

要素試験結果に基づく隙間共存下における ブロック緩衝材のバリア性能の評価

(研究報告)

2004年2月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

要素試験結果に基づく隙間共存下におけるブロック緩衝材のバリア性能の評価
(研究報告)

杉田 裕*, 川上 進*, 谷口直樹*, 油井三和*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアの施工において、緩衝材はさまざまな方法での施工が考えられている。そのひとつである圧縮成型したブロックを使用する方法での施工の場合、処分場へ持ち込む前に材料が準備されることから品質確保が容易である、機械性能に応じてより高密度の材料を製作することが可能である等のメリットの反面、現場での自由度が小さい、膨潤するまでブロック間に隙間が存在することからその評価が必要である等の問題がある。

そこで、隙間膨潤、隙間共存下での炭素鋼オーバーパックの腐食挙動の要素試験、ブロック間のせん断試験、透水試験結果から、ブロック緩衝材のバリア性能を評価した。

隙間膨潤特性、力学特性（せん断特性）、透水特性、熱影響および腐食影響（隙間共存下での炭素鋼オーバーパックの腐食挙動）の観点からブロックの性能を評価した結果、ブロック緩衝材は予想される環境、材料等を適切に判断することによりそのバリア性能を十分に発揮すると考えられる。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

Assessment of barrier performance of block type buffer material under gap
coexistence condition based on results of fundamental experimental studies
(Research Document)

Yutaka SUGITA*, Susumu KAWAKAMI*, Naoki TANIGUCHI*
and Mikazu YUI*

Abstract

Regarding installation of buffer material for geological disposal of the high-level radioactive waste, various installation techniques are studied. Block type installation technique which uses high density pre-compacted block has benefits and problems. Benefits are that quality assurance reaches high level because block is compacted before move to the disposal facilities, and that high performance machine can product the higher density blocks. Problems are that flexibility at the underground facilities is low, and that assessment of influence of the gaps between blocks until the swollen blocks fill the gaps is required.

Therefore, barrier performance of the block type buffer material was assessed by results of fundamental experiments of filling gap function, corrosion behavior of carbon steel overpack under conditions of the gap coexistence, shear tests and the permeability tests.

From the results of these tests, block type buffer material will act ideal function under consideration of the expected environment and adequate materials and so on.

* Barrier performance group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

目 次

1	はじめに	1
1.1	緩衝材の施工方法と隙間の関係	1
1.2	ブロック工法の成立性	3
2	隙間の挙動	4
2.1	隙間膨潤特性	4
2.2	力学特性（せん断特性）	9
2.3	透水特性	11
2.4	熱影響	13
2.5	腐食影響	15
3	共存隙間の緩衝材性能に対する影響の評価	18
4	おわりに	19
	参考文献	20

表 目 次

表-2.1	せん断強度一覧（ピークせん断強度）	10
表-2.2	透水係数一覧	12
表-2.3	評価点の最高温度一覧	14

図 目 次

図-1.1	緩衝材の施工方法の検討例	1
図-1.2	隙間の模式図	2
図-2.1	隙間膨潤の模式図	4
図-2.2	隙間膨潤後の膨潤応力と乾燥密度の関係	5
図-2.3	隙間膨潤（人工バリア）の模式図	5
図-2.4	試験模式図	6
図-2.5	供試体中心部の密度分布の経時変化	7
図-2.6	乾燥密度分布の経時変化	7
図-2.7	軽量棒の中心位置	7
図-2.8	軽量棒周囲の平均乾燥密度分布	8
図-2.9	一面せん断試験機模式図	9
図-2.10	せん断試験の供試体	9
図-2.11	正規化したせん断強度	10
図-2.12	透水試験装置模式図	11
図-2.13	透水試験の供試体	11
図-2.14	透水試験結果	12
図-2.15	解析モデル図	13
図-2.16	ガラス固化体の発熱量	14
図-2.17	温度評価点	14
図-2.18	緩衝材ブロック隙間とオーバーパックの関係	15
図-2.19	腐食挙動要素試験装置模式図	15
図-2.20	平均腐食と孔食係数の関係	16

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下深部に人工バリアを形成し、地質環境の備える働きをあわせることで、長期にわたり放射性核種を閉じ込め、人間環境に有意な影響を与えないようにする（核燃料サイクル開発機構，1999a）。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で構成される。人工バリアの構成要素である緩衝材は設計要件が検討され（核燃料サイクル開発機構，1999a），この要件を満たすように深部の地層内に定置されることが求められているが，その定置方法はさまざまな工法が検討されている。

緩衝材の施工方法のひとつであるブロック工法は，地上施設等においてあらかじめ所期の設計に基づいてブロック状に圧縮成型した材料を地下深部に持ち込み，施工するものである。この工法では，ブロック間や緩衝材とオーバーパックあるいは岩盤との間に隙間が生ずることとなる。このため，ブロック工法で生ずる隙間が人工バリアのバリア性能に影響を与えるかどうか確認しておく必要がある。

そこで，ブロック工法で生ずる隙間の影響を要素試験あるいは解析により確認し，バリア性能への影響を評価した。要素試験あるいは解析の実施項目は，隙間膨潤特性，力学特性（せん断特性），透水特性，熱影響および腐食影響（隙間共存下での炭素鋼オーバーパックの腐食挙動）である。

1.1 緩衝材の施工方法と隙間の関係

緩衝材の施工方法はさまざまな方法が考えられている。たとえば，図-1.1 に示すようにブロック工法（圧縮成型したもの），一体型工法（コップ上の緩衝材を前もって定置し，その中にオーバーパックを定置する），現場締固め工法（現場で材料を締固める），ペレット充填工法（粒状に固めたペレットを流し込む），プレアッセンブル工法（地上で人工バリアを組上げた状態で地下へ運ぶ）等が検討されている（千々松ほか，1999b；核燃料サイクル開発機構，1999b；原子力環境整備促進・資金管理センター，2002）。

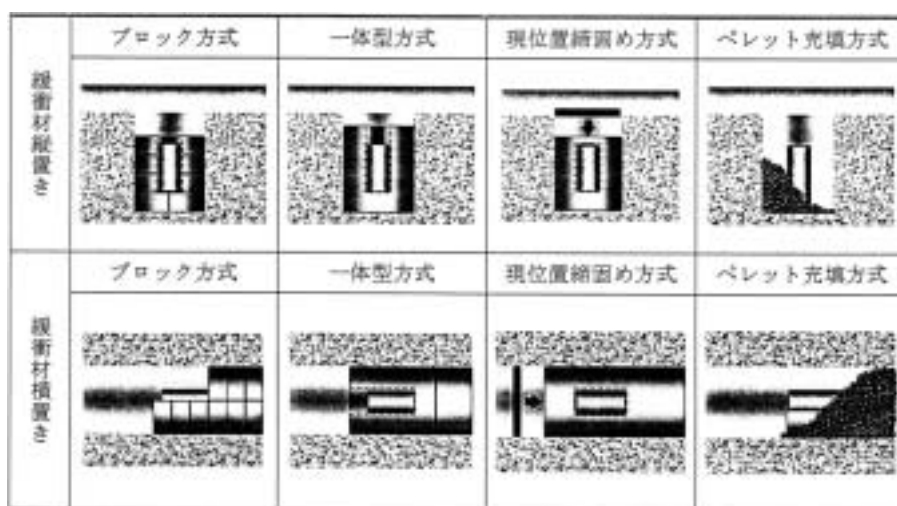


図-1.1 緩衝材の施工方法の検討例
（原子力環境整備促進・資金管理センター，2002）

緩衝材をブロックで施工する場合、あらかじめ成型したものを地下に持ち込んで施工するため、高密度の材料の製作が可能であり、材料の品質確保の面で有効であると考えられる。一方で、形状が固定されているため、現場あわせのような自由度は小さくなる。図-1.2 はブロック工法での人工バリア定置状況のイメージ図である。人工バリアの定置は放射線防護の観点から遠隔で行われるものとして考えられている（核燃料サイクル開発機構，1999b；原子力環境整備促進・資金管理センター，2002）。このため、ブロックは機械で定置されることとなり、緩衝材定置時に使用する定置機械のアームや機構上のクリアランスの関係から、緩衝材は定置する処分坑道あるいは処分孔より一回り小さい形状となる。これが隙間の原因である。第2次取りまとめでは、岩盤と緩衝材の間の隙間が 40mm，オーバーパックと緩衝材の間の隙間が 20mm とした（核燃料サイクル開発機構，1999b）。竖置き方式では、隙間幅は理想的な状態では均等であると考えられるが、横置き方式では、材料の自重により下側に偏るため隙間幅は一定ではない（図-1.2 参照）。

