

# ガス移行挙動モデルの検討

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年 2月

東洋エンジニアリング株式会社

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,

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2003

ガス移行挙動モデルの検討  
(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

山本 幹彦\*, 大場 敏行\*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の処分場内で発生すると考えられるガスの影響を、現実的な手法、データにより評価することを目的として、緩衝材中のガス移行挙動については、これまでブレイクスルー時の圧力と膨潤応力、試料の密度とブレイクスルー圧力及びガス浸透率との関係を実験的に明らかにし、緩衝材の基本的な透気特性の把握を進めてきた。また、第2次とりまとめではこれらのデータと諸外国の研究結果等を参考に、既存の2相流解析コード(TOUGH2)を用いてガス発生の影響を概略的に評価した。今後は環境条件をパラメータとしたデータの拡充、国際共同研究等によるモデル開発、ならびに地下研究施設での原位置試験によるモデルの検証等を通じて、モデルの信頼性向上と評価手法の確立を図ることが必要とされている。

このような観点から、本年度は核燃料サイクル開発機構殿にて実施したガス移行可視化試験の結果を対象として TOUGH2 改良コードによる解析を実施し、従来の2相流モデルでは高スメクタイト密度の粘土系材料中のガス移行挙動を模擬することは、特にブレイクスルー後の急激なガスフラックスの変化と極微量の間隙水排出量を模擬することが困難であるが、Kozeny-Carman モデルを応用した改良型モデルでは模擬可能であることが明らかとなった。

諸外国のガス移行評価に関わる研究については、EU 圏内の国際共同研究における議論を中心として、ガス影響評価に係る技術開発の現状と今後の課題について情報の収集を行った。

また、今後わが国において実施が予定される幌延深地層研究計画に組入れることを目的として、諸外国における同様の試験の経緯も参考としてガス移行原位置試験計画の概略検討を実施することにより、必要となる試験項目と試験技術、試験の全体フロー、及び実施工程等について検討を行った。

---

本報告書は、東洋エンジニアリング株式会社が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：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

\* : 東洋エンジニアリング株式会社

Survey on the State of the Arts of development of Gas Migration Models in Barrier System  
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Mikihiko Yamamoto\*, Toshiyuki Oba\*

Abstract

Under the environmental condition of deep geological repository, Gas production resulting from mechanisms of metal corrosion and microbial degradation is expected to occur. These phenomena may lead to overpressurisation in the repository, degradation of barriers and enhanced release of radionuclides.

Preliminary evaluation of the “gas impact” on repository performance, using a molecular diffusion model and a conventional continuum two-phase flow model “TOUGH2” code independently, was carried out. The analytical result was described in H12 report by JNC. In H12 report, subjects of the assessment of gas impact was described as “further gas permeability data of the buffer and rock mass must be acquired by experiments, and verification of predicted performance regarding computer model of gas migration will be essential.”

In the context of above mentioned subjects, the newly developed flow model based on Kozeny-Carman model was applied for the simulation of the gas injection experiments on pure bentonite sample. The simulation results of gas injection test were compared with measured test’s data. The results of the simulation were in reasonably agreement with obtained experimental data around gas breakthrough phenomenon, but it was difficult to simulate “burst flow” which was result from preference pathway created at the interface between specimen and vessel occurred immediately after the gas breakthrough. A surveillance of the development states of gas flow models and assessments of gas impact was carried out. The results of the surveillance clarified the progress of flow model development and subjects to application of gas impact assessment to performance assessment.

Finally, a conceptual plan of in-situ experiment at Horonobe deep geological laboratory was investigated. Required experiments in the geological laboratory and equipments were extracted and a stepwise schedule of each experiment was considered.

---

This work was performed by Toyo Engineering Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

\* Toyo Engineering Corporation

## 目 次

1	はじめに	1
2	TOUGH2 改良コードによる解析評価	2
2.1	移行モデル	2
2.1.1	ベントナイト/砂モデル	2
2.1.2	拡散モデル	9
2.2	ガス透過試験のシミュレーション	10
2.2.1	ベントナイトのガス透過試験	10
2.2.2	シミュレーション	22
2.2.3	モデルの適用性	33
3	諸外国におけるガス移行研究に関する調査	38
3.1	調査対象	38
3.2	調査結果の整理	38
3.2.1	GASNET プロジェクト	39
3.2.2	GAMBIT Club	51
4	原位置試験計画の検討	60
4.1	本計画の位置付けと前提	60
4.1.1	ガス影響研究の必要性	60
4.1.2	成果の反映	61
4.1.3	試験目的	61
4.1.4	試験工程の基本構成	62
4.1.5	前提とした諸条件	62
4.2	原位置試験計画	63
4.2.1	試験項目	63
4.2.2	試験方法	66
4.2.3	試験工程	76
5	おわりに	82
	参考文献	83

## 目 次

図 2-1	ベントナイト／砂モデルの計算フロー図	8
図 2-2	ガス移行可視化試験装置プロセスフロー	11
図 2-3	ガス移行可視化試験装置外観（アキュムレータ）	12
図 2-4	ガス移行可視化試験装置外観（試験容器，X線 CT スキャナ）	12
図 2-5	試験結果 クニゲル V1 (1)ーガス排出速度（広域）	15
図 2-6	試験結果 クニゲル V1 (2)ーガス排出速度（拡大 1）	15
図 2-7	試験結果 クニゲル V1 (3)ーガス排出速度（拡大 2）	16
図 2-8	試験結果 クニゲル V1 (4)ー累積排出水量（広域）	16
図 2-9	試験結果 クニゲル V1 (5)ー累積排出水量（拡大）	17
図 2-10	試験結果 クニゲル V1 試料 (5)ーガス有効浸透率（広域）	18
図 2-11	試験結果 クニゲル V1 試料 (6)ーガス有効浸透率（拡大 1）	18
図 2-12	試験結果 クニゲル V1 試料 (7)ーガス有効浸透率（拡大 2）	18
図 2-13	試験結果 クニゲル V1 (6)ー供試体上下流側圧力	19
図 2-14	試験結果 MX-80 (1)ーガス注入及び排出速度	21
図 2-15	試験結果 MX-80 (2)ー供試体上下流差圧	21
図 2-16	空間分割概念図ークニゲル V1	24
図 2-17	シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (1)ーガス排出速度（ブレイク時） .....	28
図 2-18	シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (2)ーガス排出速度（第 1 ピーク時） .....	28
図 2-19	シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (3)ー注入圧力	29
図 2-20	シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (4)ー累積排出水量	29
図 2-21	シミュレーション結果 MX-80 試料 (1)ーガス排出速度	32
図 2-22	シミュレーション結果 MX-80 試料 (2)ーガス注入圧力	32
図 4-1	原位置試験フロー及びデータ関連図	65
図 4-2	ガス移行挙動長期研究計画	77

## 表 目 次

表 2-1	主要試験条件	11
表 2-2	主要試験条件-BGS	19
表 2-3	クニゲル V1 に対するモデルパラメータ	27
表 2-4	MX-80 に対するモデルパラメータ	31
表 2-5	浸透率に相当する亀裂幅	34
表 2-6	相当亀裂幅に対応する毛管圧力, 注入圧力	34
表 2-7	浸透率に相当する毛管半径	36
表 2-8	相当毛管半径に対応する毛管圧力	36
表 3-1	考慮された処分概念-1 (HLW, 使用済燃料)	40
表 3-2	考慮された処分概念-2 (低/中レベル廃棄物)	41
表 3-3	未解決の不確実性及び未考慮の影響	51
表 4-1	原位置試験概要	67

## 1 はじめに

地層処分場内で金属腐食等によって発生するガスの影響は、EU 諸国による国際研究プロジェクト、及び米国における WIPP, Yucca Mt.に対する性能評価研究を中心に研究開発が実施されてきているが、本分野の研究開始は 1980 年代後半と歴史が浅いことから、OECD/NEA の見解においても、各バリア構成材料とも評価モデルの確立、充分なデータの取得には至っていないとしているのが現状である。

わが国においても、これまで緩衝材中のガス移行挙動については、“室温+降水系地下水条件”に対してガス透過試験が実施され、透気流速や、ブレイクスルー時の圧力等の測定を通じて、ガス浸透率、ブレイクスルー時の圧力と膨潤応力、試料の密度とブレイクスルー時の圧力などとの関係を実験的に明らかにし、緩衝材の基本的な透気特性の把握を進めてきた。また、第 2 次取りまとめにおいてはこれらのデータと諸外国の研究結果等を参考に既存の 2 相流解析コード (TOUGH2) を用いてガス発生の影響を概略的に評価した。

今後はこれまでの成果を踏まえ、実際の地質環境への適用に配慮し、環境条件をパラメータとした移行特性データの拡充、X 線 CT スキャナを用いた可視化試験装置を活用したガス移行挙動メカニズムの把握、幅広い知見を集約する国際共同研究 (GAMBIT Club) 等によるモデル開発、ならびに地下研究施設での原位置試験によるモデルの検証等を通じて、モデルの信頼性向上を図ることにより評価手法の確立を図るとともに、ガスの透過による人工バリア性能への影響を明らかにすることが必要である。

このような観点から、本年度は核燃料サイクル開発機構にて実施されたガス移行可視化試験装置による試験結果を対象として、TOUGH2 改良コードによる解析を実施することにより、既存の 2 相流コードでの粘土物質内でのガス透過現象の再現に対する限界について調査した。また、諸外国のガス移行評価に関わる研究成果の調査を行い、評価手法開発の現状と課題を明確にした。さらに、幌延に建設が計画されている深地層研究施設におけるガス移行原位置試験計画の概略検討を実施し、実施項目と試験手法、及びそれによって得られる成果を明らかにするとともに、各種試験の連携を示した試験実施フローと全体研究工程等を作成した。

## 2 TOUGH2 改良コードによる解析評価

本章ではベントナイト/砂混合材のガス移行特性の模擬を目的として開発されたモデルの適用性評価を目的として、ベントナイト（クニゲル V1）のガス移行試験結果に対してシミュレーション解析を行った。核燃料サイクル開発機構において、ガス移行可視化試験装置にて実施されたガス移行試験によって得られたガス排出速度の経時変化に対して、解析結果をフィッティングする過程で各種モデルパラメータを設定し、当該シミュレーション結果を試験結果と比較した。また、過去に東洋エンジニアリング(株)において実施した、英国地質調査所 (BGS) のガス移行試験装置による試験結果<sup>1)</sup>に対するフィッティング例とも比較し、ベントナイト中のガス移行に対するベントナイト/砂モデルの適用上の限界について評価した。

### 2.1 移行モデル

ガス移行可視化試験装置にて実施された試験の対象試料が、100 %ベントナイト（クニゲル V1）であったことことから、本研究ではブレイクスルー後の急激なガスフラックスの上昇と低排出水量を示す透過現象により適応性が高いと考えられる、ベントナイト/砂モデルを適用した TOUGH2 改良コードを用いることとした。本モデルはベントナイト/砂混合材中でのガス及び水の移行特性の再現を目的として、東洋エンジニアリング(株)と英国 AEA Technology plc. (現 Serco Assurance 社) によって共同開発された、ガス及び水に対する移行モデルである。以下に本研究で解析に適用した TOUGH2 改良コードについて記述した。

#### 2.1.1 ベントナイト/砂モデル

以下にベントナイト/砂混合材中のガス移行挙動を再現するために開発された移行モデルと、それを組み込んだシミュレーションコードについて、その概要を示す。

##### (1) モデル化の前提と要求事項

粘土系材料中のガス移行については、これまでに Mx80 ベントナイトを用いたガス透過試験によって、以下に列挙した特徴的な挙動が確認されている<sup>1)</sup>。

- ・ガス圧力にガスの侵入、透過が開始する明らかな敷居 (Threshold) 値が存在する
- ・ガスの透過による間隙水の排出はほとんどないか、または非常に少ない
- ・ガス透過後のガスの有効浸透率は、水による絶対浸透率を上回る値を示す
- ・ガスが侵入する圧力を下回る特定のガス圧力で、ガスの透過が停止する

これらの挙動は卓越流路の形成によるものであると説明され、この特性を再現するためには「discrete pathway model」、すなわち、毛管、亀裂等の非均質に生成する流路での流れを模擬するモデルが必要であると主張されている<sup>2) 3)</sup>。

一方、ベントナイト/砂混合材に対するガス透過特性については、過去の研究例<sup>4) 5)</sup>において、ブレイクスルー後数日間のガス透過によって10%前後の間隙水が排出されたと考えられる結果が得られている。このような現象は Boom Clay に対するガス透過試験においても報告され、ガス透過試験による間隙水飽和度の低下は1%以下から13%までの値が観測されている<sup>6)</sup>。この飽和度の変化量は、近年ベントナイトを対象として開発が進められている毛管束モデル、亀裂進展モデル<sup>7)</sup>等の discrete pathway model では再現できない大きな桁にある。

この相違は、スメクタイト含有率が低くなるほど（スメクタイト含有率は Mx80 ベントナイトの約 75wt% に対して、70wt% クニゲル V1 / 30wt% 珪砂混合材では約 33wt%、Boom Clay では 30~40wt%）<sup>8)</sup>、あるいは大径粒子の含有率が高くなるほど（粒径分布の中央値は Mx80 ベントナイトがほぼ  $8 \times 10^{-3}$  mm、クニゲル V1 は  $2 \times 10^{-3}$  mm であるのに対して、3号/5号混合珪砂では 0.9mm）<sup>8)</sup>、ガスの透過による間隙水の排出量が増加する傾向を示すものであり、したがって、鉱物組成、あるいは粒径の変化によってガス、水の移行機構/移行経路の形態が異なる、もしくは複数の移行機構の寄与率が変化する可能性を示唆するものと考えられる。

現時点ではこの移行機構の変遷については想像の域を出ないが、スメクタイト含有率が高く、粒径の大きい珪砂等の含有率が低いほど、固/液間の物理化学的相互作用を受ける確率が高くなり、また、均質性が高まることから、ガス圧力の上昇による移行経路の形成は、鋭利な亀裂状移行経路の先端に作用する引張り応力が鉱物粒子間に存在する吸着水層の引張り強度を超えることにより進展する機構<sup>1)</sup>にシフトし、逆にスメクタイト含有率が低く、粒径の大きい珪砂等の含有率が高いほど、ガスが鉱物粒子間の自由水（吸着水に対する意味での）と置換することによって経路を形成する機構にシフトすることが考えられる。このように、現在粘土媒体中のガス移行機構の細部については特定できない段階にないことから、ベントナイト/砂モデルはメカニスティックなモデルを開発対象とするのではなく、多孔性媒体に対する既往のフローモデルを応用することにより、相対的に大きな間隙水の累積排出量を再現しつつ、その他のガス侵入 Threshold 値、ガ

ス透過経路の閉塞圧等については粘土物質の特徴を再現可能なモデルを構築したものである。また、コード化においては、複数種類の媒体によって構成される多次元の系に対する解析を可能とするための効率的な手法として、解析適用実績の豊富な2相流解析コードである TOUGH2 に、新たなモジュールとしてベントナイト/砂モデルを組み込む方法を採用した。

なお、この移行モデルの追加に当たり、ガス移行の代表的な機構の一つである溶存ガスの拡散についてもモデル化しこれを TOUGH2 に組み込むことにより、従来の気相での移行と溶存成分の拡散移行との連成解析を可能としている。

## (2) 数学モデル

以下にベントナイト/砂混合材中のガス、及び水の移行への適用を目的として開発された数学モデルを示す。

上述のように、水で飽和したベントナイト/砂混合材のガス透過においては、有意な量の間隙水が排出されるため、既存の毛管束モデル及び国際共同研究において開発が進められている亀裂進展モデル<sup>7)</sup>、毛管進展モデル<sup>9)</sup>を適用することはできない。したがって、ここでは粒状媒体中の流体の浸透率を移行媒体の比表面積（あるいは透水半径）と間隙率との関係で記述する Kozeny-Carman モデルを適用することにより、ベントナイト/砂混合材中のガス移行挙動の再現を試みたものである。

なお、本モデルは初期飽和状態にある媒体に対するガスの透過の評価を目的とするものであり、初期不飽和の媒体については考慮の対象としていない。

基本質量収支式を式 2-1 に示す。なお、以下の式は簡略化のため拡散項は除いている。拡散モデルについては次節にて記述する。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} \sum_{\beta=1}^N (\rho_{\beta} \phi_{\beta} X_{\beta}^{(\kappa)}) dV = \int_{\Gamma_n} \sum_{\beta=1}^N (\rho_{\beta} \mathbf{u}_{\beta} X_{\beta}^{(\kappa)}) \cdot \mathbf{n} d\Gamma \quad (\text{式 2.1})$$

- $V_n$  系内の  $n$  分割された任意の体積を持つ領域
- $\Gamma_n$   $n$  分割された各領域を取り囲む面積
- $\beta$  相 (水, ガス)
- $\rho_{\beta}$  相 $\beta$ の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $\phi_{\beta}$  相 $\beta$ によって湿られた間隙率
- $X_{\beta}^{(\kappa)}$  相 $\beta$ 中の成分 $\kappa$ の質量分率

$\mathbf{u}_\beta$  相 $\beta$ の Darcy 流速 ( $\text{m s}^{-1}$ )

水の Darcy 流速は式 2-2 で表わされ, 相対浸透率  $k_{rw}$  は飽和度  $S_w$  の関数として設定される。この関数は Corey モデル, Sandia モデル等の TOUGH2 内蔵の関数の他, ユーザー入力関数, テーブル入力が可能である。

$$\mathbf{u}_w = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_w} k_{rw} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \quad (\text{式 2.2})$$

$\mathbf{u}_w$  水の Darcy 流速 ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $\mathbf{k}$  絶対浸透率テンソル ( $\text{m}^2$ )  
 $k_{rw}$  水の相対浸透率  
 $\mu_w$  水の粘度 ( $\text{Pa s}$ )  
 $p_w$  間隙水圧 ( $\text{Pa}$ )  
 $\rho_w$  水の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )  
 $\mathbf{g}$  重力加速度 ( $\text{m s}^{-2}$ )

一方, ガスの Darcy 流速は式 2-3 で表わされ, 相対浸透率  $k_{rg}$  は飽和度  $S_g$  の関数として設定される。ベントナイト/砂モデルでは, 後述するようにガスの相対浸透率は毛管圧力  $p_c$  (TOUGH2 コード内では間隙水圧と間隙ガス圧の差  $p_w - p_g$  として定義される) に依存する関数として表わされる。

$$\mathbf{u}_g = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_g} k_{rg} (\nabla p_g - \rho_g \mathbf{g}) \quad (\text{式 2.3})$$

$\mathbf{u}_g$  ガスの Darcy 流速 ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $k_{rg}$  ガスの相対浸透率 (毛管圧  $p_c$  及び 時間  $t$  に依存)  
 $\mu_g$  ガスの粘度 ( $\text{Pa s}$ )  
 $p_g$  間隙ガス圧 ( $\text{Pa}$ )  
 $\rho_g$  ガスの密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )

これまでのガス透過試験結果より, ガス透過後のガス浸透率の上昇は急速な過程であると考えられるため, ガスの相対浸透率は, 式 2-4 に示すように毛管圧力が上昇し最初

にガス侵入時の過剰間隙ガス圧  $p_o$  を超えるまで 0 であり、ガス侵入により瞬時に  $k_0$  に達するものとした。ここで、数値解を得る上で透過性の不連続な変化が問題となるため、式 2-5 に示す関数により連続的な変化となるような処理を行っている。

$$k_{rg}(t = t_e) = k_0 \quad (\text{式 2-4})$$

$t_e$  ガスが媒体に侵入する時間 (s)  
 $k_0$  ブレイクスルー時のガスの相対浸透率

$$k_{rg} = \frac{k_0}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[ w_1 \frac{-p_c - p_b}{p_b} \right] \right\} \quad (\text{式 2-5})$$

$w_1$   $k_{rg}$  の増加速度を決定するスケールファクタ  
 $p_c$  毛管圧力 (Pa)  
 $p_b$  ガスブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧 (Pa)

ブレイクスルー後、ガスの相対浸透率は式 2-6、2-7 に示すように、ガス圧力の変化に連動して変化する毛管圧力に対して一定の時間遅れをもって変化し、最大値  $k_\infty$  まで上昇するものとした。

$$\frac{\partial k_{rg}}{\partial t} = -\lambda \{ k_{rg} - k_\infty(p_c) \} \quad (\text{式 2-6})$$

$$k_\infty(p_c) = k_0 \left( \frac{-p_c - p_r}{p_b - p_r} \right) \exp \left[ 4 \frac{-p_c - p_b}{G} \right] \quad (\text{式 2-7})$$

$\lambda$  時定数 ( $s^{-1}$ )  
 $p_b$  ガスブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧 (Pa)  
 $p_r$  移行経路閉塞時の過剰間隙ガス圧 (Pa)  
 $G$  物質固有の弾性に係る定数 (Pa)

ガス圧力が低下し  $p_r$  を下回ると、ガスの相対浸透率は 0 となる。

一方、飽和度の変化については、式 2-8～式 2-11 の関係に従って算定される。ガスの飽和度  $S_g$  は Kozeny-Carman モデルに従い、間隙ガス圧に連動して変化する毛管圧力の関数として記述されるものとした。

$$S_w = 1 - S_g \quad (\text{式 2-8})$$

Kozeny-Carman モデルにおける絶対浸透率  $k$  と透水半径  $r_h$  との関係を式 2-9 に示す。

$$k = \frac{\phi \tau r_h^2}{C} \quad (\text{式 2-9})$$

$k$  有効浸透率(m<sup>2</sup>)  
 $C$  形状因子  
 $r_h$  透水半径(m)

毛管圧力  $P_c$  は Young-Laplace の式を用いて式 2-10 のように表わせる。

$$r_h = \frac{\sigma}{-p_c} \quad (\text{式 2-10})$$

$\sigma$  表面張力

ここで  $\phi_g = S_g \phi$  ,  $k_g = k_{rg} k$  であることから、式 2-9 は式 2-11 に変形できる。したがって、ベントナイト/砂モデルではガスの飽和度は式 2-11 で表わせるものとしている。

$$S_g = \frac{C k_{rg} k \left( \frac{-P_c}{\sigma} \right)^2}{\phi \tau} \quad (\text{式 2-11})$$

図 2-1にベントナイト/砂モデルを組込んだ TOUGH2 改良コードの計算フロー図を示す。

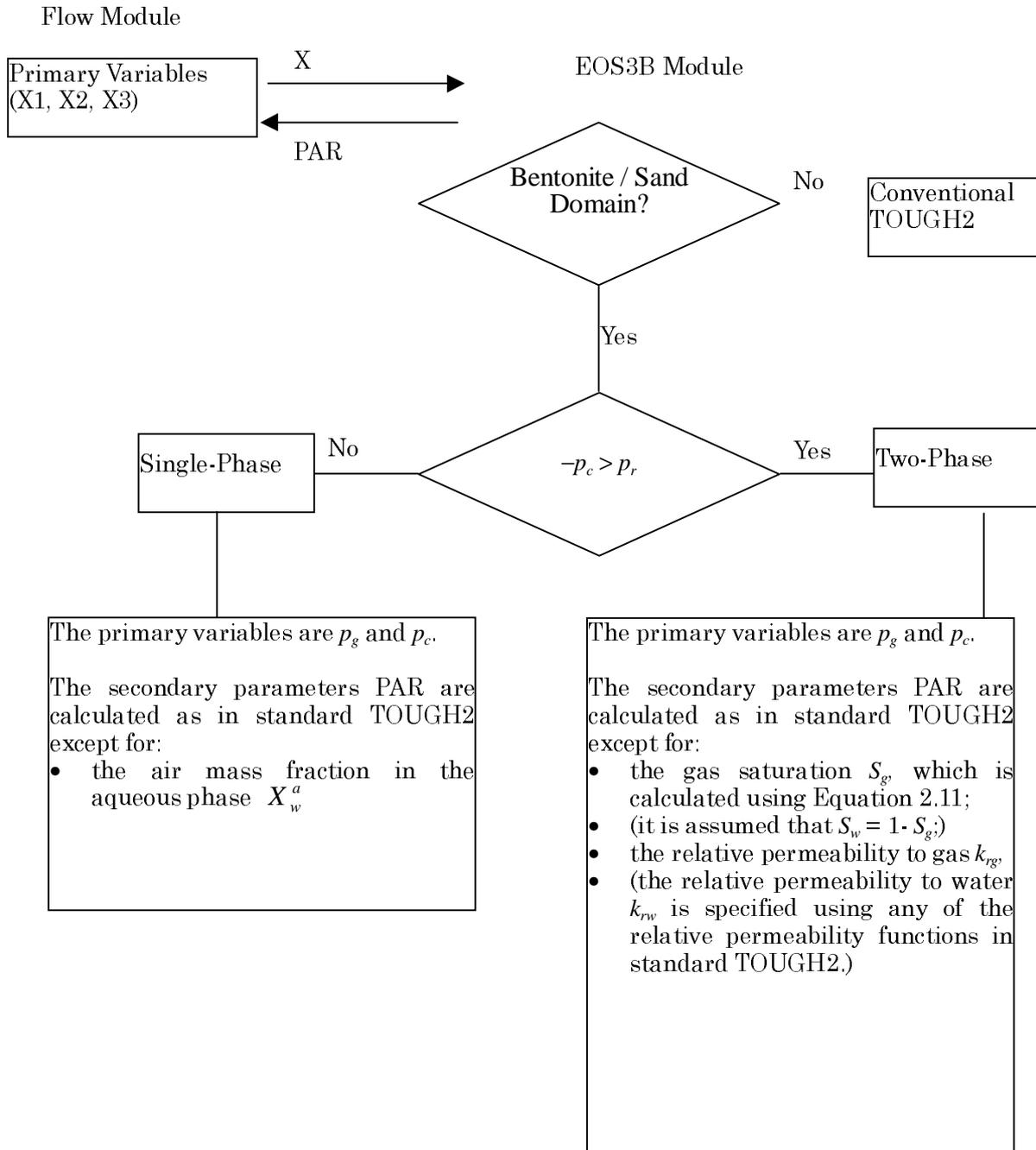


図 2-1 ベントナイト/砂モデルの計算フロー図

## 2.1.2 拡散モデル

ここでは、各種移行媒体中での溶存ガスの拡散による移行を評価するために、TOUGH2コードに付加されたモデルについて記述した。溶存ガス成分の拡散による移行を解析する移行モデルと、それを組み込んだシミュレーションコードについて、その概要を示す。

