

第36回バックエンド夏期セミナー(online)
The 36th Backend Summer Seminar

地層処分における人工バリアとしての 緩衝材の膨潤と熱力学

Swelling of Buffer Material as an Engineered Barrier in Geological
Disposal and Its Thermodynamics

岡山大学大学院自然科学研究科
産業創成工学専攻 知能機械システム学講座
高度システム安全学研究室

佐藤 治夫(Haruo SATO)

Advanced System Safety Laboratory

Department of Intelligent Mechanical Systems

Division of Industrial Innovation Sciences

Graduate School of Natural Science & Technology

Okayama University

自己紹介

1

- 千葉県出身、中学、高校を岡山県で過ごす(自宅:茨城県東海村)
- H1年3月:秋田大学鉱山学部採鉱学科卒業
- H1年4月～H10年9月:動力炉・核燃料開発事業団(PNC)
 - ✓ 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究
 - ✓ 釜石プロジェクト(H5年4月～H9年9月:釜石鉱山地下坑道での物質移行研究)
 - ✓ 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術報告書「第1次取りまとめ」(H4年9月)
- H9年3月:秋田大学大学院鉱山学研究科博士後期課程地球工学専攻修了
- H10年10月～H17年9月:核燃料サイクル開発機構(JNC)(組織改組)
 - ✓ 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術報告書「第2次取りまとめ」(H11年11月)
- H17年10月～:日本原子力研究開発機構(JAEA)(法人統合)
- H18年4月～H24年6月:幌延深地層研究センター(北海道幌延町駐在)
 - ✓ 地下研究プロジェクト「幌延深地層研究計画」
 - ✓ 福島第一原発事故に伴う環境動態研究(H23年3月～)
- H24年11月～H25年4月:福島環境安全センター(福島駐在)
 - ✓ 福島長期環境動態研究プロジェクト「F-TRACEプロジェクト」
- H25年5月～:岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 准教授

放射性廃棄物処分の概要 3

- 放射性廃棄物の種類と処分方法
- 高レベル放射性廃棄物の処理処分の概要
- 地層処分の多重バリアシステム

ベントナイトの膨潤に関する熱力学 7

- ベントナイトの主な性質と期待される機能
- ベントナイトの膨潤の原理
- ベントナイト中の水、ベントナイトの膨潤と熱力学との関係
- ベントナイトの膨潤応力に関する熱力学モデル
- 古典熱力学の理論と水(水蒸気)との関係
- 水の熱力学パラメータ
- ベントナイトの膨潤応力に関する熱力学理論
- 様々な水質条件での水の活量と自由エネルギー
- モンモリロナイト中の水の熱力学特性・水の活量の測定例、熱力学パラメータ
- ベントナイトの膨潤応力の解析例(純水系・塩水系)
- まとめ・今後の課題

放射性廃棄物の種類と処分方法(1/2)

3

廃棄物の種類(区分)		廃棄物の例	発生場所	処分方法(例)
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能レベルの極めて低い廃棄物 (L3廃棄物)	原子力発電所	浅地中トレンチ処分
		放射能レベルの比較的低い廃棄物 (L2廃棄物)		浅地中ピット処分
		放射能レベルの比較的高い廃棄物 (L1廃棄物)		中深度処分
	ウラン廃棄物	消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設	中深度処分、浅地中ピット処分、浅地中トレンチ処分 場合によっては地層処分
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物 (TRU廃棄物)*1	燃料棒の部品、廃液、フィルター	再処理施設、MOX燃料加工施設	地層処分、中深度処分、浅地中ピット処分
	放射性同位体(RI)・研究所等廃棄物	廃液固化体、雑固化体、金属、コンクリート、プラスチック、フィルター	大学・企業・研究機関、医療機関等	中深度処分、浅地中ピット処分、浅地中トレンチ処分 場合によっては地層処分
高レベル放射性廃棄物		ガラス固化体	再処理施設	地層処分
クリアランスレベル以下の廃棄物*2		原子力発電所解体廃棄物の大部分	上記全ての発生場所	再利用/一般の物品としての処分

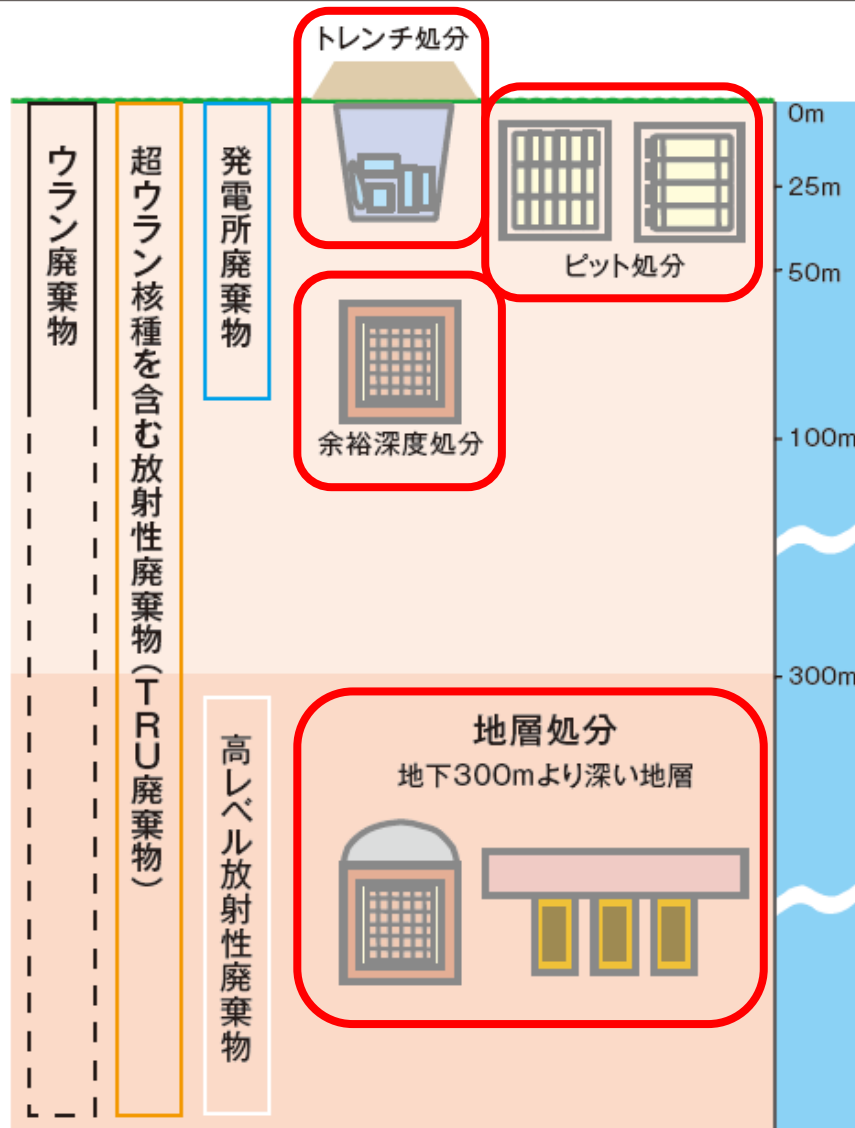
*1 TRU: Transuranium(超ウラン元素: ${}_{92}\text{U}$ より原子番号の大きい元素)

*2 放射性物質として取扱う必要のある放射能レベルを「クリアランスレベル」と言い、それ以下のレベルでは一般廃棄物として取扱うことができる(クリアランスレベル=0.01mSv/年)

放射性廃棄物の種類と処分方法(2/2)

4

処分方法



浅地中トレンチ処分

地上から数m程度の深さにトレンチを掘削し、そのまま廃棄体を埋設処分

(茨城県東海村で廃棄物埋設実地試験)

浅地中ピット処分

地上から数m～20m程度(50m以浅)の深さにコンクリート等の人工構築物を設置し、廃棄体を埋設処分

(1992年から青森県六ヶ所村で実施)

中深度処分(余裕深度処分)

地上から70m以深の深さにコンクリートでトンネル型やサイロ型の空洞を造り、廃棄体を埋設処分

(2001年から青森県六ヶ所村で調査坑道と試験空洞による調査)

