



2000-033



雑固体廃棄物の溶融固化体製作条件に関する調査・検討
(受託研究)

2001年2月

福井 寿樹・中塙 信行・磯部 元康・大竹 敦志
涌井 拓治・平林 孝圓*・中島 幹雄

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-
gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

雑固体廃棄物の溶融固化体製作条件に関する調査・検討
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部
福井 寿樹・中塩 信行・磯部 元康・大竹 敦志・涌井 拓治・平林 孝園*・中島 幹雄

(2000年11月30日受理)

原子力施設において発生する雑固体廃棄物をプラズマ溶融処理し、安定した品質の溶融固化体を製作するためには、溶融スラグの流動性を向上させる必要がある。一般的に流動性を向上させるためには、より高い温度での溶融処理や溶融助剤等の添加が考えられるが、耐火物侵食の抑制や減容性の確保といった観点からは望ましい方法とはいえない。

そこで、本稿では廃棄物中に含まれ、溶融スラグに対して流動性向上が期待される化学成分に着目し、溶融スラグの流動性を向上させると共に、溶融条件の緩和を図るものとした。まず、状態図および粘性データの文献調査により、流動性向上成分である FeO による溶融スラグの融点降下および粘性低下が期待できることを確認した。次に、模擬雑固体廃棄物としてコンクリートや保温材等を溶融処理した場合への適用性について検討し、FeO を 20w%程度添加することで、流動性は向上するとの結果を得た。さらに、実際の雑固体廃棄物処理を想定し、融点降下および粘性低下の観点から溶融条件を検討した結果、 $(\text{CaO}+\text{FeO}) / (\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ で定義される塩基度を 0.5~0.6 以上に保つことにより、安定した溶融処理が可能であることが分かった。

本研究は、特別会計による科学技術庁からの受託研究（平成7~11年度）として実施したものである
東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2・4

* (財) 放射線利用振興協会

Study on Melting Conditions of Radioactive Miscellaneous Solid Waste
(Contract Research)

Toshiki FUKUI, Nobuyuki NAKASHIO, Motoyasu ISOBE, Atsushi OTAKE,
Takuji WAKUI, Takakuni HIRABAYASHI* and Mikio NAKASHIMA

Department of Decommissioning and Waste Management
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 30, 2000)

Improvement of fluidity of molten slag is one of the most important factors for plasma melting treatment of low level radioactive miscellaneous wastes generated from nuclear facilities. In general, it is considered that elevating molten slag temperature or addition of flux is of certain use in improvement of fluidity of molten slag. However, these ways are not necessarily suitable from the viewpoints of refractory erosion or reduction of waste volume.

In this report, we suggested that fluidity of molten slag could be improved by controlling chemical compositions of molten slag. On the Basis of the investigation using phase diagram and viscosity data, FeO was selected as a key component for improving fluidity: Viscosity and melting point of molten slag decreased with increasing relative concentration of FeO in molten slag. Accordingly, we concluded that it is important to adjust basicity* of molten slag for melting treatment of low-level radioactive miscellaneous solid wastes.

* Basicity = $(\text{CaO} + \text{FeO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ at wt%

Keywords : Plasma Melting, Miscellaneous Solid Waste, Molten Slag, Melting Point, Viscosity, Basicity, Melting Condition, FeO

This study was conducted during 1995 through 1999 under contract with Science and Technology Agency of Japan

*Radiation Application Development Association

目 次

1. 緒言.....	1
2. 流動性向上成分の効果.....	1
2.1 融点降低.....	2
2.1.1 3成分系 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系) スラグの融点.....	2
2.1.2 4成分系 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系) スラグの融点.....	2
2.1.3 融点降低のまとめ.....	3
2.2 粘性低下.....	3
2.2.1 3成分系 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系) スラグの粘性.....	3
2.2.2 4成分系 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系) スラグの粘性.....	4
2.2.3 粘性低下のまとめ.....	5
3. 雑固体廃棄物処理への適用.....	5
3.1 廃棄物条件の設定.....	5
3.2 廃棄物混合による融点調整.....	6
3.2.1 FeO 成分が共存しない場合.....	6
3.2.2 FeO 成分が共存する場合.....	6
3.3 廃棄物混合による粘性調整.....	7
3.3.1 FeO 成分が共存しない場合.....	7
3.3.2 FeO 成分が共存する場合.....	7
3.4 適用のまとめ.....	8
4. 溶融固化体製作の最適化.....	9
4.1 検討条件の設定.....	9
4.2 溶融条件の最適化.....	9
4.3 溶融固化体製作の運転管理.....	10
5. 結言.....	10
謝 辞.....	11
参考文献.....	11
付録 I 状態図 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系)	41
付録 II 粘性データ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系)	44
付録 III 塩基度(1)を用いて評価したデータ集.....	57

Contents

1. Introduction.....	1
2. Effect of Controlling Components for Fluidity of Molten Slag.....	1
2.1 Depression of Melting Point.....	2
2.1.1 Melting Point of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ Slag.....	2
2.1.2 Melting Point of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ Slag.....	2
2.1.3 Discussion of Melting Point.....	3
2.2 Decrease in Viscosity of Molten Slag.....	3
2.2.1 Viscosity of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ Slag.....	3
2.2.2 Viscosity of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ Slag.....	4
2.2.3 Discussion of Viscosity.....	5
3. Applicability to Melting Treatment of MSW*.....	5
3.1 Setting of Waste Condition.....	5
3.2 Controlling of Melting Point by Blend of MSW*.....	6
3.2.1 In the Case of Slag without FeO.....	6
3.2.2 In the Case of Slag with FeO.....	6
3.3 Controlling of Viscosity by Blend of MSW*.....	7
3.3.1 In the Case of Slag without FeO.....	7
3.3.2 In the Case of Slag with FeO.....	7
3.4 Discussions on Applicability.....	8
4. Optimization of Melting Treatment	9
4.1 Prerequisite Conditions.....	9
4.2 Optimization of melting conditions.....	9
4.3 Operation Management in Melting Treatment.....	10
5. Conclusion.....	10
Acknowledgments.....	11
References.....	11
Appendix I Phase Diagrams ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ System, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ System).....	41
Appendix II Viscosity Data of Molten Slag ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ System, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ System).....	44
Appendix III Data Assembly Evaluated by Using Basicity (1).....	57

*MSW : Miscellaneous Solid Waste

Table and Figures

Table 1 Chemical compositions of miscellaneous solid wastes.....	12
Table 2 Concentration of main components and basicity of molten slag (estimated)	13
Table 3 Relationship between melting point and concentration of FeO (estimated)	14
Table 4 Favorable molten slag compositions at 1200°C (viscosity < 100 poise).....	14
Fig.1 Meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ slag at 1300 and 1400 °C.....	15
Fig.2 Meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-10wt%FeO-SiO}_2$ slag at 1300 and 1400 °C.....	15
Fig.3 Meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-20wt%FeO-SiO}_2$ slag at 1200, 1300 and 1400 °C.....	16
Fig.4 Meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-30wt%FeO-SiO}_2$ slag at 1200, 1300 and 1400 °C.....	16
Fig.5 Relationship between concentration of FeO and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1400 °C.....	17
Fig.6 Relationship between concentration of FeO and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1300 °C.....	17
Fig.7 Relationship between concentration of FeO and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1200 °C.....	18
Fig.8 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1500°C....	19
Fig.9 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1400°C....	19
Fig.10 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1300°C..	20
Fig.11 Iso-viscosity curve at 1550°C.....	20
Fig.12 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%).....	21
Fig.13 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 20wt%).....	21
Fig.14 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 5wt%).....	22
Fig.15 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 5wt%).....	22
Fig.16 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 10wt%).....	23
Fig.17 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 10wt%).....	23
Fig.18 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 15wt%).....	24
Fig.19 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 15wt%).....	24

Fig.20 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al ₂ O ₃ 20wt%).....	25
Fig.21 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al ₂ O ₃ 20wt%).....	25
Fig.22 Relationship between concentration of Al ₂ O ₃ and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 10wt%).....	26
Fig.23 Relationship between concentration of Al ₂ O ₃ and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 10wt%).....	26
Fig.24 Relationship between concentration of Al ₂ O ₃ and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 20wt%).....	27
Fig.25 Relationship between concentration of Al ₂ O ₃ and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 20wt%).....	27
Fig.26 Relationship between concentration of Al ₂ O ₃ and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 30wt%).....	28
Fig.27 Relationship between concentration of Al ₂ O ₃ and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 30wt%).....	28
Fig.28 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al ₂ O ₃ 5wt%, FeO 10wt%)	29
Fig.29 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al ₂ O ₃ 5wt%, FeO 20wt%)	29
Fig.30 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al ₂ O ₃ 5wt%, FeO 30wt%)	30
Fig.31 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al ₂ O ₃ 10wt%, FeO 10wt%)	30
Fig.32 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al ₂ O ₃ 10wt%, FeO 20wt%)	31
Fig.33 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al ₂ O ₃ 10wt%, FeO 30wt%)	31
Fig.34 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al ₂ O ₃ -CaO-SiO ₂ slag at 1300 and 1400°C.....	32
Fig.35 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al ₂ O ₃ -CaO-10wt%FeO-SiO ₂ slag at 1300 and 1400°C.....	32
Fig.36 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al ₂ O ₃ -CaO-20wt%FeO-SiO ₂ slag at 1200,1300 and 1400°C.....	33
Fig.37 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al ₂ O ₃ -CaO-30wt%FeO-SiO ₂ slag at 1200,1300 and 1400°C.....	33

Fig.38 Comparison between iso-viscosity curve and molten slag of miscellaneous solid wastes at 1550°C.....	34
Fig.39 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1500°C.....	34
Fig.40 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 10wt%).....	35
Fig.41 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 10wt%).....	35
Fig.42 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 20wt%).....	36
Fig.43 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 20wt%).....	36
Fig.44 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 30wt%).....	37
Fig.45 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 30wt%).....	37
Fig.46 Basicity range of low viscosity at 1200°C (FeO 10wt%).....	38
Fig.47 Basicity range of low viscosity at 1200°C (FeO 20wt%).....	38
Fig.48 Comparison between meltable area at 1400°C and low viscosity area (FeO 10wt%)...39	39
Fig.49 Comparison between meltable area at 1400°C and low viscosity area (FeO 20wt%)...39	39
Fig.50 Control items on melting treatment.....	40

This is a blank page.

1. 緒言

原子力施設において発生する雑固体廃棄物の減容・安定化処理技術として、短時間で高温加熱が可能なプラズマ溶融処理は有望であると考えられる。

日本原子力研究所（以下：原研）では、コンクリート等の非金属から構成される模擬廃棄物をプラズマ溶融処理し、様々なスラグ組成の溶融固化体を製作・評価することにより、物理的・化学的安定性に優れた溶融固化体の製作条件を把握すると共に、溶融条件を緩和しつつ、溶融固化体の品質を確保する方策の検討を進めている。

安定した溶融固化体の製作に大きく影響を及ぼすと考えられる因子として、溶融スラグの流動性が挙げられる。溶融スラグの流動性向上は、熱対流による溶湯の攪拌を促進し、溶融固化体の均一性を向上させる。また、溶融スラグ出湯時の気泡巻き込み、冷却収縮等により発生する引け巣、空隙等も低減されると考えられる。

一般に、溶融スラグの流動性を向上させるためには、溶融温度を上げる等の方法により、粘性を低下させることが必要である。しかし、溶融スラグによる耐火物の侵食を考えた場合、できるだけ低い温度で溶融し、出湯することが望ましい。溶融温度を上げずに溶融スラグの流動性を向上させる方策としては、溶融助剤の添加による塩基度調整が考えられるが、減容性の観点からは、適当な方法とはいえない。そこで、廃棄物に含まれる化学成分の内、溶融スラグに対して粘性低下の効果が期待される成分に着目し、溶融条件を緩和しつつ、溶融スラグの流動性向上を図ることを検討した。

雑固体廃棄物を溶融した際に想定される様々な溶融スラグ組成に対応した流動性に関するデータは少なく、流動性向上の検討を行うためには系統的なデータ整理が必要である。本稿では溶融スラグの流動性を向上すると考えられる成分（以下：流動性向上成分）に着目し、溶融スラグを構成する各成分の物性データを文献より調べ、融点降下および粘性低下の観点から溶融スラグ物性を系統的に整理した。さらに、これらデータに基づき、実際の雑固体廃棄物処理への適用性を検討し、溶融固化体製作条件の最適化を行った。

2. 流動性向上成分の効果

雑固体廃棄物を溶融した際の溶融スラグは、ネットワーク構造を形成するガラス網目形成体（network former, 以下：NWF）とネットワーク構造を切断する網目修飾体（network modifier, 以下：NWM）から構成される。NWF としては SiO_2 、 P_2O_5 、 B_2O_3 等の酸性酸化物、NWM には Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 、 FeO 等の塩基性酸化物（特にアルカリ金属、アルカリ土類金属）が挙げられる。

一般に、NWM 濃度が高くなるとネットワーク構造が（例えば、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 結合）が切断され、溶融スラグの融点や粘性が低下し、溶融時の作業性が向上することが知られている。例えば、ケイ酸塩ガラスの場合、 SiO_2 濃度が高くなると高粘度化とともに融点が高くなり、 CaO が多くなると粘度は小さくなるが結晶化しやすくなる^{[1][2]}。また、鉄鋼分野においては、 FeO 等を主成分とする溶融スラグはシリケイト系溶融スラグに比べて遙かに粘性が低いことが知られている^[3]。

そこで、本稿では NWM を流動性向上成分と位置付け、雑固体廃棄物をドラム缶や金属廃棄物と一緒に処理した際に共存すると考えられる FeO に着目し、FeO 共存による効果を融点降下および粘性低下の観点から検討した。

2.1 融点降下

溶融固化体組成の均一性を向上させるためには、溶融スラグの融点よりさらに高い温度域で溶融することが望ましいと考えられる。しかし、耐火物への影響を考えると溶融温度はできるだけ低い方が良く、溶融炉の性能によって最高温度が制限される。このため、溶融スラグの融点を降下させることは溶融条件の緩和の観点からは重要である。そこで、流動性向上成分による融点降下の影響を検討した。

雑固体廃棄物を溶融した場合、溶融スラグの主要成分は Al_2O_3 , CaO および SiO_2 であり、金属廃棄物やドラム缶を一緒に処理した際にはこれら成分に加えて、FeO が共存するものと考えられる。そこで、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系^[4]（以下：3成分系）および $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系^[5]（以下：4成分系）の状態図を用い、任意の融点以下となる各成分の濃度領域（以下：融点領域）を整理した。付録 I に各系の状態図を示す。

溶融スラグ中の各成分と融点領域の関係を評価するため、横軸に両性酸化物である Al_2O_3 濃度、縦軸に塩基度を取った関係図（以下： $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-塩基度 関係図}$ ）を作成し、FeO 濃度 0, 10, 20, 30wt%において、それぞれ融点が 1200, 1300 および 1400°C 以下となる融点領域を示した。一般に塩基度には(1)式で示される塩基度(1)を用いることが多い。しかし、本稿では FeO 濃度をパラメータとして融点降下および粘性低下の効果を評価することから、塩基性酸化物である FeO と両性酸化物である Al_2O_3 も考慮し、(2)式で示される塩基度(2)を用いて評価した。なお、塩基度(1)を用いて簡易に評価もできるように塩基度(1)を用いた検討結果を付録 III に添付した。

$$\text{塩基度(1)} = \text{CaO} / \text{SiO}_2 \quad \text{at wt\%} \quad (1)$$

$$\text{塩基度(2)} = (\text{CaO} + \text{FeO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \quad \text{at wt\%} \quad (2)$$

2.1.1 3成分系 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系) スラグの融点^[4]

金属を含まない雑固体廃棄物の溶融を想定して、3成分系について検討した。3成分系の融点領域を $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-塩基度 関係図}$ 上にプロットした結果を Fig.1 に示す。

融点領域は塩基度と Al_2O_3 濃度に大きく依存しており、1400°C の融点領域は Al_2O_3 濃度 10 ~ 20wt% の範囲において、塩基度の上限値と下限値の幅（以下：塩基度範囲）が最も広くなった。さらに、1300°C の融点領域もほぼこの濃度範囲に含まれており、3成分系では Al_2O_3 濃度 10 ~ 20wt% の範囲が融点調整しやすい条件であると考えられる。

2.1.2 4成分系 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系) スラグの融点^[5]

雑固体廃棄物をドラム缶もしくは金属廃棄物と一緒に処理することを想定して、4成分系について検討した。FeO 共存による融点降下の効果を評価するため、FeO 濃度を 10, 20, 30wt%一定として、各融点領域を $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-塩基度 関係図}$ 上にプロットした結果を Fig.2~4 に示す。FeO 0wt% の場合（3成分系）と比べると FeO 10wt% 以上では 1400°C の融点領域に対する 1300°C の融点領域が相対的に大きくなることが分かった。さらに、FeO 20wt% 以上では 1200°C の融点領域が形成されることが分かった。そこで FeO 共存による融点領域の拡大効果を評価する

ため、1200, 1300, 1400°Cの融点領域について、各 FeO 濃度における融点領域を Al₂O₃・塩基度関係図上で比較した (Fig.5~7)。図から明らかなように FeO 濃度の増加に伴い、融点領域が拡大する傾向が見られた。特に、1300°Cの融点領域については、FeO 濃度增加による融点領域の拡大が顕著であった。また、1200°Cの融点領域は FeO 20wt%と 30wt%で見られ、FeO 濃度が高い方がより低い融点に調整できる可能性があることが分かった。

何れの FeO 濃度においても、Al₂O₃ 濃度の増加に伴い融点領域が低塩基度側にシフトする傾向が見られ、融点領域の塩基度上限値と下限値が直線的に近似できることが分かった。

さらに、1400°Cにおいて、塩基度範囲が 0.5 以上となる Al₂O₃ 濃度範囲を考えた場合、3 成分系では上述したとおり、10~20wt%程度であったのに対し、FeO 10wt%で 7~22wt%程度、FeO 20wt%で 0~27wt%程度、FeO 30wt%で 0~25wt%となり、FeO 濃度が高くなると低 Al₂O₃ 濃度でも任意の融点領域に調整しやすいことが分かる。

2.1.3 融点降下のまとめ

流動性向上成分である FeO によるスラグの融点降下の効果を状態図により検討し、以下の結果を得た。

- ・ 融点領域は塩基度と Al₂O₃ 濃度に大きく依存しており、塩基度範囲を広く取るためには最適な Al₂O₃ 濃度範囲が存在する。例えば、3 成分系においては Al₂O₃ 濃度 10~20wt% 程度が低融点に調整しやすい領域である。
- ・ FeO が溶融スラグ中に存在すれば、FeO 濃度の増加とともに、融点領域は広がり、Al₂O₃ 濃度が高くなると融点領域は低塩基度側に広がる。
- ・ FeO が溶融スラグ中に存在し、FeO 濃度が高くなると低 Al₂O₃ 濃度でも融点領域への調整が可能である。

2.2 粘性低下

溶融固化体を製作する上で、溶融スラグの流動性に直接影響を及ぼす物性として、軟化点と粘性が挙げられる。そこで、粘性に関するデータを調査し、流動性向上成分の粘性低下への影響を検討した。上述したとおり、雑固体廃棄物を金属廃棄物やドラム缶と一緒に溶融処理した際の溶融スラグの主要成分は、Al₂O₃, CaO, SiO₂ および FeO であると考えられる。そこで、3 成分系^{[6][7][8]}および 4 成分系^{[9][10]}に関する粘性データを調査した。付録Ⅱに各系の粘性データを示す。

これらの粘性データを用いて、塩基度、FeO 濃度、Al₂O₃ 濃度、溶融温度が溶融スラグの粘性に及ぼす影響を評価した。ここで、塩基度は融点降下の検討同様に塩基度(2)を用いて評価した。なお、塩基度(1)を用いて評価した検討結果は付録Ⅲに添付した。

2.2.1 3 成分系 (Al₂O₃-CaO-SiO₂ 系) スラグの粘性^{[6], [7], [8]}

金属を含まない雑固体廃棄物の溶融を想定して、3 成分系について検討した。

(1) Al₂O₃ 濃度の影響

一般に塩基度が高くなると粘性が低下することが知られている。しかし、両性酸化物である Al₂O₃ 濃度の粘性への影響は明らかでないことから、Al₂O₃ 濃度の影響を調べた。溶融スラグ温度が 1300, 1400 および 1500°Cの場合について、Al₂O₃ 濃度を一定とした時の塩基度

と粘度の関係を Fig.8~10 に示す。何れの温度においても高塩基度では粘性が低く、塩基度が低くなるに伴い、指数関数的に粘性が増加する傾向が見られた。しかし、 Al_2O_3 濃度の粘性への影響はあまり見られない。

また、1550°Cの場合について、横軸に Al_2O_3 濃度、縦軸に塩基度を取った等粘度曲線を Fig.11 に示す。図から明らかなように、塩基度 0.8 程度を境に Al_2O_3 濃度の増加に伴い高塩基度側では粘性が増加し、低塩基度側では粘性が低下している。これらは、 Al_2O_3 が両性酸化物であることに起因していると考えられ、低塩基度では塩基性酸化物として働き、高塩基度では酸性酸化物として働くものと考えられる。しかし、 Al_2O_3 濃度の粘性への影響は、塩基度の影響に比べてかなり小さいといえる。

(2) 溶融スラグ温度の影響

Al_2O_3 濃度を 10 および 20wt%一定として、溶融スラグ温度が 1300, 1400 および 1500°C の場合の塩基度と粘性の関係を Fig.12, 13 に示す。図から明らかなように、1500°Cから 1300°C に溶湯スラグ温度が冷却されることにより、塩基度に関係なく粘性は 1 枠程度高くなる傾向が確認された。しかし、溶融スラグの粘性変化は塩基度に大きく依存しており、出湯を考えた場合、溶融スラグ温度よりも溶融スラグ組成の方が重要な因子であると考えられる。

2.2.2 4 成分系 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系) スラグの粘性^{[9], [10]}

雑固体廃棄物をドラム缶もしくは金属廃棄物と一括処理することを想定して、4 成分系について検討した。

(1) FeO 濃度の影響

Al_2O_3 濃度、溶融スラグ温度を一定とし、FeO 濃度を 10, 20 および 30wt%とした時の塩基度と粘性の関係を Fig.14~21 に示す。なお、 Al_2O_3 濃度は実際の模擬廃棄物組成を参考に 5, 10, 15, 20wt%、溶融スラグ温度は 1200, 1300°C とした。

溶融スラグの粘性は塩基度の増加に伴い低下し、極小値を示した後、塩基度の増加に伴い高くなる傾向が確認された。この極小値は FeO 濃度の増加に伴い高塩基度側にシフトすることが分かった。しかし、塩基度(1)を用いた場合は FeO 濃度にかかわらず 1 前後であることを確認している。(詳細は別添Ⅲ参照) また、Fig.16, 18, 20 に示すように 3 成分系に比較して、FeO が共存することにより、大幅な粘性低下が期待でき、FeO 濃度が高くなるにつれ、その効果は大きくなる。さらに、FeO 濃度、CaO 濃度および Al_2O_3 濃度等に拘わらず、塩基度 0.5 以上であれば 1300°C で 100poise 以下、塩基度 0.6 以上であれば 1200°C で 100poise 以下となる傾向が確認された。つまり、溶融スラグの粘性は酸性および両性酸化物に対する塩基性酸化物の比として評価することが可能であると考える。

(2) Al_2O_3 濃度の影響

FeO 濃度、溶融スラグ温度を一定とし、 Al_2O_3 濃度をパラメータとした塩基度と粘性の関係を Fig.22~27 に示す。なお、FeO 濃度は 10, 20, 30wt%、溶融スラグ温度は 1200, 1300°C とした。FeO 20, 30wt%の条件では Al_2O_3 濃度の増加に伴い、粘性が高くなる傾向にあるが、

FeO 10wt%の条件では Al₂O₃ 10,15wt%において、粘性が低くなる傾向が見られた。これも Al₂O₃ が両性酸化物であることに起因していると考えられ、FeO 濃度が高い場合には塩基度が高くなるため、酸性酸化物として働き、FeO 濃度が低い場合には異なった働きをしているものと考えられる。

また、Al₂O₃ 濃度の減少に伴い、粘性の極小値は高塩基度側にシフトすることが分かった。しかし、3成分系同様に Al₂O₃ 濃度の粘性への影響は、塩基度の影響に比べてかなり小さいといえる。

(3) 溶融スラグ温度の影響

Al₂O₃濃度、FeO 濃度を一定として、溶融スラグ温度をパラメータとした塩基度と粘性の関係を Fig.28~33 に示す。なお、Al₂O₃濃度は実際の模擬廃棄物組成を参考に 5,10wt%、FeO 濃度は 10,20 および 30wt%とした。1300℃から 1200℃に溶湯温度が冷却されると粘性は若干高くなるが、出湯に影響を及ぼす程の粘性増加にはならないと考えられる。

2.2.3 粘性低下のまとめ

流動性向上成分である FeO によるスラグの粘性低下の効果を粘性データにより検討し、以下の結果を得た。

- ・3成分系溶融スラグ (Al₂O₃-CaO-SiO₂系) の粘性は低塩基度で高く、塩基度が高くなるにつれて低下する。また、Al₂O₃ 濃度の粘性への影響は塩基度に比べて小さい。さらに、1500℃から 1300℃に溶融スラグが冷却されることにより、塩基度に関係なく粘性は 1 枠程度高くなる。
- ・4成分系溶融スラグ (Al₂O₃-CaO-FeO-SiO₂系) の粘性は塩基度の増加に伴い低下し、極小値を示した後、塩基度の増加に伴い高くなる。FeO 濃度の増加に伴いこの極小値は高塩基度側にシフトし、粘性も低下する。また、Al₂O₃濃度の粘性への影響は塩基度に比べて小さい。さらに、1300℃から 1200℃に溶融スラグが冷却されると、粘性は若干高くなるが出湯に影響を及ぼすほどの粘性増加にはならない。
- ・FeO 濃度および Al₂O₃濃度等に拘わらず、塩基度 0.5 以上であれば 1300℃で 100poise 以下、塩基度 0.6 以上であれば 1200℃で 100poise 以下となる傾向がある。

3. 雜固体廃棄物処理への適用

雑固体廃棄物処理における流動性向上成分の効果を評価するため、代表的な雑固体廃棄物の化学組成から溶融スラグの化学組成を推定し、前章の検討結果に基づいて、比較することにより、雑固体廃棄物処理における FeO の効果を検討した。さらに、廃棄物の組み合わせによる低融点領域や低粘性領域への調整の可能性について評価した。

3.1 廃棄物条件の設定

原子力施設において発生する代表的な廃棄物として Table 1 の廃棄物を選定し、検討対象とした。表に記載した焼却灰を除く各廃棄物の化学組成は「JIS R5202 ポルトランドセメントの化学分析方法」に準じて分析した結果である。金属溶融スラグと金属溶融耐火物は金属溶融

処理を行った際に発生するものを想定し、実際に模擬金属廃棄物を溶融した際に発生したものを分析した。また、焼却灰については発電所において発生した焼却灰の化学組成^[11]を参考に設定した。なお、塩基度(2)は廃棄物中の Fe_2O_3 を FeO に換算し、算出した。

さらに、Table1 の廃棄物を金属廃棄物やドラム缶と一括溶融した場合を想定し、溶融スラグ中の FeO 濃度を 0~30wt% の範囲で変化させた場合の溶融スラグ組成を算出した。溶融スラグの Al_2O_3 濃度、 FeO 濃度および塩基度の算定値を Table2 に示す。ここで、溶融スラグ中の FeO 濃度が高く、設定した FeO 濃度に調整できない場合は『-』と表示した。なお、溶融スラグ組成の算定において、水分、ガス等の明らかに揮発すると考えられる成分は化学成分から除いて算定した。また、ドラム缶や金属廃棄物中の Fe 成分は完全に酸化し、 FeO として溶融スラグ中に存在するものとし、コンクリート等の無機廃棄物中に含まれる Fe_2O_3 も 1600°C 以上では FeO として安定であるとの報告^[12]があることから、同様に FeO として存在するものとした。

3.2 廃棄物混合による融点調整

FeO が共存する場合と共存しない場合において、廃棄物の組み合わせにより目標とする融点以下に調整可能であるかを検討した。なお、塩基度は FeO 濃度や Al_2O_3 濃度の影響をより系統的に評価可能である塩基度(2)を用いた。

3.2.1 FeO 成分が共存しない場合

各廃棄物をドラム缶により供給せずに直接廃棄物を投入し、 FeO 成分が共存しない場合を想定し、Table2 に示される各溶融スラグ (FeO 0wt%) を Fig.1 の Al_2O_3 濃度-塩基度 関係図場にプロットした (Fig.34)。図中の各模擬廃棄物の点はそれらを溶融した際の Al_2O_3 濃度と塩基度を示し、コンクリートと結ばれる破線はコンクリートと各模擬廃棄物を混合した場合の Al_2O_3 濃度と塩基度の変化を示す。

FeO が共存しない場合 (Fig.34)、モルタルが 1400°C 付近の融点領域にあるが、それ以外の廃棄物は 1400°C の融点領域になく、かなり高融点であると推測できる。なお、ガラスについては融点領域からかなり離れているが、実際は Na_2O 等のアルカリ金属の効果により、かなりの融点降下が期待されることから、ガラス等の CaO および FeO 以外の NWM 割合が高い廃棄物については別途考察が必要であると考えられる。以上より、 FeO 成分が共存しない条件では Table1 の廃棄物を組み合わせて 1400°C の融点領域に調整することは困難であり、融点領域への調整には溶融助剤等の添加が必要であると考えられる。

3.2.2 FeO 成分が共存する場合

ドラム缶による廃棄物投入や金属との一括処理により、溶融スラグ中に FeO 濃度が共存する場合を想定し、Table2 に示される各溶融スラグ (FeO 10, 20 及び 30wt%) を Fig.2, 3, 4 の Al_2O_3 濃度-塩基度 関係図上にプロットした (Fig.35, 36, 37)。

(1) FeO 10wt%

FeO が 10wt% 共存する場合 (Fig.35) モルタルおよび金属溶融スラグが 1400°C の融点領域にそれぞれ入っており、コンクリートも他の廃棄物と組み合わせることにより、1400°C の融点領域への調整が可能であると考えられる。また、 Al_2O_3 濃度が高く、 Al_2O_3 供

給源になると考えられる金属溶融スラグおよび金属溶融耐火物を適度に添加することにより、低塩基度でも融点領域に調整可能となる。つまり、FeO が 10wt%程度共存すれば、廃棄物の組み合わせにより、1400°Cの融点領域に調整可能であると考えられる。しかし、1300°Cの融点領域への調整は溶融助剤等の添加が必要であると考えられる。

(2) FeO 20wt%

FeO が 20wt%共存する場合(Fig.36)、焼却灰が 1200°C、保温材と金属溶融スラグが 1300°C、モルタルが 1400°Cの融点領域にそれぞれ入っており、コンクリートも保温材や焼却灰と一緒に処理することにより、1300°C以下の融点領域に調整することが可能であると考えられる。つまり、FeO が 20wt%程度共存すれば、廃棄物の組み合わせにより、1200~1300°Cの融点領域に調整可能であると考えられる。

(3) FeO 30wt%

FeO が 30wt%共存する場合 (Fig.37)、焼却灰と金属溶融スラグが 1200°C、保温材、モルタルおよびコンクリートが 1300°C以下の融点領域には入っており、各種廃棄物を組み合わせて一括処理することにより 1200°Cの融点領域への調整が可能であると考えられる。

3. 3 廃棄物混合による粘性調整

FeO が共存する場合と共存しない場合において、廃棄物の組み合わせにより目標とする粘性以下に調整可能であるかを検討した。なお、塩基度は溶融スラグの粘性評価において、より妥当な評価が可能である塩基度(2)を用いた。

3. 3. 1 FeO 成分が共存しない場合

各廃棄物をドラム缶により供給せずに直接廃棄物を投入し、FeO 成分が共存しない場合を想定し、Table 2 に示される溶融スラグの Al₂O₃ 濃度および塩基度を 1550°Cの等粘度曲線にプロットした結果を Fig.38 に示す。保温材は 3poise 程度とかなり低い粘性の溶融スラグとなるのに対し、コンクリートはかなり高い粘性の溶融スラグとなることが推察された。

