
プラズマによる都市ゴミ焼却灰の溶融技術

Melting Process of Ash from Municipal Incinerators by Plasma Arc Heating

林 昭彦(Akihiko Hayashi) 木下 勝雄(Katsuo Kionoshita) 赤秀 公造(Kohzo Akahide) 山崎 健利(Taketoshi Yamazaki) 下山 統康(Noriyasu Shimoyama)

要旨：

一般廃棄物（都市ごみ）焼却灰をプラズマにより溶融してスラグとし、減容化，無害化，資源化を計る技術の開発を行った。焼却灰処理能力 200 k g / h （プラズマ出力 240 k W）のパイロットプラントにより焼却灰の溶融試験を実施し，熱収支および物質収支を明らかにした。焼却灰は3分の1に減容化されて水砕スラグまたは徐冷スラグとなり溶出試験も全く問題なく安定化することを確認した。空気を使用するプラズマから排出されるNO_xに関しては，排ガス制御による炉内還元性操業方法を確立した。トーチ電極損耗に関してはトーチ構造の影響が大きいことを明らかにし，著しい電極寿命延長効果を達成した。

Synopsis：

The authors have developed a new process of the plasma heating method to reduce the volume of ash discharged from municipal incinerators. This process also makes ash harmless and recyclable and reduces its volume. Experiments with the pilot plant clarifies the heat and material balance of this process, in which the melting capacity of ash is 200kg/h and maximum power of plasma is 240kW. Ash was metamorphosed to granulated or slow-cooling slag which was reduced to 1/3 in its volume with no toxic problem. A new operation method was also developed to maintain at low concentration the NO_x in exhaust from plasma. Structural modification of the plasma torch to prevent erosion of the electrode achieved remarkable prolongation of its life time.

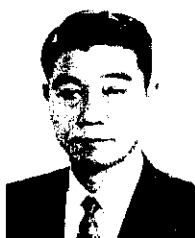
(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Melting Process of Ash from Municipal Incinerators by Plasma Arc Heating



林 昭彦
Akihiko Hayashi
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建設
エンジニアリング研究
室



木下 勝雄
Katsuo Kinoshita
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所 主
任研究員(部長)・工博



赤秀 公造
Kohzo Akahide
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所長(部
長)・工博



山崎 健利
Taketoshi Yamazaki
東京電力㈱ 開発研究
所 需要開発研究室 副
室長



下山 統康
Noriyasu Shimoyama
東京電力㈱ 開発研究
所 需要開発研究室

1 緒 言

近年、地球環境問題が社会的に注目され、資源を用いて製品を作りそれを使用した後に廃却するとした物流構造が根本的に見直されている。すなわち、社会生活の中で地球環境に出来るだけ合致するような資源の循環系を構築することが試みられつつある。その一環として一般廃棄物(都市ごみ)焼却灰をプラズマにより溶融してスラグとし、減容化、無害化、資源化を図る技術の開発を行った。

溶融の方式には、バーナ加熱を利用した表面溶融式¹⁾や旋回流溶融式²⁾、高炉技術を応用したコークスベッド式³⁾、電気加熱を利用した電気抵抗式⁴⁾やアーク炉⁵⁾などが知られているが、著者らは、原料灰の調整(粒度、金属分の選別)が不要、1500℃以上の高温が容易に得られ調整も自在、基本的に電極消耗が少ないなどの点で

要旨

一般廃棄物(都市ごみ)焼却灰をプラズマにより溶融してスラグとし、減容化、無害化、資源化を計る技術の開発を行った。焼却灰処理能力 200 kg/h(プラズマ出力 240 kW)のパイロットプラントにより焼却灰の溶融試験を実施し、熱収支および物質収支を明らかにした。焼却灰は3分の1に減容化されて水砕スラグまたは徐冷スラグとなり溶出試験も全く問題なく安定化することを確認した。空気を使用するプラズマから排出されるNO_xに関しては、排ガス制御による炉内還元性操作方法を確立した。トーチ電極損耗に関してはトーチ構造の影響が大きいことを明らかにし、著しい電極寿命延長効果を達成した。

Synopsis:

The authors have developed a new process of the plasma heating method to reduce the volume of ash discharged from municipal incinerators. This process also makes ash harmless and recyclable and reduces its volume. Experiments with the pilot plant clarifies the heat and material balance of this process, in which the melting capacity of ash is 200 kg/h and maximum power of plasma is 240 kW. Ash was metamorphosed to granulated or slow-cooling slag which was reduced to 1/3 in its volume with no toxic problem. A new operation method was also developed to maintain at low concentration the NO_x in exhaust from plasma. Structural modification of the plasma torch to prevent erosion of the electrode achieved remarkable prolongation of its life time.

