相変化を伴う焼却飛灰の構成金属が混入した高温アルゴンの組成および熱力学・輸送特性

正員 松村 年郎* 正員 横水 康伸*
学生員 渡辺 卓也* 学生員 伊藤 一将*

Equilibrium Composition of High-Temperature Argon Contaminated with Fly-Ash Metals in Consideration of Phase Transformation and its Thermodynamic and Transport Properties

Toshiro Matsumura*, Member, Yasunobu Yokomizu*, Member, Takuya Watanabe*, Student Member, Kazumasa Ito*, Student Member

Equilibrium composition of high-temperature argon contaminated with fly-ash was theoretically obtained in consideration of phase transformation of fly-ash including some metals : Na, Mg, Al, K, Ca and Fe. The calculation was performed in a temperature range from 300 to 30000 K at a pressure of 0.1 MPa. The result revealed that as the temperature decreases, first, iron and aluminum in gas phase transform into condensed phase around 2000 K and that further reduction in the temperature causes calcium, magnesium, sodium and potassium to transform into condensed phase. From the obtained equilibrium composition, thermodynamic and transport properties were also derived.

キーワード：相変化，アーク，粒子組成，熱力学特性，輸送特性

Keywords: phase transformation, arc, equilibrium composition, thermodynamic property, transport property

1. まえがき

アークプラズマは、数千から数万 K の超高温を容易に発生でき、その制御も容易であるという特長を有している。このため、溶接・溶射などの加工分野、金属の溶解・精錬などの冶金分野においてアークの応用技術が実用化されている。また、最近ではフライアッシュ(焼却飛灰)、PCB およびダイオキシンなどの廃棄物処理分野へのアーク利用が検討されている⁽¹⁾。このうち、フライアッシュに関しては、アルゴンアークによるフライアッシュの加熱が実験的に検討されており、その結果、アークの加熱によってフライアッシュをスラグ状に溶融・固化できることが確認されている⁽²⁾。

アルゴンアークによるフライアッシュ構成金属の処理を効率的に行うためには、フライアッシュ構成金属蒸気の混入したアーク状態の検討、あるいはアークが安定点弧する条件の検討を実施する必要がある。これらの検討には、粒子組成および熱力学・輸送特性の基礎データが非常に有用

である。しかし、フライアッシュ構成金属が混入したアルゴンアークにおける粒子組成および熱力学・輸送特性のデータは、今までに報告されていない。また、フライアッシュ構成金属は常温では固体であるが、アーク加熱により液体、さらに気体へと相変化した上でアークに混入するので、粒子組成および熱力学・輸送特性の計算には、混入物の相変化を考慮する必要がある。

各種高温ガスにおける粒子組成および熱力学・輸送特性の理論計算は、古くから行われてきた^{(3)~(5)}。しかし、粒子の相変化は考慮されていない。

本論文では、フライアッシュ構成金属が混入した高温アルゴンについて、金属の相変化を考慮して、粒子組成の計算結果を述べている。次いで、同ガスにおける熱力学・輸送特性を記述している。計算温度領域を 300~30000 K、全圧を 0.1 MPa とした。

粒子組成解析においては、各粒子の Gibbs の自由エネルギーの総和をとり、それが最小値となる状態を求める手法がある。しかし、今回は、フライアッシュ構成金属の飽和蒸気圧の温度依存性が文献(6)に公表されていることから、飽和蒸気圧を利用して、相変化を加味した粒子組成を求めることとした。

* 名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Department of Electrical Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