この隙間は緩衝材が飽和すればその膨潤性能により閉塞されることが考えられる。しかしながら、膨潤した緩衝材が隙間を充填することにより乾燥密度が低下し、密度分布も一時的ながら不均一になると考えられる。このため、これまでに隙間充填に関する検討がなされてきている（千々松ほか，1999a，2001；高尾ほか，2000；杉田ほか，2001，2002）。また、実規模の試験であるスウェーデンのプロトタイプ処分場プロジェクトにおいても、処分孔内の密度低下を抑制するため、ブロックと岩盤の隙間にベントナイトペレットを充填した（Johannesson, 2002；杉田ほか，2003a）。

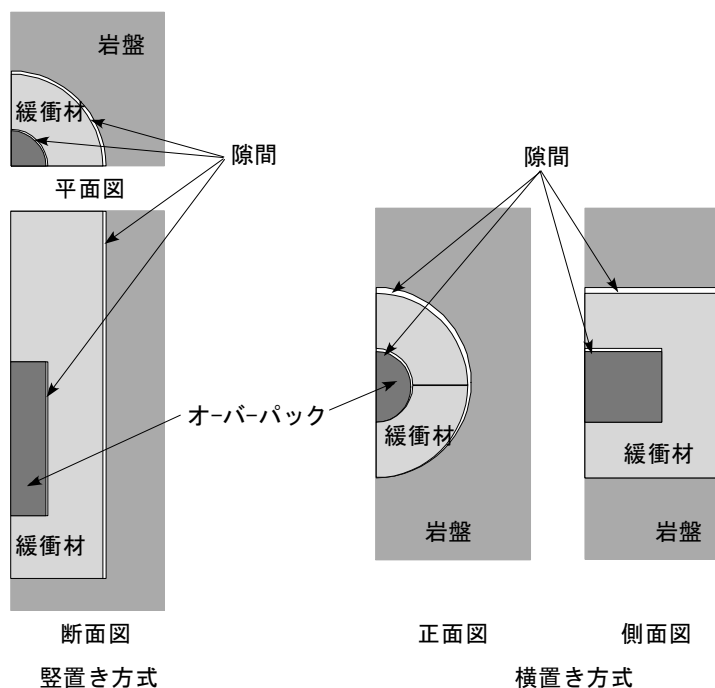


図-1.2 隙間の模式図

1.2 ブロック工法の成立性

ブロックはその製作性、搬送性、施工性等の観点から、高密度に圧縮成型された一体型や分割型が考えられている（核燃料サイクル開発機構，1999b）。大型ブロックの施工例としては、ドーナツ型のフルスケールとして圧縮成型したスウェーデンの SKB の製作例（Johannesson, 2002）、CIP で製作したコップ型の例（Awano et al., 2002）等がある。第 2 次とりまとめで示された人工バリア仕様のブロックに関しては、分割型ではあるが、直径および厚さを達成した例がある（原子力環境整備促進・資金管理センター，2003）。8 分割で製作されたブロックを組み合わせることで第 2 次取りまとめ仕様の緩衝材をブロックで製作できることが示された。

ブロックは地上施設で製作され、地下施設に搬送後、定置されると考えられる。この場合、ブロックは地上と地下施設で異なる環境におかれることとなる。地下環境は喚起されるものの、地表と比較して高温多湿であると考えられる。そこで、このような環境の影響についての試験がなされている（原子力環境整備促進・資金管理センター，2003）。ここでは、地下環境を模擬した高温高湿環境にブロックを保管し、経時変化を観察した。ブロックは初期含水比をパラメータとし、試験の結果から予想される環境を考慮した適切な初期含水比でブロックを製作することによりブロックを健全に保管することが可能であることを示した。一方で、初期含水比の設定が適切でない場合はブロックの表面が崩壊する等の現象が生ずることも確認された。

以上のことから、実規模のブロックの製作に関しては、ほぼ実現できる技術が確立されている。また、適切な材料、混合比等を考慮することで製作から定置までの保管に関しても品質を維持できると考えられることから、処分のためのブロック工法は成立すると考えられる。

2 隙間の挙動

1章で述べたようにブロックで緩衝材を施工する場合、隙間の挙動を把握しておくことが重要となる。ブロックはどのように隙間を充填し、充填するまでの挙動はどのようなことが考えられるのか、その影響はどのようなものであるか、充填後の状態はどうなるのか、と言ったことは緩衝材の性能を評価する条件となることから、それらの確認が重要である。

これまでに、隙間の挙動として、隙間膨潤特性、力学特性、透水特性、熱影響および炭素鋼オーバーパックの腐食への影響を把握した。ここではこれらの結果を個々に示す。

2.1 隙間膨潤特性

ブロック工法の場合、定置時にはブロック間、緩衝材とオーバーパックあるいは岩盤との間に隙間が生ずることとなる。緩衝材は浸潤水を取り込むことで飽和し、それとともに膨潤する。この膨潤性能により隙間は閉塞すると考えられる。緩衝材が飽和になるまでに要する時間は地質環境条件（岩盤の透水特性や間隙水圧）に依存するが、第2次取りまとめでの再冠水時間の解析では、初期圧力水頭が 1000 [m]，岩盤の固有透過度 10^{-15} [m²] の場合 5 年程度、圧力水頭が 0 [m]，岩盤の固有透過度 10^{-15} [m²] の場合 50 年程度という結果が得られている（核燃料サイクル開発機構，1999b）。

(1) 隙間膨潤における膨潤圧の発生

緩衝材の膨潤挙動は緩衝材がおかれた状況に応じて変化する。図-2.1 は、緩衝材の膨潤挙動を模式的に示したものである。図の(a)は浸潤面に接する緩衝材が浸潤水を取り込みながら膨潤して隙間を充填する挙動であり、(b)は浸潤水を取り込み膨潤した後方部分の緩衝材に押されるようにして隙間を充填する場合である。それぞれの膨潤挙動における膨潤圧は、それぞれの図の右側に示した試験条件で把握することができる。(a) および(b)の膨潤挙動において緩衝材内部が均一であれば、同じ乾燥密度の場合（ベントナイト混合率が同じ条件）、両者の膨潤圧は同じになると考えられる。そこで、両条件を模擬した膨潤圧の測定を行った（鈴木・藤田，1999；核燃料サイクル開発機構，2002）。試験セルは直径 30mm，長さ 30mm の内寸の円柱形で、条件とする隙間が生じるように供試体を圧縮成型した。試験水は蒸留水である。

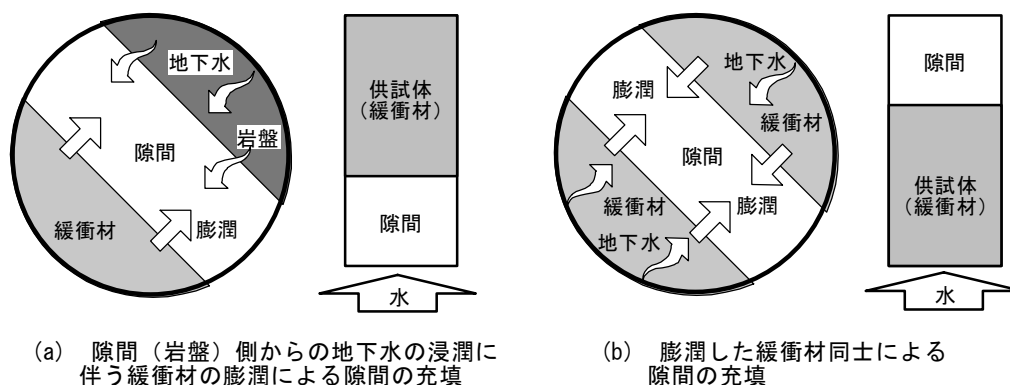


図-2.1 隙間膨潤の模式図

図-2.2 は、それぞれの隙間条件の結果を有効粘土密度で整理して示したものである。図には、これまでに取得されている隙間なしの膨潤圧の結果を合わせて示している。試験の結果、膨潤後の緩衝材の密度（ここでは有効粘土密度）が同じであれば、隙間条件によらず膨潤圧は等しいことがわかった。これは、緩衝材が均一に膨潤する条件を満たす場合、施工時の隙間の存在は発生する膨潤圧に影響しないことを示すものである。

