

マイクロ波を用いた溶融法

柴田 長吉郎*・木佐貫 郁朗*²

Microwave Melting Method

Chokichiro SHIBATA and Ikuo KISANUKI

1. ま え が き

マイクロ波は、周波数 1~100 GHz (波長 3~300 mm) 領域の電磁波の総称であるが、従来は通信やレーダー等に広く利用されてきた。ところが近年効率のよい大出力の連続波マイクロ波発振管が得られるようになり、マイクロ波を加熱エネルギーとして利用することができるようになった。

マイクロ波は、被加熱物を直接加熱する特徴を有しているため、従来の加熱方法では難しかった粉体のような熱伝導の悪い物質の加熱を効率よく行うことができる特徴をもっている。ここでは熱伝導の悪い物質の例として焼却灰を選び、焼却灰にマイクロ波を印加してガラス化する方法とファイバーガラスの原料を溶融する方法について紹介する。

2. 焼却灰のガラス化技術

2.1 焼却灰の組成

一般に廃棄物は紙や食品、下水汚泥などから成り、そ

の組成のばらつきは大きい。焼却後の焼却灰については、類似の組成を示す。紙や食品を完全に焼却した後に、出る廃棄物焼却灰、及び、一次処理をしない下水汚泥を理想的に焼却した焼却灰の主たる組成の例を表 1 に示す。

2.2 市販ガラス組成と焼却灰の類似点

表 2 に市販ガラス組成を示す。

焼却灰と市販ガラスの組成を比較すると、両方とも類似の組成から成り特に SiO_2 の量がほぼ同じである。

SiO_2 はガラスの重要成分であり、溶融すれば他の酸化物と酸素を介して結合しガラス化する。したがって焼却灰を加熱溶融後冷却すれば、ガラス化するであろうと推定できる。

2.3 焼却灰のガラス化の利点

焼却灰をセメントやアスファルトで固化し投棄する方法では、それらが破壊された時に、有害物質が溶出して環境を再汚染する可能性がある。焼却灰をガラス化すれば、有害金属酸化物を SiO_2 の網目構造の中に入れることができるので、焼却灰ガラスが破壊されたとしても、

表 1 焼却灰の組成

(wt%)

	網目構造物		中間酸化物				修飾酸化物			
	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	ZnO	TiO_2	Na_2O	CaO	MgO	K_2O
廃棄物焼却灰	53.0	1.5	6.2	2.6	0.4	4.2	4.3	14.8	9.3	3.5
汚泥焼却灰	54.4	8.1	13.5	8.8	—	—	3.2	3.2	2.4	2.8

表 2 市販ガラスの組成

	網目構造物		P_2O_5	中間酸化物		修飾酸化物			
	SiO_2	B_2O_3		Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO
アミノけい酸ガラス	56.8	3.0	—	24.4	—	—	0.8	6.6	8.4
ほうけい酸ガラス	65	25	—	1.8	0.05	8	—	—	—

昭和 61 年 6 月 10 日受付 (Received June 10, 1986) (依頼解説)

* 新日本無線(株)常務取締役研究所所長 理博 (Research & Development Laboratory, New Japan Radio Co. Ltd., 2-1-1 Fukuoka Kamifukuoka Saitama pref. 356)

*² 新日本無線(株)研究所 (Research & Development Laboratory, New Japan Radio Co. Ltd.)

Key words: microwave; electro-magnetic wave; direct heating; wave parameter; insulating materials; incinerator ash; glassy materials; melting; application; measurement; control; electric circuit; wave guide.

有害物質が溶出してくる可能性は非常に少ない。また、見かけ比重は、特別なものを除いて、0.3~0.5 程度であり、ガラス化することで比重を 2.5~3 程度まで上げることができる。すなわち体積が減少するので保管場所を有効に利用することができる利点がある。

2.4 焼却灰をガラス化する方法

焼却灰をガラス化するのに、重油やガス等で外部から加熱する方法では、粉体は断熱性が良いため、表面だけガラス化し内部までガラス化できず、均一なガラスにすることが難しい。また、焼却灰のように種々成分が入っているものに対し有効な耐火物の選定が難しい。

