

X線CT法の適用性に関する検討 (試験報告)

2003年3月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

X線CT法の適用性に関する検討

(試験報告)

棚井 憲治, 松本 一浩*, 菊池 広人*

要 旨

高レベル放射性廃棄物地層処分に関する種々の実験は、ほとんどのものが閉じられた容器内に対象物を設置し、種々の物理量を間接的に各種センサーによって測定している。このような閉じられた系における測定手法が、ある意味ではメカニズム解明の限界の一因となっている。したがって、本課題を踏まえた新たな測定手法として、X線CT技術のような非破壊による現象の観察手法が必要不可欠である。

本業務では、医療用のX線CTスキャナを用いて、緩衝材の候補材料であるベントナイトを対象として、ベントナイト中の水の移行挙動やガス移行挙動の観察の可否、さらにはこれら研究に必要な基本データとして、ベントナイトの密度とCT値の関係に関するデータの取得を実施した。

その結果、圧縮ベントナイトにおいても乾燥密度とCT値の間には正の相関関係が見られることがわかった。また、圧縮ベントナイト中における水の挙動に関しては、CT値の変化がよく捉えられるとともに、画像処理によって水の浸潤過程をよく表せることがわかった。

ガス移行可視化試験においては、試験により得られたガス有効浸透率は、 $6 \times 10^{-20} \text{m}^2$ 程度であり、これまでの試験で得られたものと同程度の結果であったが、透気現象として2つのピークが見られるというこれまでの試験では見られなかった挙動が観察された。また、X線CTによるガス移行挙動の観察に関しては、CT値及び撮影画像ともに顕著な変化は見られなかった。ガス移行可視化試験におけるこれらの問題点については、要因の絞り込みあるいはその他付加的な方法の検討を行っていく予定である。

東海事業所 環境保全センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

* 検査開発株式会社

Applicability Study of X-ray Computed Tomography technique

(Testing Document)

Kenji TANAI, Kazuhiro MATSUMOTO*, Hirohito KIKUCHI*

Abstract

Several experiments on the study of high level radioactive waste disposal indirectly measured various physical quantity in the closed test vessel by various sensor. This measurement technique on closed-system cause limit of understanding of mechanisms. Therefore, new observation technique by nondestructive technique such as X-ray computed tomography is necessary for HLW disposal study.

In this work, the objective of this study are as follows;

- (i) to clarify the relationship between dry density of bentonite and CT number,
- (ii) to observed infiltration behaviour of liquid in bentonite specimen using X-ray CT
- (iii) to observed gas migration behaviour in bentonite specimen using X-ray CT

The major conclusions obtained in this study are as follows;

- (i) CT number of X-ray increases linearly with degree of saturation and density of bentonite specimen.
- (ii) Infiltration behaviour of liquid in bentonite specimen can be observed by X-ray CT.
- (iii) Gas permeability of bentonite with a dry density of 1.6 Mg/m³ is approximately 6×10^{-20} m². And, this result was almost the same with the other experimental results. But, significant difference of breakthrough phenomena was observed between this test and other experiments results. In visualization study of gas migration through bentonite, gas migration behaviour through bentonite was not observed by X-ray CT.

Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* Inspection Development Corporation

目 次

1	はじめに	1
2	X線 CT 法の概要	2
2.1	X線 CT 法の概念	2
2.2	X線 CT アルゴリズム	3
3	X線 CT スキャナの概要	3
4	適用性試験	4
4.1	密度と CT 値の関係に関する基本データの取得	4
4.1.1	目的	4
4.1.2	試験方法	5
4.1.3	試験結果	5
4.2	水の浸潤過程の観察	5
4.2.1	目的	5
4.2.2	試験方法	6
4.2.3	試験結果	6
4.3	ガス移行可視化試験	9
4.3.1	目的	9
4.3.2	試験方法	9
4.3.3	試験結果	9
5	まとめ	13
6	おわりに	13
7	参考文献	14

目 次

図 2.1	X線 CT 画像の概念	2
図 3.1	X線 CT スキャナの外観	4
図 4.1	飽和度・乾燥密度と CT 値の関係	5
図 4.2	時間経過毎の CT 値の変化	7
図 4.3	時間経過毎の三次元画像	7
図 4.4	ガス移行試験装置の概要	9
図 4.5	ガス圧力と透気流量の測定結果	10
図 4.6	透気流量とガス有効浸透率の測定結果	10
図 4.7	ガス圧力とガス有効浸透率の測定結果	11
図 4.8	CT スキャンにより得られた CT 値により作成した画像	11
図 4.9	任意断面における CT 値の変化	12

表 目 次

表 3.1	X線 CT スキャナの仕様	4
-------	---------------	---

1 はじめに

近年医学分野では、非破壊試験の媒体として、X線、磁気、マイクロ波、超音波、ガンマ線などが用いられており、さまざまな非破壊診断技術が発達してきている。これらの技術は、今日の非破壊検査技術において、最先端の技術といえる。このような非破壊検査技術のうち、X線による非破壊検査手法、すなわち可視化手法の応用として、地盤の内部挙動や変形場の評価、地盤材料の間隙や密度分布、さらには岩盤内部の亀裂評価や水の浸透現象、せん断帯の発生機構の解明などに用いる試みが行われてきている（例えば、高野ら、1976；中山ら、1995）。

このような可視化技術は、地盤工学のみならず地層処分研究開発の面でも十分適用可能であると考えられ、第2次取りまとめ以降の目標である「処分技術の信頼性向上」や「安全評価手法の高度化」の観点から、現象の詳細な把握ならびにモデルの信頼性向上に資する新たな手法として有効であるといえる。また、このような可視化技術は、地層処分研究に対する国民の理解促進あるいは個別現象に係る専門家間の理解共有に寄与でき得るものである。

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる試験の大部分は、閉じられた容器内に対象物を設置し、種々の物理量を間接的に各種センサーによって取得してきたのが実情である。このような閉じられた系における測定手法がある意味ではメカニズム解明の限界の一因となっている。したがって、このような現状を踏まえた新たな実験手法として、前述したような非破壊による現象の観察手法が必要不可欠である。