### (1) モデル化の前提と要求事項

粘土系材料中のガス移行については、これまで高レベル放射性廃棄物の処分研究において、拡散による移行と2相流による気相での移行が個別に評価され、拡散のみを考慮した場合には緩衝材中の実効拡散係数が $10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ の桁になると、拡散によるガス移行の寄与が大きくなること等が明らかにされつつある<sup>10)</sup>。近年、緩衝材材料の実効拡散係数、及び金属の腐食速度<sup>11)</sup>に対する試験、評価が進展するに従い、気相による移行と溶存ガスの拡散による移行の寄与が拮抗する場合もあると考えられる。この場合上記2種類の移行機構を連成させた解析が必要である。したがって、東洋エンジニアリング(株)はAEA Technology plc. (現 Serco Assurance 社) と協力して1999年に既存の2相流解析コードTOUGH2のフローモデル、及びそれに組み込まれたベントナイト/砂モデルに溶存ガスの拡散モデルを連成したコードの開発を行った。

### (2) 数学モデル

以下に各移行媒体中の溶存ガスの拡散による移行に対して適用された、数学モデルについて記述する。

基本質量質量収支式、及びその総質量項、フラックス項を式2-12～式2-14に示す。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^{(k)} dV = \int_{\Gamma_n} \mathbf{F}^{(k)} \cdot \mathbf{nd}\Gamma + \int_{V_n} q^{(k)} dV \quad (\text{式 2-12})$$

$$M^{(k)} = \phi \sum_{\beta=1}^{\text{NPH}} \rho_{\beta} S_{\beta} X_{\beta}^{(k)} \quad (\text{式 2-13})$$

$$\mathbf{F}^{(k)} = \sum_{\beta=1}^N \left( X_{\beta}^{(k)} \mathbf{F}_{\beta} - \rho_{\beta} \phi S_{\beta} \tau d_{\beta}^{(k)} \nabla X_{\beta}^{(k)} \right) \quad (\text{式 2-14})$$

$M$	総質量, (kg/m <sup>3</sup> )
$\kappa$	流体構成物質
$q$	シンク, ソース項(kg/m)
$\mathbf{F}$	質量フラックス項(kg)
$\beta$	流体の相 (気, 液)
$X_{\beta}^{(\kappa)}$	相 $\beta$ で存在する流体成分 $\kappa$ の質量分率
$\mathbf{F}_{\beta}$	Darcy 則に従う相 $\beta$ のフラックス (移流項)
$\rho_{\beta}$	相 $\beta$ の密度(kg/m <sup>3</sup> )
$\phi$	間隙率
$S_{\beta}$	相 $\beta$ の飽和度
$\tau$	移行媒体の屈曲度
$d_{\beta}^{(\kappa)}$	相 $\beta$ で存在する流体成分 $\kappa$ の分子拡散係数(m <sup>2</sup> /s)

## 2.2 ガス透過試験のシミュレーション

本節では, 2.1項に数学モデル及び計算の流れを示したベントナイト/砂モデルを用いて, ベントナイト材料 (クニゲル V1) に対するガス透過試験結果のシミュレーションを実施し, ガス排出速度の経時変化に対してフィッティングを行うことにより, 各種モデルパラメータの設定を行うとともに, 当該モデルの 100 %ベントナイト中のガス透過挙動に対する再現性の限界について検討し, モデルの適用性について評価を行った。

### 2.2.1 ベントナイトのガス透過試験

ここでは核燃料サイクル開発機構 (以下, JNC という。) によってガス移行可視化試験装置を用いて実施された, 100%ベントナイト (クニゲル V1) 試料に対するガス透過試験結果のうち, 排出ガス速度, 及び注入ガス圧力の変化に対するフィッティング結果を示した。また, これと比較するため英国地質調査所 (BGS) が実施した 100%ベントナイト (MX-80) 試料に対するガス透過試験結果に対して, 過去に実施したフィッティング結果も示した。

#### (1) JNC による試験

##### (a) 試験条件

ベントナイト (クニゲル V1) 試料に対して行った当該ガス透過試験の試験条件, 及び供試体諸元を表 2-1に示した。また, 本試験に使用したガス透過試験装置の概略のプロセスフロー<sup>12)</sup>を図 2-2に, 装置外観を図 2-3, 及び図 2-4, に示した。

表 2 1 主要試験条件

項目	値 / 手法 / 仕様	備考
材料	クニゲル V1 ( 100% )	クニミネ工業製
試料寸法	3.8 cm × 2.0 cm H	円柱状
乾燥密度	1.58 Mg/m <sup>3</sup>	
間隙率	0.415	粒子密度 : 2.7 Mg/m <sup>3</sup> より算出
ガス注入方法	注入ポンプ一定流速	0.05 mL/min (3,000 μ L/hr)
背圧	0.101 MPa	大気圧
拘束圧	0.0 MPa	体積歪拘束

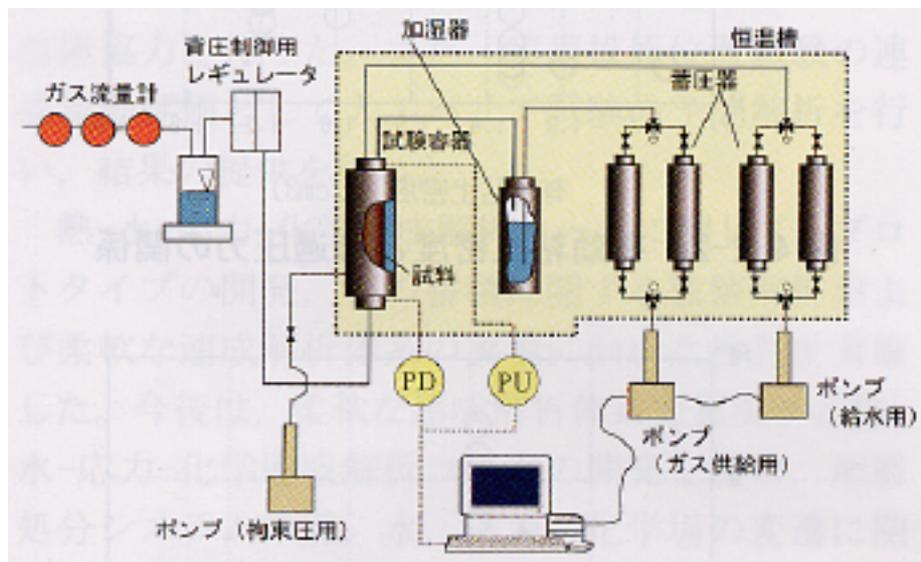


図 2-2 ガス移行可視化試験装置プロセスフロー



図 2-3 ガス移行可視化試験装置外観（アキュムレータ）

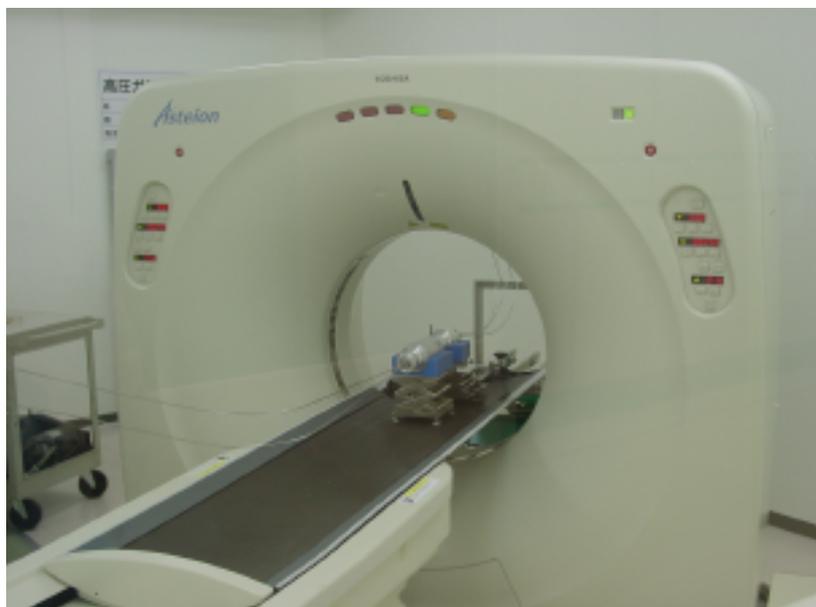


図 2-4 ガス移行可視化試験装置外観（試験容器，X線 CT スキャナ）

## (b) 試験結果

ガス移行可視化試験装置によって得られた試験結果より、ガス排出速度及び累積排出水量の経時変化を、それぞれ図 2-5～図 2-7、及び図 2-8～図 2-9に、また、供試体上下流端の圧力の経時変化については図 2-13に示した。

ガスの注入は、本試験においても注入ポンプを一定速度で運転することにより行っている。本試験におけるポンプの注入速度は、0.05 ml/min で一定とした。

図 2-5、及び図 2-6に示されているように、約 22.83 日時点で最初のガス排出速度の極大値である 116 ml/min のピークが観察され、さらにその後、約 22.88 日時点で本試験の最大値となる 1,700 ml/min に達するピークが出現した後、約 22.96 日時点においてガスの排出は停止している。ここで、ブレイクスルーの検出時点は試験結果を詳細に観察することにより、最初のピークの立ち上がりの時点ではなくさらに前の時点にあることが明らかになった。図 2-7に示されたように、約 22.3 日時点からほぼ連続的なガスの排出が観測されており、この時点でブレイクスルーが生じたものと考えられる。このことは、図 2-8及び図 2-9に示されているように、試験装置からの水の排出が約 22.32 日以降に生じていることから裏付けられる。ブレイクスルー後、ガス排出速度は約 0.5 ml/min から 1 回目のピークの立ち上がりまでの間に、約 1.2 ml/min まで緩やかに増加している。

図 2-5、図 2-6、及び図 2-7に示したガス排出フラックスから、下式に従って供試体全体としての平均的有効浸透率を算定した結果を、図 2-10から図 2-12にそれぞれ示した。

$$k_g = \frac{2\eta QLP_N}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (\text{式 2-15})$$

ここで、

$k_g$  : ガスの有効浸透率 : (m<sup>2</sup>)

$\eta$  : He の粘性係数 : 19.6 × 10<sup>-6</sup> (Pa·s : at 1atm)

$A$  : 試料の断面積 : (m<sup>2</sup>)       $L$  : 試料の長さ : (m)

$Q$  : 排出ガス速度 : (m<sup>3</sup>/s)       $P_1$  : 上流側圧力 : (Pa)

$P_2$  : 下流側圧力 : (Pa)       $P_N$  : 大気圧 : 1.01 × 10<sup>5</sup> (Pa)

ブレイクスルー直後のガスのフラックスに対する浸透率が  $10^{-19} \text{ m}^2$  の桁であったのに対して、1 番目のピーク時に  $10^{-17} \text{ m}^2$  の桁に上昇し、さらに 2 番目のピーク時には  $10^{-15} \text{ m}^2$  の桁まで達している。このような絶対浸透率 ( $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ ) を大きく超える急激なガスフラックスの上昇は、供試体側面の試験容器との界面に卓越流路が形成された可能性があると考えられる。

ガス注入圧力は図 2-13 に示すように、一定注入速度でガス注入ポンプを運転することにより上昇を続けた後、22.30 日後のブレイクスルー発生時点では圧力上昇速度が僅かに低下するが、排出フラックスが小さいため視覚的に大きな変化は見られない。その後、ガス排出フラックスの最初のピークによる圧力の急速な低下が 22.83 日時点で開始し、さらに、2 番目のピークの出現による圧力低下速度の増加が 22.90 日時点で開始している。ガス注入圧力は、この急速な低下の後約 790 kPa で定常に達し、この圧力において移行経路が閉塞したことにより、約 22.96 日時点でガスの透過が停止したことを示している。

ここで、有効粘土密度  $1.6 \text{ Mg/m}^3$  のクニゲル V1 試料の膨順応力は約 1,000 kPa 程度である<sup>8)</sup> のに対して、ブレイクスルー時のガス注入圧力が 2,610 kPa であり、膨順応力の 2 倍以上となっている。これはガス流路の進展が緩やかに進行する現象であり、ガス圧力の変化に対して時間遅れを生じる特性を有するとした場合、昇圧速度が BGS において採用されている値に比較して大きいことから、この時間遅れに係る特性が顕著化して現れたことが考えられる。また、BGS では拘束圧力を静水圧条件で一定としているが、本試験では体積歪拘束条件で試験を行っていることから、移行経路形成に要する応力が大きくなったことも考えられる。

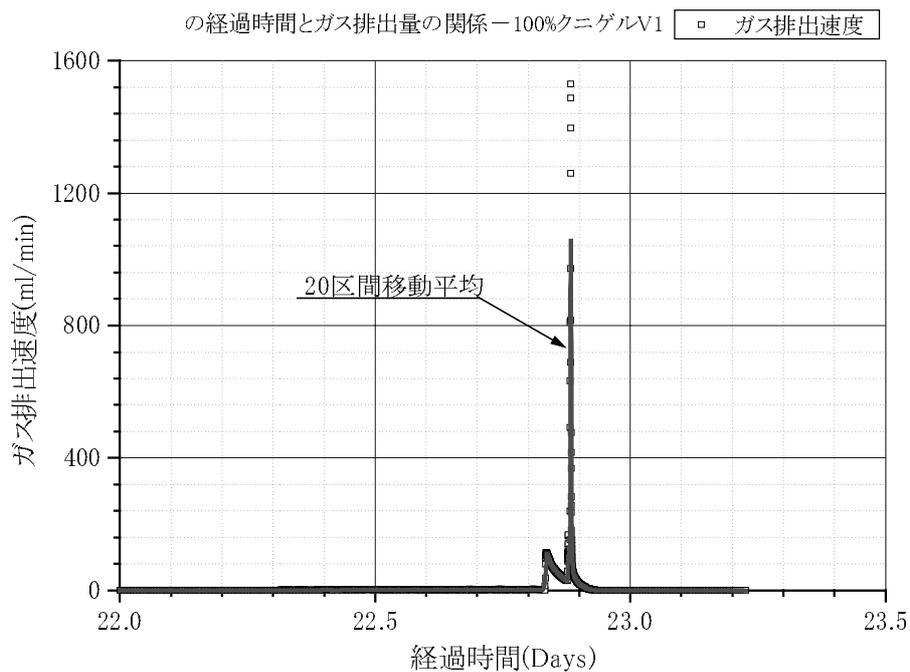


図 2-5 試験結果 クニゲル V1 (1)ーガス排出速度 (広域)

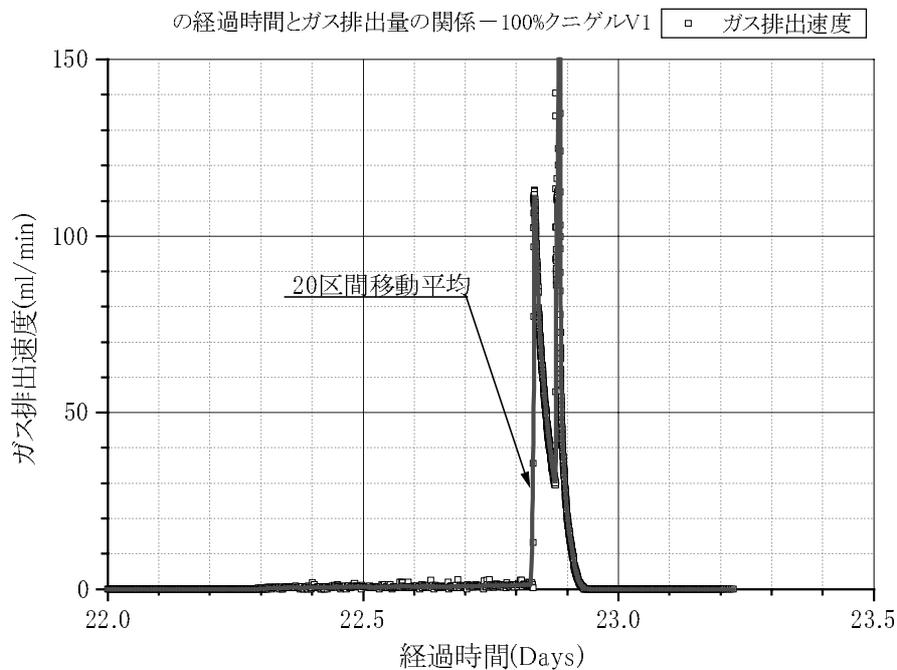


図 2-6 試験結果 クニゲル V1 (2)ーガス排出速度 (拡大 1)

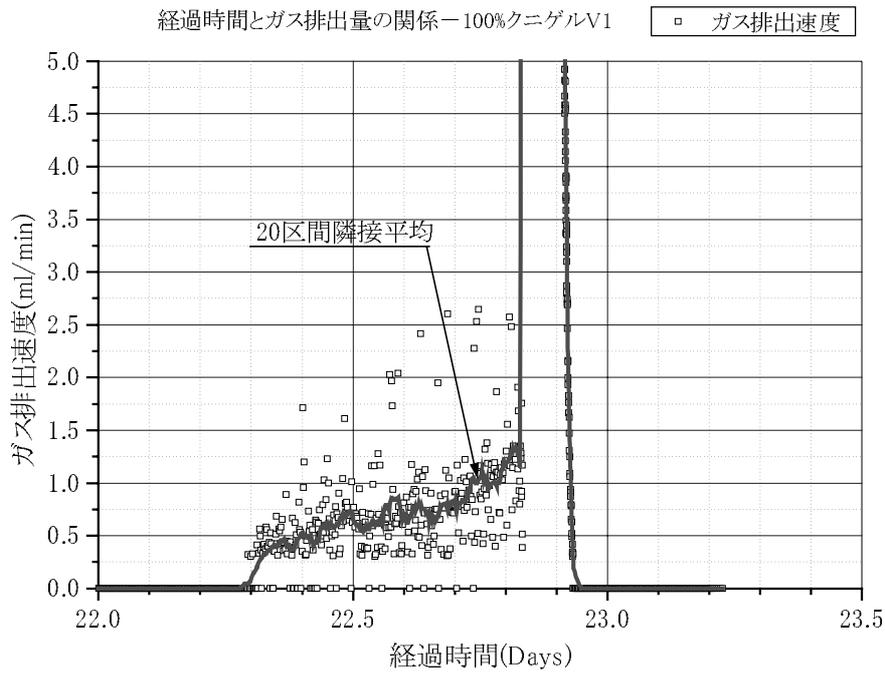


図 2-7 試験結果 クニゲル V1 (3)－ガス排出速度 (拡大 2)

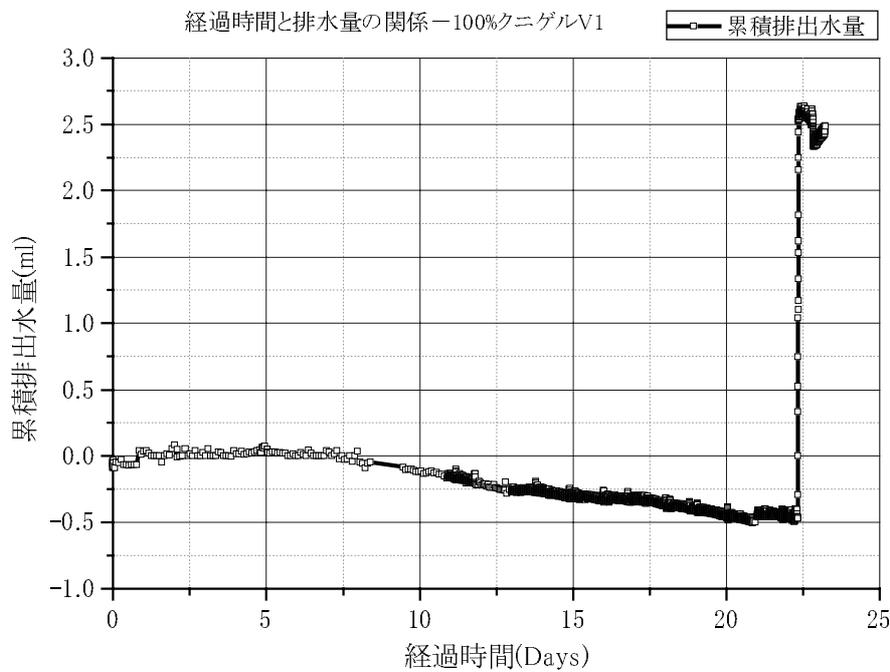


図 2-8 試験結果 クニゲル V1 (4)－累積排水量 (広域)

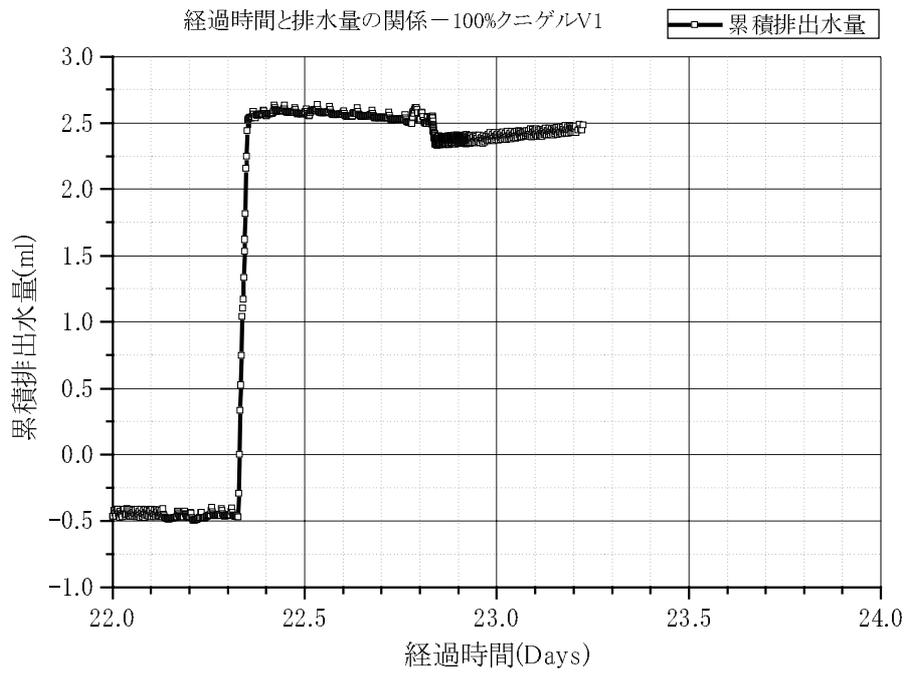


図 2-9 試験結果 クニゲル V1 (5)－累積排水量 (拡大)

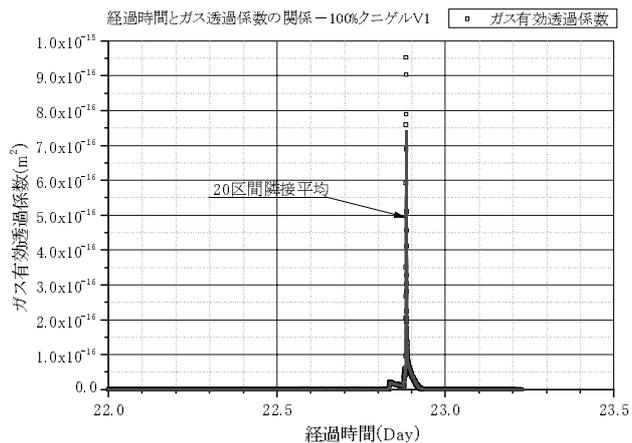


図 2-10 試験結果 クニゲル V1 試料 (5)ーガス有効浸透率 (広域)

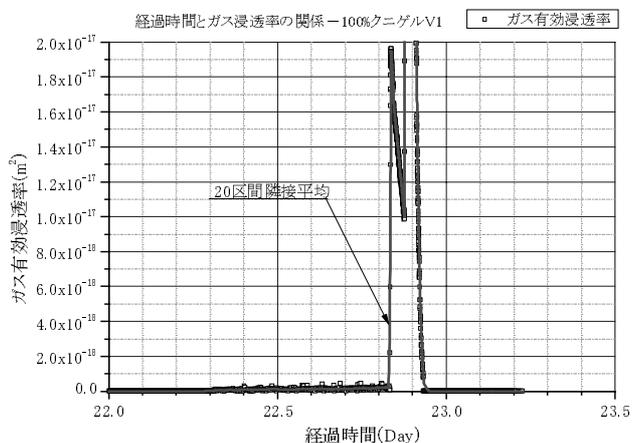


図 2-11 試験結果 クニゲル V1 試料 (6)ーガス有効浸透率 (拡大 1)

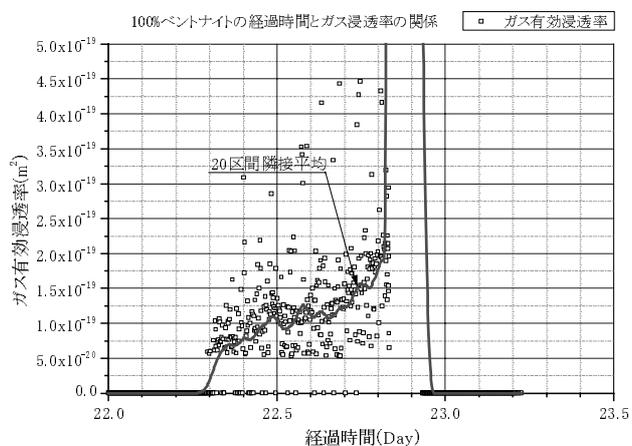


図 2-12 試験結果 クニゲル V1 試料 (7)ーガス有効浸透率 (拡大 2)

