

JNC TJ8400 2003-019

実規模人工バリア試験の解析評価研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年1月

株式会社 間 組

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大字村松 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 protection 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)

2003

実規模人工バリア試験の解析評価研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

千々松正和*

雨宮 清*

要 旨

地層処分を確実にこなうためには、人工バリアの健全性を確保する必要がある。人工バリアの健全性において重要な要因の一つとなるのが緩衝材の施工技術であり、緩衝材が設計に基づいて施工されることが必要である。本研究では、緩衝材をブロックで施工した場合に考えられるブロック間や岩盤あるいはオーバーパックとの隙間の充填性に関する検討を実施することとし、隙間をベントナイトペレットで充填した際の充填性に関して検討を行う。検討対象は、ベントナイトペレット充填層の透水性および密度の経時変化、浸潤水が人工海水となった時の止水性等である

また、施工された緩衝材内には、処分後、廃棄体からの発熱、地下水の浸潤、周辺岩盤からの地圧や緩衝材の膨潤といった連成挙動が発現すると考えられる。これらの現象を理解、評価するためには、人工バリアを対象とした原位置での実規模試験の情報に基づき、適切なモデルを構築する必要がある。ここでは、スウェーデン・エスポ島で行なわれている実規模緩衝材を用いた実証試験（Prototype Repository Project）の連成解析評価を実施した。解析に際しては、所有の熱-水-応力連成解析コードに膨潤評価式の導入を試み、より信頼性の高いモデルの構築を行った。

本報告書は、株式会社間組が、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。

サイクル機構担当部課室：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

*：株式会社間組

Research on Evaluation of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Phenomena
against Full-scale In-situ Engineered Barrier Experiment
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract)

Masakazu Chijimatsu*

Kiyoshi Amemiya*

Abstract

In order to achieve the geological disposal of radioactive waste in safe, it is necessary to ensure the stability of the engineered barrier system (EBS). One of the most important factors for the stability of the EBS is the emplacement technology of the EBS. It is considered that the stability of the EBS is secured by the properly emplacement based on the design requirement. In this research, the methods filling the gap between buffer and rock or buffer and over-pack were examined. Bentonite pellets were tested as the filling materials. To research the time-dependent phenomena of bentonite pellets after swelling, permeability tests were conducted with different period. Furthermore, to clarify the effect of test fluid, permeability test was conducted with synthetic seawater to compare the result with that of the test with distilled water.

After emplacement of the engineered barrier system, it is expected that the near-field environment will be impacted by phenomena such as heat dissipation by conduction and other heat transfer mechanisms, infiltration of groundwater from the surrounding rock in to the engineered barrier system, stress imposed by the overburden pressure and generation of swelling pressure in the buffer due to water infiltration. In order to recognize and evaluate these coupled phenomena, it is necessary to make a confidence of the mathematical models and computer codes based on the information about the in-situ experiments regarding the engineered barrier system. In this research, technical investigations about the in-situ full-scale experiment (called Prototype Repository Project) in Äspö HRL facility by SKB of Sweden were performed. In order to evaluate the coupled phenomena in the engineered barrier, we use the new swelling model based on the theoretical approach. In this paper, we introduce the modeling approach and applicability about the new model.

Work performed by Hazama Corporation under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).
JNC Liaison: Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle
Research Center

*: Hazama Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 実施工程	2
3. 隙間充填材の物性評価	3
3.1 ペレット形状	3
3.2 ベントナイトペレットの止水性に関する検討	6
3.2.1 円柱状容器を用いた透水試験	6
3.2.2 人工海水下における充填性の確認試験	17
3.2.3 蒸留水浸潤後での人工海水を用いた透水試験	25
3.2.4 ペレット、ブロック併用透水試験	29
3.2.5 楔形状の隙間に対する透水試験	34
3.3 膨潤圧試験	45
3.4 熱伝導率測定	56
3.5 まとめ	60
4. 緩衝材の力学挙動の詳細検討	62
4.1 概要	62
4.2 膨潤応力のモデル化	62
4.2.1 膨潤評価式の概要	62
4.2.2 不飽和領域における膨潤応力	67
4.3 熱-水-応力連成解析手法	72
4.3.1 物理量保存則	72
4.3.2 構成条件	73
4.4 有限要素法による定式化	76
4.4.1 ガラーキン法による支配方程式の離散化	76
4.4.2 数値解析手法	79
4.5 膨潤試験のシミュレーションによる解析手法の検証	81
4.6 まとめ	91
5. 実規模原位置試験のシミュレーション	94
5.1 エスポ地下研究施設（HRL）の概要	94
5.2 Prototype Repository プロジェクトの概要	96
5.3 ベントナイト MX-80 の特性	100
5.4 解析に用いる物性値の設定	103
5.5 解析条件および解析結果	105

5.6	まとめ	117
6.	おわりに	119
付録		
付-1	Prototype Repository Project OHP 資料	付-1(1)
付-2	Prototype Repository Project OHP 資料	付-2(18)

目 次

3. 隙間充填材の物性評価

図 3-1	ベントナイトペレット	3
図 3-2	ペレット製作機器の概要	3
図 3-3	ペレット製作機器	4
図 3-4	ベントナイト充填状況	4
図 3-5	ベントナイトペレットの成型時の乾燥密度と成型荷重の関係	5
図 3-6	透水試験装置	7
図 3-7	透水試験状況	7
図 3-8	通水試験状況	10
図 3-9	ペレット通水試験 (T-1-1)(水との接触時間～通水量)	11
図 3-10	ペレット通水試験 (T-1-1)(水との接触時間～見かけの透水係数)	11
図 3-11	透水試験結果 (蒸留水透水試験)	12
図 3-12	既存データとの比較 (蒸留水透水試験)	13
図 3-13	透水試験後の試料 (水との接触から 80 日経過)	14
図 3-14	透水試験後の試料内乾燥密度のばらつき (蒸留水透水試験)	16
図 3-15	透水試験後の密度測定結果 (蒸留水透水試験)	16
図 3-16	透水試験後の含水比測定結果 (蒸留水透水試験)	16
図 3-17	注水圧力と排水量の経時変化 (人工海水透水試験)	18
図 3-18	各注水圧力と排水量の関係 (人工海水透水試験)	19
図 3-19	透水係数の経時変化 (人工海水透水試験)	20
図 3-20	蒸留水透水試験と人工海水透水試験結果との比較	21
図 3-21	人工海水透水試験後の供試体の状況 (T-1-2)	22
図 3-22	人工海水透水試験後の供試体の状況 (T-2-2)	23
図 3-23	人工海水透水試験後の供試体の状況 (T-3-2)	24
図 3-24	透水試験後の密度測定結果 (人工海水透水試験)	25
図 3-25	透水試験後の含水比測定結果 (人工海水透水試験)	25
図 3-26	蒸留水浸潤後での人工海水を用いた透水試験の概況	26
図 3-27	透水試験結果 (蒸留水 人工海水試験)	27
図 3-28	蒸留水・人工海水透水試験と蒸留水 人工海水透水試験結果の比較	27
図 3-29	透水試験終了後の供試体の状況 (蒸留水 人工海水透水試験)	28
図 3-30	透水試験後の密度測定結果 (蒸留水 人工海水透水試験)	29
図 3-31	透水試験後の含水比測定結果 (蒸留水 人工海水透水試験)	29
図 3-32	ベントナイトペレットおよびブロックの併用透水試験の概況	30
図 3-33	試験前試料のセット状況 (ペレット・ブロック併用透水試験)	30
図 3-34	試験開始後の試料の状況 (ペレット・ブロック併用透水試験)	31
図 3-35	透水係数の経時変化 (ペレット・ブロック併用透水試験)	32

図 3-36	透水試験終了後の供試体の状況（ペレット・ブロック併用透水試験）	33
図 3-37	透水試験後の密度測定結果（ペレット・ブロック併用透水試験）	33
図 3-38	透水試験後の含水比測定結果（ペレット・ブロック併用透水試験）	34
図 3-39	透水試験後のケイ砂混合率測定結果（ペレット・ブロック併用透水試験）	34
図 3-40	楔形状隙間に対する透水試験の概要	35
図 3-41	楔形状隙間に対する透水試験の様子	35
図 3-42	透水係数の経時変化（楔形状隙間の透水試験）	36
図 3-43	透水試験終了後の供試体の状況（楔形状隙間の透水試験）	37
図 3-44	楔形状隙間におけるベントナイトペレットの設置状況	38
図 3-45	透水試験用セル	38
図 3-46	ペレットの充填状況	38
図 3-47	楔形状隙間に対する透水試験の様子（その 2）	39
図 3-48	透水係数の経時変化（楔形状隙間透水試験）	40
図 3-49	円柱状容器および楔形状隙間における試験結果と既存データの比較	40
図 3-50	試験終了後の供試体分割図（楔形状隙間透水試験）	41
図 3-51	試験終了時の試験セル（楔形状隙間透水試験）	41
図 3-52	試験セル解体状況（楔形状隙間透水試験）	42
図 3-53	隙間充填状況（その 1）	42
図 3-54	隙間充填状況（その 2）	43
図 3-55	透水試験後の密度測定結果（楔形状隙間透水試験）	43
図 3-56	透水試験後の含水比測定結果（楔形状隙間透水試験）	44
図 3-57	膨潤圧試験装置	47
図 3-58	試験前試料のセット状況（膨潤圧試験）	48
図 3-59	膨潤圧試験結果（蒸留水）	49
図 3-60	膨潤圧試験結果（人工海水）	50
図 3-61	透水係数および膨潤圧に及ぼす乾燥密度・試験水の影響比較	51
図 3-62	膨潤圧試験後の供試体の状況（蒸留水を用いた膨潤圧試験）	52
図 3-63	膨潤圧試験後の供試体（容器内）の状況（人工海水を用いた膨潤圧試験）	53
図 3-64	膨潤圧試験後の供試体の状況（人工海水を用いた膨潤圧試験）	55
図 3-65	QTM 法	57
図 3-66	熱伝導率測定の様子	58
図 3-67	各種材料のかさ乾燥密度と熱伝導率の関係	59
図 3-68	各種材料の含水比と熱伝導率の関係	59

4. 緩衝材の力学挙動の詳細検討

図 4-1	ベントナイトクニゲル V1 の最大膨潤応力と乾燥密度の関係	65
図 4-2	不飽和領域における膨潤応力の概念図	71
図 4-3	それぞれの膨潤に関するパラメータ F に対する飽和度と膨潤応力の関係	71
図 4-4	水分拡散係数の概念図	75

図 4-5	収束計算のフロー・チャート	80
図 4-6	ベントナイトクニゲル V1 の不飽和水分特性	82
図 4-7	ケイ砂混合体の不飽和水分特性	83
図 4-8	膨潤評価式による乾燥密度と最大膨潤応力の関係	84
図 4-9	等温試験(a)における体積含水率の分布	87
図 4-10	等温試験(b)における膨潤応力変化	87
図 4-11	等温試験(c)における膨潤応力変化	88
図 4-12	等温試験(c)における体積含水率分布	88
図 4-13	等温試験(c)における乾燥密度の分布	89
図 4-14	温度勾配試験(d)における体積含水率分布および温度分布	89
図 4-15	温度勾配試験(d)における各点の応力変化	90
5. 実規模原位置試験のシミュレーション		
図 5-1	試験坑道の概要	97
図 5-2	試験ピットの概要	97
図 5-3	水分特性曲線	101
図 5-4	温度勾配水分拡散係数と飽和度の関係	102
図 5-5	同定された水分拡散係数	104
図 5-6	浸潤試験のシミュレーションによる不飽和透水特性の同定	104
図 5-7	ベントナイト MX-80 の最大膨潤応力	104
図 5-8	Prototype Repository プロジェクトの解析メッシュ (廃棄体 1 本モデル)	107
図 5-9	Prototype Repository プロジェクトの解析メッシュ (廃棄体 2 本モデル)	108
図 5-10	緩衝材および岩盤の各点における温度の経時変化 (廃棄体 1 本モデル)	110
図 5-11	緩衝材および岩盤の各点における飽和度の経時変化 (廃棄体 1 本モデル)	110
図 5-12	ヒーター・緩衝材に接する岩盤に掛かる応力の経時変化 (廃棄体 1 本モデル)	110
図 5-13	廃棄体定置後の温度分布 (廃棄体 1 本モデル)	111
図 5-14	廃棄体定置後の飽和度分布 (廃棄体 1 本モデル)	111
図 5-15	緩衝材および岩盤の各点における温度の経時変化 (廃棄体 2 本モデル)	112
図 5-16	廃棄体定置後の温度分布 (廃棄体 2 本モデル)	113
図 5-17	緩衝材および岩盤の各点における飽和度の経時変化 (廃棄体 2 本モデル)	114
図 5-18	廃棄体定置後の飽和度分布 (廃棄体 2 本モデル)	115
図 5-19	廃棄体定置後の温度の経時変化の比較	116
図 5-20	廃棄体定置後の飽和度の経時変化の比較	116

表 目 次

2. 実施工程	
表 2-1 全体工程表	2
3. 隙間充填材の物性評価	
表 3-1 ベントナイトペレットの製作性に関する試験結果	5
表 3-2 ベントナイトペレットの製作実績	6
表 3-3 透水試験試料（蒸留水を用いた透水試験）	6
表 3-4 膨潤前の通水試験結果	9
表 3-5 透水試験後の密度測定結果（蒸留水透水試験）	15
表 3-6 含水比と乾燥密度分布の統計量（蒸留水透水試験）	15
表 3-7 透水試験試料（人工海水を用いた透水試験）	17
表 3-8 透水試験試料（蒸留水 人工海水透水試験）	26
表 3-9 透水試験試料（ペレット・ブロック併用透水試験）	30
表 3-10 透水試験試料（楔形状隙間における透水試験）	35
表 3-11 透水試験試料（楔形状隙間における透水試験；期間の影響評価試験）	37
表 3-12 膨潤圧試験装置諸元	45
表 3-13 膨潤圧試験ケース	45
表 3-14 熱伝導率測定結果	58
4. 緩衝材の力学挙動の詳細検討	
表 4-1 膨潤評価式における材料パラメータの設定（クニゲル V1 相当）	66
表 4-2 膨潤評価式における物理定数	66
表 4-3 膨潤評価式における環境条件パラメータ	66
表 4-4 膨潤に関するパラメータ F の飽和度依存性	70
表 4-5 試験条件	81
表 4-6 材料物性	85
5. 実規模原位置試験のシミュレーション	
表 5-1 PRP で使用される計測機器の数量	99
表 5-2 ベントナイト MX-80 の地化学データ	103

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、人工バリアの性能を精度よく評価することは、地層処分の健全性を評価するうえで、重要な因子の一つとなる。スウェーデンの地下研究施設（ハードロックラボラトリー）において実施されているプロトタイプ処分場プロジェクトは、岩盤内に掘削した処分坑道および処分孔に人工バリアを模擬したヒーター、緩衝材、埋め戻し材等を施工し、人工バリア周辺岩盤における連成現象を評価するものである。人工バリア上部の坑道まで埋め戻したシステムとしての人工バリアを模擬したこのプロジェクトにおいて連成解析コードを用いて連成現象を解析評価することにより、解析コードの適用性に関する検討を行う。

また、プロトタイプ処分場プロジェクトでは、模擬人工バリアの緩衝材と岩盤の隙間にベントナイトペレットを充填している。本プロジェクトの解析評価を行うためには、このベントナイトペレットの物性を把握する必要がある。本年度は、昨年度までに取得されたベントナイトペレットの水理特性に関するデータを整理し、不足データの取得・データの拡充を図る。

昨年度実施したプロトタイプ処分場プロジェクトの解析評価においては、隙間の評価手法として緩衝材の密度、隙間に充填する物性を仮定して解析を行った。その結果、緩衝材の変形を伴う評価において緩衝材の膨潤挙動を精度良く表現するモデルの開発が必要であることが明らかとなった。本年度は、小峯らの提案している膨潤評価式を連成解析コードへ導入することを試み、より信頼性の高いモデルの構築を行う。膨潤を含めた連成現象の解明のために、これまで各種要素試験および実規模試験が国内外で行われてきており、本研究では、膨潤応力の時間変化を計測しているサイクル機構殿により実施された体積一定膨潤試験のデータを用いてモデルの検証を行う。

2. 実施工程

本研究の実施工程は表 2-1 の通りである。

表 2-1 全体工程表

	平成 14 年						15 年
	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月
隙間充填材の物性評価	—————						
緩衝材の力学挙動の詳細検討				—————			
実規模人工バリアにおける連成挙動の解析評価			—————				
報告書の作成						—————	

3. 隙間充填材の物性評価

放射性廃棄物の地層処分を確実にを行うためには、人工バリアの健全性を確保する必要がある。人工バリアの健全性において重要な要因の一つとなるのが緩衝材の施工技術である。緩衝材が設計要件に基づいて施工されることによって人工バリアの健全性は確保することが出来ると考えられる。緩衝材をブロックで施工した場合等に生じる岩盤やオーバーパックとの隙間は何らかの材料で充填されると考えられている。その際、その充填性および止水性能等を確認することは重要であり、昨年度までに、試作したベントナイトペレットを用い種々の試験を実施している³⁻¹⁾³⁻²⁾。今年度は、昨年度までに実施された試験を整理し、不足データの取得を行い、データの拡充・整備を行った。

3.1 ペレット形状

図 3-1 に今回の試験に用いたペレットの形状、図 3-2 に製作器具の概要を示す。

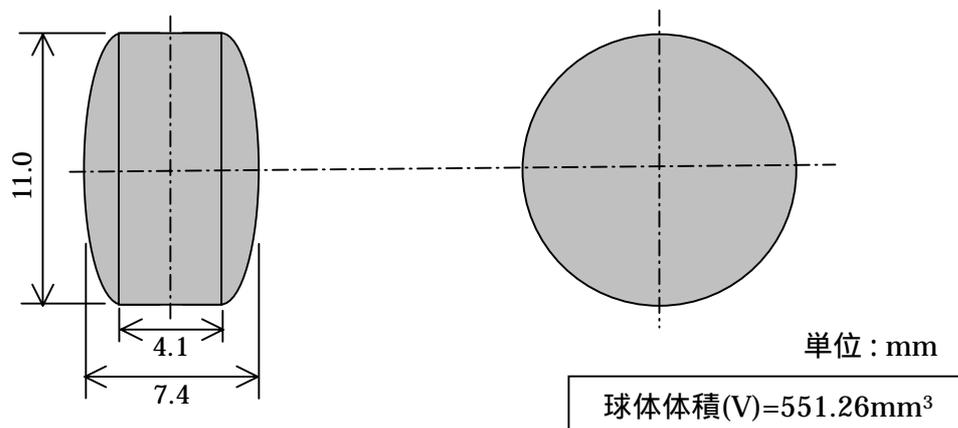


図 3-1 ベントナイトペレット

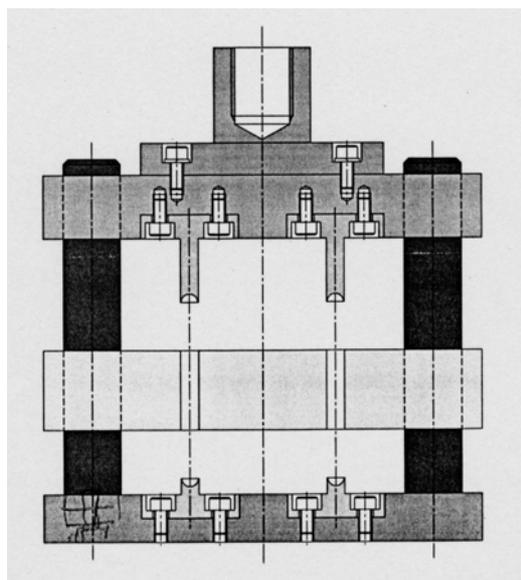


図 3-2 ペレット製作機器の概要

ペレット 1 個あたりの材料の質量、含水比を変化させたときの製作時と製作後(リバウンド 5%を許す)の密度、飽和度を試算し、この試算結果と上記の条件から、ペレットの製作は次の範囲で行うものとした³⁻¹⁾。図 3-3 には製作機器を、図 3-4 には機器にベントナイトを充填している様子を示す。

- 湿潤重量 1.28 ± 0.005 g
- 含水比 $9 \pm 1.5\%$
- 製作時乾燥密度 $2.09-2.17\text{g/cm}^3$
- 製作時飽和度 73-94%
- 製作後乾燥密度 $1.99-2.07\text{g/cm}^3$
- 製作後飽和度 60-78%



図 3-3 ペレット製作機器



図 3-4 ベントナイト充填状況

また、ここでは、成型荷重と成型時のベントナイトペレットの乾燥密度との関係を把握することを目的に、粉末ベントナイトの投入量（上記における湿潤重量）を 1.28～1.45g とした時の成型荷重の取得を行った。試験は 5 回ずつ実施し、各ケースの平均値をまとめたものが表 3-1 である。また、成型荷重とベントナイトペレットの乾燥密度との関係を整理したものが図 3-5 である。なお、成型荷重とは成型したベントナイトペレットが所定の目標高さ（厚さ）7.4mm となった時の荷重である。成型後、ペレットを取り出し寸法を測定した結果を表 3-1 に示す。これより、投入量が多くなるにつれ製作後のベントナイトペレットの高さは高くなっていることが分かる。すなわち、リバウンド量は大きくなっている。図 3-5 に示す乾燥密度は、このリバウンド量を考慮して算出したものである。なお、ここで、リバウンドはペレットの円筒部分（図 3-1 における幅 4.1mm の部分）でのみ生じると仮定し、リバウンド後の体積を求めた。乾燥密度の値は、成型荷重が増すにつれ頭打ちになっていくものと考えられるが、成型荷重 50kN ほどでペレットの乾燥密度は 2.16g/cm³ となっている。これらの関係は、成型方法や成型時間等にも依存していくものと考えられるため、最適な乾燥密度を設定するには、より詳細な検討が必要である。

なお、本報告における次節以降の検討においては、投入量 1.28g で作製したベントナイトペレット（目標乾燥密度：1.97g/cm³）を用いた。

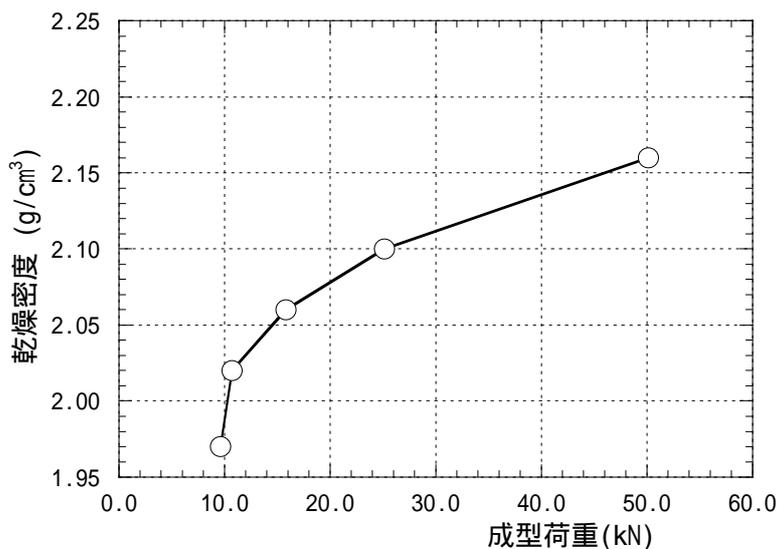


図 3-5 ベントナイトペレットの成型時の乾燥密度と成型荷重の関係

表 3-1 ベントナイトペレットの製作性に関する試験結果

投入量(g)	1.28	1.30	1.35	1.40	1.45
成型荷重(kN)	9.61	10.69	15.81	25.16	50.14
成型圧(MPa)	101.17	112.51	166.41	264.74	527.59
ペレット高さ(cm)	0.777	0.778	0.784	0.790	0.802
ペレット質量(g)	1.26	1.28	1.33	1.36	1.43
湿潤密度(g/cm ³)	2.15	2.18	2.24	2.27	2.34
含水比(%)	8.81	8.00	8.74	8.40	8.40
乾燥密度(g/cm ³)	1.97	2.02	2.06	2.10	2.16

製作したペレット(投入量 1.28g)から 20 個を取り出してノギスで寸法を実測した結果を表 3-2 に示す。この 20 個の試料について含水比と重量を実測した結果は、それぞれ平均で 9.45%、1.237 g となった。また、透水試験に供したクニゲル V1 の含水比は 9.12%であった。以上から、本試験に用いたペレットは、1 個あたりの重量 1.24g、体積 0.5946cm³、含水比 9.5%、湿潤密度 2.085g/cm³、乾燥密度 1.905g/cm³となる。

今回、ペレットの乾燥密度の製作目標値は、前述のように 1.99-2.07g/cm³である。しかし、実際は 1.905g/cm³と、これより小さい値となった。この原因は、製作現場での秤量精度(目標値は 1.28g)とリバウンドによる体積の超過(目標成型高さ: 0.74cm に対して 0.77cm)によるものである。

表 3-2 ベントナイトペレットの製作実績

	直径 (cm)	高さ (cm)
設計値	1.1	0.74
平均	1.122	0.7705
標準誤差	0.000917663	0.0005
中央値 (メジアン)	1.12	0.77
最頻値 (モード)	1.12	0.77
標準偏差	0.004103913	0.002236068
分散	1.68421E-05	5E-06
尖度	0.698529412	20
歪度	1.624465724	4.472135955
範囲	0.01	0.01
最小	1.12	0.77
最大	1.13	0.78
合計	22.44	15.41
標本数	20	20

3.2 ベントナイトペレットの止水性に関する検討

3.2.1 円柱状容器を用いた透水試験

(1) 試験条件

透水試験では、「膨潤前の通水試験」、「飽和後の透水係数測定」、「試験後の密度分布測定」を実施した。試験には、ペレットとクニゲル V1 を用いた。

透水試験の容器を図 3-6 に透水試験の状況を図 3-7 に示す。透水試験用セルはアクリル製で、直径 5cm、高さ 3cm、容積 58.9cm³である。ここに、表 3-3 の 3 種類の試料(ペレットのみ、ペレット+クニゲル V1、クニゲル V1 のみ)を自然落下で充填し試験を実施した。なお、試験には蒸留水を使用した。

表 3-3 透水試験試料(蒸留水を用いた透水試験)

ケース	試料	ペレット個数/重量	クニゲル V1 重量 (g)	湿潤密度(g/cm ³)
T-1-1	ペレット	55/68.43g	0	1.160
T-2-1	ペレット+クニゲル V1	55/68.43g	21.77	1.530
T-3-1	クニゲル V1	0/0	45.75	0.780

容器体積 58.9cm³、ペレットの乾燥密度 1.905g/cm³、クニゲル V1 含水比 9.12%、ペレット含水比 9.45%

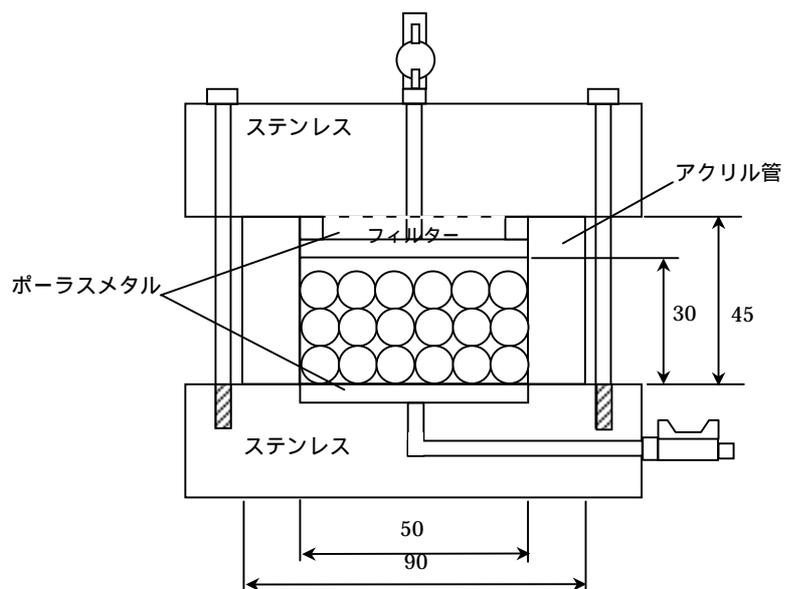


図 3-6 透水試験装置



図 3-7 透水試験状況

(2) 膨潤前の通水試験

隙間充填においては材料の投入後、流入する地下水によって充填材料が流出しないことが重要である。ここでは、透水セルに投入した 3 種類の材料に、0.01MPa の圧力で水を注水し、流出量の変化を測定、止水性を検討した。

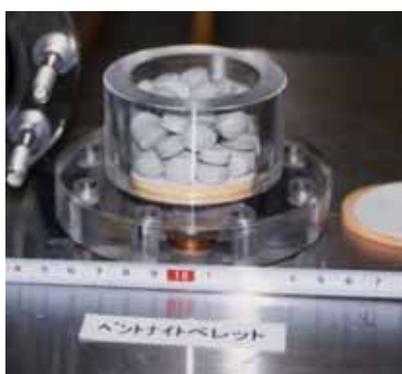
試験結果を表 3-4 に示す。まず、0.01MPa の圧力で 30 秒通水し、その後、バルブを閉めた。そして、静水中で 5 分間ベントナイトを吸水膨潤させた。この手順を繰り返し、隙間がシールされる状況を観察した。試験ケース T-2-1 (ペレット+クニゲル V1) と T-3-1 (クニゲル V1) では、通水開始とともにわずかに水が漏れるが、これは第 1 回目の通水で停止し、以後、漏水は生じなかった。一方、T-1-1 (ペレットだけのケース) では、通水直後はペレット間の隙間を通して水は流出する。この流出量はベントナイトの吸水膨潤によって減少し、本試験条件では、約 2 時間後にゼロとなった。ただし、その後圧力を 0.05MPa まで上昇させると水の流出が再び始まった。これは、図 3-8 に示すように、2 時間の膨潤では密度は均質とはならず、低密度の部分が 0.05MPa の水圧で水みちになったと考えられる。

図 3-9 に圧力の負荷状況および通水量の経時変化を示す。また、図 3-10 には通水量と圧力から計算される (試料は飽和していないので透水係数を意味するものではないが) ケース T-1-1 の見かけの透水係数の経時変化を示す。ここでは、圧力 0.01MPa の時の通水量から計算した見かけの透水係数のみを示す。通水量は時間とともに減少しており、時間とともに止水性が発揮されている様子が分かる。

これらの結果から、ペレット単体の場合は動水勾配のない状態ではベントナイトの膨潤によって図 3-10 に示すように止水性を時間とともに発揮する。しかし、水圧が加わる場合はペレット間の空隙にベントナイトの粉末を充填することが、止水性を向上させる効果があることがわかった。ただし、本試験では、水圧を加える時間は 30 秒ずつの繰り返しであり、連続して水圧を加えた流水環境下での止水性やベントナイトの流出の程度を観察することは今後の課題として残る。

表 3-4 膨潤前の通水試験結果

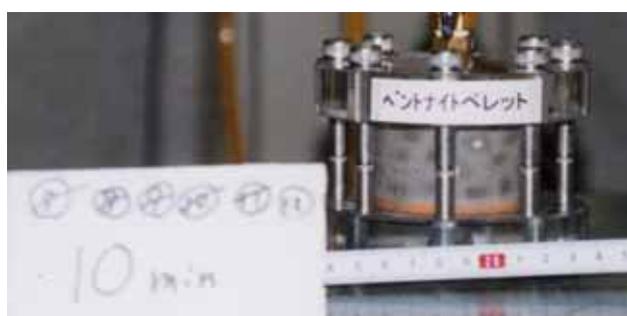
通水データ					T-1-1 (ペレット)			T-2-1 (ペレット+クニゲルV1)	T-3-1 (クニゲルV1)
開始 (時:分:秒)	終了 (時:分:秒)	工程	通水量測定 ポイント	圧力 P (MPa)	通水量 実測値 (cc)	通水量 Q (cc/sec)	見かけの 透水係数 (m/sec)	通水量 実測値 (cc)	通水量 実測値 (cc)
0:00:00	0:00:30	通水	00:00:15	0.01	160	5.33	8.1508E-05	(5)	(67)
0:00:30	0:05:30	膨潤							
0:05:30	0:06:00	通水	00:05:45	0.01	128	4.27	6.5206E-05	0	0
0:06:00	0:11:00	膨潤							
0:11:00	0:11:30	通水	00:11:15	0.01	106	3.53	5.3999E-05	0	0
0:11:30	0:16:30	膨潤							
0:16:30	0:17:00	通水	00:16:45	0.01	102	3.40	5.1961E-05	0	0
0:17:00	0:22:00	膨潤							
0:22:00	0:22:30	通水	00:22:15	0.01	86.5	2.88	4.4065E-05	0	0
0:22:30	0:27:30	膨潤							
0:27:30	0:28:00	通水	00:27:45	0.01	76	2.53	3.8716E-05	0	0
0:28:00	0:38:00	膨潤							
0:38:00	0:39:00	通水	00:38:30	0.01	117	1.95	2.9801E-05	0	0
0:39:00	0:49:00	膨潤							
0:49:00	0:50:00	通水	00:49:30	0.01	75	1.25	1.9103E-05	0	0
0:50:00	1:00:00	膨潤							
1:00:00	1:01:00	通水	01:00:30	0.01	44.5	0.74	1.1335E-05	0	0
1:01:00	1:11:00	膨潤							
1:11:00	1:12:00	通水	01:11:30	0.01	21.5	0.36	5.4763E-06	0	0
1:12:00	1:22:00	膨潤							
1:22:00	1:23:00	通水	01:22:30	0.01	7.8	0.13	1.9868E-06	0	0
1:23:00	1:33:00	膨潤							
1:33:00	1:37:00	通水	01:35:00	0.01	2.0	0.01	1.2736E-07	0	0
1:37:00	1:47:00	膨潤							
1:47:00	1:52:00	通水	01:49:30	0.01	0.2	0.00	1.0188E-08	0	0
1:52:00	2:02:00	膨潤							
2:02:00	2:03:00	通水		0.03	0				
2:03:00	2:04:00	膨潤							
2:04:00	2:06:40	通水		0.05	23				
2:06:40	2:07:40	膨潤							
2:07:40	2:08:40	通水		0.01	2				
2:08:40		膨潤							



試験前 (ペレット)



5.5 分膨潤後 (ペレット)



93 分膨潤後 (ペレット)

図 3-8 通水試験状況

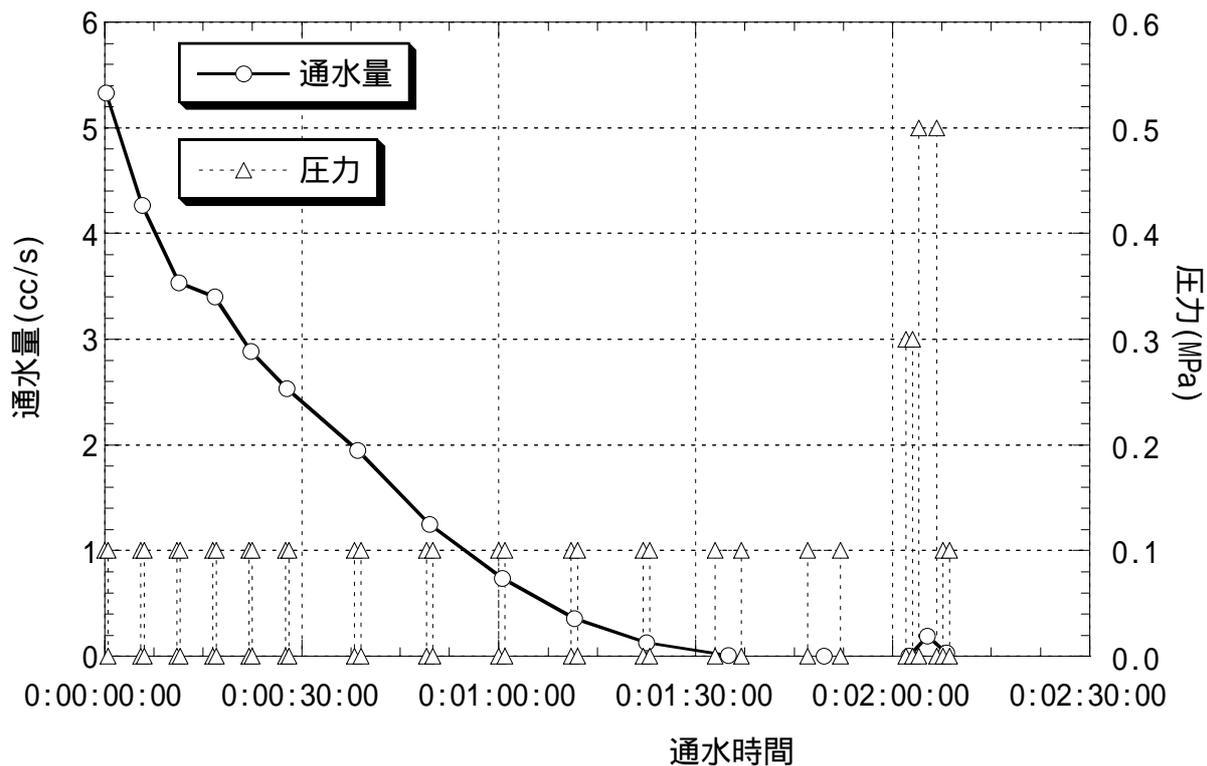


図 3-9 ペレット通水試験 (T-1-1)
(水との接触時間 ~ 通水量)

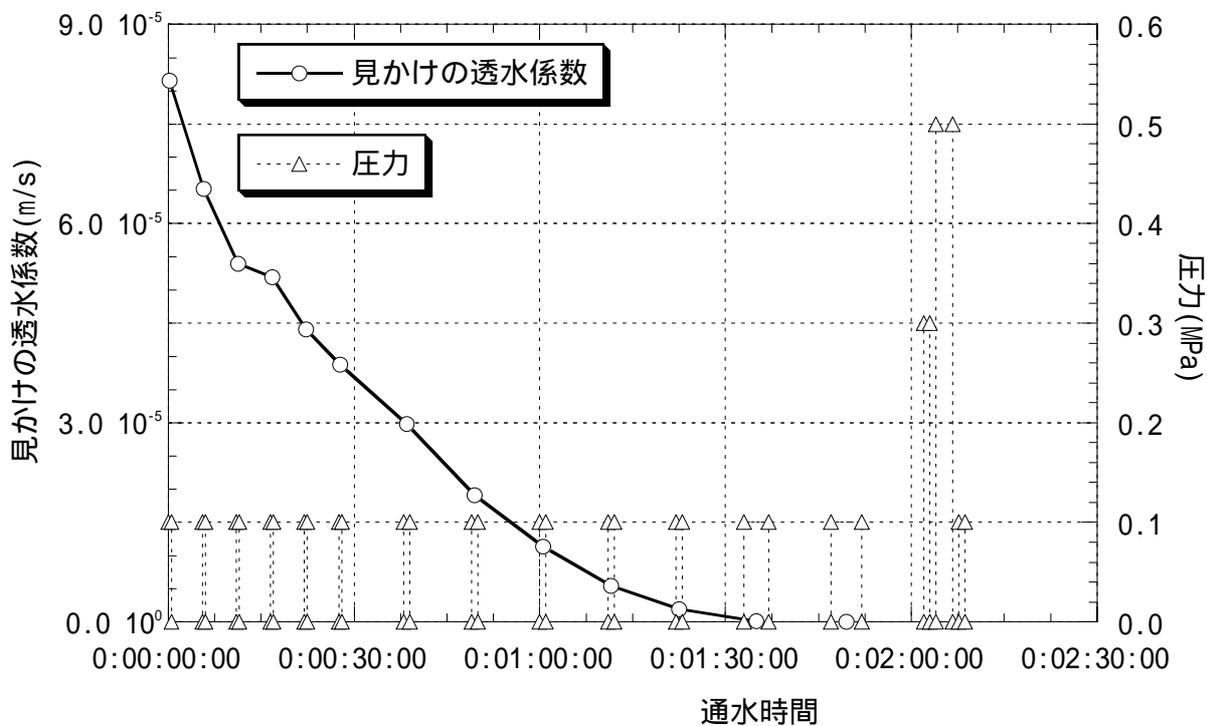


図 3-10 ペレット通水試験 (T-1-1)
(水との接触時間 ~ 見かけの透水係数)

(3) 透水試験

通水試験後に、水圧を 0.01MPa から 0.15MPa まで順次上昇させ試料を飽和させた。水の透過が始まるまでの時間（試料が飽和したと判断できる時間）は、ペレットとクニゲル V1 を混合した T-2-1 の場合 47 日であった。その後、0.15MPa の圧力で透水試験を開始した。試験の結果得られた透水係数の経時変化を図 3-11 に示す。測定された透水係数は、試験用セル内の粘土全体の乾燥密度が大きいくほど小さくなる傾向を示している。また、ペレット単体でも本試験条件では、 $3 \times 10^{-12} \text{m/s}$ 以下という小さい値を示した。以上より、ペレットにクニゲル V1 を添加する（T-2-1 の場合）ことは、透水係数の低下よりも、すでに述べた初期の遮水性向上効果としての意義が大きいことがわかる。

また、図 3-12 には透水係数を固有透過度に換算し、核燃料サイクル機構により取得された固有透過度の値と比較したものを示す。有効粘土密度で整理すると固有透過度は図中に示す式でケイ砂混合率に関係なく整理できるとされており、この結果と今回ペレットを用いた試験で得られた固有透過度の値とを比較した。その結果、ペレットを用いた試験の結果得られた固有透過度は関数式に比べ若干大きな値を示したが、傾向はほぼ一致した結果となった。

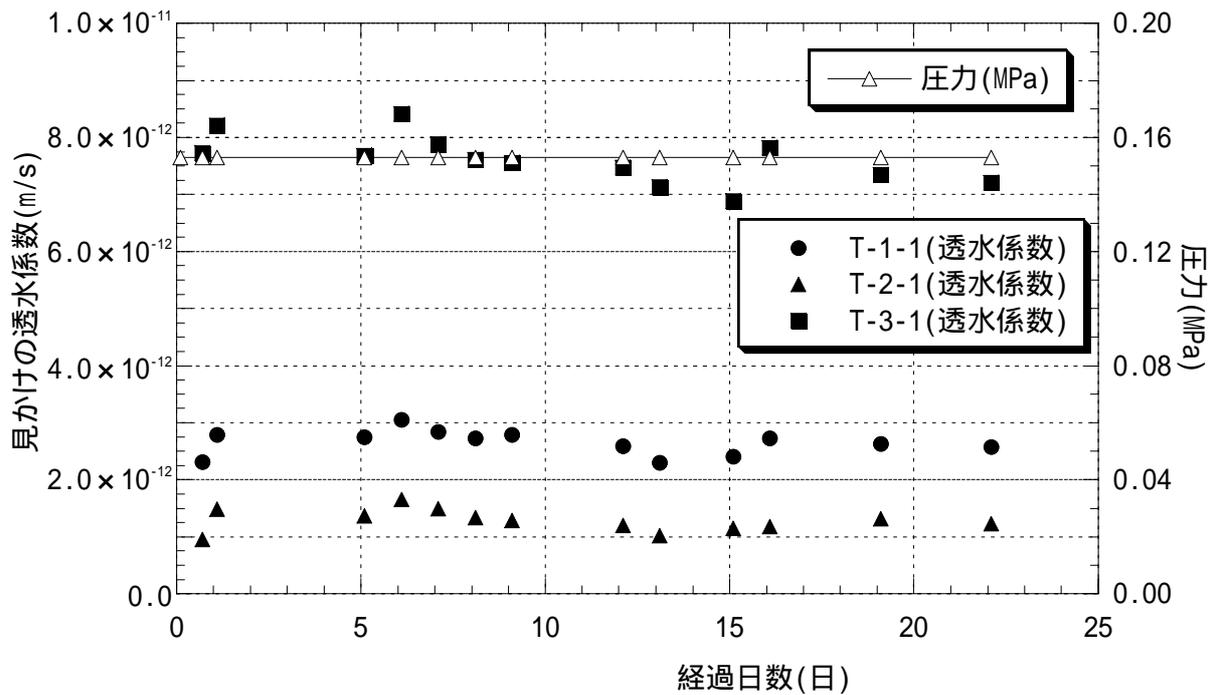


図 3-11 透水試験結果（蒸留水透水試験）

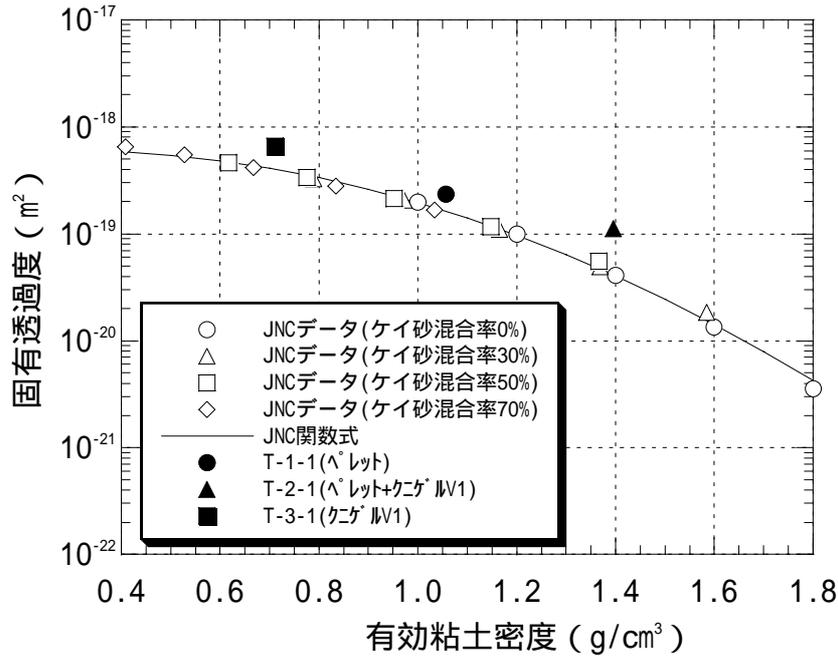


図 3-12 既存データとの比較 (蒸留水透水試験)

(4) 密度測定

透水試験後の試料を 24 分割 (鉛直 3 段×8 分割) し、密度分布を測定した。通水試験開始から密度測定までの時間、つまり試料が水と接触している時間は 80 日である。図 3-13 には、試験終了時の供試体表面の状況、および供試体分割の状況を示す。図よりクニゲル V1 のみで製作した供試体は他に比べ表面がきれいであることが分かる。また、ペレットのみの場合と、ペレットとクニゲル V1 を用いた供試体を比較すると、後者の方が若干、斑が強く残っている感じであった。密度および含水比の測定結果を表 3-5 に、図 3-14 には得られた乾燥密度のヒストグラムを示す。また、含水比と乾燥密度分布の統計量を表 3-6 に示す。表 3-6 から、密度の平均値をみると、T-1-1 ; 1.08g/cm³、T-2-1 ; 1.41g/cm³、T-3-1 ; 0.70g/cm³である。これは表 3-3 に示した試験用セル全体での粘土の乾燥密度の計算値 T-1-1 ; 1.06g/cm³、T-2-1 ; 1.40g/cm³、T-3-1 ; 0.71g/cm³ とほぼ等しい。試料の分割の人為的な誤差はあるが、平均値としての計測は正確であったことがわかる。また、図 3-14 から、密度のばらつきは、T-1-2 (ペレット+クニゲル V1) がもっとも大きく、T-1-1 (ペレットのみ) の場合がばらつきは小さいことがわかる。すなわち、ペレットにクニゲル V1 を混合して充填することは、全体の密度を上昇させることにはなるが、それに伴い、供試体内のばらつきは大きくなってしまふものと思われる。また、図 3-15 および図 3-16 には、供試体を上中下に 3 分割した場合の、乾燥密度および含水比の分布を示す。これからも、T-1-1 のケースが供試体内での密度のばらつきが最も小さいことがわかる。以上から、ペレット充填のみの場合には、充填時にペレット間の空隙によって密度の不均質性を持つ場合でも、飽和後には比較的均質になり、十分に小さい透水性 (顕著な水みちが生じていない) を発揮していることがわかる。

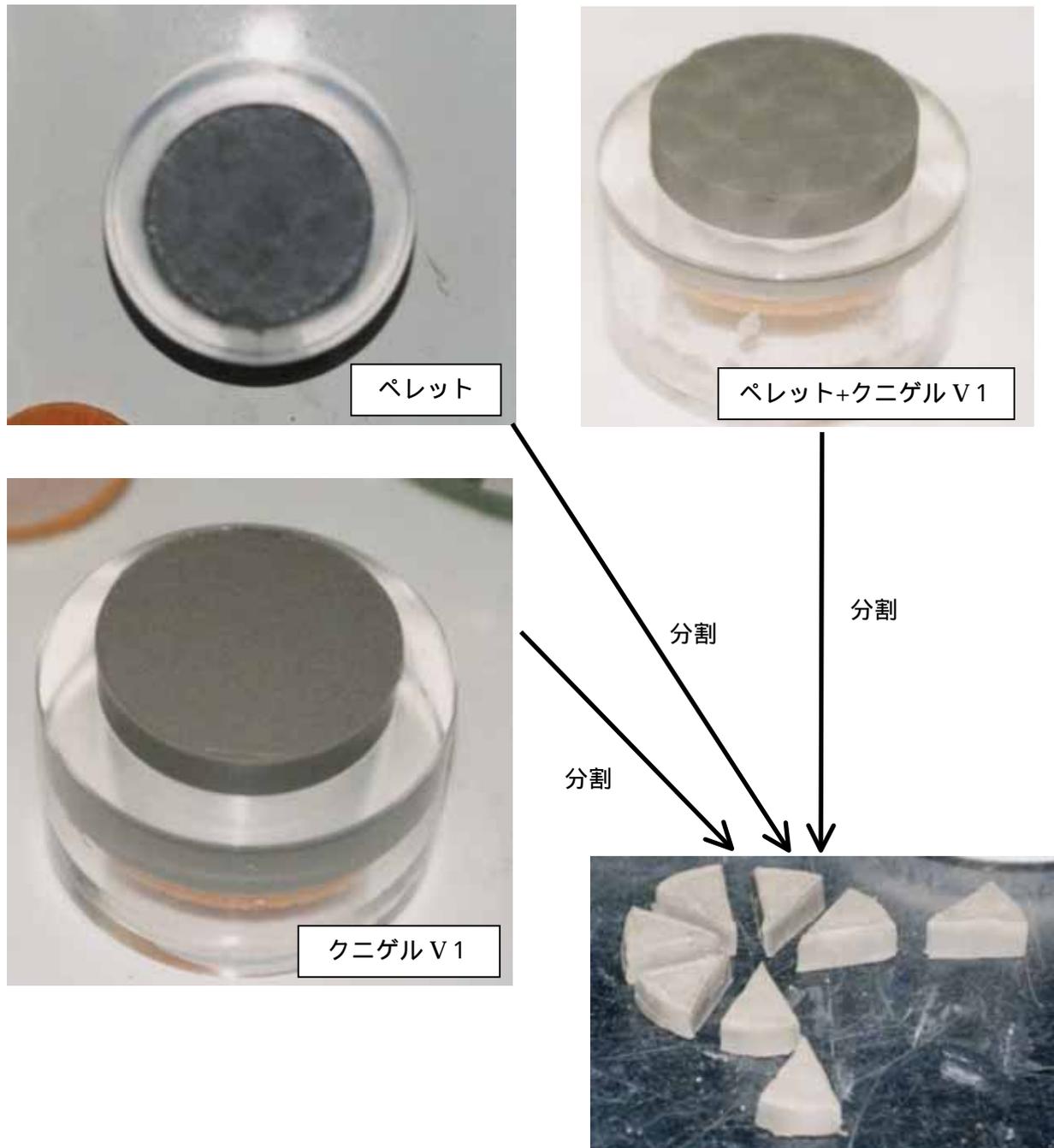


図 3-13 透水試験後の試料（水との接触から 80 日経過）

表 3-5 透水試験後の密度測定結果（蒸留水透水試験）

T-1-1 ペレット				T-2-1 ペレット+クニゲルV1				T-3-1 クニゲルV1			
試料位置	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	試料位置	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	試料位置	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)
上部 1.0cm	58.7	1.56	0.99	上部 1.0cm	37.1	1.75	1.28	上部 1.0cm	91.1	1.50	0.78
	56.2	1.76	1.12		36.0	1.74	1.28		98.8	1.37	0.69
	58.7	1.67	1.06		39.1	1.68	1.21		94.1	1.47	0.76
	56.6	1.75	1.12		35.7	1.72	1.27		94.1	1.62	0.84
	64.6	1.59	0.97		37.3	1.87	1.36		93.9	1.41	0.73
	54.8	1.59	1.03		38.2	1.71	1.24		96.5	1.37	0.70
	56.3	1.66	1.06		34.0	1.99	1.49		93.8	1.41	0.73
58.2	1.68	1.06	35.1	1.91	1.42	93.4	1.43	0.74			
中央 1.0cm	50.2	1.60	1.06	中央 1.1cm	31.1	2.12	1.62	中央 1.0cm	92.0	1.47	0.77
	48.9	1.61	1.08		30.9	1.90	1.45		92.2	1.51	0.79
	49.8	1.69	1.13		30.7	1.97	1.51		91.5	1.55	0.81
	48.6	1.72	1.16		32.3	2.13	1.61		93.4	1.67	0.86
	50.2	1.61	1.07		30.1	2.26	1.73		94.4	1.54	0.79
	50.4	1.54	1.03		31.4	2.09	1.59		95.5	1.60	0.82
	48.0	1.68	1.14		31.5	2.27	1.73		96.6	1.40	0.71
52.1	1.59	1.05	32.5	2.19	1.65	94.9	1.41	0.72			
下部 1.0cm	61.0	1.73	1.08	下部 0.9cm	39.0	1.86	1.34	下部 1.0cm	140.1	1.54	0.64
	62.2	1.69	1.04		41.3	1.55	1.10		139.9	1.35	0.56
	63.2	1.66	1.02		41.4	1.64	1.16		137.9	1.36	0.57
	61.6	1.90	1.18		39.4	1.79	1.29		141.5	1.33	0.55
	57.8	1.78	1.13		40.3	1.87	1.34		140.8	1.23	0.51
	60.5	1.94	1.21		36.8	2.02	1.48		141.5	1.33	0.55
	55.7	1.72	1.10		39.1	1.79	1.29		135.7	1.34	0.57
64.5	1.62	0.99	36.0	1.83	1.34	135.2	1.36	0.58			

表 3-6 含水比と乾燥密度分布の統計量（蒸留水透水試験）

	T-1-1	T-2-1	T-3-1
	ペレット	ペレット+クニゲルV1	クニゲルV1
含水比(%)			
平均	56.2	35.7	109.1
中央値(メジアン)	56.4	36.0	95.2
標準偏差	5.3	3.7	21.7
分散	28.5	13.3	472.6
範囲	16.5	11.3	50.3
変動係数(%)	9.51	10.23	19.92
乾燥密度(g/cm ³)			
平均	1.08	1.41	0.70
中央値(メジアン)	1.07	1.35	0.72
標準偏差	0.06	0.18	0.11
分散	0.00	0.03	0.01
範囲	0.24	0.64	0.35
変動係数(%)	5.72	12.72	15.18

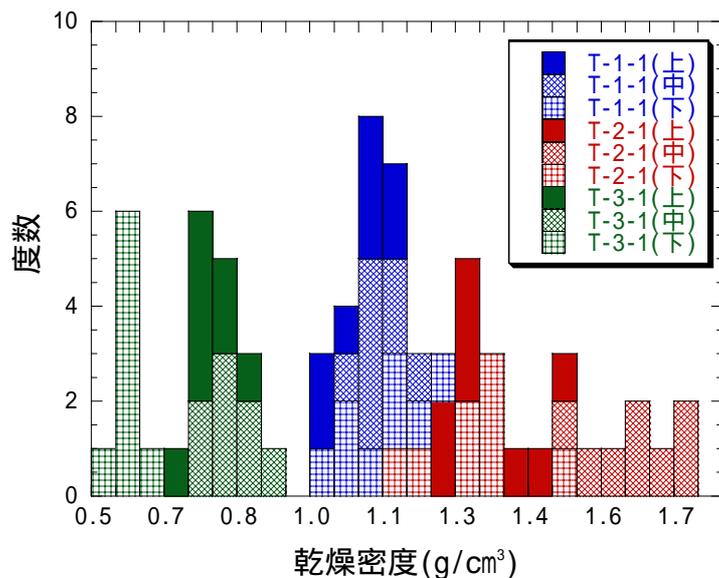


図 3-14 透水試験後の試料内乾燥密度のばらつき (蒸留水透水試験)

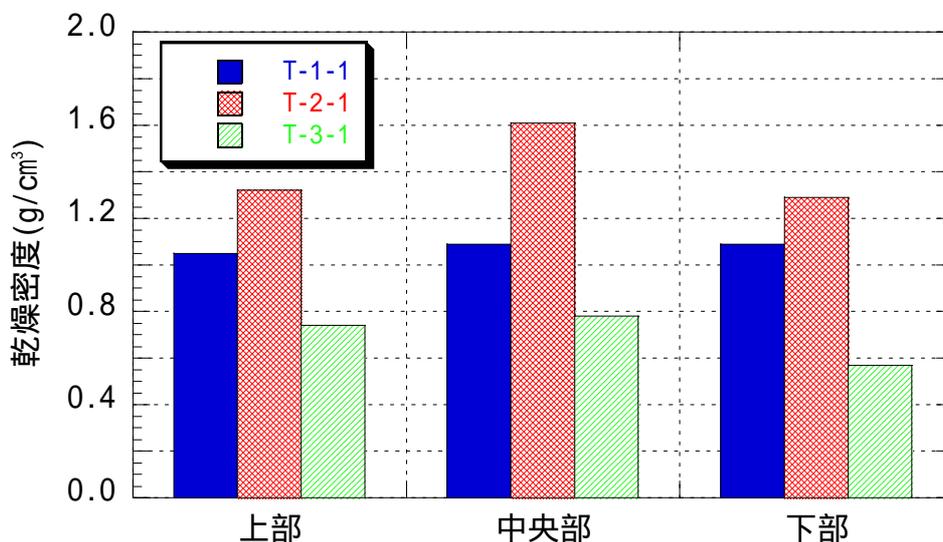


図 3-15 透水試験後の密度測定結果 (蒸留水透水試験)

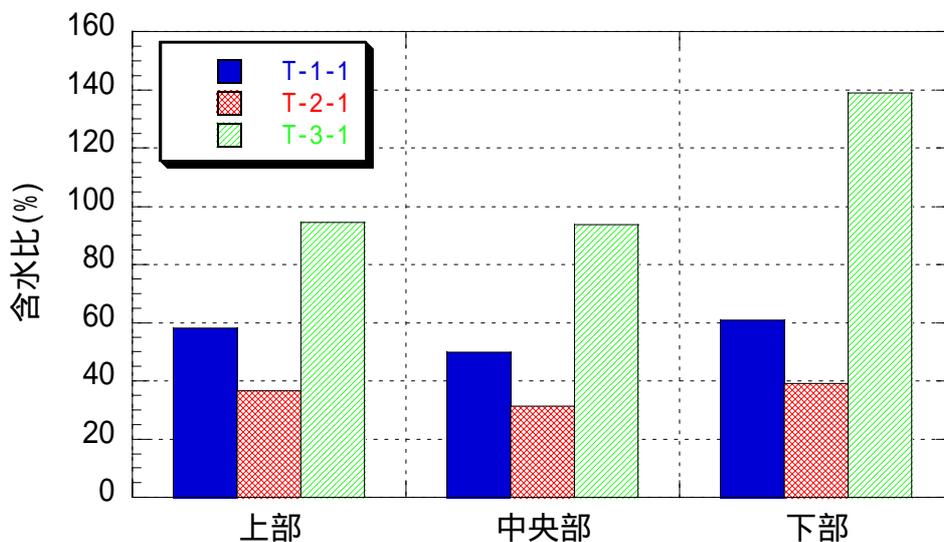


図 3-16 透水試験後の含水比測定結果 (蒸留水透水試験)

3.2.2 人工海水下における充填性の確認試験

(1) 試験条件

試験ケースは表 3-7 に示す 3 ケースであり、それぞれペレットのみ、ペレット+クニゲル V1、クニゲル V1 のみの試料を試験セルに自然落下で充填し供試体を作製した。したがって、表 3-7 に示す試験ケース T-1-2、T-2-2、T-3-2 の試験供試体は表 3-3 に示す試験ケース T-1-1、T-2-1、T-3-1 に相当することとなる。なお、人工海水としては ASTM D-1141-52 基準で作製した人工海水を用いた。

表 3-7 透水試験試料（人工海水を用いた透水試験）

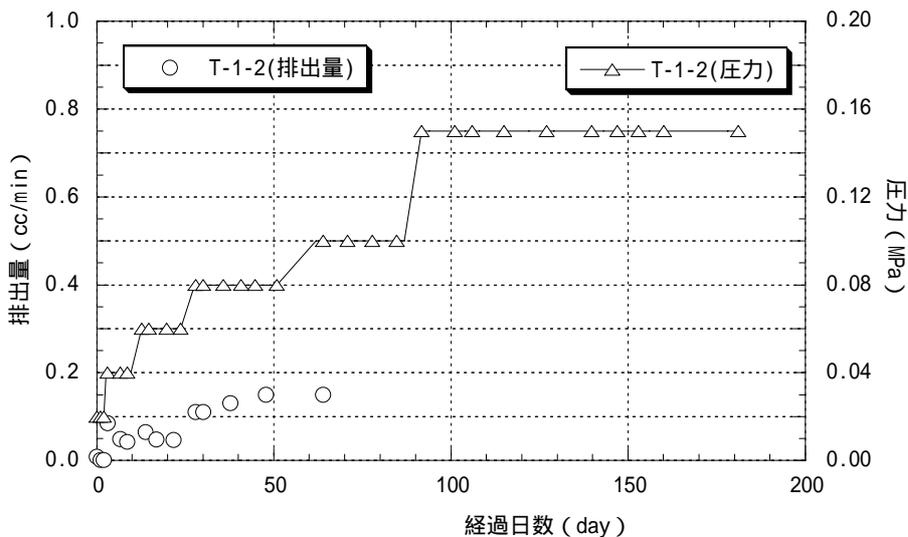
ケース	試料	ペレット個数/重量	クニゲル V1 重量 (g)	湿潤密度 (g/cm ³)
T-1-2	ペレット	55/67.39g	0	1.140
T-2-2	ペレット+クニゲル V1	55/69.55g	21.77	1.550
T-3-2	クニゲル V1	0/0	45.77	0.780

容器体積 58.9cm³、ペレットの乾燥密度 1.905g/cm³、クニゲル V1 含水比 9.12%、ペレット含水比 9.45%

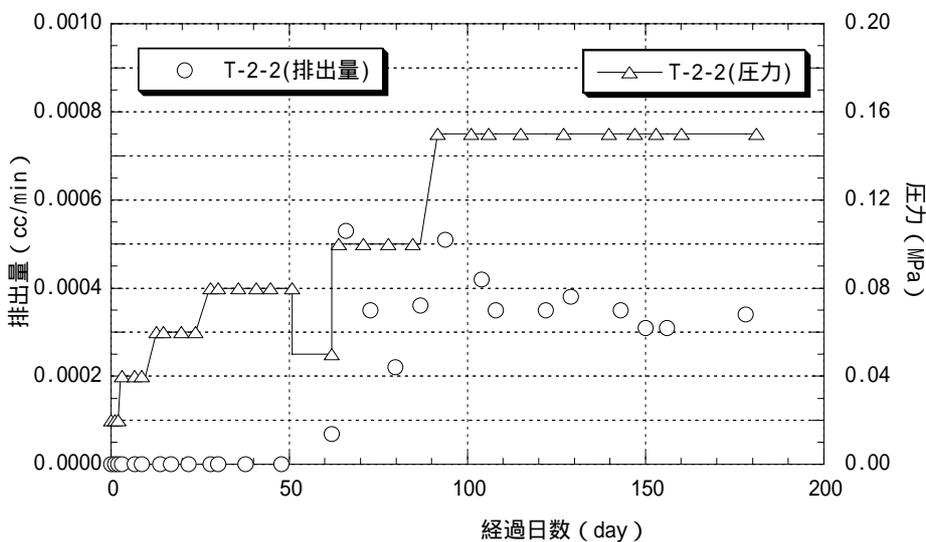
(2) 透水試験結果

透水試験は、注水圧力を 0.01MPa から 0.15MPa まで順次上昇させて行った。各圧力段階において排水量が定常となるまで注水を行い、定常になったと判断した後、次の圧力段階に進んだ。図 3-17 に各試験ケースにおける注水圧力と排水量の経時変化を示す。また、図 3-18 には各圧力段階終了時における注水圧力値と排水量の関係を示す。T-1-2 においては、0.01MPa で加圧した直後に多量の排水を生じたが、その後、排水量は低下した。しかしながら圧力を上昇させていくに従って排水量は増加していき、圧力段階を 0.15MPa とした時点で排水量は急激に増加し、給水タンクの容量の問題から試験の継続が不可能な状況となった。また、T-2-2 では圧力段階が 0.1MPa となるまで排水が生じなかった。圧力を 0.15MPa に上昇させると排水量も増加しているが、その絶対量は T-1-2 に比べると小さい。T-3-2 では、圧力段階が 0.01MPa の時点で排水が生じている。そして圧力を上昇させても排水量は減少した。