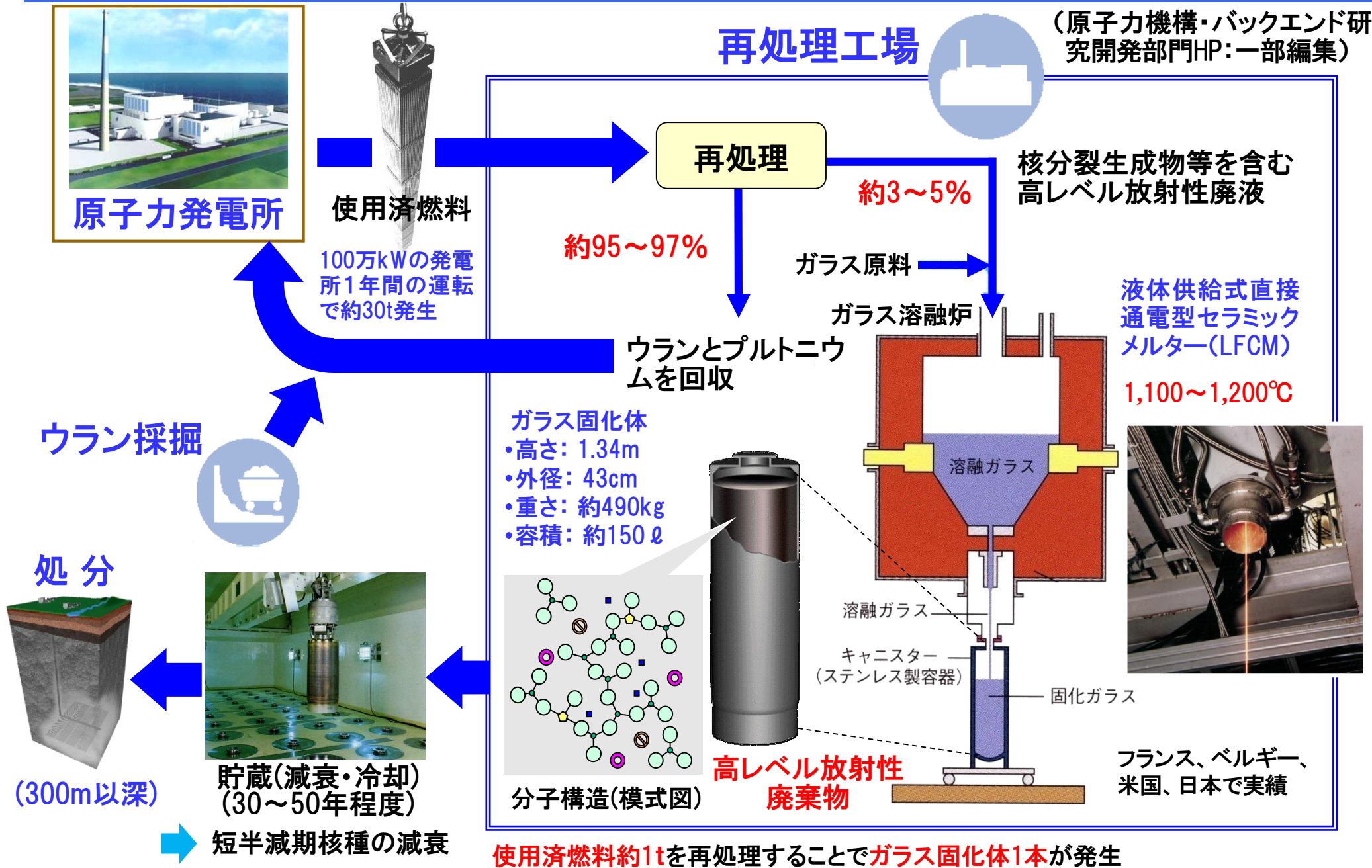
地層処分

地上から300m以深の深さに人工バリア(金属容器、緩衝材)と天然バリア(地層)を組合わせた多重バリアシステムを構築し、廃棄体を埋設処分

(実施主体が2002年から候補地公募)

高レベル放射性廃棄物の処理処分の概要

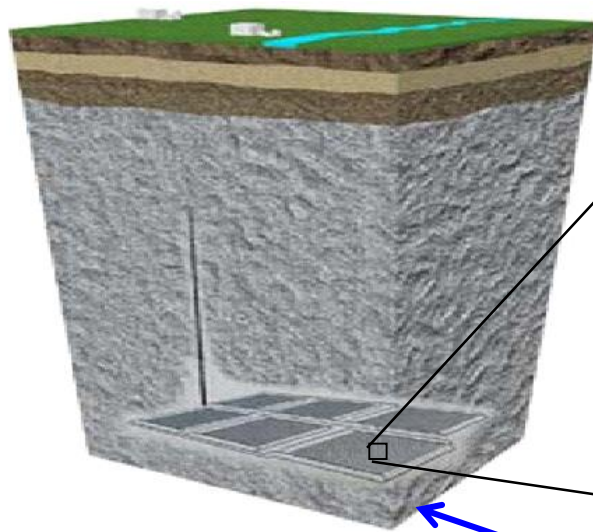
5



地層処分の多重バリアシステム

6

地層(天然バリア(natural barrier))と工学障壁材(人工バリア(engineered barrier))を組み合わせた複合システム(combined system)

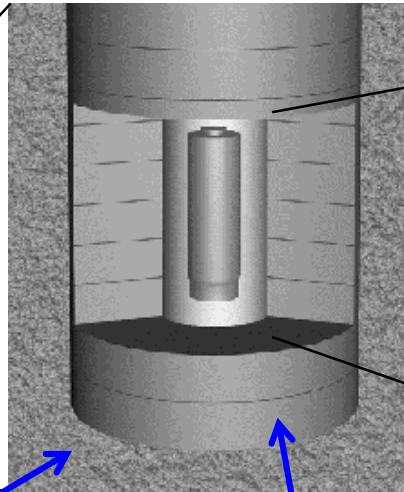


岩盤

地下深部(300m以深)

- 人間の生活圏から離れており、人間活動や自然現象の影響を受けにくい
- 酸素がほとんどなく、鉄の腐食やガラスの溶解が進みにくい
- 地下水の動きが極めて緩慢

天然バリア



緩衝材

粘土(ベントナイト)が主成分

- オーバーパックへの地下水の浸透を抑制
- 岩圧及び地下水の緩衝
- 溶出する放射性元素の移行抑制



オーバーパック

鉄(炭素鋼)製

- ガラス固化体が地下水と一定期間接触しないよう保護
- ガラス固化体からの放射線の遮蔽
- 岩圧からの保護



ガラス固化体

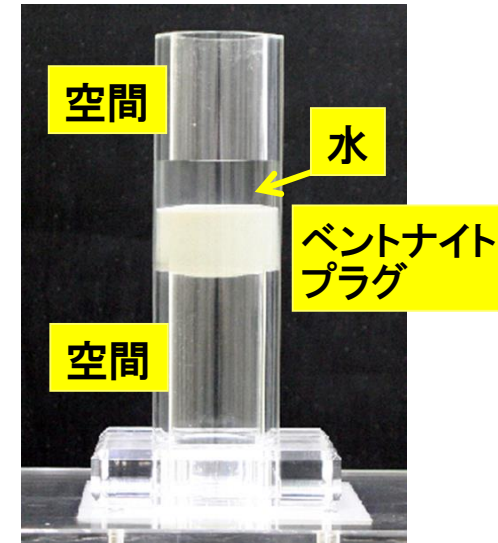
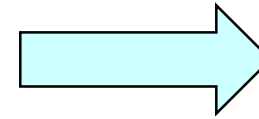
水への溶解を抑制し、放射性物質の浸出を抑制する

人工バリア

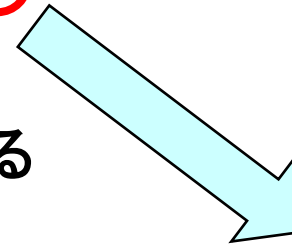
ベントナイトの主な性質と期待される機能

7

- 水を通しにくい性質(止水性(低透水性))
 - 地下水の移動を制限する(殆ど移動しない)
(透水係数: 約 $10^{-13} \sim 10^{-11}$ m/s)
 - 物質移動が拡散支配となる
- 膨らむ性質(膨潤性)
 - 水分を吸収して膨潤することで隙間を充填する
- 岩圧(地圧)を和らげる性質(力学的緩衝性)
 - 水分を吸収・排水することで膨潤応力を制御する
- 水質を制御する性質(化学的緩衝性)
 - 可溶性鉱物の溶解によりpH、間隙水組成を制御する
- 放射性核種の移動を抑制する性質(核種移行遅延性)
 - 陽イオン交換能が高く、多くの放射性核種を吸着する
- 狭滲経路(層間は水分子3個分程度と極めて狭い)
 - コロイド/有機物、微生物の移動を制限する



