

地層処分システム工学研究施設に関する試験設備の設計研究  
(試験研究計画及び試験設備の基本仕様の決定)

成 果 概 要

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1990年 8 月

三 菱 金 属 株 式 会 社  
石 川 島 播 磨 重 工 業 株 式 会 社  
株 式 会 社 大 林 組  
株 式 会 社 神 戸 製 鋼 所  
日 揮 株 式 会 社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1990年8月

地層処分システム工学研究施設（ENTRY）に関する試験設備の設計研究

三菱金属株式会社

石川島播磨重工業株式会社，株式会社大林組

株式会社神戸製鋼所，日揮株式会社

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分の長期安全性を示すためには、地層処分施設に係わる人工バリアを中心とする“ニアフィールド”および天然バリアを中心とする“ファーフールド”の諸現象を長期的に予想する“性能評価モデル”を開発し、その妥当性を確認することが必要である。こうした性能評価モデルの確認を行うためには、従来実施してきたホット室内試験、原位置試験等に加え、大規模コールド室内試験を実施し、地層処分に係る複合的諸現象を人為的に制御された条件の下で再現し、これを観察することが有益である。昨年度は、こうした性能評価モデルに関して、その確認に必要な試験設備、および、データの取得に必要な試験設備の概念を明らかにするとともに、その概念設計を実施した。

今年度は、性能評価研究を進めて行くに当たって、研究対象を“ニアフィールド”“ファーフールド”と“性能評価シナリオ”の3分野に分け、各分野の試験研究について技術的仕様を検討することにより、試験設備の基本仕様、設計条件等の具体的項目を明らかにすることを目的とした。その際に、必要な各試験研究の予察試験（小型試験装置の製作やシミュレーションによる検討を含む）についてもその目的、明らかにすべき項目、詳細仕様の検討を行った。

\* 本報告書は、三菱金属株式会社、石川島播磨重工業株式会社、株式会社大林組、株式会社神戸製鋼所、日揮株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号 : 010D236

事業団担当部課室 : 環境技術開発部 地層処分開発室

PNC TJ4449 90-007(1)

August 1990

Design Study for the Test Apparatus of ENTRY Facility

Mitsubishi Metal Corporation

Ishikawajima-Harima Heavy Industry Co.Ltd.

Obayashi Corporation, Kobe Steel.Ltd.

JGC Corporation

ABSTRACT

It is necessary for the demonstration of the long-term safety of the geologic isolation of HLW to develop and validate the performance assessment models which enable the long-term prediction of the phenomena of the near-field and the far-field of the geologic isolation facility.

For the purpose of the validation, it is significant to carry out large scale cold laboratory tests, as well as small scale hot laboratory tests and in-situ tests, and to observe the coupled phenomena under well-controlled conditions.

In this study of FY 1989, the purpose of the design study of the validation apparatus was to clear the basic specifications and the design conditions. At the same time, the purpose, items and detailed design of the previous tests were discussed.

\* Work performed by Mitsubishi Metal Corporation, Ishikawajima-Harima Heavy Industry Co.Ltd, Obayashi Corporation, Kobe Steel.Ltd, and JGC Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No. : 0100236

PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section,  
Waste Technology Development Division

# 目 次

まえがき	1
<b>第 1 部 試験研究計画</b>	
第 1 章 性能評価研究の全体目標と地層処分システム工学研究施設の位置づけ	
1.1 ENTRYにおける試験研究の目的	3
1.2 ENTRYにおける試験研究と他の試験研究との関連	4
1.3 ENTRYにおける試験研究の範囲	5
1.3.1 プロセスモデルについての試験研究	5
1.3.2 構造モデルについての試験研究	6
第 2 章 試験研究の基本的戦略	
2.1 基本シナリオに関する試験研究	9
2.1.1 プロセスモデルについての試験研究	9
2.1.2 構造モデルについての試験研究	14
2.2 変動シナリオについての試験研究	15
第 3 章 各試験研究間及び性能評価との間の相互補完についての基本方針	
3.1 ニアフィールド性能評価における相互補完	17
3.1.1 化学反応	17
3.1.2 物質移動	17
3.1.3 ニアフィールド全体プロセス評価	18
3.2 ファーフィールド性能評価における相互補完	19
3.2.1 化学反応	19
3.2.2 物質移動	19
3.2.3 化学反応と物質移動の複合プロセス	20
3.3 基本シナリオに対する摂動的事象の取扱い	20

第4章	化学環境変化試験 (EDAS)	
4.1	試験研究の目標	23
4.2	既往の研究の整理	23
4.3	試験研究の概要および優先順位	26
4.4	試験スケジュール	28
4.5	今後の開発課題の抽出	34
第5章	物質移動に関する試験	
5.1	ニアフィールドに関する物質移動試験 (IMAGE-MASTRA)	35
5.2	地質環境における物質移動に関する試験	42
5.2.1	水理・物質移動試験研究計画 (GEOTEX/LABROCK)	42
5.2.2	ファーフィールド水理・物質移動試験研究の計画 (MACRO-2D)	71
5.2.3	MACRO-2Dにおける研究の目的とその研究概要	72
5.2.4	MACRO-2Dの試験設備	73
5.2.5	試験研究計画	74
第6章	物質移動・化学反応 (IMAGE-GEOCHEM) に関する試験	
6.1	ニアフィールド及びファーフィールドにおける物質移動 — 化学反応の連成現象	77
6.2	既往の研究	77
6.3	試験項目の抽出	81
6.4	試験計画	82
第7章	構造モデルについての試験研究の計画	
7.1	ニアフィールド構造モデルについての試験研究の計画	85
7.1.1	試験研究の目標	85
7.1.2	既往の試験研究	85

7.1.3	試験研究の意義と概要	87
7.2	ファーフールドの特性評価試験研究の計画	
	(MACRO-3D)	91
7.2.1	特性評価方法の現状と問題点	91
7.2.2	特性評価方法の研究の方向	91
7.2.3	MACRO-3Dにおける研究の目的とその概要	92
7.2.4	MACRO-3Dの試験設備	92
7.2.5	試験研究計画	93
8章	性能評価シナリオ試験研究の計画	
8.1	試験研究の目標	95
8.2	試験研究概要	95
8.2.1	事象の抽出	95
8.2.2	抽出された事象	96
8.3	イベント・シーケンス構築および試験範囲	96

## 第 2 部 試験設備設計

### 第 1 章 I M A G E における試験設備設計

1. 1 M A S T R A における試験設備設計 .....	99
1. 1. 1 試験研究の段階及び各段階での試験内容と実施計画 .....	99
1. 1. 2 本試験設備の設計 .....	107
1. 2 G E O C H E M における試験設備設計	
1. 2. 1 試験研究の目的 .....	110
1. 2. 2 試験研究の段階及び各段階での試験内容と実施計画 .....	110
1. 2. 3 予察試験設備 .....	114
1. 2. 4 本試験設備 .....	118

### 第 2 章 G E O T E X / L A B R O C における試験設備設計

2. 1 予察試験設備 .....	131
2. 1. 1 予察試験の目的 .....	131
2. 1. 2 予察試験項目 .....	131
2. 1. 3 予察試験の基本仕様 .....	143
2. 1. 4 予察試験スケジュール .....	149
2. 2 本試験設備 .....	152
2. 2. 1 本試験の目的と概要 .....	152
2. 2. 2 本試験に先立って—試験規模の検討— .....	153
2. 2. 3 本試験の基本仕様 .....	157
2. 2. 4 試験体の準備 .....	158

### 第 3 章 M A C R O - 3 D 設備の設計

3. 1 多孔質媒体水理・物質移動予察試験（カラムタイプ） .....	167
3. 2 多孔質媒体水理・物質移動予察試験（セルタイプ） .....	167
3. 3 M A C R O - 2 D .....	168
3. 4 M A C R O - 3 D .....	168



## 第4章 PASSにおける試験設計設備

4.1	BORESHEAR	177
4.1.1	試験研究の目標	177
4.1.2	試験研究の段階	177
4.1.3	設備設計の成果	177
4.2	BENTFLOW	184
4.2.1	試験研究の目標	184
4.2.2	試験研究の段階	184
4.2.3	設備設計の成果	184
4.3	HYDROGEN	189
4.3.1	試験研究の目標	189
4.3.2	試験研究の段階	189
4.3.3	設備設計の成果	189

## CONTENTS OF FIGURE (第1部)

Fig. 3-1	Integration of test results for engineered barriers .....	21
Fig. 3-2	Integration of test results for geological environment .....	22
Fig. 4.1-1	Dynamics phenomena of chemical environmental variation in near field system. ....	24
Fig. 4.4-1	The basic design of EDAS No.1 equipment .....	33
Fig. 5.2.1-1	Overall schematic study flow .....	45
Fig. 5.2.1-2	Flow diagram of section 4 .....	58
Fig. 5.2.1-3	Procedure of research for mass transport in fractured media .....	63
Fig. 5.2.1-4	Concept of Tsang cord .....	68
Fig. 5.2.1-5	Research program .....	70
Fig. 7.1.3-1	Event sequence on H <sub>2</sub> gas production .....	88
Fig. 7.1.3-2	Event sequence on earthquake .....	89
Fig. 8.3-1	Event sequence on earthquake .....	97

## CONTENTS OF TABLE (第1部)

Table 2-1	Tasks in ENTRY project .....	16
Table 4.4-1	Relation between test schedule and test equipment .....	30
Table 4.4-2	Defferance between EDAS No.1 equipment and EDAS No.2 equipment .....	32
Table 5.1.-1	Phenomena and issues highlighted in near-field nuclide migration analysis .....	37
Table 5.1.-2	Time schedule of IMAGE-MASTR .....	40
Table 5.2.1-1	Work sheet of previous physical tests(Ref.No.7) .....	50
Table 5.2.1-2	Work sheet of previous physical tests(Ref.No.8) .....	51
Table 5.2.1-3	Work sheet of previous physical tests(Ref.No.10) .....	52
Table 5.2.1-4	Work sheet of previous physical tests(Ref.No.12) .....	53
Table 5.2.1-5	Analytical codes for the fractured media .....	55
Table 5.2.1-6	Items to be studied with relation to codes .....	56
Table 5.2.1-7	Subjects in a single fracture .....	59
Table 5.2.1-8	Subjects of ENTRY .....	66
Table 6.2.1	Representative chemical reaction making for groundwater .....	78
Table 6.4.1	Time schedule of GEOCHEM .....	83

## CONTENTS OF FIGURE (第2部)

Fig.1.1.1-1	Basic concept of the flow cell for examination of the effect of the viscosity and decompressed zone .....	101
Fig.1.1.1-2	Schematic flow cell for examination of the effect of buffer intrusion into fracture .....	101
Fig.1.1.1-3	Schematic flow cell for examination of the effect of local density decrease in buffer .....	102
Fig.1.1.1-4	Framwork of MASTR .....	103
Fig.1.1.2-1	Perspective drawing of the apparatus .....	108
Fig.1.1.2-2	Perspective drawing of the flow cell for examination of the effect of the viscosity and decompressed zone .....	109
Fig.1.1.2-3	Configuration of the flow cell for examination of the effect of the viscosity and decompressed zone .....	109
Fig.1.2.1	Schematic flow of GEOCHEM .....	111
Fig.1.2.2	Column type cell for preliminary test .....	116
Fig.1.2.3	Experimental setup for GEOCHEM .....	120
Fig.1.2.4	Arrangement of columns for GEOCHEM .....	123
Fig.1.2.5	Overview of GEOCHEM equipment .....	125
Fig.1.2.6	Layout of GEOCHEM equipment .....	126
Fig.1.2.7	Relative equipments to GEOCHEM .....	129
Fig.2.1-1	Status of preliminary tests and main tests .....	132
Fig.2.1-2	Elevation of whole system .....	144
Fig.2.1-3	Block diagram of loading control system .....	145
Fig.2.1-4	Block diagram of measuring system .....	146
Fig.2.1-5	Experimental relation between natural and artificial fracture .....	151
Fig.2.1-6	Procedures of preliminary tests artificial fracture .....	151

Fig. 2. 2. 2-1	Previous permeability tests(1)	.....	156
Fig. 2. 2. 2-2	Previous permeability tests(2)	.....	156
Fig. 2. 2. 4-1	Work flow for making LABROCK test block	.....	159
Fig. 2. 2. 4-2	Flex-cutting method	.....	162
Fig. 2. 2. 4-3	Hydro-cutter with rotating nozzle	.....	162
Fig. 2. 2. 4-4	Slot-drilling method	.....	163
Fig. 2. 2. 4-5	Blazing jet method	.....	163
Fig. 3. 1-1	Equipment layout for column dispersion test	.....	169
Fig. 3. 2-1	Equipment layout for cell test	.....	171
Fig. 3. 3-1	Outline drawing for MACRO-2D (1)	.....	173
Fig. 3. 4-1	Perspective drawing for MACRO-3D	.....	175
Fig. 4. 1. 3-1	Test specimen of BORESHEAR	.....	180
Fig. 4. 1. 3-2	Configuration for BORESHEAR test equipment	.....	181
Fig. 4. 2. 3-1	Test apparatus for preliminary test of BENTFLOW	.....	185
Fig. 4. 2. 3-2	Equipment schetch of BENTFLOW	.....	187
Fig. 4. 2. 3-3	Equipment schetch of BENTFLOW	.....	188
Fig. 4. 3. 2-1	Test system for hydrogen gas production	.....	190
Fig. 4. 3. 3-1	Test equipment for H <sup>+</sup> ion diffusion coefficient measurement	.....	191
Fig. 4. 3. 3-2	Test equipment for H <sub>2</sub> gas diffusion coefficient measurement	.....	193
Fig. 4. 3. 3-3	H <sub>2</sub> gas flow test equipment	.....	197
Fig. 4. 3. 3-4	Overpack corrosion accelerating test equipment	.....	198
Fig. 4. 3. 3-5	H <sub>2</sub> gas accumulation and diffusion test equipment	.....	198

CONTENTS OF TABLE (第2部)

Table 1.2.1 Time schedule of GEOCHEM .....	111
Table 1.2.2 Example conditions for basic test under static state .....	113
Table 1.2.3 Example conditions for application test under controled state .....	115
Table 1.2.4 Test condition of preliminary tests .....	116
Table 1.2.5 Time schedule of preliminary tests .....	117
Table 1.2.6 Components in one equipment of GEOCHEM .....	121
Table 1.2.7 Time schedule of GEOCHEM .....	129
Table 2.1-1 Preliminary tests for ENTRY .....	133
Table 2.1-2 Previous tests with relation to preliminary tests .....	135
Table 2.1.3 Measurement items .....	139
Table 2.2.4-1 Comparison of the method for cutting out rock .....	165
Table 2.2.4-2 Items for evening the rock .....	166
Table 4.3.3-1 Control item, test parameter and measuring item for the preliminary test .....	195
Table 4.3.3-3 Control item, test parameter and measuring item fot the main test .....	200

## ま え が き

高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する安全な最終処分技術を確立するために、昭和62年6月に策定された「原子力開発利用長期計画」を基として、地層処分技術に関する研究開発と技術開発が動力炉・核燃料開発事業団殿を中核に精力的に推進されている。

地層処分技術は、高レベル放射性廃棄物を“天然バリア”である深部地層中に、放射性物質の移行を遅延させる効果を持つ“人工バリア”内に閉じ込めた状態で処分する技術である。この技術の処分環境に与える安全性を示すためには、廃棄物中に含まれる放射性核種が、人類の歴史を超える長期間にわたり、人類の生活圏から有効に隔離されることを示す必要がある。

このためには、高レベル放射性廃棄物の処分された複合環境において長期間にわたり生じる諸現象を、現時点で取得しうるデータと科学的根拠の明らかな概念及び法則により構成される“理論モデル”を用いて予測評価する“性能評価”を実施することが必要である。

しかし、このような“理論モデルによる性能評価”の妥当性を示すためには、性能評価による予測結果と長期間の現象観測結果を直接的に対比する方法によって、証明することは不可能である。そこで、この妥当性を証明するためには、評価に用いられた手段の正さを科学的根拠の明らかな概念及び法則により構成される“理論モデル”による各種試験を通して確認すること、すなわち“確証試験”を実施することによって間接的に証明することが最良の方法となる。

地層処分システム工学研究施設（ENTRY）は、上記の“確証試験”を実施するワールドの大規模室内試験施設であり、動力炉・核燃料開発事業団殿の東海事業所内に建設される予定である。本報告書は、このENTRY施設に設置される試験設備の設計研究、特に試験研究計画及び試験設備の基本仕様の決定を行った結果を示すものである。

# 第 1 部 試 験 研 究 計 画



## 第1章 地層処分システム工学研究施設（ENTRY）における試験研究の位置づけ

### 1.1 ENTRYにおける試験研究の目的

地層処分における性能評価研究の目標は、地層処分システムの長期にわたる性能を定量的に示すことにあり、さらに、そこで用いた評価手法の妥当性を確認する、所謂確証という課題も含まれることとなる。

そこで、上記の目標を達成するために、確証可能な解析モデルの開発という研究上の要請が課せられることとなる。

ここで言う解析モデルの確証可能性を考える上では、地層処分システムの長期的性能の評価に含まれ得る不確実性の主要なソースと考えられる時間と空間の取扱いがその中核的概念となる。時間、ないしは空間によってもたらされ得る不確実性の発生機構とは、次の様なものである。

#### (1)外挿に伴う（同一のモデル位相内の）誤差の累積

これは、評価対象となる時間、あるいは空間領域に対して評価すべき現象の位相が変化しない場合において、実験的に再現された部分領域において確認された実験結果と解析結果との差異が、解析を全体領域に外挿した場合に拡大しうることを指すものである。

#### (2)現象の位相の変化

これは、時間の経過に伴うプロセスの進展により、その効果が現象のプロセスモデルの位相を変化させること、ないしは空間的拡がり（より正確には、空間的不均質性）により部位によって現象の構造モデルの位相が異なることを示すものである。

上記の内、第一の発生機構については、決定論的な影響因子をモデルに適切に取り込んだ後、残差について所謂不確実性解析を行うことにより誤差を統計的に把握するという戦略を採ることが適当である。他方、第二の発生機構については、位相変化に関してのdecision table となるべき全体集合に未知の部分が残るため、上記の手法を直接適用することは困難である。そこで、プロセスの進展に伴う現象の位相変化と、

空間的不均質性に起因する位相の異なる現象の派生についての積極的なモデル開発と実験的検証とが必要となる。

プロセスの進展に伴う位相変化と空間的不均質性に起因する位相の異なる現象の派生の問題とは、研究開発上の取組みに関して根本的な差異を有する。即ち、プロセスの進展に伴う位相の変化とは、現在存在しないものであり、他方、空間的不均質性に起因する位相の異なる現象は存在するが認識されていないものである。そこで、前者については実験的に評価対象となる現象を創出することの必要性が明らかであり、事実、浸出に伴うガラス表面層の変化等の問題についての実験的取組みが既に行われている。逆に、後者については、地下深部の水理の問題等、現在生じている現象であるために、原位置での実際の現象の観察に研究開発の主力が注がれてきた。

しかしながら、原位置での実際の現象の観察においても、得られる観察結果は、観察する事項の抽出及び結果の解釈という点においてその背景にある現象理解、ないしは理論というものへの依存性が大であり、この意味から、必ずしも人為的な営みと独立なものではない。つまり、この問題についても、観察し、解釈するための理論の開発という課題が存するのであり、この目的のためには、原位置試験に加えて、現状の理論に基づき人工的な実験系を組立て、試験を行うことにより、当該理論の更なる発展を目指す試験を考案する余地が残されているものとする。

地層処分システム工学研究施設における試験研究の目的は、上述したプロセスの進展による現象の位相変化と、空間的不均質性に起因する位相の異なる現象の派生についてのモデル開発と実験的検証を行うことである。

また、上記の目的に沿って行われる試験研究において得られる入力データや、調査、試験機器の開発、実証等の結果も副次的な研究成果として重要である。

## 1.2 ENTRYにおける試験研究と他の試験研究との関連

上記の目的に対応して行われるENTRYの試験研究の設備上の特徴は、以下の点に集約される。

- (1) コールドの試験施設であること
- (2) 人工的に実験系を作成して行う室内試験であること
- (3) 種々のプロセスを複合して行う相当規模の試験が実施可能であること

上記の特徴のうち、(1)に関しては、実際に高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種についての特性値についてのみ適用範囲が制約される代わりに、モデル開発や理論の確立といった研究開発にとって不可避の試行錯誤に係る制約が緩和されるという特徴を活かすことが可能である。また、(2)に関しては、従来、原位置試験のみによって行われてきた地質環境中での現象把握について、原位置試験の結果を観察し、解釈するためのモデルや理論の開発において、複雑な地質環境の構造モデルを単純化し、かつ正確に制御することによってプロセスモデルに係る問題と構造モデルに係る問題とを分離して抽出可能にすること、及び条件を種々に変化させた実験を行うことにより重要な因子の抽出を容易にするという特徴を活かすことが可能である。さらに、(3)に関しては、従来の室内試験が、単一のプロセスを主として対象として行われていたことに対して、従来の試験では観察することが困難であった、プロセス間の相互作用の問題（これは後述する様に特にニアフィールドにおいては時間の進展と系の挙動との相関を把握する上で中心的な課題となる）についての複合試験を積極的に実施し得るという特徴を活かすことが可能である。

### 1.3 ENTRYにおける試験研究の範囲

ENTRYにおける試験研究は、性能評価における評価対象領域の区分であるニアフィールドとファーフィールドに対して、項目間の重要性に差はあるものの、いずれも以下の範囲を網羅するものである。

#### 1.3.1 プロセスモデルについての試験研究

##### (1)プロセスの種類

性能評価上対象とするプロセスは、

- ・放射性核種の溶解、沈澱、及び吸着やこれらの条件を規定することとなる岩石と地下水、あるいは人工バリア材と地下水との間の相互作用に代表される  
化学反応
- ・上記の化学反応に寄与する放射性核種や人工バリア材、岩石に含まれる化学種の物質移動

に大別することが可能である。さらに複数の化学反応同士、あるいは物質移動

同士の競合過程が評価対象となり、また、化学反応と物質移動の諸プロセスの複合も重要な評価対象となる。

ENTRYにおける試験研究は、上述した設備上の特徴を考慮した上で、以上の各プロセスをいずれも対象とするものである。

## (2)研究内容

プロセスモデルに関して、性能評価上は、モデル開発、確認、及び解析に必要な入力データの取得という研究が必要となる。このうち、ENTRYにおける試験研究は、先に述べた様に主としてモデル開発と確認とを目的として行うものであり、ニアフィールドに関しては、

- ・複数の化学反応同士、物質移動同士の競合過程のモデル化と化学反応と物質移動の諸プロセスの複合モデルの開発
- ・上記のモデルに基づく、プロセスモデルの位相変化についての確認が重要な研究内容となり、他方、ファーフィールドに関しては、
- ・構造モデルに係る不確実性を最小化して行う実験の結果に基づく、構造モデルの不均質性に対応して適用可能なプロセスモデルの開発
- ・既知の構造モデルを前提とした系での上記プロセスモデルの確認が重要な研究課題となる。

### 1.3.2 構造モデルについての試験研究

#### (1)構造モデルの種類

構造モデルには、当該構造モデルの形成過程についてのプロセスモデルに基づく解析の結果推定されるものと、直接的な観察事実を主として、これを形成過程についての理論や一般的傾向についての知見により補い作成されるものがあり、ニアフィールドについての構造モデルの大部分は前者に（例えば、ある時点でのベントナイトの密度は、設計値を初期条件としてベントナイトの地下水による浸食についてのプロセスモデルによって記述される等）、ファーフィールドについての構造モデルのうち固相側のものの大部分は後者に（例えば、地質環境調査にもとづく地質構造モデルの作成等）属する。また地下水についての水質モデルは、前者、後者いずれの方法によっても原則として可能であり、

両者の開発をおこなうべき分野である。

ENTRYにおける試験研究は、ニアフィールドについての構造モデルを規定するプロセスモデルを、1. 3. 1に述べた範囲に加えて研究対象とする。また、ファーフィールドについては、水質形成過程を1. 3. 1にのべた範囲の中で扱うことに加え、岩体の主として水理・物質移動特性についての構造モデルの問題を取り上げる。

## (2)研究内容

ニアフィールドに関しては、

- ・人工バリアを中心とする構造の変化に係る水理、応力、熱、及び化学の連成プロセスについてのモデル開発と確証
- ・放射性核種の移行に直接的に関与しないため従来あまり知見が得られていないが、構造変化という観点からは寄与が大きくなる可能性のあるプロセスのモデル開発と確証

ファーフィールドに関しては、

- ・岩体の水理・物質移動特性についての構造モデルを作成するための調査・解析手法（キャラクターゼーション手法）の開発と既知の構造を有する系での同手法の確証

が重要な研究内容となる。

以上は、主として地下水を移行媒体とした所謂基本シナリオについての、ENTRYにおける試験研究の位置づけであり、これに加えて、基本シナリオに対して摂動として作用しうる地震等の確率的事象による影響の機構解明に関する試験研究を実施する。

## 第2章 試験研究の基本的戦略

### 2.1 基本シナリオに関する試験研究

#### 2.1.1 プロセスモデルに関する試験研究

##### (1) 化学反応に係る試験研究

本項目は、人工バリア材、岩石と地下水の間での化学反応について、個々の素反応、及び複数の素反応の競合として理解される化学反応システムについてのモデル開発と確認を行うことを目標とするものである。

化学反応について、利用可能な解析コードとしては地球化学コードと呼ばれる一連のコード群があり、これらは、平衡論的な解析として、液相中での分種化の問題、溶解・沈澱・吸着・コロイド形成といった固-液間の平衡の問題の取扱い、及び速度論的な解析として上記の種々の反応過程の進展速度の解析を範囲とするものである。

この、地球化学コードに関しては、上記の範囲の内、イオン交換、表面錯体生成反応以外の吸着の問題、コロイド形成の問題、及びほとんど全ての速度論的解析について未開発な状況である。

また、上記の解析コードを用いて解析する際に定義すべきモデルについては、上記の吸着、コロイド形成、及び各反応過程の進展速度について適切なモデルが未開発であることに加え、分種化、溶解・沈澱に関しても地層処分の性能評価上対象とする複雑な反応系については、素反応の構成が全て知られている訳ではなく、人工バリア材、岩石鉱物、地下水の共存系における反応系が既知の素反応により網羅されるか否かという問いが残されている状況である。

更に、上記の解析にあたって用いるべき入力データに関しては、放射性元素という本分野に特徴的な問題を除いても、未取得、あるいは不確実性の大きい項目があり、これは、上記のモデルに関する問題点への対処の際に併せて考慮すべき課題である。

以上の様な本分野の研究開発の状況を踏まえ、化学反応に関する試験研究においては、以下をその基本的戦略として試験研究計画を立案する。

#### ①定量的モデルの開発とその検証

##### i) 平衡論的モデル

分種化、及び溶解・沈澱については、解析コードが既に開発されており、かつ、現在までに知られている素反応については、平衡定数等の熱力学データがデータベースとしてまとめられていることから、これを用いた予備解析の結果と実験結果との比較、差異の原因分析を通じて反応系の設定に係るモデルの網羅性の向上、及び活量係数の補正式等の定量的箇所の精度の向上を図る。

このため、地層処分研究開発において対象とする反応系と環境条件、特に低酸素濃度、あるいは低炭酸根濃度を正確に設定することが重要であり、この様な系を模擬可能な静的反応試験装置（EDAS）において、人工バリア材、岩石等の反応物についていずれも鉱物のレベルにまで対象物を細分化することにより、より基礎的かつ汎用的なレベルでの知見に基づくモデル化を原則とし、このモデルの検証にあたっては、モデル開発のために規定した比較的単純な系から実際の複雑な系まで段階的に試験を進めることとする。

上記の試験の実施にあたっては、地層処分システムの長期的性能を確実に保証するという目標に応じた優先順位に沿って、具体的には放射性核種の溶解度を規定する環境条件として感度の大きいガラス固化体近傍の地下水の酸化還元電位、pH、及び種々のイオン濃度の問題に優先順位を与えることとし、このための実験系の規定に関しては、地質環境中に存在する種々の鉱物に比して相対的に反応性が高く、かつ多重バリアシステムの構成から確実に上記部位における地下水特性に影響を及ぼすと考えられる人工バリア材に含まれる鉄鉱物、粘土鉱物等に着目した単純系から試験を開始する。また、この実験系における素反応の同定については、研究内容として未知の素反応の把握をも包含することから、解析結果との差異の分析を通じた探索的手法により種々の反応を想定して研究を進める。

## ii) 速度論的モデルの開発と確証

平衡論的モデルの開発におけるのと同様の方針に従い、速度論的なモデルの開発と確証を行う。この際、平衡論的な解析が、反応過程の終端における系の状態を記述する素反応のみを対象とするのに対して、速度論的なモデルの開発においては、系の変化における各過程で反応の進展を律速する素反応が明確化されることが必要であり、このような観点からの素反応の網羅と、各素反応についての反応速度式の作成を行うこととする。

## ②概念モデルの開発

コロイドの生成、及びイオン交換や表面錯体生成反応以外の吸着機構については、今後の本試験研究において新たな概念モデルを作成することが必要であり、このため、上記の試験研究における成果に基づき、性能評価上対象とする反応物、反応系、及び環境条件での信頼すべき観察を可能とすることを考慮する。

## ③解析コードの開発、及び入力データの取得

上記の試験研究の進展に伴い、解析コードの中核となるモデルが開発、改良されて行くこととなる。これに対応して、適宜、新たなモデルに基づく解析コードを作成するとともに、対応する入力データを取得し、その網羅性と精度を高めることとする。また、この様にして改良される解析ツールは、逐次、実験結果と比較すべき解析において活用することとする。

## (2)物質移動に係る試験研究

性能評価研究においては、ガラス固化体中の放射性核種の地表への移動、及びこの核種移行に影響を及ぼす地下水成分の移動、更にはこれらの物質移動を駆動する主要な因子となる水理の問題が研究対象となる。

これらの物質移動は、水理についてはダルシー則、溶質移動については拡散ないし分散・移流方程式により表現される。これらの基本的な理論は、従来の多くの分野における適用法が確立されているものの、地層処分についての性能評価に用いる際には、本分野に特有の問題について考慮した上で、その適用性を検証す



るとともに、必要に応じて改良を行うことが必要となる。物質移動の基本的な理論を地層処分の問題に適用する際に考慮すべき問題とは、拡散支配となる物質移動特性を有する領域（緩衝材、空隙率の比較的小さい岩体マトリクス）と、移流・分散支配となる物質移動特性を有する領域（亀裂内、空隙率の比較的大きい岩体マトリクス）とが隣接する不均質な構造モデルに対する上記の基本的な理論ないしはそれらを組合せた理論体系の適用性である。

この問題は、より具体的には、以下の二つの課題に対応するものと考えられる。

- ① 拡散支配の領域と移流・分散支配の領域との界面における各理論の接合
- ② 成因等に応じた決定論的、及び統計的不均質性を有する地質環境中の水理、溶質移動に適用可能な理論の確立

これらの問題は、いずれもニアフィールド及びファーフィールドの構造モデルに対応した課題であり、かつ、後述する様に構造モデル自体が、独自の問題を有するものであるために、従来の原位置試験においては、プロセスモデルの問題と構造モデルの問題とが不可分に抽出されることが一つの研究開発上の障壁となっている。そこで、ENTRYにおける試験研究としては、構造モデルを人為的に設定した系において、即ち、構造モデルが既知の条件下において①に対してはIMAGE-MASTRA試験により、また②に対しては多孔質媒体についてMACRO2D、亀裂状媒体についてGEOTEX、及びLABROC試験設備により水理、物質試験を実施することを基本的な戦略とする。

更に、上記のプロセスモデルの適用性の問題を扱う上では、複数の理論間の比較を経てより適用性の高いものの選定を行う上で各モデルの調整可能なパラメータの自由度を上回る量の情報が得られることが必須である。そこで、上記の試験研究において、現象の結果に加えて、その現象の進展過程に対応するデータの取得を可能とすることを目標として付加する。

また、試験系の設定にあたっての構造モデルの取組みにおいては、実験自体への習熟、プロセスモデルの現実化のステップが合理的なものとなる様に、単純な構造モデルから、複雑なものへと漸進することとする。

### (3) 化学反応と物質移動との複合プロセスに係る試験研究

上述した様に、化学反応及び物質移動に関しては、個々に解決すべき課題があり、この様な状況下で行うべき複合プロセスの試験研究としては、上記の各課題についての成果の統合・完成ではなく、むしろ以下の様な目標設定を行う必要がある。

- ・(1)及び(2)において個別に詳細な研究開発を実施すべき項目の抽出
- ・化学反応と物質移動の単一プロセスには含まれない複合プロセスに固有の効果についてのモデル開発と確証

#### ①個別の試験研究についての研究項目の抽出

地質環境における深部地下水の水質形成過程には、天然の岩石が影響を及ぼし、設計時に材質の規定される人工バリアに比して多くの種類の鉱物が関与することとなる。また、この過程には、地下水の流動や化学種のマトリクス拡散等の物質移動プロセスが関与することとなる。このため、化学反応について個別に試験研究を行うべき項目の抽出にあたっては、物質移動の効果等を検討し、当該反応物のavailabilityを考慮した重要度が明確にされることが必要である。そこで、溶液の移動と溶液・固相間の化学反応を同時に生ぜしめる様な反応型のフローセルを用いた試験（IMAGE-GEOCHEM）により、セル透過後の水質を規定する要因の抽出を目的とした試験を実施する。

#### ②複合プロセスに固有の問題についてのモデル開発と確証

物質移動と化学反応とを統合した現有の解析コードにおいては、多くの場合、物質移動に比して化学反応に要する時間は無視し得る程小さいとする、所謂瞬時平衡の過程が採用されている。この仮定の妥当性は、流動する地下水の水質形成に関与する全ての重要な反応について確証された訳ではなく、岩石の化学的変遷の仮定で生ずる準安定相等については、この仮定が必ずしも適用可能ではないことが示唆されている。

そこで、本試験において、以下の項目についての試験研究を今後実施していくことが必要となる。

- ・瞬時平衡の仮定が成立する様な、反応速度と物質移動速度の組合せ範囲を明らかにすること

- ・上記の範囲外の化学反応、物質移動の複合について、化学反応の進展に係る reaction path、及び各律速過程の速度式を解法する様なモデルの開発と確証

これらの課題については、①の試験研究による実験への習熟、及び化学反応についての速度論的モデルと対応するデータセットの充実に従い逐次試験を開始することとする。

以上の試験においても、反応系及び構造モデルの規定については、実験結果の解釈可能性を担保する様、単純な系から複雑な系へと漸進するものとする。

## 2.1.2 構造モデルに係る試験研究

第1章において述べた様に、構造モデルの導出方法としては構造モデルの形成過程についてのプロセスモデルに基づく解析の結果に基づくものと、直接的な観察事実を主として、これを形成過程についての理論や一般的傾向についての知見により補い作成するものがある。

人工バリアについての構造モデルは、その初期値が設計により与えられ、その後の構造モデルの経時的変化は、種々の化学反応や物質移動プロセスにより表現され得ることから、この問題については、上記のプロセスモデルについての試験研究において取り上げられておらず、かつ、構造モデルの経時的変化については重要と考えられる熱—水理—応力—化学反応連成問題（BIGBEN）、水素発生（HYDROGENE）、及び緩衝材の流出の問題（BENTFLOW）を取り上げモデル開発と確証を行う。これらの試験については、2.1.1に述べたものと同様の基本方針に従い行うこととする。

他方、地質環境については、水質形成の問題等、構造モデルをプロセスモデルにより規定することが可能と考えられるものも含まれるが、岩体側の構造モデルについては、これを定量的に規定する様なプロセスモデルは未開発であり、主として観察事実に基づき作成されることとなる。評価対象となる広大な地質環境に対して、少数のデータに基づき構造モデルを作成する手法としては、地球統計学的キャラクター化手法が開発され適用されている。しかし、この手法にも、地質環境特性の自己相関関数を比較的簡単な関数系により表現することが可能である等の仮

定を置いていることから、エルゴート性の乏しい特性分布を有する地質環境に対する同手法の適用性の検証（誤差の定量化）や、より推定精度の高い手法の開発のために既知の自己相関関数を有する地質環境特性を人為的に設定し、この系に対して地球統計学的キャラクタリゼーション手法を適用する試験研究（MACRO3D）を実施する。

## 2.2 変動シナリオについての試験研究

地層処分システムに対して、地震や地殻変動等の確率的事象が影響を及ぼす可能性が問題とされており、これらの事象を含んだ変動シナリオを設定して評価を行うことの必要性が示唆されている。しかし、この変動シナリオについての研究開発を開始するには、地層処分システムの物理的形態ではなく、その性能の観点からの影響機構と重要性とが整理される必要がある。例えば、地殻変動によってガラス固化体の形状は変化するかもしれない。しかし、ガラス固化体の核種閉じ込めに係る機能は、基本的にはガラスマトリクスと放射性核種との結合によってもたらされるものであり、このような微細な構造までが外力によって破壊されることは考えにくいことである。

そこで、ENTRYにおける試験研究として、多重バリアシステムの各バリア機能をもたらず本質的な構造、特性を詳細に検討した上で、この構造、特性が上述した事象によってどの程度の変化をこうむるのか、そして、その結果地層処分システムの性能がどの程度変化するかを定量的に明らかにするための試験（PASS）を実施する。本試験の実施にあたっては、上記の変動シナリオを構成する一連の事象・プロセスの連鎖（イベントシーケンス）のうち末端に位置する部分、即ち、多重バリアシステムの性能に直接関与する特性、構造に対して外乱が加わる過程から評価対象とするバリア性能に変化が生じるまでの過程を試験対象とする。そこで、実験的には、人工バリアに外乱を加える試験を行い、その試験終了後のサンプルに対する性能評価試験を行うという一連の試験体系を作成することとする。

以上をまとめ、ENTRYにおける試験設備の全体構成を表2-1に示す。

Table 2-1 Tasks in ENTRY project

基本シナリオ								変動シナリオ
プロセスモデル					構造モデル			
化学反応	物質移動				化学反応と物質移動の複合	ニアフィールド	ファ-フィールド	
EDAS	領域間での物質移動理論の接合	不均質な地質環境に対応可能な理論の確立			IMAGE-GEOCHEM	BIGBEN HIDROGENE BENTFLOW	MACRO-3D	
	IMAGE-MASTRA	多孔質媒体	亀裂状媒体					
		MACRO-2D	模擬岩体	実岩体				
			GEOTEX	LABROCK				

### 第3章 各試験研究間及び性能評価との間の相互補完についての基本方針

2. に述べた各試験研究の成果は、最終的には、地層処分システム全体についての性能評価という形でまとめられるべきものである。そして、将来のとりまとめを行うためには、試験研究の実施過程においても、適宜、試験研究の成果を統合し予備的性能評価を並行的に実施することが、各時点での適切な試験項目の抽出、及び試験項目の重要度分類を行う上で必要である。ここでは、以下に、今後の研究開発の進展に伴い行うべき成果の統合、及び相互の反映における基本方針を、ニアフィールド、及びファーフィールド性能評価の重要項目について述べる。

#### 3.1 ニアフィールド性能評価における相互補完

##### 3.1.1 化学反応

化学反応自体についての試験成果は、2. に述べた範囲において主としてEDAS試験設備による試験研究により得られることとなる。しかし、EDASは、後述する様に、或る時刻、或る位置での化学反応系を閉じたシステムとして設定するものであり、緩衝材中での溶質の拡散により相互に関連する個々のシステム間のsynergisticな効果については原理的に項目の探査を行うことができない。そこで、別途実施するIMAGE-GEOCHEM試験により動的なシステムの挙動を観察し、この様な問題として重要な項目を明確化し、更に対応する化学反応系をEDAS試験によって詳細に研究するという成果の反映を行う。

また、IMAGE-GEOCHEM試験における試験系の設定（特にセル内での反応時間等）や、試験結果の解釈については個々の素反応についての精度の高いデータが不可欠であるため、これらのデータをEDAS試験の成果から適宜供給することとする。

##### 3.1.2 物質移動

ニアフィールドにおける物質移動理論に関して、主として改良、確証が必要な箇所は、2. に述べた拡散支配の領域と分散・移流支配の領域との界面における両理論の接合の問題である。この問題に関しては、IMAGE-MASTRA試験においてモデル開発、及び確証を行って行くこととしているが、本試験において用いる

試験体は、実際の人工バリア材料とは異なる模擬材料であり、ここで得られたデータの絶対値自体の性能評価上の意義は乏しい。そこで、現在基礎研究として実施中の緩衝材の特性試験や、溶質の拡散試験、及び人工バリアの周辺に位置する母岩の水理・物質移動特性の原位置での測定等を継続的に実施することとし、これらの試験により必要な入力データを取得することとする。また、ここで得られるデータは I M A G E - M A S T R A 試験における模擬的実験系の特性設定や実際の処分環境との対応づけに活用することとする。

また、I M A G E - M A S T R A 試験においては、分散・移流支配の領域が含まれることから、特にニアフィールドに含まれる母岩の不均質性を考慮した分散現象の定式化について、M A C R O 2 D 試験の成果を繁栄することとする。

### 3.1.3 ニアフィールド全体プロセス評価

ニアフィールドにおける個々のプロセスを、各時点における相関を考慮して解析可能な総合的性能評価コードとしては、動燃事業団と米国バテル記念研究所により開発中の A R E S T - P N C がある。上述した各試験研究の研究計画と、A R E S T - P N C コードの開発、及びこれを用いた解析とは以下の様に相互に成果を反映しつつ行うことが必要である。

#### (1)構造モデルの経時的変化

現在の A R E S T - P N C コードは、ニアフィールドの構成を時間的に固定して考えるものであり、この点について、ニアフィールドについての構造モデルの開発、改良を目的とした B I G B E N、H Y D R O G E N E、及び B E N T F L O W の試験結果を反映して、構造モデルの経時的変化を表現する様な新たなサブモデルの開発を行うことが必要である。また、上述した各試験において直接的に観察されるニアフィールド構成要素の挙動は時間的に限られており、この制約にも関わらず評価対象とする時間領域における観察を可能とするために、A R E S T - P N C コードの開発程度に応じて適宜予察解析を行い、その結果に基づき各試験で対象とする時刻をスキップした試験系を設定するという試験手順を踏むことが必要となる。

## (2) 化学反応、物質移動とこれらの複合プロセス

AREST—PNCコードにおいて用いられている地球化学コードであるEQ3/6とそのデータベースは、EDAS試験の成果に基づき、また、物質移動に係るサブモデルであるwaste package releaseモデルについてはIMAGE—MASTRA試験の成果に基づき、更に上記二つのサブモデルの結合についてはIMAGE—GEOCHEM試験の成果に基づき今後改良を加えていくこととする。また、このAREST—PNCコードの改良に伴い、予察解析を実施し、(1)に述べたのと同様の状況にある各試験の試験系の改定を行っていく必要がある。

以上のニアフィールド性能評価のための各試験研究と性能評価の補完関係を図3—1にまとめる。

## 3.2 ファーフィールド性能評価における相互補完

### 3.2.1 化学反応

ファーフィールドにおける化学反応としては、深部地下水の水質形成に係るものが重要である。この問題については、反応に寄与し得る鉱物の種類が多数想定されることから、原位置での水質分布と鉱物の分布状況についての観察に基づき水質形成に影響を及ぼし得るプロセスの抽出を行い、更にIMAGE—GEOCHEM試験においてavailabilityを含めた反応物の重要性を明確にした上で、EDAS試験により個々の鉱物の寄与する素反応の明確化とデータ取得を行っていくこととする。また、EDAS試験において取得される精度の高いデータは、IMAGE—GEOCHEM試験の結果の解釈等に用いることとする。

### 3.2.2 物質移動

ファーフィールドにおける物質移動については、まず、原位置試験等における実際の系での問題点の把握という段階が必要であり、この段階での実現象の観察結果に基づき、プロセスモデル、及び構造モデルそれぞれについてENTRYにおいて当該項目の問題解決、即ちモデル開発と人工的な系での確証、を行うために適切な試験系の設定を行う必要がある。更に、ENTRYにおいて適切な解析モデルの開



発、プロセスモデル及び構造モデル個々の人工的な系における確証を行い、その成果を総合的解析モデルとして統合した上で再び原位置試験へとたちかえり、当初の観察により認識された問題点に対する正しい解析上の対処がとられたか否かを確認するという段階が必要である。

### 3.2.3 化学反応と物質移動の複合プロセス

これら二つのプロセスモデルは、3.2.1及び3.2.2に述べた手順によりそれぞれ個々に開発、確証されることとなり、次には、これらを統合したファーフィールドの総合的解析モデルを開発することが必要となる。この、総合的解析モデルは原位置での深部地下水の水質形成過程、及び溶質の移動過程についての観察結果との比較により確証することが必要となる。

以上のファーフィールド性能評価における各試験研究の補完関係を図3—2にまとめる。

### 3.3 基本シナリオに対する摂動的事象の取扱い

PASS試験の結果として、摂動的事象によるニアフィールド構造モデルの変化の機構とその結果が明らかとなることと呼応して、変動シナリオとして3.1及び3.2の各試験研究の前提条件を変化させた試験を必要に応じて、今後計画していくこととする。

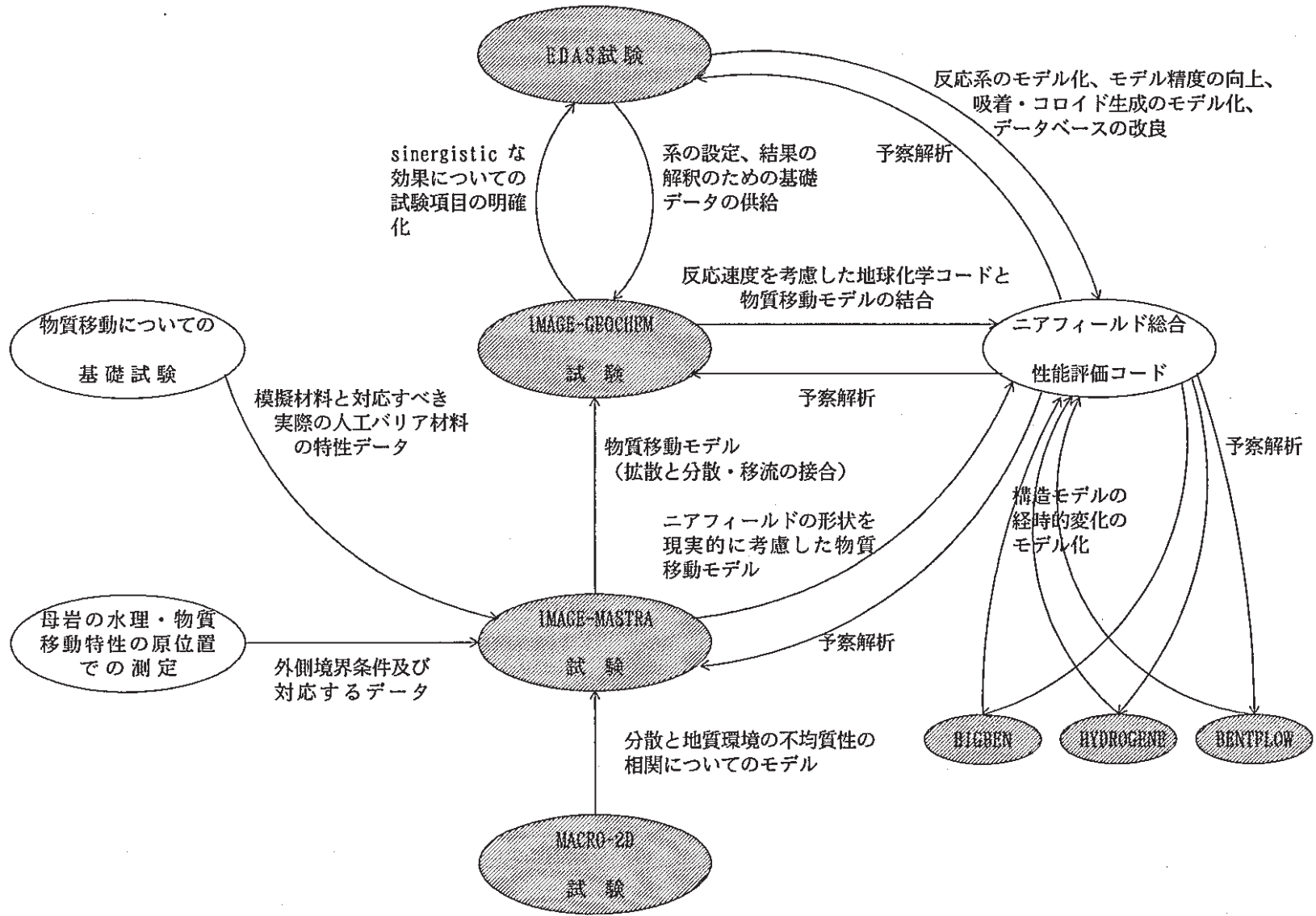


Figure 3-1 Integration of test results for engineered barriers

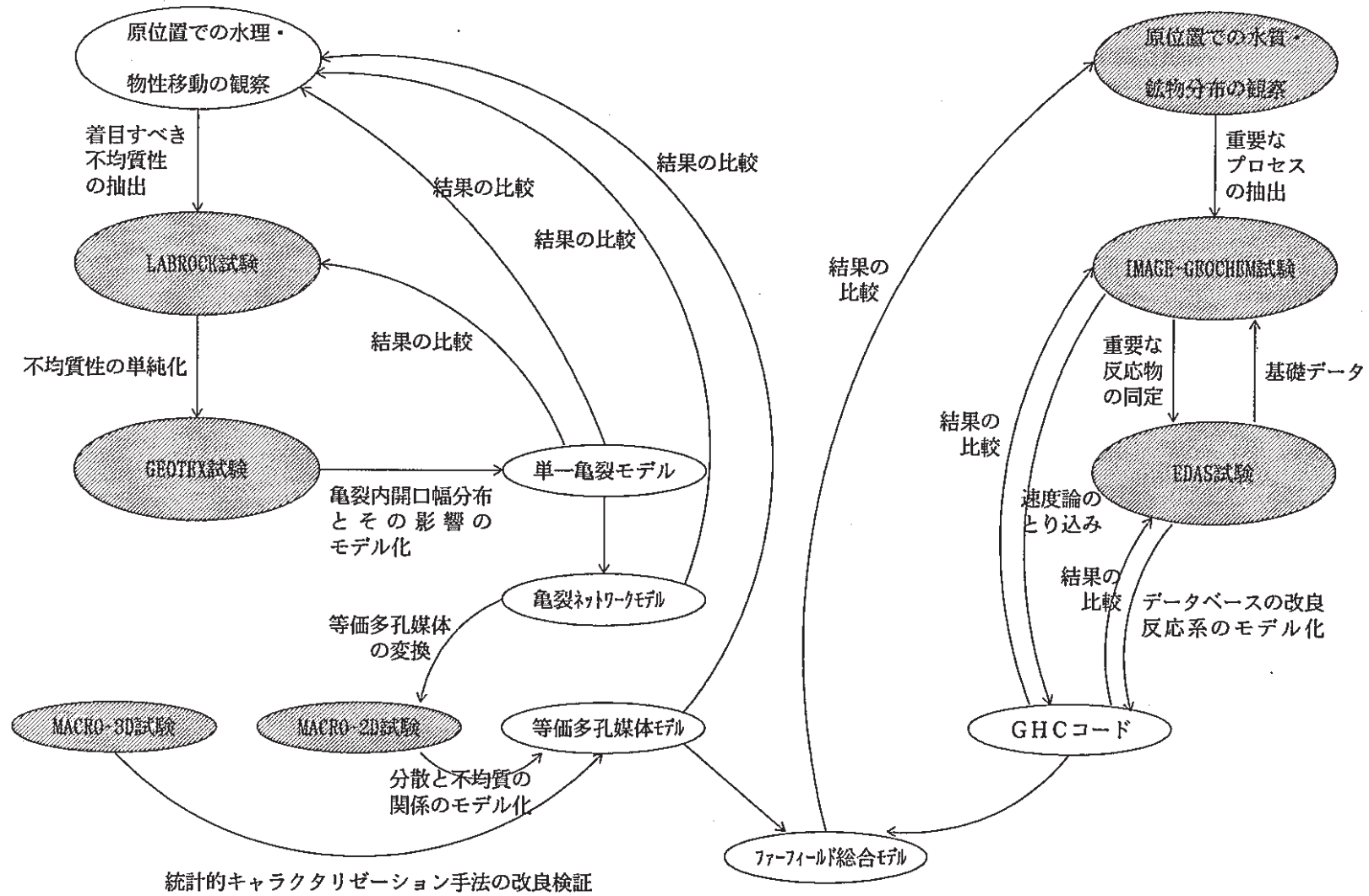


Figure 3-2 Integration of test results for geological environment

## 4. 化学環境変化試験 (EDAS)

### 4.1 試験研究の目標

超長期間にわたる高レベル廃棄物地層処分の安全性の多くを担保することが期待されるニアフィールド（及びファフィールド）の化学バリア機能は、地下水を媒体として取り囲む天然の化学種の影響を受ける。