本報告ではこれらを背景としてX線CT法の適用による新しい評価手法の構築に向けた第一ステップとして、X線CTスキャナを用いた予備試験を通じて、本手法の適用性に関する検討を行った結果を報告するものである。

2 X線CT法の概要（岩井，1979）

2.1 X線CT法の概念

CTとはComputed Tomographyの略であり，コンピュータ断層映像法と呼ばれる逆解析手法の一つである。すなわち，X線CT撮影の対象物の外部で，各方向に測定した多数個の投影データをCTアルゴリズムの演算手法に適用して計算を行い，対象物の任意断層内における各種物理量を映像化する数値処理のことである。X線を対象物に照射すると，対象物の密度に比例して，対象物を透過中にX線エネルギーが吸収され，X線CT法ではX線吸収係数の空間分布が求められる。X線吸収係数は，(1.1)式でCT値と定義される数値に変換される。

$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \tag{1.1}$$

ここで， μ_t ：求める位置の吸収係数， μ_w ：水の吸収係数， K ：比例定数である。

(1.1)式は，医療分野を対象に定義された式であり，水のX線吸収係数が基準（水のCT値 = 0）となっている。例えば，空気でのX線吸収係数はほとんどないと考えゼロとすると，(1.1)式より空気のCT値は-1000となる。

前述したようにX線吸収係数が，物体の密度に比例することから，物体の密度とCT値の関係には正の相関関係がある。以上のことからX線CT画像とは，CT値によるデジタル画像であり，対象物内部の密度空間分布を画像表示したものである。

X線CT画像を構成する最小要素は，画素（ピクセル）と呼ばれ，512×512個の正方格子から構成されており，撮影領域が直径150mmの場合は，1ピクセルが0.293×0.293mm²の正方格子となる。なお，X線CT画像においては，一つの正方画素（ピクセル）にX線照射厚さを高さとする直方体（ボクセル）であり，CT値とはこの直方体の密度を表している。したがって，ボクセルの集合体であるX線CT画像は，図2.1に示すような厚みを持つ画像を意味するものである。

また，X線CT画像でのCT値は，白黒の256階調濃淡レベルに置き換えられて表示され，X線CT画像ではCT値が高い領域は白く，低い領域では黒く表示される。

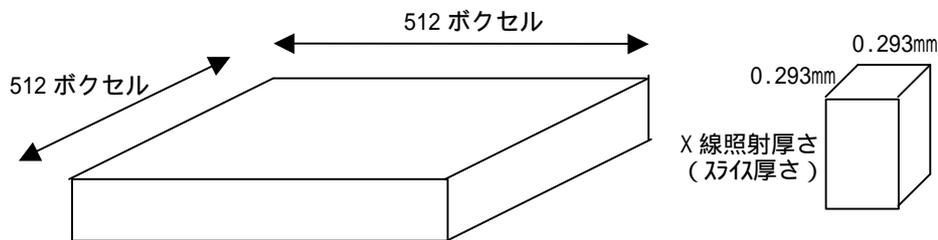


図 2.1 X線CT画像の概念

2.2 X線CTアルゴリズム（樋渡，1986）

X線CT法の基本概念は、逆解析であり、物体の複数の投影像からその実体を数値的に再構成するという考え方である。画像工学においては、X線CT法は、「所要の断面を横断するX線の吸収に関する情報又はX線吸収分布に関する多くの情報を記憶・蓄積し、コンピュータにより再構成し断面画像を得る手法」と定義される。

X線CT法ではX線を対象物に照射すると、対象物の密度に比例して、対象物透過中のX線エネルギーが吸収されX線吸収率の空間分布が求められる。したがって、X線CT法では対象物内部の密度分布が明らかになる。

X線を照射することによって得られるX線投影像は、「ラドン変換」と呼ばれる。これは、X線吸収係数のX線伝播方向に関する線積分の形で表現され、「投影関数」と呼ばれる。これを投影関数の分布方向に関して「1次元フーリエ変換」すると「1次元フーリエ変換像」が得られる。このとき、「フーリエ切断面の定理」を用いると「1次元フーリエ変換式」が「二次元フーリエ変換式」を意味していることから、「二次元フーリエ変換像」が求められる。次に、これを「二次元フーリエ逆変換」することによって、最終目標であるX線吸収係数の空間分布が求められる。また、CTアルゴリズムでは、「重積分の変数変換定理」を用いた「フィルタ補正逆投影法」を導入しており、高周波領域を強調し、かつ演算時間が短縮される。このようにX線CT法においては、フーリエ変換が巧みに用いられている。X線CT法における数学的基本概念は、逆投影法と呼ばれるアルゴリズムである。逆投影法は、単純逆投影法 畳み込み逆投影法 フィルタ補正逆投影法の順で発展している。なお、単純投影法および畳み込み逆投影法については、樋渡（1986）の著書を参考にされたい。

3. X線CTスキャナの概要

X線CTスキャナのデータ収集方式には、第1世代から第4世代と呼ばれるものがあり、世代が上がるごとにデータ収集時間が短くなる。各世代の特徴は、概略以下のようなものである。

- ・第1世代：1組のX線管と検出器を向かい合わせて配置し、その中で被検査物を直走走査させる。その後、被検査物を微小角だけ回転させる。両動作を交互に繰り返す。最終的にX線管と検出器に対して被検査物が180°回転したところでデータ収集が終了する。この方式は理論に忠実であるが、データ収集時間がかかるため実験機で使われる程度である。
- ・第2世代：第1世代の長所を残し、複数の検出器を配し、1回の直走走査で複数方向の投影データを取りデータ収集時間の短縮を図った方式である。
- ・第3世代：X線管とX線検出器を対向して配置し、その扇状のX線の中で被検査物を1回転させるか、あるいはX線管とX線検出器が一体となって被検査物のまわりを回転しながらデータを収集する。
- ・第4世代：被検査物のまわりの円周上に固定した検出器を置き、X線管は被検査物と検出器の間を回転する。回転できない被検査物を高速で測定するのに適している。