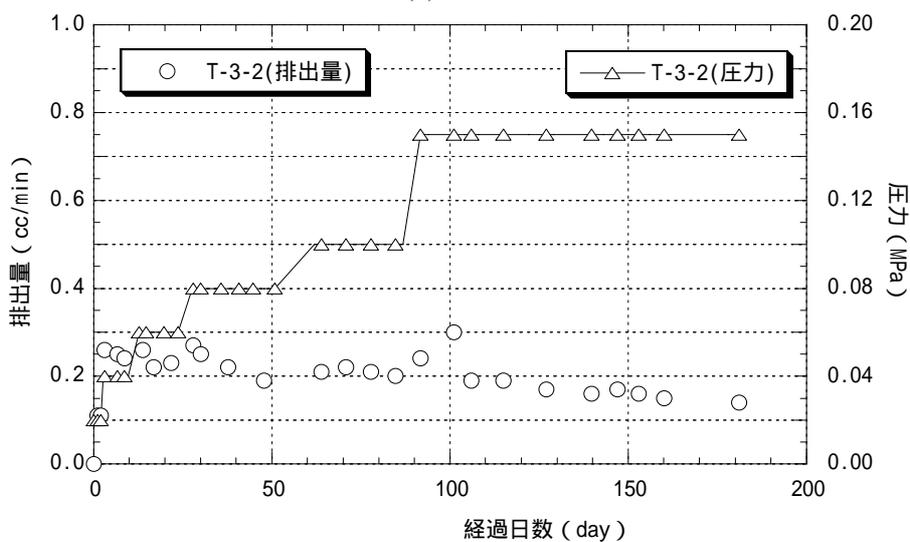
図 3-19 には、各圧力段階における排水量から算定した透水係数の経時変化を示す。透水係数は T-2-2 で 10⁻⁹m/s のオーダー、T-1-2 および T-3-2 で 10⁻⁶m/s のオーダーとなった。この値は、蒸留水を用いて実施したケースに比べかなり大きな値と思われるため、蒸留水で実施した試験結果との比較を行った。結果を図 3-20 に示す。各ケースとも蒸留水を用いて実施した試験結果（図の白抜き）よりかなり大きくなっていることが分かる。ペレットのみのケース（ および ）が最も差が大きくなっており、さらに、ペレットのみの試料内に人工海水を浸潤させたケースは圧力段階を 0.15MPa にした時点で排水量がかなり多くなったことにより試験の継続が不可能となったため、同図では 0.10MPa の時点の透水係数をプロットしていることを鑑みると、海水に近い組成の地下水が浸潤してきた際には、ベントナイトペレットのみでは十分な隙間充填性および止水性が発揮できないものと考えられる。



(a) T-1-2

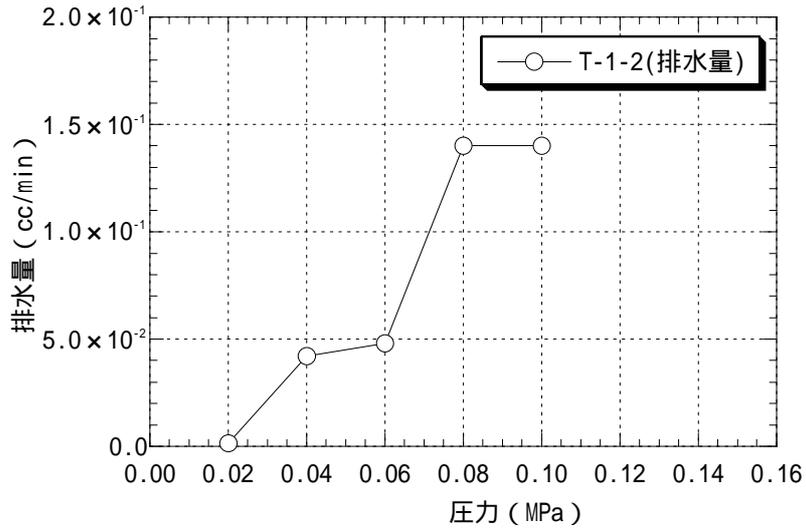


(b) T-2-2

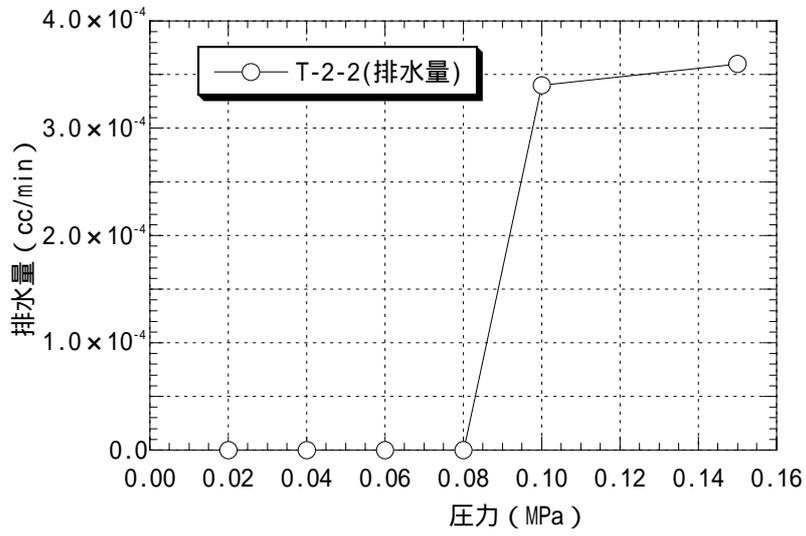


(c) T-3-2

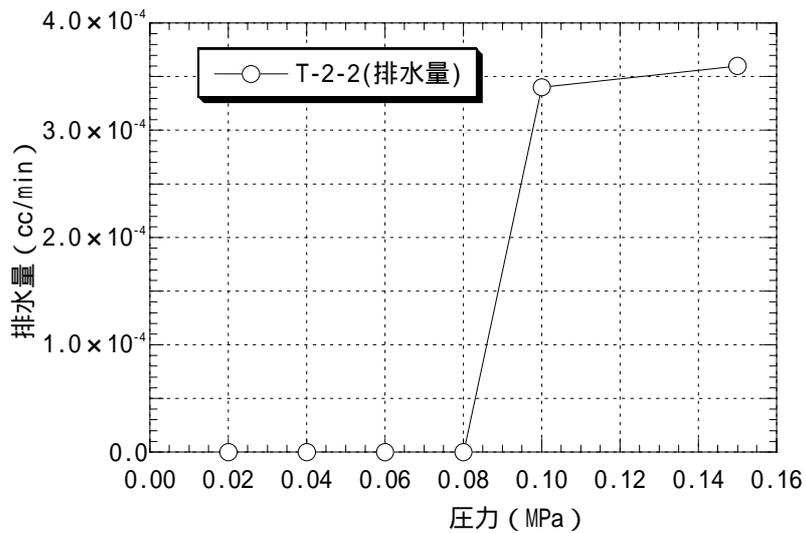
図 3-17 注水圧力と排水量の経時変化 (人工海水透水試験)



(a) T-1-2

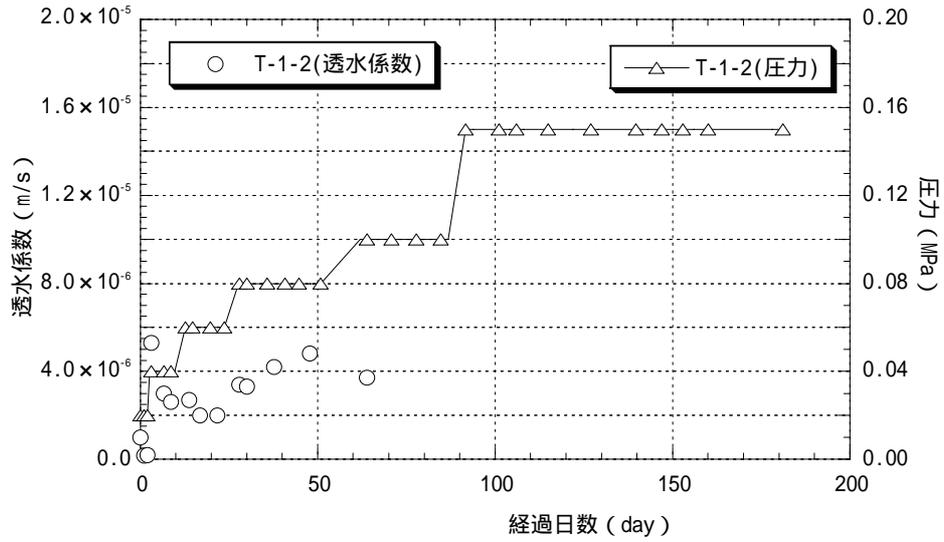


(b) T-2-2

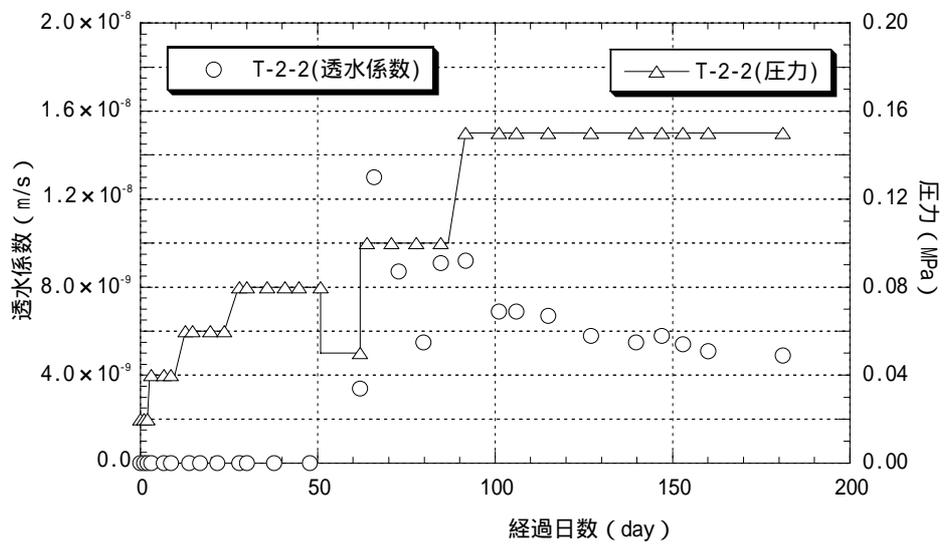


(c) T-3-2

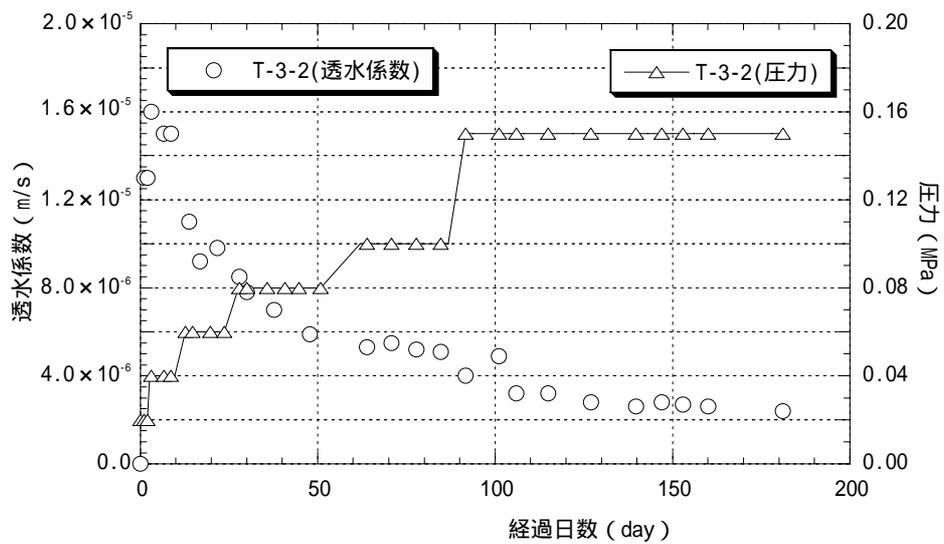
図 3-18 各注水圧力と排水量の関係 (人工海水透水試験)



(a) T-1-2



(b) T-2-2



(c) T-3-2

図 3-19 透水係数の経時変化 (人工海水透水試験)

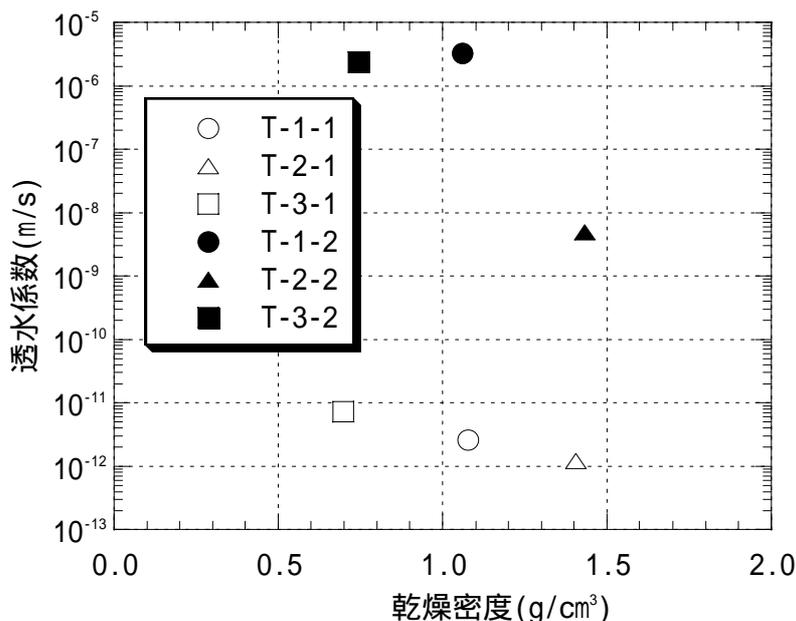


図 3-20 蒸留水透水試験と人工海水透水試験結果との比較

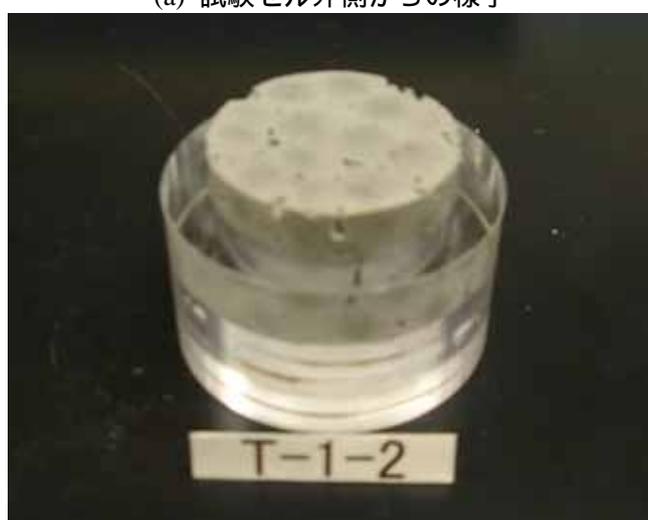
- T-1-1; 試験水: 蒸留水、 試料: ペレットのみ
- T-2-1; 試験水: 蒸留水、 試料: ペレット+粉末
- T-3-1; 試験水: 蒸留水、 試料: 粉末のみ
- T-1-2; 試験水: 人工海水、 試料: ペレットのみ
- T-2-2; 試験水: 人工海水、 試料: ペレット+粉末
- T-3-2; 試験水: 人工海水、 試料: 粉末のみ

(3) 密度測定

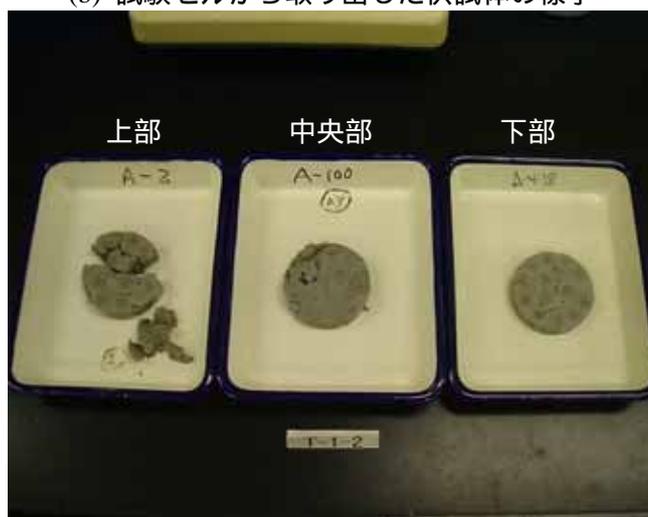
透水試験後の試料を3分割(鉛直3段)し、密度分布を測定した。通水開始から密度測定までの時間、つまり試料が人工海水と接触している時間は約180日である。図3-21~図3-23には、試験終了時の供試体の様子を示す。図3-21は供試体T-1-2、図3-22は供試体T-2-2、図3-23は供試体T-3-2についての写真であり、それぞれ、(a)は試験セル外側から見た概観、(b)は供試体を試験セルから取り出したときの外観、(c)は密度測定用に鉛直方向に3分割した試料である。同図よりクニゲルV1のみで製作した供試体は他に比べ表面がきれいであることが分かる。また、ペレットのみの場合と、ペレットとクニゲルV1を用いた供試体を比較すると、後者の方は若干、斑が残っているという感じであるが、前者に関してはペレットがまだ塊として残っている様子が分かる。この影響で、ペレットのみの供試体の透水係数が高くなったものと考えられる。また、乾燥密度の測定結果を図3-24に、含水比の測定結果を図3-25に示す。T-1-2に関しては、乾燥密度、含水比とも上下方向で大きな差は見られず、試験セル上下方向全体に浸潤していることが分かる。これは、ペレット間の隙間により、セル内に均一に水が供給されたためと考えられる。一方、T-2-2は下部で乾燥密度が小さくなっており、その結果、含水比が大きくなっている。これは、浸潤面である下部において発生した膨潤圧により上部が圧密され、その結果、下部の乾燥密度が大きくなったものと考えられる。T-3-2に関しては、含水比で大きな差(下部の方が大きい)が見られたが、乾燥密度は上下方向で差がなかった。これは、粉末を充填した供試体であるため隙間が無いということではT-2-2と同じ条件であるが、もともと密度も小さく発揮される膨潤圧が小さいことから、密度の差があまり生じなかったものと考えられる。



(a) 試験セル外側からの様子

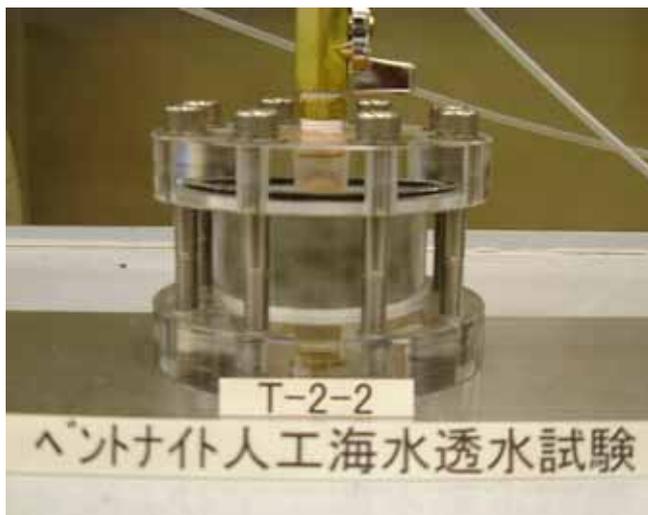


(b) 試験セルから取り出した供試体の様子



(c) 密度測定用に鉛直方向に3分割した試料

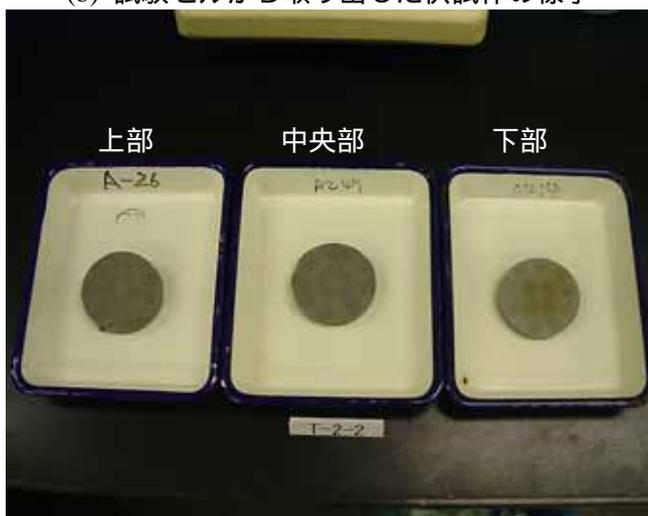
図 3-21 人工海水透水試験後の供試体の状況 (T-1-2)



(a) 試験セル外側からの様子

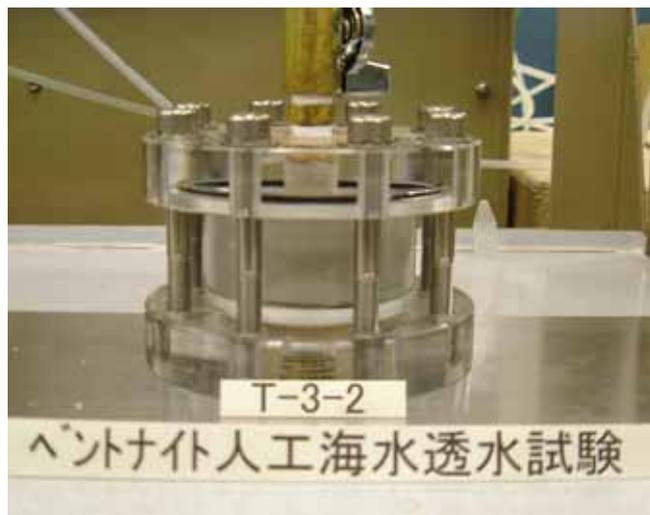


(b) 試験セルから取り出した供試体の様子



(c) 密度測定用に鉛直方向に3分割した試料

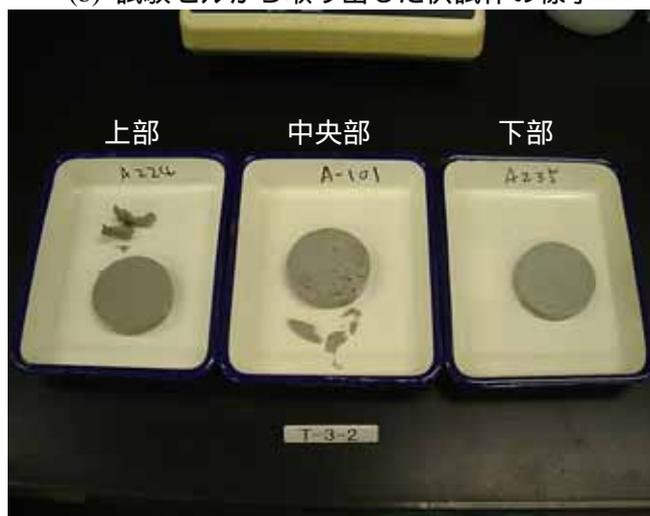
図 3-22 人工海水透水試験後の供試体の状況 (T-2-2)



(a) 試験セル外側からの様子



(b) 試験セルから取り出した供試体の様子



(c) 密度測定用に鉛直方向に3分割した試料

図 3-23 人工海水透水試験後の供試体の状況 (T-3-2)

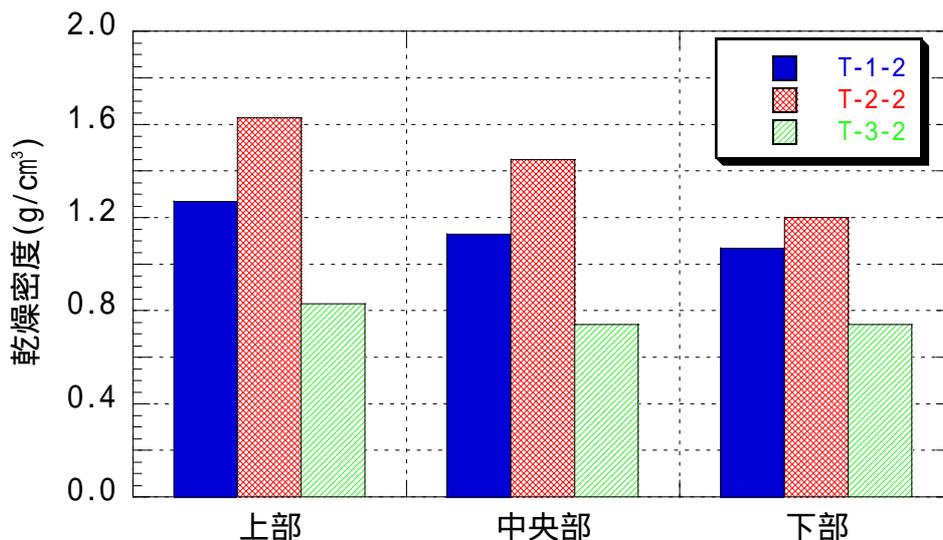


図 3-24 透水試験後の密度測定結果 (人工海水透水試験)

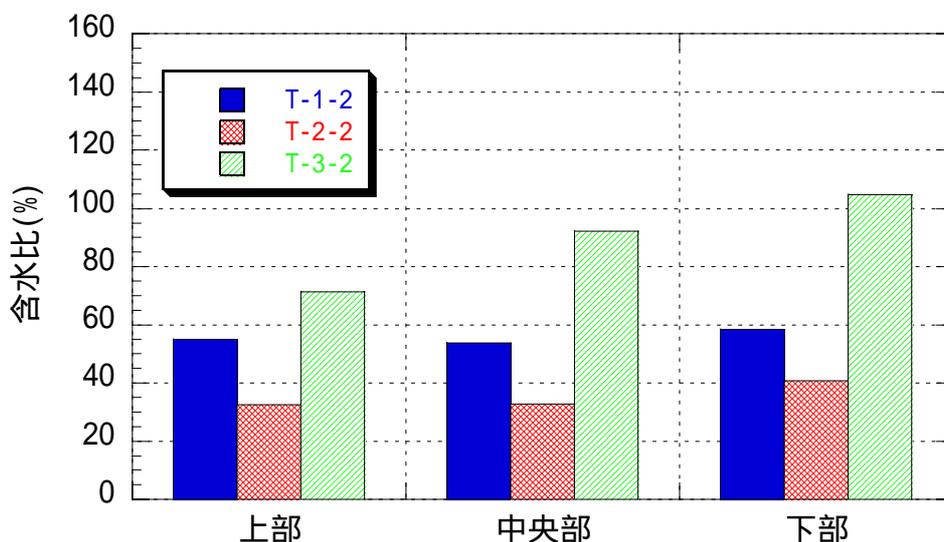


図 3-25 透水試験後の含水比測定結果 (人工海水透水試験)

3.2.3 蒸留水浸潤後での人工海水を用いた透水試験

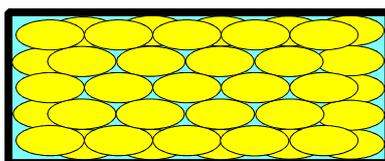
(1) 試験条件

蒸留水を用いた試験結果と人工海水を用いた透水試験の結果を比較した結果、人工海水を用いた場合、その止水性は蒸留水を用いた場合に比べ大きく劣ることが分かった。これは、人工海水の場合、ベントナイトの膨潤性が十分に発揮されないため、ペレットとペレットとの間の大きな隙間を十分に充填することが出来ないためであると考えられる。そこで、ここでは、一旦蒸留水を用いてペレットを膨潤させペレット間の大きな隙間を膨潤充填させた後に人工海水を通水し、その効果を確認することとした。試験の概況を図 3-26 に示す。試験ケースは表 3-8 に示す 3 ケースであり、供試体はペレットのみを用いることとし、試験期間を変化させその影響を確認することを目的とした。なお、蒸留水による浸潤・膨潤時間は 1 日とした。

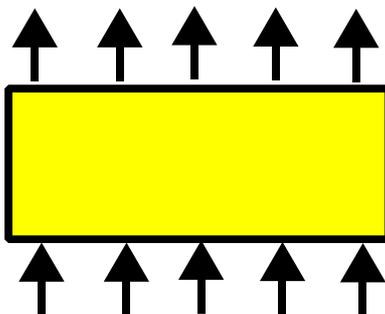
表 3-8 透水試験試料（蒸留水 人工海水透水試験）

ケース	試料	ペレット個数	ペレット質量 (g)	湿潤密度(g/cm ³)	試験期間(日)
T-1-3S	ペレット	55	71.80	1.219	20
T-1-3M	ペレット	55	72.10	1.224	150
T-1-3L	ペレット	55	72.80	1.236	190

容器体積 58.9cm³、ペレットの乾燥密度 1.905g/cm³、ペレット含水比 9.45%



(1)蒸留水により浸潤・膨潤



(2)一定時間後、人工海水を用いて透水試験

図 3-26 蒸留水浸潤後での人工海水を用いた透水試験の概況

(2) 試験結果

図 3-27 に試験の結果得られた透水係数の経時変化を示す。蒸留水を 1 日浸潤させた後に人工海水を通水させ試験を行った。比較的初期には透水係数は高い値を示しているが、その後、 $1 \times 10^{-12} \text{m/s}$ まで低下している。浸潤期間とともに透水係数の値は若干大きくなっているが、200 日弱経過した後も $3 \times 10^{-12} \text{m/s}$ 程度の値を保っている。図 3-28 には蒸留水で実施した試験および最初から人工海水を通水させた試験の結果得られた透水係数との比較を示す。最初から人工海水を通水させた場合に比べ、その止水性ははるかに高くなっていることが分かる。蒸留水を通水させた際に得られた透水係数と比較すると約 1 オーダー大きくなっているが、ベントナイトブロック供試体の透水係数は蒸留水と人工海水を用いた場合で約 1 オーダー異なることが分かっており³⁻³⁾、これを鑑みると、ペレットを充填材として用いた場合に、初期に蒸留水を使用して膨潤させることは非常に効果があるといえる。

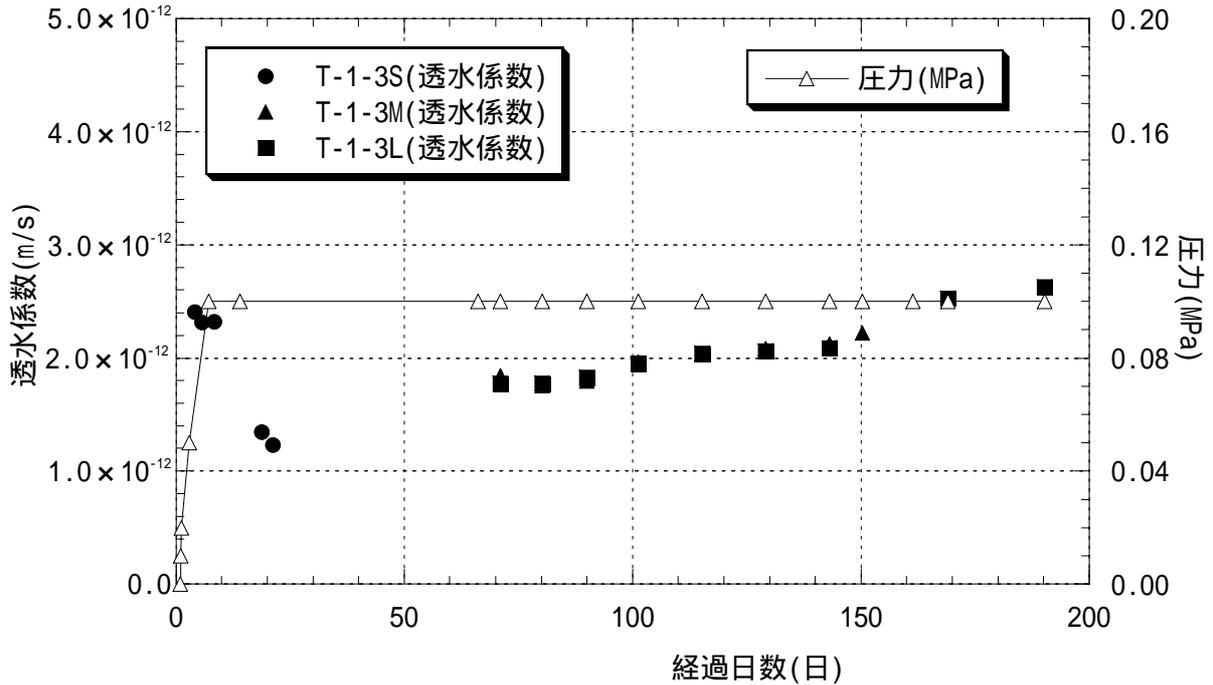


図 3-27 透水試験結果 (蒸留水 人工海水試験)

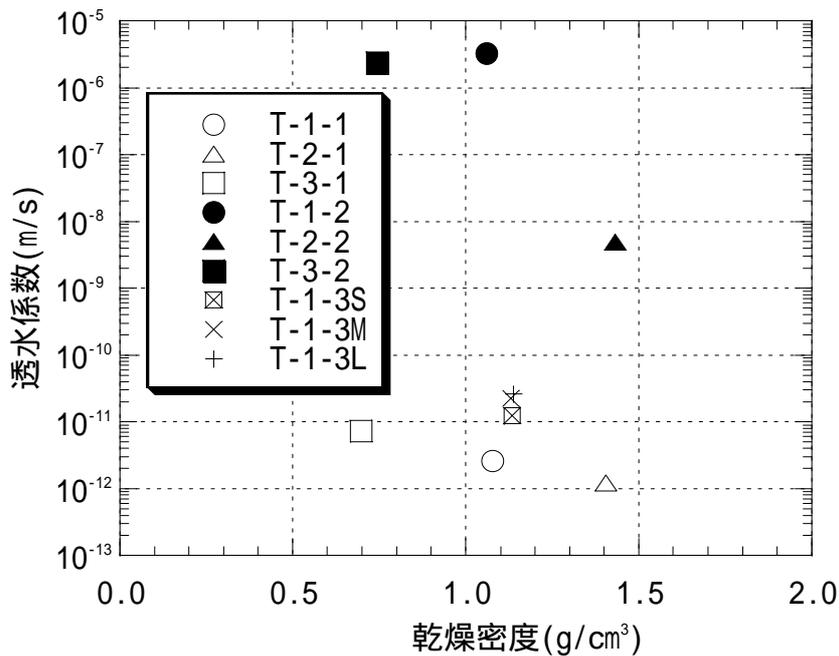


図 3-28 蒸留水・人工海水透水試験と蒸留水 人工海水透水試験結果の比較

- T-1-1 ; 試験水 : 蒸留水、 試料 : ペレットのみ
- T-2-1 ; 試験水 : 蒸留水、 試料 : ペレット+粉末
- T-3-1 ; 試験水 : 蒸留水、 試料 : 粉末のみ
- T-1-2 ; 試験水 : 人工海水、 試料 : ペレットのみ
- T-2-2 ; 試験水 : 人工海水、 試料 : ペレット+粉末
- T-3-2 ; 試験水 : 人工海水、 試料 : 粉末のみ
- T-1-3 ; 試験水 : 蒸留水 人工海水、 試料 : ペレットのみ
- T-1-3S : 20 日、 T-1-3M : 150 日、 T-1-3L : 190 日

(3) 密度測定

透水試験後の試料を3分割（鉛直3段）し、密度分布を測定した。図3-29には、試験終了時の供試体の様子を示す。(a)は供試体 T-1-3S、(b)は供試体 T-1-3M、(c)は供試体 T-1-3L についての写真である。同図より試験期間による差は特に見られないことがわかる。また、乾燥密度の測定結果を図3-30に、含水比の測定結果を図3-31に示す。各試験期間のケース全てにおいて、乾燥密度、含水比の両者とも上下方向で大きな差は見られず、試験セル内においてほぼ均等に浸潤・膨潤していることが分かる。

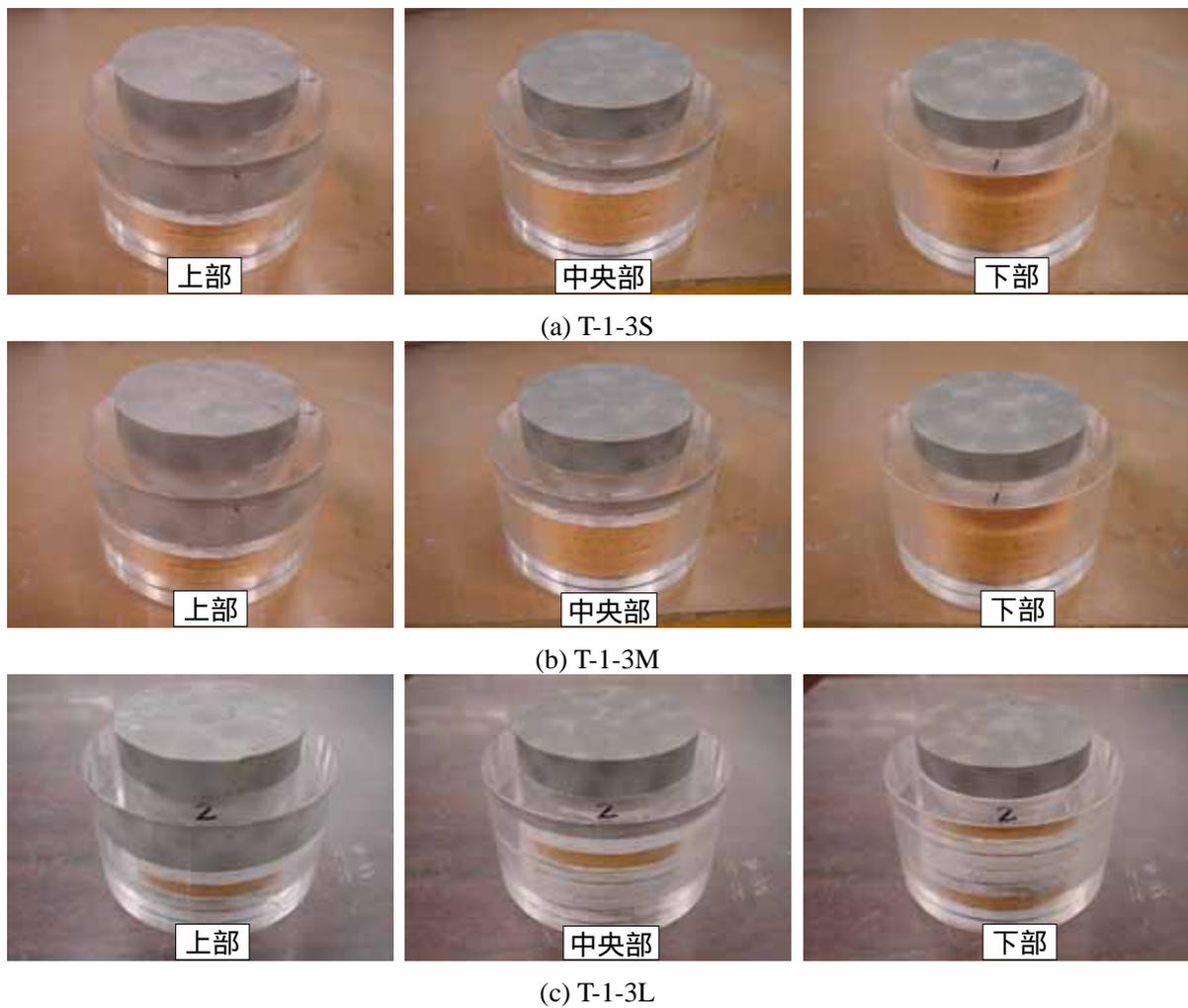


図 3-29 透水試験終了後の供試体の状況（蒸留水 人工海水透水試験）

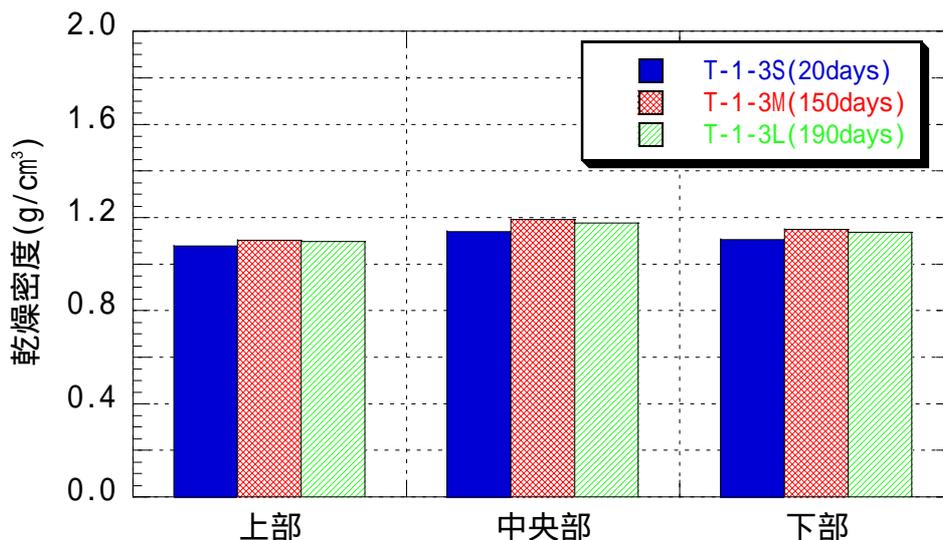


図 3-30 透水試験後の密度測定結果 (蒸留水 人工海水透水試験)

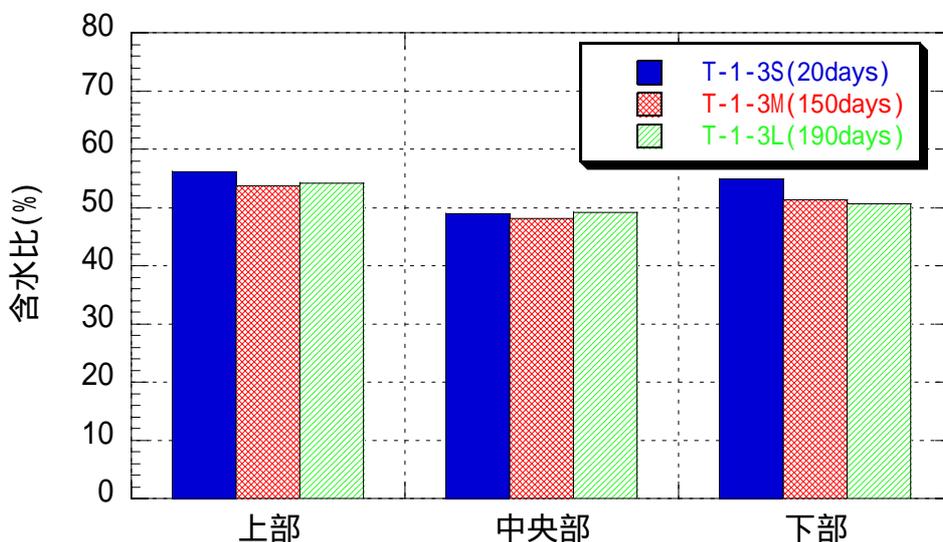


図 3-31 透水試験後の含水比測定結果 (蒸留水 人工海水透水試験)

3.2.4 ペレット、ブロック併用透水試験

(1) 試験条件

ベントナイトペレットを隙間充填材として使用する場合の性状を確認することを目的にブロックと併用した透水試験を実施した。3.2.3 節まではすべて隙間部だけに着目した試験であり、隙間部でのペレットの挙動を確認してきた。しかしながら、実際の処分場で隙間充填材としてペレットを使用した場合、ペレットはブロックと同時に存在することとなり、ブロックの膨潤も隙間充填に寄与することとなる。この試験はこのようなブロック部とペレット部が混在する場での水理挙動を把握することに着目する。試験の概況を図 3-32 に示す。試験条件は以下の通りである。試験ケースは表 3-9 に示す通りであり、性状の時間的な変遷を確認することを目的とした。

試料のセット状況を図 3-33 に示す。所定のサイズのベントナイトブロックを試験用セルに設置後、残りの部分にベントナイトペレットを充填した。

試験用セル： 50mm × H30mm

ブロックの大きさ： 50mm × H10mm

ブロック仕様：ケイ砂混合ベントナイト (B:S=7:3、 $\rho_d=1.9\text{g/cm}^3$)

浸潤水：蒸留水

注入圧力：0.10MPa

表 3-9 透水試験試料 (ペレット・ブロック併用透水試験)

ケース	試料	ペレット個数/質量	ブロック質量 (g)	湿潤密度 (g/cm ³)
M-1-1S	ペレット+ブロック	30/40.05	36.32	1.296
M-1-1M	ペレット+ブロック	30/39.92	37.34	1.312
M-1-1L	ペレット+ブロック	30/40.23	36.82	1.308

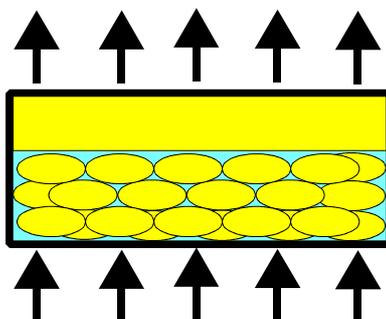


図 3-32 ベントナイトペレットおよびブロックの併用透水試験の概況



ブロック試料セット状況 -1



ブロック試料セット状況 -2



ブロック試料セット状況 -3



ペレット



ペレットセット状況 -1



ペレットセット状況 -2

図 3-33 試験前試料のセット状況 (ペレット・ブロック併用透水試験)

(2) 試験結果

試験後の状況を図 3-34 に示す。時間とともにベントナイトペレットが膨潤して隙間を埋めていることが分かる。図 3-35 には透水係数の経時変化を示す。透水係数は時間とともに減少しており、約 150 日後で定常となっている。その際の値は約 $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$ である。

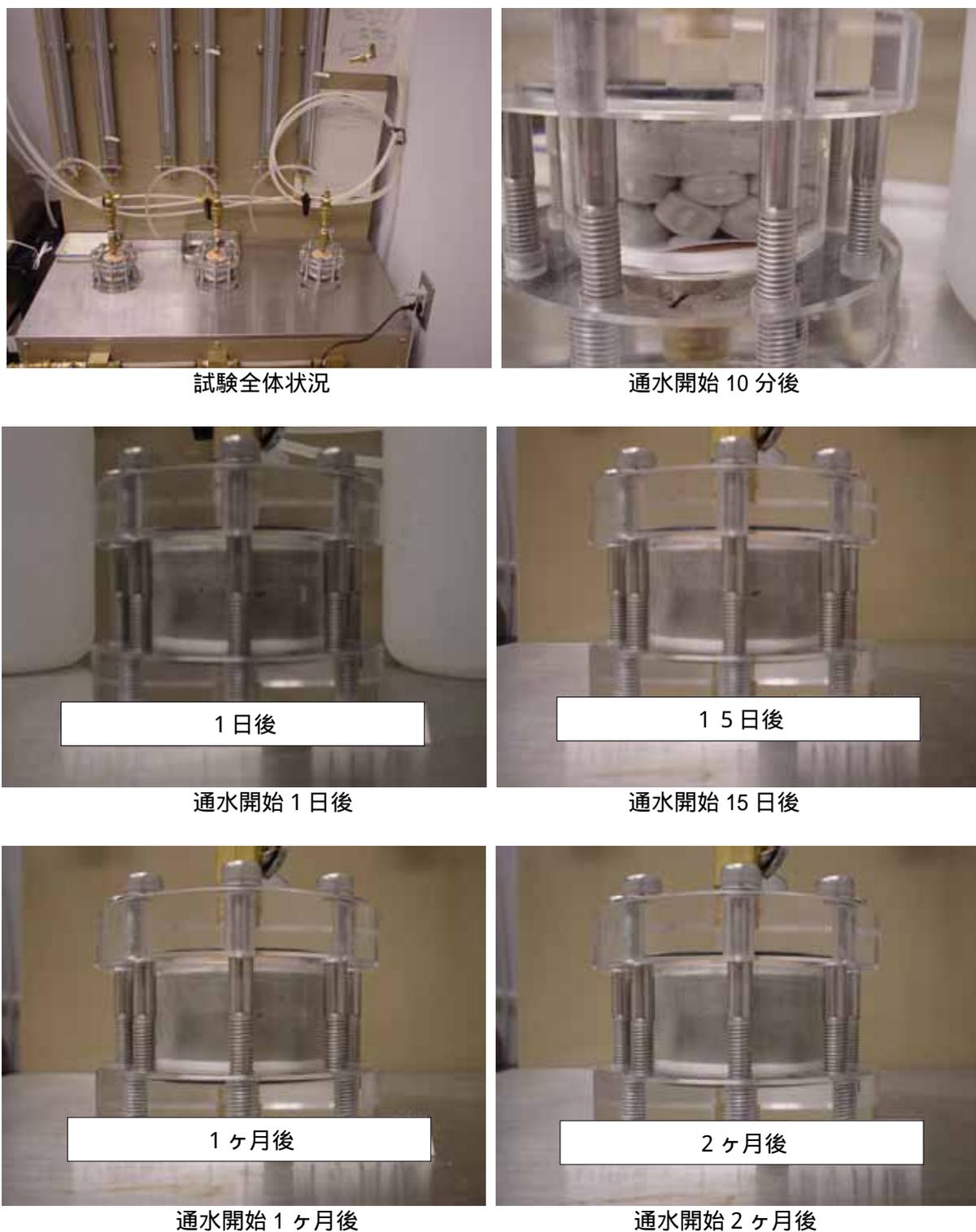


図 3-34 試験開始後の試料の状況（ペレット・ブロック併用透水試験）

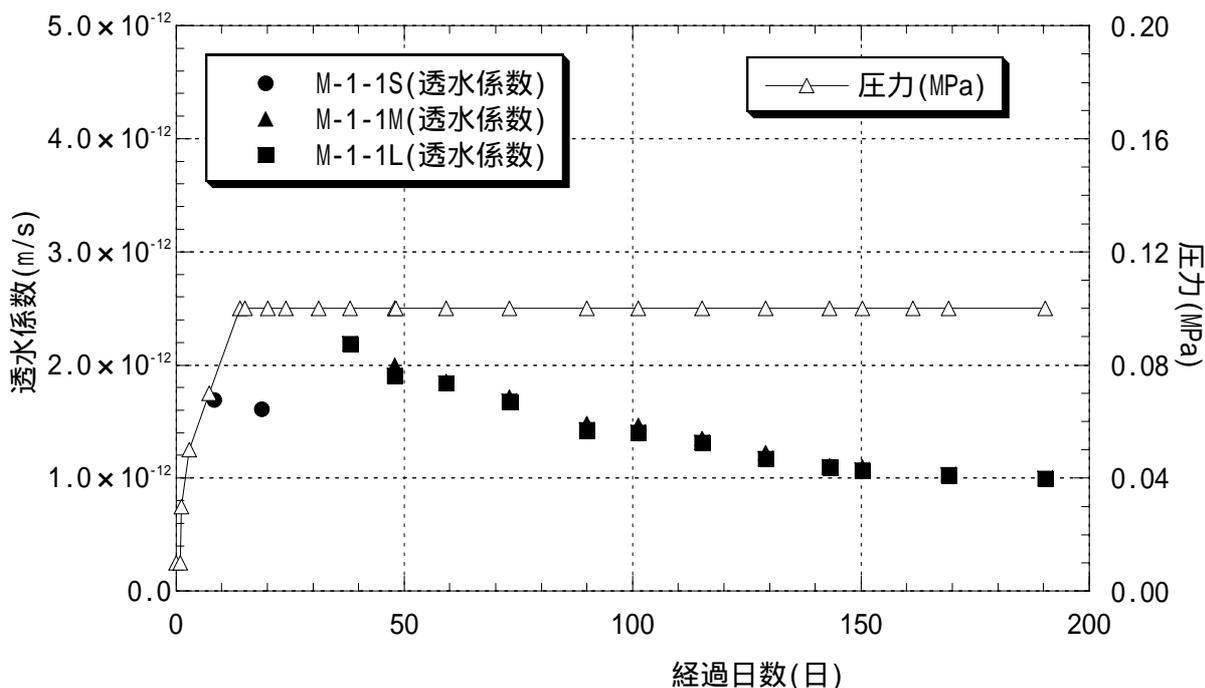


図 3-35 透水係数の経時変化 (ペレット・ブロック併用透水試験)

(3) 密度測定

透水試験後の試料を3分割 (鉛直3段) し、密度、含水比、ケイ砂混合率の分布を測定した。図 3-36 には、試験終了時の供試体の様子を示す。(a)は供試体 M-1-1S、(b)は供試体 M-1-1M、(c)は供試体 M-1-1L についての写真である。同図より試験期間による差は特に見られないことがわかる。また、乾燥密度の測定結果を図 3-37 に、含水比の測定結果を図 3-38 に、ケイ砂混合率の測定結果を図 3-39 に示す。供試体上部の高密度のケイ砂混合体ブロックがあるため、上部の方が密度が高くなっており、その結果、含水比が低くなっている。また、時間的な変化は小さい。3.2.1 節で実施した試験と比べ、ペレット充填部分 (セルの下部 2cm) に充填したペレットの単位空間当たりの個数 (すなわち質量) は小さいに関わらず、セル下部における供試体の乾燥密度は 3.2.1 節で実施したケース T-1-1 とほぼ同じになっている。これは、ベントナイトブロックを充填したセル上部の密度が初期ブロック密度より小さくなっていることから、セル全体で平均化が図られた結果であると考えられる。これは、設置時にはペレットのみが充填されていたセル中央部分にもケイ砂が存在していることから明らかである。また、供試体中央部分におけるケイ砂の混合率が時間とともに若干上昇しているが、供試体全体でのケイ砂混合率が長期のものほど高くなっていることから、ケイ砂混合体ブロックの隙間充填への寄与が時間とともに大きくなっている結果と考えられる。

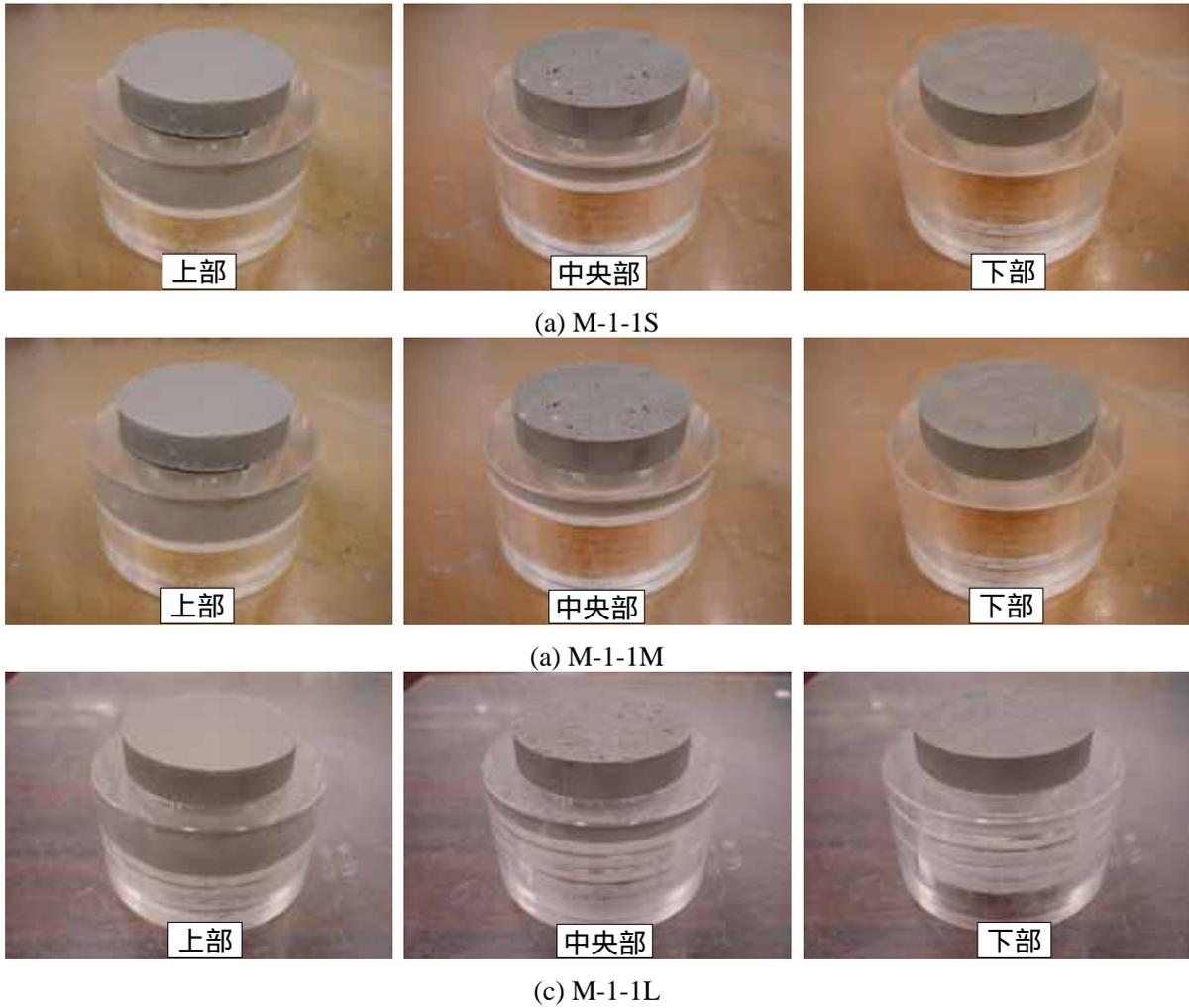


図 3-36 透水試験終了後の供試体の状況 (ペレット・ブロック併用透水試験)

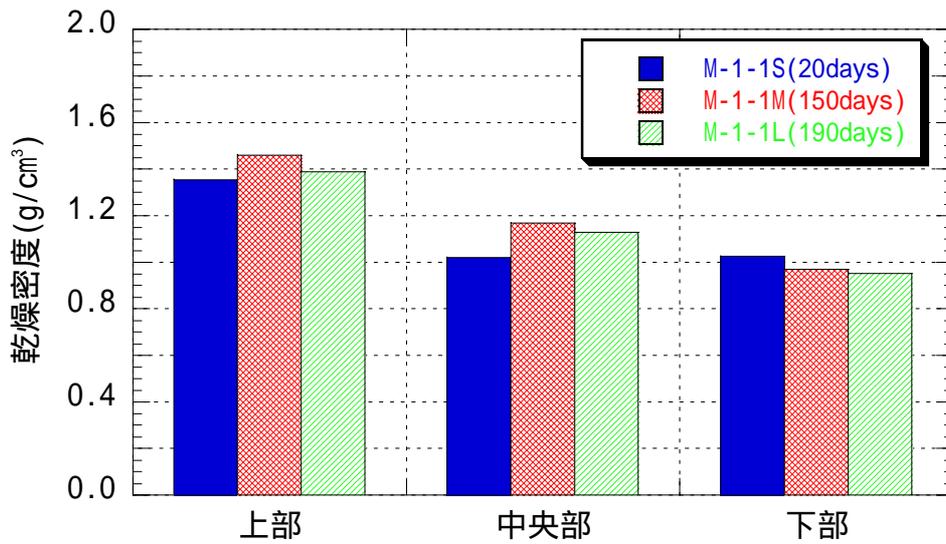


図 3-37 透水試験後の密度測定結果 (ペレット・ブロック併用透水試験)

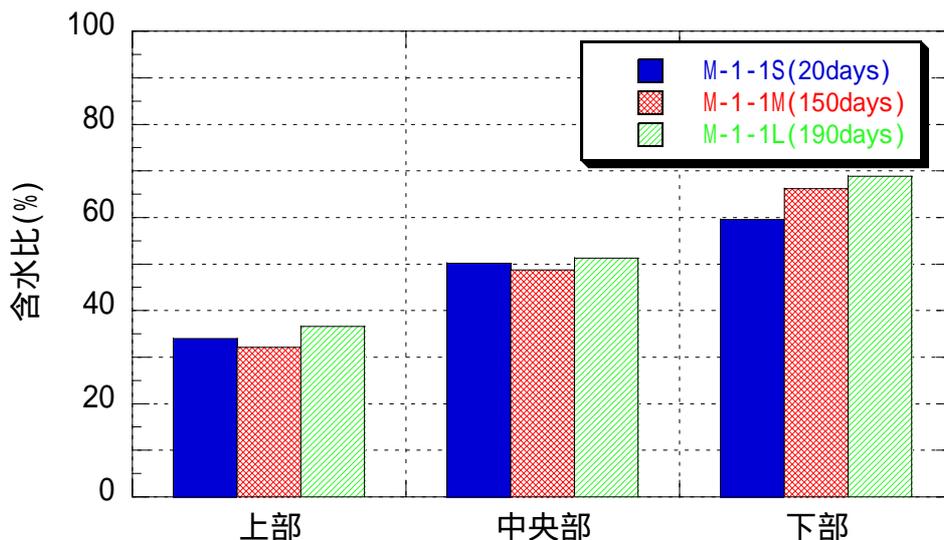


図 3-38 透水試験後の含水比測定結果 (ペレット・ブロック併用透水試験)

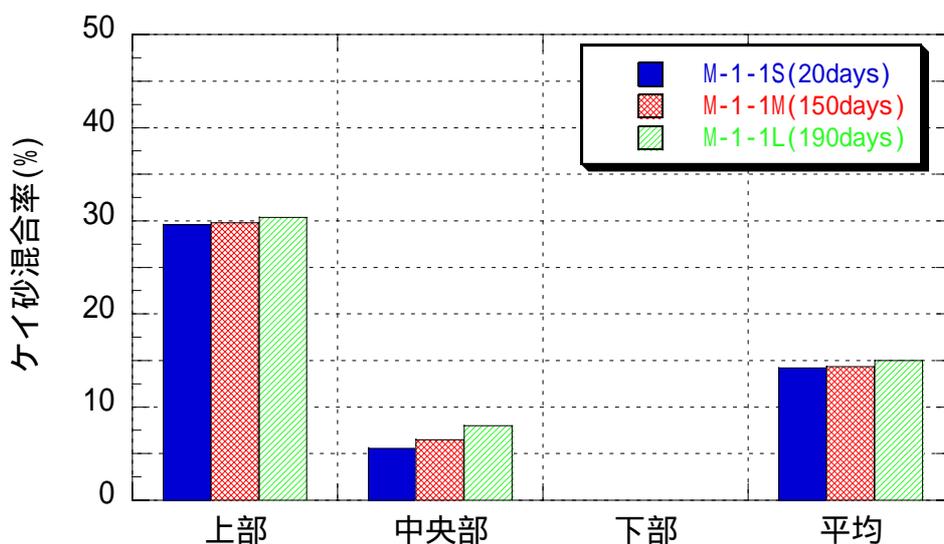


図 3-39 透水後のケイ砂混合率測定結果 (ペレット・ブロック併用透水試験)

3.2.5 楔形状の隙間に対する透水試験

ブロックで緩衝材を施工する際に生じる鋭角部におけるベントナイトペレットの充填性を確認することを目的に、楔形状の隙間に対するペレット充填および透水試験を実施した。試験用のセルは、3.2.1 節で使用したセルと同じものを用いた。そして、通水部が角度の異なる 3 種類の楔形状となるようなシリコンを作成し、試験用セル内に設置した。なお、本試験は昨年度までに実施した内容であるが、本年度の結果を含め、総括的まとめを行う。

表 3-8 には、実施した試験ケースを示す。また、図 3-40 にはベントナイトペレットの設置状況を示す。試験ケース S-1-1 と S-1-2 は楔部の形状は異なるが、ベントナイトが膨潤後の密度は一緒になるように設定したケースである。また、S-1-2 と S-1-3 は楔形状部が同じであるが充填

するベントナイトペレットの個数を変え、最終的な密度が異なるように設定したケースである。図 3-41 には試験の様子を示す。

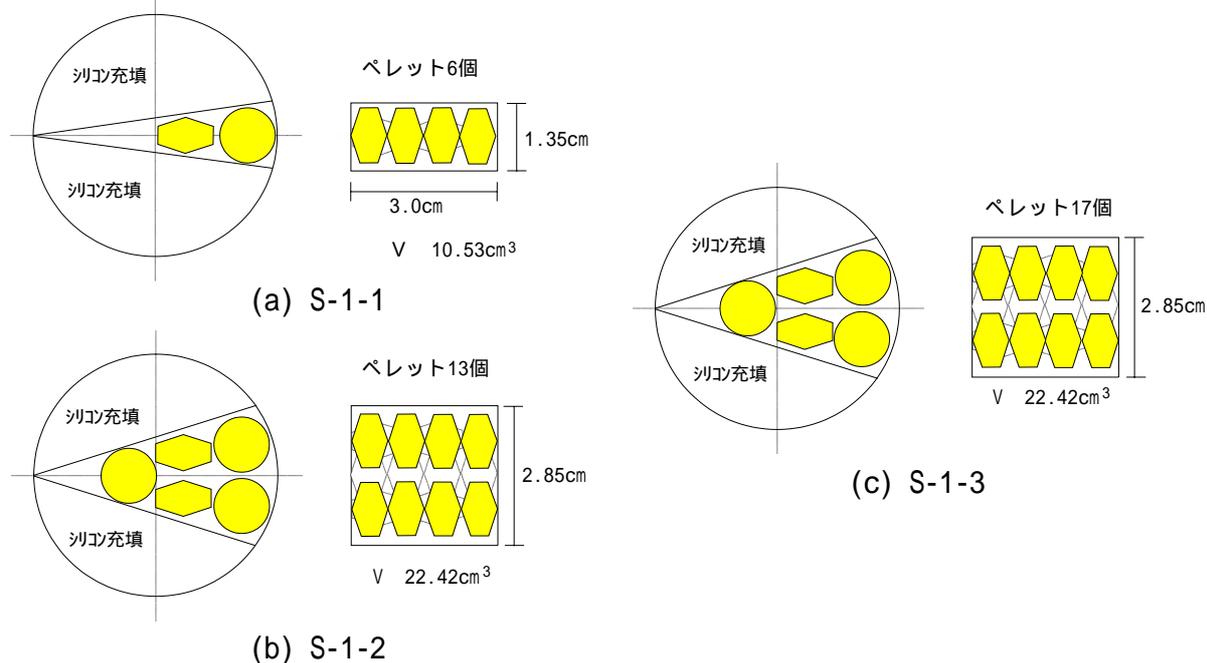


図 3-40 楔形状隙間に対する透水試験の概要

表 3-10 透水試験試料（楔形状隙間における透水試験）

ケース	試料	楔部体積 (cm ³)	試料質量 (g)	湿潤密度 (g/cm ³)
S-1-1	ペレット 6 個	10.53	7.50	0.71
S-1-2	ペレット 13 個	22.42	16.11	0.72
S-1-3	ペレット 17 個	22.42	21.30	0.95