また、ニアフィールドに侵入した地下水中には、緩衝材成分の溶出、オーバーパックの腐食を経て、ガラス固化体からの放射性核種の浸出及び拡散による移行等の放射性物質の閉じ込め性能に係わる重要な過程が複合して起こる。Fig. 4.1-1にEDASが対象とする現象の一例を示す。

ここでは、試験パラメータ（環境条件）を精度良く制御できる設備による精度の高いデータの取得と地球化学モデルによる試験対象系の解析により、アクチニド等の核種の溶解度等を支配する重要な環境条件に影響を与える重要な地球化学プロセス及び化学反応速度を同定・定量化及び反応速度を定量化することを目的とした以下の試験を検討対象とする。

- ① 処分場埋め戻し直後の状態からその後のニアフィールド固有の状態への上記の重要な環境条件の変化をもたらす得るニアフィールド構成要素と地下水の反応に係わる熱力学的データの取得（以下、「化学反応試験」とする。）

本試験の目的は、大別して以下の3項目に分類できる。

- i) 地球化学プロセスの同定
  - ii) 熱力学的データの取得
  - iii) 地球化学コードの数学式（補正式）の検証
- ② 上記ニアフィールド構成要素と地下水の反応の反応速度について（非常に遅い反応を含めた）処分環境条件におけるデータの取得（以下、「長期反応速度試験」とする。）
  - ③ ニアフィールド環境におけるコロイドに関する基礎データの取得（以下、「コロイド基礎試験」とする。）

### 4.2 既往の研究の整理

#### (1) 海外研究機関における研究報告

Battelle PNL（米国）およびUKAEA/Harwell研究所におけるニアフィールド性能評価研究を調査・整理した。Battelleの研究報告では、鉄とケイ酸との反応過程の動

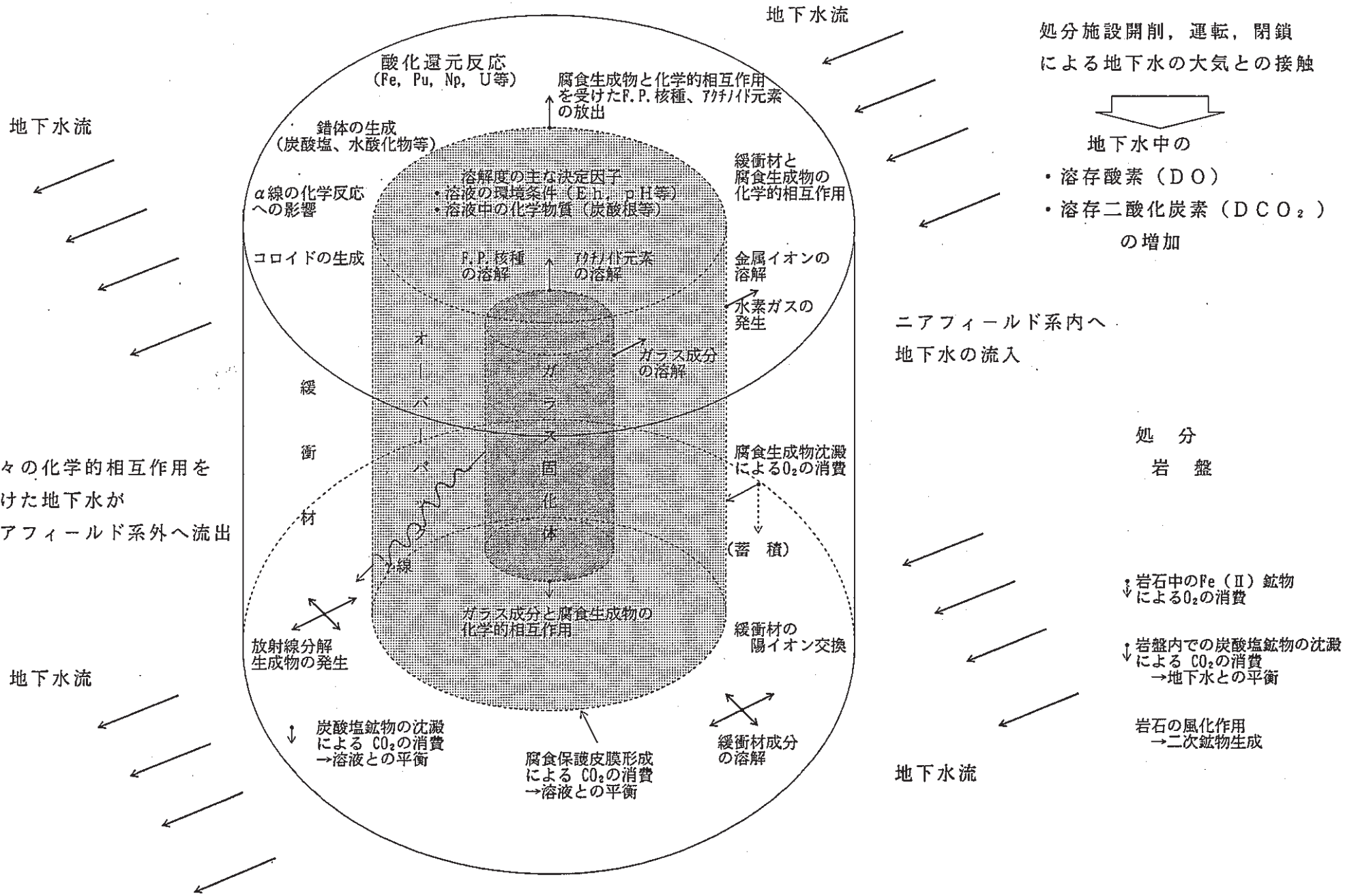


Fig. 4.1-1 Dynamic phenomena of chemical environmental variation in near field system

的モデルと物質移動モデルとが結合したモデルの開発過程および岩石／水反応系における地下水組成の温度依存性の地球化学モデルによる推定結果が示されている。

Harwellの研究報告では、一次元拡散+化学平衡を取り扱う数値解析コード「CHEQMATE」によるニアフィールド化学環境（Eh, pH等）変化の推定結果、固相への収着現象のモデル化を取り扱う改良型地球化学コード「HARPHRQ」および熱力学的データベース「HATCHES」に関する情報が示されている。

## (2) 既存の熱力学的データに対する考察

### ① 熱力学的データが既に取得されている領域に関する考察

酸化物の熱力学的データは一部の元素を除き、地球上のほとんどの元素についてひとりデータが取得されている模様である。

また、酸化物以外の熱力学的データは、過去に一般産業分野で要求のあった部分だけが取得されている模様であるが、必ずしも全ての化学種について全ての項目が取得されている訳ではなく、さらに全ての化学種が判明している訳でもない模様である。

### ② 既に取得されているFeに関する熱力学的データの精度についての考察

Feに関する各化学種の平衡データについて熱力学的データ集、化学便覧および地球化学モデルのデータベースのデータ間のばらつきについて考察した。

$Fe^{2+}/Fe^{3+}$ の平衡データは測定値間のばらつきも比較的小さく、データベースに収録されているデータも近い値であった。しかし、 $Fe(OH)_2$ の溶解度データは測定値間のばらつきの大きなデータが取得されており、これらの平均値が-15.10であることに対してPHREEQEのデータベースは-20.57を採用しており、大幅の違いがあった。

### ③ 熱力学的データベースのデータの精度の確認の必要性とその方法

熱力学的データが既に存在するものについても、反映されているデータが必ずしも”真の値”であるとは限らないため、その精度を確認する必要がある。

さらに、確認された熱力学的データの精度は、例えばEQ3/6のDATA0の「Quality」の欄に記入することにより品質保証の結果を示しておく必要があるものと考えられる。

但し、EQ3/6のDATA0（1983年12月Version）のFe化合物の「Quality」の欄の記載事項に品質保証を行った結果を記載されたものはない。Fe等の一般的な元素の熱力学的データの品質保証をすることが今後の課題である。

### (3) 地球化学モデルによる事前解析

地球化学モデル P H R E E Q E を用いて 4.3 の「E h を決定する地球化学プロセスの同定」に係る研究計画の立案に情報を提供するため、金属鉄、鉄鉱物、鉄化合物の溶液への溶解反応についてのモデル化検討及び事前解析を行った。

その結果、E h を決定する酸化還元系の p H 依存性、複数の鉄鉱物の混合平衡溶解系での E h を決定すると予想される酸化還元系および  $Fe^0$ ,  $Fe^{2+}$  等の還元剤への溶存酸素の影響等を評価した。

## 4.3 試験研究の概要および優先順位

### (1) 試験手順と個別の試験の難易度の定性的評価

ここでは、E D A S の各試験について、概念設計で示唆されたトップダウン的なアプローチ（1）E h 決定プロセスの追求 > 2）炭酸根の関与するプロセスの追求  $\geq$  3）p H 決定プロセスの追求  $\rightarrow$  4）新たな視点からのアプローチ）を行う場合の各試験項目の優先度とそれら技術的な難易度を考慮して、具体的な試験の優先順位を検討した。

#### ① 酸化還元電位（E h）を決定する地球化学プロセスの同定、定量化

F e には反応に関与する錯体が多く存在し、これを中間生成物とする反応が多いことが知られているが、これらの反応速度の兼ね合いを考慮した上での反応過程の知見は必ずしも多くない。しかし、気相中の酸素等の不純物濃度を極めて少なくした系を除き、還元条件下の実験を行える技術的な目処は得られている。

現時点で有望視されている炭素鋼製オーバーパックの腐食により発生する  $Fe^{2+}$  によりニアフィールドの E h 決定プロセスが支配されるものと考えられるため、この地球化学プロセスの同定に最初に取り組み、次に熱力学的データの評価・取得、反応速度データの取得を行う必要がある。

#### ② 炭酸根が関与する地球化学プロセスの同定、定量化

炭酸根の反応に関連する反応過程の知見としては、大気平衡状態にある溶液中のカルサイト平衡や純水中の p H を決定するプロセス等が良く知られているが基本的にはあまり多くない。しかし、炭酸根濃度（気相雰囲気、溶存物、イオン、沈殿炭酸塩鉱物）をパラメータとした実験が必要なため、炭酸ガスの除去あるいは任意濃度への調整機能が附属した雰囲気制御設備が必要とされることなど、実験自体が技術的に困難である。

そのため、これらの炭酸根が関与する地球化学プロセスの同定は、E h に関する地球化

学プロセスの同定の次の（あるいは一部平行した）実施項目として位置付けられている。

但し、1) 溶液中の全炭酸根濃度は測定できるが、各イオン、溶存物別の測定は極めて困難であること、2)  $\text{CO}_3^{2-}$ イオンに起因するコロイドの存在が予想され、平衡データが得られにくいこと、等の実験データの精度に起因する問題から困難であるものと推定される。

### ③ pHを決定する地球化学プロセスの同定、定量化

pHを決定する地球化学プロセスの同定を行う頃からは、ベントナイト等へのイオンの固相による収着（表面吸着、沈殿）や環境条件に対応する溶液系内の平衡を形成するコロイド生成の問題が表面化し、①、②に示すような比較的簡単な系の考え方の延長線上で現存する地球化学モデルにより精度良くモデル化できるとは思えない。

そのため、上記の収着やコロイドの影響度を②等の試験結果により評価した後に、新たな試験計画を策定することが望ましい。

### ④ 新たな視点からのアプローチ

ベントナイト、腐食生成物、岩石鉱物等の固相に対する収着（表面吸着、沈殿）現象、およびコロイド形成現象等は、①、②の化学反応試験の実験上の誤差として表現され、既存の、あるいは、今後取得する熱力学的データの精度を阻害しているものと推定される。

これらについては、上記の課題が提起される毎に個別に当該の現象の影響を同定、定量化する試験計画を策定し、これに対応する実験を行うこととする。

## (2) EDASの各試験項目の段階的な位置付け

### ① 化学反応試験

#### i) 近未来的な位置付け

- 複合系における化学的相互作用に基づく現象を把握
- 単純な試験により取得されたデータと予測解析結果の比較  
既存する熱力学的データの精度を確認（品質保証）
- 不足している、または精度の悪い熱力学的データを取得
- 地球化学コードの温度、イオン濃度等の系の条件を補正する補正式の精度を検証

#### ii) 中期的な位置付け

- 気相部からの外乱要因をさらに排除した還元性条件下の実験
- やや複雑な試験により取得されたデータと予測解析結果の比較  
既存する熱力学的データの精度を確認（品質保証）



- 不足している、または精度の悪い熱力学的データを取得
- 地球化学コード圧力等の系の条件を補正する補正式の精度を検証
- 固相表面での収着（表面吸着、沈澱等）における基礎的なデータの取得
- 収着データの改良型地球化学モデルへの反映、データの精度を確認（品質保証）

iii) i)、ii) に含まれない位置付けの試験

- (非常に遅い反応を含めた) 反応速度データの取得
- コロイド生成に関する現象的な知見
- コロイド移行に関する知見

## ② 長期反応速度試験

本試験は近未来的あるいは中期的に独自に試験を行う計画とされていない。①の化学反応試験により得られた現象に関する知見、反応速度に関する知見を注視する位置付けとなる。

①の知見により重要な反応過程であるとされ、かつ、反応速度が性能評価モデルの時間的メッシュと比べて長いと評価された反応過程について反応速度データを取得し、性能評価モデルのサブモデルのデータベースに反映する。

## ③ コロイド基礎試験

②と同様に本試験は近未来的あるいは中期的に独自に試験を行う計画とされていない。①の化学反応試験により得られた現象に関する知見および平衡定数 ( $\log K$ ) に誤差を生じさせる原因を注視する位置付けとなる。

①により知見が得られるに従って研究計画を立案し、還元性条件下の溶液系において、生成するコロイドの種類を同定し、コロイド生成定数データを特定の条件下で取得する。

## 4.4 研究スケジュール

### (1) E D A S の研究スケジュールの策定

E D A S の試験内容は、①Phase I 試験計画、②Phase II 試験計画および③研究計画が策定されていないその他の試験項目、に分類される。

Phase I 試験計画は、4.3(2)にて近未来的に実施する必要があるとされた試験が該当する。Phase I 試験計画に対応する試験設備は、E h を決定する地球化学プロセスを同定するために低酸素、低二酸化炭素雰囲気を達成できる E D A S 第1次設備とこれら現象の定量化も可能とする E D A S 第2次設備である。

Phase II 試験計画は、4.3(2)にて中期的に実施する必要があるとされた試験が該当する。

Phase II 試験計画に対応する試験設備は、炭酸根の挙動に関与する地球化学プロセスと pH を決定する地球化学プロセスを同定するために任意の二酸化炭素濃度、低酸素雰囲気を達成できる E D A S 第 2 次設備とこれら現象の定量化も可能とする E D A S 第 3 次設備（概念未検討）である。

研究計画が策定されていないその他の試験項目には、1)長期反応速度試験、2)コロイド基礎試験が該当する。これらは、Phase I、Phase II の各試験の進捗により得られた知見を基に研究計画を策定する。そのため、試験時期としては現時点では明確化できないが、Phase I、Phase II に並列、またはこれらが終了後に実施することとなる。

Phase I 試験計画および Phase II 試験計画における E D A S の各試験項目の研究スケジュールとこれに対応する試験設備の相関を Table 4.4-1 に示す。

## (2) Phase I 試験計画

### ① Phase I 試験における試験計画、試験方法の検討

地球化学モデルによる予測解析結果で得られた知見から、以下に一例を示す「E h を決定する地球化学プロセスの同定」に関する試験計画、試験方法を策定した。但し、ここで研究計画を策定する目的は、E D A S の試験のイメージを理解するために行ったものであり、E D A S 試験の進捗に応じ見直されるべき種類のものである。

#### i) 地下水の E h 決定プロセスの同定 / E h 経時変化の可能性の予測

本研究項目が取り扱う、予測される E h 決定シナリオは以下の通りと推定される。

天然の地下環境 → 酸素の侵入 → 鉱物等による酸素の消費 → 本来の地下環境に復帰

この場合の主要な E h 決定プロセスには、溶存酸素濃度、系内の還元剤の種類、還元剤のバランス、E h を決定する還元剤の溶存酸素による消費、その他の還元剤（有機物等）の存在、等が影響すると考えられる。

#### ii) 緩衝材中に地下水が侵入した際の E h 変化（オーバーパック開口以前）




本研究項目が取り扱う、予測される E h 決定シナリオは以下の通りと推定される。

残留酸素の影響 } → { 粘土鉱物による溶存酸素の消費  
温度変化の影響 }      { pH 調整に伴う E h の決定

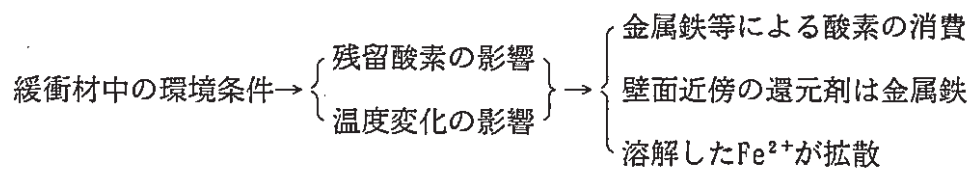
この場合の主要な E h 決定プロセスには、温度変化、空隙中に残留する大気中の酸素、Fe (II) 鉱物による酸素の消費、粘土鉱物の pH 緩衝機能、等が影響すると考えられる。

#### iii) オーバーパックの腐食に伴う E h 変化（オーバーパック開口以前）

Table 4.4-1 Relation between test schedule and test equipment

E D A S の 試 験 項 目		試 験 ス ケ ジ ュ ー ル								
		1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Phase I 試験計画	化学反応試験	E <sub>h</sub> 測定、E <sub>h</sub> プロット定量化								
Phase II 試験計画	化学反応試験	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     炭酸根、pH同定      炭酸根、pHプロット定量化                      固相への収着に関する知見                 </div>								
研究計画が策定されていないその他の試験項目	コロイド基礎試験 長期反応速度試験	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;">                     コロイド生成データ取得                      遅い反応速度の測定                 </div>								
備 考	 EDAS第1次設備、  EDAS第2次設備、  現時点では概念が未定な設備									

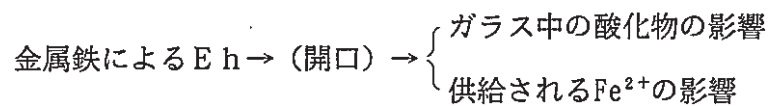
本研究項目が取り扱う、予測される E h 決定シナリオは以下の通りと推定される。



この場合の主要な E h 決定プロセスには、温度変化、緩衝材の空隙中に残留する大気中の酸素、金属鉄、Fe (II) 鉱物による酸素の消費、オーバーパック壁面の極近傍の Fe<sup>0</sup> / Fe<sup>2+</sup> の酸化還元系、等が影響すると考えられる。

iv) ガラス固化体への地下水の侵入による E h 変化 (オーバーパック開口以降)

本研究項目が取り扱う、予測される E h 決定シナリオは以下の通りと推定される。



この場合の主要な E h 決定プロセスには、オーバーパック壁面の極近傍の Fe<sup>0</sup> / Fe<sup>2+</sup> の酸化還元系、溶解した Fe<sup>2+</sup> がガラス固化体近傍に向かっての拡散、ガラス中の酸化還元反応を生じる元素の酸化物からの酸素の遊離、ガラス固化体近傍の Fe-Si 化合物の蓄積、等が影響すると考えられる。

② Phase I 試験の試験設備の位置付け

EDAS 第 1 次設備、第 2 次設備の設計思想を以下に示し、制御パラメータを Table 4.4-1 に示す。

i) EDAS 第 1 次設備における試験設備の考え方

EDAS 第 1 次設備は、1) 取得されるデータ数、知見を大きくするため、2) 実験; 試験計画策定のプロシジャ-の確立するために比較的短期間の試験を基本とする。

また、比較的小容量のチェンバ (2 m<sup>3</sup> 以下) を採用し、全体に予察試験的な位置付けの強い試験が多いため、試験容器の数量、試験容器作製容量はあまり多くしない。

ii) EDAS 第 2 次設備における試験設備の考え方

EDAS 第 2 次設備では、比較的長期間を要する溶液反応試験を含めて対象とし、雰囲気制御設備の気密保持性能、ガス置換機能の高度化状況を鑑み、順次、大容量のチェンバを採用することとする。また、本設備では CO<sub>2</sub> 調整機能を付加する。

③ Phase I 試験に平行して行う制御パラメータ感度予察試験

- 液相圧力、ガスによる内圧の上昇が溶液反応に与える影響度の確認
- 高温域の温度、圧力が溶液反応に与える影響度の確認

Table 4.4-1 Defferance between EDAS No.1 equipment and EDAS No.2 equipment

比較項目	地層処分環境の条件範囲の推定	EDAS第1次設備の制御パラメータ	第2次設備で可能性のある制御パラメータ
(a) 温度 (b) 液相圧力 (c) ガスによる内圧	125℃(推定)→50℃程度 常圧～100kg/cm <sup>2</sup> (処分深度1000mの場合) 常圧～数100kg/cm <sup>2</sup> (水素ガスの平衡分圧)	常温～130℃(予定) 常圧のみ 考慮しない。	} 予察試験を踏まえて高温域での溶液反応試験の必要性を検討する。 } 予察試験を踏まえて高圧域での溶液反応試験の必要性を検討する。 } ガスの発生/消費を伴う反応の平衡分圧を評価できるシステムを追加する。
(d) 溶液組成 (e) 固相(鉱物)組成	淡水～硬水(例えば海水組成) 粘土鉱物、岩石鉱物、及び各種の二次鉱物	任意に選択可能 粘土鉱物、岩石鉱物、及び各種の二次鉱物について任意に選択可能	同 左 同 左
(f) 気相部雰囲気 i) 酸素 ii) 二酸化炭素	(i) 処分開始直後期 処分環境内に取り込まれている酸素(溶存酸素)が存在。 (ii) 処分環境条件安定期 (i)が消費され、元の地質環境のレベルまで酸素(溶存酸素)が低減。 当該地質環境の大気との接触履歴により、存在する炭酸根を含む鉱物、イオン、溶存物の量が決まっている模様。	} チェンバ内O <sub>2</sub> 濃度 0.1ppm以下 } チェンバ内CO <sub>2</sub> 濃度 0.1ppm以下安定	左記数値を機能開発により低減化 機能開発によりCO <sub>2</sub> を任意濃度に安定化
(g) 作用する還元剤	地下水中には高濃度のFe <sup>2+</sup> が検出される。	i) 添加剤として使用する試薬等 1) 金属鉄(鉄粉) 2) 鉄化合物 ii) 気相部雰囲気に添加する水素(予定)	予察試験、EDAS試験の過程で高度化される可能性がある。

(3) EDAS第1次設備の基本構成

EDAS第1次設備は、ユーティリティ的な部分を除くと大別して試料脱気設備、試料調整設備、恒温・定常雰囲気保持設備、サンプリング・分析・評価設備およびその他の分析設備に分類できる。

また、必要とされる雰囲気の程度に応じて段階的に濃度を設定した恒温・定常雰囲気保持設備内の試験には、開放系（低酸素，低二酸化炭素雰囲気内に試験容器を保持）、密閉系（密閉容器を比較的酸素濃度の低いエリアまたは大気中に保持）の2形態がある。

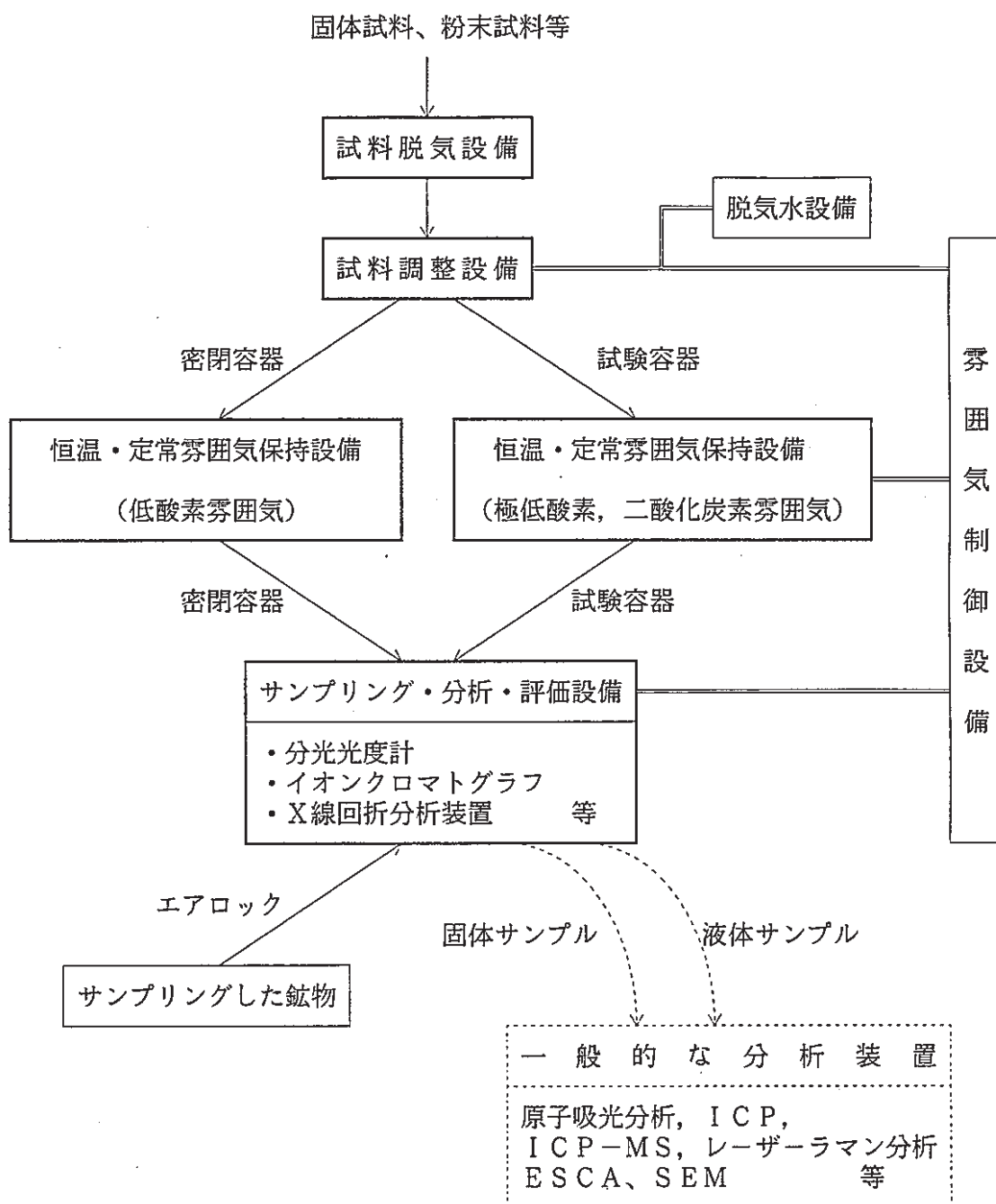


Fig. 4.4-1 The basic design of EDAS No.1 equipment

#### (4) Phase II 試験計画の基本構成

E D A S 第 2 次設備は、E D A S 第 1 次設備に比べると、雰囲気制御下の分析設備が拡充された点と、CO<sub>2</sub> 制御チェンバが新規に付け加わった点の特徴である。

CO<sub>2</sub> 制御チェンバは、試験容器内の溶液の pH を一定に保つために還元性条件下で任意の濃度の CO<sub>2</sub> ガスを吹き込む（開放系）機能を有する設備である。

追加する雰囲気制御下の分析設備は、原子吸光分析装置、誘導結合プラズマ分析装置、SEM 等が候補として考えられる。

#### 4.5 今後の開発課題の抽出

今回の試験計画の検討で抽出された化学環境変化試験（E D A S）の試験計画策定に関する開発課題を以下の通り抽出した。

##### ① Phase I 試験計画の詳細検討

本年度に検討した内容に基づき地球化学モデルを使用した以下の事前解析を行い、E D A S 第 1 次設備で当初実施すべき試験内容の詳細を更に具体化する必要がある。

また、この地球化学モデルによる事前解析結果を確認する予察試験を行えば、更に想定したシナリオの確度は向上するものと考えられる。

##### ② Phase I 試験の早期実施

本書で検討した Phase I 試験計画および上記①の試験計画に則り、1990 年度に製作する E D A S 第 1 次設備により早期に試験に着手することが必要である。

##### ③ Phase I 試験に平行する感度予察試験の実施

Phase I 試験に平行して以下の感度予察試験を実施し、E D A S 第 2 次設備に反映すべき制御パラメータであるか否かを判断する。

① 液相圧力、ガスによる内圧の上昇が溶液反応に与える影響度の確認

② 高温域の温度、圧力が溶液反応に与える影響度の確認

##### ④ ニアフィールド総合性能評価モデルとの相関の検討とデータの反映

ニアフィールドの性能評価モデルによる性能評価計算とそのモデル開発には、データおよびモデル化する現象に対する知見を取得できる E D A S が必要不可欠である。

E D A S の Phase I 試験計画、Phase II 試験計画の策定に平行してニアフィールド総合性能評価モデルの概念の検討を行うことが必要である。

##### ⑤ E D A S 第 2 次設備の機能開発

## 第5章 物質移動に関する試験

### 5.1 ニアフィールドに関する物質移動試験 (IMAGE-MASTR)

#### (1) ニアフィールドにおける物質移動現象

処分システムの性能評価を現実的かつ信頼性に富むものにするための方策として、

- ・対象となる系の形状や物理的プロセスを詳細に把握すること、
- ・系内で生ずる化学的な現象やプロセスを十分に把握すること、

が挙げられる。ニアフィールド性能評価研究においては、前者についての不確実性は少ないと考えられるため、化学的な現象やプロセスの把握が重要である。本研究では、化学現象・プロセスに関わる物質移動に焦点を当てる。

ニアフィールドからファーフィールドへ放出される核種の放出率の予測においては、ニアフィールドを化学反応物質や反応生成物の種類や濃度が時間的・空間的に変化する動的な場として捉えることが肝要と考えられ、ニアフィールドにおける物質移動を研究することは、物質の動的挙動を把握することを通じて、性能評価の現実化及び信頼性の向上に寄与するものと考えられる。

以上のような観点から、本節では、ニアフィールドを対象として物質移動に着目した研究の計画を検討する。



## (2) 既往の研究

MASTRに関わる既往の研究成果を表5.1.1にまとめた。なお、ここでは、現象理解・モデルが初歩的段階にある金属容器の腐食については除き、核種移行のみを対象とした。調査結果から以下の点を読み取れる。

- ・従来の解析は、固化体周辺の地下水流れと固化体の溶解を対象にしたものが主体であり、その化学現象や周囲の人工バリアでの現象についての解析例は少ない。
- ・地下水の粘性など、既往の研究は、その効果を無視することを前提として行われており、精密に評価されていない現象がある。
- ・条件の時間的な変化を考慮した解析例は少ない。
- ・発生確率が1ではない現象、十分理解されていない現象については、解析例が少ない。

ここで、ニアフィールドにおける核種放出を、

- ①ガラス固化体からの核種の溶出
- ②核種の緩衝材中移行
- ③核種の岩中移行

の3段階に分け、それぞれの解析状況をまとめる。

①については、詳細な現象解析レベルを除いては、ある程度確証されたモデルが存在する。また、②は異常事象シナリオを考慮しなければ、そのなかでの核種の移行はよく知られた簡易な表現で記述される。このことは、核種の緩衝材中移行評価においては、流れを考慮した緩衝材外側での境界条件の設定が重要であることを意味し、それは③から与えられる。③の、ニアフィールド岩盤での核種移行については、想定される基本的状況を反映したモデルは存在するものの、それらは核種移行に影響を与える岩盤状態乃至は水理状況の細部までを検討した結果導出されたものとはいえない面がある。ニアフィールドの水理が現地での特性調査から特定できるものではないため、性能評価研究においてこの点を考慮して、保守的かつ合理的モデルとしてまとめられていくことが肝要と考えられる。

Table 5.1-1 Phenomena and issues highlighted in near-field nuclide migration analysis

現象	因子	解析状況		
ニアフィールド核種移行	地下水流況	流速	○	
		緩衝材と周辺岩盤の空隙率	○	
		固化体と岩との間のギャップ	○	
		多孔質媒体	容器の貫通孔	○
		外側濃度境界	○	
		粘性の効果	×	
		亀裂系媒体	廃棄体を横切る単一割れ目	○
			廃棄体を横切る複数割れ目	○
			断層 (カキライトゾーン)	○
			割れ目への緩衝材侵入	△
			粘性の効果	×
		共通	緩み域での流速の増加	△
			ガスによる地下水流れの変化	×
ガラスの溶解による粘性・比重の変化	×			
ニアフィールド系の形状	溶解によるガラス固化体の表面積・体積の変化	×		
	ガラス固化体と緩衝材の間の腐食容器中の物質移行経路	×		
	流失による緩衝材厚さの減少	×		
	緩衝材のクラック	△		
	緩衝材の密度の不均一性	×		
化学反応	固化体の溶解	溶解反応速度	○	
	収着	吸着の非線型性	○	
	地下水化学環境 (Eh, pH)	Redox front の展開, 析出, 析出位置パラメータ	○	
	核種の化学形態・溶解度	×		
	シリケート沈澱形成時の核種の共沈	×		
容器による閉じ込め期間	ガラスの変質	×		
	緩衝材の変質	×		
	掘削・腐食・放射線による化学環境変化	×		
	コロイド	△		
	容器破損時間の分布	○		
熱影響	化学的影響	遅延係数, 溶解度, 拡散係数	○	
	力学的影響	×		
崩壊連鎖		○		
微生物		×		
ガス発生		×		
放射線		×		
廃棄体の配置/施設形状	(現象ではないが, 影響あり)	×		

\* ○: 詳細な解析, △: モデル開発途上, ×: ほとんど行われていない

### (3) 試験項目の抽出

前節での調査を踏まえ、以下の検討対象を抽出した。

#### (a) 母岩が亀裂系媒体の場合の粘性の効果

簡単のため、単一亀裂が廃棄体パッケージを横切っている状況を想定し、亀裂は無限平行平板とする。亀裂壁及び緩衝材開口部は地下水と接しており、その挙動は粘性流体の運動方程式で記述される。粘性係数が流体中で一定、かつ流体が非圧縮性であるなら、Euler の式はNavier-Stokes の式に帰着される。これは非線型であり、いくつかの近似を導入した解法が採用されている。

Reynolds数が大きいときには、バルクでは慣性項が粘性項よりも極めて大きくなるため、沖合では理想流体として扱い、物体表面近傍のみで粘性を考慮する「境界層近似」が用いられる。ここで、ニアフィールドでのReynolds数を見積もってみる。沖合地下水流速 $V$ を $1\text{m/y}$ とすると、

$$Re = \frac{V \times x}{\nu} = 3 \times 10^{-2} \times x$$

ニアフィールドの広がりがある程度であることを考慮すると、代表長さをどの様に採っても、

$$Re < 1$$

となり、境界層近似の適用範囲外であることが分かる。

Reynolds数が小さいときには、慣性項を粘性項に比べて無視する、いわゆるStokes近似や、慣性項の一部を残しつつ線型化を図るOseen近似が行われる。Reynolds数が小さいとき粘性による流線変化は広い範囲に及ぶ。しかしながら、亀裂の幅はその長さに比べて非常に小さいと考えられるので粘性の影響は亀裂壁によるものが、緩衝材側面開口部によるものより圧倒的に大きい。したがって、緩衝材界面での粘性効果は無視することは妥当な近似であるかもしれない(Neretnieksの解析)。但し、次の点は課題として残されている。すなわち、壁（亀裂と緩衝材）による粘性効果は亀裂からのものが圧倒的に大きいとはいえ、物質移行においても緩衝材壁の効果は無視できるのかどうかという点である。

#### (b) 緩み域での流速の増加

緩み域が発生すれば、緩衝材表面での流速は増加し、その結果緩衝材からの核種のフ

ラックスは増加する方向へ向かうことは、定性的には明らかである。緩み域をミキシング・セルで近似した簡易モデルが開発されているが、ミキシング・セルでは、低流速域での保守性が担保できないため、緩み域中の地下水流れを現実的に扱った評価を行ったうえで、ミキシング・セルモデルの適用性を明確にしておく必要がある。

(c) 母岩の亀裂中への緩衝材の侵入

母岩の亀裂中へ緩衝材が侵入した場合には極めて狭い空間を核種が拡散するため、核種の放出率を効果的に抑えることができる。したがって、この影響の大きさを正確に見積もることによって、この現象を無視した保守側の評価に対する安全余裕を知ることができる。この現象についてはKBSの解析があるが、これは、固化体表面、緩衝材表面、亀裂中へ侵入した緩衝材の表面での核種濃度が、それぞれ一定であると仮定して得られたものである。また、母岩中のマトリックス拡散を無視しているが、この仮定が成り立つのは、母岩中の拡散係数が緩衝材中の拡散係数より極めて小さい場合である。

(d) 緩衝材の密度の不均一性

緩衝材の透水係数、拡散係数は、密度に依存する。緩衝材の密度に不均一性がある場合、その分布が1次元状であれば、拡散係数は密度が高い部分での値に支配されるが、実際に分布があれば、2次元、ないし3次元に分布すると考えられ、この場合、密度が低い部分が核種の拡散の選択的経路となって拡散係数が増加する可能性がある。

また、密度が小さい部分が緩衝材／母岩界面の近くにあると、ここでの水の流れも同時に考慮することが必要になる。

IMAGE—MASTERにおいては、以上の4つの現象を考慮したニアフィールドからの放出率を予測するモデルの物理的verificationを行うこととする。

(4) 試験計画

(3)で抽出したIMAGE-MASTR試験の各テーマを検討するのに要する時間を図5.1.1に示す。図では、最も早い予察試験の開始時期を初年度とした相対的表記としてある。

MASTRは基本的性格がニアフィールド解析の物理的verificationであるため、予察試験に要する期間は比較的短く、速やかに装置製作、試験実施へと進めることが可能と考えられる。

「亀裂系における粘性の影響に関する試験」と「緩み域の影響に関する試験」の装置の形状は、「亀裂中への緩衝材の侵入の影響に関する試験」及び「緩衝材の密度の不均一性に関する試験」よりも単純であるため、これらの試験を優先させ、順次複雑な系での試験へと進む。

	1	2	3	4	5	6	7	8~
MASTR								
亀裂系における粘性の影響 ・予察試験 ・装置製作 ・本試験								
緩み域の影響 ・予察試験 ・装置製作 ・本試験								
亀裂中への緩衝材の侵入の影響 ・予察試験 ・装置製作 ・本試験								
緩衝材の密度の不均一性 の影響 ・予察試験 ・装置製作 ・本試験								

Fig. 5.1-1 Time schedule of IMAGE-MASTR

(5) 試験研究相互の各分野内，分野間での関連性

M A S T Rにおける地下水流れの場合は，試験条件に対する擾乱への抵抗性を確保するため，粒子を充填した多孔質媒体とすることが考えられる。そのなかでの流れは一部透水係数に分布を持たせるものの，概して均一であり，そのような場を形成することが試験装置設計における要件の一つである。一方，M A C R Oにおいては，性格付けが明確に行われた不均一な透水性を有する媒体の集合体を作成し，それによる分散効果の検討が行われる。したがって，流れの場の均一性の形成という点からは，I M A G Eとは逆の方向を指向することになるが，M A C R Oの設計において考慮される諸事項は，反面的な参考となる可能性があると考えられる。

本試験設備設計のための予察試験においては，M A S T Rにおけるソース（模擬固化体）からの模擬核種の放出挙動に関わる基礎データの取得には，既にガラス固化体の評価に用いられている諸手法を参考とすることができるであろう。米国において標準化されているM C C法等をこの候補と考えられる。また，拡散係数データの取得には，動力炉・核燃料開発事業団からの委託研究で弊社が検討を行った定常拡散試験手法を参考とすることができる。

G E O C H E Mにおける環境制御，特に化学的雰囲気調整技術では，E D A Sの成果を参考にすることが可能である。しかし，E D A Sがバッチ型反応セルを用いることから，より開放性の高いカラム型反応セルを用いるG E O C H E Mにおいては改良が必要になるかもしれない。

## 5.2 地質環境における物質移動に関する試験

### 5.2.1 水理・物質移動試験研究の計画 (GEOTEX/LABROK)

#### 1. 研究の目的と概要

##### 1.1 研究の経緯

まず、前期の概念設計 (1989/3~6/末) においては、ファーフィールドにおける水理・物質移動現象に関する試験のうち、特に亀裂状媒体水理・物質移動試験を対象として、その確証試験の目的、確証すべき性能評価モデル、試験の基本概念について短期間ではあったが調査・検討を行い、その結果としてエンジニアリング・モデルを用いた3種類の試験及び実岩体を用いた2種類の試験の計5種類の試験を提案し、それらの概略の試験装置等まで出来るだけ試験として幅広く計画を立案するという立場で一応の取まとめを行った。

その後、9月、11月の2度にわたり米国のBattelle研究所 (PNL) において主に北米の専門家によるENTRY計画に対するレビューの為のワークショップが開催され、そのコメントを受けて計画全体の見直しが行われた。その結果、概念設計において提案した計5種類の試験のうち更に設計検討のレベルを進めるものとして

LABROCK試験 (大型実岩体試験)

GEOTEX試験 (大型人工岩体試験) の2種類が評価され、残りの試験については更にその基本概念の検討を行うことになった。そこでも強調されたことは試験設備の具体化を図る際には予備解析・予察試験等による試験計画の作成が重要なことである。以上の経緯を踏まえて今期の「設計研究」においては「ファーフィールドにおける岩体水理・物質移動現象に関する試験」に関する研究計画を行った。

##### 1.2 実施目的

ファーフィールド試験研究は、広域的な岩体中の地下水の動き及び核種の移行挙動の把握 (モデル化) が主要テーマであるが、そのためには原位置試験が非常に重要である。しかし、原位置試験ではサイトも限られ、必ずしも普遍的な水の流れに関する試験が可能ではないこと、及びそこで得られるデータには経験的なものにとどまるものが多いことから、サイトに依存しない普遍的、かつ理論的な水理・物質移動モデルの開発のためには、多種の岩体または、人工的な模擬物を用いて一般的、かつ前提条件の明確なデータを取得する必要がある。そこで、本研究においては、概念設計の成果及びそれ以降の情報を反映して、上記試験についての全体計画及び技術的仕様を検討することにより、試験設備の基本仕様、設計条件等の具体的項目を決定することを目的とする。

### 1.3 実施項目

ここでは、ファーフィールド試験研究のうち、特に岩体水理・物質移動現象について初期条件・境界条件を明確に設定した上で、その性能評価モデルの確証を目指して、適切な亀裂形状を有する媒体を用いて実施する試験に係わる以下の項目の検討を行った。

- ① 試験研究計画
- ② 予察試験の基本仕様
- ③ 設備の基本仕様
- ④ 試験段階毎の試験方法及び試験計画
- ⑤ 試験にあたって必要となる制御条件、出力として得られるデータ等情報の仕様
- ⑥ 解析
- ⑦ 上記情報の品質保証の方法
- ⑧ 基本仕様の範囲内での概略見積もり

### 1.4 実施内容

#### (1) 試験対象の現象

本研究においては、以下の内容をその試験対象として検討を行った。

- (7) 単一亀裂及び複数の交差する亀裂を有する岩体による地下水流れに関する平行板理論の適用性及び亀裂交差部における流動挙動の把握。
- (i) 当該スケールにおける物質移動の法則の把握。
- (9) 少数の亀裂を有する媒体と（等価多孔質媒体と見なされる）多数の亀裂を有する媒体が組み合わさった媒体での水理・物質移動試験についてその試験の位置付け、目的等の概略検討。

ここでは、概念設計、及びその後の事前検討の成果を踏まえて、LABROCK試験（大型実岩体試験）及びGEO TEX試験（大型人工岩体試験）並びにそれらの予察試験を主な対象として検討を行った。

尚、Fig. 5.2.1-1 に本研究業務の実施フローを示す。

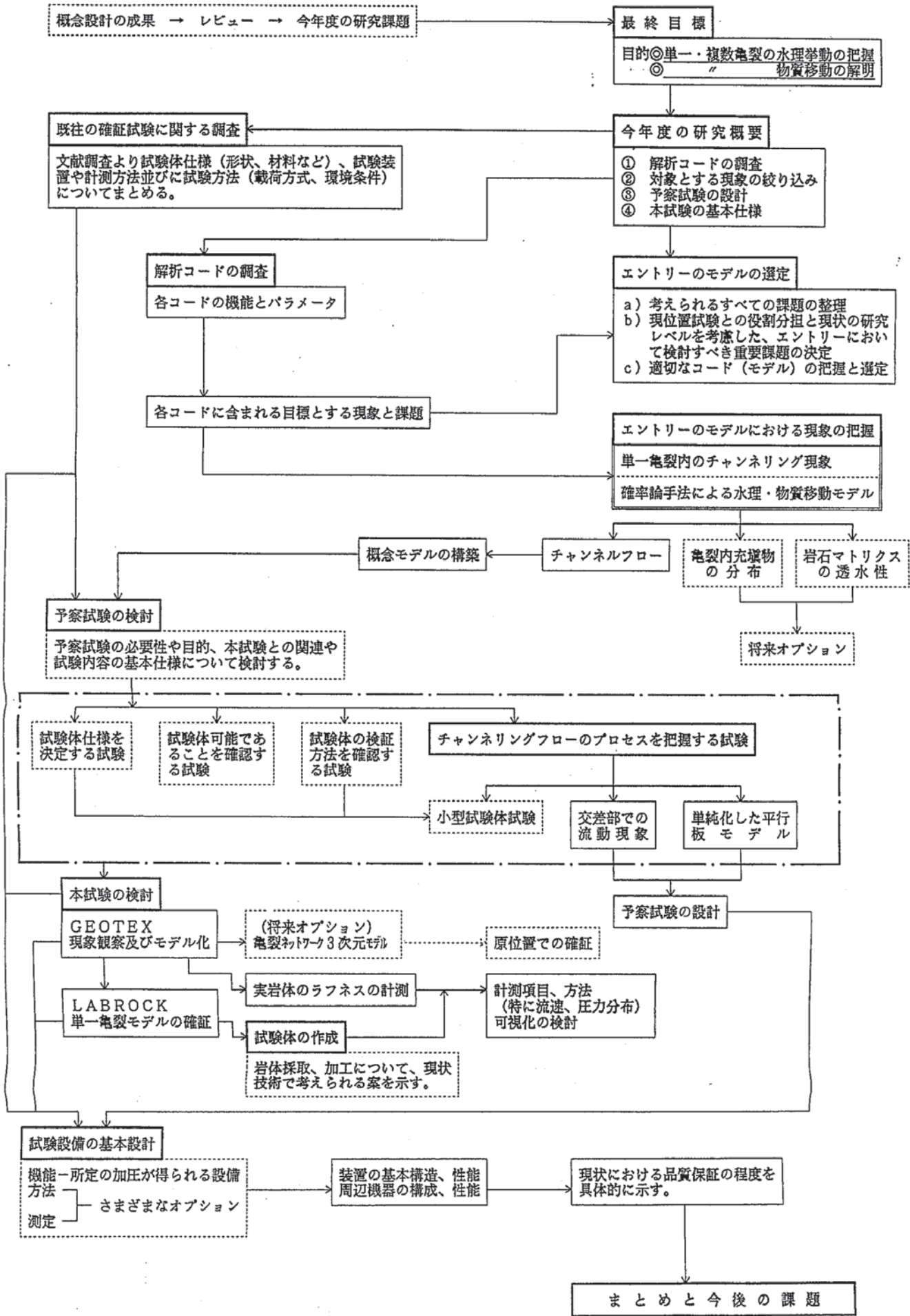
#### (2) 作業概要

##### (a) 試験研究計画

動燃事業団殿の御指導に基づき以下の項目について具体的に検討を行った。

##### (1) 試験研究の意義、概要





Overall schematic study flow

Fig. 5. 2. 1-1 今期の概略全体作業フロー

(2)試験スケジュール（時期、予察試験一本試験）

(3)試験研究相互の各分野内、分野間での関連性

(4)既往の確証試験の追加調査

(b) 予察試験の基本仕様

確証試験を実施するにあたり必要と考えられる予察試験について、その試験の目的、明らかにすべき項目を抽出し、その試験設備の基本仕様の検討を行った。

(c) 設備の基本仕様

対象とする確証試験についての構造図、機器仕様、系統図、取得データの仕様等について検討を行い、設備の基本設計を実施した。

(d) 試験段階毎の試験方法及び試験計画

予察試験、確証試験を通して、全体の試験の手順、スケジュール、各試験間の流れとその関連性及び各試験についての試験方法、試験計画について検討を行った。

特に、LABROCK試験については、岩体切り出し方法、搬送方法、養生方法、試験体の規模等について検討した。また、GEOTEX試験に対しては、試験体の作成方法、規模等について検討を実施した。

(e) 試験時に必要な制御条件、出力として得られるデータ等情報の仕様

試験条件（応力、温度等）についての仕様を検討した。また、計測・制御方法とその精度についても検討を行った。

(f) 解析

亀裂を有する媒体の水理・物質移動現象の解析に関しては、その必要となる解析コードの基本仕様、既往の関連するコードの機能の調査、及びそれらを踏まえて本解析に適切と考えられるコードの選定を行った。

ここでは、主に諸外国のコードをその調査対象として、機能の詳細について調査した。

もし、機能的に不十分と考えられる場合においては、必要なコードの整備のための要件を検討した。

(g) 上記情報の品質保証の方法

得られるデータに影響を与える因子を抽出し、その関連を整理した。また、試験において必要と考えられる水準を保証するための方策を検討した。

(h) 基本仕様の範囲内での概略見積もり

予察試験を含む確証試験の試験設備、試験費用についての概略見積もりを行った。

## 2 既往の確証試験に関する調査

流体挙動と物質移動を対象とした文献のうち、選定した主要文献の内容を確証試験調査表にまとめたのが、Table 5.2.1-1~4 である。ここで確証試験における試験体規模、試験方法、計測手段などについて検討した。

円柱形の供試体で試験を行う場合、径20~100cmの花崗岩を採用し、亀裂も自然の割れ目や人工的な割れ目を対象としている。人工的な割れ目では切断面に工夫をこらし、種々の割れ目を再現し、円柱形の場合、室内での応力-透水試験やトレーサー試験を対象としている。直方体の供試体を用いる場合、比較的扱いやすい人工的なモデル岩盤が採用されている。その中で注目されるのが、自然亀裂のレプリカ（鑄造）を供試体としているユニークなものである（E.Hakami）。これは花崗岩などのボーリングコア試料の亀裂部分の両面を取り出し、特殊な材料（エポキシ樹脂）を流し込んで凹凸のある供試体を作成する方法で、亀裂面内の流動挙動を調べるために考え出された手法である。一方、モデル岩盤として直交する2系列の割れ目模型をプラスチックガラスで作成し、亀裂ネットワークでの物質移動を対象としてトレーサー試験を行っている例もある（L.C.Hull）。

試験方法では、円柱形を用いたある载荷応力下での透水試験では、軸方向荷重や注水圧などの制御を行ない、かなり高度な試験条件の再現が可能となっている。一方、トレーサー試験の場合はほとんど無载荷の条件下で試験を行うことになる。直方体の場合には、今回の文献では、流入側と流出側の水頭固定あるいは水頭勾配可変などの境界条件を考慮している特徴がある。その他に、载荷重や流入量や間隙量などの初期条件を設定している。直方体の場合にはあくまでモデル岩盤が対象で、試験規模も小さくきめ細かな試験制御が要求される。

計測手段では、各研究者によって特徴的な方法を採用している。円柱供試体で流動挙動を把握するために、非接触型の変位計を用いて割れ目の微小変位を把えたり、注水孔やその周囲の水圧を測定したりして種々の工夫をこらしている。この場合载荷応力と割れ目変位、透水係数の関係などを求めている（J.E.Gale）。直方体のモデル供試体を用いてカラーインジェクション（注入試験）を行う場合、写真撮影によって注入状況を把握し、流跡線を把えて流速を計算している。その他、自然亀裂レプリカ供試体の亀裂間隙を求めるために、高精度の一定点滴量による方法で算出している（E.Hakami）。トレーサー試験の模型実験では、プラチナ電極の比抵抗によって濃度を計測したり、細径のピエゾメータで圧力測定を行っている（L.C.Hull）。

Table 5.2.1-1

エントリー設計研究 既往の確証試験調査表

確証の対象とする モデル・現象	試験者名	発表年	機関名 (国名)	試 験 体					試 験 方 法		計測データ及 び使用機器	試験装置・試験 方法上の課題	確証別	備 考
				形状	寸法	重量	岩種	亀裂性状	载荷方式とその性能	境界条件又は初期条件				
流動挙動 ・単一亀裂面の流動現象	J.E.Gale	1977年	Inland Waters Directorate  Water Resources Branch (カナダ)  大型三軸試験施設:  Richmond Field Station of the University of California Berkeley	円柱形	径 $\phi 96.5\text{cm}$ 高さ $h 180\text{cm}$	8,000 lb	花崗岩	カッターによる切断割れ目  引張割れ目 (圧裂試験)  砂吹付割れ目 ( $\phi 35.5\text{cm}$ 内)	室内透水試験セル (内径2.0m)  軸荷重 $4 \times 10^4 \text{ lb}$ (=1800t)	軸圧200psi 水圧100psi (注水、揚水試験)	割れ目変位LVDT (非接触型変位計 10 <sup>-6</sup> ft精度)  岩盤ひずみひずみゲージ  流体圧中心孔  周方向水圧  流量  中心孔より12.7m外側の水圧		なし	
				試 験 装 置 の イ メ ー ジ										
出典 J.E.Gale ; A Numerical Field and Laboratory Study of Flow in Rocks with Deformable Fracture, 1975.														

