

# 材料境界部の物理的・化学的観察法の開発と模擬処分場供試体境界への応用

人 見 尚 鶴 山 雅 夫  
(本社技術本部)

## Development of the Physical and Chemical Observation Methods and Application for the Samples in the Simulated High-Level Nuclear Waste Disposals

Takashi Hitomi Masao Uyama

### Abstract

A high-level nuclear waste disposal is planned to be constructed at deep underground (approximately 500 m). It comprises a multiple barrier system made of a waste canister, sealing clay, the supporting concrete and plug concrete, and the surrounding host rock. Specifically, concrete contains soluble alkali ions, and their contact with the clay and host rock is a concern. Over a long term, the interaction between the alkali ions and clay increases the degradation of the clay, which loses its function of sealing. To observe the interaction area, the authors develop a micro-scale observing method combining high-resolution X-ray computer tomography and local X-ray diffraction. Simultaneously, a full-scale engineering barrier experiment is performed at the Grimsel test site in Switzerland. The authors apply the observing method to an interface mortar used as a plug and bentonite used as sealings. Accordingly, the visualized boundary area exhibit the porous and fusion of materials.

### 概 要

高レベル放射性廃棄物処分場は500m以深の大深度地下に建設が計画され、廃棄体は格納容器、止水用粘土、支保工およびプラグからなる多重バリアシステムから構成されている。長期間の間に地下水の作用によりコンクリートからは高アルカリ溶液が発生し、粘土や周辺母岩に影響を及ぼすことが懸念されている。このような異種材料の接合部の観察のため、筆者らは物理的・化学的な相互作用の観察を可能にする高分解能X線CTとX線回折の連成分析法を開発した。一方、スイスのグリムゼル試験場では高レベル放射性廃棄物処分場の実物大模擬試験(FEBEX)が実施され、試験場は2015年に解体(FEBEX-DP)された。筆者らは連成分析法を、解体時に採取したプラグ用モルタルと止水用ベントナイトの異種材料の境界の観察に適用した。内部の可視化の結果では境界部分において粗な領域が存在し、材料の分析より互いの材料が混合状態にあることを示す結果を得た。

### 1. はじめに

大深度地下に建設が予定されている高レベル放射性廃棄物処分場では、放射性元素の生活圏到達を抑制するために、天然と人工の多重バリアシステムの構成が検討<sup>1)</sup>されている。放射性元素は地下水を介して移行することが想定される。バリアは天然バリアと人工バリアから構成され、天然バリアは坑道の周囲の母岩である。人口バリアは、コンクリートで補強した坑道と、その内部の止水材である粘土鉱物であるベントナイト、その中央の円筒形の鋼製容器に格納したガラス固化廃棄体からなる。さらに、坑道の端部にコンクリート製プラグが設置される。廃棄体の設置期間は、数万年に及ぶ可能性がある。設置期間中の各バリアの性能低下により、地下水の進入するケースはその一つとして想定する必要がある。

スイスのグリムゼル試験場では、高レベル放射性廃棄物の実物大試験(Full Engineered Barrier Experiment : FEBEX)が国際プロジェクト<sup>2)</sup>として実施された。1997年に開始したFEBEXは二期の試験(FEBEX I, FEBEX II)を行い、およそ15年間で完了し、解体となった。FEBEX

プロジェクトの最終段階として試験場の解体作業をFEBEX-DP<sup>3)</sup>(Dismantling Project)と称し、大林組は人工バリア構成材料の間の接合面の詳細分析の担当として参加した。人工バリア材料と周辺の母岩や止水用粘土とは、地下水の侵入により水を媒介として互いに影響を及ぼすことが懸念される。特に、コンクリートからはカルシウムイオンなどアルカリ金属イオンの溶出が予想されている。アルカリ性の高い溶液に触れた場合の花崗岩の変質挙動に関しては、Savageらが検討を行い、粘土鉱物への変化の可能性<sup>4)</sup>を示している。同様の検討をOwadaら<sup>5)</sup>も行った。コンクリートに接するベントナイトに関しては、半井が検討を行っている<sup>6)</sup>。

コンクリートとバリア材の相互作用は長期経過後に顕在化すると考えられる。供試体内部の幾何学的な変化にはX線CT(Computed Tomography)が、供試体の構成鉱物の変化には、結晶を検出できるX線回折が有効と考えられる。FEBEXのような実験期間では、相互作用領域もごく狭い範囲と考えられる。このため、詳細な観察には、これらの装置も高分解能であることが必要となる。さらにX線回折では、数g程度に粉碎した試料が必要で有姿の

ままの観察は困難である。大林組は、大型放射光施設 SPring-8 において、高輝度光科学研究センターと北海道大学と共同で、高分解能CT (Computed Tomography)と非破壊状態で内部の観察が可能な微小領域X線回折 (XRD : X-Ray Diffraction)を組み合わせた独自技術である非破壊CT-XRD連成法を開発した<sup>7)</sup>。

本報告では、FEBEX-DPプロジェクトにおいて、モルタルとベントナイトの境界領域の供試体に注目し、非破壊CT-XRD連成法を用いた観察を実施し、境界領域での相互作用の評価を行った。

