

中国産ベントナイトの利用可能性調査報告書

寺田 賢二、関根 一郎、雨宮 清、伊藤 雅和

平成 23 年 3 月

本報告書は公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した自主研究「中国産ベントナイト利用基礎調査」の研究成果の一部をとりまとめたものである。

目 次

第1章 全体概要.....	1
1.1 研究目的.....	1
1.2 実施体制.....	1
第2章 海外ベントナイトの文献調査.....	3
2.1 海外ベントナイトの文献調査概要.....	3
2.2 資源分布、生産量、輸出入量.....	3
2.2.1 ベントナイトの主要産出国および産出量.....	3
2.2.2 ベントナイトの主要輸出国および輸出力.....	5
2.2.3 世界のベントナイトの産出地の現況.....	6
2.2.4 日本におけるベントナイトの主な産地、輸入量.....	17
2.2.5 日本に輸入されている主なベントナイト.....	20
2.3 放射性廃棄物処分分野のベントナイト研究事例.....	22
2.4 放射性廃棄物処分分野での主なベントナイトの特徴.....	26
第3章 中国産ベントナイトの調査.....	32
3.1 中国における主なベントナイト鉱床.....	32
3.2 中国におけるベントナイト産業の現状.....	35
3.3 日本への輸出.....	37
3.4 主な中国産ベントナイトの調査.....	39
3.4.1 高廟子 Gaomiaozi (GMZ) ベントナイト鉱床調査.....	39
3.4.2 CIMCO (建平科力磁業有限公司).....	50
3.4.3 四平劉房子愛思克膨潤土有限公司.....	57
第4章 中国産ベントナイトの放射性廃棄物処分施設への適用性評価.....	63
4.1 わが国の放射性廃棄物処分におけるベントナイトに対する要件の整理.....	63
4.1.1 ベントナイトの使用量.....	63
4.1.2 ベントナイトへの要求品質.....	68
4.1.3 ベントナイトとしての基本的な品質.....	70
4.1.4 人工バリアとして要求される性質.....	70
4.2 中国産ベントナイト (GMZ-1) の特性値の整理.....	73

4.3 中国産ベントナイトの適用性を検討する上での今後の課題	79
第5章 各国のベントナイトの試験方法と品質比較.....	82
5.1 各国のベントナイト品質評価のための試験方法調査	82
5.2 中国、日本、米国産ベントナイトの物性比較	87
第6章 今後の課題とまとめ.....	95
6.1 今後の課題.....	95
6.1.1 高廟子（GMZ）ベントナイトを対象とした研究計画.....	95
6.1.2 統一試験の実施.....	98
6.1.3 中国産ベントナイトを利用する場合の品質確保方策.....	98
6.2 まとめ	101
6.3 謝辞.....	103

目 次

図 2.2-1	ベントナイト主要産出国と産出量	4
図 2.2-2	ベントナイト主要輸出国と輸出量	5
図 2.2-3	米国ワイオミング州の主な産地	7
図 2.2-4	インドの主なベントナイト鉱床の位置	10
図 2.2-5	ロシアのベントナイト鉱床分布	12
図 2.2-6	チェコ共和国のベントナイト鉱床分布	13
図 2.2-7	ウクライナのベントナイト産地	14
図 2.2-8	稼行中のベントナイト、酸性白土鉱床 (2009 年現在)	18
図 2.2-9	日本のベントナイト輸入量の経年変化	19
図 2.2-10	日本のベントナイト輸入契約単価の経年変化	19
図 3.1-1	推定埋蔵量 5 千万トン以上の大規模鉱床の分布	33
図 3.1-2	推定埋蔵量 5 百万トン～5 千万トンの中規模鉱床の分布	34
図 3.2-1	中国国内のベントナイトメーカー	35
図 3.3-1	日本への中国ベントナイト輸出量の推移	38
図 3.3-2	中国ベントナイトの輸入契約単価の推移	38
図 3.4-1	GMZ 鉱床付近地質平面図と調査位置	44
図 4.2-1	中国機関の透水試験装置	74
図 4.2-2	GMZ-1 の透水係数 (密度依存性と温度依存性)	74
図 4.2-3	高速透水試験の飽和供試体作製手順	75
図 4.2-4	クニゲル V1 原鉱石で得られた高速透水試験の結果	75
図 4.2-5	GMZ-1 の膨潤圧 (文献 13) のデータをグラフ化	76
図 4.2-6	GMZ-1 の一軸圧縮強度 (文献 13) のデータをグラフ化	77
図 4.2-7	GMZ-1 の熱伝導率 (文献 13) のデータをグラフ化	78
図 5.2-1	各種ベントナイトの液性限界と膨潤力	91
図 5.2-2	各種ベントナイトの交換性 Na イオン量と膨潤力	91
図 5.2-3	各種ベントナイトの Na/Ca 比と膨潤力	92
図 5.2-4	各種ベントナイトの塑性限界と膨潤力	92

図 6.1-1	GMZ ベントナイト鉱床評価の計画 (1/2)	96
図 6.1-2	GMZ ベントナイト鉱床評価の計画 (2/2)	97

表 目 次

表 2.2-1	ベントナイト主要産出国と産出量(U.S. Geological Survey, 2007)	4
表 2.2-2	ベントナイト主要輸出国と輸出量	5
表 2.2-3	米国の有望な鉱床リスト	7
表 2.2-4	韓国のベントナイト埋蔵量	8
表 2.2-5	韓国のベントナイト生産量 (単位: t)	8
表 2.2-6	韓国のベントナイト輸入量と輸入先	9
表 2.2-7	サンプルの物理化学特性	11
表 2.2-8	代表的サンプルの化学成分	11
表 2.2-9	サンプルの溶解性イオン容量	11
表 2.2-10	サンプルの地盤工学的性質	12
表 2.2-11	日本に輸入されているベントナイトの産地、基礎物性等一覧表	21
表 2.3-1	各国の研究対象となったベントナイト	24
表 2.4-1	クニゲル V1 の基本物性 (クニミネ工業(株)作成資料より)	27
表 2.4-2	ボルクレイ(MX-80)の基本物性	28
表 2.4-3	GMZ の基本物性	29
表 3.2-1	中国の有力なベントナイト工場	36
表 3.4-1	GMZ 鉱床で採取したCa ベントナイトの一般物性試験結果	49
表 4.1-1	試算結果	64
表 4.1-2	数量試算の根拠 (1/3)	65
表 4.1-3	数量試算の根拠 (2/3)	66
表 4.1-4	数量試算の根拠 (3/3)	67
表 4.1-5	バリユクレープロジェクトのデータベース	69
表 5.1-1	各国のベントナイト品質評価のための試験方法一覧表	84
表 5.1-2	陽イオン交換容量 (CEC) の試験方法比較	85
表 5.1-3	膨潤力の試験方法比較	86

表 5.2-1	各種ベントナイトの基礎物性一覧表	89
---------	------------------------	----

写 真 目 次

写真 3.4-1	Gaomiaozi(高廟子)集落の入口の案内石碑	40
写真 3.4-2	Gaomiaozi(高廟子)集落とGMZ 鉱床間の渡川地点状況.....	41
写真 3.4-3	GMZ 鉱床上部の状況	42
写真 3.4-4	GMZ サイト①からの鉱区全景.....	45
写真 3.4-5	GMZ サイト①露頭 サンプル No.1 採取.....	46
写真 3.4-6	GMZ サイトボーリング・立坑地点	46
写真 3.4-7	GMZ サンプル No.1.....	48
写真 3.4-8	建平科力磁業有限公司のベントナイト工場と事務所.....	51
写真 3.4-9	建平科力磁業保有ベントナイト鉱山の露天掘り状況.....	52
写真 3.4-10	ベントナイト工場内クラッシャ	54
写真 3.4-11	ローラーミル.....	55
写真 3.4-12	製品貯蔵状況.....	55
写真 3.4-13	工場内検査室。VGメーターによる粘性測定	56
写真 3.4-14	四平劉房子ベントナイト鉱山の坑外の状況.....	60
写真 3.4-15	トロッコで運搬されるベントナイト鉱石	60
写真 3.4-16	運搬されたベントナイト鉱石をトロッコから積み替える転車台	60
写真 3.4-17	ベントナイト鉱石の人力による選鉱作業	61
写真 3.4-18	乾燥原鉱置場（旧工場）	61
写真 3.4-19	四平劉房子ベントナイト鉱山.....	61

第1章 全体概要

1.1 研究目的

放射性廃棄物処分施設においては、緩衝材としてベントナイトの利用が検討されており、今後の放射性廃棄物処分事業を進めるにあたり、長期的に安定した供給が必要と考えられる。一方、ベントナイト需要の増大に伴い、国内産ベントナイトの供給不足、品質の変化、価格の上昇等が発生した場合には、放射性廃棄物処分事業に対して、大きな影響を及ぼすことが懸念される。

本報告は、放射性廃棄物処分事業におけるベントナイトの長期的に安定した供給量を確保することを念頭に置き、海外のベントナイトの産出状況や我が国のベントナイト輸入状況を概観するとともに、我が国に地理的に近い中国のベントナイトについて調査した結果を取りまとめたものである。中国のベントナイト鉱床についてはこれまで情報が少ないことから、鉱床の品質、規模、生産可能量等の情報のほか、生産設備、輸送などに関する調査を行い取りまとめた。さらにこれらの結果から中国産ベントナイトの日本での使用可能性について検討し、現時点での課題を提示した。

1.2 実施体制

本調査は、平成 18 年度から 4 年間にわたり(公財)原子力環境整備促進・資金管理センターの自主研究として行われ、当センターの特別賛助会員会社に対する公募に応じて自主研究に参加した有志によって、実施された。中国のベントナイト調査の実施に当たっては、中国の関係機関に協力をいただくとともに、有志による中国訪問調査を行い、鉱床の規模、品質、生産設備、輸送などに関する調査を行い、現在までに得られた情報を取りまとめた。

現地調査においては、中国の放射性廃棄物処分技術の研究機関である中国核工業集团公司地質局 (CNNC/BOG)、核工業北京地質研究院 (BRIUG) や地方の地質調査院の協力を得て共同での調査を実施することができた。

また、日中のベントナイト研究の現状に関して情報交換するためワークショップを実施した。上記機関のほか東華理工学院をはじめとした中国の大学の協力を得た。平成 20 年 12 月に実施されたワークショップでは韓国の KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) の参加も得て、韓国のベントナイト資源に関する情報も得ることができた。既

存鉱山工場の調査では、現地企業の協力を受けた。

これらの内外機関、企業の情報、技術を活用した上で、さらに現地調査により最新の情報を得ることによって、今までのベントナイト研究にない視点から知見をとりまとめることができた。

第2章 海外ベントナイトの文献調査

2.1 海外ベントナイトの文献調査概要

ベントナイトは、我が国の高レベル放射性廃棄物処分施設や余裕深度処分施設等に使用が予定されており、人工バリアを構築する重要な材料である。我が国でも有望なベントナイトが産出され、様々な実験研究が行なわれ成果を挙げている。

ベントナイトは、世界で計画されている放射性廃棄物処分施設で今後長期的にかつ多量に使用されることが予想されるため、世界のベントナイトの産出状況や特徴について把握しておく必要がある。

本章では、世界のベントナイト資源分布、生産量、輸出入量および放射性廃棄物処分野のベントナイト研究事例について調査した結果を報告する。

2.2 資源分布、生産量、輸出入量

2.2.1 ベントナイトの主要産出国および産出量

表 2.2-1に 2007 年のベントナイトの主な産出国および産出量の一覧を示す。また、図 2.2-1 は表 2.2-1を円グラフに示したものである。これらの資料によると 2007 年の世界の総産出量は、1,580 万トンで、米国は産出量 482 万 t と世界の産出量の 31%を占めており、日本の約 10 倍、中国の約 1.5 倍となっている。

表 2.2-1 ベントナイト主要産出国と産出量(U.S. Geological Survey, 2007)¹⁾

順位	国または共同体名	産出量 (千 t)	%
1	米国	4,820	30.5
2	中国	3,300	20.9
3	ギリシャ	950	6.0
4	トルコ	930	5.9
5	CIS (独立国家共同体)	750	4.7
6	イタリア	600	3.8
7	インド	500	3.2
8	メキシコ	435	2.8
9	日本	420	2.7
10	ドイツ	365	2.3
	その他	2,730	17.3

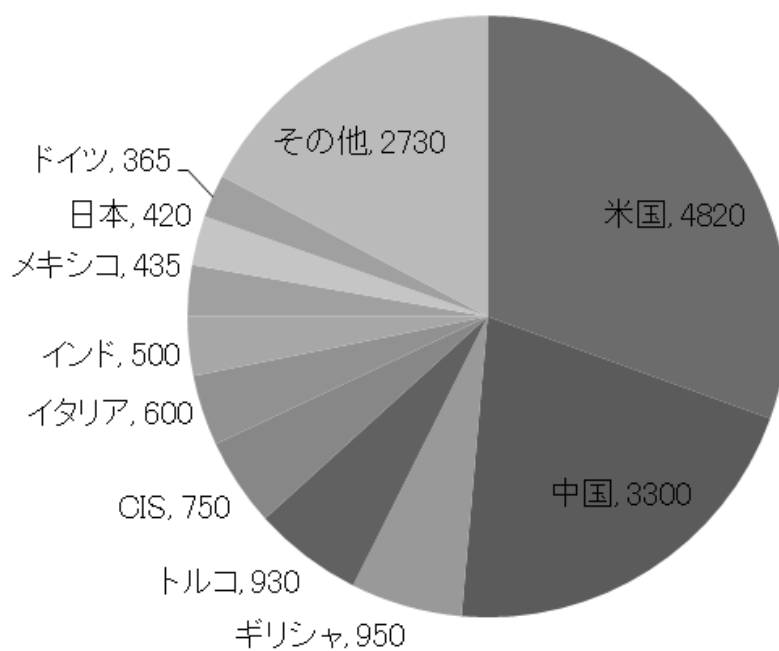


図 2.2-1 ベントナイト主要産出国と産出量¹⁾

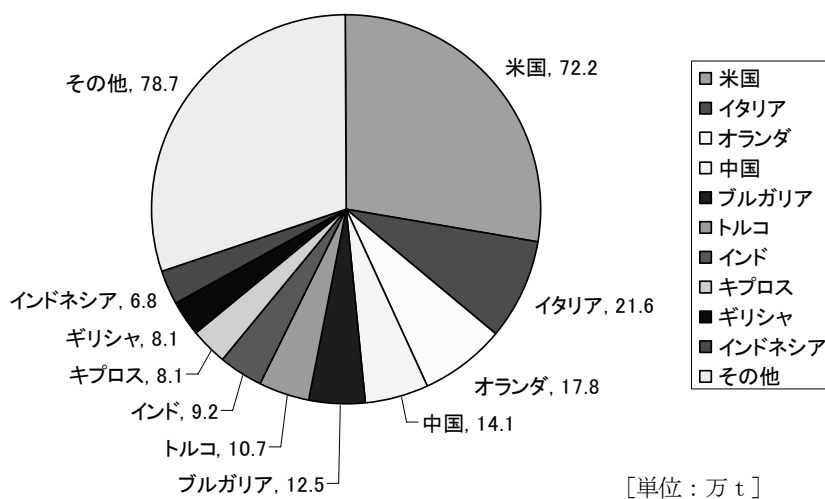
2.2.2 ベントナイトの主要輸出国および輸出量

表 2.2-2に 2002 年のベントナイトの主な輸出国および輸出量の一覧表を示す。また、図 2.2-2は表 2.2-2を円グラフに示したものである。

輸出量は米国が 72.2 万 t で世界の輸出量の 27.8%と飛び抜けて多い存在となっている。また、日本に近いアジアの輸出国としては、中国、インド、インドネシアがある。

表 2.2-2 ベントナイト主要輸出国と輸出量²⁾

順位	輸 出 (2002年)		
	国 名	輸出量 (万 t)	%
1	米国	72.2	27.8
2	イタリア	21.6	8.3
3	オランダ	17.8	6.9
4	中国	14.1	5.4
5	ブルガリア	12.5	4.8
6	トルコ	10.7	4.1
7	インド	9.2	3.5
8	キプロス	8.1	3.1
9	ギリシャ	8.1	3.1
10	インドネシア	6.8	2.6
	その他	78.7	30.3
	合 計	259.8	100.0



出典：「BENTONITE, PYROPHYLLITE AND TALC IN THE REPUBLIC OF SOUTH AFRICA, 2004」REPORT R46 /2005 Department : Minerals and Energy REPUBLIC OF SOUTH AFRICA

図 2.2-2 ベントナイト主要輸出国と輸出量²⁾

2.2.3 世界のベントナイトの産出地の現況

2.2.2 で述べた世界のベントナイトの産出国、輸出国の状況から、主な産出国を取り上げ、生産量、産地の状況等、入手できた情報を次に記載する。中国の産地等の詳細については第3章に述べることとし、ここでは、米国、インド、韓国、ロシア、チェコ、ウクライナ、南アフリカ、トルコ、イタリア、ギリシャの産地の情報を取り上げる。

(1) 米国のベントナイトの主な産出地³⁾

2.2.2 の結果より、日本がベントナイトを輸入する国として中国と米国が有力と考えられる。中国のベントナイトについては第3章で詳細に述べるため、以下、米国のベントナイト産出状況と特徴について示す。

図 2.2-3に米国ワイオミング州の主な産地を示す。米国は生産量、輸出量とも世界最大でその大部分がワイオミング州および隣接のサウスダコタ州で生産されている。ワイオミング州のローベル・グレイブル・キャスパーのビッグホーン地域とワイオミング州およびサウスダコタ州のコロニー、ベルフォールシュのブラックヒル地域が有名である。

ビッグホーン地域には、図中にあるように Bent.Corp 社、AmColl 社、M-I 社、Black Hills 社、Wyo-Ben 社の5社の工場、産地があり、米国のほとんどのベントナイトはこの大手5社によって産出されている。表 2.2-3に米国の有望な鉱床リストを示す。特徴としては鉱床が数 km 連続する層状鉱床で、緩傾斜であり、Na 型のベントナイトを露天掘りで産出していることがあげられる。層厚は、0.3~3mであるが品質が安定し、埋蔵鉱量ではグレイブルが最も多く 33~44 百万 t と推定されており、今後も安定供給が期待できる。

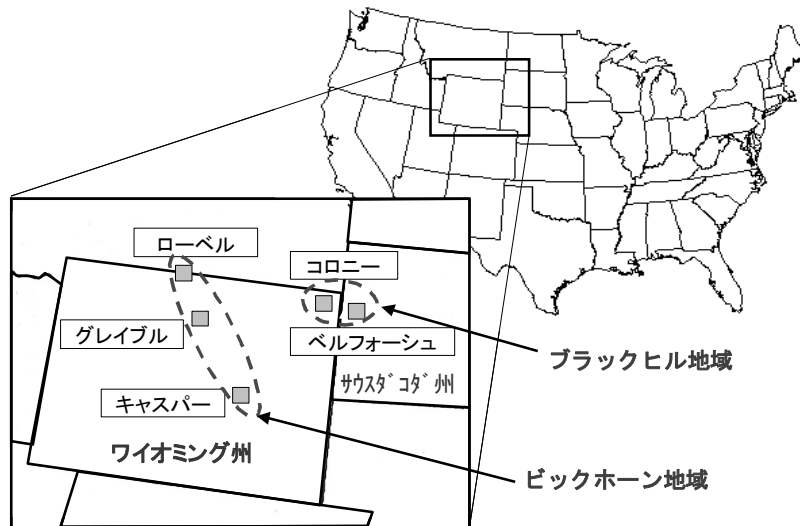


図 2.2-3 米国ワイオミング州の主な産地³⁾

表 2.2-3 米国の有望な鉱床リスト³⁾

産地	グレイブル	ローベル	キャスパー	コロニー	ベルフォーシュ
州	ワイオミング			ワイオミング	サウスダコダ
地域	ピックホーン			ブラックヒル	
鉱床形態	連続性のある層状 (数m) 鉱床の傾斜0~10°, 局部的に70°			連続性のある層状 (数m) 鉱床の傾斜0~10°	
物性特徴	クリストパライト系が主			石英系	
原鉱のタイプ	Na型			Na型	
年間産出量 (千t)*	731	1,368	197	1,217	510
埋蔵鉱量 (百万t)**	33~44	20~25	18	13	1
採掘方法	露天掘			露天掘	

* 2004年米国ベントナイト産出主要5社(5社トータル産出量4,537千t)の実績より

** MI社 資料より

(2) 韓国⁴⁾

韓国のベントナイトの埋蔵量を産地別に表 2.2-4に、年間生産量を表 2.2-5に示す。産出量は年により差があるが年間4万~10万t程度で、日本の1/4~1/10程度である。消費量の半分以上を輸入に頼っており、輸入先は中国が年間10万t以上と飛びぬけて多く、米国の約10倍に達する(表 2.2-6)。我が国の中国からの輸入量が45,674t(2006年度)なので、韓国の方が中国からの輸入量が2倍以上となっていることがわかる。

表 2.2-4 韓国のベントナイト埋蔵量⁴⁾

Mine	Location	Reserves (1,000 ton)			Minable Ore (1,000 ton)
		Definite	Estimated	Total	
Oseong	Yangnam		340.0	340.0	270.0
Dusan	Yangnam		176.0	176.0	141.0
Naa	Yangnam		162.0	162.0	128.0
Jeil	Yangnam		31.1	31.1	21.8
Taekwang	Yangnam		178.6	178.6	148.0
Jinmyeong	Yangnam		443.7	443.7	310.6
Sudchemi	Yangbuk		360.0	360.0	288.0
Songjeon	Yangbuk		52.0	52.0	41.0
Hanlim	Yangbuk		184.9	184.9	147.9
Yeonil13	Donghae	27.0		27.0	24.3
Donghae	Donghae		1,998.9	1,998.9	1,399.3
Mahyeon	Donghae	916.0		916.0	824.4
Gyeongju	Yangnam		32.0	32.0	24.0
Total		943.0	3,959.2	4,902.2	3,744.3

(出典 : KOMIS(Korea Mineral Information Service), 2006)

表 2.2-5 韓国のベントナイト生産量 (単位 : t)⁴⁾

Mine	Location	2002	2003	2004	2005	2006	B/A(%)
					(A)	(B)	
Oksan	Yangbuk	27,934	190,083	41,634	50,607	29,820	-41.10
Hanlim	Yangbuk	2,093	813	9,720	11,300	9,147	-19.1
Hyodong	Yangnam	0	0	0	7,000	8,000	14.3
Jinmyeong	Yangnam	2,500	6,100	5,000	3,000	5,500	83.3
Taekwang	Yangbuk	1,500	2,500	4,000	2,500	4,000	60
Heundol	Sangla	0	0	0	1,000	2,500	150
Dusan	Yangbuk	6,149	1,852	2,250	885	1,440	62.7
Okcheon	Yangnam	750	920	750	630	730	15.9
Nodang	Angang	32,000	0	32,000	5,500	0	-
Daeseong	Yangnam	613	652	659	1,555	0	-
Dongyang	Yangbuk	2,850	0	0	1,200	0	-
Wooil	Jangki	1,820	0	2,660	0	0	-
Daemaek	Namjeong	300	300	500	0	0	-
DongBaek	Jangki	0	4,200	0	0	0	-
Jeil	Yangnam	5,200	2,500	0	0	0	-
Pungdae3	Jangki	947	612	0	0	0	-
Samkang	Donghae	5,249	563	0	0	0	-
Total		89,905	40,095	99,173	85,177	61,137	-28.2

(出典 : MOCIE,2007)

表 2.2-6 韓国のベントナイト輸入量と輸入先⁴⁾

Country	2005		2006	
	Weight (ton)	Am. of Money (1,000 Dollars)	Weight (ton)	Am. of Money (1,000 Dollars)
South Africa	-	-	126	21
Russia	-	-	7	26
USA	13,685	2,767	10,265	2,653
Singapore	-	-	5	18
UK	41	61	52	78
Italy	40	48	66	50
India	11,549	699	9,313	548
Japan	34	181	73	316
China	105,578	7,986	108,173	7,926
Turkey	1,120	192	400	71
Australia	0	0	2,439	318
others	37	12	60	27
Total	132,084	11,946	130,979	12,052

(出典 : MOCIE,2007)

高レベル放射性廃棄物処分場建設のために利用するベントナイト鉱床の候補としては、Gampo ベントナイトが選ばれている。Gampo ベントナイトは、韓国南東部の Gyeongju 地域で産し、凝灰岩層の中に 1～2 m の層状に産出する。

Gampo ベントナイトの基本物性や熱特性が調べられているが、Ca 型ベントナイトであり、低品質で採掘可能な埋蔵鉱量が少ないことが課題とされている。

(3) インド

インドは、様々な地方に多量の膨潤土埋蔵量がある。図 2.2-4 に主なベントナイト鉱床の位置を示す⁵⁾。インドの確定鉱量は 3000 万 t と言われ、スメクタイトが豊富な鉱床約 2000 万 t はインドの西部地方で発見されてきた。主な産地には、西部地方のパキスタンに隣接したグジャール (Gujarat) 州、ラジャスタン (Rajasthan) 州等があり、年間 50 万 t (2002 年) を生産する。約 20% が輸出され、原鉱石の状態でも中東油井などに向けられる⁶⁾。

ほとんどの世界のベントナイト鉱床とは異なり、西部地方産出のベントナイトは、古い時代の火山性の変質した粘土である。高レベル放射性廃棄物の地層処分の緩衝材と埋め戻し材の候補材料の一つとしての可能性を調べるため、詳細な分類研究が行われた。

約 26 種類の膨潤粘土サンプルが、インド西部地方の異なった鉱床から採取され、物理化学的、化学的、鉱物学的、地質学的特性が調査された。サンプルの特性を表 2.2-7、8、9、10 に示した。また、サンプルは XRD によってモンモリロナイト、カオリン、石英に