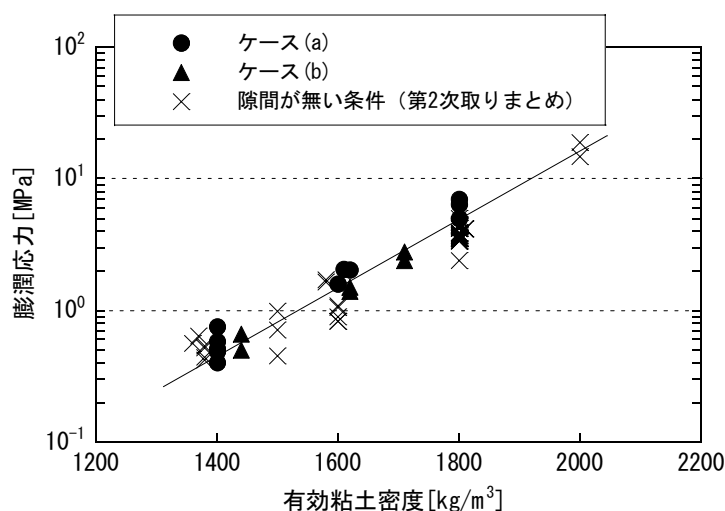


図-2.2 隙間膨潤後の膨潤応力と乾燥密度の関係

(2) 隙間膨潤挙動

(1)の膨潤圧試験では、直線的に隙間を充填する挙動の評価となるが、実際の緩衝材の隙間膨潤の過程では、浸潤水の浸入は均一とは限らず、膨潤しやすいところから順次膨潤すると考えられる。このような隙間膨潤挙動は人工バリア単位での挙動を評価する必要がある。

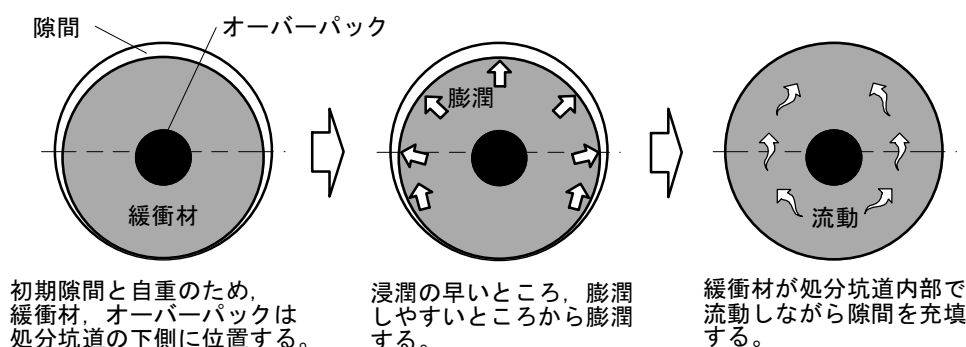


図-2.3 隙間膨潤（人工バリア）の模式図

図-2.3 は、横置き方式で人工バリアを定置した場合の、膨潤挙動を模式的に示したものである。浸潤水を取り込んだ緩衝材は膨潤するが、隙間部で障害物のない部分への膨潤は、障害物のある部分に比較して膨潤しやすいと考えられる。つまり、処分坑道の上部の緩衝材は早期に膨潤し、低下した密度を補うために下部の緩衝材が膨潤すると考え

られる。下部の緩衝材の膨潤時には、12 [ton]のオーバーパックの部分と緩衝材のみの部分では、障害物の小さい緩衝材のみの部分が膨潤しやすいと考えられる。つまり、オーバーパックを避けるように緩衝材が流動して隙間を充填する場合も考えられる。この場合、緩衝材厚さの不均一が発生することとなり、隙間膨潤時にこのような緩衝材の流動が生じるとすれば、それを考慮した緩衝材厚さの設計が必要であると考えられる。

そこで、このようなバリア単位での隙間膨潤挙動を把握する要素試験を行った（杉田・菊池，2002；杉田ほか，2003b）。

試験は、図-2.4 に示すように処分坑道を模擬した試験セルに隙間が存在するように供試体を作成した。要素試験のため、隙間は大きくし、密度変化を捉えやすいようにした。初期の緩衝材は乾燥密度 $1,800[\text{kg}/\text{m}^3]$ で、隙間膨潤後の乾燥密度は $933[\text{kg}/\text{m}^3]$ となる。初期の緩衝材の中心位置の変化を把握するために、緩衝材の中心部には緩衝材の膨潤に対して自重を無視できる軽量の棒をセットした。軽量棒としたのは、試験条件である膨潤後の緩衝材の密度が初期の半分という低密度であることから重さを縮尺で考慮していないため、また、オーバーパックは回り込みの指標とするために初期の中心位置の目印としてのみ使用したためである。試験水は蒸留水である。

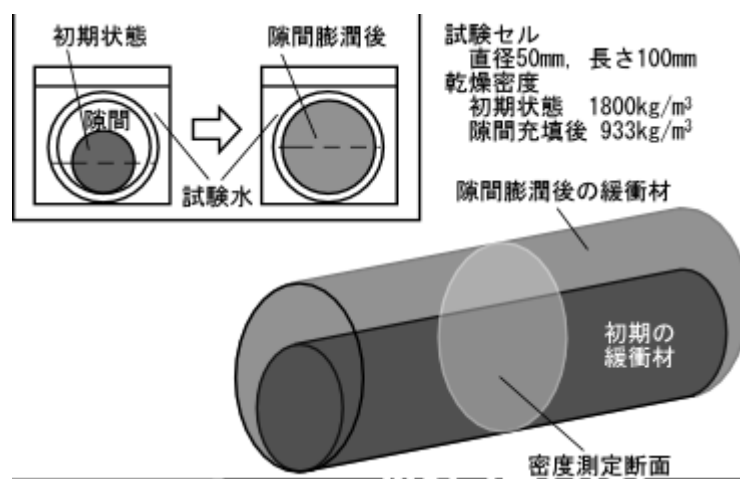


図-2.4 試験模式図

図-2.5 に供試体中心部分の密度分布の経時変化を示す。膨潤初期の状態では隙間は充填されているが、乾燥密度は元の隙間部で小さい。しかしながら、時間の経過に伴い隙間部の乾燥密度は増加し、初期に供試体の存在した部分での乾燥密度の低下が著しくなる。図-2.6 は乾燥密度の分布を経時変化で示したものである。図から、時間の経過とともに、乾燥密度のばらつきの幅が小さくなっていることがわかった。これは、隙間を充填するとともに、内部で密度を均一にするように挙動していることを示している。図-2.7 は、初期の供試体の中心部の目印である軽量棒の中心位置の経時変化である。図から、軽量棒はまだ十分に膨潤後の供試体の中心には達していないことがわかった。

