論文 廃コンクリートを主原料とした溶融スラグの製造と骨材評価

羽原 俊祐*1・廣瀬 裕之*2・小山田 哲也*3・藤原 一成*4・

要旨: コンクリートから再生粗骨材を取り出した後に残る 5mm 以下の廃コンクリート粉末を主原料とした溶融スラグの製造を、大型の電気抵抗式試験溶融炉を用いて行い、コンクリート試験ができる十分な量の溶融スラグを製造した。得られたスラグは粒度調整して細骨材とし、モルタルおよびコンクリートを作成することで、骨材としての性能評価を行った。この結果、得られた溶融スラグ骨材の性能は、天然資源の砕砂よりはやや劣るが、実際に利用されている一般廃棄物の溶融スラグと同等またはそれ以上の性能を示した。

キーワード: 廃コンクリート, 電気抵抗式試験溶融炉, 溶融スラグ, 骨材評価

1. はじめに

建物解体時に発生する解体コンクリートを積極的に 再利用することは、環境保全や資源節約の観点から非常 に重要である。近年、廃コンクリートから再生粗骨材を 製造する技術がいくつか確立されてきているが¹⁾、副産 物として粒径 5mm 以下の廃コンクリートが大量に発生 することが問題となる。著者らは、これまでこの 5mm 以下の廃コンクリートを主原料に、フライアッシュおよ び石灰石を副原料として加えて成分調整し、小型の電気 炉を用いて小規模な溶融を繰り返し行った。その結果、 石英-ワラストナイト-アノーサイトの共晶点付近の組成 とワラストナイト-アノーサイト-ゲーレナイトの共晶点 付近の組成において、比較的低温での溶融ができ、溶融 後の密度が高い溶融スラグが得られることを確認した²⁾。

本研究では、先の報告²⁾を発展させ、電気抵抗式試験溶融炉(㈱タナベ:糸魚川市)を用いてコンクリート試験ができる量(200kg 程度)の溶融スラグの実製造実験を行った。得られた溶融スラグは粒度調整して細骨材とし、モルタルおよびコンクリートを作成して強度試験等を行い、骨材としての性能評価を行った。

2. スラグの溶融実験

2.1 溶融スラグの原料と化学組成

本実験では5mm以下の廃コンクリートを主原料とし、 副原料としてフライアッシュと石灰石を用いて溶融ス

ラグ原料とした。溶融に用いた原料の化学組成を表-1 に示す。いずれの原料も、CaO、SiO₂、Al₂O₃の3成分の 合計が 80%以上を占めている (石灰石の強熱減量を除 く)。3つの原料の混合により目標とする化学組成を図ー **1** の CaO-SiO₂-Al₂O₃ の三成分状態図に示す。廃コンクリ ートの組成を X, フライアッシュの組成を Y, 石灰石の 組成を Z とする。本実験では、低融点組成である石英-ワラストナイト-アノーサイトの共晶点付近の組成であ る組成点 g およびワラストナイト-アノーサイト-ゲーレ ナイトの共晶点付近の組成である組成点 o (先の報告で の結果より 2) に加え、比較として廃コンクリートのみ の組成点 x, 廃コンクリート: フライアッシュをおよそ 3:1の割合で混合した組成点wについて溶融を行った。 これらの組成点の CaO, SiO₂, Al₂O₃の 3 成分を 100 と した場合の組成と原料粉末使用比をそれぞれ表-2に示 す。目標の組成点 g は廃コンクリートの原料割合が 60% 程度と多いのに対して、比較の組成点 o は廃コンクリー トの原料割合が8%程度と少ない。

2.2 溶融スラグの製造と骨材粒度調整

溶融スラグは各組成点それぞれ200kg を目標製造量とした。実験に用いた電気抵抗式試験溶融炉を図-2に示す。原料は計量し、コンクリートミキサーを用いて混合して調整した。溶融では、最初に20kg程を調合原料として炉底に投入し、着火後、溶融状態を確認しながら、少量ずつ残りの原料を追加投入し、十分に溶融した後に