優れるプラズマ方式を採用した。

これまでに、処理能力 200 kg/h のパイロットプラントにより都市内清掃工場から排出された焼却灰の溶融減容化試験を実施するとともに、より大型のプラントテストも進めている。

ここでは、パイロットプラントによる熱収支および物質収支、さらに排ガス組成の制御方法、プラズマトーチ電極寿命延長等の知見をもとに確立したプラズマによる都市ゴミの溶融技術について報告する。

2 プラズマ式溶融プロセス

プラズマ式溶融プロセスの概要を 200 kg/h のパイロットプラントについて以下に示す。

2.1 プラズマトーチ

プラズマシステムは、電力供給系統、冷却水供給系統、プラズマ

* 平成5年4月26日原稿受付

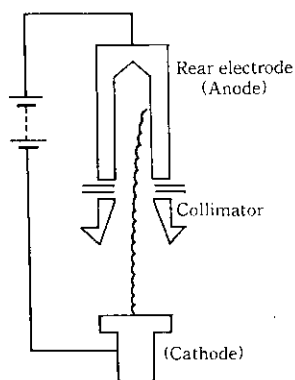


Fig. 1 Schematic diagram of plasma torch (transferred)

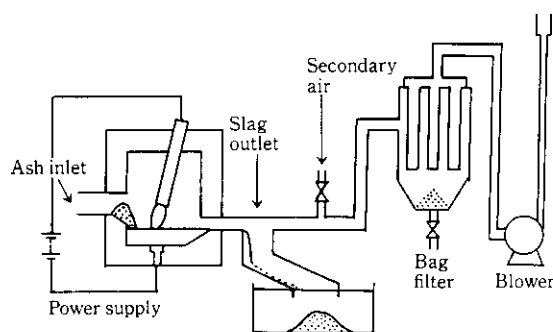


Fig. 2 Schematic diagram of ash melting process

ガス供給系統から構成される。電源は、出力 240 kW (最大電流 400 A) の定電流制御直流電源である。トーチは溶融効率の面で有効なトランスファー型 (Fig. 1) を使用した。電極は中空円筒状になっており、その内面からアークが発生する。この円筒の内面にプラズマガス (空気) を旋回流として供給し、さらに、圧力を周期的に変動させることにより、プラズマアーク発生点を電極面内に広範囲に移動させて電極の損耗を低減している。また、電極およびトーチ本体は、水冷してプラズマおよび炉の熱から保護する。

電極材質はクロム銅であり、プラズマガスとして空気を使用できることが特長である。

2.2 溶融炉

Fig. 2 に溶融プロセスの概要を示す。焼却灰は、灰供給口から炉内に装入され、トーチと炉底電極の間に発生しているトランスファー型プラズマによって加熱され溶融した後、排滓口からオーバーフローして炉外に排出される。溶融スラグは水流ジェットで冷却され、砂状の水砕スラグとなる。焼却灰はシリカ濃度が高いため、石灰を灰に対し 25% 程度の割合で混合し塩基度を 1 程度に調整する。これは、溶融温度と粘性で示されるスラグの流動性が塩基度 1 で最も良くなるためである⁹⁾。

溶融炉は内径 720 mm、高さ 860 mm の円筒形であり、その外側に平均 350 mm の厚さで耐火物が施工されている。

2.3 排ガス処理

炉内で発生した高温のガスは溶融スラグを加温 (保温) しながら排気系に導かれ、2 次空気による希釈で 200°C 程度に冷却されバグ

フィルターでダストを除去された後大気に放出される。

また、酸化鉄の生成およびプラズマからの NO_x 発生を抑制するため、コークスあるいは RDF (refuse derived fuel—生活ごみを乾燥後、圧縮固化した燃料) のような炭水素源を供給して炉内を還元性雰囲気 に 保 つ。これに伴い発生した可燃性ガス (CO, H₂ など) を 2 次空気によって燃焼する。

3 プラズマ溶融炉の運転

3.1 排ガス制御方法

プラズマガスとして空気を使用した場合、高温のプラズマにより窒素と酸素が反応して高濃度の NO_x が生成する。本プロセスでは、NO_x 低減対策として炉内を還元性雰囲気にして生成した NO_x を還元する。揮発分が高くガス化の容易な炭水素源物質供給が NO_x 還元効果が高いため、ここでは RDF を使用した。

