数は正であり、その勾配は多くの実測値とほぼ一致している。値としては  $n_{eff} = 1.0$  の場合が実測値に近く、 $n_{eff} = 0.4$  での値は低い。 $n_{eff}$  の値については Fe のような遷移金属では一般に固体の場合には 1 より小さい値をとる<sup>14)</sup>が Fe については固体とあまり差がないとして菅野<sup>14)</sup>は 0.4 を使つており、この種の推定値は実測値と比較する場合には理論的最低値を示すとしている。

Fig. 9 において多くの実測値が推定線 10 より高い値を示しているのは測定条件による影響として見かけ上放

射率を増加せしめた結果であると考えられ実測値はいわゆる有効放射率を示していることが理解できる。

本研究による線 1 と線 2 は類似の条件で測定したもので Fig. 7 および Fig. 8 の点のばらつきを考慮し、これらの条件下の有効放射率の温度との関係として一つにまとめれば、

$$\epsilon = 0.35 + 1.07 \cdot 10^{-4} \cdot (t - 1535) \dots\dots\dots (7)$$

$$t : 1535^\circ \sim 1900^\circ \text{C}$$

を得る。

放射率の温度による変化については D. J. PRICE<sup>17)18)</sup> は高温金属 (固体) の放射率が赤外線範囲内にある特定の波長 (X-point と名づけており金属によつて異なる) では温度による影響を受けないことを指摘しており、また長波長 (10  $\mu$  以上) で成立する HAGEN-RUBENS の関係<sup>19)</sup>

$$\epsilon = 2\sqrt{\nu/\sigma} \dots\dots\dots (8)$$

$\nu$  : 放射の周波数,  $\sigma$  : 電気伝導度

によれば放射率は温度の上昇とともに増加する。したがつて X-point より低波長の範囲では逆に温度の上昇により減少することになる。なお Fig. 12 に X-point を定性的に示した。

PRICE<sup>17)18)</sup> はほかの研究者の測定に基づき固体 Fe の X-point として 1.0  $\mu$  を与えているが、これによれば 0.65  $\mu$  では放射率は温度の上昇により減少する。これは Fig. 9 に示した本研究の結果およびほかの研究者の結果とは相反するものであり以上のような関係が溶融純金属においても成立するか否かは明確でない。

### 3.2 溶融純金属および Fe 合金の有効放射率

測定結果を系列順に Fig. 13~Fig. 28 に示した。Fig. 13~Fig. 17 の Fe の有効放射率が Fig. 6~Fig. 8 の同温度付近の値に比べて高い値を示しているが、その一因として使用したるつぼ [Fig. 3 (II)] の深さが条件 B, C で使用したるつぼ [Fig. 3 (I)] のそれより大であるため、るつぼの内壁での反射の影響をより大きく受けるものと考えられる。またこの影響はランス (内径約 6 mm) を試料表面上 5 mm 程度まで下げて測定した場合のランスの内壁などによる反射の影響に比べて大きい、すなわち試料表面の見かけの輝度温度を高める。

溶融 Fe 合金の有効放射率の実験室的な測定はあまり多くないが以下において合金別に本研究の結果と比較して示す。

#### (1) Fe-Co 系

測定結果およびほかの研究者の値を Fig. 13 に示した。本研究の結果では 20%Co 程度まではほとんど変化はな



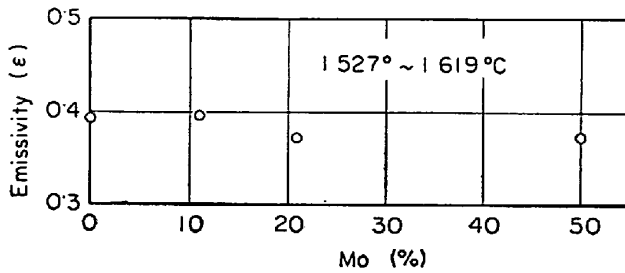


Fig. 14. Emissivities of Fe and Fe-Mo alloys (condition A, series 1).

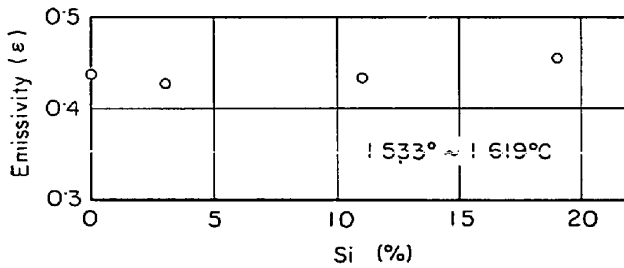


Fig. 15. Emissivities of Fe and Fe-Si alloys (condition A, series 2).

