



地層処分におけるコロイドおよび微生物の影響評価

吉川英樹 黒澤 進

東海事業所環境技術開発部

資料番号：99-2

Experimental Investigation of Colloidal and Microbiological Effect for Geological Disposal

Hideki Yoshikawa Susumu Kurosawa
(Waste Technology Development Division, Tokai Works)

緩衝材として期待されるベントナイト中の核種の移行挙動を理解するためには、圧縮ベントナイトの間隙構造を明らかにすることが重要である。仮に圧縮ベントナイトの間隙径が、コロイドや微生物等より大きい場合、これらはベントナイト中を容易に移行し、核種の移送媒体となることが想定される。しかし、このコロイドや微生物の透過について、間隙構造との関係を直接実験的に評価した例は未だない。

そこで、本研究では、それを実験的に評価するため、コロイドについてはコロイドの透過性の試験を、微生物についてはベントナイトの化学的緩衝作用を受けた地下水組成中での耐性の試験を行った。その結果、緩衝材として期待される圧縮ベントナイト中の核種移行に関しては、コロイドや微生物の影響はない可能性が示された。

1. はじめに

現在高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体にして地表より数百メートル以上深い地層中に処分する方策が考えられており、地層中での放射性核種の移行挙動を解明することは、処分システムの安全性評価の観点からも重要な課題である。ガラス固化体から地下水中に溶出した核種は、地下水中のコロイドや微生物に収着したり、あるいは核種自体がコロイドを形成して移動する可能性があることが近年指摘されてきている。

放射性核種はイオンの形で溶存している状態では、地層へ吸着して移行が遅延される。しかし、コロイドや微生物に収着した核種やコロイドを形成した核種は、地層へ吸着しにくい(静電的相互作用が小さい)ことから放射性核種の移行が遅延されない可能性がある。また逆に、大きな粒子に成長した場合は、沈澱して移行が抑制される可能性もある。

そこで、処分システムの性能評価においては、人工バリア材料の候補材として期待されるベント

ナイト(粘土鉱物の一種)や、その周辺岩盤中におけるコロイド、微生物の移行挙動について、知見の収集、評価を行うことが必要である。

処分環境を大きく人工バリアと人工バリア周辺の天然バリアの2つに分けた場合、人工バリア内では空隙のような物理的な環境が、人工バリア周辺では人工バリアの影響を受けた地下水の化学的な環境の評価が重要である。人工バリア内の物理的環境は、圧縮ベントナイトを人工バリア材料として用いるので、コロイドおよび微生物の移行性に大きく影響する。

これまでの研究では、圧縮成形されて用いられるベントナイトブロックの空隙構造が極めて小さいと推定されることから、コロイド、微生物は物理的に濾過(フィルトレーション効果)されて移行しないと推測されている。しかしながら、空隙構造とコロイド、微生物の透過の関係は、処分研究のシナリオ設定のうえで重要にも拘らず、未だ実験的に直接確認された例はない。

そこで微生物より大きき小さい粒径既知の金

コロイドを用いて、透水試験法により実験を行い、圧縮ベントナイト中での物質の透過性について検討を行った。

一方、微生物の影響を評価するには、さらに次の3つの段階があると考えられる。

- 1) 処分環境においてどのような微生物が存在するのか
- 2) 処分場に持ち込まれた微生物のうち、処分環境で生息する、すなわち代謝活性を持つことができるのか
- 3) 処分システムや処分シナリオに対し、微生物やその代謝生成物がどのような影響をおよぼすか

1) のためには天然で、特に深層地下水中に存在する微生物の種類と量を調査する必要がある。この場合1) で確認された微生物はその成長速度を求め、3) の評価を行うことになる。現状では1) について文献調査等で実施している段階である。

2) で述べた「処分環境で生息する」ということは「処分環境で活動する」ということである。微生物は活動することによって影響をおよぼすので、処分環境を模擬した培養条件での微生物の活性（増殖、代謝速度等）を測定すれば、間接的に活動度を測定することになる。

本報告では、これらに対応するためにコロイドの実験結果より微生物の圧縮ベントナイトによるフィルトレーション効果を考察した。また、人工バリア周辺の地下水の化学的環境は、酸化還元電位(Eh)、pH の条件に変動を持つ。これらをパラメータとして微生物の培養ができるような実験装置を用いることにより、微生物の生息環境の範囲を調査する実験を行った。

