

飽和水酸化カルシウム水溶液を用いたベントナイトの
膨潤圧及び透水係数の評価
(研究報告)

1998年12月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Information Section,
Administration Division,
Tokai Works,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1998

飽和水酸化カルシウム水溶液を用いたベントナイトの
膨潤圧及び透水係数の評価
(研究報告)

1998年12月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Information Section,
Administration Division,
Tokai Works,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1998

飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた
ベントナイトの膨潤圧及び透水係数の評価
(研究報告)

報告者 青柳孝義*、前田宗宏**

三原守弘***、田中益弘****

要旨

これまでに核燃料サイクル開発機構では、放射性廃棄物の処分研究において、主として蒸留水を試験水として用いた天然のナトリウム型及びカルシウム型ベントナイトと天然のナトリウム型ベントナイトを人工的にカルシウム型化させたカルシウム型化ベントナイトの膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数について試験結果を取りまとめている。

しかしながら、TRU廃棄物の処分施設においては、構造躯体や充填材、さらには支保にセメント系の材料を使用する可能性があり、その場合、セメント系材料を通過した地下水には多量のカルシウム成分が溶解するものと考えられる。したがって、TRU廃棄物の処分研究においては、カルシウム成分を多く含む水に対するベントナイトの特性を知る必要がある。

本報告書はTRU廃棄物の処分概念の検討の一環として行われた、ベントナイトの基本特性に対する液組成の影響把握として、カルシウム成分を多く含む水を模擬した飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験についてまとめたものである。対象としたベントナイトは、先に述べたナトリウム型、カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの3種類である。また、実施した試験は、液組成の影響を受ける可能性があると考えられた膨潤圧測定試験及び透水試験である。

膨潤圧測定試験では最大及び平衡膨潤圧を、透水試験では透水係数を得た。各試験は、乾燥密度をパラメータとして行った。また、カルシウム型化ベントナイトに対しては、ベントナイト混合率をパラメータとした試験も行った。そして、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験と既存の蒸留水を用いた試験結果を比較し、膨潤圧と透水係数について、液組成の影響は大差ないことが明らかとなった。

* 株式会社小堀鐸二研究所

** 株式会社小堀鐸二研究所、現 鹿島建設株式会社 土木設計本部

*** 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

**** 鹿島建設株式会社 技術研究所

Evaluation of Permeability and Swelling Pressure of Compacted Bentonite Using a Calcium Hydroxide Solution

Takayoshi Aoyagi*, Munehiro Maeda**
Morihiro Mihara***, Masuhiro Tanaka****

Abstract

Tests to determine the swelling pressure, permeability, compressive strength and elastic modulus of Ca-Na exchanged bentonite, Na-bentonite and Ca-bentonite at the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation have mainly used distilled water.

However, disposal facilities for TRU waste will use cementateous material for packaging, backfill as well as structural support. In this case, a large amount of calcium will dissolve in groundwater flowing through the cementateous material. Therefore, it is important to investigate the mechanical properties of bentonite in calcium-rich water as part of the disposal research program for TRU waste.

In order to understand the effect of the chemical composition of water on the basic mechanical properties of bentonite - part of evaluating the disposal concepts for TRU waste disposal - we tested the permeability of compacted bentonite under saturated conditions using a calcium hydroxide solution. The aqueous solution represents water dominated by the calcium component. Na-bentonite, Ca-Na exchanged bentonite and Ca-bentonite were used for swelling pressure measurement tests and permeability testing.

Measures of the maximum and equilibrium swelling pressure as well as permeability were obtained. The dry density of bentonite was varied between tests. Results show that swelling pressure and permeability are dependent on dry density. In separate tests using Ca-bentonite, the bentonite-mixing rate was varied as an independent parameter. Results show that there is little change in the swelling pressure and permeability between tests using calcium hydroxide solution and distilled water for all bentonite types.

* : Kobori Research Complex INC.

** : Kobori Research Complex INC. At present Kajima Civil Engineering Division

*** : Repository System Analysis Group Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

**** : KAJIMA Technical Research Institute

目 次

1 はじめに	1
2 使用材料	2
2.1 ベントナイト	2
2.2 ケイ砂	4
3 膨潤圧測定試験	5
3.1 試験方法	5
3.1.1 圧縮固化法	5
3.1.2 膨潤圧測定試験	6
3.2 試験条件	7
3.3 試験結果	7
3.4 考 察	9
3.4.1 クニゲル VI	9
3.4.2 カルシウム型化クニゲル VI	10
3.4.3 クニボンド	12
3.4.4 各ベントナイトの比較	13
3.4.5 蒸留水を用いた試験結果との比較	16
4 透水試験	18
4.1 試験方法	18
4.1.1 圧縮固化法	18
4.1.2 透水試験	18
4.2 試験条件	19
4.3 試験結果	20
4.4 考察	23
4.4.1 クニゲル VI	23
4.4.2 カルシウム型化クニゲル VI	24
4.4.3 クニボンド	26
4.4.4 各ベントナイトの比較	27
4.4.5 蒸留水を用いた試験結果との比較	29

5まとめ	31
5.1膨潤圧	31
5.1.1ベントナイト単体	31
5.1.2ケイ砂混合ベントナイト	32
5.1.3有効ベントナイト乾燥密度による結果の整理	32
5.2透水係数	33
5.2.1ベントナイト単体	33
5.2.2ケイ砂混合ベントナイト	34
5.2.3有効ベントナイト乾燥密度による結果の整理	34
付録.....	35
謝辞	54
参考文献	54

1 はじめに

現在までのところ、放射性廃棄物の地層処分における緩衝材として、圧縮ペントナイトが有望な候補材料と考えられる。緩衝材には、拡散場を維持するための止水性や力学的安定性といった物理的、機械的な性能が要求される。これまでに核燃料サイクル開発機構では、高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物の処分研究において、主として蒸留水を試験水として用いた天然のナトリウム型及びカルシウム型ペントナイトと天然のナトリウム型ペントナイトを人工的にカルシウム型化させたカルシウム型化ペントナイトの物理的、機械的特性について試験結果を取りまとめている^{1) , 2) , 3) , 4) , 5)}。

一方、TRU 廃棄物の処分施設においては、構造躯体や充填材、さらには支保にセメント系の材料を使用する可能性があり、その場合、セメント系材料を通過した地下水には多量のカルシウム成分が溶解するものと考えられる。したがって、TRU 廃棄物の処分研究においては、カルシウム成分を多く含む水に対するペントナイトの特性を知る必要がある。

本報告書は TRU 廃棄物の処分概念の検討の一環として行われた、ペントナイトの基本特性に対する液組成の影響把握として、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験についてまとめたものである。対象としたペントナイトは、先に述べたナトリウム型、カルシウム型化及びカルシウム型ペントナイトの 3 種類である。また、実施した試験は、液組成の影響を受ける可能性があると考えられた膨潤圧測定試験及び透水試験である。

膨潤圧測定試験では最大及び平衡膨潤圧を、透水試験では透水係数を得た。各試験は、乾燥密度をパラメータとして行い、それに対する依存性を明らかにした。また、TRU 廃棄物処分研究の主要課題の一つであるカルシウム型化ペントナイトに対しては、ペントナイト混合率をパラメータとした試験も行った。そして、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験と既存の蒸留水を用いた試験結果を比較することにより、各ペントナイト材料に対する液組成の影響を明らかにしている。

なお、本報告書における飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた各試験は、平成 9 年度に動燃事業団の委託研究として鹿島建設株式会社で行われた「TRU 廃棄物の処分概念の検討（Ⅲ）」において実施したものであり、本報告書はその成果について報告するものである。

2 使用材料

2.1 ベントナイト

ナトリウム型及びカルシウム型ベントナイトには、表-2.1.1に示すとおりクニミネ工業社の市販製品であるクニゲルVI及びクニボンドを使用した。また、カルシウム型化ベントナイトは、クニゲルVIを強制的にカルシウム型に変質させることにより作製した。以下においては、ナトリウム型ベントナイトに対し「クニゲルVI」、カルシウム型化ベントナイトに対し「Ca型化クニゲルVI」、カルシウム型ベントナイトに対し「クニボンド」と記述する。

Ca型化クニゲルVIは、クニゲルVIの随伴鉱物をできるだけ変化させないように、塩化カルシウム水溶液を用いてモンモリロナイトの層間をカルシウムに置換したものを用いた^{5) 6)}。その後、ろ過・水洗いを行い可能な限りベントナイトに付着した塩化物イオンを除去し、その上澄み液に硝酸銀溶液を添加して溶液が白濁しないことを確認したものである。また、X線回折分析により、Ca型化クニゲルVIの随伴鉱物が、クニゲルVIと比較して変化が少ないことも確認されている。

クニゲルVI、Ca型化クニゲルVI及びクニボンドの化学特性を表-2.1.2に示す。浸出陽イオン量の測定結果から、Ca型化クニゲルVIにおいては、浸出陽イオンのほとんどがカルシウムイオンであり、天然のカルシウム型ベントナイトであるクニボンドよりカルシウムイオンの浸出陽イオン量が多いことが示されている^{5) 6)}。

また、各ベントナイトの物理特性を表-2.1.3に、粒径加積曲線を図-2.1.1に示す^{5) 6)}。

表-2.1.1 使用ベントナイト

ベントナイト	製造元及び商品名
ナトリウム型ベントナイト	クニミネ工業社製、クニゲルVI [®]
カルシウム型化ベントナイト	クニゲルVI [®] を強制的にカルシウム型に変質させたもの
カルシウム型ベントナイト	クニミネ工業社製、クニボンド [®]

表-2.1.3 ベントナイトの物理特性⁵⁾

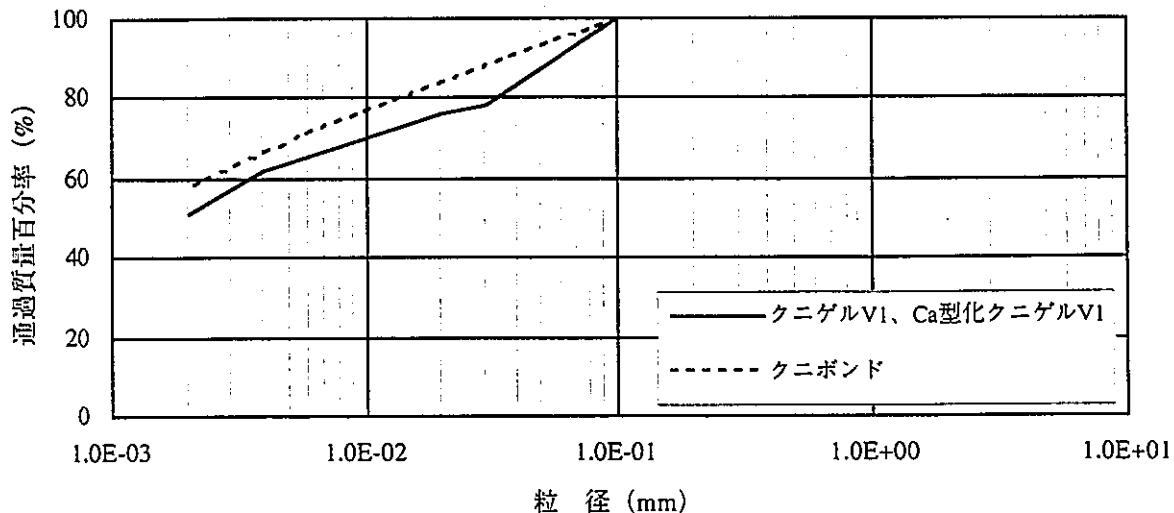
ベントナイト	自然含水比 w _n (%)	土粒子密度 G _b (g/cm ³)	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _p (%)	塑性指数 I _p (%)
クニゲルVI	6.2	2.7	419.2	18.4	400.8
Ca型化クニゲルVI	1.6	2.7	121.0	23.9	97.1
クニボンド	8.6	2.64	144.5	63.9	80.6

表-2.1.2 ベントナイトの化学特性⁵⁾

	クニゲル VI ^{6), 7)}	Ca型化クニゲル VI ⁶⁾	クニボンド ⁷⁾
pH	10.1	9.4	9.5
メチレンプルーム吸着量 (mmol/100g)	68	71	106
陽イオン交換容量 (meq/100g)	59.9	60.8	86.5
浸出陽イオン量 (meq/100g)			
Na ⁺	53.9	5.2	18.1
K ⁺	1.4	1.4	2.4
Ca ²⁺	48.5	102.8	74.2
Mg ²⁺	7.4	7.0	8.1
合計	111.2	116.4	102.8
化学組成 (%)			
SiO ₂	68.9	69.4	70.9
TiO ₂	0.24	0.17	0.22
Al ₂ O ₃	13.7	13.2	14.9
Fe ₂ O ₃	1.69	1.00	1.61
FeO	0.71	0.54	0.19
MnO	0.08	0.08	0.02
MgO	2.54	2.24	3.85
CaO	2.62	3.61	2.16
Na ₂ O	2.72	0.88	0.37
K ₂ O	0.36	0.30	0.21
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.02
Ig loss	5.80	7.31	5.08
合計	99.41	98.78	99.53
S	0.50	0.06	0.06
CO ₂	2.80	2.23	0.03
Cl	<0.01	<0.01	0.01
鉱物組成 (%)			
モンモリロナイト	50	注2	80
石英	35	注2	5
クリストバライト	注1	注2	15
長石	8	注2	注1
黄鉄鉱	1	注2	注1
方解石	5	注2	注1
その他	ドロマイト	注2	注1

注1：検出されず。

注2：Ca型化クニゲルVIに対する鉱物組成は具体的な数値として得られていないが、X線回折分析より、クニゲルVIと比較して変化が少ないことを確認している。

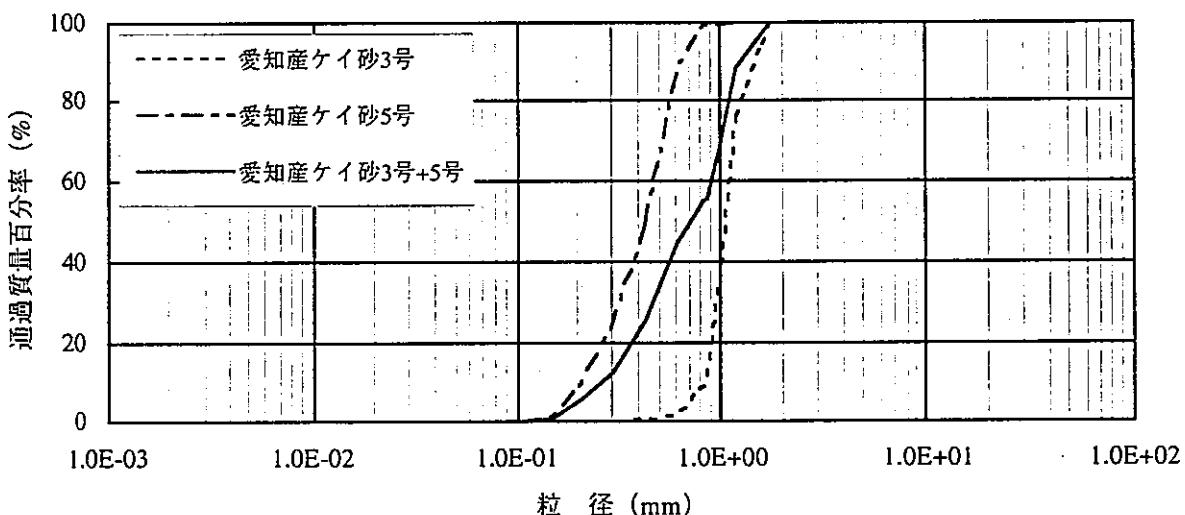
図-2.1.1 ベントナイトの粒径加積曲線⁵⁾

2.2 ケイ砂

ケイ砂は、高レベル放射性廃棄物処分の第2次取りまとめに向けた研究と整合を図り、表-2.2.1に示す2種類のケイ砂を乾燥重量比1:1で混合した愛知産ケイ砂3号+5号（土粒子密度2.7g/cm³）を使用した。図-2.2.1に、各ケイ砂単体及び混合後の粒径加積曲線⁵⁾を示す。

表-2.2.1 使用ケイ砂

呼 称	販売元、産地等
愛知産ケイ砂3号	日陶連原料(株)製、愛知県瀬戸市窯元産
愛知産ケイ砂5号	日陶連原料(株)製、愛知県知多郡美浜産

図-2.2.1 ケイ砂の粒径加積曲線⁵⁾

3 膨潤圧測定試験

3.1 試験方法

3.1.1 圧縮固化法

市販のペントナイトは粉体であるため、所定の乾燥密度を有する供試体を作製するためには圧縮固化する必要がある。試料の一部より含水比をあらかじめ測定した上で目標乾燥密度に必要な重量を測定し、図-3.1.1 に示す圧縮固化体作製治具に投入する。その後、一軸圧縮試験装置で一定の応力を加え、所定の供試体形状（直径 4cm×高さ 2cm）になるよう静的に固化させた。

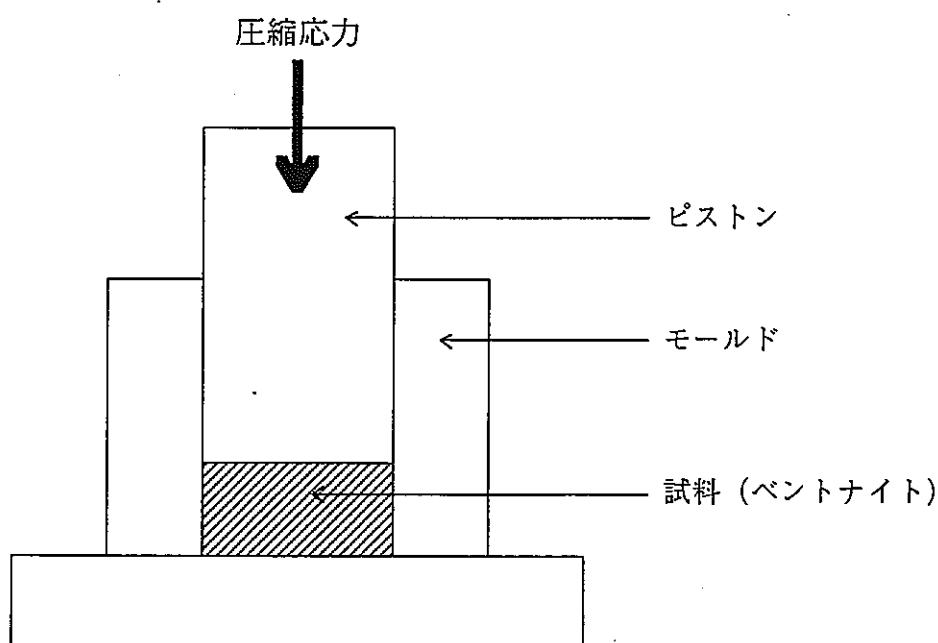


図-3.1.1 圧縮固化体作製治具

3.1.2 膨潤圧測定試験

図-3.1.2 に膨潤圧測定試験装置を示す。この試験装置は、供試体をポーラスメタルを介して体積変化が無いように拘束し、上下から飽和水酸化カルシウム水溶液を供給して、ピストンと固定枠の間に入れた超小型のロードセルで膨潤圧を測定するものである。圧縮固化したペントナイト供試体の膨潤圧測定試験は、以下の手順で行った。

- ① 圧縮固化後、供試体の割れがないか確認して、円筒セルを試験装置に設置する。
- ② 供試体の上下から真空度を徐々に高めていき、24時間真空脱気する。
- ③ その後、圧力を徐々に大気圧に戻して水頭差約100cmで供試体の上下面から吸水させて、膨潤圧を測定する。
- ④ 膨潤圧が平衡状態に達することを確認できるまで測定を続ける。
- ⑤ 試験終了後、供試体の湿潤重量及び乾燥重量を測定し、含水比及び飽和度を確認する。

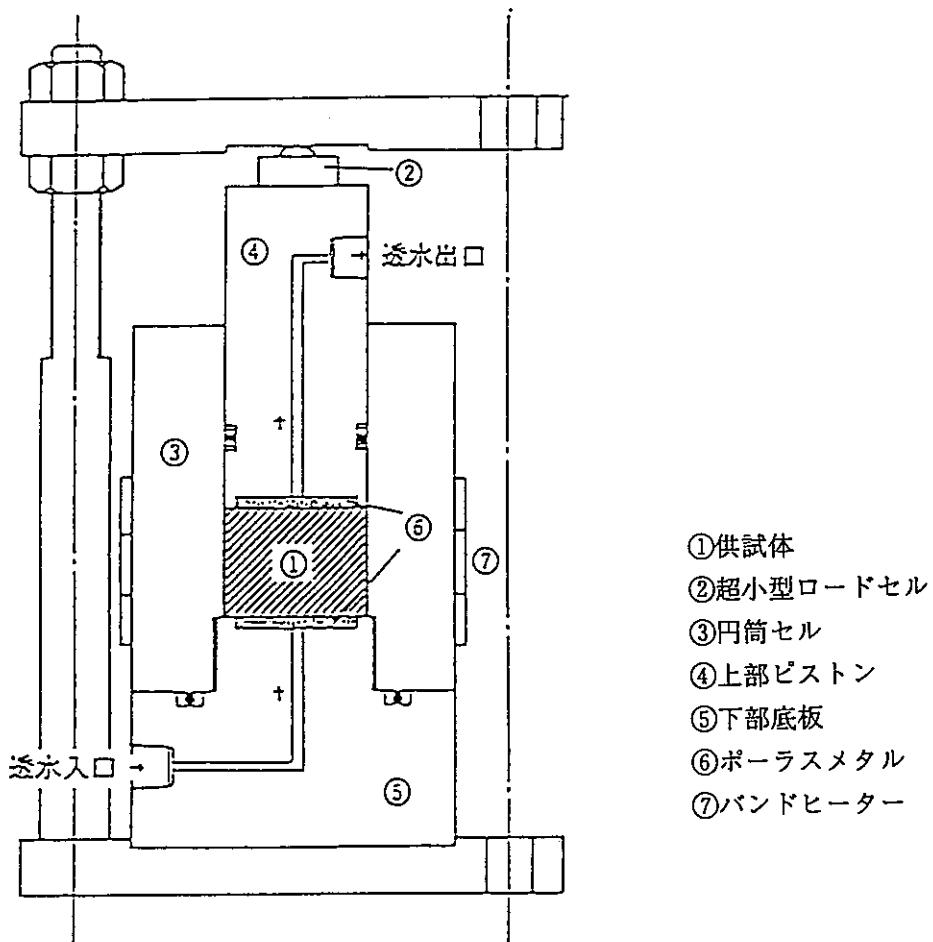


図-3.1.2 膨潤圧測定試験装置

3.2 試験条件

以下に試験条件を示す。

- ・供試体形状：直径 4cm × 高さ 2cm
- ・初期含水比：自然含水比（但し、ケイ砂は絶乾状態）
- ・試験温度：20°C
- ・試験水：飽和水酸化カルシウム水溶液
- ・乾燥密度：
 - (1) クニゲル V1 単体 $1.2 \pm 0.1, 1.8 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$
 - (2) Ca 型化クニゲル V1 単体 $1.2 \pm 0.1, 1.8 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$
 - (3) ケイ砂混合 Ca 型化クニゲル V1 $1.8 \pm 0.1, 2.0 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$
(ペントナイト含有率 30wt.%)
 - (4) クニボンド単体 $1.0 \pm 0.1, 1.4 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$

3.3 試験結果

得られた各ペントナイトの膨潤圧の時間変化は、模式的に図-3.3.1 に示すように曲線 A 及び B に分類することができた。このことは、鈴木らの試験¹⁾によても示されている。そこで、図-3.3.1において曲線 A で例示したように吸水開始後の早い段階で平衡膨潤圧より高い圧力を呈した場合の圧力を最大膨潤圧として、また、曲線 B のように初期のピークが無いまま平衡膨潤圧に達した場合は、最大膨潤圧及び平衡膨潤圧として試験結果を整理することにした。

膨潤圧測定試験結果を表-3.3.1～表-3.3.3 に示す。表-3.3.1～表-3.3.3 には、各供試体の試験条件と最大及び平衡膨潤圧を整理している。さらに、表-3.3.1～表-3.3.3 には、最大膨潤圧の発生時間と平衡膨潤圧に到達した時間を整理している。