Table 5.2.1-2

エントリー設計研究 既往の確証試験調査表

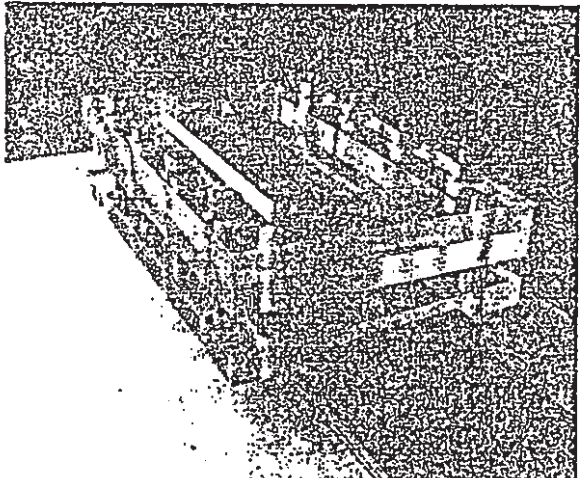
確証の対象とする モデル・現象	試験者名	発表年	機関名 (国名)	試 験 体				試 験 方 法		計測データ及 び使用機器	試験装置 ・試験方法 上の課題	確 証 例	備 考
				形状	寸法	重量	岩種	亀裂性状	載荷方式とその性能				
流動挙動 ・亀裂内の流動性 モデル実験	Eva. Hakami	1989年 5月	Lulea University of Technology (スウェーデン)	長方形 透明エポキシ	載荷板幅 6cm 長さ 15cm 供試体厚 2cm		花崗岩 ストリー バ鉱山 ボーリン グコア試 料	自然亀裂 レプリカ シリコンラ バー採用 Silastic 3112RTV テフロン吹付	カラーインジェクシ ョン試験 プラスチックガラス 製載荷板 (長さ150mm ×幅60mm) トルクレンチ法によ るボルト締め その他注入装置、二 重球式恒圧装置、脱 気水容器を使用	載荷重 (一定) 水頭勾配可変 (水圧一定) 間隙量 (水温測定)	写真撮影によ ってカラー染 料(メチレン ブルー)を追 跡し、流動速 度を算定 亀裂間隙量は 一定の点滴量 による微量水 量測定装置を 使用し、写真 撮影後デジタ イザー解析し て水滴占有面 積より平均間 隙を算出 点滴量 5~500ml (精度0.5ml)	レプリカ供 試体と岩供 試体の力学 特性の類似 性 三乗則平行 平板の仮定 条件での計 算流量と実 験値との 比較	レプリカ供試 体による繰り 返し載荷試験 結果 $\sigma_c = 72\text{MPa}$ $E = 3.5\text{GPa}$
試 験 装 置 の イ メ ー ジ													
													
出典 E. Hakami; Water Flow in Single Rock Joints, 1989.													

Table 5.2.1-3

エントリ設計研究 既往の確証試験調査表

確証の対象とする モデル・現象	試験者名	発表年	機関名 (国名)	試 験 体					試 験 方 法		計測データ及 び使用機器	試験装置・試験 方法上の課題	確証例	備 考
				形状	寸法	重量	岩種	亀裂性状	载荷方式とその性能	境界条件又は初期条件				
物質移動 ・亀裂ネットワーク中の分散現象	L.C.Hull J.D.Miller T.M.Clemo	1987年 8月	Hydrology Unit, Idaho National Engng. Lab. (U.S.A)	直方体	幅 W 58cm 長さ l 172cm 高さ h 1.91cm		プラスチック製 (アクリル酸樹脂製)	直交2系列 割れ目幅 0.318 ±0.002cm 間隔 10.2cm	室内トレーサー試験 手動ポンプによる出力調整 ポンプ容量 93cm <sup>3</sup> (3.36cm <sup>3</sup> /minの注入可能)	流入出口の水頭固定 流入量固定	(濃度測定) φ3.2mm プラチナ電極  (圧力測定) φ1.5mm ピエゾメーター  (トレーサーの種類) k Cl溶液  (流体の種類) CsCl溶液	平行平板モデルの適用性	なし	FRACSL解析コードによる2次元割れ目系内の流動と物質移動解析
試 験 装 置 の イ メ ー ジ														
出典 L.C.Hull, J.D.Miller, T.M.Clemo ; Laboratory and Simulation Studies of Solute Transport in Fracture Networks, 1987.														

Table 5.2.1-4

エントリー設計研究 既往の確証試験調査表

確証の対象とする モデル・現象	試験者名	発表年	機関名 (国名)	試 験 体					試 験 方 法		計測データ及 び使用機器	試験装置・試験 方法上の課題	確証例	備 考
				形状	寸法	重量	岩種	亀裂性状	载荷方式とその性能	境界条件又は初期条件				
物質移動 ・単一割れ目の チャンネルング 現象 ・岩体中の 吸着と拡散現象	Ivars Neretnieks  Triggve Eriksen  Päivi Tähtinen	1982年 8月	Department of Chemical Engineering  Royal Institute of Technology (スウェーデン)	円柱形	径 φ20cm 高さ h30cm		花崗岩  ストリー バ鉱山 GL-360m より採取	軸に平行な自然割れ目  円柱表面からの漏水防止のためウレタンラッカー塗装処理済	トレーサ試験 (非吸着、吸着)  ・プラスチックガラス製プレートによる端部のキャッピング (流入流出部分)  ・ぜん動ポンプによる供試体上面より採水  ・連続的にトレーサ濃度を測定(分別コレクター)	非吸着トレーサ  THO, Na Ls 濃度 $5 \times 10^{-5}$ (mol/l)  吸着トレーサ  $^{85}\text{Sr}$ 濃度 $2 \sim 5 \times 10^{-8}$ (mol/l)  $^{134}\text{Cs}$ 濃度 $4 \sim 8 \times 10^{-9}$ (mol/l)	(トレー) 人工的な地下水 (成分表別途)  (測定機器) $^3\text{H}$ : 液体シンチレーションカウンタ  $^{85}\text{Sr}$ , $^{134}\text{Cs}$ NaI ウェルタイプ  $\text{L}^{3-}$ 紫外可視分光光度計		なし	流体力学上の分子分散の考え方と平行平板理論による(SNOW理論)チャンネルング現象を解析
試 験 装 置 の イ メ ー ジ														
<p>The diagram illustrates the experimental setup. A cylindrical granite sample is shown with a central fissure. The top and bottom of the cylinder are labeled 'endpiece inlet' and 'endpiece outlet' respectively. The sample is connected to a 'fractional collector' at the bottom. A 'peristaltic pump' is connected to the top of the cylinder, drawing 'tracer solution' from a reservoir. The pump also draws 'flushing water' from a 'groundwater' source. The setup is used to study tracer movement through the fissure in the granite rock.</p>														
出典 I. Neretnieks, T. Eriksen, P. Tähtinen; Tracer Movement in a Single Fissure in Granite Rock, 1982.														



### 3 亀裂性岩盤の水理・物質移動解析コードの調査

#### 3.1 調査目的と方法

前期概念設計においては、解析コードの詳細については十分な調査を実施しなかった為、今期の設計研究においては、今後の本試験を考える上で最も重要と考えられるモデルの選定に向けての検討を行う。

亀裂性岩盤の水理・物質移動現象を確証するに当たっては、まず、ENTRYにおいて実施する各種の試験の検討のためのモデルを選定する必要がある。

そのモデルを選定するに際して今期の設計研究においては、この分野の実績が豊富な諸外国の解析コード（モデル）を主体として調査し、その結果に基づき必要と考えられる要件の抽出を行った。

ここで、調査対象とした解析コード（モデル）及び研究者（研究機関）をTable 5.2.1-5

にまとめて示す。今回は、世界の第一線の研究レベルのものをできる限り調査する方針で行ったが、結局北米が主体となり米国9件、カナダ4件、英国1件、日本2件の計16件について調査を行った。調査に当たっては出来る限り開発者が直接記載したものに基づいて取りまとめる方針で行った。

#### 3.2 調査コードの概要と特徴

##### (a) 調査項目

Table 5.2.1-6 に各コードについて主要な調査項目を示す。

ここでは、基本の調査の他に亀裂の取扱い及びモデル化上の仮定について重点を置いて調査した。

Table 5.2.1-5 Analytical codes for the fractured media

	解析コード総称	開発機関	所在地・国名	開発担当者	コード名
1	NAPSAC	Harwell Lab.	UK	A. Herbert	
2	JINX Package	Golder Assoc.	Seattle	W. Dershowitz	FracMan MAFIC
3	FMG Program	LBL	Berkeley	J. Long K. Karasaki	TRINET CHANGE
4	MOTIF	AECL	Canada	T. Chan et al.	
5	SWIFT II	Intera	Houston	M. Reeves et al.	
6	Battelle Codes	Battelle, PNL	Richland	C. R. Cole	CFBST MGRID
7	Westinghouse Codes	Westinghouse E. C.	Hanford	R. Khaleel et al.	MAGNUM-2D CHAINT
8	DEFLOW	Memorial Univ.	St. John's, Canada	L. C. Atkinson & Gale	
9	Rouleau, Robinson & Gale	Univ. Waterloo	Canada	A. Rouleau J. W. Robinson J. E. Gale	NETWRK NETFLO NETRANS
10	STAFF2D	Hydrogeologic, Inc.	Virginia	P. S. Huyakorn	FTRANS TRAFRAP
11	SANGRE	Los Alamos N.L.	New Mexico	C. A. Anderson	
12	UOA Code	Univ. of Arizona	Arizona	T. C. Rasmussen & D. D. Evans	
13	FRACSL	Idaho N. E. L.	Idaho	T. Clemo & L. C. Hull	
14	UOA/UBC Code	Univ. Alberta, Univ. British Columbia	Canada	F. W. Schwartz & L. Smith	
15	Donchan	埼玉大	日本	渡辺邦夫	
16	SPTRAN	計算力学研究センター	日本		

注) 国名省略は米国を意味する

Table 5.2.1-6 Items to be studied with relation to codes

Items
<ul style="list-style-type: none"><li>• purpose of code</li><li>• code applicability</li><li>• code capabilities<ul style="list-style-type: none"><li>-modeled processes</li><li>-assumptions for analysis</li><li>-major inputs/outputs</li><li>-code limitations</li><li>-special features(compared to other codes)</li></ul></li><li>• available documentation</li><li>• code benchmark status</li><li>• code availability</li><li>• O/S system</li></ul>

#### 4 試験研究課題

本項では、岩体水理・物質移動現象のモデル化における課題をもとに、現状での研究レベルを考慮して本研究で取扱うべき課題を検討する。更にそれらを表現しようとするモデルを研究対象として選定し、次項以降の各試験計画策定の基本とする。本項の検討フローをFig. 5.2.1-2に示す。

##### (1) 岩体水理・物質移動現象における課題

岩体水理・物質移動現象における課題を、目的とスケールによって4項目に大別して考えることとする。

性能評価のためのモデル化を目的とした課題：

- ① 単一亀裂面内における現象のモデル化に係わる課題
- ② 複数の亀裂が交差している系内における現象のモデル化に係わる課題
- ③ 等価多孔媒体近似モデルに係わる課題

原位置試験の解釈のためのモデル化を目的とした課題：

- ④ 原位置透水試験における非定常現象のモデル化に係わる課題

##### (a) 性能評価のためのモデル化の課題

モデル化に際しての課題をまとめたものを、Table 5.2.1-7に示す。課題については水理・物質移動の1次的現象を中心にまとめた。したがってそれぞれの課題は、さらに細かい要因に分解できるものもある。

モデルと既往の試験の有無については、確証の有無を問わず課題として取り上げているかどうかで判断し、主に昨年度と今年度の文献調査によった。

##### (b) 原位置透水試験における非定常現象のモデル化に係わる課題

難透水性岩盤における原位置透水試験の結果の解釈には、非定常現象を表現するモデルが重要である。これに関する課題をまとめたものをTable 5.2.1-7に示す。

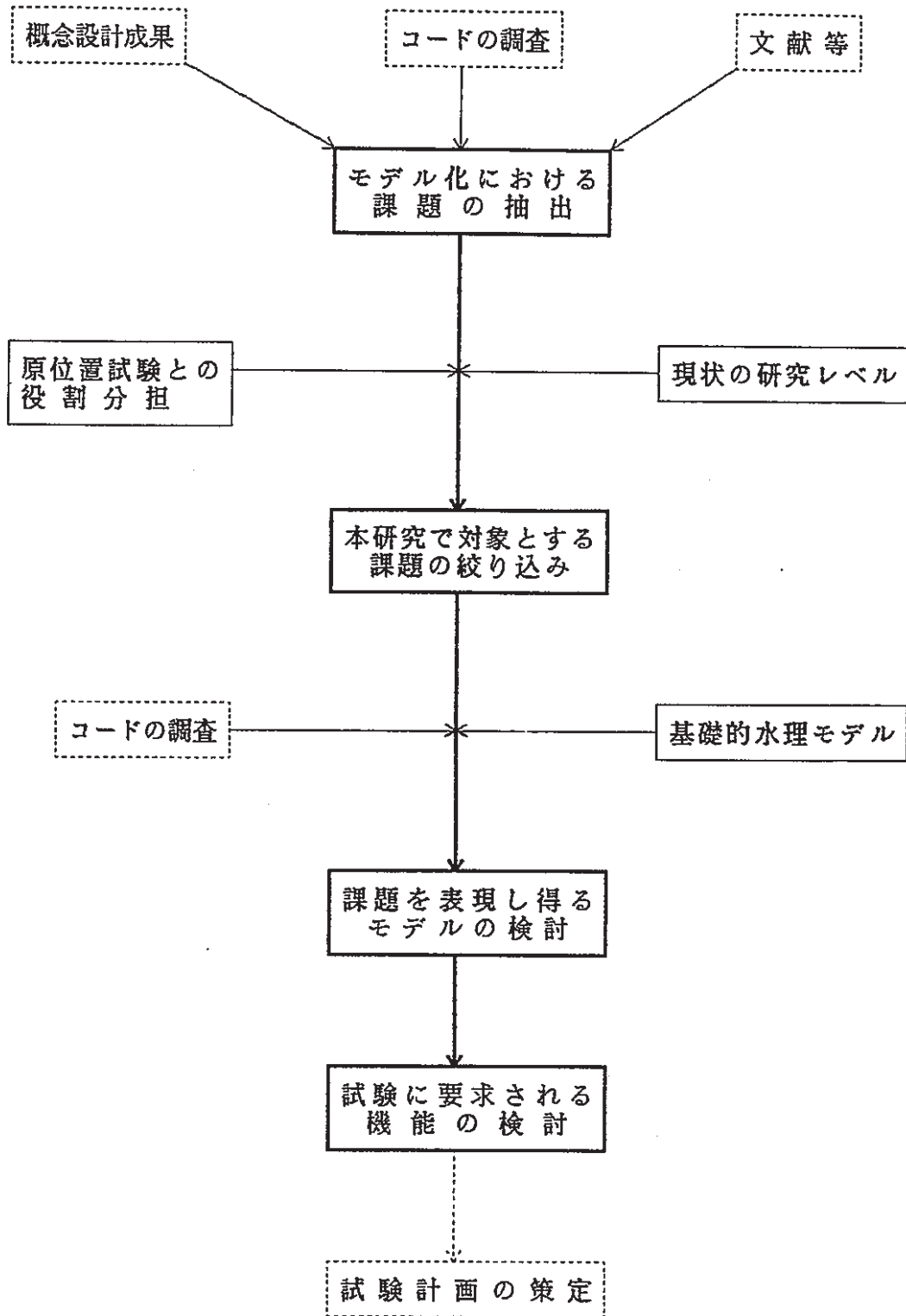


Fig. 5.2.1-2 第4項の検討フロー

Flow diagram of Section 4

Table 5.2.1-7 単一亀裂面内におけるモデル化の課題  
Subjects in single fracture

スケール	課 題	内 容	モデルの有無	既往の試験の有無	
単一亀裂面内における現象	亀裂構造の把握	開口幅分布	亀裂面の凹凸による開口幅の分布	△	△
		開口幅分布の変化	応力作用による開口幅分布の変化	△	○
		亀裂内充填物	亀裂内に沈積あるいは抑留されている粒子等による亀裂構造の変化	×	×
	水理現象	流 態	流速の違いによる流態（層流、乱流）の変化	○	○
		チャンネルング	チャンネルの形成、流路の選択性、デッドエンドの影響	△	△
		岩石マトリクス部の貯留	岩石マトリクス部分の空隙、微小亀裂等への亀裂面からの流入あるいは亀裂面への流出	△	△
	物質移動現象	亀裂表面への吸着		×	×
		亀裂内充填物への吸着	主に亀裂間粘土物質への吸着であり、多孔媒体への吸着にモデル化できる	×	×
		岩石マトリクス部空隙への吸着		×	×
		拡 散	亀裂内流体中の拡散及び岩石マトリクス中への拡散	△	×
		核種の崩壊	核種の崩壊と娘核種の生成	○	○
		沈 澱	低流速域での物質の沈澱	○	○
	現象内における複数亀裂系	亀裂系構造の把握	亀裂の交差角度、交差間隙、交差形態、亀裂系の開口幅分布、デッドエンド	△	×
チャンネルング		亀裂系内の卓越流路	△	△	
交差部の分配特性		亀裂交差部の流れの分配率	○	△	
媒体等価モデル	亀裂系全体構造の把握	亀裂密度、亀裂系の方向性	△	×	
	等価透水係数の算定	多孔媒体への置換	△	△	
	マクロ的分散	亀裂構造の不均質性	×	△	
現象内における位置非定常試験	試験区間における亀裂系構造の把握	亀裂本数、亀裂系の形態、ひろがり、デッドエンド	△	△	
	単一亀裂のチャンネルング	チャンネルの形成、デッドエンド	△	△	
	複数亀裂系のチャンネルング	亀裂系内の卓越流路	△	△	

凡例 ○：研究が進んでいると考えられるもの ×：ほとんど研究されていないもの  
△：研究例はあるが今後さらに研究が必要と考えられるもの

## (2) 現状の研究レベル

昨年度概念設計及び今年度の設計研究業務を通じて得られた知見から、岩体水理・物質移動現象に関する現状のおおよその研究レベルは次に示すようなところにあると判断した。

### ① 単一亀裂構造の把握

開口幅分布の調査については、切り出した岩体について、直接的に測定したり物質を注入凝固させたり (Pyrak-Nolte ら, 1986<sup>41)</sup>; Gale, 1987<sup>2)</sup>) して実施されている。ただし原位置では亀裂横断面のみの調査に限られる。

開口幅分布の応力変化については、垂直応力、せん断応力とも実施されている (Bandis ら, 1986<sup>3)</sup>) が実際の計測は亀裂横断面のみの調査に限られる。基本的な開口幅分布を基に、解析的にアプローチする方法も試みられている。

また、応力と透水性の関係が直接的に検討されている例も多い (Gale, 1987<sup>2)</sup>)。

亀裂内充填物については、原位置における調査及び切出し岩体の観察等が一般的に実施されている。また動的な目詰り現象については、一部で室内実験が実施されている (伊藤ら, 1988<sup>4)</sup>)。

モデル化については、開口幅分布を対数正規等の確率分布で表現する試みが多くされている。他の項目については、まだ明確にモデル化された例はない。

### ② 単一亀裂の水理現象

3乗則の適用性について、応力や亀裂状態をパラメータとして実験が多く行われている (Watkins ら, 1987<sup>5)</sup> 他)

チャンネリングについては、原位置においてトレーサー試験を中心に流出分布が観測されている (Neretnieks ら, 1987<sup>6)</sup>)。また岩盤を切り出して、染料等を流して、チャンネルの形成状況を観察することも行われている (Hakami, 1989<sup>7)</sup>)。その他に、パルス法による透水試験を実施して、その圧力の伝達方向等を観測することにより、チャンネルの形成が観測されている。

チャンネリングのモデル化については、一部で有限要素分割した亀裂面に開口幅分布を割り当てて、トレーサー濃度分布を計算した例 (Tsang ら, 1988<sup>8)</sup>) があるが、まだその数は少ない。

③ 単一亀裂の物質移動

吸着・拡散・崩壊と水理現象との組み合わせについては、1次元流れについてモデル化がされている。これについては、要求があれば2, 3次元へのモデルの拡張も可能と考えられる。

④ 複数亀裂の亀裂系構造の把握

原位置において、坑道表面観察及びボーリング孔を用いた観測等により亀裂系の構造について調査がされている。

またモデル化については、調査結果をそのままモデル化する方法や確率論的に3次元モデルを作成する方法等が試みられている。

⑤ 複数亀裂系のチャンネルング

原位置において、トレーサー試験等により、系としてのチャンネルング現象が観測されている。

モデル化については、前述の亀裂系構造のモデル化において、各亀裂の特性（一般に透水量係数や開口幅）をそれぞれ面内では一様にして、モデル化が試みられている。また、各亀裂面内にチャンネルを仮定して、その亀裂を組み合わせることにより、3次元のパイプネットワークとしてモデル化した例（渡辺ら、1989<sup>9)</sup>）がある。

またこれ以外に、室内において、単純な系の人工岩体（ネットワークとしてモデル化）によりチャンネルング現象を観測したもの（Hullら、1987<sup>10)</sup>）もある。

⑥ 交差部の分配特性

条件が複雑なため、亀裂の特性を盛り込んだ実験・モデル化の例はほとんどない。単純なチャンネル同士の交差部については、モデルが2, 3作成されている（Hullら、1987<sup>10)</sup>）が、確立されたものはない。

⑦ 等価多孔媒体近似

亀裂系全体構造の把握については、ボーリング孔等を用いた観測により推定する方法がある。最近ではフラクタルを用いた推定も研究され始めているが、全体的にモデル化の段階には至っていないと考えられる。

等価透水係数については、室内模型実験や解析（Longら、1985<sup>11)</sup>）により算定が試みられている。いずれも各亀裂の特性を一定として実施されている。同様の手法でREVについての検討もされた例（Longら、1985<sup>11)</sup>）もある。



分散については、多孔媒体について基本式が与えられているが、不均質性について確証された例はなく、ENTRYのテーマの1つ(MACRO試験)となっている。

### (3) 原位置試験との関連

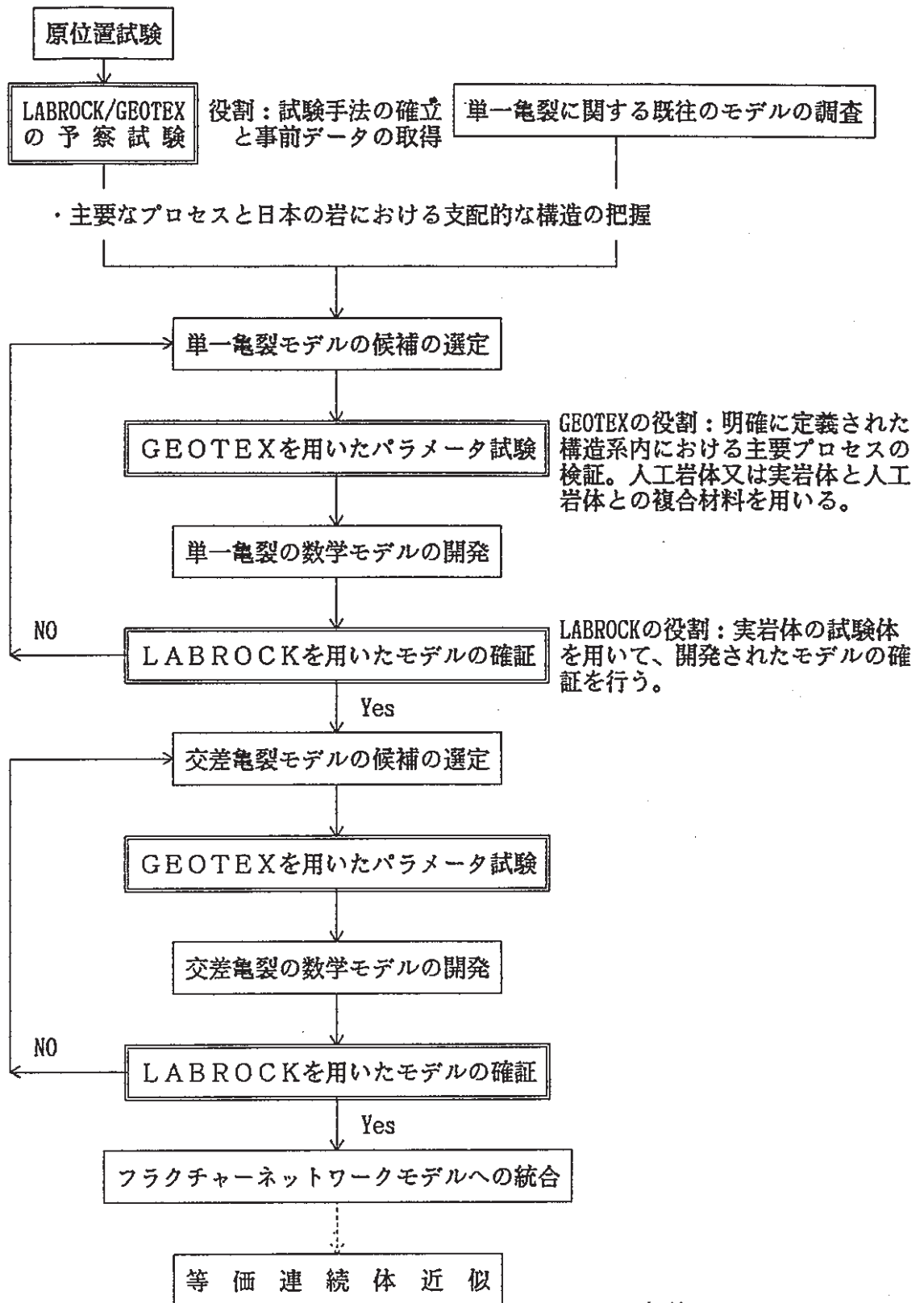
ここでは課題絞り込みのために、原位置試験の特性を次のように考えた。

- ① 環境条件は、実際の性能評価に必要な条件により近い。
- ② 基本的には試験スケールは自由に選択できる。
- ③ 境界条件、初期条件等の試験条件の把握、制御には限界がある。
- ④ 観察、特に現象の詳しい観察はどちらかといえば不向きで、ブラックボックスが残りやすい。つまりパラメータの影響がすべて総合された試験である。
- ⑤ 一般に大がかりな試験で、何ケースものパラメータ試験の実施には困難を伴う。

そこで、ENTRYの持つべき特性は次のようになる。

- ① 試験条件の把握、制御が可能である。
- ② 現象の詳しい観察が可能である。
- ③ パラメータ単独の現象に与える影響が検討可能である。
- ④ ケーススタディーが比較的手軽にできる。

岩体水理・物質移動の各試験(LABROCK試験、GEOTEX試験)と原位置試験との関連について検討したものをFig. 5.2.1-3に示す。



モデルへの要求事項：

- ①適切な量のサイト特性調査を越えるようなインプットデータを要求しない。
- ②大規模な計算を必要としない。

Fig. 5.2.1-3 亀裂媒体における物質移動の検討手順

Procedure of research for mass transport in fractured media

#### (4) 本研究で対象とする課題

以上の各検討を受けて、ここでは本研究で優先的に取り扱うべき課題を絞り込む。

#### (7) スケール

まずスケールについて検討すると、等価多孔媒体近似については、原位置試験での亀裂の構造把握が実験を行って評価する段階に至っておらず、ENTRYと原位置との対応付けが困難であり、またスケールの関係からENTRYの特性が生かせないと考えられるため、先の課題とすべきである。同様に等価透水係数の算定についても、現状では単純な考え方（モデルは亀裂の数により複雑となるが）で解析的にアプローチする手法を優先すべきであり、先の課題とする。

複数亀裂系については、現象を詳細に観察すべきスケール内のものについてはENTRYの課題となり得る。つまり、亀裂面の特性や交差部の分配率等個々の課題が結果を支配する範囲のものについてはENTRYの課題とすべきである。一方、ネットワークの特性や原位置岩盤の複雑な圧力状況等が支配的となる場合には、原位置試験の方が適していると考えられる。

単一亀裂については、ENTRYの課題である。現象を詳細に観察し、パラメータ試験を行いモデル化に結びつける課程により課題を解決する手法は、ENTRYの方が適している。もちろん最終的な確証は、原位置で実施されなければならない。

#### (1) 対象とする課題

対象とする課題についてまとめたものをTable 5.2.1-8 に示す。この表をまとめる際には、次の方針で課題についての優先性を決定した。

##### ① 単一亀裂面内における課題を中心とする。

現状の研究レベルを見ると、単一亀裂内における課題についても十分に解明されていないと判断される。また、ENTRYの特性からして、大スケールの亀裂系を対象とするよりも、詳細な現象によりモデルを作成して、それを原位置試験等により大スケールへ展開して行く方がより効果的であると考えられるからである。

なお、そのステップとしての原位置試験の解釈に関する課題もここに含める。

##### ② 化学的あるいは分子規模の諸課題は対象外とする。

これらの課題については、いずれは水理現象と連成した総合試験が必要となるが、現状においては、基礎的なデータの蓄積が優先されるべきと考えられる。またこれらの課題を確証するためにはかなり大がかりな施設が必要となるため、本研究とは別の

テーマとすべきであろう。ただし、試験装置及び試験手法は応用できると考えられる。

③ 重要ではあるが、現状で対応が困難なものについては、次段階の課題とした。

たとえば亀裂内充填物によるチャネリングや充填物（多孔体と想定）中の流れとチャネルフローの相互作用、岩石マトリクス部の空隙や微小クラックでの貯留等は水理現象に係わる課題と考えられるが、現象を複雑にしモデル化を困難にするもの。

これらの方針より、「単一亀裂面内のチャネリング現象の解明」を主要課題とし、モデル作成のための開口幅分布の把握も同時に行うこととする。

Table 5.2.1-8 本研究で対象とする課題

## Subjects of ENTRY

スケール	課題	優先度	内容
単一亀裂面	開口幅分布	A	モデル作成のための測定方法、パターン認識と処理の方法
	開口幅分布の変化	C	実験条件と原位置条件との対応の検討が必要
	亀裂内充填物	B	チャンネリングモデル確認後に対象とする
	流 態	D	モデル有。
	チャンネリング	A	詳細な観察、亀裂形状パラメータとの関係、現象のモデル化
	岩石マトリクス部の貯留	B	試験方法に課題が多い。モデル化も複雑となることが予想される。
	吸着、拡散、崩壊、沈澱	D	総合試験として先の課題とする。
	原位置試験の解釈	B	チャンネリング現象の解明後の課題とするが、並行してデータ取得は可能。
複数亀裂系内	亀裂系構造の把握	D	原位置試験のテーマである。
	チャンネリング	C	「亀裂系」チャンネリングは、単一亀裂面内の水理の課題が解決した後の課題とするただし、小スケールを対象とする。原位置試験が中心となる課題である。
	交差部の分配特性	B (A)	単一亀裂面内の水理現象解明後に実施するただし、単純な系の分配率の試験は別途実施してもよい。
等価多孔媒体近似	亀裂系全体構造の把握	D	原位置調査の課題とする。
	等価透水係数の算定	D	解析によるアプローチを優先させる。
	マクロ的分散	D	ENTRY別テーマ。

- 凡例
- A : 最も優先度が高く初期に製作される試験設備の対象となるべき項目
  - B : 優先度は高いが現状の試験技術では対応できない項目
  - C : 優先課題が解決したのちの課題項目
  - D : 当面は対象としない課題項目

## (5) モデルの検討

前記の単一亀裂面内のチャンネリング現象についての課題を検討するためのモデルを選定する。

既存のコードの調査より、単一亀裂面内のチャンネリング現象を取り扱っているものを選定すると、次の2つとなる。

① NAPSACコード

② Tsangのコード

両者とも有限要素法による水理／物質移動コードで、次のような共通点と相違点がある。

共通点：

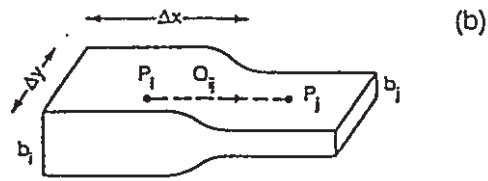
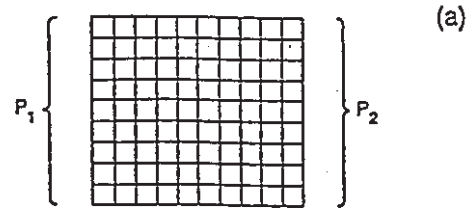
- ・亀裂面上に、統計的手法あるいは任意の開口幅分布を与える。
- ・移流のみを取り扱う。
- ・岩石マトリクス部分は不透水。
- ・一般に公開されていない。(NAPSACはいずれは公開される予定である)

相違点：

- ・NAPSACは3次元亀裂ネットワークの取り扱いが可能。
- ・Tsangは、亀裂面を正方形の格子状に分割し、格子交点の圧力差により流れを計算する。それぞれの格子は、開口幅から3乗則により計算した1次元流路とする。  
交点では流れは完全混合が仮定されている。
- ・NAPSACについては計算モデルの詳細は不明であるが、Tsangのような1次元への置き換えはされておらず、ある開口幅をもった2次元要素の組み合わせで亀裂面を表現しているものと予想される。

現在入手している情報から判断すると、これらのコードは両方とも単一亀裂内のチャンネリング課題の当面の検討に必要な要件はほぼ備えていると考えられる。

つまり、これらのコードで表現可能な現象は、「開口幅の亀裂面内でのばらつきによって発生するチャンネリング」であると判断され、単一亀裂面内のチャンネリング現象の主たるパラメータ(要因)についてのモデル化が可能であるからである。



$$R_i = 6\mu \frac{\Delta x}{\Delta y} \left( \frac{1}{b_1^3} + \frac{1}{b_2^3} \right)$$

Fig. 5.2.1-4 Tsangコードのモデル概念

Concept of Tsang code

(a) 格子状に分割された領域に割り当てられたさまざまな開口幅の値をもった単一亀裂を通る流れの概念図。

$P_1$ ,  $P_2$ は境界での圧力。

(b) 異なった開口幅の隣り合った2つの節点の概念図。

(c) 隣り合った節点間の流れの電気アナログの概念図。

ただし、両コードとも、将来課題（亀裂内充填物、岩石マトリクス部分の貯留等）に対しては、現状では対応できないため、その際には大幅な修正が必要となるであろう。または、それらについての将来の対応が容易なコードを別途作成することも検討してよい。

これらのコードを確証する際の留意点のうち、現在のところ次に示すようなものがあげられる。

- ① 実岩体の開口幅をモデルの開口幅分布に割り当てる方法。

実際の開口幅は連続的に変化しているので、それを離散化して各有限要素に一定の開口幅を割り当てる必要がある。

- ② 各要素に3乗則を適用する場合の面の粗度の把握と影響の評価

- ③ Tsang コードの場合、実際には発生するであろうX, Y軸に平行でない「斜め」の流れの影響がうまく考慮されるかどうか。

- ④ 要素交点あるいは交線における混合、流れ方向の分配率はどのように考えればよいのか（いずれのコードとも完全混合が仮定されていると予想される）。

- ⑤ 両コードとも計算機に多くの容量と、速度が要求される模様である。

これらのうち、①は実岩体の開口幅の測定方法（精度）とモデルの分割サイズ等が関連する問題である。②は基礎試験により摩擦等を正確に把握する必要があるであろう。③は最終的にはモデルの分割サイズの問題に帰結できると考えられる。④は物質移動については重要な課題である。基礎試験でのモデル検討が必要となる。⑤については、極力効率の良いプログラムとすることで対応する必要がある。



5 試験研究の全体スケジュール

試験研究実施の概略のスケジュールをFig. 5. 2. 1-5 に示す。

このうち、予察試験については、本試験との対応をとりながら必要に応じて適宜実施する計画である。

Fig. 5. 2. 1-5 試験研究の全体スケジュール

Research program

項 目	1989	1990	1991	1992	1993	1994以降
概 念 設 計	□					
詳 細 設 計		□				
予 察 試 験			設計・製作・試験			(継続)
本 試 験 ①LABROCK			製作設計	製 作	試 験	(継続)
②GEOTEX				製作設計	製 作	試 験 (継続)
モデル化の検討						

## 5.2.2 ファーフィールド水理・物質移動試験研究の計画 (MACRO2D)

多孔質媒体中の物質移動は一般的に分散移流方程式により表され、物質移動のDriving Force としては地下水流とともに溶質が移動する移流効果と、媒体の不均質性に帰因する分散効果があげられる。

分散現象には微視的分散現象と巨視的分散現象がある。前者は微視的スケールにおける地下水流速の平均値からの偏差により溶質の移動速度が分布を持ち、溶質の空間分布が形成される現象である。微視的分散現象については、解明が進んでおり、Fickの法則が成立することが確かめられ、微視的分散係数は地下水の平均流速と媒体の関数によって与えられている。

巨視的分散現象は媒体の不均質に起因する大規模な地下水流速の空間分布の存在によって生起する。例えば異なる透水係数を有する複数の地層の積層によって構成される帯水層があるとして、汚染物質が積層に垂直な面状に放出された場合、汚染物質は各々の層の地下水流速に従って移動するため、帯水層の断面平均濃度分布は地下水流方向に拡がったものとなる。一般に巨視的分散効果は微視的分散効果の10~100倍以上といわれており、ファーフィールドの放射性核種の移行に大きな影響を有している。巨視的分散現象についても従来からFickの法則を用いて表現されている。

また、機械的分散係数は地下水の速度ベクトルと分散能係数との積であるといわれている。

しかしながら、巨視的分散現象について従来の移流分散方程式を用いることに対し以下の疑問が呈されている。

- ① 分散項がFickの法則を満足するとの仮定は検証されているのか
- ② 分散能係数は物理的に測定可能なパラメータとして定数化が可能なのか

これらの疑問に対して従来のdeterministicなアプローチに加えてStochasticなアプローチにより研究が著しく進んでいる。

そのため、不均質な地層における分散現象について、以下の2点について今後研究を進める必要がある。

### (7) 物質移動に関する定式化

物質移動については十分な移動距離がある場合は従来の分散移流方程式が成立するが移動距離が短い場合は成立しない。したがって、前者の領域についてはその成立の条件

(例えば移動距離)及び分散係数同定方法が研究の主眼となる。一方、移動距離が短い領域においては物質移動現象の定式化が必要となる。

従来の分散移流方程式が成立する領域とは、おそらく数100m以上の規模が必要とされるため、その領域の研究は室内実験では対応できずField 試験が実験の主軸となろう。ただし、理論的な研究は今後も進めていく必要がある。

一方、物質移動現象の定量化が必要な領域はそれほど大きな規模ではないため室内試験が十分可能である。この場合、定式化の前にまず、生起している現象を十分観察することが大切であり、その後、実験結果をもとに定式化に着手することになる。

#### (1) 解析手法の確立

(a) に示したように従来は物質移動現象を決定論的に表現することが主流であったが、不均質性を有する地層中の物質移動を解析するにはこの方法だけでは不十分になってきている。すなわちStochastic (統計的) なアプローチが必要になっており、統計的な解析手法の研究を今後実施していくことになる。しかしながら、実際の性能評価を実施する際にはどちらか一方の手法のみを用いるとは予想されず、両者を併用することにより合理的で簡易に信頼性を十分保ちながら答を求めていくことが望まれる。例えば性能評価は決定論的に行うことにして、決定論的な手法が過度の保守性を排除しつつ十分信頼性のある結果をもたらすことを統計論的な手法により証明する方策が考えられる。したがって解析手法については両者の関係をよく理解しつつ研究を進めることとなる。

### 5.2.3 MACRO-2Dにおける研究の目的とその研究概要

#### (1) MACRO-2Dの研究の目的

上述した通り不均質な地層における物質移動現象において室内試験が可能な範囲では従来の分散移流方程式は成立しない。したがってMACRO-2Dは以下の項目を目的とする。

- 1) 分散移流方程式が成立しない体系における不均質多孔質媒体中の物質移動現象の観察
- 2) 分散移流方程式が成立しない体系における不均質多孔質媒体中の物質移動現象の定式化およびその確証

## (2) MACRO-2Dの研究概要

分散現象は汚染源近傍では標準的な分散移流方程式は使用できず、時間もしくは移動距離に依存した分散係数を適用する手法があるのに止まり、未だ理論として確立されたものはない。したがってENTRYにおいては、汚染源近傍の分散現象をGelhar, Mercado, Matheron, 藤間らの理論に基づいて再現してこれらの理論の検証を行う。さらに、必要であれば新たなモデル開発を行う。

また、分散現象については、Fickの法則が成立した場合の分散係数の求め方の確立という大きなテーマがあるが、Fickの法則が成り立つ距離はENTRYにおいて許される幅を越えることが明らかのため、それについてはENTRYの試験を基にした数値シミュレーションもしくは原位置試験に委ねるものとする。

### 5.2.4 MACRO-2Dの試験設備

MACRO-2Dは不均質多孔質媒体中の物質移動を観察するための設備である。また設備の設計データの取得及び媒体の特性を調べるためにMACRO-2D稼働させる前に2つの予察試験設備を設けるものとする。以下にそれらの概要を示す。

#### (1) MACRO-2D

MACRO-2Dは「不均質多孔質媒体中の物質移動評価手法の確立」を目的とした設備である。物質移動の状況を観測出来ることが必要条件であることから、体系は2次元として、壁面からセンサーを挿入して物質の濃度分布を測定するものとする。積層の帯水層を模擬するため平板を垂直にたてた形態で、水位差により水流を生じさせる。媒体はガラスビーズを、トレーサとしてはNaClを用いる。その他の詳細については第2編にて述べる。

試験は、簡単のために吸着のない系で行うが、不均質性を持たせるためにガラスビーズの粒径を変化させて巨視的分散を生じさせる。Gelhar, 藤間らの理論の成立範囲、成立条件の確認、新たなモデル構築を目指すものとする。

なお、将来的には吸着実験も行うこととする。

#### (2) 予察試験

MACRO-2D及びMACRO-3Dの設備を実現し、試験が円滑に遂行可能となる

べく予察試験を行う。予察試験はカラム試験及びセル試験を行うが各々の目的は次の通りである。

(a) カラム試験

円筒縦置のカラム中に多孔質媒体を充填し、通水試験を行う。水流は水位差によって生ぜしめ、トレーサを注入可能とする。試験の目的は以下の通りである。

- a) 試験方法の開発
- b) 媒体の透水係数の測定
- c) 媒体の微視的分散係数の測定

(b) セル試験

MACRO-2Dを小型化した水槽中にガラスビーズを充填し、通水試験を行う。水流は水位差によって生じしめ、トレーサを注入可能とする。試験の目的は、以下の通りである。

- a) 試験方法の開発
- b) 透水係数の測定
- c) 物質移動現象の観察

## 5.2.5 試験研究計画

本項では各試験の試験項目及び試験スケジュールを述べる。

### (1) 予察試験

(a) カラム試験

(7) 試験方法の開発

- a) 媒体の選定
- b) 媒体の充填方法の開発
- c) トレーサの選定
- d) トレーサの注入方法
- f) センサーの挿入方法の検討

(4) 透水係数の測定

媒体の選定及び次のセル試験、MACRO-2D試験を行うために種々の媒体の透水

係数を粒径、水流速度等を変化させて測定する。そして、粒径と透水係数の関係を得る。

(ウ) 微視的分散係数の測定

選定された媒体について、微視的分散係数を測定する。そして、分子拡散係数、Pe数との関係を把握する。

予察試験は約1年間をかけて実施する。

(b) セル試験

(7) 試験方法の開発

- a) 媒体の充填方法の開発
- b) トレーサ(NaCl)濃度の検討
- c) トレーサ注入方法の開発
- d) センサーの挿入方法の検討
- e) センサーの配置方法の検討

(4) 透水係数の測定

カラム試験から得られた透水係数の値を、セル試験によって再測定してズレがないことを確認する。

(ウ) 物質移動現象の観察

層状に不均質な多孔質媒体層を構築して、物質移動現象を観察する。

(1) その他

試験設備を用いないが、以下の項目を検討する。

a) 媒体の再使用の検討

一度トレーサと接触した媒体の洗浄、粒径による分別方法を検討する。

b) 充填方法の検討(不均質)

不均質に媒体を充填する方法を検討する。特に格子状に不均質層をつくる場合には、媒体を凍結することも考慮する。

予察試験は約1年間をかけて実施する。

(b) MACRO-2D

MACRO-2Dの目的は物質移動モデルの確証であるが、実施項目としては、以下のものがあげられる。

- 1) 試験が可能であることの確認
- 2) 物質移動モデルの確認・確証

① 物質が線源から発生して帯水層中を分散していく過程の観察及びモデルの確証。

Fickの法則に従わず、分散係数が時間の関数で与えられる領域を対象とする。

モデルとしては決定論的、確率論的手法がある。

② 吸着反応がある場合の物質移動モデルの確証。

吸着物質の分布が均一の場合及び不均質な場合について、モデルを確証する。

③ 分散における境界条件の検討。

物質の分散現象のうち、外側境界、例えば地表水、湖沼、海洋に対する境界条件の検討を行う。

④ 上流移行問題の検討。

水流の上流側に物質が移動する可能性は否定できないが、その定量的な評価手法の検討を行う。

MACRO-2Dは3年以上の期間が必要である。

## 6. 物質移動・化学反応 (IMAGE-GEOCHEM)

### 6.1 ニアフィールド及びファーフィールドにおける物質移動—化学反応の連成現象

高レベル放射性廃棄物の地層処分に伴う人工バリアや天然バリアの安定性及び核種の移行は、処分システムを取り巻く地下水環境に大きく左右される。地下水は、その水質に応じた化学反応特性により処分システムを構成する種々の物質と反応するだけでなく、反応生成物や核種の運搬に最も重要な役割を果たすと考えられる。

一方、地下水の水質自体も岩盤中を移動するにつれて変化し、また、地層処分においても処分場に持ち込まれた廃棄物及び種々の構造材、あるいは地上から侵入した大気等と反応して変化するし、処分場の掘削や閉鎖による地下水流の変化も水質の変化や反応生成物の移動に大きく関わってくる。

したがって、処分システムの性能評価を行うためには、地下水の動的な水質変化を把握することが求められる。これらの現象を解析するには、地下水の流れの場における化学反応・物質移動の主要機構や影響因子の同定を行い、それぞれの環境における水質形成に関わる要因を明らかにし、さらに環境の変化に対する水質の変化を動的に理解することが必要となる。

### 6.2 既往の研究

#### (1) 水質形成に関する研究

温泉や地熱地帯の一部および地層中に化石水を胚胎する場合等を除けば、地下水は一般的に降水によって供給される。降水は岩盤や地層中を浸透していくにつれて岩石や地層と反応し、その経路や環境に応じて様々な水質が付与されていくが、地下水の水質形成過程において最も基本的な現象は、地層や岩石からの溶出と陽イオン交換反応と考えられている。表6.2.1に地下水の形成に係わる主要な化学反応の一例を示す。

表6.2.1に掲げた地下水の水質形成機構はごく一般的なもの、実際の地下水では、これらの作用と他の要因が複雑に組合わさって水質が形成されている。たとえば、滞留時間の影響、鉱物の組合せによる効果、涵養地の鉱物組成による影響、化石塩水の影響、準安定鉱物相による効果等である。また、人為的な影響による地下水の水質変化も処分場の掘削に関連して重要である。

滞留時間の影響については、たとえば三木他(1977)が片麻岩を貫くトンネルに見られる



Table 6.2.1 Representative chemical reaction making for groundwater

種 類	主 な 作 用
炭酸塩化	CO <sub>2</sub> を伴った水が珪酸塩鉱物やアルミノ珪酸塩鉱物と反応し鉱物の化学組成に応じた陽イオンとHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 及びSiO <sub>2</sub> を地下水中に供給する。反応の進行に伴い地下水のpHが上昇する。 ex) $\frac{2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8}{\text{斜長石}} + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4}{\text{カオリナイト}} + 2\text{Na}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{SiO}_2$
溶 解	岩石や地層中に含まれる可溶性塩類が溶解し、地下水中にCl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> 等が付加される。海成の泥岩地域で顕著。 ex) NaCl → Na <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup> , CaSO <sub>4</sub> → Ca <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> etc
加水分解	鉱物の化学組成に応じた陽イオンとOH <sup>-</sup> 及びSiO <sub>2</sub> が地下水中に供給される。 ex) $\frac{2\text{KAlSi}_3\text{O}_8}{\text{カリ長石}} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4}{\text{カオリナイト}} + 2\text{K}^+ + 2\text{OH}^- + 4\text{SiO}_2$
酸 化	溶存酸素の多い地表部で硫化鉄が存在すると顕著となる。 $\frac{2\text{FeS}_2}{\text{黄鉄鉱}} + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$
還 元	硫化鉄の酸化や有機物の分解により地下水中の溶存酸素が消費されることにより顕著となる。鉄の溶解により地下水中にFe <sup>2+</sup> が溶出したり、また、硝酸還元や硫酸還元によって、地下水中のNO <sub>3</sub> <sup>-</sup> やSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> が消費され、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> が増加する。 ex) Fe <sup>3+</sup> → Fe <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> S, NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> → N <sub>2</sub> 等
陽イオン 交 換	土壌や岩石中に粘土鉱物が含まれる場合に顕著となり、地下水中のCa <sup>2+</sup> やMg <sup>2+</sup> が減少しNa <sup>+</sup> が増加する。 ex) Na-CLAY + Ca <sup>+</sup> → Ca-CLAY + Na <sup>+</sup>

湧水において報告したように、水の移動速度が遅いと、陽イオン交換とpHの上昇によるCaCO<sub>3</sub>の沈澱によって、移動速度の速い場合に比べてCa<sup>2+</sup>が減少しNa<sup>+</sup>が増加する。

鉱物組合せによる影響としては、木村(1990)が興味深い例を報告している。すなわち、地滑り地の様に置換性Naを持つ粘土鉱物と微量のCaCO<sub>3</sub>が共存する場合、CaCO<sub>3</sub>の溶解度が小さいにもかかわらず、溶出したCa<sup>2+</sup>がNa<sup>+</sup>と交換されることにより、CaCO<sub>3</sub>の平衡溶解が崩れCaCO<sub>3</sub>の溶解が促進され、結果として高濃度のNa-HCO<sub>3</sub>型の地下水が形成される。また、鶴巻(1987,1989)は、火山山麓の湧水において、輝石を含む火山砕屑物の分布と、溶存成分量、特にHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の高い湧水の分布が一致する事を報告している。さらに、高

松他(1981)は、花崗岩地帯の鉱泉水を例に、安定な二次鉱物が生成されなくても、加水分解の初期においては、準安定なアルミノ珪酸塩相にCaやMg等の水酸化物イオンが吸着され、pHが高いにもかかわらず比較的溶存成分の少ない水質を形成すると報告している。

我が国ではしばしば、海岸から遠く離れた内陸部において、高塩分濃度の地下水が観測されているが、これらの大半は化石塩水が降水起源の循環水に希釈されたものと考えられている〔奥田他(1973)、加藤(1983)等〕。

一方、人為的な地下水の水質変化としては、トンネル掘削による影響がある。三木他(1977)や笠間他(1971)は、結晶岩地帯におけるトンネル掘削後の湧水の水質変化を9ヵ月ないし3ヵ年間にわたって調査し、時間の経過とともに $\text{Na}^+$ が減少し $\text{Ca}^{2+}$ と $\text{HCO}_3^-$ が増加することを報告している。また、地下水の汲み上げによる水質変化もいくつか報告されている。東海三県地盤沈下調査会(1985)は、平野部において、汲み上げによる地下水位の低下によって、地表からの高酸素濃度水が供給されるため浅部の海成粘土層中の硫化鉄が酸化され地下水中に $\text{SO}_4^{2-}$ が溶出されること、地盤沈下に伴う海成粘土層からの絞り出しにより地下水中に $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 及びNa/全陽イオン比の増加することを報告している。賦圧層が海成粘土層ではなく未分解の有機物を含む粘土層の場合は、有機物の硫酸還元による $\text{HCO}_3^-$ が絞り出し供給により増加することが鶴巻(1982)により報告されている。この場合、アンモニア態窒素とリン酸態リンを伴っていることで通常の地下水と区別される。さらに、石井他(1976)は、東京都下の被圧地下水について酸化還元電位を測定し、地下水の汲み上げ停止により酸化状態( $E_h > 0$ )から還元状態( $E_h < 0$ )へ変化した事を報告している。

## (2)水質形成に関する実験研究

自然環境水の水質形成に係わる実験研究は、一般に、①降水の水質形成、②海洋水/湖沼水の地球化学バランス、③耕作土壌の物質バランスに係わる土壌溶液、④岩石-水相互作用による水質形成に関して行われている。しかし、これらのほとんどは地表環境近傍を対象にしており、地下深部を対象にしたものは岩石-水相互作用に関するもののうち続成作用や低温低圧変成作用に関する研究がある程度である。ただし、これらに関しても、その対象としている温度圧力領域は0.1GPa以上、100℃以上と高く、地下1000mの処分環境(10MPa, 約40~50℃)とは大きく異なっている。また、熱水や温泉水に関する研究も温度が高く、特異なものといえる。

