

高レベル放射性廃棄物の処分孔模型のX線CT撮影

西本 壮志^{1*}・岡田 哲実¹

¹ (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
*E-mail: soshi-n@criepi.denken.or.jp

本研究では、高レベル放射性廃棄物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、岩石ブロック（人工岩）および緩衝材（ベントナイト）、模型廃棄体（SUS430）から構成され、処分孔のごく近傍の縮小模型である。医療用X線CTは産業用に比べX線が低強度であるため、CT撮影を行うと金属部分からメタルアーチファクトと呼ばれる放射状のノイズが発生し、画像が乱れてしまう。この現象を避けるために模型供試体のスキャンする方向および解析する画像方向を工夫した結果、比較的明瞭に岩盤部および緩衝材部、模型廃棄体部をCT画像、CT値の両方で区別することができた。

Key Words : X-ray CT, High-Level Radioactive Waste, disposal hole, model test

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る。非常に長い期間に渡り、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¹⁾。廃棄体からの熱は緩衝材、岩盤に熱ひずみを発生させるとともに、地下水の移動に影響を与え、それが緩衝材の膨潤挙動に影響を与える。さらに、将来の被曝に対する安全評価のために超長期の挙動評価が必要になる。そのため、HLW地層処分施設の建設のためには従来施設的设计で行われるような岩盤だけの短期間の挙動評価でなく、岩盤と相互作用する人工バリアも含めたニアフィールドの超長期の力学的挙動を評価する必要がある。そのための基盤研究的知見を得るためには、室内試験レベルにおいて処分孔模型を用いた様々な評価試験を行い、試験終了後の岩盤模型の内部構造、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法を用いればサンプル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、サンプル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、X線CT装置を用いてその内部構造の把握を目的とする。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. 模型供試体試および撮影方法

(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。模型供試体は、電中研・電事連共同研究報告書²⁾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10.0 cmである（図-1、表-1）。処分孔模型において、岩盤部は30 cm角の立方体の人工岩ブロックであり、木節粘土および早強セメント、グラウト材（タスコン）、水を混ぜ合わせ作成した。この人工岩の乾燥密度、湿潤密度はそれぞれ、約1.25 g/cm³、1.58 g/cm³であり、一軸圧縮強さは7.83~10.25 MPaである。緩衝材には圧縮ベントナイト（クニゲルV1）を用い、密度は1.6 g/cm³、初期含水量は約10%になるように圧縮、調整してある。模型廃棄体はステンレス鋼材（SUS430）を用い、密度が6.16 g/cm³となるように内部に空洞を設けて調整してある。

また、比較検討用に直径10 mmのジルコニアボール（ZrO₂、密度6.00 g/cm³）を十数個程度をナイロン袋に入れ円柱状に整え、同様に模型廃棄体としてCT観察を行った。

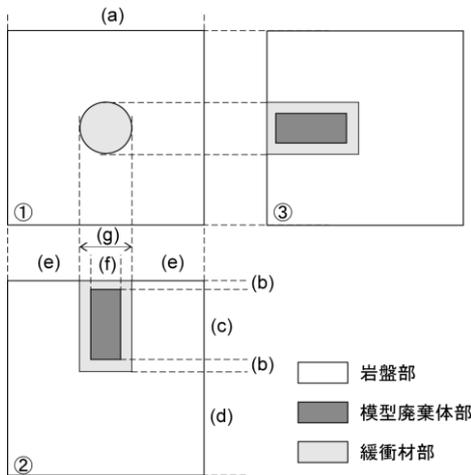


図-1 CT撮影に用いた処分孔模型の展開図

表-1 図-1における模型の各部位の寸法

	(単位: cm)
(a)	30.0
(b)	1.3
(c)	6.2
(d)	21.1
(e)	12.3
(f)	2.7
(g)	5.4

(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サンプルに入射し、透過させたX線の強度を測定する。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^{3,4,5}。X線CTで得られたサンプルの断面はCT画像として得られ、また、その各画素（画像）におさめられた再構成計算で推定されたX線吸収係数の値はCT値と呼ばれている。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、CT値も密度に比例した値と考えることができる^{3,6}。

