

## 放射性廃棄物処分施設への中国産ベントナイトの利用可能性について

関根一郎\*1 雨宮清\*2 伊藤雅和\*3 寺田賢二\*4

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。また、海外のベントナイトの試験方法の調査を実施したほか、中国、日本、米国産ベントナイトの物性比較を行い、ベントナイトの種類ごとの傾向を調べた。最後に、放射性廃棄物処分施設へ海外のベントナイトを利用するための今後の課題を示した。

**Keywords:** ベントナイト, 緩衝材, 放射性廃棄物処分, 中国

Bentonite will be used for a buffer material of radioactive waste disposal facilities in many countries of the world. For the operation of the facilities in the future, the stable supply of bentonite in the long term is necessary. When supply deficiency, quality change and soaring price of bentonite occur due to the demand growth, they would give adverse effects on the radioactive waste disposal project. In this paper, we studied the situation of bentonite production in the world, in particular in China. We also investigated analytical procedures and brief properties of Chinese, Japanese and American bentonite. As a result, however, we identified that the establishment of quality assurance systems for not only production but analytical procedures are necessary to assess evenly the suitability of each bentonite for radioactive waste disposal facilities.

**Keywords:** bentonite, buffer material, radioactive waste disposal, China

## 1 はじめに

放射性廃棄物処分施設において、人工バリアの構成材料の一つとしてベントナイトの利用が検討されている。ベントナイトは低透水性で自己修復性を有する緩衝材として重要視されており、今後の放射性廃棄物処分事業を進めるために、長期的に安定した供給が必要と考えられる。

一方、ベントナイトは土木建築分野で孔壁の安定材料として使われるだけでなく自動車エンジンの鋳物の製作や塗料の原料として広く利用されている。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大きな影響を及ぼすことが懸念される。

本報告は、このようなベントナイトの材料としての特殊性を鑑み、(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結果の一部を紹介するものである[1]。中国のベントナイト調査に当たっては、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った。

## 2 海外のベントナイトに関する文献調査

## 2.1 ベントナイト産出国と我が国の輸入

ベントナイトは世界中に比較的広く分布する資源である。Fig. 1に各国のベントナイト産出量を示す[2]。2007年の世界の総産出量は1,580万トン、米国が最大の産出国で31%を占める。以下、中国、ギリシャ、トルコと続き、我が国も9番目の産出国である。Table 1は主な産出国の産地を示している。中国は3章で詳述するので、割愛した。それぞれの国のベントナイトの特徴は参考文献[3-6]に詳述しているので参照されたい。

Fig. 2に、我が国のベントナイト輸入量の経年変化を示す[7]。米国からの輸入が多く、中国からの輸入が続いている。それ以外の国のベントナイトはスポット的に使用目的に合わせて輸入されているが、一般的に少量である。

米国はワイオミング州を中心に良質なNa型ベントナイトを産出し、露天掘りで大規模に掘削している。我が国への輸入は鉄道と外航船によっており、運送に費用がかかっている。中国のベントナイト鉱山については3章で詳述するように、港に比較的近く輸送に便利な鉱山が開発されて

Study on the possibility of the utilization of Chinese bentonite for radioactive waste disposal facility by Ichiro SEKINE (ichiro.sekine@toda.co.jp), Kiyoshi AMEMIYA, Masakazu ITO, Kenji TERADA

\*1 戸田建設株式会社

Toda Corporation  
〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1

\*2 株式会社間組

Hazama Corporation  
〒305-0822 茨城県つくば市刈間 515-1

\*3 クミニネ工業株式会社

Kunimine Industries Co., Ltd.  
〒989-0916 宮城県刈田郡蔵王町遠刈田温泉字下田 6 番地

\*4 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

Radioactive Waste Management Funding and Research Center  
〒104-0052 東京都中央区月島 1-15-7

(Received 3 October 2011, accepted 23 November 2011)