## 2. 試験の概要

### 2.1 非破壊CT-XRD連成法

#### 2.1.1 非破壊CT-XRD連成法の概要

非破壊CT-XRD連成法は、試料に対してX線CT観察を行い、内部の構造や変質状態を把握したうえでXRD(X線回折)観察位置を決め、XRD観察を行う。Fig. 1に観察の流れを示す。高輝度光科学研究センターに設置の放射光施設SPring-8の実験施設BL28B2では、特定のエネルギーのX線(単色X線)ではなく、さまざまなエネルギーが含まれる白色X線を入射光として利用できる。Fig. 2に示すように、X線CTの場合、白色X線を試料全体に照射し、下流に設置のSi単結晶のX線フィルターによって特定のエネルギーのX線のみを抽出し、CCDカメラで捕捉し、透過像を撮影する。

X線CT撮影の結果、透過像群が生成される。これらを入力し、再構成と呼ばれる数値演算を行うことで断面像が得られる。本報告では再構成ソフトに、SPring-8で作製されたプログラムを用いた。また、断面図群を用いて3次元画像への加工には、中野らの作製した画像処理ソフトウェアである 'Slice'<sup>8)</sup>を用いた。

2.1.2 エネルギー分散型X線回折 X線回折では、Fig. 3に示すように市販のX線回折装置と異なり、試料にX線の様々な角度の観察は行わず、図中の2θで示すように回折角は固定である。すなわち、通常のX線回折が角度をパラメーターとした観察法で角度分散型と呼称される。本法では白色X線を用い、エネルギーをパラメーターとしているためエネルギー分散型と呼称される。本法ではX線の強度をエネルギーごとのX線回折プロファイルとして観測する。本測定で得られるエネルギー分散型のX線回折プロファイルは、式(1)に示すBraggの反射条件と式(2)に示すX線のエネルギーと波長の関係を用いて、市販のX線回折装置で得られる角度型のX線回折プロファイルと等価であることが示される。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

ここで、θは回折角、nは自然数、dは結晶の格子間距離、λはX線の波長、Eは照射エネルギー、hはプランク定数、cは光速を表す。結晶のデータを取り込むため、観察の間に、ステージを水平方向に揺動させた。

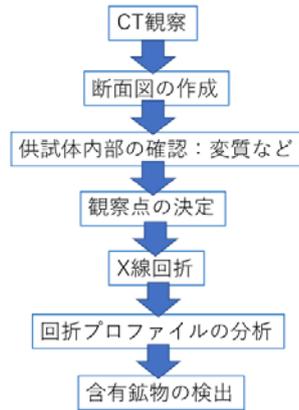


Fig. 1 観察の流れ  
Flow of Observation

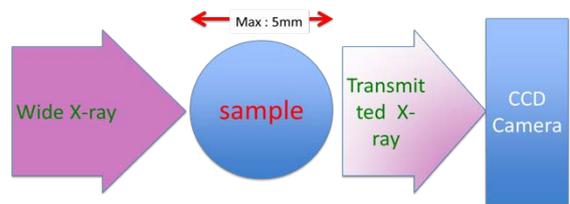


Fig. 2 X線CT観察の概要  
Conceptual Image of X-ray CT

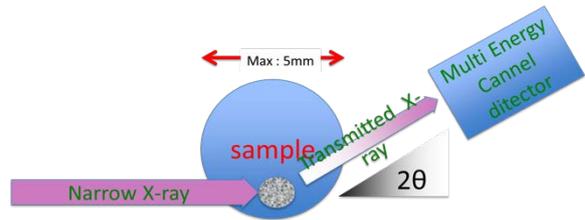


Fig. 3 X線回折測定の概要  
Conceptual Image of X-ray Diffraction

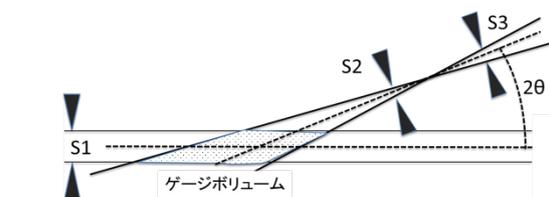


Fig. 4 ゲージボリュームとスリットとの関係  
Relations of Gage Volume and Slits

2.1.3 エネルギー分散型X線回折 実際の観察領域は図中のゲージボリュームと呼ばれる領域で、さらにゲージボリュームの中央で試料を回転させた。このため、実際の観察領域はおおよそ0.1 mmの円盤状の領域となる。スリットの配置と観察領域となるゲージボリュームの概要をFig. 4に示す。入射X線は、上流にあるS1スリットで、幅0.15 mm、高さ0.05 mmの横長のマイクロビームとした。回折角は20°とした。下流側の2つのスリットにより回折角方向のX線を取り込んだ。

