

地下水中のコロイドの特性評価に及ぼす 水質擾乱影響の予察的検討

Preliminary Examination of Disturbance Influence of Groundwater Chemistry on Colloidal Characterization in Groundwater

久野 義夫 笹本 広

Yoshio KUNO and Hiroshi SASAMOTO

地層処分研究開発部門

核種移行研究グループ

Radionuclide Migration Research Group

Geological Isolation Research and Development Directorate

本レポートは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（<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>）
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

地下水中のコロイドの特性評価に及ぼす水質擾乱影響の予察的検討

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

久野 義夫^{*}, 笹本 広⁺

(2008年1月16日受理)

地下水中のコロイドについて信頼性のあるデータを取得することは、地下環境中での核種移行に及ぼすそれらコロイドの影響を予測する上で重要である。この研究では、幌延地区において地下水コロイドの特性評価を実施することを通じ、地下の原位置環境と地上の大気環境との化学的条件の相違が無機コロイドの特性に与える影響について検討した。HDB-10孔から採水した地下水において、主にCaを含む有意な量の懸濁成分が観察された。そのため、大気に開放することによる地下水の組成やコロイドの特性に与える影響を確認するために、この地下水を用いた補足的な室内試験を実施した。大気環境下では、主にCaCO₃から成る生成物が、沈殿だけではなく浮遊性の粒子として確認された。予察的な地球化学計算からは、炭酸分圧の減少によるpHの変化が、CaCO₃の溶解度に影響を及ぼすことが示唆された。しかしながら、この浮遊性の粒子については、本地下水中で分散安定性を有していないことがDLVO理論による評価により予測された。この浮遊性の粒子の生成は、化学的条件の変化に起因する一時的な挙動と推定され、原位置の地下水では存在していなかったものと考えられる。これらの結果から、原位置の地下水におけるコロイドの特性に関する信頼性の高いデータを取得するためには、地下水水質に及ぼすサンプリングによる擾乱の影響を推定しておくことが必要であることが示された。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33

* 技術開発協力員 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課（兼務）

+ 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課（兼務）

Preliminary Examination of Disturbance Influence of Groundwater Chemistry
on Colloidal Characterization in Groundwater

Yoshio KUNO[※] and Hiroshi SASAMOTO⁺

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

(Received January 16, 2008)

It is important to obtain the reliable data about the groundwater colloids in order to estimate their effects on radionuclide migration in deep underground. In this study, the influence of chemical difference between in-situ condition and atmospheric condition on inorganic colloids was examined by carrying out the characterization of groundwater colloids in the Horonobe area. Remarkable amount of suspended substance including mainly Ca was observed in the groundwater collected from the HDB-10 borehole. Additional laboratory experiments were therefore conducted using this groundwater to investigate the impact on the groundwater composition and the colloidal properties by exposing to the atmosphere. Not only precipitation but also suspended particles composed mainly of CaCO_3 were generated under the atmospheric condition. It is suggested that a change of pH due to the decrease of partial pressure of $\text{CO}_2(\text{g})$ affects on the solubility of CaCO_3 from a preliminary geochemical calculation. From the prediction using the DLVO theory, however, the suspended particles are not expected to have a dispersive stability in this groundwater. Formation of suspended particles seems to be a transient behavior caused by the change of chemical conditions and these particles would not exist in in-situ groundwater. From these results, it is concluded that the estimation of disturbance influence on groundwater chemistry by sampling from the deep underground is necessary to obtain the reliable data about the colloidal properties in in-situ groundwater.

Keywords: Groundwater Colloids, Colloidal Characterization, Chemical Disturbance, Precipitation of CaCO_3 , Partial Pressure of $\text{CO}_2(\text{g})$

[※] Collaborating Engineer: Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (Additional Post)

⁺ Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (Additional Post)

目 次

1.はじめに	1
2.方法	2
2. 1 地下水試料の採取	2
2. 2 現地での地下水試料の処理	2
2. 3 大気開放による地下水水質への影響の推定	2
3.分析結果	5
3. 1 現地処理試料の分析結果	5
3. 2 大気開放試料の分析結果	5
4.考察	11
4. 1 地下水試料のマテリアルバランスの検討	11
4. 2 採水による擾乱影響の予察的検討	11
4. 3 浮遊物の分散安定性に関する検討	13
4. 4 摆乱影響の抑制のための調査方法の改善	15
5.おわりに	19
謝辞	20
参考文献	21

Contents

1 . Introduction	1
2 . Experimental method	2
2 . 1 Sampling of groundwater	2
2 . 2 Treatment of the groundwater sample at the field	2
2 . 3 Estimation of the impact on the groundwater composition caused by exposing to the atmosphere	2
3 . Analytical results	5
3 . 1 Analytical results of the groundwater sample treated at the field	5
3 . 2 Analytical results of the groundwater sample exposed to the atmosphere	5
4 . Discussions	11
4 . 1 Discussion of material balance in groundwater	11
4 . 2 Preliminary examination of disturbance influence by groundwater sampling	11
4 . 3 Prediction on the dispersive stability of suspended particles	13
4 . 4 Improvement of experimental method for control of disturbance influence	15
5 . Conclusions	19
Acknowledgement	20
References	21

図リスト

図 3.1 捕捉された粒子の元素組成の分析結果	9
図 3.2 大気開放した試料で回収された沈殿の XRD 測定結果	10
図 3.3 大気開放試料の上澄み液中の粒径分布の測定結果	10
図 4.1 地下水試料中での pH, 炭酸分圧と Ca 濃度に関する計算結果	17
図 4.2 粒子間ポテンシャルの計算結果（表面電位として-4mV を設定）	18
図 4.3 粒子間ポテンシャルの表面電位依存性	18

表リスト

表 3.1 現地で分画処理した地下水試料の分析結果 (mg/L)	7
表 3.2 地下水試料中のアニオンの分析結果 (mg/L)	8
表 3.3 大気開放後の地下水試料の分析結果 (mg/L)	8
表 3.4 酸溶解した沈殿の分析結果 (mg/L)	10
表 4.1 現地処理試料と大気開放試料の組成分析結果の比較 (mg/L)	17
表 4.2 炭酸カルシウムの形成に関与する各イオンの地下水試料中の 活量係数の計算値	17
表 4.3 電荷バランスが考慮されるときの炭酸カルシウムとの平衡状態の計算結果	18

写真リスト

写真 2.1 HDB-10 孔での採水状況	3
写真 2.2 地下水の採取直後の状況	3
写真 2.3 懸濁した地下水試料の状況	4
写真 2.4 沈殿が生じた地下水試料の状況	4
写真 2.5 回収された沈殿の状況	4
写真 3.1 限外ろ過フィルターによって捕捉された成分の観察結果	9

This is a blank page.

