

高レベル放射性廃棄物処分施設におけるすき間充てん技術の開発

中島 均 齋藤 亮 石井 卓 戸栗 智仁 沖原 光信 岩佐 健吾
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部) (土木技術本部) (第一土木事業本部)

Development of gap filling technique in HLW repository

Hitoshi Nakashima, Akira Saito, Takashi Ishii, Satohito Toguri, Mitsunobu Okihara, Kengo Iwasa

高レベル放射性廃棄物は地下 300m より深い地層に埋設し最終処分される計画である。緩衝材は廃棄物中の核種が地下水へ移行するのを抑制する人工バリアの一つであり、膨潤性粘土のベントナイトが主要な材料と考えられている。緩衝材の施工技術について様々な方式が研究開発されている一方で、緩衝材の周囲に発生するすき間の処理については検討が遅れていた。すき間を適切に処理することは緩衝材の品質を確保するうえで非常に重要である。本報告では、緩衝材の周辺に発生するすき間を緩衝材と同等の性能に施工することを目的として、ベントナイトペレットを用いたすき間充てん技術を開発した。これまでに得られているよりも高い密度の充てんが必要であることから、球形で高密度なベントナイトペレットを製造する新たな方法を開発した。この方法を用いて製造したベントナイトペレットの充てん性能や使用条件を小規模充てん実験で確認するとともに、実寸規模のすき間に対する施工実験で充てん技術の適用性を示した。

HLW is supposed to be disposed underground at depths more than 300 m in Japan. Buffer is an artificial barrier that controls radionuclides migrating into the groundwater. The buffer would be made of a natural swelling clay, bentonite. Construction technology for the buffer has been studied for many years, but studies for the gaps surrounding the buffer are little. The proper handling of the gaps is important for guaranteeing the functions of the buffer. In this paper, gap filling techniques using bentonite pellets have been developed in order to the gap having the same performance as the buffer. A new method for manufacturing high-density spherical pellets has been developed to fill the gap higher density ever reported. For the bentonite pellets, the filling performance and how to use were determined. And full-scale filling tests provided availability of the bentonite pellets and filling techniques.

1. はじめに

わが国の高レベル放射性廃棄物処分では、使用済み燃料の再処理で発生する高レベル廃液は、ガラス固化体にしたうえで、地下 300m より深い地層に最終処分することになっている¹⁾。ガラス固化体はオーバーパックと呼ばれる金属容器に納められ、地層中に設けられる空洞に定置される。オーバーパックの周囲の空間、すなわち空洞壁面との間には、緩衝材と呼ばれる人工バリアが、オーバーパックの全面を 1m ほどの厚さで取り囲むように設置される²⁾。

緩衝材は、放射性核種の移行を抑制する主要な人工バリアであり、ベントナイトと呼ばれる天然の粘土を使用することが考えられている。ベントナイトには自発的に水を吸収して膨張する性質があり、その性質により緩衝材は低透水性や膨潤性を示し、これらが総合的に核種移行抑制に寄与し、処分施設の安全を確保する。

このような低透水性や膨潤性は、緩衝材の密度に依存して増加するため、緩衝材は所定の密度を確保する必要がある。現状では緩衝材の仕様として、ベントナイトと砂を乾燥重量比で 70% : 30% に混合した材料を乾燥密度 1.6Mg/m³ に締め固めた状態が想定されている³⁾。このような仕様を地下深部で確実に満足するためには、緩衝材の施工方法を確立する必要があり、様々な施工方法が提案され、国の基盤研究などで研究開発が進められている⁴⁾。

しかし、施工方法によっては緩衝材の周囲に、施工に伴うすき間が発生する場合がある。このようなすき間は適切に対処しなければ緩衝材の機能を損なう恐れがある。ベントナイトですき間を充てんする方法は、緩衝材の機能を確保するために効果的な方法として期待されている。

筆者らは、ベントナイトペレットを用いて、緩衝材周囲に発生するすき間を高密度に充てんする技術を開発した。はじめに、球形で高密度なベントナイ

トペレット（商品名：クレイパール）を製造する新しい方法を開発した。次に、提案した方法で実際にベントナイトペレットを製造し、大きさの異なるペレットの組み合わせなどで、十分な密度のすき間充てんができることを室内試験により確認した。最後に、実寸規模のすき間を模擬し充てん実験を行い、すき間の充てん方法を検討し、充てん技術の適用性を確認した。

