

# 性能評価研究施設(仮称)基本計画(案)

1993年5月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

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。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

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

1 9 9 3 年 5 月

## 性能評価研究施設(仮称)基本計画(案)

棚井 憲治\*

### 要 旨

我が国における当面の地層処分研究開発は、高レベル放射性廃棄物の安全な地層処分が実現可能であることを科学的、技術的に明らかにし、国民の理解と地層処分の実施に資することである。

事業団は、この地層処分研究開発の第一次のとりまとめとして、先般、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書」をとりまとめ、地層処分性能の概括的評価を行った。

今後は、個別現象の試験や調査をさらに進め、かつ、地質環境を模擬した条件下での試験、個別現象を複合させた試験を実施し、その結果を基に詳細に性能を評価し、2000年前までに予定している第二次とりまとめに向け、人工バリア性能の定量的評価を図っていく計画である。

本計画(案)は、このような今後の研究開発の展開における性能評価研究施設(以下、本名称は仮称とする。)の役割り、位置づけ及び本施設で計画されている確証試験計画等を定めるものである。

---

\* 環境技術開発部 地層処分開発室

## 目 次

I. 基本計画概要 .....	1
1. 地層処分研究開発の基本的進め方 .....	1
2. 性能評価研究の進め方 .....	1
3. 性能評価研究の現状と今後の展開 .....	2
4. 性能評価研究施設における確証研究 .....	3
4.1 確証研究の方針 .....	3
4.2 性能評価研究施設の役割 .....	4
4.3 性能評価研究施設における試験研究の範囲 .....	5
II. 試験研究計画 .....	8
1. モデルの開発確証についての試験研究 .....	9
1.1 化学反応に係る試験研究 .....	9
1.2 化学反応と物質移動との複合プロセスに係る試験研究 .....	15
1.3 水理・物質移動に係る試験研究 .....	18
1.3.1 ニアフィールド物質PNC TN8020 93-002 .....	19
1.3.2 多孔質媒体水理試験研究 .....	22
1.3.3 亀裂状媒体水理試験研究 .....	27
1.4 連成プロセスに係る試験研究 .....	31
1.5 構造力学に係る試験研究 .....	34
1.5.1 水素ガス移行挙動試験研究 .....	34
1.5.2 緩衝材流出挙動試験研究 .....	38
1.5.3 緩衝材力学試験研究 .....	41
2. データベースの充実 .....	41
3. 性能評価シミュレーションシステムの研究開発 .....	42
III. 試験設備の概要 .....	46
1. 化学平衡反応試験設備 .....	46
2. ニアフィールド物質移動試験設備 .....	52
3. 地下水水質形成過程試験設備 .....	55
4. 亀裂状媒体水理試験研究 .....	58
5. 多孔質媒体水理試験設備 .....	64

6. 緩衝材流出挙動試験設備 .....	68
7. 水素ガス移行挙動試験設備 .....	72
8. 熱-水-応力連成試験設備 .....	76
9. 緩衝材力学試験設備 .....	79
IV. 施設概要 .....	82
1. 建屋仕様 .....	83
2. 敷地配置概要 .....	84
3. 建屋配置概要 .....	85
4. 動線 .....	85
5. 電気設備概要 .....	86
6. 換気空調設備概要 .....	87
7. 衛生設備概要 .....	87

## I. 基本計画概要

### 1. 地層処分研究開発の基本的進め方

(1) 我が国における当面の地層処分研究開発は、高レベル放射性廃棄物の安全な地層処分が実現可能であることを科学的、技術的に明らかにし、国民の理解と地層処分の実施に資することである。

(2) 地層処分研究実施計画として「地層処分研究開発工程」を平成2年7月に作成し平成15年に至る「性能評価」を中心とした地層処分の研究開発の進め方を定めた。この間、段階的に成果をとりまとめていくこととしている。

○第1次とりまとめ（平成3年度）：これまでの知見に基づき、地層処分の概括的な性能を評価する。

○第2次とりまとめ（2000年前）：人工バリアの性能を中心に地層処分の定量的な性能を評価する。

○最終とりまとめ（平成15年度頃）：多重バリアシステムの性能を科学的・技術的に明らかにする。

### 2. 性能評価研究の進め方

PNC TN8020 93-002

(1) 地層処分システムに関する性能評価は、長期にわたる挙動を想定するシナリオ（想定される事象とその影響過程）の開発、その挙動を数学的に表現するためのモデルの開発、およびこれらの数学モデルと適切なデータを用いた予測解析という一連の作業により、成し遂げられる。

