JAEA-Technology 2009-065



ベントナイトの長期安定性の評価試験

ーセメント系材料と海水系地下水との反応により 形成されるアルカリ性間隙水の影響ー

Experimental Study on Long-term Stability of Bentonite -Influence of Hyperalkaline Pore Water Generated by the Chemical Reaction of Cementitious Material and Saline Groundwater-

> 市毛 悟 山口 耕平 小田 治恵 Satoru ICHIGE, Kohei YAMAGUCHI and Chie ODA

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

日本原子力研究開発機構

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

ベントナイトの長期安定性の評価試験

―セメント系材料と海水系地下水との反応により形成されるアルカリ性間隙水の影響―

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

市毛 悟*1,山口 耕平*1,小田 治恵

(2009年12月10日受理)

評価上重要な核種を多く含む TRU 廃棄物の地層処分では、ベントナイトを利用した緩衝材と多 量のセメント系材料からなる人工バリアシステムが検討されている。セメント系材料から浸出す る高アルカリ性の溶液の中では、ベントナイトの主成分鉱物であるモンモリロナイトは安定では なく、溶解してより安定な二次鉱物に再結晶すると考えられる。これまで我々は、わが国に広く 分布する降水起源の希薄な地下水を検討対象として、ベントナイトの変質挙動について、試験を 行ってきた。一方、わが国の沿岸地域などにおいては海水起源の高塩分濃度の地下水が存在する ことも知られている。鉱物の溶解速度は、温度、反応溶液のpH、化学親和度等の影響を受けるこ とが知られている。海水起源の地下水は溶質の元素濃度が高いため、モンモリロナイトの溶解速 度が、化学親和度等を介して影響を受け、降水起源の地下水中とは変質挙動が異なる可能性があ る。しかし、海水起源の地下水中を対象とするアルカリ性条件でのモンモリロナイトの変質挙動 については、十分に把握されているわけではない。

このため本報告書では、セメント系材料の影響を受けた海水系地下水中でのベントナイトの変 質挙動の把握を目的とし、海水系地下水がフレッシュなセメント系材料に流入して形成される間 隙水の模擬水溶液(模擬液)および海水の主成分である塩化ナトリウムと水酸化ナトリウムを脱 イオン水に溶解した溶液(単純化模擬液)の2種類の試験溶液と粉末ベントナイトを用いたバッ チ浸漬試験を行った。

その結果,単純化模擬液中ではアナルサイムの生成が,模擬液中ではアナルサイムとフィリップサイト-Kの生成が確認された。また,模擬液の場合には,液相分析の結果から,カルシウムのケイ酸塩やアルミノケイ酸塩の生成が示唆された。

今回の試験の結果は、高アルカリ性環境における緩衝材の変質挙動に関して、二次鉱物の化学 組成と当該二次鉱物が析出する溶液組成は対応するという小田ら(2005)の報告と整合的であった。 JAEA-Technology 2009-065

Experimental Study on Long-term Stability of Bentonite --Influence of Hyperalkaline Pore Water Generated by the Chemical Reaction of Cementitious Material and Saline Groundwater-

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 10, 2009)

The engineered barrier system (EBS) in the geological disposal of TRU waste is composed of bentonite and cementitious materials. The montmorillonite component of bentonite is, however, not chemically compatible with the high pH leachates derived from cementitious materials and may alter to a more stable secondary mineral assemblage. Previous research for TRU waste disposal has focused on the alteration behavior of bentonite in leachates from cementitious materials exposed to fresh groundwater. If the EBS is located in the coastal region, then the leachates will instead be derived from the interaction of cementitious materials and saline groundwater. This has important implications for the alteration of bentonite because the likely difference in the chemical composition of the leachate will influence the dissolution rate of montmorillonite and the composition of the secondary mineral assemblage. At present, these processes are not well understood. The focus of the present study was to examine the alteration of bentonite in high pH saline groundwaters. Two solutions were used in batch immersion experiments of bentonite. The first solution was prepared using a mixture of NaOH and NaCl (NN), and the second solution was prepared using synthetic Region 1 water (high K and Na content) and synthetic seawater (SR). Analysis showed that bentonite altered to analcime in the NN solution and to analcime and phillipsite-K in the SR solution. Moreover, the generation of calcium silicate hydrate and calcium aluminosilicate hydrate were extrapolated in the SR solution based on the concentrations of dissolved species.

These alteration products were in accord with Oda et al. (2005), who summarized the possible relationships between the secondary mineral assemblage of bentonite under high pH conditions and the influence of solution composition.

Keywords: Bentonite, Analcime, Phillipsite-K, Saline Groundwater, TRU Waste

℁1 Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	Ĺ
2. 試験方法	2
2.1目的	2
2.2 材料	2
2.3 方法	2
2.4条件	3
2.5分析項目および分析法	5
3. 試験結果	7
3.1 pH および液相の組成	7
3.2 固相の X 線回折分析 10)
3.3 固相の SEM 観察および EDS 測定結果13	3
4. 考察	3
5.おわりに)
謝辞)
参考文献)
付録-1 液相の成分分析結果	
付録-2 走査型電子顕微鏡観察およびエネルギー分散型特性 X 線分析結果 33	3
付録-3 X線回折分析結果	3
付録-4 示差熱分析結果	7
付録-5 MB 吸着量の測定結果/CEC 測定結果/LC 測定結果11	L
付録-6 浸漬試験のために調製した溶液の化学平衡計算112	7

JAEA-Technology 2009-065

Contents

1. Introduction 1
2. Experiment description 2
2.1 Purpose of the experiments 2
2.2 Materials used
2.3 Experimental methods 2
2.4 Experimental conditions 3
2.5 Analysis items and methods 5
3. Analysis results
3.1 pH and concentrations of dissolved components
3.2 X-ray diffraction
3.3 SEM; Scanning Electron Microscope photographs/EDS; Energy Dispersive x-ray
Spectroscopy
4. Consideration
5. Afterword 19
Acknowledgement
Reference
Appendix-1 Concentrations of dissolved components 21
Appendix-2 SEM; Scanning Electron Microscope photographs/EDS; Energy Dispersive x-ray
Spectroscopy analysis results
Appendix-3 X-ray diffraction patterns
Appendix-4 DTA; Differential thermal analysis results
Appendix-5 MB; methylene blue absorption/CEC;Cation Exchange Capacity/LC;Leaching cation
measurement results
Appendix-6 Geochemical equilibrium calculation of the solution prepared for immersion
experiment

図目次

図-1	試験操作フロー	4
ً⊠−2	液相の pH の経時変化	8
⊠-3	液相中のナトリウムイオン,カリウムイオンおよびケイ酸イオンの経時変化	9
図-4	X線回折チャート1	1
図-5	処理前後のX線回折チャート(単純化模擬液中,360日浸漬)1	2
図-6	処理前後のX線回折チャート(模擬液中, 360日浸漬)1	2
図-7	試験で使用したクニピア F®の二次電子像写真1	4
図-8	試験で使用したクニピア F®の EDS 測定チャート1	4
図-9	単純化模擬液中に 360 日浸漬した試料の二次電子像写真 1	4
図-10	模擬液中に 360 日浸漬した試料の二次電子像写真 1	5
図-11	単純化模擬液および模擬液中に 360 日浸漬した試料の EDS 測定チャート 1	5
図-12	単純化模擬液中に360日浸漬した試料の二次電子像写真(浸漬後の試料を水ひ処理した	
	試料)1	6
図-13	模擬液中に 360 日浸漬した試料の二次電子像写真(浸漬後の試料を水ひ処理した試料)	
		6
図-14	模擬液中に360日浸漬した試料で観察された棒状,角柱状結晶の二次電子像写真1	6
図-15	模擬液中に 360 日浸漬した試料で観察された棒状,角柱状結晶の EDS 測定チャート 1	7

表目次

表-1	試験条件	5
表−2	pH および液相組成の測定結果	7
表−3	X 線回折による固相分析のまとめ	13
表-4	EDS 測定による主要成分の簡易定量分析結果(1)	15
表-5	EDS 測定による主要成分の簡易定量分析結果(2)	17

This is a blank page.

1.はじめに

評価上重要な核種を多く含む TRU 廃棄物の地層処分では、ベントナイトを利用した緩衝材と多 量のセメント系材料からなる人工バリアシステムが検討されている。緩衝材には、低透水性、緩 衝材の構成鉱物への核種の収着、コロイドのろ過など放射性核種の移行を遅延する機能が期待さ れている。ベントナイトはモンモリロナイトを主成分とする粘土材料で、これらの機能は主成分 であるモンモリロナイトによりもたらされる。セメント系材料から浸出する高アルカリ性の溶液 の中では、モンモリロナイトは安定ではなく、溶解してアルカリ性環境で、より安定な二次鉱物 に変化すると考えられる[1]。

セメント系材料由来のアルカリ性条件において,モンモリロナイトが他の二次鉱物に変化する と,その結果として緩衝材に期待されている核種移行を遅延する機能に影響を与える可能性があ る。このため,アルカリ性条件でのモンモリロナイトの化学的変遷挙動を把握し,人工バリアシ ステムの核種移行解析における条件設定に反映させることが重要である。

これまで我々は、わが国に広く分布する降水起源の希薄な地下水を検討対象として、ベントナ イトの変質挙動について、試験を行ってきた。試験では、降水系地下水がフレッシュなセメント 系材料に流入して形成される高アルカリ性の間隙水を、イオン交換水に水酸化カルシウムおよび 水酸化ナトリウムを添加することにより、pH、カルシウムイオン濃度およびナトリウムイオン濃 度の条件で模擬し、その溶液とベントナイトとを接触させることにより変質試験を実施した[2]。 その結果、モンモリロナイトの一部がアナルサイム等に変質することが示された。一方、わが国 の沿岸地域などにおいては海水起源の高塩分濃度の地下水が存在することも知られている[3]。鉱 物の溶解速度は、温度、反応溶液のpH、化学親和度等の影響を受けることが知られている(例え ば、[4])。海水起源の地下水は溶質の元素濃度が高いため、モンモリロナイトの溶解速度が、化 学親和度等を介して影響を受け、降水起源の地下水中とは変質挙動が異なる可能性がある。しか し、海水起源の地下水中を対象とするアルカリ性条件でのモンモリロナイトの変質挙動について は、十分に把握されているわけではない。

