

金属溶解における アルゴンアークプラズマの温度分布

何 国偉*・石井 邦宜*²・佐々木 康*²・柏谷 悦章*³・高橋 平七郎*³

Temperatures of Metallic and Ar Atoms in Ar Arc Plasma on Melting of Metal
Guowei HE, Kuniyoshi ISHII, Yasushi SASAKI, Yoshiaki KASHIWAYA and Heishichiro TAKAHASHI

Synopsis : In order to examine the effect of metallic vapor on temperature of Ar plasma, graphite, pure iron and Fe-5mass%Mn alloy were melted in Ar arc plasma as an anode material. The high speed and high sensitive multi-channel monochromator was used for measurement of intensity of spectral lines. Based on these intensities, distribution of temperatures of metallic and Ar atoms were calculated. Measured temperature of metallic atom was different from that of Ar atom, and local thermal equilibrium was not established.

The temperatures of Ar atom in the center of arc column were about 9000K, 11000K and 9000K for graphite, pure iron and Fe-5mass%Mn alloy, respectively. This is due to the different plasma current density and electric conductivity of plasma. The details of configuration of plasma column and plasma current characteristic were discussed.

Key words : thermal plasma ; local thermal equilibrium ; spectroscopic measurement ; Boltzmann plot ; temperature distribution ; electron density ; metallic vapor.

1. 緒言

金属の精錬、溶解および加工などに熱プラズマを用いる場合、熔融金属が蒸発し、その金属蒸気が熱プラズマ中に混入する。一般に、金属はプラズマの作動ガスより低い電離エネルギーを有しているため(例えば、Ar, FeおよびMnの電離エネルギーはそれぞれ15.76eV, 7.87eVおよび7.43eVである)、電離しやすく、熱プラズマの電気伝導率、熱伝導率および比熱などに大きな影響を与える¹⁾。例えば、溶鋼のタンディッシュ加熱において大電流を投入する必要があるが、これは、金属蒸気の混入によりプラズマの電気抵抗が低下し、出力が上がりにくいと考えられている²⁾。熱プラズマを溶解などの実操業に広く適用するためには、プラズマ炉の効率的な設計や正確な制御が重要であり、これら金属蒸気がプラズマに及ぼす影響を把握しておく必要がある。

プラズマはそれ自体非常に複雑な現象であるため、これまで、プラズマ中の金属蒸気の影響を詳細に検討した報告はほとんどない。特に実験で金属蒸気のプラズマ中の分布を実際に測定した例はなく、わずかに、プラズマ中の局所的熱平衡が成立することおよび金属蒸気がプラズマ中に均

一分布することを仮定して、プラズマの電気伝導率、熱伝導率を計算した例があるのみである^{3,4)}。それらの計算結果によると、FeをArプラズマに混入した場合、約15000K以下の低い温度領域では、電気伝導率と熱伝導率は著しく増加し、15000K以上の高い温度領域では逆に減少することが報告されている。しかしながら、実際のプラズマでの金属溶解を考えた場合、金属蒸気は溶解金属の表面近傍に多く存在し、表面から離れるに従って減っていく、つまり、現実のプラズマ溶解においては金属蒸気は不均一に分布している可能性が高いと思われる。さらに、金属蒸気原子とプラズマ作動ガス原子間の温度平衡が成立していないことも考えられるので⁵⁾、プラズマの熱伝導率や電気伝導率は均一分布を仮定して求めた計算結果とかなり異なることも考えられる。そこで本研究では、第一段階として金属溶解時のプラズマの特性を明確にするため、熱プラズマ下で溶融せず、蒸気圧が無視できる黒鉛、溶融し、かつその蒸気圧が異なる純FeとFe-Mn合金を試料として用い、そのときのプラズマの電圧—電流特性、プラズマの様相やプラズマ中の各原子温度の空間分布を測定し、これらの測定結果に基づき、それぞれの試料におけるプラズマの電気抵抗について検討した。

平成8年6月7日受付 平成8年7月15日受理 (Received on June 7, 1996; Accepted on July 15, 1996)

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University, Kita-13 Nishi-8 Kita-ku Sapporo 060)

* 2 北海道大学工学部 (Faculty of Engineering, Hokkaido University)