岩石-水相互作用に関する研究のほとんどは、野外データの一部を検証するためにバッ

チ試験により行われている。また、多くの研究が平衡論が前提として行われており速度論的に論じているのは僅かである。しかし、いずれも実験の前提条件として、あるいは、実験結果として水質について記載しているが、水質自体の変化を扱ったものは少ない。

### (3) 化学反応・物質移動のモデル化に関する研究

開発された化学反応・物質移動に関するモデルでは、分配係数の概念が用いられている。これは、計算が容易であることや、分配係数の推定に簡単なバッチ吸着実験からのデータを使用することができるという利点を有している。しかしながら、分配係数は固体表面と溶液間の可逆的吸脱着反応を一つのパラメータで平衡論的に扱っているため、複数の競合イオン種や反応性物質を含み、かつ、その濃度が時間的空間的に変化するような場では、これに基づく予測は必ずしも妥当なものとはなっていない。このため、現在、化学反応・物質移動のモデル化においては化学反応をより現実的に考慮することが行われている。このようなモデル化の趨勢のなかで、直接法と2ステップ法による化学反応と物質移動の結合が行われており、一部速度論的な扱いも行われている。しかしながら、現状では、物質移動に組み合わせる化学反応の取扱いは未だ初歩的な段階にあるといえる。また、形状及び化学反応が複雑なものに適用される2ステップ法においては、計算時間の短縮のための計算効率の向上が実際の面での課題となっている。

### (4) 既往の研究における問題点

これまでに示したような水質形成に係わる研究の現状については、次の様にまとめることができる。

- ・ 定性的に論じられているものが多く、水質形成について定量的に研究されたものが少ない。
- ・ 研究が単一鉱物や特定の環境を対象に行われているので、反応間の相互作用が必ずしも明確ではない。
- ・ 地表あるいは地下浅部を対象としており、地下深部を対象とした研究が少ない。
- ・ 岩石と水が平衡状態にあることを前提に研究されているので、水質形成に至る過渡的な状態を定量的に把握したものが少ない。また、平衡状態の変化に対する緩衝作用の研究も少ない。
- ・ 物質の移動を組み合わせたモデルは、初歩的な段階であり、実験データや観測事実

との比較・対照もなされていない。

地層処分が具体化される時点においては、候補地の水文地質環境を説明するため、その適切なモデルを作成する必要がある。そのモデルには、涵養源や流出点のように地下水を流れとして捉えたものに加え、地下水の年代学や水質の形成論のような地球化学的なものも含まれるべきである。

したがって、処分環境における地下水の水質形成過程や廃棄体が地下深部の水質に与えるファクターとその影響を明確にすることが、地層処分の評価に残された課題といえる。

### 6.3 試験項目の抽出

地下水は涵養源から浸出点へと連続して循環しているが、深層被圧地下水の循環速度は約数100年から数1000年といわれており、さらに、帯水層と難透水層間における間隙水と循環水の交換速度はさらに遅いであろう。このような場合には、岩石と地下水の相互作用における反応は、平衡論で記述することが可能と考えられる。6.2(1)～(2)に示した研究の多くは地表近傍の反応が速やかに進む環境で、平衡論が成立するとの前提の下で実施されてきた。

これに対し、6.2(4)で述べたように、地層処分が具体化される時点においては、候補地周辺の水質形成モデルや、処分行為がその水質に与える影響の予測が重要になる。しかしながら、処分場の稼行時には、反応が平衡に達する前に環境が変化することが予想され、平衡論のみで水質変化が記述できるかが問題となる。

したがって、GEOCHEM では、これらをふまえて、以下に示す項目を最終的な目標として地下水の水質形成に関わる諸問題を動的試験系で検討する。

- ①地下深部では一般的に地下水と岩石は化学的に平衡状態にあると考えられているが、反応系における水の滞留時間が短かったり反応自体が遅ければ、平衡論の適用性自体が問題となるため、これについて検討を行う。
- ②掘削により人為的に平衡状態が乱された場合、たとえば、地下深部への酸素や炭酸ガスの供給や、処分場からの腐食生成物の漏出、あるいは地下水の流れが変化した場合における地下水の水質変化についての解答を用意する。
- ③準安定相の挙動が水質に与える影響を明確にする。
- ④コロイドや大粒子の運搬について、平衡論の適用性と関連して検討する。

## 6.4 試験計画

### (1) 試験目的

6.3に示した項目を検討するためGEOCHEMでは、反応量を指標とした岩石-水反応試験を行い、水質変化を連続的に測定することにより、一般的な地下水の水質形成から処分環境での水質形成や処分による水質の変動を論じ、最終的にはファーフールドとニアフールドを含めた水質形成モデルを構築する際のデータを提供することを目的とする。

### (2) 試験の概要

試験装置は、岩石(鉱物)試料を詰めたカラム型反応セルとし、これに水を循環させ、その水質を連続的に測定する。装置は、温度、圧力、雰囲気、pH、Eh、流量等が制御できる仕様とする。試験は常温常圧下で単純な反応系を対象に行う基礎試験と実際の処分環境を模擬した反応系で行う応用試験からなる。GEOCHEMは、現時点においては模倣できる装置が存在しないため、試験自体や試験装置のフィージビリティについては事前に予察試験を行って確認する必要がある。

#### (a) 基礎試験

代表的な造岩鉱物を用いて、特定鉱物/水反応による水質を測定し、研究の基礎データを整備する。また、我が国の地質状況に合わせて岩石を模擬した数組の鉱物組み合わせを用い、複数鉱物/水反応試験を行い、その水質特性を測定し、鉱物が相互に与え合う影響について検討する。さらに、実際の岩石を粉碎した試料を用いて岩石/水反応による水質変化を測定し、先のデータと比較検討することで、副成分鉱物等の水質への影響因子を抽出する。

なお、基礎試験は常温常圧下で実施する。

#### (b) 応用試験

応用試験では、温度圧力をパラメータとした水-岩石反応や化学環境の変化による水質変化の測定や異なった媒体を通過することによる水質の変化を測定する。さらに、初期水の化学成分を制御したりコロイドを添加した試験を行い、緩衝材、鉄、ガラス等、処分により地下深部に持ち込まれた外乱因子が水質に与える影響を検討する。

応用試験は、原則として処分環境を模擬した温度圧力(約40~50℃, 100atm=10MPa)下で、化学的雰囲気を調整して実施する。

(3)試験スケジュール

GEOCHEM試験の工程を図6.4.1に示す。図では、最も早い予察試験の開始時期を初年度とした相対的表記としてある。

Table 6.4.1 Time schedule of GEOCHEM

	1	2	3	4	5	6	7	8~
基本試験（単純系での水質） ・予察試験 ・装置製作 ・本試験								
応用試験（処分環境での水質） ・予察試験 ・装置製作 ・本試験								

(単位：年)

## 第7章 構造モデルについての試験研究の計画

### 7.1 ニアフィールド構造モデルについての試験研究の計画

#### 7.1.1 試験研究の目的

本試験研究では、ENTRYの他の試験研究で取り扱われていない決定論的に発生する事象の中から、人工バリアの構造上の変化に関する事象を抽出し、現象解明、そのモデル化およびモデルの検証を行うことを目標とする。

そのために本試験研究では、

- ① 事象の抽出
- ② 構造変化過程の推定（イベント・シーケンス構築）
- ③ 試験方法および試験装置の検討
- ④ 試験実施

の4ステップで試験研究を展開する。

#### 7.1.2 試験研究概要

##### (1) 事象の抽出

試験研究の対象となる事象の抽出に際しては、動燃事業団殿より受領した

WASTE/REPOSITORY/GEOLOGICAL ENVIRONMENTAL INTERACTION

(Multi-barrier performance)

に記載されている事象を対象とした。

抽出に用いた基準は、

- ① ニア・フィールドに関する事象(NEAR-FIELD PHENOMENA)
- ② 人工バリアの構造（形状、特質）変化に関する事象
- ③ 核種放出に直接関与しない事象
- ④ 構造変化の挙動が不明な事象（様々な挙動が考えられる事象）
- ⑤ バリア性能への影響が大きいと推察される事象

の5つである。

## (2) 抽出された事象

### (a) 水素ガス発生 (H<sub>2</sub> gas production)

処分容器である炭素鋼製のオーバーパックは、処分孔内で地下水により腐食する。その腐食形態は、処分場建設時および操業時に持ち込まれた酸素を消費してしまうと水素ガス発生型の腐食に変わる。この様にして発生する水素ガスの挙動およびその影響に関しては十分な知見が得られていない。しかし、その挙動を推定してみると、

- ① 蓄積による水素ガスの局所的放出
- ② 水素ガス薄膜による腐食速度の低下

などが、考えられるのでこの現象の解明は、不可欠である。

そこで本試験では、

- ① 水素ガス蓄積モード（蓄積および放出の形態等）
- ② 水素ガス発生モード（発生量の経時的変化の有無等）

に関する試験を行う。

本試験研究の名称は、HYDROGENとする。

### (b) 熱-水理-応力の三連成(Coupled thermal-mechanical-hydrological process)

処分孔再冠水後の人工バリア内の伝熱（廃棄体による発熱）、水分の移動、および応力の分布が、緩衝材およびオーバーパックの特質や構造に何らかの影響（熱による緩衝材のイライト化や不均一な応力分布によるオーバーパックの移動、変形等）を与えると考えられる。即ち、人工バリアの構造、特質の変化につながる。

ただし、本試験研究は既に実施されているので本報告には、記載しない。

### (c) 緩衝材流出

「地下水透水抑制機能」および「放射性核種吸着保持機能」の2つのバリア機能を担う緩衝材が、処分孔から流出することは明らかにバリア性能の低下につながる。

処分孔内岩盤壁面での亀裂の存在が、かなりの確率で予想されるのにも関わらず緩衝材流出に関する知見が少ないのが現状である。

したがって、緩衝材流出という現象を解明し、影響を及ぼす因子をパラメータとする構造モデルを開発し、その影響を評価していく必要がある。

本試験研究の名称は、BENTFLOWとする。



### 7.1.3 構造変化過程の推定（イベント・シーケンス構築）および試験範囲

#### (1) 水素ガス発生（HYDROGEN）

本試験研究に関して構築したイベント・シーケンスをFig.7.1.3-1 に示す。  
点線で囲まれた部分が、試験範囲となる。

#### (2) 緩衝材流出（BENTFLOW）

本試験研究では、流出現象に対して摂動となる事象に関してイベント・シーケンスを構築した。Fig.7.1.3-2 にイベント・シーケンスを示す。

試験範囲は、緩衝材が亀裂内の水と接触して膨潤して亀裂に侵入し、地下水により運び去られるまでとする。

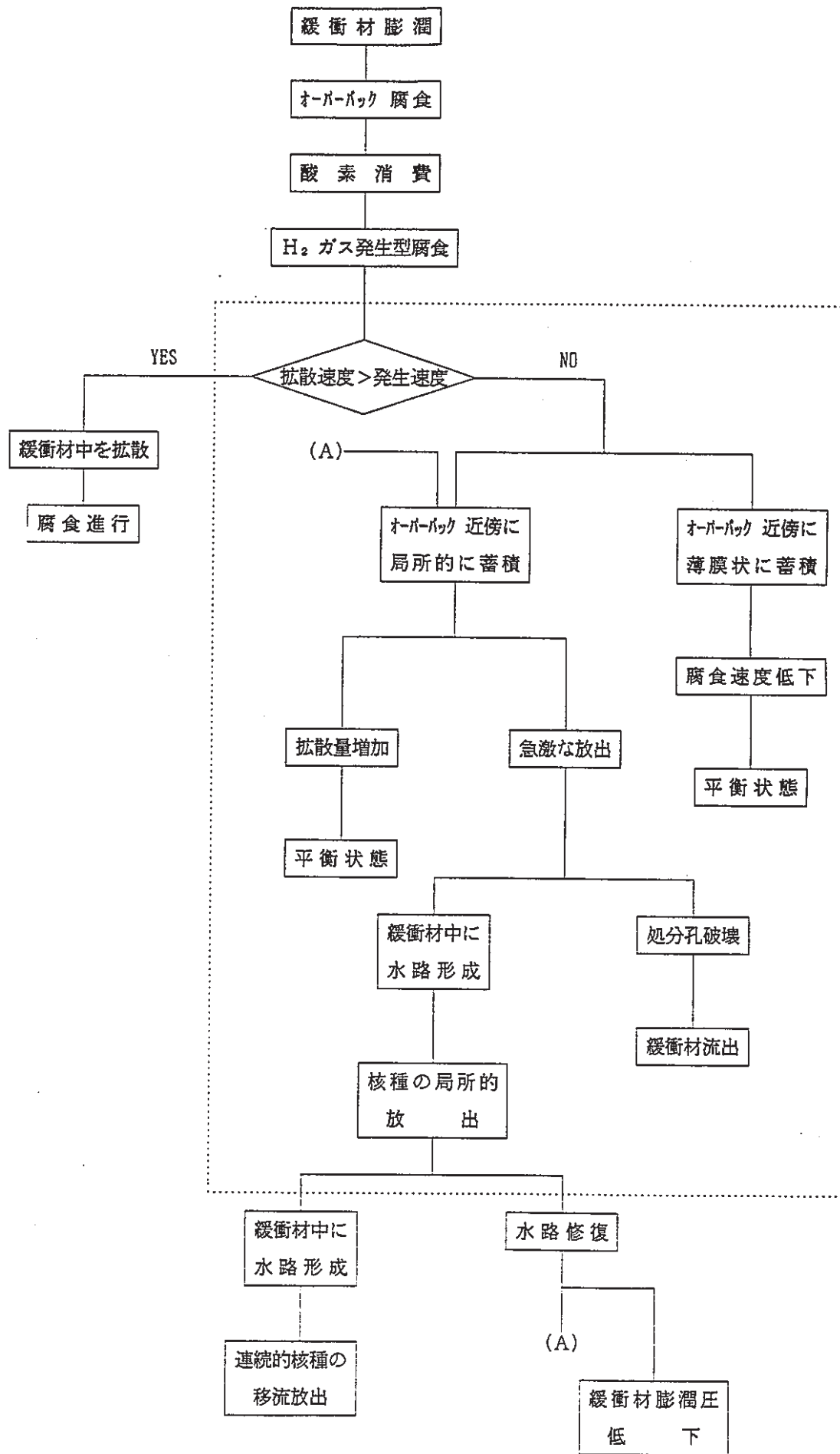


Fig. 7.1.3-1 Event sequence on H<sub>2</sub> gas production

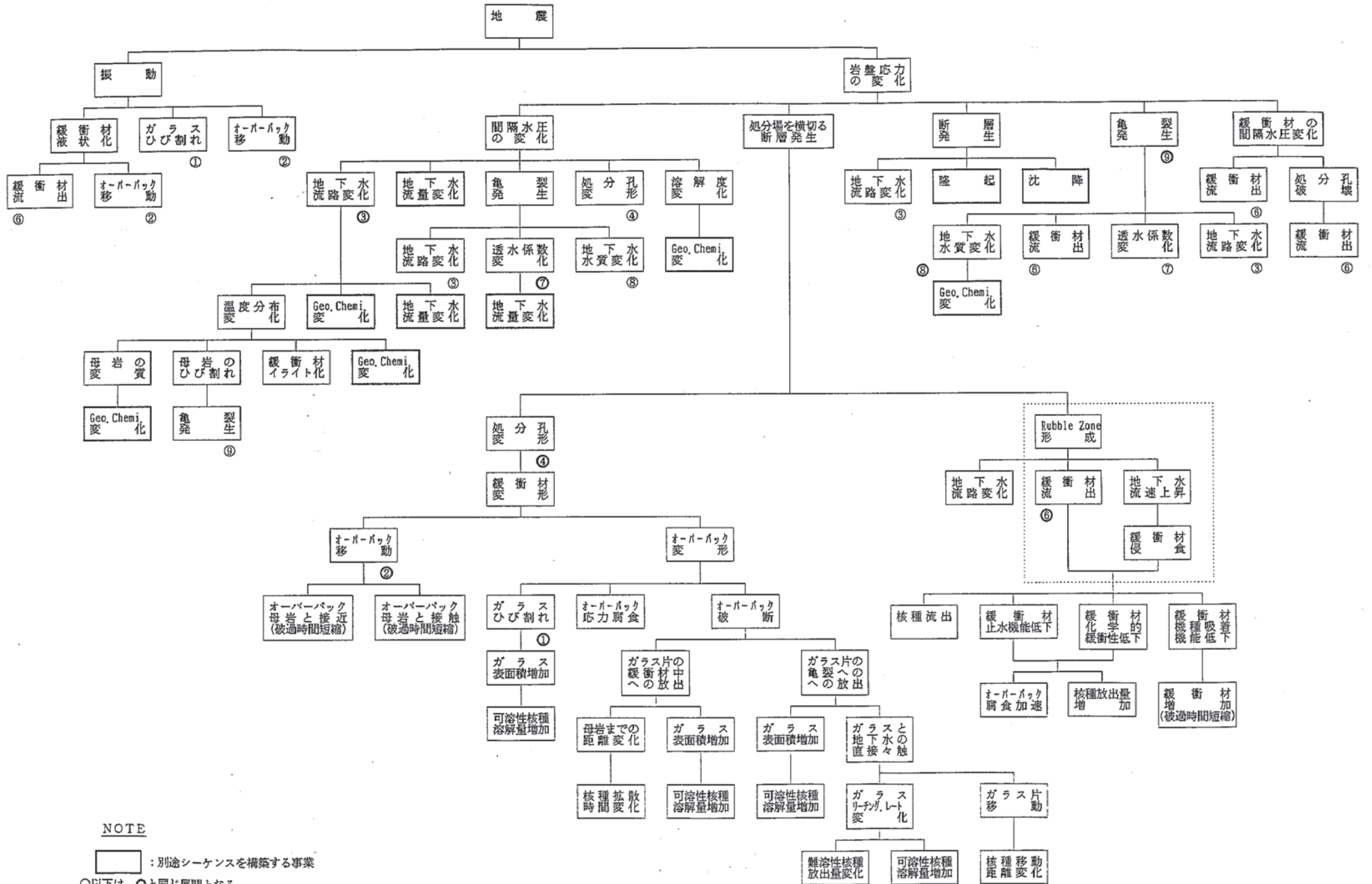


Fig. 7.1.3-2 Event sequence on earthquake

## 7.2 ファーフィールドの特性評価試験研究の計画 (MACRO-3D)

### 7.2.1 特性評価方法の現状と問題点

#### (1) 特性評価方法の現状

地層処分の性能評価を行う際のパラメータ値を決める上で重要な点は、少ないサンプリングにより数多くの有用なデータを引き出す方策の確立である。そのパラメータデータは原位置における透水試験、サンプリングによる室内試験等により決めていくものと思われる。

現在あるCharacterization手法としては地点パラメータを求める揚水試験法、分布パラメータを求める逆問題、Stochasticなアプローチである地盤統計手法がある。

#### (2) 特性評価方法の問題点<sup>1)</sup>

揚水試験法に関しては、低廉で簡便な図式解法が適応可能なため多用されているが、現実の地下水系においては満足され難い仮定に基づいていることから、結果に不確実さが含まれることになる。

逆問題は地域観測網による定期的な地下水位観測で得られたデータに基づき透水係数等を求める方法で、地下水位を決定論的に取り扱う直接法と観測誤差を導入する間接法に区分される。直接法は確率論的に発生する現象や誤差を考慮しないため、観測値に誤差が含まれると透水量係数は過剰に応答し、解の発散や一意的な解が得られない欠点がある。

間接法は観測値が量的に不十分の場合にも適応でき、地下水位の透水量係数に関する微分を必要としない長所を有する。しかしながら、岩盤の不均質性に十分対処できず、定性的な解釈を行うに留まっている。

地盤統計手法とはサンプリング領域の場の特性とサンプリング点の幾何的な配置より、ある推定点に対して最適な重みの組を計算し、推定値を計算するものである。

### 7.2.2 特性評価方法の研究の方向

5.2 で述べたように物質移動現象の解明は今後統計的なアプローチが主流になっていくであろう。そこでは、空間的なズレにより当該パラメータがどの程度変化するのかいわゆる自己相関関数を求めることが必要になってきている。実はCharacterizationについても

前述の地盤統計手法ではこの自己相関係数を求めることが7.2.1(2)のサンプリング領域の特性把握に他ならず、両者は表裏一体の関係にあるといえよう。

したがって特性評価方法についても地盤統計手法を中心としてその精度の向上、信頼性の確認さらには訓練のための試験・研究開発が必要になってくる。

### 7.2.3 MACRO-3Dにおける研究の目的とその概要

#### (1) 研究の目的

多孔質媒体中の水理物質移動現象に関しては、現実の地層が不均質を有しているために、統計論的なアプローチを中心として地層のCharacterizationを行う必要がでてきた。また、MACRO-3Dにおいては、異岩種の混在による地質特性が不連続な体系の地下水理・物質移動について観察が可能である。したがってMACRO-3Dにおける研究の目的とは以下の通りである。

- 1) 不均質多孔質媒体中のCharacterization手法の確立
- 2) 不均質多孔質媒体中の物質移動現象の観察

#### (2) MACRO-3Dの研究概要

Characterization手法としては、前項で述べた通り揚水試験法、逆問題、地盤統計法があり、このうち地盤統計法が近年有力となりつつある。MACRO-3Dにおいては、パラメータ値が既知の体系を用いて、各々のCharacterization手法を用いてパラメータ値の推定、真値との比較を行い、各々の手法の精度向上、訓練を図るものとする。

一方、異岩種が混在し、地質特性が不連続な体系における地下水理・物質移動を予測するモデルについても、その検証は終了していない。MACRO-3Dは、その体系が極めて大きいことから、上記の不均質体系を十分再現可能である。

### 7.2.4 MACRO-3Dの試験設備

MACRO-3Dの要件は、原位置を模擬するためにある程度の大きさを有すること、透水係数の測定が可能なこと、系全体の透水係数分布は自然の状態を模擬した値であることである。

以上の背景からMACRO-3Dは3次元に拡張された水槽内にガラスビーズ等を充填

し、透水係数の測定及び水流並びにトレーサの濃度分布が測定できるシステムとする。トレーサはNaCl、センサーは上面から垂直に挿入するものとする。

#### 7.2.5 試験研究計画

MACRO-3Dの試験項目としては以下のものがあげられる。

- 1) 試験が可能であることの確認
- 2) 地層のCharacterization手法手法の確立
- 3) 不均質多孔質媒体中の物質移動現象の観察

これらについて、3年以上のスケジュールで試験を実施することにする。

## 第8章 性能評価シナリオ試験研究の計画

### 8.1 試験研究の目標

ENTRYにおける試験研究の一連の流れにおいて基本シナリオがその前提条件になっている。さらに、この基本シナリオの中に確率論的に発生する事象は含まれていない。

しかし、これらの確率論的に発生する事象が、基本シナリオを覆したり、変動させたりうると考えられる。そこで本試験研究では、これらの事象に着目し、その基本シナリオへの影響を評価することを目的とする。

本試験研究は、

- ① 事象を網羅するためのイベント・シーケンスの構築
- ② 事象群からの重要な事象の抽出
- ③ 試験方法および試験装置の検討
- ④ 試験の実施

の4つのステップで実施する。

### 8.2 試験研究概要

#### 8.2.1 事象の抽出

本試験研究では、バリア機能に影響しそうな事象を抽出し、動燃事業団殿より受領した

Lists of events and processes which should be considered in H3 performance analysis (H3性能分析において考慮すべき事象とプロセス)

をSKB/SKIの手法でいうところのEXTERNAL EVENTとして扱い、

- ① EXTERNAL EVENTとバリア機能に影響しそうな事象
- ② バリア機能に影響しそうな事象とバリア機能

以上2点の間をそれぞれ埋める形でイベント・シーケンスを構築した。

事象の抽出に際しては下記の人工バリアに期待されるバリア機能に影響しそうな事象を検討し、抽出した。

- ① 緩衝材の「地下水透水抑制機能」

- ② 緩衝材の「放射性核種吸着保持機能」
- ③ オーバーバックの「放射性核種の閉じ込め機能」
- ④ 廃棄体自体の「放射性核種溶出制限機能」

### 8.2.2 抽出された事象

人工バリアの変形や破損を考慮して「処分孔剪断」を抽出した。処分孔が剪断された場合を想定すると人工バリアの挙動としては、

- ① 緩衝材の移動・変形
- ② オーバーバックの移動・破損
- ③ ガラス固化体のひび割れ・放出

が考えられる。

そこで本試験研究では、ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材、および岩体からなる試験体に剪断力を加え、

- ① ガラス固化体の破損状況
- ② オーバーバックの破損状況
- ③ 緩衝材の変形・流出状況

を観測する。

本試験研究の名称は、BORESHEARとする。

### 8.3 イベント・シーケンス構築および試験範囲

本試験研究で取り扱う「処分孔剪断」という事象に対して「処分場にスリップをを伴う断層が発生して処分孔が変形する」という状況を想定し、動燃事業団殿より受領した先述のリストから「Faulting/seismicity」（断層運動／地震）をExternal Eventとしてイベント・シーケンスを構築した。その結果、Fig.8.3-1 に示したイベント・シーケンスが、得られた。特に「処分孔変形」以下のシーケンスに関しては、詳細に事象を検討し盛り込んだ。

また、試験研究の範囲に関しては、Fig.8.3-1 で点線で囲まれた部分とする。



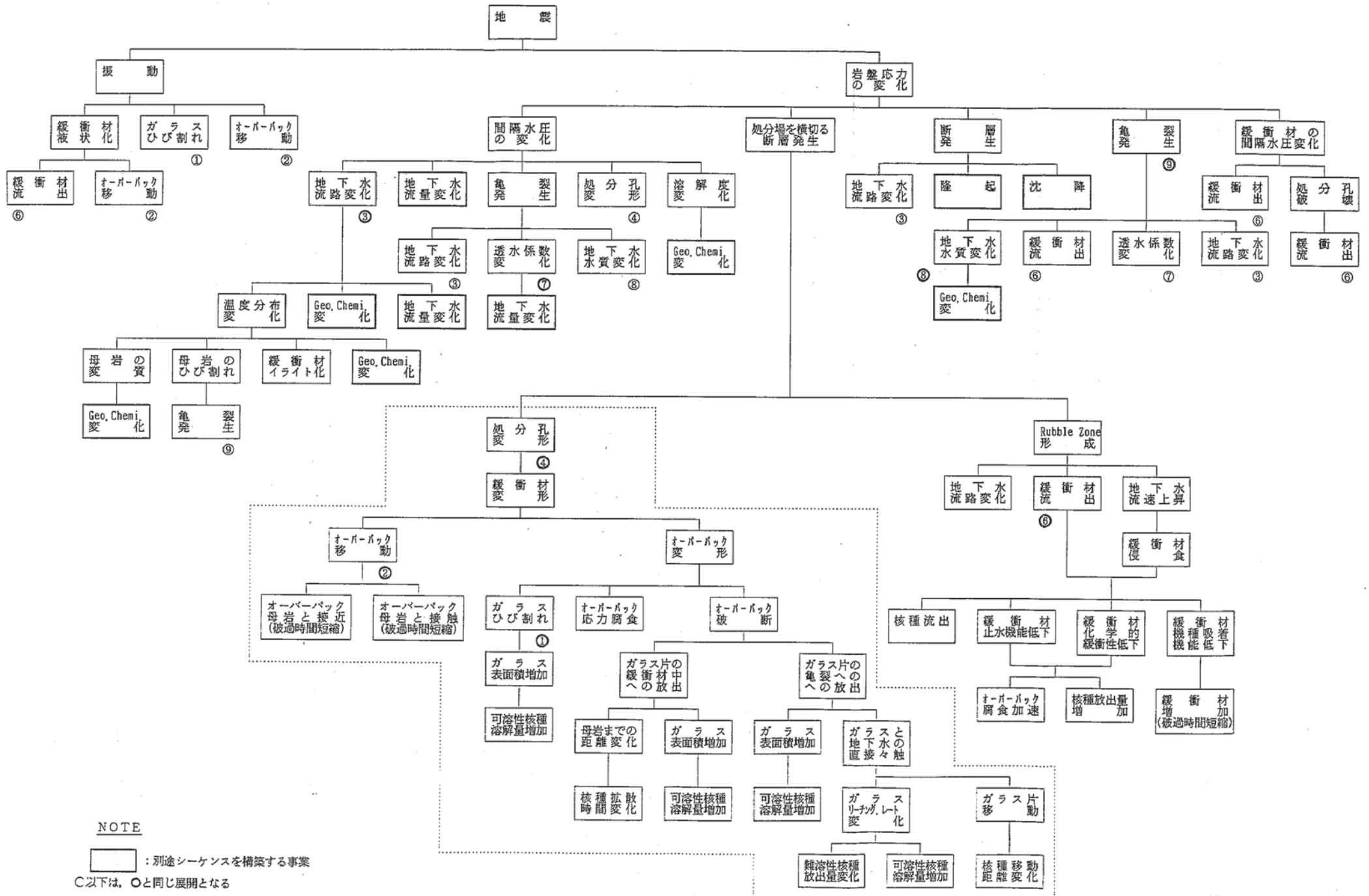


Fig. 8.3-1 Event sequence on earthquake

## 第 2 部 試 驗 設 備 設 計

## 第 2 部 試験設備設計

### 第 1 章 I M A G E における試験設備設計

本章では、I M A G E を構成する M A S T R 及び G E O C H E M のそれぞれについて、試験研究の目的、内容及び設備について検討を行う。

#### 1.1 M A S T R における試験設備設計

##### 1.1.1 試験研究の段階及び各段階での試験内容と実施計画

第 1 部第 5 章で抽出したテーマは、次の 4 つである。

- ・亀裂系における粘性の影響
- ・緩み域の影響
- ・亀裂中への緩衝材の侵入の影響
- ・緩衝材の密度の不均一性の影響

この項では、まず、前項で抽出した試験テーマを必要な試験装置の形態により分類する。次に、本試験を求められる精度で行う為に必要な予察試験及び機能確認のための予備試験の項目を抽出し、それらの関連を整理し、試験の全体像を明らかにする。

##### (1) 試験テーマのグルーピング

水の粘性の影響を見る試験は、ガラス固化体、緩衝材、その外側に亀裂系媒体が存在する体系中を流れる水の性質をより厳密に扱い、粘性の項を考慮することによって現れる緩衝材／母岩界面近傍における流速分布の違いが放出フラックスに与える影響に着目している。そこで、この試験を行う装置では、流動解析から予測される流速場を単に模擬することはもちろん、流速の影響が顕著に現れる条件を適切に実現できる機能も備えていることが望ましい。

緩み域の影響は、緩み域の存在によって、母岩中の流速分布が変化し、それによってフラックスが変化することに着目した試験である。これは、多孔質媒体中で起こる現象であるが、水の粘性の影響を見る試験と同様に流速分布とフラックスの関係を見る試験と捉えられることから、この試験の装置に必要な機能は、やはり流速場を適当に与えることができる機能であり、同様の装置で試験が可能である。

これに対し、亀裂中への緩衝材の侵入の影響を見る試験、緩衝材中の密度の不均一性の影響を見る試験は、いずれも、その体系の形状自身が持つフラックスへの影響に関心がある。

以上から、粘性の影響、緩み域の影響の試験は、流速分布の影響としてまとめて同じ試験装置で実施することにし、試験としては次の3種類に集約する。

- ① 流速分布の影響
- ② 亀裂中への緩衝材の侵入の影響
- ③ 緩衝材の密度の不均一性の影響

## (2) 試験装置の概念

### (i) 流速分布の影響に関する試験

試験は、固化体、緩衝材、母岩を模擬した体系を作り、緩衝材／母岩界面から放出されるトレーサのフラックスを、この近傍での流速分布を変化させながら測定するものである。この試験でパラメータは次の3点である。

- ・母岩中の流速
- ・界面近傍の流速分布
- ・母岩と緩み域の空隙率

試験装置の中に流速分布を与えるときに、実際に粘性によって流速分布を与えようとすると、速度境界層が厚くなるような極めて小さな流速の制御技術、その中で流速場を乱さずにサンプリングをする技術、さらに、試験期間を著しく長期に亘らせないための技術が必要とされる。そこで、これらの困難を避けるために、この現象を観察するのに直接必要なのは流速分布を与えることであることに留意し、透水係数の異なる媒体を層状に配置することによって段階的に変化する流速分布を与えることにする。このとき、亀裂系媒体の代わりに、粘性の効果が無視できる多孔質媒体を用いれば、流速分布を制御することは容易となるし、サンプリングの際にトレーサの濃度分布を乱す程度も小さくなると考えられる。

緩み域は、透水係数が大きく、空隙率の大きい多孔質媒体を配置することによって模擬できる。

試験装置の形状に、流れの中に円筒形の緩衝材がある体系を用い、試験が長期のわたらないように拡散係数が極端に小さくはない材料を用いると、その中に流れが生じ緩衝

材中の物質移行が拡散支配でなくなる。そこで母岩中の流線が緩衝材にぶつかることのない、図1.1.1-1の体系を考えることにする。この装置で、流線方向の流速を一定とし、流線と垂直方向に速度分布を与えるものとする。

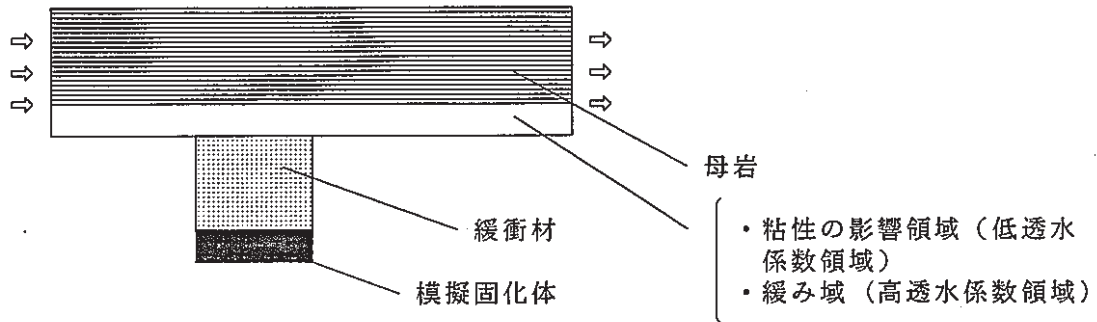


Fig. 1.1.1-1 Basic concept of the flow cell for examination of the effect of the viscosity and decompressed zone

(ii) 亀裂への緩衝材の侵入の影響に関する試験

この試験は、固化体、緩衝材、緩衝材が侵入している亀裂部分、母岩中の亀裂部分からなる体系を作り、緩衝材/母岩界面から放出されるトレーサのフラックスを、亀裂へ緩衝材が侵入した深さを変化させながら測定するものである。この試験でのパラメータは次の3点である。

- ・ 緩衝材が侵入している亀裂部分の長さ
- ・ 亀裂の幅
- ・ 母岩中の流速

母岩の健全な部分には水は流れないものと考えため、この部分は再現しない。

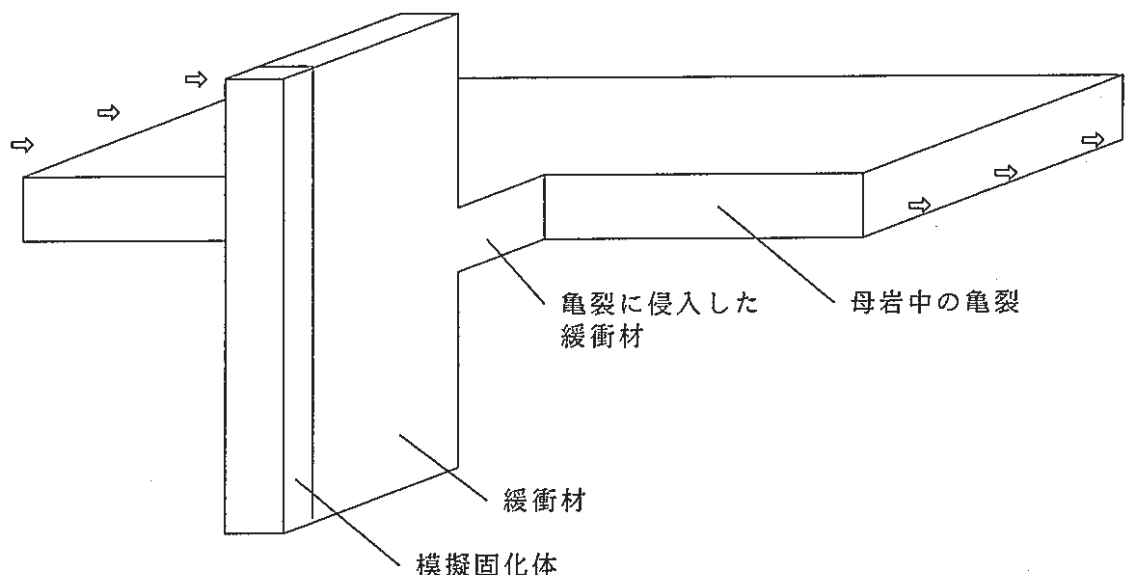


Fig. 1.1.1-2 Schematic flow cell for examination of the effect of buffer intrusion into fracture

(iii) 緩衝材の密度の不均一性の影響に関する試験

この試験は、固化体、緩衝材、密度が低下している緩衝材部分、母岩からなる体系を作り、緩衝材／母岩界面から放出されるトレーサのフラックスを、低密度緩衝材部の形状を変化させながら測定するものである。この試験でのパラメータは次の3点である。

- ・ 低密度緩衝材部分の長さ
- ・ 低密度部の幅
- ・ 母岩中の流速

この試験で、比較の基準となるのは低密度部がない場合であり、これは流速分布の影響を見る試験の基準となる条件と同一である。

試験装置も、流速分布の影響を見る試験とほぼ同一であり、緩衝材に低密度部を設ければよい。この部分へは、透水係数の大きな多孔質媒体を詰めるものとする。

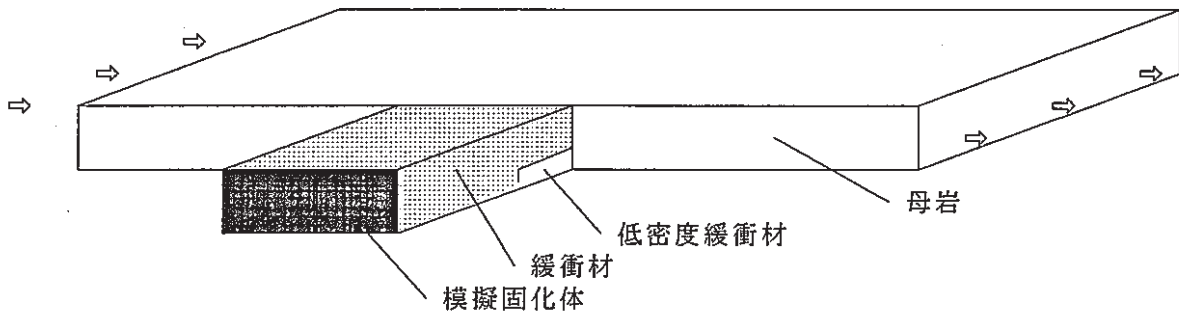


Fig. 1.1.1-3 Schematic flow cell for examination of the effect of local density decrease in buffer

(3) 予察, 予備試験, 本試験の全体像

検討は、まず入力データを得る予察試験、設計計算、及び試験に入り込む種々の要因からの誤差の大きさを見積もる計算から開始する。誤差要因については、計算により、その影響が十分小さくなる対策を選定した後、適当な規模の装置で、影響が取り除くことができることを確認する試験を行う。また、この検討から、材料の選定、選定した材料について必要な入力データを得る試験へのフィードバックも行われる。

本試験装置の製作が完了したら、本試験に入る前に、必要な機能が備えられているか、誤差要因は取り除かれているかを確認する。この作業は、単純な系での確認から、複雑な系での確認へ順次進行する。

以上の試験の流れを図1.1.1-4 にまとめる。

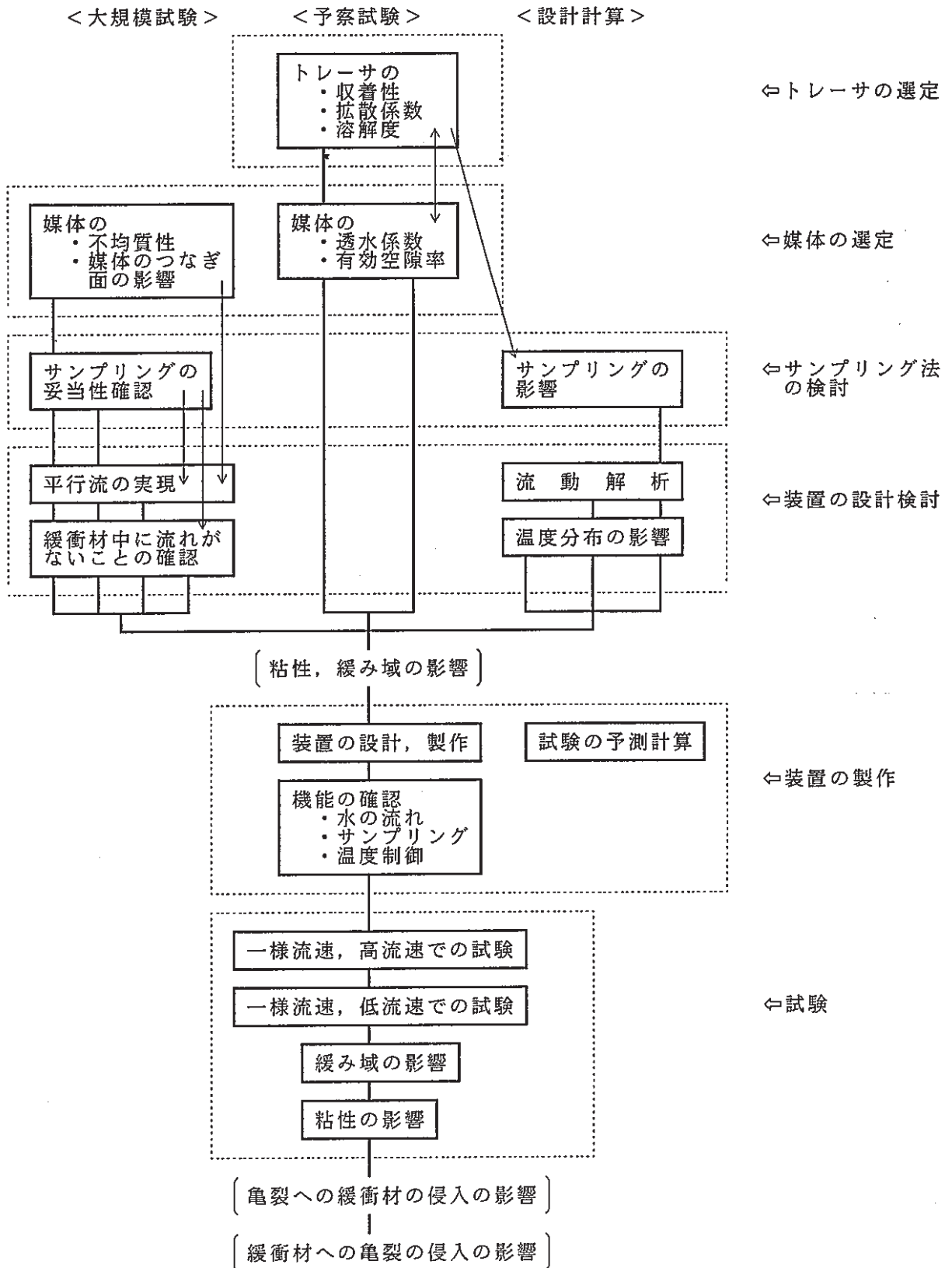
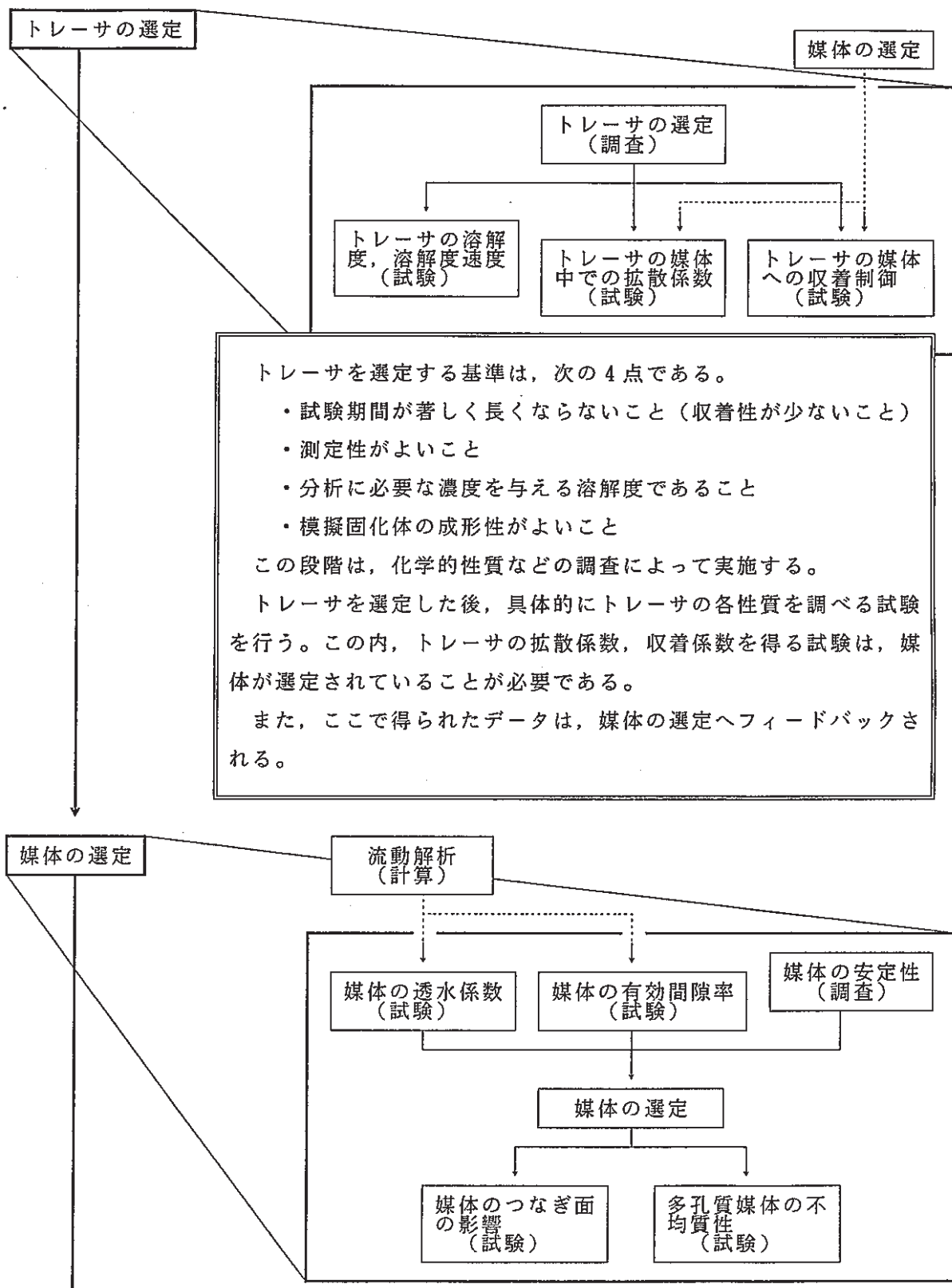


Fig. 1.1.1-4 Framwork of MASTR

また、IMAGE試験の流れは以下になると考えられる。





流動解析の結果から、媒体の透水係数、有効間隙率の目標値が与えられる。この値になる粒度、粒度分布、充填方法を試験によって決定する。

媒体が試験に使用できる前提として、液中で媒体が安定であることも考慮されている必要がある。

媒体が選定されたら、その媒体を用いて試験装置を構成する際に問題となる点について、検討を行う。

サンプリング法の検討

トレーサの選定

サンプリング法の検討  
(調査)

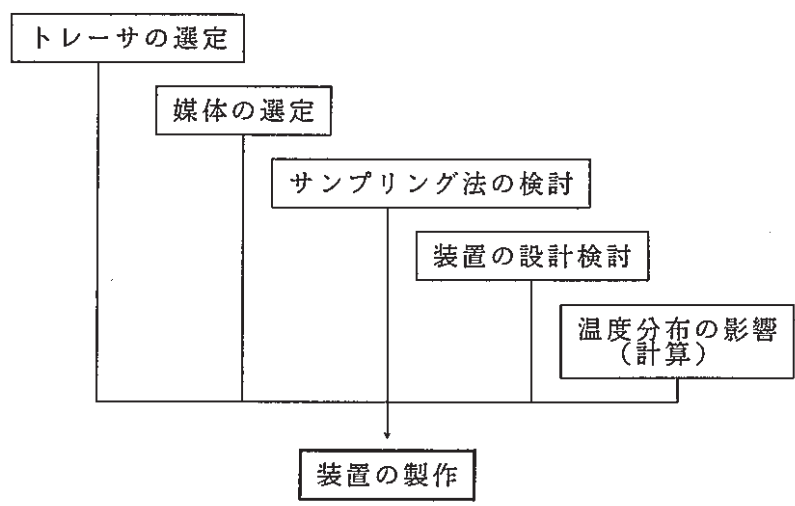
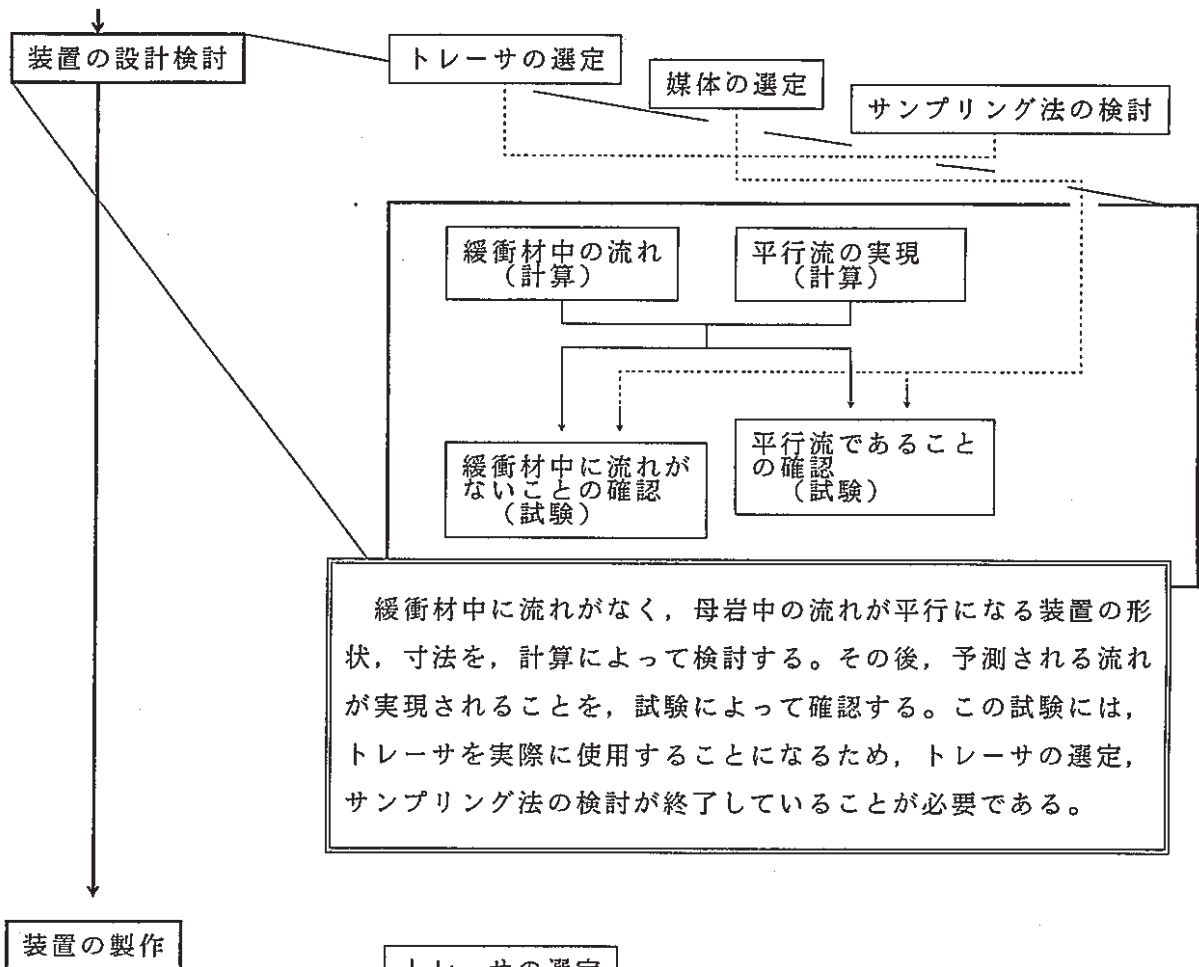
サンプリングの影響  
(計算)

サンプリング法の選定

サンプリング法の確認  
(試験)