2. ベントナイトの金コロイド濾過試験

2.1 試験方法

コロイドの濾過試験は、図1⁴⁾に示すように、ケイ砂を混合した圧縮ベントナイトの試験体に対して、金(Au)コロイドが分散する試験液を用いた透水試験法により行った。

ベントナイト試料を透過するコロイド量は、試験体を透過した試験液を採取して、限外濾過10³nmまでの粒径のものを溶液中からこし分ける方法の1つ)を行ったものと行わないものに分けて、これらの液中のAuの濃度差より求めた。例えば、コロイド粒子が圧縮ベントナイト中を透過している場合は、この濾過操作によってコロイドはこし分けられるため、液中のAu濃度は濾過操作を行っていない方が高くなることが分かる。よって、本試

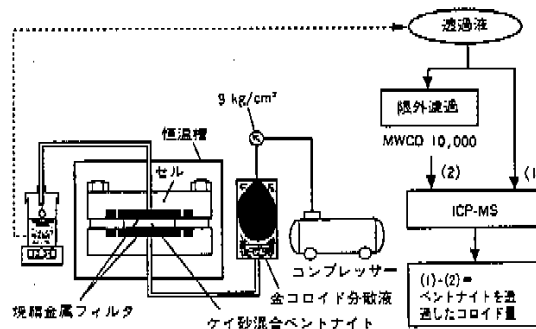


図1 コロイド移行試験の概略

験では圧縮ベントナイトを透過したコロイド量を、図1に示すように分画分子量(MWCO)10,000(孔径約1.5nm:本試験では粒径1.5nm以上の微粒子をコロイドと定義する)の限外濾過の有無より生じる透過液中のAuの濃度差から求めることとした。Auの濃度分析はICP質量分析法より行った。

ベントナイトには、Na型のベントナイトであるクニゲルV1(クニミネ工業(株)製)を用いた。また、ベントナイトには緩衝材に求められる熱伝導性の向上や経済性の観点から、ケイ砂を混合する検討⁵⁾が行われているので、本研究では、ケイ砂を混合したベントナイトについても評価を行った。

ケイ砂は市販の3号ケイ砂(粒径:0.92~1.18mm)を用い、ベントナイトに50 wt%の割合で混合した。試験に供した試料は、直径5 cm、高さ5 mmの寸法で、乾燥密度が1000, 1800 kg/m³となるよう圧縮成型した。そして試験は、これらの試料が蒸留水によって十分に浸潤したのち、金コロイドが分散する試験液を用いて透水を開始した。

なお、ベントナイトへのケイ砂混合率では、50 wt%以上では熱伝導率の向上は特に認められないこと⁶⁾、また、ケイ砂を多く含むことは経済性の観点からは良いと判断されるが止水性、膨潤性を低下させることから、本試験はケイ砂混合率50 wt%で実験を行った。

2.2 試験に供した金コロイドの分散性

コロイド粒子の圧縮ベントナイト中での移行性を評価する場合、用いるコロイドについては、1) 表面(またはゼータ)電位、2) 粒径分布、3) 分散液のpH、4) コロイド濃度が既知であること、さらには5) 分散性の高いコロイドを用いること等が望まれる。

そこで本研究では、荻野ら⁶⁾の報告に基づいて



写真1 TEMによるコロイド分散状態の観察結果

表1 クニゲルVIの主な溶出イオン組成²⁾(mol/L)

液固比 (mL/g)	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH
0.3	3.78×10^{-1}	1.97×10^{-1}	3.40×10^{-2}	9.7
1.0	7.39×10^{-2}	3.33×10^{-2}	5.57×10^{-2}	10.1

生成された分散性が極めて高い金コロイドを用いることとした⁴⁾。写真1には、ベントナイトを蒸留水に液固比0.3 mL/gの割合で浸漬させた場合に主に溶出するNa⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻を、コロイドが分散する液中に添加して、3ヶ月ののち、コロイドの分散状態を透過電顕(TEM)により観察した結果を示す。添加したイオンの濃度は表1⁴⁾に示す。