さらに詳細な粘性を評価するため、Table2 のコンクリート並びにモルタルの溶融スラグ組成を、塩基度と粘性の関係図にプロットした結果を Fig.39 に示す。なお、各溶融スラグの粘性は Al₂O₃ 濃度が 5~10wt%の範囲にあることから、Al₂O₃ 濃度 5,10wt%の粘性曲線を参考に、推測される粘度範囲を破線にて示した。また、溶融スラグ温度は 1500°Cとした。

FeO が共存しない場合(Fig.39)、1500°Cにおいて、モルタルは 20poise 程度の粘性であると推察される。しかし、コンクリートは 1000poise 以上となり 1500°Cでの出湯は困難であると考えられる。

3. 3. 2 FeO 成分が共存する場合

ドラム缶による廃棄物投入や金属との一括処理により、溶融スラグ中の FeO 濃度が共存する場合を想定し、コンクリート、モルタルおよび焼却灰 (FeO 20,30wt%のみ) の溶融スラグ組成を、塩基度と粘性の関係図にプロットした結果を Fig.40~45 に示す。なお、各溶融スラグの粘性は Al₂O₃ 濃度が 5~10wt%の範囲にあることから、Al₂O₃ 濃度 5,10wt%の粘性曲線を参考に、推測される粘度範囲を一点鎖線にて示した。また、溶融スラグ温度は

1200,1300°Cとした。

(1) FeO 10wt%

FeO が 10wt%共存する場合 (Fig.40,41)、1300°Cではどちらの溶融スラグも 100poise 以下で十分低い粘性であり、出湯可能であると推察される。しかし、コンクリートの溶融スラグに関しては 1200°Cまで冷却されると粘性がかなり高くなることから、出湯時の冷却に伴う粘性増加が懸念される。

(2) FeO 20wt%

FeO が 20wt%共存する場合 (Fig.42,43)、1200 および 1300°Cではどの溶融スラグも 100poise 程度以下であり、十分出湯可能であると推察される。冷却に伴う粘度増加が少ないことから、出湯の観点からは FeO を 20wt%添加することが望ましいと考えられる。

(3) FeO 30wt%

FeO が 30wt%共存する場合 (Fig.44,45)、1300°Cおよび 1200°Cで 10poise 程度以下と推測され、どの溶融スラグも低い粘性であり、十分出湯可能であると推察される。FeO 20wt% 同様に冷却に伴う粘度増加が少ないとから、出湯の観点からは FeO を 20wt%以上添加することが望ましいと考えられる。しかし、FeO 30wt%以上については粘性データがないため、試験等による確認が必要であると考える。

3.4 適用のまとめ

Table1 に示した廃棄物の溶融処理において、ドラム缶や金属廃棄物との一括処理や廃棄物の組み合わせによって低融点領域や低粘性領域に調整可能であるか評価した。

(1) 融点降下

Table3 に示すとおり、FeO が共存することにより各廃棄物を溶融した際の溶融スラグの融点は降下する。また、ドラム缶や金属廃棄物として FeO を 20~30wt%添加した場合、廃棄物を上手く組み合わせることにより、コンクリート等の高融点廃棄物も 1300°Cの融点領域に調整可能である。

(2) 粘性低下

保温材の溶融スラグは 1500°Cで 3poise 程度と推測され、単独溶融処理可能であると考えられる。また、FeO が共存すれば、より低い溶融スラグ温度でも粘性を低く保てると考えられる。焼却灰並びにモルタルの溶融スラグについては、ドラム缶や金属廃棄物等と一括処理することにより、FeO を 10~20wt%に調整すれば、1200°Cで十分低い粘性となることが考えられる。また、コンクリートについては、1500°Cにおいても溶融スラグの粘性が 1000poise 以上であると考えられることから、単独溶融はかなり困難である。しかし、ドラム缶や金属廃棄物との一括処理により FeO を 20wt%以上添加すれば、1200°Cで 100poise 以下になると推察され、出湯性も向上すると考える。

一方、FeO が共存しない場合は高塩基度廃棄物の保温材等を投入することにより低粘性領域への調整も可能であると考えられる。

4. 溶融固化体製作の最適化

流動性向上成分である FeO による融点降下および粘性低下の効果があることを調査・検討により確認し、実際の廃棄物組成を用いた検討により、低温度域においても流動性を確保することが可能であるとの見通しを得た。しかし、実際の処理を考えた場合、雑固体廃棄物が多種多様な組成および材質から構成され、様々な溶融スラグ組成となることから、Table1 に示した代表的な廃棄物組成のみで評価することは不可能である。実操業においてこれら知見を有用に活用するためには、実操業における廃棄物条件や処理条件等から推察される前提条件を設け、流動性向上成分を考慮した溶融方策を汎用化させる必要がある。そこで、実際の雑固体廃棄物処理を想定し、融点降下および粘性低下の観点から溶融条件の最適化を行った。

4. 1 検討条件の設定

実際の雑固体廃棄物処理を想定し、溶融処理方法および廃棄物組成の範囲を設定した。また、目標とする溶融スラグの粘性および融点を設定した。

(1) 溶融処理方法の設定

雑固体廃棄物を溶融処理する条件として、雑固体廃棄物はドラム缶により溶融炉に供給され、プラズマ加熱方式によって 1500°C 程度まで加熱されるものとした。また、溶融スラグは傾動出湯により鋳型内固化され、出湯時にはプラズマ照射を停止するものとした。この際、溶融スラグは自然冷却により 1200~1300°C 程度まで冷却されるものとした。なお、出湯の溶融スラグ温度は炉型、蓄熱量、出湯方式等によって大きく異なるため、保守的な温度域として設定した。

(2) 廃棄物組成の範囲設定

雑固体廃棄物は Table1 に示すとおり、ほとんどの廃棄物が 5~10wt%程度の低 Al₂O₃ 濃度廃棄物であることから、溶融スラグ中の Al₂O₃ 濃度範囲は 5~10wt%の範囲であると設定した。さらに、雑固体廃棄物は嵩密度 0.5~1.5(t/m³)の範囲でドラム缶に収納されているものと仮定し、これら金属が溶融・酸化されることにより、溶融スラグ中の FeO 濃度は 10~20wt%の範囲であると設定した。また、雑固体廃棄物中の CaO および SiO₂ 濃度は様々であるが、一般的に塩基度(1)で 0~1 程度の範囲と考えられることから、これに対応した塩基度(2)を 0.11~1.35 の範囲と設定した。

(3) 目標の設定

安定した溶融固化体を製作するため、出湯時における溶融スラグの粘性を 1200°C で 100poise と設定した。100poise 以下であれば、出湯性は良好であると考えられる。また、溶融固化体の均一性を確保するため、溶融スラグの融点を溶融温度より 100°C 低い 1400°C に設定した。

4. 2 溶融条件の最適化

上記の検討条件に従い、溶融スラグが 1200°C で 100poise 以下となる組成範囲を Fig.23,25 の粘性データを用いて検討した。塩基度は系統的に整理するという観点から塩基度(2)を用い

た。その結果を Fig.46,47 に示す。但し、低塩基度側に関するデータがないため、粘性の外挿値を破線にて示した。これら検討結果をもとに 100poise 以下となる低粘性領域を整理した結果を Table 4 に示す。表より、塩基度(2)が 0.5~0.6 以上となる範囲に溶融スラグ組成を調整することにより、1200°Cで 100poise 以下の粘性を保てると考えられ、塩基度の増加に伴い粘性はさらに低下すると考えられる。また、FeO10wt%に比べ、FeO20wt%とする方が粘度は低下する傾向にある。

また、Table4 に示した低粘性領域と 1400°Cの融点領域を比較するため、これら領域を Al₂O₃・塩基度 関係図にプロットした (Fig.48,49)。1200°Cで 100poise となる低粘性領域は 1400°C の融点領域内にほぼ入っており、低粘性領域に調整することにより、必然的に融点も 1400°C 以下となると推測される。つまり、雑固体廃棄物を溶融し、スラグの粘性を 1200°Cで 100poise 以下とし、融点を 1400°C以下とするためには塩基度(2)を 0.5~0.6 以上とする必要があり、FeO 濃度は極力高い方が望ましい。しかし、最適な融点および粘度は炉型や出湯方式等によって異なると考えられ、本結果を基に実機に適した設定を行っていく必要がある。

4. 3 溶融固化体製作の運転管理

溶融条件や出湯条件を緩和し、常に安定した溶融固化体を製作するためには溶融スラグ中の FeO 濃度、CaO 濃度、SiO₂ 濃度、Al₂O₃ 濃度に加え、溶融スラグ温度を管理することにより、溶融スラグの融点を下げると共に流動性を向上させる必要があり、適切な追装廃棄物の選定が重要である。しかし、実機による溶融体製作を考えた場合、溶融スラグ組成をバッチごとに分析し、把握することは運転管理上困難である。そこで、Fig.50 に示す運転管理方法が考えられる。以下に運転管理方法の概要を示す。

- I. 雜固体廃棄物を組み合わせて、塩基度(2)が極力高くなるように初期装荷する。
- II. 初期装荷した雑固体廃棄物をプラズマ加熱方式により溶融する。溶融管理は溶湯温度と溶融時間で行う。(管理条件は試験的・経験的に設定する。)
- III. 溶融スラグが均一であると判断された時点で、溶湯の流動性を目視により確認する。
- IV. 十分に粘性が低く、出湯可能と判断される場合には出湯し、溶融固化体を製作する。
- V. 粘性が高く、出湯困難と判断される場合には溶融スラグ組成を推定する。
- VI. 溶融スラグ組成が推定される場合は、溶融スラグの塩基度(2)が 0.5~0.6 以上となるように模擬廃棄物を追装する。
- VII. 溶融スラグの組成が推定できない場合は蛍光 X 線分析装置等を用いて溶融スラグ組成を確認し、同様に模擬廃棄物を追装する。
- VIII. 成分調整用の雑固体廃棄物を追装後、Ⅲ工程に戻り、出湯により溶融固化体を製作する。

5. 結言

原子力施設において発生する雑固体廃棄物をプラズマ溶融処理し、安定した品質の溶融固化体を製作するためには、溶融スラグの流動性を向上すると共に、溶融条件を緩和する必要がある。そこで、溶融スラグに対する流動性向上が期待される化学成分に着目し、溶融条件を緩和しつつ、

溶融スラグの流動性向上を図るものとした。

本稿では溶融スラグの流動性向上成分として、ドラム缶等との一括処理により混入することが期待される FeO に着目し、FeO 添加の効果を状態図および粘性データを用いて整理・検討した。その結果、溶融スラグの融点は降下し、粘性も大幅に低下するとの結果を得た。

また、上記の検討結果に基づき、模擬雑固体廃棄物としてコンクリートや保温材等を溶融処理した場合を評価したところ、FeO が 20w%程度共存すれば、融点は 1300°C 以下に、粘性も 1200°C で 100poise 以下となることが分かった。

さらに、実際の雑固体廃棄物処理を想定し、融点降下および粘性低下の観点から溶融条件緩和のための検討を行った。その結果、FeO 濃度は極力高い方が良く、 $(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ で定義される塩基度(2)を 0.5~0.6 以上にすることが望ましいとの結果を得た。このため、安定した溶融体を製作するためには溶湯温度に加え、塩基度(2)を管理する必要がある。

今後、塩基度の定義に関し、本稿では取り上げなかったアルカリ金属やアルカリ土類金属の影響についても評価を行い、実験等により適正化を進める必要があると考える。

謝辞

本調査を行うにあたり、貴重な情報を提供して頂いた東北大学素材工学研究 板垣乙未生教授、日野光久助教授に感謝いたします。本報告書をまとめるにあたり、データ整理等の御協力を頂いた廃棄物処理技術試験室の各氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 佐多敏之: フайнセラミックス工学, p.25-p.28(1990)
- [2] 荒井康夫: セラミックスの材料化学(3 版改訂), p.78-p.85, pp.207-pp.209
- [3] 日本金属学会: 講座・現代の金属学 精錬編 1 鉄鋼精錬, p.60-p.61(1979)
- [4] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, p.105 (1995)
- [5] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, p.154-p.155 (1995)
- [6] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, p.364 (1995)
- [7] Narottam P. Bansal and R.H.Doremus: Handbook of Glass Properties, p.297 (1986)
- [8] O.V.Mazurin, M.V.Streltsina and Shvaiko-Shvaikovskaya: Handbook of glass data part C ternary silicate glasses, p.779-p.782 (1987)
- [9] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, p.379-pp.380 (1995)
- [10] Gimmelfarb.A.A.: Izv. Akad. SSR Metally vol.2, p.59-pp.70 (1968)
- [11] 加藤清, 平山勝嘉, 加藤明: 放射性固体廃棄物の焼却灰の性状, 日本原子力学会, Vol.31, No.8 (1989)
- [12] サソノフ監修: 酸化物便覧, p.215 (1969)

Table 1 Chemical compositions of miscellaneous solid wastes

[wt%]

Chemical component	Concrete	Glass	Heat insulator	Ash	Mortar	Slag of metal melting	Refractories of metal melting
Al ₂ O ₃	5.9	1.5	1.7	8.6	5.9	19.9	48.2
CaO	10.6	9.8	37.5	12.7	27.6	5.4	0.7
MgO	1.0	0.9	0.7	4.4	1.5	5.1	3.8
Na ₂ O	1.7	11.0	0.3	2.5	1.0	3.3	0.4
K ₂ O	1.9	0.9	0.3	1.3	0.4	1.2	0.1
Fe ₂ O ₃	2.3	0.0	0.7	19.2	1.9	8.7	4.1
SiO ₂	59.4	69.9	40.2	32.8	46.9	54.2	15.7
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	22.9
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0
Volatile component	10.9	0.0	2.5	0.0	14.0	0.0	0.0
Others	6.3	6.0	16.1	18.5	0.8	0.0	4.1
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Basicity(1)	0.18	0.14	0.93	0.39	0.59	0.10	0.04
Basicity(2)	0.19	0.14	0.91	0.72	0.55	0.18	0.07

Basicity(1)=CaO/SiO₂ at wt%Basicity(2)=(CaO+FeO) / (SiO₂+Al₂O₃) at wt%

Table 2 Concentration of main components and basicity of molten slag (estimated)

	Concrete	Glass	Heat insulator	Ash	Mortar	Slag of metal melting	Refractories of metal melting
FeO [wt%]	0						
Al ₂ O ₃ [wt%]	5.9	1.6	1.7	—	5.9	—	—
Basicity(1)	0.18	0.14	0.93	—	0.59	—	—
Basicity(2)	0.19	0.14	0.91	—	0.55	—	—
FeO [wt%]	10						
Al ₂ O ₃ [wt%]	5.3	1.4	1.5	—	5.3	19.4	45.1
Basicity(1)	0.18	0.14	0.93	—	0.59	0.10	0.04
Basicity(2)	0.33	0.29	1.16	—	0.73	0.21	0.18
FeO [wt%]	20						
Al ₂ O ₃ [wt%]	4.8	1.4	1.37	8.3	4.8	17.2	40.0
Basicity(1)	0.18	0.14	0.93	0.39	0.59	0.10	0.04
Basicity(2)	0.54	0.49	1.49	0.81	0.99	0.38	0.39
FeO [wt%]	30						
Al ₂ O ₃ [wt%]	4.2	1.1	1.2	7.3	4.2	15.1	35.0
Basicity(1)	0.18	0.14	0.93	0.39	0.59	0.10	0.04
Basicity(2)	0.81	0.74	1.91	1.16	1.32	0.61	0.66

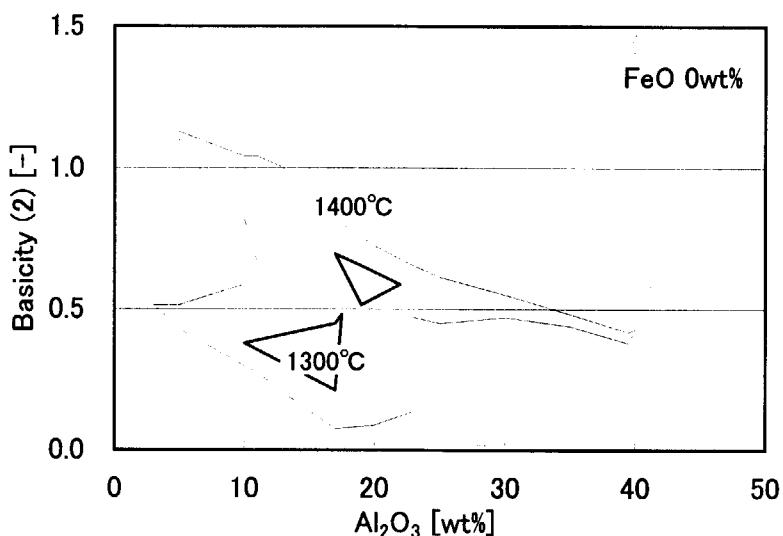
Basicity(1)=CaO/SiO₂ at wt%Basicity(2)=(CaO+FeO) / (SiO₂+Al₂O₃) at wt%

Table 3 Relationship between melting point and concentration of FeO (estimated)

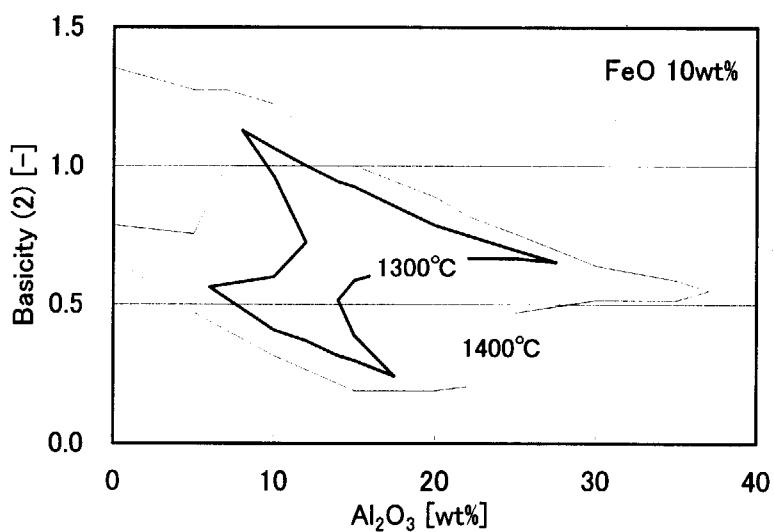
Concentration of FeO [wt%]	Concrete	Heat insulator	Ash	Mortar
0	> 1400°C	> 1400°C	—	1400°C
10	> 1400°C	> 1400°C	—	1400°C
20	> 1400°C	1300°C	1200°C	1300°C
30	1300°C	1300°C	1200°C	1200°C

Table 4 Favorable molten slag compositions at 1200°C (viscosity < 100 poise)

Concentration of FeO [wt%]	Concentration of Al ₂ O ₃ [wt%]	Basicity(2) [-]
10	5~10	0.6~1.0
20		0.5~1.25



**Fig.1 Meltable area of Al_2O_3 - CaO - SiO_2 slag
at 1300 and 1400°C**
Basicity(2)= $(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$



**Fig.2 Meltable area of Al_2O_3 - CaO -10wt% FeO - SiO_2 slag
at 1300 and 1400°C**
Basicity(2)= $(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

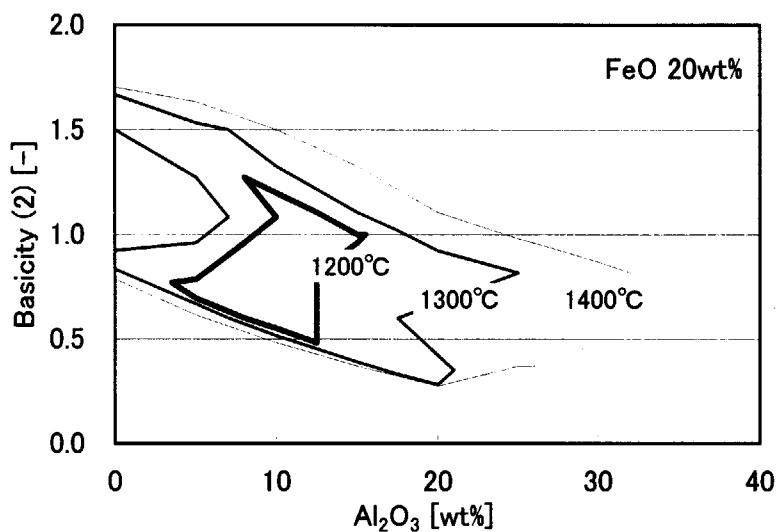


Fig.3 Meltable area of Al_2O_3 -CaO-20wt%FeO-SiO₂ slag
at 1200, 1300 and 1400°C
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

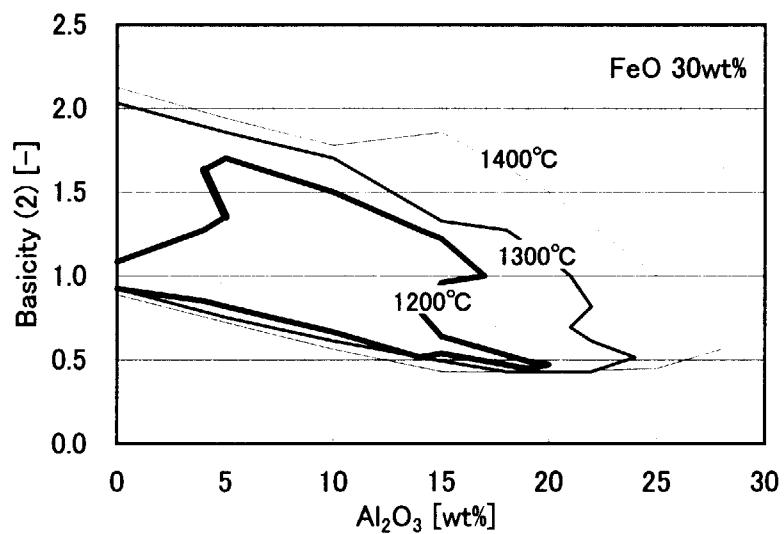


Fig.4 Meltable area of Al_2O_3 -CaO-30wt%FeO-SiO₂ slag
at 1200, 1300 and 1400°C
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

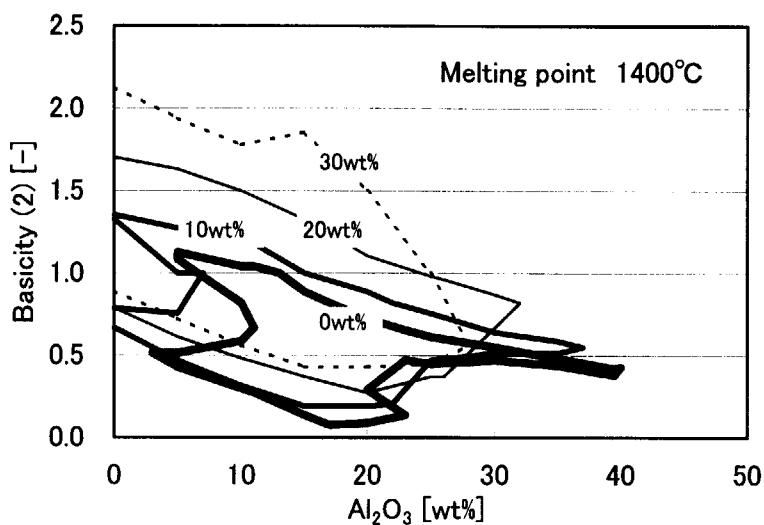


Fig.5 Relationship between concentration of FeO
and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1400°C
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

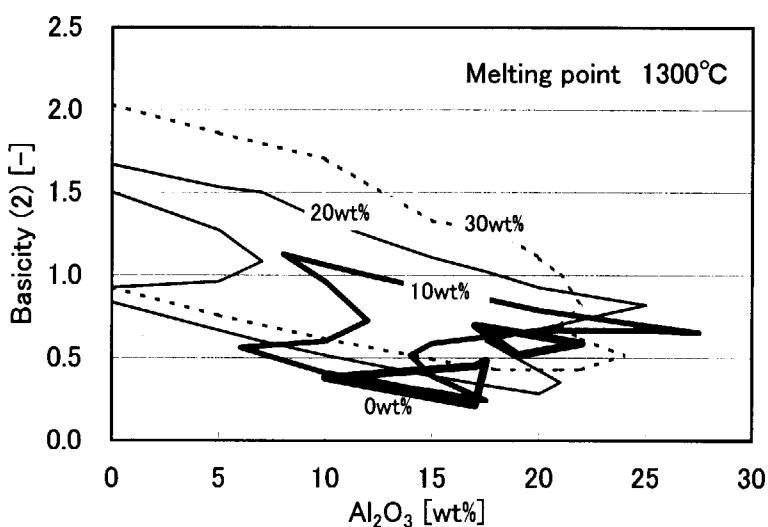


Fig.6 Relationship between concentration of FeO
and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1300°C
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

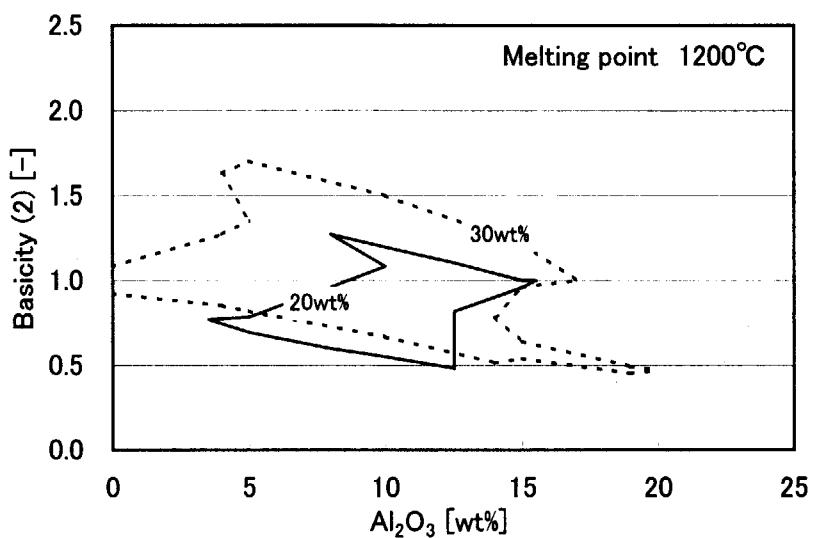


Fig.7 Relationship between concentration of FeO
and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1200°C
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

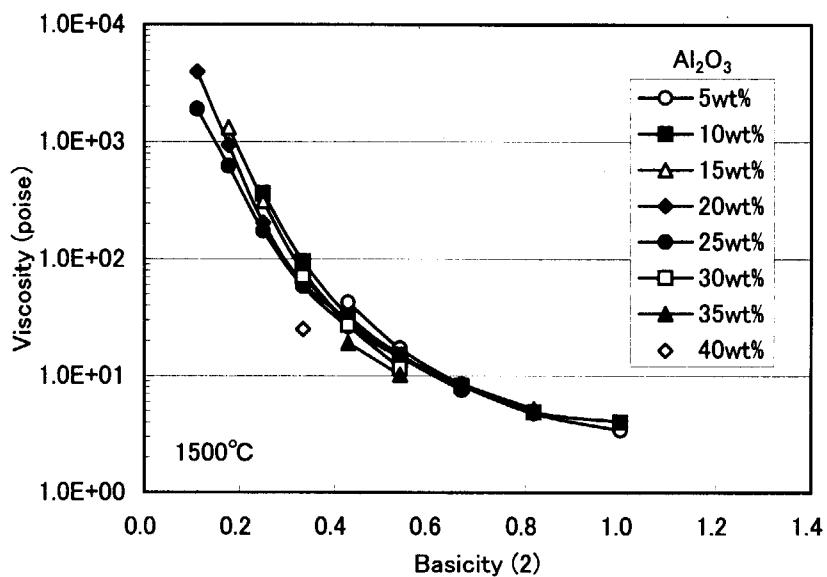


Fig.8 Relationship between concentration of Al₂O₃
and viscosity of molten slag at 1500°C
Basicity(2)=CaO/(SiO₂+Al₂O₃)

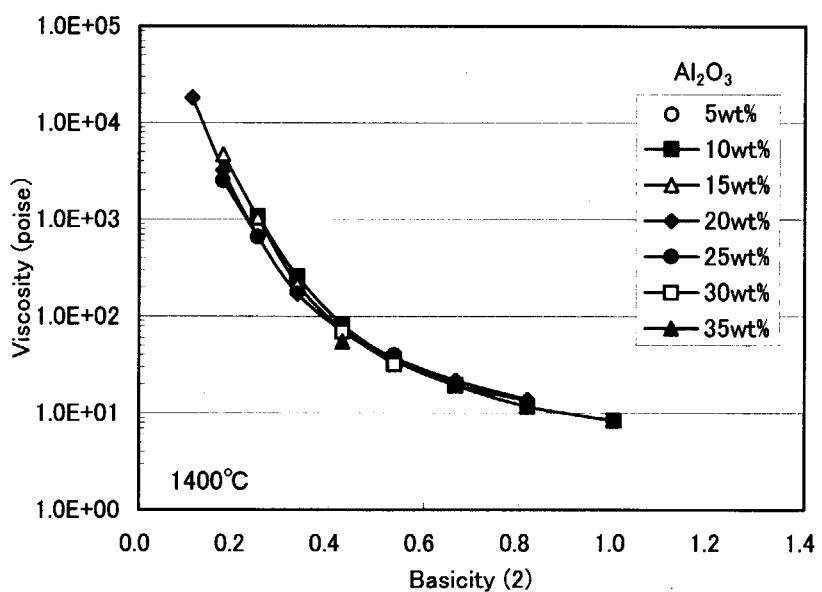


Fig.9 Relationship between concentration of Al₂O₃
and viscosity of molten slag at 1400°C
Basicity(2)=CaO/(SiO₂+Al₂O₃)

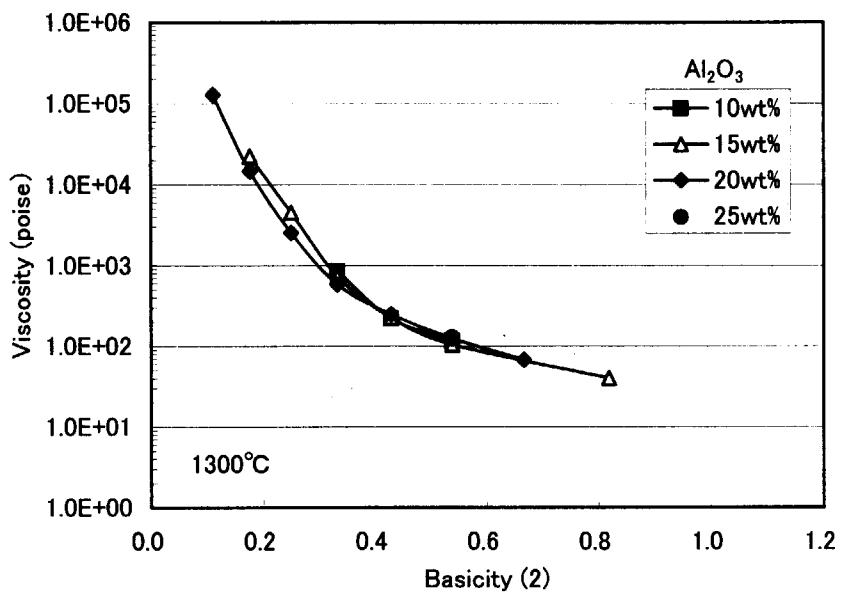


Fig.10 Relationship between concentration of Al₂O₃
and viscosity of molten slag at 1300°C
Basicity(2)=CaO/(SiO₂+Al₂O₃)