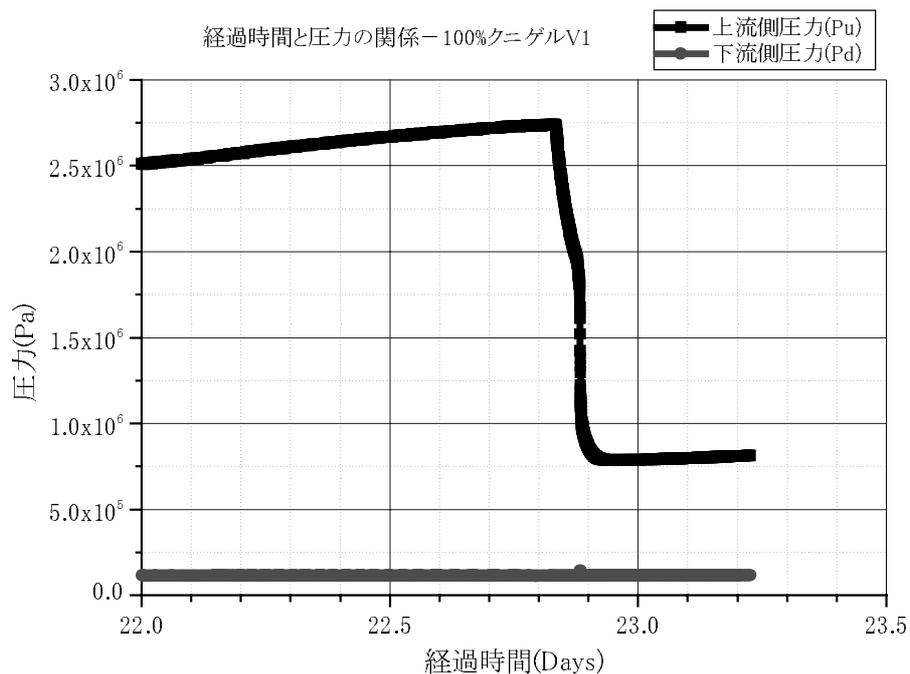


図 2-13 試験結果 クニゲル V1 (6)一供試体上下流側圧力

(2) BGS による試験

(a) 試験条件

MX-80 ベントナイト試料に対して行ったガス移行試験の試験条件、及び供試体諸元を表 2-2に示した<sup>1)</sup>。

表 2-2 主要試験条件-BGS

項目	値/手法/仕様	備考
材料	Mx-80	ワイミングベントナイト
試料寸法	4.90cm φ × 4.90cm H	円柱状
乾燥密度	1.626Mg/m <sup>3</sup>	
間隙率	0.397	
ガス注入方法	一定流速	375 μ L/hr
背圧	1.01MPa	有効応力 14.99MPa
拘束圧	Mx-80	(初期：注入圧負荷前)

## (b) 試験結果

得られた試験結果のうち、ガス排出速度及びガス注入速度の経時変化について図 2-14 に、供試体上下流端間の差圧の経時変化について図 2-15に示した。

375  $\mu$  L/hr の一定速度でガスを注入することによってガス注入圧力が上昇し、供試体上下流端間の差圧が約 15.3 MPa を超えると、ガスが供試体を通過（ブレイクスルー）する。このときガスのフラックスは急激に上昇した後に低下に転じ、ガス注入速度と等しい値に漸近する。この試験ではガス排出速度が定常に達したところでガスの注入を一旦停止し、ガスの排出がほぼ停止した時点で再度圧力を上昇させることにより 2 度目のブレイクスルーを発生させている。この 2 度目のブレイクスルー検出時点におけるガス注入圧力は、1 度目のブレイクスルー検出時に観察されたガス注入圧力よりも低い値となっている。その後、ガスフラックスの応答を観測しながらガス注入速度、ガス注入圧力を段階的に低下させることによって、ブレイクスルー発生時の圧力より低いガス注入圧力で、再度ガスの移行が停止する挙動が示されている。

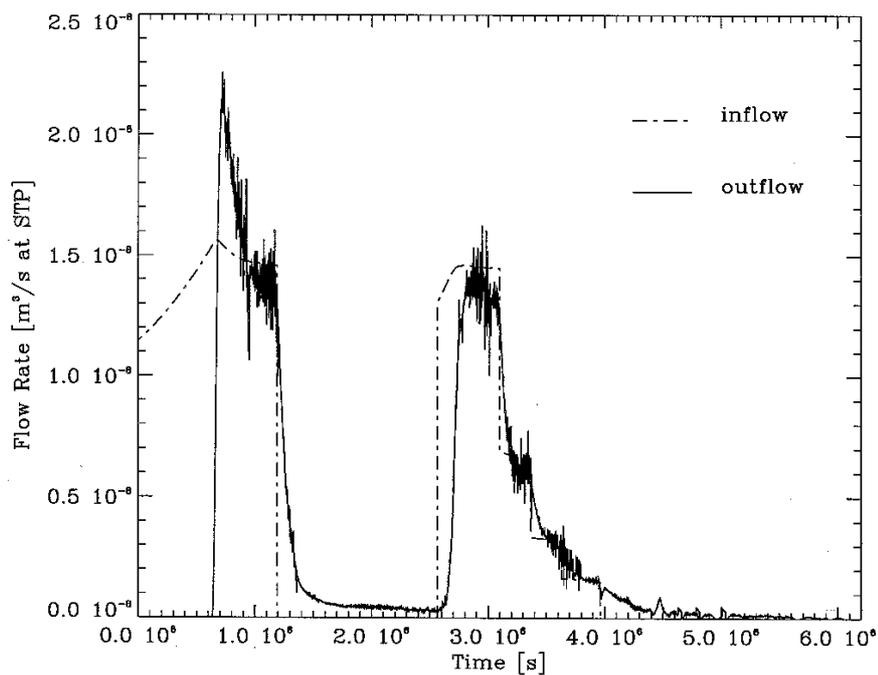


図 2-14 試験結果 MX-80 (1)ーガス注入及び排出速度

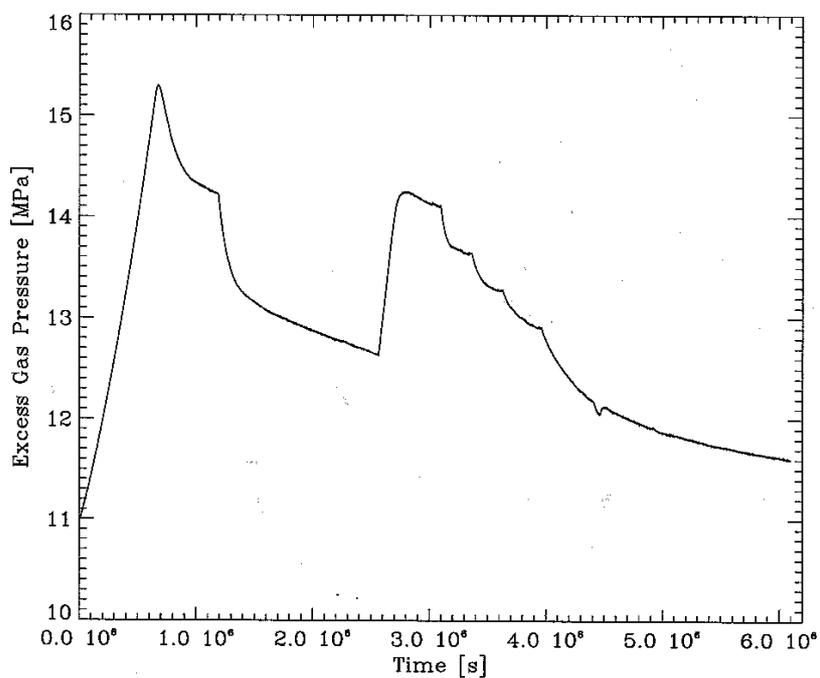


図 2-15 試験結果 MX-80 (2)ー供試体上下流差圧

## 2.2.2 シミュレーション

### (1) JNCによる試験

図 2-5から図 2-13に示した結果のうち、ブレイクスルー及びその直後のガス排出速度とガス注入差圧の経時変化に対して、ベントナイト/砂モデルを用いてフィッティングを行った。なお、その後のガス排出速度のピークに対しては、上述のように供試体側面の試験容器との界面に形成された卓越流路による透気の可能性があると考えられ、また、極めて短時間内での浸透率の急激な上昇であり、連続媒体モデルによって数値解を得ることは極めて困難であると考えられたが、ここでは最初のガス排出速度のピークに対するガス排出速度とガス注入差圧についてフィッティングを試みた。

#### (a) 解析条件

前述のように、解析には改良型の TOUGH2 コードを用いたが、同コードには He の状態量を評価するモジュールがないことから、EOS3（ガスを空気とした場合の解析モジュール）を使用した。この場合、He の粘度は常圧付近（0.1 MPa at 300° K）で空気の 1.07 倍、高圧下（5.0 MPa at 300° K）では 1.03 倍程度であり、解析モデルの適用性を評価する上での問題はないと判断できる。

解析上の幾何体系、及び注入圧力の昇圧に対する模擬方法等の各種条件は以下の通りである。

#### (7) 空間分割

供試体に対する空間分割概念図を図 2-16に示す。解析は 1 次元で行うこととし、供試体部のエレメントは供試体軸方向（流体移行方向）に 34 分割とした。各エレメントの供試体軸方向の厚さについては、上流側から 17 エレメントについて 1 mm, 2 エレメントについて 0.5 mm, 5 エレメントについて 0.2 mm, 最も下流側の 10 エレメントについては 0.01 mm とした。

#### (4) 初期・境界条件

境界条件としては、最上流側のエレメントにアキュムレータ/ポンプ系の容積を設定し、一定速度で容積が減少して内部のガスが圧縮される過程をモデル化することにより、ガス注入圧の上昇を模擬するものとした。また、供試体下流側の金属焼結フィルタは省略し、大気圧に等しい“inactive”エレメントを配することにより、境界外側の熱力学的条件を一定として、大気中への放出を模擬するものとした。初期条件は表 2-3にも示すように、注

入ガス圧力（最上流側エレメント圧力）を 0.754 MPa，供試体間隙水圧は大気圧に等しい 0.112 MPa，最下流側の “inactive” エレメントについても大気圧に等しい 0.112 MPa とし解析を実施した。

#### (ウ) パラメータ値の設定

ベントナイト／砂モデルに使用されるモデルパラメータ値の設定に対する基本的考え型は以下の通りである。

- ・初期注入ガス圧力 ( $P_g|_{t=0}$  at アキュムレータ) : 試験で得られた値 (試験開始時注入ガス圧力)
- ・初期間隙水圧 ( $P_w|_{t=0}$  at ベントナイト) : 試験で得られた値 (背圧 ; 以後一定)
- ・初期間隙ガス圧 ( $P_g|_{t=0}$  at ベントナイト) : 試験温度における飽和水蒸気圧
- ・絶対浸透率 ( $k$ ) : 透水試験によって得られた飽和試料に対する水の浸透率
- ・ブレイクスルー時のガス相対浸透率係数 ( $k_0$ ) : 試験結果で得られたブレイクスルー時の有効浸透率を基に繰返し計算により設定
- ・ブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧 ( $P_b$ ) : 試験結果で得られたブレイクスルー時の注入ガス圧力を基に繰返し計算により設定
- ・移行経路閉塞時過剰間隙ガス圧 ( $P_r$ ) : 試験結果で得られたガスフラックス停止時の注入ガス圧力
- ・弾性に係る定数 : 本来，下式に示すようにヤング率とポアソン比によって求められるものであるが，飽和粘土に対するヤング率の実測値を用いた場合より挙動の再現性が向上することから，ここではフィッティングパラメータとし，MX-80 試料に対する設定値を基に推定

$$G = \frac{E}{1+\nu}$$

$E$       ヤング率 (Pa)  
 $\nu$       ポアソン比 (-)

- ・時定数 ( $\lambda$ ) : 主にブレイクスルー時のガス排出フラックスの上昇率との関係で繰返し計算により設定
- ・形状因子 ( $C$ ) : 主に試料からの排出水量との関係で繰返し計算により設定 (今回は排出水量がごく微小であると仮定して MX-80 試料での設定値を使用)
- ・ $k_{rg}$  の増加に係るスケールファクタ ( $w_1$ ) : ブレイクスルー時の急激な浸透率の上昇による不連続性の影響を緩和するため， $\Delta t$  及び  $P_g$  vs.  $k_{rg}$  の関係を考慮して設定

なお、本解析ではブレイクスルー後暫く後に出現するガスフラックスの急激な上昇に対応するため、ピーク発生時点で、ガスの相対浸透率、ガスの相対浸透率の増加に係るスケールファクタ、時定数をさらに変化させて解析を行った。

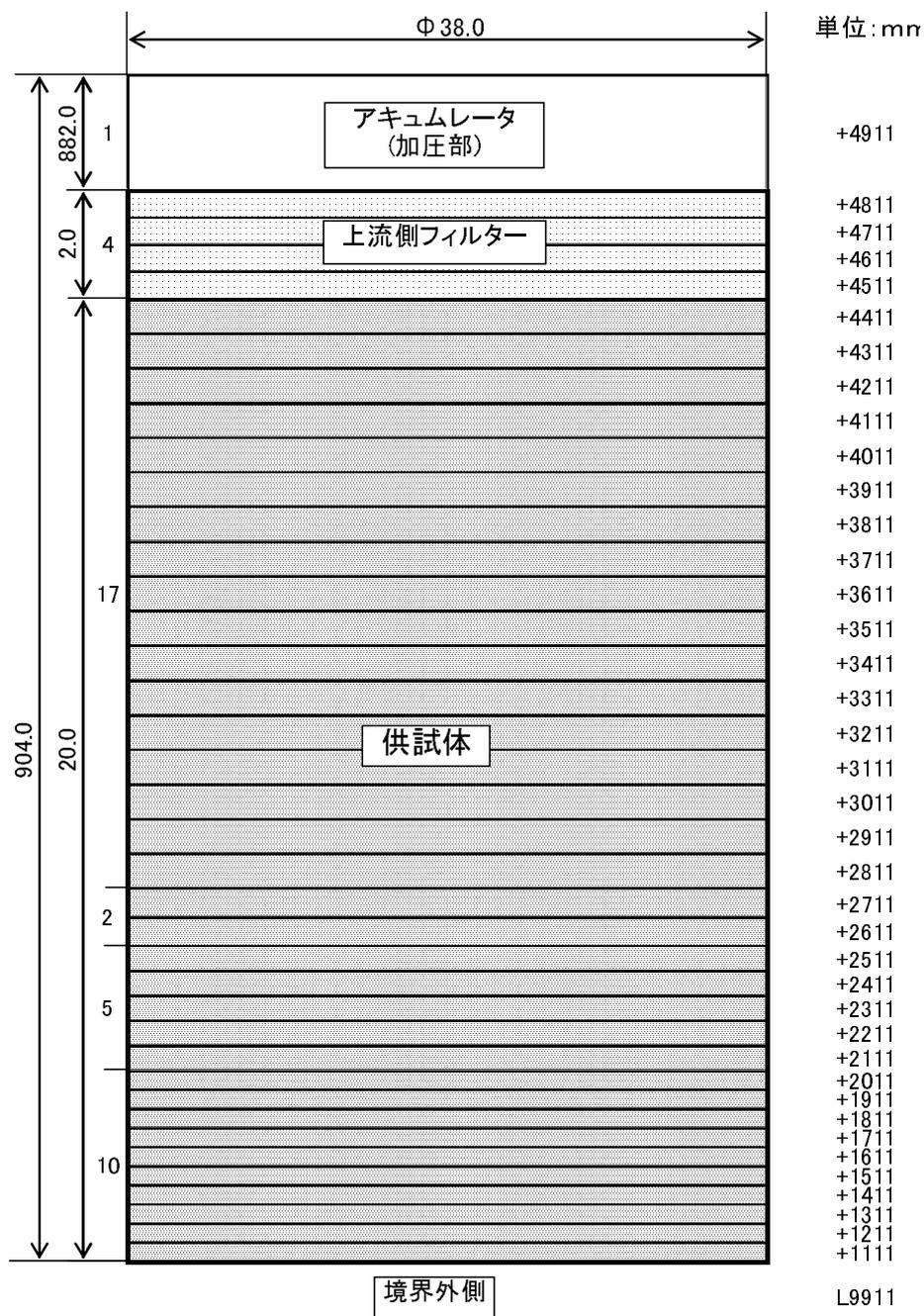


図 2-16 空間分割概念図－クニゲル V1

## (b) 解析結果

上述の解析条件に従って、試験結果に示されたガス注入圧力、及びガス排出速度に対して繰返し計算によるフィッティングを行った。その結果、クニゲル V1 試料に対しては表 2-3に示す各種モデルパラメータ値を設定した場合に、最も実験値に近い結果が得られた。

表 2-3に示されたパラメータを用いた解析でのフィッティング結果を、ガス排出速度について図 2-17、及び図 2-18に、またガス注入圧力については図 2-19に示した。図 2-17はブレイクスルーの発生とその直後のガス排出速度の経時変化を示している。この段階でブレイクスルー時のガスの相対浸透率は10としているが、22.30日のブレイクスルーの発生時点とその後の最初のガス排出速度の急激な増加までの期間は、実験結果とシミュレーション結果とはよく一致している。一方、図 2-18は第1ダイナミックフローによる最初のガス排出速度のピークについて実験値と解析結果を比較したものであり、この段階ではブレイクスルー後のガスの相対浸透率を $3.75 \times 10^5$ としているが、ピーク出現時期及びピーク値については実験結果と良い一致が見られるものの、ピーク後のガス排出速度は、実験結果がピーク値を過ぎた後に徐々に低下するのに対して、シミュレーション結果ではピーク値を過ぎた後実験値に比較して急速にガス排出速度が低下し、約 36 ml/min 付近まで低下した後徐々に低下する挙動となっている。この原因としては、ピーク出現時期に解析を中断してガスの相対浸透率を解析初期段階から約 4 桁増加させる等して計算を再開させたため、不連続性の非常に大きい条件での計算となり、 $\Delta t$ を相当程度小さい値として計算を行っているが、現実的な計算時間の範囲内では相対誤差との関係で、急激に生じる実現象に対して追従できなかったことによると考えられる。

図 2-19にはガス注入圧力の経時変化について実験結果との比較を示しているが、試験開始後 22.30 日のブレイクスルー以降第1ダイナミックフロー出現までの期間については、ガス排出速度が実験結果と良く一致していることから、ガス注入圧力についても実験結果と良い一致を示している。一方、第1ダイナミックフロー出現以降については、上述のように実験結果に比較して解析結果のガス排出速度がピーク後急激に低下することから、ガス注入圧力の低下が実験結果に比較して緩やかとなっており、約 22.88 日時点で出現する第2ダイナミックフロー開始時点でのガス注入圧力は、実験結果が約 1.96 MPa であるのに対して解析結果では約 2.30 MPa となっており、再現性は高いとはいえない結果となった。なお、図 2-20には試験装置からの累積排出推量について、試験結果と解析結果を比較して

いるが、実験結果は気液分離ポッド接合チューブのテンションの変化、あるいは気液分離ポッド内の水の蒸発によると思われる累積水量の減少の後、約 22.32 日以降に約 2 ml の水が急速に排出されている。これは上述のようにガスのブレイクスルーによる供試体下流側フィルタ及び配管内の残留水が排出されたものと考えられる。一方解析結果は、供試体上流側フィルタへのガスの侵入によるフィルタ内間隙水の排出量が約 0.29 ml、供試体内からの間隙水排出量約 0.1 ml の合計 0.39 ml となった。このときの上流側フィルタ及び供試体の平均間隙水飽和度は、それぞれ 0.64, 0.99 であった。供試体部分については、高スメクタイト密度の材料に特徴的な排出水量の極めて小さい挙動が再現されている。

なお、解析では供試体下流側のフィルタ及び配管を考慮していないため、累積排出水量は実験値に比較して小さい値となっている。

表 2-3 クニゲル V1 に対するモデルパラメータ

パラメータ	設定値	備考
初期条件		
注入ガス圧力	0.754 MPa	
間隙水圧	0.112 MPa	
間隙ガス圧	2336.6 Pa	飽和水蒸気圧 at20°C
パラメータ (ブレイクスルー前)		
絶対浸透率	5.0 E-20 m <sup>2</sup>	試験結果
ブレイクスルー時のガス相対浸透率係数	1.0 E+1	試験結果に基づき設定
ブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧	2.48E+6 Pa	試験結果に基づき設定
移行経路閉塞時過剰間隙ガス圧	8.01E+5 Pa	試験結果に基づき設定
弾性に係る定数	3.1 E+6 Pa	フィッティングパラメータ
時定数	3.0 E-5	フィッティングパラメータ
形状因子	5.0 E-4	フィッティングパラメータ
$k_{rg}$ の増加に係るスケールファクタ	1.0 E+3	フィッティングパラメータ
パラメータ (ブレイクスルー後)		
絶対浸透率	5.0 E-20 m <sup>2</sup>	試験結果
ブレイクスルー時のガス相対浸透率係数	3.75 E+5	試験結果に基づき設定
ブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧	2.48E+6 Pa	試験結果に基づき設定
移行経路閉塞時過剰間隙ガス圧	8.01E+5 Pa	試験結果に基づき設定
弾性に係る定数	3.1 E+6 Pa	フィッティングパラメータ
時定数	5.0 E-2	フィッティングパラメータ
形状因子	5.0 E-4	フィッティングパラメータ
$k_{rg}$ の増加に係るスケールファクタ	6.9 E+2	フィッティングパラメータ

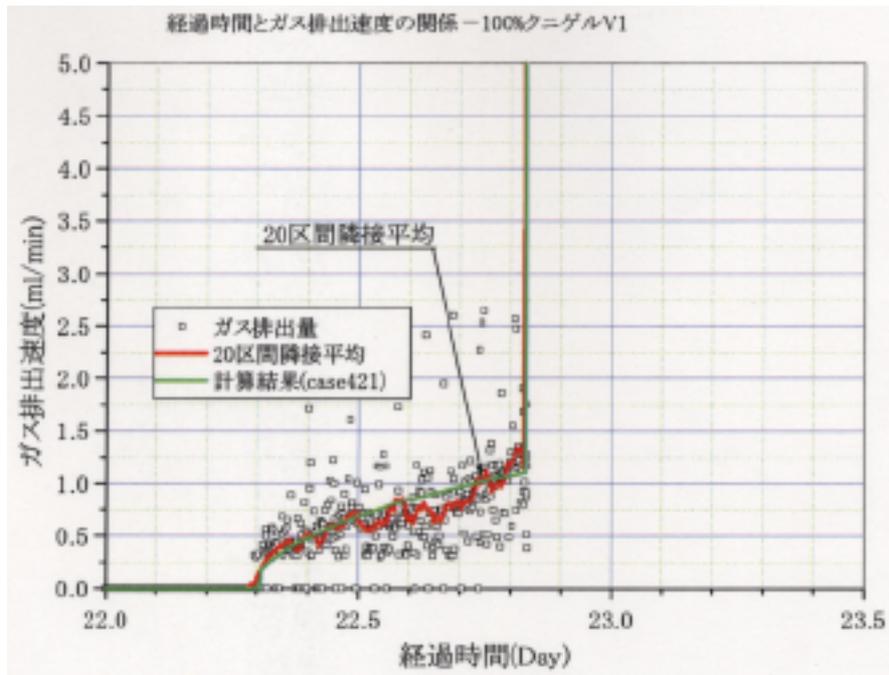


図 2-17 シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (1) - ガス排出速度 (ブレイクスル-時)

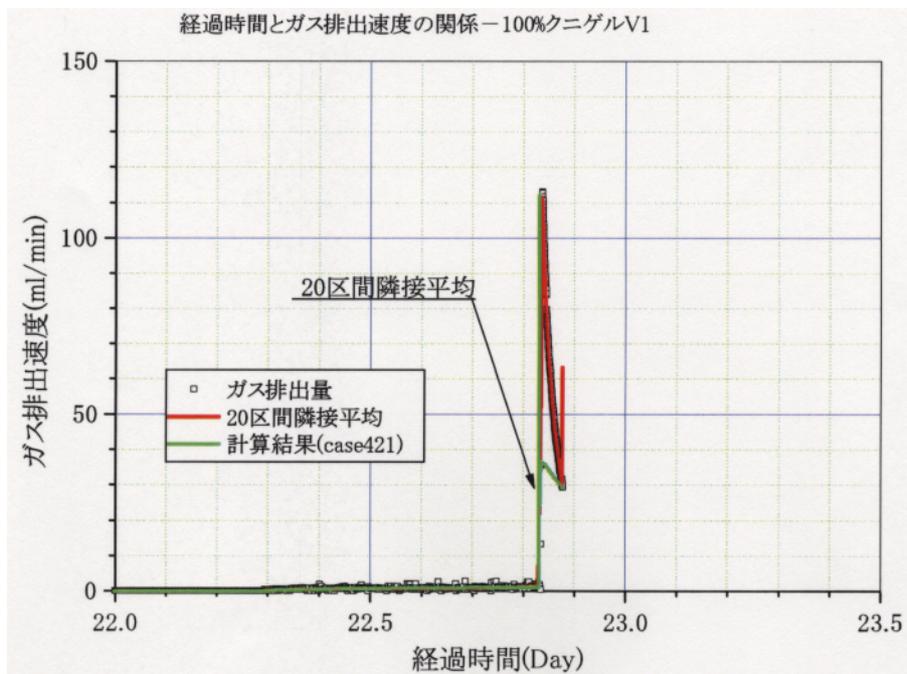


図 2-18 シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (2) - ガス排出速度 (第1ピーク時)