ガラス及び焼却灰は 1000°C 以上になると電気抵抗値が下がり始め 1400°C 程度において数 $\Omega \cdot \text{cm}$ になる。その程度の電気抵抗の溶融体であれば、商用交流を使用し十分にジュール加熱が可能で、ガラス業界でも使用されている直接通電炉を別の溶融法として使うことができる。しかし、ガラス及び焼却灰は常温で非常に高い抵抗値を示し、ほぼ絶縁物であり商用交流を流すことは不可能であるので、補助熱源として電気ヒーター、重油バーナーなどで、800~1000°C まで昇温させ、抵抗値が下がった時点で商用交流を印加し、直接通電を開始する。

ガラスの場合組成があらかじめわかっているため、この方法が採用されているが、焼却灰のように不純物として何が入ってくるか判断できないようなとき、補助熱源の選定に困難を生ずるし、電極を絶縁している炉壁材の耐火物が不純物により浸食される現象を生じ、寿命の面で重大な支障を生ずる。また、直接通電炉の電極として通常水冷されたモリブデンが使用されているが、モリブデン電極先端は 1500°C 程度の高温になり、非常に反応性に富み、焼却灰中の不純物によるモリブデン電極の消耗が激しく実用に適さない。

以上の理由で焼却灰をガラス化する上で次の条件が必要である。

- (1) 特別な断熱を必要としない。
- (2) 焼却灰を完全にガラス化できる。
- (3) 保守点検が容易である。
- (4) 排出ガス量が少ない。

上記条件を満たす方式としてマイクロ波による焼却灰のガラス化がある。

2.5 マイクロ波による焼却灰のガラス化

焼却灰は、常温では誘電体（絶縁体）であり、溶融状態では数 $\Omega \cdot \text{cm}$ の低い抵抗値を持つ物体である。焼却灰を溶融するためには、誘電体と数 $\Omega \cdot \text{cm}$ 程度の抵抗体とを連続的に同時加熱することが必要である。また、焼却灰を溶融するには、高効率で動作するマイクロ波発振管が必要であり、一般にマグネトロンが使用され、周波数は電波法の ISM (Industrial, Scientific and Medical) バンドとの兼合いから 2450 MHz 帯及び 915 MHz 帯のものが現在当社において生産されている。2450 MHz 帯

の管球は 5 kW 及び 10 kW、915 MHz 帯においては、30 kW、100 kW のマイクロ波出力を持つマグネトロンが商品化されている。焼却灰溶融に使用するには、エネルギーの大きなマグネトロンが必要であるため 915 MHz 帯が適している。

3. 高効率マイクロ波加熱方法

3.1 マイクロ波を使用した誘電体加熱方法

誘電体にマイクロ波を印加したとき、単位体積当たり消費される電力 P は次式で表される。

$$P = 5.54 \times 10^{-13} \cdot f \cdot E^2 \cdot \epsilon_s \cdot \tan \delta \quad (\text{W/cm}^3)$$

ただし、 f : 周波数 (Hz), E : 電界強度 (V/cm), ϵ_s : 比誘電率, $\tan \delta$: 誘電体損失角の正接

焼却灰は粉体であり見かけ比重が小さく、従って、見かけの ϵ_s , $\tan \delta$ が小さい。 $\epsilon_s \cdot \tan \delta$ の値が小さいので上式から単位体積中に消費される電力を大きくするには、 $f \cdot E^2$ の値を大きくする必要がある。一般に電界 E は、空气中ではあまり高く取れず、実用的規模において約 1000 V/cm であるので、 f を高くする方法が、得策である。

図 1 のような装置を作り周波数 915 MHz、電力 30 kW のマイクロ波を印加すると、導波管中には約 400 V/cm の電界が生じ、焼却灰温度は 10 s 後に約 150°C 前後になる。図 1 に示した装置では、整合負荷にマイクロ波入力がほとんど消費されてしまい、マイクロ波の利用効率が非常に悪い。