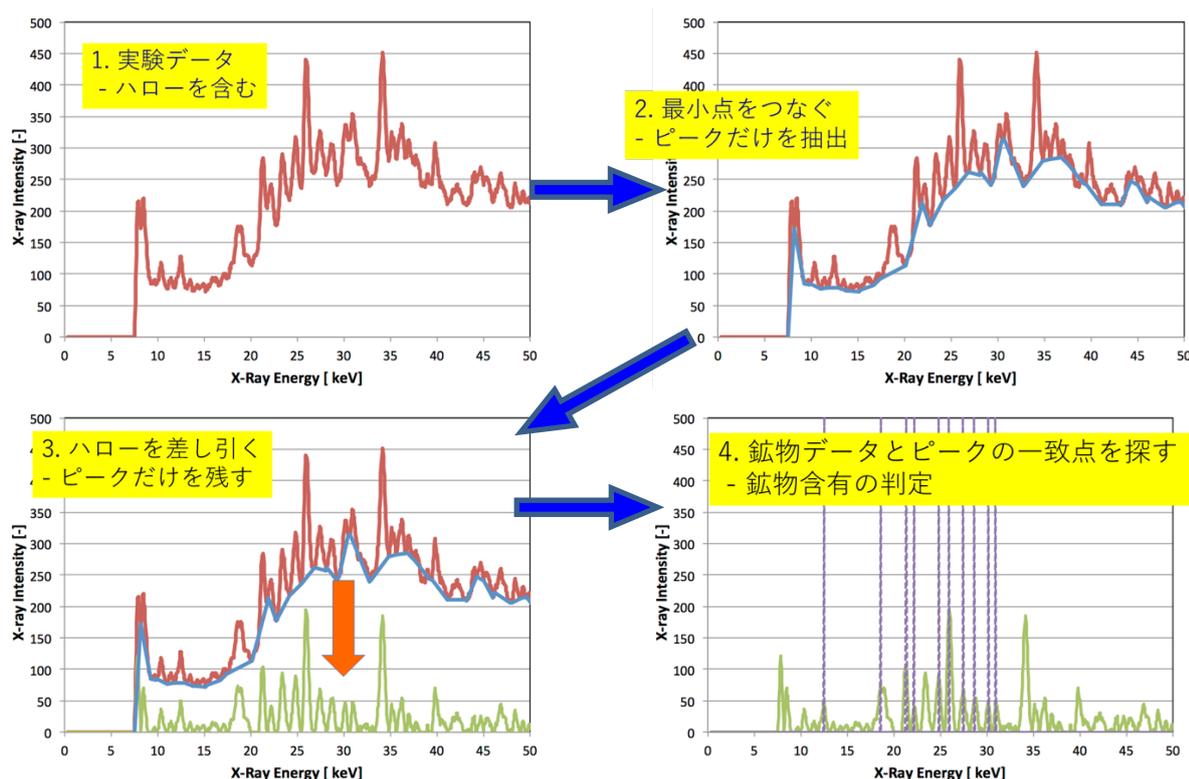


Fig. 5 回折プロファイルの処理の流れ  
Flow of Processing of XRD Profile

2.1.3 X線回折のデータ処理 X線回折の測定結果はエネルギーと強度の関係として得られ、結晶に応じて対応するエネルギーを中央にピークが形成される。また非晶質な物質が含まれる場合は、ハローと呼ばれるピークの明瞭でない広がりを持ったデータが混入し、全体の強度を押し上げる。本報では、自作のソフトウェアを用いてハローの除去とノイズと思われる微小なピークから結晶に起因するピークの抽出を行い、データベースより求めた鉱物のピークとの比較を行った。抽出にあたっては、試行の結果、最大ピーク強度の10%以下のデータは除外した。Fig. 5に回折データの処理の流れを示す。

実験データと比較を行う鉱物の結晶構造データは、インターネット上で公開されているフリーのデータベースであるCrystallography Open Database<sup>9)</sup>より入手し、SPRing-8で配布のシミュレーションソフトで結晶データより対象とする鉱物のエネルギーをパラメーターとしたX線回折プロファイルを作成した。

## 2.2 FEBEXプロジェクトの概要

スイスの放射性廃棄物処分実施主体であるNAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle: 放射性廃棄物管理共同組合)では、グリムゼル試験場において高レベル放射性廃棄物の実物大試験(FEBEX)を実施した<sup>2)</sup>。グリムゼル試験場は、母岩を結晶質岩とする。日本国内でも、母岩を結晶質岩とする地域は多く存在し、本技術は日本への転用が可能になると考えられる。

FEBEXの運営は、スペインのCiemat(Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas: エネルギー・環境・科学技術研究センター)およびスペインのAitemin (Asociación para la Investigación y el Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales: 天然資源研究開発協会)が主体となった。さらにスウェーデンなどEU各国や、韓国、アメリカなどが試験に参加した。スイスは試験場の所有者および共同運営者として参加した。

FEBEXの試験開始は1997年で、母岩に建設した坑道にブロック化した圧密ベントナイトを同心円状に設置し、中央の中空部分に模擬廃棄体として鋼製円筒容器が2体設置された。実験施設の終端にはコンクリート製のプラグが設置され、周辺の母岩に直接打設され、内部はベントナイトに接していた。鋼製円筒容器は、廃棄体からの発熱を模擬し、内部にヒーターを設置して実験期間中は100℃に保たれていた。試験開始から10年後の2007年に、プラグを解体し、ベントナイトの一部と手前側の鋼製円筒容器の半分までを取り出し、これらの分析を行った(FEBEX I)。残りの部分に対しては、ショットクリートを用いたモルタルによるプラグを新たに設置し2015年まで試験を継続した(FEBEX II)。Fig. 6に最終解体前の配置図を示す。最終的に、FEBEXは2015年4月に加熱を終了し、8月にすべての解体を完了し、原位置での試験を終了した。