分析された。調査結果は、商業的に調達されたベントナイトサンプルやMX80に関して報告された値と比較された。

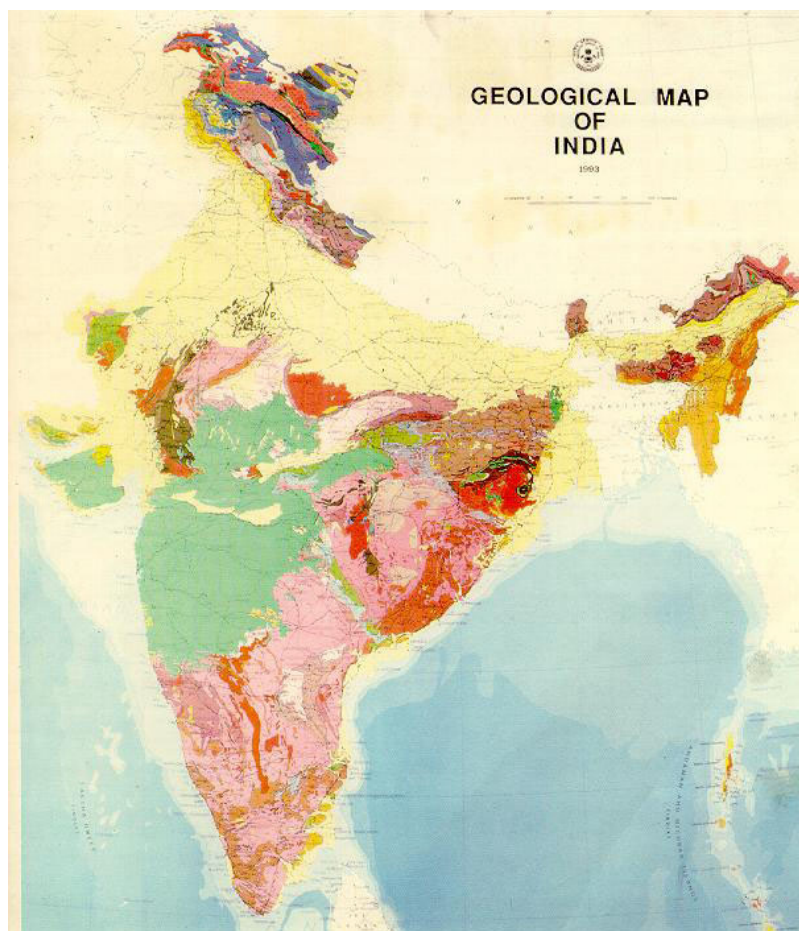


図 2.2-4 インドの主なベントナイト鉱床の位置⁵⁾

収集された膨潤粘土サンプルは、メチレンブルー吸着法によって、高いスメクタイト含有量を示すことがわかった。表 2.2-9 からわかるように、すべての膨潤粘土サンプルの塩化物含有量は、粘土1グラム当たり3~6mg 範囲にあり、海洋起源のベントナイトサンプルに起因する可能性がある。塩化物含有量や他の性質の変化を調べるために、同じサイトからいくつかのサンプルを異なった深さで追加採取することが行われた。

表 2.2-7 サンプルの物理化学特性⁵⁾

物性	物性値の範囲
Moisture content (% w/w)	10 – 12
pH	7.01 – 8.68
True density (g/ml)	2.04 – 2.58
Bulk density (g/ml)	1.19 – 1.29
Porosity (%v/v)	43 – 50
Void ratio	0.74 – 0.99
Cation Exchange Capacity (meq/100g)	50 – 65
Kd (⁹⁰ Sr)	245 – 350
Kd (¹³⁷ Cs)	400 – 580
Kd (²⁴¹ Am)	280 – 400

表 2.2-8 代表的サンプルの化学成分⁵⁾

主な酸化物	成分 (重量) の範囲 (%)
SiO ₂	48 – 56
Al ₂ O ₃	15 – 20
Fe ₂ O ₃	3 – 6
MgO	3 – 4
Na ₂ O	1 – 2
CaO	0.14 – 0.42
Organic matter	4 – 6

表 2.2-9 サンプルの溶解性イオン容量⁵⁾

溶解性成分	範囲 (mg/g)
Soluble salts (%)	1 – 3
Na ⁺	10 – 16
Cl ⁻	3 – 6
Ca ⁺⁺	1 – 3
SO ₄ ⁻⁻	0.5
F ⁻	< 0.005

表 2.2-10 サンプルの地盤工学的性質⁵⁾

Properties	Range
Liquid limit (%)	420 – 430
Plastic limit (%)	53 – 55
Plasticity index (%)	369 – 375
Shrinkage limit (%)	11 – 15
Porosity (% _{v/v})	43 – 50
Free swelling volume (ml/g)	20 – 30
Grain size distribution (%)	
Gravel	0
Sand	3 – 4
Silt	13 – 15
Clay	84 – 86

(4) ロシア⁷⁾

ロシアの高レベル放射性廃棄物処分の研究中の概念は、他の国と同様に多重バリアシステムに基づいており、緩衝材、埋め戻し材材料として膨潤粘土が必要である。

ロシアのベントナイト資源は他の資源と異なり、豊富ではない。主な発見された鉱床を図 2.2-5に示す。



図 2.2-5 ロシアのベントナイト鉱床分布⁷⁾

サンクトペテルスブルグ地域の Pikalevskoe ベントナイト鉱床は 1996 年に発見された。探鉱されたベントナイト資源は約 400 万 t で、約 3 億 t の推定埋蔵量がある。Pikalevskoye 鉱床のベントナイトはアルカリ土類タイプに属し、陶器、鋳物工業、掘削水準備、鉄鉱石ペレット化に利用される。ベントナイト粘土の層は石炭紀前期の Serpukhovian 期の Tarusa 層位に位置付けられ、0.5～4.0mの厚さ（平均 1.5m）である。ベントナイトの鉱物組成は、アルカリ土類ダイオクタヘドラル型スメクタイトが 80%を占めるとされている。

(5) チェコ⁷⁾

チェコ共和国は年間約 70 千 t のベントナイトを算出する。世界のベントナイト生産量のおおよそ 0.75%に相当する。チェコ共和国のベントナイトは、ほとんどが Mg-Ca、または Ca-Mg 型で Na 型ベントナイトは見つかっていないため、ベントナイトは活性化によって、ナトリウム型に改良されている。チェコ共和国のベントナイト生産者には、Keramost 社（チェコで最大のベントナイト生産者）、Calofrig Borovany 社、Sedlecký kaolin 社などがある。

ベントナイトは主に北ボヘミア火山地域で見つかっている。例えば České Středohoří 山地、Doupovské 山地（Kadaň, Podbořany, Karlovy Vary）と第三紀の盆地（Cheb 盆地, Plzeň 盆地 並びに Třeboň 盆地）である。（図 2.2-6参照）

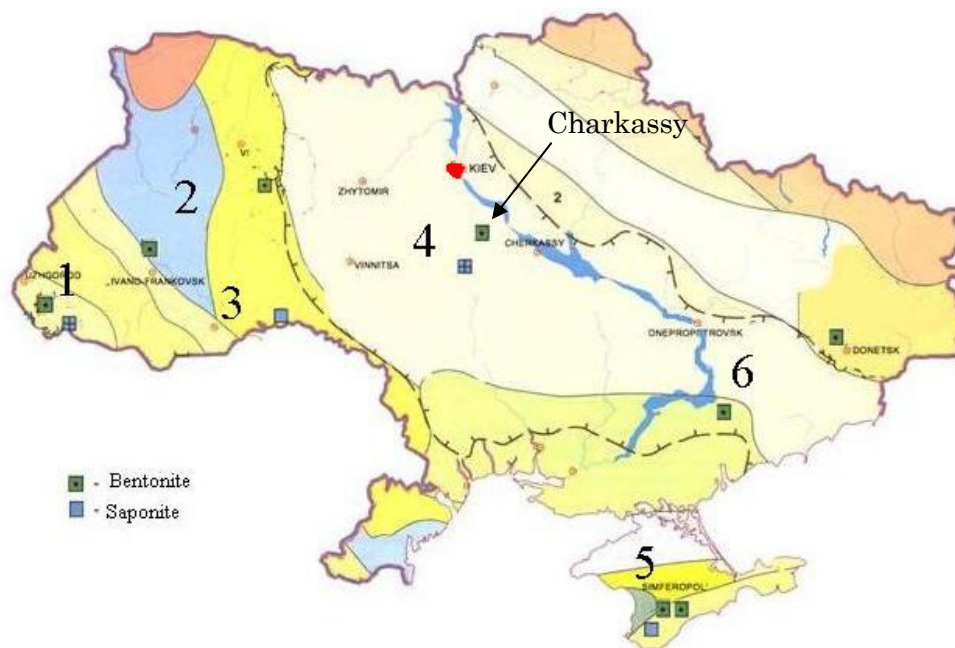


図 2.2-6 チェコ共和国のベントナイト鉱床分布⁷⁾

放射性廃棄物処分分野では、Rokle 地区(共和国の西北、図 2.2-6 の近傍に位置する)で産出する RMN ベントナイトがチェコ共和国の地下処分施設に使用されるベントナイトとして、優先的な候補に選ばれている。この地域は十分に広く、十分な量の材料がある。この材料は粉末化され、活性化されていない自然の材料である。ČSN 73 1001 (チェコ共和国の国制定基準) に従って、Rokle 地区で産出するベントナイトの基本的な試験が実施されており、極めて高い塑性を示す粘土に分類されている。

(6) ウクライナ⁷⁾

ウクライナには図 2.2-7に示すように6か所のベントナイト産地があり、年間 30 万 t (2007 年) 産出する。ウクライナ楯状地 (Ukrainian shield)にある Charkassy 鉱床は、鉱層の範囲が 195km²におよび、埋蔵量は 825 百万 t である。ウクライナのベントナイト埋蔵量の 93.9%を占める代表的な鉱床であり、放射性廃棄物処分のための研究対象となった。Charkassy ベントナイトについて、物理的性質、化学成分、熱特性、吸着試験等が実施されている。



There are 6 bentonite provinces within the country :

- 1-Zacarpatska depression;
- 2-Peredcarpatska depression,
- 3-Prychornomorska depression;
- 4-Ukrainian shield;
- 5-Mountain Crimea and epihercynic platform of the flat Crimea;
- 6-Donbas

図 2.2-7 ウクライナのベントナイト産地⁷⁾

(7) 南アフリカ⁷⁾

南アフリカは放射性廃棄物管理のための国策と戦略を作成している途上である。緩衝材と埋め戻し材を含む多重人工バリアシステムによる大深度の地層処分が認知されてきた。南アフリカのベントナイト鉱床の調査は、研究が先行する国に倣って行われている。経済的に見込みのあるベントナイト（火山性材料の変質によって形成）の南アフリカの全埋蔵量は、240万tである。年間のベントナイト生産量は年により差があるが、2007年は4.6万tであった。

Koppies と Heidelberg のベントナイト鉱床が、南アフリカで試験をする膨潤粘土の候補に選ばれている。物理的性質、化学成分、熱特性等が試験され、MX-80 や Abonseal の物性と比較された。Heidelberg のベントナイトは、モンモリロナイト含有量が94% (MX-80 は75%) と非常に多くなっているが、データはまだ十分でなく、今後の調査に期待される。

(8) トルコ⁶⁾

トルコは、2002年世界第5位の産出量（56万t）があり、そのうち10.7万tを輸出している。ベントナイトの種類は、Ca型とソーダ処理した改質ベントナイトが主である。主な産地中北部に散在しており、バルケシール、キュタヒヤ、黒海に面したオルドゥなどがある。

(9) イタリア⁶⁾

イタリアのベントナイト生産量は2002年で58万tであり、主な輸出先はドイツ、フランスで、ドイツへは年間5~6万tを輸出している。主に島部で産出し、特にサルジニア島（Sardinia）が産地として有名である。ベントナイトはCa型で、堆積岩起源のものが多く、厚さ25mのベントナイト層も存在する。ベントナイトの産地は島の中央から西部に分布し、Uri、Oristano、キャリアーリ Cagliari 地域がベントナイトを豊富に産出する地域で、加工工場がある。キャリアーリは港町で、良好な港湾施設がある。Ponza、Sardinia、Sicily 島、LCM（Laviosa Chimica Mineraria, SpA）がイタリアにおける最も大きなメーカーで、また、製品の輸入も行っている。その他にCECA（CECA, Italiana SpA）、Eredi Dr. Settimio Cinicola などのメーカーが知られている。

(10) ギリシャ

ギリシャは、2002年において年129万tの産出量があり世界第3位であり、このうち8.1万tを輸出している。主な産地として、アテネの150km南に位置するミロス島があり鉱量が大きい上に、気候的にベントナイトの乾燥に適している。港湾施設も水深が深い

め、世界各地に向け輸出が可能である。ギリシャのベントナイトは、活性化したベントナイトと原鉱石の状態で輸出している。(参考文献：6) に加筆)

2.2.4 日本におけるベントナイトの主な産地、輸入量

(1) 日本のベントナイト鉱床

日本のベントナイト（膨潤土）鉱床については昭和 21 年発行の内田宗義著の「膨潤土」に昭和 19 年 8 月現在の採掘業者として 8 県 115 業者があると記載されている。また、これらの産出量は 30,000 トン～38,300 トン程度であるとしている。月産製品量（乾燥品）は 300 トンを越えるものはないとしている。従って、当時はほとんどが極零細規模での採掘利用であり、現在のような工業的な段階ではなかったと考えられる。

1978 年の「日本の窯業原料」ではベントナイトおよび酸性白土の原料分布図が記載されている。鉱床数は 22 ヶ所となり、このうち稼働中となっているのは 14 ヶ所であった。この段階では「膨潤土」から規模の小さいものは淘汰され、鉱床数が絞り込まれたと考えられる。

「日本の窯業原料」の 1992 年版では 12 ヶ所と更に少なくなっている。高木が取りまとめた日本のベントナイトでは 2005 年段階で 15 ヶ所の鉱床があると記載されている⁸⁾。

2009 年現在で稼働が確認できる鉱床として、青森県黒石市温湯（日本砥研）、山形県大江町月布（クニマイン）、宮城県川崎町上ノ台（川崎鉱業）、宮城県蔵王町土浮山（クニミネ工業）、群馬県富岡市上黒岩（ホージュン）、安中市中野谷（豊洋ベントナイト）、同郷原（豊洋ベントナイト）、新潟県阿賀町細越（関ベン鉱業）、同白崎（関ベン鉱業）、同三川（ホージュン）、島根県出雲市鏡山（カサネン工業）、大田市長谷（サンベントナイト工業）、同市朝山（カサネン工業）岡山県笠岡市笠岡（カサネン工業）の 14 ヶ所であり、この他に新潟県新発田市小戸（黒崎白土）、胎内市羽黒山（水澤化学工業）、山形県鶴岡市水沢（水澤化学工業）、秋田県大森町八沢木（ソフトシリカ）で酸性白土が採掘されている。

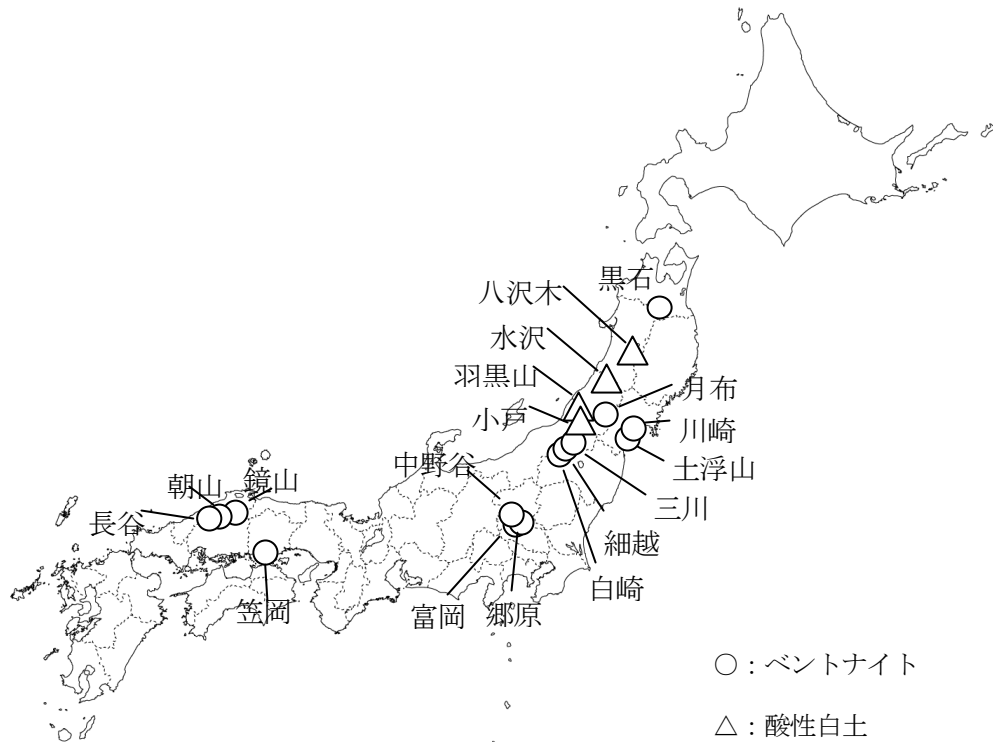


図 2.2-8 稼働中のベントナイト、酸性白土鉱床（2009年現在）

(2) 日本のベントナイト輸入の現状

日本のベントナイト輸入の実態について、調査を行った。図 2.2-9、図 2.2-10は、日本の輸入量・輸入契約単価の経年変化についてまとめたものである。日本のベントナイトの輸入量は、財務省貿易統計によると米国からが最も多く 1988年～2008年の年平均で約 16 万 t となっている。ついで中国からの輸入量は、1988年から徐々に増加する傾向にあり、2008年には年 8 万 t にせまる水準まで増加している。他のインド、トルコ、イタリア等からの輸入は、数量的に少ないのが現状である。

輸入契約単価については、アメリカからの輸入の場合 1988年～2008年で約 16,000 円/t となっており、近年上昇傾向にある。なお、輸入契約単価は、(年間船上渡し価格/年間輸入量) で定義している。アメリカからの輸入では、鉱石専用船で原鉱を輸入し、日本で粉砕し商品化している。そのため価格が低く抑えられている。中国からの輸入契約単価は、1988年～2008年で多少上昇する傾向にあり平均で約 12,400 円/t となっている。中国からの輸入契約単価が比較的高くなっている理由は、バルク船で猫砂等加工品として輸入しているためである。

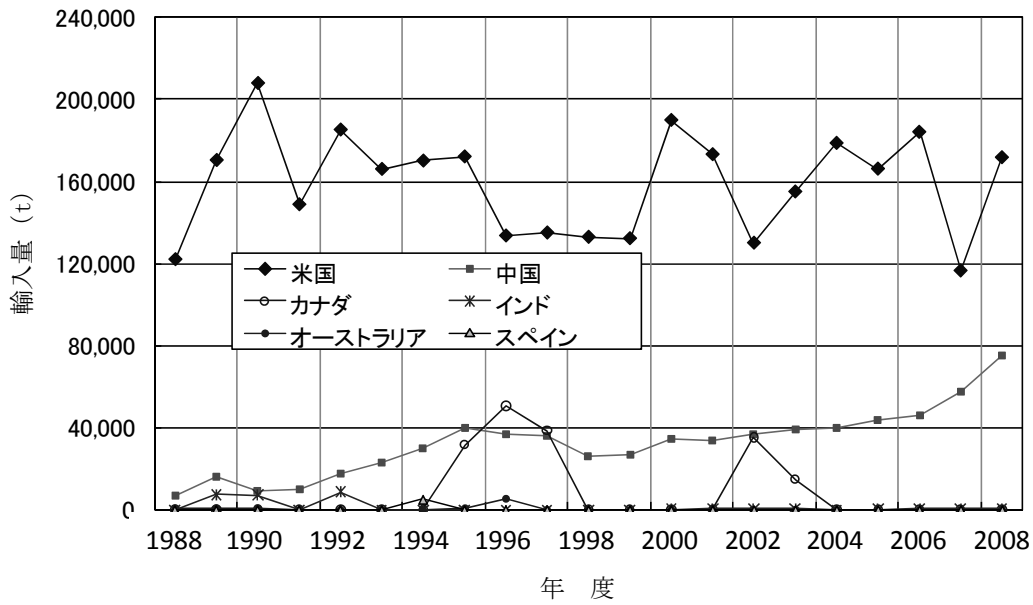
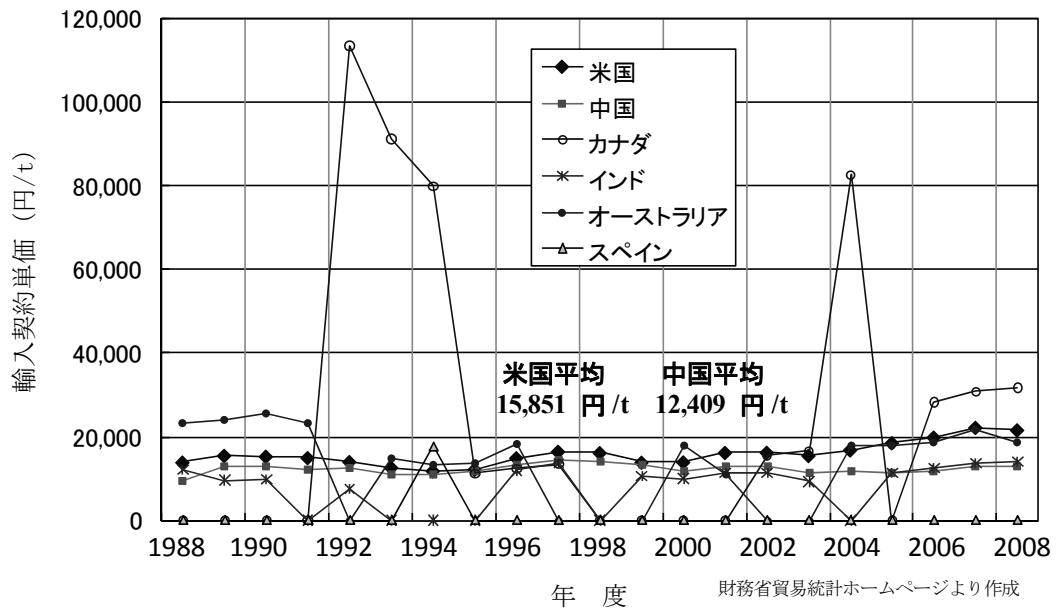


図 2.2-9 日本のベントナイト輸入量の経年変化⁹⁾



- 輸入契約単価 = 年間船上渡し価格 / 年間輸入量
- 米国から輸入：鉱石専用船で原鉱輸入
- 中国から輸入：バルク船で猫砂等加工品として輸入

図 2.2-10 日本のベントナイト輸入契約単価の経年変化⁹⁾

2.2.5 日本に輸入されている主なベントナイト

日本に輸入されている代表的なベントナイト5点について、メーカーにアンケート調査した結果をもとに輸入元、埋蔵量等、基礎物性等を表 2.2-11にまとめた。なお、表中の推定埋蔵量、産出量は輸出元の会社の総量を表示している。

各ベントナイトの概略の特徴は下記のとおりである。

(1) 製品名：ボルクレイ（㈱ボルクレイ・ジャパン）

米国ワイオミング産のベントナイトで、ボルクレイを供給する AMCOL 社は、北米各地（ワイオミング州、サウス・ダコタ州、モンタナ州、アラバマ州）、及び中国にナトリウム系及びカルシウム系のベントナイト資源を保有している。ワイオミング産ベントナイトの採掘作業は、露天掘りで行われる。

(2) 製品名：クニゲルMAX（クニミネ工業㈱）

本ベントナイトについては、輸入元、産地など詳細は明らかにされていない。

(3) 製品名：スーパークレイ（㈱ホーゲン）

米国ワイオミング産の Na 型ベントナイトで、MI 社から輸入している。

(4) 製品名：アースフレンド（㈱ホーゲン）

中国遼寧省建平産の Ca 型ベントナイトをソーダ灰で改質した Na 交換型ベントナイトで、㈱ホーゲンが CIMCO 社から継続的に輸入している。

(5) 製品名：筑前（品川窯材㈱）

品川窯材㈱は中国吉林省の四平劉房子愛思克膨潤土有限公司よりベントナイトを輸入しており、詳細は3.4.3 に示す。品川窯材では、この Na 型ベントナイトを成分調整した製品として、筑前7号、筑前8号の商品名で取り扱っている。筑前8号は、電力共通研究で海外ベントナイトの実験に供されたサンプルの一つで、結果は日本原子力学会「1995春の年会」で発表されている。

表 2.2-11 日本に輸入されているベントナイトの産地、基礎物性等一覧表

商品名	ボルクレイ	クニゲル MAX	スーパークレイ	アースフレンド	筑前
輸入販売業者	(株)ボルクレイ・ ジャパン	クニミネ工業(株)	(株)ホージュン	(株)ホージュン	品川窯材(株)
輸出国	米国	非公開	米国	中国	中国
産地	ワイオミング州	非公開	ワイオミング州	遼寧省建平県	吉林省四平市
輸出元	AMCOL 社	非公開	M-I 社	建平科力砒業有限公司 (CIMCO)	四平劉房子愛思克 膨潤土有限公司
推定埋蔵量	105,000 万 t (鉱山局補正值)	非公開	5,300~6,900 万 t	2,000 万 t	2,600 万 t
産出量	—	非公開	53 万 t (2004 年)	7.5 万 t (2006 年)	5~6 万 t
採掘方法	露天掘り	非公開	露天掘り	露天掘り	坑内掘り
原鉱のタイプ	Na 型	Na 型	Na 型	Na 交換型	Na 型
密度 (g/cm ³)	2.7	2.74	2.60	—	2.78
液性限界 (%)	600 以上	625	615.5	—	316.9
塑性限界 (%)	—	37.9	47.6	—	22.7
塑性指数	—	570	567.9	—	294.2
膨潤力 (ml/2g)	—	—	—	25	—
MB 吸着量 (meq/100g)	—	—	—	102	—
モンモリロナイト含有率 (%)	90 以上	64	75	80	65
陽イオン交換容量 (meq/g)	—	0.702	0.723	—	0.706
交換性 Na イオン量 (meq/g)	50-60	0.503	0.618	—	0.328
交換性 Ca イオン量 (meq/g)	15-30	0.232	0.272	—	0.086
交換性 K イオン量 (meq/g)	1-5	0.022	0.013	—	0.013
交換性 Mg イオン量 (meq/g)	5-10	0.08	0.055	—	0.073
pH	8.5-10.5	9.7	9.7	10.4	9.7
出典	(株)ボルクレイ・ジャパン へのアンケートにより 作成	クニミネ工業(株)へのアン ケートにより作成	(株)ホージュンへの アンケートにより 作成	・ソーダ灰による改質後 のデータ ・(株)ホージュンへのアン ケートにより作成	・産出量等はヒアリングによる ・基礎物性は四平劉房子愛思克 膨潤土有限公司 HP より作成

2.3 放射性廃棄物処分分野のベントナイト研究事例

放射性廃棄物処分分野でどのようなベントナイトが取り上げられているのか、海外の機関および我が国の研究事例を調査した。以下に、機関ごとにまとめて示す。なお、海外の機関については網羅的な調査ではなく、主要な機関についての整理となっている。

