高レベル放射性廃棄物処分における ベントナイト系人エバリア材料の開発

拓雄 板場建太

New type of Bentonite Pellet Development for Engineered Barrier Backfilling

Takuo Mori

森

Kenta Itaba

Abstract

Several construction methods such as bentonite brick emplacement and bentonite pellet (BP) backfilling have been proposed as an engineered barrier (EB). The BP backfilling can be easily remote controlled. However, an EB backfilled by BP has permeability higher than other methods for EB. The high grain density BP is expected to solve this disadvantage. The authors have developed a new type of BP. Powder bentonite is processed in three steps: compression, crushing, and mechanical stabilization. Hence, a 2.00 Mg/m³ grain density with the Fuller curve grain size distribution is achieved. A model disposal drift is backfilled by the high-density BP with injecting a screw conveyor, and the engineered barrier density is confirmed to achieve more than 1.37 Mg/m³.

概 要

高レベル放射性廃棄物処分において、放射性物質を封じ込める人工バリアの構築方法として様々な方法が検 討されている。その有力な候補の1つであるベントナイトペレットをスクリューコンベアで充填する方式は、 施工が簡便なため放射線管理区域内での遠隔操作に優れているが、構築される人工バリアの透水係数は他の方 法よりも大きい。ベントナイトの透水係数は密度と相関があることが広く知られており、高密度のベントナイ トペレットを用いて充填すれば、より高密度の、すなわち高い遮水性能を有する人工バリアが構築できる。そ のため、高密度ベントナイトペレットの合理的な製造方法を検討し、さらにスクリューコンベアで模擬空洞に 充填してできあがる人工バリアの密度を確認した。その結果、乾燥密度2.00Mg/m³のペレットを開発し、この 材料を用いて構築する人工バリアのかさ密度は目標の1.37Mg/m³以上が得られることを確認した。

1. はじめに

東日本大震災後,高レベル放射性廃棄物処分場建設の 早期着工の機運が高まっている。例えば,資源エネルギ ー庁は科学的特性マップを公表し,実施主体である原子 力発電環境整備機構(NUMO)は資源エネルギー庁との共 催で,対話型の説明会を全国で開催している¹⁾。廃棄体の 周りに構築する人工バリア(緩衝材)の施工方法として, ブロック定置,原位置締固め,ペレット充填,吹付けな どの方式が検討されている²⁾。これまで高い遮水性能が 得られるブロック型緩衝材方式が主に検討されてきたが, 放射線管理区域内での廃棄体定置の遠隔操作を考慮した 場合,より現実的な方法としてFig.1に示すペレット充填 方式も技術開発の対象となってきている^{3),4,5)}。

ペレット充填方式は操作性が簡便である反面,透水係 数が他の方法よりも大きい。核燃料サイクル開発機構 (現:日本原子力研究開発機構)はベントナイトの透水係 数(遮水性能)は密度と相関があり,高密度のベントナイ トペレットを用いて充填すれば,高い遮水性能を有する 人工バリアが構築できることを示した⁶⁾。高密度ベント ナイトペレットの製造方法として,ブリケッテイングや ロールプレス,パン造粒,コールドプレスなど様々な方 法が検討されている^{7,8,9}。

このうち比較的安価で大量にベントナイトペレットを



Fig. 1 横置きペレット充填方式(文献5)に加筆) Configuration for a Deep Geological Repository

製造できるロールプレス法について検討した^{10,11)}。ベン トナイトペレットの製造は、①ロールプレス法による粉 体の圧縮成形、②解砕、③粒度調整の3つの工程で行う。 各工程について機械の選定や配合設計などを行い、高密 度ベントナイトペレットの製造方法を検討した。

また,このベントナイトペレットの搬送性ならびに構 築される人工バリアの密度(以下,「かさ密度」と称す)を 調査するため,専用のスクリューコンベアでベントナイ トペレットを模擬空洞に充填した。現時点では,かさ密 度について明確なスペックは示されていないが、例えば 原子力環境整備促進・資金管理センターが進めている PEM(廃棄体と人工バリアを鋼製容器に入れて一体化)の 定置・回収プロジェクトの隙間充填材では、かさ密度 1.37Mg/m³(乾燥)を暫定の目標値として設定している⁹。 この値を念頭に、ペレット充填方式の充填速度や充填位 置などのパラメータの最適化を図った。

