



Title	廃棄物溶融炉の安定操業に及ぼす高温酸化物の液相領域とその流動性の解析
Author(s)	宮林, 良次; 吉川, 健; 田中, 敏宏
Citation	高温学会誌. 2006, 32(5), p. 281-288
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/26041
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka



廃棄物溶融炉の安定操業に及ぼす高温酸化物の液相領域とその流動性の解析

Investigation of Liquidus Area and Fluidity of Oxides Affecting Stable Operation of Melting Furnace

宮 林 良 次*・吉 川 健**・田 中 敏 宏**

Yoshitsugu MIYABAYASHI, Takeshi YOSHIKAWA and Toshihiro TANAKA

(Received July 7, 2006)

Since high social demands have been focused on detoxification as well as recycling of industrial wastes, the role of melting furnaces for wastes has been highlighted these days. However, due to scattering of compositions of components in industrial wastes, we are required to operate melting furnaces stably and to elucidate adequate operating conditions even for some compounds which are difficult to be melted under usual operations. In the present paper, we investigated 1) phase equilibria by thermodynamic databases, and 2) fluidity of molten slag for several compounds provided in melting furnaces. Then, we found that beneficial information was available on composition and temperature ranges of molten slag by thermodynamic investigation, which could provide useful guide to melt even asbestos and high-melting point compounds.

Key Words: Waste Melting Furnace, Fluidity, Slag, Asbestos

1. 緒言

非鉄製錬技術を有する廃棄物処理プロセスは、高温溶融技術に優れており、それに対して処理ニーズの高い廃棄物として、シュレッターダスト、鉛含有ガラス、石綿含有物がある。シュレッターダストは廃自動車、廃家電品のリサイクル事業者から鉄、アルミ、銅等を回収した後に発生する残渣である。これらは、銅を1～5%含有しており、銅等の有価物の再資源化が求められている。シュレッターダストは廃プラスチック等の可燃物を30～70%、塩素を3～5%含有していることから、著者の一人は、可燃物の予備焼却処理により、これらを除去した残渣（焼却灰）を溶融処理し銅を効率的に回収する方法を検討してきた。¹⁾²⁾

鉛含有ガラス屑は、廃家電品リサイクル工場から、ブラウン管や液晶パネルをリサイクルする際に発生する。鉛を無害化し資源リサイクルするためには、鉛回収技術を有する溶融処理が望ましい。³⁾

また、石綿（アスベスト）含有廃棄物については、建築物の解体に伴って、スレート等の石綿含有建材、吹き付け石綿、石綿含有家庭用品等の廃棄物が今後、大量に発生する。これらは、国内に今後30年間で4300万トンを超える量が発生し、毎年100万トン/年以上発生するとされている。廃石綿含有廃棄物は、飛散性石綿廃棄物と非飛散性石綿廃棄物に廃棄

物処理法で区別されている。飛散性石綿廃棄物は、建築物の吹き付け石綿及び石綿を含有した保温材で除去作業時に飛散の恐れがあるもので、廃棄物処理法では特別産業廃棄物に指定されている。非飛散性石綿廃棄物は、石綿がセメント、珪酸カルシウム等と一体化したもので、特別産業廃棄物には指定されていないが、破壊又は破断時に飛散の恐れがある廃棄物である。特に、飛散性石綿を溶融処理できる産業廃棄物処理業の許可業者は国内に15社（2005年8月時点）しかなく、2004年度に処理された飛散性石綿廃棄物は18,334トン、その内、溶融処理は1315トンであったと報告されている。⁴⁾⁵⁾ 現在、これらのほとんどは埋立処分されていることから、廃石綿の溶融処理⁶⁾⁷⁾⁸⁾についても社会的ニーズが高い。

このように種々の廃棄物を安全に無害化、並びに再資源化する溶融処理技術の確立が望まれている。ここで、廃棄物溶融炉のひとつに、次のプロセスがある。廃棄物溶融炉の概略図をFig.1に示す。炉本体は、長さ11m、幅4m、高さ4mの耐火物（レンガ）構造であり、廃棄物等の原料は天井部に設置した7つの原料装入口から投入する。原料は、3本の重油バーナーによる火炎で溶解する。高温の火炎を得るため、燃焼空気には酸素を富化している。³⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾ この廃棄物溶融炉は、廃棄物等に含まれる銅をリサイクルすることを目的としている。廃棄物等の原料に含まれるCuは、金属または酸化物の形態が主であり、原料とともに硫化鉄鉱（FeS₂）を投

* 日鉱環境株式会社（〒317-0055 茨城県日立市宮田町 3453）

Nikko Environmental Services Co., Ltd (3453 Miyatacho, Hitachi, Ibaraki 317-0055, Japan)

** 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻（565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

Department of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University
(2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

入しマットに濃縮する。このとき、Au 及び Ag 等も Cu に付随してマットに吸収される。一方、主要成分である原料中の Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 及び CaO 等は、安定したガラス質のスラグを形成する。マット（硫化物）とスラグは、溶体の比重差により分離する。代表的な原料並びにマット、スラグの組成の例を **Table 1**, **2**, **3** に示す。