CT値、 N_{CT} (Hu : Hounsfield unit) は、

$$N_{CT} = \frac{\mu(t) - \mu(w)}{\mu(w)} \times K \quad (1)$$

で表される。ここで、 $\mu(t)$ は被測定物質のX線吸収係数、 $\mu(w)$ 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/cm³のコンクリートで1500 Hu程度、約5.0 g/cm³の鉄で4000 Hu程度である⁶。

本研究におけるX線CT装置による撮影は、(財)電力中央研究所が所有する東芝メディカルシステムズ株式会社製の医療用マルチスライスX線CT装置（Aquilion, TSX-101A）を使用しCT画像を取得した（図-2）。Aquilion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。

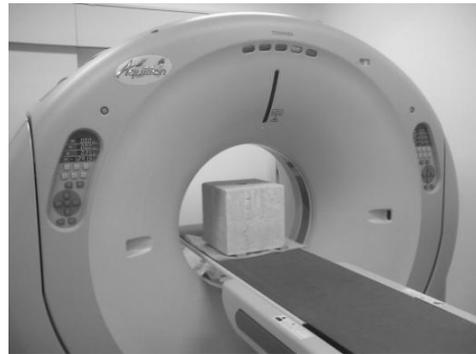


図-2 本研究で用いたX線CT装置と模型供試体(中央)

(3) 撮影方法

処分孔模型供試体をX線CTスキャナーで撮影する際、3方向から撮影を行った。図-3に示す様に、処分孔部を上から見た方向（①）、側面から見た方向（②および③）する方向である。すなわち、図-1の展開図①～③が、それぞれ得られるスライス画像の模式図と同等である。得られたCT画像からDICOMビューアーであるOsiriXを使い三次元画像として再構成を行った。

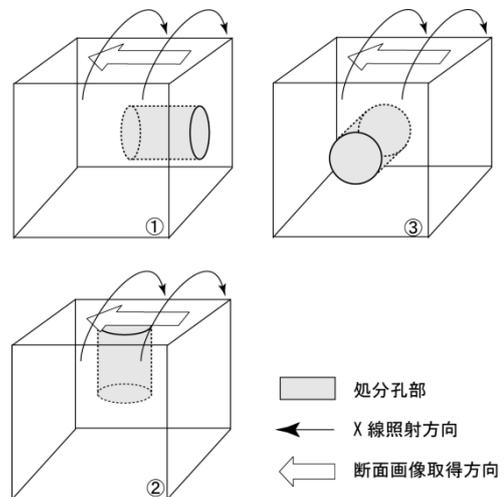


図-3 模型供試体のスキャン方向を示した模式図

この3方向について、岩盤ブロックのみ、岩盤+緩衝材、岩盤+緩衝材+模型廃棄体の3種類、および、岩盤模型全体と処分孔を拡大した部分のスキャンを行った。また、将来的に模型に三軸応力を载荷することを想定し、岩盤ブロックの各面に1 mmのアルミ板 (A5052P-H34, 密度 2.69 g/cm^3) 2枚を載せてスキャンも行った。スキャン時のX線出力 (管電圧・管電流) は135 kV・350 mAである。

3. 撮影結果

以下に、得られたCTスキャン画像及び再構成画像を示す。画像は処分孔部の中心を基準として、供試体ブロックに対して平行あるいは垂直にスライスした時の画像である。

(1) 処分孔部を上から見た方向の断面撮影

処分孔部を上から見た方向 (図-3の①の場合) のCT撮影結果を、図-4~6に示す。図-4は岩盤+緩衝材、図-5, 6は岩盤+緩衝材+模型廃棄体で、模型廃棄体はそれぞれ、ステンレス鋼材及びジルコニアボールの時の画像である。これらは処分孔部付近を拡大してスキャンしたときのCT画像である。図-4a~6aがスキャンによって得られたCT画像、図-4b~6bおよび図-4c~6cがスキャン画像に対して縦・横方向に垂直な面の多断面再構成 (MPR : Multi Planer Reconstruction) 画像である。図-4では密度差の小さい岩盤部と緩衝材部をできるだけ区別するために、画像のCT値 (濃淡) の上限・下限を0~1000 Hu (黒~白) とした。図-5~10では密度差の大きい模型廃棄体部と岩盤+緩衝材部の区別を明確にするために-500~2500 Hu (黒~白) として解析画像を得た。

