

セメント系材料の浸出液の地質媒体への影響評価

—大型カラム試験設備を用いた高pHブルームの岩盤への影響試験—

(試験報告)

2000年5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。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

セメント系材料の浸出液の地質媒体への影響評価
－大型カラム試験設備を用いた高pHプルームの岩盤への影響試験－
(試験報告)

加藤 大生*, 佐藤 光吉**, 大和田 仁***,
三原 守弘***, 大井 貴夫***

要 旨

TRU廃棄物の処分システムには多量のセメント系材料の使用が検討されており、セメント系材料からの高アルカリ性の浸出液の拡がりによって処分場周辺岩盤が溶出し、二次鉱物が析出すると考えられている。この浸出液の拡がりは高pHプルームと呼ばれている。高pHプルームは地下水の流れに沿って徐々に拡がることから、二次鉱物を含む岩石の性状や地下水の成分は時間的あるいは空間的に変遷することが予想される。しかし、これまで二次鉱物及び地下水成分の時間的、空間的変遷についての知見は得られていない。

このため、本研究では二次鉱物及び地下水成分の変遷に関する知見を得ることを目的としたカラム試験を実施した。総延長4m、内径3.7cmの大型カラムに粉碎した花崗閃緑岩を充填し、80℃の恒温槽中においてpH13.3の模擬セメント浸出液 (Na:0.1mol/l、K:0.1mol/l、Ca:0.002mol/l) を流量0.1ml/minで7ヵ月間通水した結果、カラムの上流においてカルサイト及びC-S-H系化合物、中流から下流にかけてはC-S-H系化合物が岩石の表面に二次鉱物として析出し、4m先まで高pHプルームの影響が及んでいることを確認した。また、Na、Kが支配的な模擬セメント浸出液では、岩石との反応によるpHの低下がみられなかった。

本研究により、高pHプルームの流れに沿った二次鉱物及び地下水成分の変遷に関する基礎的な知見が得られた。

* 検査開発株式会社

** 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ
(現 株式会社東芝)

*** 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

Effect of Leachate of Cementitious Materials on the Geological Media
-Experimental Study of the Influence of High pH Plume on Rock-

Hiroshige Kato*, Mitsuyoshi Sato**, Hitoshi Owada***,
Morihiro Mihara***, Takao Ohi***

ABSTRACT

Cementitious materials will be used in TRU waste disposal repository. In such cases, it is considered that the migration of alkaline leachates from cementitious materials, so called high pH plume, will cause dissolution of rock and precipitation of secondary minerals. In addition, the high pH plume will move along the flow of groundwater, so it is predicted that rock formation and components of high pH groundwater vary with time and space. However, time and spatial dependence of the variations of secondary minerals and groundwater components has not been clarified.

In order to acquire the data of variations of secondary minerals and groundwater components, we carried out the rock alteration experiments with column method. The crushed granodiorite was filled into 4 meters length column (ϕ 3.7 cm) and artificial cement leachate (pH=13.3; Na=0.1mol/l, K=0.1mol/l, Ca=0.002mol/l) was streamed at flow rates of 0.1 ml/min for 7 months at 80°C. As the result, secondary minerals confirmed on the rock were calcite and C-S-H at upstream of column and C-S-H at mid-downstream. The pH value of the fluid dominated by Na and K did not be decreased by reaction with the rock.

In this study, the data relating to the effect of high pH plume on rock over the long term was acquired.

* Inspection Development company Ltd.

** Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works
(now Toshiba Corporation)

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

目 次

1. 緒論	1
2. 高pHプルームの概念	2
3. 試験方法	3
3.1 試験手法の選択	3
3.2 試験手順	4
4. 結果	6
4.1 岩石の分析結果	6
4.2 溶液の分析結果	8
5. 考察	9
5.1 二次鉱物の変遷	9
5.2 高 pH プルームが核種移行へ及ぼす影響	11
6. 結論	12
7. 参考文献	13
付録 本試験条件と実際の処分場条件の水量の比較	46

表 目 次

表-1 花崗閃緑岩のモード分析結果.....	14
表-2 カラムの特性.....	15
表-3 試験条件.....	16
表-4 各元素の分析方法及び定量下限値一覧.....	17
表-5 高pH溶液を通水した岩石の比表面積測定結果.....	18
表-6 高pHブルームが周辺岩盤に及ぼす影響と核種移行特性の変化.	19

図 目 次

図-1 セメント浸出液のpH変化の概念図.....	20
図-2 高pHブルームの概念図	21
図-3 IMAGE-GEOCHEMの外観	22
図-4 装置の概略	23
図-5 母岩のXRD結果	24
図-6 高pH溶液を2ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム2m地点よりサンプリング.....	25
図-7 高pH溶液を2ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム4m地点よりサンプリング.....	26
図-8 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム0m地点よりサンプリング	27
図-9 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム0.25m地点よりサンプリング	28
図-10 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム0.5m地点よりサンプリング	29
図-11 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム0.75m地点よりサンプリング	30
図-12 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム2m地点よりサンプリング	31
図-13 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム3m地点よりサンプリング	32
図-14 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、カラム4m地点よりサンプリング	33
図-15 母岩と高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の元素分布の比較	34
図-16 高pH溶液を7ヵ月通水した後のカラム位置ごとの岩石の様子 ..	35
図-17 通水溶液の成分の経時変化（高pH溶液）	36
図-18 通水溶液の成分の経時変化（蒸留水）	37
図-19 通水溶液のpHの経時変化	38
図-20 高pH溶液と岩石との反応により析出する二次鉱物の変遷の概念	39

写 真 目 次

写真-1～3	溶液を通水していない母岩の表面の電子顕微鏡写真	40
写真-4～7	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間2ヵ月、サンプリング位置2m)	41
写真-8	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間2ヵ月、サンプリング位置4m)	42
写真-9～10	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間3ヵ月、サンプリング位置4m)	42
写真-11～13	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間6ヵ月、サンプリング位置4m)	42
写真-14、15	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間7ヵ月、サンプリング位置0m)	43
写真-16	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間7ヵ月、サンプリング位置1m)	43
写真-17	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間7ヵ月、サンプリング位置2m)	43
写真-18、19	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間7ヵ月、サンプリング位置3m)	43
写真-20～25	高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間7ヵ月、サンプリング位置4m)	44
写真-26～28	蒸留水を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間2ヵ月、サンプリング位置2m)	45
写真-29	蒸留水を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真 (通水期間7ヵ月、サンプリング位置2m)	45

1. 緒論

現在検討されているTRU廃棄物の処分システムでは、廃棄体や充填材、構造躯体等へのセメント系材料の使用が考えられている¹⁾。セメント系材料を処分場に使用した場合、セメント系材料から溶出するナトリウムやカルシウム等のアルカリ成分によりpHの高くなった地下水が、その流れに沿って徐々に処分場周辺へ拡がることが予想される。このような高pH地下水の拡がりは高pHブルームと呼ばれている²⁾。

高pHブルームによって、処分場周辺における化学的環境の変化、岩盤の溶出や二次鉱物の析出が起こり、核種の岩石に対する分配係数や岩盤の透水係数が変化すると考えられる^{2,3,4)}。分配係数・透水係数の変化が処分場の安全性に及ぼす影響を評価するためには、解析によって高pHブルームを考慮した天然バリア（岩石）の長期的な変化を予測する必要がある。また、このような岩石の長期的な変化を現状のモデルで解析し、なおかつその結果についての妥当性を検証するためには、岩石と地下水との反応により生成する二次鉱物の把握が必要である。

高pHブルームによる岩石の変質に関する研究例として、Savageらは岩石のアルカリ変質試験をバッチ法及びカラム法で実施し、セメント浸出液を模擬した高pH溶液との反応により岩石（花崗岩）が溶解し、二次鉱物として岩石表面にカルシウム／シリカ比が0.5～1.5のC-S-H系化合物（Ca-Si-hydrate）が析出したことを報告している³⁾。また、Adlerらは粘土質の岩石と模擬セメント浸出液との反応によるC-A-S-H系化合物（Ca-Al-Si-hydrate）の析出を報告している⁴⁾。ここで、高pHブルームは地下水の流れに沿って徐々に拡がることから、二次鉱物を含む岩石の性状や地下水の成分が時間的あるいは空間的に変遷することが予想される。しかし、二次鉱物及び地下水成分のこのような変遷についての報告はされていないのが現状である。

本研究では、高pH地下水との反応により岩石の表面に析出する二次鉱物が時間的、空間的に変遷する現象についての知見を得るために、4mの大型カラムを用いた岩石のアルカリ変質試験を実施したので報告する。

2. 高pHプルームの概念

図-1にセメント浸出液のpHの変化の概念図を示す。この図はAtkinson⁵⁾とBradburyら⁶⁾の報告を基に作成したものである。セメント浸出液のpHは、初期においてナトリウム、カリウムの溶出によって13以上を示す。その後、浸出液のpHはポルトランダイト（水酸化カルシウム）の溶出に支配され、12.5程度でしばらく維持される。ポルトランダイトが枯渇した後、浸出液のpHはC-S-Hゲルに含まれるカルシウムの溶出によって支配され、その溶出量の減少に従って徐々に低下し、やがては地下水と同等のpHとなる。それぞれの過程をBradburyらはRegion I、II、IIIと定義している⁶⁾。

図-2に高pHプルームの概念を示す。セメント系材料から溶出したアルカリ成分によって高pHとなった地下水のpHは、上述したように徐々に低下することが考えられている。しかし、処分場周辺における地下水のpHは10.5以上のアルカリ性で10⁴年以上という非常に長い期間維持されることが予想されている⁵⁾。

3. 試験方法

3.1 試験手法の選択

試験手法としてバッチ法及びカラム法が考えられた。バッチ法ではセメント系材料からの距離と時間による二次鉱物の変遷の様子を調べることが困難であると考え、本研究ではカラム法を採用した。Savageらは長さ8cmの比較的短いカラムを使用して試験を実施している³⁾が、二次鉱物の空間的な変遷について確認していない。このため、大型の試験装置（IMAGE-GEOCHEM）を用い、カラム長さが4mの試験を実施した。図-3に試験装置の外観を示す。本装置はカラム、恒温槽、定流量ポンプにより構成される。以下にそれぞれの仕様を示す。

カラム：大きさ 外寸法 4.3 cm (φ) × 100 cm (L)
 内寸法 3.7 cm (φ) × 99.5 cm (L)
 容積 1070 cm³
 材質 SUS 304
 耐圧 12 kg/cm²

恒温槽： 大きさ 290 cm (W) × 64 cm (D) × 239 cm (H)
 制御温度 常温～90 °C

定流量ポンプ：流量 0.02～0.15 ml/min
 最大吐出圧 60 kg/cm²

図-4に装置の概略を示す。本装置は粉碎した岩石を充填したカラムを恒温槽内に設置し、定流量ポンプで溶液を通水する仕組みになっている。また、恒温槽には長さ1mのカラムを10本まで設置することでき、それらを直列につなぐことによりカラム長さを最長で10mまで設定することが可能である。本研究では図-4に示すように岩石を充填したカラムを6本設置し、そのうち4本を直列につなぎ総延長を4mとしてセメント浸出液を模擬した高pH溶液を通水した。残りの2本のカラムについては、ブランクとして、直列につなぎ総延長を2mにして蒸留水を通水した。

なお、カラム外で生成した沈殿物等のカラム内への侵入、及び、岩石等による配管の詰りを防止するため、図-4に示すようにカラムの両端に焼結フィルターを設置した。また、Oリングには、耐アルカリ性のもの（EPT製）を用いた。

3.2 試験手順

(1) 粉碎岩石の準備

対象岩石として、釜石鉱山の250mレベルW-18地点⁷⁾より採取した花崗閃緑岩を用いた。花崗閃緑岩のモード分析結果を表-1に示す。花崗閃緑岩はおよそ7割が斜長石と石英で構成されていた。この花崗閃緑岩をタンクスティン乳鉢で粉碎し、粒度が1~5mmとなるようにふるいで分けた。粉碎後は、岩石表面に付着した微粉末を除去するため、蒸留水で洗浄し、自然乾燥させた。粉碎した岩石の乾燥密度を水中飽和法⁸⁾により測定した結果、2.7g/cm³であった。

(2) 岩石の充填

(1)で用意した粉碎岩石を6本のカラムに充填した。それぞれのカラムに均一に岩石を充填するため、充填後は重量計を用い、岩石の充填量を確認した。表-2にそれぞれのカラムの特性を示す。この表に示すように、各カラムに均一に岩石が充填され、カラムの空隙は約42%であった。

(3) 高pH溶液の準備

2.で述べたように、セメント浸出液のpHは初期のRegion Iにおいて最も高く、岩石に対し最も変質しやすい条件となることが予想される。本研究では、Region Iのセメント浸出液を水酸化ナトリウム(0.1mol/l)、水酸化カリウム(0.1mol/l)、水酸化カルシウム(0.002mol/l)を用いて模擬した。各試薬が所定濃度となるように蒸留水に溶かしてpH13.3の高pH溶液を調製した。調製後は、ろ紙#5B、0.45μmフィルターの順でろ過を行い、沈殿物を除去した。

(4) カラム試験

表-3に試験条件を示す。岩石を充填したカラムを図-4に示すように恒温槽内に設置し、各カラムを所定の溶液で冠水した。その後、定流量ポンプで安定して送液できる流量である0.1ml/minで各溶液の通水を開始した。カラムへの各溶液の通水を開始してから7日後に恒温槽のヒータを作動させ、処分場の温度上限値と考えられている80℃¹⁾で恒温槽内の温度を維持し、約7ヶ月間のカラム試験を実施した。

ここで、以下の仮定のもとで本試験条件と実処分場条件において、単位体積あたりの岩石に供給される1日分のアルカリ量を比較すると、本試験条件での流量(0.1ml/min)で供給されるアルカリ量は、処分場条件でのそれの約2×10⁷倍(5,800年分)に相当する*1。

仮定1 本試験条件の流量において岩石と溶液との反応が十分平衡に達する。

仮定2 岩石の溶解は比表面積に依存せず、溶出ししうる成分はすべて溶出する。

仮定3 地下深部における水理条件として、透水係数を 10^{-9} m/s、動水勾配を0.01、空隙を20%と仮定した。

*¹詳細については付録参照のこと。

(5) サンプリング

岩石については、各溶液を通水してから2、3、6ヵ月後に図-4に示す岩石サンプリングポイント（上流：0m地点、中流：2m地点、下流：4m地点）よりサンプリングした。また、通水終了後（7ヵ月後）には、カラムを解体し、0m、0.25m、0.5m、0.75m、1m、2m、3m、4m地点から岩石をサンプリングした。

溶液については、最も下流側のカラムの出口（図-4に示す溶液サンプリングポイント）よりサンプリングした。

(6) 分析

サンプリングした岩石について、走査型電子顕微鏡（SEM）により表面状態を観察し、X線回折分析（XRD）及びエネルギー分散型X線分析（EDX）により二次鉱物の同定を行った。XRDを行う際には、バックグラウンドにおける母岩の回折強度を小さくするため、蒸留水にサンプリングした岩石を浸漬させ、超音波振動により二次鉱物を母岩から分離した。次にその上澄液をサンプリングし、乾燥させたもの（水ひ試料）をXRDにより分析した。さらに、高pH溶液を通水したカラムの下流からサンプリングした岩石について、N₂ガスを用いたBET 1点法^{*2}により比表面積を測定した。