廃棄物溶融炉は、シュレッターダストの焼却灰、ガラス屑、汚泥、ばいじん等の種々の廃棄物（鉄の多いもの、シリカの多いもの、アルミナの多いもの等）を目標のスラグ組成となるように配合し溶解している。スラグ温度は、炉体構造、加熱能力から 1573K 付近で調整する。スラグ温度が鉄鋼製錬プロセスと比べて低いために、スラグの液相領域は狭く、固

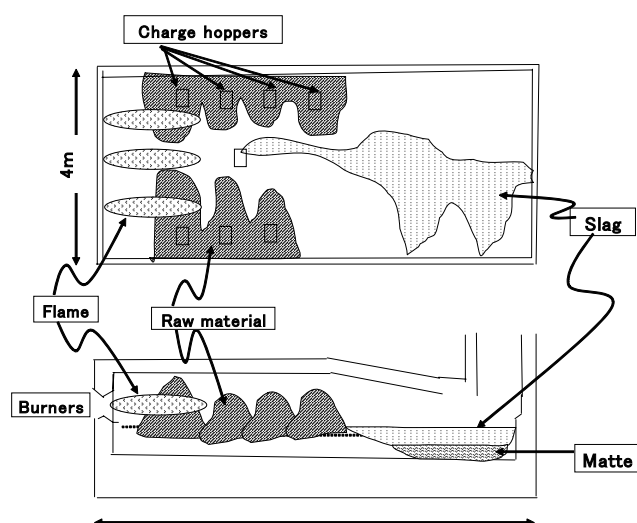


Fig.1 Schematic drawing of melting furnace.

Table 1 Chemical compositions of raw materials of melting furnace.

	(mass%)							
	Cu	Pb	Zn	Fe	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO
Dirt A	2	1	1	10	8	10	8	0
Dirt B	0	1	1	50	10	2	2	0
Dust	0	0	1	0	15	52	10	0
Ash	6	1	1	8	10	24	24	1
Glass waste	0	3	0	1	1	70	5	0
Asbestos	0	0	0	2	1	52	4	37

Table 2 Chemical composition of matte of melting furnace.

	(mass%)							
	Cu	Pb	Zn	Fe	S	CaO	SiO_2	Al_2O_3
	29	1	1	38	20	0.1	0.1	0.1

Table 3 Chemical composition of slag of melting furnace.

	(mass%)							
	Cu	Pb	Zn	Fe	S	CaO	SiO_2	Al_2O_3
	0.4	0.1	0.5	20	0.5	10	29	7

相が析出しやすい。そのため、液相領域の組成に入るように他の溶解物と接触しながら溶解が進行する。この過程で安定操業の阻害要因である高融点の未溶解物が生成する。また、処理プロセスで発生するメタルを完全に酸化することが出来ないため、廃棄物中の金属成分（Fe, SUS）は溶融スラグとならず、炉底で固体のメタル層を形成しやすい。

廃棄物溶融炉における廃棄物の溶解及び固相析出挙動に関する知見は少ないことから、安定した操業を継続する指針を得るため、基礎的な解析が望まれている。

そこで本研究では、まず、廃棄物溶融炉の主要な原料であるシュレッターダストの焼却処理残渣（焼却灰）について、溶融炉の操業温度の指針を得るために、均一融体を生成する温度を測定した。次に、廃棄物溶融炉のスラグと未溶解物について、流動性測定と熱力学データベースを利用した相平衡解析を行い、廃棄物溶融炉の操業に及ぼす高温酸化物の液相領域とその流動性について解析した。最後に、石綿含有廃棄物の溶融処理について、熱力学データベースを利用した相平衡解析を行い、溶融処理条件について検討した。

2. 廃棄物の溶解温度の測定

廃棄物溶融炉の主原料のひとつであるシュレッターダストの焼却灰について溶解温度を測定した。

2.1 試料

シュレッターダストを焼却炉で焼却し発生した焼却灰（主灰）を 1mm の篩で篩い分け、篩下を試料とした。**Table 4** に分析値を示す。Cu, Zn, Fe のほとんどは酸化物として存在する。

2.2 測定方法

試料 30g を磁性るつぽに入れ、超高速昇温電気炉で高温保持し溶融状況を観察した。保持温度は、1373K から 100K 刻みで、1473, 1573, 1673K とし、保持時間は 30 分とした。保持終了後、電気炉から取り出し冷却した。冷却後、垂直方向に切断し、断面を目視観察した。

2.3 結果

高温保持後の断面写真を **Fig.2** に示す。1373K では溶融せず、1473K 並びに 1573K では部分的な溶融が認められ、1673K で均一融体が生成していることが観察できた。従って、シュレッターダストを焼却処理することによって得られた焼却灰を溶融するためには少なくとも 1673K 程度の温度まで加熱する必要があることが明らかになった。

Table 4 Chemical composition of bottom ash.