今回試験に使用したX線CTスキャナは、第4世代に属するものであり、医療用として幅広く

用いられている。図 3.1 に試験に用いた X 線 CT スキャナの概観を示す。また，表 3.1 に当該装置の仕様を示す。



図 3.1 X 線 CT スキャナの外觀

表 3.1 X 線 CT スキャナの仕様

装置名	Asteion VI (東芝メディカル)	
撮影条件	スキャン方式	360° 連続回転方式
	スキャン時間	0.75, 1, 1.5, 2, 3 秒
	最大連続ヘリカル	133 回転 / 100 秒
	スライス厚	1, 2, 3, 5, 7, 10mm
	ガントリ傾斜角度	± 30°
	ガントリ開口部	720mm
X 線条件	管電圧	80, 120, 135kV
	管電流	30 ~ 300mA
データ処理	画像再構成時間	3 秒

4. 適用性試験

X 線 CT 法の適用性確認として， 緩衝材に関する CT 値と密度との相関関係に関するデータの取得， 緩衝材中の水の浸潤過程の観察ならびに ガス移行可視化試験をそれぞれ行った。以下にこれら試験の目的， 試験方法及び結果について報告する。

4.1 密度と CT 値の関係に関する基本データの取得

4.1.1 目的

ベントナイトを対象とした試験研究に対する X 線 CT 法の利用範囲としては、ベントナイト中の物質移行挙動や緩衝材の膨潤により岩盤亀裂中に侵入したベントナイトの密度分布の把握などに幅広く適用できるものと考えられる。しかし、実際にこれらの試験に本手法を適用していくためには、得られた CT 値からベントナイトの密度や飽和度などを算定する必要性が生じる。

すでに2章で述べたようにCT値と物体の密度には正の相関関係があるとされていることから、これに関するデータの取得が本手法の適用性を確認する意味でも重要となる。したがって、飽和度および乾燥密度をパラメータとして、CT値を測定し、それらの相関関係式を得るための試験を行った。

4.1.2 試験方法

試験に使用した材料は、緩衝材の研究で広く用いられているクニゲルV1である。試験に際しては、各飽和度に調整したベントナイト粉末を所定の乾燥密度に圧縮成型したものを使用した。試料の寸法は、直径50mm、厚さ10mmであり、当該試料をビニール製のサンプル袋に入れた状態でスキャンを行った。X線CTスキャナによる撮影条件は、管電圧：135kV、管電流：200mA、スキャン時間：1.0秒、スライス厚さ：1.0mmとし、数断面分の撮影を行い、それらの平均値を測定試料の平均的なCT値とした。

4.1.3 試験結果

試験により得られたデータを各乾燥密度毎に横軸に飽和度、縦軸にCT値をとり、図4.1に示す。また、同図には実測値から設定した各乾燥密度の近似直線を示す。これらの結果から、圧縮ベントナイトについても、CT値との関係には正の相関関係があることがわかる。

なお、乾燥密度1.8Mg/m³に関しては、低飽和度領域のデータが不十分であることから、今後データを充足する予定である。

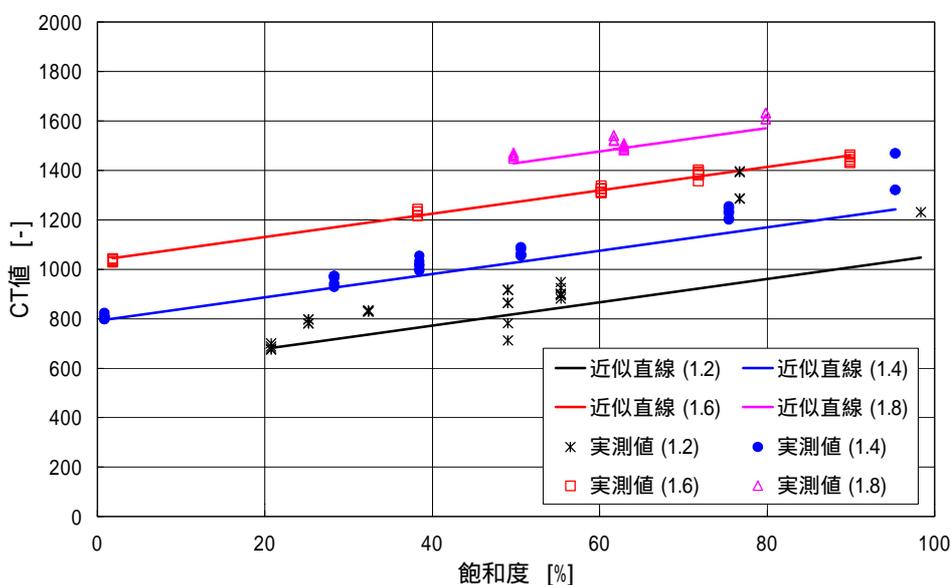


図 4.1 飽和度，乾燥密度とCT値の関係

4.2 水の浸潤過程の観察

4.2.1 目的

X線CT法の適用性検討の一つとして、緩衝材中における物質移行の観察の可能性の可否を把握する観点から、最も基本となるベントナイト中の水の浸潤現象の観察を行った。具体的には、

含水比 0% から試料が飽和に達するまでのプロセスを把握できるかについて、CT 値及び画像上の変化の有無など、現象の可視化の可能性について試験を行ったものである。

4.2.2 試験方法

試験に際しては、炉乾燥により絶乾状態（含水比 = 0%）としたクニゲル V1 の粉末を X 線 CT 用に製作したアルミ容器内に充填し、乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 、厚さ 20mm（試料直径：38mm）に圧縮成型したものを使用した。アルミ容器を用いた理由は、ここで使用した X 線 CT スキャナが医療用のものであることから、通常の鉄製やステンレス鋼製などの容器を透過しにくく、X 線ビームハードニング現象により、アーチファクトが生じてしまうことによる。