小さい電力で電圧を高くし、マイクロ波の利用効率を

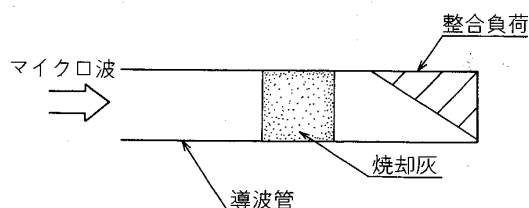


図 1 整合負荷で終端された導波管中に置かれた焼却灰

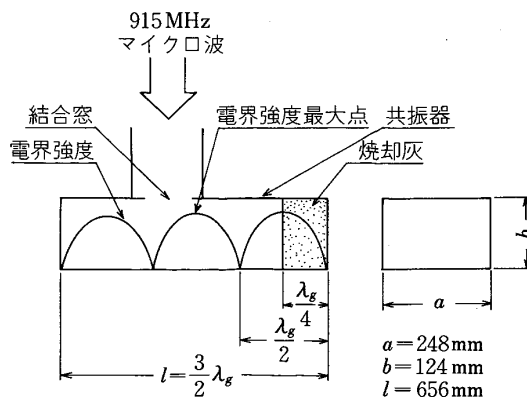


図 2 共振器中に置かれた焼却灰

よくするためには、図2に示すような共振器を用いて、その中に焼却灰を入れる方法がよい。

図2において共振器を形成する伝送線路としては、 $a=24.8\text{ cm}$ 、 $b=12.4\text{ cm}$ となる。使用するマイクロ波の周波数を915 MHzに選ぶと波長 λ は、32.8 cmとなり、共振器長さ l は下式で与えられる。

$$l = n \lambda_g / 2 = n \lambda / (2 \times \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2})$$

ただし、 $n:1$ 以上の整数、 λ_g :管内波長
 $n=3$ に選べば、 $l=65.6\text{ cm}$ となる。

図2からわかるように共振器の中では、電界が最大となる点と最小となる点が交互に現れ、電界最大点に置かれた焼却灰は加熱されるが電界最小点に置かれた焼却灰は加熱されない。一例として、周波数915 MHz、入射電力5 kWに設定し、結合窓を調整することによって電界の最大値は1000 V/cm程度になり、10 s後に800°C以上になり、非常に効率が良くなる。

3.2 マイクロ波を使用した抵抗加熱方法

焼却灰温度が900°Cを越えると電気抵抗は下がり抵抗体として取り扱う範囲になる。図3において、周波数915 MHz、入射電力30 kWに設定し溶融焼却灰を加熱しようとしても、加熱に使用できる電力は数%で残りのほとんどのマイクロ波電力は反射してしまい、有効にマイクロ波を溶融焼却灰の加熱に使用することができない。