ベントナイトの低透水性



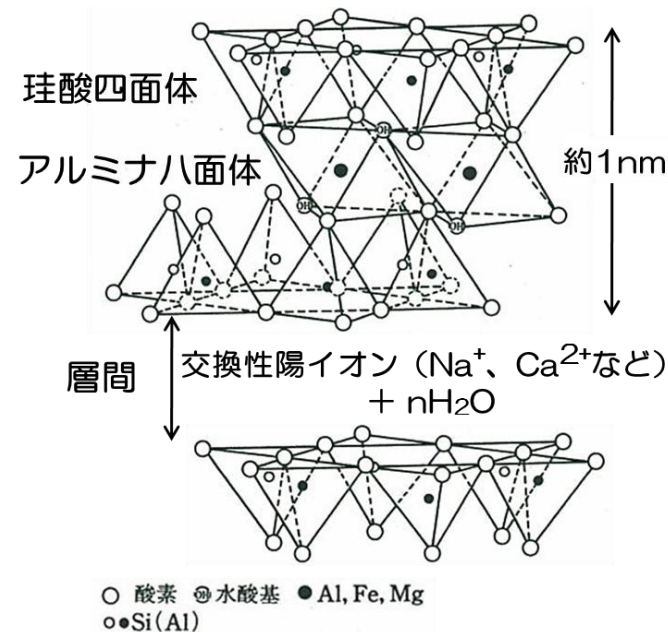
ベントナイトの膨潤性

ベントナイトの親水性

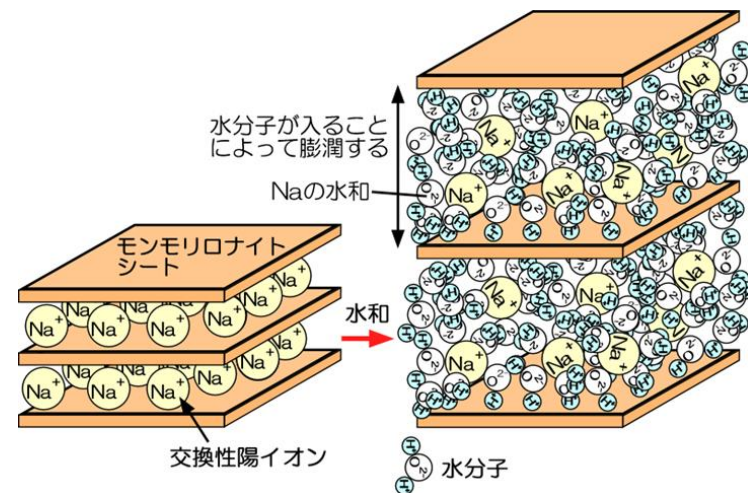
- ベントナイトは水を吸収して膨れる性質がある。これを**膨潤**(swelling(expansion))と言う。これは、主成分のモンモリロナイトの**結晶層間**(interlayer)に水を取り込むからであり、水を吸収して**何倍もの体積**になる

膨潤のメカニズム

- モンモリロナイト結晶層(右上図)は、**平面的な構造**(シート構造(sheet structure))を持っている。通常、それらが何枚か積み重なって存在し、**重層体**や**積層体**(aggregates)などと呼ばれる
- 結晶シート間を**層間**と言い、 Na^+ や Ca^{2+} などの陽イオンが存在する。これらは**交換性陽イオン**(exchangeable cation)と呼ばれ、層間に Na^+ が存在する場合は**Na型モンモリロナイト**と呼ばれる。水と接触すると、**陽イオンが水和**(hydration)するため、層間に水分子が侵入し、これによって層間が押し広げられ、膨潤する(右図)。膨潤性は交換性陽イオンの種類によって異なる
- 海水のように、**塩分が高い水**と接触すると、塩水中の Na^+ なども水和するため、層間に入ろうとする水の一部がそちらに奪われることで、**膨潤性が低下**する



モンモリロナイトの結晶構造

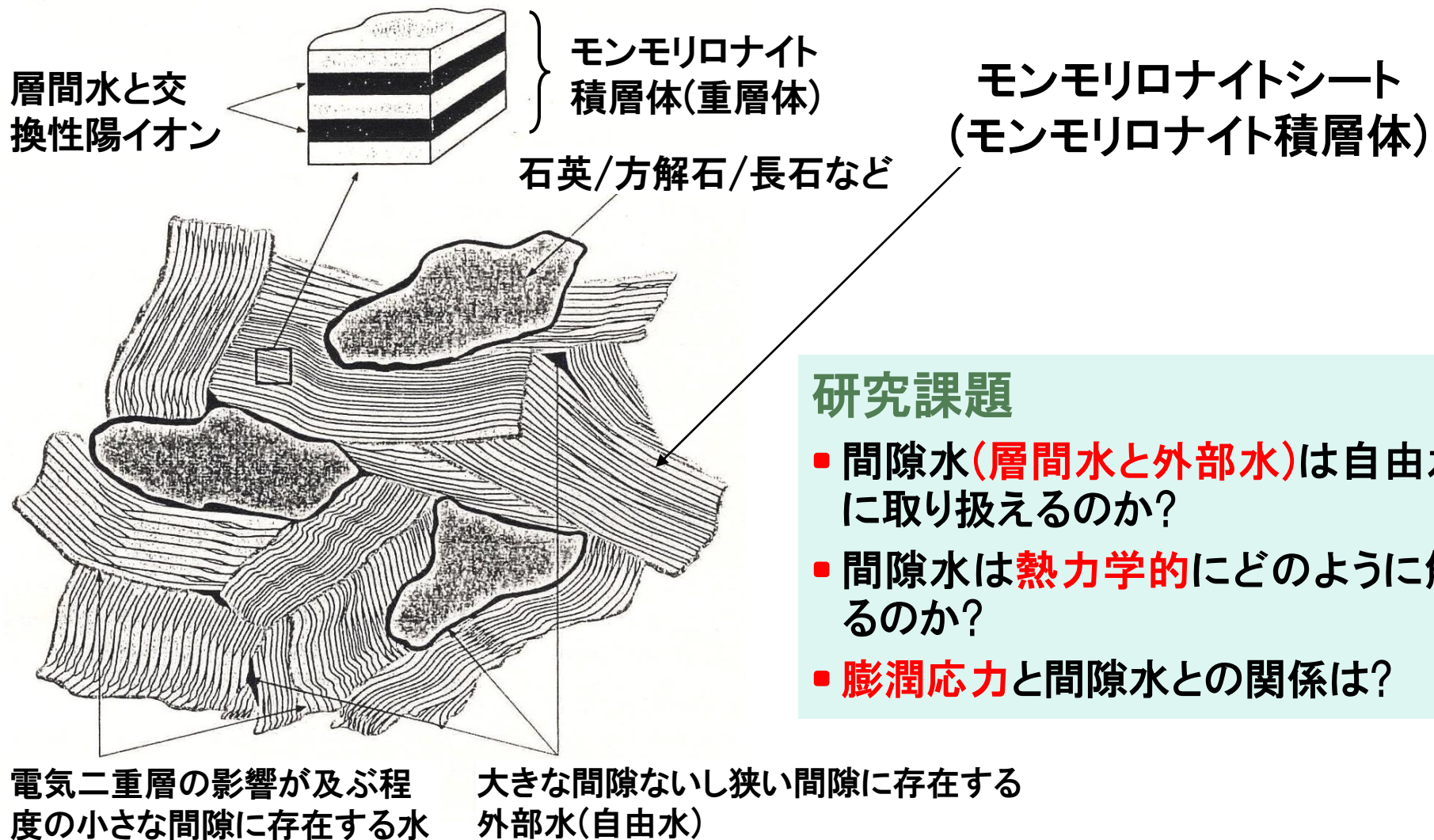


乾燥状態

水和状態

層間の水和によるモンモリロナイトの膨潤

ベントナイト中の水(間隙水(porewater))の存在状態

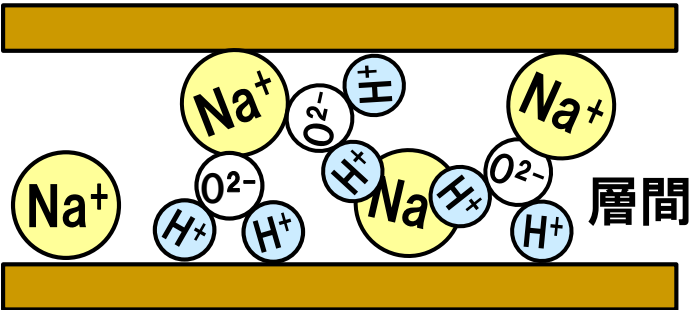


ベントナイトの膨潤と熱力学との関係

10

ナメクジに塩をかけるとなぜ縮む？

モンモリロナイトシート



殆ど水が無い状態(最初の状態)