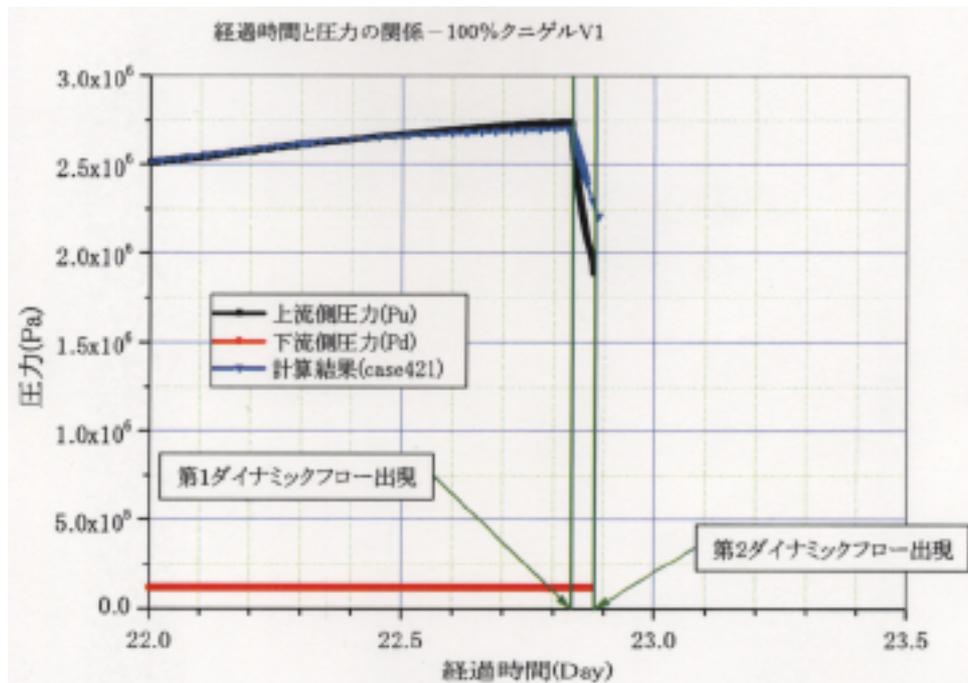


図 2-19 シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (3) - 注入圧力

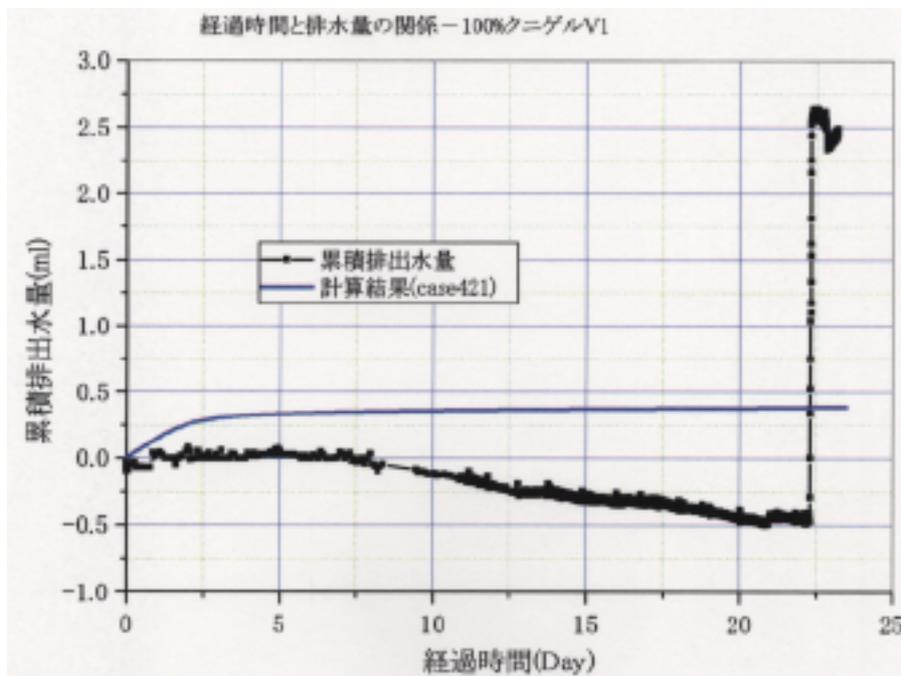


図 2-20 シミュレーション結果 クニゲル V1 試料 (4) - 累積排出水量

## (2) BGS による試験

図 2-14, 及び図 2-15に示した結果のうち, ガス排出速度, 及びガス注入圧力の経時変化に対して, 過去にベントナイト/砂モデルを用いてフィッティングを試みた例を示す。

### (a) 解析条件

解析上の幾何体系, 及び注入圧力の昇圧に対する模擬方法は以下の通りである。

供試体幾何モデルに対する空間分割は軸方向に 96 分割とした。各エレメントの厚さについては上流側 48 エレメントについては 0.1 cm, 下流側 48 エレメントについては  $2.1 \times 10^{-5}$  cm とした。また, 注入圧力の昇圧については, 供試体上流側のアキュムレータが一定速度で圧縮される過程をモデル化することによりガス注入圧を上昇させるものとした。

### (b) 解析結果

上記の解析条件において試験結果に示したガス注入圧力, 及びガス排出速度に対して概略フィッティングを行った結果, 表 2-4示す各種モデルパラメータ値が設定された。表 2-4に示したパラメータを用いた解析におけるフィッティング結果を, ガス排出速度, 及びガス注入差圧の経時変化ガス排出速度について図 2-21に, またガス注入圧力について図 2-22に示した。

この解析ではブレイクスルー時のガスの相対浸透率を 40 として実施しているが, 解析結果のほうブレイクスルーの開始時期がやや遅れていることからブレイクスルー時点でのガス注入圧力が実験値を上回り, このためにブレイクスルー直後のガス排出速度が試験結果より大きくなること, また, 1 回目のガス注入停止時の圧力低下が試験結果より大きくなっている。しかしながら, これらの相違はさらにパラメータを微調整することで縮小するものであると考えられ, ベントナイト/砂モデルは注入ガス圧力, ガス排出速度とも試験結果に対して高い再現性を有すると考えられる。

これらの結果より, ベントナイト/砂モデルは高スメクタイト濃度の 100 %ベントナイトの系に対しても, 水の絶対浸透率に対してガスの相対浸透率が極端に大きくない透過現象に対しては, ブレイクスルー時の急速なガス排出フラックスの上昇と, 注入圧力の低下によって生じる移行経路の閉鎖による排出フラックスの停止を, 高い再現性で模擬できることが示されている。

表 2-4 MX-80 に対するモデルパラメータ

パラメータ	設定値	備考
初期条件		
注入ガス圧力	12.02MPa	
間隙水圧	1.01MPa	
間隙ガス圧	2336.6Pa	飽和水蒸気圧 at20°C
パラメータ		
絶対浸透率	5.8 E-21m <sup>2</sup>	試験結果
ブレイクスル-時のガス相対浸透率係数	4.0 E+1	試験結果に基づき設定
ブレイクスル-時の過剰間隙ガス圧	1.52E+7Pa	試験結果に基づき設定
移行経路閉塞時の過剰間隙ガス圧	1.10E+7Pa	試験結果に基づき設定
弾性に係る定数	4.0 E+6Pa	フィッティングパラメータ
時定数	5.0 E-4	フィッティングパラメータ
形状因子	5.0 E-4	フィッティングパラメータ
$k_{rg}$ の増加に係るスケールファクタ	6.9 E+2	フィッティングパラメータ

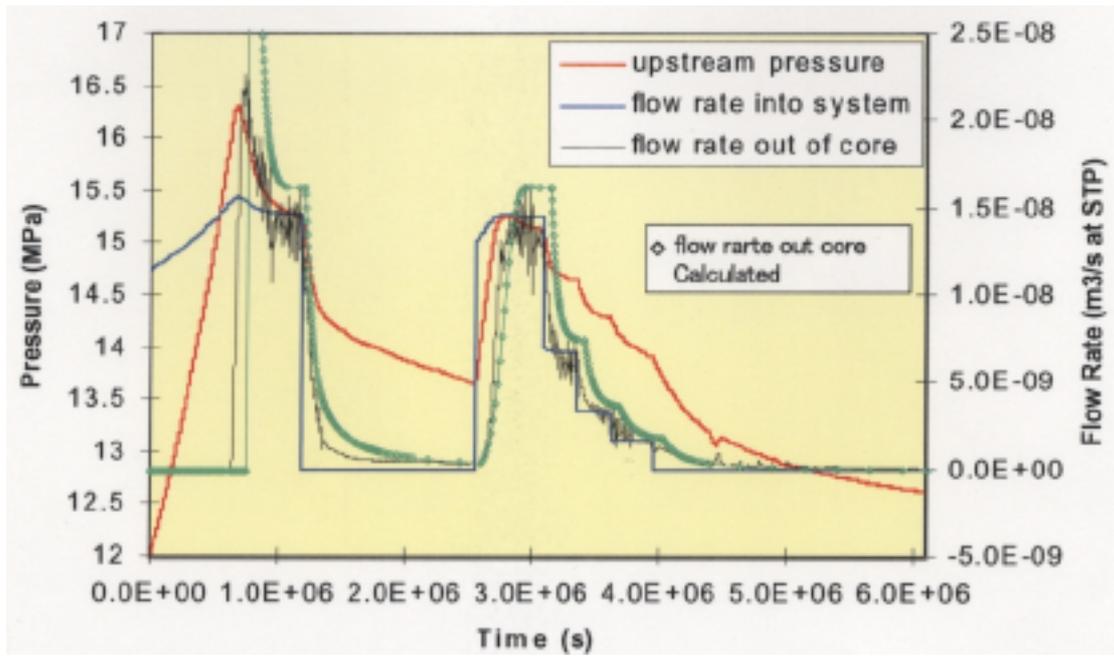


図 2-21 シミュレーション結果 MX-80 試料 (1) - ガス排出速度

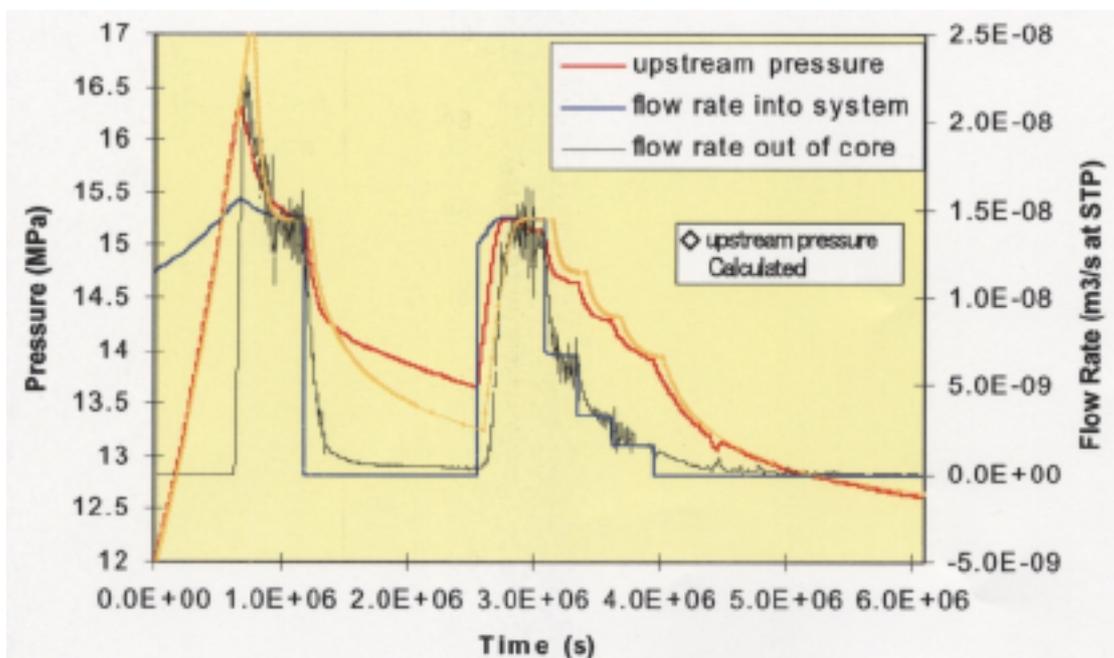


図 2-22 シミュレーション結果 MX-80 試料 (2) - ガス注入圧力

### 2.2.3 モデルの適用性

#### (1) 移行経路に対する考察

ここではガス移行試験で観察されたブレイクスルー直後のフラックス、第1ダイナミックフロー、第2ダイナミックフローの各3段階のガス排出フラックスに対して、それらが単一毛管の形成による場合と単一亀裂による場合を想定して、その毛管径、亀裂幅、及び毛管圧力について評価し、その移行経路の性状について検討した。

#### (a) 亀裂幅の算定

粘土媒体中に形成された移行経路が亀裂（平衡平板）形状を有すると仮定した場合、ガス排出フラックスと亀裂幅<sup>13)</sup>、及び亀裂幅と毛管圧力の関係は、以下の式で表すことができる。ここで亀裂の間隔は、試料（1.5 inch φ）断面に相当する面積の正方形内に平行して存在する亀裂の間隔とし、試料相当面積正方形の1辺の長さを亀裂本数で序した値とした。

$$k_f = \frac{h_e^3}{12h} \quad (\text{式 2-16})$$

$k_f$  : 亀裂による浸透率 (m<sup>2</sup>)  
 $h_e$  : 平行平板亀裂の幅 (m)  
 $h$  : 亀裂の間隔 (m)

$$Pc_f = \frac{2\gamma}{h_e} \quad (\text{式 2-17})$$

$Pc_f$  : 亀裂の毛管圧力 (Pa)  
 $h_e$  : 平行平板亀裂の幅 (m)  
 $\gamma$  : 表面張力 (Pa m) : 水/空気 at 25°C = 0.072 (Pa m)

各3段階のフラックスに対する相当亀裂幅を表 2-5に、また算定された亀裂幅に対応する毛管圧力と各フラックス発生時の注入ガス圧力を表 2-6に示した。

ブレイクスルーが生じた直後のガスフラックスに対応する単一亀裂の幅は約 0.4 μm と算定され、この亀裂幅に対応する毛管圧力は 370 kPa であり、ブレイクスルー発生時のガ

ス注入圧力の 2,610 kPa に比較して 1/9 と極めて小さい値となった。また、第 1 次及び第 2 次ダイナミックフローのガスフラックスに対応する単一亀裂の幅は、それぞれ 1.9  $\mu\text{m}$  及び 7.4  $\mu\text{m}$  であった。この亀裂幅に対応する毛管圧力は、それぞれ 74 kPa, 及び 20 kPa であり、第 1 次及び第 2 次ダイナミックフロー発生時の注入ガス圧力 2,740 kPa, 及び 1,960 kPa に比較して 1/40 から 1/100 の小さい値となっている。このことは、ガス移行経路は既に媒体に存在する単一の亀裂によるものではないことを示している。

また、同一幅の亀裂が複数同時に存在する場合について考慮すると、表 2-6 に示すようにガス注入圧力に等しい毛管圧力を有する幅の亀裂がピーク時の浸透率を達成するためには、ブレイクスルー時に数百本以上の亀裂が形成される必要がある。しかしながら、38 mm  $\phi$  の供試体中にブレイクスルー時に数百本以上の貫通亀裂が形成されることについては議論のあるところである。さらに、第 1 次及び第 2 次ダイナミックフローに関しては、ブレイクスルー時に対してさらに毛管圧力の小さい 5 倍から 20 倍の亀裂幅であることが示されており、別途新規の卓越流路が形成されたものと考えられる。

表 2-5 浸透率に相当する亀裂幅

出現時期	有効浸透率 ( $\text{m}^2$ )	相当亀裂幅 (m)
亀裂数 : 1		
第 2 次ダイナミックフロー	$\cong 1.0\text{E-}15$	7.4E-6
第 1 次ダイナミックフロー	$\cong 1.8\text{E-}17$	1.9E-6
ブレイクスルー直後	$\cong 1.5\text{E-}19$	3.9E-7
亀裂数 : 100		
第 2 次ダイナミックフロー	$\cong 1.0\text{E-}15$	1.6E-6
第 1 次ダイナミックフロー	$\cong 1.8\text{E-}17$	4.2E-7
ブレイクスルー直後	$\cong 1.5\text{E-}19$	8.5E-8

表 2-6 相当亀裂幅に対応する毛管圧力, 注入圧力

出現時期	相当亀裂幅 (m)	毛管圧力 (Pa)	注入圧力 (Pa)
亀裂数 : 1			
第 2 次ダイナミックフロー	7.4E-6	2.0E+04	1.96E+06
第 1 次ダイナミックフロー	1.9E-6	7.4E+04	2.74E+06
ブレイクスルー直後	3.9E-7	3.7E+05	2.61E+06
亀裂数 : 100			
第 2 次ダイナミックフロー	1.6E-6	9.0E+04	1.96E+06
第 1 次ダイナミックフロー	4.2E-7	3.5E+05	2.74E+06
ブレイクスルー直後	8.5E-8	1.7E+06	2.61E+06

## (b) 毛管径の算定

粘土媒体中に形成された移行経路が毛管形状を有すると仮定した場合、ガス排出フラックスと毛管径<sup>14)</sup>、及び毛管径と毛管圧力との関係は、以下の式で表すことができる。

$$kc = \frac{n\pi r^4}{8} \quad (\text{式 2-18})$$

$kc$  : 円筒経路による浸透率 ( $\text{m}^2$ )  
 $r$  : 円筒経路の半径 ( $\text{m}$ )  
 $n$  : 単位面積当りの円筒経路数 ( $\text{m}^{-2}$ )

$$Pc_c = \frac{2\gamma}{r} \quad (\text{式 2-19})$$

$Pc_c$  : 円筒経路の毛管圧力 ( $\text{Pa}$ )  
 $r$  : 円筒経路の半径 ( $\text{m}$ )  
 $\gamma$  : 表面張力 ( $\text{Pa m}$ ) : 水/空気 at 25°C = 0.072 ( $\text{Pa m}$ )

各 3 段階のフラックスに対する相当毛管径を表 2-7に、また算定された毛管径に対応する毛管圧力と各フラックス発生時の注入ガス圧力を表 2-8に示した。

ブレイクスルーが生じた直後のガスフラックスに対応する単毛管の径は約  $4.6 \mu\text{m}$  と算定され、この毛管径に対応する毛管圧力は  $32 \text{ kPa}$  であり、ブレイクスルー発生時のガス注入圧力の  $2,610 \text{ kPa}$  に比較して約  $1/80$  と極めて小さい値となった。また、第 1 次及び第 2 次ダイナミックフローのガスフラックスに対応する単毛管の径は、それぞれ  $15 \mu\text{m}$  及び  $41 \mu\text{m}$  であった。毛管径に対応する毛管圧力は、それぞれ  $9.5 \text{ kPa}$ 、及び  $3.5 \text{ kPa}$  であり、第 1 次及び第 2 次ダイナミックフロー発生時の注入ガス圧力  $2,740 \text{ kPa}$ 、及び  $1,960 \text{ kPa}$  に比較して  $1/290$  から  $1/560$  の小さい値となっている。このことは、亀裂状経路を想定した場合と同じく、ガス移行経路は既に媒体に存在する単一の毛管によるものではないことを示している。

また、同一径の毛管が複数同時に存在する場合について考慮すると、表 2-8に示すよう

にガス注入圧力に等しい毛管圧力を有する径の毛管が供試体全体としての浸透率を達成するためには、ブレイクスルー時に  $10^7$  本以上の毛管が形成される必要がある。しかしながら、 $38 \text{ mm } \phi$  の供試体中にブレイクスルー時に  $10^7$  本以上の貫通毛管が形成されることについては、ガス放出速度が間欠的に変動することから、少数の経路によってガスの移行が生じているものと想像されており、このような多数の毛管によってガスの透過が起こることは考えにくい。さらに、第1次及び第2次ダイナミックフローに関しては、ブレイクスルー時に対してさらに毛管圧力の小さい3倍から10倍の径となることが示されており、新規の卓越流路が形成されたものと考えらるべきである。

表 2-7 浸透率に相当する毛管半径

出現時期	有効浸透率 ( $\text{m}^2$ )	相当毛管半径 (m)
毛管状流路数：1		
第2次ダイナミックフロー	$\cong 1.0\text{E-}15$	$4.1\text{E-}5$
第1次ダイナミックフロー	$\cong 1.8\text{E-}17$	$1.5\text{E-}5$
ブレイクスルー直後	$\cong 1.5\text{E-}19$	$4.6\text{E-}6$
毛管状流路数： $10^7$		
第2次ダイナミックフロー	$\cong 1.0\text{E-}15$	$7.3\text{E-}7$
第1次ダイナミックフロー	$\cong 1.8\text{E-}17$	$2.7\text{E-}7$
ブレイクスルー直後	$\cong 1.5\text{E-}19$	$8.1\text{E-}8$

表 2-8 相当毛管半径に対応する毛管圧力

出現時期	相当毛管半径 (m)	毛管圧力 (Pa)	注入圧力 (Pa)
毛管状流路数：1			
第2次ダイナミックフロー	$4.1\text{E-}5$	$3.5\text{E+}03$	$1.96\text{E+}06$
第1次ダイナミックフロー	$1.5\text{E-}5$	$9.5\text{E+}03$	$2.74\text{E+}06$
ブレイクスルー直後	$4.6\text{E-}6$	$3.2\text{E+}04$	$2.61\text{E+}06$
毛管状流路数： $10^7$			
第2次ダイナミックフロー	$7.3\text{E-}7$	$2.0\text{E+}05$	$1.96\text{E+}06$
第1次ダイナミックフロー	$2.7\text{E-}7$	$5.4\text{E+}05$	$2.74\text{E+}06$
ブレイクスルー直後	$8.1\text{E-}8$	$1.8\text{E+}06$	$2.61\text{E+}06$

## (2) モデルの適用性限界

上述のように、移行経路が亀裂あるいは毛管形状を想定した場合について、粘土媒体中のガスの移行は供試体中に既に存在し、水で満たされた間隙に気相が侵入することによ

て生じることは考えにくいことが示されている。すなわち、本試験で対象とした高スメクタイト密度の粘土試料では気相が一定の圧力に達したとき固相に歪を生じさせ、ベントナイト結晶板間に移行経路を形成する機構が支配的になるものと考えられる。本解析ではこのような時間的空間的に不連続性の強い現象に対して対応可能とするために開発された、前述のベントナイト／砂モデルを適用してガス透過試験結果に対するシミュレーションを行った。

その結果、ブレイクスルー及びその直後のガス排出フラックスとそれによるガス注入圧力の変化に対しては非常に良い再現性を示したが、その後のさらに急激なガス排出速度の上昇に対しては再現性に問題のある結果となった。これは、前述のようにベントナイト／砂モデルはガス侵入圧力と経路閉塞圧力を設定可能であるが、基本的に連続媒体モデルを基礎とした解析モデルであることから、空間及び時間を離散化させて数値計算を行うため、各分割要素間の物理特性の変化が大きく不連続性が強い条件では、数値解を得ることが困難になることが原因である。

移行特性パラメータとして最も変動幅の大きいもののひとつが有効浸透率であり、解析条件に及ぼす影響も大きい。今回の解析でのガスブレイクスルー時のガスの相対浸透率は、クニゲル V1 試料では 10、MX-80 試料では 40 に設定しており、この場合は高い再現性が得られている。一方、クニゲル V1 試料のダイナミックフローに対しては、離散化によって形成される圧力、浸透率の勾配をクリアするためガスの相対浸透率を  $3.75 \times 10^5$  として解析を行ったが、上述のようにガス排出速度に高い再現性は得られていない。

以上より、ベントナイト／砂モデルは水の絶対浸透率に対してブレイクスルー時のガスの相対浸透率が、1 桁から数桁以上程度の極端に変動が大きい透過現象に対しては、高スメクタイト濃度の 100 %ベントナイトの系に対しても、ブレイクスルー時の急速なガス排出フラックスの上昇と、注入圧力の低下によって生じる移行経路の閉鎖による排出フラックスの停止を高い再現性で模擬できるが、ガスの相対浸透率が  $10^4$  から  $10^5$  を超える極端に大きなフラックスの変動に対しては、数値計算上の制約から適用が困難であるものと考えられた。

### 3 諸外国におけるガス移行研究に関する調査

本章では、専門家会議、国際共同研究におけるガス移行研究に関する情報を収集し、ガス影響評価に有用な研究例を抽出してそれらの研究成果について調査を実施することにより、現状のガス移行研究に対して性能評価上要求される課題、及び問題点を整理した。

#### 3.1 調査対象

本年度は以下の対象について情報を収集するとともに、研究成果に対する調査を実施した。

- ・ EU 圏内国際研究プロジェクト「GASNET」における研究開発状況、各国の共通認識、及び今後の研究開発課題
- ・ 国際共同研究「GAMBIT Club」における粘土中ガス移行モデル開発状況、適用性評価
- ・ その他の国際会議における研究開発状況

#### 3.2 調査結果の整理

上記の情報収集対象を基に性能評価上のガス影響の位置付け、現状のガス移行研究の進捗状況、現状の問題点と今後の課題等の観点から研究成果を整理した。

最近数年間の主要なガス透過試験、ガス影響評価研究の実施状況は、以下の通りである。

##### ① EU 国際共同プロジェクト

ガス影響評価に関する EU の国際共同研究プロジェクトは、EU 圏内の 7 ヶ国が参加して 1991 年から 1996 年まで実施された PEGASUS プロジェクト (MEGAS, 及び EVAGAS プロジェクトを含む), 1996 年から 1999 年にかけて実施された PROGRESS プロジェクト, そして 2001 年から開始された GASNET プロジェクトと、EC 時代を含めて 10 年以上にわたり継続実施されている。

##### ② GAMBIT Club プロジェクト。

1996 年より核燃料サイクル開発機構、スウェーデン、スイス、フランス、スペイン、フィンランドの 6 カ国の共同研究として開始された、圧縮ベントナイト中のガス移行モデル開発プロジェクトであり、1996 年から 1998 までの Phase I, 1999 年から 2000 年までの Phase II, 2001 年から現在継続されている Phase III がある。本プロジェクトは、さらに 2003 年から Phase IV として継続されることが予定されている。

##### ③ GMT プロジェクト

2000 年より財団法人原子力環境整備促進・資金センターがスイスの NAGRA に委託

して Grimsel Test Site で実施している原位置ガス移行試験であり、コンクリートサイロ内に設置した低配合ベントナイト中のガス移行を対象として 2005 年までの予定で実施中である。

④ LASGIT プロジェクト

SKB 及び Posiva が BGS (英国地質調査所) に試験計画の検討を委託し、Aspo URL での実施を予定している、KBS-3 処分概念に基づく 1 キャニスタケールの緩衝材中の原位置ガス移行試験である。

⑤ その他

その他の関連研究状況については、2001 年 9 月に開催されたバックエンド分野を対象とした国際会議である GLOBAL 200, 及び 2002 年 12 月に開催された粘土系材料によるバリアに係る国際会議である Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement に報告例が見られる。