2. 粒子組成

2.1 フライアッシュ ゴミ処理場や清掃センターなどで採集されたフライアッシュの成分分析の結果が文献⁽⁷⁾・⁽¹¹⁾に報告されている。これらの分析によれば、いずれのフライアッシュも構成成分として、Na, Al, K, Ca および Fe を含有しているが、他の成分は採集された場所および時期によって異なっている。本論文では文献⁽⁷⁾の中央大学理工学研究所先端技術研究センターにおける“超高温プラズマ式環境破壊物質無害化・有効活用技術の研究”により分析された結果に基づいて検討を進めることとした。表 1 にその結果を示している。常温におけるフライアッシュの主な成分として上述の五つの金属種の他に Mg を含有していることがわかった。同研究によって分析されたフライアッシュにおいては、これらの金属の質量パーセントは、採取されたフライアッシュによって多少変動するとはいうものの Na, Mg, Al, K, Ca および Fe の質量パーセントの比は 1:1:3:1:3:1 であることがわかった。そこで、本研究ではフライアッシュの成分は Na, Mg, Al, K, Ca および Fe であるとし、これらの質量混合比を 1:1:3:1:3:1 とした。

2.2 解析手法 フライアッシュ構成金属蒸気が混入した高温アルゴンにおいては、熱平衡が成り立つと仮定した。粒子組成の解析を行うにあたり、表 2 に示す 34 種類の粒子を考慮した。すなわち、各種金属粒子に関しては、相変化を考慮して、固相(添字 s で表す)および液相(添字 l で表す)を取り上げ、気相粒子として原子(添字 g で表す)、1 価イオンおよび 2 価イオンを取り上げた。一方、アルゴン系においては、Ar, Ar⁺, Ar²⁺ を考慮した。なお、0.1 MPa における各種金属の融点および沸点は表 3 に示すとおりである。なお、上述のようにイオンとして 2 価まで考慮し、3 価を考慮していない。しかし、いずれの粒子においても 2 価イオンの電離エネルギーは 1 価イオンの電離エネルギーよりも約 10 eV も高いため、30000 K においても 3 価イオンの密度は、全粒子密度よりも桁違いに小さいと考えられる。

(1) 混入率の式 フライアッシュ構成金属の混入率 X_{ash} を、全質量に対するフライアッシュ構成金属の質量の比として、以下に示す式で定義した。

表 1 フライアッシュの成分分析の例

Table 1. Example of concentration for the elements in fly-ash.

Atom	Atomic number	Example of real concentration (%)	Round ratio
Na	11	2.35	1
Mg	12	1.69	1
Al	13	8.46	3
K	19	1.56	1
Ca	20	9.29	3
Fe	26	2.62	1

$$X_{\text{ash}} = \frac{M_{\text{ash}}}{\sum_i n_i m_i} \times 100 \quad (\%) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 n_i は i 種粒子の粒子密度、 m_i は i 種粒子の質量であり、

$$M_{\text{ash}} = m_{\text{Na}} N_{\text{Na}} + m_{\text{Mg}} N_{\text{Mg}} + m_{\text{Al}} N_{\text{Al}} + m_{\text{K}} N_{\text{K}} + m_{\text{Ca}} N_{\text{Ca}} + m_{\text{Fe}} N_{\text{Fe}} \cdots \cdots (2)$$

である。ここで、 $N_{\text{Na}}, N_{\text{Mg}}, N_{\text{Al}}, N_{\text{K}}, N_{\text{Ca}}$ および N_{Fe} は各金属の密度の総和であり、例えば N_{Fe} について示せば、

$$N_{\text{Fe}} = n_{\text{Fe(s)}} + n_{\text{Fe(l)}} + n_{\text{Fe(g)}} + n_{\text{Fe}^+} + n_{\text{Fe}^{2+}} \cdots \cdots (3)$$

である。

(2) 金属の相変化および気相金属の圧力に関する式

解析手法について鉄系を例として以下に述べる。後述するように、各種の方程式を連立させ、数値的に解く。この解法においては、数密度の初期値を与える。鉄系気相粒子の密度 $n_{\text{Fe(g)}}, n_{\text{Fe}^+}$ および $n_{\text{Fe}^{2+}}$ の初期値を用いれば、鉄のモル混入率 $X_{\text{m,Fe}}$ を全気相粒子の数密度の総和に対する気相の鉄系の密度として求めることができる。

$$X_{\text{m,Fe}} = \frac{n_{\text{Fe(g)}} + n_{\text{Fe}^+} + n_{\text{Fe}^{2+}}}{\sum_{i \in \text{gas}} n_i} \cdots \cdots (4)$$