図-4において、スキャン画像、再構成画像ともに岩盤、ベントナイト、隙間が色の濃淡によって明瞭に区別されていることがわかる。撮影試験時において、岩盤は乾燥状態で使用したため、ベントナイトとの間には約 0.4 g/cm^3 の密度差があり、ベントナイトの方が若干白っぽく見えている。一方で、再構成画像において、岩盤の上端面部分が干渉縞による影響で不鮮明になっている。そのため載せているアルミ板を判別するのが難しくなっている。

図-5, 6において、模型廃棄体のステンレス鋼材及びジルコニアボールを入れた供試体のCT画像は、スキャン画像、再構成画像ともに高密度の模型廃棄体の影響で大きく虚像が現れている。特に、スキャン画像において、模型廃棄体を中心として黒い (CT値の低い) クロスした虚像およびベントナイト部に見える白い (CT値の高い) 虚像が顕著であり、岩盤、ベントナイトともに画像

の色がそれに侵されている。また、再構成画像においても模型廃棄体を中心として白い帯状の虚像が見える。この白い帯状の虚像はメタルアーチファクトと呼ばれ、CT撮影の際、物質間のX線吸収係数が極端に異なるために生じるアーチファクトである。ステンレス鋼材の模型廃棄体の中心部には低いCT値が観察されており、密度調整用の空隙を捉えたものと考えられる。高密度の模型廃棄体の影響によるメタルアーチファクトが存在するが、基本的には再構成画像においては、岩盤部、緩衝材部、模型廃棄体部が比較的明瞭に区別することができる。

(2) 処分孔部を側面から見た方向の断面撮影

図-3における②および③の時のCT撮影結果をそれぞれ、図-7, 8および図-9, 10に示す。岩盤+緩衝材+模型廃棄体の撮影結果である。前項と同様に、すべてのCT画像において、高密度の模型廃棄体から発せられるメタルアーチファクトが現れている。一方で、再構成画像である図-7c, 8cおよび図-9b, 10cでは、処分孔部の縦方向にCT値の低い黒い虚像が発生しているものの、メタルアーチファクトはそれほど大きくなく、岩盤、ベントナイト、模型廃棄体が比較的明瞭に区別できる。また、模型供試体上端部に載せてあるアルミ板も明瞭に捉えている。アルミは岩盤やベントナイトに比べ密度差がそれほど大きくないため、アルミ板からはメタルアーチファクトは発生していないと考えられる。

4. 考察

(1) CT値による模型供試体の判別

岩盤部、緩衝材部、模型廃棄体部が比較的明瞭に区別できた図-7c (模型廃棄体がステンレス鋼材)、図-8c (ジルコニアボール) の処分孔部における横断方向のCT値の変化を図-11, 12に示す。CT値は、岩盤部では概ね400~600 Hu、ベントナイトでは概ね600~800Huを示した。岩盤部とベントナイトの間で得られている急激なCT値の低下部分は、その間に存在している隙間であり、CT値はマイナスを示している。同様に、ベントナイトと模型廃棄体との間にある急激なCT値の低下も隙間の存在を示している。ステンレス鋼材模型廃棄体は、3000 Hu程度の高いCT値が得られているが、その中に密度調整のための空洞が存在するため、中心に向かってCT値の低下が得られている。しかし、空洞と考えられる中心でのCT値は約1300 Huであり、メタルアーチファクトによる影響がきわめて強いと考えられる。ジルコニアボールのCT値は4500~6000 Huと、ステンレス鋼材よりも若干密度が低いにも関わらずかなり高い値が得られた。