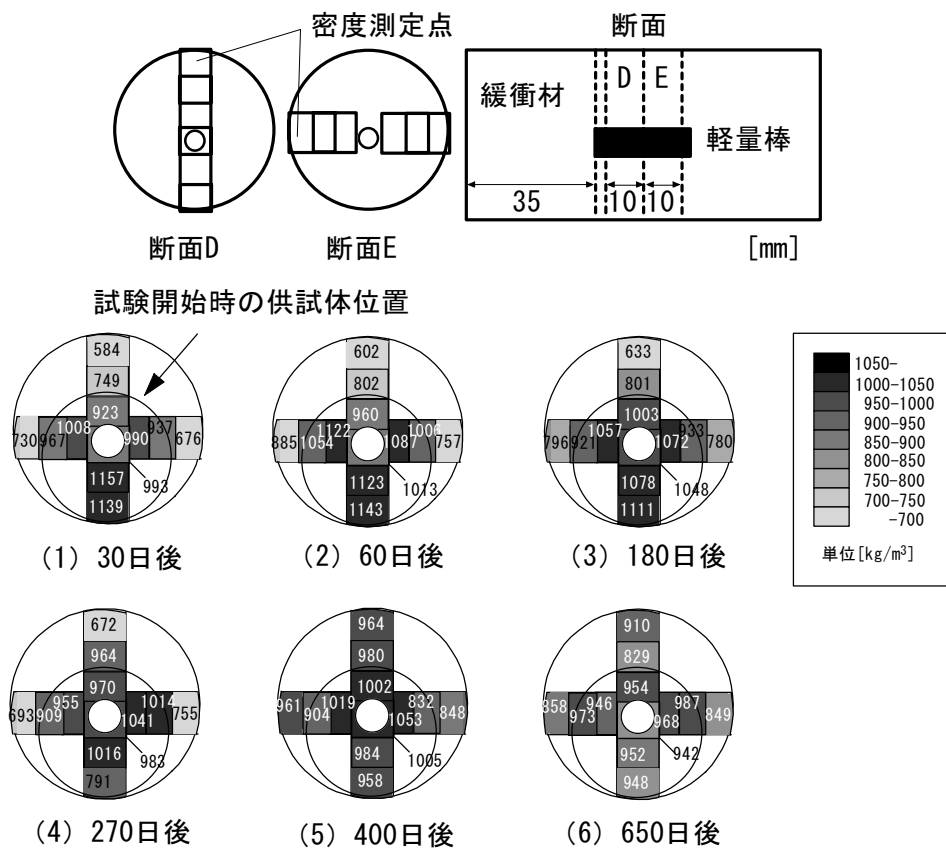


図-2.5 供試体中心部の密度分布の経時変化

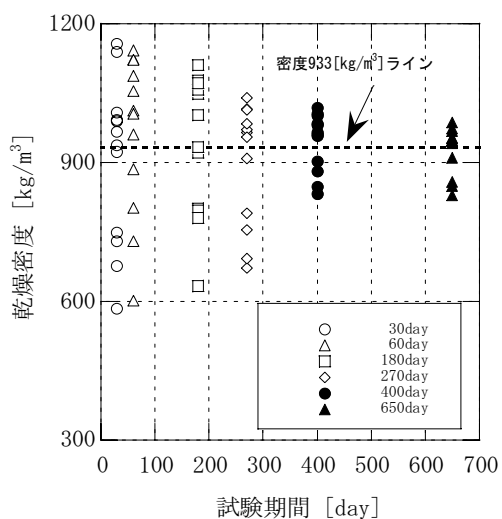


図-2.6 乾燥密度分布の経時変化

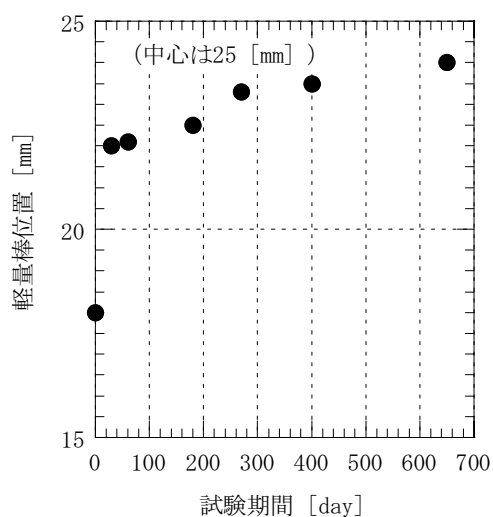


図-2.7 軽量棒の中心位置

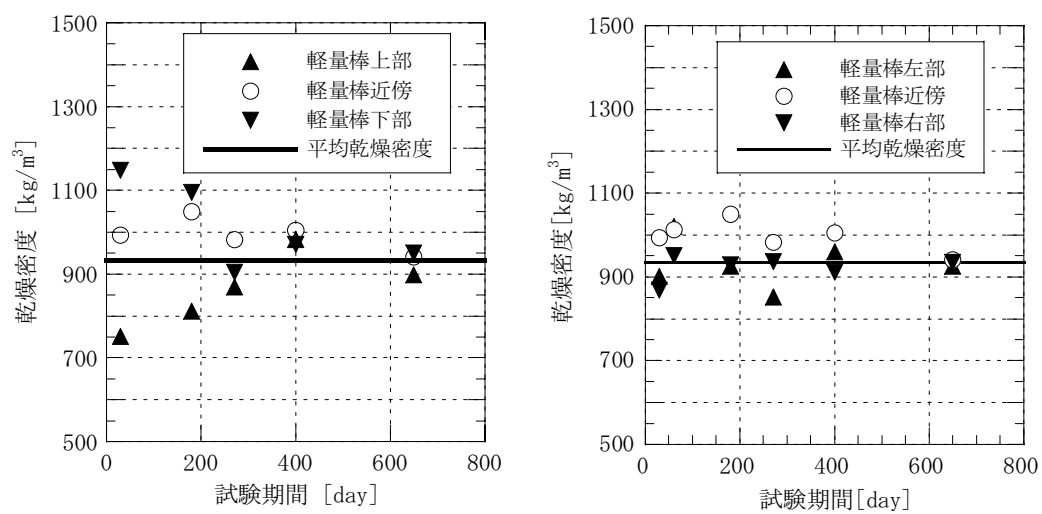


図-2.8 軽量棒周囲の平均乾燥密度分布

2.2 力学特性（せん断特性）

ブロック施工の場合、ブロック単体は高密度に圧縮成型されており、搬送および定置時の荷重や振動等に耐える設計となっていることから、力学的に安定であると考えられる。しかしながら、ブロック緩衝材の均一化は、ブロック間が膨潤により密着し、一体化することを期待しているものであり、その挙動の把握が必要である。そこで、ブロック間の力学特性としてせん断特性を把握した（千々松ほか，1998，1999b；今村ほか，2001）。試験は、図-2.9に示すような円柱形の供試体を用いた一面せん断試験である。せん断面が供試体の中心断面に一致させ、垂直荷重を一定に制御し、せん断変位を作用させる。供試体は、図-2.10に示すようにブロック部分そのもの（一体型）、分離して作製したものを飽和セルで圧着させたもの（圧着型）、分離して作製したもの（分離型）の3種類である。圧着型は飽和時間の変化（1ヶ月および8ヶ月）による圧着の効果を把握した。供試体を飽和するため、内部を区切った飽和セル内に供試体をセットし、一定期間強制注水した。

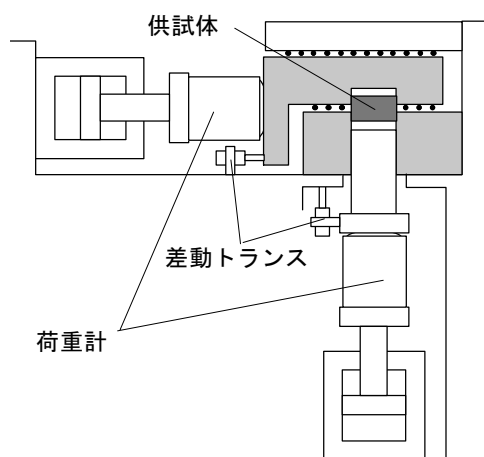


図-2.9 一面せん断試験機模式図

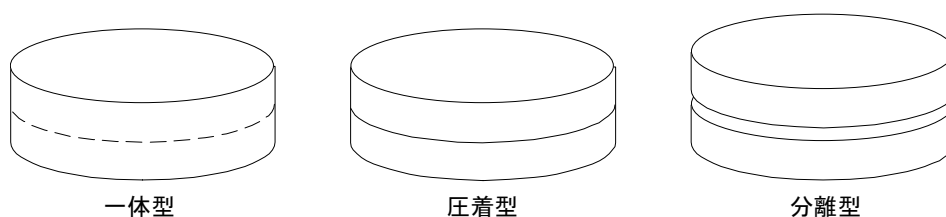


図-2.10 せん断試験の供試体

表-2.1は、せん断試験のピークせん断強度の一覧を示す。各供試体（不飽和、飽和期間ごと）で比較すると、同じ垂直応力条件の場合、せん断強度は大きいものから一体型、圧着型、分離型である。一体型で比較すると、せん断強度は不飽和のときが大きく、飽和することにより低下する。圧着型は、飽和期間が長くなることによりせん断強度が増加している。これは、飽和期間が長くなることによりブロック同士が圧着し、一体化に繋がっているものと考えられる。