試験は、所定の密度に圧縮成型された試料を内包するアルミ容器を X 線 CT スキャナの寝台に固定し、水を供給する前の絶乾状態の試料をスキャンした。この時のデータを初期値とした上で、給水圧により試料を乱さないように 80kPa 程度の低い圧力で試料片面より給水を開始し、膨潤応力の進展を想定して徐々に 700kPa 程度まで昇圧させながら時間経過毎の試料の断面撮影を行った。X 線スキャン条件は、管電圧：135kV、管電流：200mA、スキャン時間：0.75 秒 / 断面である。

4.2.3 試験結果

初期状態での CT 値と給水開始後、任意の時間にスキャンした時の CT 値のそれぞれの変化を図 4.2 に示す。この図から、初期状態（乾燥状態）における CT 値が約 1000 程度にあったものが、給水約 4 時間後には給水面の CT 値が 1350 程度まで上昇し、時間の経過とともに、試料下流に向かって CT 値が徐々に上昇しているのがわかる。最終的には約 500 時間程度で CT 値が 1400 近傍で一定となっている。この結果から、浸潤面が徐々に下流に向かって進んでいることが把握できているといえる。なお、図 4.2 における乾燥状態時の CT 値は約 1000 程度であり、先に示した図 4.1 の結果とほぼ合っているが、飽和に達したと推定される約 504 時間時点のそれは約 1400 程度であり、図 4.1 の結果に比して若干小さめとなっている。これについては、当該試料を 4.3 章で後述するガス移行可視化試験に供したことにより、本試験終了後、直ちに試料の重量測定を行うなどの対応が取れなかったため比較検討ができていない。

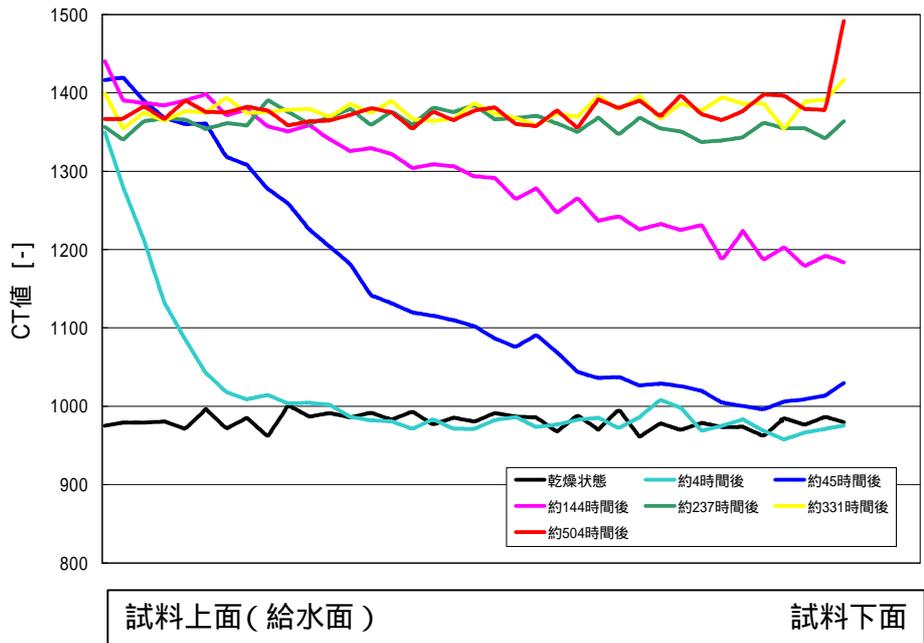


図 4.2 時間経過毎の CT 値の変化

一方，撮影画像をもとに三次元画像処理したものを，図 4.3(a)から図 4.3(d)に示す。この図から，浸潤面が徐々に下側に向かって広がっているのがわかる。また，試料中心面に比して若干試料外側の浸潤が早いような傾向にある。このように，緩衝材中への水の浸潤過程が X 線 CT 法により十分観察可能であることがわかった。なお，この三次元画像をもとに動画処理することも可能であり，このことによって現象の進展が視覚的に把握でき，現象の理解促進などに十分反映できるといえる。

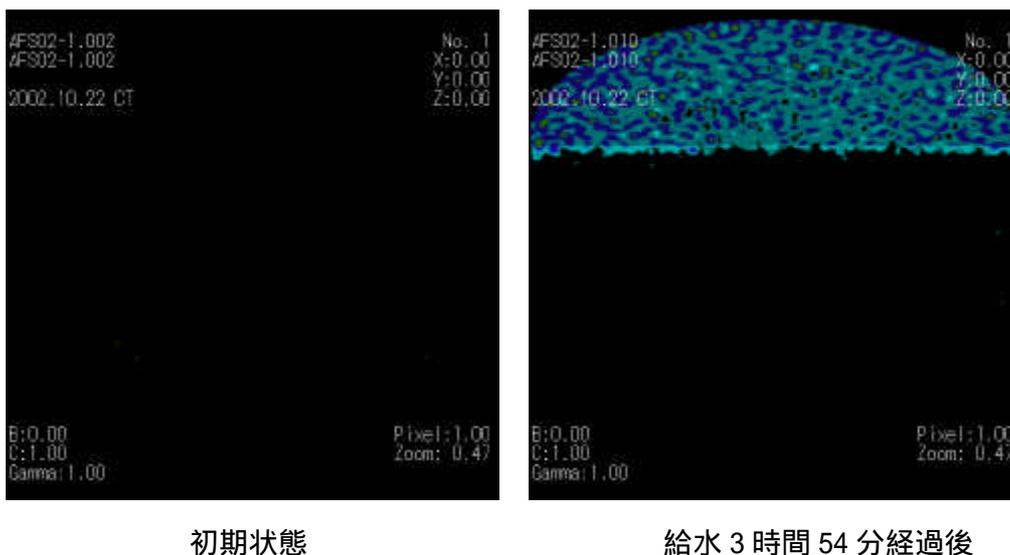
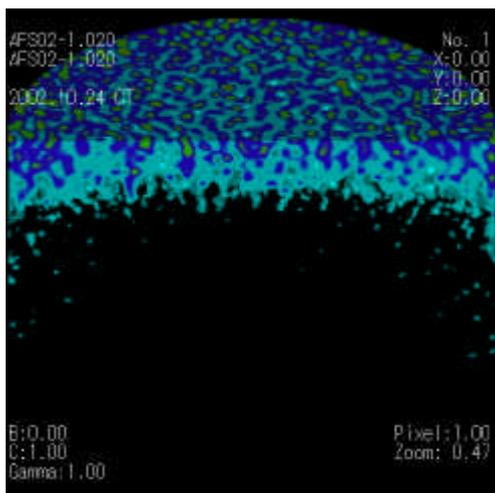
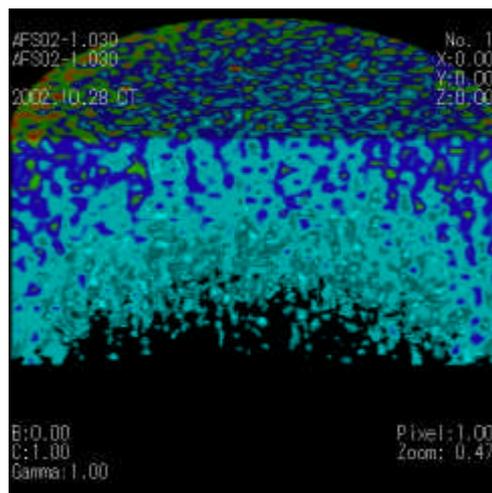