カラム出口よりサンプリングした溶液については、pH測定、液組成分析を行った。液組成分析では、Na、Kを原子吸光（AAS）で、Al、Si、Ca、Feを誘導結合プラズマ原子発光分光（ICP）で、SO₄²⁻をイオンクロマトグラフでそれぞれ分析した。表-4に各元素の分析方法及び定量下限値をまとめた。

*² BET法とは、測定対象物に気体を吸着させ、その単分子吸着量から測定対象物の比表面積を求める方法であり、多点法と1点法がある。1点法では、単分子吸着量に相当する圧力の気体の吸着量を測定し、表面積を求める。

4. 結果

4.1 岩石の分析結果

(1) XRD結果

図-5に母岩（試験前の岩石）のXRD結果を示す。図-6、7に高pH溶液を2ヵ月間通水したカラム2m及び4m地点の岩石の水ひ試料のXRD結果をそれぞれ示す。これらを比較して分かるように、高pH溶液を2ヵ月通水後、カラム2m及び4m地点からサンプリングした岩石のXRDには、母岩以外の鉱物のピーク、すなわち二次鉱物のピークが存在しなかった。

図-8～14に高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果を示す。0m地点（カラム入口）のXRD結果では、図-8に示すように二次鉱物としてカルサイトと結晶性のC-S-H系化合物である11Åトバモライト（以下トバモライトという）の明確なピークが確認された。また、0.25m、0.5m、0.75m地点（図-9～11）では、いずれの地点においても、0m地点（図-8）で示されたトバモライトのピークは確認されたが、カルサイトのピークは確認されなかった。2m地点（図-12）では、微弱なカルサイトのピークが確認され、上流の0～0.75m地点（図-8～9）で示されたトバモライトのピークは確認されなかった。3m地点（図-13）では、二次鉱物のものと考えられるピークが何も確認されなかった。また4m地点（図-14）では、30～40°に明確ではないものの低結晶性のC-S-H系化合物（以下、低結晶性C-S-H相と称す）のものと推定される細かいピークが確認された。

(2) SEM観察及びEDXによる元素分布測定結果

写真-1～3に母岩の表面の電子顕微鏡写真を、写真-4～25に高pH溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真を、写真-26～29に蒸留水を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真をそれぞれ示す。

写真-1～3から分かるように、いずれの倍率で観察しても、母岩の表面には粉碎時の劈開面や亀裂がみられるが、析出物は存在しなかった。また、蒸留水を通水した試料（写真-26～29）についても、母岩との大きな違いはみられなかった。

一方、高pH溶液を2ヵ月通水した試料（写真4～8）では、2m地点及び4m地点において網目状の析出物が観察された。この網目状の析出物は、通水期間2ヵ月と7ヵ月の4m地点の電子顕微鏡写真（それぞれ写真-8、20）の比較から分かるように、通水時間が長くなるほど析出量が増大していた。通水期間7ヵ月の試料では、0m地点（写真-14、15）において薄片層状の二次鉱物が観察された。それより下流では網目状の二次鉱物が観察された。また、最も下流の4m地点では、網目状のものに加えて、頻度は低いものの写真-22、25に示すよう

な針状の二次鉱物が観察された。このほかに、写真-10、12、24に示すような板状に成長した二次鉱物も確認された。

図-15に母岩と高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の元素分布の比較を示す。これらの元素分布はEDXにより測定した結果である。図-15に示すように、カラム0m地点で観察された薄片層状の二次鉱物には母岩と比較してCaが多く含まれていた。この結果と試験を大気下で実施したことから、薄片層状の二次鉱物はカルサイトであると推定される。一方、カラム3m地点で観察された網目状の二次鉱物はCaとSiが多く含まれていることが分かった。

網目状、針状の二次鉱物の析出はSavageらの研究においても確認され、網目状のものについては低結晶性C-S-H相、針状のものについてはエトリンガイドであると報告している³⁾。本研究で観察されたそれらの析出物についても、試験条件、XRDによる同定、SEMによる表面観察、EDXによる元素分布から、網目状のものは低結晶性C-S-H相、針状のものはエトリンガイドもしくはゼオライト系鉱物の一種であるフィリップサイトと考えられる。また、写真-10、12、24に示される板状に成長した二次鉱物は、試験条件ならびに結晶形態からトバモライトと推定した。

(3) 通水試験後の岩石の外観

図-16に高pH溶液を7ヵ月通水した後のカラム位置ごとの岩石の様子を示す。これらの岩石は、試験終了後カラムを解体して各地点からサンプリングした後、炭酸化の影響を防ぐため直ちに雰囲気制御グローブボックス（Ar雰囲気）内に搬入し、乾燥させたものである。この図に示すように、カラム入口（0m地点）の岩石の外観は、カルサイトの析出により0.5m地点以降のものと比較して白色化していた。この白色化はカラムの入口から15cm程度まで達していた。また、0.5m地点以降の岩石については、SEM及びXRDにより二次鉱物の析出が確認されたが、外観に違いはみられなかった。

(4) 比表面積の変化

表-5に高pH溶液を通水した岩石の比表面積測定結果を示す。比表面積測定はカラム4m地点よりサンプリングした岩石について実施した。表-5に示すように、高pH溶液を通水することにより、高pH溶液を通水する前（母岩）と比較して比表面積が2倍以上になった。

4.2 溶液の分析結果

(1) 成分の変化

図-17、18に溶液サンプリングポイントにおける高pH溶液と蒸留水の成分の経時変化をそれぞれ示す。図-17から、高pH溶液に含まれるNa、Kの濃度は、試験期間中（7ヵ月間）、初期に添加した量（Na、Kとも 0.1mol/l ）のまま一定の値を示した。Caについては、岩石に通水することにより初期に添加した量（ 0.002mol/l ）より3桁程低下していた。このことから、高pH溶液に初期に添加したCaの大部分が二次鉱物として析出していることが分かった。一方、図-18より、蒸留水では、Na、K、Caとともに $1 \times 10^{-4}\text{mol/l}$ 程度で溶出しており、試験期間中、それらの濃度に変化は見られなかった。

その他の主な成分として、いずれのケースにおいてもSi、Alが岩石から溶出していた。図-17、18を比較して、Siについては、高pH溶液では 10^{-2}mol/l のオーダで岩石から溶出しているのに対し、蒸留水で 10^{-4}mol/l のオーダで一定して溶出していることから、高アルカリ条件ではSiの溶出が促進されたことが分かった。また、高pH溶液でのSiの溶出量は、時間の経過とともにわずかに増加した。一方、Alについては、高pH溶液では試験開始直後においてAlが $2 \times 10^{-2}\text{mol/l}$ 程溶出していたが、その溶出量は時間の経過とともに減少し、試験終了時には $5 \times 10^{-5}\text{mol/l}$ 程度であった。蒸留水ではAlが 10^{-5}mol/l のオーダで一定して溶出していた。

(2) pHの変化

図-19に溶液サンプリングポイントにおける高pH溶液と蒸留水のpHの経時変化を示す。高pH溶液では、試験開始から終了（7ヵ月後）までpHは13前後で維持され、通水前のpHから変化しなかった。このことから、岩石との反応によって生じるNa、Kの濃度変化は、添加したそれぞれの量（各 0.1mol/l ）よりもはるかに小さいと考えられる。

一方、蒸留水では徐々にpHの上昇が確認され、試験終了時にはpHが9.2程度まで上昇した。これは岩石からNa、K、Ca等のアルカリ成分が溶出したことに起因すると考えらる。釜石鉱山の250mレベルW-18地点における実際の地下水のpHは9.6～10.0程度であるため⁷⁾、試験期間を延長する、あるいはカラム長さを2mより長くすることにより、カラム出口のpHはさらに上昇するものと考えられる。

5. 考察

5.1 二次鉱物の変遷

高pH溶液を7ヶ月間通水することにより、カラムの入口から15cm程度までカルサイトの析出が確認された。またカラムのほぼ全域において低結晶性C-S-H相が確認され、この鉱物の析出量は通水期間が長くなるにともない増大していた。さらにカラムの入口から0.75m地点までは結晶性のトバモライトの析出が確認された。このトバモライトはSEMにより下流においても観察された。

以上の試験結果から考えられる二次鉱物の時間的・空間的な変遷を図-20に示す。図-20について、各鉱物の領域における色の濃さは相対的な析出量を表す。それぞれの鉱物の析出について以下に述べる。

カルサイト

カルサイトの析出は、以下に述べるように高pH溶液が岩石と反応し、岩石から様々な成分が溶出することにより、それまで微妙に保たれていた平衡が崩れ、カルシウムと炭酸イオンが反応したことにより生じたと考えられる。

カルサイトの析出はカラムの入口付近で起きていた。本試験は大気下で実施したため、タンク（図-4参照）内で、大気中の炭酸ガスの溶け込みにより、高pH溶液に炭酸イオンが混入したことが考えられる。この大気起源の炭酸イオンとカルシウムは即座に反応しカルサイトとして沈殿することが予想される。また、カラムの入口に設置した焼結フィルターの表面にはカルサイトの析出が見られなかったことから、タンク内で沈殿したカルサイトがカラムまで輸送されたとは考えられない。これらのことから、タンク内ではカルサイトの沈殿反応が起きていたが、タンクから送液された後は、岩石と接触するまでカルシウムと炭酸イオンが反応せず、平衡が保たれていたと推定される。したがって、カラム入口でのカルサイトの析出は、高pH溶液と岩石が反応し、それまで保たれていた微妙な平衡が崩れたことによって生じたものと考えられる。また、7ヶ月後では、カルサイトはカラム入口から約15cmまで析出していたが、時間の経過とともにその生成領域は下流へ拡がっていくものと推定される。

上述したとおり、カルサイトの析出は大気起源の炭酸イオンに起因していると考察した。一方、地下深部では一般的に地下水とカルサイトは常に平衡状態にあると考えられている⁹⁾。これは、カルサイトが地下深部において多量に存在する鉱物であり、カルサイトのような溶解・沈殿反応が速い物質ならば、地下水の滞留時間が非常に長いため常に平衡状態に達していると考えられるためである。地下水とカルサイトが平衡状態にあることは、

すなわち地下水中のカルシウムと炭酸イオンが平衡状態にあることを意味する。したがって、地下深部においても、高pHブルームの影響により処分施設周辺においてカルサイトが析出すると推測される。

C-S-H系化合物

分析により、低結晶性C-S-H相と結晶性のトバモライトの2種類のC-S-H系化合物が確認された。これらのC-S-H系化合物は、もともと溶液に含まれていたカルシウムと岩石から溶出したカルシウム及びシリカが液相で過飽和となり析出したものと考えられる。また、溶液中のこれらの成分濃度はカラムの場所ごとに異なり、このため析出したC-S-H系化合物もカラムの場所によって若干異なると考えられる。

本研究では析出したC-S-H系化合物のカルシウム／シリカ比までは定量できなかった。しかし、カラム出口（溶液サンプリングポイント）において高pH溶液には高濃度のシリカが溶存し、またそれとは対照的にカルシウムの濃度が低かった。このことから、C-S-H系化合物のカルシウム／シリカ比は下流に向かうほど小さくなることが推定される。また、XRDにより上流（0～0.75m地点）でトバモライトが同定された。しかし、このトバモライトは4m地点においてはSEMによって所々で観察された程度であり、XRDによる同定はされなかった。このことから、上流ほどトバモライトの析出量が多いと推定され、十分にカルシウムが存在する上流側においてはトバモライトのような結晶性のC-S-H系化合物が析出しやすいと考察される。

ここで、実際の処分場の温度条件を考えた場合、本試験条件である80℃より低いことが考えられる。C-S-H系化合物のうち、低結晶性C-S-H相については、その安定領域は100℃以下である¹⁰⁾ことから、より低い温度条件でも十分に析出することが予想できる。本試験では層間が11Åのトバモライトが同定された。トバモライトには層間が14Å、11Å、9Åのものが知られている。Leaらによれば、各トバモライトの生成温度は14Åで60℃以上、11Åで110～140℃、9Åで250～450℃である¹¹⁾。一方、Atkinsらは、低結晶性C-S-H相が60℃以上で結晶化をはじめ、85℃で11Åトバモライトへと変化すると報告している¹²⁾。このように低結晶性C-S-H相から11Åトバモライトへの相転移温度には報告によって幅がある。したがって、本試験の条件でも長期間の養生によって11Åトバモライトが析出することが十分考えられる。今後、実際の処分場でトバモライトが析出するか議論するためには、C-S-H系化合物の温度による変遷を調査しなければならない。

上述したように、試験の結果、カラムの上流ではカルサイト及びC-S-H系化合物、中流から下流にかけてはC-S-H系化合物が主な二次鉱物であることが示された。Savageらの試験結果においてもC-S-H系化合物が支配的な二次鉱物で

あったが、長期的にはそれがゼオライトあるいは長石になっていることが解析によって示されている³⁾。本研究では、高pHプルームの影響を評価するために必要とされる基礎的データ、例えば析出する二次鉱物の種類や高pH溶液の成分の時間的な変化を取得できた。これらのデータを基に、物質移行と化学反応を連成させ、さらに化学反応に伴うモデルの空隙変化を反映させることができ可能な解析モデル等を用いて計算し、Savageらの結果と比較するとともに、長期的な岩盤の変化を評価する予定である。また、本研究では速度論的なデータについて取得していない。今後、それらのデータの取得の必要性についての検討も行う予定である。

5.2 高pHプルームが核種移行へ及ぼす影響

高pHプルームの影響によって起こると予測される周辺岩盤の特性の変化と、そのときの核種移行特性への影響を表-6に示す。

高pHプルームによって、岩石の溶解にともなう亀裂の拡張、空隙率の上昇、比表面積の変化が予測される。また、二次鉱物の析出にともなう亀裂の閉塞、比表面積の変化、二次鉱物の被覆が予測される。

比表面積の変化については、Holgerssonらが閃緑岩を用いた浸漬試験で2~3倍に比表面積が増大したことを報告しており¹³⁾、本研究の結果もこれと一致している。比表面積の変化は、岩石の溶解による表面形状の変化や亀裂の拡張の他、岩石表面への二次鉱物の析出によるものと考えられる。

本研究において観察された二次鉱物は主にC-S-H系化合物であった。岩石の表面が二次鉱物に覆われると、二次鉱物への核種の分配によって核種の移行特性が変化すると考えられる。C-S-H系化合物のうち、カルシウム/シリカ比の低いものについては、その表面電位が負に帶電するため、Cs等の陽イオンの吸着能を有することが報告されている^{14,15)}。また、Ewartらによって、Pu及びAmがC-S-H系化合物によく吸着することが報告されている¹⁶⁾。