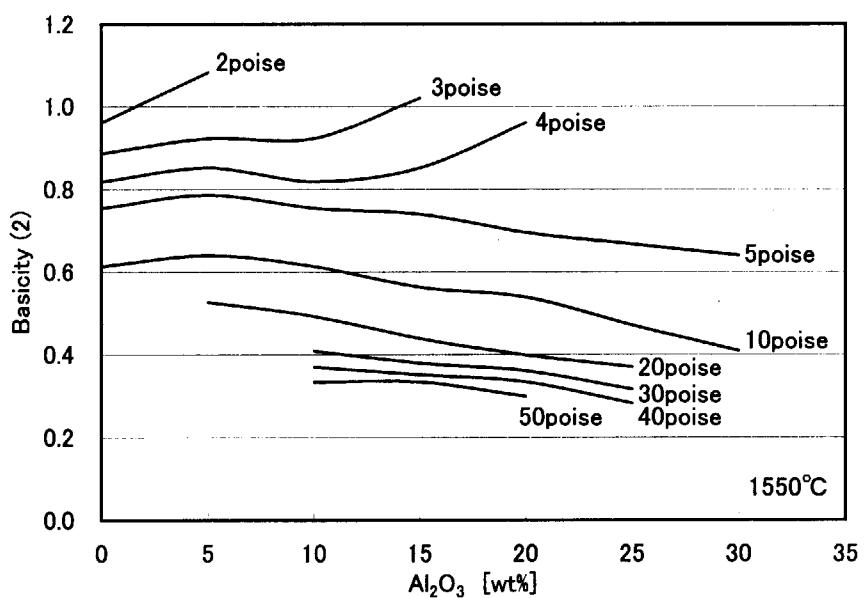


Fig.11 Iso-Viscosity curve at 1550°C
Basicity(2)=CaO/(SiO₂+Al₂O₃)

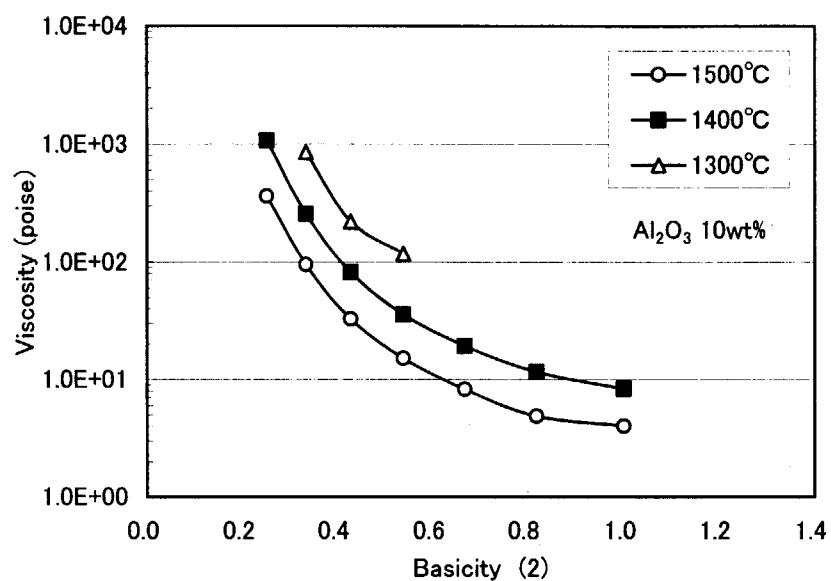


Fig.12 Relationship between temperature of melting
and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%)
Basicity(2)= $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

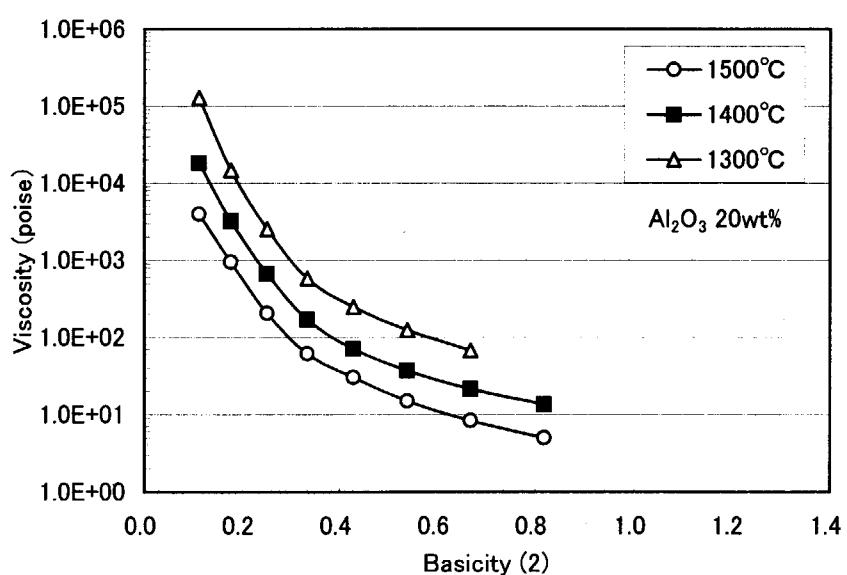


Fig.13 Relationship between temperature of melting
and viscosity of molten slag (Al_2O_3 20wt%)
Basicity(2)= $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

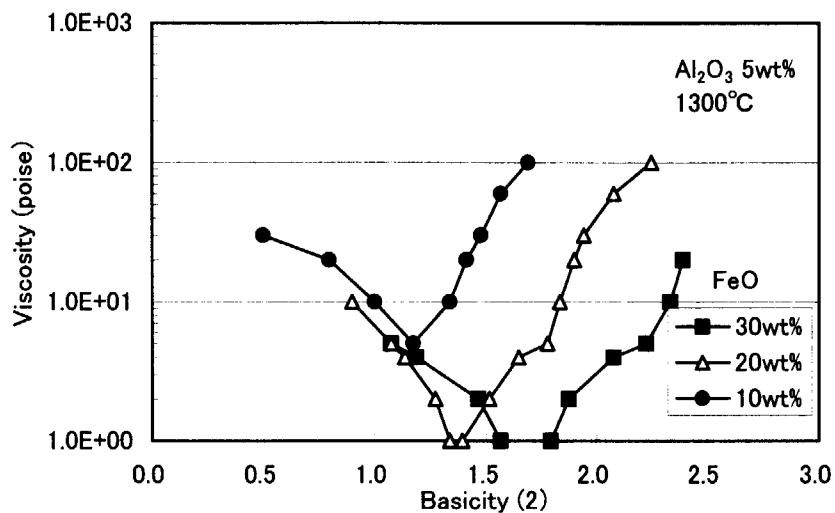


Fig.14 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 5wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

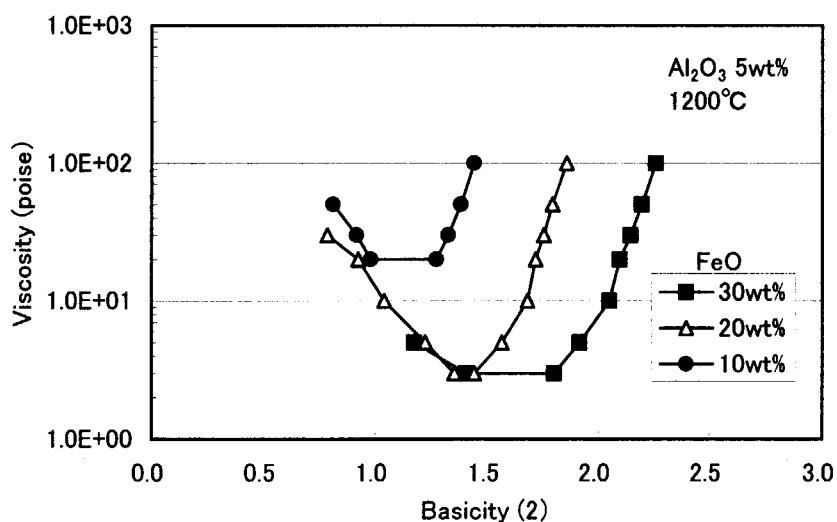


Fig.15 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 5wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

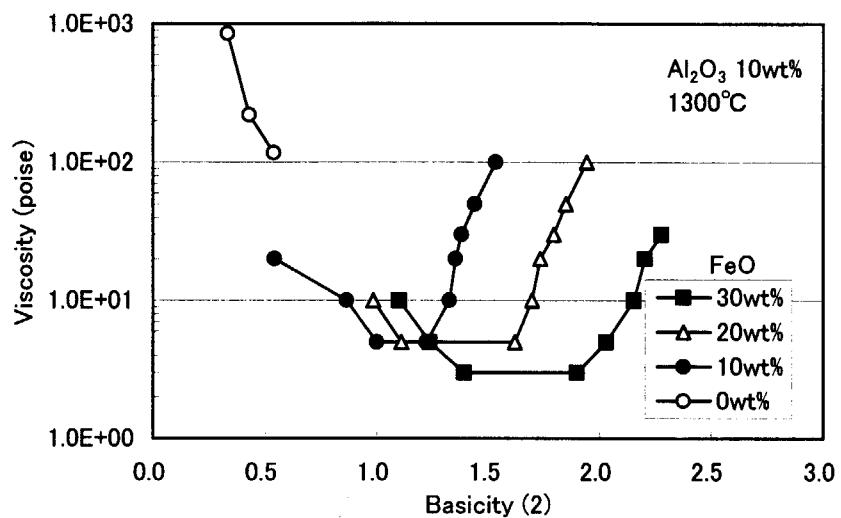


Fig.16 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al₂O₃ 10wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

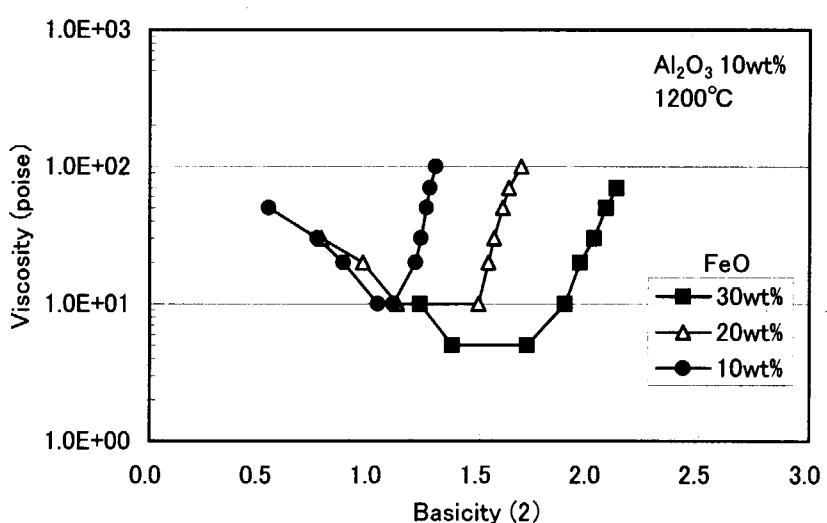


Fig.17 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al₂O₃ 10wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

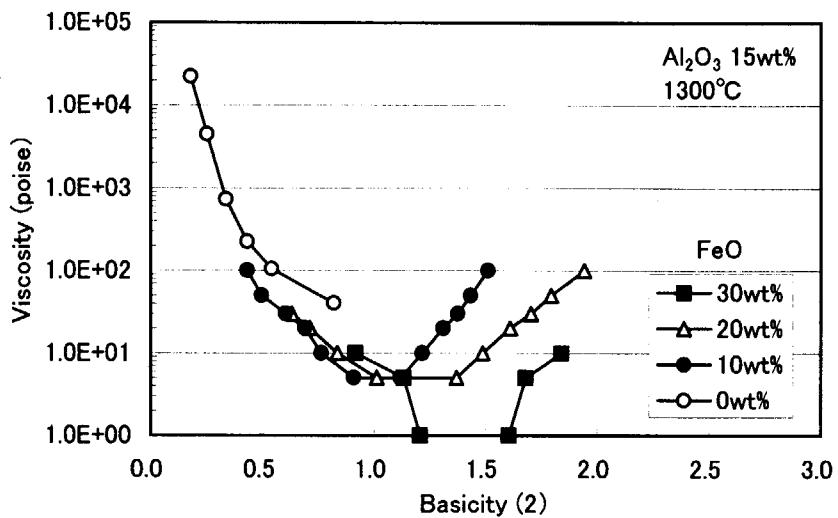


Fig.18 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al₂O₃ 15wt%)
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

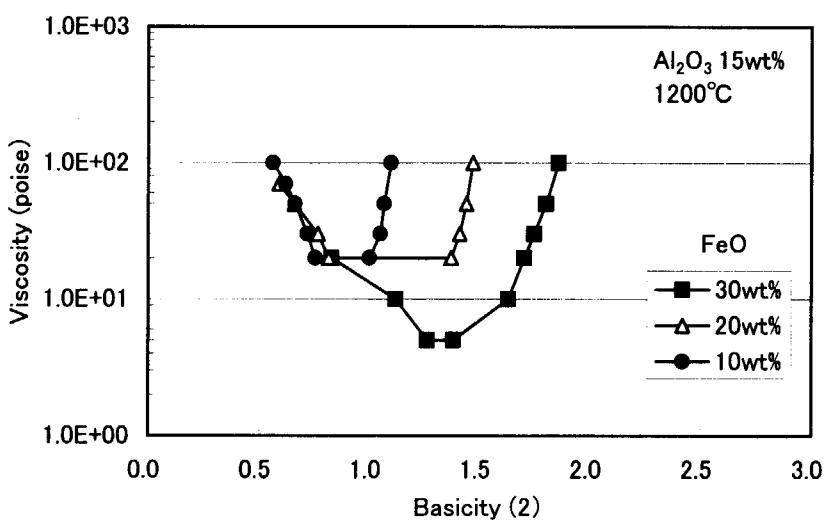


Fig.19 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al₂O₃ 15wt%)
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

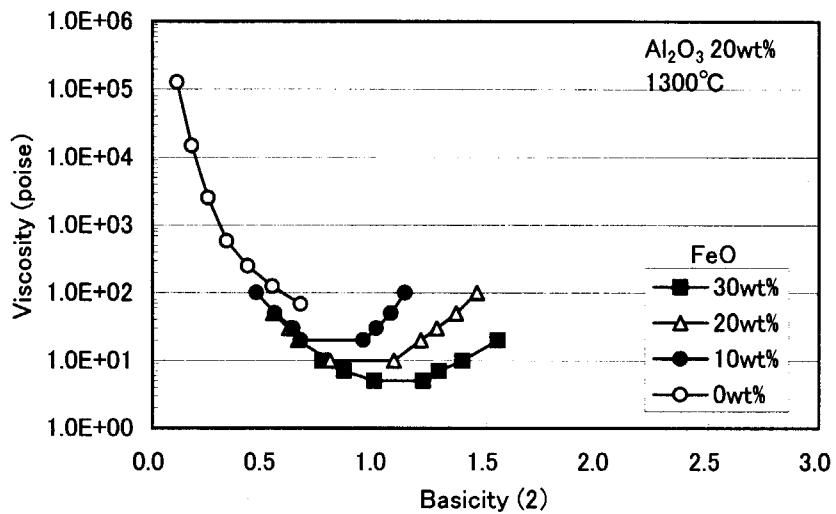


Fig.20 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 20wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

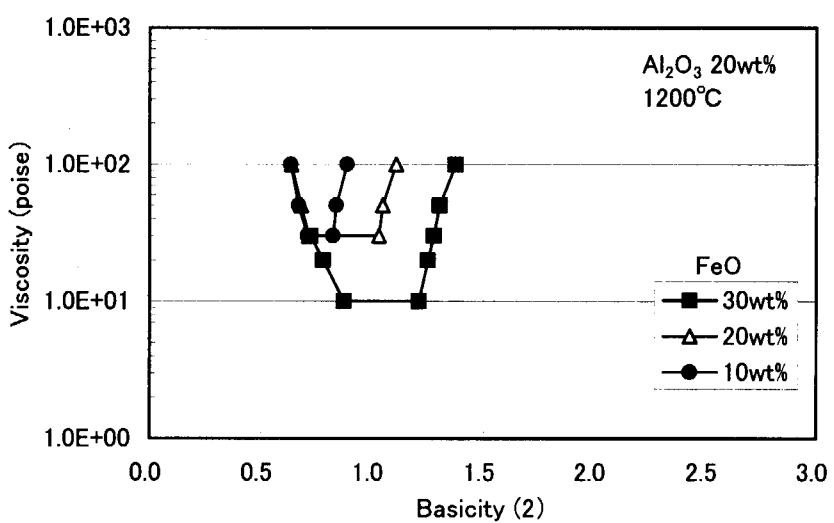


Fig.21 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 20wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

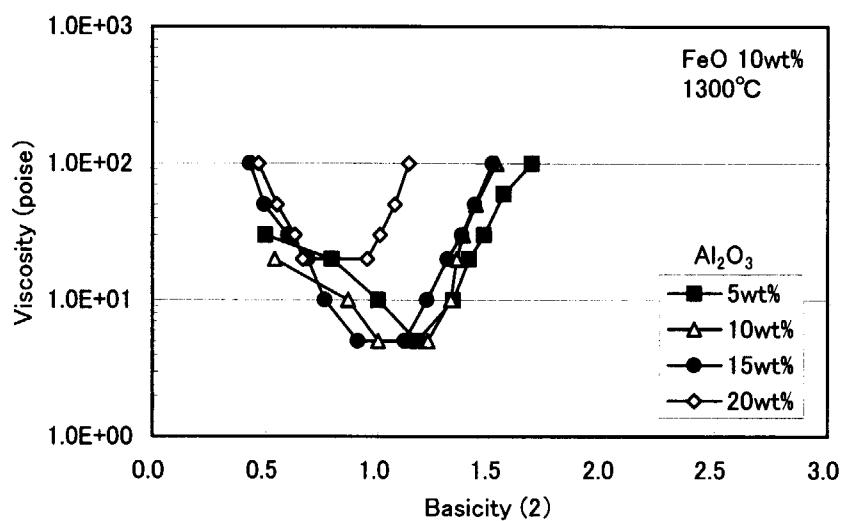


Fig.22 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 10wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

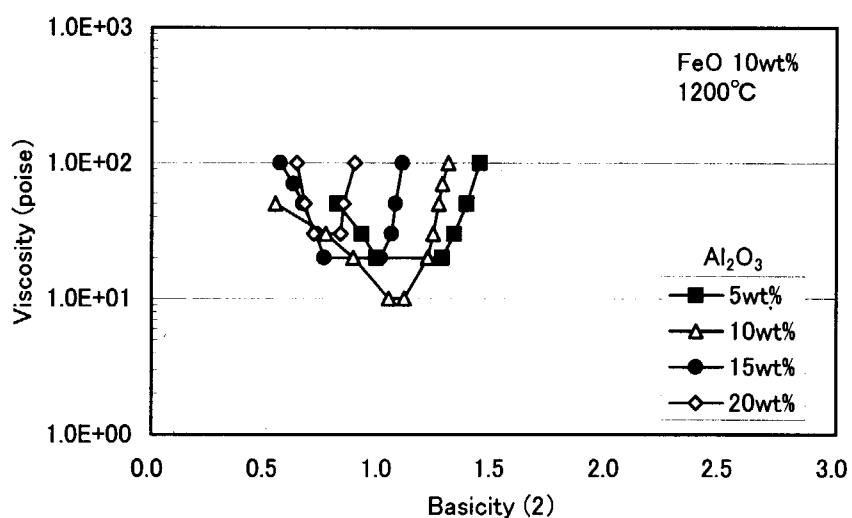


Fig.23 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 10wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

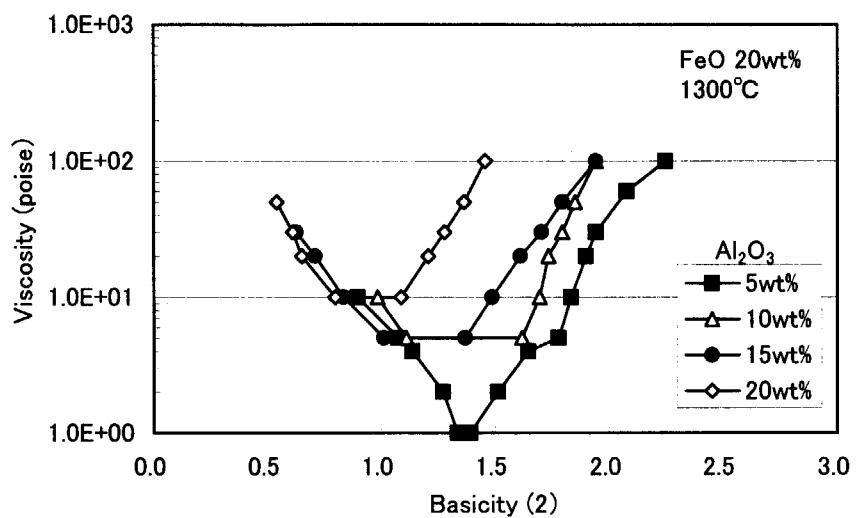


Fig.24 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 20wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

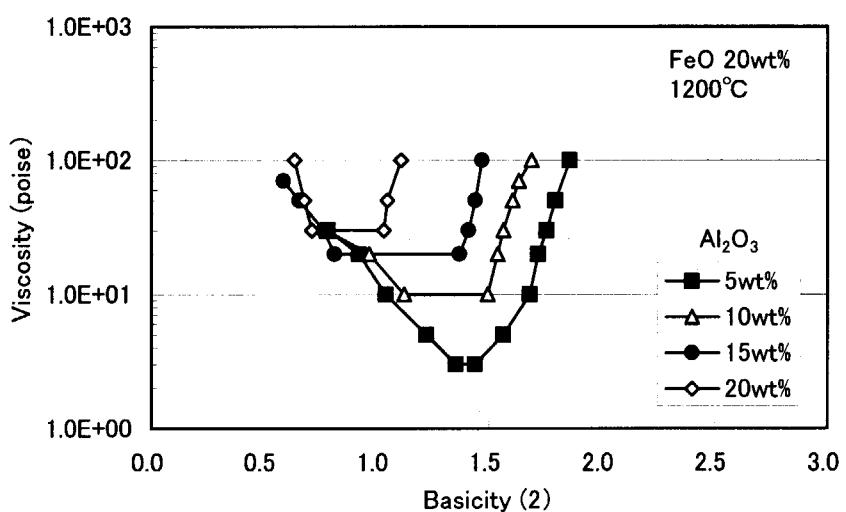


Fig.25 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 20wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

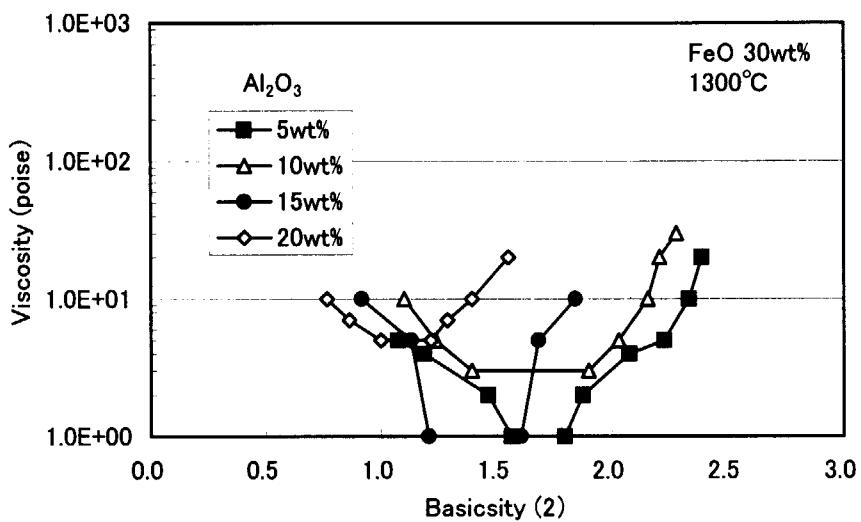


Fig.26 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 30wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

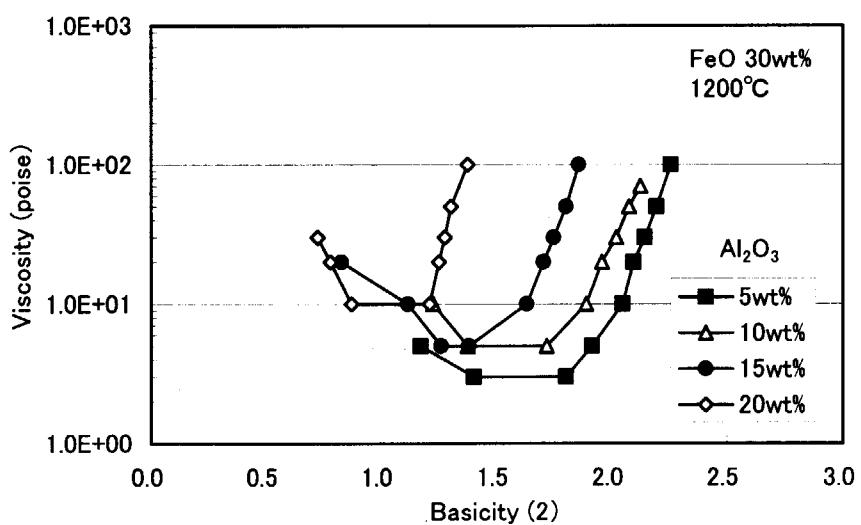


Fig.27 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 30wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

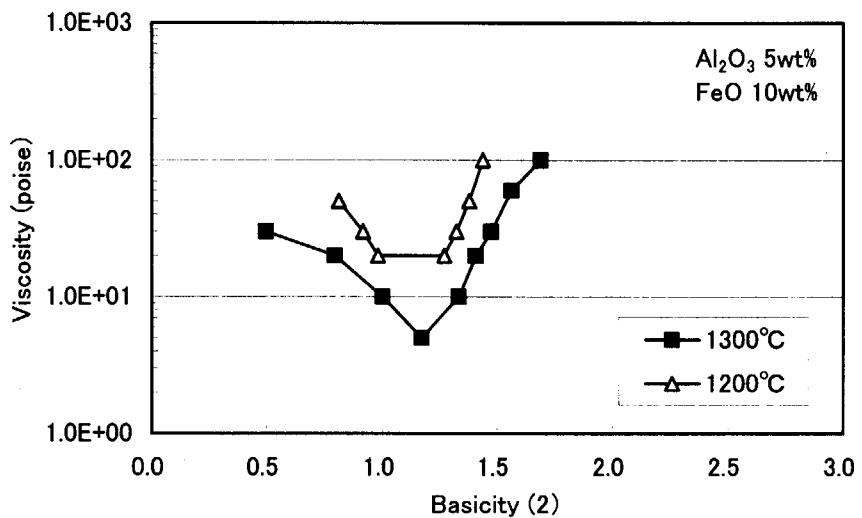


Fig.28 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 5wt%, FeO 10wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

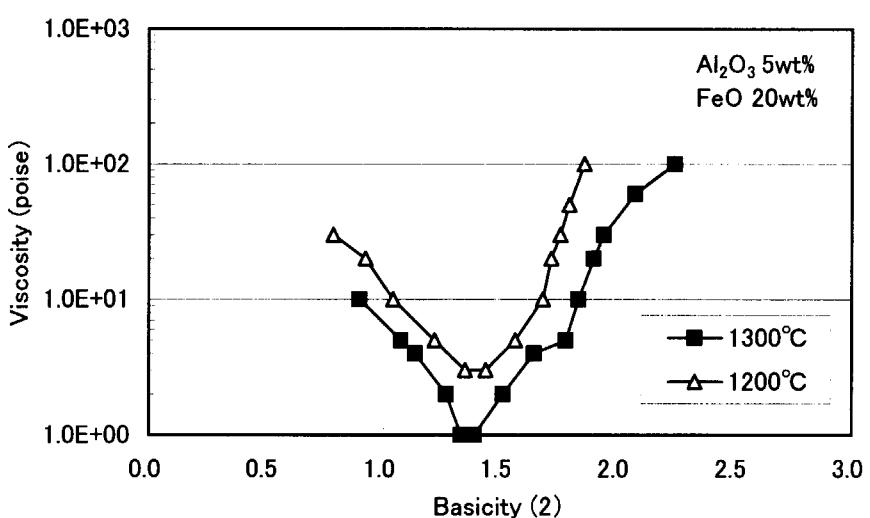


Fig.29 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 5wt%, FeO 20wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

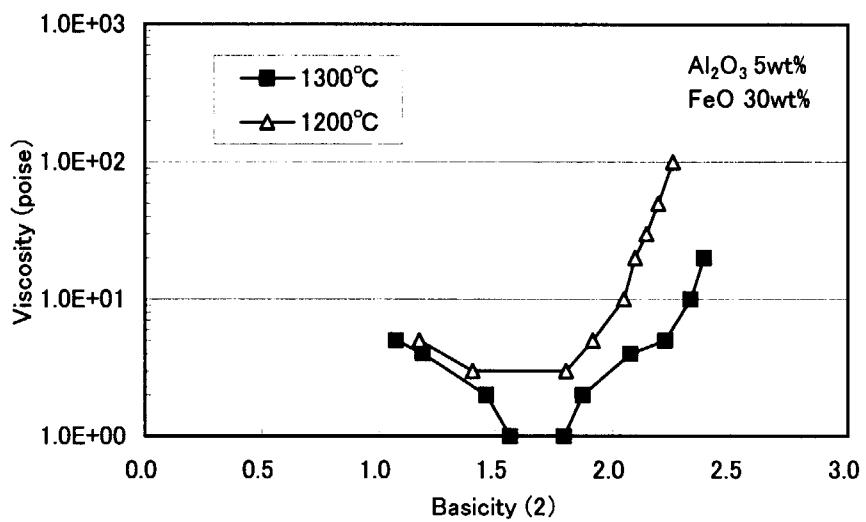


Fig.30 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 5wt%, FeO 30wt%)
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

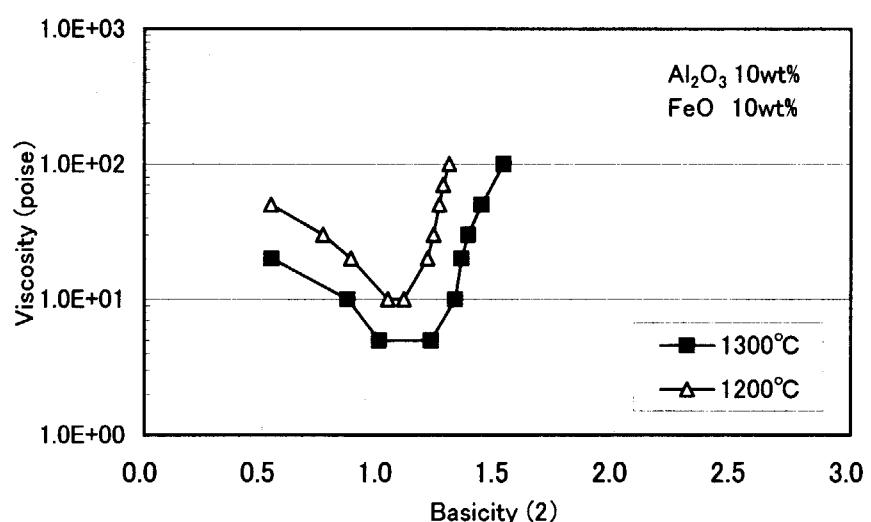


Fig31 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%, FeO 10wt%)
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

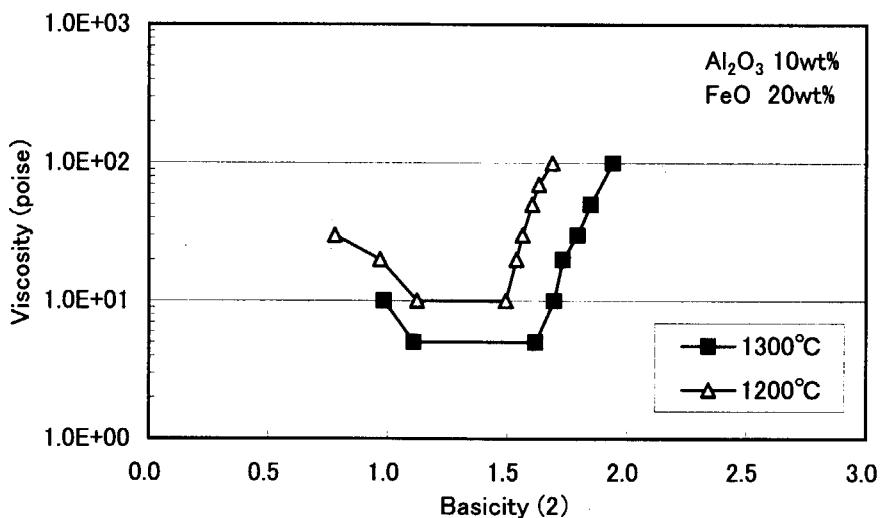


Fig.32 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%, FeO 20wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