(2) 多重バリアシステムの長期的な性能評価は、想定される事象・プロセスを規定するシナリオ（評価シナリオ）と、その評価シナリオに基づき包括的評価を可能とするモデル体系（システム評価モデル）により行われるわけであるが、システム評価モデルは、現象の包括性の観点から大きな時空間領域を扱っており、実験によりその妥当性を直接確認することは不可能である。

そこで、空間領域については、原位置試験、時間領域については、ナチュラルアナログ研究等により部分的にシステム評価モデルの妥当性を評価するとともに、個々の現象に対しては、現象解析モデルと室内実験の対比による確認、現象解析モデルの合理的統合化を行い、システム評価モデルの妥当性を示す。

- (3) 地層処分研究開発の成果は、上記地層処分研究開発の特徴から学際的であり、研究者にとっては多くの他分野の研究成果を把握する必要がある、それぞれの研究開発成果を理解し易い形で情報提供する工夫が必要である。また、研究者以外の人の研究開発成果の理解は、研究開発の過程や内容の分かりやすさによるところも大きいと考えられる。そのため、研究開発の過程や成果の可視化により、研究者間の情報の共有と研究開発過程の公開による一般公衆の理解の促進を図る。

### 3. 性能評価研究の現状と今後の展開

#### (1) 性能評価研究の現状

原子力委員会の方針にしたがって、先般、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書」（以下「H3報告書」とする。）を取りまとめたところであるが、既存の学問分野での知見に加え、地層処分性能に重要な因子となる個別現象の試験や調査から得られた結果を基に、概括的にその性能を評価してみると、深部地層に設置された人工バリアには、地下水による影響に対して、特定のサイトや地層の条件に影響されない固有の性能があることがわかってきた。即ち、想定し得る地質環境条件の幅の中で、放射能が無視できる程度まで減衰するのに十分な期間にわたって、人工バリアは、止水性、化学的緩衝性等の性能を維持し、放射性核種の地下水への溶解と人工バリア内の移行が制限される過程が明らかになりつつある。

さらに地殻変動や人間の侵入による直接PNC TN8020 93-002 安定な地層」による隔離性に関する知見が得られてきている。

#### (2) 第2次取りまとめに向けての展開

今後、個別現象の試験や調査をさらに進め、かつ、地質環境を模擬した条件下での試験、個別現象を複合させた試験等を実施し、その結果を基に、上記の知見が正しいものであることを示し、さらにこれらの知見を詳細に定量化していくことが課題である。具体的には、先ず、これらの現状想定している事象やその影響過程（シナリオ）の妥当性を確認し、さらにシナリオを数学的に記述するための法則性や理論（モデル）およびシステムの特徴値や初期条件、境界条件の設定値（データ）の妥当性を示すことである。なかでも、H3報告書で用いたモデル、データの保守性を確認するとともに、より現実的かつ詳細な評価を行うためのモデルの詳細化、信頼性の高いデータの取得・整備が重要である。次いで、それらの結果を基に人工バリアの性能を定量化するとともに、これを担保するために必要な地質環境条件、および天然バリアとして地質環境が有すべき性能を評価するための研究方針を提示すること

である。

この性能評価研究と並行して、地層科学研究と地質環境調査により、地殻変動等による直接影響に対する性能の評価と地下水影響に対する地質環境条件の的確な把握のために必要な地質環境データベースの整備を別途進める。

#### 4. 性能評価研究施設における確証研究

##### 4.1 確証研究の方針

(1) 地層処分研究開発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的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、いわゆる解析モデルの確証という課題も含まれる。

地層処分システムの性能評価の対象となる現象の大半は、超時間領域に及ぶため、解析モデルの妥当性を実験により直接実証することは不可能である。

このような解析モデルの確証という課題を考える上では、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が重要となる。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は次のようなものである。