2 2 200 2 200 2 200 1 200													
		化 学 成 分 (%)											
	ig-loss	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ti ₂ O	P_2O_5	MnO	S	
廃コンクリート	23.6	64.3	11.1	4.2	15	1.8	1.37	1.4	0.4	0.05	0.08	0.1	
フライアッシュ	0.98	60.1	27	3.9	2.9	1.8	0.72	0.48	1.55	0.09	0.02	0.2	
石灰石	43.4	0.4	0.2	0.1	55.1	0.4	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0	

表-1 実験で使用した原料の化学組成

^{*1} 岩手大学 工学部建設環境工学科准教授 博(工) (正会員)

^{*2} 岩手大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻 (正会員)

^{*3} 岩手大学 工学部建設環境工学科助教 博(工) (正会員)

^{*4} 日本原子力発電(株) 開発計画室 建築工事・保守グループ (非会員)

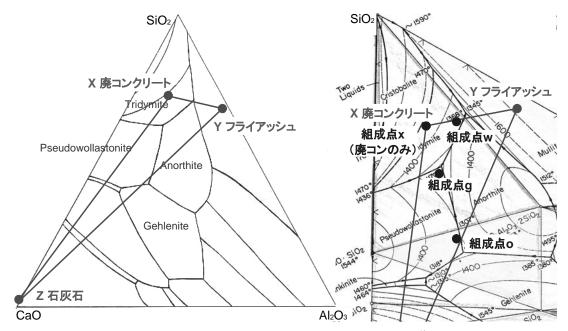


図-1 CaO-SiO₂-Al₂O₃の三成分状態図と同拡大図(1960 E.F.Osborn et al)³⁾ と溶融スラグの化学組成

表-2 目的組成と原料粉末使用比

	糸	且成比(%)	原料粉末使用比(%)			
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	X	Y	Z	
組成点g	25	60	15	58.31	21.75	19.94	
組成点o	35	46	19	7.84	49.37	42.78	
組成点x	17	70	13	100	0	0	
組成点w	13	64	23	75	25	0	

出湯(溶融スラグの排出)を行い、空冷したものを回収した。原料の混合と出湯の状況を図-3に示す。溶融スラグの出湯の様子は、スラグg、スラグoについては比較的粘性の低い溶湯であったが、スラグx及びwについては前者2つに比べて粘性が高く、溶融にも時間がかかったため、実験では約1.4倍の電力を要する結果となった(表-3より)。なお、組成点x、組成点wについては、廃コンクリートのみの溶融を行い、その一部を出湯して回収したものをスラグxとし、炉内に残った溶湯にフライアッシュを加えてさらに溶融をしたものをスラグwとした。そのため、スラグwについては、廃コンクリートとフラ

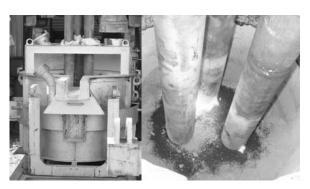


図-2 電気抵抗式試験溶融炉外観と内部



図-3 原料の混合と出湯(溶融スラグの排出)

イアッシュの比はおおよその値となる。

得られた溶融スラグを**図ー4**に示す。いずれのスラグも十分に溶融している様子が観察される。溶融スラグは大きな塊状のものを粒度調整して細骨材粒度とした。調整にはハンマークラッシャーを使用し、粉砕後2.5mm篩上を再度粉砕し、粗粒率が3以下になるように調整した。溶融から粉砕後までの各段階における試料の量を表-3に示す。どの組成のスラグも粉砕後の回収量は溶融

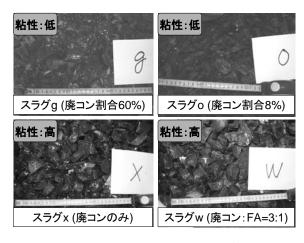


図-4 得られた各溶融スラグ

表-3 各段階における試料の量と要した電力原単位

	試料量(kg)							
		溶融前投入量	溶融後	破砕後	原単位			
	廃コンクリート	フライアッシュ	石灰石	合計	回収量	回収量	(kWh/t)	
スラグ g	256. 34	84. 84	78. 61	420	285	230	1463	
スラグo	31. 76	197. 24	170.96	400	294	230	1407	
スラグ x	200	-	_	200	45	20	1985	
スラグ w	x 溶湯	40		40+x 溶湯	158	115	1900	