RDF は焼却灰供給量および炉内供給空気量 (プラズマガスを含む) に応じて焼却灰と混合して原料供給系から炉に供給される。

3.2 トーチ電極損耗の低減

運転開始当初はプラズマトーチの電極の損耗が著しかった。操業パラメータやトーチ構造が電極損耗に及ぼす影響を解析した結果、以下に示すようにトーチ先端にあってアークを集中させる部品 (コリメータと呼ばれる) の影響が顕著であること、また、アーク電流を大きくして操業したほうが損耗が低減することが明らかとなった。以上から、運転はコリメータを適正に選定し、電流値を管理するようにした。

電極損耗量は、各操業条件の下で一定時間運転し、その間の電極重量減少量から損耗速度 (g/h) を算出し、以下の式で定義される単位電荷 (クーロン) 当りの損耗量、すなわち損耗率で評価した。

$$\text{損耗率 } ER (\text{ng/C}) = V/I \times 10^9$$

ここで、 V は損耗速度 (g/s)、 I は電流 (A) である。

3.3 熱収支

3.3.1 温度分布

溶融炉を LPG バーナで予熱後、焼却灰を装入しながらプラズマを 26 時間運転した。24 時間後よりスラグのオーバーフローを開始し 2 時間の連続排滓を行った。このときの炉内温度の経時変化を Fig. 3 に示す。途中 3 回温度が低下しているのは、プラズマを一時的に停止し炉を傾転してスラグを排滓したためである。連続排滓中

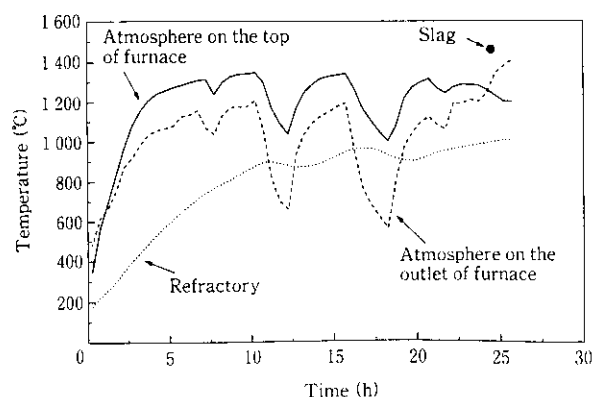


Fig. 3 Change in temperature in the furnace with time

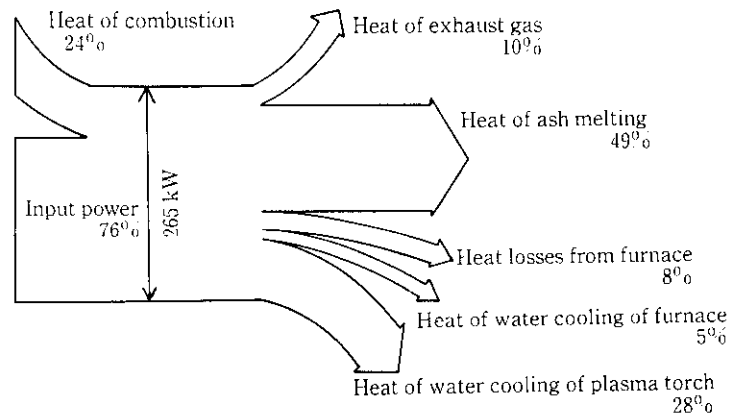


Fig. 5 Analysis of exhaust gas

Table 1 Relationship between ash feeding rate and electrical power consumption

Ash Feeding rate (kg/h)	Electrical Power Consumption (kW·h/t)
100	1 900
150	1 260
210	960

の焼却灰供給量は 210 kg/h、平均プラズマ出力 200 kW である。

耐火物内部温度（炉内表面から 140 mm の深さで耐火物内に埋められた熱電対の指示温度）は 1 000℃ で一定となっており炉はほぼ定常状態と推定される。

連続排滓中のスラグ温度（排滓樋通過後）は 1 450℃ であり、推定されるスラグ融点から 150 ないし 200℃ 過熱されている。この過熱度により排滓が安定する。また、炉頂温度（耐火物内表面上にある熱電対の指示温度）は 1 200℃ 程度であり、スラグ温度の方が 200～300℃ 高く、トランスファー型プラズマの特長である溶融池の直接加熱の効果が顕著である。