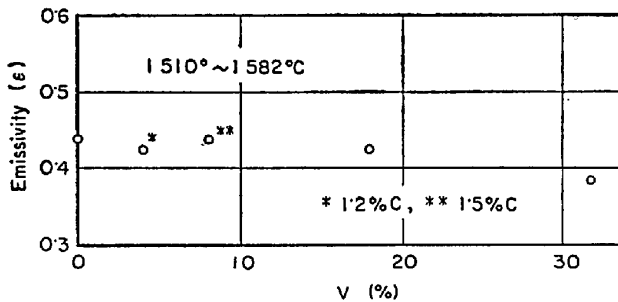


Fig. 16. Emissivities of Fe and Fe-V alloys (condition A, series 2).

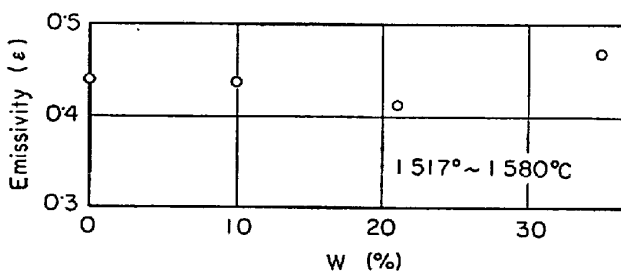


Fig. 17. Emissivities of Fe and Fe-W alloys (condition A, series 2).

いが、それ以上ではやや増加の傾向がある。黒丸の点 1, 2 は FLORIDIS and CHIPMAN<sup>21)</sup> の Co の融点 1490°C における  $\epsilon = 0.36$  と Fe の  $\epsilon$  値とを直線で結んで得たものである。Co の値は本研究の値がほかに比べてやや高い。

## (2) Fe-Mo 系

測定結果を Fig. 14 に示した。10%Mo 程度までは変化がなく、それ以上でやや低くなった。

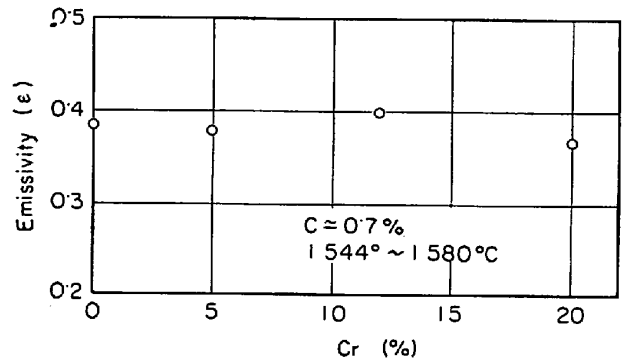


Fig. 18. Emissivities of Fe-C and Fe-C-Cr alloys (condition B, series 3).

## (3) Fe-Si 系

測定結果を Fig. 15 に示した。Si 添加による変化のようすは Fe-C-Si 系の Fig. 25 と類似しており 5%Si 程度までは減少し、それ以上でやや増加している。

## (4) Fe-V 系

測定結果を Fig. 16 に示した。20%V 近くまでは大きな変化はなく 20%V 以上でやや減少した。

## (5) Fe-W 系

測定結果を Fig. 17 に示した。10%W 程度まではほとんど変化はない。

## (6) Fe-C-Cr 系

測定結果を Fig. 18 に示した。15%Cr 程度まではほとんど変化はなく、20%Cr ではやや低い値となったが全体的には大きい変化はない。

本研究における 3 元系の測定では C 濃度は 0.7% 付近として第 3 元素の影響を調べたが Fe-C 系については後で述べる。

## (7) Fe-C-Cu 系

測定結果を Fig. 19 に示した。Fig. 27 の Fe-Cu 系全域にわたる測定では 20%Cu まではやや増加しているが C を含む 3 元系では 5%Cu でほとんど変化はない。

## (8) Fe-C-S 系

測定結果を Fig. 20 に示した。2%S まではほとんど変化はない。

## (9) Fe-C-Sn 系

測定結果を Fig. 21 に示した。10%Sn でやや低い値を示した。

## (10) Fe-C 系

測定結果を Fig. 22 および Fig. 26 (Fig. 22 の場合と条件は異なる) に示した。両図より C は 4% 程度までは  $\epsilon$  値を高める傾向がある。ほかの研究者の結果および推定値との比較を Fig. 29 に示した。菅野<sup>14)</sup> は高周波炉を用い試料としては 15 kg の Fe を 20 kg 用のライニングし

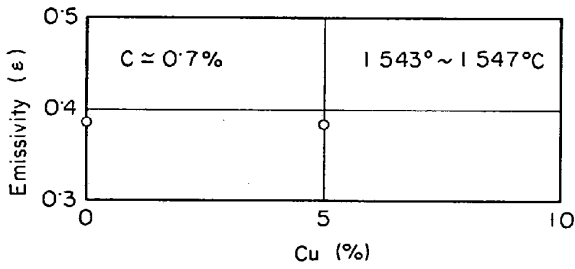


Fig. 19. Emissivities of Fe-C and Fe-C-Cu alloys (condition B, series 3).