本研究では粉碎した岩石を使用したため、岩石の亀裂の拡張あるいは閉塞、岩石の空隙率の変化を知ることはできなかったが、二次鉱物の核種吸着能が母岩と同等以上であれば、二次鉱物の析出や比表面積の増大による核種の移行遅延効果が期待できると考えられる。しかし、岩石表面へのC-S-H系化合物の析出による核種の吸着特性の変化についての研究例はない。このため、二次鉱物が析出することにより岩石に対する核種の分配係数等がどのように変化するのかを調査する必要がある。

6. 結論

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 総延長が4mのカラムに粉碎した花崗閃緑岩を充填し、温度80℃の条件下、0.1ml/minの流量で模擬セメント浸出液を7ヶ月通水した。その結果、岩石の表面にはカラムの上流においてカルサイト及びC-S-H系化合物、中流から下流にかけてはC-S-H系化合物が析出し、4m先まで高pHブルームの影響が及んでいることを確認した。
- ・ カラムの位置により析出したC-S-H系化合物は異なり、上流において結晶性のC-S-H系化合物であるトバモライトが析出しやすい傾向にあった。また、低結晶性C-S-H相が上流から下流まで析出していた。
- ・ 岩石との反応によるNa、K（各0.1mol/l）が支配的な模擬セメント浸出液のpHの低下はみられなかった。
- ・ カラム出口での模擬セメント浸出液に含まれる成分のうち、カルシウムについては岩石との反応により 10^{-3} mol/lから 10^{-6} mol/lへ濃度が低下した。このことから、ほとんどのカルシウムが二次鉱物として析出していることが分かった。また、岩石からは 10^{-2} mol/lのオーダでシリカが溶出した。

7. 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構 電気事業連合会 共同作業チーム：TRU廃棄物処分概念検討書，JNC TY1400 2000-001 / TRU TR-2000-01, 2000
- 2) C. A. Rochelle, K. Bateman, A. E. Milodowski, D. J. Noy, J. Pearce, D. Savage : Reaction of cement pore fluids with rock : Implications for the migration of radionuclides, Water-Rock Interaction, Kharaka & Maest (eds), 1992
- 3) D. Savage, K. Bateman, P. Hill, C. Hughes, A. Milodowski, J. Pearce, E. Rae, C. A. Rochelle : Rate and mechanism of the reaction of silicates with cement pore fluids, Applied Clay Science, 7, 1992
- 4) M. Adler, U. Mader, H. N. Waber : High-pH alteration of argillaceous rocks : an experimental study, Scheiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 79, pp.445-454, 1999
- 5) A. Atkinson : The time dependence of pH within a repository for radioactive waste disposal, AERE-R 11777, 1985
- 6) M. H. Bradbury, F. A. Sarott : Sorption Database for the cementitious Near-Field of a L/ILW repository for performance assessment, PSI Bericht Nr.95-06, 1995
- 7) 笹本広, 瀬尾俊弘, 油井三和, 佐々木康雄：釜石鉱山における地下水の地球化学的研究 (I), PNC TN8410 96-203, 1996
- 8) H. Sato, T. Shibutani, Y. Tachi, K. Ota, K. Amano : Diffusion Behaviour of Nuclides Considering Pathways in Fractured Crystalline Rocks, PNC TN8410 97-127, 1997
- 9) Nagra bulletin (Nagra広報), Special Edition Dec. 1989
- 10) 荒井康夫：セメントの材料化学, 大日本図書(株), 1984
- 11) F. M. Lea : The chemistry of cement and concrete, Edward Arnold Ltd., pp.188, 1970
- 12) M. Atkins, F. P. Glasser, L. P. Moroni : The long-term properties of cement and concrete, Material Research Society Symposium Proceeding, Vol.212, 1991
- 13) S. Holgersson, Y. Albinsson : Interaction of cement pore fluids with host rock and the effects on HTO, Na and Cs diffusion, Radiochim. Acta 82, pp.197-203, 1998
- 14) J. A. Berry : The Role of Sorption onto the Borrowdale Volcanic Group in Proving Chemical Containment for a Potential Repository at Sellafield, Chemical Containment of Waste in the Geosphere, 3/4 Sept. 1996
- 15) T. G. Heath, D. J. Ilet, C. J. Tweed : Thermodynamic Modelling of the Sorption of Radioelements onto Cementitious Materials, Material Research Society Symposium Proceeding, Vol.412, 1996
- 16) F. T. Ewart, R. McCrohon : Mechanisms of sorption In the near-field, AERE-R 13800, 1990

表-1 花崗閃綠岩のモード分析結果

	X面		Y面		Z面		平均値		標準偏差
	カウント数	%	カウント数	%	カウント数	%	カウント数	%	
斜長石	723	48.2	975	65.0	703	46.9	800	53.4	7.8
石英	392	26.1	251	16.7	257	17.1	300	20.0	4.1
カリ長石	14	0.9	41	2.7	9	0.6	21	1.4	0.9
普通角閃石	133	8.9	80	5.3	178	11.9	130	8.7	2.2
黒雲母	87	5.8	130	8.7	195	13.0	137	9.2	2.6
絹雲母	85	5.7	13	0.9	2	0.1	33	2.2	2.3
粘土鉱物	57	3.8	7	0.5	140	9.3	68	4.5	3.2
ざくろ石	1	0.1	0	0.0	3	0.2	1	0.1	0.1
螢石	1	0.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
ジルコン	1	0.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
炭酸塩鉱物	1	0.1	0	0.0	3	0.2	1	0.1	0.1
不透明鉱物	5	0.3	3	0.2	10	0.7	6	0.4	0.2
合計	1500	100.0	1500	100.0	1500	100.0	1500	100.0	

表-2 カラムの特性

カラムNo.	充填量 (g)	充填体積 (cm ³)	空隙 (cm ³)	空隙率(%)
1	1670	619	451	42.2
2	1663	616	454	42.4
3	1669	618	452	42.2
4	1697	629	441	41.3
5	1679	622	448	41.9
6	1653	612	458	42.8

充填量： 充填した岩石の重量 (g)

充填体積： 充填した岩石の体積 (cm³)

$$(\text{充填体積}) = (\text{岩石充填量}) / (\text{岩石の乾燥密度}^{*1})$$

空隙： カラムの空隙体積 (cm³)

$$(\text{空隙体積}) = (\text{カラム内容積}^{*2}) - (\text{充填体積})$$

空隙率： カラムの空隙率 (%)

$$(\text{空隙率}) = (\text{空隙}) / (\text{カラム内容積})$$

*1 2.7g/cm³

*2 1070cm³

表-3 試験条件

岩 石	花崗閃緑岩 (1~5mmに粉碎)
通水液	高pH溶液 (Region Iのセメント浸出液を模擬した溶液) (高pH溶液の組成) NaOH 0.1mol/l KOH 0.1mol/l Ca(OH) ₂ 0.002mol/l pH13.3
	蒸留水
カラム長さ	4m (高pH溶液系) 2m (蒸留水系)
流 量	0.1ml/min
温 度	80℃
試験期間	約7カ月
雰囲気	大気雰囲気

表-4 各元素の分析方法及び定量下限値一覧

元素	分析方法	定量下限値:ppm (mol/l)
Na	AAS	0.1 (4E-6)
Al	ICP	0.2 (7E-6)
Si	ICP	0.2 (7E-6)
K	AAS	0.3 (8E-6)
Ca	ICP	0.2 (5E-6)
Fe	ICP	0.3 (5E-6)
SO ₄ ²⁻	イオンクロマトグラフ	0.4 (4E-6)

表-5 高pH溶液を通水した岩石の比表面積測定結果

通水期間	比表面積 (m ² /g)
0ヵ月 (母岩)	0.0678
2ヵ月	0.164
6ヵ月	0.158
7ヵ月	0.134

N₂ガスを用いたBET法により測定。
カラム下流 (4m地点) よりサンプリングした岩石について測定を実施。

表-6 高pHプルームが周辺岩盤に及ぼす影響と核種移行特性の変化

周辺岩盤の特性変化		核種移行特性への影響
岩石の溶解	亀裂の拡張 (×)	透水係数の上昇
	空隙率の上昇 (×)	透水係数の上昇
	比表面積の変化 (○)	分配係数の変化
二次鉱物の析出	亀裂の閉塞 (×)	透水係数の低下
	比表面積の変化 (○)	分配係数の変化
	二次鉱物の被覆 (○)	分配係数の変化 (二次鉱物への核種の分配)