表-2.1 セン断強度一覧（ピークせん断強度）

供試体		せん断強度 [MPa]		
垂直応力 [MPa]		0.2	1.0	2.0
不飽和 供試体	一体型	2.64	2.75	3.18
	分離型	0.19	0.87	1.52
飽和期間 1ヶ月	一体型	0.93	1.53	1.49
	分離型	0.16	0.51	0.64
	圧着型	0.72	0.73	0.75
飽和期間 8ヶ月	一体型	1.60	1.55	1.70
	分離型	0.29	0.57	0.75
	圧着型	0.94	1.03	1.20

図-2.11 は、各飽和期間における一体型供試体のせん断強度で正規化した圧着型供試体のせん断強度を示したものである。1ヶ月の飽和期間では圧着型のせん断強度は最低では0.5以下であり、8ヶ月経過後では最低で0.6程度の値となっている。これは、飽和期間が長くなると相対的に一体型と圧着型の強度差が縮まっていることを示しており、飽和による圧着効果、つまり隙間部の影響が顕在化しなくなることを示していると考えられる。

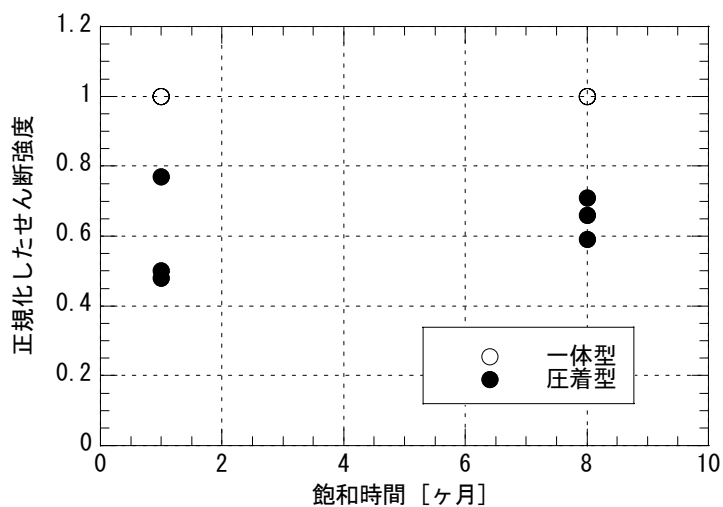


図-2.11 正規化したせん断強度

2.3 透水特性

ブロック施工の場合、ブロック部分は高密度の圧縮成型体のため、そこでは低透水係数である。しかしながら、ブロック間の隙間部ではその部分でのブロック同士の密着具合によっては透水性がよく、水みちになる可能性がある。そこで、ブロック間の隙間部を対象とした透水試験を実施した（千々松ほか，1998，1999b；今村ほか，2001）。試験は、図-2.12 に示すような通常の透水試験セルを用い、圧縮成型した供試体をセットした。供試体は図-2.13 に示すように一体部と隙間部の2種類である。隙間部を模擬した供試体は、一体部の供試体の中心部に切込みを入れ分割して作成した。実現象では、初期の隙間は隙間膨潤特性で考慮したように空間を持っていることになるが、透水試験では、膨潤したブロック同士が接触したところを試験の開始と仮定した。

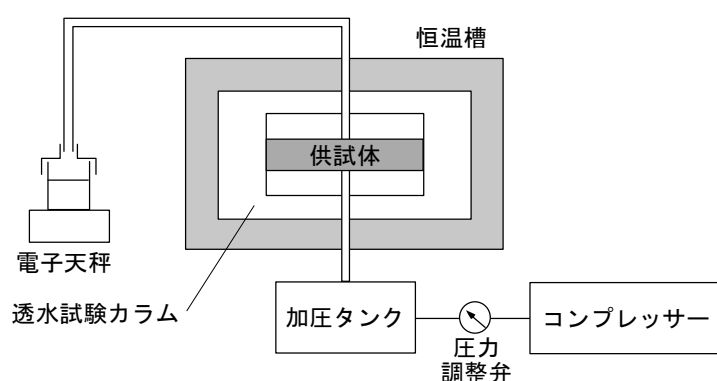


図-2.12 透水試験装置模式図

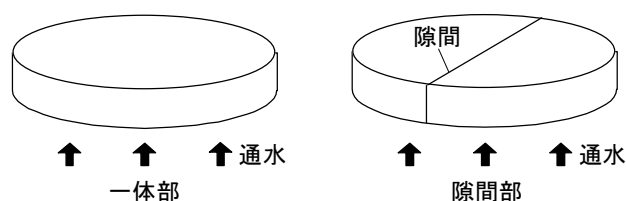


図-2.13 透水試験の供試体

図-2.14 は試験水の透過量と経過時間との関係を示したものである。上図は、隙間部の試験結果である。図から、いずれの供試体でも試験開始直後は試験水の透過量が大きく、隙間部が水みちとなっていることがわかる。しかし、数十時間で透過量は減少し、その後の透過量の勾配は低いままで安定している。これは、供試体が飽和し、供試体が膨潤することにより隙間部が充填されたためと考えられる。下図は、一体部の試験結果と隙間部の透過量低下後の安定時の結果を合わせて示したものである。隙間部の勾配が一体部と比較して若干大きめではあるが、両者はほぼ同様の傾向を示している。これは、隙間部をもつ供試体は、飽和することにより隙間部が充填され、一体部と同様な供試体の透水特性になったことを示していると考えられる。

透水係数に換算すると、それぞれの透水係数は表-2.2 のようになる。乾燥密度のばらつきは $1,790$ から $1,820[\text{kg/m}^3]$ で、透水係数のオーダーは $10^{-14} [\text{m/s}]$ で、すべての供試体で同じであった。