* 3 北海道大学エネルギー先端工学研究センター (Center for Advanced Research of Energy Technology, Hokkaido University)

2. 実験方法

2.1 ボルツマンプロット法によるプラズマ温度の測定

プラズマの分光診断法には、多くの方法がある。その中で、ボルツマンプロット法は比較的簡単に測定できるスペクトル線の相対強度を用い、他の方法では困難な低い温度領域(例えば、Arプラズマの場合約16000K以下)の温度を測定できる利点がある。タンディッシュ加熱のようにプラズマ電極間距離が長い場合、全体的にプラズマ温度は低く、特に熔融金属近傍でのプラズマは温度が低いと考えられるので、分光測定法としてはボルツマンプロット法が適切である。スペクトル線の測定強度 I_{nm} と粒子温度 T の関係はボルツマン分布の式を用い、次式のように得られる⁶⁾。

$$\ln \frac{I_{nm} \lambda_{nm}}{A_{nm} g_n} = -\frac{E_n}{k_B T} + \ln \frac{N_0 h c}{Z(T) \beta} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A_{nm} は遷移確率、 λ_{nm} はスペクトル線の波長、 N_0 は当該粒子の全密度、 g_n は統計的重み、 E_n は n 準位のエネルギー、 $Z(T)$ は粒子の分配関数、 k_B はボルツマン定数、 β は測定系の吸収率である。

ある粒子温度を T とすると、粒子温度の関数である分配関数 $Z(T)$ および密度 N_0 は一定である。吸収率 β が波長に依存しない範囲について、 $\ln(I_{nm} \lambda_{nm} / A_{nm} g_n)$ を E_n に対してプロットすると直線関係が得られる。その傾き G から温度が求まる。

$$T = -G / k_B \dots\dots\dots (2)$$

ボルツマンプロット法では遷移確率の値が温度値の確度に大きな影響を与える⁶⁾。通常は既往の文献値^{7,8)}を用いて計算しているが、前報⁹⁾で詳しく議論したように文献値には大きな誤差が含まれるので適用できない。そこで、本研究においては、Ar原子のボルツマンプロットに、前報で求めたAr原子の遷移確率を用いた。また、金属蒸気のボルツマンプロットは、Ar遷移確率と同様にFeとMnの遷移確率を求め直した。新しい遷移確率の値を用いた。それについては後述する。

2.2 実験装置

試料の溶解には移行式直流アークプラズマ溶解炉を用いた。実験装置は前報⁹⁾で詳しく説明したものと同一である。金属試料を溶解するとき、プラズマ電源の出力、プラズマ作動ガスの流量およびチャンバー内の圧力の変動は、プラズマが不安定になる原因である。プラズマを安定させるために、Arガスの流量は $8000 \pm 10 \text{ Ncm}^3/\text{min}$ に、チャンバー内の圧力は減圧弁とバルブを用いて $0.122 \pm 0.001 \text{ MPa}$ に制御した。また、プラズマ電源は、可飽和リアクター電源であり、安定な出力が得られている。なお、プラズマの温度に及ぼす金属蒸気の影響を調べるため、本研究では、印加電流を120A、極間距離を30mmに固定して実験した。金属

試料として純FeとFe-5mass%Mn合金を用いた。それぞれ約30gの板状の高純度電解鉄および別途溶解したFe-5mass%Mn合金をアークプラズマ炉で約30秒間予備溶解し、ボタン状にしてから試料とした。また、金属試料と比較するため、金属ボタンと同じ形状に加工した高純度黒鉛板(灰分20ppm)を用いた。

プラズマは見かけ上安定でも熔融金属内の流動などにより陽極点は微妙に移動しており、本研究のように温度分布などを空間全体にわたって測定する場合、可能な限り短時間で全体のプラズマの分光測定を終える必要がある。本研究では2400本のグレーティングを有する分光器に高感度マルチチャンネル波高検出器を組み込んだ分光測光装置を採用することにより、最大走査速度が $2 \text{ ms}/\text{nm}$ (走査中の波長分解能 0.05 nm)での測定を可能にした。一カ所の分光測定に要する時間は約0.1秒間である。なお、同じ実験条件で測定を5回行い、得られた値がほぼ変わらないことを確認してから、その平均値を測定値とした。測定は比較的強い強度を示すピークが多く含まれ、また、互いに波長が接近せずの波長範囲を選んで行った。その範囲は、Ar: 415~426nm, Fe: 430~440nm, Mn: 472~484nmである。