これらの結果から、荻野らの金コロイドは、ベントナイトから溶出するイオンが競合した場合でも、単分散(粒径約15 nm)しており、圧縮ベントナイト中を移行する過程でも凝集が起こり難いこと

が推測される。また、これら金コロイドの表面電荷は、表1に示したNa⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻の添加の有無にかかわらず、電気泳動法による測定では、一定の負の電荷(-6.9 mV)で帯電しており、ベントナイトの電荷も負であることを考慮すれば、静電的作用によるベントナイトと金コロイドの異種粒子間凝集も起こり難いと考えられる。

3. 試験結果および考察

図2には、乾燥密度1000 kg/m³で圧縮成型したベントナイト、ケイ砂混合ベントナイトの、透水試験での金コロイドの透過の割合を示す。その結果、ケイ砂を混合しないベントナイトはコロイドを100%濾過できるが、ケイ砂を混合した場合には、濾過効果を十分に維持できなくなることが分かった。この原因としては、次のことが考えられる。まず、ベントナイトは水の浸潤にともない層間に水を取り込み、膨潤して膨潤圧を発生する。この膨潤圧は、ベントナイトの粒子を表面の方へ押し上げるように働くため、表面に拘束するものがないときは(セル等を使って試料を囲んでない状態)、試料表面を元の位置より高くする。すなわち、自由膨張する。しかし、本試験のようにベントナイトが拘束条件下に置かれる場合、ベントナイトの膨潤やそれにともなう粒子移動は、その位置で粒子の局所的な再配置運動を発生させ、粒子間隙を圧縮する⁷⁾。その結果、コロイドが移行できないほどの狭隘な粒子間隙が形成され、コロイドはそこで濾過されると考えられる。しかし、ケイ砂を混合する圧縮ベントナイト(乾燥密度1000 kg/m³)では、ケイ砂を混合しない場合と比較して間隙率が大きいために、膨潤圧はケイ砂を混合しない場合と比較して低く、粒子間隙を圧縮する度

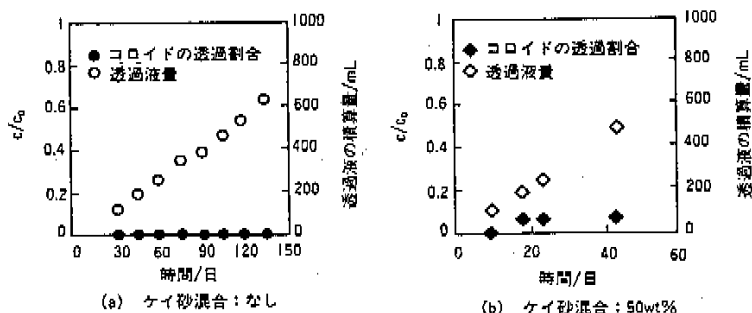


図2 圧縮ベントナイト(乾燥密度 1000kg/m³)のコロイド濾過試験の結果
C: ベントナイトを透過した後のコロイド濃度
C₀: ベントナイトを透過する前のコロイド濃度

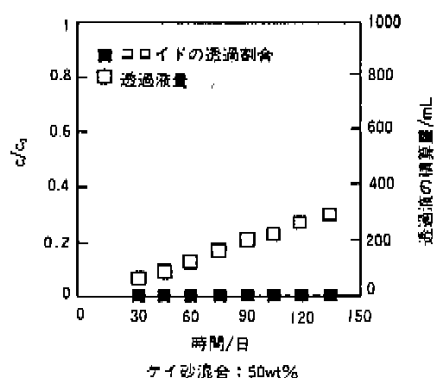


図3 圧縮ベントナイト (乾燥密度 1800kg/m³) のコロイド透過試験の結果
C: ベントナイトを透過した後のコロイド濃度
C₀: ベントナイトを透過する前のコロイド濃度

合も小さい。このため、ケイ砂を混合する圧縮ベントナイト (乾燥密度1000 kg/m³) では、コロイドの移行を抑制できるほど狭い粒子間隙が試料全体にわたって形成され難く、そこをコロイドが移行したものと考えられる。