このため、セメント系材料の影響を受けた海水系地下水中でのベントナイトの変質挙動の把握 を目的とし、海水系地下水がフレッシュなセメント系材料に流入して形成される間隙水の模擬水 溶液(模擬液)および水酸化ナトリウムと海水の主成分である塩化ナトリウムをイオン交換水に 添加し調製した溶液(単純化模擬液)の2種類の試験溶液と粉末ベントナイトを用いたバッチ浸 漬試験を行った。本書は、その内容について示すものである。

2. 試験方法

2.1目的

セメント系材料の影響を受けた海水系地下水中でのベントナイトの変質挙動の把握を目的とす る。

2.2 材料

試験に用いた試験材料は以下の通りである。

(1) 試薬類

①塩化ナトリウム:関東化学(株)製,試薬特級

②水酸化ナトリウム:関東化学(株)製,試薬特級

③水酸化カリウム:関東化学(株)製,試薬特級

④水酸化カルシウム:関東化学(株)製,試薬特級

⑤人工海水:八洲薬品(株)製,アクアマリン®(液相調整済み品)

⑥メタノール:関東化学(株)製,試薬特級(固相洗浄用)

⑦塩酸:関東化学(株)製,試薬特級

(2)ベントナイト

クニミネ工業株式会社製,クニピアF®(モンモリロナイト95wt%以上)

2.3 方法

試験操作のフロー図を図-1に示す。

(1) 試料の作製

106 ℃で 24 時間乾燥したクニピア F®10 g と 2.4(1) で調製した試験溶液 0.2 dm³をアルゴンガ ス雰囲気下で容器に入れ、ベントナイトが液相中に均一に分散するまで手で振とうした。

(2)浸漬方法

浸漬期間中は温度 70 ℃に設定した恒温槽内に保管した。浸漬期間中は 1 回/週の頻度で, 試験容器を恒温槽中から取り出し, ベントナイトが液相中に均一に分散するまで手で振とうした。 加温処理を開始後, 所定の期間経過後に試料を取り出した。

(3) 固液分離

所定の期間浸漬した試料は、アルゴンガス雰囲気下で遠心管に全量移し、10、000回転/分(rpm) で 30 分間,遠心分離を実施した。分離した液相は、0.2 µmのメンブランフィルタでろ過し、(9) の液相分析に供した。分離した固相は、1 週間真空乾燥後、ハンマーで粗砕し、その後更に 3 日 間真空乾燥を行った。真空乾燥後の固相は、100 メッシュのふるいを試料の全量が通過するまで メノウ乳鉢で粉砕した。

(4)固相洗浄

(3)で粉砕した固相試料全量を遠心管に移し、メタノールを 0.5 dm³加え、手による振とうと超

音波洗浄器を用いた分散操作を行い,固相がメタノールに分散していることを目視で確認した後に 30 分間静置した。その後,10,000 rpm で 30 分間の遠心分離を実施し,分離後の上澄みを廃棄 した。この操作を各試料について 3 回ずつ行った。

(5) 試料の分割

洗浄後の固相試料を3分割し、そのうち2つにそれぞれ(6)希塩酸処理または(7)水ひ処理を実施して分析に供した。残りの1つは未処理のまま分析に供した。

(6)希塩酸処理

ビーカに希塩酸(1 mol/dm³) 0.2 dm³と固相 200mg を加え,スターラで 10 分間攪拌した。その 後,10,000 rpm で 30 分間の遠心分離を実施し,分離後の上澄みを廃棄し,沈殿物を回収した。

(7)水ひ処理

遠沈管に蒸留水 0.05 dm³と固相 500mg を加え,目視で固相と懸濁液が分離するまで静置した。 その後,デカンテーションにより上澄みを廃棄し,沈殿物を回収した。水ひ処理は目視で懸濁液 が透明になるまで繰り返した。

(8)固相分析

2.5分析項目および分析法に従い分析を実施した。

2.4条件

試験条件を以下に示す。また表-1に試験条件をまとめた。

(1)試験溶液

海水の主要成分である塩化ナトリウムの影響と塩化ナトリウム以外の成分の影響とを把握する ために,試験溶液には以下の2種類の試験溶液を用いた。

①セメント海水系地下水単純化模擬液(以下、単純化模擬液とする。)

水酸化ナトリウムを 0.3 mol/dm³,塩化ナトリウムを 0.6 mol/dm³となるようにイオン交換水 に溶解させて試験に用いた。

②セメント海水系地下水模擬液(以下,模擬液とする。)

アクアマリン®に水酸化ナトリウムおよび水酸化カリウムをモル比で3:7となるよう添加した。添加量は、水酸化ナトリウムと水酸化カリウムを合計したモル濃度が0.35 mol/dm³となるように調製した。その後、液相1 dm³当りに水酸化カルシウム 10 g を添加し、手で振とうして 攪拌した。約1時間清置後、0.2 μm メンブランフィルタでろ過した溶液を模擬液とした。

(2)温度

浸漬中は70℃に設定した恒温槽内で一定温度とした。



図-1 試験操作フロー

(3)液固比

試験溶液 0.2 dm³にクニピア F®10 g を添加した。したがって液固比は 50 g/dm³となる。

(4) 浸漬期間

30日,90日,140日,250日および360日とした。

(5)雰囲気

試料の調整は、アルゴン雰囲気下で実施し、浸漬および分析操作は大気下で実施した。

項目	条件									
試験溶液	セメント海水系地下水単純化模擬水									
	水酸化ナトリウム:0.3 mol/dm³, 塩化ナトリウム:0.6 mol/dm³									
	②セメント海水系地下水模擬液									
	人工海水に試薬を添加し,水酸化ナトリウム:0.105 mol/dm³, 水酸化									
	カリウム:0.245 mol/dm ³ , 水酸化カルシウム:飽和濃度とした。									
温度	70 °C									
液固比	$10 \text{ g/}0.2 \text{ dm}^3$									
浸漬期間	30日, 90日, 140日, 250日および 360日									
攪拌方法	1回/週で,手で振とうして攪拌									
雰囲気	試料の調整:アルゴン雰囲気下,浸漬および分析操作:大気下									
繰り返し数	2									

表-1 試験条件

2.5 分析項目および分析法

(1)pH 測定

pHの測定は,pHメータ(堀場社製,D-53)を用いて,ガラス電極法により測定した。pHメー タの校正には,pH9標準液(ホウ酸ナトリウム溶液)(堀場社製)と飽和水酸化カルシウム水溶液 を用いた。飽和水酸化カルシウム水溶液は,実験室温度の変化に伴う溶解度の変化に対応できる よう試薬量を溶解度より過剰に添加し,沈殿している状態のものを校正液とした。また,飽和水 酸化カルシウム水溶液は,水酸化カルシウム粉末を添加後,1日以上静置して使用した。

(2)液相の成分分析

液相組成については、ナトリウムイオン、カルシウムイオン、カリウムイオン、ケイ酸イオン、 アルミニウムイオン、マグネシウムイオン、硫酸イオン、ホウ酸イオンおよびストロンチウムイ オンの濃度は、ICP 発光分光分析装置(Varian 社製、VISTA-AX)の分析結果に基づき決定した。 フッ化物イオン、臭化物イオン、塩化物イオンはイオンクロマトグラフ(東亜電波、ICA-5000) により測定した。また、無機炭素は全有機体炭素(TOC)計(島津製作所、TOC-5000)により測定 した。 (3) 走査型電子顕微鏡観察およびエネルギー分散型特性 X 線分析

本測定には、走査型電子顕微鏡(日立製作所製,S-4100)を使用した。試料調整は、固相をイ オン交換水に超音波洗浄器を用いて分散させ、この懸濁液をカーボンテープ上に滴下し、乾燥さ せた。この試料に白金-パラジウム蒸着を行い観察・分析に供した。試料の広域の二次電子像観察 を倍率1,500倍で行い、特徴的な部分については倍率6,000倍で実施した。EDS測定では、アウ トプットデータとして得られる元素含有率から主成分8元素(カルシウム、ケイ素、アルミニウ ム、マグネシウム、鉄、ナトリウム、カリウムおよび硫黄)を指定し、測定試料がこの8元素の みで構成されていると仮定して簡易定量分析を実施した。しかし、鉄は検出されなかったため、 残りの7元素について、酸化物(酸化カルシウム、二酸化ケイ素、酸化アルミニウム、酸化マグ ネシウム、酸化ナトリウム、酸化カリウムおよび三酸化硫黄)換算で100wt%になるように、酸 化物換算組成を計算した。なおEDS測定による簡易定量分析は、各試料の主要な部位(モンモリ ロナイトのシートが折重なる平坦な部位)と主要な部位とは形状の異なる鉱物について実施した。

(4)X線回折分析

本測定には、X 線回折分析装置(理学電機社製, RINT2500)を使用した。測定は,粉末状試料 に対して実施した。測定後,得られたピークチャートより結晶性の鉱物を同定した。この結果よ り,初期試料の含有している鉱物の浸漬後の有無と新たな生成鉱物の有無を評価した。測定条件 は以下の通りである。

発散スリット:1°(20) 散乱スリット:1°(20) 受光スリット:0.15 mm ターゲット:Cu 電圧,電流:50 kV,250 mA 走査範囲:5~60°(20) 走査速度:5°(20)/min

(5)示差熱分析

本測定には、示差熱分析装置(理学電機社製,TG8101D)を使用した。測定は、窒素ガス雰囲気 中で室温から1,000 ℃まで、10 ℃/分の昇温速度で実施した。

(6)メチレンブルー(MB)吸着量/陽イオン交換容量(CEC)/浸出陽イオン(LC)の測定

MB 吸着量の測定は、日本ベントナイト工業会標準試験法[5]に従い実施した。CEC の測定は、日本ベントナイト工業会標準試験法[6]に従い実施した。LC は、CEC 測定の際に浸出操作に用いた酢酸アンモニウム溶液に浸出した成分を測定し、決定した。