3. 結果と考察

3.1 プラズマの電流—電圧特性

黒鉛、純FeおよびFe-5mass%Mn合金試料をプラズマで加熱した時のプラズマ電流と電圧の関係をFig. 1に示す。プラズマ電流が約50~60Aと小さい範囲では、電圧はほとんど同じであるが、それ以上電流を増やすと電圧に差が生じ、黒鉛、Fe、Fe-Mn試料の順で小さくなる。また、Fig. 1の直線の傾きはプラズマ陽光柱の電気抵抗に対応しているとみなすことができ、その値は黒鉛、純Fe、Fe-5mass%Mn合金順に小さくなる。

プラズマ電圧はプラズマの電気抵抗により決まる。Dunnら³⁾および天川ら⁴⁾の計算によるとプラズマの温度が低い領域では、プラズマの電気伝導率は金属蒸気の混入量の増加につれ大きくなる。例えば、10000Kの場合、純Arガスに10

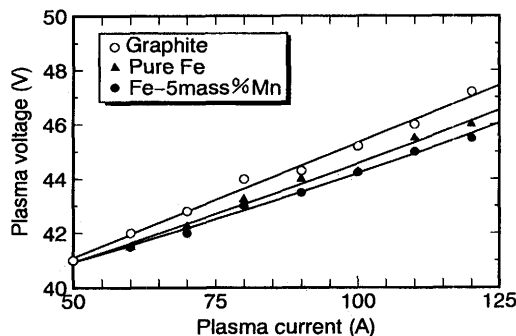


Fig. 1. Plasma current-voltage characteristics dependent on anode material.

％のFe蒸気を混入したとき、プラズマの比電気伝導率は10倍程度増大すると報告されている。本研究において、黒鉛の蒸気圧はほとんど無視でき、金属試料の場合、Fe-5mass%MnはFeに比べ、より多くの金属蒸気がプラズマ陽光柱に混入すると考えられる。したがって、プラズマの比電気抵抗は、黒鉛、Fe、Fe-5mass%Mn合金の順に低下すると思われる。後述するように、金属蒸気が発生するとプラズマ陽光柱の形状も変化するので、比電気抵抗だけでは正確な議論はできないが、大まかにはこの順にプラズマ電圧は低下していることがわかる。また、60A以下で電圧—電流特性の差が生じないのは、金属蒸気が発生量が少なく、電気伝導率への影響が少なかったためと考えられる。

3・2 プラズマの発生状況およびスペクトル線の分布

プラズマの発生状況をFig. 2に模式的に示す。蒸発物がほとんどない黒鉛試料の場合、プラズマ陽光柱は白色であり、プラズマ流は黒鉛の表面に沿って流れる。蒸気圧が低い純Feの場合も、プラズマ陽光柱は白色であり、陽光柱は黒鉛の場合に比べやや細い。溶融金属表面中心部ではプラズマ気流の衝突によって浅いくぼみが生じる。また、プラズマ陽光柱と溶融金属表面との間にはほとんど発光しない暗い層がある。純Feと比較して多量の蒸気を発生したFe-Mn合金の場合、プラズマ陽光柱の白色部分はやや細くなり、その外側に青白いフレームがオーロラのように観察された。また、プラズマと溶融金属表面との間の暗い層には鋭く光る青白い輝線も見える。溶融金属表面より1mm上方で測定した波長範囲340nmから500nmまでのスペクトル線分布の一例をFig. 3に示す。純Fe試料の場合、表面近傍にもかかわらず、Fe原子スペクトル線強度はArの強度と比べてかなり低く、S/N比は悪い。一方、Fe-Mn合金の場合、Mnの蒸気圧が大きいので、Mn原子スペクトル線の強度が強だけでなく、ピーク数もFeのそれより多い。さらに、Mn原子のみならず、Mnイオンスペクトル線も測定された。また、純Feと同じ感度で測定したとき、Fe-Mn合金のスペクトル線分布にFe原子のスペクトル線を見出すことは困難であった。多くのFe原子スペクトル線がMn原子スペクトル線に重なっており、また、全体のバックグラウンドの増加によりS/N