図 3-41 楔形状隙間に対する透水試験の様子

図 3-42 には、透水係数の経時変化を示す。通水開始当初はペレット間の隙間を水が通るため通水量は大きくなっている。しかし、通水開始 1 日後には透水係数は 10^{-11} m/s 程度となっており、20 日程度経過すれば透水係数はほぼ定常に達している。定常となった透水係数の値を 3.2.1 節に示した透水試験の結果と比べると (T-3-1 と S-1-3)、楔形状部における透水係数の方が若干大きい結果となった。そこで、定常に達した後、試験装置を解体し、内部のベントナイトの状況を観察することとした。

図 3-43 には試験終了後の供試体の様子を示す。全ての図において左側が試験用セルから取り出した状態で、右側がシリコンを外した状態である。全てのケースにおいて鋭角部奥まで十分に粘土が充填されている様子が観察できる。しかし、シリコンを外したところ、鋭角部では粘土の密度がかなり低く、かなり柔らかい状態であった。特に、鋭角部の角度の小さいケース S-1-1 においてその傾向が顕著であった。すなわち、ベントナイトペレットの膨潤により鋭角部奥まで粘土は充填されるが、得られる密度は若干小さくなり、その影響で透水係数も若干大きくなるものと考えられる。しかし、大きいとはいえ透水係数は 10^{-11} m/s 程度であるため緩衝材の要件である低透水性は十分に確保できると考えられる。

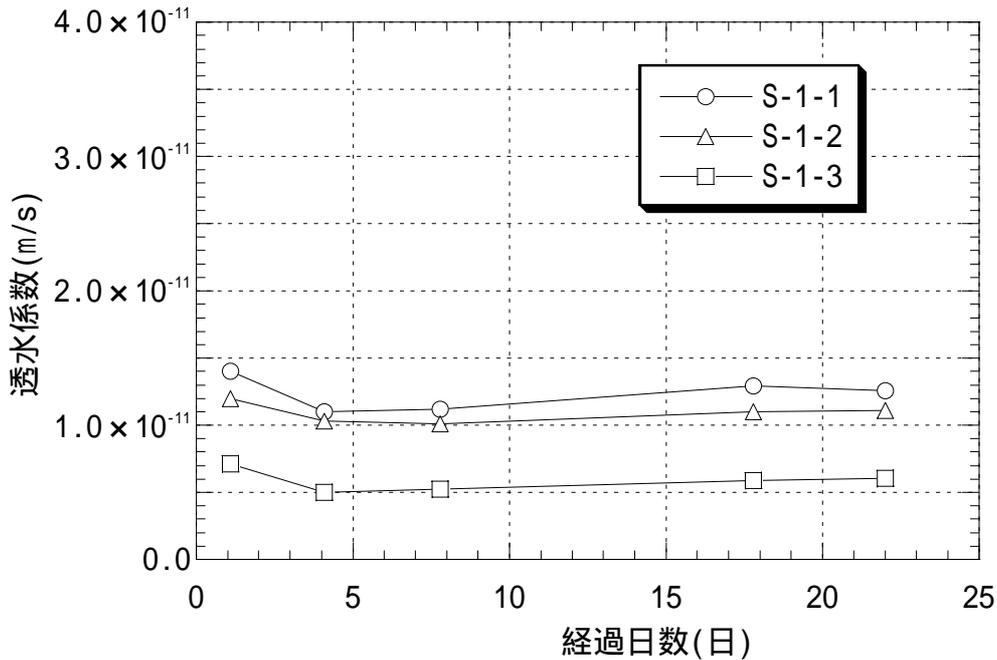


図 3-42 透水係数の経時変化 (楔形状隙間の透水試験)

また、隙間部の充填性に関する時間の影響を確認するため、通水期間を変化させた試験を実施した。通水部の角度は 1 種類とし、通水時間を短期から長期へと変化させ、透水性および密度の変化の測定を行った。表 3-11 には、実施した試験ケースを示す。試験条件 (隙間形状、充填密度) はすべて同じとし、試験期間をそれぞれ、2、5、8 ヶ月とし、透水性の経時変化、試験終了時における隙間部の密度分布の測定を行った。図 3-45 には試験前のセルの状況を、図 3-46 にはベントナイトペレットの充填状況を、図 3-47 には透水試験の状況を示す。

表 3-11 透水試験試料（楔形状隙間における透水試験；期間の影響評価試験）

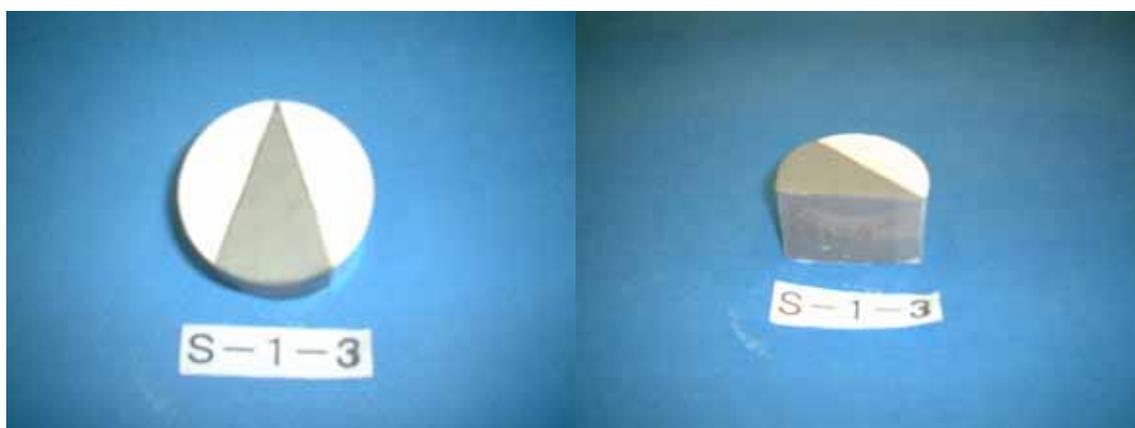
ケース	試料	楔形状部体積(cm ³)	初期密度(g/cm ³)	試験期間
S-1-1S	ベレット6個	10.53	0.71	2ヶ月
S-1-1M	ベレット6個	10.53	0.71	5ヶ月
S-1-1L	ベレット6個	10.53	0.71	8ヶ月



(a) S-1-1



(b) S-1-2



(c) S-1-3

図 3-43 透水試験終了後の供試体の状況（楔形状隙間の透水試験）

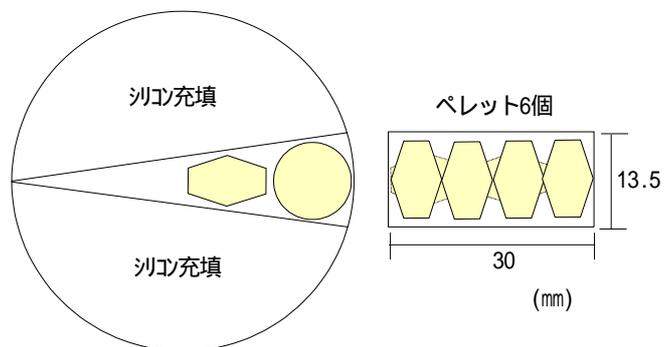


図 3-44 楔形状隙間におけるベントナイトペレットの設置状況

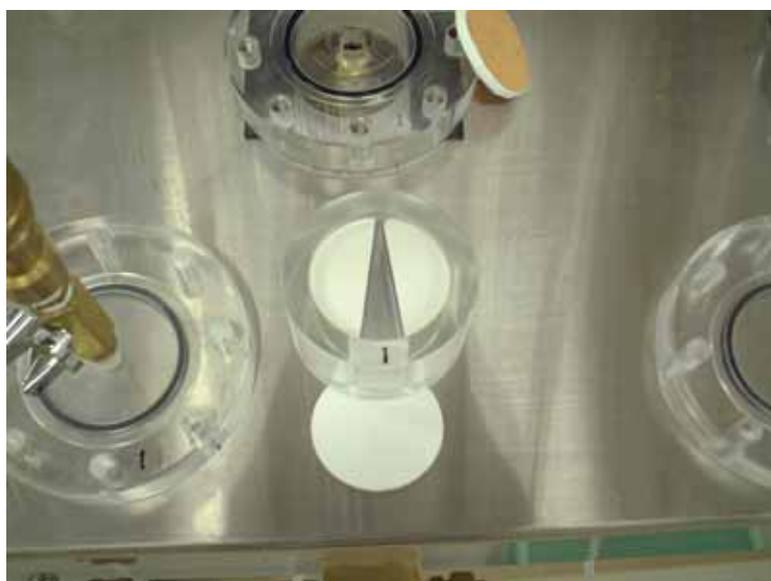


図 3-45 透水試験用セル



(a)横方向から



(b)上方向から

図 3-46 ペレットの充填状況



図 3-47 楔形状隙間に対する透水試験の様子（その 2）

図 3-48 に各試験ケースにおいて算定された透水係数の経時変化を示す。浸潤開始当初、透水係数は高い値を示すが時間とともに減少し、約 100 日後には定常に達している。S-1-1S と S-1-1L とはほぼ同じ値を示しているが、S-1-1M はこの他の 2 ケースに比較して大きな値を示している。解体後の供試体の乾燥密度を測定したところ、S-1-1M は他の 2 ケースより小さくなっており、この影響により透水係数が大きかったものと推察される。図 3-49 には、各試験ケースで得られた有効粘土密度と固有透過度の関係を、既存のベントナイトブロックに対する透水試験結果および円筒形状の試験セルにおいてベントナイトペレットを用いて実施した透水試験結果と比較した結果を示す。ベントナイトペレットを供試体とした試料の固有透過度の値はベントナイトブロックを用いた場合の透水試験の結果と比べると若干大きくなっていることが分かる。しかしながら、有効粘土密度との相関性はブロックの場合とほぼ同等である。

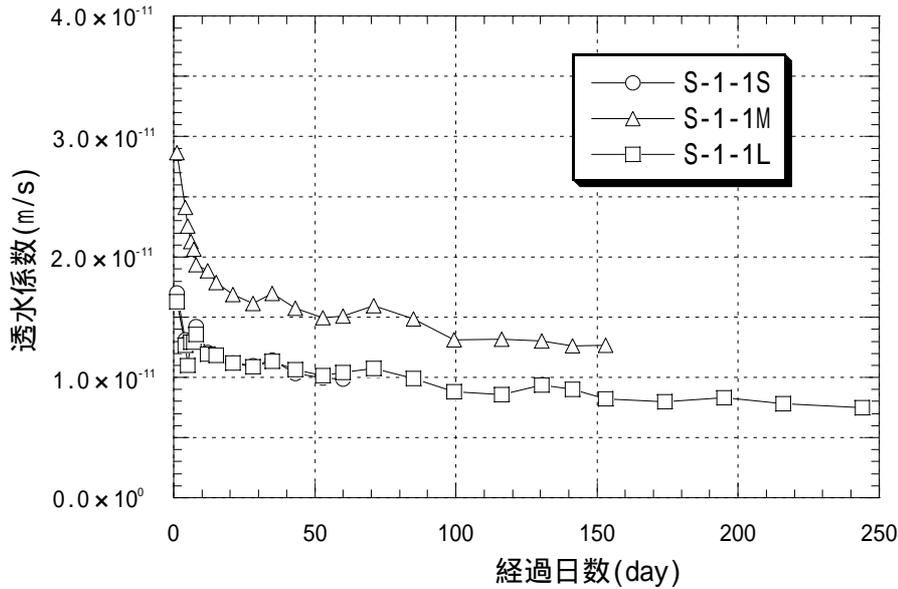


図 3-48 透水係数の経時変化（楔形状隙間透水試験）

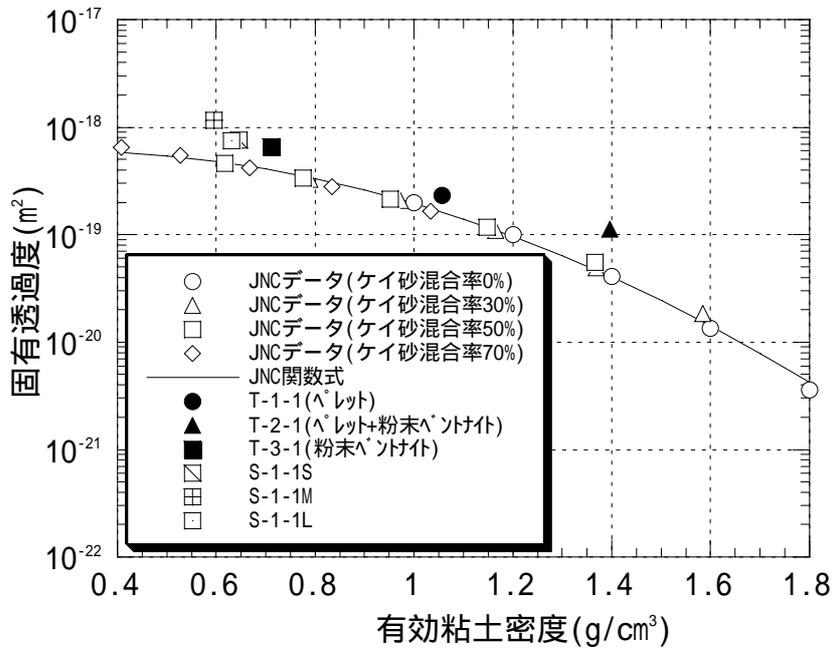


図 3-49 円柱状容器および楔形状隙間における試験結果と既存データの比較

試験終了時の供試体内の密度分布を測定するため、図 3-50 に示すように、供試体を半径方向に 5 等分し、各試料の含水比および乾燥密度の測定を行った。図 3-51 には試験終了時の試験セルの状況、図 3-52 には試験セルを解体した状況を示す。また、図 3-53 は供試体の状況であり、図 3-54 はシリコンを外した時の供試体の状況である。なお、図 3-54 は 2 ヶ月試験終了時の供試体 (S-1-1S) である。図 3-53 より楔鋭角部までベントナイトが充填されている様子が分かるが、シリコンを外したところ、鋭角部はまだかなり軟弱な感じであった (図 3-54 参照)。図 3-55 および図 3-56 にはそれぞれ、供試体内の含水比および乾燥密度を測定した結果を示す。浸潤期間が 2 ヶ月である S-1-1S においては ρ_1 と ρ_5 の差が大きく約 0.6g/cm^3 であった。この差は時間の経過とともに小さくなっており、S-1-1L では約 0.4g/cm^3 であった。

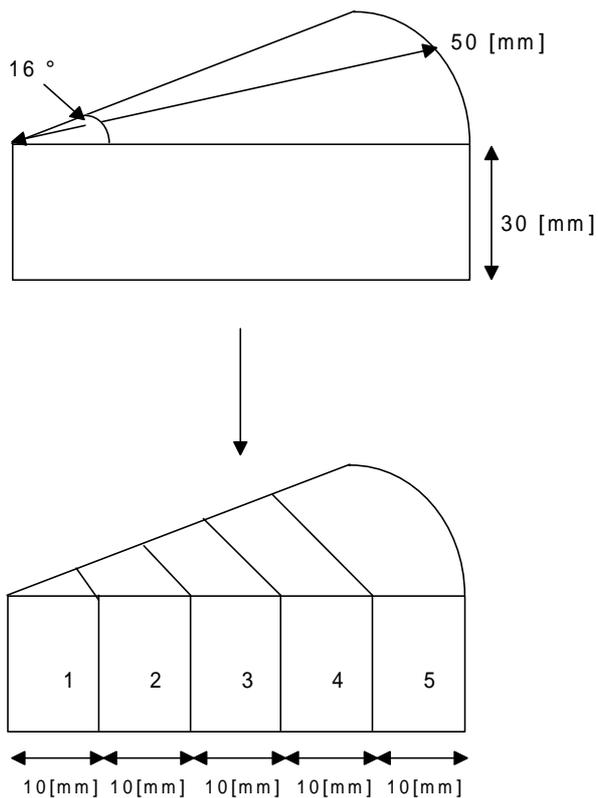


図 3-50 試験終了後の供試体分割図（楔形状隙間透水試験）



図 3-51 試験終了時の試験セル（楔形状隙間透水試験）



図 3-52 試験セル解体状況（楔形状隙間透水試験）



図 3-53 隙間充填状況（その1）



図 3-54 隙間充填状況 (その 2)

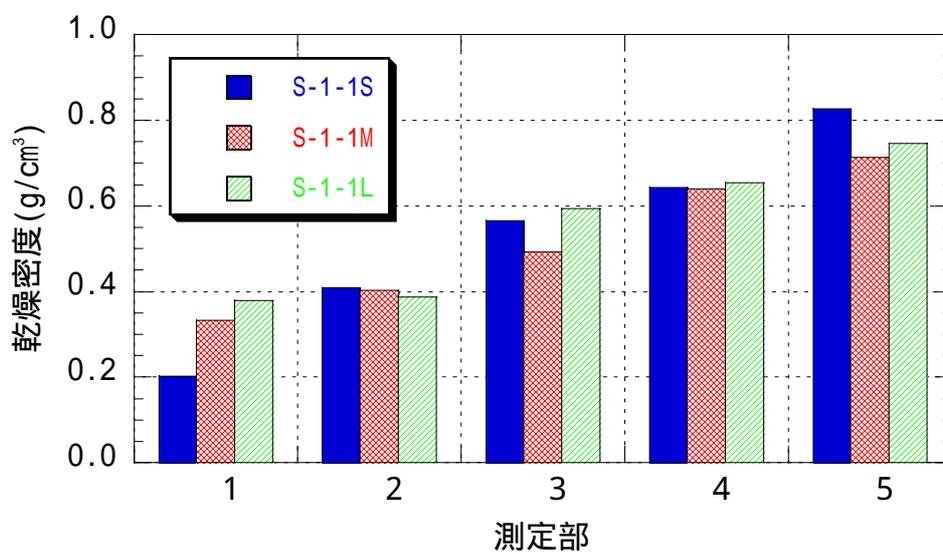


図 3-55 透水試験後の密度測定結果 (楔形状隙間透水試験)

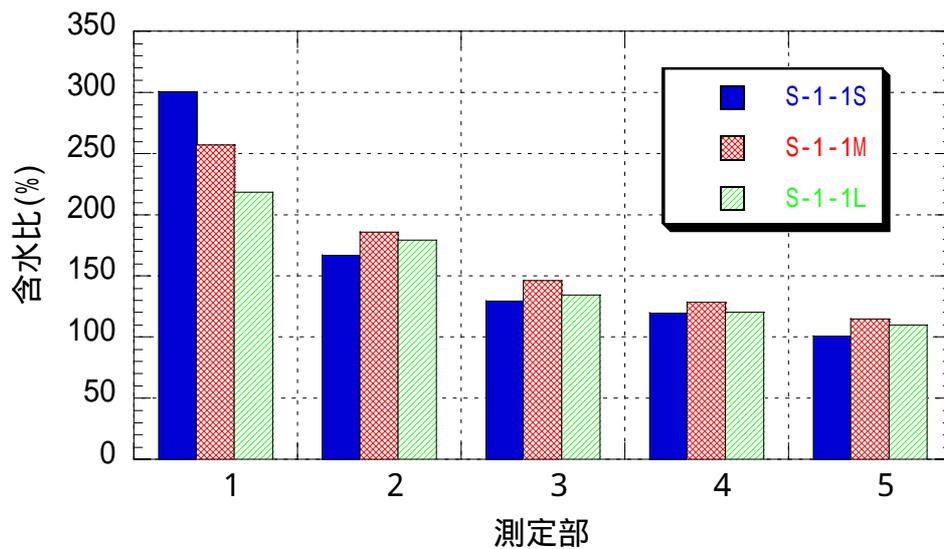


図 3-56 透水試験後の含水比測定結果（楔形状隙間透水試験）

3.3 膨潤圧試験

ペントナイト充填材（ペレット、粉末、ペレット+粉末）の膨潤性を確認することを目的に膨潤圧測定試験を実施した。試験装置の仕様を表 3-12 に、装置の外観を図 3-57 に示す。

表 3-12 膨潤圧試験装置諸元

装置	諸元
試料容器	<ul style="list-style-type: none"> ・ SUS304, SUS316 製 ・ メタルフィルタ SUS304 製 70μ ・ M B ボルト 6 本 ・ 透水圧層 5L バルーン入り ・ 透水圧ウォータートラップ
反力枠	<ul style="list-style-type: none"> ・ 支柱 S45C 30 M24 ・ アッパー SS400 ・ 架台（箱形）SS400 ・ ボールスクリュージャッキ 2ton
給水ピュレット	・ 25cc
出力付ダイヤルゲージ	・ 10mm
荷重検出器	・ C2M1 2ton
周辺機器	・ データロガ

本試験装置では試料上面の変位を制御する試験と制御しない試験を行うことが可能である。変位の制御はダイヤルゲージを用いて実施し、膨潤により変位が所定の値に達すれば、変位を 0 に戻すという作業を行う。ここでは、変位制御を行わずに試験を実施し、圧力の測定を行った。

試験ケース表 3-13 に示す。試料は 3.2.1 節において実施した透水試験と同じとし、試験水が蒸留水の場合と人工海水の場合の両者について試験を行った。また、繰り返し数は各ケース 2 回とした。図 3-58 には試料のセット状況を示す。

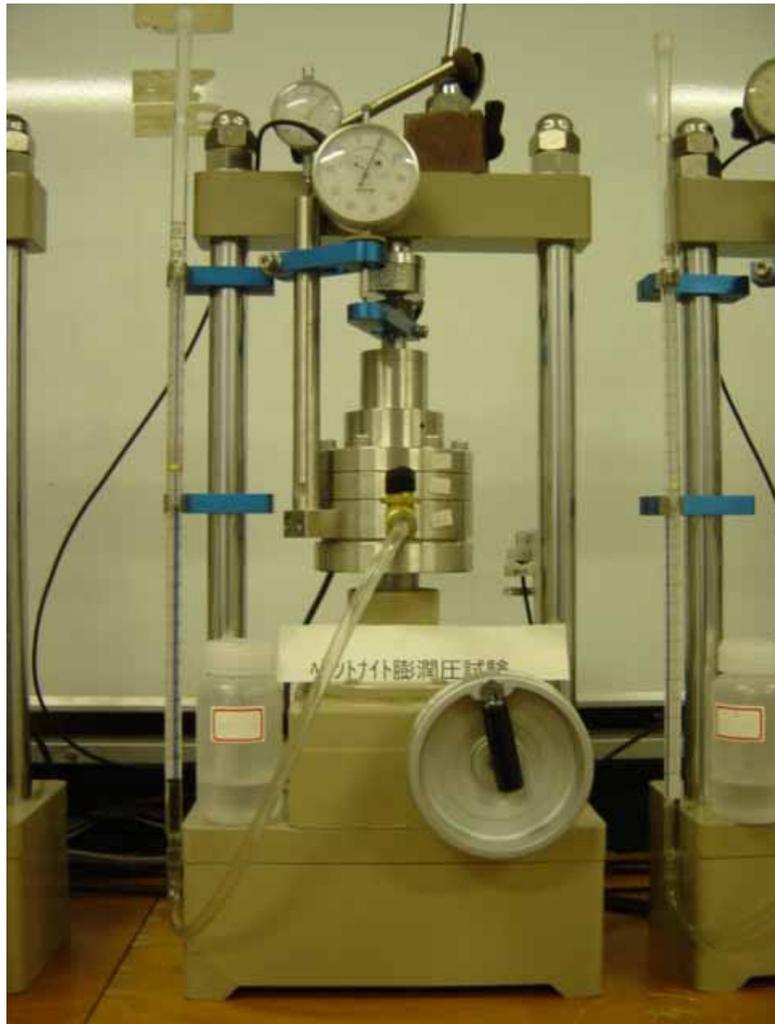
表 3-13 膨潤圧試験ケース

ケース	試料	試験水	試験数
SW-1-1	ペレット	蒸留水	2
SW-2-1	ペレット+クニゲル V1	蒸留水	2
SW-3-1	クニゲル V1	蒸留水	2
SW-1-2	ペレット	人工海水	2
SW-2-2	ペレット+クニゲル V1	人工海水	2
SW-3-2	クニゲル V1	人工海水	2

試験結果を図 3-59 および図 3-60 に示す。図 3-59 は蒸留水を用いた膨潤試験の結果、図 3-60 は人工海水を用いた場合の膨潤試験の結果である。図 3-59 からは、試料の形態に関わらず、最終的な膨潤圧の値はセル内の平均密度に対応しているものと考えられる。挙動的には、ペレットのみの充填の場合、初期に値のピークが出た後に、一旦値が低下するが、再度上昇に転じ、定常値

に達しているというような変遷を辿っている。一旦値が低下する理由としては、浸潤により膨潤したペレット表面が隙間を塞ぐことにより使われるとともに表面が軟らかくなることから、硬いペレット同士のツッパリが無くなり、セル内の形状に合わせてペレットが変形していくため（なじみによる低下）であると考えられる。また、人工海水を用いた場合は、粉末のクニゲル V1 でペレット間の隙間を充填し、初期の密度が比較的高い SW-2-2 のケースのみ圧力が計測されており、他の 2 ケースではほとんど圧力が発生していない。これは、人工海水を用いた場合、粉末ベントナイトでは膨潤しないためである。圧縮したベントナイトの場合、人工海水を用いても膨潤圧が発生することは分かっており³⁻³⁾、そのため、SW-2-2 のケースでは圧力が発生している。圧縮ベントナイトの場合では人工海水を用いても膨潤圧が発生することから、ペレットそのものは膨潤しているものと考えられる。しかしながら、充填材としてペレットを用いた場合、その膨潤はペレット間の隙間を充填することに費やされ、外部には膨潤圧として発生しにくいものと考えられる。SW-1-2 において、初期に圧力が上昇しているのは、ペレット同士のツッパリの結果であり、その後は、膨潤した部分が隙間の充填に費やされるために圧力は減少していったと考えられる。

図 3-61(b)には各試験の結果得られた膨潤圧の値と供試体内の乾燥密度の関係を示す。(a)には、同一の試験ケースにおいて得られた乾燥密度と透水係数の関係を示す。同図より、高い膨潤圧が発生するにつれて得られる透水係数が小さくなっていることが分かる。また、図 3-62～図 3-64 には、試験終了後の供試体の状況を示す。図 3-62 は蒸留水を用いた試験、図 3-63 および図 3-64 は人工海水を用いた試験の結果である。蒸留水を用いた試験の場合、ペレットのみの場合はペレットの跡が斑のように残っているが比較的均質になっていることが分かる。一方、人工海水の場合は、ペレットのみの場合、まだペレットが形として残っていることが分かる。このことから十分に膨潤していないことが分かる。



(a) 試験装置



(b) 全体図

図 3-57 膨潤圧試験装置



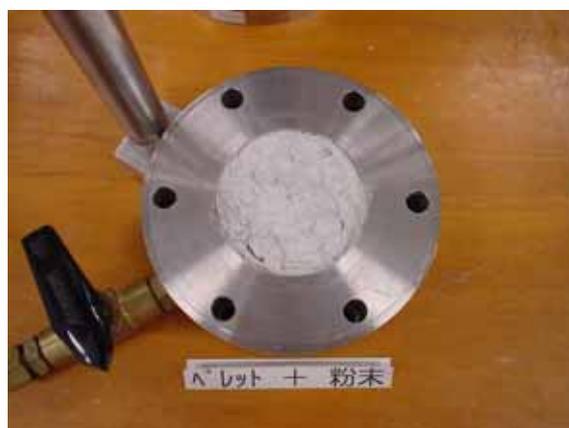
(a) SW-1-1(1)



(b) SW-1-1(2)



(c) SW-2-1(1)



(d) SW-2-1(2)

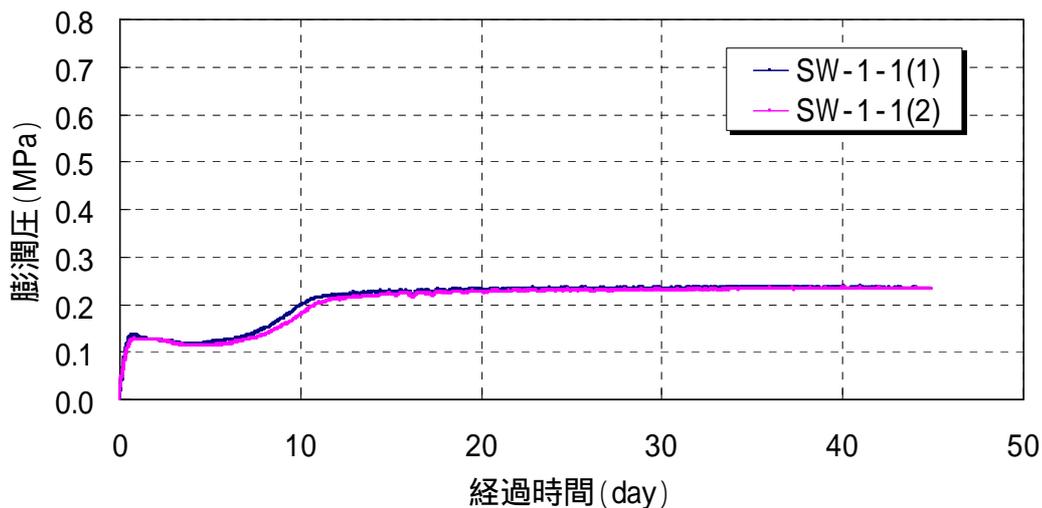


(e) SW-3-1(1)

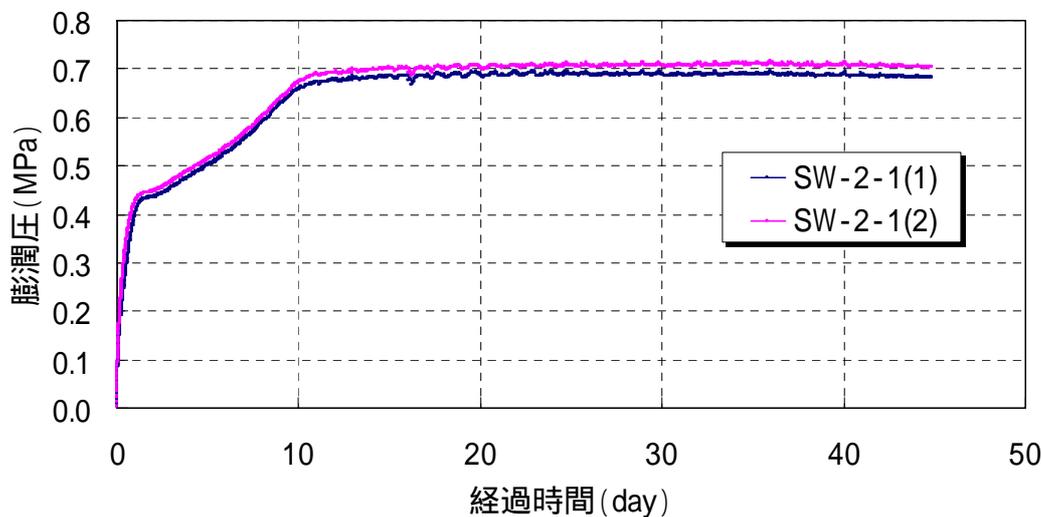


(f) SW-3-1(2)

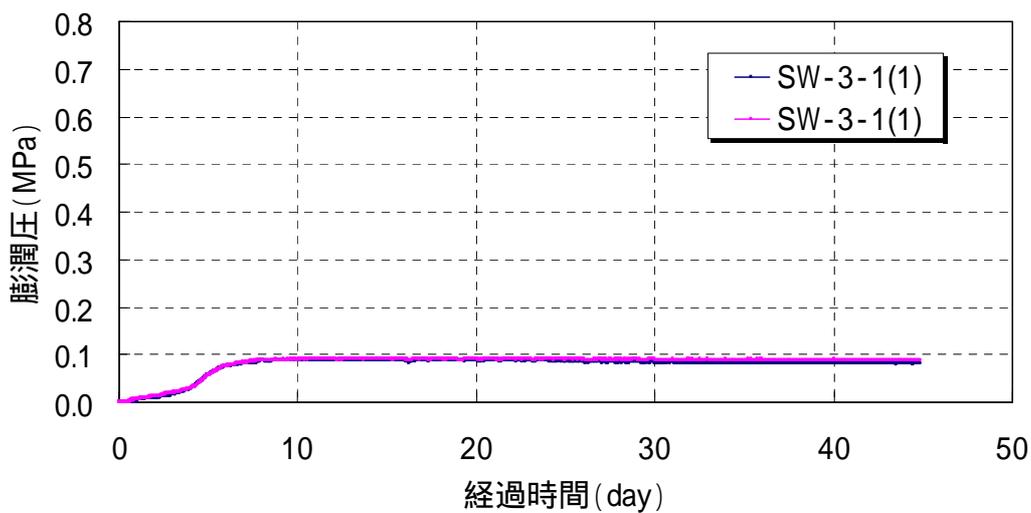
図 3-58 試験前試料のセット状況（膨潤圧試験）



(a) ペレットのみ

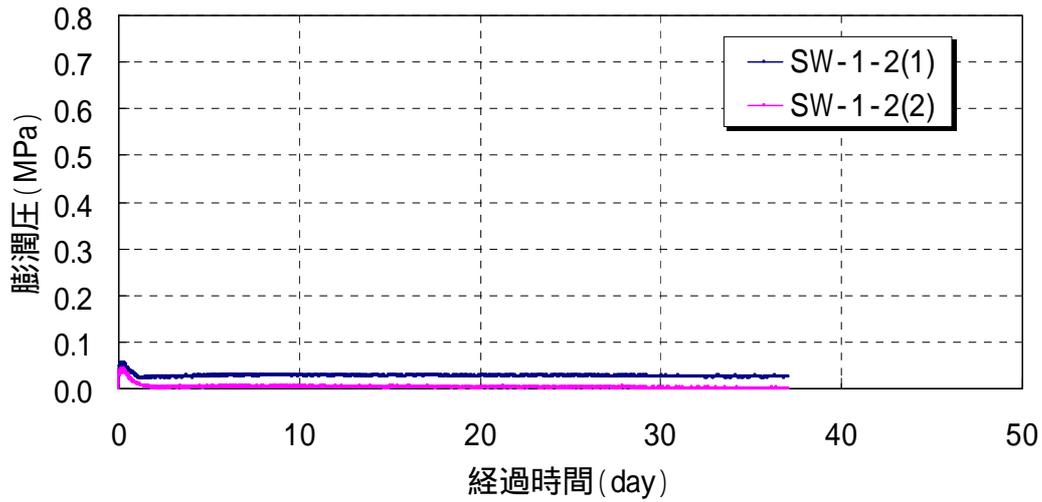


(b) ペレット+クニゲル V1

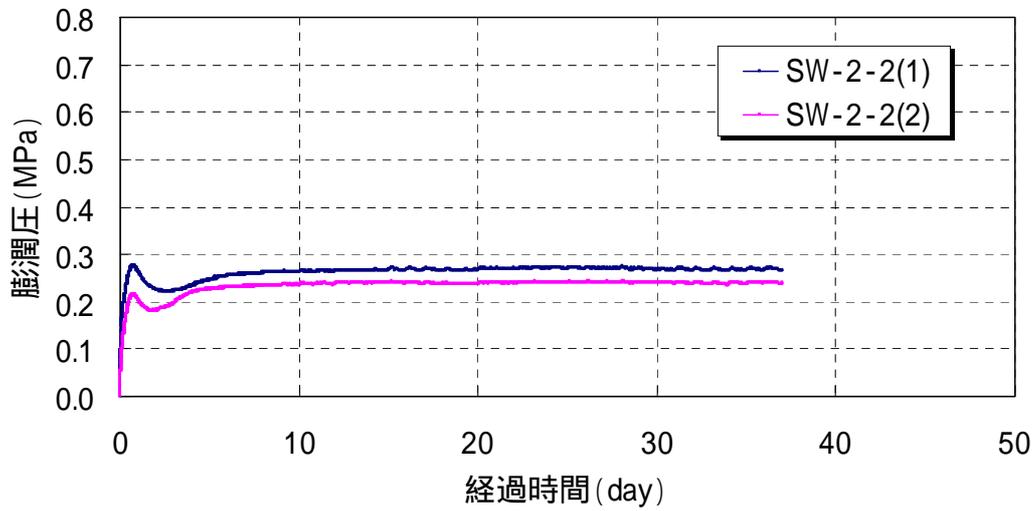


(c) クニゲル V1 のみ

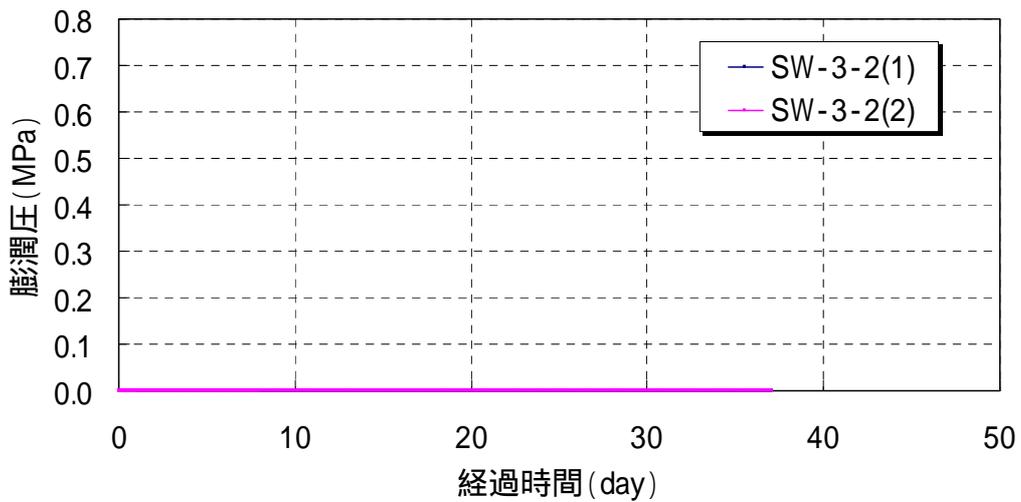
図 3-59 膨潤圧試験結果 (蒸留水)



(a) ペレットのみ

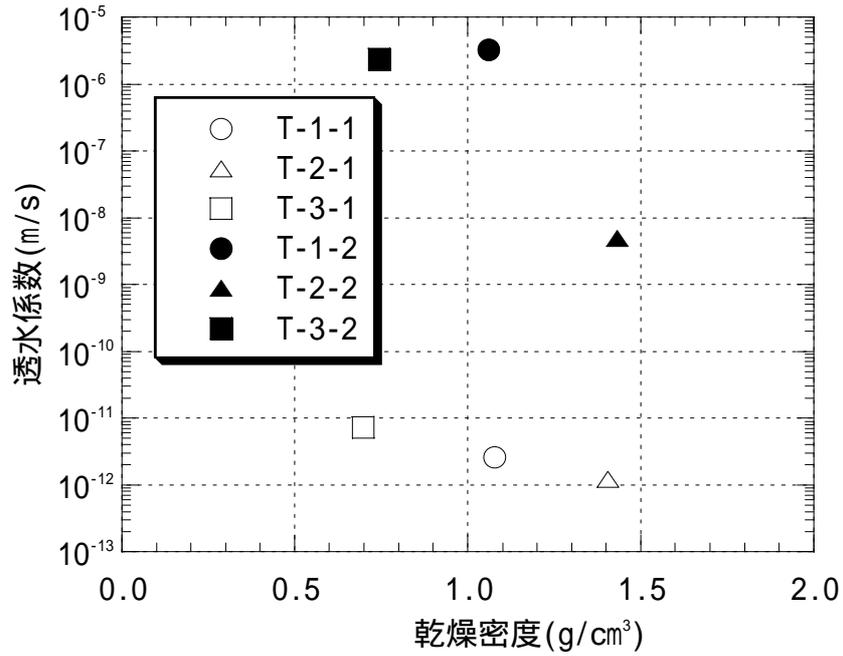


(b) ペレット+クニゲル V1

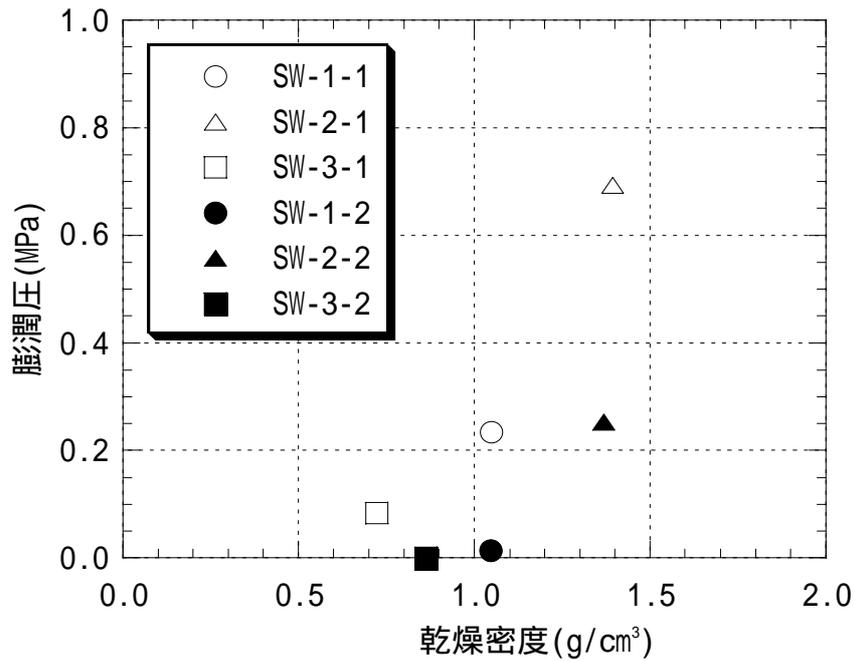


(c) クニゲル V1 のみ

図 3-60 膨潤圧試験結果 (人工海水)



(a) 透水係数



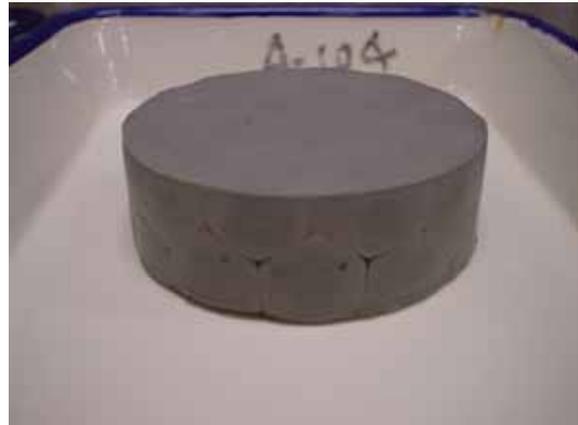
(b) 膨潤圧

図 3-61 透水係数および膨潤圧に及ぼす乾燥密度・試験水の影響比較

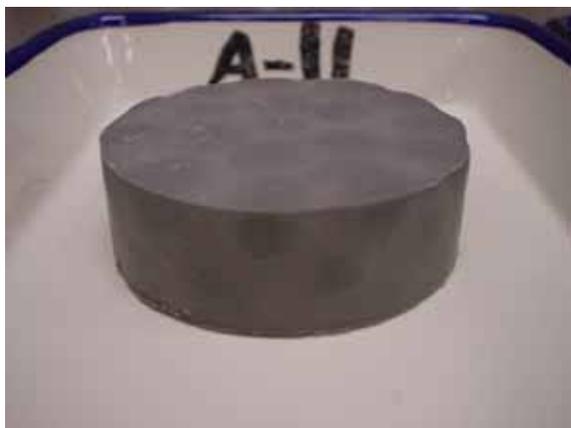
- T-1-1・SW-1-1；試験水：蒸留水、 試料： \wedge レットのみ
- T-2-1・SW-2-1；試験水：蒸留水、 試料： \wedge レット+粉末
- T-3-1・SW-3-1；試験水：蒸留水、 試料：粉末のみ
- T-1-2・SW-1-2；試験水：人工海水、 試料： \wedge レットのみ
- T-2-2・SW-2-2；試験水：人工海水、 試料： \wedge レット+粉末
- T-3-2・SW-3-2；試験水：人工海水、 試料：粉末のみ



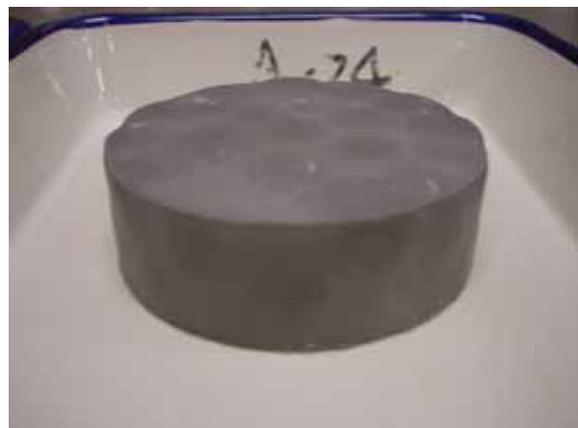
(a) SW-1-1(1)



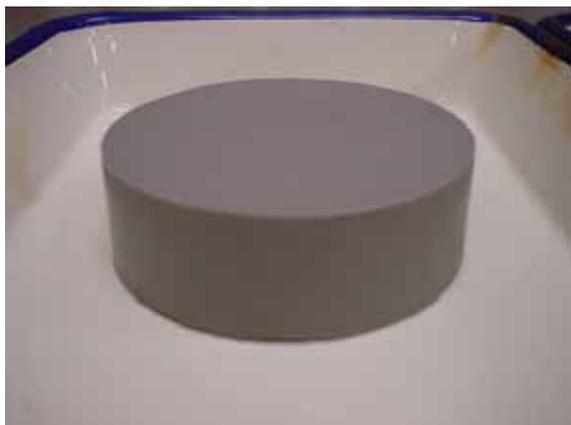
(b) SW-1-1(2)



(c) SW-2-1(1)



(d) SW-2-1(2)



(e) SW-3-1(1)



(f) SW-3-1(2)

図 3-62 膨潤圧試験後の供試体の状況（蒸留水を用いた膨潤圧試験）

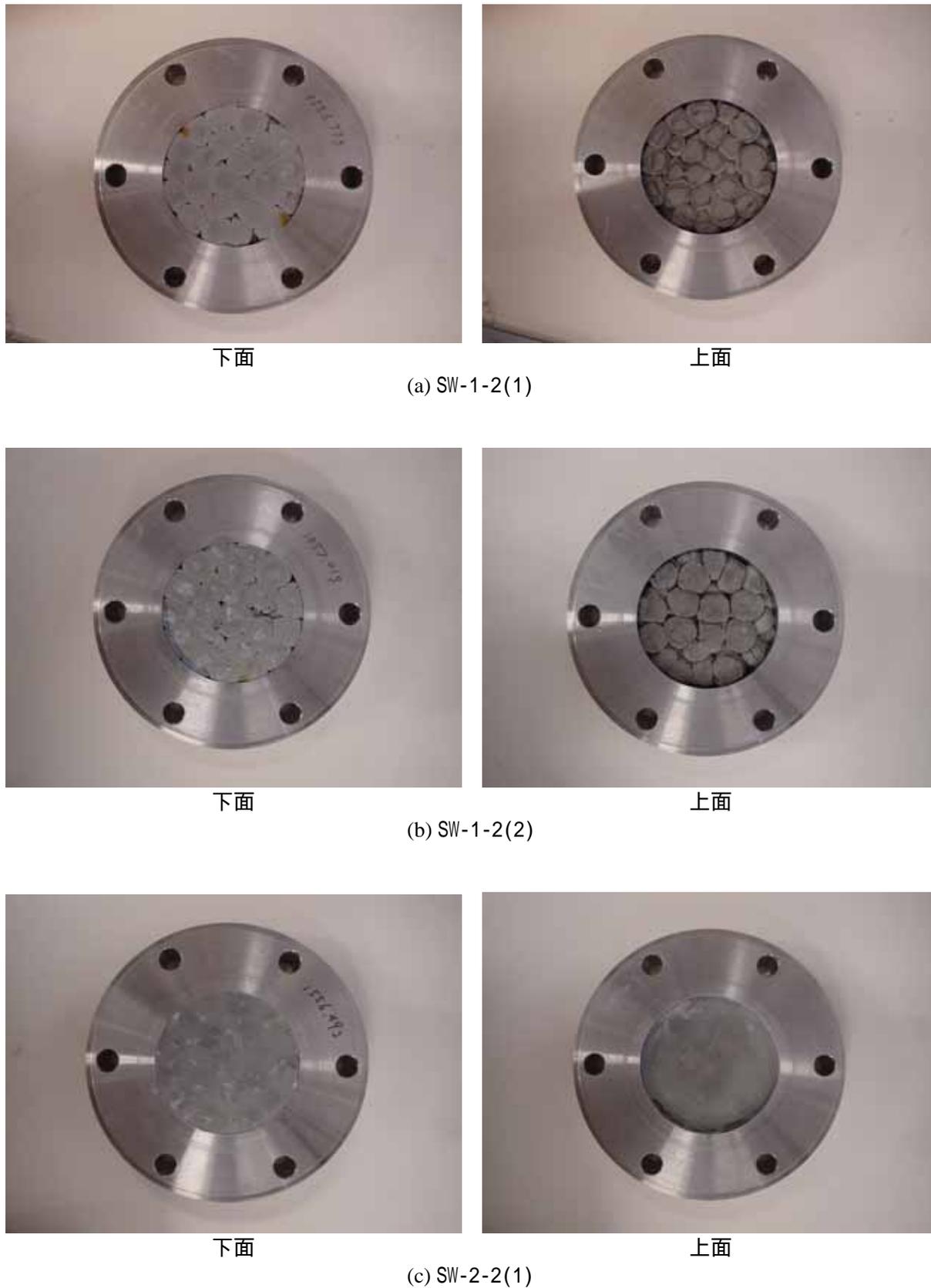


図 3-63 膨潤圧試験後の供試体（容器内）の状況（人工海水を用いた膨潤圧試験）



下面



上面

(d) SW-2-2(2)



下面



上面

(e) SW-3-2(1)



下面



上面

(f) SW-3-2(2)

図 3-63 膨潤圧試験後の供試体（容器内）の状況（人工海水を用いた膨潤圧試験）（続き）



(a) SW-1-2(1)



(b) SW-1-2(2)



(c) SW-2-2(1)



(d) SW-2-2(2)



(e) SW-3-2(1)



(f) SW-3-2(2)

図 3-64 膨潤圧試験後の供試体の状況（人工海水を用いた膨潤圧試験）

3.4 熱伝導率測定

ベントナイトペレットを隙間充填材として使用した際の熱伝導性を確認することを目的に熱伝導率測定を実施した。測定方法としては非定常熱線法《transient hot wire method》を用いた。

物体中に温度勾配が存在するときの熱の伝導は次式で示される。

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3-1)$$

ここに、 q ：単位時間、単位面積当たりの熱流量（W/m²）、 λ ：熱伝導率（W/m）、 T ：温度（℃）、 x ：熱流方向の座標（m）である。

式(3-1)は、温度勾配が生じていれば、定常、非定常を問わず成立するが、非定常状態において、温度勾配と熱流量を同時に測定することは非常に難しい。したがって、式(3-1)によって熱伝導率を測定するときは、定常状態に試料を置き、その時の熱流束を熱流束計などによって計る「定常熱流法」による。

しかし、ベントナイト材料の熱伝導率測定の場合は、熱伝導率の含水比依存性が大きく、材料内に含まれる水分が温度勾配によって移動する現象を考慮すると、定常法は不相当となる。そこで、次式の非定常熱伝導方程式に基づく、「非定常熱流法」を用いることになる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (3-2)$$

ここに、 t ：時間（sec）、 α ：熱拡散率（m²/s）である。

熱拡散率は、熱伝導率 λ （W/m）を比熱 C （kJ/kg）および密度 ρ （kg/m³）で除したものの $\alpha = \lambda / \rho C$ であり、温度伝導率とも呼ばれる。

式(3-2)は、時間 t の十分大きい値に対しては、近似的に次式で示される。

$$T = q / (4 \lambda) [d + \ln(t_2 - t_1)] \quad (3-3)$$

式(3-3)は、温度上昇過程に対応し、 T ：温度上昇、 $t_2 - t_1$ ：加熱時間、 d ：定数である。

熱伝導率の「非定常熱流法」は、式(3-3)に従って一定の時間、試料に熱流を与え、その間の温度上昇から熱伝導率を求めることになる。

以下には、測定方法の概要を示す。

「非定常熱流法」による熱伝導率測定は、「非定常熱線法《transient hot wire method》」とも呼ばれる。ここでは、この応用としての「比較法による非定常熱線法」（機器の名称を用いて「QTM法」と呼ばれる）を採用した。本手法は、核燃料サイクル開発機構における「第2次取りまとめ」においても使用された手法である³⁻³⁾。

QTM法は熱線を試料中心に試料と密着するように設置し、軸対称の発熱による温度上昇を熱電対によって測定するものである。土質材料のように、水分の温度勾配による移動が生じる材料に対しては、優れた測定法である。「QTM法」の概略を図3-65に示す。QTM測定器は、あらかじめ

熱伝導率が既知の比較物質に、熱線と熱電対が取り付けられひとつのプローブを構成している。このプローブを測定試料に押し当てて、熱線の発熱による温度上昇から、熱伝導率を計算するものである。「QTM法」は、異種の物質との境界面が測定面となるため測定の誤差要因が増す。また、試料の測定面の粗さの影響を受けるなどの問題点もある。しかし、緩衝材ブロックのような、軟岩に近い強度を持つ含水物質の熱伝導率の測定手法としては優れたものである。

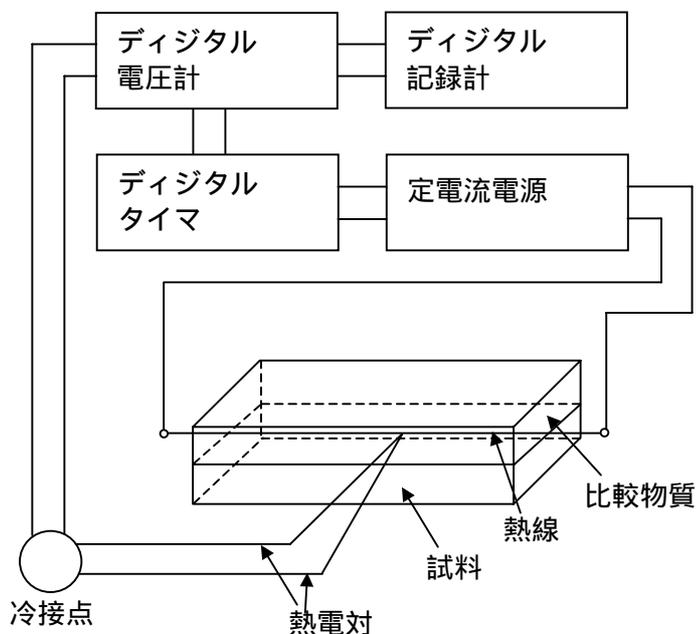


図 3-65 QTM 法

各材料に対して計測を実施した。図 3-66 に計測の様子を示す。材料は図 3-66 に示すようにバットに敷き詰めた状態で計測を行った。ベントナイトペレットを充填した場合のように空隙の大きい媒体においては熱源の接触具合により計測値にばらつきが出てくるものと考えられるため数回計測を行った。計測結果を表 3-14 に示す。計測は計 9 回実施し、その平均は 0.280W/m であった。また、別途、かさ乾燥密度を測定し、ベントナイトペレットを自然充填した際のかさ乾燥密度およびペレットの含水比と得られた熱伝導率の関係を整理した。また、異なるベントナイトペレットを対象に実施された熱物性試験の結果³⁻⁴⁾を合わせて比較を行った。結果を図 3-67 および図 3-68 に示す。図 3-67 はかさ乾燥密度と熱伝導率の関係、図 3-68 は含水比と熱伝導率の関係である。今回使用しているベントナイトペレットは図に示す他のペレットの内 Tablet 型と呼ばれるものに近いものである。RWMC により製作された Tablet 型のペレットに比べ、今回使用したペレットはかさ乾燥密度は高くなっている。すなわち、充填性が高くなっており、その結果、熱伝導率も大きくなっている。



(a) 使用機器 (Shotherm QTM)



(b) プロブによる測定状況

図 3-66 熱伝導率測定の様子

表 3-14 熱伝導率測定結果

測定回数	熱伝導率 (W/m)	測定温度 ()
1	0.237	31
2	0.298	30
3	0.313	30
4	0.320	29
5	0.286	30
6	0.258	32
7	0.298	31
8	0.258	31
9	0.252	32
(平均値)	0.280	31

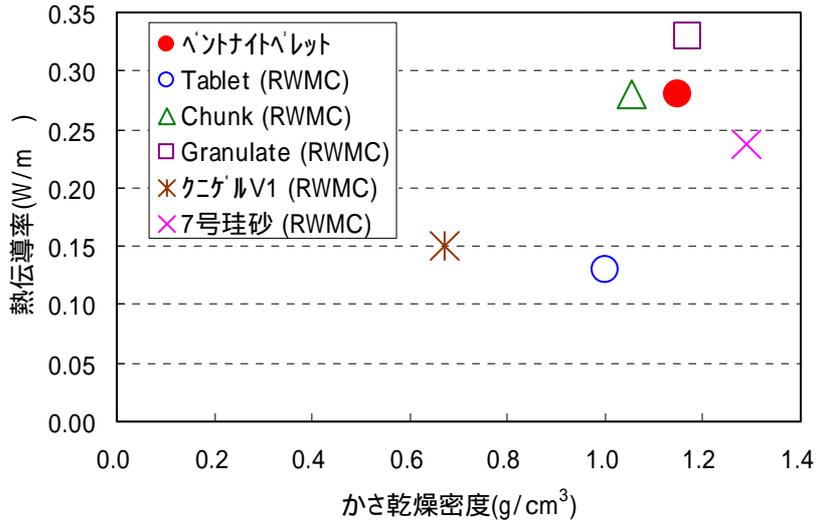


図 3-67 各種材料のかさ乾燥密度と熱伝導率の関係

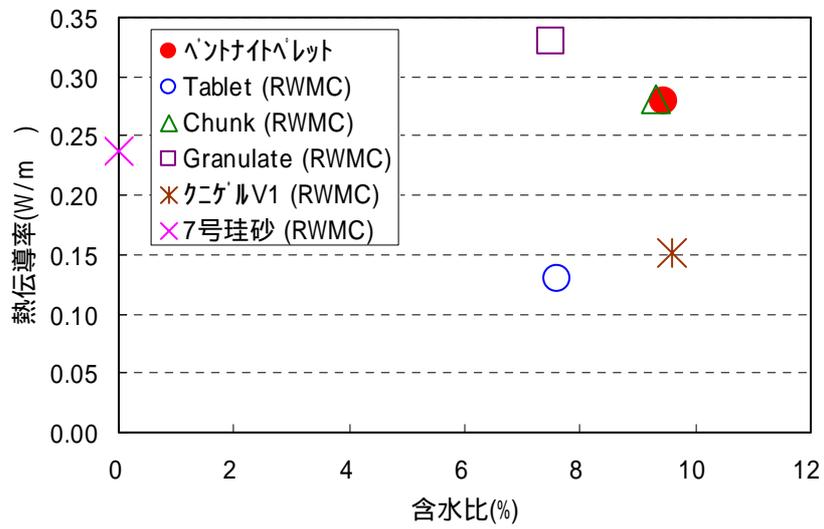


図 3-68 各種材料の含水比と熱伝導率の関係

3.5 まとめ

ベントナイトペレットの充填性、止水性および熱特性に関する検討を行った。その結果、隙間が楔形のような形状であっても、浸透水が蒸留水の場合は十分な性能が得られることが分かった。隙間が楔形のような形状の場合、ペレット充填時には隙間の鋭角部にはペレットは充填できていない。しかしながら、地下水が浸潤し、ペレットが膨潤していくことにより鋭角部の隙間にはベントナイトが充填されていき、それに伴い、止水性が発揮されていく。膨潤初期は、鋭角部におけるベントナイトの密度は低い、時間の経過とともに密度は上昇していき、隙間全体において平均化されていくものと推察される。また、浸潤水が蒸留水ではなく、人工海水である場合のベントナイトペレットの充填性および止水性に関する検討も行った。その結果、媒体が人工海水になることにより止水性がかなり低下することが分かった。これは、人工海水が媒体となることによってベントナイト自体の膨潤性能が無くなってしまふことによるものである。ベントナイトのみの場合で初期の空隙が大きい場合や、ベントナイト粉末のみで初期の密度が低い場合が特に止水性の低下が激しいという結果となった。したがって、地下水の組成によっては、隙間の処理としてベントナイトペレットやベントナイト粉末のみでは十分な止水性能は発揮されないと考えられる。しかしながら、ペレット充填時に同時に蒸留水を浸潤させ、先に蒸留水でベントナイトペレットを膨潤させておくことにより、その後、人工海水が浸潤してきても十分な止水性が発揮できることが分かった。また、ブロックとの混材下での試験結果から、ブロックの膨潤が隙間充填に寄与することが確認できた。この傾向は時間の経過に伴い大きくなる。

ペレット熱特性に関しては、QTM法により、かさ密度での熱伝導率の値を求めた。この結果は、他の製法によるペレットのばらつきの範囲内であった。

3章 参考文献

- 3-1) 株式会社 間組：“人工バリアにおける緩衝材挙動評価研究”、核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書、JNC TJ8400 2001-020 (2001)
- 3-2) 株式会社 間組：“実規模原位置試験の連成挙動評価研究”、核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書、JNC TJ8400 2002-023 (2002)
- 3-3) 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)
- 3-4) 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 - 遠隔操作高度化調査 - (2/2)”、pp.3-479 ~ 3-533 (2002)

4. 緩衝材の力学挙動の詳細検討

4.1 概要

本章では、熱-水-応力連成挙動の中で、定量的評価が困難であった膨潤応力を理論的にモデル化するために、物理化学的な意味が明確な小峯の提案している膨潤評価式^{4-1) 4-2)}を取り入れた熱-水-応力連成モデルの構築を検討する。膨潤応力は主にベントナイトの化学的性質に起因して発生することから、膨潤応力の定量的評価は緩衝材の化学的緩衝性や核種移行遅延性などの緩衝材に要求される多くの化学的性質とも深く関連し、緩衝材の性能評価の上でも非常に重要な役割を果たすと考えられる。

膨潤評価式は完全に飽和した状態での膨潤応力を定義するものであるが、廃棄体定置後数百年の間は、緩衝材は不飽和状態である。緩衝材が飽和に至る過程での膨潤応力の評価は、廃棄体定置直後の自己シール性、すなわち初期状態で存在する緩衝材内部の間隙や緩衝材と岩盤の隙間の閉鎖性能において極めて重要である。そのような背景から、本論では不飽和状態での膨潤応力のモデルを構築し、膨潤評価式と組み合わせることで、膨潤評価式の不飽和領域への拡張を行った。さらに、従来の熱-水-応力連成モデルに不飽和領域へ拡張した膨潤評価式を導入した。

また、提案したモデルを離散化した有限要素解析コードを構築し、要素試験の膨潤試験と比較した。

4.2 膨潤応力のモデル化

4.2.1 膨潤評価式の概要

緩衝材および坑道の埋め戻し材に対する膨潤応力の推定モデルは、小峯により精力的に行われている。ここでは、小峯の膨潤評価式^{4-1) 4-2)}の概要を示す。

ベントナイトは緩衝材の有力な候補材料であるが、経済的な観点等から、実際にはベントナイトのみではなく、比較的安価な砂や現地発生土をベントナイトに混合して利用されると考えられている⁴⁻³⁾。小峯の提案している膨潤評価式は、Gouy-Chapmanの拡散二重層理論およびvan der Waals力の考え方に、提案した最大膨潤率とモンモリロナイトの膨潤体積ひずみの関係式および膨潤体積ひずみと二粘土粒子間距離の関係式を導入したモデルで、ベントナイト配合比だけでなく、ベントナイトに含有される陽イオンの種類や組成を考慮することが可能である。また、この式の中には周辺環境条件の変化を考慮してベントナイト中のイオン濃度を補正する手法、およびベントナイトの比表面積の算定手法も含んでいる。ベントナイトの主要な交換性陽イオンである Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} に対して、それぞれの交換性陽イオンに起因する粘土結晶層間に作用する拡散二重層理論による反発力とvan der Waals力による引力を算出し、各イオンの交換容量を用いて加重平均し、緩衝材または埋め戻し材の膨潤応力を決定する。小峯による膨潤評価式は次のとおりである。

$$\sigma_{sw\max} = \frac{1}{CEC} \sum_{i=Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}} [EXC_i \{(f_r)_i - (f_a)_i\}] \text{ [kPa]} \text{ (ただし、}\sigma_{sw\max}\text{ は反発を正とする)} \text{ (4-1)}$$

ここに、 $\sigma_{sw\max}$ はベントナイトを含有する緩衝材・埋め戻し材の発生する圧力(最大膨潤応力と定義する)[kPa]で、飽和時に最大の圧力を発生することから、下付で max と示している。また、CEC は陽イオン交換容量[mequiv./g]、 i は Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} のいずれかの交換性陽イオン、 EXC_i は交換性陽イオン i の交換容量[mequiv./g]、 $(f_r)_i$ は交換性陽イオン i に起因する反発力[kPa]、 $(f_a)_i$ は交換性陽イオン i に起因する引力[kPa]である。反発力 $(f_r)_i$ は拡散二重層理論より、以下のように求められる。

$$(f_r)_i = 2nkT(\cosh u_i - 1) \times 10^{-3} \text{ [kPa]} \quad (4-2)$$

ただし、

$$u_i = 8 \tanh^{-1} \left[\exp(-\kappa_i d_i) \tanh \left(\frac{z_i}{4} \right) \right]$$

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{2n\nu_i^2 e'^2}{\epsilon kT}}$$

$$z_i = 2 \sinh^{-1} \left(96.5 \times \frac{EXC_i}{S} \sqrt{\frac{1}{8\epsilon n kT}} \right)$$

である。ここで、 n は緩衝材・埋め戻し材中の間隙水の補正イオン濃度[個数/ m^3]、 k は Boltzmann 定数 ($=1.38 \times 10^{-23} J/K$)、 T は絶対温度[K]である。 u_i 、 κ_i 、 z_i は式の誘導過程で必要となるパラメータで、 u_i は二粒子間中央部の、 z_i は粒子表面部の電位に関するパラメータである。 κ_i は Debye-Huckel のパラメータと呼ばれ、拡散二重層理論における静電ポテンシャル分布が影響する範囲に関する指標である。 d_i は交換性陽イオン i に対する結晶層間距離の $1/2$ [m]、 ν_i は交換性陽イオン i の価数、 e' は電子電荷 ($=1.602 \times 10^{-19} C$)、 ϵ は間隙水の誘電率 [$C^2 J^{-1} m^{-1}$]、 S はベントナイトの比表面積 [m^2/g] である。