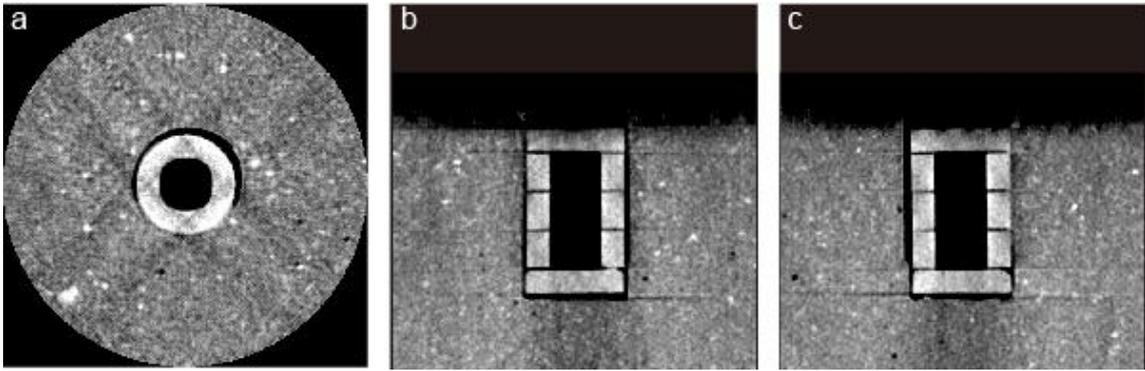


図-4 岩盤+緩衝材のCT画像(a)およびMPR画像(b, c). スキャン方向は図-3①参照.

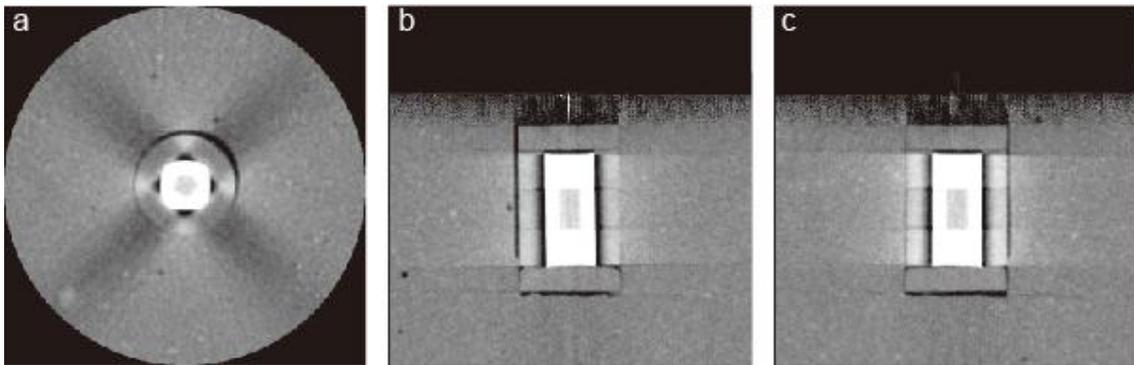


図-5 岩盤+緩衝材+ステンレス鋼材模型廃棄体のCT画像(a)およびMPR画像(b, c). スキャン方向は図-3①参照.