(1) Posiva 社

Posiva 社の 2004 年 Working Report¹¹⁾では、世界の主なベントナイトに対して基礎的な試験を実施し、それらの鉱物学的な特徴などを明らかにしている。試験に供したベントナイトは表 2.3-1 に示すように、ワイオミング産 2 種類、インドのクッチ産が 4 種類、ギリシャのミロ産が 3 種類、ドイツ北東産 1 種類、チェコ産が 4 種類である。

本調査の結果、異なる地域から産出するベントナイトは、それぞれ典型的な特徴を有することが把握できた。ワイオミング産のベントナイトは良好な品質を有し、主に Na 型ベントナイトから成る。クッチ産（インド）のベントナイトは、多くの鉄分（10.6～14.2%、 Fe_2O_3 ）を含有し、部分的に赤鉄鉱のような性状を示す。ミロ産（ギリシャ）のベントナイトは、黄鉄鉱を含有（2.2～2.8%、 FeS_2 ）している。チェコ産のサンプル 4 種の内、2 種はカオリンを含むベントナイトで、2 種はスメクタイトを含むカオリン粘土である。それらは全て鉄分（9.2～13.2%、 Fe_2O_3 ）を含む。陽イオン交換容量は、ワイオミング、クッチ、ミロのベントナイトは高いのに対して、チェコのサンプルの CEC はかなり低い。以上のようにサンプルごとの特徴が明らかになった。

(2) SKB 社

2006 年に発刊された SKB 社テクニカルレポート TR-06-30 では、チェコ、デンマーク、ドイツ、ギリシャ、インド、ワイオミング産のベントナイトについて、X 線回折、CEC など基礎物性試験の他、膨潤圧や透水性を測定し示している¹²⁾。また、「SKB 社テクニカルレポート、The Buffer and Backfill Handbook (緩衝材と埋戻し材に関するハンドブック、Roland Pusch 著)、Part1: Difinitions, basic relationships, and laboratory methods(定義、基本関係、試験方法)、2002 年 4 月¹³⁾、Part2: Materials and techniques(材料と方法)、2001 年 12 月¹⁴⁾」にベントナイトについて詳しく紹介されている。

多年にわたる SKB 関連の研究開発活動において、基準クレイ材料として使用されてきた「MX-80」に加えて、スペイン産の Saponite（マグネシウム・リッチなスメクタイト）、ドイツ産の Friedland Ton 等が緩衝材として代替可能な候補材料として挙げられた。また、これらは、供給面でも大量の鉱石確保が可能なものである。

(3) 電力共通研究

放射性廃棄物処分別野の海外産ベントナイトの研究は、電力共通研究において実施されている。本項では、中国産を含む海外ベントナイトの調査研究を実施した電力共通研究の成果のうち、1995年原子力学会春の年会で発表された知見¹⁶⁾についてまとめる。

発表された資料は学会の予稿であり、限られた情報の中からの紹介とせざるを得なかった。それによれば、試験対象とする海外ベントナイトの選定にあたり、米国、東アジア、東南アジア、オーストラリアで産出するベントナイトの埋蔵量、製品特性等を調査しているとされている。選定した海外及び日本のベントナイトを対象として、基礎的特性試験、透水試験、拡散試験を実施している。

電力共通研究で調査対象とされたベントナイトは、以下の5種類である。

- ① 米国産 BARA-KADE 90
- ② 米国産 FEDERAL SEAL 200
- ③ オーストラリア産 TRUBOND 72
- ④ 中国産 筑前8号
- ⑤ インドネシア産 Powder (200Mesh)

上記の①～④はNa型、⑤はCa型ベントナイトである。

また、上記選定試料との比較基準として、国内産クニゲルV1及び米国産Volclay MX-80のデータを、またそれ以外に比較用試料として国内産佐渡のデータを付記している。

(4) JAEA

核燃料サイクル開発機構が作成した「我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(2000年レポート)」平成11年度一分冊2地層処分の工学技術—(JNC TN1400-99-022)に国内外のベントナイトを使用した試験結果を取りまとめている¹⁷⁾。取り扱われたベントナイトは、山形県月布産のクニゲルV1、クニピアF、米国ワイオミング産のMX-80、ドイツババリア産のMontigel、カナダサスカチュワン産のAvonsealである。MX-80はスウェーデン、スイスの緩衝材の基本材料とされ、Montigelはドイツの、Avonsealはカナダの緩衝材の基本材料とされている。

表 2.3-1 各国の研究対象となったベントナイト

Posiva 社主な候補検討材料 ¹¹⁾			SKB 社主な候補検討材料（緩衝材） ¹²⁾			電力共通研究（1995） ¹⁶⁾¹⁶⁾			日本原子力研究開発機構 ¹⁷⁾		
産出国	ベントナイト	備考 スメクタイト割合	産出国	ベントナイト	備考 スメクタイト割合	産出国	ベントナイト	備考	産出国	ベントナイト	備考
米国	MX-80	緩衝材、Na 型、75 (%)	米国	MX-80	Na 型、75 (%)	米国	MX-80	Na 型	米国	MX-80	Na 型
ギリシャ	Deponit CA-N	緩衝材、Ca 型、81 (%)	ドイツ	IBECO	Na 型、70 (%)	米国	BARA-KADE90	Na 型	ドイツ	Motigel	Ca 型
インド	Asha230	埋め戻し材、Na 型、 60 (%)	ドイツ	IBECO	Ca 型、80 (%)	米国	FEDERAL -SEAL200	Na 型	カナダ	Avonseal	
ギリシャ	MilosB	埋め戻し材	チェコ	RMN	90 (%)	オーストラリア	TRUBOND72	Na 型	日本	クニゲル V1	Na 型
チェコ	DJP	埋め戻し材	ギリシャ	Beidelite	35 (%)	インドネシア	Powder (200Mesh)	Ca 型	日本	クニピア F	Na 型
ドイツ	Fliedland	埋め戻し材、45 (%)	スペイン	Saponite	70 (%)	中国	筑前 8 号	Na 型			
ギリシャ	ミロ産ベントナイト/掘削スリ:30/70	埋め戻し材、Ca 型	日本	クニゲル	50 (%)	日本	クニゲル V1	Na 型			
ギリシャ	ミロ産ベントナイト/掘削スリ:50/50	埋め戻し材、Ca 型	ドイツ	Fliedland	45 (%)	日本	佐渡	Ca 型			

放射性廃棄物処分分野における海外のベントナイトの研究状況を Posiva 社、SKB 社などを例に取り述べた。欧州機関の調査では、ワイオミング産ベントナイトの他、地理的に近いギリシャ、チェコ、ドイツのベントナイトが検討対象になっており、中国のベントナイトは調べられていない。我が国の場合、欧州とは地理的に異なるので、輸送上の観点から検討対象としてはアジア、太平洋地域が重要であり、独自の調査・検討対象を設定する必要がある。中でも地理的に近い中国産ベントナイトの重要性は高く、特に重点的に調査研究を実施する必要があると考えられる。

2.4 放射性廃棄物処分分野での主なベントナイトの特徴

放射性廃棄物処分分野で重要と考えられる主な Na 型ベントナイトとして、本節では、クニゲル V1、MX-80、GMZ（中国内モンゴル自治区（高廟子））の3つのベントナイトを取り上げその特徴を示す。MX-80 は欧米の放射性廃棄物処分の研究に用いられているベントナイトである。クニゲル V1 は日本の放射性廃棄物処分の研究に用いられているものであり、また、GMZ は中国の放射性廃棄物処分用として候補材料になっているもので、詳細は4章に述べる。クニゲル V1 はクニミネ工業㈱、MX-80 は、ボルクレイ・ジャパンへのアンケート調査結果をもとに本資料を作成した。又、GMZ については、今回、中国でのワークショップ時に入手した核工業北京地質研究院（BRIUG）の Wen Zhijian 氏、東華理工學院の Liu Xiaodong 氏のパワーポイントデータに基づいて記述した。

1) クニゲル V1

クニゲル V1 を産出するベントナイト鉱床は山形県大江町月布に位置し、新第三紀中新世の杉山層中にあり、硬質泥岩と互層状にある火山灰が続成変質したものである。ベントナイト層は30層以上あり、6～7mの厚層1層および1m程度の薄層8層が採掘対象になっておる。鉱山の年間採掘量は7～10万トンである。クニゲル V1 を生産する左沢工場は、月布鉱山から10kmの距離にあり、自動化の進んだ工場である。

クニゲル V1 の特徴として、ワイオミング産のベントナイトに比較してクリストバライトの含有が見られないベントナイトで、モンモリロナイト含有量がワイオミング産より少ないことがあげられる。また、カルサイト（方解石）が存在するため、交換性 Ca イオン量に付加され数値が大きくなっている。

表 2.4-1 クニゲル V1 の基本物性 (クニミネ工業(株)作成資料より)

試料名		クニゲルV1	試験法
水分	(%)	10.5	
メチレンブルー吸着量	(mmol/100g)	82	JBAS-107-91に準拠
モンモリロナイト含有率	(%)	58	注1)
膨潤力	(ml/2g)	18	JBAS-104-77に準拠
液性限界		490	JSF T 141-1990に準拠
塑性限界		29.04	
陽イオン交換容量	(meq/100g)	68.0	JBAS-106-77に準拠
浸出陽イオン(meq/100g)	Na ⁺	60.0	陽イオン交換容量測定時に得られた酢酸アンモニウム抽出液中の各イオン濃度を測定. 交換性陽イオンとは厳密には異なる.
	K ⁺	3.1	
	Mg ⁺⁺	4.1	
	Ca ⁺⁺	56.1	
	Total	123.3	
化学組成 (wt%)	SiO ₂	68.6	化学組成分析方法：蛍光X線 (R I X 1 0 0 0) による分析
	Al ₂ O ₃	15.1	
	Fe ₂ O ₃	2.58	
	TiO ₂	0.18	
	MgO	2.02	
	CaO	2.87	
	Na ₂ O ₃	1.74	
	K ₂ O	0.40	
	MnO	0.06	
	P ₂ O ₅	0.03	
	SrO	0.03	
	ZrO ₂	0.02	
	Ig-loss (%)	5.65	
	Total	100.0	
Cl	0.01		
SO ₃	0.75		
示差熱分析	脱水温度 (°C)	53.8・85.3	TG-DTAによる
	発熱ピーク (°C)	465.6	
	脱OH温度 (°C)	673.7	

注1) モンモリロナイト含有率試験法：月布ベントナイト中のモンモリロナイト100%のメチレンブルー吸着量を140mmol/100gとして推定

2) MX-80

放射性廃棄物処分施設で適用が検討されている MX-80 は、2.2.5 に記載のボルクレイの粒度調整を行ったベントナイトである。基本物性については表 2.4-2に示す。

MX-80 の粒度は、乾式粒度：40 メッシュ～140 メッシュ（約 385 μm～105 μm）通過：65%～85%、200 メッシュ（74 μm）通過：10%となっている。

表 2.4-2 ボルクレイ(MX-80)の基本物性

(株ボルクレイ・ジャパン作成資料より)

試料名		ボルクレイ	試験法
水分 (%)		10	
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)		110	
膨潤力 (ml/2g)		26	
液性限界		610	
塑性限界		37.40	
陽イオン交換容量 (meq/100g)		84.0	
浸出陽イオン (meq/100g)	Na ⁺	48.0	
	K ⁺	1.6	
	Mg ⁺⁺	13.3	
	Ca ⁺⁺	19.8	
	Total	83.1	
化学組成(wt%)	SiO ₂	60-62	化学組成分析方法:蛍光X線による分析
	Al ₂ O ₃	21-23	
	Fe ₂ O ₃	3.0-4.0	
	TiO ₂	-	
	MgO	2.0-3.0	
	CaO	0.1-0.7	
	Na ₂ O	2.0-3.0	
	K ₂ O	0.4-0.5	
	MnO	-	
	P ₂ O ₅	-	
	SrO	-	
	ZrO ₂	-	
	Ig-loss (%)	6.9	
Total	100.0		
Cl			
SO ₃			
示差熱分析	脱水温度 (°C)	115	TG-DTAによる
	発熱ピーク (°C)	なし	
	脱OH温度 (°C)	698	

3) GMZ (中国内モンゴル自治区高廟子)

中国産ベントナイト GMZ の基本物性を表 2.4-3 に示す。GMZ の資料は、Wen 氏、Liu 氏のパワーポイントデータを用いて作成したものである。両氏の示す基本物性値が多少異なるため、表 2.4-3 には、両氏が示した GMZ の試料名 GMZ-1, GMZ の両方について併記して示した。

両氏のデータによると GMZ は Na 型ベントナイトで、放射性廃棄物処分分野での研究がなされているクニゲル V1、MX-80 と比較しても遜色のないモンモリロナイト含有率を有し、膨潤力はクニゲル V1 と同等の特徴を有している。

表 2.4-3 GMZ の基本物性

試料名		GMZ-1	GMZ	試験法
報告者		Prof. Wen	Prof. Liu	
タイプ		Na 型	Na 型	
水分		—	8~11	
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)		102	—	
膨潤力 (ml/2g)		18	—	24 時間、蒸留水
液性限界		—	336	
塑性限界		—	46	
pH		8.6~10	8.7~9.2	
土粒子密度 (g/cm ³)		2.66	2.77	
陽イオン交換容量 CEC (meg/100g)		77.06	74	
交換性陽イオン (meg/100g)	Na ⁺	40.68		
	K ⁺	0.45		
	Mg ²⁺	10.17		
	Ca ²⁺	27.03		
化学組成 (wt%)	SiO ₂	—	69.17	
	Al ₂ O ₃	—	14.43	
	Fe ₂ O ₃	—	3.12	
	CaO	—	1.29	
	MgO	—	3.31	
	K ₂ O	—	0.83	
	Na ₂ O	—	1.95	
	H ₂ O	—	5.40	
含有量 (wt%)	モンモリロナイト	72.5	75~90	
	石英/玉髄	19.0	10~22	
	長石	4.3	3~10	
	カオリン	0.8		
	方解石	0.5	0.5~1.0	

(Wen、Liu 氏パワーポイント資料より作成)

【参考文献】

- 1) U.S. Geological Survey, Bentonite world production by country, Minerals Information Minerals Yearbook
- 2) Benthite,Pyrophyllite and Talc in the Republic of South africa , 2004, Report, R46/2005,Department:Minelals and Enegy Republic of South Africa.
- 3) 中村隆浩他:放射性廃棄物処分施設に適用する海外ベントナイトに関する基礎的調査,土木学会第61回年次学術講演会,共通セッション,2006年9月
- 4) 西安日中韓ワークショップ (2008) での発表資料より
- 5) C.P.Kaushik: Characterization and performance assessment of Indian clays for use in geological repository, Bhabha Atomic Research Center, Mumbai, India
- 6) ベントナイトをもう少し知りたい人のために・(株)ボルクレイ・ジャパン
- 7) IAEA Co-ordinated Research Program 資料より
- 8) T. Takagi, Bentonite in Japan - Geology and Industries -, Open file report of Geological Survey of Japan, no.425
- 9) 財務省貿易統計ホームページ (<http://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm>)
- 10) Posiva Oy: Nuclear Waste Management of the Olkiluoto and Loviisa Power Plants, TKS-2006, Programme for Research, Development and Technical Design for 2007-2009, 2006
- 11) Liisa Carison: Bentonite Mineralogy: Part 1: Methods of Investigation-a literature Review, Part 2: Mineralogical Research of Selected Bentonites, Posiva Working Report 2004-02, 2004
- 12) SKB Thechinal Report, TR-06-30, Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials, 2006
- 13) SKB Thechinal Report, The Buffer and Backfill Handbook, Part 1: Diffinitions, basic relationship, and laboratory methods, 2002
- 14) SKB Thechinal Report, The Buffer and Backfill Handbook, Part 2: Marerials and thechniques, 2001
- 15) 志村聡, 村瀬拓也, 赤坂秀成, 加藤耕一, 齋藤茂幸, 海外ベントナイトの緩衝材適用性調査検討(1)-基礎的, 諸特性及び透水性の評価-日本原子力学会「1995春の大会」J19, 1995

- 16) 志村聡, 村瀬拓也, 赤坂秀成, 加藤耕一, 齋藤茂幸, 海外ベントナイトの緩衝材適用性調査検討(2)-実効及び見かけの拡散係数の評価-日本原子力学会「1995春の大会」
J20, 1995
- 17) 我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平成11年度一分冊 2
地層処分の工学技術一, JNC TN1400 99-022, 1999

第3章 中国産ベントナイトの調査

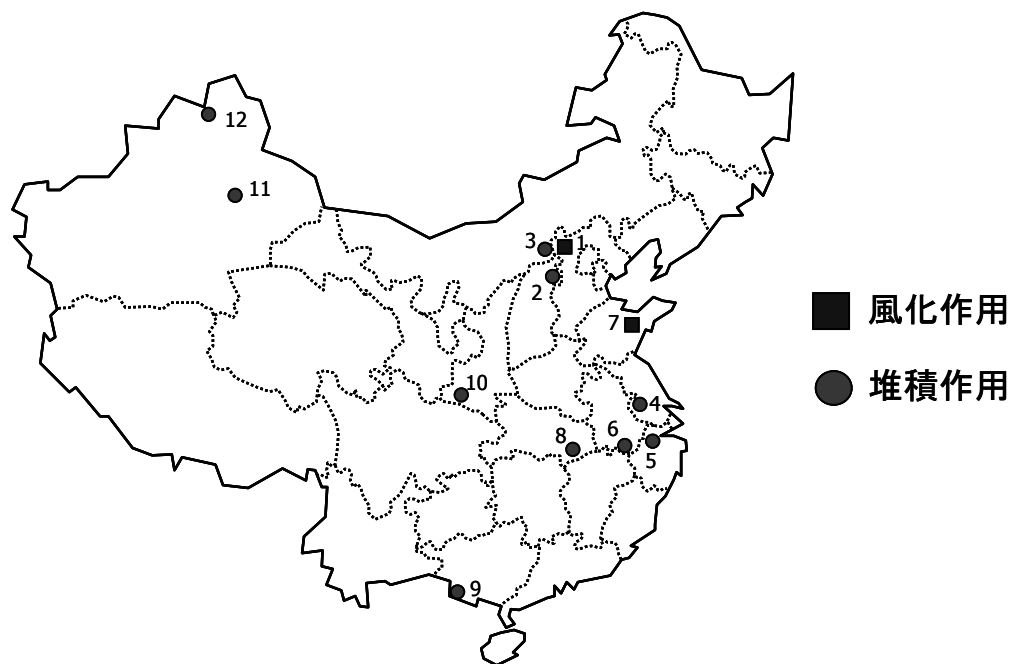
中国産ベントナイトに関する調査は協力関係にある中国核工業集团公司 (CNNC)、地質局 (BOG)、同北京地質研究院(BRIUG)及び関係する組織、大学等の協力のもとに情報交換、ワークショップ及び現地調査を行った。ここではそれらの活動結果をもとに中国全体のベントナイト鉱床や産業の状況、中国が高レベル放射性廃棄物処分の人工バリア材として候補材料としている内モンゴル自治区高廟子 (GMZ) ベントナイト鉱床の調査結果、日本に輸出実績のある中国東北部のベントナイト工場の調査結果等を記載した。

3.1 中国における主なベントナイト鉱床

Industrial Minerals 2008 July によると、世界のベントナイト年間生産量 1,490 万トン (国毎の統計年度異なる。2004-2007 年)のうち 510 万トン/年のアメリカに次ぎ、中国は世界第二位の生産量 310 万トン/年となっている。世界的な資源量は 15~100 億トンとされており、そのうちアメリカ、ロシア、中国がその 1/3~1/4 を占めている。

今回の調査の中国側担当者として協力して頂いた中国核工業集团公司北京地質研究院の温 (Wen Zhijian) 氏のワークショップでの報告や Wen Lu ら(1998)¹⁾によれば、中国における 23 の省には 400 以上のベントナイト鉱床の記録がある。それらのうち、86 のベントナイト鉱床が詳細に調査されており、その結果、ベントナイトの推定埋蔵量として 25 億トンが見込まれ、そのうち 7 億トンの賦存がすでに確認されている。ただし、それらのうち、約 90%が Ca 型に分類されるものであり、残りが Na 型や活性白土である。

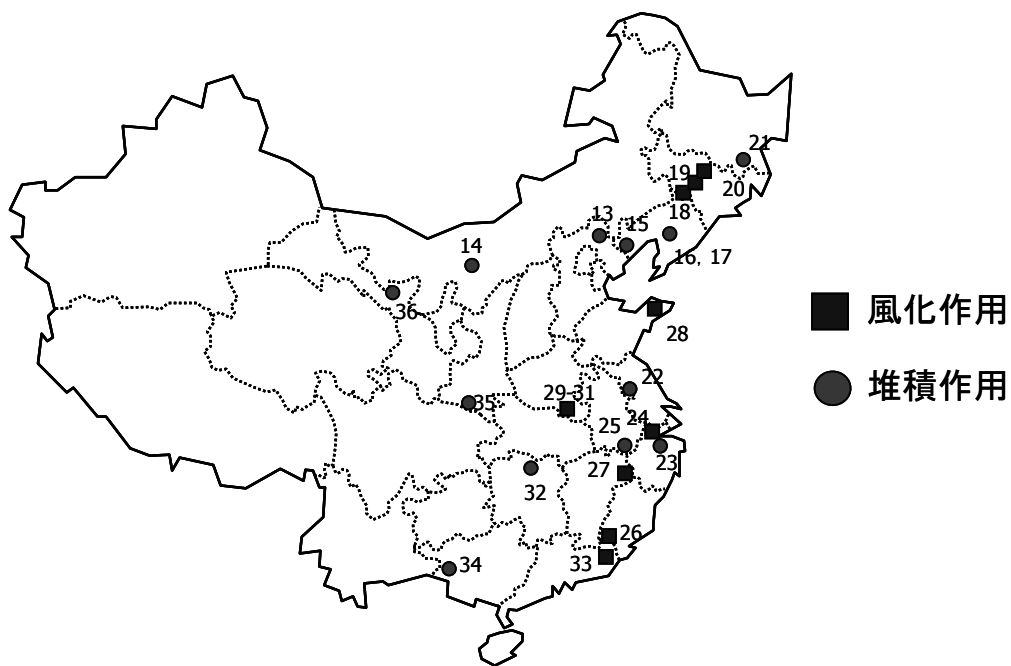
中国には 86 のベントナイト鉱床の存在が確認されているが、鉱床の埋蔵量の規模を 1) 大規模(埋蔵量 5 千万トン以上および 2)中規模(埋蔵量 5 百万~5 千万トン)に分類し、整理すると、それぞれ図 3.1-1および図 3.1-2のようになる。さらに、ベントナイトの成因別にも記載が行われている。ベントナイトの成因は熱水変質、堆積(続成)および風化作用などの水・岩石の反応によるものであるが、熱水変質によるものはほとんどないようである。



番号	鉱床名	備考
1	Yanjiagou, Xuanhua, Hebei	Ca 型ベントナイト、低品質
2	Qiangfengling, Hunyuan, Shanxi	
3	Gaomiaozhi, Xinghe, Inner Mongolia	GMZ、Na 型ベントナイト
4	Jiashan, Jurong, Jiangsu	低品質
5	Pingshan, Linan, Zhejiang	高品質
6	Xintan, Huangshen, Anhui	高品質、埋蔵量少
7	Yongquanzhuang, Weifang, Shandong	Ca 型ベントナイト、低品質
8	Shangxiong, Wuchang, Hubei	低品質
9	Ningming, Guangxi	
10	Yangxian, Shaanxi	
11	Kerjian, Tokson, Xinjiang	低品質
12	Wulanlinge, Hoboksar, Xinjiang	Ca 型ベントナイト、低品質

図 3.1-1 推定埋蔵量 5 千万トン以上の大規模鉱床の分布¹⁾

(備考は Wen Zhijian さんの発表資料による。)

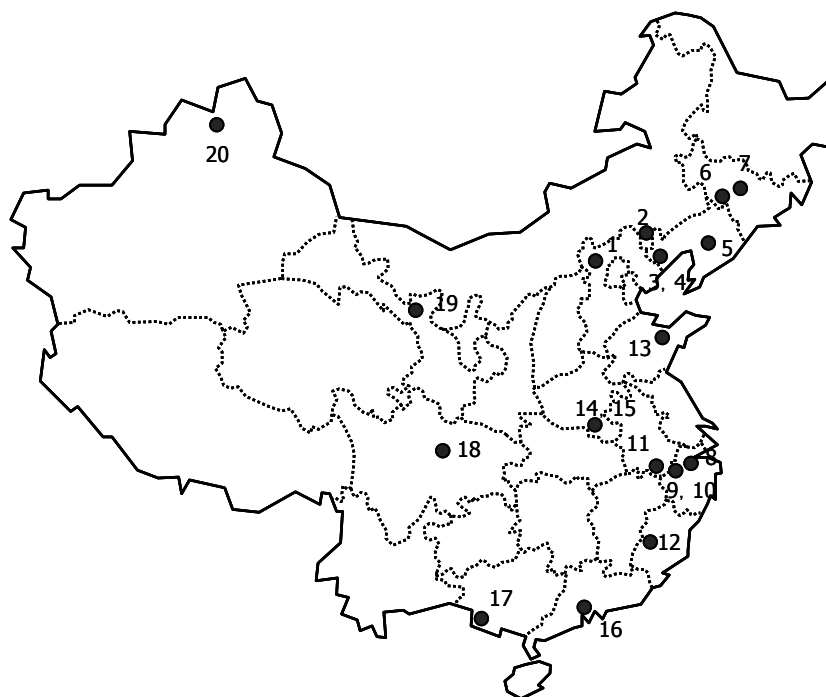


番号	鉱床名	番号	鉱床名
13	Yixunhegou, Longhua, Hebei	25	Dasha, Xiuning, Anhui
14	Baimiaozi, Urad, Qianqi, Inner Mongolia	26	Zhongshan, Wuping, Fujian
15	Reshuitang, Lingyuan, Liaoning	27	Lijia, Guangfeng, Jiangxi
16	Suntun, Heishan, Liaoning	28	baitengkou, Laiyang, Shandong
17	Shili, Heishan, Liaoning	29	Shangtianti, Xinyang, Henan
18	liufangi, Siping Jilin	30	Liujiachong, Xinyang, Henan
19	Shibeilin, Changchun, Jilin	31	Yangjiawan, Xinyang, Henan
20	Yinkuangshan, Jiutan, Jilin	32	Wujiayu, Lixian, Hunan
21	Hailin, Heliongjiang	33	Tashaba, Meizhou, Guangdong
22	Longwangshan, Xuy, Jiangsu	34	Xinzhou, Tiandong, Guangxi
23	Choushan, yuhang, Zhejiang	35	Yangheba, Xixiang, Shaanxi
24	Hongmiao, Anji, Zhejiang	36	Hongguan, Jinchang, Gansu