一方、引力 $(f_a)_i$ は van der Waals 力であり、次式で与えられる。

$$(f_a)_i = \frac{A_h}{24\pi} \left[\frac{1}{d_i^3} + \frac{1}{(d_i + t)^3} - \frac{2}{(d_i + t/2)^3} \right] \times 10^{-3} \text{ [kPa]} \quad (4-3)$$

ここで、 A_h は Hamaker 定数 (モンモリロナイトの場合、 $2.2 \times 10^{-20} J$)、 t は粘土結晶層厚 (モンモリロナイトの場合、 $9.60 \times 10^{-10} m$) である。

さらに、モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ϵ_{sv}^* を導入すると、結晶層間距離に関するパラメータ d_i は以下のように表される。

$$d_i = \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100} \left\{ t + (R_{ion})_i \right\} + (R_{ion})_i \quad [\text{m}] \quad (4-4)$$

ここで、 R_{ion} はモンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン i の非水和半径[m]である。膨潤体積ひずみ ε_{sv}^* は以下のように与えられる。

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{s\max}}{100} (e_0 + 1) \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 \quad [\%] \quad (4-5)$$

ただし、

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad [\text{Mg/m}^3]$$

ここで、 e_0 は緩衝材・埋め戻し材の初期間隙比、 $\varepsilon_{s\max}$ は緩衝材・埋め戻し材の最大膨潤率[%]、 C_m はベントナイトのモンモリロナイト含有率[%]、 ρ_m はモンモリロナイトの土粒子密度[Mg/m³]、 ρ_{nm} はモンモリロナイト以外の土粒子密度[Mg/m³]、 ρ_{sand} は砂粒子密度[Mg/m³]、 α はベントナイト配合率[%]である。

また、緩衝材・埋め戻し材中の補正イオン濃度 n は、以下のように表す。

$$n = \frac{n_0 (\text{mol/m}^3) \times N_A}{1 + \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100}} \quad [\text{個数/m}^3] \quad (4-6)$$

ただし、 n_0 は緩衝材・埋め戻し材中の間隙水のイオン濃度[mol/m³]、 N_A はアボガドロ数 (=6.023 × 10²³) である。

ベントナイトの比表面積は、以下のように与える。

$$S = \frac{C_m}{100} S_m + \left(1 - \frac{C_m}{100} \right) S_{nm} \quad [\text{m}^2/\text{g}] \quad (4-7)$$

ここで、 S_m はモンモリロナイトの比表面積[m²/g]、 S_{nm} はモンモリロナイト以外の鉱物の比表面積[m²/g]である。

膨潤評価式で必要となるパラメータ・物理定数は、材料固有のパラメータと周辺環境に係わるパラメータおよび物理定数に分類される。表 4-1～4-3 に膨潤評価式に用いるパラメータの設定値を示す。ただし、各パラメータは山形県月布産のベントナイト（クニミネ工業製、クニゲル V1）と三河ケイ砂 6 号に対する値である。これらの値を用い、最大膨潤率 ε_{smax} 、初期乾燥密度 ρ_{d0} およびベントナイト配合比 α を与えることで、最大膨潤応力を算定することが可能となる。ところで、膨潤評価式(2-1)を次節で述べる熱-水-応力連成モデルに適用する場合、これらのパラメータのうち、連成モデルとの受け渡しが行われるものは、温度および初期乾燥密度となる。連成モデルの中で変形が生じるが、変形に伴う乾燥密度の変化を膨潤評価式に反映することで、膨潤評価式との相互作用を表現できる。ただし、地下水組成の影響などを考慮する場合や、陽イオン交換が行われてベントナイトの変質を考慮する場合は、イオン濃度や交換性イオン量なども受け渡さなければならない。しかし、現状ではそのような地化学的現象に対するデータが不十分であることから、本研究では地化学現象と膨潤評価式の相互作用は行わないこととする。図 4-1 はベントナイト配合比 100%の時の初期乾燥密度と最大膨潤応力の関係を各温度で示したものである。乾燥密度の上昇と共に膨潤応力も増大し、その傾向は特に乾燥密度が大きい範囲で顕著になっている。また、温度が高いほど膨潤応力も大きくなる。

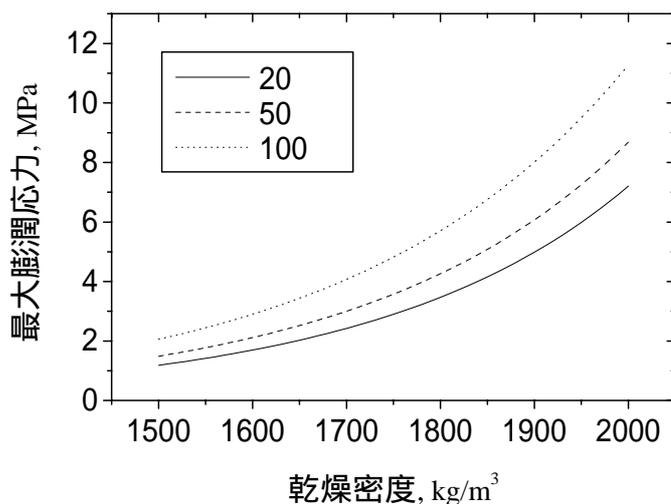


図 4-1 ベントナイトクニゲル V1 の最大膨潤応力と乾燥密度の関係

表 4-1 膨潤評価式における材料パラメータの設定 (クニゲル V1 相当)⁴⁻⁴⁾

モンモリロナイトの土粒子密度 ρ_m	2.77 Mg/m ³
モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 ρ_{nm}	2.81 Mg/m ³
砂の土粒子密度 ρ_{sand}	2.66 Mg/m ³
モンモリロナイトの比表面積 S_m	810 m ² /g
モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積 S_{nm}	0 m ² /g
ベントナイトのモンモリロナイト含有率 C_m	48 %
陽イオン交換容量 CEC	0.732 mequiv./g
交換性 Na イオン量 EXC_{Na}^+	0.405 mequiv./g
交換性 Ca イオン量 EXC_{Ca}^{2+}	0.287 mequiv./g
交換性 K イオン量 EXC_K^+	0.009 mequiv./g
交換性 Mg イオン量 EXC_{Mg}^{2+}	0.030 mequiv./g
交換性 Na イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_{Na}$	0.098 nm
交換性 Ca イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_{Ca}$	0.1115 nm
交換性 K イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_K$	0.133 nm
交換性 Mg イオンの非水和イオン半径 $(R_{ion})_{Mg}$	0.0825 nm
交換性 Na イオンの価数 ν_{Na}	1
交換性 Ca イオンの価数 ν_{Ca}	2
交換性 K イオンの価数 ν_K	1
交換性 Mg イオンの価数 ν_{Mg}	2
モンモリロナイト結晶層厚 t	9.60×10^{-10} m

表 4-2 膨潤評価式における物理定数

電子電荷 e'	1.602×10^{-19} C
Boltzmann 定数 k	1.38×10^{-23} J/K
Hamaker 定数 A_h	2.2×10^{-20} J
Avogadro's 数 N_A	6.023×10^{23}

表 4-3 膨潤評価式における環境条件パラメータ

間隙水の誘電率 ε	$80 \times 8.8542 \times 10^{-12}$ C ² /(J·m)
温度 T	連成モデルに依存
緩衝材・埋め戻し材中の間隙水のイオン濃度 n_0	40 ~ 50 mol/m ³

4.2.2 不飽和領域における膨潤応力

小峯の提案している膨潤評価式は、完全に飽和した状態を想定して、その時点での拘束条件、緩衝条件、材料条件を設定することにより、膨潤応力や膨潤変形を定量的に計算することができる。しかし、再冠水時の緩衝材や埋め戻し材の挙動を評価するためには、この膨潤評価式に対し、さらに飽和度の変化が考慮できるように拡張する必要がある。

不飽和領域における膨潤の扱いは、モンモリロナイトの層間のポテンシャルの低下量を膨潤圧とし、膨潤圧の一部が膨潤応力として外部に作用すると仮定される^{4,5)}。

一般に、平衡状態にある土壌中の系に対して周囲から dw の仕事をされ、 dq の熱量を吸収し、再び平衡状態に至った時、系の全エネルギー(内部エネルギー)の増加 du は、熱力学の第1法則より、

$$du = dq + dw \quad (4-8)$$

となる。周囲と成分 i の交換がある時、仕事 dw は、

$$dw = -Pdv + \sigma dA + \sum \mu_i dn_i \quad (4-9)$$

となる。ここで、 P は外圧、 dv は体積変化、 σ は水の表面張力、 dA は水 - 空気界面の面積変化、 μ_i は i 成分の化学ポテンシャル、 dn_i は i 成分のモル変化である。

また、この変化が可逆的であると仮定すると、熱量 dq は熱力学第2法則から、以下のように表現することができる。

$$dq = Tds \quad (4-10)$$

ここで、 T は絶対温度、 ds はエントロピー変化量である。

式(4-9)、(4-10)を式(4-8)に代入すると、以下ようになる。

$$du = Tds - Pds - Pdv + \sigma dA + \sum \mu_i dn_i \quad (4-11)$$

ここで、次式で定義されるギブスの自由エネルギー G を導入する。

$$G = u - Ts + Pv \quad (4-12)$$

この微分を取ると、

$$dG = du - Tds - sdT + Pdv + vdp \quad (4-13)$$

となり、ここに、式(4-11)の du を代入すると、

$$dG = -sdT + vdp + \sigma dA + \sum \mu_i dn_i \quad (4-14)$$

となる。

ここで、等温つまり $dT=0$ 、表面積も変化しない、つまり $dA=0$ 、さらに成分 i の出入りもないとき、次のようになる。

$$dG = vdp \quad (4-16)$$

通常、土中水は、間隙の中で水蒸気と平衡している。すなわち、水の化学ポテンシャルと水蒸気の化学ポテンシャルは等しい状態にある。そのため、水の化学ポテンシャルは、この水蒸気の化学ポテンシャルを測定することで知ることができる。すなわち、水 1 モル当たり、平衡している水蒸気分圧から^{4,6)}、

$$\Delta G = \int_{p_0}^p vdp = \int_{p_0}^p \frac{RT}{p} dp = -RT \ln \frac{p_0}{p} \quad (4-17)$$

ここで、 ΔG は温度、表面積、成分 i の量を固定した条件でのギブスの自由エネルギー、 p は水蒸気分圧、 p_0 は飽和水蒸気圧、 p/p_0 は相対湿度、 R は水蒸気に対する気体定数で $R=47.06\text{m/K}$ である。

一方、地盤工学で一般的に用いられる、土の全ポテンシャル ψ は、以下のように表される。

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_g \quad (4-18)$$

ここで、 ψ_m はマトリックポテンシャル(圧ポテンシャル)、 ψ_o はオスモティックポテンシャル(浸透ポテンシャル)、 ψ_g は重力ポテンシャルである。マトリックポテンシャルは、大気圧以上の静水圧下にある場合は正となり、大気圧以下にある場合は負となる。オスモティックポテンシャルは、溶質の存在に依存するポテンシャルであり、以下の式が成立する^{4,7)}。

$$\psi_m + \psi_o = RT \ln \frac{p}{p_0} \quad (4-19)$$

蒸気圧法によるサクシヨンの測定はこの原理を利用している。

ところで、マトリックポテンシャルと重力ポテンシャルが、土壌溶液全体すなわち土壌水とそれに溶解している物体を一体としたものに関係するのに対し、オスモティックポテンシャルは水だけにあてはまる量であることから、実際には互いに独立として単純に加えるべきではない。しかし、土壌溶液が十分希薄で、溶液内の溶質がマトリクスにそれほど影響しない限り、実際はこの違いは無視できる^{4,7)}。

式(4-17)と式(4-18)、(4-19)より、ギブスの自由エネルギーと土の全ポテンシャルの関係は、

$$\Delta G = \psi \quad (4-20)$$

とすることができる。本研究で対象とするベントナイトにおいては、重力ポテンシャルは他のポテンシャルに比べて非常に小さいことから、無視している。前述したように、膨潤圧はポテンシャルの低下量であるが、これをギブスの自由エネルギーの低下量とし、すなわち式(4-20)より、全ポテンシャルの低下量と仮定することができる。

したがって、不飽和のベントナイトは、潜在的に非常に大きい膨潤圧を有していることとなる。しかし、飽和に至る過程で間隙の閉鎖や骨格構造の変化によって膨潤圧は低下し、実際に外力として作用する割合は数%にも満たない。全ポテンシャルの低下量に対し、実際に外力（膨潤応力）として働く割合を表す関数 F を用いて、膨潤応力の増分 $\Delta\sigma_{sw}$ [Pa] は以下のように表すこととする。

$$\Delta\sigma_{sw} = -F \cdot \rho_{w0} g \Delta\psi \quad (4-21)$$

ここで、 S_r は飽和度、 ψ はサクシオン [m]、 ρ_{w0} は水の基準密度、 g は重力加速度である。本来、サクシオンはマトリックポテンシャルの絶対値を指すが、ここではマトリックポテンシャルとオスモティックポテンシャルの和とする。

関数 F に対しては、これまで各要素試験や原位置試験に合わせて同定が必要であった。例えば、Noorishad & Tsang⁴⁻⁸⁾ や Nguyen⁴⁻⁹⁾ は、式(4-8)の代わりに飽和度の変化量に定数を乗じることにより膨潤応力を評価しているが、その定数は試験とのフィッティングにより求めている。Chijimatsu et al.⁴⁻¹⁰⁾ は関数 F を定数とし、同様に試験とのフィッティングを行っているが、やはり物理的意味は不明確であった。

本研究では、式(4-8)に次式の拘束条件を与えることで、ある飽和度における膨潤応力を一意的に決定する手法を提案する。

$$\sigma_{sw} = -\int_0^\psi \rho_{w0} g F(S_r) d\psi = -\int_0^{S_r} \rho_{w0} g F(S_r) \frac{\partial\psi}{\partial S_r} dS_r \quad (4-22)$$

$$\sigma_{sw\max} = -\int_0^1 \rho_{w0} g F(S_r) d\psi = -\int_0^1 \rho_{w0} g F(S_r) \frac{\partial\psi}{\partial S_r} dS_r \quad (4-23)$$

ここで、 σ_{sw} は飽和度 S_r (サクシオン ψ) における膨潤応力である。最大膨潤応力は $\sigma_{sw\max}$ は小峯の膨潤評価式から算定される値である。この式の物理的意味は、ベントナイトが気乾状態から吸水することにより膨潤応力が飽和度に対して一意的に決定し、飽和に至ると最大膨潤応力 $\sigma_{sw\max}$ を発揮することを表しており、また、逆に脱水すると可逆的に膨潤応力が減少することを意味する。図 4-2 に飽和度と膨潤応力の関係の概念図を示す。気乾状態から吸水することにより膨潤圧は次第に上昇し、図中の I や II のような経路を辿ると考えられる。しかし、実際にはベントナイトは最適含水率付近で締めめられた状態から吸水するため、初期飽和度 S_{r0} からの膨潤応力は、III、IV、V のように初期状態で膨潤応力がゼロの点から発生する。既往のモデルは、III、IV のように、初期飽和度から飽和に至る過程を適当な関数を仮定して同定しているため、初期飽和度に依存し

てパラメータを求めなければならなかった。本研究では、飽和度と膨潤応力を一意的に決定し、まず経路 I (または II) のように設定することで、初期飽和度からの経路を V のように捉えることとする。このようにモデル化すると、初期状態で膨潤応力が発生していることになるが、実際、後述の膨潤試験からも試験直後に膨潤応力が発生していることから妥当性が確認できる。ただし、実際には経路 V から経路 I (または II) に滑らかに移行すると予想される。初期状態に対応する膨潤応力を初期膨潤応力 σ_{sw0} と呼ぶこととする。

経路 I や II に対応する経路は、現段階では確定されたものはないが、例えば、膨潤応力が飽和度、その平方根、2 乗、3 乗に比例するモデルとして、関数 F を表 4-4 のように与えることができる。これらのモデルを図示したものを図 4-3 に示す。

表 4-4 膨潤に関するパラメータ F の飽和度依存性

	関数 $F(S_r)$	膨潤応力 $\sigma_{sw}(S_r)$	
(a)	$F = \frac{1}{2} \sigma_{sw \max} S_r \frac{\partial S_r}{\partial \psi}$	$\sigma_{sw} = \sigma_{sw \max} \sqrt{S_r}$	飽和度の平方根に比例
(b)	$F = \sigma_{sw \max} \frac{\partial S_r}{\partial \psi}$	$\sigma_{sw} = \sigma_{sw \max} S_r$	飽和度に比例
(c)	$F = 2 \sigma_{sw \max} S_r \frac{\partial S_r}{\partial \psi}$	$\sigma_{sw} = \sigma_{sw \max} S_r^2$	飽和度の 2 乗に比例
(d)	$F = 3 \sigma_{sw \max} S_r^2 \frac{\partial S_r}{\partial \psi}$	$\sigma_{sw} = \sigma_{sw \max} S_r^3$	飽和度の 3 乗に比例
(e)	$F = 2 \sigma_{sw \max} (1 - S_r) \frac{\partial S_r}{\partial \psi}$	$\sigma_{sw} = 2 \sigma_{sw \max} \left(S_r - \frac{S_r^2}{2} \right)$	後述の膨潤試験に適用したモデル

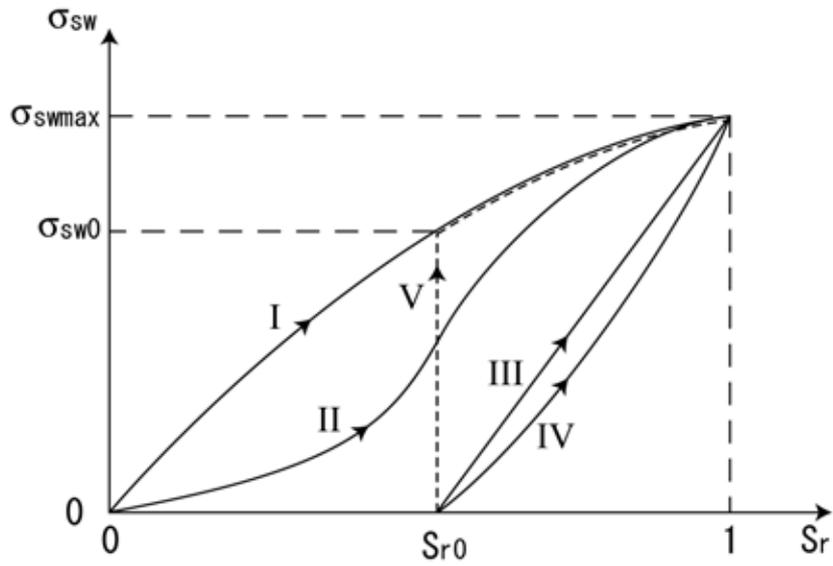


図 4-2 不飽和領域における膨潤応力の概念図

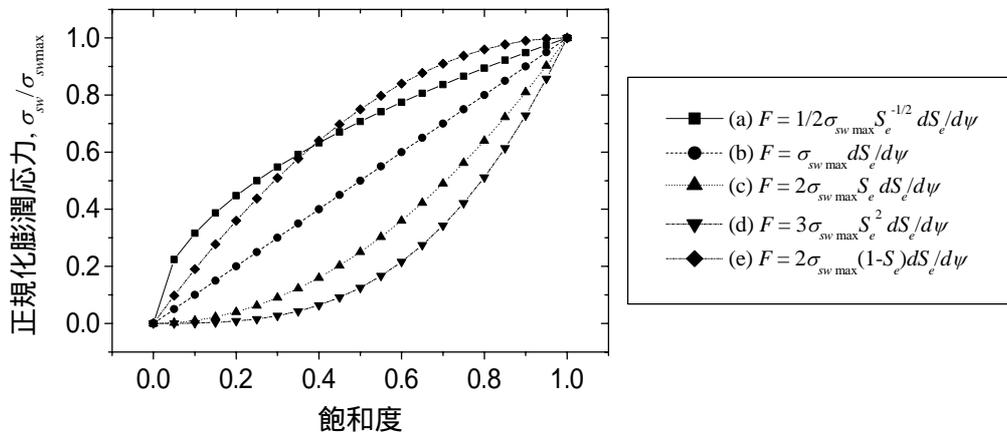


図 4-3 それぞれの膨潤に関するパラメータ F に対する飽和度と膨潤応力の関係

4.3 熱-水-応力連成解析手法

熱-水-応力連成現象のモデルは、岩盤に対する解析手法が Noorishad et al.⁴⁻¹¹⁾によって提案され、その後、国内では Ohnishi et al.^{4-12), 4-13)}によって開発された。Ohnishi et al.によって構築された有限要素コード THAMES は、千々松ら⁴⁻¹⁴⁾によって不飽和粘土中の水分移動⁴⁻¹⁵⁾および温度勾配による水分移動⁴⁻¹⁶⁾が導入され、改良されてきた。そのモデルに、前節で述べた膨潤評価式を不飽和に拡張したモデルを導入する。本節では、熱-水-応力連成現象の支配方程式および膨潤評価式の導入について記述する。

熱-水-応力連成現象は、運動量保存則(力のつりあい式)、水の質量保存則、熱エネルギー保存則の物理量保存則に従う。未知量は変位、全水頭、温度とする。空気の挙動については、境界条件や連成に対する物性値などに対して未解明の部分が多いことから、空気の質量保存則は考慮していない。

4.3.1 物理量保存則

a) 運動量保存則

運動量保存式は、静的条件を仮定すると、以下の力のつりあい条件式となる。

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (4-24)$$

ここで、 σ_{ij} は全応力テンソル、 f_i は外力ベクトルを示す。外力が一定のとき上式を増分形に書き直すと、以下のようなになる。

$$\Delta \sigma_{ij,j} = 0 \quad (4-25)$$

b) 水の質量保存式

水の質量保存式は、以下のように記述される。

$$\frac{\partial \theta \rho_w}{\partial t} + q_{i,i} + Q = 0 \quad (4-26)$$

ここで、 θ は体積含水率、 ρ_w は間隙水の密度、 q_i は流束ベクトル、 Q は湧き出し、 t は時間である。

c) 熱エネルギー保存式

熱エネルギー保存式は、以下のように記述される。

$$\frac{\partial \{(\rho c)_m T\}}{\partial t} + q_{i,i}^h + Q^h = 0 \quad (4-27)$$

ここで、 c は比熱容量、 T は温度、 q_i^h は熱流束ベクトル、 Q^h は発熱量である。下付の m は熱的な

局所平衡状態を意味する。

4.3.2 構成条件

構成条件は材料によって異なるが、ほぼ同様であるので、特に断らない限り全ての材料に対して適用されることとする。

a) 力学的構成条件

全応力の増分は、飽和領域において、

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{1}{2}C_{ijkl}(\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) + \Delta p\delta_{ij} - \beta\Delta T\delta_{ij} \quad (4-28)$$

と表される。ただし、 u_i は変位ベクトル、 C_{ijkl} は弾性係数テンソルで、Lame の定数 λ 、 μ およびヤング係数 E 、ポアソン比 ν との関係は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} C_{ijkl} &= \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \\ &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\delta_{ij}\delta_{kl} + \frac{E}{2(1+\nu)}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \end{aligned} \quad (4-29)$$

また、 p は間隙水圧であり、全水頭 h を用いて、

$$p = \rho_{w0}g(h-z) \quad (4-30)$$

と表される。ただし、 ρ_{w0} は水の基準密度、 g は重力加速度、 z は鉛直上向きを正とする。 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。 β は熱応力に関するパラメータで、Lame の定数を用いて、以下のように表される。

$$\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha_s \quad (4-31)$$

ただし、 α_s は線膨張係数である。

式(4-28)の第1項、第2項は弾性変形に伴う応力増分、第3項は水圧変化に伴う応力変化、第4項は温度変化に伴う熱応力を表している。

一方、不飽和領域における全応力は、以下のように与えられる。

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{1}{2}C_{ijkl}(\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) + S_r\Delta p\delta_{ij} - \Delta\sigma_{sw}\delta_{ij} - \beta\Delta T\delta_{ij} \quad (4-32)$$

ここで、 S_r は飽和度、 σ_{sw} は膨潤応力である。式(4-32)の中で、第4項の膨潤応力は膨潤性の材料、すなわちベントナイトなどのときに発生する。膨潤応力は前節の式(4-21)で述べたとおり、以下のように表される。

$$\Delta\sigma_{sw} = -F \cdot \rho_{w0} g \Delta\psi \quad (4-21)$$

サクション ψ は、全水頭を用いて以下のように表すことができる。

$$\psi = -(h - z) \quad (4-33)$$

不飽和ベントナイトでは、水分量や乾燥密度によって弾性係数が変化することがわかっており、各ベントナイトに対して経験式が得られている。

b) 水理学的構成条件

飽和領域における間隙水の移動は、ダルシー則に従うと仮定する。すなわち、

$$q_i = -\rho_w \frac{\rho_w g K_{ij}}{\mu} h_{,j} \quad (4-34)$$

ここで、 K は固有透過度テンソル、 μ は水の粘性係数である。通常用いられる透水係数では、温度の影響などをうまく表現できないため、固有透過度を用いている。

不飽和領域における水分の移動は、ベントナイト緩衝材中では、体積含水率の勾配および温度の勾配により生じると仮定し、以下のように定義する。

$$\begin{aligned} q_i &= -\rho_w (D_\theta)_{ij} \theta_{,j} - \rho_w (D_T)_{ij} T_{,j} \\ &= -\rho_w (D_\theta)_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) - \rho_w (D_T)_{ij} T_{,j} \end{aligned} \quad (4-35)$$

ここで、 D_θ は水分拡散係数、 D_T は温度勾配水分拡散係数である。水分拡散係数 D_θ は体積含水率 θ と温度 T の関数となっており、体積含水率に対してグラフを描くと、U字型になる(例えば図 4-6、4-7)。水分拡散係数は、図 4-4 のように体積含水率が小さい領域では蒸気による水分移動が卓越し、大きい領域では液状水による移動が卓越すると言われており⁴⁻⁵⁾、水分拡散係数はそれらを足し合わせたものと考えられている。すなわち、

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta l} \quad (4-36)$$

となる。

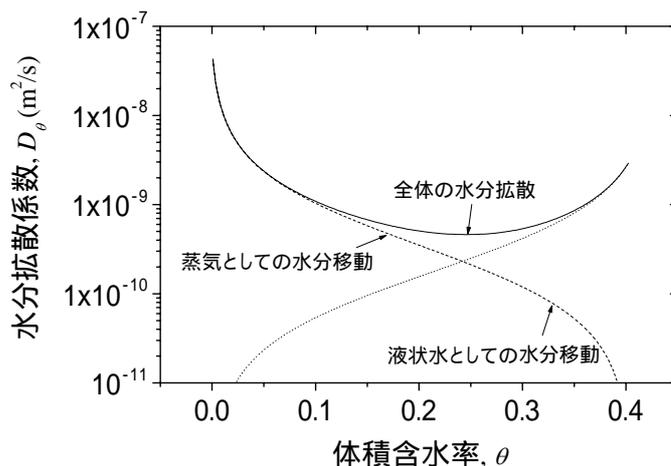


図 4-4 水分拡散係数の概念図

一方、温度勾配水分拡散係数も蒸気としての水分移動と液状水としての水分移動に分割できるが、温度勾配による液状水移動量は蒸気水移動量に比べ、極めて小さいことから⁴⁻¹⁷⁾、温度勾配による水分移動は主に蒸気によって生じると考えられている。すなわち、

$$D_T \approx D_{Tv} \tag{4-37}$$

一方、岩盤などの他の材料に対しては、ダルシー則を不飽和領域に拡張した以下の式を用いる。

$$q_i = -\rho_w \frac{r_k \rho_w g K_{ij}}{\mu} h_{,j} \tag{4-38}$$

ここで、 r_k は比透水係数である。

また、サクシオン ψ と体積含水率の関係として、以下の式で与えられる van Genuchten (VG) モデルを用いる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^n \right\}^{-m} \tag{4-39}$$

ここで、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小容水量、 α および n は VG パラメータである。

c) 熱的構成条件

熱流束は移流、拡散、潜熱により構成され、以下のように表される。

$$q_i^h = q_i^a + q_i^d + q_i^h \tag{4-40}$$

ここで、

$$q_i^a = \theta \rho_w c_w v_i T \quad (4-41)$$

$$q_i^d = -(\lambda_m)_{ij} T_{,j} \quad (4-42)$$

$$q_i^h = L \rho_w \cdot (D_{\theta v})_{ij} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) \quad (4-43)$$

である。ここで、 v_i はダルシー流速ベクトル、 λ_m は局所平衡を仮定した熱伝導率、 L は潜熱、 $D_{\theta v}$ は水分拡散係数 D_{θ} の蒸気に起因する部分である。ダルシー流速ベクトルは、以下のように表される。

$$\text{ベントナイト} \quad v_i = -(D_{\theta})_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) - (D_T)_{ij} T_{,j} \quad (4-44)$$

$$\text{その他の材料} \quad v_i = -\frac{r_k \rho_w g K_{ij}}{\mu} h_{,j} - (D_T)_{ij} T_{,j} \quad (4-45)$$

不飽和ベントナイトの熱伝導率および比熱の水分量依存性の試験も行われており、経験式が提案されている。

4.4 有限要素法による定式化

前節で示した支配方程式を有限要素法により離散化する。有限要素法は、一般的なガラーキン法を用いるため、離散化手法の詳細は省略する。ここでは、離散化後の支配方程式およびプログラミングに用いた解析技術の概略について述べる。

4.4.1 ガラーキン法による支配方程式の離散化

式(4-25)、(4-26)、(4-27)にそれぞれの構成条件を代入することにより、最終的な支配方程式を得ることができる。その際、各材料や飽和・不飽和の条件で構成条件が異なることから、数値解析のコード化に有利なように、次のような関数を設ける。

χ : 飽和のとき 1、不飽和のとき 0 となる関数

ξ : ベントナイト系材料のとき 1、その他の材料のとき 0 となる関数

これらのスイッチ関数を用いると、各物理量保存式は、以下のように集約することができる。

運動量保存式 (力のつりあい式)

$$\left\{ \frac{1}{2} C_{ijkl} (\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) + S_r \rho_{w0} g \Delta h \delta_{ij} - \xi F \rho_{w0} g \Delta h \delta_{ij} - \beta \Delta T \delta_{ij} \right\}_{,j} = 0 \quad (4-46)$$

水の質量保存式

$$\begin{aligned}
 & -\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} - \\
 & \left[\chi \rho_w \frac{\rho_w g K_{ij}}{\mu} h_{,j} + (1-\chi) \left\{ \xi \rho_w (D_\theta)_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) + (1-\xi) \rho_w \frac{r_k \rho_w g K_{ij}}{\mu} h_{,j} + \rho_w (D_T)_{ij} T_{,j} \right\} \right]_{,i} \\
 & + Q = 0
 \end{aligned} \tag{4-47}$$

熱エネルギー保存式

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + \left\{ \theta \rho_w v_i T - (\lambda_m)_{ij} T_{,j} \right\}_{,i} + \left\{ L \rho_w (D_\theta)_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) \right\}_{,i} + Q^h = 0 \tag{4-48}$$

水の質量保存則における貯留項は、厳密には変位および温度にも依存するが、他の項に比べ極めて小さいため省略している。

要素内の内挿関数は、変位、全水頭、温度に対してそれぞれ $N^{(1)}$ 、 $N^{(2)}$ 、 $N^{(3)}$ とする。すなわち、

$$u_i = \sum_{j=1}^{20} N_j^{(1)}(u_i)_j \tag{4-49}$$

$$h = \sum_{i=1}^8 N_i^{(2)} h_i \tag{4-50}$$

$$T = \sum_{i=1}^8 N_i^{(3)} T_i \tag{4-51}$$

ただし、3次元の6面体要素とし、変位に対しては2次、全水頭および温度に対しては1次の内挿関数を用いている。したがって、 $N^{(2)}=N^{(3)}$ である。

それぞれの支配方程式に対してガラーキン法を適用し、部分積分を行うと、最終的に以下の要素内の離散化式が導出される。運動量保存式(力のつりあい式)は、以下のようになる。

$$K_{nm}^{ik} \Delta u_m^k + C_{nm}^i \Delta h_m + G_{nm}^i \Delta T_m = \Delta F_n^i \tag{4-52}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 K_{nm}^{ik} &= \int_{V^e} N_{n,j}^{(1)} C_{ijkl} N_{m,l}^{(1)} dV^e \\
 C_{nm}^i &= \int_{V^e} N_{n,j}^{(1)} (S_r - \xi F) \rho_{w0} g \delta_{ij} N_m^{(2)} dV^e
 \end{aligned}$$

$$G_{nm}^i = \int_{V^e} N_{n,j}^{(1)} (-\beta \delta_{ij}) N_m^{(3)} dV^e$$

$$F_n^i = \int_{S^e} \hat{t}_n^i dS^e$$

ただし、 V^e は要素の体積（2次元では面積）、 \hat{t} は表面力を意味している。また、上付の指標は空間的な次元を表し、下付の指標は要素節点数を表す。

水の質量保存式は、以下のように離散化される。

$$A_{nm}^i \frac{\partial}{\partial t} u_m^i + E_{nm} \frac{\partial}{\partial t} h_m + D_{nm} \frac{\partial}{\partial t} T_m + H_{nm} h_m + I_{nm} T_m = Q_n \quad (4-53)$$

ここに、

$$A_{nm}^i = \mathbf{0}$$

$$E_{nm} = \int_{V^e} N_n^{(2)} \left(-\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right) N_m^{(2)} dV^e$$

$$D_{nm} = \mathbf{0}$$

$$H_{nm} = - \int_{V^e} N_{n,i}^{(2)} \left[\chi \rho_w \frac{\rho_w g K_{ij}}{\mu} + (1-\chi) \left\{ \xi \rho_w (D_\theta)_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} + (1-\xi) \rho_w \frac{r_k \rho_w g K_{ij}}{\mu} \right\} \right] N_{m,j}^{(2)} dV^e$$

$$I_{nm} = - \int_{V^e} N_{n,i}^{(2)} \rho_w (D_T)_{ij} N_{m,j}^{(3)} dV^e$$

$$Q_n = \int_{S^e} \hat{q}_m dS^e - \int_{V^e} \frac{\partial N_m^{(2)}}{\partial z} \left\{ \xi \rho_w (D_\theta)_{nm} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right\} dV^e$$

熱エネルギー保存式は、以下のようになる。

$$J_{nm}^i \frac{\partial}{\partial t} u_m^i + M_{nm} \frac{\partial}{\partial t} T_m + L_{nm} h_m + V_{nm} T_m = P_n \quad (4-54)$$

ここに、

$$J_{nm}^i = \mathbf{0}$$

$$M_{nm} = \int_{V^e} N_n^{(3)} (\rho c) N_m^{(3)} dV^e$$

$$L_{nm} = \int_{V^e} N_{n,i}^{(3)} \left\{ L \rho_w (D_{\theta v})_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right\} N_{m,j}^{(2)} dV^e$$

$$V_{nm} = \int_{V^e} N_{n,i}^{(3)} \theta \rho_w v_i T N_m^{(3)} dV^e + \int_{V^e} N_{n,i}^{(3)} (\lambda_m)_{ij} N_{m,j}^{(3)} dV^e$$

$$P_n = \int_{S^e} \hat{q}_h dS^e - \int_{V^e} \frac{\partial N_m^{(3)}}{\partial z} L \rho_w (D_\theta)_{nm} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} dV^e$$

さらに、これらの式は時間で離散化する必要がある。ここでは、差分法を用いる。差分パラメータ α を以下のように与える。

$$\phi \approx (1-\alpha)\phi_{t-\Delta t} + \alpha\phi_t \quad (4-55)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \approx \frac{\phi_t - \phi_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (4-56)$$

α : 中央差分のとき 0.5、後退差分のとき 1.0、前進差分のとき 0.0 となる関数

上式を差分法により、時間に対して離散化すると、最終的に以下のようなマトリクスが得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{nm}^{ik} & C_{nm}^i & G_{nm}^i \\ A_{nm}^k & \alpha\Delta t H_{nm} + E_{nm} & \alpha\Delta t I_{nm} + D_{nm} \\ J_{nm}^k & \alpha\Delta t L_{nm} & \alpha\Delta t V_{nm} + M_{nm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_m^k \\ (h_m)_t \\ (T_m)_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F_n^i + C_{nm}^i (h_m)_{t-\Delta t} + G_{nm}^i (T_m)_{t-\Delta t} \\ \Delta t \bar{Q}_n + \{D_{nm} - (1-\alpha)\Delta t H_{nm}\} (h_m)_{t-\Delta t} + \{D_{nm} - (1-\alpha)\Delta t I_{nm}\} (T_m)_{t-\Delta t} \\ \Delta t \bar{P}_n - (1-\alpha)\Delta t L_{nm} (h_m)_{t-\Delta t} + \{M_{nm} - (1-\alpha)\Delta t V_{nm}\} (T_m)_{t-\Delta t} \end{Bmatrix} \quad (4-57)$$

この連立方程式を各要素に対して立てて、足し合わせることで、式(4-57)と同形の連立方程式群が構築される。これに、ある境界条件・初期条件を与えることで解を求めることができる。

4.4.2 数値解析手法

3次元の時空間で離散化した有限要素マトリクス(4-57)を解くために、数値解析コードを構築した。要素は、変形に対して2次、全水頭および温度に対して1次の6面体アイソパラメトリック要素であり、数値積分には、変形に関するマトリクスに対して27点(3×3×3)、全水頭および温度に関するマトリクスに対して8点(2×2×2)のガウスポイントを用いた。収束計算は、図4-5のフローチャートに示す手法を用いる。すなわち、運動量保存式、水の質量保存式、熱エネルギー保存式をそれぞれ独立に解き、収束判定を行うといった、古典的な単純繰り返し代入法である。この手法は収束が遅いとされているが、以降の解析より、時間ステップや要素の大きさを調整することにより、比較的収束は早い結果となっている。収束計算の中に膨潤評価式を導入することで、最大膨潤応力の乾燥密度・温度依存性の影響を取り入れている。

また、3次元化、大自由度化に対応するために、連立方程式の解法として、ICCG法(不完全コレスキー分解を前処理とした共役勾配法⁴⁻¹⁸)、サブルーチン ICCGLU は Netlib⁴⁻¹⁹)から入手)を導入している。

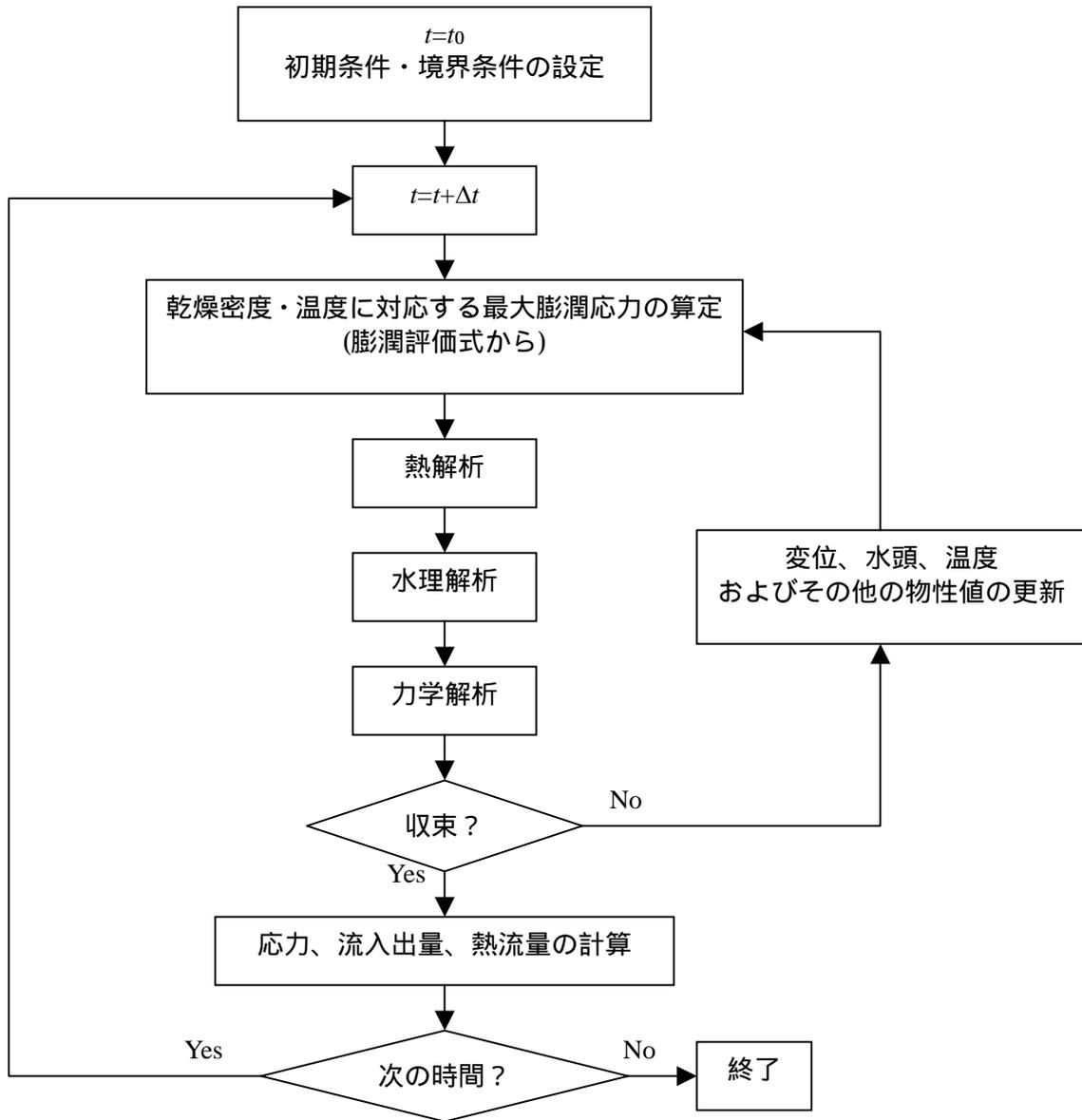


図 4-5 収束計算のフロー・チャート

表 4-5 試験条件

ケース	等温試験		温度勾配試験
	(a)、(b)	(c)	(d)
試験材料	ベントナイトクニゲル V1		ケイ砂混合体(クニゲル V1 にケイ砂を 30wt% 混合したもの)
供試体寸法 [mm]	小($\phi 20 \times$ 高さ 20)	大($\phi 50 \times$ 高さ 100)	大($\phi 50 \times$ 高さ 100)
乾燥密度 [g/cm ³]	1.8	1.8	1.6
初期含水比 [%]	0.5、9.0	10.0	7.0
試験温度 []	25	25	上端 30, 下端 40
浸潤液	純水	純水	純水
浸潤圧力 [mH ₂ O]	下端 0.0	上端 1.0	上端 1.0
初期条件に対する最大膨潤応力 [MPa]	3.7	3.7	0.35

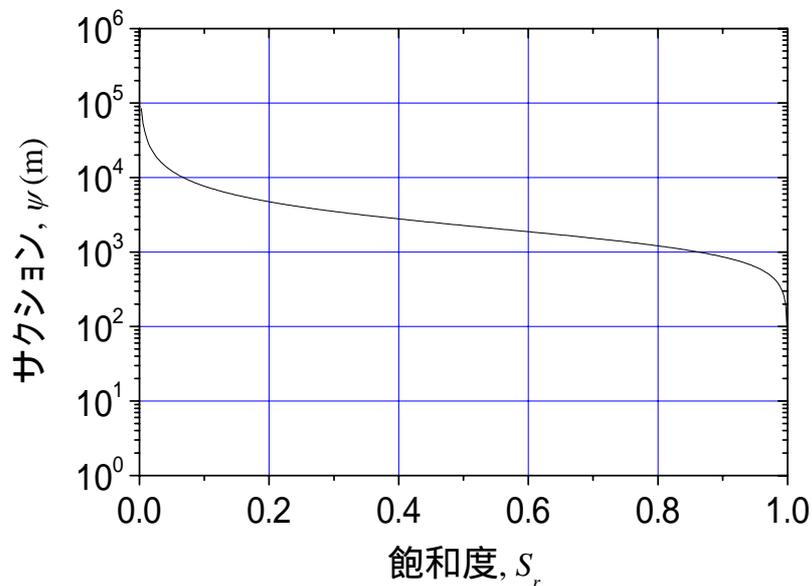
4.5 膨潤試験のシミュレーションによる解析手法の検証

ここでは、構築した有限要素コードを用い、等温条件下および温度勾配条件下における体積一定膨潤試験^{4-20)、4-21)}のシミュレーションを行うことで、開発したコードの検証を行うことを目的とする。試験材料は、ベントナイトクニゲル V1 およびケイ砂混合体である。試験条件を表 4-5 に、主な物性値を表 4-6 に示す。膨潤評価式に用いる物性値は、表 4-1 から表 4-3 で示したものである。それぞれの材料に対する水分特性曲線および水分拡散係数を図 4-6 および図 4-7 に示す。最大膨潤応力は、膨潤評価式より乾燥密度と温度の関数として図 4-8 のように表される。不飽和膨潤応力に関する関数 F は、表 4-4(e)、すなわち次式を用いた。

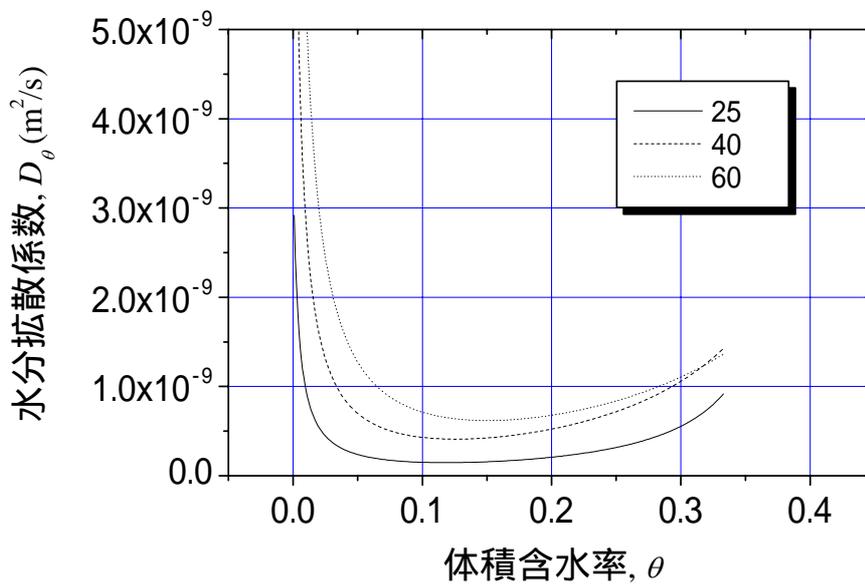
$$F = 2\sigma_{sw \max} (1 - S_r) \frac{\partial S_r}{\partial \psi} \quad (4-58)$$

ベントナイトは、不飽和状態でサクションが非常に大きい値を示すことが特徴である。ケイ砂混合体は、施工性の向上、経済性等の観点からベントナイトにケイ砂を混合したものであり、締め固め特性が有利であること以外にベントナイト単体と大きな違いはないとされている⁴⁻²²⁾。

試験は、ベントナイトクニゲル V1 を用いた等温試験が 3 ケース ((a)小型供試体：初期含水比 0.5%、(b)小型供試体：初期含水比 9.0%、(c)大型供試体：初期含水比 10.0%) と(d)ケイ砂混合体を用いた温度勾配浸潤試験が 1 ケースである。等温試験(a)は、浸潤試験として行われており、膨潤応力の測定はなされておらず、水分分布の経時変化が同条件で行われた複数の供試体で行われている。ここでは、このデータを用いて浸潤解析の検証を行った。等温試験(b)および(c)の主な相違は、供試体寸法と浸潤圧力であり、これらによる膨潤応力の発現の違いに関する評価を行った。温度勾配浸潤試験(d)は、実際の処分に近い条件での膨潤のメカニズムを評価するために行われている。

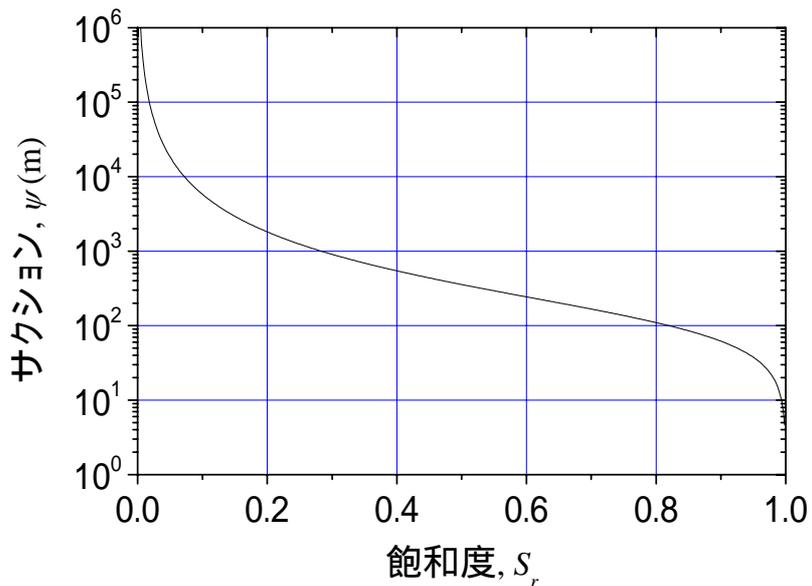


(a) 水分特性曲線

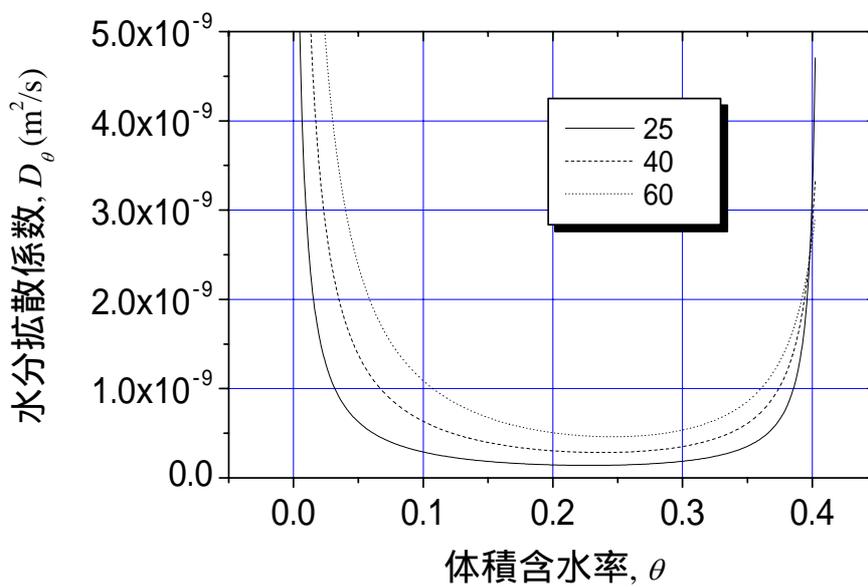


(b) 水分拡散係数

図 4-6 ベントナイトクニゲル V1 の不飽和水分特性

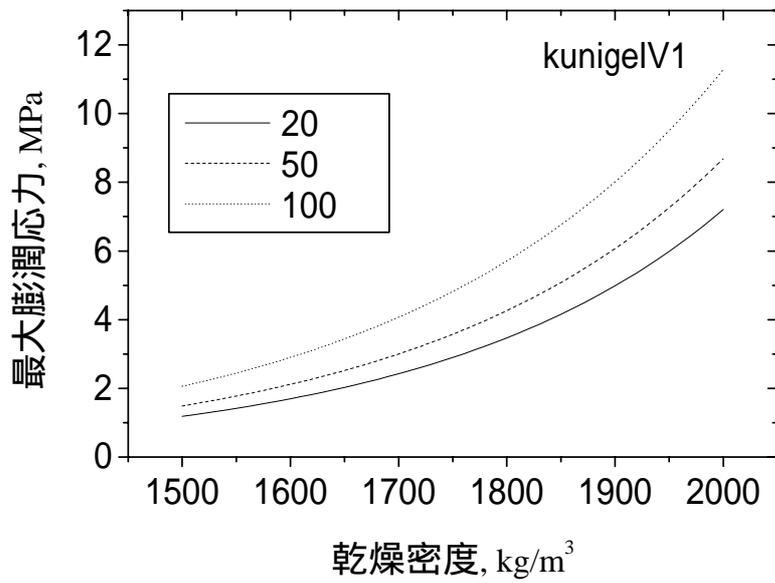


(a) 水分特性曲線

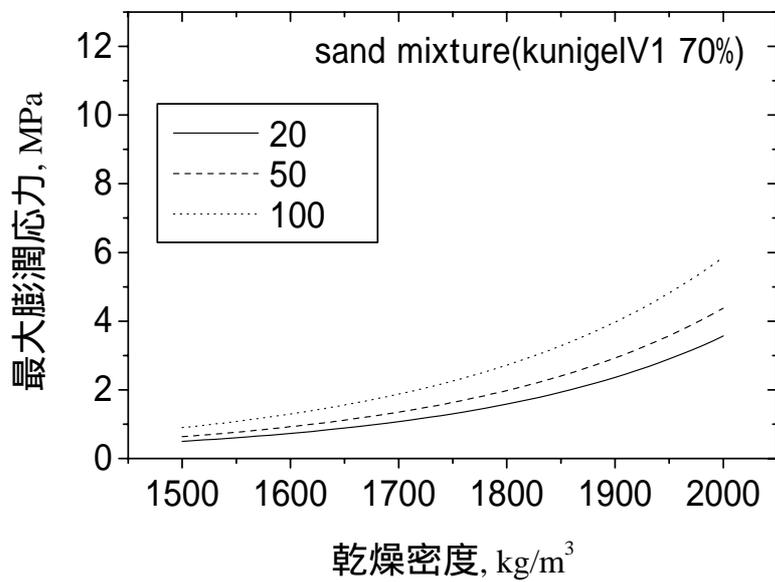


(b) 水分拡散係数

図 4-7 ケイ砂混合体の不飽和水分特性



(a) クニゲル V1



(b) ケイ砂混合体(B/S=7/3)

図 4-8 膨潤評価式による乾燥密度と最大膨潤応力の関係

表 4-6 材料物性

		クニゲル V1	ケイ砂混合体
乾燥密度 [g/cm ³]		1.8	1.6
弾性係数 [MPa]		1140.0-55.64w	58.74-1.87 w
ポアソン比 [-]		0.3	0.3
固有透過度 K [m ²]		4.2 × 10 ⁻²¹	1.4 × 10 ⁻²⁰
Van Genuchten パラメータ	θ_s [-]	0.333	0.403
	θ_r [-]	0.000	0.000
	α [1/m]	6.0 × 10 ⁻⁴	8.0 × 10 ⁻³
	n [-]	2.5	1.6
水分拡散係数 [cm ² /s] $D_\theta = \frac{a_1(\theta - \theta_s)}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_s)} + \frac{a_2\theta}{b_2(\theta - b_2)}$	a_1	1.76 × 10 ⁻⁸ T-3.04 × 10 ⁻⁷	2.99 × 10 ⁻⁸ T-3.78 × 10 ⁻⁷
	a_2	-1.48 × 10 ⁻⁷ T+2.98 × 10 ⁻⁶	-1.50 × 10 ⁻⁸ T+1.49 × 10 ⁻⁷
	b_1	-3.68 × 10 ⁻³	-2.49 × 10 ⁻³
	b_2	5.22 × 10 ⁻³ T+2.68 × 10 ⁻¹	5.59 × 10 ⁻⁴ T+3.93 × 10 ⁻¹
温度勾配水分拡散係数 D_T [m ² /s/K]		2.0 × 10 ⁻¹²	7.0 × 10 ⁻¹²
熱伝導率 λ_m [W/m/K]		5.58 × 10 ⁻¹ +6.17 × 10 ⁻² w -5.28 × 10 ⁻⁴ w ² -9.67 × 10 ⁻⁶ w ³	4.44 × 10 ⁻¹ +1.38 × 10 ⁻² w +6.14 × 10 ⁻³ w ² -1.69 × 10 ⁻⁴ w ³
比熱 c [kJ/kg/K]		(32.3+4.18w)/(100+w)	(34.1+4.18w)/(100+w)
線膨張係数[1/K]		1.0 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴

w: 含水比, T: 温度 []

有限要素法によるメッシュは、1次元モデルとし、鉛直方向に高さ1mmで100要素(試験ケース(c)、(d))および高さ1mmで20要素(試験ケース(a)、(b))とした。境界条件は、上端および下端を圧力水頭固定、他端を不透水とした。側面はスライド境界で不透水、断熱とした。初期条件は、温度は等温試験では25、温度勾配浸潤試験では30とし、表4-5で示した初期含水比に対応した初期圧力水頭を与えた。

等温試験(a)の計算結果を図4-9に示す。この試験は緩衝材中の不飽和水分拡散係数を求めるために行われており、体積含水率分布の経時変化の比較を行う。同図より、本モデルは緩衝材中の水分移動過程を精度良く再現できることがわかる。

また、等温試験(b)の計算結果のうち、鉛直方向の膨潤応力の変化を図4-10に示す。式(4-9)より求めた初期状態の膨潤応力は試験に比べやや大きい値となっているが、膨潤応力の発現過程は良く表現できていると考えられる。

等温試験(c)の膨潤応力の変化を図4-11に示す。試験(b)と同様、解析結果と試験結果は良く一致していると言える。また同図より、スケールによる膨潤応力の相違は見られないことがわかる。図4-12、図4-13は試験(c)における各時間の体積含水率分布および乾燥密度分布を示したものである。乾燥密度は初期乾燥密度に対する比で表している。浸潤の初期において、浸潤面側が膨潤により乾燥密度が低下し、逆に浸潤面から遠いところで圧縮されて乾燥密度が上昇している様子がわかる。そして飽和後の乾燥密度は再び一樣となる。しかし、飽和に至るまでを通して、乾燥密度の分布の偏りは0.2%程度に過ぎないことから、膨潤過程での密度分布変化は起こるものの、その値は非常に小さいと言える。

図4-14は温度勾配浸潤試験(d)の各時間の体積含水率および温度の分布である。本試験では初期温度30で、浸潤側と反対側の端部の温度を40に上昇させている。温度勾配により、高温側の水分の低下が見られる。この試験では水分の分布は測定されていないが、このような傾向は、他の温度勾配浸潤試験の結果と一致している⁴⁻²³⁾。図4-15は鉛直応力および高温側、中央、低温側における水平応力の時間変化を表している。鉛直方向は浸潤方向と一致し、浸潤面と反対側の端部において測定されている。水平方向応力はカラムの側壁部で測定されている。鉛直応力は計算値と実験値で良く一致している。一方、水平応力は膨潤と共に増加する傾向は計算でも表現できているが、初期の複雑な挙動は再現されていない。これは、供試体作製時の不均一性(密度のばらつき)の影響などが測定されているものと思われる。しかし、その後の膨潤によりカラム側面へ与える力の増加割合は実測値と良く一致しており、提案する膨潤応力モデルは、水平方向応力に対しても評価可能であると言える。浸潤時に緩衝材内で応力の不均一性が生じることはこれまでも言われてきた⁴⁻²¹⁾が、この現象は緩衝材ブロックの隙間の封鎖に深く関わるため非常に重要である。

これらの一連の要素試験との比較により、開発したモデルがベントナイト単体だけでなく、ケイ砂混合体の挙動も精度良く表現できることが確認できた。

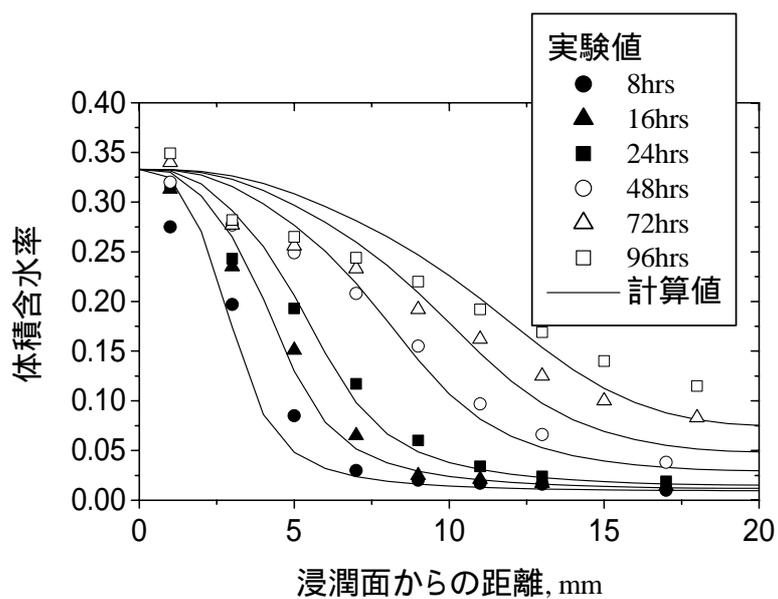


図 4-9 等温試験(a)における体積含水率の分布

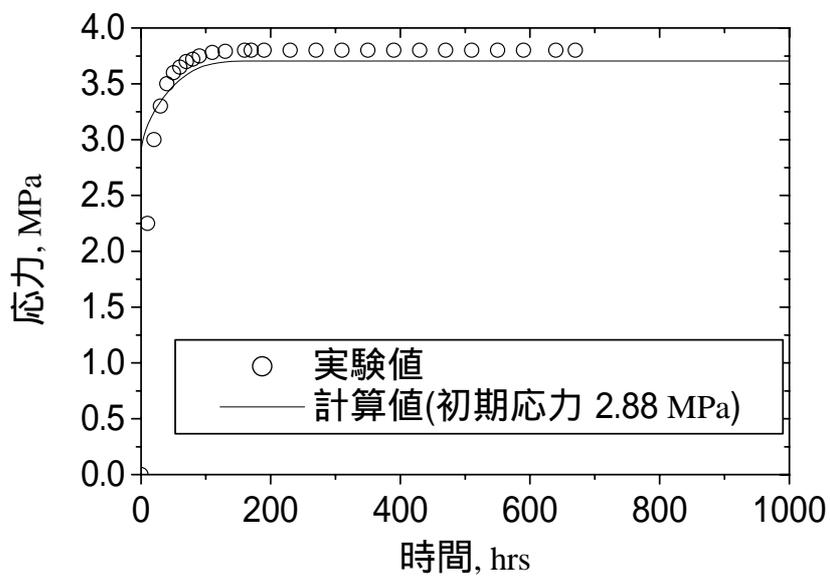


図 4-10 等温試験(b)における膨潤応力変化

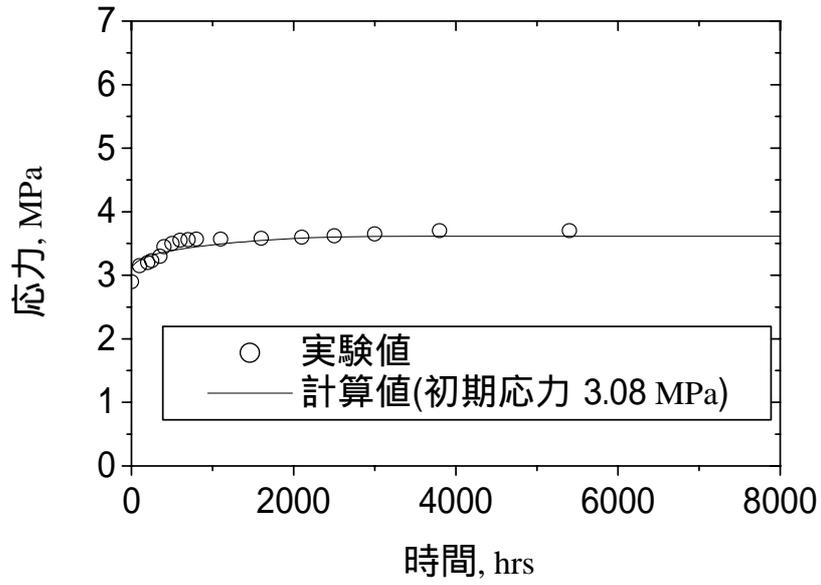


図 4-11 等温試験(c)における膨潤応力変化

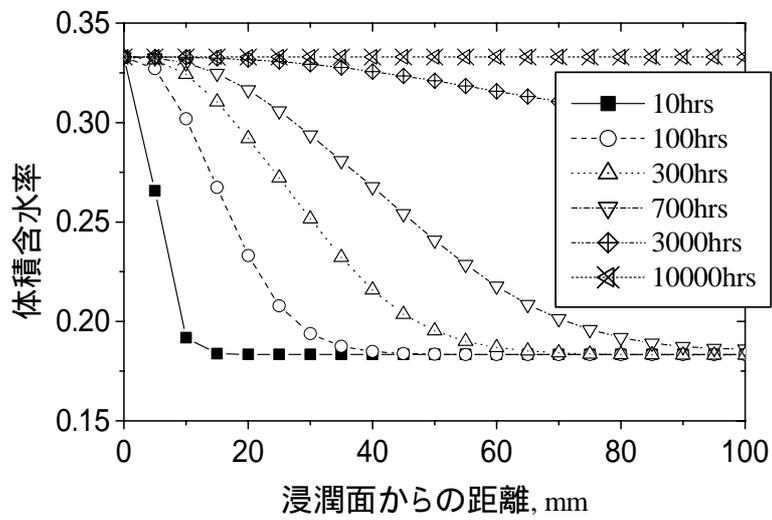


図 4-12 等温試験(c)における体積含水率分布

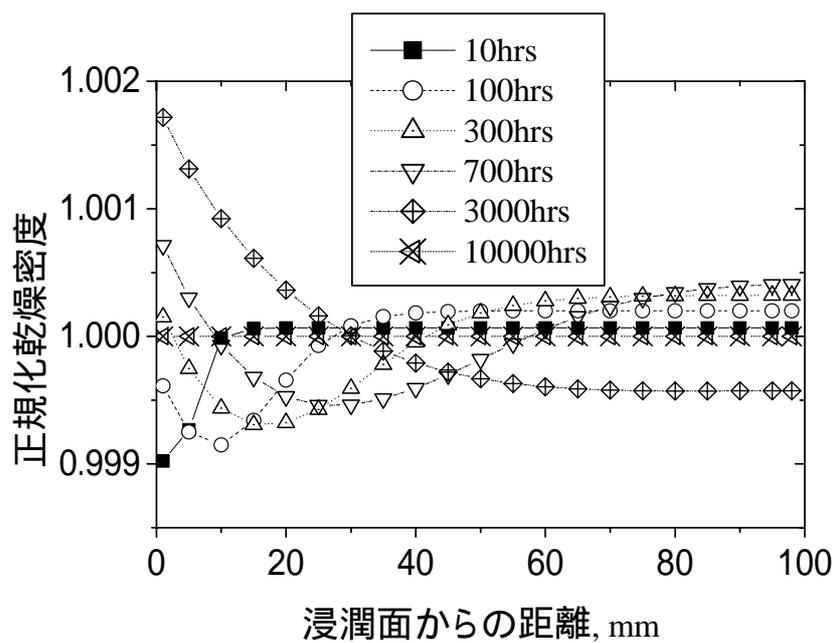


図 4-13 等温試験(c)における乾燥密度の分布

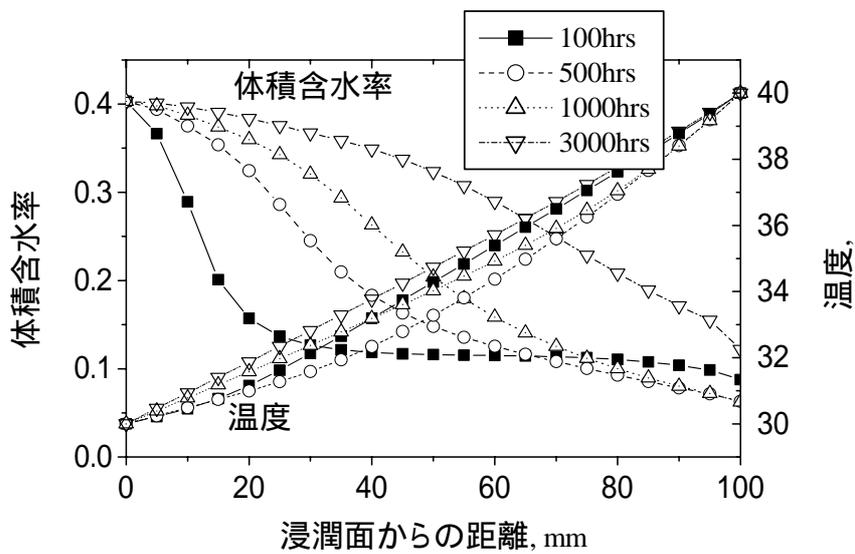


図 4-14 温度勾配試験(d)における体積含水率分布および温度分布

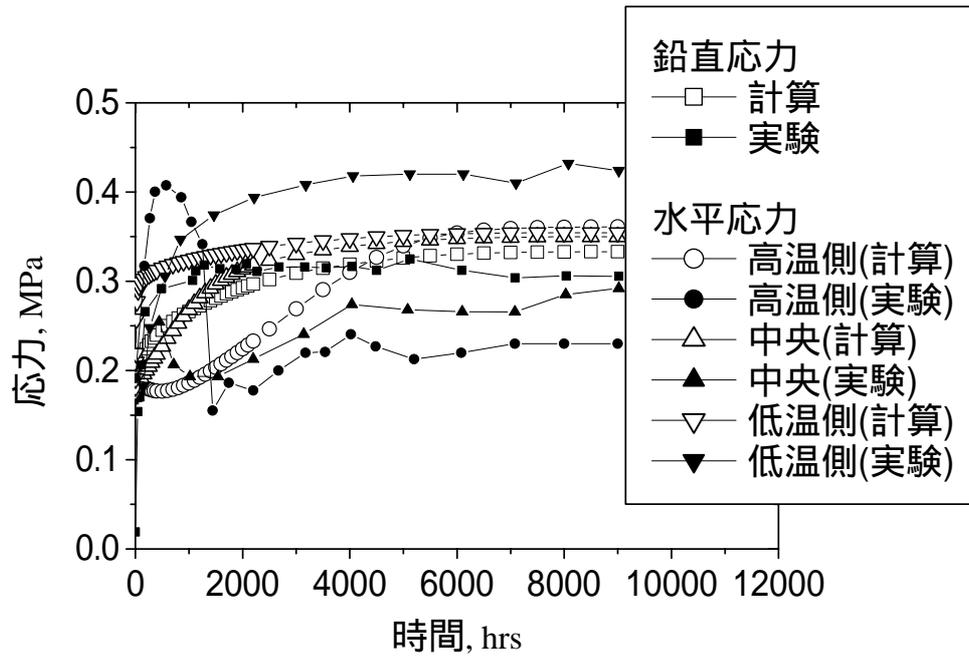


図 4-15 温度勾配試験(d)における各点の応力変化

4.6 まとめ

本章では、緩衝材の冠水時の膨潤特性を理論的に表現するためのモデル化を行った。飽和時の膨潤応力は、小峯の提案している膨潤評価式を取り入れることで、乾燥密度や温度に依存する膨潤応力の影響を熱-水-応力連成モデルに反映することができた。同時に、膨潤評価式では、陽イオン交換容量や間隙水のイオン濃度の影響を再現できるため、緩衝材の変質や地下水組成の影響をモデル化することができる。特に、地下水が海水起源である場合には、塩濃度が高く、純水と比べて膨潤性能が大きく異なることから、このモデルは非常に有用である。