○：本研究において確認した項目

×：本研究において未確認の項目

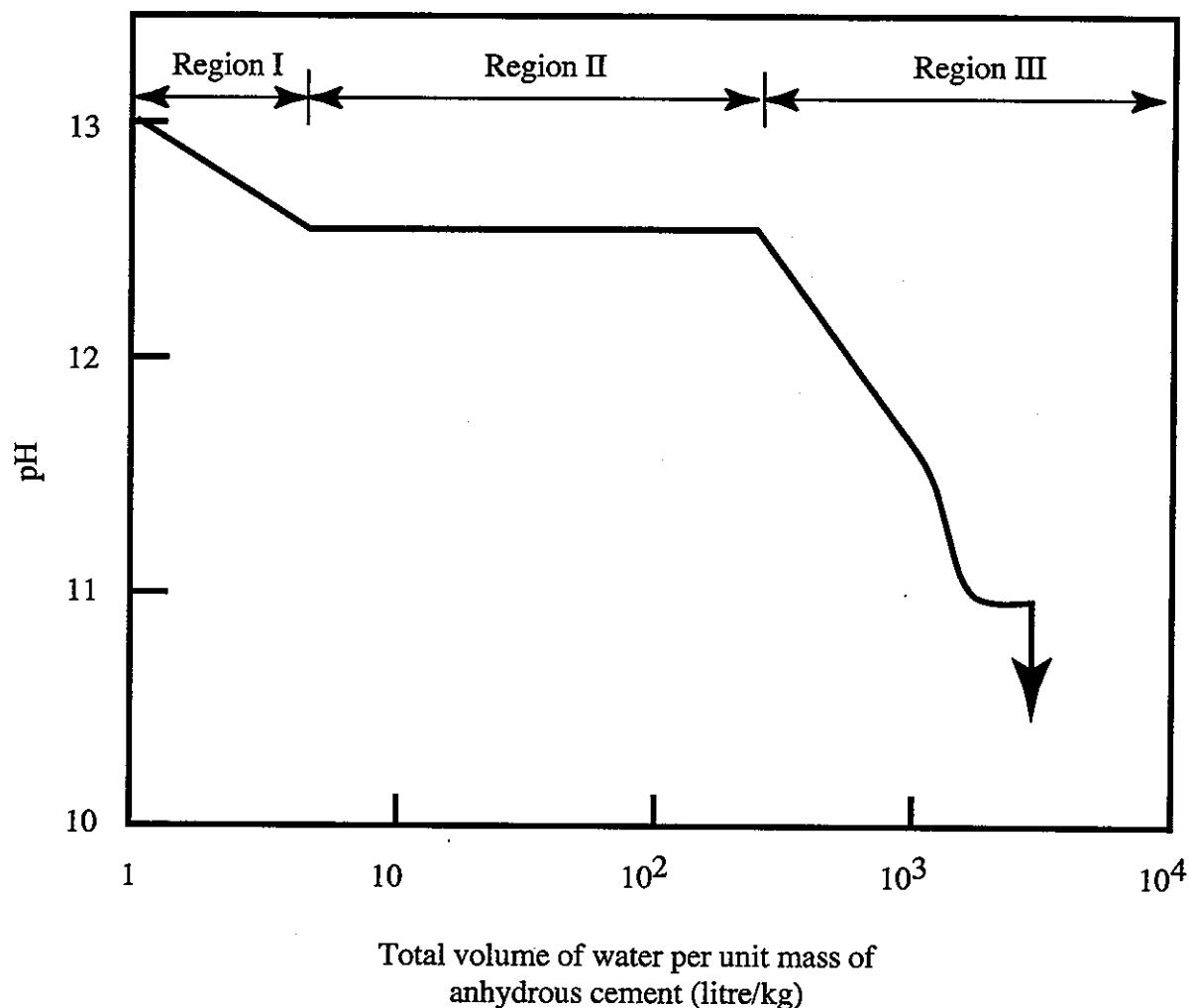


図-1 セメント浸出液のpH変化の概念図

Atkinson(1985)とBradburyら(1995)の報告を基に作成

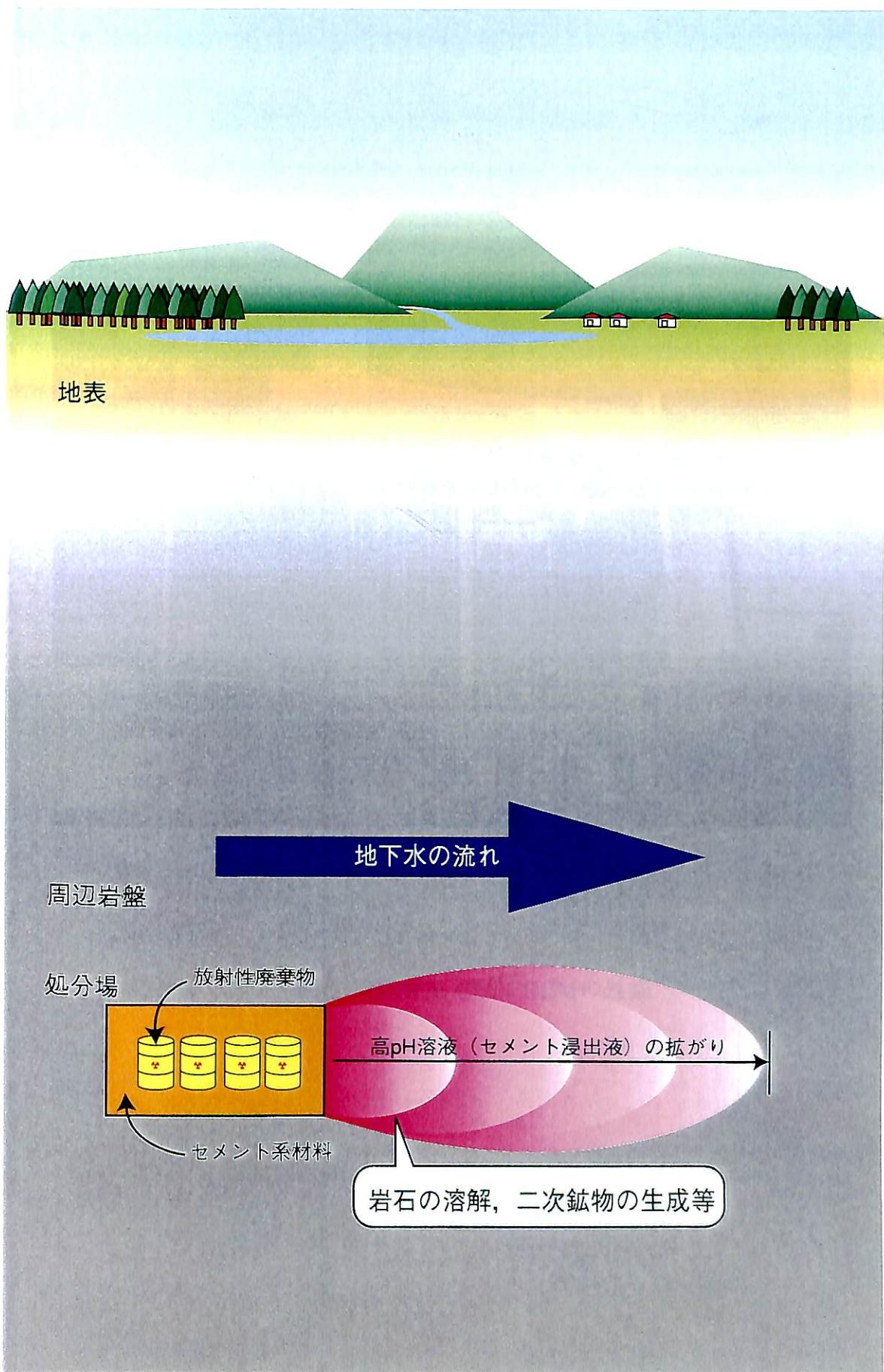


図-2 高pHプルームの概念図



図-3 IMAGE-GEOCHEMの外観

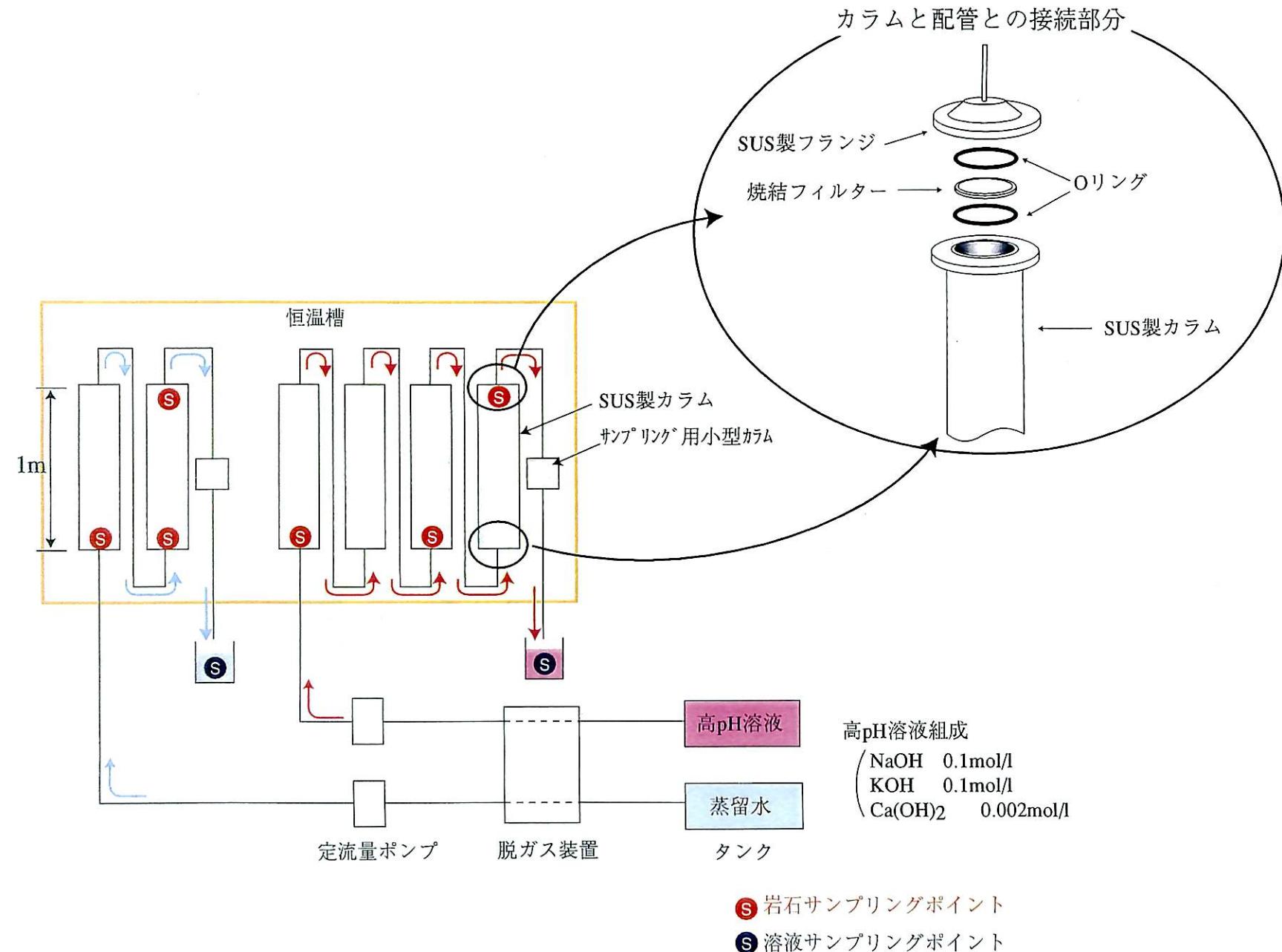


図-4 装置の概略

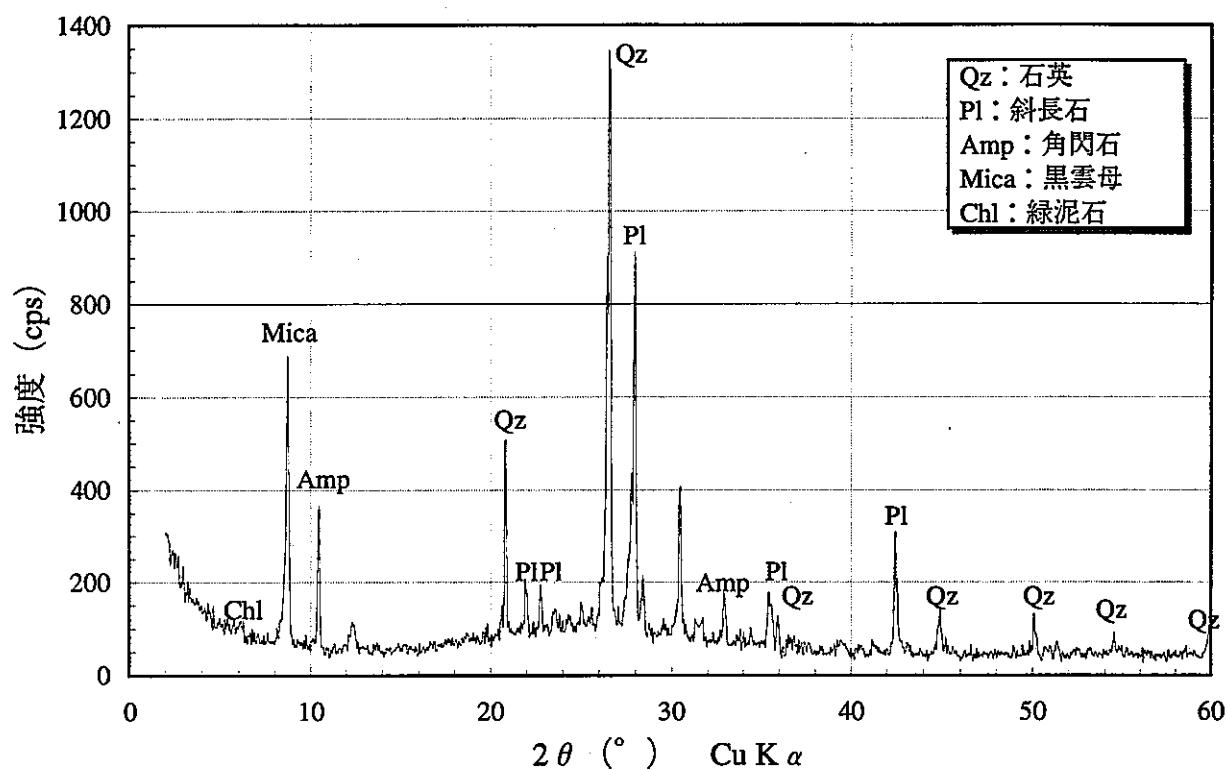


図-5 母岩のXRD結果

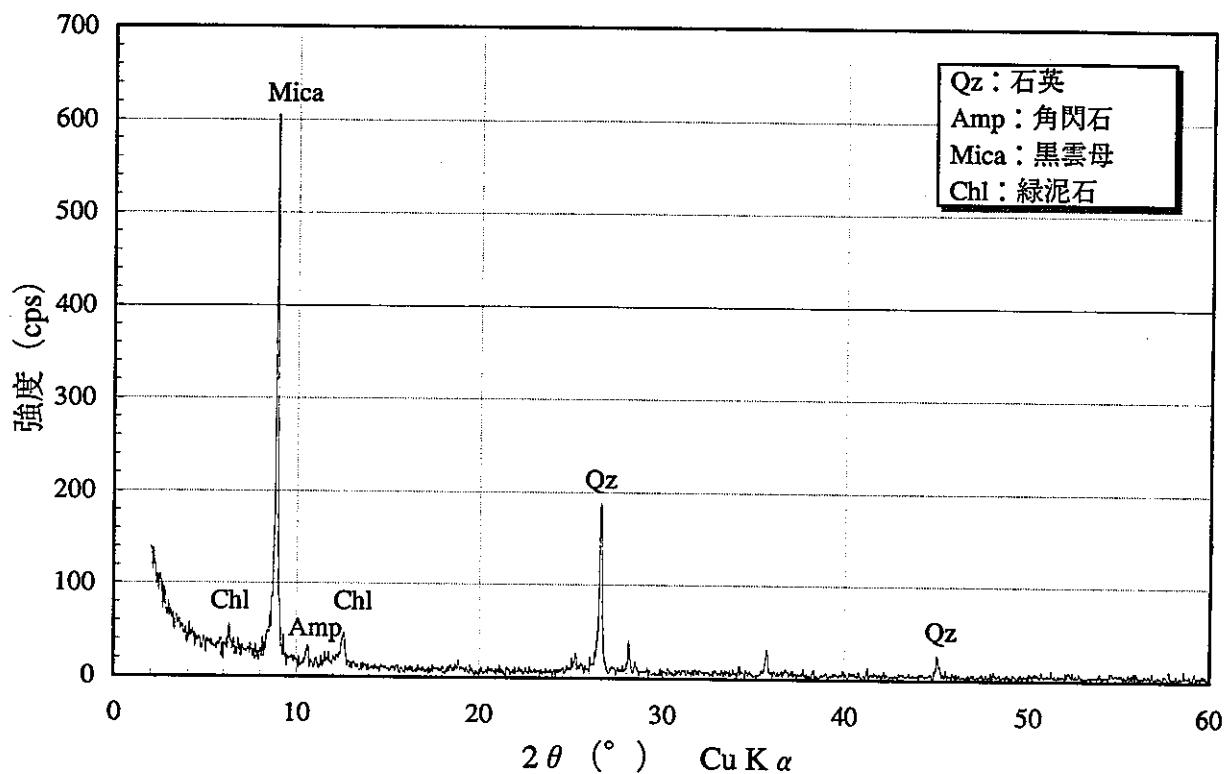


図-6 高pH溶液を2ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム2m地点よりサンプリング

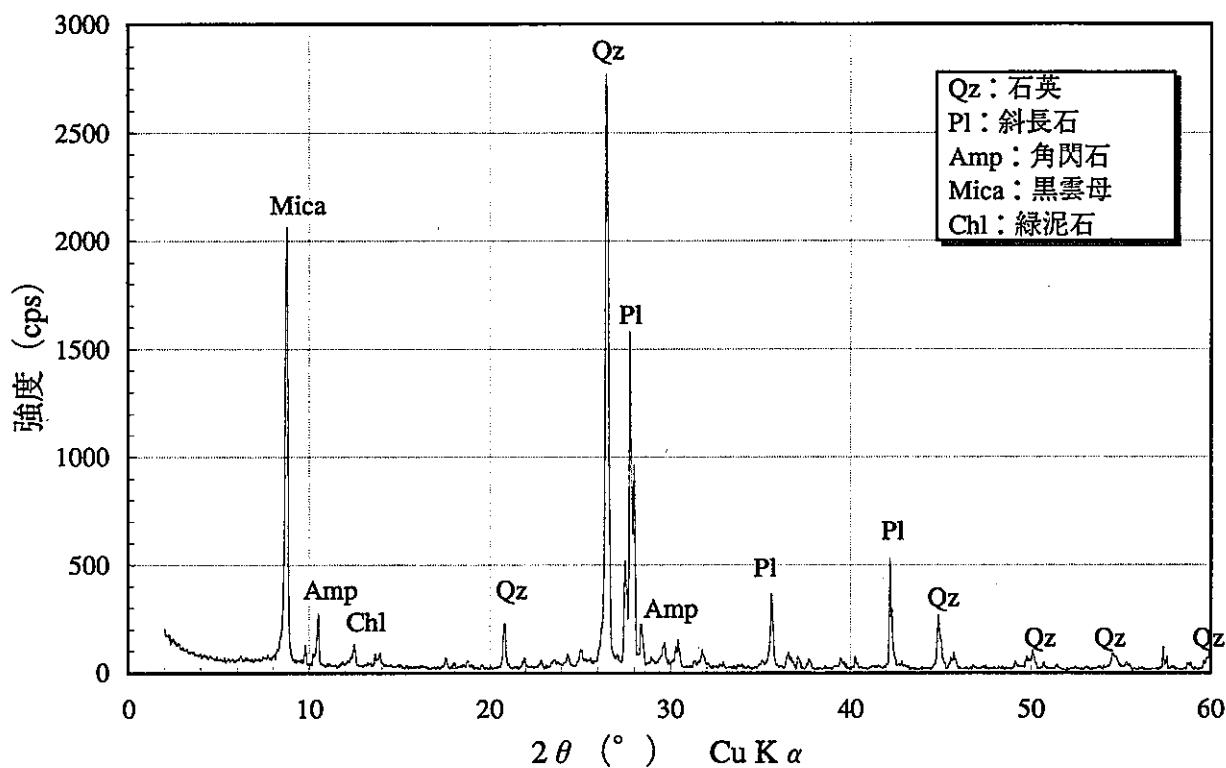