2. 高密度ベントナイトペレットの製造

原材料として,粉体の山形産Na型ベントナイト(クニゲ ルV1,含水比ω=7.0%)を使用した。高密度ベントナイト ペレットの製造方法として様々な方法が検討されている が,既往の研究では,おおむね乾燥密度2.00Mg/m³の圧縮 物を用いて空洞に充填すると,かさ密度1.37Mg/m³(乾燥) の人工バリアが得られている^{8),9),12)}。そこで,本研究にお いてもロールプレス機を用いて2.00Mg/m³の圧縮物を製 造することを目標とした。ロールプレスの機構をFig.2に 示す。粉体のベントナイトが2つのロールを通過すると板 状に圧縮される。Garitteらはロールプレスで圧縮し,解 砕した材料をふるい分けして,最適な粒度に再調整して いる¹²⁾。3つの工程(①圧縮,②解砕,③粒度調整)について, 加工機械の選定ならびにパラメータの最適化を図り,よ りシンプルな製造方法を検討した。

2.1 ロールプレスによる圧縮

まず,多くのロールプレス機で採用されている2つの ロール同士をばねで押さえつけるタイプのロールプレス 機(ロール径×幅:200×200mm,押力:40kN)を用いて, 粉体のベントナイトを圧縮した。一旦,ロールプレスさ せた板状の圧縮物を再びロールプレス機に通過させると, 圧縮物の密度が増し,板の厚みも増す。Fig.3にベントナ イトをロールプレス機に5回通過させたときの板状圧縮 物の密度(JIS A 1225 パラフィン法で測定し乾燥密度に 換算,3個平均)を示す。2回目までは通過回数とともに板 状ベントナイトの密度が上昇するが,3回目以降は乾燥密 度1.86Mg/m³前後で大きな変化は見られない。

ばねタイプのロールプレス機では目標密度2.00Mg/m³ が得られなかったため、ロール同士を油圧で押し付ける Table 1に示すロールプレス機で圧縮を行った。油圧で制 御しているため、ロールを600kNまでの力で押し付ける ことができる。Photo 1に通過回数1回目と2回目の板状ベ ントナイトを、Table 2には通過回数と板状ベントナイト の厚さおよび密度(3個平均)の関係を示す。通過回数1回 目から、板状ベントナイトの密度は、1.98Mg/m³でほぼ目 標に達したが板の厚さは1.39mmで、解砕しても板状で充 填後隙間が発生する。2回目以降は4mm前後で、それ以上 は厚くならなかった。ベントナイトペレットの製造の低 コスト化を図るため、ロールプレス通過回数を2回とする ことにし、この厚さを基に解砕の最大粒径を検討した。



Fig. 2 ロールプレスによるベントナイトの圧縮 (文献7) に加筆) Bentonito Compression by a Roll Press



Dry Density of Compressed Bentonite

Table 1 油圧式ロールプレス機の仕様 Roll Press Specification

	1
項目	値
ロール径×幅	Ф300×300mm
回転数	\sim 20rpm
押力	\sim 600kN
モーター	18.5kW



Photo 1 圧縮された板状ベントナイト Bentonite Plate Compressed by a Roll Press

Table 2 板状ベントナイトの物性 Bentonite Plate Properties

Bentonnie Thate Troperties			
通過	出来形		
回数	厚さ	密度(乾燥)	
	mm	Mg/m ³	
1	1.39	1.98	
2	3.59	2.02	
3	4.13	1.98	

		-	
方式	原理	解砕後の粒度	処理能力
カッター	羽根が高速で回転し、羽根が対象 物を解砕	○ 比較的目標の粒度分布 に近い	○ 湿潤質量約80~150kg/h [※] (最大粒径によって異なる)
(1)7-	ドラムが回転し,遠心力で対象物 が外壁に打ち付けられ解砕	 比較的目標の粒度分布 に近い	◎ 湿潤質量約200kg/h [※]
二軸ローラー	2つのローラーの隙間に対象物が 通過させることで解砕	×	(調査せず)
ジョー	板状の片刃がローリング動作し, 対象物を小割りにする	 (調査せず)	△ 湿潤質量約50kg/h [※]