以下にこれらのうち代表的な研究検討例について概要を示す。

### 3.2.1 GASNET プロジェクト

GASNET は EU の国際共同プロジェクトとして、英国 (Nirex, Serco Assurance), ドイツ (ISTec), スウェーデン (SKB), フランス (ANDRA), スイス (NAGRA), スペイン (ENRESA), ベルギー (ONDRAF/NIRAS), フィンランド (Posiva, VTT Process) の 8 ヶ国 10 機関が参加して 2001 年より開始された。本プロジェクトの目的は、各種の処分概念に対して考慮すべき現象と性能評価への影響を整理し、現状の科学的知見を今後どのように性能評価に反映すべきかを示すことにある。ここでは 2002 年 11 月に開催されたワークショップでの議論を下に作成された、研究開発、及び評価状況の現状認識、性能評価に反映すべき課題に対する報告<sup>15)</sup>について記述した。

#### (1) 考慮された処分概念

本プロジェクトにおいてガス影響の前提として考慮の対象となった処分概念は、欧州諸国において現時点で計画、研究されている低/中レベル廃棄物 (L/ILW) 及び高レベル廃棄物 (HLW (使用済燃料(S/F)を含む)) 処分概念を対象としている。なお、これらのうち Boom Clay (ベルギー), Opalinus Clay (スイス), Callovo Oxfordian Clay (フランス), 及び岩塩ドーム (ドイツ) については高レベル廃棄物 (もしくは使用済燃料) と低/中レベル廃棄物の併置処分が考慮されているが、ここでは異なる廃棄物処分エリア間の相互作用

については考慮されていない。また、すべての処分場が帯水層中にあることを仮定しており、Yucca Mt.に見られるような不飽和帯に位置する処分場は考慮されていないことが特徴である。

考慮された処分概念の緒元を表 3-1及び表 3-2に示す。

表 3-1 考慮された処分概念-1 (HLW, 使用済燃料)

廃棄物種類	廃棄体容器材料	母岩	施設配置	緩衝材／埋め戻し材
HLW ガラス 固化体 使用済燃料 (S/F)	HLW ガラス固化体： ステンレス鋼製容器 S/F： ステンレス鋼, シルカ (充填材：砂)	地下約 240 m ～100 m 厚さ Boom Clay	直径 2 m の円形坑道 中央に横置き	ベントナイト／砂 混合材
HLW 使用済燃料	炭素鋼	地下約 650 m Opalinus Clay	直径 2.5 m の円形坑道 中央に横置き	ベントナイト
使用済燃料	銅製キャニスタ 鋳鉄製内鞘		坑道（横置きを考慮） からアクセスする垂直孔 に縦置き	圧縮ベントナイト
使用済燃料	炭素鋼製 (充填材：ガラスビーズ)	花崗岩	直径 2.4 m の円形坑道 炭素鋼製ライク内に横置 き	圧縮ベントナイト
HLW ガラス 固化体 使用済燃料 (S/F)	HLW ガラス固化体： 炭素鋼またはNi合金製 オーバーパック S/F： 炭素鋼またはNi合金製 キャニスタ (充填材：砂)	地下～500 m ～135 m 厚さ Callovo - Oxfordian Clay	HLW： 直径 2.5 m の円形坑道 または処分孔（炭素鋼 ／コンクリートライク） S/F： 同上 またはホール中 in-floor	膨潤性粘 土： 坑道, 処分孔  ホール概念は 廃棄体周囲 にコンクリート性 充填材
HLW 使用済燃料	炭素鋼製容器 ステンレス鋼製オーバーパック	地下 800 m 岩塩ドーム	坑道横置き または処分孔縦置き	破碎岩塩

表 3-2 考慮された処分概念-2 (低/中レベル廃棄物)

廃棄物種類	廃棄体容器材料	母岩	施設配置	緩衝材/ 埋め戻し材
ILW LLW (検討中)	ILW : 多くは炭素鋼製 一部はステンレス鋼製 (充填材:セメント, ビチュー ム, 樹脂) LLW : 炭素鋼製ドラム缶 (コンクリート容器収納)	地下約 240 m ~100 m 厚さ Boom Clay	ILW : 直径 5.5 m の円形坑 道に横置き LLW : ILW に同じ	セメント
ILW LLW	コンクリート, 鋳鉄, 炭素鋼 一部セメント充填	地下約 ~ 800 - 1,300 m Oxfordian corallian oolite (Malm)	断面積 40 m <sup>2</sup> の水平 坑道	セメント/破碎岩
ILW LLW	炭素鋼, コンクリート 廃液の原位置固化	Zechstein 岩塩	定置空洞	Lignite fly ash, 破碎岩塩
ILW	ステンレス鋼	地下約 650 m Opalinus Clay	大径坑道	セメント
ILW	一次容器をコンクリート容器 に収納	地下 ~ 500 m ~135 m 厚さ Callovo - Oxfordian Clay	直径 5~7 m の円形 坑道 または 17 mW×25 mH のホールト	セメント
LLW ILW	鋼製ドラムまたは箱 (充填材:セメント, ビチュー ム)	海洋底下 50 m 花崗岩	15-20 mW×10-20 mH のホールト 直径 25 m×50 mH のサイロ	高透過性セメント
LLW ILW	炭素鋼またはステンレス鋼 製容器 (充填材:セメント)	地下 300-1,000 m 花崗岩系硬岩	大規模ホールト	セメント
ILW LLW	ILW : 鋼製容器 LLW : 円筒形, 方形の 鋼製またはコンクリート製容 器	地下 800 m 岩塩ドラム	ILW : ボーリング孔 または立坑 LLW : 坑道	破碎岩塩

## (2) 研究開発の現状

ここでは、ガス発生、ガス移行、潜在的ガス影響に対する研究開発の現状について整理された内容を示す。

## (a) ガス発生

Safety Case の検討において考慮すべきとして合意が得られているガス発生機構としては、以下の 3 種類がある。

- ・鉄及び鉄系合金及び他の金属（活性の高いAl, MAGNOXを含む）の腐食
- ・有機物の微生物分解
- ・放射線分解

ガス発生源となる金属については、廃棄物、廃棄体容器のほか、ロックボルト、坑道ライニング等の構造物も評価の対象として考慮せねばならないことが述べられている。

また、ガス発生量評価全体にかかわる課題としては以下の項目があげられている。

- ・ガス発生領域の物理的・化学的不均質性の反映
- ・化学的環境の変遷の反映
- ・ガス発生による水の供給の制限の反映
- ・ガス発生機構による Eh, pH 等の地球化学環境の変化の反映

以下に上記の主要なガス発生機構に対する評価手法の現状調査結果を示す。

## (7) 金属の腐食

### (1) 鉄及び鉄系合金の腐食

鉄及び鉄系合金の腐食による H<sub>2</sub> 発生に対する評価手法の現状は以下の通りである。

処分場閉鎖後初期の酸化性雰囲気期間に、金属表面に生成する酸化皮膜が還元性雰囲気下でマグネタイトに還元されることによる、H<sub>2</sub> 発生速度への長期的影響について評価すべきことが述べられている。

また、酸化性雰囲気中でのステンレス鋼等に生じる局部腐食に関しては、ガス発生量に対する影響よりは、主に容器の健全性に対する影響が重要であるとしている。

還元性環境下において形成する腐食生成物による不導体皮膜の効果については、皮膜の形成による腐食速度の時間的変化を反映すべきであるが、その長期安定性が不明であるため、現状では短期の腐食試験から得られた過大評価と考えられる腐食速度によって処分場の安全性を包含させざるを得ない。処分場環境ごとに異なる環境条件下における長期腐食試験に基づく合理的な長期腐食速度の評価が重要である。

炭素鋼及び鋳鉄に対する既往の評価例では、ガス発生にかかわる腐食速度として 0.1 ~ 10  $\mu$  m/y の範囲が適用されているが、アルカリ環境下における炭素鋼及び鋳鉄の長期腐食速度は 0.1  $\mu$  m/y、もしくはそれ以下が現実的と思われる。

ステンレス鋼については長期腐食試験で 0.1  $\mu$  m/y 以下の値が得られており、これが評価上の上限値であろう。NIREX の最近の評価では 0.03  $\mu$  m/y の値が適用されている。

(II) ジルカロイ

ジルカロイの腐食速度は鉄に比較して極めて小さく、処分対象となるジルカロイの量によってはガス発生源としては無視しうる程度であるが、pH による傾向が実験により異なる等の不確定因子がある。

現状では、安全評価においてステンレス鋼と同程度の腐食速度が設定されている。

(III) 高活性金属

アルミニウムはアルカリ環境下において、酸化性雰囲気、還元性雰囲気、双方で腐食が進行し、それによる H<sup>2</sup> 発生速度に係る腐食速度は鉄に比較して極めて大きく、最近の評価例ではセメント環境において 30 μ m/y 及び 1 mm/y の値が用いられている。

MAGNOX もアルミニウムと同様の影響があり、セメント環境中において ~0.3 μ m/y (25°C) 及び 15 μ m/y (50°C) の値が報告されている。

亜鉛を考慮した評価例では、H<sub>2</sub> 発生に係る腐食速度として 1 mm/y の値が用いられている。

なお、ワークショップでは上記以外の課題として以下の指摘があった。

①異種金属の接触によるガルバニ電池の形成による腐食速度の増加

炭素及び鋼鉄系合金等との接触により、MAGNOX 及びアルミニウムの腐食速度を増加させる可能性があり、また、グラファイトが存在する場合、鉄及び鉄系合金と接触した場合には鉄及び鉄系合金の腐食速度を増加させる可能性が指摘されているため、含有金属種、廃棄物処理方法等により個別に評価する必要があるとしている。

②微生物活動による金属表面での Biofilm の形成によって生じる、局所的な pH の低下等による腐食速度の上昇

(I) 有機物の微生物分解

特定の低・中レベル廃棄物に対する問題であるが、処分場内での微生物の活動に対する考慮は現時点では排除できない現象である。しかしながら、さまざまな種類の有機物微生物、生成ガスが対象となりうること、また、試験データが制限され、試験結果にばらつきが大きいことから簡易な経験的モデル、より複雑なプロセスモデルともに評価が難しい状況である。

現状では、好気性環境下では主に  $\text{CO}_2$  が発生すると考えられているが、処分場閉鎖後、金属の腐食及び好気性微生物の活動によって急速に  $\text{O}_2$  が消費されることから、比較的短時間で嫌気性環境に移行し、 $\text{CO}_2$  と  $\text{CH}_4$  がほぼ等量発生するものと考えられているが、 $\text{N}_2$  の発生量等に対しては明確な情報がない。また、 $\text{H}_2$  を消費して  $\text{CH}_4$  を生成する微生物の存在が知られており、これによりガス発生総量の減少効果があるとしている。

微生物分解によるガス発生速度は、廃棄体、処分環境によって大きく影響されるため他の評価からの引用は極めて困難である。ガス発生量評価の基本的パラメータは、有機物に対するガスの総収率と有機物単位質量当りのガス発生速度であるが、セルロースからのガス発生速度を  $4 \text{ L/kg/y}$ 、他の有機物からのガス発生速度を  $0.04 \text{ L/kg/y}$  ( $1/2$  が  $\text{CO}_2$ ) に一般化して設定した例がある。

将来的にガス発生速度の統計学的データが取得できれば、シンプルなガス発生モデルとの組み合わせにより確率論的評価が有効となる可能性があるとしている。

#### (ウ) 放射線分解

低レベル廃棄物及びほとんどの中レベル廃棄物にとって、放射線分解はガス発生機構として重要ではないが、再処理廃棄物のビチューメン固化体については主要なガス発生機構となる可能性があり、腐食によるガス発生量の 25% に達するとした評価例もある。また、ハル・エンドピースセメント固化体内部の放射線分解によるガス発生量についても腐食によるガス発生速度に匹敵する可能性が示されている。

高レベル廃棄物については薄肉の容器に収納された場合にのみ、極端に低い腐食速度を仮定した場合に放射線分解によるガス発生速度が腐食によるガス発生速度を超える可能性があるとしている。

#### (イ) 放射性ガスの発生

非放射性ガスの発生体積に比較して放射性ガスの発生量は微々たるものであるが、放射線学的影響を及ぼす可能性について考慮する必要がある。ガスの構成分子となる放射性核種には、 $\text{C-14}$ 、 $\text{H-3}$ 、 $\text{Rn-222}$ 、 $\text{I-129}$ 、 $\text{Kr-87}$  が考えられるが、半減期、インベントリ、ガス発生量等から、実質的に  $\text{C-14}$  のみが放射線学的影響を及ぼしうると予測できるとしている。

放射性炭素を含むガスの発生量は、有機物の微生物分解によって発生する全  $\text{CO}_2$ 、及び  $\text{CH}_4$  発生量に対して  $\text{C-14}/\text{C-12}$  の同位体存在比を考慮すればよい。

また、C-14 は有機廃棄物のほか、ジルカロイ、ステンレス鋼等の放射化金属中に含まれ、ジルカロイからの腐食による C-14 の放出は最大で  $10^{-6}/y$ 、炉内構造物の鋼の腐食による C-14 の放出が最大で  $10^{-5}/y$  であるとの報告例から、腐食による気体状 C-14 の発生は無視しうると考えられるが、腐食による気体状 C-14 の発生については不確実性が大きいと、いくつかの評価では保守側の裕度として考慮されている。

また、放射化グラファイトについてはガス状の C-14 は放出されないと考えられているが、確認が必要である。

(b) **ガス移行**

処分場内で発生したガスの移行機構としては、以下のものが考慮される。

- ・ 溶存ガス成分の拡散による移行
- ・ 溶存ガス成分の移流による移行
- ・ 気相の移行

(7) **溶存ガス成分の拡散**

耐食性容器に収納された廃棄物を低透水性粘土層等に定置した場合、腐食によって発生するガスは全て拡散によって母岩中に移行する状態が予測できる。このため、これら低透水性材料に対する実規模装置での拡散係数の測定評価が必要である。

(4) **気相の移行**

ここでは、移行媒体ごとのガス移行評価手法について安全評価に対する適用の現状と課題が検討されている。

(I) **セメント系材料**

一般的に従来の連続媒体 2 相流モデルの適用が可能であり、2 相流パラメータも適切に設定しうると考えられている。

(II) **亀裂性岩盤**

一般的に従来の連続媒体 2 相流モデルの適用が可能であると考えられているが、2 相流パラメータをどのように設定するかについては、パラメータ近似関数の選定、不均質性の反映等の観点から議論がある。地表へのガスの放出の分布を評価する、あるいは亀裂中の水の移行の影響を評価する場合には、より正確な亀裂中の 2 相流に対する理解とモデル化が必要である。

(III) 粘土物質

ベントナイト緩衝材、粘土、及び泥岩中のガスの移行については、密度、鉱物組成等によって固有のガス侵入圧力が存在し、ガスの透過による間隙水の排出がごく少ないという特徴がある。このため、従来の連続媒体2相流モデルでは正しく模擬されないと考えられている。(ただし、Opalinus Clay では連続媒体2相流の形成と、非連続な流路(discrete pathway)の形成の双方が生じるとされており、媒体特性、地層環境条件により関与する移行機構は異なることが考えられる。)

これまでに微小亀裂の形成を考慮したモデル等の開発が行われているが、確証されたモデルは未だない。現在実験とモデル開発が進められている。

ガス透過後の移行経路は水の侵入により閉塞し、間隙水に対する卓越流路とはならないことがいくつかの試験によって示されている。

(IV) 立坑、主要坑道、EDZ

立坑、主要坑道、EDZ 中のガスの移行については、処分場立地及び施設設計に大きく依存することから一般的な検討は困難であるが、これらの経路がガスの移行に寄与するかどうか検討する必要がある、シールが重要な役割を果たす。

(ウ) 不飽和領域でのガス移行

再冠水とガス発生 の同時進行が生じる可能性があり、あまり重要とは認識されていないが、この場合は不飽和状態の緩衝材中のガスの透過を考慮せねばならない。

(c) ガス発生による影響

ガス発生による主要な影響として、以下の7項目を摘出している。

- ・ガス発生による間隙圧力の上昇とそれによる処分場と母岩に対する損傷
- ・処分場上部の“ガスクッション”の形成とガスの圧力による汚染水の排出
- ・銅/鋼製使用済燃料キャニスタの欠陥からの水の流入、ガス発生、汚染水の排出
- ・気泡の移行を含むガス移行に伴う地下水による核種移行
- ・放射性(毒性)ガスの生物圏への放出
- ・閉鎖後処分場への侵入による有意な量の燃焼性ガス及び放射性ガスの放出
- ・その他の影響

以下に上記の主要なガス影響に対する検討結果を示す。

(7) 間隙圧力の上昇

(I) 粘土系媒体

低透過性粘土、泥岩を処分地層とする処分場、及び低透過性緩衝材を用いる処分概念では重要な影響であるが、現在までに得られている試験結果からは、ガスは巨視的亀裂を生じる圧力（最小垂直応力と引張り強度の合計）以下で微視的な規模の移行経路を形成すること、またガス移行経路は水の侵入により閉塞することが示唆されている。

低透過性粘土、泥岩を処分地層とする低／中レベル廃棄物処分場については高レベル廃棄物／使用済燃料のようにガス発生源物質を管理／制御できないため、廃棄物の処理によるガス発生量の制御、緩衝材、シールの設計によるガス放出と地下水流のバランスを制御する必要がある。

(II) 亀裂性岩盤

多くの亀裂性の結晶質系岩盤については、ガス圧力の顕著な上昇なしにガスが放出されると評価されている。

(イ) 銅／鋼製使用済燃料キャニスタの欠陥からの水の流入、ガス発生、汚染水の排出響

微小な欠陥を通過する水の流入、鋳鉄製インサートの腐食によるガス発生、腐食生成物による応力の発生、化学環境の変化とそれによる使用済燃料からの核種の放出に対する影響、水の排出、緩衝材中のガス・水の移行が連成した複雑なプロセスであり、単純化した手法による予察計算が行われている段階である。

(ウ) 地下水による放射性核種の移行に対する影響

safety case に影響を及ぼすほどの核種放出が予測された例はない。低透過性粘土、泥岩を処分地層とする処分場、及び低透過性緩衝材内の間隙水は、ガスの透過によって数%程度しか排出されないことから、この影響は小さいと考えている。ただし、亀裂性岩盤については影響が大きい恐れがある。

放射性核種が収着した粘土コロイドが気泡表面に添着して移行することによる、放射性核種の早期移行現象については著しい影響は生じないとの評価例があるが、さらに確認が必要である。

粘性フィンガリング、微小気泡による移行等、処分場で他の移行機構によるガスの移行が生じるかどうかの確認が必要である。

(イ) 放射性ガスの放出

嫌気性雰囲気中における微生物活動によって発生する主要なガスには、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  がある。このうち毒性を有する  $\text{H}_2\text{S}$  は水に対する溶解度、及び反応性が高く、地表まで気体として到達することはないと考えられる。

地表に到達して生物圏に放射線学的影響を及ぼす可能性のある核種は、上述のように C-14 である。C-14 を含有する可能性のあるガスは  $\text{CO}_2$ 、及び  $\text{CH}_4$  であるが、このうち  $\text{CO}_2$  については溶解度が高く、特にセメント環境では地下水中の Ca と反応して  $\text{Ca}(\text{CO}_3)$  として沈殿を生じることから、この化学形態で地表に達することはないと考えられる。考慮すべき放射性ガスの生物圏に到る経路には以下のものがある。

- ・  $\text{CH}_4$  の直接生物圏への放出と吸入
- ・ 地表付近の土壌で  $\text{CO}_2$  に転換し、これを吸収した植物を摂取
- ・ 地表付近の帯水層で地下水に溶解し、これを飲用

(オ) 人間侵入

これまで、人間侵入シナリオにガスの影響は考慮されていなかったが、 $\text{Rn}$  等の短半減期核種も放出されることから評価の必要がある。短期的な影響は試験孔周辺に限定されることから評価もさほど困難ではない。

(カ) 燃焼性ガスの放出

これまでの評価から、地表への  $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$  の放出による爆発等の危険が生じることはないと考えてよい。また、閉鎖後処分場内での燃焼も着火源がないことから極めて起こりにくいと考えられる。

(キ) その他の影響

その他の影響として以下の項目について確認されるべきである。

- ・ キャニスタ内に空気と水が存在する場合、放射線分解によって硝酸が生成し、応力腐食割れを誘発する。
- ・  $\text{H}_2$  ガスの存在は使用済燃料の劣化反応を抑制する。
- ・ 処分場内、及び周囲にガスが蓄積することによる処分場内の地下水流動の抑制。

これについては適切なデータと robust なモデルによる実証が必要であるが、現実的には困難であると考えられ、safety case ではより保守的な仮定とせねばならないとしている。

(3) **ガス移行による影響の緩和策**

いくつかの処分場概念で考慮されている、あるいは適用されているガス影響緩和策については、以下の項目が摘出されている。

(a) **ガス発生量低減策**

①容器材料に耐食性材料を用いる

炭素鋼容器に替えて銅、ステンレス鋼、コンクリート製の容器を適用する。

②ガス吸収剤の適用

CO<sub>2</sub>に対してセメント系材料、及びMgOを適用する。

H<sub>2</sub>に対してMnO<sub>2</sub>を適用する。

③化学環境の制御

高pHによる金属腐食速度、及び微生物活性の抑制。

(b) **処分システムからのガス放出策**

①ガスが間隙水を排出せずに放出される処分施設の配置

②特定のガス放出経路の設置

コンクリート製バリアへのガス放出管（ガスベント）の設置。

低透水性岩盤からのガス放出のための毛管バリアの設置

③充填材、埋め戻し材の仕様の設定

ガスに対して高透過性の材料、配合の選定。

④ベントナイト／砂混合材配合比の調整による緩衝材特性の制御

ガス侵入圧力を適切が値となるよう、緩衝材のベントナイト配合率を選定する。

⑤ガス放出経路を組み込んだ処分施設設計

あらかじめ予測可能なガス放出経路を設けることにより不測の移行経路の発生を防止し、Safety caseに付随する不確実性を減少させる。

(c) **処分システム内での圧力上昇抑制策**

①処分場内の間隙容積の増加

処分場内にガス蓄積エリアを設け、処分場内の圧力上昇を抑制する方策であるが、間隙水排出の影響を考慮する必要がある。

(4) **シナリオ解析**

初期の安全評価では、ガス影響は生物圏への放射性核種の主要な移行経路の評価に対し

て付加的に行われ、処分場の設計に反映されない場合もあったが、近年では処分場概念の開発、及び安全評価のアプローチ検討の初期から考慮する必要のあることが明らかとなってきた。

NEA の FEP リストを基にガス影響シナリオの検討が進められているが、処分場概念等によりその内容は大きく異なるものであり、また、ガス影響に係るどの現象を基本シナリオとするかあるいは変動シナリオに組み込むかの議論もあり、一般的なガス影響シナリオは存在しない。

現実的には、処分場の安全性に対するガスの潜在的影響は複雑であり地下水移行とは異なるプロセスによって生じること、現時点で得られるデータ、知識、評価ツールが十分に整備開発されていないことから、核種の地下水移行とは独立して評価されている。また、同じ理由により評価は決定論的な手法のみで行われている。

ガス移行を表現するための要求は、当該処分概念に適用されるシナリオ解析によって抽出されるべきであるが、安全評価においてガス影響評価は常に正式なシナリオ解析によって確認されてはいない。これについて GASNET のメンバーは、このこと自体は重要な問題ではなく、一般的に評価が必要な問題であることを確認するアプローチがとられていると認識している。

#### (5) 結論

GASNET プロジェクトでは、プロジェクトメンバー及びワークショップにおいて提供された情報を基に、処分場の安全評価へのガス影響の反映に対するアプローチについて見直しを行った。その結果、処分場の設計及び対象廃棄物によって大きく異なる重要なガス影響を抽出し、Safety case に含めるべき影響を確認できたとしている。

また、ガス影響を評価する際の主要な不確実性と現在性能評価で考慮されていないガス影響項目を、表 3-3 に示すようにまとめている。

表 3-3 未解決の不確実性及び未考慮の影響

項目	概要
長期腐食速度	鋼及び鉄系合金、ジルカロイの長期腐食速度の決定は重要
微生物活動による ガス発生速度	非常に不確実性が大きい 上限値の改訂が必要
気体状 C-14 の放出	CH <sub>4</sub> が地表付近で CO <sub>2</sub> に転換されると放射線の影響が大きい 放射化金属からの気体状 C-14 の発生について情報が少ない
粘土中のガス移行	ベントナイト緩衝材、粘土、泥岩中ガス移行機構に不確実性が大きい ガス移行がバリア機能に影響を及ぼさないことの確認 アップスケール手法の確認 ガス透過試験（大規模試験を含む）によるデータの取得が必要
ニアフィールドの 変化	セメント系材料による影響とその経時変化など
EDZ の影響	潜在的移行経路である EDZ の移行特性に対する理解が必要
人間侵入	放射性ガスの急速な放出の可能性について評価する必要がある
ガスの移行による 地下水流への影響	ガスによる処分場内の間隙水の排出 亀裂性岩盤中のガス移行による地下水流への影響
ベントナイトの侵 食・気泡による流失	核種を収着したベントナイトコロイドが気泡に添着して移動する 予察解析では影響少ないが確認必要

### 3.2.2 GAMBIT Club

GAMBIT Club は核燃料サイクル開発機構、スウェーデン、スイス、フランス、スペイン、フィンランドの 6 カ国の共同研究として 1996 年より開始された、圧縮ベントナイト中のガス移行モデルの開発プロジェクトである。1996 年から 1998 までの Phase I、1999 年から 2000 年までの Phase II、2001 年から現在まで継続されている Phase III と段階的に開発が進められている。さらに、本プロジェクトは 2003 年以降に開始される Phase IV として継続されることが予定されている。

#### (1) 開発経緯

GAMBIT Club は高圧縮ベントナイトを対象として、ガス透過試験で観察された主要な特徴を適切に再現し、試験結果の分析と説明に使用でき、さまざまな設計のキャニスタから発生する H<sub>2</sub> ガスの逃散と圧力の上昇に対するベントナイトバリアの効果を適切に評価