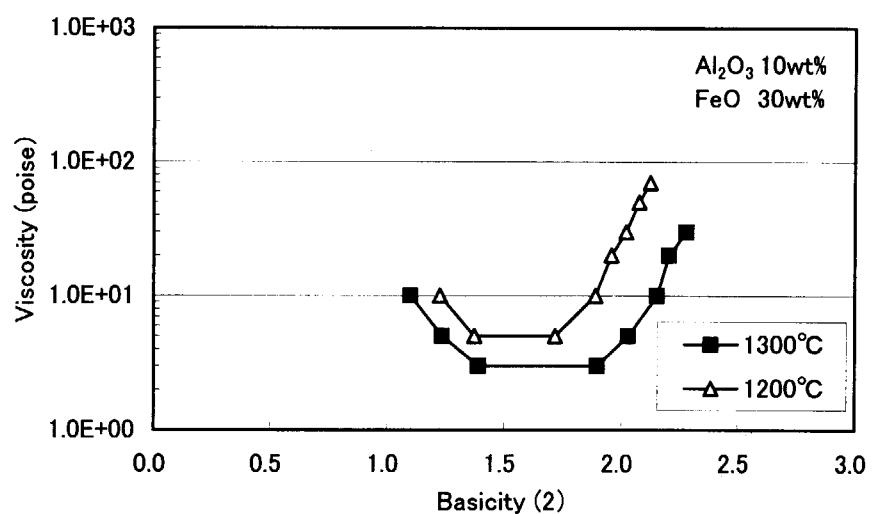


Fig.33 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%, FeO 30wt%)
 Basicity(2)=($\text{CaO}+\text{FeO}$)/($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)

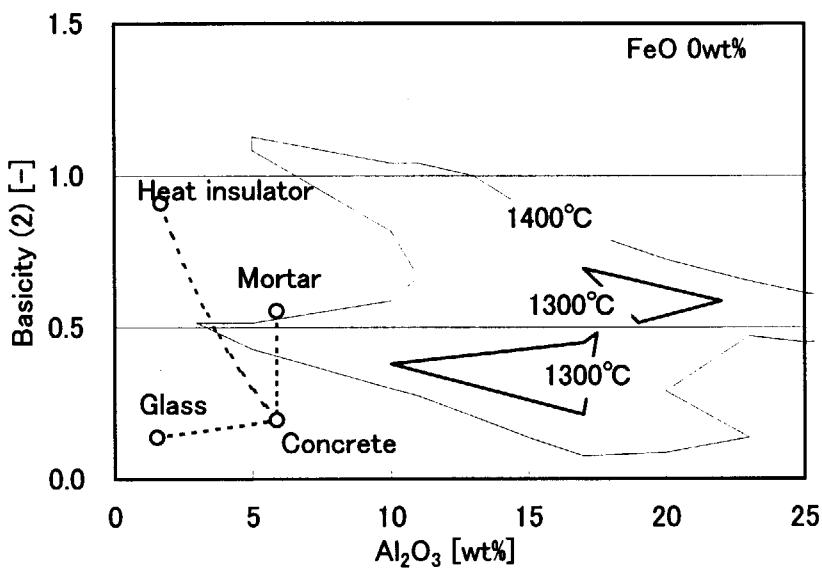


Fig.34 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al_2O_3 - CaO - SiO_2 slag at 1300 and 1400°C
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

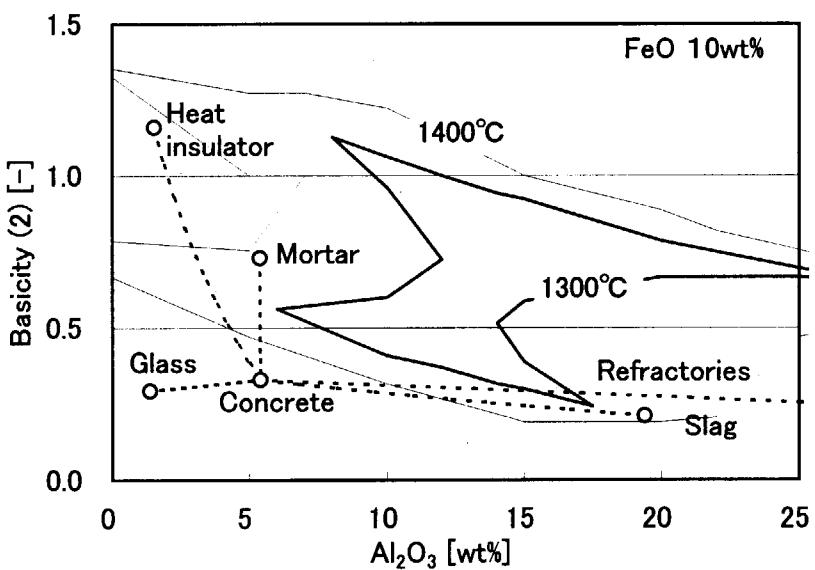


Fig.35 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al_2O_3 - CaO - 10wt\% FeO - SiO_2 slag at 1300 and 1400°C
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

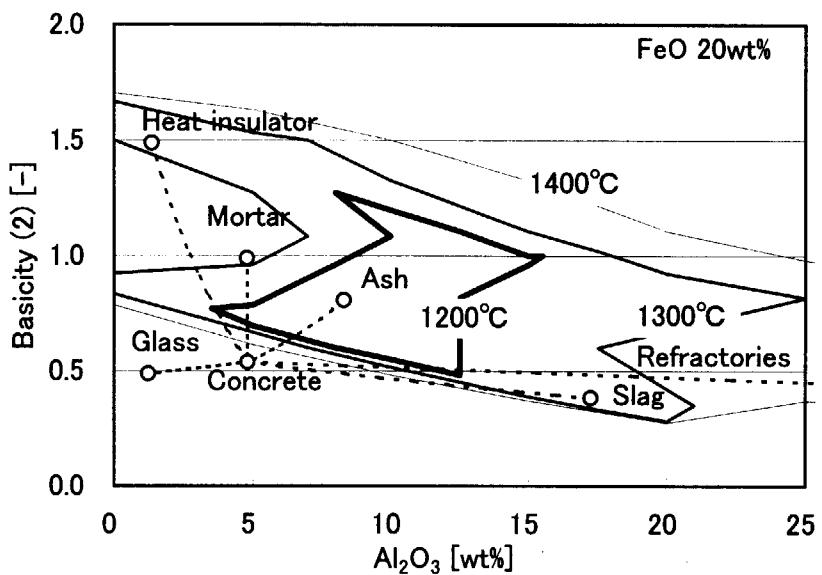


Fig.36 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-20wt\%FeO-SiO}_2$ slag at 1200, 1300 and 1400°C
 $\text{Basicity(2)} = (\text{CaO} + \text{FeO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$

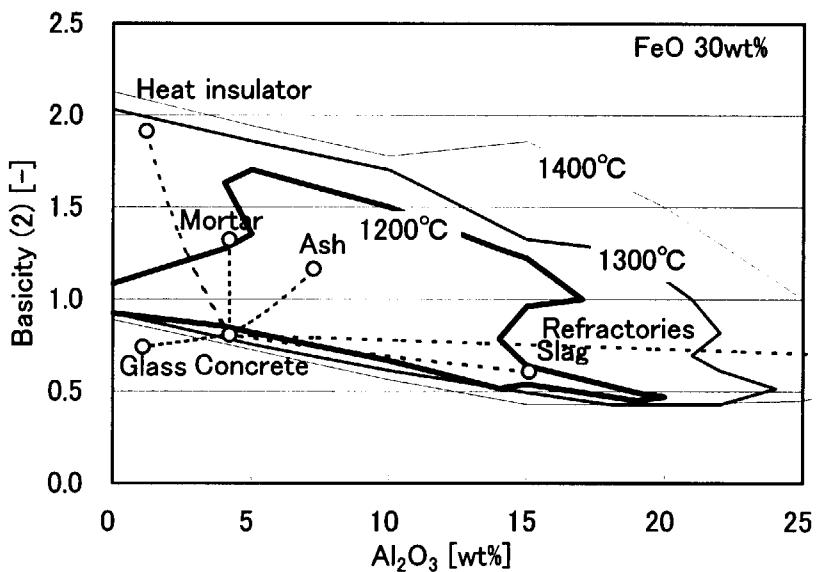


Fig.37 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-30wt\%FeO-SiO}_2$ slag at 1200, 1300 and 1400°C
 $\text{Basicity(2)} = (\text{CaO} + \text{FeO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$

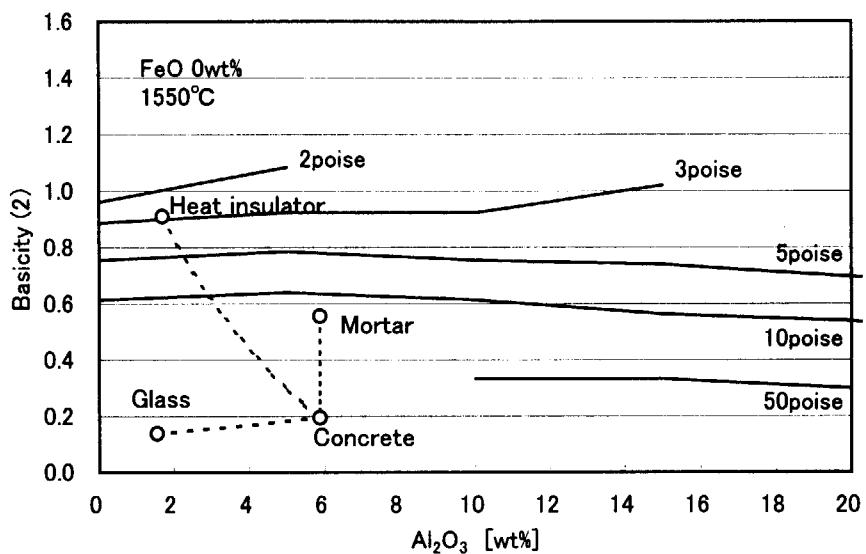


Fig.38 Comparison between iso-viscosity curve and molten slag of miscellaneous solid wastes at 1550°C
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

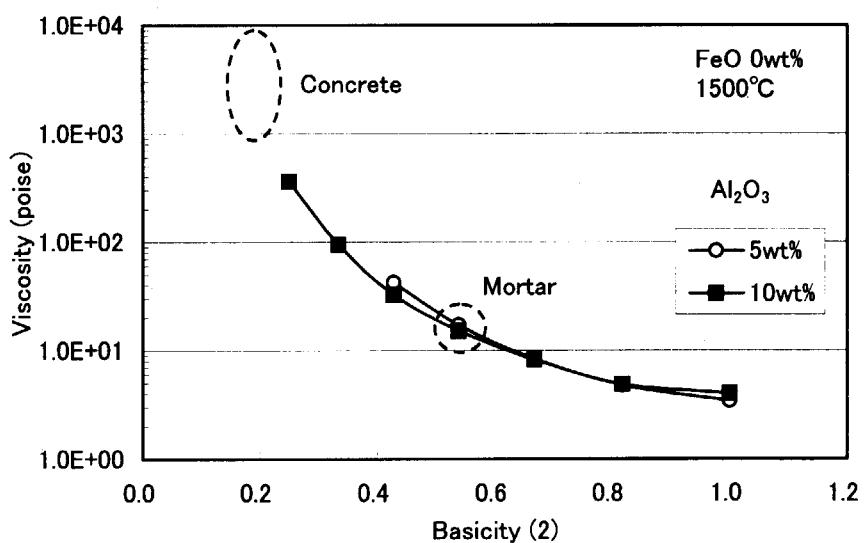


Fig.39 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1500°C
 $\text{Basicity}(2)=(\text{CaO}+\text{FeO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

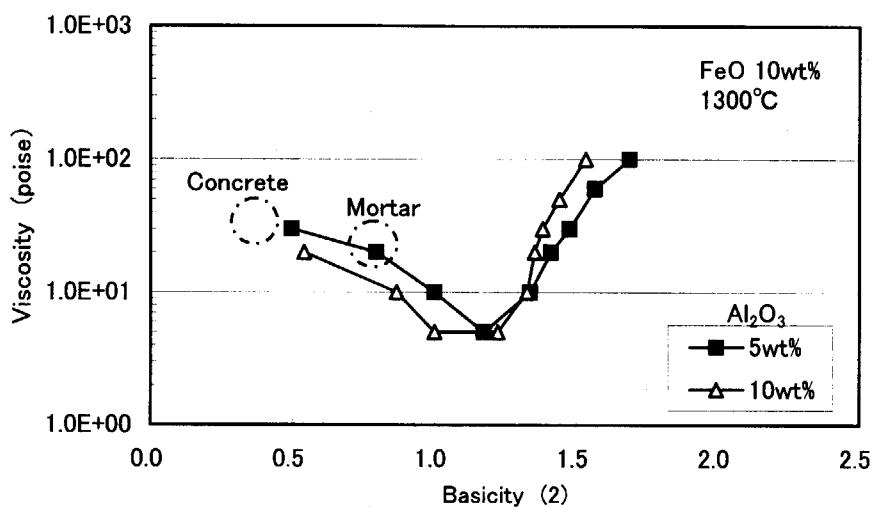


Fig.40 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 10wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

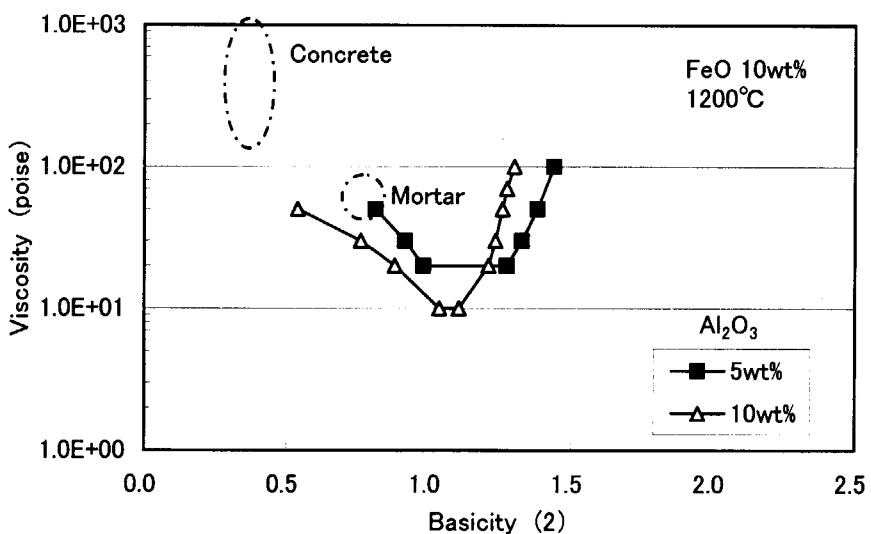


Fig.41 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 10wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

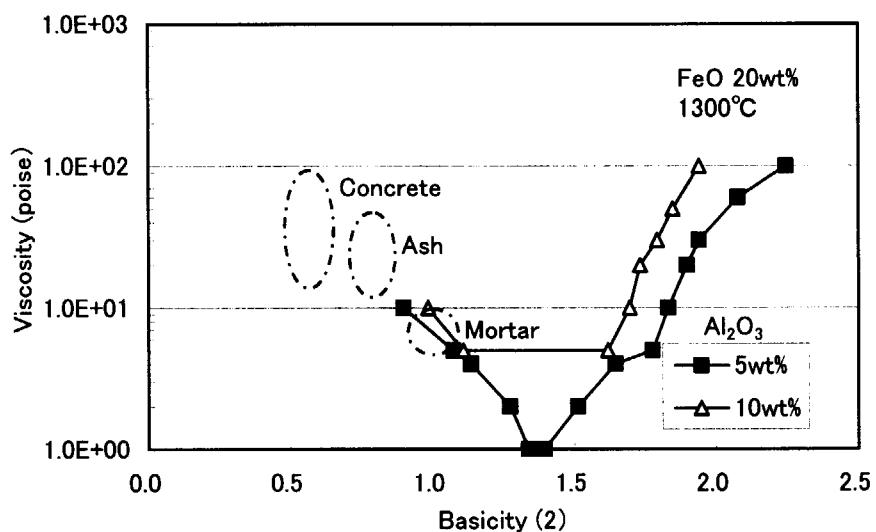


Fig.42 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 20wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

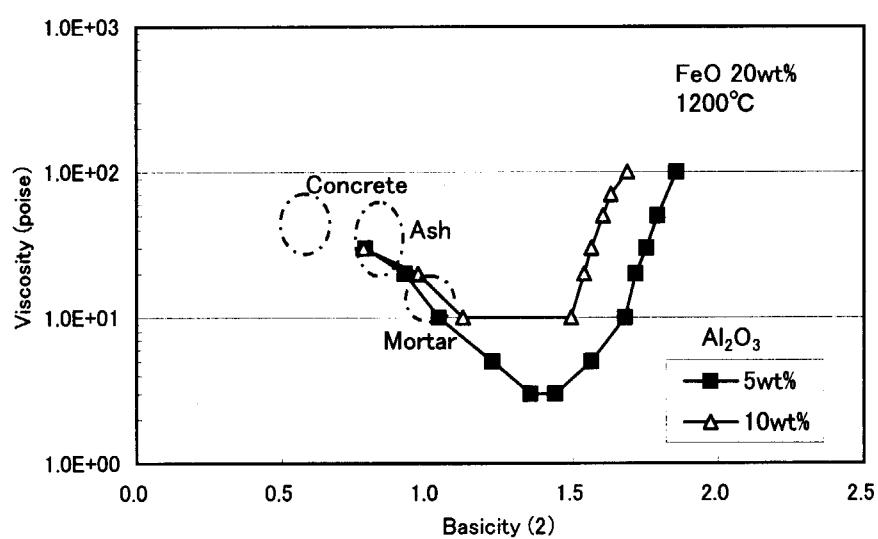


Fig.43 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 20wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

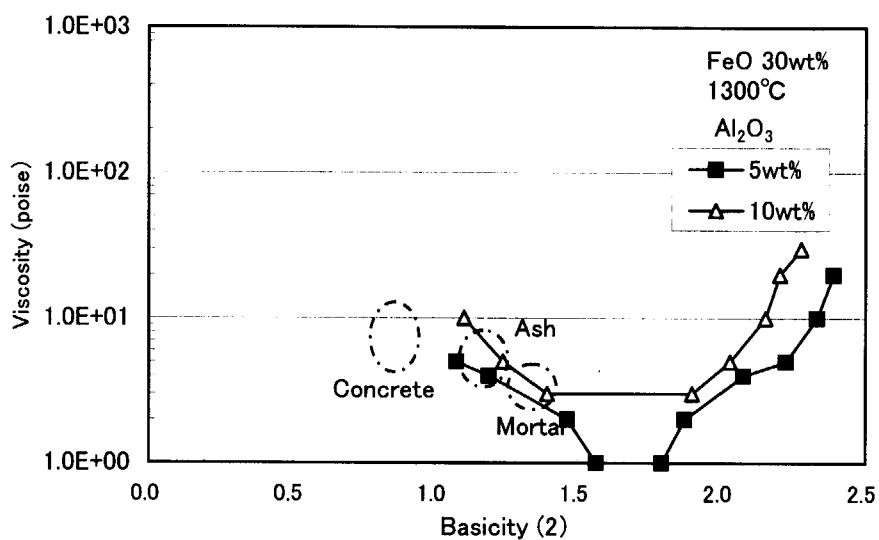


Fig.44 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 30wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

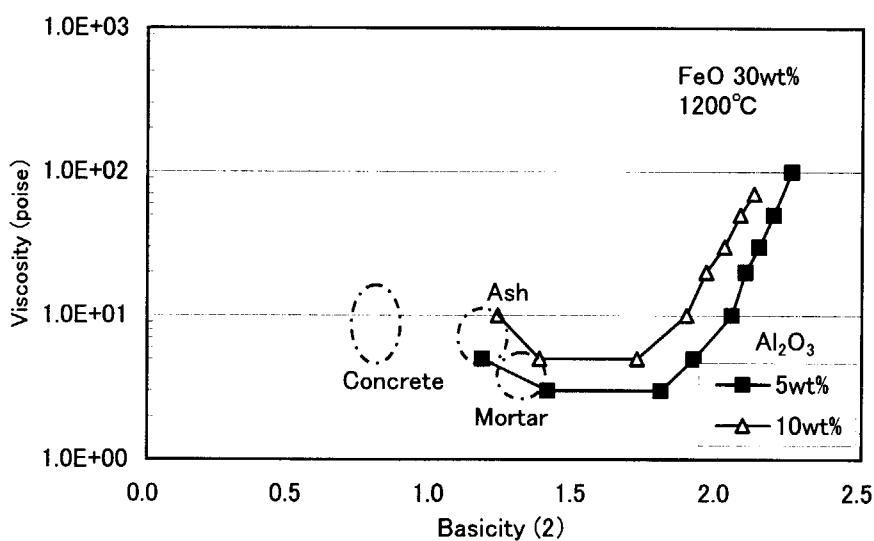


Fig.45 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 30wt%)
 Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

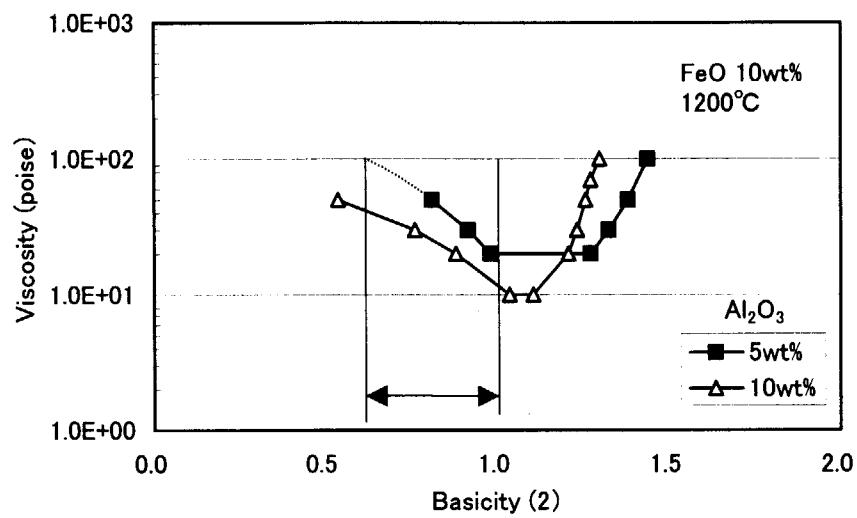


Fig.46 Basicity range of low viscosity at 1200°C (FeO 10wt%)
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

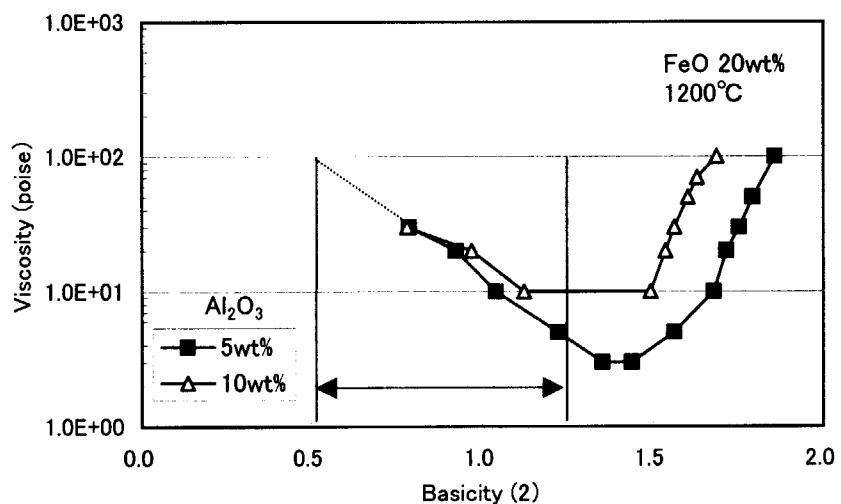


Fig.47 Basicity range of low viscosity at 1200°C (FeO 20wt%)
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

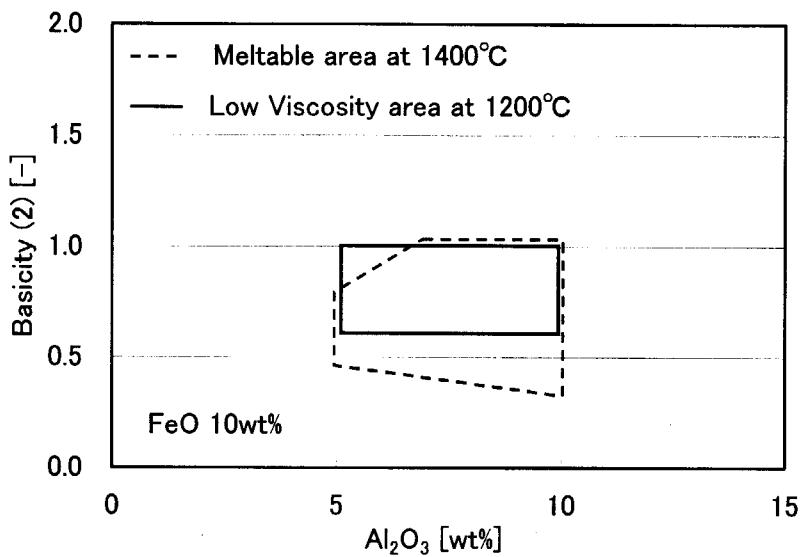


Fig.48 Comparison between melttable area at 1400°C
and low viscosity area (FeO 10wt%)
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

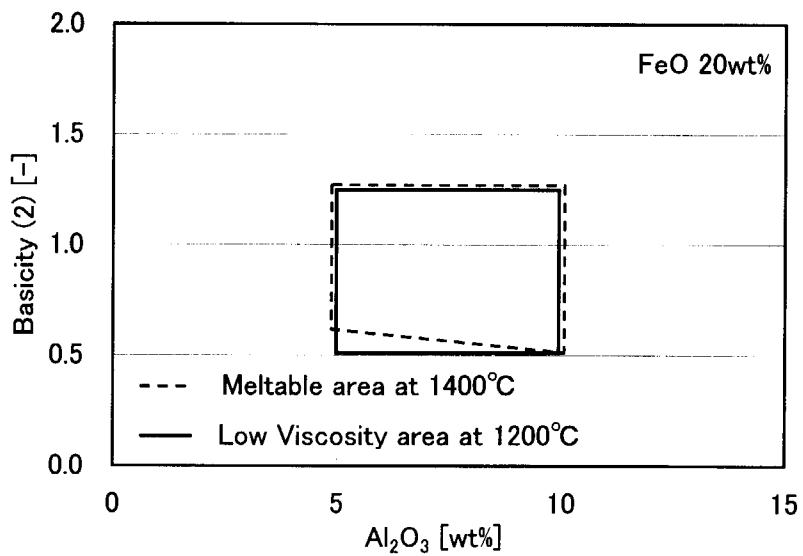


Fig.49 Comparison between melttable area at 1400°C
and low viscosity area (FeO 20wt%)
Basicity(2)=(CaO+FeO)/(SiO₂+Al₂O₃)

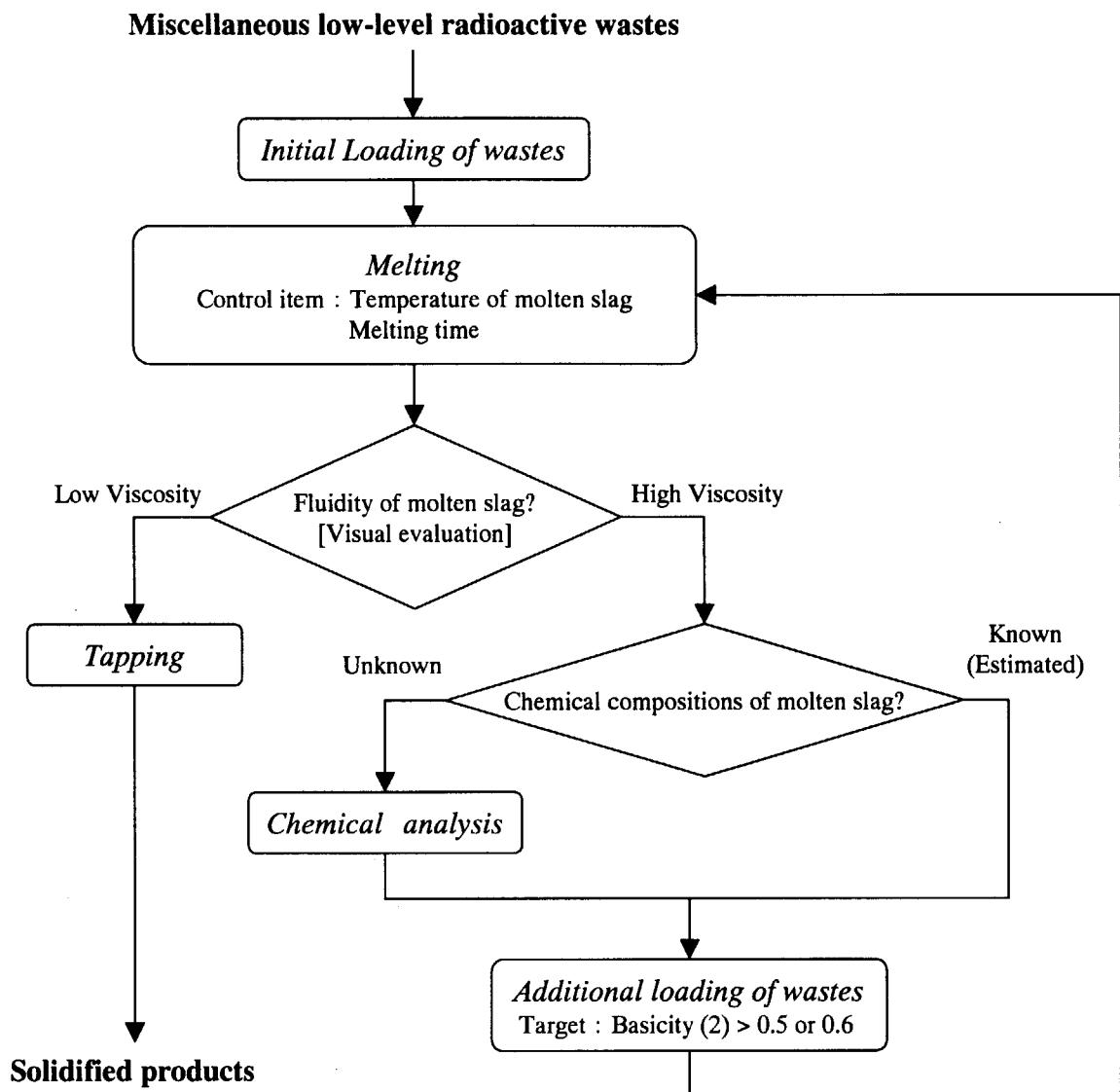


Fig.50 Control items on melting treatment

付録 I

状態図

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系

[4] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.105 (1995)

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$

[5] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.154-pp.155 (1995)

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系

[4] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.105 (1995)

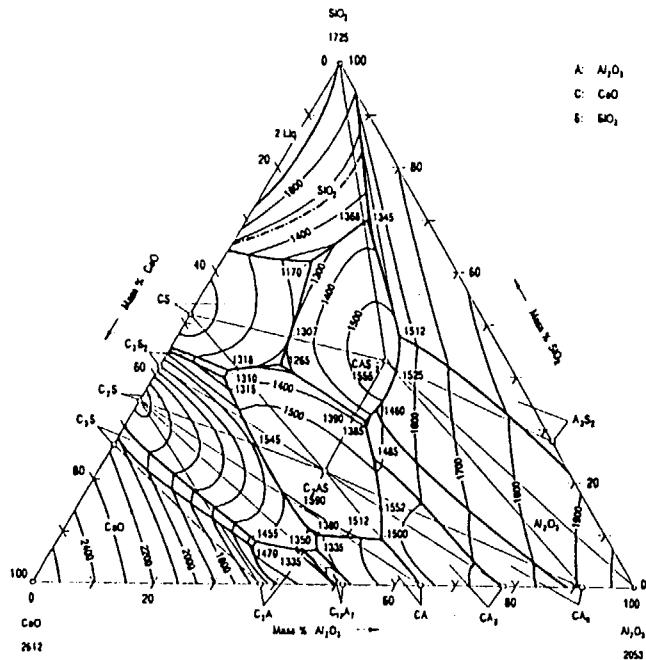
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 

Fig. 3.166. Liquidus surface and sub-solidus equilibria in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ system after Rankin, Wright [1], with later revisions due to Greig [2], Filonenko, Lavrov [3], Langenberg, Chipman [4], Aramaki, Roy [5] and Gentile, Foster [6]. The revisions of the $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ primary field reported by Gutt, Russell [7], as well as the revision of the Al_2O_3 -rich portion of the system due to Criado, De Aza [8] are also included in the figure. According to Longhi, Hays [9] the primary field of cristobalite on the $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$ section ranges up to the eutectic between SiO_2 and $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$. For thermodynamic assessment of the system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ and calculated phase equilibria, see Eriksson, Pelton [10].

