



JAEA-Conf

2007-003



JP0750116

# 「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」

## 第1回情報交換会講演資料集

Announced Document Collection of the 1st Information Exchange Meeting  
on Radioactive Waste Disposal Research Network

連携重点研究課題5

「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」  
第1回情報交換会実行委員会

Theme Five of Interorganization Atomic Energy Research Program  
Planning Committee of the 1st Information Exchange Meeting  
on Radioactive Waste Disposal Research Network

安全研究センター

廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

Waste Disposal and Decommissioning Safety Research Group  
Nuclear Safety Research Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」  
第1回情報交換会講演資料集

日本原子力研究開発機構  
安全研究センター原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット  
連携重点研究課題5  
「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」第1回情報交換会実行委員会※

(2007年1月18日受理)

「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」は、放射性廃棄物処分のための基礎研究を促進し、また若手研究者を育成することを目的として、日本原子力研究開発機構の「連携重点研究」制度をその枠組みとして設立された研究者ネットワークである。その第1回情報交換会が、2006年8月4日、日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所において開催された。本講演資料集は、本課題の第1回情報交換会における発表、及び討論をまとめたものである。

---

原子力科学研究所(駐在) : 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

※中山 真一<sup>1)</sup>、長崎 晋也<sup>2)</sup>、稻垣 八穂広<sup>3)</sup>、大江 俊昭<sup>4)</sup>、佐々木 隆之<sup>5)</sup>、  
佐藤 正知<sup>6)</sup>、佐藤 努<sup>6)</sup>、田中 知<sup>2)</sup>、柄山 修<sup>7)</sup>、長尾 誠也<sup>6)</sup>、長沼 豊<sup>8)</sup>、日高 洋<sup>8)</sup>、  
藤原 武<sup>1)</sup>

1) 安全研究センター 2) 東京大学 3) 九州大学 4) 東海大学  
5) 京都大学 6) 北海道大学 7) 東北大学 8) 広島大学

Announced Document Collection of the 1st Information Exchange Meeting on  
Radioactive Waste Disposal Research Network

Theme Five of Interorganization Atomic Energy Research Program  
Planning Committee of the 1st Information Exchange Meeting on Radioactive Waste  
Disposal Research Network※

Nuclear Facility Safety Research Unit  
Nuclear Safety Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 18, 2007)

The 1st information exchange meeting on Radioactive Waste Disposal Research Network was held in Nuclear Science Research Institute of Japan Atomic Energy Agency on August 4, 2006. Radioactive Waste Disposal Research Network was established by under Interorganization Atomic Energy Research Program of Japan Atomic Energy Agency, and the objective is to bring both research infrastructures and human expertise in Japan to an adequate performance level, thereby contributing to the development of the fundamental research area in the field of radioactive waste disposal. This lecture material is a collection of research presentations and discussions during the information exchange meeting.

Keywords: Researcher's Network Community, Radioactive Waste, Disposal, Research  
Infrastructures, Human Expertise

---

※Shinichi NAKAYAMA<sup>1)</sup>, Shinya NAGASAKI<sup>2)</sup>, Yaohiro INAGAKI<sup>3)</sup>, Toshiaki OHE<sup>4)</sup>,  
Takayuki SASAKI<sup>5)</sup>, Seichi SATO<sup>6)</sup>, Tsutomu SATO<sup>6)</sup>, Satoru TANAKA<sup>2)</sup>,  
Osamu TOCHIYAMA<sup>7)</sup>, Seiya NAGAO<sup>6)</sup>, Takeshi NAGANUMA<sup>8)</sup>, Hiroshi HIDAKA<sup>8)</sup>,  
Takeshi FUJIWARA<sup>1)</sup>

1) Nuclear Safety Research Center of Japan Atomic Energy Agency    2) Univ. Tokyo  
3) Kyusyu Univ.                  4) Tokai Univ.                  5) Kyoto Univ.                  6) Hokkaido Univ.  
7) Tohoku Univ.                  8) Hiroshima Univ.

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」とは .....	2
3.研究報告 .....	5
3.1 「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」について .....	6
中山真一（日本原子力研究開発機構）他	
3.2 粘土・微生物の研究—ワークショップより .....	11
大江俊昭（東海大学）	
3.3 水酸化物錯体の熱力学データの検討 .....	19
小林大志（京都大学）他	
3.4 ベントナイト緩衝材の鉄型化に関する研究例紹介と今後の展開 .....	25
小崎完（北海道大学）他	
3.5 ベントナイトの長期変質研究の現状と今後の方向 .....	30
佐藤努（北海道大学）	
3.6 マイクロフォーカス X 線 CT によるベントナイト-珪砂混合体の微細構造観察 .....	61
河原木千恵（北海道大学）他	
3.7 ガラス固化体の長期的溶解の不確かさが核種移行評価に与える影響 .....	75
武田聖司（日本原子力研究開発機構）他	
3.8 マルチトレーサー法を用いた間隙水中での多種のイオンの拡散に関する研究 -表面拡散の寄与について .....	83
高橋嘉夫（広島大学）他	
3.9 腐植物質に対する全希土類元素の錯生成定数決定に基づく水圈での 希土類元素の挙動解析 .....	97
山本祐平（広島大学）他	
3.10 放射性廃棄物処分におけるコロイド形成・輸送モデリング .....	108
長崎晋也（東京大学）	
4.おわりに .....	115
謝辞 .....	116
参考文献 .....	116
添付資料 .....	117

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Introduction of "Radioactive waste disposal research network" .....	2
3.	Technical Session .....	5
3.1	Introduction of "Radioactive waste disposal research network" .....	6
	Shinichi NAKAYAMA (JAEA) et al.	
3.2	Report of "Workshop of clay porewater and microorganism" .....	11
	Toshiaki OHE (Tokai Univ.)	
3.3	Solubility study of tetravalent metal hydrous oxides .....	19
	Taishi KOBAYASHI (Kyoto Univ.) et al.	
3.4	Introductions of current and future studies on the alteration of bentonite buffer from Na-type into Fe-type .....	25
	Tamotsu KOZAKI (Hokkaido Univ.) et al.	
3.5	Current state and future direction of research on long-term alteration of bentonite ..	30
	Tsutomu SATO (Hokkaido Univ.)	
3.6	Observation of the microstructure of bentonite-quartz mixtures by microfocus X-ray CT .....	61
	Chie KAWARAGI (Hokkaido Univ.) et al.	
3.7	Influence of uncertainty associated with Long-term Dissolution of vitrified waste on nuclide migration evaluation .....	75
	Seiji TAKEDA (JAEA) et al.	
3.8	A study on the diffusion of various ions in pore water using multitracer technique -contribution of surface diffusion- .....	83
	Yoshio TAKAHASHI (Hiroshima Univ.) et al.	
3.9	Behavior of rare earth elements in hydrosphere based on the stability constants of humate complexes with all rare earth elements .....	97
	Yuhei YAMAMOTO (Hiroshima Univ.) et al.	
3.10	Colloid formation and transportation modeling in radioactive waste disposal .....	108
	Shinya NAGASAKI (Univ. Tokyo)	
4.	Concluding Remarks .....	115
	Acknowledgment .....	116
	References .....	116
	Attachment .....	117

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、大学の研究者と連携し、さらに民間企業等の研究者の参加を募って、原子力分野に係る公募型の共同研究を行う制度として、「連携重点研究」の制度を運用している。平成18年度には6課題が採択された。放射性廃棄物処分の分野では、基礎研究を着実に進めるために、参加機関の設備を有効に活用するというハード面の活動と、今後の処分研究を担う人材を育成するというソフト面の活動の場として「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」が開始された。

本課題の第1回情報交換会は、本課題を構成するテーマのひとつである微生物に関するワークショップ、並びに、本課題に関連する研究施設見学会を含めて、下記の日程で日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所において開催された。

平成18年8月2日(水)～平成18年8月3日(木) 午前

連携重点研究ワークショップ

—緩衝材物性と微生物活動を指標とした処分環境の理解—

平成18年8月3日(木) 午後

施設見学会

原子力科学研究所 燃料サイクル安全工学研究施設(NUCEF)

核燃料サイクル工学研究所 地層処分基盤研究施設(ENTRY)

地層処分放射化学研究施設(QUALITY)

平成18年8月4日(金)

「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」第1回情報交換会

本講演資料集は、本課題の第1回情報交換会における発表及び討論について、その概要をまとめたものである。同時に開催されたワークショップ「緩衝材物性と微生物活動を指標とした処分環境の理解」は、課題「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」を構成するサブグループのうちのひとつの活動であり、それについては別途報告することとする。

本情報交換会は、下記に挙げた「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」第1回情報交換会実行委員会のメンバーによって企画、運営が行われ、事務局が本報告書の取りまとめを行った。

### 研究代表者

中山 真一

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

長崎 晋也

東京大学 大学院工学系研究科原子力専攻

### サブグループリーダー(五十音順)

稻垣 八穂広

九州大学 大学院工学研究院エネルギー量子工学部門

大江 俊昭

東海大学 工学部応用理学科エネルギー工学専攻

佐々木 隆之

京都大学 大学院工学研究科原子核工学専攻

佐藤 正知

北海道大学 大学院工学研究科エネルギー環境システム専攻

佐藤 努

北海道大学 大学院工学研究科環境循環システム専攻

田中 知

東京大学 大学院工学系研究科システム量子工学専攻

柄山 修

東北大大学 多元物質科学研究所

長尾 誠也

北海道大学 大学院地球環境科学研究院

長沼 豊

広島大学 大学院生物圏科学研究所

日高 洋

広島大学 大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

藤原 武(事務局)

日本原子力研究開発機構 安全研究センター

## 2. 「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」とは

「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」は、日本原子力研究開発機構が運用する「連携重点研究」の枠組みを利用して立ち上げられた研究者ネットワークであるが、その意義や目指すところについては、日本原子力学会誌上に「“処分研究ネットワーク”へのいざない」と題して紹介されている<sup>1)</sup>。ここでは「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」立ち上げの趣旨を再確認するため、以下に日本原子力学会誌上に掲載された内容を再掲する。

放射性廃棄物の地層処分はその「安全性」を文字通りの意味では決して実証できない。Fick の法則といった単純な法則、何人もの科学者が吟味した自信のある実験データ、そしてよく実証された計算コード、これらに基づく間接的な評価の他に安全性を判断する材料はない。当然他の工学に比べ、科学的基礎とか科学的健全性が厳しく要求される。しかし、現実には、人類初の地層処分という工学を支えるために、今われわれが有している科学的知識で充分であるとは思えないというのが、おそらくは、地層処分に携わる科学者、技術者たちの共通の認識である。もちろんすべての科学的真実を突き止めることは到底かなわないし、その必要はない。わからないことは危険側の結果が出るような前提をおいて判断する。しかし危険側とおいた論拠に、およそ科学的合理性とはかけ離れていると認めざるを得ないものが少なからずあることは事実である。いわゆる専門家と称される者の責務として、信頼性の欠如につながるような曖昧さは出来うる限り排除しなければならない。

とは言うものの、今もって、このような当たり前のことと言い続けなければならぬこと自体が実は深刻な問題である。放射性廃棄物処分に関する組織や機関が複雑すぎるからだろうか。あるいは、処分研究や処分事業そのものが有するはずの社会に対する責任の所在が明確になっていないからなのかな。組織や立場を超えて一段高いところから処分研究全体をマネジメントする仕組みもなければ、マネジメントする人もいない。そのような状況の下では、資金や情報や人材が分散し、各々の研究者が、目標や達成時期を明確にせずに、持ちうる資源の範囲で可能な研究を進めがちになる。なおかつ、多忙のためにお互いのコミュニケーションはどんどん希薄になり、研究成果発表会と称する集まりは先生方のご意見を聞き置く会と化す。研究者もみなそのことに本音では気が付いている。いきおい各研究者は肅々と自分のテリトリーの中で専門の論文数を増やすことにエネルギーが費やされ、心ある若い研究者はわが国の実態に失望し目を外に向けるようになる。

一方、大学では不自由なく研究ができるのかというと決してそうではない。今や大学では放射性物質を扱うことは容易ではない。アクチニド元素を扱うことは限りなく難しい。予算と人員が不足し、実験施設やひとつの実験機器を1つの研究室単独で維持・管理することは容易ではない。そういう現状に鑑みれば、同じ目標の下に集まる研究者が、融通の利く緩やかな連携のような集まりを作つて施設や装置を共有できないか、できれば煩雑な事務手続きもせずに、というのが本音の希望である。

そこへ折しも旧サイクル機構と旧原研が合体して日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」)が発足した。放射性物質取り扱い施設といえば原子力機構を使わない手はない。処分に関する研究施設といえば、旧サイクル機構の地層処分基盤研究施設 ENTRY、地層処分放射化学研究施設 QUALITY、そして旧原研の燃料サイクル安全工学研究施設 NUCEF の一部がある。

筆者が知る限り、処分に関する研究を主たる目的にした実験施設がこれほど集中した恵まれた環境は世界に他に例をみない。大学の実験環境の窮屈を鑑みれば、これらの施設とそこに備

えられている実験装置・分析装置を世界最先端研究実現のハード部分の核として使わない手はない、という発想に自然に向かう。

ではどのように「連携」するかである。欧州の EU では、アクチニドの科学と工学の分野で、ACTINET という研究ネットワークを組織している。参加研究機関・大学の有機的なネットワークを構築することで、テーマの設定、装置利用の融通、学生など若い研究者の育成などを戦略的に進めている。

処分の科学を若い研究者にとって魅力ある分野とするという意味でこの仕組みに学ぶべきところはない。日本における廃棄物処分に関する基礎研究のネットワーク化である。処分研究体制を維持し、影響力のある成果を発信していく集団が欲しい。そこでわれわれが目をつけたのが旧原研時代に立ち上げられた「連携重点研究制度」である。

連携重点研究制度は、旧原研と大学が中核となり、民間企業の参加を募って有機的な連携を図り、保有する人的資源や先進的研究施設・設備等の物的資源、及び外部資金を効果的に活用して行う総合共同研究の一つの形態である。平成 15 年度に開始された。この制度は、特定のテーマや課題を共有するのではなく、おのおのの研究テーマは参加者が持ち込み、原子力機構や大学等が所有する設備・装置を利用するグループとして形成されている点が他の一般的な共同研究と異なる。平成 17 年度までの 3 年間では、筆者 2 名がグループリーダーとなり、放射性廃棄物処分の基礎研究を行ってきた。

平成 18 年度からは、引き続き筆者 2 名がグループリーダーとなり、「放射性廃棄物処分安全研究のためのネットワーク」という課題を掲げた。国内各大学、研究機関および民間企業に呼びかけ、集ってきた研究テーマは、

- コロイドの形成・輸送・収着
- 微生物活動の物質移行への影響
- き裂内の流体流動
- 圧縮ベントナイトの間隙水物理化学と長期健全性
- 物質挙動解明へのマイクロ・ナノビーム分析技術の応用
- ガラス固化体の長期溶解・変質の地球化学
- ハルの溶融固化
- アクチニド元素の溶解度

と多彩である。これらの研究が 12 のサブグループに分かれて進められる。参加者は 8 大学、8 社、3 研究機関延べ 100 名。放射性廃棄物の処分の分野でこれまで活躍してきた先生や企業が名を連ねているのは、これらのトピックスへの興味だけでなく、わが国の放射性廃棄物処分基礎研究の現状に対する危機意識、ならびに研究ネットワーク構築を通しての研究環境改善、とくに学生や若手研究者を中心とした人的交流の活性化やそれらによる研究レベルの底上げといった意識への共感を受け取りたい。

上に述べたとおり、この連携重点研究はまとまって何かひとつの成果を出していくものではない。各研究者は、これこそは放射性廃棄物処分を安全に行うために必要だと信じて研究を行い、それに対し、連携重点研究という制度をどう機能させるか。

- ・まずはこの制度を、各大学と原子力機構間で、お互いに保有する研究設備の自由かつ積極的な利用を可能とするための枠組みとして利用する。原子力機構は、NUCEF などの施設を最大限に活用できるように積極的に門戸を開放するとともに、外部利用者が施設を利用しやすい制度・環境の整備を行う。例えば、マシンタイムなどをシェアしあって、その機器を有效地に利用する。ある大学での研究でピコ秒時間分解型蛍光分光測定の必要が生じた場合には、東大は試料だけを受け取りその大学の先生に代わり測定を行う。もちろんその大学の大学院生が一緒に測定をすることを希望した場合に

は受け入れる。東大はその対価は要求しない。

- ・ 日本原子力学会バックエンド部会夏期セミナーを含め、年に2回以上シンポジウムを開催し、参加機関間での研究情報交換を通して、研究のアクティビティを上げるとともに、とくに学生や若手研究者の放射性廃棄物研究に対するエンカレッジとする。学生や若手研究者のエンカレッジについて何度か言及しているが、研究室を超えて同世代の学生・研究者間での良い意味での競争意識の醸成が重要である。そして、このような若手をエンカレッジする場に民間企業が参加している意義も大きい。
- ・ 掛け声はいさましいのだが、予算は、実は、ない(連携重点研究制度の中で旅費および消耗品費等は支援される)。EUのACTINETが英国BNGや米国DOEからも予算を獲得できているのは、よほどしっかりした事務局があるのだろう。われわれの場合、この連携を、MEXT科研費、METI公募、原子力学会を通しての委託研究、バックエンド部会の助成金応募など公的資金のみならず民間からの委託の獲得の枠組みとする。さらに、近い将来には各研究グループへの研究費や博士課程学生の奨学金の確保を目指すとともに、若い研究者にとって魅力あるポストの獲得も念頭に置く。

平成18年度からの連携重点研究は書面上4月1日から開始されるが、あるサブグループテーマについてはすでに勉強会が始まっているし、国際ワークショップの企画が進んでいるグループもある。上記趣旨からは、サブグループリーダーの了解のもと、サブグループを超えての議論への参加にも何ら問題はない。むしろ歓迎である。あくまで研究、交流、国内の貴重な実験設備の共同利用など、広い意味でのネットワークとして活用する枠組みとして捉えればよい。

現在有る人材と物とで、放射性廃棄物の処分を支えるための科学的知識を積み上げたい。大学での研究がやりにくくなっているなか、お互いが装置や施設を工面して便宜を図ればよい。原子力機構の誕生はハード面の場を提供できる絶好のタイミングである。「人」というソフト面は、大学、民間、原子力機構にまだまだそろっている。今がチャンスであろう。そこに「連携重点研究制度」の活用というハードとソフトを結びつけるネットワークの場を用意したつもりである。

この「場」をこれからどう拡大していくかについては、とくに、500名以上の専門家集団である原子力学会バックエンド部会とも関わりながら、走りながら考えていくことにしよう。

本稿執筆にあたり連携重点研究制度の関係者および参加者よりコメントいただきました。感謝します。

### 3. 研究報告

本章においては、情報交換会において各サブグループからの研究報告に使われた資料を、各発表に対して行われた質疑応答とともに掲載する。

平成 18 年 8 月 4 日（金）

「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」について .....	6
中山真一（日本原子力研究開発機構）	
粘土・微生物の研究—ワークショップより .....	11
大江俊昭（東海大学）	
水酸化物錯体の熱力学データの検討 .....	19
小林大志（京都大学）	
ベントナイト緩衝材の鉄型化に関する研究例紹介と今後の展開 .....	25
小崎完（北海道大学）	
ベントナイトの長期変質研究の現状と今後の方針 .....	30
佐藤努（北海道大学）	
マイクロフォーカス X 線 CT によるベントナイト-珪砂混合体の微細構造観察 .....	61
河原木千恵（北海道大学）	
ガラス固化体の長期的溶解の不確かさが核種移行評価に与える影響 .....	75
武田聖司（日本原子力研究開発機構）	
マルチトレーサー法を用いた間隙水中での多種のイオンの拡散に関する研究 表面拡散の寄与について .....	83
高橋嘉夫（広島大学）	
腐植物質に対する全希土類元素の錯生成定数決定に基づく水圈での 希土類元素の挙動解析 .....	97
山本祐平（広島大学）	
放射性廃棄物処分におけるコロイド形成・輸送モデリング .....	108
長崎晋也（東京大学）	

3.1 「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」について



「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」  
について

ワークショップおよび第1回情報交換会

平成18年8月2日(水)~4日(金)

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター  
原子力科学研究所 先端基礎交流棟大会議室

日本原子力研究開発機構 中山真一  
東京大学 長崎晋也

1

背景 (1/3)

(「“処分研究ネットワーク”へのいざない」日本原子力学会誌vol.48, p.202より)

- ◆ 放射性廃棄物の地層処分はその「安全性」を文字通りの意味では決して実証できない。Fickの法則といった単純な法則、何人もの科学者が吟味した自信のある実験データ、そしてよく実証された計算コード、これらに基づく間接的な評価の他に安全性を判断する材料はない。
- ◆ 当然他の工学に比べ、科学的基礎とか科学的健全性が厳しく要求される。しかし現実には、人類初の地層処分という工学を支えるために、今われわれが有している科学的知識で充分であるとは思えないというのが、おそらくは、地層処分に携わる科学者、技術者たちの共通の認識である。
- ◆ もちろんすべての科学的真実を突き止めることは到底かなわないし、その必要はない。わからないことは危険側の結果が出るような前提をおいて判断する。
- ◆ しかし危険側とおいた論拠に、およそ科学的合理性とはかけ離れていると認めざるを得ないものが少なからずあることは事実である。いわゆる専門家と称される者の責務として、信頼性の欠如につながるような曖昧さは出来うる限り排除しなければならない。

2

## 背景 (2/3)

(「“処分研究ネットワーク”へのいざない」日本原子力学会誌vol.48, p.202より)

- ◆ とは言うものの、今もって、このような当たり前のこと言い続けなければならないこと自体が実は深刻な問題である。放射性廃棄物処分に関する組織や機関が複雑すぎるからだろうか。あるいは、処分研究や処分事業そのものが有するはずの社会に対する責任の所在が明確になっていないからなのか。組織や立場を超えて一段高いところから処分研究全体をマネジメントする仕組みもなければ、マネジメントする人もいない。
- ◆ そのような状況の下では、資金や情報や人材が分散し、各々の研究者が、目標や達成時期を明確にせずに、持つらう資源の範囲で可能な研究を進めがちになる。なおかつ、多忙のためにお互いのコミュニケーションはどんどん希薄になり、研究成果発表会と称する集まりは先生方のご意見を聞き置く会と化す。
- ◆ 研究者もみなそのことに本音では気が付いている。いきおい各研究者は肃々と自分のテリトリーの中で専門の論文数を増やすことにエネルギーが費やされ、心ある若い研究者はわが国の実態に失望し目を外に向けるようになる。

3

## 背景 (3/3)

(「“処分研究ネットワーク”へのいざない」日本原子力学会誌vol.48, p.202より)

- ◆ 一方、大学では不自由なく研究ができているのかというと決してそうではない。今や大学では放射性物質を扱うことは容易ではない。アクチニド元素を扱うことは限りなく難しい。予算と人員が不足し、実験施設やひとつの実験機器を1つの研究室単独で維持・管理することは容易ではない。
- ◆ そういう現状に鑑みれば、同じ目標の下に集まる研究者が、融通の利く緩やかな連携のような集まりを作つて施設や装置を共有できないか、できれば煩雑な事務手続きもせずに、というのが本音の希望である。

4

## 連携重点研究（1/2）

- ◆ 日本原子力研究開発機構と大学の研究者が連携し、さらに民間企業等の研究者の参加を募って行う原子力分野に係る公募型の共同研究。
- ◆ 研究費は当事者負担（必要に応じ、協力して外部資金を獲得）が原則。一部原子力機構から支援。
- ◆ 研究施設や設備は、相互に協議のうえ無償で利用できることを原則。
- ◆ 研究期間は3年以内を目安。

「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」を進める制度的枠組みとしてこの制度を利用。

H18年度採択 課題1 柴田・神谷グループ（サブグループ 2）  
 課題2 石井・神谷グループ（サブグループ 8）  
 課題3 海老原・大島グループ（サブグループ 6）  
 課題4 池田・森田グループ（サブグループ 4）  
課題5 長崎・中山グループ（サブグループ 12）  
 （8大学 57名、6民間企業 9名、3研究機関 24名、合計 90名）  
 課題6 大貫・實川・長谷川グループ（サブグループ 6）

5

## 連携重点研究（2/2）

### 課題5 「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク

研究テーマ、グループリーダおよび参加機関（＊はグループリーダの所属機関）

- |  |  |
|--|--|
| 1. 放射性廃棄物処分におけるコロイド形成・輸送モデリング                      | 藤原武; JAEA*, 東大, CRIEPI, MMC  |
| 2. 地下水中におけるコロイドへの核種収着機構解明と収着モデリング                  | 田中知; 東大*, JAEA   |
| 3. 地質環境中の微生物活動が物質移行に及ぼす影響評価のモデリング                  | 長沼毅; 広大*, 名大, JAEA, 地層科学研究所  |
| 4. 処分場近傍開放系におけるき裂内の流体運動とコロイド挙動の精緻化                 | 朽山修; 東北大*, JAEA, MMC   |
| 5. 圧縮ベントナイトの間隙水物理化学特性のモデル化                         | 大江俊昭; 東海大*, 産創研, JAEA, CRIEPI, MMC                                       |
| 6. マイクロ・ナノビーム分析技術を用いた化学状態解析および同位体比分析に基づく放射性核種の挙動評価 | 日高洋; 広大*, JAEA   |
| 7. ベントナイト緩衝材の長期健全性に関する研究                           | 佐藤正知; 北大*, JAEA, MMC   |
| 8. ガラス固化体の長期溶解／変質の地球化学的機構の評価とモデル化                  | 稻垣八穂広; 九大*, JAEA   |
| 9. ハルの処分安全性に関する研究                                  | 藤原武; JAEA*, 九大   |
| 10. アクチニド元素の溶解度に関する熱力学データの整備とモデリング                 | 佐々木隆之; 京大*, JAEA   |
| 11. 地下環境における核種移行に及ぼすバリア材変質とそのモデリング                 | 佐藤努; 北大*, JAEA, 名大, 産創研, CRIEPI, クインテッサジャパン, 日揮, 太平洋コンサルタント, クニミネ工業, MMC |
| 12. 地下水中有機コロイドの特徴と核種移行に及ぼす影響評価                     | 長尾誠也; 北大*, 東北大, 東大*, 広大, JAEA  |

## 「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」の 目指すところ

- 放射性廃棄物処分の安全評価の信頼性の向上のために、十分な科学的基盤情報を得られないいくつかの現象について基盤研究が必要。関連する研究者が連携して、課題の解決を目指す。
- 大学では装置・機器類の維持が難しく、またRI利用も思うようにいかないのが現状。参加機関の装置・機器類の共用を促進してハード面を充実させる。
- ソフト面では、参加機関間での情報交流・議論を活発にして研究の活性化の維持、若手研究者のエンカレッジを図る（アウトカムを如何に示すのかの議論）。また、外部資金を獲得し、参加者への研究費や博士課程学生の奨学金の確保、若い研究者にとって魅力あるポストの獲得を目指す。そしてこれらをベースに、
- 処分の基礎研究に係る資源の維持・活性化を目指す。

7

## 具体的なアクション

- 研究施設・設備の利用 原子力機構は、NUCEFなどの施設について、外部利用者が利用しやすいよう制度・環境を整備し、積極的に門戸を開放。
- 議論の場
  - 8月2,3日 サブグループ5によるワークショップ「緩衝材物性と微生物活動を指標とした処分環境の理解」
  - 8月3,4日 第1回情報交換会合
  - 8月10日 サブグループ3「地質環境中の微生物活動が物質移行に及ぼす影響評価のモデリング」作戦会議
  - 冬 第2回情報交換会合
- 外部資金 この「ネットワーク」という“資源”への投資を。

8

(参考) H15-H17実績  
「より広範囲な地質化学条件が放射性核種の地中移行に及ぼす影響の研究」

- **背景**
  - ✓ 高レベル放射性廃棄物HLWの地層処分に関しては、核燃料サイクル開発機構による2000年レポートによって安全な処分が可能であることが示された。
  - ✓ それ以降は、HLW以外の放射性廃棄物の処分も含め、地下環境や処分場設計の進展に伴い具体化してきた個別現象に対する研究モデル構築、および不確実性の定量化や低減による安全評価の信頼性向上が重要な課題であり、現象理解とそれを定量化するデータが求められる。
  - ✓ 具体的には、還元性雰囲気、高pH環境、高塩濃度環境などより現実的な地質環境条件下における現象を定性的かつ定量的に考慮しそのプロセスの解明とモデル化が必要。
- **研究テーマ**
  - ✓ 廃棄物固化体の溶解／変質／核種浸出に及ぼす地下水pH、塩濃度の影響（九州大・稻垣八穂広）
  - ✓ 岩石－水相互作用にともなう岩石の選択的溶解と岩石表面層への放射性核種の吸着挙動（東北大・土屋範芳）
  - ✓ 処分の人工バリアの長期挙動の予測のためのペントナイトの溶解 メカニズムと溶解速度（金沢大・佐藤努）
  - ✓ レーザ誘起蛍光分光システムによるスペシエーション（東京大・長崎晋也）
- **実績**
  - ✓ 学術雑誌発表 5件、国際会議・学会発表 29件、外部資金 5件

9

### 質疑応答

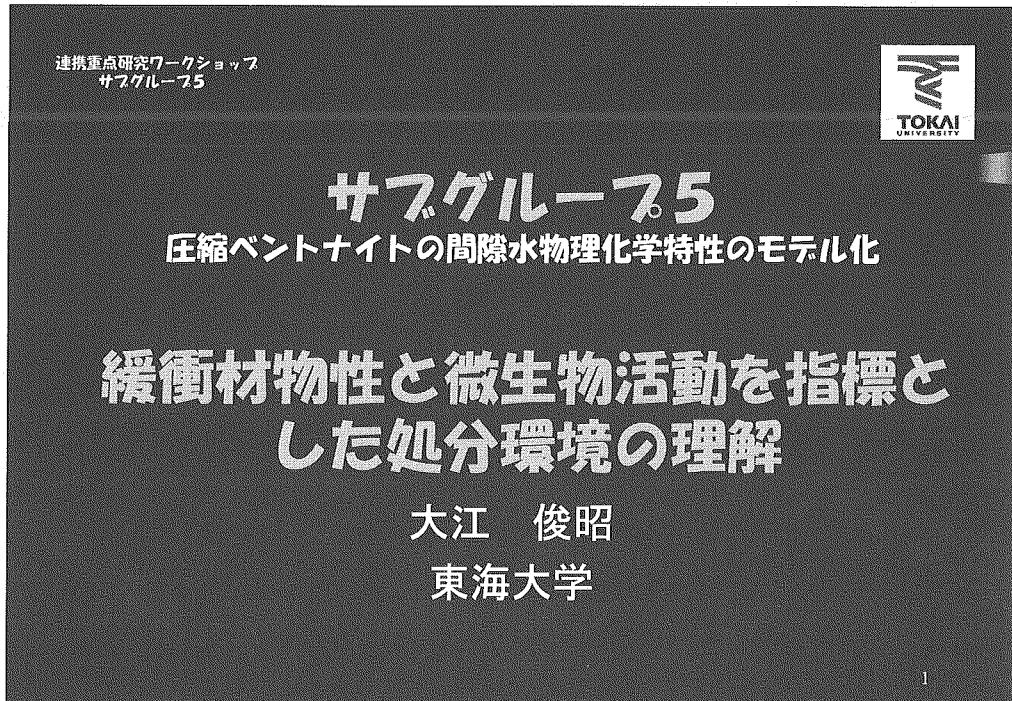
「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」について（原子力機構・中山真一）に関して、以下の質疑応答が行われた。

**Q:** 「連携重点研究」の枠組みの中で利用対象となる施設の範囲について。

**A:** 現状では、旧日本原子力研究所の施設のみが利用可能であって、旧核燃料サイクル開発機構の施設は対象とはなっていない。しかし、われわれのこのネットワークによって対象を増やして行きたい。また、旧日本原子力研究所関連の施設であっても、JMTR等の、いわゆる「公用施設」と称される施設は有償利用である。「公用施設」についての詳細は日本原子力研究開発機構のホームページを参照されたい。

**C:** 参考文献1)が英文化されれば是非引用したい。

3.2 粘土・微生物の研究—ワークショップより



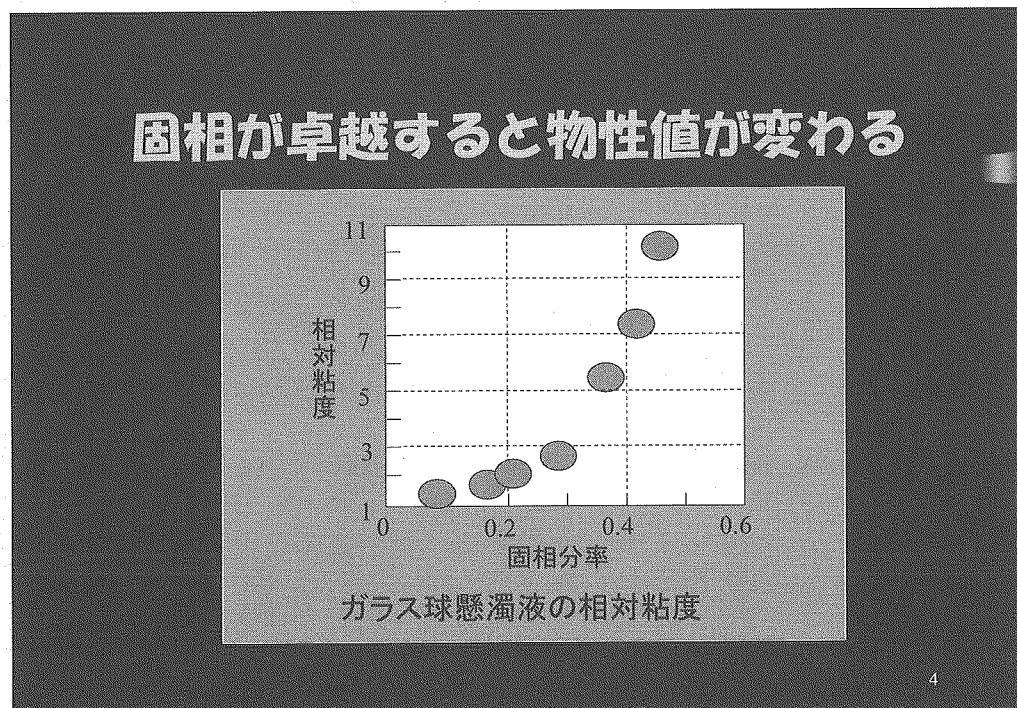
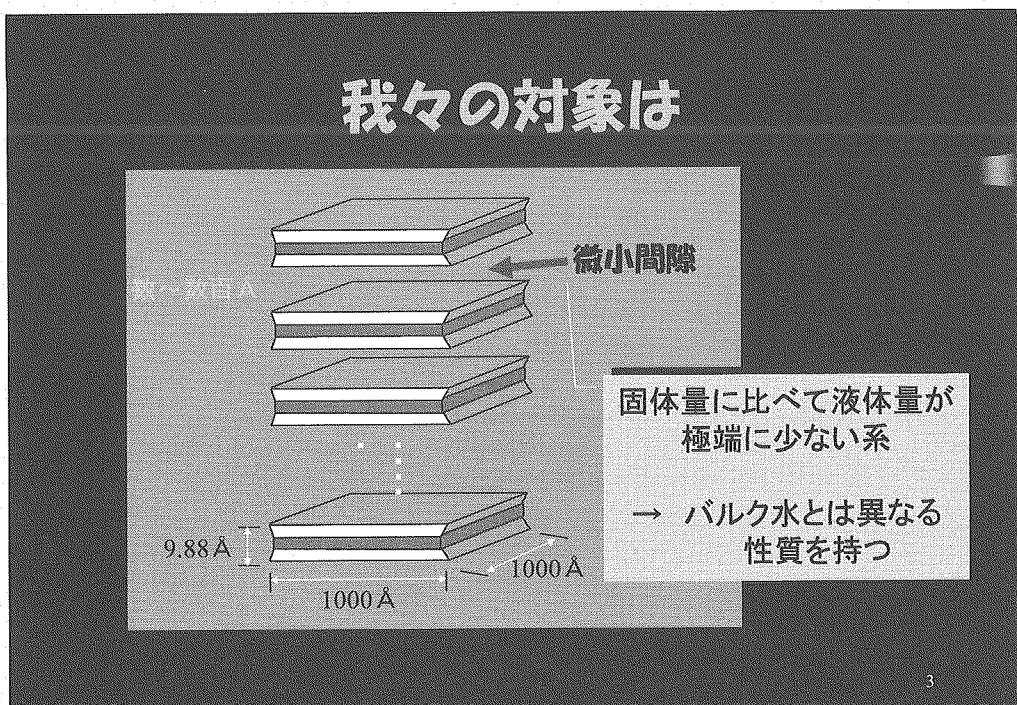
**サブグループ5の活動方針**

・ 圧縮ベントナイトの間隙水物理化学特性のモデル化

圧縮状態におけるベントナイトの浸透圧および誘電率を評価し、間隙水の物理化学的性質解明のためのモデル化を行うとともに、データベースを整備する。

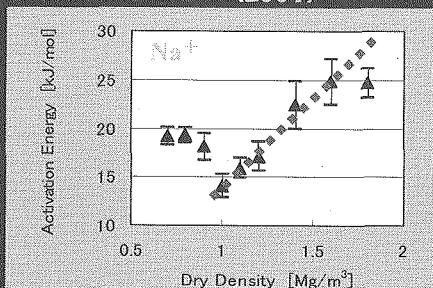
**議論の目的**

活動の方向性について共通認識を持ち、各自の持つ情報をどのように整理し、どのようなプロダクトに仕上げていくかを議論する。



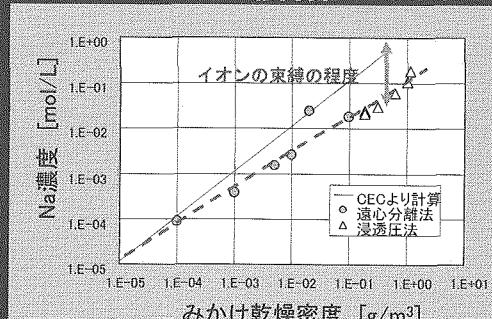
## 異常な性格の証拠はあるか

Kozaki (2001)