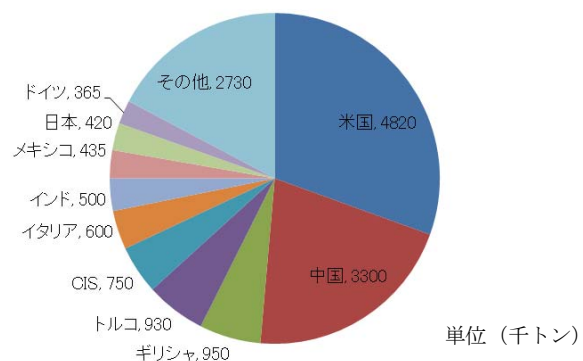


Fig. 1 Main producing country of bentonite[1]

Table 1 Main bentonite production countries

| 国名       | 主な産地   | 備考             |
|----------|--|----------------|
| 米国[3]    | Wyoming 州に Colony, Lovell, Greybull, Casper 他    | Na 型が主         |
| 韓国[4]    | Oksan, Jinmyeong, Hanlin, Taekwang 他             |                |
| インド[5]   | Chennai, Gujarat, Bihar, Rajasthan 他             |                |
| ロシア[5]   | Pikalevskoe 他                                    |                |
| チェコ[5]   | České Středohoří, Kadaň, Podbořany, Karlovy Vary | Na 型は産しない      |
| ウクライナ[5] | Charkassy 他                                      |                |
| 南アフリカ[5] | Koppies, Heidelberg                              |                |
| トルコ[6]   | Balikesir, Kutahya, Ordu 他                       | Ca 型, 改質ベントナイト |
| イタリア[6]  | Sardinia, Uri, Oristano, Cagliari                | Ca 型           |
| ギリシャ[6]  | Milos  | Ca 型, 改質ベントナイト |

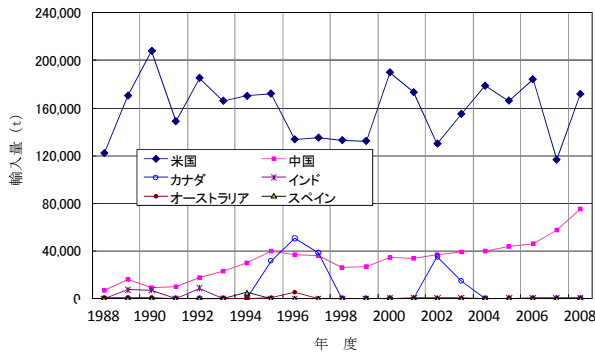


Fig. 2 Japanese import volume of bentonite[1]

おり、我が国へは内航船で輸送可能なので輸送費が比較的に安価ですむと言う有利点がある。Fig. 2 に示すように中国からの輸入は年々増加する傾向にあり、中国産ベントナイトの重要性が増している。

2.2 海外のベントナイトに関する研究事例

欧州で先行して地層処分場の立地が決まったフィンランド、スウェーデンの計画でも緩衝材としてベントナイトを使用するが、両国ともベントナイトを産出しない。そのため、世界のベントナイトに対する研究がなされている。

Table 2 に両国と我が国で実施されたベントナイトの研究で取り上げられたベントナイトを一覧表にして示した。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。

3 中国産ベントナイトの調査

中国には 86 のベントナイト鉱床の存在が確認されており、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、図示すると、Fig. 3 のようになる[13]。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。

Table 2 Proposed bentonite for the buffer materials of radioactive waste disposal facilities in the world[1]

| Posiva 社主な候補検討材料[8] |                      |                       | SKB 社主な候補検討材料 (緩衝材) [9] |           |                | 志村ら(1995) [10,11] |                  |      | 日本原子力研究開発機構 [12] |          |      |
|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|----------------|-------------------|------------------|------|------------------|----------|------|
| 産出国                 | ベントナイト               | 備考<br>スラグ割合           | 産出国                     | ベントナイト    | 備考<br>スラグ割合    | 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, 約 75 (%)   | 米国                      | MX-80     | Na 型, 約 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, 約 81 (%)   | ドイツ                     | IBECO     | Na 型, 約 70 (%) | 米国                | BARA-KADE90      | Na 型 | ドイツ              | Motigel  | Ca 型 |
| インド                 | Asha230              | 埋め戻し材, Na 型, 約 60 (%) | ドイツ                     | IBECO     | Ca 型, 約 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       | 約 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 | 約 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, 約 45 (%)       | スペイン                    | Saponite  | 約 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      | 約 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 | 約 45 (%)       | 日本                | 佐渡               | Ca 型 |                  |          |      |