3. 試験結果

本試験で実施した液相の組成分析,SEM 観察/EDS 測定,X線回折分析,示差熱分析およびMB 吸着量/CEC 測定/LC 測定の全データは付録-1~付録-5 に添付する。

3.1 pH および液相の組成

液相の組成分析を実施した 13 元素のうち,モンモリロナイトの主な層間陽イオン種に対応する ナトリウム,カルシウム,カリウムおよびマグネシウムの4元素およびモンモリロナイトの骨格 の構成元素であるアルミニウム,ケイ素およびマグネシウムの3元素について,pHの測定結果と 併せて表-2に示す。なお,マグネシウムは層間,骨格いずれにも含まれるため,6元素について 表示することとなる。また,pHの経時変化を図-2に,ナトリウムイオン,カリウムイオンおよび ケイ酸イオンの経時変化を図-3に示す。

液	浸漬期間	N	TT			液相組成	$(mo1/dm^3)$		-
相	(日)	INO.	рн	Na	Ca	К	Mg	A1	Si
	初期浸漬	预液	13.26	8.4×10 ⁻¹	MQL	1.3 \times 10 ⁻³	MQL	MQL	MQL
	20	1	13.16	8.5×10 ⁻¹	MQL	8.1×10 ⁻⁴	MQL	MQL	2.9×10 ⁻²
	30	2	13.16	8.6×10 ⁻¹	MQL	6. 3×10^{-4}	MQL	MQL	3. 0×10^{-2}
нч	00	1	13.13	8.7×10 ⁻¹	MQL	2.9×10 ⁻³	MQL	MQL	3. 4×10^{-2}
単純	90	2	13.14	8.6 $\times 10^{-1}$	MQL	8.5×10 ⁻⁴	MQL	MQL	3. 5×10^{-2}
化模	140	1	13.13	8.5×10 ⁻¹	MQL	5. 4×10^{-4}	MQL	MQL	3.5 \times 10 ⁻²
擬海	140	2	13.12	8.6×10 ⁻¹	MQL	7.7 $\times 10^{-4}$	MQL	MQL	3.5 \times 10 ⁻²
112	250	1	13.12	8.8×10 ⁻¹	MQL	1.8×10 ⁻³	MQL	MQL	3.8 $\times 10^{-2}$
		2	13.12	8.7×10 ⁻¹	MQL	9.6×10 ⁻⁴	MQL	MQL	3. 7×10^{-2}
	360	1	13.11	8.8×10 ⁻¹	MQL	MQL	MQL	MQL	3.5 \times 10 ⁻²
		2	13.11	8.9×10 ⁻¹	MQL	7.7 $\times 10^{-4}$	MQL	MQL	3. 6×10^{-2}
	初期浸漬	液	13.15	6. 3×10^{-1}	3. 7×10^{-3}	1.9×10^{-1}	MQL	MQL	MQL
	20	1	12.98	6.8×10 ⁻¹	MQL	1. 6×10^{-1}	MQL	MQL	2.4×10 ⁻²
		2	12.98	6.8 $\times 10^{-1}$	MQL	1.6×10^{-1}	MQL	MQL	2.4×10 ⁻²
	00	1	12.94	6.8×10 ⁻¹	MQL	1.7 $\times 10^{-1}$	MQL	MQL	2.9×10 ⁻²
榵	90	2	12.94	6.7 $\times 10^{-1}$	MQL	1.7×10^{-1}	MQL	MQL	2.9×10 ⁻²
擬	140	1	12.92	6.8×10 ⁻¹	MQL	1.7 $\times 10^{-1}$	MQL	MQL	3. 0×10^{-2}
攸	140	2	12.92	6.9 × 10 ⁻¹	MQL	1.7×10^{-1}	MQL	MQL	3. 0×10^{-2}
	950	1	12.90	6.9 × 10 ⁻¹	MQL	1.7 $\times 10^{-1}$	MQL	MQL	3. 2×10^{-2}
	250	2	12.90	6.8×10 ⁻¹	MQL	1.7×10^{-1}	MQL	MQL	3. 2×10^{-2}
	200	1	12.93	7.0×10 ⁻¹	MQL	1.7×10 ⁻¹	MQL	MQL	3. 3×10^{-2}
	360	2	12.90	6.9×10 ⁻¹	MQL	1.7×10^{-1}	MQL	MQL	3. 3×10^{-2}

表-2 pH および液相組成の測定結果

MQL:定量下限値(Na=8.7×10⁻⁴ mol/dm³, Ca=5.0×10⁻⁴ mol/dm³, K=5.1×10⁻⁴ mol/dm³, Mg=8.2 ×10⁻⁴ mol/dm³, A1=7.4×10⁻⁴ mol/dm³, Si=7.1×10⁻⁴ mol/dm³) 以下 単純化模擬液および模擬液の初期の pH は, それぞれ 13.26 および 13.15 であったが, その後 90 日までに, それぞれ 13.16, 12.98 まで低下した。その後, 浸漬期間の経過と共にゆるやかに 低下し, 360 日後には, それぞれ 13.11, 12.92 となった。



液相の組成では、単純化模擬液の主要元素は、試験溶液として添加したナトリウムおよび塩素 であった。単純化模擬液では、添加した元素以外にカリウムが検出された。カリウムは、関東化 学(株)の水酸化ナトリウムおよび塩化ナトリウムの製品規格書に記載されている不純物のひと つであり、試薬を高濃度で添加したため、不純物が検出された可能性がある。ただし、試薬の不 純物としてのカリウム含有量から算定された濃度より、一桁程度高い濃度で検出されており、そ の理由は、現時点では不明である。模擬液の初期液相の主要元素はナトリウム、塩素、カリウム、 硫黄であった。試験溶液として添加した人工海水中に含まれるマグネシウムおよびカルシウムは、 検出されなかった。地球化学計算コード PHREEQC と熱力学データベース JNC TDB. TRU を用いて解 析したところ (付録-6 参照)、計算上でも、マグネシウムはアルカリ性の液相中で水酸化マグネ シウムとして沈殿し、定量下限値以下となり、人工海水中のカルシウムは、その約 1/4 が液相中 に残留し、1/2 が水酸化物カルシウムとして、1/4 が炭酸カルシウムとして沈殿すると評価された。 液相中のカルシウムを添加したが、むしろ水酸化カルシウムは沈殿する方向であるため、こ の操作は、結果としてあまり意味がないことを示唆している。



図-3 液相中のナトリウムイオン、カリウムイオンおよびケイ酸イオンの経時変化

単純化模擬液および模擬液のナトリウムイオン濃度は、初期には 8.4×10⁻¹ mol/dm³および 6.3 ×10⁻¹ mol/dm³であったが、その後 30 日までにそれぞれ 8.8×10⁻¹ mol/dm³および 6.8×10⁻¹ mol/dm³ まで若干上昇し、その後は、360 日後までは、ほぼ一定の濃度で推移した。カリウムイオン濃度は、 初期には 1.3×10⁻³ mol/dm³および 1.9×10⁻¹ mol/dm³であった。その後 360 日までは、顕著な経 時変化は認められなかった。ただし単純化模擬液については値が定量下限値付近であったため、 ばらつきが大きくなった。ケイ酸イオン濃度は、初期において単純化模擬液、模擬液共に定量下 限値以下で、その後 90 日までにそれぞれ約 3.0×10⁻² mol/dm³および 2.4×10⁻² mol/dm³まで急激 に上昇した。その後、浸漬期間の経過と共にゆるやかに上昇し、360 日後にはそれぞれ約 3.5×10⁻² mol/dm³および約 3.3×10⁻² mol/dm³ となった。カルシウムイオン濃度は、模擬液で初期に 3.7× 10⁻³ mol/dm³であったが、90 日以降は定量下限値以下となった。

ICP 発光分光分析は複数元素の同時定量が可能であるが,主成分共存下で同時に複数元素を測定する場合には感度が低下するという欠点がある[7]。そのため ICP 発光分光分析の際は,試験溶液に高濃度で含まれる元素の妨害を防ぐため,液相試料を 400 倍に希釈して分析試料とした。そのため,マグネシウムイオンおよびアルミニウムイオンは,定量下限値以下となった。

3.2 固相の X 線回折分析

結果の例として、単純化模擬液または模擬液に、90日間および360日間浸漬した試料のX線回 折チャートを図-4に示す。また二次鉱物を精度良く観察するために、希塩酸処理および水ひ処理 を実施した試料についても分析に供した。単純化模擬液、模擬液それぞれに360日間浸漬した試 料について、上記の処理を実施して行なったX線回折分析のチャートを図-5、6に示す。

図-4からは、主要な初期鉱物であるモンモリロナイトの存在が確認されるとともに初期鉱物に わずかに存在していた玉髄の消失が確認された。また単純化模擬液においては初期試料では確認 されなかったアナルサイムの生成が確認された。アナルサイムのピーク高さ/モンモリロナイトの ピーク高さは、浸漬日数が長くなるにつれて大きくなることも観察され、経時的にアナルサイム の含有割合が増しているまたはモンモリロナイト含有割合が減少している或いは両方が起こって いることを示唆している。模擬液では、初期試料では認められなかったピークとして、アナルサ イムのピークと図中◇で示したわずかなピークが確認された。

単純化模擬液で生成が確認されたアナルサイムのピークが希塩酸処理で消失し、水ひ処理では アナルサイムが主要なピークになることが確認された。一方、模擬液では、単純化模擬液同様に、 アナルサイムのピークが希塩酸処理で消失した。また、わずかに確認されていた◇で示すピーク も同様に希塩酸処理で消失した。水ひ処理後も主要なピークはモンモリロナイトであったが、ア ナルサイムのピーク強度が大きくなった。さらに未処理の試料で確認された◇のわずかなピーク も水ひ処理でピーク強度が大きくなり、そのピークがフィリップサイト-Kのピークであることが 判明した。表-3 に X 線回折分析の結果をまとめた。