2. すき間充てん技術開発の前提

2.1 緩衝材の施工技術とすき間

緩衝材の施工方法として様々な方法が検討されているため、それに応じてすき間も異なる。

図-1は岩盤内に円筒形状の空洞を設け、あらかじめ所定の密度に成型した緩衝材ブロックを、オーバーパックの周囲に定置し、緩衝材を構築する施工方法を示している。ブロックを定置するためには図に示す位置に最低限のすき間が必要である。すき間が狭ければ、緩衝材が膨潤してすき間を閉塞することも可能であるが、すき間は事前に充てんするほうが望ましいと考えられる。

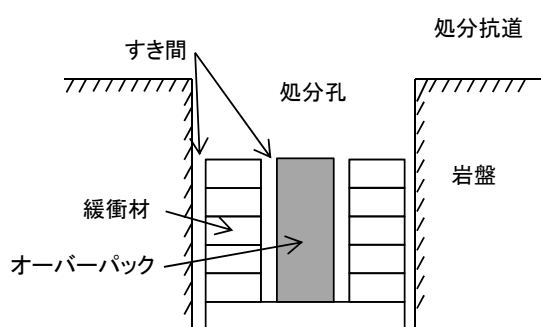


図-1 縦置き処分方式におけるすき間の概念

図-2は岩盤内に円形のトンネルを掘削し、オーバーパックを横置きに定置する場合の、緩衝材ブロックの施工概念を示している。図-1に示した縦置き方式の場合に比べると、緩衝材ブロックの定置技術の難易度は高いと考えられている。施工法が確立されたとしても、すき間の幅は縦置き方式に比べて広がる可能性が高い。横置き定置方式では定置技術の困難さを解決する代替案として図-3に示すようなPEM工法（Prefabricated Engineered barrier system Module）も開発された。オーバーパックと緩衝材を地上にて事前に金属容器内にパッケージ化し、PEM容器ごと地下の所定の位置に定置する施工法である⁵⁾。しかし、この方法においてもPEM容器の外側にすき間が発生することは避けられない。

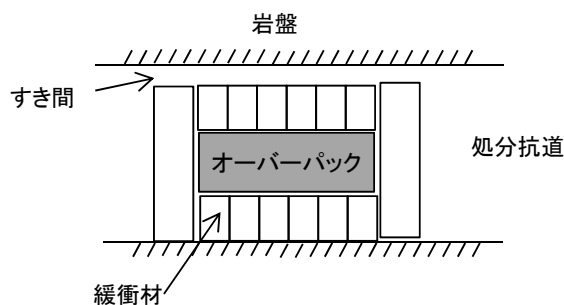


図-2 横置き処分方式におけるすき間の概念

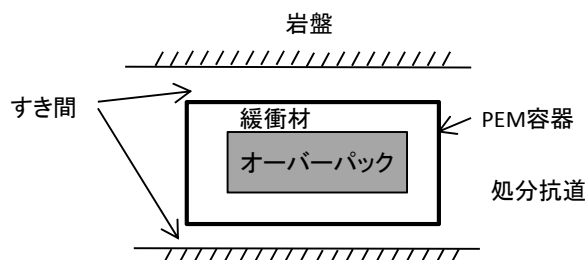


図-3 PEM方式におけるすき間の概念

2.2 すき間充てん技術の目標と従来のベントナイトペレットの製造方法

緩衝材周囲に発生するすき間をベントナイト系材料で充てんすれば、緩衝材と同様の低透水性や膨潤性が期待でき、緩衝材の機能低下の抑制に有利に働く。施工性を考慮するとベントナイトペレットは効果的な充てん材料である。ベントナイトペレットのような粒状材料は、締固めるなどの作業を行わなくとも、すき間に落下させるだけで、ある程度の密度を確保できると考えられるからである。すき間が狭いことや、地下の狭隘な空間で施工しなければならないことなどを考慮すると、なるべく簡易な施工法が選択できれば有利である。

すき間の充てん密度としては、 1.37Mg/m^3 以上が確保できることが望ましい。緩衝材は砂を30%混合した状態で乾燥密度 1.60Mg/m^3 とされている。ベントナイトのみで製造されるペレットを考えると、充てん密度 1.37Mg/m^3 で緩衝材相当の性能が期待できる。

これに対し、既存の研究において報告されている充てん密度は $1.0\sim 1.2\text{Mg/m}^3$ 程度である⁶⁾。使用されているベントナイトペレットは、ベントナイト原鉱石を破碎した材料や市販の造粒機などで製造したベントナイトペレットである。これらのペレットの密度はベントナイト原鉱石は鉱石そのものの密度が 1.8Mg/m^3 程度であり、市販のペレット製造機で製造されたペレットも最大で乾燥密度 1.96Mg/m^3 である⁷⁾。