透水試験の結果から、飽和時の透水特性は一体部と隙間部ではその差は小さく、ほぼ同等であるといえる。

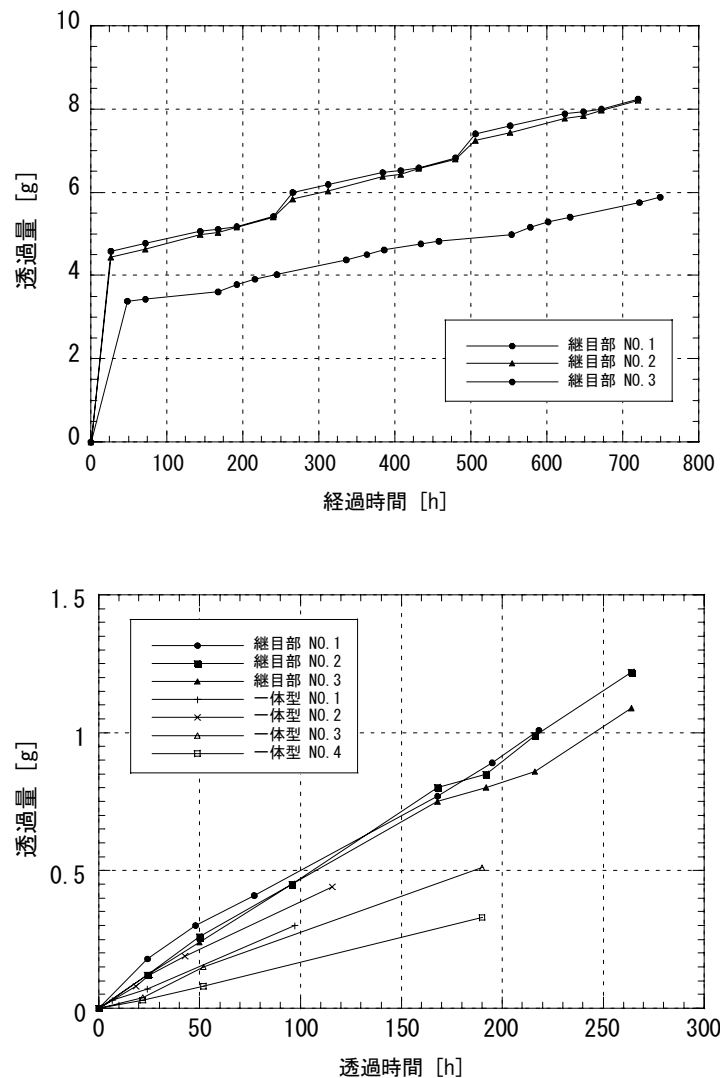


図-2.14 透水試験結果
(上；隙間部，下；全試験)

表-2.2 透水係数一覧

供試体	乾燥密度 [kg/m ³]	透水係数 [10 ⁻¹⁴ m/s]	供試体	乾燥密度 [kg/m ³]	透水係数 [10 ⁻¹⁴ m/s]
一体部	1,800	2.4	隙間部	1,820	8.0
	1,790	3.3		1,790	7.7
	1,810	2.4		1,790	7.9
	1,810	1.6			

2.4 熱影響

隙間のない人工バリアに対して隙間部のある人工バリアは、隙間部に存在する空気層が断熱材の働きをすることから、廃棄体からの発熱が人工バリア内部にこもり、人工バリアの温度上昇を助長すると考えられる。極端な温度上昇は緩衝材の特性に影響を与えることから、隙間部が存在することの影響を人工バリアに対する解析により評価した(核燃料サイクル開発機構、1999b)。

解析では、緩衝材の飽和に伴う熱物性の変化は考慮せず、初期の物性での最高温度を評価した。解析は図-2.15 に示す 3 次元解析で、隙間幅は図-1.2 での幅を考慮した。解析は有限要素法汎用解析コード FINAS（動力炉・核燃料開発事業団，1992）を用いた。図-2.16 は解析に用いた廃棄体 1 本当たりの発熱量のプロファイルである。

図-2.17 に温度評価点を示す。縦置き方式では、人工バリアの半径方向の緩衝材の隙間と接触する VX1, 2, 軸方向のオーバーパックと上下で接触する VZ1, 2 である。横置き方式では、坑道軸方向でオーバーパックとの接触部となる HX1, 隣接する人工バリアとの境界となる HX2, 人工バリア中心部での半径方向では、オーバーパックと下部で接触する HZ1, オーバーパック上部となる緩衝材の隙間と接触する HZ2, 3 である。

各点での最高温度を表-2.3 に示す。隙間がない場合、いずれの点においても 100℃未満であるが、空気層が入ることにより温度が上昇することがわかる。硬岩の場合、処分震度も深いことから地温も高く、限られた期間ではあるが、緩衝材とオーバーパックの接触部では 115℃を超える温度になることがわかった。しかしながら、緩衝材の膨潤に伴いこれらの隙間は充填されると考えられ、空気層の影響はさらに小さくなるものと考えられる。