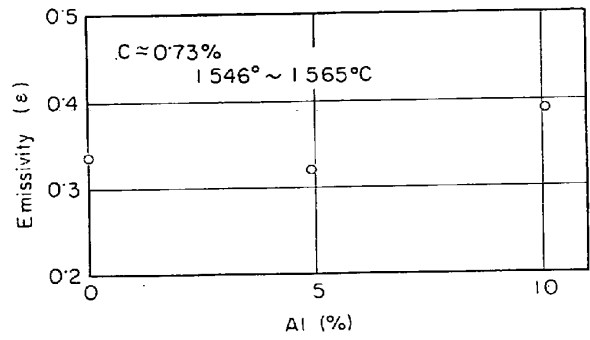


Fig. 23. Emissivities of Fe-C and Fe-C-Al alloys (condition B, series 4).

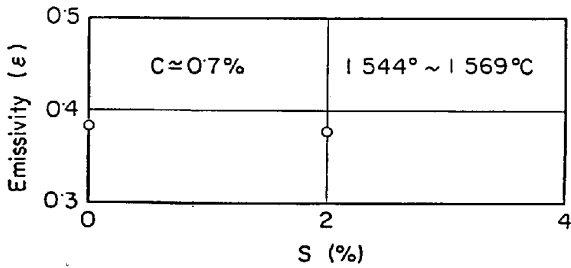


Fig. 20. Emissivities of Fe-C and Fe-C-S alloys (condition B, series 3).

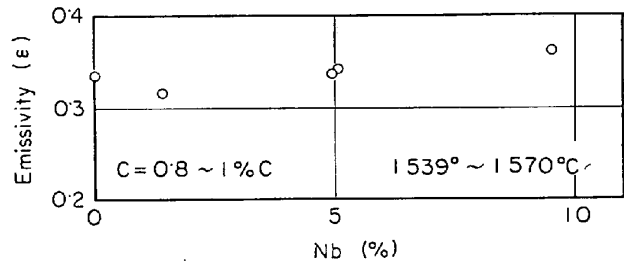


Fig. 24. Emissivities of Fe-C and Fe-C-Nb alloys (condition B, series 4).

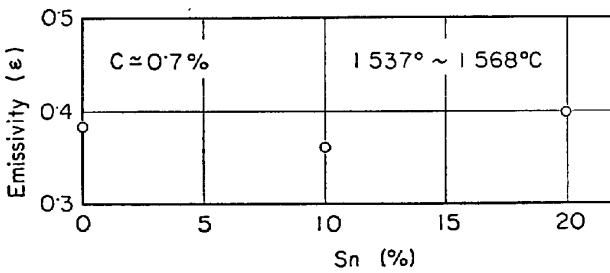


Fig. 21. Emissivities of Fe-C and Fe-C-Sn alloys (condition B, series 3).

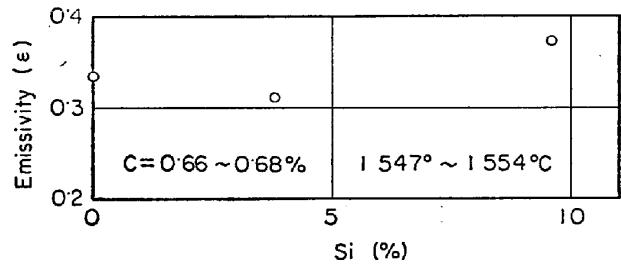


Fig. 25. Emissivities of Fe-C and Fe-C-Si alloys (condition B, series 4).

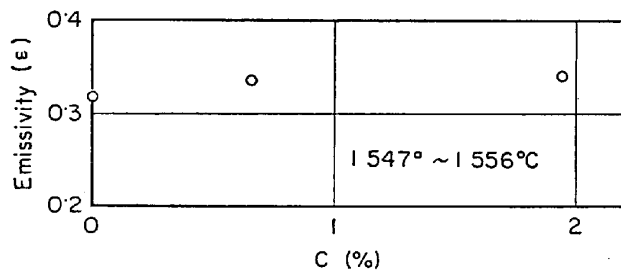


Fig. 22. Emissivities of Fe and Fe-C alloys (condition B, series 4).

た黒鉛をつぼに入れて溶解し酸化していない表面の有効放射率を測定した結果 Fe として  $\epsilon = 0.45$  を得ている。次に銦鉄あるいは黒鉛を添加して C の影響を調べた。なお試料の温度は Fe-W 熱電対で測定している。G. NÄSER<sup>22)</sup> は真温度を Pt/Pt-Rh 熱電対で決めており使用した炭素鋼は Mn 0.19~1.29%, Si 0.19~1.30% を含有し、一部はさらに Cr および Ni を含有している。なお溶解は高周波炉により表面は酸化されていない。破線