図-7 高pH溶液を2ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム4m地点よりサンプリング

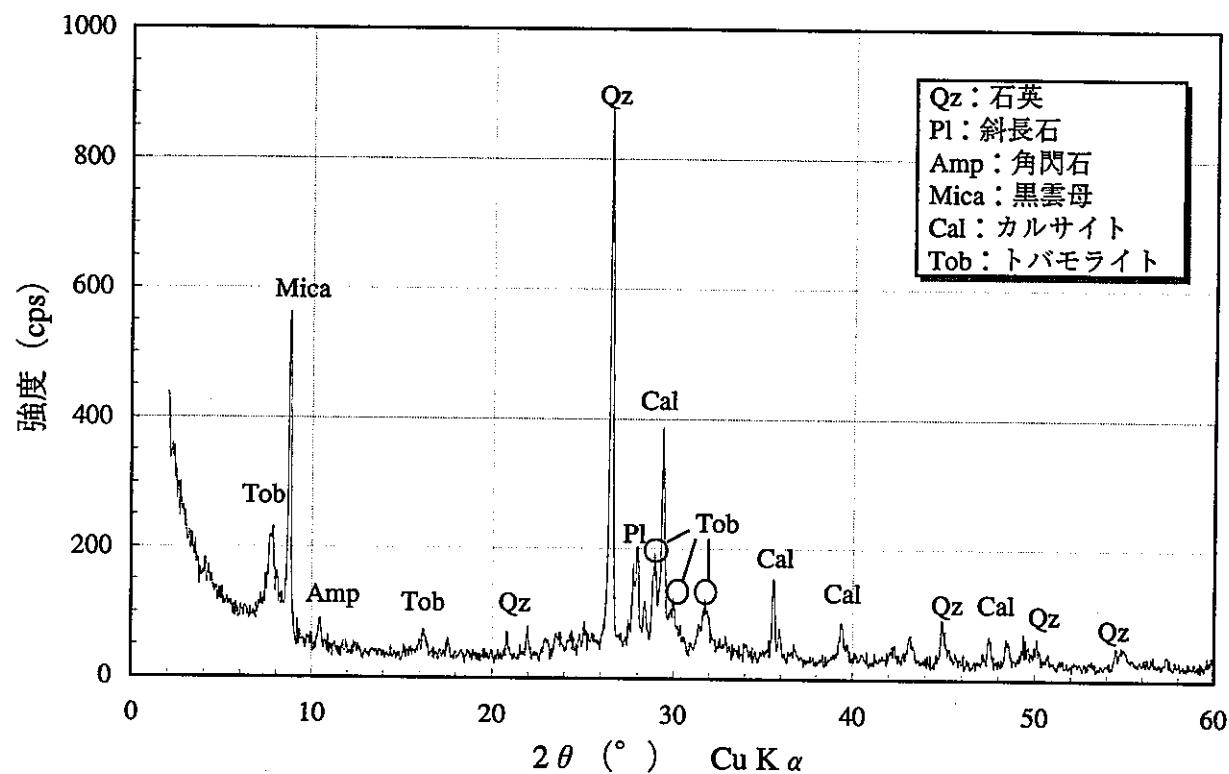


図-8 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム0m地点よりサンプリング

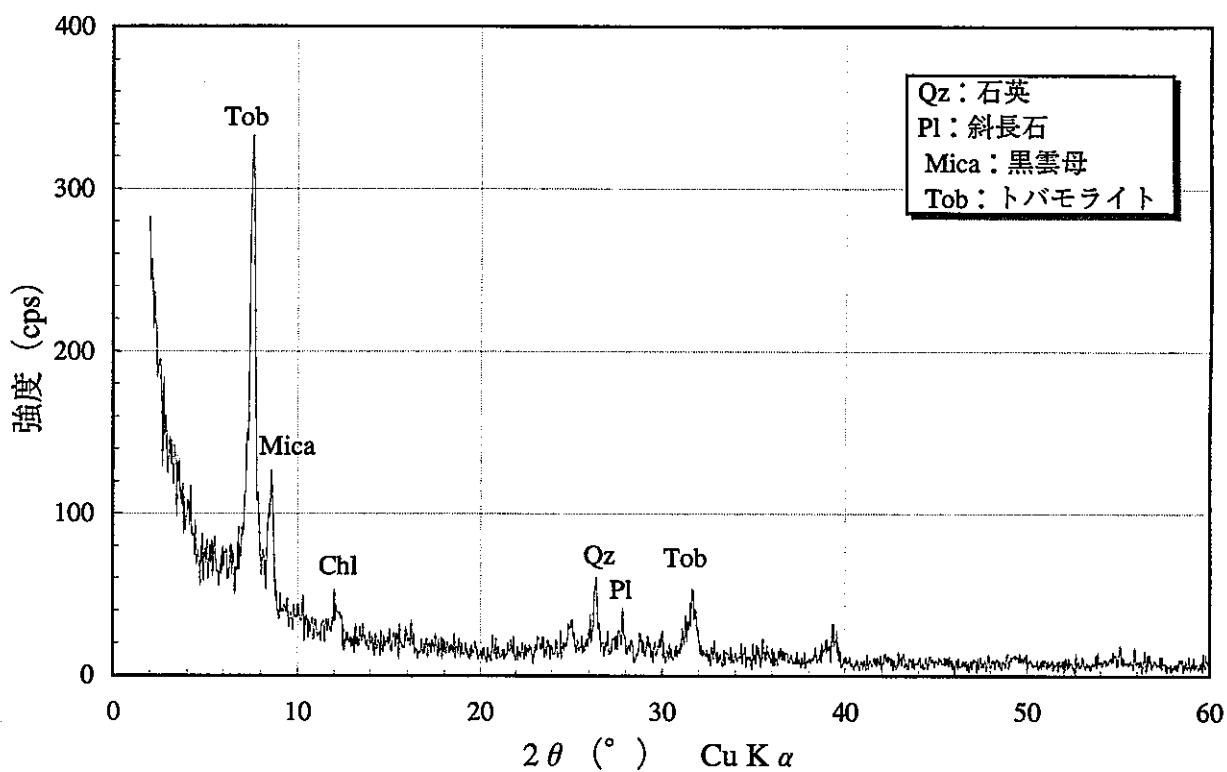


図-9 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム0.25m地点よりサンプリング

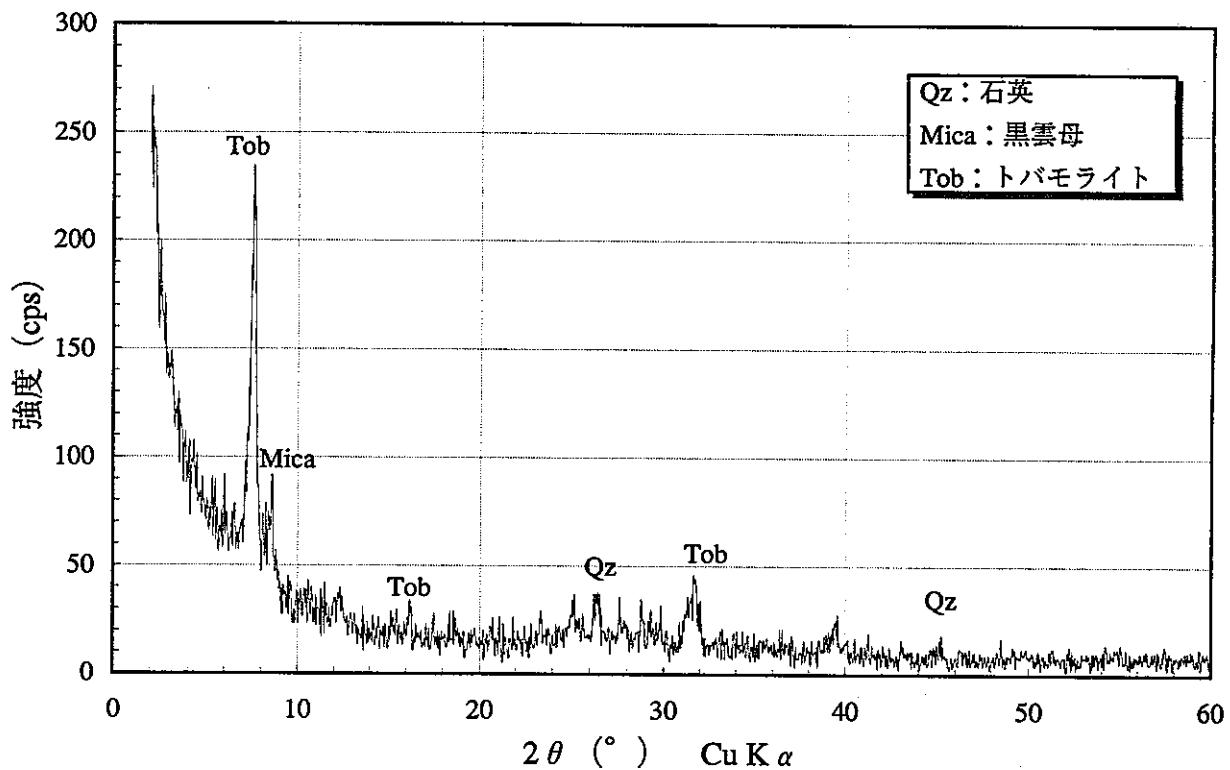


図-10 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム0.5m地点よりサンプリング

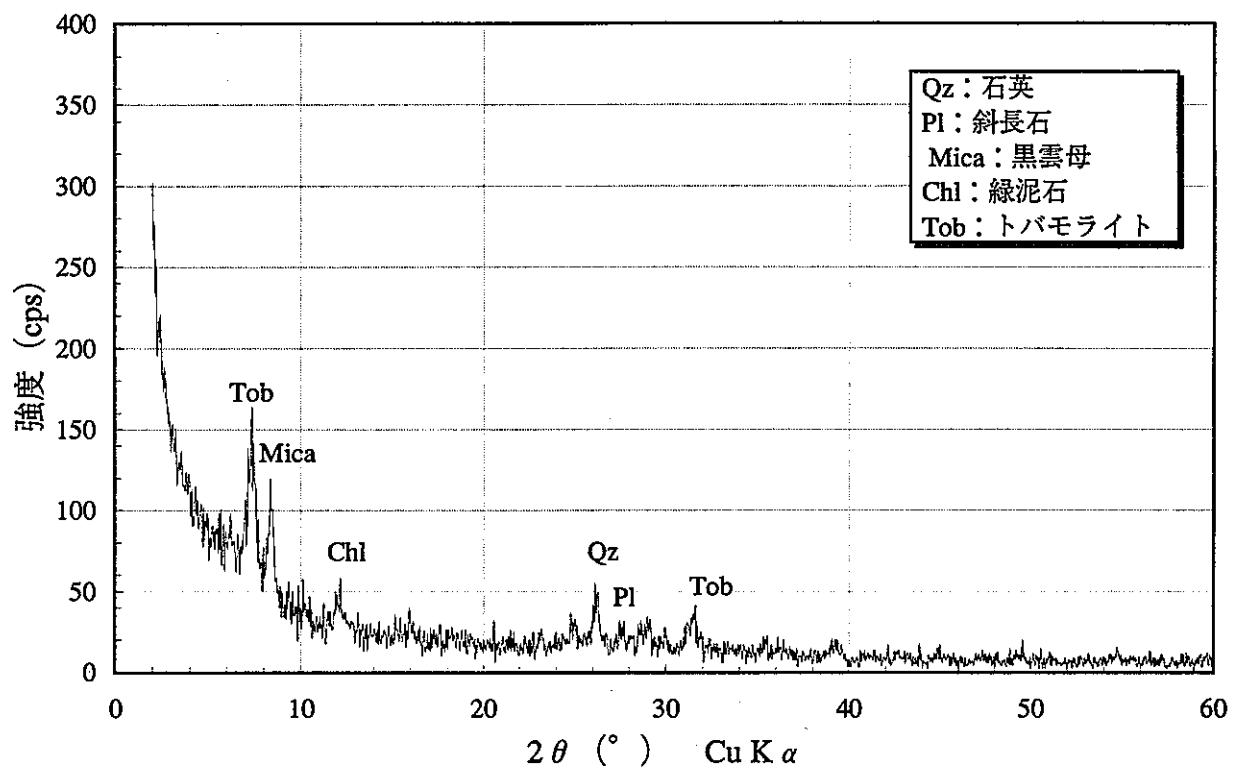


図-11 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム0.75m地点よりサンプリング