サンプリングの方法は、流速分布、トレーサの濃度分布を擾乱しない方法を選定する必要がある。そこで、サンプリングの影響を計算で見積り、最も影響の少ない方法を選定する。トレーサの種類と測定方法によって、必要なサンプリング量が異なり、その影響にも差がでることから、サンプリング法の選定にあたっては、トレーサが決まっている必要がある。

サンプリングが、擾乱を起こすことなく実施できることは、試験によって確認する。この試験は、選定したトレーサを用いて行う。



以上の検討を経て、装置の設計作業が開始される。このとき温度分布の影響を避けるのに必要な温度制御も、設計に反映される。

### 1.1.2 本試験設置の設計

#### (1) 試験設備の仕様

本試験設備は、固化体から放出されたトレーサが、緩衝材、母岩中を移行する現象を観測するための装置であり、次の機能を持っている。

- ・空間的に多様な流速分布を設定できる。
- ・均質、不均質な緩衝材の状態を模擬できる。
- ・多孔質、亀裂系、及び一部に緩衝材が侵入した亀裂系の、母岩の状態を模擬できる。
- ・濃度分布、流速分布を乱すことなくトレーサの濃度分布を測定することができる。

試験装置の構成と候補材料を次にまとめる。

- ① 模擬固化体；（材質）  $\text{CaSO}_4^{2-}$   
トレーサは、 $\text{SO}_4^{2-}$  イオンである。
- ② 媒体；（材質） ガラスビーズ  
（透水係数）  $\text{CaCl}_2$  20 % 溶液
- ④ 設定流速；（実流速）  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  ( m/sec )
- ⑤ 温度制御；温度分布が空間的に一様であること。  
試験期間中、一定の温度であること。

装置の、試験設備概念図を図1.1.2-1 に示す。また、フローセルの部分の例を図1.1.2-2, 1.1.2-3 に示す。

#### (2) 測定項目、制御条件

試験で測定する項目を以下に示す。

- ・緩衝材／母岩境界付近を中心に、濃度分布を得るのに必要な地点における、トレーサ濃度
- ・装置下流側出口におけるトレーサの濃度

試験期間中を通して、試験装置で制御する必要がある条件を以下に示す。

- ・流速の空間的、時間的分布
- ・模擬固化体表面のトレーサ濃度
- ・温度分布

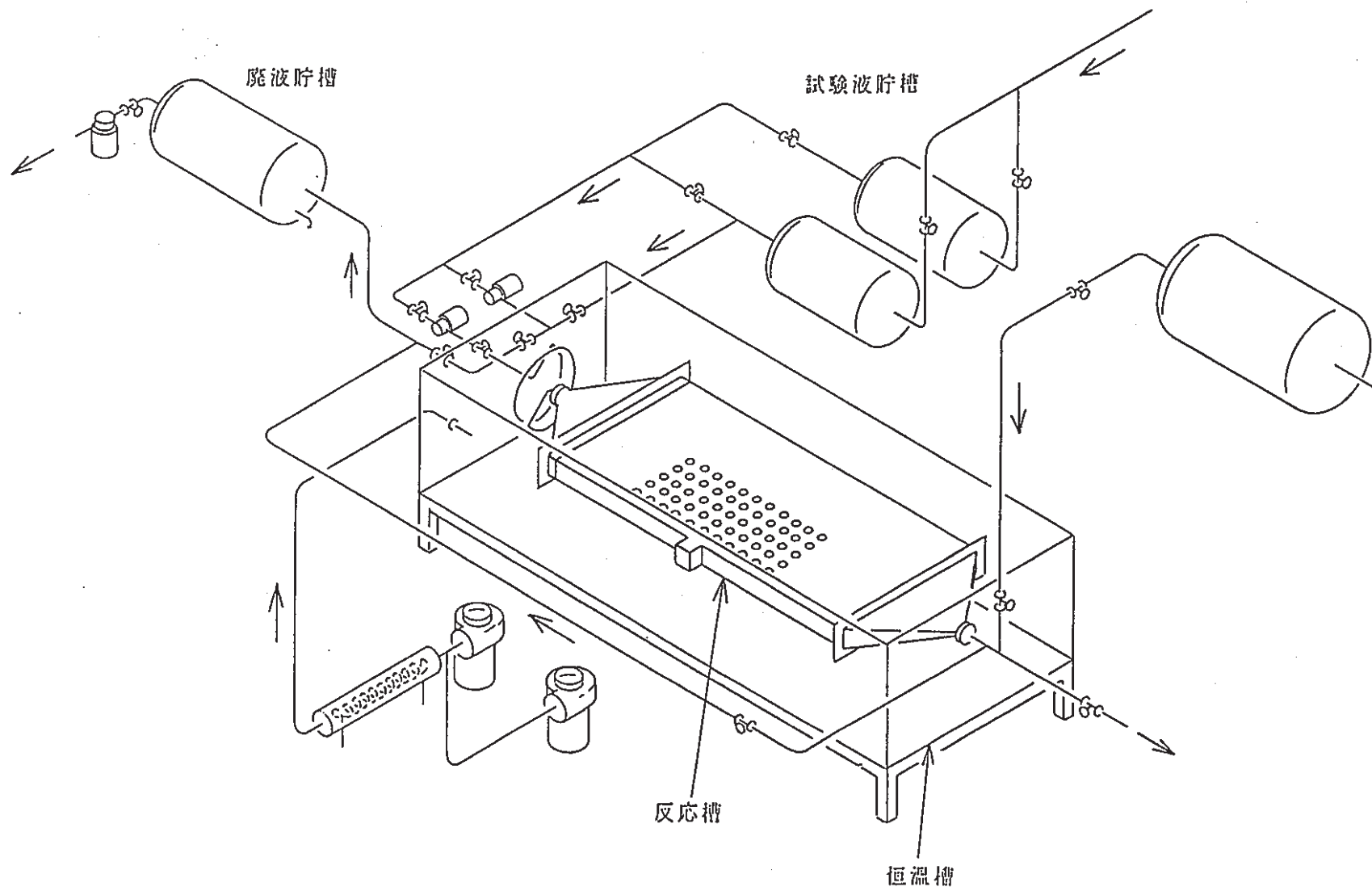


Fig. 1.1.2-1 Perspective drawing of the apparatus

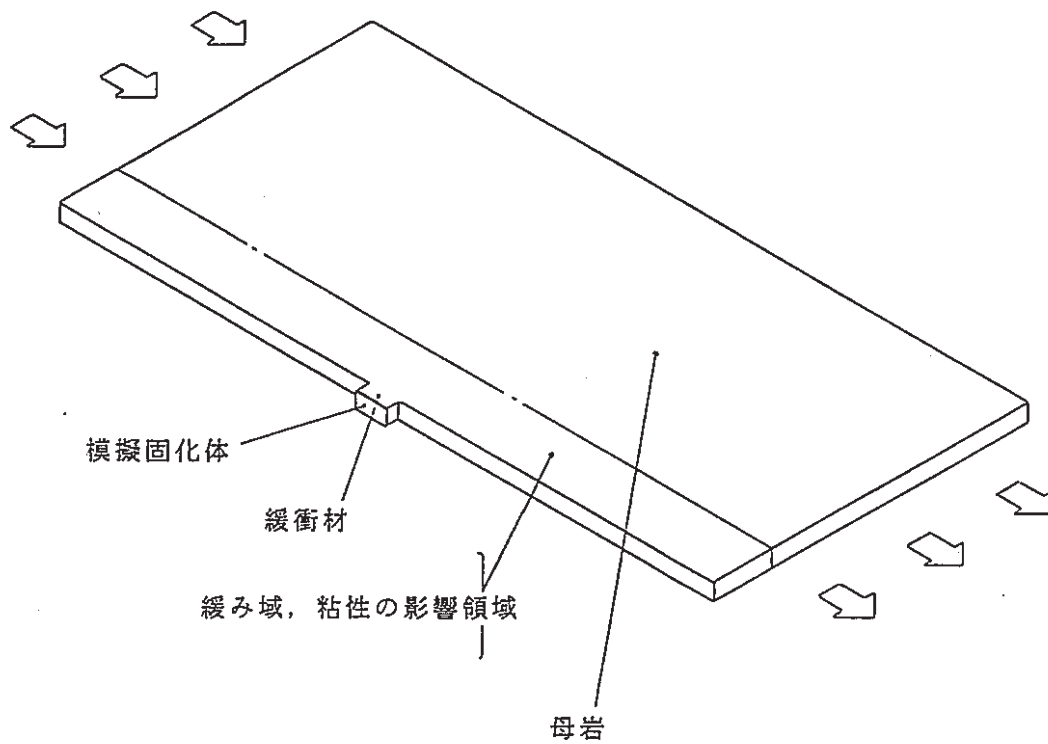


Fig. 1.1.2-2 Perspective drawing of the flow cell for examination of the effect viscosity and decompressed zone

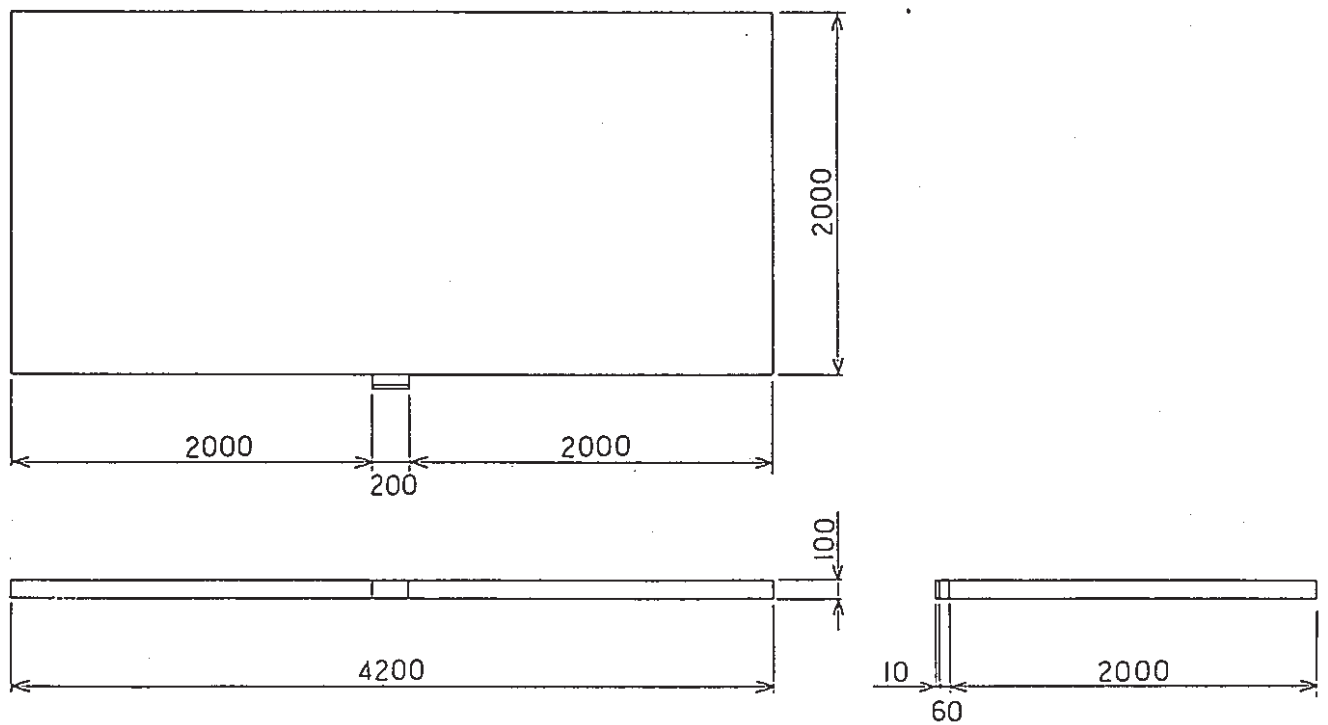


Fig. 1.1.2-3 Configuration of the flow cell for examination of the effect of the viscosity and decompressed zone

## 1.2 GEOCHEMにおける試験設備設計

### 1.2.1 試験研究の目的

地下水の水質形成過程における非平衡反応や準安定相の介在する反応及びコロイド等の粒子輸送は、動的な状態において検討されるべき課題である。これらの課題についての回答は、将来処分候補地の水理地質データが得られたときに、その水質形成をモデル化するための重要な資料となる。また、処分行為によって地下深部に持ち込まれる物質の化学成分等が地下水の水質に与える影響の予測に際しての参考となる。

GEOCHEM試験では、岩石と水の反応量を指標として、環境を連続的に変化させた動的な状況下における水質変化の性状や水質に影響をおよぼす因子を把握し、水質形成モデルを構築する際のデータを提供することを目的とする。

### 1.2.2 試験研究の段階及び各段階での試験内容と実施計画

GEOCHEM試験は、鉱物や岩石と水の反応特性試験を把握するための基礎試験と地下深部や処分環境を模擬した条件で行う応用試験とから構成される。また、試験自体のフィジビリティを確認するための基礎的な実験および分析方法や環境制御法についての検討を予察試験として実施する。予察試験は、基礎試験に対応した予察試験Ⅰと応用試験に対応した予察試験Ⅱに分けられる。

予察試験Ⅰ及びⅡ、基礎試験、応用試験に、試験装置の設計製作を加えたGEOCHEM試験の概念的フローを、図1.2.1に示す。また、各試験の実施スケジュールを、予察試験の着手を初年度として表1.2.1に示す。

#### (1) 予察試験Ⅰの概要

GEOCHEM試験では、反応の進捗やコロイドの移動に伴う水質変化の遷移状態を把握する必要があるため、反応を加速する目的で一般的に行われているような粉体状の試料を用いることは望ましくない。そこで、現象の把握に十分なほどの岩石—水反応が観察され、かつ、コロイドの移動が規制されないような試料の粒径や溶液の量を決定することが必要である。予察試験Ⅰでは簡単な鉱物の浸出試験を行って、適正な試料の粒径、固液比、溶液の供給量等を検討する。

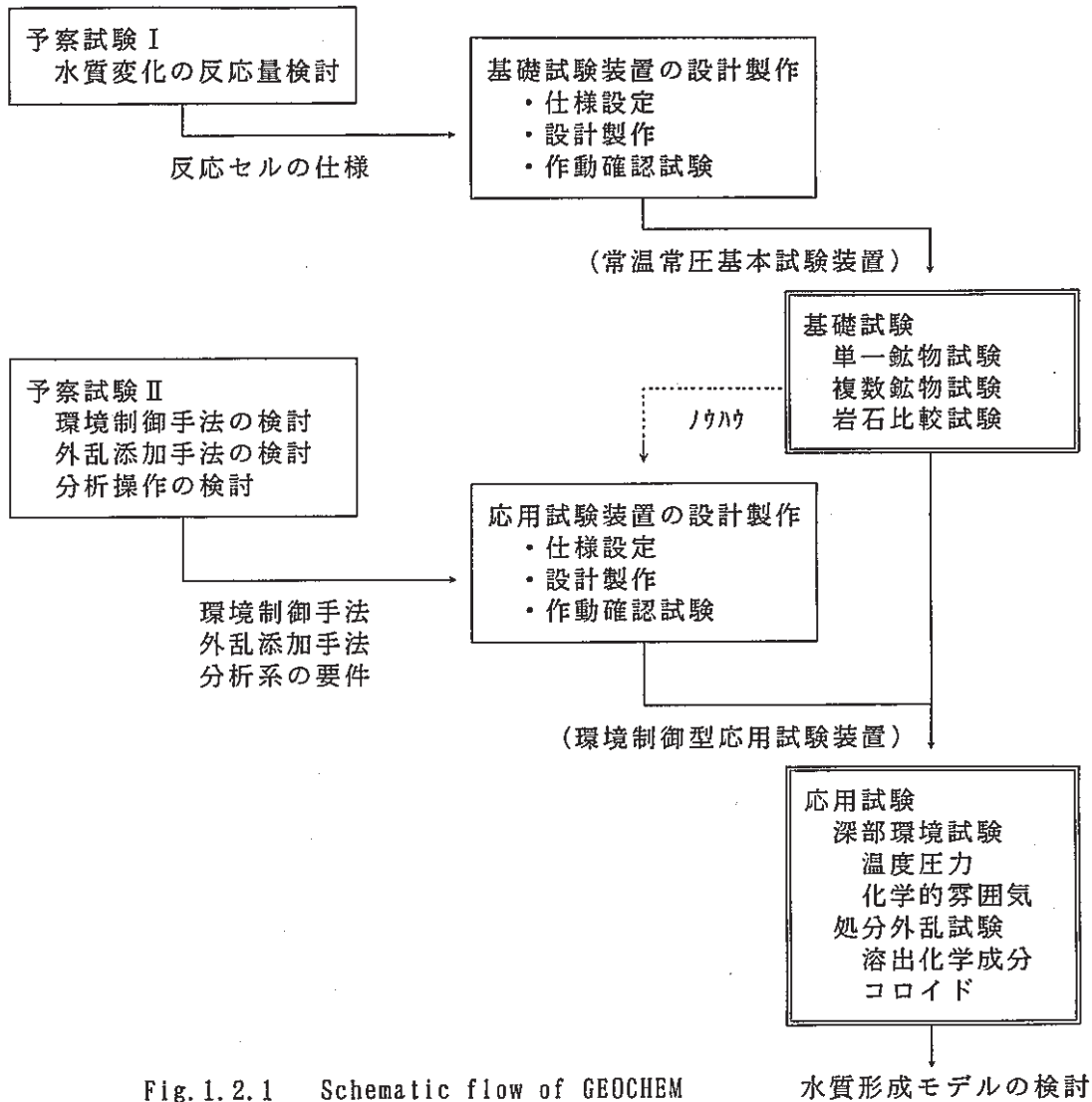


Fig. 1.2.1 Schematic flow of GEOCHEM

水質形成モデルの検討

Table 1.2.1 Time schedule of GEOCHEM

	(year)							
	1	2	3	4	5	6	7	8~
予察試験								
I 水質変化の反応量検討	■							
II { 環境制御手法の検討		■						
外乱添加手法の検討		■						
分析操作の検討		■						
試験装置の設計製作								
基礎試験装置		■						
応用試験装置			■					
基礎試験								
単一鉱物試験			■					
複数鉱物試験				■				
岩石比較試験					■			
応用試験								
深部環境試験						■		
処分外乱試験							■	
その他応用試験								■
水質形成モデルの検討				■				

## (2) 予察試験Ⅱの概要

予察試験Ⅱでは、応用試験装置の設計に資することを目的として、環境の制御法、外乱要因の添加法、分析操作法等を検討開発する。

### (a) 環境制御装置の開発

化学的雰囲気の制御を行うため、適切な溶存ガスの種類や、pH, Eh の制御方法を検討し、制御を行う環境因子の相互効果の確認と、環境を長期間安定に維持、供給するための手法を開発する。

### (b) 外乱添加手法の開発

処分システムの建設によって地下水に生じる外乱要因、たとえば、掘削に伴って流入する大気の影響、ベントナイトからの化学成分の溶出、及び鉄やガラスの溶解に伴うコロイドの混合等の模擬方法、特にコロイドの添加手法について検討する。

### (c) 分析操作の検討

溶液の水質分析項目のうち、水温、pH, Eh, ECについてはオンラインでリアルタイムに測定することが望ましい。また、陽イオン、陰イオン及び溶存ガスについては、化学的雰囲気を保ったままで測定できることが好ましい。そこで、これらを可能にする試験装置や溶液採取方法等について検討開発する。

## (3) 基礎試験の概要

基礎試験は、地下水の水質形成において最も基本的な水と岩石との相互作用を理解することを目的として、常温・常圧下で行い、以下の3つの試験から構成される。

### (a) 単一鉱物／水反応試験

日本で最も普通にみられる火成岩類を構成する造岩鉱物を対象として、単一鉱物／水の反応試験を行い鉱物の差異による水質の特性を把握する。

### (b) 複数鉱物／水反応試験

日本の代表的な岩石の鉱物組成を模した複数の鉱物を組合せを用いて水質の差異を検討する。また、特定の副成分鉱物を添加しその影響を把握する。複数鉱物／水反応試験の試験例を表1.2.2に示す。

### (c) 実岩石／水反応試験

(b)で模擬した岩石に対応する実際の岩石を用いて水との反応試験を行い、(b)の結果と比較する事により、実岩石中の副成分鉱物や微量成分が水質に与える影響やそ



Table 1.2.2 Example conditions for basic test under static state

	試料	溶液	温度	圧力	雰囲気	Eh	Ph	背景となる地質状況
a	石英, 斜長石, アルカリ長石, 黒雲母	蒸留水 (大気平衡)	15°C ±	1 気圧	大 気	非制御	非制御	花崗岩, 流紋岩等の酸性火成岩
b	斜長石, 角閃石, 黒雲母, 石英	蒸留水 (大気平衡)	15°C ±	1 気圧	大 気	非制御	非制御	閃緑岩, デイサイト等の中～酸性火成岩
c	斜長石, 輝石, 角閃石	蒸留水 (大気平衡)	15°C ±	1 気圧	大 気	非制御	非制御	安山岩質の火山岩類
d	石英, 斜長石, 方解石	蒸留水 (大気平衡)	15°C ±	1 気圧	大 気	非制御	非制御	たとえば方解石を含む岩石として石灰質の砂岩, 泥岩等
e	石英, 斜長石, モルデン沸石	蒸留水 (大気平衡)	15°C ±	1 気圧	大 気	非制御	非制御	たとえばモルデン沸を含む岩石として続成作用を受けた凝灰岩や熱水脈を含む火山岩
f	石英, 斜長石, 黄鉄鉱	蒸留水 (大気平衡)	15°C ±	1 気圧	大 気	非制御	非制御	たとえば黄鉄鉱を含む岩石として泥質堆積岩, 熱水変質を受けた岩石
g	石英, 斜長石, 粘土鉱物 (a~bの結果を考慮して選定する)	蒸留水 (大気平衡)	15°C ±	1 気圧	大 気	非制御	非制御	たとえば粘土鉱物を含む岩石として風化岩, 泥岩, 変質岩等

の程度を把握する。

#### (4) 応用試験の概要

応用試験では、地下深部の環境を模擬した水質形成試験と、処分場の掘削が水質に及ぼす影響の把握を行う。応用試験の初期に想定される主な試験例を表1.2.3に示す。応用試験では、各カラム毎に雰囲気、Ehを適宜制御する。さらに、応用試験の後期の段階では外乱因子を添加した試験を行う。

#### 1.2.3 予察試験設備

従来より実施されている岩石-水反応試験はほとんどがバッチ型反応セルを用いたもので、攪拌や振とうのため試料が攪乱されてしまい、また、溶液の連続的な交換も行われていない。GEOCHEMでは、試料を静置させた状態で溶液を循環させることが重要であるため、カラム型反応セルを用いて試験を行う。しかし、このような装置での岩石-水反応による水質変化が測定可能なほどに生じるか否かは、早急に実験的検討によって確認する必要がある。そこで、当面の重要課題である予察試験Iについて、その問題点と概要を述べる。

##### (1) 予察試験装置の仕様

予察試験Iは基礎的な検討であるため、諸条件を確実に把握できるバッチ型の試験から着手しカラム型試験へと発展させる。

###### (a) バッチ試験

バッチ型容器としては、容量200ml程度の市販バイアルビンもしくは同等の容器を用いる。試料は、MCC-3S法に準拠した攪拌装置を用いて10~14回転/minで横転させて攪拌する。

###### (b) カラム試験

カラム試験装置は、予想される本試験を想定して、図1.2.2に示す流動型の装置を製作する。なお、装置のサイズは、バッチ試験の結果を考慮して設定する。溶液は低速でカラム内を循環させ、流速は単位時間当たりの流量が一定となるように調整する。

Table 1.2.3 Example conditions for application test under controlled state

	試料	溶液	温度	圧力	雰囲気	Eh	Ph	背景となる地質状況
a	石英, 斜長石, アルカリ長石, 黒雲母	基礎試験(2)-aの反応後の溶液	40℃ >	100気圧	①大気 ②N <sub>2</sub> ガス		非制御	花崗岩, 流紋岩等の酸性火成岩の地下深部 (①循環水, ②停滞水)
b	斜長石, 角閃石, 黒雲母, 石英	基礎試験(2)-bの反応後の溶液	40℃ >	100気圧	①大気 ②N <sub>2</sub> ガス		非制御	閃緑岩, デイサイト等の中～酸性火成岩の地下深部 (①循環水, ②停滞水)
c	斜長石, 輝石, 角閃石	基礎試験(2)-cの反応後の溶液	40℃ >	100気圧	①大気 ②N <sub>2</sub> ガス		非制御	安山岩質の火山岩類の地下深部 (①循環水, ②停滞水)
d	石英, 斜長石, 黄鉄鉱	基礎試験(2)-fの反応後の溶液	任意	任意	N <sub>2</sub> ガス		非制御	硫化鉄の酸化による還元環境への変化
e	①海成泥岩 (複数種類) ②淡水成泥岩	蒸留水 (大気平衡)	15℃ ±	1気圧	大気	非制御	非制御	①海成泥岩地帯 ②①との比較
f	基礎試験(2)-g→基礎試験(2)-a～b → 応用試験-a～b の順にカラムを接続	各カラム毎に各試験の条件に準拠する						地表付近の風化帯→新鮮部→地下深部への地下水の移動
g	海成泥岩→安山岩→花崗岩の順にカラムを接続	初期のみ大気平衡の蒸留水, 他は各カラムの反応水	15℃ ± から順次昇温	1気圧から順次昇圧	初期のみ大気	非制御	非制御	日本の標準的な新第三紀堆積盆地

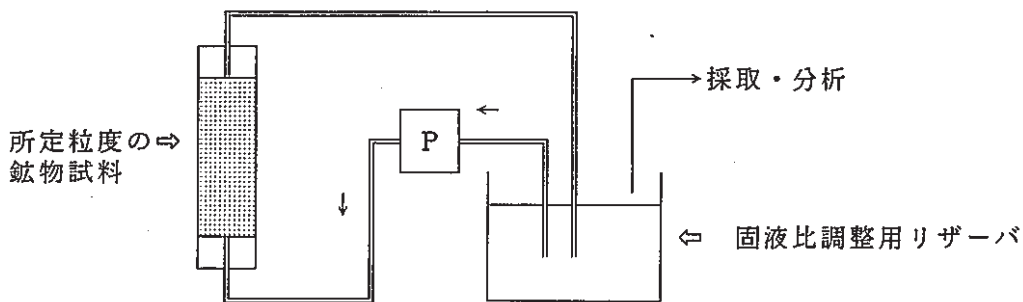


Fig 1.2.2 Column type cell for preliminary test

(c) 試験試料

装置仕様の実験的検討であるため、水質変化の大きい試料が望ましく、条件を単純にするためになるべく均質な試料が望ましい。そこで、試料は、我が国に分布する岩石に普遍的に含まれ、比較的成分が溶出し易い斜長石とカリ長石を用いる。鉱物試料は市販の標準試料を用いる。

(2) 制御条件

予察試験 I の制御条件を表1.2.4 に示す。

Table 1.2.4 Test conditions of preliminary tests

	バッチ試験	カラム試験
粒 度	1500 $\mu\text{m}$ 1000 $\mu\text{m}$ 500 $\mu\text{m}$ 200 $\mu\text{m}$ 100 $\mu\text{m}$	バッチ試験結果から判断して浸出挙動の良好な2例を選定する。
固液比	0.1 $\text{g/ml}$ 0.5 $\text{g/ml}$ 1.0 $\text{g/ml}$ 2.0 $\text{g/ml}$	バッチ試験結果から判断して浸出挙動の良好な2例を選定する。
溶 液	大気平衡の蒸留水	同左
試時間 (日)	3, 7, 14, 28, 36, 56, 90	同左
温度圧力	常温・常圧	同左
その他	MCC-3S法を参考にして試料を緩慢に攪拌。	溶液をカラム内で低速に循環させる。

GEOCHEMでは、反応の進み易さのみが求められるのではなく、反応が進行して

いく過程での遷移状態を観測する必要もある。したがって、いたずらに粒子径を小さくすることは不適當である。このため、鉍物試料の粒径は粉末状の100  $\mu\text{m}$ を下限とし、mmオーダーまでを5グループに区分する。固液量比については、カラム型容器内での粒子の間隙率で定まるような高い固液量比にまで、条件を拡張する必要があるが、当面0.50~2.0g/mlまでを4段階に区分する。

### (3) 分析測定

水質に関する測定項目としては、使用する斜長石及びカリ長石から溶出が予想される $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}$ 、 $\text{Si}$ 及び $\text{HCO}_3^-$ について行う。ただし、事前に全岩化学分析を行い溶出可能性の高い成分を選定する必要がある。

一方、鉍物試料については次項の(4)で検討する方法を用いて表面積を測定し、反応量の検討に資する。

### (4) 予察試験に関連して実施する試験

上記の試験とは別に、高温で短期間のバッチ式鉍物浸出試験を行い標準浸出試料を作成し、浸出溶液中の元素量と鉍物試料表面の元素の浸出状況をSEM、EPMA、オージェ分光法等を用いて測定する。一方、鉍物試料についてBET法、試料粒の球体近似および試料粒の立方体近似による3種類の方法で表面積の測定を行い、それぞれの方法で得られた値を用いて元素の浸出量を求め、先の浸出試験から得られた元素の浸出量のデータと対比し、最も妥当な表面積測定方法を選定する。

### (5) 試験工程

表1.2.5に予察試験の試験工程を示す。

Table 1.2.5 Time schedule of preliminary tests

(単位:月)

項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
浸出特性試験 (バッチ法)	試料調整 密度測定・化学、X線分析		浸出試験							
浸出特性試験 (カラム法)										
鉍物表面積測定法の検討	標準試料の作成		浸出相の測定(標準試料)				浸出相の測定			
試験装置の仕様 の検討										

## 1.2.4 本試験設備

### (1) 試験の目的

水質形成過程における非平衡過程や準安定相の介在する反応及びコロイド等の粒子輸送を動的な状態で検討するため、岩石と水の反応量を指標として、各種の岩石・鉱物を試験対象とし、常温常圧からさらに処分環境を模擬した環境条件下で、条件の変化に応じた水質性状の変化を動的に把握することを目的とする。

### (2) 既往の研究結果

既往の試験研究例はバッチ型反応セルを用いた試験がほとんどであり、カラム型反応セルを用い、動的な状況下での岩石-水反応による水質形成を対象としたものは見当たらない。したがって、試験装置を構成する各要素ごとに、参考となる例を調べ、また、実験的検討をとおして、本試験装置の設計製作を進める必要がある。

### (3) 事前検討の結果

試験装置を構成する機能要素ごとに、試験設備設計において考慮すべき事項を以下に記す。

#### (a) 反応セル

GEOCHEMでは、水質形成過程を動的に把握するため、カラム型の試験装置を用いた試験を行う。カラム型の装置による岩石-水反応特性は未知な部分が多いが、適切な粒子径及び固液量比を設定（予察試験Ⅰ）し、その知見を踏まえた上でカラム型の試験を実施することで、水質の変化を観測できるようなカラム型反応セルの設計が可能と考えられる。

#### (b) 環境制御

環境制御項目として、溶存ガス、pH、Ehの3つが考えられ、各々、以下の事項について設計で配慮する必要がある。

化学的雰囲気左右する重要な溶存ガスとして、酸素と炭酸ガスがある。溶存ガスの制御には、適切なセンサーでガス濃度を正確に測定し、流量調整を行う必要があるが、簡易的には貯槽タンク内のセンサーで濃度を測定して流量調整することで十分であろう。ガスの供給は高圧ポンプからレギュレータを通じて行われるが、少量の流量制御には更

に制御バルブが必要である。

pHを調整する一般的な緩衝試薬はNaやKを含み、鉱物からの陽、陰イオン成分の浸出試験には不適當である。したがって、初期の試験ではpH調整を行わず、初期水を大気中の二酸化炭素と平衡させることによりpHを5～6に調整する。

Ehは酸化剤や還元剤を添加することで調整されるが、地下深部は還元環境であり、主として還元剤を用いることになろう。還元剤としては水素ガスが最も安定した効果が期待される。使用に際しては、水素ガス濃度とEh変化の関係を把握する必要がある。

#### (c) 試験装置

応用試験を行う試験装置は、地下深部の処分環境が有する次の諸条件に対応する必要がある。

- ・ 温度（平均的な地温勾配に基づく地下1000mの温度は約40～50℃）
- ・ 圧力（地下1000mの静水圧は約100atm=10MPa）
- ・ 化学的雰囲気（(b)による）

化学反応試験には温度が重要な要素であるが、水質変化は温度に対し鋭敏な感度は有していない。したがって、制御範囲は1℃以下の精度であれば十分と考えられる。

試験系には深度1000mの静水圧に相当する10MPaの圧力を加える必要がある。このためには高圧ポンプで試料水を流す方法が基本となるが、その圧力に耐える連続的なオンライン測定や試料採取が可能な試料採取系を選定する必要がある。

反応セルや循環系の材質は、実験条件下で力学的かつ化学的に安定である必要がある。これらの一般的な装置材料として、ガラス系、プラスチック系、金属系材料が挙げられるが、各材料はそれぞれの材料特性上、使用に際して最適な環境が決まっていることから、試験の条件に応じた適当な材料を適宜選定、組み合わせて試験装置を構成する必要がある。

### (4) 試験設備仕様

#### (a) 主試験設備の仕様

図1.2.3に試験装置の概要を示す。

前項(3)の検討結果をふまえて、現時点で設定しうる各装置の仕様は以下のとおりである。

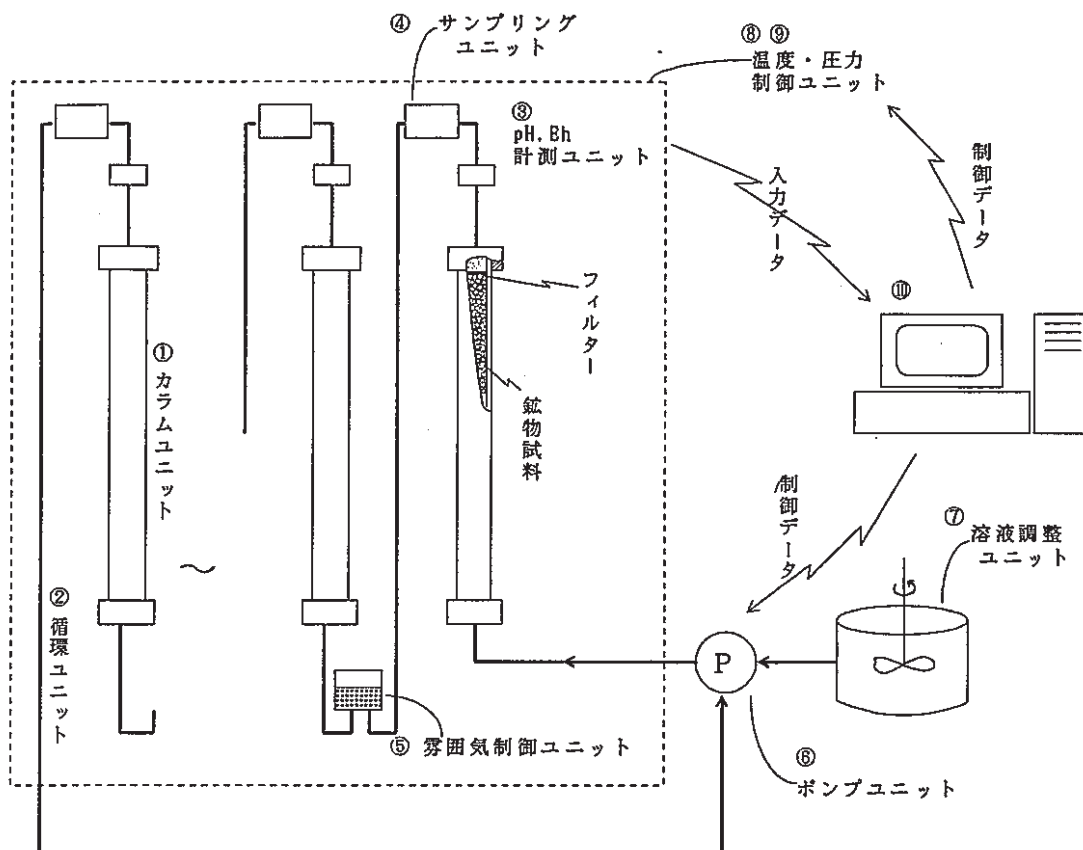


Fig 1.2.3 Experimental setup for GEOCHEM

試験装置はカラム型の反応セルを中心とし、循環ユニット、pH, Eh 計測ユニット、サンプリングユニット、雰囲気制御ユニット、ポンプユニット、溶液調整ユニット、温度制御装置、及び計測、データ取得装置から構成される。

カラムは長さ1000mm、径20mmで、材質は耐食性、耐圧性、耐熱性を考慮し、ステンレス製のカラムにテフロンチューブを合わせたものとする。

循環ユニットは、バルブ、継ぎ手を介して任意のカラムを接続できるものとする。

pH, Eh, EC, 溶存ガス計測ユニットは、外気に触れず、温度、圧力を保持した状態で、オンライン計測できるものとする。

サンプリングユニットは、循環ユニットに対し、圧力減少や逆流を生じないようにバルブを介して接続する。

雰囲気制御ユニットは、pH, Eh, 溶存ガスの測定機能を備え、必要に応じて試料水を採取できる構造とする。使用気体は酸素、炭酸ガス、窒素、水素等を用いる。

ポンプユニットは100気圧程度の高圧をかけることができ、かつ、脈動のない低流



速（数 ml/h）を与えられるものとする。

溶液調整ユニットは、最大容量25ℓとし、pH, Eh, 雰囲気調整機能を備え、温度、圧力の管理が行える構造とする。

温度制御装置はヒーターあるいはエアコン等を用い、常温～50℃までを制御できるものとする。

計測、データ取得装置は、EWSを中核とし、計測データをオンラインで取得し、温度、圧力、流速を制御し、さらに、取得データを随時引き出せるものとする。

(b) 付属試験設備の仕様

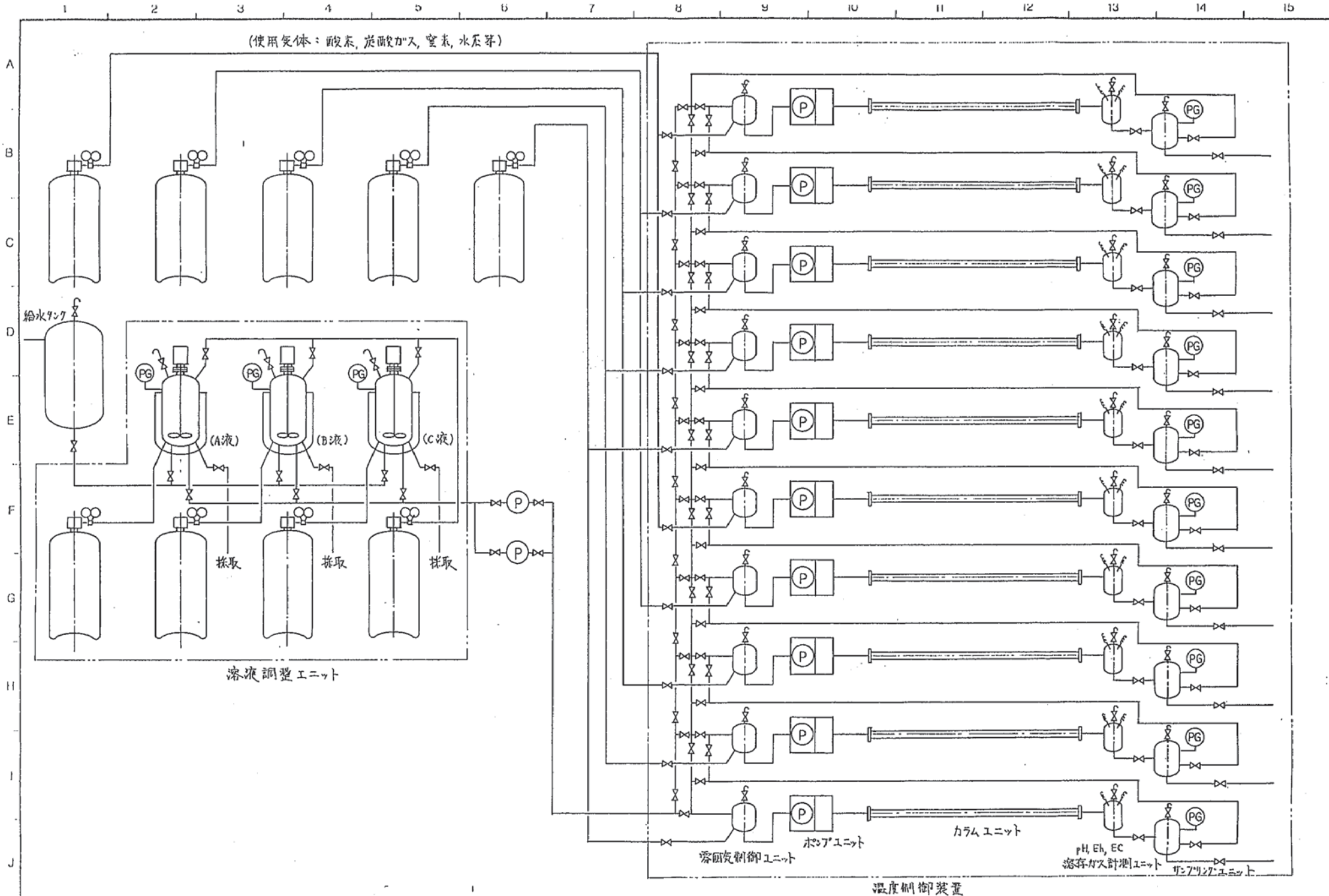
GEOCHEMでは試験に先立って、岩石・鉱物試料について試料調整（粉碎、粒度区分等）や試料の前処理及び試料の計測（粒度、密度、表面積測定等）を行う必要がある。そこで、付属試験設備として粒度分析器、密度測定器、岩石薄片工作機器等を配置する。

(c) 各ユニットの組合せと数量

試験装置1基はカラム10本より構成するものとする。また、試験装置は5基を常時稼働させ1基を予備基とし計6基を作製する。表1.2.6に装置1基あたりの構成機器を示す。また、図1.2.4に主試験装置の配管系統を、図1.2.5及び図1.2.6に付属試験設備を含めた試験設備の配置を示す。

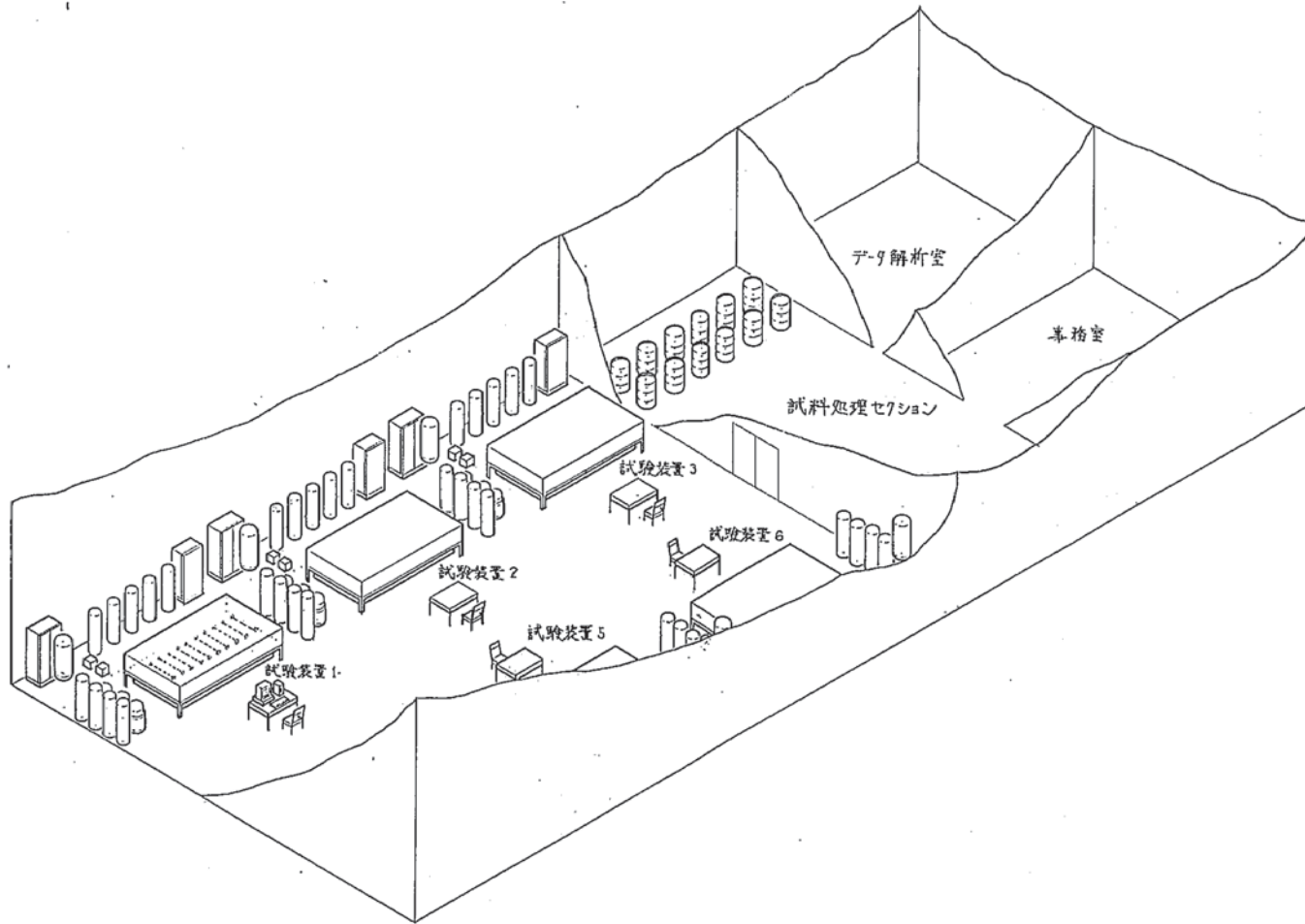
Table 1.2.6 Components in one equipment of GEOCHEM

構成単位	1試験装置当たり の構成数	備考
カラムユニット	10 基	10連で1セット。ただし、任意に取り外し可能とし、カラム1基でも試験可能とする。
循環ユニット	10 式	
pH, Eh 計測ユニット	10 器	原則としてカラム1基につき各1器を接続する。
サンプリングユニット	10 器	
雰囲気制御ユニット	10 器	
ポンプユニット	1 台	
溶液調整ユニット	3 槽	常時接続は1槽であるが、1試験で異なった溶液を供給するため。
温度制御装置	1 台	
計測、データ取得装置	1 式	



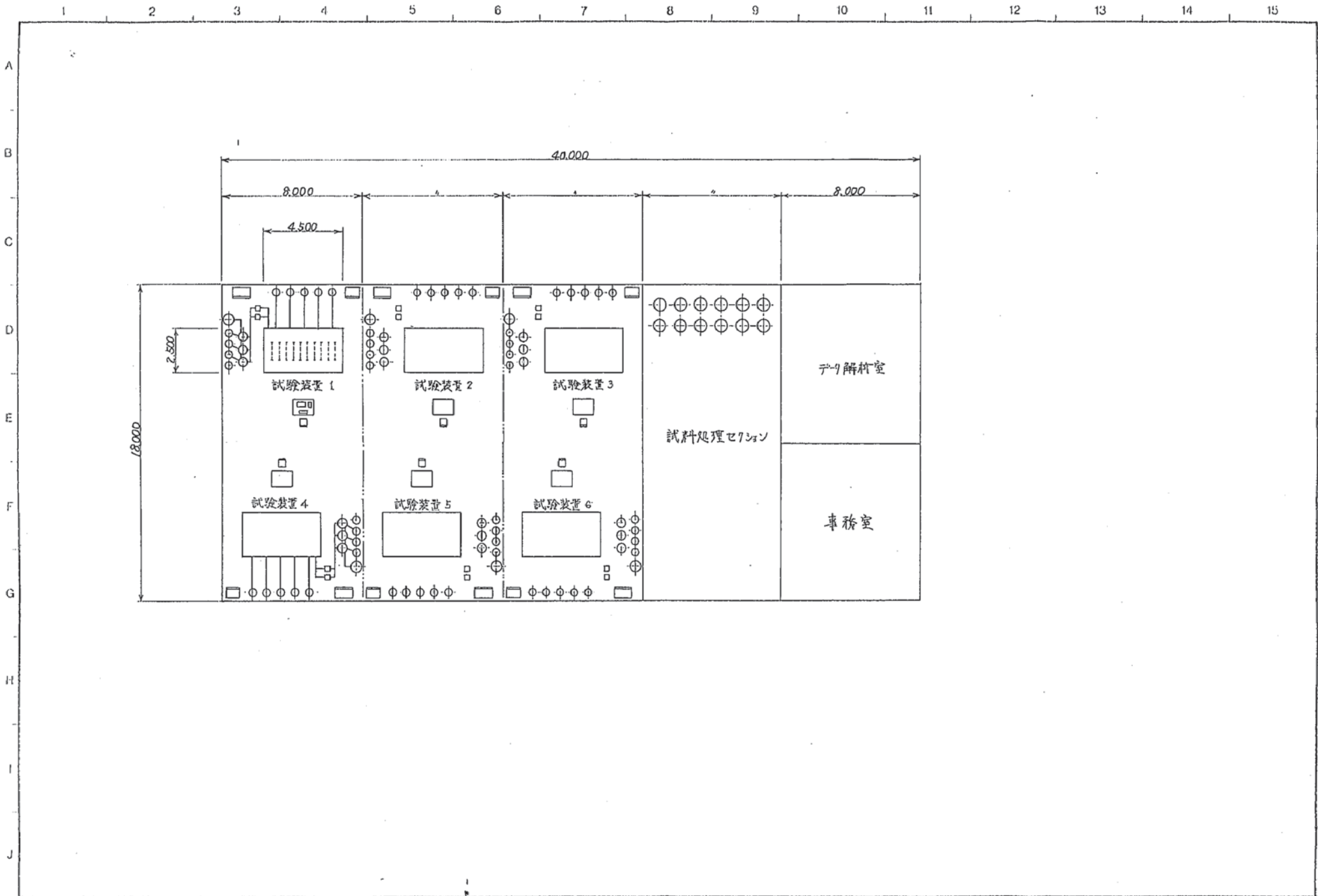
				DRAWN 作成	DESIGNED 設計	CHECKED 照査	APPROVED 検認	3RD. ANGLE PROJECTION SCALE 尺度 DATE 日付	分類	CODE No. コード番号	CUSTOMER 客先
				MITSUBISHI METAL CORPORATION				CODE コード名		TITLE 図名 <u>ENTRY- GEOCHEM 試験装置</u>	
								DWG. No. 図番		-123-124-	
No.	REV. 改訂	APP. 検認	DATE 日付	DESCRIPTION 記 事							

Fig 1.2.4 Arrangement of columns for GEOCHEM



ENTRY-GEOCHEM 試験装置 配置鳥瞰図

Fig 1.2.5 Overview of GEOCHEM equipments



				DRAWN 作成	DESIGNED 設計	CHECKED 照査	APPROVED 検認	3RD. ANGLE PROJECTION SCALE 尺度 DATE 日付		分類	CODE No. コード番号	CUSTOMER 客先	
				MITSUBISHI METAL CORPORATION						CODE コード名		TITLE 図名	
No.	REV. 改訂	APP. 検認	DATE 日付					DESCRIPTION 記 事					
										DWG. No. 図番		REV. 改訂	ISSUE 出図先

Fig 1.2.6 Layout of GEOCHEM equipments

(5) 制御条件・測定項目

(a) 制御条件

試験対象とする試料は、基礎試験・応用試験ともに、我が国の主要な岩石を構成する主要造岩鉱物7種（Na-長石，Ca-長石，アルカリ長石，黒雲母，輝石，石英）と地下水の水質形成に重要な鉱物3種（方解石，モルデン沸石，黄鉄鉱）の合計10種，及び我が国に一般的に分布する主要な岩石を試料とする。

試験水は、基礎試験では、大気と平衡状態（炭酸ガス及び酸素ガスを溶存している）とし、pH, Ehは特に制御しない。一方、応用試験では、試験水は、大気と平衡状態のものから、処分環境の化学的雰囲気を反映したもの、他の岩石と反応したもの、処分された物質と反応したもの等、種々の状況に設定する。

温度は、基礎試験では地表近傍の平均温度（年平均気温にほぼ一致する）を想定し15℃とするが、応用試験では、15℃から50℃の間とする。

圧力は、基礎試験では常圧（1 atm）とし、応用試験では1気圧から100気圧まで変化させる。

(b) 測定項目

溶液については、温度，pH, Eh, EC, 陽イオン( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )，陰イオン( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )，Fe,  $\text{SiO}_2$ 及び溶存ガスを分析し、鉱物試料については、溶出元素の特定のためEPMAによる鉱物粒子表面の分析と反応層の厚さ及び反応生成物の同定のためSEM及びTEMによる観察を行う。

(6) 試験スケジュール

岩石と水の反応に関するは既往のバッチ型の試験は、長いもので2年程度の試験を行っている。しかし、GEOCHEMでは、必ずしも平衡状態になるのを待つ必要はなく、水質の変化が測定されれば良い。そこで、従来のバッチ試験を参考として数カ月から1年を当面の試験時間として設定する。表1.2.7に試験スケジュールの概要を示す。