図 4.3(a) 時間経過毎の三次元画像

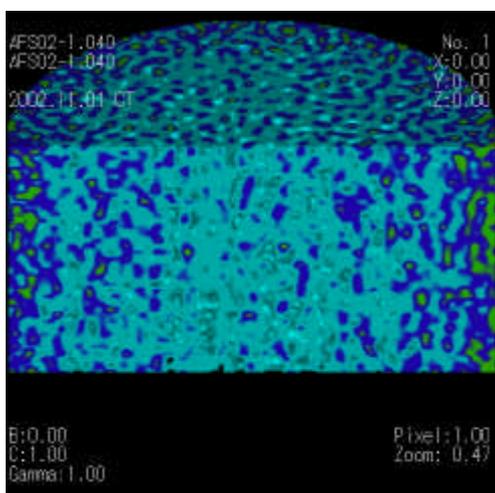


給水 45 時間 34 分経過後

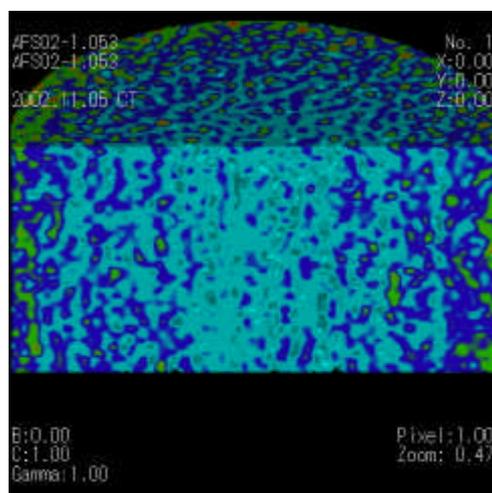


給水 144 時間 3 分経過後

図 4.3(b) 時間経過毎の三次元画像

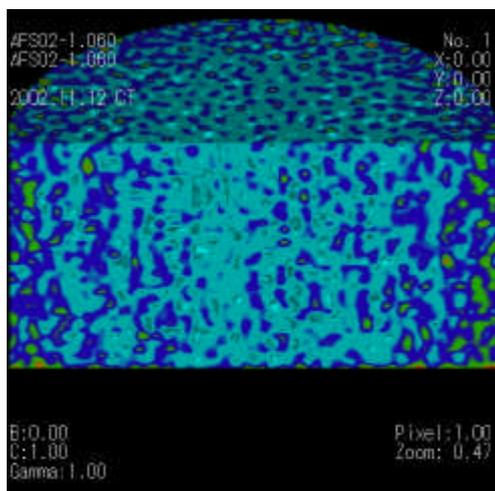


給水 236 時間 54 分経過後



給水 331 時間 6 分経過後

図 4.3(c) 時間経過毎の三次元画像



給水 503 時間 40 分経過後

図 4.3(d) 時間経過毎の三次元画像

4.3 ガス移行可視化試験

4.3.1 目的

従来のガス移行試験では、容器の出入口にセンサーを設置し、圧力状態や透気流量の測定を行ってきており、その結果から緩衝材内のガス移行現象を推定しモデルの開発を進めてきた。しかしながら、それらのデータから現象を把握するには不十分であり、これらを補完する新たな試験手法が必要である。そこで、非破壊で試料内部の観察が可能である X 線 CT 法の適用可能性について検討を行うことを目的として、ガス移行可視化試験を実施した。

4.3.2 試験方法

本試験は、4.2 章で用いた試料をそのまま適用した。試験に際しては、可視化研究の予備試験という観点から、背圧の負荷などは行わず単純な系での試験とし、図 4.4 に示す装置を用いて一定流量 (0.05ml/min) で試料片側よりヘリウムガスの供給を行った。また、CT スキャン方法は、水の場合と同様に、ガスの供給前を初期状態とし、ガスの供給過程において適宜実施した。なお、スキャン条件は、管電圧：135kV、管電流：200mA、スキャン速度：0.75 秒である。