筆者らは、充てん密度を高めるためには、高密度なベントナイトペレットを用いることが効果的だと考えた。また、狭いすき間への充てん性を考慮すると、できるだけ球形のペレットが望ましいと考えた。

一般的に、高密度なベントナイトペレットは成形圧力を高めると製造可能である。しかし大規模な装置が必要であったり、製造コストが高まる問題点があった。また、高い成形圧力では球形なペレットを製造することは難しい。このため、市販の造粒機器を用いて、新たな方法でベントナイトペレットを製造することを試みた。

3. 乾燥収縮を用いたベントナイトペレットの製造方法

高い成形圧力により高密度を実現するのではなく、乾燥収縮を利用してベントナイトペレット（商品名：クレイパール）を製造する方法を開発した⁸⁾。市販の粉体加工機器を利用して球形のペレットを製造し、そののちに乾燥収縮を利用して高密度化を図る方法である。製造手順を図-4に示す。前半は球形ペレットを製造する工程（造粒工程）、後半は高密度化を図る工程（乾燥工程）である。

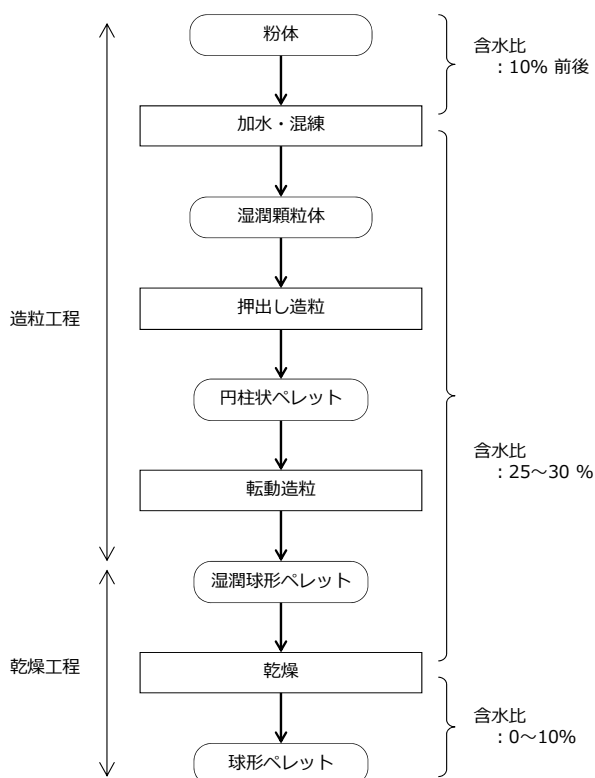


図-4 提案するベントナイトペレット製造方法の手順

3.1. 造粒工程

造粒工程では市販の2種類の造粒機器を用いて球形のペレットを製造する。押し出し造粒機を用いて円柱形のペレットを製造したのちに、転動造粒機を用いて球形のペレットに変形する。これらの造粒機は、種々の粉体材料を球形もしくは楕円形のペレットに加工するのに汎用的に用いられている。

押し出し造粒の概念は図-5に示すとおりである。適正な水分状態に調整した粉体材料を、ダイス（図-6）と呼ばれる無数の円形孔を有した金属板の上に供給する。ダイスの上を円形のローラーが材料を押しつぶすように回転する。材料は円形孔で圧縮され、ダイスの下から押し出される。ダイスの下部には押し出された材料を適度な長さに整えるカッターがあり、円柱型ペレット（図-7）ができる。

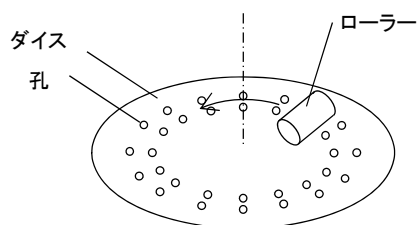


図-5 押し出し造粒の概念



図-6 押し出し造粒機のダイス（左：8mm、右：3mm）



図-7 円柱状ペレット（押し出し径：8mm）

転動造粒機は図-8に示すようである。円形の高速回転板の上に、円柱状ペレットを供給すると、それらは回転による遠心力で周囲の壁に衝突する。このような挙動やペレット同士の衝突や摩擦などで、