	(mass%)									
	Cu	Pb	Zn	Fe	S	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	C
Bottom ash	6.0	0.5	2.0	7.6	1.4	9.8	24.2	24.0	2.8	5.0

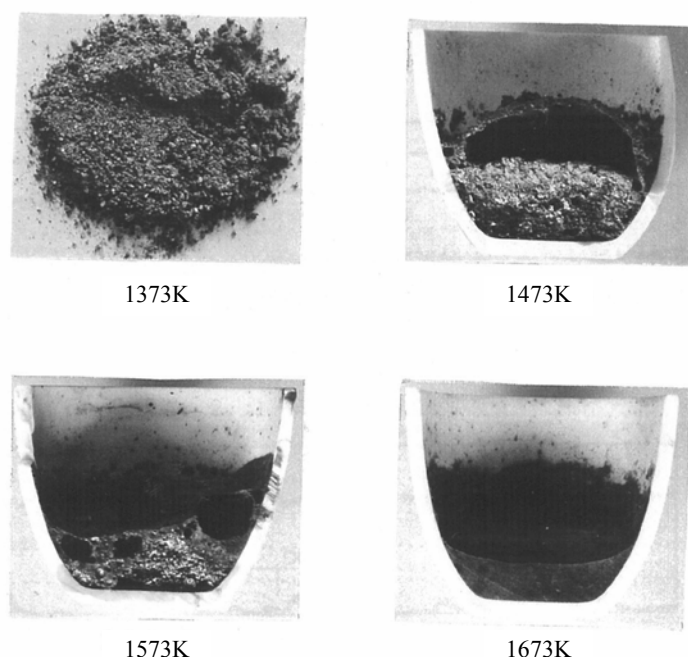


Fig.2 Experimental results of dissolution thermometry for bottom ash.

3. 廃棄物溶融炉のスラグ及び未溶解物の流動性測定

未溶解物を処理する操作温度の指針を得るため、廃棄物溶融炉のスラグ及び未溶解物の流動性を測定した。

3.1 試料

廃棄物溶融炉のスラグ排出口にて、スラグ及び未溶解物を採取し、これらを粉砕したものを試験試料とした。未溶解物は溶融スラグ上に半溶融状態で浮上しながら排出される。試料の分析値を Table 5 に示す。Fe は、 FeO_x ($x = 1 \sim 1.33$) の形態で存在する。

3.2 流動性測定方法

試料の融点、流動性を評価するには、精度のある回転振動法等による粘度測定方法¹²⁾を用いるが、本研究では下記に示す簡易的な方法で流動性を評価した。

試験装置の概略図を Fig.3 に示す。粉砕した試料を長さ 約 14cm、幅 約 1.5cm の磁性ボート（主材質：Mullite、化学組成： SiO_2 66%、 Al_2O_3 28%）に 8g 装入する。試料はボートの片側半分に入れ、5度の傾斜を持たせて横型管状炉にセットする。昇温保持中の試料の過剰な酸化を抑えるため、管状炉内は窒素雰囲気（ N_2 99.99%）とし、所定温度で 15 分間保持する。その後、冷却し、先端部の流下長さから流動性を評価する。保持温度は、スラグについては 1273 から 1373K まで、未溶解物は 1398 から 1498K までとし、両者とも 25K 毎に試験を行った。保持温度の下限は、目視で溶融開始が観察された温度とした。予備実験に基づくと、流下長さが 3.5cm 以上になると、試料が均一に溶融しているように見え、廃棄

Table 5 Chemical compositions of slag and non-dissolved compound.

	(mass%)										
	Cu	Pb	Zn	Fe	S	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Slag	0.3	0	1	20	0	15.4	32.1	13.0	3.2	2.8	2.3
Non-dissolved compound	6.0	1	2	29	3	9.9	18.4	10.4	2.9	1.8	0.7

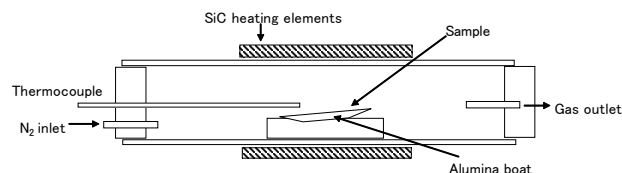


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus for fluidity.

物溶融炉内の融体としては流動性も良好と判断している。

3.3 流動性の測定結果

廃棄物溶融炉スラグの流動性の測定結果を Fig.4 に示す。1273K 付近から溶融を開始し、1348K で良好な流動性を示すことが判った。

未溶解物の測定結果を Fig.5 に示す。1398K 付近から溶融を開始し、1498K で良好な流動性を示すことが判った。

流動性の測定結果より、未溶解物について 1348K におけるスラグの流動性と同等の流動性を得るには、スラグより 125K 高い、1473K の温度が必要であることが明らかになった。