廃棄物の定置後数百年は緩衝材が不飽和であり、また廃棄体からの発熱の影響も残っている。この時期の熱-水-応力連成現象に膨潤評価式を取り入れるために、不飽和領域の膨潤性のモデルを新たに提案した。このモデルでは、乾燥密度や温度から決定される飽和時の膨潤応力（最大膨潤応力）と飽和度から膨潤応力が一意に決定されるという考え方に基づいており、複数の室内実験からその適用性が確認された。本来、飽和度に対するヒステリシスの影響が存在すると考えられるが、ベントナイトに対するヒステリシスのメカニズムは不明確であるため、ここでは考慮しなかった。このモデルでは、初期膨潤応力が存在することになる。初期膨潤応力は、圧縮ベントナイト緩衝材の製作時において与えられる締固め応力によって与えられ、内部に蓄えられたエネルギーが水分の吸収によって解放されて発生することを示している。締固めた緩衝材に対する膨潤応力は水の浸潤初期において大きく発生することが、室内試験、原位置試験を問わず得られていることから、このモデルの妥当性が伺える。

4章 参考文献

- 4-1) 小峯秀雄：“高レベル放射性廃棄物処分におけるベントナイト粘土の役割と技術開発動向”、粘土科学、第41巻、第4号、pp.182-189、(2002)
- 4-2) Komine, “ H. : Evaluation of swelling the exchangeable cations compositions of bentonite and its applicability ”, Proc. of the 15th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 3, pp.1981-1984, (2001)
- 4-3) 動力炉・核燃料開発事業団：“地層処分研究開発の現状”、PNC TN1410 94-094、(1994)
- 4-4) 小峯秀雄、緒方信英：“高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案 - 砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響 - ”、電力中央研究所研究報告 U99013、(1999)
- 4-5) 中野政詩：土の物質移動学、東京大学出版会、(1991)
- 4-6) 八幡敏雄：土壌の物理、東京大学出版会、(1975)
- 4-7) Hillel, D. : Environmental soil physics, Academic Press, (1998)
- 4-8) Noorishad, J. and Tsang, C-F. :“ Coupled thermohydro-elasticity phenomena in variable saturated fractured porous rocks – Formulation and numerical solution ” In: Stephansson, O., Jing, L. and Tsang, C-F. editors, Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media, Developments in Geotechnical Engineering., Vol.79, pp. 93-134, (1996)
- 4-9) Nguyen, T.S. :“ DECOVALEX II T-H-M in-situ experiment at the Kamaishi Mine, Japan. Report on Task 2C: Prediction of T-H-M response of bentonite and rock mass ”, Technical Report Atomic Energy Control Board, Canada, (1999)
- 4-10) Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M. :“ Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials ”, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol.24, pp. 403-424, (2000)
- 4-11) Noorishad, J., Tsang, C-F, Witherspoon, PA. :“ Coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: numerical approach ”, J. Geophys. Res., 89, 10365-73, (1984)
- 4-12) Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A. :“ Development of finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of a saturated-unsaturated medium ” In: Tsang C-F. editor, Coupled processes associated with nuclear waste repositories, Academic Press, Orlando, pp.551-557, (1987)
- 4-13) Ohnishi, Y. and Kobayashi, A. :“ THAMES ” In: Stephansson, O., Jing, L. and Tsang, C-F. editors, Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media, vol. 79, Elsevier: Developments in Geotechnical Engineering, pp. 545-553, (1996)
- 4-14) 千々松正和、谷口航、鈴木英明、西垣誠：“熱 - 水 - 応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価”、土木学会論文集、No.687/III-56、pp. 9-25、(2001)
- 4-15) Philip, J.R. and de Vries, D.A. :“ Moisture movement in porous materials under temperature

- gradient ” , Transactions, American Geophysical Union, Vol. 38(2), pp. 229-237, (1957)
- 4-16) de Vries, D.A. and Afgan, N.H. :“ Heat transfer in soils, heat and mass transfer in the biosphere ” , advances in thermal engineerings, 3, John Wiley & Sons Inc., (1975)
- 4-17) 鈴木英明、千々松正和、藤田朝雄、中野政詩 :“ 不飽和圧縮ベントナイトの水分移動パラメータに関する考察 ”、土木学会論文集、No.701/III-58、pp.107-120、(2002)
- 4-18) George, A. and Liu, J. W. :“ Computer solution of large sparse positive definite systems ” Prentice-Hall, New Jersey, (1981)
- 4-19) <http://netlib.org/>
- 4-20) 千々松正和、谷口航 :“ 熱-水-応力連成モデルを用いたニアフィールド解析評価 ”、核燃料サイクル開発機構、JNC TN8400 99-014, (1999)
- 4-21) 鈴木英明、千々松正和、藤田朝雄 :“ 温度勾配による緩衝材内の水分移動と膨潤応力の測定 ”、核燃料サイクル開発機構、JNC TN8400 99-020, (1999)
- 4-22) 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 - ”、JNC TN1400 99-020、(1999)
- 4-23) enresa :“ FEBEX project final report ” , Publicaciones tecnica 1/2000, (2000)

5. 実規模原位置試験のシミュレーション

5.1 エスポ地下研究施設(HRL)の概要⁵⁻¹⁾

スウェーデンでは、使用済燃料深地層処分場の正確な設計および立地はまだ決定されていないが、20年以上にわたって、様々なデータが室内および原位置における広範な研究活動を通じて収集されている。スウェーデン使用済燃料および廃棄物管理会社（SKB）は、現在得られている知識をまとめ、深地層処分場で使用される手法を実際の自然条件の下で実証するために、エスポ島に地下実験施設（Äspö Hard Rock Laboratory（HRL）エスポ地下研究施設）を建設した。エスポ地下研究施設は、Oskarshamn 原子力発電所の近くに有り、その深度は約 460 メートルで、坑道の総延長は 3600 メートルである。

エスポ地下研究施設の目的は、処分で想定される深度の乱されていない地下環境に、研究開発とデモンストレーションの場を与えることにある。つまり、

- ・ サイト調査手法の開発
- ・ モデルの検証
- ・ 天然および人工バリアの機能の確認
- ・ 処分技術のデモンストレーション

が試験の焦点であり、1986 年以降次のような活動が展開されている。

エスポ地下研究施設における試験は 3 段階（サイト調査段階、建設段階、操業段階）に分けられている。サイト調査段階（1986-1990）においては、サイト調査および詳細な特性調査に関する様々な方法がテストされてきた。また、これらのデータを用い、地質構造モデルの作成、建設段階における水理場の変化予測などが実施された。建設段階（1990-1995）には、地表面下 460 メートルまでの坑道の掘削、ベンチレーションのための立て坑掘削などが実施され、また同時に、さらなる地質調査も実施された。また、地下水の化学的性質や地下水流動の変化なども計測された。こうして得られた結果は、坑道掘削前に実施された予測、すなわち、岩種の分布、破碎帯の分布、地下水の化学的性質の変化、地下水流動に関する予測などのチェックに用いられた。操業段階は 1995 年半ばから開始された。以下に各フェーズの概要を示す。

a) サイト調査段階（1986-1990 年）

エスポ地下研究施設では、サイト調査および詳細な特性調査に関する様々な方法がテストされてきた。これらの方法は今後、深層処分候補サイトの特性調査に使用されることになる。また、こうした調査により、岩盤の局所的な特性に深地層処分場を適合させる方法に関する情報や、深層処分場の安全評価にとって重要なデータも入手される。地表およびボアホール調査の結果が、エスポ地下研究施設が建設された岩盤内の様々な条件をモデル化するために利用されている。これらのモデルは、岩種の分布、破碎帯の位置および特徴、地下水の化学的性質、研究施設地下部分の建設が地下水の移動に及ぼすと予想される影響などを記述するものである。

b) 建設段階（1990-1995年）

建設期間には、坑道掘削と平行して広範な調査が実施された。地下水の化学的性質や地下水流動の変化が、建設期間中および期間後に記録された。そしてこうして新たに得られた結果が、坑道掘削が始まる前になされた予測、すなわち岩種の分布、破碎帯、地下水の化学的性質および地下水流動に関する予測のチェックに用いられた。

その結果、予測と坑道内で観測された実際の結果の間には良好な一致が見られた。HRLの国際モデル化タスクフォースにおいて、地下水流に関する3次元モデルシミュレーションが行われ、これらのモデルが実際の条件を要綱に表していることが示されている。

c) 操業段階（1995年-）

エスポ研究施設の建設は1995年に完了し、この時点から使用済燃料の定置に使用される技術の開発、試験および実証を目的とした計画が開始された。この技術を深地層処分場を使用する前に、エスポ地下研究施設の現実的な環境において様々な試験が実施された。

エスポ地下研究施設は国際的にも大きな関心を集めている。このプロジェクトへの参加契約に署名している国として、カナダ、フィンランド、フランス、ドイツ、日本、スペイン、スイスおよびイギリスが挙げられる。

このエスポ地下研究施設での作業は、今では廃山となっている Stripa 鉄鉱石鉱山で1977年に開始された現実的な深層処分場環境における国際協力と現場実験の伝統を受け継ぐものである。

操業段階の試験の目的は以下の通りである。

- ・ サイト調査段階における調査手法の検証
- ・ モデルの検証
- ・ 天然および人工バリアの機能の確認
- ・ 処分技術のデモンストレーション

4番目のデモンストレーションのためには種々の要因に関して試験を行う必要がある。これらの要因を満足するためにHRLにおいて以下の試験が実施されている。

- ・ Prototype Repository
- ・ Demonstration of Deposition Technology
- ・ Canister Retrieval Test
- ・ Backfill and Plug Test
- ・ Long Term Test of Buffer Material (LOT Project)

Prototype Repository は、実際の処分を模擬した実規模の試験であり、処分坑道内に6本の模擬処分を行う。この試験の目的は、処分場の総合機能に関するデモンストレーションと解析モデルによる解析結果との比較を行うことである。この試験には、処分坑道の構造モデル作成手法の確

認、処分孔の掘削工法の確認、緩衝材・キャニスター・埋め戻し材の定置技術の確認、プラグの構築、計測機器の設置などが含まれている。

Demonstration of Deposition technology は、4 本の実規模の模擬処分孔において実施される。この試験の目的は、実際の処分において必要な定置技術、定置装置などを開発および確認することである。そのために、この試験では、放射線を隔離するという条件の下で緩衝材およびキャニスターを定置するための装置を実規模で製作する。

Canister Retrieval Test においては、1 本の実規模の処分孔を使用し、再取り出しのため処分坑道の埋め戻しは行わない。この試験の目的は、飽和した緩衝材の中からキャニスターを取り出す技術を確認することである。

Backfill and Plug Test においては、処分坑道の埋め戻しおよびプラグの構築が実施される。この試験の目的は、種々の埋め戻し材の比較、埋め戻しおよびプラグ構築技術の確認、および埋め戻し材、プラグ、岩盤の総合機能に関する研究を実施することである。この試験で開発された技術は、Prototype Repository においても実施される。

Long Term Test of Buffer Material (LOT Project)は、実際よりは小規模のサイズにおいて実施される試験である。この試験の目的は、人工バリアの長期の挙動について観測することである。

5.2 Prototype Repository プロジェクトの概要

a) 試験の概要

本節では、これらの試験のうち、実規模で実施する連成試験である Prototype Repository についてその試験の詳細を記述する。

この試験の主な目的は以下の通りである。

- ・ KBS-3 コンセプトの具現化
- ・ 処分場のふるまいの観察とモデル（概念および理論）による予測との比較
- ・ 工学的な基準と品質保証方法の開発、試験、デモンストレーション
- ・ 処分場設計、建設手順の模擬
- ・ 最低 20 年に及ぶ長期のモニタリング
- ・ 参加各機関のモデルに対する信頼性確保

Prototype Repository は釜石粘土充填・熱負荷試験⁵⁻²⁾や FEBEX⁵⁻³⁾などと比べ、これまでにない特徴として「設計、建設、操業までの一連の作業が実規模で行われること」、「ガスの挙動評価」、「化学、微生物の影響観察」などがある。また、図 5-1 に示すように処分坑道内に計 6 本のキャニスターを設置し、これらの相互作用などについての観察も行う。各試験ピットでは図 5-2 に示すような形状のキャニスターおよびベントナイトブロックが設置される。岩盤とベントナイトブロックとの隙間にはベントナイトペレットが充填される。処分坑道は図 5-1 に示すように 2 つのセクションに区分けされており、セクション II の試験期間は約 5 年、セクション I の試験期間は約 20 年である。

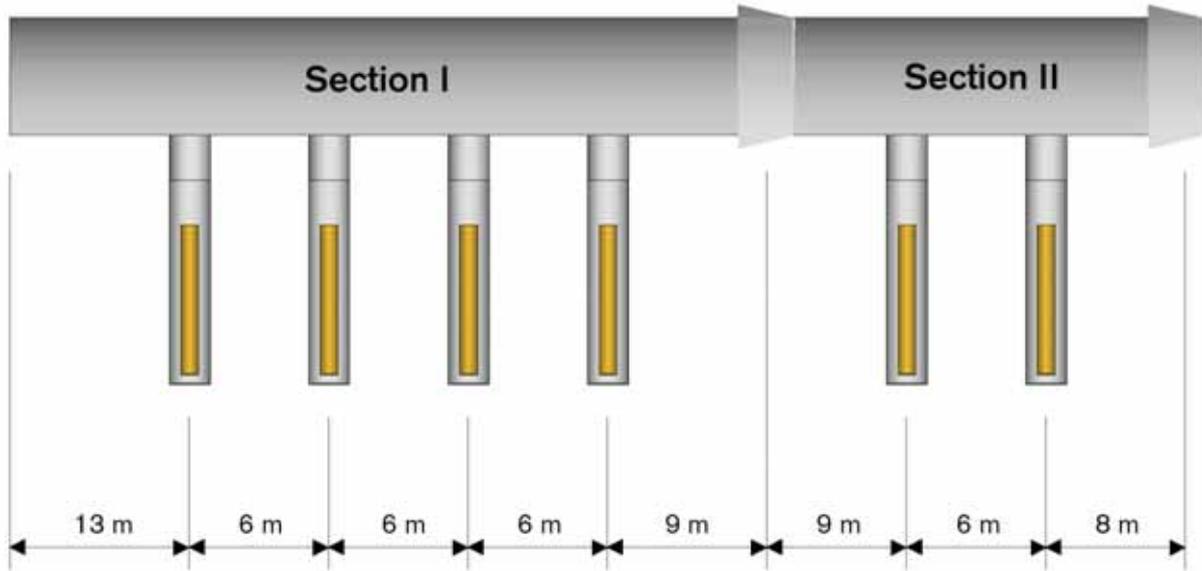


図 5-1 試験坑道の概要⁵⁻¹⁾

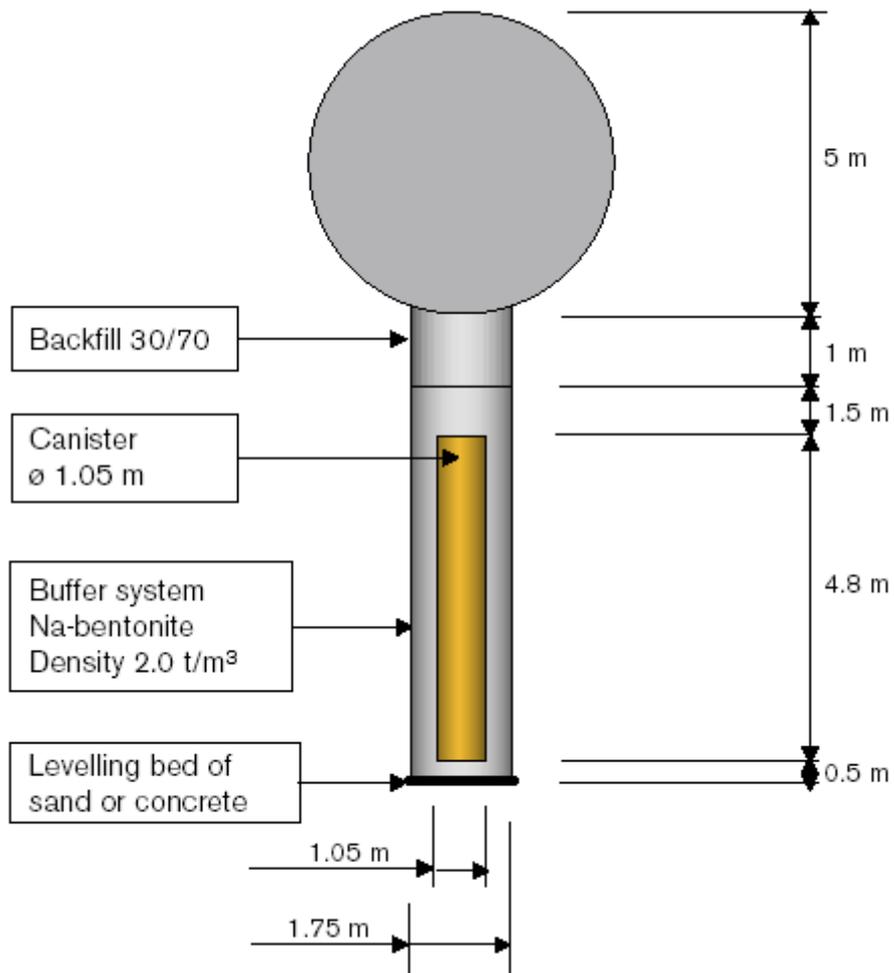


図 5-2 試験ピットの概要⁵⁻¹⁾

キャニスターは、銅/炭素鋼製で長さ 4830mm、直径 1050mm、重量 21.4ton である。また、ヒーターは、ヒーターの表面温度が 100 を超えない(設計温度 90)ように制御される。さらに、ヒーターは温度の現象を考慮できるように設計されている。

キャニスターと岩盤との間には高密度に圧縮されたナトリウム型ベントナイト(MX-80)ブロックが充填される。隙間充填後の乾燥密度が一定になるように初期のベントナイトブロックは設計されており、その結果、キャニスターの上部および下部のベントナイトブロックの初期乾燥密度は 1.66g/cm³、キャニスター周囲のベントナイトブロックの初期乾燥密度は 1.78g/cm³ となっている。また、初期の含水比は 17%となっている。

試験坑道はベントナイトと碎石を用い、原位置施工により埋め戻される。締固め層厚は 20cm で、35°の傾斜で原位置締固めが実施される。ベントナイトと碎石の混合率は 30 : 70 である。また、試験坑道では 2 つのコンクリートプラグが構築される。コンクリートプラグは 4.5MPa の水圧と 100kPa の埋め戻し材の膨潤圧に耐えるように設計される。

b) 計測機器

試験期間中は岩盤内、緩衝材内および埋め戻し材内において熱、水、応力の各現象に関する種々の計測が実施される。また、ガス挙動、間隙水の化学変化、微生物活動などに関する調査も行われる。各現象に関する挙動は適切な位置に設置された計測機器で計測される。エスポ地下研究施設は海底下であるため地下水の塩濃度は 1.2% から 1.5% である。また、温度がヒーター近くで 90 近くにまでなること、地圧が 15MPa 程度、間隙水圧が 5MPa 程度と高いこと、および試験期間が長期にわたることなどを考慮して計測機器の開発が行われた。計測機器の材質に関しては、ステンレス、インコネル(ニッケル 80%、クロム 14%、鉄 6% からなる高温、腐食に強い合金)、チタン、プラチナ、プラスチックなどの多くの候補材料の中から、最終的に上記の試験環境を考慮してチタンを使用することとなった。表 5-1 には、計測機器による計測項目および数量を示す。

温度は、T、J、K の各タイプの熱電対により計測される。また、光ファイバーシステム、抵抗式温度計なども使用される。これらの計測機器による計測範囲は 0 ~ 200 である。計測機器は耐食性の材質で作られた外被やシースで保護され設置される。

圧力および間隙水圧は、油圧式の測定器により間接的に計測されるか、圧力計により直接的に計測される。圧力計には振動弦式(Vibrating wire)および電気抵抗式の両者が用いられる。圧力計の計測範囲は、間隙水圧が 0 ~ 5MPa、圧力が 0 ~ 15MPa である。また、圧力計は以下の温度に耐えうように設計されている。

- ・ 埋め戻し材内 : 0 ~ 40
- ・ 緩衝材内 : 0 ~ 120

含水比の測定は、以下の方法で行われる。

- ・ 電気容量式センサーによる相対湿度の測定
- ・ TDR による体積含水率の測定

- ・ サイクロメータによる相対湿度の測定
- ・ 抵抗式センサーによる体積含水率の測定

サイクロメータは埋め戻し材内の含水比の測定に主として使用される。また、サイクロメータは緩衝材内においては緩衝材が飽和に近づいた時点で有効となる。各計測機器の測定範囲は以下の通りである。

- ・ 電気容量式センサー : 0 ~ 100% (相対湿度)
- ・ TDR : 0 ~ 100% (体積含水率)
- ・ サイクロメータ : 95 ~ 100% (相対湿度)
- ・ 抵抗式センサー : 0 ~ 100% (相対湿度)

また、これらの計測機器も圧力計と同様の温度に耐えうるように設計されている。さらに、圧力および間隙水圧にも以下のように対応している。

- ・ 埋め戻し材内 : 0 ~ 40
- ・ 緩衝材内 : 0 ~ 120
- ・ 圧力 : 0 ~ 15MPa
- ・ 間隙水圧 : 0 ~ 5MPa

表 5-1 PRP で使用される計測機器の数量

計測項目	計測機器	個数		
		Section I	Section II	計
温度	熱電対	113	72	185
	光ファイバー	16	10	26
圧力	振動弦式	56	35	91
	光ファイバー	56	35	91
間隙水圧	振動弦式	37	23	60
	光ファイバー	37	23	60
含水比	TDR	45	27	71
	湿度計	84	56	140
	サイクロメータ	50	24	74
計		493	304	797

5.3 ベントナイト MX-80 の特性

緩衝材として使用されているアメリカ・ワイオミング産のベントナイト MX-80 に対する各種物性試験が、SKB によって実施されている^{5-4) 5-5)}。以下に試験により得られたパラメータについて示す。

a) 熱特性

熱伝導率 λ [W/m/K] は、飽和度 S_r [-] の関数として測定されている。回帰曲線は以下のようになる。

$$\lambda = 0.300 - 0.221S_r - 1.28S_r^2 + 16.4S_r^3 - 23.1S_r^4 + 8.44S_r^5 + 0.793S_r^6 \quad (5-1)$$

比熱 $(\rho c)_m$ [kJ/m³/K] は、含水比 w の関数として、以下のように得られている。

$$(\rho c)_m = \rho_w \frac{80.0 + 4.2w}{100 + w} \quad (5-2)$$

b) 水理特性

間隙比の異なる供試体に対して、種々の温度環境下で透水係数の測定が行われており、固有透過度は間隙比の関数として、以下のように表されることがわかっている。

$$K = 1.81 \times 10^{-20} (e)^{4.30} \quad (5-3)$$

また、不飽和透水係数に関しては、比透水係数 r_k を飽和度のべき乗として以下のように同定している。

$$r_k = S_r^3 \quad (5-4)$$

水分特性曲線は、サクションを蒸気圧法で測定することにより、図 5-3 のように求められている。van Genuchten モデルによるフィッティングにより、以下のようになる。

$$S_r = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^n \right\}^{-m} \quad (\text{van Genuchten モデル}) \quad (5-5)$$

ただし、

$$m = 1 - 1/n$$

$$\alpha = 5.2 \times 10^{-4} \text{ [1/m]}, \quad n = 1.70 \text{ [-]}$$

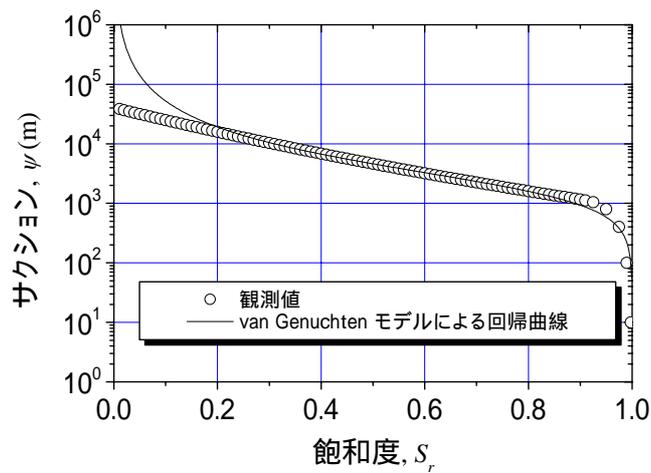


図 5-3 水分特性曲線

また、温度勾配水分拡散係数を同定するために、熱-水連成試験が行われている。本研究で用いる連成モデルで同定された結果、温度勾配水分拡散係数は、以下のように決定されている⁵⁻⁶⁾。

$$D_{Tv} = D_{Tvb} \quad (0.3 \leq S_r \leq 0.7) \quad (5-6a)$$

$$D_{Tv} = D_{Tvb} \cdot \cos^a \left(\frac{S_r - 0.7}{0.3} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (0.7 \leq S_r) \quad (5-6b)$$

$$D_{Tv} = D_{Tvb} \cdot \sin^b \left(\frac{S_r}{0.3} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (S_r \leq 0.3) \quad (5-6c)$$

ここに、

$$D_{Tvb} = 2.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s/K}$$

$$a = 6$$

$$b = 6$$

この場合の温度勾配拡散係数と飽和度の関係は図 5-4 のようになる。

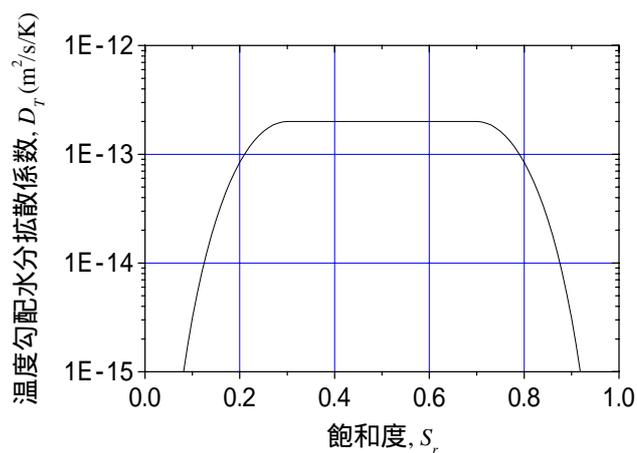


図 5-4 温度勾配水分拡散係数と飽和度の関係

c) 力学特性

オedometer試験により e - $\log p$ 曲線が得られており、体積弾性係数 κ は以下のように求められている。

$$\kappa = 0.2 \quad (5-7)$$

また、ポアソン比 ν は以下のものである。

$$\nu = 0.4 \quad (5-8)$$

d) 化学特性

ベントナイト MX-80 は Na 型ベントナイトであり、モンモリロナイト含有率は約 75% である。その他の主な成分は、斜長石 (5 から 8%)、石英 (10 から 15%) であり、他に黄鉄鉱、方解石、岩塩、無水石膏およびカオリナイト、イライトなどである。MX-80 の鉱物学的、物理化学的データを表 5-2⁽⁵⁻⁷⁾ に示す。

表 5-2 ベントナイト MX-80 の地化学データ⁵⁻⁷⁾

Property	Value
Montmorillonite content	75 wt. %
Cation Exchange Capacity (CEC)	85.0 meq/100g
Edge sites (OH groups)	2.8 meq/100g
Exchangeable Na	81.7 %
Exchangeable Mg	3.9 %
Exchangeable Ca	14.1 %
Exchangeable K	0.3 %
Total carbonate (CaCO ₃)	1.4 wt. %
Total quartz (SiO ₂)	10 wt. %
Total pyrite (FeS ₂)	0.3 wt. %
CaSO ₄ impurities	0.34 wt. %
NaCl impurities	0.007 wt. %
Plagioclase (Mainly albite)	5 to 9 wt. %
Illite	0 to 4 wt. %
Kaolinite	<1 to 7 wt. %

5.4 解析に用いる物性値の設定

不飽和透水係数に関して、式(5-4)に示す比透水係数から水分拡散係数の同定を行った。同定した水分拡散係数を図 5-5 (実線) に示す。これまで扱ってきたベントナイト (クニゲル V1) と異なり、体積含水率が低い領域での水分拡散係数が大きくないことがわかる。体積含水率が低い領域では、van Genuchten モデルによる水分特性曲線のフィッティングが良くできなかったことも要因として考えられるが、VG 回帰曲線はサクシオン勾配を大きく見積もっており、逆に水分拡散係数を大きく評価するはずであるが、逆となっているため、水分拡散係数が小さくなる主な原因ではない。そこで、浸潤試験のシミュレーションにより、水分拡散係数を再同定することとした。

浸潤試験は、高さ 50mm の供試体で、初期間隙比 0.75、初期飽和度 0.4 とし、下端から圧力 0kPa で浸潤させる。各時間ステップにおける飽和度分布が計測されている。同じ境界条件、初期条件の下、 $\Delta z=1\text{mm}$ とした 1 次元メッシュで解析を行った。水分拡散係数は比透水係数の関数であるため、比透水係数を同定することで、水分拡散係数を同定した。VG パラメータは式(5-5)の値を用いた。解析結果と実測値を比較したものを図 5-6 に示す。このとき、比透水係数は、

$$r_k = S_r^{2.2} \quad (5-9)$$

が得られた。このときの水分拡散係数は、図 5-5 (破線) に示したとおりである。水分拡散係数は、クニゲル V1 と同様に体積含水率に対し、U 字型となっており、より正しい物性値が同定されたといえる。

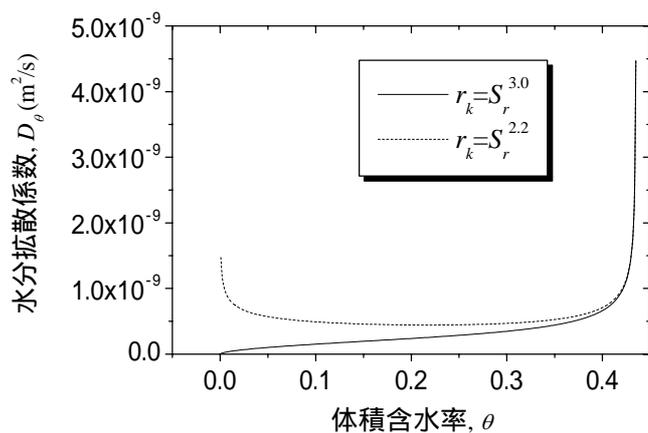


図 5-5 同定された水分拡散係数
(実線：修正前、破線：修正後)

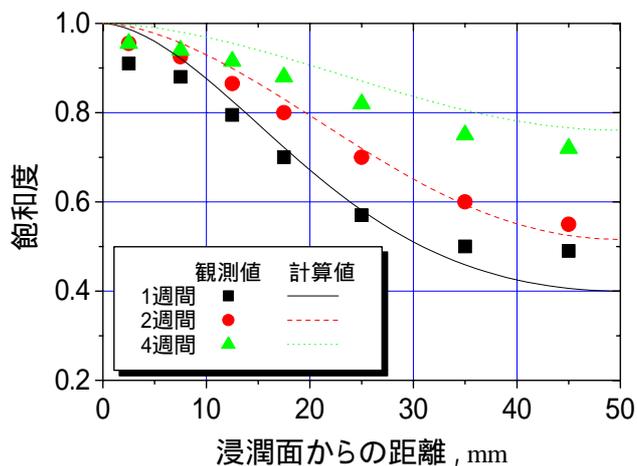


図 5-6 浸潤試験のシミュレーションによる不飽和透水特性の同定

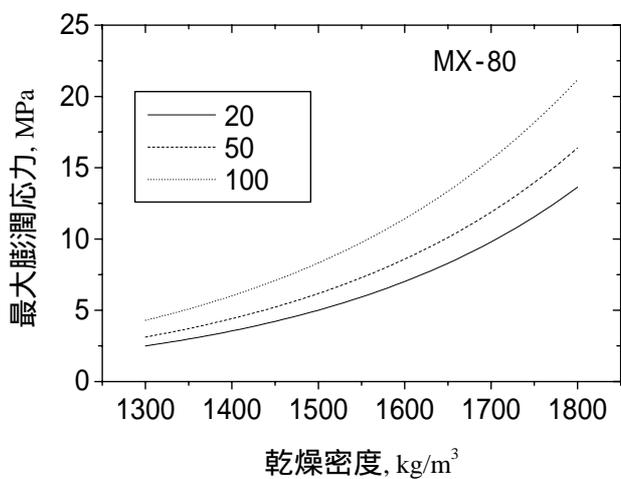


図 5-7 ベントナイト MX-80 の最大膨潤応力

一方、弾性係数は、

$$E = 3K(1 - 2\nu) = 3(1 + e_0) \frac{P}{\kappa} (1 - 2\nu) \quad (5-10)$$

となり、拘束圧 p に依存するが、第 4 章で示したように再冠水時の緩衝材中の密度変化はほとんどないことから、微小ひずみ領域で線形弾性および拘束圧 2.5MPa を仮定し、弾性係数 E を 13MPa と仮定する。

不飽和膨潤応力に関するパラメータ F は、第 4 章で実測値と良く一致したものを採用することとした。すなわち、

$$F = 2\sigma_{sw \max} (1 - S_r) \frac{\partial S_r}{\partial \psi} \quad (5-11)$$

最大膨潤応力は、表 5-2 で示した陽イオン交換容量およびモンモリロナイト含有率を用い、第 4 章で示した膨潤評価式(4-1)～(4-7)に適用し、最大膨潤応力を求めた。ただし、モンモリロナイトの密度などは、表 4-1 で示したクニゲル V1 と同じ値を用いた。この時の最大膨潤応力の乾燥密度に対する変化を図 5-7 に示す。ベントナイト MX-80 の膨潤応力は、他のベントナイトに比べ、かなり大きい値を示すことが特徴である。

5.5 解析条件および解析結果

解析モデルは 3 次元とし、図 5-8 に示す廃棄体 1 本のみモデル (1/4 モデル) および図 5-9 に示す廃棄体 2 本のモデル (1/2 モデル) の 2 種類を用いた。前者は、処分孔が周期的に配置されていることを仮定しており、実際のもとは異なる境界条件である。一方、後者は隣り合う廃棄体同士の影響も含めて境界を考慮することができる。

メッシュ作成において簡単のため、処分坑道、処分孔およびヒーターを矩形とした。解析の初期条件は、岩盤で 400m の全水頭 (処分孔上部を基準面とする) とし、緩衝材および埋め戻し材で飽和度 60% とし、温度は全領域で 20 とした。また、緩衝材の初期間隙比は 0.75 とした。境界条件は、上下端面で温度および水頭を固定し、廃棄体 1 本モデル (1/4 モデル) では他を断熱不透水境界とし、廃棄体 2 本モデル (1/2 モデル) では $y=0$ の面および $x=5$ の面で温度および水頭を固定した。また、ヒーターからの発熱量は 1800W で固定とした。

変形解析は、廃棄体 1 本モデルのみで行い、さらに緩衝材内部のみとした。これは、廃棄体 2 本モデルでは自由度が大きくなってしまふこと、および、廃棄体 1 本モデルと廃棄体 2 本モデルの違いは、境界条件のみであり、力学的挙動に相違はないと考えられるためである。

図 5-10 は廃棄体 1 本モデルの観測点における温度の経時変化を示したものである。観測点は、ヒーターと水平で、 $y=0$ の線上の各点である。ヒーターからの発熱量を一定としているために温度は上昇し、約 1000 日でも上昇している。数 100 日程度で温度上昇の傾向がやや変化しているが、

これは緩衝材が飽和に至り、熱伝導率の変化が小さくなったためである。図 5-11 は、廃棄体 1 本モデルの緩衝材内部および緩衝材近傍の岩盤における飽和度の経時変化を示したものである。ヒーター近傍では緩衝材の飽和度は解析開始より 200 日程度まで低下しており、最小値は約 40%となっている。また、岩盤近傍では解析開始初期より飽和度は岩盤からの地下水の浸入に伴い上昇している。最終的にヒーター近傍まで飽和に至る時間は約 1000 日となっており、再冠水時間は緩衝材の厚さが小さいために第 2 次取りまとめの結果と比べて短い結果となっている。図 5-12 は 1/4 本モデルの廃棄体および岩盤に掛かる応力の経時変化を示したものである。両者は若干異なるものの、飽和に至るに連れ、膨潤応力の影響で応力が大きくなっていることがわかる。図 5-13、および図 5-14 には廃棄体定置後の処分場付近の温度分布および緩衝材内の飽和度分布をそれぞれ示す。

図 5-15 は廃棄体 2 本モデルの観測点における温度の経時変化を示したものである。 $x=5\text{m}$ の面で温度を固定していることにより、廃棄体 1 本モデルに比べて温度は低く評価されていると同時に、温度はピークを持って低下している。さらに $y=0\text{m}$ の面の温度を固定しているために、2 本の処分孔内の温度もやや異なっており、温度を固定している境界に近い処分孔（図 5-15(a)）で温度は低く評価されている。図 5-16 は廃棄体定置後の温度分布を示したものである。 $y=0\text{m}$ の境界で温度を固定している影響が確認できる。図 5-17 は廃棄体 2 本モデルの観測点における飽和度の経時変化を示している。廃棄体 1 本モデルに比べて、やや飽和に至るまでの時間が長くなっている。この原因としては温度が低いことにより水分拡散係数が小さいことなどが考えられるが、この差はほとんどない。また、2 本の処分孔での飽和度の推移も若干異なるが、これも無視できるほどである。図 5-18 は廃棄体定置後の飽和度分布を示したものである。温度分布に比べて境界条件の影響は小さいことがわかる。

図 5-19 および図 5-20 は廃棄体 1 本モデルおよび廃棄体 2 本モデルの比較を示す。廃棄体 1 本モデルに比べて廃棄体 2 本モデルの方が温度は低くなっているが、これは廃棄体の数が 1 本および 2 本であることの違いよりは境界条件の影響が大きいと考えられる。また、廃棄体 2 本モデルにおいて各廃棄体近傍での挙動が異なるのは各廃棄体に近い境界の設定の違いによるものである。

これらの解析結果から、温度分布は境界に依存しやすいことが確認され、温度を正確に評価するためにも、境界条件は充分検討しなければならないと考えられる。また、飽和度に関しては、設定した岩盤の透水性に依存するものであるが、本解析では緩衝材内部のみ不飽和となる傾向が得られた。そのため、緩衝材内部の飽和度に対しては、境界の影響はあまりないと言うことができる。これは、各現象に対してその影響範囲が異なることを意味しており、メッシュサイズなども各現象に対応するように設定する必要性も示唆している。ただし、今回、緩衝材の飽和度に関して境界条件の影響が少なかったのは、坑道掘削等の現象を考慮していないためであって、掘削による岩盤内の水圧変化等を考慮すると境界条件の設定の方法により緩衝材内の飽和度の分布は変わってくるものと考えられる。

Prototype Repository プロジェクトの解析は、事前解析ということもあり、正当性の低いものではあるが、実測値を用いたキャリブレーションにより、より信頼性のあるモデルを構築できると考えられる。実際の処分場建設の際にも同様の手順が踏まれることを考慮すると、ブラインド解析から実測による検証、将来予測というステップは非常に重要な役割を果たすと考えている。

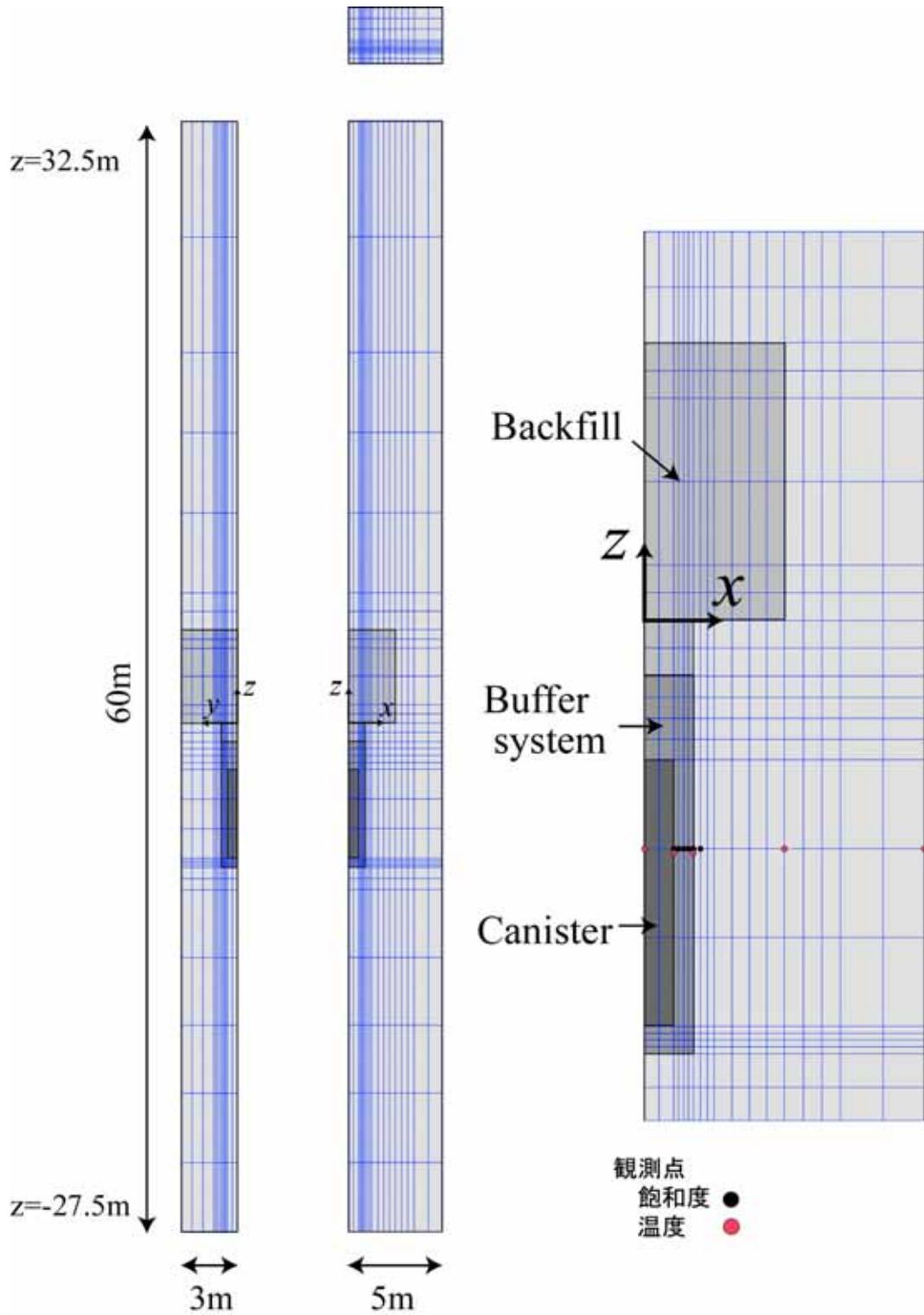


図 5-8 Prototype Repository プロジェクトの解析メッシュ (廃棄体 1 本モデル)

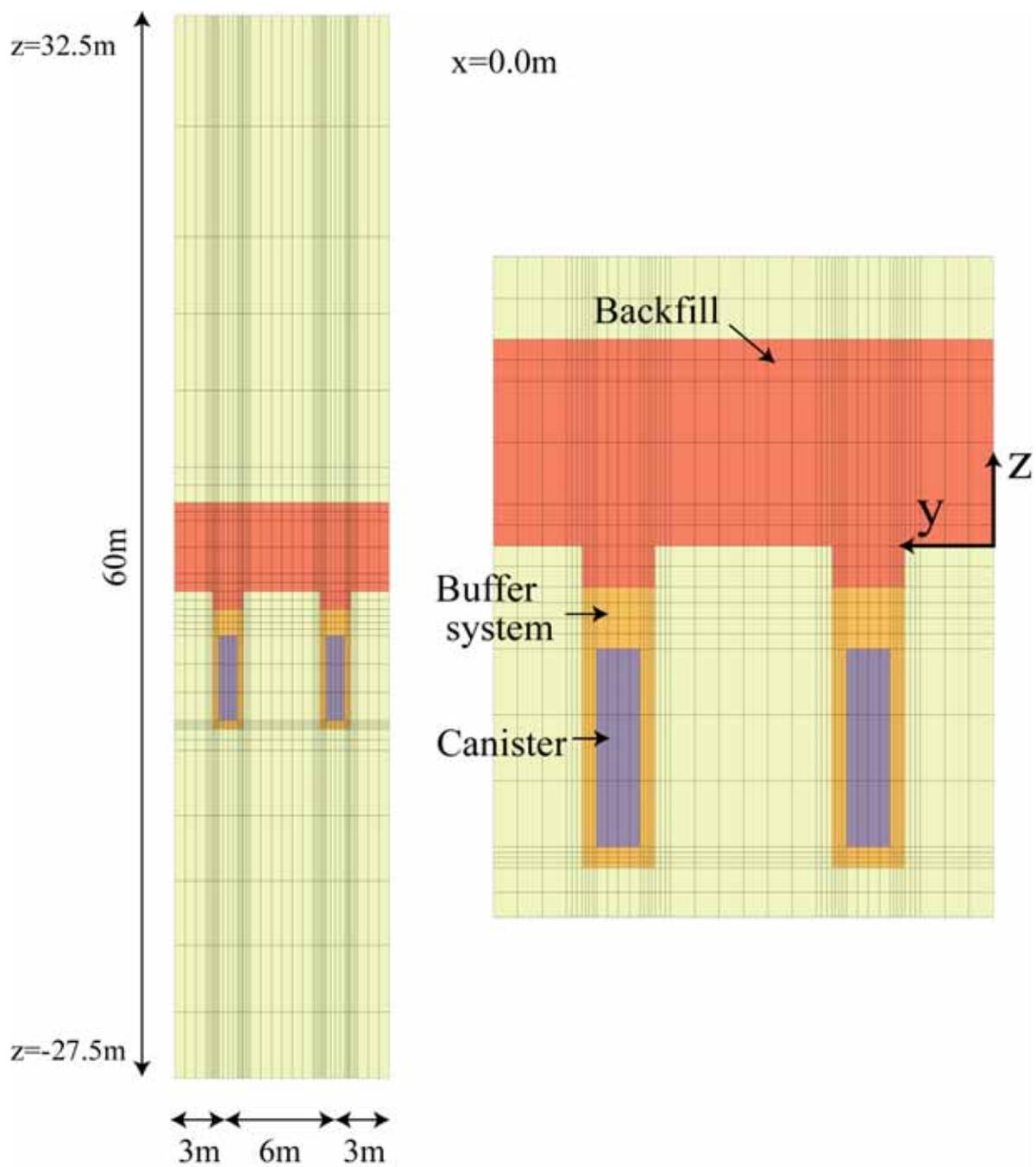


図 5-9(a) Prototype Repository プロジェクトの解析メッシュ (廃棄体 2 本モデル)

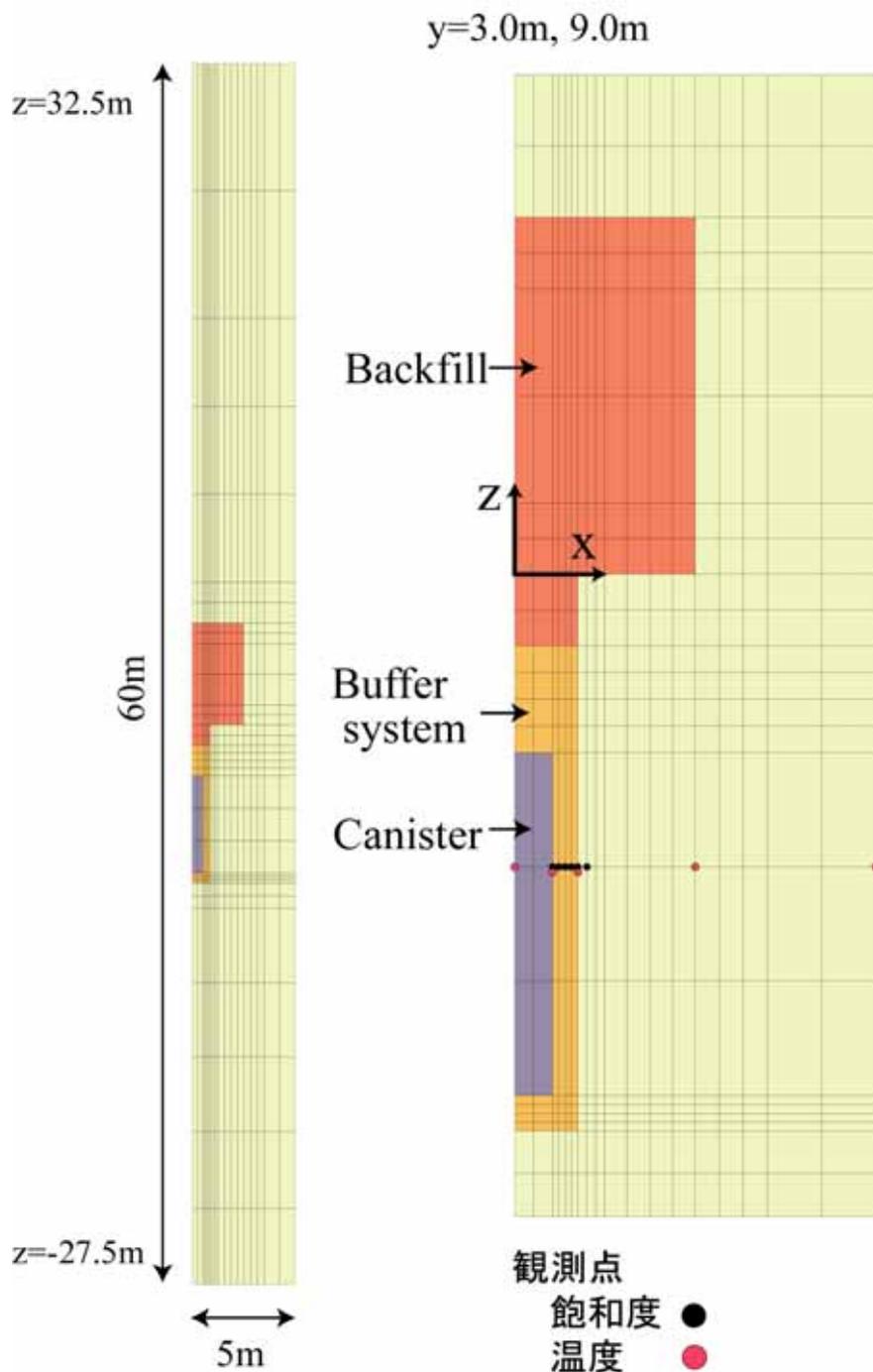


図 5-9(b) Prototype Repository プロジェクトの解析メッシュ (廃棄体 2 本モデル)

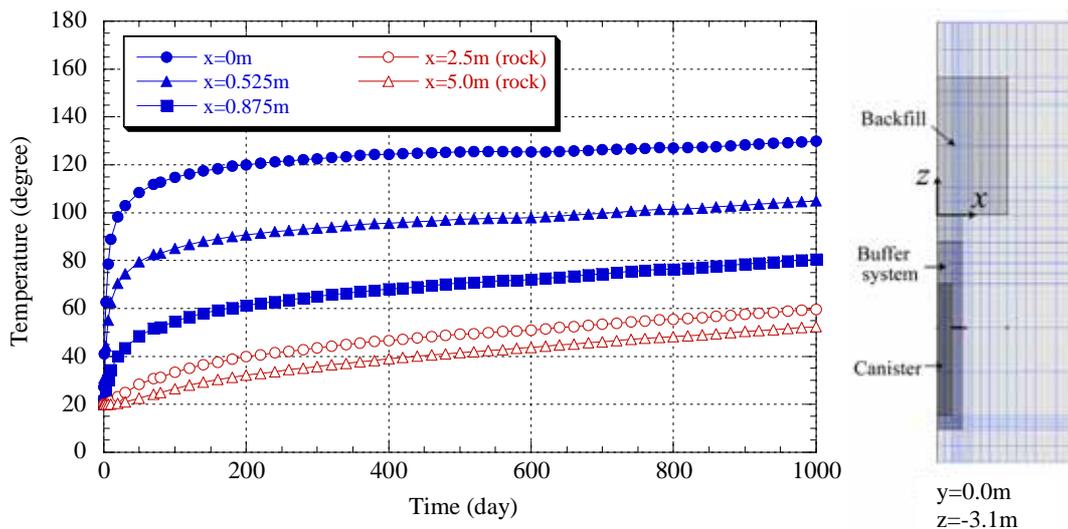


図 5-10 緩衝材および岩盤の各点における温度の経時変化（廃棄体 1 本モデル）

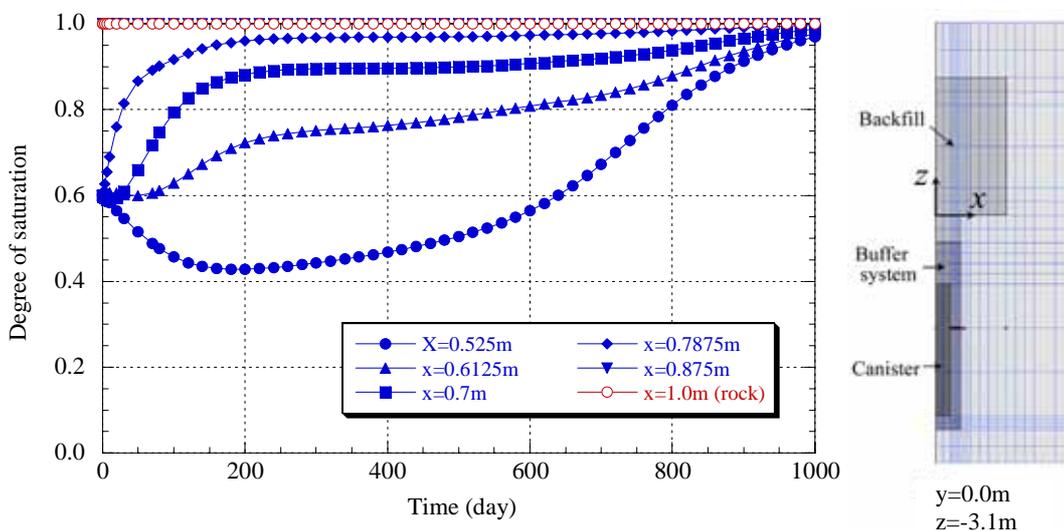


図 5-11 緩衝材および岩盤の各点における飽和度の経時変化（廃棄体 1 本モデル）

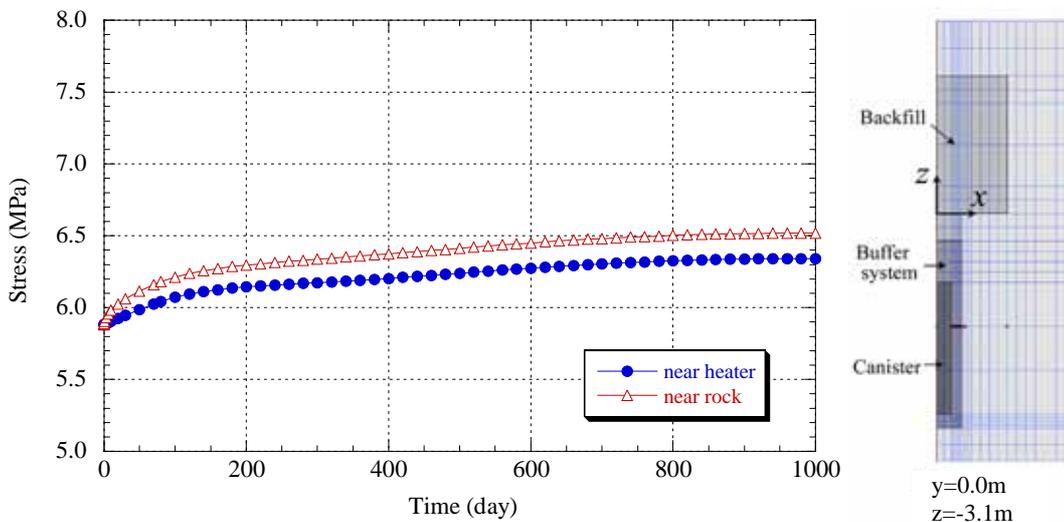


図 5-12 ヒーター・緩衝材に接する岩盤に掛かる応力の経時変化（廃棄体 1 本モデル）

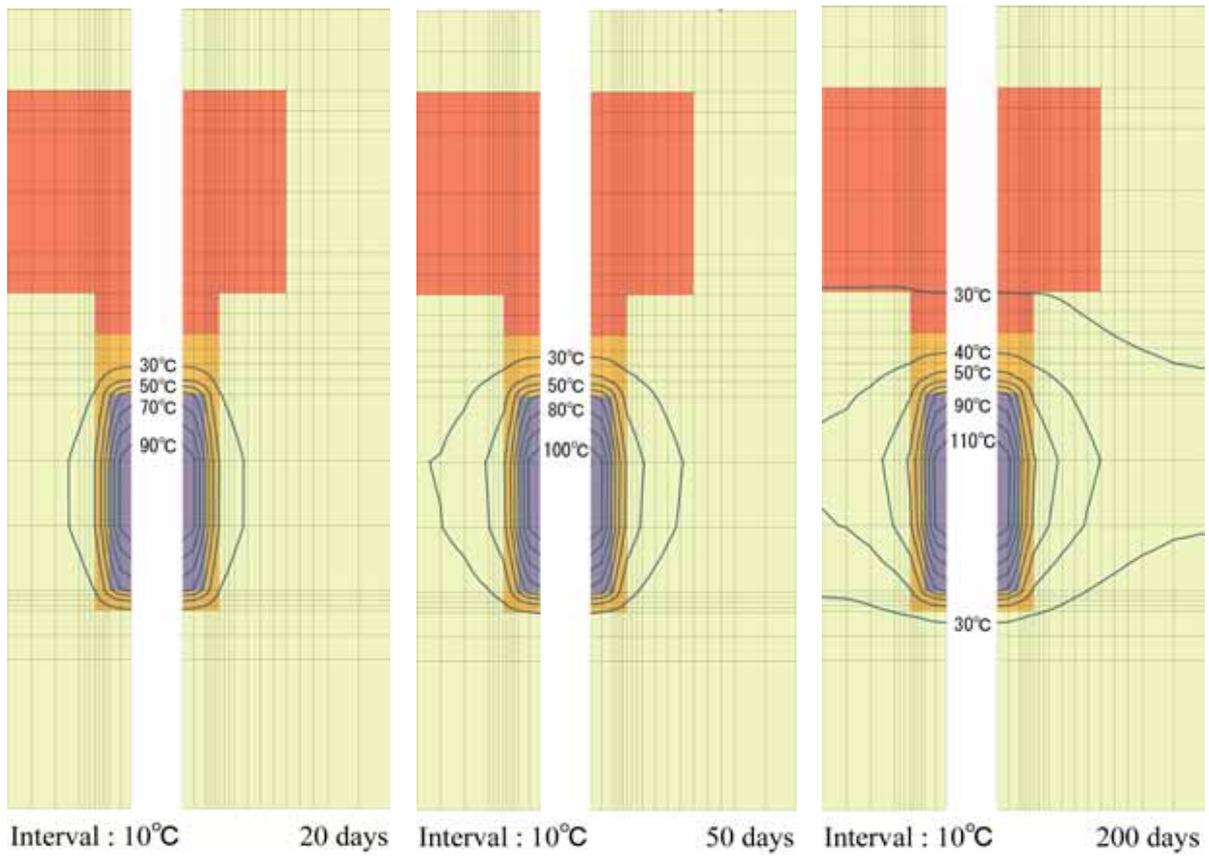


図 5-13 廃棄体定置後の温度分布（廃棄体 1 本モデル）

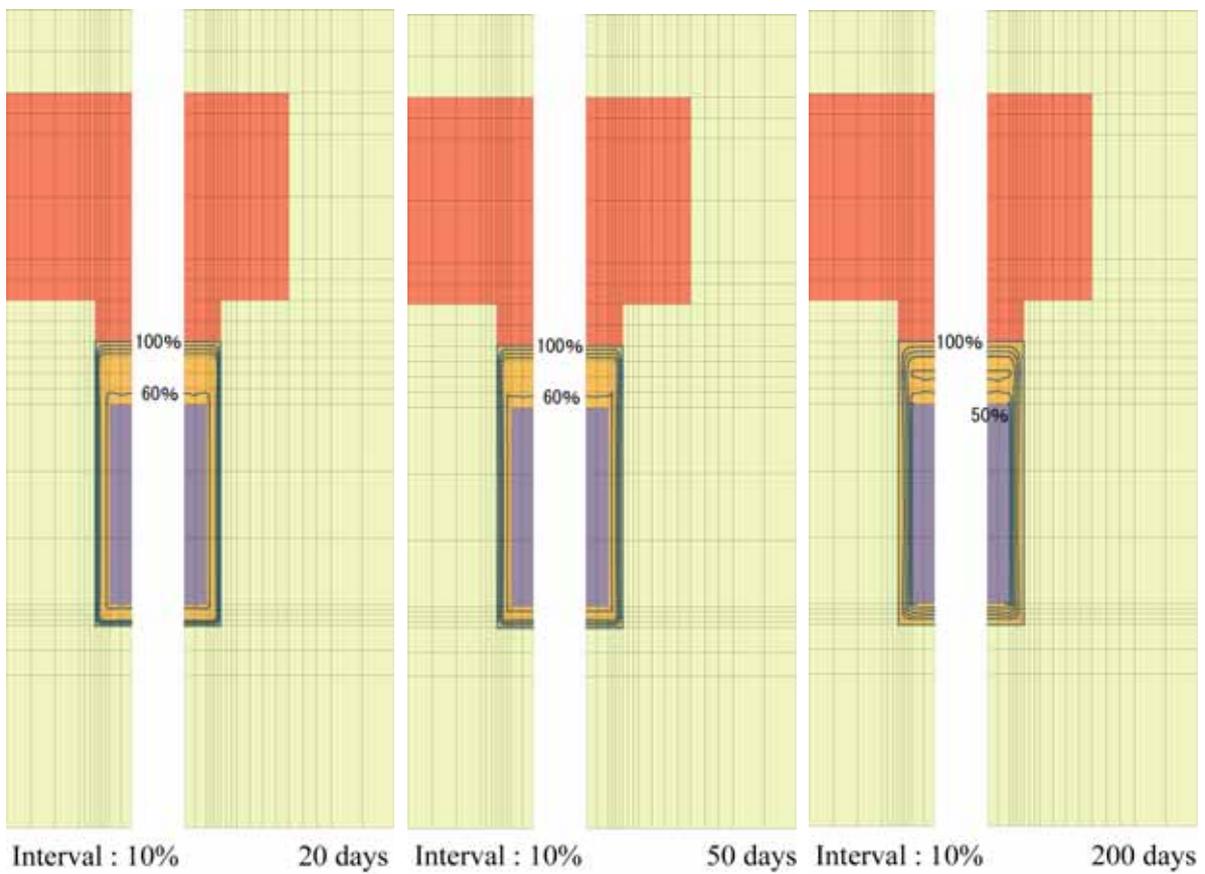
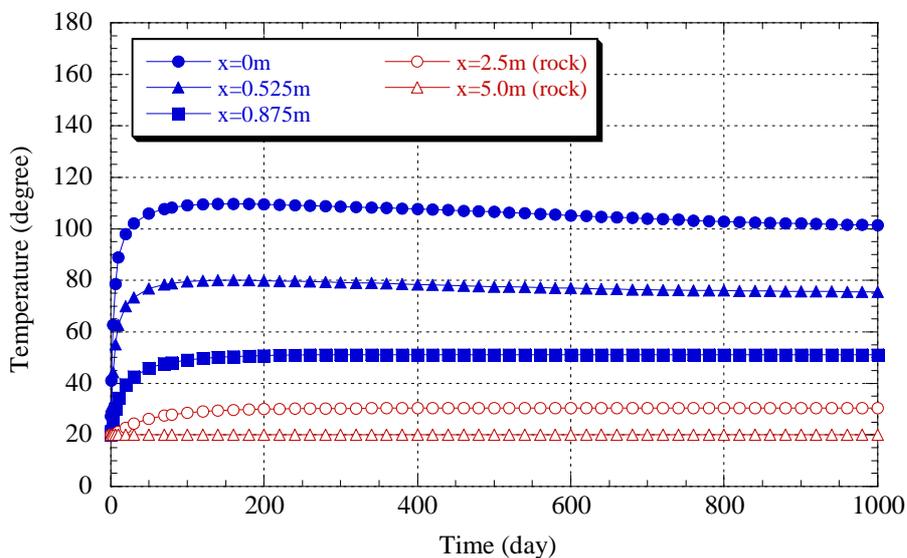
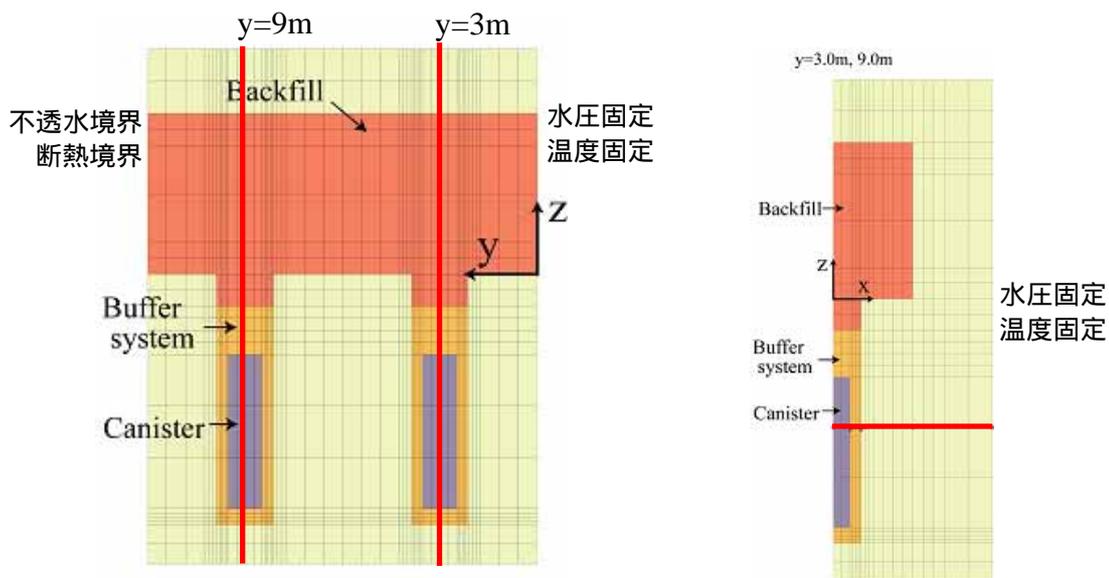
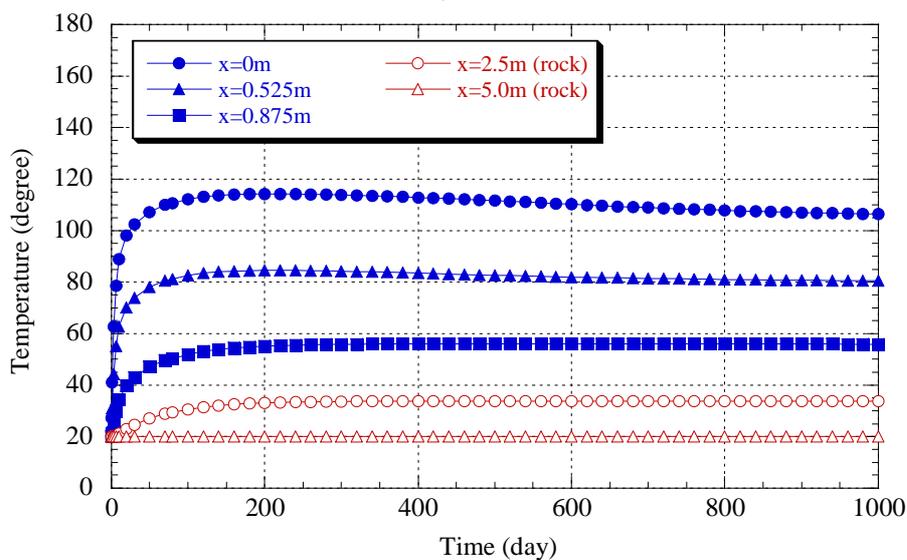