References

- [1] Rankin, G. A., F. E. Wright: Am. J. Sci., 4th Ser. 39 (1915), p. 1/79
- [2] Greig, J. W.: Am. J. Sci., 5th Ser. 13 (1927) No. 73, p. 1/154
- [3] Filonenko, N. E., I. V. Lavrov: Dokl. Akad. Nauk SSSR 66 (1949) No. 4, p. 673/6
- [4] Langenberg, F. C., J. Chipman: J. Am. Ceram. Soc. 39 (1956) No. 10, p. 432/3
- [5] Aramaki, S., S. Roy: J. Am. Ceram. Soc. 42 (1959) No. 12, p. 644/45
- [6] Gentile, A. L., W. R. Foster: J. Am. Ceram. Soc. 46 (1963) No. 2, p. 74/6
- [7] Gutt, W., A. D. Russell: J. Mater. Sci. 12 (1977) No. 9, p. 1869/78
- [8] Criado, E., S. De Aza: Proc. 1st C.E.R.P., Ed.: Faenza Editrice (1976), p. 97/101
- [9] Longhi, J., J. F. Hays: Am. J. Sci. 279 (1979) No. 7, p. 876/90
- [10] Eriksson, G., A. D. Pelton: Metall. Trans. B 24B (1993), p. 807/15

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ 系

[5] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.154-pp.155 (1995)

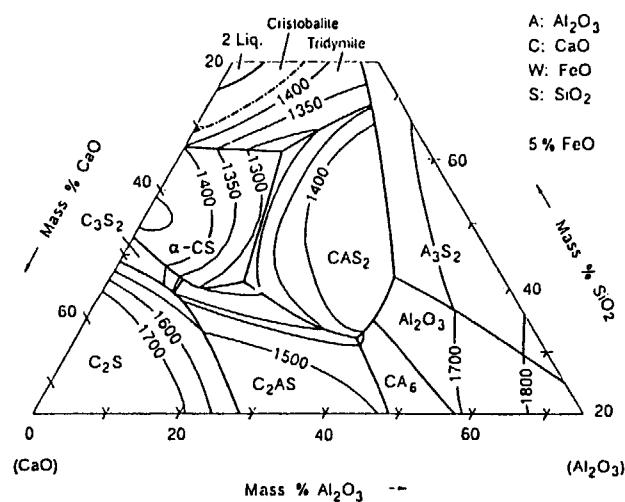
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_x\text{-SiO}_2$ 

Fig. 3.308.

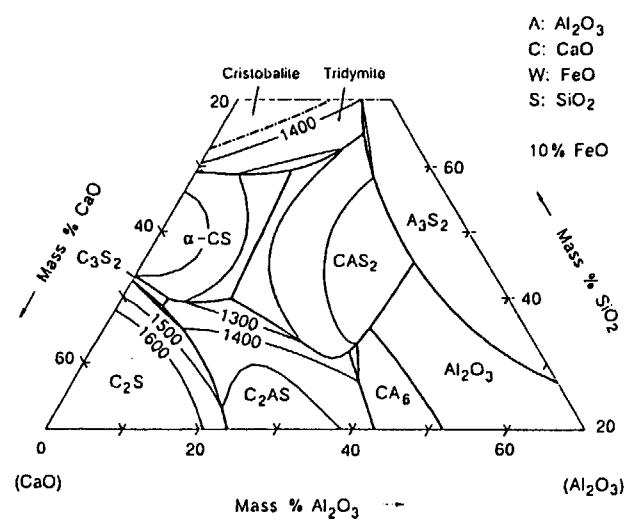


Fig. 3.309.

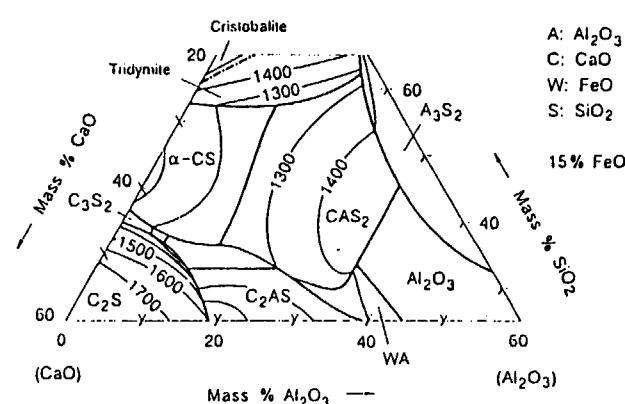


Fig. 3.310.

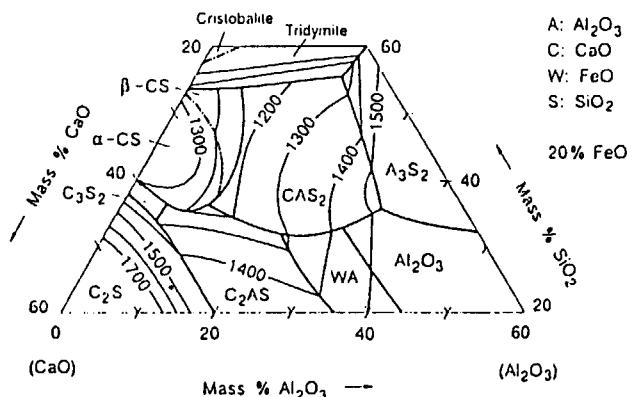


Fig. 3.311.

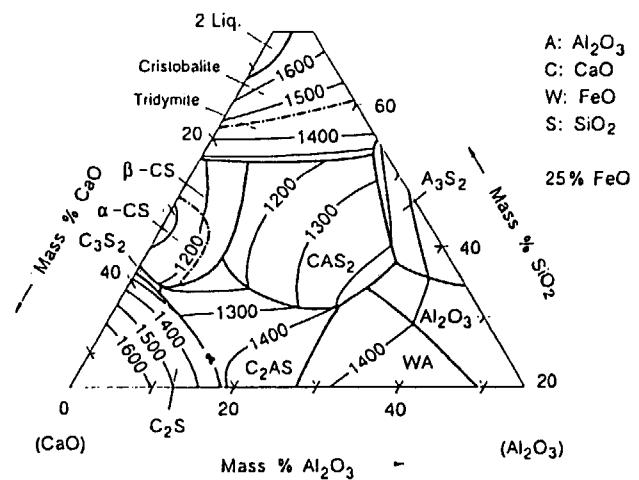


Fig. 3.312.

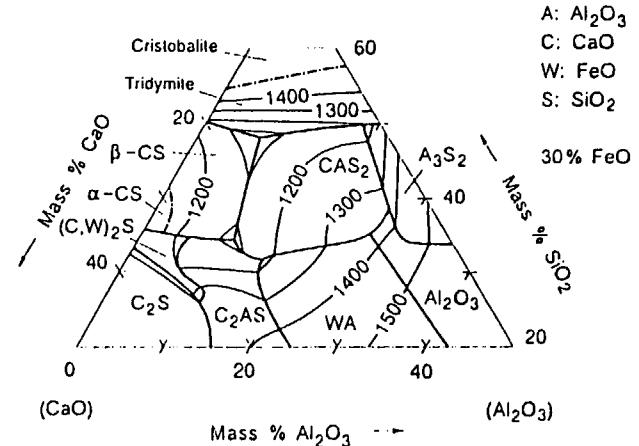


Fig. 3.313.

Figures 3.308 to 3.313. Tentative liquidus surfaces in the system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_x\text{-SiO}_2$ with 5, 10, 15, 20, 25 and 30 mass % FeO (total iron oxide contents as re-calculated in equivalent FeO contents) after Kalmanovitch, Williamson [1] and Kalmanovitch et al. [2]. For the base system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$, see Fig. 3.166.

付録 II

粘性データ

Al₂O₃-CaO-SiO₂ 系

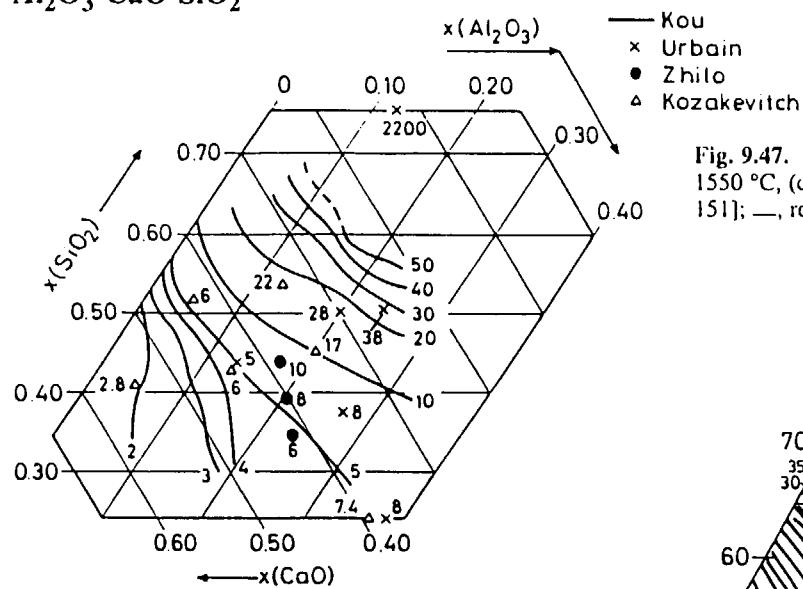
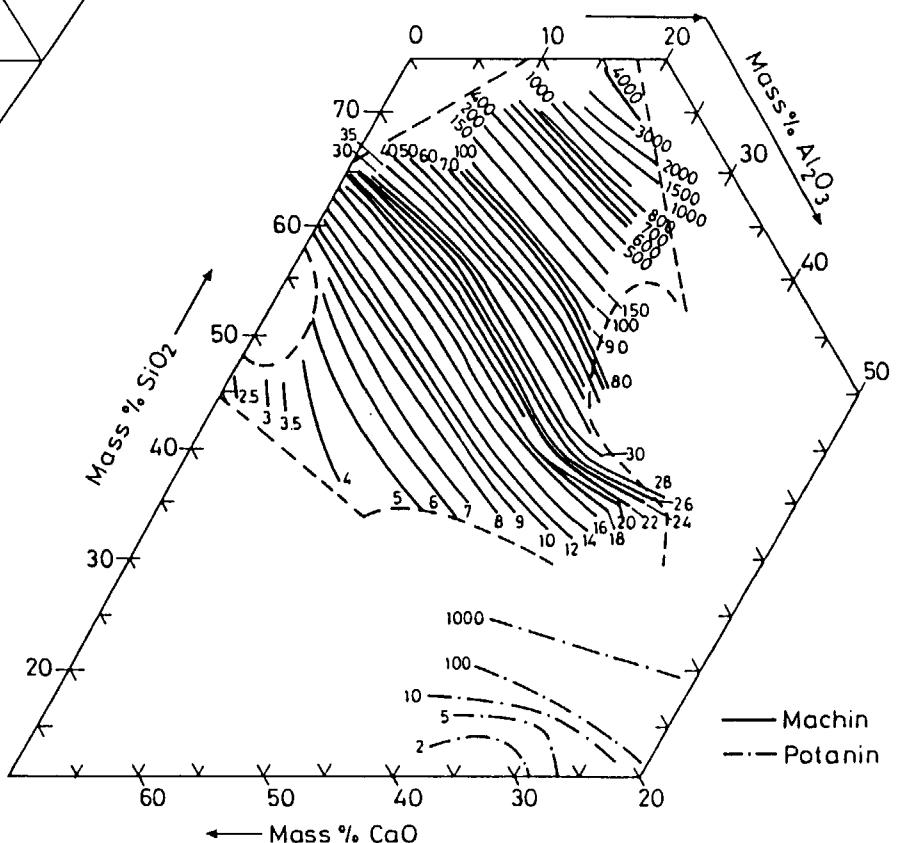
- [6] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.364 (1995)
- [7] Narottam P. Bansal and R.H.Doremus: Handbook of Glass Properties, pp.297 (1986)
- [8] O.V.Mazurin, M.V.Streltsina and Shvaiko-Shvaikovskaya: Handbook of glass data part C ternary silicate glasses, pp.779-pp.782 (1987)

Al₂O₃-CaO-FeO-SiO₂ 系

- [9] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.379-pp.380 (1995)
- [10] Gimmelfarb.A.A.: Izv. Akad. SSR Metally vol.2, pp.59-pp.70 (1968)

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系

[6] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.364 (1995)

 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ Fig. 9.47. Viscosities (poise) of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ melts at 1550 °C, (composition in mole fractions) [27, 56, 135, 150, 151]; —, recommended valuesFig. 9.48. Iso-viscosity (poise) contours of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ melts at 1500 °C [153, 154]; the preferred values due to [27, 56, 135] are ca. 20 % lower than contours shown [153]. Further values [152, 155-157]

[7] Narottam P. Bansal and R.H.Doremus: Handbook of Glass Properties, pp.297 (1986)

TABLE 9.101
Parameters of the Equation $\eta = \eta_0 \exp(E/RT)$ for the Viscosities of Calcium Aluminosilicate Glass Melts^a

Composition (mole %)			Temperature range (°C)	-log η_0 (P)	E (kcal mole ⁻¹)	Composition (mole %)			Temperature range (°C)	-log η_0 (P)	E (kcal mole ⁻¹)
CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂				CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂			
4	4	92	1650–1950	6.44	98.8	28	42	30	1550–2100	4.57	45.16
4.28	10.72	85	1850–2100	5.89	86.02	30	20	50	1550–2000	5.25	47.59
7.13	17.87	75	1750–2050	4.99	67.9	30	40	30	1700–2050	4.41	43.88
8	8	84	1650–1950	6.48	88.93	30	50	20	1750–2100	4.32	41.27
10	50	40	1900–2200	4.21	44	32	32	36	1550–1950	4.85	48.54
10	60	30	1900–2100	4.08	41.5	35	15	50	1700–2000	4.35	45.75
10.97	4.03	85	1700–2100	5.70	83.08	37.61	37.61	24.78	1600–1850	5.05	48.88
11.3	58.8	29.9	1850–2100	3.96	40.61	40	20	40	1550–2000	4.31	43
12.27	12.27	75.46	1650–1850	6.17	79.32	42	28	30	1550–2100	4.57	45.16
15	35	50	1800–2000	4.75	54	43.62	43.62	12.76	1650–1950	4.68	44.41
16.8	16.8	66.4	1650–1950	5.81	69.68	50	10	40	1500–1950	3.78	37.5
18.3	6.7	75.0	1700–2100	4.32	60.29	51	34	15	1550–2150	4.07	39.16
19.2	42.3	38.5	1700–2100	4.69	46.5	51.22	18.78	30.0	1550–2000	4.12	38.15
20	50	30	1750–2050	4	41.6	58.16	11.84	30.0	1750–2000	3.27	30.75
20	60	20	1850–2200	3.71	35.68	62.19	22.81	15.0	1550–2000	3.94	37.07
21.3	6.5	72.2	1550–1850	6.21	66.4	70.63	14.37	15.0	1700–2050	2.80	23.83
21.62	21.62	56.76	1550–1950	6.04	66.54						
24.25	60.75	15.0	1800–2050	3.41	34						
25	25	50	1550–1950	5.32	57.97						
26.7	26.7	46.6	1550–1950	4.90	52.19						

^a Data from Rossin *et al.* (1964).

- [8] O.V.Mazurin, M.V.Streltsina and Shvaiko-Shvaikovskaya: Handbook of glass data part C
ternary silicate glasses, pp.779-pp.782 (1987)

Machin, Hanna, 1945; Machin, Yee, 1948, 1954; Machin, Yee, Hanna, 1952

Oscillating cylinder viscometer. $\Delta\eta = \pm 4\% \eta$. Melting and measurements in platinum crucible.

Wt% by batch		η, P at temperature, °C							
R0	Al ₂ O ₃	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500
30	MgO 10	-	-	-	-	-	-	-	20.4
25	15	-	-	-	-	-	118	68.6	40.7
20	20	-	-	-	-	538	269	148	86.8
15	25	-	-	8260	3040	1310	612	318	175
20	15	-	-	-	1770	778	392	216	126
15	20	-	-	12400	4070	1980	956	488	263
10	15	-	-	-	-	-	2340	1100	568
35	CaO 35	-	-	-	-	-	-	-	10.2
45	20	-	-	-	-	-	13.6	7.6	4.96
40	25	-	-	-	-	-	19.9	11.9	7.53
35	30	-	-	-	-	-	31.7	18.9	11.6
30	35	-	-	-	248	109	54.7	31.4	19.0
25	40	-	-	-	-	-	-	40.9	24.9
50	10	-	-	-	-	-	8.33	5.23	4.01
45	15	-	-	85.8	40.3	22.2	13.32	8.22	5.16
40	20	-	-	148	67.6	35.1	21.5	13.7	8.32
35	25	-	-	283	128	63.9	34.9	21.7	14.3
30	30	-	-	-	-	129	69.4	39.5	27.1
50	5	-	-	-	-	-	-	4.80	3.41
45	10	-	-	-	-	-	11.6	7.57	4.88
40	15	-	-	-	-	33.1	19.4	12.6	8.54
35	20	-	674	272	125	63.3	37.1	22.6	15.0
30	25	-	-	-	-	132	70.1	41.0	26.3

(continued)

Wt% by batch			η, P at temperature, °C							
R0	Al ₂ O ₃		1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500
25	CaO	30	-	-	-	-	-	-	-	70.5
45	5	-	-	-	-	-	-	-	-	4.78
40	10	-	-	-	-	-	-	19.2	12.1	8.23
35	15	1250	469	209	105	57.1	34.7	21.9	14.3	
30	20	-	-	529	247	125	70.9	42.3	30.2	
25	25	-	-	-	-	-	-	99.8	57.7	
40	5	-	-	-	-	-	-	-	12.8	8.40
35	10	-	-	-	117	60.8	35.7	22.3	15.1	
30	15	2780	1080	456	225	121	73.2	44.8	28.6	
25	20	7950	2870	1200	580	309	171	98.7	61.5	
20	25	-	-	-	-	-	660	317	173	
35	5	-	-	-	-	-	39.4	25.0	17.1	
30	10	2520	990	421	220	126	81.6	51.7	32.6	
25	15	10600	3730	1560	730	391	214	128	77.7	
20	20	-	14700	5750	2530	1260	663	353	204	
15	25	-	-	-	-	-	2500	1220	621	
30	5	-	-	-	-	-	-	69.9	42.2	
25	10	11100	4160	1780	854	460	256	152	94.6	
20	15	-	-	-	4500	1960	1040	574	311	
15	20	-	-	31200	14700	6440	3210	1590	940	
10	25	-	-	-	-	-	-	3960	1900	
20	10	-	-	-	-	-	1070	600	361	
15	15	-	163000	56700	22200	9870	4690	2390	1320	
10	20	-	-	-	128000	46200	18200	8270	3950	

Imoto, Hirao, 1959.

Counterbalanced platinum sphere method. Melting and measurements in platinum crucible.

Wt% by analysis			Wt% by analysis		
PbO	B ₂ O ₃	t, °C	PbO	B ₂ O ₃	t, °C
70.1	0	764	4.08	70.4	9.6
		867	3.11	80.0	0
		972	2.46		668
70.4	9.6	605	4.12		670
		664	3.00		774
		770	1.84		889

(continued)

Wt% by analysis				Wt% by analysis			
PbO	B ₂ O ₃	t, °C	log η (P)	PbO	B ₂ O ₃	t, °C	log η (P)
70.5	19.5	572	3.97	71.1	28.6	552	3.93
		614	2.93			614	2.50
		707	1.43			717	1.04
		824	0.61			824	0.35
80.0	9.6	498	4.13	79.8	19.6	474	3.72
		518	3.48			511	2.44
		568	2.30			563	1.74
		665	1.10			668	0.57
		771	0.49		89.5	448	2.30
90.3	0	700	0.24			568	0.45
		753	0.10			591	0.29

Mikiashvili, Tsylev, Samarin, 1957.

Rotating viscometer using graphite crucible and molybdenum spindle.
Temperature 1500°C.

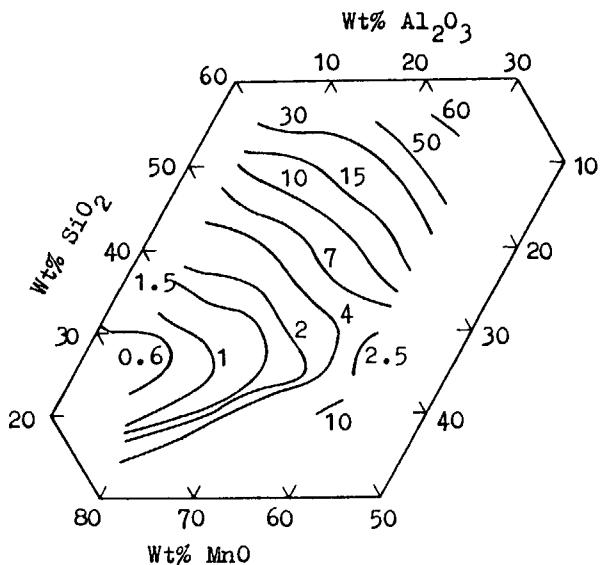


Fig. 699. Numbers by curves are viscosity, P.

Kozakevitch, 1960.

Rotating viscometer with coaxial molybdenum or tungsten cylinders.
Measurements in argon atmosphere. Melting in molybdenum crucible.

Wt% by batch		η, P at temperature, °C											
CaO	Al_2O_3	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000
60	30	-	-	2.2	1.3	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	-	-
50	40	7.7	5.0	3.3	2.3	1.7	1.5	1.2	1.0	0.9	0.8	-	-
40	50	-	-	5.2	3.4	2.3	1.7	1.4	1.2	1.0	1.0	-	-
35	55	-	-	-	3.9	2.6	1.9	1.6	1.4	-	-	-	-
25	65	-	-	-	-	2.2	1.7	1.4	1.2	-	-	-	-
50	30	-	-	-	2.4	1.8	1.4	1.2	1.0	0.8	0.7	-	0.6
40	40	-	-	6.3	4.0	2.7	2.0	1.5	1.3	1.1	0.9	-	-
30	50	-	11.5	7.4	4.7	3.3	2.5	1.9	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0
20	60	-	-	-	-	-	2.7	2.0	1.6	1.4	1.3	-	-
50	20	-	-	-	2.5	1.8	1.4	1.1	0.9	0.8	0.7	-	0.6
40	30	-	9.2	6.1	4.4	3.3	2.4	1.9	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
30	40	30.2	18.0	11.4	7.8	5.8	4.4	3.2	2.4	1.9	1.7	1.4	1.2
20	50	-	-	-	-	6.6	5.0	3.9	3.0	2.3	1.8	1.5	1.2
10	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.9	1.5	1.2
50	10	5.3	3.9	2.8	2.1	1.6	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
40	20	14.7	9.2	6.2	4.3	3.0	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2
30	30	39.2	25.7	16.8	11.0	7.6	5.3	3.8	2.8	2.3	2.0	1.8	1.6
20	40	-	-	-	19.9	13.9	9.6	7.1	5.3	4.1	3.1	-	-
20.2	36.6	-	-	-	25.4	16.6	10.7	7.3	5.6	-	-	-	-
40	10	12.3	8.6	6.2	4.5	3.4	2.6	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
30	20	42.4	32.2	22.1	15.8	11.6	8.4	5.9	4.4	3.5	3.0	2.7	2.5
20	30	-	-	-	-	33.4	22.3	14.7	10.7	8.0	6.0	4.6	3.8
10	40	-	-	-	-	-	-	17.5	12.4	8.6	6.1	4.4	3.7
30	10	-	-	-	17.9	12.4	8.9	6.6	5.0	3.9	3.0	-	-
20	20	-	-	-	-	-	38.0	27.1	18.7	13.2	10.1	8.4	7.3
10	30	-	-	-	-	-	-	-	25.5	16.8	12.4	9.8	-

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}\text{-FeO}\text{-SiO}_2$ 系

[9] Verein Deutscher Eisenhuttenleute: SLAG ATLAS 2nd Edition, pp.379-pp.380 (1995)

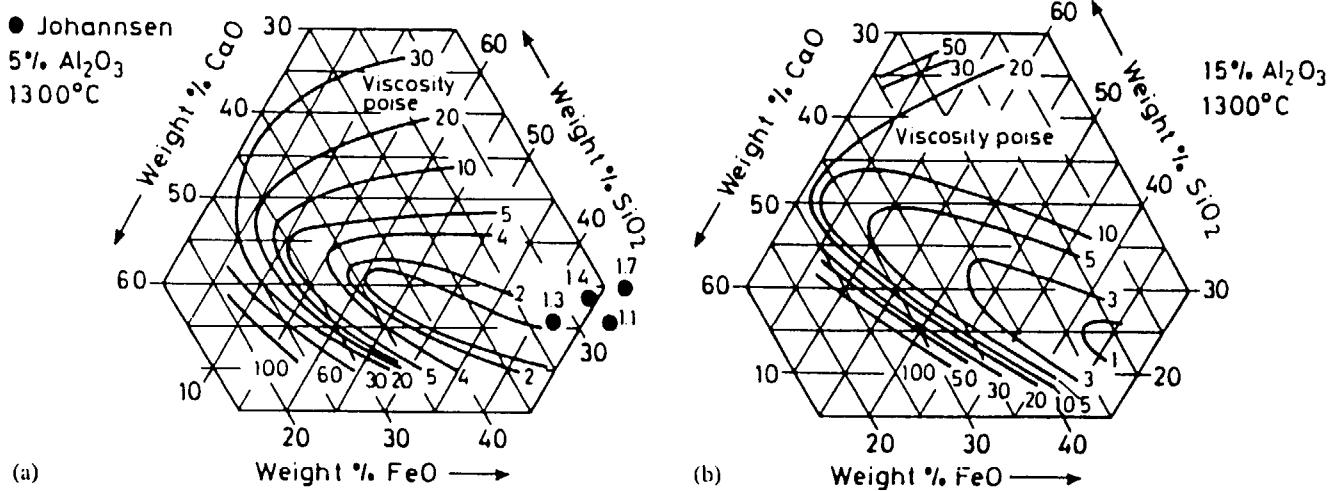
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-Fe}_x\text{O-SiO}_2$ 

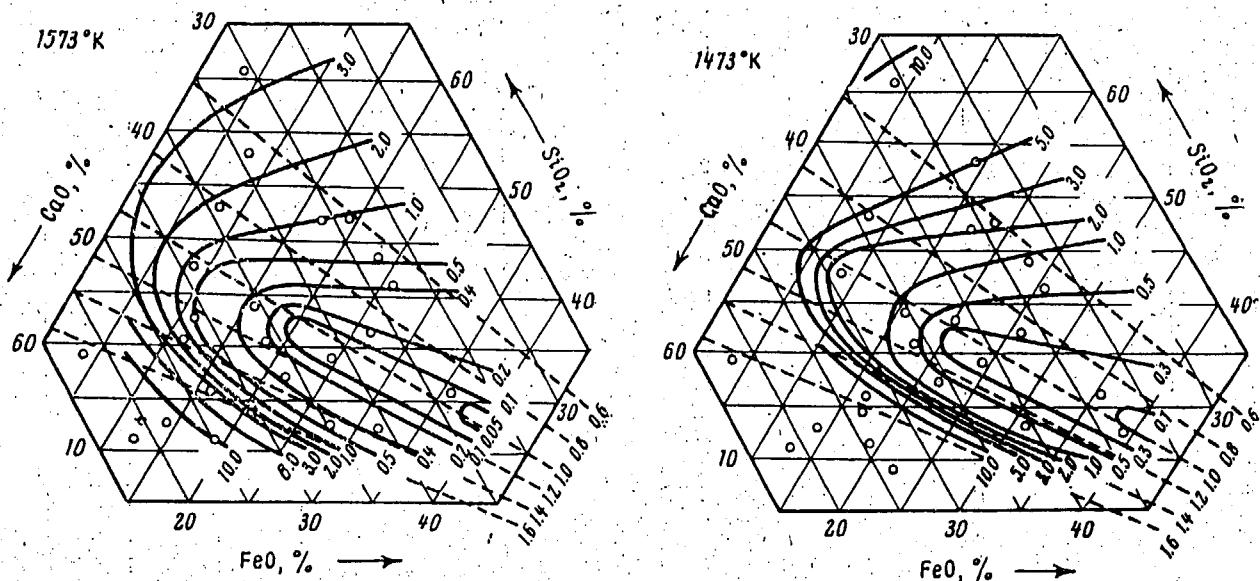
Fig. 9.86 a,b. Iso-viscosity (poise = 10^{-1} Pa.s) contours at 1300°C for $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ melts containing (a) 5 and (b) 15 mass % Al_2O_3 [228, 188]. Further Ref. [157]

Tab. 9.17. Viscosities reported for $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Fe}_x\text{O} + \text{SiO}_2$ system

References	Composition, mass %				Viscosity (poise) at T °C Experimentally						Estimated R , U
	Al_2O_3	CaO	Fe_xO	SiO_2	1250	1300	1400	1500	1600	1700	
Kolesov [229]	7.3	22.4	19.2	38.1	12.7						8.7 , 10.8 17 , 24
	3.7	5.4	65.4	20.3	1.1						
	5.5	9.2	51.1	31.5	1.9						
	4.8	9.2	56.1	31.4	2.2						
	2.7	3.7	59.0	20.0	1.1						
	4.5	1.4	65.0	25.1	1.6	1.1					
	5.2	2.6	56.5	28.0	1.6	1.1					
	5.8	2.7	61.1	29.7	1.6	0.6					
	4.4	1.4	59.6	26.5	1.2	0.3					
	3.9	1.7	58.0	27.0	2.2	1.1					
	5.6	1.6	39.6	39.6	7.0	5.5					
	4.9	6.7	41.0	35.1	3.6	2.4					
	7.0	17.4	44.6	26.6	2.0	1.7					
Izchanov [189]	10.2	1.9	47.8	39.7	10	4					(1300) 65 , 80 143 , 232
	10.5	5.8	44.6	40.3	19	8					
	10.4	9.9	40.2	39.8	40	17					
	10.7	3.8	41.2	44.8	18	9					
	11.2	9.8	35.8	43.7	35	15					
	11.3	3.8	35.6	49.5	44	28					
	11.0	9.9	30.4	50.9	88	45					
	11.1	3.9	31.3	54.8	60	40					
	11.4	10.2	25.0	54.7	190	115					
Nurkeev [230]	26.6	14.6	4.6	52.2						60	(1700) 58 , 74
	26.1	16.5	4.5	51.1						140	
	25.5	18.2	4.4	49.5						100	
	25.0	19.9	4.3	49.0						57	
	24.5	21.5	4.2	48.0						42	
	23.9	23.6	4.1	46.8						22	
	23.3	25.5	4.0	45.6						18	
Sheludyakov [175]	21.7	15.5	12.0	50.8			400				66 , 64
	18.5	13.2	25.0	43.3			45				
Kurochkin [231]	3.3	13.1	29.9	54.3		26					(1400) 68 , 100 1500 64 , 73
	3.3	18.4	20.3	57.4		24					
	3.7	29.2	16.7	48.6		24					
	13.2	12.6	25.2	48.5			28	24			
	12.6	17.1	19.9	50.6			41	32			
	11.6	20.6	14.8	52.6			32	29			
	16.9	23.9	11.8	46.7			13	6			
	19.6	16.4	7.8	57.8			35	19			
	22.0	21.8	6.4	48.9			30	20			
Johannsen [188]	4.6	4.5	54.7	34.2	2.8	2.0	1.2				(1400) 3 , 4
	4.1	8.1	50.6	35.2	3.3	2.5	1.3				
	4.9	4.5	56.3	31.0	1.8	1.4	0.9				
	5.2	7.4	52.9	31.7	2.1	1.6	1.1				
	5.0	3.3	59.9	28.6	1.4	1.0	0.8				
	5.1	6.4	55.7	29.7	1.6	1.2	0.9				
	5.3	4.5	56.6	31.1	1.8	1.3	0.9				
	5.1	7.4	53.0	32.7	1.8	1.4	1.0				
	5.0	3.8	59.1	30.8	1.4	1.1	6.8				
	5.6	7.0	54.0	30.9	—	1.3	0.9				