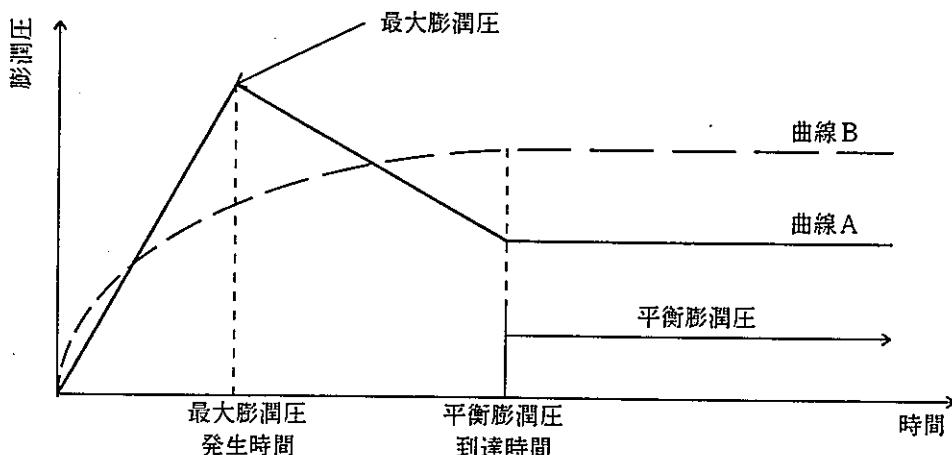


図-3.3.1 膨潤圧の時間変化

表-3.3.1 飽和水酸化カルシウム水溶液による膨潤圧測定試験結果（クニゲルV1）

乾燥密度 ρ_d (g/cm³)	間隙比 e	ペント率 C_p	ケイ砂率 C_s	砂材料	初期含水比		初期飽和度		最終含水比		最終飽和度		試験期間 (日)	最大膨潤圧 P_{max} (MPa)	最大膨潤圧 発生時間 (時間)	平衡膨潤圧 P_{bal} (MPa)	平衡膨潤圧 到達時間 (時間)
					w_0	Sr_0	w	Sr	(%)	(%)	(%)	(%)					
クニゲルV1単体																	
1.20	1.25	100	0	—	—	6.23	13.5	45.83	99.0	6.75	0.27	57	0.27	57			
1.20	1.25	100	0	—	—	6.23	13.5	41.89	90.5	6.75	0.14	11	0.10	72			
1.20	1.25	100	0	—	—	6.23	13.5	45.09	97.4	6.75	0.23	114	0.23	114			
1.85	0.46	100	0	—	—	5.46	32.1	22.81	134.0	6.75	4.40	10	4.0	138			
1.81	0.49	100	0	—	—	5.46	30.0	23.19	127.3	6.75	3.21	75	3.1	99			
1.85	0.46	100	0	—	—	5.46	32.1	22.85	134.3	6.75	3.19	10	3.0	117			

表-3.3.2 飽和水酸化カルシウム水溶液による膨潤圧測定試験結果（Ca型化クニゲルV1）

乾燥密度 ρ_d (g/cm³)	間隙比 e	ペント率 C_p	ケイ砂率 C_s	砂材料	初期含水比		初期飽和度		最終含水比		最終飽和度		試験期間 (日)	最大膨潤圧 P_{max} (MPa)	最大膨潤圧 発生時間 (時間)	平衡膨潤圧 P_{bal} (MPa)	平衡膨潤圧 到達時間 (時間)
					w_0	Sr_0	w	Sr	(%)	(%)	(%)	(%)					
Ca型化クニゲルV1単体																	
1.21	1.23	100	0	—	—	1.55	3.4	44.27	97.1	6.62	0.06	2.5	0.06	2.5			
1.21	1.23	100	0	—	—	1.55	3.4	44.73	98.1	6.62	0.10	2.5	0.10	2.5			
1.18	1.29	100	0	—	—	1.55	3.2	46.35	97.2	6.62	0.06	1.5	0.06	1.5			
1.80	0.50	100	0	—	—	1.55	8.4	19.59	105.8	6.62	4.39	7	3.4	96			
1.80	0.50	100	0	—	—	1.55	8.4	19.79	106.9	6.62	7.18	7	5.0	84			
1.81	0.49	100	0	—	—	1.55	8.5	20.22	111.0	6.62	4.48	7	3.4	72			
ケイ砂混合Ca型化クニゲルV1																	
1.87	0.44	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.09	0.5	17.48	106.3	6.62	0.11	0.2	0.09	3			
1.83	0.48	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.09	0.5	19.76	112.2	6.62	0.07	0.3	0.06	33			
1.79	0.51	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.09	0.5	18.13	96.3	6.62	0.09	0.2	0.06	66			
1.99	0.36	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.47	3.6	12.82	97.0	7.00	0.50	0.5	0.38	81			
2.00	0.35	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.47	3.6	12.98	100.1	7.00	0.31	0.7	0.24	63			
2.00	0.35	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.47	3.6	13.04	100.6	7.00	0.27	0.5	0.19	84			

表-3.3.3 飽和水酸化カルシウム水溶液による膨潤圧測定試験結果（クニボンド）

乾燥密度 ρ_d (g/cm³)	間隙比 e	ペント率 C_p	ケイ砂率 C_s	砂材料	初期含水比		初期飽和度		最終含水比		最終飽和度		試験期間 (日)	最大膨潤圧 P_{max} (MPa)	最大膨潤圧 発生時間 (時間)	平衡膨潤圧 P_{bal} (MPa)	平衡膨潤圧 到達時間 (時間)
					w_0	Sr_0	w	Sr	(%)	(%)	(%)	(%)					
クニボンド単体																	
0.99	1.67	100	0	—	—	8.59	13.6	57.30	90.8	5.77	0.45	2	0.43	51.5			
0.99	1.67	100	0	—	—	8.59	13.6	59.26	93.9	5.77	0.44	1.5	0.43	45.5			
0.99	1.67	100	0	—	—	8.59	13.6	60.42	95.7	5.77	0.35	1.5	0.35	22			
1.43	0.85	100	0	—	—	8.59	26.8	39.32	122.7	6.75	5.18	33	5.1	48			
1.39	0.90	100	0	—	—	8.59	25.2	38.79	113.9	6.75	4.12	33	4.0	81			
1.43	0.85	100	0	—	—	8.59	26.8	37.36	116.6	6.75	5.18	33	5.1	54			

3.4 考 察

3.4.1 クニゲル VI

(1) クニゲル VI 単体

図-3.4.1 は、表-3.3.1 に示したクニゲル VI 単体の膨潤圧測定試験結果を乾燥密度と膨潤圧の関係で整理したものである。

図-3.4.1 より、以下に示すことが明らかとなった。

- ① 最大及び平衡膨潤圧は、乾燥密度が大きいほど大きい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。
- ② 最大及び平衡膨潤圧の対数と乾燥密度との関係を、以下に示す線形回帰式により表現した。

・最大膨潤圧 $\log_{10} P_{\max} = 1.945 \rho_d - 3.021$ (相関係数 0.99、 $1.2 \text{g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.85 \text{g/cm}^3$)

・平衡膨潤圧 $\log_{10} P_{\text{bal}} = 1.976 \rho_d - 3.107$ (相関係数 0.98、 $1.2 \text{g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.85 \text{g/cm}^3$)

ここに、 ρ_d ：クニゲル VI の乾燥密度 (g/cm^3)

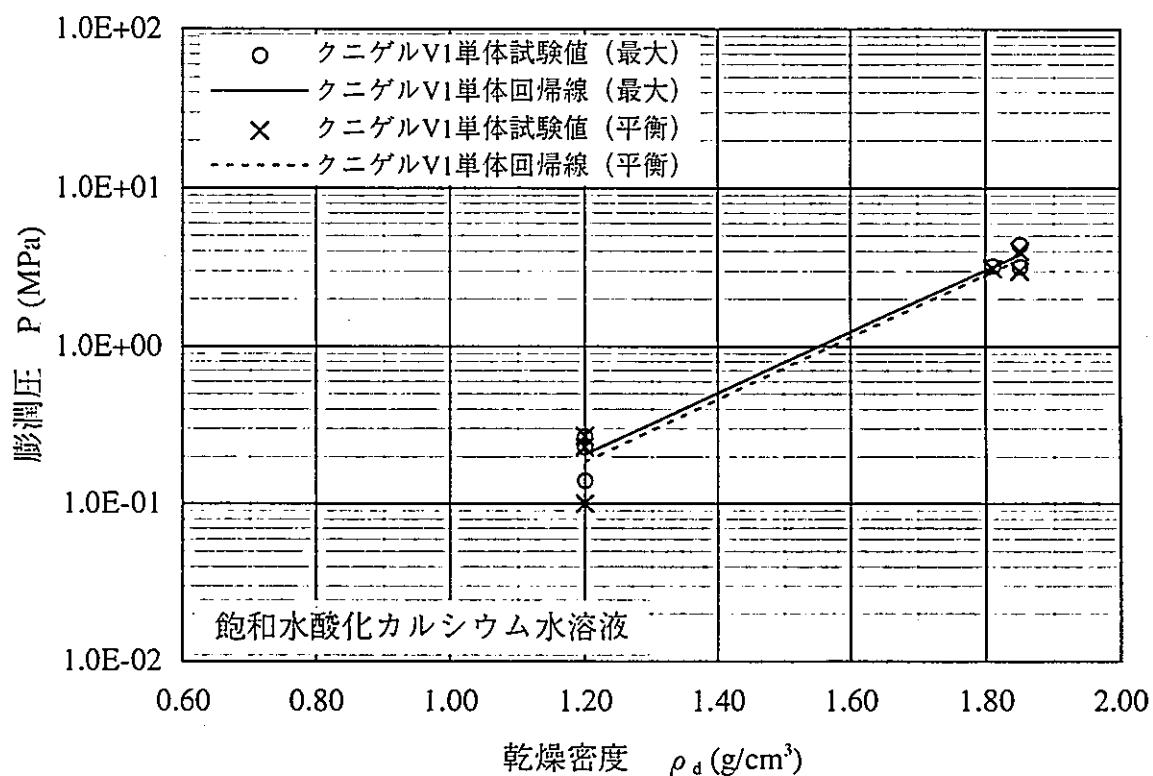


図-3.4.1 乾燥密度～膨潤圧関係（クニゲル VI 単体、飽和水酸化カルシウム水溶液）

3.4.2 カルシウム型化クニゲル V1

(1) カルシウム型化クニゲル V1 単体

図-3.4.2は、表-3.3.2に示したCa型化クニゲルV1単体の膨潤圧測定試験結果を乾燥密度と膨潤圧の関係で整理したものである。

図-3.4.2より、以下に示すことが明らかとなった。

- ① 最大及び平衡膨潤圧は、乾燥密度が大きいほど大きい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。
- ② 最大及び平衡膨潤圧の対数と乾燥密度との関係は、以下に示す線形回帰式により表現した。

・最大膨潤圧 $\log_{10} P_{\max} = 3.094 \rho_d - 4.863$ (相関係数 0.99、 $1.2 \text{g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.8 \text{g/cm}^3$)

・平衡膨潤圧 $\log_{10} P_{\text{bal}} = 2.880 \rho_d - 4.606$ (相関係数 0.99、 $1.2 \text{g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.8 \text{g/cm}^3$)

ここに、 ρ_d : Ca型化クニゲルV1の乾燥密度 (g/cm^3)

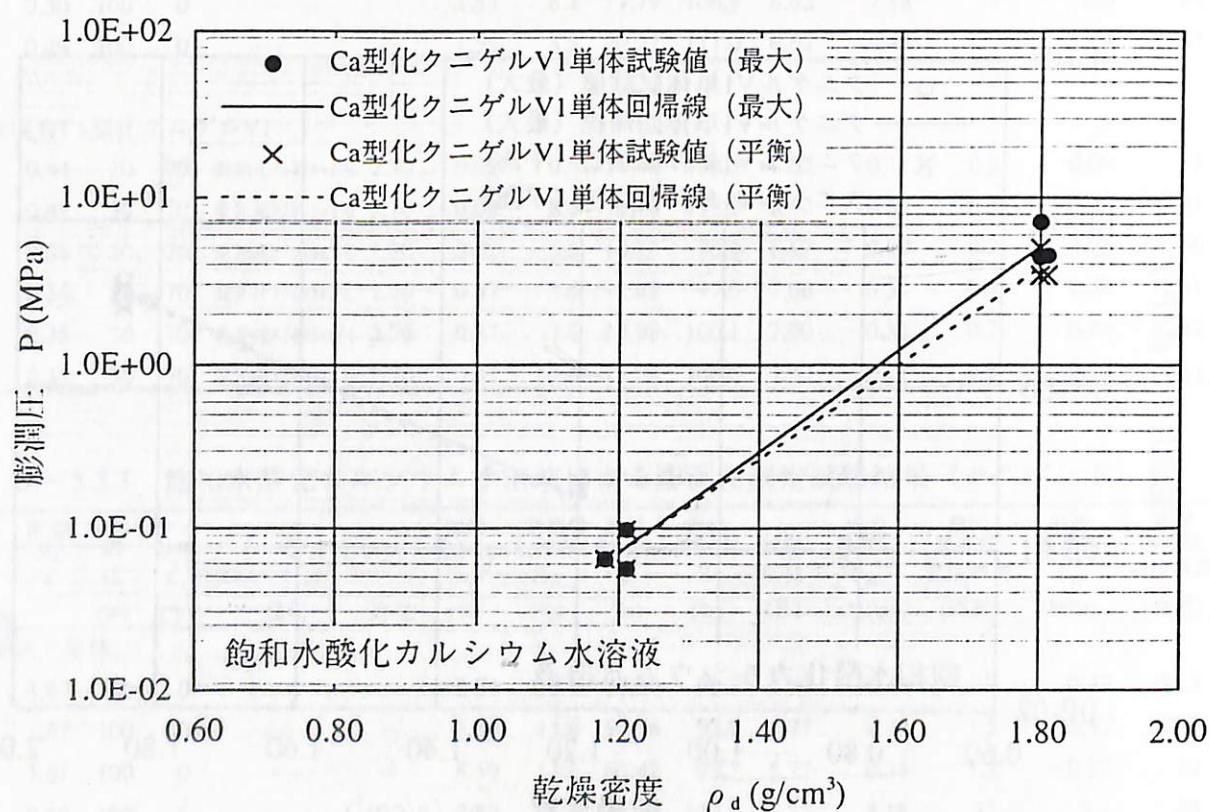


図-3.4.2 乾燥密度～膨潤圧関係 (Ca型化クニゲルV1単体、飽和水酸化カルシウム水溶液)

(2) ケイ砂混合カルシウム型化ケニゲル V1

図-3.4.3 は、表-3.3.2 に示したケイ砂混合 Ca 型化ケニゲル V1 の膨潤圧測定試験結果をベントナイト混合率と膨潤圧の関係で整理したものである。ここで、乾燥密度は、小数点以下第 2 位を四捨五入して結果を整理した。

図-3.4.3 より、以下に示すことが明らかとなった。

- ① 乾燥密度 1.8g/cm^3 の結果より、最大及び平衡膨潤圧は、ベントナイト混合率が大きいほど大きい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。
- ② 最大及び平衡膨潤圧は、同じベントナイト混合率であれば乾燥密度が大きいほど大きい。この傾向も、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。
- ③ 乾燥密度 1.8g/cm^3 に対する最大及び平衡膨潤圧の対数と乾燥密度との関係は、以下に示す線形回帰式により表現した。

乾燥密度 1.8g/cm^3

- ・ 最大膨潤圧 : $\log_{10} P_{\max} = 0.02605C_b - 1.888$ (相関係数 1.00、 $30\text{wt.\%} \leq C_b \leq 100\text{wt.\%}$)
- ・ 平衡膨潤圧 : $\log_{10} P_{\text{bal}} = 0.02612C_b - 2.024$ (相関係数 1.00、 $30\text{wt.\%} \leq C_b \leq 100\text{wt.\%}$)

ここに、 C_b : ベントナイト混合率 (wt.%)

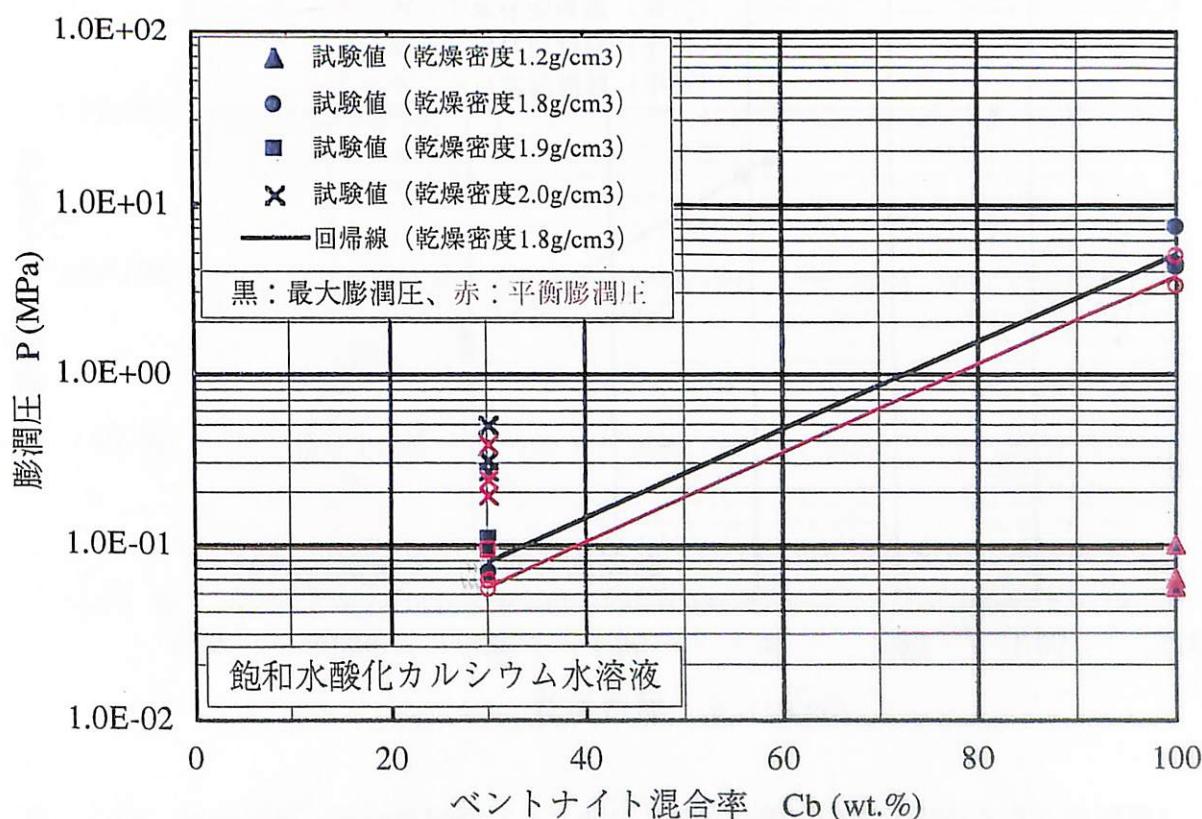


図-3.4.3 ベントナイト混合率～膨潤圧関係(ケイ砂混合 Ca 型化ケニゲル V1、飽和水酸化カルシウム水溶液)

3.4.3 クニボンド

(1) クニボンド単体

図-3.4.4は、表-3.3.3に示したクニボンド単体の膨潤圧測定試験結果を乾燥密度と膨潤圧の関係で整理したものである。

図-3.4.4より、以下に示すことが明らかとなった。

- ① 最大及び平衡膨潤圧は、乾燥密度が大きいほど大きい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。
- ② 最大及び平衡膨潤圧の対数と乾燥密度との関係は、以下に示す線形回帰式により表現した。

$$\cdot \text{最大膨潤圧 } \log_{10} P_{\max} = 2.502 \rho_d - 2.864 \quad (\text{相関係数 } 1.00, 1.0 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.43 \text{ g/cm}^3)$$

$$\cdot \text{平衡膨潤圧 } \log_{10} P_{\text{bal}} = 2.505 \rho_d - 2.877 \quad (\text{相関係数 } 1.00, 1.0 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.43 \text{ g/cm}^3)$$

ここに、 ρ_d : クニボンドの乾燥密度 (g/cm³)

- ③ 最大膨潤圧と平衡膨潤圧は、ほぼ等しい。この傾向も、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。

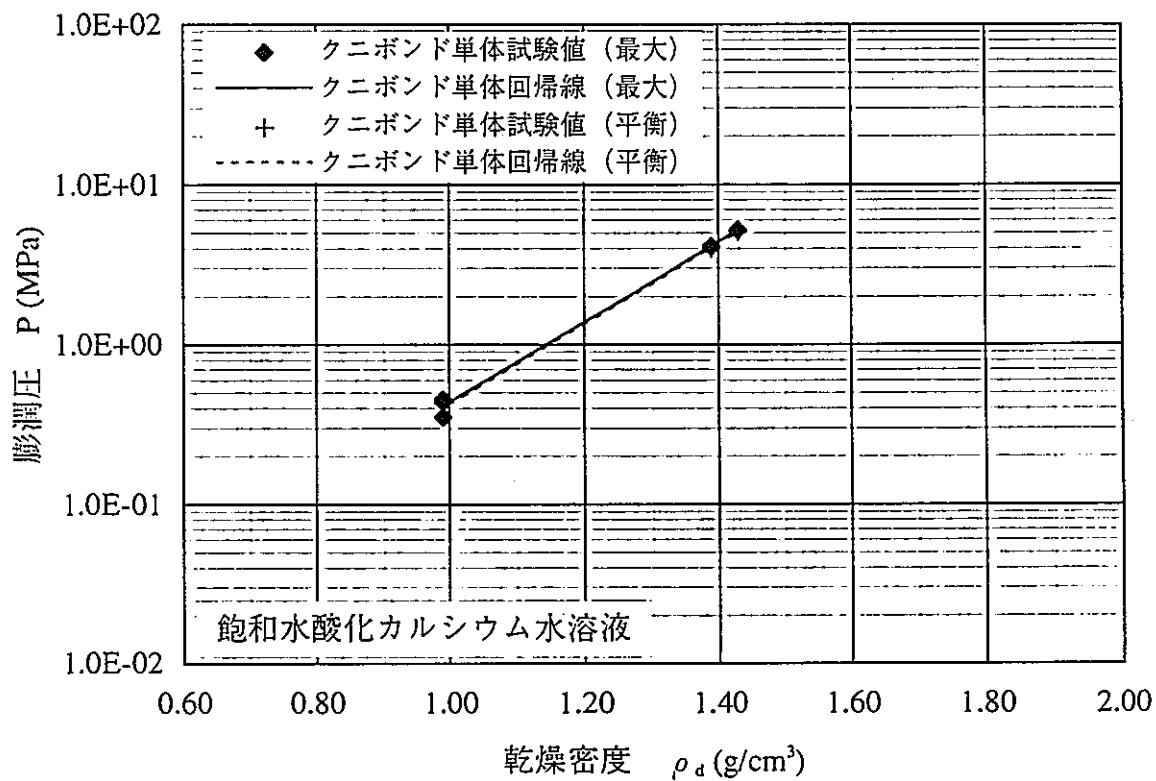


図-3.4.4 乾燥密度～膨潤圧関係（クニボンド単体、飽和水酸化カルシウム水溶液）

3.4.4 各ペントナイトの比較

(1) ペントナイト単体における線形回帰線による比較

図-3.4.5 は、前項までに得られた各ペントナイト単体の乾燥密度～最大膨潤圧関係を線形回帰線により示したものである。最大及び平衡膨潤圧は、ほぼ同様の傾向を示すため、ここでは最大膨潤圧に着目した。図-3.4.5 より、以下に示すことが明らかとなった。また、以下に示す傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。