図 5-14 廃棄体定置後の飽和度分布（廃棄体 1 本モデル）



(a) $y=3.0m$



(b) $y=9.0m$

図 5-15 緩衝材および岩盤の各点における温度の経時変化 (廃棄体 2 本モデル)

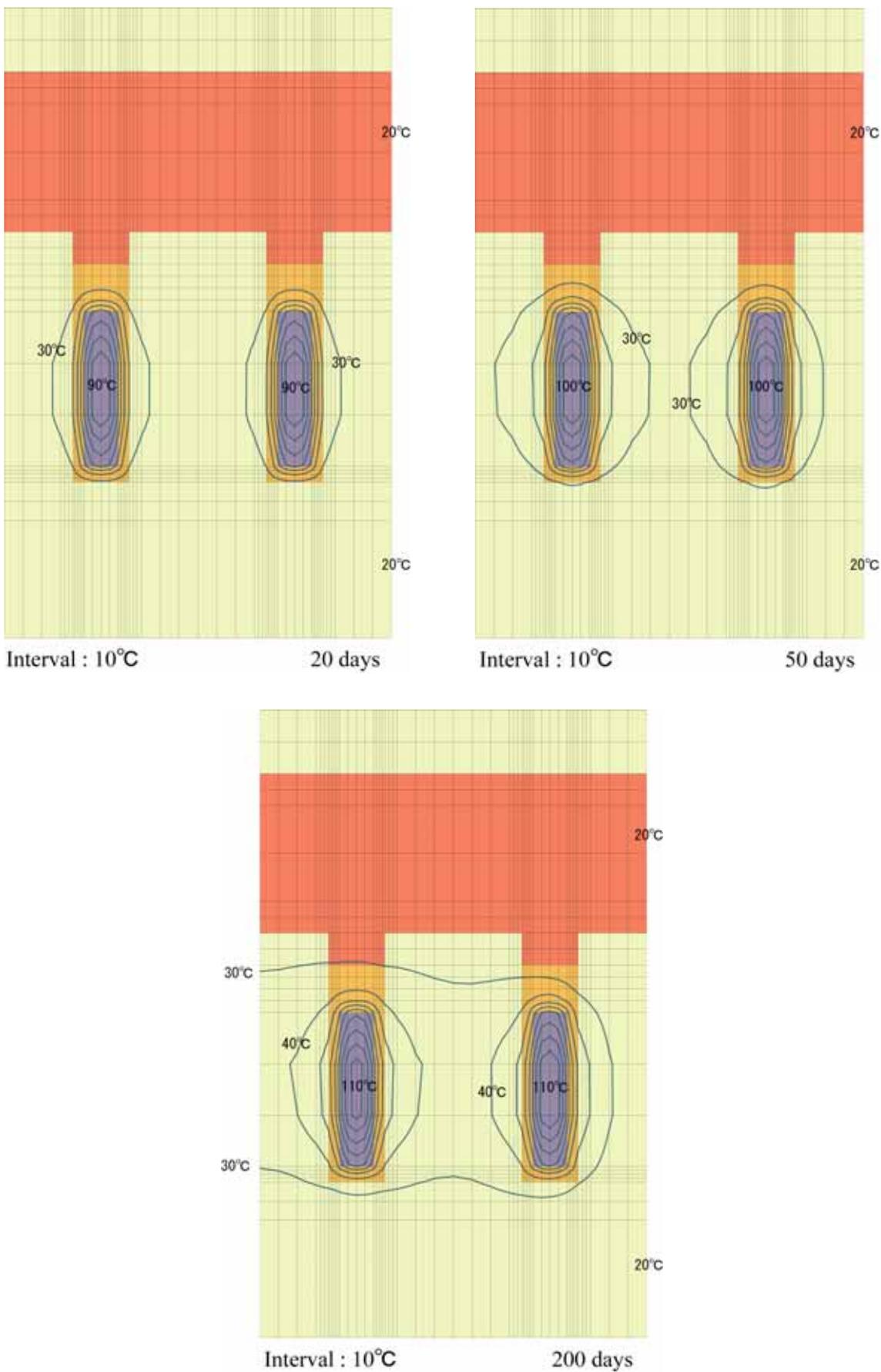
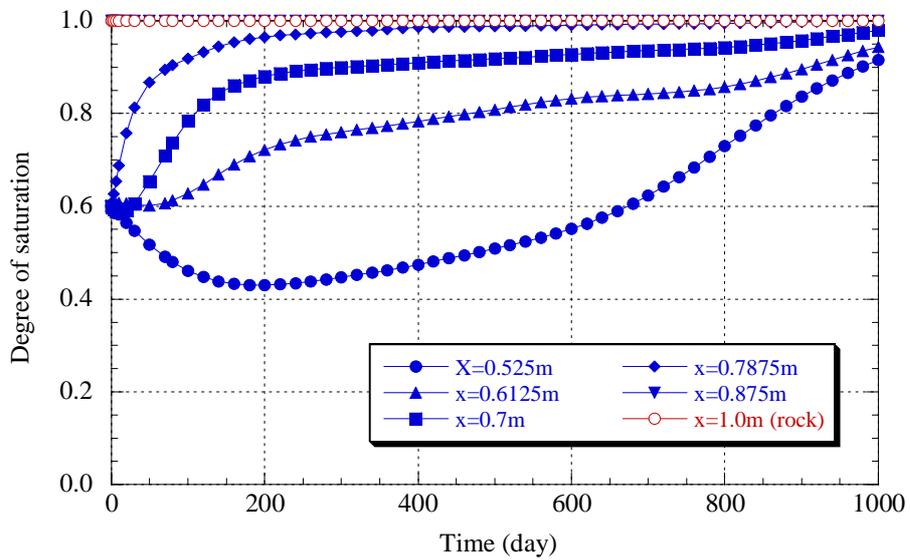
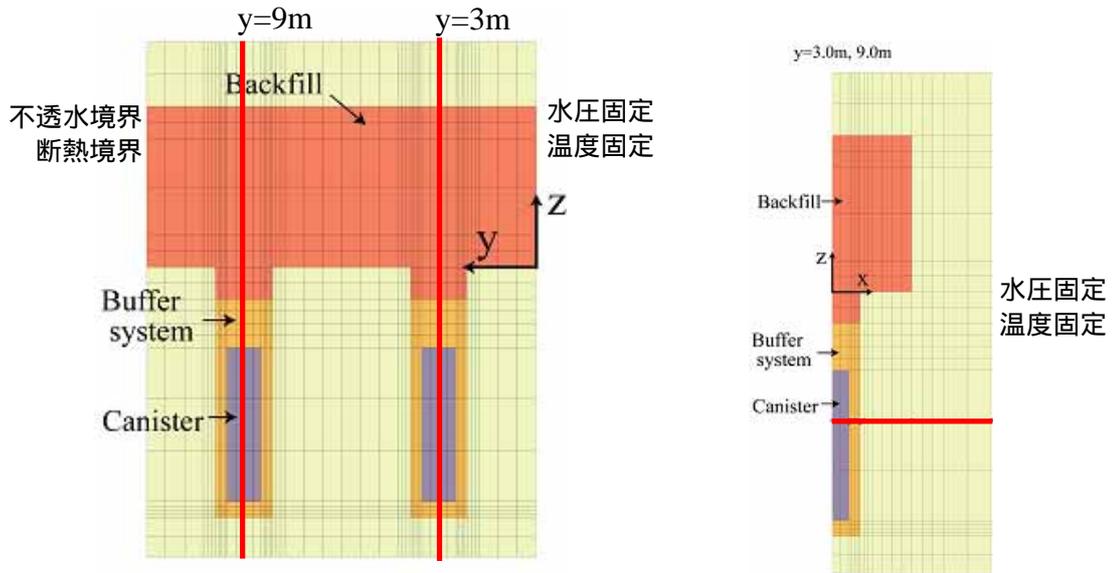
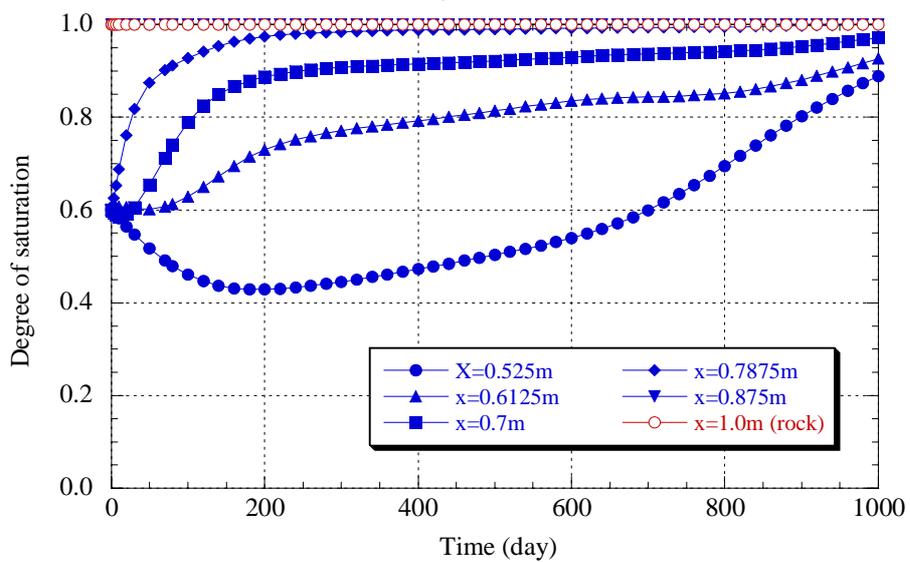


図 5-16 廃棄体定置後の温度分布（廃棄体 2 本モデル）



(a) $y=3.0\text{m}$



(b) $y=9.0\text{m}$

図 5-17 緩衝材および岩盤の各点における飽和度の経時変化 (廃棄体 2 本モデル)

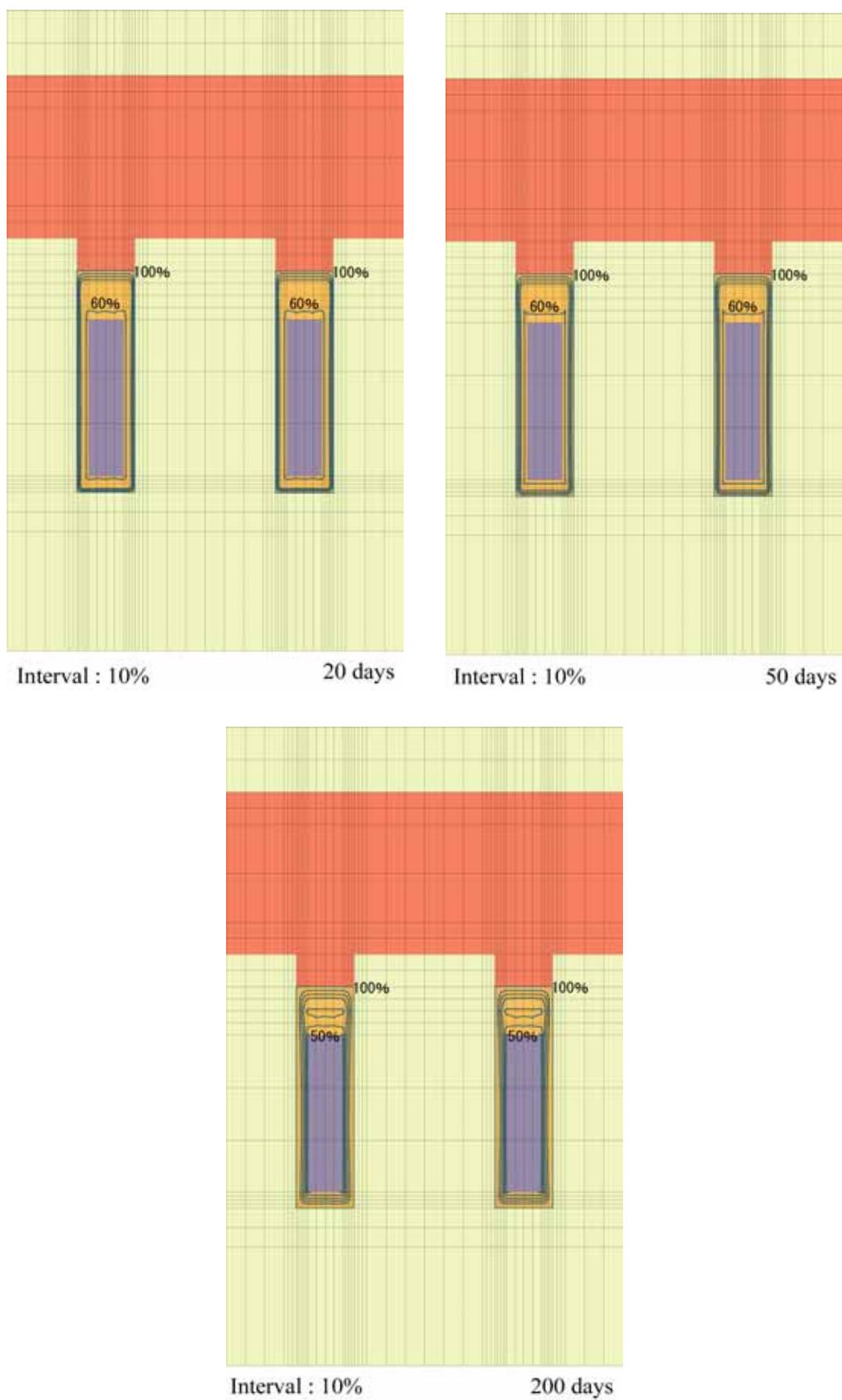


図 5-18 廃棄体定置後の飽和度分布（廃棄体 2 本モデル）

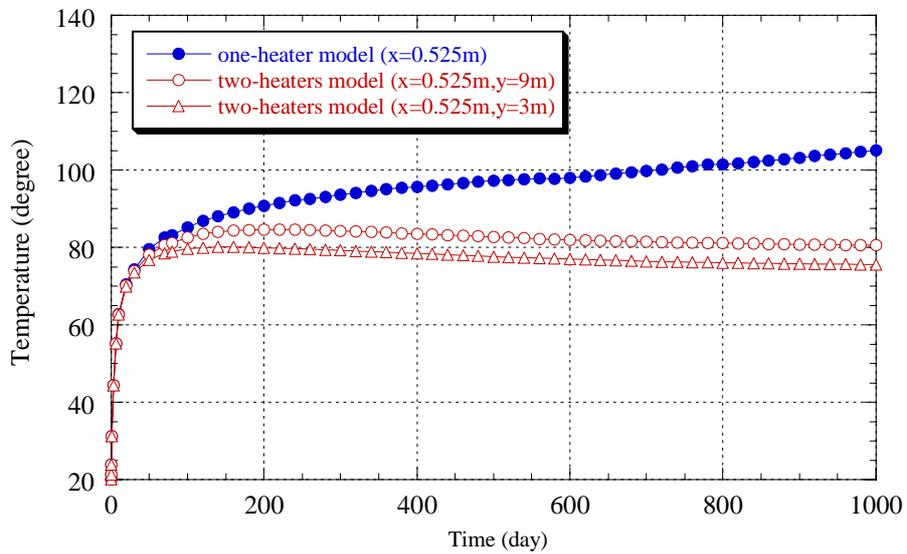
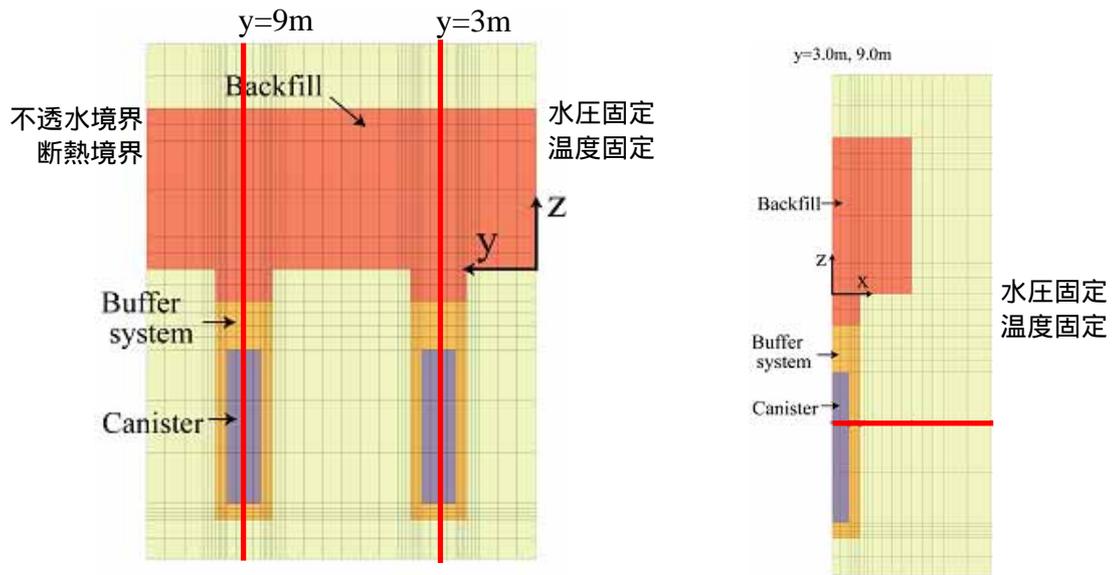


図 5-19 廃棄体定置後の温度の経時変化の比較

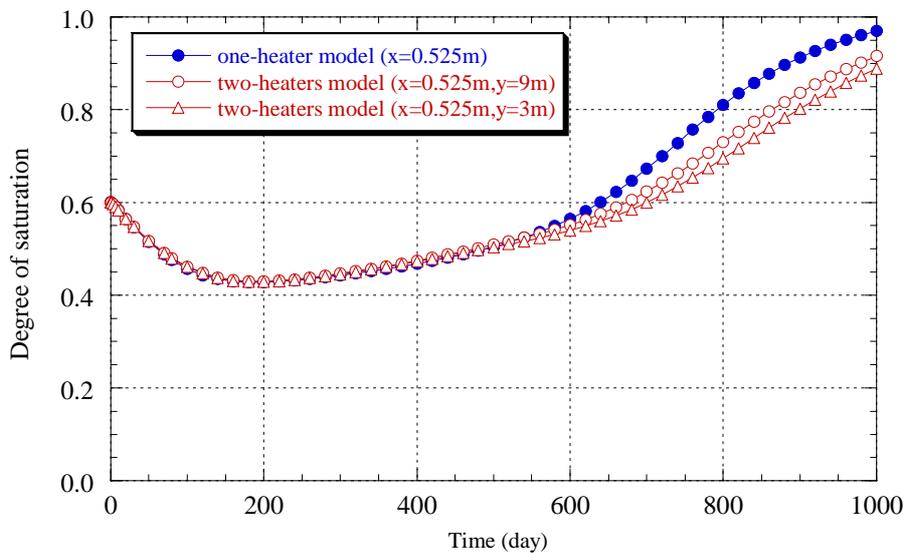


図 5-20 廃棄体定置後の飽和度の経時変化の比較

5.6 まとめ

スウェーデン、エスポ HRL の Prototype Repository プロジェクト (PRP) における実規模原位置試験を対象とした解析により、以下の知見を得た。

- 1) ベントナイトの種類により得られている物性値が異なるが、基礎的データから同定することができる。ただし、不飽和透水係数として比透水係数を用いる場合、不飽和水分特性と比透水係数から水分拡散係数を算定し水分拡散係数が体積含水率に対して U 字型になることを確認することで物理的意味が明確になるため、そのようなステップを踏むことが重要である。
- 2) 原位置試験での不飽和の膨潤応力を推定することは非常に困難である。特に、PRP 原位置試験では緩衝材ブロックを用いており、ブロック間およびブロックと岩盤の隙間が閉鎖されるまで膨潤ひずみが発生するため、膨潤応力の発生が遅れると予想される。ベントナイトは膨潤性が大きいですが、エスポ HRL の地下水のように塩を少なからず含む場合、膨潤ひずみが発生しにくくなるため、地下水組成の影響も膨潤応力の評価を困難にしていると考えられる。

Prototype Repository プロジェクトは、20 年間にも及ぶ試験であり、解析による予測の精度、モデルの改良手順は実際の処分場建設に際して重要な役割を果たすと考えられる。現段階で考察はできないが、2 次元軸対称モデルを用いたパラメトリック・スタディ⁵⁻⁶⁾によって、岩盤の透水性や緩衝材と岩盤、ヒーター間の隙間の有無の影響などが考察されており、このようなアプローチも重要である。また、この試験場は地下水が海水起源であるために、塩分が多く、本解析は、今後の研究で地下水組成の影響を考慮する上でも有益であると考えている。

また、緩衝材内部だけの挙動を考えるだけでなく、埋め戻し材との相互作用、周辺岩盤の影響、周辺岩盤に対する影響を評価する必要もある。本研究では主に緩衝材内部に注目しているが、岩盤における温度や水圧の観測も行われていることから、岩盤側も同時に検討することでより良いモデルが構築できる。緩衝材内部の水分移動は、岩盤の透水性にあまり影響を受けないことが、昨年度までの研究⁵⁻⁶⁾などでも確認されているが、温度は岩盤のモデル化領域も重要となり、岩盤側は緩衝材からのサクシヨンの影響、熱の影響を受けるため、やはり岩盤のモデル化は重要であり、本研究における今後の課題である。同時に、そのような各現象の時間的、空間的な影響領域の違いがあるにも関わらず、同サイズのメッシュ、時間刻みを仮定することは非効率的であり、各現象に対して、メッシュおよび時間刻みの重点化も必要であると考えられる。近年、エレメント・フリー・ガラーキン法を筆頭としたメッシュ・レス法と呼ばれる数値解析手法が盛んに研究されており(例えば⁵⁻⁸⁾)、これらの技術を導入することは今後の連成解析の上で、非常に有効である。このような手法を取り入れれば、Prototype Repository プロジェクトでは、6 本のヒーターを用いた大規模な試験が行われているが、これらを全て含めて解析することも可能になると考えている。

5章 参考文献

- 5-1) SKB :“ Äspö hard rock laboratory - Annual report 2000 ”, SKB Technical Report TR-01-10, (2001)
- 5-2) Fujita, T., Chijimatsu, M., Sugita, Y. and Amemiya, K. :“ Field experiment of coupled T-H-M processes in the near field ”, 5th International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Reserch, Barcelona, (1998)
- 5-3) Enresa :“ FEBEX project final report ”, Publicaciones tecnica 1/2000, (2000)
- 5-4) Börgesson, L. Johannesson, L.-E., Sanden, T. and Hernelind, J. :“ Modelling of the physical behaviour of water saturated clay barriers. Laboratory tests ”, material models and finite element application, SKB Technical Report TR 95-20, SKB, (1995)
- 5-5) Börgesson, L., Fredriksson, A. and Johannesson, L.-E. :“ Heat conductivity of buffer materials ”. SKB Technical Report TR 94-29, (1994)
- 5-6) Sugita, Y., Ito, A., Chijimatsu, M. and Kurikami, H. :“ Aspo Hard Rock Laboratory Prototype Repository : Prediction analysis A for the PRP with the numerical code THAMES ”, International Progress Report IPR-02-24, SKB, (2002)
- 5-7) Bruno, J. Arcos, D. and Duro, L. :“ Processes and features affecting the near field hydrochemistry – Groundwater-bentonite interaction ”, SKB Technical Report TR-99-29, (1999)
- 5-8) 鈴木克幸 :“ メッシュレス法(特集 メッシュレス法 企画趣旨) ”、計算工学、Vol.7 No.1、pp.410、 (2002)

6. おわりに

本研究では、人工バリアの健全性において重要な要因の一つとなる緩衝材の施工技術のうち、緩衝材をブロックで施工した場合等に考えられるブロック間や岩盤あるいはオーバーパックとの隙間の充填性に関する検討を実施した。ベントナイトペレットの充填性および止水性に関する検討を行なった結果、隙間が楔形のような形状であっても、十分な性能が得られることが分かった。隙間が楔形のような形状の場合、ペレット充填時においては隙間の鋭角部にはペレットは充填できていない。しかしながら、地下水が浸潤し、ペレットが膨潤していくことにより鋭角部の隙間にはベントナイトが充填されていき、それに伴い、止水性が発揮されていく。膨潤初期は、鋭角部におけるベントナイトの密度は低いが、時間の経過とともに密度は上昇していき、隙間全体において平均化されていくものと推察される。また、浸潤水が蒸留水ではなく、人工海水である場合のベントナイトペレットの充填性および止水性に関する検討も行なった。その結果、媒体が人工海水になることにより止水性がかなり低下することが分かった。これは、人工海水が媒体となることとによってベントナイト自体の膨潤性能が無くなってしまふことによるものである。ベントナイトのみの場合で初期の空隙が大きい場合や、ベントナイト粉末のみで初期の密度が低い場合が特に止水性の低下が激しい。したがって、地下水の組成によっては、隙間の処理としてベントナイトペレットやベントナイト粉末を用いることは不適切となる可能性があるものと考えられる。しかしながら、ペレット充填時に同時に蒸留水のような水を充填し、最初にこの水によりペレットを膨潤させることにより、十分な止水性を確保できることが分かった。この場合、隙間の形状によってはその施工性が困難になってくると思われるため、今後はその施工性に関してもより詳細な検討が必要になってくると思われる。

また、施工された緩衝材内には、処分後、廃棄体からの発熱、地下水の浸潤、周辺岩盤からの地圧や緩衝材の膨潤といった連成挙動が発現すると考えられる。これらの現象を理解、評価するためには、人工バリアを対象とした原位置での実規模試験の情報に基づき、適切なモデルを構築する必要がある。そこで、緩衝材および岩盤を含めた人工バリア周辺における連成現象に関する試験であるスウェーデン Äspö 等における HRL において実施されている Prototype Repository Project に参加し、試験の解析評価を実施した。なお、それに先立ち、膨潤評価式を解析コードに導入し、その摘要性を確認した。Prototype Repository Project の解析は 3 次元で実施し、廃棄体 1 本を対象にした解析を 1/4 モデルで、廃棄体 2 本を対象にした解析を 1/2 モデルで実施した。その結果、解析領域の違いにより、温度の境界条件の取り方により温度の結果は若干異なってくるが、温度の結果が一致してくるようであれば、緩衝材内の浸潤挙動はほど同じになってくることが分かった。今後は、実測値との比較を行い、解析モデルのキャリブレーションおよび高度化を図っていくことは必要であると考えられる。

付録

付-1 Prototype Repository Project OHP 資料

付-2 Prototype Repository Project OHP 資料

付-1

Prototype Repository Project
OHP資料

PROTOTYPE
REPOSITORY

Current Status of Analysis for Prototype Repository

Yutaka SUGITA
Japan Nuclear Cycle Development Institute
&
Masakazu CHIJIMATSU
Hazama Corporation

JNC

Hazama

PROTOTYPE
REPOSITORY

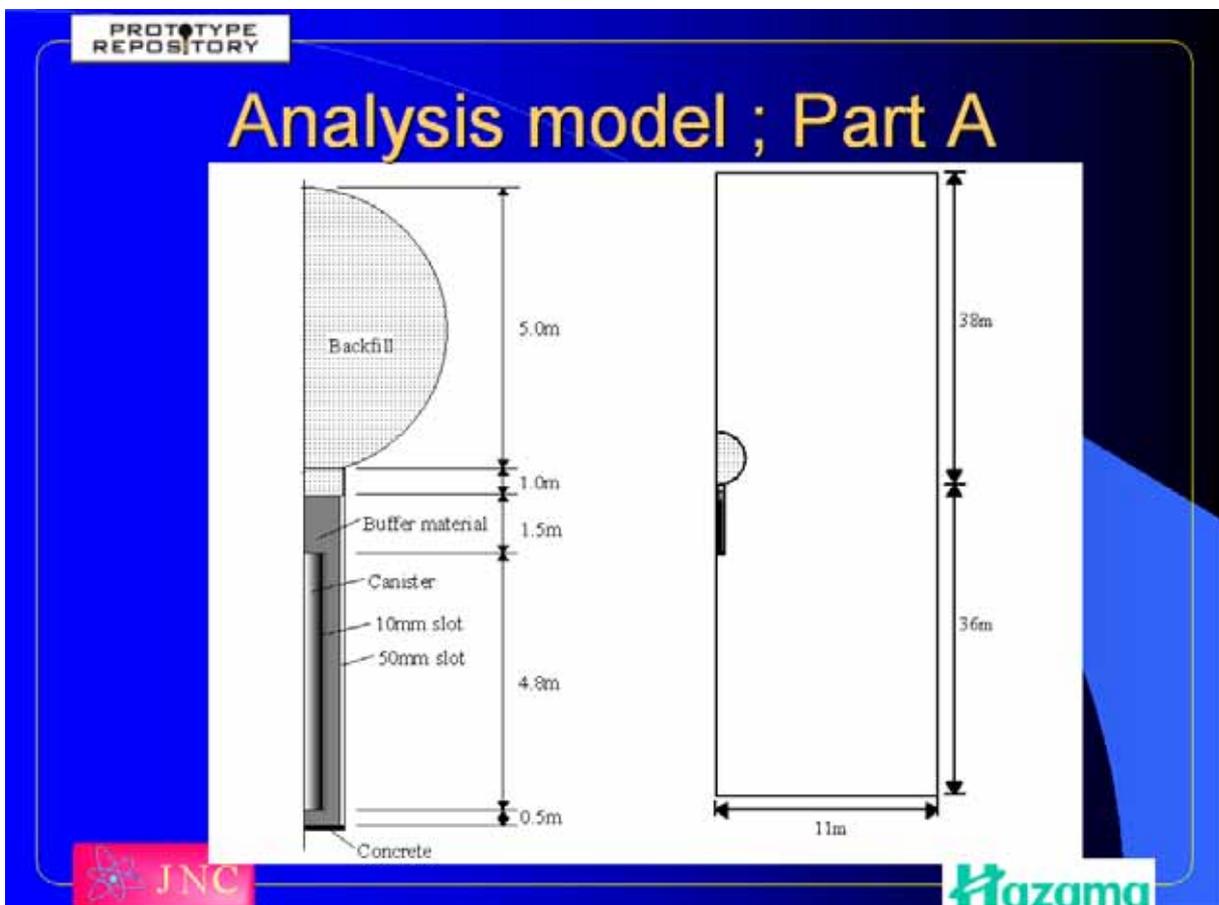
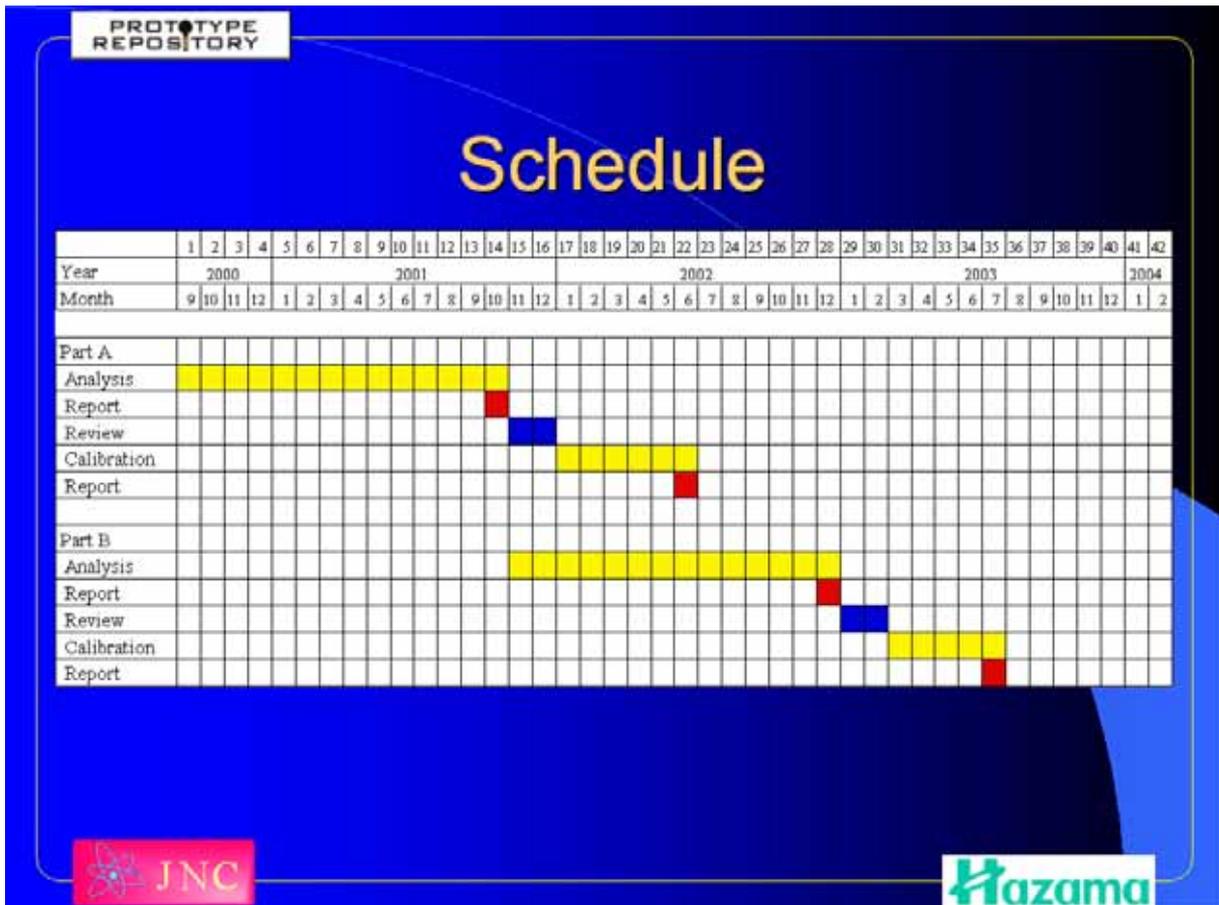
Analysis plan

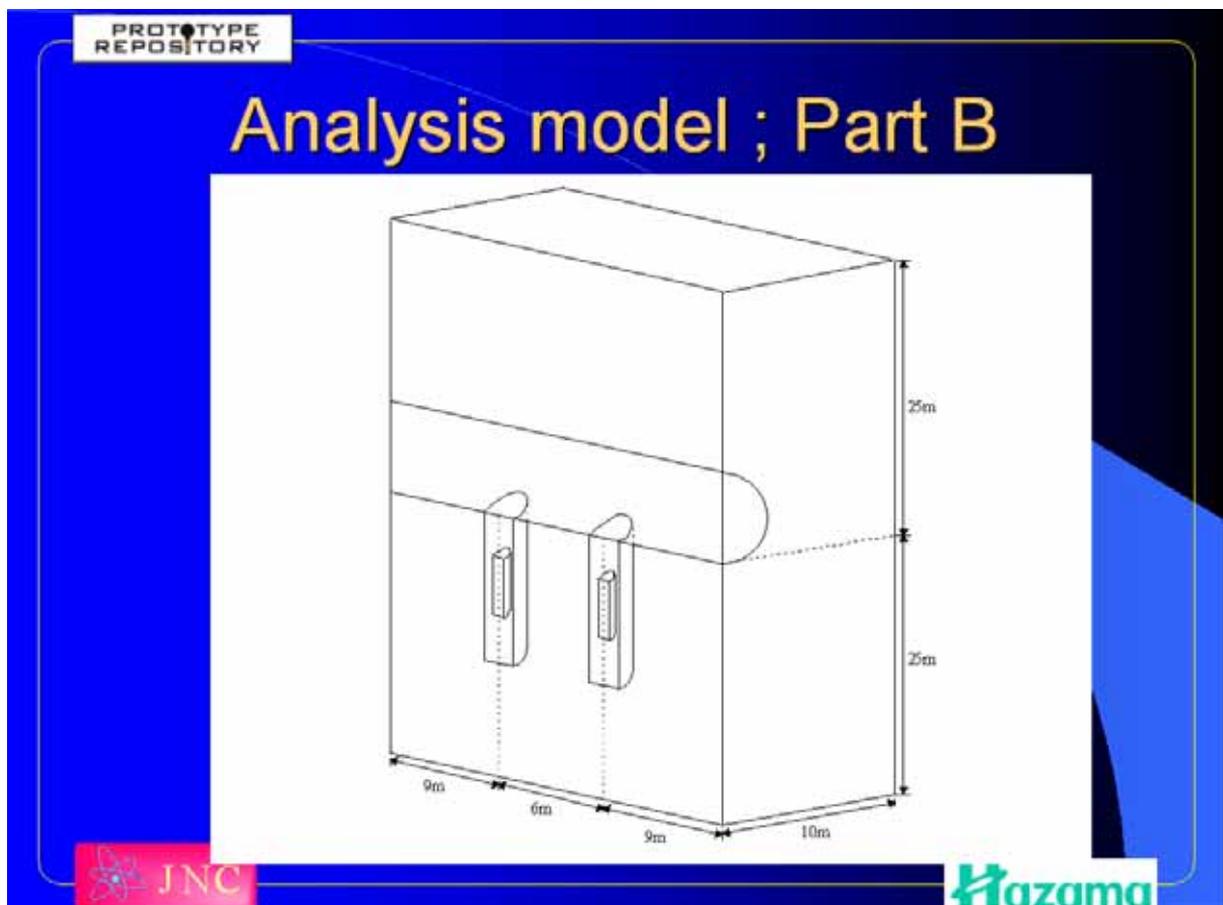
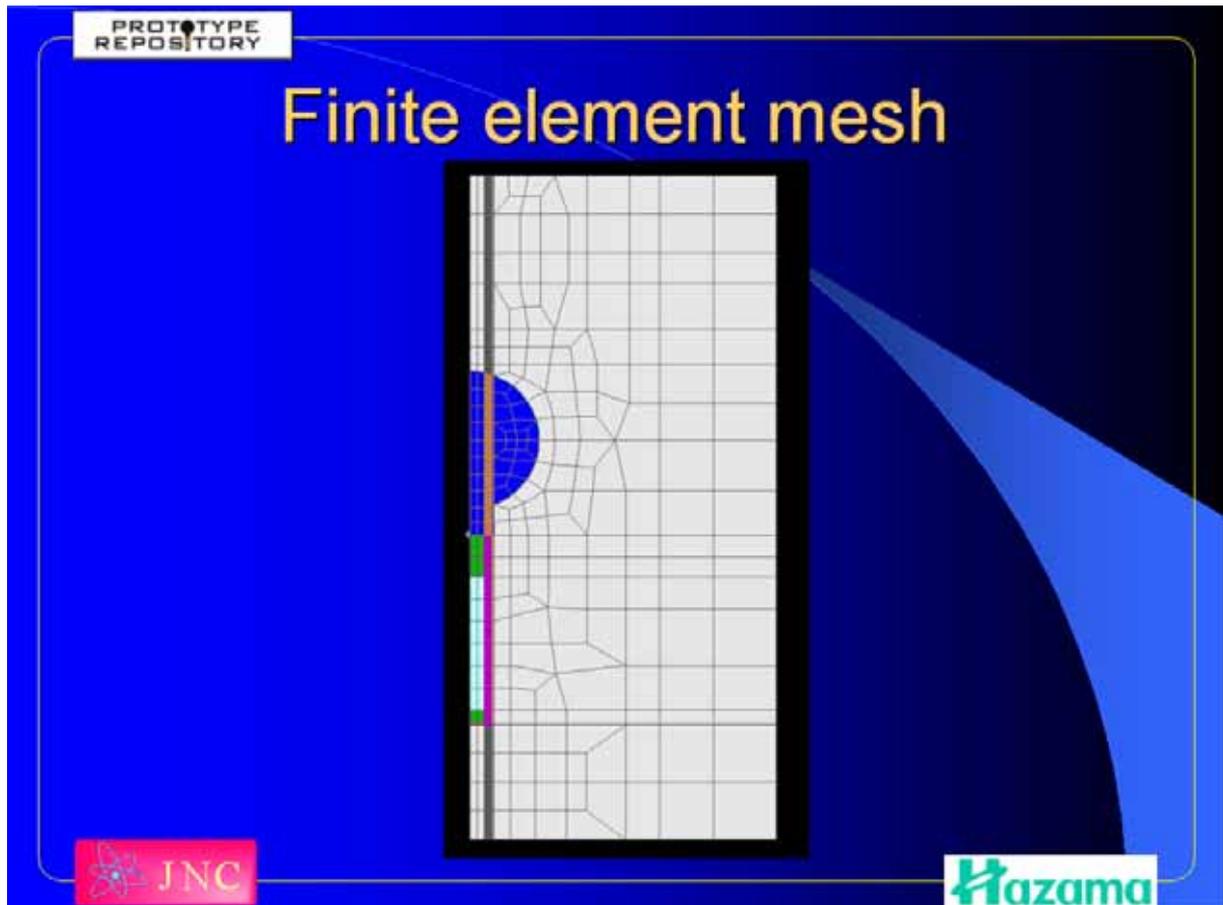
Part A: Two dimensional axial symmetric model
*One disposal pit

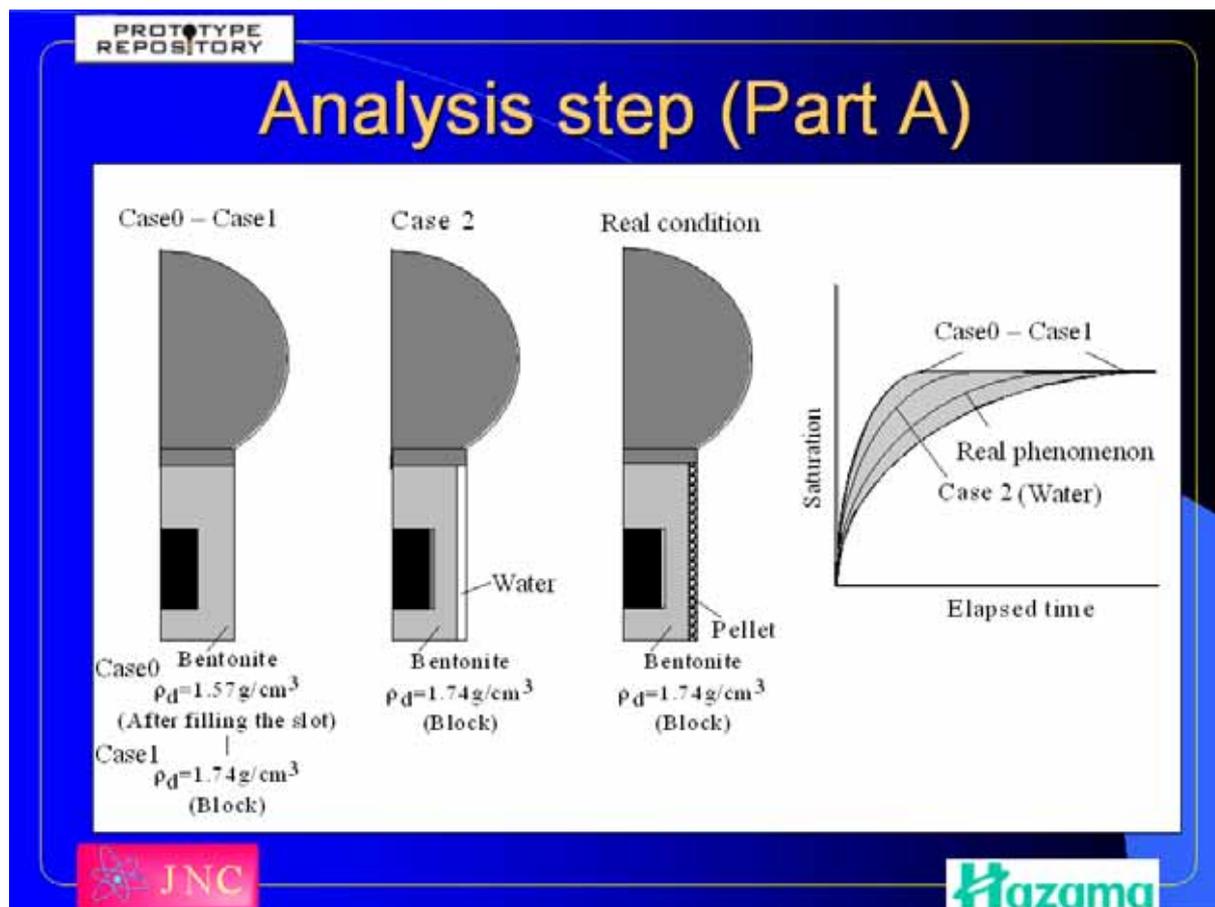
Part B: Three dimensional model
*Two disposal pits

JNC

Hazama







PROTOTYPE REPOSITORY

Results of analysis A for the Prototype Repository with the numerical code THAMES

PROTOTYPE REPOSITORY

Parameter for analysis; Thermal property

Thermal conductivity

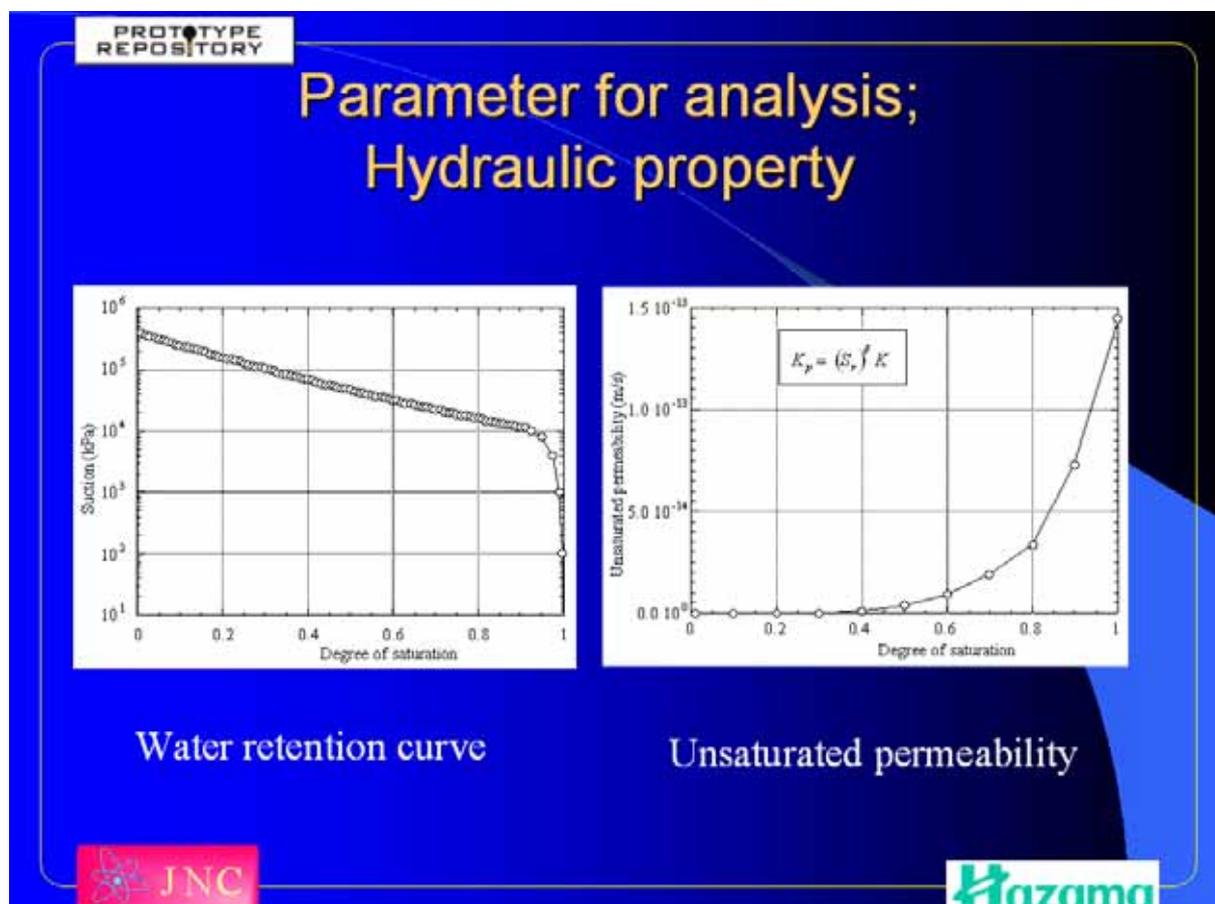
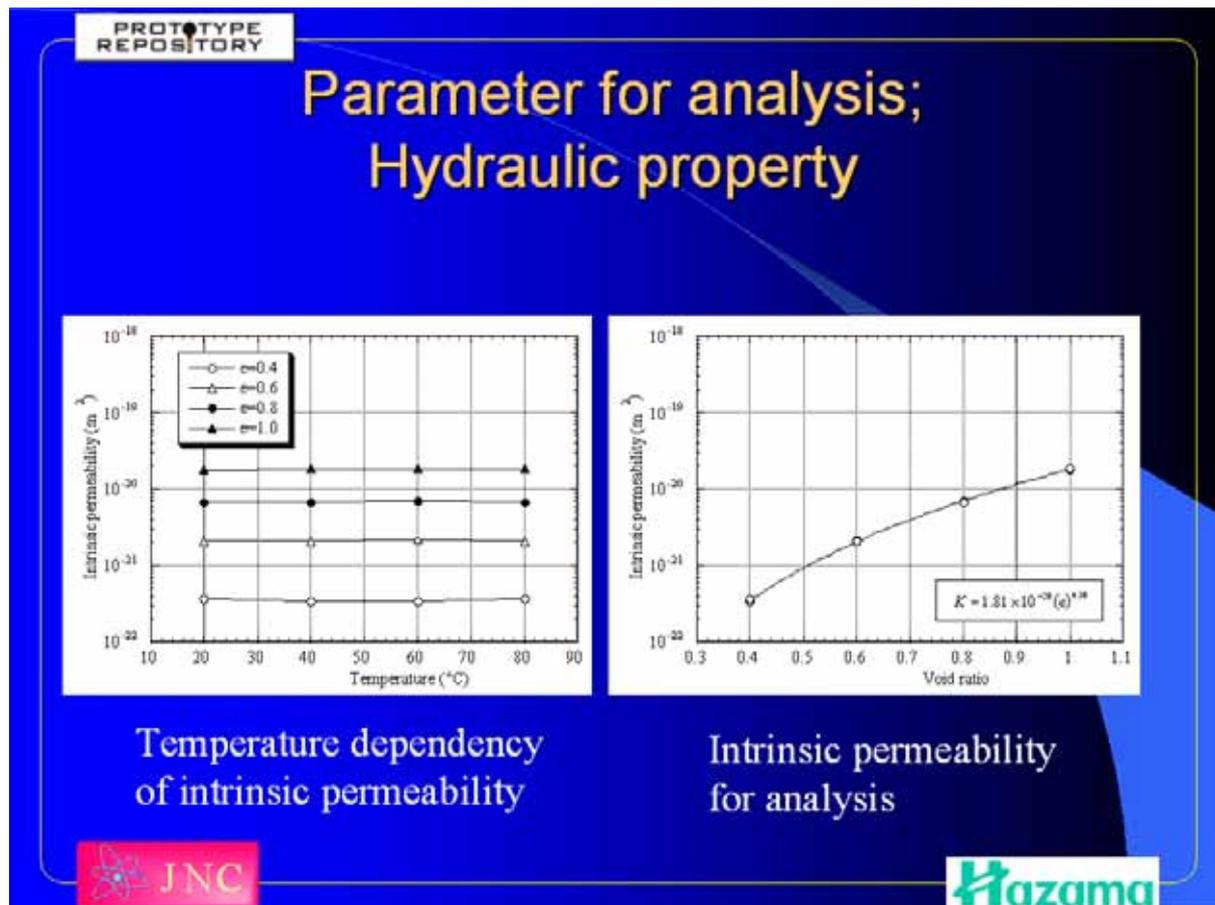
Specific heat

PROTOTYPE REPOSITORY

Parameter for analysis; Hydraulic property

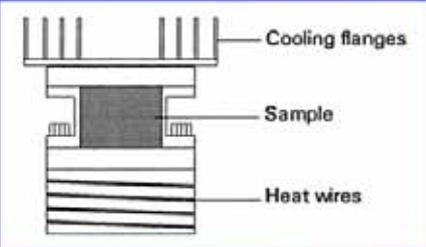
Relationship between hydraulic conductivity and void ratio

Temperature dependency of hydraulic conductivity

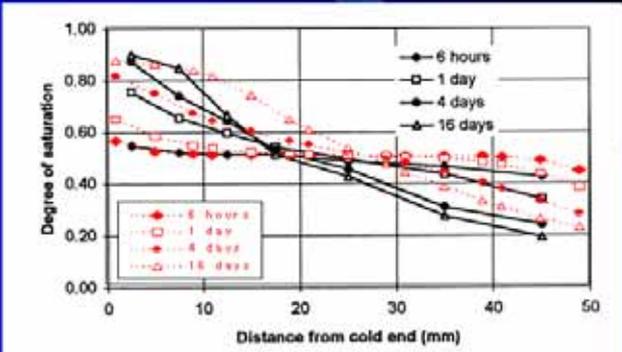


PROTOTYPE REPOSITORY

Parameter for analysis; Hydraulic property



Cooling flanges
Sample
Heat wires



Degree of saturation

Distance from cold end (mm)

6 hours
1 day
4 days
15 days

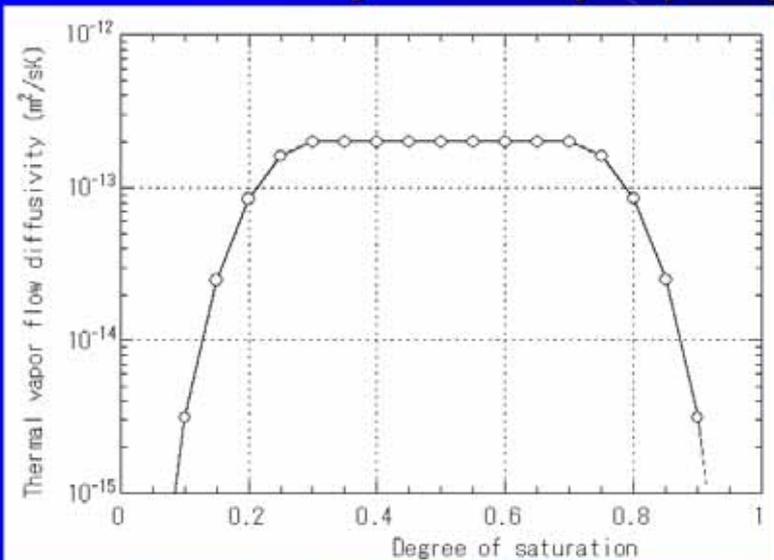
Test apparatus for temperature gradient test

Measurement results




PROTOTYPE REPOSITORY

Parameter for analysis; Hydraulic property



Thermal vapor flow diffusivity (m²/sK)

Degree of saturation

$(S_r \leq 0.3)$

$$D_{Tn} = D_{Tn0} \cdot \sin^2\left(\frac{S_r}{0.3} \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

$(0.3 \leq S_r \leq 0.7)$

$$D_{Tn} = D_{Tn0}$$

$(0.7 \leq S_r)$

$$D_{Tn} = D_{Tn0} \cdot \cos^2\left(\frac{S_r - 0.7}{0.3} \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

$D_{Tn0} = 2.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{sK}$

$a = 6$

$b = 6$

Thermal vapor flow diffusivity




PROTOTYPE REPOSITORY

Initial and Boundary conditions

H (Constant)
 T (Constant)
 20°C
 $H_0 = 400\text{m}$
 Backfill
 $S_{r0} = 60\%$
 Buffer
 $S_{r0} = 60\%$
 Heater 90°C or
 1800W
 H (No flow)
 T (Constant)

Initial conditions

- ; Total pressure head = 400m
- ; Saturation = 60% (Buffer and Backfill)
- ; Temperature = 20°C

