# 高レベル放射性廃棄物処分孔ニアフィールドの 内部構造に関する実験的研究

## 西本 壮志1\*·岡田 哲実<sup>1</sup>·荒井 郁岳<sup>2</sup>

# <sup>1</sup>(財)電力中央研究所地球工学研究所(〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646) <sup>2</sup>(株)ジオデザイン(〒108-0023東京都港区芝浦3-14-6 バリュー芝浦ビル) \*E-mail: soshi-n@criepi.denken.or.jp

本研究では、高レベル放射性廃棄物(HLW)の処分孔模型を用いて、その内部構造の把握のために医療用X線CT装置を用いた模型撮影試験を行った. 試験に用いた処分孔模型供試体は、岩石供試体、ベントナイト緩衝材、模型廃棄体から構成され、処分孔のごく近傍の縮小模型である. 模型供試体を圧力容器に封入して、拘束水圧5 MPa、注入水圧4.9 MPa条件下でX線CT撮影を行った. その結果、岩石供試体、ベントナイト緩衝材、模型廃棄体をほぼ区別できることが確認できた. また、注水した水が移動しているフロントと考えられるラインやベントナイト緩衝材の膨潤した様子も観察できた.

Key Words : X-ray CT, High-level radioactive waste, Disposal hole

#### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分施設の周 辺(ニアフィールド)は従来の地下施設と大きく異なり, 非常に長い期間にわたり、廃棄体の発熱、地下水の再冠 水、緩衝材・埋戻し材の膨潤、岩盤のクリープなどが発 生する<sup>1)</sup>. そのため, ニアフィールドにおける数十年~ 数百年にわたる超長期の挙動評価が必要になる. 場所や 時間・経済的制約から実物大実験は極めて困難であり、 超長期の挙動予測は数値解析的検討がこれまでに行われ ている.一方で、ニアフィールドで生じる諸現象は極め て複雑であり、数値解析モデルやそのパラメーターの妥 当性検証が必要不可欠である. そのための基礎的な知見 を得るためには、室内試験レベルにおける緩衝材や処分 孔模型試料を用いた様々な評価試験を行い、応力やひず み、透水特性を把握し、さらに試験終了後の緩衝材の変 位量や模型試料の内部構造、例えば、クラック等の空間 的(三次元)分布を把握することは非常に重要な課題と 言える.

岩石内部の構造に関するデータを得る手法として,X 線断層撮影(CT: Computerized Tomography)法がある. 医療分野の利用でも明らかなように,X線CT法を用い れば試料の内部構造を示す高精度デジタル画像を非破壊 で撮影,観察,解析を簡便かつ精密に行うことができる. また,複数のCT 画像を積み重ねることにより,試料の 三次元内部構造を把握することも可能である.

本研究では、放射性廃棄物処分孔を模した、岩石ブロ ック、緩衝材、模型廃棄体からなる処分孔模型を作製し、 所定の三軸応力条件下で、X線CT装置を用いその内部構 造を把握する. 医療用X線CTスキャナーを用いた撮影試 験を行った際、密度が似たような岩石部・緩衝材部、そ れらとは密度に大きなコントラストがある模型廃棄体部 から得られるCT画像について知見を得る.

#### 2. 模型供試体および試験方法

#### (1)模型供試体

本研究で用いた処分孔模型供試体は、処分孔周辺の岩 盤部および処分孔内の緩衝材部・廃棄体部から成る縮小 模型である(図-1).模型供試体は、電中研・電事連 共同研究報告書<sup>3</sup>において提案されている処分孔サイズ の約1/30の大きさである.すなわち、模型廃棄体(オー バーパック)は直径2.7 cm、高さ6.2 cm、処分孔部は直径 約5.5 cm、高さ12.7 cmである.処分孔模型において、岩 盤部は18 cm円柱状の田下凝灰岩を使用した.乾燥密度、 湿潤密度はそれぞれ、約1.25 g/cm<sup>3</sup>、1.58 g/cm<sup>3</sup>であり、一 軸圧縮強さは16 MPa(気乾)および33 MPa(湿潤)であ る<sup>2</sup>.緩衝材および埋め戻し材には圧縮ベントナイト (クニゲルV1)を用い,膨潤後目標密度を1.55 g/cm<sup>3</sup> (初期乾燥密度は1.90 g/cm<sup>3</sup>)になるように圧縮した. 模 型廃棄体はバルク密度が6.16 g/cm<sup>3</sup>となるように,ステン レス鋼材(SUS430)にエポキシ樹脂を被覆し調整して ある.エポキシ樹脂の厚さは2 mm程度である.

#### (2)X線CT法

X線CT法は、X線CTスキャナーを用いて様々な光路で 試料に入射し、透過させたX線の強度を測定する.X線 が試料を透過する時、X線の減衰は、

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon \chi) \tag{1}$$

で表される.ここで, 1は試料を透過後のX線強度, 10は 入射するX線強度, 6はX線吸収係数, 次はX線が通過す る試料の厚さである.それらのデータをもとに試料内部 のX線吸収係数の空間分布を二次元断面の積み重ねから 三次元的に可視化することが可能であり,非破壊で試験 試料の空間的分布特性を計測できる技術として非常に優 れている<sup>4,5,0</sup>.