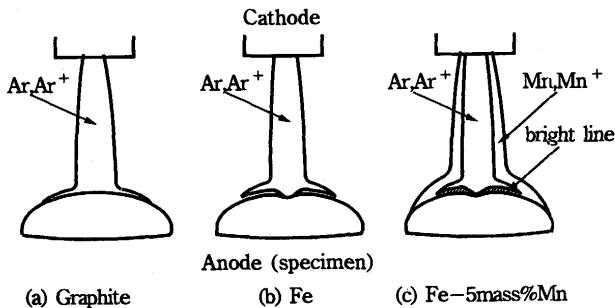


Fig. 2. Schematic views of Ar plasma heating of graphite, Fe and Fe-Mn alloy.

比が悪くなったためである。これらのスペクトル線測定の結果から見て、金属蒸気の影響という観点からは、Fe-Mn合金溶解におけるFe蒸気がプラズマに及ぼす影響は小さいと考えられる。よって、Fe-Mn合金の場合、プラズマ中の金属蒸気はMnのみを対象として検討した。

3・3 FeとMn原子の遷移確率の決定

FeおよびMnの遷移確率については、現在、NBSによる推奨値⁹⁾が最も広く用いられている。これらに基づくFeとFe-Mn合金をプラズマ溶解におけるFeとMnスペクトル線のボルツマンプロットをFig. 4に示す。ここで、前報⁶⁾で述べたAr原子の遷移確率の決定法と同様に、図における回帰線からのずれを補正して最適化法によりFeとMnの遷移確率を決定した。求めた値をそれぞれTable 1とTable 2に示す。本研究で測定したFeとMnの遷移確率の誤差はおおむね±6%

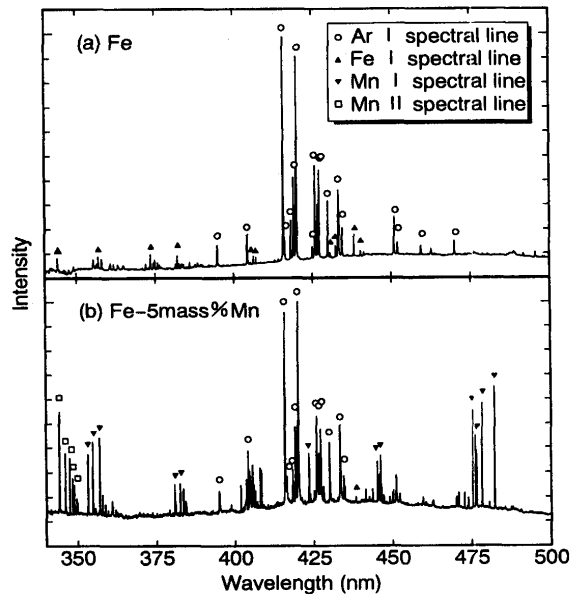


Fig. 3. Spectral lines measured at 1mm above the molten surface in Ar plasma melting of Fe and Fe-Mn alloy.

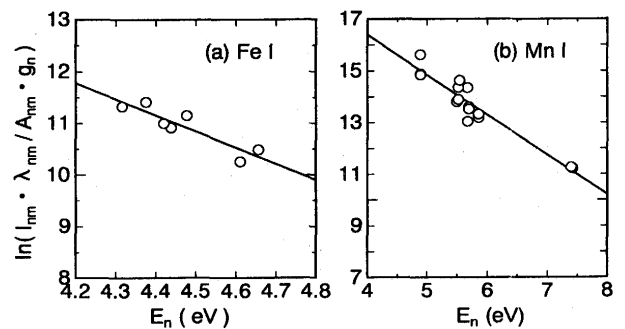


Fig. 4. Fe and Mn Boltzmann plots by NBS's Fe and Mn transition probabilities. (a) in Ar plasma melting Fe (b) in Ar plasma melting of Fe-5mass%Mn alloy

Table 1. Fe I transition probabilities.