可能な計算モデルの開発を目的として開始されたものである。

Phase I ではガス透過試験で観察された現象の主要な特徴について、適切な再現を目的とした 1 次元概念モデルを構築した。このモデルはガスの圧力が一定のしきい値を超えると楕円形断面の亀裂が形成され、ガスの圧力と粘土結晶板間に吸着した水の層の結合力との関係によって亀裂先端が進展し、ガス圧力と等方から作用する拘束応力との関係から移行経路の断面積が決定されるモデルであった。水の移行や膨潤特性についてはモデル化されていない。

モデルの再現性に一部不十分な点が見られたこと、及び多次元化、アップスケーリングが困難であることから、新たに多次元化、アップスケーリングに対応可能な連続媒体系のモデル (GAMBIT-GW モデル) を開発した。同モデルは水の移行についても評価可能であること、ガス移行経路の閉塞現象について再現可能であること、吸排水による粘土中の応力場の変化が評価可能であることが特徴である。

Phase III では、Phase II において開発された GAMBIT-GW モデルの多次元化対応、及び応力解析との連成ため、有限要素法による応力解析プログラムに連成させることによりガス移行方向をコード内で設定可能とするほか、この改良に併行して、二重間隙モデルを適用することにより、層間水と重層体間隙に存在する水とを分離して評価することによって、膨潤に係る (移行しない) と移行に係る (移行する) 水を別個に評価可能とするための改良、さらに、最終的にはヒステリシス現象を再現するため、ガス圧力による浸透率の変化に時間依存性を付与する改良が実施される。

## (2) Phase III における開発

Phase III において実施されている開発内容<sup>16)</sup>について、以下に概要を記述する。

### (a) 応力との連成

応力との連成モデル (GAMBIT-SGW モデル) は、多孔質媒体の力学的変形と媒体中の物質移行の組み合わせに対して Biot の圧密理論を適用することにより、以下に記述する段階的な拡張により定式化が行われている。

### (7) 変形する多孔質媒体中の水の移行

Biot の圧密モデルは、式 3-1 に示す力の平衡方程式、式 3-2 に示す Hooke 則を、間隙流体を伴う等方弾性体について一般化した巨視的応力／歪関係式、及び式 3-3 に示す Darcy 則に基づく間隙流体の連続方程式によって構成される。

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} + \rho X_i = 0 \quad (\text{式 3-1})$$

- $x_j$  : 空間座標 (m)  
 $\sigma_{ij}$  : 応力テンソル (Pa)  
 $\rho$  : 要素の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $X_i$  : 体積力 ( $\text{m/s}^2$ )

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{ij} &= \frac{1+\nu}{E} \Delta \sigma_{ij} - \frac{3\nu}{E} \frac{\Delta \sigma_{ll}}{3} \delta_{ij} + \frac{1}{3H} \Delta p_w \delta_{ij} \\ \frac{\Delta V_p}{V} &= \frac{1}{H} \frac{\Delta \sigma_{ll}}{3} + \left( \frac{1}{R} - \phi \beta_w \right) \Delta p_w \end{aligned} \quad (\text{式 3-2})$$

- $\varepsilon_{ij}$  : 歪テンソル (・)  
 $\nu$  : ポアソン比 (・)  
 $E$  : ヤング率 (Pa)  
 $H, R$  : 材料特性パラメータ (Pa)  
 $p_w$  : 間隙流体圧力 (Pa)  
 $V_p$  : 要素の間隙体積 ( $\text{m}^3$ )  
 $V$  : 要素の体積 ( $\text{m}^3$ )  
 $\phi$  : 間隙率 (・)  
 $\beta_w$  : 間隙流体の圧縮率 ( $1/\text{Pa}$ )

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w q_i) &= \frac{1}{1-\phi} \frac{D\phi}{Dt} + \frac{\phi}{\rho_w} \frac{D\rho_w}{Dt} - \frac{\phi}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} \\ q_i &= -\frac{k_{w,ij}}{\mu_w} \left[ \frac{\partial P_w}{\partial x_i} + \rho_w g \delta_{j3} \right] \end{aligned} \quad (\text{式 3-3})$$

- $q_i$  : Darcy 流速 (m/s)  
 $\rho_w$  : 間隙流体の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_s$  : 土粒子の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $k_{w,ij}$  : 間隙流体の浸透率 ( $\text{m}^2$ )  
 $\mu_w$  : 間隙流体の粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )  
 $g$  : 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

式 3-2 及び式 3-3 より Biot の圧密モデル (式 3-4) が得られる。

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w q_i) &= \left( -\frac{E}{3[1-2\nu]H^2} + \frac{1}{R} \right) \frac{DP_w}{Dt} + \left( \frac{E}{3[1-2\nu]H} \right) \frac{D\varepsilon_{ll}}{Dt} \\
 &= \frac{1}{Q} \frac{DP_w}{Dt} + \alpha \frac{D\varepsilon_{ll}}{Dt}
 \end{aligned}$$

(式 3-4)

$Q$  : Biot によるパラメータ (Pa)  
 $\alpha$  : Biot によるパラメータ (・)

## (イ) 非圧縮性土粒子による簡素化

土粒子を非圧縮性と仮定することにより、上記の Hooke 則 (式 3-2) 及び圧密モデル (式 3-4) は、それぞれ式 3-5, 式 3-7 のように簡略化される。

$$\begin{aligned}
 \Delta\varepsilon_{ij} &= \frac{1+\nu}{E} \Delta(\sigma_{ij} + P_w \delta_{ij}) - \frac{\nu}{E} \Delta(\sigma_{ll} + P_w \delta_{ll}) \delta_{ij} \\
 \frac{\Delta V_p}{V} &= \Delta\varepsilon_{ll}
 \end{aligned}$$

(式 3-5)

なおここで

$$\sigma_{ij}^{eff} = \sigma_{ij} + P_w \delta_{ij} \quad (\text{式 3-6})$$

$\sigma_{ij}^{eff}$  : 有効応力テンソル (Pa) (引張方向を正)

$$-\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w q_i) = \phi \beta_w \frac{DP_w}{Dt} + \frac{D\varepsilon_{ll}}{Dt} \quad (\text{式 3-7})$$

## (ウ) 変形する多孔質媒体中の 2 相流

さらに上記の非圧縮性土粒子圧密モデルに対して、ガスの存在による気相の圧力及び飽和度の概念を導入することにより 2 相流への拡張を行っている。すなわち Hooke 則に係る 式 3-5 については式 3-8, 式 3-9 のように変形され、また圧密モデルについては連続方程式が式 3-10 に示すように拡張されることから、間隙流体 (液相) については

式 3-11 のように、ガスについては溶存状態での移流拡散、気相での移行を考慮することにより式 3-12 に示すように定式化が行われている。

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \Delta(\sigma_{ij} + P_w \delta_{ij}) - \frac{\nu}{E} \Delta(\sigma_{ll} + P_w \delta_{ll}) \delta_{ij} + \frac{1}{3\tilde{H}} \Delta(P_g - P_w) \delta_{ij}$$

$$\frac{\Delta V_p}{V} = \Delta \varepsilon_{ll}$$

(式 3-8)

$$\frac{\Delta(S_w V_p)}{V} = \frac{1}{E_w} \Delta(\sigma_{ll} + P_w \delta_{ll}) + \frac{1}{H_w} \Delta(P_g - P_w)$$

(式 3-9)

- $\tilde{H}$  : 毛管圧 ( $P_g - P_w$ ) の変化に係る粘土構造の弾性係数 (Pa)  
 $P_g$  : 気相の圧力 (Pa)  
 $S_w$  : 液相の飽和度 (-)  
 $E_w$  : ( $\sigma_{ll} + p_g \delta_{ll}$ ) の変化に係る液相の体積係数 (Pa)  
 $H_w$  : ( $P_g - P_w$ ) の変化に係る液相の体積係数 (Pa)

$$-\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w q_i) = \frac{S_w}{1-\phi} \frac{D\phi}{Dt} + \phi \frac{DS_w}{Dt} + \frac{S_w \phi}{\rho_w} \frac{D\rho_w}{Dt}$$

(式 3-10)

$$-\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w q_i) = S_w \phi \beta_w \frac{DP_w}{Dt} + \frac{1}{V} \frac{D(S_w V_p)}{Dt}$$

(式 3-11)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{M_g}{H_c} \left[ -P_g q_i + D_{ij} \frac{\partial P_g}{\partial x_j} \right] + \rho_g \frac{k_{g,ij}}{\mu_g} \left[ \frac{\partial P_g}{\partial x_j} + \rho_g g \delta_{j3} \right] \right)$$

$$= \frac{1}{V} \frac{D \left( P_g \left[ S_w \frac{M_g}{H_c} + S_g \frac{M_g}{R_g T} \right] V_p \right)}{Dt}$$

(式 3-12)

$D_{ij}$	: 分散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$k_{g,ij}$	: 気相の浸透率 ( $\text{m}^2$ )
$\rho_g$	: 気相の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\mu_g$	: 気相の粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
$S_g$	: 気相の飽和度 (-)
$H_c$	: Henry 定数 ( $\text{Pa}\cdot\text{mol}/\text{m}^3$ )
$M_g$	: ガスの分子量 ( $\text{kg}/\text{mol}$ )
$T$	: 絶対温度 (K)
$\rho_s$	: 土粒子の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$k_{w,ij}$	: 間隙流体の浸透率 ( $\text{m}^2$ )
$\mu_w$	: 間隙流体の粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

## (b) 二重間隙モデルの導入

二重間隙モデルの導入により新たに付加された要素は以下の通りである。

- ・ 初期間隙率の重層体間隙への適用と、これらの間隙による全浸透率のモデル
- ・ 重層体間隙水と層間水との間の移行モデル
- ・ 重層体間隙へのガス侵入と間隙水の排出モデル
- ・ 重層体間隙の移行経路の体積変化と移行経路内の気液の圧力変化との関係

## (7) 移行経路の全浸透率

重層体間隙に生成する移行経路の全浸透率は式 3-13 で定義される。

$$k_c = k_{c0} \left( \frac{\phi_c}{\phi_{c0}} \right)^{n_c} \quad (\text{式 3-13})$$

$k_c$	: 移行経路の全浸透率 ( $\text{m}^2$ )
$k_{c0}$	: 初期平衡状態における移行経路の浸透率 ( $\text{m}^2$ )
$\phi_c$	: 移行経路の体積率 (総間隙率に占める移行経路の比率) (-)
$\phi_{c0}$	: 初期平衡状態における移行経路の体積率 (-)
$n_c$	: フィッティングパラメータ (-)

## (i) 重層体間隙水と層間水との間の移行モデル

重層体間隙水と層間水との間の水の移行は各位置の圧力差に比例するものとし、Darcy 則類似の挙動を示すと仮定し、式 3-14 に示すように定義された。

$$q_x = \begin{cases} \chi \rho_m \frac{k_m}{\mu_w} (P_m - P_w) & , P_w \leq P_m \\ \chi \rho_m \frac{k_m}{\mu_w} (S_w - S_{wc1})(P_m - P_w), & P_w \leq P_m , S_w > S_{wc1} \\ 0 & , otherwise \end{cases}$$

(式 3-14)

- $X$  : 移行経路の形状に依存する定数  
 $S_w$  : 移行経路の間隙水の飽和度 (-)  
 $S_{wc1}$  : 移行経路の残留間隙水飽和度 (-)  
 $P_w$  : 移行経路内の間隙水圧 (Pa)  
 $P_m$  : 層間水と平衡状態にある水圧 (Pa)  
 $\rho_m$  : 層間水の密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $k_m$  : 層間の浸透率 (m<sup>2</sup>)  
 $\mu_w$  : 水の粘度 (Pa·s)

## (ウ) 重層体間隙へのガス侵入と間隙水の排出モデル

重層体間隙へのガス侵入と間隙水の排出モデルは移行経路中の飽和度を定義することにより、従来の2相流と同様のモデルを適用している。すなわち、気相の圧力と液相の圧力との関係は毛管圧力類似の関係式(式 3-15)を導入し、移行経路内の気液の移行特性を記述する相対浸透率は、式 3-16、式 3-17 に従うものとしている。

$$P_g = P_w + P_d [\theta + (1 - \theta) S_w]^{n_p} \left( \frac{\phi_{c0}}{\phi_c} \right)^{1/2} \quad (\text{式 3-15})$$

- $P_d$  : ガス侵入圧力 at  $\phi_c = \phi_{c0}$  (Pa)  
 $\theta$  : フィッティングパラメータ ( $\theta \ll 1$ )  
 $n_p$  : フィッティングパラメータ

$$k_{rg} = \begin{cases} \left( \frac{1 - S_w - S_{gc}}{1 - S_{gc}} \right)^{n_g} , & 1 - S_w > S_{gc} \\ 0 & , 1 - S_w \leq S_{gc} \end{cases} \quad (\text{式 3-16})$$

$$k_{rw} = \begin{cases} \left( \frac{S_w - S_{wc2}}{1 - S_{wc}} \right)^{n_w}, & S_w > S_{wc2} \\ 0 & , S_w \leq S_{wc2} \end{cases} \quad (\text{式 3-17})$$

$S_{gc}$  : 残留ガス飽和度 (-)  
 $S_{wc}$  : 残留間隙水飽和度 (-)  
 $n_g, n_w$  : フィッティングパラメータ

(I) 重層体間隙の移行経路の体積変化と移行経路内の気液の圧力変化との関係

重層体間隙の移行経路の体積変化と移行経路内の気液の圧力変化との関係は、式 3-18 に従うものとしている。

$$\phi_c = \phi_{c0} \left( \xi + \eta e^{\varepsilon [S_w P_w + (1 - S_w) P_g - \sigma]} \right) \quad (\text{式 3-18})$$

$\sigma$  : 粘土中の応力 (Pa)  
 $\xi, \eta, \varepsilon$  : フィッティングパラメータ

ここで、 $S_w = 1$  のとき

$$\xi = 1 - \eta e^{\varepsilon (P_{w0} - \sigma_0)} \quad (\text{式 3-19})$$

$\sigma_0$  : 粘土中の初期応力 (Pa)  
 $P_{w0}$  : 移行経路中の初期初期間隙水圧 (Pa)

また、粘土中の応力は膨潤によって決定されると仮定し、

$$\sigma = \frac{\alpha}{e^\gamma} + P_m \quad (\text{式 3-20})$$

$e$  : 粘土中の間隙比 (-)

$$e = \frac{1 - \phi_c - \phi_s}{\phi_s} \quad (\text{式 3-21})$$

$\phi_s$  : 固相の体積比 (-)

ここで、式 3-22 が成立せずガスが媒体中に侵入しない場合、式 3-18 は式 3-20、式 3-21 より式 3-23 のように表され、式 3-22 に示す条件でガスが移行経路に侵入すると、式 3-18 は式 3-15 において  $\theta = 0$  とすることにより、式 3-24 のように表すことができるとしている。

$$P_g > P_w + P_d \quad (\text{式 3-22})$$

$$\phi_c = \phi_{c0} \left( \xi + \eta e^{\epsilon \alpha \left[ \frac{\phi_s}{1 - \phi_s - \phi_c} \right]^\gamma} \right) \quad (\text{式 3-23})$$

$$\phi_c = \phi_{c0} \left\{ \xi + \eta e^{\epsilon \left[ (P_g - P_w) \left( 1 - \left( \frac{P_d}{P_g - P_w} \right)^{1/n_p} \right) - \alpha \left( \frac{\phi_s}{1 - \phi_s - \phi_c} \right)^\gamma \right]} \right\} \quad (\text{式 3-24})$$

$\gamma$  : フィッティングパラメータ

(c) 透過性変化の時間依存性の付与

ガス圧力による浸透率の変化に時間依存性を付与し、最終的にはヒステリシス現象を再現するための改良については、以下に示す時定数を導入することで対応している。

$$\frac{d}{dt}(k_{ct} - k_c) = -\lambda(k_{ct} - k_c) \quad (\text{式 3-25})$$

$\lambda$  : 時間遅れに係るパラメータ (1/s)

## 4 原位置試験計画の検討

核燃料サイクル開発機構が幌延において建設準備中の地下研究施設に対する幌延深地層研究計画を踏まえることにより、同研究施設においてガス移行原位置試験を実施する上での要件を検討するとともに、地上からの試験、立坑建設中の試験、地下研究施設内での試験等について、実施すべきガス移行試験項目を摘出した。また、時系列を考慮した段階的試験実施フロー、全体工程表等について概略的な検討を行った。

### 4.1 本計画の位置付けと前提

本試験計画の検討は、核燃料サイクル開発機構が平成15年度に実施を予定している、幌延深地層研究施設の試験坑道の設計に反映することを目的として作成されたものである。以下に原位置ガス移行試験の必要性、目的、計画検討の前提となる諸条件等を整理した。

#### 4.1.1 ガス影響研究の必要性

我が国において想定される HLW 処分概念においては、炭素鋼オーバーパックの腐食によって発生する水素ガスの蓄積やその移行が、処分システムの安全性に影響を及ぼすものであるとして懸念されている。ガスの発生と移行による主な影響としては以下のものがあると考えられている（Progress Project における検討結果）<sup>17)</sup>。

- ①発生したガスが周辺岩盤を含めた処分システム内に蓄積され、間隙圧力が上昇することによる以下の影響
  - ・力学的に影響による卓越流路を形成することによって生じる水理的機能、核種移行遅延機能の低下（EBS/NB の核種移行遅延機能の低下）
  - ・緩衝材に形成されたガス移行経路が修復されず、卓越透水／拡散経路となることによる緩衝材の核種移行遅延機能低下（EBS の止水機能、核種移行遅延機能の低下）
- ②C-14 等の放射性ガスが生物圏に放出されることによる影響
- ③H<sub>2</sub> 等の可燃性ガスが生物圏に放出されることによる影響
- ④ガスがバリア中を移行することにより派生する以下の影響
  - ・処分場内の汚染した間隙水の排出
  - ・気泡の移行による地下水流速の増加
- ⑤気液界面に濃縮されるコロイド等の化学種の移行

第2次とりまとめでは上記の潜在的影響のうち、①及び④の一部（間隙水の排出）について評価を行っているが、必ずしも透過特性データの取得が充分ではなかったことから、「これらの影響はほとんど問題のないレベルであると考えられるが、緩衝材や岩盤の透気特性データの拡充や評価モデルの改良とその適用性の確認が重要である」としている。

高レベル放射性廃棄物では TRU 廃棄物に比べて単位廃棄体体積当りのガス発生量が小さく、特に銅製キャニスタを用いる処分概念では、発生したガスの移行は溶存ガスの拡散に支配される可能性が高いと考えられている。しかしながら、周辺岩盤を含めたバリアシステム内での移行形態、移行速度は各バリア構成材料の透気透水特性や周辺岩盤の水利条件に依存し、多くの材料に対する透気透水特性が不明であること、また炭素鋼のガス発生速度は環境条件により大きく変動することから、ガス発生の影響は未だ定量的な評価が困難な状態にある。したがって、今後は緩衝材、充填材、埋め戻し材、岩盤、コンクリート（空洞支保、プラグ）などの複合材料で構成されるシステムとしての処分場内のガス移行挙動を評価可能なモデル、手法を構築し検証する必要がある。

#### 4.1.2 成果の反映

本原位置試験の成果は処分施設建設地選定のため、原子力発電環境整備機構が精密調査地区で実施を予定している原位置試験と、試験データに基づく影響評価に資するものである。具体的には、本試験の成果に基づいて精密調査においてガス影響評価の観点から調査、検討、及び試験の実施内容とその試験方法、ならびに影響評価方法を提示する。なお、精密調査地区の選定が平成 20 年代前半、最終処分場建設地区の選定が平成 30 年代後半とされていることから、遅くとも平成 28 年度（2016 年度）を目途に処分場建設地選定に適用可能な成果が得られている必要があるものとした。

#### 4.1.3 試験目的

本原位置試験は、堆積岩系岩盤内において実際のバリア構成条件下でのガス移行挙動を再現することにより、異なる移行機構を有する媒体に対して開発された複数のモデルを統合した「統合ガス移行解析ツール」について、堆積岩系岩盤内での適用性を検証することを最終目的とする。

具体的には以下の項目として表すことができる。

- ・複数の移行機構に対応するモデル、解析ツールの構築と検証

- ・上記のモデル，解析ツールの堆積岩系岩盤内処分場への適用性の確証
- ・原位置工学規模試験による HLW 処分場（堆積岩系，堅置き）におけるガス移行挙動の再現
- ・精密調査において調査，検討，試験について実施すべき内容の明確化と調査試験手法，評価手法の提示

#### 4.1.4 試験工程の基本構成

本原位置試験は確実に成果を得るため，以下に示すように下記の 5 段階で構成するものとし，また，別途実施される移行モデル／解析ツール開発工程と連携させるものとする。

第 1 段階：試錐孔による試験

第 2 段階：室内モックアップ試験

第 3 段階：坑道からのボアホール試験

第 4 段階：原位置モックアップ試験

第 5 段階：原位置工学規模試験（緩衝材厚さ：数十 cm 規模）

#### 4.1.5 前提とした諸条件

本試験計画の検討において前提とした技術的条件，ならびに環境条件は，以下に記述する通りである。

##### ①処分概念

施工の容易性の観点から，第 2 次とりまとめで示されている軟岩系岩盤内における「処分孔堅置き」処分概念とした。

##### ②試験場所

上述のように，遅くとも平成 28 年度（2016 年度）を目途に処分場建設地選定に適用可能な成果が得られている必要があり，早期に試験を開始する必要があることから，完成時期の早い GL-250m レベルの試験坑道を使用するものとした。

また，試験実施位置の岩盤には模擬処分孔が自立，安定する強度が必要であるが，声間層（珪藻質泥岩，～ - 321m(HDB-1 孔)) の一軸圧縮強度は 2～7MPa であり，稚内層（硬質泥岩 - 321m～(HDB-1 孔)) の一軸圧縮強度 10～30MPa に比較して小さいことから，声間層境界から十分な距離をもった稚内層内に原位置試験施設が建設できることを前提とした。なお，声間層での試験を想定する場合には，力学的

試験実施の可能性、有効性について安定性の観点から別途検討することが必要である。

#### ③地下水溶存ガスの湧出

地層から湧出するガス、及び地下水中に溶存するガスについては、試験坑道全体の換気システムによって排出され、試験施設は十分安全な状態に維持されているものとする。

#### ④廃棄体からの発熱

廃棄体の発熱による温度上昇から生じるニアフィールドの透過特性への影響は、室内試験によって得られるデータから予測可能な範囲にあると考えられる。したがって、ここでは廃棄体の発熱は模擬しないものとした。

### 4.2 原位置試験計画

上記の目的、前提条件に従って検討した原位置試験計画概要を以下に示した。

#### 4.2.1 試験項目

試験項目は4.1.4に記載した5段階の各段階には以下の項目を含むものとした。

第1段階：試験錐孔による試験

- ① コアを用いた室内試験
- ② 試験錐孔を用いた孔壁検層、透水試験
- ③ 試験錐孔を用いたガス注入試験

第2段階：室内モックアップ試験

- ① 室内モックアップ試験

第3段階：坑道からのボアホール試験

- ① 周辺岩盤調査

第4段階：原位置モックアップ試験

- ① 界面、EDZ 特性試験
- ② ミニチュアシステム試験

第5段階：原位置工学規模試験（緩衝材厚さ：数十 cm 規模）

- ① 原位置ガス移行試験（解体調査を含む）
- ② モデルの適用性評価

これら各段階に含まれる試験項目について、取得されるデータ、取得されたデータが

反映される解析評価, 次段階試験及び反映項目を示した原位置試験フロー及びデータ関連図を図 4-1に示した。

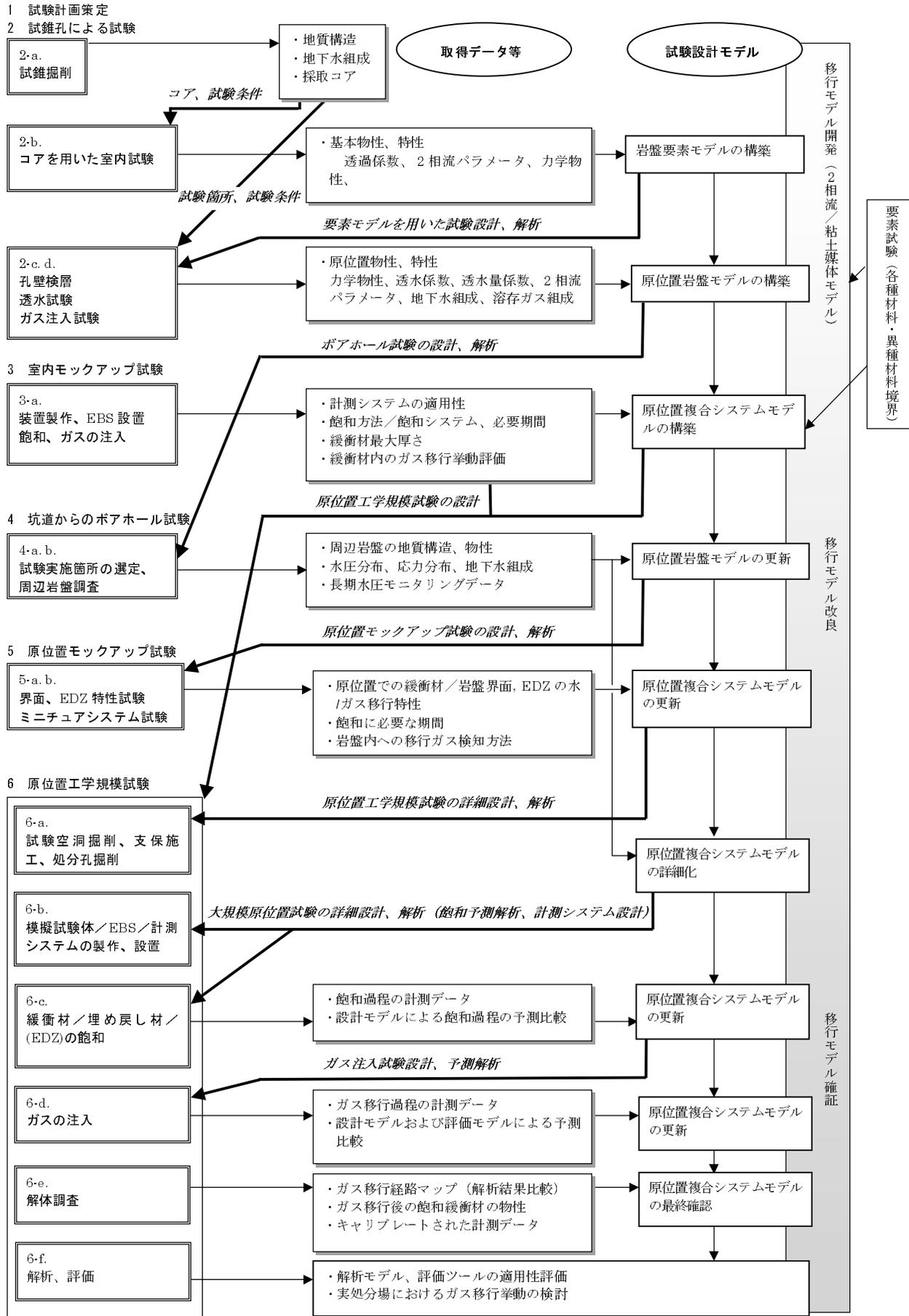


図 4-1 原位置試験フロー及びデータ関連図

#### 4.2.2 試験方法

4.2.1に示した各試験項目について、その目的、試験概念及び試験方法、得られる成果とその利用方法、試験を実施する上での制限、要求事項、ならびに詳細計画の立案上検討すべき課題についてまとめた。また、試験方法、試験装置、試験施設の概念図を各試験項目に対して示した。