図 3.1-2 推定埋蔵量 5 百万トン～5 千万トンの中規模鉱床の分布¹⁾

3.2 中国におけるベントナイト産業の現状

中国国内のベントナイトメーカーは数百社にもなるとされており、その数や工場規模は年々増加の一途をたどっている。中国のベントナイト鉱床の規模は非常に大きなものであるが、一つのメーカーで一つの鉱床が掘削されているというようなことは稀で、一つの大きな鉱床内でいくつものメーカーが掘削を行っているというのが現状のようである。これは、鉱区数が86ということからも明らかである。図 3.2-1に中国におけるベントナイトの主要メーカーを示す。



- (1) Hebei Xuanhua Chemical Works
- (2) Inner Mongolia Fuyan bentonite Co. Ltd
- (3) Liaoning Lingyuan Bentonite Mine
- (4) Sudechemie Redhill Co. Ltd
- (5) Heishan Bentonite Mine
- (6) Siping Liufangzi Bentonite Development Co.
- (7) Jiutai Benonite Mine
- (8) Zhejiang Yuhanh Choushan Situ Mine
- (9) Zhejiang Linan bentonite Chamental Works
- (10) Zhejiang Linan bentonite Mine
- (11) Huangshan Xiuning Fine Chemical Warks
- (12) Fujian Liancheng Bentonite Mine
- (13) Shandong Weifang bentonite Works Xinyang Huashen Bentonite Products Co. Ltd
- (14) Xinyag Huashen Bentonite Products Co. Ltd
- (15) Henen Xinyang Shangtianti Non-metal Mine
- (16) Nanhai Non-Metal Development Co
- (17) Guangxi Ningming Bentonite Development Co
- (18) Sichuan Santai Fujiang Chemical Co. Ltd
- (19) Jinchang Bentonite Works
- (20) Xinjiang Hoboksar bentonite Works

図 3.2-1 中国国内のベントナイトメーカー¹⁾

これらのメーカーのほとんどが、露天掘りによってベントナイトの掘削を行っている。最も大きな露天掘り鉱床は Heishan Bentonite mine (図 3.2-1中の5) で、900×350m²の表面積を有し、埋蔵量は数千万トンとされている。Heishan Bentonite mine において掘削されているベントナイトは Ca 型を主とし、それを活性化処理したベントナイトが生産されている。日本においては砕石法にのっとり、安全面などを考慮してベンチカット方式によって掘削が進められるが、中国においては必ずしもそのような掘削は行われていないようである。

一方で、坑内掘りによる掘削が進められているのは、Siping Liufangzi Bentonite Development Co. (図 3.2-1中の6、以下同様に表記)、Jiutai Bentonite Mine(7)、Zhejiang Yuhanh Chousan Works(8)、および Guangxi Ningming Bentonite Development Co. (17) である。

中国東北部の吉林省、遼寧省などには有力なベントナイト産業があり、表 3.2-1のように日本にも輸出しているメーカーの工場が立地する。表 3.2-1の内、主な企業の概要は3.4節で述べる。

表 3.2-1 中国の有力なベントナイト工場

工場	所在地	年間生産量※
CIMCO (建平科力砵業有限公司)	遼寧省建平	約 10 万 t
Sud Chemie redhill ⁴⁾	遼寧省建平	約 9 万 t
Volclay Dunming ⁵⁾	遼寧省建平	約 5 万 t
四平劉房子愛思克膨潤土有限公司 (Siping Liufangzi Bentonite Development Co.)	吉林省四平市劉房子	約 6 万 t

※年間生産量はメーカーへのヒアリング調査 (2007 年度実施) による

(1) ベントナイトの製造方法

中国におけるベントナイトの製造は、日本やアメリカとほとんど違いはなく、乾燥・粉碎によって行われる。Ca 型に活性化処理を施す場合においても同様のようである。一部のメーカーにおいては、品質別に原鉱石をストックし、品質のバラつきを極力小さくすることを試みているようである。

(2) 中国産ベントナイトの市場

ベントナイトの需要は土木分野以外にも、鋳物、農業、化粧品やトイレタリーなど非常に多岐に渡っており、中国国内においても同様である。中国のベントナイトは 24 以上の市場で使用されており、このうち 2000 年時点での用途別比率は、鋳造 52%、ボーリング

24%、鉄ペレット 8%であり、残りが石油化学、農業、建築基礎などである。直近の金融危機により、鉄ペレットおよび鋳物用の生産量が減少している。特に鋳物用は 30%以上減少しており、多くの地元零細業者は休業状態となっている。

中国国内で製造されたベントナイトの多くは自国内で消費される。1980 年代においては鋳物における利用が 7 割を占めていたが、徐々に土木分野の泥水などでの利用が増加しており、1990 年代後半では鋳物分野で 5 割、土木分野で 2.5 割となっている。今後、インフラの整備などで、土木分野における需要がますます増えるものと考えられる。

また、日本や韓国、東南アジアへの輸出も年々増加している。特に特に活性化処理ベントナイトの輸出相手国として、日本と韓国が挙げられる。例えば日本の猫砂に用いられる活性化ベントナイトは徐々に中国産に置き換えられているようである。

3.3 日本への輸出

中国から日本への輸出量および輸入契約単価の推移を、それぞれ図 3.3-1および図 3.3-2に示した。

ここ 20 年における推移を見ると、輸出量は毎年増加の傾向をたどっている。これらのベントナイトのほとんどが鋳物分野で消費されているようである²⁾。また、ここ数年でペットや土木などの分野での需要も増えているが、その実態は詳細に調べられていない。

一方で、輸入契約単価はほぼ横ばいで推移してきた。しかし、近年、リーマンショックによる経済の落ち込みとその後の回復など、変化が著しいと予想されるので、今後の情報収集が重要になると思われる。

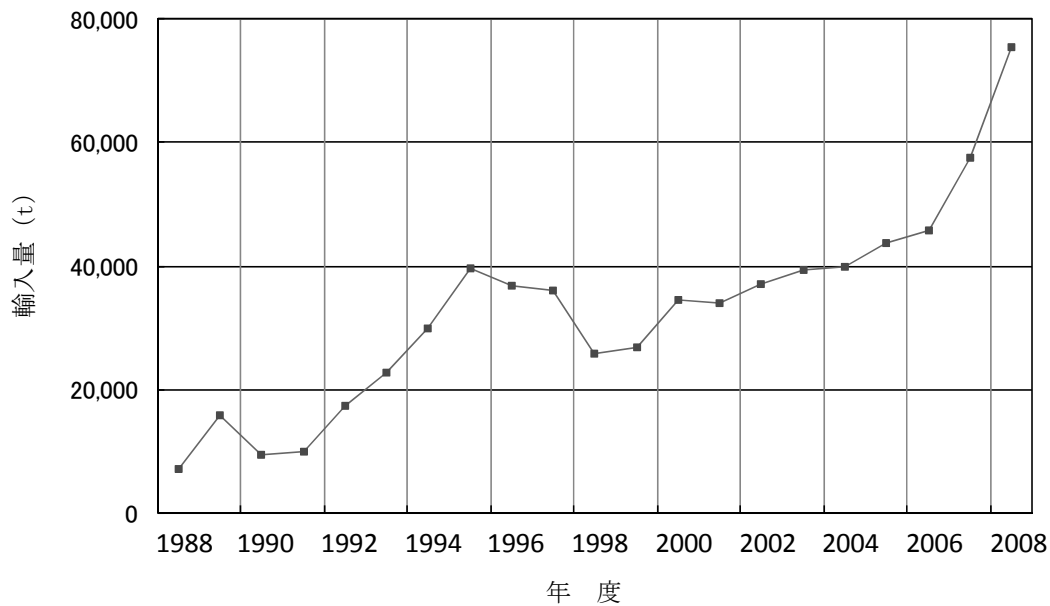


図 3.3-1 日本への中国ベントナイト輸出量の推移
(財務省貿易統計³⁾より作成)

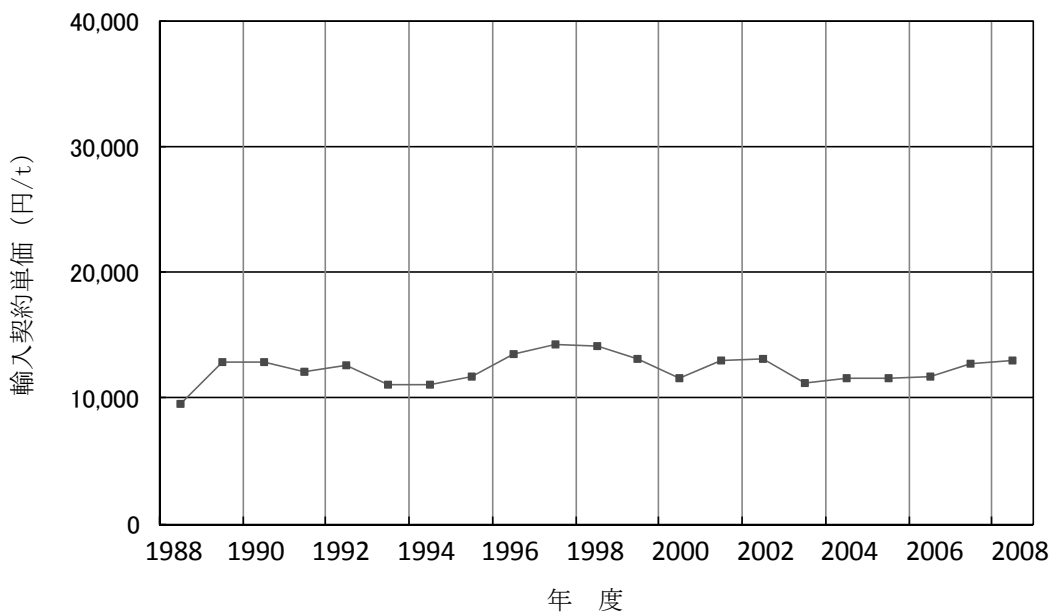


図 3.3-2 中国ベントナイトの輸入契約単価の推移
(財務省貿易統計³⁾より作成)

3.4 主な中国産ベントナイトの調査

先にも述べたように、中国のベントナイトメーカーは非常に多く、また各社ごとに得意分野が存在する(例えば、活性白土や有機化ベントナイトなど)。

ここでは、中国機関が放射性廃棄物処分施設用として研究対象としている内モンゴル自治区興和県の高廟子 Gaomiaozi (GMZ) ベントナイト鉱床、日本に近く近代的工場があり土木や鋳物などの既存分野で実績のある中国東北地域のメーカーとして遼寧省建平の CIMCO 及び吉林省公主嶺市の四平劉房子愛思克膨潤土有限公司を対象とし、現地訪問調査に基づいて情報を整理した。

GMZ 鉱床は、放射性廃棄物処分への利用を念頭に中国の研究機関で調査研究が進められており、深部から採取された Na 型ベントナイトに関する試験結果がいくつか公表されている(2.4.3参照)。CIMCO では、露天掘りで採掘された Ca 型ベントナイトを、活性化処理して Na 型に変換している。また、四平劉房子愛思克膨潤土有限公司では、地下約 200m の坑内から Na 型ベントナイトが採掘されている。

3箇所のベントナイトの基本物性について、クミネ工業で測定を実施した。その結果を、第5章表5.2-1にその他のベントナイトとともに整理して示した。

3.4.1 高廟子 Gaomiaozi (GMZ) ベントナイト鉱床調査

(1) 地点の概要

当地点のベントナイトは中国側が高レベル放射性廃棄物処分施設に使用する候補材料としているものであり、浅部には Ca 型ベントナイトが、深部には Na 型ベントナイトが存在するとしている。クニゲル V1 と比較した多くの研究データが報告されている。(4.2に記述)

以下の調査結果は、現地調査の結果と採取した試料の試験結果(クミネ工業株が実施)及び文献⁶⁾⁷⁾⁸⁾に基づいている。

(2) 位置、交通

張家口市の西 80km (北京の西北 160km、参照) に位置する。

GMZ (Gaomiaozi) 鉱床は、張家口市と内モンゴルを結ぶ高速道路及び国道 101 号からは約 5km で、比較的アクセスの容易なところにある。

(3) インフラの状況

高廟子(Gaomiaozi)集落の入口は高速道路と国道 101 号沿いにあり、集落入口の石碑がある(写真 3.4-1)。国道 101 号は 2 車線幅があり、大型トラックなどの通行に問題はない。

国道 101 号と高速道路は並行しており、高速道路の出口は宣化または興和である。この高速道路は内モンゴル自治区など北部で産出する石炭等を運搬する重要なルートとなっており、交通量が非常に多い。物資を運ぶ多数のトラックにより、激しく渋滞するため、北京市内を通過するトラックには時間帯による交通制限がなされている。待機するトラックが長蛇の列をなしており、輸送上の問題点となる可能性がある。

鉦山は国道 101 号の高廟子入口から南方に約 5km に位置する。国道からの道は整備されておらず、大型トラックによる運搬には道路整備が必要である。高廟子集落入口から南に向かい約 300m で河床を横断するが、橋がなくジープにより渡河した(写真 3.4-2)。増水時(少ないと思うが)の通行には問題が生じると考えられる。

調査地周辺はなだらかな丘陵が続き、丘陵間には河川の下刻谷があり、高低差は 20～30m 程度で、平坦な部分は畑地となっている。民家は国道と鉦床間で 2ヶ所に見られた。高廟子集落は、小さな農村の集落である。周辺の町としては高速道路に沿って西北西に約 15km 離れた所に興和県がある。興和の町には食堂など店舗がある。



写真 3.4-1 Gaomiaozi(高廟子)集落の入口の案内石碑
前方にあるカルバートは、高速道路。



写真 3.4-2 Gaomiaozi(高廟子)集落とGMZ 鉞床間の渡川地点状況
未舗装道路に橋のない川を渡る箇所が1ヶ所ある。

(4) ベントナイト鉞床

“内モンゴル興和県高廟子ベントナイト鉞床”については、内モンゴル省資源情報院⁹⁾が概説しており、鉞区は興和県中心部から東南 15km に位置し、面積 72km²、資源埋蔵量 17,489 万トン、そのうち Na 型ベントナイトが 7 割以上を占める大規模なベントナイト鉞床であり、露天掘りが可能で水、電力の供給条件も良好であることが述べられている。

(5) 現地調査結果

地元業者によるベントナイト採掘は現在も行われているが、開発はほとんど進んでいない。道路沿いに小規模原鉞ストックパイルがあり、また民家近くに採掘用らしい重機が見られる。現地確認ルートは①丘陵中央(Ⅲ層直上部)、②Ⅲ層南端、③東側採取場の順に調査した。①、②、③の地点の位置関係を図 3.4-1 に示す。

図 3.4-1 に示す地質図の①付近で鉞床全体の地形、賦存状況の説明を受けた。鉞床の走向方向(NE-SW)延長は 8.1km 程度で、東側は河北省との省境まで続いている。丘陵自体の起伏は少ないが、下刻谷との高低差は 20~30m 程度である(写真 3.4-3 及び 3.4-4 参照)。

鉞区の広がりには 72km² と称しているが、この鉞区の意味は鉞床の広がりではなく、採掘権(中国では採鉞許可証)を設定または取得しているわけではない。現在採掘権をもっているのは地元業者である。

ここには高廟子鉞床の発見のもととなったベントナイトⅢ層と呼ばれる層の露頭がある。露頭の最上部は白色部と紫色部と縞状になっており、全体的には砂質であるが部分的には蠟感のある部分もある。サンプル No. 1 は露頭のⅢ層上部からランダムに採取した(写真

3.4-5参照)。

露頭東側には以前採掘をしていた採取跡がある。クニミネ工業(株)では、ここの原鉱を使用した猫砂を200トン/月程度約1年購入していた実績がある。採取跡でのベントナイトは硬質且つ砂質であり、2ヶ所をまとめてサンプルNo.2とした。ベントナイトの上盤の層を現地では第三紀層としていたが、文献では白亜紀層となっている。上位層との関係は不整合的である。

採取跡の西側の道路を隔てて採取跡と見られる場所がある。ここはベントナイト層を追いかけていったものとみられるが、10m程度の幅しかなく、また遠望ではベントナイト層はみられない。

・①と②間

ボーリング孔跡、立坑跡がある(写真3.4-6参照)。立坑は1m角程度、深さは97mとのものである。立坑内部にはほとんど地下水はなく、地下水位は不明である。ベントナイトは50~60m以深ではNa型となっているとの説明があった。



写真 3.4-3 GMZ 鉱床上部の状況

・②Ⅲ層南端

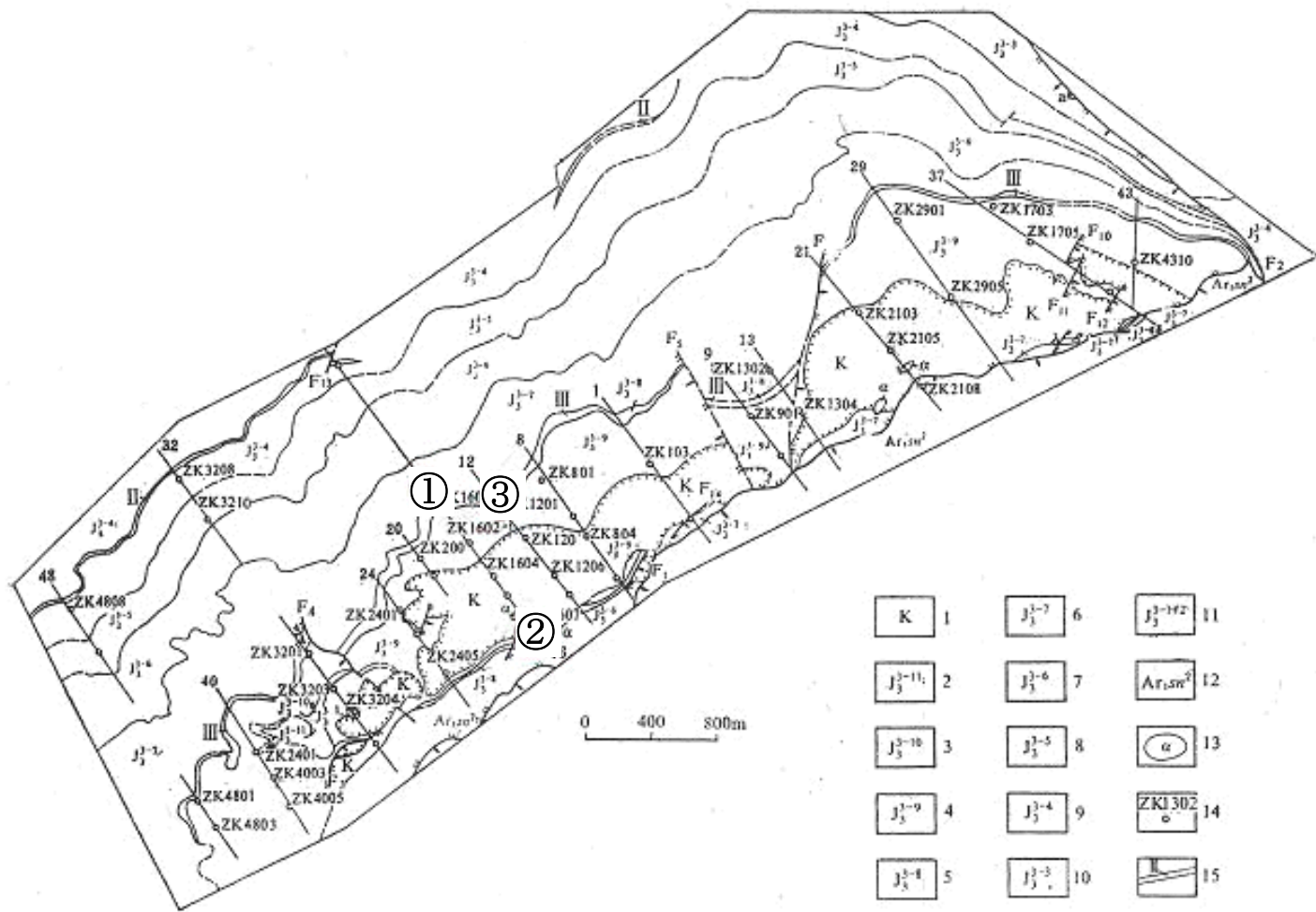
Ⅲ層の向斜の南翼露頭付近。南翼側は断層があり、また傾斜も急になっている。従って切羽の傾斜方向での幅は狭くなっている。ここではサンプルNo.4, 5を採取した。No.4は東側で蠟感がある部分、No.5は砂質な部分である。

・③東側採取場

②の東側300m程度にある採取場で、切羽は30m×30m×高さ5~10m程度である。当

日、採掘は行なっていなかったが、最近まで採掘は行っている。場内外に 100 トン単位で 2 ヶ所原鉱をストックしている。ここもベントナイトは全体に砂質であるが、一部黄色で砂がほとんど入っていない部分がある（サンプル No.6）。この黄色ベントナイトは不規則に入っている。また、西側の上盤側には灰色で多少砂質なものもある（サンプル No.8）。場内のストックパイルの砂質なベントナイトもサンプル No.7 として採取した。採掘ベースではサンプル No.7 が代表的ではないかと考える。中国側の説明ではこの場所が最も良質と話しているが、良質なものもあるといった程度と考える。

露頭①②③及び採取場でのベントナイトを全体に通してみると、このベントナイトは品質の変化（色の変化、砂質分の含有量）が大きいのが特徴と考えられる。従って、代表試料を採取することは容易ではない。数多くのボーリングコアを用いる、または採取数量を多くするなどの対応が必要となる。



高庙子膨润土矿床地质图

1—白垩系砖红、紫红色砂岩；2—褐黄、暗紫色砾岩夹砂岩；3—膨润土矿层（IV矿层）；4—褐黄、暗紫色砾岩夹砂岩；5—膨润土矿层（III矿层）；6—暗紫色、猪肝色砾岩；7—灰紫色砂砾岩；8—浅灰紫色砾岩；9—杂色砂砾岩（中部有II矿层）；10—红紫色含结核砂岩；11—含植物化石砂岩夹白色砾岩；12—太古界桑干群长石石英岩；13—安山岩脉；14—部分钻孔及编号；15—矿层及编号

图 3.4-1 GMZ 磁床付近地质平面图与调查位置

東

西



写真 3.4-4 GMZ サイト①からの鉱区全景



写真 3.4-5 GMZ サイト①露頭 サンプル No.1 採取



写真 3.4-6 GMZ サイトボーリング・立坑地点
(南から北に向かって撮影)

(6) 採取したサンプルの試験結果

採取したベントナイトサンプルをビニール袋に密封した上で日本に送付し、クニミネ工業（株）にて、一般物性を測定した。採取した No.1 サンプルの写真と目視観察結果を写真 3.4-7 に、一般物性試験結果一覧表を表 3.4-1 に示す。膨潤力は 5~7ml/2g、液性限界は 98~138% となっている。これらのサンプルはいずれも地表付近で採取した Ca 型ベントナイトであり、深部で採取された中国側の GMZ 鉱床のベントナイト試験結果とは異なるものである。以下にサンプル試験結果と現地調査結果および中国側情報から言えることを述べる。

①ベントナイト中のスメクタイト（モンモリロナイト）含有量について

スメクタイト含有量はメチレンブルー吸着量から通常、推定している。旧動燃とクニミ

ネ工業㈱とで実施したクニゲル V1 の鉱物組成分析では月布ベントナイト中のスメクタイト 100%のメチレンブルー吸着量と CEC から推定している。クニゲル V1 では、メチレンブルー吸着量 140mmol/100g がスメクタイト 100%に相当するとしている。この関係をそのまま適用すると、GMZ のサンプルで最も高純度とされた No.6 のスメクタイト含有量は 70~80%程度となる。ただし、このメチレンブルー吸着量とスメクタイト純度の関係はスメクタイトの種類（層電荷量など）により異なるため注意が必要である。

ワイオミング産の MX-80 のメチレンブルー吸着量は 90-100mmol/100g であり、GMZ の高純度試料と同様の 70-80%のスメクタイト量となる。ベントナイト工業関係者は経験的にワイオミング産のスメクタイト 100%のメチレンブルー吸着量は 140mmol/100g よりも低いと考えており、70-80%スメクタイト量よりも実際は純度が高い可能性もある。

GMZ で採取したサンプルでは、最も高純度と認められたサンプル No.6 のメチレンブルー吸着量が 108 で、その他が 78~88mmol/100g であることから、中国側の発表している GMZ の評価試験に使用した Na 型ベントナイト試料のメチレンブルー吸着量 102mmol/100g と比較すると低く、中国側性能評価試験は GMZ ベントナイトの平均的なスメクタイト含有量よりも高いもので実施されている可能性がある。評価試料としては鉱床の代表的な試料を用いることが重要であると考えるが、GMZ では開発が進んでおらず、試料の選定が難しい。

②GMZ のベントナイトの特性

GMZ は地表で Ca 型、深部で Na タイプとされている。今回調査で採取した試料は地表のものであり、地表が Ca 型となっていることは確認したが、深部の Na ベントナイトが月布やワイオミングと同様の特性を有しているかは不明である。中国側の発表している GMZ 深部で採取されたベントナイトの試験結果では、液性限界が高くないことなどから、Na 型というよりは Na と Ca の中間的なタイプとなっているようである。川崎鉱山（宮城県）のベントナイトでも地表付近で浸出 Ca イオンが多く、深部では Na イオンが多くなる。この場合イオン組成からは深部は Na 型となるが、性能的には Ca 型に近い。Na タイプ、Ca 型の区別は化学分析値だけではできない。浸出陽イオン組成で区別することはできるが、実用的には膨潤性、止水性などの性能も加味して区別する必要がある。