4. 熱力学データベースを利用した相平衡の解析

熱力学データベース(FactSage)を利用して、廃棄物溶融炉

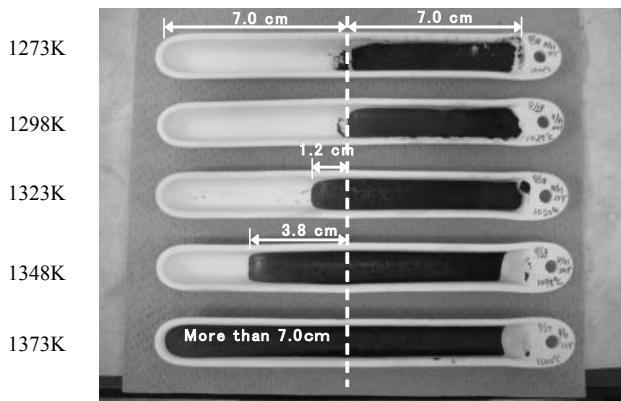


Fig.4 Experimental results of fluidity of slag.

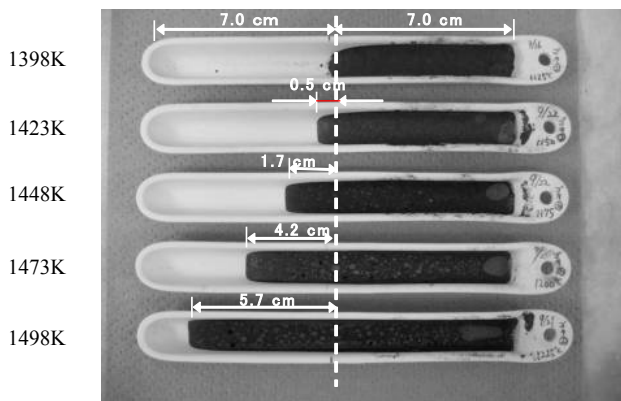


Fig.5 Experimental results of fluidity of non-dissolved compound.

スラグ並びに未溶解物についての相平衡を解析し、固相析出温度、析出物、完全液相領域の推定を行った。

4.1 熔融炉スラグ

熔融炉スラグについて、酸素分圧 $\log P_{O_2} = -7, -9, -11$ の3条件で熱力学データ(Fact Sage)を利用して相平衡を解析し、1773K から 1273K への冷却過程で固相析出温度、析出物の組成、単一液相温度域を求めた。データファイルは SiO_2 , CaO , Fe , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO などの酸化物成分からなる各種化合物相、液相の生成自由エネルギーならびに液相における活量の情報を含むデータファイルを作成し、計算に利用した。入力成分は、主要含有成分である SiO_2 , CaO , Fe , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO とし、気相総圧 1atm 下において、所定の酸素分圧で平衡状態の計算評価を行った。なお、FactSage を用いた計算では、上記の成分を含む種々の物質系に対して、本研究の温度・圧力の条件においては相平衡の実験結果を再現できることを確認している。

Fig.6 に熔融炉スラグについて、各主要化合物相に対する酸素分圧及び温度と固相の存在領域に関する比較を示す。図中で■は、固相の存在を示し、網掛けは液相領域を示す。酸素分圧 $\log P_{O_2} = -7$ では、1603K 以上では完全液相領域であるが、1603K で Fe_3O_4 相が析出を開始する。 $\log P_{O_2} = -9$ の条件に対しては、1499K 以上では完全液相領域であるが、1499K で Fe_3O_4 相が析出を開始する。計算結果において FeO が析出しない理由は、熔融炉スラグの SiO_2 濃度が 32%であり、 FeO は SiO_2 と反応して Fe_2SiO_4 を生成後、 CaO とさらに反応して融体となるためと考える。 $\log P_{O_2} = -11$ では、1581K 以上では Fe 相が存在するが、1581K で Fe 相が一旦、消失し、完全液相を示すが、1434K で $KA1Si_2O_6$ 相が、1406K で Fe_3O_4 相が析出する。