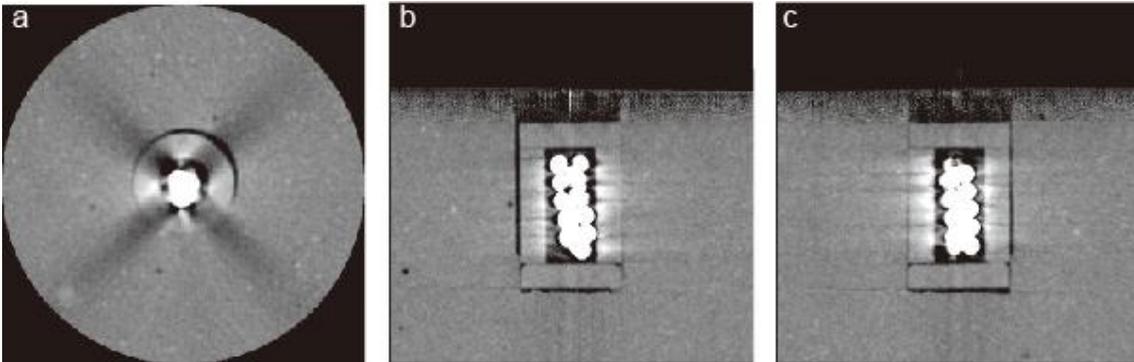


図-6 岩盤+緩衝材+ジルコニアボール模型廃棄体のCT画像(a)およびMPR画像(b, c). スキャン方向は図-3①参照.

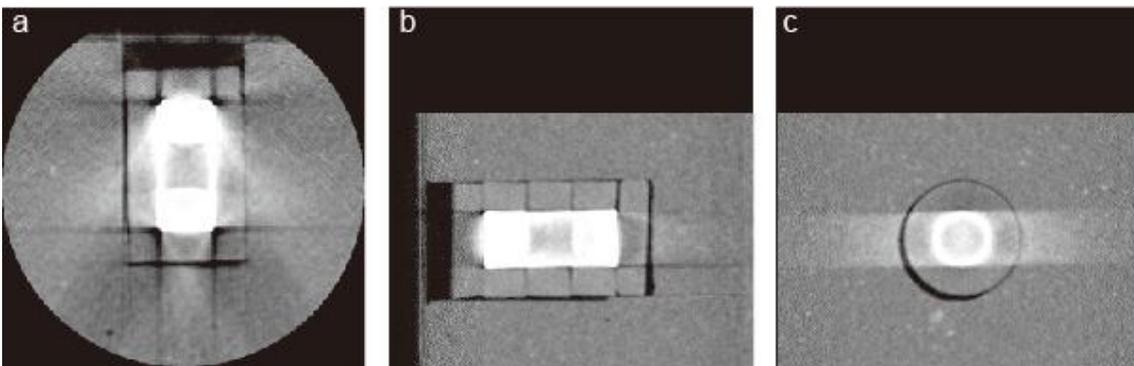


図-7 岩盤+緩衝材+ステンレス鋼材模型廃棄体のCT画像(a)およびMPR画像(b, c). スキャン方向は図-3②参照.

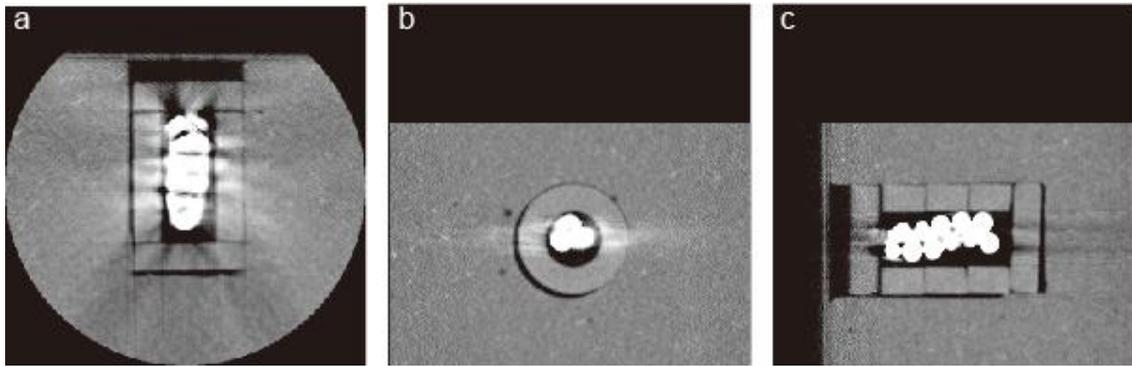


図-8 岩盤+緩衝材+ジルコニアボール模型廃棄体のCT画像(a)およびMPR画像(b, c). スキャン方向は図-3②参照.