Table 1.2.7 Time schedule of GEOCHEM

	1	2	3	4	5	6
基礎試験						
単一鉱物試験						
複数鉱物試験						
実岩石試験						
応用試験						
深部環境試験						
処分外乱試験						
その他の試験						

(7) 必要となる他の関連設備

GEOCHEMは、(4)で述べたように本試験装置と、試料処理のための付属試験設備から構成される。しかし、試料の分析やデータの解析のためには既存の分析・試験設備が不可欠である。図1.2.7に既存の分析設備との関連を示す。

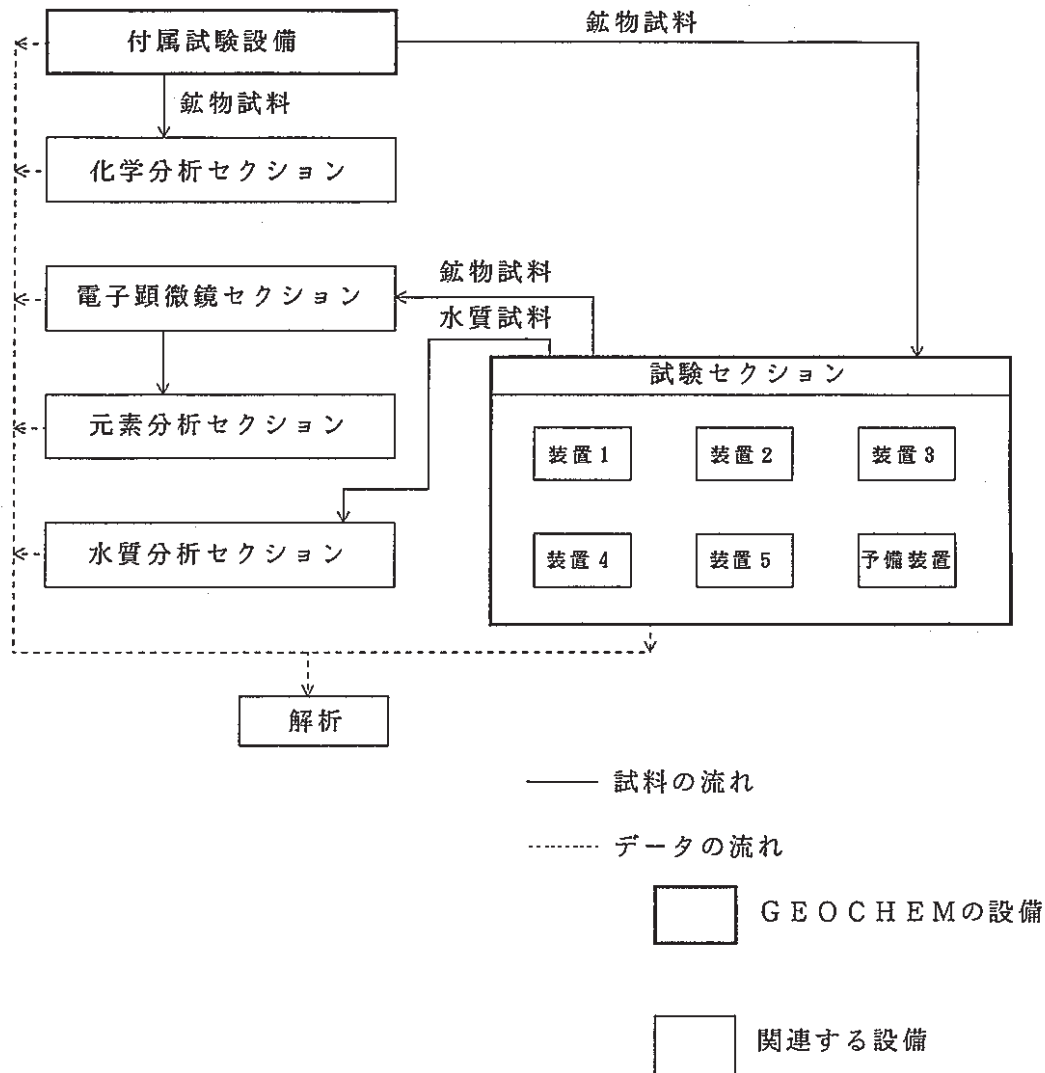


Fig 1.2.7 Relative equipments to GEOCHEM

化学分析セクションでは、鉱物・岩石試料の化学組成を分析する。また、電子顕微鏡セクションにおいては、試験後の鉱物・岩石試料の表面をTEMやSEMを用いて観察し、反応生成物の性状や反応層の厚さを測定する。元素分析セクションでは、試験後の鉱物・岩石試料について、反応層と新鮮部の元素量比を測定し、浸出元素量を求め水質分析結果と合わせ、試料の反応特性のデータを得る。一方、調整溶液や試験後の反応水についての水質分析は、水質分析セクションにて行われる。

## 2.1 予察試験設備

### 2.1.1 予察試験の目的

#### (1) 目的

本試験を実施するに当たり必要と考えられる予察試験について、その試験目的、明らかにすべき項目を抽出し、その試験設備の基本仕様の検討を行う。具体的には、予察のための試験体の構築の検討及び、試験の測定方法、制御方法、解析方法について既往の試験例から抽出を行い、単一亀裂のチャンネルリングモデルの基礎的実験の基本仕様の検討を行う。

#### (2) 位置付け

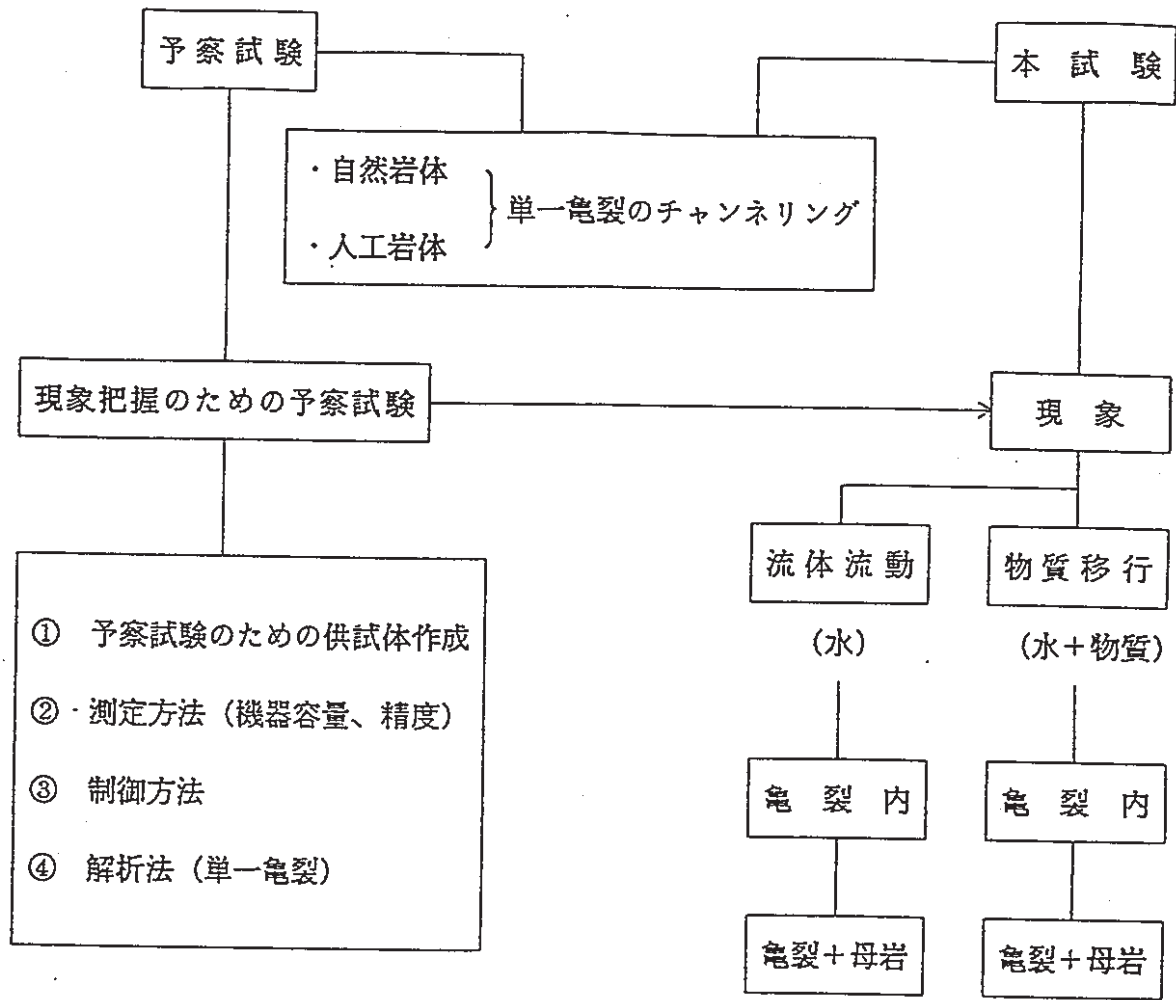
本試験を行うにあたっては、具体的に次のような項目を設定する必要がある。

- ① どういう現象を対象とし、どういう解析を行うか
- ② そのための試験体の材料は何を使うか
- ③ どのように試験体（亀裂）作成するか
- ④ 試験体の寸法はどうするか
- ⑤ 流す流体は何を使用するのか
- ⑥ そのための試験装置はどうするか
- ⑦ どのように現象を計測するか
- ⑧ 計測結果をどのように処理するか

したがって、本試験への移行前にこれらの項目を設定するため、Table 2.1-1 に示すような予察試験の検討を行う必要がある。しかし、今年度は主に、単一亀裂のチャンネルリングにおける予察試験と本試験の位置付けのFig. 2.1-1 に示すように、基礎的実験を通じて、Table 2.1-1 に示す試験が可能であることを確認する試験の内、計測仕様について検討するものとする。

### 2.1.2 予察試験項目

第1編5.2.2節で検討した既試験例から、予察試験に関係する主な試験例を第1編のTable 5.2.2-3 に示す文献から抽出して、試験項目、目的、測定項目、試験体、解析式についてまとめたものをTable 2.1-2 に示した。この既往の試験例と第1編5.2.2の既往の確証試験の調査結果をもとに、予察試験の試験項目について以下に検討を行う。



Status of preliminary tests and main tests

Fig.2.1-1 予察試験と本試験の位置付け



Table 2.1-1

Preliminary tests for ENTRY

ENTRY計画における予察試験の分類

( ファーフールド試験研究 : 岩体水理・物質移動試験 )

試験の分類と概略フロー	試験の目的	具体的な試験計画・成果	問題点・課題など	備考
① 基礎的実験 (要素試験計画)	<ul style="list-style-type: none"> <li>単一亀裂及び複数亀裂模型による 平行平板理論の適用性 亀裂交差部での流動把握 (チャンネルリング現象)</li> <li>モデルの基本物性の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小さい供試体での模型実験と解析コードでの検証。 例えば、単一亀裂模型による浸透実験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験計画の検討及び試験装置の基本仕様の検討</li> <li>解析コードの選定、整備</li> </ul>	
② 試験体仕様を決定する試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>適正な模型規模の選定</li> <li>試験供試体での基本物性試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>模型の大きさ(容量)と亀裂チャンネル分布の関連性</li> <li>通常の室内物性試験、その他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>供試体の相似則の適用</li> </ul>	
③ 試験が可能であることを確認する試験 (試験設備・計測システムの仕様と試運転計画)	<ul style="list-style-type: none"> <li>計器の装着性の確認</li> <li>計器の精度と応答性能の把握 (圧力、流量、温度等)</li> <li>試験条件の保持、制御性能の把握</li> <li>計測システムの確認</li> <li>トレー分布・流速を調査する方法の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力と計器の応答試験</li> <li>使用する計器の選択、試験データの精度</li> <li>計器の設置技術</li> <li>制御保持の確認試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>メーカーの選定</li> <li>設備の基本仕様の範囲</li> </ul>	
④ 試験体の検証方法を確認する試験 (試験体検証計画)	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂の分布を調査する方法の確立</li> <li>試験体を切断する方法の確立</li> <li>試験体の物理的変化を把握する方法の確立 (応力、重量、体積変化、亀裂の幅や分布等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>トモグラフィ試験による適用</li> <li>ワイヤーソー、ウォータージェット、ブレードなどによる切断実験</li> <li>可能な切断厚さの検討</li> <li>応力計による測定、亀裂関係は写真分析、レーザー、ウッドメタル</li> <li>(亀裂と応力の関連性)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂の評価</li> <li>試験ブロック切断装置の開発</li> <li>切り代分のクラックの評価</li> <li>亀裂面測定時に亀裂内充填物が分離・剝離する</li> </ul>	<p>切断して分布を求めることを基本的な考えとする</p>

Table 2.1-2

Previous tests with relation to preliminary tests  
予察試験に関する既往の試験例

( NO 7, 8 .....流体挙動、  
NO10,12 .....チャンネルリング、物質移動 )

NO	試験項目	目的	測定項目	試験体	解析式
7	原位置試験ポンプテスト (注入、揚水) 井戸径 $\phi 75\text{mm}$ 注入試験 (リークテスト) ・流体圧制御...圧力一定テスト ・流量制御...圧力上昇テスト  室内試験	流体圧の変化による割れ目の開口・閉塞量の決定...開口量の変化が割れ目内の流体圧分布・流量 (速) にどんな影響を与えるか調べる。(三乗則の確認、割れ目幅約0.03mmの変化)  原位置割れ目の変形パターンを人工割れ目で模擬できるか	開口幅 (測定法...井戸内に“割れ目計”を設置 (流入井又は観測井)) 流量 Gale & Welhan (1975) 参照 流体圧: 注入井、観測井 (1本、3ft間隔)、間隙水圧計 水温 ( $6^{\circ}\text{C} \sim 17^{\circ}\text{C}$ ): サーミスターとホイストストーンブリッジ  割れ目変位: LVDT (非接触型変位計) 流体圧: 中心孔及び周囲 流量	亀裂の少ない花崗岩 (カナダ) 現位置試験 R = 45m (150 フィート) L = 15m ~ 9m (30 ~ 50 フィート) P = 13 ~ 25 PC  試験体... $\phi 38$ インチ $\times$ h6フィート 割れ目作製方法...①カッター割れ目、②砂吹き付け割れ目 (部分的)、③引張り割れ目、上の方法の2本の組み合わせ	FEM解析 (ジョイント要素) 応力-浸透解析 定常状態 (剛体割れ目、 $K_n$ , $K_s$ を持つ割れ目)
8	室内試験 (室温)  開口幅は0.08m/m ~ 0.46m/m	実岩体割目を模擬した割目の三乗則の確認 (亀裂の凹凸の変化等より三乗則で推定した値の10~75%の誤差) 問題点...亀裂凹凸のアルゴリズム	流量 染料による流跡測定→流速 (時間的写真撮影) 開口幅、水頭勾配 (流入量を変化、流出0) を変化 開口幅を荷重 (0.4kgf/cm <sup>2</sup> ) で変化 (平均開口幅は水滴の広がる範囲を写真撮影により測定) 最大30kgf/cm <sup>2</sup> (3Mpa)	ストリーバの花崗岩 厚さ2cm、高さ15cm $\times$ $\phi$ 6cm ) →亀裂サンプルとして 亀裂をシリコンラバーで取り透明エポキシで試験体を作成 ・プラスチックガラス板で平行平板モデル	
10	・室内試験のチャンネルリング ・物質移動のチャンネルリング ①連続交差ネット試験 ②不連続交差ネット試験 (フラクチャーネットワーク)	・実験と計算値との比較 ・濃度分布との計算比較 ・交差部の拡散分配に関する実験的解析	・トレーサー濃度...プラチナ電極で抵抗測定 ( $\phi 3.2\text{mm}$ ) 上下壁に埋込み ・圧力水頭をピエゾメーターで測定 (19点) 上部のカバー (1.5mm) に穴を開けて銅、ステンレスパイプで測定 (パイプ径1.5m/m) $Q = 5.26\text{cc/min}$ ・測定は流量と濃度、水頭	・アクリル酸樹脂にスリット (厚さ3.2m, 幅1.905cm) 172cm $\times$ 58cm 10.16cm の格子ネット ・トレーサー - KCl } 電気伝導度の違いで判定 ・流体...塩化セシウム	・トレーサー追跡法 交差 ・差分解析 ・濃度拡散と移流解析 ・Junction Transfer Function } 含む ・解析コード FRACSL
12	・室内試験 ①吸着トレーサー試験 ②非吸着トレーサー試験 流量をパラメーターとして濃度測定	・放射性核種移動の実験的現象より提案式の係数 (吸着と拡散) の算出	・4チャンネルゼン動ポンプで流量一定注入 ( $Q = 0.175 \sim 0.0258\text{cc/min}$ ) ・吸着 (Cs, Sr (ホット試験))・非吸着 (THO, NaI) トレーサー濃度測定 (流入・流出点) ・流量をパラメータとして変化	・花崗岩の自然状態の割れ目 ( $\phi 20\text{cm} \times H30\text{cm}$ ) ストリーバ鉱山GL-360m から採取した亀裂幅0.18m/mの軸に平行な自然割れ目	

Table 5.2.2-3 に示す文献 No. 7 : J. E. Gale : Inland Waters Directorate, Water Resources Branch, 1977

Table 5.2.2-3 に示す文献 No. 8 : Eva. Hakami : Lule'a University of Technology, 1989

Table 5.2.2-3 に示す文献 No.10 : L. C. Hull, J. P. Miller, T. M. Clemo : Hydrology Unit, Idaho National Engineering, Lab.

Table 5.2.2-3 に示す文献 No.12 : Ivars Neretnieks, Trtgre Eriksen, Päivi Tähtanen : Department of Chemical Engineering, Royal Insitute of Technology

## (1) 予察試験の供試体作製方法

第1編のTable 5.2.2.2-2 には、既往の確証試験の内室内試験で使用した岩種材料、試験法、課題別にわけて示している。

試験体の材料としては

- ① アクリル板
- ② 岩石の天然割れ目
- ③ コンクリート
- ④ 電気アナログ

等がある。

予察試験における試験材料の選定においては亀裂中の流れの可視化を考慮すると、透明板（アクリル板、ガラス板）によるGEOTEX模型、透明板と半割りの自然岩体との組み合わせ模型が考えられる。また、LABROCKの予察として自然岩体の自然割れ目を対象とする試験体も考えられる。

## (2) 測定項目と測定方法

測定項目としては、(i) 流体圧、(ii) 亀裂幅の分布、(iii) 流量、(iv) 流跡線、(v) 流速、(vi) 拡散、(vii) 温度の項目が単一亀裂中の地下水流動及び物質移動現象について上げられる。ここでは、既往の試験例をもとに、これら測定項目についての測定方法及びその検討課題について抽出し、予察試験の基本仕様を検討する資料とする。その測定項目を一覧にしたものをTable 2.1-3 に示す。

### (a) 流体圧

流体圧の測定としては、模型の流入、流出側の水頭を測定するものと、亀裂模型内の流体の圧力を測定するものがある。前者については、亀裂模型内の流速を制御するものであり、流入側で圧力をかけ、流出側は越流方式のものが考えられる。また、後者については、亀裂面位置にピエゾメータを設置する方式と圧力計を設置する方式がある。ピエゾメータの設置に関しては、亀裂内の流れを乱さないでかつ水頭が精度よく測定できるピエゾメータの径を検討する必要がある。また、圧力計に関しては、設置方法、計器の精度、等を試験仕様に合わせて検討する必要がある。

### (b) 亀裂幅

亀裂幅の測定には、

- ① レーザー（又は変位計）による表面凹凸計測の重ね合わせ

Table 2.1-3

## 測定項目一覧表

測定項目	測定方法	測定センサー	測定装置	測定結果処理	計測システム	検討課題	備考
1. 亀裂幅	1) レーザー変位形 (又は変位形) による表面計測 2) 微小水量点滴法 3) ウッズメタル注入法 4) 継目計	1) レーザー変位計又は変位計 2) 微量容量ピペット 3) ビスス-鉛-すず合金 4) 継目変位計	1) プロファイルメーター 2) 面積測定 3) 走査電顕 4) 変位測定装置	1) 3次元表面凹凸画像 2) 平均間隙幅 3) 亀裂幅の断面分布と表面分布 4) 変位量経時変化	1) 変位計+座標移動装置+制御記録装置	・割れ目を分割した後の測定となる ・点滴水材料 ・メタル材料 ・幅制御が可能なもの ・相対変位	
2. 流体圧	1) マノメータによる水位計測 2) 間隙水圧計による水圧測定	・径3~5mmの管 (100~1000mm H <sub>2</sub> O) ・間隙水圧計又は微差圧計	・圧力測定装置	・水頭差の制御 ・水圧分布	・目視 ・自動測定	・圧力センサー容量の選定 ・マメタの径、測定自動化 ・間隙水圧計の精度、容量 (初期化の方法) ・透水材料の選定	
3. 流量	1) メスシリンダーによる計測 2) 水位計による容積測定 3) 圧力計による容積量 4) 流量計による読み取り	・圧力センサー ・流量計	・メスシリンダー及び直示天秤 ・ビューレットと水位計 ・差圧計	・流量経時変化 ・流量計経時変化	・目視及びセンサーによる自動計測 (直示天秤+パソコン)	・流量の測定範囲 (直示天秤容量等の選定) ・微量測定による蒸発の考慮 ・模型両側面のシール	
4. 流跡線	・トレーサー注入による時刻歴の写真撮影	・着色剤 ・蛍光性塗料	・高速度カメラ ・ビデオカメラ	・時刻歴における写真画像の画像処理	・ビデオカメラ+画像モニター+記録装置	・外側からの可視化 ・トレーサー材料	
5. 流速	・カラーインジェクションの撮影	・着色剤等のトレーサー	・ビデオカメラ	・時刻歴における写真画像の画像処理	・ビデオカメラ+画像モニター+マイグ+パソコン	・外側からの可視化 ・トレーサー材料	
6. 分散	・プラチナ電極による抵抗測定	・流体の材料	・比抵抗測定器	・比抵抗値からの濃度変換	・比抵抗測定装置+記録装置	・流体材料、トレーサー材料 ・設置方法	
7. 温度	・温度計による流体温度測定	・熱電対	・温度測定装置	・温度経時変化	・自動測定		

- ② 微量水量点滴法
- ③ ウッズメタル注入法
- ④ 継目計

の測定方法がある。これらの測定方法の留意点は次のようなものがある。①は、亀裂表面は正確に計測できるが、2表面を合成して亀裂幅の分布となるために、両面の位置が一致していないと精度が悪い。また、亀裂幅を直接に計測できないため、亀裂中に粘土等の介在物を含む場合、分離・剥離する。

②は、点滴の広がった面積内の平均亀裂幅の測定となるため、点滴を移動して何回も測定しなければならないので、その度毎に誤差を伴う場合がある。

③については、亀裂面に付着している合金を走査電顕で撮影して、両面の写真合成により、間隙形状、接触面積を測定するものであるが、点滴法と同様に平均開口幅を出すのに非常に手間がかかる。また、メタル材料についても検討する必要がある。

④は全体の平均亀裂幅の測定であり、しかも相対値しかわからない。

#### (c) 流量

流量測定方法としては、

- ① メスシリンダーによる計測
- ② 水位計による容積算定
- ③ 圧力計による容積量
- ④ 流量計による読み取り

等がある。流量計測で留意する点としては、試験を行う模型の流量範囲を測定できるものが必要であり、特に微量測定となる場合は、測定精度および蒸発に対して考慮する必要がある。

#### (d) 流跡線、流速

流跡線、流速の測定方法については、流体中に着色剤や塗料等を注入し、ビデオ撮影、写真撮影による写真画像処理方法がある。

#### (e) 拡散

拡散の測定方法としては、既往の文献からプラチナ電極による抵抗測定方法があるが、流体材料、電極の設置方法については、まだ検討する必要がある。

#### (f) 温度

温度測定については、流体の温度の計測を行う。

### (3) 試験装置の制御方法

試験例をもとに(i) 開口幅、(ii) 温度、(iii) 水頭(流入、流出側)、(iv) 流量(流入又は流出側)の制御方法について検討する。

#### (a) 開口幅

開口幅の制御方法としては、トルクメータによる手動制御、荷重による制御等が考えられるが、自動制御方式が望ましい。

#### (b) 温度

温度の制御は、模型と流体の温度は一定に制御するものとし、室温を基本として考える。

#### (c) 水頭

模型の流入側、流出側の制御方式としては、水頭(水圧)制御方式を考える。

#### (d) 流量

模型の流量は(c) 水頭の制御に基づくものとする。

### 2.1.3 予察試験の基本仕様

#### (1) 今年度対象とする予察試験モデル

以上、検討した結果を基に、今年度対象とする予察試験モデルを選定すると、可視化を主目的とした計測方法を検討するとともに、単一亀裂のチャンネルリングの基礎的実験となる。

#### (2) 試験装置の基本仕様

この装置は、透明板模型に一定垂直圧力の荷重が可能で、さらに水平方向への移動機能も重ね備え、模型の透水挙動を測定するものである。

試験装置の全体システム立面図をFig. 2.1-2 に、荷重制御システムブロック図をFig. 2.1-3 、また、Fig. 2.1-4 に計測システムブロック図を示す。

予察試験の試験装置の基本仕様を以下に示す。

##### (a) 試験装置の構成

本装置は、下記の主要部から構成されている。

1) 荷重フレーム	1 基
2) 試験体容器	1 式
3) 垂直荷重荷重装置	1 式
4) 水平 (剪断) 荷重荷重装置	1 式
5) 油圧源	1 式
(油圧ユニット)	
6) 荷重制御装置 (垂直用)	1 式
7) 同上 (水平用)	1 式
8) 検出器	
① 荷重計 (垂直用)	1 式
② 同上 (水平用)	1 式
③ 垂直変位用	1 式
④ 水平変位用	1 式
⑤ 透水圧計	1 式
(供給圧)	
⑥ 同上	1 式
(中間位置圧)	

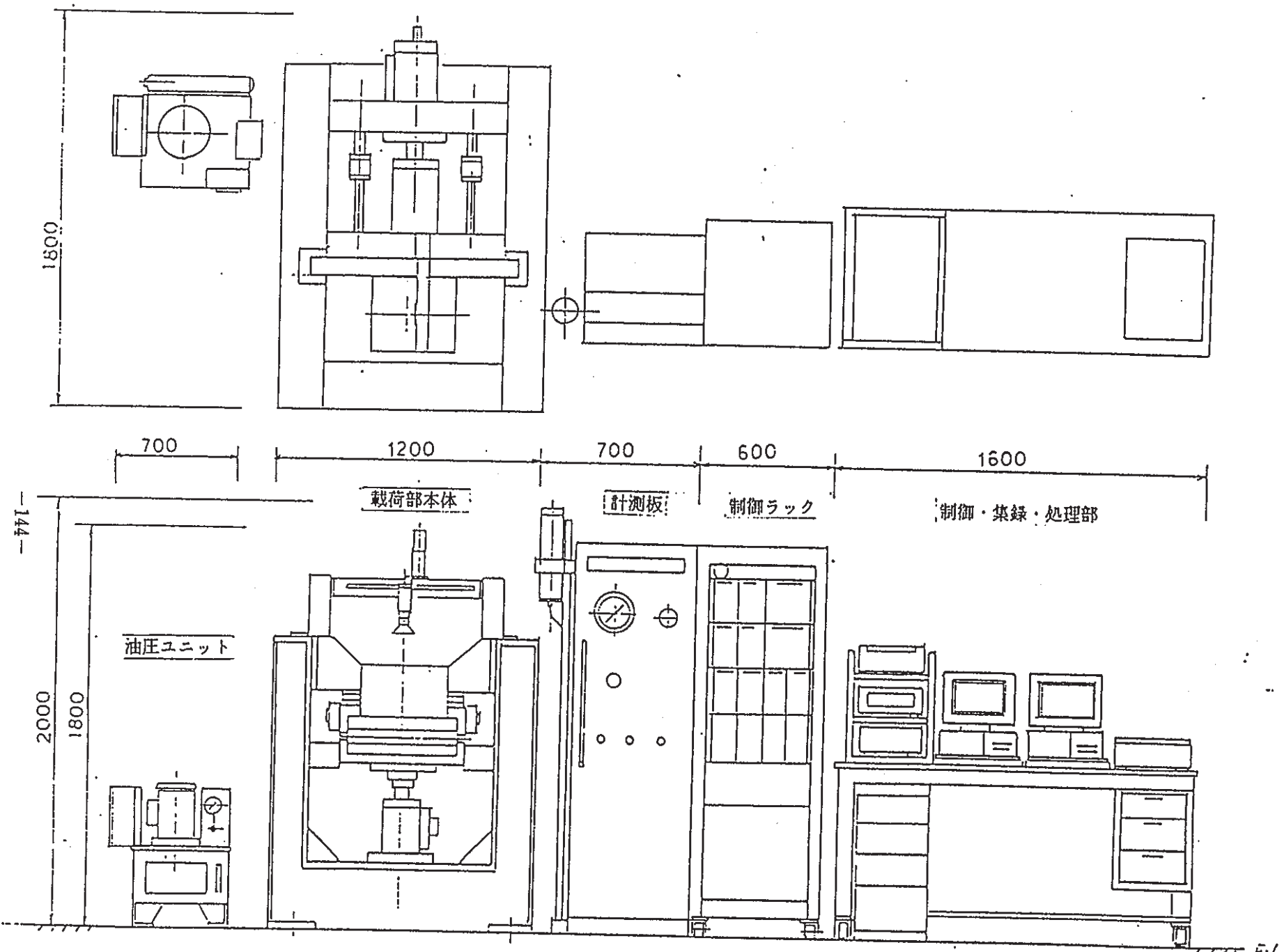


Fig. 2.1-2 全体システム立面図  
Elevation of whole system



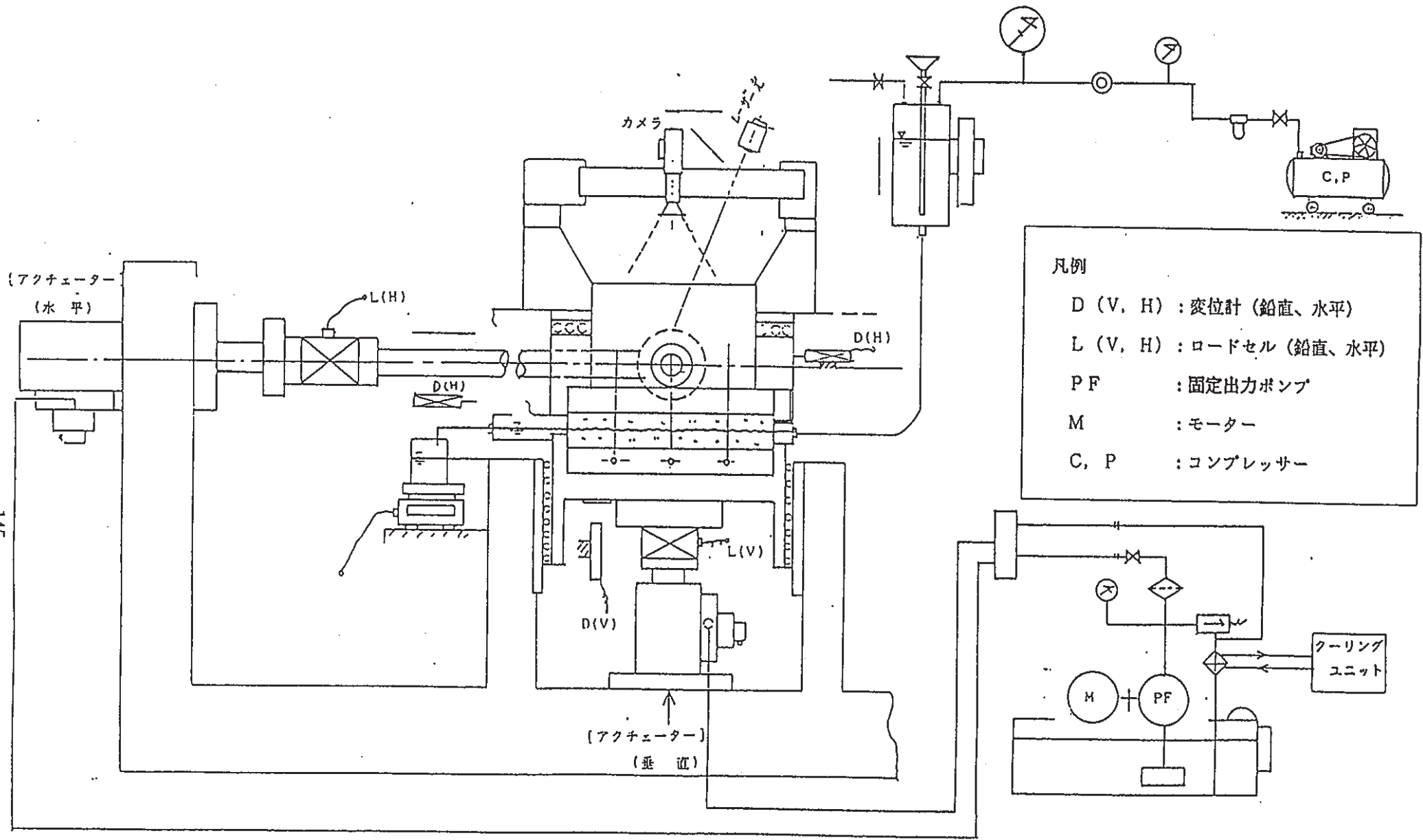
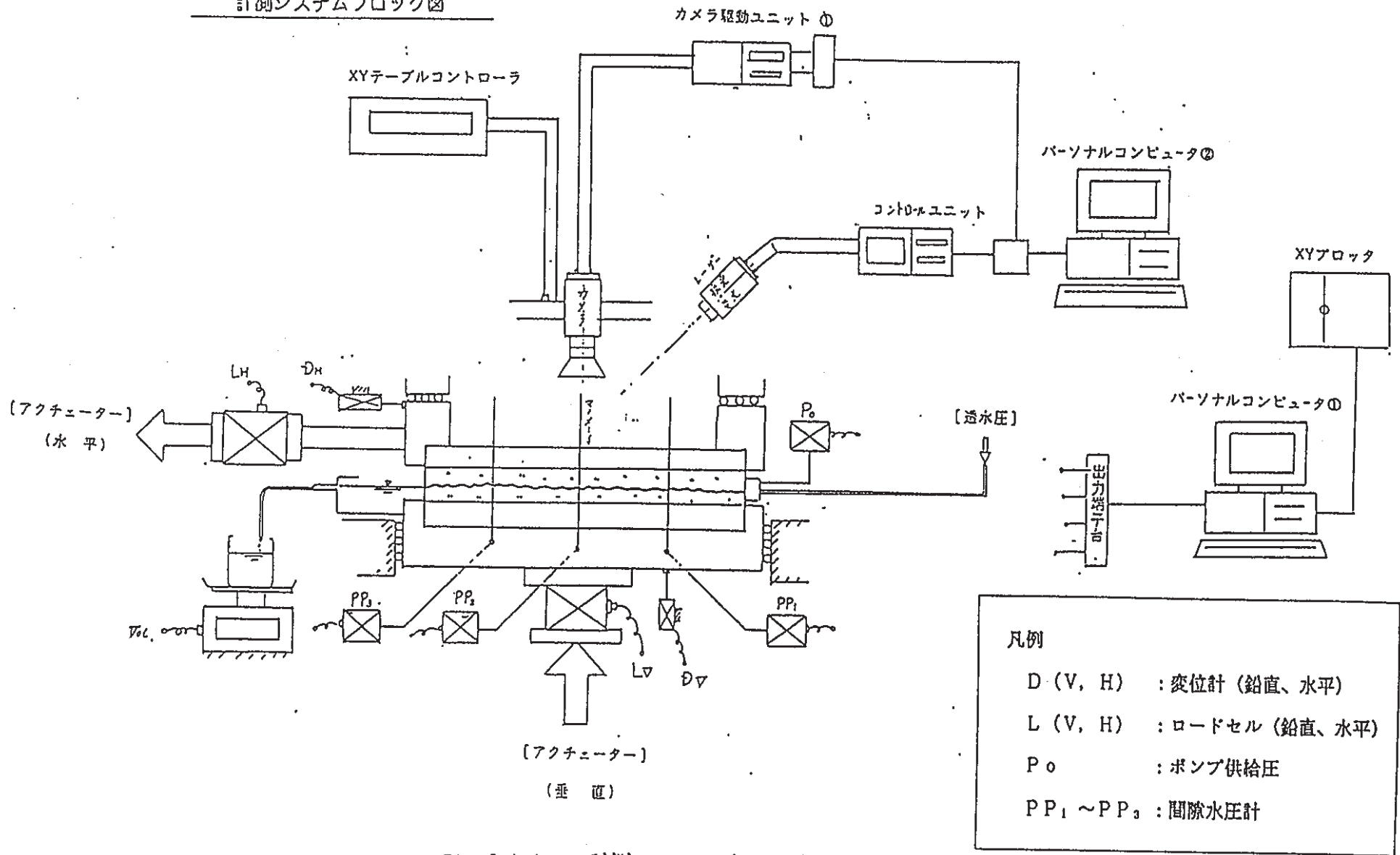


Fig. 2.1-3 载荷制御システムブロック図

Block diagram of loading control system

計測システムブロック図



- 凡例
- D (V, H) : 変位計 (鉛直、水平)
  - L (V, H) : ロードセル (鉛直、水平)
  - P<sub>0</sub> : ポンプ供給圧
  - PP<sub>1</sub> ~ PP<sub>3</sub> : 間隙水圧計

Fig. 2.1-4 計測システムブロック図

Block diagram of measuring system

⑦ 流量計 .....	1 式
⑧ キレツ幅 .....	1 式
⑨ 流跡線 .....	1 式
⑩ 流速計 .....	1 式
⑪ 温度計 .....	1 式
⑫ 拡散 .....	1 式
9) 増幅器 (フィードバック用) .....	1 式
① 荷重用 (垂直)	
② 同上 (水平)	
③ 変位用 (垂直)	
④ 同上 (水平)	
⑤ 透水圧	
⑥ 透水量	
10) 計測板 .....	1 基
11) 制御ラック盤 .....	1 基
12) データ集録用コンピューター .....	1 式
13) データ処理装置 .....	1 式
画像処理装置 (CRTプリンター、XYプロッター)	
14) パソコンデスク .....	1 基

(b) 試験装置の機能

本装置の主な機能を次に示す。

1) 載荷方法及び容器

- ① 垂直荷重：電気・油圧サーボ方式、10tonf
- ② 水平荷重：同上、10tonf
- ③ 透水圧：水頭圧、1<sup>m</sup>H<sub>2</sub>O

2) 制御パターン

- ① 垂直負荷：・荷重制御  
                  ・変位制御
- ② 水平負荷：・荷重制御  
                  ・変位制御

- ③ 透水圧 : ・静水圧 (定水頭)  
(水槽)

3) テストサンプル

- ① 材質 : 透明アクリル  
② サイズ : 500×500×500mm (25mm厚板、上下)  
③ オープンサイズ : 上方のみ400×400mm

4) 計測要素及び容量

- ① 荷重計 (垂直用) : ストレンゲージ型ロードセル (10tonf用) ----- 1式  
② 同上 (水平用) : ストレンゲージ型ロードセル (±10tonf用) ---- 1式  
③ 垂直変位用 : ・渦電流型変位計 (±2.5mm) ----- 1式  
④ 水平変位用 : ・ストレンゲージ型変位計 (±12.5mm) ----- 1式  
⑤ 透水圧計 : ・ストレンゲージ型圧力計 (1kg/cm<sup>2</sup>) ----- 1式

(供給圧)

- ⑥ 同上 : ・静電容量型差圧計 (250mmH<sup>2</sup>O) ----- 3式  
(中間位置圧)

- ⑦ 流量計 : ・デジタルバランサー (500cc) ----- 1式  
⑧ キレツ幅 : ・ビデオカメラ ----- 1式  
⑨ 流跡線 : ・ビデオカメラ ----- 1式  
⑩ 流速計 : ・ビデオカメラ ----- 1式  
⑪ 温度計 : ・水温用 (50℃) ----- 1式  
⑫ 拡散 : ・ビデオカメラ ----- 1式

5) 油圧源 (油圧ユニット) : 垂直及び水平負荷用

- ・定格圧力 : 210 kgf/cm<sup>2</sup>  
・流量 : 10 ℓ/cm<sup>2</sup>  
・モーター : 5.5 Kw

6) 電源及び消費電力

- ① 3相 200V AC 50Hz 約10Kw  
② 単相 100V AC 50Hz 約5Kw

## 2.1.4 予察試験スケジュール

### (1) 予察試験の進め方

単一割れ目内の水の流れを特徴付ける最も単純な解析モデルは、平滑平行平板によって割れ目を表現するものである。しかし、天然の割れ目では、それを形成する2つの面上に不規則な凹凸が存在するために、部分的な接触が起こり、それを避けるような流路が形成される現象が起こる。さらにその流路では、凹凸の存在と接触部の分布により流路幅、流路高さ、流路長さがそれぞれ変化している。

天然の割れ目をモデル化する上で、考慮しなければならない要因は、次のように分析されよう。

#### ① 開口幅の密度分布

位置とは無関係に、開口幅を小さいものから大きいものに並べた場合の各幅の頻度又は密度の分布

#### ② 開口幅の空間分布

開口幅の大きな位置の近傍は、突然幅が小さくなるのではなくある程度の拡がりを持つはずである。つまり、空間的な開口幅の分布は必ずしもランダムではない。

#### ③ 接触面の割合

割れ目と考えられる面内における接触部分の割合

#### ④ 接触面の空間分布

接触面の割合が同一であっても、それが一ヶ所に集中しているか、それとも分散しているかにより変形特性も透水性も異なる。

#### ⑤ 流路長及び流路数とその連結性

接触面の割合がある程度増加すると、完全な流路（チャンネル）が形成される。

流路幅は、接触面の空間分布に依存し、流路高さは開口幅の密度と空間分布で表現できる。

以上の5つの要因について解析的に評価し、それに合った予察試験を行うことで単一割れ目内の水の流れとそれに伴う物質移動のモデル化が可能になると考えられる。

モデル実験を行う場合、対象となる単一割れ目とその開口幅をモデル化したものの水理特性が十分近いものになることが必要である。モデル化と実験との関係をFig. 2.1-5 に示す。割れ目の水理特性がその凹凸や接触面という構造特性に依存していることはこれまでの調査で明らかになった点である。それら構造特性をモデル化した割れ目モデルと天然

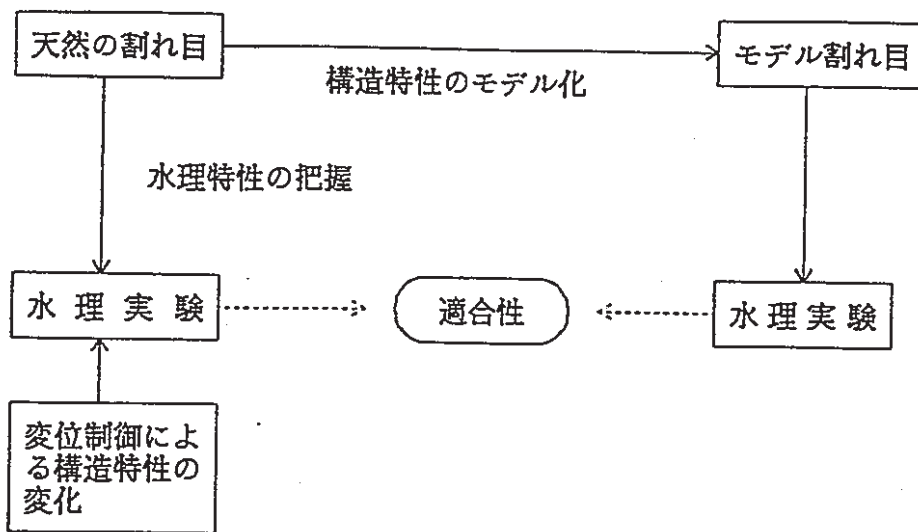
の割れ目との水理特性の適合性が認められると、今後の岩盤のモデル化に十分役立つと考えられるものである。

そこでFig. 2.1-6 に示すように、まず単純化した平行板チャンネルモデルにより、計測方法の検討を行い、亀裂を模擬したモデル、自然岩石モデルへの進め方が考えられる。

## (2) 予察試験スケジュール

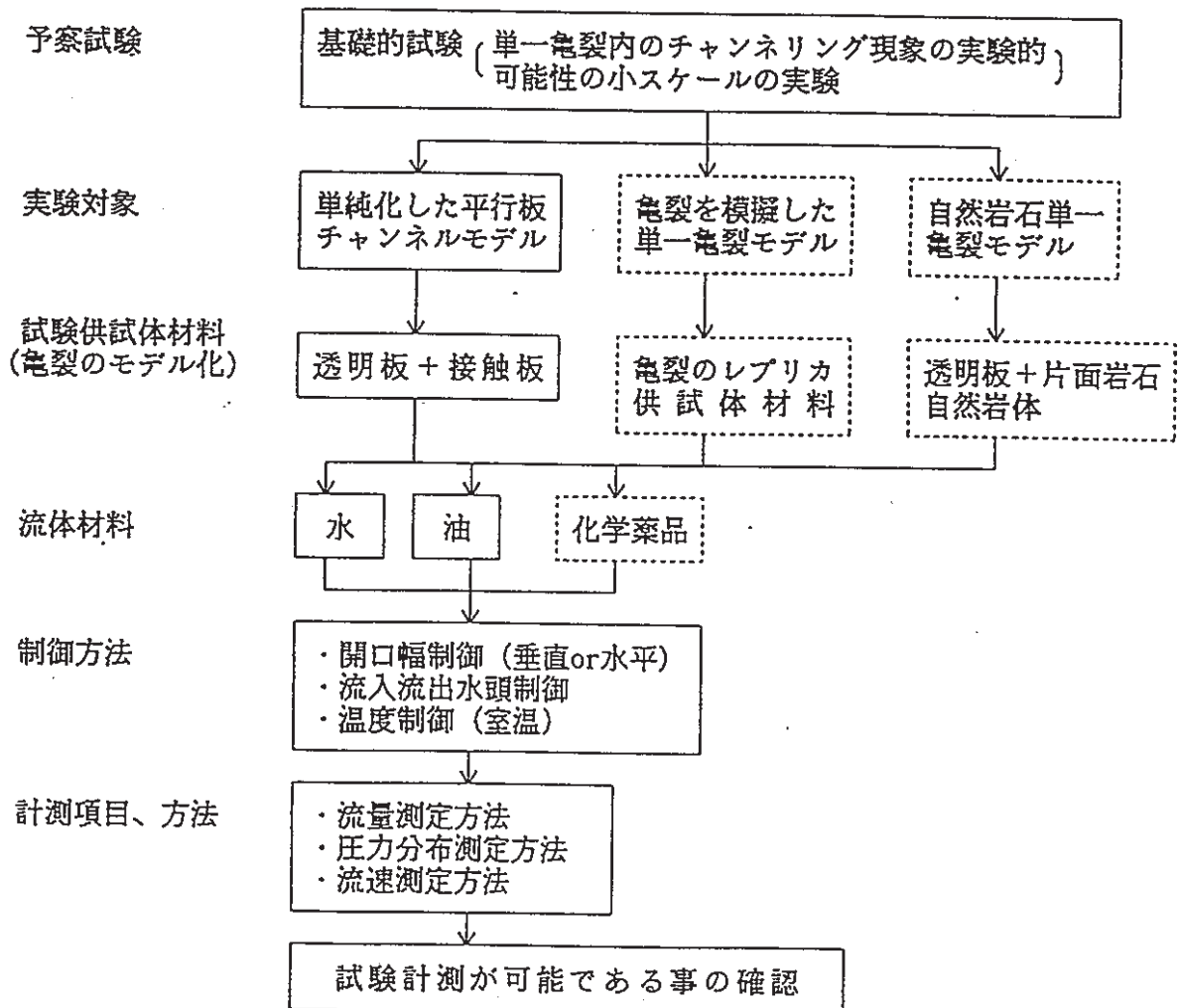
予察試験については、本試験前の予備試験として随時試験項目が追加されるものと予想されるため、具体的なスケジュールについてはその度ごとに具体的な試験計画を立案し対処していく必要がある。また、前述の試験計測が可能である事の基礎試験については、今年度試験装置の基本仕様を検討し、次年度以降具体的な試験計画を立案していく。

## 2.1.5 予察試験費用



Experimental relation between natural and artificial fracture

Fig. 2.1-5 天然割れ目と人工割れ目の実験的關係



Procedures of preliminary tests

Fig. 2.1-6 今年度の予察試験の進め方

## 2.2 本試験設備

### 2.2.1 本試験の目的と概要

ファーストフィールドにおける物質移動現象を把握する場合、最も重要な要素として、その水理挙動現象の経路や速度を検討しておかねばならない。昨年度の成果では、最も現実的な評価手法として、その移行媒体としての地下水の挙動と、その水理条件下での物理的、化学的な物質移動、遅延挙動とに分割して考えることが得策のようである。また、地下水移行媒体が岩盤と想定され、つまり亀裂性媒体と考えられる。そこで、本試験の最終的な目的としては、亀裂性媒体中の水理現象と物質移動を明らかにすることにあるが、今回は主に、水理現象の観察やモデル化を目指すことが第一歩となる。また、複雑な亀裂のモデル化、つまりネットワークモデルの検証や解析モデルの開発を目標とするが、その第1歩として単一亀裂の場合に的を絞って考えてみる。

ここで取り扱う本試験とは、具体的な試験設備の他に本試験を行うために必要な一連の準備作業や試験後の作業が伴うことになる。例えば、試験準備のためには、試料の採取地の選定－採取場所の決定－岩試料の事前調査－岩試料の作成・養生・運搬－試験体の整形などの作業工程が考えられる。また、試験後の作業には試験体の検査・検証と撤去などを考慮しておく必要がある。今回は、本試験における各作業工程を踏まえ、その項目や概略の留意点等に限ってまとめてみた。次年度以降個々の作業工程を詳細に検討し、試験スケジュールに組み込んでいく必要がある。

なお本試験設備については前年度の成果より、その基本的な仕様や試験手順を考えてみるとともに、既往の研究成果をもとに試験規模について検討してみた。



## 2.2.2 本試験に先立って一試験規模の検討一

ここでは、本試験に先立って検討しておかねばならない課題の一つである試験規模について、既往の研究成果をもとに考察してみた。まず、天然の割れ目の代表的な大きさからの制約から検討してみる。凹凸のある天然の割れ目の中から、その一部分をサンプリングして実験を行ったり、モデル化する際にはその試験体の規模が割れ目の局所的なものなのか、あるいは全体を代表するものなのかの議論が必要となる。例えば、割れ目の強度特性に関して、割れ目の大きさの異なるせん断試験を行ってその寸法効果に与える凹凸の影響を指摘している。〔Barton(1980)、吉中(1990)〕一方、このような力学的あるいは水理学的な寸法効果は割れ目の凹凸に支配されることより、凹凸のサンプリング長さに関する多くの研究がある。Brownらはスペクトラム解析により $2 \times 10^{-5} \text{m}$ ～1mまでの波長の凹凸を調べて、割れ目の凹凸に関して特に代表的な寸法はなく、長い割れ目では振幅の大きな凹凸まで含むことを示した。更に、その関係は周波数領域により異なり、即ち、寸法により形態が変化するとしている。〔Brown & Scholts(1985)〕透水性に関する寸法効果は、割れ目の間隔に比べて十分大きくない寸法の割れ目系では、定性的に連続体の挙動と異なることが多くの研究者により指摘されている。単一割れ目に関しては、三乗則に基づく割れ目のモデル化と実験結果からの偏りの検討から、天然の割れ目が持つ凹凸、所謂ラフネスの影響評価から寸法効果についての議論に絞られている。Brown(1987)は、割れ目を形成する二つの面の凹凸を合成し開口幅の分布を作成し、スペクトラム解析より、開口幅はある程度以上の長さになるとほぼ一定の値になる、即ち、開口幅については代表的な寸法が存在するとしている。また粗い表面の割れ目でも、二つの面の接触がなければ、凹凸についての適当な補正で三乗則が成立するが、接触が密になると凹凸についての補正だけでは割れ目内のチャンネルングや流れの性質(層流、遷移流、乱流)を完全に定義することはできないとしている。〔Gale(1985)〕接触の影響、即ち、凹凸の空間分布の影響のあることは明らかである。凹凸の空間的な分布について、バリオグラム手法を用いて寸法に対して分散が停留するときの値をとることにより代表的な寸法(相関距離)を定義できることを提案している。〔今村(1989)〕例えば、相関距離が1cmであるということは、1cm間隔毎に同一成分の波が現れるということであるから、それより小さな波長の波の影響を考えねばならないことを示している。供試体寸法の異なる既往の実験結果では、同一割れ目(花崗岩の天然割れ目)の直径10cm～29cmの供試体について実験を行い、少なくとも $0.04 \text{m}^2$ (半径11cm)の割れ目についての実験が、原位置の割れ目の透水性の外挿には必要であるとし