拡散係数の活性化工エネルギー

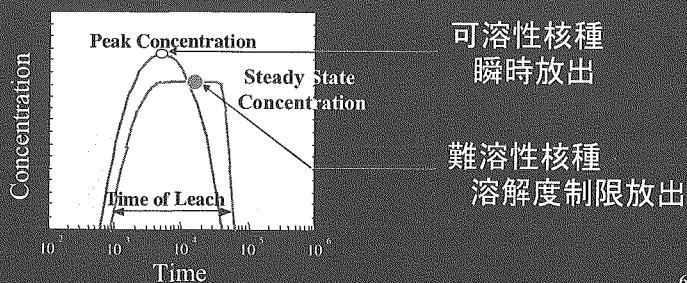
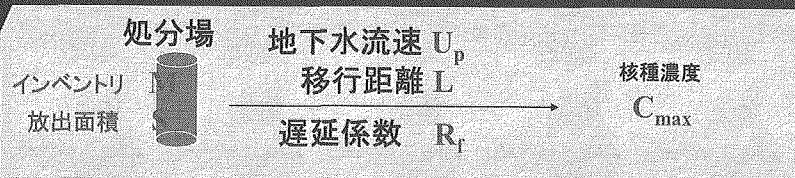
Ohe (2005)

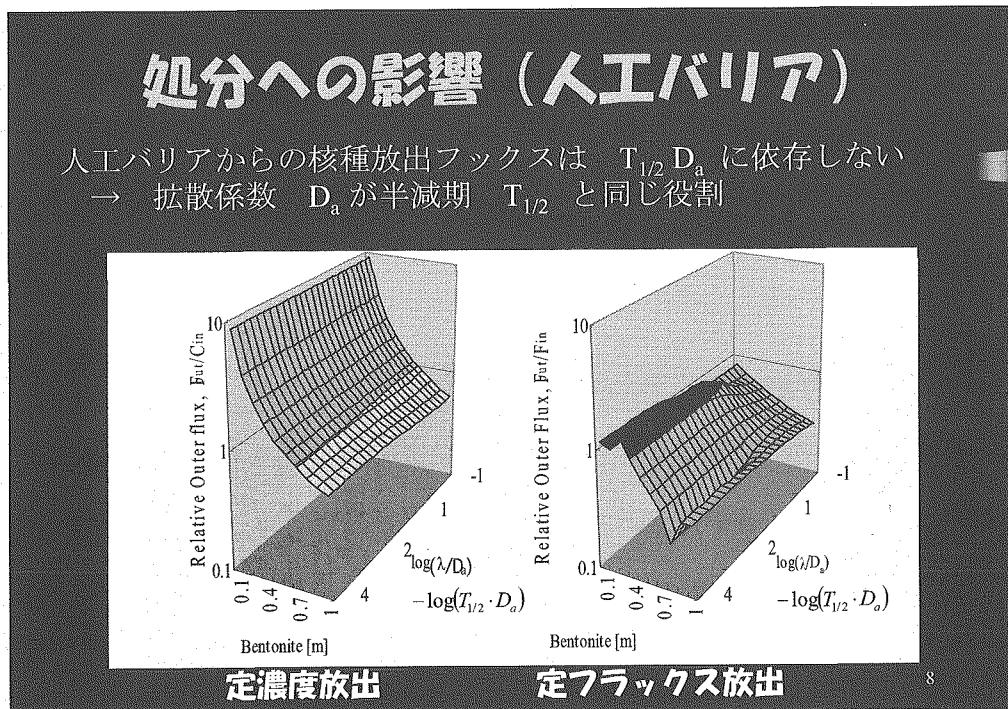
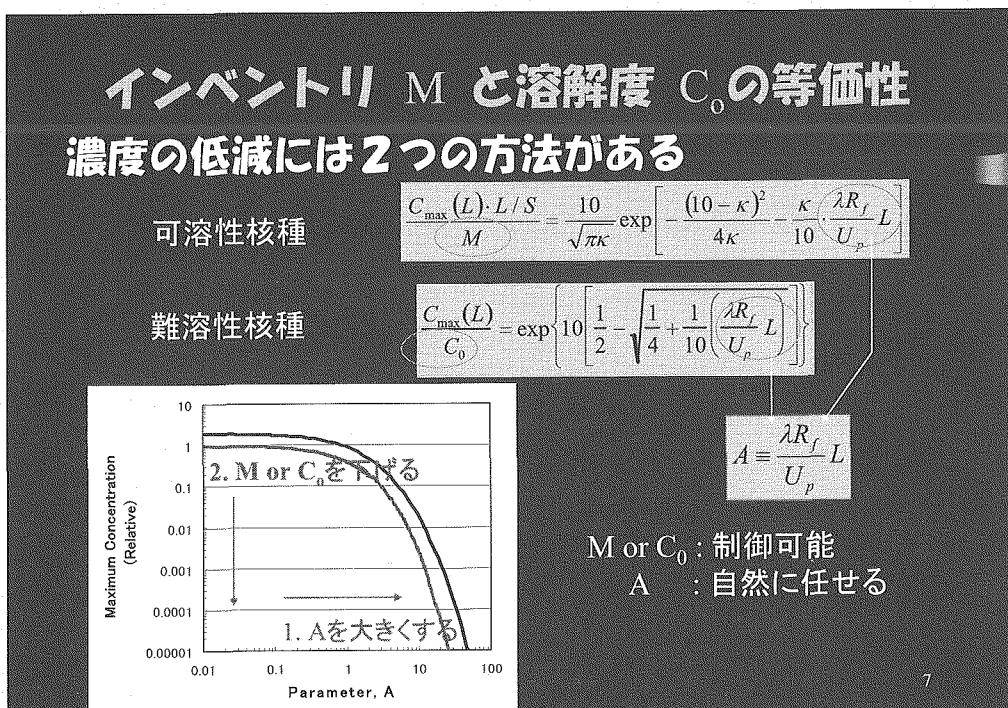


浸透圧から求めたNa濃度

## 処分への影響（天然バリア）

影響 ≈ 地下水中の最大核種濃度

可溶性核種  
瞬時放出難溶性核種  
溶解度制限放出



## 固／液界面

- 間隙水の化学的性質の影響を受ける  
溶解度 ( $C_o$ ) 収着分配係数 ( $K_d$ ) 拡散係数 ( $D_o$ )
- 間隙水は海水のような特異な状態にある  
- 蒸気圧測定より [Torikai,1996]
- 2つの粘土鉱物の表面間には通常の理論では得られない電気二重層が形成される  
- 例えば [Basu,1994]
- 圧縮ベントナイトのような極狭い領域での間隙水の性質を知ること
  - イオン強度
  - 誘電率

*Pore water is unable to treat as bulk water.*

## 【問題提起】

- ① 圧縮状態で異常な現象が起こっているか
- ② それはどの密度からおこるのか（臨界点はあるか）
- ③ その異常現象をもたらす原因是特定できているか
- ④ その原因を考慮して、何をどのように評価するのか
- ⑤ 評価手段が具体的に明らかになっているか
- ⑥ 微生物を指標として見た場合、緩衝材の置かれている環境条件とは何か？

## 【進め方】

- ① 年2回のWSを開き、情報を共有する  
手間をできる限り省いて議論に集中する／ウハウを蓄積する  
招待講演も積極的に支援する
- ② プロダクティビティーを上げ、成果をいち早くまとめて発信  
ウィキペディアのような編集手段

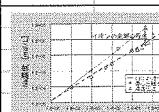
**第1回配布イメージ：異常現象を表すデータ**

**第2回配布イメージ：異常現象を説明する方法  
を整理する。**

**第3回配布イメージ：共同作業を行い、成果を公表する。**

11

### 異常データ報告 シート

日付	2006年 8月 2日
報告者	大江 俊昭
連絡先	ohe@keyaki.cc.tokai.ac.jp
浸透圧	
パラメータ	
図、表	
概要	浸透圧測定値から推定した間隙水中のNaイオン濃度は圧縮度の増加とともに相対的に減少し、その挙動は非線形的であり、間隙水中のイオンが何らかの束縛を受けている。
試料性状	クニピアF 乾燥密度 0.3~1.2g/cm <sup>3</sup>
試験条件	圧縮状態のままナトリウム水溶液中で減圧脱気し、水分飽和させた後、酢酸セルロース膜で仕切った溶液側に純水から逐次濃度を増加させた硫酸ナトリウム水溶液を入れ、膨潤ベントナイト層側に発生する浸透圧を測定する。この操作を繰り返して浸透圧曲線を得て、浸透圧Oに外挿した濃度を間隙水中の硫酸ナトリウム等価濃度と見なす。
出典	T.OHE, The Effect of Compaction of Na-montmorillonite on the Solubility, Diffusivity, and Sorption Capability of Ions due to Specific Pore Water Chemistry, Clay Science, 12, Supplements 2, 211-216, April,(2006).

## [ワークショップのメニュー]

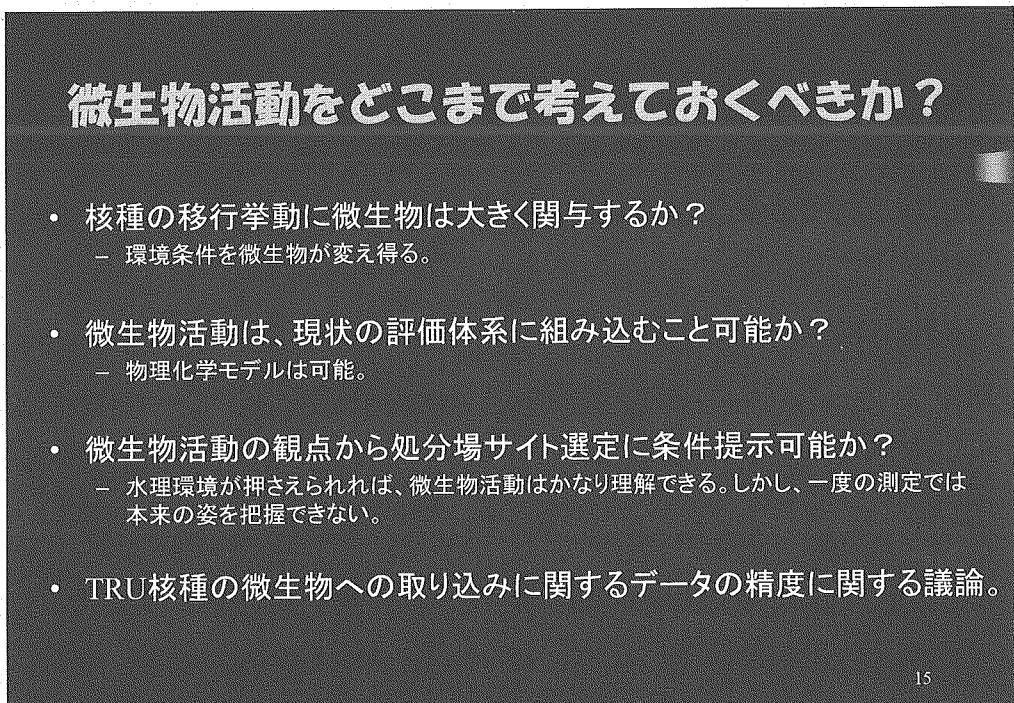
- 1) 圧縮ベントナイト間隙水の熱力学特性の膨潤圧への適用について
- 2) スメクタイト層間水の分子構造と拡散特性の研究
- 3) 誘電率測定によるコンクリート系材料中の間隙水の性質に関して
- 4) 核種移行解析上の重要パラメータ設定における間隙水物理化学特性の理解の必要性
- 5) 微生物影響の定量評価を行うためのモデル開発について
- 6) 地下圈の微生物の生態

13

## 処分における間隙水特性研究の議論

- モデルをどうつなぐか?
  - 現象の理解はミクロな扱い、評価はマクロな扱い。
  - 確率的な評価を行うには、どの程度のデータの量と質が求められるか。
- 相矛盾する結果は?
  - FT/IR(+MD) と 拡散データ
- 研究体制は?
  - 個人の力の限界、組織間連携の限界。
  - 「人」という字の実践。
- 学生教育
  - 人材育成の支援活動を具現化する場。

14



15

#### 質疑応答

「粘土・微生物の研究—ワークショップより」(東海大学・大江俊昭)に関して、以下の質疑応答が行われた。

Q: 微生物をマーカーとして、間隙水特性の測定プローブ代わりに使用することの可否について。

A: アイデアは承知している。間隙水が微生物にとって厳しい環境なのか、好ましい環境なのかから考えたい。マイクロビームとの連携も有意義と考えている。

C: 圧縮状態で観測された異常な現象などのデータシートの作成は、議論用のデータベース資料として非常に有意義と考える。

### 3.3 水酸化物錯体の熱力学データの検討

平成18年8月4日

連携重点研究情報交換会

「放射性廃棄物処分安全研究のためのネットワーク」



## 水酸化物錯体の熱力学データの検討

京大院・工 小林大志 (M2)

サブグループリーダー 佐々木隆之

森山裕丈 高岡祥泰 (M1)

藤原健壯 (JAEA)

### 背景

・高レベル放射性廃棄物、TRU廃棄物等の地層処分の安全性評価。

⇒放射性核種の地下水水中での移行挙動の把握が重要。

・核種移行の遲延促進に影響を及ぼす要素の定量的評価。

⇒錯生成(加水分解)、溶解度・溶解度積、コロイド生成、吸着などに関する信頼性の高い熱力学データの取得が不可欠。

多価金属イオン→十分整備しきれていない?

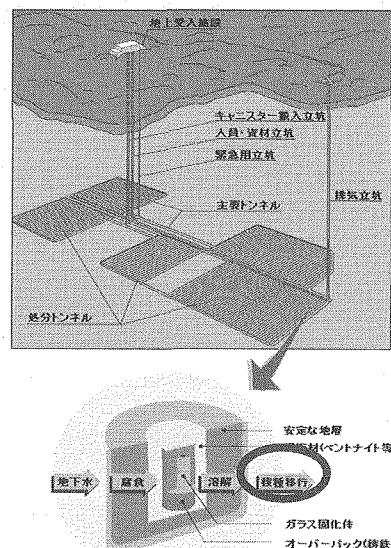
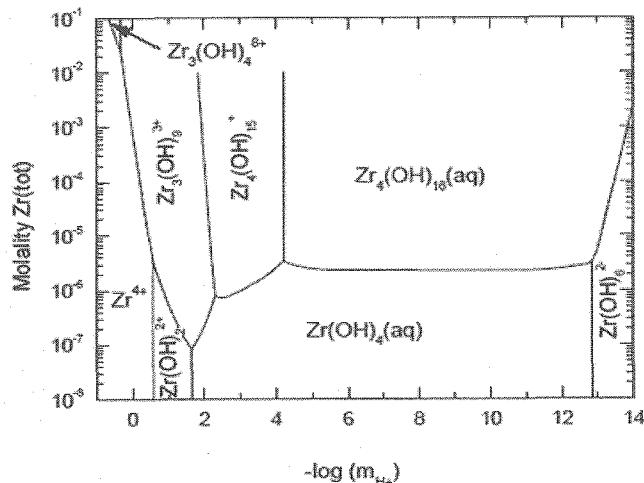


図2 高レベル放射性廃棄物地層処分場の概念図

【出典】財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターホームページ:  
調査研究業務. <http://www.rwmc.or.jp/jigyou/j2.htm> (2002年2月12日)

## 信頼性向上に向けて

"NEA-TDB Vol.8 Chemical Thermodynamics of Zirconium" (2005)



## 信頼性向上に向けて

### 多価金属イオン水酸化物の 溶解度、溶解度積、加水分解定数の取扱い

- ・各値の過大あるいは過小評価の根源にある 文献データ群のばらつきに関する考察が不可欠。

↑幾つかの文献において、これらを算出する際の溶存種の仮定に疑問の余地がある。

#### 1. 見かけの溶解度を支配する要因の確認

- 固液分離法の違い:遠心分離、限外ろ過の孔径依存性など。
- 過飽和法と不飽和法とその他の。
- 溶解度の経時変化:平衡状態/定常状態(実験時間の限界)
- 固相状態の確認:溶解度制限固相を分光学的手法で確認。

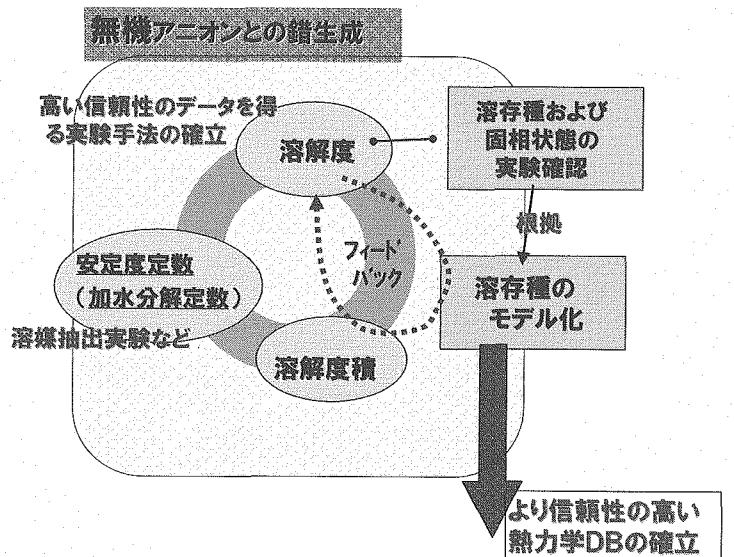
#### 2. 溶存種の実験的検証

- 加水分解定数:溶媒抽出など
- モノマー・ポリマーの確認:分光学的手法(LIBD, ESI-MS)など

#### 3. モデルによる熱力学定数の系統的解析的アプローチ

- 加水分解定数・溶解度の予測

## 多価金属イオンの熱力学データの取得および評価の概念



### 研究例：

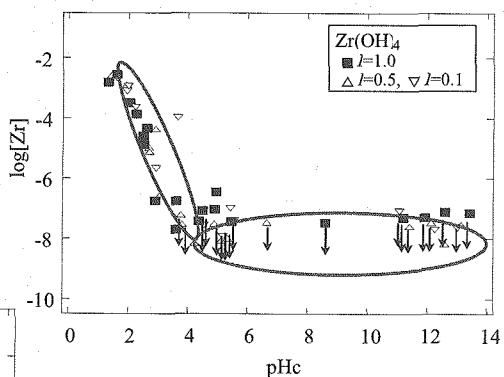
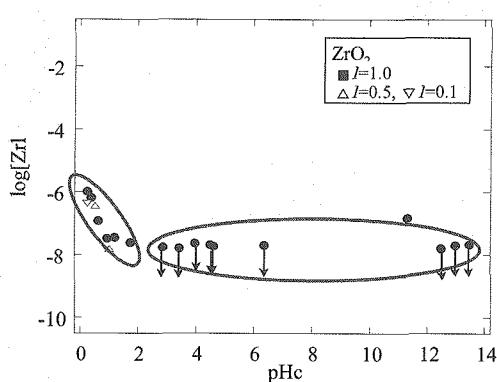
#### ・4価Zrのみかけの溶解度測定

##### 過飽和法

酸性溶液  $[Zr]_{initial} = 0.01\text{M}$  にアルカリを添加し、所定の  $pH_c$  で分取

$\lambda = 0.1, 0.5, 1$  ( $\text{NaClO}_4$ )

NMWL3kDa 限外ろ過

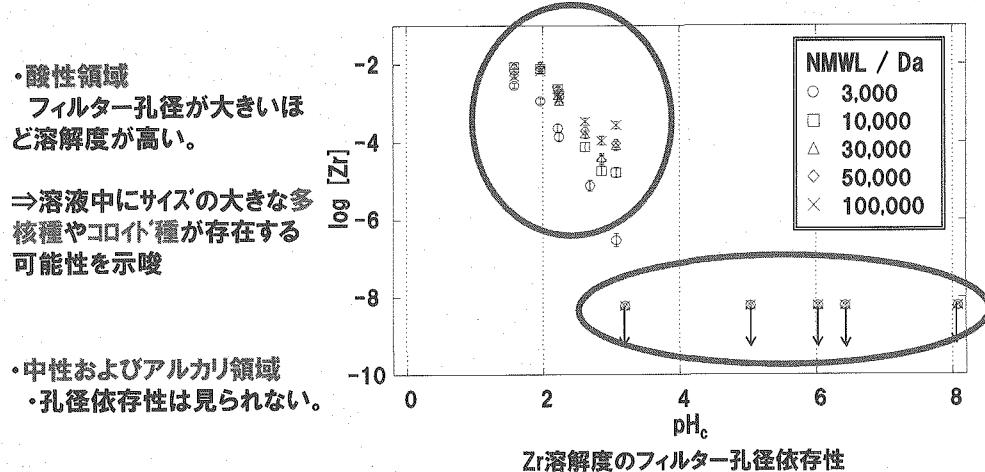


不飽和法  
 $\text{ZrO}_2$ を固相として添加

どのような溶解種が存在しているのか？

## 研究例：過飽和法による溶解度の孔径依存性

・異なる孔径を有するフィルターでろ過した試料の溶解度



## 過飽和法と不飽和法の比較

	過飽和法	不飽和法
固相状態	$\text{Zr}(\text{OH})_4$ Amorphous	$\text{ZrO}_2$ Crystalline
溶解度[<3kDa]	高い(酸性領域) 低い(中性・アルカリ域)	低い(酸性領域) 低い(中性・アルカリ域)
孔径依存性 [3k-100kDa]	あり(酸性領域) $\text{pH}_c$ と共に 溶存種の粒径が増加	なし 溶存種は3kDa以下
溶存支配種	多核種、コロイド種が 支配的?	単核種が支配的?

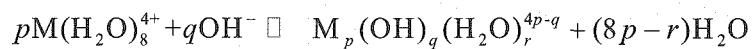
## 剛体球モデルによる加水分解定数の予測

剛体球間の静電ポテンシャル  $E_{p,q}$

$$E_{p,q} = \sum_{i \neq j}^N \left( \frac{Z_i Z_j}{\epsilon d_{ij}} \right)$$

N:剛体球の総数,  $Z_i, Z_j$ :剛体球i, jの電荷,  
 $\epsilon$ :誘電率,  $d_{ij}$ :剛体球i, j間の距離

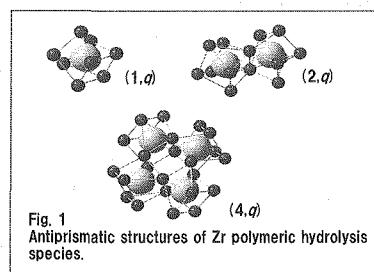
OH架橋反応による多核種の生成



多核種の生成による静電エネルギーの変化を求め、  
 加水分解定数  $\beta_{p,q}^0$  を評価

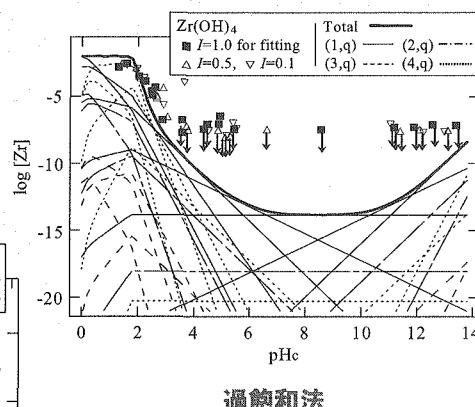
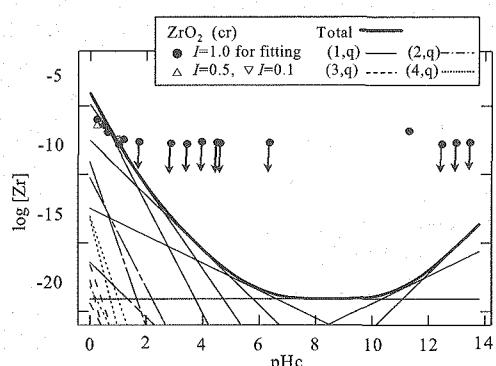
$$\beta_{p,q}^0 = \exp(-\Delta E_{p,q}/RT)$$

既存の加水分解定数の解析からモデルにおける  
 各種パラメータを求め、未知の加水分解定数を推  
 定する。



### 研究例:

・Zrの溶解度解釈



不飽和法

## おわりに：今後の方向・課題

### 多元系におけるポリマー・コロイド生成の予測について

#### 質疑応答

「水酸化物錯体の熱力学データの検討」（京都大学：小林大志）に関して、以下の質疑応答が行われた。

- Q: 溶解度のモデル評価値が中性付近で実験値よりも遙かに低くなっている原因について。  
A: 現状での測定限界と考えている。測定試料濃縮や、より検出感度の良いMSの使用等を対策として検討している。
- C: 測定方法等の工夫を行えば、検出感度はあと4桁くらいの改善は可能と考える。放射化分析も検討の余地がある。
- C: 桁がこれだけ離れると数値の議論より、化学種の同定に焦点を当てた方がよい。
- Q: 放射性廃棄物処分の安全性評価の信頼性の向上に対するこの研究の貢献分野について。  
A: 熱力データの信頼性向上と、それに基づく生成化学種に関する科学的基盤の整備と考える。
- Q: 剛体球モデルを適用する妥当性について。  
A: 第1次近似の出発点として妥当であると考えている。

### 3.4 ベントナイト緩衝材の鉄型化に関する研究例紹介と今後の展開

## ベントナイト緩衝材の鉄型化に関する 研究例紹介と今後の展開

### サブグループ7: ベントナイト緩衝材の長期健全性に関する研究

#### 連携重点研究情報交換会

日時: 平成18年8月3日(木)13:30~8月4日(金)15:00

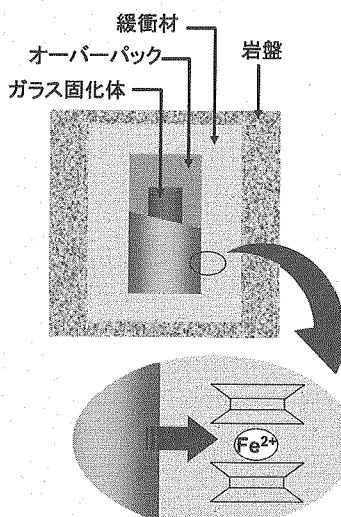
場所: 日本原子力研究開発機構 東海原子力研究開発センター

北海道大学大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻  
佐藤正知、小崎 完

日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター  
大貫敏彦、香西直文

三菱マテリアル(株)  
中澤俊之

### ベントナイトのFe型化とは?



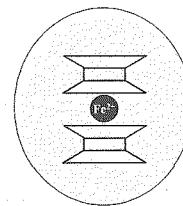
陽イオン交換によるイオン型の変化としては、初期の $\text{Na}^+$ イオンが、地下水におよびベントナイト中方解石起源の $\text{Ca}^{2+}$ イオンと置き代わる $\text{Ca}$ 型化、あるいはオーバーパック材料である炭素鋼の腐食により生じる $\text{Fe}^{2+}$ イオンによる $\text{Fe}$ 型化が考えられる。

Ca型化は評価上問題とならないと考えられる。 $\text{Fe}$ 型化した試料について、緩衝材性能を測定したデータはないものの、イオン型の変化のみであれば、スマクタイト特有の性質(膨張性、核種の収着性)は有しており、緩衝材性能の変化は、Ca型化で認められる程度の変化であると推定される。

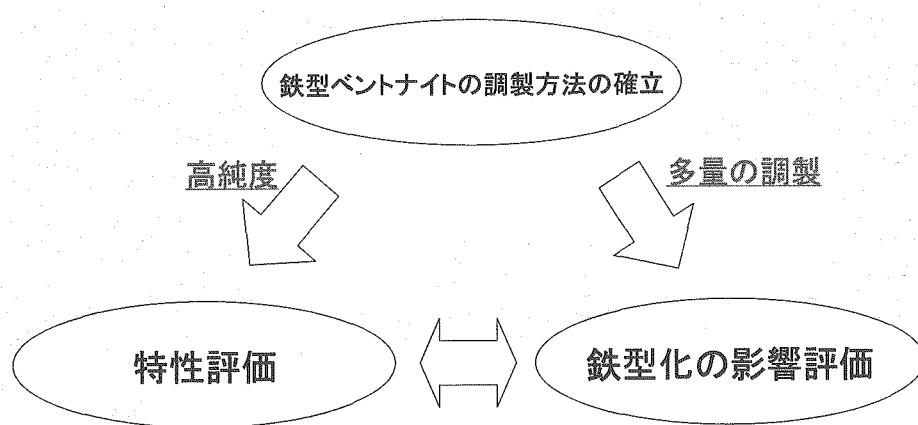
「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的  
信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ-」分冊3

## 目的

本研究では、オーバーパック材の腐食に伴いベントナイト緩衝材が鉄型化する現象を実験室内で再現するとともに、鉄型化ベントナイト試料の調製方法を確立し、調製した試料の特性評価に取り組む。さらに、鉄型ベントナイトへの核種の収着ならびに鉄型ベントナイト中の核種の移行挙動に関して実験を行い、鉄型化の影響を明らかにすることを目的とする。



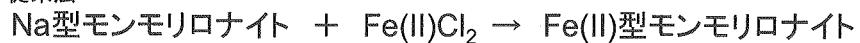
## 研究計画



## 研究例1

### Fe(II)-NTA錯体を用いたFe(II)型モンモリロナイトの調製

従来法



雰囲気制御グローブボックス中で、Na型モンモリロナイトをFe(II)Cl<sub>2</sub>溶液中に懸濁しイオン交換を促進させる。その後、脱気したイオン交換水で過剰塩を除去。

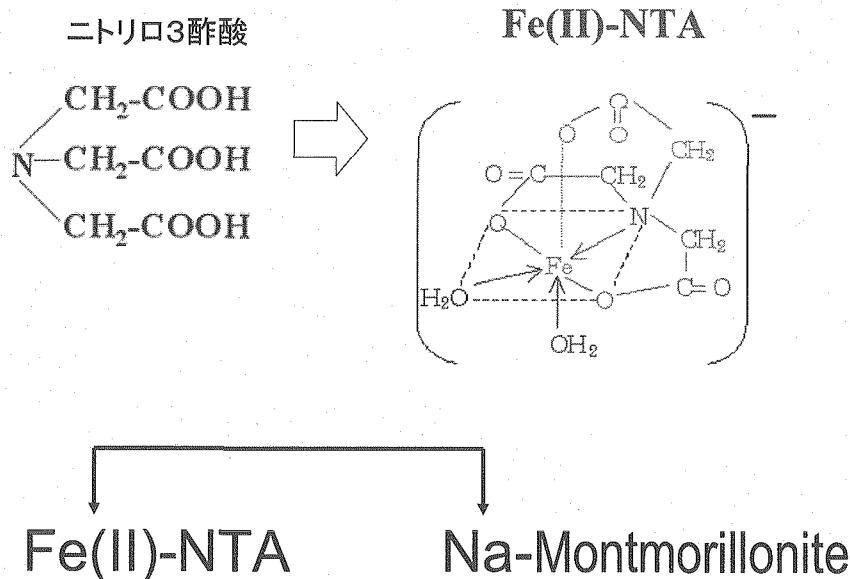
短所：GBが不可欠（操作が煩雑）。Fe(III)の混入、塩化物イオンの残留の可能性あり。

Manjanna method（特許出願済）



Na型モンモリロナイトをFe(II)-NTA溶液中に懸濁しイオン交換を促進させる。その後、脱気したイオン交換水で過剰塩を除去。

短所：GBが不要。Fe(III)の混入、塩化物イオンの残留の可能性は低い。



## 特性評価の例

### Fe(II)型モンモリロナイト(従来法による調製)

- ①X線回折 :Na型と底面間隔に変化
- ②メスバウア一分光分析 :Na型とは異なる新たなピーク  
:Fe(II)型サポナイトとI.S.の一一致
- ③陽イオン交換容量 :Fe(II)と考えるとFe脱離量と一致
- ④示差熱分析 :Na型とは構造に大きな変化なし(?)

→ Feはモンモリロナイトの層間にFe(II)イオンとして存在

### 酸化したFe(II)型モンモリロナイト

- ①酸化過程での色 :白から黄色に変化
- ②メスバウア一分光分析 :Fe(II)型とは異なる大きなピーク
- ③X線回折 :モンモリロナイトとは異なるピーク
- ④選択的逐次抽出 :酸化日数増加に伴い、析出量増加

→層間のFeは酸化日数増加に伴い、遊離鉄として析出

## 今後の展開

### 特性評価

メスバウア一分光、示差熱分析、  
FT-IR、X線回折、選択的逐次抽出法、micro-PIXE

### 鉄型化の影響評価

#### Fe(III)-Montmorillonite:

透水係数、見かけの拡散係数(実施中)  
収着挙動

#### Fe(II)-Montmorillonite

収着挙動(一部実施済み)  
透水係数、見かけの拡散係数

## 連携に向けて

北大院工・原子力環境材料学研究室(佐藤正知研究室)  
の近年の研究活動

### 1. 圧縮ベントナイト

放射性核種の拡散挙動

ガスの拡散挙動

内部微細構造観察(X線マイクロCT)

界面動電現象

### 2. セメント

ガスの拡散挙動

セメント-ベントナイト相互作用

### 3. フミン酸

鉱物への放射性核種の吸着に及ぼす有機酸の影響

## 質疑応答

「ベントナイト緩衝材の鉄型化に関する研究例紹介と今後の展開」(北海道大学・小崎完)に関して、以下の質疑応答が行われた。

Q: Fe(II)-NTA作成時に、Fe(III)の生成を抑制する方法について。

A: 少量のアスコルビン酸を添加し還元状態で調製している。

Q: Fe(II)-MONTとCaイオンとの反応について。

A: イオン交換選択性を考慮すべきである。亀井(1999)らがFe(II)の値を報告している。ただし、セメントからのCaイオン量が圧倒的に多ければ、当然置換されると考える。

C: ベントナイトはOPとセメントでサンドイッチ状態のため、Fe(II)やCaの拡散性や移流など輸送も考慮した上での検討が必要と考える。

A: 同感である。

C: 近く、旧JNCにおいて、OPと10年接触させたベントナイトのデータが入手される予定である。

3.5 ベントナイトの長期変質研究の現状と今後の方向

平成18年8月4日(金)  
連携重点研究情報交換会  
JAEA原子力科学研究所  
先端基礎交流棟大会議室

# ベントナイトの長期変質研究の現状と 今後の方向



北海道大学 大学院 工学研究科  
環境循環システム専攻  
地圈循環工学講座 環境地質学研究室

佐藤 努

Phone & Fax: 011-706-6305  
e-mail: tomsato@eng.hokudai.ac.jp  
Web pages: <http://geology5-er.eng.hokudai.ac.jp/RG/LoEG/index.html>



## 工学的長期安全性評価の考え方

- 評価しなければならない期間内で使用した資材の性能が保たれる。



性能が保たれることの証明

- 評価しなければならない期間内で使用した資材の性能が保たれない。



- ・性能が変化するのであればその変化を評価
- ・それが安全評価上問題となるものかどうかを判断
- ・工法によって安全性を担保できるかどうかを判断



3年前のバックエンド部会でのお話 → 平成15年7月31日(木)  
日本原子力学会  
「バックエンド部会」  
於 静岡音楽館AOI

## ベントナイトの長期安定性評価 — 残された課題とその解決に向けた取り組み —

金沢大学自然計測応用研究センター  
自然計測研究部門  
佐藤 努

phone: 076-264-5725 fax: 076-264-5746  
e-mail: tomsato@earth.s.kanazawa-u.ac.jp  
Web page: [http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/Environmental\\_Mineralogy/](http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/Environmental_Mineralogy/)

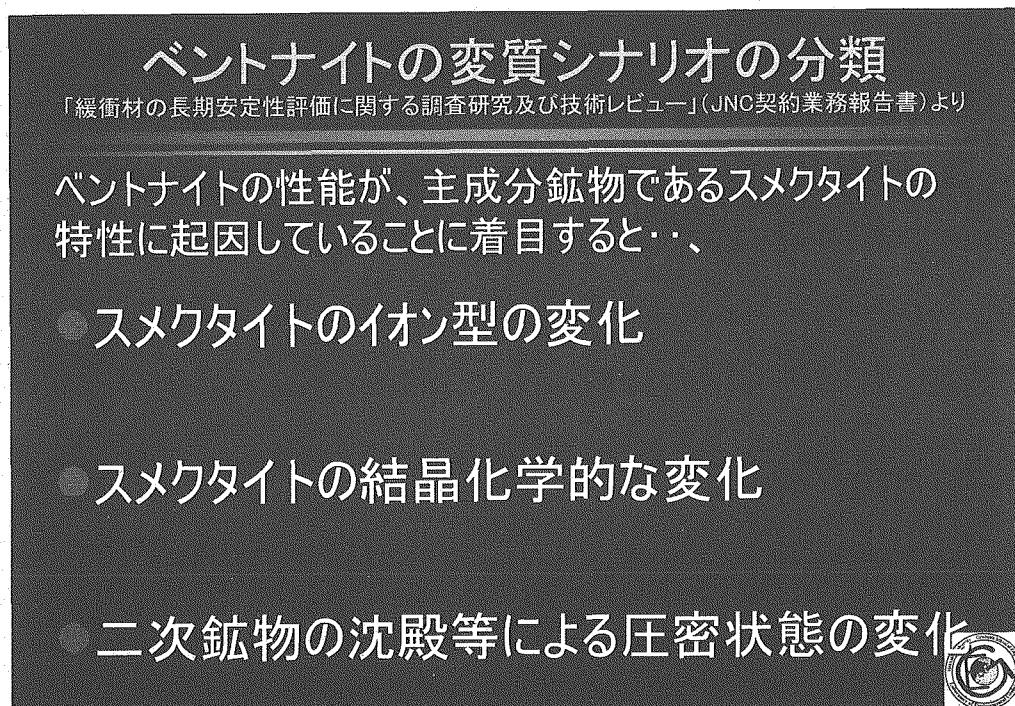
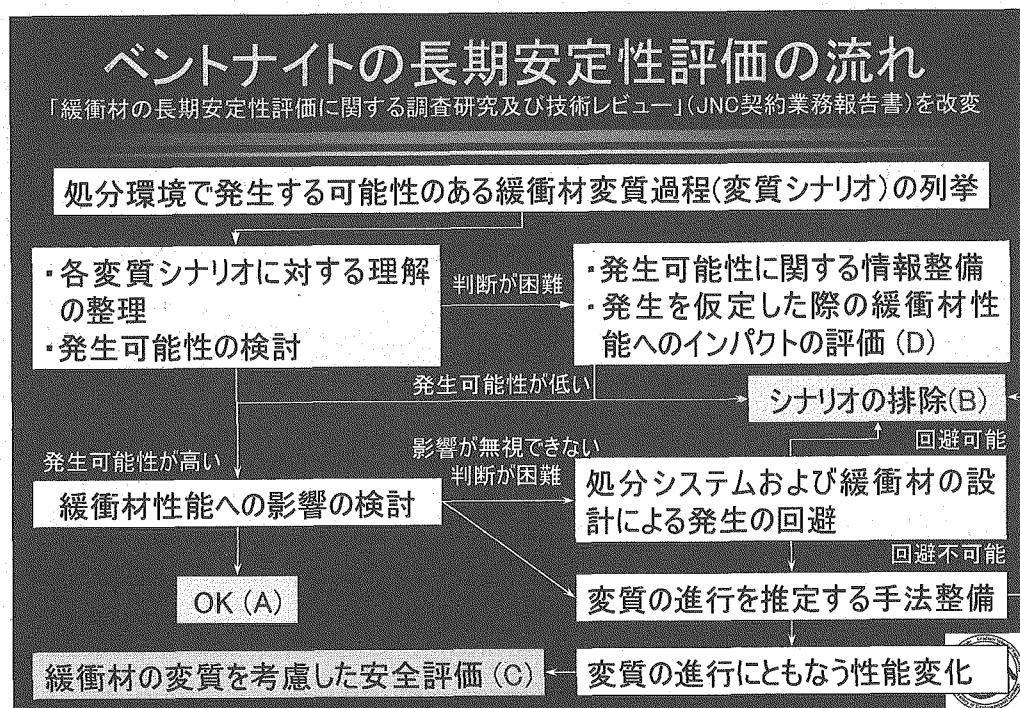