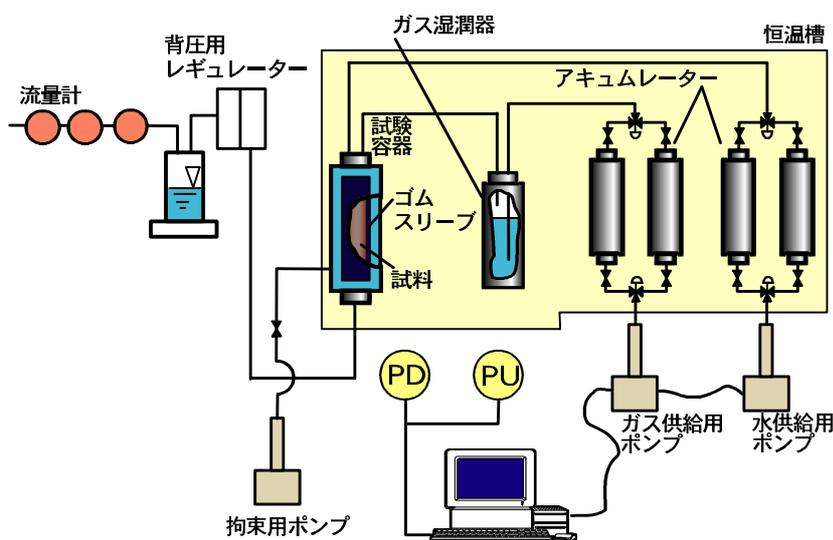


図 4.4 ガス移行試験装置の概要

4.3.3 試験結果

ガス移行可視化試験の結果については、緩衝材中のガス移行挙動研究の一つとしての見方と現象の可視化研究という見方の2つがある。そこで、以下にはそれぞれの観点から当該試験の結果を考察する。

(1) 緩衝材中のガス移行挙動

図 4.5 にはガス圧力と透気流量の結果を示す。0.05ml/min の流量でガスの供給を行っていることから、ガス圧力は徐々に上昇し、試験開始後約 23 日程度でガス流量計の値が上昇しているのがわかる。この結果から、ガスの破過圧力は約 2.6MPa 程度となる。Pusch らの (1985) 試験結果では、ガスの破過圧力はほぼ膨潤応力程度であるとしているが、本試験で得られたガスの破

過圧力は膨潤応力の約 2.6 倍とかなり大きな値を示す結果となった。

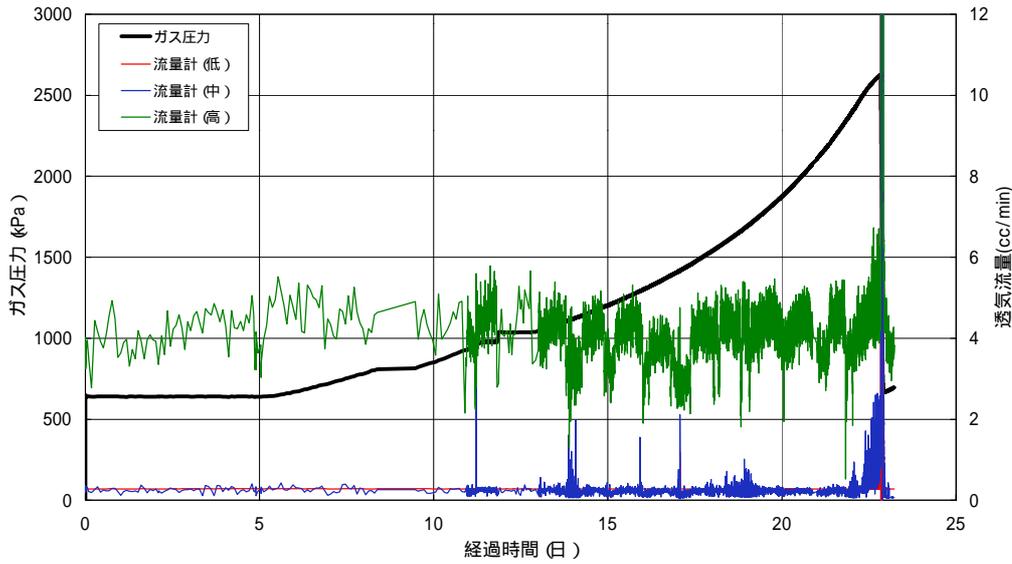


図 4.5 ガス圧力と透気流量の測定結果

図 4.6 及び図 4.7 はガスの破過が生じた約 22.8 日から 22.94 日までの区間を拡大した図であり、透気流量及びガス有効浸透率及びガス圧力の経過を示したものである。これらの図から約 22.83 日で破過し、その後徐々にガス圧力の低下とそれに呼応した透気流量の減少が見られたが、約 22.88 日の時点でガス圧力が 1.7MPa まで下降したにもかかわらず、突如ダイナミックフローが発生している。これまでの試験では破過と同時にダイナミックフローが発生したという事象は確認しているものの、このように 2 つのピークの発生は確認されていない。このような現象が生じた理由について、現時点で明確な説明は難しいが、一つの可能性としてガスがベントナイト試料と容器の界面を移行したことも考えられる。これに関しては、実験を繰り返し実施しつつ要因の絞込みを行う必要がある。なお、この結果から得られるガス有効浸透率は、破過時点での値は $6 \times 10^{-20} \text{m}^2$ でありオーダー的にはこれまでの結果と乖離しないものである。