(a) R, U, Estimated by Riboud and Urbain methods respectively

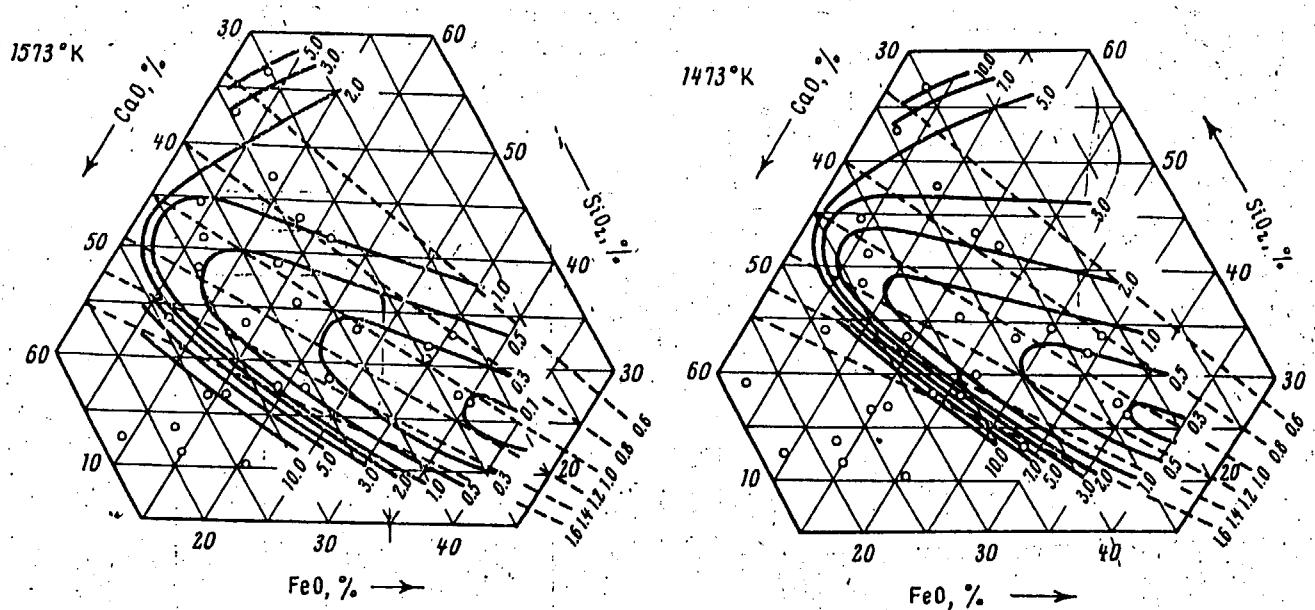
[10] Gimmelfarb.A.A.: Izv. Akad. SSR Metally vol.2, pp.59-pp.70 (1968)



Фиг. 2. Диаграммы вязкости шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ при 5% Al_2O_3 для температур 1573 и 1473°К

Показатели вязкости шлаков I группы

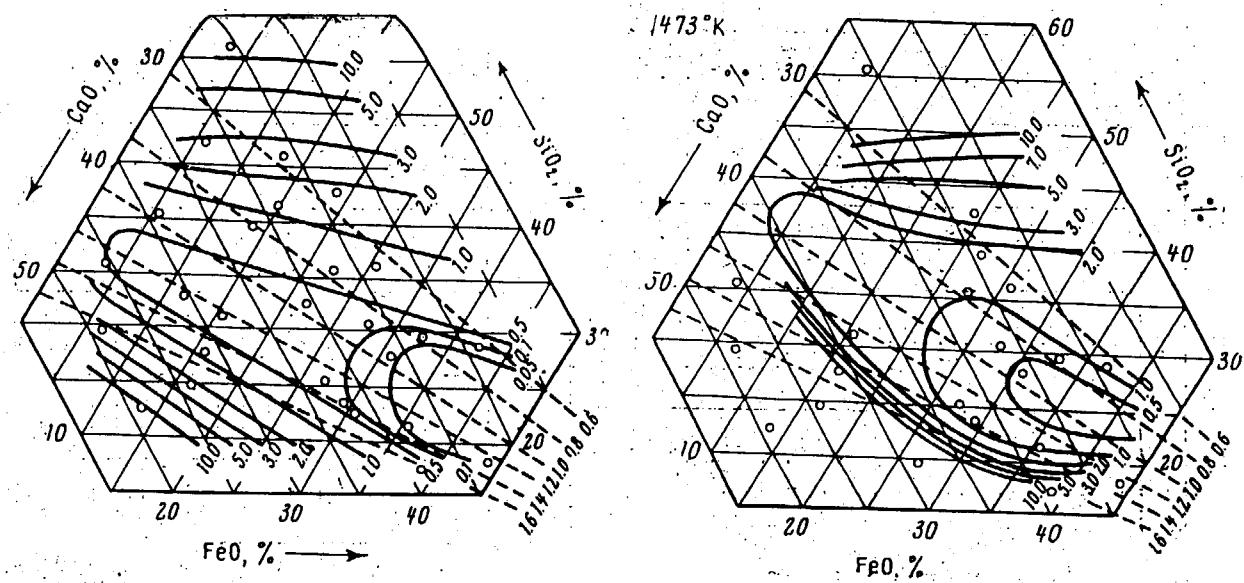
Al_2O_3 , %	Химический состав шлаков, %			Основ- ность	Вязкость шлака, $\text{n}\cdot\text{сек}/\text{м}^2$, при температуре, °К						
	FeO	CaO	SiO ₂		1323	1373	1423	1473	1523	1573	1623
5.1	5.8	62.6	26.5	2.36	—	—	—	—	—	—	—
5.7	2.9	56.8	34.6	1.65	—	—	—	—	—	—	—
5.5	6.5	44.3	42.7	1.04	—	—	—	—	—	—	—
5.8	6.5	39.8	46.9	0.85	—	—	—	—	—	—	—
5.1	7.1	35.4	52.4	0.67	—	—	—	—	—	—	—
5.8	3.4	30.7	60.1	0.51	—	—	—	—	—	—	—
5.03	12.37	55.8	26.8	2.08	—	—	—	—	—	—	—
5.2	14.2	53.6	27.1	1.98	—	—	—	—	—	—	—
5.0	10.7	48.3	36.0	1.35	—	—	—	—	—	—	—
5.9	11.6	45.7	36.8	1.24	—	—	—	—	—	—	—
4.7	13.9	28.1	53.3	0.54	—	—	—	—	—	—	—
5.4	17.9	50.6	26.1	1.95	—	—	—	—	—	—	—
5.4	16.7	48.3	29.6	1.65	—	—	—	—	—	—	—
5.1	16.3	47.8	30.8	1.56	—	—	—	—	—	—	—
5.8	17.7	41.4	35.1	1.18	—	—	—	—	—	—	—
5.0	15.3	40.8	38.9	1.05	—	—	—	—	—	—	—
5.7	16.6	30.9	46.8	0.66	—	—	—	—	—	—	—
5.2	19.3	28.6	46.9	0.61	—	—	—	—	—	—	—
5.0	22.8	49.1	23.1	2.13	—	—	—	—	—	—	—
5.4	21.7	41.5	31.4	1.33	—	—	—	—	—	—	—
5.5	24.9	36.3	33.3	1.09	2.0	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05
6.0	20.0	37.1	36.9	1.00	1.5	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.05
6.1	22.7	27.9	43.3	0.64	—	—	—	—	—	—	—
6.0	27.1	40.4	26.5	1.53	—	—	—	—	—	—	—
5.6	25.7	32.4	36.3	0.89	—	—	—	—	—	—	—
6.3	25.6	27.3	40.8	0.67	—	—	—	—	—	—	—
5.7	31.9	35.7	26.2	1.34	—	—	—	—	—	—	—
6.3	31.0	35.3	27.4	1.29	—	—	—	—	—	—	—
5.3	38.9	31.4	24.4	1.28	—	—	—	—	—	—	—
5.6	40.5	27.5	26.5	1.04	—	—	—	—	—	—	—
6.3	35.8	27.0	30.9	0.87	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.05



Фиг. 3. Диаграммы вязкости шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ при 10% Al_2O_3 для температур 1573 и 1473° К

Показатели вязкости шлаков II группы

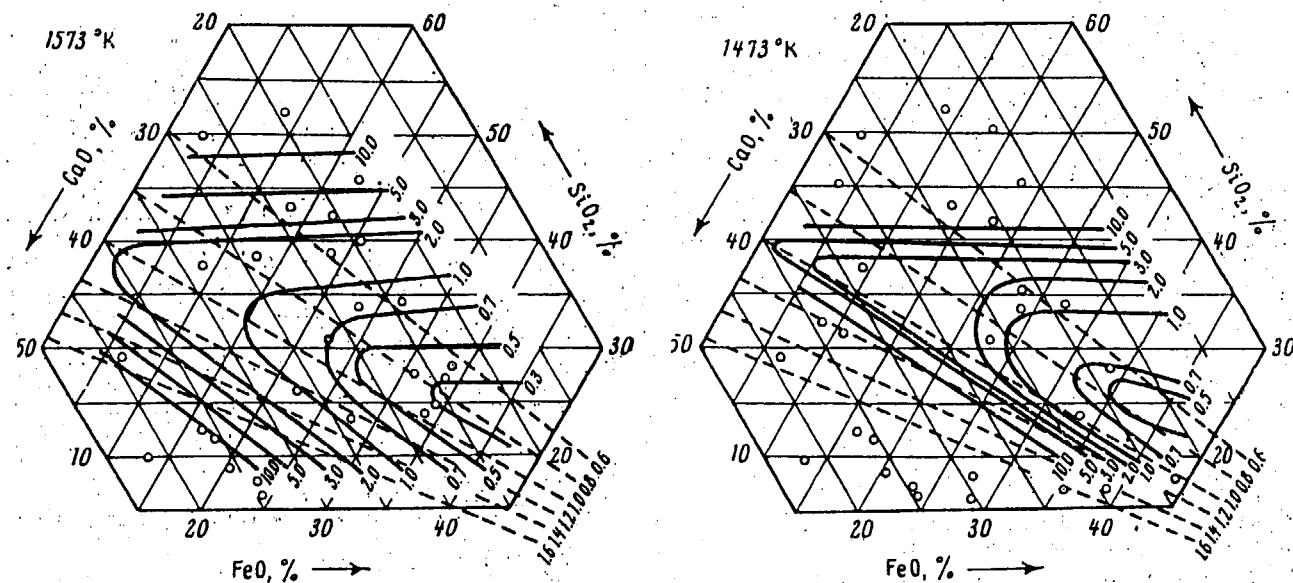
Химический состав шлаков, %	Основ- ность	Вязкость шлака, н.сек/м ² , при температуре, °К						
		1323	1373	1423	1473	1523	1573	1623
10.9	1.3	64.0	23.8	2.69	—	—	—	—
10.4	3.1	40.9	45.6	0.89	—	—	Tв.	2.1
10.8	2.8	34.0	52.4	0.65	—	—	Tв.	6.2
10.6	4.7	30.5	54.2	0.56	—	—	Tв.	6.3
10.2	9.8	56.9	23.1	2.46	—	—	—	—
10.3	6.2	49.1	34.4	1.43	—	—	Tв.	4.3
10.7	7.2	44.3	37.8	1.17	Tв.	3.5	1.9	1.1
10.5	6.5	43.3	41.7	1.04	—	—	Tв.	1.6
8.8	9.5	34.8	46.9	0.74	—	—	Tв.	3.2
10.9	14.1	54.3	20.7	2.62	—	—	—	—
11.3	12.5	53.2	23.0	2.31	—	—	—	—
10.6	14.1	49.5	25.8	1.94	—	—	—	Tв.
10.9	13.5	42.7	32.9	1.30	—	—	Tв.	1.3
10.5	13.5	37.1	38.9	0.95	Tв.	4.0	2.2	1.2
10.4	12.4	34.0	43.2	0.78	—	Tв.	4.3	2.3
11.1	10.7	28.7	49.5	0.58	—	Tв.	6.3	3.7
11.1	15.0	47.4	26.5	1.79	—	—	—	—
10.3	18.1	43.0	28.6	1.50	—	—	Tв.	7.0
10.8	16.3	37.7	35.2	1.07	Tв.	1.5	1.2	0.9
9.9	16.0	32.2	41.9	0.77	—	—	Tв.	2.1
10.7	20.0	48.3	21.0	2.40	—	—	—	—
10.6	20.1	41.5	27.8	1.51	—	—	Tв.	4.7
11.1	20.2	39.0	29.7	1.31	—	Tв.	1.2	0.8
10.7	22.0	33.0	34.3	0.98	7.5	1.6	0.9	0.5
10.4	29.0	38.1	22.5	1.69	—	—	Tв.	4.8
10.7	29.2	29.9	30.2	0.99	Tв.	1.2	1.0	0.4
10.6	28.9	28.8	31.7	0.91	1.2	0.7	0.5	0.4
8.9	30.9	26.8	33.4	0.80	1.5	1.2	0.9	0.8
10.7	41.5	28.6	19.2	1.52	—	—	Tв.	0.9
9.7	35.0	29.8	25.5	1.17	Tв.	0.9	0.4	0.3
10.7	33.2	29.0	27.1	1.07	Tв.	1.0	0.5	0.3



Фиг. 5. Диаграмма вязкости шлаков системы CaO-SiO₂-FeO-Al₂O₃ при 15% Al₂O₃ для температур 1573 и 1473°К

Показатели вязкости шлаков III группы

Химический состав шлаков, %	Основность	Вязкость шлака, н·сек/м ² , при температуре, °К						
		1323	1373	1423	1473	1523	1573	1623
Al ₂ O ₃	FeO	CaO	SiO ₂					
16.1	1.2	56.2	26.5	2.12	—	—	—	Tв.
15.0	7.0	47.4	30.6	1.57	—	—	—	2.2 0.4
14.9	3.8	45.7	35.6	1.28	—	—	—	0.8 0.5
15.1	5.4	39.5	40.0	0.99	Tв.	5.3	2.7	1.6 0.6
15.8	6.2	31.8	46.2	0.70	—	—	Tв.	4.3 2.8
14.6	3.1	26.6	55.7	0.48	—	—	—	1.9 6.8
15.1	12.3	50.7	21.9	2.41	—	—	—	Tв.
14.9	12.4	40.2	32.5	1.23	—	—	Tв.	0.8 0.4
15.4	12.3	36.9	35.4	1.04	—	Tв.	2.5	1.4 0.5
15.9	13.4	31.7	39.0	0.82	—	Tв.	4.4	1.7 0.8
15.9	12.4	26.6	45.1	0.59	—	Tв.	5.0	3.0 2.4
15.5	16.6	44.0	23.9	1.88	—	—	—	2.3 1.3
16.1	16.1	41.0	26.8	1.53	—	—	—	Tв. 0.8
15.4	15.1	38.0	31.5	1.21	—	Tв.	5.9	1.9 0.7
16.3	15.0	27.7	41.0	0.68	Tв.	5.8	3.2	2.4 1.8
14.7	19.4	23.2	42.7	0.54	—	—	Tв.	3.4 1.8
16.0	22.6	36.3	25.0	1.45	—	Tв.	2.0	0.9 0.5
14.1	22.0	31.4	32.5	0.97	—	Tв.	1.8	0.9 0.6
15.9	22.1	26.8	35.2	0.76	6.4	2.8	1.5	1.1 0.9
15.2	21.7	24.8	38.3	0.65	—	Tв.	2.6	1.5 1.1
16.3	26.8	38.1	19.8	1.92	—	—	—	Tв. 2.0
15.5	29.9	32.0	22.6	1.43	—	—	Tв.	1.0 0.5
14.1	27.1	33.8	25.0	1.35	—	Tв.	1.7	0.8 0.6
15.7	27.1	26.8	30.4	0.88	Tв.	1.3	1.0	0.8 0.5
15.8	25.7	22.5	36.0	0.65	4.5	2.3	1.6	1.2 0.9
15.4	30.7	31.6	22.3	1.42	—	—	1.1	0.8 0.5
16.2	30.8	25.9	27.1	0.96	6.5	0.9	0.5	0.3 0.1
15.1	32.9	22.7	29.3	0.77	1.4	1.2	0.9	0.7 0.2
15.7	37.9	29.1	17.3	1.70	—	—	—	1.0 0.5
15.3	39.3	28.3	17.1	1.65	—	—	—	0.5 0.2
14.6	35.1	28.7	21.6	1.33	—	Tв.	5.9	0.9 0.4
15.4	44.3	22.2	18.1	1.23	—	—	Tв.	4.0 0.4
14.7	37.0	19.1	29.2	0.65	Tв.	6.2	2.5	1.0 0.5



Фиг. 6. Диаграммы вязкости шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ при 20% Al_2O_3 для температур 1573 и 1473°К.

Показатели вязкости шлаков IV группы

Химический состав шлаков, %	Основность	Вязкость шлака, н·сек/м ² , при температуре, °К						
		1323	1373	1423	1473	1523	1573	1623
21.4	1.5	51.6	25.8	2.0	—	—	—	—
20.6	3.2	37.6	38.6	0.97	—	Tв.	5.2	3.1
20.3	3.9	30.8	45.0	0.68	—	—	—	—
20.1	3.5	26.7	49.9	0.54	—	—	—	—
19.5	6.8	44.8	28.9	1.55	—	—	—	—
20.0	9.6	38.2	32.2	1.19	—	—	—	—
19.0	9.0	34.9	37.1	0.94	—	Tв.	9.8	2.2
20.4	8.6	19.5	51.5	0.38	—	—	—	—
20.6	12.8	46.5	20.1	2.35	—	—	—	—
19.2	10.9	38.1	31.8	1.20	—	—	—	—
20.3	14.8	32.8	32.1	1.02	—	Tв.	4.9	2.8
20.1	12.9	28.7	38.3	0.75	—	Tв.	3.5	2.5
18.8	14.1	23.9	43.2	0.55	—	—	Tв.	6.2
19.2	18.0	40.8	22.0	1.85	—	—	—	—
19.0	16.2	41.7	23.1	1.81	—	—	—	—
20.7	18.5	22.8	38.0	0.59	—	Tв.	3.3	2.1
19.3	17.5	20.6	42.6	0.48	—	Tв.	4.5	3.0
19.1	18.0	17.0	45.9	0.37	—	—	Tв.	5.6
20.3	23.4	39.7	16.6	2.48	—	—	—	—
20.4	20.7	40.3	18.6	2.17	—	—	—	—
18.9	23.0	32.4	25.7	1.26	—	Tв.	7.3	1.7
19.5	32.9	27.4	30.2	0.91	—	Tв.	2.7	1.7
20.2	24.3	22.5	33.0	0.68	5.5	2.1	1.4	1.1
19.2	22.9	22.8	35.1	0.65	Tв.	5.4	2.4	1.6
18.6	20.2	20.1	41.1	0.49	—	Tв.	6.7	2.7
21.2	27.9	35.1	15.8	2.22	—	—	—	Tв.
19.5	25.7	34.0	20.8	1.62	—	—	—	Tв.
19.6	28.4	29.2	22.8	1.28	—	—	—	Tв.
20.7	26.6	18.6	34.1	0.55	Tв.	3.3	1.7	1.2
19.3	33.4	23.3	24.0	0.97	Tв.	6.1	1.6	0.8
18.6	30.4	23.3	27.7	0.84	Tв.	3.3	1.5	0.8
20.5	34.1	19.4	26.0	0.75	2.3	1.3	0.7	0.5
20.5	33.4	17.9	28.6	0.63	4.3	2.3	1.2	0.7
21.1	36.0	26.9	16.0	1.68	—	—	—	Tв.
20.0	39.9	23.9	16.2	1.45	—	—	—	Tв.
20.0	37.3	22.8	19.9	1.14	—	Tв.	3.1	0.9
20.3	44.7	17.6	17.4	1.01	—	Tв.	2.1	0.9

付録III

塩基度(1)を用いて評価したデータ集

※ 塩基度(2)を用いて評価した本文記載の図を全て塩基度(1)で評価

※ Fig.番号は全て本文に対応

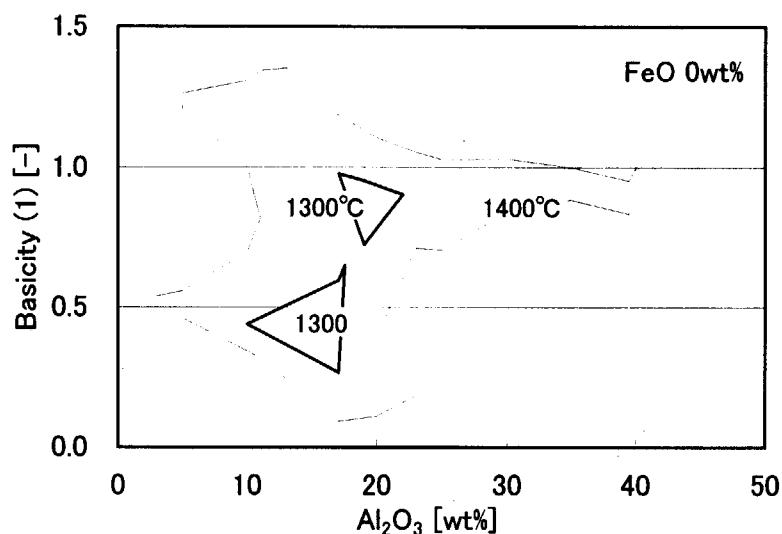


Fig.1-1 Meltable area of Al_2O_3 - CaO - SiO_2 slag
at 1300 and 1400°C
Basicity(1)= CaO/SiO_2

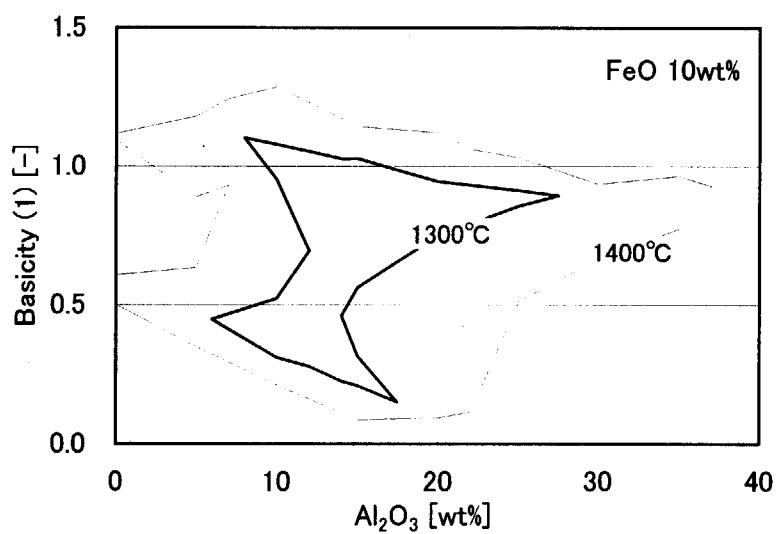


Fig.2-1 Meltable area of Al_2O_3 - CaO -10wt% FeO - SiO_2 slag
at 1300 and 1400°C
Basicity(1)= CaO/SiO_2

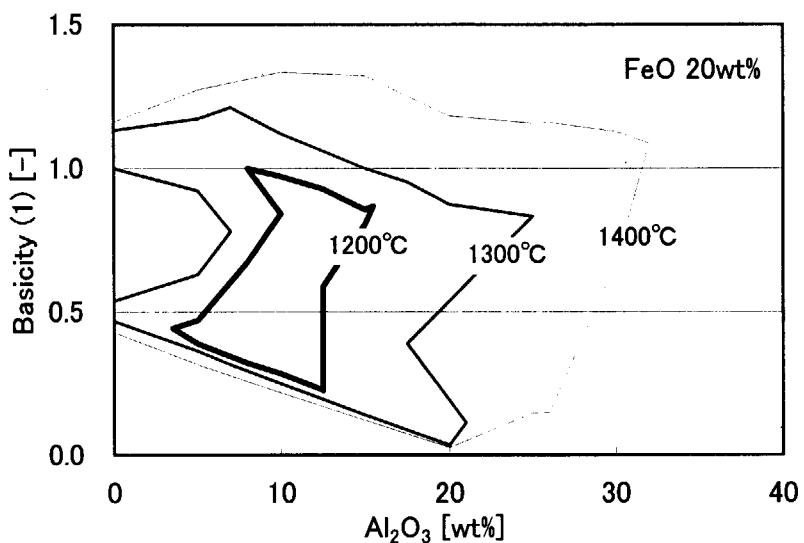


Fig.3-1 Meltable area of Al_2O_3 -CaO-20wt%FeO-SiO₂ slag
at 1200, 1300 and 1400°C
Basicity(1)=CaO/SiO₂

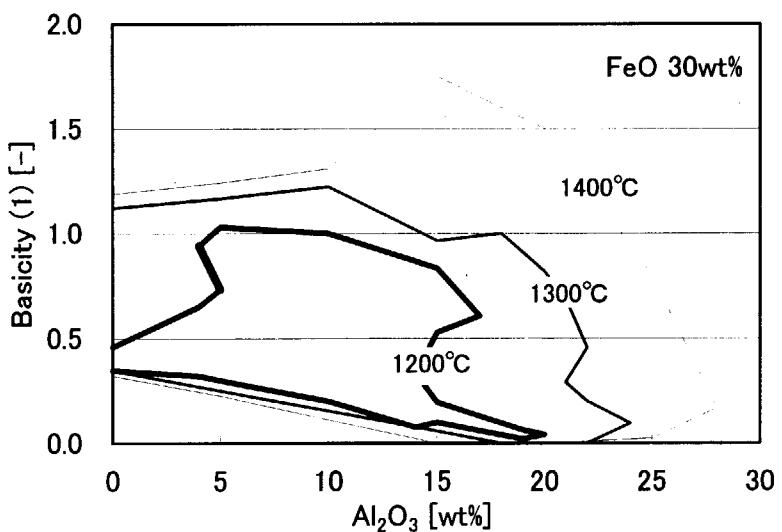


Fig.4-1 Meltable area of Al_2O_3 -CaO-30wt%FeO-SiO₂ slag
at 1200, 1300 and 1400°C
Basicity(1)=CaO/SiO₂

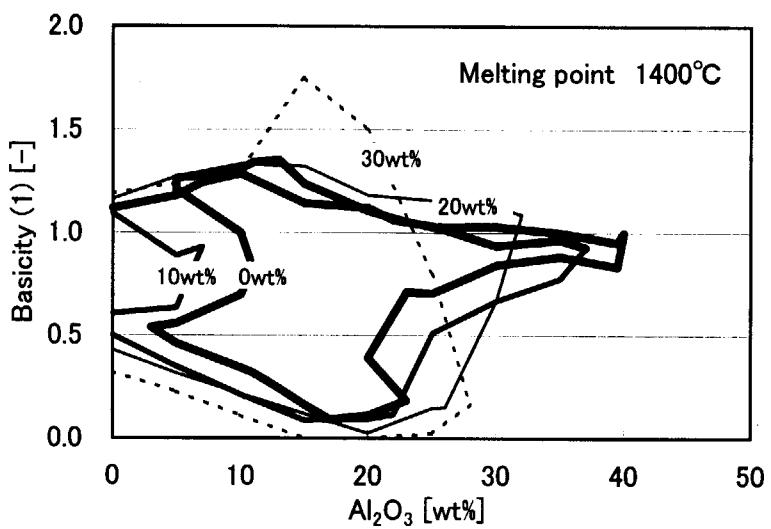


Fig.5-1 Relationship between concentration of FeO
and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1400°C
Basicity(1)= CaO/SiO_2

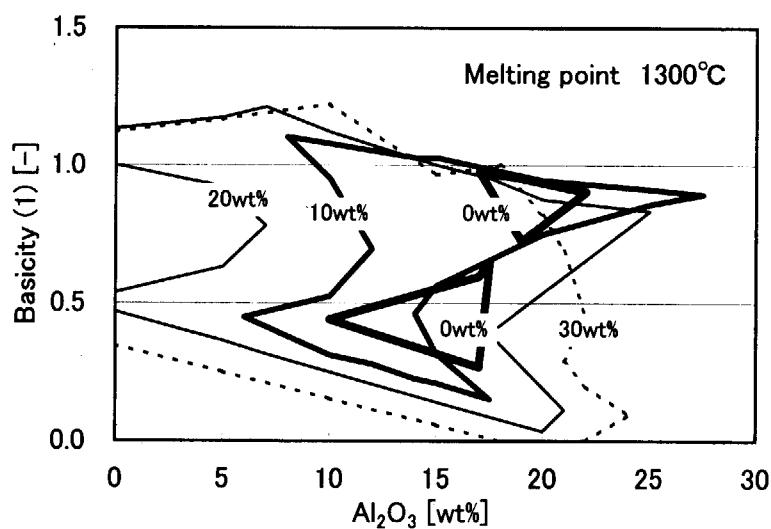


Fig.6-1 Relationship between concentration of FeO
and meltable area of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO-SiO}_2$ slag at 1300°C
Basicity(1)= CaO/SiO_2

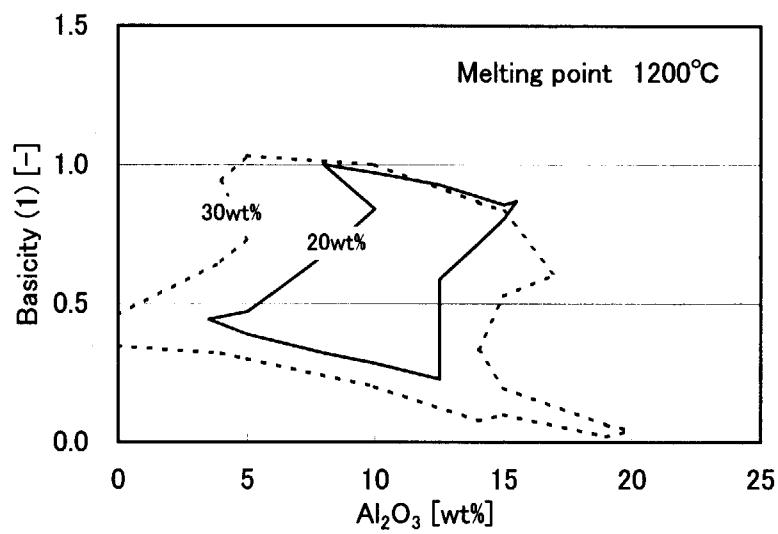


Fig.7-1 Relationship between concentration of FeO
and meltable area of Al₂O₃-CaO-FeO-SiO₂ slag at 1200°C
Basicity(1)=CaO/SiO₂

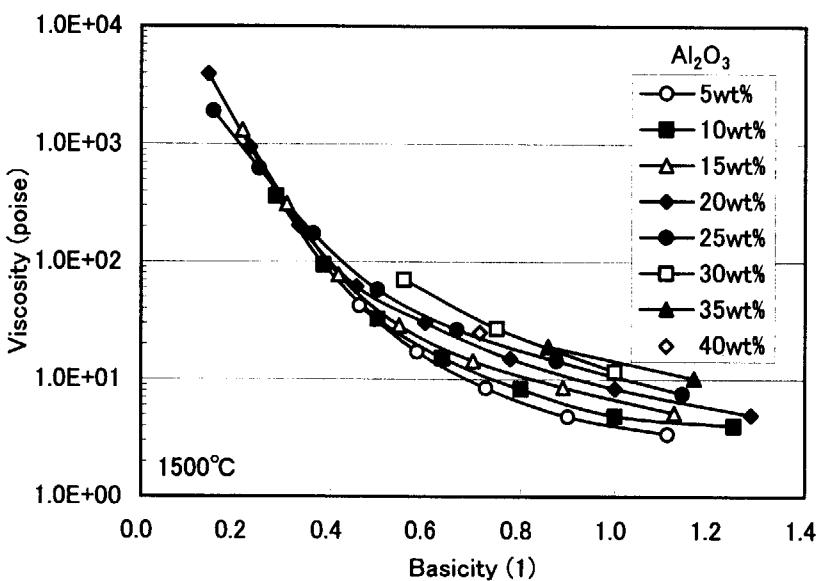


Fig.8-1 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1500°C
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