で示した推定線は Table 3 の 1600°C の値である。

(11) Fe-C-Al 系

測定結果を Fig. 23 に示した。5%Al まではほとんど変化はなく 10%Al で増加が認められた。

(12) Fe-C-Nb 系

測定結果を Fig. 24 に示した。5%Nb までは大きな変化はなく 10%Nb でやや高くなった。

(13) Fe-C-Si 系

測定結果を Fig. 25 に示した。4%Si 付近まで減少しそれ以上で増加している。この傾向は Fe-Si 系と似ている。

(14) Fe-Cu 系

測定結果を Fig. 27 に示し、ほかの測定値との比較を Fig. 30 に示した。Cu の  $\epsilon$  値は Fe に比べてかなり低く固体では 1000°C で 0.105<sup>20)</sup>、1080°C で 0.12<sup>20)</sup> 程

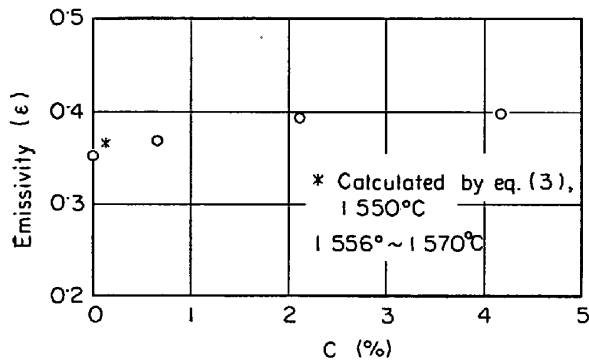


Fig. 26. Emissivities of Fe and Fe-C alloys (condition C, series 5).

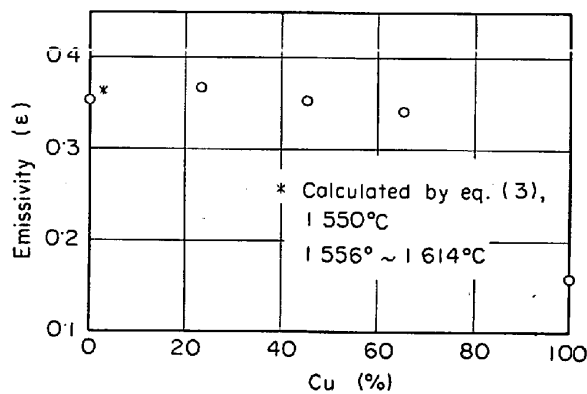


Fig. 27. Emissivities of Fe, Cu and Fe-Cu alloys (condition C, series 5).

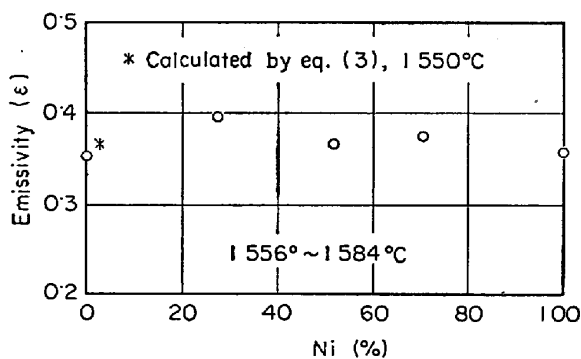


Fig. 28. Emissivities of Fe, Ni and Fe-Ni alloys (condition C, series 5).

度であり、液体では SMITH and CHIPMAN<sup>23)</sup>が 0.19, JIS<sup>24)</sup>では 0.16 を参考値としてあげている。

#### (15) Fe-Ni 系

測定結果を Fig. 28 に示し、ほかの測定値および推定値との比較を Fig. 31 に示した。本研究では Fe および Ni の値はほぼ等しく 40~50%Ni 付近で最大値を持つような曲線が得られた。この変化のようすは LUND and WARD<sup>25)</sup>が 1000°C で得た結果 (波長は異なる) とよく似ている。

また SMITH and CHIPMAN<sup>23)</sup>の結果は本研究に比べて

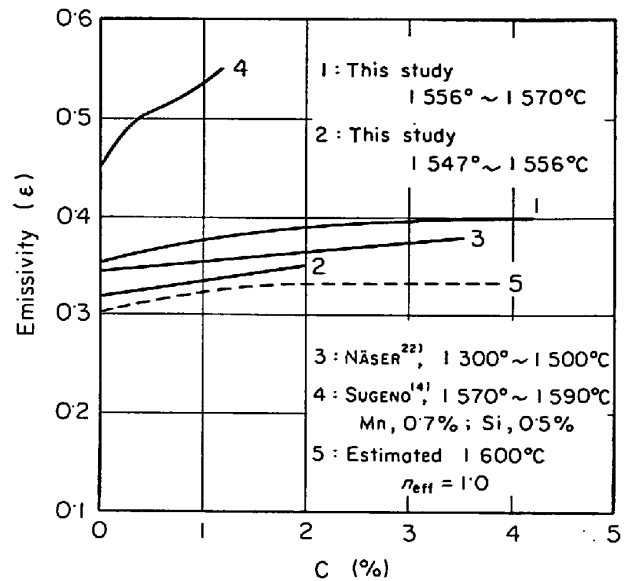


Fig. 29. Emissivities of Fe and Fe-C alloys.