これに対して、図3には、乾燥密度を1800 kg/m³で成型したケイ砂混合圧縮ベントナイトにおける、金コロイドの透過割合の結果を示す。これから分かるように、この圧密度においては金コロイドは100%透過されている。このことは、ベントナイトの圧密度を大きくしたことで膨潤圧が高まり、粒子の再配置運動を助長して、乾燥密度を1000 kg/m³のケイ砂混合ベントナイトと比較し、試料全体の粒子間隙をより狭いものへと圧縮できたためと考えられる。

したがって、実施した透水試験の結果に基づけば、圧縮ベントナイトおよびケイ砂混合圧縮ベントナイトは、圧縮成型の際の乾燥密度次第では十分にコロイドを透過できることから、圧縮ベントナイト中の核種移行評価に関して、コロイドの影響を無視できるものと推測される。

4. 微生物の耐性領域図の作成

微生物の影響評価研究では、研究の対象となる微生物として、深地層に存在する微生物と処分場建設時および固化体搬入時に、地表あるいは地表近くより持ち込まれる微生物がある。深地層に存在する微生物は、地質環境に特異的であり、現在の研究開発段階が特定の微生物を研究対象とするのは難しい。しかしながら、人工バリア材料の圧縮ベントナイトが健全であれば、前述のように微

生物より小さなコロイドが移行しないで、原位置の微生物が人工バリア内に進入する可能性は低い。

一方、持ち込まれる微生物は地表近くに存在する一般的な細菌があり、その微生物の中には処分環境あるいは人工バリア材料に影響を及ぼしそうな菌が存在し、人工バリア内部にも存在する。この侵入した微生物が人工バリア周辺岩盤を含めた処分環境で増殖し活性を持つかどうか重要であり、個々の微生物の活性と環境条件の関連を把握する必要がある。スウェーデンの考え方として、Pedersen²⁾、Champ³⁾によると処分場を地下約1000mとした場合、想定される地下環境は地下水中の溶存酸素濃度が0.1 ppm以下(空気と平衡だと約8ppm)で、酸化還元電位は-100~-300 mV(大気下で+200mV)と還元雰囲気であり、有機物含有量は全有機炭素量(TOC)で換算すると数 mg-TOC/Lと少ないという報告がある。pHは人工バリア材料の緩衝材の化学的作用によりアルカリ性になることが予想される。本報告では深部地質環境条件に適應できるかを判断する目的で環境因子として pH、Eh をパラメータとした生理活性を実験的に確認し、pH、Eh に関する耐性領域図の作成を行った。

4.1 微生物の培養方法

微生物の培養方法の一つに、液体培地をガラス容器中に入れ用いられるファーメンタ (発酵槽) 法がある⁹⁾。各種環境下における微生物の生育挙動をみるため、ファーメンタ培養装置で液体培地を用いた。pH および Eh を実験容器のガス相のガス成分でコントロールし、生育環境を制御させた環境下での増殖テストを行った。ここでは嫌気性細菌の研究に用いられる方法を参考にし^{9,10)}、本手法を用いて pH、Eh の制御が可能かの評価も併せて行った。

ファーメンタを図4に示した。ファーメンタへのガス流入配管、中和剤の配管には 0.2μm メンブレンフィルタを取り付け外部の微生物の侵入を防止した。本装置は、pH、ORP (酸化還元電位: Oxidation and Reduction Potential) 電極により pH、Eh を測定しながらの培養が可能である。