1. はじめに

地下水中に存在するコロイドに核種が収着することにより、核種の移行が助長されることが懸念されている。これは地下水中で安定に分散しているコロイドは岩盤表面に付着しにくいと考えられること、および微細な間隙を有する岩石のマトリクス領域には、その大きさのために侵入しにくいと考えられることから、核種の岩石への収着を阻害する媒体として作用することが考えられることによる。そのため、第2次取りまとめにおける亀裂岩石中での核種移行評価でも、天然に存在するコロイドを対象とした評価が行われ、コロイドの濃度とコロイドへの核種の分配係数が核種移行に影響を与えるパラメータとして扱われている¹⁾。地下水中に存在するコロイドは、種々の事例調査が第2次取りまとめ以降も実施されており、鉱山坑道での湧水などをサンプルとする特性評価が実施され、コロイド濃度、粒径分布および安定性などの知見の取得が行われている^{2,3)}。これらの調査結果に基づけば、地下水中に存在するコロイドの種類や濃度は、調査サイトの環境条件に依存すると考えられる。また、コロイドの安定性に影響を与える地下水化学データは、地下水の採水方法やpH、Ehなどのパラメータ測定方法の違いに影響されることも指摘されている⁴⁾。したがって、地下水の採水・分析方法やコロイドの分析方法などの情報も踏まえて、地下水中のコロイド特性に関するデータを取得し、その信頼性を確認していくことが重要であると考えられる⁵⁾。

コロイドの特性評価データの信頼性の確認としては、想定される地下条件とデータ取得を実施した条件とを比較し、採水などに伴う環境の変化が擾乱影響の要因とならないかを検討することが重要と考える。すなわち、地下水の採水には人為的な擾乱、例えば大気との接触や大気圧に水圧が減少することで生じる溶存ガスの脱離による液性の変化や沈殿の析出、大流量での採水による沈殿物の地下水への分散あるいは採水装置や機器類からの異物の混入などが生じることにより、コロイドのような成分を共存させる可能性も考えられる⁶⁾。したがって、地下水中に存在するコロイドの特性を把握するためには、両者の環境の相違を念頭におき、条件の違いがコロイドの濃度や特性にどのような影響を及ぼすのかを推定することが、取得データの信頼性を確保する上で重要であると考えられる。

本研究では、幌延深地層研究センターにおいて採取した実地下水を対象として、地下水中のコロイドの特性評価を試行するとともに、地下水を地上に汲み上げることによる地下水試料の環境条件の変化により、浮遊成分や沈殿の生成といった擾乱がおこり得るかについて予察的な検討を実施した。なお、地下水中に含まれるコロイドとしては岩石構成鉱物などから生成する無機コロイドと、フミン酸に代表される有機コロイドとが考えられるが、本研究では前者の無機コロイドを対象とした。

2. 方法

2. 1 地下水試料の採取

平成 18 年 9 月 11 日、幌延深地層研究センターの HDB-10 孔で地下水試料の採取を実施した。深度 500~550m のボーリング孔から、ポンプにより汲み上げられた湧水を地上で採水している状況を写真 2.1 に示す。汲み上げた地下水は、大気開放下で直接ポリ容器に採取した。採水時の湧出量は約 300mL/min であり、採水チューブからは断続的な地下水の吐出が確認された。これはガス成分の混入によるものと思われる。湧出する地下水試料の液性を現地で電極により測定したところ、pH=6.7 であった。また、採水直後の地下水試料は、写真 2.2 のようにほぼ無色透明であった。その後、気泡を含まないように地下水を容器の縁まで充填し、密閉して保管した。

2. 2 現地での地下水試料の処理

容器に密封した地下水試料は、その後、採水地点（HDB-10 孔）から幌延深地層研究センターの実験室へ移送した。採取直後は透明だった地下水が、30 分～1 時間程度の短時間のうちに写真 2.3 のように白褐色に懸濁することが目視で確認された。採水時の大気との接触や溶存ガスの脱離により、地下水の水質が変化したことが予想された。

地下水試料の一部は、浮遊成分の組成を調べるために、 $0.45 \mu\text{m}$ のメンブランろ過および分画分子量(MWCO)10,000 の限外ろ過を実施した。懸濁した地下水試料および分画したろ液は酸で処理してから、地層処分基盤研究施設（ENTRY）に移送し、無機コロイドとしての成分（Na, K, Ca, Mg, Al, Si, Fe）を対象として、濃度を ICP-AES および原子吸光法により測定した。上述のように分画を行ったことにより、比較的大きな成分 ($>0.45 \mu\text{m}$) と小さな成分 ($0.45 \mu\text{m} \sim \text{MWCO}:10,000$) およびイオン形態の成分 ($<\text{MWCO}:10,000$) を把握した。なお別途、地下水中のアニオンについても、イオンクロマトグラフ法および TOC により分析を行った。

2. 3 大気開放による地下水水質への影響の推定

採水した地下水試料は、地層処分基盤研究施設に移送後、容器に密封した状態のまま雰囲気制御ボックス内で保管した。なお 2. 1 で確認されたように、本試料は採水時にガスが混在して吐出していたと考えられること、また後述するように脱ガスが地下水水質に影響を与える要因となり得ると考えられることから、ここでは採水した試料の一部を大気に開放し、水質にどのような変化が生じるかを確認することとした。

保管した試料は目視では懸濁が減じていたが、容器壁に白色結晶状の付着物が析出するのが確認された。大気下で試料を容器ごと超音波洗浄処理し、結晶状の粒子を容器壁から剥離させた状態を写真 2.4 に示す。本写真において、容器底部に白色の結晶が沈降しているのが確認される。本試料をエアポンプを用い大気下でバブリングし、大気で十分に置換した。本操作により試料の液性は、pH=7.9 から 8.6 まで増加することが確認された。

試料を 1 昼夜静置した後、デカンテーションにより沈殿と上澄み液とを分離した。回収

した沈殿を純水でよく洗浄し、乾燥した状況を写真 2.5 に示す。分離した上澄み液は、分子量 10,000 の限外ろ過を実施し、上澄み液およびろ液の成分 (Na, K, Ca, Mg, Al, Si, Fe) の濃度分析を ICP-AES および原子吸光法で実施し、浮遊成分の有無を確認した。この限外ろ過によりフィルター上に捕捉された浮遊成分については、SEM-EDS によって形状観察と元素成分の分析を実施した。一方、純水で洗浄した沈殿は XRD により生成物の同定を行うとともに、沈殿を酸で溶解した溶液を分析することにより成分元素の確認を行った。

さらに上澄み液中の浮遊成分については、電気泳動法によりゼータ電位を、またレーザー回折法により粒径分布をそれぞれ測定し、コロイドの分散安定性の予測評価のための特性データを取得した。



写真 2.1 HDB-10 孔での採水状況



写真 2.2 地下水の採取直後の状況



写真 2.3 懸濁した地下水試料の状況



写真 2.4 沈殿が生じた地下水試料の状況



写真 2.5 回収された沈殿の状況

3. 分析結果

3. 1 現地処理試料の分析結果

現地（幌延深地層研究センター）で分画処理した試料の分析結果を表3.1に、また別途実施したアニオンの分析結果を表3.2に示す。なお、今回の地下水採取では、短時間のうちに懸濁物の生成が認められたことから、コロイドの粒径の定義（約 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下）ではなく、溶液中に浮遊している全ての成分を対象として、粒径の大きい成分（ $>0.45\text{ }\mu\text{m}$ 、表3.1の①）と小さい成分（ $0.45\text{ }\mu\text{m} \sim \text{MWCO}:10,000$ 、同表の②）およびイオン形態の成分（ $<\text{MWCO}:10,000$ 、同表の③）の把握を行った。また表3.1には、(1)式で定義される各元素の浮遊成分の割合も併せて示した。これは地下水中に存在する該当元素の全濃度に対する、粒子として浮遊している全成分の濃度の割合を意味する。

$$\frac{(\text{粒径の大きい成分の濃度}) + (\text{粒径の小さい成分の濃度})}{(\text{粒径の大きい成分の濃度}) + (\text{粒径の小さい成分の濃度}) + (\text{イオン形態の成分の濃度})} \times 100\% \quad (1)$$