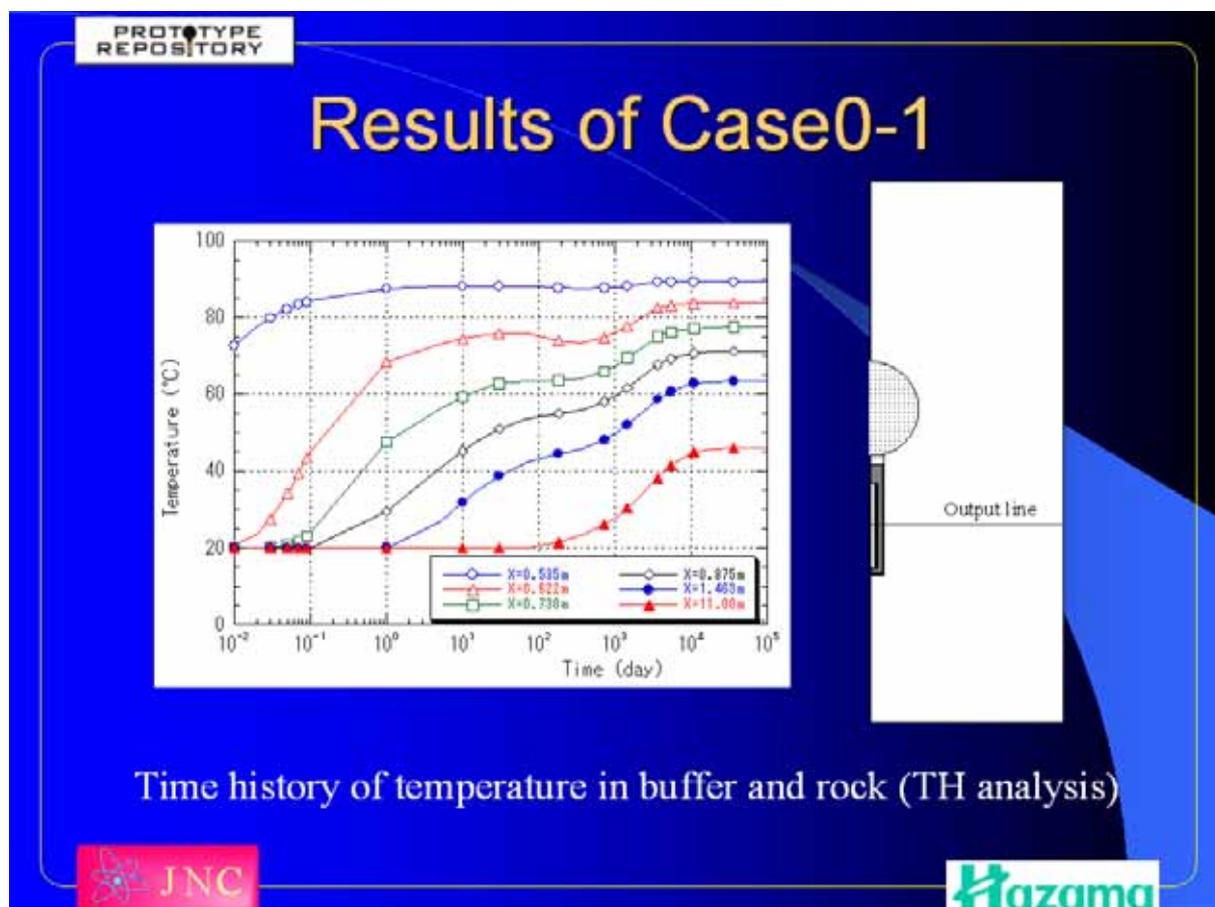
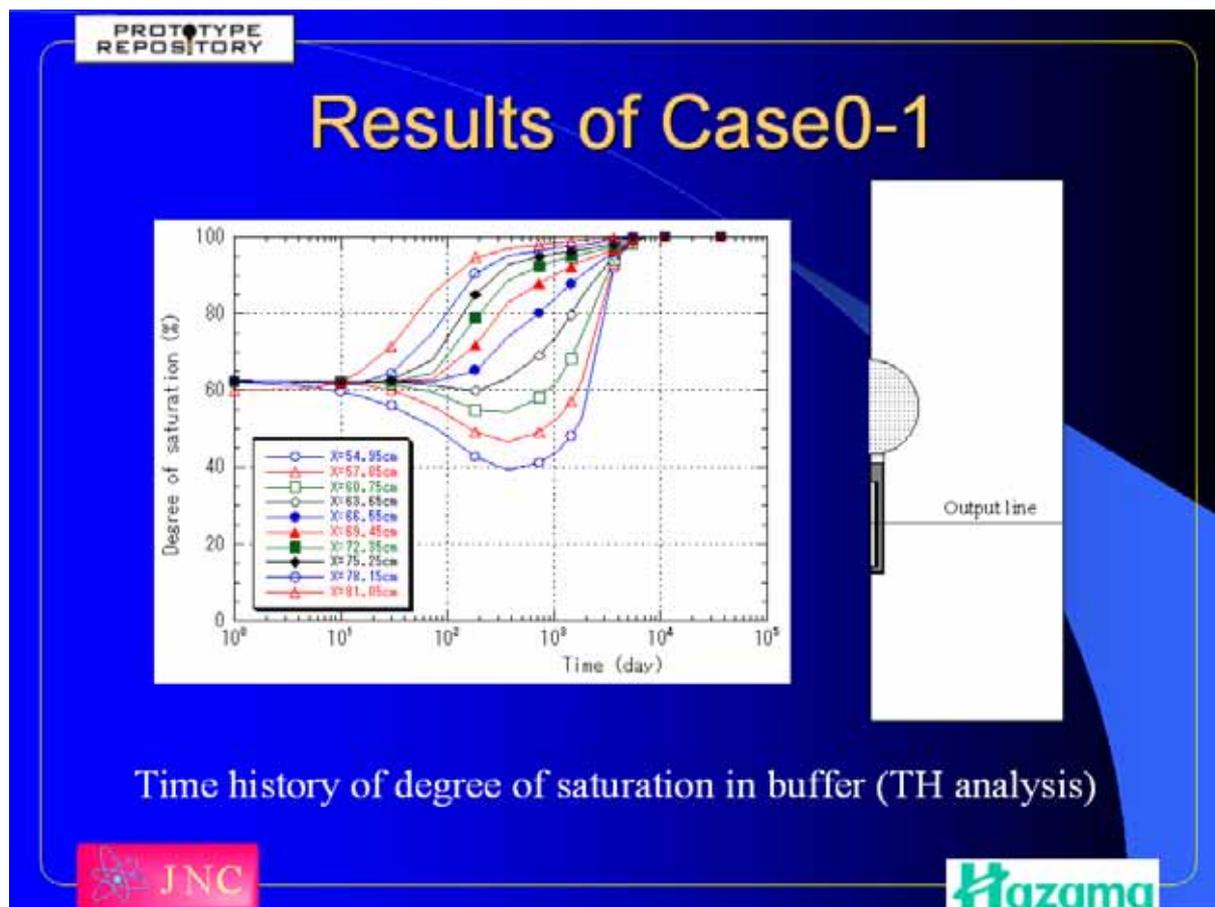
Boundary conditions

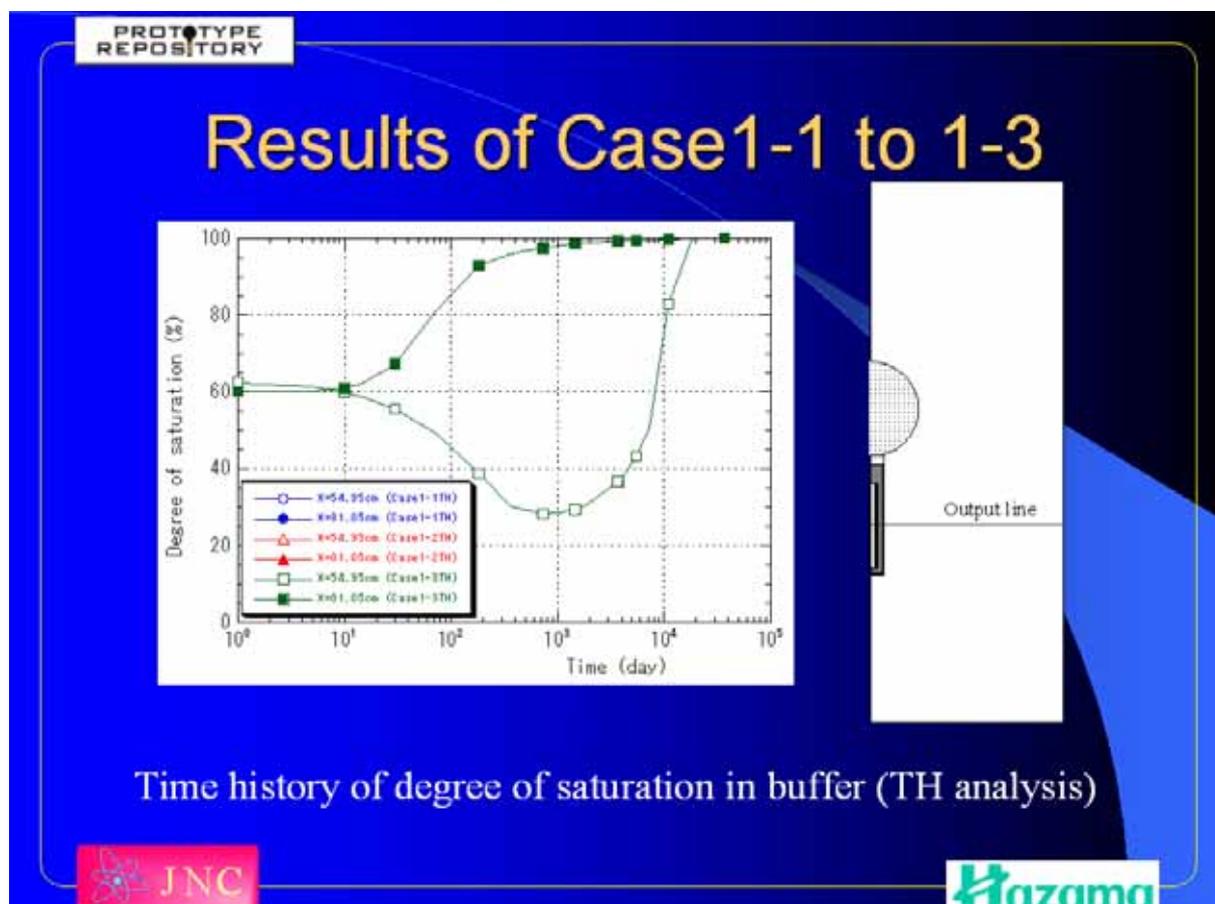
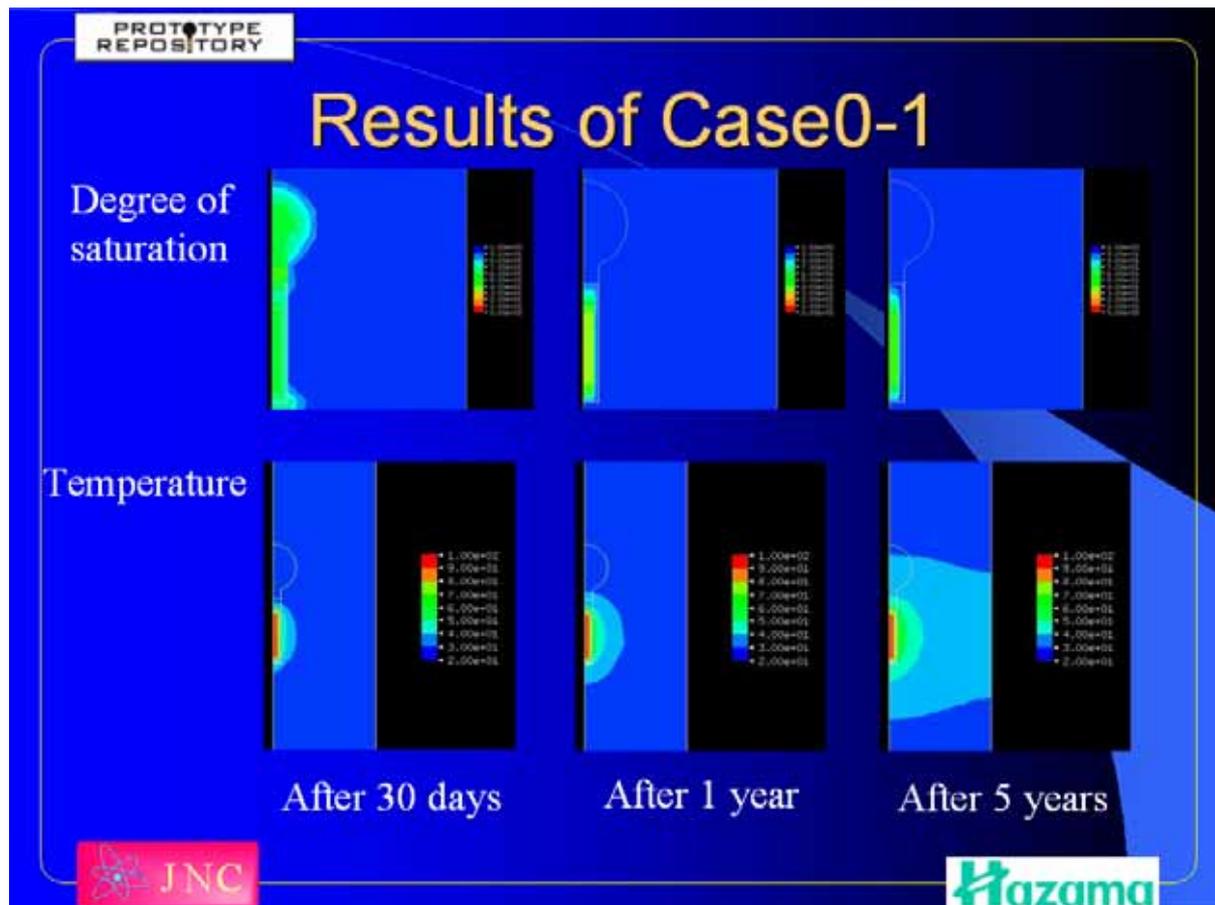
- ; Upper
 - : Constant temperature
 - : Constant water pressure
- ; Upper
 - : Constant temperature
 - : No flow
- ; Side
 - : Adiabatic condition
 - : No flow
- ; All boundaries are fixed
- ; Heater is fixed at 90°C or heat flux is 1800W

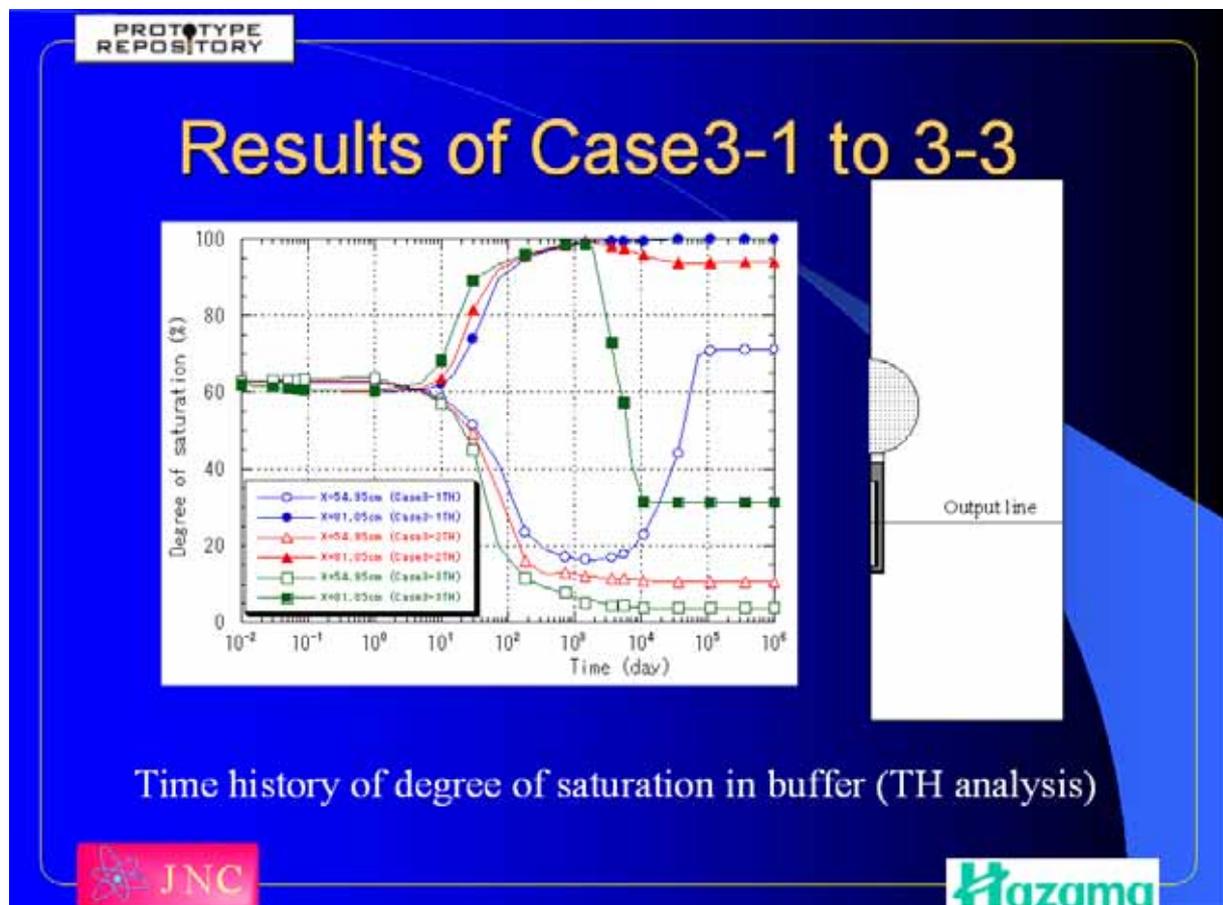
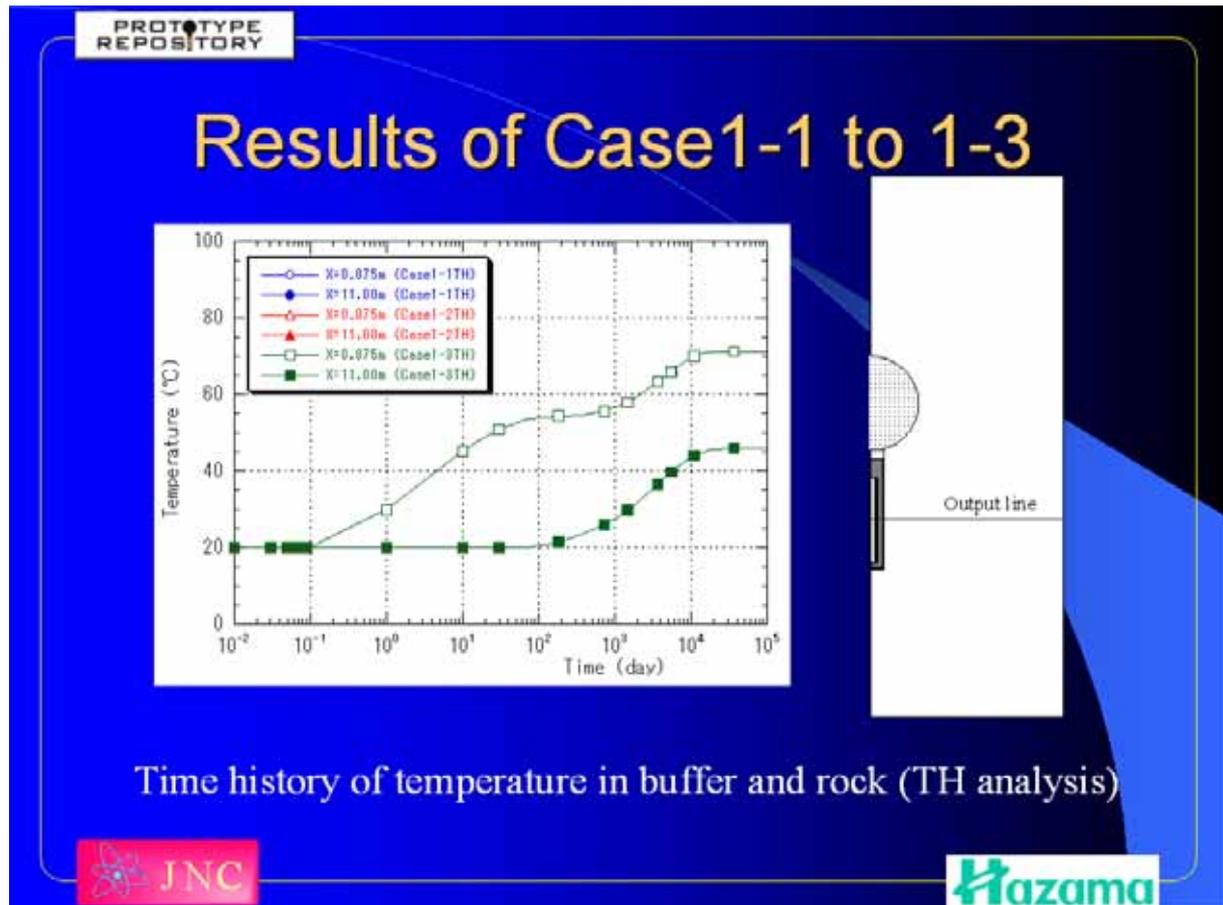
PROTOTYPE REPOSITORY

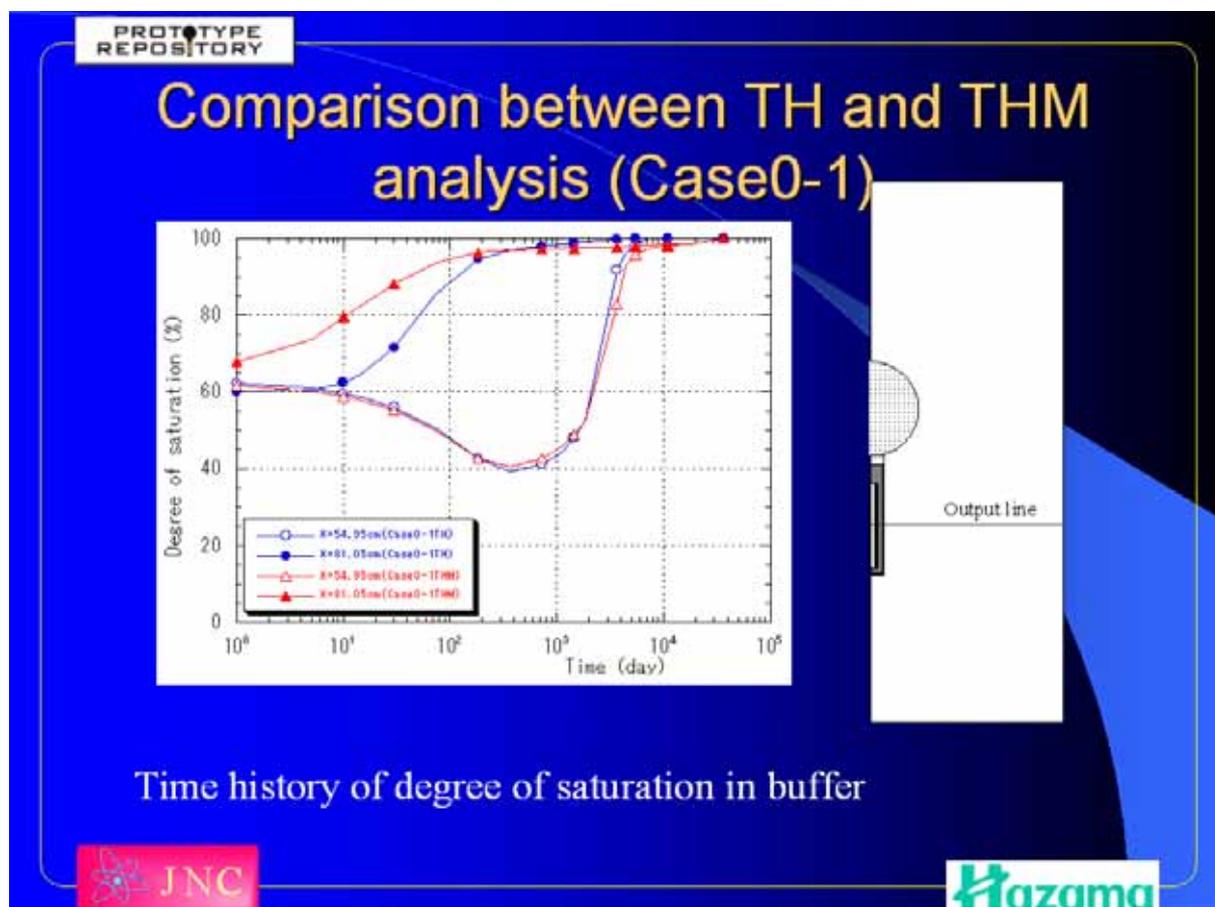
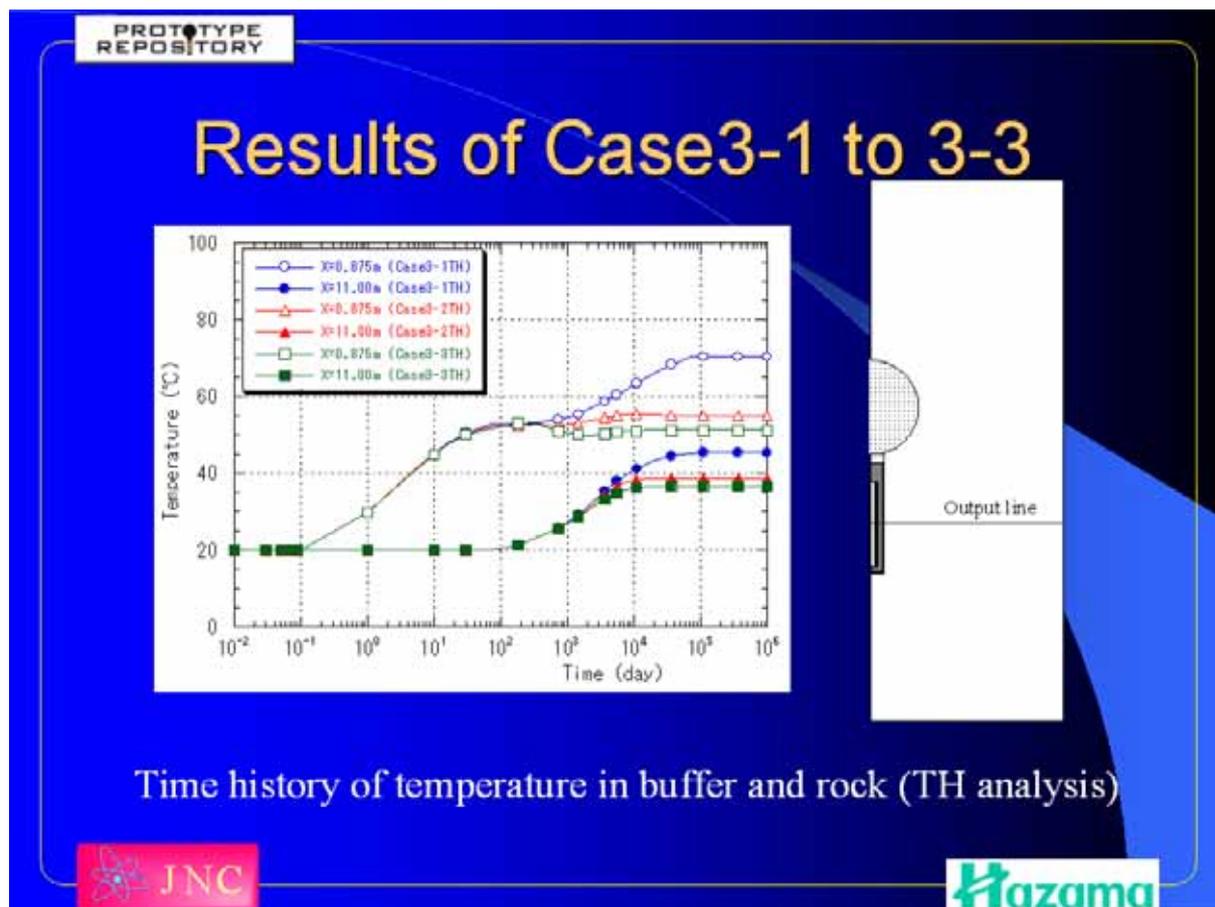
Analysis Case

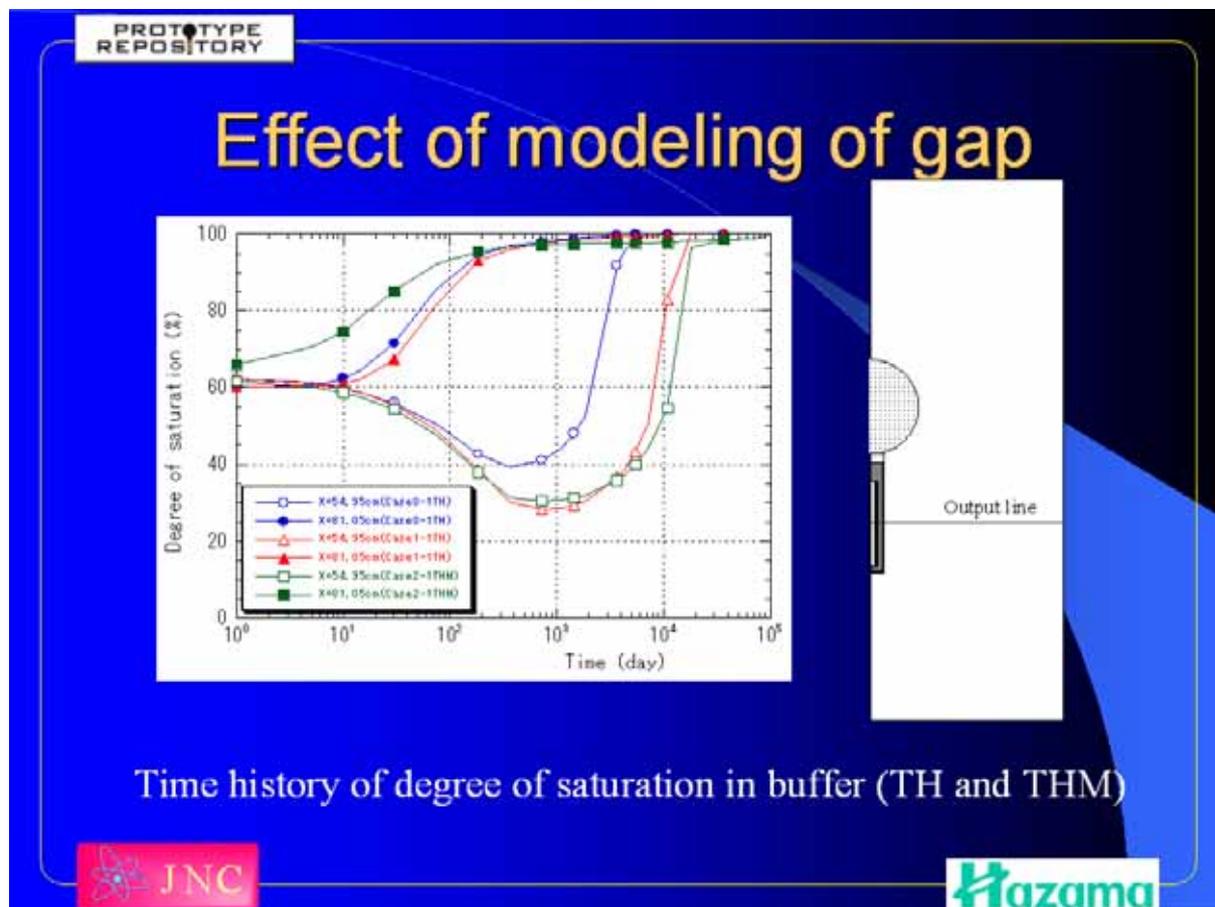
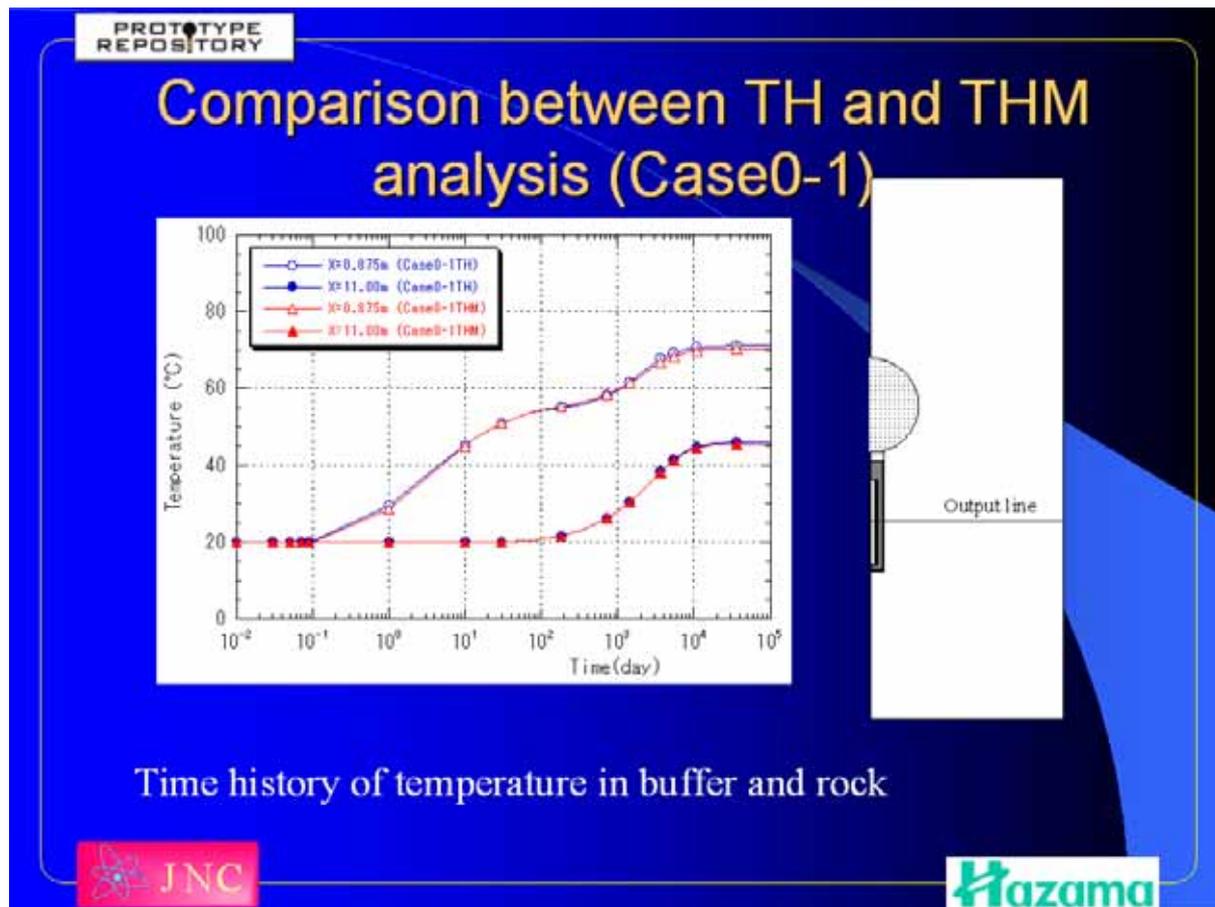
Case	Boundary condition of heater	Initial void ratio of buffer material	Hydraulic conductivity of rock mass (m/s)	Consideration of gap	Thermal vapor flow diffusivity (m^2/sK)	Analysis
Case0-1	Temperature constant	0.77	10^{-10}	No	$2.0 \cdot 10^{-13}$	TH and THM
Case0-2	Heat flux constant	0.77	10^{-10}	No	$2.0 \cdot 10^{-13}$	TH
Case1-1	Temperature constant	0.64	10^{-10}	No	$2.0 \cdot 10^{-13}$	TH and THM
Case1-2	Temperature constant	0.64	10^{-12}	No	$2.0 \cdot 10^{-13}$	TH
Case1-3	Temperature constant	0.64	10^{-14}	No	$2.0 \cdot 10^{-13}$	TH
Case2-1	Temperature constant	0.64	10^{-10}	Yes	$2.0 \cdot 10^{-13}$	THM
Case3-1	Temperature constant	0.64	10^{-10}	No	$4.0 \cdot 10^{-13}$	TH
Case3-2	Temperature constant	0.64	10^{-10}	No	$6.0 \cdot 10^{-13}$	TH
Case3-3	Temperature constant	0.64	10^{-10}	No	$10.0 \cdot 10^{-12}$	TH

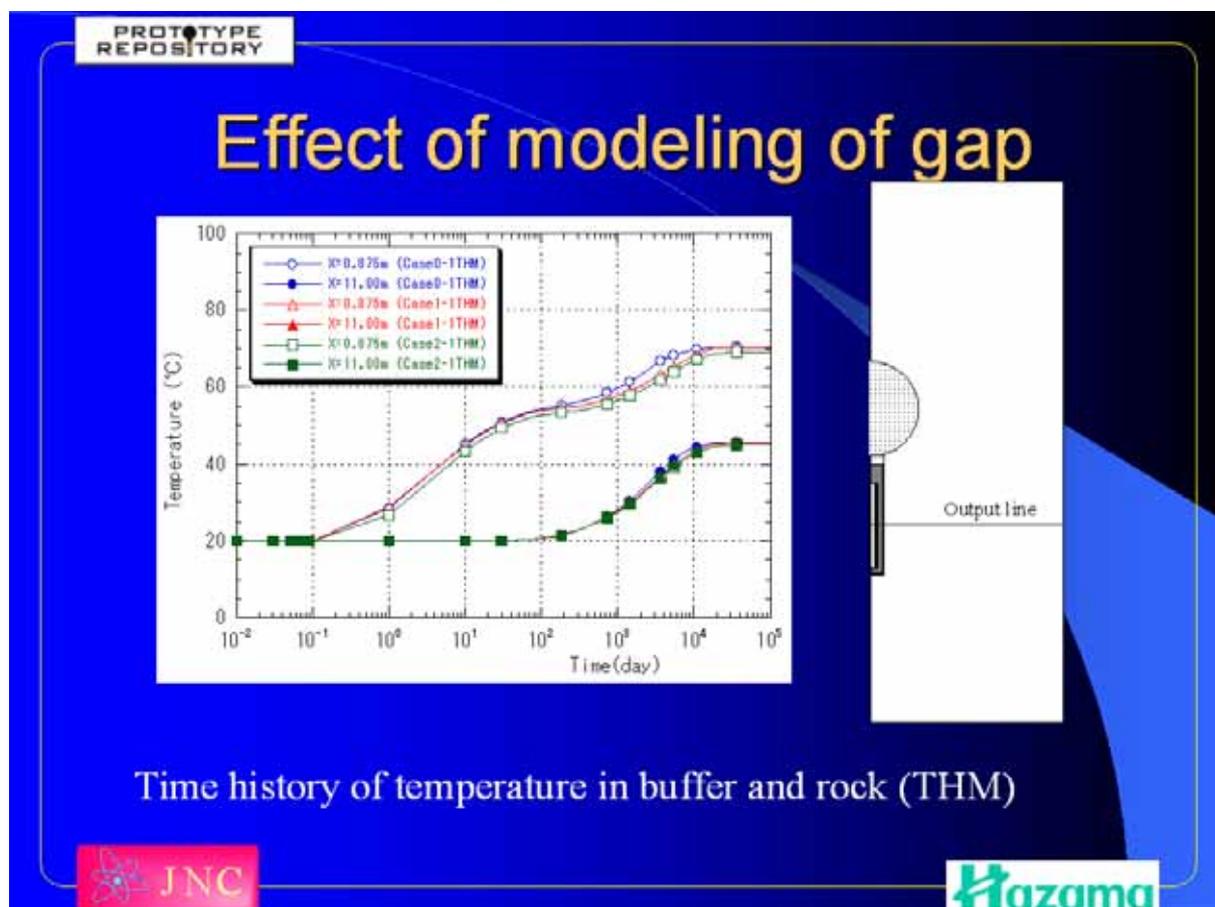
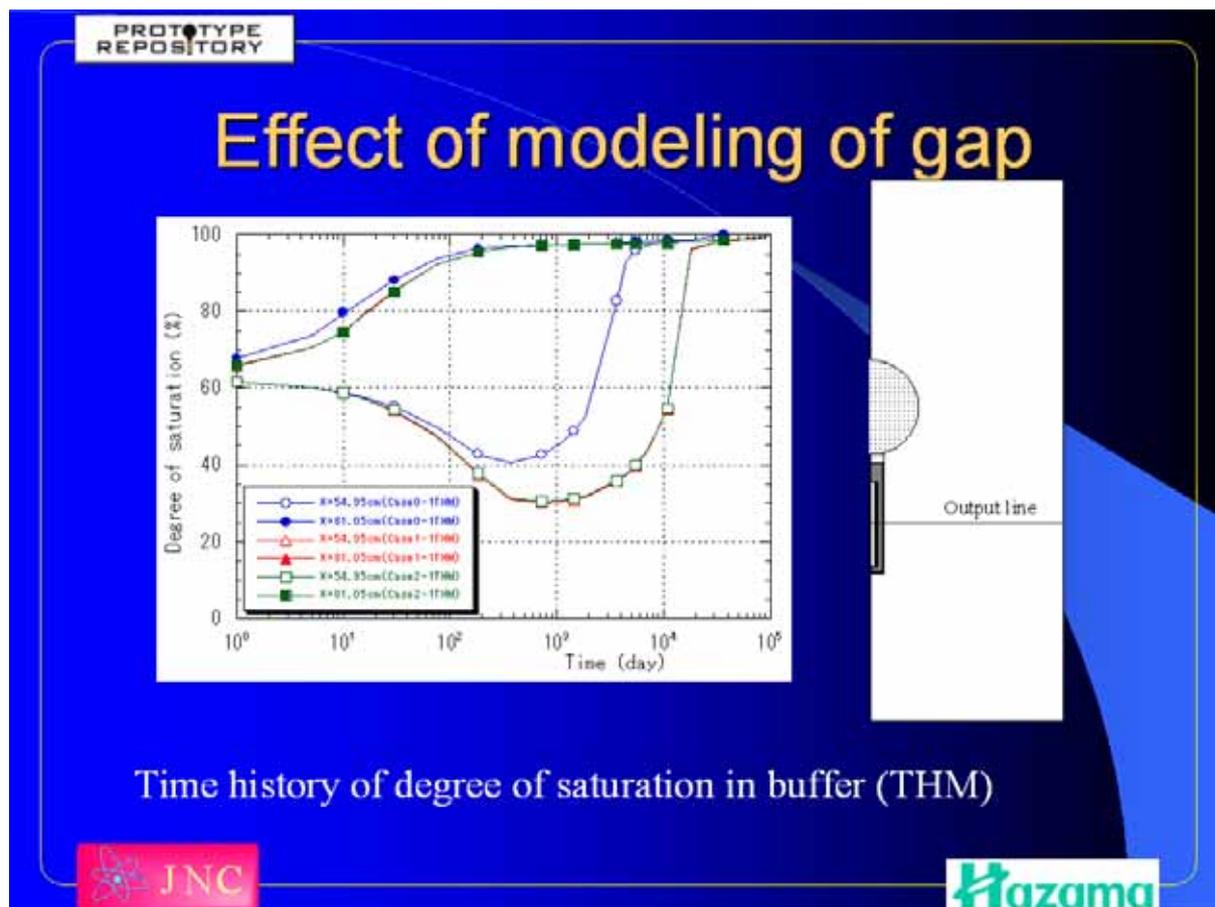












PROTOTYPE REPOSITORY

Summary

- 1) Re-saturation phenomena in the buffer are not dependent on the permeability of rock mass if the hydraulic conductivity of rock mass is in the 10^{-10} to 10^{-14} m/s range.
- 2) The re-saturation time of the buffer is between 6,000 days and 20,000 days. It is dependent on the initial void ratio of the buffer.
- 3) There is not so large difference about the temperature distribution between the some cases for modeling of the gap compared with the distribution of degree of saturation in the buffer.

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

Summary

- 4) It is important to evaluate the water movement due to thermal effect in order to estimate the re-saturation phenomena in the buffer mass.
- 5) When gap is not considered in the model, it is better to use the property at the high density of bentonite before installing into the disposal pit. However, these are the results when we did not consider the structure change inside the bentonite due to the swelling in detail. In order to achieve the more detail evaluation, it needs to consider the structure change inside the bentonite and the parameter change during the swelling.

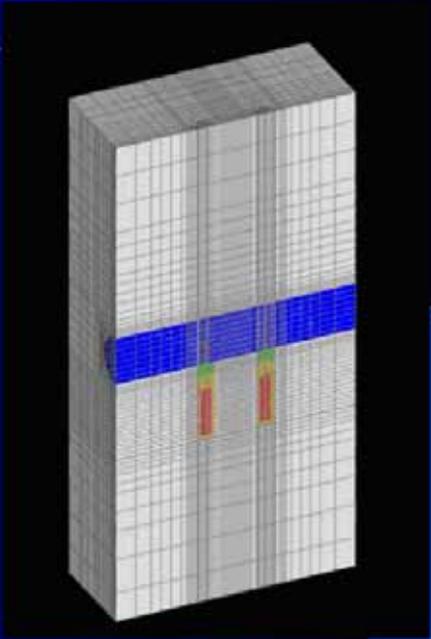
JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

Future work

- 1) Simulation by three dimensional model
- 2) Comparison measured and simulated results

- Information of location of sensors in buffer and rock mass
- Results of laboratory tests
- Emplacement results of buffer and backfill (dry density, water content)



The image shows a 3D perspective view of a rectangular grid representing a repository structure. A horizontal blue band is visible across the middle, and two vertical red and green lines indicate the locations of sensors within the structure.

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY



The image is a close-up photograph of numerous translucent, yellowish, crystalline fragments. The crystals have irregular, angular shapes and are piled together, with some showing clear facets and sharp edges.

JNC Hazama

付-2

Prototype Repository Project
OHP資料

PROTOTYPE
REPOSITORY

Current Status of Analysis for Prototype Repository

Yutaka SUGITA
Japan Nuclear Cycle Development Institute
&
Masakazu CHIJIMATSU
Hazama Corporation

PROTOTYPE
REPOSITORY

Presentation

Simulation of PRP by THAMES

Properties of bentonite pellet

PROTOTYPE REPOSITORY

Analysis plan

Part A: Two dimensional axial symmetric model

- *One disposal pit
- Treatment of gap for simulation

Part B: Three dimensional model

- *one and two disposal pits

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

Schedule

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42											
Year	2000			2001												2002												2003						2004																			
Month	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2											
Part A																																																					
Analysis																																																					
Report																																																					
Review																																																					
Calibration																																																					
Report																																																					
Part B																																																					
Analysis																																																					
Report																																																					
Review																																																					
Calibration																																																					
Report																																																					

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

Results of analysis B for the Prototype Repository with the numerical code THAMES

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

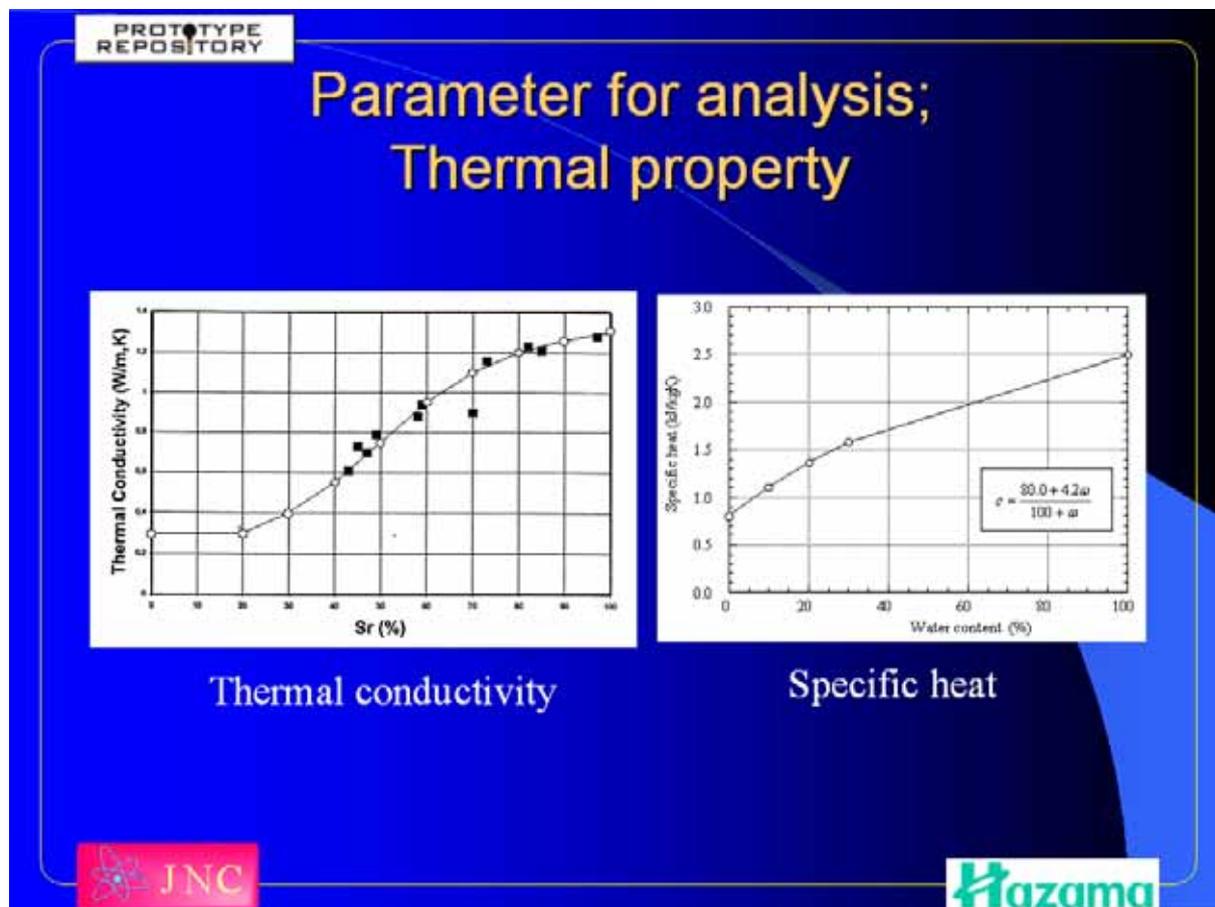
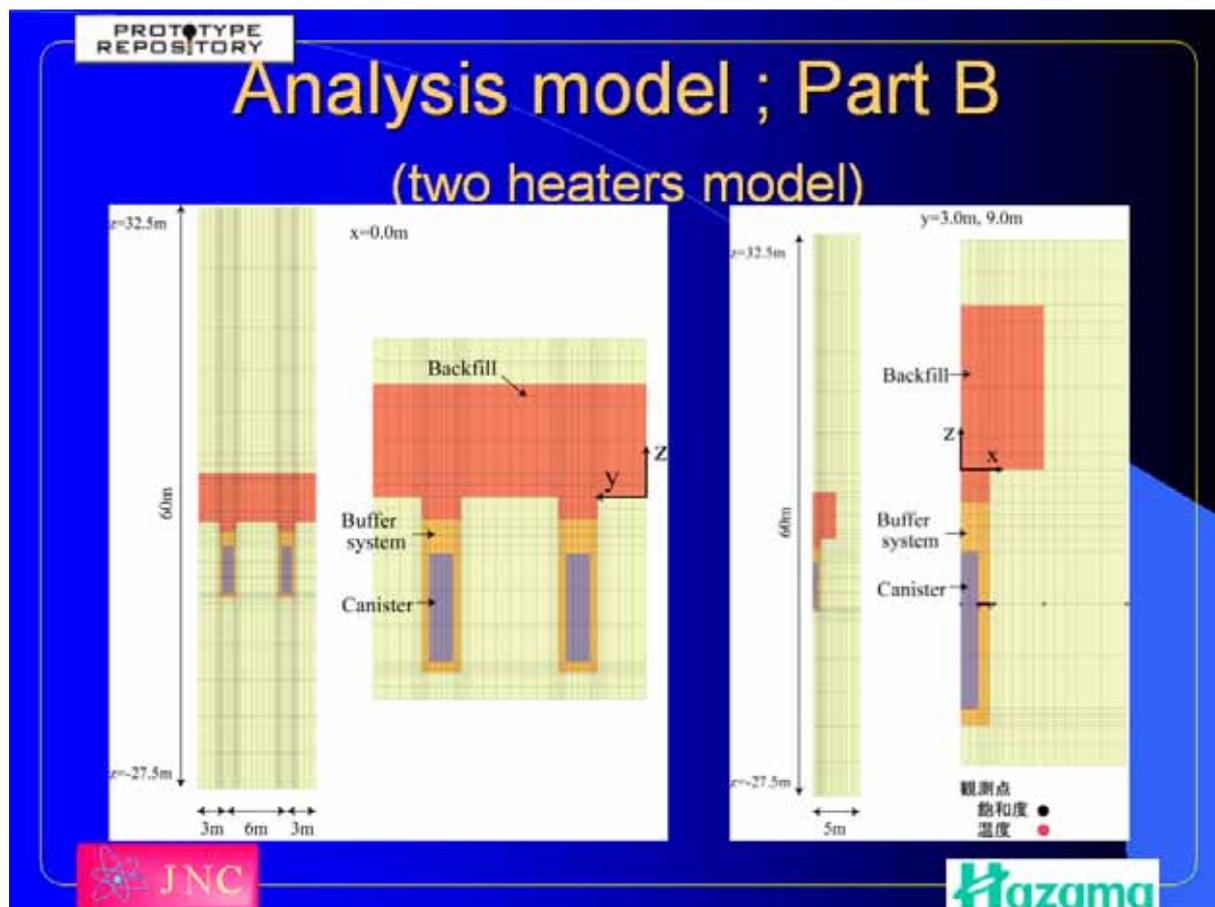
Analysis model ; Part B (one heater model)

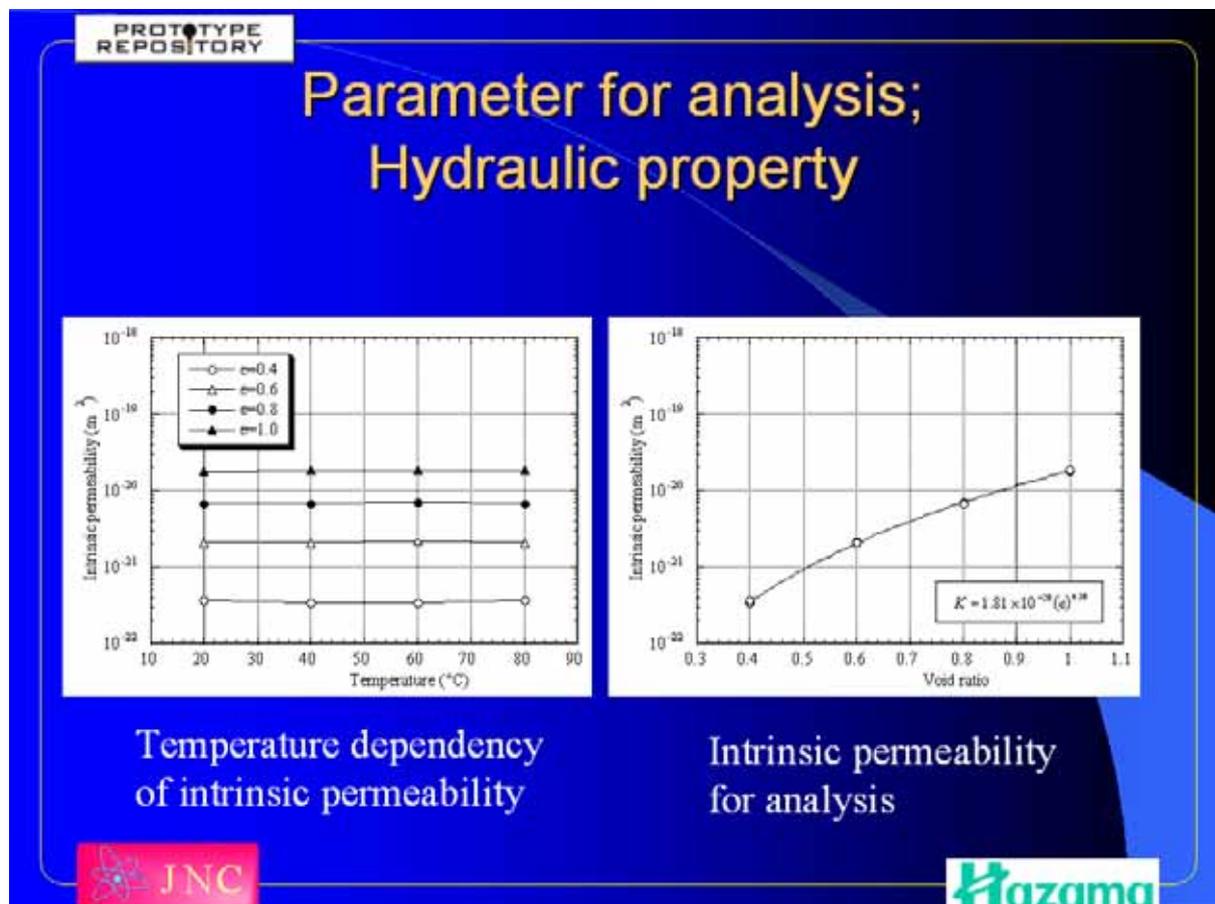
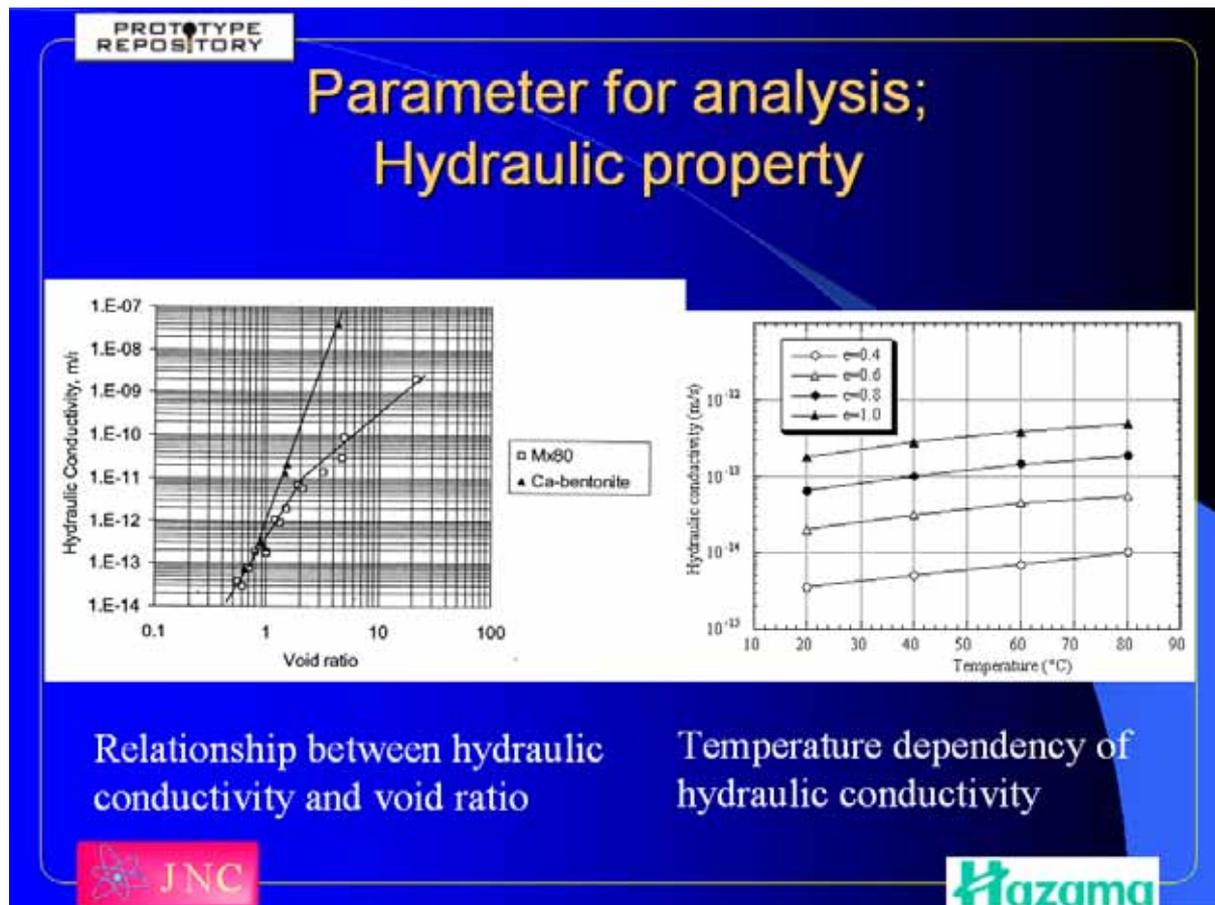
z=32.5m
60m
z=27.5m
3m 5m

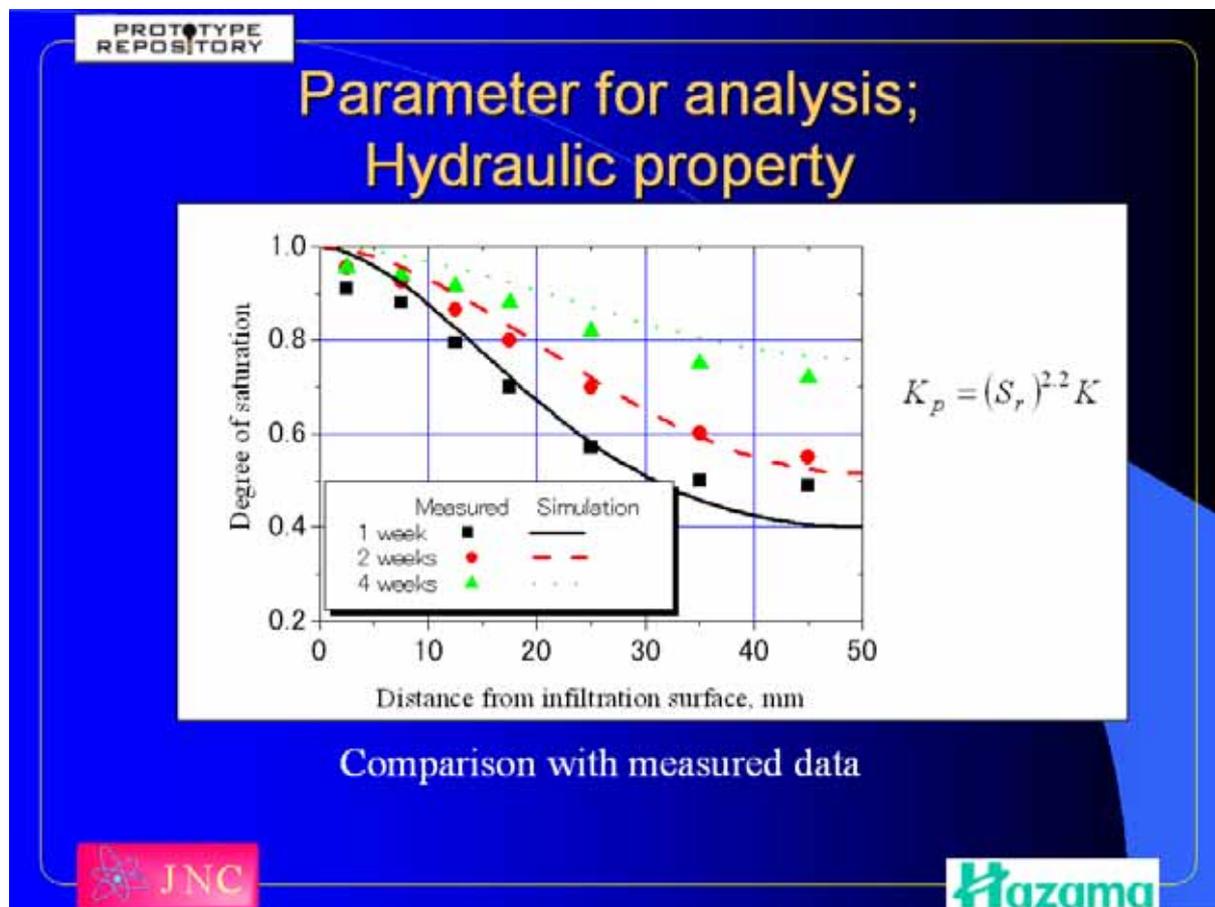
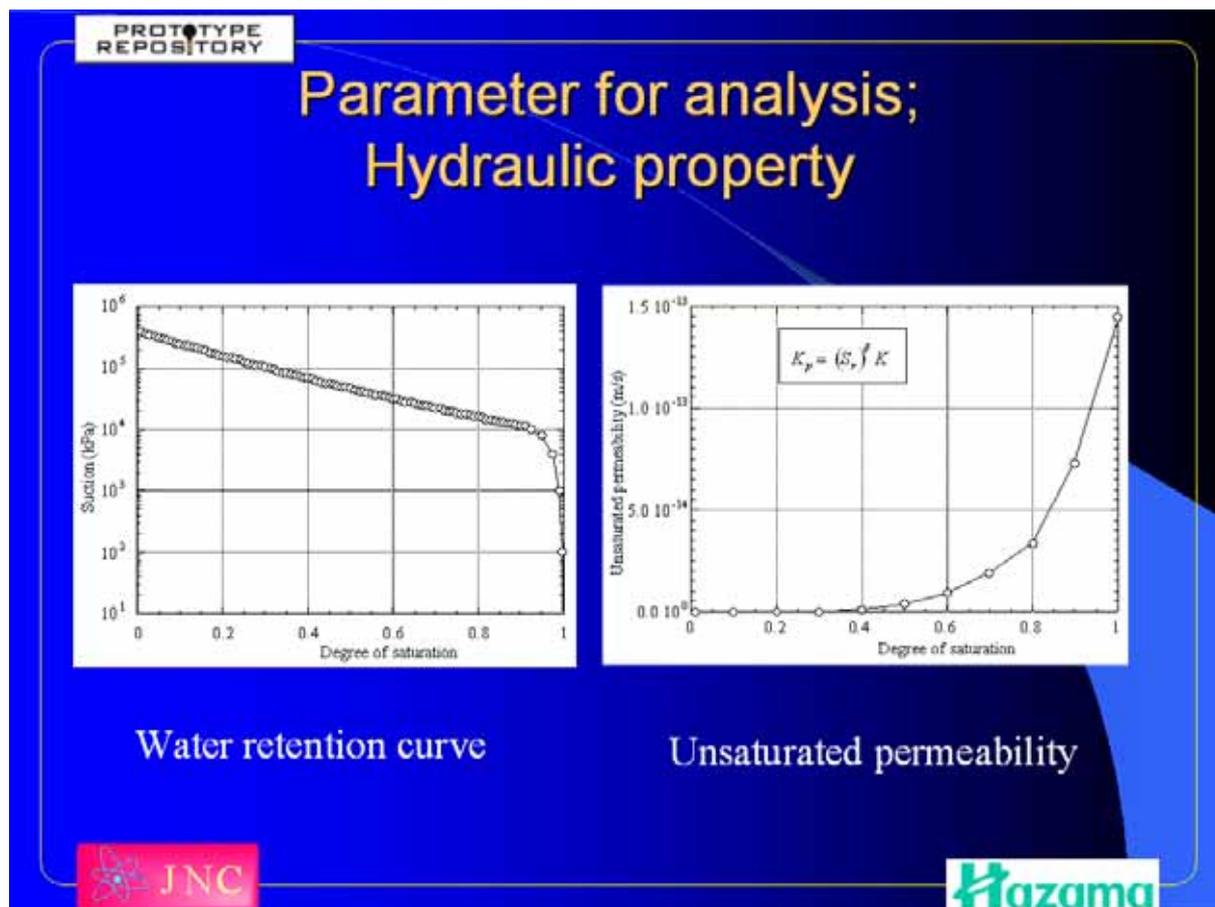
Backfill
Z
X
Buffer system
Canister

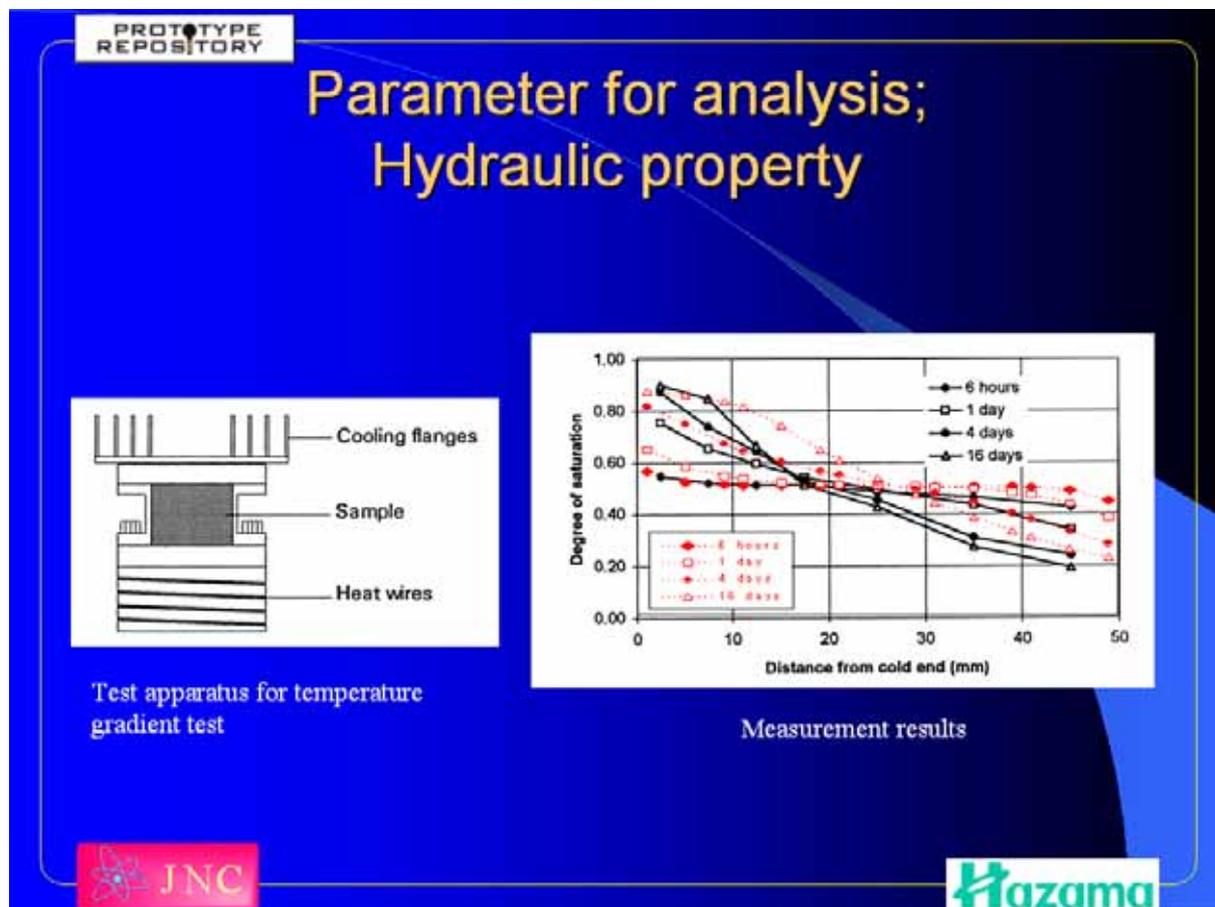
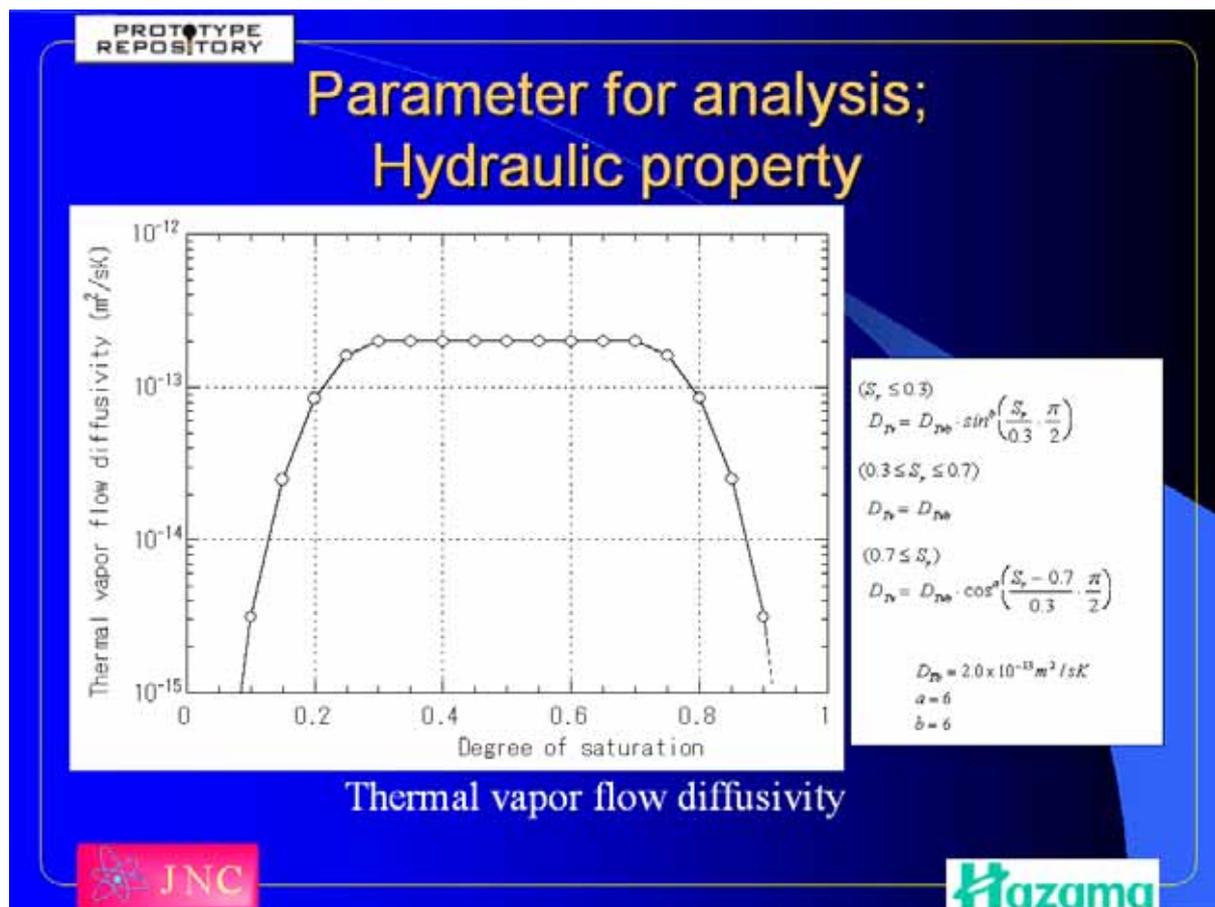
計算点 ●
飽和度 ●
温度 ●

JNC Hazama











Swelling pressure

Komine's model

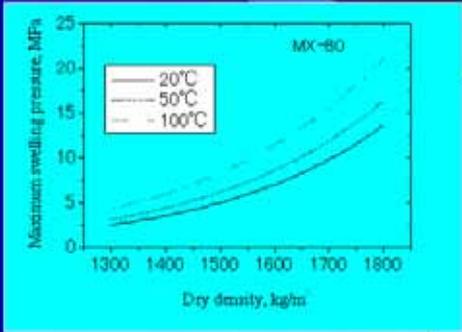
$$\sigma_{sw\max} = \frac{1}{CEC} \sum_{i=Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}} [EXC_i \{ (f_r)_i - (f_a)_i \}]$$

where

- $\sigma_{sw\max}$: swelling pressure in saturated state,
- CEC : cation exchange capacity,
- EXC : exchange capacity of each component,
- f_r : repulsive force
- f_a : attractive force.