水と接触

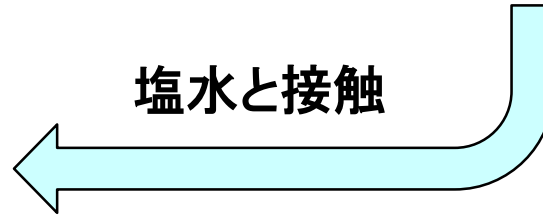


層間中の Na^+ イオンが水和することで水を吸水し、層間は膨潤

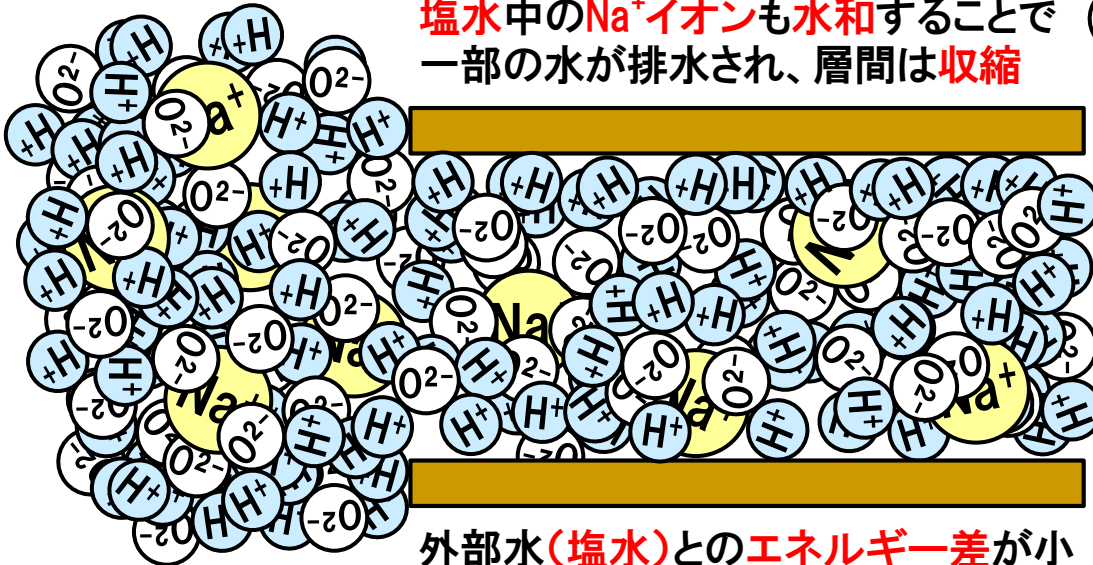


膨潤しないようにすると、熱力学的には外部水とのエネルギー差が膨潤エネルギーとして作用

塩水と接触



塩水中の Na^+ イオンも水和することで一部の水が排水され、層間は収縮



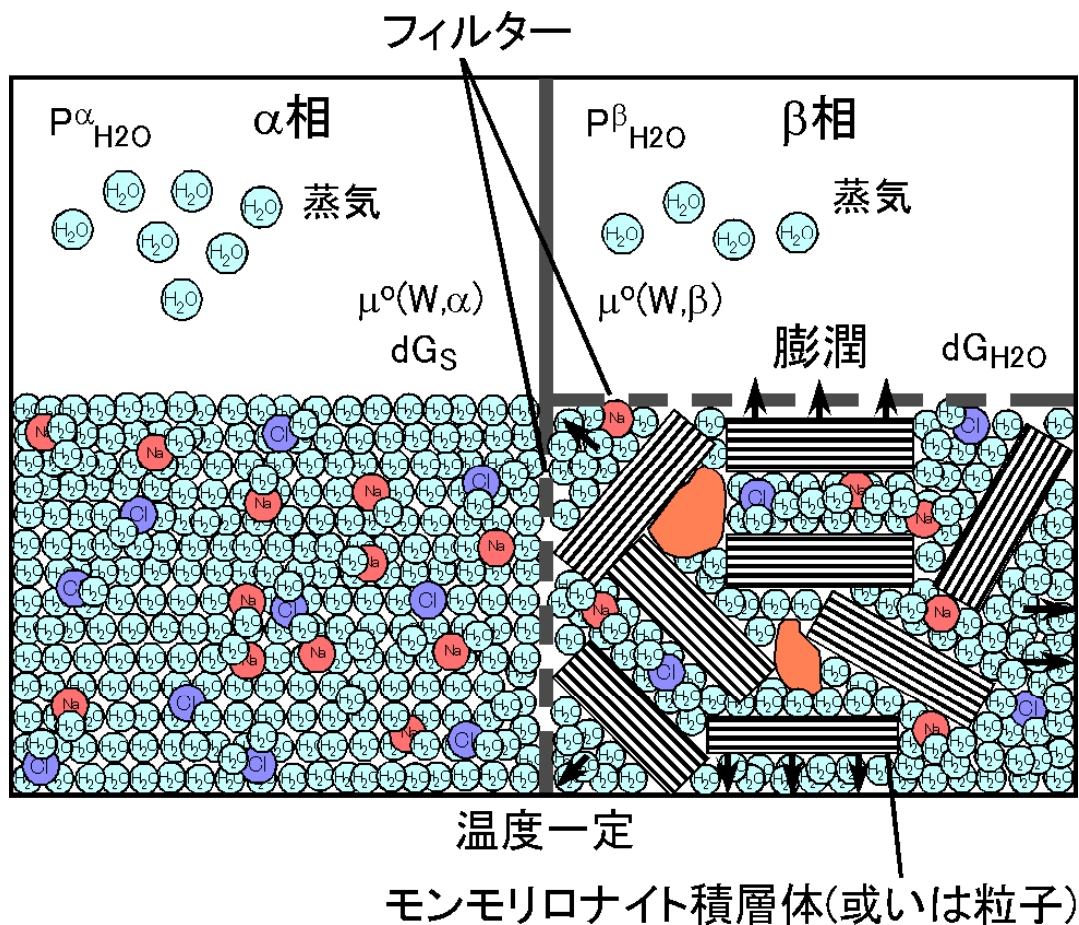
外部水(塩水)とのエネルギー差が小さくなり、膨潤エネルギーは低下

層間中の水と外部水との浸透圧のバランスをエネルギーのバランスとして考えることで、膨潤応力を熱力学理論により解析できる

ベントナイトの膨潤応力に関する熱力学モデル

11

独立した任意の濃度の電解質溶液(α 相)とベントナイト(β 相)がフィルターを介して接触し、両相が平衡状態にある時の水の化学ポテンシャルバランスの概念



フィルターを介して α 相から β 相へ水溶液が浸潤し、両相が平衡である時、両相間の化学ポテンシャル(μ^0)は等しい

$$\mu^0(W, \alpha) = \mu^0(W, \beta) \quad \dots\dots (1)$$

この系において、両相が平衡状態になった時の両相間の水のGibbsの自由エネルギーの変化(dG)が膨潤エネルギーとして作用する

dG は、浸潤平衡後の α 相の水の相対部分モルGibbsの自由エネルギーを dG_S , β 相のそれを dG_{H_2O} として以下のように求められる

$$dG = dG_S - dG_{H_2O} \quad \dots\dots (2)$$

気体のエンタルピー(定義)

$$h \equiv u + pv$$

h : 比エンタルピー

u : 比内部エネルギー

p : 圧力

v : 比容積

(3)式より、 h は u, p, v の関数であることから、 h は次式で表すことができる

$$h = h(u, p, v) \quad (4)$$

(4)式を全微分して、次式を得る

$$\begin{aligned} dh &= \left(\frac{\partial h}{\partial u} \right) du + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right) dp + \left(\frac{\partial h}{\partial v} \right) dv \\ &= du + vdp + pdv \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式について、体積は一定であることから、 $dv = 0$ より

$$dh = du + vdp \quad (6)$$

Gibbsの自由エネルギー(定義)

$$g \equiv h - sT \quad (7)$$

g : 比Gibbsの自由エネルギー

s : 比エントロピー

T : 絶対温度

g は h, s, T の関数であることから、次式で表すことができる

$$g = g(h, s, T) \quad (8)$$

(8)式を全微分して、次式を得る

$$\begin{aligned} dg &= \left(\frac{\partial g}{\partial h} \right) dh + \left(\frac{\partial g}{\partial s} \right) ds + \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right) dT \\ &= dh - Tds - sdT \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式について、温度一定、即ち、同一の温度条件に対しては、 $dT = 0$ より

$$dg = dh - Tds \quad (10)$$

次に、**熱力学第1法則**より

$$dq = du + pdv \quad (11)$$

q : 比熱量

体積が一定であることから、(11)式は

$$dq = du \quad (12)$$

また、**熱力学第2法則**より

$$ds = \frac{dq}{T} \quad \therefore dq = Tds \quad (13)$$

(13)式を(12)式に代入して

$$du = dq = Tds \quad (14)$$

更に、(14)式を(6)式に代入して

$$dh = du + vdp = Tds + vdp \quad (15)$$

(15)式を(10)式に代入して

$$\begin{aligned} dg &= dh - Tds = Tds + vdp - Tds \\ &= vdp \end{aligned}$$

$$\therefore dp = \frac{dg}{v} \quad (16)$$

古典熱力学の理論と水(水蒸気)との関係(3/4)

14

気体の状態方程式より

$$pv = RT \quad \therefore v = \frac{RT}{p} \quad (17)$$

(17)式を(16)式に代入して

$$dg = vdp = \frac{RT}{p} dp = RT \frac{dp}{p} \quad (18)$$

この微分方程式を $g_1 = g(p_1)$, $g_2 = g(p_2)$ の条件で積分して

$$\int_{g_1}^{g_2} dg = RT \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}$$
$$\therefore g_2 - g_1 = RT \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (19)$$

これは、状態1から状態2へ p が変化した時の g の変化を表す

(19)式について、取り扱う気体が水蒸気の場合

$$dG_{H_2O} = g_2 - g_1$$

$$p_1 = P_{H_2O}^0$$

$$p_2 = P_{H_2O}$$

として、(19)式は次のように整理できる

$$dG_{H_2O} = RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0} \right) \quad (20)$$

dG_{H_2O} : Gibbsの自由エネルギーの変化
(相対部分モルGibbsの自由エネルギーの変化)