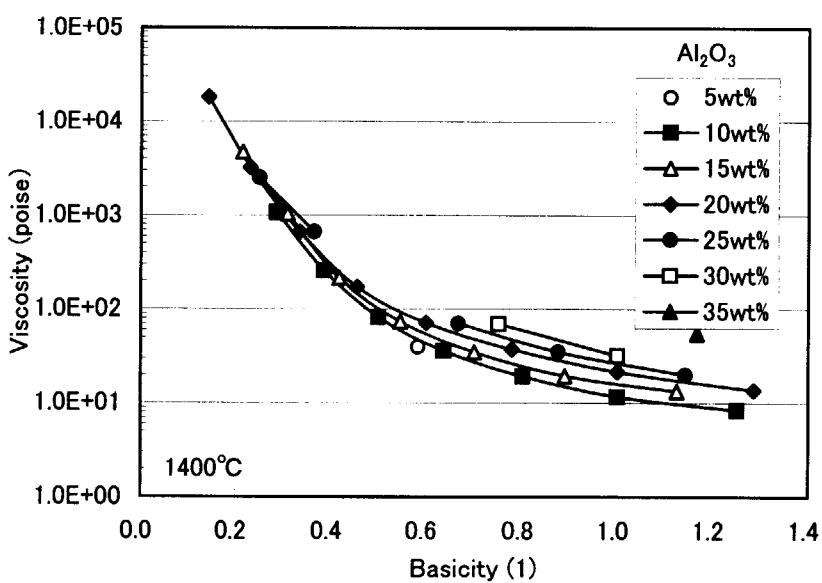


Fig.9-1 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1400°C
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

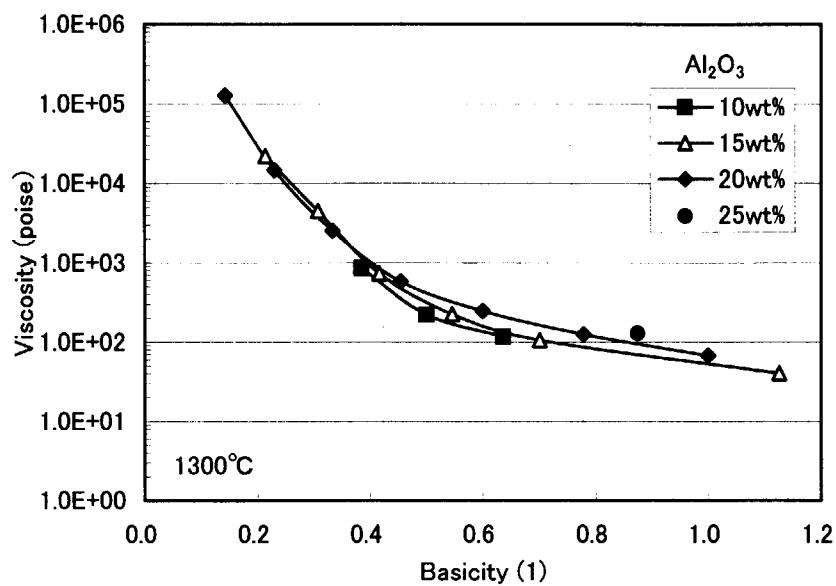


Fig.10-1 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1300°C
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

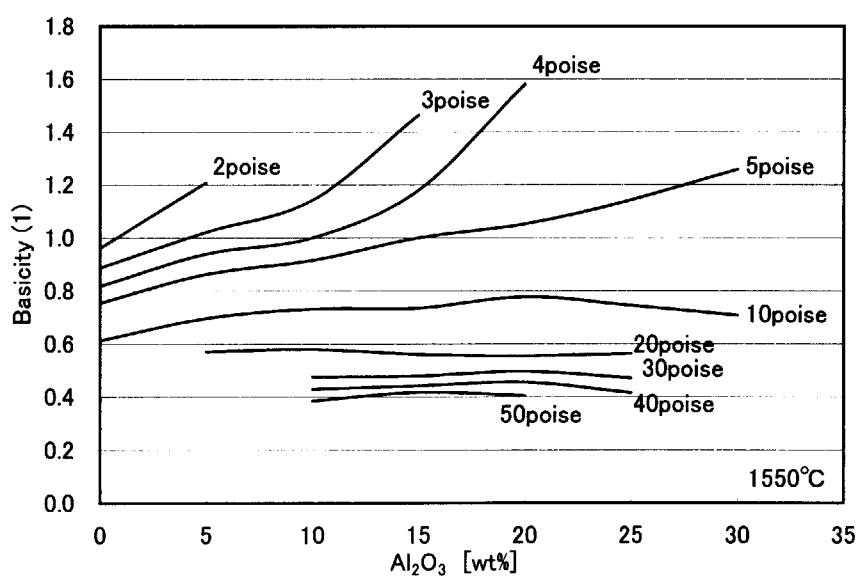


Fig.11-1 Iso-Viscosity curve at 1550°C
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

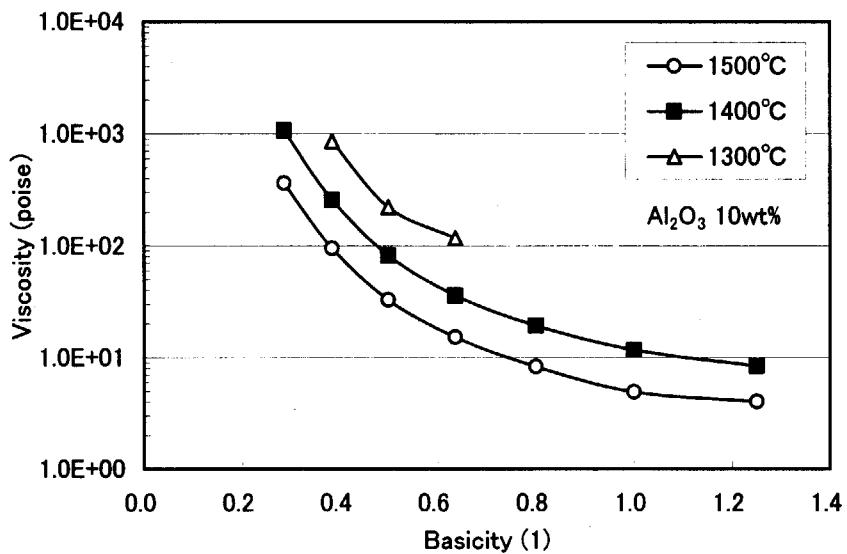


Fig.12-1 Relationship between temperature of melting
and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

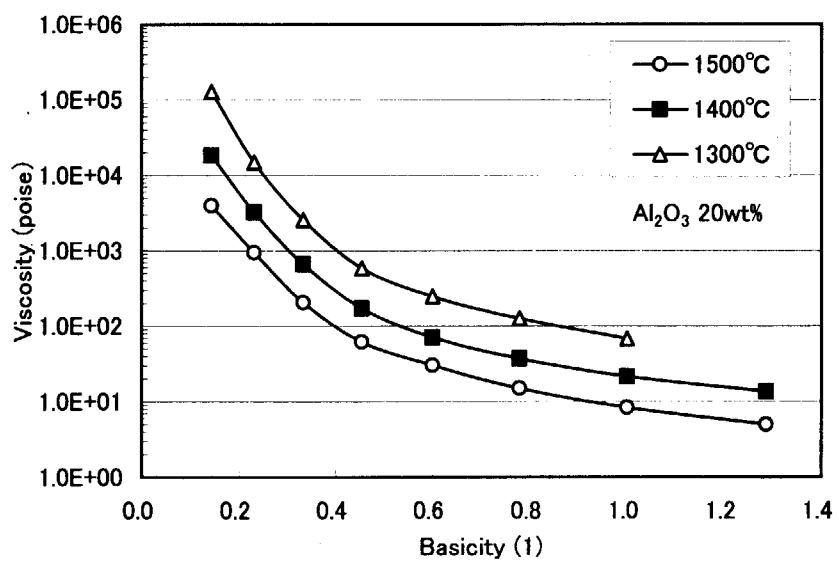


Fig.13-1 Relationship between temperature of melting
and viscosity of molten slag (Al_2O_3 20wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

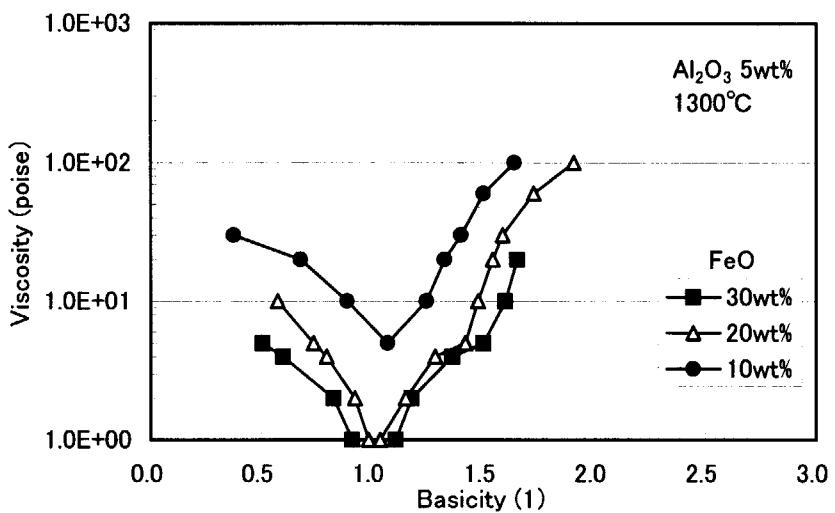


Fig.14-1 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 5wt%)

$$\text{Basicity(1)} = \text{CaO}/\text{SiO}_2$$

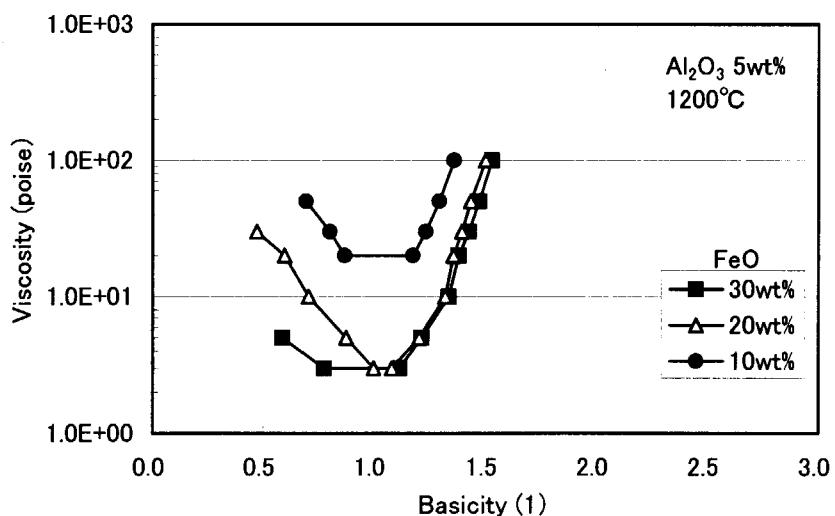


Fig.15-1 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 5wt%)

$$\text{Basicity(1)} = \text{CaO}/\text{SiO}_2$$

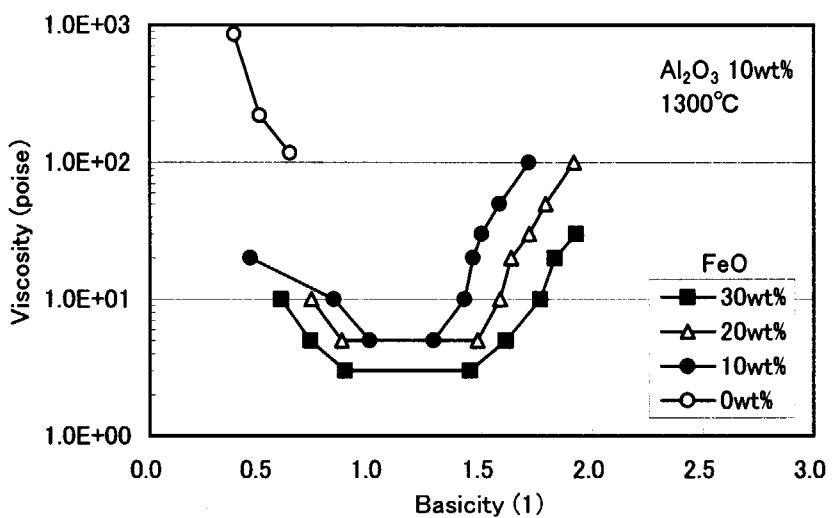


Fig.16-1 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 10wt%)

$$\text{Basicity(1)} = \text{CaO}/\text{SiO}_2$$

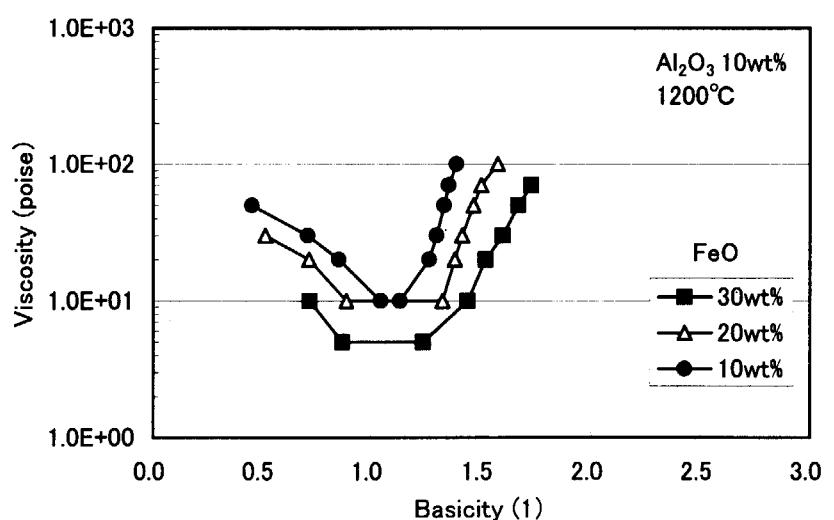


Fig.17-1 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 10wt%)

$$\text{Basicity(1)} = \text{CaO}/\text{SiO}_2$$

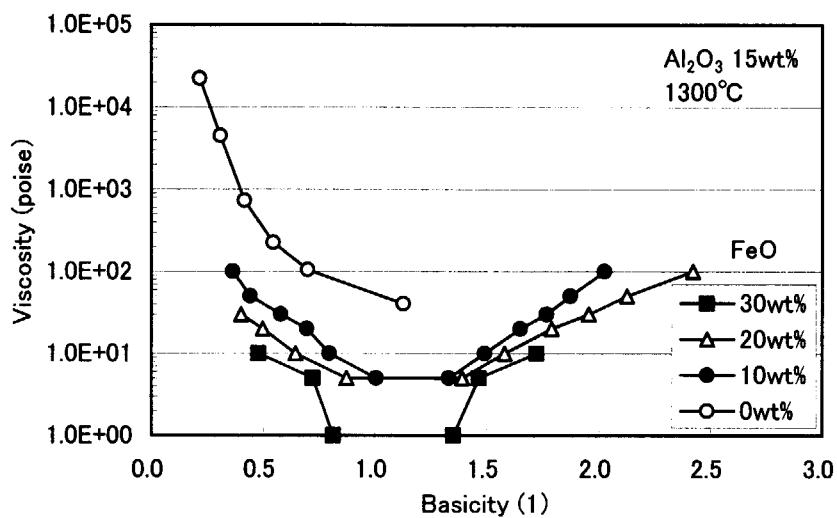


Fig.18-1 Relationship between concentration of FeO
and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 15wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

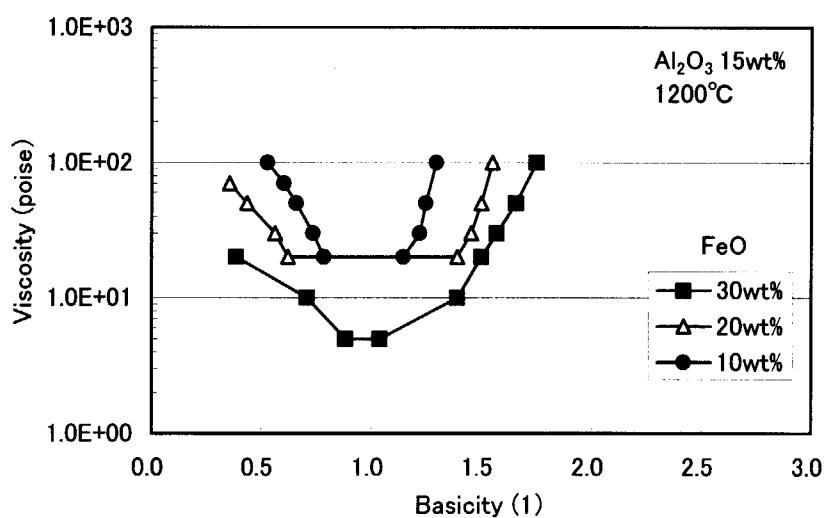


Fig.19 Relationship between concentration of FeO
and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 15wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

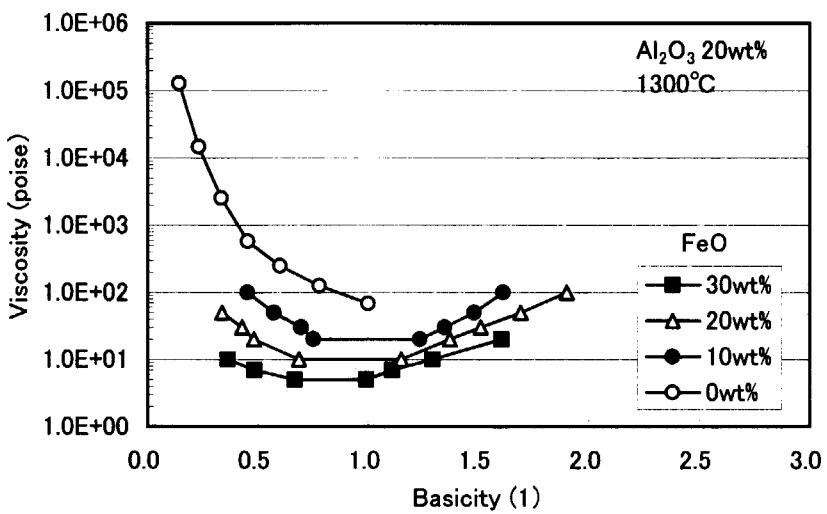


Fig.20-1 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1300°C (Al_2O_3 20wt%)
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

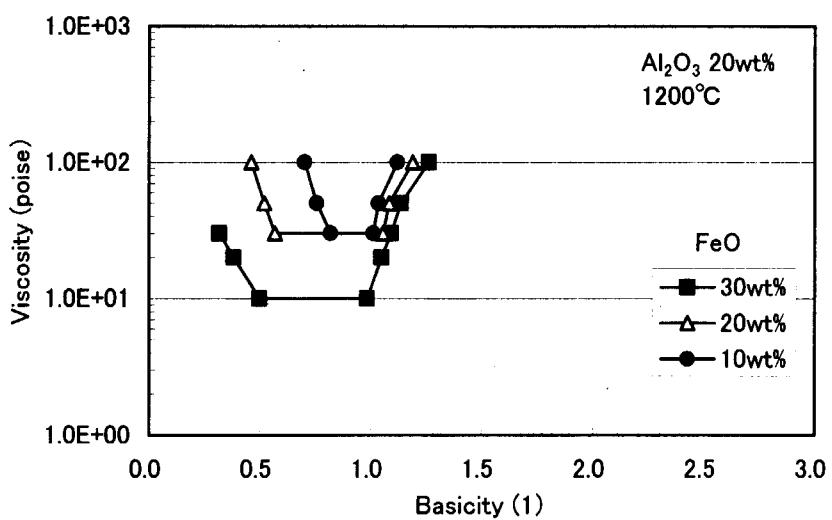


Fig.21-1 Relationship between concentration of FeO and viscosity of molten slag at 1200°C (Al_2O_3 20wt%)
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

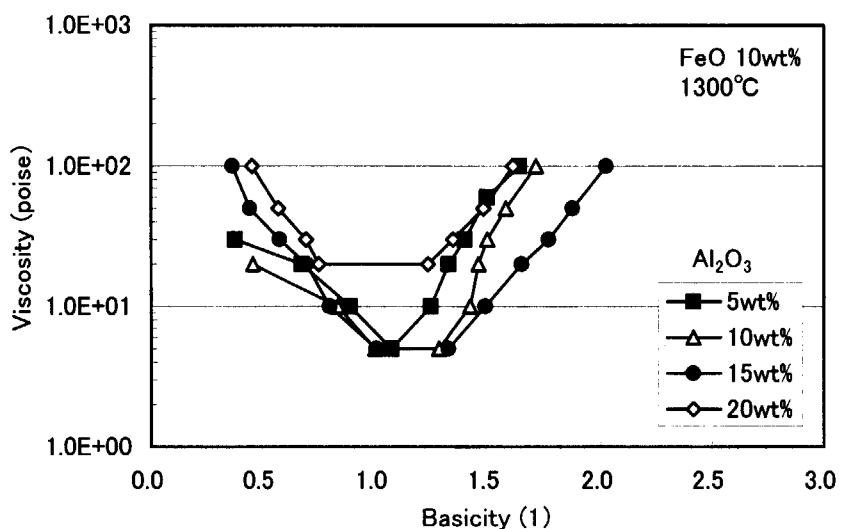


Fig.22-1 Relationship between concentration of Al₂O₃
and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 10wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

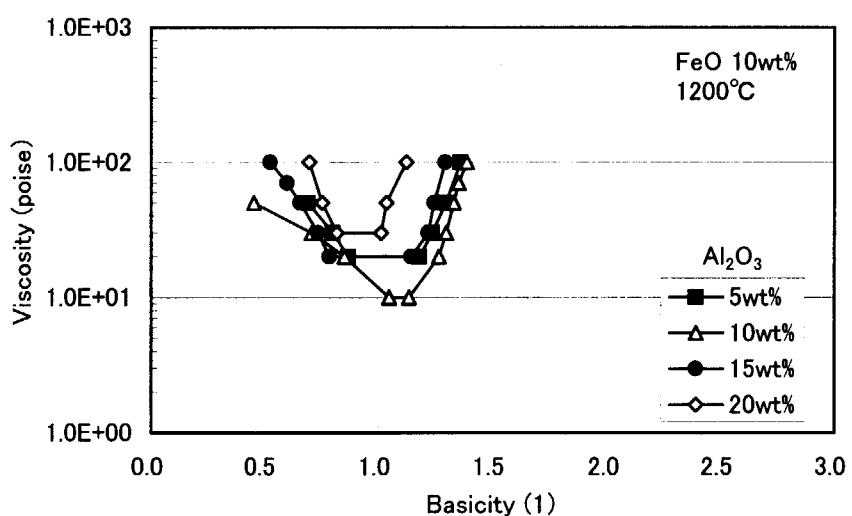


Fig.23-1 Relationship between concentration of Al₂O₃
and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 10wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

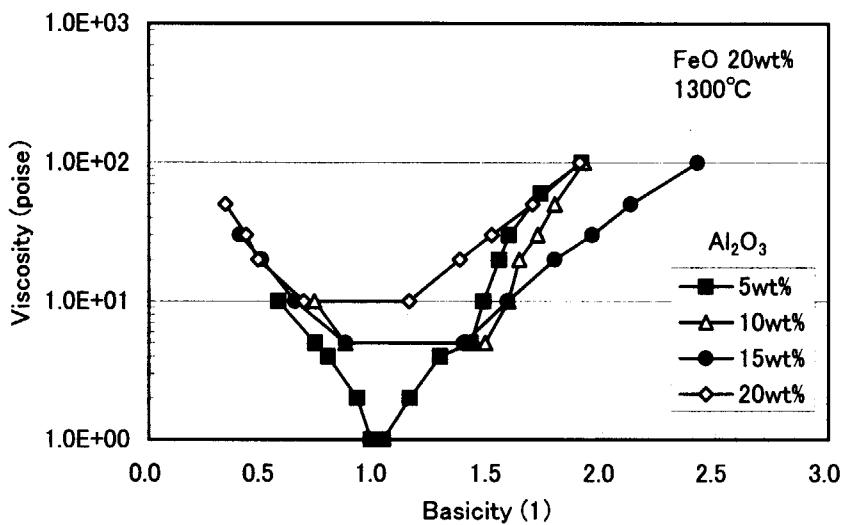


Fig.24-1 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 20wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

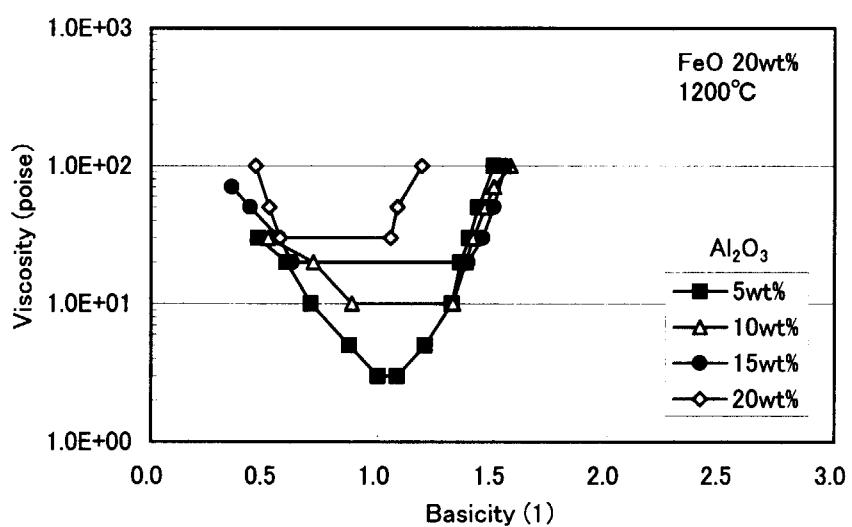


Fig.25-1 Relationship between concentration of Al_2O_3 and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 20wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

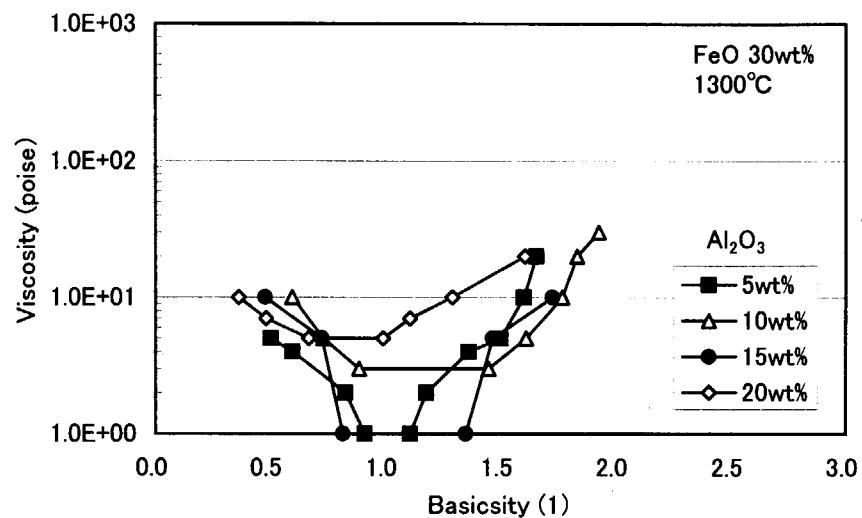


Fig.26-1 Relationship between concentration of Al₂O₃
and viscosity of molten slag at 1300°C (FeO 30wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

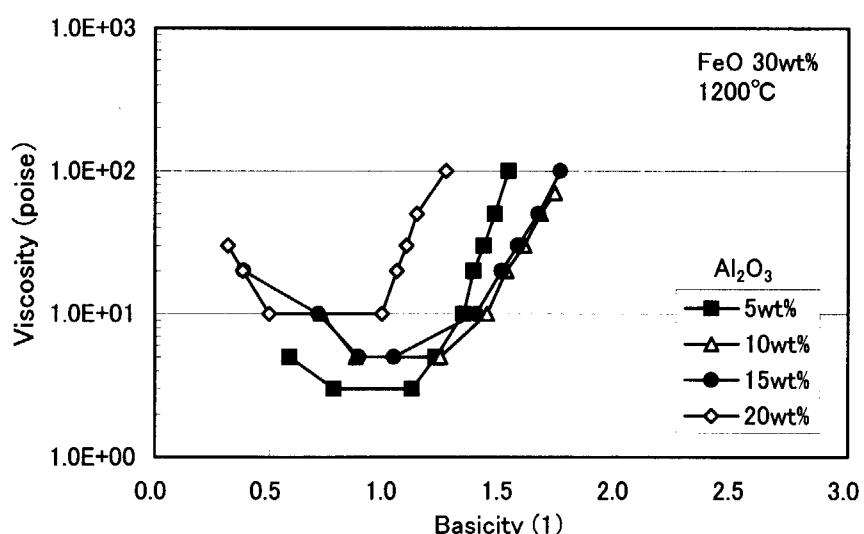


Fig.27-1 Relationship between concentration of Al₂O₃
and viscosity of molten slag at 1200°C (FeO 30wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

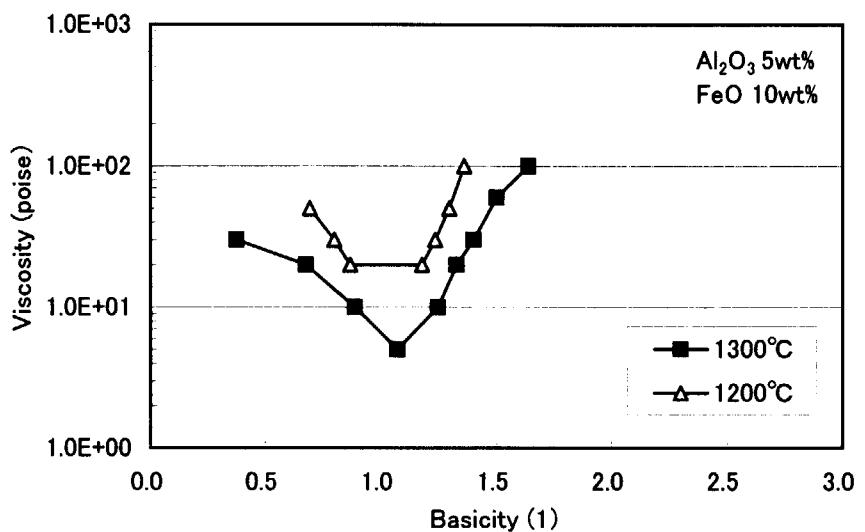


Fig.28-1 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al₂O₃ 5wt%, FeO 10wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

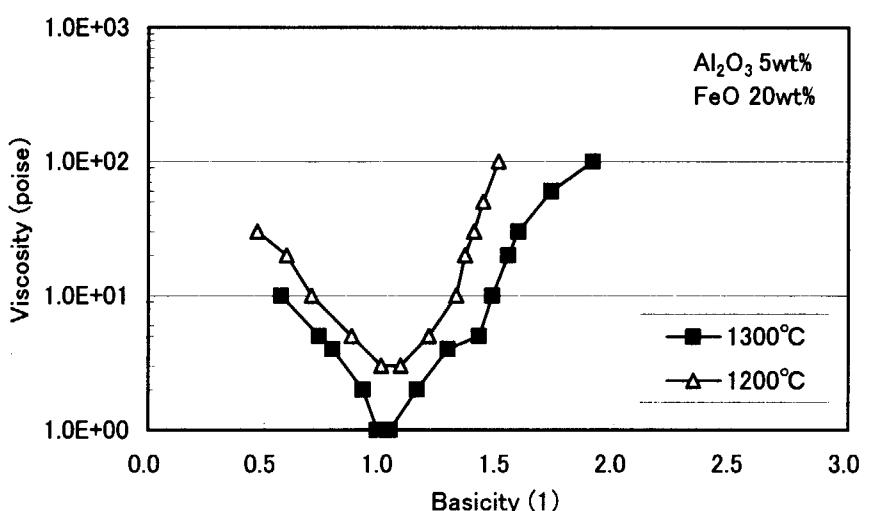


Fig.29-1 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al₂O₃ 5wt%, FeO 20wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