次第に角が丸くなり、やがて球形のペレット(図-9)が成形される。

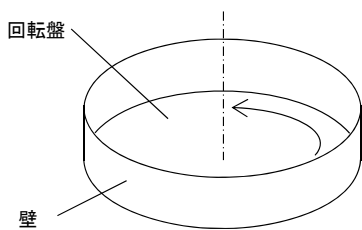


図-8 転動造粒の概念



図-9 球形ペレット(押し出し径:8mm)

ベントナイトは粘着性の高い材料であり、農薬や肥料などの造粒の分野では粘結材(バインダー)として用いられることも多い。しかし、ベントナイトのみに対して、このような機器で球形ペレットに加工した実績はなかった。そこで、造粒が可能な水分量があるのか、あるとすればどの程度なのかを造粒試験によって確認した。

図-10は、造粒試験の各ケースの含水比と押し出し径の関係を示している。おおよそ25~30%の含水比に調整することで球形ペレットが造粒できる。使用したベントナイトは国産のNa型ベントナイトであるクニゲルV1(クニミネ工業社製)なので、塑性限界21%、液性限界416%である³⁾ことを考慮すると、塑性限界より少し多い水分量で造粒可能なことがわかった。ただし、押し出し径の違いに応じて水分量を

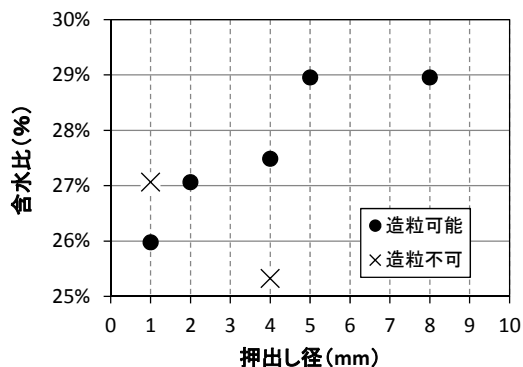


図-10 造粒時の適正な水分状態

適宜調整する必要があり、押し出し径が小さいと含水比を低くしなければならない。

なお、図には造粒困難なケースを2つ示しており、それぞれ次のような挙動が確認された。押し出し径1mmで含水比27.1%のケースでは、押し出された円柱状ペレットは水分が多すぎ、丸め時に団粒化した。また、押し出し径4mmで含水比25.4%のケースでは、水が少なすぎて、押し出しはできたものの円柱状ペレットが固く球形に丸められなかった。

3.2. 乾燥工程

乾燥工程では造粒工程で作製した球形の湿潤ベントナイトペレットを乾燥させて、乾燥収縮によって密度を増加させる必要がある。造粒したベントナイトペレットは、含水比が25~30%程度であり、ほぼ飽和状態だと考えれば、乾燥密度は1.5Mg/m³程度である。これはブリケットマシンや打錠機などのように圧縮力でベントナイトペレットを製造する汎用的な造粒機で製造されるベントナイトペレットよりも低い密度である。

造粒工程で用いた押し出し造粒機や転動造粒機で製造される農薬や肥料などのペレットは、100℃程度の熱風を送風し、比較的早く乾燥させるのが一般的である。ベントナイトペレットを同様の方法で乾燥させると乾燥速度が速すぎるため、ペレットに割れが発生したり、脆い状態になる。このようなペレットでは、高い充填密度が要求されるすき間充填には適さない。

乾燥速度を小さくすることで良好な乾燥収縮が起きると考え、低温での乾燥を行ってベントナイトペレットの密度増加を確認した。乾燥温度として40~50℃程度を設定した。乾燥の方法として送風乾燥だけでなく、送風しないタイプの汎用的な電気乾燥炉も使用した。なお、用いたペレットは押し出し径5mmと8mmの2種類のペレットである。

図-11(a)は40~50℃の温風を送風した場合の乾燥の進展を示している。温度を低く抑えても、送風している限りは、1~2時間と比較的早く乾燥した。一方、図-11(b)は電気乾燥炉を用いた場合である。電気乾燥炉を用いると炉内の湿気の排出が遅くなるため、ペレットからの蒸発が抑制され、送風した場合に比べて非常に乾燥速度が遅くなる。

表-1は、乾燥後のペレットの密度を示している。送風乾燥機の場合は、乾燥収縮により乾燥前よりも密度が増加しているものの、乾燥密度は1.8Mg/m³程度であった。一方、電気乾燥炉を用いた場合は、2.0Mg/m³程度まで密度が増加している。電気乾燥