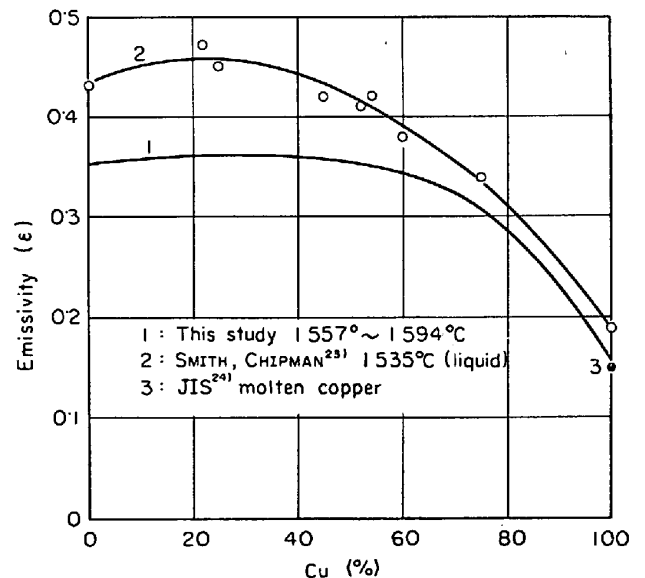


Fig. 30. Emissivities of Fe, Cu and Fe-Cu alloys.

高い値を示しているが使用した装置の光学系 (プリズム + 視野ガラス) の透過率として 0.62 (1535°C の Fe の有効放射率を 0.43 として、その温度での輝度温度を 1358°C と測定して決定) を用いているのが一因と思われる。Prismeter による同様の光学系の透過率から類推してたとえば 0.80 とすれば直線 2 は破線 2' のようになり Fe および Ni の値は本研究あるいは JIS<sup>24)</sup>の値に近くなる。

推定線 6 および 6' は (5), (6) 式において  $\rho_M = 1.36 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $a = 2 \times 10^{-6} \text{m}^2$  としてそれぞれ  $n_{\text{eff}} = 1.0, 0.4$  について 10 原子% (10.46 重量%) まで  $\rho = \rho_M + a\rho$  が成立するものとして (4) 式によつて計算したものである。なお Ni の有効放射率は  $\rho_M = 1.25 \times 10^{-4}$

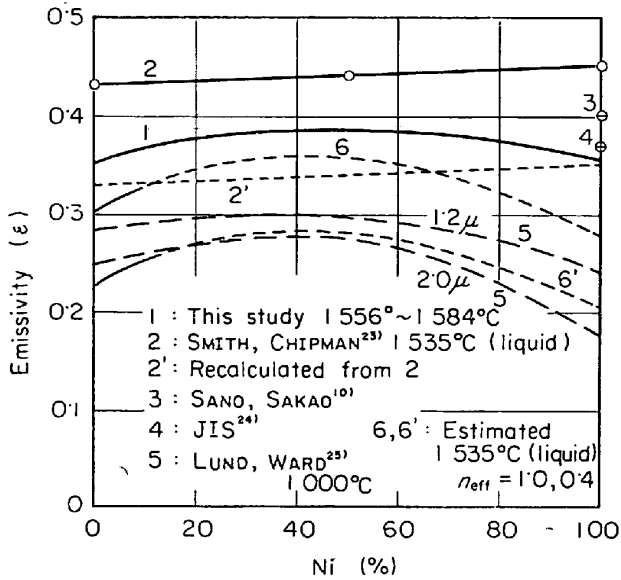


Fig. 31. Emissivities of Fe, Ni and Fe-Ni alloys.

$\Omega \cdot \text{cm}^{2\theta}$  (融点  $1455^\circ\text{C}$ , 液体) として計算した値で  $\epsilon = 0.284 (n_{\text{eff}}=1.0)$ ,  $\epsilon = 0.208 (n_{\text{eff}}=0.4)$  である。

### 3.3 試料表面の見かけの輝度温度におよぼす諸条件の影響

#### 3.3.1 ランスの影響

ランス (不透明石英) を通して試料表面の見かけの輝度温度を測定する際ランスの内径が異なる場合 (試料表面とランスの先端との距離は 4 mm) またランスを使用していない場合の見かけの輝度温度の変化について検討した。その結果より有効放射率とランスの内径との関係

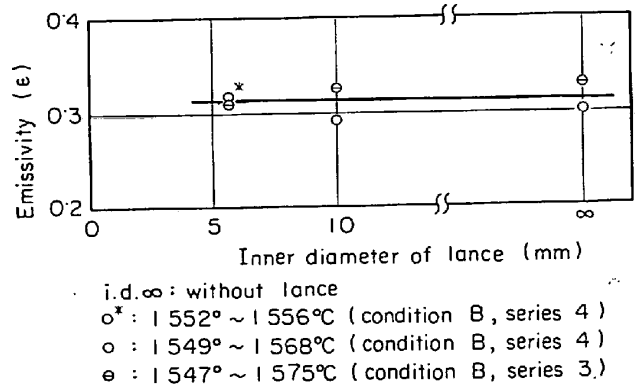


Fig. 32. Influence of inner diameter of lance upon emissivity (apparent optical temp.).