式 (4) の定義を用いることによって、鉄系気相粒子の分圧は $X_{\text{m,Fe}} P$ で表される。ここで、 P は全圧である。一方、図 1 に鉄の飽和蒸気圧 $P_{\text{s,Fe}}$ の温度依存性を太い実線で示す。 $X_{\text{m,Fe}} P$ と飽和蒸気圧とを比較することによって、以下に示すように各相の密度を求めることができる。

粒子組成を求めるべき温度 T において、分圧 $X_{\text{m,Fe}} P$ が飽和蒸気圧 $P_{\text{s,Fe}}$ よりも小さいならば、鉄系の粒子のすべてが気相として存在することを示している。したがって、

$$n_{\text{Fe(l)}} = n_{\text{Fe(s)}} = 0 \cdots \cdots (5)$$

表 2 考慮した粒子

Table 2. Species and states taken into account.

Host gas	Impurity						
Ar	Na(s)	Mg(s)	Al(s)	K(s)	Ca(s)	Fe(s)	: Solid
	Na(l)	Mg(l)	Al(l)	K(l)	Ca(l)	Fe(l)	: Liquid
	Na(g)	Mg(g)	Al(g)	K(g)	Ca(g)	Fe(g)	} Vapour
	Na ⁺	Mg ⁺	Al ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Fe ⁺	
	Na ²⁺	Mg ²⁺	Al ²⁺	K ²⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	
electron							

表 3 各種金属の融点および沸点⁽¹²⁾

Table 3. Melting and boiling points of metals at a pressure of 0.1 MPa.

	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe
Melting Point [K]	371	922	932	337	1121	1812
Boiling Point [K]	1163	1383	2740	1043	1763	3023

である。鉄系の気相粒子の分圧 P_{Fe} は、モル混入率 $X_{\text{m,Fe}}$ を用いて

$$P_{\text{Fe}} = X_{\text{m,Fe}} P \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表すことができる。

一方、式 (4) から求めた分圧 $X_{\text{m,Fe}} P$ が飽和蒸気圧 $P_{\text{s,Fe}}$ よりも大きいならば、飽和蒸気圧に相当する密度のみ鉄系の粒子が気相として存在することを示している。よって、鉄系の気相粒子の分圧 P_{Fe} は、 $X_{\text{m,Fe}} P$ ではなく、

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{s,Fe}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

に補正される。その他の鉄系の粒子は、温度 T が融点より高い場合は Fe(l) として存在する。すなわち、

$$n_{\text{Fe(l)}} = N_{\text{Fe}} - \frac{P_{\text{Fe}}}{kT} \quad \text{および} \quad n_{\text{Fe(s)}} = 0 \quad \dots\dots (8)$$

温度 T が融点より低い場合には、気相以外の鉄系の粒子は固相として存在し、

$$n_{\text{Fe(l)}} = 0 \quad \text{および} \quad n_{\text{Fe(s)}} = N_{\text{Fe}} - \frac{P_{\text{Fe}}}{kT} \quad \dots\dots (9)$$

と表現できる。

(3) アルゴン系および電子の圧力の式 上記と同様に、他の金属種 j についても、図 1 に細い実線で示した飽和蒸気圧と比較することによって、金属の気相粒子の分圧 P_j を

図 1 鉄の飽和蒸気圧

Fig. 1. Saturation vapour pressure of Fe.

表 4 電離反応と電離エネルギー⁽¹³⁾

Table 4. Chemical reaction and ionization energy.