$P_{H_2O}^0$: 標準状態(25°C)における純水の蒸気圧(=3.168kPa)

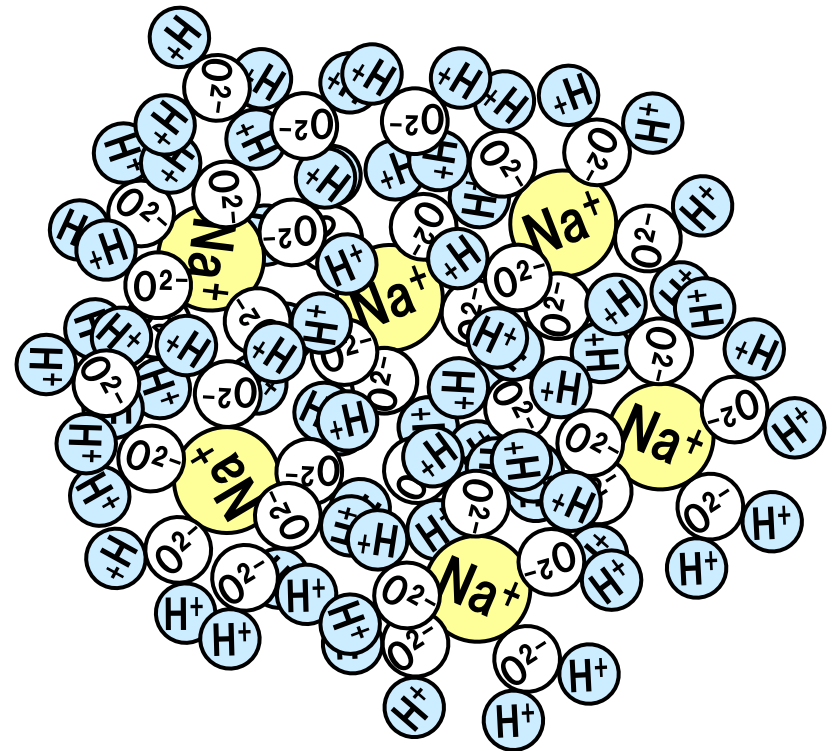
P_{H_2O} : 任意の温度における試料中の水の蒸気圧

また

$$a_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^0} \quad (21)$$

とする時、 $a_{\text{H}_2\text{O}}$ は水の活量(温度が同一の場合は相対湿度)と呼ばれ、水の自由度、即ち、活動度(activity)を表す(或いは水の束縛の程度を表す)

ベントナイトの膨潤は、層間が水和(hydration)することによって発現することから、層間水の挙動、即ち、層間水の活量を理解することが重要



イオン近傍の水(特に第1水和圏の水)は静電的影響により強い束縛を受ける(構造化する)

活量(温度が同じ: **相対湿度**): $a_{\text{H}_2\text{O}}$

$$a_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^0} \quad (21)$$

相対部分モル**Gibbs**の自由エネルギー: $dG_{\text{H}_2\text{O}}$

$$dG_{\text{H}_2\text{O}} = RT \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^0} \right) \quad (20)$$

蒸発の**エンタルピー**: $dH_v(s)$
(**Clausius-Clapeyron**の式)

$$\frac{d \ln P_{\text{H}_2\text{O}}}{d \left(\frac{1}{T} \right)} = - \frac{dH_v(s)}{R}$$

$$\therefore \frac{dP_{\text{H}_2\text{O}}}{dT} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} dH_v(s)}{RT^2} \quad (22)$$

相対部分モル**エンタルピー**: $dH_{\text{H}_2\text{O}}$

$$dH_{\text{H}_2\text{O}} = dH_v^0(\text{H}_2\text{O}) - dH_v(s) \quad (23)$$

相対部分モル**エントロピー**: $dS_{\text{H}_2\text{O}}$

$$dG_{\text{H}_2\text{O}} = dH_{\text{H}_2\text{O}} - T dS_{\text{H}_2\text{O}} \quad (24)$$

$$dS_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{dH_{\text{H}_2\text{O}} - dG_{\text{H}_2\text{O}}}{T} \quad (25)$$

$P_{\text{H}_2\text{O}}$: 試料中の水の蒸気圧

$P_{\text{H}_2\text{O}}^0$: 25°Cにおける純水の蒸気圧
(=3.168kPa)

R : ガス定数(8.314J/mol/K)

T : 絶対温度(273.15+t (°C), K)

$dH_v^0(\text{H}_2\text{O})$: 水の蒸発のエンタルピー

ベントナイトの膨潤応力に関する理論

17

ベントナイト相(β 相)に水溶液(α 相)が浸潤し
両相が平衡になった時の両相における水の
化学ポテンシャル

$$\mu^0(W, \alpha) = RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\alpha}{P_{H_2O}^0} \right) \dots\dots\dots (26)$$

$$\mu^0(W, \beta) = RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\beta}{P_{H_2O}^0} \right) + \int_{P_{ext}^0}^{P_{ext}} V_w dP \dots (27)$$

平衡状態では両相間の水の化学ポテンシャル(μ^0)は等しい

$$RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\beta}{P_{H_2O}^0} \right) + \int_{P_{ext}^0}^{P_{ext}} V_w dP = RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\alpha}{P_{H_2O}^0} \right)$$

$$\int_{P_{ext}^0}^{P_{ext}} V_w dP = RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\alpha}{P_{H_2O}^0} \right) - RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\beta}{P_{H_2O}^0} \right) \\ = dG_S - dG_{H_2O} \quad (28)$$

膨潤応力(dP_{exp})と両相間の水の自由エネルギー変化($dG = dG_S - dG_{H_2O}$)との関係

$$dP_{ext} = \frac{RT}{V_w} \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\alpha}{P_{H_2O}^0} \right) - \frac{RT}{V_w} \ln \left(\frac{P_{H_2O}^\beta}{P_{H_2O}^0} \right) \\ = \frac{dG_S - dG_{H_2O}}{V_w} \dots\dots\dots (29)$$

dP_{ext} : 膨潤応力(Pa)

V_w : 25°Cでの水のモル体積
(18.0686cm³/mol)

$P_{H_2O}^\alpha$: 25°Cでの α 相における水の蒸気圧(Pa)

$P_{H_2O}^\beta$: 25°Cでの β 相における水の蒸気圧(Pa)

$P_{H_2O}^0$: 25°Cでの純水の蒸気圧(3.168kPa)

R : ガス定数(8.314J/mol/K)

T : 絶対温度(273.15 + t (°C), K)

様々な水質条件での水の活量と自由エネルギー

18

電解質溶液中の水の活量(a_s)とGibbsの自由エネルギー(dG_s)の計算(25°C)

$$a_s = \exp\left(-\frac{m\gamma W}{1000} \phi\right) = \exp\left(-\frac{M\gamma W}{1000d d_0} \phi\right) \dots\dots\dots (30)$$

$$dG_s = RT \ln(a_s) \dots\dots\dots (31)$$

a_s : 電解質溶液中の水の活量

dG_s : 電解質溶液中の水の相対部分モル
Gibbsの自由エネルギー(J/mol)

m : 電解質の重量モル濃度(mol/kg)

γ : 1molの電解質より生じるイオンの化学量
論的な全モル数(1分子が解離して生ず
るイオン数)

W : 水の分子量($H_2O=18.01528$)

ϕ : 浸透係数(Osmotic coefficient)

M : 電解質の体積モル濃度(mol/L)

d : 25°Cにおける溶液の比重

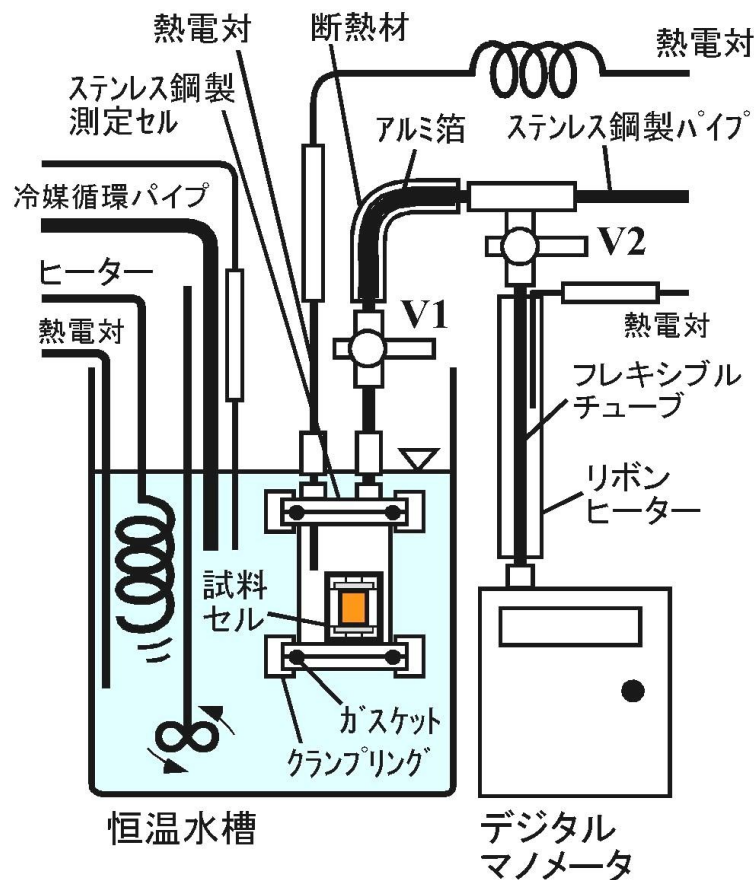
d_0 : 25°Cにおける水の比重(=0.997044)