ベントナイトの変質シナリオの分類  
「緩衝材の長期安定性評価に関する調査研究及び技術レビュー」(JNC契約業務報告書)より

ベントナイトの性能が、主成分鉱物であるスメクタイトの特性に起因していることに着目すると…、

- スメクタイトのイオン型の変化
- スメクタイトの結晶化学的な変化
- 二次鉱物の沈殿等による圧密状態の変化



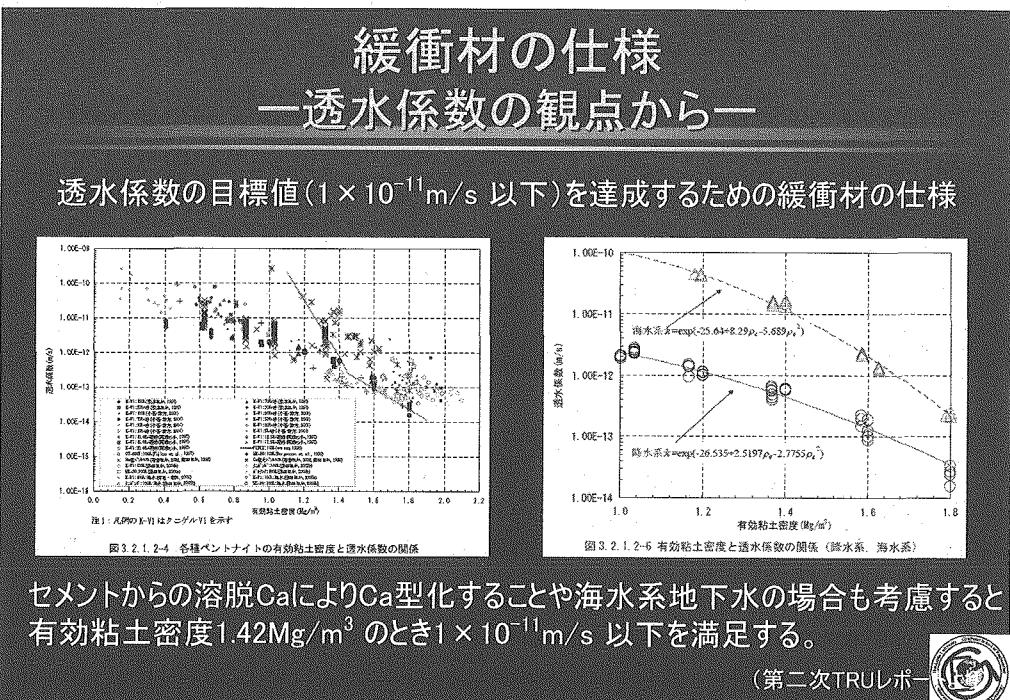


**スメクタイトのイオン型の変化**  
 「緩衝材の長期安定性評価に関する調査研究及び技術レビュー」(JNC契約業務報告書)を修正

●Ca交換 (A)  
 セメント浸出液により、間隙水のCaイオンの濃度が上昇。それに伴い層間陽イオンがCaに交換する可能性が高くなる。

●Fe交換 (A or C?)  
 オーバーパックの腐食により、間隙水のFe<sup>2+</sup>溶液の濃度が上昇。それに伴い層間陽イオンがFe<sup>2+</sup>に交換する可能性が高くなる。

●K固定(イライト化) (B)  
 高アルカリ条件で、低温条件でもイライト化することが報告されているが、温度が低ければイライト化の発生可能性は低い。

## スメクタイトの結晶化学的な変化

「緩衝材の長期安定性評価に関する調査研究及び技術レビュー」(JNC契約業務報告書)を修正

- イライト化 (B)
- バイデライト化 (D)
- クロライト化 (B)
- 鉄サポナイト・ノントロナイト化 (D)
- 摶クロライト、バーチェリン化 (D)
- 溶解およびゼオライト化 (C)
- 溶解およびC-S-Hゲル化 (C)



## 二次鉱物の沈殿等による圧密状態の変化

「緩衝材の長期安定性評価に関する調査研究及び技術レビュー」(JNC契約業務報告書)より

- シリカセメンテーション (C)
- 腐食生成物によるセメンテーション (D)

圧縮ベントナイト間隙中に腐食生成物やシリカが侵入・沈殿することにより、間隙の閉鎖、組織の緻密化が起こる可能性あり。この現象により、物質移行の特性、膨潤特性、可塑性などが変化する可能性が高まる。



## セメントー粘土混合バリア系の問題点

### セメント劣化

高アルカリ地下水とベントナイトの相互作用が不可避(?)

理解しなければ  
ならないこと

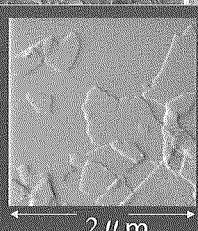
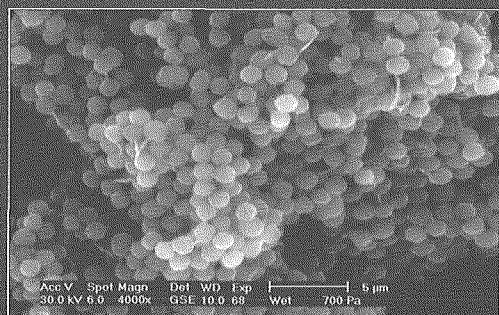
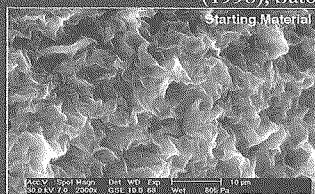
- 空隙や透水性の変化
- 沈殿や共沈挙動の変化
- 吸着挙動の変化
- 拡散挙動の変化
- コロイドの安定性や移動性の変化
- 微生物の活動度の変化
- ベントナイトの安定性の変化→スメクタイトの溶解



## 高アルカリ溶液一スメクタイト相互作用

### 先行研究

Carroll and Starkey (1971), Eberl (1978), Push (1982), Inoue (1983), Kamarneni and Roy (1983), Johnston and Miller (1984), Duerden (1992), Chermak (1992, 1993), Eberl et al., (1993), Karland (1997), Bauer and Berger (1998), 久保ほか (1998), Sato et al., (2001)



ゼオライト(アナルサイム)に変化



## 海外の事例(フィンランド)

ニアフィールド核種移行解析:  
REPCOMモデル

発破ブリ+破碎岩  
+セメント

Olkiluoto処分場  
(中レベルサイロ)

コンクリートサイロ壁  
コンクリートプラグ

1991年当時は…

破碎岩／ベントナイト混合材

中レベルサイロおよび原子炉サイロとも、ベントナイトの挙動やコンクリートとの相互作用が不明確なので、ベントナイトは存在しないという仮定で安全評価を実施

## 海外の事例(スウェーデン:SFR-1)

サイロの頂版  
コンクリート  
砂／ベントナイト  
ガスの排出

ベントナイト  
低透水バリアとし水平  
方向の地下水流动を  
拡散支配

※収着はビューメン固化体以外の  
全ての人工バリアで考慮

サイロ - 1 / 2 断面図

サイロ - 1 / 4 平面図

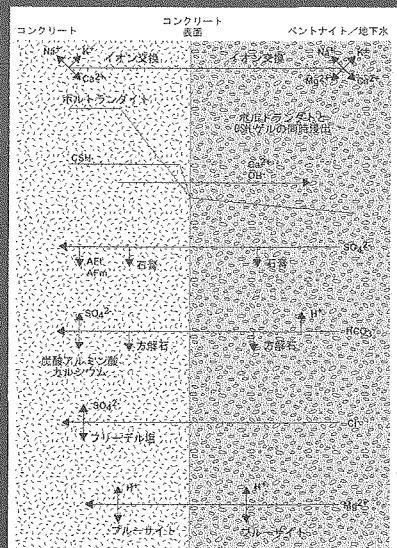
凡例

砂・ベントナイト サイロの力学的な安定

サイロにおけるベントナイトとの相互作用はサイロの頂版のみで考慮

透水係数 ベントナイト:  $6 \times 10^{-12}(\text{m/s})$ 、砂・ベントナイト:  $1 \times 10^{-9}(\text{m/s})$   
 $\downarrow$ 劣化  
 $1 \times 10^{-8}(\text{m/s})$

## SFR-1:SAFE Project 地下水-コンクリート-ベントナイト相互作用



### 相互作用のモデル

バリア物質の特性に長期的な影響を及ぼす可能性のある成分を合理的に表示

ただし、ベントナイトの主成分であるスマectaitとの相互作用はイオン交換のみ

SKB R-01-08

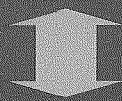


## 高アルカリ溶液一スマectait相互作用

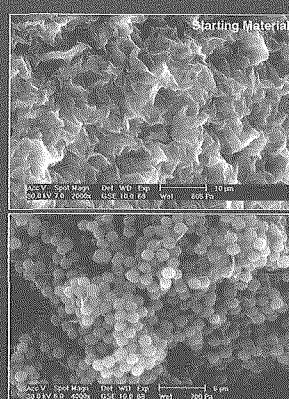
### 先行研究

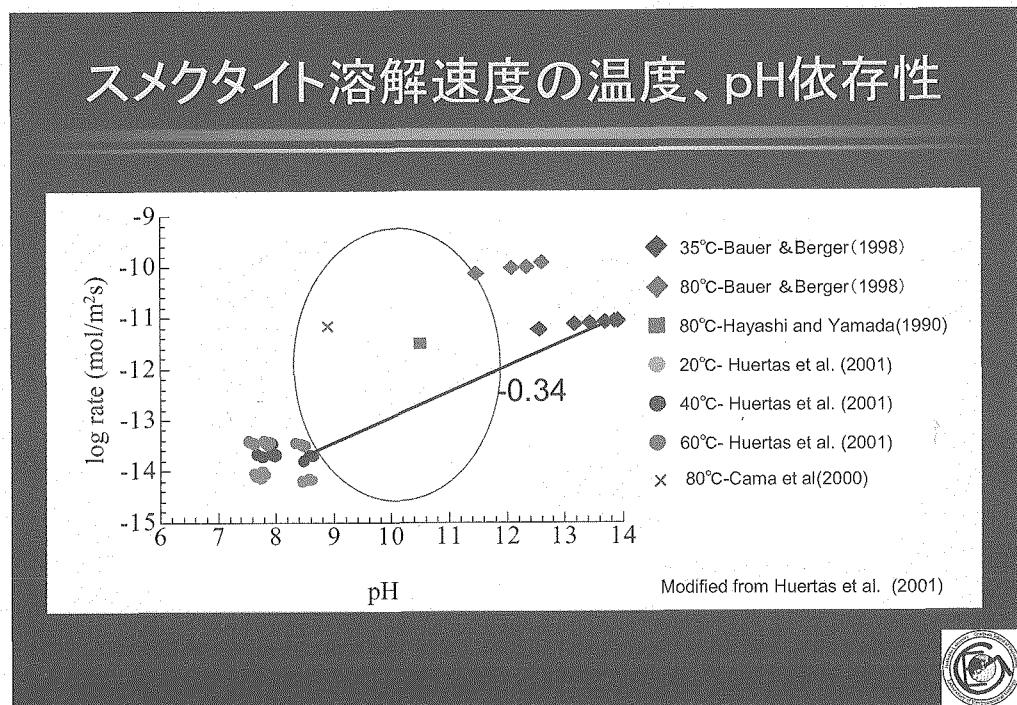
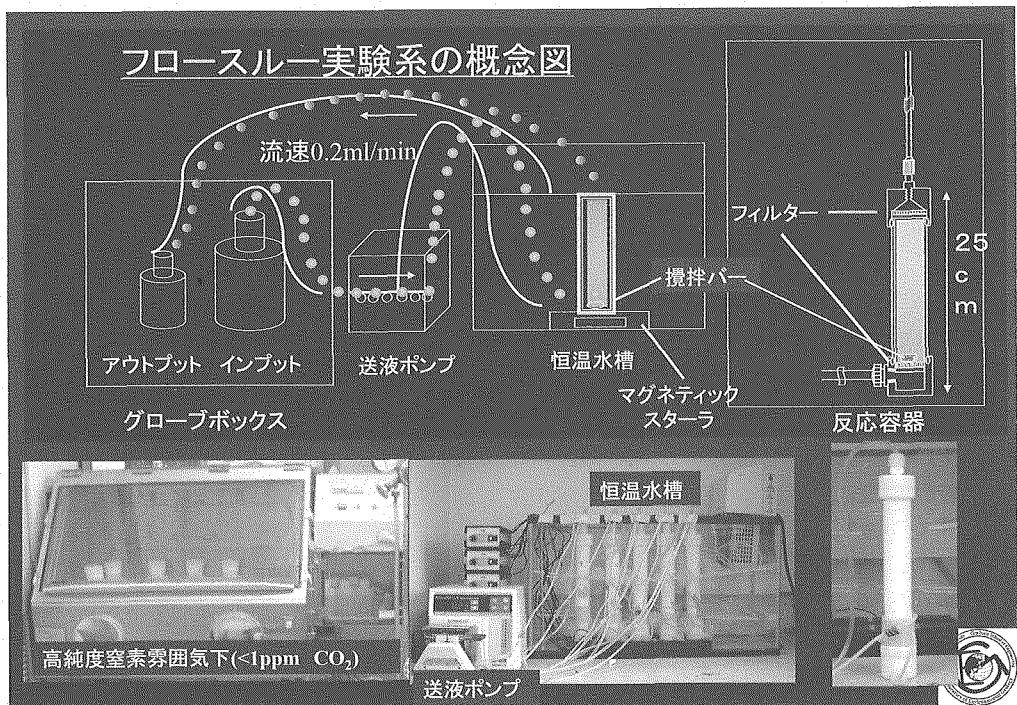
Carroll and Starkey (1971), Eberl (1978), Push (1982), Inoue (1983), Kamarneni and Roy (1983), Johnston and Miller (1984), Duerden (1992), Chermak (1992, 1993), Eberl et al., (1993), Karnland (1997), Bauer and Berger (1998), 久保ほか(1998), Cama et al., (2000), Huertus et al., (2001), Sato et al., (2001)

### バッチ系の溶解実験

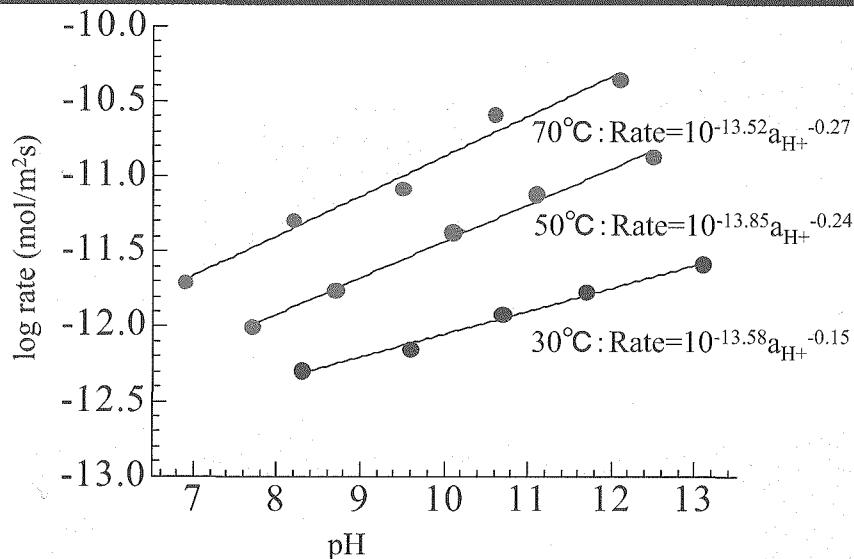


### フロースルー系の溶解実験

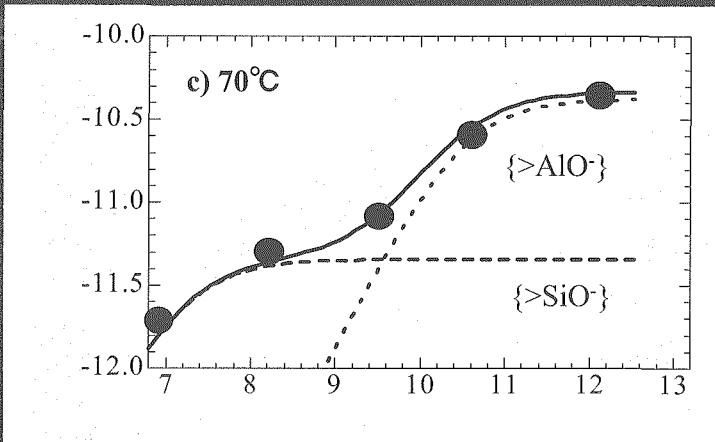




## 溶解速度のpHと温度依存性



## Results of Multiple Non-linear Regression



$$Rate = 4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.54/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.36/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.36/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{-69.66/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.51/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.51/RT} \cdot a_{OH^-}}$$

 $\{>SiO^- \}$  $\{>AlO^- \}$

## ベントナイトのアルカリ変質 - スメクタイトの溶解速度 -

経験式ではあるが、PAで溶解速度論的にスメクタイトを取り扱えるようになった。

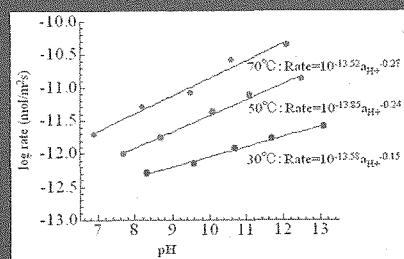


図 モンモリロナイト溶解速度への温度、pHの影響  
Sato et al. (2004)

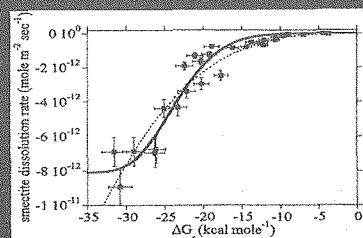


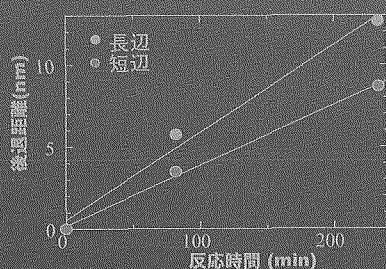
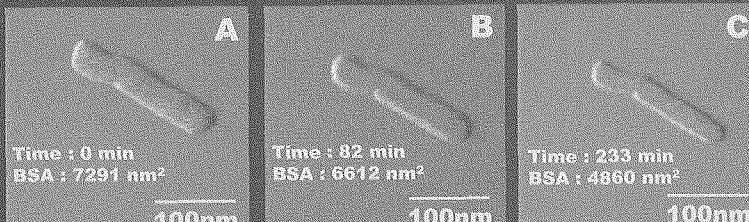
図 モンモリロナイト溶解速度への飽和度の影響  
Cama et al. (2000)

- ・温度が低ければモンモリロナイトの溶解速度に対するpH依存性は小さい。
- ・溶解反応速度は飽和に近づくにつれて遅くなる。

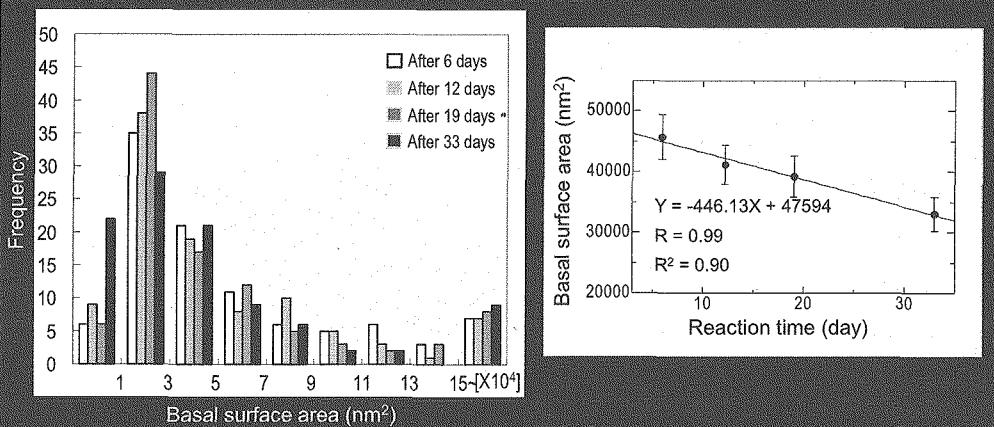
$$\text{Rate} = (4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.6/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.4/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.4/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.5/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.5/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.5/RT} \cdot a_{OH^-}}) \cdot (1 - e^{(-610^{-6}) \cdot (\Delta G_f / RT)^2})$$

式 モンモリロナイト溶解速度の一般式 Sato et al. (2004)

## AFMによる*in situ*観察で溶解速度を算出する —溶解速度の絶対値のクロスチェック—



## 溶解過程におけるスメクタイト粒子体積の変化 (ex situ AFM)



The median values of BSA linearly decreased as function of reaction time.  
From this figure, we can obtain the dissolution rate at steady state.



## 異なる方法で求められた スメクタイト溶解速度の比較

### Flow-through experiments

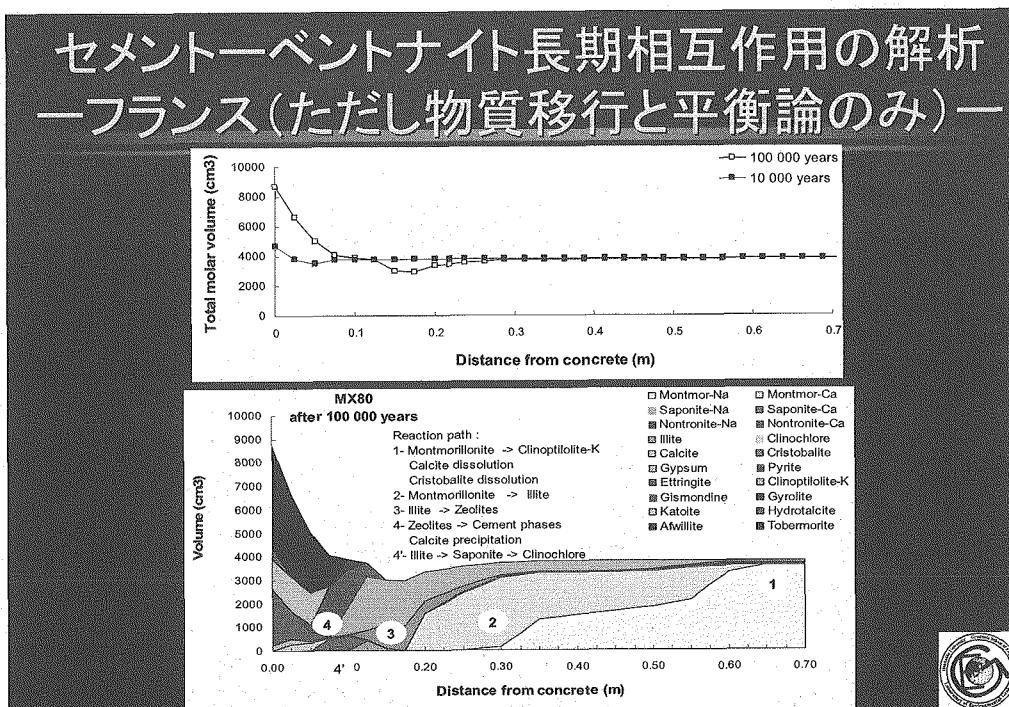
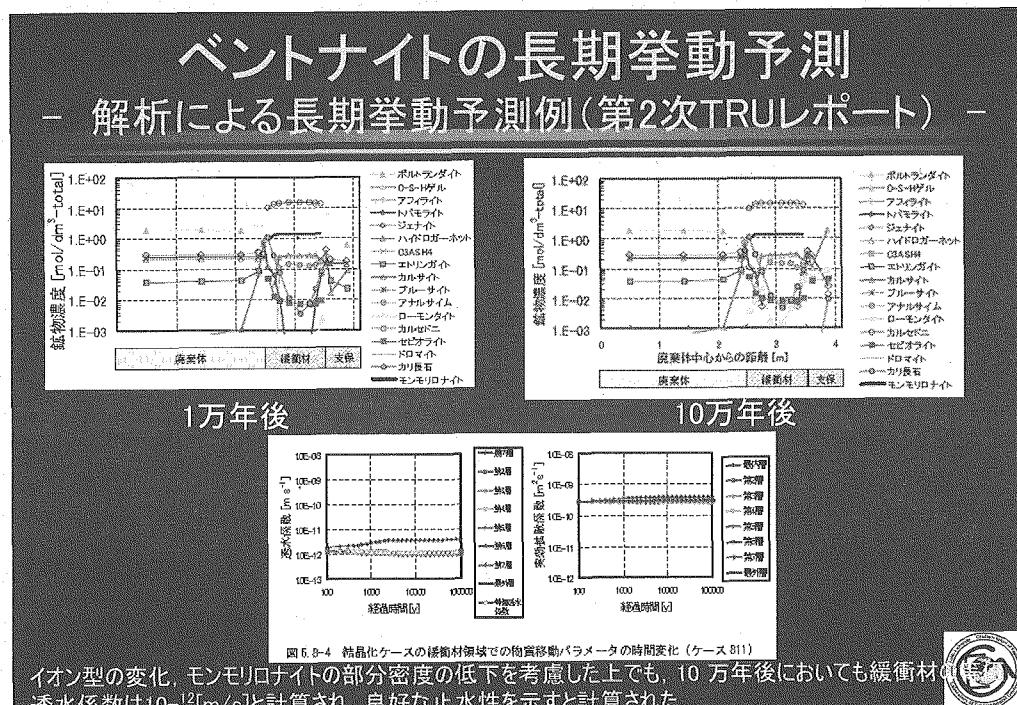
Temperature	$N_2$ -BET	TSA	ESA
30 ° C	$2.33 \times 10^{-12}$	$2.29 \times 10^{-14}$	$3.60 \times 10^{-12}$
50 ° C	$1.20 \times 10^{-11}$	$1.18 \times 10^{-13}$	$1.85 \times 10^{-11}$
70 ° C	$4.00 \times 10^{-11}$	$3.92 \times 10^{-13}$	$6.16 \times 10^{-11}$

### Ex situ AFM observations

Temperature	TSA	ESA
50 ° C	$1.04 \times 10^{-13}$	$1.11 \times 10^{-11}$

This AFM observation would support that the rate obtained from flow-through experiments was reliable.





## ベントナイトの変質に伴う性能変化に関する研究 性能評価研究の進展

ベントナイトのアルカリ変質に関する研究：  
TRU廃棄物処分システムの性能評価研究において、特に日本で進展。

第1次レポート  
(2000)

セメント-ベントナイト反応  
はデータ不足により定量的な  
評価ができなかった。

第2次レポート  
(2005)

ベントナイトの構成鉱物の溶解  
速度に関わるデータの取得や二  
次生成鉱物の組み合わせおよび  
熱力学データを整備した結果、  
長期間安定性の評価が可能に  
なった。

(第2次TRUレポートより抜粋)

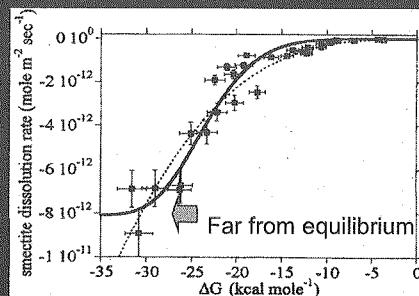
原子力安全委員会第5回低レベル放射性廃棄物埋設分科会配布資料



### スメクタイト溶解速度への $\Delta G_r$

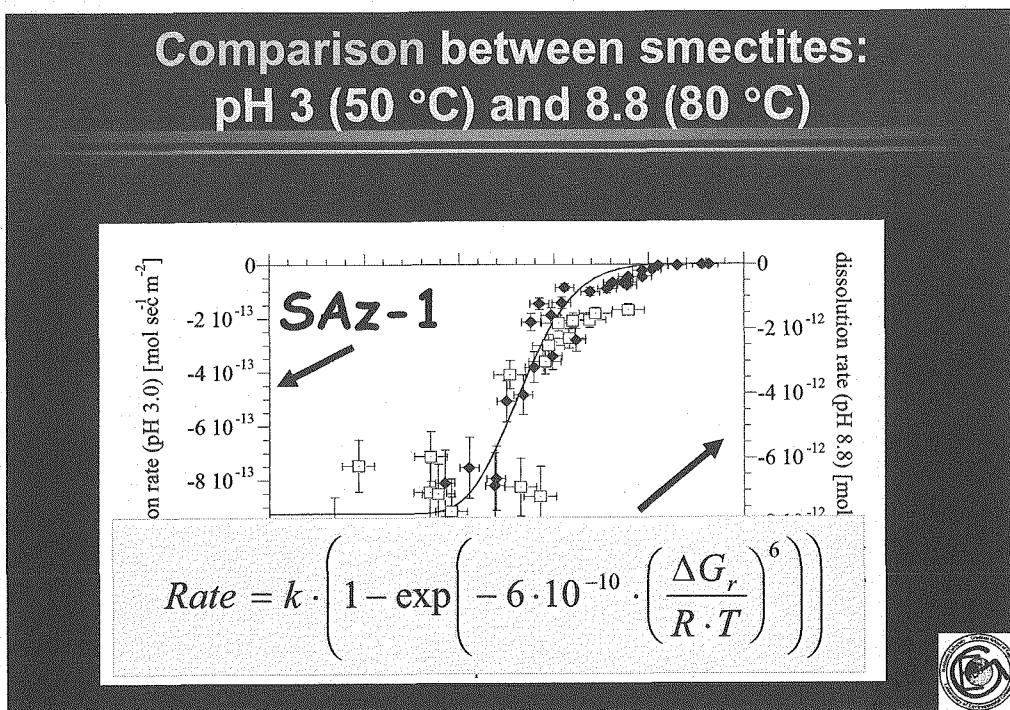
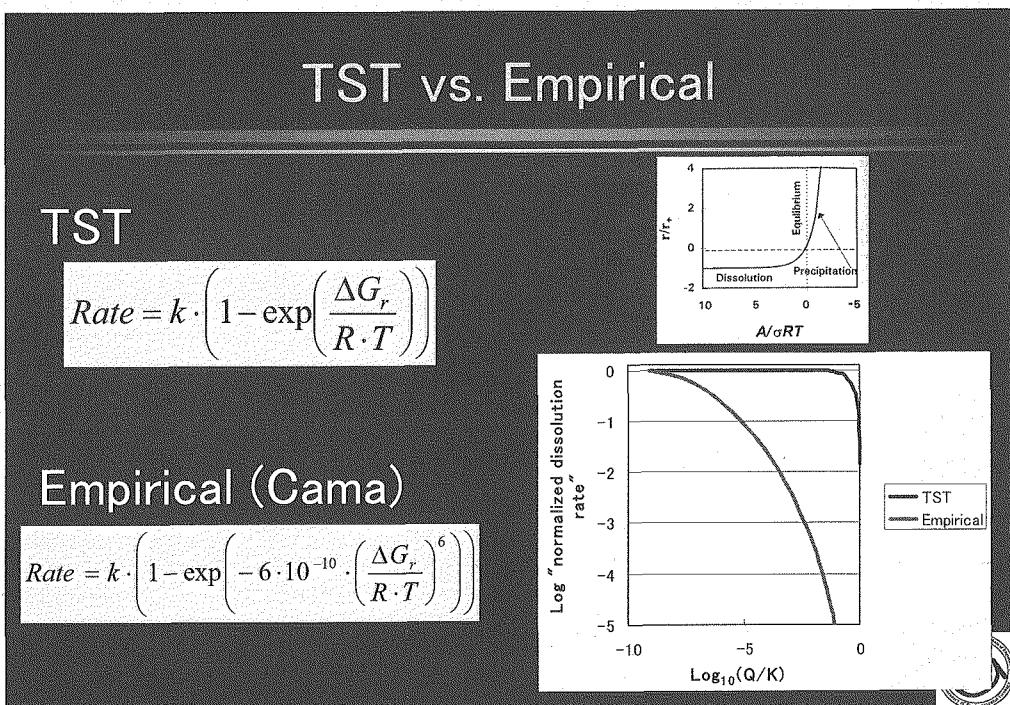
$$\text{Rate} = k_0 \cdot s_r \cdot e^{-E_{app}/RT} \cdot a_{H^+}^{n_{H^+}} \cdot \prod_i a_i^{n_i} \cdot g(I) \cdot f(\Delta G_r)$$

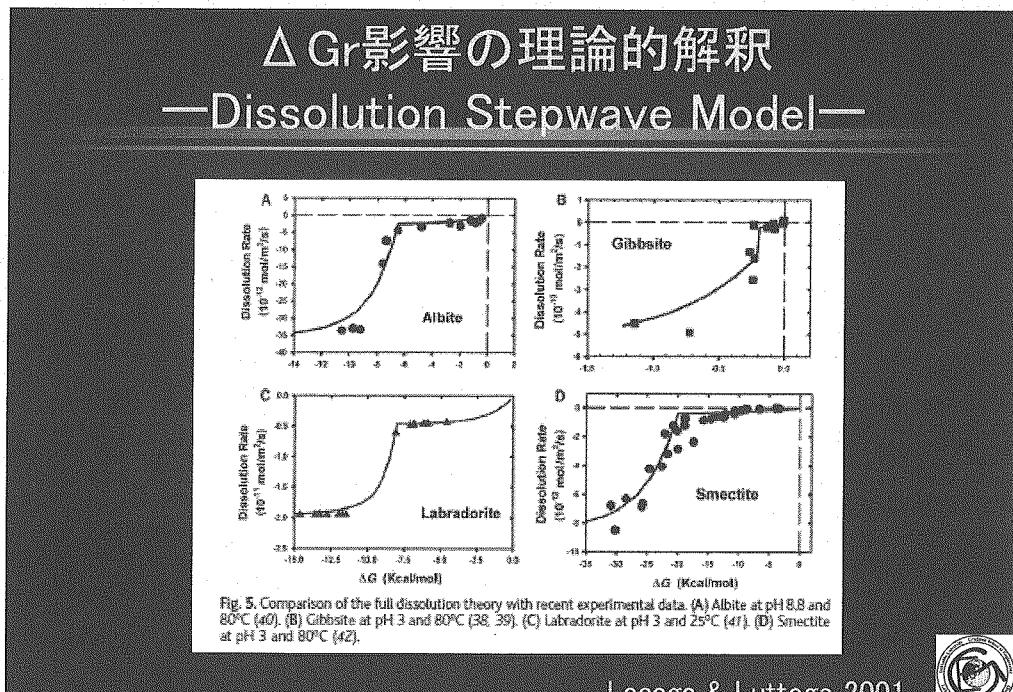
$$\text{Rate} = -8.1 \times 10^{-12} \cdot (1 - \exp(-6 \times 10^{-10} \cdot (\frac{\Delta G_r}{RT})^6))$$



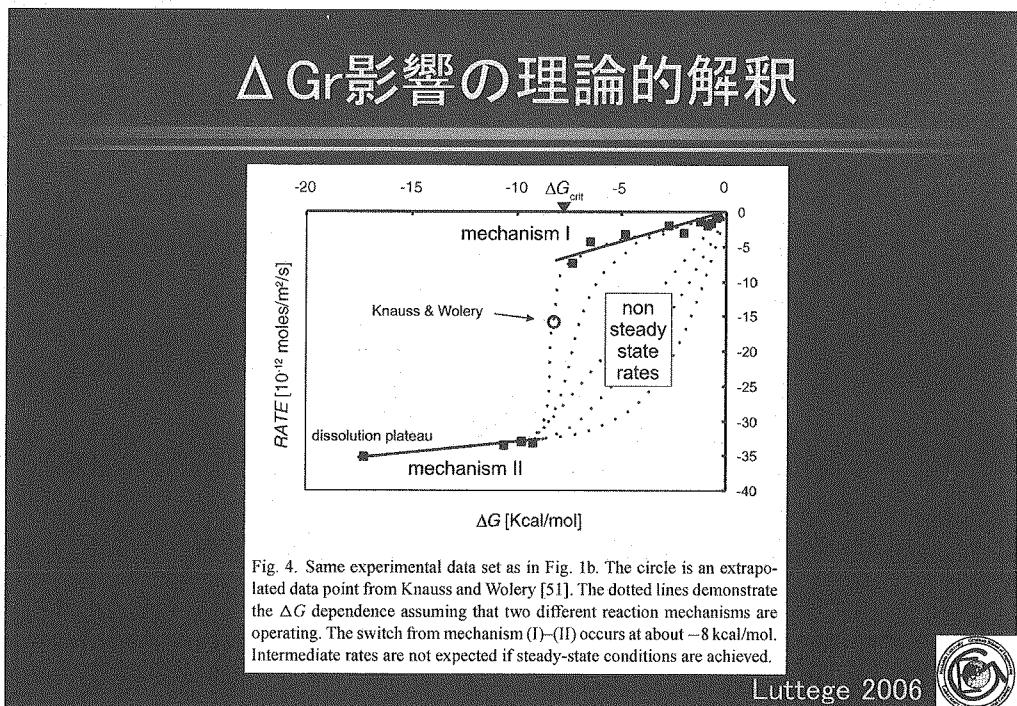
Dissolution rates at 80 deg C and pH 8.8 (Cama et al., 2000)







Lasaga &amp; Luttege 2001



Luttege 2006



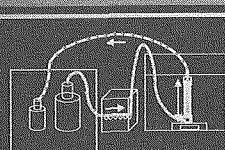
## 長期予測のための不確実性 —規制上必ずしも必要でないものも含む—

- モンモリロナイト溶解速度式
- 二次鉱物の種類
- 鉱物の沈殿速度
- 热力学データ
- 二次鉱物による間隙充填の安定性
- 外側境界条件に関する不確定性
- 力学的な影響

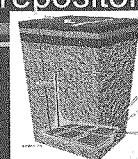
感度が高く重要

現実的なケースでは10万年経過後も止水性は確保される解析結果となっているが、上記不確実性をもとに可能性は低いが否定できない仮想的なケースを設定する。数千年後には止水性が失われるという解析結果もある。(TRU二次レポート)

Difference in dissolution rate at the laboratory ( Flow-through exp.) and field (Radioactive waste repositories).