- ① ペントナイトの種類によらず、乾燥密度が大きいほど膨潤圧は大きい。
- ② クニゲルV1を強制的にカルシウム型化させたCa型化クニゲルV1の膨潤圧は、乾燥密度が小さい領域においてクニゲルV1のそれより小さい値を示す傾向にある。しかし、乾燥密度1.6～1.7g/cm³程度以上においてCa型化クニゲルV1の膨潤圧は、クニゲルV1と同等もしくはそれ以上と考えられる。
- ③ クニボンドは、クニゲルV1やCa型化クニゲルV1と比較して低乾燥密度で比較的大きな膨潤圧を発生する。例えば、乾燥密度1.4g/cm³のクニボンドと乾燥密度1.8g/cm³のクニゲルV1及びCa型化クニゲルV1の膨潤圧は、同等の値を示す。これは、表-2.1.2に示したようにクニボンドにおけるモンモリロナイトの含有率が80wt.%とクニゲルV1より大きいことに起因すると考えられる。

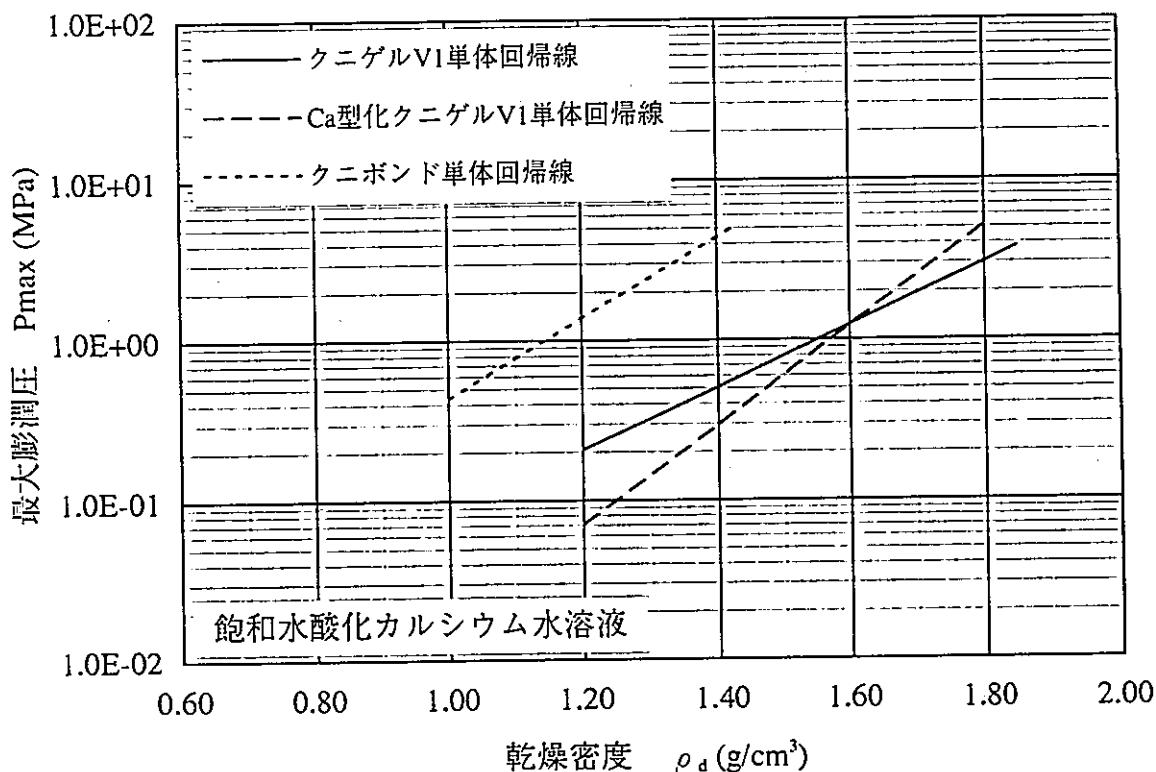
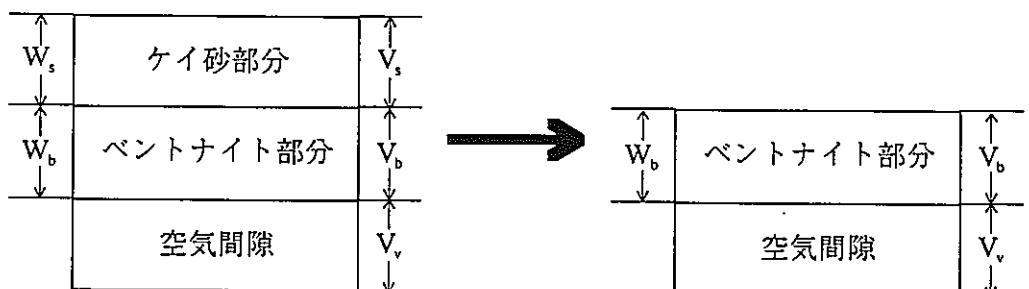


図-3.4.5 乾燥密度～最大膨潤圧関係の比較（飽和水酸化カルシウム水溶液）

(2) 有効ペントナイト乾燥密度による比較

ペントナイト単体においては、前述したように比較的容易に各ペントナイト材料の比較を行うことができる。しかし、ケイ砂を混合した場合においては、ペントナイト混合率や乾燥密度、さらには使用ケイ砂が異なるといったことから一義的な比較が困難である。そこで、本報告では、文献5)と同様にケイ砂部分を除いたペントナイトと空気間隙で構成される乾燥密度を有効ペントナイト乾燥密度と定義して試験結果の整理を試みた。図-3.4.6に、有効ペントナイト乾燥密度の概念を示す。ペントナイト単体の場合は、その乾燥密度が有効ペントナイト乾燥密度となる。



(a) 通常の乾燥密度

(b) 有効ペントナイト乾燥密度

$$\rho_d = \frac{W_b + W_s}{V_v + V_b + V_s}$$

$$\rho_{be} = \frac{W_b}{V_v + V_b}$$

 ρ_d : 通常の乾燥密度 ρ_{be} : 有効ペントナイト乾燥密度 W_b : ペントナイト部分の重さ W_s : ケイ砂部分の重さ V_v : 空気間隙の体積 V_b : ペントナイト部分の体積 V_s : ケイ砂部分の体積

図-3.4.6 有効ペントナイト乾燥密度の概念

具体的には、次式により有効ペントナイト乾燥密度を算定した。

$$\rho_{be} = \frac{\rho_d \times C_b / 100}{1 - \frac{(1 - C_b / 100) \times \rho_d}{G_s}}$$

ここに、 ρ_{be} : 有効ペントナイト乾燥密度 (g/cm^3)

ρ_d : ケイ砂混合ペントナイトの乾燥密度 (g/cm^3)

C_b : ペントナイト混合率 (%)

G_s : ケイ砂の土粒子密度 (g/cm^3) = 2.7

(i) カルシウム型化ケニゲル V1

図-3.4.7 は、表-3.3.2 に示した Ca 型化ケニゲル V1 の膨潤圧測定試験結果を基に有効ペントナイト乾燥密度と膨潤圧の関係で整理したものである。添付資料に、図-3.4.7 に適用したデータを示す。

図-3.4.7 より、以下に示すことが明らかとなった。

① 最大及び平衡膨潤圧は、有効ペントナイト乾燥密度が大きいほど大きい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。

② 最大及び平衡膨潤圧の対数は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様に有効ペントナイト乾燥密度と線形関係にある。したがって、ペントナイト単体とケイ砂混合ペントナイトを同次元で比較することが可能である。最小自乗法により得られる線形回帰式は、以下に示すとおりである。

- ・ 最大膨潤圧 $\log_{10} P_{\max} = 2.472 \rho_{be} - 3.760$ (相関係数 0.95、 $1.0 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{be} \leq 1.8 \text{ g/cm}^3$)
- ・ 平衡膨潤圧 $\log_{10} P_{bal} = 2.413 \rho_{be} - 3.774$ (相関係数 0.96、 $1.0 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{be} \leq 1.8 \text{ g/cm}^3$)

ここに、 ρ_{be} : Ca 型化ケニゲル V1 の有効ペントナイト乾燥密度 (g/cm^3)

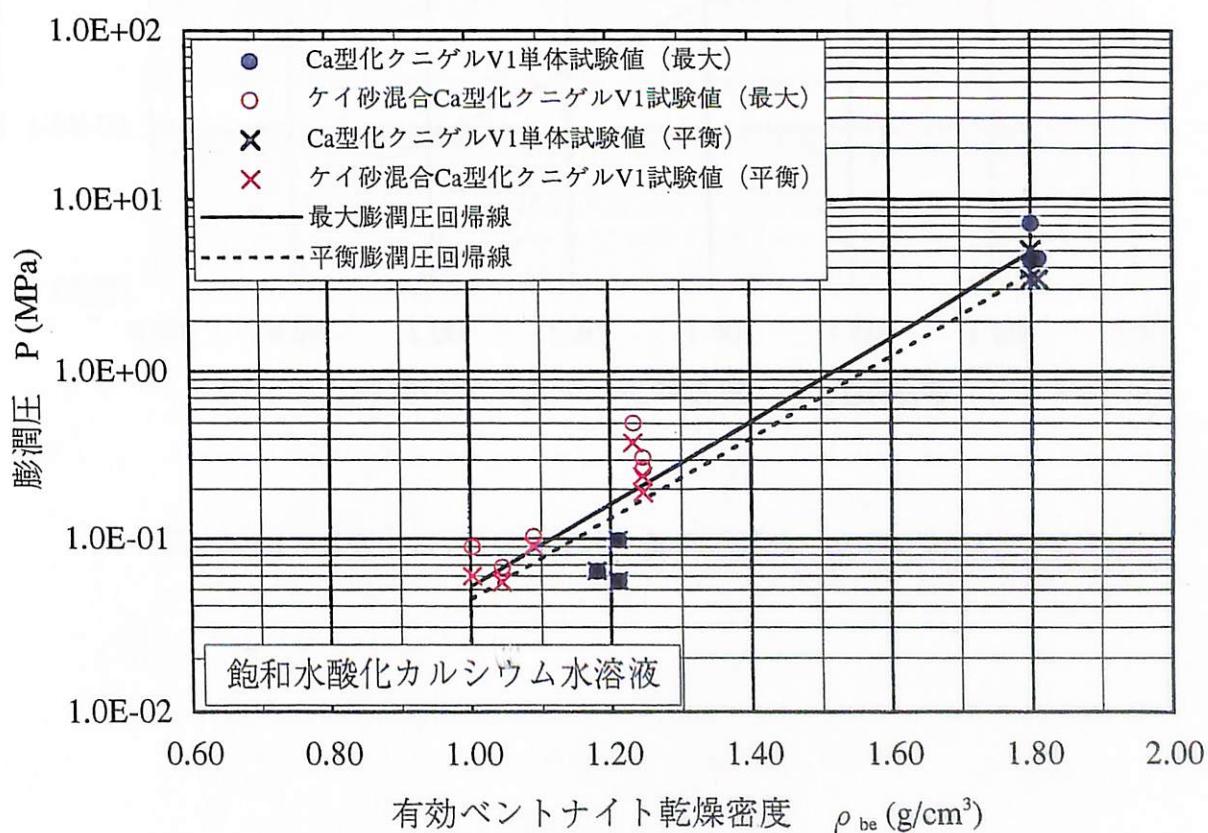


図-3.4.7 有効ペントナイト乾燥密度～膨潤圧関係 (Ca 型化ケニゲル V1、飽和水酸化カルシウム水溶液)

3.4.5 蒸留水を用いた試験結果との比較

各ペントナイト毎に飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験結果と蒸留水を用いた試験結果を比較することを目的に図-3.4.8~10を作成した。各図は、ケイ砂混合試料の結果をも含めた比較を可能とするために有効ペントナイト乾燥密度と最大膨潤圧の関係で整理した。また、最大及び平衡膨潤圧は、ほぼ同様の傾向を示すため、ここでは最大膨潤圧に着目した。なお、図中に記入した蒸留水を用いた試験結果に基づく回帰線は、文献5)によるものである。

以上の結果、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた膨潤圧と蒸留水を用いた膨潤圧は、どのペントナイトにおいても同等の値を示し、液組成の影響はほとんどないことが明らかとなった。

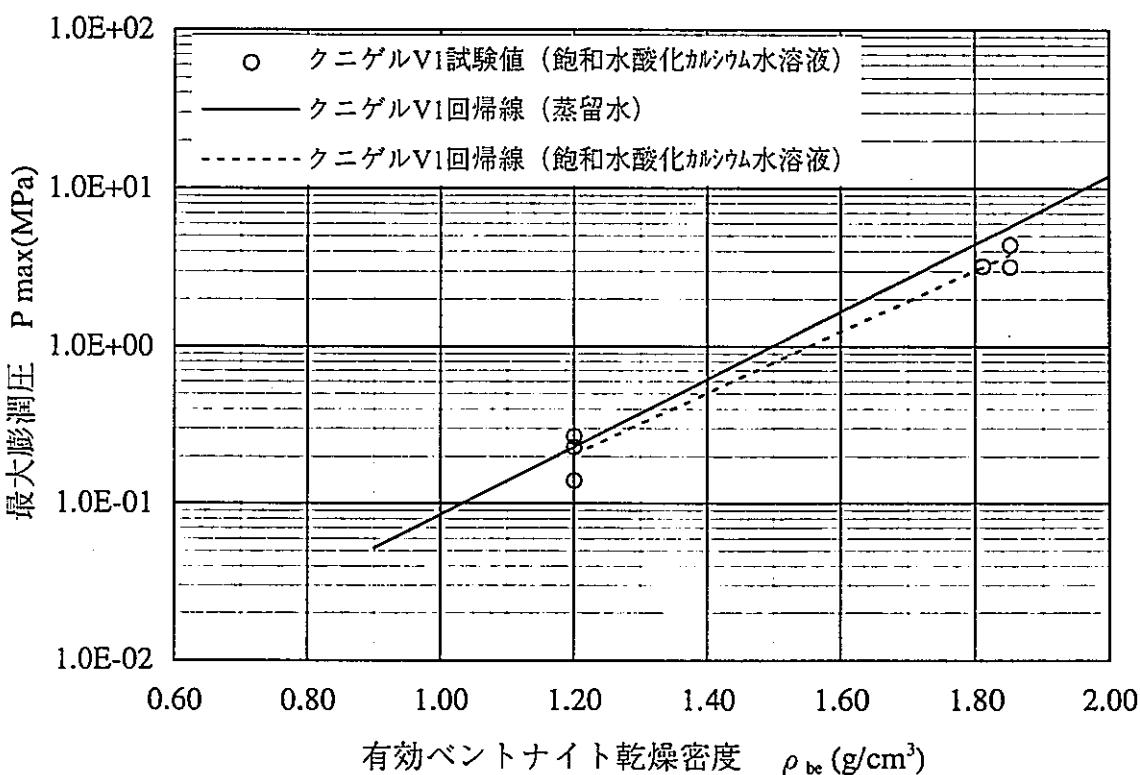


図-3.4.8 有効ペントナイト乾燥密度～膨潤圧関係（クニゲルV1）

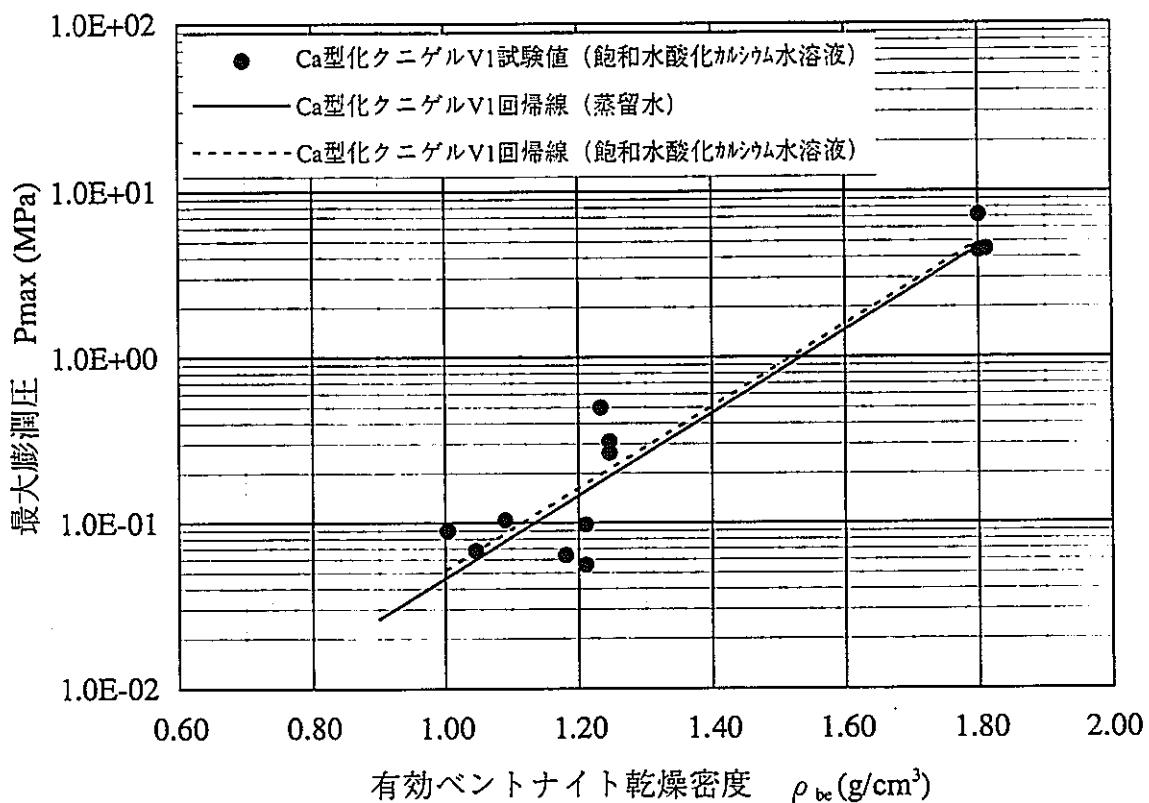


図-3.4.9 有効ペントナイト乾燥密度～膨潤圧関係 (Ca型化クニゲルVI)

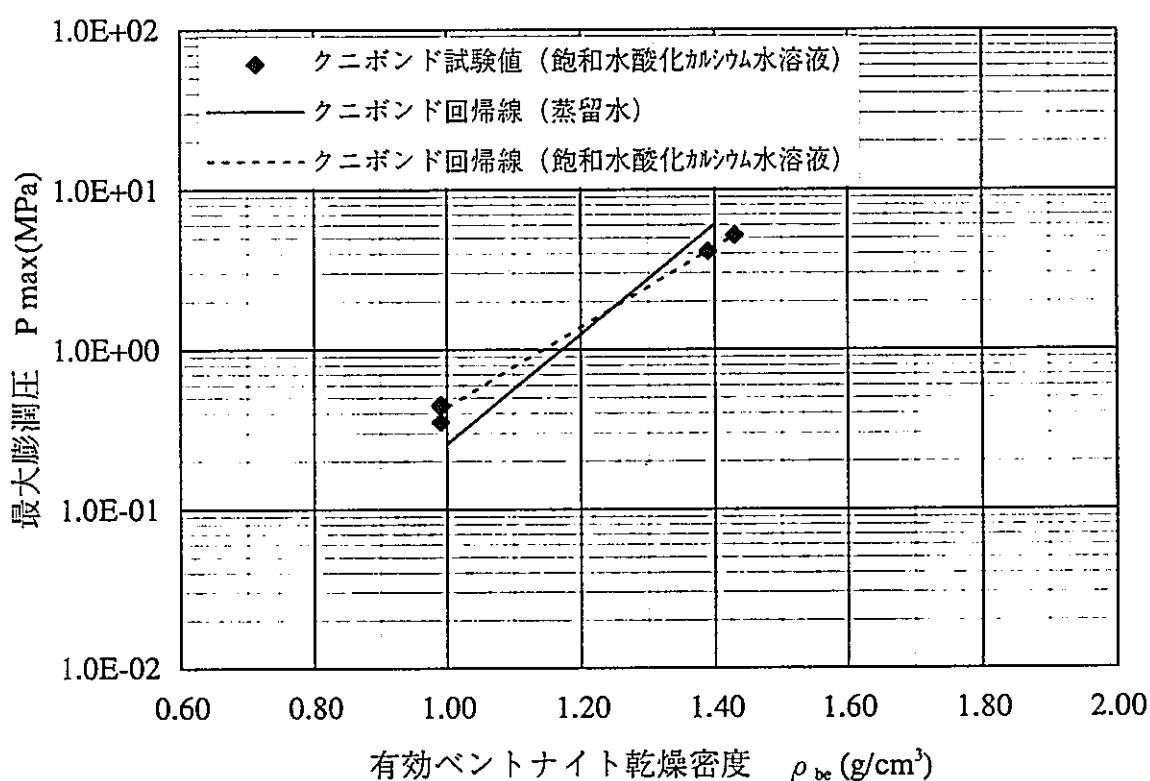


図-3.4.10 有効ペントナイト乾燥密度～膨潤圧関係 (クニボンド)

4 透水試験

4.1 試験方法

4.1.1 圧縮固化法

市販のベントナイトは粉体であるため、所定の乾燥密度を有する供試体を作製するためには圧縮固化する必要がある。試料の一部より含水比をあらかじめ測定した上で目標乾燥密度に必要な重量を測定し、図-3.1.1 に示した圧縮固化体作製治具に投入する。その後、一軸圧縮試験装置で一定の応力を加え、所定の供試体形状（直径 4cm×高さ 2cm）になるよう静的に固化させた。

4.1.2 透水試験

透水試験装置は、図-3.1.2 に示した膨潤圧測定試験装置と同じものを用いた。圧縮固化したベントナイト供試体の透水試験は、JIS A 1218（土の透水試験方法）に準拠して、定水位法により以下の手順で行った。また、図-4.1.1 に透水試験状況を示す。

- ① 圧縮固化後、供試体の割れがないか確認して、円筒セルを試験装置に設置する。
- ② 供試体の上下から真空度を徐々に高めていき、24 時間真空脱気する。
- ③ その後、圧力を徐々に大気圧に戻して供試体の上下面から吸水させて膨潤圧を測定する。

膨潤圧の変化が平衡に達した時点で供試体が飽和したと考える。

- ④ その後、飽和水酸化カルシウム水溶液に圧力を負荷し、排水量の時間変化が一定になったことを確認して単位時間当たりの排水量を測定する。排水量の測定は、出口に接続されたマノメータ下部の水圧計によって測定する。なお、飽和水酸化カルシウム水溶液への圧力負荷は、空気（炭酸ガス）との接触を回避するために窒素ガスを用いて行った。
- ⑤ 試験終了後、供試体の湿潤重量及び乾燥重量を測定し、含水比及び飽和度を確認する。透水係数は、圧縮固化したベントナイト中を流れる浸透水が Darcy（ダルシー）の法則に従うと仮定して、次式により算定した。

$$k_w = \frac{\Delta Q}{A \cdot i \cdot \Delta t}$$

ここに、 k_w ：透水係数 (m/sec)

ΔQ ：測定時間 Δt あたりの排水量 (m³)

A：供試体の断面積 (m²)

i：動水勾配(ー)

Δt ：測定時間 (sec)

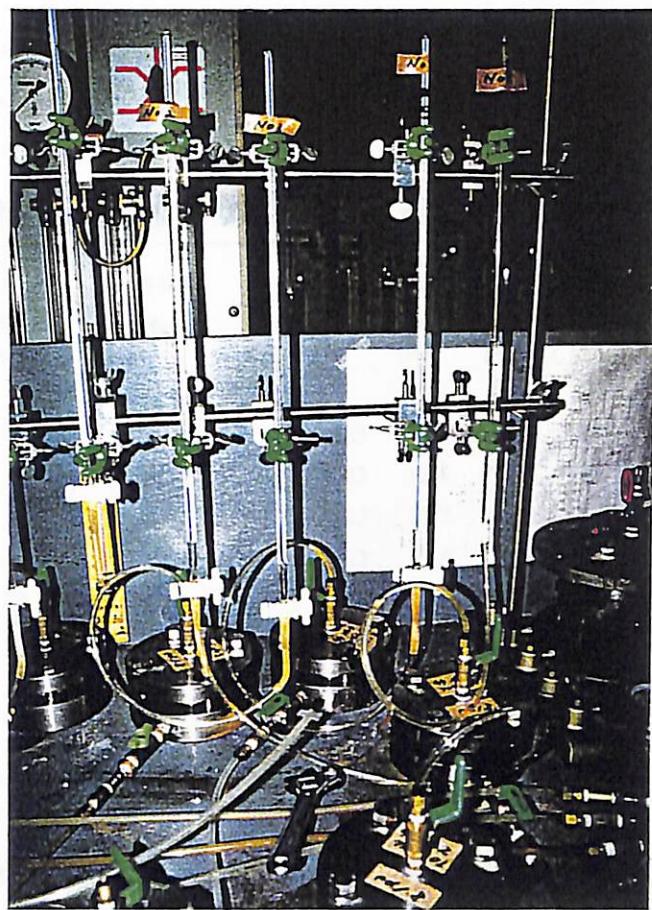


図-4.1.1 透水試験状況

4.2 試験条件

以下に試験条件を示す。

- ・供試体形状：直径 4cm × 高さ 2cm
- ・初期含水比：自然含水比（但し、ケイ砂は絶乾状態）
- ・試験温度 : 20°C
- ・試験水 : 飽和水酸化カルシウム水溶液
- ・乾燥密度 :
 - (1) クニゲル V1 単体 1.2 ± 0.1 、 $1.8 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$
 - (2) Ca 型化クニゲル V1 単体 1.2 ± 0.1 、 $1.8 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$
 - (3) ケイ砂混合 Ca 型化クニゲル V1 $1.8 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$
(ベントナイト含有率 30wt.%)
 - (4) クニボンド単体 1.0 ± 0.1 、 $1.4 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$