JAEA-Technology 2009-065

-11 -

JAEA-Technology 2009-065



-12-

		X 線回折分析					
分析工	須目	140 日浸漬試料	360 日浸漬試料				
単純化模擬液	未処理	モンモリロナイト:++ アナルサイム:+	モンモリロナイト:++ アナルサイム:+				
	希塩酸処理	モンモリロナイト:++	モンモリロナイト:++				
	水ひ処理	モンモリロナイト : - アナルサイム : ++	モンモリロナイト : - アナルサイム : ++				
	未処理	モンモリロナイト:++ アナルサイム:-	モンモリロナイト:++ アナルサイム:-				
模擬液	希塩酸処理	モンモリロナイト:++	モンモリロナイト:++				
	水ひ処理	モンモリロナイト:++ アナルサイム:- フィリップサイト-K:-	モンモリロナイト:++ アナルサイム:- フィリップサイト-K:-				

表-3 X線回折による固相分析のまとめ

※X線回折分析の判別記号について

++: 強いピークが確認された鉱物

+:ピークが確認された鉱物

-: 微弱なピークが確認された鉱物

3.3 固相の SEM 観察および EDS 測定結果

SEM 観察/EDS 測定では, 試料の広域の SEM 観察を倍率 1,500 倍で行い, 特徴的な部分について は倍率 6,000 倍で実施した。各試料の主要な部位(モンモリロナイトのシートが折重なる平坦な 部位)と主要な部位と形状の異なる鉱物が確認された場合にはその部分について, EDS 測定によ る主要成分(カルシウム,ケイ素,アルミニウム,マグネシウム,鉄,ナトリウム,カリウムお よび硫黄)の簡易定量分析を実施した。また比較のため,ベントナイト材料であるクニピア F®も 同様に実施した。クニピア F®の二次電子像を図-7 に,図-7 中の EDS 測定点 A, B の測定チャート を図-8 に示す。

結果の例として,単純化模擬液,模擬液それぞれに 360 日間浸漬した試料の二次電子像を図-9, 10 に,図-9,10 中の EDS 測定点 A,Bの測定チャートを図-11 に示す。さらに,測定点 A~D の部 位の EDS による簡易定量分析による化学組成を表-4 に示す。また表-4 中には,クニピア F®およ び降水系地下水を想定して実施された変質試験[2]において二次鉱物として検出されたアナルサ イムについても,同様に簡易定量分析を実施し,その結果も併せて示した。

SEM 観察の結果,全ての試料でモンモリロナイトのシート状の結晶が観察された。単純化模擬 液および模擬液いずれに浸漬した試料にも、粒状の鉱物の生成が確認された。EDS 測定の結果, 粒状結晶の化学組成は単純化模擬液中のものが SiO₂:Al₂O₃=73.2 wt%:22.8 wt%,模擬液が SiO₂: Al₂O₃=70.6 wt%:22.8 wt%であった(表-4 参照)。それらの粒状結晶は、模擬液よりも単純化 模擬液中で多く観察された。それらの粒状結晶は、水ひ処理をし、モンモリロナイトのシート状 結晶を除去した試料の二次電子像写真(図-12,13)でさらに数多く観察された。

また,図-14 に示すように模擬液中では棒状の結晶や角柱状の結晶も観察された。それらの結 晶の化学組成は,表-5 に示すように未処理試料(測定点 E)が SiO₂:Al₂O₃=67.3 wt%:19.5 wt%, 水ひ処理試料(測定点 F)が SiO₂:Al₂O₃=62.0 wt%:21.1 wt%であった。







(1) 測定点 A

(2) 測定点 B

図-8 試験で使用したクニピア F®の EDS 測定チャート



(1)低倍率(2)高倍率図-9 単純化模擬液中に 360 日浸漬した試料の二次電子像写真



(1)低倍率(2)高倍率(2)高倍率(2)高倍率(2)高倍率(2)高倍率



(1)測定点 C

(2) 測定点 D

図-11 単純化模擬液および模擬液中に 360 日浸漬した試料の EDS 測定チャート

	測定	化学組成(wt%)						
訊科名	部位	Ca0	K_2O	Na ₂ 0	SiO_2	$A1_{2}0_{3}$	SO_3	MgO
単純化模擬液*1	С	0.6	0.3	2.7	73.2	22.8	0.0	0.5
模擬液※2	D	0.5	0.9	4.7	70.6	22.8	0.5	0.1
クニピア F®	А	1.6	0.6	1.2	74.4	20.1	0.3	1.8
(初期試料)	В	11.5	0.7	0.8	67.3	17.2	0.6	1.9
アナルサイム ^{※3}	_	0.3	0.2	5.4	72.8	21.0	0.1	0.3

表-4 EDS 測定による主要成分の簡易定量分析結果(1)

※1:単純化模擬液中に 360 日浸漬した試料 (図-9 測定点 C)

※2: 模擬液中に 360 日浸漬した試料 (図-10 測定点 D)

※3:比較のために実施。標準物質を使用。



(1)高倍率
 (2)低倍率
 (2)低倍率
 (2)12
 単純化模擬液中に360日浸漬した試料の二次電子像写真
 (浸漬後の試料を水ひ処理した試料)



(1)高倍率
 (2)低倍率
 (2)低倍率
 (2)
 (2)低倍率
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (2)
 (3)
 (4)
 (4)
 (4)
 (5)
 (4)
 (5)
 (5)
 (6)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)
 (7)



高倍率(未処理) 高倍率(水ひ処理後) 図-14 模擬液中に360日浸漬した試料で観察された棒状,角柱状結晶の二次電子像写真



(1)測定点 E

(2) 測定点 F



うちゃい 友	測定	化学組成 (wt%)							化学組成(wt%)					
訊科名	部位	Ca0	K_2O	Na ₂ 0	SiO_2	$A1_{2}0_{3}$	SO_3	MgO						
棒状結晶*1	Е	1.7	9.9	1.0	67.3	19.5	0.4	0.3						
角柱状結晶 ^{※2}	F	0.8	14.8	0.9	62.0	21.1	0.3	0.1						
クニピア F®	А	1.6	0.6	1.2	74.4	20.1	0.3	1.8						
(初期試料)	В	11.5	0.7	0.8	67.3	17.2	0.6	1.9						
アナルサイム*3	_	0.3	0.2	5.4	72.8	21.0	0.1	0.3						

表-5 EDS 測定による主要成分の簡易定量分析結果(2)

※1: 模擬液中に 360 日浸漬した試料で観察された棒状結晶 (図-14 測定点 E)

※2:模擬液中に 360 日浸漬した試料で観察された角柱状結晶 (図-14 測定点 F)

※3:比較のために実施。標準物質を使用。

4.考察

SEM 観察および X 線回折分析の結果から,いずれの試料もモンモリロナイトが残存していることが確認され,本実験の条件では,360 日間で全てのモンモリロナイトが変質することはなかった。しかし,不純物として含まれる玉髄の回折ピークは,全ての浸漬後試料で消失した。SEM 観察の結果,すべての浸漬後試料で直径 3~5 µm 程度の粒状結晶の鉱物の生成が確認された。この粒状結晶は模擬液より単純化模擬液に浸漬した試料で多く認められ,EDS による簡易定量分析による SiO₂: Al₂O₃比がアナルサイムのそれと良い一致を示した。単純化模擬液に浸漬した試料に水ひ処理を施すと,ほとんどがこの粒状結晶となった。X 線回折分析では,何れの浸漬後試料でも,アナルサイムが検出された。アナルサイムの回折ピークは,浸漬期間が同じなら模擬液に浸漬した場合よりも単純化模擬液に浸漬した場合の方が明瞭であった。単純化模擬液に浸漬した試料について水ひ処理を行った場合には,アナルサイムが主要な回折ピークとなった。以上のことを考え併せると,すべての浸漬後試料で認められた直径 3~5 µm 程度の粒状結晶はアナルサイムと推定される。模擬液においては,アナルサイムのピークの他に,わずかなピークが確認され,このピークは水ひ処理を行った結果,フィリップサイト-K のものであることが判明した。

模擬液調製に用いた人工海水にはカルシウムやマグネシウムなどの成分が含まれているが、本 試験ではナトリウムやカリウムを含む沸石のアナルサイム(化学式:NaAlSi₂0₆・H₂0)[8]とフィ リップサイト-K(フィリップサイトの理想化学式:(1/2Ca,Na,K)₃Al₃Si₅0₁₆・6H₂0)[8]の生成が 確認された。これは、3.1章に示したように人工海水中のマグネシウムのほとんどと、カルシウ ムの 3/4 が模擬液調製時に沈殿物として除去されたため、カルシウムやマグネシウムなどの液相 濃度が低下し、これらの元素を含むアルミノケイ酸塩が生成されにくかったことが考えられる。 しかし、模擬液を用いた液相分析の結果を検討すると、模擬液の場合、ベントナイト浸漬により ケイ酸濃度が上昇すると、カルシウム濃度が低下し、定量下限値以下になっている。このことは、 たとえ X線回折により検出されなくとも、カルシウムのケイ酸塩やアルミノケイ酸塩が生成して いる可能性を示唆している。生成物が非晶質や結晶性が悪い場合には、このような結果になりや すいと考えられる。二次的生成物に関して、より多くの情報を得るためには、非晶質物質の検出 方法など分析方法を検討する必要がある。

一方,小田ら[9]は高アルカリ性環境における緩衝材の変質挙動について,二次鉱物の種類と溶 液組成の関係を既往の研究事例に基づきまとめている。その中で,二次鉱物の化学組成と当該二 次鉱物が析出する溶液組成は対応しており,ナトリウム,アルミニウム,ケイ素からなる溶液組 成中の場合にはアナルサイムが生成し,ナトリウム,カリウム,カルシウム,アルミニウム,ケ イ素からなる溶液組成中の場合にはアナルサイム,フィリップサイトおよびクリノタイロライト が生成すると報告した[9]。表-2の液相組成の分析結果に示すように,アナルサイムが生成した 単純化模擬液はナトリウムイオンを高濃度で含み,アナルサイムとフィリップサイトが生成した 模擬液にはナトリウムイオンとカリウムイオンが高濃度で含まれており,小田ら[9]の報告と整合 的な結果であった。

5.おわりに

本試験では、セメント系材料の影響を受けた海水系地下水中でのベントナイトの変質挙動の把 握を目的とし、塩化ナトリウムと水酸化ナトリウムとの混合溶液(単純化模擬液)および海水系 地下水がフレッシュなセメント材料に流入して形成される間隙水の模擬水溶液(模擬液)の2種 類の試験溶液と粉末ベントナイトを用いたバッチ浸漬試験を実施した。