Ar	$\rightleftharpoons$	Ar ⁺	+	e ⁻	(E_{Ar} = 15.76 eV)
Ar ⁺	$\rightleftharpoons$	Ar ²⁺	+	e ⁻	(E_{Ar^+} = 27.62 eV)
Na(g)	$\rightleftharpoons$	Na ⁺	+	e ⁻	($E_{\text{Na(g)}}$ = 5.138 eV)
Na ⁺	$\rightleftharpoons$	Na ²⁺	+	e ⁻	(E_{Na^+} = 47.29 eV)
Mg(g)	$\rightleftharpoons$	Mg ⁺	+	e ⁻	($E_{\text{Mg(g)}}$ = 7.644 eV)
Mg ⁺	$\rightleftharpoons$	Mg ²⁺	+	e ⁻	(E_{Mg^+} = 15.03 eV)
Al(g)	$\rightleftharpoons$	Al ⁺	+	e ⁻	($E_{\text{Al(g)}}$ = 5.984 eV)
Al ⁺	$\rightleftharpoons$	Al ²⁺	+	e ⁻	(E_{Al^+} = 18.82 eV)
K(g)	$\rightleftharpoons$	K ⁺	+	e ⁻	($E_{\text{K(g)}}$ = 4.339 eV)
K ⁺	$\rightleftharpoons$	K ²⁺	+	e ⁻	(E_{K^+} = 31.81 eV)
Ca(g)	$\rightleftharpoons$	Ca ⁺	+	e ⁻	($E_{\text{Ca(g)}}$ = 6.111 eV)
Ca ⁺	$\rightleftharpoons$	Ca ²⁺	+	e ⁻	(E_{Ca^+} = 11.87 eV)
Fe(g)	$\rightleftharpoons$	Fe ⁺	+	e ⁻	($E_{\text{Fe(g)}}$ = 7.900 eV)
Fe ⁺	$\rightleftharpoons$	Fe ²⁺	+	e ⁻	(E_{Fe^+} = 16.18 eV)

式 (6) および式 (7) に対応する形で表すことができる。これを用いることによって、金属種による圧力は $\sum_j P_j$ で表され、残りの圧力 $P - \sum_j P_j$ は Ar 系および電子による圧力であるから、

$$n_{\text{Ar}} + n_{\text{Ar}^+} + n_{\text{Ar}^{2+}} + n_{\text{e}^-} = \frac{P - \sum_{j \in \text{metal}} P_j}{kT} \quad \dots\dots\dots (10)$$

が成り立つ。

(4) その他の式 気相状態にある粒子について表 4 に示すような 14 の電離反応式を考え、各反応を Saha の式で表した。さらに電荷中性保存式を立て、上記 (a) ~ (c) で述べた式に連立させた。連立方程式を Newton-Raphson 法で数値的に解き、粒子密度を求めた。第 1 章で述べたように全圧一定、つまり $P = 0.1 \text{ MPa}$ とした。

2.3 解析結果 図 2 に全圧 0.1 MPa、混入率 10 % の場合の粒子組成を示す。いずれの金属も、2260 K 以上の温度域では気相で存在している。2260 K 以下では、温度低下に伴い Fe(g) および Al(g) の密度は低下し、 Fe(l) および Al(l) の密度は激増している。温度がさらに低下すると、Ca(l)、Mg(l)、Na(l)、K(l) がこの順で出現している。この温度低下過程において、これらの金属の液相原子は、各金属の融点を境に固相原子に変化している。

粒子組成の計算結果に基づいて、気相金属のモル分率を各金属種ごとに式 (4) を用いて計算した。図 3 は、混入率 $X_{\text{ash}} = 10 \%$ 、温度 300~4000 K におけるモル分率を示している。同図では、気体状態の全粒子に対するアルゴン系粒子 (Ar , Ar^+ , Ar^{2+}) のモル分率および電子のモル分率も併せて示している。Al および Fe のモル分率は、2260 K

図 2 フライアッシュ構成金属の混入率が 10 % の場合における高温 Ar ガスの粒子組成

Fig. 2. Equilibrium composition of high-temperature Ar with fly-ash metals concentration of 10.0 %.