浮遊成分中に確認された元素としては、Naが最も濃度が高い。ただし、Naは本試料における支配的な元素であり、溶液中の濃度としては他の元素と比較して20倍以上大きい値を有している。したがって、溶液全体に対するNaの浮遊成分の割合は2.8%程度であり、操作上や分析上の誤差の影響によりコロイド成分を見積もっている可能性がある。同様に浮遊成分の割合が小さいKやMgについても、上記の誤差の影響も考えられ、その取り扱いは留意すべきと考える。

一方、浮遊成分の割合が10%をこえるCaやSiについては、有意な量の浮遊成分が存在している可能性が高いと考えられる。とくにAlやFeについては、限外ろ過後の溶液中には検出されないにも関わらず、ろ過前の溶液では検出されているので、本試料中では浮遊成分として存在している可能性が極めて高いと考えられる。これらの結果から、浮遊成分としては、粒径が $0.45\text{ }\mu\text{m}$ より大きい成分の方が比較的多く、数10mg/L程度が含まれていると判断される。

3. 2 大気開放試料の分析結果

採水した地下水試料は表3.1に示したように、浮遊成分としてCaが比較的多く含まれていることが確認された。Caは難溶性の炭酸塩を形成する性質があり、この塩の析出は炭酸分圧にも依存する。今回の採水ではガスが混在して吐出していたと考えられることから、炭酸を含むガスが地下水から脱離していたことも推測される。そこで地上での地下水の状態を確認するため、地下水試料を大気で置換・開放し、水質にどのような変化が生じるかを確認した。大気開放後の地下水試料の分析結果を表3.3に示す。なお、大気開放後の試料は後述のフィルター上の捕捉粒子のSEM観察にも供したことから、直接、分画分子量10,000の限外ろ過を実施し、浮遊成分全体のろ別を行った。また、本表において(1)式と同様に定義される浮遊成分の割合については、(2)式により算出した。

$$\frac{(\text{浮遊成分の濃度})}{(\text{浮遊成分の濃度}) + (\text{イオン形態の成分の濃度})} \times 100\% \quad (2)$$

浮遊成分中に確認された元素としては、Na が最も濃度が高い。これは表 3.1 と同様に、Na が最も濃度が高い元素であり、操作上や分析上の誤差影響が他の元素よりも大きいことが考えられる。なお、現地処理試料において浮遊成分の割合が高かった Ca, Si, Al および Fe については、大気開放した試料ではその割合が低下している。これは前者については採水後に懸濁した試料を速やかに分画したのに対し、後者については試料を 1 昼夜静置してから沈殿と上澄み液とを分離したため、時間の経過とともに浮遊成分が十分に沈降することが可能であったことが考えられる。この表 3.3 の大気開放した試料の成分分析結果に基づけば、現地処理試料と比べて、有意な量の浮遊成分を確認するのは困難であった。

一方、限外ろ過によりフィルター上に捕捉された成分の有無を SEM で観察した結果を写真 3.1 に示す。この観察からわかるように、平滑なフィルター上には粒子状の成分が付着しているのが確認された。低倍率の図に見られるように、粒子の大部分はサブマイクロから数マイクロの大きさであったが、局所的には $10 \mu\text{m}$ に近いような、さらに大きな粒子が凝集している状態も観察された。またその多くを占めるサブマイクロから数マイクロの大きさの粒子を高倍率で観察したところ、比較的均一なサブマイクロの大きさの単位粒子を形成し、これらがさらに複数結合してより大きな数マイクロの粒子を形成していると推定される状況が確認された。なお、フィルター上の粒子を EDS で元素分析した代表的な測定結果を図 3.1 に示す。この図での Au は、測定試料への蒸着成分に起因している。この結果から、浮遊成分は Ca, C, O を主成分とするとともに、さらに Mg や Si なども含むことが確認された。なお上述したように、大気開放試料については、液相の分析からは有意な量の浮遊成分を確認するのが困難であった。そこで概算ではあるが、SEM 観察の結果から浮遊成分の液相中の濃度を(3)式から算出した。

$$C = \frac{4\pi(D/2)^3 Nd}{3} \frac{S}{S'V} \quad (3)$$

ここで、C : 浮遊成分の液相中の濃度[mg/L], D : 粒子を球形と仮定したときの粒径[m], N : SEM の画面上で観察された粒子の数[-], d : 粒子の比重[mg/m³], S : フィルターの全面積[m²], S' : SEM で観察した画面の面積[m²], V : ろ過した液量[L]である。写真 3.1 の高倍率での観察結果をもとに、観察面積（約 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ）あたりに、粒径 $1 \mu\text{m}$ の粒子が 10 個存在するものと仮定すると、もとの大気開放試料中には 0.9 mg/L 程度の浮遊成分が存在していたことが試算された。この浮遊成分が炭酸カルシウムであると仮定すると、Ca 濃度としては約 0.4 mg/L に相当することになる。SEM で観察した状況の代表性や粒子の球形近似の仮定があり、算出される値は概略的な見積もりではあるが、濃度差から算出する液相分析からは判別が困難な微量の浮遊成分が存在していたことが推測される。

次に、回収した沈殿の XRD の測定結果を図 3.2 に示す。純水で沈殿を洗浄したため、地下水の主要な成分である NaCl (ハライト) の析出は検出されず、測定された回折パターンは CaCO_3 (カルサイト) のそれにはほぼ一致した。このことは、大気開放による水質の変化は、炭酸分圧に依存する炭酸カルシウムの溶解性の変化に起因するという推定を支持する。なお、回収した沈殿 10 mg を酸 50 mL に溶解した溶液の分析結果を表 3.4 に示す。これより

Ca を主成分として含んでいることが組成分析からも確認された。また、沈殿には Ca と同様に炭酸塩を析出する可能性のある Mg も微量に含まれており、大気開放した試料では浮遊成分の割合が低下した Al および Fe についても、沈殿中に含まれていたことが確認された。このことは 1 昼夜静置した大気開放試料では、浮遊成分が沈降したとする上述の推定と整合する結果と考えられる。ただし、表 3.1 に示した現地で浮遊成分として確認された Al と Fe の濃度の割合 ($Al/Fe = 1.4/3.5 = 0.4$) と、表 3.4 で沈殿として確認された割合 ($Al/Fe = 0.1/1.8 = 0.06$) とは一致していないため、両者の生成・沈降に伴う挙動は同様ではない可能性が推測される。

電気泳動法で帶電状態の測定を実施したところ、分離した上澄み液中には電位差によつて泳動する粒子が存在することが確認された。これは SEM 観察では、浮遊成分が確認された結果を裏付けるものである。電気泳動法から、浮遊粒子のゼータ電位として -4mV が求められた。また、レーザー回折法による上澄み液中の粒子の粒径分布の測定結果を図 3.3 に示す。本図では相対粒子量を体積基準として示しており、粒径に対して 3 乗の重み付けを行つている。そのため粒径の大きな成分は個数が少くとも、相対粒子量としては大きく評価される傾向がある。本測定からは、粒径として $0.3\sim10 \mu m$ 程度の幅広い分布が確認され、コロイドとして定義されるような $1 \mu m$ 以下の粒子よりも、さらに大きな粒子が含まれることがわかった。これは SEMにおいて、サブマイクロから $10 \mu m$ に近いような種々の大きさの粒子が観察された傾向と一致するものと考えられる。今回は粒径分布に関する経時変化を確認していないため断定はできないが、上述のように浮遊成分は時間の経過とともに沈降していくことが推察されることから、この粒径分布の測定結果はコロイドのような微細な粒子が凝集することにより、比較的大きな粒子に成長し、さらにそれらが沈殿を形成していく過程を反映していることが推察される。