4.3 試験結果

クニゲルV1、Ca型化クニゲルV1及びクニボンドに対する透水試験結果を表-4.3.1～表-4.3.3に示す。表-4.3.1～表-4.3.3には、各供試体の試験条件と透水係数を整理している。

表-4.3.1 飽和水酸化カルシウム水溶液による透水試験結果一覧（クニゲルV1）

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	ペント率 C_p (wt.%)	ケイ砂率 C_s (wt.%)	砂材料 種別	比重	初期含水比 w_0 (%)	初期飽和度 Sr_0 (%)	最終含水比 w (%)	最終飽和度 Sr (%)	通水圧 (MPa)	動水勾配 i	透水係数 k_w (m/sec)
クニゲルV1単体												
1.20	1.25	100	0			6.23	13.5	47.8	103.2	0.59	3,000	1.38E-12
1.20	1.25	100	0			6.23	13.5	49.1	106.1	0.59	3,000	1.33E-12
1.21	1.23	100	0			6.23	13.7	50.2	110.1	0.59	3,000	1.38E-12
1.20	1.25	100	0			6.23	13.5	50.3	108.6	0.59	3,000	1.38E-12
1.20	1.25	100	0			6.23	13.5	49.7	107.4	0.59	3,000	1.33E-12
1.80	0.50	100	0			5.46	29.5	20.7	111.8	0.98	5,000	4.38E-14
1.80	0.50	100	0			5.46	29.5	22.3	120.4	0.98	5,000	9.15E-14
1.81	0.49	100	0			5.46	30.0	19.2	105.4	0.98	5,000	9.41E-14
1.80	0.50	100	0			5.46	29.5	23.5	127.1	0.98	5,000	9.12E-14

表-4.3.2 飽和水酸化カルシウム水溶液による透水試験結果（Ca型化クニゲルV1）

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	ペント率 C_p (wt.%)	ケイ砂率 C_s (wt.%)	砂材料 種別	比重	初期含水比 w_0 (%)	初期飽和度 Sr_0 (%)	最終含水比 w (%)	最終飽和度 Sr (%)	通水圧 (MPa)	動水勾配 i	透水係数 k_w (m/sec)
Ca型化クニゲルV1単体												
1.20	1.25	100	0			1.55	3.3	41.13	88.8	0.07	350	1.40E-10
1.21	1.23	100	0			1.55	3.4	40.84	89.5	0.08	400	1.37E-10
1.20	1.25	100	0			1.55	3.3	41.22	89.0	0.08	400	2.11E-10
1.20	1.25	100	0			1.55	3.3	41.70	90.1	0.08	400	2.12E-10
1.21	1.23	100	0			1.55	3.4	40.74	89.3	0.08	400	2.42E-10
1.76	0.53	100	0			1.55	7.8	22.80	115.3	0.98	5,000	2.77E-13
1.76	0.53	100	0			1.55	7.8	21.80	110.2	0.98	5,000	2.35E-13
1.76	0.53	100	0			1.55	7.8	21.50	108.7	0.98	5,000	2.23E-13
1.80	0.50	100	0			1.55	8.4	21.90	118.3	0.98	5,000	1.88E-13
1.74	0.55	100	0			1.55	7.6	21.53	105.4	0.98	5,000	2.82E-13
ケイ砂混合Ca型化クニゲルV1												
1.80	0.50	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.50	2.5	17.7	93.8	0.06	400	1.25E-11
1.80	0.50	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.50	2.5	17.5	94.5	0.06	400	4.37E-11
1.80	0.50	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.50	2.5	17.5	93.4	0.06	400	1.87E-11
1.80	0.50	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.50	2.5	17.3	91.6	0.06	400	1.25E-11
1.80	0.50	30	70	愛知産ケイ砂3+5号	2.70	0.50	2.5	17.2	91.7	0.06	400	1.25E-11

表-4.3.3 飽和水酸化カルシウム水溶液による透水試験結果（クニボンド）

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	ケイ砂 率 C_s (wt.%)		砂材料 種別	比重	初期 含水比 w_0	初期 飽和度 S_{r0}	最終 含水比 w	最終 飽和度 S_r	通水圧 (MPa)	動水 勾配 i	透水係数 k (m/sec)
		C_{s1}	C_{s2}			w_0	S_{r0}	w	S_r			
クニボンド単体												
1.03	1.56	100	0			5.46	9.2	62.2	105.1	0.48	2,450	3.25E-12
1.03	1.56	100	0			5.46	9.2	63.0	106.4	0.48	2,450	4.29E-12
1.03	1.56	100	0			5.46	9.2	62.7	105.9	0.48	2,450	4.44E-12
1.03	1.56	100	0			5.46	9.2	63.2	106.7	0.48	2,450	4.14E-12
1.03	1.56	100	0			5.46	9.2	62.1	104.9	0.48	2,450	4.44E-12
1.35	0.96	100	0			8.59	23.7	39.5	109.1	1.42	7,250	2.63E-13
1.36	0.94	100	0			8.59	24.1	40.2	112.8	1.42	7,250	3.68E-13
1.36	0.94	100	0			8.59	24.1	39.3	110.2	1.42	7,250	3.68E-13
1.41	0.87	100	0			8.59	26.0	37.2	112.6	1.42	7,250	3.68E-13
1.36	0.94	100	0			8.59	24.1	40.2	112.8	1.42	7,250	4.73E-13

図-4.3.1 は、今回実施したCa型化クニゲルV1における透水係数及び通水圧の経時変化の一例を整理したものである。赤及び青線で表示したCa型化クニゲルV1 単体の透水係数は、若干の乱れはあるものの乾燥密度によらず試験開始直後からほぼ一定の値を示している。また、通水圧を上昇させても透水係数に対する影響はみられない。鈴木らによる蒸留水を用いた試験における通水圧の影響検討でも、同様の結果が得られている¹¹⁾。

一方、黒線で表示したケイ砂70%混合Ca型化クニゲルV1（乾燥密度1.8g/cm³）の透水係数は、全体的な傾向として試験開始直後から低下している。今回結果を取りまとめた試験期間約50日間では初期の透水係数から2桁程度の低下がみられ、収束する結果となった。

また、ケイ砂混合試料についてのみ時間経過とともに透水係数が小さくなる原因として、飽和水酸化カルシウム水溶液とケイ砂が反応し、間隙に何らかの鉱物が沈殿していることが推察される。そこで、原因究明の最初のアプローチとして、飽和水酸化カルシウム水溶液及び蒸留水を通水させた試料に対して、SEM（走査型電子顕微鏡）観察を実施した。これについての考察を付録に示す。

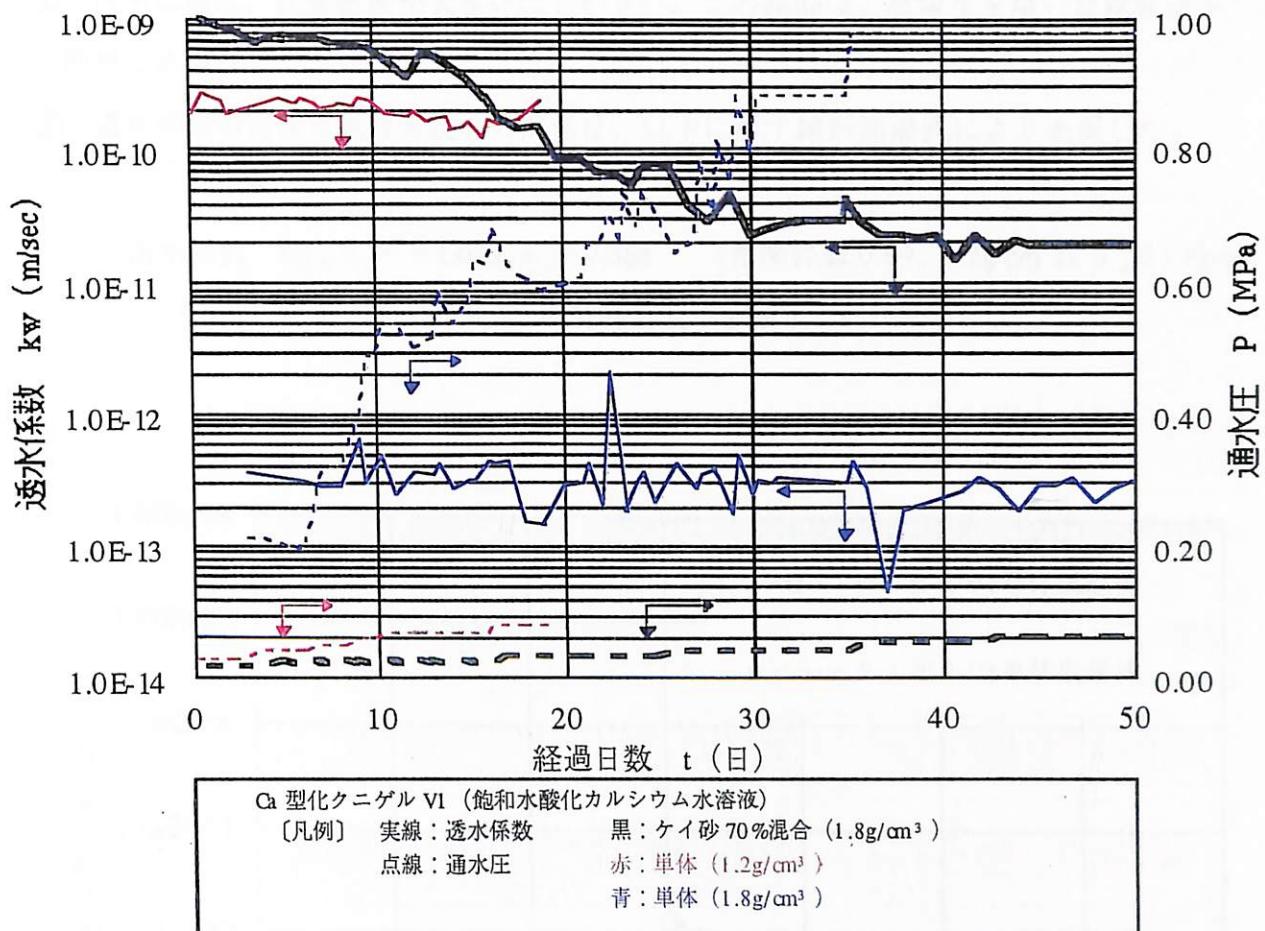


図-4.3.1 Ca 型化クニゲル V1 における透水係数及び通水圧の経時変化

4.4 考 察

4.4.1 クニゲル VI

(1) クニゲル VI 単体

図-4.4.1 は、表-4.3.1 に示したクニゲル VI 単体の透水試験結果を乾燥密度と透水係数の関係で整理したものである。

図-4.4.1 より、以下に示すことが明らかとなった。

- ① 透水係数は、乾燥密度が大きいほど小さい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。
- ② 透水係数の対数と乾燥密度との関係は、以下に示す線形回帰式により表現した。

$$\cdot \text{透水係数 } \log_{10} k_w = -2.079 \rho_d - 9.368 \quad (\text{相関係数 } 0.99, 1.2 \text{g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.8 \text{g/cm}^3)$$

ここに、 ρ_d : クニゲル VI の乾燥密度 (g/cm^3)

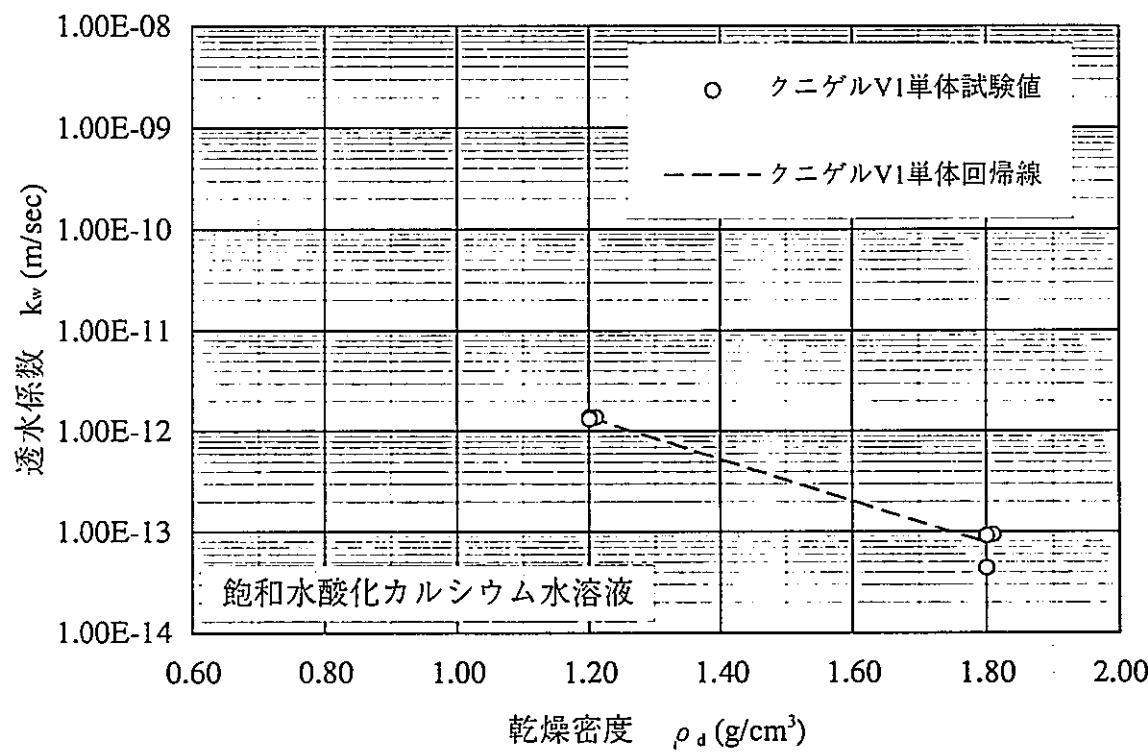


図-4.4.1 乾燥密度～透水係数関係（クニゲル VI 単体、飽和水酸化カルシウム水溶液）

4.4.2 カルシウム型化クニゲル V1

(1) カルシウム型化クニゲル V1 単体

図-4.4.2 は、表-4.3.2 に示した Ca 型化クニゲル V1 単体の透水試験結果を乾燥密度と透水係数の関係で整理したものである。

図-4.4.2 より、以下に示すことが明らかとなった。

① 透水係数は、乾燥密度が大きいほど小さい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。

② 透水係数の対数と乾燥密度との関係は、以下に示す線形回帰式により表現した。

$$\text{・透水係数 } \log_{10} k_w = -5.148 \rho_d - 3.540 \quad (\text{相関係数 } 1.00, 1.2 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.8 \text{ g/cm}^3)$$

ここに、 ρ_d : Ca 型化クニゲル V1 の乾燥密度 (g/cm³)

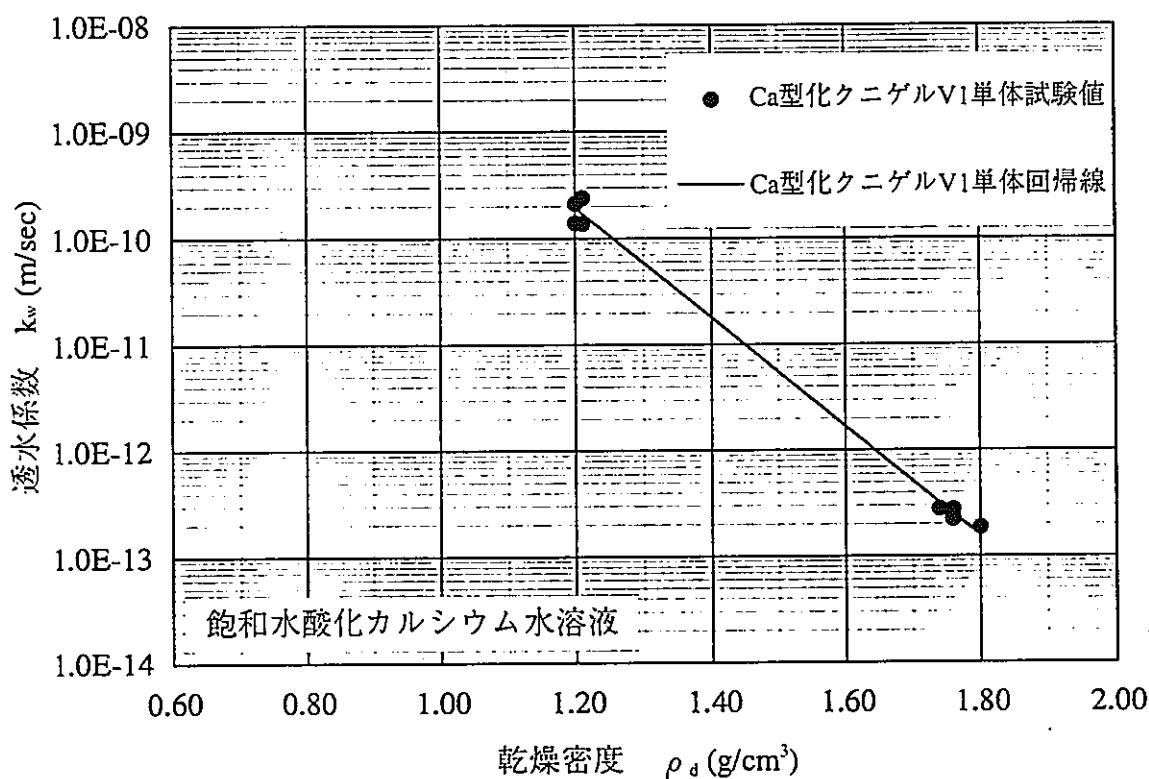


図-4.4.2 乾燥密度～透水係数関係 (Ca 型化クニゲル V1 単体、飽和水酸化カルシウム水溶液)

(2) ケイ砂混合カルシウム型化クニゲル VI

図-4.4.3 は、表-4.3.2 に示したケイ砂混合 Ca 型化クニゲル VI の透水試験結果をペントナイト混合率と透水係数の関係で整理したものである。ここで、乾燥密度は、小数点以下第 2 位を四捨五入して結果を整理した。また、初期値と最終値について標記しているが、これはケイ砂混合 Ca 型化クニゲル VI の試験値が、透水前と透水後の値で変化したことに対してそれぞれ初期値、最終値として表したものである。

図-4.4.3 から、ペントナイト混合率が大きいほど透水係数は小さいことがうかがえる。

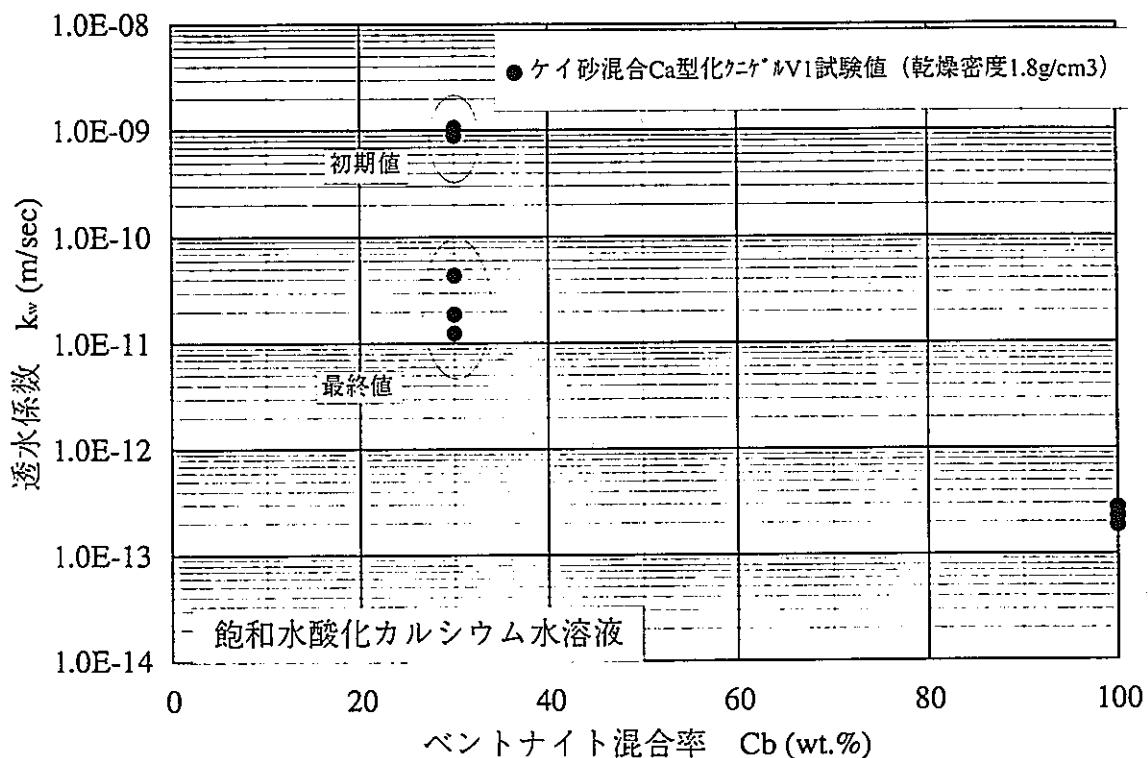


図-4.4.3 ペントナイト混合率～透水係数関係
(ケイ砂混合 Ca 型化クニゲル VI、飽和水酸化カルシウム水溶液)

4.4.3 クニボンド

(1) クニボンド単体

図-4.4.4は、表-4.3.3に示したクニボンド単体の透水試験結果を乾燥密度と透水係数の関係で整理したものである。

図-4.4.4より、以下に示すことが明らかとなった。

① 透水係数は、乾燥密度が大きいほど小さい。この傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。

② 透水係数の対数と乾燥密度との関係は、以下に示す線形回帰式により表現した。

$$\text{・透水係数 } \log_{10} k_w = -3.084 \rho_d - 8.218 \quad (\text{相関係数 } 0.99, 1.0 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_d \leq 1.4 \text{ g/cm}^3)$$

ここに、 ρ_d : クニボンドの乾燥密度 (g/cm^3)