These forces are estimated from chemical component of bentonite and pore water and environmental conditions such as temperature, dry density etc.

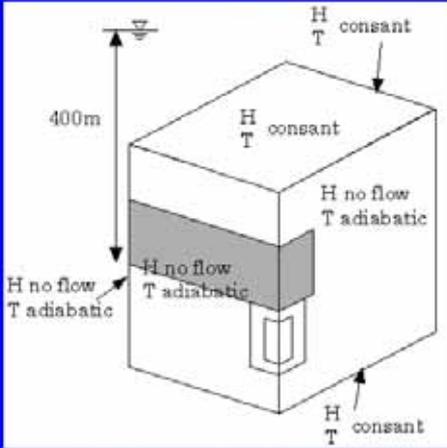
$$F = 2\sigma_{sw\max} (1 - S_r) \frac{\partial S_r}{\partial \psi}$$

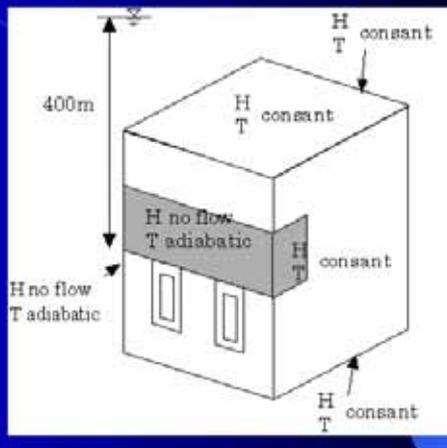







Initial and Boundary conditions





Initial total head of rock mass = 400m

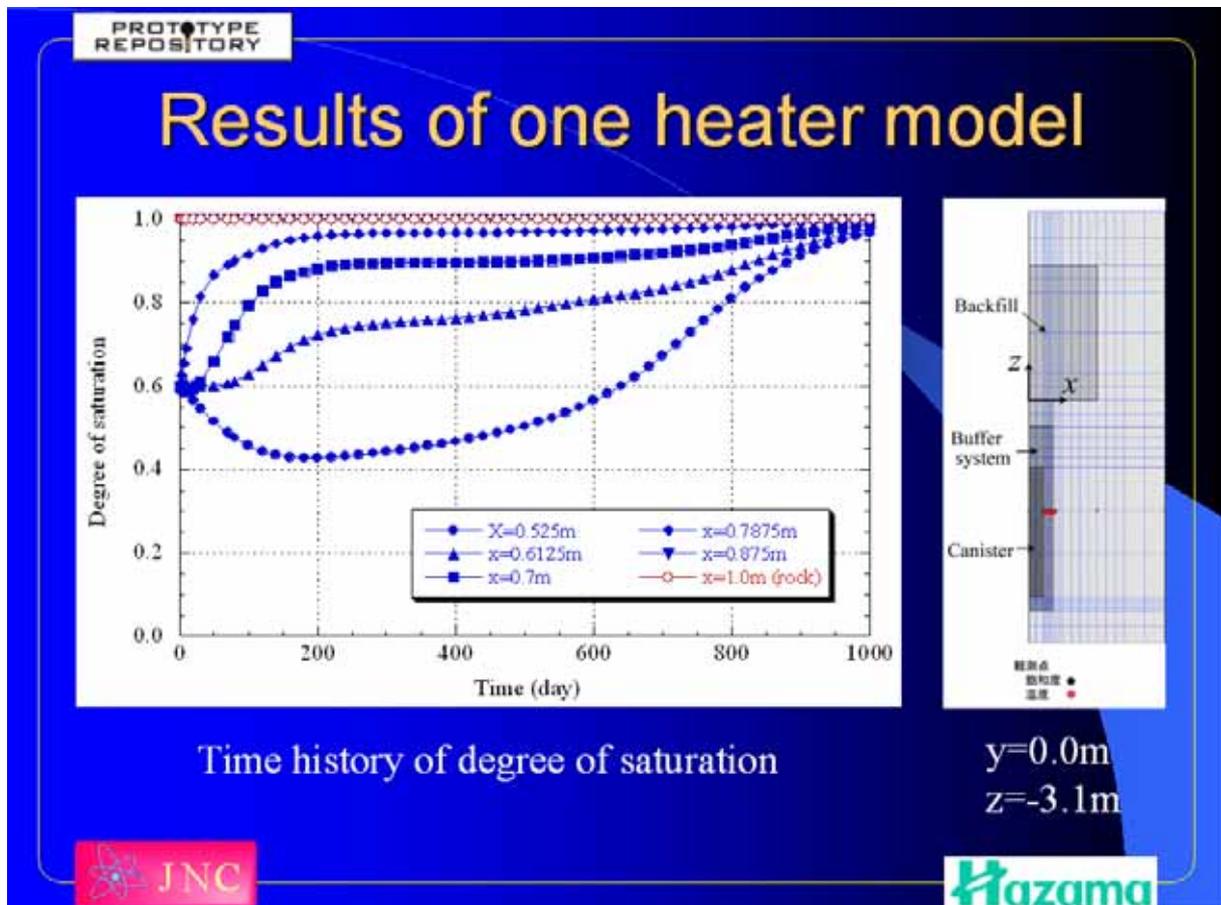
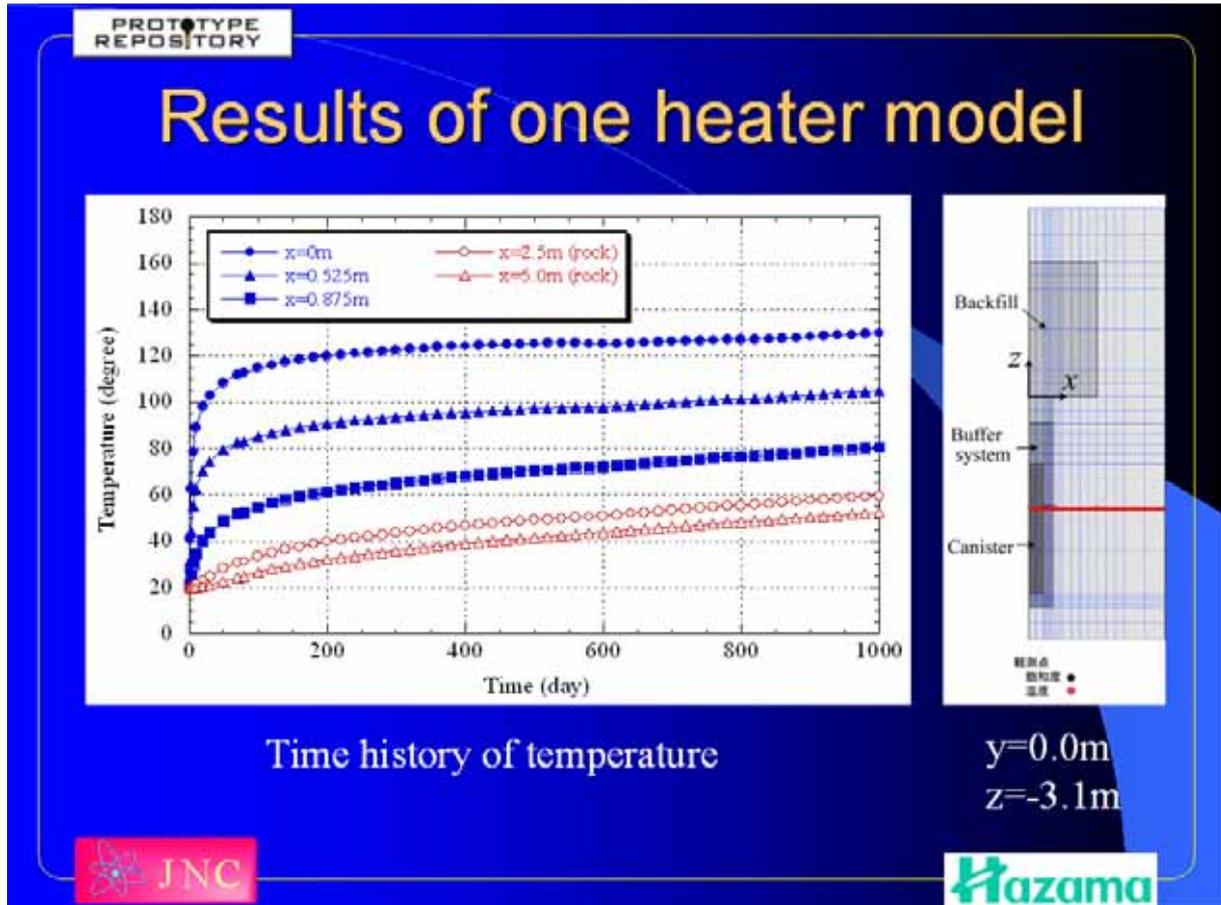
Initial degree of saturation of buffer and backfill = 60%

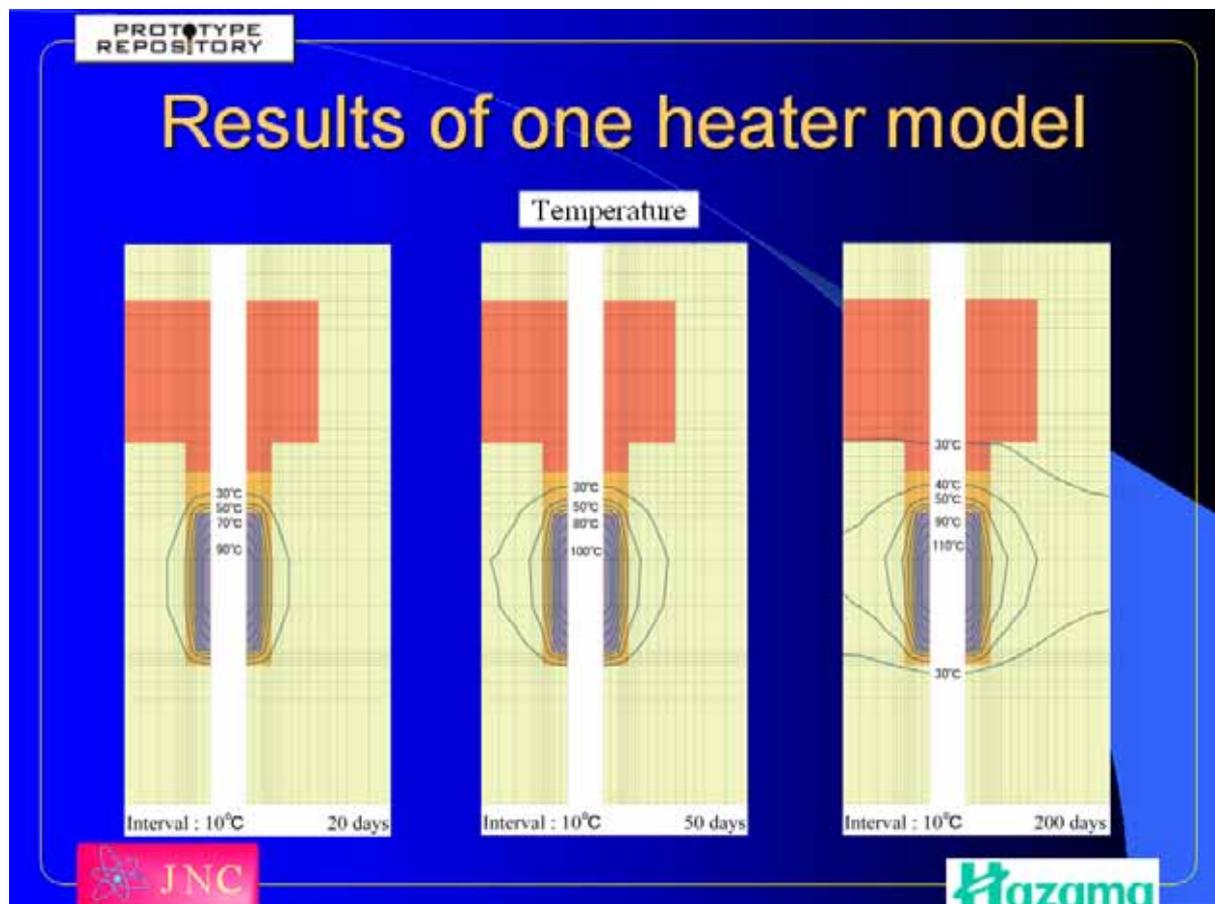
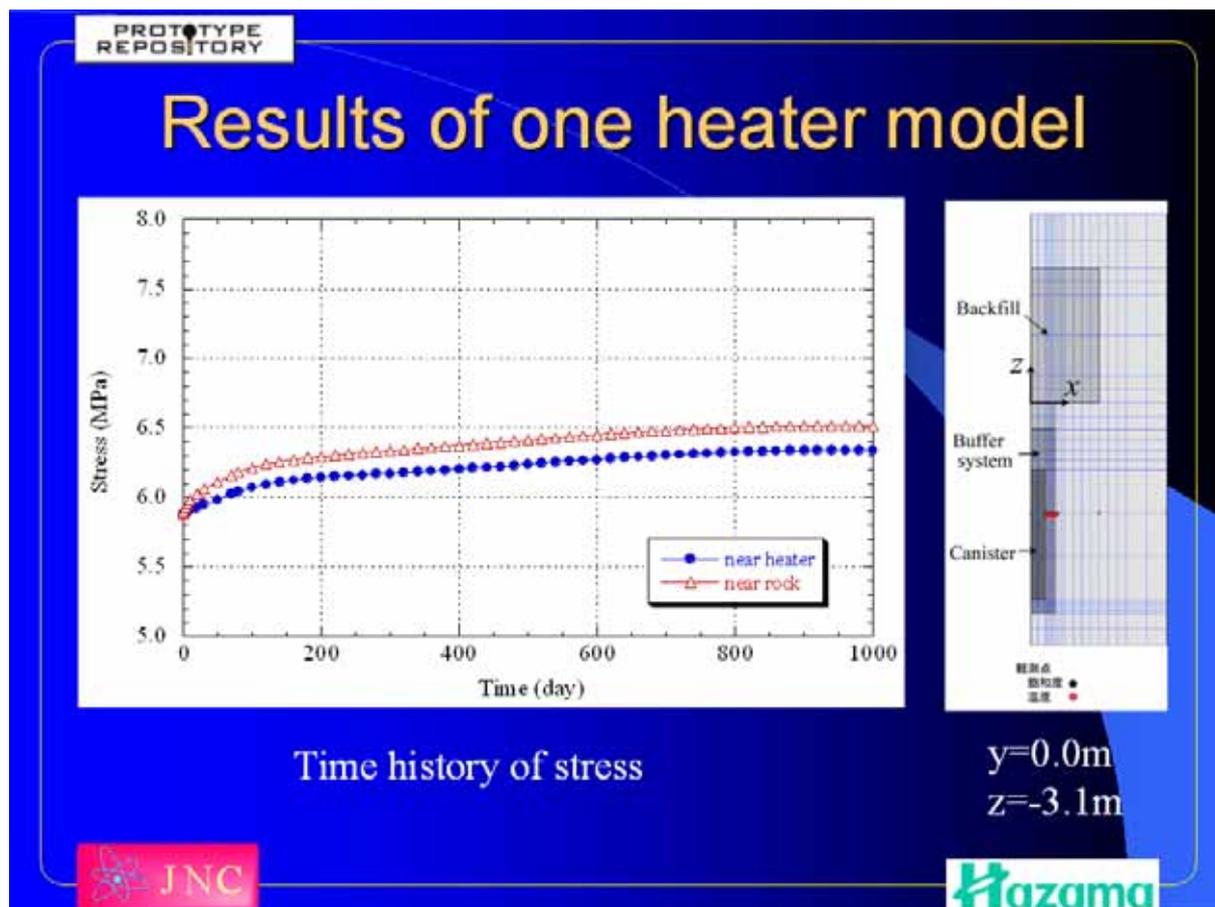
Initial temperature = 20 degree Celsius

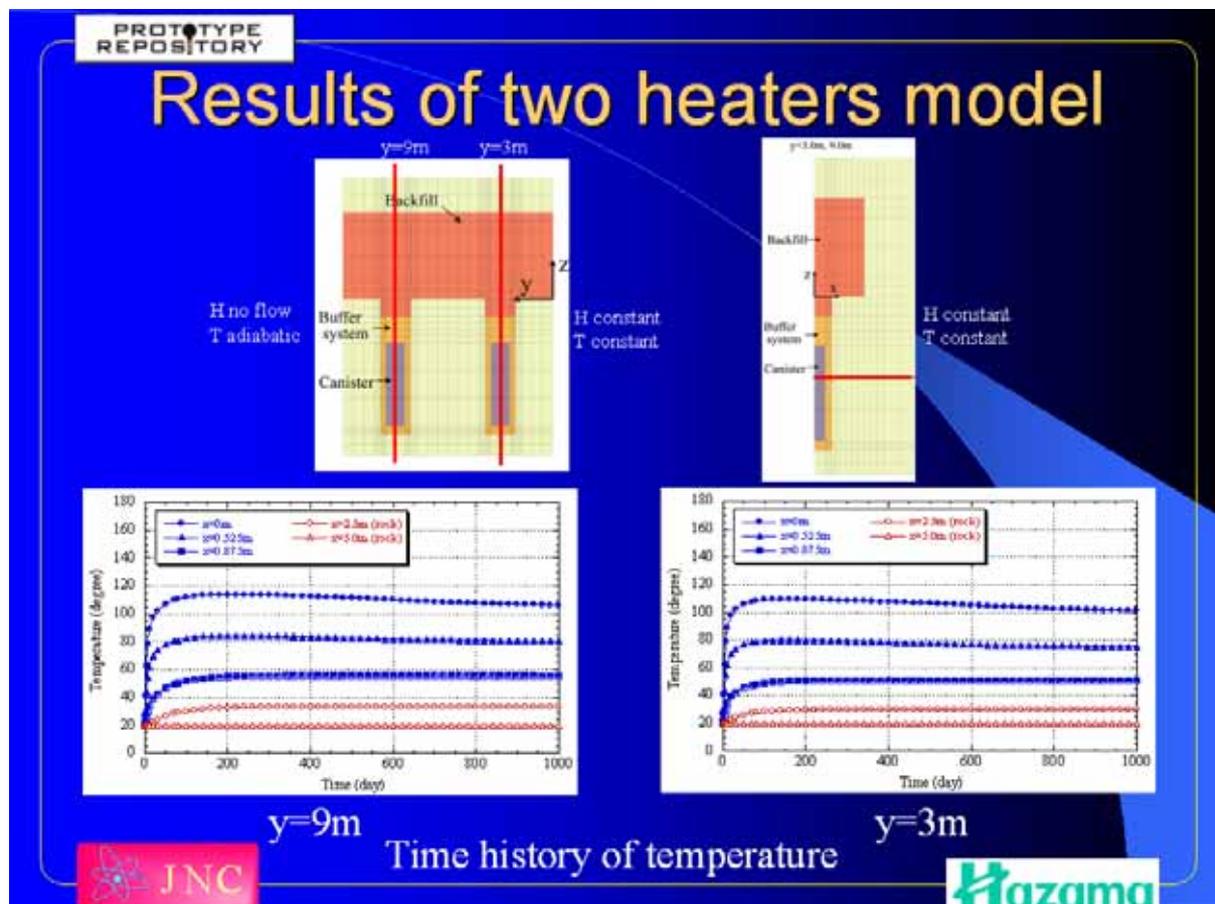
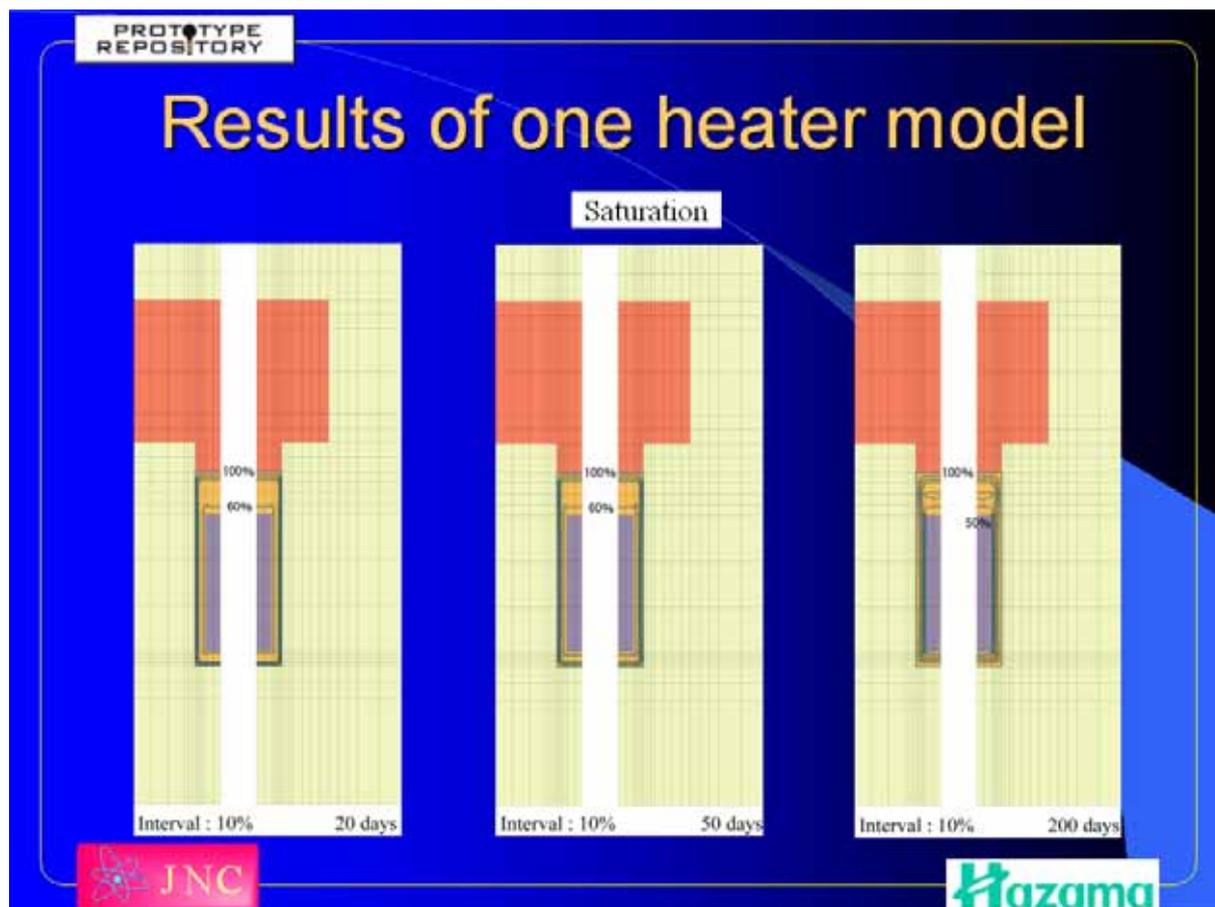
Initial void ratio of buffer = 0.75

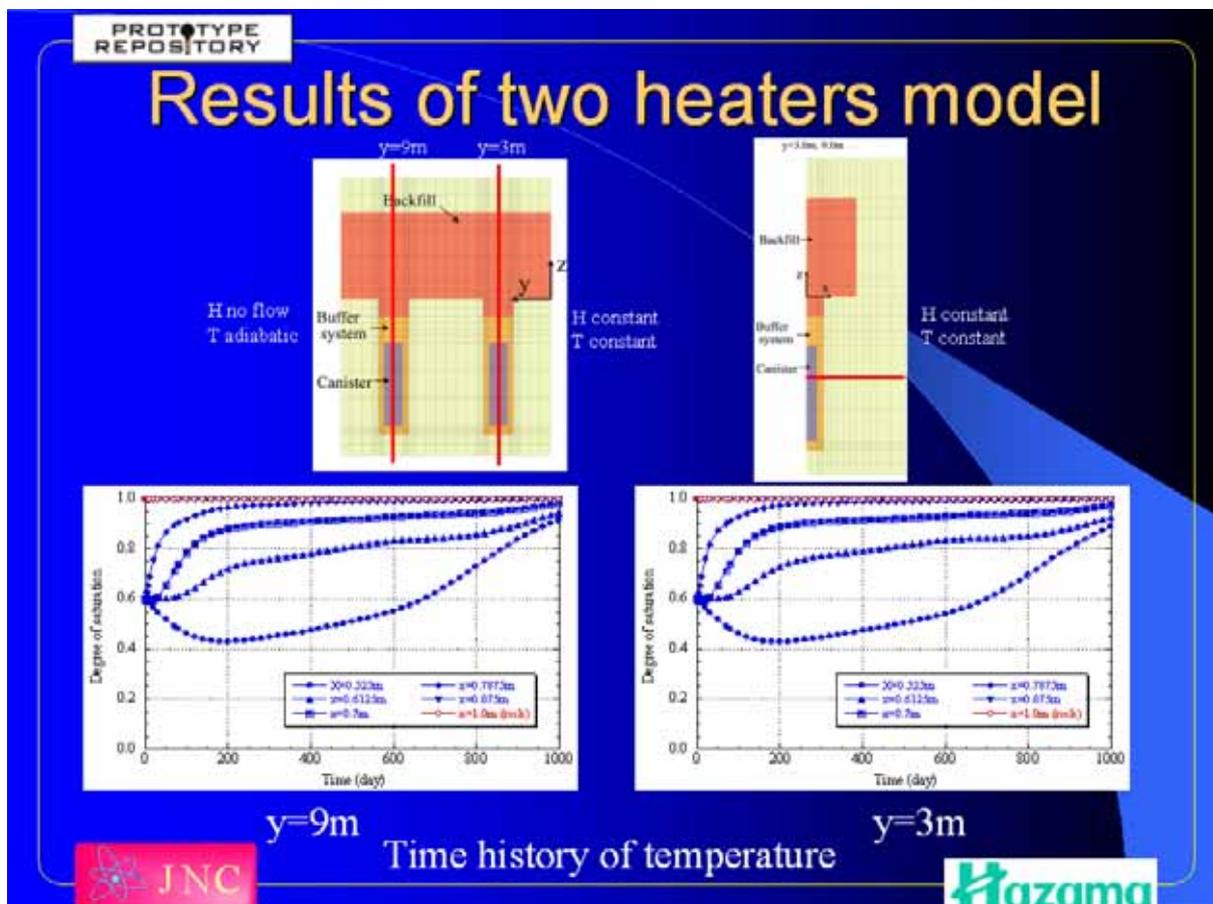
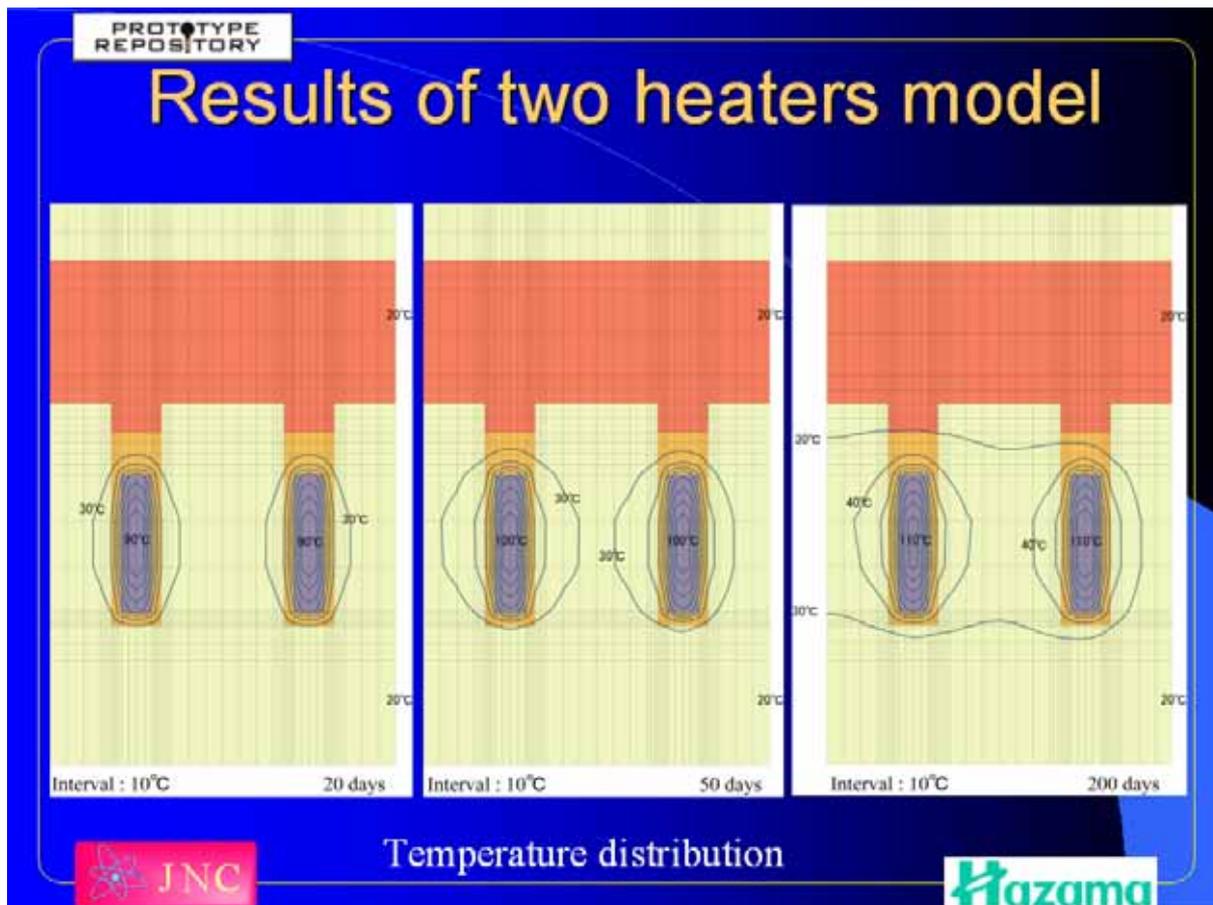
Heat output = 1800W

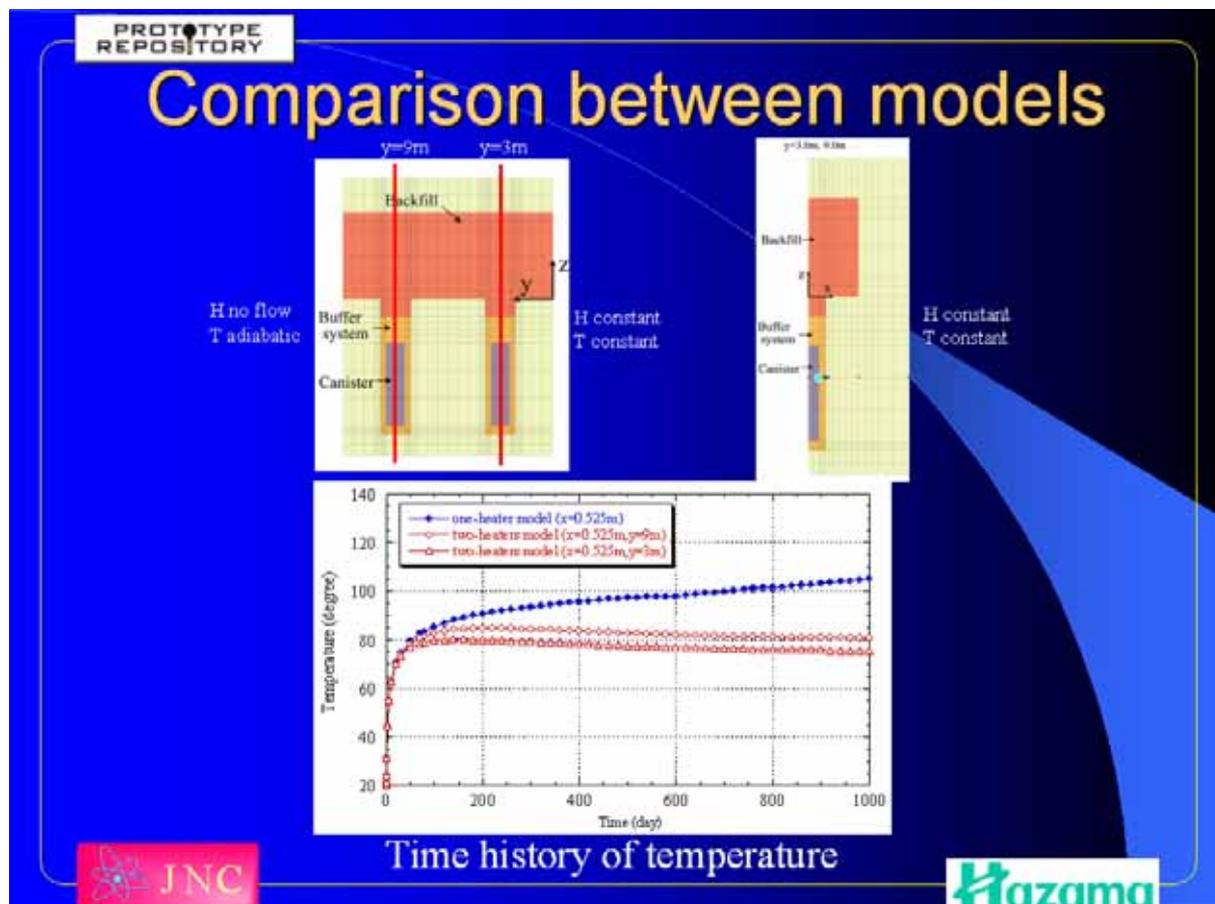
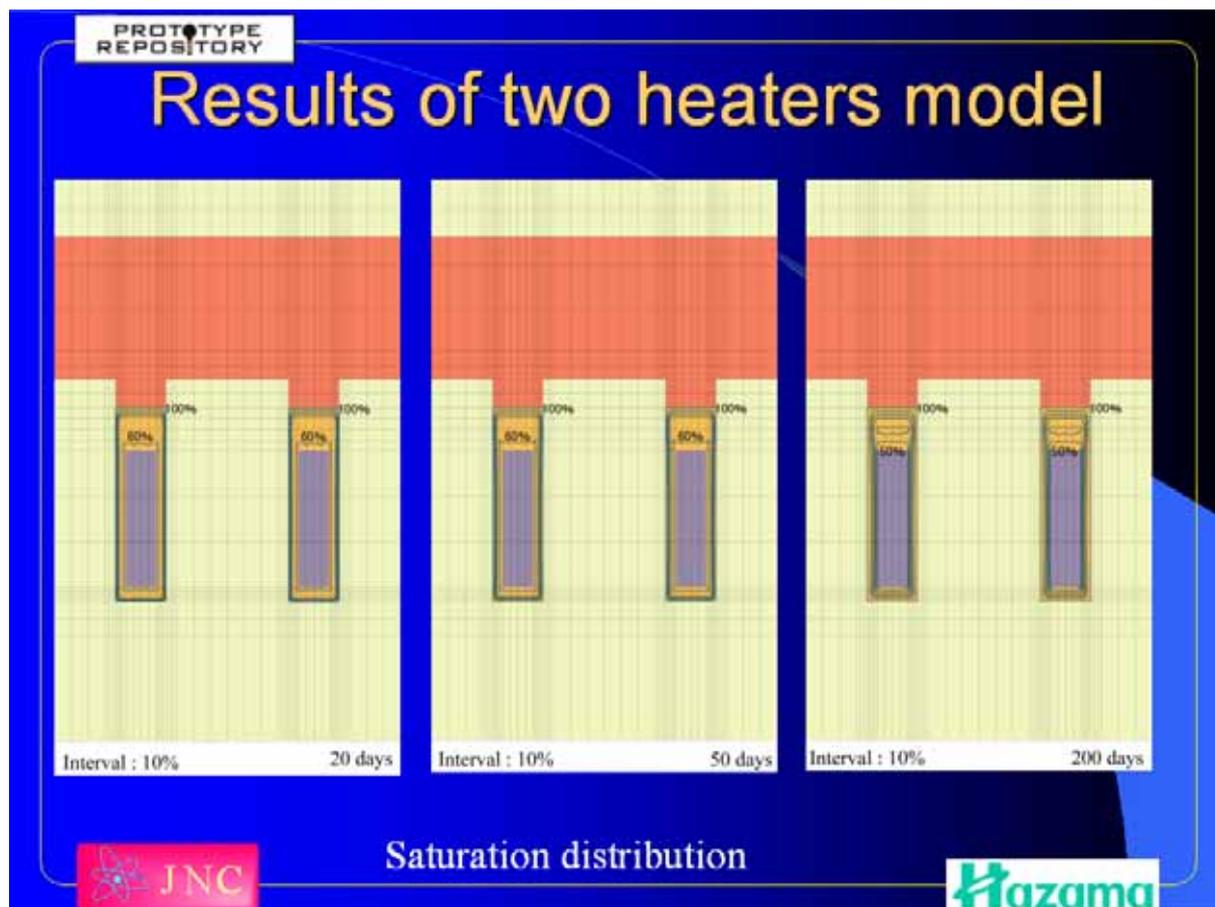


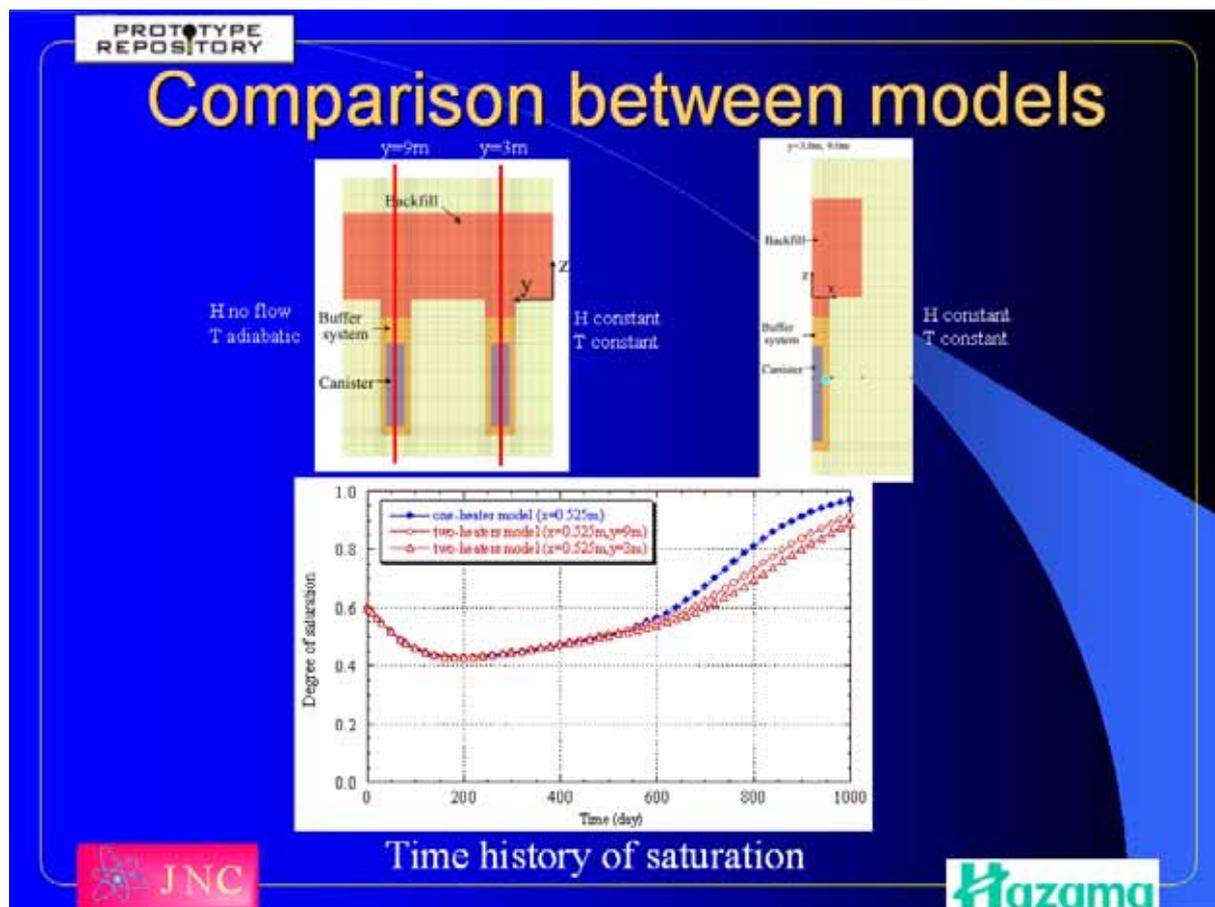













PROTOTYPE REPOSITORY

Summary

- 1) Temperature distribution around the experimental hole is highly dependent on the boundary conditions. Furthermore, the re-saturation time is dependent on temperature distribution. Therefore, it is important to use the suitable boundary condition for the accurate simulation.
- 2) Seepage in the buffer is dependent on permeability of the rock mass and pore pressure distribution in the rock mass. It is important to understand these characteristics in order to evaluate the saturation phenomena in the buffer

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

Future work

- 1) Comparison between measured and simulated results
- 2) Calibration of simulation model.
(Geometry, boundary condition, and so on.)

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

Properties of Pellet

Backfill

Buffer

Gap(50mm)

Pellet

Swollen Pellet

Swollen Block

Swollen Pellet

Gap

Gap

Gap

JNC Hazama

PROTOTYPE REPOSITORY

Properties of Pellet

	Pellet	Swollen Pellet	Low dense Block	High dense Block
Dry Density [kg/m ³]	Ave. 1,000	1,000	1,000	1,600 1,800

φ11

7.4

4.1

[mm]

Pellet

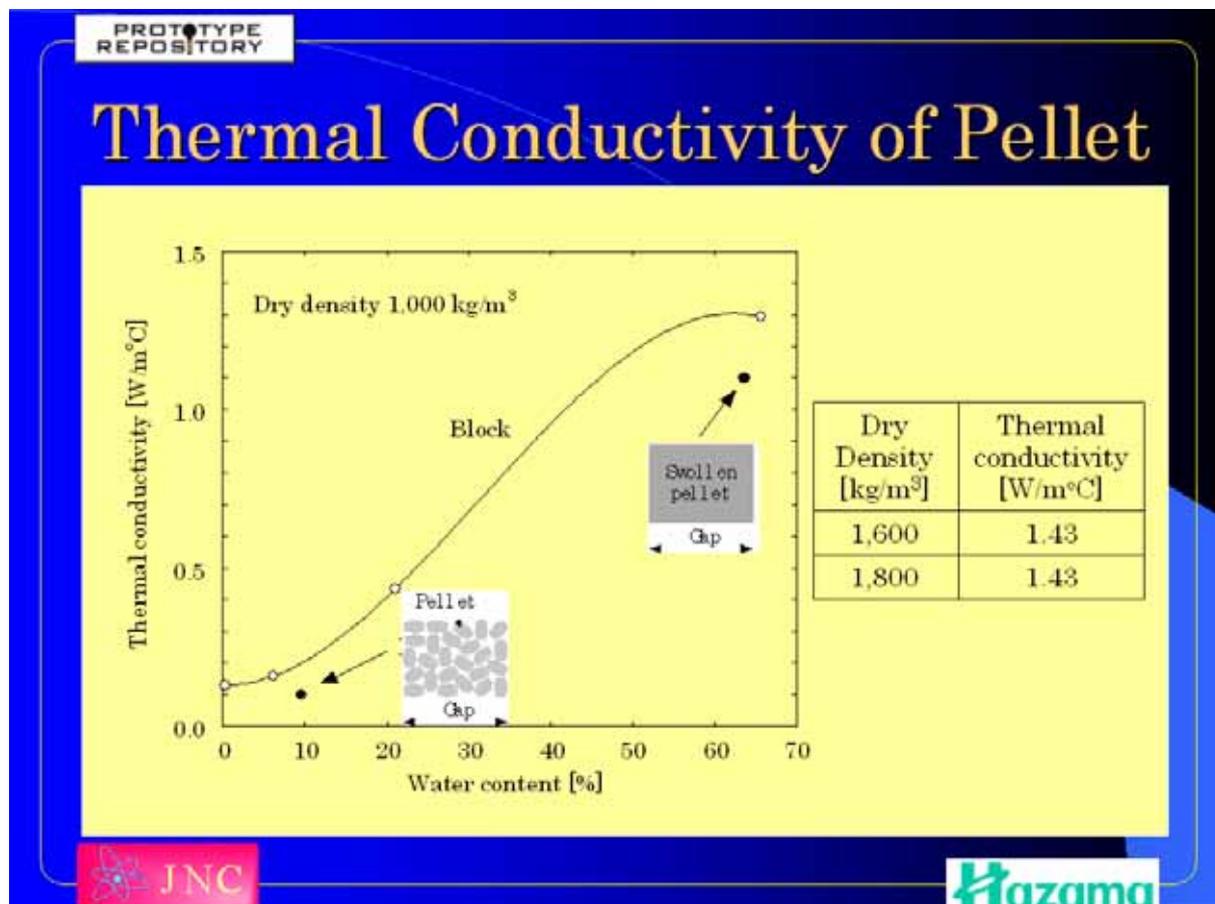
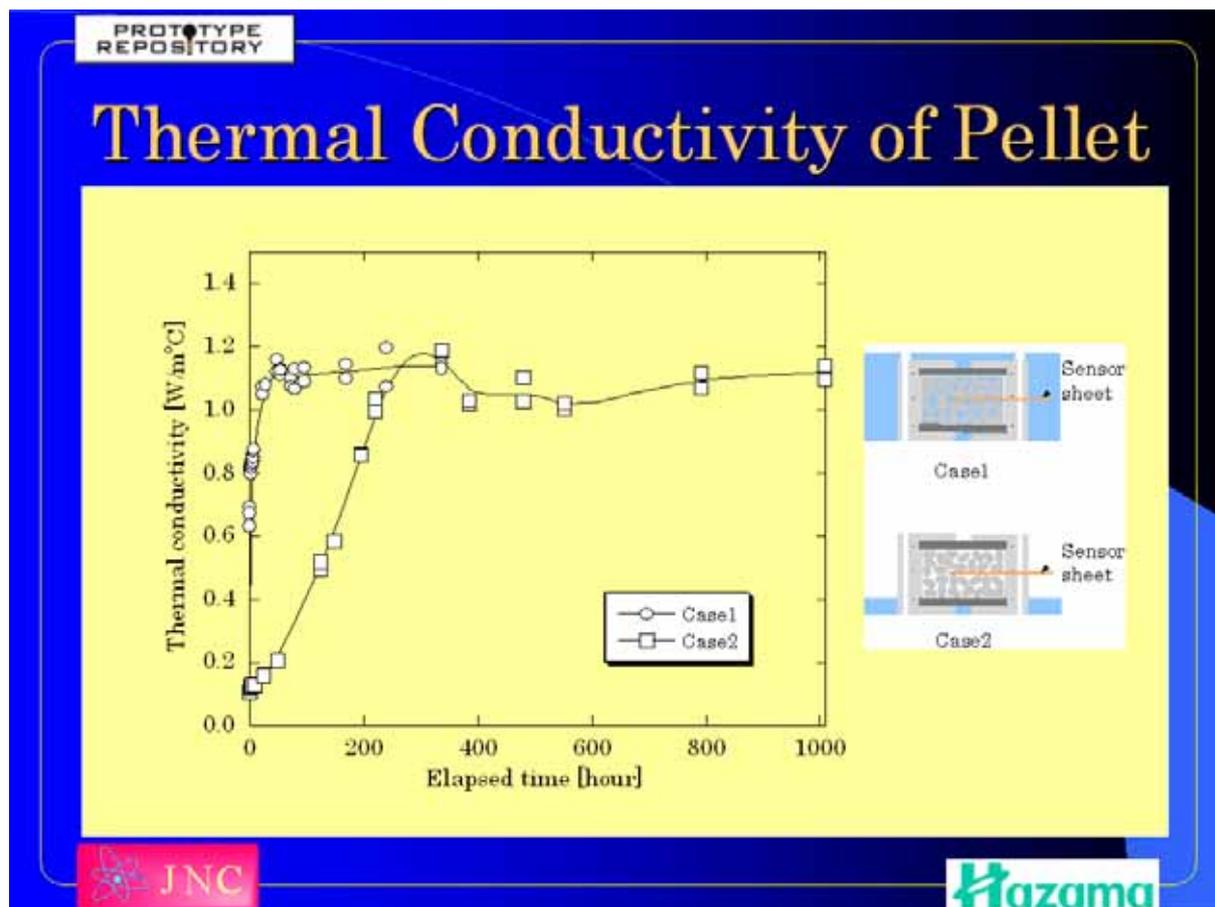
Japanese bentonite
Kunigel V1
Dry density 1,900[kg/m³]

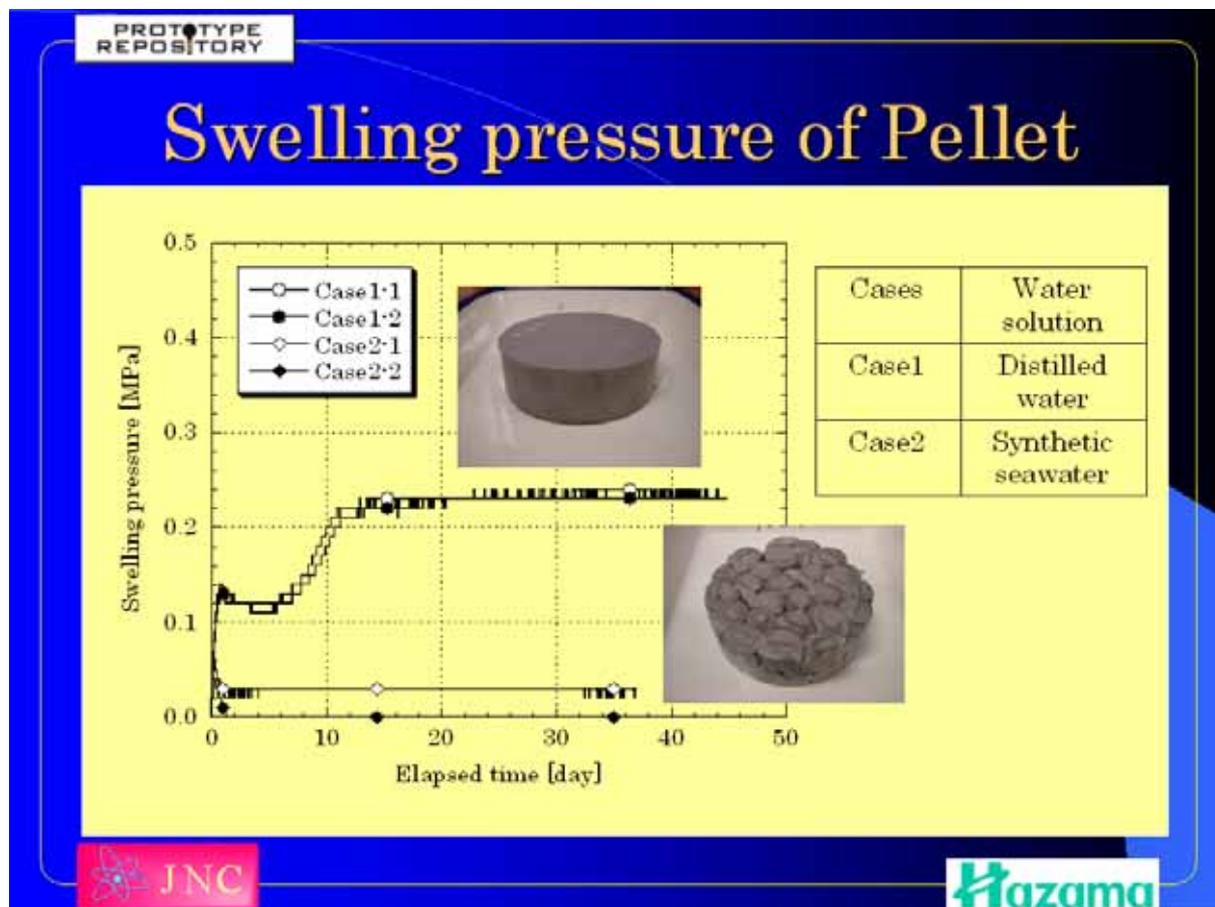
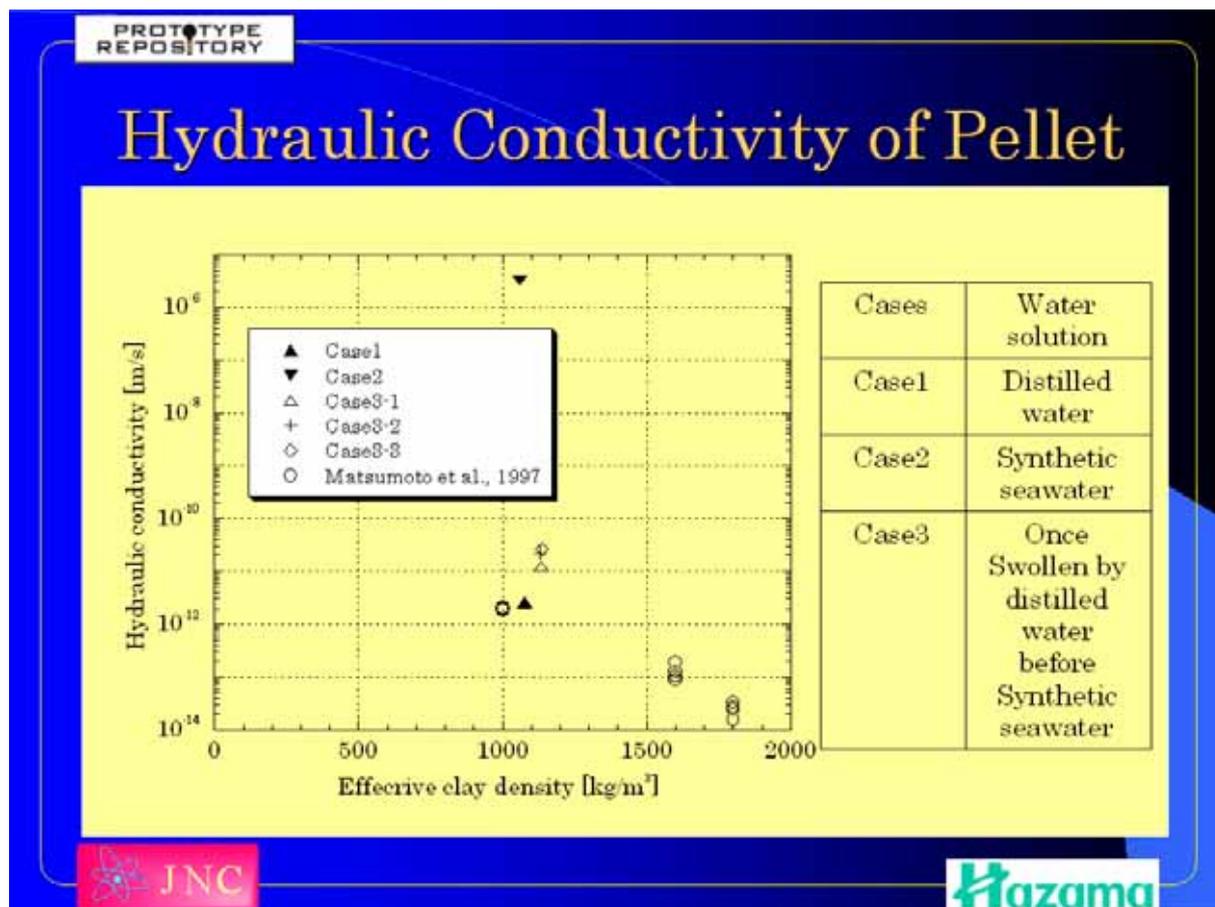
Water solution
distilled water
Synthetic seawater

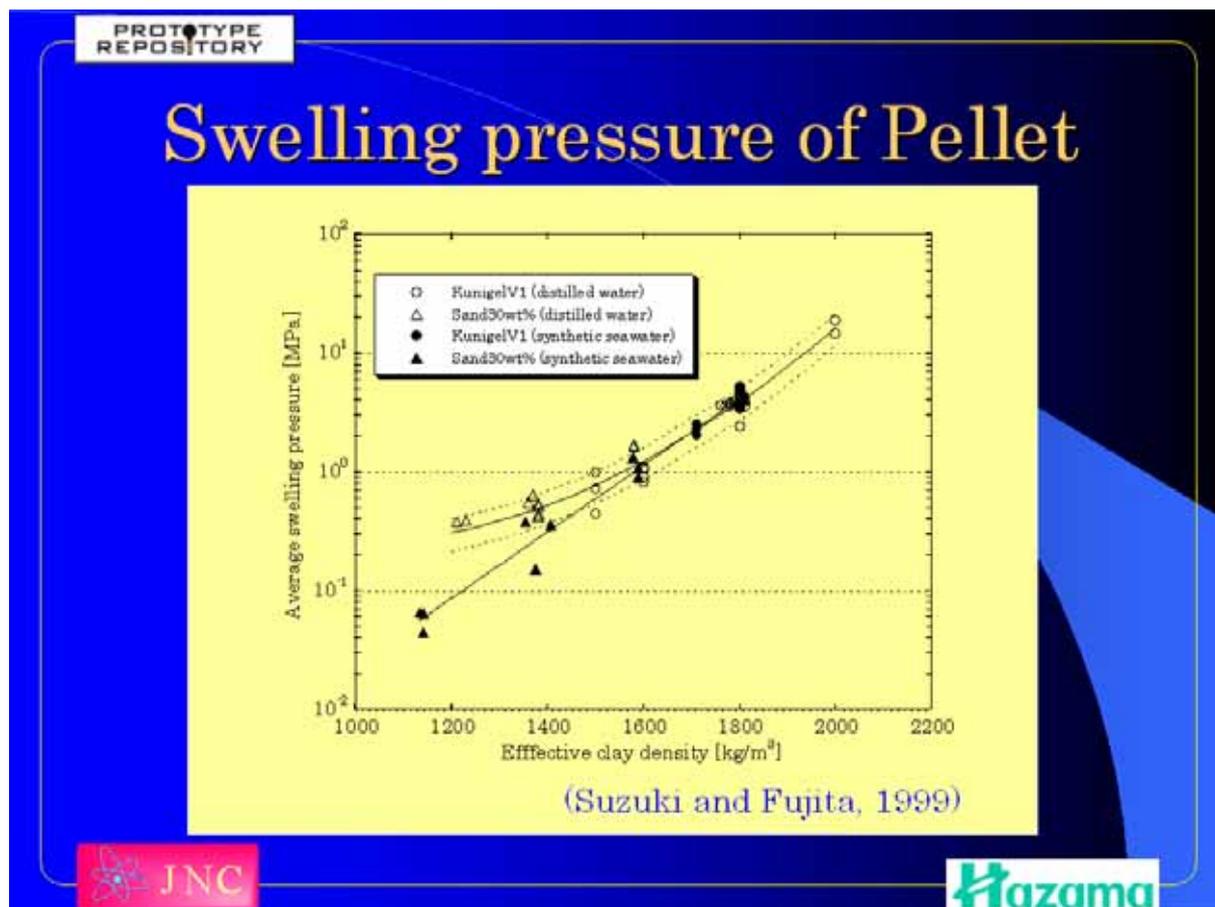
PROTOTYPE REPOSITORY

Properties of Pellet

- 1) Thermal conductivity
- 2) Hydraulic conductivity
- 3) Swelling pressure







PROTOTYPE REPOSITORY

Tentative conclusions

Thermal and hydraulic properties of bentonite pellet and bentonite block show applying block properties to pellet is negligible on calculation of the THM behavior.

JNC Hazama