4.2 微生物の選定

処分システムの性能評価の観点から、微生物により影響を与えそうな現象と地表に広く存在する微生物の種類を考慮すると次のような菌が目される。

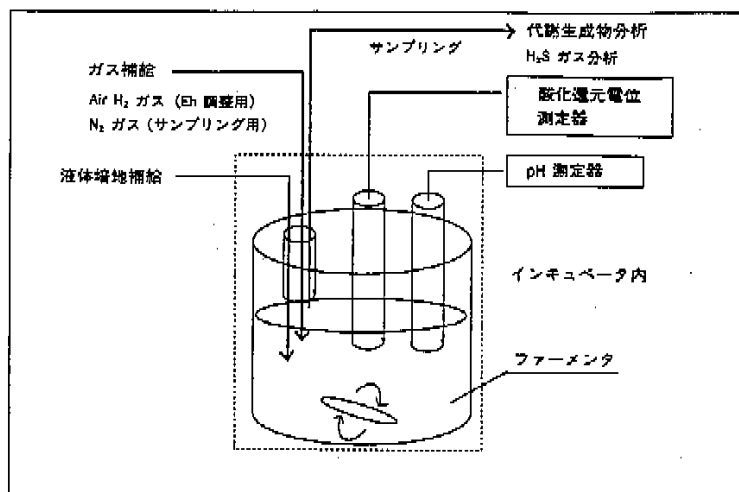


図4 微生物培養フーメンタの概念図

1) 材料の腐食：硫酸塩還元菌、鉄酸化細菌

2) ガス発生：メタン生成菌

3) 地下水の化学的性質の変化：硫酸化細菌
これらの細菌は考えられる主なものであり、酸素濃度等の環境が変化すれば微生物の種類も変わる可能性がある。本実験を進めるにあたり、第一段階として、酸素あるいは有機物が少なくても生息でき、処分システムに影響を与えそうな細菌が地上より処分環境に持ち込まれた場合を想定した。具体的には光を必要としなくても増殖可能な細菌である硫酸塩還元菌、メタン生成菌に注目した。

(1) 硫酸塩還元細菌（以下 SRB と略す）

微生物の性質は個々の菌種にかなり依存する。ここでは菌種がなるべく一般的な性質を持ち、実験の再現性が保証できるように国内外で認められた菌種の保存機関より入手することにした。増殖させた SRB は代表的 SRB である(財)発酵研究所所有の「*Desulfovibrio desulfuricans* ATCC 7757」を用いた。培養方法もさまざまな報告されているが、土壌微生物研究会で報告されている「17-1 培地」(ただし Fe の成分は Eh をコントロールするという実験条件の設定の都合上添加しなかった)¹⁴⁾(表2)を用いた。同液で予め培養を行い、10℃で保存しておき、35℃でさらに培養したのち培養(反応)容器に接種した。

(2) メタン生成細菌（以下 MPB と略す）

MPB の選定も SRB 同様に考えた。ただし MPB は TRU 廃棄物処分場の環境を考慮し、処分場で供給される可能性のある、メタノールを基質として利用できる MPB を選定した。MPB は、

表2 硫酸塩還元菌の培地（17-1 培地）

I 液	
脱塩水	985ml
NH ₄ Cl	1.0g
Na ₂ SO ₄	1.0g
CaCl ₂ ・2H ₂ O	0.1g
FeSO ₄ ・7H ₂ O	4.0mg
MgSO ₄ ・7H ₂ O	2.0g
乳酸ナトリウム50%液	4.9g
酵母エキス	1.0g
II 液	
脱塩水	100ml
K ₂ HPO ₄	5.0g
III 液	
脱塩水	10ml
チオグリコール酸ナトリウム	0.45g

I 液614mlにII液5.2ml、III液4.0mlを加える。
・H₂S分析の為、量を少なくしている。

多くの MPB を保存していることで世界的に有名な菌株保存機関の DSM (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen) から「*Methanosarcina barkeri* DSM 804 株」を入手して用いた。その顕微鏡写真を写真2に示す。この写真は紫外線(V 励起)により励起され、青い蛍光を発している様子を示している。