##### ① 外挿に伴う誤差の累積

これは、評価対象となる時間あるいは空間領域に対して、評価すべき現象の発現メカニズム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、モデルの近似性やデータの精度に起因して解析を全体領域に外挿した場合に拡大し得ることを示すものである。

##### ② 現象の発現メカニズムの変化

これは時間の経過に伴うプロセスの進展により、その効果が現象の発現メカニズムを変化させること、ないしは空間的広がり（空間的不均質性）により部位によって現象の発現メカニズムが異なることを示すものである。

(2) 第一の発生機構については、現象を支配する影響因子やデータの精度を考慮した不確実性解析により誤差を統計的に把握するという方法をとることが適当である。

具体的に時間的領域については、着目する現象の発現メカニズムが変化しない条件・範囲で、精度の高い実験や加速試験を行い、解析結果との分散の把握と、モデル開発という過程を反復することにより誤差の分散を統計的にとらえる。また、空間的領域についても、同様に発現メカニズムが変化しない条件・範囲で高精度の実験、縮尺模型試験を行い、解



析結果との分散の把握とモデル開発を繰り返しながら、誤差を統計的にとらえるという方法をとる。

第二の発生機構については、まず、実際の人工バリア材若しくはその成分を用いた実験や観察を基に、現象を素プロセスに分解し、それらのプロセスについての科学的理解に基づき、解析モデルにおける理論の妥当性を確認するために、パラメータを広範にコントロールした試験を行う。このような科学的理解とは、可能な限り観察と実験によって、個々のプロセスに当てはまる物理/化学法則を見だし、裏付けとなる科学的根拠を得ることであり、それによってモデルにおける理論の適合性の正しさを保証するものである。

次に個々に確認された素プロセスモデルを複合した場合の解析モデルにおける仮定の妥当性を複合実験とモデル化の反復により確認するという方法をとる。

- (3) 科学的な方法論の中で長期性を補完するためのアプローチとしてナチュラルアナログの活用がある。

ナチュラルアナログは、室内試験では不可能な長期のデータ及び情報を入手でき、かつ公衆に対する地層処分プロセスの説明に有意義である。

#### 4.2 性能評価研究施設の役割

- (1) 多重バリアシステム性能評価モデルの妥当性を示すためには、以上に述べた通りモデルによる解析結果と、モデルを構成する個々の要素の試験データとを比較し、その差が許容できる範囲にあることを確認するという手順が採られる。この際、その差が大きい場合には、モデルをさらに詳細要素に分割し、詳細要素に対応するモデルを開発し、確認するという過程を反復する。

性能評価研究施設では、H3報告書の中で想定したシナリオや評価に用いたモデル、データの保守性を確認すると同時に、より現実的かつ詳細な評価を行うためのモデルの改良・詳細化と信頼性の高いデータを取得し、別途進める原位置試験やホット試験データ等を集約して、地下水に対する多重バリアシステムの性能を評価、解析し、「安全な地層処分が技術的に可能である」という認識に必要な知見を提供する。

- (2) 地層処分で想定される諸影響過程の内、地下水影響過程に着目し、地下水に対する多重バリアシステム性能評価モデルの開発・検証に必要なデータを取得する。

- (3) コンピュータ・シミュレーションの手法を開発・利用し、取得したデータを理解しやすい情報や知見に加工することによって、異種分野の研究者間の知識の共有化を図り、交流を促進することにより、専門家間での合意形成、さらには、一般公衆の理解の促進に資する。

#### 4.3 性能評価研究施設における試験研究の範囲（表I-1）

性能評価研究施設における試験研究は、第2次とりまとめの人工バリアの定量化に向けて、人工バリア性能についての解析モデルの開発確証を進めるとともに、ニアフィールドにおける化学反応や水理・核種移行挙動について、より詳細な解析を可能にすることに重点を置き進められる。

性能評価研究施設における試験研究は、

- ① 地下水移行シナリオに基づき、多重バリアシステムを構成するそれぞれの場における種々の現象に対するモデルの開発確証
- ② 多重バリアシステムの性能評価に必要な信頼性の高い入力データの取得・整備  
(データベースの充実)
- ③ 各試験研究から得られたデータ、モデルを統合化して、地層処分システム全体の性能評価シミュレーションシステムの構築  
の範囲を網羅する。