Flow-through experiments



Radioactive waste repositories

Sample	Particle	Compacted
Density	Low	High
Solid / Liquid ratio	Low	High
Reactive surface area	High	Low?

The fastest dissolution rate?

Retardation?

## より現実的なスメクタイト溶解速度の見積もり

- 間隙水の飽和度(間隙水の化学組成)
- スメクタイト以外の成分の溶解挙動  
クニゲルV1では特にアモルファスシリカとカルサイト
- 間隙水のアクティビティ
- 反応表面積



## ベントナイトのアルカリ変質 -圧縮成型ベントナイト中の溶解と二次生成物の沈殿-

実験的評価で通常用いられている粉体での変質だけでなく、最近では圧縮体を用いた変質実験のデータが蓄積されてきている



より現実的な仕様での変質挙動の評価

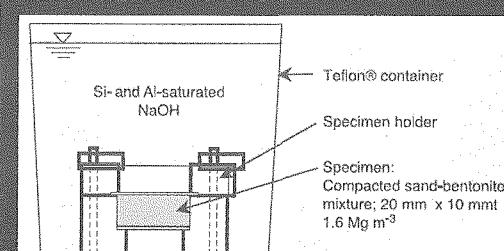


図 圧縮成型ベントナイトの変質実験(浸水系)  
Nakayama et al. (2000)

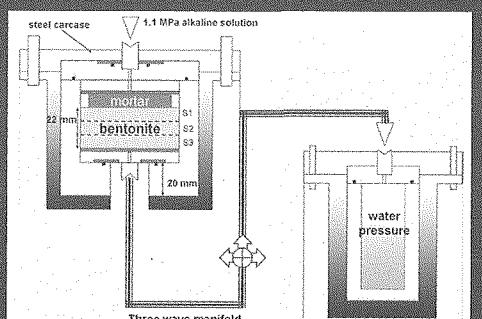


図 圧縮成型ベントナイトの変質実験(透水系)  
Fernandez et al. (2006)



## 石英の溶解速度(天然vs. 実験)

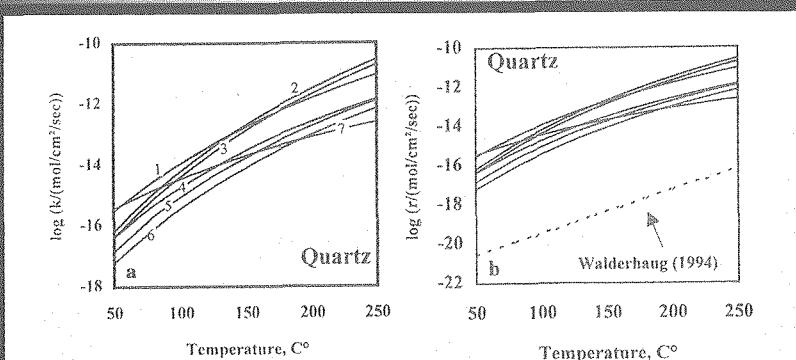
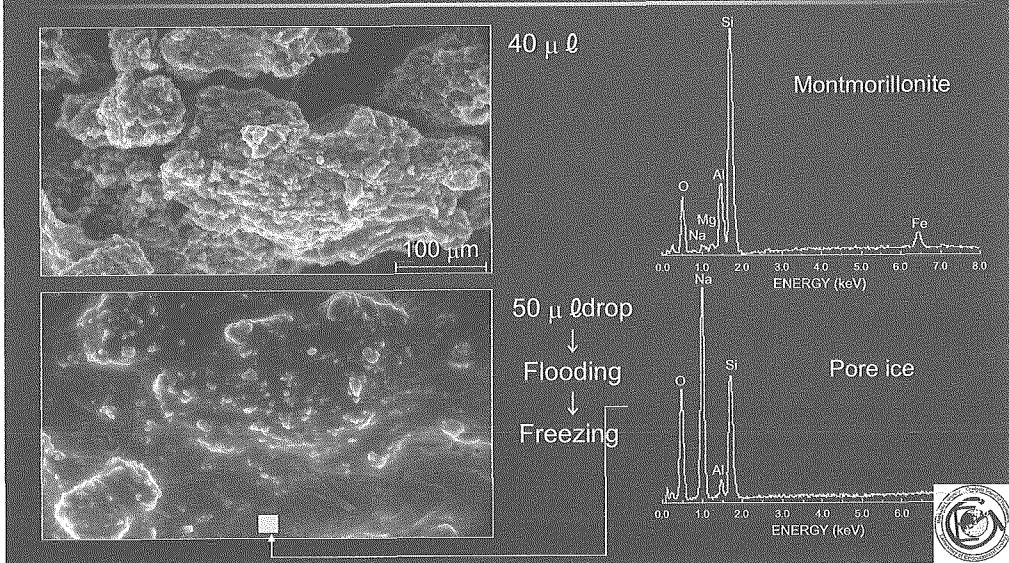
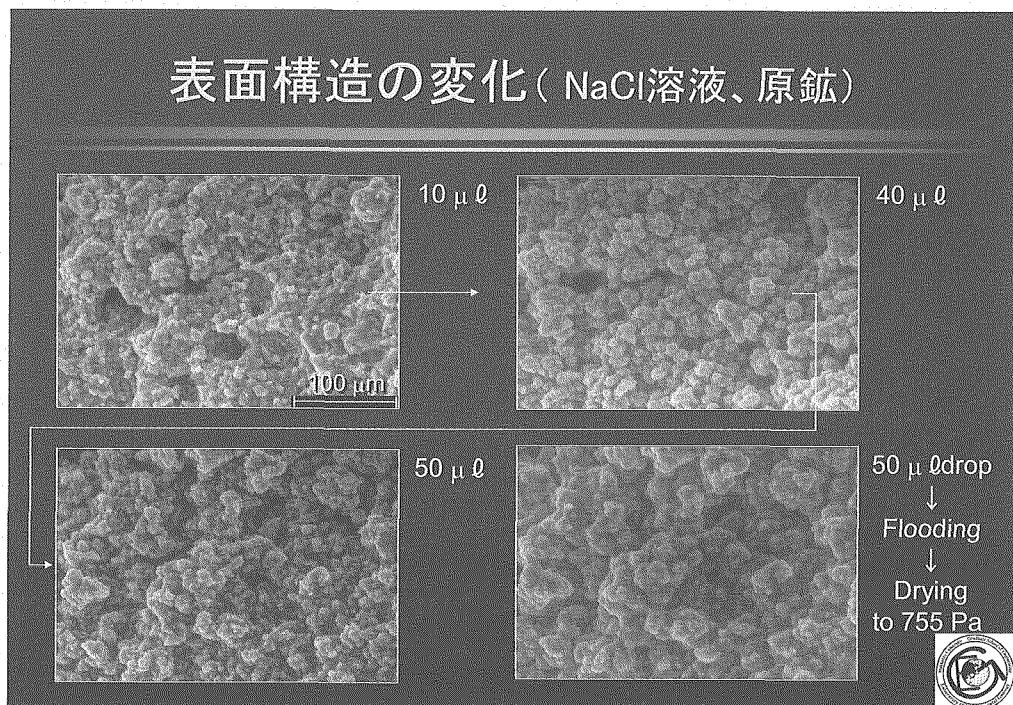


Figure 19. Quartz dissolution rates at near to neutral pH as a function of temperature. (a) Curves computed for steady state dissolution at far from equilibrium conditions by adopting equations and parameters reported by (1) Dove and Crerar (1990), (2) Knauss and Wolery (1989), (3) Tester et al. (1994), (4) Rimstidt and Barnes (1980), (5) Murphy and Helgeson (1989), (6) Gislasen et al. (1996), and (7) Brady and Walther (1990). (b) Solid curves correspond to the same calculations as in (a), and the dotted curve illustrates the variation of quartz precipitation rates obtained from the interpretation of Jurassic North Sea sandstones as a function of temperature reported by Walderhaug (1994).



## NaOH溶液滴下後の間隙水の組成





セメント一ベントナイト相互作用により生成する  
二次鉱物のリストアップ法

対象とするフェーズ: CSHおよびゼオライト

- 類似した天然システムからの証拠
  - 海底堆積物、埋没続成作用、塩基性岩のアミグダル、塩・アルカリ湖
- 適切に設計された実験からの証拠
- 利用可能な熱力学データを利用した安定関係の解析から考察

Savage (2005)

## 考慮すべきゼオライト

- Erionite
- Chabazite
- Clinoptilolite
- Analcime
- Phillipsite
- Heulandite

(Savage (2005)には含まれていないが筆者の天然における知見  
より)

Savage (2005)



## Estimation of the Rate and Extent of Water–Bentonite Interaction and Chemical Transport

Need the quantitative understanding of the physical and chemical properties of the bentonite itself and fluid in bentonite

If compute the above, the following properties should be parameterized,

- Smectite dissolution/precipitation rates
- Permeability
- Porosity
- Tortuosity
- Dispersivity
- Aqueous diffusion coefficients
- Thermodynamic equilibrium constants

After Oelkers (1996)

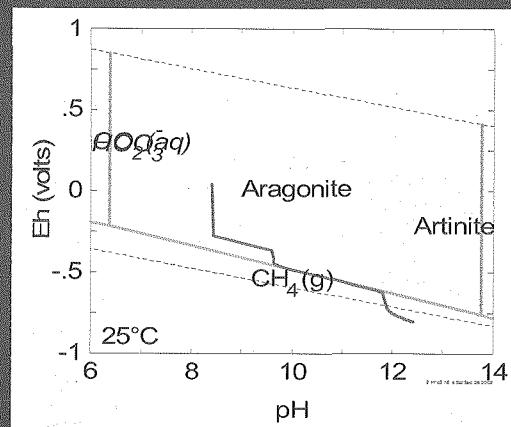
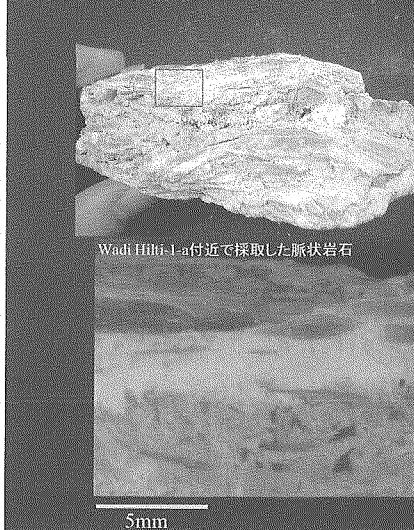


## そもそもベントナイトが反応する溶液は？

- 本当に高アルカリ溶液がベントナイトエリアに潤沢に供給されるのか?  
コンクリート内でできる二次鉱物の生成で緩衝されないか?  
ベントナイトとの境界で緩衝されないか?
  
- セメント物質の反応と透水性の関係
- 反応溶液中の炭酸イオンのアクティビティ
- 反応溶液の還元性



## ベントナイトの長期安定性 鍵を握るのは一炭酸イオニアクティビティ



還元性が強いと炭酸イオンはメタンガス



## 今後のベントナイト長期変質研究の方向

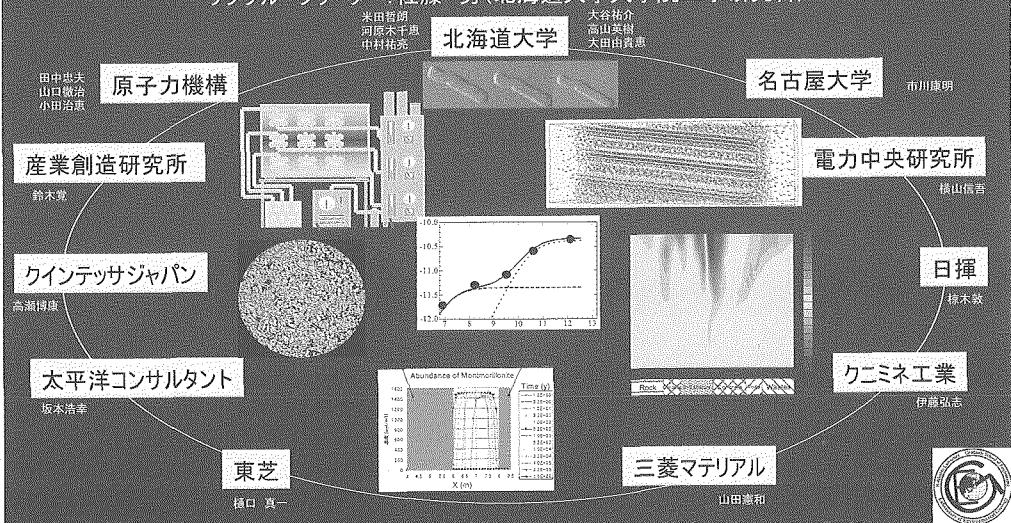
- 溶解反応に関する現象解明と理論構築  
→経験式から理論式へ(他の鉱物溶解反応との整合性)
- 上記を踏まえた溶解速度モデルの開発
- 溶解反応と物質移動を連成させた信頼性の高いモデルの開発(特に二次鉱物の種類と生成速度,圧縮系でのOHの挙動など←小崎先生よろしくお願ひいたします)
- 圧縮系のデータ取得と特異性の整理←大江先生よろしくお願ひいたします)
- 上記を踏まえた理論構築とモデルの開発(力学モデルとの連成?)  
上記プロセスにおける科学的知見の整理とアップデート



## 地下環境における核種移行に及ぼすバリア材変質とモデリング

処分場の環境下におけるベントナイトやセメント構成鉱物の溶解速度や挙動について定量的にまとめるとともに、それらを考慮した物質移行・地球化学反応をカップリングしたモデルを開発する。核種移行に及ぼす影響評価、さらに長期挙動を考慮に入れたバリア材仕様の提案を行う。

サブグループリーダー：佐藤 努(北海道大学大学院工学研究科)



## バリア材の劣化により生成する二次鉱物への 陰イオン核種の取り込み

- オーバーパックの海水による腐食
- 腐食性生物によるオキシアニオンの取り込み
- 取り込み後の安定性

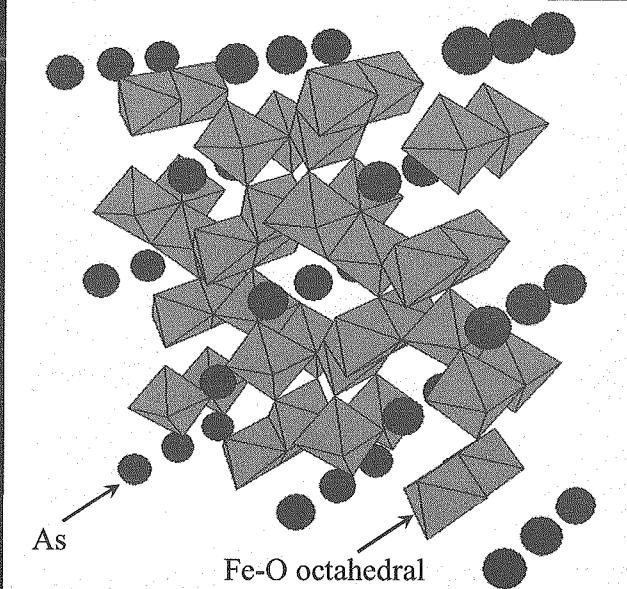
### 休廃止鉱山廃水路における有害陰イオン種の自然 浄化

- Ca-OHタイプの高アルカリ地下水の水道で生成  
する沈殿物
- 沈殿物によるオキシアニオンの取り込み

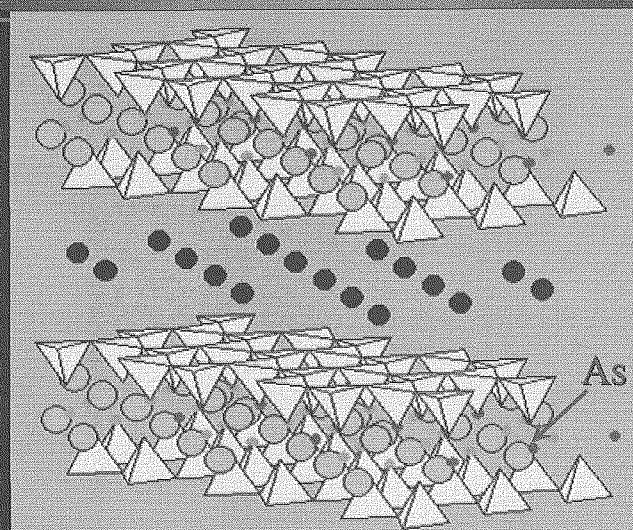
### オマーンオフィオライトから湧出する高アルカリ泉と沈殿 物の生成過程



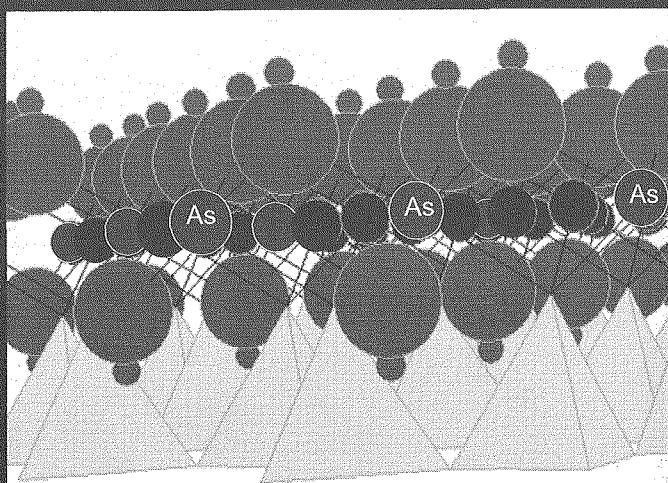
Schwertmannite



## Smectite



## Serpentine



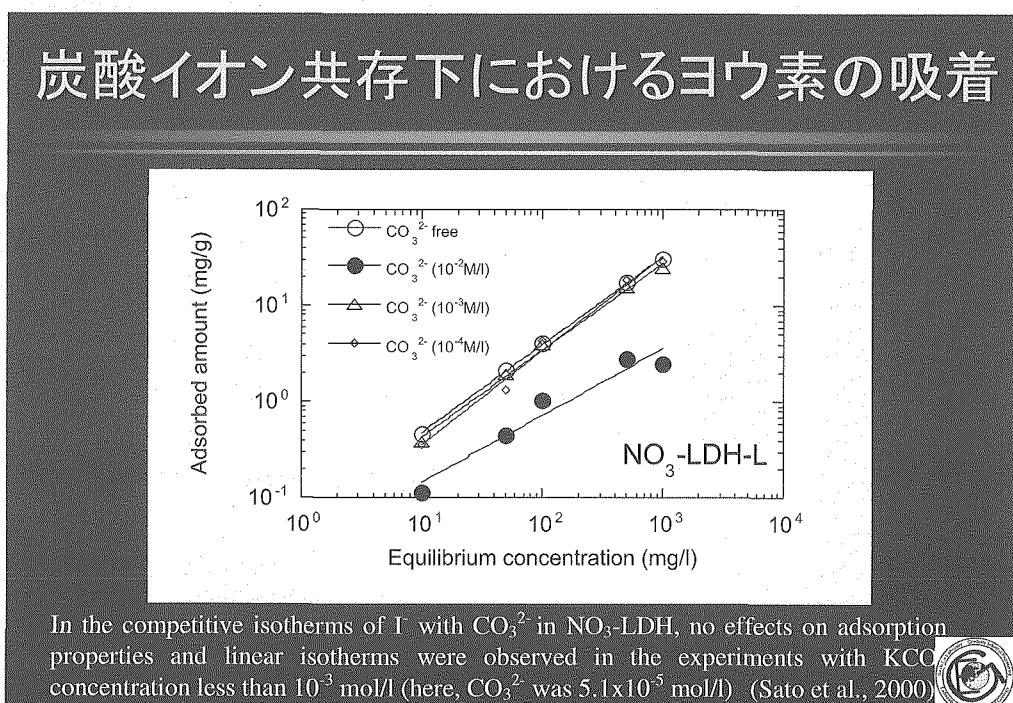
## Layered Double Hydroxides -アルカリ条件における天然の陰イオンゲッター-

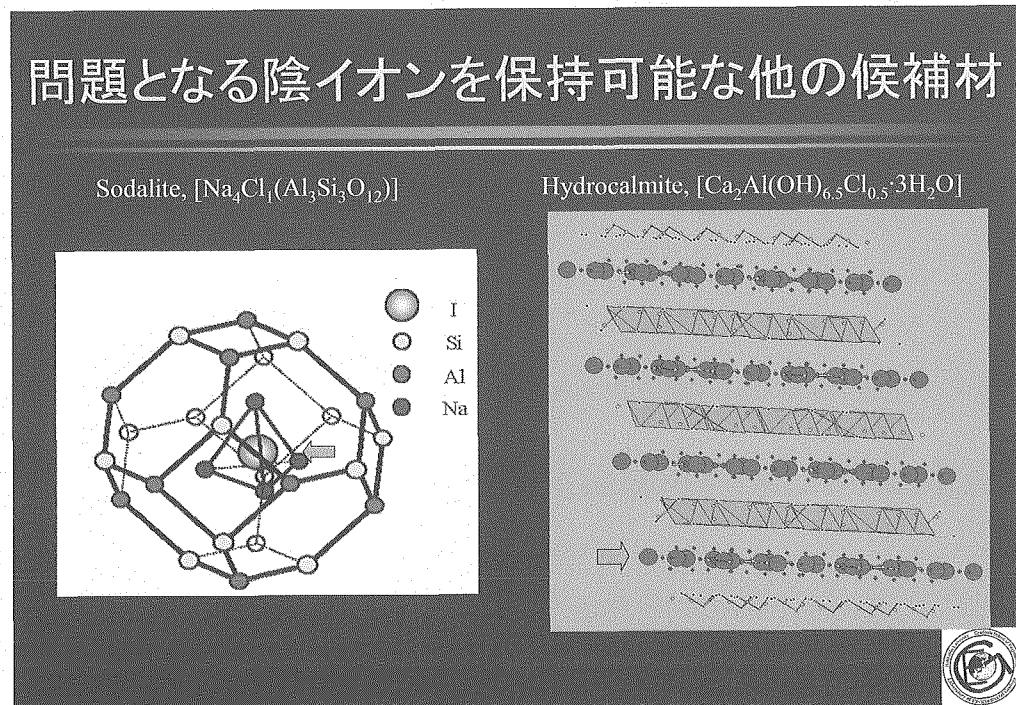
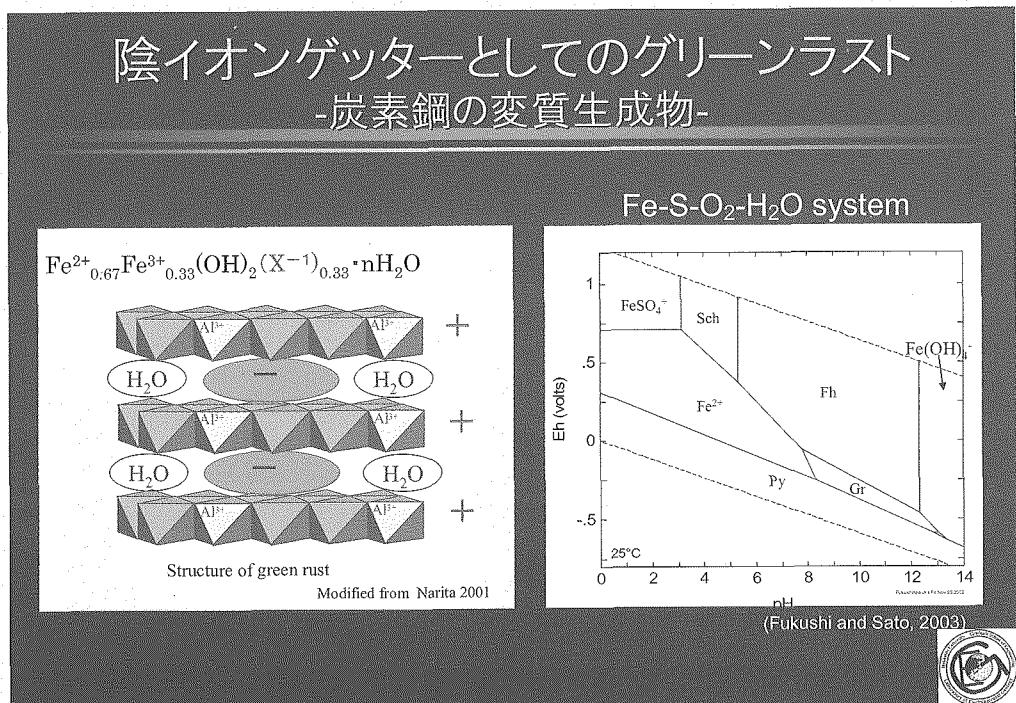
$Mg_{0.67}Al_{0.33}(OH)_2(X^{-1})_{0.33} \cdot nH_2O$

From Narita 2001

Anion selectivity

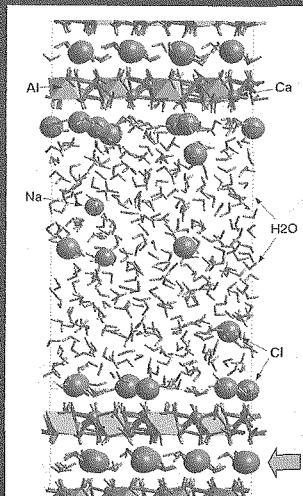
$$CO_3^{2-} >> SO_4^{2-} >> OH^- > F^- > Cl^- > Br^- > NO_3^- , I^-$$



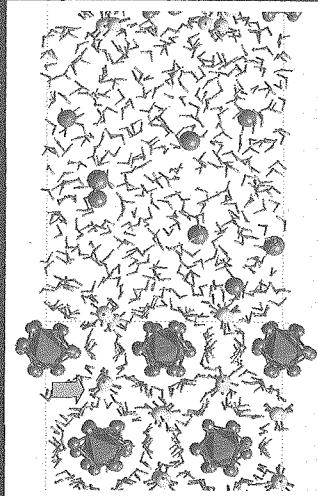


## 問題となる陰イオンを保持可能な他の候補材

Friedel's salt,  $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]\text{Cl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$



Ettringite,  $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2[\text{SO}_4]_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$



## 会議報告 International workshop on chemistry and stability of bentonites in radioactive waste disposal



期日：平成15年9月18日(木)、19日(金)

場所：金沢大学インキュベーション施設



## 本邦のベントナイト研究

- ベントナイト中の物質の挙動(吸着、拡散)
- ベントナイト中の間隙水化学
- ベントナイトの溶解実験と様々な因子を考慮した溶解速度の定式化
- ベントナイト溶解の機構論
- ベントナイト溶解キネティクスを考慮したモデリング
- ベントナイトの安定性に関するナチュラルアナログ
- ベントナイトと炭素鋼の相互作用によるベントナイトの変質
- ベントナイトの膨潤特性とその場観察(特に塩水の効果)



## 本邦のベントナイト研究の特徴

- 安全評価上重要なモーデリングにつなげる(つながる)研究を意識して行われている。
- 様々な手法を有する研究者で研究が実施され、それらの手法は、現状で必要とされているすべての分野のものをすでに含んでいる。
- 様々なバックグラウンドを持つ研究者から実施されているが、すでに共通な問題意識と言葉遣いで議論を深める状態にまで成熟している。



## 北海道資源素材フォーラムのご案内

### 「持続型社会形成のための土壤汚染の浄化(案)」

●期日:平成18年12月21日(木)

●場所:北海道大学学術交流会館2階講堂

●講演予定者:

上智大学大学院地球環境学研究科

中杉修身氏

### 「土壤汚染対策法施行から3年(仮題)」

スミコンセルテック株式会社

二見達也氏

### 「汚染土壤浄化技術とビジネス展望」

金沢大学自然科学研究科

川西拓也氏

九州大学農学研究院

和田信一郎氏

北海道立地質研究所

遠藤裕司氏



## 第51回粘土科学討論会のご案内

●期日:平成19年9月月12-13日

●場所:北海道大学学術交流会館

米田先生・小崎先生・佐藤を中心に北大メンバーでオーガナイズしますので、皆さんいらっしゃいませんか?



## 質疑応答

「ベントナイトの長期変質研究の現状と今後の方向」(北海道大学・佐藤努)に関して、以下の質疑応答が行われた。

C: 土壌汚染復元は原位置での実施が検討されている。その分野への協力も重要な役割である。

A: 圧縮系での溶解速度がどれくらいのものであるか、確かなデータがない。今後、実験室と自然界における石英溶解速度のギャップのような情報をベントナイトの長期性能評価にFBさせ、より現実的な評価につなげたい。

Q: モンモリロナイトの溶解における律速機構について。

A: モンモリロナイトの溶解は二次元結晶の端面から進行するので、その溶解律速の機構は、電荷を帯びている端面の酸素と金属の結合が切れて、Mg や Al が溶脱することであると考える。

3.6 マイクロフォーカス X 線 CT によるベントナイト-珪砂混合体の微細構造観察

2006.8.4 連携重点研究情報交換会

# マイクロフォーカスX線CTによる ベントナイト-珪砂混合体の 微細構造観察

北海道大学工学研究科 河原木千恵  
中村裕亮  
金子勝比古  
佐藤努  
米田哲朗



## 項目

1. はじめに

2. 管理型最終処分場のベントナイトライナー

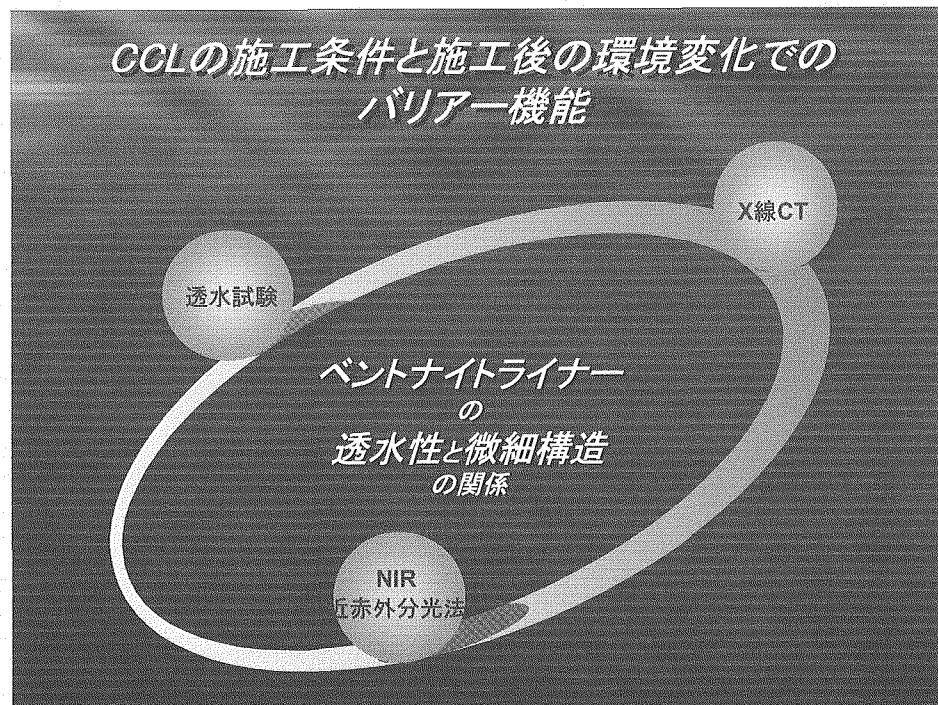
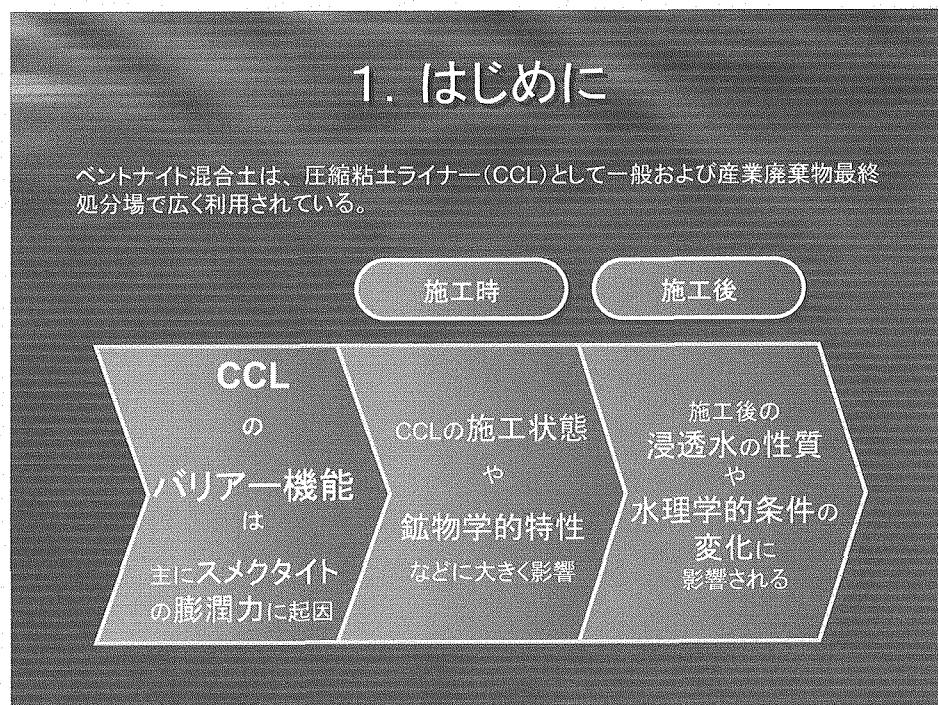
3. X線CTによる微細構造観察

4. おわりに

5. 今後の課題

## 1. はじめに

ペントナイト混合土は、圧縮粘土ライナー(CCL)として一般および産業廃棄物最終処分場で広く利用されている。



## 2. 管理型最終処分場の ベントナイトライナー

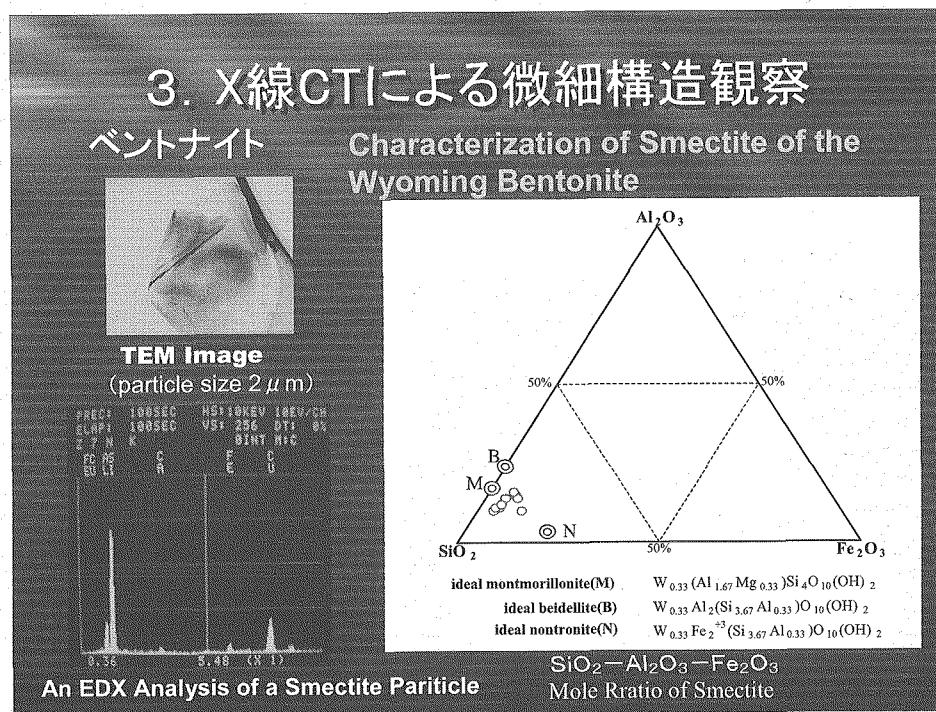
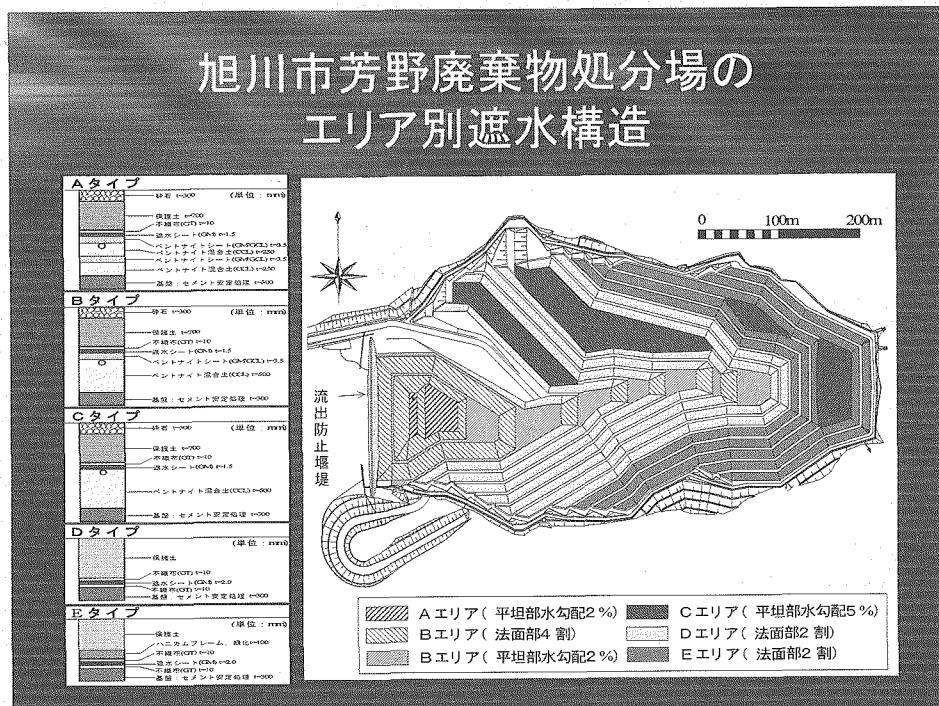