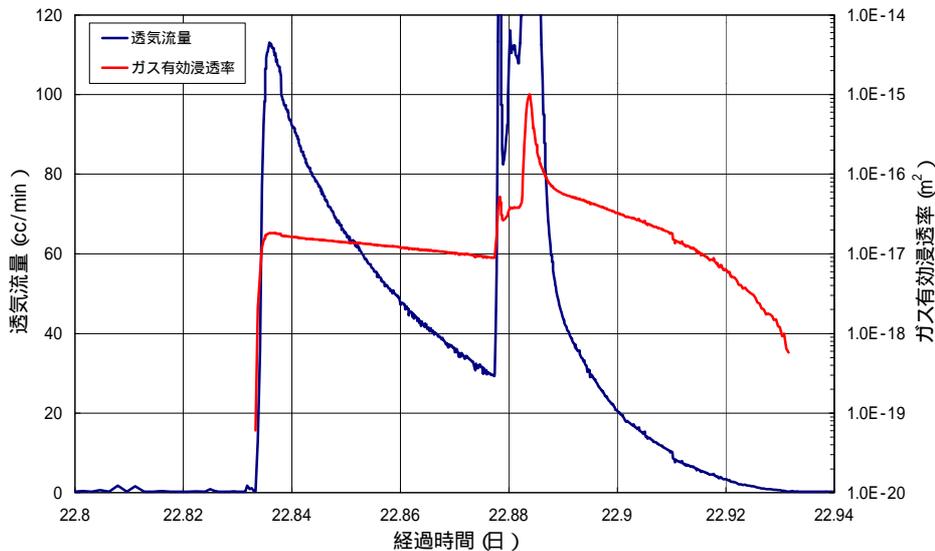


図 4.6 透気流量とガス有効浸透率の測定結果

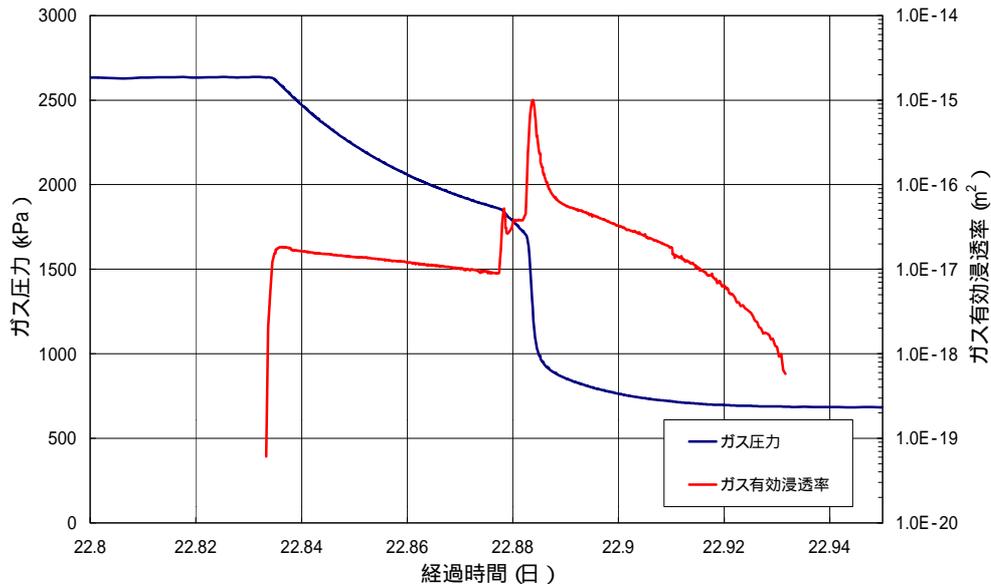


図 4.7 ガス圧力とガス有効浸透率の測定結果

(2) ガス移行可視化試験

本試験は、前述したガス移行試験の過程を適宜 X 線 CT スキャナにより撮影し、試料内部の変化や CT 値そのものの変化の把握の可能性について検討したものである。図 4.8 には初期状態の画像と図 4.7 で示した第 1 ピーク及び第 2 ピーク時のスキャンデータをもとに作成した画像をそれぞれ示しており、これらの図からは明瞭な状態の変化は把握できない。また、図 4.9 には試料の任意の断面における CT 値を示している。この図から初期状態、第 1 ピーク及び第 2 ピーク時における CT 値の形状は、一部大きな値を示している箇所があるものの、ほぼ同様の形状をしており、明確な変化としては現れていない。なお、試料のスキャンにおいては、撮影開始位置をゼロ地点として寝台を 1mm ずつ移動させながら撮影を行っている。したがって、かなりの回数寝台を往復運動させながら移動させているため、微妙に開始位置がずれるという問題も生じている。これにより図 4.9 で示している位置は若干のずれを含んでおり、同一地点でのデータではない可能性もある。この問題に関しては、試料全体をスキャンするのではなく、寝台を移動せず試料のある任意の同一断面をスキャンし続けるという方法をとることで解決できる。

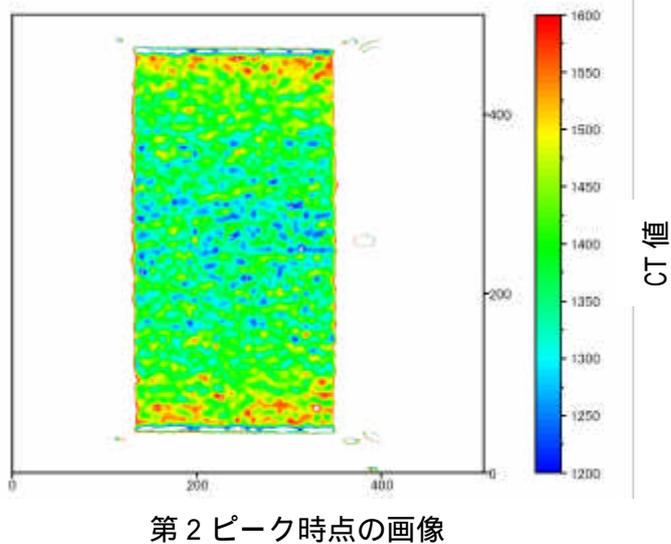
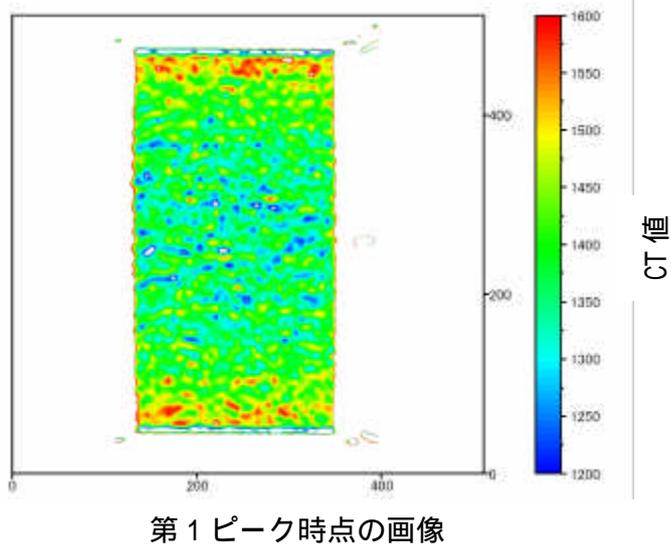
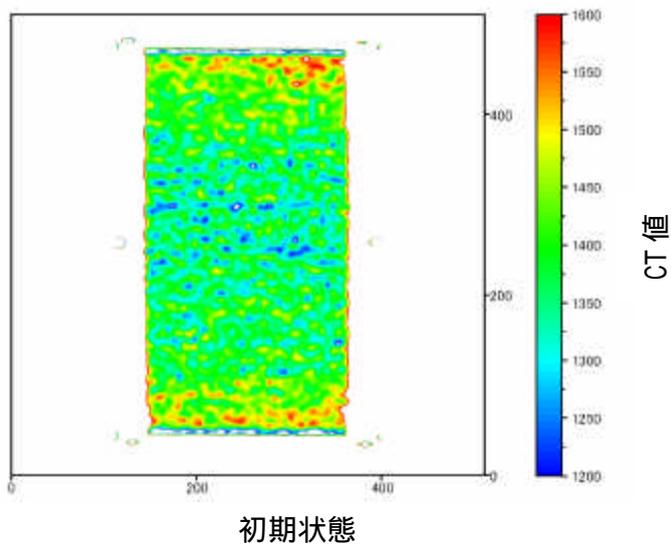