Wavelength (nm)	Reference data ⁸⁾		Present study	Deviation * (%)
	A _{nm}	uncertainty		
406.36	0.69	± 25%	0.59 ± 4.2%	-14.5
407.17	0.80	± 25%	0.85 ± 2.3%	6.2
430.79	0.35	± 25%	0.34 ± 3.6%	-2.8
432.58	0.51	± 25%	0.57 ± 3.1%	11.8
438.35	0.46	± 25%	0.41 ± 2.5%	-10.9
440.48	0.25	± 25%	0.26 ± 1.5%	4.0
441.51	0.13	± 25%	0.14 ± 1.2%	7.7

*: Deviation between data of the reference and present study.

Table 2. Mn I transition probabilities.

Wavelength (nm)	Reference data ⁸⁾		Present study	Deviation * (%)
	A _{nm}	uncertainty		
476.24	0.57	± 25%	0.56 ± 5.2%	-1.8
476.64	0.45	± 25%	0.42 ± 4.5%	-6.7
478.34	0.39	± 25%	0.40 ± 2.9%	2.5
482.35	0.45	± 25%	0.44 ± 3.8%	-2.2

*: Deviation between data of the reference and present study.

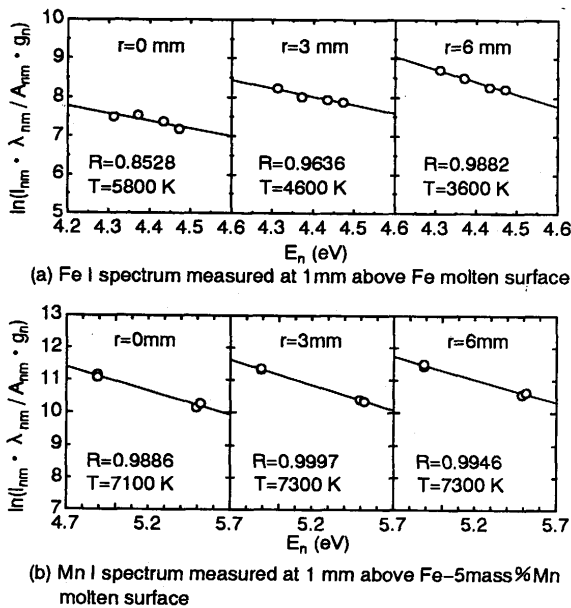


Fig. 5. Typical plots of $\ln(I_{nm} \cdot \lambda_{nm} / A_{nm} \cdot g_{nm})$ vs. excited energy E_n using calibrated transition probabilities, shown in Table 1 and Table 2.

以内に入っている。また、これらの値とNBS推奨値の偏差はNBS推奨値の誤差範囲内にあり、ほぼ妥当なもの判断される。Fig. 5は、熔融金属表面直上1mmにおける金属原子温度の半径方向分布を対象に、これらの値の適用性を調べたものである。なお、即応性を考慮して、Feでは430~440nm、Mnでは475~485nmの、それぞれ4本のスペクトル線について測定を行った。図中のRは $\ln(I_{nm} \cdot \lambda_{nm} / A_{nm} \cdot g_{nm})$ 対励起エネルギー E_n のプロットの一次式近似の相関係数である。金属原子の温度と密度の変化にもかかわらず、ボルツ

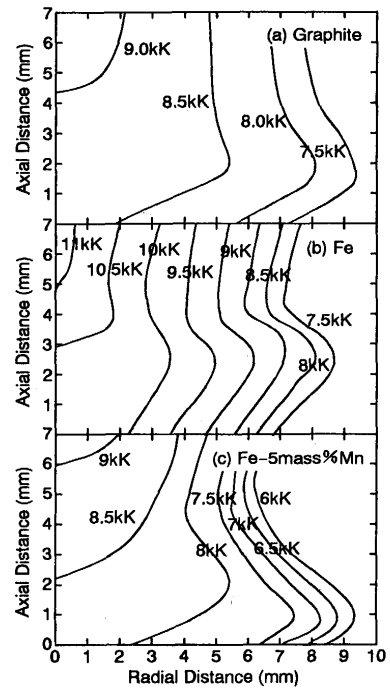


Fig. 6. Isothermal lines of Ar atom in Ar plasma heating of graphite, Fe, and Fe-Mn alloy.