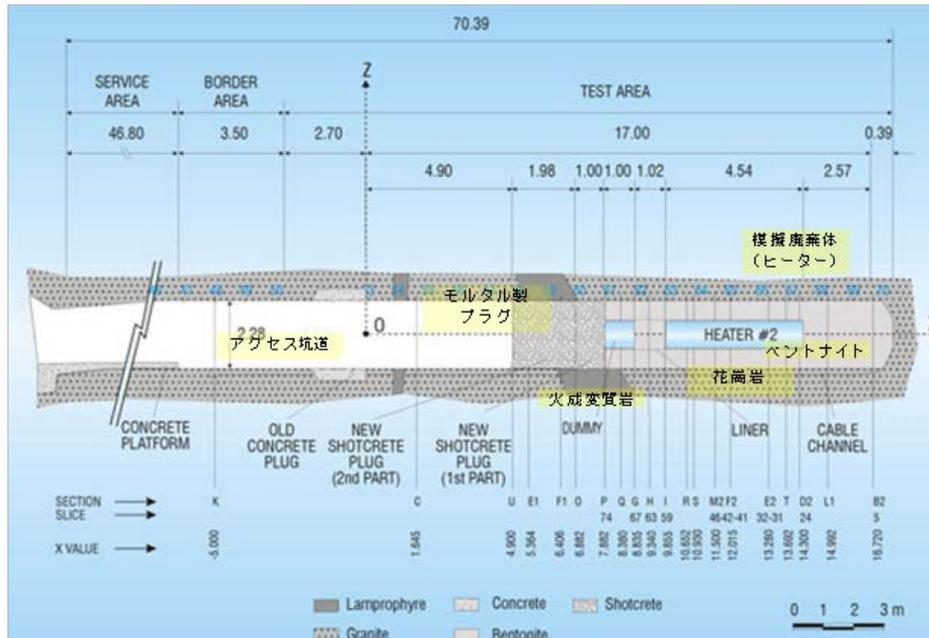


Fig. 6 FEBEXの概要<sup>3)</sup> (日本語表記は筆者加筆)  
Conceptual Image of FEBEX

### 2.3 異種材料接合部の相互作用の観察

FEBEXでは、長期に渡って発熱する模擬廃棄体と周辺岩盤からの地下水の作用という環境条件の下、さまざまな分析が、各機関の分担で実施されている。しかし、異種材料接合部における相互作用の検討は取り上げられることが少ない。このため、FEBEXプロジェクトにおける大林組の分担としてモルタルプラグとベントナイト境界およびベントナイトと花崗岩材の境界についての詳細観察を提案し実施<sup>7)</sup>した。供試体採取位置を Fig. 7に示す。

本報告では、異種材料接合部の例としてモルタルとベントナイトの境界について注目し、境界での相互作用の有無についての観察を行った。

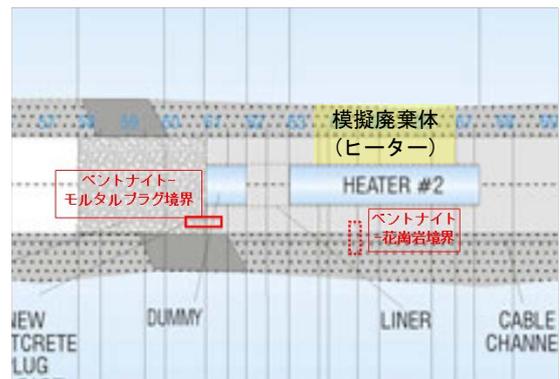


Fig. 7 供試体の採取位置<sup>3)</sup> (日本語表記は筆者加筆)  
Location of Test Piece Sampling

## 3. モルタルとベントナイトの接合部の観察

### 3.1 試験方法

**3.1.1 供試体の仕様と原位置からの採取** プラグ用モルタルの配合をTable 1に、使用材料の一覧をTable 2に示す。モルタルやベントナイトなどの接合部分は、Bern大学のMader教授の開発によるコアボーリングの実施前に小径コア孔をボーリングの周上に複数個削孔し、そこにレジンを注入し、接合部を補強して採取する方法<sup>10)</sup>がとられた。採取された供試体は、Ciematによって送付された。供試体は遮光の真空バッグに封入され、空気に触れない状態となっていた。Photo 1に取り出した供試体の外観を示す。

**3.1.2 供試体の加工方法** 供試体は、レジンで周囲を補強してあるものの、特にベントナイト部分は強度が低く、乾燥が進むと崩壊する懸念があった。このため、

Photo 2 に示すように、乾式切断とエポキシによる表面保護を繰り返し、2cm×1cm×1cm程度の小片に加工した。小片の中央には、ベントナイトとモルタルとの境界が現れている。小片をエポキシで補強することなく、ワイヤーカッターで3.5mm×3.5mm×10mmの角柱状に加工し、観察用の供試体とした。