図 4.8 CT スキャンにより得られた CT 値により作成した画像

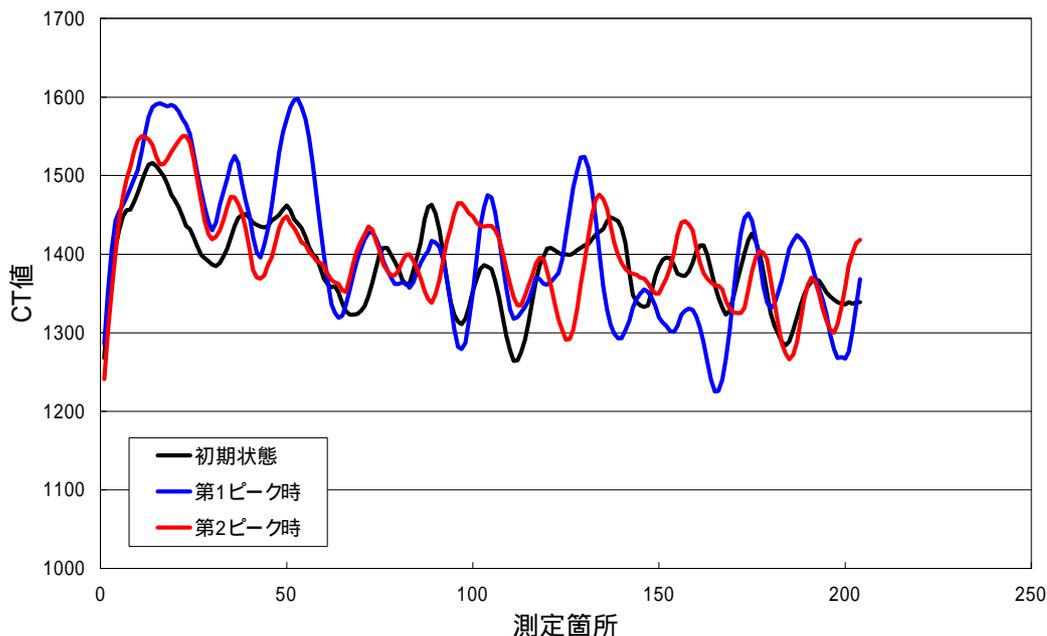


図 4.9 任意断面における CT 値の変化

5 まとめ

X線 CT 法の適用性に関してこれまで述べてきた幾つかの試験を行ったが、これらの結果は以下のようにまとめられる。

- 1) ベントナイトの飽和度をパラメータとした乾燥密度と CT 値の関係は、一般的に言われている他の材料と同様に正の相関関係を示すことがわかった。
- 2) ベントナイト中の水の浸潤状態の把握に関しては、CT 値及び画像上の変化としてこれらの挙動十分捉えることが可能であり、X線 CT 法が適用できることがわかった。
- 3) ベントナイト中のガス移行挙動に関しては、従来とは異なる事象が観察され、ガス移行試験自体の問題も含んでいるが、X線 CT による現象把握には至らなかった。この点に関しては、血管造影剤やキセノンガスの使用などといった補完的な手法の検討やスキャン方法の見直しなどを行う必要がある。

6 おわりに

X線 CT 法は、地盤工学など多岐にわたる分野において、現象の解明などの観点から利用されてきている。この手法は地層処分研究の分野においても、X線 CT 法の適用範囲を考慮すれば、緩衝材や岩盤を対象とした種々の試験研究に広く利用できるものと考えられる。今回の適用性試験は、緩衝材を対象として行い一部課題となる点も挙げられたが、画像のコントラストをつけるための血管造影剤の利用やキセノン CT 手法の適用など、医療分野における技術も参考にしていくことで、新たな実験手法の一つとして十分利用可能なものになっていく。また、このような技術を単に研究の一つの手法としてだけ用いるのではなく、一般国民への地層処分研究の理解促進などにも十分活用していけるものとする。

7 参考文献

高野昭信,大西靖和,岸田英明:”X線による杭先端部地盤の変形解析”,第11回土質工学会研究発表会後援概要集,pp.633-636,(1976)

中山栄樹,持田文弘,田中達吉,田中壮一:地盤物性評価におけるX線CTの使用例,第26回岩盤力学シンポジウム論文集,土木学会,pp.336-340,(1995)

岩井喜典:CTスキャナ,コロナ社,(1979)

樋渡涓二:画像工学ハンドブック,朝倉書店,(1986)