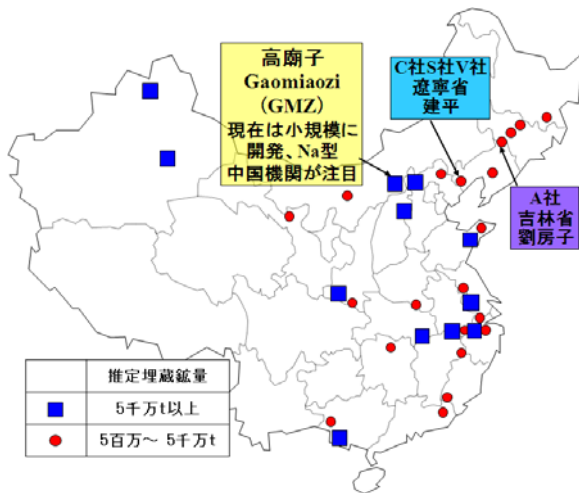


Fig. 3 The main deposit of bentonite in China

図中の高廟子（Gaomiaozi (GMZ)）ベントナイト鉱床は、中国機関が中国の地層処分施設用の緩衝材として採用を予定しているものである。遼寧省建平は現在最も多くベントナイトが採掘されている地域で、輸送も比較的便利な地点であることから多くの有力なベントナイトメーカーが立地し、日本にも輸出されている。吉林省劉房子は坑内掘りだが Na 型ベントナイトを産し、日本にも輸出されているベントナイト鉱山である。本研究では、中国機関、ベントナイト会社の協力を得て、これらの中国のベントナイト鉱床・鉱山を訪問調査した。結果を以下に述べる。なお、調査結果は、訪問調査時のヒアリングとメーカーのパフレットに基づいている。なお、各鉱山のベントナイトの物性については 4.2 に後述する。

### 3.1 内モンゴル自治区高廟子（Gaomiaozi (GMZ)）の鉱山

当鉱床は、北京の西北 160km の張家口市の西 80km に位置し、張家口市と内モンゴルを結ぶ高速道路、国道 101 号から約 5km と近く、比較的アクセスの容易なところにある。

内蒙古国土资源信息院[14]によると資源埋蔵量 1 億 7,489 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鉱床であり、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。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、地表付近から深度約 100m にわたってベントナイト層が分布している。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としており、両者の境界は遷移的に変化している。Na 型ベントナイトについてはクニゲル V1 と比較した多くの研究データが中国機関から報告されている[15,16]。

現在は、露天掘りにより複数箇所小規模に採掘されており、ベントナイト工場は存在しない。Fig. 4 は、鉱床の直上で斜めボーリングを実施してある地点である。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 程度である。

Fig. 5 は本鉱床の露頭の調査状況で、訪問時に 3 か所の露頭から地表付近に分布する Ca 型ベントナイトを計 8 点



Fig. 4 The view of Gaomiaozi (GMZ) region A inclined borehole is located at the center of photo[1]



Fig. 5 The deposit of Gaomiaozi (GMZ)

サンプル採取し、クニミネ工業(株)にて基礎的な試験を実施した。試験の結果、メチレンブルー吸着量が 1 サンプルで 108 mmol/100g であったが、他は 78～88 mmol/100g となっており、中国側の発表していた当サイトの Na 型ベントナイトのメチレンブルー吸着量 102 mmol/100g より低い値となった。本鉱床は開発が進んでおらず、鉱床を代表する試料の選定が難しいのが実情である。地点数を増やしてボーリング調査を実施するなど鉱床の評価には更なる調査が必要である。

### 3.2 遼寧省建平の鉱山

建平地区のベントナイト鉱山は瀋陽市の西約 100km に位置し、北京と瀋陽市を結ぶ幹線である鉄道が通っている。近年、高速道路も開通し、積み出し港である錦州港へ約 180km、営口港へ約 250km と利便性が高い。