その結果,単純化模擬液中ではアナルサイムの生成が,模擬液中ではアナルサイムとフィリッ プサイト-Kの生成が確認された。また,模擬液の場合には,液相分析の結果から,カルシウムの ケイ酸塩やアルミノケイ酸塩の生成が示唆された。

今回の試験の結果は、高アルカリ性環境における緩衝材の変質挙動に関して、二次鉱物の化学 組成と当該二次鉱物が析出する溶液組成は対応するという既往の報告[9]と整合的であった。

謝 辞

本報告書は,試験および分析作業を株式会社太平洋コンサルタントで実施していただき,その 結果をまとめたものである。

試験・分析作業を実施していただいた同社の坂本浩幸様,柴田真仁様に深く謝意を申し上げます。

参考文献

- [1]Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) (2004); Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05.
- [2]市毛悟,三原守弘,大井貴夫(2002);ベントナイトの長期安定性の検討-セメント系材料の 影響を受けた地下水中のベントナイト安定性の予備調査-,JNC TN8430 2001-007.
- [3]核燃料サイクル開発機構(1999);わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- [4]Lasaga, A.C. (1998) : Kinetic Theory in Earth Scienses., Princeton Univ. Press.
- [5]日本ベントナイト工業会(1991);ベントナイト(粉末)のメチレンブルー吸着量の測定, JBAS-107-91.
- [6]日本ベントナイト工業会(1977);ベントナイトの陽イオン交換要容量の測定,JBAS-106-77
- [7]田中誠之,飯田芳男(1971);基礎化学選書7 機器分析(改訂版),裳華房.
- [8] 地学団体研究会, 地学事典編集委員会 (1970); 增補改訂 地学事典, 平凡社.
- [9]小田治恵, 佐々木良一, D. Savage, R. C. Arthur, 本田明 (2005); 緩衝材の鉱物学的長期変遷 シナリオ, JNC TN8400 2005-020.

付録-1 液相の成分分析結果

液相組成分析結果(1/2)を表-1に、液相組成分析結果(2/2)を表-2に、液相組成分析 結果(希塩酸処理後の液相:浸漬期間 360 日)を表-3 にそれぞれ示す。また、液相分析結 果を図-1から図-13 にそれぞれ示す。 This is a blank page.

河库	浸漬				液相約	且成(mol/	/dm ³)		
<i>反</i> 俱 条件	期間 (日)	No.	A1	Ca	K	Mg	Na	SO_4	Si
	浸漬液	夜	2.5×10 ⁻⁵	1.4×10^{-4}	1.3 $\times 10^{-3}$	5. 2×10^{-5}	8.4×10 ⁻¹	1.4×10^{-4}	2.5×10 ⁻⁴
	20	1	1.3×10 ⁻⁴	3.8×10 ⁻⁵	8.1×10 ⁻⁴	1. 6×10^{-5}	8.5×10 ⁻¹	1.9×10^{-3}	2.9×10 ⁻²
	30	2	1.2×10^{-4}	9.8×10 ⁻⁵	6.3 $\times 10^{-4}$	3. 2×10^{-5}	8.6×10 ⁻¹	2.0×10 ⁻³	3. 0×10^{-2}
	00	1	3. 0×10^{-4}	6.6×10 ⁻⁵	2.9×10 ⁻³	3. 2×10^{-5}	8.7×10 ⁻¹	2.0×10 ⁻³	3.4×10 ⁻²
セメント	90	2	1.9×10^{-4}	3.7×10 ⁻⁵	8.5×10 ⁻⁴	8.2×10 ⁻⁶	8.6×10 ⁻¹	2.0×10 ⁻³	3.5×10 ⁻²
一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	140	1	4.4×10 ⁻⁵	5.6×10 ⁻⁶	5.4 $\times 10^{-4}$	4. 3×10^{-5}	8.5×10 ⁻¹	2.3×10 ⁻³	3.5×10 ⁻²
小中地位候	140	2	5.5×10 ⁻⁵	ND	7.7 $\times 10^{-4}$	2. 3×10^{-5}	8.6×10 ⁻¹	2.2×10 ⁻³	3.5×10 ⁻²
JACTIX	250	1	ND	3.5×10 ⁻⁵	1.8×10^{-3}	ND	8.8×10 ⁻¹	1.8×10 ⁻³	3.8×10 ⁻²
	250	2	ND	ND	9.6×10 ⁻⁴	ND	8.7×10 ⁻¹	1.9×10^{-3}	3.7×10 ⁻²
	360	1	1.7×10 ⁻⁵	1.5×10 ⁻⁵	3.0×10 ⁻⁴	ND	8.8×10 ⁻¹	2.0×10 ⁻³	3.5×10 ⁻²
		2	2.8×10 ⁻⁵	ND	7.7 $\times 10^{-4}$	ND	8.9×10 ⁻¹	1.9×10^{-3}	3. 6×10^{-2}
	浸漬液		8.8×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻³	1.9×10^{-1}	1. 2×10^{-4}	6. 3×10^{-1}	2.9×10 ⁻²	3.7 \times 10 ⁻⁴
	20	1	1.6×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.6×10^{-1}	6.7×10 ⁻⁵	6.8×10 ⁻¹	3. 1×10^{-2}	2.4×10 ⁻²
	30	2	4.1×10 ⁻⁵	1.3×10^{-4}	1.6×10^{-1}	6. 0×10^{-5}	6.8×10 ⁻¹	3. 1×10^{-2}	2.4×10 ⁻²
	00	1	3.7×10 ⁻⁴	1.3×10^{-4}	1.7×10^{-1}	4.8×10 ⁻⁵	6.8×10 ⁻¹	3. 1×10^{-2}	2.9×10 ⁻²
セメント	90	2	1.9×10^{-5}	ND	1.7×10^{-1}	ND	6.7×10 ⁻¹	3. 1×10^{-2}	2.9×10 ⁻²
海水系地下	140	1	1.5×10 ⁻⁶	ND	1.7×10^{-1}	2.8×10 ⁻⁵	6.8×10 ⁻¹	3. 3×10^{-2}	3.0×10 ⁻²
水模擬液	140	2	9.1×10 ⁻⁵	8.6×10 ⁻⁵	1.7 $\times 10^{-1}$	5. 3×10^{-5}	6.9×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻²	3.0×10 ⁻²
	250	1	ND	3. 2×10^{-5}	1.7×10^{-1}	7. 6×10^{-6}	6. 9×10^{-1}	3. 4×10^{-2}	3. 2×10^{-2}
	200	2	ND	3. 9×10^{-5}	1. 7×10^{-1}	ND	6. 8×10^{-1}	3. 4×10^{-2}	3. 2×10^{-2}
	260	1	1.9×10^{-5}	ND	1.7×10^{-1}	7. 1×10^{-5}	7.0×10 ⁻¹	3. 2×10^{-2}	3. 3×10^{-2}
	360	2	ND	ND	1. 7×10^{-1}	ND	6. 9×10^{-1}	3. 2×10^{-2}	3. 3×10^{-2}

表-1 液相組成分析結果(1/2)

ND:検出限界以下

: 定量下限值以下

※定量下限値以下の値であっても検出下限値を超えた元素については、参考としてその値 を記した。

闫涛	浸漬				液相組成	$(mo1/dm^3)$		
<i>夜</i> 俱 条件	期間 (日)	No.	BO ₃	F	Sr	Br	無機 C	C1
	浸漬ネ	夜	ND	ND	ND	ND	9.5×10 ⁻⁴	6. 0×10 ⁻¹
	20	1	3. 7×10^{-5}	1.6×10^{-4}	2. 2×10^{-6}	ND	4. 0×10^{-3}	6. 1×10 ⁻¹
	50	2	3. 7×10^{-5}	2. 1×10^{-4}	2. 2×10^{-6}	ND	4. 0×10^{-3}	6. 2×10^{-1}
キンパ	90	1	3. 7×10^{-5}	3. 2×10^{-4}	1.9×10^{-6}	ND	4. 6×10^{-3}	6. 2×10^{-1}
セメント	90	2	4. 6×10^{-5}	2.6×10 ⁻⁴	2. 1×10^{-6}	3.8×10 ⁻⁵	4. 7×10^{-3}	6. 3×10^{-1}
<i>一</i> 本 畄 純 化 档	140	1	4. 6×10^{-5}	3. 2×10^{-4}	2. 1×10^{-6}	ND	6. 1×10^{-3}	6. 3×10^{-1}
小平吨10英 擬演	140	2	4. 6×10^{-5}	2.6×10 ⁻⁴	2. 1×10^{-6}	ND	6. 1×10^{-3}	6. 3×10^{-1}
JACHX	250	1	_					6. 3×10^{-1}
	250	2	_	_		_	—	6. 4×10^{-1}
	360	1	_					6. 3×10^{-1}
		2					_	6. 3×10^{-1}
	浸漬ネ	夜	3.8×10 ⁻⁴	ND	1.4×10^{-4}	8.6×10 ⁻⁴	1. 1×10^{-3}	5. 5×10^{-1}
	20	1	4. 6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	7. 4×10^{-6}	9. 3×10^{-4}	5. 0×10^{-3}	5. 7×10^{-1}
	50	2	4. 6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	7.3 $\times 10^{-6}$	9. 3×10^{-4}	4. 5×10^{-3}	5. 6×10^{-1}
	90	1	4. 2×10^{-4}	2. 1×10^{-4}	6.8×10 ⁻⁶	9. 0×10^{-4}	4. 9×10^{-3}	5. 7×10^{-1}
セメント	90	2	4. 6×10^{-4}	2.6×10 ⁻⁴	6.8×10 ⁻⁶	9. 3×10^{-4}	5. 0×10^{-3}	5. 7×10^{-1}
海水系地下	140	1	4. 6×10^{-4}	2.6×10 ⁻⁴	6. 6×10^{-6}	9. 3×10^{-4}	5. 3×10^{-3}	5.8×10 ⁻¹
水模擬液	140	2	4. 6×10^{-4}	2.6×10 ⁻⁴	6. 5×10^{-6}	9. 3×10^{-4}	5. 3×10^{-3}	5.8×10 ⁻¹
	250	1	4. 6×10^{-4}	4.7×10 ⁻⁴	6. 4×10^{-6}	1.5×10 ⁻³	5. 2×10^{-3}	5.9 $\times 10^{-1}$
	200	2	4. 6×10^{-4}	4. 7×10^{-4}	6. 5×10^{-6}	1. 5×10^{-3}	5. 1×10^{-3}	5. 9×10^{-1}
	360	1	4. 6×10^{-4}	5. 3×10^{-4}	6. 6×10^{-6}	1. 4×10^{-3}	6. 1×10^{-3}	6. 0×10^{-1}
	360	2	4. 6×10^{-4}	5. 3×10^{-4}	6. 3×10^{-6}	1. 5×10^{-3}	6. 4×10^{-3}	6. 0×10^{-1}