4.3 実験方法

(1) SRB 培養実験

① 培地

微生物培養用の培地は、対象微生物の特性に応じて適したものが多数開発されている。本実験で

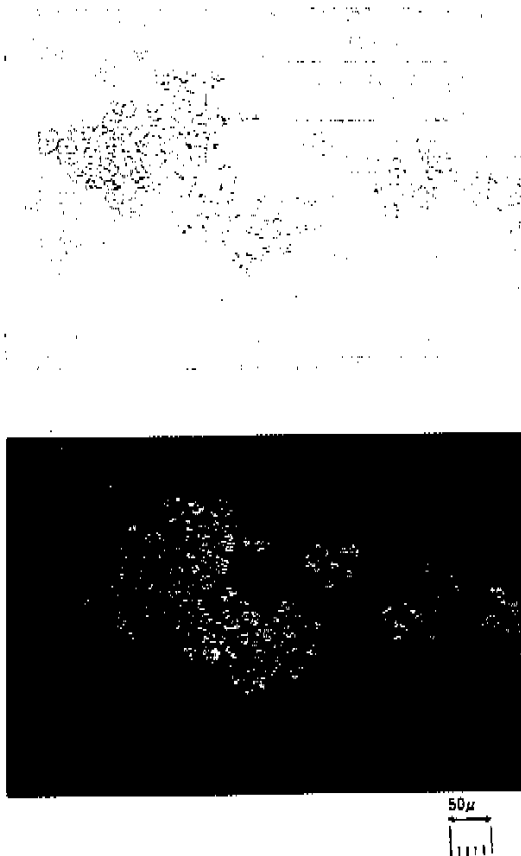


写真2 *Mchanosarcina barkeri* DSM 804 の顕微鏡写真
(上：光学顕微鏡、下：蛍光顕微鏡)

は炭素源として基質に乳酸を含む液体培地を用いた。pH 緩衝剤にリン酸塩を用いる培地として、17-1 培地 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 2.5mg/L)¹²⁾を用いた。

② 実験方法

ファーマンタを恒温器に入れ、培養温度35℃に制御した。Ehの制御は、東亜電波社製の発酵用ORP電極とORP指示調節計で測定と制御を行った。還元剤としては、0.45 g/Lのチオグリコール酸ナトリウムを用いた¹²⁾。pHの制御は0.2 NH_4Cl と0.1MNaOHを用いて行った。細菌の増殖を調べるには濁度を測定する方法や代謝生成物を分析する方法等がある。ここでは代謝生成物のガス分析を行うことにし、ファーマンタ上部のヘッドスペースガス中の硫化水素測定で確認した¹³⁾。硫酸塩還元により発生した硫化水素をリアクターから排出し、2.5 % 酢酸亜鉛液で吸収し、よう素滴定法で硫化水素を定量した。

(2) MPB 培養実験

① 培地

MPBは絶対嫌気性細菌であり、慎重な嫌気操

作が要求される¹³⁾。ここでは、選定したMPBについてメタノールを基質とする液体培地を用いた。

② 実験方法

基本操作や環境条件の調製方法についてはSRBと同様である。異なる点は、菌の増殖の測定としてメタンガスの分析を行った点である。また、SRBより嫌気条件に敏感であるので、還元的環境を維持するためにファーマンタの通気ガスに必要なに応じて H_2S を含ませた。一方、NaやK等の一価の陽イオンに阻害されやすいという報告¹⁴⁾があるので、pH制御にはNaOHの使用を避ける理由で、ガスラインの N_2 ガスと $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ ガスの供給量を制御してpH調整を行った。

5. 結果および考察

5.1 SRBについて

図5に本実験の結果を耐性領域図として示した(一部発表済み)^{11,15)}。これから次の2つのことが分かった。SRBは設定したpH・Eh条件の範囲では、Ehが低いほど硫化物生成活性が高く(増殖しやすい)、あるEhを超えると活性が無くなった(増殖しなくなった)。また、既報のSRBの増殖範囲を図中に合せて示してある。この範囲より高アルカリ側での増殖が確認され、しかもSRB増殖可能なEh上限は、pHが高いほど低下する事が初めて分かった。一方、SRB増殖可能なEh上限値が、菌体量の変化により変った。これはガス発生量の違いでは説明できず、測定誤差と細胞数の影響も考えられるが、以下のように考えた。ファーマンタ内にフロック(凝集)ができることにより、ファーマンタのEhよりフロック内部のEhが低くなったため、フロック内部のSRBがより増殖しやすくなった可能性もあり得る。測定精度を上げるためには菌体量が多い方が良いが、フロック化による微細環境(Microenvironment)の形

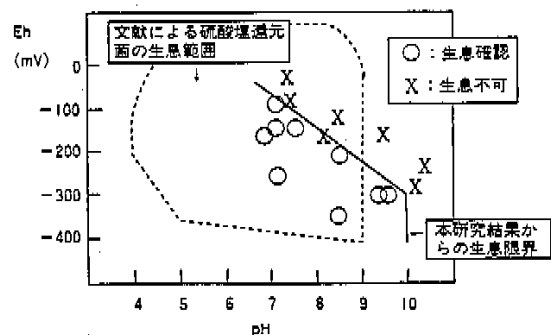


図5 硫酸塩還元菌の耐性領域図

成は、今後の検討課題として残った。

5.2 MPB について

メタノールを基質とする方法では、Eh を ORP 指示調節計の制御により微量の空気を混入させることにより順次上昇させることができた。また、pH は N_2+CO_2 ガスを混入させることによりコントロールし、各条件で菌の増殖を示すメタンの発生を検出した。Eh、pH の耐性領域を調べる実験として、ファーマンタの pH を 7、8、9 に設定し、