Fig.7 に熔融炉スラグについて酸素分圧及び温度に対する

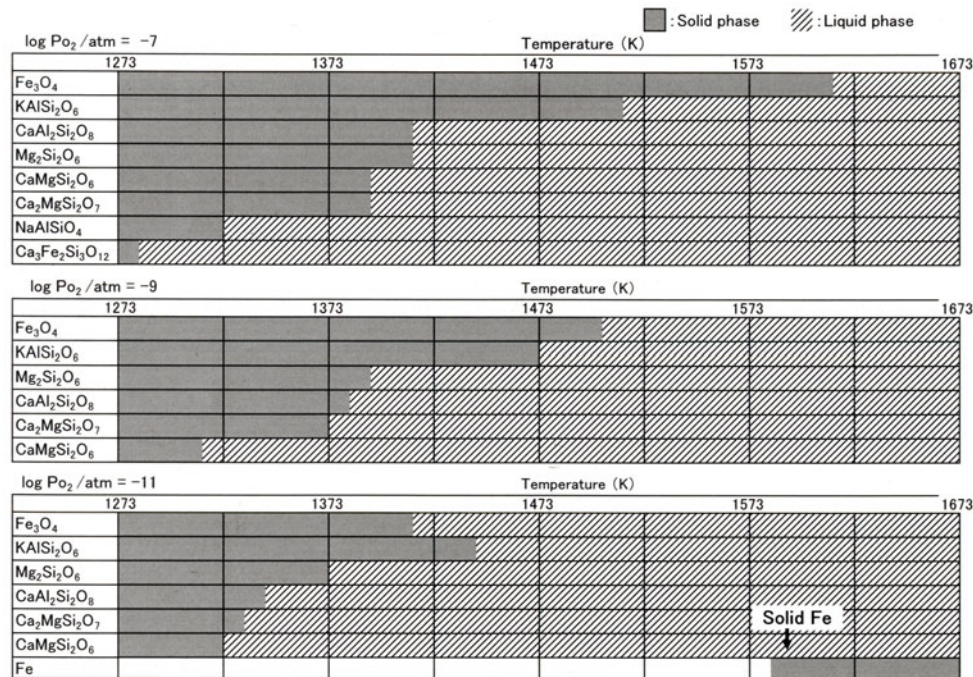


Fig.6 Effects of temperature and oxygen potential on precipitation of solid compounds in molten slag.

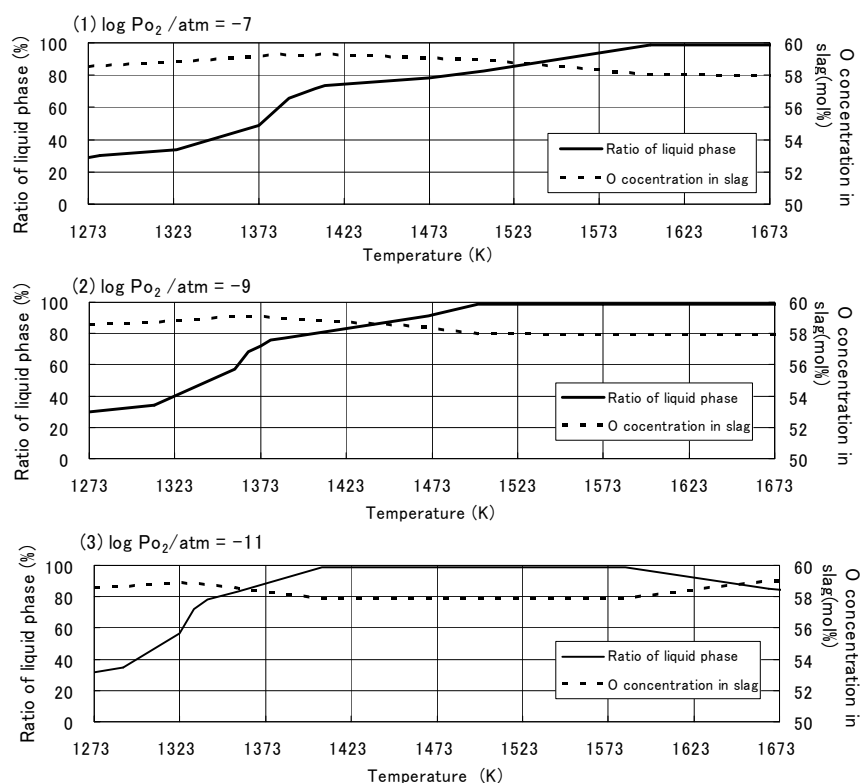


Fig.7 Effects of temperature and oxygen potential on ratio of liquid phase of slag in melting furnace.

液相の比率とスラグ中の酸素のモル濃度を示す。図中で実線が液相の比率を、点線が酸素のモル濃度を示す。酸素分圧 $\log P_{O_2} = -7$ では、1603K で Fe_3O_4 相が析出を開始し、液相の比率は、温度低下に伴い 1473K で 78%、1373K で 49% に低下する。スラグ中の酸素のモル濃度は、完全液相領域で 58%、固相が析出すると 59% 程度に上昇する。 $\log P_{O_2} = -9$ では、1499K で Fe_3O_4 相が析出を開始し、液相の比率は、温度低下に伴い 1473K で 92%、1373K で 72% に低下する。スラグ中の酸素のモル濃度は、 $\log P_{O_2} = -7$ と同じ傾向である。 $\log P_{O_2} = -11$ では、1581K 以上では Fe 相が存在し、1673K で液相の比率は 85% である。1434K から 1581K までの範囲は単一液相を示すが、1434K で $KA \ 1 \ Si_2O_6$ が、1406K で Fe_3O_4 相が析出し、1373K で液相の比率は 87% である。スラグ中の酸素のモル濃度は、Fe 相が存在する 1581K 以上では 59% 程度、1434K から 1581K までの範囲は 58%、1434K 以下では固相が析出し、59% 程度となる。