表 3.1 現地で分画処理した地下水試料の分析結果 (mg/L)

分画試料	Na	K	Ca	Mg	Al	Si	Fe
$> 0.45 \mu m$ ①	40	5.4	23.8	ND*	1.4	3.4	3.5
$0.45 \mu m \sim MWCO:10,000$ ②	120	5.4	6.2	0.4	ND	0.4	ND
$< MWCO:10,000$ ③	5500	158	182	119	ND	27.4	ND
浮遊成分の割合 (①+②)/(①+②+③) × 100(%)	2.8 %	6.4 %	14.2 %	0.3 %	100 %	12.2 %	100 %

* : 濃度差が負に算出されるケースは、本表では ND として標記した。

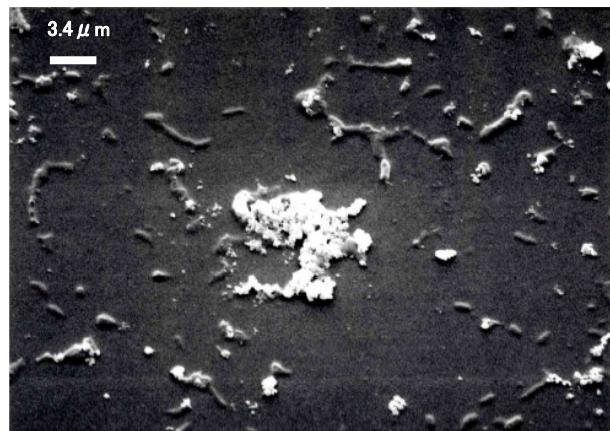
表 3.2 地下水試料中のアニオンの分析結果 (mg/L)

Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
7510	ND	1740

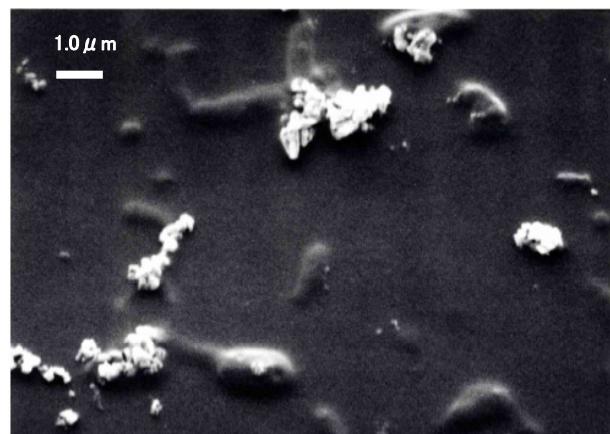
表 3.3 大気開放後の地下水試料の分析結果 (mg/L)

分画試料	Na	K	Ca	Mg	Al	Si	Fe
> MWCO:10,000 ①	40	3.0	ND*	4.6	ND	0.2	ND
< MWCO:10,000 ②	5060	122	38.6	97.7	ND	26.5	ND
浮遊成分の割合 ①/(①+②)×100(%)	0.8 %	2.4 %	0 %	4.5 %	0 %	0.7 %	0 %

* : 濃度差が負に算出されるケースは、本表では ND として標記した。



(低倍率)



(高倍率)

写真 3.1 限外ろ過フィルターによって捕捉された成分の観察結果

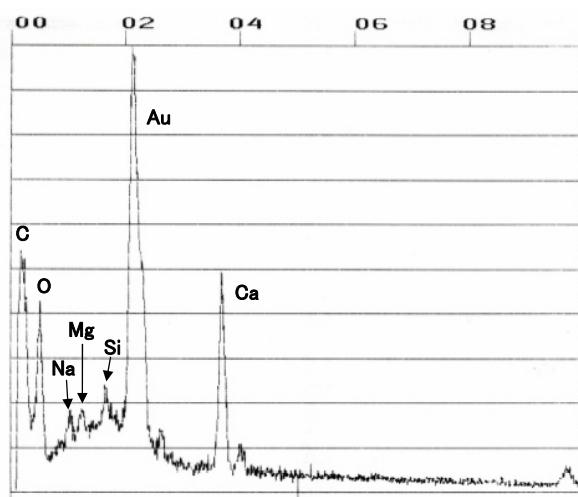


図 3.1 捕捉された粒子の元素組成の分析結果

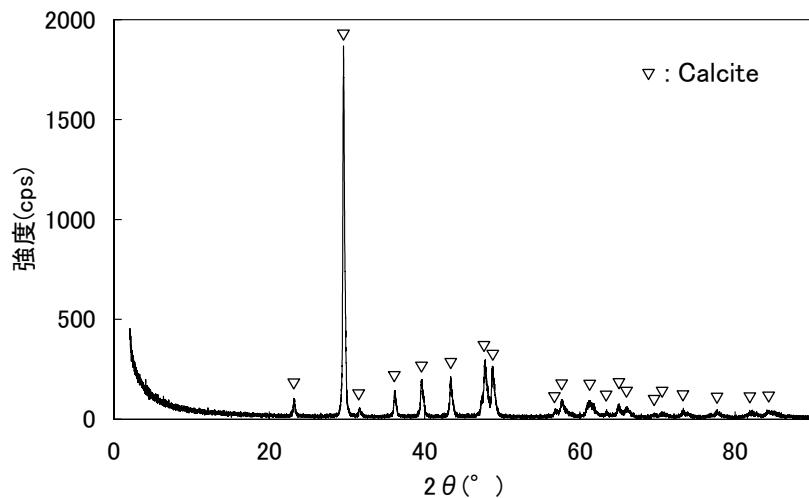


図 3.2 大気開放した試料で回収された沈殿の XRD 測定結果

表 3.4 酸溶解した沈殿の分析結果 (mg/L)

Na	K	Ca	Mg	Al	Si	Fe
ND	ND	66.0	2.5	0.1	ND	1.8

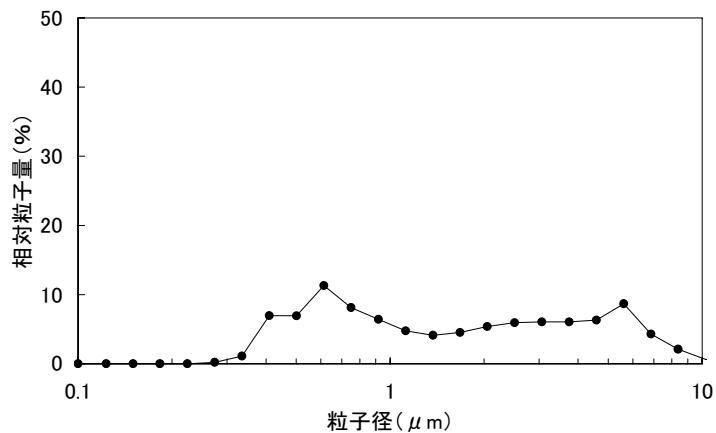


図 3.3 大気開放試料の上澄み液中の粒径分布の測定結果

4. 考察

4. 1 地下水試料のマテリアルバランスの検討

現地で処理した地下水試料と大気開放を行った試料の分析結果を表 4.1 に比較する。なお、現地処理試料は懸濁物を含めたろ過前の濃度を示しており、また大気開放試料は上澄み液と沈殿での含有量を別々に求め、その和を試料全体での濃度として評価した。ここで沈殿は、表 3.4 の組成分析結果をもとに、大気開放試料に溶解したものとして相当する液相濃度に換算した。