色調	ピンク,白色
粒度	細粒～微細粒ベントナイト
質感	白色部はロウ感
夾雑物	1mm 以下石英、雲母、 細岩片含む

写真 3.4-7 GMZ サンプル No.1

表 3.4-1 GMZ 鉱床で採取したCa ベントナイトの一般物性試験結果

試料名		No.1	No.2	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
水分 (%)		8.7	8.0	7.0	7.6	7.5	8.0	7.8
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)		88	86	82	78	108	84	84
膨潤力 (ml/2g)		5	5	6	7	5	5	6
pH		9.2	9.2	9.6	9.7	8.8	9.1	8.8
乾式粒度-63 μ m通過分 (%)		87.8	82.7	90.0	87.7	84.8	89.3	91.0
液性限界 (%)		128	98	126	138	126	105	100
塑性限界 (%)		38.0	33.2	31.4	27.5	30.8	28.2	31.7
塑性指数		90.0	64.8	94.6	110.5	95.2	76.8	68.3
浸出陽イオン (meq/100g)	Na ⁺	12.8	11.2	16.0	14.8	10.9	12.3	10.0
	K ⁺	1.6	1.4	1.4	1.1	1.3	1.7	0.9
	Mg ⁺⁺	27.6	23.6	25.4	26.0	36.3	26.3	27.6
	Ca ⁺⁺	48.0	43.7	29.5	28.6	41.8	34.8	35.7
	Total	90.0	79.9	72.3	70.5	90.3	75.1	74.2
陽イオン交換容量 (meq/100g)		73.8	71.3	57.8	58.2	88.0	64.4	67.1
化学組成 (wt%)	SiO ₂	71.6	65.1	71.4	70.6	67.6	70.4	70.4
	Al ₂ O ₃	14.0	17.5	14.6	15.0	17.2	15.0	15.0
	Fe ₂ O ₃	1.96	2.87	2.52	3.30	2.18	2.49	2.23
	TiO ₂	0.08	0.23	0.19	0.19	0.08	0.21	0.19
	MgO	2.51	3.19	2.37	2.16	3.26	2.53	2.47
	CaO	2.13	2.49	1.55	1.65	1.89	1.86	1.81
	Na ₂ O	0.32	0.65	0.49	0.66	0.28	0.32	0.30
	K ₂ O	0.63	1.57	1.01	1.24	0.54	1.02	0.95
	MnO	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
	P ₂ O ₅	0.02	0.06	0.03	0.05	0.03	0.06	0.05
	Cr ₂ O ₃	0.02	0.06	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05
	CuO	-	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	SrO	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05
	ZnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Y ₂ O ₃	0.04	-	-	-	0.04	0.04	0.04
	ZrO ₂	-	0.02	0.03	0.03	-	-	0.02
	lg-loss (%)	6.53	6.04	5.65	4.95	6.79	5.77	6.35
Total		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Cl		-	-	-	0.01	-	0.01	0.01
SO ₃		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
鉱物組成		モンモリロナイト 石英 クワスタライト 長石	モンモリロナイト 石英 クワスタライト 長石	モンモリロナイト 石英 クワスタライト 長石	モンモリロナイト 石英 クワスタライト 長石	モンモリロナイト 石英 クワスタライト 長石	モンモリロナイト 石英 クワスタライト 長石	モンモリロナイト 石英 クワスタライト 長石
示差熱分析	脱水温度 (°C)	86.6・149.0	88.2・147.5	79.2・149.2	73.3・150.6	101.4・156.5	85.2・155.0	83.6・150.6
	発熱ピーク (°C)	-	-	-	-	-	-	-
	脱OH温度 (°C)	662.4	646.0	663.9	677.2	666.8	668.3	666.9

※ X線チャートおよびDTAチャート添付

3.4.2 CIMCO (建平科力磁業有限公司)¹⁰⁾

(1) 調査実施概要

2008年12月に現地調査を実施した際のヒアリング調査結果をまとめ、訪問先に送付し確認を得たものを以下に記載する。

(2) 位置、交通

建平地区ベントナイト鉱山は、瀋陽市から西へ約400kmの遼寧省建平县に位置する。北京と瀋陽市(旧奉天)を結ぶ幹線である鉄道が通っており利便性は高い。また、高速道路も建平まで開通しアクセスが向上した。

(3) 調査結果

1) 会社概要

会社名：建平科力磁業有限公司

(Clay Industrial Minerals Co., Ltd. In Jianping CIMCO)

所在地：遼寧省建平县青峰山郷趙家店村

会社設立：2000年3月22日設立

代表者：総経理 荆磊晶

元山西省地質鉱物局211地質チーム副リーダー、

元遼寧紅燦粘土有限公司社長

従業員数：150名

営業項目：ベントナイトの露天採掘、真珠岩、高陵土の加工、販売など

出荷数量：2002年5,000トン、2003年10,000トン、2004年30,000トン、2005年50,000トン、2006年70,000トン、2007年100,000トンと増加している。2008年度見込みは120,000トンである。

出荷先：国外(日本、台湾など)と国内向け(鋳物、土木)が同程度である。

商品：7~8種。鋳物PNa-1235、土木KL001などが主力である。

品質管理：ISO9001



写真 3.4-8 建平科力砒業有限公司のベントナイト工場と事務所

2) 同社の鉍山

①鉍山の概況

遼寧省の建平县での確認鉍量は 1.5 億トンであり、中国の中でもトップクラスである。建平县のベントナイト鉍山および加工企業は 50 社以上あり、年間生産能力は 100 万トンである。建平地域には外資企業が 3 社（Sud Chemie Redhill、Volclay Dongming、韓国系企業）ある。生産量が 10 万トン／年を越える会社は VolClay Dongming、SudChemie および建平科力砒業（CIMCO）であり、次にアジアベントナイト社が 5～10 万トン／年程度の生産量でつづいている。

建平科力砒業の同社保有原鉍鉍量は 2,000 万トンで、保有および買鉍している鉍区は建平县内に 9 ヶ所以上あり、うち 7 ヶ所が稼働している。ただし、2008 年 12 月時点では、遼寧省、朝陽市により乱開発防止のために一時的に建平县内の全鉍山の採掘が停止されている。省、市による採掘状況および計画の確認後、適正な開発の実施ができるものから再開していく予定である。

採取場は 100m×150m×高さ 20m 程度の規模で、鉍量は 200 万トン、ベントナイトの層厚は 10～20m 程度、表土は 8m 程度である（写真 3.4-9参照）。ベントナイトの品質はメチレンブルー吸着量、湿態抗圧力、膨潤力が高く、鋳物、防水シート（GCL）用などに使用している。



写真 3.4-9 建平科力砒業保有ベントナイト鉞山の露天掘り状況

②鉞山位置

鉞山は建平県青峰山趙家店村にあり、建平科力砒業工場より 3km 離れている。沙海鎮の部落東南約 5km に位置し、主要道から 300m 程度離れている。鉞山の標高および座標は下記の通りである。

鉞区標高：585～725m

東経：119° 31′ 33″

北緯：41° 27′ 14″

③地質状況

鉞区地層の東部及び東南部は太古界建平群小塔子溝組片麻岩類であり、上部は白亜系下統義県組火山碎屑岩および火山熔岩で、不整合的な接触関係にある。鉞区内は儀県組凝灰岩である。

④鉞区地質

鉞区では太古界建平群小塔子溝組黒云角閃斜張片麻岩と白亜系儀県組安山岩が露出している。凝灰岩は淡黄色であり、塊状構造を示す。主要成分は凝灰質火山碎屑で、火山角礫岩が少量含まれており、当鉞区のベントナイト鉞の母岩となっている。母岩とベントナイト鉞床の構造は基本的に一致する。

④ベントナイトの存在状態及び特徴

ベントナイト鉞層の下盤が太古界片麻岩で、上盤が安山岩、凝灰岩及び第四系黄土であ

る。鉍区内の鉍石は緑色、緑黄色で、蠟状～半蠟状を呈する。鉍物成分はモンモリロナイト60%以上で、少量の岩屑等を含有する。触感は繊細且つ滑らかであり、可塑性と粘結性を有する。吸水すると崩壊・膨潤し泥状となり、光沢が無く且つ亀裂がある小塊となる。

鉍床成因は火山堆積型で、ベントナイトの母岩は湖成層の中～酸性凝灰岩である。凝灰岩は主に盆地に落下した火山噴発物に由来する。ベントナイトの生成はこれらの物質が適度な水理条件の中で、脱ガラス、水和により結晶化したことによる。中～中酸性凝灰岩の玻（ガラス）屑は水的作用を受けて、モンモリロナイトを主成分とするベントナイトが生成された。鉍体（層）の産状、形態は古い時代の基底風化岩の表面形態より規制されている。

採取場の採掘方向は下盤に沿って、500m延長している。走向方向延長は150mで鉍体の平均厚さは15mである。

CIMCO 社の製品としては物性、応用分野により、上から下へ三層に分けられる、一層目のモンモリロナイト含有率は80～90%であり、高膨潤力の特徴があり。鋳物とGCL粒状品に適合する。二層目のモンモリロナイト含有率は75～85%であり、高膨潤力及び高泥水粘度の特徴があり、GCL 顆粒、土木用品に適合する。三層目のモンモリロナイト含有率は80～95%であり、高MBと高GCの特徴があり、鋳物用品に適合する。

3)同社工場

工場は、建平(吐柏寿鎮)の東北約10km、主要道沿いに位置する。工場の3km西にはSud Chemie Redhill、10km西にはVolclay Dongmingの工場がある。

工場には生産、事務・検査および厚生関連の建屋がある。敷地面積は50,000m²で工場建築面積は4,500m²、事務所300m²である。生産関連設備は原鉍置き場（天日乾燥場）、ソーダ灰添加・活性化工程、乾燥工程、粉碎・貯留工程、包装工程からなる。

①原鉍置き場、天日乾燥場

工場敷地内に200m×100mの原鉍置き場兼天日乾燥場がある。原鉍置き場は場外にもあり、約20万トン原鉍種類毎に在庫している。原鉍水分は採掘状態で28～35%であるが、天日乾燥で19～24%程度まで低下する。なお、建平地区の年間降水量は500～600mlで雨期は7～9月で、月平均気温は21℃程度（7～9月）である。

②ソーダ灰添加、活性化工程

天日乾燥原鉍はホイールローダーを使用して台貫で重量、供給量を確認して、粗砕後ソーダ灰を添加する。ソーダ灰は計量して添加している（通常製品では4%/34%水分原鉍）。

ソーダ灰添加時、加水（温水）をする。

ソーダ灰添加後、二軸混練機（パグミキサー）および2本ロールによる活性化が行われる。ロールは2段（2台1組）になっている。ロール間隔はロール後の厚さ3～5mm程度である。ソーダ灰、活性化工程処理能力は6万トン／年である。



写真 3.4-10 ベントナイト工場内クラッシャ

③乾燥工程

活性化後、水分27%程度まで天日乾燥する。天日乾燥後ロータリードライヤにより乾燥する。ロータリードライヤは2基あり、合計の乾燥能力は10万トン／年である。ロータリードライヤの燃料は石炭を使用しており、乾燥後の水分は12%以下である。

④粉砕・貯留工程

乾燥鈹は遠心ローラーミルで粉砕を行うが、一部は振動ふるいによりふるいい分け猫砂とされる。粉砕粒度は200メッシュ（ふるい目開き75ミクロン）80～90%程度である。粉砕機は42インチ（粉砕能力2トン／時）3基、52インチ（粉砕能力4トン／時）2基である（写真3.4-11）。粉砕品は製品毎にサイロに投入される。200m³容量のサイロが3基ある。



写真 3.4-11 ローラーミル

⑤包装工程

サイロ貯留品は切り出し包装される。包装は 25kg 袋および 1 トンジャンボバックである。



写真 3.4-12 製品貯蔵状況

⑥検査工程

品質管理は受入原鉱（採掘、買鉱）の品質確認から、包装製品まで工程の各段階での品質確認、規格適合判定が 3 直体制で行われている。

主な検査項目としては、水分、粒度、膨潤力、pH、メチレンブルー吸着量などの基本物性に加え、粘性、鋳物砂試験なども実施している。



写真 3.4-13 工場内検査室。VGメーターによる粘性測定

⑦輸送

製品輸送はトラックおよび貨車を利用している。鉄道は工場近くの石脳駅または建平の吐柏寿駅から出荷している。最近鉄道輸送は少なくなっている。輸出貨物はトラックで錦州港（バラ積み）または営口港（コンテナ積み）まで輸送後、船積みされる。錦州港までの距離は約 180km、営口港は約 250km である。

3.4.3 四平劉房子愛思克膨潤土有限公司¹⁾

(1) 調査実施概要

以下の調査結果は、ヒアリング調査を実施した結果をまとめ、訪問先に送付し確認を得たものである。

(2) 位置、交通

四平劉房子ベントナイト鉱山は、吉林省長春市と四平市の間に位置する公主玲市にあり、公主玲市劉房子鎮の東南約 4km に位置する。近くには長春市と瀋陽市（旧奉天）を結ぶ幹線である高速道路、鉄道が通っており利便性は高い。ベントナイト鉱山には写真 3.4-19 に示すように鉄道引込み線があり、門型クレーンによりトンパックを貨車に運べるように整備されている。貨車に積載されたベントナイトは、瀋陽市から最も近く約 200km 西南に位置する営口港から船に積み日本へも輸出されている。

(3) 調査結果

1) ベントナイト鉱山・工場の組織

四平劉房子ベントナイト鉱山は、1 年半前に国営企業から民営化された。四平劉房子愛思克膨潤土有限公司は、四平劉房子鉱業有限公司（石炭鉱山）を含め傅智奎理事長が所有している。愛思克株式会社の劉祖豪代表取締役社長は、四平劉房子愛思克膨潤土有限公司の副社長でもあり、10 年携わっている。

ベントナイト加工に携わる職員は、事務も含め 148 名。国営企業の際は 350 名いたが、民営化したときに約 200 名は不要と考え、国に引き取ってもらった。石炭鉱山の従業員は 1,100 名で、ベントナイトの採掘も石炭会社が行い、採掘されたベントナイトを四平劉房子愛思克膨潤土有限公司が買い取り、加工して出荷している。

2) ベントナイト鉱山・工場の生産体制

ベントナイト鉱山の出産能力は 30 万 t/年であるが、出産実績は 6 万 t/年程度である。石炭鉱山の出産実績は 50 万 t/年である。ベントナイト採掘は、6 万 t/年を 50 人程度が交代で掘削している。1 パーティー10 人で 150t/日を生産する。ベントナイトの掘削は発破、石炭採掘は機械化している。鉱夫の人件費は上昇しており、基本給+出来高払いである。

鉱山の事故は、15 年前に発生したが、それ以降、死亡事故は発生していない。鉱山事故などがあったことなどの安全上の理由により、外国人の入坑は国から禁止されている。（他の鉱山も同様）

ベントナイト工場の生産能力は8~10万t/年、実績は4~5万t/年である。粉砕機が6基あり、現在休止中の粉砕機も稼働させれば12万t/年の生産が可能である。第一工場と第二工場に分かれている。工場の操業は3交代で、1年のうち1ヶ月相当程度がメンテナンスのために休みとなる。

ベントナイトの出荷先は、鞍山鉄鋼2万t/年、長春一気6000t/年、他の国内消費2~3000t/年、日本への輸出6000~7000t/年、韓国への輸出（土木向け一般廃棄物処分場用）6000~7000t/年である。

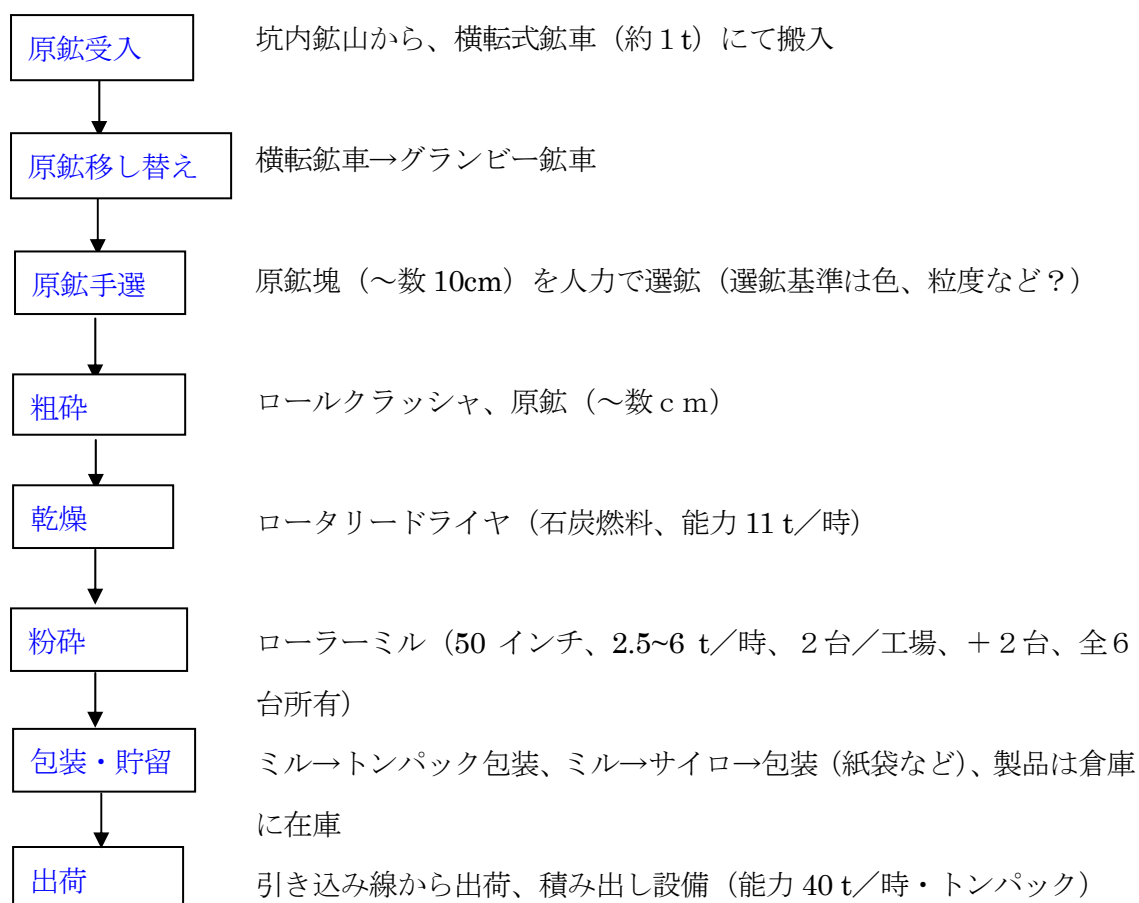
3) ベントナイト鉱床

ベントナイト鉱床は3層あり、そのうち1層を採掘している。層厚は最小が2m、厚いところで5~6mで、平均は約5mである。埋蔵鉱量は、2000万tで、その75%が今掘削している層にある。現在までに100万t以上採掘した。採掘箇所は、地下200m、層の傾斜は13度である。

民営化以降、選鉱を厳しくしている。鉱石のグレードにより1級品と2級品に手作業で選鉱している。区別はモンモリロナイト含有状態によっている。

4) ベントナイト工場

ベントナイト生産工程の概要は下記の通りである。



見学した工場は 2 つある工場のうち新しい方であるが、パンフレットなどによると、同社では顆粒品も生産しており、この生産には振動ふるい（能力 10～30 t/時）が使用されている。

5) 品質管理

同社は ISO9001 を取得している。また、品質管理での試験項目は下記の通り。

基本物性： メチレンブルー吸着量測定、膨潤力試験

（水分、粒度、pH は確認しないものの、測定していると考えられる）

泥水試験関係： マーシュファンネル、泥水性状（見かけ粘度など、脱水量）

鋳物砂試験： 湿態抗圧力、高温試験

膨潤力は、絶乾状態で測定している。膨潤力は、時期により変動があるが、最低でも 16mL/2g 以上は確保されている（日本への輸入業者、品川窯材のコメント）。



写真 3.4-14 四平劉房子ベントナイト鉱山の坑外の状況
鉱石の運搬にはトロッコを使用。



写真 3.4-15 トロッコで運搬されるベントナイト鉱石



写真 3.4-16 運搬されたベントナイト鉱石をトロッコから積み替える転車台



写真 3.4-17 ベントナイト鉱石の人力による選鉱作業



写真 3.4-18 乾燥原鉱置場（旧工場）



写真 3.4-19 四平劉房子ベントナイト鉱山
鉄道の引込み線と積み込み用設備状況

【参考文献】

- 1) Wen Lu, Chinese Industrial Materials, pp33-38, Published by Industrial mineral Information Ltd.1998
- 2) Industrial Materials June, pp32-34,2003
- 3) 財務省貿易統計ホームページ (<http://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm>)
- 4) SudChemie redhill パンフレット
- 5) Volclay Donming パンフレット
- 6) 内蒙古 102 地質隊「高廟子膨潤土鉍区初步勘探地質報告」1986
- 7) 干鴻図、内蒙古烏盟興和県高廟子膨潤土鉍地質特性、1982
- 8) 中国鉍床発達史「内蒙古」
- 9) 内蒙古国土資源信息院『興和県高廟子ベントナイト鉍床開発プロジェクト』紹介 2004 年
- 10) CIMCO パンフレット
- 11) 四平劉房子愛思克膨潤土有限公司 パンフレット

第4章 中国産ベントナイトの放射性廃棄物処分施設への適用性評価

中国で高レベル放射性廃棄物処分に使用する材料の候補として研究が行われている内モンゴル自治区高廟子（GMZ）のベントナイトを、放射性廃棄物処分に使用する場合についての課題等について整理した。

4.1 わが国の放射性廃棄物処分におけるベントナイトに対する要件の整理

4.1.1 ベントナイトの使用量

HLW、TRU、余裕深度処分の三つの事業を対象に、ベントナイトの使用量を整理する。人工バリアとしては、緩衝材、埋戻し材、プラグ/シールを対象とした。試算結果を表 4.1-1 に示す。また、表 4.1-2, 表 4.1-3, 表 4.1-4にその根拠を示す。

試算は、以下の文献情報に基づいて行った。

- ・HLW；『第2次取りまとめ』¹⁾²⁾に準拠。堆積岩-500m 縦置きの場合。埋戻し材の仕様は示されていないのでSKBの仕様と同様とした。
- ・TRU；『第2次TRU取りまとめ』³⁾に準拠。軟岩-500m地層処分対象分。埋戻し、プラグはHLWと同じ仕様に設定。
- ・余裕深度処分；廃棄体換算物量 59,300m³（容器内空）『22回バックエンド夏季セミナー』⁴⁾の数量を対象。緩衝材、埋戻し材の仕様は、『地下空洞型処分施設性能確認試験』⁵⁾での設計例に準拠。深度 100m、坑道配置、寸法はTRUと同様とした。

表 4.1-1 試算結果

緩衝材、埋め戻し材、プラグの容量 (単位 ; $\times 10^3 \text{m}^3$)

堆積岩、深度 500m (HLW では縦置き)

	緩衝材	埋戻し		プラグ	total
		坑道	遮蔽用		
HLW	448	6,248	154	10	6,860
TRU (地層処分)	31	279	0	4	314
余裕深度処分	171	191	0	4	366

放射性廃棄物処分 (緩衝材、埋め戻し材、プラグ) に用いられるベントナイト重量

(単位 : $\times 10^3$ トン)

堆積岩、深度 500m (HLW では縦置き)

	緩衝材	埋戻し	プラグ	total
HLW	520	3,320	10	3,850
TRU (地層処分)	30	140	4	170
余裕深度処分	280	40	4	320

*ベントナイトは製品含水比 5% の場合の重量

表 4.1-2 数量試算の根拠 (1/3)

・HLW

埋め戻し数量

部位	仕様	軟岩系 (堅置き、-500m)									数量の出典、根拠		
		施工延長(m)	内空 (埋戻し断面 積:m2)	設計掘削断面積 (m2)	掘削数量(m3)	立坑吹付け	横坑吹付け		覆工コンクリート (m3)	インパートコンク リート(m3)		埋戻し体積(m3)	
						吹付け体積(m3)	吹付け面積(m2)	吹付け体積、厚さ 50cm、(m3)					
立坑 (7本)	B/S=3/7 (SKBに準 じる) 乾燥密度1.6Mg/m3 (本研 究で設定値)	3,752	33	坑口部φ9.5m 本坑φ7.5m(図 3.1-2)	175,301	982			49,826		124,499	JNC TN8400 99-046表3.3-2	
斜坑		0									0		
連絡坑道		48,679		26.98	1,313,351		752,821	376,411		96,871	840,070	JNC TN8400 99-046表4.3-5、7	
主要坑道		24,177		26.98	652,295		373,897	186,949		48,112	417,235	JNC TN8400 99-046表4.3-5、7	
処分坑道		282,000		26.98	7,608,360		4,361,130	2,180,565		561,180	4,866,615	JNC TN8400 99-046表4.3-5、7	
遮蔽上必要な埋戻し材	B/S=7/3 乾燥密度1.6Mg/m3	40,000		3.87	154,828						154,828	『第2次取りまとめ』総論図4.3-27	
											合計 空洞	6,248,412	
											合計 遮蔽用	154,828	

緩衝材数量

部位	仕様	軟岩系 (堅置き、-500m)									出典	
		ビット当たり緩衝 材体積(m3)		ビット数						緩衝材体積(m3)		
処分孔	B/S=7/3 乾燥密度1.6Mg/m3 (『第2 次取りまとめ』)	11.2		40,000						448,074	『第2次取りまとめ』総論図4.3-27	
											合計	448,074

水理プラグ数量

部位	仕様	軟岩系 (堅置き、-500m)									出典、根拠	
		長さ(m)	断面積(m2)	個数						プラグ体積(m3)		
主要坑道システムプラグ	B/S=7/3 乾燥密度1.6Mg/m3 (緩衝 材と同様に設定)	5	50	20						5,027	φ8m長さ5mと仮定。個数は『第2次取り まとめ』総論図4.3-53から推定	
主要坑道破砕帯プラグ		5	50	20						5,027	φ8m長さ6mと仮定	
											合計	10,053

・TRU（地層処分相当）

表 4.1-3 数量試算の根拠（2/3）

埋め戻し数量

部位	仕様	軟岩系（-500m）				埋戻し体積(m3)	数量の出典、根拠
		施工延長(m)	内空（埋戻し断面 積:m2）				
立坑（2本）	B/S=3/7 乾燥密度1.6Mg/m3 HLWと同様に設定	1,000	28			28,274	『第2次TRU取りまとめ』
斜坑		5,000	22			111,587	『第2次TRU取りまとめ』 10%勾配
連絡坑道・主要坑道		2,848	39			110,630	『第2次TRU取りまとめ』図3.2.2.2-8、一部推察
処分空洞埋戻し部		260	113			29,405	同上
合計 空洞埋戻し						279,897	

緩衝材数量

部位	仕様	軟岩系（-500m）				緩衝材体積(m3)	出典
		施工延長(m)	内空（緩衝材断面 積:m2）				
処分空洞	B/S=7/3 乾燥密度1.6Mg/m3（『第2 次TRU取りまとめ』）	553.6	57.2			31,683	『第2次TRU取りまとめ』図3.2.2.2-8、緩衝材内空面積は、グループ2、キャスカ、インバート厚さ1.3m図3.2.2.2-4、図3.2.2.2-7
合計						31,683	