Fig.6, Fig.7 より酸素分圧と固相析出温度、液相の比率の関係から次のことが判った。

①酸素分圧が小さくなる(還元雰囲気が強くなる)ほど、 Fe_3O_4 相の析出温度が下がる。ちなみに、 $\log P_{O_2} = -7$ で 1603K から $\log P_{O_2} = -9$ で 1493K となる。液相の比率も同様の傾向で酸素分圧が低い方が低温側で大きな値となっている。よって、未溶解物の主成分が Fe_3O_4 となるような場合、すなわち、廃棄物中の Fe 含有量が多い場合には、炉内の酸素分圧を下げることで Fe_3O_4 相の析出を抑えることに有効であり、廃棄物

熔融炉の操業では、可燃物配合比を増すとか、炭材を添加することが提案される。

② $\log P_{O_2} = -11$ では、1583K より高温で固相として鉄が存在する。 $\log P_{O_2} = -7, -9$ では、固相の鉄は存在しない。固相の鉄は比重がスラグ 3.5 に対し 8 と大きいため、液相の下(炉底)に沈み固化すると考える。

③ 3 節の熔融炉スラグの流動性測定の結果によれば、1348K で良好な流動性を示した。同温度は $\log P_{O_2} = -11$ の条件で液相の比率が 80~90% となったところと対応している。このように、流動性測定の結果と熱力学データベースを利用した相平衡の解析の結果は良い一致を示しており、同相平衡解析は廃棄物熔融炉の操業指針を得る手段として流動性測定の代替として利用できることが判った。

4.2 未溶解物

未溶解物について、酸素分圧 $\log P_{O_2} = -9, -11$ の 2 条件で、熱力学データベースを利用した相平衡の解析を行い、1673K から 1273K への冷却過程で固相析出温度、析出物の組成、完全液相温度域を求めた。入力成分は、主要含有成分である SiO_2 , CaO , Fe , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO とし、所定の酸素分圧で平衡状態となるようにした。ここで、未溶解物組成としては、Table 6 に示す廃棄物熔融炉で得られた代表的な 3 つの組成とした。組成 A は、表記以外に Cu_2S を約 10% 含有している。また、各組成とも Fe は酸化物として存在する。

Fig.8 に各未溶解物について酸素分圧及び温度に対する液

Table 6 Chemical compositions of non-dissolved compounds.

	SiO ₂	CaO	T-Fe	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
Compound A	18.4	9.9	29.0	10.4	1.8	0.7	2.8
Compound B	27.9	15.4	21.0	15.9	3.2	0.8	2.7
Compound C	77.1	2.8	4.6	13.8	0.7	0.2	0.5

相の比率を示す。同図において、実線は $\log P_{O_2} = -9$ の場合の液相領域の比率を、破線は $\log P_{O_2} = -11$ の場合の液相領域の比率を示す。**Fig.8** より、次のことが判った。

①組成 A は、酸素分圧 $\log P_{O_2} = -9$ の条件では 1513K で Fe_3O_4 相が析出する。 $\log P_{O_2} = -11$ の条件では還元性が強いいため、1553K 以上では固相の鉄が存在し、1553K で固相が消失し、1513K で FeO 相が析出する。1513K から 1553K の 40K が完全液相領域である。組成 A は 3 節で流動性測定に供与した未溶解物の組成に相当する。流動性の測定結果では 1473K 以上で流動性がよくなった。 $\log P_{O_2} = -9$ の場合、液相の比率は 1473K で 66%, $\log P_{O_2} = -11$ の場合、液相の比率は 1473K で 85%である。**Fig.9** に、流動性測定結果と液相の比率の関係を示す。液相の比率が増すと流動性はよくなってお

り、相平衡解析を流動性測定の代替として利用できることが判った。

②組成 B は、酸素分圧 $\log P_{O_2} = -9$ の条件ではサンプル A 同様、1513K で Fe_3O_4 相が析出する。 $\log P_{O_2} = -11$ の条件では還元性が強く、1573K 以上では固相の鉄が存在し、1573K で固相が消失後、1483K で FeO の固体が析出する。1483K から 1573K の約 80K が完全液相領域である。完全液相領域の温度範囲が組成 A の 1519K から 1551K までに比較して、組成 B は 1484K から 1568K と広がっている。この主要因として塩基性酸化物の Na_2O が組成 A の 1.8%に対し、組成 B が 3.2%, CaO が 9.9%に対し 15.4%に増加していることが考えられる。

③組成 C は、ガラス系廃棄物を処理した際の未溶解物である。酸素分圧 $\log P_{O_2} = -9, -11$ の条件とも 1673K の高温から固相が析出し、酸素分圧の影響が認められない。これは、この温度域で酸化還元反応する Fe が 4.6%と低いためである。以上のことから、4.1 節で述べた熔融スラグの場合よりも未溶解物は完全液相温度域が狭く、液相線温度も高いことが判った。