マイクロ波の伝送用に使用している導波管のインピーダンスは通常400 Ω 程度であり、それに対し、溶融焼却灰の抵抗値は数 Ω と低いため不整合を生ずるので、トラ

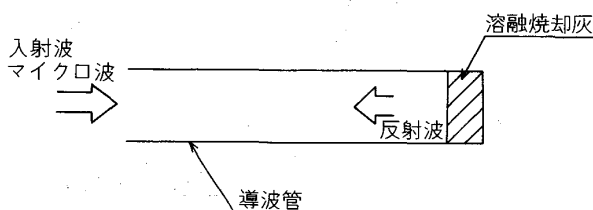


図3 導波管中に置かれた溶融焼却灰

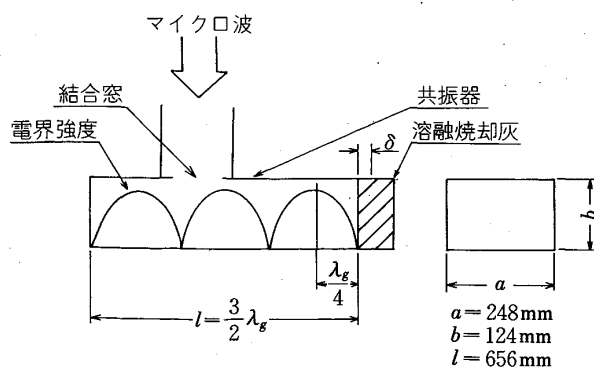


図4 共振器中に置かれた溶融焼却灰

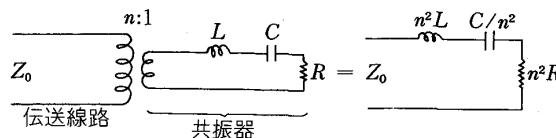


図5 共振器の等価回路

ンスを挿入することによって見かけ上低い溶融焼却灰抵抗値を導波管インピーダンスに合わせることができる。

図4に示すように共振器を用いればトランスを挿入した場合と等価になり、溶融焼却灰の表面にマイクロ波電流を流すことができる。

共振器中に挿入された溶融焼却灰の等価回路を図5に示す。共振器のインダクタンスを L 、キャパシタンスを C 、溶融焼却灰の抵抗を R とし、伝送線路の特性インピーダンスを Z_0 で示す。共振器の長さ l を図4に示すように $(3/2)\lambda_g$ に取り、そのときの共振器の L, C を L_0, C_0 とすれば共振周波数 f_0 は下式で示される。

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_0 \cdot C_0}) \text{ (Hz)}$$

よって、 f_0 を、使用するマイクロ波の周波数に合わせることににより、伝送線路に直列に挿入されている $n^2L, C/n^2$ は直列共振を生じ抵抗値 n^2R だけが残る。そこで結合窓の開口面積を調整し $n^2R=Z_0$ とすることにより入射電力を有効に溶融焼却灰に与えることができる。

一例として周波数915 MHz、入射電力25 kWに調整し、共振器として、 $a=24.8\text{ cm}$ 、 $b=12.4\text{ cm}$ の寸法の導波管を使用し $l=65.6\text{ cm}$ 、 $n=2.7$ にした場合、溶融焼却灰の表面における温度は1400~1500°Cに達する。

表面温度は1400~1500°Cになつていても、深さ X 方向に対しマイクロ波電流は $\exp(-X/\delta)$ で減少する。表面電流の $1/e$ になる深さ δ を一般にスキンドープスと称し、 δ は下式で与えられる。

$$\delta = \sqrt{2/w\mu\sigma}$$

ただし、 $w=2\pi f$ 、 $\mu=4\pi \times 10^{-7}$ 、 σ :コンダクタンス(Ω^{-1}/m)

915 MHzの周波数を用い $\sigma=20\Omega^{-1}/\text{m}$ を代入すれば $\delta=3.7\text{ mm}$ となる。

δ だけ奥で消費されるエネルギーは表面で消費されるエネルギーの $(1/e)^2=0.14$ となり、深さ δ 以上の点におけるマイクロ波エネルギーによる加熱は無視できるほど小さい。よって δ より奥の焼却灰は焼却灰自身が断熱材として作用し、特に断熱レンガを使用する必要がない。

4. 焼却灰連続溶融炉

4.1 構造

共振器中に焼却灰を投入すれば、誘電体的特性をもつ低温から、低抵抗の特性をもつ高温時まで能率よく加熱できる。

(2)設備がコンパクトで溶融時の起動が速いため、少量多品種のプリメルト要求に対しては、溶融炉交換から再起動までが短時間でしかも簡単に対応できる。

(3)加熱源がクリーンなマイクロ波であることから、排気ガスは溶融時に原料から発生するものだけとなる。よつてバーナーを使用した時に比べると排気ガス量がはるかに少なくなり、付帯設備である排気ガス処理設備を小さくすることができる。

6. あ と が き

周波数 915 MHz、電力 25 kW のマイクロ波を用いて焼却灰を連続的に溶融し、これをガラス化する装置の概

略を述べた。本焼却灰処理方法は、特に、放射性廃棄物を含む焼却灰の処理に役立つものと期待している。

またマイクロ波加熱の特徴を有効に活かした応用例としてファイバーガラス原料の溶融技術を紹介した。今後とも本加熱方式の応用展開が期待される。

文 献

- 1) 成瀬 省: ガラス工学 (1961) [共立出版]
- 2) 武藤暢夫, 菱田一雄, 吉持俊太郎: 廃棄物の処理技術 (工業調査会) (1972)
- 3) 福本 勤: 廃棄物処理技術 (1977) [共立出版]
- 4) G. L. RAGAN: Microwave Transmission circuits (1964) [Boston Technical Publishers Inc.]
- 5) 柴田長吉郎: 工業用マイクロ波応用技術 (1986) [電気書院]