前の原料投入量の55%程度であった。スラグg, スラグo, スラグwについては、粉砕後の回収量が115~230kgであり、コンクリート試験を行うための十分な量が確保できたが、スラグxについては粉砕後の回収量が20kgと少なくコンクリート試験を行うための十分な量の確保ができなかったため、モルタル試験のみでの評価を行うこととした。

2.3 溶融スラグの骨材評価

4種のスラグを用いて、一般のコンクリート用骨材と同様の物性試験を行い、溶融スラグの骨材としての品質を評価した。現状では、産業廃棄物を溶融処理したスラグのコンクリート用骨材としての規格はないため、「JIS A5031 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用スラグ骨材」に規定されている各種骨材試験の規格値と比較することとした。

各種骨材の物性試験の結果を表-4に示す。骨材試験における4種のスラグとの比較として,砕砂(閉井川産),廃コンクリート原粉,コンクリート製品工場で実際に使用されている一般廃棄物の溶融スラグ(以下,比較スラグ)を用いた。絶乾密度は、スラグ o が 2.83 g/cm³,スラグ g が 2.69 g/cm³ であり、実績のある比較スラグと同等

の値となった。また、いずれのスラグも JIS 規格値 2.5g/cm³を上回ってはいるが、溶融スラグ x・w は、溶湯 の粘度が高いこともあり、やや低かった。吸水率については、4種のスラグともにガラス質であるため低く、JIS 規格値 3.0%以下を十分に満足し、比較スラグより低い値となった。凍結融解抵抗性を示す安定性、微粒分量については、いずれのスラグも規格値を満足した。

粒形の良否を示す粒形判定実積率については、いずれもほぼ同じ値を示し、JIS 規格値を満足したものの、砕砂、比較スラグより低い。これは、スラグの形状が砕砂、比較スラグに比べて扁平であったり、角ばっているため、低くなったものと思われる。ただし、実際に大量の溶融スラグを粒度調整した場合には粒度も改善されるものと思われる。スラグg、w及びxは、ガラス中のシリカ量が多いことから、アルカリシリカ反応性の生起が危惧される。骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法)(JIS A1145:2001)の結果、スラグgについては、溶解シリカ量(Sc)は、ほぼ砕砂レベルと低いが、スラグwおよびxは、溶融シリカ量(Sc)が多い。原料が廃コンクリートのみのスラグxについては、化学法及びモルタルバー法ともに無害でないと判定される場合もあるが、ここで

表一4 骨材試験結果

		スラグ g	スラグ o	スラグ x	スラグ w	廃コン 原粉	砕砂	比較 スラグ	JIS A 5031 **1	試験方法
表乾密	度(g/cm³)	2.70	2.84	2.56	2.60	2.10	2.88	2.69		
絶乾密	度(g/cm³)	2.69	2.83	2.55	2.59	1.60	2.83	2.66	≥2.5	JIS A1109
吸水	率(%)	0.22	0.20	0.24	0.20	30.92	1.76	1.08	≦3.0	
安定	性(%)	0.3	0.1	0.2	0.2	6.4	3.1	0.5	≦10	JIS A1122
微粒分	分量(%)	2.0	1.7	1.8	1.7	9.0	6.7	3.5	≦7	JIS A1103
粗	粒率	2.73	2.93	2.85	2.85	2.57	3.03	2.68		JIS A1102
単位容積	賃賃量(kg/l)	1.64	1.77	1.61	1.57	1.28	1.89	1.73		JIS A1104
粒形判定	実積率(%)	61	63	62	62	80	67	65	≧53	JIS A5505
アルカリ	Rc(mmol/l)	34	29	138	136	384	42	35	0 /	
シリカ	Sc(mmol/l)	23	2	102	57	1	10	4	Sc≦ Rc	JIS A1145
反応性※2	判定	無害	無害	無害	無害	無害	無害	無害	110	

^{※1} 比較として用いた規格値、この値を満たすものでなければならない

 $^{^2}$ 溶解シリカ量 Sc が 10mmol/l 以上でアルカリ濃度減少量 Rc が 700mmol/l 未満のとき、 Sc>Rc となる場合、無害でないと判定

は全ての溶融スラグが「無害」となった。これは製造時の冷却方法などが関係しているものと思われる。これらの判定結果から,今回製造された4種の溶融スラグはすべてコンクリート用骨材として適用可と判断できる。一方,廃コンクリート原粉については,絶乾密度,吸水率,微粒分量の項目でJIS 規格外となった。微粒分量については,骨材に付着したセメントペーストが削れやすいこともあったためか,他のものより高い値となった。安定性についても,JIS 規格は満足するものの比較的値が高い。よって,低密度・高吸水率で微粒分量が多い廃コンクリート原粉は,コンクリート用骨材として使用できないと判断できる。

3. モルタルおよびコンクリートによる骨材評価

3.1 使用材料

モルタル及びコンクリートでの評価試験には,表-5に示す材料を使用した。溶融スラグは,表-4に示すものを使用し、粒度調整後に細骨材として使用した。使用材料の密度および粗粒率を表-5に示す。スラグ及び細骨材は,それぞれ絶乾状態のものを使用した。

3.2 配合

圧縮強度試験に用いるモルタルおよびコンクリートの配合をそれぞれ表-6、表-7に、スラグの粒度分布を図-5に示す。コンクリートの配合決定に先立ち、事前にモルタルを試製したところ、粒度調整した溶融スラグ

表-5 使用材料

使用材料	種類	密度 (g/cm³)	F.M.
セメント	普通ポルト ランドセメント	3.15	-
細骨材	砕砂 (閉伊川産)	2.83	3.03
粗骨材	砕石 (黒川産)	2.89	
	スラグ g	2.69	2.73
	スラグ ο	2.83	2.93
スラグ	スラグ x	2.55	2.85
	スラグ w	2.60	2.85
	比較溶融スラグ	2.66	2.68

表一6 モルタル配合

モルタル試験のみを行った。

の粗粒率は、いずれも砕砂と同程度の値であるが、2.5mm

以上の骨材がほとんどなく, 粒度分布に違いがあるため,

細骨材全量をスラグ置換した配合では,流動性が悪く,

骨材分離やブリーディングが顕著であった。そこで、細

骨材容積の 50%を溶融スラグとし、残りの 50%を砕砂

とすることにした。初めに、砕砂単味でスランプが5cm

となる単位水量および高性能 AE 減水剤の量を見出し、

これを基準として、細骨材にスラグを置換したところ、

スラグを使用したものは砕砂単味と比較するとコンク

リートは柔らかい傾向があり、スランプ値は若干大きい

ものが多く、5~7.5cm となった。これは、スラグ骨材に 対する高性能 AE 減水剤の効果が向上したことによるも

のと思われる。モルタルは、コンクリートから粗骨材を

取り除いた配合としJIS R 5201 に準拠して混練を行った。 また、細骨材として使用した溶融スラグの粒度分布の影

響を相殺するため、篩分けを行った細骨材を用いて検討

を行った。配合をW:C:S=0.5:1:2.5 とし、細骨材質

量の 50%をスラグの粒度を揃えたものに置換したモル

タルを作成し、圧縮強度試験を行った。スラグの粒度に

ついては、 2.5-1.2mm・1.2-0.6mm・0.6-0.3mm のものを

それぞれ 25%, 0.3-0.15mm のものを 15%, 0.15mm 以下

のものを10%とした。なお、前述した通り、回収量の少

ないスラグxについては、コンクリート試験から除外し、

	24							
	W/C		単位量(kg/m³)					
置換物	W/C (%)	W	С		SP 剤 (%)			
	(70)	l w		砕砂	置換物	(70)		
砕砂単味	- 55			1514	-			
スラグ g					707			
スラグ ο		281	511		745	0.25		
スラグ w	33	201	511 757		670	0.23		
スラグ x					681			
比較スラグ					699			

表-7 コンクリート配合

	粗骨材	スランプ	s/a	W/C	単位量(kg/m³)					SP 剤	
置換物	最大寸法	(cm)	(%)	(%)	W	С		S	G	SF 知 (%)	
	(mm)				''		砕砂	置換物	G	, ,	
砕砂単味		5					922	-			
スラグ g		7.5						432			
スラグ ο	20	5	45	55	171	311	461	454	1130	0.25	
スラグ w		6					461	410			
比較スラグ		7						430			

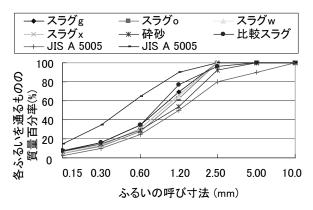


図-5 溶融スラグの粒度分布

3.3 実験方法

(1) 圧縮強度試験

モルタルおよびコンクリートの圧縮強度試験では、モルタルは $4\times4\times16$ cm の角柱供試体、コンクリートは ϕ 10×20 cm の円柱供試体を使用した(各材齢 3 本)。いずれも材齢は 3 日、7 日、28 日、91 日とし、材齢 1 日で脱型した後、試験材齢まで 20 C の水槽内で養生を行った。

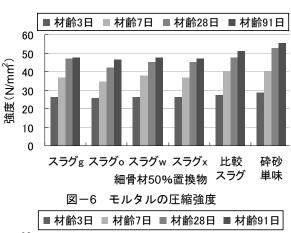
(2) アルカリシリカ反応性試験(モルタルバー法)

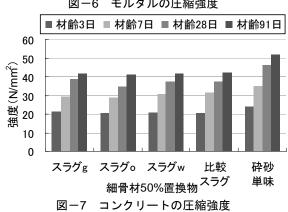
試験はJIS A 1146 に準拠し、4×4×16cm の角柱供試体を使用して行った。スラグの純粋な性能が試験値に反映するよう、細骨材にはスラグ単味を使用した。材齢1日で脱型し、長さ変化の基準となる初期値の計測をした後、40±2℃、湿度 95%以上の密閉容器で貯蔵し、所定の材齢毎にダイヤルゲージを用いて長さ変化の測定を行った。

3.4 実験結果および考察

(1)圧縮強度試験

モルタル, コンクリートの圧縮強度試験結果を図-6, 図-7 に示す。モルタル、コンクリート共に、いずれの 溶融スラグを使用した場合も, 砕砂単味と比較すると圧 縮強度はやや低い傾向がある。例えば、スラグ g では砕 砂単味の80~90%程度の圧縮強度となった。また、比較 スラグと比べると、モルタル、コンクリートともに、ス ラグgとwとではほぼ同じ圧縮強度を示す。一方, スラ グ o は, モルタル, コンクリートともに材齢 28 日強度 が他の溶融スラグと比較してやや小さいが、材齢 91 日 強度は他の溶融スラグと同等となっている。試験結果は、 モルタル、コンクリートともに、ほぼ同様の傾向が見ら れた。これらの結果から判断すると、溶融スラグを使用 したモルタルおよびコンクリートは、砕砂単味と比べて やや強度低下は見られるものの, 細骨材に置換して使用 することは十分可能であると考えられる。粒度分布を再 調整したスラグを用いたモルタルの圧縮強度を図-8に 示す。粒度を一定にすることにより、図-6 及び図-7 の圧縮強度の結果に比べ、スラグ間における圧縮強度の





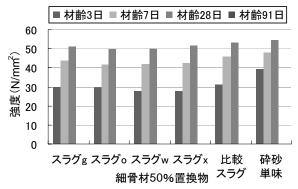


図-8 スラグの粒度を揃えたモルタルの圧縮強度

差が少なくなっている。この結果から、実際のコンクリートの試験においては、十分な粒度調整を行えば、スラグを骨材として用いることによるコンクリートの強度低下の影響は小さく、比較スラグと比べてもほぼ同等の強度が得られるものと思われる。

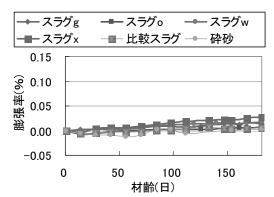


図-9 骨材のアルカリシリカ反応性試験結果(モルタルバー法)

(2) アルカリシリカ反応性試験(モルタルバー法)

より現実に近い骨材のアルカリシリカ反応性評価試験であるモルタルバー法の結果を $\mathbf{Z}-\mathbf{9}$ に示す。いずれのスラグも膨張量が $\mathbf{0.02}$ %以下であり,溶融スラグ骨材の反応性評価としては「無害」となった。スラグ \mathbf{g} , \mathbf{x} , \mathbf{w} については,いずれもシリカに富む組成であることから,アルカリ骨材反応が危惧されたが,いずれも「無害」であり,アルカリ骨材反応の危険性が少ないことがわかった。

4. 廃コンクリート溶融スラグの細骨材としての適性

本実験で得られた 4種のスラグについて、溶融スラグ 細骨材としての適性を評価した。評価項目を表-8 に示す。いずれのスラグも、比較スラグを用いたモルタルおよびコンクリートと同等の圧縮強度を示していること から、圧縮強度の適性には問題がないと考えられる。しかし、スラグ x、w については、密度がやや低いことに 加え、溶融時の粘性が高く、溶融に時間がかかるため、要する電力量も多い(スラグ g、o の約 1.4 倍)という問題があった。また、スラグ o については、原料としての廃コンクリートの割合が 8%程度と低い。よって、原料としての廃コンクリートの割合が 60%と比較的高く、溶融時の粘性も低いスラグ g が、溶融スラグ骨材として最も適していると思われる。

20 行風ハファ幅目的としての過じ										
	廃コンの 原料割合	溶湯の 粘性	物性	圧縮 強度	総合評価					
スラグg	多	低	0	0	0					
スラグο	少	低	0	0	0					
スラグw	多	高	Δ	0	Δ					
スラグ x	多	高	Δ	0	Δ					

表-8 溶融スラグ細骨材としての適性

5. まとめ

廃コンクリートから再生粗骨材の製造時に副産する5mm 以下の廃コンクリート粉末を主原料とした溶融スラグの製造を,電気抵抗式試験溶融炉を用いて行った。得られた溶融スラグは粒度調整して細骨材とし,モルタルおよびコンクリートを作成して強度試験等を行い,骨材としての性能評価を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) 石英-ワラストナイト-アノーサイトの共晶点付近の組成である組成点 g, ワラストナイト-アノーサイト-ゲーレナイトの共晶点付近の組成である組成点 o について溶融を行ったところ, コンクリート試験ができる量(200kg 程度)のスラグが確保でき

- た。比較として溶融を行った組成点 x, w については、溶融は可能であったが、溶融スラグの粘性が高く、溶融に要する時間も長いため、要する電力量も多い。
- (2) 得られた 4 種のスラグの物性試験を行い、JIS A 5031 の規格値と比較したところ、スラグ g, o については、規格値を全て満足し、骨材として十分な性能を有していた。スラグ x, w については、全ての規格値を満足するものの、密度がやや低い。一方、廃コンクリート原粉に関しては、密度・吸水率・微粒分量の項目で規格値を満足せず、骨材としての使用は難しいと思われる。
- (3)モルタルおよびコンクリートでの圧縮強度試験を行ったところ、いずれの溶融スラグ置換のコンクリートも、砕砂単味のコンクリートに比べてやや強度低下が見られるものの、比較用のごみ溶融スラグを置換したコンクリートと同等の強度であり、スラグは細骨材として置換使用できる可能性が十分にあることがわかった。
- (4)骨材のアルカリシリカ反応性試験(モルタルバー法)を 行ったところ、いずれのスラグを置換したモルタ ルも、判定結果は「無害」であり、アルカリ骨材 反応の危険性は少ないものと思われる。
- (5)スラグ x, w は, 密度がやや低いことに加え, 溶融 時の粘性が高く, 要する電力量も多いという問題 があった。また, スラグ o については, 廃コンク リートの原料割合が少ない。したがって, 廃コンクリートの原料割合が多く, 溶融時の粘性も低い スラグ g が, 溶融スラグ骨材として最も適していると思われる。
- (6)本研究により得られた条件を基に、実用化に向けた フィジブィリティ・スタディーが可能となる。原子 力発電所解体にともない発生する廃コンクリート微 粉末の処理方法としての実用性の評価が実施できる。

参考文献

- 1) 「電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計製造指針(案)」コンクリートライブラリー120. 七木学会, 2005.6
- 2) 廣瀬裕之,羽原俊祐,小山田哲也,藤原一成:廃コンクリートの溶融スラグ化の検討,コンクリート工学,Vol.30, No.2, pp.445-450, 2008.7
- Edward Orton, Jr: Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems (Plate1), American Ceramic Society, 1960