プラグ数量

部位	仕様	軟岩系（-500m）				プラグ体積(m3)	出典、根拠
		長さ(m)	断面積(m2)	個数			
主要坑道システムプラグ	B/S=7/3 乾燥密度1.6Mg/m3（緩衝 材と同様に設定）	5	50	19		4,775	HLWと同じくφ8m長さ5mと仮定。個数は『第2次TRU取りまとめ』図3.2.2.3-1から推定
合計						4,775	

・ 余裕深度処分

表 4.1-4 数量試算の根拠 (3/3)

埋め戻し数量

部位	仕様	軟岩系 (100m)				埋戻し体積 (m3)	数量の出典、根拠
		施工延長 (m)	内空 (埋戻し断面 積:m2)				
立坑 (2本)	B/S=15/85 (『国プロ H17年度』p4-343の設計 例) 乾燥密度1.6Mg/m3 (本研 究で設定)	200	28			5,655	本研究で設定
斜坑		1,000	22			22,317	『第2次TRU取りまとめ』の断面 10%勾配
連絡坑道・主要坑道		3,459	39			134,342	『第2次TRU取りまとめ』のレイアウト に処分空洞延長を当てはめ計算
処分空洞埋戻し部		260	113			29,405	同上
合計 空洞埋戻し						191,720	

緩衝材数量

部位	仕様	軟岩系 (100m)				緩衝材体積 (m3)	出典
		施工延長 (m)	内空 (緩衝材断面 積:m2)				
処分空洞	B/S=10/0 乾燥密度1.6Mg/m3、厚さ 1m (『国プロH17年度』p4-4 の設計例)	4,657	36.8			171,360	廃棄体換算物量59300m3 (容器内空) 『22 回バックエンド夏季セミナー』 人工バリアの詳細は決定していないの で、TRUグループ1,2の廃棄体発生量 (容器内空) 7050m3との比から、TRU の空洞延長を計算 (4657m)、TRUと同 じ9本のレイアウト
合計						171,360	

緩衝材断面積は、TRUグループ2の廃棄体の周囲にコンクリート系バリア厚さ1mを
置き、その周囲に厚さ1mの緩衝材を配置

プラグ数量

部位	仕様	軟岩系 (100m)				プラグ体積 (m3)	出典、根拠
		長さ (m)	断面積 (m2)	個数			
主要坑道システムプラグ	B/S=7/3 乾燥密度1.6Mg/m3 (HL W、TRUと同様に設 定)	5	50	19		4,775	TRUと同様に設定
合計						4,775	

4.1.2 ベントナイトへの要求品質

例えばHLW処分についての『第2次取りまとめ』¹⁾では、放射性核種の隔離と人工バリアの成立のふたつの観点から、緩衝材の設計要件を抽出している。ベントナイトの要求品質は、水理、物質移行、化学、力学、製作施工、熱に関係する幅広い設計要件から導かれるものである。

緩衝材、埋戻し材については、熱-水-応力-化学に関連し多様なデータが収集されている。例えばバリュクレーププロジェクト《VALUCLAY Project》¹⁾では、AECL、SKB、JNCの参加のもと、緩衝材と埋戻し材についてのデータ収集が試みられた。データベースの種類は以下のとおりである。これらの特性は、ベントナイト自体の基本的な品質と人工バリアとしての機能を評価する上で必要なパラメータに区分される。

表 4.1-5 バリユクレーププロジェクトのデータベース

分類	項目
Chemical Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ Chemical composition ・ Organic matter ・ Pore water composition ・ Pore water chemistry
Consolidation Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ Compressibility ・ Coefficient of consolidation ・ Compression index ・ Drying shrinkage ・ Rebound index ・ Shrinkage index ・ Shrinkage limit ・ Swelling pressure
Flow Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ Air conductivity ・ Air entry pressure head ・ Intrinsic permeability ・ Hydraulic conductivity ・ Local swelling pressure ・ Moisture characteristic C. ・ Relative permeability ・ Tortuosity factor
Geotechnical Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ Degree of saturation ・ Dry density ・ Fluid dynamic viscosity ・ Free swell ・ Grain size ・ Maximum dry density ・ Moisture content ・ Liquid limit ・ Optimum moisture content ・ Plastic limit ・ Plasticity index ・ Porosity ・ Specific gravity ・ Void ratio ・ Volumetric moisture C. ・ Wet density
Mechanical Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ Bulk Modulus ・ Cohesion ・ Critical State Slope of F. ・ Friction angle ・ Modulus of elasticity ・ Poison ratio ・ Shear modulus
Mineralogy	<ul style="list-style-type: none"> ・ Mineralogical composition
Geochemical Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ CEC ・ MBC ・ pH ・ Surface area
Thermal Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ Latent heat of vaporization ・ Specific heat capacity ・ Thermal conductivity ・ Thermal expansion coef.
Transport Properties	<ul style="list-style-type: none"> ・ Apparent diffusion ・ Diffusion ・ Moisture diffusivity ・ Thermal conductivity ・ Thermal diffusivity ・ Thermal moisture diffusivity

4.1.3 ベントナイトとしての基本的な品質

放射性廃棄物処分の分野では、前節で示されたようにベントナイト自体や緩衝材に対して多くのデータが取得されている。

動燃事業団が高レベル廃棄物処分研究における標準的ベントナイト製品を検討したレポート⁶⁷⁾では、「ベントナイトとしての基本的な品質」の指標として、「鉱物学的・化学的特性」、「機械的特性」、「膨潤特性」、「熱的特性」、および「水理的特性」に分類される14の代用特性が示され、各種のベントナイト製品に対して取得されている。また、これら代用特性と緩衝材への要求性能との関係がまとめられている。

そして『第2次取りまとめ』⁷⁾では、主要な代用特性に鉱物組成と浸出イオンを加え、以下のデータが、内外の5つの標準的ベントナイト製品について示されている。

- ・モンモリロナイトの構造式
- ・鉱物組成
- ・物理特性
 - 真比重
 - コンシステンシー限界
 - 陽イオン交換容量
 - 浸出陽イオン(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)
- ・粒度分布

4.1.4 人工バリアとして要求される性質

前節では、ベントナイト自体の品質についての指標を整理しまとめた。本節では、人工バリアとして設置される緩衝材、埋戻し材とプラグについて、設計の考え方、設計要件、性能保証項目について整理した。そして、これと関連して重要な、止水性、核種収着遅延性、膨潤性、力学的安定性、熱伝導性に係る特性値をGMZ地点のベントナイトについて収集、整理し、試験方法の検討とあわせ課題を整理した。

(1) 人工バリアに要求される性質の概要と設計要件

人工バリアに要求される性質は、放射性核種の放出を抑制することである。核種は地下水によって運ばれるため、地下水の流れが小さいほうが望ましい。このため、人工バリアには止水性もしくは低透水性が必要となる。地下水に乗って人工バリア中を移動している間に、核種は人工バリアに吸着される。人工バリアには核種収着遅延性と呼ばれるこのような性質が要求される。

人工バリアの止水性や核種収着遅延性は、様々な条件のもとで、必要とされる期間にわ

たって担保されなければならない。このためには、膨潤性、力学強度、熱伝導性などの、さまざまな性質が要求される。膨潤性は自己シール性や自己修復性を担保する。例えば、HLW では、人工バリアと岩盤との間に生じるすき間を、人工バリアが充てんし、止水性を担保するために必要となる。力学強度は、廃棄体を人工バリアの中に固定するために必要となる。廃棄体が固定されないことは人工バリアの形状が維持されないことであり、止水性や核種収着性などの性能が得られないことを意味している。熱伝導性はガラス固化体から発生する熱をすみやかに外部に放出する性質であり、施設内に熱が蓄積することで人工バリアの性能が低下するのを防止する。この性質は特に HLW のように発熱する廃棄体が対象の場合には重要となる。どんなに止水性や核種収着性に優れた人工バリアであっても、これらの性質が不足していれば人工バリアとしての目的を果たすことができない。

このほかに、所定の状態に作製しやすいこと、すなわち施工性も重要な人工バリアの性質である。土質材料であるベントナイトを人工バリアとする場合には、締固め性がこれにあたる。ベントナイトでは止水性は密度の増加に伴って高まる。止水性の指標である透水係数は小さくなる。人工バリアに必要な透水係数が決まれば施工時に目標とする密度が決まる。この目標密度はなるべく容易に実現できることが望ましい。このような性質が施工性である。

このように人工バリアには様々な性質が期待されている。しかし、これらの性質の中には相反するものも少なくない。例えば、あるベントナイトを用いた人工バリアにおいて、密度を高く設定すれば止水性は高まるが、それに応じて熱伝導性は低下する。そのほかの例としては、止水性と透気性などがある。

期待するすべての機能を最適化するように、人工バリアを設計することが望ましい。しかし、すべての性質に設定値を与え、それを満足するように設計することは非常に困難である。まして、処分される放射性廃棄物が HLW、TRU、LLW ように異なる場合では、それらの設定値も大きく異なり、必要とされる性質も異なる。このような状況の中で、複数の候補の中国産ベントナイトの性能を判定することは非常に難しい。しかし、必要不可欠となる重要な性質に対しては、代表的な特性値を取得しておく必要がある。

材料の仕様、設計寸法等を導出する設計作業は、要件項目（もしくは設計要件）を満足することの確認を行い次のステップに進む。したがって、要件項目（もしくは設計要件）を設計作業の根拠情報として示せるまでに具体化することが必要となる。

要件項目（もしくは設計要件）については、電事連の体系化報告書で示されている⁸⁾。

JNC の第 2 次取りまとめにおいても設計要件が示されている。JAEA が実施した人工バリア等の性能保証に関わる検討では、同表の内容の列に記載されている要件を具体的かつより詳細な個別の内容に細分化し、まとめる作業が行われている。

(2) 人工バリア等の性能保証に関わる検討

JAEA では、人工バリア等の処分場の構成要素について、長期安全性の観点から性能を保証すべき項目を抽出し、①長期安全性能をどのように評価するのか、②評価に必要なデータベースは何か、③現状に照らして今後の課題は何か、といった観点で整理を行っている¹³⁾。この整理結果は、中国産ベントナイトの適用性を検討するために評価すべき項目や評価の方法を検討する上で参考になると考えられる。そこで、JAEA が実施した性能保証に関わる整理の全体概要が示されている H17 レポート⁹⁾及び、特にベントナイトに関連した以下のレポートの内容をまとめた。

- ・緩衝材の性能保証項目に係わる評価ツールの現状 (2006)¹⁰⁾
- ・埋め戻し材、プラグ、坑道および処分孔等の性能保証項目に係わる評価ツールの現状 (2006)¹¹⁾

長期的安全性を確保するためには、人工バリアなどの処分場を構成する各要素に対して期待する性能が確実に発揮されることを評価などにより保証する必要がある。この保証すべき性能（以下、性能保証項目（案）とする）について、オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材、プラグ、アクセス・連絡・主要・処分の各坑道および処分孔といった処分場を構成する要素ごとに抽出・整理が行われている。この整理においては、①何を保証すべきか、②それをどう保証（評価）するか、③評価にあたっての今後の課題は何か、④その課題に対する取り組みの状況はどうか、⑤評価に用いるモデル、データベースや実験方法など（評価ツール）の整備状況、の手順により実施されている。また、性能保証すべき項目は、処分事業開始からの時間の経過に伴い変化することを十分に考慮することが重要であり、処分場における時間の経過を軸とした段階（操業中、埋め戻し前、埋め戻し後など）を設定し、その段階に対応した抽出が行われている。

各要素について抽出・整理した性能保証項目（案）に対する保証（評価）方法は、処分場の設計、製作、建設・施工、モニタリングなどの各段階で異なることが考えられる。例えば、設計段階におけるモデルによる評価方法や評価に用いるデータベース、製作や建設・施工段階における品質管理内容、モニタリング段階における測定方法・項目などである。

4.2 中国産ベントナイト (GMZ-1) の特性値の整理¹²⁾¹³⁾

1) 止水性

止水性の指標には透水係数が用いられることが多い。ここでは飽和透水係数のことを指す。透水係数は、ベントナイトの締固め状態、すなわち人工バリアの密度に大きく依存する。処分施設において人工バリアの密度は、対象としている施設で必要とされる止水性能に応じて決定される。ベントナイトがどのような密度の状態で使用されるかは、設計に依存している。このためベントナイトの透水係数は最低限、密度を変えた条件で測定しておく必要がある。

中国で Na 型ベントナイトとされ研究対象とされている材料 (GMZ 地点の地下から採取されたもの、GMZ-1) に対して、図 4.2-1 に示すように一定圧力で水を通水し、測定された流量よりダルシーの法則を用いて、飽和透水係数を得ている。試料の形状は直径 50mm × 厚さ 5~50mm で、動力炉・核燃料開発事業団技術資料 (PNC TN8410 92-057)¹⁴⁾ で実施された透水試験装置とほぼ同じ形式のものである。図 4.2-2 に示すように透水係数の密度依存性および温度依存性が示されている。高レベル処分施設では廃棄物の発熱現象によって周辺の温度が高くなる。このような施設の地下水流動を検討する場合には、予想される温度条件のもとでの透水係数を用いる必要がある。一方、低レベル処分のように、高温環境にさらされない施設で使用することを前提にベントナイトを検討する場合には、かならずしも温度依存性を取得する必要はない。

今後、候補となる複数の中国産のベントナイトについても、最低限、飽和透水係数の密度依存性は取得する必要がある。試験方法は図 4.2-1 で示しているもので問題はない。ただし、密度が高く、透水係数が小さい領域では、透水試験に非常に時間を要する恐れがあるため、候補材料が非常に多く選定された場合には、短時間で見通しが得られる試験法が有効である。

短時間で透水係数が得られる試験方法としては、石井¹⁵⁾らの開発している高速透水試験がある。この方法は、所定の密度の供試体を作製する時点で、供試体を飽和にする方法であり、透水試験で最も時間を要する飽和過程を劇的に短縮することができる。透水係数の見通しを得るだけであれば、供試体作製後、2週間程度で試験が完了する。図 4.2-3 に供試体の飽和手順を示す。また、図 4.2-4 にクニゲル V1 原鉱石で得られた透水係数の密度依存性の結果を示す。なお、複数の候補ベントナイトに試験を適用する場合には、乾燥密度条件は3種類程度が望ましい。

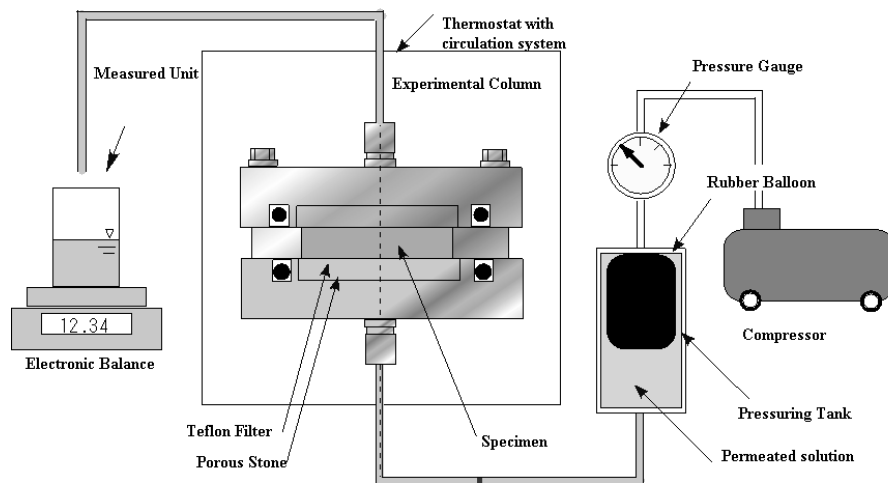


図 4.2-1 中国機関の透水試験装置¹³⁾

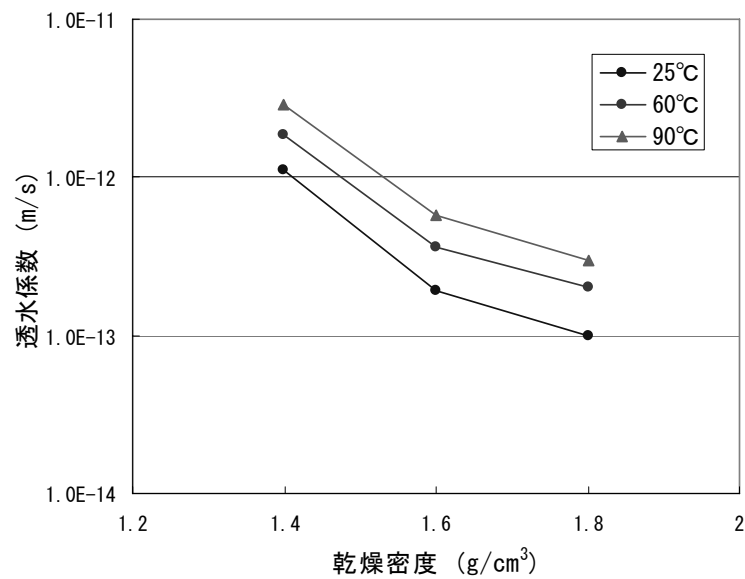


図 4.2-2 GMZ-1 の透水係数 (密度依存性と温度依存性)
(文献 13) のデータをグラフ化)

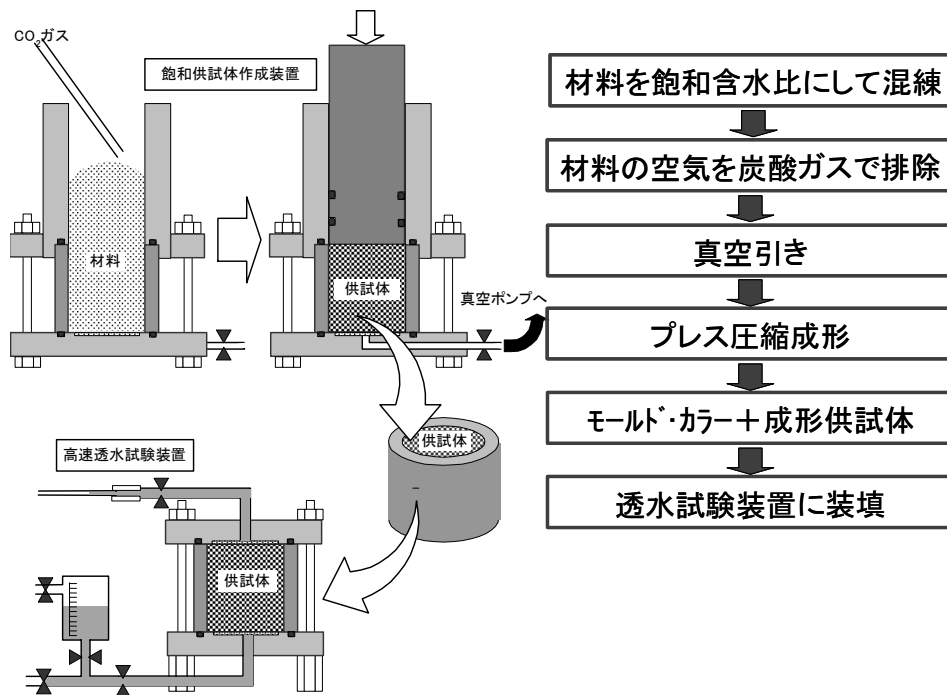


図 4.2-3 高速透水試験の飽和供試体作製手順¹⁵⁾

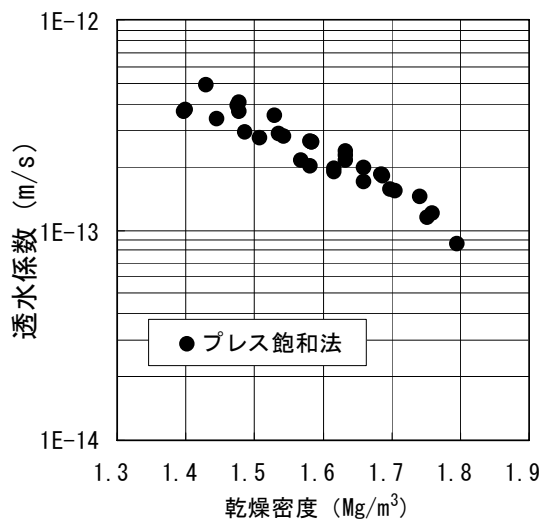


図 4.2-4 クニゲル V1 原鉱石で得られた高速透水試験の結果¹⁶⁾

2) 核種収着遅延性

核種収着遅延性は、核種の種類によって異なるため、性能評価を踏まえてデータを取得するには、非常に時間とコストが必要となる。このため、複数の中国産ベントナイトの候

補に対して実施するのは合理的でないと考えられる。

現状で、唯一の候補材料である GMZ-1 においても、この種のデータは取得されていない。今後、候補材料の中から絞り込まれた少数の候補材料については、ベントナイトの評価に必要となる最低限のデータ取得は必要となる。

3) 膨潤性

止水性や自己シール性は、ベントナイトの膨潤性に関係している。膨潤性も密度に依存している。膨潤性は膨潤圧や膨潤率で評価される。膨潤圧は変位を許さない場合の膨潤によって発生する圧力である、膨潤量は変位を拘束しない場合に膨潤によって発生する変形量のことである。ベントナイトの予備評価のためには、膨潤圧と膨潤量のどちらか一方を取得しておくだけでよい。密度依存性を考慮して取得したデータであれば、もう一方は推測が可能である。

GMZ-1 では図 4.2-5に示すような、膨潤圧の密度依存性データが取得されている。クニゲル V1 のような人工バリアに使用することが想定されている材料と比較して、特に劣っているわけではないと考えられる。

今後、候補となる複数の中国産ベントナイトの予備評価を行ううえでも、同程度の試験は必要である。

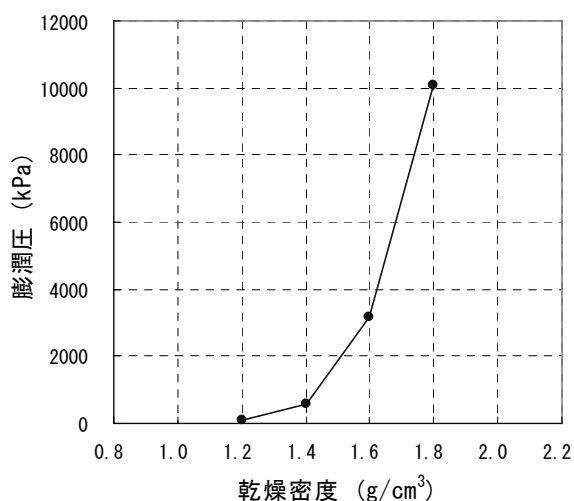


図 4.2-5 GMZ-1 の膨潤圧 (文献 13) のデータをグラフ化)

4) 力学的安定性

力学的安定性を評価するためには、力学特性が必要となる。評価方法を高度化すれば、それにとまって必要となる特性データが増加する。しかし、ベントナイトの予備評価の

ために、それらすべてを取得することは現実的でない。予備評価のための試験としては、実施しやすさの観点からも一軸圧縮試験が適当であると考えられる。

GMZ-1 においては、図 4.2-6 に示すように一軸圧縮強度が取得されている。今後、候補となる複数の中国産のベントナイトの評価・選定を行うときにも、同様のデータを取得することが必要である。

さらには、選定した少数の候補ベントナイトに対しては、詳細な試験を行うことが望ましい。例えば、三軸圧縮試験、動的試験、圧密試験などが挙げられる。

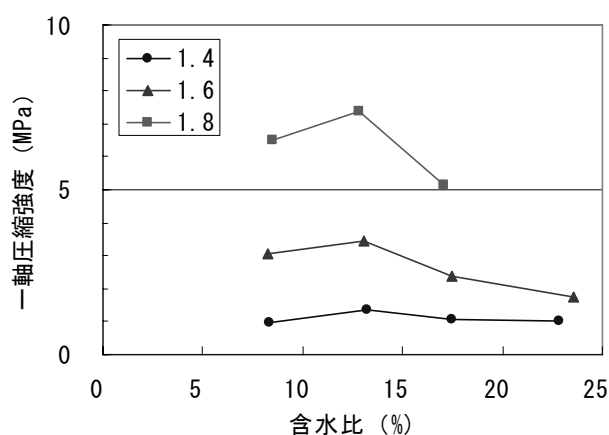


図 4.2-6 GMZ-1 の一軸圧縮強度 (文献 13) のデータをグラフ化)

5) 熱伝導性

HLW においては廃棄体が発熱する。ベントナイトは高温環境化で劣化する恐れがあるため、施設内部を一定温度以下にする必要がある。施設内の温度を評価するためには、それぞれの部位の熱特性を把握する必要がある。熱伝導率は熱特性の一つであり、熱の伝えやすさの指標である。人工バリアは廃棄体の周囲に配置されるので、それに用いるベントナイトは熱伝導率が高い方がよい。

図 4.2-7 は GMZ-1 において取得された熱伝導率を示している。密度が高く、含水比が大きい場合に、熱伝導率は増加する。今後選定される複数の候補材料においても、同様な試験を実施することが望ましい。

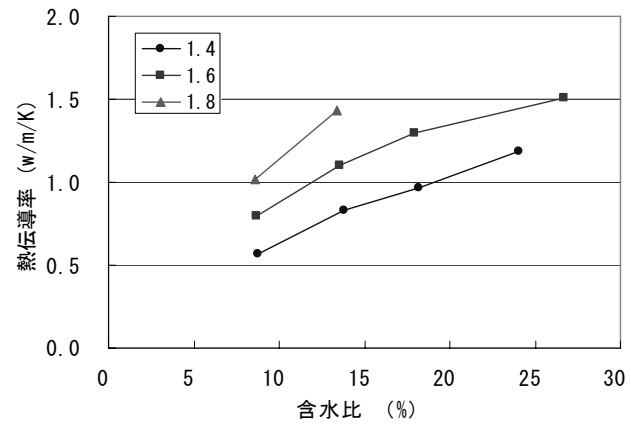


図 4.2-7 GMZ-1 の熱伝導率 (文献 13) のデータをグラフ化)

4.3 中国産ベントナイトの適用性を検討する上での今後の課題

本章では、前章までの調査結果（2章、3章）を取りまとめ、中国産ベントナイトの国内放射性廃棄物処分施設への適用性について検討した。その結果、以下の課題が明らかになった。

（1）処分事業におけるベントナイトへの要件の整理について

HLW、TRU、余裕深度処分の三つの事業を対象にベントナイトの使用量を公開されている情報に基づき計算した。この概算には仮定が含まれておりその精度を上げることと、事業スケジュールにあわせた経時的な需要の変化を示すことが重要である。