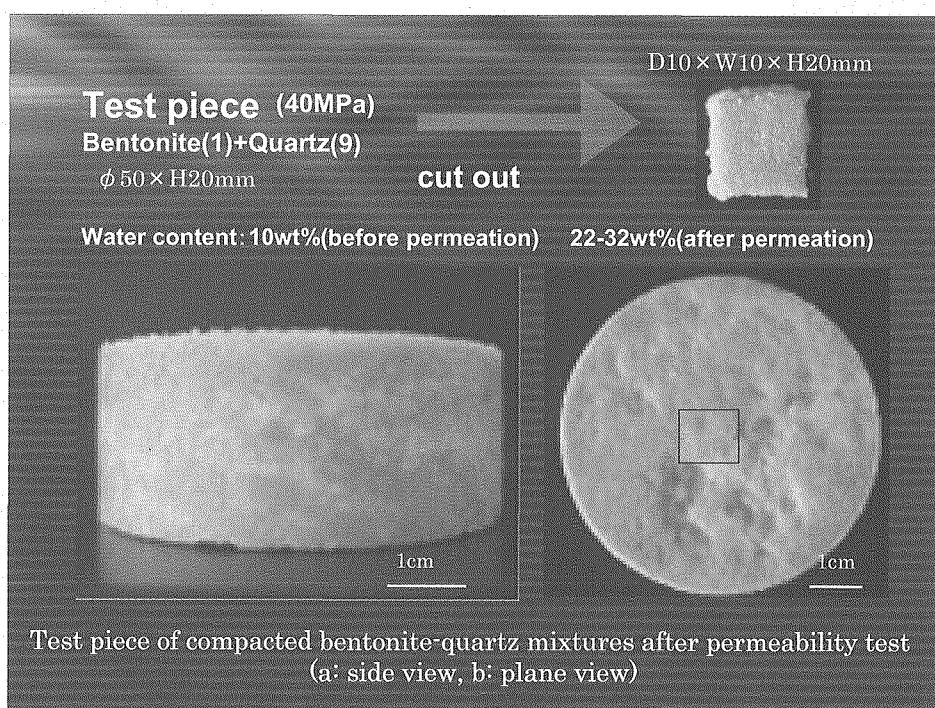
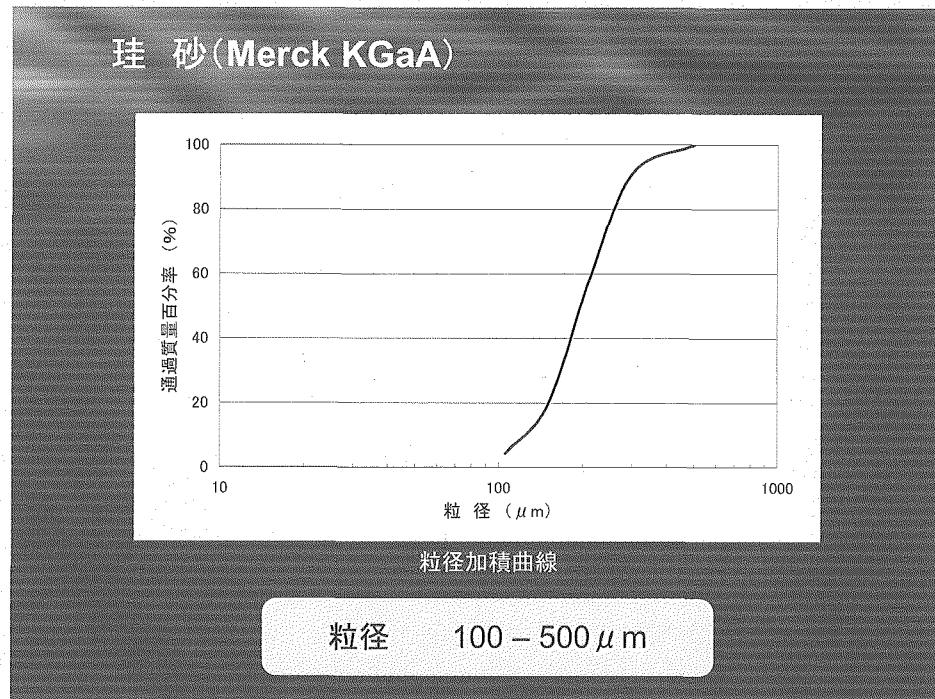
管理型最終処分場では

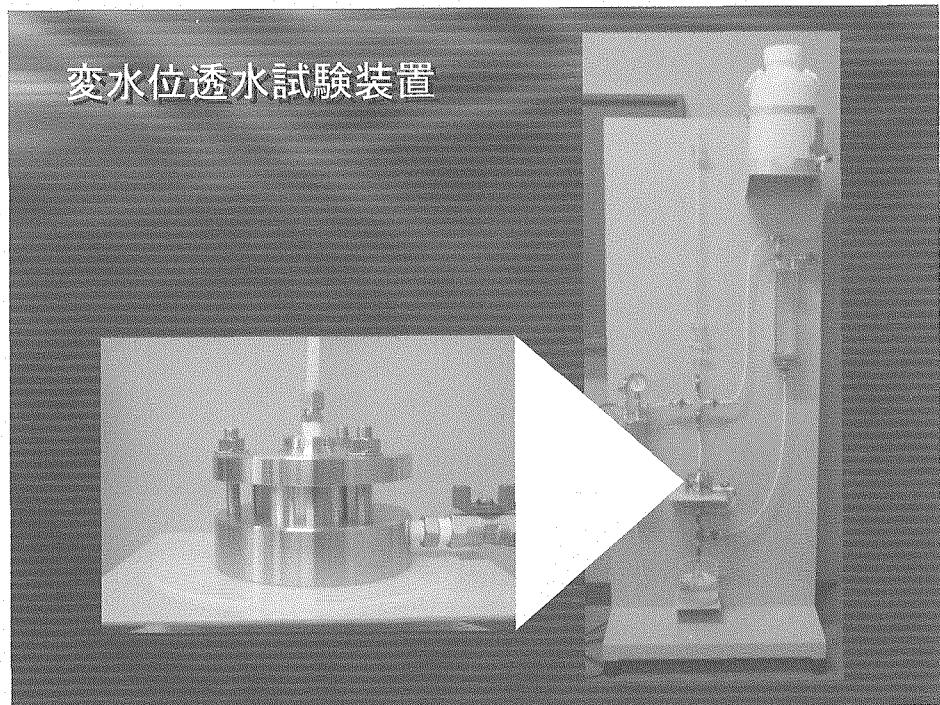
ベントナイトライナー  
の  
施工基準

透水係数  
( $<1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ )

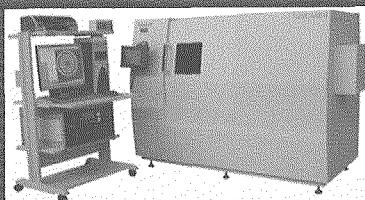
十分な強度





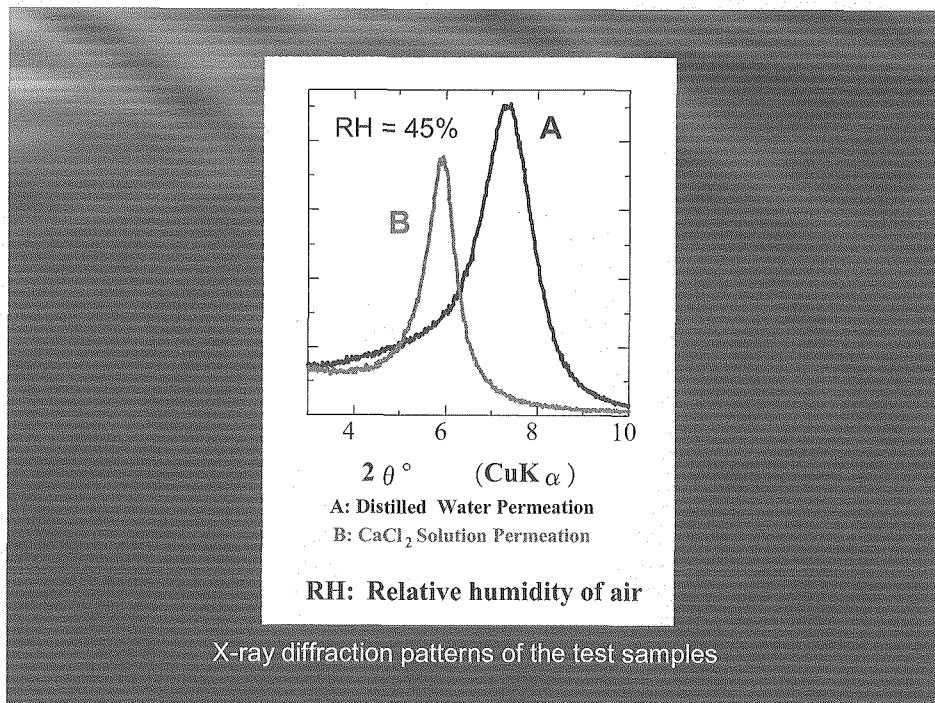
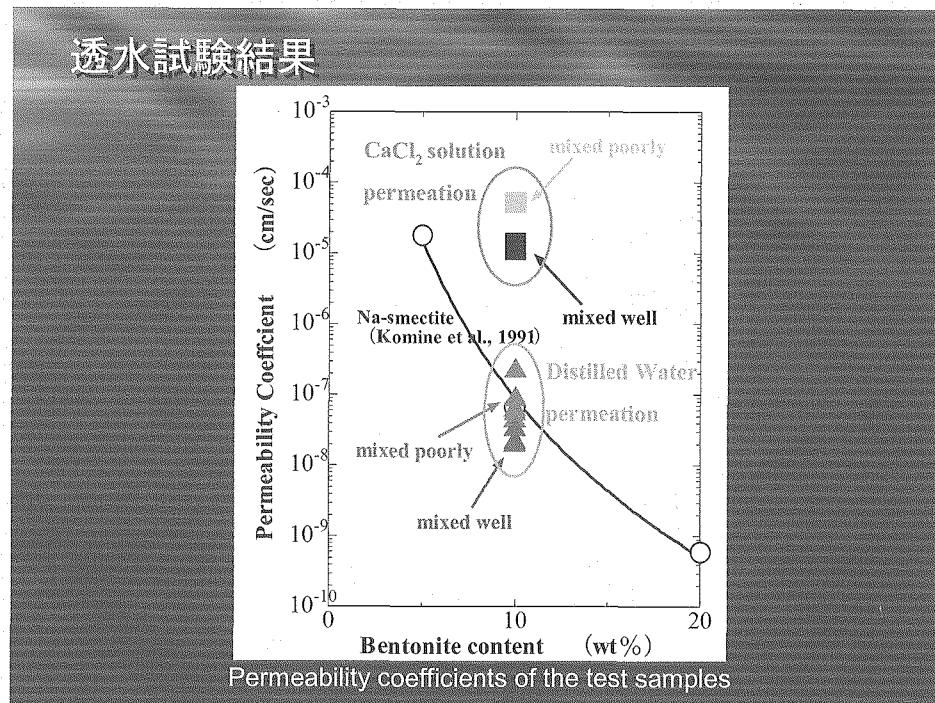


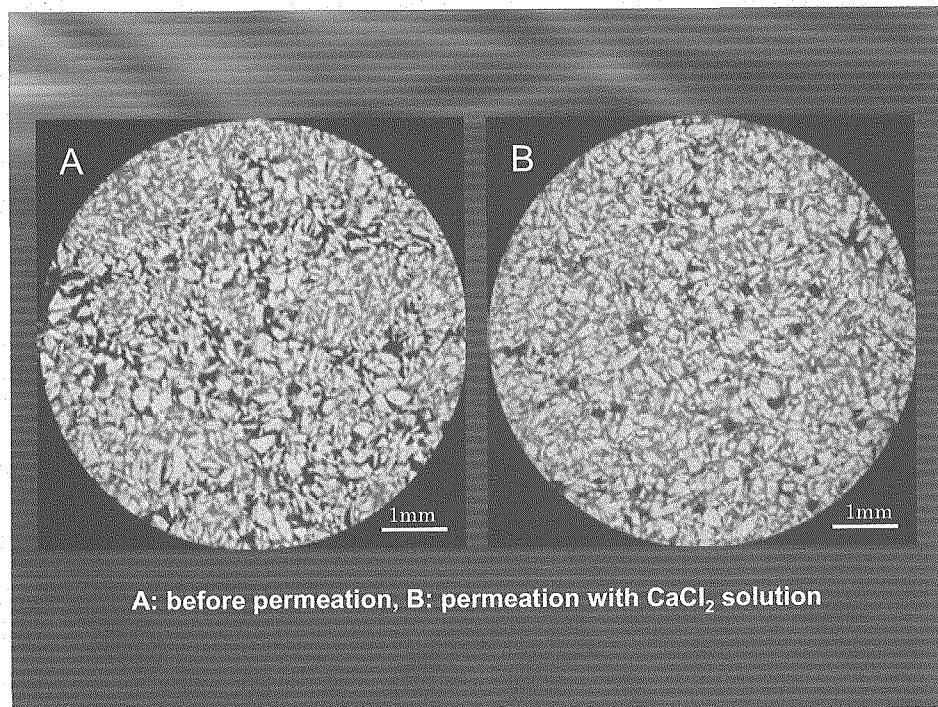
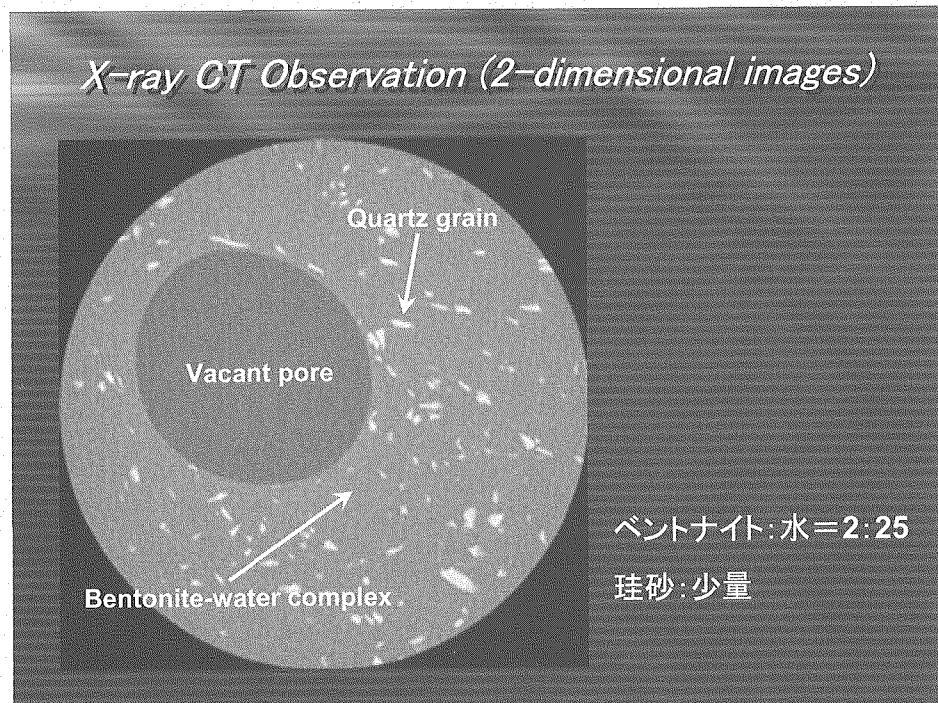
### Experimental condition of the micro-X-ray CT observations

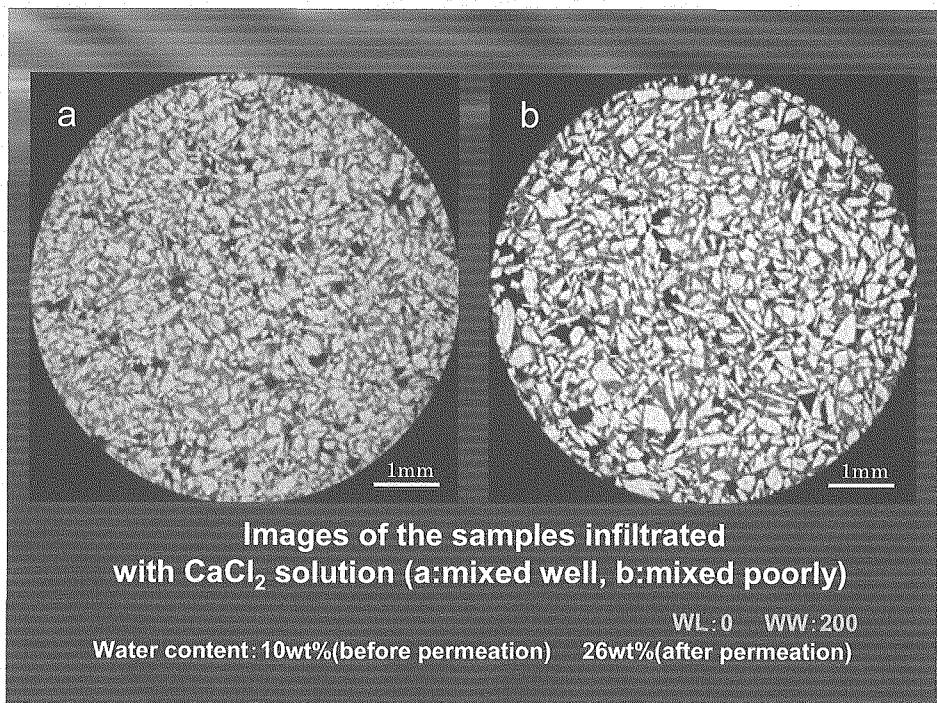
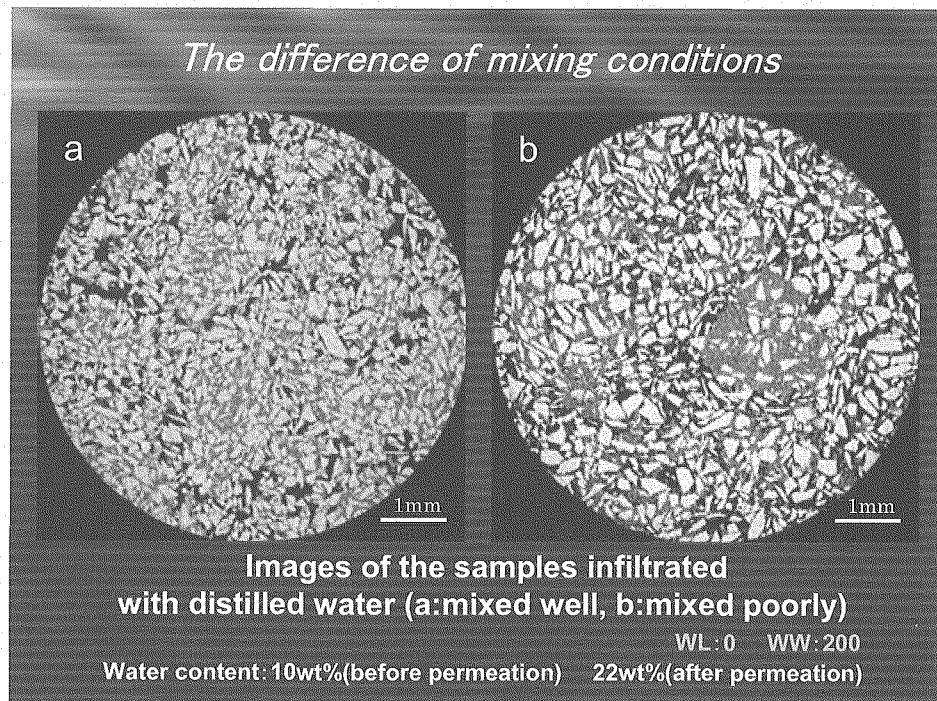


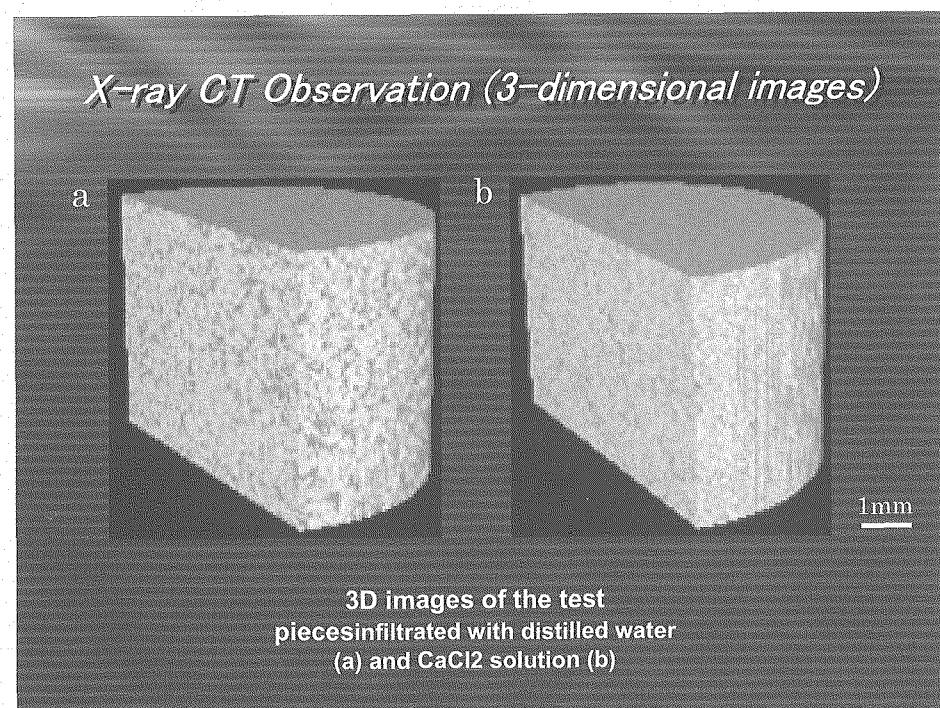
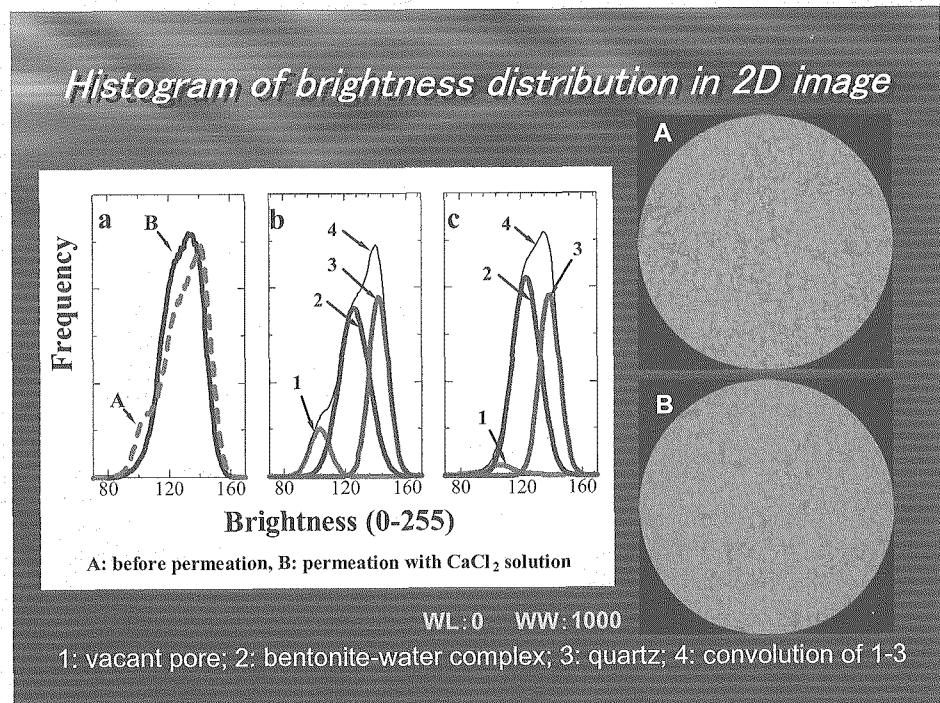
(TOSCANER 30900 $\mu$ hd,  
TOSHIBA IT control system Co.)

Scan type	Rotating
Power of X-ray	90kV
Current of X-ray	89 $\mu$ A
Spatial resolution	5 $\mu$ m
X-ray I.I.	10.16 cm
View number	1500
Sheets of multiplication number	20
Max scanning area	7.3mm
Slice thickness	0.012mm
Matrix size	1024*1024







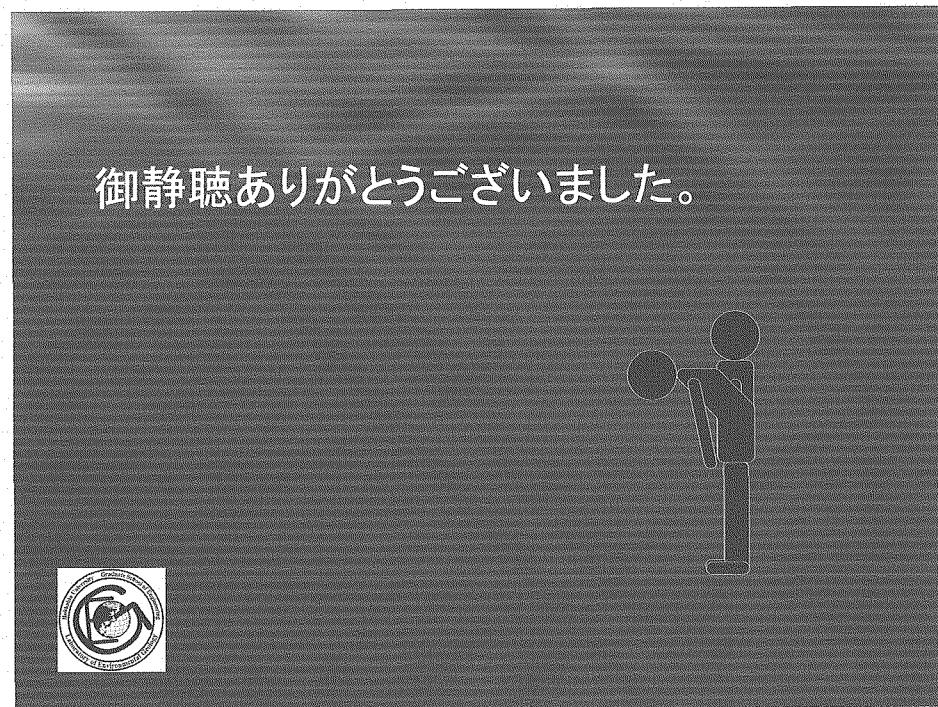
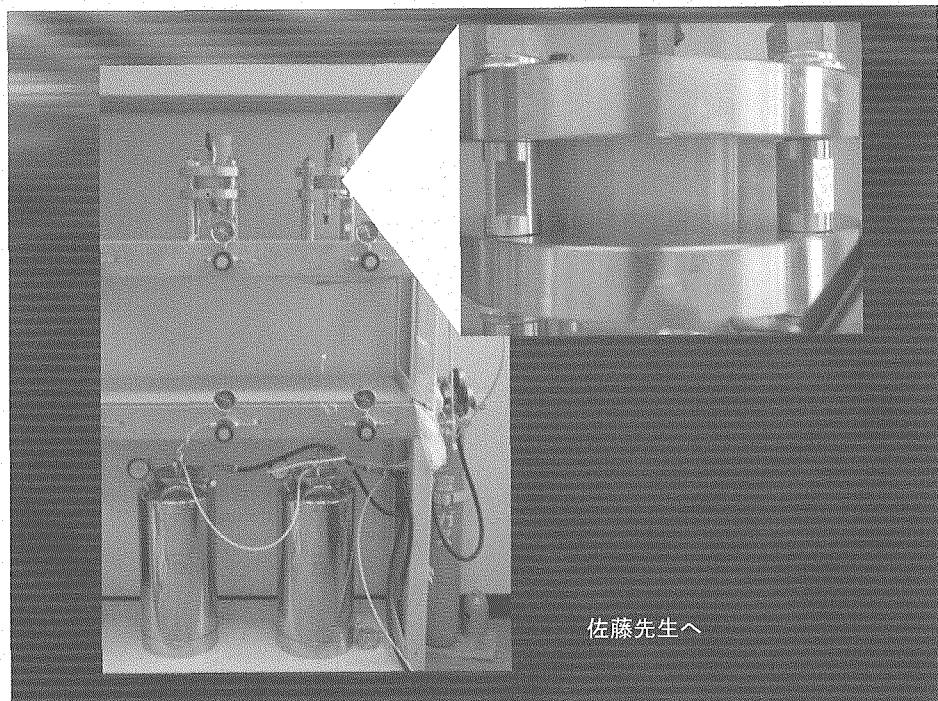


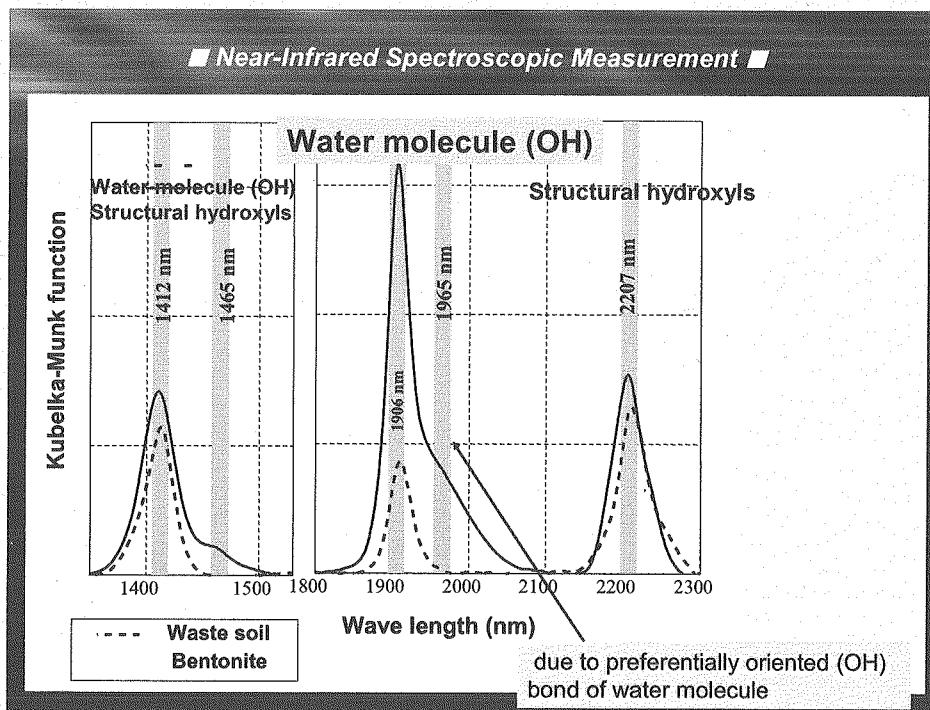
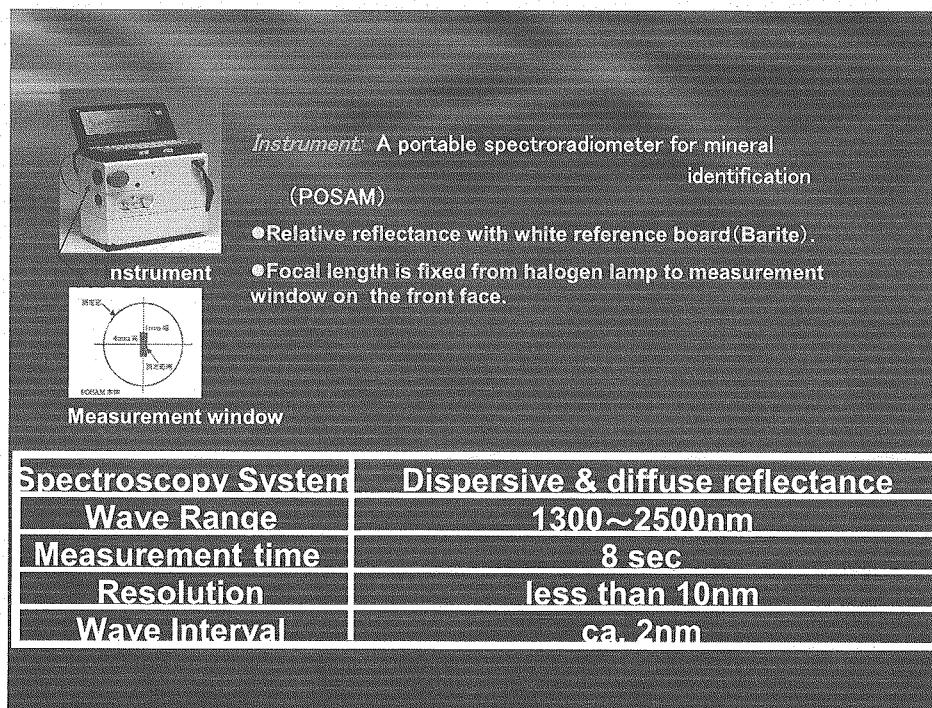
## 4. おわりに

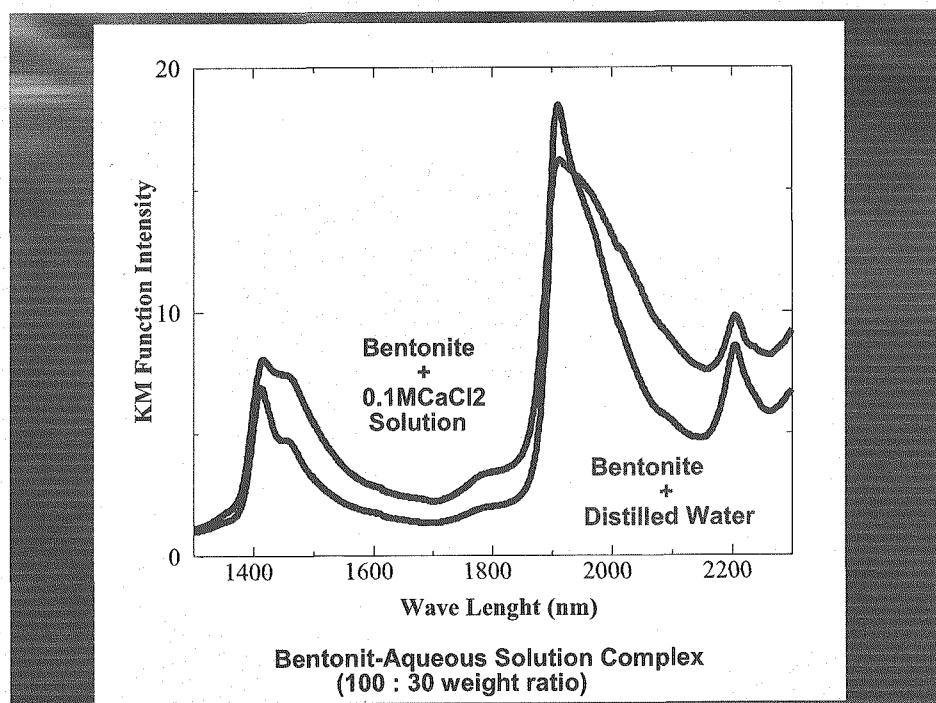
- ◆試験体の混合条件や透水条件による微細構造の違いを観察することができた。
- ◆X線CT画像を珪砂、「ベントナイト一水複合体」、「空隙」と考えられる3つの異なった輝度分布を持つ領域に識別することができた。
- ◆3次元画像から試験体の水みちを再現することが可能であることが示された。

## 5. 今後の課題

- ◆試験体に対してさらに種々の施工条件・環境条件を想定した測定・観察を行い、バントナイライナーのバリアー機能と微細構造の関連を明らかにすることが必要である。
- ◆試験体の2次元画像による‘空隙’と‘ベントナイト一水の複合体’は、試験体のNIR測定やより高分解能のX線CT観察などにより、その詳細が明確になることが期待される。







### 質疑応答

「マイクロフォーカス X 線 CT によるベントナイト-珪砂混合体の微細構造観察」（北海道大学・河原木千恵）に関して、以下の質疑応答が行われた。

- Q: 供試体作成時の水分 10% の意味について。
- Q: 発表された 3D 映像のみから水みちの評価を可能とする根拠について。
- A: I をトレーサに使えば良いが、間隙体積および濃度的に検出は簡単ではない。
- Q: 透水係数  $10^{-6} \text{ m/s}$  で止水と見なす根拠について。

3.7 ガラス固化体の長期的溶解の不確かさが核種移行評価に与える影響



## ガラス固化体の長期的溶解の不確かさ が核種移行評価に与える影響

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 武田聖司

連携重点研究「放射性廃棄物処分研究ネットワーク」ワークショップおよび  
第1回情報交換会 平成18年8月4日

### サブグループ8

### ガラス固化体の長期溶解／変質の地球化学的機構の評価とモデル化

グループリーダー：稻垣八穂広（九州大）

三ツ井誠一郎（JAEA）、馬場恒孝（JAEA）、水野大（JAEA）、武田聖司（JAEA）、関岡靖司（JAEA）、堀田克敏（JAEA）、  
河村和廣（JAEA）、飯島和毅（JAEA）、藤原健壯（JAEA）、笛本 広（JAEA）、林真紀（JAEA）、前田敏克（METI）、奥山圭太（日立）

### ガラス固化体の性能評価の高度化に関する研究

- ◆地層処分の信頼性向上に寄与
- ◆過度の保守性を排除した、より現実的な評価



研究  
項目

- ・ガラス長期溶解／核種浸出の地球化学的機構解明
- ・ガラス溶解／核種浸出の環境条件依存性評価
- ・上記を基にしたガラス溶解／核種浸出のモデル化
- ・既存データの再検討
- ・各種反応パラメータの取得とその体系的評価