表-2 液相組成分析結果(2/2)

— : 測定せず

ND: 検出限界以下

: 定量下限值以下

※定量下限値以下の値であっても検出下限値を超えた元素については、参考としてその値 を記した。

浸漬 条件	No.	液相組成 (mol/dm ³) *1								
		A1	Ca	К	Mg	Na	SO_4	Si		
セメント海水系	1	3.9×10 ⁻⁴	9. 7×10^{-5}	8. 2×10^{-6}	1. 1×10^{-4}	1. 5×10^{-3}	8.5×10 ⁻⁷	4.9×10 ⁻⁴		
模擬液	2	3.8×10 ⁻⁴	9.5×10 ⁻⁵	7.7×10 ⁻⁶	1. 1×10^{-4}	1.5×10 ⁻³	8.7×10 ⁻⁷	4.7×10 ⁻⁴		
セメント海水系	1	2. 3×10^{-4}	1.6×10 ⁻⁴	8.6×10 ⁻⁴	7. 0×10^{-5}	4. 4×10^{-4}	2.9×10 ⁻⁵	3. 2×10^{-4}		
地下水模擬液	2	2. 3×10^{-4}	1.6×10 ⁻⁴	8. 7×10^{-4}	7. 1×10^{-5}	4. 5×10^{-4}	3. 0×10^{-5}	3. 2×10^{-4}		

表-3 液相組成分析結果(希塩酸処理後の液相:浸漬期間360日)

:定量下限值以下

※:定量下限値以下の値であっても検出下限値を超えた元素については、参考としてその値 を記した。

*1:液相組成は、固相 0.100 g/0.100dm³希塩酸の溶解液を採取して分析した結果。







図-2 液相組成分析結果(Ca)







図-4 液相組成分析結果 (Mg)







図-6 液相組成分析結果(SO₄)






図-8 液相組成分析結果(B0₃)



図-9 液相組成分析結果(F)



図-10 液相組成分析結果(Sr)







図-12 液相組成分析結果(無機 C)



付録-2 走査型電子顕微鏡観察およびエネルギー分散型特性 X 線分析結果

EDS 測定結果(浸漬試料:セメント海水系地下水単純化模擬液)を表-1に,EDS 測定結果(浸 漬試料:セメント海水系地下水模擬液)を表-2に,EDS 測定結果(抽出処理試料:セメント海 水系地下水単純化模擬液)を表-3に,EDS 測定結果(抽出処理試料:セメント海水系地下水模 擬液)を表-4にそれぞれ示す。また,SEM 像観察および EDS 測定結果を図-1から図-33 にそれ ぞれ示す。 This is a blank page.

浸漬期間	N	測定	化学組成 (wt%)							
(日)	INO.	部位	Ca0	K ₂ 0	Na_20	SiO_2	$A1_{2}0_{3}$	SO_3	MgO	
石英		_	0.9	0.6	0.2	97.4	0.3	0.0	0.5	
アナルサイム		—	0.3	0.2	5.4	72.8	21.0	0.1	0.3	
クニピアF		А	1.6	0.6	1.2	74.4	20.1	0.3	1.8	
(初期試料)		В	11.5	0.7	0.8	67.3	17.2	0.6	1.9	
	1	А	1.1	0.2	1.1	74.4	20.1	0.6	2.5	
140		В	0.4	0.1	3.8	70.8	23.5	0.8	0.7	
140	2	А	1.4	0.3	1.5	74.5	19.8	0.2	2.2	
		В	0.5	0.1	3.6	72.4	22.6	0.2	0.7	
	1	А	2.5	0.2	0.9	74.7	18.7	0.5	2.5	
250		В	0.2	0.1	4.0	71.7	22.8	0.3	0.8	
230	2	А	1.3	0.3	1.3	74.8	19.7	0.4	2.2	
		В	0.2	0.1	3.9	72.1	22.8	0.1	0.8	
360	1	А	0.9	0.2	2.2	75.6	18.6	0.5	1.9	
		В	0.6	0.3	2.7	73.2	22.8	0.0	0.5	
	2	А	0.2	0.6	1.7	74.4	20.1	0.4	2.6	
		В	0.4	0.1	3.6	74.1	21.4	0.0	0.3	

表-1 EDS 測定結果(浸漬試料:セメント海水系地下水単純化模擬液)

浸漬期間	N	測定	化学組成(wt%)								
(日)	INO.	部位	Ca0	K ₂ 0	Na_20	SiO_2	$A1_{2}0_{3}$	SO_3	MgO		
30	1	А	0.9	4.4	0.2	72.6	19.2	0.1	2.5		
		В	2.7	5.0	0.2	71.1	18.4	0.2	2.5		
	2	А	1.5	4.9	0.2	71.1	19.7	0.2	2.4		
		В	53.4	1.0	0.6	32.5	4.4	5.9	2.2		
	1	А	0.4	5.1	0.2	72.3	19.4	0.2	2.5		
00		В	0.5	1.1	5.8	69.2	22.4	0.2	0.9		
90	2	А	0.9	5.1	0.1	72.4	19.0	0.3	2.2		
		В	0.6	1.1	4.7	70.0	22.4	0.4	0.8		
	1	А	1.4	4.5	0.1	71.7	19.2	0.5	2.6		
140		В	1.0	6.0	1.2	68.0	21.0	1.2	1.6		
140	2	А	0.2	0.4	4.7	71.5	22.5	0.2	0.5		
		В	0.7	5.7	0.1	72.0	19.1	0.4	2.1		
	1	А	0.4	0.9	4.4	71.1	22.6	0.3	0.4		
250		В	0.9	6.6	0.0	71.0	18.9	0.3	2.2		
230	2	А	0.4	0.7	4.2	71.2	22.5	0.3	0.7		
		В	1.0	5.0	0.1	71.9	19.5	0.1	2.5		
360	1	А	1.7	9.9	1.0	67.3	19.5	0.4	0.3		
		В	1.1	5.6	0.3	70.3	19.7	1.1	1.9		
	2	А	0.5	0.9	4.7	70.6	22.8	0.5	0.1		
		В	1.4	5.4	0.3	70.7	19.2	0.4	2.6		

表-2 EDS 測定結果(浸漬試料:セメント海水系地下水模擬液)

抽出処	浸漬期	N	測定	化学組成 (wt%)							
理条件	間(日)	INO.	部位	Ca0	K_2O	Na_20	SiO_2	$A1_{2}0_{3}$	SO_3	MgO	
処理前	140	1	А	1.1	0.2	1.1	74.4	20.1	0.6	2.5	
			В	0.4	0.1	3.8	70.8	23.5	0.8	0.7	
		2	А	1.4	0.3	1.5	74.5	19.8	0.2	2.2	
			В	0.5	0.1	3.6	72.4	22.6	0.2	0.7	
		1	А	0.9	0.2	2.2	75.6	18.6	0.5	1.9	
	260		В	0.6	0.3	2.7	73.2	22.8	0.0	0.5	
	360	2	А	0.2	0.6	1.7	74.4	20.1	0.4	2.6	
			В	0.4	0.1	3.6	74.1	21.4	0.0	0.3	
希塩酸処理	140	1	А	0.2	0.2	0.0	78.2	18.2	0.2	2.9	
			В	0.1	0.0	0.2	73.9	21.7	0.2	3.9	
		2	А	0.3	0.1	0.1	76.7	19.7	0.1	3.1	
			В	0.3	0.1	0.1	76.8	19.8	0.2	2.7	
	360	1	А	0.6	0.7	0.1	76.3	20.5	0.4	1.5	
			В	0.5	0.1	0.1	75.5	21.2	0.4	2.3	
		2	А	0.2	0.3	0.1	76.0	20.5	0.5	2.5	
			В	0.5	0.4	0.0	77.2	19.6	0.2	2.1	
	140	1	А	0.3	0.1	4.0	72.0	22.5	0.7	0.4	
水ひ 処理		I	В	1.2	0.2	2.4	74.6	19.9	0.7	1.0	
		2	А	0.4	0.2	4.8	69.8	24.0	0.3	0.6	
			В	3.6	0.1	2.1	76.0	15.4	0.5	2.3	
		1	А	0.3	0.0	5.3	71.6	22.7	0.1	0.1	
	360		В	1.3	0.5	1.0	74.3	20.8	0.2	2.0	
	300	2	А	0.3	0.2	4.4	72.0	22.6	0.3	0.1	
			В	1.4	0.2	1.1	76.3	18.6	0.7	1.5	

表-3 EDS 測定結果(抽出処理試料:セメント海水系地下水単純化模擬液)