図 3 気相のモル分率 (混入率 10 %)

Fig. 3. Molar fraction of Ar series, gas phase of metals and electron.

図 4 相変化が起こる温度の上限値

Fig. 4. Temperature at which metal vapour transform into condensed phase as a function of fly-ash concentration.

以上の温度域において一定である。これは、図 2 で示したように、 $X_{\text{ash}} = 10\%$ の場合には、同温度域における Al および Fe の粒子はすべて気相であるからである。温度が 2260 K から低下すると、Al および Fe のモル分率は急激に低下しており、Al(l) および Fe(l) が相変化によって出現することを示している。同様な考察から、温度低下に伴って、Ca(l), Mg(l), Na(l) および K(l) は、1300 K, 1000 K, 800 K および 700 K において現れ始めることがわかる。すなわち、 $X_{\text{ash}} = 10\%$ の場合には、温度が 2200 K から低下するにつれて、各種の気相金属原子が液相に変化し、それに伴って気体の構成粒子は次第に純粋 Ar に近づいていく。

図 2 に示したように、 $X_{\text{ash}} = 10\%$ の場合には、温度低下に伴って Fe(g) が 2200 K を境として相変化する。相変化が起こる温度の上限値 T_d に関して X_{ash} 依存性を示したのが図 4 である。 X_{ash} が 0.1 % から 50 % に増加すると共に、鉄の T_d は 1800 K から 2400 K に 600 K だけ上昇する。他の金属種についても 0.1 % から 50 % に増加すると共に Mg, Na, K については 300 K 程度、Ca は 500 K, Al は 700 K 上昇している。

3. 熱力学特性

アルゴンアークによるフライアッシュの加熱処理におい

図 5 質量密度

Fig. 5. Mass density.

ては、フライアッシュの加熱部ではフライアッシュの固相・液相粒子が存在するが、アーク空間部では気相粒子のみが存在する。そこで、第 2 章で得られた気相粒子の密度を用いて、気体の質量密度⁽¹⁴⁾ およびエンタルピー⁽¹⁴⁾ を計算した。さらに、以下に示すように、温度を 1 K 上昇させるために要するエネルギー Q_P も理論的に計算した。

3.1 質量密度 図 5 に質量密度 ρ の温度依存性を示す。パラメータに混入率 X_{ash} をとっている。約 700 K 以下の温度域における ρ は、いずれの混入率 X_{ash} の場合でも純粋アルゴンにほぼ等しい。これは、図 3 で示したように、この温度域では、フライアッシュ構成金属のほとんどは液体もしくは固体で存在し、気相粒子のほとんどは Ar 系であるためである。一方、700 K 以上の温度域では、フライアッシュ構成金属が気相になるため、同一温度における ρ は X_{ash} の増加につれて減少する。特に、6000 K ~ 30000 K の温度域では、 X_{ash} の増加による ρ の減少が顕著に現れている。

3.2 エンタルピー 図 6 は、各 X_{ash} におけるエンタルピー h の温度依存性を示している。約 700 K 以下の温度域では、混入率 X_{ash} による h の差は見られない。700 K 以上の温度域においては、 $X_{\text{ash}} = 0.1\%$ および 1% の h は同一温度における純粋アルゴンの h にほぼ等しい。しかし、 $X_{\text{ash}} \geq 10\%$ の h は純粋アルゴンの場合よりも大きい。また、15000 K ~ 30000 K の温度域においては、同一温度における h は X_{ash} によらずほぼ等しい。

h の温度依存性に着目すれば、特に $X_{\text{ash}} = 50\%$ の場合、約 800 K, 900 K, 1100 K, 1500 K および 2400 K 付近において、 h は温度上昇に伴って急激に増加している。約 800 K における h の急増は、K(l) から K(g) への相変化に起因している。同様に、温度 900 K では Na, 温度 1100 K では Mg, 温度 1500 K では Ca, 温度 2400 K では Al と Fe に起因している。

3.3 温度を 1 K 上昇させるために要する単位質量あたりのエネルギー エネルギー平衡式を解くことによりアークの過渡特性を求めるためには、一定圧力下において、単位質量あたりの気相を温度を 1 K 上昇させるために必要なエネルギー Q_P を把握する必要がある。全粒子が気相の

図 6 エンタルピー

Fig. 6. Enthalpy.