マンプロットは直線性が良く、求めたFeとMn遷移確率が実用上十分適用可能であることを示している。

3・4 Arプラズマの温度分布

局所的熱平衡が成立するとき、プラズマ中の原子、イオンおよび電子などの粒子は同じ運動エネルギーを持つため、プラズマ中それぞれの粒子の温度は等しくなっており、そのときのプラズマ温度は、粒子の温度を用いて表現できる。しかし、現実の多くの場合、局所的熱平衡は厳密には成立しないので、プラズマ中のそれぞれの粒子が持っている運動エネルギーは異なっており、プラズマの温度は、原子、イオン、電子それぞれの温度で示されなければならない。このため、本研究においても、Arと金属原子の温度を測定した。

3・4・1 Ar原子の温度分布

Fig. 6は、試料近傍のプラズマ陽光柱におけるAr原子の等温度線図である。中心軸上のAr原子温度はトーチ先端から試料表面5mm程度まではほとんど変化せず、温度低下は試料近傍に集中している。また、中心軸から離れるにしたがいAr原子温度は低下する。そして、中心からの高温プラズマの流れ込みに伴い、試料表面から2、3mmの部分にプラズマの半径方向での温度勾配が緩やかになる領域ができ、等温度線は広がる。

黒鉛と純Feを比較した場合、Fig. 1に示したように黒鉛のプラズマ電圧は純Feより高く、Ar原子温度は黒鉛の方が高くなると推測されるが、Fig. 6でみられるように、中心軸上のAr原子温度は純Feの方が約2000K高い。純Feの場合、微量のFe金属蒸気が熔融金属表面近傍に存在し、熔融金属

表面近傍層でプラズマの電気伝導率が大きくなると思われるが、その上の領域ではFe蒸気がほとんど存在しないので、プラズマ電気伝導率は黒鉛の場合とほぼ同じと考えてよい。すなわち、Fe蒸気が直接的に陽光柱のAr原子温度に与える影響は少ないと思われる。Fe蒸気存在以外に、純Feと黒鉛を比較したときの大きな違いは陽極試料にくぼみができるかどうかである。純Fe試料表面にはプラズマ流の圧力によりくぼみが形成されており、このため、プラズマ陽光柱は黒鉛の場合と比べてあまり広がらず、相対的に中心部の電流密度が高くなり、Arプラズマの温度が上昇したものと考えられる。

黒鉛とFe-5mass%Mn合金を比較した場合、陽光柱中心軸上でのAr原子温度はほぼ同じであるが、中心から離れるとAr原子温度はFe-5mass%Mnの方が低くなっている。これは、Fe-Mn合金の場合、Fig. 2 (c)に示したように、多量の金属蒸気が全域にわたって分布しており、そのため、プラズマ中の電流はArばかりでなく周辺の金属蒸気部にも供給され、Arプラズマの電流密度が低下し、Ar原子温度が低下したと考えられる。

3.4.2 金属原子の温度分布

プラズマ中の金属蒸気はほとんどが電離している。プラズマにおける金属蒸気の振る舞いを明らかにするには、プラズマ中でより密度が高いイオンを測定対象とするのが適当である。しかし、Feの場合、Feイオンの遷移確率は小さく、スペクトル線の強度はFe原子に比べて非常に低い。また、Feイオンのスペクトル線は短い波長の範囲に集中するため、精度良く測定することは困難である。一方、Fe-Mn合金の場合、Fig. 3に示したように、一部Mnイオンのスペクトル線の測定が可能であった。これらのMnイオンのスペクトル線を用いて計算したボルツマンプロットをFig. 7に示した。図に示したように、測定可能なMnイオンスペクトル線の励起エネルギーは二点に集中し、ボルツマンプロットの勾配から正確なイオン温度を求めることは困難である。そこで本研究においてはイオンでなく金属原子の温度を用いてプラズマの検討を行った。温度は金属原子のスペクトル線強度からボルツマンプロットによって求めた。純Fe試料およびFe-Mn合金のプラズマ溶解におけるFeとMnの原子温度分布図をFig. 8に示す。純Feの場合、Feの温度分布は表面から離れるに従い高くなる。また熔融金属表面上では、中心から10mm離れたところにFeの温度の最も高い領域が存在する。Fe-Mn合金の場合、純Feの場合とは逆に、Mnの温度分布は表面から離れるに従い次第に低くなっている。また、熔融金属表面上の最高値は、中心軸から5mm離れたところである。純FeとFe-Mn合金におけるFeとMnの金属蒸気温度を比較すると、全体的にMn蒸気の高いことがわかる。