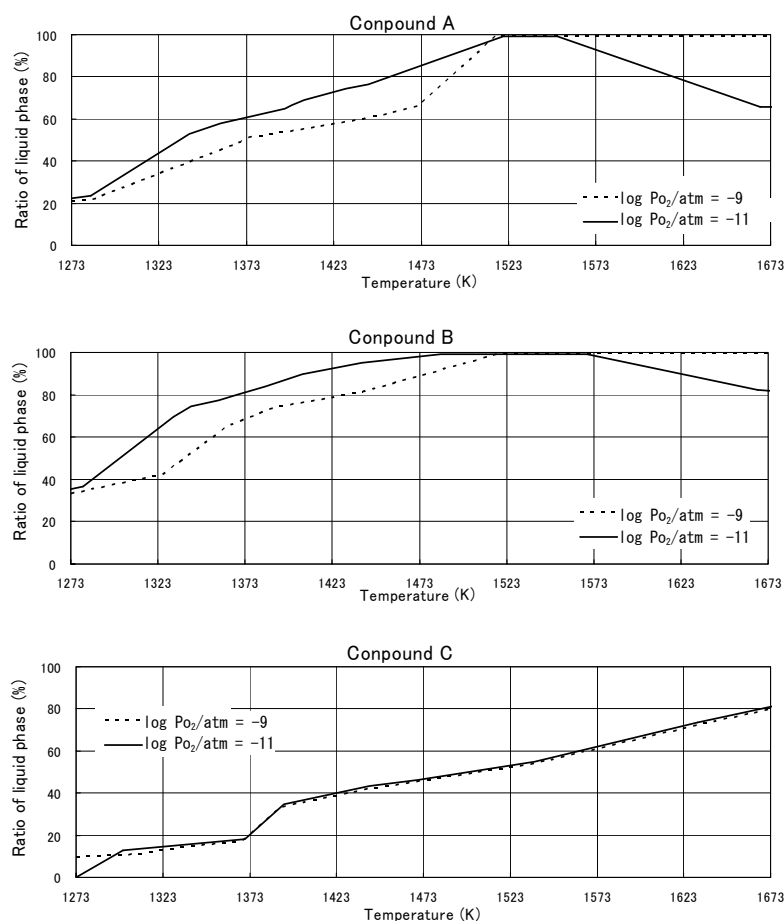


Fig.8 Effects of temperature and oxygen potential of ratio of liquid phase to non-dissolved compounds in melting furnace.

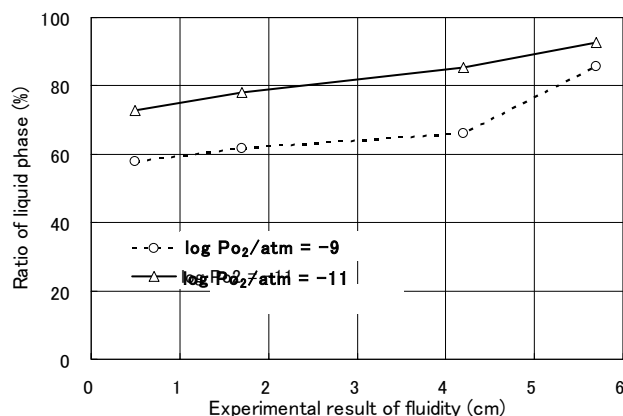


Fig. 9 Relation between experimental result of fluidity and ratio of liquid phase of slag.

5. 高融点廃棄物（石綿含有廃棄物）の溶解条件の推定

4. 節より、熱力学データベースを利用した相平衡解析より、配合組成から実操業の指針となるスラグの熔融温度範囲

を推定できることが判った。応用例として、石綿含有廃棄物（石綿を約 50%程度含有した廃棄物）とスラグを任意の比で混合した場合の組成から、同様に、熱力学データベースを利用した相平衡解析を行った。熔融炉スラグへ石綿含有廃棄物を 0,10,30,50%の割合で混合した場合の組成を Table 7 に示す。

Fig.10 に各混合条件について酸素分圧 $\log P_{O_2} = -9$ の時の温度に対する液相の比率を示す。

Table 7 Compositions of slag mixed with asbestos.

(mass%)							
Mixing ratio (%)	SiO ₂	CaO	T-Fe	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
0	32.1	15.4	20.0	13.0	2.8	1.2	3.2
10	32.9	13.9	18.2	12.1	2.5	1.1	6.3
30	34.5	11.0	14.6	10.3	2.0	0.8	12.7
50	36.1	8.1	11.0	8.5	1.4	0.6	19.1

Asbestos	52.0	1.0	2.3	3.8	0.1	0.0	36.5
----------	------	-----	-----	-----	-----	-----	------