3.3.2 電力原単位

焼却灰供給量 210 kg/h の場合の熱収支を Fig. 4 に示す。入熱は、プラズマ電力 200 kW と炭水素源物質および焼却灰未燃焼分の燃焼熱 65 kW を合わせて 265 kW である。出熱は排気損失、焼却灰溶融熱、炉体放熱、炉体水冷損失、プラズマトーチ水冷損失で構成される。

トーチ水冷損失が 28% と大きく、トーチの炉内への挿入長が大きいことが原因であり、炉体設計の適正化により低減可能である。

焼却灰供給量と電力原単位の関係は、Table 1 に示すように灰供給量の増加にともない電力原単位は減少しており、今後さらに電力原単位の低減が可能と推察される。

3.4 物質収支

3.4.1 排ガス組成

排ガスは NO_x 抑制のため還元性ガスとなっている。炉排気直後の CO および NO_x の経時変化を Fig. 5 に示す。NO_x は酸素 15% 換算値を示した。時間は原料の供給開始を始点とした。CO が増加すると NO_x は急速に減少し、CO が 10% 程度の場合 NO_x は 130 ppm となり、環境基準を満足する。

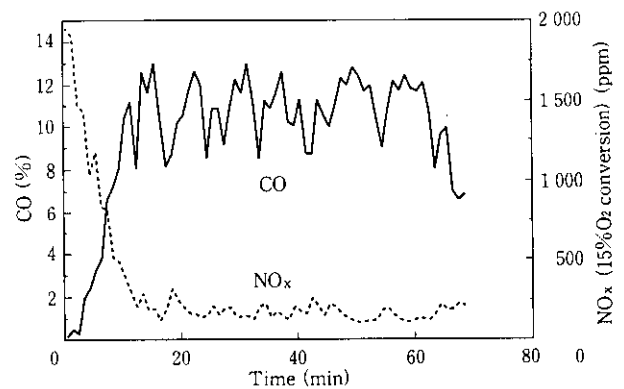
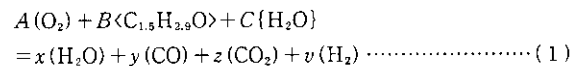


Fig. 4 Heat balance (the case of 210 kg/h)

以下、排ガス組成につき平衡反応論的に考察する。炉内に供給された炭水素源物質はプラズマガス中の酸素、灰中の水分と次式により反応する。

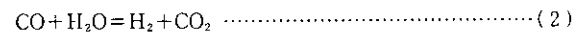


ここで、A, B, C : プラズマガス量、炭水素源物質供給量および灰添加量と含水率から決まる係数

x, y, z, v : それぞれの成分の発生モル数

なお炭水素源物質の組成は RDF の組成分析値より推定した。

一方、(1)式の生成系に対しては次式に示す水性ガス反応平衡が成立する。



(2) 式の平衡定数 K_p は次式で与えられる。

$$K_p = (H_2)(CO_2) / (CO)(H_2O) = zv/xy \quad (3)$$

さらに K_p は次式⁷⁾で与えられる。

$$\log_{10} K_p = 1879/T - 1.67 \quad (4)$$

ここで、T : 平衡反応温度 (K)

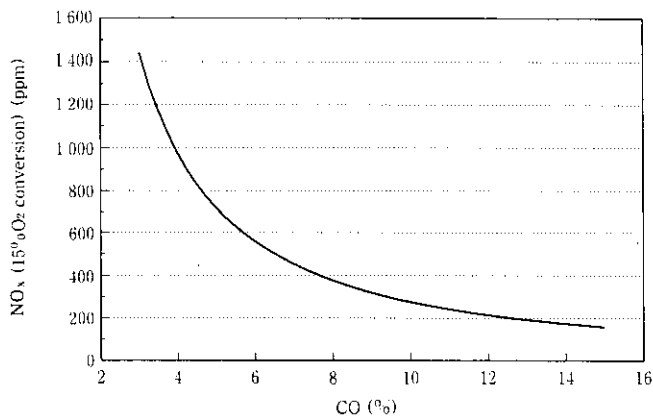
以上の式を連立して解き、ガス組成を計算した。さらに、CO あるいは H₂ による NO_x の還元反応の平衡計算から排ガス中 NO_x を求めた。排ガス中の CO と NO_x の計算結果を Fig. 6 に示す。CO の上昇にともない NO_x は急速に低下し、実験結果とよく一致している。