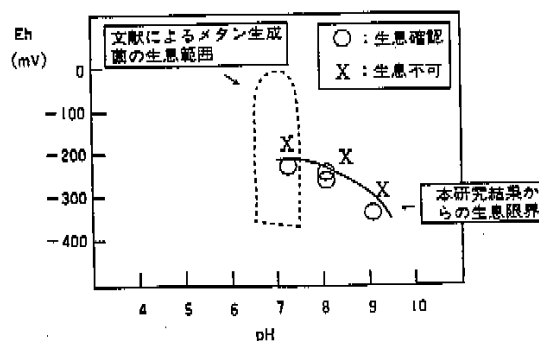


図6 メタン生成細菌の耐性領域図

表3 メタン生成菌の培養結果

基 質	接種後の日数	pH	Eh (mV)	排ガス中のメタン (%)
メタノール	7	7.31	-212~-213	0.009
	14	7.19	-179	<0.001
メタノール	15	8.12	-235~-238	0.008~0.02
	16	8.12	-220~-234	0.005
	17	8.30	-206	<0.001
メタノール	12	8.88	-310	0.008~0.009
	19	8.97	-287	<0.001

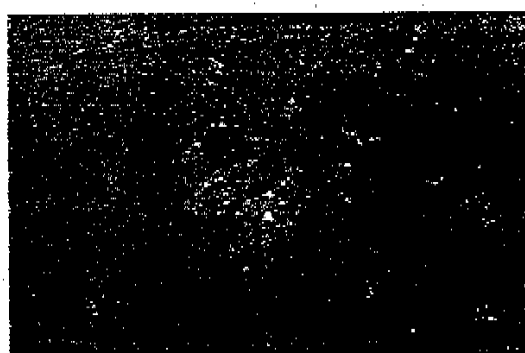
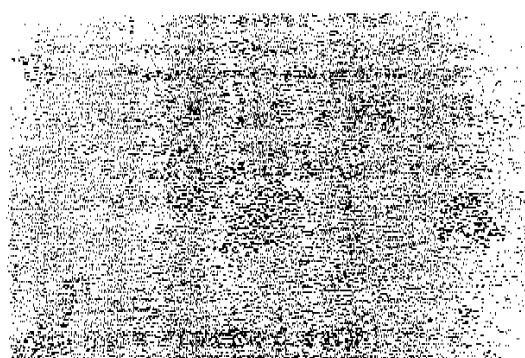


写真3 ファーマンタ内の微生物の写真
(上：光学顕微鏡、下：蛍光顕微鏡)

各 pH 条件で Eh を上昇させ MPB の生息を調べた。結果を表3に、ファーマンタ内の微生物の状況を写真3に示した。pH が7.3、8.9の時メタンの発生が確認でき、MPB の増殖をメタン発生その他、顕微鏡的にも確認した。また、pH 8.1の時、Eh = -230 mV ではメタンが発生したが、わずかにガス量を変化させ Eh = -206ではメタンは検出できなかった。この付近に MPB の生成境界があると思われる。以上の結果を図6に耐性領域図としてまとめた(一部発表済み)¹³⁾。文献で報告されているメタン生成菌の生息範囲を点線で示した。この範囲では、処分環境の高アルカリ、低 Eh では生息できないことになるが、本研究の結果 Eh が低く、pH9の高アルカリでも生息可能である事がわかった。

6. おわりに

本研究では、地層処分におけるコロイドおよび微生物の影響を評価するため2つの実験を行った。得られた結果と今後の課題について以下にまとめる。

(1) コロイドの影響

① 粒径が15 nm の金コロイドは、圧縮ベントナイト(乾燥密度1000kg/m³)中を移行しないことを実験により確認した。一方、ケイ砂を50wt% 混合するベントナイトは、乾燥密度が1000kg/m³ の試料ではコロイドが透過するものの、乾燥密度1800kg/m³ の試料ではコロイドが濾過されることを確認した。