本報告の  
関連事項

## 本研究の概要

ガラス長期溶解に関するパラメータ(溶解速度、ガラス表面積)は…

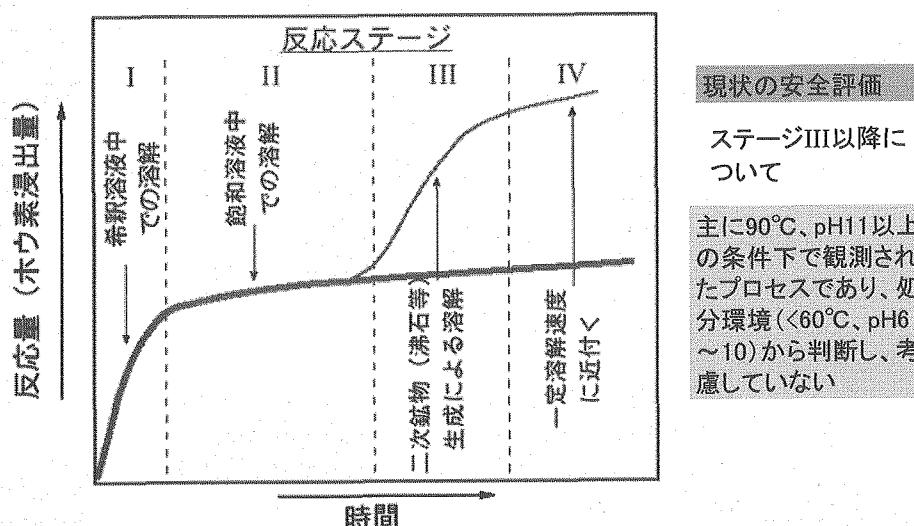
- ◆従来の評価:長期的な知見が乏しく、一定値を仮定した評価
- ◆ガラス溶解速度:長期溶解速度 Klongに関する実験的知見・データの蓄積
- ◆ガラス表面積:OP腐食膨張などの外部応力の作用によるガラス表面積の増大の可能性



ガラス溶解速度、ガラス表面積の時間変動を想定した解析を行い、パラメータ時間変動が核種移行に与える影響を検討

- 
- ・ガラス溶解パラメータの時間変動データの検討
  - ・決定論的手法による感度解析
  - ・モンテカルロ法によるパラメータ不確かさ解析

## ガラス溶解／変質の反応段階 (反応ステージ)



Jiricka, et al., J.Non-Cryst. Solids(2001)

## ガラス溶解速度(現在の評価)

$$r = k_o \cdot 10^{\eta \cdot \text{pH}} \cdot \exp(-E_a/RT) \cdot [1 - (Q/K)] + k_{long}$$

pH依存性      温度依存性      化学親和力      長期溶解

### ステージI (シリカの一次溶解)

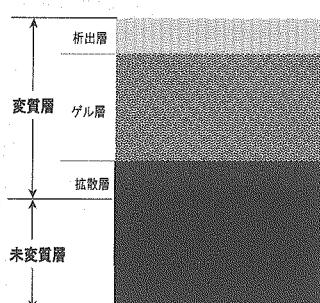
### ステージII

$r$  : ガラス固化体の溶解速度 [g/m<sup>2</sup>/d]  
 $k_o$  : ガラス固化体の固有速度定数 (初期溶解速度) [g/m<sup>2</sup>/d]  
 $\eta$  : 溶解のpH依存性係数  
 $E_a$  : 活性化エネルギー [kJ/mol]  
 $R$  : 気体定数 [kJ/mol/K]  
 $T$  : 温度 [K]  
 $Q$  : イオン活量積 (溶存シリカ濃度)  
 $K$  : ガラス溶解反応のみかけの平衡定数  
 $k_{long}$  : 化学親和力に依存しない長期溶解速度 [g/m<sup>2</sup>/d]



ガラス溶解速度  $r$  = 長期溶解速度  $k_{long}$   
(時間に依らず一定、ステージIの寄与：小)

## 長期ガラス溶解速度(拡散律速)



### ステージIIにおける長期溶解の律速過程

- ◆水和変質モデル(拡散層中の水分子の拡散)
- ◆ゲル層モデル(保護的なゲル層中のシリカの拡散)



拡散機構の詳細は未確定

- ◆長期溶解速度  $k_{long}$  は、ある拡散過程に律速される
- ◆  $k_{long}$  は時間とともに減少するとして、浸出量を時間の平方根則により整理(良い直線性が確認)

$$\rightarrow NL = at^{0.5} + b \quad NL : B\text{浸出量} \quad t : \text{時間}$$

$$k_{long} = 0.5at^{-0.5} \quad a : \text{定数} [g/m^2/d^{0.5}]$$

## ガラス溶解速度データの検討(1)

### ◆ガラス溶解速度のデータベース整備:

-測定条件(ガラス組成、温度、pH等)を含めたデータ整備

-登録年:1970~2005年



データ絞り  
込み条件

・我が国のガラス組成に近いデータ

・pH6~10、温度150°C以下

・測定時間の平方根×S/Vの積:10000以上

### $K_{long}$ 一定値ケース

長期溶解速度データをアレニウス式により温度補正し、統計処理から「一定の長期溶解速度」を評価

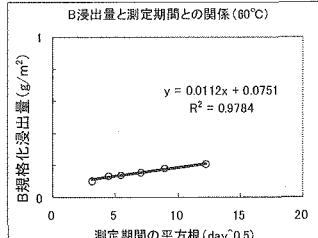
・対数平均値(60°C):  
 $4.2 \times 10^{-3} (\text{g}/\text{m}^2/\text{d})$

・範囲(±3σ):  
 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1} (\text{g}/\text{m}^2/\text{d})$

### $K_{long}$ 時間変動ケース

定数  $a$  をB浸出量と時間の平方根の関係から求める

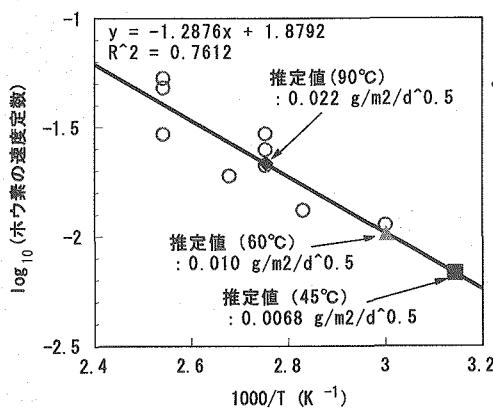
$$NL = at^{0.5} + b$$



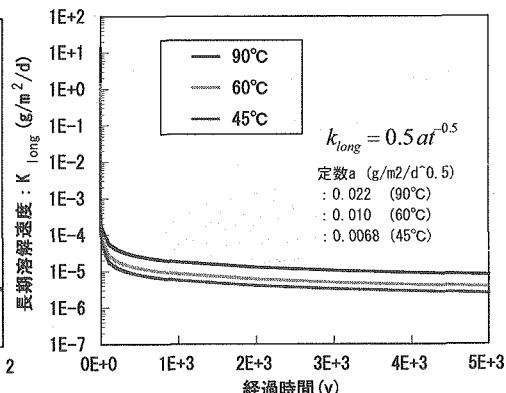
(検討例) S/V=7400m-1、測定期間10~150日、pH(終了時):9.5

## ガラス溶解速度データの検討(2)

### 定数 $a$ の温度依存性



### 長期溶解速度の温度-時間依存性



B浸出量と測定期間の平方根との間の近似性のよいもの(データ数なども考慮)を抽出し、温度の逆数と  $a$  の対数をプロット。その回帰直線より、温度に依存した定数  $a$  を導出

上記の長期溶解速度の温度-時間依存性式を解析に適用(1000年間の核種閉じ込めを想定し、60°Cのモデル式を使用)

## ガラス表面積の設定

### ◆ガラス初期表面積の設定

#### ①熱変動(初期冷却)に伴った内部応力による寄与

- 冷却期間に幾何表面積の10~15倍(W.A.RossとJ.E.Mendel)
- ガラス溶解に寄与する有効反応表面積30~50%

幾何表面積  
の3~7.5倍

#### ②ハンドリング過程における事故の影響

- 輸送時の事故による衝撃により幾何表面積の40倍(T.H.SmithとW.A.Ross)
- 事故率を0~1%と仮定

幾何表面積  
の1~1.4倍

両者の倍率を考慮(3~10倍)し幾何表面積1.7m<sup>2</sup>を基に、ガラス初期表面積の変動範囲を設定

### ◆溶解開始後のガラス表面積の時間的変動

- オーバーパックの腐食膨張による表面積の増加が考えられる

炭素鋼の腐食速度0.01mm/yから、腐食膨張の継続時間をおよそ5000年と推定。ガラス表面積の増加の継続時間の幅は、感度解析的に5000年の1/10, 10倍(500~50000年)として設定

- オーバーパック腐食膨張に伴う増加割合: 初期表面積に対し40倍まで、時間に比例して増大

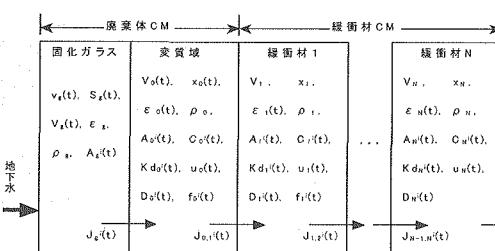
●ガラス表面積の時間変動なし(初期の一一定表面積による溶解)

●ガラス表面積の時間変動あり(増大)

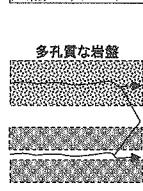
## 評価モデル(確率論的安全評価コードGSRW-PSA)

パラメータ不確かさを確率密度関数で記述し、モンテカルロ法による確率論的解析が可能

### ソースタームモデル(コンパートメントモデル)



### 天然バリアモデル



### 生物圏モデル

環境媒体中の核種移行及び人間の被ばく線量を評価

### ソースタームモデル

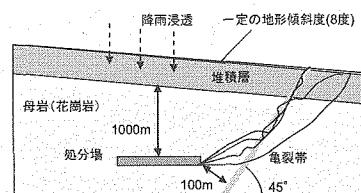
- 廃棄体、緩衝材及び周辺岩盤までを複数の1次元的に連続したコンパートメント
- コンパートメント間の移流-拡散、収着及び崩壊/生成による核種移行

### 天然バリアモデル

- ソースタームからの核種フラックスを保存、1次元の移流-分散、収着及び崩壊/生成の現象をモデル化
- 多孔質媒体と亀裂性媒体の2種類の近似、亀裂性媒体ではマトリックス拡散を考慮

## 解析概要

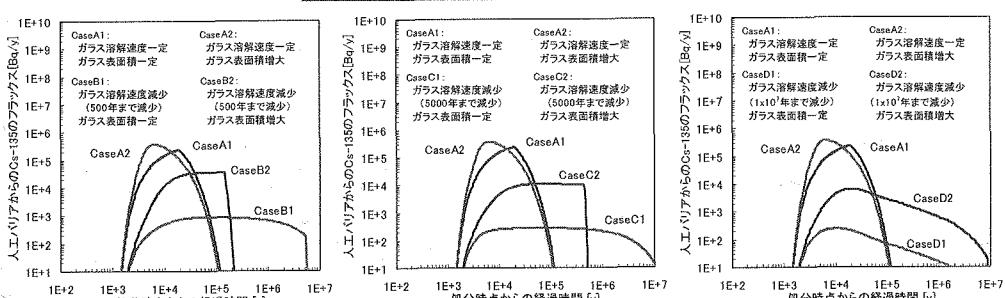
- ◆ 第2次取りまとめの処分概念をベース
- ◆ 一定傾斜度の花崗岩からなる仮想的な処分サイト想定
- ◆ 処分場の下流側100mに亀裂帯(傾斜45度)が存在するとして、処分場→母岩領域→亀裂帯の核種移行のシナリオを想定
- ◆ 岩盤等級A&B級(母岩)、風化花崗岩(亀裂帯)の透水係数の統計データを用いた2次元の地下水流动及びトラジェクトリー解析を実施
  - ➡ 処分システム内の流速、移行距離の確率分布を入力条件とする
- ◆ オーバーパックは1000年間の核種閉じ込め機能を有し、ペントナイトの変質は想定せず、人工バリア内は拡散律速とする
- ◆ ガラス溶解パラメータの時間依存性に関する影響解析として、決定論及び確率論的解析ケースを設定
  - ガラス溶解速度(一定、減少)とガラス表面積(一定、増加)の組み合わせによる  
CaseA1～CaseD2までの8ケース



解析ケース	ガラス溶解速度	ガラス表面積
CaseA	A1	一定
	A2	時間増加
CaseB	B1	時間減少
	B2	(500年まで)
CaseC	C1	時間減少
	C2	(5,000年まで)
CaseD	D1	時間減少
	D2	( $1 \times 10^7$ 年まで)

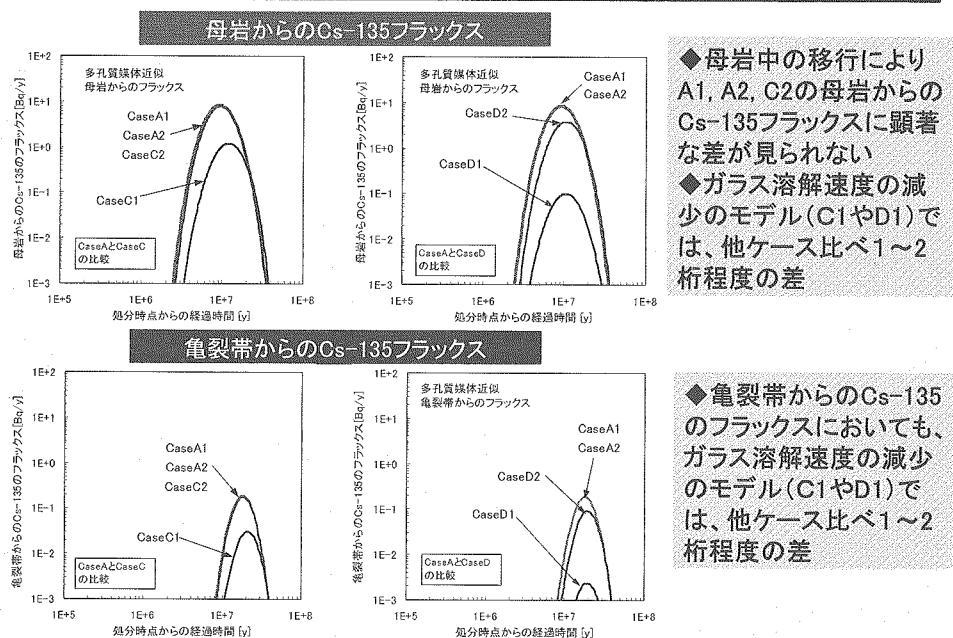
## ガラス溶解パラメータの時間依存性の影響(決定論その1)

人工バリアからのCs-135フラックス



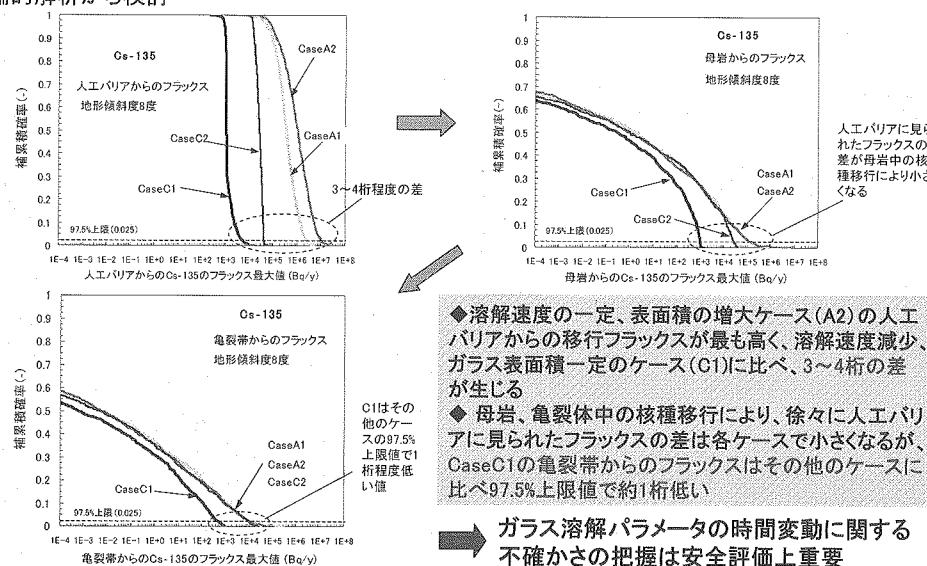
- ◆ ガラス溶解速度の減少モデル(B1)は、速度一定のケース(A1)に比べ、ピークフラックスは1/270程度低下し、ガラス溶解の継続期間はより長期になる
- ◆ ガラス表面積の増大の影響は、B1とB2では大きいが、溶解速度一定のA1とA2ではピーク時間が異なるもののピーク値の差は顕著ではない
- ◆ ガラス溶解速度の時間依存性を500年(B1)、5,000年(C1)、 $1 \times 10^7$ 年(D1)まで適用した場合の比較から、モデル適用時間の長さの増加に応じてCs-135フラックスの減少傾向を確認できる

## ガラス溶解パラメータの時間依存性の影響(決定論その2)



## ガラス溶解パラメータの時間依存性の影響(確率論)

ガラス溶解パラメータの時間依存性の影響を、その他のパラメータの不確かさの影響を含め確率論的解析から検討



## まとめと今後の課題

### まとめ

- ◆収集したガラス浸出量のデータ分析から、時間の平方根則に基づく長期溶解速度式を整備した。
- ◆ガラス長期溶解に関する評価パラメータ(溶解速度、ガラス表面積)の時間変動を想定した確率論的解析から、人工バリアからのCs-135のフラックスは4桁程度、亀裂帯からのフラックスで1桁程度の変動可能性が示された。ガラス溶解パラメータの時間変動に関する詳細な不確かさの検討は安全評価上重要である。
- ◆ガラス溶解速度の時間依存性を500年、5,000年、 $1 \times 10^7$ 年まで適用した場合の確率論的解析から、最終的な亀裂帯からのCs-135の移行フラックスは最大で1桁程度の差異が生じる結果が得られ、ガラス溶解速度の時間依存性モデルの適用時間についても移行フラックス最大値に有意な影響を与える可能性があると考えられる。

### 今後の課題

- ◆温度以外の環境因子による定数aの不確かさ、ガラス表面積の時間増大の不確かさの検討
- ◆ガラス溶解速度の時間依存性モデルを長期安全評価に用いることのコンセンサスを得るための拡散機構の解明

### 質疑応答

「ガラス固化体の長期的溶解の不確かさが核種移行評価に与える影響」(原子力機構・武田聖司)に関して、以下の質疑応答が行われた。

Q: ガラス表面積の実測が困難であるとの前提の元に、パラメータとしての重要性について検討を行うことの是非について。

A: 長期的なガラス表面積の変化の予測については困難さを伴うが、ガラス溶解の進行による表面積の減少やガラス固化体の衝撃試験による表面積のデータ等を基に、評価用データをある程度推定できると考えている。

3.8 マルチトレーサー法を用いた間隙水中での多種のイオンの拡散に関する研究  
-表面拡散の寄与について

**サブグループ6**

**「マイクロ・ナノビーム分析技術を用いた化学状態解析  
および同位体比分析に基づく放射性核種の挙動評価」**

**広島大・理・地惑 研究グループ**

- 同位体地球惑星科学研究室

○ 日高 洋、堀江 恵治、菊池 麻希子

二次イオン質量分析計による微小領域同位体比分析

- 表層環境地球化学研究室

高橋 嘉夫、山本 祐平、古川 賢史

XAFS法の高度化（微小領域分析・高感度化）

**マイクロ・ナノビーム分析技術を用いた化学状態解析  
および同位体比分析に基づく放射性核種の挙動評価**

**サブグループリーダー：日高 洋（広島大・院理）**

**二次イオン質量分析**

イオンビーム

同位体比分析

U同位体比  
Pb同位体比

&

**蛍光X線・X線吸収**

X線ビーム

化学状態分析

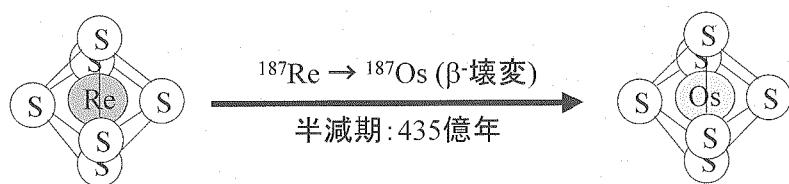
U: U<sup>IV</sup>/U<sup>VI</sup>比  
Pb: O配位/S配位

ウラン・トリウム系列の核種の  
移行挙動(損失・付加)を反映

高感度なXAFS分析  
の移行挙動の解析

## 『研究例』

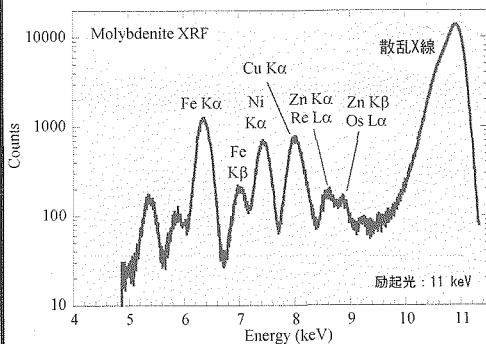
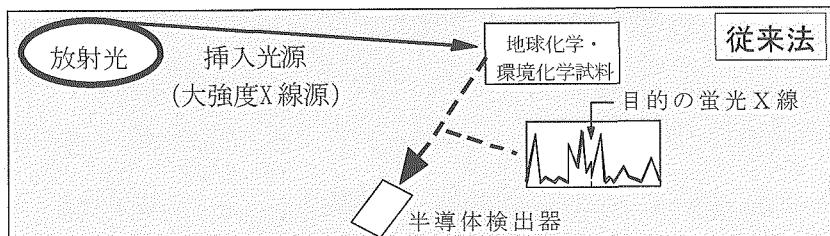
高感度XAFS法のモリブデナイト中の  
放射壊変起源オスミウムの化学状態解析



放射壊変によって  
無理やり生成させられたOsの局所構造？

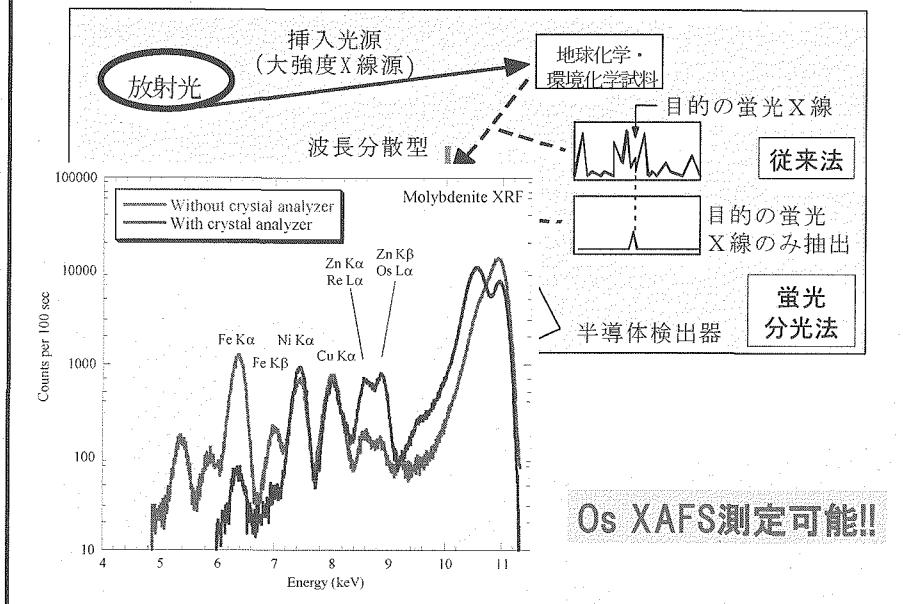
放射化学、ホットアトム化学

Molybdenite中の微量OsのXAFS測定



OsのXRF 相対的に弱い  
ReのXRFなどが妨害  
弹性散乱で検出器飽和  
XAFS測定不能

## 蛍光分光XAFS法 (SPring-8 宇留賀氏との共同研究)

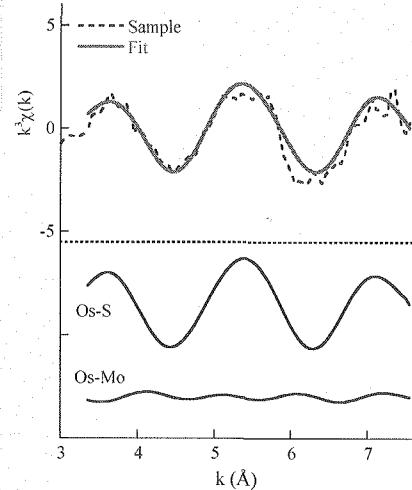
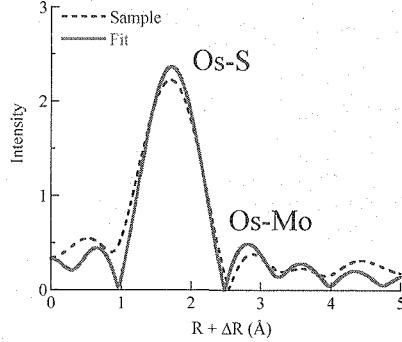


Os in molybdenite

## Os L<sub>III</sub>-edge EXAFS

Pure  $\beta$ -decay

→ No rupture of chemical bonds

FEFF: Os in MoS<sub>2</sub> structure

**サブグループ12**  
**「地下水中有機コロイドの特徴と核種移行に及ぼす影響評価」**  
 (代表: 北大・長尾先生)

1. 腐植物質と希土類元素の錯生成 (山本)
2. (腐植物質など)錯生成が生じた場合の拡散 (古川)

**マルチトレーサー法を用いた間隙水中での  
多種のイオンの拡散に関する研究  
-特に表面拡散の寄与について-**

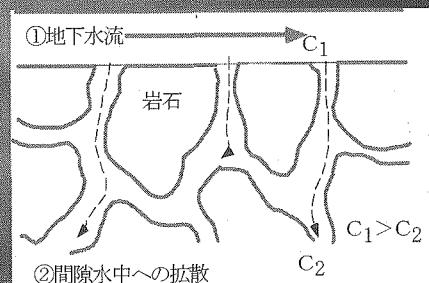
**はじめに**

廃棄物処理の安全性評価のために、放射性廃棄物や一般廃棄物より漏れ出した有害物質の地層中での挙動を知ることが必要である。

**一岩盤中の核種の移行機構一**

- ①亀裂を流れる地下水による移流
- ②岩石マトリックスへの間隙水を介した拡散

↓  
 亀裂中で移動する核種の  
 遅延・希釈効果として作用



**地層中の元素の挙動を考える上で拡散現象を  
定量化し、拡散モデルを構築することが必要**

## これまでの研究

### 岩石間隙水中の拡散の研究

- ・多数あり：表面拡散の存在を示唆
- ・1～数種類の元素についてのみの実験

### 多元素の比較

→ 系統的な拡散モデルの構築のために必須

同一の条件の下、多種の元素について

拡散の情報を手に入れることが必要

## マルチトレーサー法

多数の元素のRI(放射性同位体)を同時に系に適用・検出し、

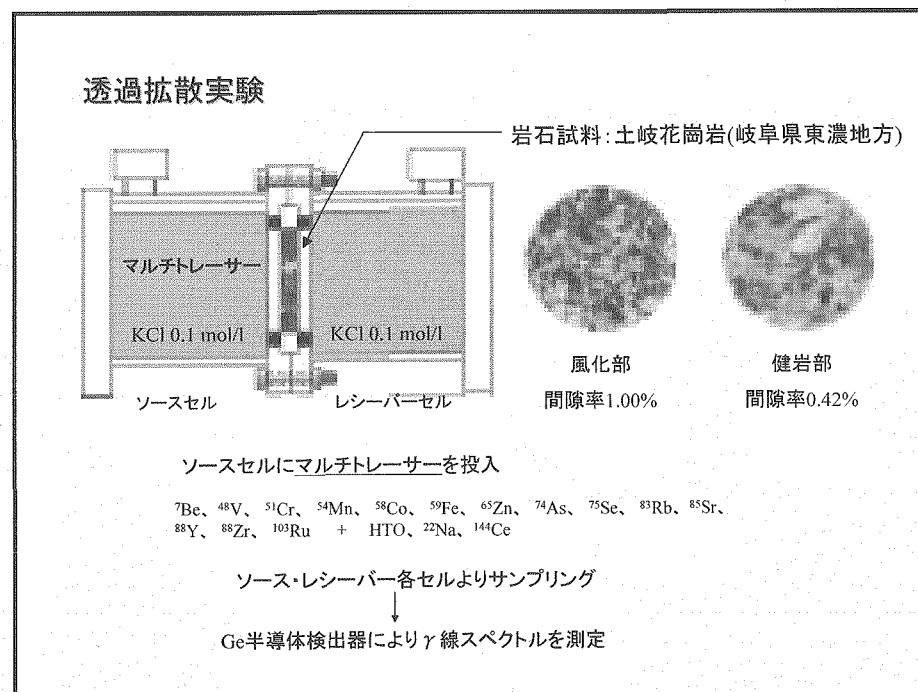
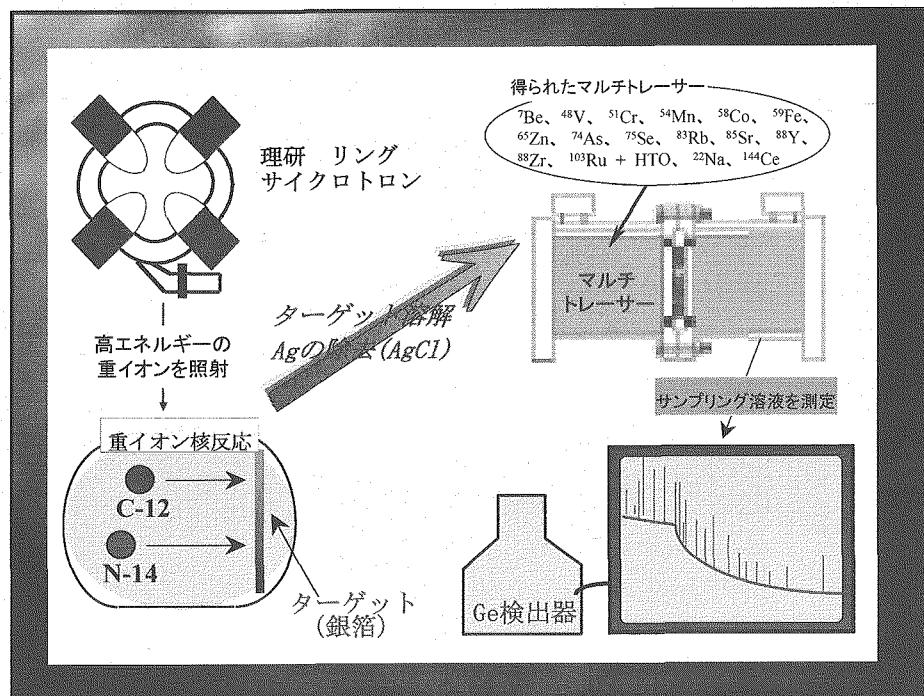
多数の元素の挙動を同時追跡するRIトレーサー法

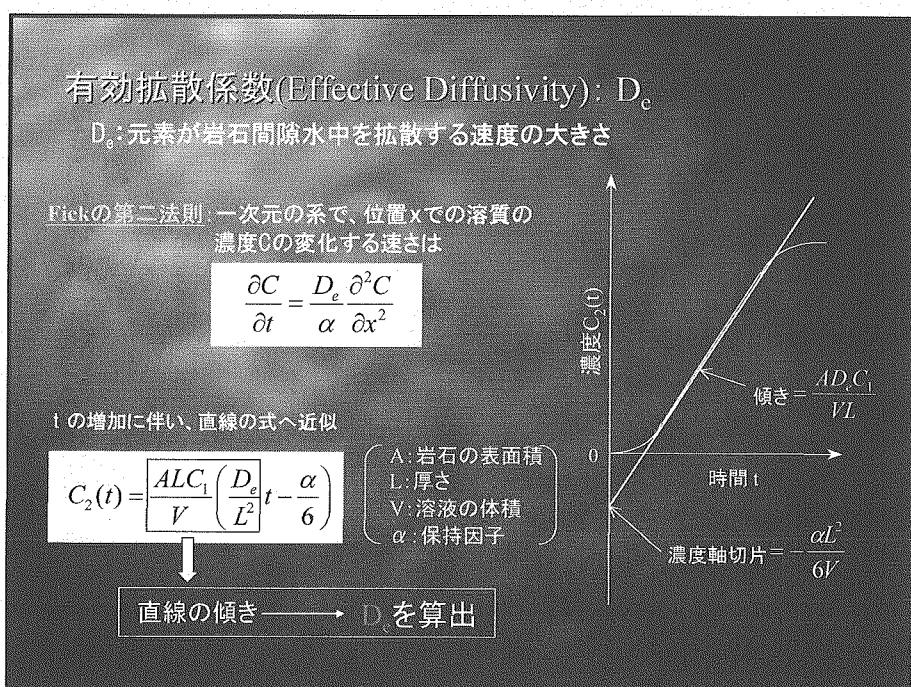
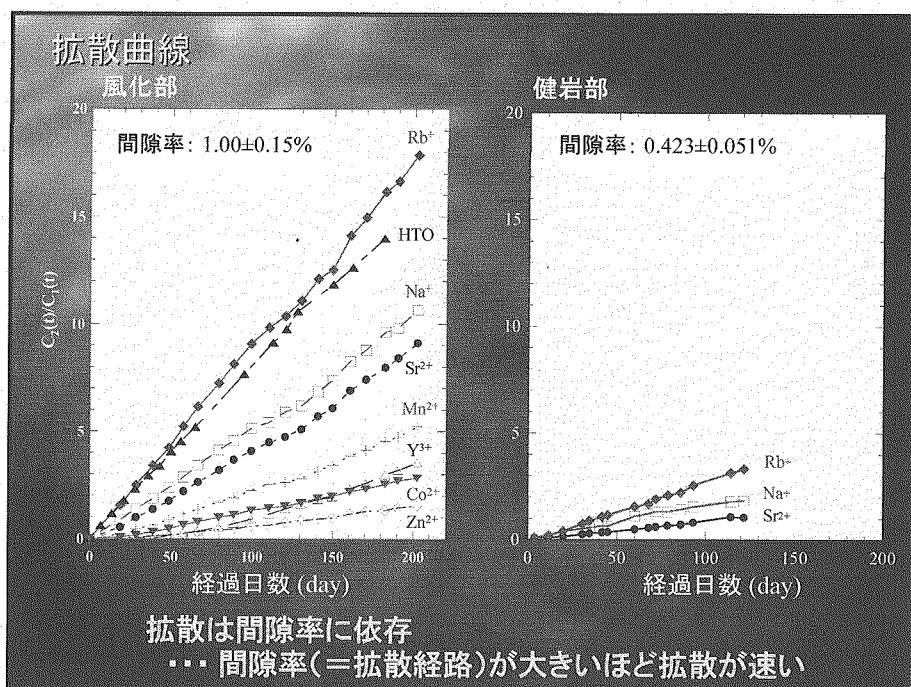
### マルチトレーサー法の特色

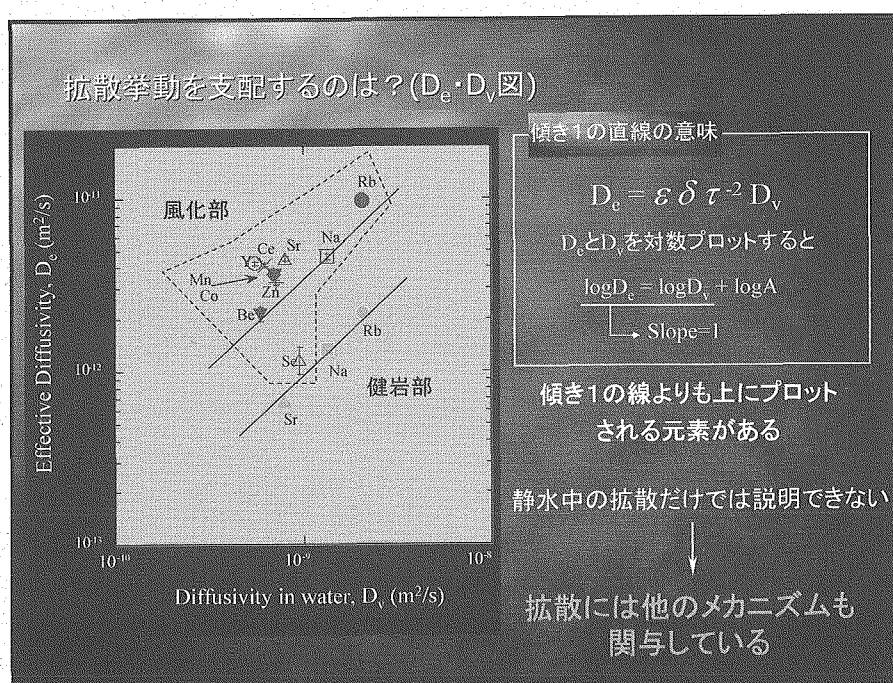
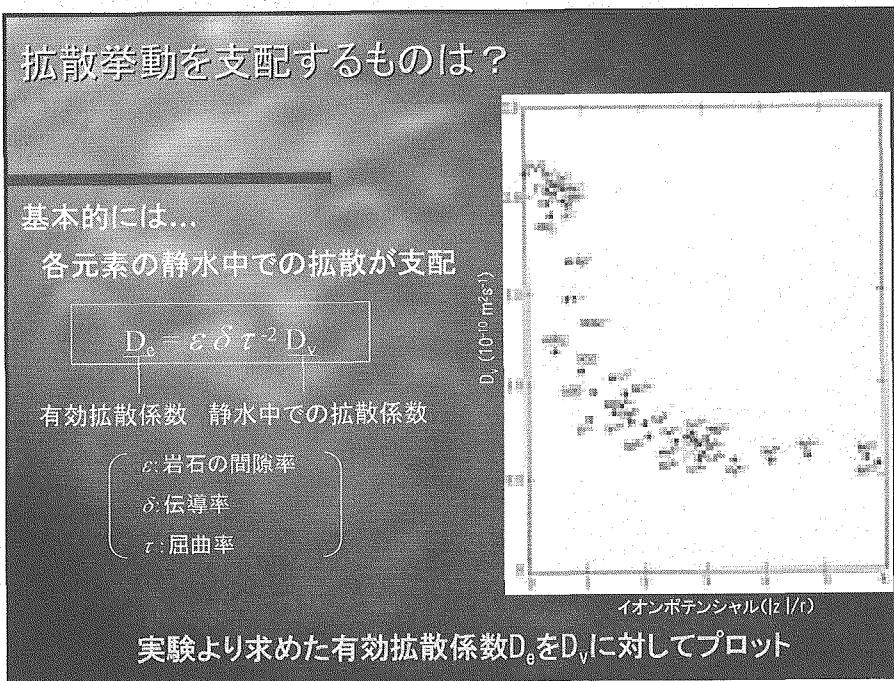
- ・1回の実験で多種類の元素について情報が得られる
- ・完全に同一の条件下で情報が得られる