炉を用いて送風がない状態で乾燥時間が長くなるほうが、乾燥収縮が大きくなり、ペレットの密度が増加していることがわかる。

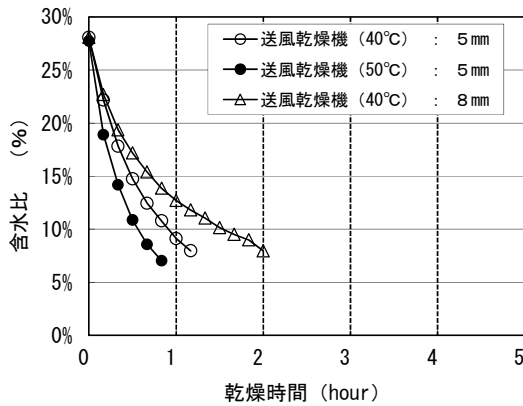


図-11(a) 乾燥による水分低下 (送風乾燥)

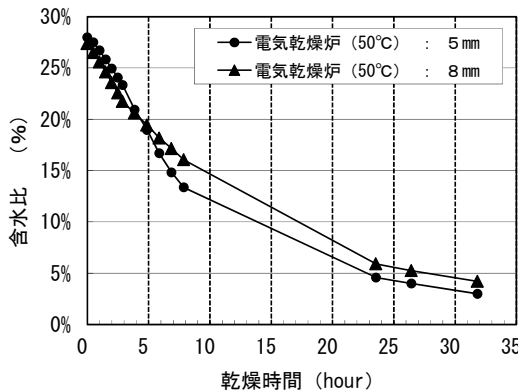


図-12(b) 乾燥による水分低下 (炉乾燥)

表-1 ベントナイトペレットの乾燥密度

乾燥方式	乾燥温度 °C	ペレット径 mm	乾燥密度 Mg/m ³
送風乾燥	40	5	1.82
送風乾燥	50	5	1.81
送風乾燥	40	8	1.81
乾燥炉	50	5	2.03
乾燥炉	50	8	1.97

3.3. ベントナイトペレット(クレイパール)の特徴

ゆっくり乾燥させて製造したベントナイトペレットの粒度分布を図-13に、外観を図-14に示す。ダイスの孔径を変えることで、さまざまな粒径のベントナイトペレットを製造することができる。適用できる孔径は 0.3mm~20mm である。各々の押し出し径のペレットで、若干大きな塊や破碎した屑が混在するが、おおむね粒径が揃った状態で製造可能である。

表-2 は水中浸漬し、水置換法で測定したペレット単体の乾燥密度である。おおむね、2.0Mg/m³を示しており、小さい粒径のほうが、より高密度になる傾向がある。

表-2 ベントナイトペレットの乾燥密度

押し出し径 (mm)	乾燥密度 (Mg/m ³)
20mm	1.90~2.00
15mm	1.95~1.99
8mm	1.96~2.00
4mm	1.97~2.04
1mm	2.05~2.16

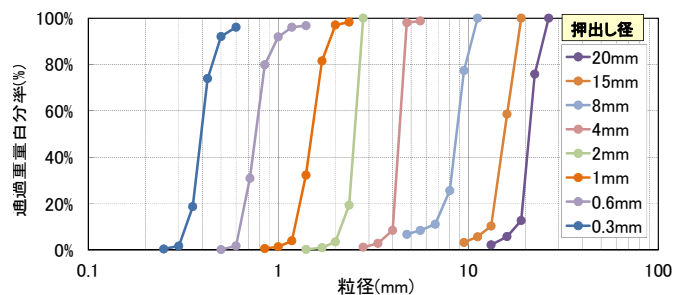


図-13 ベントナイトペレットの粒度分布



図-14 粒径が異なるベントナイトペレット

4. ベントナイトペレット(クレイパール)の充てん性能

4.1 充てん試験の方法

ベントナイトペレットの充てん性能は、充てん密度、すなわち、所定空間に充てんできたベントナイトの重量で表現できる。実際のすき間の幅は施工方法などにより変わるが、まずは基本的な充てん性能を直径 100mm、高さ 127mm の小型容器に充てんすることで確認した。充てんは容器上面より流し込

む方法を用い、振動や加圧などは加えなかった。なるべく簡易な充てん方法が望まれており、落下だけで目標とする充てん密度が得られることが重要だと考えた。

4.2 ベントナイトペレットの充てん密度

クレイパールは粒径が揃っているため、単粒径で用いると充てん密度が高くない。表-3は、それぞれのペレットの充てん密度の測定結果である。最大でも1.31Mg/m³であり、目標の1.37Mg/m³は満足できない。