② 今後は、ニアフィールド周辺岩盤で、コロイドが共存する場合の核種の移行挙動について理解し、コロイドが核種の移行を助長するののか否かを定量的に評価していく予定である。

(2) 微生物の耐性

① 処分場での微生物の生息条件のうち深部地質

環境への耐性を実験的に検討することを目的として、pH、Eh を自動的に制御可能なファーマンタを製作した。鉄の腐食を促進させる微生物として硫酸塩還元細菌 (SRB) について、またガスを発生し核種移行を促進すると思われるメタン生成細菌 (MPB) についてファーマンタを用いて培養した。その結果、活性を示す pH、Eh 領域を調べることができ、処分環境として考えられるアルカリ、低 Eh の環境で SRB、MPB が生息可能であることが分かった。

- ② 圧縮ベントナイト中では、前述のコロイドのデータが示すように、コロイドより大きな微生物は移動できないと考えられる。
- ③ 今後は、ベントナイト外側での挙動の把握が重要であり、その生息可能性をここで述べた実験装置および手法を用いることにより把握し評価を行う予定である。

7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、試験に供した金コロイドは鐘紡(株)化粧品研究所より提供頂いた。ここに同社大谷泰永氏、荻野和男氏、松井順一氏に心から感謝致します。また、微生物の試験に関しては石川島播磨重工業株式会社技術研究所の福永栄氏の協力を頂いたので合せて感謝致します。

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：“地層処分研究開発の現状(平成5年度)”, *PNC TN1410 94-094*, (1994).
- 2) Pedersen, K.: "Preliminary Investigations of Deep Ground Water Microbiology in Swedish Granitic Rock", *SKB T/R 88-01*, (1987).
- 3) Champ, D.R.: "Microbial Mediation of Radionuclide transport: Significance for the Nuclear Fuel Waste Management Program", *AECL-8566*, (1984).
- 4) 黒澤通, 古川英樹, 他：“圧縮ベントナイト中のコロイド移行に関する研究”, *放射性廃棄物研究*, 1, 177 (1995).
- 5) 鈴木英明, 柴田雅博, 他：“緩衝材の特性試験(1)”, *PNC TN8410 92-057*, (1992).
- 6) Ogino K., Ohta M., et al.: "Application of Colloidal Gold to Cosmetics", 18th Int. I.F.S.C. Congr., Italy B109/272 (1994).
- 7) 中野政時：“土の物質移動学”, 東京大学出版会, (1991).
- 8) Stambury, P.F. & Whitaker: "A. Principles of fermentation technology", Pergamon Press Ltd., 1984; 石崎文彬訳, “発酵工学の基礎”, 学会出版センター, (1984).
- 9) Cappenberg, Th.E.: "A Study of Mixed Continuous Culture of Sulfate-Reducing and Methane-Producing Bacteria", *Microbial Ecology*, 2, 80 (1975).
- 10) Brown, D.E., Groves, G.R., et al.: "pH and Eh Control of Cultures of Sulphate-Reducing Bacteria", *J. Appl. Chem. Biotechnol.*, 23, 141 (1973).
- 11) Fukunaga, S., Yoshikawa, H., et al.: "Experimental Investigation on the Active Range of Sulfate-Reducing Bacteria for Geological Disposal", *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII*, accepted, (1995).
- 12) 土壌微生物研究会, “新編土壌微生物実験法”, 養賢, (1992).
- 13) 古賀洋介, 森井宏幸, 他：“メタン生成細菌の分離・培養法の実験”, *発酵工学*, 65, 419 (1987).
- 14) Kugelman, I.J. & Chin, K.K.: "Toxicity, Synergism, and Antagonism in Anaerobic Waste treatment Processed", *Anaerobic Biological Treatment Processed*, 55 (1971).
- 15) 古川英樹, 福永栄, 他：“地層処分システムにおける微生物の影響について(1) 還元環境に対する微生物の耐性に関する実験”, *放射性廃棄物研究*, 1, 199 (1995).