これらの結果を比較すると、大気開放試料の Ca については、沈殿の形成に多くの供給され、上澄み液中に溶解している量は全体の 20%程度でしかないことがわかる。3. 1 で記述したように、現地処理試料では浮遊成分の割合が約 14%であったが、大気で強制的に置換した開放試料では、さらに難溶性の炭酸塩が増加し、割合が逆転したことになる。このように炭酸カルシウムの形成に関与する Ca は、とくに顕著に水質変化の影響を受けていることが確認された。

なお、現地処理試料と大気開放試料とでマテリアルバランスを比較すると、Mg, Fe, Si については比較的一致しているが、Ca, Al, Na, K については大気開放試料において全体としての物質量が減少している。この相違の原因は現状では特定されていないが、Ca については、2. 3 で記述したように炭酸塩が容器壁などに付着して析出したことが可能性として推定され、試験容器や大気置換のためにバーリングに用いた器具などに付着し、沈殿としての操作上の回収ロスが生じたことが見込まれる。Al については、3. 2 で記述したように沈降挙動が異なることが考えられたが、上述のような回収ロスの可能性を含め、沈殿成分としての含有量が少ない理由について、なお慎重な検討が必要と考える。また、Na, K の可溶性の成分については、僅かではあるが負に帶電している沈殿成分と相互作用を有し、それを洗浄の過程でロスしたことなどが推測されるが、この点についても同様にお検討が必要である。

4. 2 採水による擾乱影響の予察的検討

本地下水試料は採水時に大気圧に開放され、溶存ガスが脱ガスしていたことが考えられ、またこの脱ガスによって地下水の水質が変化し、Ca を含む浮遊成分および沈殿が生成したことが考えられた。幌延地域の地下水中には炭酸ガスなどの溶存ガスが多く含まれ、地上に汲み上げた地下水では脱ガスが生じる可能性が指摘されている^{7,8)}。ここでは、炭酸ガスの脱離を炭酸分圧の大気条件への減少として扱い、沈殿として確認された炭酸カルシウムの溶解性にどのような変化を生じさせたかについて、取得された限られた範囲のデータではあるが、予察的な評価を行うこととする。

炭酸カルシウムの溶解に関係した平衡定数は、25°C, 1 気圧の条件では、以下のようである⁹⁾。

$$K_{CaCO_3} = (\gamma_{Ca^{2+}} m_{Ca^{2+}}) (\gamma_{CO_3^{2-}} m_{CO_3^{2-}}) = 10^{-8.3} \quad (4)$$

$$K_{H_2CO_3} = \frac{(a_{H^+})\gamma_{HCO_3^-} m_{HCO_3^-}}{m_{H_2CO_3}} = 10^{-6.4} \quad (5)$$

$$K_{HCO_3^-} = \frac{(a_{H^+})\gamma_{CO_3^{2-}} m_{CO_3^{2-}}}{\gamma_{HCO_3^-} m_{HCO_3^-}} = 10^{-10.3} \quad (6)$$

$$k_{CO_2} = \frac{m_{H_2CO_3}}{P_{CO_2}} = 10^{-1.5} \quad (7)$$

なお、 $\gamma_{H_2CO_3} = 1$

ここで、 γ_i ：イオン i の活量係数[-]、 m_i ：イオン i のモル濃度[mol/L]、 a_{H^+} ：実測された水素イオン濃度[mol/L]である。各イオンの活量係数は、以下の Davies の式から算出した¹⁰⁾。

$$-\log \gamma_i = Az_i^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3I \right) \quad (8)$$

z_i ：対象とするイオンの価数[-]、 I ：溶液のイオン強度[mol/L]であり、また A は溶媒の種類（ここでは水）によって決まる定数である。本地下水試料の分析値からは、 $I=0.26$ が求められる。そこで(8)式から炭酸カルシウムの形成に関与する各イオンの活量係数を表 4.2 のように算出した。

これらの活量係数を考慮すると、(4)～(6)式の平衡定数は本地下水試料中では以下のように補正される。

$$K'_{CaCO_3} = m_{Ca^{2+}} m_{CO_3^{2-}} = 10^{-7.2} \quad (4')$$

$$K'_{H_2CO_3} = \frac{a_{H^+} m_{HCO_3^-}}{m_{H_2CO_3}} = 10^{-6.3} \quad (5')$$

$$K'_{HCO_3^-} = \frac{a_{H^+} m_{CO_3^{2-}}}{m_{HCO_3^-}} = 10^{-9.9} \quad (6')$$

これらの(4')～(6')式および(7)式から、溶液の pH、接触するガスの炭酸分圧と Ca 濃度の関係は以下のように表される。

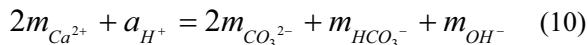
$$\log m_{Ca^{2+}} = 10.4 - 2pH - \log P_{CO_2} \quad (9)$$

この(9)式の関係を図示すると図 4.1 における平衡濃度曲線のようになる。なお、幌延地域の地下水の既存の調査^{7,8)}では、炭酸分圧として数%～約 20%程度が測定された結果がある。そこで本図では大気中での炭酸分圧である 0.033%を想定するとともに、炭酸分圧が高い地下環境での条件を模擬するため、10%および 20%として設定した計算結果も示した。これか

らわかるように、炭酸カルシウムとの溶解平衡を仮定した計算では、酸性条件 (pH が減少) で溶解する Ca 濃度が増加し、また同一の pH であれば炭酸分圧が大きいほど、Ca 濃度が減少する。

今回の採水で吐出する地下水の液性を現地で測定したところ、pH=6.7 であり、この湧出直後の段階ではまだ試料に懸濁は生じていなかった。そのため、現地処理試料における懸濁した成分も含めた Ca 濃度 (212mg/L, 表 4.1) が、採水時点ではまだ維持されていたものと推測される。一方、地下水試料の保管および大気でのバブリングにより、pH は増加することが確認され、十分に大気と接触させた段階では pH=8.6 となり、Ca 濃度 (38mg/L, 同表) は低下した。これらの関係を図 4.1 に併せて記載する。本図に示した採水時および大気開放時の水質は、それぞれ炭酸分圧 20% および炭酸分圧 0.033% における平衡濃度曲線に近い位置にある。今回の採水では溶存ガスに関するデータ取得を行っていないため断定はできないが、既存の調査で確認されているように炭酸分圧が 20% 程度の条件であるとすれば、液性として酸性側であるため、Ca の溶解濃度が高い条件が維持されていたことが推察される。この地下水を地上で採水すると、大気中の炭酸分圧と平衡となり、その過程で余剰の炭酸は脱ガスとして脱離する。そのため試料の pH は増加し、Ca の溶解濃度も低下することになる。その濃度減少分の Ca は炭酸カルシウムの生成に寄与し、最終的には沈殿として沈降する。またその過程では、一時的に微細な浮遊成分として上澄み液中に存在することもおこり得るものと思われる。

なお、溶液中の電荷バランスとして(10)式のように、溶液の pH が炭酸カルシウムの溶解と炭酸分圧にのみ支配され、他の共存固相や共存イオンが pH に影響を与えない状態を仮定する。