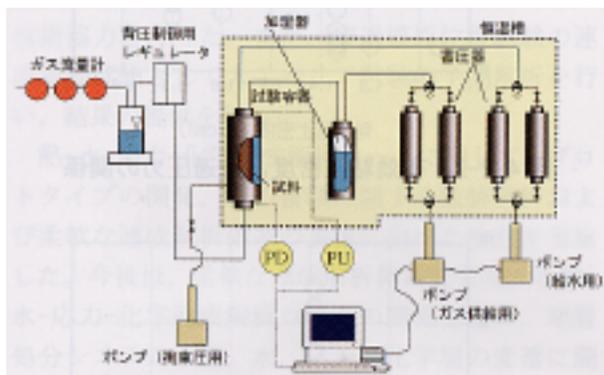
これらの結果を表 4-1に示した。

表 4-1 原位置試験概要

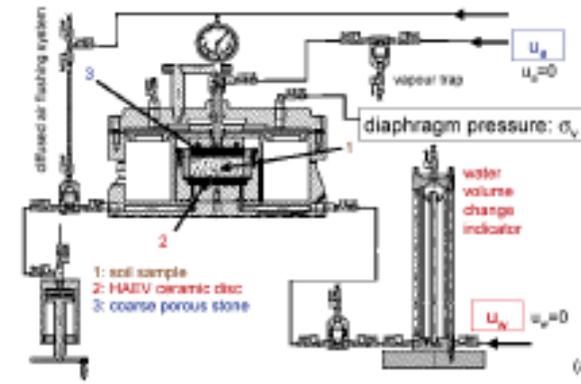
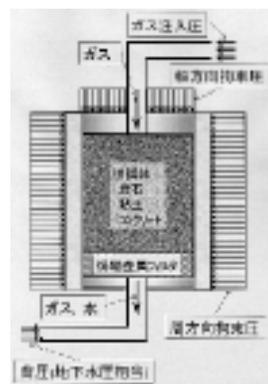
試験項目	目的	制限、要求事項	試験概念、方法（案）	成果、利用方法	課題
1.試験計画策定	<ul style="list-style-type: none"> <li>各試験の仕様、期間の設定</li> <li>試験相互間のデータ連携設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原位置環境条件に従う</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>原位置条件の早期把握</li> </ul>
2.試錐孔による試験					
2-a 試錐掘削	<ul style="list-style-type: none"> <li>コア採取及び孔内透水試験、ガス注入試験、物理検層、応力評価を目的とした試錐掘削を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GL-250m に十分な厚さの稚内層が存在</li> <li>試錐深度 280m 程度</li> <li>石油・ガス仕様の機器、防噴装置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試錐掘削は 1 本、方法は既設試錐と同様</li> <li>特性試験対象試料は、5 力所×3 試料 / 各試験程度</li> <li>物理検層（孔径、密度、比抵抗、温度、流速、孔壁画像：割れ目密度）及び応力測定（水圧破砕法）も同様に実施する。実施箇所は GL-250m 近傍の 5 区間</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コアを用いたガス透過試験</li> <li>物理検層、透水試験</li> <li>ガス注入試験</li> <li>コアを用いた試験条件、試錐孔内での透気試験計画（試験箇所決定を含む）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水溶存ガスに対する対処</li> <li>清水掘削時の孔壁の安定性</li> </ul>
2-b コアを用いた室内試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>室内試験により、母岩の透過特性、力学特性、地下水化学特性を評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>透過特性試験は原位置応力を含む幾つかの想定応力下で実施</li> <li>透過特性試験は亀裂の影響を考慮</li> </ul>	<p>コアを用いて要素レベルでの物性、各種特性データ取得のため、以下の試験を実施する。（試錐孔 1 本、5 力所×3 試料 / 各試験程度）</p> <p>透過特性試験 飽和試料に対する透水試験、及びガス透過試験を実施する。 2 相流パラメータの取得では、透過係数の異方性についても評価する。 （実効拡散係数の評価に係る試験は別途実施されるものとする）</p> <p>毛管圧特性評価試験 岩盤の透過性、力学特性により以下の手法を選択して用いる。 高飽和域：高速遠心法、サクシオン制御オedometer試験（図参照、定配合ベンツナイト試料に対して実績あり：GMT） 中飽和域：高速遠心法、サイクロメータ法、マルチステップ加圧流出法 力学特性試験 岩盤の応力、異方性、亀裂を考慮し、弾性係数、圧縮強度を測定する。 地下水化学試験 地下水分析、コアからのガス採取により溶存ガス組成を評価する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>絶対透過係数等の 2 相流パラメータ（応力、異方性、亀裂を考慮）</li> <li>力学特性：弾性係数、強度（応力、異方性、亀裂を考慮）</li> <li>地下水組成、溶存ガス成分</li> </ul> <p>岩盤要素モデルの構築と原位置モデルへ反映</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂内の透過特性評価</li> <li>排水 / 吸水条件に対する毛管圧測定手法選択</li> <li>2 相流パラメータのヒステリシス効果の評価</li> <li>ガス透過特性の過圧密度の影響評価</li> </ul>

ガス注入試験装置概念

ガスエントリー、及びブレイクスルー等のガス透過挙動を測定し、移行特性パラメータを評価する。応力依存性を評価するため、拘束圧を制御できる試験装置により試験を行う。等方応力及び側圧係数を反映した応力状態での試験が考えられる。毛管圧特性データを取得することにより、解析モデルによる物性評価 / 移行特性評価を併せて実施する。飽和間隙水は原位置の間隙水組成に調整した水を用いる。



三軸ガス移行試験装置（AFS）及び試験容器構造概念

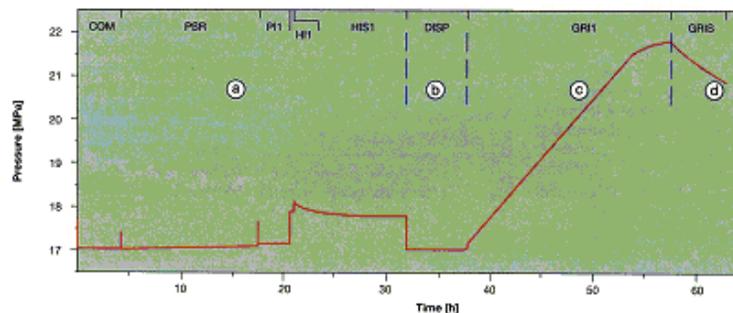
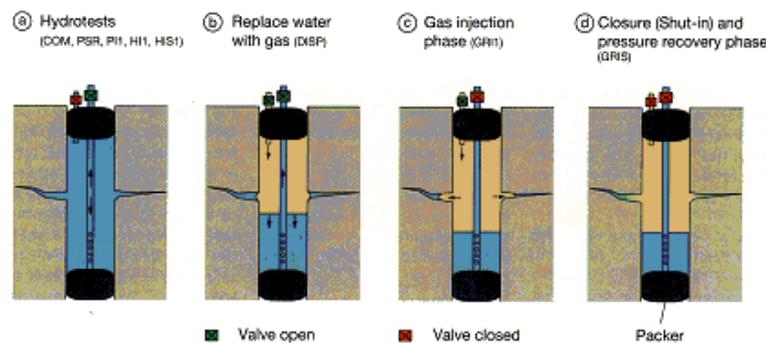


毛管圧特性評価試験装置(例) サクシオン制御オedometer（UPC）

<p>2-c 試錐孔を用いた孔壁検層、透水試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原位置での亀裂分布、応力分布等のデータを取得する。</li> <li>・地下施設建設等の影響を受けない原位置環境下（応力、間隙圧、溶存ガス）での透水特性を事前に評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・亀裂の影響を考慮</li> <li>・稚内層内での試験</li> <li>・溶存ガス湧出の最小化</li> </ul>	<p>原位置における特性データ取得のため、以下の試験を実施する。（試錐孔1本、GL-250m 近傍の5区間）</p> <p>物理検層 孔径、密度、比抵抗、温度、流速、孔壁画像：割れ目密度、及び応力測定（水圧破砕法）の測定評価を実施する。</p> <p>透水試験 透水試験は溶存ガスの湧出を避けるため、注水試験で実施する。低透水性岩盤にはトランジェントパルス法等の適用を考慮。また、異方性についても評価する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検層結果、原位置応力</li> <li>・原位置透水係数、透水量係数</li> </ul> <p>コアを用いた試験条件や試験結果の評価、試錐孔内透気試験の計画（試験箇所決定を含む）、結果の評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶存ガスに対する対処</li> <li>・清水掘削の孔壁安定性</li> <li>・試験深度（地層境界近傍、工学規模試験実施レベルと+20m 深部？）</li> <li>・長期モニタリングの意義、必要性の検討</li> <li>・試験坑道からのボアホール試験により代替できるが、時間的な制約を考えると実際には困難</li> </ul>
<p>2-d. 試錐孔を用いたガス注入試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下施設建設等の影響を受けない原位置環境下（応力、間隙圧、溶存ガス）でのガスの透過特性、2相流パラメータを事前に評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検層 / 透水試験実施位置で行う</li> <li>・亀裂の影響を考慮</li> <li>・稚内層内での試験</li> <li>・溶存ガス湧出の最小化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・透水試験に引き続き定流量ガス注入試験を行う（試錐孔1本、検層 / 透水試験と同位置 3 区間程度 (GL-250 ± 20 の範囲内)）。試験手順は下図参照（実績あり：Nagra）。なお、詳細は事前の予備解析に基づく試験設計で検討する。</li> <li>・試験データから井戸解析、2相流モデルによる逆解析に基づいて原位置物性を同定する。</li> <li>・別途、ガス採取により溶存ガス成分・量を分析する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原位置透気係数、ガスエントリ圧、2相流パラメータ</li> <li>・溶存ガス組成</li> </ul> <p>コア試験との比較検討 原位置岩盤モデルの構築 坑道からのボアホール試験と工学規模原位置試験の概要設計</p>	

ガス注入試験手順

a パルス注水試験 (PI) 定流量注水試験 (RI) シャットイン・回復 (RIS) b 水/ガス置換 (DISP) c 定流量ガス注入試験 (GRI) d シャットイン・回復 (GRIS) ガス/水置換 (DISP) パルス注水試験 (PI)

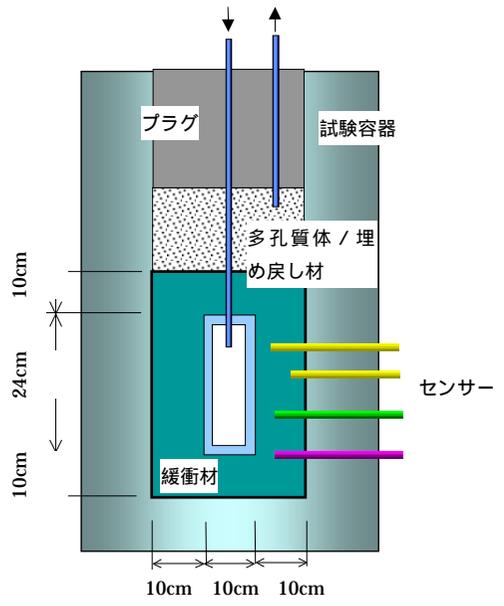


2相流特性評価のための透水・透気試験 (EGTP) の概念 (Nagra)

3.室内モックアップ試験				
3-a. 装置設計製作 EBS 設置 飽和 ガスの注入	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測システム、EBS 飽和システム、ガス注入システムの試作と検証（システムの最適化）</li> <li>原位置試験方法の検討、妥当性確認、試験期間評価、計測手法・評価手法の適用性確認、事前評価のためのデータ取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>予備解析による飽和条件 / 期間、ガス透過期間に基づいた設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>5.に示す試験モデル概念の処分孔内における人工バリア、計測システム、人工飽和システムを模擬した室内モックアップ試験を行う。スケールは原位置試験の1/5 - 1/3 程度とする（緩衝材厚 10-15cm）。</li> <li>工学規模原位置試験の処分孔内に設置される EBS を試験容器内に設置し、飽和試験、ガス注入試験を行い、模擬廃棄体 / 緩衝材界面 緩衝材 緩衝材 / 岩盤界面へのガス移行挙動を把握する。</li> <li>必要に応じ関連する室内試験（e.g. ブロックベントナイトの品質試験、トレーサー）を実施する（充填材の室内物性試験は別途行われるものとする）。</li> <li>モデル解析による詳細設計と事後解析を実施する。</li> <li>（埋め戻し材、コンクリート、岩盤の界面の試験は別途実施する）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測システムの適用性</li> <li>飽和システム・方法、飽和必要期間、緩衝材最大厚さ</li> <li>緩衝材内のガス移行挙動</li> </ul> <p style="text-align: center;">工学規模試験設計 原位置複合システムモデルの構築</p>

室内モックアップ試験の概念と主な確認事項

- 機能確認対象：模擬廃棄体、緩衝材、埋め戻し材、プラグ、計測機器、注水・ガス注入システム、ガス収集システム、及び計測データを遠隔モニタリングするデータ収集・表示システム
- 緩衝材 / 埋め戻し材内に設置する計測器：温度センサー、湿度計、水分量計（STDR, RI or サイクロメータ）、テンシオメータ、間隙圧計（ピエゾメータ）、応力計など



4.坑道からのボアホール試験

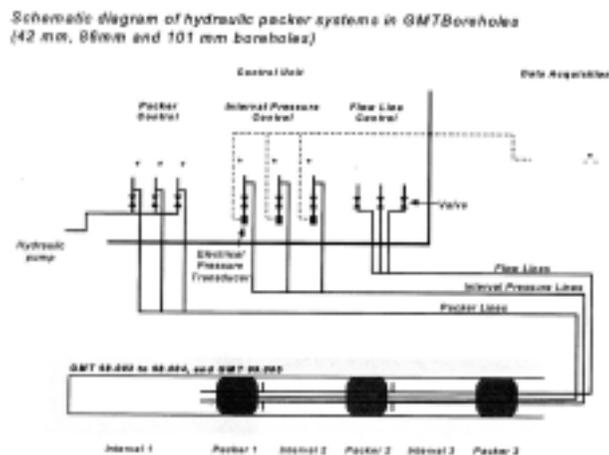
4-a.  
試験実施箇所  
の選定  
4-b.  
周辺岩盤調査

・工学規模試験周辺岩盤の透  
気・透水、力学特性（試験坑  
道、処分孔掘削前）を評価す  
る。

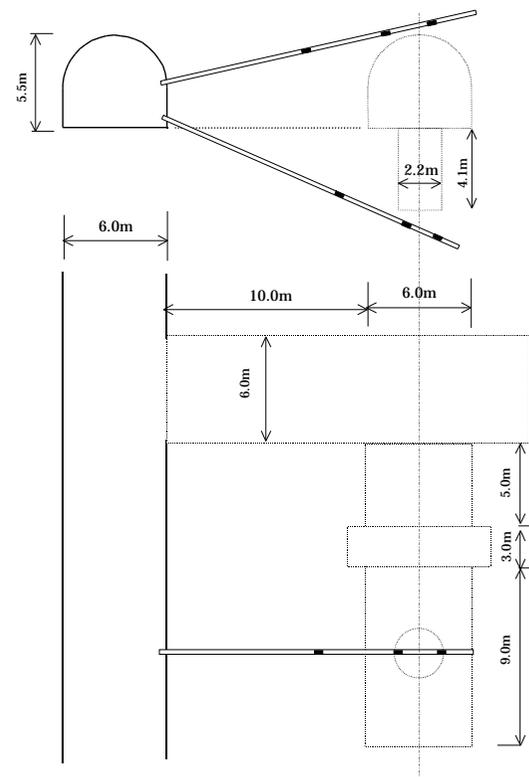
・溶存ガスの degas の最小化

・既存情報から工学規模試験実施場所を選定し、ボアホール試験と空洞内での試験により、岩盤内のガス移行挙動評価（計測とモデル構築）及び試験方法（飽和、ガス注入）の設計に必要な周辺岩盤の特性を取得、評価する。  
・試験坑道は防曝の観点から図に示すようなレイアウトとし、試験空洞上下を通過するボアホールを最低2本掘削し、調査試験を行う。  
・孔壁観察（BTV）と、2-b.と同様のコア試験に基づいて透水・透気、力学、地下水化学特性を評価する。  
・マルチパッカーシステムにより 2-と同様の透水、透気試験（EGTP）を行い、井戸解析、2相流モデルによる逆解析に基づいて原位置物性を同定する。  
・健岩部の透過特性試験には数 m ~ 15m 程度のボアホールに対しトリプルパッカーを用いる。EDZ の透過特性試験にはパッカー間が 15-20cm 程度のミニマルチパッカーを用いる。また、水分量測定には TDR あるいは RI 計測が考えられる  
・その後は長期水圧モニタリングを行う。

周辺岩盤の地質構造、物性（絶対透過係数等の2相流パラメータ、力学）、水圧分布、応力分布、（掘削前）工学規模試験位置の確定（What's criteria）  
原位置岩盤モデルの更新  
原位置複合システムモデルの詳細化  
工学規模試験の詳細設計（空洞掘削安定性、地下水流動、水圧、システム飽和、プラグ、計測機器）  
・長期水圧モニタリングデータ



マルチパッカーシステム概念図

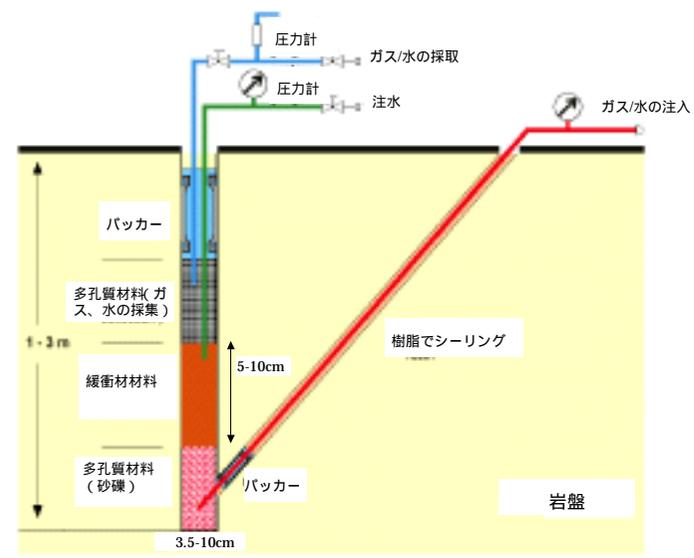


試験空洞レイアウトと周辺岩盤調査試験ボアホール

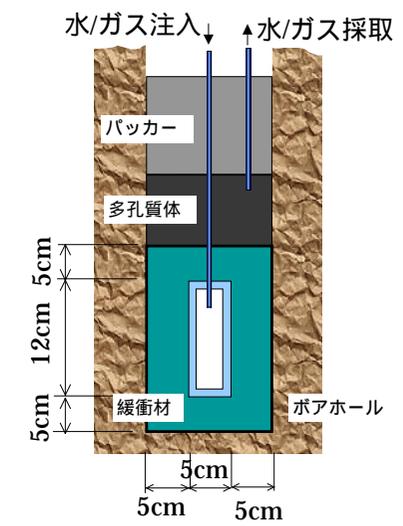
5.原位置モックアップ試験

<p>5-a. 界面、EDZ 特 性試験 5-b. ミニチュアシ ステム試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材と岩盤界面のガス移行特性の評価</li> <li>EDZ 内のガス移行特性の評価</li> </ul>	<p>&lt; 界面、EDZ 特性試験 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原位置ボアホール内に緩衝材を設置し、飽和試験、ガス注入試験を行って、岩盤との界面の透過特性を評価する（他の界面の透過特性については室内試験により評価する）。</li> <li>ベントナイト設置深さ（EDZ 部分と健全部）、ボアホール壁面状態の異なる場合の試験（4 ケース）を、ガス注入速度をパラメータとして計 8 試験程度実施する。</li> </ul> <p>&lt; ミニチュアシステム試験 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>工学規模原位置試験の処分孔内に設置される EBS のミニチュアシステムをボアホール内に設置し、飽和試験、ガス注入試験を行って、模擬廃棄体 模擬廃棄体 / 緩衝材界面 緩衝材 緩衝材 / 岩盤界面 岩盤へのガス移行挙動を把握する。</li> <li>同時に周辺岩盤へ移行したガスの検知方法を検討、試験する。</li> <li>モデル解析による詳細設計と事後解析を実施する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤界面を含めた原位置での充填材の水 / ガス移行特性（ガス注入速度による移行プロセスなど）</li> <li>飽和に必要な期間の推定</li> <li>岩盤内への移行ガス検知方法</li> </ul> <p>工学規模試験設計 原位置複合システムモデルの更新</p>
--	---	--	--

試験モデル概念



界面、EDZ 特性試験の概念図原



ミニチュアシステム試験の概念図

6.原位置工学規模試験

試験施設概念

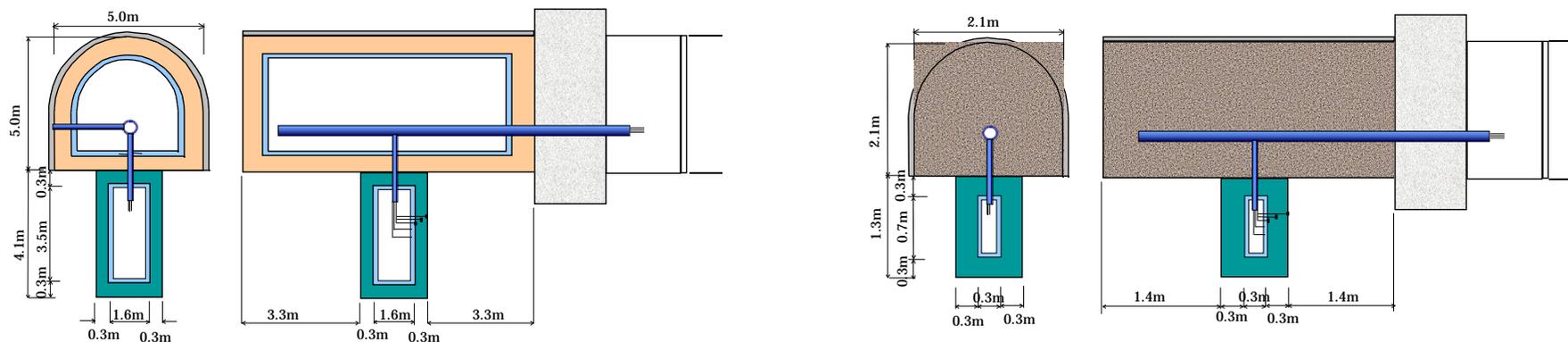
- ・開発 / 整備した移行評価モデル / 解析ツールの適用性確認
- ・処分場でのガス移行プロセスの再現

- ・ベントナイト / ケイ砂緩衝材の飽和期間を最大 1.5 年程度とした場合、飽和可能な緩衝材層厚を加圧注水を考慮してもほぼ 30cm 程度と仮定（ベントナイト / ケイ砂：70/30 の場合）。
- ・上部空洞は相当程度スケールダウン（1/5 以下）しないと埋め戻し材は飽和困難であると思われる（ベントナイト / ケイ砂：15/85 の場合）。
- ・以上の仮定に基づき、試験モデルとして、下記、 に示す 2 ケースを検討する  
 空洞、処分孔は 1/1 スケールとし、緩衝材厚と埋め戻し材厚を小さくするモデル  
 3/7 スケールとし、埋め戻しを砂で代用するモデル。

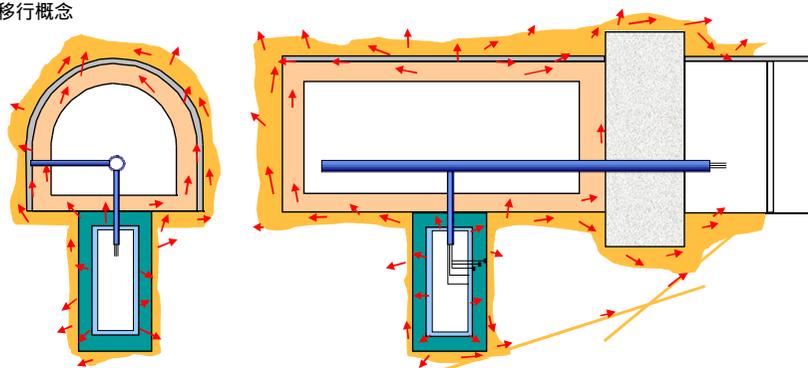
- ・ベンチレーション
- ・防爆設備

JNC T18440 2003-004

試験モデル概念



ガス移行概念



実スケールの空洞、処分孔で、緩衝材厚と埋め戻し厚だけを小さくしたモデル（70%ベントナイト緩衝材、15%ベントナイトで埋め戻し、上部空洞に人工飽和システムを導入した鋼製枠を設置）