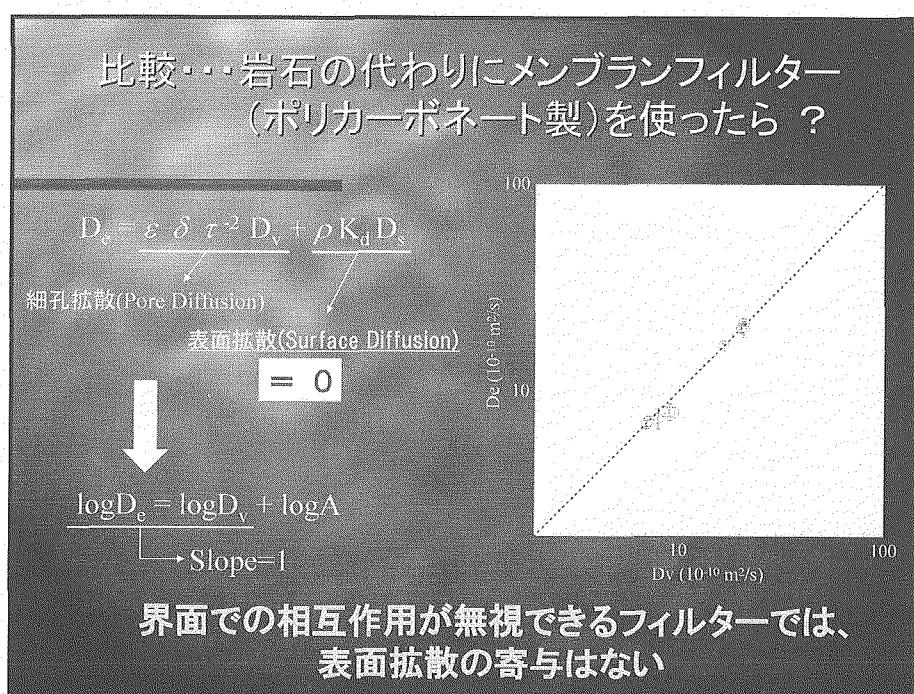
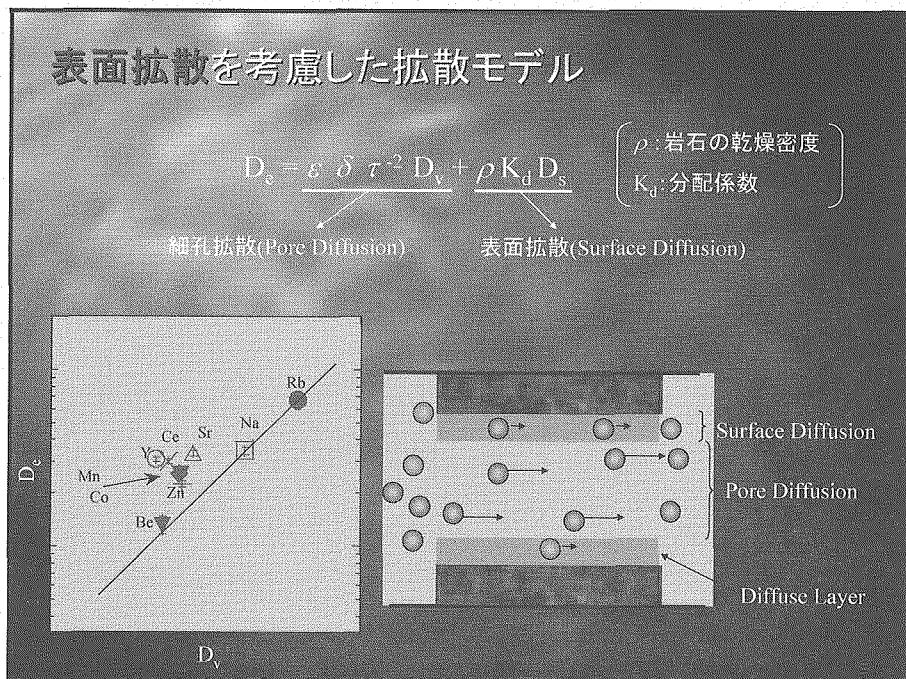
★試料の性質に差のある岩石において、完全に同一の  
条件で拡散実験が行える

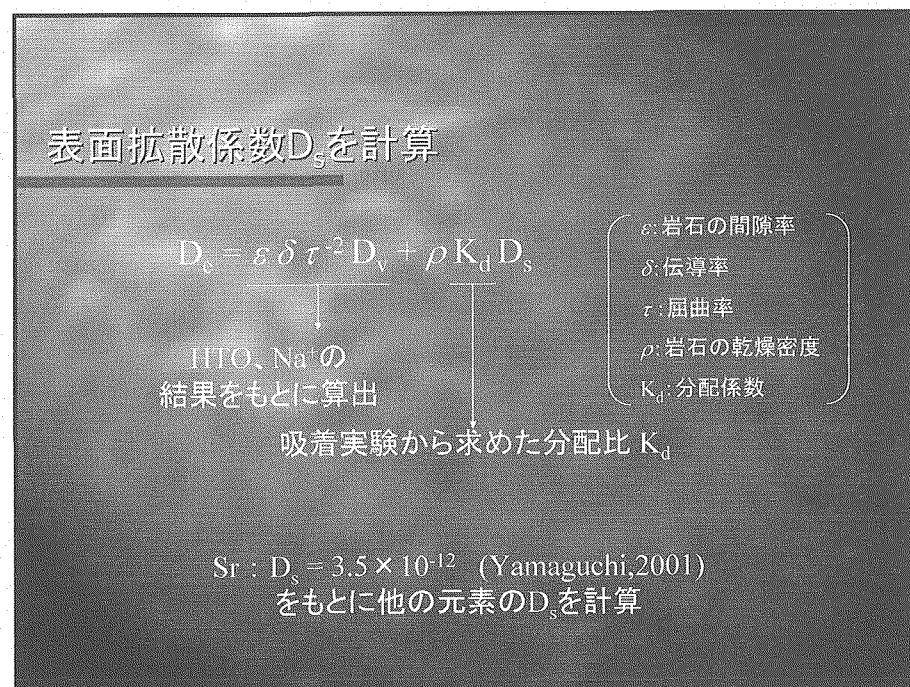
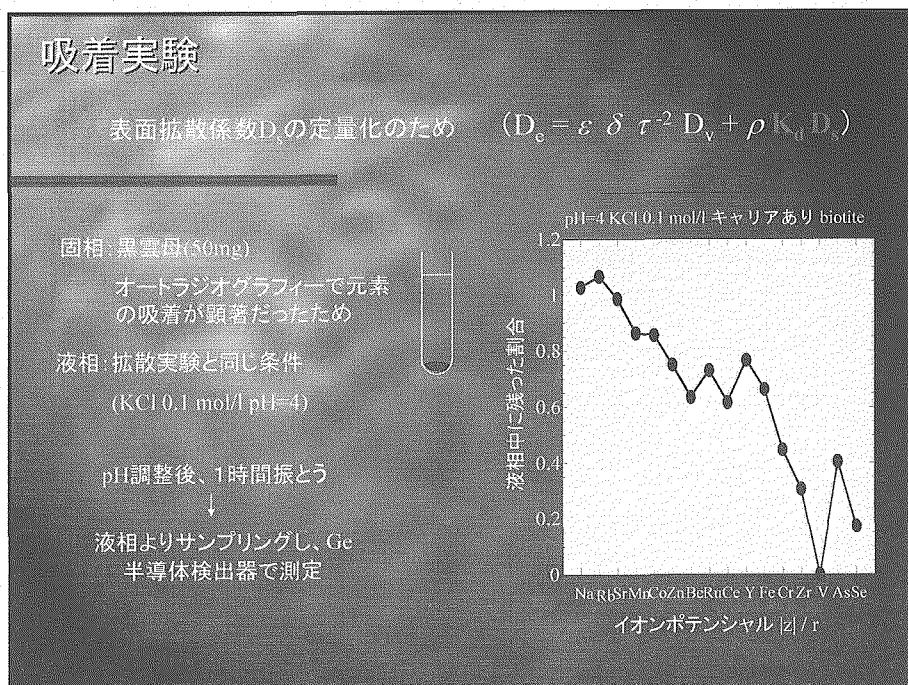
★多種類の元素についての情報が得られ、拡散モデル  
を構築する上で有効

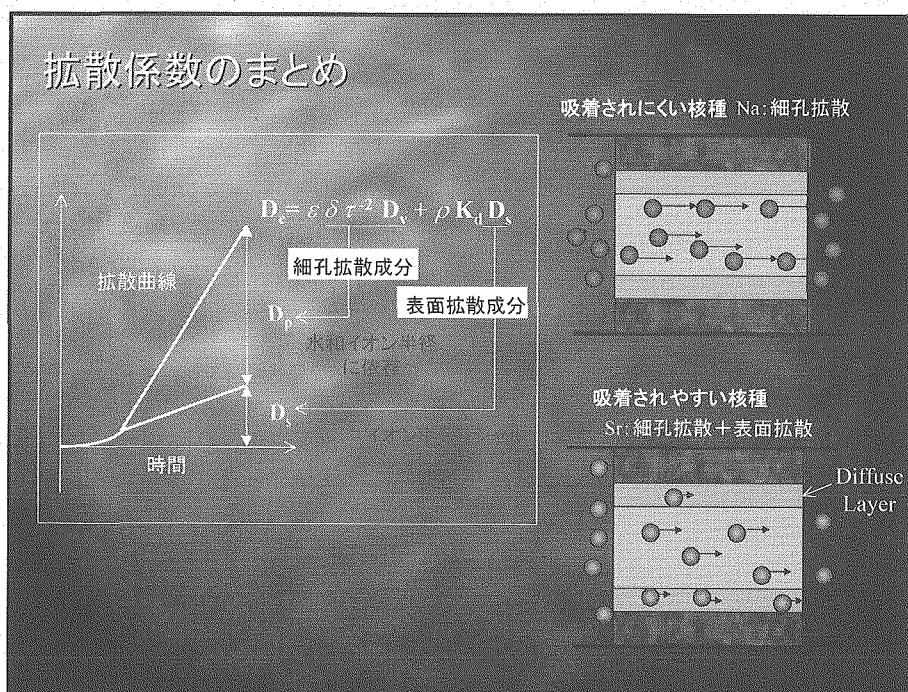
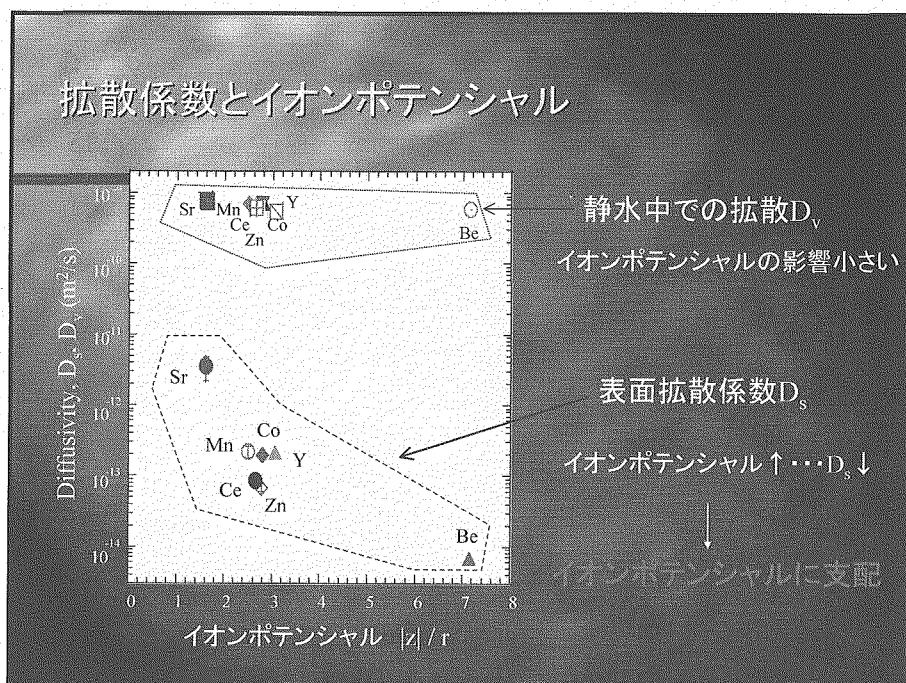




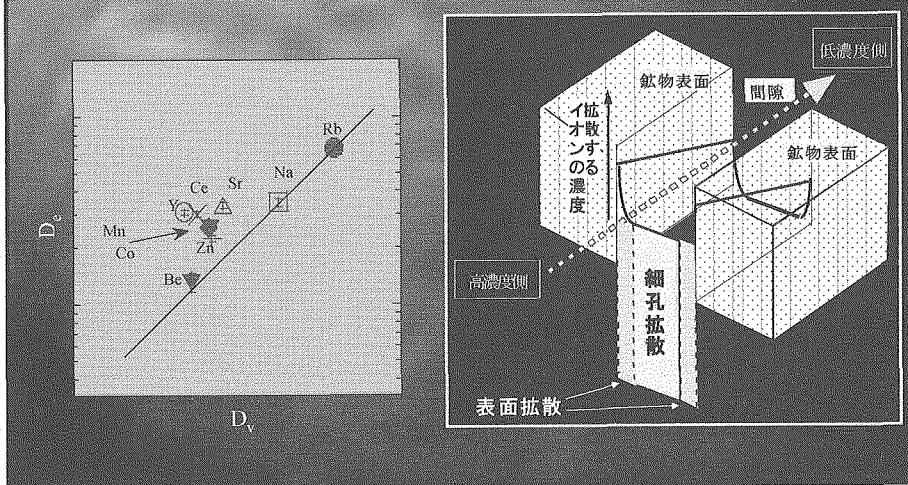








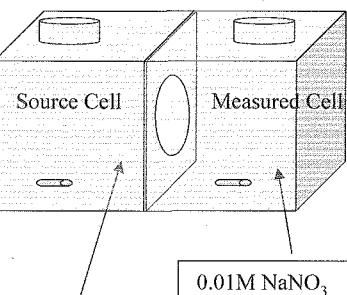
適度に吸着され、適度に表面拡散係数が大きいイオンでは  
表面拡散の寄与が大きい



## まとめ

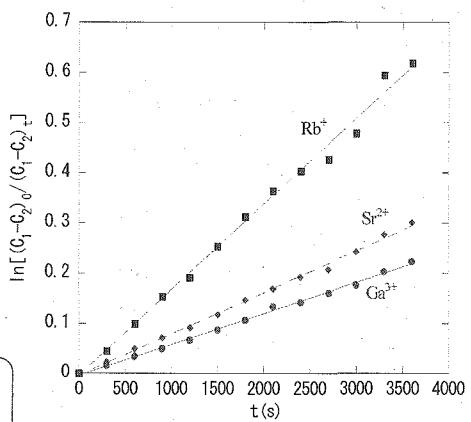
- マルチトレーサー法により、多元素の岩石間隙水中での有効拡散係数を得た。
- 元素によっては、静水中での拡散係数からの予想値より大きくなり、表面拡散の寄与が見られた。
- イオンポテンシャルの増大と共に、表面拡散係数は大きく減少した。
- 適度に吸着され、適度に表面拡散係数が大きいイオンでは表面拡散の寄与が大きい。

## 実験方法(透過拡散実験)

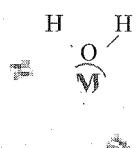


金属イオン(各 0.1 mg/L)  
+ 0.01M NaNO<sub>3</sub>(+EDTA)

- ・2つのセルに同量の溶液を入れる
- ・適当な時間間隔で溶液を採取
- ・濃度の時間変化をICP - MSで測定

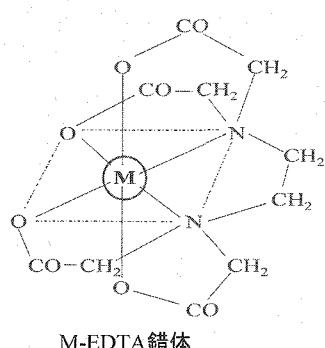


## 溶液中のイオンの形態



### フリーなイオン(アコ錯体)

- ・H<sub>2</sub>O分子に囲まれた状態(水和)で拡散
- ・イオンポテンシャル(z/r)大 → 水和数大
- ・水和イオン半径が拡散に影響



### EDTA

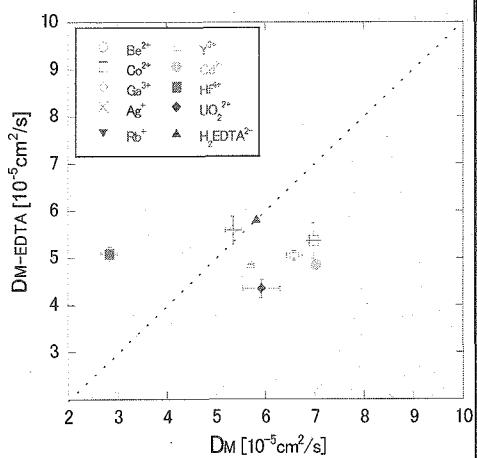
- ・人工の有機キレート剤
- ・生分解されず、環境中に蓄積  
→ 河・湖で検出
- ・金属と非常に安定な錯体を形成  
 $M^{Z+} + EDTA^{4-} \rightarrow M\text{-EDTA}^{Z-4}$
- ・構造、電荷が変化  
→ 拡散挙動が変化

## 錯生成による拡散係数の変化

**フリーなイオン**  
 イオンポテンシャルに応じた拡散係数  
 → イオン間ではっきりとした差

**M-EDTA**  
 イオン間での差が減少  
 H<sub>2</sub>EDTA<sup>2-</sup>の拡散係数に近づく  
 → 錯体としての拡散係数  
 UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>:他のイオンよりも減少  
 → UO<sub>2</sub>-HEDTA<sup>-</sup>, (UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-EDTA  
 他の錯体より大きな構造

錯生成がイオンの拡散挙動に影響



### 質疑応答

「マルチトレーサー法を用いた間隙水中での多種のイオンの拡散に関する研究－表面拡散の寄与について－」（広島大学・高橋嘉夫）に関して、以下の質疑応答が行われた。

Q: 測定条件として採用しているU濃度(10 ppm)の由来について。

A: 産業技術総合研究所が実施したボーリングコアのU濃度が10 ppmであったので、これを採用している。

Q: 定常状態維持が測定原則であるが、入口側の濃度、pH等の変化の有無、並びに、これらの制御方法について。

A: 入り口側の濃度については、試験開始後10%まで濃度減少した後ほぼ定常となったので、この値を使った。pHは4であった。イオン強度は統一した。

Q: Y切片があまりないように見えることから、吸着が少ないと考えられる。この状況において、表面拡散の効果がある判断することの是非について。

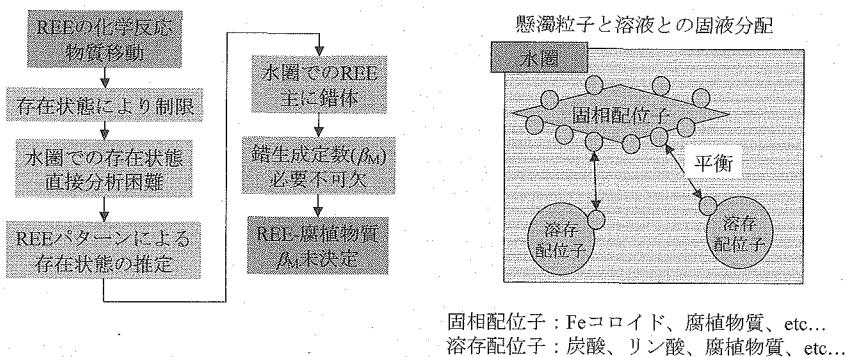
A: マルチトレーサーを用いて完全同一条件下で実験をした中で、静水中の拡散係数に比べて相対的に大きな拡散を示す元素は表面拡散の寄与があると判断した。

3.9 腐植物質に対する全希土類元素の錯生成定数決定に基づく水圏での  
希土類元素の挙動解析

腐植物質に対する全希土類元素の錯生成定数決定に基づく水圏での希土類元素の挙動解析

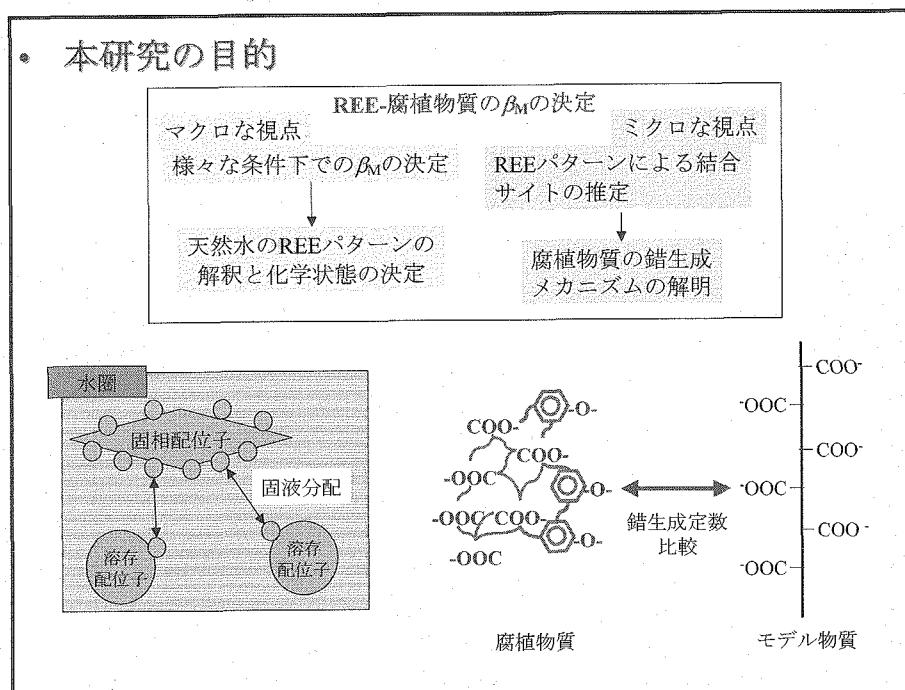
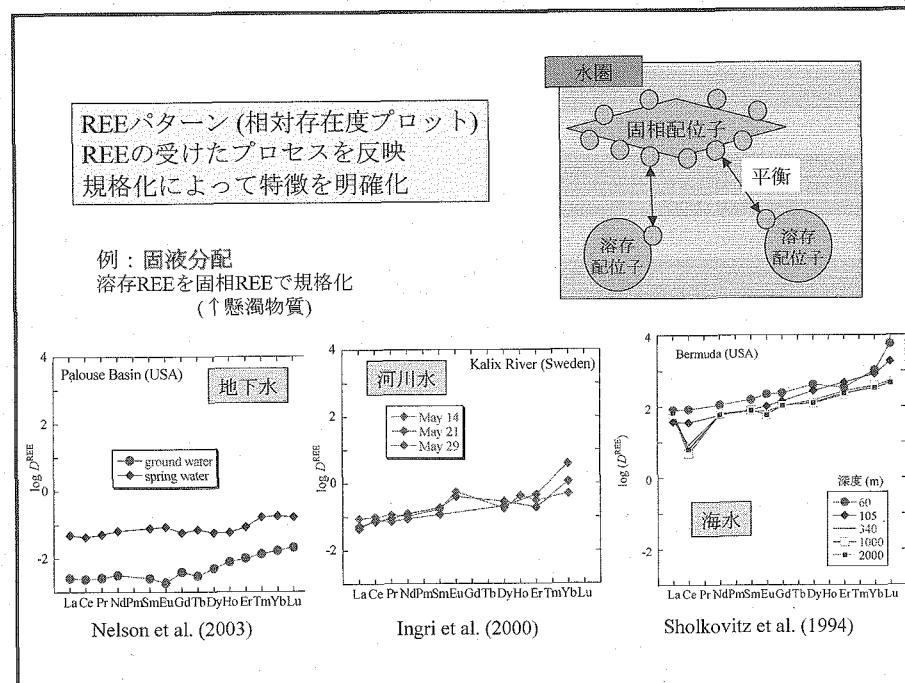
広島大学院理学研究科  
地球惑星システム学専攻  
○山本 祐平・高橋嘉夫・清水洋

・はじめに



どのようにしてREEパターンが形成されるのか？

熱力学平衡定数に基づきその原理を明らかにする



**1. Experimental**

腐植物質とは?  
実験方法&実験手順

**2. Result**

## 錯生成定数結果

REE loading level、pHに対する関数  
結合サイトの推定  
直線自由エネルギー関係に基づくREEパターンの形状の解釈

**3. Discussion**

モデルとのフィッティング  
幅広い条件への $\beta_M$ の適用  
固液分配比  
 $\beta_M$ を用いた固液分配比の計算方法  
天然、モデル計算の比較  
海水、河川水での固液分配比

**・実験方法**

- ・溶媒抽出法(Torres and Choppin, 1984)
- ・3価の陽イオンを選択的に抽出するジエチルヘキシルリン酸(DEHP)を使用
- ・抽出剤によるREEのフリーなイオンの抽出平衡に基づき錯生成定数を決定
- ・実験における前提条件

・REE濃度 << 配位子濃度

・REEをイオン半径に応じて3組に分けて別々に実験(1:La~Eu, 2:Eu~Ho+Y, 3:Ho~Lu)

・EuとHoを Standard Suwannee river fulvic and humic acids (SRFA and SRHA)

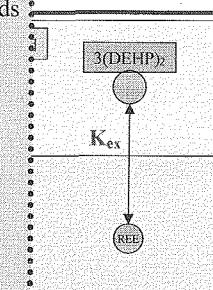
(SRFA and SRHA)

SRFA: pH = 3.9 ± 0.1, 4.9 ± 0.1, 5.4 ± 0.1  
SRHA: pH = 4.7 ± 0.1

・Ionic strength = 0.10 M NaClO<sub>4</sub>

・[REE] = 1-160 mg/dm<sup>3</sup>

$$\frac{[\text{HS}]}{(\text{腐植物質ありの分配比} - \text{腐植物質なしの分配比})} = \text{配位子なしの分配比}$$



### ・腐植物質 (Humic Substance: HS)

- ・動植物が分解してできる天然における典型的有機物の総称
- ・フミン酸(HA)、フルボ酸(FA)、ヒューミン
- ・高分子電解質、高い錯生成能
- ・河川(0.045-27 mg/L)、海洋(4-47.7 µg/L) (Gustafsson et al., 2000)
- ・産地によって性質が異なる

### ・REE-HSの研究

天然

- ・粒径別濃度分布による研究: Ingri et al. (2000)、Tanizaki et al. (1992)

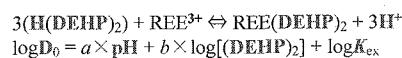
室内実験

- ・標準試料を用いた錯生成定数の決定: Torres and Choppin (1984)、Moulin et al. (1992)

モデル

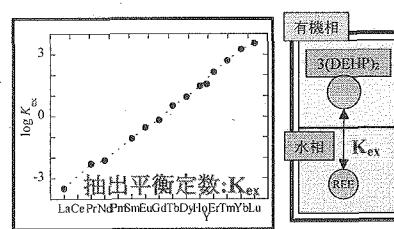
- ・理論計算による錯生成の定量化: Tipping (1998)、Tang and Johannesson (2003)

### ・配位子なしでの分配比( $D_0$ )



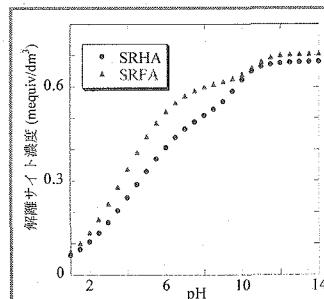
pH係数:  $a = 2.99 \pm 0.07$

抽出剤濃度係数:  $b = 2.83 \pm 0.08$



### ・解離度

高分子電解質、pKaの異なる複数種の官能基  
SRHAとSRFAで異なる解離度  
滴定実験から得られる解離度は  
文献値を用いた(Ritchie and Perdue, 2003)



## 1. Experimental

腐植物質とは？

実験方法&実験手順

## 2. Result

錯生成定数結果

REE loading level、pHに対する関数

結合サイトの推定

直線自由エネルギー関係に基づくREEパターンの形状の解釈

## 3. Discussion

モデルとのフィッティング

幅広い条件への $\beta_M$ の適用

固液分配比

$\beta_M$ を用いた固液分配比の計算方法

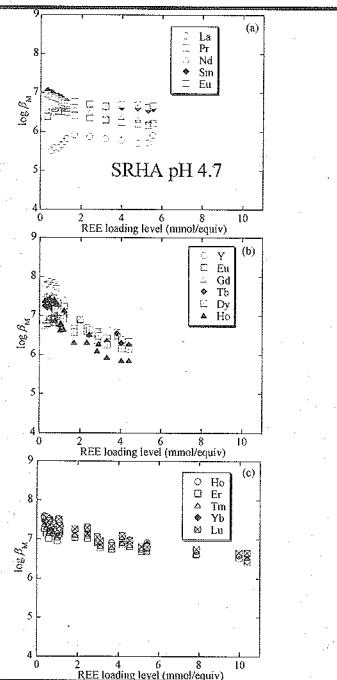
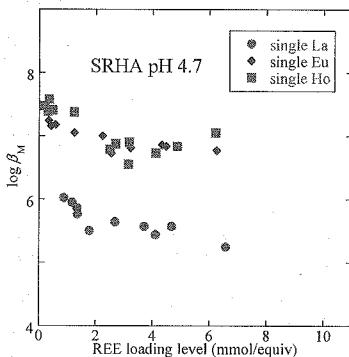
天然、モデル計算の比較

海水、河川水での固液分配比

### • REE loading level

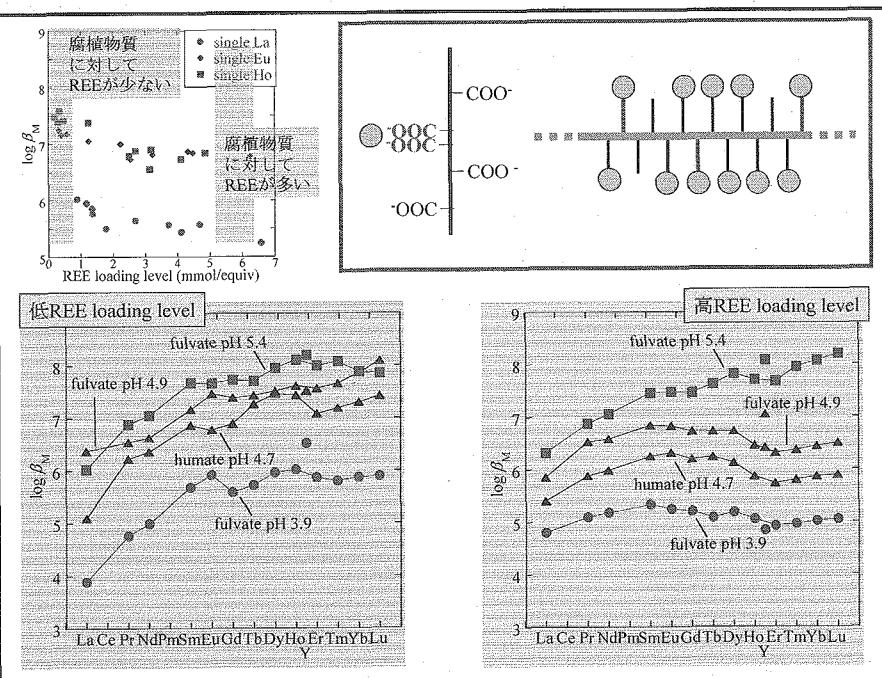
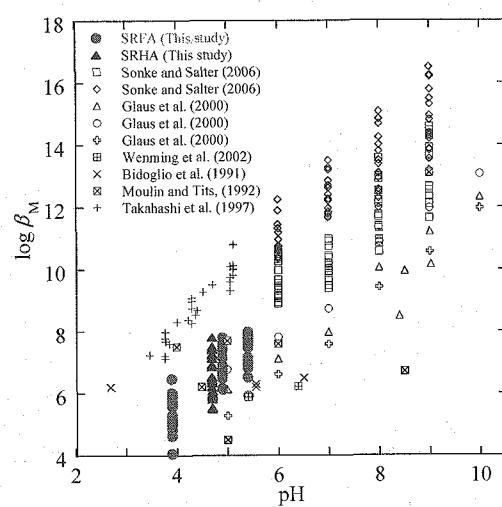
= [REE-HS]/[解離サイト]

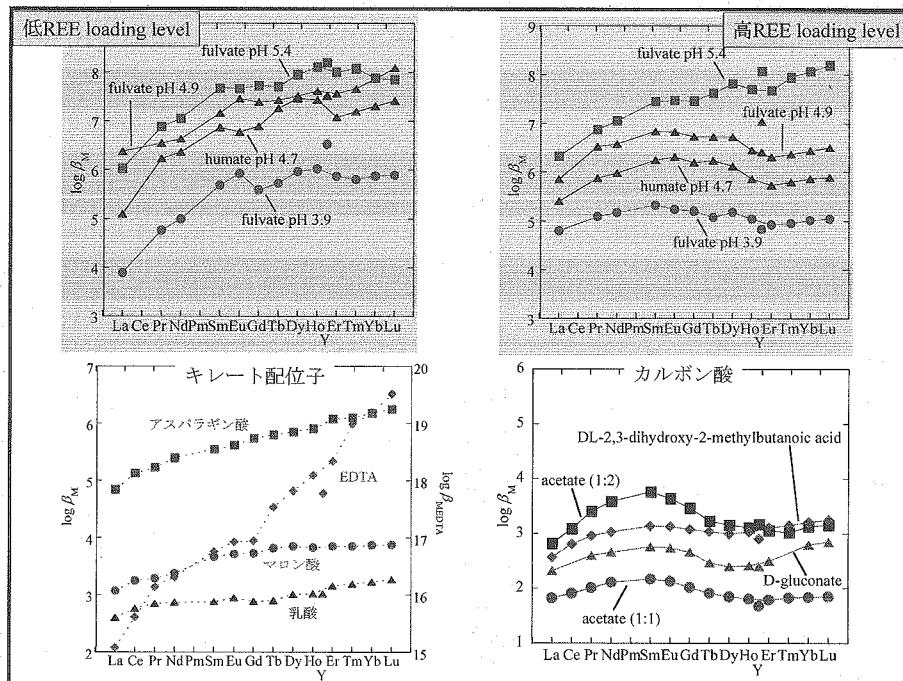
メタル/ligand比を変化  
HS :  $\beta_M$ 変化  
ポリアクリル酸 :  $\beta_M$ 一定  
Kubota et al. (2002)



### 文献値との比較

実験方法、HSの種類に依らず  
 $\log \beta_M$ はpHに対して相関





## 1. Experimental

腐植物質とは？

実験方法 & 実験手順

## 2. Result

錯生成定数結果

REE loading level、pHに対する関数

結合サイトの推定

直線自由エネルギー関係に基づくREEパターンの形状の解釈

## 3. Discussion

モデルとのフィッティング

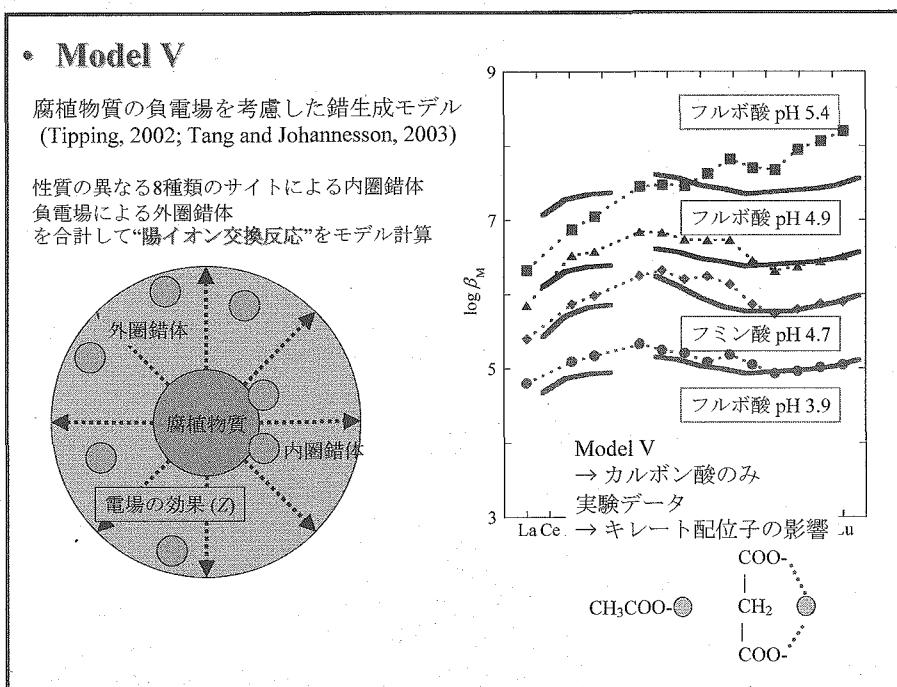
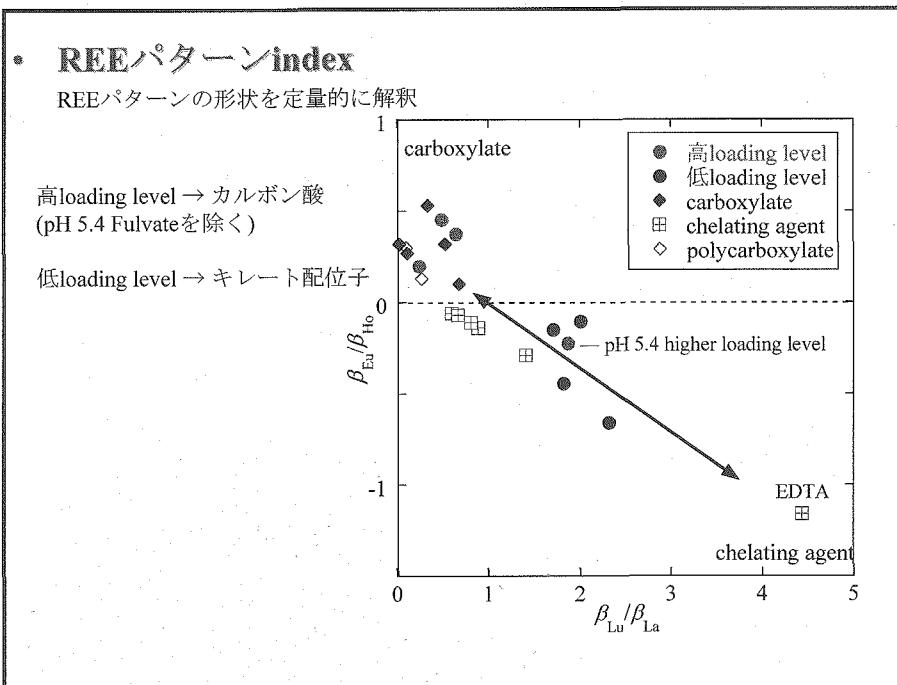
幅広い条件への $\beta_M$ の適用