Table 3 解砕機の選定 Type of Disintegrators



Fig. 4 ハンマー方式の解砕機 Hammer Type Disintegrator and the Specification

2.2 解砕

2.1節で製造した板状ベントナイトを,フレーク状に解 砕する。圧縮物を解砕する機械として,Table 3に示す① カッター,②ハンマー,③二軸ローラー,④ジョーなど の方式があり,この4つの方式について試行した。そのう ち二軸ローラー方式では解砕が行えず,またジョー方式 は他の方式と比較して処理速度(50kg/h)が遅かった。カッ ター方式,ハンマー方式とも目標粒度分布(2.3で後述)に 近いフレーク状のベントナイトが得られたが,最も処理 速度が速いハンマー方式(約200kg/h)を採用した。

Fig.4にハンマー方式の解砕機の内部の構造を示す。ロ ータリーカッターの回転で材料が側壁に打ちつけられ解 砕され,さらにセッティングカッターとの隙間で擦りつ ぶされる。材料は、スクリーンの目の大きさよりも小さ くなるまで解砕機内に留まり解砕され続け、目の大きさ 以下になるとスクリーンを通過して、解砕機から排出さ れる。

板状ベントナイトの厚み(約4mm)に近い,目の大きさ が6mmスクリーンをセットして解砕したフレーク状の ベントナイトの粒度分布(〇)をFig.5に示す。一点鎖線 (緑)は最密充填を得るための理論曲線であるFuller曲線 で,最大粒径を5mmと8mmのものを示した¹¹⁾。粒径1mm 以上の分布は比較的一致しているが,0.425mm以下の粒 径のものが不足している。





Bentonite Pellet Filling Preliminary Test

2.3 粒度調整

2.3.1 配合設計 2.2節の解砕で得たフレーク状の ベントナイトをFuller曲線に近づけるために,粉体のNa 型ベントナイトを乾燥重量比で15%添加した結果(●)を Fig. 5に示す。暫定の管理目標とした最大粒径は5mmと 8mmのFuller曲線の間に収まっている。しかしながら汎用 スクリューコンベアでFig. 6のようにバケツに充填し,そ の容積と重量からかさ密度を求めたところ,1.30Mg/m³ しか得られなかった。そこで,ハンマー方式の解砕機の スクリーン径を6mmから10mmに変更し,フレーク状ベ ントナイトの最大粒径が10mmになるようにした。また, 粒度調整用に添加する比較的細かい粒径の材料について

				0			
	配合(乾燥質量比:%)			密度試験結果(乾燥)			
ケース	解石	24日	原鉱石破	译砕品(GX)	粉体(V1)	最小	最大
	10mm以下	1mm以下	2mm以下	0.425mm以下		Mg/m ³	Mg/m ³
1	75	_	17	_	8	1.19	1.56
2-1	80	—	_	20	—	1.22	1.58
2-2	80	_	_	12	8	1.22	1.58
3	75	17	_	_	8	1.17	1.56
4-1	80	20	_	_	_	1.20	1.57
4-2	80	12	_	_	8	1.19	1.57

Table 4 配合試験結果 Mixing Test Results

も、さらに検討した。粉体ベントナイトの他に、ベント ナイトの原鉱石破砕品から2mm以下あるいは0.425mm以 下を抽出したり、板状ベントナイトを最大粒径1mmに解 砕したりしたものを、用いてより忠実にFuller曲線に近づ ける試みを行った。所定の配合のベントナイトペレット を製造し、最小密度・最大密度試験(JIS A 1224に準ずる) を行った。Table 4に試行したベントナイトペレットの配 合と最小・最大密度(乾燥)を示す。Fig. 5のFuller曲線が粒 径が小さくなると通過重量百分率が約8%に漸近する傾 向が見られたため、粉体ベントナイトを用いるケースに ついては配合を8%とした。密度に関しては、特に優位な 差は見られなかったのでより忠実にFuller曲線を再現で きるケース2-2、解砕品10mm以下:ベントナイト=80:12:8を本 研究での配合に決定した。