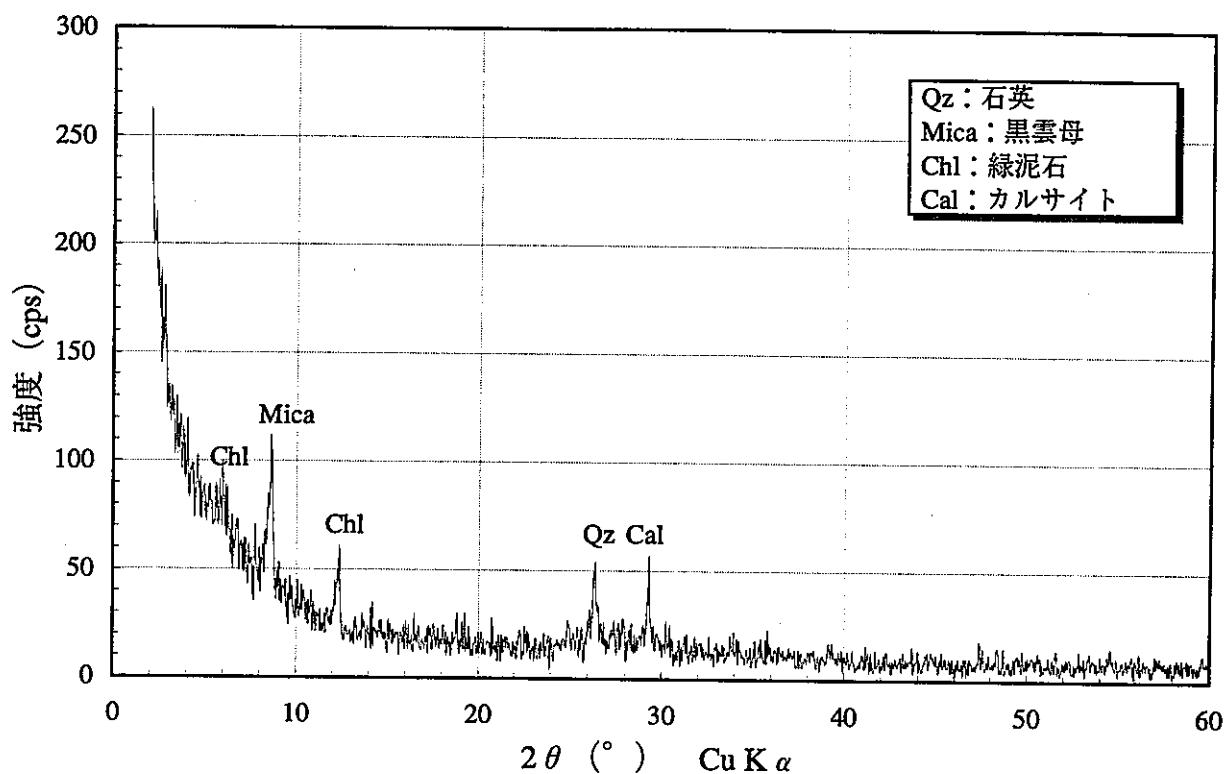


図-12 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム2m地点よりサンプリング

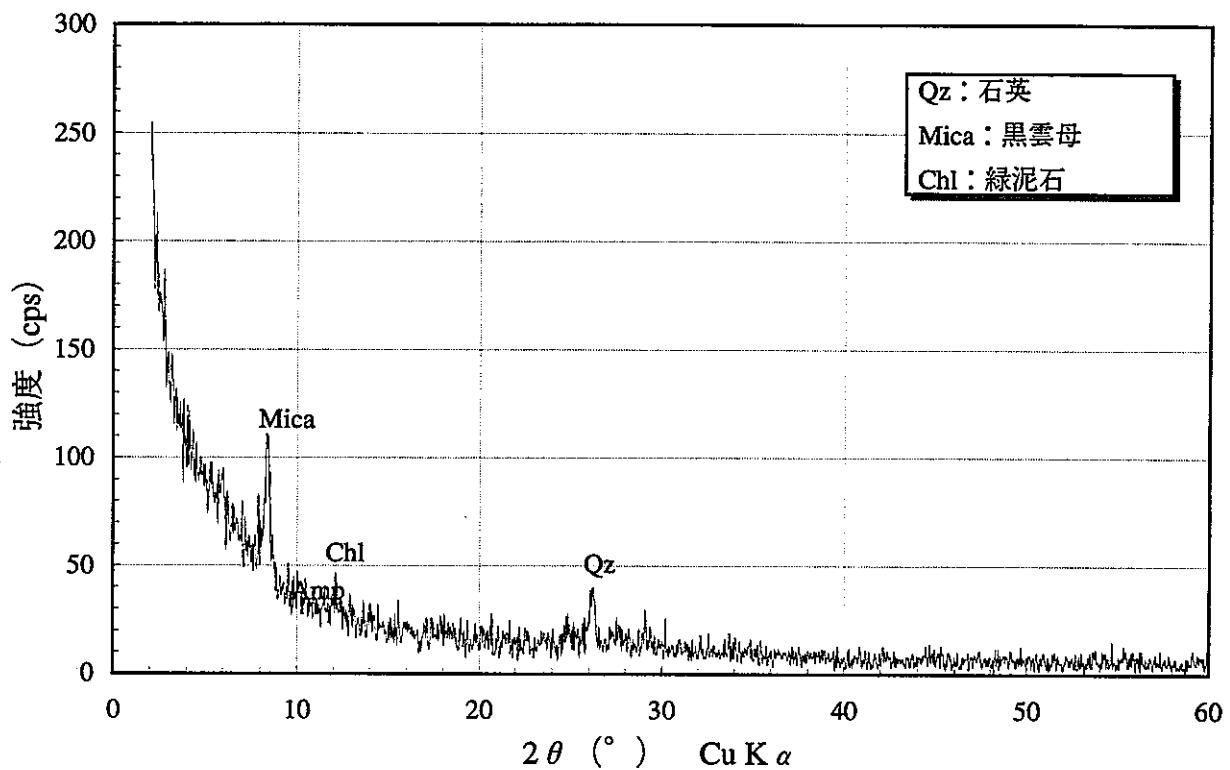


図-13 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム3m地点よりサンプリング

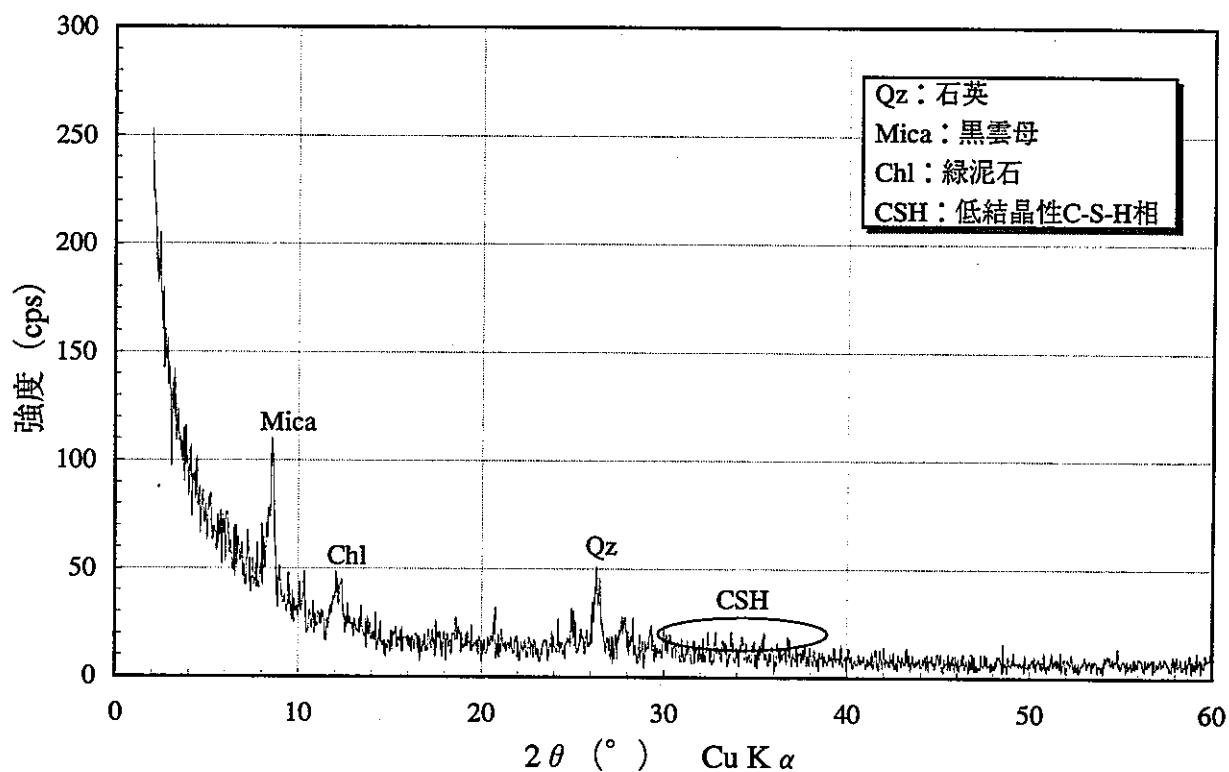
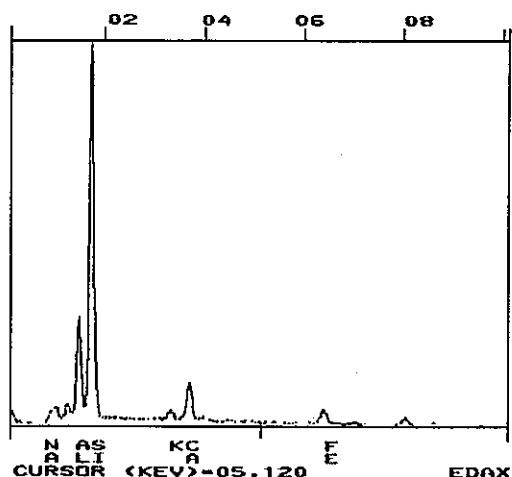
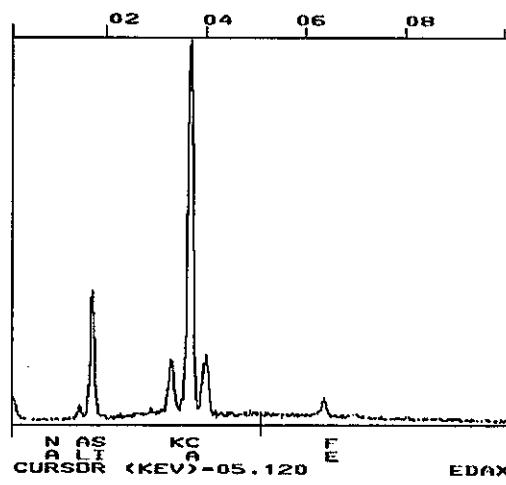


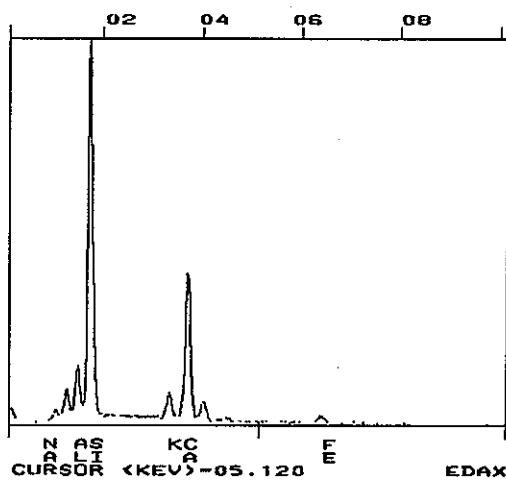
図-14 高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の水ひ試料のXRD結果、
カラム4m地点よりサンプリング