図 7 温度を 1 K 上昇させるために要するエネルギー

Fig. 7. Energy required for increase in temperature by 1 K.

状態であれば、このエネルギーは定圧比熱に相当する。本研究では、フライアッシュ構成金属の相変化を考慮しているため、温度域によっては、温度変化に伴い相変化する金属種が存在する。そこで、定圧比熱に蒸発エンタルピーを加味したものとして Q_P を定義した。

$$Q_P = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{P=\text{const}} + \sum_j \Delta H_j \frac{m_j}{\rho} \frac{dn_{j(l),j(s) \rightarrow j(g)}}{dT} \quad (11)$$

ΔH_j は蒸発エンタルピー、 $n_{j(l),j(s) \rightarrow j(g)}$ は ΔT の温度上昇によって気体に相変化した粒子数である。なお、融解エンタルピーは蒸発エンタルピーより非常に小さいため、上式では蒸発エンタルピーのみを考慮した。

図 7 にエネルギー Q_P を示す。パラメータに混入率 X_{ash} をとっている。 $X_{\text{ash}} = 50\%$ の場合を例にとれば、温度約 800 K、900 K、1100 K、1500 K および 2400 K において極大値がある。各温度における極大値は、前節 3.2 で述べたように、各金属の相変化に起因している。このため、 $X_{\text{ash}} = 50\%$ の Q_P は、これらの温度において純粋アルゴンに比べて約 10~20 倍である。 $X_{\text{ash}} = 50\%$ から 0.1% に下がるにつれて、これらの極大値の大きさは小さくなる。

4. 輸送特性

気相粒子の密度を用いて、「first-Chapman-Enskog」近

図 8 導電率

Fig. 8. Electrical conductivity.

図 9 熱伝導率

Fig. 9. Thermal conductivity.

似⁽¹⁵⁾に基づいて導電率および熱伝導率を計算した。この計算においては、各粒子間の衝突断面積が必要となるため、文献⁽¹⁶⁾に記載した方法と同様な方法によって衝突断面積を求めた。

4.1 導電率 図 8 は、各 X_{ash} に対する導電率 σ を示している。10000 K 以下の温度域において、フライアッシュ構成金属がわずか 0.1% 混入することによって、 σ は純粋アルゴンに比べて急激に上昇している。この σ の上昇は、温度が 3000 K 以下に低下しても現れている。この温度域では、温度低下に伴い気相は次第に純粋アルゴンに近づく。しかし、金属の気相粒子が飽和蒸気圧分だけ存在しており、その電離エネルギーがいずれも Ar より小さいため、気相の金属原子の電離反応によって電子密度が大きくなっているからである。

4.2 熱伝導率 図 9 に熱伝導率 κ を示す。約 700 K 以下の温度域では、 X_{ash} によらず同一温度における κ は等しいが、700 K~10000 K の温度域では、 X_{ash} による κ の差が現れている。特に、 $X_{\text{ash}} = 50\%$ の場合に注目すると、温度域 700 K~2400 K における温度上昇に伴い、 κ は急激に上昇している。これは、この温度域において、フライアッシュ構成金属が液相から気相に相変化することに

起因している。10000 K 以上の温度域では、同一温度における κ は X_{ash} にほとんど依存していない。この温度域では、 κ の中で電子と他粒子との衝突に起因する接触熱伝導率 κ_{tr}^e が主体となる。また、 κ_{tr}^e は電子密度に強く依存する。10000 K 以上の温度域では、 X_{ash} が変化しても電子密度はほとんど変化せず、この結果、 κ_{tr}^e がほとんど変化しないため、先に示したように κ は X_{ash} にほとんど依存しない。