X線CTで得られた試料の断面はCT画像として得られ る.CT画像は、最小構成要素(ボクセル:voxel)から 構成され、各ボクセル内にCT値が格納される.ディス プレイに表示させる時、ウィンドウ幅(WW:Window Wide)とウィンドウレベル(WL:Window Level) を設定し、格納されたCT値からどの範囲を表示させる かを決定する.各ボクセルに白黒の濃度差が与えられ、 目的の領域のコントラストを得ることができる.X線吸 収係数は物質の密度(比重)にほぼ比例すると考えられ ているため、得られるCT値も密度に比例した値と考え ることができる<sup>4,7</sup>.すなわち、吸収係数(密度)の大 きい物質は白く、小さい物質は黒く表示される.

CT値, N<sub>CT</sub>(Hu:Hounsfield unit)は,

$$N_{CT} = \frac{\mu(t) - \mu(w)}{\mu(w)} \times K \tag{2}$$

で表わされる.ここで、µ(t)は被測定物質のX線吸収係数、 µ(w)は基本物質のX線吸収係数、Kは定数である.この ようにCT値は被測定物質のX線吸収係数を基本物質に対 する相対値として表したもので、一般的には基本物質を 水として、水のCT値が0 Hu、空気が-1000 Huとなるよう にK=1000としている.例えばこの時、密度が約2.5 g/cm<sup>3</sup> のコンクリートで1500 Hu程度、約7.8 g/cm<sup>3</sup>の鉄で6800 Hu 程度である<sup>7</sup>.

本研究におけるX線CT装置による撮影は,寝台が移動し対象物の周囲を螺旋状に回転しデータを取得する医療用ヘリカル CT スキャナ(東芝メディカルシステムズ社製, Aquilion64 TSX-101A)を使用しCT画像を取得した.



図-1 CT撮影に用いた模型供試体の断面図.

表-1	図-1における模型の各部位の寸法.			
		/ <del>14</del> / L	`	

	(単位:cm)
(a)	18.0
(b)	3.7
(c)	1.3
(d)	6.2
(e)	8.9
(f)	12.7
(g)	6.3
(h)	2.7
(i)	5.4

Aquilion64は同時に64列の断面データを収集でき,空間 分解能は最小で0.35 mm,スキャンに要する時間は,対 象物の大きさにもよるが数秒程度である.また,ガント リー開口径は72 cmで最大撮影領域径は50 cmである.ス キャン時のX線出力(管電圧・管電流)は135 kV・350 mAである.

得られたCT画像からDICOMビューアーを使い三次元 画像として再構成を行い,任意の断面画像を取得した.

撮影試験は模型供試体をアルミニウム(ANP79,密度 2.77 g/cm<sup>3</sup>)製圧力容器に封入し、拘束水圧5 MPa,注入 水圧4.9 MPa(背圧無し)条件下で行った.アルミニウ ムは比較的X線の透過率が高いことから圧力容器の素材 に採用した.また,圧力容器を開封後の模型供試体の撮 影も行った.

#### 3. 撮影結果および考察

以下に, X線CT撮影で得られた再構成画像(MPR: Multi Planer Reconstruction)の内,中心部の縦断面図を示 す.

#### (1) 拘束圧条件下でのCT撮影結果

図-2は圧力容器に入れ,拘束水圧および注入水圧を 与えない条件下でのCT撮影結果,図-3は拘束圧5 MPa, 注入圧4.9 MPa(背圧無し)条件下でのCT撮影結果であ る.画像の濃淡はCT値を示しており,-500~1500 Hu (白〜黒)である.

図-2において、圧力容器および岩石供試体、ベントナ イト緩衝材、模型廃棄体が不鮮明であるが区別すること ができる。岩石供試体上・下端部に見える白い帯状のラ インは供試体を覆うゴムスリーブを押さえるためのステ ンレスのクランプバンドによるメタルアーチファクト (金属虚像)である。西本・岡田<sup>8</sup>で報告された、ステ ンレスの模型廃棄体からのメタルアーチファクトはそれ ほど大きくない反面、岩石供試体とベントナイト緩衝材

図-3は、供試体に5 MPaの拘束水圧を与え下端面から 49 MPaの水圧で注水したときのCT画像である. 図は注 水から10時間経過したときの画像である. 拘束水圧を与 えると、理由は不明だが図-2と比較して、岩石供試体、 ベントナイト緩衝材、模型廃棄体がより明瞭に区別でき る. また、図中に示した矢印で示した部分には、注水し た水が移動しているフロントと考えられるラインが観察 された. また、模型処分孔底部の黒い部分は模型供試体 作成時に生じてしまった空隙である. その高さは4 mm 程度である. 一方で模型廃棄体上下端面にも黒い部分が 見えるが、これは模型廃棄体から生じたメタルアーチフ ァクトであると考えられる<sup>8</sup>.