ている。〔Raven & Gale(1985) 既往の透水試験結果をまとめたのが Fig. 2.2.2-1 及び 2.2.2-2 である。また、垂直応力に対する変形性や透水性は、長い波長の凹凸の形に支配されていると指摘している。長い波長の凹凸が開口幅の分布形を決める大きな要因であり、そのかみ合いが良ければ開口幅分布はピークの鋭い分布となり、逆に凹凸のかみ合いが悪い場合は分布幅の広いものになる。〔Tsang & Witherspoon(1983) 〕

以上のように割れ目の変形性や透水性の寸法効果はその形態に依存している、あるいは逆に、凹凸があるために寸法効果が表われると結論できる。さらに寸法の影響は凹凸や開口幅の分布そのものではなく、それらの空間的な分布に支配されているといえる。原位置の天然の割れ目の変形性や透水性を実験結果から外挿するためには、外挿可能な試験供試体の寸法が必要である。対象とする天然の割れ目が特徴付けられれば、それをもとに供試体寸法が求められるが、単純に何cm以上の透水経路を確保しなければならないという条件を示すことはかなり難しい。単一割れ目に関しては、ある岩種の場合には $0.04\text{m}^2$ 以上の割れ目は、原位置のものと水理学的に等価な挙動を示すという事例があるのみである。

つぎに割れ目系の分布からの制約から検討してみる。岩盤中には大小様々な割れ目が存在するが、透水性を規定する割れ目系の性質は、主に割れ目相互の連続性であると考えられる。割れ目の連続性の程度によって、水みちが存在したり異方性が表われたりするが、ここでは異方性も含めて多孔質媒体として近似できる場合を考える。連続性の表現法はこれまでいろいろなものが提案されている。一つは、割れ目系を流れる浸透流へのパーコレーション理論の適用について言及している。〔Robinson(1984)〕これは、等方的な割れ目系において、割れ目一本当たりの他の割れ目との交差数 $N$ は、三次元の場合密度 $\rho$ と長さ $r$ の三乗の積 $\rho r^3$ に、二次元の場合は $\rho r^2$ に比例するとして、三次元では平均交差数2.0、二次元では3.1以上あれば流れは連続する、即ちパーコレート（透過）することを示した。また、二次元の連続性の条件をクラックテンソルを用いて異方性まで拡張している報告もある。〔羽出山(1987)〕また、割れ目の相互連結パターンを分類し、そのパターンの存在確率から連続性を表現している。〔渡辺(1987)〕その他に、1つの走査線上の割れ目系の走向分布の変化によって広域岩盤割れ目系の場所的な不均質性を表現するものもある。

これまで多くの割れ目系モデルでは、割れ目頻度、長さや開口幅の分布、割れ目の方向分布などが考慮されてきたが、連続性という“質的”なパラメータについては考慮されてなかった。実際の計測と評価の難易は別として、室内岩石試験やモデル実験を岩盤透水性の評価の手助けとする場合には、連続性のパラメータが大きなウェイトを占めると考えら

れる。透水性に関する寸法効果の原因の1つが連続性であり、もう1つは開口幅である。開口幅の分布は、およそ割れ目の長さ分布に依存している。長い割れ目の場合、大きな凹凸が存在し、かみ合いにより開口幅は長さとともに大きくならないという報告もあるが、ここでは単純化して考える。

原位置岩盤から室内試験にスケールを変化させると、含まれる割れ目が少なくなるために力学的又は水理学的な寸法効果が表われるというのが一般的な考え方である。しかし、近年、割れ目のフラクタル性の研究が行なわれ、限られた範囲ではあるがフラクタル性が成立しているとの報告がある。“フラクタル”(fractal)とは、特徴的な長さを持たないような図形や構造、現象などの総称である。フラクタルという言葉の語源はラテン語の形容詞fractusである。この語の派生語であるfractional(少数の)やfracture(破碎)などから推定できるように、fractusは物が壊れて不規則な破片になった状態を表わしている。具体的には、割れ目長さの分布があったときに長さ $L$ 以上の割れ目の数、又は存在確率が長さ $kL$ 以上の場合のそれを考えた時に $k^{-D}$ 倍の数、又は確率になっているような関係が成立する時にフラクタル性を持つという。ここで、 $k$ のべき乗の指数 $D$ をフラクタル次元という。現状では、 $Km$ 単位から $\mu m$ 単位の間で連続したフラクタル性については不詳であるが、仮にフラクタル性が証明されれば岩盤評価として、1)異なる任意の寸法の割れ目の予測と評価、2)計測の対象とすべき割れ目の大きさの定量的な判断などが可能となる。

一方、REV (Representative Elementary Volume) という考え方から、岩盤の割れ目系を代表するのに最小な寸法はどの位かという議論がある。評価したい岩盤の寸法に対して、次第に寸法を小さくしていくと、評価のバラツキが増加する。許容のバラツキ又は誤差の範囲で最も小さい寸法を調べるために、割れ目の長さ、方向単位体積当たりの個数というデータを用いて誤差の定義を行っている。〔小田ら(1987)〕この定義によると、初めに岩盤の割れ目を評価する必要があるが、対象が広域である場合は詳細な割れ目調査を全域にわたって行うのは不可能である。この時、広域の概略の割れ目調査と前述のフラクタル性の評価を考えることで現実的な評価の可能性があると考えられる。さらに、誤差の評価を行う際に、調査する寸法を小さくし、より小さな割れ目までを調査対象とすることにより、その影響はさほど大きくないと思われ、さらに誤差を小さくできる可能性もある。

以上の既往の研究内容から、直接的に試験体の必要寸法を規定することはできないが、今後、フラクタル性やREVの検討が進めば、試験体という小さな寸法で得られた結果を原位置の岩盤に外挿する際の補正法についての議論が可能になると考えられる。

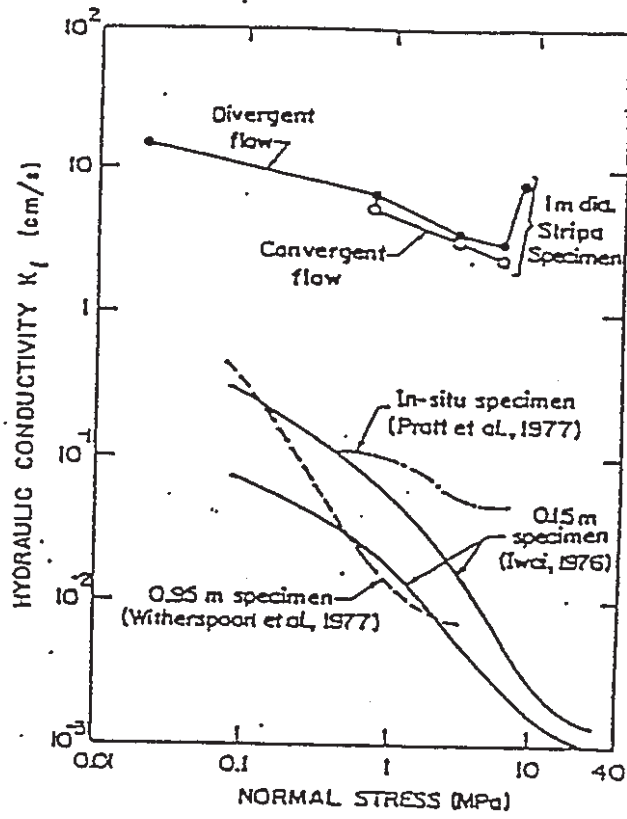


Fig. 2.2.2-1 既往の透水試験結果(1)  
Previous permeability tests(1)

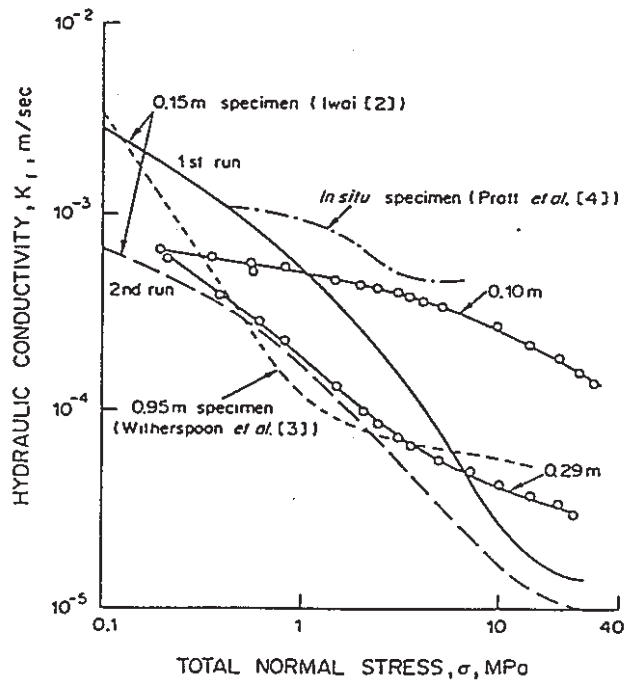


Fig. 2.2.2-2 既往の透水試験結果(2)  
Previous permeability tests(2)

### 2.2.3 本試験の基本仕様

本試験設備の基本仕様としては、既往研究による試験研究や既存の試験設備（実績）などにより、基本仕様項目の抽出を行い若干の検討を行った。具体的な仕様の作成にあたっては、予察試験の結果も参考に検討していくことになり、また、試験の目的と試験研究スケジュールを策定した段階に、本試験の仕様も明確になるものと考えられる。

ここでは、前年度の概念設計などをもとに検討を重ね、現段階で明らかになっている事項についてまとめてみる。本試験の基本仕様として種々の項目があるが、ここでは試験設備の構成について考えてみる。

- |               |                              |
|---------------|------------------------------|
| (1) 本体部       | 載荷架台、試験体容器<br>荷重負荷装置、動力源（油源） |
| (2) 計測部       | 計測パネル<br>計測装置（増幅器）           |
| (3) 制御・データ収録部 | 制御パネル<br>データ収録装置             |
| (4) データ処理部    | データ処理・画像処理装置                 |

この試験設備のうち本体部では、試験体の形状、規模や載荷機構、能力によって種々の形式が考えられる。また、試験の持続時間によっても試験設備の耐久性に考慮すべき点が考えられる。計測部並びに制御部の主な計測、制御項目としてはつぎのようなものが挙げられる。

荷重（垂直、水平）

変位（垂直、水平）

透水圧

透水量

その他には、流速、流跡線、温度及び間隙幅などが考えられる。

## 2.2.4 試験体の準備

LABROCK用の試験体は、原位置より採取するため、基本的な留意点として、原位置における状況を変化させないことが肝要となる。しかしながら切出しに伴う応力解放は避けられないので、これ以外には岩体を劣化させたり、損傷を与えるような変化を避けるような試験体作成方法を検討することにする。特に注意すべき留意点としては

- ① 試験体の風化、劣化の防止対策の採用
- ② 試験体の欠損を防ぐための取扱い方法
- ③ 乾燥させたり、新しいクラックの発生の防止

等である。

試験体の作成のための作業フローと検討項目をFig. 2.2.4-1 に示す。大きく分けて i) 採取地の選定 ii) 岩盤の事前調査試験 iii) 試験体の作成 (採取～運搬) iv) 試験体の整形、設置などの過程が考えられる。以下においては、そのフローに従って概略検討を行い、現状においてもっとも適切と思われる方法について検討する。

今回は、このフローのうち比較的先行的に考慮しておかねばならない試験体の作成について基本的な検討を行った。次年度以降、採取地を決め実際に実施することも可能である。

以下、このフローの中で左肩の番号の順に検討していく。

<検討すべき項目>

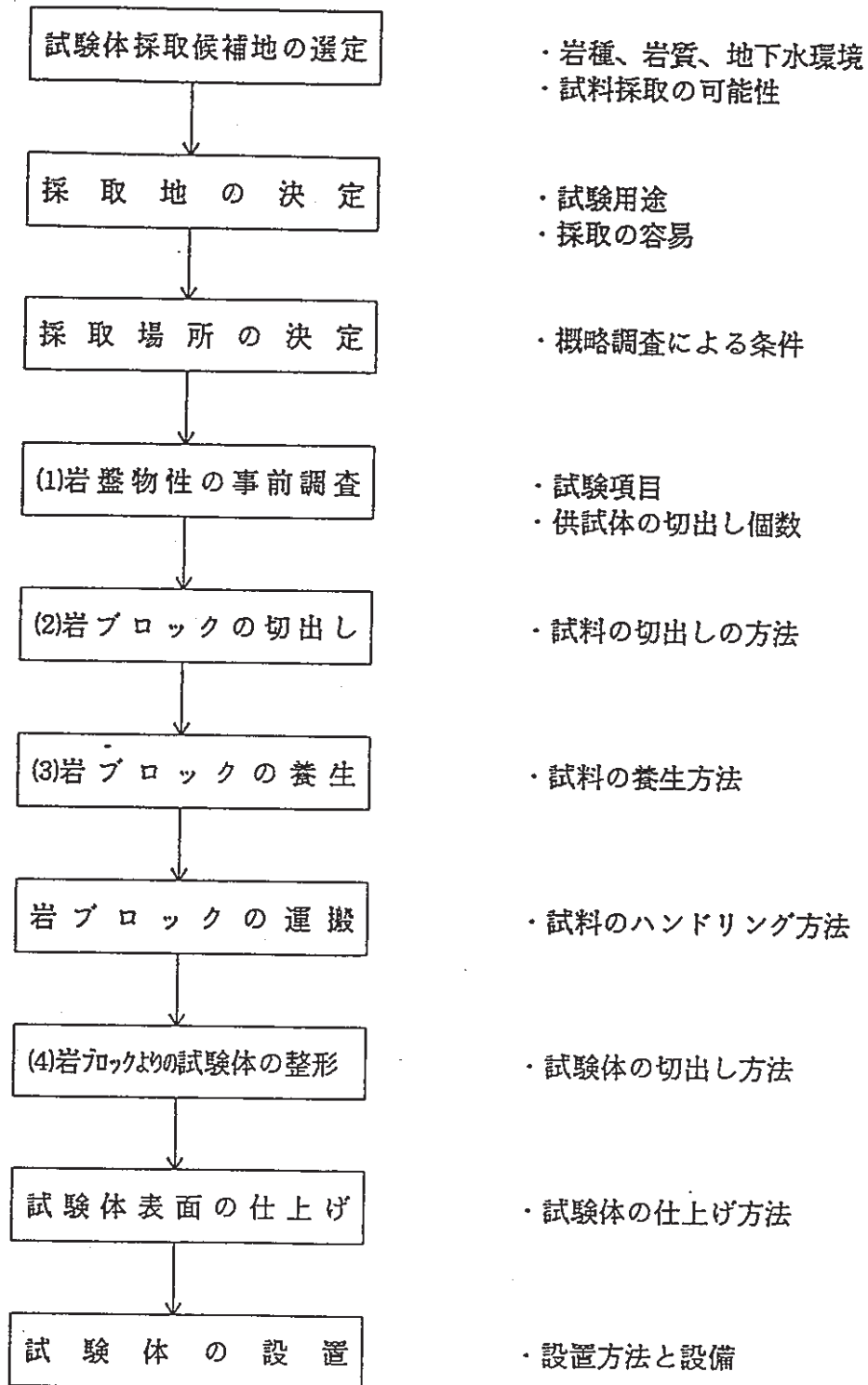


Fig. 2.2.4-1 LABROCK用試験体作成フローと検討項目

Work flow for making LABROCK test block

## (1) 岩盤物性の事前調査

試験体の大きさについては、予察試験等において基本的には決定されるが、岩盤からの切出し技術、ハンドリング技術、本試験設備の条件等も考慮され総合的に決定される。ここでは、最小の大きさとして1 m×1 m×1 m程度の正方形の試験体を考え、切出しの岩ブロックについては、加工のための余裕代も考慮する。この切出し岩ブロックに対して、切出す前にその物性を把握し、本試験に対して適性があるかどうかを事前にチェックする必要がある。切出し部分を含めて原位置の物性を把握することが事前調査の目的で、その目的を達成するための調査項目を具体的に計画する。調査項目としては、次のような項目が考えられる。

### ① 原位置における地山応力状態の把握

イ. AE法によってコアーより応力状態を調査

ロ. オーバーコアリングによる原位置試験（孔底歪法）

などの方法によって地山応力状態を総合的に判断する。

### ② 原位置透水試験

低圧ルジオン試験を用いて、周辺岩盤の透水性の状況を把握する。

### ③ 孔内載荷試験

KKTによる孔内載荷試験を実施し、地山の力学特性と緩み領域等の分布を知り、掘削影響等を受けていない岩ブロックの位置を決定する。

### ④ 地温、水温の計測

この試験は、原位置の条件を再現するための基本データとする。

### ⑤ 水質分析

本試験に用いる水の検討資料に用いる。

### ⑥ 地下水の状況把握

切羽における浸出量、流向、流速、蒸発量等を計測し、本試験におけるパラメータの設定のための基礎資料とする。

### ⑦ クラックの分布状況

ボーリングコアや切羽面におけるクラックの状況について（数、幅、充填物等）調査し、岩ブロックの切出し位置の設定に用いる。



### ⑧ トモグラフィーによる岩ブロックの調査

岩ブロックの切出し前にその全体の状況を確認する。手法としては、レーダートモグラフィー等を考える。

以上の調査・試験はサイト条件や岩盤条件によって変化するものであり、それらの条件に合った適切な調査・試験システムを選定する必要がある。

## (2) 岩体切出しの方法の検討

以下に述べる方法は岩盤を切断する事の可能な方法を網羅したもので、これらの中から現状の知見においてふさわしいと思われる方法を絞り込み、方法の概略を示す。

### ① フレックスカッター（ワイヤーソー）工法

Fig. 2.2.4-2 に示すようなダイヤモンドワイヤーを対象物に巻き付けて切断する方法である。岩体を切り出す場合は $\phi 250\text{mm}$  程度のコア抜きを先に行い、プーリーを介してワイヤーを押し込むような形で切断する事になる。切断能力は優れており、 $2.0 \sim 2.5\text{m}^2/\text{h}$  の速度で数百 $\text{m}^3$ を一気に切断する事ができる。但し、切断時には冷却・潤滑用に注水する事が必要である。

### ② ハイドロカッター（ウォータージェット）工法

超高圧（約 $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ ）の水をノズルからマッハ1～1.5 程度の速度で噴出させると共に、その水流に鉄粉やガーネット砂等のアブレイシブを添加させ、切断する方法である。切断可能深さは50～60cm程度に止まるが、原子炉のコンクリート解体用に開発されたノズル本体が切断スリットに入り込む回転ノズル型の装置もある。この装置では深さ1.5mまでの切断が可能であり、原理的にはさらに深くすることも可能である。

(Fig. 2.2.4-3 参照)

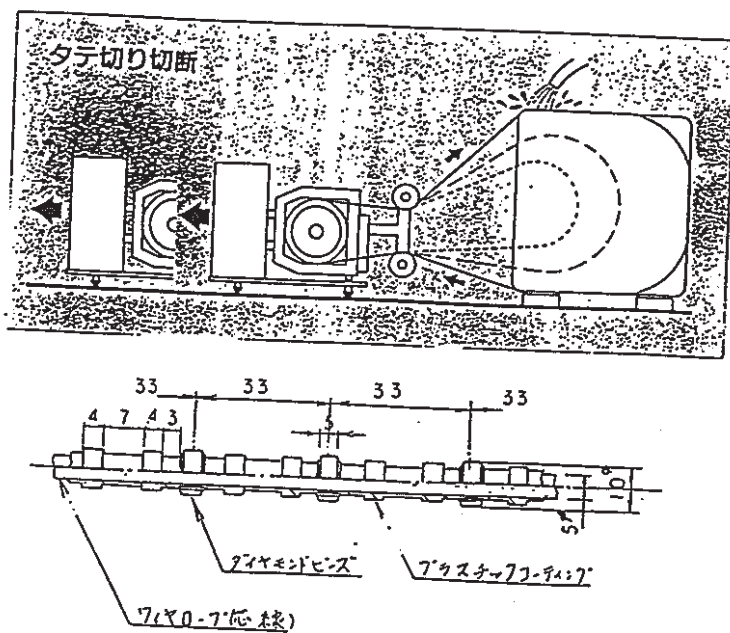


Fig. 2.2.4-2 フレックスカッター工法  
Flex-cutting method

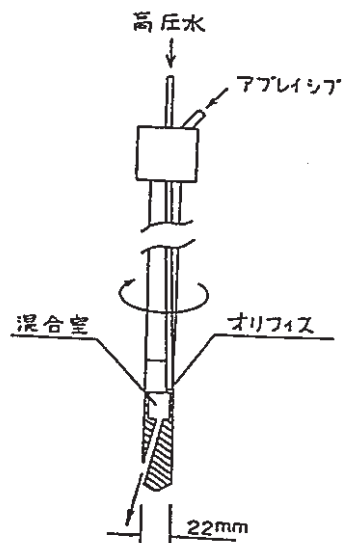


Fig. 2.2.4-3 回転ノズル型  
ハイドロカッター  
Hydro-cutter with rotating nozzle

③ ブレードカッター工法

円盤状ブレードにより切断する方法で、コンクリートの切断では最も一般的に用いられている。この方法は原理的にブレード直径の半分未満の深さ迄しか切断できず、現状では最大65cmである。

④ 連続コアボーリング法

φ150mm 程度のコアボーリングを連続させることにより切断する方法であり、コンクリートに関してはかなりの実績を持ち、岩盤に対しても十分な能力を持つ。通常は切削水を必要とするが、水の代わりにエアフォーム（泡）による切削も行われることがある。

⑤ スロットドリリング法

5連装のドリルビットにて連続的に削孔する事により切断する方法である。通常は粉じん防止と冷却のため注水を行いながら削孔されるが、水を使わずに施工する事も可能と思われる。また、現状の機種においては削孔深さ1.5m迄であるが、さらに改良は可能である。

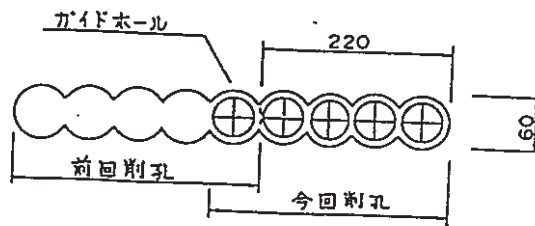


Fig. 2.2.4-4 スロットドリリング法 Slot-drilling method

⑥ 火炎ジェット工法

酸素とケロシン（灯油）をロケットエンジンの原理で燃焼させて3000℃程度の高温かつ高速の火炎ジェットを発生させて岩体を溶断する方法である。切断深さは1トレースで30cm、最大80cm程度である。

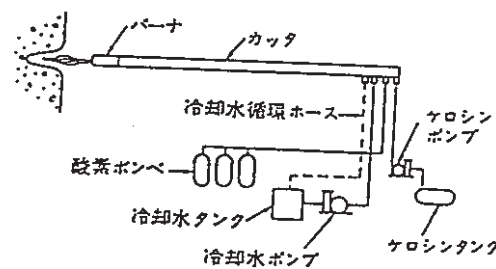


Fig. 2.2.4-5 火炎ジェット装置の一例 Blazing jet method

⑦ プラズマアーク工法

アークを利用してガスを加熱し、8千～2万℃の超高温のフレイムを発生させて溶断する方法である。金属材料の切断に関しては実用化されているが、コンクリートや岩盤については研究の初期段階にある。

⑧ レーザー工法

レーザー光線の高熱により溶断するもので、機械加工の分野では実用化されているが、岩石類の切断に関しては研究の初期段階にある。切断能力はレーザー発振器の出力によるが、現在の所最大切断深さ20cm程度のものである。

#### ⑨ 発破工法

ここで対象となるのは、ラインドリリングやプレスブリッキング等の制御発破である。発破による方法は石材の採取で一般に用いられているが、試験体へ衝撃が加わる事から、ボルトで縫い付けておくなどの対策が必要である。

#### ⑩ 膨圧による方法

試験体部分の周囲を削孔し、そこに膨圧をかけて岩盤を割裂させる方法であり、膨圧は機械的（ロックジャッキ）に与えるか、膨張剤によるなどの方法がある。この方法では試験体部分の外側に自由面が必要であり、周囲が完全に拘束されている状態では、試験体への影響が大きい。

岩体は現地で切り出された後、屋内施設において再度切断、整形が行われる。従って現地では試験体寸法よりも一まわり大きな寸法で切り出すことになり、風化や変質はそれ程大きな問題とならないが、亀裂に対する力学的な影響、すなわち亀裂の開口、ズレ、変形や亀裂充填物の流出などには十分な配慮が必要である。また、この他にも施工性や安全性も考慮する必要があり、特に表面から切り込んだ後、底部を切断できる工法は限られたものになる。Table 2.2.4-1 に定性的ではあるが、各切断方法の概略の総合評価を試みた。主な評価課題としては、岩盤への影響度合、切断能力、実績、経済性、施工性、安全性、などである。施工に当たっては、複数の工法を組み合わせる事も考えられる。

Table 2.2.4-1 岩体切出し方法の比較

工法 項目	フレックス カッター	ハイドロ カッター	ブレード カッター	連続 コア	スロット ドリリング	火炎 ジェット	フラス アーク	レーザー	発破	膨圧
試験体に与える衝撃	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
高温の影響 (温度応力)	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○
乾式の切断	×	×	×	△	△	○	○	○	○	○
切断能力	○	△	×	○	○	×	×	×	○	△
低部切断	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
施工実績	△	△	○	○	○	×	×	×	○	○
施工性	○	○	△	○	○	△	△	△	○	○
安全性	△	△	△	○	○	△	△	△	△	○
経済性	△	△	○		○	×	×	×	○	○
総合評価	○	○	△	○	○	×	×	×	△	△

## (3) 切出し岩ブロックの養生対策

切出し後の岩ブロックの養生対策については、切出し後の状況を化学的にも物理的にも変化させない対策を講じる。基本的には、岩ブロックに表面加工をする必要があるが、その条件としては

- ① クラック等を埋めたりするような材料でないこと
- ② 水分の蒸発を防ぐこと
- ③ 水に溶けこまず、岩ブロック内に浸みこまないこと
- ④ 耐久性があること

等を考慮する。現在考えている対策には

- ① シート養生
- ② ビニールコートの吹付
- ③ コンクリートによる周辺覆工

等が考えられる。

#### (4) 整形作業

取り出した岩体から作成する試験体の仕上がり要求精度についてTable 4.3.2.4-2 の項目について検討する。 岩ブロックより試験体の作成については、現段階では、角柱の場合ブレードによる切出し、円柱の場合には大型コアドリル方式がある。切出し後は、仕上がり要求精度になるように表面仕上げを行う。整形された試験体に対しても試験前の調査を行うものとするが、その主体となるものは表面の岩盤亀裂調査である。この調査は試験後に行われる試験体の調査と密接な関係がある。調査結果は、基本的には、事前解析に利用することが考えられる。具体的には次のような作業が伴うことになる。

- ① クラック分布図の作成 (スケッチ、写真等)
- ② クラックテンソルによる透水係数の予測
- ③ 事前調査による内部の状況の予測
- ④ 試験体の立体イメージの作成
- ⑤ 事前解析 (予測解析) 用データの作成

Items for evening the rock

Table 2.2.4-2 試験体の仕上がり精度

検 討 項 目	制 約 条 件
①製作寸法精度 (大きさの精度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験設備の仕上がり精度</li> <li>・切出し方法の精度</li> <li>・仕上げ技術</li> <li>・ハンドリングの方法 (重量物の取扱い、角の欠損防止)</li> </ul>
②試験体壁面の精度 (凹凸の精度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験設備の仕上がり精度</li> <li>・切出し後の仕上げ技術</li> <li>・ハンドリングの方法</li> <li>・計測方法</li> </ul>

### 第3章 MACRO-3D設備の設計

本章においては予察試験（カラム，セル）、MACRO-2D及びMACRO-3Dの設備設計結果を示すものとする。ただし、各設備の設計グレードは下に示す通りである。

多孔質媒体水理・物質移動予察試験（カラムタイプ）	C
多孔質媒体水理・物質移動予察試験（セルタイプ）	C
MACRO-2D	B
MACRO-3D	A

Aグレード：設備概念図に主要寸法を記載

Bグレード：構造図、機器仕様、及び系統図を作成

Cグレード：詳細設計の実施

#### 3.1 多孔質媒体水理・物質移動予察試験（カラムタイプ）

カラム試験設備の主目的は透水係数、微視的分散係数の測定であり、長さ約1.1m内径0.1mのカラムに媒体を充填し、ヘッド差により水流を生じさせ、トレーサ(NaCl)を注入してその濃度分布を測定して目的を達成するものである。

Fig. 3.1-1 にカラム試験設備の外形図を示す。

#### 3.2 多孔質媒体水理・物質移動予察試験（セルタイプ）

セル試験設備はMACRO-2Dの予察試験の意味合いが強いため、MACRO-2Dの縮小版といえよう。0.7m<sup>H</sup> × 0.1m<sup>W</sup> × 1m<sup>L</sup> の細長いアクリル製の水槽内に媒体を充填して多孔質媒体層を構築し、ヘッド差により水流を生じさせ、トレーサ(NaCl)を注入してその分布を経時的に測定出来るものとする。

Fig. 3.2-1 にセル試験設備の外形図を示す。

### 3.3 MACRO-2D

MACRO-2Dは主に物質移動モデルの確証を目的として設備で、現在の計画では $1\text{m}^{\text{H}} \times 0.1\text{m}^{\text{W}} \times 2\text{m}^{\text{L}}$ の細長いアクリル製及びSUS製の水槽を想定している。水槽内に適当な媒体を充填して、ヘッド差により水流を生じさせ、トレーサ(NaClを予定)を注入してその分布を経時的に測定するものとする。

Fig. 3.3-1にMACRO-2Dの外形図を示す。

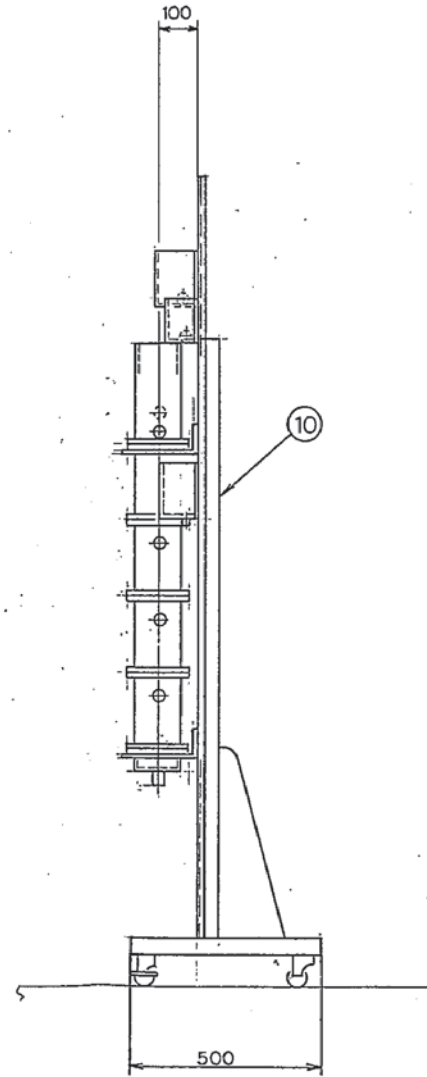
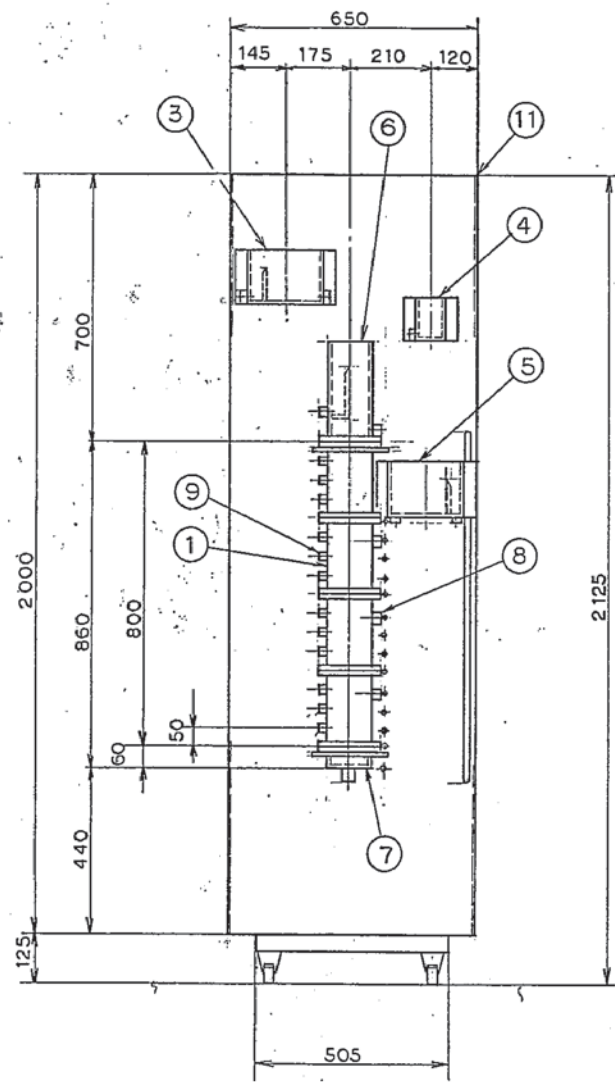
### 3.4 MACRO-3D

MACRO-3DはCharacterization手法の確立を目標としている。しかしながら、この問題を扱うためには体系が大きくなければならず、それに伴い予察試験にて確認すべき事も多いことから、本検討ではMACRO-3Dについては概念の検討にとどめている。

$4\text{m}^{\text{H}} \times 4\text{m}^{\text{W}} \times 25\text{m}^{\text{L}}$ のコンクリート製水槽を製作し、内側をステンレスライニングする。その中に、媒体を充填して現実の地層を模擬した体系をつくる。上部からトレーサ濃度、地下水流速及びパラメータ値測定のためのボーリング孔を掘ることが可能であるものとする。また、水流を生じさせることが可能なものとする。

Fig. 3.4-1にMACRO-3Dの概念図を示す。





11	ステンレス板	SUS	1	650×2000×2 <sup>t</sup>
10	架台	SPCC	1	R <sub>0</sub> -1700 オランダ製
9	マダダ取付部	"	12	"
8	セラ取付部	"	4	"
7	カラム下部	"	1	"
6	上部堰タンク	アクリル	1	詳細図参照
5	下部堰タンク	"	1	200×150×100
4	トレー容器	"	1	80×80×120
3	ヘッドタンク	"	1	200×150×100
2	補給水容器	PVC	1	φ450×750 詳細図参照
1	カラム	アクリル	1	φ114×800×4 <sup>t</sup>
NO	品名	材質	個数	型式

番号	日付	内容	作成	検討	承認	項目
		改訂				
<b>JGC 日揮株式会社</b>						
日付	— —		縮尺			
作成	検討	承認				
JOB コード	□-□-□-□-□-□					
図面番号						承認 C

Fig. 3.1-1 Equipment layout for column dispersion test

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

A

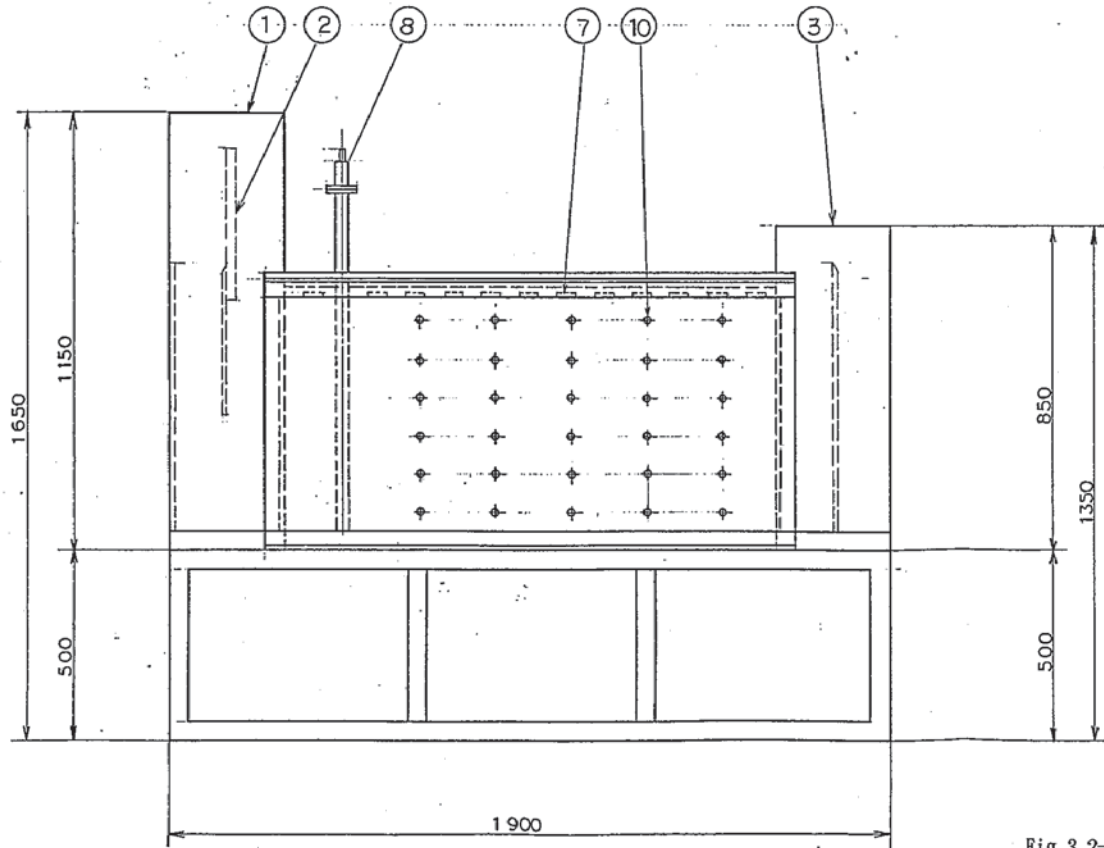
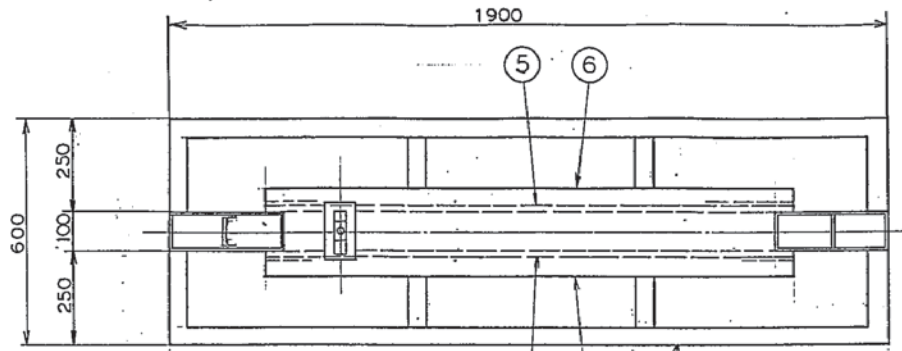
B

C

D

E

F



11	架台	SUS	1	1900x600x500 <sup>(4)</sup>
10	センサ取付部		30	"
9	トレサ完		1	"
8	トレサ容器		1	"
7	上部不浸透層		1式	詳細図参照
6	取付アングル	SUS	4	1400x50x2 <sup>1</sup>
5	後部塩ビ板	PVC	1	1400x710x15
4	前部アクリル板	アクリル	1	1400x710x15
3	流出部	SUS	1式	"
2	流調用堰調節部		1式	"
1	流入部	SUS	1式	詳細図参照
NO	品名	材質	個数	型一式

◇					
◇					
◇					

番号	日付	内容	作成	検討	承認
----	----	----	----	----	----

**JGC 日揮株式会社**

日付 \_\_\_\_\_ 縮尺 \_\_\_\_\_

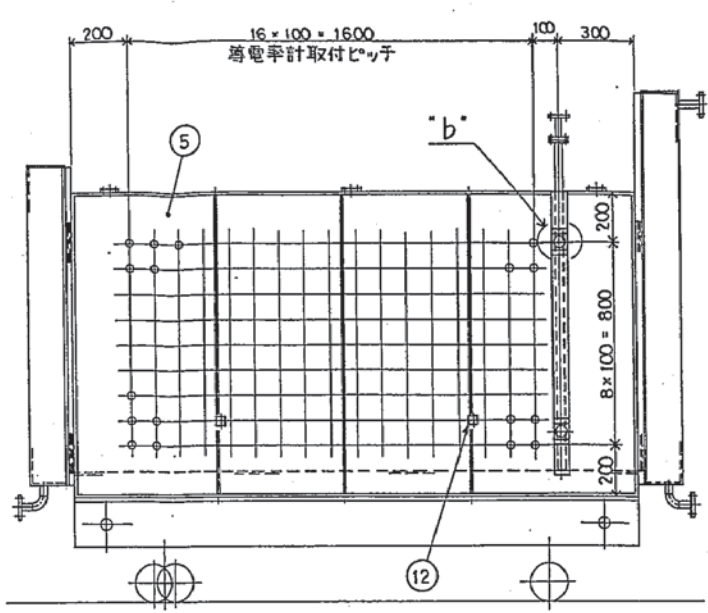
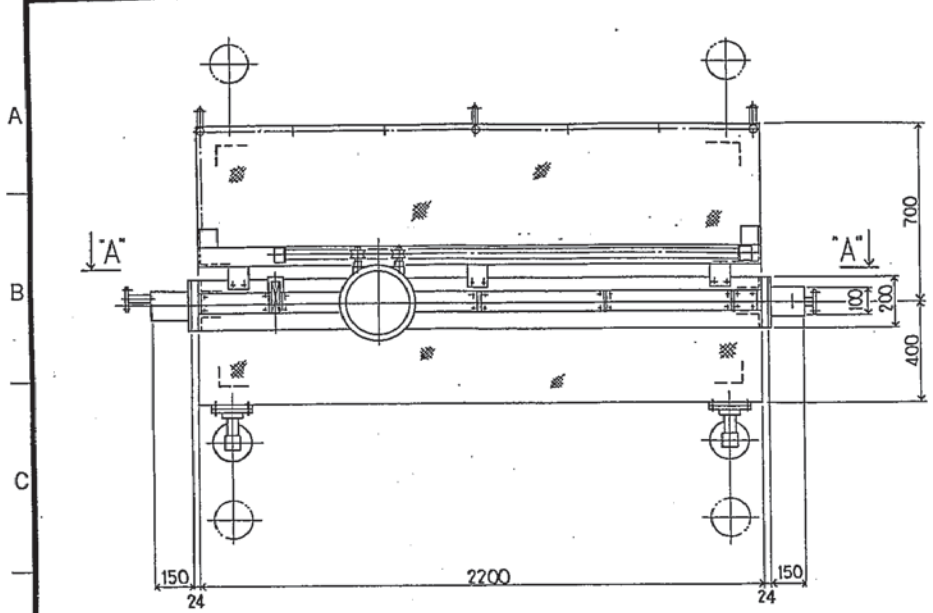
作成 \_\_\_\_\_ 検討 \_\_\_\_\_ 承認 \_\_\_\_\_

JOB コード

図面番号 \_\_\_\_\_ サイズ 改訂 **C**

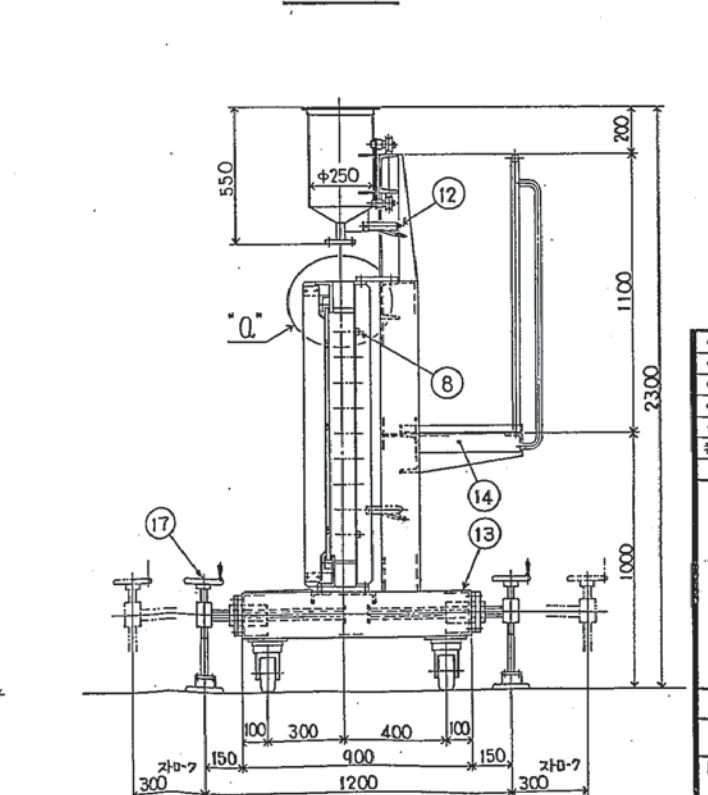
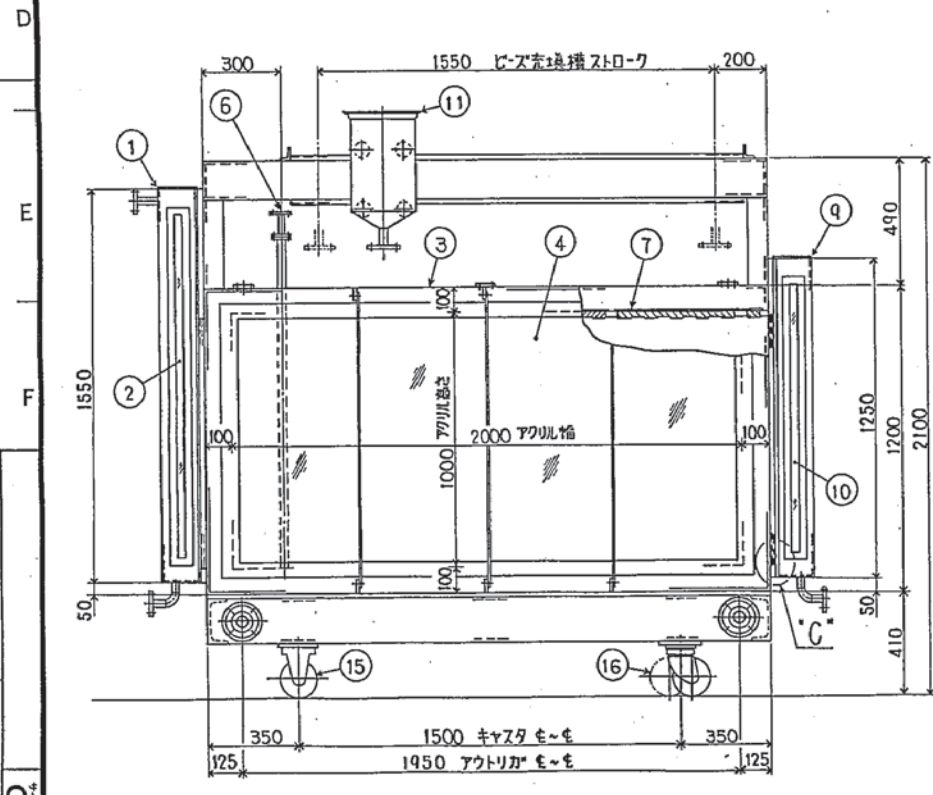
Fig. 3.2-1 Equipment layout for cell test

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11



"A - A"

17	アクトリカ	SS41	4	
16	自在キャスタ	ウレタンゴム	2	
15	固定キャスタ	ウレタンゴム	2	
14	作業台	SS41	1	
13	架台	SS41	1	
12	エアパイプ	-	3	
11	ビーズ交換槽	SUS304	1	
10	排水槽アクリル板	アクリル	1	
9	排水槽	SUS304	1	
8	導電率計取付ノズル	テフロン	153	
7	チャネリング防止アノード	軟質ゴム	1式	
6	H-ラ注入ノズル	SUS304	1	
5	前面パネル	SUS304	1	
4	前面アクリルパネル	アクリル	1	
3	成層帯水槽	SUS304	1	
2	注水槽アクリル板	アクリル	1	
1	注水槽	SUS304	1	
符号	名 称	材 質	数 量	備 考



注 記  
 各部の詳細は別図"MACRO-2D 構造図(1/2)"  
 を参照のこと。

番号	日付	内 容	作成	検討	承認	現場
		改 訂				

**JGC 日揮株式会社**

Fig. 3.3-1 Outline drawing for MACRO-2D (1)

**MACRO-2D 構造図 (1/2)**

日付 \_\_\_\_\_ 縮尺 1/15

作成 原田 検討 茂木 承認 原田

JOB コード 0-611211-0-5-\_\_\_\_\_

図面番号 \_\_\_\_\_ サイズ 改訂 \_\_\_\_\_ 現場 配付先 \_\_\_\_\_

**C**

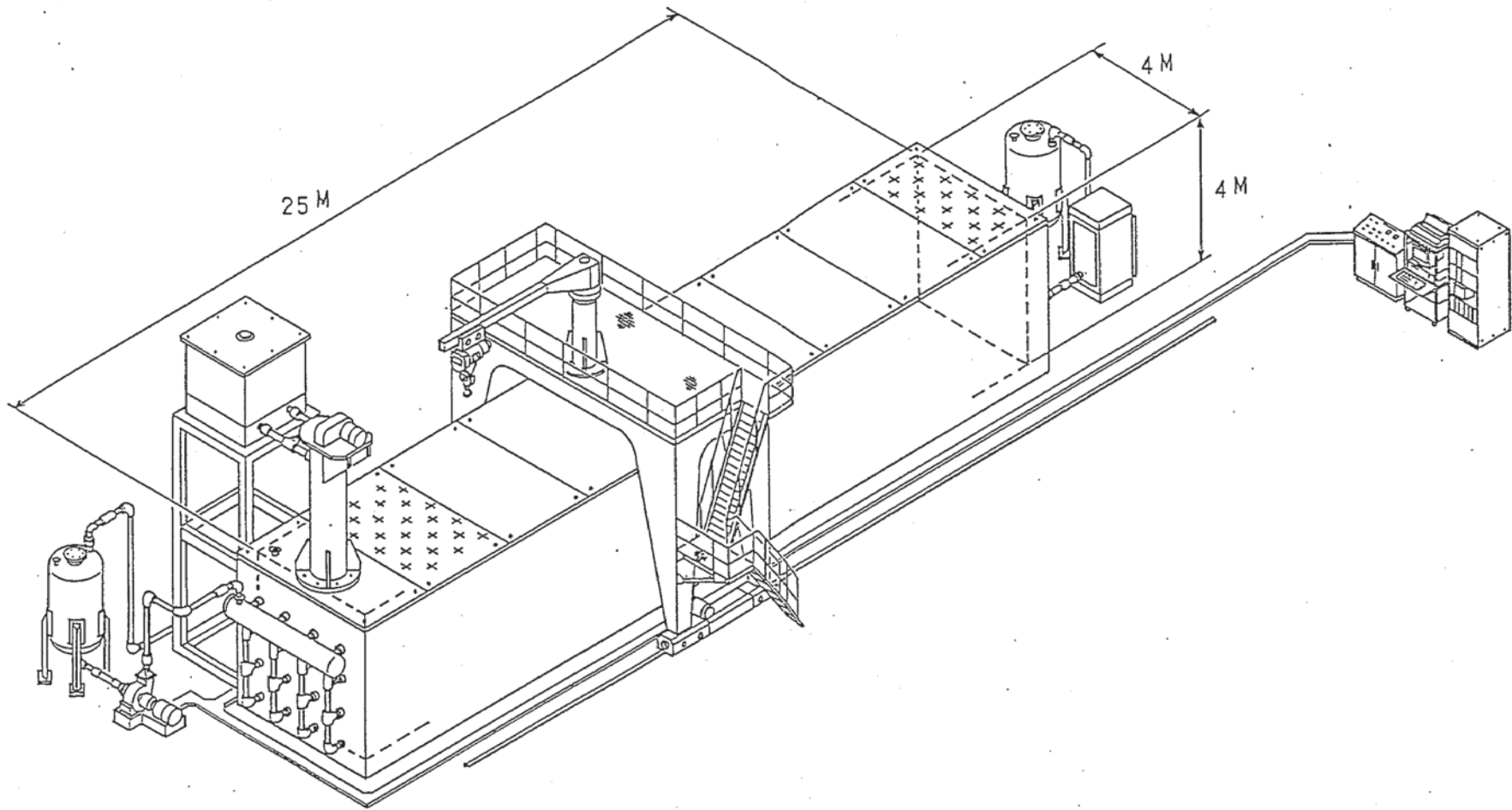


Fig. 3.4-1 Perspective drawing for MACRO-3D

## 第4章 試験設備設計

### 4.1 BORESHEAR

#### 4.1.1 試験研究の目標

本試験研究は、模擬処分孔を剪断して、

- ① オーバーバックの変形・破損状況
- ② ガラス固化体の変形・破損状況
- ③ 破砕ガラス片の分布状況
- ④ 緩衝材の移動・変形状況

等の多重バリアシステムの特質、構造の変化を観測し、バリア性能への影響を定量的に評価するための性能評価試験へ結び付けることを目的とする。

#### 4.1.2 試験研究の段階

本試験研究は、下記段階に分けて実施する。

- ① 予察試験
- ② 単純系試験
- ③ 本試験（処分場系試験）

#### 4.1.3 設備設計の成果

##### (1) 予察試験設備

予察試験は、岩体強度と緩衝材の力学的特性データを取得するための2つの試験を実施する。本試験の結果を基に本試験設備等の設計を行う。

##### (a) 岩体強度試験（予察試験Ⅰ）

##### (7) 試験設備仕様

一面剪断装置を使用する。

(イ) パラメータ等

- ① 制御条件：実岩圧を確保する。
- ② 制御パラメータ：試験岩種を変化させる。
- ③ 観測パラメータ：剪断強度

(b) 緩衝材力学試験（予察試験Ⅱ）

(7) 試験設備仕様

三軸試験機を用いる。

(イ) パラメータ等

- ① 制御条件：実岩圧を確保する。
- ② 制御パラメータ
  - ・緩衝材密度
  - ・緩衝材飽和度
  - ・緩衝材組成
- ③ 観測パラメータ
  - ・圧縮強度
  - ・内部摩擦角
  - ・応力
  - ・歪み
  - ・歪み速度
  - ・膨潤圧