抽出処	浸漬期	N	測定	化学組成 (wt%)							
理条件	間(日)	INO.	部位	Ca0	K_2O	Na_20	SiO_2	$A1_{2}0_{3}$	SO_3	MgO	
処理前・		1	А	1.4	4.5	0.1	71.7	19.2	0.5	2.6	
	140	1	В	0.2	0.4	4.7	71.5	22.5	0.2	0.5	
	140	2	А	0.7	5.7	0.1	72.0	19.1	0.4	2.1	
			В	0.4	0.9	4.4	71.1	22.6	0.3	0.4	
		1	А	1.7	9.9	1.0	67.3	19.5	0.4	0.3	
	360	1	В	1.1	5.6	0.3	70.3	19.7	1.1	1.9	
	360	2	А	0.5	0.9	4.7	70.6	22.8	0.5	0.1	
			В	1.4	5.4	0.3	70.7	19.2	0.4	2.6	
希塩酸処理	140	1	А	0.4	0.3	0.1	76.5	19.7	0.2	2.7	
			В	0.2	0.5	0.0	75.5	20.1	0.3	3.4	
		2	А	0.2	0.2	0.1	75.6	20.4	0.5	3.0	
			В	0.3	0.5	0.2	75.2	21.1	0.0	2.7	
	360	1 360 2	А	0.7	0.5	0.0	78.3	19.1	0.0	1.4	
			В	0.2	1.2	0.0	77.3	19.5	0.0	1.8	
			А	0.2	0.4	0.1	83.2	14.5	0.3	1.3	
			В	0.5	1.1	0.1	76.0	20.2	0.1	2.0	
	140	1	А	0.4	1.3	4.5	70.0	23.2	0.2	0.4	
			В	5.0	8.8	0.2	63.9	21.4	0.2	0.5	
		2	А	0.4	1.2	4.0	70.6	22.7	0.3	0.9	
水ひ 処理			В	5.7	9.6	0.4	62.5	21.1	0.1	0.6	
		1	А	0.7	15.6	0.8	62.4	20.1	0.3	0.1	
	260		В	0.4	0.8	4.4	72.0	22.2	0.1	0.1	
	360	2	А	0.8	14.8	0.9	62.0	21.1	0.3	0.1	
			В	0.7	1.7	4.3	70.9	22.4	0.0	0.0	

表-4 EDS 測定結果(抽出処理試料:セメント海水系地下水模擬液)



(クニピアF)



図-2 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日-1)



図-3 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日-2)



図-4 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 250 日-1)



図-5 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 250 日-2)



図-6 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-1)



図-7 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-2)



図-8 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 30 日-1)



図-9 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 30 日-2)



⁽セメント海水系地下水模擬液:浸漬 90 日-1)



(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 90 日-2)



図-12 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-1)



図-13 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-2)



図-14 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 250 日-1)



(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 250 日-2)



図-16 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-1)



図-17 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-2)



(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日-1, 希塩酸処理)



(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日-2, 希塩酸処理)



(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-1, 希塩酸処理)



(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-2, 希塩酸処理)



(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-1, 希塩酸処理)



図-23 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-2,希塩酸処理)



図-24 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-1,希塩酸処理)



(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-2, 希塩酸処理)



(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬140日-1,水ひ処理)


(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日-2, 水ひ処理)



(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-1, 水ひ処理)



(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-2, 水ひ処理)



(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-1,水ひ処理)



図-31 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-2,水ひ処理)



図-32 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-1,水ひ処理)



図-33 SEM 像観察および EDS 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-2,水ひ処理)

付録-3 X線回折分析結果

XRD 測定による鉱物の同定結果(浸漬試料)を表-1に,XRD 測定による鉱物の同定結果(抽 出処理試料)を表-2にそれぞれ示す。また,XRD 測定結果を図-1から図-18にそれぞれ示 す。

浸漬条件	浸漬期間 (日)	No.	初期	鉱物	生成鉱物	
			モンモリ	石英	アナル	フィリップ
			ロナイト	(玉髄)	サイム	サイト-K
クニピアF(初期試料)			++	_		
セメント海水 系地下水 単純化模擬液	30	1	++		_	
		2	++		_	
	90	1	++		+	
		2	++		+	
	140	1	++		+	
		2	++		+	
	250	1	++		+	
		2	++		+	
	360	1	++		+	
		2	++		+	
	30	1	++			
		2	++			
	90	1	++			
		2	++			
セメント海水 系地下水 模擬液	140	1	++		_	
		2	++		-	
	250	1	++		-	-
		2	++		_	-
	360	1	++		-	-
		2	++		_	_

表-1 XRD 測定による鉱物の同定結果(浸漬試料)

++ : 強いピークが確認され,同定した鉱物が非常に多く含まれていると推測される。

+ :ピークが確認され、同定した鉱物が含まれていると推測される。

- : 微弱なピークが確認され、わずかではあるが同定した鉱物が含まれていると推測される。

無印:ピークが確認されない。

浸漬条件	抽出処理 条件	浸漬 期間 (日)	No.	初期鉱物		生成鉱物	
				モンモリ ロナイト	石英 (玉髄)	アナル サイム	フィリッ プサイト - K
セメント海水 系地下水 単純化模擬液	処理前	140	1	++		+	
			2	++		+	
		360	1	++		+	
			2	++		+	
	希塩酸 処理	140	1	++			
			2	++			
		360	1	++			
			2	++			
	水ひ 処理	140	1	_		++	
			2	-		++	
		360	1	_		++	
			2	_		++	
	処理前	140	1	++		-	
			2	++		-	
		360	1	++		-	-
			2	++		-	-
ヤメント海水	希塩酸如理	140	1	++			
ビメンド海小 系地下水 模擬液			2	++			
		360	1	++			
			2	++			
	水ひ 処理	140	1	++		+	+
			2	++		+	+
		360	1	++		-	-
			2	++		—	_

表-2 XRD 測定による鉱物の同定結果(抽出処理試料)

++ : 強いピークが確認され、同定した鉱物が非常に多く含まれていると推測される。

+ :ピークが確認され、同定した鉱物が含まれていると推測される。

- : 微弱なピークが確認され、わずかではあるが同定した鉱物が含まれていると推測される。

無印:ピークが確認されない。



図-1 XRD 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 30 日)



図-2 XRD 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 90 日)



図-3 XRD 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日)



図-4 XRD 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 250 日)



図-5 XRD 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日)



図-6 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 30 日)



図-7 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 90 日)



図-8 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日)



図-9 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 250 日)



図-10 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日)



図-11 XRD 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日,希塩酸処理)



図-12 XRD 測定結果(セメント海水系地下単純化水模擬液:浸漬 360 日,希塩酸処理)



図-13 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日,希塩酸処理)



図-14 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日,希塩酸処理)



図-15 XRD 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日,水ひ処理)



図-16 XRD 測定結果(セメント海水系地下単純化水模擬液:浸漬 360 日,水ひ処理)



図-17 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日,水ひ処理)



図-18 XRD 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日,水ひ処理)

付録-4 示差熱分析結果

脱 OH 温度の浸漬期間依存性(浸漬試料)を表-1 に,脱 OH 温度の浸漬期間依存性(抽出 処理試料)を表-2 に,モンモリロナイトの脱 OH 温度の浸漬期間依存性を図-1 に示す。また,DTA 測定チャートを図-2 から図-38 にそれぞれ示す。

闫津友仲	浸漬期間	N	モンモリロナイト	浸漬試料の
 夜俱禾件	(日)	INO.	の脱 0H 温度(℃)	ig-loss (%)
クニピア	~F(初期試料)	670.1	6.47	
	20	1	668.6	11.18
	30	2	667.5	11.18
	90	1	668.3	11.27
トリント海水ズ		2	666.8	11.34
セメント海水糸地下水	140	1	666.3	15.68
	140	2	667.5	15.24
中心化视频加	250	1	662.2	9.86
		2	661.0	10.06
	360	1	663.4	8.70
		2	660.5	8.73
セメント海水系 地下水模擬液	20	1	646.5	9.96
	30	2	648.0	10.40
	00	1	648.6	10.85
	90	2	648.4	10.48
	140	1	649.6	9.73
	140	2	653.1	10.04
	250	1	644.2	10.49
	200	2	644.6	10.13
	260	1	646.1	9.68
	200	2	647.7	9.58

表-1 脱 OH 温度の浸漬期間依存性(浸漬試料)

闫连夕仲	抽出処理	浸漬期間	N	モンモリロナイト	浸漬試料の
 夜俱禾件	条件	(日)	INO.	の脱 0H 温度(℃)	ig-loss (%)
セメント海水 系地下水 単純化模擬液	処理前	140	1	666.3	15.68
			2	667.5	15.24
		360	1	663.4	8.70
			2	660.5	8.73
	希塩酸 処理	140	1	639.3	24. 29
			2	627.2	22.80
		360	1	523.6	19. 59
			2	626.8	20.10
	水ひ 処理	140	1	663.3	11.67
			2	671.1	11.80
		360	1	669.6	11.38
			2	674.3	11.43
セメント海水 系地下水 模擬液	処理前	140	1	649.6	9.73
			2	653.1	10.04
		360	1	646.1	9.68
			2	647.7	9.58
	希塩酸 処理	140	1	637.7	21.99
			2	620.3	22. 23
		360	1	632.4	19. 52
			2	624.4	19. 28
	水ひ 処理	140	1	648.1	14.61
			2	646.7	14.90
		360	1	638.0	14. 42
			2	640.5	14.18

表-2 脱 OH 温度の浸漬期間依存性(抽出処理試料)

モンモリロナイトの脱 OH 温度は,層間の陽イオンの種類により変化することが知られて いる。また,風化,変質などによるモンモリロナイト骨格からのマグネシウムの溶出に伴 って,八面体シートに欠陥を生じた場合に,脱 OH 温度が低温で生ずることも報告されてい る(粘土ハンドブック第2版)。DTA 測定結果から,本試験においては試験後の全ての試料 について 670 ℃付近に見られる脱 OH 温度の低下が認められた。特に,単純化模擬液に浸漬 した試料に比較して模擬液に浸漬した試料の脱 OH 温度の低下が大きい結果となった。した がって,単純化模擬液に浸漬した試料よりも模擬液に浸漬した試料の方が,層間陽イオン 種の変化および八面体シートに欠陥がより生じていることが示された。また,ばらつきは あるもののどちらの試料も浸漬期間が長くなるにつれて,脱 0H 温度が低下する傾向が観察 された。



図-1 DTA によるモンモリロナイトの脱 OH 温度の浸漬期間依存性 ※クニピア F®の脱 OH 温度(670.1 ℃)である。



図-2 DTA 測定結果 (クニピアF: 初期試料)



図-3 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 30 日-1)



図-4 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 30 日-2)



図-5 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 90 日-1)



図-6 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 90 日-2)