**3.1.3 CT-XRD連成法観察の諸条件** 本測定では、CTの際の捕捉X線エネルギーを25 keV(キロ電子ボルト)とした。モルタルはケイ素やカルシウムおよびアルミニウムを主な構成元素として含有する。25 keVのX線は、これらの元素に吸収される度合に大きな違いがあるため、可視化すると材料の違いが明確になり、構成材の空間的な分布を視認できる。

Table 1 モルタルの配合  
Mix proportion of Concrete

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						SP (×C.%)	CC (×C.%)	Acc (×C.%)
	W	C	S	SF	FS	PP			
40	172	430	1700	30	50	0.8	1.5	1.0	6.0

Table 2 使用材料の一覧  
List of Materials of Mortar

材料	略号	銘柄	備考
セメント	C	CEM II A-L 32.5 R	普通ポルトランドセメント相当
細骨材	S	(特に記載なし)	0-8mm通過分
シリカフェューム	SF	Nanosilica MEYCO MS660	スラリー, 現在MasterRoc MS660 (BASF)
鋼繊維	FS	Dramix ZP306	長さ30mm, 幅0.62mm (Bekaert)
有機繊維	PP	(特に記載なし)	ポリプロピレン製と推定
減水剤	SP	GRENIUM T803	ポリカルボン酸系, 現在MasterGleniumSKY8403
養生剤	CC	MEYCO TCC735	表面養生剤, 現在MasterRocTCC736
急結剤	Acc	MEYCO SA160	吹付用急結剤, 現在MasterRocSA736



Photo 1 採取後の供試体  
Sampled Test Piece

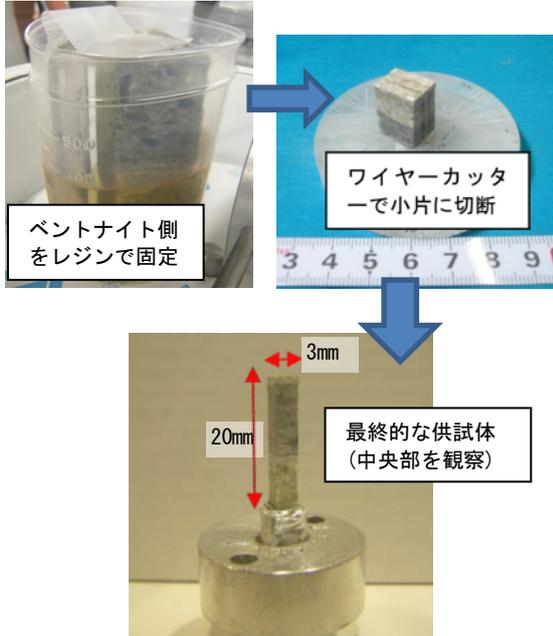


Photo 2 供試体の加工過程  
Processing of Test Piece

Table 3 X線CTおよびX線回折の測定条件  
Observation Conditions of X-ray CT and Diffraction

CT	投影数	1500枚
	露光時間	150ms(ミリ秒)
回折	画素数	768ピクセル(縦横共)
	画素長	7.14μm(水平), 5.08μm(高さ)
回折	全体の視野	5.48mm(水平), 3.90mm(高さ)
	ビームサイズ	0.15mm(水平), 0.05mm(高さ)
回折	露光時間	300s

Table 4 比較対象とした鉱物の一覧  
List of Compared Minerals

Quartz	石英
Portlandite	水酸化カルシウム
Ettringite	エトリンガイト
Calcite	炭酸カルシウム
Vaterite	炭酸カルシウム
Biotite	黒雲母
Albite	曹長石
Anorthite	灰長石
Clinocllore	緑泥石
Brucite	ブルーサイト
Brownmillelite	ブラウンミラライト
Montmorillonite	モンモリロナイト
Gypsum	石膏
Orthoclase	正長石
Larnite	ビーライト
Illite	イライト
Muscovite	白雲母

X線回折では、観察時間は5分とし、データは積分したものを用了。Table 3にこれら測定条件を示す。加えて、事前に周辺の母岩から30gを採取し、市販の装置を用いたX線回折の結果より曹長石、緑泥石、白雲母などの鉱物が含有されることが分かった。これらを加えた比較対象とした結晶の一覧をTable 4に示す。