5. あとがき

本論文では、フライアッシュ構成金属の相変化を考慮して、フライアッシュ構成金属が混入した高温アルゴンの粒子組成を理論的に明らかにした。例えば、フライアッシュ構成金属の混入率が 10 % の場合、温度 2260 K 以上ではフライアッシュ構成金属はすべて気相で存在する。しかし、温度 2260 K 以下では温度低下に伴い、まず気相の Fe および Al の密度が相変化によって減少する。さらに温度が低下すると、気相の Ca, Mg および Na が液相・固相に変化し、約 700 K で K が相変化する。

次いで、気相粒子の密度を用いて、気体の熱力学・輸送特性を理論的に計算した。質量密度、エンタルピーおよび熱伝導率については、数百 K では純粋アルゴンの特性が現れ、それ以上の温度域ではフライアッシュ構成金属混入による特性が表れている。一方、8000 K 以下の温度域において、混入率がわずか 0.1 % であっても導電率は純粋アルゴンの場合よりも桁違いに上昇する。この上昇は、約 3000 K 以下の温度域での相変化によるフライアッシュ構成金属蒸気の減少が現れても継続している。また、熱力学特性について構成金属の相変化に関わるエネルギーを加味して、温度上昇に要するエネルギー Q_P を求めた。このエネルギーは、混入率の増加につれて、800 K~2400 K の温度域で非常に大きくなる。

本研究は中央大学理工学研究所先端技術研究センター（文部科学省私立大学ハイテクリサーチ・センター）における“超高温プラズマ式環境破壊物質無害化・有効活用技術の研究”の一環として行われたものである。

（平成 14 年 7 月 18 日受付，平成 15 年 1 月 31 日再受付）

文 献

- (1) 稲葉：「アークプラズマの新利用技術 - 廃棄物の減容と無害化に向けて -」，中央大学父母連絡会発行「草のみどり」，No.110 (1997-11)
- (2) T. Inaba, M. Nagano, and M. Endo: “Investigation of Plasma Treatment for Hazardous Wastes such as Fly Ash and Asbestos”, *T. IEE Japan*, Vol.117-D, No.7, pp.831-838 (1997-7) (in Japanese)
稲葉・長野・遠藤：「焼却飛灰とアスベストに見る有害物質のプラズマ処理の検討」，電学論 D，117，7，pp.831-838 (1997-7)