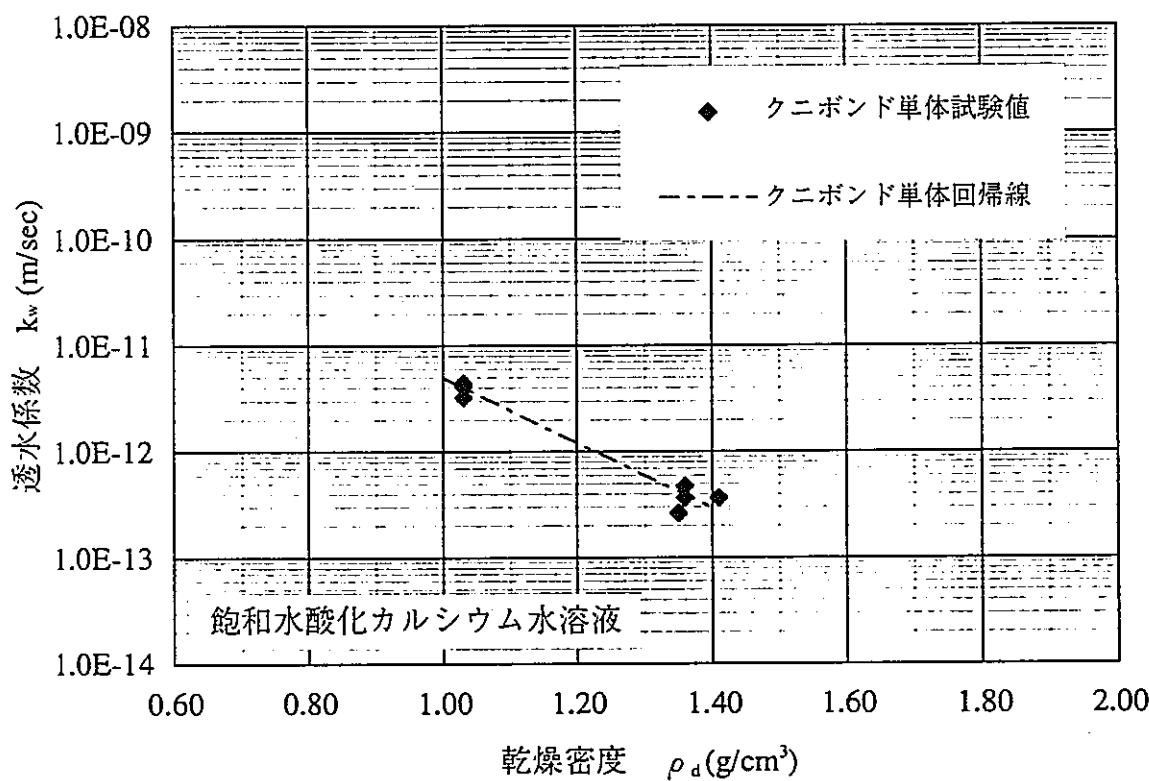


図-4.4.4 乾燥密度～透水係数関係（クニボンド単体、飽和水酸化カルシウム水溶液）

4.4.4 各ベントナイトの比較

(1) ベントナイト単体における線形回帰線による比較

図-4.4.5 は、前項までに得られた各ベントナイト単体の乾燥密度～透水係数関係を線形回帰線により示したものである。図-4.4.5 より、以下に示すことが明らかとなった。また、以下に示す傾向は、蒸留水を用いた試験結果⁵⁾と同様である。

- ① ベントナイトの種類によらず、乾燥密度が大きいほど透水係数は小さい。
- ② クニゲルV1を強制的にカルシウム型化させたCa型化クニゲルV1の透水係数は、乾燥密度が小さい領域においてクニゲルV1のそれより大きい値を示す傾向にある。しかし、乾燥密度1.8g/cm³程度では、Ca型化クニゲルV1とクニゲルV1の透水係数は、ほぼ同等の値を示す。
- ③ クニボンドは、クニゲルV1やCa型化クニゲルV1と比較して低乾燥密度で比較的小さな透水性を有する。例えば、乾燥密度1.4g/cm³のクニボンドと乾燥密度1.5g/cm³程度のクニゲルV1及び乾燥密度1.75g/cm³程度のCa型化クニゲルV1の透水係数は、ほぼ同等の値を示す。これは、表-2.1.2に示したようにクニボンドにおけるモンモリロナイトの含有率が80wt.%とクニゲルV1より大きいことに起因すると考えられる。

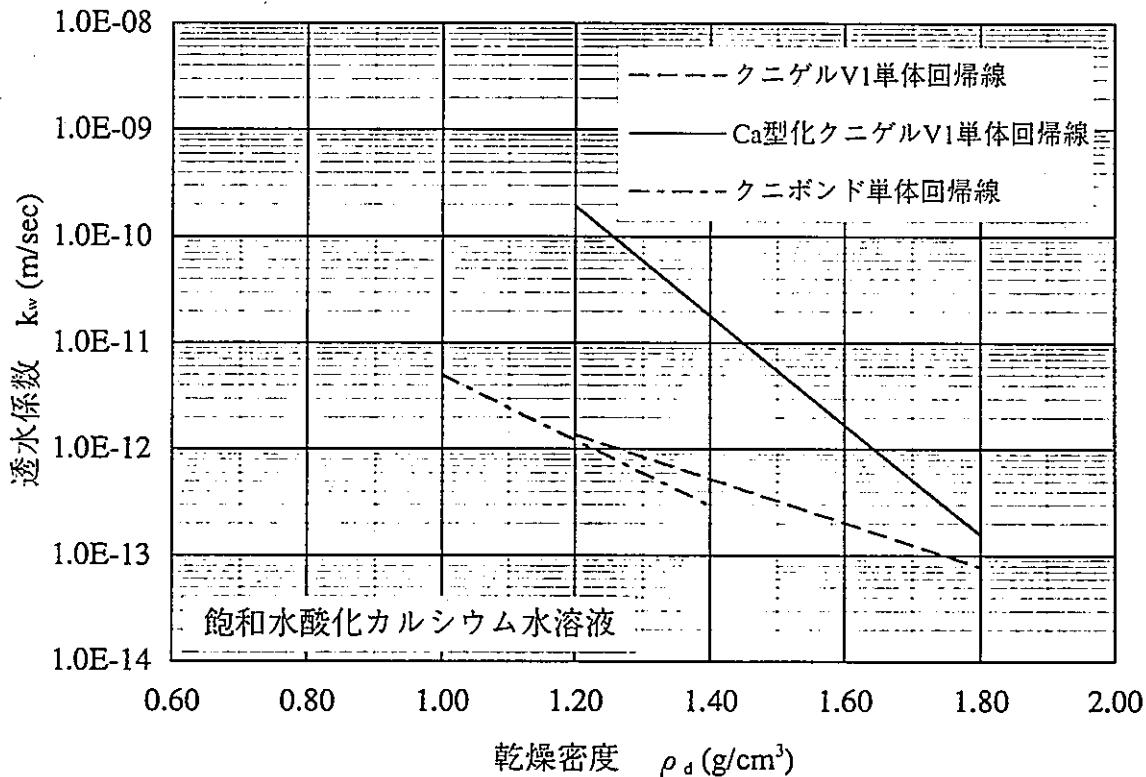


図-4.4.5 乾燥密度～透水係数関係の比較（飽和水酸化カルシウム水溶液）

(2) 有効ペントナイト乾燥密度による比較

膨潤圧と同様に、有効ペントナイト乾燥密度による透水係数の整理を行う。

(i) カルシウム型化クニゲル VI

図-4.4.6は、表-4.3.2に示したCa型化クニゲルVIの透水試験結果を基に有効ペントナイト乾燥密度と透水係数の関係で整理したものである。また、ケイ砂混合Ca型化クニゲルVIに関しては、経時変化により透水係数が低下する以前の初期値も示している。添付資料に、図-4.4.6に適用したデータを示す。

これまで蒸留水を用いた試験では、透水係数と有効ペントナイト乾燥密度の間に相関が見いだされ、ペントナイト単体とケイ砂混合ペントナイトを同次元で表現可能なことが明らかとなった⁵⁾。図-4.4.6から、ケイ砂混合Ca型化クニゲルVIの初期値と単体試料に基づいた場合、前記と同様の相関関係がみられる。しかしながら、ケイ砂混合Ca型化クニゲルVIの透水係数は前述のとおり時間とともに低下する傾向にあり、当然のことながら相関は認められない。これは、飽和水酸化カルシウム水溶液を通水した場合、ペントナイト単体試料とケイ砂混合試料を同次元で表現困難なことを示唆しているものと考える。

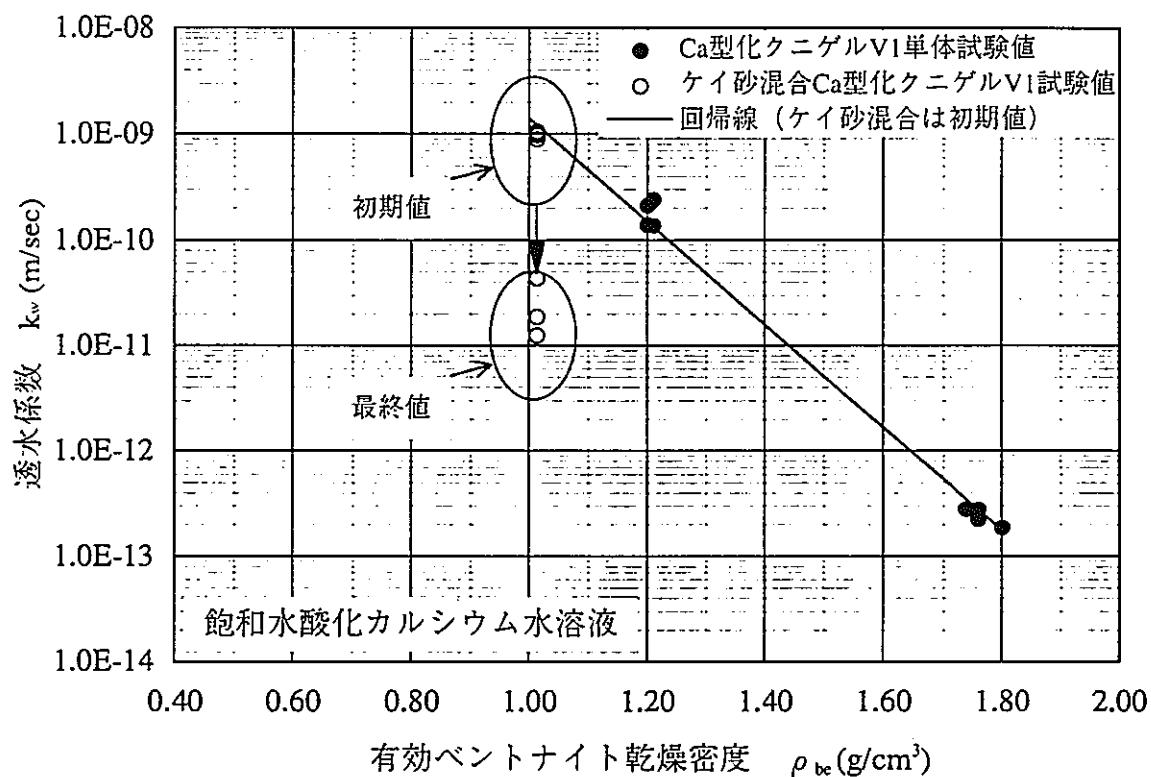


図-4.4.6 有効ペントナイト乾燥密度～透水係数関係 (Ca型化クニゲルVI、飽和水酸化カルシウム水溶液)

4.4.5 蒸留水を用いた試験結果との比較

各ペントナイト毎に飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験結果と蒸留水を用いた試験結果を比較することを目的に図-4.4.7～9を作成した。各図は、ケイ砂混合試料の結果をも含めた比較を可能とするために有効ペントナイト乾燥密度と透水係数の関係で整理した。なお、図中に記入した蒸留水を用いた試験結果に基づく回帰線は、文献5)によるものである。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- ① クニゲルV1の場合、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた透水係数と蒸留水を用いた透水係数は、ほぼ同等の値を示し、液組成の影響はほとんどないと考えられる。
- ② Ca型化クニゲルV1及びクニボンドの場合、乾燥密度に対する感度（回帰線の傾き）は、ほぼ同程度である。しかし、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた透水係数の方が若干大きな値を示す（蒸留水を用いた透水係数に対して2～4倍程度）。この差が、試験誤差に起因するものなのか、それともCa型化あるいはCa型ペントナイトと飽和水酸化カルシウム水溶液との相互作用に起因するものなのかは、現状の知見だけでは推察困難である。
- ③ ケイ砂を70%混合したCa型化クニゲルV1（有効ペントナイト乾燥密度で1.0g/cm³程度）に飽和水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の透水係数は、蒸留水を通水した場合の透水係数に比べ、最終値で1～2桁程度小さな値を示す。

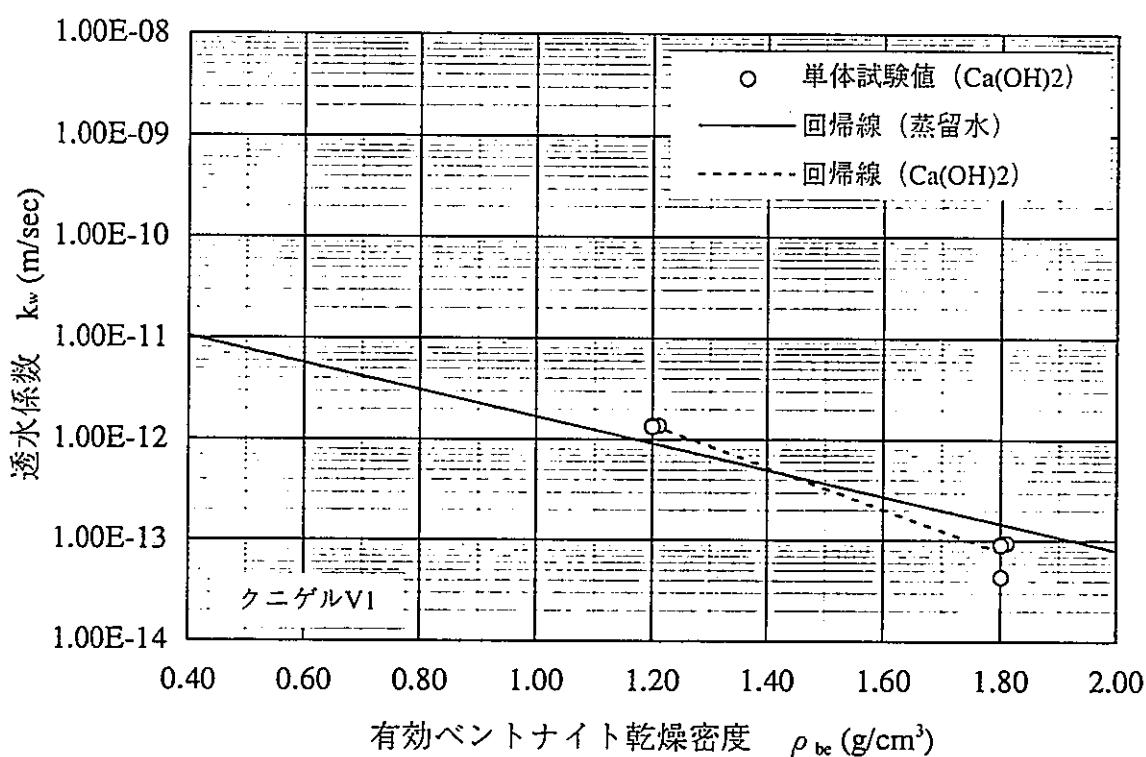


図-4.4.7 有効ペントナイト乾燥密度～透水係数関係（クニゲルV1）

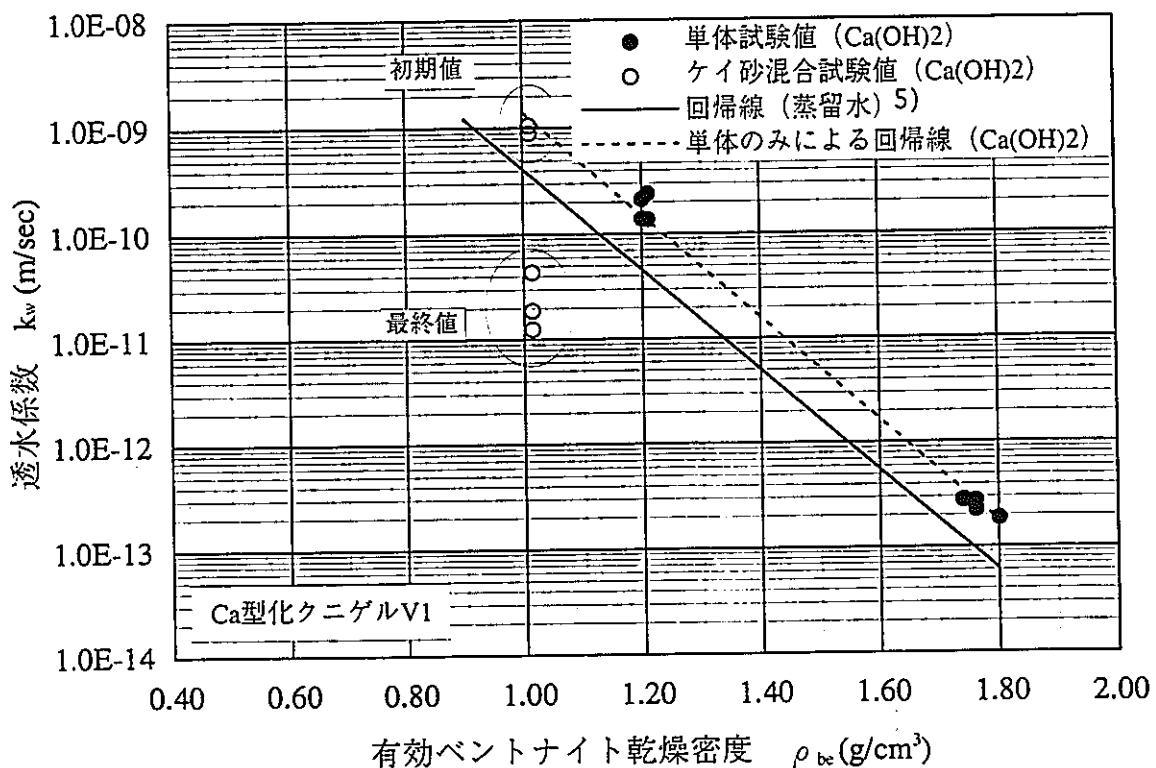


図-4.4.8 有効ペントナイト乾燥密度～透水係数関係 (Ca型化クニゲルV1)

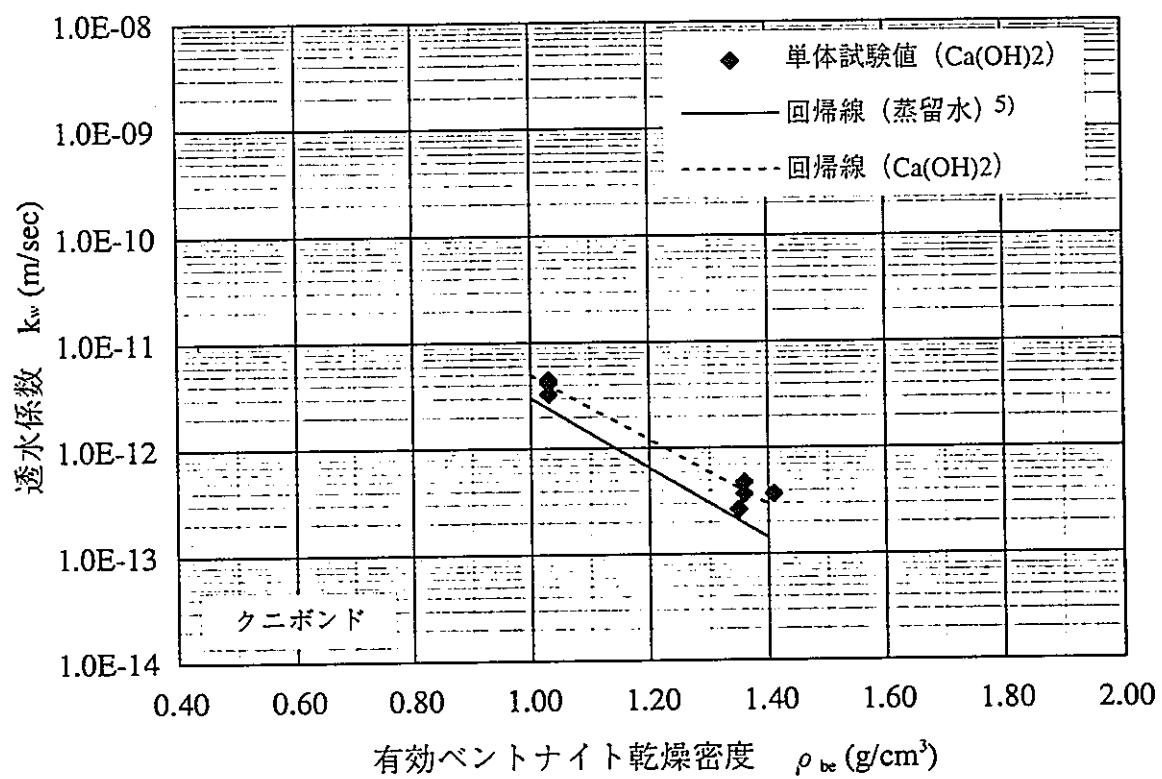


図-4.4.9 有効ペントナイト乾燥密度～透水係数関係 (クニボンド)

5 まとめ

TRU廃棄物の処分概念の検討の一環として行われた、ベントナイトの基本特性に対する液組成の影響把握として、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた膨潤圧測定試験及び透水試験を行い、乾燥密度やケイ砂混合率が各特性値に及ぼす影響や蒸留水を用いた試験結果との相違を検討した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

5.1 膨潤圧

飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた膨潤圧と蒸留水を用いた膨潤圧は、どのベントナイトにおいても同等の値を示し、液組成の影響はほとんどないことが明らかとなった。

以下においては、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験結果について整理する。

5.1.1 ベントナイト単体

① ベントナイトの種類によらず、乾燥密度が大きいほど膨潤圧は大きい。また、膨潤圧の対数と乾燥密度との関係を表現する回帰式は、表-5.1.1に示すとおりである。

表-5.1.1 ベントナイト単体における膨潤圧と乾燥密度の関係式（飽和水酸化カルシウム水溶液）

膨潤圧の種類	関 係 式	適用条件		
		相関係数	乾燥密度 (g/cm ³)	温度 (°C)
クニゲル V1				
最大膨潤圧	$\log_{10} P_{\max} = 1.945 \rho_d - 3.021$	0.99	1.2~1.85	20
平衡膨潤圧	$\log_{10} P_{\text{bal}} = 1.976 \rho_d - 3.107$	0.98	1.3~1.85	20
Ca型化クニゲル V1				
最大膨潤圧	$\log_{10} P_{\max} = 3.094 \rho_d - 4.863$	0.99	1.2~1.8	20
平衡膨潤圧	$\log_{10} P_{\text{bal}} = 2.880 \rho_d - 4.606$	0.99	1.2~1.8	20
クニボンド				
最大膨潤圧	$\log_{10} P_{\max} = 2.502 \rho_d - 2.864$	1.00	1.0~1.43	20
平衡膨潤圧	$\log_{10} P_{\text{bal}} = 2.505 \rho_d - 2.877$	1.00	1.0~1.43	20

ここに、 ρ_d ：ベントナイトの乾燥密度 (g/cm³)

② クニゲル V1 を強制的にカルシウム型化させた Ca 型化クニゲル V1 の膨潤圧は、乾燥密度が小さい領域においてクニゲル V1 のそれより小さい値を示す傾向にある。しかし、乾

燥密度 1.6~1.7g/cm³程度以上において Ca 型化クニゲル V1 とクニゲル V1 の膨潤圧は、同等もしくはそれ以上と考えられる。

③ クニボンドは、クニゲル V1 や Ca 型化クニゲル V1 と比較して低乾燥密度で比較的大きな膨潤圧を発生する。例えば、乾燥密度 1.4g/cm³のクニボンドと乾燥密度 1.8g/cm³のクニゲル V1 及び Ca 型化クニゲル V1 の膨潤圧は、同等の値を示す。これは、表-2.1.2 に示したようにクニボンドにおけるモンモリロナイトの含有率が 80wt.% とクニゲル V1 より大きいことに起因すると考えられる。

5.1.2 ケイ砂混合ベントナイト

乾燥密度 1.8g/cm³の結果によると、膨潤圧はベントナイト混合率が大きいほど大きい。また、膨潤圧は、同じベントナイト混合率であれば乾燥密度が大きいほど大きい。膨潤圧の対数とベントナイト混合率との関係を表現する回帰式は、表-5.1.2 に示すとおりである。

表-5.1.2 ケイ砂混合ベントナイトにおける膨潤圧と乾燥密度の関係式

膨潤圧の種類	関 係 式	相関 係数	適用条件		
			乾燥密度 (g/cm ³)	ベントナイト 混合率 (wt.%)	温度 (℃)
Ca型化クニゲル V1					
最大膨潤圧	$\log_{10} P_{\max} = 0.02605C_b - 1.888$	1.00	1.8	30~100	20
平衡膨潤圧	$\log_{10} P_{\text{bal}} = 0.02612C_b - 2.024$	1.00	1.8	30~100	20