2.3.2 混合方法 混合装置の検討を行った。まず, 経済性の観点から,2.2節の解砕と同時に混合を行う方法 を検討した。2.3.1項で決定した配合の原鉱石破砕品と粉 体ベントナイトを板状ベントナイトと同時に解砕機に投 入した。しかし投入と同時に細かい粒径ものだけが先に 排出され,混合できないことが明らかになった。次にミ キサーの選定を行った。ミキサーを大別すると,①混合 翼が回転するタイプ(パン型)のものと,②胴体が回転す るタイプのもの,がある。各々試行した結果,②につい ては混合の際に再造粒(粗粒分に細粒分が付着)し粒度分 布が変化したため,①のパン型ミキサーを使用すること とした。

2.4 ベントナイトペレットの製造方法

以上の結果, Fig.7に示すように粉体ベントナイトを原 材料として,次の3つの工程を高密度ベントナイトペレッ トの製造方法とした。①ベントナイトペレットをロール プレスに2回通過させる。②ハンマー方式の解砕機で最大 粒径を10mmに解砕する。③解砕品とベントナイト原鉱 石破砕品(0.425mm以下)および粉体ベントナイトをパン 型ミキサーで混合する。



Fig. 7 高密度ベントナイトペレット製造フロー Manufacturing Process of Hight Density Bentonite Pellet

高密度ベントナイトペレットを用いて構築 する人工バリアの密度

2章で確立した方法でベントナイトペレットを製造し, スクリューコンベアで充填して出来上がる人工バリアの 密度を調査した。

3.1 実験概要

模擬空洞を準備し、ベントナイトペレットをスクリュ ーコンベアで充填した。

3.1.1 模擬空洞 内径500mmのヒューム管(コンク リート製,厚さ42mm)を模擬空洞として使用した。長さ 500mmのヒューム管をPhoto 2に示すように3つ並べて全 長1.5mとした。模擬空洞を山留材の上に載せ、山留材の 高さを変えることで、充填装置(スクリューコンベア)と 模擬空洞の相対的な位置を変化させた。

3.1.2 充填装置 使用した充填装置をPhoto 3に, そ の仕様をTable 5に示す。スクリューの直径は81mmで, 定 格の50rpmで回転すると1時間に1,000kgの搬送能力を有 する。モータにインバータを取り付けて, スクリューの 回転数を変化させた。事前にキャリブレーションを行い, 回転数と搬送量の関係を把握した。



Photo 2 模擬空洞 Disposal Drift Model

3.1.3 実験ケース 模擬空洞断面に対するスクリュ ーコンベア吐出口の相対的な位置をTable 6に示すように 上部,中央,下部の3か所に変化させ実験を行った。また 搬送量(スクリュー回転数30,50,70rpm)も変化させた。 3.1.4 密度測定 Fig.6と同様に充填後,Photo 2中の 空洞①と空洞②の間に仕切り板を差し込み,空洞①内の 質量と容積から湿潤密度を求め,含水比から乾燥密度に 換算した。また確認のため充填完了後,空洞③の入り口 から斜面形状を定規で測り,充填容積と充填全質量から も密度を求め,測定方法の信頼性を確認した。

3.2 実験結果

3.2.1 充填状況 スクリューコンベアの吐出口位置 を模擬空洞の下部にセットして充填を行った場合,吐出 口を出た材料は山状に堆積したあと,手前に流れた。ス クリューコンベアを模擬空洞の一番奥まで配した状態で 充填を続けたが,材料が空洞②まで達しても,上部に未 充填の空間が残ったため,空間を隙間なく充填する条件 を満足しなくなり不適となった。吐出口位置が中央部お よび上部の場合は,未充填部が発生しなかった。

Fig. 8には吐出口位置が中央部のときのスクリューの回転 数と移動速度の関係を示す。キャリブレーションで得られた 単位時間当たりの搬送重量が実験結果の密度で充填される と仮定して求めた推定値も併せてプロットした。スクリュー回 転数30,50rpmのとき移動速度の推定値と実験値はほぼ一致 しており,搬送のロスが少ないことが分かる。スクリュー回転 数70rpmのときは、材料がスクリューをスリップし、搬送ロスが みられる。