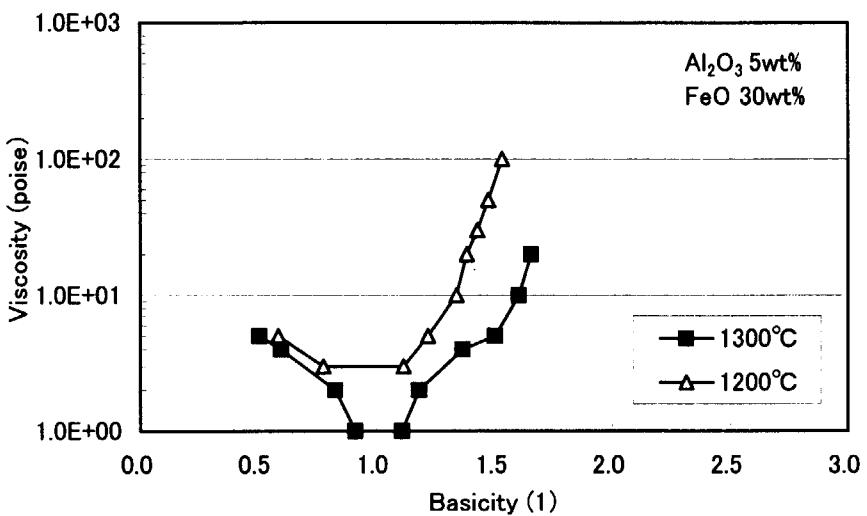


Fig.30-1 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 5wt%, FeO 30wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

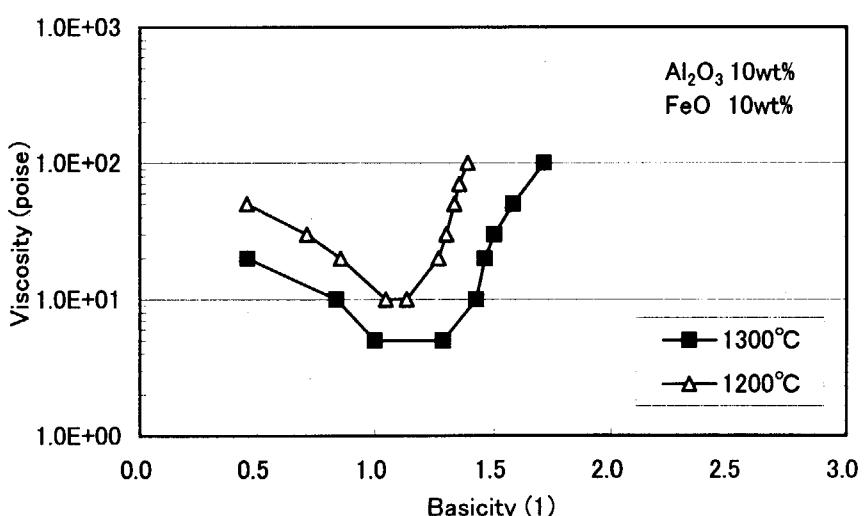


Fig.31-1 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%, FeO 10wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

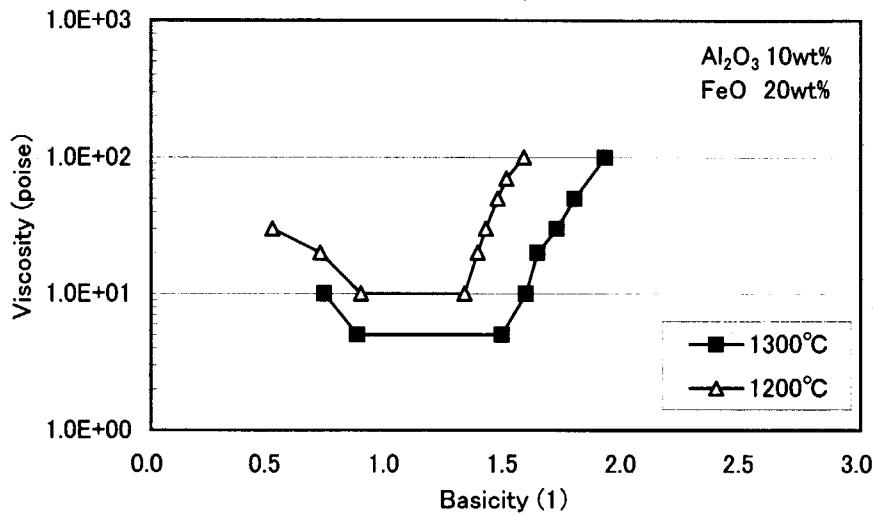


Fig.32-1 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%, FeO 20wt%)
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

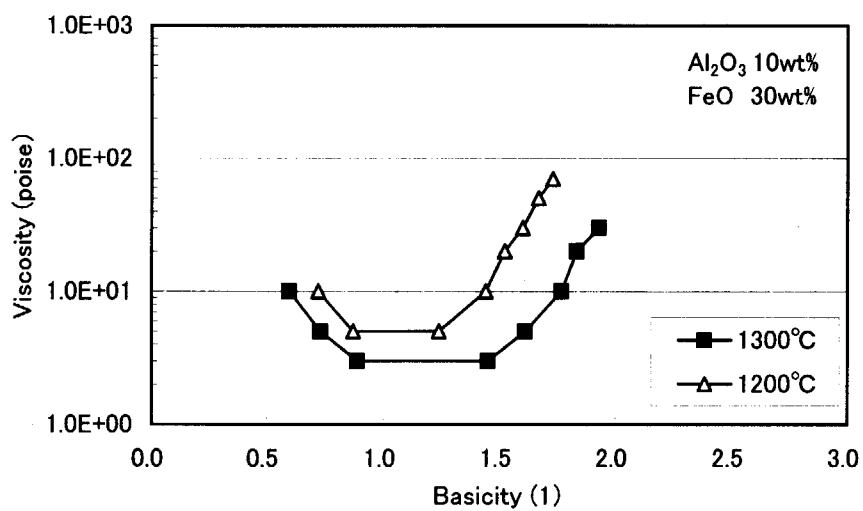


Fig.33-1 Relationship between temperature of melting and viscosity of molten slag (Al_2O_3 10wt%, FeO 30wt%)
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

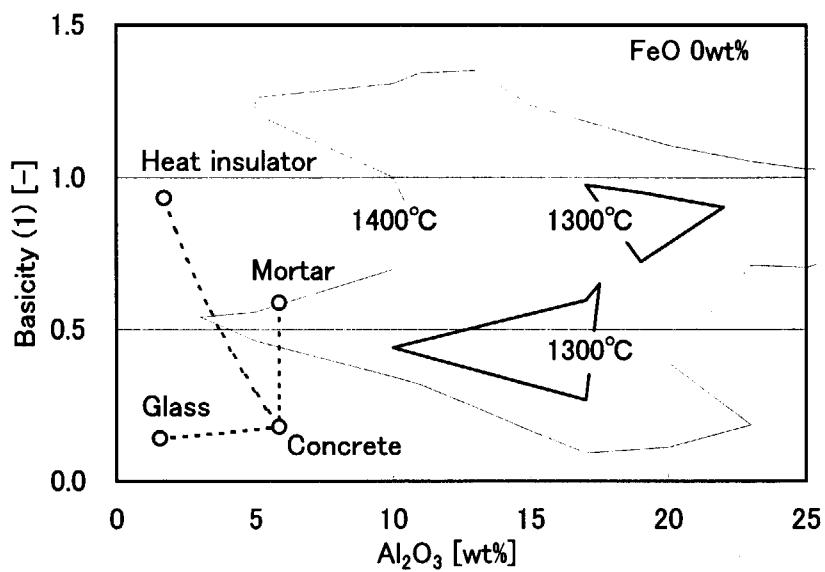


Fig.34-1 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al_2O_3 - CaO - SiO_2 slag at 1300 and 1400°C

$$\text{Basicity}(1)=\text{CaO}/\text{SiO}_2$$

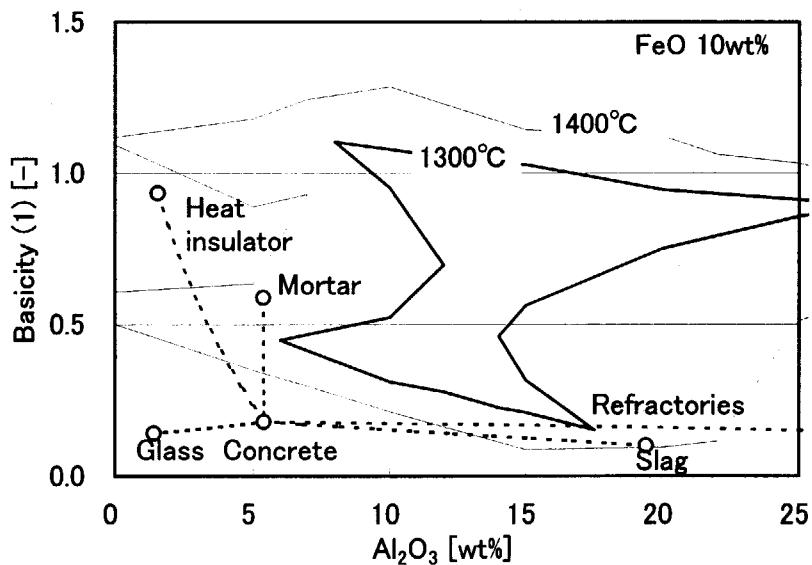


Fig.35-1 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al_2O_3 - CaO -10wt% FeO - SiO_2 slag at 1300 and 1400°C

$$\text{Basicity}(1)=\text{CaO}/\text{SiO}_2$$

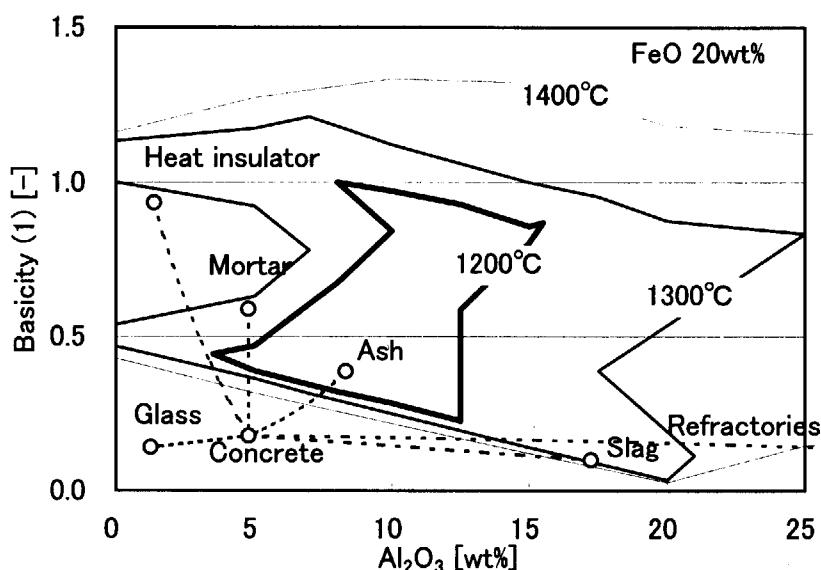


Fig.36-1 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al_2O_3 - CaO -20wt% FeO - SiO_2 slag at 1200, 1300 and 1400°C
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

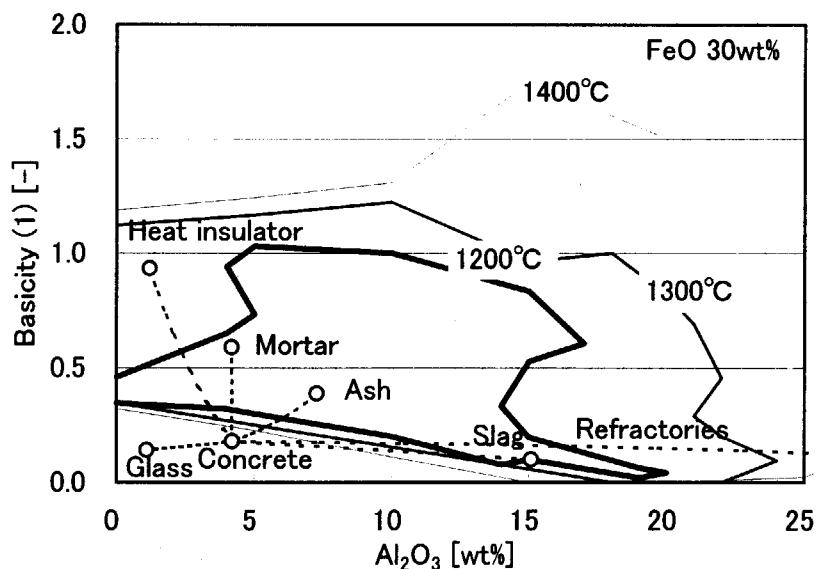


Fig.37-1 Comparison between estimated chemical compositions of melting slag and meltable area of Al_2O_3 - CaO -30wt% FeO - SiO_2 slag at 1200, 1300 and 1400°C
 Basicity(1)= CaO/SiO_2

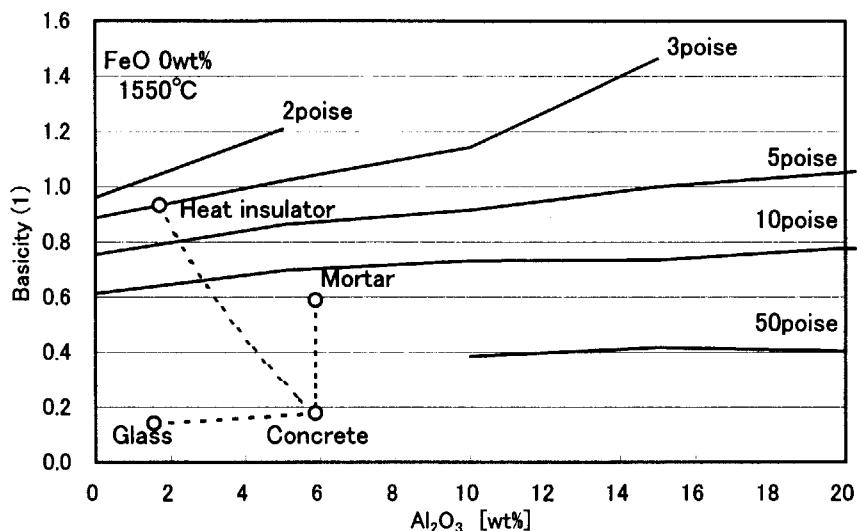


Fig.38-1 Comparison between iso-viscosity curve and molten slag of miscellaneous solid wastes at 1550°C
 Basicity(1)=CaO/SiO₂

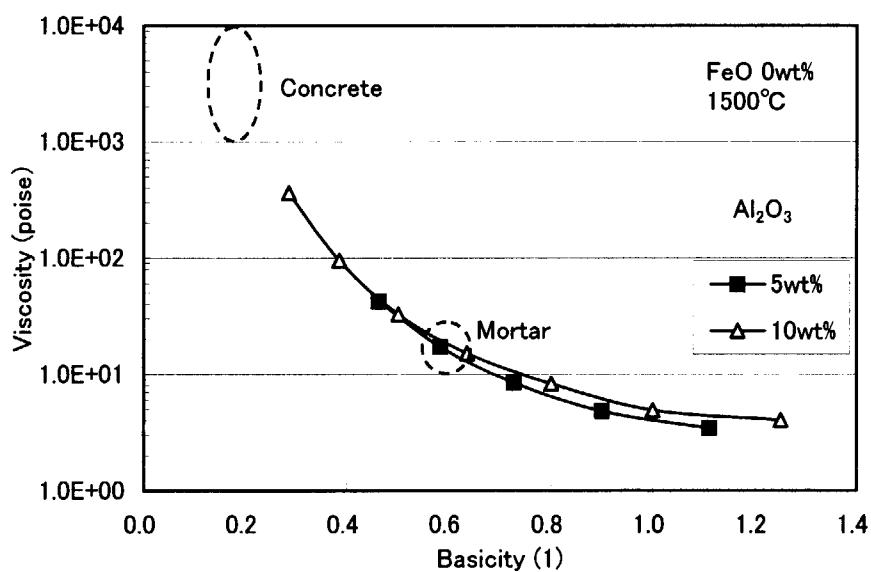


Fig.39-1 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1500°C
 Basicity(1)=CaO/SiO₂

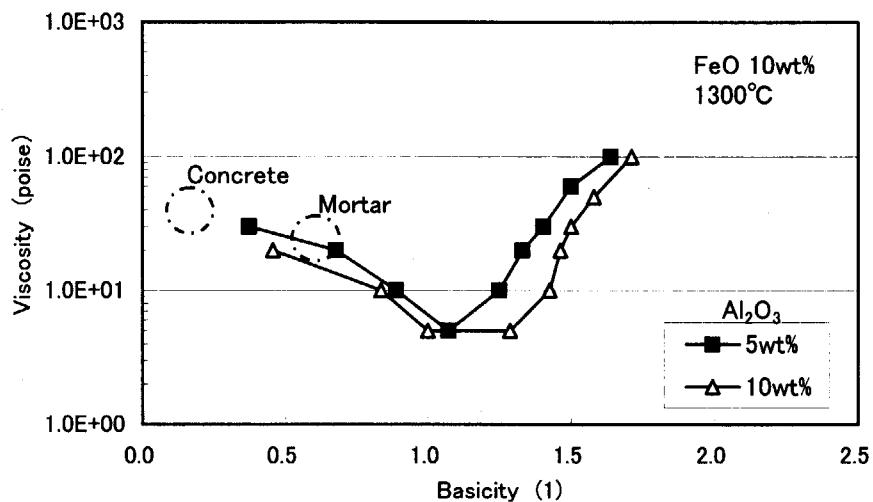


Fig.40-1 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 10wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

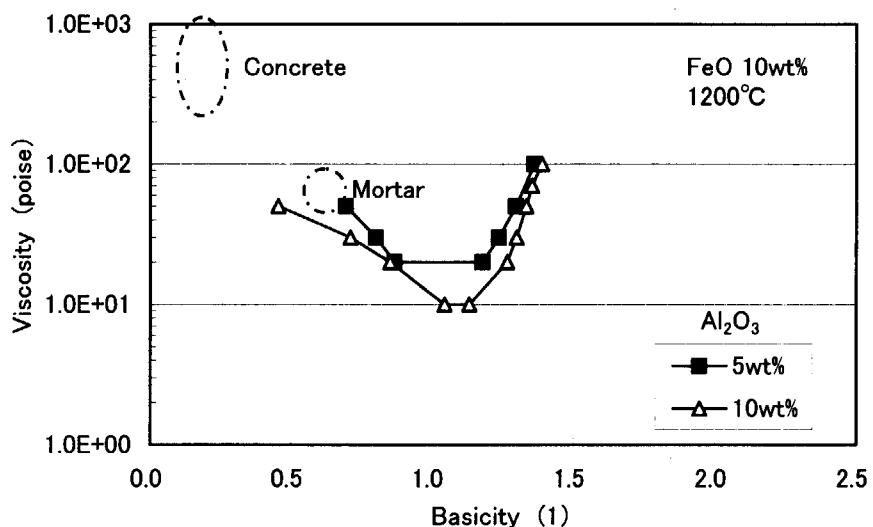


Fig.41-1 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 10wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

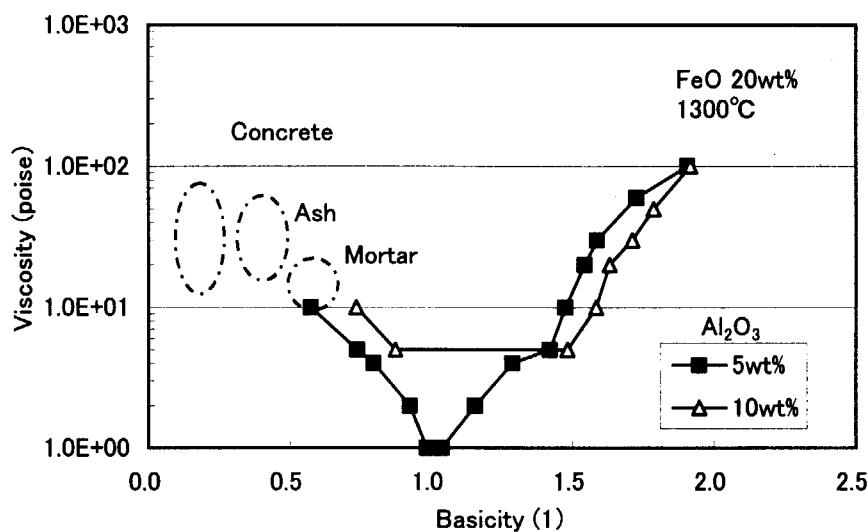


Fig.42-1 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 20wt%)
 Basicity(1)=CaO/SiO₂

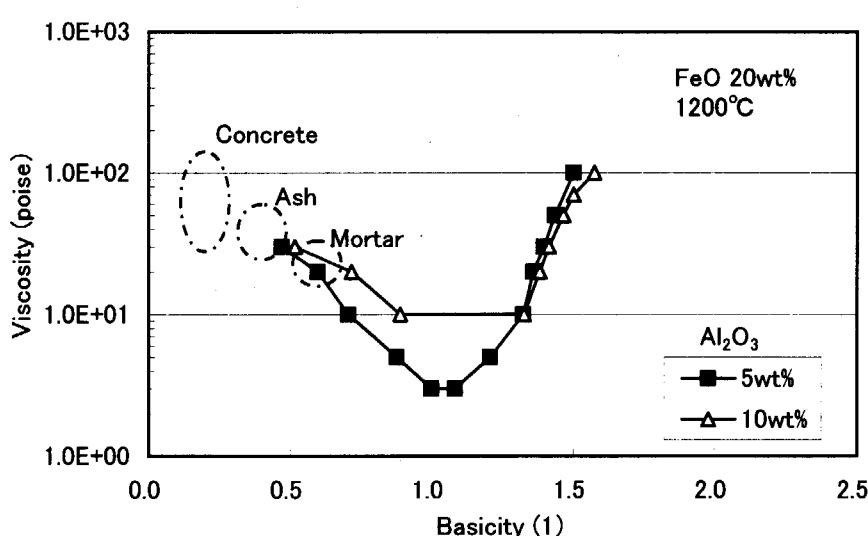


Fig.43-1 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 20wt%)
 Basicity(1)=CaO/SiO₂

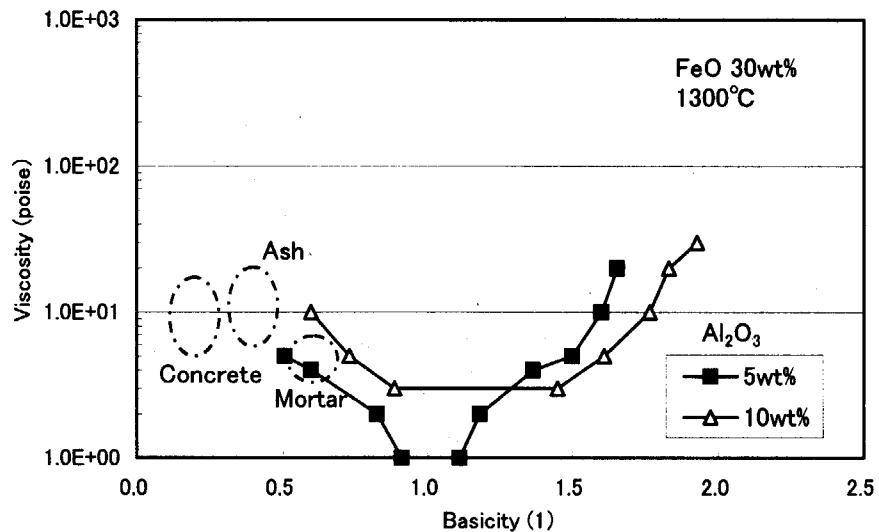


Fig.44-1 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1300°C (FeO 30wt%)
 Basicity(1)=CaO/SiO₂

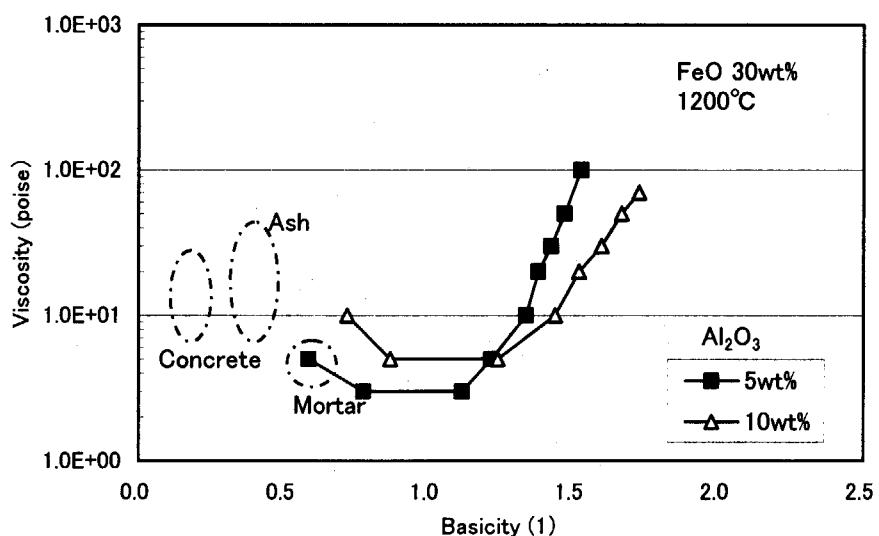


Fig.45-1 Estimated viscosity of molten slag of miscellaneous solid wastes at 1200°C (FeO 30wt%)
 Basicity(1)=CaO/SiO₂

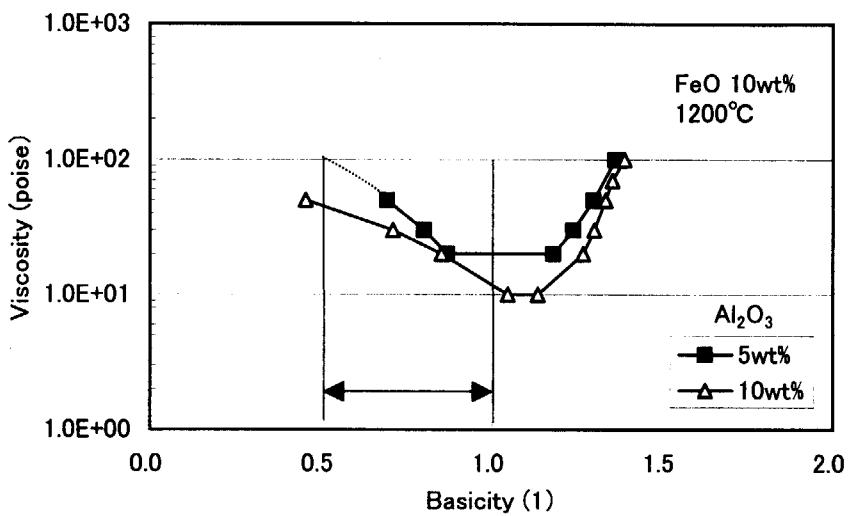


Fig.46-1 Basicity range of low viscosity at 1200°C (FeO 10wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

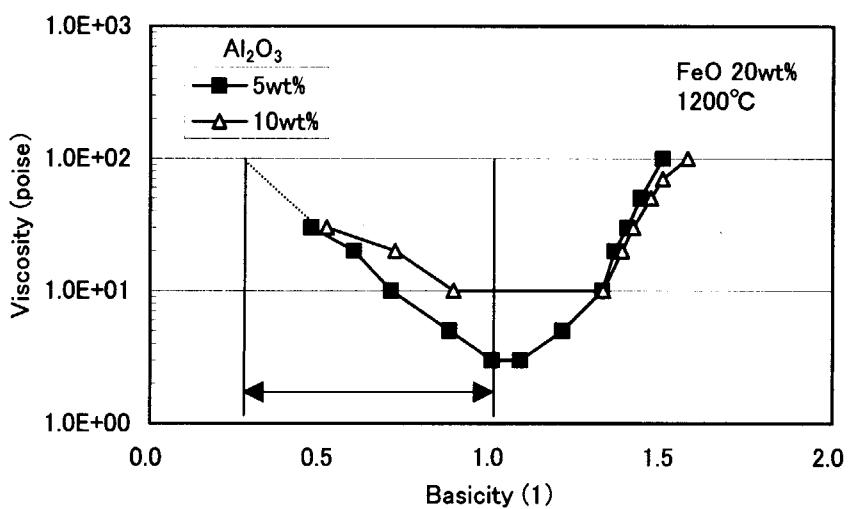


Fig.47-1 Basicity range of low viscosity at 1200°C (FeO 20wt%)
Basicity(1)=CaO/SiO₂

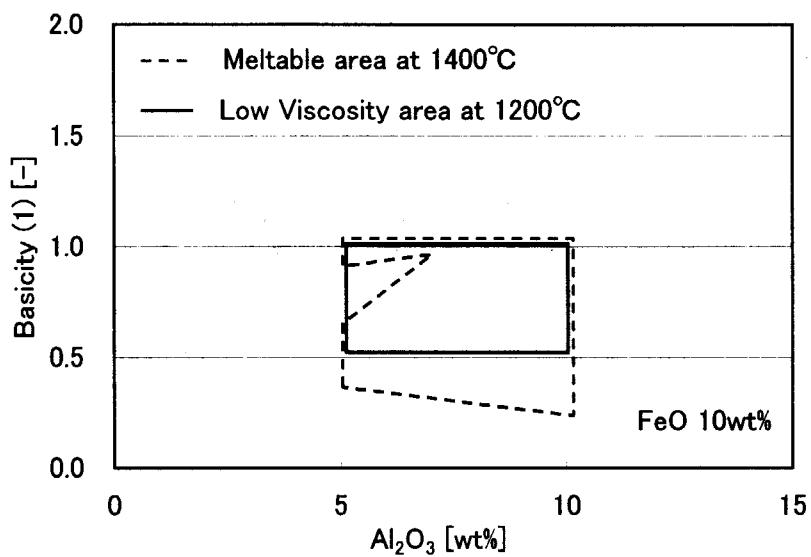


Fig.48-1 Comparison between meltable area at 1400°C
and low viscosity area (FeO 10wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

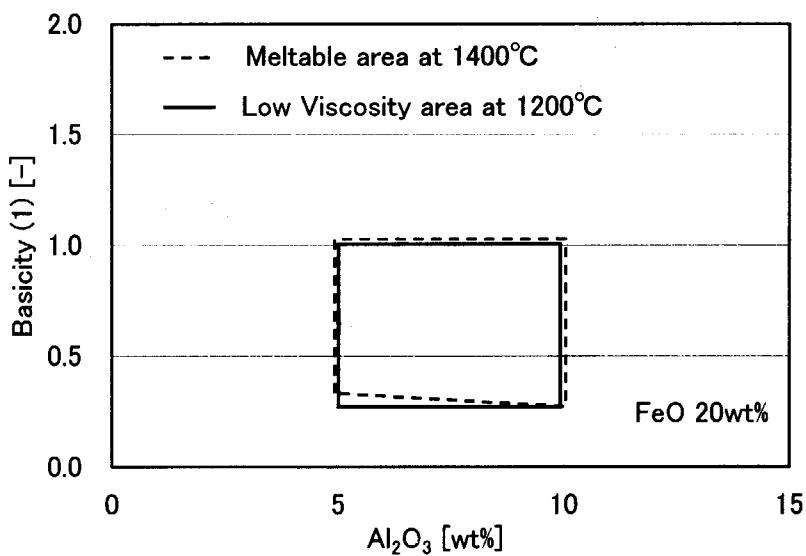


Fig.49-1 Comparison between meltable area at 1400°C
and low viscosity area (FeO 20wt%)
Basicity(1)= CaO/SiO_2

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
9.80665		1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ³	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		= 4.1868 J(国際蒸気表)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		= 735.499 W
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	1
3.7 × 10 ¹⁰	1	

吸収線量	Gy	rad
1	100	1
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	1
2.58 × 10 ⁻⁴		1

線量当量	Sv	rem
1	100	1
0.01		1

(86年12月26日現在)

雑固体廃棄物の溶融固化体製作条件に関する調査・検討（受託研究）