NaNO₃及びNaCl中の水の a_s と dG_s の計算例

Electrolyte & concentration (m: mol/kg)	Osmotic coefficient ϕ	Activity a_s	dG_s (kJ/mol)
0.207m-NaCl	0.929	0.9931	-0.01718
0.5m-NaCl	0.921	0.9935	-0.04113
0.64m-NaCl	0.925	0.9789	-0.05287
0.8m-NaCl	0.930	0.9735	-0.06645
1.7m-NaCl	0.936	0.9424	-0.14713
3.4m-NaCl	1.076	0.8765	-0.32674
0.1m-NaNO ₃	0.921	0.9967	-0.00823
0.5m-NaNO ₃	0.873	0.9844	-0.03899
1.0m-NaNO ₃	0.851	0.9698	-0.07601
2.0m-NaNO ₃	0.826	0.9422	-0.1475
3.0m-NaNO ₃	0.812	0.9160	-0.2176
4.0m-NaNO ₃	0.797	0.8915	-0.2847
5.0m-NaNO ₃	0.793	0.8669	-0.3541
6.0m-NaNO ₃	0.788	0.8434	-0.4223

蒸気圧法による水の活量の測定

蒸気圧測定装置の例



測定の基本手順

- ① Naモンモリロナイトの調製(精製)
- ② 試料セルへの試料(モンモリロナイト)の充填・含水
- ③ 試料セルの解体・試料取出し・再組立
- ④ 測定セルへの封入・恒温水槽中で温度制御・真空引き
- ⑤ 蒸気圧測定(3～5℃間隔、範囲15～40℃)
- ⑥ 測定セルからの試料セルの取出し・含水重量測定
- ⑦ ④～⑥を各含水比に対して繰り返す
- ⑧ 試料セルの解体・試料取出し
- ⑨ 105～110℃で乾燥・乾燥重量測定

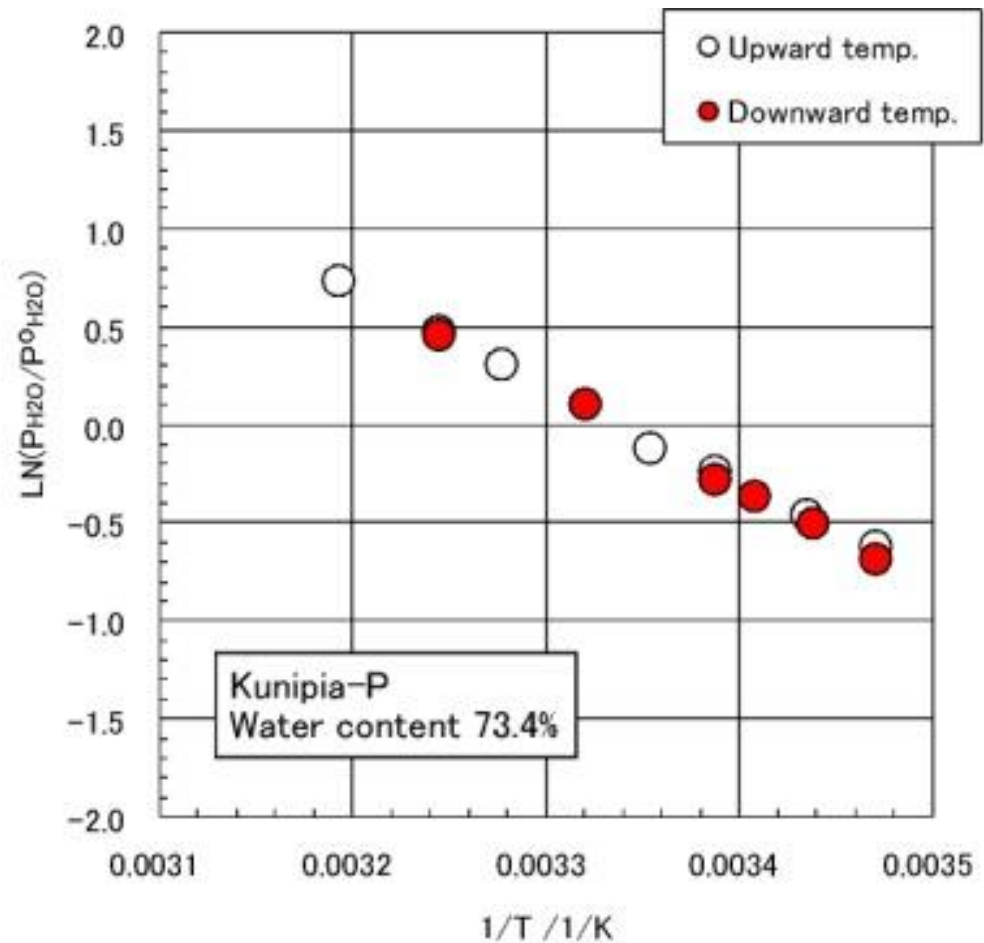
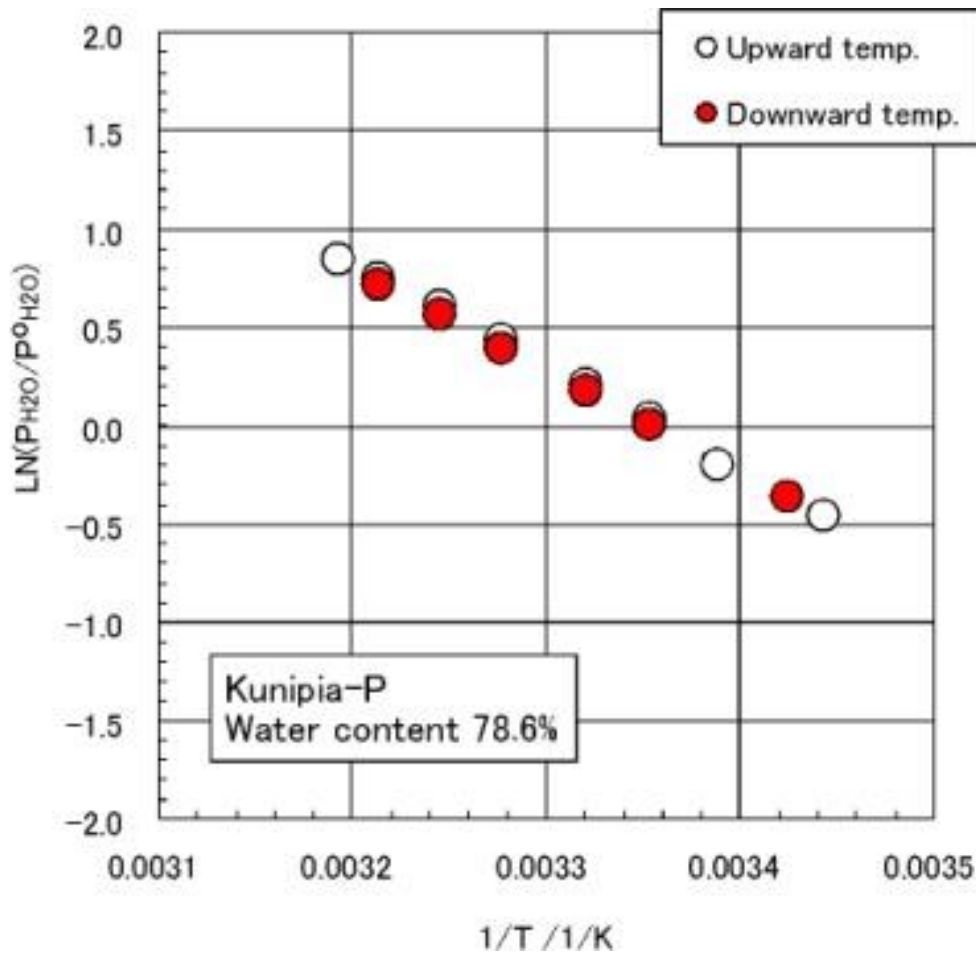
水の活量とは？

自由な水を基準として、どれほど束縛されたかを表現する指標(自由水は活量が1)