建平には、ベントナイト鉱山および加工企業が 50 社以上立地し、確認鉱量は 1.5 億トン、年間生産能力は 100 万トンである。生産量が 10 万トン/年を越える会社は CIMCO（建平科力礦業）、および、外資系の Volclay Dongming, Sud-Chemie があり、本調査では CIMCO を訪問した。同社から日本への輸出量は中国で最多である。

CIMCO の保有原鉱量は 2,000 万トンで、主な採取場は 100m×150m×高さ 20m 程度の規模で、埋蔵量は 200 万





Fig. 6 The open-cut mining of the deposit at Jianping in Liaoning[1]



Fig. 8 The underground mine of Siping Liufangzi in Jilin[1]



Fig. 7 The shipping facility of bentonite at Jiamping in Liaoning



Fig. 9 The shipping facility by railway in Siping Liufangzi[1]

トン、ベントナイトの層厚は10~20m程度、表土は8m程度でFig. 6のように露天掘りで採掘されている。

Fig. 7に工場のベントナイト出荷施設を示す。生産設備は原鉱置き場（天日乾燥場）、ソーダ灰添加・活性化工程、乾燥工程、粉碎一貯留工程、包装工程からなる。ベントナイトはCa型で、ソーダ灰添加により改質している。改質したベントナイトは、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）用などに使用されている。工場内の検査室は粘度計など測定機器が充実しており、製品の貯蔵状況も良好であった。

### 3.3 吉林省劉房子の鉱山

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嶺市にあり、公主嶺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。

劉房子ベントナイト鉱山は、石炭鉱山に併設されている。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。

ベントナイト鉱山の出鉱能力は30万トン/年であるが、出鉱実績は6万トン/年程度である。ベントナイト工場の生産能力は8~10万トン/年、実績は4~5万トン/年である。粉碎機が6基あり、現在休止中の粉碎機も稼働させれば12

万トン/年の生産が可能である。

ベントナイトの出荷先は、鉄鋼業2万トン/年、自動車産業6000トン/年、他の国内消費2~3000トン/年、日本への輸出6000~7000トン/年、韓国への輸出（土木向け一般廃棄物処分場用）6000~7000トン/年である。

ベントナイトはNa型で、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、2,000万トンで現在までに100万トン以上採掘した。採掘箇所は、地下200m、層の傾斜は13度で、Fig. 8のようにトロッコを使用し坑内掘りで採掘されている。

ベントナイトの品質は、4.2に示すように我が国で放射性廃棄物処分研究にしばしば供されるクニゲルV1と比較して、膨潤力、液性限界ともやや小さな値を示している。

ベントナイト工場にはFig. 9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、約200km西南に位置する營口港から船に積み輸出されている。

## 4 中国、日本、米国のベントナイトの試験方法と物性

### 4.1 各国のベントナイトの品質評価のための試験方法調査 放射性廃棄物処分技術の研究・技術開発に取り組んでい

る各国からさまざま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。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。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の総括表を Table 3 に示す。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にしている。
- 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、カラム浸透法による測定、遠心分離法による測定などさまざま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。

#### 4.2 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している[16, 17]。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思われる。

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、ベントナイトメーカーに依頼し我が国の試験基準に従って物性試験を実施した。物性比較に使用したベントナイトは 14 種類で、Table 4 に凡例と産地、特徴を示した。表中、高廟子 Gaomiaozhi (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。

Fig. 10 に液性限界と膨潤力との関係を示した。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

Table 3 The comparison of standard test methods for bentonite in each country[1]

| 国名               | 日本   | 中国                                      | 米国<br>(MX-80, AMCOL 社)                                   | Posiva 社<br>レポート <sup>[17]</sup>                     |
|------------------|--|---|--|--|
| 1)陽イオン交換容量 (CEC) | JBA 注 1)<br>S106:77 <sup>[18]</sup> (一般のベントナイトを対象)<br>JGS0261-2009 <sup>[19]</sup> 注 3) (土を対象)<br>JIS K1478 <sup>[20]</sup> (人工ゼオライトを対象) | GB/T 20973-2007 <sup>[24]</sup><br>注 2) | メチレンブルー吸着量試験 (TP-1016 <sup>[27]</sup> (AMCOL 社試験基準)) で代用 | ISO11260 <sup>[32]</sup>                             |
| 2)液性限界           | JBA S109:77 <sup>[21]</sup>  |   | TP-7019 <sup>[28]</sup> (AMCOL 社試験基準)                    | ASTM D4318-05 <sup>[33]</sup>                        |
| 3)メチレンブルー吸着量     | JBAS-107-77 <sup>[22]</sup>  | GB/T 20973-2007 <sup>[25]</sup>         | TP-1016 <sup>[27]</sup> (AMCOL 社試験基準)                    | ASTM C837-09 <sup>[34]</sup>                         |
| 4)膨潤力            | JBAS-104-77 <sup>[23]</sup>  | GB/T 20973-2007 <sup>[26]</sup>         | ASTM D5890-06 <sup>[29]</sup> に準じる                       | ASTM D5890-06 <sup>[29]</sup>                        |
| 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 <sup>[35]</sup>                        |
| 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 <sup>[30]</sup>                            | ASTM D5334-08 <sup>[30]</sup>                        |
| 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 <sup>[31]</sup>                            | ASTM D5084-03 <sup>[30]</sup>                        |
| 8) 不飽和水分移動特性     | 日本ベントナイト工業会標準試験法に該当なし<br>研究機関、大学等の試験による  |   |  | ASTM D6836-02 <sup>[36]</sup><br>(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) JGS : 地盤工学会基準

**Table 4 Legend of bentonite for the comparison of the basic properties**

| 記号 | 名称               | 産出国 | 産出地         | タイプ   |
|----|------------------|-----|-------------|-------|
| □  | MX-80 ※1         | 米国  | ワイオミング州     | Na型   |
| ◇  | スーパークレイ※2        | 米国  | ワイオミング州     | Na型   |
| △  | OS-FG ※2         | 米国  | ワイオミング州     | Na型   |
| ◆  | GMZ,GMZ-1(Na型)※3 | 中国  | 内モンゴル自治区高鵬子 | Na型   |
| ●  | クニゲルV1 ※1        | 日本  | 山形県         | Na型   |
| ■  | 劉房子※1            | 中国  | 吉林省公主岭市     | Na型   |
| ✱  | 赤城 ※2            | 日本  | 群馬県         | Ca改質型 |
| ＝  | 浅間 ※2            | 日本  | 群馬県         | Ca改質型 |
| ＝  | 穂高 ※2            | 日本  | 群馬県         | Ca改質型 |
| +  | アースフレンド ※2       | 中国  | 遼寧省建平       | Ca改質型 |
| ×  | 建平A ※1           | 中国  | 遼寧省建平       | Ca改質型 |
| ▲  | 建平B ※1           | 中国  | 遼寧省建平       | Ca改質型 |
| ○  | クニボンド※1          | 日本  | 宮城県         | Ca型   |
| ◇  | GMZ(Ca型)※1       | 中国  | 内モンゴル自治区高鵬子 | Ca型   |

※1 クミネ工業(株)測定, ※2 ホーゲン(株)測定  
 ※3 GMZ, GMZ-1(Na型)は日本側でサンプル未入手のため  
 中国機関の測定結果を使用

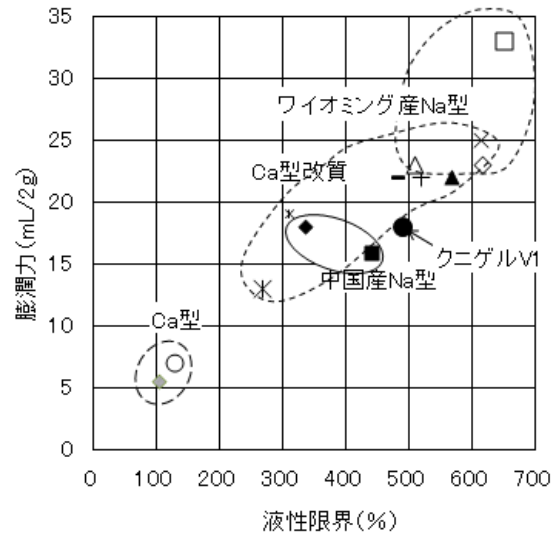
質である保水性と関係するためであり、以降は膨潤力とその他の物性値についてグラフ化した。

Fig. 11 に浸出 Na イオン量と膨潤力の関係を、また、Fig. 12 に浸出 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。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構成層の結合が弱く、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[37]。

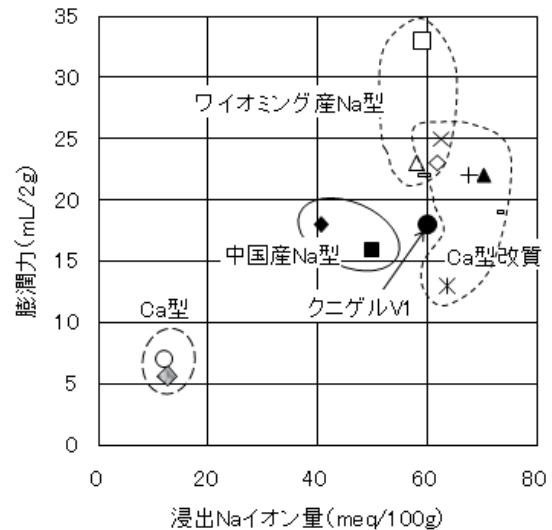
Fig. 11, Fig. 12 ともに、ベントナイトの産地やタイプごとにグループ化すると似た特性を示していることがわかる。例えば、ワイオミング産ベントナイトは高い膨潤力を示し、Na/Ca 比が大きいグループである。ワイオミング産ベントナイトは、白亜紀後期に大規模な火山活動があり、汽水性の内海に火山灰が堆積しベントナイトに変質したもので、個々の鉱床により性質が異なるベントナイトを産するが、巨視的に見れば類似した特徴を有している。

中国産 Na 型ベントナイト鉱床 2 箇所 (GMZ-1, 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。中国産 Na 型ベントナイトとワイオミング産 Na 型ベントナイトは Na/Ca 比が同程度だが、膨潤力はワイオミング産の方が大きな値を示している。これはワイオミング産の方がモンモリロナイト含有量が大きいことに起因する可能性があるが、モンモリロナイト含有量は測定方法が基準化されていないため、評価できなかった。また、中国産 Na 型ベントナイトは 2 点しかデータがない上、Na/Ca 比が大きく異なっており、今後データの充実を図る必要がある。

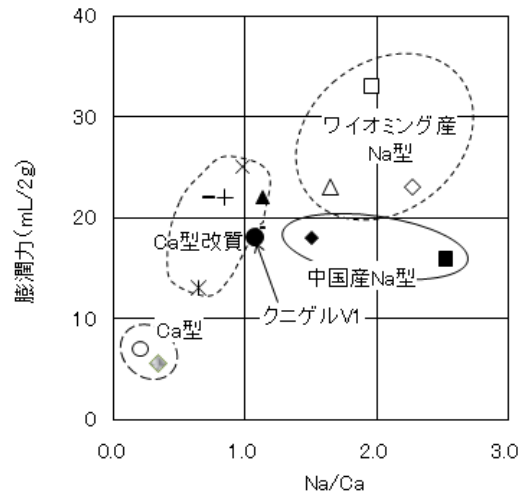
Fig. 13 に塑性限界と膨潤力の関係を示した。塑性限界が低いベントナイトは締め固めやすいと言われており[38]、



**Fig. 10 Relationship between liquid limit and swelling power ([1]を加筆修正)**



**Fig. 11 Relationship between exchange capacity of Na and swelling power ([1]を加筆修正)**



**Fig. 12 Relationship between Na/Ca and swelling power ([1]を加筆修正)**

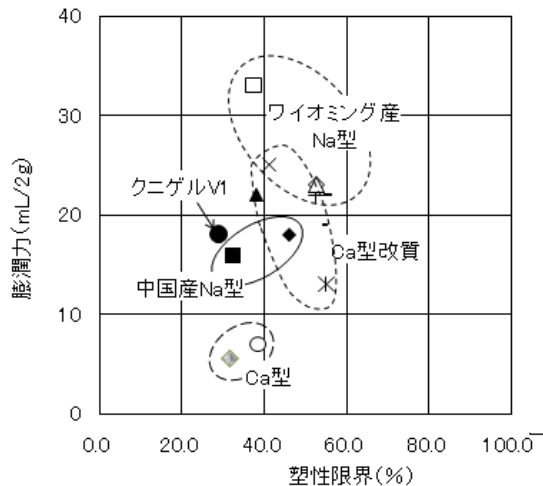


Fig. 13 Relationship between plastic limit and swelling power ([1]を加筆修正)

クニゲル V1 と中国の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、データが豊富に取得されている放射性廃棄物処分研究で頻繁に試験されているベントナイトに限らず他のベントナイトも利用できる可能性があると思われる。

## 5 まとめと今後の課題

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の可能性を探るため、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を行い、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。

- ④日中米の主なベントナイトの基礎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、グループ化できることがわかった。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。

今後の課題として、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。また、中国産ベントナイトを利用する場合の品質確保の方策確立が重要である。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。

中国機関が有力とする高廟子 (GMZ)ベントナイト鉱床を始め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まだ少ないのが実情であり、今後、試験条件を検討、統一した上で、さらに試験を実施し、データを蓄積していく必要がある。

## 謝辞

本技術報告は、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。同センターの自主研究に参加した諸氏\*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)、核工業北京地質研究院 (BRIUG)の皆様を始め、地方の地質調査院、東華理工学院をはじめとした中国の大学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。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、今まで情報がきわ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、技術報告としてまとめることができましたことを深く感謝いたします。

\*参加機関：鹿島建設株式会社、株式会社 I H I、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



## 参考文献

- [1] 寺田賢二, 関根一郎, 雨宮清, 伊藤雅和: 中国産ベントナイトの利用可能性調査報告書, 原環センター技術報告, RWMC-TRJ-10002 (2011)
- [2] U. S. Geological Survey: Bentonite world production by country, Minerals Information Minerals Yearbook
- [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)
- [4] KOMIS (Korea Mineral Information Service) (2006)
- [5] IAEA Co-ordinated Research Program における情報
- [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] 財務省貿易統計ホームページから図化作成 ([http://www. customs. go. jp/toukei/srch/index. htm](http://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm))
- [8] Posiva Oy: Nuclear Waste Management of the Olkiluoto and Loviisa Power Plants, Programme for Research, Development and Technical Design for 2007-2009, TKS-2006 (2006)
- [9] Roland Pusch: The Buffer and Backfill Handbook, Part 2, Materials and techniques, SKB Technical Report, TR-02-12 (2001)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] Wen Lu, Chinese Industrial Materials, pp33-38, Published by Industrial mineral Information Ltd. (1998)
- [14] 内閣府国土資源院『興和県高廟子ベントナイト鉱床開発プロジェクト』紹介 (2004)
- [15] 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)
- [16] Wen Zhijian: 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)
- [17] Lasse Ahonen, et al: Quality Assurance of the Bentonite Material, Posiva Working Report 2008-33 (2008)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 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)
- [24] 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)
- [25] 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)
- [26] 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)
- [27] AMCOL international, Methylene blue determination - bentonite, TP-1016(2008)
- [28] AMCOL international, Liquid limit determination, TP-7019(2008)
- [29] ASTM D5890-06, Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners, ASTM international
- [30] ASTM D5334-08, Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure, ASTM international
- [31] ASTM D5084-03, Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, ASTM international
- [32] ISO11260:1994, Soil quality - Determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution (1996)
- [33] ASTM D 4318-05, Standard test method for Liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM international
- [34] ASTM C 837-09, Standard test method for Methylene blue index of clay, ASTM international
- [35] ASTM D 4546-08, Standard test method for One-dimensional swell or collapse of cohesive soils, ASTM international
- [36] 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
- [37] 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)
- [38] 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)