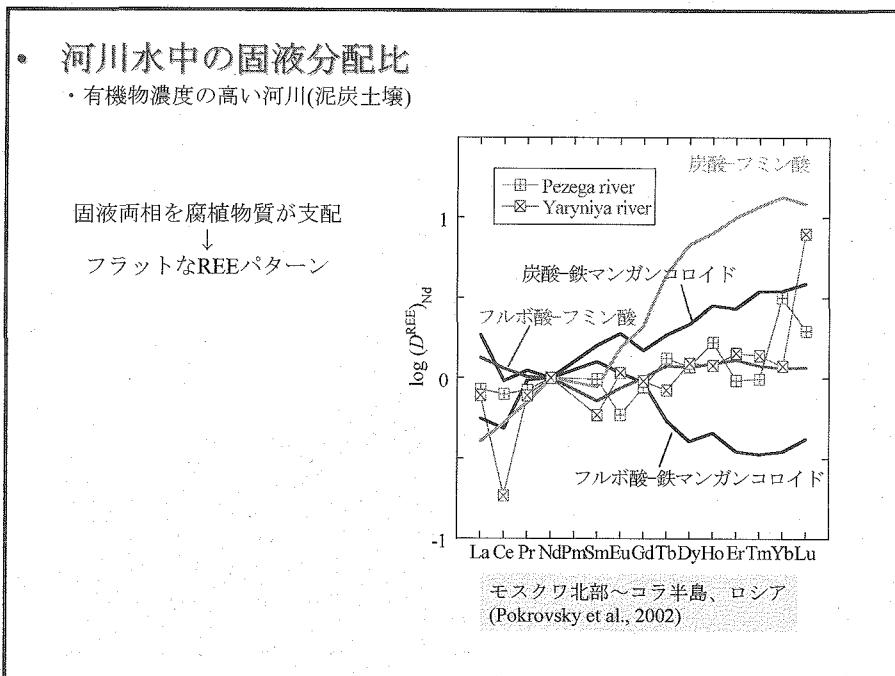
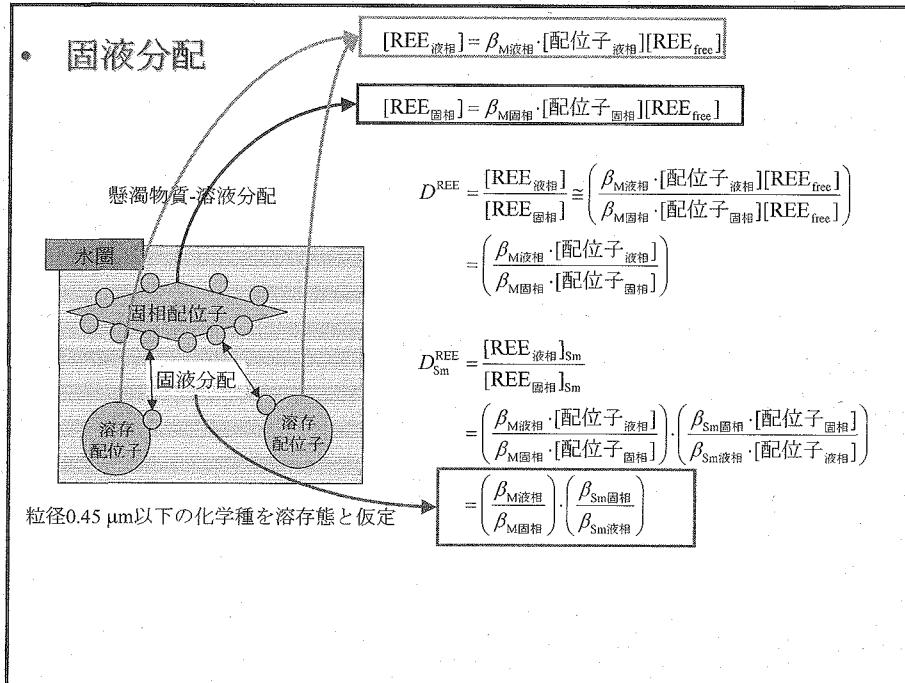
固液分配比

$\beta_M$ を用いた固液分配比の計算方法

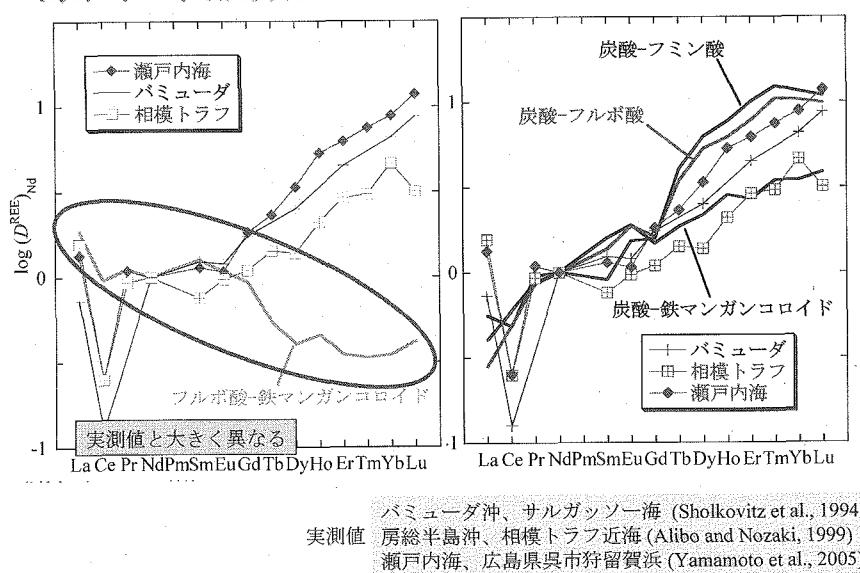
天然、モデル計算の比較

海水、河川水での固液分配比





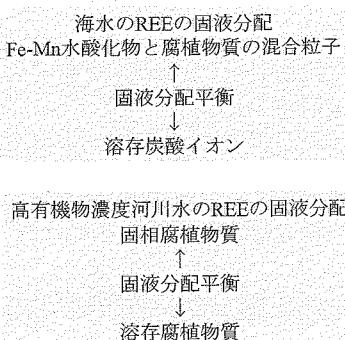
• 海水中の固液分配比



## マクロな視点

REE-腐植物質の $\beta_M$ の決定

## ミクロな視点



REE-腐植物質のメインの結合サイト  
モノカルボキシル基と推定

高pH、低Metal loading levelでの  
キレート配位子の影響を示唆

天然水中では高Metal loading level  
→キレート配位子の寄与の減少

## 質疑応答

「腐植物質に対する全希土類元素の錯生成定数決定に基づく水圈での希土類元素の挙動解析」  
(広島大学・山本祐平)に関して、以下の質疑応答が行われた。

Q: 元素濃度の測定方法について。

A: 10-100 ppbの溶液を測定している。

Q: より高い検出感度での測定のために、RIを利用する可能性について。

A: RIの利用は感度的に良いが、パターンで捉えるためには全元素のデータが必要なので、RIを利用しない試験方法で統一した。

Q: Laのみが他の希土類元素とは異なる挙動を示しているように見える理由について。

A: Laのみ異なる挙動をしているが、理由は現状でははっきりしない。

A: MODEL Vの7つのパラメータのうち、いくつかは文献値を使用した。パラメータが7つもあるとフィッティングで合わせることは容易であるので、あえて文献値を積極的に利用した。

パターンに影響を与えるパラメータのみを、なるべくフィッティングするようにした。

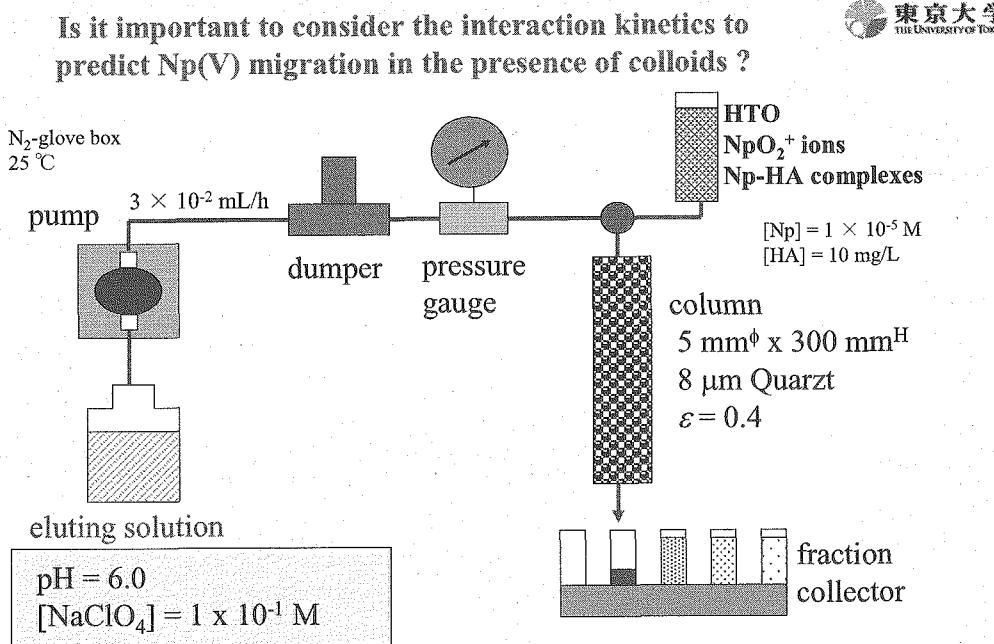
## 3.10 放射性廃棄物処分におけるコロイド形成・輸送モデリング



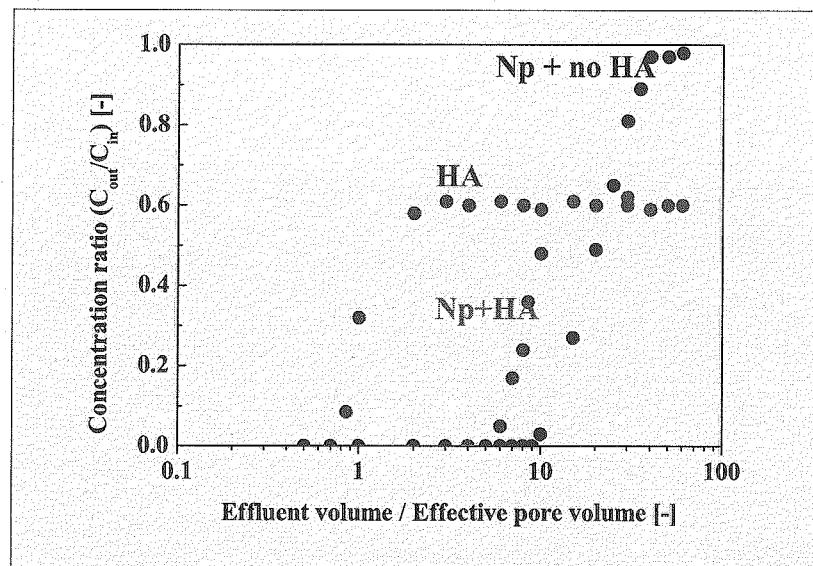
## 放射性廃棄物処分におけるコロイド形成・ 輸送モデリング

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻  
長崎 晋也

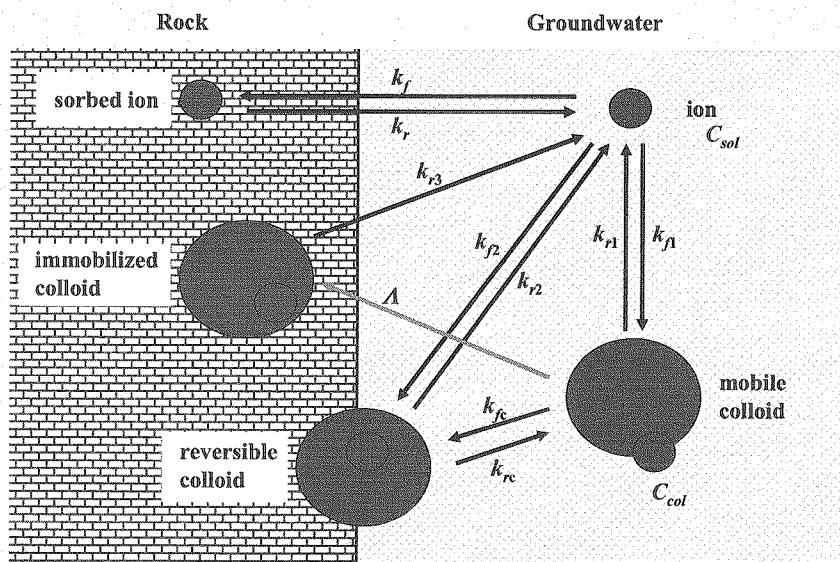
連携重点研究  
「放射性廃棄物処分安全研究のためのネットワーク」  
情報交換会  
平成18年8月4日



### Breakthrough curves of HA, $\text{NpO}_2^+$ in the presence and absence of HA



### Ion – Colloid – Rock interactions



**Linear sorption model**

$$\frac{dC_{sol}}{dt} = - \left( k_{f1} + \lambda + \frac{k_f \lambda}{\lambda + k_r} + \frac{k_{f2}(k_{rc} + \lambda)}{k_{rc} + \lambda + k_{f2}} \right) C_{sol} + \left( k_{r1} + \frac{k_{f2} k_{fc}}{k_{rc} + \lambda + k_{f2}} + \frac{\Lambda k_{r3}}{\lambda + k_{r3}} \right) C_{col}$$

$$\frac{dC_{col}}{dt} = \left( k_{f1} + \frac{k_{f2} k_{rc}}{k_{rc} + \lambda + k_{r2}} \right) C_{sol} - \left( k_{r1} + \Lambda + \lambda + \frac{k_{fc}(\lambda + k_{r2})}{k_{rc} + \lambda + k_{r2}} \right) C_{col}$$

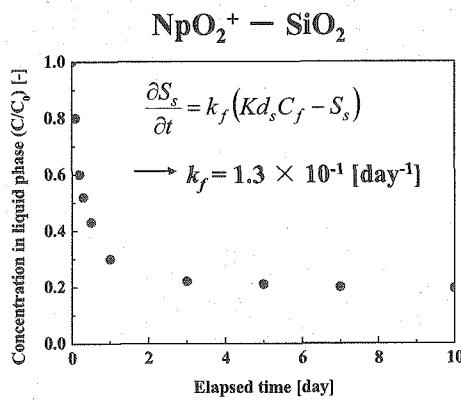
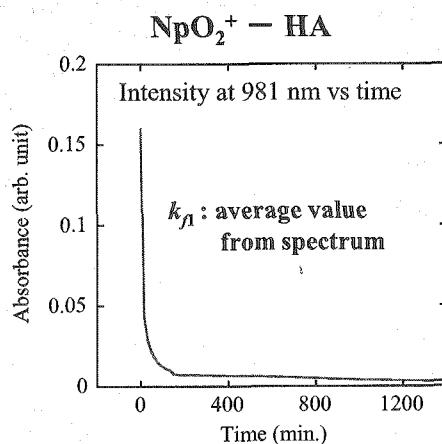
**Langmuir-type sorption model**

$$\frac{dC_{sol}}{dt} = -k_{r1} \left( \frac{\alpha C_{sol}}{1 + \frac{\varepsilon J}{v} C_{sol}} - C_{col} \right) - \lambda R C_{sol}$$

 $\varepsilon$ : porosity $J$ : feed rate of actinides $v$ : flow rateSorption kinetics  $\alpha = \frac{k_{f1}}{k_{r1}}$ Retardation factor  $R$ 

$$\frac{dC_{col}}{dt} = k_{r1} \left( \frac{\alpha C_{sol}}{1 + \frac{\varepsilon J}{v} C_{sol}} - C_{col} \right) - \lambda C_{col}$$

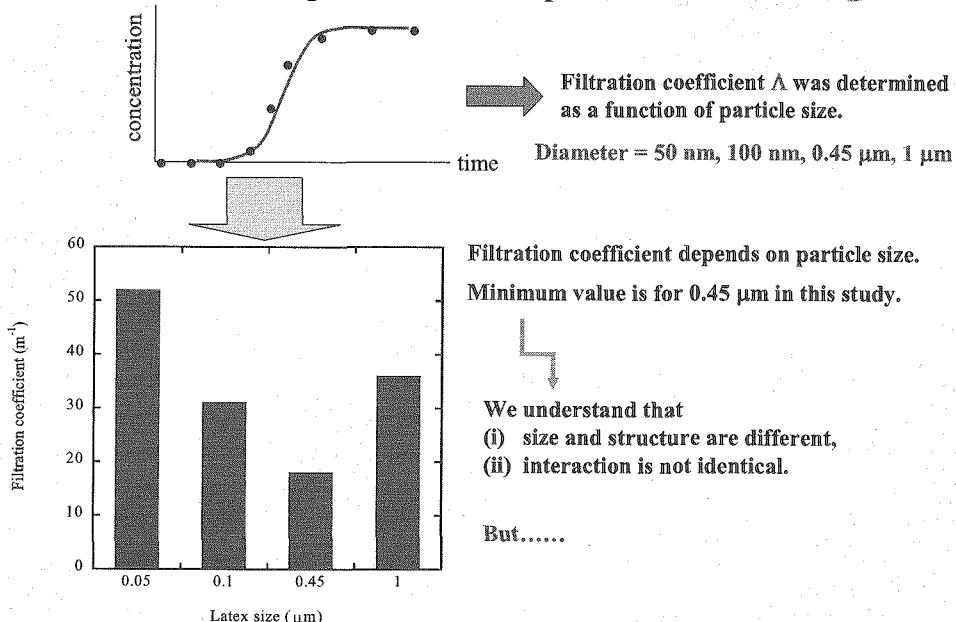
→ Advection/Dispersion model  
combined with



We assumed that humic acids instantaneously interacted with SiO<sub>2</sub>.

→ Instantaneous & Reversible

### Breakthrough curves of latex particles

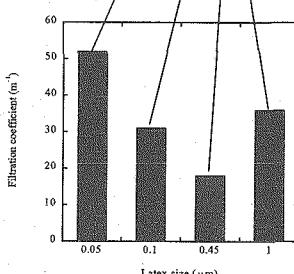


S.Nagasaki, *J. Nucl. Fuel Cycle Environ.*, 9 (2002).

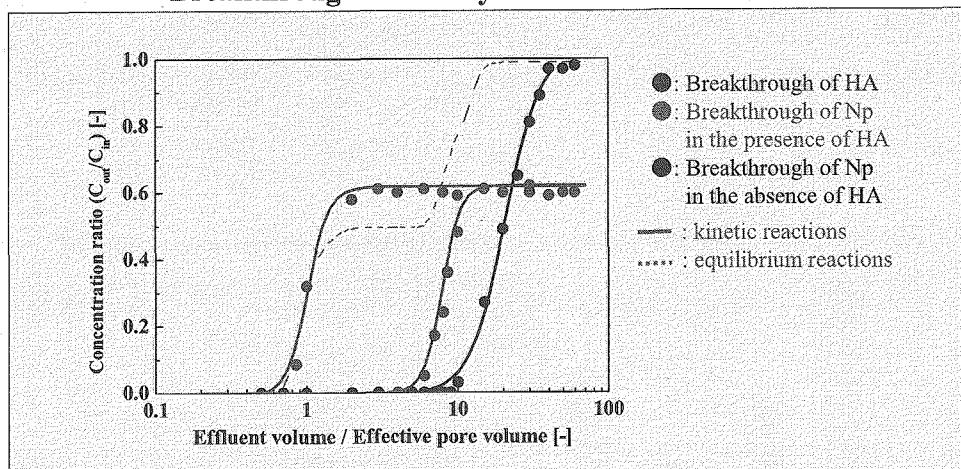
### Size distribution of Np-HA in input solution

size	Fractionation (%)	Filtration coefficient ( $\text{m}^{-1}$ )
< 0.1 $\mu\text{m}$	10	52
0.1 $\mu\text{m}$ ~ 0.2 $\mu\text{m}$	56	31
0.2 $\mu\text{m}$ ~ 0.8 $\mu\text{m}$	22	18
> 0.8 $\mu\text{m}$	12	36

As the 0th approximation:



### Breakthrough curves by model calculation



- Np in the presence of HA migrates faster than that in the absence of HA through columns.
- Calculation results seem to agree relatively well with experimental results.
- It suggests that kinetics of interactions should be considered in the present systems.
- Some fractions of Np were considered to be retained in the columns by filtration of HA.

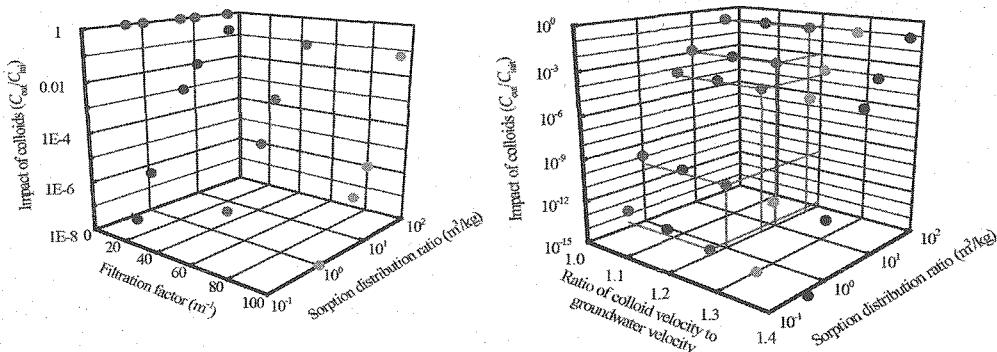
Using the data and assumptions in "Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan (2000)", the impacts of filtration, sorption of ions on colloids, flow velocity of colloids and colloid concentration on the migration of ions in the presence of groundwater colloids are evaluated.

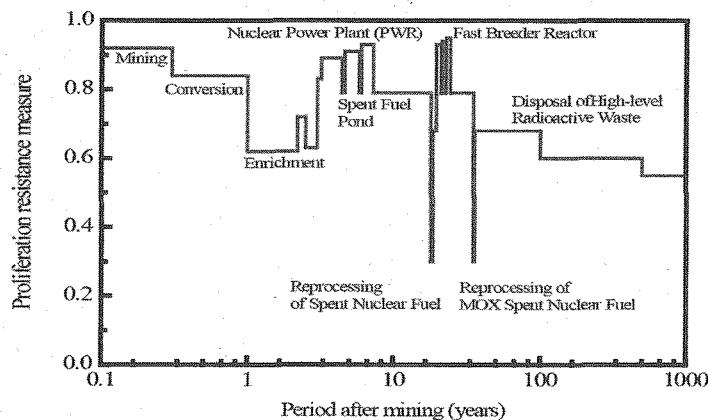
Filtration factor:  $0.1 \sim 100 \text{ m}^{-1}$

Sorption distribution ratio:  $0.5 \sim 50 \text{ m}^3/\text{kg}$

Ratio of colloid velocity to groundwater velocity:  $1.0 \sim 1.4$

Colloid concentration:  $0 \sim 10^{20} \text{ particles/m}^3$





## コロイド研究

### 基盤研究

- ・高比表面積, 固液界面の化学, 界面電気化学
- ・輸送論, 反応速度論
- ・擬平衡論
- ・極低濃度の化学反応
- ・コロイド形成, 輸送モデリング
- ・コロイド分析技術

### 処分技術

- ・コロイドを考慮すべき環境条件の明確化
- ・長期不確実性の科学の構築
- ・余裕深度, ウラン, RI・研究所等ほか, GNEPなど

### 国内外での協力研究の推進

## 質疑応答

「放射性廃棄物処分におけるコロイド形成・輸送モデリング」(東京大学・長崎晋也)に関して、以下の質疑応答が行われた。

Q: コロイドが自然界に存在すると分かっていても、核種移行に対する影響評価は不要と結論づけられる可能性について。

A: 存在しているのがどのようなコロイド(吸着性など)ならば影響が有るか無いのかを理解し、その上で核種移行への影響の有無についての判断をすべきと考える。

Q: 評価の手法に  $K_d$  モデルを適用することの是非について。並びに、評価を行うためのデータ整備の進捗状況について。

A: 評価手法はまだ確立していないが、使うときまでには答えが出ているようにする必要があると考える。また、亀裂のモデル化も重要な課題である。

Q: 国外の鉱物学会ではコロイドの話題が少なくなっている。このような状況に至った原因として考えられる要因について。

A: コロイド研究そのものの行き詰まりや、この研究分野への資金獲得の困難さが影響していることもあるかもしれない。

Q: 処分分野におけるコロイドと言った場合、想定される対象物の範囲について。

A: 腐植酸、粘土、金属酸化物、微生物等が考えられる。但し、深いところで何がどの位あるかという情報は、日本においては十分ではない。

Q: コロイドの核種に対する吸着力が大きいことを考慮しても、核種移行に対してのコロイドの影響を否定できる可能性について。

A: 非可逆性といった吸着のされ方、フィルトレーション性などと共に、これらのバランスが重要であって、一概に影響があると断定することはできない。

#### 4. おわりに

「放射性廃棄物処分研究ネットワーク」第1回情報交換会は、2006年8月4日、日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所において開催された。今回の情報交換会においては、概要説明を含めて10件の発表があった。大学関係者をはじめとして、原子力機構以外からの参加者も約40名にのぼり、有益な討論、議論、意見交換を行うことができた。

参加機関が保有する装置・施設利用の融通というハード面は連携重点研究の制度で整えられつつあるが、われわれの課題では、処分を支えるべき基礎研究をどのように進めていくかの議論もまた重要であり、ネットワークとはそのための場である。

今回情報交換会で紹介された個々の研究に対し、方向やアプローチの仕方の再検討を促す指摘が少なからずあったが、これは参加者が論点を認識している結果である。それらの指摘は発表した学生にとってやや酷で面食らったものだったかも知れない。しかし、ネットワークに参画することによって、国内有数の実験設備を使い品質の高いデータを出して自分の研究アクティビティを上げることはもちろんのこと、研究室を超えて志を同じくする研究者・学生と交わってギリギリと議論をするきっかけは出来たであろう。

なお、昨今議論となっている安全評価の確率論的取り扱いに関して、今後新たにこのネットワークで考えて欲しいとの提案があった。確率論的評価のためのデータの選択等については、モデルに任せることではなく実験者側の積極的な関わりが重要であり、主として実験者で構成されるこのネットワークの中で議論し、発信できないかとの提案であった。これはサブグループを超えた課題になる。今後検討していきたい。また、今回は見学だけであったが、NUCEF, ENTRY, QUALITYに備えられた装置・設備などハードの財産をいかに効率良く連携して活用するかについて具体的な有り様を考えて行きたい。

この情報交換会以降、微生物、コロイド、有機物をテーマとする各サブグループが相次いで会合を開き課題の検討を進めている。ネットワークとは、持てる情報と資産を互いに融通し合い、良きライバルとして協力を惜しまないことを約束した仲間のことである。当該制度に大きな予算枠が確保されているわけではなく、主な活動エネルギーは自分たち自身の共鳴エネルギー、それしかない。各サブグループとも、今は、現状課題の整理と互いの情報の集約段階であるが、サブグループ間の連携の重要性にも多くの声が上がっており、より的を絞った議論と一緒に伴う成果が今後期待できるものと考える。初回の情報交換会およびワークショップを引き金として、数多くの会合が開かれ始めた実績を見ると、研究ネットワークの網目が徐々に張り巡らされてきたことを実感できる。

次回は、微生物と同じく処分の安全評価での取り扱い方が定まっていないコロイドについて、集中的に議論する予定である。

### 謝辞

このたびの「放射性廃棄物処分研究ネットワーク」第1回情報交換会、並びに関連する研究施設の施設見学会の開催にあたり、会場の設営、運営等に協力していただいた廃棄物・廃止措置安全評価研究グループの皆さんに、深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 中山 真一、長崎 晋也；「処分研究ネットワーク」へのいざない”，日本原子力学会誌，48(3), p202-203, (2006)

添付資料 「放射性廃棄物処分研究のためのネットワーク」メンバーリスト

研究代表者

中山 真一 日本原子力研究開発機構 (JAEA) 安全研究センター

廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

長崎 晋也 東京大学 大学院工学系研究科原子力専攻

サブグループ1 「放射性廃棄物処分におけるコロイド形成・輸送モデリング」

サブグループリーダー

藤原 武 JAEA 安全研究センター 廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

グループ構成メンバー

長崎 晋也 東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻

川崎 大介 東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻

中田弘太郎 電力中央研究所 我孫子研究所

中澤 俊之 三菱マテリアル(株) エネルギー事業センター 那珂エネルギー開発研究所

大場 隆広 東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻

高橋 道和 東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻

竹中 陽子 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻

サブグループ2 「地下水におけるコロイドへの核種吸着機構解明と吸着モデリング」

サブグループリーダー

田中 知 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻

グループ構成メンバー

木村 貴海 JAEA 原子力基礎工学研究部門 アクチノイド分離化学研究グループ

虎石 貴 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻

斎藤 拓巳 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻

Giuseppe Palladino 東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻

石田 圭輔 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻

本多 剛 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻

佐藤 雅彦 東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻

サブグループ3 「地質環境中の微生物活動が物質移行に及ぼす影響評価のモデリング」

サブグループリーダー

長沼 肇 広島大学 大学院生物圏科学研究科

グループ構成メンバー

吉田 英一 名古屋大学 博物館 資料分析系

大貫 俊彦 JAEA 先端基礎研究センター

刺激因子との相互作用解析による生命応答ダイナミックスの解明グループ

岩月 輝希 JAEA 地層処分研究開発部門 瑞浪超深地層研究所

里 優 (株)地層科学研究所

サブグループ4 「処分場近傍開放系におけるき裂内の流体流動とコロイド挙動の精緻化」

サブグループリーダー

柄山 修 東北大学 多元物質科学研究所

グループ構成メンバー

木村 貴海 JAEA 原子力基礎工学研究部門 アクチノイド分離化学研究グループ

土屋 範芳 東北大学 大学院環境科学研究科 環境科学専攻

新堀 雄一 東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻

桐島 陽 東北大学 多元物質科学研究所

下田紗音子 三菱マテリアル(株) エネルギー事業センター 地下環境システム部

臼井 秀雄 東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻

小池慎之介 東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻

サブグループ5 「圧縮ベントナイトの間隙水物理化学特性のモデル化」

サブグループリーダー

大江 俊昭 東海大学 工学部エネルギー工学科

グループ構成メンバー

新屋敷直木 東海大学 理学部物理学科

鈴木 覚 (財)産業創造研究所柏研究所

小崎 完 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

杉山 大輔 (財)電力中央研究所 原子力技術研究所

佐藤 努 北海道大学 大学院工学研究科 環境循環システム専攻

佐藤 治夫 JAEA 地層処分研究開発部門 堆積岩工学技術開発グループ

横山 信吾 電力中央研究所 バックエンド研究センター

加藤 博康 三菱マテリアル(株) エネルギー事業センター 地下環境システム部

増田 遊介 東海大学 工学部エネルギー工学科

サブグループ6 「マイクロ・ナノビーム分析技術を用いた化学状態解析および

同位体比分析に基づく放射性核種の挙動評価」

サブグループリーダー

日高 洋 広島大学 大学院理学研究科 地球惑星システム学専攻

グループ構成メンバー

高橋 嘉夫 広島大学 大学院理学研究科 地球惑星システム学専攻

尾崎 卓郎 JAEA 先端基礎研究センター

刺激因子との相互作用解析による生命応答ダイナミックスの解明グループ

光延 聖 広島大学 大学院理学研究科 地球惑星システム学専攻

山本 祐平 広島大学 大学院理学研究科 地球惑星システム学専攻

菊池麻希子 広島大学 大学院理学研究科 地球惑星システム学専攻

古川 賢吏 広島大学 大学院理学研究科 地球惑星システム学専攻

サブグループ7 「ベントナイト緩衝材の長期健全性に関する研究」

サブグループリーダー

佐藤 正知 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

グループ構成メンバー

小崎 完 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

三輪田親野鯉 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

牛来 将明 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

濱崎 真克 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

マンジャナ・ジャヤバ 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

高松 英則 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

田中 真悟 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

長谷川鉄平 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

箱崎 佑 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

佐藤 記徳 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

原彬 博 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

横塚 和寛 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻

大貫 俊彦 JAEA 先端基礎研究センター

刺激因子との相互作用解析による生命応答ダイナミックスの解明グループ

香西 直文 JAEA 環境放射線工学ユニット 環境動態研究グループ

中澤 俊之 三菱マテリアル(株) エネルギー事業センター 那珂エネルギー開発研究所

サブグループ8 「ガラス固化体の長期溶解／変質の地球化学的機構の評価とモデル化」

サブグループリーダー

稻垣八穂広 九州大学 大学院工学研究院 エネルギー量子工学部門

グループ構成メンバー

武田 聖司 JAEA 安全研究センター 廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

馬場 恒孝 JAEA 安全研究センター 研究計画調整室

三ツ井誠一郎 JAEA 地層処分研究開発部門 研究計画グループ

斎藤 育成 九州大学 大学院工学研究院 エネルギー量子工学専攻

河村 和廣 JAEA 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

飯島 和毅 JAEA 地層処分研究開発部門 核種移行研究グループ

笹本 広 JAEA 地層処分研究開発部門 核種移行研究グループ

藤原 健壯 JAEA 地層処分研究開発部門 核種移行研究グループ

サブグループ9 「ハルの処分安全性に関する研究」

サブグループリーダー

藤原 武 JAEA 安全研究センター 廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

グループ構成メンバー

稻垣八穂広 九州大学 大学院工学研究院 エネルギー量子工学部門

馬場 恒孝 JAEA 安全研究センター 研究計画調整室

サブグループ 10 「アクチニド元素の溶解度に関する熱力学データの整備とモデリング」

サブグループリーダー

佐々木 隆之 京都大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻

グループ構成メンバー

森山 裕丈 京都大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻

藤原 健壯 JAEA 地層処分研究開発部門 核種移行研究グループ

小林 大志 京都大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻

高岡 祥泰 京都大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻

サブグループ 11 「地下環境における核種移行に及ぼすバリア材変質とそのモデリング」

サブグループリーダー

佐藤 努 北海道大学 大学院工学研究科環境循環システム専攻

グループ構成メンバー

田中 忠夫 JAEA 安全研究センター 廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

山口 徹治 JAEA 安全研究センター 廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

小田 治恵 JAEA 地層処分研究開発部門 TRU 廃棄物処分研究グループ

米田 哲朗 北海道大学 大学院工学研究科 環境循環システム専攻

市川 康明 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻

鈴木 覚 (財)産業創造研究所 原子力化学工学センター

横山 信吾 電力中央研究所 バックエンド研究センター

高瀬 博康 (株)クインテッサジャパン

棕木 敦 日揮(株) 産業プロジェクト統括本部 原子力・環境事業部

坂本 浩幸 (株)太平洋コンサルタント ソリューション事業部

伊藤 弘志 (株)クニミネ工業株式会社 黒磯研究所

河原本千恵 北海道大学 大学院工学研究科

中村 祐亮 北海道大学 大学院工学研究科

大谷 祐介 北海道大学 大学院工学研究科

高山 英樹 北海道大学 大学院工学研究科

大田由貴恵 北海道大学 大学院工学研究科

山田 憲和 三菱マテリアル(株) エネルギー事業センター 那珂エネルギー開発研究所

サブグループ 12 「地下水中有機コロイドの特徴と核種移行に及ぼす影響評価」

サブグループリーダー

長尾 誠也 北海道大学 大学院地球環境科学研究院

グループ構成メンバー

柄山 修 東北大学 多元物質化学研究所

長崎 晋也 東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻

高橋 嘉夫 広島大学 大学院理学研究科 地球惑星システム学専攻

田中 忠夫 JAEA 安全研究センター 廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

岩月 輝希 JAEA 地層処分研究開発部門 瑞浪超深地層研究所

濱 克宏 JAEA 地層処分研究開発部門 堆積岩地質環境研究グループ

# 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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
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 <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率(数の)	1	1

表 5. SI 接頭語

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

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 <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
压力, 応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率, 放射束	ワット	W	$J/s$
電荷, 電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
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 <sup>(d)</sup>	°C	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^{-2}$
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	$J/kg$
線量当量, 周辺線量当量	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
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量), 質量エンタルピー	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
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	ワット毎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 <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	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 <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg \cdot s^{-4} \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1 L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3$
トン	t	$1 t = 10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1 Np = 1$
ベル	B	$1 B = (1/2) \ln 10 (Np)$

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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	$1 eV = 1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1 u = 1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1 ua = 1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

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
アード	a	$1 a = 1 dam^2 = 10^3 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar = 0.1 MPa = 100 hPa = 10^5 Pa$
オンストローク	Å	$1 Å = 0.1 nm = 10^{-10} m$
バーン	b	$1 b = 100 fm^2 = 10^{-28} m^2$

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	$1 P = 1 dyn \cdot s/cm^2 = 0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
スチル	sb	$1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

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	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad = 1 Gy = 10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1 IX unit = 1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy = 10^{-29} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr = (101325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101325 Pa$
カリ	cal	$1 cal = 1 J$
ミクロン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$