モンモリロナイト中の水の活量の側定例

20

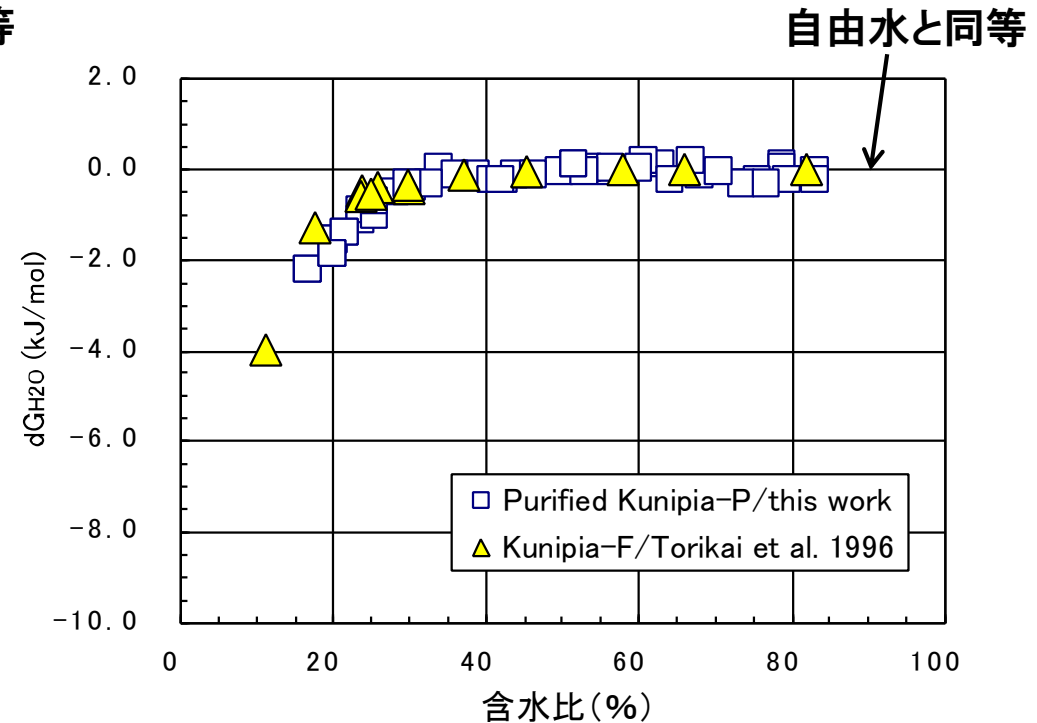
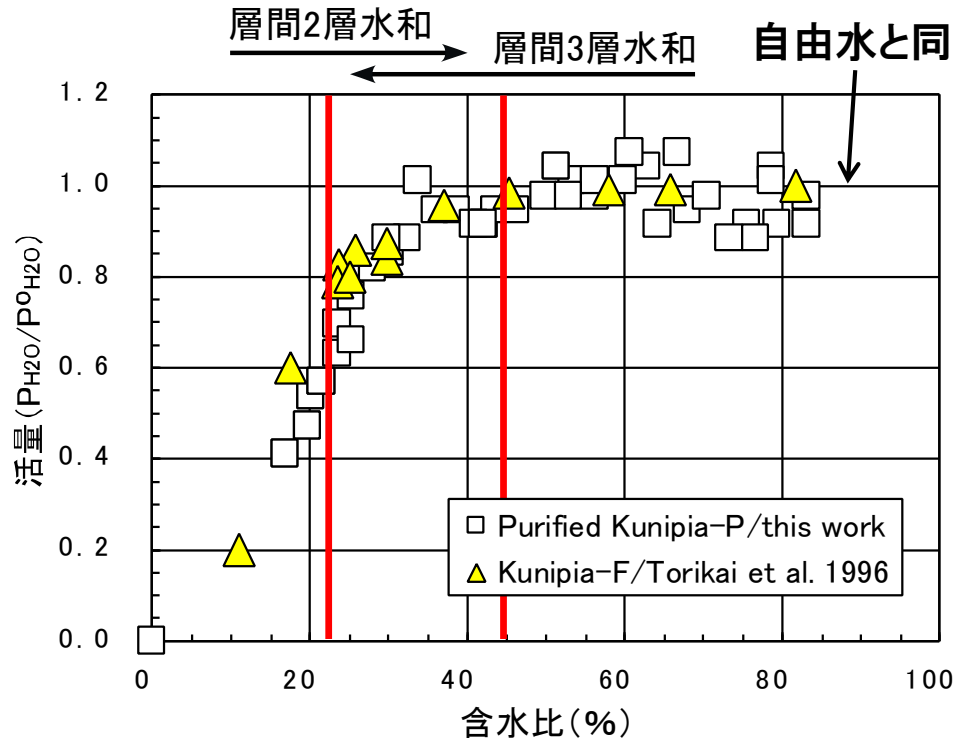
1/Tに対する $P_{H_2O}/P_{H_2O}^0$ (= 活量)の測定結果の例



P_{H_2O} : 試料中の水の蒸気圧
 $P_{H_2O}^0$: 25°Cにおける純水の蒸気圧
 T : 絶対温度

モンモリロナイト中の水の熱力学パラメータ

21



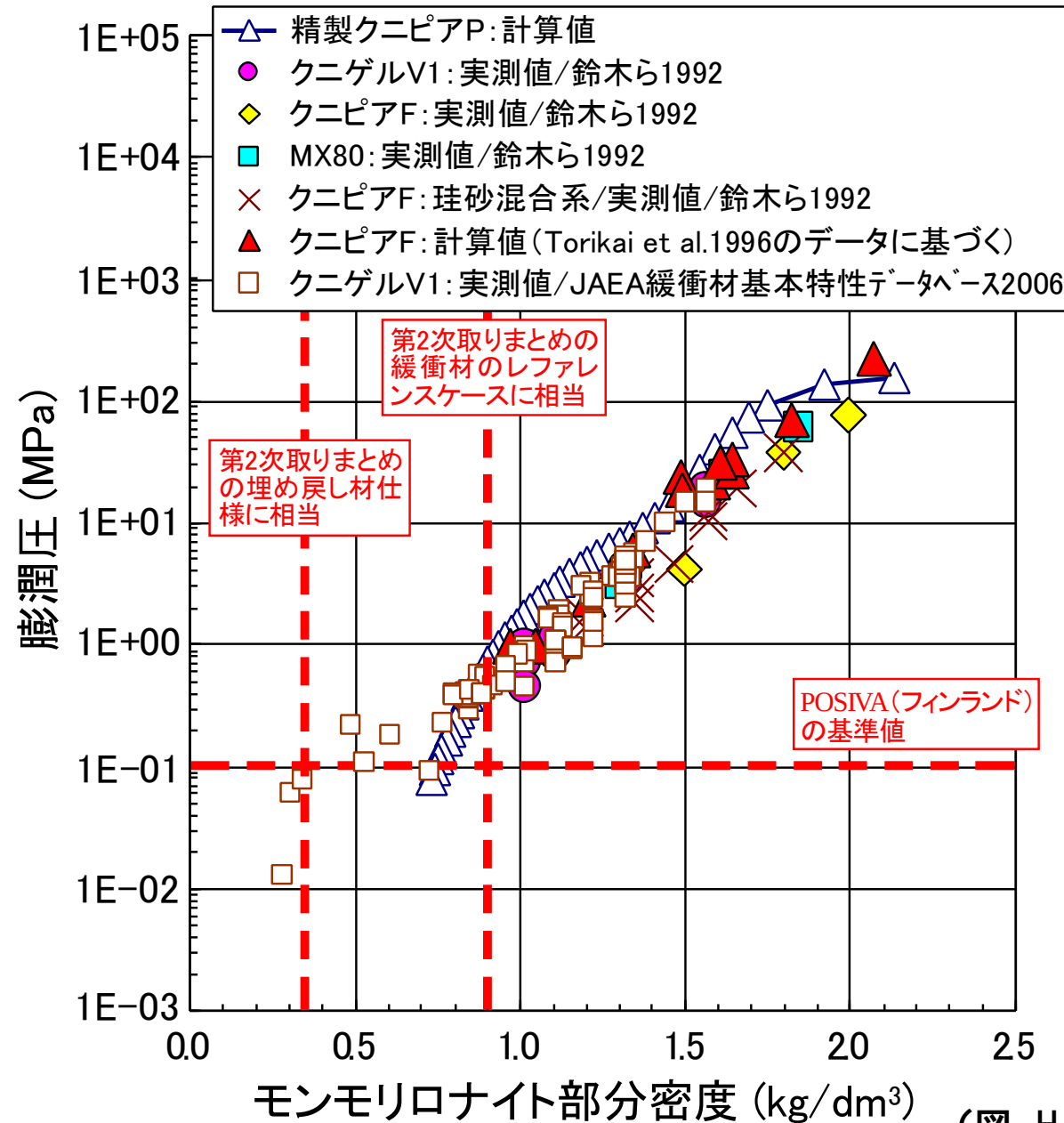
含水比に対する水の活量(左図)及び dG_{H_2O} (Gibbsの自由エネルギー:右図)
(□: This work, △: Torikai et al. 1996)

- * モンモリロナイトの比表面積を $800\text{m}^2/\text{g}$ として計算
 - * 赤線(左図中)はモンモリロナイト表面から水分子1層(含水比22.4%)と2層(含水比44.8%)に相当
 - * 矢印の範囲はXRD(X線回折)測定に基づく層間水和数
- モンモリロナイト表面から影響を受ける水は水分子2層以内
- 影響を受ける水は全て層間水