この(10)式が成立する条件であれば、(4')～(6')式および(7)式と連立させることにより、炭酸分圧に依存した pH と Ca の平衡濃度を特定の条件として求めることができる。この電荷バランスを考慮したときの、炭酸カルシウムとの平衡状態における pH および Ca 濃度を表 4.3 に示す。これらの予測計算結果は図 4.1 に示した、採水時および大気開放時の地下水試料の pH および Ca 濃度の実測値とおおむね整合する結果が得られた。このことより、本地下水中での pH および Ca 濃度に関する擾乱影響については、炭酸分圧に依存する炭酸カルシウムとの溶解平衡によって説明できるものと考えられる。

なお、今回は常温・常圧の条件を仮定し、炭酸カルシウムの溶解平衡を予察的に検討したが、地下条件下では温度や圧力が地上とは異なることが考えられるので、より厳密に地下環境での状態を推定するためには、これらの要因についても、今後、考慮することが必要であると考えられる。

4. 3 浮遊物の分散安定性に関する検討

上述の結果より、採水した地下水中に一時的にコロイド的な挙動を示す浮遊物が存在する可能性が確認された。このような浮遊粒子の溶液中の分散安定性を理論的に検討する

ために、大気開放した試料を対象に DLVO 理論を適用した予測評価を実施した。なお本検討では、球形粒子同士の相互作用を仮定し、ポテンシャルの算出を行った¹¹⁾。

まず、粒子表面での電気二重層による静電的な反発ポテンシャル $V_r[J]$ は、(11)式より算出した。

$$V_r = \frac{\varepsilon a^2 \phi_0^2 (1+a)}{h+2a} \ln \left[1 + \frac{a}{h+a} \exp(-\kappa h) \right] \quad (11)$$

ここで、 ε ：水の比誘電率[-], a ：粒子半径[m], ϕ_0 ：表面電位[mV], h ：粒子間距離[m]である。また、 κ ：電気二重層の厚さの逆数であり、これは(12)式より算出される。

$$\kappa = \sqrt{\frac{8\pi n z^2 e^2}{\varepsilon k T}} \quad (12)$$

ここで、 n ：溶液単位体積中のイオン数[-/m³], z ：イオンの価数[-], e ：電子の電荷[esu], k ：Boltzmann 定数[J/K], T ：絶対温度[T]である。

一方、中性分子間に作用する London-van der Waals 力による引力ポテンシャル $V_a[J]$ は、(13)式より算出した。

$$V_a = -\frac{A}{6} \left[\frac{2}{s^2 - 4} + \frac{2}{s^2} + \ln \left(\frac{s^2 - 4}{s^2} \right) \right] \quad (13)$$

ここで、 A ：Hamaker 定数[J]である。なお、 s は(14)式で示されるパラメータである。

$$s = \frac{h}{a} + 2 \quad (14)$$

1 対の球状粒子間に作用する全ポテンシャル $W[J]$ は、これらの反発と引力のポテンシャルの和で示される。

$$W = V_r + V_a \quad (15)$$

採取した地下水は NaCl が成分として支配的であることから、本検討では溶液を 1 倍の対称型電解質として扱うこととし、以下のような設定で予測評価を行った。

- NaCl 濃度 : 0.2 mol/L (地下水の組成分析結果より設定)
- 粒径 : 500 nm (粒径分布の測定結果より、粒径の小さい成分を設定)
- 表面電位 : -4 mV (ゼータ電位の実測値を代用、なお-30, -40 mV とした設定も実施)
- Hamaker 定数 : 1E-20 J

ゼータ電位測定で実測された-4mV を設定し、反発ポテンシャル V_r 、引力ポテンシャル V_a 、およびその和の全ポテンシャル W を算出した結果を図 4.2 に示す。本条件ではゼータ電位は中性に近く、粒子表面での静電的反発がほとんどおこらないため、全ポテンシャルとしては引力ポテンシャルが支配的に作用している。本図のように、全ポテンシャルのエ

エネルギー曲線に正のエネルギー障壁が存在せず、粒子間に引力（負のポテンシャル）のみが支配的に作用する状態は、粒子同士が凝集する状態であることを予測している。この理論的な評価結果に基づけば、大気開放した試料に存在した浮遊粒子は、コロイドのような分散安定な状態を形成しないことを示している。

なお図4.3には、この表面電位を-4mVの他に、-30mVおよび-40mVと設定したときの粒子間の全ポテンシャルWの依存性を示している。表面電位の絶対値が増加するにしたがい、粒子間の反発ポテンシャルが増加し、-30mVを設定した条件からは粒子の接近を阻害するポテンシャル障壁が生成することが予測された。本評価に基づけば、浮遊粒子がコロイド的な分散安定な挙動を示すためには、-30～-40mV程度以上の表面電位が必要であることが推定される。

一般にコロイド粒子はイオン濃度の高い溶液中では分散安定性が低く、安定には存在しにくいと考えられる。今回の地下水採取では、大気開放による水質の擾乱により、炭酸カルシウムを主成分とする浮遊粒子が生成する可能性が推定されたが、DLVO理論による予測評価の結果からは、コロイド粒子として長期的には安定に存在しにくいことが予想された。粒径分布の測定で示唆されたように、浮遊成分については $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下のコロイド成分だけではなく、それらがさらに凝集したと考えられる $1\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の粒径の大きな成分も確認され、これらは最終的には沈殿として沈降するものと考えられる。これらの理論予測や粒径測定からは、大気開放により確認された浮遊成分は、水質変化により沈殿を形成する過程で一時的に形成されたと考えられ、長期的な分散安定性は有さないことを示している。またこのことは、もとの地下環境中でもこれらの粒子は安定な状態で存在していなかったことを示唆するものと考える。

4. 4 摆乱影響の抑制のための調査方法の改善

今回の地下水採水では、水質の擾乱として最も顕著な影響を与えたのは炭酸カルシウムの生成（沈殿、浮遊成分）であった。この過程がコロイドの特性データの取得に及ぼす影響として、上述の結果や考察から、以下のような挙動が推察される。

- 地下環境では、地上での測定から推定されるほど、炭酸カルシウムについて過飽和になっていないと考えられ、汲み上げられる前の被圧された地下水中では、炭酸カルシウムの浮遊成分は存在していないと考えられる。地上での大気圧環境下での採水による炭酸分圧の低下によって、pHが増加する。このpHの変化により溶解度が減少し、その結果、比較的均一な粒径の粒子が析出する。また、炭酸カルシウムは膠結物質であり、結晶生成の段階で他の鉱物粒子を取り込むことも考えられる。析出した炭酸カルシウムは凝集して沈殿となるが、その過程で一時的にコロイド的な粒子として浮遊成分を形成する可能性がある。

この推察のように水質が変化する場合、地下環境ではコロイド粒子が存在しなくとも、地下水の存在する環境が変化することによって、コロイドが生成する可能性があると考えられ、地上で採水した地下水のコロイド濃度に関するデータに、正の誤差を与える要因となる。そのため、今回試料としたような水質の地下水については、Caに起因するコロイドに