ここに、 C_b ：ベントナイト混合率 (wt.%)

5.1.3 有効ベントナイト乾燥密度による結果の整理

ベントナイト単体とケイ砂混合ベントナイトは、ベントナイト混合率や乾燥密度、さらには使用ケイ砂が異なるといったことから一義的な比較が困難である。そこで、ケイ砂部分を除いたベントナイトと空気間隙で構成される乾燥密度を有効ベントナイト乾燥密度と定義して試験結果の整理を試みたところ、膨潤圧と有効ベントナイト乾燥密度の間に相関が見いだされ、ベントナイト単体とケイ砂混合ベントナイトの両者を同次元で比較可能なことが明らかとなつた。

① 有効ベントナイト乾燥密度が大きいほど膨潤圧は大きい。また、膨潤圧の対数は有効ベ

ントナイト乾燥密度と線形関係にあり、その回帰式は表-5.1.3 に示すとおりである。

表-5.1.3 膨潤圧と有効ベントナイト乾燥密度の関係式

膨潤圧の種類	関 係 式	相関 係数	適用条件	
			有効ベントナイト 乾燥密度 (g/cm ³)	温度 (℃)
Ca型化クニゲルV1				
最大膨潤圧	$\log_{10} P_{\max} = 2.472 \rho_{be} - 3.760$	0.95	1.0~1.8	20
平衡膨潤圧	$\log_{10} P_{bal} = 2.413 \rho_{be} - 3.774$	0.96	1.0~1.8	20

ここに、 ρ_{be} ：試料の有効ベントナイト乾燥密度 (g/cm³)

5.2 透水係数

飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた透水係数と蒸留水を用いた透水係数は、クニゲル V1 の場合においてのみ同等の値を示し、液組成の影響はほとんどないと考えられた。しかし、Ca 型化クニゲル V1 及びクニボンドの場合、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた透水係数の方が蒸留水を用いた透水係数に対して 2~4 倍程度大きくなつた。この差の原因を推察することは、現状の知見だけでは困難であった。

また、ケイ砂を 70% 混合した Ca 型化クニゲル V1 に飽和水酸化カルシウム水溶液を通水した場合、透水係数が時間とともに低下する現象が現れた。試験期間約 50 日間では、初期の透水係数から 2 衍程度の低下がみられ、最終値は蒸留水を通水した場合の透水係数に比べ 1~2 衍程度小さな値を示していた。

以下においては、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた試験結果について整理する。

5.2.1 ベントナイト単体

- ① ベントナイトの種類によらず、乾燥密度が大きいほど透水係数は小さい。また、透水係数の対数と乾燥密度との関係を表現する回帰式は、表-5.2.1 に示すとおりである。
- ② クニゲル V1 を強制的にカルシウム型化させた Ca 型化クニゲル V1 の透水係数は、乾燥密度が小さい領域においてクニゲル V1 のそれより大きい値を示す傾向にある。しかし、乾燥密度 1.8 g/cm³ 程度以上において Ca 型化クニゲル V1 とクニゲル V1 の透水係数は、ほぼ同等と考えられる。

③ クニボンドは、クニゲルV1 やCa型化クニゲルV1と比較して低乾燥密度で比較的小さな透水性を有する。例えば、乾燥密度 1.4g/cm^3 のクニボンドと乾燥密度 1.5g/cm^3 程度のクニゲルV1 及び乾燥密度 1.75g/cm^3 程度のCa型化クニゲルV1の透水係数は、ほぼ同等の値を示す。これは、表-2.1.2に示したようにクニボンドにおけるモンモリロナイトの含有率が80wt.%とクニゲルV1より大きいことに起因すると考えられる。

表-5.2.1 ベントナイト単体における透水係数と乾燥密度の関係式

関 係 式	適用条件		
	相関 係数	乾燥密度 (g/cm^3)	温度 ($^\circ\text{C}$)
クニゲル V1			
$\log_{10} k_w = -2.079 \rho_d - 9.368$	0.99	1.2~1.8	20
Ca型化クニゲル V1			
$\log_{10} k_w = -5.148 \rho_d - 3.540$	1.00	1.2~1.8	20
クニボンド			
$\log_{10} k_w = -3.084 \rho_d - 8.218$	0.99	1.0~1.4	20

ここに、 ρ_d :ベントナイトの乾燥密度 (g/cm^3)

5.2.2 ケイ砂混合ベントナイト

乾燥密度 1.8g/cm^3 の結果によると、透水係数はベントナイト混合率が大きいほど小さいといった傾向が見られる。

5.2.3 有効ベントナイト乾燥密度による結果の整理

膨潤圧と同様に有効ベントナイト乾燥密度による試験結果の整理を試みた。ケイ砂混合 Ca型化クニゲルV1 の初期値と単体試料に基づいた場合、透水係数と有効ベントナイト乾燥密度には相関関係がみられた。しかしながら、ケイ砂混合 Ca型化クニゲルV1 の透水係数は時間とともに低下する傾向にあり、当然のことながら相関は認めらない。これは、飽和水酸化カルシウム水溶液を通水した場合、ベントナイト単体試料とケイ砂混合試料を同次元で表現困難なことを示唆しているものと考えられた。

付 錄

透水試験試料（ケイ砂を混合したCa型化ペントナイト） のSEM観察及びEDSによる元素分析結果について

1. はじめに

ペントナイトの基本特性に対する液組成の影響把握として、飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた透水試験を行ったが、図一4.3.1に示したように、ケイ砂を混合したCa型化ペントナイトに飽和水酸化カルシウム水溶液を通水させると、時間とともに透水係数が低下する結果が得られた。(蒸留水を通水させた場合は透水係数は一定であった。)

そこで、原因究明のアプローチとしてそれぞれの試料についてSEM(走査型電子顕微鏡)観察及びEDS(エネルギー分散型X線分光法)による元素分析を行い、その結果について考察を行った。

2. 使用試料

使用する試料を、常温減圧下で24時間乾燥した後、分析に供した。真空蒸着装置にて炭素を蒸着させた後、走査型電子顕微鏡(SEM)観察及びエネルギー分散型X線分光法(EDS)による元素分析を行った。試料番号と透水試験での試験条件の関係を以下に示す。ここで、Sample No.6、7については、透水液を蒸留水とした試料結果であり、水酸化カルシウム水溶液を透水した場合と比較するものとする。

表一1 使用試料

Sample No	乾燥密度(g/cm ³)	透水液	配合率(wt.%)
1	2.0	水酸化カルシウム水溶液	ペントナイト：ケイ砂=30：70
2	2.0	水酸化カルシウム水溶液	ペントナイト：ケイ砂=30：70
3	2.0	水酸化カルシウム水溶液	ペントナイト：ケイ砂=30：70
4	1.8	水酸化カルシウム水溶液	ペントナイト：ケイ砂=30：70
5	1.8	水酸化カルシウム水溶液	ペントナイト：ケイ砂=30：70
6	2.0	蒸留水	ペントナイト：ケイ砂=30：70
7	2.0	蒸留水	ペントナイト：ケイ砂=30：70

3. 使用機器

試料を分析するために以下の機器を使用した。

真空蒸着装置：島津社製、CC-50TB

走査型電子顕微鏡：トプコン社製、ISI-DS130

エネルギー分散型X線分光装置：フィリップス社製、EDAX®9100

4. SEM観察及びEDS元素分析結果

全試料において、低倍率での結晶形態には混合したケイ砂とベントナイトが凝縮したような塊が観察され、大きな違いは見られなかった（写真-1～7）。各試料の詳細なSEM観察及びEDSの分析結果を以下に示す。

Sample No.1

モンモリロナイト部の成分比（図-1）と比較して、カルシウム成分が多く含まれる結晶が観察された（写真-8、図-2）。また、カルシウムが主成分となるような結晶も観察された（写真-9、図-3）。

Sample No.2

No.2の試料においても、モンモリロナイト部と比較して、カルシウム成分が多く含まれる結晶（写真-10、図-4、5）とカルシウムが主成分となるような結晶（写真-11、図-6）が観察された。

Sample No.3

No.3の試料においても、No.1、No.2同様にモンモリロナイト部と比較して、カルシウム成分が多く含まれる結晶（写真-12、図-7）とカルシウムが主成分となるような結晶（写真-12、図-8）が観察された。

Samnple No.4

No.4の試料においても、No.1～No.3同様にモンモリロナイト部と比較して、カルシウム成分が多く含まれる結晶（写真-13、図-9）とカルシウムが主成分となるような結晶（写真-13、図-10、写真-14、図-11）が観察された。しかし、それらの結晶は硫黄分も多く含んでいる（図-9、10、11）ことが分かった。

Samnple No.5

No.4 の試料においては、モンモリロナイト部と比較して、カルシウム成分が多く含まれる結晶（写真-15、図-12）は観察されたが、カルシウムが主成分となるような結晶は見られなかった。また、硫黄分と鉄分からなるパイライトと思われる結晶（写真-16、図-13）も観察された。

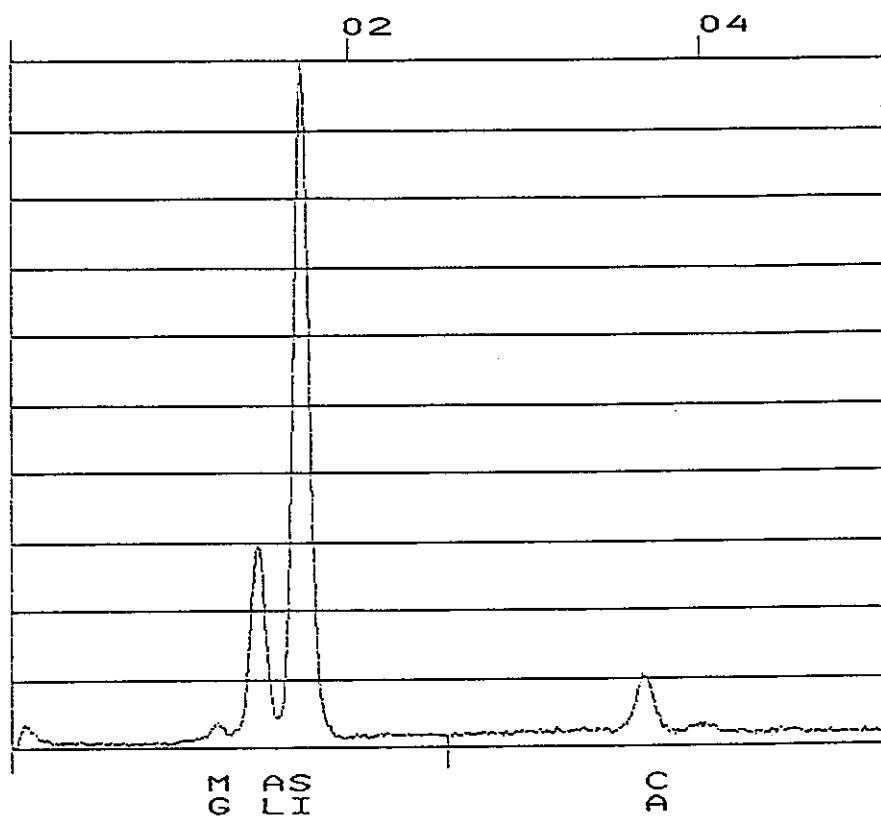
Sample No.6 及び No.7

これらの試料においては、No.1～No.5 の試料で見られたようなモンモリロナイト部と比較して、カルシウム成分が多く含まれる結晶は観察されなかった（写真についてはモンモリロナイト部と同じ成分比を示した結晶のみであったため、省略した。）。また、No.5 と同様に硫黄分と鉄分からなるパイライトと思われる結晶（写真-17、図-14）が観察された。

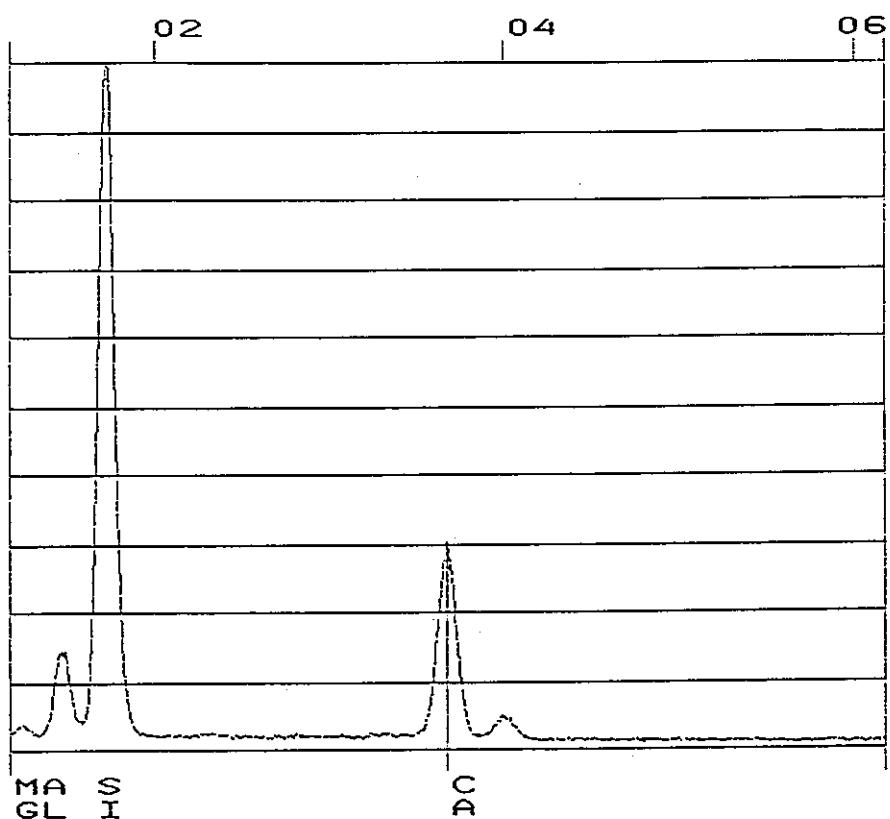
5. 考察

観察結果より、水酸化カルシウム水溶液を通水させた Sample については、蒸留水を通水させた Sample には見られないカルシウム成分を多く含む結晶が観察された。この結晶がベントナイトに付着することで透水係数が時間とともに低下すると思われる。しかし、Ca 化させたベントナイト 100% の試料に水酸化カルシウム水溶液を通水させた場合には、透水係数の低下は見られておらず、試料に 70% 含むケイ砂が何らかの影響を及ぼしていると考えられるが、今回の観察ではわからなかった。

透水係数が低下することは、評価上悪影響ではない。しかし、どの程度小さくなるか予測することは困難であると考えられ、評価上は初期の透水係数を用いることが望ましいと思われる。



図一1 モンモリロナイト結晶のEDSグラフ



図一2 Sample No.1 の EDS グラフ(写真-8 黒丸内結晶)

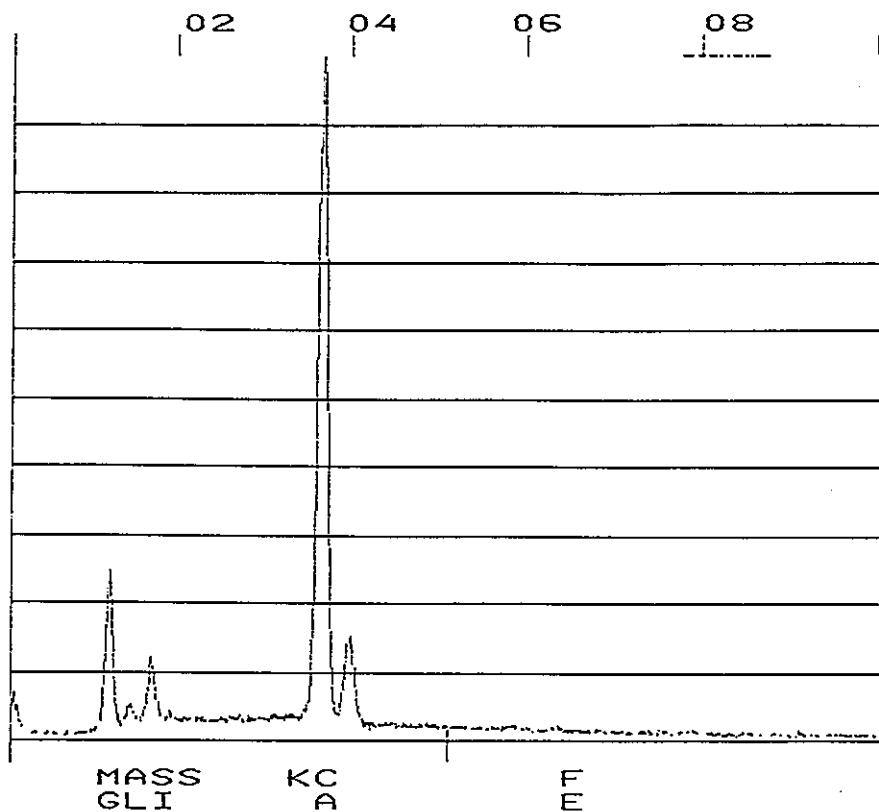


図-3 Sample No.1 の EDS グラフ(写真-9 黒丸内結晶)

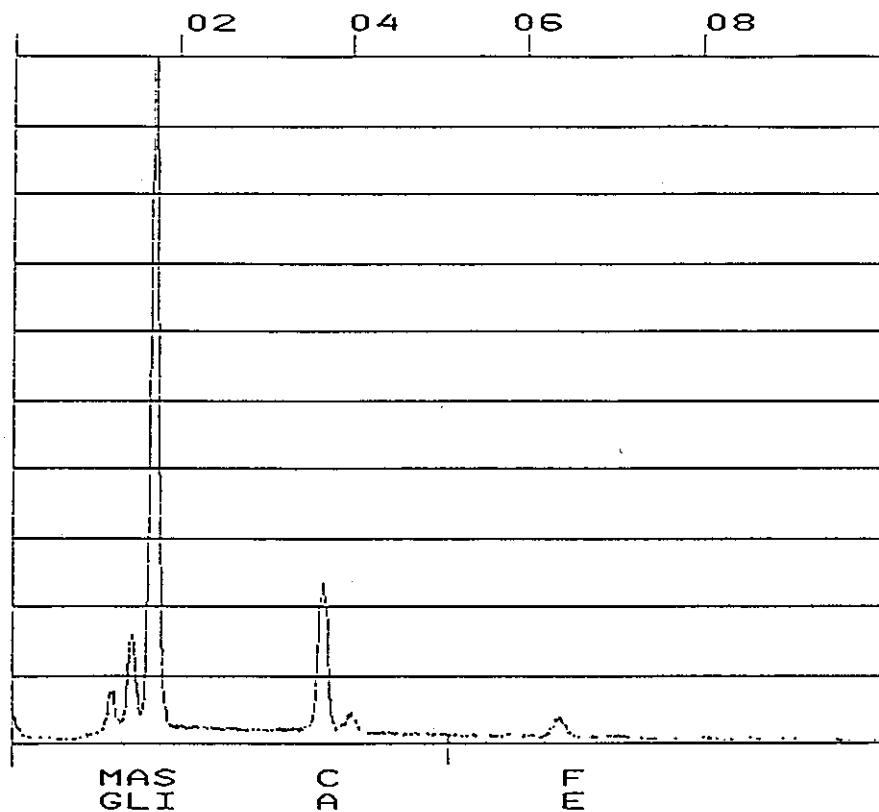


図-4 Sample No.2 の EDS グラフ(写真-10 黒丸A内結晶)

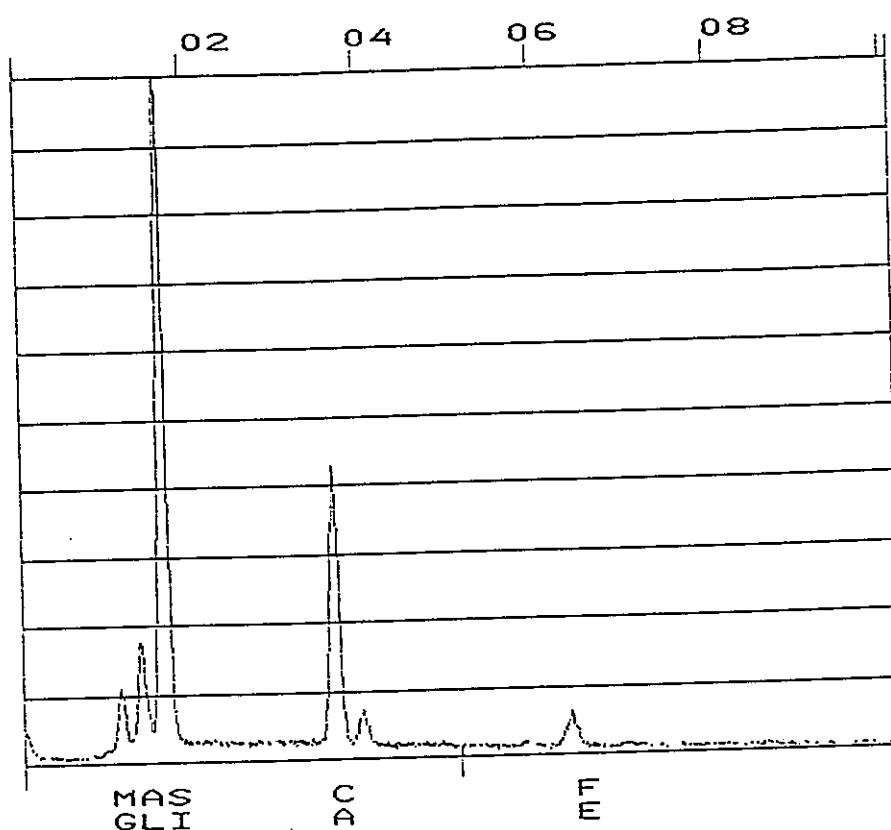


図-5 Sample No.2 の EDS グラフ(写真-10 黒丸B 内結晶)

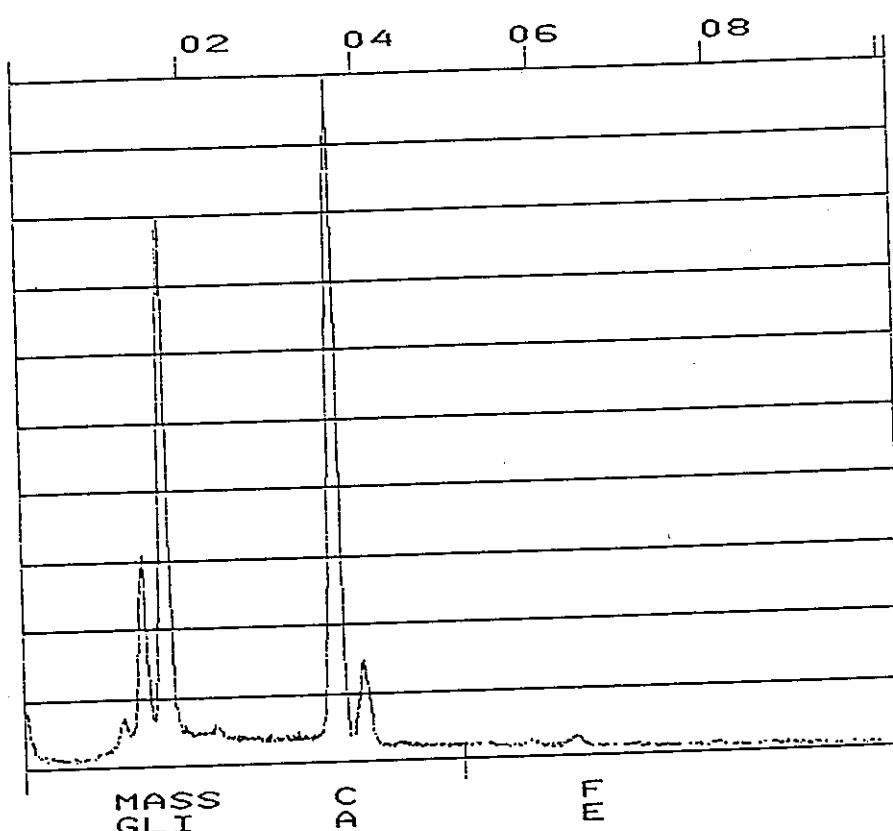


図-6 Sample No.2 の EDS グラフ(写真-11 黒丸内結晶)