また、ベントナイトへの要求品質に関しては、4.3 節で示した設計要件とあわせその目標値の範囲を今後当該事業の進展に応じて収集整理していくことが必要である。

（2）中国産ベントナイトの品質の整理

「ベントナイトとしての基本的な品質」に関しては GMZ-1 の 2 件の公開情報をもとに整理した。クニゲル V1 や MX-80 といった既往の標準的材料に比較して、不純物の含有量など不足している情報もあり、鉱物、化学的な基本的な品質情報の蓄積が必要である。

「人工バリアとして要求される性質」に関しては、GMZ-1 の飽和透水係数、一軸圧縮強度、膨潤圧、および熱伝導率が報告されているが、これに加え、核種収着遅延性に係るデータの取得、詳細な力学試験（例えば、三軸圧縮試験、動的試験、圧密試験など）が重要である。また、候補となる複数の中国産ベントナイトの予備評価を行うとき、飽和透水係数、一軸圧縮強度、膨潤圧、熱伝導率を、密度との関係で、取得することが重要である。

また、日本へ輸出されている中国東北部で産するベントナイトについては、水分、pH、膨潤力などは輸出の際に調べられている。今回の調査で入手したサンプルについて CEC、液性限界、塑性限界、化学成分など基本的な試験をクニミネ工業(株)にて実施した。しかし、透水係数、膨潤圧などを始め人工バリアに使用する際に必要な性質はほとんど調べられていないのが実情である。ロットによる品質の変動や不純物の混入の有無を含め、調査が必要と思われる。

【参考文献】

- 1) 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次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学技術. JNC TN1400 99-022 (1999)
- 2) 棚井他：地層処分場の建設技術に関する検討, JNC TN8400 99-046 (1999)
- 3) 共同作業チーム 核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会 (2000)：TRU 廃棄物処分概念検討書, JNC TY1400 2000-001, TRU TR-2000-01.
- 4) 原子力学会：22回バックエンド夏季セミナー資料集 (2006)
- 5) (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 地下空洞型処分施設性能確証試験報告書(2006.3)
- 6) Ishikawa, H., Amemiya K., et al. ,“Comparison of Fundamental Properties of Japanese Bentonite as Buffer Material for Waste Disposal”, *Proc. of the 9th Int. Clay Conf.* 1989, pp107-115
- 7) 雨宮清、柴田雅博他、「ベントナイトの基本特性調査」、PNC-N8410 89-003、1989.6 (動燃事業団研究報告書)
- 8) 土木学会、原子力土木委員会、高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上にむけて・土木工学技術に係る技術を中心として—2004
- 9) サイクル機構,高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年度取りまとめ—分冊2 工学技術の開発、JNC-TH 1400-2005-015,2005
- 10) 棚井憲治,神徳敬,菊池広人,西村繭果,松本一浩,青柳茂男,油井三和,緩衝材の性能保証項目にかかわる評価ツールの現状,JAEA-Reserch 2006-035,2006
- 11) 川上進,藤田朝雄,油井三和,埋め戻し材,プラグ,坑道及び処分孔等の性能保証項目にかかわる評価ツールの現状,JAEA- Reserch 2006-015,2006
- 12) Wang Ju, et al., DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE IN CHINA, *Chinese Jour. Of Rock Mech. and Eng.* Vol.25, No.4, pp649-658 (2006)
- 13) Wen Zhijian et al., PHISICAL PROPERTIES OF CHINA'S BUFFER MATERIAL FOR HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORIES, *Chinese Jour. Of 9 Rock Mech. and Eng.* Vol.25, No.4, pp794-800 (2006)

- 14) 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬 (1992) : 緩衝材の特性試験 (I),
動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN8410 92-057
- 15) 石井卓・中島均・白石知成・後藤高志 : $1\text{E}\cdot 13$ m/s の透水係数を短時間で測定する高速透水試験, 土木学会第 58 回年次学術講演会, CS7-021, pp.319- 320, 2003
- 16) 小野文彦・庭瀬一仁・谷智之・中島均・石井卓 : ベントナイト原鉱石の高速透水試験ープレス飽和法ー, 原子力学会 2006 秋の大会, B41, pp.108, 2006

第5章 各国のベントナイトの試験方法と品質比較

5.1 各国のベントナイト品質評価のための試験方法調査

1) 調査の目的と調査対象

放射性廃棄物処分技術の研究・技術開発に取り組んでいる各国から様々な報告が発表されているが、その試験方法については整理されていない。ここでは、日本、中国、米国の他、欧州を代表しフィンランドのベントナイト調査研究で適用されている試験方法、試験基準について調べた。ASTM等の試験基準は内容が著作権で保護されており、参考資料として添付することができないが、調査にあたっては、各国で使用された試験基準を入手し内容を調査した上で、各国の試験基準を比較した。

2) 試験基準調査結果

ベントナイトの試験項目に対する各国の試験基準を調査した結果を表 5.1-1に示す。また、試験方法を比較した一例として、陽イオン交換容量（CEC）の比較表を表 5.1-2に、膨潤力の比較表を表 5.1-3に示した。調査の結果、明らかになったことは下記の通りである。

- ・各国の試験基準は鋳物や土木用ベントナイトを対象にしており、放射性廃棄物処分への適用を念頭に置いた基準はない。Posiva社のレポートに挙げられている ASTM や ISO の基準も、必ずしもベントナイトを対象にした基準ではなく、一般的な粘土等を対象としている。

- ・MX-80の試験は多くの項目が ASTM では実施されておらず、主に生産者の AMCOL 社独自のベントナイト試験基準によって試験されている。

- ・ASTM の膨潤圧、熱伝導度、透水性、水分保持特性の基準は放射性廃棄物処分における基準としてそのまま適用できるものではない。これらの試験項目については、研究機関、大学等がそれぞれ独自の方法により試験しているのが実態である。

- ・中国では中華人民共和国国家標準にベントナイトを対象とした基準があるが、基準が整備されている試験項目が限られている。

- ・各国のベントナイトの試験基準は、膨潤力、メチレンブルー吸着量、液性限界では試験の考え方は一緒であるが、試験方法の細部が異なっている。

- ・陽イオン交換容量（CEC）試験では、表 5.1-2のようにカラム浸透法による測定、遠心分離法による測定など様々な試験方法が適用されており、試験方法の違いが著しいのが現状である。

・各国のベントナイトの物性値を比較するには、試験方法を細部まで統一した試験基準を各国共通して作成、適用する必要があるが、実際には容易ではない。そのため、我が国で中国産等海外のベントナイトについて評価するには、同じ試験条件で一斉試験を実施することが望ましいと考える。

表 5.1-1 各国のベントナイト品質評価のための試験方法一覧表

国名	日本	中国	米国 (MX-80、 AMCOL 社)	Posiva 社 レポート (注 3)
1)陽イオン交換容量 (CEC)	JBA (注 1) S106:77 ²⁾ (一般のベントナイトを対象) JGS0261-2009 ³⁾ (土を対象) JIS K1478 ⁴⁾ (人工ゼオライトを対象)	GB/T 20973-2007 ⁸⁾ (注 2)	メチレンブルー吸着量試験 (TP-1016 ¹¹⁾ (AMCOL 社試験基準) で代用	ISO11260 ¹⁶⁾
2)液性限界	JBA S109:77 ⁵⁾		TP-7019 ¹²⁾ (AMCOL 社試験基準)	ASTM D4318-05 ¹⁷⁾
3)メチレンブルー吸着量	JBAS-107-77 ⁶⁾	GB/T 20973-2007 ⁹⁾	TP-1016 ¹¹⁾ (AMCOL 社試験基準)	ASTM C837-09 ¹⁸⁾
4)膨潤力	JBAS-104-77 ⁷⁾	GB/T 20973-2007 ¹⁰⁾	ASTM D5890-06 ¹³⁾ に準じる	ASTM D5890-06 ¹³⁾
5)膨潤圧	研究機関、大学等の試験による	研究機関、大学等の試験による		ASTM D4546-08 ¹⁹⁾
6)熱伝導度	研究機関、大学等の試験による	研究機関、大学等の試験による	ASTM D5334-08 ¹⁴⁾	ASTM D5334-08 ¹⁴⁾
7)透水性	研究機関、大学等の試験による	研究機関、大学等の試験による	ASTM D5084-03 ¹⁵⁾	ASTM D5084-03 ¹⁵⁾
8) 水分保持特性	日本ベントナイト工業会標準試験法に該当なし 研究機関、大学等の試験による			ASTM D6836-02 ²⁰⁾ (ASTM D3152-72 が改編)

注 1) JBA : 日本ベントナイト工業会 (現在は解散) が策定した試験基準。建設用、鋳物用等一般のベントナイトを対象にしている。

注 2) GB/T : 中華人民共和国国家標準。その中からベントナイトに関する規格を抜粋。建設用、鋳物用等一般のベントナイトを対象にしている。

注 3) Posiva Working Report 2008-33 による

注 4) JGS : 地盤工学会基準

表 5.1-2 陽イオン交換容量 (CEC) の試験方法比較

国名	日本			中国	米国 (MX-80、AMCOL 社)	Posiva 社レポート
試験基準 番号	JBA S106:77	JGS0261-2009	JIS K1478	GB/T 20973-2007		ISO11260
試験基準 名称	ベントナイト (粉状) の陽イオン交換容量 (CEC) 測定方法	土の陽イオン交換容量 (CEC) の試験方法	人工ゼオライトの陽イオン交換容量測定方法	付録 A 陽イオン交換容量および交換性陽イオン含有量の測定方法	メチレンブルー吸着量試験 (TP-1016 (AMCOL 社試験基準)) で代用	Soil quality -- Determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution (土の品質—塩化バリウムを用いた有効陽イオン交換容量と塩基飽和度の測定)
相違点	カラム浸透法による測定	遠心分離法による測定	振とう・カリウム法 カラム・アンモニウム法	遠心分離法による測定		遠心分離法による測定
備考	ベントナイトを対象にした基準	ISO11260 に準じ日本の土質を考慮して修正を加えた試験基準	人工ゼオライトを対象に特化して試験基準を作成	ベントナイトを対象にした基準		

表 5.1-3 膨潤力の試験方法比較

国名	日本	中国	米国 (MX-80、AMCOL 社)	Posiva 社レポート
試験基準 番号	JBAS-104-77	GB/T 20973-2007	ASTM D5890-06	ASTM D5890-06
試験基準 名称	ベントナイト（粉状）の膨潤力試験方法	膨潤力	Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners (GCL の粘土鉱物成分の膨潤指数の標準試験方法)	Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners (GCL の粘土鉱物成分の膨潤指数の標準試験方法)
相違点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試料は水分 4～10%で実験に供する。水分が 10%以上の場合を除き、原則として強制乾燥させない。 ・ 膨潤させる時間は 24 時間。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試料は 105±3℃で 2 時間炉乾燥する。 ・ 膨潤させる時間は 24 時間 	ASTM D5890-06 に準じて測定しているが、ベントナイトは炉乾燥させず、気乾状態で測定に供している。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試験に用いる試料は 105±5℃で重量変化がなくなるまで、強制乾燥させる。 ・ 膨潤させる時間は 16 時間。
備考	・ 試料 2g を精製水 100ml で膨潤させ容器内で膨潤後の容積を測定するのは基本的に ASTM と同じだが、試料を乾燥させず、自然含水状態で試験に使用すること、膨潤させる時間が、ASTM とは異なる。	・ 試料 2g を精製水 100ml で膨潤させ容器内で膨潤後の容積を測定するのは基本的に ASTM と同じである。膨潤させる時間は 24 時間で ASTM とは異なり、日本と同様である。		

5.2 中国、日本、米国産ベントナイトの物性比較

中国産のベントナイトや米国ワイオミング産のベントナイトの物性については、生産者や研究機関が論文やホームページ等で公開されている。しかし、前節に述べたように試験方法の違いがあり発表された物性を単純に比較することはできず、我が国で参照する場合、参考程度とするべきものと考えられる。

そこで、本調査の対象となった主要な鉱山のベントナイトについて、我が国の試験基準に従って物性試験を実施した。その結果を表 5.2-1に示す。ただし、表中、高廟子 Gaomiaozi (GMZ) の Na 型ベントナイトについては、我が国でサンプルを入手していないので試験することができないため、中国機関の発表データを使用した。

物性比較に使用したベントナイトは、14 種類で下記に産地と特徴を示す。

①GMZ、GMZ-1 (Na 型)

内モンゴル自治区興和県高廟子 (Gaomiaozi) に産する。地下深いところに産するため中国側機関が実施した立坑による調査で得られたサンプルを、中国機関が実施した試験結果である。日本で実施したデータではないが、ここでは参考として記載する。

②GMZ (Ca 型)

平成 19 年度の自主研究で内モンゴル自治区興和県高廟子 (Gaomiaozi) を現地調査した際、採取した Ca 型サンプルの試験結果の平均値を記載した。

③四平劉房子

吉林省公主岭市劉房子鎮に産する Na 型ベントナイトで、四平劉房子愛思克膨潤土有限公司により商業ベースで出荷されている中国産の Na 型ベントナイトである。3.4.3 に鉱山と工場の現況を紹介した。坑内掘りで日本にも定期的に輸出されている。

④アースフレンド

遼寧省建平县青峰山に産する Ca 型ベントナイトで、ソーダ灰により改質され建平科力砒業有限公司(CIMCO)から日本に輸出されている。(株)ホージュンが国内販売している。

⑤建平 A、⑥建平 B

遼寧省建平县青峰山に産する Ca 型ベントナイトで、ソーダ灰により改質され建平科力砒業有限公司(CIMCO)からクミネ工業(株)が日本に輸入している製品 2 種である。

⑥MX-80

米国ワイオミング産の Na 型ベントナイトで、AMCOL 社により露天掘りで採掘され、(株)ボルクレイ・ジャパンにより日本国内でも輸入販売されている。人工バリアに使用す

るベントナイト候補として欧米では最も一般的である。

⑥スーパークレイ

米国ワイオミング産の Na 型ベントナイトで、MI 社により露天掘りで採掘され、(株)ホーゲンにより日本国内で輸入販売されている。一般廃棄物処分場の遮水層に使用するベントナイトとして使用実績が多い。

⑦OS-FG

米国ワイオミング産の Na 型ベントナイトで、(株)ホーゲンがサンプルとデータを提供した。

⑧クニゲル V1

山形県大江町月布産の Na 型ベントナイトで、日本の放射性廃棄物処分研究で最も一般的に試験に供されており、広範囲なデータが取られている。

⑨クニボンド

クミニネ工業(株)が取り扱う代表的な Ca 型ベントナイトである。

⑩赤城

群馬県産の Ca 型ベントナイトをソーダ灰により改質したベントナイトで、土木用として連続地中壁の掘削壁安定、ソイルセメント工法用のベントナイトとして広く使用されている。粒度は 250 メッシュ (63 μ m) で次の浅間、穂高より粗い。

⑪浅間

群馬県産の Ca 型ベントナイトをソーダ灰により改質したベントナイトで、土木用として地中連続地中壁、シールド・推進工事の掘削壁安定等の目的で広く使用されている。粒度は 300 メッシュ (53 μ m) 製品で赤城より細かい。

⑫穂高

群馬県産の Ca 型ベントナイトをソーダ灰により改質したベントナイトで、鋳物用として広く使用されている。粒度は浅間と同じ 300 メッシュ (53 μ m) 製品である。

表 5.2-1 各種ベントナイトの基礎物性一覧表

	膨潤力 (ml/2g)	MB吸着量 (mmol/100g)	モンモリロナイト 含有量(%)	交換性Na イオン量 (meq/100g)	交換性Ca イオン量 (meq/100g)	交換性K イオン量 (meq/100g)	交換性Mg イオン量 (meq/100g)	Na/Ca	(Na+K) /(Ca+Mg)	液性限界	塑性限界	CEC (meq/100g)	Na/CEC	備考
GMZ,GMZ-1(Na型)	18	102	72.5	40.7	27.0	0.5	10.2	1.50	1.11	336	46.0	77.1	0.53	中国機関データ
GMZ (Ca型)	5.6	87.1	62	12.6	37.4	1.3	27.5	0.34	0.21	103	31.5	68.7	0.18	クミネ工業測定
四平劉房子K	15.9	73.2	52	49.8	19.7	2.4	7.1	2.53	1.95	439	32.3	67.9	0.73	クミネ工業測定
アースフレンド	22	102	89	67.6	80.0	1.3	16.6	0.85	0.71	519	52.6	78.4	0.86	ホー Junction 測定
建平A	25	112	80	62.5	64.0	2.2	13.2	0.98	0.84	614	41.2	80.3	0.78	クミネ工業測定
建平B	22	114	81	70.3	62.2	2.5	16.5	1.13	0.93	566	38.1	84.3	0.83	クミネ工業測定
MX-80	33	104		59.0	30.1	1.9	12.3	1.96	1.44	649	37.4	83.0	0.71	クミネ工業測定
スーパークレイ	23	76	75	61.8	27.2	1.3	5.5	2.27	1.93	616	52.8	72.3	0.85	ホー Junction 測定
OS-FG	23	87	80	58.0	35.2	2.1	6.3	1.65	1.45	509	52.8	71.3	0.81	ホー Junction 測定
クニゲルV1	18	82	59	60.0	56.1	3.1	4.1	1.07	1.05	490	29.0	68.0	0.88	クミネ工業測定
クニボンド(Ca型)	7	104	84	11.9	58.5	1.9	7.2	0.20	0.21	129	38.4	79.5	0.15	クミネ工業測定
赤城	13	52	47	63.6	98.6	7.4	6.2	0.65	0.68	266	55.1	77.0	0.83	ホー Junction 測定
浅間	22	56		59.3	82.0	3.6	10.1	0.72	0.68	481	55.0	70.1	0.85	ホー Junction 測定
穂高	19	56		72.7	65.1	6.0	6.6	1.12	1.10	310.5	54.1	85.1	0.85	ホー Junction 測定
										GMZ,GMZ-1(Na型)は日本側でサンプル未入手のため中国機関の測定データを使用				
										MX-80は液性限界、塑性限界以外は原鉱石の測定結果				

表 5.2-1の各種ベントナイトの物性をグラフ化し、液性限界と膨潤力との関係を図 5.2-1 各種ベントナイトの液性限界と膨潤力に示した。両者の関係は、ベントナイトの種類によらずほぼ比例関係にあることがわかる。これは両物性値がベントナイトの基本的な性質である保水性と関係するためであり、以降は膨潤力とその他の物性値についてグラフ化した。

図 5.2-2は浸出 Na イオン量と膨潤力の関係を、また、図 5.2-3は浸出 Na イオン量と浸出 Ca イオン量の比 (Na/Ca)と膨潤力の関係を示した図である。Na イオンを吸着している場合、Ca イオンを吸着している場合よりも Si_2O_5 層の結合が弱く、膨潤し易いことが知られている。また、Na/Ca 比が小さい方が、塩水の影響を受けにくいことが指摘されている²¹⁾。

図 5.2-2、図 5.2-3とも、ベントナイトの産地やタイプごとにグループ化すると似た特性を示していることがわかった。例えば、ワイオミング産ベントナイトは高い膨潤力を示し、Na/Ca 比が大きいグループである。ワイオミング産ベントナイトは、白亜紀後期に大規模な火山活動があり、汽水性の内海に火山灰が堆積しベントナイトに変質したもので、個々の鉱床により性質が異なるベントナイトを産するが、巨視的に見れば類似した特徴を有している。

中国産 Na 型ベントナイト鉱床 2 箇所 (GMZ-1、四平劉房子) は地理的には離れているが、どちらも中生代白亜紀前期頃の陸性堆積層が変質したものである。Ca 型改質ベントナイトは、Ca 型ベントナイトをソーダ灰処理して活性化した製品で膨潤力は比較的大きいが Na/Ca 比は小さく、天然の Na 型ベントナイトとは区別される。

図 5.2-4に塑性限界と膨潤力の関係を示した。塑性限界が低いベントナイトは締め固めやすいと言われており²²⁾、クニゲル V1 と中国四平劉房子産ベントナイトが比較的小さな値を示している。

以上の結果から、ベントナイトにはそれぞれ特徴があるが、産地や産状が類似したベントナイトは比較的似た性質を示すことがわかった。ベントナイトによりデータが豊富に取りられているものと基礎物性程度のデータしかないものがあるが、広範にデータを取得すれば、相互に代換えがきく可能性もあると考えられる。