母岩のEDX結果



カラム0m地点よりサンプリングした岩石のEDX結果
薄片層状の二次鉱物にスポットを合わせて測定



カラム3m地点よりサンプリングした岩石のEDX結果
網目状の二次鉱物にスポットを合わせて測定

図-15 母岩と高pH溶液を7ヵ月通水した岩石の元素分布の比較

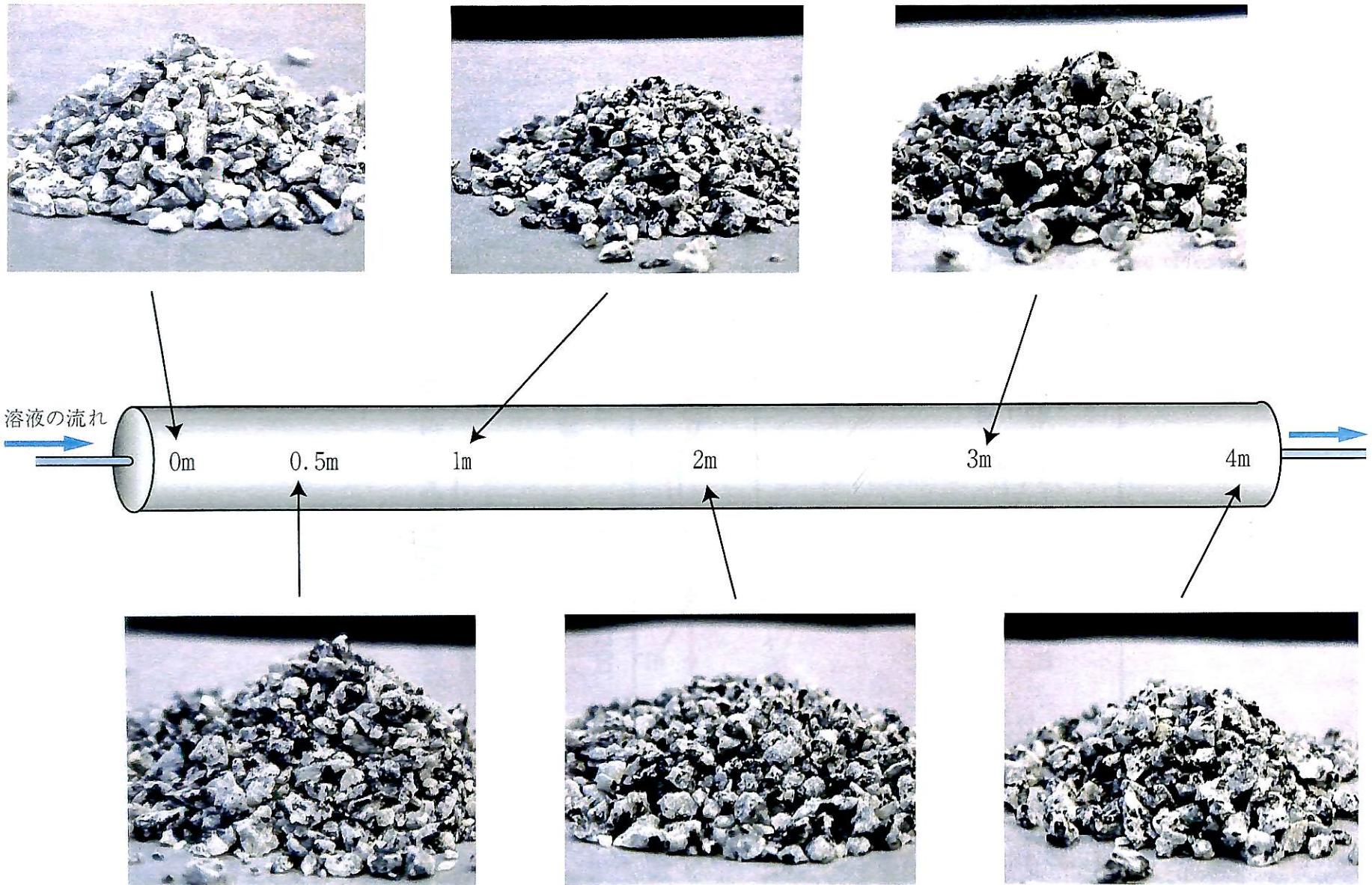


図-16 高pH溶液を7カ月通水した後のカラム位置ごとの岩石の様子

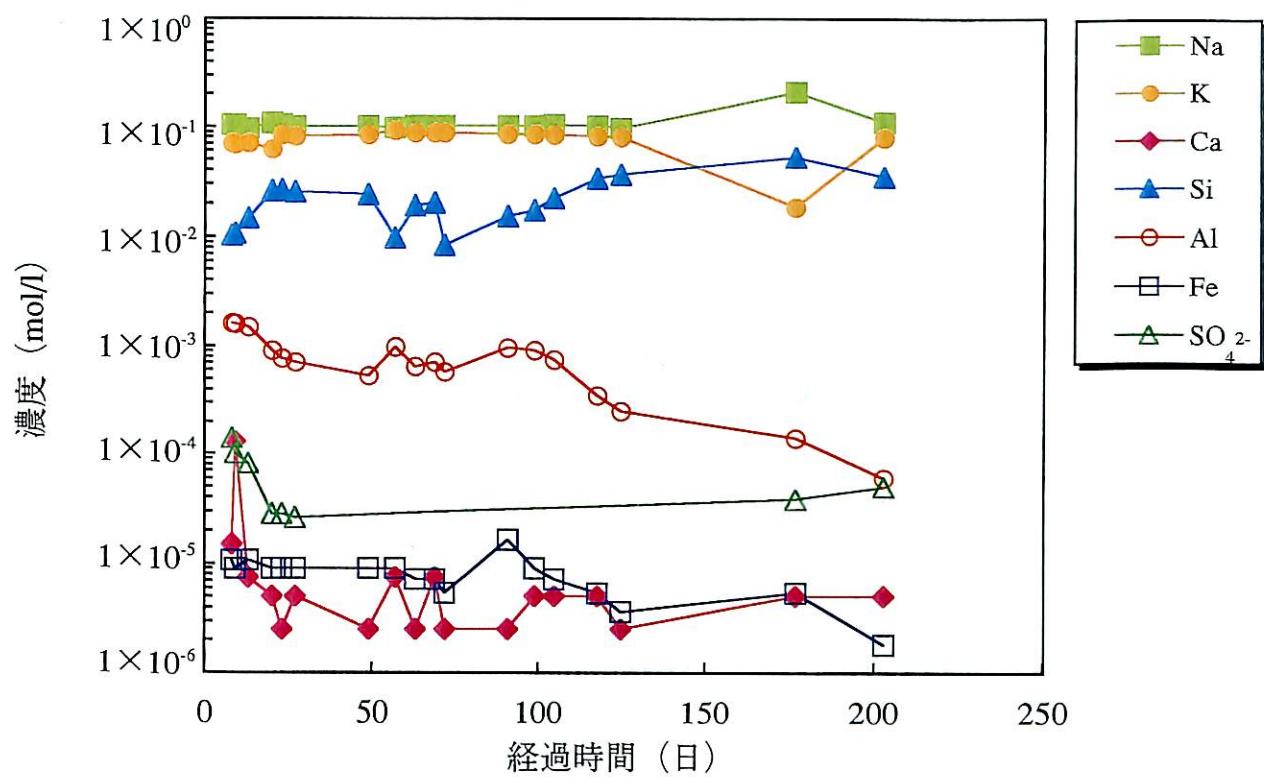


図-17 通水溶液の成分の経時変化（高pH溶液）

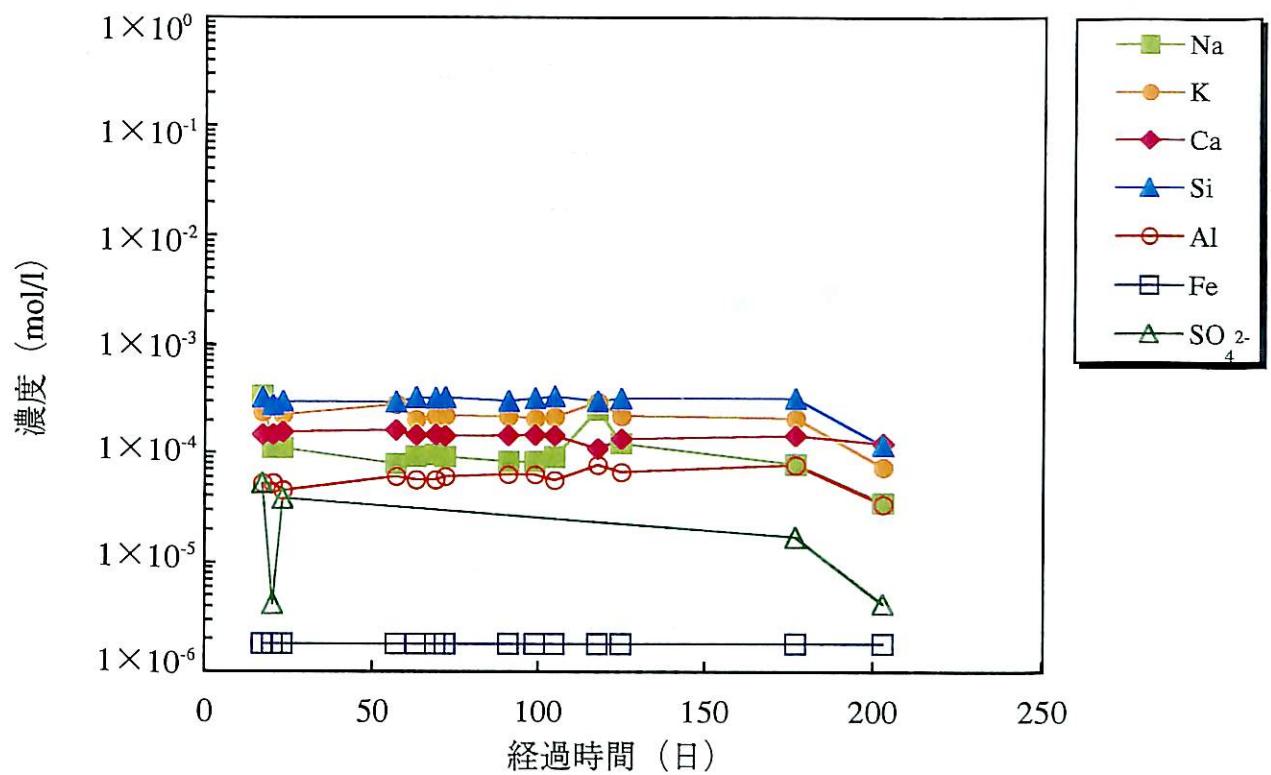


図-18 通水溶液の成分の経時変化（蒸留水）

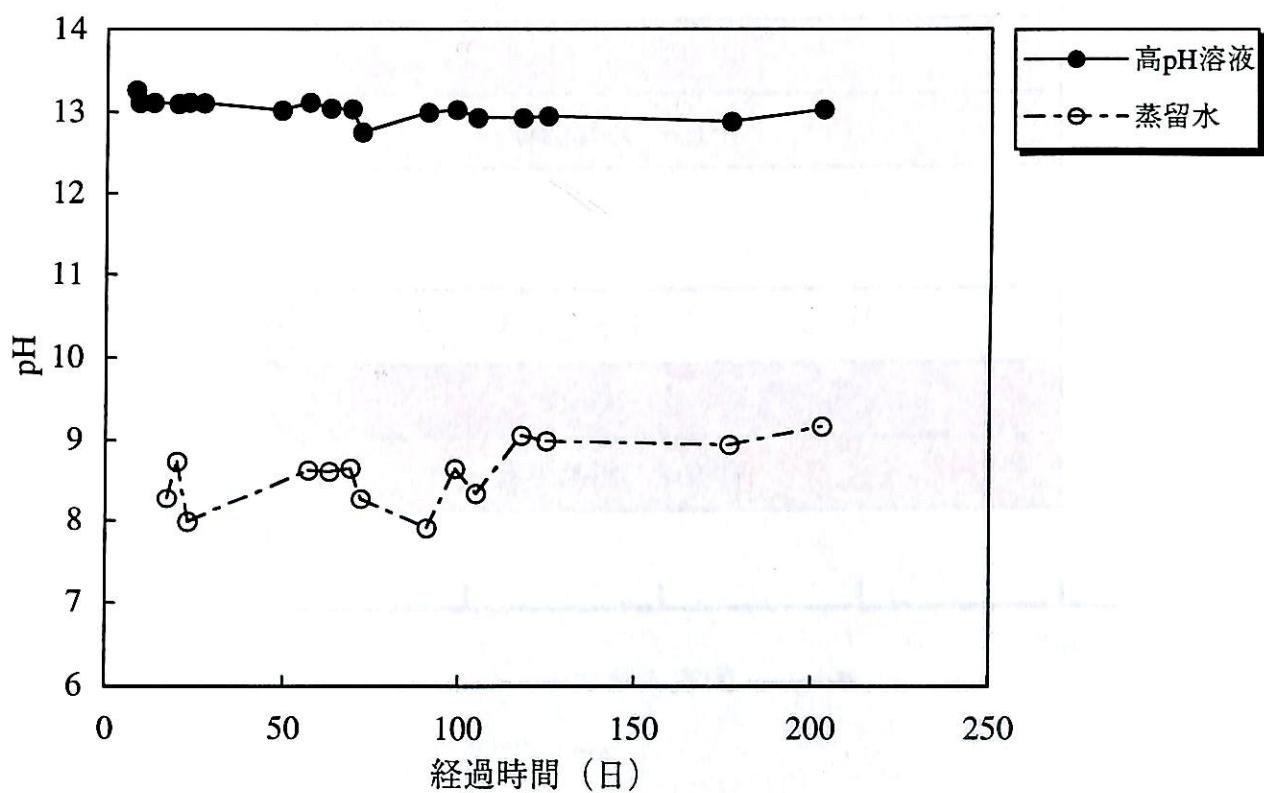


図-19 通水溶液のpHの経時変化

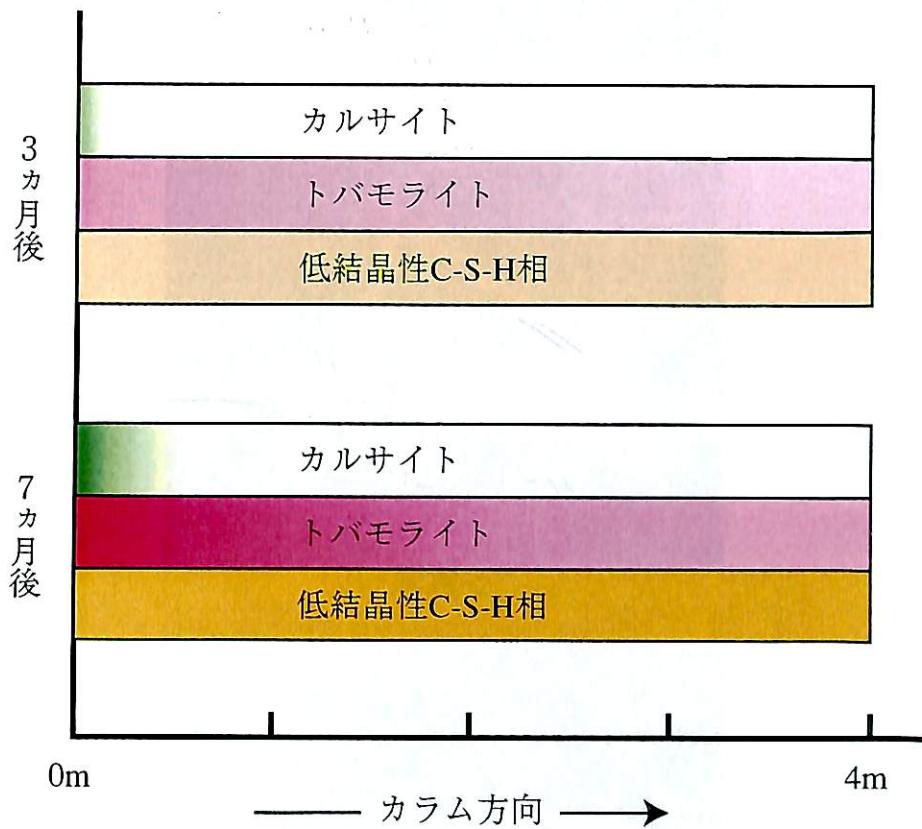


図-20 高pH溶液と岩石との反応により析出する
二次鉱物の変遷の概念
(色の濃さは析出量を示す。)

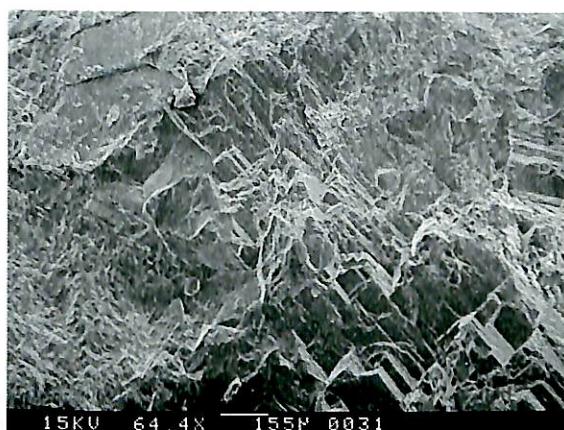


写真-1



写真-2

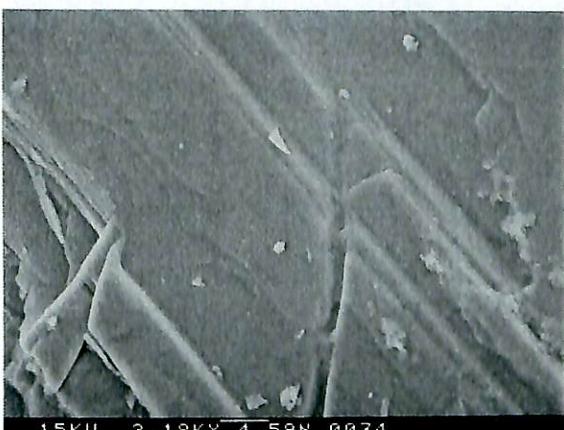


写真-3

写真-1～3 溶液を通水していない母岩の表面の電子顕微鏡写真



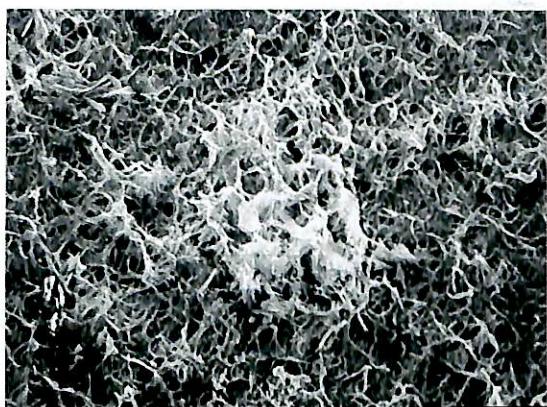
15KV 80.6X 124μ 0063 OPC

写真-4



15KV 1.53KX 6.54μ 0001

写真-5



15KV 2.05KX 4.88μ 0068 OPC

写真-6



15KV 3.07KX 3.26μ 0058 OPC

写真-7



15KV 502X 19.7μ 0066 OPC

写真-8

- 写真-4 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2 カ月、サンプリング位置 2m)
写真-5 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2 カ月、サンプリング位置 2m)
写真-6 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2 カ月、サンプリング位置 2m)
写真-7 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2 カ月、サンプリング位置 2m)
写真-8 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2 カ月、サンプリング位置 4m)

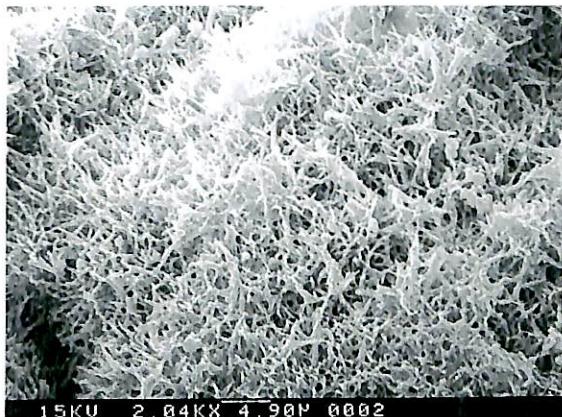


写真-9

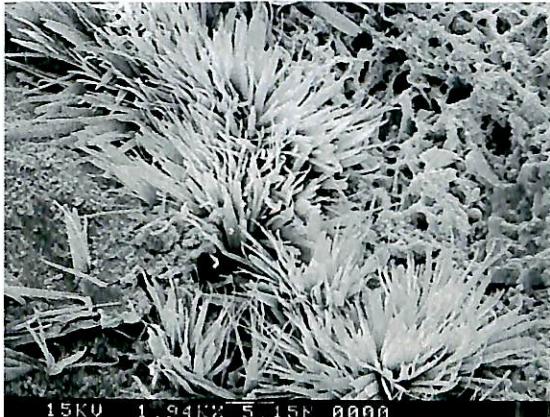


写真-10

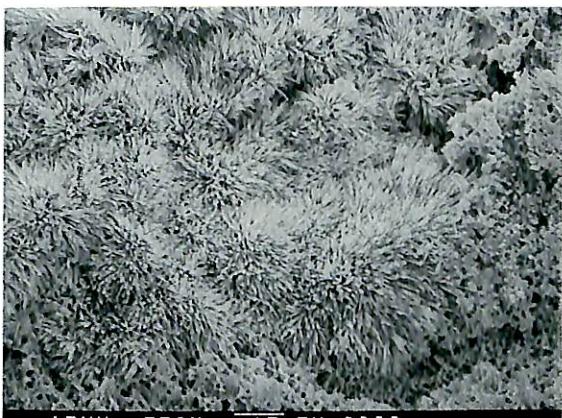


写真-11

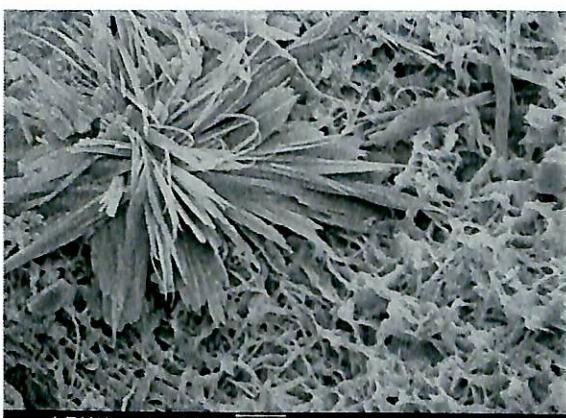


写真-12

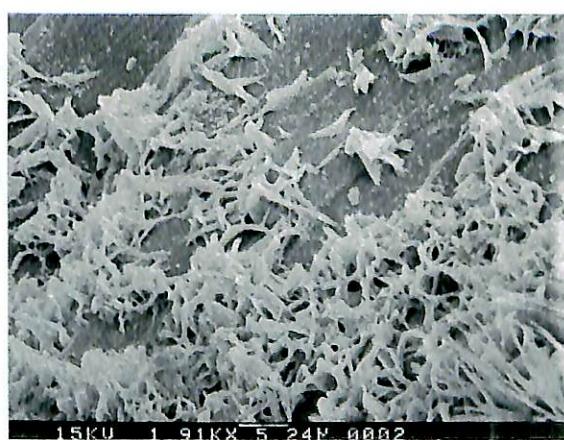


写真-13

写真-9 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 3 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-10 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 3 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-11 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 6 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-12 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 6 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-13 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 6 カ月、サンプリング位置 4m)