については、その濃度を差し引くなどの補正を施したほうが、地下環境中でのコロイドの特性を推測する上では、より適切であると思われる。

なお、現地処理試料では Si や Al, Fe についても、それぞれ数 mg/L 程度はあるが、浮遊成分に含まれる可能性が確認された。擾乱影響としての炭酸カルシウムの生成が顕著であったため、これらの微量元素の無機コロイドとしての化学形態や粒径などの特性については、今回の分析の範囲では確認できなかった。しかしながら、既存の調査でも指摘されているように⁷⁾、幌延地域の地下水では酸化還元条件に鋭敏な Fe についても環境条件変化的影響を受けやすいことが考えられ、大気接触により難溶性の Fe(III)に変化し、その結果、現地処理試料中では浮遊成分として含まれた可能性も考えられる。また、比較的擾乱の影響を受けづらいと思われる Si や Al についても、これらのコロイドが炭酸カルシウムの形成に伴い、取り込まれるような相互作用を有していたならば、大気開放下で取得されたデータは、地下環境での特性を必ずしも反映していない可能性がある。

以上より、今回の地下水の調査・分析では、地下環境でのコロイドの特性を直接把握することは困難であったと考えられ、また環境変化による主要な水質変化については予察的な平衡計算から評価できたものの、コロイドの特性に及ぼす擾乱影響は多岐にわたることから、それらの全ての要因に対し正確な補正を施すことは現状の知見からは困難であった。したがって、今後、地下水中のコロイドの特性評価を実施するためには、まずは水質への擾乱影響を極力抑制するような処置を講じ、地下水の水質に応じて、炭酸分圧や酸化還元環境の維持に留意するなどのサンプリング方法や分析方法の改善を検討することが重要と考えられる。地下水の水質の調査については、地上からの調査および地下施設での調査などの状況によって、その手段が異なることが考えられるので、ここではそれぞれのケースを想定し、具体的な手法の改善案を提示する。

まず今回のように、地上からの調査を想定した場合は、地上に汲み上げられた地下水を採取し、別途、実験室などに移送して前処理や分析に供することになる。このようなオフラインでの調査・分析では、とくに脱ガス成分も含めた雰囲気の維持に留意して処理することが重要である。Fe などの酸化還元に鋭敏な元素に対する条件を維持するためには、Ar 雰囲気制御ボックスなどの利用が考えられるが、今回の地下水試料のように、pH の変化によって顕著な炭酸塩の析出が予想される水質の場合は、むしろ炭酸分圧を制御するようなシステムを検討し、試料の移送・処理などをを行うべきと考えられる。例えば、Ca²⁺や HCO₃⁻, pH などの地下水データから、4. 2 の予察計算で実施したように、事前に地下環境での炭酸分圧を推定することが可能である。推定される配合で炭酸ガスを含む混合ガスを準備して、作業雰囲気を調整し、pH に変化が生じないことおよび懸濁物が生成しないことを確認しながら、地下水の処理などを実施する方法が考えられる。

次に後者のように地下施設での調査が可能な場合は、分析に関わる主要な設備を直接施設に搬入することが可能と考えられる。例えば、グリムゼルにおける原位置試験では、搬送可能なコロイド分析装置を地下施設に設置し、坑道の試錐孔と接続して、コロイドを検出するようなシステムが検討されている¹²⁾。擾乱を抑制し、より正確な情報を取得するためには、大気との接触を避けることが可能なオンラインでの採水と、それと接続可能な分

画などの処理や分析システムを検討しておくことが望まれる。

表 4.1 現地処理試料と大気開放試料の組成分析結果の比較 (mg/L)

試料		Na	K	Ca	Mg	Al	Si	Fe
現地処理試料	懸濁試料	5660	169	212	117 ^{*2}	1.4	31.2	3.5
大気開放試料	上澄み液①	5100	125	38.1 ^{*2}	102	ND	26.7	ND
	沈殿② ^{*1}	ND	ND	129	4.9	0.1	ND	3.5
	試料全体 (①+②)	5100	125	167	107	0.1	26.7	3.5

*1: 表 3.4 の沈殿の分析結果より、大気開放試料に溶解したときに相当する濃度を算出した。

*2 : 表 3.1(Mg)および表 3.3(Ca)で濃度差が負に算出されたため、表 3.1 および表 3.3 における各分画成分の濃度の和とはなっていない。

表 4.2 炭酸カルシウムの形成に関与する各イオンの地下水試料中の活量係数の計算値

イオン i	Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
活量係数 γ_i	0.30	0.30	0.74