表-3 ベントナイトペレットの充てん密度

ペレットの種類	ペレットの乾燥密度 (Mg/m ³)	充てん密度 (Mg/m ³)
1mm ペレット	2.16	1.31
2mm ペレット	2.10	1.26
4mm ペレット	2.04	1.21
20mm ペレット	2.00	1.11

4.3 2粒径混合ペレット

粒径の異なるペレットを適切に混合することで、充てん密度が高まることは一般的な考え方である。大きい粒径のペレットが作る空間に小さいペレットを配置することで充てん密度は高まる。

図-15は2粒径を混合した場合の充てん密度を示している⁹⁾。大きい粒径のペレットとして、20mmペレットを用い、小さい粒径のペレットとして1mm、2mm、4mmの3種類のペレットを用いている。3種類の組み合わせ毎に混合率も変化させ、横軸に示した。横軸の両側は単粒径で充てんしたときの充てん密度である。

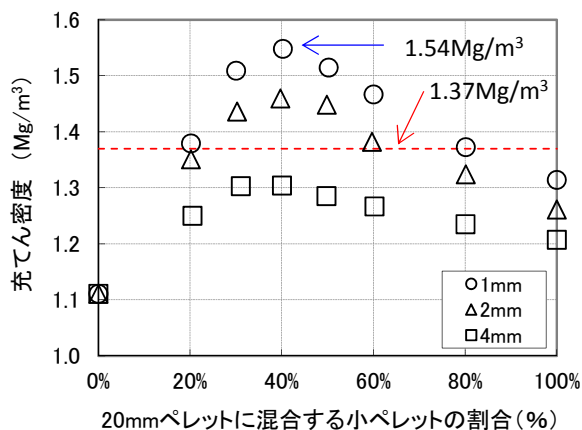


図-15 2粒径混合ペレットの充てん密度

2粒径を混合すると充てん密度が高まることが確認できる。小さい粒径のペレットが40%において、充てん密度は最大値を示す。また、小さい粒径のペレットが1mmの場合に充てん密度は最も高かった。すなわち、異なる粒径のペレットを混合する場合には、粒径の差が大きいほど充てん密度が高くなることが確認できた。

使用したペレットの中で、最大の充てん密度を示したのは、20mmペレットと1mmペレットを60:40で混合した場合で、その値は1.54Mg/m³であった。

5. ベントナイトペレット(クレイパール)を用いたすき間充てん実験

5.1 概要

充てん方法が確立していない横方向すき間(図-2、図-3参照)に対して、実寸規模の型枠ですき間を模擬して、充てん試験を行った⁹⁾。対象としたすき間の断面は図-16に示すとおりである。

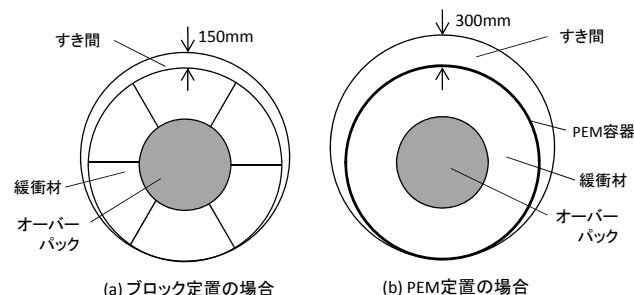


図-16 横方向すき間の断面

5.2 充てん方法

図-1に示したような縦置き方式の場合には、すき間は縦方向に広がっており、上部よりベントナイトペレットを落下させる簡易な施工方法が適用できる。実寸法のすき間における充てん密度は前章で示した小規模な充てん試験の結果と同程度になると考えられる。

これに対して、すき間が水平方向に長い場合には、上部にペレットを供給するための空間がないので、ペレットを水平方向に奥に向けて供給する必要がある。すき間幅が大きい天端部分にペレット供給装置を水平方向に挿入し、天端から下部にペレットを落下させて充てんする方法が考えられる。

ペレットの天端部への供給方法として、空気圧送方式、機械搬送方式などが考えられたが、空気圧送方式が狭い空間への適用性や長距離搬送などの観点で優位性が高かった。

5.3 充てん実験

横方向すき間の充てん実験は、図-17 に示す型枠をすき間に見立てて実施した。天端部分はA型枠で模擬し、側方部分はB型枠で模擬し、2つを開口部で連結する構造である。天端部分の高さは100mmと300mmの2種類として、100mmは横置きブロック方式におけるすき間を、300mmはPEM方式におけるすき間を想定した。