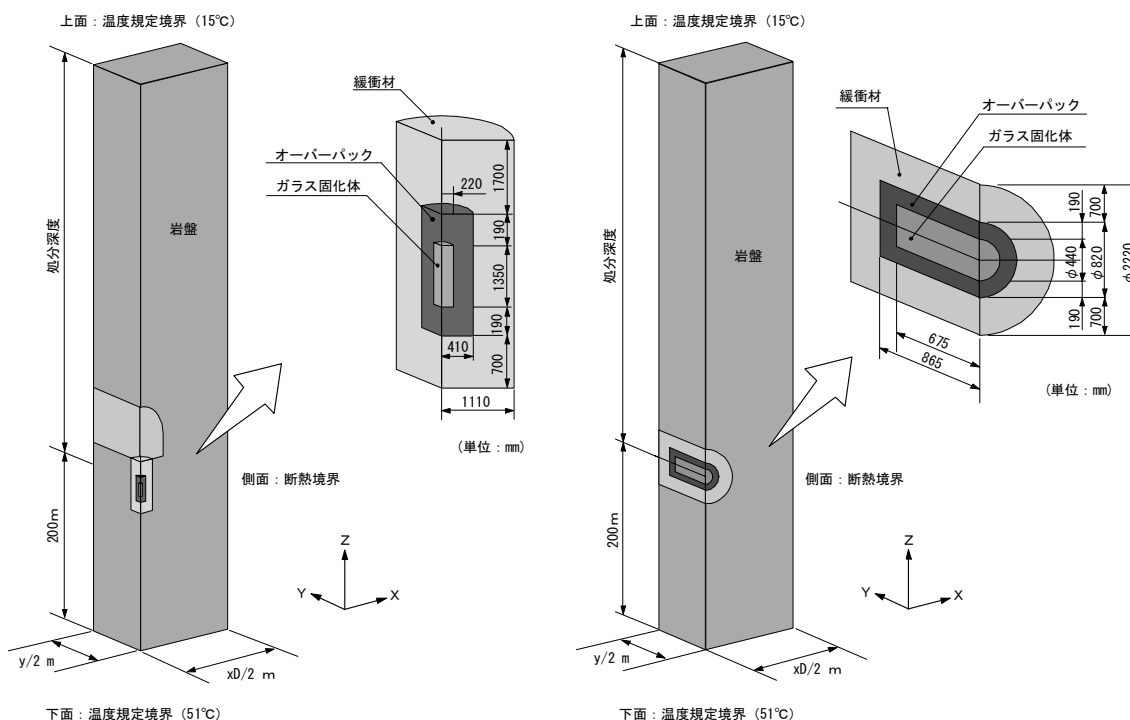


図-2.15 解析モデル図

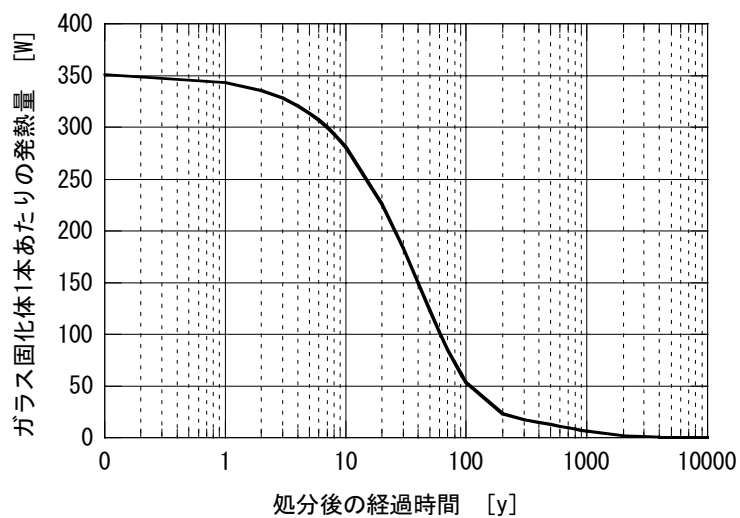


図-2.16 ガラス固化体の発熱量

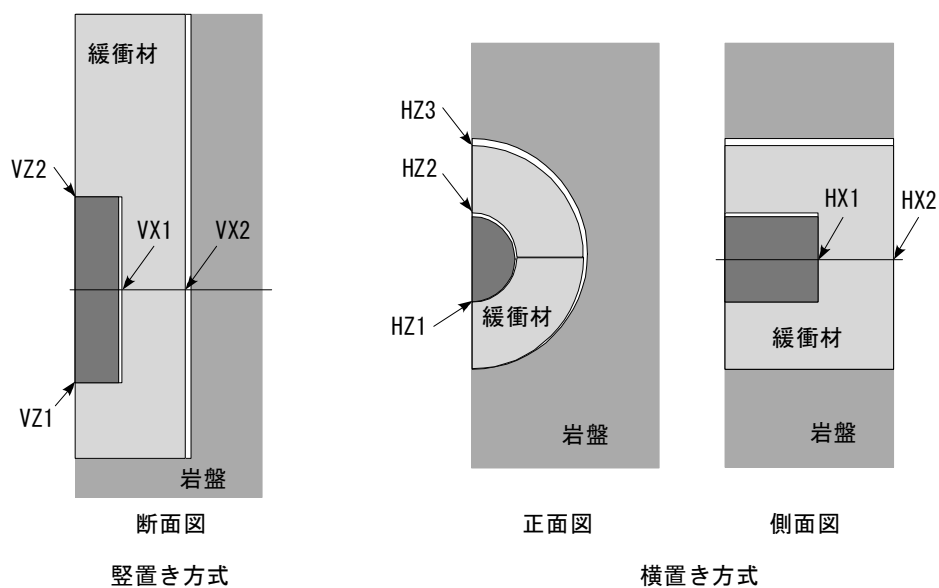


図-2.17 温度評価点

表-2.3 評価点の最高温度一覧

評価点	硬岩		軟岩		評価点	硬岩		軟岩	
	空気層	隙間無	空気層	隙間無		空気層	隙間無	空気層	隙間無
VX1	100.2	97.7	74.2	70.9	HX1	115.5	99.1	111.0	96.6
VX2	89.6	81.7	60.8	51.6	HX2	97.6	88.4	95.3	86.9
VZ1	116.3	96.9	92.6	69.7	HZ1	116.9	99.8	112.4	97.3
VZ2	116.3	97.0	92.6	69.9	HZ2	99.1	99.8	96.6	97.3
					HZ3	92.8	83.0	90.9	82.0

2.5 腐食影響

理想的な人工バリアでは、オーバーパックの全表面は緩衝材と接触している。しかしながら、ブロック工法のような緩衝材の施工方法の場合、オーバーパック表面は図-2.18に示すように緩衝材と接触している部分と接触していない部分が生じることとなる。このような隙間部はいずれ膨潤した緩衝材で充填され、オーバーパック全面が緩衝材と接触すると考えられる。しかし、このような全面接触までの過程や隙間が残存する場合には、接触-未接触部の存在がオーバーパックの腐食挙動に何らかの影響を与えると考えられる。

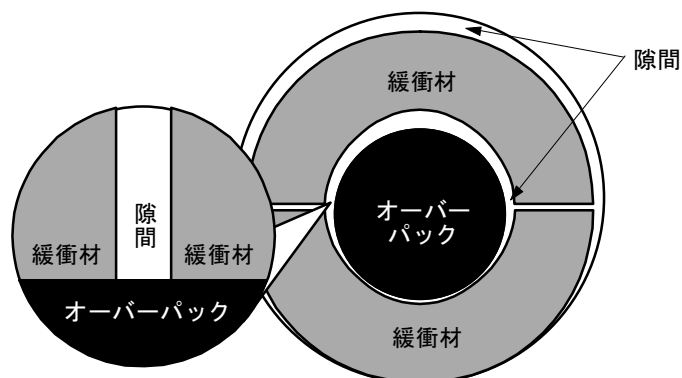


図-2.18 緩衝材ブロック隙間とオーバーパックの関係

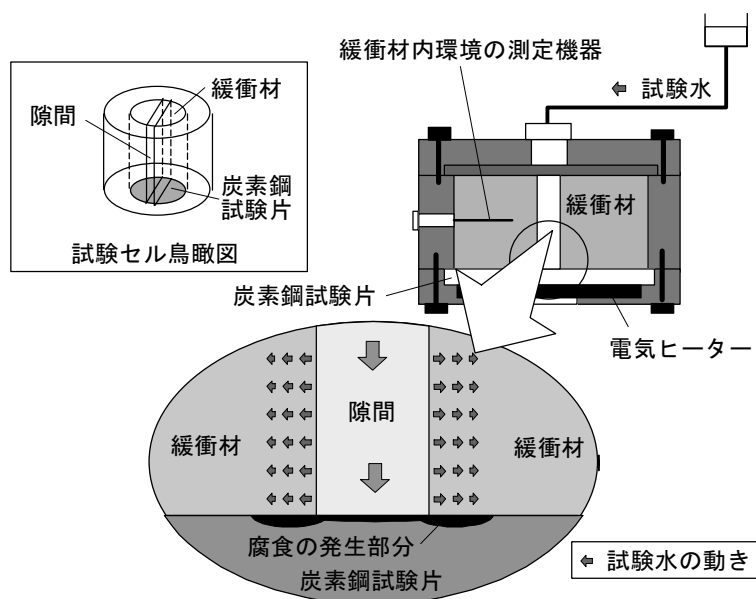


図-2.19 腐食挙動要素試験装置模式図

そこで、このような人工バリアにおけるオーバーパック表面での隙間の存在の腐食への影響を把握するための要素試験を実施した（核燃料サイクル開発機構，2002，2003；谷口ほか，2003；鈴木ほか，2003）。要素試験は、隙間の存在，温度勾配，試験水の供給等を考慮した図-2.19に示す試験装置で、オーバーパック表面の状態を模擬した浸漬試験である。

試験水は腐食速度が比較的大きいと考えられる、人工海水を基本とし、普通セメントおよび低アルカリ性セメントの溶出液も用いた。また、炭素鋼の不動態化を促進し局部腐食を生じ易くすると考えられる炭酸塩 (0.1MNaHCO_3) 溶液を試験水とした。試験期間は 60 日および 150 日である。

供試体の緩衝材ブロック (直径 146mm, 厚さ 50mm) は、ベントナイトにケイ砂を 30% 混合した材料を乾燥密度 $1,800\text{kg/m}^3$ に圧縮成型し、ブロックの中央には隙間を付与した。隙間は、膨潤とともに隙間が閉塞するケース、フィルターを隙間に挿入し試験期間中隙間を存続させるケースの 2 通りとした。処分後初期におけるオーバーパック表面付近の温度条件を模擬するため、炭素鋼試験片 (直径 226mm, 厚さ 9mm) の表面温度を電気ヒーターで 90°C に制御し、緩衝材は断熱カバーで覆った。試験後、炭素鋼試験片を取り出し、重量減少量から平均腐食速度を算出するとともに腐食深さ分布を測定した。

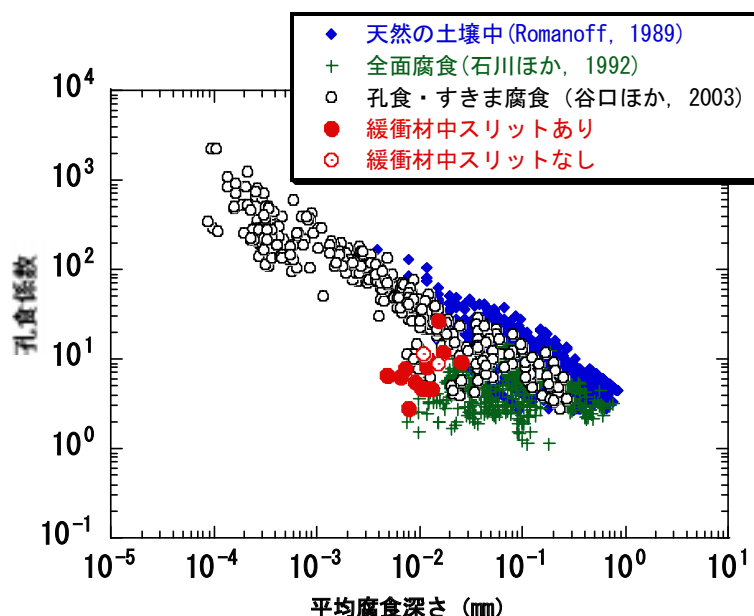


図-2.20 平均腐食と孔食係数の関係

試験の結果を図-2.20 に示す。これは、平均腐食深さと孔食係数の関係を示している。図には、天然の土壌中でのデータおよび水溶液環境での全面腐食と局部腐食の孔食係数測定結果もあわせて示した。試験片の重量減少量から算出された平均腐食速度は概ね 0.1mm/y 以下であり、溶液条件、隙間条件による明確な影響は認められなかった。炭素鋼の浸漬試験後の観察結果から、隙間部においては腐食が認められず、緩衝材と接触していた部分で腐食が生じていた。これは、隙間が存在する間は隙間部では酸素が供給されるのに対し、緩衝材と接触している部分では酸素が供給されにくくなるため、隙間部では酸素還元のカソード反応が、緩衝材接触部では鉄の溶解反応であるアノード反応が起きたためと考えられる。隙間のない条件でも水分分布や緩衝材の接触状態の不均一性に起因すると思われる不均一な腐食が観察された。