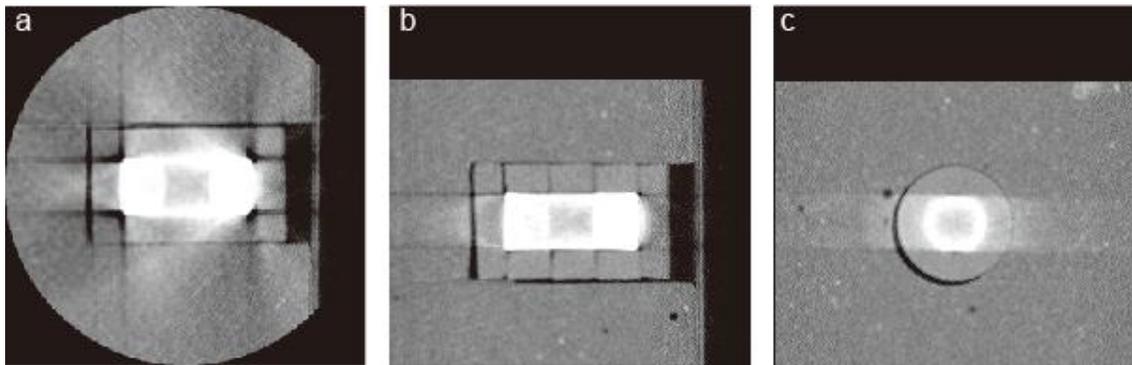


図-9 岩盤+緩衝材+ステンレス鋼材模型廃棄体のCT画像(a)およびMPR画像(b, c). スキャン方向は図-3③参照.

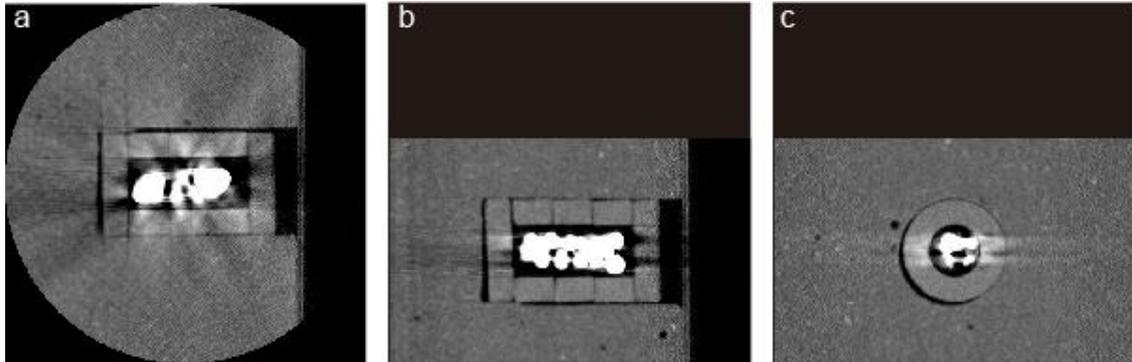


図-10 岩盤+緩衝材+ジルコニアボール模型廃棄体のCT画像(a)およびMPR画像(b, c). スキャン方向は図-3③参照.

ステンレス鋼材は円柱状で一様な形状をしているのに対して、ジルコニアボールはボールの集合体であるので、形状も比較的いびつで、ボール間に存在する空隙も点在する。そのため、メタルアーチファクトがステンレス鋼材より複雑な形で発生した影響で、このような現象が起こったのではないかと推測される。また、急激なCT値の低下は、ジルコニアボール模型廃棄体に点在する隙間の影響と考えられる。空隙と考えられるCT値が高く得られている原因は、ステンレス鋼材模型廃棄体と同様の理由と考えられる。