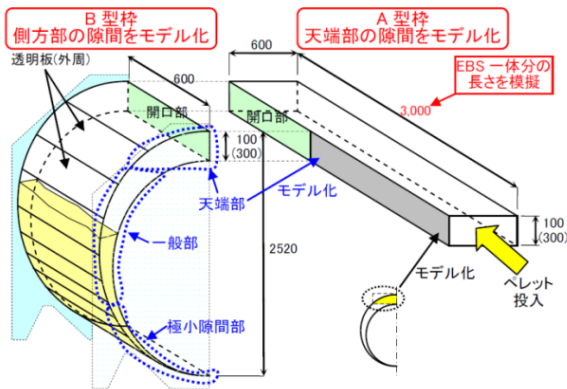


図-17 実寸規模の横方向すき間充てん型枠

空気圧送方式は、図-18 に示すエアブローノズル(商品名:ラウンドブロー、サンワ・エンタープライズ社製)を主要な装置とした。このエアブローノズルは圧縮空気を動力源として周囲の空気を大量に吸引し、空気の流れを作る小型ユニットである。前側に径50mm、長さ3mの吐出管を取付け、吐出口はすき間の天端を模擬したA型枠の奥まで挿入した。

充てんに用いるペレットは、20mmペレットと1mmペレットを60:40で混合した2粒径混合ペレットである。図-15 に示したように、小規模充てん試験で得られた充てん密度の最大値 1.54Mg/m^3 を期待できる材料である。

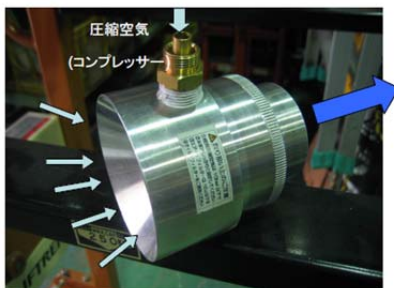


図-18 エアブローノズル(ラウンドブロー)

5.4 充てん密度

試験結果を図-19 に示す。鉛直方向に分割して区間ごとに平均的な充てん密度を求めた。同図(a)に示す天端高さ100mmの場合には中間部位⑦より上部

では、バラツキはあるものの、小規模充てん試験で得られた充てん密度 1.54Mg/m^3 程度が得られており、目標の充てん密度の 1.37Mg/m^3 よりも高い。一方、それより下部ではすき間幅が狭いため、極端に充てん密度が小さくなる。

同様のことが同図(b)に示す天端高さ300mmの場合でも確認できる。充てん密度が極端に小さくなっている部位は下部の2区間(⑪、⑫)であり、天端高さ100mmの場合と同様にすき間幅が50mmより小さい部位が充てん不良である。充てん密度が低い原因は、大きい方の20mmペレットが50mm以下の幅のすき間に十分入らないことにあると思われる。