は Fig. 32 のようになった。\*印の点はほかの白丸の点と対応する内径 5.7 mm の値 (Fig. 22 の Fe の値) を用いた。Fig. 32 を全体的に見ればランスの内径の影響は認めがたい。ランスの内径の小さいものほど反射による放射密度の増加すなわち見かけの輝度温度の増加が考えられるが本研究ではその差を確認できなかった。

#### 3.3.2 ランスの先端と試料表面との距離の影響

測定結果を Fig. 33 に示した。破線は佐野, 坂尾<sup>10)</sup>が予熱管 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) と試料表面との距離を変えて試料表面の見かけの輝度温度を真温度  $1600^\circ\text{C}$  において  $\text{Ar} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$  ガス雰囲気中で測定した結果から光学系の透過率を 0.80 として計算した有効放射率の変化を示す。佐野, 坂尾<sup>10)</sup>は距離の接近 (10 mm 以下) によつて見かけの輝度温度が 1 deg/mm の割合で増加すると報告してい

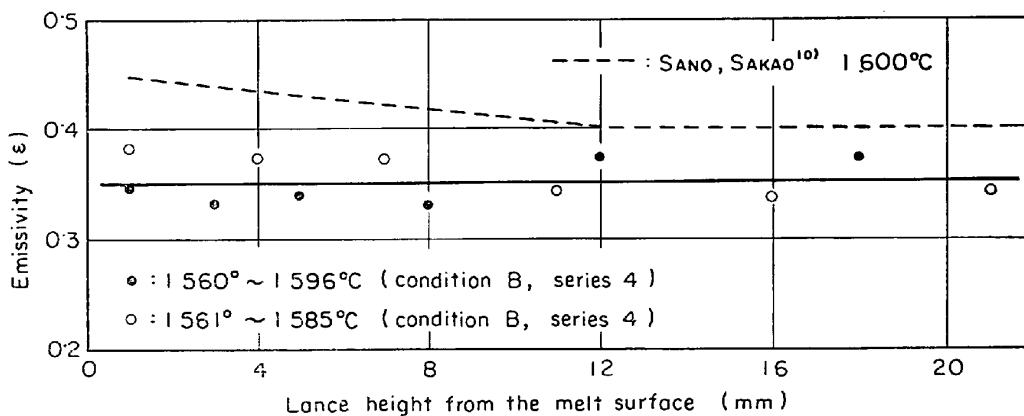


Fig. 33. Influence of lance height from the melt surface on emissivity (apparent optical temp.).

Table 4. Variation of the true temperature for  $\epsilon = 0.35 \pm 0.01$ .

$\epsilon$	$\tau$	$\epsilon \cdot \tau$	Apparent optical temp. ( $^\circ\text{C}$ )		
			1400	1600	1800
0.36	0.910	0.3276	1554	1796	2042
0.35	0.910	0.3185	1559	1801	2049
0.34	0.910	0.3094	1563	1806	2056

Table 5. Experimental conditions.

1) Emissivity of the cavity    2) Transmissivity of the optical system    3) Inner diameter of the lance  
4) Lance height from the melt surface    5) Sample weight