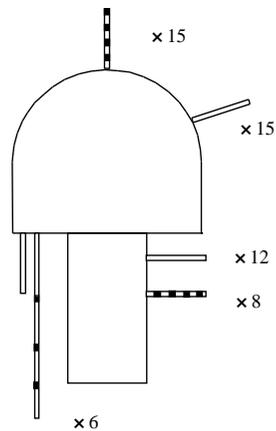
3/7 スケールで充填材厚を 30cm としたモデル（70%ベントナイト緩衝材、砂で埋め戻し）

<p>6-a. 試験空洞掘削、支保施工、処分孔掘削</p>	<p>・工学規模試験を実施するための、「処分孔道」、「処分孔」を施工する。</p>	<p>・実処分場で想定されるものと等価な品質          ・ブロックベントナイト設置も考慮した平滑な処分孔          ・防爆仕様、ガス対策</p>	<p>・試験空洞は、「幌延深地層研究計画：地下施設建設に関する基本計画の検討」で示されている中間ステージ水平坑道と同様、自由断面掘削機による機械掘削で行う。          ・支保工に関しても同様である（鋼製支保＋ロックボルト＋吹き付けコンクリート）          ・処分孔は「第2次とりまとめ」で検討されているロータリー掘削工法が第一候補。          ・以下の条件（仮）を考慮して詳細な検討が必要          岩盤条件          珪藻質泥岩、硬質泥岩（稚内層） 深度 GL-250m、一軸圧縮強度：10MPa、粘着力：2MPa、内部摩擦角 25、E50=2MPa、最小主応力 5MPa、最大主応力 7MPa、湧水量？、透水係数 1.E-10m/s          掘削量          上部空洞 200m<sup>3</sup>、処分孔：15m<sup>3</sup>、アクセス坑道 500m<sup>3</sup></p>	<p>・工学規模試験用の試験空洞、処分孔          原位置の各種試験</p>	<p>・防爆仕様、ガス対策</p>
-----------------------------------	---	--	--	--	-------------------

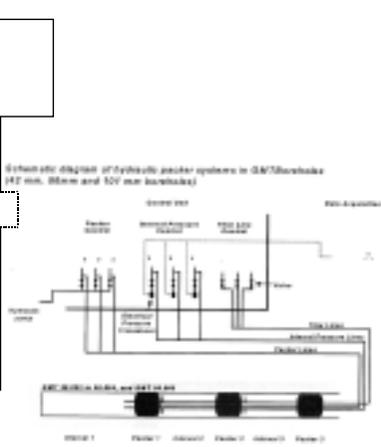
<p>6-b. 模擬廃棄対 / EBS / 計測システムの製作、設置</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>工学規模試験の計画、実施、評価に必要な周辺岩盤の各種情報を取得、評価する。</li> <li>試験概念に基づき、所定の試験体、計測システムを設置する</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>健全部は数 m ~ 15m 程度のボアホールにトリプルパッカーを、EDZ にはパッカー間 15-20cm 程度のミニマルチパッカーを適用。水分量測定は TDR、RI 計測を考慮。</li> <li>試験概念、各種試験計測データに基づいて、試験装置の詳細設計を行い、模擬廃棄体、緩衝材、埋め戻し材、プラグ並びに計測機器、水 / ガス注入システム、ガス収集システムを製作、設置する。</li> <li>模擬廃棄体からの注水により緩衝材を人工的に飽和するシステム、また、埋め戻し材を人工的に飽和するためのシステムを設置する。</li> <li>緩衝材は現地締固めと事前圧縮成型ブロック設置が考えられるが、前者は不均質性の評価が困難なため後者が適当と考えられる。</li> <li>岩盤内の計測は基本的に 4-b. で設置の計測器（水圧、水分量の計測）で実施するが、4-b. の結果から追加設置の必要性を検討する（例えば、水 / ガスサンプリングシステムの設置などが考えられる）。</li> <li>緩衝材内に設置する計測器としては、温度センサー、湿度計、水分量計（STDR、RI or サイクロメータ）、テンシオメータ、間隙圧計（ピエゾメータ）、応力計などを検討する。</li> <li>計測データを遠隔モニタリングできるデータ収集・表示システムを設置する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周辺岩盤の地質水理学データ、モデル（水圧、水分量、応力、地質水理構造・物性、湧水・蒸発量）</li> <li>試験体と計測システム設計 / 設置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水 / ガス注入システムとしての模擬廃棄体設計</li> <li>人工飽和システム</li> <li>計測器配管方法</li> <li>配管周囲の止水、止ガス</li> <li>センサーの適用性（高圧、長期）</li> <li>周辺岩盤内での移行ガスの検知方法</li> <li>高圧ガス</li> <li>防爆システム</li> </ul>
--	--	--	--	--	--

ボアホール設置場所ごとの計測項目、数（例）

・空洞内での試験として、蒸発量計測（埼玉 JNC 法）を 6 カ所程度で実施し、透水係数を評価する。また、空洞及び処分孔への湧水量を計測し、サイトの局所的なベンチレーション試験と併用して自然流入量を評価する。さらに、壁面観察に基づいて地質構造（割れ目、湧水状態）マッピングを行う。



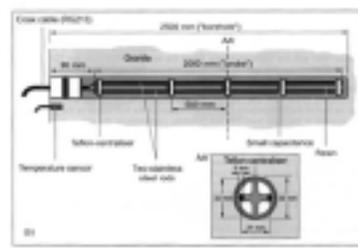
計測概念図



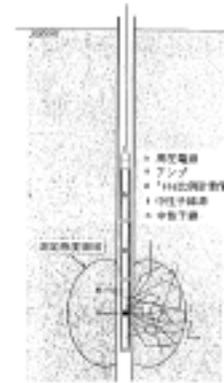
トリプルパッカーシステム概念図



EDZ 計測用ミニマルチパッカーシステム概念図



TDR 水分量プローブ概念図



挿入型 RI 水分計

試験空洞： トリプルパッカー（×5）、 ミニマルチパッカー（×15）、 TDR or RI（×15）  
 処分孔近接鉛直： トリプルパッカー（×6）  
 処分孔： ミニマルチパッカー（×8）、 TDR or RI 1（×2）

6-c. 緩衝材 / 埋め戻し材 / (EDZ) の飽和	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス移行試験のため、緩衝材及び埋め戻し材を飽和させる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1.5 年程度以内で飽和を達成する</li> <li>・システムに人工的な損傷を与えない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水の自然流入及び人工飽和システムにより EBS ( EDZ ) を飽和させる。</li> <li>・飽和試験データを基に原位置複合システムモデルの更新を行い、飽和試験方法を必要に応じて修正する。</li> <li>・飽和確認は計測データ及び原位置複合システムでの透水試験によって行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・飽和過程の計測データと飽和試験体</li> <li>・原位置複合システムモデルによる飽和過程の予測結果 ( 実験結果との比較 )</li> </ul> <p>原位置複合システムモデルの更 ガス注入試験の予測</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適切 ( 人工的な損傷を回避可能な )、かつ効率的な人工的飽和方法 / 条件</li> </ul>
6-d. ガスの注入	<ul style="list-style-type: none"> <li>・周辺岩盤を含めた複合的システムにおけるガス移行挙動を評価する。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・更新された原位置複合システムモデル及び評価モデルによる予測解析に基づき、ガス注入速度や注入期間など、ガス試験の条件設定を行う。</li> <li>・廃棄体模型内からガスを注入し、人工バリア + 埋め戻し ~ 周辺岩盤 ~ プラグシステムのガス移行挙動を調査する。</li> <li>・全てのセンサー応答をモニタリング、記録する。</li> <li>・試験はプラグ周辺、空洞端部で移行ガスが検知された時点で終了とする。</li> <li>・原位置複合システムでの透水試験を行って、ガス注入後の緩衝材及び全体システムの透水性を評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス移行試験の計測データ</li> <li>・原位置複合システムモデル及び評価モデルによる予測結果 ( 実験結果との比較 )</li> </ul> <p>原位置複合システムモデルの更新 総合評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス注入速度 ( 加速試験の考え方 )</li> <li>・安全対策 ( ガス : 圧力、化学 )</li> <li>・ガストレーサーの使用</li> </ul>
6-e. 解体調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス移行挙動の事後評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解体作業による影響の最小化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス移行挙動の事後評価とそれによるモデルの検証に資するため、試験体解体時に以下の項目について調査する。 緩衝材内や岩盤界面等のガス移行経路や移行プロセス評価に資する調査 トレーサー調査、コアによる水理、力学、化学試験 構造部材及び岩盤内のガス移行経路や移行プロセス評価に資する調査 注入システム、計測器の有効性評価 ( キャリブレーション )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス移行経路マップ及びモデル解析結果との比較</li> <li>・ガス移行後の飽和緩衝材の物性</li> <li>・キャリブレートされた計測データ ( 再評価された計測データ )</li> </ul> <p>更新された原位置複合システムモデル の確認 総合評価</p>	
6-f. 解析、評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデル・パラメータの適用性評価</li> <li>・処分場でのガス移行に関する検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・6-b. ~ 6-e.の結果に基づき、原位置複合システムモデルと移行モデルの適用性を確認・評価するとともに、測定、解析上の課題を整理する。</li> <li>・原位置複合システムモデル及び移行モデルによる解析に基づいて、堆積岩での処分概念のガス移行に対する問題点、検討課題を整理し、その解決策を検討する。</li> <li>・精密調査地区において調査検討すべき項目、並びに調査方法、評価手法を提案する。</li> </ul>			

#### 4.2.3 試験工程

4.2.1に示した各試験項目について、平成 28 年度（2016 年度）を目途に処分場建設地選定に適用可能な成果が得られていることを条件として、解析モデル及び評価ツール開発工程、及び試験施設の概略規模に関する検討とも整合を考慮して、原位置試験の実施工程を検討した。

本検討で抽出された各試験工程を、処分事業計画上のマイルストーン、解析モデル及び評価ツールの開発、室内ガス移行試験との相互関連とともに図 4-2に示した。また、ここには諸外国で計画されているガス移行試験、ガス影響評価に係る研究計画をともに示した。

最後に以上の検討結果を要約することにより、「ガス移行挙動試験」計画として一定のフォーマット上にまとめた。





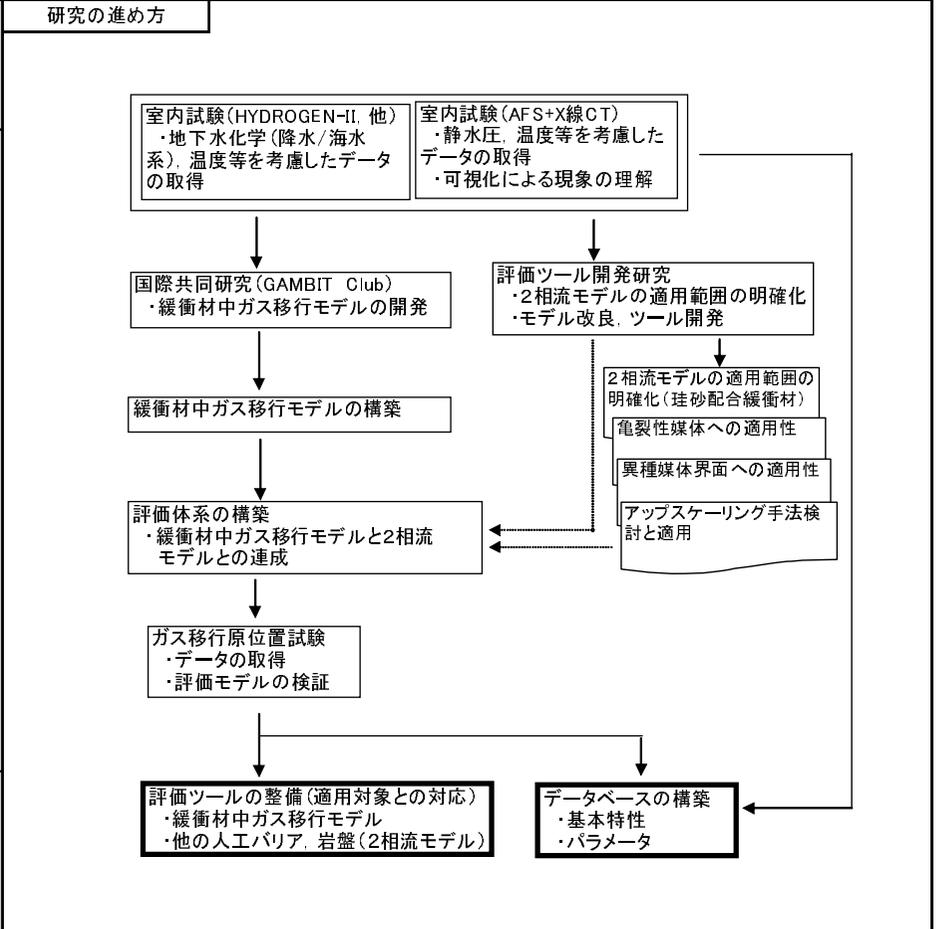
# 「 ガ ス 移 行 挙 動 試 験 」 計 画

研究テーマ名 緩衝材／岩盤：ガス透気体挙動に関する研究（原位置試験名：ガス移行挙動試験（仮称）） 1/2

**概要とねらい**  
 種々の環境条件を考慮して緩衝材等バリア構成材料の基本的な透気特性に関するデータを取得するとともに、緩衝材及び岩盤中のガス移行現象を総合的に把握するとともに、各バリア構成材料に対する移行モデルの開発を進め、炭素鋼製オーバーパツクの腐食により発生する水素ガスの影響を定量的に評価する。

- 研究全体の実施項目**
- 室内試験**  
 地下水圧条件、地下水化学（降水系及び海水系）、温度等を考慮して緩衝材、岩盤等に対する基本的な透気特性データを取得し、またX線CTを用いてリアルタイムに移行現象を把握することによりバリア中のガス移行の特徴を明確化し、移行機構の理解とモデル化に資する。
  - バリア中ガス移行モデルの開発**  
 緩衝材中のガス移行については、室内試験結果を基に国際共同研究において開発を進めている、応学場を考慮した連成モデル及びアップスケールリングへの対応を実施する。  
 セメント系材料等その他の人工バリア中のガス移行については、室内試験結果を基に2相流モデルの適用性を確認する。  
 岩盤中のガス移行については、室内試験及び原位置試験によりデータを取得するとともに、2相流モデルの適用性を確認する。
  - 2相流モデルの適用範囲の明確化**  
 緩衝材に適用した場合の適用性について整理する（珪砂配合による適用性への影響）。  
 その他の人工バリア及び岩盤については、亀裂性媒体、異種媒体界面への対応、アップスケールリング手法の検討を行い、適用モデルへの反映、解析ツールの改良を行う。
  - 評価体系の構築**  
 緩衝材中のガス移行モデルと、2相流モデルを基本としたその他の人工バリア、及び岩盤中の移行モデルとを連携することにより、多重バリア中の一連の移行を評価可能なガス影響評価ツールの構築を実施する。
  - ガス移行原位置試験**  
 実際のバリア構成及び、各種の不確定因子を含む規模の試験設備を用いることにより、4. で構築されたツールに対してその妥当性を検証する。

- 問題点**
- ①実施主体が精密調査地区において実施を予定する原位置試験に本研究の成果が反映されるためには、遅くとも平成29年度頃までに本研究の成果を取りまとめる必要がある。
  - ②このため、試験坑道（～250m levelでの実施を想定）の完成が予定される平成20年以降、速やかに試験、評価を実施する必要がある。
  - ③高压ガスの使用、地層ガスへの対策を検討する必要がある。



実施項目	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31
室内試験	[Progress bar]																
GAMBIT Club	[Progress bar]																
2相流モデル適用性	[Progress bar]																
評価体系の構築	[Progress bar]																
原位置試験	[Progress bar]																
・試験坑道掘削等	[Progress bar]																
・人工バリア建設	[Progress bar]																
・ガス移行試験	[Progress bar]																

まとめ

原位置試験名	ガス移行挙動試験	2/2
--------	----------	-----

試験の目的	・堆積岩系岩盤内において実際のバリア構成でのガス移行挙動を再現し、移行挙動を把握する。 ・異なる移行機構を有する媒体に対して開発されたガス移行解析ツールの適用性を確認する。
試験の必要性	異なる移行機構に対するモデルの統合、アップスケーリングへの対応、異種媒体界面での移行挙動に対する評価ツールの適用性評価、ならびに原位置データの評価への適用手法を確認する観点が必要。

予想される成果と反映先	成果：信頼性の高い評価ツール及びデータベースの整備 反映先：実施主体による処分施設建設地の選定、及び国による安全審査
-------------	---

試験概念・環境	規模	・モックアップ試験：緩衝材厚さ $n \times 10^0 \text{cm} \sim 1 \times 10^1 \text{cm}$ 規模 ・工学規模試験：緩衝材厚さ $n \times 10^1 \text{cm}$ 規模 (施工／飽和に要する期間、処分孔の力学的安定性等により決定)
	定置	施工性の観点から処分孔設置方式を第一候補とする。
	支保工	処分孔壁に支保は適用しない。
	深度	早期に試験を実施する必要があることから、-250mレベルでの実施を前提とする。
	地質	・処分孔が自立、安定する強度を有する岩盤であること。
	地下水	原位置地下水(海水系)、もしくは人工地下水(非海水系)

**試験内容**

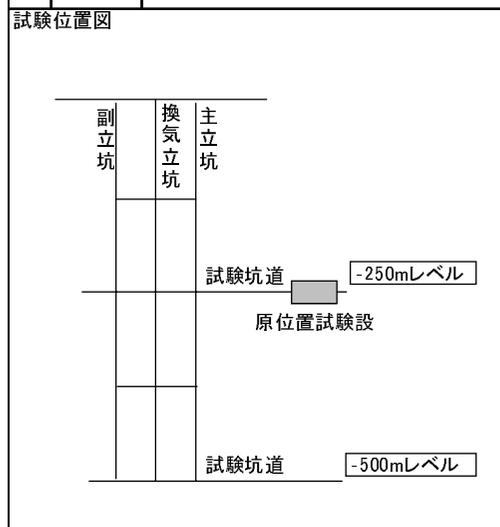
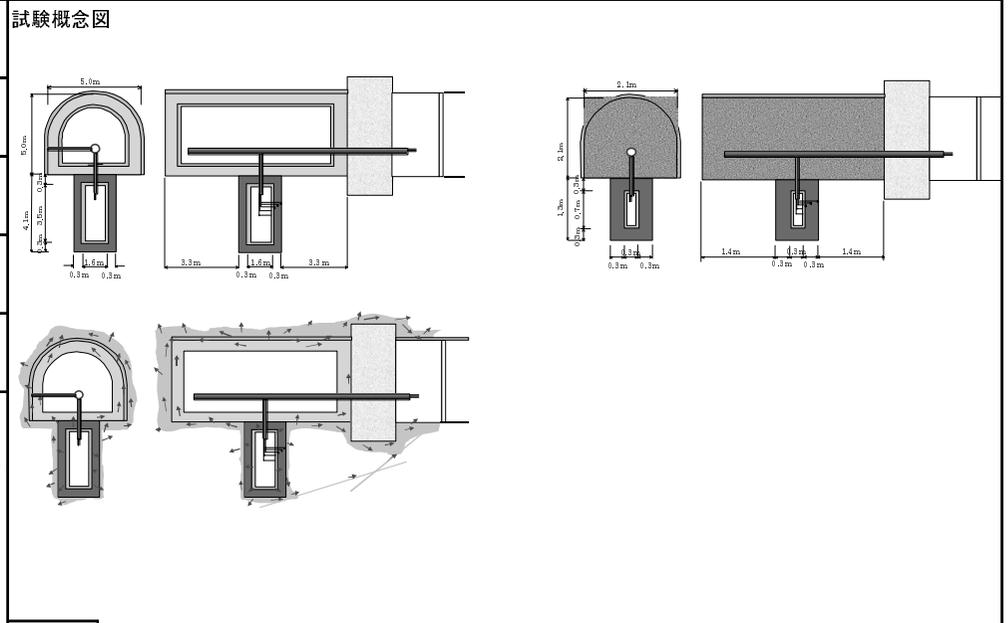
第1段階 試験錐による試験  
：コアを用いた室内特性試験、孔壁検層、孔内透水／ガス注入試験による基礎データの取得

第2段階 室内モックアップ試験(緩衝材厚さ：数～10cm規模)  
：EBS飽和／計測システムの検証を行い、試験モデル、工学規模試験の施設設計、試験工程／条件に反映

第3段階 坑道からのボアホール試験  
：周辺岩盤特性調査(坑道からのボーリング孔の掘削と、水理学的及び力学的データの取得)

第4段階 原位置モックアップ試験(緩衝材厚さ：数～10cm規模)  
：緩衝材と岩盤界面、及びEDZ内のガス移行特性の評価を行い、試験モデル、工学規模試験の施設設計、試験工程／条件に反映する

第5段階 原位置工学規模試験(緩衝材厚さ：数10cm規模規模)  
：処分坑道／処分孔の掘削、EBS／センサー類の設置、施工中のデータの取得、緩衝材飽和、ガスの供給、終了後サンプリング、評価手法の評価を行う



**施設建設への制約**

：声間層(珪藻質泥岩、～-321m(HDB-1孔))の一軸圧縮強度は2～7MPaであり、試験設備建設の可能性について確認する必要がある。  
：割れ目の存在については、可能な限り均質性の高い、割れ目の少ない部位が望ましい。  
：地層中のガスの存在については、多量のガスが溶存する地層では試験結果に影響を及ぼす可能性がある。

**試験エリアの考え方**

：本原位置試験では可燃性ガスを使用しないが、地層中の可燃性ガスに対する処置について検討する必要がある。  
：使用ガスの注入圧力が1MPaを超えると予想されるため、高圧ガス保安法、及び鉱山保安法との関連、対応について検討する必要がある。

工程表	項目	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
	試験錐による試験	～H17								
	坑道からの試験	H20～								
	周辺岩盤調査				長期水圧測定					
	試験施設の建設									
	緩衝材の飽和									
	ガス移行試験									
	解析／評価									

## 5 おわりに

地層処分環境下においては炭素鋼製オーバーパック、金属製廃棄物の腐食、微生物による有機物の分解によりガスが発生する。処分場内で発生したガスは、その蓄積と移行の過程で人工バリアシステム内の間隙圧力上昇による力学的影響、核種に汚染された間隙水の早期排出等の現象を誘発し、処分システムの長期安全性に影響を及ぼす可能性が指摘されており、バリアのガス移行特性の把握と評価手法の確立が必要である。

本研究では粘土系材料に対するガス透過試験結果について Kozeny-Carman モデルを適用した改良型 2 相流解析コードを適用し、粘土系材料に特有なブレイクスルー挙動の再現性が高いことを示すとともに、間隙水の排出量の評価に対しては課題のあることが明を明らかにした。

また、諸外国におけるガス移行研究、及びガス影響評価に関する研究成果に対する調査から、国際共同研究の進展等によって岩種等の処分場環境条件、人工バリア構成、処分対象廃棄物の種類により重要となる現象が抽出されてきており、各現象の評価に必要となる課題が整理されつつあることが明らかになった。

これらの課題の中からわが国の処分概念に適合した項目に対してさらに研究を進めることが重要であり、その一環として堆積岩系岩盤内に建設が予定される深地層研究施設におけるガス移行原位置試験計画について概略検討を行い、実施すべき項目とそれらの相互関連、全体工程等を作成した。

今後は本研究で明確となった移行評価モデルについて改良、開発を進め、各バリア構成材料に対する評価モデルと特性データを整備するとともに、原位置試験により実地層における評価ツールの確証を実施することが必要である。

参 考 文 献

- 1) Horseman, S. T. and Harrington, J. F. : “Study of Gas Migration in Mx80 Buffer Bentonite”, British Geological Survey Natural Environment Research Council, NERC BGS Internal Report, WE/97/7 (1997)
- 2) Volckaert, G., et al. : “MEGAS – Modelling and experiments on gas migration in repository host rocks - Final report – Phase 2”, R-3101 (1996)
- 3) Harrington, J. F. and. Horseman, S. T. : “Gas transport properties of clays and mudrock, Mud and Mud stone: Physical and Fluid Flow Properties”, Geological Society London, Special Publications, vol. 158, pp.107-124 (1999)
- 4) 山本幹彦, 他 : “人工バリアシステム中のガスの移動に関する研究 (IV) ”, JNC ZJ8400 99-023 (1999)
- 5) 山本幹彦, 他 : “人工バリアシステム中のガスの移動に関する研究 (V) ”, JNC TJ8400 2000-032 (2000)
- 6) Volckaert, G., et al. : “MEGAS – Modelling and experiments on gas migration in repository host rocks - Final report – Phase 1”, EUR 16235 EN (1995)
- 7) Nash, P. J., et al. : “Modelling gas migration in compacted bentonite”, POSIVA Report 98-08 (1998)
- 8) 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)
- 9) Wood, G. P., et al. : “Single capillary model of gas pathway propagation in Boom clay, Projects on the effects of gas In underground storage facilities for radioactive waste (Pegasus project)”, Proceedings of progress meeting held In Mol, Belgium, 28 and 29 May 1997-, EUR 18167 EN (1998)
- 10) 棚井憲治, 他 : “地層処分場におけるガスの拡散・移行に関する検討”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-045 (1999)
- 11) Cuñado, M., et al., : “Gas generation - data, models and assessment”, Proceedings of GASNET Workshop on How to treat gas in safety assessments of a radioactive waste repository”, To be published
- 12) 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開発—平成13年度報告—” JNC TN1400 2002-003 (2002)
- 13) Horseman, S. T., et al.: “Water Gas and Solute Movement Through Argillatious Media”, Report CC-96/1, OECD/NEA (1996)
- 14) Dullien, F. A. L.: “Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure, 2<sup>nd</sup> Edition”, Academic Press, London (1992)
- 15) GASNET : “A Thematic Network on Gas Issues in Safety Assessment of Deep Repositories for Nuclear Waste”, Final Report on the Treatment in Safety Assessments Issues Arising from Gas Generation, EUR, To be published
- 16) Swift, B. T., et al. : “Modelling Gas Migration in Compacted Bentonite: GAMBIT Club Phase 3 Final Report”, To be published
- 17) Rodwell, R. W. Edit, : “Research into Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Repository Systems (PROGRESS Project)”, EUR 19133 EN, pp237-266 (2000)