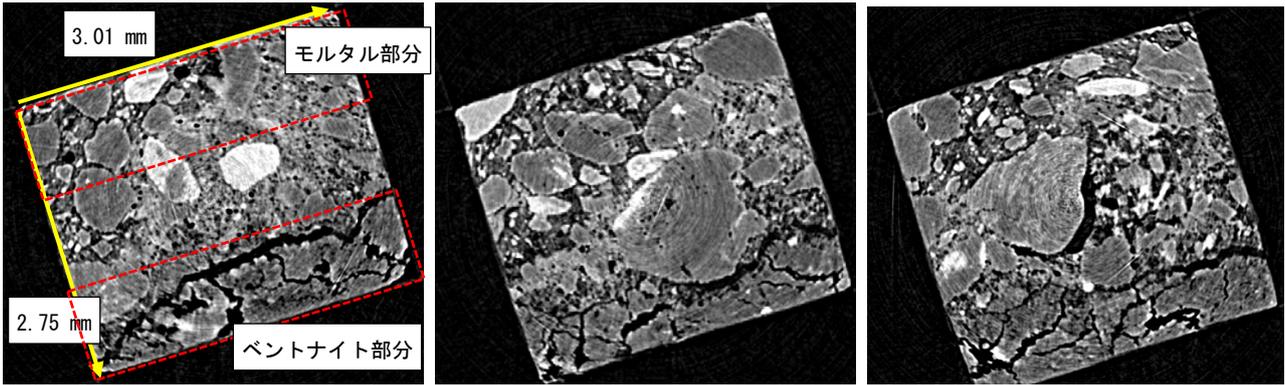


Fig. 8 断面図の一部(左から、上端から1.52mm(300レイヤー), 2.54mm(500レイヤー), 3.57mm(700レイヤー))  
Cross Sections (1.52mm from top (300 layer), 2.54mm (500 layer), 3.57mm (700 layer))

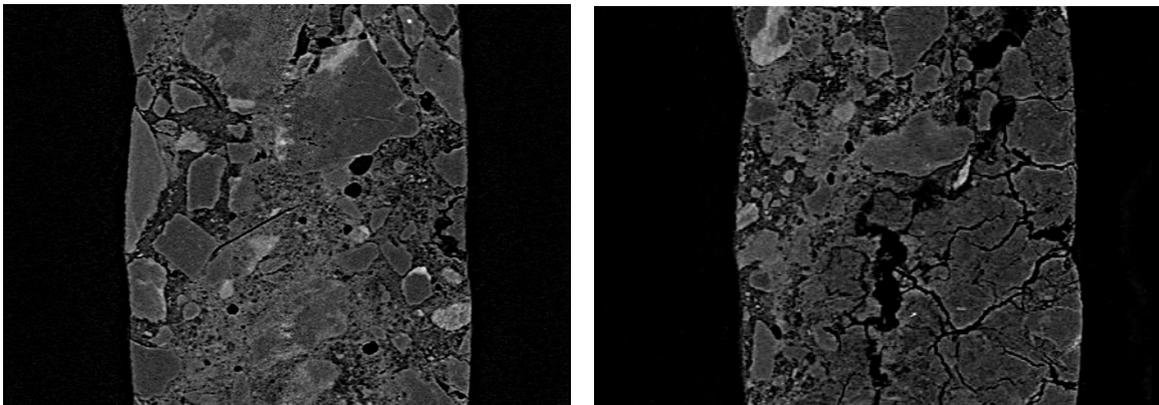


Fig. 9 縦断面 (左: 中央部, 右: ベントナイト側)  
Longitudinal Cross Section (Left: Center, Right: Bentonite)

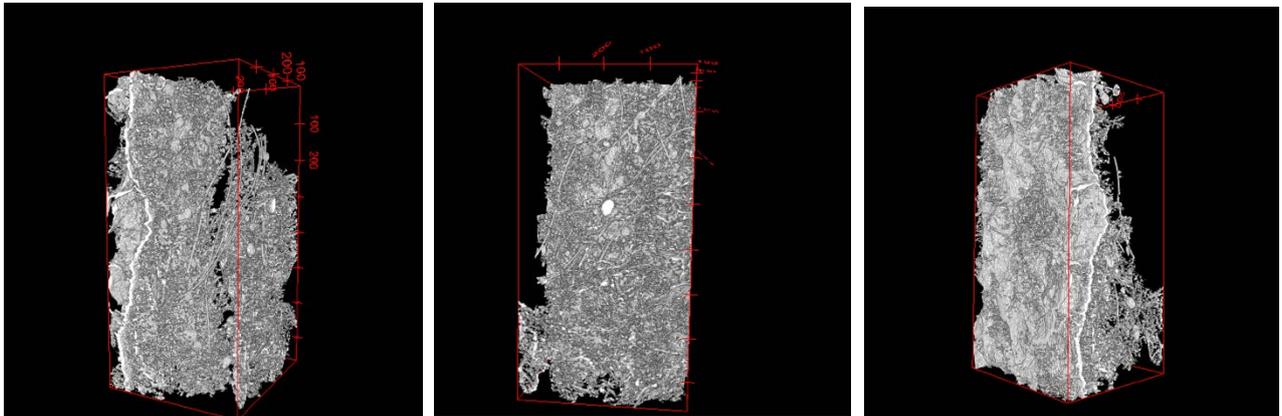


Fig. 10 二値化処理により抽出した空隙の立体像 (角度を変えて表示(時計回り))  
3-Dimensional Digitized Image of Void (Different Rotational View (Clockwise))

## 3.2 試験結果

3.2.1 CTの結果 CTによって取得した断面をFig. 8に示す。左から順に300レイヤー(上端から1.52 mm), 500レイヤー(上端から2.54 mm), 700レイヤー(上端から3.57 mm)の断面を示す。Fig. 8の左図に示すように、断面の上部はモルタル、下部はベントナイトとなる。色調は密度にほぼ比例し、密度が低くなるにつれて暗色となる。黒色は空気の領域に相当する。