図-7 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日-1)



図-8 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 140 日-2)



図-9 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 250 日-1)



図-10 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 250 日-2)



図-11 DTA 測定結果(セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-1)



図-12 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水単純化模擬液:浸漬 360 日-2)



図-13 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 30 日-1)



図-14 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 30 日-2)



図-15 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 90 日-1)



図-16 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 90 日-2)



図-17 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-1)



図-18 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-2)



図-19 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 250 日-1)



図-20 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 250 日-2)


図-21 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-1)



図-22 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-2)



図-23 DTA 測定結果(セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 140 日-1,希塩酸処理)



図-24 DTA 測定結果 (セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 140 日-2,希塩酸処理)



図-25 DTA 測定結果(セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 360 日-1,希塩酸処理)



図-26 DTA 測定結果 (セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 360 日-2,希塩酸処理)



図-27 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-1,希塩酸処理)



図-28 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-2,希塩酸処理)



図-29 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-1,希塩酸処理)



図-30 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-2,希塩酸処理)



図-31 DTA 測定結果(セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 140 日-1,水ひ処理)



図-32 DTA 測定結果(セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 140 日-2,水ひ処理)



図-33 DTA 測定結果(セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 360 日-1,水ひ処理)



図-34 DTA 測定結果(セメント海水系単純化地下水模擬液:浸漬 360 日-2,水ひ処理)



図-35 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-1,水ひ処理)



図-36 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 140 日-2,水ひ処理)



図-37 DTA 測定結果(セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-1,水ひ処理)



図-38 DTA 測定結果 (セメント海水系地下水模擬液:浸漬 360 日-2,水ひ処理)

付録-5 MB吸着量の測定結果/CEC 測定結果/LC 測定結果

MB 測定結果を図-1 および表-1 に, CEC 測定結果を表-2 に, LC 測定結果を表-3 に示す。

MB は、溶液中で1価の陽イオンとなり、モンモリロナイトに吸着する。したがって、MB 吸着量からモンモリロナイトの量を知ることができる。試験で用いたクニピア F®の MB 吸着 量は、クニミネ工業社カタログ値から、140 mmol/100 g である。MB 測定結果から、単純化 模擬液に浸漬した試料に比較して模擬液に浸漬した試料の MB 吸着量は少なくなっているこ とが確認された。したがって、単純化模擬液に浸漬した試料よりも模擬液に浸漬した試料 の方が、モンモリロナイトの量が減少していることが示された。また、ばらつきはあるも ののどちらの試料も浸漬期間が長くなるにつれて、MB 吸着量が減少、すなわちモンモリロ ナイトの量が減少する傾向が観察された。MB 吸着量は、固相 100 g に吸着した MB のモル数 で表される。したがって、固相が溶解あるいは沈殿した場合は固相重量が変化するため、 MB 吸着量の値を直接モンモリロナイトの減少量として扱うことはできない。実際に試験後 の MB 吸着量がクニピア F®の MB 吸着量カタログ値(140 mmol/100 g)を超えるケースも観 察された。



闫连久仲	浸漬期間 (日)	No.	MB吸着量 (mmo1/100 g)			
仅俱木什			1回目	2回目	平均	
	20	1	144	142	143	
	30	2	144	142	143	
224	00	1	128	130	129	
単純	90	2	130	132	131	
化	140	1	140	138	139	
模	140	2	142	142	142	
· 凝	250	1	134	134	134	
TIX	250	2	134	132	133	
	360	1	132	136	134	
		2	132	136	134	
	30	1	128	130	129	
		2	128	128	128	
	90	1	118	118	118	
		2	118	118	118	
模	1.40	1	122	122	122	
液	140	2	120	122	121	
ΪΧ	250	1	122	122	122	
	200	2	122	122	122	
	260	1	118	120	119	
	360	2	118	120	119	

表-1 MB 吸着量の測定結果

※クニミネ工業社のクニピア F®のカタログ値(140 mmol/100 g)

浸漬条件	浸漬期間 (日)	No.	陽イオン交換容量 (meq/100 g)
セント海水で	140	1	123. 2
セメント海水糸 地下水 単純化模擬液	140	2	123.8
	360	1	121.1
		2	121.0
	140	1	106. 7
セメント海水系 地下水模擬液		2	106.2
	0.00	1	108.4
	300	2	107.9

表-2 CEC 測定結果

闫洼冬州	浸漬期間	Ne	浸	是出カチオ	ーン(meq,	/100 g)	
仅俱未 件	(日)	110.	Na^+	K^+	Mg^{2^+}	Ca^{2+}	Total
	140	1	132.0	2.9	2.3	18.4	155.6
セメント海水糸		2	136.0	1.3	2.0	19.0	158.3
地十小 単幼 小 齿 擬	360	1	123.3	1.7	1.7	18.5	145.2
中视行现知道		2	124.7	1.6	2.4	19.3	148.0
セメント海水系	140	1	44.8	82.3	0.9	29.7	157.7
		2	45.1	84.4	1.2	32.3	163.0
地下水模擬液	360	1	40.0	76.7	0.8	30.2	147.7
	300	2	39.1	78.3	1.0	30.8	149.2

表-3 LC 測定結果

付録-6 浸漬試験のために調製した溶液の化学平衡計算

1. 浸漬試験のために調製した溶液の化学平衡計

1.1 化学平衡計算の方法

地球化学計算コード PHREEQC ¹⁾および熱力学データベース 050700c0.tdb ²⁾を使用し, ク ニピア F®の浸漬試験のために調製した模擬液の組成を計算した。計算の手順として,まず, イオン交換水に,メーカ(八洲薬品社)が報告している人工海水中の塩類 ³⁾を添加した。 次に,水酸化カリウムと水酸化ナトリウムをモル比7:3 で合計 0.35 mol/dm³となるように 添加した。続いて,ポルトランダイトを飽和平衡させた。ポルトランダイトは過飽和であ れば沈殿し,未飽和であれば溶解するものとして,飽和平衡に達するまで計算した。この とき同時に,過飽和であれば沈殿する鉱物として,カルサイト,ドロマイトおよびブルー サイトを設定した。

1.2 化学平衡計算結果

イオン交換水に模擬海水中の塩類を添加した後の溶液組成を表-1 に示し、ポルトランダ イトと飽和平衡させた後の溶液組成を表-2 に示す。

ポルトランダイトと飽和平衡させた際には、ポルトランダイト (Ca (OH)₂) 5.6e-3 mole が沈殿し、また、ブルーサイト (Mg (OH)₂) 5.5e-2 mole,カルサイト (CaCO₃) 2.2e-3 mole がそれぞれ沈殿し、平衡となった。このとき、ドロマイト (CaMg (CO₃)₂) は沈殿しなかった。 なお、これらの沈殿量は、溶媒 1.0 kg に対するモル量である。

 ¹⁾ Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2) a computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations. US Geol. Surv. Water Resour. Inv. Rep. 99-4259, 312p.
 ²⁾ Arthur, R.C., Hiroshi Sasamoto, Chie Oda, Akira Honda, Masahiro Shibata, Yasushi Yoshida and Mikazu Yui, 2005. Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkaline, Argillaceous Systems, JNC Technical Report, JNC TN8400 2005-010.
 ³⁾ 武井明彦、藤田英樹、原澤修一、2004. セメント系材料の水理・力学特性の変遷に関す る研究(Ⅲ)、JNC TJ8400 2004-024.

рН	7.5
	質量モル濃度 (mol/kg)
В	4.4E-04
Br	9.2E-04
С	2.4E-03
Ca	1.0E-02
C1	5.6E-01
F	7.0E-05
К	1.0E-02
Mg	5.4E-02
Na	4.8E-01
S	2.9E-02
Sr	1.6E-04

表−1 模擬海水の溶液組成

рН	13.1
	質量モル濃度 (mol/kg)
В	4.4E-04
Br	9.2E-04
С	1.7E-04
Ca	2.6E-03
C1	5.6E-01
F	7.0E-05
К	2.5E-01
Mg	3.6E-09
Na	5.8E-01
S	2.9E-02
Sr	1.6E-04

表-2 ポルトランダイトと飽和平衡させた後の溶液組成

表 1. SI 基本单位						
甘大昌	SI 基本単位					
巫平里	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	А				
熱力学温度	ケルビン	Κ				
物質量	モル	mol				
光度	カンデラ	cd				

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例						
ar da SI 表	基本単位					
和立重 名称	記号					
面 積 平方メートル	m ²					
体 積 立法メートル	m ³					
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s					
加速度メートル毎秒毎	秒 m/s ²					
波 数 毎メートル	m ⁻¹					
密度, 質量密度キログラム毎立方	メートル kg/m ³					
面 積 密 度キログラム毎平方	メートル kg/m ²					
比体積 立方メートル毎キ	ログラム m ³ /kg					
電 流 密 度 アンペア毎平方	メートル A/m^2					
磁界の強さアンペア毎メー	トル A/m					
量濃度(a),濃度モル毎立方メー	トル mol/m ³					
質量濃度 キログラム毎立法	メートル kg/m ³					
輝 度 カンデラ毎平方	メートル cd/m^2					
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1					
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1					

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

		SI 組立単位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
平 面 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
· 体 催	ステラジア、(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ¹	
力 力	ニュートン	N		m kg s ⁻²	
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²	
エネルギー、仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕事率,工率,放射束	ワット	w	J/s	$m^2 kg s^{-3}$	
電荷,電気量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²	
カーマ		, and	0.115		
線量当量,周辺線量当量,方向	SUNCE (g)	Sv	J/kg	m ² a ⁻²	
性線量当量, 個人線量当量		50	orkg	III 8	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性抜種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を通の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘质	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$	
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$	
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$	
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語					
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60s				
時	h	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	۰	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$				

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される剱旭が夫缺的に待られるもの						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J				
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg				
統一原子質量単位	u	1u=1 Da				
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m				

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値			
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m			
海		里	М	1 M=1852m			
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²			
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np				
ベ		N	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.			
デ	ジベ	N	dB -				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位					
名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 2} \text{ ms}^{\cdot 2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹			

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
	3	名利	尓		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	Ŧ		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			ン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています