

## 高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術 —その4 人工バリアの設計と製作—<sup>†</sup>

緒方信英<sup>1</sup> 小崎明郎<sup>1</sup> 植田浩義<sup>2</sup> 朝野英一<sup>3</sup> 高尾 肇<sup>4</sup>

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアは、長期間にわたって健全であることが必要である。ここでは、人工バリアとしてオーバーパックと緩衝材をとりあげ、その設計の考え方や設計例を示すとともに、製作と品質管理及び検査についての概要を述べた。オーバーパックとしては、強度部材に炭素鋼を選定し、処分深度が1,000 mの結晶質岩の検討結果を用いて、その設計仕様を定めた。また緩衝材は、主に透水係数と緩衝材の施工に伴なう隙間の自己シール性から、ベントナイト80 %、砂20 %で混合され、密度が $2.0 \text{ g/cm}^3$ に締め固められた材料を選定し、仕様を定めた。さらに、製作については、オーバーパックの蓋および複合オーバーパックの場合の耐食層の接合方法を、緩衝材については、ブロック型と一体型緩衝材の製作について検討した。

**Keywords:** 地層処分、人工バリア、オーバーパック、緩衝材、設計、製作

Ensuring the physical integrity of engineered barriers for an extremely long time period is necessary for geological disposal of high-level radioactive wastes.

This report describes the design process and the designed configurations of both overpack and buffer as engineered barriers. Manufacturing procedure, quality control and inspection methods are also summarized.

Carbon steel was selected as a structural material of the overpack and the specification of the overpack was determined assuming disposal in the depths of 1000 m below surface of crystalline rock site.

The mixture of bentonite and sand (80% sodium bentonite and 20 % silica sand by mass) was selected as material for a buffer from mainly its permeability and characteristics of self-sealing of a gap occurred in construction work.

Welding method of a lid onto the main body of the overpack, uniting method of a corrosion-resistance layer and the structural component in the case of a composite overpack and manufacturing procedures of both blocks-type and monolithic-type buffers are also investigated.

**Keywords:** geological disposal, engineered barrier, overpack, buffer, design, manufacturing procedure

### 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、現在から遠い将来の非常に長い、今までに人類が経験したことがない、長期間の安全性を検討する必要が生じてくるが、多重バリアの概念は、地層処分の安全性を高め、かつ信頼を得る上での基本的な考え方として検討されている。そのため、天然の地質環境に加えて、適切に設計された人工バリアが、十分に所期の機能を果たすことが必要である。

本特集では、「高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術」として、処分の実施主体が行う処分サイト選定、地質・地下水特性調査、施設設計、安全評価、施設建設、廃棄体埋設、施設閉鎖など、一連の処分事業を模擬的に机上で検討した。本報告（その4）では、本特集（その2）で設定した地質環境条件を対象とし、（その6）地下施設の設計・建設で設定した処分深度（結晶質岩での深度1000 m、堆積岩での深度500 m）を用いた。また（その7）廃棄体の埋設と処分施設の埋め戻しとの技術的調整を図りつつ、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材から成る人工バリアのうち、オーバーパックと緩衝材の設計と製作

について検討した結果を述べる。

### 2 人工バリアの役割

人工バリアは、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材から構成されるものとした。ガラス固化体は、放射性核種をガラスで固化し、核種の溶出を抑制する役割を有する。オーバーパックは、所定の期間、ガラス固化体を密封保護するとともに、ガラス固化体と地下水の接触を抑制する役割を有する。緩衝材は、オーバーパックと岩盤の間に充填され、地下水の移動を抑制するとともに、吸着により放射性核種の移行を抑制する役割を持ち、その他に物理的、化学的緩衝の役割も期待される。

### 3 オーバーパックの設計・製作

#### 3.1 オーバーパックの要件項目

前述のオーバーパックの役割に対して、オーバーパックの設計寿命を1000年と設定した。設定にあたっては、初期の毒性支配核種であるCs137やSr90が十分減少するのに処分後500年程度必要なこと[1]を考慮するとともに、ガラスの溶解速度等、核種移行に関する重要パラメータに対する処分後の高温度の影響を定性的に検討し1000年とした。

この設計寿命を前提として、Table 1に示すようなオーバーパックに求められる要件項目を網羅的に抽出し、それらを3つのカテゴリに分類した。すなわち、オーバー

<sup>†</sup> Execution techniques for high level radioactive waste Disposal: IV Design and manufacturing procedure of engineered barriers, by Nobuhide Ogata (n-ogata@criepi.denken.or.jp), Akio Kosaki, Hiroyoshi Ueda, Hidekazu Asano and Hajime Takao

1 (財)電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) 〒270-1194 秩父市秩父1646

2 東京電力(株) Tokyo Electric Power Company 〒100-0011 千代田区内幸町1-1-3

3 石川島播磨重工業(株) Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.,Ltd. 〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地

4 日揮(株) JGC Corporation 〒220-6001 横浜市西区みなとみらい2-3-1

Table 1 Requirements for assessing the performance of overpack and their categories

要件項目	要件内容	カテゴリ分類	
		カテゴリ	カテゴリ内容
耐食性	深部地下環境における耐食性を有すること	A	オーバーパック単独として設計できる要件項目
気密性・水密性	操業中の作業環境を維持すること（内部被爆の防止）		
廃棄体	廃棄体と地下水との接触を遅延すること		
製作性・ハンドリング性	製作上の容易性、溶接性、経済性を満足すること	B	人工バリアシステム全体の設計において考慮する要件項目
放射線遮蔽性	放射線に対する地下水の放射線分解を緩和すること		
耐圧性	緩衝材の膨潤圧、および地圧等の外力に対する機械的強度を有すること		
耐熱性	核種の崩壊熱に対する安定性を有すること	C	性能評価等において確認する要件項目
耐放射線性	放射線に対する安定性を有すること		
放射線遮蔽性	放射線に対する緩衝材の劣化の影響を緩和すること		
還元環境維持性	人工バリア周辺の化学的特性を還元性雰囲気に維持すること（放射線分解生成物対策を含む）		
腐食生成物物性	腐食生成物がバリア機能に有意な影響を与えないこと		
ガス発生	オーバーパック腐食により生成するガスによる、人工バリア破損および核種放出率の上昇を防止すること		

パック単独で設計が進められる要件項目をカテゴリ A, 人工バリアシステム全体として設計を行う必要のある要件項目をカテゴリ B とした。また、カテゴリ A とカテゴリ B の要件項目に対して設計を行ったオーバーパックの仕様について、性能評価等より安全性が担保されていることを確認する要件項目をカテゴリ C とした。

要件項目は、人工バリアの基本的な概念、システムの性能評価のシナリオを構築するために用いた FEP·PID、核燃料サイクル開発機構等による従来の知見等を参考にして抽出した。

### 3.2 オーバーパックの設計

具体的な設計作業に入る前に、前述の要件項目とカテゴリに基づいて、Fig.1 に示すような設計フローを構成した。構成にあたっては、3 つのカテゴリにより重要度を分類し、設計作業を効率的にするフローの構成を目指した。このような要件項目と設計フローに関する一連の検討は、将来の事業化のために、現段階では未成熟である人工バリア設計のための方法の整理、確立を目指したものである。

#### 3.2.1 オーバーパック候補材料

オーバーパック用材料の候補として、廉価でかつ構造材として一般に広く用いられている炭素鋼、工業的にも実用化され高耐食性材料の代表としてのチタン(チタン合金を含む)、同じく古くから耐食性材料として知られている銅(純銅)の3種類を検討した。

オーバーパックにとって重要な要件項目の一つである耐食性についての特性を概説する。

一般に、金属材料が地下水や海水等の自然水環境の下で起こりうる腐食形態として、全面腐食と局部腐食がある。全面腐食は、金属表面全体にわたってほとんど同一の速度で進行する腐食であるが、腐食の進行とともに、金属表面に凹凸が出来て局在化が起こる。一方、局部腐

食は特定の場所において選択的に進行する腐食であり、腐食進行は全面腐食に比べて速いと考えられている。

炭素鋼は、pH、酸化還元電位、温度等の環境条件によって腐食形態が異なり、全面腐食になる場合と局部腐食になる場合とがある。通常の河川水、海水、地下水のような自然水環境では、pH は 7~8 の付近にあり、炭素鋼は全面腐食領域にある。一方、ベンナイトとオーバーパックが共存するような環境では、pH は 10~12 付近にあり、平衡状態図から判断する限り、炭素鋼は耐食性被膜が形成される不働態域にあって、一般には、その腐食形態は局部腐食であると考えられる。しかし、オーバーパックが圧縮ペントナイトに接触している場合には、炭素鋼は全面腐食する可能性が高いとの報告がある[2]。したがって、炭素鋼が不働態化せず全面腐食すると考えられる場合には、必要な腐食代を設けることで対応が可能と考えられる。なお、腐食生成物の存在によって炭素鋼の腐食速度が増加したとの報告[3]があり、この現象についてはメカニズムの解明が今後の課題である。

チタンは想定される処分環境においては常に不働態化領域にある。このことから、微小速度の不働態皮膜の成長が進行する。しかし、この不働態化を阻害するような要因、例えば構造的すきまの存在、環境中の有害なイオンの存在によって局部腐食(すきま腐食)を発生する場合もあるが、温度、塩分濃度ならびにチタン合金の材質を検討することにより、これを防止することも可能である。

銅は中性環境で不働態化し、表面に安定な酸化皮膜( $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ )が形成される。この酸化皮膜を維持しつつ全面腐食が進行し、環境が還元性に変化すると銅は不働態域に入り、金属として安定な状態になることから、それ以上の腐食が進行しないことになる。一方、不働態化した銅の腐食形態は酸化皮膜の安定性によって左右されるものと考えられる。つまり酸化皮膜が中性、アルカリ性領域で安定であれば上記のように全面腐食が進行するが、

イオウ化合物等の溶存イオン種の影響により酸化皮膜の安定性に影響が生じると局部腐食生起の可能性もある。さらに、ガラス固化体挿入後の作業は高線量場における遠隔操作となるので、材料選定に際しては遠隔作業に重点をおいた製作性も考慮する必要がある。

### 3.2.2 オーバーパックの設計の考え方

#### (1) 耐食性から設定される設計条件

炭素鋼については、設計上、全面腐食するものと仮定し、処分孔に持ち込まれた酸素が消費されるまで酸素による腐食が進展し、その後、地下水の還元による腐食が進展するものとして腐食代を設定する。

- ① 酸素による腐食：1000 年以上の長期を考慮する場合には、腐食量は処分場に持ち込まれた残存酸素量の消費による腐食を計算して求める[4]。
- ② 水の還元による腐食：中性で静止した 100 °C 以下の脱気溶液中における炭素鋼の腐食速度は、1 年後には 0.01 mm/y 以下になると実験データより、不均一化

を考慮した腐食速度を 0.02 mm/y と仮定する[4]。

- ③ 平均侵食深さから最大侵食深さの推定：酸素による腐食においては、最大侵食深さによる評価が望ましい。次式で表される最大侵食深さと平均侵食深さの関係から、最大侵食深さの推定値を求める[4]。

$$P = X_m + 7.9X_m^{0.5}$$

P: 最大侵食深さの推定値,  $X_m$ : 平均侵食深さ

チタンは不動態化し全面腐食（皮膜の成長）の速度は極めて小さい。海水の暴露試験でも腐食速度は 0.0001 mm/y 以下であると報告[5]されており、他の研究における試験結果に基づく推定では 10 万年でも 160 オングストローム の侵食深さと評価[6]されている。従って、安全側に腐食速度を 0.0001 mm/y と設定できる。

銅は還元性環境においては不感領域に入り、腐食は起こらないという特徴がある。また、大気、土壌、海水環境で良好な耐食性（0.005 mm/y 以下）を示すこと[1]が知られている。腐食代は処分孔に持ち込まれた残存酸素量の腐食反応による消費を仮定して求めるものとし、その侵食深さに至るまでの腐食速度は 0.005 mm/y とするが、以降は腐食は進展しないと仮定できる。

オーバーパック材料については、実処分環境での腐食速度評価の精度を高めることが今後の課題である。

以上の算定方法によりオーバーパック材料の腐食代を実際の板厚を考慮せずに計算した結果を Table 2 に示す。

#### (2) 腐食生成物特性（膨張）から設定される設計条件

オーバーパックは長年月の間に腐食するが、その腐食生成物の成長による体積膨張は、オーバーパックおよび周囲の緩衝材の設計にとって重要である。鉄が腐食すると、最終的な安定状態として、 $\text{Fe(OH)}_2$ あるいは $\text{Fe}_2\text{O}_3$ になると考えられる。その際、 $\text{Fe(OH)}_2$ は Fe（金属鉄）の約 3 倍の体積、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ は Fe の約 2 倍の体積を有する。従って、鉄が地下水中、ベントナイト中で腐食して生成した腐食生成物の体積は、腐食した鉄の 2~3 倍になるものと判断される。この体積膨張の影響は、緩衝材への圧力増加ならびにオーバーパックへの反力を考慮する必要がある。

Table 2 Calculated results of corrosion allowance (mm)

材料	年数		
	1,000 年	10,000 年	100,000 年
炭素鋼	28.5	208.5	2008.5
内訳：酸素腐食	8.5	8.5	8.5
：水還元腐食	20	200	2000
チタン	0.1	1	10
銅	5	19	19

注) 10,000 年以上は参考値で、設計では反映されていない

Fig.1 Design procedure for overpack

## (3) ガス発生（圧力）から設定される設計条件

オーバーパックが腐食すると、腐食生成物の発生のみでなく、水素ガスも同時に発生する。この水素ガスが、緩衝材を通して十分に透過しなければ、圧力がオーバーパックに負荷されることになる。その最大圧力の算定は、オーバーパックの設計にとって重要となる。

## (4) 気密性・水密性から設定される設計条件

オーバーパックは、長期間ガラス固化体に地下水が触れるのを防ぐ必要があるが、この期間を 1000 年間と設定した。

## (5) 耐圧性評価条件（オーバーパックに対する荷重条件）

## (a) オーバーパックに想定される荷重の項目

埋設後オーバーパックには以下の荷重を考慮する必要がある。

- ① 地圧（地下水圧）：地盤から緩衝材を介してオーバーパックにかかる荷重は、地圧と地下水圧が想定される。地圧の中には地下水圧は含めて考えられているが、結晶質岩のように自立性があり、設計寿命期間中に直接緩衝材に地圧がかかる可能性が極めて低い場合は、地下水圧が単独でかかるものとする。
- ② 緩衝材の膨潤圧：緩衝材に関して、本報告では、施工時の乾燥密度は  $2 \text{ g/cm}^3$ （ケイ砂 20 %、ベントナイト 80 %）で設定した（4.2.3 緩衝材の設計仕様 参照）。また、緩衝材と周辺岩盤等との隙間を 5 cm とした場合、膨潤後の密度は  $1.73 \text{ g/cm}^3$ （4.2.3 緩衝材の設計仕様 参照）となる。ここでは、有効粘土密度を用いた実験式[4]を基に、膨潤圧を  $1.1 \text{ MPa}$  と設定した。
- ③ 腐食生成物膨張圧（オーバーパックの腐食に対する緩衝材の反力）：オーバーパックが腐食する場合、腐食生成物の密度は、腐食前の密度よりも小さいことから、オーバーパックの体積が膨張することになる。これに対して処分孔の空間は変化しないと保守的に仮定すると、緩衝材が徐々に間隙水を排出しながら圧密され、この圧密にともなって緩衝材からの反力がオーバーパックに作用する。この圧密反力をオーバーパックに対する外荷重として考慮する必要がある。
- ④ 生成ガス蓄積圧：水の還元型腐食の進行によって水素ガスが発生し蓄積する。緩衝材中の透気量とガス発生量とのバランスに基づいた解析から、ガス破過時の最大圧力として  $2 \text{ MPa}$ （4.2.3 (7) 透気性 参照）を設定する。

## (b) 荷重の足し合わせの考え方

## a) 地圧と緩衝材の膨潤圧の組合せ

岩盤が結晶質岩の場合：花崗岩は堅固でクリープ変形は小さく、オーバーパックの設計寿命 1000 年では、空洞は自立するものと考えられるため、オーバーパックには直接地圧荷重は作用しない。したがって、オーバーパ

ックにかかる荷重は、地下水圧と緩衝材の膨潤圧を足し合わせたものとなる。

岩盤が堆積岩の場合：堆積岩は空洞が地圧によってクリープ変形すると言われていることから、埋め戻し後岩盤が変形・収縮して初期地圧に回復するものと仮定する。地圧の方が緩衝材の膨潤圧よりも大きい場合は、緩衝材はその反力が初期地圧と均衡するまで圧密されると考えられる。したがって、膨潤圧に地下水圧を加えた値と地圧とを比較し、その大きいほうをオーバーパックへの荷重とする。

## b) 地圧と腐食膨張圧の組合せ

前述したように、オーバーパックに腐食が生じた場合、オーバーパックが体積膨張するが、膨張が拘束された状態では、圧力（腐食膨張圧）が発生することになる。地圧と腐食膨張圧の組合せは、a)で示した膨潤圧と同じ考え方で設定でき、オーバーパックの腐食が進行してゆくと、腐食膨張圧（膨潤圧を含む）のほうが地圧よりも大きくなる。ここでは、堆積岩の場合も、岩盤の変形による腐食膨張圧の圧力低下は考慮せずに、保守側の条件として岩盤は弾性変形以外の変形はしないものとした。

## c) 生成ガス蓄積圧（破過圧）

生成ガス蓄積圧に関してはその挙動が不明なこと、その値が  $2 \text{ MPa}$  程度で大きな影響を持たないことから保守的に前記の荷重に足し合わせて考えるものとする。

以上の考え方をまとめて、荷重足し合わせのフローを Fig.2 に示し、作用する荷重を定めた結果を Table 3 に示す。

## 3.2.3 オーバーパックの設計仕様

## (1) 材質選定

オーバーパックは、圧力を内包しないため圧力容器とはならないが、ガラス固化体を封入することから、高度の品質が要求される。この点で、具体的な材質の選定に当たっては、JIS B 8270（圧力容器基盤）の材料使用制限、成形加工上の制限、韌性および割れ感受性から炭素鋼を主な候補材料とした。より広範な処分環境を考慮して、外側に耐食層としてチタン、銅を用いた複合オーバーパックも検討した。

チタン、銅については、耐食上の観点から選定すべきであるが、被覆材としての溶接性、板材からの曲げ加工性、製作精度確保の点から機械加工性、そして経済性を考慮する必要がある。

## (2) 構造

オーバーパックの内部空間の大きさは、ガラス固化体寸法（外形 430 mm、高さ 1335 mm）に対して遠隔操作時の精度を考慮し、内径 440 mm、内部高さ 1350 mm とした。

オーバーパック本体構造は、緩衝材を効率的に設置するためには、外面形状として円筒形がよく、単体及び複合オーバーパックいずれの形態も表面に突起物を形成

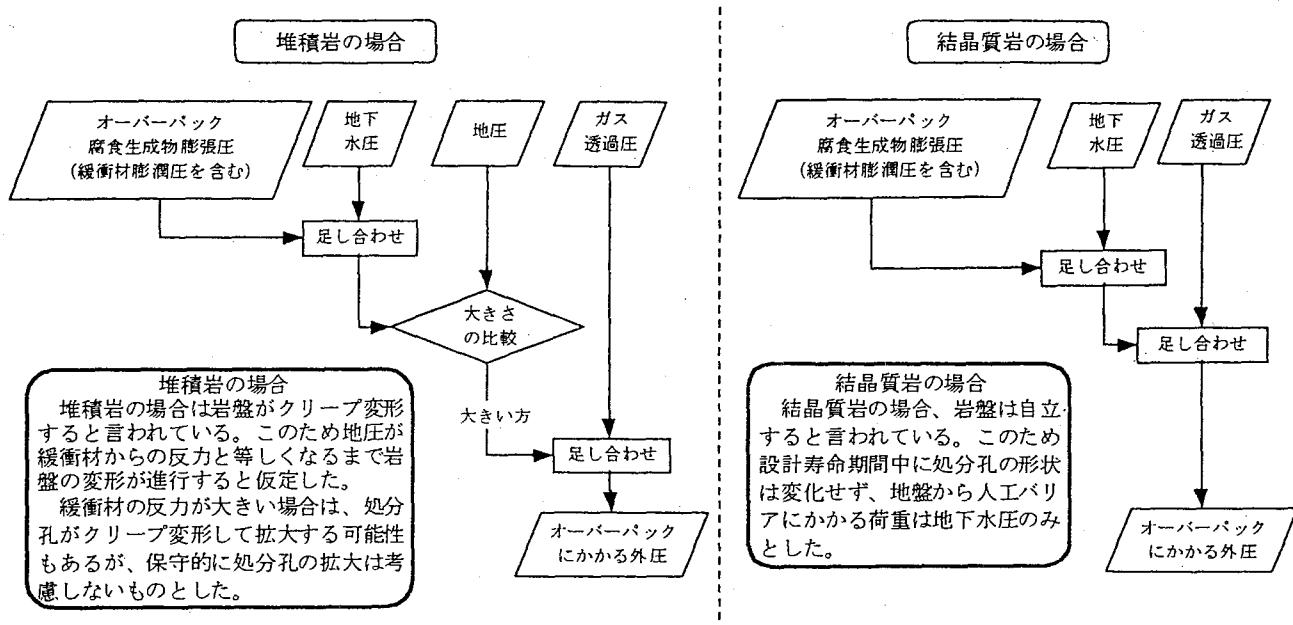


Fig.2 Combining procedure of loads

Table 3 Calculated results of load for crystalline and sedimentary rocks

地層の種類	深さ(m)	初期地圧(MPa)	地下水圧(MPa)	緩衝材密度(g/cm³)	緩衝材厚さ(cm)	緩衝材膨潤圧(MPa)	耐食層材質(MPa)	オーバーパック腐食膨張圧(膨潤圧を含む、MPa)		ガス圧(MPa) 注2)	荷重(MPa) 10³年
								10³年	10³年		
結晶質岩	1000m	(26)	9.8	2.0	40	1.1	炭素鋼	16.7	2.0	28.5	
							チタン	4.3	—	14.1	
							銅	5.5	—	15.3	
堆積岩	500m	10	5.1	2.0	40	1.1	炭素鋼	16.7	2.0	23.8	
							チタン	4.3	—	10.0	
							銅	5.5	—	10.6	

注 1) 地圧は仮に土被り圧(堆積岩密度 1.9g/cm³、結晶質岩密度 2.6 g/cm³)を用いた。

注 2) チタンおよび銅は腐食に伴なう水素ガス発生量が少ないため、ここではガス圧を無視した。

注 3) 地震、せん断荷重は考慮していない。

しない構造とする。蓋構造について、品質、施工性、検査、ガラス固化体への影響及びハンドリング性を考慮する必要があり、製作性を考え平板型の蓋を採用した。また、オーバーパックに対する荷重は外圧荷重であり、溶接の熱影響や施工時間を考慮すると溶接部の体積は小さいことが望ましいため、蓋に対する外圧を支圧面で支える構造を設定した。

### (3) オーバーパックハンドリング構造

オーバーパックの通常作業／縦置き定置作業におけるハンドリング構造案としては、ガラス固化体を確実に取り扱うという点を重視し、オーバーパック蓋面側(上部)に吊部を設ける方法を選定した。

### (4) 複合オーバーパックの被覆

複合オーバーパックの被覆構造の検討に当たり考慮すべき点は、①長期間にわたる水密性・シール性、②施

工法の信頼性、③施工法の実績、および、④接合部に対する非破壊試験、などである。

被覆方法は、現状の技術においては、予め成形したものを圧入等の方法により、炭素鋼製の強度層の外側にはめ込むか、直接巻き付けるかの方法が考えられる。

### (5) オーバーパックの板厚

Table 3 に示したオーバーパックに作用する荷重に対する強度層の必要板厚を有限要素法を用いた座屈解析により算定した。板厚、荷重をパラメータとして、円筒胴部の座屈に対する評価曲線(塑性ひずみが 1%を超える荷重と板厚の関係)を作成し、ASME、告示 501 号に従い安全率 3.0 を用いた。蓋板の厚さは、告示 501 号の平板の式に基づいて設定した。

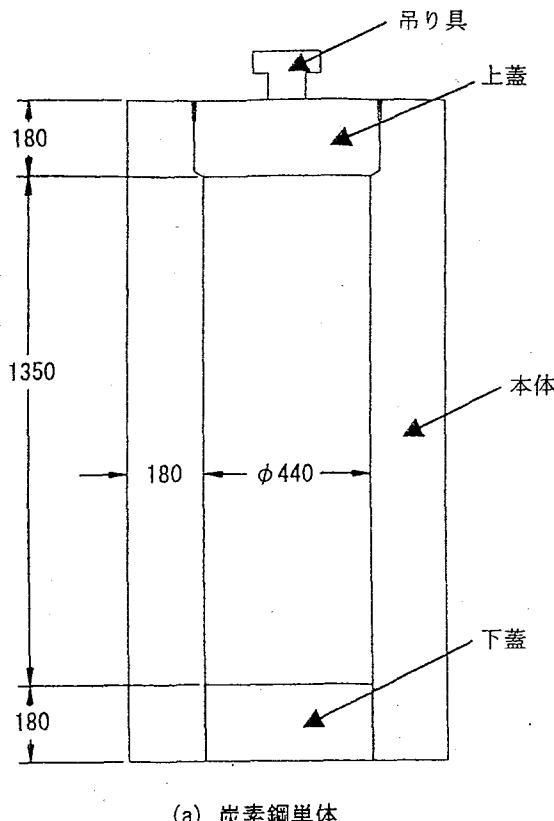
深さ 1000 m の結晶質岩の場合、強度層材としての炭素鋼の胴部の厚さとして、炭素鋼単体の場合 135 mm、チタ

ン複合オーバーパックの場合 60 mm, 銅複合オーバーパックの場合 69 mm, の結果を得た。ただし、炭素鋼単体については、放射線の影響による局部腐食の進展を防止する観点から腐食代以外に厚さ 150 mm を設定した例[4]も合わせて評価し、ここでは 150 mm とした。

一方、深さ 500 m の堆積岩の場合にはこれらよりも小さな値となったので、以下の検討では深さ 1000 m の結晶岩を対象とした板厚を設定した。この結果を基に、炭素鋼単体の場合、1000 年で必要とされる腐食代 30 mm (28.5 mm に余裕を加えた値) を足し合わせ、180 mm を炭素鋼オーバーパックの板厚として設定した。チタン複合オーバーパックの場合は強度層のみの厚さとして 60 mm、銅複合オーバーパックの場合は強度層のみの寸法として余裕を見て 70 mm とした。なお、チタン複合オーバーパックの場合、耐食層（チタン）の厚さとして、後述の製作性を考慮して 10 mm とした。

蓋板の厚さについては、強度層の厚さとして、炭素鋼単体の場合 150 mm (腐食代 30 mm を足し合わせて 180 mm)、チタン複合オーバーパックの場合 90 mm、銅複合オーバーパックの場合 100 mm とした。なお、チタン複合オーバーパックの場合、上蓋での吊り具の取り付け部の厚さを 50 mm としている。

以上により求められた炭素鋼単体およびチタン複合オーバーパックの寸法・形状を Fig.3 に示す。



(a) 炭素鋼単体

### 3.3 オーバーパックの製作方法の検討

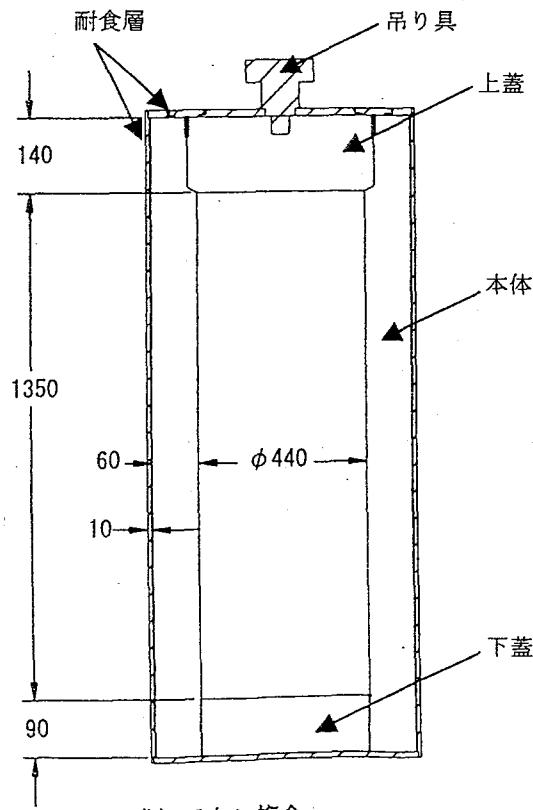
#### 3.3.1 オーバーパック製作の前提条件

オーバーパックの製作工程は、放射線源の無い状態のガラス固化体収納前の空のオーバーパックを素材から製作する工程と、高線源下で遠隔操作が必要となるガラス固化体収納後のオーバーパック本体と蓋を接合する工程とに大別される。前者の空オーバーパック製作は処分場の外でおこなわれ、処分場に運搬される。後者のオーバーパック本体と蓋との接合作業は、処分場の地上施設で行われるものとする。各施設での工程ブロックフローを Fig.4 に示す。

- ① 製作施設：基本的な形状まで加工した部材を受け入れ、オーバーパックの胴体部の組立と蓋部及び付属部品を製作する施設。
- ② 地上施設：空オーバーパック（胴体部及び蓋部）を受け入れ、ガラス固化体の収納、オーバーパック蓋部の接合、検査及び搬送を行う施設。
- ③ 地下施設：地上施設から搬送されたオーバーパックの処分場内の搬送を行い、処分坑道、又は処分孔に定位する施設。

#### 3.3.2 オーバーパック蓋

オーバーパックの構造としては、溶接品質、施工性、装置化を総合的に判断して落とし蓋方式を採用した。水密性及び法規制上の要求から封入性を確保するため、



(b) チタン複合

Fig.3 Concept of overpack

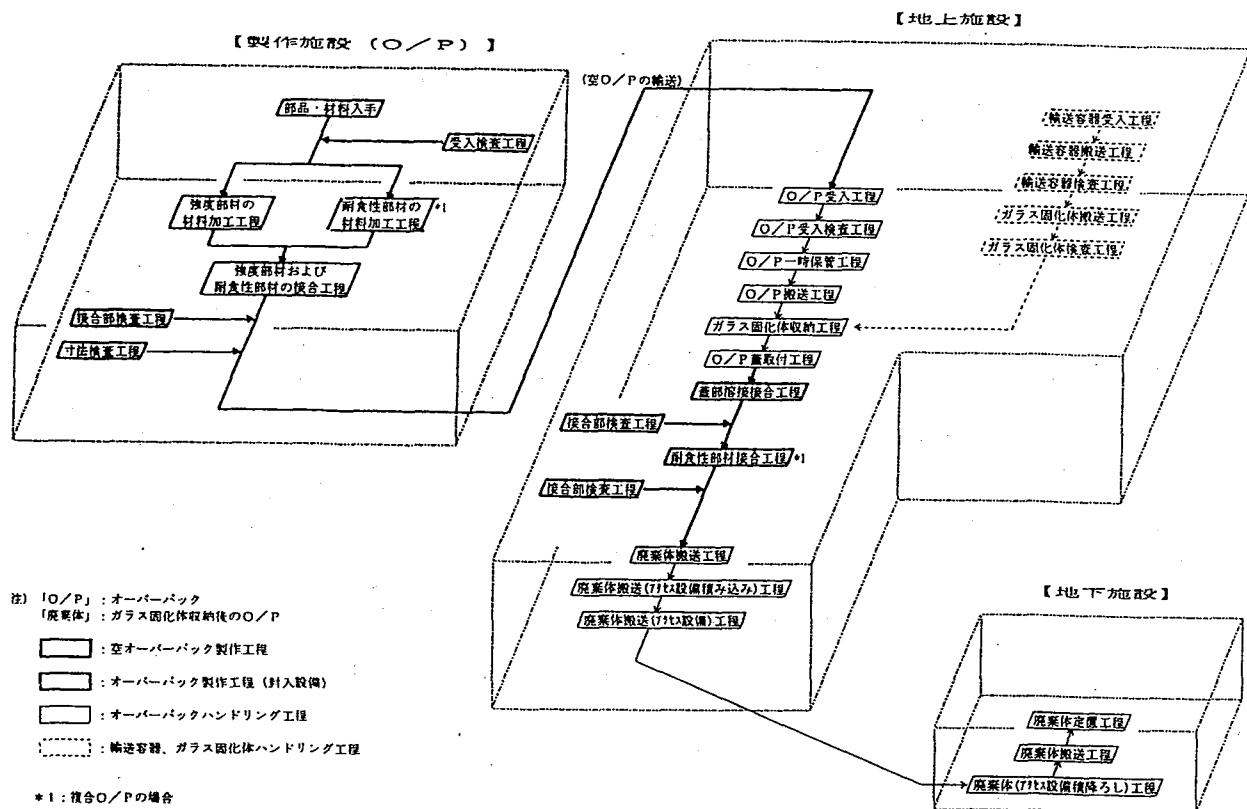


Fig.4 Manufacturing and handling processes of overpack at disposal facilities

漏洩試験または代替検査としての非破壊検査の実施が必要になる。また、これとは別に腐食代を担保するための蓋接合部の非破壊検査が必要になる。

複合オーバーパックは、強度層に封入性が要求されないため、本体胴溶接部に対する腐食代を担保するための非破壊検査は要求されない。一方、耐食層は、漏洩試験または代替検査としての非破壊検査の実施が必要になる。また、単体オーバーパックと同様に腐食代を担保するための蓋接合後の接合部の非破壊検査の実施が必要と考えられる。

### 3.3.3 複合オーバーパック耐食層

耐食層の最小必要厚さは、チタンの場合 1000 年の設計寿命で 0.1 mm であるが、製作時の取扱い、ハンドリング時の損傷対策などを考慮すると、耐食層の厚さとして 3 ~ 10 mm 程度が適当と判断され、ここでは 10 mm とした。チタンを被覆材とする場合の一般的な接合方法として、現状の技術では溶接、爆発圧着、圧延圧着、ろう付等がある。

## 3.4 オーバーパックの品質管理・検査

### 3.4.1 品質管理の考え方

オーバーパックが放射性物質の輸送容器等と大きく異なる点としては、① 運用期間が超長期であること、② 運用期間中（埋設後）は、定検、改造等が行えない（あるいは

は行わない）こと、③ 運用環境が地下深部であり、物理的、化学的に環境条件が複雑でサイトスペシフィックであること、が挙げられる。

以上のようなオーバーパックの製作上管理すべき項目として、以下が考えられる。

- ① 十分な空間寸法の確保
- ② 製作時の許容温度の設定(ガラス固化体の転移温度 500°C 以下)
- ③ 腐食代の担保
- ④ 強度上必要な板厚の確保
- ⑤ オーバーパック材料の耐熱性及び耐放射線性の確認

### 3.4.2 検査方法

材料購入、工場での部品製作、現地での封入の各段階毎のオーバーパック品質管理項目、検査方法、検査装置の関係をTable 4 に示す。特に現地封入段階では遠隔による以下の検査が必要であると判断した。

#### ① 超音波探傷試験検査

超音波探傷試験(UT)は、腐食代の担保として行うこと、及び漏洩検査の代替試験として実施する。炭素鋼単体オーバーパックについては炭素鋼溶接部が、チタン及び銅複合オーバーパックについては被覆材溶接部が検査の対象となる。具体的な検査方法をTable 5 に示す。

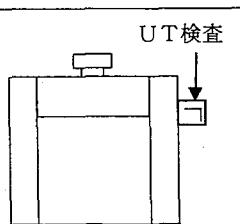
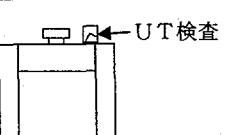
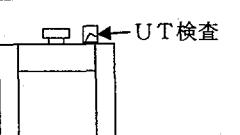
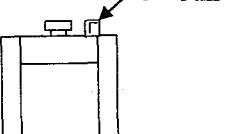
#### ② 漏洩試験検査

「廃棄物の事業に関する規則」(昭和 61 年 12 月 23 日総理

Table 4 Quality control and inspection method for overpack

建設ステップ*	要求される品質管理項目	管理項目	検査方法	検査装置
材料購入	ガラス固化体保管空間の確保	内径、内部高さ	材料ノカでの寸法実測と受入時の記録確認	なし
	強度部材料の品質確保	化学成分、機械的強度、非破壊試験	ミルシートと購入仕様書内容との照合	なし
	本体胴、蓋板の設計寸法の確保	板厚、全長、真円度、表面粗度	材料ノカでの寸法実測と受入時の記録確認	なし
	被覆材の品質確保	化学成分、機械的強度、非破壊試験	ミルシートと購入仕様書内容との照合	なし
	被覆材設計寸法の確保	板厚、所定寸法	ミルシートと購入仕様書内容との照合	なし
	溶接材料	化学成分、機械的強度	溶接材料証明書と購入仕様書内容との照合	なし
工場部品製作	強度部材料の材料確認	管理ラベル、手配ラベル	シート、購入仕様書と現物の管理ラベルの照合	なし
	被覆材の材料確認	管理ラベル、手配ラベル	シート、購入仕様書と現物の管理ラベルの照合	なし
	適用溶接条件の確認	電流値、溶接材料、溶接条件	溶接施工要領書内容との照合	なし
	適用溶接士技量の確認	技量、資格	溶接士名簿の確認	なし
	溶接部の健全性確認(腐食代の担保)	非破壊試験	UT試験	UT検査装置
	溶接部の健全性確認(封入性の確保)	漏えい試験または代替検査としての非破壊試験	漏えい試験または代替検査としてのUT、PT	漏えい検査装置(UT、PT検査装置)
	工場完成部品の健全性確認	外観、寸法検査	外観検査、寸法検査	寸法検査装置
現地封入時	使用部品の健全性確認	試験検査記録	工場検査記録の確認。受入検査。	なし
	適用溶接条件の確認	電流値、溶接材料、溶接条件	溶接施工要領書内容との照合および	なし
	適用溶接士技量の確認	技量、資格	溶接士名簿の確認、遠隔溶接の技量確認。	なし
	溶接部の健全性確認(腐食代の担保)	非破壊試験	UT試験	遠隔UT検査装置
	溶接部の健全性確認(封入性の確保)	漏えい試験または代替検査としての非破壊試験	漏えい試験または代替検査としてのUT、PT	遠隔漏えい検査装置(遠隔UT、PT検査装置)
	完成品の健全性確認	外観検査	外観検査	遠隔外観検査装置

Table 5 Ultrasonic examination for overpack

形状	材質板厚 mm	探査深さ mm	余盛り除去	UT検査				検査位置
				深触子	接触媒体	検出能	検査位置、幅	
単体 オーバー パック	炭素鋼 180	50	不要(胴部 より検査)	垂直探傷 高温	高温用接触媒体 (摺動性、検査後 の剥離性に難有)	高	胴側面から 検査	
				垂直探傷 常温	水	高	胴側面から 検査	
	チタン 10	200	不要(胴部 より検査)	垂直探傷 高温	高温用接触媒体 (摺動性、検査後 の剥離性に難有)	高	胴側面から 検査	
				垂直探傷 高温	水	高	胴側面から 検査	
複合 オーバー パック	チタン 10	10mm 裏当付	不要(斜角 探傷)*1	斜角探傷 高温	高温用接触媒体 (摺動性、検査後 の剥離性に難有)	検出能にや や難有	蓋上面より 検査	
				斜角探傷 高温	水	検出能にや や難有	蓋上面より 検査	
			必要 (垂直探傷)	垂直探傷 高温	高温用接触媒体 (摺動性、検査後 の剥離性に難有)	検出能にや や難有	蓋上面より 検査	
				垂直探傷 常温	水	検出能にや や難有	蓋上面より 検査	

\*1 探査触子の走査範囲によっては必要になる。

府令第73号)中の規定を準用し、「封入されていること」を確認するための方法として耐食層の漏洩試験または代替試験としての非破壊検査の実施を行う。単体オーバーパックについては炭素鋼本体の溶接部が、複合オーバーパックについてはチタン被覆の溶接部が漏洩試験の対象となる。

漏洩試験方法としては、化学的に最も安定な不活性ガスを使用するヘリウムリーク試験が、現時点では最も可

能性の高い方式と考えられる。Table 6にヘリウムリーク試験方法のオーバーパックへの適用性をまとめて示す。

#### 4 緩衝材の設計・製作

##### 4.1 緩衝材の要件項目

緩衝材の設計を合理的に行うためには、緩衝材周辺での現象を時間経過に従って把握しておくことが必要であ

Table 6 Evaluation of He leak tests for overpack

	加圧法及び真空法		加圧-真空方式	溶接前ヘリウム充填
	製作施設 (工場)	蓋溶接後 (現地)	蓋溶接後 (現地)	蓋溶接後 (現地)
現状技術による フィージビリティ	○	○	△	△
検査によるオーバー パックへの影響	○	×	○	○
検出精度	○	○	△	△
遠隔操作法	—	△	△	△
技術的課題	—	(1)ヘリウム注入孔ま たは減圧孔の検査 後の遠隔密封法開 発	(1)検査時のヘリウム残留量 に係わるR&D (2)遠隔操作式チャンバの開 発 (3)漏洩試験パラメータ確認	(1)微小欠陥からのヘリウム 流入量に係わるR&D (2)遠隔操作式耐圧容器、チャ ンバの開発 (3)漏洩試験パラメータ確認

要件項目	要件項目内容	カテゴリ ※	時間軸(年)			
			0 O/P定置前 操業期間	100前後 O/P定置 緩衝材冠水 地下水O/P接触	250 緩衝材冠水 地下水O/P接触	1,000 O/Pの設計 対象期間
①止水性	地下水の移動を抑制すること	A		不飽和		飽和
②自己シール性	緩衝材ブロック間および緩衝材と周辺岩盤とのすき間を充填すること	A	—	—	—	—
③核種収着性	核種移行を遅延すること	A				—
④熱伝導性	廃棄体の発熱によりバリア機能が低下するほどのバリア内の温度上昇を抑制すること	B		—	—	—
⑤化学的緩衝性	ペントナイト間隙水のpHを適正に維持すること	C			—	—
⑥オーバーパック支持性	オーバーパックを固定支持すること	B		—		—
⑦応力緩衝性	オーバーパック腐生成物により生じる応力、周辺岩盤から人工バリアにかかる応力を緩和すること	B			—	—
⑧透気性	オーバーパックの腐食により生成するガスによる、人工バリア破過および核種放出率の上昇を防止すること	B		—	—	—
⑨コロイド透過性	コロイドを濾過すること	A				—
⑩長期健全性	長期にわたりバリア機能が低下するほど変質、流出しないこと	C	—	—	—	—
⑪製作・施工性	製作、定置上の容易性、経済性を満足すること	A	—	—	—	—

※ カテゴリA: 緩衝材単独として設計する要件項目。  
 カテゴリB: 人工バリアシステム全体の設計において考慮する要件項目。  
 カテゴリC: 性能評価等において確認する要件項目。

Fig.5 Relationships between requirements for buffer and time

る。Fig.5には、緩衝材の設計にあたって抽出した要件項目とその分類を、検討すべき期間とともに示す。ただし、図中に示した時間は厳密なものではなく、現段階における概略の設定値である。

## 4.2 緩衝材の設計

### 4.2.1 緩衝材候補材料とその基本的性質

#### (1) 緩衝材の候補材料

緩衝材は、前述の要件を満たすとともに、かつ大量に安価に利用できる材料という観点から幾つか候補が挙げられる。すなわち、天然の粘土、砂、破碎した岩石、ペントナイト等であるが、実際には、これらの中、ペントナイトが有力視されている。その理由は、ペントナイトがモンモリロナイトという膨潤性に富んだ粘土鉱物を主成分としているので、水との接触によって膨潤し、隙間を充填する自己シール性の機能を有すること、低透水性を有すること、また砂などを混入することによって熱伝導性の改良やオーバーパック支持性等の機能を期待できることである。さらに、陽イオン交換性、核種の吸着性などの性質を持つことも緩衝材の材料として適切である。

ペントナイトには、Na型ペントナイトとCa型ペントナイトがある。Na型ペントナイトは、交換性陽イオンが主として $\text{Na}^+$ イオンからなるモンモリロナイトを多く含有しており、膨潤性、止水性、増粘性、懸濁安定性、耐熱性に優れている。Ca型ペントナイトは、交換性陽イオンが主として $\text{Ca}^{2+}$ および $\text{Mg}^{2+}$ イオンからなるモンモリロナイトを主成分とするペントナイトであり、密度がある程度高い場合には、膨潤圧はNa型ペントナイトよりも大きく、粘結力は大きいが、Na型ペントナイトよりも止水性が低く、膨潤率、増粘性、懸濁安定性、耐熱性に劣る。

#### (2) 候補材料の基本的性質

緩衝材の候補として取り上げたペントナイト等の材料について、期待される機能についての基本的性質を調査した。

##### (a) 透水特性

緩衝材が低い透水性を有することは、オーバーパックへの地下水接触の遅延および緩衝材中の地下水移動の抑制において重要な機能の一つである。

ペントナイト配合率が5~20%の範囲では、ペントナイト量の増加に伴い透水係数は著しく低下するが、20%以上になると透水係数の低下の割合が小さくなる特性がある[7-13]。ペントナイト配合率が5~20%の場合、透水係数は $1 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-10} \text{ cm/sec}$ の範囲で大きく変化しているが、20%以上では $5 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ cm/sec}$ の範囲にあることが得られている。

混合する骨材の粒度分布を変化させたペントナイト系材料の透水試験の結果では、ペントナイト配合率が小さ

いときには骨材の粒度特性が透水係数に与える影響が大きく、ペントナイト配合率が20%以上になると、その影響も小さくなるという結果を得ている。ペントナイト配合率が20%以上であれば、多少膨潤変形しても、透水係数の変化は小さいものと考えられる。

##### (b) 力学特性

緩衝材の候補材料であるペントナイトあるいは砂・ペントナイト混合材料の力学特性について概説する。

##### a) 締固め特性

Na型のペントナイトは、含水比を調整することにより大きな乾燥密度に締固めることができ可能である。一方、Ca型のペントナイトは、締固め圧力を大きくしても、乾燥密度はあまり大きくならず、また含水比を変化させても乾燥密度の上昇は小さい。

実際の緩衝材の締固めに際しては、製作装置の特性なども考慮して緩衝材に求められる機能を担保するための締固め密度の目標値を決めていく必要がある。

##### b) 膨潤特性

膨潤性は、緩衝材に求められている重要な特性の一つである。ここでは、主に締固めたペントナイトの膨潤特性について述べる。

膨潤特性を調査する方法は、大きく分けて2種類の試験方法がある。一つは、変形を拘束した状態で膨潤圧を測定する試験、もう一つは、圧力一定の下での膨潤変形量を測定する試験である。

ペントナイトの膨潤圧は、試料の乾燥密度によって大きく変化するが[14]、種々の試験結果を比較すると、乾燥密度が同じでも大きな差異が認められる。この膨潤圧測定データの違いは、主にペントナイト中の粘土鉱物であるモンモリロナイトの含有率の違いと供試体作製時の締固め圧力の取り扱いの違いに起因するものと考えられる。また、ペントナイト間隙中の水質も膨潤特性に大きな影響を及ぼすことが知られている[15,16]。

したがって、ペントナイトの膨潤特性や自己シール性を検討する場合、モンモリロナイト含有率、密度さらに浸水する地下水の水質の性状の把握が重要になるものと思われる。

##### c) 圧密特性

ペントナイトの圧密特性については、先の透水特性や膨潤特性と比較して、測定データや研究例も少ないようである。特に、緩衝材の候補材料である高密度に圧縮したペントナイト（圧縮ペントナイト）の圧密特性に関するデータは十分ではない。圧縮ペントナイトの圧密特性として、圧密試験より得られた圧密降伏応力は、膨潤圧より大きな値を示すことが報告されている[17]。

処分施設の長期的な力学安定性を評価するためには、緩衝材の一次圧密特性だけでなく、二次圧密特性を把握することも重要であり、さらに、膨潤特性と同様に圧密

特性にも水質の影響が重要であることが指摘されている。このような現象を定量的に評価することも、処分施設の力学的な安定性を議論する上で必要であり、さらなるデータの蓄積が必要と考えられる。

#### d) 強度変形特性

締固めたペントナイトの強度変形特性についても測定データが少なく、最も多く実施されているのが一軸圧縮試験である。含水比が10%程度で一定の場合、一軸圧縮強度および弾性係数は、乾燥密度の増加に伴い直線的に増加する。また、含水比が10~15%以上になると、一軸圧縮強度は小さくなり、弾性係数が低下すなわち変形しやすくなることが伺われる[18]。締固めたペントナイトの強度変形特性は、ごく限られた条件でのデータしか取得されていないのが現状であり、今後、緩衝材の強度特性に関するデータの精度を高めるためには、①種々の条件下での三軸圧縮試験の実施による特性の把握、②長期的なクリープ特性に関するデータの取得、③ペントナイトの強度変形特性に関する広範囲な水質の影響を考慮したデータの蓄積などが必要である。

#### (c) 熱特性

ガラス固体からの崩壊熱によって、緩衝材中のモンモリノサイトが変質し、緩衝材の機能が劣化することを防ぐため、緩衝材の温度が高くなりすぎないように、廃棄体の配置間隔を適切に決める必要がある。熱解析に必要な緩衝材の熱物性である熱伝導率と熱容量の算定に必要な比熱について述べる。

ペントナイトの熱伝導率は、乾燥密度が大きいほど、また含水比が高いほど大きくなる[19,20]。さらに、ペントナイトに砂を混入することにより、熱伝導率を改善することが可能である。土の比熱は、水の比熱が土を構成する鉱物の比熱に較べて非常に大きいため、含水量の影響を大きく受ける。圧縮ペントナイトの比熱の含水比(水分量)依存性を調べた実験でも、含水比が増加すると圧縮ペントナイトの比熱が増大することが確認されている。なお、温度勾配下で、水分が移動し、含水比が変化することも念頭に置いておく必要がある。

#### (d) 化学的性質

ペントナイトは地下水と反応し、種々の化学反応により地下水組成を緩衝する化学的緩衝性を有する。地下水化学の主たる特徴は、pH、酸化還元電位、イオン濃度であり、これらはペントナイト間隙水中での元素の溶解度や放射性核種のペントナイトへの吸着性に影響を及ぼす。主な反応は粘土鉱物中のイオン交換成分と地下水中的カチオンとのイオン交換反応、粘土鉱物や随伴鉱物の溶解反応である。ペントナイトへの放射性核種吸着現象は、緩衝材からの核種漏出を遅延させる重要な役割を担うもので、処分システムの性能評価で吸着現象を考慮するためのいくつかのモデルと吸着パラメータが提唱されてい

る[19]。

#### (e) 長期安定性

人工バリアシステムの性能の変化を正確に予測することは、現状の技術では困難と思われるが、ここでは、システム構成要素材料の化学的変化や物理的影響を現状の知見の範囲で性能評価に取り入れ、より現実的な評価、あるいは保守的な評価を行うこととする。以下に緩衝材に関するそれぞれの物理的、化学的変質作用について記述する。

##### a) イライト化反応

ペントナイトの要求性能を満足させる主要鉱物であるスメクタイトは、天然の続成作用、熱水作用によりイライト化することが知られている。イライト化することによって膨潤性、可塑性、陽イオン交換容量(CEC)及び吸着性がスメクタイトよりも低下する可能性がある。

##### b) カルシウム化反応

掘削坑道のコンクリート覆工が地下水と接すると大量のカルシウムを溶出し、緩衝材としてナトリウム型ペントナイトが用いられた場合、イオン交換反応によりカルシウム型に変質する可能性がある。ナトリウム型ペントナイトがカルシウム型に変質した場合、緩衝材の透水性、核種吸着性、核種溶解度など、諸特性が変化する可能性がある。

##### c) その他の反応

上記以外のペントナイトの長期にわたる反応として、以下の現象がある。

- ・透水性が大きくなるゼオライト化。
- ・シリカの沈殿により、スメクタイトの間隙率が低下し、止水性の上昇に繋がる可能性が考えられるシリカセメントーション。
- ・弱酸性条件下では、低温でもスメクタイトの層間にアルミニウムハイドロキシ錯体が固定されることにより、緩衝材のCECや膨潤性が低下する可能性。
- ・酸化条件下では、鉄-オキシハイドロオキサイドによるセメントーションの発生及びスメクタイト層間での鉄ハイドロキシ層の形成。

##### d) 緩衝材の流出

ペントナイトは、周辺岩盤中に亀裂が存在あるいは発生する場合、膨潤性により亀裂内への流出が起こると考えられており、実験室において流出の速度データの測定が行われている。また、緩衝材の膨潤による亀裂開口部等への侵入については、小型の模擬実験が行われ、拡散による侵入速度に関する実験式の設定等がなされている[21]。

一方、侵食現象については、粘度計試験から求めたペントナイト粒子の結合強度と理論的に求めた抗力との比較検討が行われており、ペントナイト粒子を剥離させるのに必要な地下水の限界流速は $10^{-2}$  cm/s以上というこ

とが示唆されている[1].

#### (f) 微生物による影響

緩衝材の長期安定性に対する微生物の影響としては、ペントナイトに含まれる有機物の分解によるガス発生の可能性の検討がなされている。二酸化炭素、メタン等は、有機物の分解によって生産されるガスであるが、特に、易分解性有機物が多く存在する場合には、顕著な量が発生する可能性があり[22]、処分施設内部のガス圧力変化の影響の観点から重要である。

#### 4.2.2 緩衝材の設計の考え方

緩衝材の設計において、具体的にコントロールできる設計パラメータは緩衝材の厚さ、密度、材質（ペントナイト含有率等）であるが、現段階において要件項目のすべてについて定量的な値が示されているわけではない。このことに配慮しながら、Fig.6 に示す設計フローを構成した。このような要件項目と設計フローに関する一連の検討について、その背景とねらいはオーバーパックと同様である（3.1 及び 3.2 参照）。

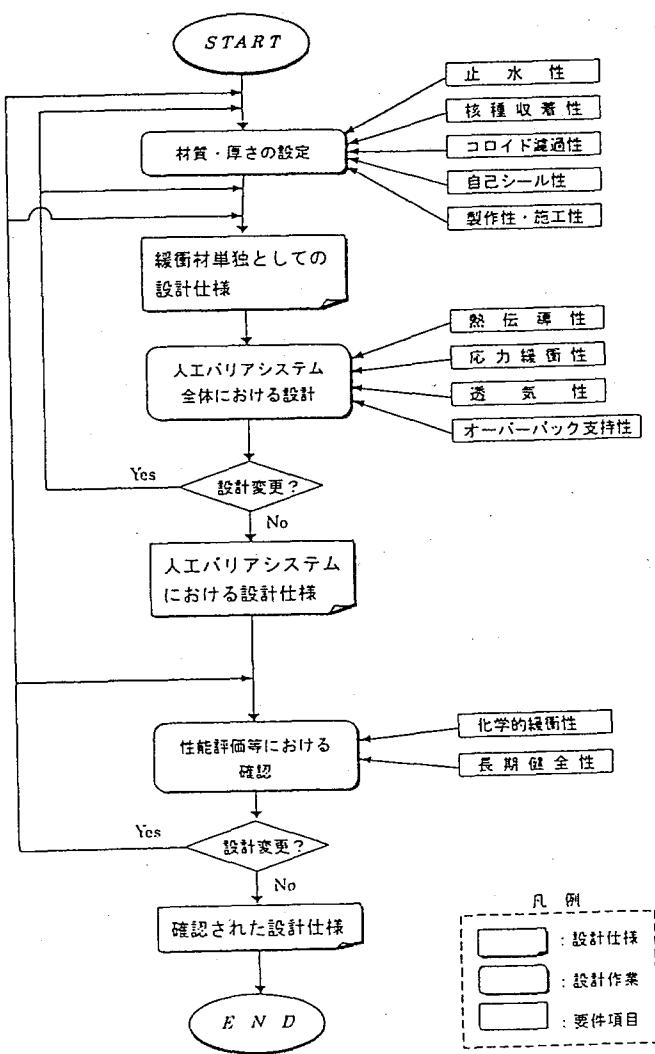


Fig.6 Design procedure for buffer

設計上の基本的考え方は、既存の文献等を参照して[1]、地下水の動水勾配を設定したのち、緩衝材の透水係数、厚さおよびオーバーパックの開口時間をパラメータとした核種移行解析を実施した。核種移行解析結果より、上記のパラメータが核種移行に与える影響を検討し、その結果、緩衝材内部が拡散場を維持し、また核種移行を抑制する機能に対して、緩衝材厚さと透水係数をこれ以上保守側に設定しても顕著に向かうしない値を、緩衝材に必要な厚みと透水係数とし、厚さを 30 cm、透水係数を  $1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  以下と設定した。

この緩衝材の必要厚さと透水係数を前提として、Fig.5 に示すような緩衝材に求められる要件項目を抽出し、それらを 3 つのカテゴリに分類した。すなわち、緩衝材単独で設計を進められる要件項目をカテゴリ A、人工バリアシステム全体として設計を行う必要のある要件項目をカテゴリ B とした。また、カテゴリ A とカテゴリ B の要件項目に対して設計を行った緩衝材仕様に対して、性能評価等より安全性が担保されていることを確認する要件項目をカテゴリ C とした。

#### (1) 核種移行の観点からの緩衝材の必要厚さの設定

緩衝材の厚さを変化させて、核種漏出のパラメータサーベイを行い、緩衝材からの核種漏出挙動を計算、すなわち厚さおよび止水性による核種漏出フラックスおよび周辺岩盤における地下水中の核種濃度への影響が調べられている。その結果、緩衝材が核種漏出に対して有効に機能するための止水性を担保するためには、数 10 cm 程度の厚さが必要であることが確認されており[23]、ここではこの厚さを 30 cm とした。

#### (2) 岩盤およびオーバーパックへの膨潤圧

処分施設の断面設計やオーバーパックの設計を行うために、緩衝材の膨潤圧を適切に設定する必要がある。処分孔道閉鎖後、再冠水により緩衝材外面からペントナイトの膨潤が発生するものと考えられる。この膨潤挙動についてはサイトの地下水特性等の影響を大きく受けるため、実際にはサイトの地下水の水質の変化を考慮して、設計値を決める必要がある。

#### (3) 緩衝材の自己シール性

緩衝材は、廃棄体の定置時に生じるオーバーパックや周辺岩盤との間の隙間を膨潤により充填する役割（自己シール性）が期待されている。自己シール性を担保する指標として、緩衝材と周辺岩盤の間及び緩衝材とオーバーパックの間に生じる隙間を、緩衝材の膨潤により充填することとしつつ隙間を充填した後になお、緩衝材は膨潤圧力として 1 MPa が発生していることを条件として仮定した。

#### (4) オーバーパックの沈下の検討（オーバーパック支持性）

オーバーパックが長期の間に緩衝材中において沈下し、その結果、オーバーパック下部の緩衝材の必要厚さが不

足することが懸念されている。この問題を回避するためには以下のような2つの方法が考えられる。このような対策を講ずるためにも、今後二次圧密特性を含めた、精度の高い緩衝材の長期的な物性値を取得する必要がある。

- ① 機械的にオーバーパックの沈下が発生しない構造や対策を講じる。
- ② 沈下量を予測し、沈下する量を設計厚さに見込んで仕様の設定を行う。

#### (5) 緩衝材の応力緩衝性

緩衝材に要求される機能の一つに応力緩衝性がある。緩衝材が期待されている応力緩衝性とは、①周辺岩盤の変形によりオーバーパックに生じる応力(歪み)の緩和および②オーバーパックの腐食生成物等により生じる周囲岩盤に発生する応力(歪み)の緩和である。なお、岩盤は掘削の影響を受けるので、掘削面の近傍は自ら損傷を受けているものと考えられる。したがって、応力緩衝性の検討においてはこの点を考慮し、FEMを用いたオーバーパックの腐食膨張による周辺岩盤への影響の検討を実施する。

#### (6) 緩衝材への温度の影響

ガラス固化体は、放射性核種の崩壊により多量の熱を発生するので、この熱による周辺環境への影響について十分に検討する必要がある。特に、ペントナイトは熱の影響を受け、緩衝材の機能として要求されている止水性や膨潤性等が低下する可能性がある。110℃以上の温度にペントナイトが曝されると、1年程度で膨潤変形特性が低下してしまうこと、高い温度になるほど短期間で膨潤変形特性が低下してしまうことなどが明らかにされている。ここでは、より合理的な設計を行うためには長期のデータを取得する必要があるが、研究の現状を考慮し、緩衝材の温度の上限値を保守側に100℃とした。

#### 4.2.3 緩衝材の設計仕様

前項で述べた設計の考え方(フロー)にもとづいて、緩衝材に求められる材質、透水係数、密度、材料の配合率、厚さ等の設定の検討を以下のように行った。

##### (1) 材質

緩衝材の候補材料として、①Na型ペントナイト単体、②Ca型ペントナイト単体、③Na型ペントナイト+砂、④Na型ペントナイト+砾、の4種類の材料について検討を行ったが、現状では②と④は透水係数のデータ等の収集が十分行われていないので、本検討では除外することとした。

##### (2) 止水性

設計透水係数kの設定条件は、緩衝材が拡散場を保持することとし、そのためには、 $k = 1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ よりも小さい値であれば十分条件(ペクレ数が1より小さいこと[4])を満足するが、ここでは、透水係数が試験方法の違いによりバラツキ易いことや、同一条件での試験でもある程

度の幅がであることなどの特性および現状では精度の高い緩衝材の製作技術がまだ確立していないこと等を考慮して、要求されている透水係数よりもオーダーを2桁下げた値の $k = 1 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ を設計透水係数とした。

Fig.7およびFig.8より、ペントナイト配合率が30%程度以上あれば、設計透水計数と同等のオーダーの透水係数が、また緩衝材密度が $1.2 \text{ g/cm}^3$ 以上あれば、設計透水計数と同等のオーダーの透水係数がほぼ確保できることが分かる。

ただし、透水係数はペントナイト配合率および緩衝材密度と関係するが、Fig.7とFig.8は、ペントナイト配合率あるいは緩衝材密度にのみ着目してまとめてあるため、この図の使用に際しては注意を要する。

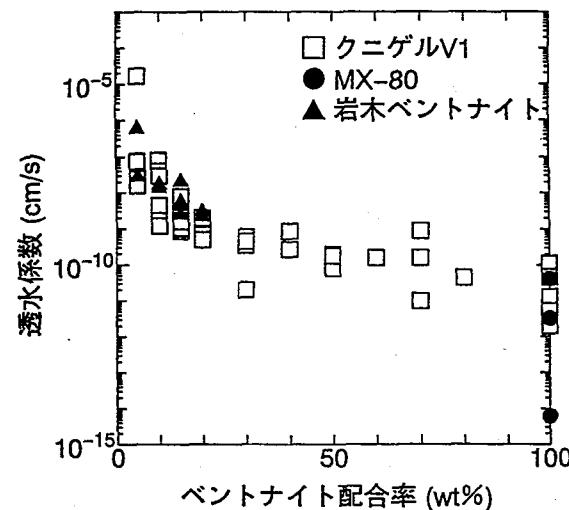


Fig. 7 Relationships between permeability and bentonite content (bentonite-sand mixture)

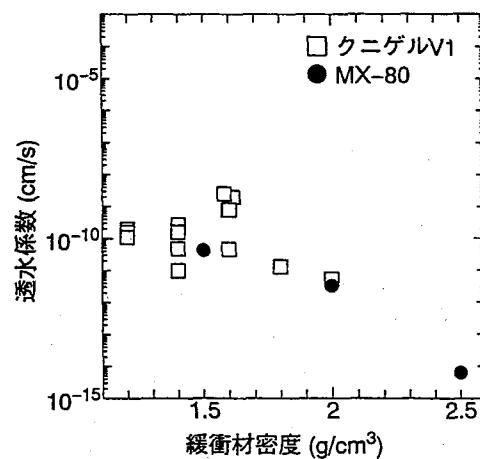


Fig. 8 Relationships between permeability and dry density of bentonite (bentonite-sand mixture)

## (3) 自己シール性

「(4) 製作・施工性」の検討より、現状の施工・定置技術では緩衝材を処分孔に定置するためには、周辺岩盤と緩衝材、緩衝材とオーバーパックの間に、合計で 5 cm 程度のクリアランスが必要なことが分かった。このため、緩衝材の膨潤によりクリアランスの 5 cm を充填するための条件を、提案されている膨潤評価式[24]を用いて検討した。その結果、Fig.9 に示すように、クリアランスを横軸に、そのクリアランスを膨潤により充填するのに必要な緩衝材の厚さを縦軸にしたときの関係から、緩衝材乾燥密度  $\rho_d = 2.0 \text{ g/cm}^3$ 、ペントナイト配合率 80% (クニゲルVI相当のペントナイト) で、緩衝材の厚さが 40 cm あれば、緩衝材の吸水による膨潤により自己シールすることが可能なことが判明した。従って、自己シール性の要求から、緩衝材の厚さは、前記の条件で必要な厚さ 30 cm に 10 cm を加えた 40 cm とした。

## (4) 製作・施工性

ペントナイト単体を締め固めたものおよびペントナイトにケイ砂を 0~70 % 混合して締め固め特性を調べた試験結果より、乾燥密度  $\rho_d = 2.0 \text{ g/cm}^3$  程度のペントナイトブロックが十分製作可能であり[1]、また、ペントナイト単体で成形するよりも、ケイ砂を混合した方が締め固め特性が向上する。さらに、経済的観点からは、ペントナイトの使用量を減らし、砂等の混合割合を増加した方が有利となる。

## (5) 熱伝導性 (施設規模) への影響

ペントナイトに砂を混合することにより、緩衝材の熱伝導性が向上し、廃棄体定置間隔を狭めることができる。ペントナイトに砂を 20 % 混合することにより、含水比

0 % の場合でも熱伝導率は 1.3 W/m°C 程度となることが推定されており、この程度の熱伝導率を有しておれば、本特集 (その 6) の検討より、人工バリアおよび施設規模に大きな影響を与えないものと判断される。

## (6) 応力緩衝性

オーバーパック腐食生成物による体積膨張の処分孔周辺岩盤への力学的な影響について、堆積岩を対象に、緩衝材の密度、厚さ、弾性係数等をパラメーターとして、応力緩衝性の検討を行った。なお、解析に際しては、以下の仮定および条件を設置した。

- ・周辺岩盤は掘削による影響を考慮する場合と掘削による影響を受けない場合を仮定して検討した。
- ・掘削により影響を受けると仮定した検討では、掘削による影響範囲内（処分孔の壁面より 30 cm とした）の岩盤の弾性係数を初期の弾性係数の 1/10 に低下するものとしてモデル化した。
- ・オーバーパックの腐食生成物による体積膨張が周辺岩盤へ及ぼす影響は、発生する引張応力と限界ひずみにより評価した。
- ・解析は軸対称線形解析モデルとし、汎用有限要素法解析コード ABAQUS を用いた。

解析結果より、厚さ 40 cm の緩衝材について、大略以下の知見が得られた。

- ① 1,000 年経過後の腐食時（オーバーパック腐食量 : 28.5 mm）に対しては、いずれの場合も処分孔周辺岩盤には過度の応力は発生しない。
- ② オーバーパックが全量腐食した際には、周辺岩盤への影響が認められるが、その範囲は掘削による影響範囲として仮定した壁面から 30 cm 以内にある。

現状では、腐食生成物の量と物性、緩衝材の長期挙動、オーバーパックの腐食膨張に対する掘削影響領域の取り扱い等不明な点が多く、より合理的な検討を行うためには、今後詳細に検討する必要がある。

## (7) 透気性

オーバーパックの腐食により発生するガスが、緩衝材内部に蓄積することによる影響を、ガス発生による蓄積圧力と外圧とのバランスにより算定する簡易モデルを用いて評価した。その結果、ガス透気に対して、透気係数を小さく、また緩衝材の厚さを厚くしたり、保守的な条件での解析においても、緩衝材内部のガスの蓄積圧力が 2 MPa 程度に達した時点で、ガスが破過することを確認した。本検討では、この 2 MPa をオーバーパックの耐圧設計の条件として考慮した。

## (8) 緩衝材仕様

緩衝材の設計フローに従い、各要件項目について検討した結果を総合的に判断して、以下のように緩衝材の仕様を設定した。

材質 : Na-型ペントナイト (クニゲルVI相当)

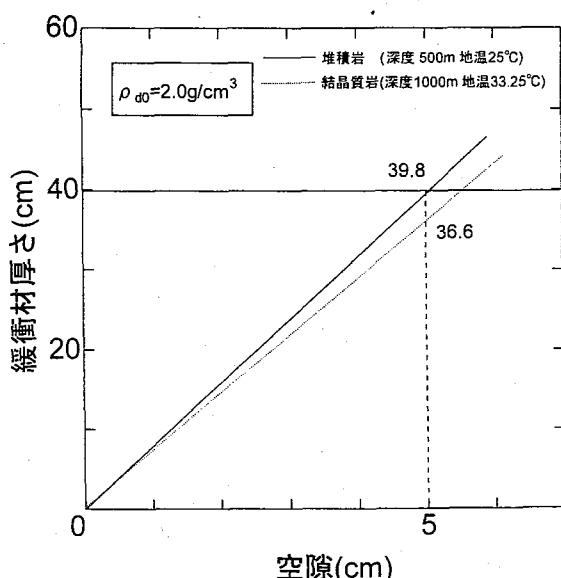


Fig. 9 Thickness of buffer which is necessary to fill a gap of

5 cm

ペントナイトと砂の混合材料で、ペントナイト/砂 = 80/20 (重量比)  
 乾燥密度 : 2.0 g/cm<sup>3</sup>  
 厚さ : 40 cm  
 オーバーパックの寸法を加味した緩衝材の寸法を、縦型定置の場合を例にとってFig.10示す。

#### 4.3 緩衝材の製作方法の検討

##### 4.3.1 緩衝材の製作

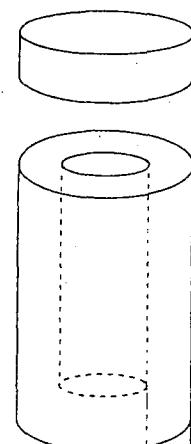
製作される緩衝材の形状として、ブロック型緩衝材と一体型緩衝材が考えられる。Fig.11にそれぞれの形状を示す。

ブロック状のものは、比較的小規模な金型プレス機を援用することにより製作することが可能と考えられる。また、地上での緩衝材の製作場所から狭い処分坑道を通って目的の処分孔まで運搬する際にも、特に大がかりな運搬施設は必要がないものと思われる。その反面、定置の際にブロックを組み上げなければならないので、定置手順が比較的複雑になることが十分予想される。なお、各ブロック間の隙間は水と接触した緩衝材の膨潤によって閉じられ、止水性が確保されるものと考えられる。

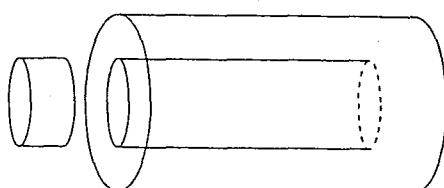
一体型緩衝材は、緩衝材ブロックの個数を出来るだけ少なくし、ブロック同士の継ぎ目部を減らすことによって施工性を向上させることを目的とするものである。具体的には、Fig.11に示すように、処分孔縦置き方式で言えばオーバーパックの下に設置される部分(底部)とオーバーパック周囲に設置される部分(胴部)が一体となった中空円筒形状の胴体部と上部に設置される蓋の部分で構成されている。一方、この一体型緩衝材は規模が大きくなるので、製作装置、運搬施設、定置に必要となる装置などがすべて大型化することが予想される。

##### 4.3.2 一体型緩衝材の製作方法と品質

一体型緩衝材の製作では、緩衝材中の密度分布が均一



縦置き一体型緩衝材



横置き一体型緩衝材

(一体型)

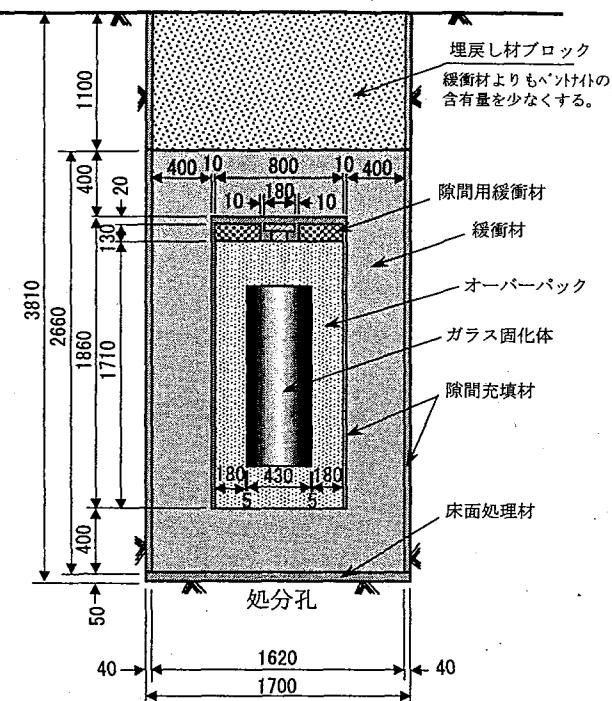
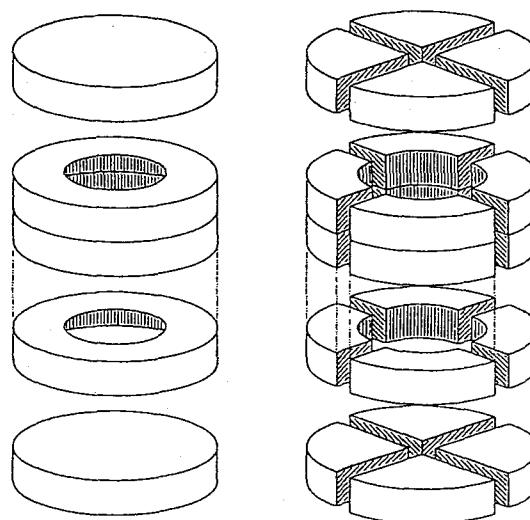


Fig.10 Size of engineered barrier (vertical emplacement type)

になるような製作装置の開発が必要である。可能性のある既存技術として、冷間等方圧プレス(以下CIPと記述する)を用いた製作装置が考えられる。CIP成型法は、粉末材料等をゴム製のモールドに充填して密封し、等方的に液圧を加えることにより、圧縮成型する方法である。Fig.12は、冷間等方圧プレス(100 MPa)で作製した厚さ80 mm及び100 mmの一体型緩衝材模型中の密度分布を示したものであるが、成型体中の密度分布のバラツキは小さいといえる。したがって、肉厚400 mmの一体型緩衝材の可能性は高いと思われるが、試作により、密度分布の有無の確認が必要である。



ドーナツ型  
(ブロック型)  
イチョウ型

Fig.11 Examples of segmentalization of buffer for monolithic type and block type

#### 4.4 緩衝材の品質管理・検査

緩衝材の要件は 4.2.2 で述べた 11 項目であるが、これらを直接管理することは不可能であるので、予め要件を満足するベントナイト及び砂等の仕様を設定しておき、その仕様通りに材料が納入されていることを確認する。

##### 4.4.1 品質管理

###### (1) ベントナイト鉱物の品質管理

ベントナイトの品質特性として、検討すべき項目に材質、透水係数、水分拡散係数、膨潤圧、膨潤率、分配係数、核種の溶解度、実効拡散係数、陽イオン交換容量、pH 等があげられるが、これらの諸特性のすべてを測定管理することは基本的に困難である。ベントナイトが鉱物の集合体であることから、化学組成、鉱物組成、モンモリロナイト含有率、モンモリロナイトの Na/Ca 比が、緩衝材製作の観点からは鉱物学的なベントナイトの分類あるいは特性評価を簡便にできる測定事項として挙げられる。これらに、簡単に測定できる膨潤力を加えた項目は、上記の本来的な品質管理項目に代替できる直接的な品質管理項目、すなわち代用特性となりうる。

Table 7 に緩衝材の品質特性と緩衝材の要件項目およびベントナイトの品質管理項目等との関係を示す。

###### (2) 緩衝材の製作にかかる品質管理

###### (a) 材料管理

ベントナイト鉱物、砂、水等の緩衝材の製作に用いる材料について品質を管理する。

###### (b) 製作管理

###### a) 緩衝材の品質特性と製作用代用特性の考え方

緩衝材の品質特性を測定するために選ばれる特性値は、一般に測定が容易でないこと、また測定に時間がかかることなどから、そのまま品質管理項目とするのは非合理的である。そこで、緩衝材の品質特性と緩衝材を製作するまでの代用特性との関係を明らかにし、その代用特性

を品質管理項目とすることは、緩衝材そのものの品質管理を行う上で非常に有効な手段である。緩衝材の品質特性と代用特性の関係について検討を行った (Table 8 参照)。

###### b) 管理項目の抽出

以上の検討結果から、緩衝材の代用特性としては緩衝材の寸法、乾燥密度、ベントナイト配合率とすることができる。したがって、緩衝材の製作管理においては、これらの代用特性の特性値を満足するための管理項目を抽出する必要がある。以下に、緩衝材製作工程ごとに管理項目を抽出した。

- ・ 材料調整工程においては、緩衝材材料の含水比、混合材料の混練度
- ・ 成形加圧工程においては、プレス圧、ストローク、成型サイクル等の油圧プレス設備の運転管理
- ・ 緩衝材検査工程においては、緩衝材の外観、寸法、重量、均一性
- ・ 保管工程においては、保管施設の温度、湿度

###### (c) 据え付け管理

据え付け管理の要件は以下の通りである。

- ① 緩衝材が保管時の形状、性状を維持し、定置位置に搬入される。
- ② 緩衝材が所定の位置に定置される。
- ③ 緩衝材と処分孔の隙間が適切に充填される。

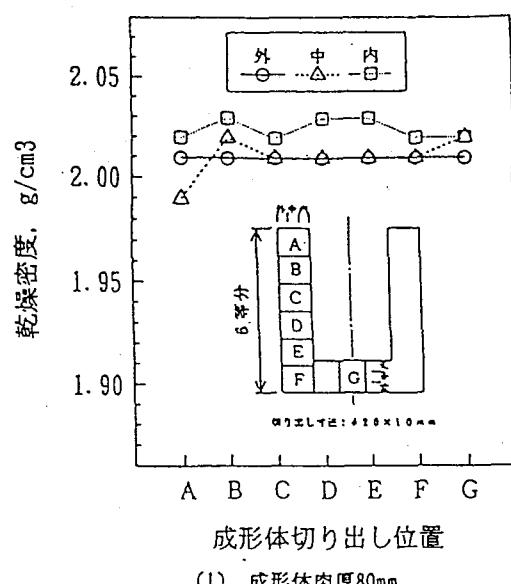
#### 4.4.2 検査

緩衝材の主材料であるベントナイト鉱物とその加工製品であるブロック型緩衝材および一体型緩衝材を対象に、品質管理を行うための検査について検討した。

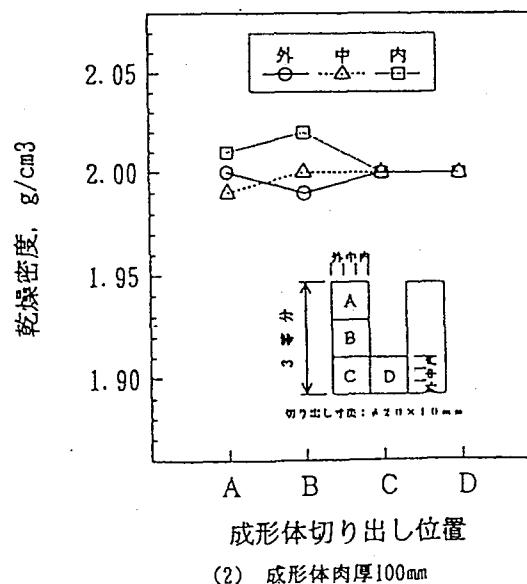
###### (1) ベントナイト鉱物の検査

検査項目としては以下の通りである。

- ・ モンモリロナイト含有率
- ・ モンモリロナイトの Na/Ca 比
- ・ 膨潤力



(1) 成形体肉厚80mm



(2) 成形体肉厚100mm

Fig.12 Density distribution of monolithic type buffer

Table 7 Relationships of quality characteristics of buffer to requirements of buffer and quality control items of bentonite

緩衝材 材質	寸 法	含 水 比	密 度	透 水 係 數	水 分 拡 散 係 數	緩衝材の品質特性										
						膨 潤 圧	膨 潤 率	分 配 係 數	核 種 の 溶 解 度	実 効 拡 散 係 數	熱 伝 導 率	陽 イ オ ン 交 換 容 量	P H	圧 縮 強 度	引 張 強 度	
緩衝材の要件項目																
① 止水性	○	○	○	○	○	○										
② 自己シール性	○	○		○			○	○								
③ 核種移行遅延性	○	○							○	○	○				○	
④ 熱伝導性	○	○		○										○		
⑤ 化学的緩衝性	○	○	○											○	○	
⑥ オ-バ-パ-ウク支持性	○	○														
⑦ 応力緩衝性	○	○		○			○								○	○
⑧ 透気性	○	○			○											
⑨ コロイド透過性	○	○			○											
⑩ 長期健全性	○	○		○	○		○	○	○	○	○			○	○	○
⑪ 施工性	○	○		○										○	○	
ベントナイトの品質管理項目																
粒 度					○	○										
(塑性限界*)																
代 用 特 性	化学組成					○						○				
	鉱物組成					○	○			○	○	○		○	○	
	モンモリロナイト含有量					○	○	○	○	○	○	○		○	○	
	モンモリロナイトの Na/Ca 比					○	○	○	○	○	○	○		○	○	
	膨潤力							○	○							
安全評価による仕様設定		○			○	○			○	○	○			○		
緩衝材の設計	○	○	○	○	○		○	○				○		○	○	
オ-バ-パ-ウクの設計	○	○		○			○							○	○	

\* 塑性限界は緩衝材の締固め管理に用いられる

Table 8 Requirements and material characteristics of buffer

緩衝材に要求される機能	材料特性
①止水性	透水係数、水分拡散係数
②自己シール性	膨潤圧、膨潤変形
③核種移行遅延性	分配係数、実効拡散係数
④熱伝導性	熱伝導率
⑤化学的緩衝性	間隙水の pH、Eh
	圧縮強度・引張強度・せん断強度・変形特性
⑦応力緩衝性	圧縮強度・引張強度・せん断強度・変形特性
⑧透気性	透水係数、透気特性
⑨コロイド透過性	コロイドろ過特性
⑩長期健全性	変質特性（イライト化、ゼオライト化等）流出性
⑪施工性	

これらに係わる検査方法を以下に列挙する。

- ・モンモリロナイト含有率はX線回折法等による。
- ・化学組成は成分により分析法が異なるが、モンモリロナイトの Na/Ca 比の代用としての Na<sub>2</sub>O, CaO はプラズマ発光分析による。また Na<sup>+</sup>は原子吸光法, Ca<sup>2+</sup>はイオンプラズマ発光分析による。
- ・膨潤力は日本ベントナイト工業会試験法（容積法, JBAS-104-77）による。

## (2) ブロック型緩衝材の検査

緩衝材の製作工程ごとに、検査項目を以下に述べる。

- ・材料調整工程においては、含水比およびベントナイト配合率。
- ・緩衝材検査工程においては、寸法、外観、重量（密度）
- ・横型定置押し込み方式では、型枠と緩衝材の間のすきまの充填状態を検査するために、充填の散らばり程度を把握するために散乱度が検査される。

通常の含水比、重量測定に必要な設備以外に、緩衝材の品質特性と代用特性を確認するため、透水試験装置、膨潤性測定装置、熱伝導性測定装置、三軸圧縮試験装置等の試験装置と、原子吸光光度計、X線回折装置等の各種分析装置が必要になることも考えられる。

### (3) 一体型緩衝材の検査方法・設備

検査項目としては以下の通りである。

- ・緩衝材密度
- ・密度差の有無
- ・砂の分布状態
- ・寸法・重量
- ・き裂等の欠陥の有無
- ・外観

## 5まとめ

人工バリアの設計及び製作等について、現在の知見をもとに検討を行い、概略以下の結果を得た。

### (1) オーバーパックについて

オーバーパックの設計寿命を1,000年とし、500m深さの堆積岩中に廃棄体を処分する場合および1,000m深さの花崗岩中に廃棄体を処分する場合の2ケースについて、オーバーパックに作用する岩盤からの地圧、緩衝材からの膨潤圧、腐食生成物による膨張圧、水圧、ガス圧等の荷重の組み合わせを検討した。さらに、設計フローを提示するとともに、1,000年間の腐食量を算定して、炭素鋼および複合オーバーパックの仕様を設定した。その結果、オーバーパックの厚さとして、花崗岩中に処分する場合を想定し、単体オーバーパックの場合は、胴部、上下蓋部とともに厚さ180mmの炭素鋼を、また複合(チタン)オーバーパックの場合は、胴部60mm、上蓋部140mm、下蓋部90mmの厚さの炭素鋼に、厚さ10mmのチタンの被覆材を表面に接合することとした。

また、オーバーパックの製作技術について、接合方法、蓋の構造、製作方法と手順及び品質管理と検査について検討を行った。

### (2) 緩衝材について

緩衝材の要求性能(透水係数及び最小厚さ)を満たすために、種々の観点から検討を加え、候補材料を選定するとともに、緩衝材の要件項目をおりこんだ設計フローを提示し、そのフローに従って検討を進め、緩衝材の仕様を設定した。その結果、緩衝材の仕様として、ペントナイト(ケニゲルVI担当)80%、砂20%の配合(重量比)で、乾燥密度が2.0g/cm<sup>3</sup>を有し、半径方向の厚さを40cmとした。さらに、設定した仕様を持つ緩衝材の製作の可能性について、緩衝材の分割構造の検討、特に一体型緩衝材の製作の可能性については、成形後の密度の均一性、強度試験と有限要素法解析によるハンドリング性の確認

を行った。また、ペントナイトおよび緩衝材の品質管理法・検査についても検討を行い、代用特性の計測による品質管理の有効性を提案した。

## 参考文献

- [1] 動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－、PNC TN1410 92-081 (1992).
- [2] 本田明 他：オーバーパック候補材料の長期寿命評価の考え方と評価の現状、第44回材料と環境討論会講演集、1997年9月28～30日、D102、(社)腐食防食協会(1997).
- [3] 児島洋一、辻川茂男：圧縮ペントナイト環境中炭素鋼腐食速度の堆積腐食生成物層による加速、第44回材料と環境討論会講演集、D-108、(社)腐食防食協会(1997).
- [4] 動力炉・核燃料開発事業団：地層処分研究開発第2次取りまとめ第1次ドラフト、IV-37、PNC TN1412 98-013 (1998年9月2日).
- [5] Henrikson, S., de Pourbaix, M., KBS-TR 79-14, 1979.
- [6] Mattsson, H., Olefjord, I.: General corrosion of Ti in hot water and water saturated bentonite clay, SKB TR 84-19 (1984).
- [7] 小峯秀雄、緒方信英、菅原 宏：砂とペントナイトの混合材料の透水係数、土木学会第46回年次学術講演会、第3部門、pp. 884-885 (1991).
- [8] 谷澤房郎、今村聰、安部聰、古賀善雄、後藤聰：ペントナイト・砂混合土の透水特性、土木学会、第48回年次学術講演会、第3部門、pp. 1082-1083 (1993).
- [9] 動力炉・核燃料開発事業団：緩衝材の特性試験(I)、PNC TN8140 92-057, pp. 44-52 (1992).
- [10] Johnson, L. H., Tait, J. C., Shoesmith, D. W., Crosthwaite, J. L., Gray, M. N.: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineered Barriers Alternatives, AECL-10718, pp. 199-201 (1992).
- [11] SKBF/KBS: Final Storage of Spent Nuclear Fuel -KBS-3 III Barriers, pp. 9:7 (1983).
- [12] 緒方信英、小峯秀雄、中島均、長沢達朗、石井卓：所定の透水係数を有するペントナイト混合土の配合設定方法、粘土科学、34, 95-101 (1994).
- [13] 動力炉・核燃料開発事業団：地層処分研究開発の現状(平成5年度)、PNC TN1410 94-094, pp. 44-45 (1994).
- [14] 動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－、PNC TN1410 92-081 pp. 57-61 (1992).
- [15] 小峯秀雄、緒方信英、田代勝浩：締固めたペントナイトの膨潤変形に及ぼすNaイオン濃度の影響、第30回土質工学研究発表会、pp. 351-340 (1995).

- [16] 小峯秀雄, 緒方信英, 田代勝浩: 締固めたペントナイトの膨潤変形に及ぼす水質の影響— $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ イオンの影響—, 第30回土質工学研究発表会, pp. 339-340 (1996).
- [17] 並河努, 菅野毅: 圧縮成形したペントナイトの1次元圧密試験, 第32回地盤工学研究発表会平成9年度発表講演集2分冊の1, pp.397-398 (1997).
- [18] 動力炉・核燃料開発事業団: 緩衝材の特性試験(I), PNC TN8140 92-057, pp. 14-22 (1992).
- [19] 動力炉・核燃料開発事業団: 地層処分研究開発の現状(平成8年度), PNC TN1410 96-071 (1996).
- [20] 動力炉・核燃料開発事業団: 緩衝材の熱物性試験, PNC TN1410 92-052 (1992).
- [21] 動力炉・核燃料開発事業団: ペントナイト緩衝材の流出特性の評価(I), PNC TN8410 97-313 (1997).
- [22] Stroes-Gascoyne, S., West, J. M.: An overview of microbial research related to high-level nuclear waste disposal with emphasis on the Canadian concept for the disposal of nuclear waste. *Can. J. Microbial.*, **42**, 349-366 (1996).
- [23] 塚本政樹, 藤田智成: 入力パラメータ値の分布を考慮した高レベル廃棄物地層処分人工バリア性能の解析, 電力中央研究所報告 U96045 (1997).
- [24] 小峯秀雄, 緒方信英: ペントナイトを含有する緩衝材の膨潤評価式と自己シール性評価, 土と基礎, Vol. 46(10), 23-26 (1998).