排ガスに含まれるダストはバグフィルタで捕集されるが、その割合は焼却灰供給量の 1 ないし 2% であった。ダストには鉛、カドミ

Table 2 Results of leachate test of granulated slag

(ppm)

	T-Hg	Cd	Pb	Cr ⁶⁺	As	CN	PCB	R-Hg	Org. P
Mesured	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Upper limit by law	0.005	0.1	1	0.5	0.5	1	0.003	0.0005	1

Fig. 6 Relationship between CO and NO_x by numerical calculation

ウムなどの有害重金属が濃縮されているため、セメント固化に代表される適正処理が必要となる⁹⁾。

3.4.2 水砕スラグの性質

供給された焼却灰は、プラズマによって溶融し、溢流堰を通過して排滓口から流出する際、水ジェットで急冷、破砕されて水砕スラグとなり、水槽に貯まる。一方、実験後炉底に溜まったスラグは炉を傾転して鑄型に受け徐冷した。徐冷スラグの比重は2.9であり、灰が1/3に減容化されることを確認した。

水砕スラグの比重は、真比重は2.8~2.9であり、1/3程度減容された。また、かさ比重は、1.4~1.5程度であった。

溶融処理の特徴の一つとして、得られたスラグからの重金属などの溶出が全く無いことがあげられ、焼却灰の安定化がはかれる。

Table 2 に水砕スラグの溶出試験の結果を示す。試験は環境庁告示13号にしたがって行った。全ての項目にわたり不検出であることが確認された。

3.5 電極損耗に及ぼすトーチ構造の影響

3.5.1 パイロットプラントによるホットモデル実験

ノズル径を小さくして旋回流の中心部に負圧領域を形成しノズル半径方向の圧力勾配を増加させプラズマアークを安定化する方法が知られている^{9,10)}。この点に着目し、コリメーター孔径を通常のφ18.5 mm からφ15 mm に変えて操作をし、電極の重量変化を測定した。Fig. 7 に電極損耗量の経時変化を示す。比較のため、φ18.5 mm コリメーターについての結果も示した。φ15の結果で勾配の大きい範囲は電流値が300 Aの場合である。φ15では300 Aと400 Aの場合を含め損耗率は100~200 ng/C となり、φ18.5の4000 ng/C に比較し1/20~1/40に低減し、その電極寿命への著しい改善効果が得られた。

3.5.2 コールドモデルによる流体特性実験

実機におけるプラズマガスの流動と圧力特性を調べるため、トーチ先端部のアクリル製実物大モデルを作製し、後部電極内のガス流動と圧力特性を測定した¹¹⁾。

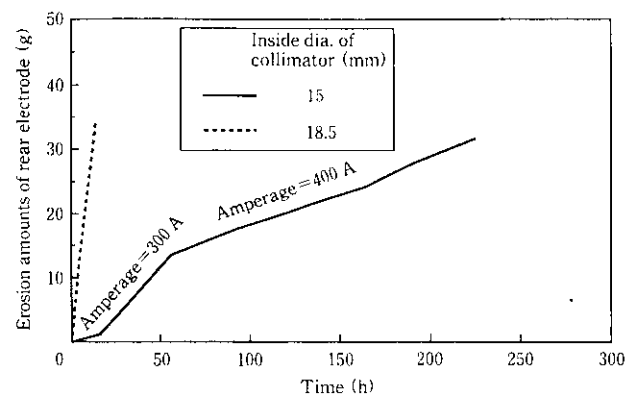


Fig. 7 Change in erosion of rear electrode with time

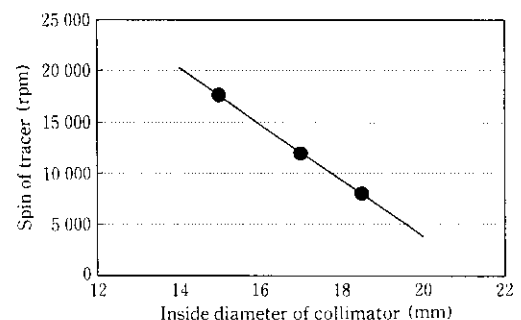


Fig. 8 Influence of inside diameter of collimator on spin velocity of plasma gas

コリメーター孔径を変化させた場合のプラズマガスの電極内旋回速度の変化を Fig. 8 に示す。コリメーター孔径の減少にともない、回転数は増加し、φ15 ではφ18.5 の約2倍に達する。実機における回転数の絶対値は、コールドモデルのガス圧力が1.5 kg/cm²で実機の約1/2であることおよび測定に使用したプラスチック球がガス流れに対し遅れることからここに示した数値より大きくなると思われる。