モルタル部分はセメント硬化体に細骨材が分散し、セメント硬化体と細骨材の境界に空隙と思われる領域がみられ、セメント硬化体の内部にも気泡が分散している様子がみられた。トナイト内部では大きなひび割れが左右に走っている様子も見られた。実物大試験の期間において、ベントナイトは一定の含水状態にあったが、大気中での加工で供試体が乾燥しやすい状態にあったこと、さらに観察時に照射したX線の低波長領域の材料吸収に伴

う発熱でさらに乾燥が進み、収縮が生じたためと考えられた。

断面図を集積し、縦方向の断面を求めた結果のうち、中央部での断面とベントナイトとの境界を含む断面を Fig. 9 に示す。モルタルと思われる中央部の断面では、細骨材が密に充填され、その隙間をセメント硬化体が充填している。また、細骨材がかみ合うことで形成された狭隘部に空隙が見られた。ベントナイト側の断面では、モルタルとベントナイトの境界は図の右上端より左下端にかけて斜めに認められた。

3次元で空隙を抽出した結果について、角度を変えた3方向からの結果を Fig. 10 に示す。ベントナイトに見られた大きなひび割れは、供試体を観察した視野の全体に及んでいることがわかる。また、モルタル側の空隙の一部は、細長い管の形状を呈していた。これは、モルタルに混和した有機繊維であると思われる。有機繊維が凝集した状態で存在していることが確認された。

**3.2.2 XRDの結果** XRDの観察は上端から500レイヤーの断面において7点を選び実施した。Fig. 11 に縦断面中の500レイヤー断面の位置を黄色の線で示す。Fig. 12 に測定点の位置(Point1~Point7)を示す。可能な限り細骨材は避けるように選択した。Point1~Point4まではセメント硬化体と思われる部分、Point5は境界部で周囲と色調の異なる部分、Point6およびPoint7はベントナイトと思われる部分を選択した。

Fig. 13 にベントナイト側の Point 7 と結晶データベースより求めたモンモリロナイトとの比較の結果である X線回折プロファイルを示す。横軸はエネルギー、縦軸は X線強度である。青線に Point 7 における測定結果 (Row Data)、オレンジの線はハローを除去しピークのみを抽出したデータ (Modified Data)、Point 7 で検出されたピークを黒色の点線、モンモリロナイトとピーク一致したピークを黄色の線で示す。本結果では 8 個のピークが一致する結果となった。特に大きなピークが一致する傾向がみられなかったため、結晶のピークを検出できていない可能性が考えられる。供試体からの回折 X線をより多く検出するために、現在行っている供試体の揺動以外の方法を検討する必要があると考える。

Table 5 に各点における検出ピーク数と鉱物データとの一致数を示す。各点とも曹長石、灰長石および緑泥石との一致数が多い傾向を示した。また、モルタルおよびベントナイトの内部で、炭酸カルシウム的一种である Vaterite との一致が多くみられた。

これは、モルタルが、砂との混合物であり、砂に含まれるこれらの成分を多く検出したためと考えられる。また、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトはモルタル側でも検出され、モルタル側から生成したと考えられる炭酸カルシウムがベントナイト側に検出された。明確な相互作用は確認できなかったものの、境界においては、材料の混合が起きているものと考えられた。

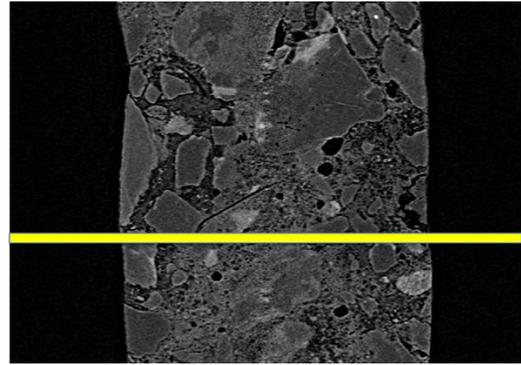


Fig. 11 X線回折実施の断面の位置(黄線で表示)  
Position of Cross Section of XRD (With Yellow Line)