Fig.	Experimental conditions				
Fig. 6	1) 0.993	2) 0.910 (Prism)	3) 6 mm	4) 4 mm	5) 30~35 g
Fig. 7	Heat No I	1) 0.997	2) 0.910 (Prism)	3) 5.7 mm	4) 5 mm 5) 30~35 g
	Heat No II	1) 0.996	2) 0.910 (Prism)	3) 5.7 mm	4) 4 mm 5) 30~35 g
	Heat No III	1) 0.996	2) 0.910 (Prism)	3) 5.7 mm	4) 2 mm 5) 30~35 g
Fig. 8	Heat No I	1) 0.994	2) 0.910 (Prism)	3) 6.0~6.5 mm	4) 4~5 mm 5) 30~35 g
	Heat No II	1) 0.994	2) 0.910 (Prism)	3) 6.0~6.5 mm	4) 4~5 mm 5) 30~35 g
	Heat No III	1) 0.990	2) 0.910 (Prism)	3) 6.0~6.5 mm	4) 4~5 mm 5) 30~35 g
	Heat No IV	1) 0.995	2) 0.910 (Prism)	3) 6.0~6.5 mm	4) 4~5 mm 5) 30~35 g
Fig. 13	(Fe)	1) 0.995	2)* 0.861 (upper), 0.837 (lower)	3) —	4) — 5) 34 g
	(10%Co)	1) 0.999	2)* 0.896 (upper), 0.901 (lower)	3) —	4) — 5) 37 g
	(20%Co)	1) 0.999	2)* 0.896 (upper), 0.901 (lower)	3) —	4) — 5) 35 g
	(34%Co)	1) 0.999	2)* 0.896 (upper), 0.901 (lower)	3) —	4) — 5) 48 g
	(71%Co)	1) 0.999	2)* 0.896 (upper), 0.901 (lower)	3) —	4) — 5) 33 g
	(Co)	1) 1.000	2)* 0.896 (upper), 0.901 (lower)	3) —	4) — 5) 33 g
Fig. 14	(Fe)	See the conditions of Fig. 13			
	(11%Mo)	1) 0.992	2)* 0.861 (upper), 0.837 (lower)	3) —	4) — 5) 26 g
	(21%Mo)	1) 0.996	2)* 0.861 (upper), 0.837 (lower)	3) —	4) — 5) 38 g
Fig. 15	(Fe)	1) 0.995	2)* 0.806 (upper), 0.826 (lower)	3) —	4) — 5) 40 g
	(3%Si)	1) 0.997	2)* 0.806 (upper), 0.826 (lower)	3) —	4) — 5) 22 g
	(11%Si)	1) 0.994	2)* 0.901 (upper), 0.856 (lower)	3) —	4) — 5) 24 g
	(19%Si)	1) 0.997	2)* 0.901 (upper), 0.856 (lower)	3) —	4) — 5) 26 g
Fig. 16	(Fe)	See the conditions of Fig. 15			
	(4%V)	1) 0.996	2)* 0.806 (upper), 0.826 (lower)	3) —	4) — 5) 29 g
	(8%V)	1) 0.997	2)* 0.806 (upper), 0.826 (lower)	3) —	4) — 5) 40 g
	(18%V)	1) 0.994	2)* 0.806 (upper), 0.826 (lower)	3) —	4) — 5) 25 g
Fig. 17	(Fe)	See the conditions of Fig. 15			
	(10%W)	1) 0.999	2)* 0.896 (upper), 0.901 (lower)	3) —	4) — 5) 41 g
	(21%W)	1) 0.999	2)* 0.896 (upper), 0.901 (lower)	3) —	4) — 5) 39 g
Fig. 18	(Fe-C)	1) 0.997	2) 0.910 (Prism)	3) 5.8 mm	4) 7 mm 5) 30~35 g
	(5%Cr)	1) 0.996	2) 0.910 (Prism)	3) 5.8 mm	4) 3 mm 5) 30~35 g
	(12%Cr)	1) 0.996	2) 0.910 (Prism)	3) 5.8 mm	4) 4 mm 5) 30~35 g
	(20%Cr)	1) 0.995	2) 0.910 (Prism)	3) 5.8 mm	4) 4 mm 5) 30~35 g
Fig. 19	(Fe-C) (5%Cu)	See the conditions of Fig. 18			
Fig. 20	(Fe-C) (2%S)	See the conditions of Fig. 18			
Fig. 21	(Fe-C)	See the conditions of Fig. 18			
	(10%Sn) (20%Sn)	1) 0.994 1) 0.997	2) 0.910 (Prism)	3) 5.8 mm	4) 10.5 mm 6 mm 5) 30~35 g
Fig. 22	(Fe)	1) 0.996	2) 0.910 (Prism)	3) 5.7 mm	4) 4 mm 5) 30~35 g
	(0.66%C)	1) 0.996	2) 0.910 (Prism)	3) 5.7 mm	4) 3.5 mm 5) 30~35 g
	(1.94%C)	1) 0.996	2) 0.910 (Prism)	3) 5.7 mm	4) 7.8 mm 5) 30~35 g
Fig. 23	(Fe-C)	See the conditions of Fig. 22, 0.66%C			
	(4.9%Al) (10.1%Al)	1) 0.996 1) 0.997	2) 0.910 (Prism)	3) 5.7 mm	4) 7 mm 8 mm 5) 30~35 g



0.063 (約6%)となる。したがって本研究における相対誤差は10%以下と考えられる。LANGE and SCHENCK<sup>27)</sup>は光学系の透過率の測定法、試料の真温度の決定法は本研究の場合と異なるが有効放射率の測定誤差として $\pm 10 \sim 15\%$ を与えている。先に示した相対誤差9%を真温度 $1540^\circ\text{C}$ 近傍での $\epsilon=0.35$ に対して適用すれば $0.3185 \sim 0.3815$  ( $0.32 \sim 0.38$ )の幅が得られる。これを真温度の幅に換算すれば $1559^\circ\text{C}$  ( $\tau=0.910$ ,  $\epsilon=0.35$ ,  $s'=1400^\circ\text{C}$ )に対して $1572^\circ\text{C} \sim 1546^\circ\text{C}$  ( $\epsilon=0.32 \sim 0.38$ )すなわち $1559^\circ\text{C}$  ( $\epsilon=0.35$ ) $\pm 13$  degとなる。 $\epsilon=0.35 \pm 0.01$ に対する真温度の変動をTable 4に示した。

#### 4. 結 言

(1) 溶融 Fe の有効放射率を測定し、その温度依存性を検討した結果、融点 ( $1535^\circ\text{C}$ ) では $\epsilon=0.35$ となり温度の影響については温度の上昇によつて増加する傾向が認められた。