写真-14

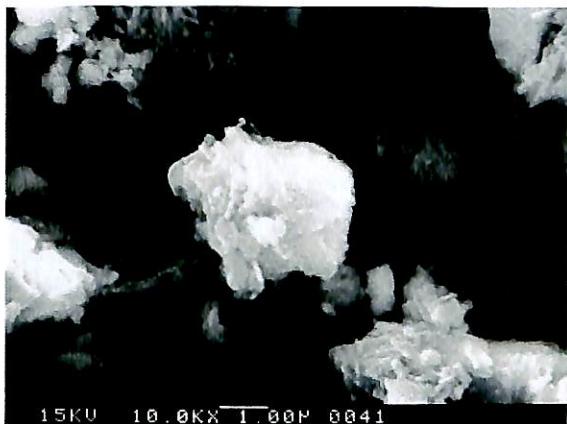


写真-15

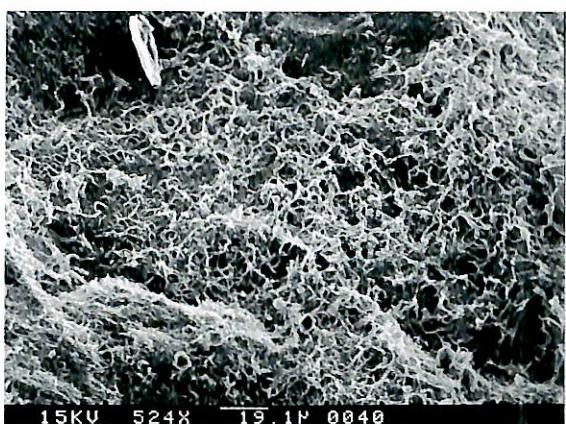


写真-16

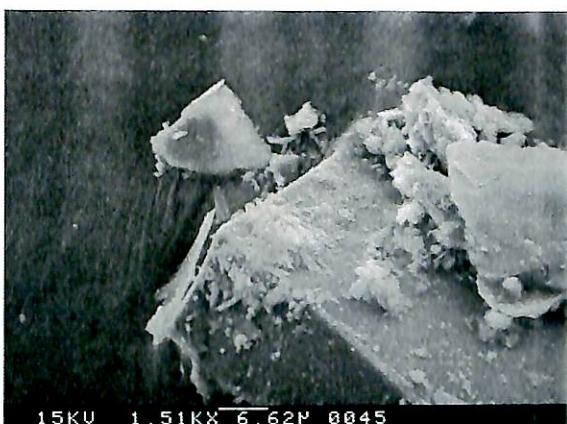


写真-17

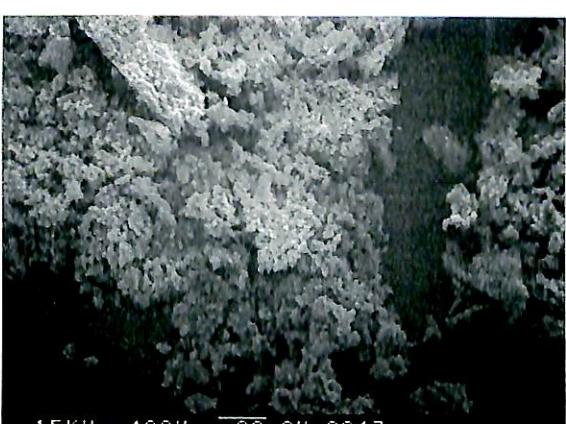


写真-18

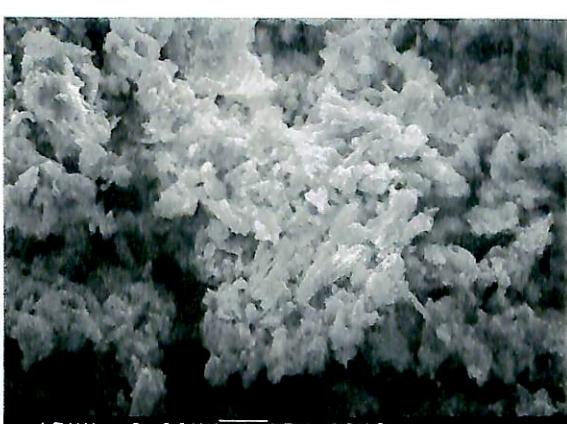


写真-19

- 写真-14 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 0m)
写真-15 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 0m)
写真-16 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 1m)
写真-17 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 2m)
写真-18 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 3m)
写真-19 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 3m)

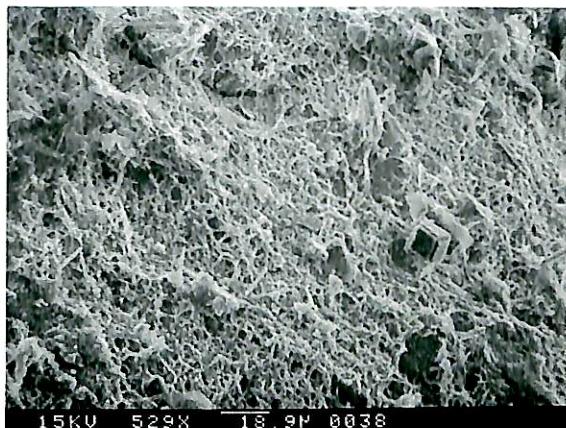


写真-20

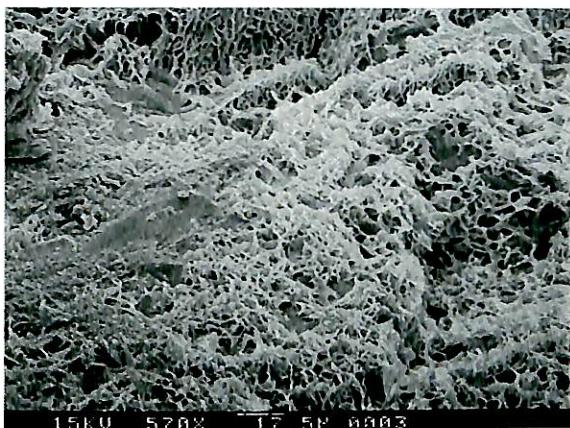


写真-21

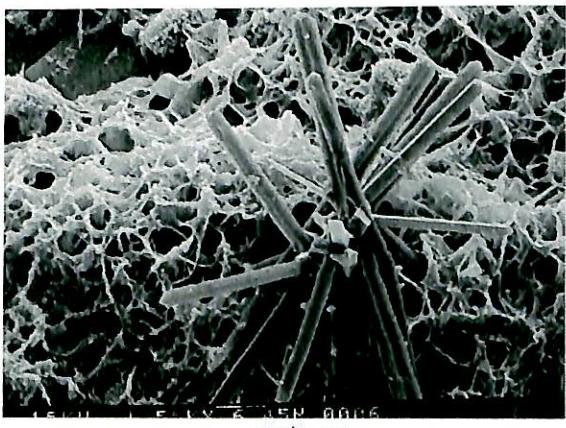


写真-22

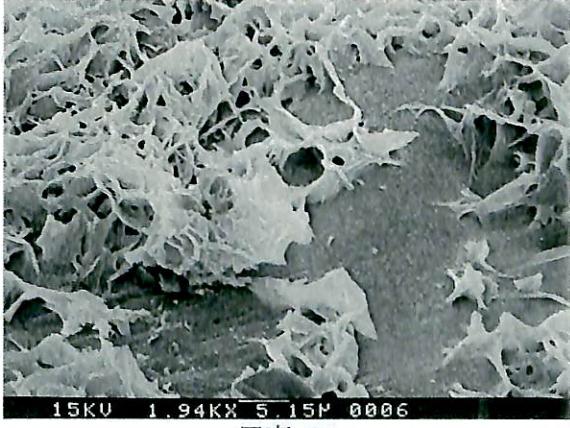


写真-23

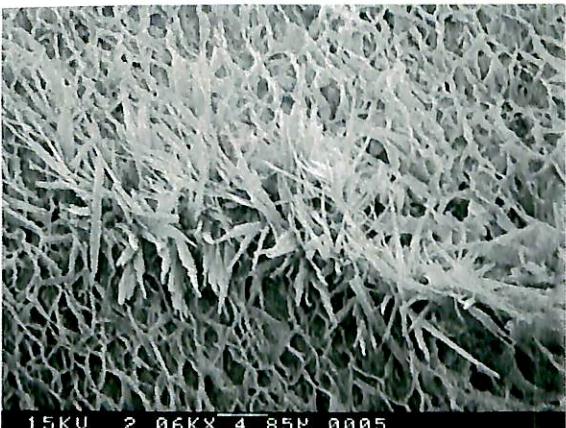


写真-24

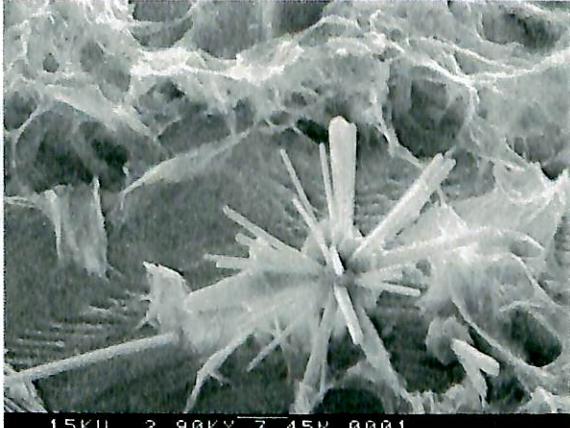


写真-25

写真-20 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-21 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-22 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-23 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-24 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 4m)

写真-25 高 pH 溶液を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7 カ月、サンプリング位置 4m)



写真-26



写真-27



写真-28



写真-29

写真-26 蒸留水を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2カ月、サンプリング位置 2m)

写真-27 蒸留水を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2カ月、サンプリング位置 2m)

写真-28 蒸留水を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 2カ月、サンプリング位置 2m)

写真-29 蒸留水を通水した岩石の表面の電子顕微鏡写真(通水期間 7カ月、サンプリング位置 2m)

付録 本試験条件と実際の処分場条件の水量の比較

ここでは、以下の仮定のもとで、単位体積あたりの岩石に供給されるアルカリ量にて比較した。

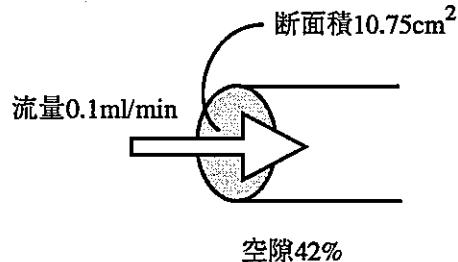
- ①本試験条件の流量において岩石-溶液の反応が十分平衡に達する。
- ②岩石の溶解は比表面積に依存せず、溶出しうる成分はすべて溶出する。
- ③地下深部における地下水の透水係数を 10^9 [m/s]、岩盤の空隙を 20%とする。

本試験では、断面積 10.75 [cm²]、空隙 42% のカラムに流量 0.1 [ml/min] で通水した。ここで、断面積 A のカラムに流量 Q で通水したときのダルシー流速 V は以下の式で与えられる。

$$V = Q / A$$

したがって、カラム内における溶液のダルシー流速 V は、

$$\begin{aligned} V &= 0.1 / 10.75 \\ &= 9.30 \times 10^{-3} [\text{cm}/\text{min}] \end{aligned}$$



一方、実際の処分場条件を想定した場合、地下深部における地下水の透水係数は 10^9 [m/s]、また岩盤の空隙は 20% とされている。ここで、透水係数 k 、動水勾配 i のときのダルシー流速 V' は以下の式で与えられる。

$$V' = k \cdot i$$

したがって、地下水のダルシー流速 V' は、動水勾配を 0.01 とすると

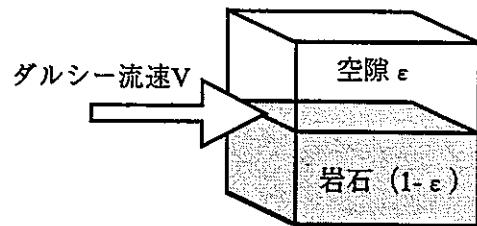
$$\begin{aligned} V' &= 10^9 \cdot 0.01 \\ &= 1 \times 10^{-11} [\text{m}/\text{s}] \\ &= 6.00 \times 10^{-11} [\text{cm}/\text{min}] \end{aligned}$$

ここで、本試験条件と実際の処分場条件の水量を比較するため、それぞれの

条件について、単位体積あたりの岩石に対する流量、すなわち、ダルシー流速を岩石含有率 $1 - \epsilon$ (ϵ : 空隙) で割った値を求める。

本試験条件での単位体積あたりの空隙のない岩石に対する流量は、

$$9.30 \times 10^{-3} / (1 - 0.42) = 1.60 \times 10^{-2} \quad -①$$



また、処分場条件での単位体積あたりの空隙のない岩石に対する流量は、

$$6.00 \times 10^{-10} / (1 - 0.2) = 7.50 \times 10^{-10} \quad -②$$

① / ②より、

$$1.60 \times 10^{-2} / (7.50 \times 10^{-10}) = 2.13 \times 10^7$$

以上から、本試験では、1日あたり、処分場で予想される周辺岩盤へのアルカリ供給量の約 2×10^7 倍 (5,800年分) のアルカリ量を供給したこととなる。