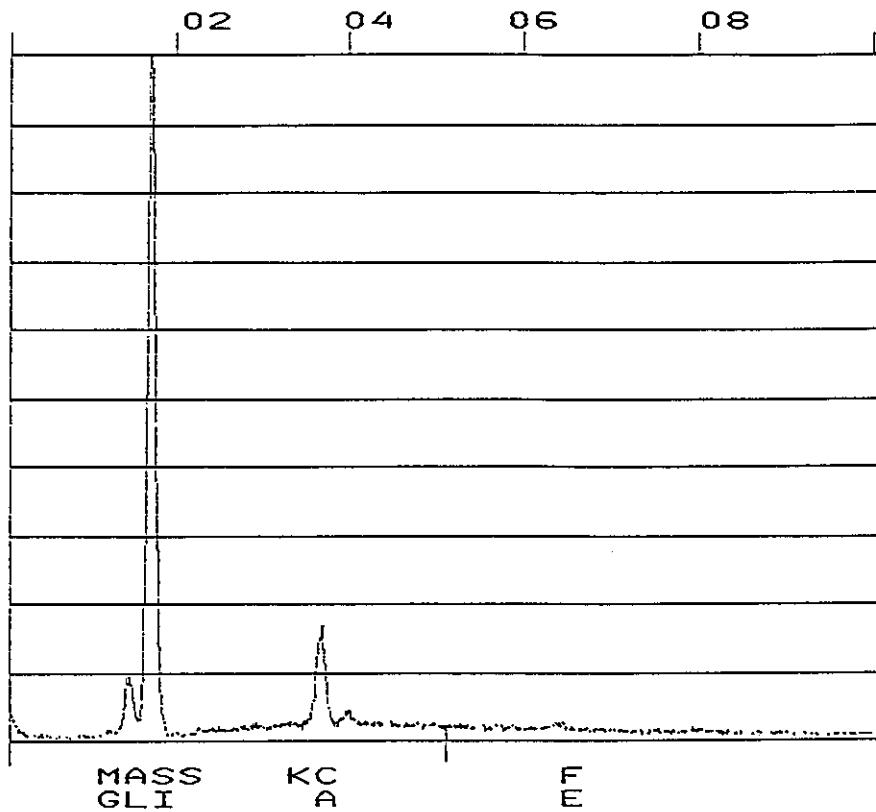


図-7 Sample No.3 の EDS グラフ(写真-12 黒丸A内結晶)

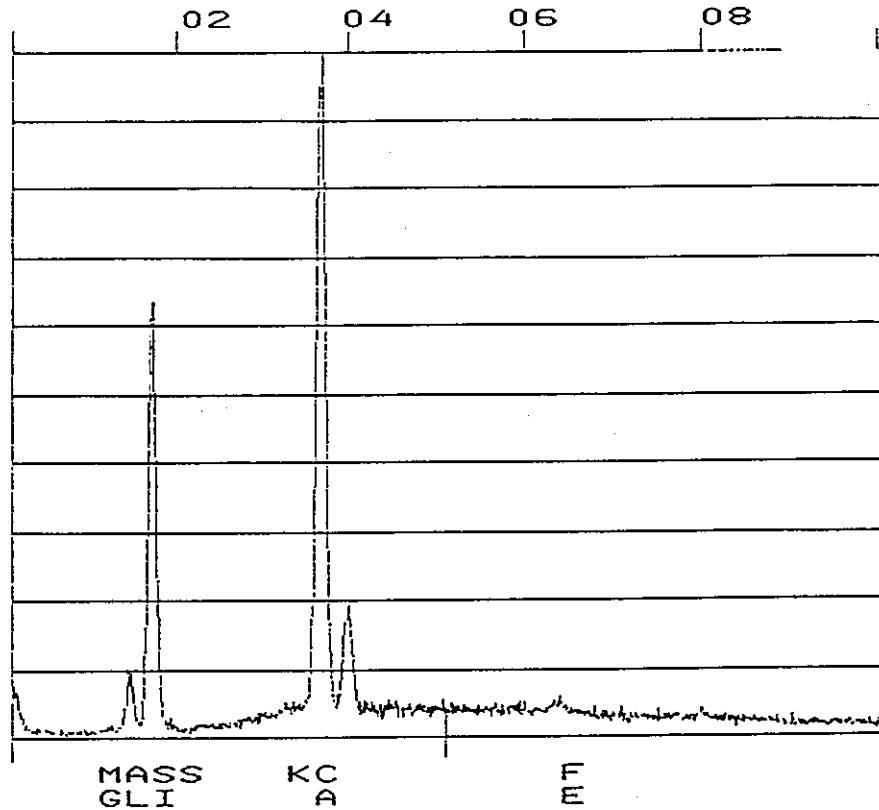


図-8 Sample No.3 の EDS グラフ(写真-12 黒丸B内結晶)

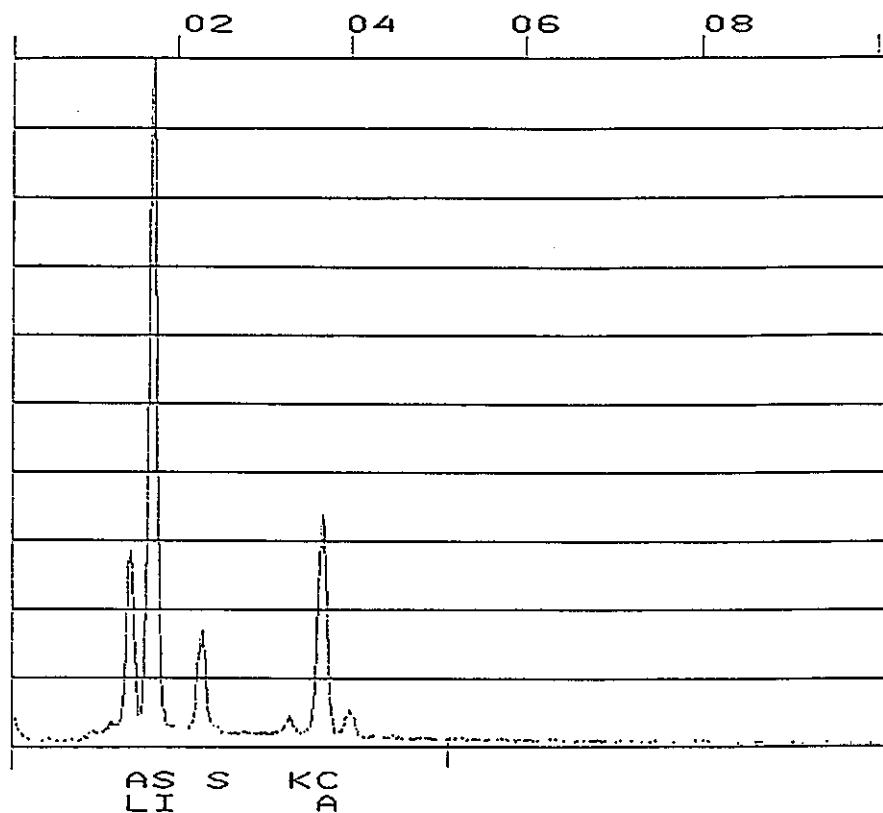


図-9 Sample No.4 の EDS グラフ(写真-13 黒丸A内結晶)

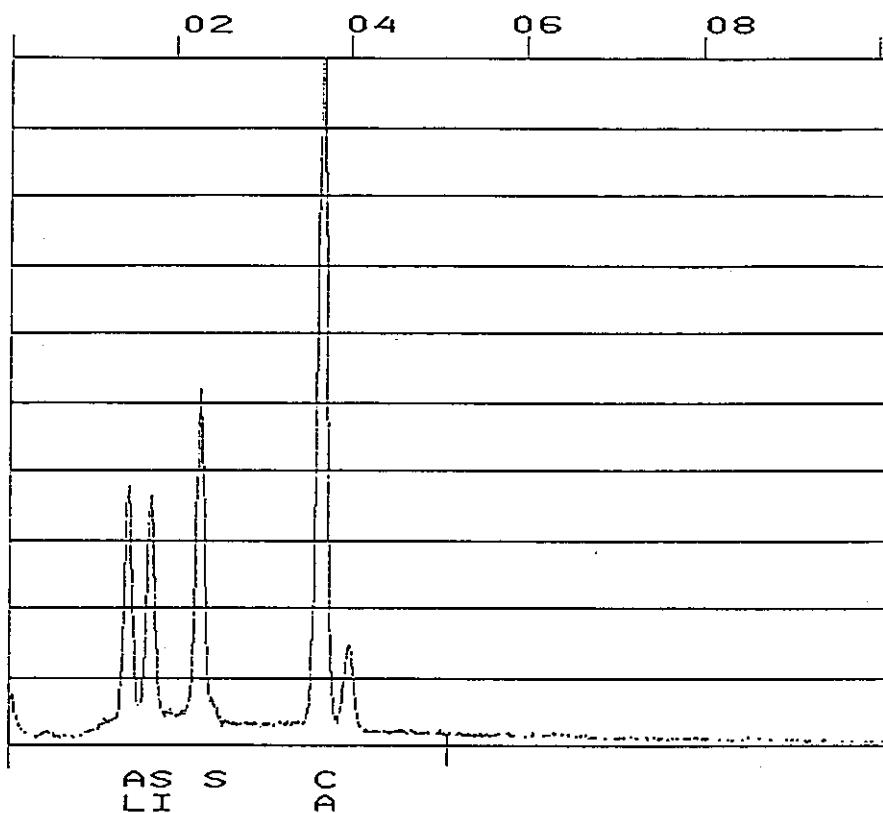


図-10 Sample No.4 の EDS グラフ(写真-13 黒丸B内結晶)

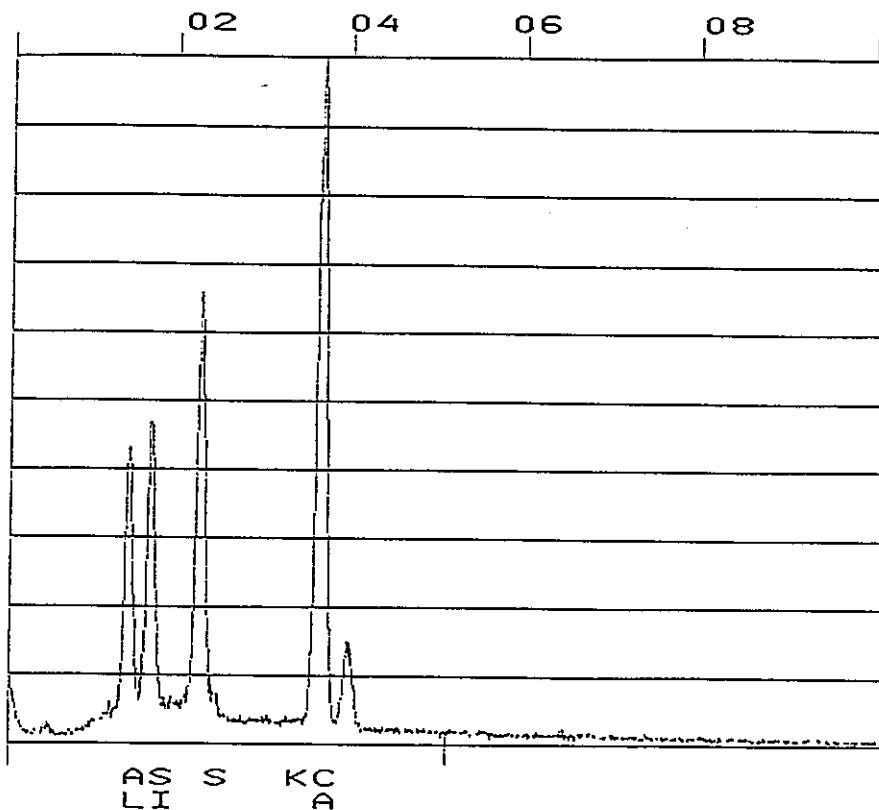


図-11 Sample No.4 の EDS グラフ(写真-14 黒丸内結晶)

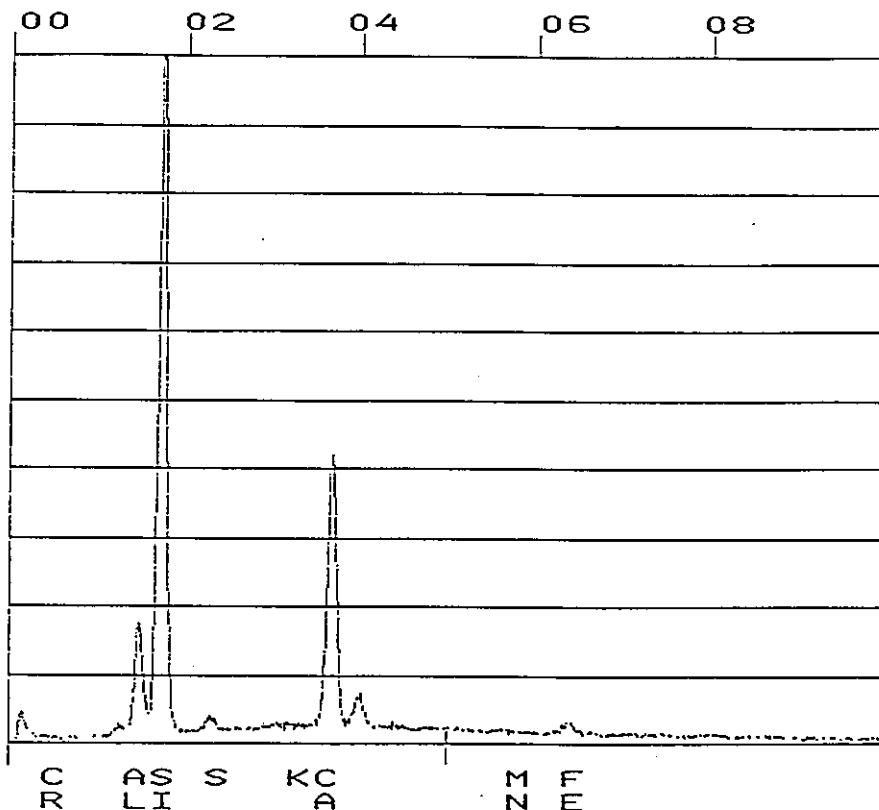


図-12 Sample No.5 の EDS グラフ(写真-15 黒丸内結晶)

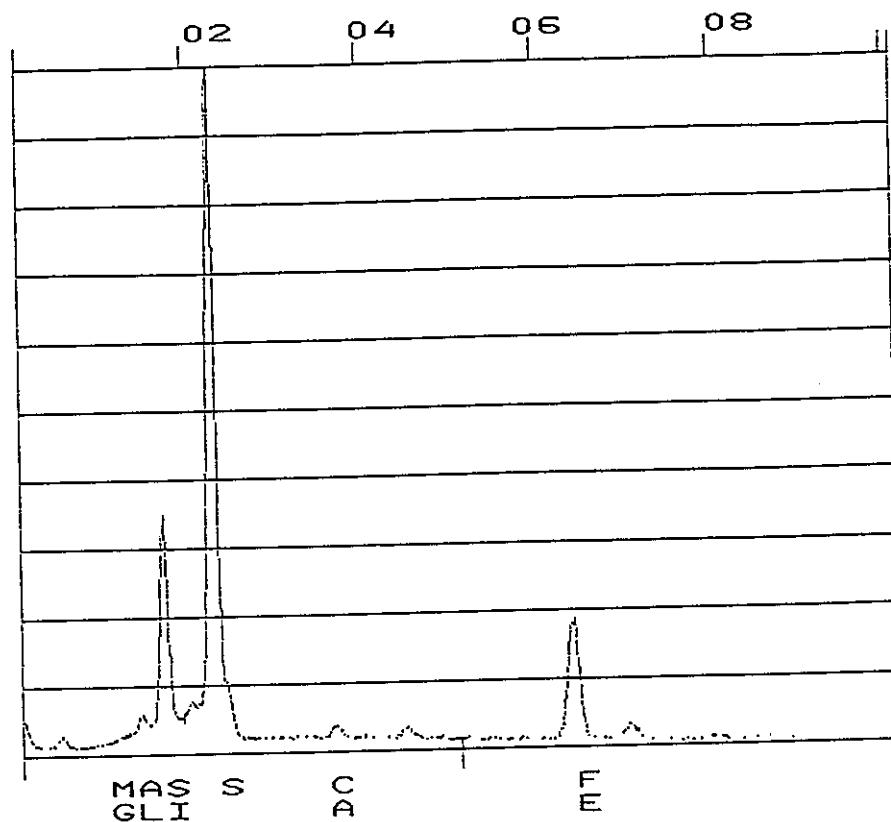


図-13 Sample No.5 の EDS グラフ(写真-16 黒丸内結晶)

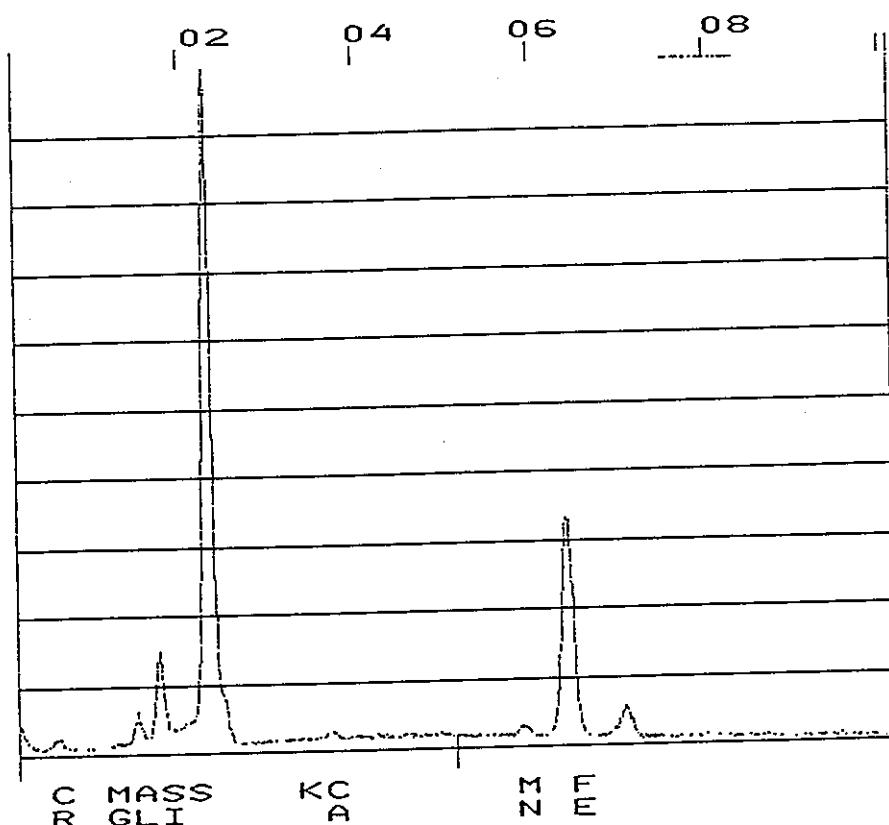
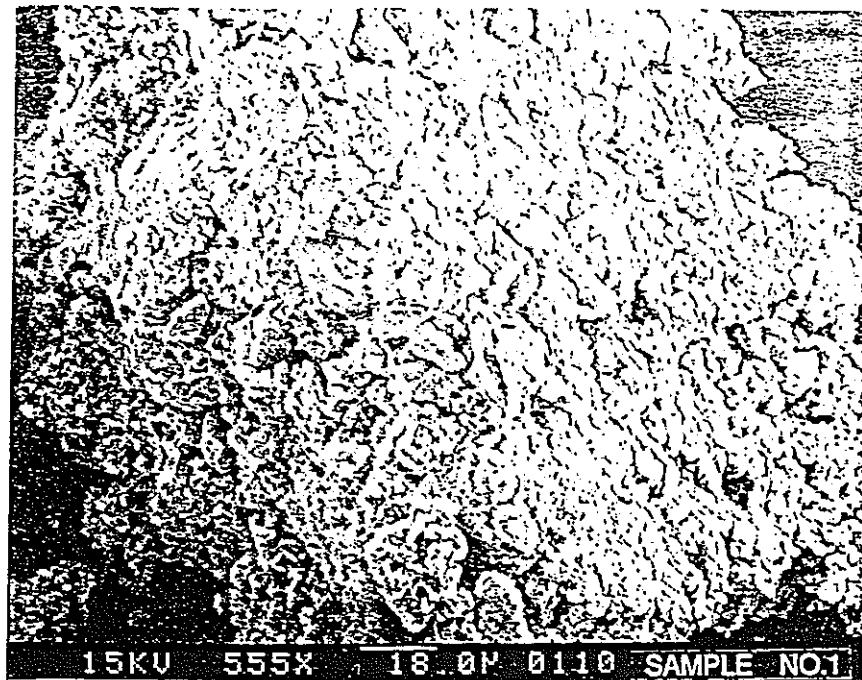
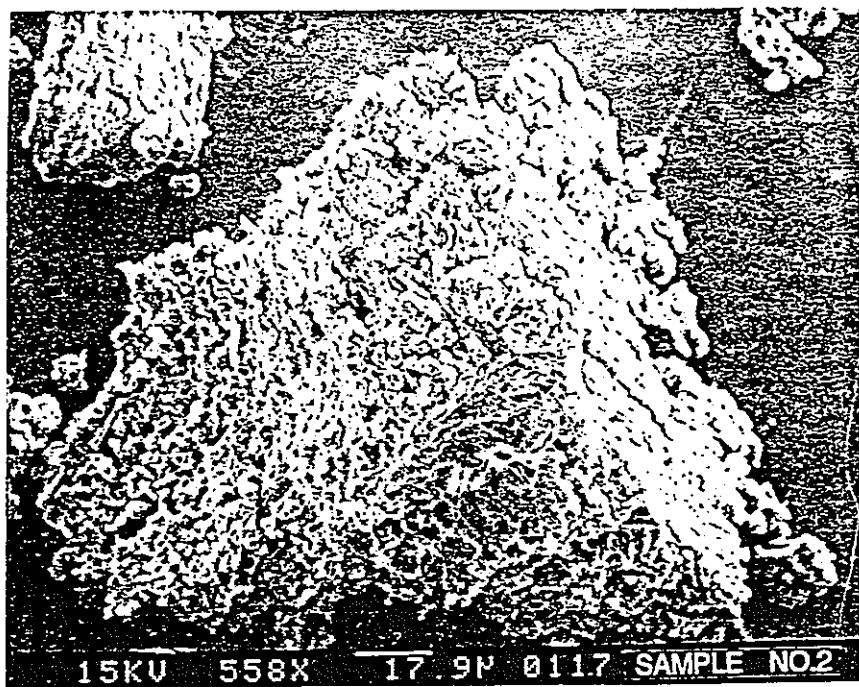


図-14 Sample No.7 の EDS グラフ(写真-17 黒丸内結晶)



15KV 555X 18.0μ 0110 SAMPLE NO.1

写真-1 低倍率での結晶形態(Sample No.1)



15KV 558X 17.9μ 0117 SAMPLE NO.2

写真-2 低倍率での結晶形態(Sample No.2)



写真-3 低倍率での結晶形態(Sample No.3)

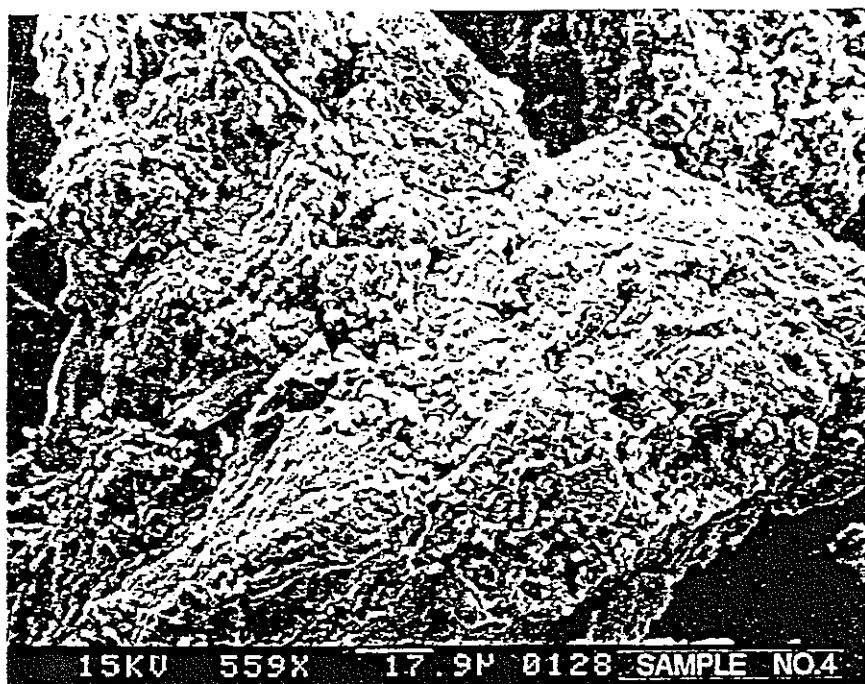


写真-4 低倍率での結晶形態(Sample No.4)

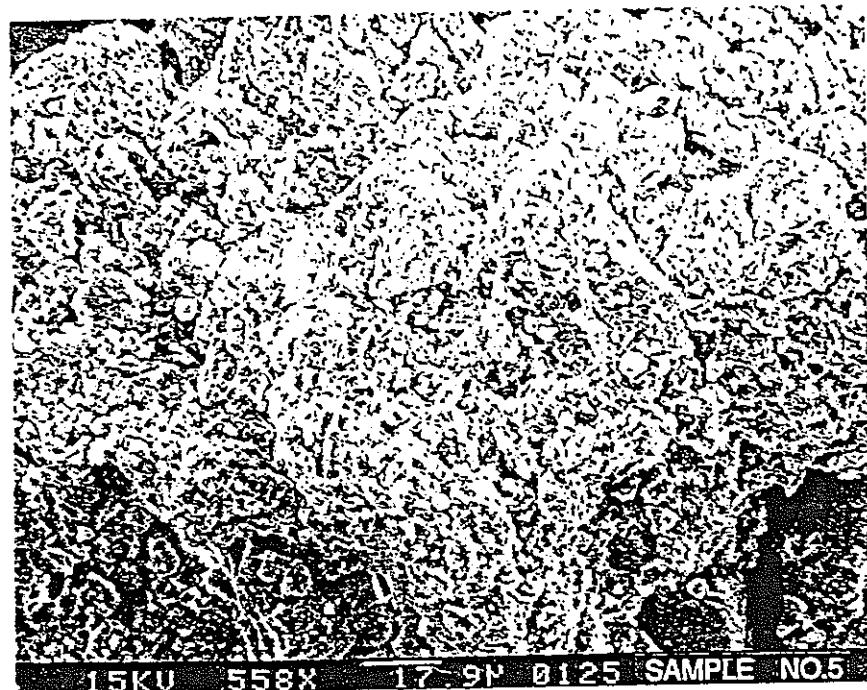


写真-5 低倍率での結晶形態(Sample No.5)

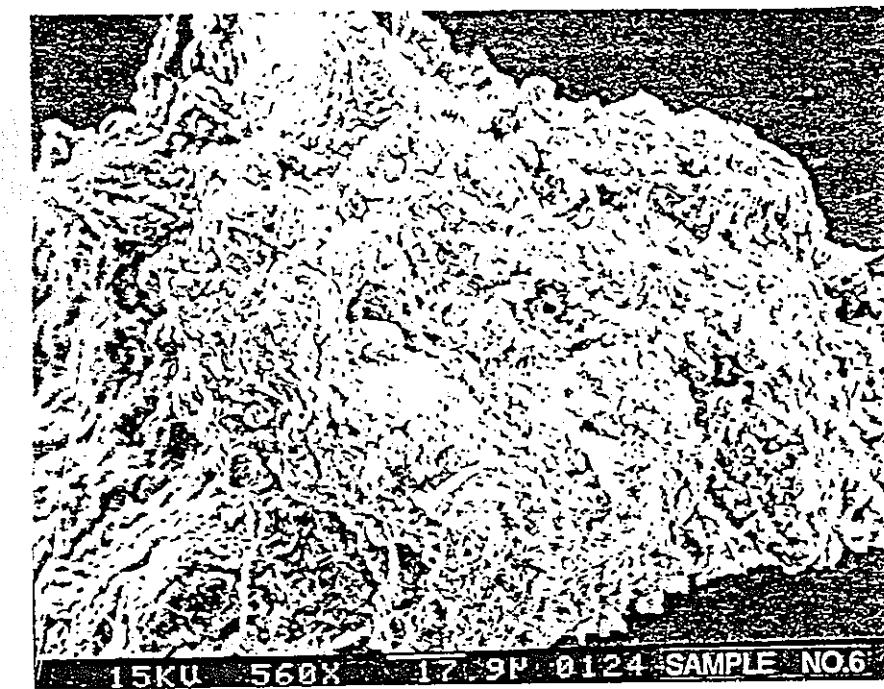


写真-6 低倍率での結晶形態(Sample No.6)

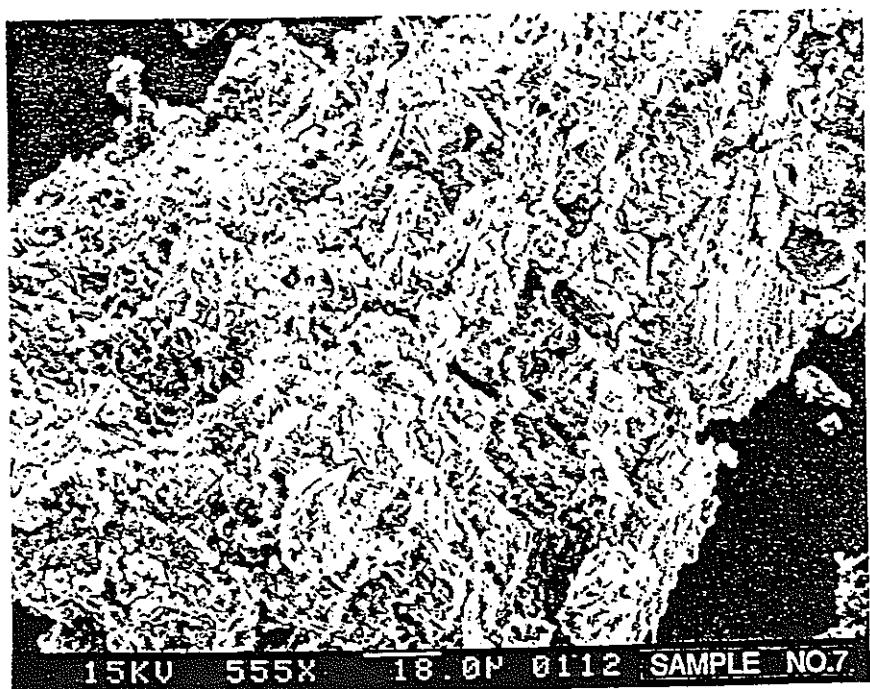


写真-7 低倍率での結晶形態(Sample No.7)

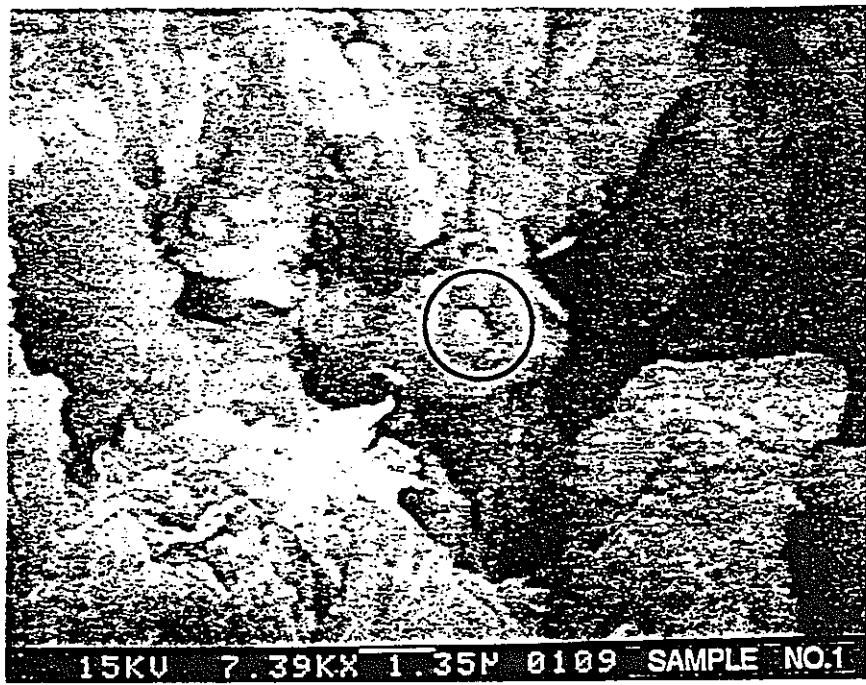


写真-8 カルシウム成分が多く含まれる結晶(Sample No.1)

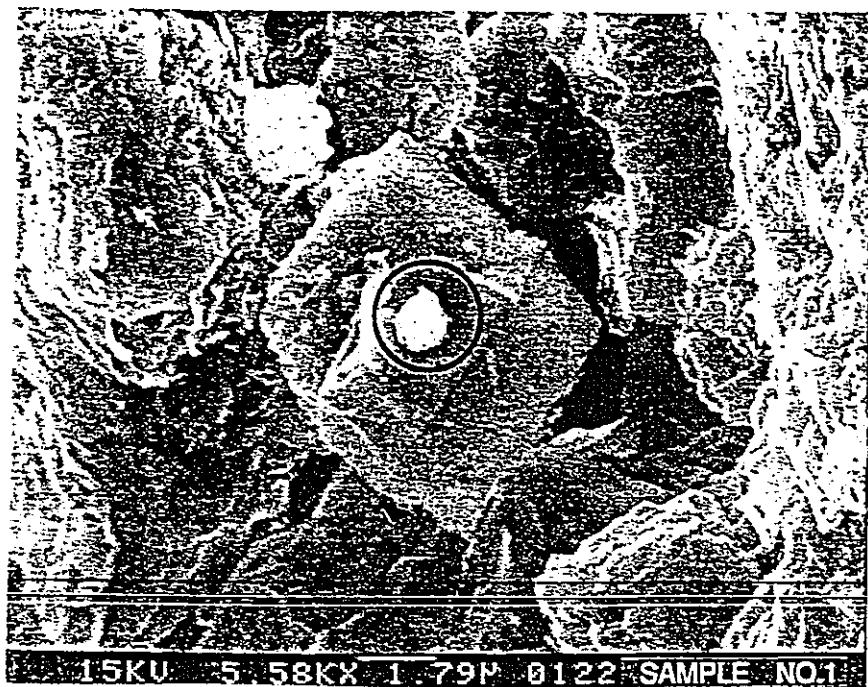


写真-9 カルシウムが主成分となるような結晶(Sample No.1)

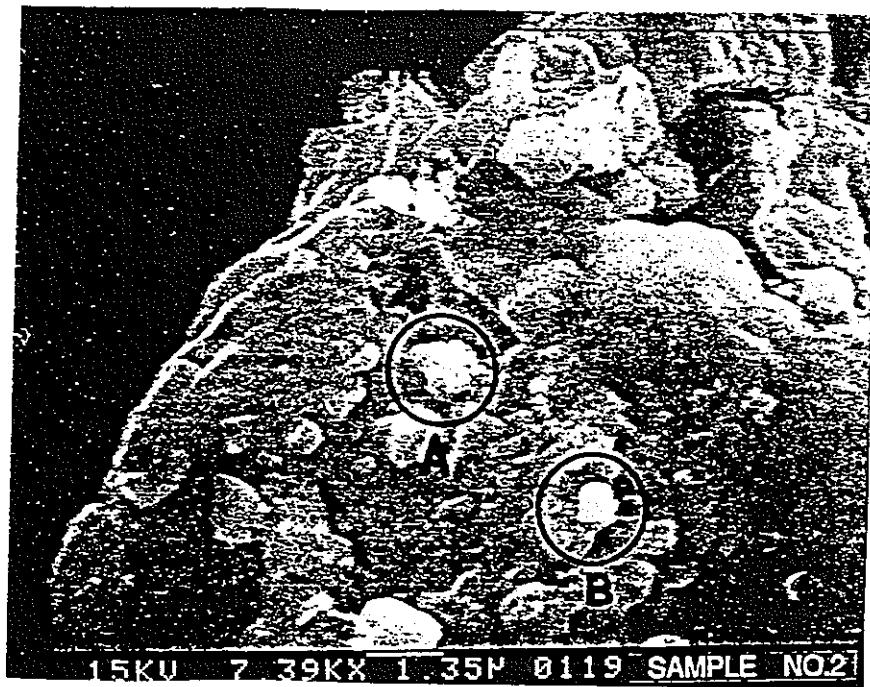


写真-10 カルシウム成分が多く含まれる結晶(Sample No.2)

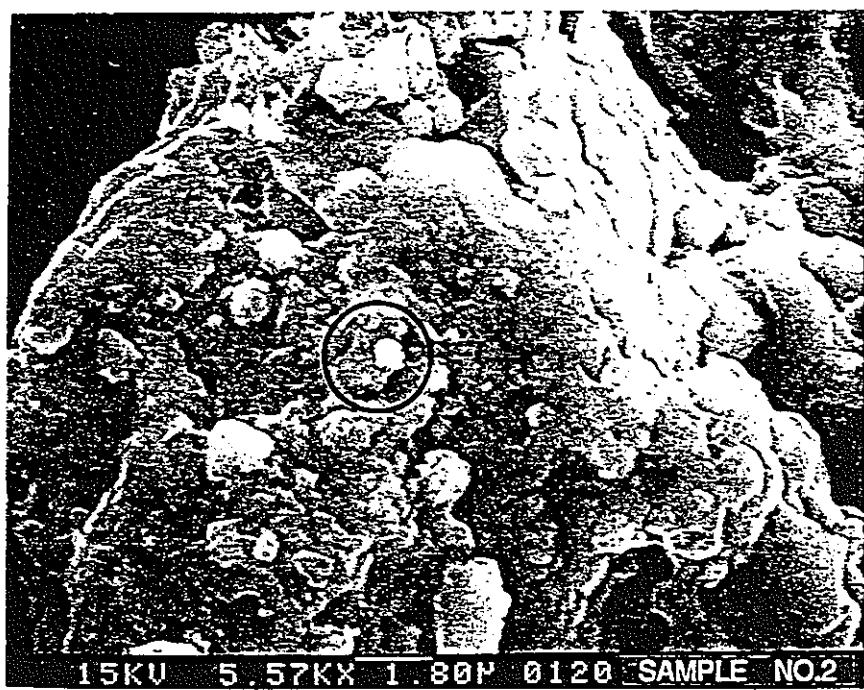


写真-11 カルシウムが主成分となるような結晶(Sample No.2)



写真-12 カルシウムが主成分となるような結晶(Sample No.3)

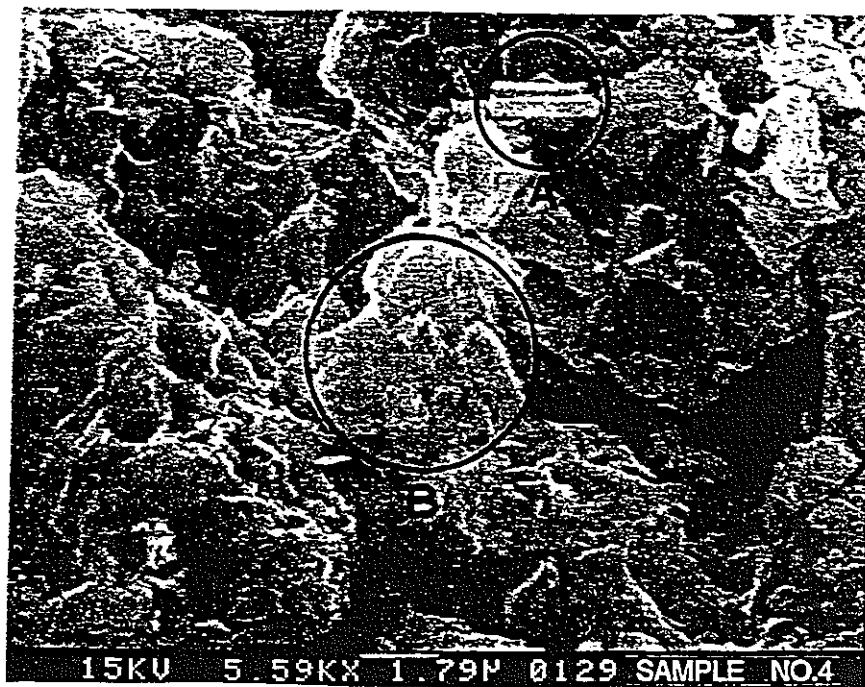


写真-13 カルシウム成分が多く含まれる結晶(Sample No.4)



写真-14 カルシウムが主成分となるような結晶(Sample No.4)

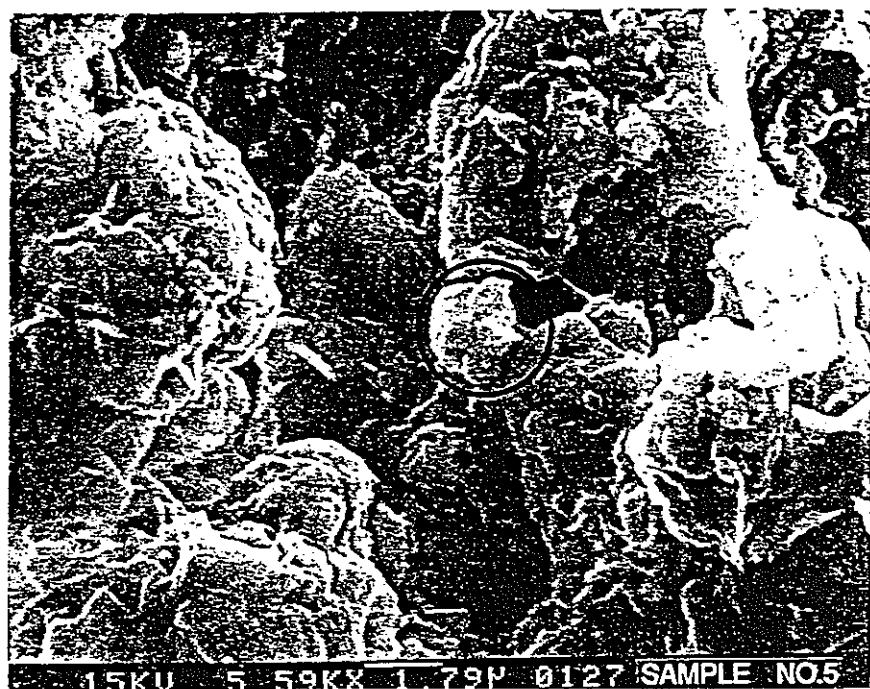


写真-15 カルシウム成分が多く含まれる結晶(Sample No.5)

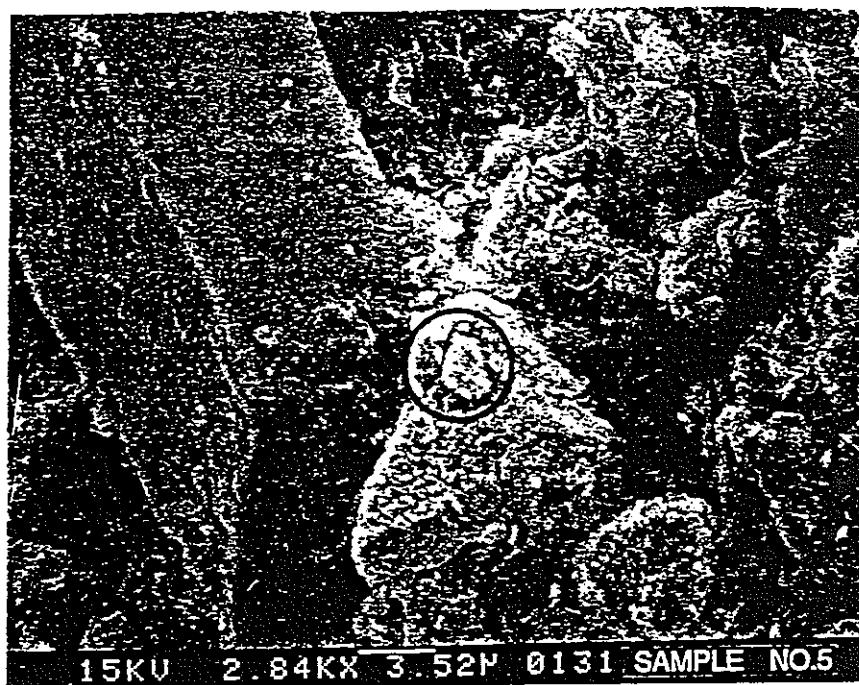


写真-16 硫黄分と鉄分からなるパイライトと思われる結晶(Sample No.5)

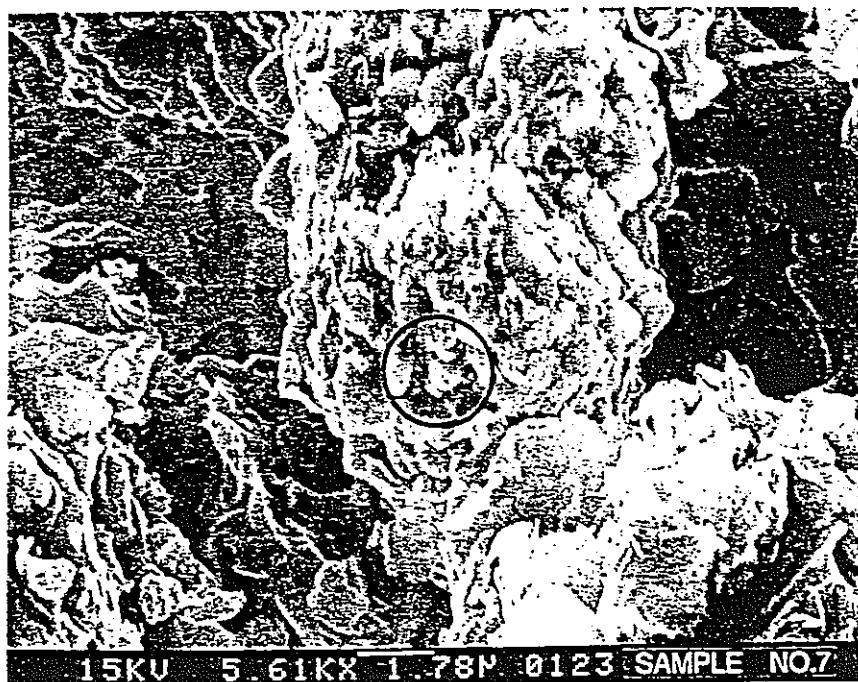


写真-17 硫黄分と鉄分からなるパイライトと思われる結晶(Sample No.6、7)

謝 辞

本研究の大部分のデータは動燃事業団の委託研究により鹿島建設株式会社技術研究所により取得されたものであり本研究に携わった方々に感謝の意を表します。また SEM 観察を実施するに当たっては、検査開発株式会社 市毛 悟氏に、英文のチェックに当たっては、処分解析システム室 Erik K Webb 氏に多大な御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木英明、柴田雅博、山形順二、広瀬郁郎、寺門一馬：緩衝材の特性試験（I），
PNC TN8410 92-057, (1992)
- 2) 藤田朝雄、五月女敦、原啓二：緩衝材の力学試験, PNC TN8410 92-170, (1992)
- 3) 並河努、菅野毅：緩衝材の圧密特性 PNC TN8410 97-051, (1997)
- 4) 松本一浩、菅野毅、藤田朝雄、鈴木英明：緩衝材の飽和透水特性,
PNC TN8410 97-*** (作成中), (1997)
- 5) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘：カルシウム型化及びカルシウム型ペントナイトの基本特性－膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数－ PNC TN8410 98-021, (1998)
- 6) 三原守弘、伊藤勝、加藤博康、上田真三：ナトリウム型ペントナイトのカルシウム型化に伴う形状因子の変化 - 圧縮ペントナイト中のトリチウムの実効拡散係数による比較 -(社)日本原子力学会「1995年秋の大会」, p642 (1995)
- 7) クニミネ工業株式会社資料 私信