Fig. 6とFig. 8に見られるように、Arプラズマ中のFeとMnの原子温度はAr原子温度より2000K程度低い。これは、

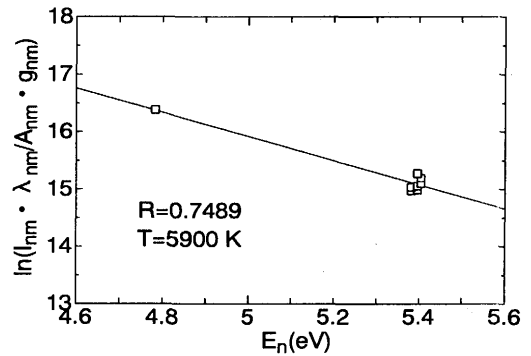


Fig. 7. Plots of $\ln(I_{nm} \cdot \lambda_{nm} / A_{nm} \cdot g_{nm})$ vs. excited energy E_n using Mn ion spectral lines. (Calculated from the results of Fig. 3)

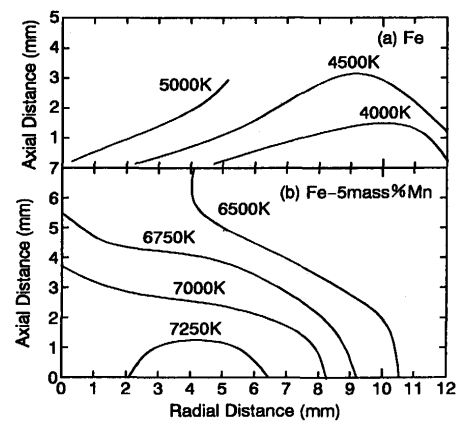


Fig. 8. Isothermal lines of metallic atom in Ar plasma melting of Fe and Fe-Mn alloy.

金属原子のような重い原子を含むプラズマの場合、金属原子とAr原子との間で必ずしも局所的熱平衡が成立していないことを示している。熱プラズマ内では、Ar, FeおよびMnの原子は最も速度の速い粒子である電子と衝突してエネルギーを受け取り、やや遅くて原子間のエネルギー交換が始まる。局所的熱平衡が成立するためには、プラズマ中の各種粒子が互いに衝突によってエネルギーを交換し、ほぼ等しい運動エネルギーを獲得する必要がある。プラズマ中の粒子間のエネルギー交換度合は粒子間のエネルギー緩和時間 τ (s)で表れる。緩和時間は次式で与えられる⁵⁾。

$$\tau_{1-2} = \frac{(m_1 + m_2)^2}{2m_1m_2 \sigma_{1-2} v_1 n_2} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 m は粒子の質量、 σ_{1-2} は衝突断面積(cm^2)、 v_1 は粒子1の平均速度(cm/s)、 n_2 は単位体積当たりの粒子2の密度($1/\text{cm}^3$)、である。

本研究条件下で推定したエネルギー緩和時間 τ (s)がTable 3である。ここで、衝突断面積は足立ら等¹⁰⁾が求めた値を用い、各粒子の平均速度はマクスウェル分布に従うとして、

Table 3. Relaxation time of energy in Ar plasma melting of Fe and Fe-5mass%Mn alloy.

Fe	Fe-5mass%Mn
$\tau_{e-Ar} = 6.2 \times 10^{-8}$	$\tau_{e-Ar} = 5.9 \times 10^{-8}$
$\tau_{e-Fe} = 6.1 \times 10^{-4}$	$\tau_{e-Mn} = 8.1 \times 10^{-5}$
$\tau_{Ar-Ar} = 2.2 \times 10^{-9}$	$\tau_{Ar-Ar} = 2.1 \times 10^{-9}$
$\tau_{Fe-Fe} = 1.8 \times 10^{-6}$	$\tau_{Mn-Mn} = 1.7 \times 10^{-8}$
$\tau_{Ar-Fe} = 2.9 \times 10^{-6}$	$\tau_{Ar-Mn} = 3.7 \times 10^{-7}$