酸化性雰囲気の水溶液環境での炭素鋼の腐食データおよび種々の土壌中における炭

素鋼の平均腐食深さと孔食係数（最大腐食深さと平均腐食深さの比）の関係との比較では、いずれのデータもこれらの孔食係数に比較して十分に小さいことがわかった。また、隙間の有無による違いも認められなかった。よって本試験条件の範囲では、緩衝材中に隙間部が存在してもそれによる顕著な腐食の局在化が発生しないことが確認された。

3 共存隙間の緩衝材性能に対する影響の評価

ここでは、2章で示した要素試験および解析結果を総合的に評価する。

ブロックはその施工方法から、定置時には岩盤やオーバーパックとの間に隙間が生じることとなる。これらの隙間は必ずしも一様ではない。隙間存在下での緩衝材は地下水の浸潤とともに膨潤していく。このとき隙間と緩衝材の相対量によっては緩衝材の膨潤時に流動を伴うことが考えられることから、適切な配分になるように緩衝材を設置することが必要になることも考えられる。しかしながら、隙間膨潤に関する要素試験では隙間を実際の施工において予想される大きさよりも極端に大きくしており、実際の施工での隙間の比率が小さい場合には緩衝材はその膨潤により要素試験よりも早く均一になると考えられる。一方、隙間への膨潤による密度低下を抑制する方法として隙間に充填材を充填する方法も有効である。

隙間存在による熱的影響としては空気層の断熱効果による緩衝材の温度上昇が考えられるが、その温度上昇は20度程度であり、その期間も緩衝材の膨潤による隙間層の減少により低下すると考えられることから、その影響はさらに小さくなると考えられる。これら隙間のオーバーパックの腐食挙動への影響に関しても、ほとんど影響はないと考えられる。

今回実施した試験条件の範囲では、人工バリアの性能を著しく低下させるような影響は確認されなかった。また、実際の施工においては隙間をベントナイト等で充填することも検討されており、緩衝材の密度低下や熱的影響等を緩和するものと期待できる。したがって、隙間共存下における緩衝材ブロックにはそのバリア性能を十分期待することができると考えられる。しかしながら、緩衝材の膨潤挙動への浸潤地下水組成（例えば海水系地下水）の影響、要素試験と実規模でのスケールが異なることからの影響、初期の隙間膨潤における緩衝材の挙動等、地質環境やスケール等に対するバリア性能への影響を実験的に確認し、また、解析モデル等による実規模人工バリアでの挙動の評価が必要と考える。

4 おわりに

緩衝材の施工法のひとつであるブロック工法に着目し、そこで考えられる現象の理解を目的とした要素試験および解析に基づき、ブロック工法の緩衝材のバリア性能への影響を評価した。

隙間膨潤特性、力学特性（せん断特性）、透水特性、熱影響および腐食影響（隙間共存下での炭素鋼オーバーパックの腐食挙動）の観点からブロックの性能を評価した結果、ブロック緩衝材は考えられる環境、材料等を適切に判断することによりそのバリア性能を十分に発揮すると考えられる。

参考文献

Awano, T., Kanno, T., Ueda, H. and Kimoto, T.: “Manufacturing and Handling Techniques of the Monolithic Buffer Material for HLW Disposal”, JSME International Journal Series B, vol.45, No.3, pp.615-620 (2002)

千々松正和, 杉田裕, 松本一弘, 菊池広人, 村田澄彦, 斎藤敏明: “緩衝材ブロック継ぎ目部の力学および浸潤特性”, サイクル機構技術資料, JNC TN8410 98-058 (1998)

千々松正和, 杉田裕, 雨宮清: “緩衝材の製作・施工技術に関する検討”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-035 (1999a)

千々松正和, 杉田裕, 菊池広人, 今村雅弘, 村田澄彦, 斎藤敏明: “緩衝材ブロック継ぎ目部の力学および浸潤特性 (II)”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-036 (1999b)

千々松正和, 雨宮清, 杉田裕: “ベントナイトペレットを用いた緩衝材の隙間充填性に関する検討 (その 2) 楔形状の隙間に対する充填性に関する検討”, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS1-002, pp.4-5 (2001)

動力炉・核燃料開発事業団: “汎用非線形構造解析システム FINAS V.12 使用説明書”, PNC TN9520 92-006 (1992)

原子力環境整備促進・資金管理センター: “平成 13 年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書—遠隔操作技術高度化調査— (2/2) ” (2002)

原子力環境整備促進・資金管理センター: “平成 14 年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書—遠隔操作技術高度化調査— (2/2) ” (2003)

石川博久, 本田明, 鶴留浩二, 井上邦博, 小畑政道, 佐々木憲明: “オーバーパック候補材料選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評価”, 動燃技術資料, PNC TN8410 92-139 (1992)

Johannesson, L-E.: “Manufacturing of bentonite buffer for the Prototype Repository”, SKB AEHRL International Progress Report IPR-02-19 (2002)

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—総論レポート—”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-020 (1999a)

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—分冊 2 地層処分の工学技術—”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-022 (1999b)

核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究報告－平成 13 年度報告－”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-003（2002）

核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究報告－平成 14 年度報告－”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2003-004（2003）

今村雅弘，千々松正和，杉田裕，菊池広人，村田澄彦，雨宮清，斎藤敏明：“高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト緩衝材継ぎ目部の力学および浸潤特性”，土木学会論文集 No.673/III-54，p.61-70（2001）

Romanoff, M. :“Underground Corrosion”, Originally Issued by NBS in 1957, Reprinted by NACE, p.80（1989）

杉田裕，千々松正和，雨宮清：“ベントナイトペレットを用いた緩衝材の隙間充填性に関する検討（その 1）ベントナイトペレット膨潤後の止水性能に関する検討”，土木学会第 56 回年次学術講演会，CS1-001，pp.2-3（2001）

杉田裕，千々松正和，雨宮清：“ベントナイトペレットによる隙間充填性および人工海水下での性能確認”，土木学会第 57 回年次学術講演会，CS10-038，pp.457-458（2002）

杉田裕，菊池広人：“人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2002-003（2002）

杉田裕，伊藤彰，川上進：“プロトタイプ処分場プロジェクトにおける試験環境条件および計測項目”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-027（2003a）

杉田裕，菊池広人，棚井憲治：“人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎試験（II）”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-007（2003b）

鈴木治雄，杉田裕，谷口直樹，川上進，藤島敦：“隙間の存在する緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動”，日本原子力学会 2003 年「春の年会」要旨集，P15，p.935（2003）

鈴木英明，藤田朝雄：“緩衝材の膨潤特性”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-038（1999）

高尾肇，竹ヶ原竜大，佐藤由子，和田秀孝，荒岡邦明，中嶋幸房，植田浩義，木元宗宏：“すきま充填材としてのベントナイト特性に関する研究（その 1）－すきま充填材の充填特性評価－”，土木学会第 55 回年次学術講演会，CS10-038，pp.457-458（2000）

谷口直樹，川崎学，川上進，鈴木治雄：“弱アルカリ性およびアルカリ性環境における炭素鋼オーバーパックの局部腐食進展挙動”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-016（2003）