(2) 単純系試験設備

岩体をも含んで実施する本試験の結果を正確に評価するために人工バリアの構成要素（緩衝材、オーバーバック、ガラス固化体）単独もしくは人工バリアのみで剪断試験を行う。

(a) 試験設備仕様

本試験設備の装置を用いて行う。

(b) パラメータ等

① 制御パラメータ

- ・ 剪断速度
- ・ 剪断変位量
- ・ 緩衝材密度
- ・ 試験体の種類
- ・ 試験体の組み合わせ

② 観測パラメータ

- ・ 試験体の破損状況
- ・ ガラス片の分布
- ・ 緩衝材の水分
- ・ 膨潤圧
- ・ オーバーバックの歪み

(3) 本試験設備

岩体を含めた試験体の剪断挙動を調べるために実施する。

(a) 試験設備仕様

大型油圧装置を主要素とした設備を用いる。

① 試験体寸法

スケール1/8、Fig. 4.1.3-1参照。

② 油圧剪断装置(Fig. 4.1.3-2)

- ・ 総重量：200 ton (概略)
- ・ 剪断能力：1,500 ton
- ・ 加圧能力：最大 688 kgf/cm<sup>2</sup> (岩圧模擬用)
- ・ ストローク：最大 250 mm (剪断変位量)
- ・ 作動速度：最大 21 mm/sec (剪断速度)

③ その他

- ・ 計測制御装置
- ・ 注水ユニット
- ・ 油圧ユニット

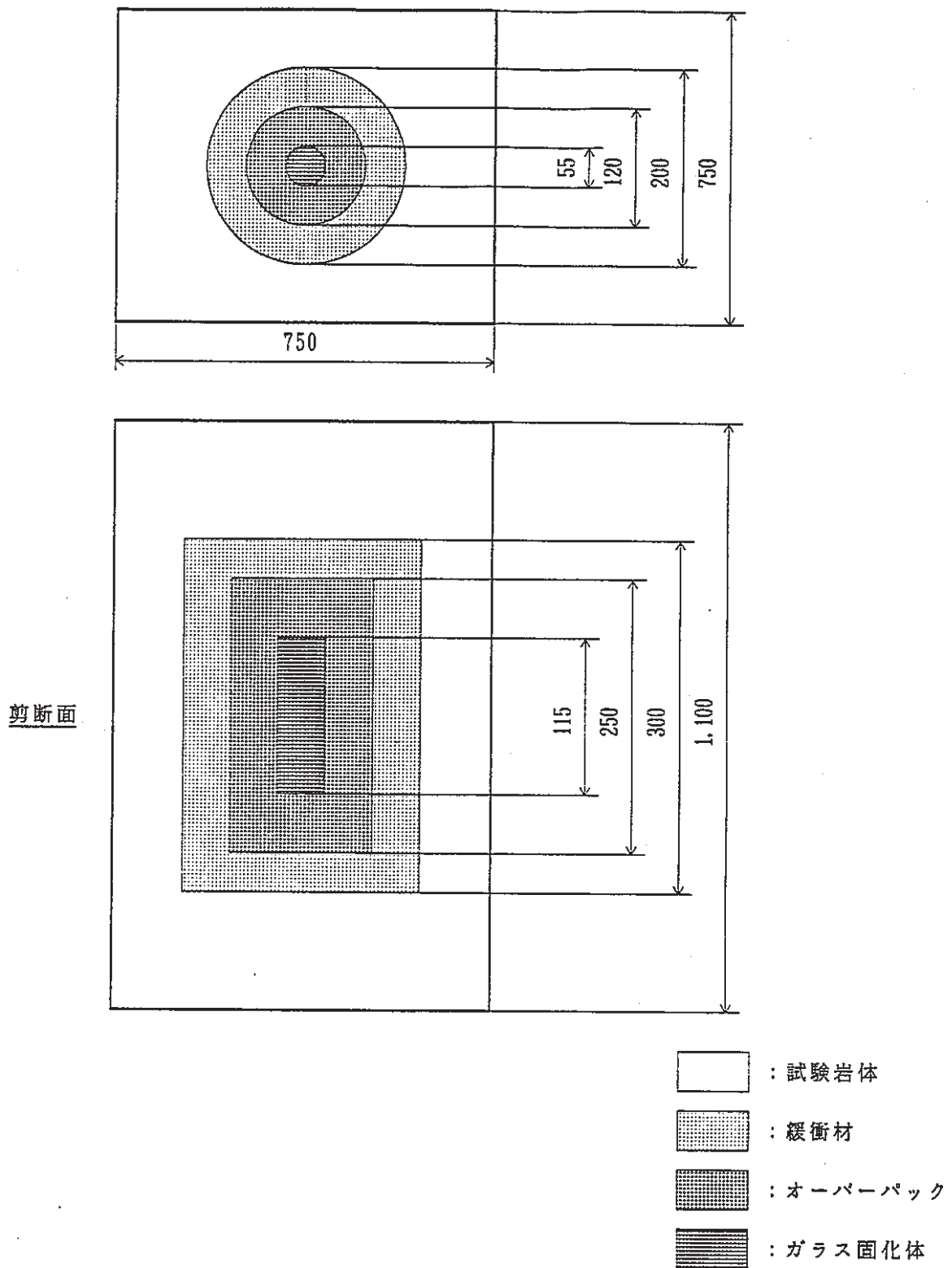


Fig. 4.1.3-1 Test specimen of BORESHEAR



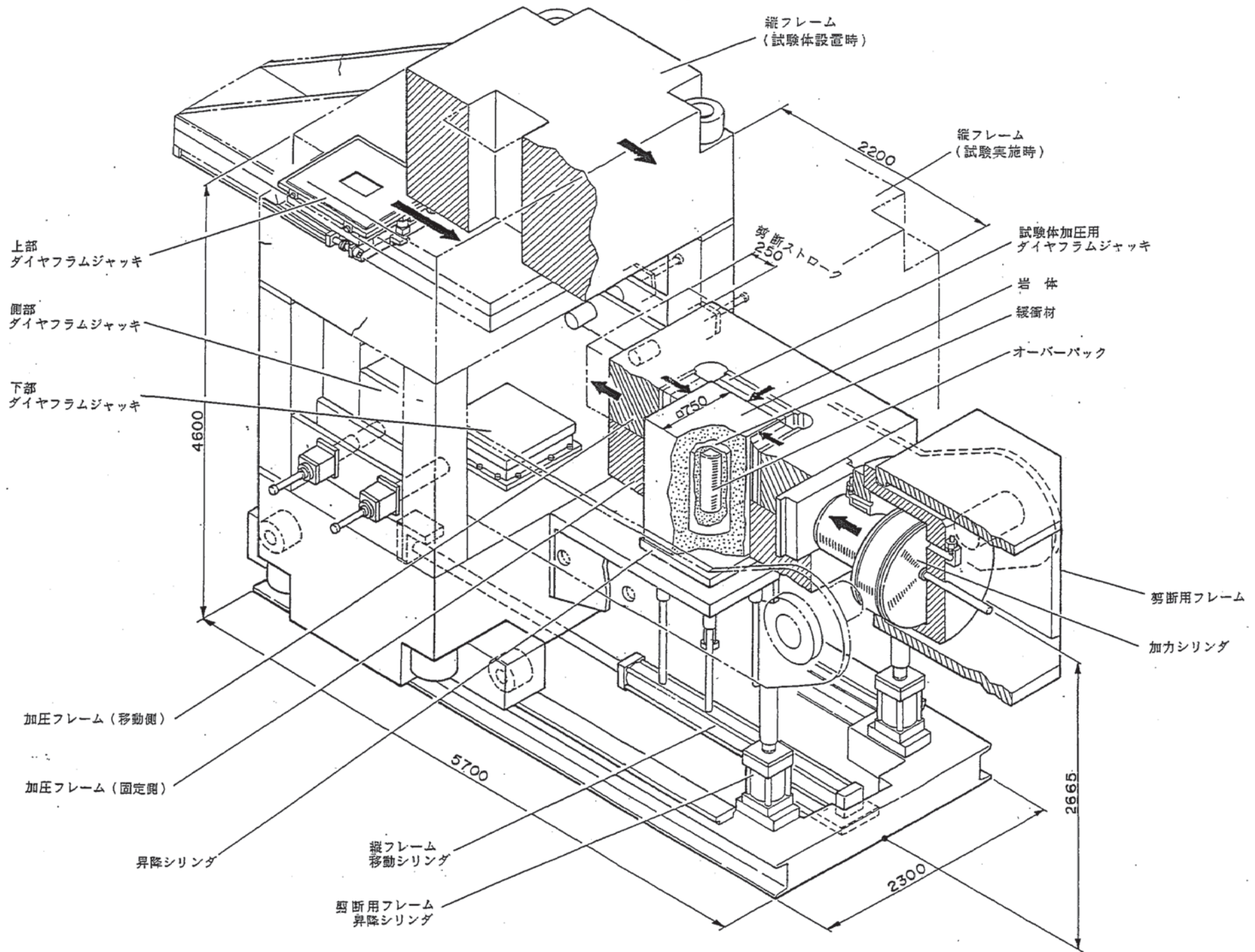


Fig. 4.1.3-2 Configuration for BORESHEAR test equipment

(b) パラメータ等

① 制御パラメータ

- ・ 剪断速度
- ・ 剪断変位量
- ・ 緩衝材密度
- ・ 試験岩体の種類

② 観測パラメータ

- ・ 試験体破損状況
- ・ ガラス片分布
- ・ 緩衝材水分
- ・ 緩衝材密度
- ・ 緩衝材膨潤圧

## 4.2 BENTFLOW

### 4.2.1 試験研究の目標

本試験研究の目標は、緩衝材の流出というプロセスによる構造変化の過程を周辺母岩の亀裂（開口幅、亀裂形状）と地下水流速に着目して、これらをパラメータとする試験を実施し緩衝材流出というプロセスを解明することである。

さらに、上記の関係をモデル化して、それらにより得られる構造モデルを用いた性能評につなげる。

### 4.2.2 試験研究の段階

本試験研究は、

- ① 予察試験
- ② 本試験（通水流出試験）

の2段階に分けて実施する。

### 4.2.3 設備設計の成果

#### (1) 予察試験設備

予察試験では、膨潤による亀裂への侵入プロセスを明らかにし、モデル化を計る。

試験により確認する事項は、

- ① 流出に対する亀裂開口幅、亀裂形状の影響
- ② 流出に対する人工亀裂と実岩体亀裂の関係
- ③ 流出量と膨潤圧の関係

である。

#### (a) 試験設備仕様 (Fig. 4.2.3-1)

上下二分割で中がくり抜かれた試験岩体の中に緩衝材を設置し、試験岩体の亀裂部（分割面）に隙間ゲージを挟み、その一体を拘束板で拘束し、注水する。

試験岩体として流出過程を目視できるようにアクリル板を用いた試験も行う。

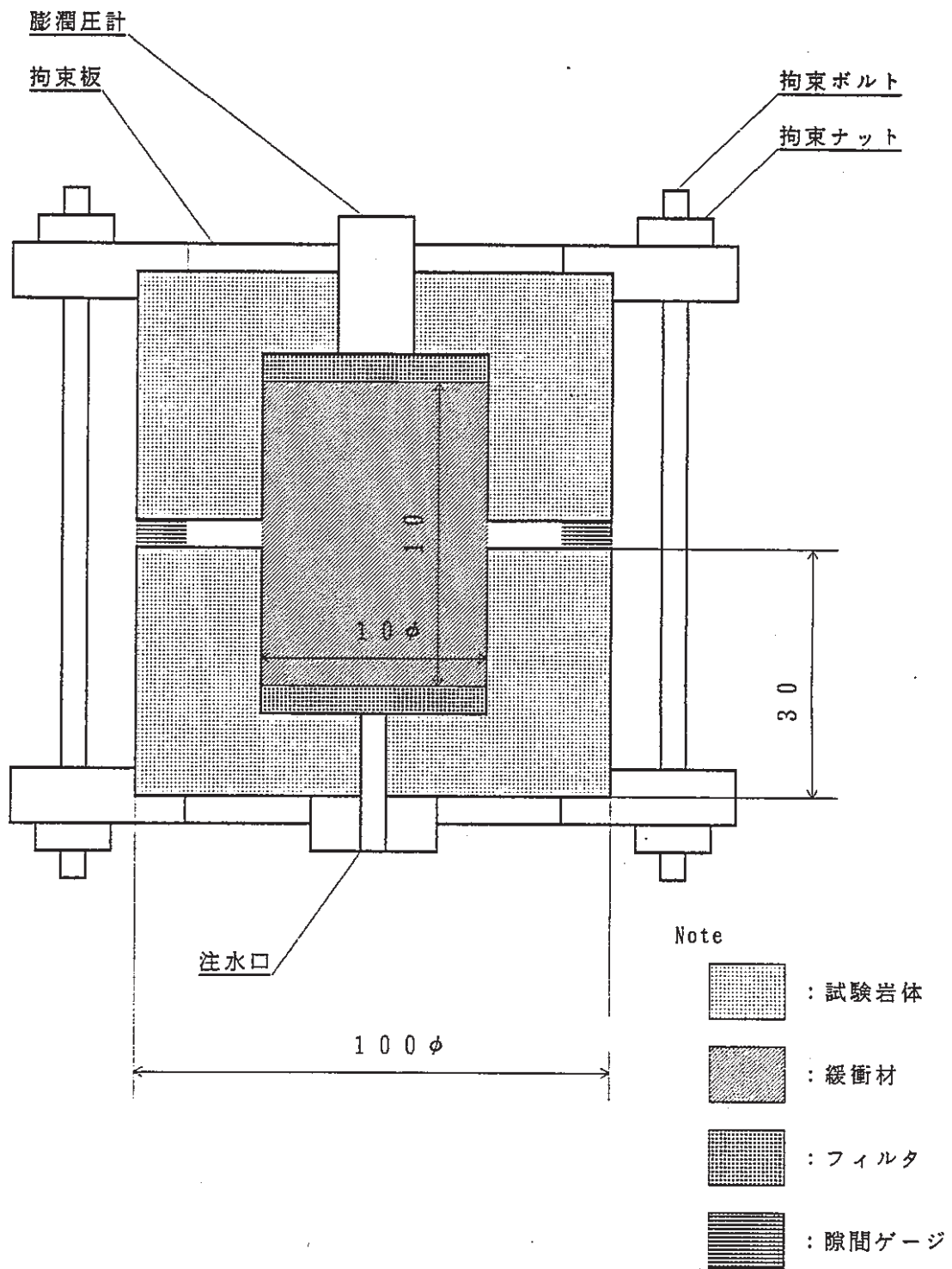


Fig. 4.2.3-1 Test apparatus for preliminary test of BENTFLOW

(b) パラメータ等

① 制御パラメータ

- ・緩衝材密度
- ・亀裂幅
- ・試験岩体の種類

② 観測パラメータ

- ・緩衝材流出量
- ・膨潤圧
- ・緩衝材流出状況

(2) 本試験設備

本試験では、亀裂存在下での緩衝材流出に対する亀裂内地下水の影響（ゲル化および浸食）を把握し、亀裂形状と地下水流速をパラメータとするモデルを開発する。

最終的には、実岩体を用いたモデルの検証試験を実施する。

(a) 試験設備仕様

装置としては、Fig. 4.2.3-2 に示すように予察試験と同等のものを水槽に浸漬した  
置で実施する。ただし、試験体の規模は、予察試験より大型にする。

また、モデル検証用の装置の概念をFig. 4.2.3-3 に示す。

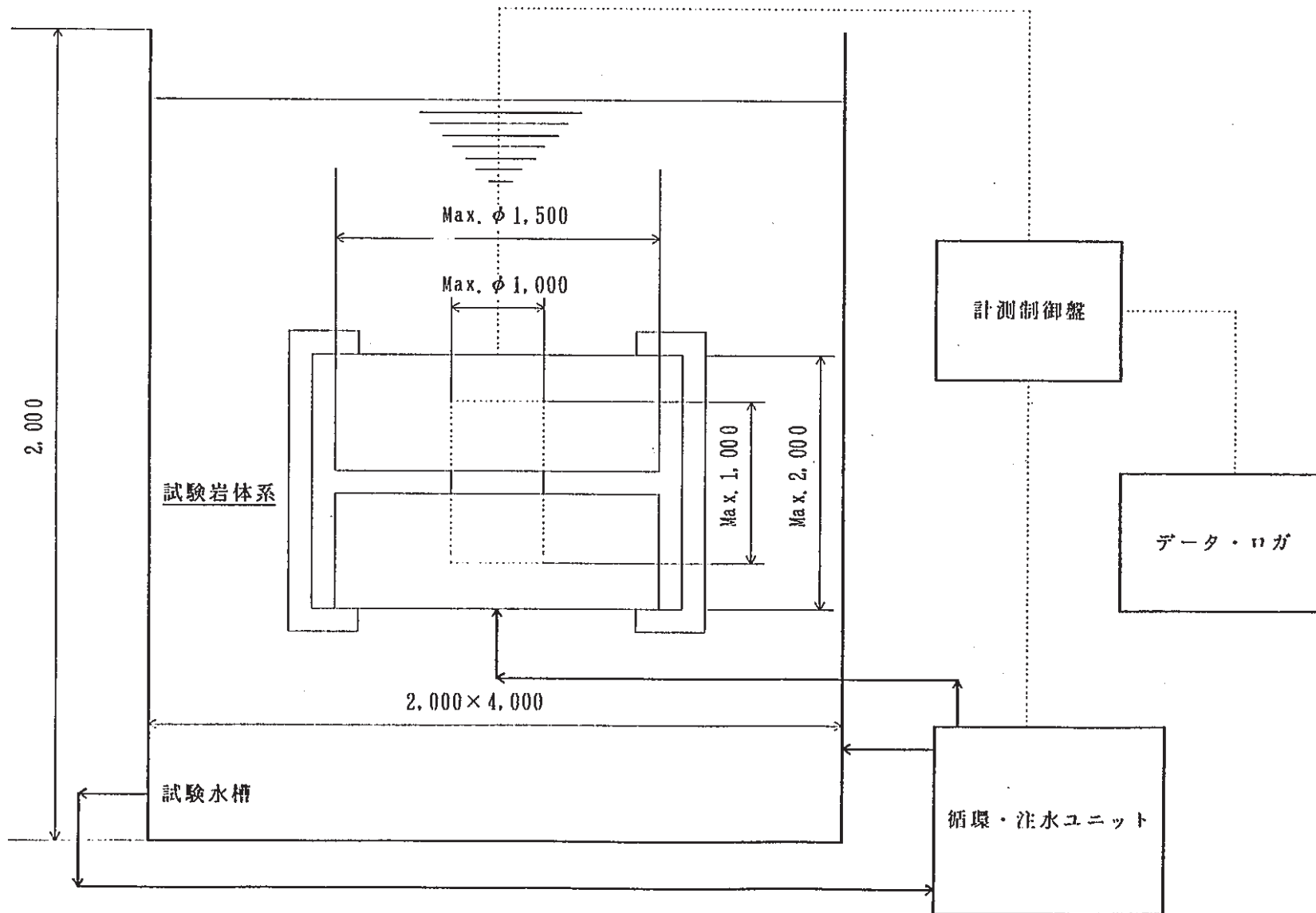
(b) パラメータ等

① 制御パラメータ

- ・緩衝材密度
- ・亀裂幅
- ・地下水流速
- ・試験岩体の種類

② 観測パラメータ

- ・緩衝材流出量
- ・膨潤圧
- ・緩衝材流出状況



Note  
— : 配管  
..... : 電気信号

Fig. 4.2.3-2 Equipment sketch of BENTFLOW

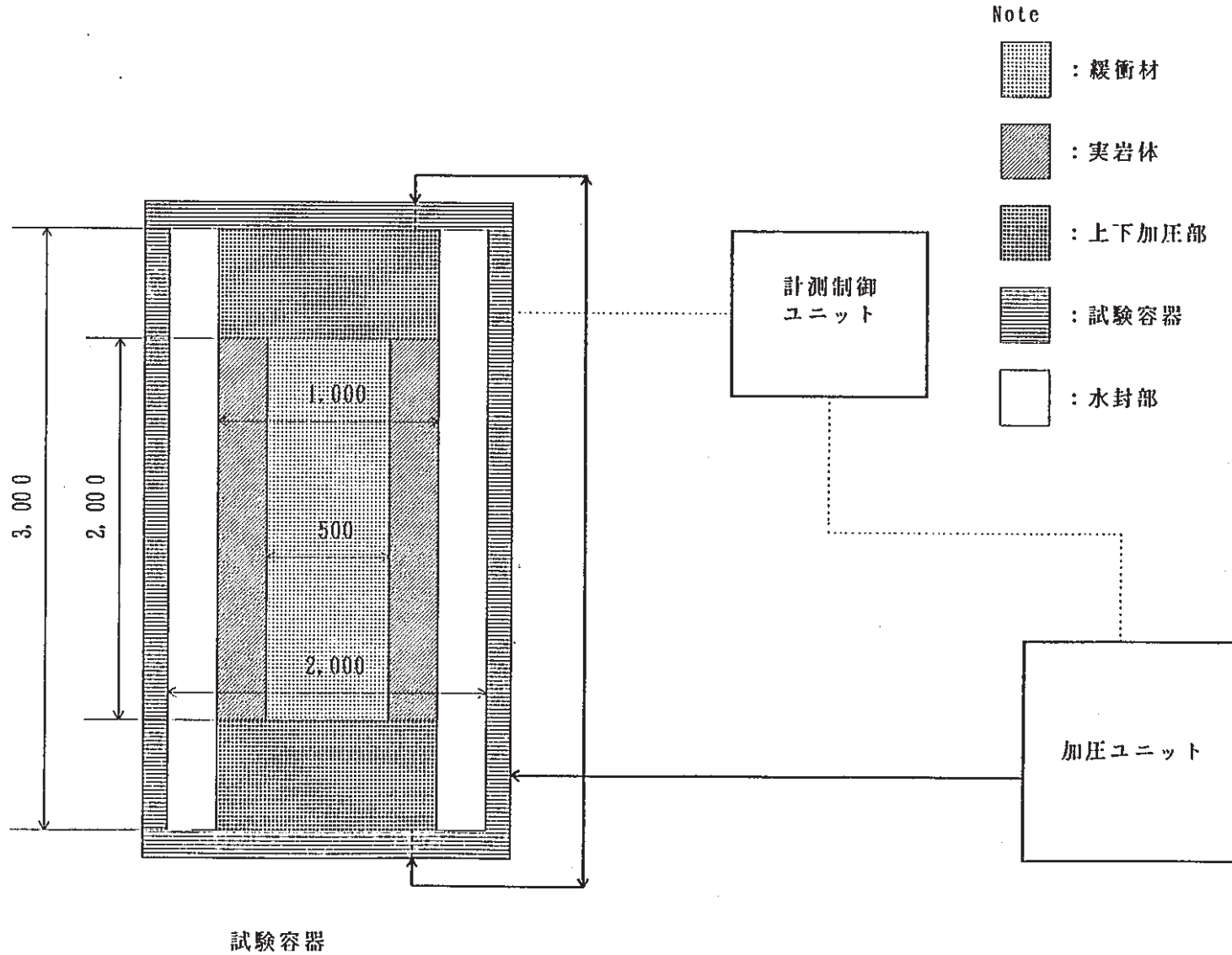


Fig. 4.2.3-3 Equipment sketch of BENTFLOW

## 4.3 HYDROGEN

### 4.3.1 試験研究の目標

オーバーパックの腐食は、酸素消費型から水素ガス発生型に移行する。

本試験研究では、この腐食により発生する水素ガスによる影響を評価するために

- ① オーバーパック近傍での発生した水素ガス蓄積の有無
- ② 水素ガスのベントナイト中での透気の有無（蓄積するとなった場合）

を確認することを目標とする

### 4.3.2 試験研究の段階及び各段階での試験内容と実施計画

上記のように水素ガス発生に関する試験では、腐食による水素について発生モードと蓄積モードの2つの挙動を検討する。試験手順をFig. 4.3.2-1 示す。

### 4.3.3 設備設計の成果

#### (1) 予察試験設備

##### (a) 本試験に向けての要確認事項

##### (7) $H^+$ の拡散係数測定試験

ベントナイト中での $H^+$  の拡散係数を求め、腐食反応における水素ガスの発生量を得る。

##### (4) $H_2$ の拡散係数測定試験

生成した水素のベントナイト中での拡散係数を測定する。

##### (b) 予察試験設備設備

##### (7) $H^+$ の拡散係数測定試験

水素イオンの還元反応に関して、そのイオンのベントナイト中での拡散挙動を定量化する基礎試験である。そこで、ベントナイトをイオン交換体と見立て、イオン交換の原理に基づいた拡散係数の測定試験装置とする。試験装置をFig. 4.3.3-1 に示す。



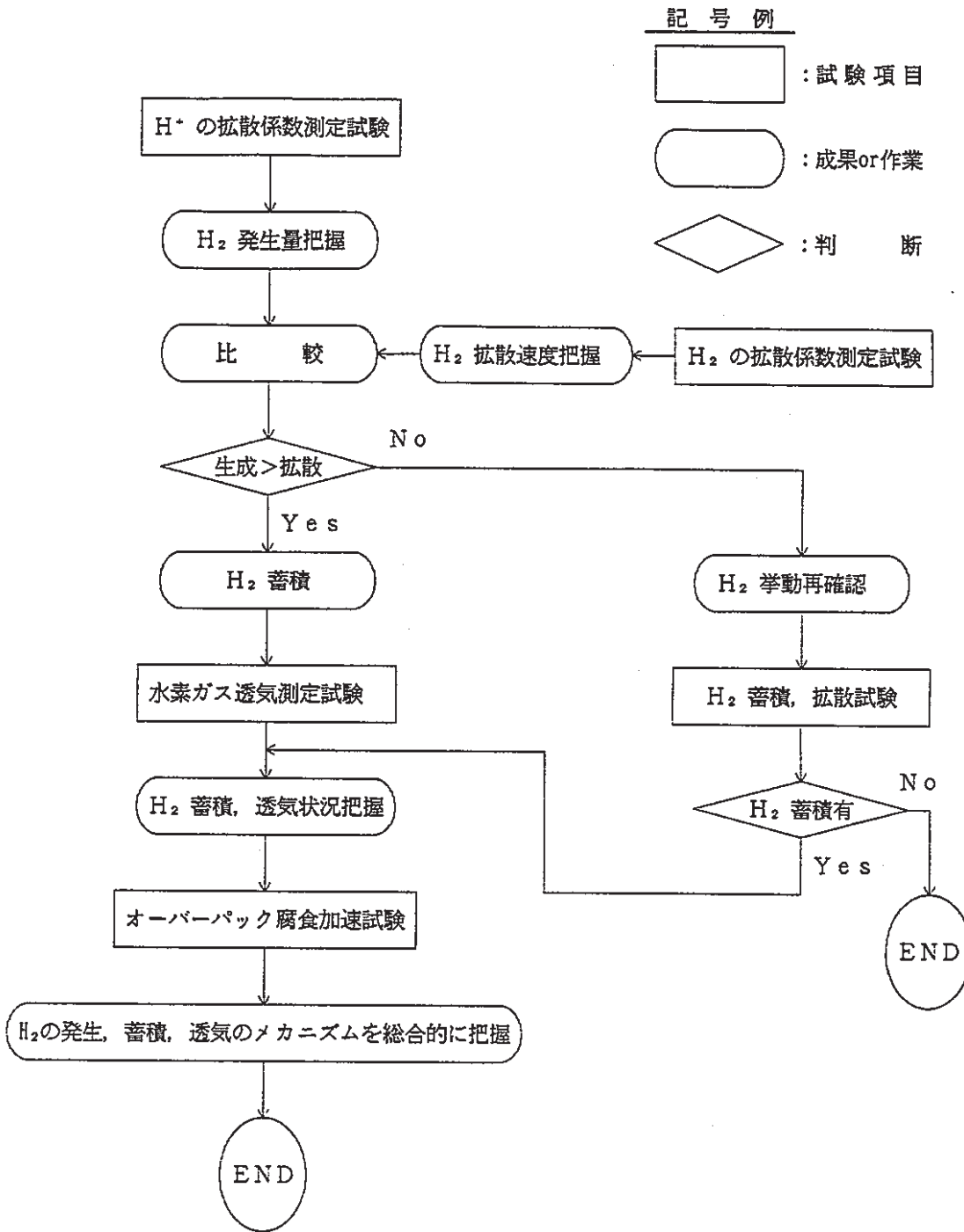


Fig. 4.3.2-1 Test system for hydrogen gas production

模擬地下水供給タンク

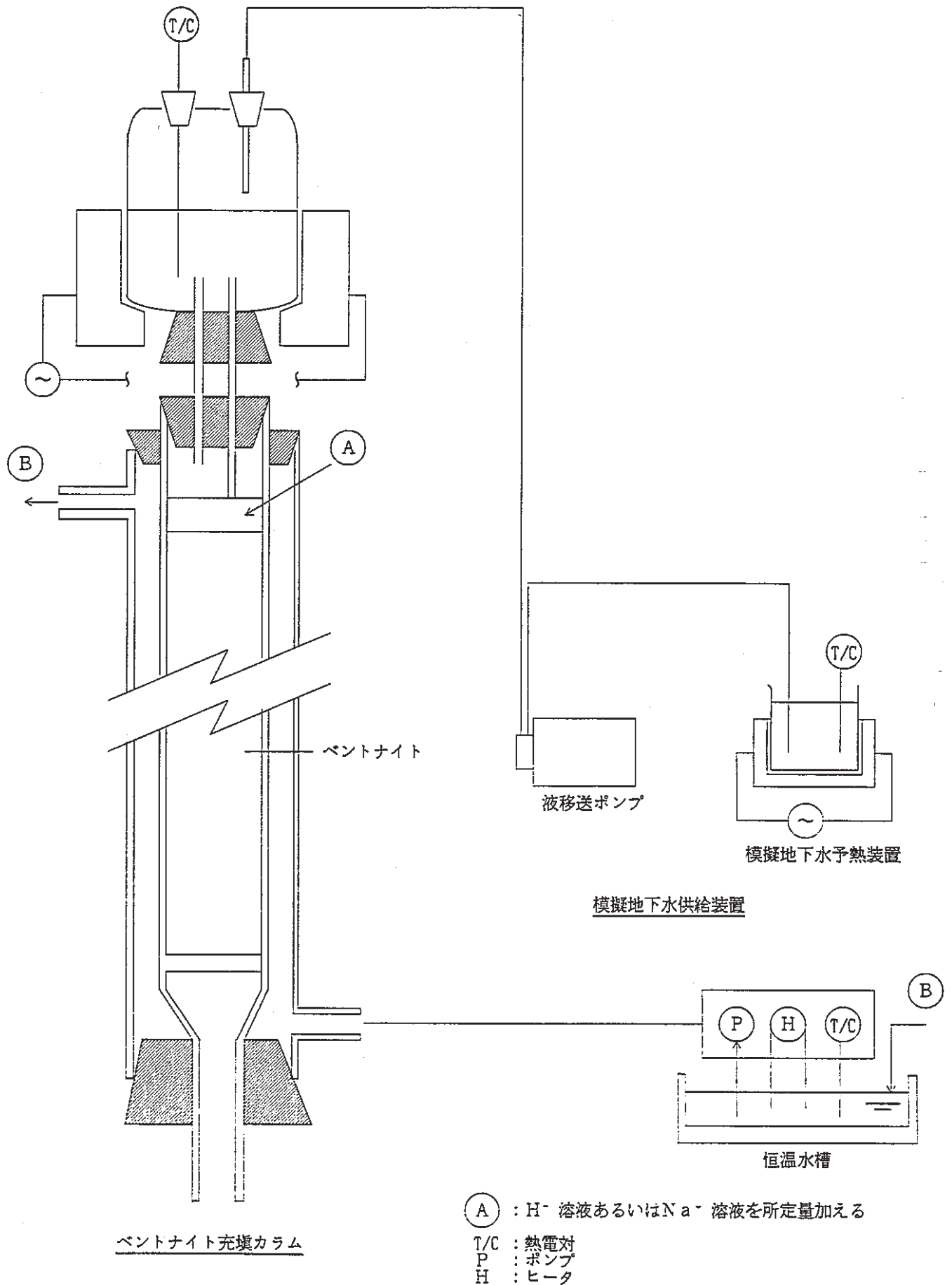


Fig. 4.3.3-1 Test equipment for  $H^+$  ion diffusion coefficient measurement

なお、カラムの主要な仕様は以下とする。

- ・型式：二重管式
- ・材質：ガラス（耐熱ガラス）
- ・形状
  - 内筒管：内径 40 mm
  - 外径 1500 mm（直管部）
  - 外筒管：内径 60 mm
  - 外径 1650 mm
- ・付属品：溶離液供給タンク（ポリ容器）

(4) H<sub>2</sub> の拡散係数測定試験

試験の原理は上記の試験と同じものとし、同じ仕様のカラムを用いる。ただし、付属品として模擬地下水水素ガス飽和装置を用意する。

試験装置をFig. 4.3.3-2 に示す。

(c) 制御条件、測定項目

(7) H<sup>+</sup> の拡散係数測定試験

ベントナイトの密度、混合比、種類を試験パラメータとし、模擬地下水を用いて試験を行う。また実験においてはベントナイト温度を制御するものとする。

なお本予察試験は次の2つの試験に分ける。

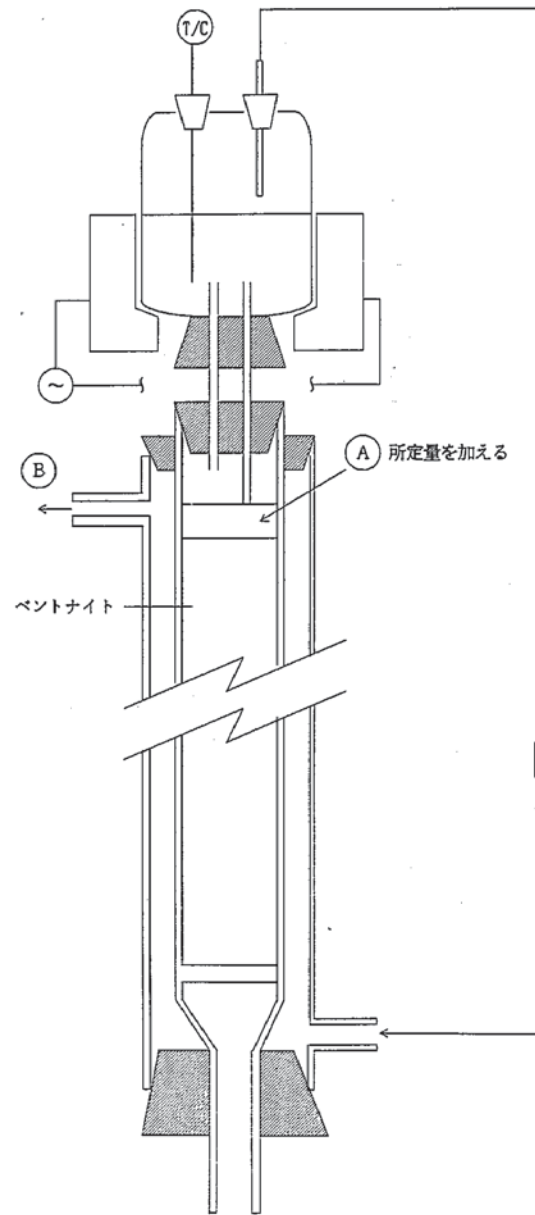
- ・地下水で膨潤したベントナイト中のH<sup>+</sup>の溶離速度の測定。
- ・完全にNa型に置換したベントナイト中のH<sup>+</sup>の溶離速度の測定。

Table4.3.3-1に制御条件、試験パラメータ、測定項目をまとめる。

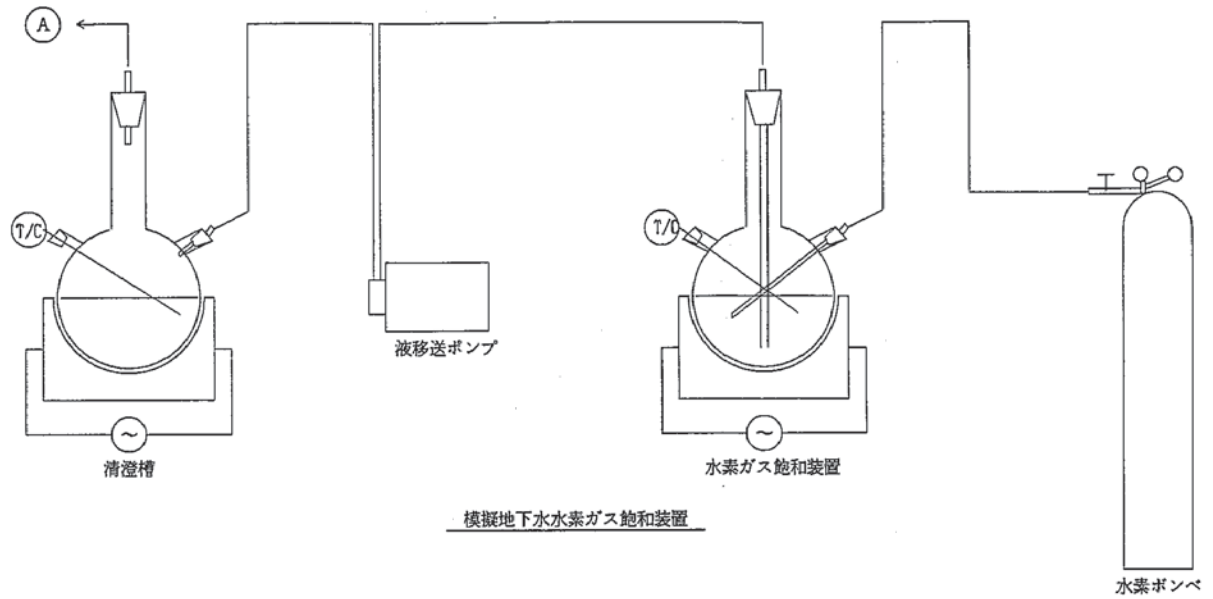
(4) H<sub>2</sub> の拡散係数測定試験

水に溶解した水素ガスについて上記の試験と同じようにその拡散係数を測定する。制御条件、試験パラメータ、測定項目は同じものとする。

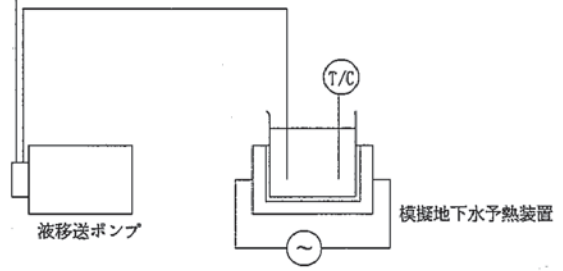
模擬地下水供給タンク



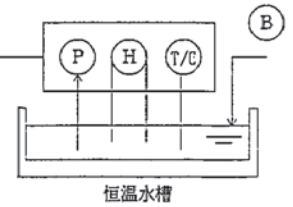
ベントナイト充填カラム



模擬地下水水素ガス飽和装置



模擬地下水供給装置



T/C : 熱電材  
P : ポンプ  
H : ヒータ

Fig. 4.3.3-2 Test equipment for H<sub>2</sub> gas diffusion coefficient measurement

Table 4.3.3-1 Control item, test parameter and measuring item for the preliminary test

No	予 察 試 験	制 御 条 件	試 験 パ ラ メ ー タ	測 定 項 目
1	H <sup>+</sup> の拡散係数測定試験	①ベントナイト温度：～50℃	①ベントナイト密度 ②ベントナイト混合比 ③ベントナイトの種類	①H <sup>+</sup> イオン供給総量 ②H <sup>+</sup> イオン溶離速度 ③H <sup>+</sup> イオン溶離総量
2	H <sub>2</sub> の拡散係数測定試験	①ベントナイト温度：～50℃	①ベントナイト密度 ②ベントナイト混合比 ③ベントナイトの種類	①H <sub>2</sub> 供給量 ②H <sub>2</sub> 透過速度 ③H <sub>2</sub> 透過総量

## (2) 本試験設備

### (a) 試験目的

オーバーパックの腐食により発生する水素ガスの挙動について、発生、蓄積、透気といった一連のメカニズムを総合的に評価する。

### (b) 試験設備仕様

#### (7) 水素ガスの透気測定試験

試験容器の中にオーバーパックを模擬した焼結金属とベントナイトを入れ、水素ガスをこの焼結金属を通して膨潤したベントナイト中に供給する。ベントナイト中を通過した水素ガスは水素補集チェンバで補集し、ガスクロマトグラフを用いて分析を行う。試験装置をFig. 4.3.3-3 に示す。

#### (4) オーバーパック腐食加速試験

腐食の加速は模擬オーバーパックとその周囲にベントナイトを介して設置する対向電極の間の通電によって行う。また、印加する電流によって水素を発生させる。対向電極の周囲は絶縁材を充填し、試験容器との間で絶縁をとる。透気によってベントナイト中を移動する水素ガスは水素補集チェンバで補集し、ガスクロマトグラフを用いて分析する。試験装置をFig. 4.3.3-4 に示す。

#### (7) 水素ガス蓄積、拡散試験

オーバーパックを模擬した焼結金属を試験容器の中に入れ、その周囲をベントナイトで充填する。模擬オーバーパックへは外部から水素ガスを導入して腐食による水素発生を再現する。オーバーパック表面から透気によって移動する水素は水素補集チェンバで補集しガスクロマトグラフを用いて分析する。

試験装置をFig. 4.3.3-5 に示す。

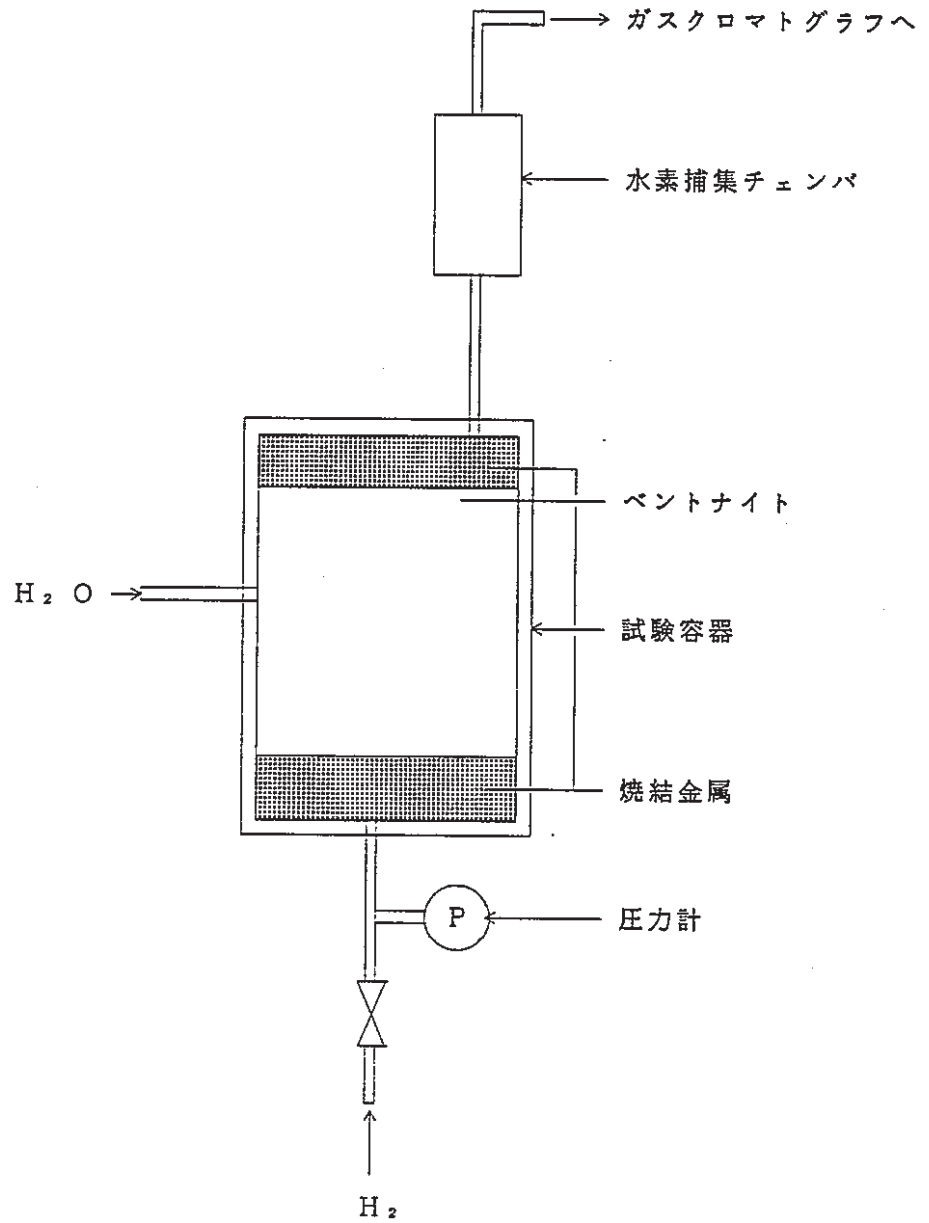


Fig. 4.3.3-3 H<sub>2</sub> gas flow test equipment

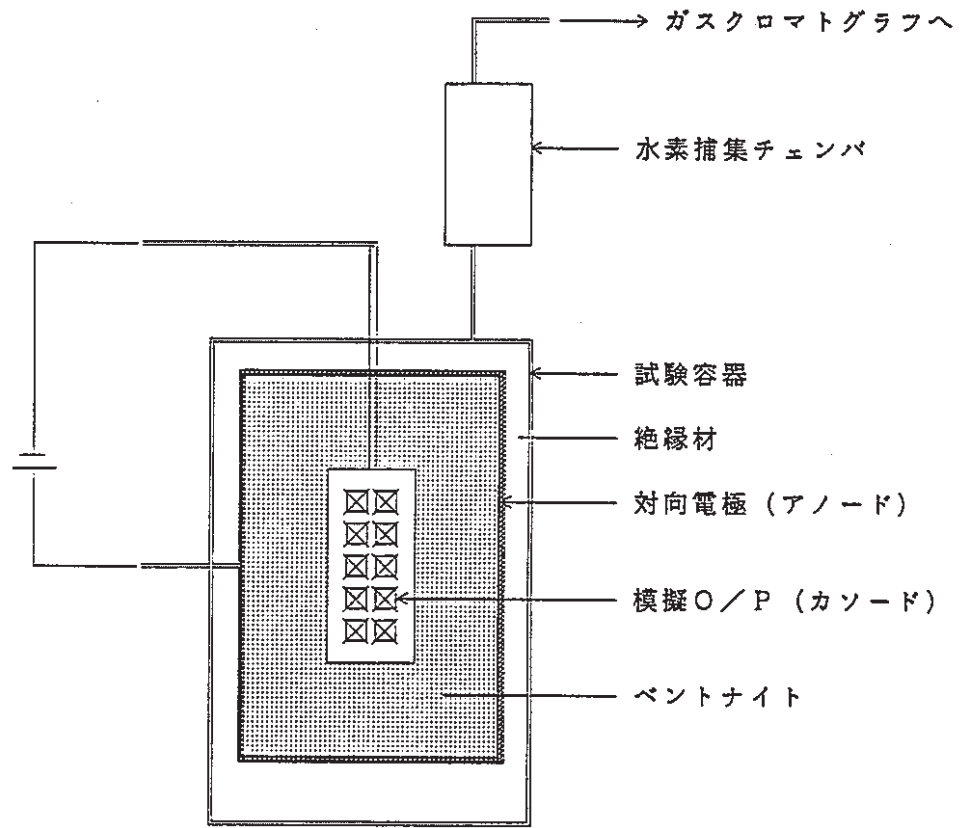


Fig. 4.3.3-4 Overpack corrosion accelerating test equipment

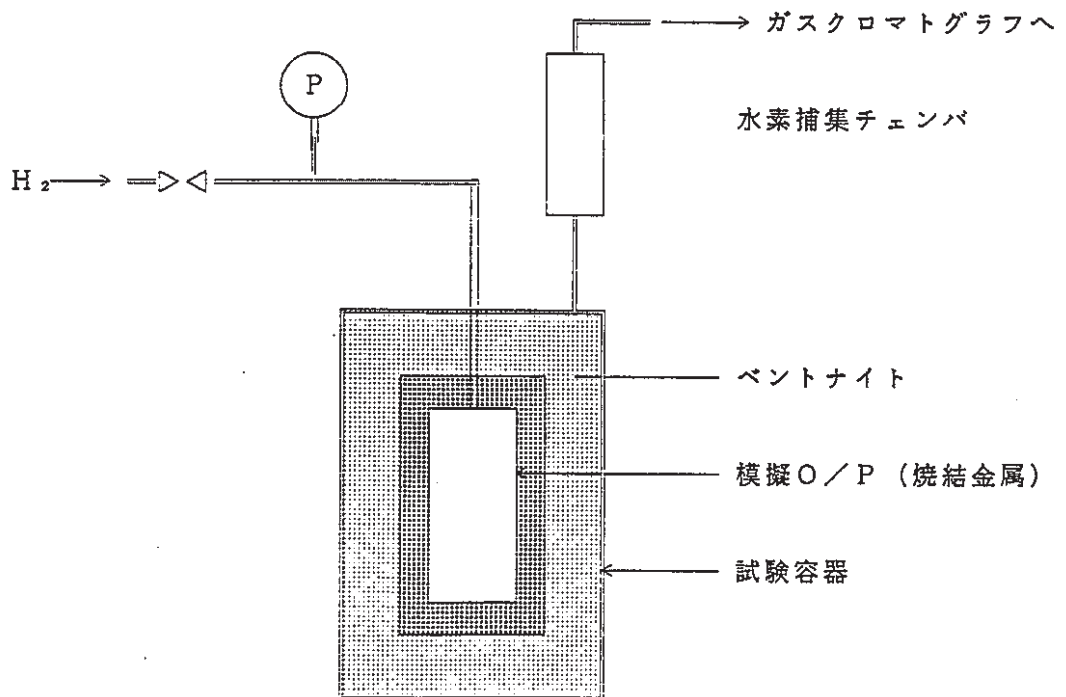


Fig. 4.3.3-5 H<sub>2</sub> gas accumulation and diffusion test equipment



(c) 制御条件、測定項目

(f) 水素ガスの透気測定試験

試験パラメータとしては、水素ガス圧力、ベントナイトの膨潤圧とし、これに加えて試験容器内の水圧をコントロールするものとする。これらの値の他に、透気による水素ガス濃度を測定する。

(g) オーバーパック腐食加速試験

試験パラメータは、ベントナイトの膨潤圧のみとし、水素ガス透気の現象を確実に追うものとする。電気化学的観点からは、通電量の制御が重要である。また上記と同様、透気による水素ガス濃度を測定する。

(h) 水素ガス蓄積、拡散試験

本試験は内容的には上記（ア）に類似しているので、制御条件、試験パラメータ、測定項目はそれと同じとする。

以上の各項目をTable4.3.3-3にまとめる。

Table 4.3.3-3 Control item, test parameter and measuring item for the main test

No.	予 察 試 験	制 御 条 件	試 験 パ ラ メ ー タ	測 定 項 目
1	水素ガスの透気測定試験	①水素ガス圧力 ②水素ガス供給速度 ③ベントナイトの膨潤圧 ④試験容器内の水圧	①水素ガス圧力 ②水素ガス供給速度 ③ベントナイトの膨潤圧	①水素ガス圧力 ②水素ガス供給速度 ③ベントナイトの膨潤圧 ④透気水素の濃度変化 ⑤透気水素の総量
2	オーバーパック腐食加速試験	①印加電流 ②ベントナイトの膨潤圧	①ベントナイトの膨潤圧	①印加電流 ②ベントナイトの膨潤圧 ③透気水素の濃度変化 ④透気水素の総量
3	水素ガス蓄積，拡散試験	①水素ガス圧力 ②水素ガス供給速度 ③ベントナイトの膨潤圧 ④試験容器内の水圧	①水素ガス圧力 ②水素ガス供給速度 ③ベントナイトの膨潤圧	①水素ガス圧力 ②水素ガス供給速度 ③ベントナイトの膨潤圧 ④透気水素の濃度変化 ⑤透気水素の総量