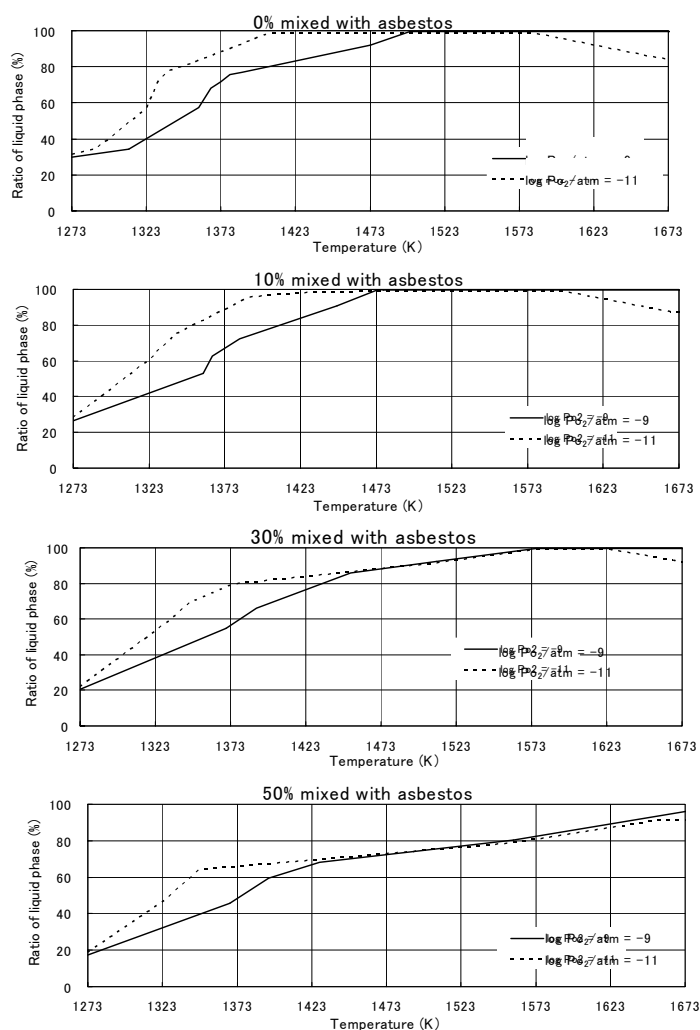


Fig.10 Effect of temperature and oxygen potential on ratio of liquid phase of slag mixed with asbestos.

石綿含有物の混合率が 0% の時, 1499K で Fe_3O_4 相が析出を開始し, 液相の比率は 1473K で 92%, 1373K で 72% となる。石綿含有物の混合率が 10% の時, 1475K で Fe_3O_4 相が析出を開始し, 液相の比率は 1473K で 100%, 1373K で 66% となる。石綿含有物の混合率が 30% の時, 1576K で Mg_2SiO_4 相が析出を開始し, 液相の比率は 1473K で 88%, 1373K で 56% となる。石綿含有物の混合率が 50% の時, 1699K で Mg_2SiO_4 相が析出を開始し, 液相の比率は 1573K で 82%, 1473K で 71%, 1373K で 47% となる。

以上より, 次のことがわかった。 $\log P_{\text{O}_2} = -9$ では, 石綿含有廃棄物を溶融炉スラグに対して 10%, 30%, 50% 添加することにより液相線温度が上がる。石綿含有廃棄物の添加率が 30% の時, 液相線温度が 1576K となる。廃棄物溶融炉のスラグ温度を 1573~1623K で操業管理している場合, スラグ量に対して石綿含有廃棄物の添加量が 30% 程度までならば安定操業が可能であると思われる。

6. 結 言

産業廃棄物を無害化し, 再資源化する社会的ニーズは高く, その中で溶融炉の役割が重要となってきた。産業廃棄物は, 種々雑多であり組成, 含有量がばらついており, 廃棄物溶融炉の操業条件 (温度, 酸素分圧) では溶融が困難なものもある。

本報では, 廃棄物溶融炉のスラグ及び未溶解物について流動性の測定と熱力学データベースを用いた相平衡解析を行った。

その結果, 廃棄物溶融炉のスラグの溶解に関して, 熱力学データベースを用いた相平衡解析を行うことにより, 石綿含有廃棄物のような実験が困難な廃棄物に対しても簡単な流動性試験と同等な評価が可能であることが明らかとなり, 良好な溶融スラグを得るための安定操業に関する有効な指針が得られることがわかった。

引 用 文 献

- 1) 日野順三, 宮林良次: 高温学会誌, **2** (1999) 59-65.
- 2) 宮林良次, 能登久次, 成迫誠: 資源と素材, **121** (2005) 149-153.
- 3) 青木威尚, 宮林良次, 柳田辰也: 資源と素材, **122** (2006) 235-238.
- 4) 日経エコロジー, (2006) 40-41.
- 5) 循環経済新聞, 2006.1.16.
- 6) 川崎靖人, 青木威尚, 宮本和明: 特開 2003-181412.
- 7) 鈴木宏明, 眞保良吉, 鈴木眞夫, 小川修: 資源・素材関係学協会 1996 年度秋季大会, (1996) 50-53.
- 8) 眞保良吉, 渡辺薫生, 鈴木眞夫, 星野重夫: 資源と素材, **121** (2005) 72-77.
- 9) 平林 儁: 資源と素材, **109** (1993) 949-952.
- 10) 川崎靖人, 青木威尚, 宮本和明: 資源・素材関係学協会 平成 13 年(2001)度秋季大会, (2001) 285-288.
- 11) 川崎靖人, 青木威尚: 特開 2001-201032.
- 12) 飯田孝道ら: “溶融スラグ・ガラスの粘性”, アグネ技術センター, (2003) 107-109.