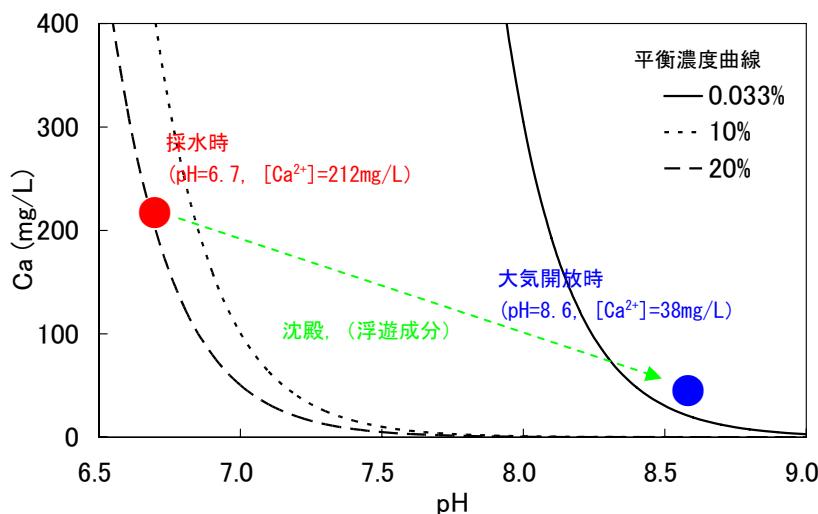


図 4.1 地下水試料中の pH, 炭酸分圧と Ca 濃度に関する計算結果

表 4.3 電荷バランスが考慮されるときの炭酸カルシウムとの平衡状態の計算結果

炭酸分圧	pH	Ca^{2+} (mg/L)
0.033%	8.5	36
10%	6.8	233
20%	6.6	293

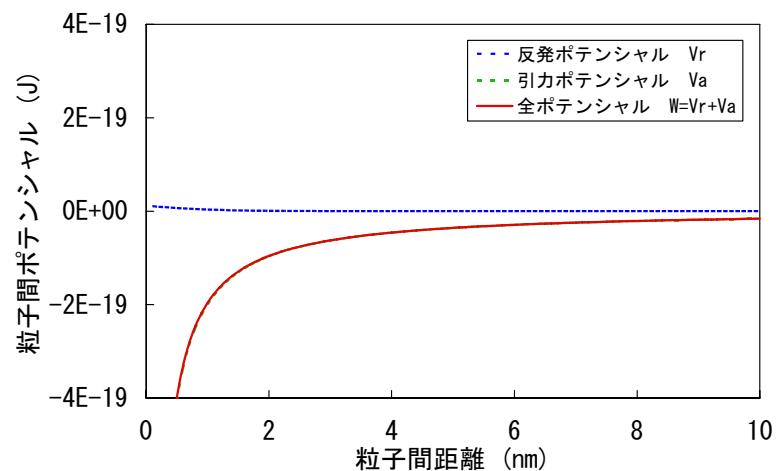


図 4.2 粒子間ポテンシャルの計算結果（表面電位として-4mVを設定）

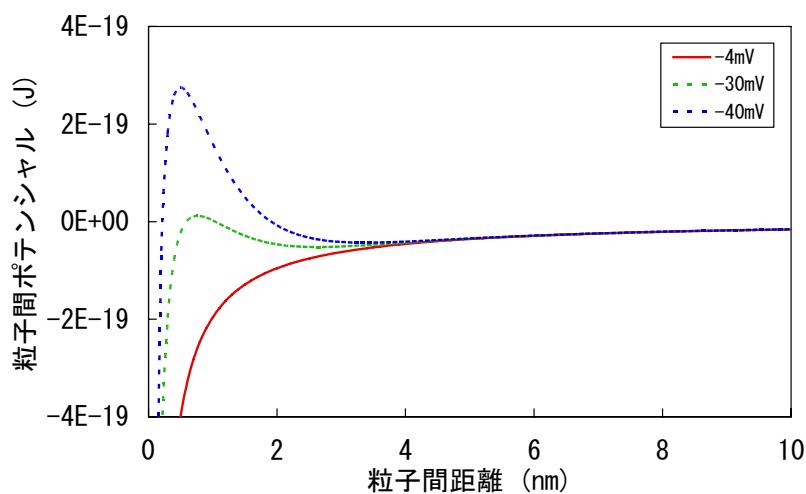


図 4.3 粒子間ポテンシャルの表面電位依存性

5. おわりに

地下水中に存在するコロイドの特性評価データの信頼性を確認するためには、想定される地下条件とデータ取得を実施した条件とを比較し、採水などに伴う環境の変化が擾乱影響の要因となるいかを十分に検討することが重要と考えられる。本研究では、幌延深地層研究センターにおいて採取した実地下水を対象として、地下水中のコロイドの特性評価を試行するとともに、地上に汲み上げることによる地下水試料の環境条件の変化により、浮遊成分や沈殿の生成といった擾乱がおこり得るかについて検討を実施した。

ボーリング孔から湧出する地下水を地上で採水した。その際に、ガス成分の混入と思われる断続的な地下水の吐出が認められ、湧出直後で pH=6.7 であった。また短時間で試料は懸濁することが確認された。現地で分画処理した試料の液相組成を分析したところ、Ca については有意な量の浮遊成分が存在し、とくに Al や Fe については本試料中でほぼ全量が浮遊成分として存在していると考えられた。ただし、これらの取得された浮遊成分の特性については、後述のような擾乱の影響を受けていることが推測され、その取り扱いについてはなお検討を要すると考えられる。

大気開放による脱ガスが地下水水質に影響を与える要因となることから、採水した試料を大気で置換し、生起する変化を確認した。Ca は沈殿の形成に多くが供給され、上澄み液中に溶解している成分はもとの地下水中的 20%程度でしかないことがわかった。これは地下条件から採水条件への環境の変化による炭酸分圧の低下により、pH がアルカリ側にシフトしたことが原因と考えられる。なお、これらの pH および Ca 濃度に関する擾乱影響は、炭酸カルシウムとの溶解平衡を想定した予察的な計算によって説明することができた。

なお大気開放試料についても、微量ではあるが Ca を含む浮遊成分が確認された。ただし、この浮遊成分についてはゼータ電位が中性に近く、コロイドのような長期的な分散安定性は有さないと考えられること、また粒径分布の測定結果からも、コロイドのような微細な粒子が凝集して、比較的大きな粒子に成長し、沈降していく過程が推察されたことから、大気開放による水質の変化の過程において一時的に生成し残留していたことが予想された。この考察に基づけば、現地で処理した試料中の浮遊成分としての Ca についても、もとの地下水中に存在していたと考えるよりも、採水による擾乱により一時的に含まれていたものと考える方が妥当と考えられる。

このことからコロイドの特性に関するデータの信頼性を確認するためには、現地で取得されたデータだけではなく、採水に伴う環境の相違が及ぼす影響を検討することが重要であると考えられた。また、これらの影響要因を極力抑制するために、地下水の水質に応じて、炭酸分圧や酸化還元環境の維持に留意するようなサンプリング方法の改善を行うことが、今後の課題と考えられる。そのためのポイントを以下に記述する。

- 採水した地下水を、別途、実験室などに移送して分析に供する場合は（オフライン）、脱ガス成分も含めた雰囲気の維持に留意して処理することが重要と考える。還元条件を維持するために、Ar 雰囲気制御ボックスなどを利用することが考えられるが、今回のように pH の変化により炭酸塩の析出が予想されるような水質の場合は、むしろ炭酸分圧を制

御できるようなシステムを検討し、試料の移送・処理などを行うべきと考えられる。

- より正確な情報を取得するためには、大気との接触を避けるためのオンラインでの採水と、それと接続可能な分画などの処理や分析システムを検討することが望まれる。

謝辞

本研究にあたって、地下水試料の採取では、検査開発株式会社の磯貝武司氏、地層処分基盤研究開発ユニット・博士研究員の藤井直樹氏（現 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター）および幌延深地層研究センターの各スタッフの皆様に多くのご協力を頂きました。また地下水試料の液相分析・固相観察では、地層処分基盤研究開発ユニット・飯島和毅氏および陶山忠宏氏に多大なご支援を頂きました。

ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“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次取りまとめ一分冊3 地層処分システムの安全評価”，JNC TN1400 99-023, (1999).
- 2) Y. Kuno, G. Kamei and H. Ohtani: “Natural colloids in groundwater from a bentonite mine - Correlation between colloid generation and groundwater chemistry-”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 713, pp.841-848 (2002).
- 3) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成17年取りまとめ一分冊3 安全評価手法の開発”，JNC TN1400 2005-016, (2005).
- 4) M. Laaksoharju: “Groundwater characterization and modelling : problems, facts and possibilities”, SKB Technical Report TR-99-42, (1999).
- 5) C. Deguelde, I. Triay, J. Kim, P. Vilks, M. Laaksoharju and N. Miekeley: “Groundwater colloid properties : a global approach”, Appl. Geochem., Vol.15, pp.1043-1051(2000).
- 6) J. McCarthy and C. Deguelde: “Sampling and characterization of colloids and particles in groundwater for studying their role in contaminant transport”, In Characterization of environmental particles, IUPAC Environmental analytical chemist series Vol.II, Lewis publishers, inc. (1993).
- 7) K. Hama, T. Kunimaru, R. Metcalfe and A. Martin: “The hydrogeochemistry of argillaceous rock formations at the Horonobe URL site, Japan”, Phys. Chem. Earth, Vol.32, pp.170-180 (2007).
- 8) H. Sasamoto, M. Yui and K. Hama: “A preliminary interpretation of groundwater chemistry in the Horonobe area, Japan”, In Water-rock interaction, Vol.1, pp. 385-389, Taylor and Francis Group. (2007).
- 9) R. Garrels and C. Christ: Solutions, minerals and equilibria, Freeman Cooper and Company. (1965).
- 10) W. Stumm and J. Morgan: Aquatic chemistry, John Wiley and Sons, inc. (1981).
- 11) 北原文雄, 古澤邦夫: 最新コロイド化学, 講談社, (1990).
- 12) A. Möri, W. Alexander, H. Geckelis, W. Hauser, T. Schäfer, J. Eikenberg, Th. Fierz, C. Deguelde and T. Missana: “The colloid and radionuclide retardation experiment at the Grimsel Test Site: influence of bentonite colloids on radionuclide migration in a fractured rock”, Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects, Vol.217, pp.33-47(2003).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
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	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法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
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	J/kg
線量当量、周辺線量当量	カーマ		
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)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“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$m^2 \cdot s^{-2}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-3}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1b=100 fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイニン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm ² =0.1Pa · s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m/s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≈ (1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≈ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジヤンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
標準大気圧	atm	1 Torr = (101 325/760) Pa
カリヨーン	cal	1 atm = 101 325 Pa
ミクロ	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