コリメータ孔径がガス旋回速度に及ぼす影響は顕著であり、孔径を小さくすることによりガス旋回速度が増加して、アーク接触点の移動速度が増加すると推定される。

圧力勾配（電極中心と壁面間）と電極損耗との関係を調べるためコリメータおよびボルテックスジェネレータの組み合わせを4通り設定してコールドモデルにより圧力勾配を測定するとともに、各々対応する組み合わせについて実機操作による損耗率を測定した。ここで操作は電流300 Aの条件で行った。

後部電極開口付近の圧力差と損耗率を Fig. 9 に示す。圧力差が増加すると指数関数的に損耗率は低下することが明らかである。

以上のコールドモデルおよびホットモデル実験から、コリメータ孔径を小さくすることにより、後部電極内の圧力勾配が増加しアーク

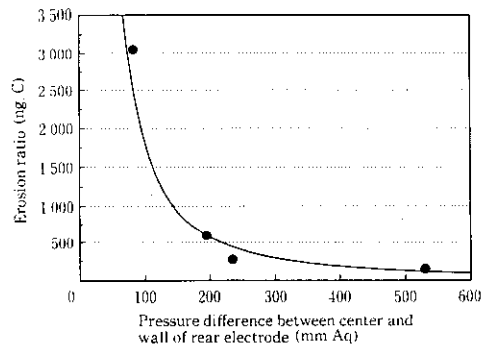


Fig. 9 Influence of pressure difference on erosion ratio

クが安定するとともにプラズマガスの巡回速度が増加してアーク接
 触点の移動速度を増加し、この二つの効果が相乗して電極の損耗を
 低減すると推察される。

4 結言

都市ゴミ焼却灰の減容化、無害化を図るため、処理能力 200
 kg/h のパイロットプラント（プラズマ出力 240 kW）を使用して
 実験を行い、焼却灰溶融技術を確立した。得られた結果は以下のよ
 うに要約される。

- (1) 本プラントの熱収支および物質収支を明かにした。
- (2) 焼却灰は 3 分の 1 に減容化される。
- (3) 水砕スラグ、徐冷スラグは溶出試験に対して問題なく、安定
化されることを確認した。
- (4) プラズマから発生する NO_x に対しては、炭水素源添加によ
る炉内還元性操業方法を確立した。
- (5) プラズマトーチ電極損耗に対しては、ホットモデルおよびコ
ールドモデル実験により、トーチ構造の影響が顕著であることを
明かにした。

千葉市、東京電力㈱、川崎重工業㈱および川崎製鉄㈱は、すでに
 処理能力 1 000 kg/h の実証プラントを千葉市清掃工場内に建設し、
 1993 年 1 月より運転を開始しており、この実績をもとに都市ゴミ
 等の一般廃棄物の新しい処理方法の開発を積極的に進めている。

参 考 文 献

- 1) 藤本忠生：クボタ技報，22（1989），1-28
- 2) 笠井利雄，松田正夫，鈴木富雄，吉ヶ江武男：神戸製鋼技報，41
（1991）4，119-122
- 3) 鍛塚峻二，白石光彦，小野 創，朝長 隆，小畑弘之，渡辺邦博：
新日鉄技報，（1992）345，67-75
- 4) 江藤 肇，大谷 断，山岸一雄，山名 淳，山岸三樹：日本鋼管技
報，（1980）85，73-85
- 5) 志村 進，後藤 祐：工業加熱，26（1989）5，42-50
- 6) 藤本忠生，河杉忠昭，藤内博征，石原栄彰，清水 治，阿部清一，上
林史朗：環境技術，17（1988）9，607-611
- 7) 大谷正康：「鉄冶金熱力学」，（1971），170，[日刊工業新聞社]
- 8) 竹中伸也，南條道夫：東北大学選鉱精錬研究所集報，40（1984），49
-60
- 9) Y. Arata：J. Phys. Soc. Japan，43（1977），1107-1108
- 10) 荒田吉明，小林 明：高温学会誌，11（1985）1，18-28
- 11) 林 昭彦，木下勝雄，赤秀公造，山崎健利：「熱プラズマ研究部会
報告書」，（1993），[日本鉄鋼協会]，掲載予定