#### (2) 開封後のCT撮影結果

が区別しづらい.

図-4において, 圧力容器から取り出しCT撮影を行ったものであり,画像の濃淡は500~3500 Huの範囲で示してある. 圧力容器に封入して撮影した図-2,3に比べ, 岩石供試体,ベントナイト緩衝材,模型廃棄体がより明瞭に区別することができる. 模型廃棄体の上下端面から 黒いラインが上下に出ているが,これは模型廃棄体から 生じたメタルアーチファクトであると考えられる. 岩石 供試体上端部よりベントナイト緩衝材が膨潤により1 mm程度飛び出しており,同様に,模型処分孔底部に存 在した空隙部分が膨潤したベントナイト緩衝材で埋めら れている.

また,図-4中のA-A'のCT値を図-5に示す.岩石供試



図-2 模型供試体を圧力容器に封入した直後のCT画像. 右上の縮小図の点線は供試体およびベントナイト緩衝材, 廃棄体の位置を示している.



図-3 拘束水圧5 MPa, 注入水圧4.9 MPa条件下でのCT画像.

体およびベントナイト緩衝材のCT値はおよそ800~1000 Huと似たような値となった.これは岩石供試体の湿潤 密度は1.58 g/cm<sup>3</sup>、ベントナイト緩衝材の膨潤後目標密度 は1.55 g/cm<sup>3</sup>であり、密度がほぼ同じであることと調和的 である.一方で、模型廃棄体部分におけるCT値は3000 ~3500 Huを示している.メタルアーチファクトの影響 で模型廃棄体のSUSを覆っているエポキシ樹脂部分は本 撮影では判別することができなかったが、周囲の岩石供 試体およびベントナイト緩衝材とは明瞭に区別される.



図-4 圧力容器から開封後のCT画像.

#### 4. まとめおよび今後の課題

本研究は、高レベル放射性廃棄物処分孔ニアフィール ドの模型供試体を作製し、拘束圧および注水条件下でX 線CT装置を用いて得られるCT画像を検討した.その結 果、岩石供試体、ベントナイト緩衝材、模型廃棄体をほ ぼ区別できることが確認できた.また、注水によるベン トナイト緩衝材の膨潤した様子も観察できた.今後は、 ニアフィールドの長期力学挙動を予測するために、圧力 容器を遠心載荷装置に載せて拘束圧条件下で注水実験を 行い、実験終了後、CT撮影によりベントナイト緩衝材 の変形や模型廃棄体の沈下量を測定する予定である.

謝辞:本研究を行うに当たり,(財)電力中央研究所の上田 上席研究員,吉沢技術計測(株)の又吉技術員にはX線 CTスキャナーの操作方法および有益なコメントをいた だいた.感謝の意を表します.



#### 参考文献

- 1) 新孝一,岡田哲実,中村邦彦,澤田昌孝:高レベル放射性 廃棄物処分施設のニアフィールドの力学的な長期挙動評価 技術,電力中央研究所報告,N02, p.69, 2006.
- 大久保誠介,福井勝則,杉田隆博:緩み領域の強度回復に 関する基礎検討,資源と素材,117,8,pp.631-638,2001.
- 3) 電力中央研究所,電気事業連合会:高レベル放射性廃棄物 地層処分の事業化技術(概要版), p.195, 1999.
- 4) 西澤修,中野司,野呂春文,稲崎富士:X線 CT による地球科学試料内部構造分析技術の最近の進歩について,地質調査所月報,46, pp.565-571,1995.
- 5) 中野司, 中島善人, 中村光一, 池田進: X 線 CT によ る岩石内部構造の観察・解析法, 地質学雑誌, 106, 5, pp. 363-378, 2000.
- 1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  1110
  <
- 7) 天明敏行,尾原祐三,堤知明,村上祐治: RCD コアの X線 CT 法による物性分布の評価,土木学会論文集 F, 64, 3, pp.248-260, 2008.
- 西本壮志、岡田哲実:高レベル放射性廃棄物の処分孔模型のX線CT撮影、第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、38、pp.363-368,2009.

## EXPERIMENTAL STUDY FOR INNER STRUCTURE OF NEAR-FIELD OF HLW DISPOSAL HOLE

#### Soshi NISHIMOTO, Tetsuji OKADA and Fumitaka ARAI

The objective of this paper is to evaluate inner structure using model specimen of high-level radioactive waste (HLW) disposal hole. The model specimen consist of rock mass, bentonite buffer and model waste. The specimen was enclosed with the pressure vessel and X ray CT scanning was conducted at 5 MPa of confining pressure and 4.9 MPa of injection pressure. As results, the rock, bentonite and model waste were clearly distinguished in the CT images. In addition, the migration-front of poured water and bentonite swelling were observed.