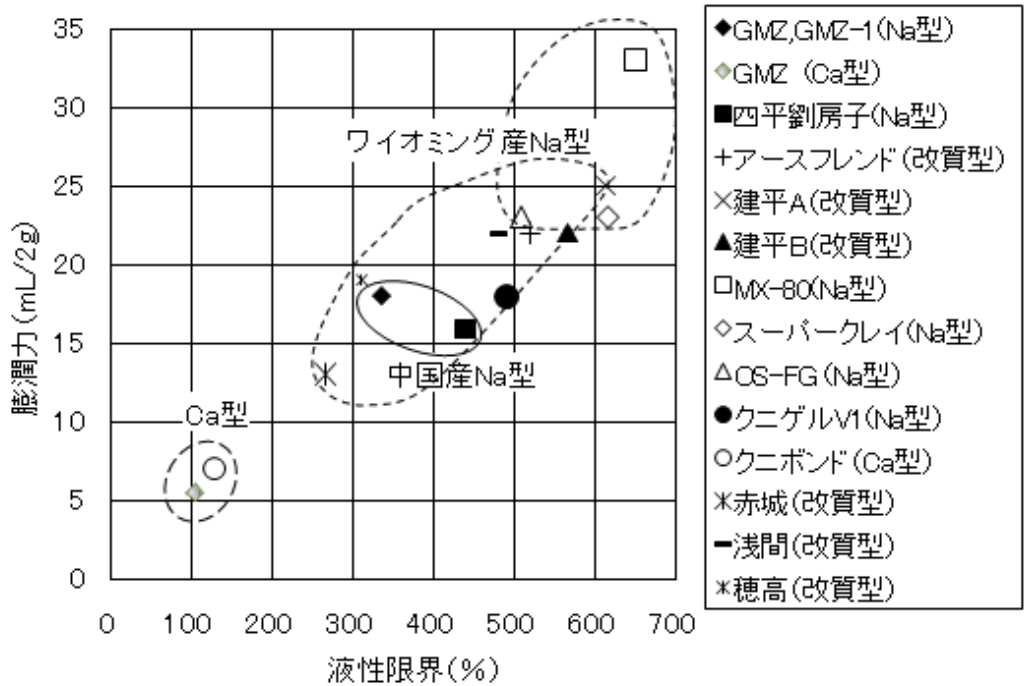


図 5.2-1 各種ベントナイトの液性限界と膨潤力

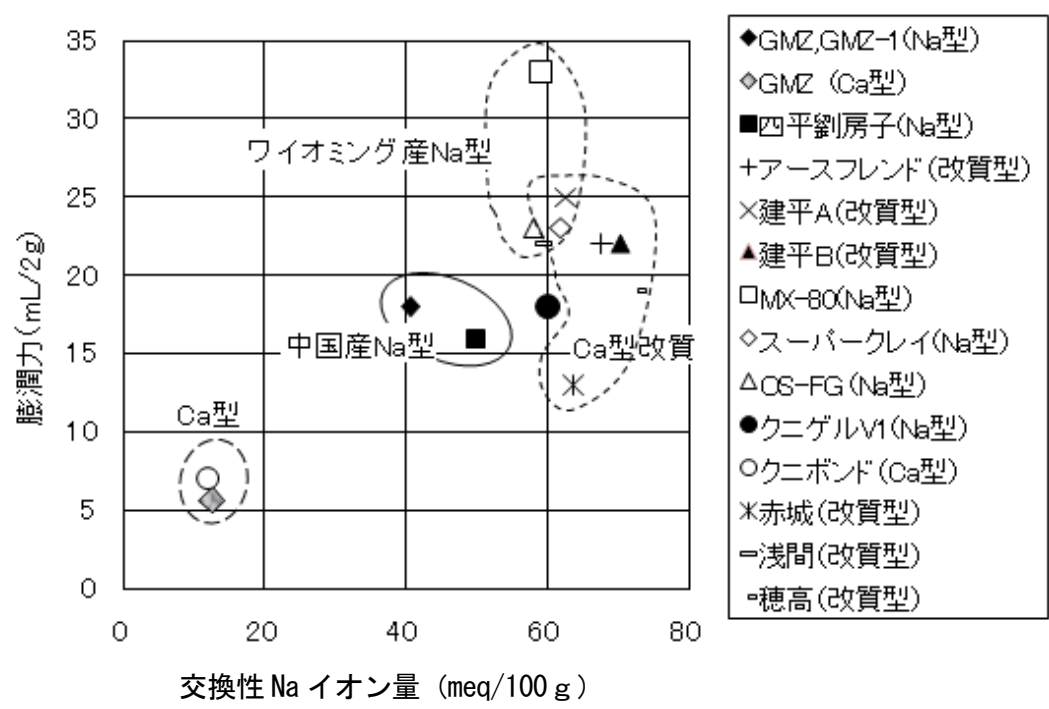


図 5.2-2 各種ベントナイトの交換性Naイオン量と膨潤力

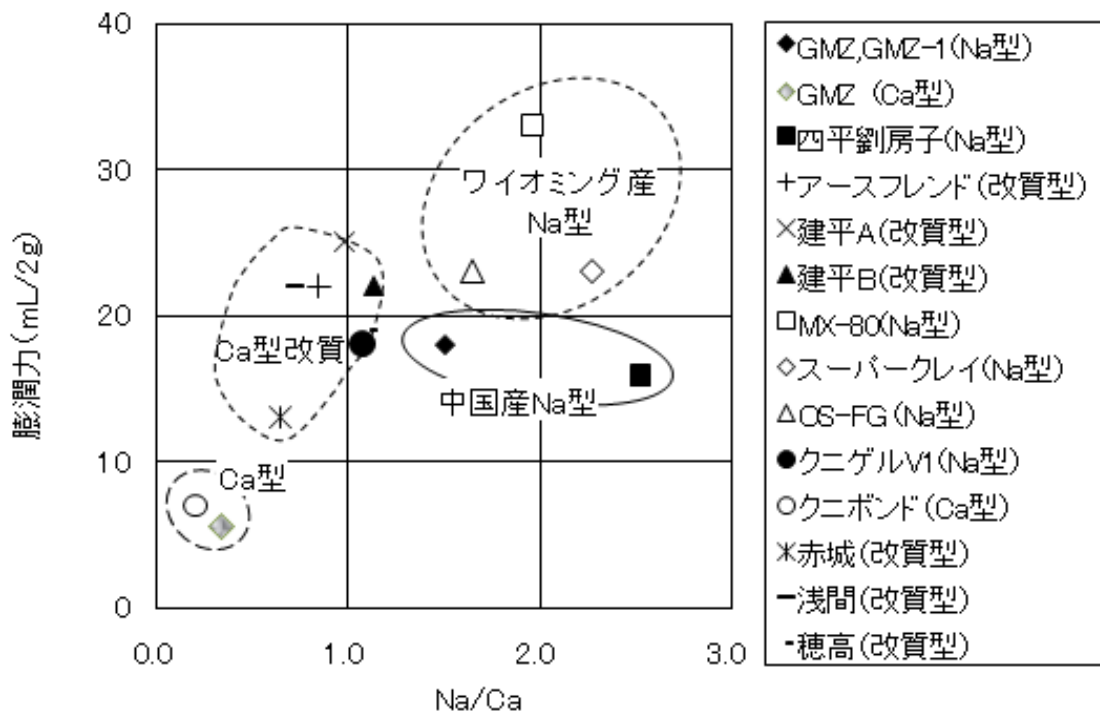


図 5.2-3 各種ベントナイトの Na/Ca 比と膨潤力

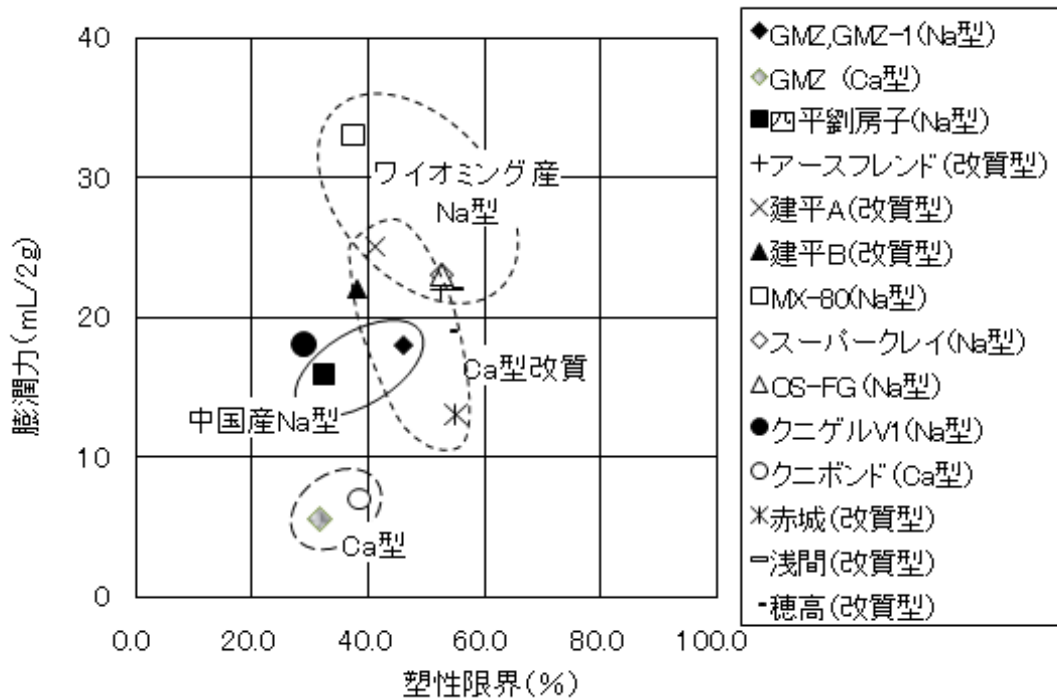


図 5.2-4 各種ベントナイトの塑性限界と膨潤力

【参考文献】

- 1) Lasse Ahonen, etal, Quality Assurance of the Bentonite Material, Posiva Working Report 2008-33, 2008
- 2) JBAS-106-77、ベントナイト（粉状）の陽イオン交換容量（CEC）測定方法、日本ベントナイト工業会標準試験方法、1977
- 3) JGS0261-2009、土の陽イオン交換容量（CEC）の試験方法、地盤工学会基準、2009
- 4) JISK1478、人工ゼオライトの陽イオン交換容量（CEC）測定方法、日本工業標準調査会、2009
- 5) JBAS-109-77、ベントナイト（粉状）の液性限界測定方法、日本ベントナイト工業会標準試験方法、1977
- 6) JBAS-107-77、ベントナイト（粉状）のメチレンブルー吸着量測定方法、日本ベントナイト工業会標準試験方法、1977
- 7) JBAS-104-77、ベントナイト（粉状）の膨潤試験方法、日本ベントナイト工業会標準試験方法、1977
- 8) GB/T20973-2007、付録 A、陽イオン交換容量および交換性陽イオン含有量の試験方法、中華人民共和国国家標準、ベントナイト、2008（原文中国語）
- 9) GB/T20973-2007、ベントナイト、6.3、中華人民共和国国家標準、2008（原文中国語）
- 10) GB/T20973-2007、ベントナイト、6.7、中華人民共和国国家標準、2008（原文中国語）
- 11) AMCOL international, Methylene blue determination – bentonite, TP-1016, 2008
- 12) AMCOL international, Liquid limit determination, TP-7019, 2008
- 13) ASTM D5890-06, Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners, ASTM international
- 14) ASTM D5334-08, Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure, ASTM international
- 15) ASTM D5084-03, Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, ASTM international
- 16) ISO11260:1994, Soil quality – Determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution, 1996

- 17) ASTM D 4318-05 , Standard test method for Liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM international
- 18) ASTM C 837-09, Standard test method for Methylene blue index of clay, ASTM international
- 19) ASTM D 4546-08, Standard test method for One- dimensional swell or collapse of cohesive soils, ASTM international
- 20) ASTM D 6836-02, Standard test method for Determination of the soil water characteristic curve for desorption using hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, or centrifuge, ASTM international
- 21) 直井優, 小峯秀雄他 : 各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響, 土木学会論文集, No. 785/III-70, 2005
- 22) 小峯秀雄, 緒方信英 : 塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案, 土木学会論文集 No. 436/III-16, 1991

第6章 今後の課題とまとめ

6.1 今後の課題

6.1.1 高廟子（GMZ）ベントナイトを対象とした研究計画

3回の中国現地調査および既存情報整理などにより、中国ベントナイトの概況についての知見は前述までの通り取りまとめることができてきた。中国のベントナイトの資源ソースとしての可能性、重要性は高く、またベントナイトの既存市場においては既に活用が進んでいる。ただし、放射性廃棄物処分の分野ではベントナイトへの要求性能は汎用向けとは異なり、長期安定性や鉱物組成などといった新たな性能評価が重要となっている。これら新規および長期性能評価などに対応していくためには現製品の品質評価だけでは十分ではなく、ベントナイト鉱床の基礎的なデータも含め蓄積していくことが重要である。

中国側で放射性廃棄物処分用のベントナイトの候補材料となっているGMZベントナイトも物性などに関して中国側で実施したデータは多くあるが、鉱床の基礎的なデータがまだ不足している。今後日本でGMZベントナイトの活用を検討していく場合に、最低限必要と考えられる調査内容について、以下に示した。

必要な調査は3つの段階に分けられる。第1段階ではGMZベントナイト鉱床の基礎的なデータを入手し、性能評価を行う試料を選定し、第二段階では試料の各種性能評価を行い、第三段階ではGMZベントナイトの実使用を考えた場合の経済性などの評価を行う。

①GMZベントナイト鉱床基礎調査

GMZベントナイト鉱床のデータで不足しているのは、深度毎のベントナイト物性に関するデータである。ベントナイトの交換性陽イオンはCa-Mgイオンが多く、深部ではNaイオンが多くなるという傾向がベントナイト鉱床の多くで見られる。中国側が実施しているGMZベントナイトの研究には深部（100m程度）から採取した交換性Naイオンが多いベントナイトが用いられているが、このイオン組成のベントナイトが工業製品として安定的に供給できるものかについてデータはない。深度毎のベントナイトの交換性陽イオン組成や物性などのデータを取得した上で、研究試料の選択をする必要があると考える。

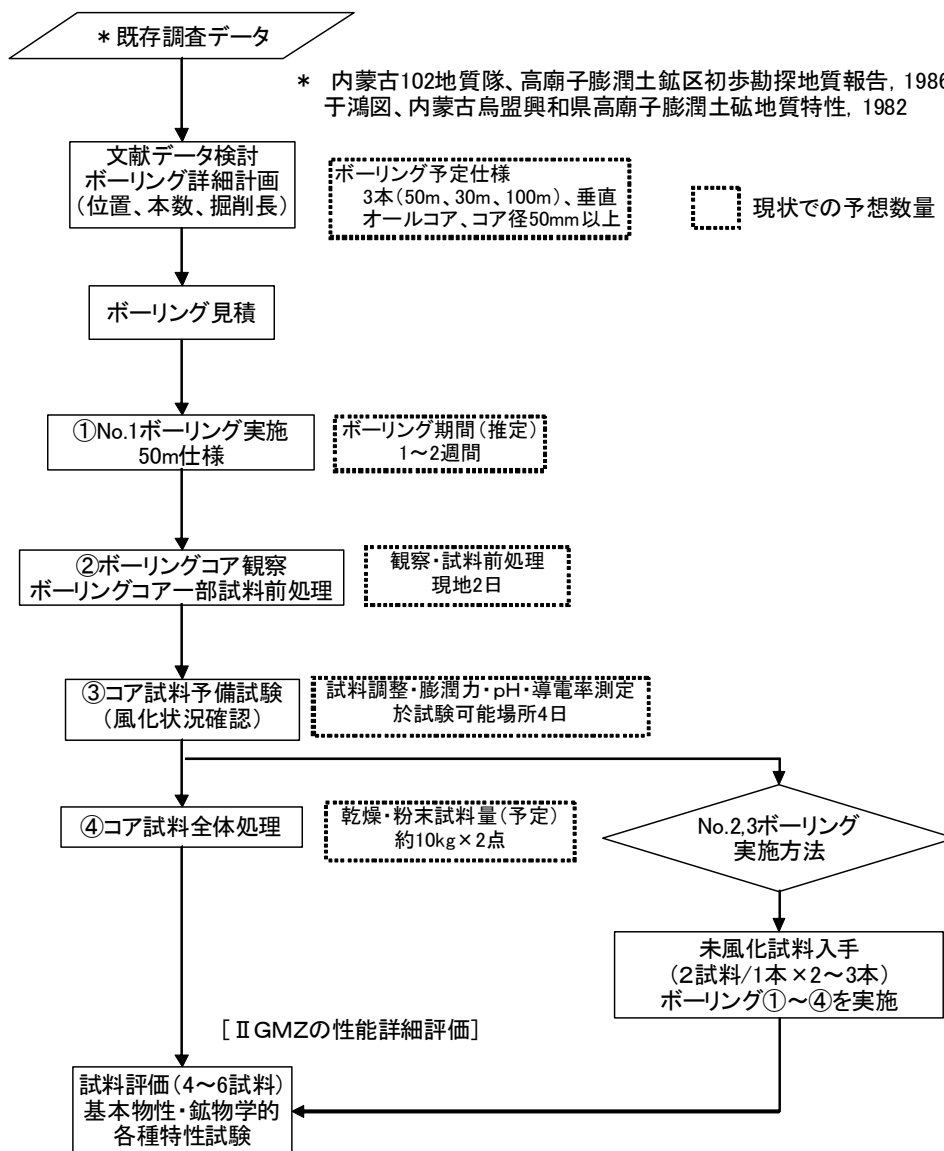
②GMZベントナイトの性能評価

中国側でGMZベントナイトの性能評価は積極的に進められている。鉱床基礎調査に基づき選択した試料の各物性、性能測定を行い、中国側のこれまでの評価と比較検討を行う。

③GMZ ベントナイトの経済性

GMZ ベントナイトに求める性能と鉞床調査結果に基づいて、本格的に本ベントナイトを利用した場合の経済性を評価する必要がある。経済性の評価にはこれらのデータの他に開発規模、方法などの設定を行なって進める必要があり、基本的には現地側が主体となった検討であるが、経済性の概略把握は独自でも進めておく必要があると考える。

[I GMZベントナイト(Ⅲ層)品質評価のための試料入手]



上記は傾斜・深度方向での物性変化(風化)が主であり、水平(走向)方向での変化は少ないと仮定したもの
水平方向での変化が大きい場合はボーリングを追加する必要が生じる

図 6.1-1 GMZ ベントナイト鉞床評価の計画 (1/2)

[II GMZベントナイトの性能詳細評価]

クニゲルなどで実施している各性能詳細評価

[III GMZベントナイト鉱床開発経済性の検討]

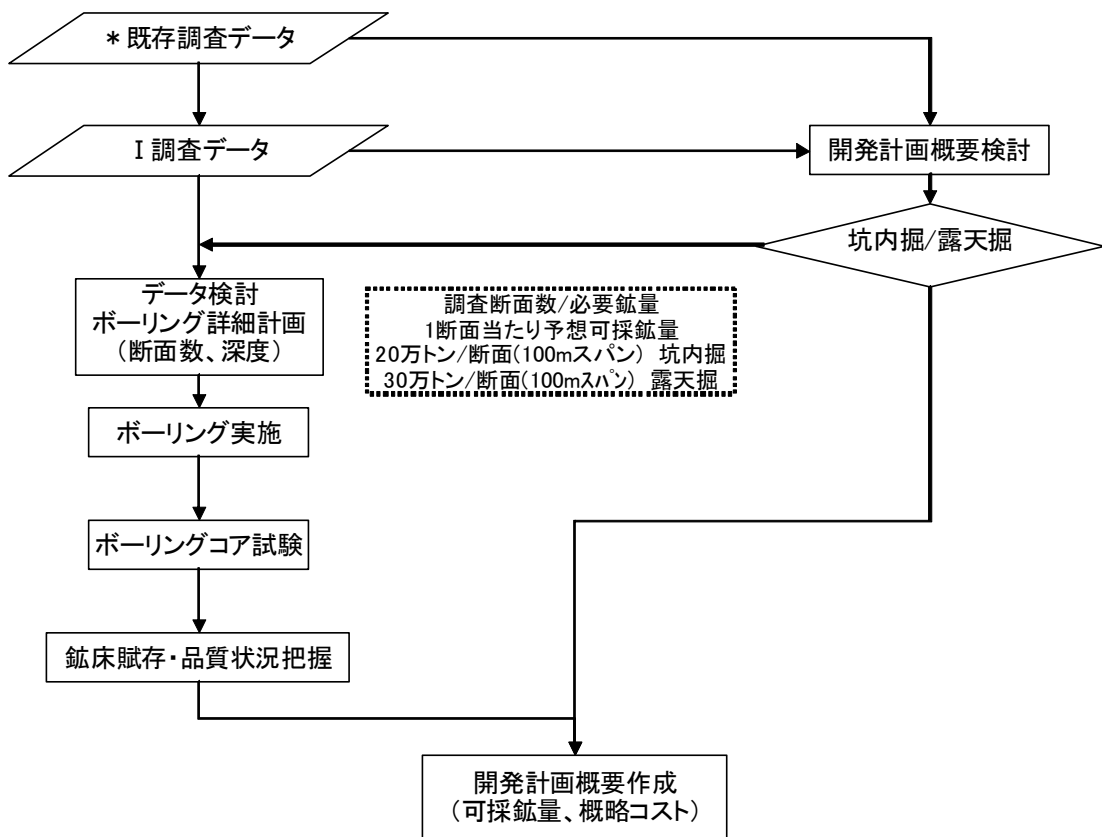


図 6.1-2 GMZ ベントナイト鉱床評価の計画 (2/2)

6.1.2 統一試験の実施

2.4 節に述べたように、SKB 社や POSIVA 社では使用する可能性のある海外産のベントナイトについて、統一的な試験を実施している。しかし、その試験方法は必ずしも放射性廃棄物処分施設への利用を念頭に置いたものではないのが実情である。また、実施対象になったベントナイトは欧州産、米国産、インド産のベントナイトで、中国産などアジア地域のベントナイトについては研究対象になっていない。

わが国では地理的に近く輸送コストを抑制できる中国産ベントナイトに注目する必要がある、独自の統一試験を進める必要があると考える。高廟子（GMZ）、四平劉房子、建平産のベントナイトについては 2009 年度に基礎物性試験を実施したが、一部のベントナイトについての試験に留まっている。透水試験、膨潤圧試験など放射性廃棄物処分施設への適用を考えた場合、重要とされる試験項目については、まだ試験を実施していない。今後、放射性廃棄物処分施設の使用部位に応じた要件を整理し、必要な試験を統一的に実施する必要があると考える。

6.1.3 中国産ベントナイトを利用する場合の品質確保方策

放射性廃棄物処分分野でのベントナイトの利用にあたっては、他の分野とは異なり、安定した品質の製品が長期間にわたって計画通り入手できるかどうか重要である。ベントナイトの利用では物性的な品質の他に、ものづくりの基本である QCD（Quality：品質 Cost：コスト Delivery：納期）のうちの品質以外の包装・輸送・供給体制など鉱産物資源に共通する項目も重要である。本項ではベントナイトの物性的な品質確保方策を主に取り上げる。

(1)品質管理の現状

中国のベントナイトメーカーで現在行われている品質管理は鋳物、ボーリングなどの既存市場で最低限必要とされるものが主となっており、また対象も現在採掘している原鉱、生産している製品のみとなっているものが多い。従って、放射性廃棄物処分など要求品質が異なり、また将来的、長期的な供給安定性を求められる市場において現時点で品質確保が容易であるとは言えない。

(2)品質の規定

品質確保のためには、まず必要とされる品質特性を明確にすることが重要と考える。品

質特性によってはメーカーが管理できる項目および管理ができない項目があり、管理できない項目の場合は管理可能な代用特性があるか検討が必要である。

(3) ベントナイト資源の絞り込み (対象ベントナイトの有無)

要求品質を明確にした後、これに合致する物性のベントナイトであるか、または今後の供給の可能性があるかを判断していく必要がある。既存製品の判断は容易であるが、将来的な可能性や長期の供給安定性を判断することは難しい。このためには、ベントナイト鉱床のデータが不可欠であるが、中国のベントナイト鉱床のデータは少なく、また応用が可能な測定項目も多くないと考えられる。従って、中国ベントナイトメーカーなどが保有する既存データのみでは一次的な利用可能性の絞り込みしかできないと考える。

(4) 実用段階 (対象製品の安定方策)

絞り込んだベントナイト資源の実用にあたっては、鉱山での採掘、工場での加工、納入の各段階での確認が必要である。

(3)の検討で、対象となるベントナイトがあることが確認できたとしても、これが供給可能なものか、また安定供給されるものかの確認が必要である。

供給可能性、安定性を検討していくためには、鉱床調査に基づいた鉱山の開発方法（採掘場所、数量、時期）の確認が必要である。対象としたベントナイトの採掘が、現状開発方法に沿っている場合は供給には問題がないが、現状開発方法と整合しない場合は採掘コストなど供給に問題が出てくる場合がある。

また、ベントナイトの品質の安定をはかる（バラツキを少なくする）ためには採掘方法、貯鉱方法、生産方法などの検討が必要である。鉱床調査で鉱床中の品質のバラツキがあることが確認された場合、採掘段階で採掘原鉱の品質のバラツキが少なくなるような採掘方法があるか検討する。採掘段階で品質のバラツキが大きい場合は貯鉱、生産段階での管理の検討が必要となる。

採掘原鉱の品質のバラツキが大きい場合は、選別貯鉱および工場での原鉱混合の検討が必要となる。選別貯鉱では選別原鉱毎の出鉱および使用数量のバランスが重要であり、選別原鉱の品質確認、工場生産時の適切な原鉱混合が必要となる。

ベントナイト製品の品質のほとんどは原鉱品質に起因するものである。ただし、膨潤性、粘性などの一部は工場生産時に管理可能である。原鉱選別以外の工程管理操作としては、乾燥、粉碎、活性化処理（ソーダ灰添加）などがある。これらの工程生産管理は既存の市場向けに実施しているものであり、中国のベントナイトメーカーも既にある程度の品質管

理レベルを持っていると考えられるが、現状の品質管理方法の確認および精度向上をはかる必要がある。

中国ベントナイトメーカーも ISO を取得している会社が多く、製品の品質確認は適切に実施されているが、(2)の要求品質が明確に設定されていない、または管理可能な項目となっていない場合には品質管理システムだけで品質管理ができるかは疑問である。

通常の製品物性品質以外に、異物混入、製品取り扱いなどの基本的な管理も重要である。最近でも中国の鉱産物製品に様々な異物が混入する例はまだ多くみられる。また、製品の倉庫保管時、輸送時の製品の濡れや破れなどの発生も多い。これらの取り扱いをレベルアップしていくには長期にわたって中国側の意識を変えていく指導が必要である。

(5)ベントナイト供給全体での課題

(2)～(4)の品質管理、確保方案はベントナイト製品の主に品質確保のための方策であるが、中国ベントナイトの活用にあたっては中国との取引の特殊性が今現在でもまだ残っていることを理解することが不可欠である。中国の鉱産物取引では突然の法律・政策変更の影響を受け、コスト、供給が変動することがある。資源の基礎情報である鉱山の権利関係も採鉱許可証などで確認できるが、土地利用者である農民などとの関係が明確とはなっておらず、多数の業者によって1つの鉱山の開発が複雑な形で進められているものもある。ベントナイト鉱山の規模は大きいものは少なく、鉱山全体の計画的な開発ではなく、安全面での問題もある。また、為替レートの変動、人件費上昇も不明である。従って、現時点では中国ベントナイトに対して QCD 全体を長期に予想することはできないと考えられる。

中国産ベントナイトの日本市場での活用は拡大してきているが、長期的な計画に基づく処分事業での使用材料としてベントナイトを考える放射性廃棄物処分分野では、前述のような状況にある中国ベントナイトだけに依存するような使用は考え難い。ただし処分方法の選択肢を広げる目的やスポットまたは補完的な位置付けで中国ベントナイトの利用を考えていくことは意味があると考えられる。

6.2 まとめ

放射性廃棄物処分事業を進めるにあたり、人工バリアの構築に欠かせないベントナイトの長期的な安定した供給を図るため、中国産ベントナイトを中心に、市場の現状、物性や埋蔵量、生産体制等の調査を行った。得られた結果は以下のとおりである。

①第2章では、世界のベントナイト産出状況や放射性廃棄物処分技術研究分野でどのようなベントナイトが取り上げられ、研究されているかを整理して述べた。欧米の機関では地理的制約からアジアのベントナイトはあまり研究されていないことから、アジアに位置する我が国として独自の調査を進める必要があることを認識した。

②第3章では、中国産ベントナイトについて調査した。中国には多くのベントナイト鉱床が存在し、近年、我が国への輸出も増加しており重要性が高まっている。主要なベントナイト鉱床の訪問調査も行い、中国のベントナイト産業の実態を調査した。その結果、一部の近代的なベントナイト鉱山では我が国と同様な生産管理が行われていることがわかった。

③第4章では、放射性廃棄物処分施設におけるベントナイトの要求品質等を調べるとともに、中国の研究機関が強く推薦する高廟子（GMZ）ベントナイトに関する中国側の試験結果を整理した。中国のベントナイトは、放射性廃棄物処分施設として使用することを前提にして試験されたデータが少ないのが実情であり、今後、試験条件を明らかにした上で、さらに試験を実施する必要がある。

④第5章では、ベントナイトの日米中の試験方法を比較するとともに、日本のメーカーによる試験結果から日中米のベントナイトの基礎的な物性を比較した。ベントナイトの基礎的な試験方法においても各国で違いが認められ、また、透水性や膨潤圧の試験方法になると各研究機関がそれぞれの試験方法で試験しているのが実態であることがわかった。

⑤日中米の主なベントナイトの基礎的物性の取りまとめ結果から、産地、成因の類似したベントナイトは比較的近い性質を示し、グループ化されることがわかった。放射性廃棄物処分施設で使用するベントナイトの要件が具体的に示され、十分な試験データと品質管理体制の裏付けがあれば、使用できるベントナイトの種類を増やせる可能性があることが示された。

⑥今後の課題として、中国機関が有力とする高廟子（GMZ）ベントナイト鉱床を対象とした研究計画、統一試験の実施、品質確保の方策について記述した。ベントナイトは鉱産物であり、採掘箇所ごとの品質の変化やばらつきがあるので、それを踏まえた調査計画や

品質確保方策を立てる必要がある。また、各国の試験方法に違いがあることから、統一試験によってベントナイトを評価する必要がある。

6.3 謝辞

本報告書は、平成18年度から4年間にわたり(公財)原子力環境整備促進・資金管理センターの自主研究として行われた成果を中心に取りまとめたものです。同センターの特別賛助会員会社等で自主研究に参加*された諸氏に感謝致します。

中国のベントナイト調査の実施に当たっては、中国の放射性廃棄物処分技術の研究機関である中国核工業集团公司地質局(CNNC/BOG)のCong Weike 対外合作部副部長、核工業北京地質研究院(BRIUG)のWang Ju 総工程師上席研究員、Wen Zhijian 研究員を始め、地方の地質調査院の協力を得て共同での調査を実施することができました。中国訪問の都度、丁寧な対応を頂いたこと、ここに深くお礼申し上げます。また、ワークショップでは上記機関のほか東華理工學院のLiu Xiaodong 副院長教授をはじめとした中国の大学の協力を得ました。平成20年12月に実施されたワークショップでは韓国のKAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) の参加も得て、韓国のベントナイト資源に関する情報も得ることができました。

さらに既存鉱山工場の調査では、現地企業のご協力を受け、詳細な調査を実施することができました。

これらの皆様のご協力により、訪問調査を含め前例のないベントナイトの調査を実施することができ、今まで情報が極めて少なかった中国産のベントナイトの現状と品質等について、調査資料としてまとめることができました。

本調査結果が、今後、長期にわたって我が国の重要な事業となる放射性廃棄物処分の推進に寄与することを願っております。

*参加特別賛助会員・機関：鹿島建設株式会社、株式会社IHI、株式会社竹中工務店、株式会社竹中土木、株式会社間組、株式会社福田組、原子力発電環境整備機構、クニミネ工業株式会社、清水建設株式会社、大成建設株式会社、東電設計株式会社、戸田建設株式会社、日本原燃株式会社、日本国土開発株式会社

【問合せ先】

〒104-0052 東京都中央区月島1丁目15番7号(パシフィックマークス月島8階)
公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター (原環センター)
電話 03-3534-4511, ファックス 03-3534-4567

Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC)
PACIFIC MARKS TSUKISHIMA, 8th FL, 1-15-7, TSUKISHIMA, CHUO-KU.
TOKYO. 104-0052, Japan

本書の転載などの問い合わせは、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 企画部までお願いいたします。