(2) 現時点での課題点および今後の展開

岩盤部、緩衝材部ともにCT値に ± 100 Hu程度のばらつきが生じているため、基準となるCT値からの差分をとるなど方法によって、できるだけ虚像による影響を排除する必要がある。加えて、金属のような高密度物質をX線CT装置でスキャンすると、きわめて大きなメタルアーチファクトが発生する。現時点では再構成画像を用いた、メタルアーチファクトの影響が少ない画像を用いて解析しているが、より厳密な密度、変位量などの推定をする場合には、小関ほか⁷⁾などが提案しているメタルアーチファクトを低減するリバースエンジニアリングによ

る手法等を導入，検討する必要がある．また，実際の HLW 処分孔を想定した条件下，すなわち，応力や温度の負荷，注水等を行いながら CT 撮影を行い，模型共試体の内部構造を把握すれば，放射性廃棄物処分施設のニアフィールドに関する研究に対してより基礎的な貢献ができると考えられる．

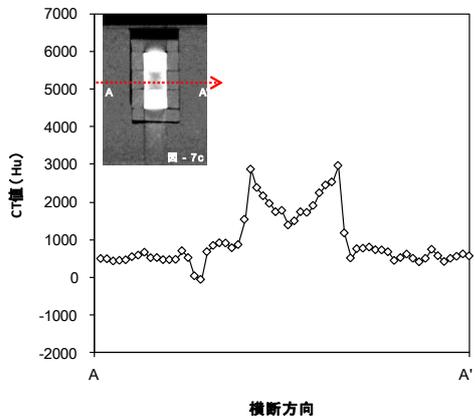


図-11 図-7cにおけるCT値の変化.

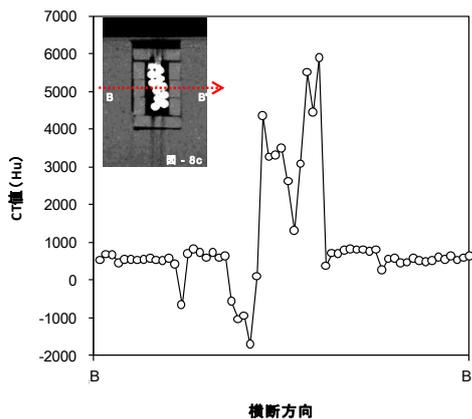


図-12 図-8cにおけるCT値の変化.

5. 結言

本研究は，高レベル放射性廃棄物処分孔を模した，人

工岩，緩衝材，模型廃棄体からなる処分孔模型を作製し，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，約0.4 g/cm³の密度差がある岩ブロックおよびベントナイトは，画像，CT値ともに明確に区別された．一方で，高密度の模型廃棄体をスキャンした場合，きわめて大きなメタルアーチファクトが発生したが，再構成画像を用い，解析する方向を変えることにより，比較的良好的なCT画像，CT値を得ることができた．本研究で得られた知見は，放射性廃棄物処分施設のニアフィールドにおける内部構造把握に関する研究に対して基礎的な貢献ができる．

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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 土山明，上杉健太郎，中野司：高分解能X線CT法による岩石・鈾物の3次元構造の研究-太陽系初期物質とコンドリュール-，地学雑誌，109，pp.845-858，2000.
- 6) 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.
- 7) 小関道彦，橋本周平，佐藤慎平，木村仁，伊能教夫：X線CT画像におけるメタルアーチファクトの低減アルゴリズム，日本機械学会論文集A編，72，724(20061225)，pp.1888-1894，2006.

X-RAY CT MEASUREMENT OF MODEL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL HOLE

Soshi NISHIMOTO and Tetsuji OKADA

The objective of this paper is to evaluate internal structure using model specimen of high-level radioactive waste disposal hole with medical X-ray CT scanning. The model specimen consist of rock mass, bentonite buffer and model waste. The rock mass and bentonite were clearly distinguished in the CT images. However, the CT images around the model waste which has high bulk density were largely disturbed because "metal artifact" occurred at the model waste. As a result of devising the scanning-direction of the model specimen and using Multi-Planer-Reconstruction images, we were able to distinguish the rock mass, buffer material and model waste in the CT image and CT value comparatively.