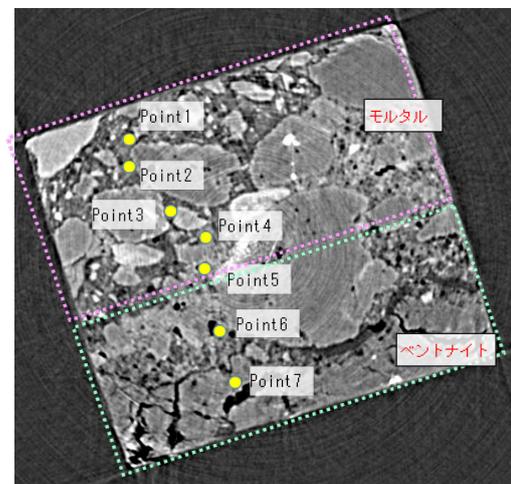


Fig. 12 局所X線回折観察位置  
Location of Pin-Point XRD Observation

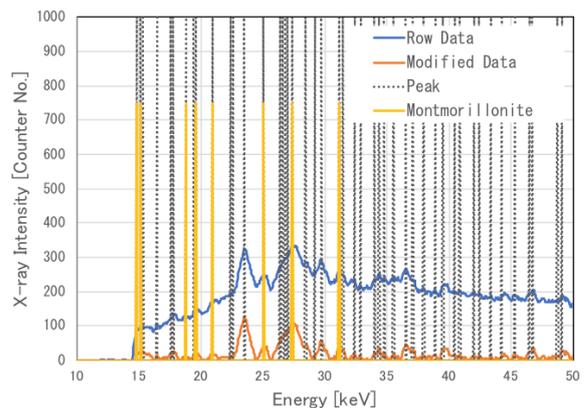


Fig. 13 Point 7における測定結果とモンモリロナイトとの比較  
Comparison Result of Observation data and Montmorillonite at Point 7

Table 5 各点における検出ピーク数と鉱物データとの一致数の一覧  
List of Number of Observed Peaks and Fit Numbers with Minerals at Each Point

Point	Peak数	Quartz	Calcite	Vaterite	Ettringite	Albite	Anorthite	Clinocllore	Montmorillonite	Illite	Muscovite
1	13	0	0	1	3	5	3	10	3	1	3
2	44	0	1	6	8	10	15	11	7	3	2
3	15	0	0	3	4	4	6	4	5	2	3
4	12	0	0	2	1	5	6	1	3	1	0
5	15	0	1	1	4	4	8	4	3	2	3
6	34	0	0	2	7	5	10	8	4	5	4
7	46	0	0	5	6	7	10	10	16	2	6

#### 4. まとめ

異種材料接合部の観察のため、物理的・化学的な相互作用の観察を可能にする高分解能X線CTとX線回折の連成分析法を開発した。スイスにおける高レベル放射性廃棄物処分の人工バリア実物大試験の解体(FEBEX-DP)に伴い、ベントナイトとモルタルプラグの境界部分より試料を採取した。境界部分におけるベントナイトとモルタル相互作用の詳細観察に連成分析法を適用し、高分解能CTによる内部の非破壊観察で得られた内部の断面図より対象となる1mm以下の微小領域を絞り込み、その領域でのX線回折(XRD:X-Ray Diffraction)で鉱物組成を求め、その適用性を検討した。結果として以下の知見を得た。

- 1) X線CTの観察による内部構造の可視化より、モルタルでは細骨材の周囲に空隙の多いこと、有機繊維の存在および凝集が観察され、ベントナイト中では乾燥に伴う大きなひび割れが確認され、内部構造に関する情報を得ることができた。
- 2) X線回折の観察では、モルタルとベントナイトの双方に、砂由来と思われる鉱物が検出された。またベントナイト側にはモルタルに由来すると思われる炭酸カルシウムが、モルタル側には、ベントナイトに含有されると思われる、モンモリロナイトが検出され、境界では物質の混合が起きていることを示唆する結果を得た。

以上より、非破壊CT - XRD連成法による、内部構造の可視化と局所的な鉱物分析法によって、異種材料間の間に発生した現象を観察することが可能であることが示された。

今後、日本国内における実物大試験の実施とそれに伴う解体が検討されている。本技術の適用に向けて技術の向上に取り組む。

#### 謝辞

本報告は、高輝度光科学研究センターの研究課題(課題番号：2015A1709, 2015B1623)の一部として実施されたものです。ここに銘記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構編：我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-, JNC TN1400 99-020, 1999
- 2) <http://www.grimsel.com/gts-phase-v/febex/febex-i-introduction-> (2018)
- 3) [http://www.grimsel.com/gts-phase-vi/febex-dp/febex-dp-introduction\(2018\)](http://www.grimsel.com/gts-phase-vi/febex-dp/febex-dp-introduction(2018))
- 4) Savage D. et.al : Rate and mechanism of the reaction of silicates with cement pore fluids, Appl. Clay Sci., 7, pp.33-45, 1992
- 5) Owada et.al : Degradation studies on granite in alkaline solution, JNC TN8400 2000-027 (2000).
- 6) 半井健一郎：ベントナイトおよび周辺地盤との連成によるセメント系複合材料からのカルシウム溶脱解析, コンクリート工学年次論文集, 27巻, 1号, pp.859-pp.864, 2005,7
- 7) Kajiwara K., Hitomi T., Sugiyama T. : Development of the evaluation technic of mineral distribution in concrete with non-destructive integrated CT-XRD method, abstract of 67th the annual meetings cement and concrete engineering, pp.82-83(2013), in Japanese
- 8) 中野司ら：“Slice” -Softwares for basic 3-D analysis, <http://www.bl20.spring8.or.jp/slice/> (2006)
- 9) <http://www.crystallography.net/cod/search.html> (2018)
- 10) Turrero M.J. et. al. : FEBEX-DP Concrete ageing, concrete/bentonite and concrete/rock interaction analysis, Arbeitsbericht NAB 16-18, 2017,5
- 11) In private communicaiton