すなわち、横方向すき間においては、すき間幅が50mm以上の部位は、空気圧送方式により充てんす

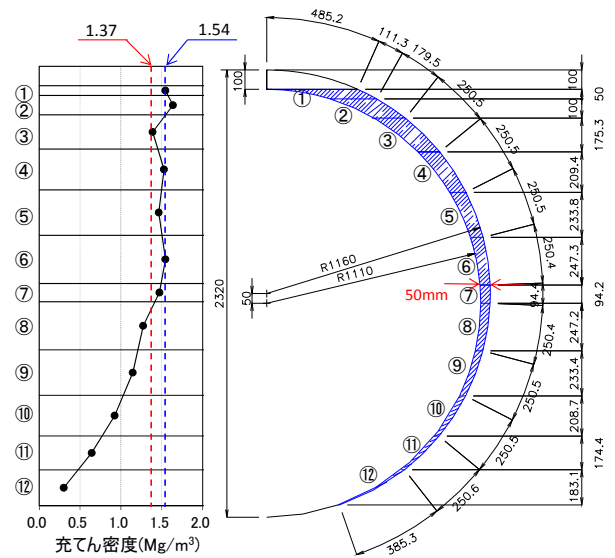


図-19(a) 天端高さ100mmのケースの充てん密度

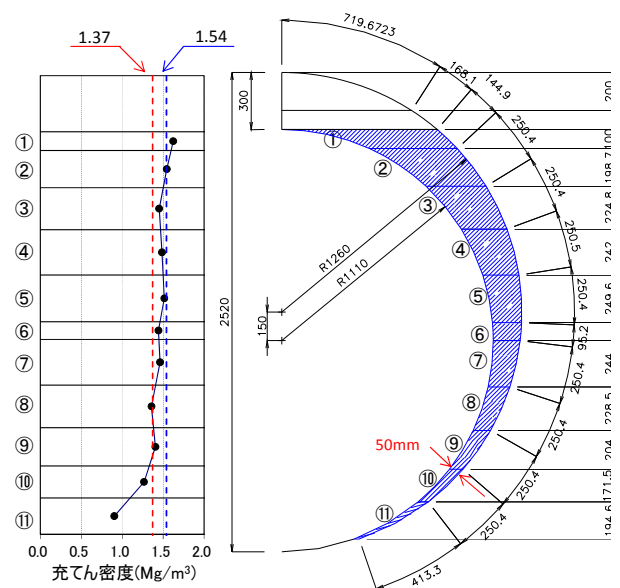


図-19(b) 天端高さ300mmのケースの充てん密度

ることで、目標の $1.37\text{Mg}/\text{m}^3$ 以上で充てんできることがわかった。なお、下部の 50mm 以下のすき間幅の箇所については、図-20 に示すように台座等により設計的に解決することができる。

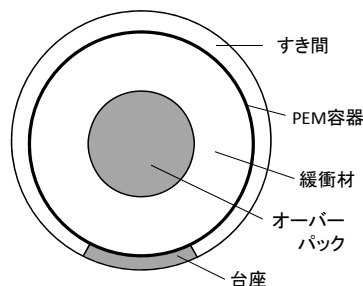


図-20 50mm 以下のすき間の設計対応

5. まとめ

高レベル放射性廃棄物処分において核種が地下水中に移行することを抑制する緩衝材の機能を確保するために、緩衝材の周囲に発生するすき間は適切に処理する必要があり、このようなすき間をベントナイトペレットを用いて充てん密度 $1.37\text{Mg}/\text{m}^3$ 以上に充てんする技術を開発した。

高密度充てんに適した球形で高密度なベントナイトペレットの製造方法として、球形なペレットを成形し、乾燥収縮により密度を高める新たな製造方法を開発した。これにより乾燥密度 $2.0\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度のベントナイトペレットが製造できることを確認した。

製造したベントナイトペレット（商品名：クレイパール）は粒径の異なる2粒径を適切に混合することで、高い充てん密度が得られることがわかった。室内試験で得られた最大の充てん密度は、 20mm ペレットと 1mm ペレットを $60:40$ で混合した場合で、その値は $1.54\text{Mg}/\text{m}^3$ であった。

横置き定置方式を模擬した実寸規模の横方向すき間に対して充てん実験を行った。空気圧送方式の充てんを行うことで、 50mm 幅より広い箇所については目標の $1.37\text{Mg}/\text{m}^3$ 以上で充てんできることがわかった。

開発した技術によって、すき間充てん技術の工学技術としての実現性は確認できた。今後は施工後の品質変化についても検討を進めていく必要がある。すなわち、実際の施設に充てんしたベントナイトペレットは施工直後はペレット間に空隙が多い状態であるが、地下水の浸潤にともなって飽和・膨潤して均質になっていき、低透水性や膨潤性を示すと思わ

れる。このような状態変化や特性変化について研究を進めていくことが重要である。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁から公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが受託した受託研究「処分システム工学要素技術高度化開発」での成果を、一部に含んでいる。本研究の実施にあたり、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターの朝野英一氏には多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を示す。

<参考文献>

- 1) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成十二年六月七日法律 第百十七号），2000. (<http://law.e-gov.go.jp/htmlldata/H12/H12HO117.html>)
- 2) 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010年度版）—確かな技術による安全な地層処分の実現のために—。原子力発電環境整備機構。NUMO-TR-11-01，(2010)。
- 3) 核燃料サイクル開発機構：わ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次とりまとめ—総論レポート，JNC TN1400 99-020，(1999)。
- 4) 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成24年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）—遠隔操作技術高度化開発—，(2013)。
- 5) 矢萩良二 他：PEM 施工技術の開発(3) 鋼殻リング PEM における製作・組立技術の実験的検討。土木学会第 67 回年次講演会，pp.85-86，(2012)。
- 6) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成18年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査 報告書（2/2），(2007)。
- 7) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成13年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書—遠隔操作技術高度化調査—(2/2)，(2002)。
- 8) 中島均，齋藤亮，石井卓：乾燥収縮を利用したベントナイトペレットの製造方法，原子力バックエンド研究，Vol.21，No.2，pp.83-93，(2014)。
- 9) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成19年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）—遠隔操作技術高度化開発—（2/2），(2008)。