3.2.2 人工バリアの密度 Fig. 9に充填後のかさ密 度を示す。吐出口位置が上部のかさ密度は1.30Mg/m³前後 で,目標値に届かなかった。吐出口位置が中央部のときの かさ密度は1.37Mg/m³前後(スクリュー回転数50rpmのと き最大1.41Mg/m³)で,目標をほぼ達成した。吐出口位置 が上部の場合,吐出口を出た材料は手前に流れ堆積するが, 吐出口位置が中央部の場合には,吐出口から出た材料が 吐出口なり上部に堆積した材料により拘束されるため,奥行 き方向に押し付けられ密度が増すと考えられる。



Photo 3 充填装置(スクリューコンベア) :キャリブレーション状況 Screw Conveyor

Table 5 充填装置の仕様

Screw Conveyor Specification		
項目	値	
搬送能力	1,000kg/h(定格時)	
スクリュー径	81mm	
スクリュー長さ	2,000mm	
スクリュー回転数	30~70:定格50rpm/50Hz	
モーター	2.2kW	





4. まとめ

高レベル放射性廃棄物処分における人工バリアをペレ ット充填方式で構築する際に使用する高密度ベントナイ トペレットの製造方法ならびに充填方法について実験し た結果,以下に示す知見が得られた。

- ベントナイトペレット製造において各工程で使用 する機械は、①圧縮:油圧式ロールプレス、②解 砕:ハンマー方式、③混合:パン型ミキサーが適 する。
- 2) 粉体ベントナイトを油圧式ロールプレス機に2回 通過させると乾燥密度約2.00Mg/m³の板状ベント ナイトが得られた。その解砕品とベントナイト原 鉱石破砕品を粒度調整したものと粉体ベントナイ トを混合することでFuller曲線(最密充填)に近づ けることが可能である。
- ロールプレスで圧縮し、粒度調整したベントナイトペレットをスクリューコンベアで充填するとか さ密度1.37Mg/m³の人工バリアが構築できる。

ペレット充填方式は、PEM方式の定置で処分坑道と PEMの間にできる狭隘な隙間の充填にも適する。今後、 開発した材料の放射性廃棄物処分における用途の拡大を 図る予定である¹³。

謝辞

本研究に関して,貴重なご指導を戴きました日本原子 力研究開発機構核燃料・バックエンド研究開発部門幌延 深地層研究センターの棚井憲治様に深謝致します。

参考文献

 経済産業省資源エネルギー庁:科学的特性マップ,資 源エネルギー庁ホームページ,http://www.enecho.me ti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakut ekitokuseimap/maps/kagakutekitokuseimap.pdf, 2017.7



- 原環センターら:オーバーパック,緩衝材の遠隔ハンドリング・定置技術の開発,日本原子力学会第20バックエンド夏期セミナー,2004.7
- Tomoo Fujita, et al. : Plan of Full-scale Experiment on Engineered Barrier System in Horonobe Underground Research Laboratory, International Conference on the Performance of Engineered Barriers, pp. 435-442, 2014.2
- Jenni, H. et al.: Full-Scale Emplacement (FE) Experiment Report on the Construction, Testing and Commissioning of the Emplacement Equipment, LUCOEX WP2, EUROPIAN COMMISSION D2.4, 2015.5
- Ryoichi Masuda, et al. : Buffer Construction Technique by means of Granular Bentonite, GLOBAL 2005, No. 245, 2005.10
- 7) 高尾肇,他:ベントナイトペレットの特性試験(その 1)ーベントナイトペレットの製作方法の検討および 製作-,土木学会第57回年次学術講演会,CS10-046, 2002.9
- 8) 中島均,他: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,清水建設研究報告,93号, pp.39-46,2016.1
- 9) 原環センター:地層処分技術調査等事業 可逆性・回 収可能性調査・技術高度化開発H28報告書,2017.3
- 10) 棚井憲治,他:埋め戻し用充填材料の試作,日本原 子力学会2016年秋の大会,2D10,2016.9
- 11) 森拓雄,他:埋め戻し用充填材料の試作(その2)-ベントナイトペレット製造の合理化-,土木学会第72回年次学術講演会,-035, pp.69-70, 2017.9
- 12) Garitte, B. et al.: Requirements, manufacturing and QC of the buffer components Report, LUCOEX WP2, EUROPIAN COMMISSION D2.3, 2015.9
- 13) 森拓雄,他:ベントナイトペレットによるPEM隙間 充填技術の開発,土木学会第73回年次学術講演会, 2018.8