(図 H. Sato: Physics & Chemistry of the Earth (2008))

ベントナイトの膨潤応力の解析例(純水系)

22



- 各種ベントナイトの膨潤応力の計算値と実測値は良く一致
- 相対部分モルエンタルピー(dH_{H_2O})とエントロピー(dS_{H_2O})を用いれば、温度変化に対する計算も可能
→ 熱力学的に計算可能

モンモリロナイト含有率

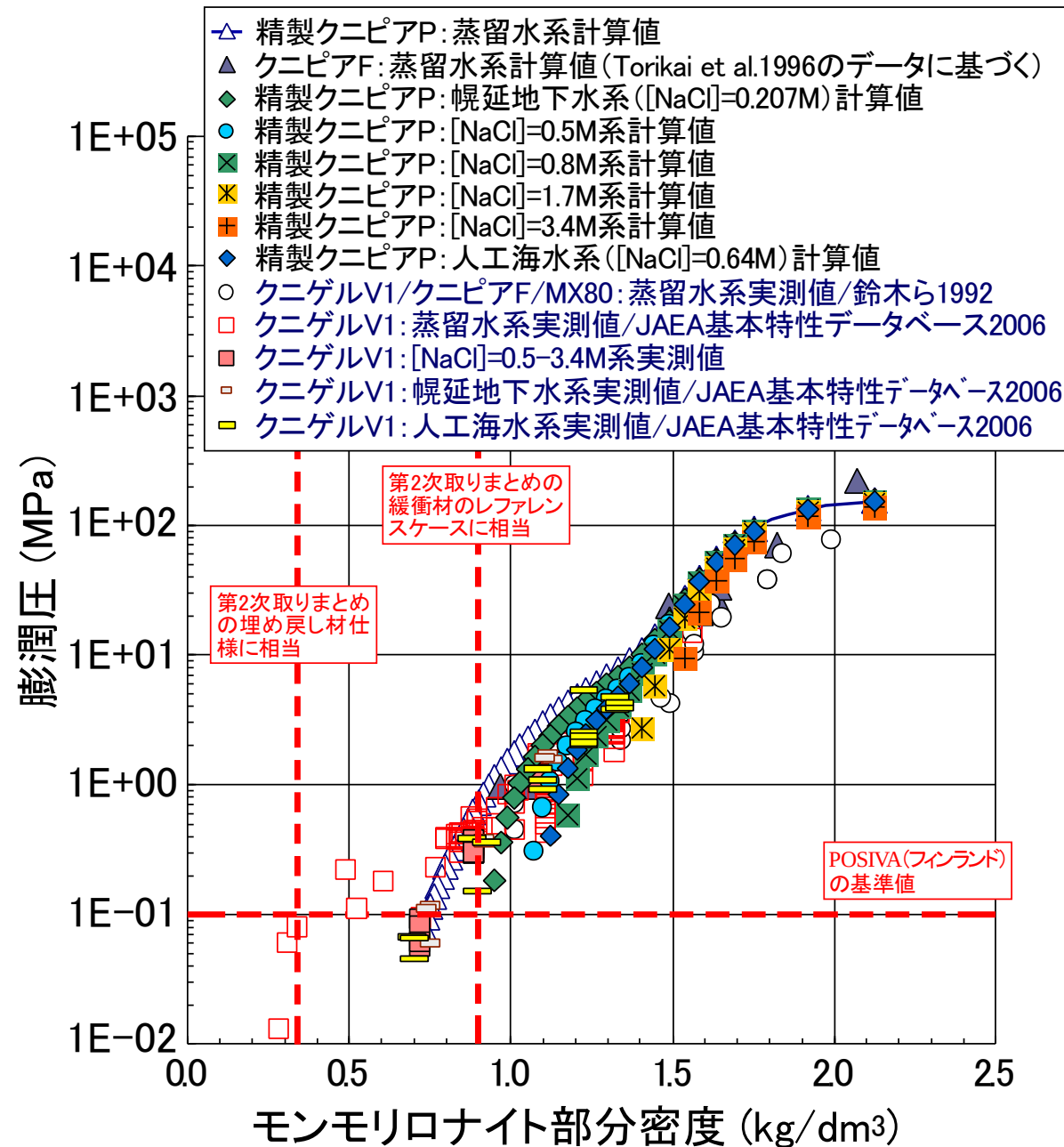
クニゲルV1: 48wt%

クニピアF: 99wt%

MX-80: 75wt%

ベントナイトの膨潤応力の解析例(塩水系)

23



- 塩濃度の増加に伴い膨潤応力(計算値)は低下するものの、密度の高い領域では殆ど差が無い
 - 塩濃度増加に伴う低下は既存の知見とも一致
 - 密度の高い領域で差が無いのは層間水の dG_{H_2O} が極めて低いため
- 密度 0.7Mg/m^3 以上の領域で塩濃度の影響(実測値)はバラついているが、実測値と計算値はほぼ同じ範囲
 - 可溶性鉱物の溶解によるイオン強度増加の効果を含むため(塩濃度の影響はこの範囲内と推定)

溶液条件(実測値・計算値)

[NaCl]=0 (DW), 0.5, 0.8, 1.7, 3.4M
 幌延地下水([NaCl]=0.207M)
 人工海水([NaCl]=0.64M)

まとめ

- ベントナイトの膨潤応力は、熱力学理論に基づいて、様々な条件(水質、密度、モンモリロナイト含有率など)に対して解析することができる
- ✓ ベントナイトの膨潤は、主成分であるモンモリロナイト層間中の陽イオンが水和することで発現することから、層間水と外部水の自由エネルギーの差に基づいて膨潤エネルギーとして解析できる
- ✓ 自由エネルギーと水の活量との関係から、層間水の活量と外部水の活量を知ること、自由エネルギーの差を解析し、膨潤応力を解析できる
- ✓ この方法に基づいて、これまでに、Na型モンモリロナイトについてモデル化し、純水系、塩水系、NaOH系、KOH系、 Ca(OH)_2 系、 NaNO_3 系、NaOH-KOH- Ca(OH)_2 系、NaOH-KOH- Ca(OH)_2 - NaNO_3 系に対して膨潤応力を解析

今後の課題

- 現状、層間水の活量に関するデータは限定的であることから、今後、これらのデータを拡充すると共に、温度の影響についても検討する

ご清聴ありがとうございました

1. 電気事業連合会：原子力・エネルギー図面集2016 (2016) “<http://www.fepc.or.jp/>”.
2. 日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門HP: “<http://www.jaea.go.jp/04/tisou/toppage/top.html>”.
3. Michael H. Bradbury & Bart Baeyens: Porewater Chemistry in Compacted Re-Saturated MX-80 Bentonite: Physico-chemical Characterisation and Geochemical Modelling, Nuclear Energy and Safety Research Department, Waste Management Laboratory, PSI Bericht Nr. 02-10 (2002).
4. Yuji Torikai, Seichi Sato, Hiroshi Ohashi: Thermodynamic Properties of Water in Compacted Sodium Montmorillonite, Nuclear Technology 115, pp.73-80 (1996).
5. H. Sato: Thermodynamic Understanding on Swelling Pressure of Bentonite Buffer, Proc. of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE15), ICONE15-10207, 7 pages (in pdf format)(2007).
6. H. Sato: Thermodynamic Model on Swelling of Bentonite Buffer and Backfill Materials, Physics and Chemistry of the Earth, Vol.33, pp.S538-S543 (2008).

7. H. Sato: A Thermodynamic Approach on Effect of Salinity on Swelling Pressure of Bentonite, Proc. of the 4th Japan-Korea Joint Workshop on Radioactive Waste Disposal 2008: Perspective of Science and Engineering, pp.1-17 (2008).
8. H. Sato: A Thermodynamic Approach on the Effect of Salt Concentration on Swelling Pressure of Water-saturated Bentonite, Materials Research Society (MRS) Symp. Proc. Vol.1124, 1124-Q07-11, 6 pages (2009).
9. H. Sato: Thermodynamic Data of Water on Smectite Surface and Those Applications to Swelling Pressure, Workshop Proc. of Mobile Fission and Activation Products in Nuclear Waste Disposal, Nuclear Science 2009, OECD/NEA, pp.173-184 (2009).
10. H. Sato and M. Fukazawa: A Thermodynamic Analysis on the Swelling Stress of Na-Bentonite under Various Solution Conditions, MRS Advances, Vol.1, Issue 61 (Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIX), pp.4019-4025 (2016).
11. 日本化学会編: 化学便覧基礎編Ⅱ 改定2版、丸善、東京(1975).

- **高度システム安全学研究室**(Advanced System Safety Laboratory)で行っている研究内容・メンバー等の詳細は、以下に示すURLを参照して下さい
- 各研究室のURLは、**システム工学コース**(Systems Engineering Course)のHPからもアクセスすることが出来ます

コースURL: <https://www.okayama-u.ac.jp/user/syseng/laboratory/index.html>

研究室URL: forest.sys.okayama-u.ac.jp/nishilab/