(2) 溶融 Fe 基 2 元合金 Fe-C, Fe-Co, Fe-Mo, Fe-Si, Fe-V, Fe-W ならびに全域にわたる 2 元合金 Fe-Cu, Fe-Ni あるいは Fe 基 3 元合金 Fe-C-Al, Fe-C-Cr, Fe-C-Cu, Fe-C-Nb, Fe-C-S, Fe-C-Si, Fe-C-Sn の有効放射率を真温度  $1550^\circ\text{C} \sim 1600^\circ\text{C}$  の範囲で測定し、Fe の有効放射率に及ぼす各種元素の影響を調べた。さらに放射率の理論計算の試算を行ない実測値と比較した。

(3) 光高温計による見かけの輝度温度に及ぼす試料周辺の幾何学的構成のうちランスの内径およびランスの先端と試料表面との距離について検討した結果いずれも測定範囲内では大きな影響は認められなかった。

(4) 本研究の方法で有効放射率を測定する際の誤差について検討し相対誤差  $|d\epsilon/\epsilon|$  として最大約 10% を得た。

終わりに当たつて本研究の遂行に協力された新日本製鉄(株)野田郁郎工学修士、住友金属工業(株)岡島弘明工学修士、新日本パイプ(株)桜井市蔵工学士、新日本製鉄(株)山内昭男工学士ならび東邦金属(株)広谷倫成工学士、さらには有効放射率の推定値の計算にご協力下さつた中部工大助手山口隆生氏、また終始有意義な助言を下さつた中部工大教授藤田清比古氏に心から感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) K. W. LANGE: アーヘン工科大学 学位論文 (1965)
- 2) 盛 利貞, 藤田清比古, 岩崎 滋, 下荒地勝治, 近藤 寛: 水曜会誌, 16 (昭和43年) 7号,

- p. 494~498
- 3) 盛 利貞, 藤田清比古, 岩崎 滋: 鉄鋼基礎共同研究会, 溶鋼溶滓部会, 第6回シンポジウム資料「溶鋼の輻射率(珪酸塩の赤外線吸収)について」昭和44年10月, p.29~52
- 4) 宮内鉄也, 林 俊孝, 渡辺 勝, 杉山鍾司: 温度測定並自動制御 (昭和38年), p. 143, コロナ社
- 5) 宮内鉄也ら: ibid, p. 160
- 6) 盛 利貞, 藤村侯夫, 東 敏宏, 吉本 宏: 学振19委 8979, 第3-186 (昭和44年7月)
- 7) J. C. d' ENTREMONT: Trans. Met. Soc. AIME, 227 (1963), p. 482~485
- 8) M. N. DASTUR and N. A. GOKCEN: Trans. Met. Soc. AIME, 185 (1949), p. 665~667
- 9) D. KNOWLES and R. J. SARJANT: JISI, 155 (1947), p. 557~592
- 10) 佐野幸吉, 坂尾 弘: 学振19委5834 (昭和35年4月)
- 11) K. GUTHMANN: Stahl u. Eisen, 57 (1937), S 1269~1279
- 12) 海野三郎: 鉄と鋼, 23 (1937), p. 644~655
- 13) 盛 利貞, 藤田清比古, 岩崎 滋: 水曜会誌, 14 (昭和36年) 6号, p. 305~311
- 14) 菅野 猛: 鉄と鋼, 27 (1941) 2号, p. 1~19 参考-高温測定と溶鋼温度. 学振19委編 (1960), p. 104~113, 日刊工業新聞社
- 15) 藤田清比古, 諸岡 明, 山口隆生: 学振19委 8944, 第2-188 (昭和44年6月)
- 16) J. F. ELLIOTT, M. GLEISER and V. RAMAKRISHNA: Thermochemistry for Steelmaking, Vol. 2 (1963), p. 627 Addison-Wesley Pub. Co.
- 17) D. J. PRICE: Proc. Phys. Soc., 59 (1947). p. 118~131
- 18) D. J. PRICE: ibid, p. 131~138
- 19) E. HAGEN and H. RUBENS: Ann. Physik, Lpz., (1900) 1, p. 352; 文献17より引用
- 20) C. J. SMITHELLS: Metals Reference Book, Vol. II, [Interscience Publishers], New York, p. 659 (1955)
- 21) T. P. FLORIDIS and J. CHIPMAN: Trans. Met. Soc. AIME, 212 (1958), p. 549~553
- 22) G. NÄSER: Mitteilungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Inst. für Eisenforschung zu Düsseldorf, Band 12 (1930), p. 365~372
- 23) D. B. SMITH and J. CHIPMAN: J. Metals, 4 (1952), p. 643~644
- 24) JIS Z 8706 (1958), 光高温計による温度測定法
- 24) H. LUND and L. WARD: Proc. Phys. Soc., B\_65 (1952), p. 535~540
- 26) 文献16) と同じ, p. 628
- 27) K. W. LANGE and H. SCHENCK: Arch. Eisenhüttenw., 39 (1968) 8, S 611~615