測定温度から換算した⁹⁾。Table 3に見られるように、電子とAr原子間のエネルギー伝達は電子と金属原子間のものに比べ高速度で行われること、異種原子Ar-FeおよびAr-Mn間のエネルギー緩和時間は同種原子Ar-Ar, Fe-Fe, Mn-Mn間のそれより長く、同種原子間のエネルギー交換は速いが、異種原子間のエネルギー交換は遅いことがわかる。つまり、熱プラズマであっても、必ずしも全ての粒子の間で簡単に熱平衡が成立するわけではない事を示している。

前に述べたように、各粒子に関するボルツマンプロットは、Fig. 5で示されているように良好な直線性を示した。これは各種粒子、それぞれについては熱的に擬平衡の状態にあり、ボルツマン分布に従うことを示している。すなわち、粒子種ごとについては個別に温度を決めることができるが、異なる粒子間では局所的にも温度平衡は成立しておらず、異なる温度を持っている。同じような異種粒子間の温度非平衡は他の研究者によっても報告されている⁹⁾。

上述したように、金属蒸気が多量に混入する場合には、金属蒸気がプラズマ温度に多大の影響を与えることが分かった。よって、実際にタンディッシュなどで蒸気圧の高い合金をプラズマで加熱する場合、装置の設計(例えば、電極の電流密度)や、操業法について配慮する必要がある。

4. 結論

金属蒸気が混入したAr熱プラズマの温度特性を調べるために、蒸気圧がほとんどない黒鉛、蒸気圧が低いFeおよび蒸気圧が高いFe-5mass%Mn合金試料を陽極材料として用いてArアークプラズマ加熱を行い、Ar, FeとMn原子の温

度の空間分布を測定し、下記の結果を得た。

(1)プラズマ電流-電圧特性は陽極材料によって異なり、同じ電流値では、プラズマの電圧は黒鉛試料より金属試料の方が、また、純FeよりFe-5mass%Mn合金の方が低いことが明らかになった。これは、金属蒸気の混入度合により、プラズマの電気伝導率が変化するためと考えられる。

(2)純FeおよびFe-5mass%Mn合金の溶解において、測定されたFeおよびMn原子の温度とAr原子の温度は異なっており、いずれの場合にも局所的熱平衡は成立していない。

(3)金属蒸気が溶融金属表面付近にしか存在しない純Feの場合では、プラズマの電気抵抗は黒鉛の場合より低いと思われるが、Arプラズマの温度は黒鉛の場合より高くなった。これは溶融金属表面にくぼみが生じ、Arプラズマ陽光柱が収束し、プラズマの電流密度が高くなったためと思われる。

(4)Fe-5mass%Mn合金場合のAr原子の温度は黒鉛の場合に比べて全体的に低くなったが、これは、Mn蒸気が全域にわたって混入し、プラズマ中の電流はArばかりでなく金属蒸気部にも供給されるため、Arプラズマの電流密度が低下したためと思われる。

文 献

- 1) P. J. Shayler and M. T. C. Fang: J. Phys. D: Appl. Phys., **10** (1977), 1659.
- 2) 藤本英明, 齊藤 忠, 清水基良, 清川雅充, 入谷英樹, 西誠 治: 鉄と鋼, **77** (1991), 1649.
- 3) G.J.Dunn and T.W.Eagar: Metall. Trans., **17A** (1986), 1865.
- 4) 天川正士, 足立和郎, 渋谷正豊, 稲葉次紀: 電気学会論文誌A, **113** (1993), 321.
- 5) 武田絃一, 北村寿宏: あたりあ, **33** (1994), 1142.
- 6) 何国 偉, 石井邦宜, 柏谷悦章, 粥川尚之: 鉄と鋼, **82** (1996), 279.
- 7) W. L. Wiese, M. W. Smith and B. M. Glennon: Atomic Transition Probabilities, Sodium Through Calcium, U. S. Department of Commerce, NBS, (1966), 187.
- 8) J. Reader, C. H. Corliss, W. L. Wiese and G. A. Martin: Wavelengths and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions, U. S. Department of Commerce, NBS, (1980), 378, 384.
- 9) 足立和郎, 天川正士, 稲葉次紀: 電中研研究報告, W90036 (平成3年), 11.
- 10) 林 泉: プラズマ工学, 朝倉書店, (1987), 15.