- (3) P. Kovita: “Thermodynamic and transport properties of ablated vapors of PTFE, alumina, Perspex and PVC in the temperature range 5000-30000 K”, *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol.12, pp.38-42 (1984)
- (4) T. Amakawa, K. Adachi, Y. Ohki, and T. Inaba: “Thermodynamic Properties and Viscosity of High Temperature Argon Mixed with Iron Vapor”, *T. IEE Japan*, Vol.119-A, No.1, pp.75-79 (1999-1) (in Japanese)
天川・足立・大木・稲葉：「鉄蒸気の混入した高温アルゴンの熱力学特性と粘性率」，電学論 A，119，1，pp.75-79 (1999-1)
- (5) P. Andre: “Composition and thermodynamic properties of ablated vapours of PMMA, PA6-6, PETP, POM and PE”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.29, pp.1963-1972 (1996)
- (6) 物理学辞典編集委員会：物理学辞典，p.2330，培風館 (1986)
- (7) 古田・大畑・Vassileva：「焼却飛灰をプラズマ処理して作製したスラグの溶出試験」，超高温プラズマ式環境破壊物質無害化・有効活用技術 平成 10 年度 研究報告集，IV-3，pp.1-13 (1998)
- (8) M. Ishida, K. Hamabe, H. Sato, S. Sakata, K. Sakakibara, and Y. Sekiguchi: “Twin Torch Type Plasma Arc Ash Melting of Municipal Solid Waste Incinerator”, *Hitachi Zosen Technical Rev.*, Vol.61, No.1, pp.35-40 (2000) (in Japanese)
石田・浜辺・佐藤・坂田・榊原・関口・佐々木・中村：「都市ごみ焼却飛灰のツイントーチ式プラズマ溶融処理」，日立造船技報，61，1，pp.35-40 (2000)
- (9) Y. Kubo, T. Hosoi, Y. Kaneko, M. Ohata, T. Iwao, N. Furuta, and T. Inaba: “Investigation of pH Dependency of Solubility and Physical Property about Plasma Molten Slag from Fly Ash”, *T.IEE Japan*, Vol.121-D, No.4, pp.493-500 (2001-4) (in Japanese)
久保・細井・金子・大畑・岩尾・古田・稲葉：「プラズマによる焼却飛灰溶融スラグの pH 別溶出特性と物理的特性の検討」，電学論 D，121，4，pp.493-500 (2001-4)
- (10) H.B. Gu, T. Kawai, K. Yoshino, E. Yagasaki, and T. Suda: “Electrochemical Properties of Fly Ash by Fossil Power Plant Combustion of Oil and Characteristics as Electrode Material in Secondary Battery”, *T.IEE Japan*, Vol.118-A, No.7/8, pp.832-837 (1998-7/8) (in Japanese)
呉・河合・吉野・矢ヶ崎・須田：「火力発電所燃焼灰フライアッシュの電気化学的特性と二次電池特性」，電学論 A，118，7/8，pp.832-837 (1998-7/8)
- (11) 竹中：「都市ごみ焼却灰のプラズマ溶融処理」，電学誌，Vol.119, No.5, pp.285-287 (1999-5)
- (12) 東京天文台：理科年表，丸善 (1986)
- (13) M.W. Chase, Jr.: “NIST-JANAF Thermochemical Tables Fourth Edition”，Monograph No.9, American Chemical Society, Washington (1998)
- (14) M.I. Boulos, P. Fauchais, and E. Pfender: Thermal Plasma - Fundamental and Applications - Vol.1, pp.244-248, Plenum (1994)
- (15) J.M. Yos: “Transport Properties of Nitrogen, Hydrogen, Oxygen and Air to 30,000 K”，Research and Advanced Development Division AVCO Corporation, Massachusetts (1967) Amendments to AVCO RAD-TM-63-7.
- (16) Y. Tanaka, Y. Yokomizu, M. Kato, T. Matsumura, K. Shimizu, S. Takayama, and T. Okada: “Electrical and Thermal Conductivities and Enthalpy of Air Plasma Contaminated with Fe, Ca, Mg or H₂O vapour”，Proc. of the Fourth Int. Thermal Plasma Processes Conference, pp.587-594 (1997)

松村 年 郎（正員）1951 年生。1979 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。同年 4 月同大学助手。1987 年 2 月同大学講師。1989 年 3 月京都大学講師。1992 年 1 月名古屋大学助教授。1995 年 4 月同大学教授，現在に至る。工学博士。主として、大電流遮断，電気エネルギーの有効利用に関する研究に従事。IEEE 会員。

横 水 康 伸（正員）1962年生。1990年4月名古屋大学助手。1997年10月名古屋大学講師。1998年10月～2002年3月同大理工学総合研究センター併任。2000年2月同大学助教授。現在に至る。工学博士。環境調和型エネルギーシステムに関する研究に従事。IEEE およびエネルギー・資源学会会員。

伊 藤 一 将（学生員）1978年生。2002年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同課程において、環境負荷低減を実現する遮断技術に関する研究に従事。同年4月三菱電機（株）に入社，現在に至る。

渡 辺 卓 也（学生員）1978年生。2001年3月名古屋大学電気電子・情報工学科卒業。同年4月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期課程入学，現在に至る。アークプラズマ応用技術に関する研究に従事。