##### (1) モデルの開発確証

ここでは、

- ① 放射性核種の溶解、沈殿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化学反応
- ② 上記の化学反応と物質移動の複合プロセス
- ③ 人工バリア及び岩体中の水理・物質移動
- ④ ニアフィールドの構造モデルを規定する熱-水-応力の連成プロセス
- ⑤ 人工バリアの構造力学的安定性に影響を及ぼす可能性のある事象・プロセス等を研究範囲としたモデルの開発及び確証を行う。

(2) データベースの充実

『高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度-』において評価に用いている入力データの妥当性を確認すると同時に、より信頼性の高いデータの取得及び整備を実施する。

データの取得に際しては、上記の(1)の試験において、モデル開発確証と並行して熱力学データや各種化学反応データの取得及び圧縮ベントナイトの高側圧、圧密排水、圧密非排水条件下での強度特性、またはそれらの温度依存性のデータの取得を実施する。

(3) シミュレーションシステムの構築

各試験研究から得られたデータ、モデルを統合化して、地層処分システム全体の性能評価シミュレーションシステムを構築する。

表 I - 1 性能評価研究施設における試験研究展開

シナリオと研究目標		モデル		研究内容と研究段階	
【目標】	【システムを構成する場合】	【モデル化対象】	【モデル化方針】		
個別モデルの詳細化とシステムモデルの検証	地層 (地下水)	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水の水理と地球化学</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水の地球化学的変遷プロセス</li> <li>地形、地質構造と対応する水理・水文場</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質環境の天然バリア性能を信頼性をもって定量化し得る範囲の明確化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球化学モデルの検証 (EDAS, IMAGE-GEOCHEM)</li> <li>不均質媒体、多孔質媒体中の水理を記述するモデルの開発と検証 (LABROCK/GEOTEX, MACRO)</li> <li>周辺岩盤を含む人工バリア系の水理・熱・応力連成モデルの開発と検証 (COUPLE)</li> <li>緩衝材の拡散モデル、制限モデルの開発と検証 (BENTFLOW)</li> <li>緩衝材の力学モデルの開発と検証 (TRIAK)</li> <li>地球化学モデルの検証 (EDAS, IMAGE-GEOCHEM)</li> <li>局部腐食モデル及び腐食生成物と地下水の反応モデルの開発と検証 (EDAS)</li> <li>深部地下水条件下での溶解モデル及びガラス変質挙動のモデルの開発と検証 (EDAS)</li> <li>吸着現象を素要素プロセスに分解したモデルの開発と検証 (EDAS)</li> <li>緩衝材の長期変質挙動モデルの開発と検証 (EDAS)</li> <li>不均質媒体 (母岩) / 拡散媒体 (ベントナイト) 間の物質移動、プロセスモデルの開発と検証 (IMAGE-MASTRA)</li> <li>腐食により生じる水素ガスの臨界圧力の把握と移行モデルの開発と検証 (HYDROGEN)</li> <li>不均質媒体、多孔質媒体中の水理を記述するモデルの開発と検証 (LABROCK/GEOTEX, MACRO)</li> <li>不均質媒体中の物質移行を記述するモデルの開発検証 (LABROCK/GEOTEX)</li> <li>多孔質媒体中の物質移行を記述するモデルの開発検証 (MACRO)</li> <li>核種の熱力学データ、拡散定数、分配係数等の取得 (EDAS, IMAGE-MASTRA)</li> <li>水理、地下水化学及び構造力学データの取得 (IMAGE-GEOCHEM, LABROCK/GEOTEX, MACRO, TRIAX)</li> </ul>
	人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材 (ベントナイト)</li> <li>オーバーバック (鉄)</li> <li>ガラス固化体 (核種)</li> <li>緩衝材 (ベントナイト+鉄の腐食生成物)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材の止水性</li> <li>人工バリア材-地下水化学反応</li> <li>緩衝材の流出・浸食プロセス</li> <li>緩衝材及び周辺岩盤の変形プロセス</li> <li>オーバーバックの腐食</li> <li>ガラス固化体-地下水化学反応</li> <li>溶解</li> <li>緩衝材による拡散、吸着、沈殿</li> <li>水素ガスの蓄積、移行プロセス</li> </ul>		
	地層	<ul style="list-style-type: none"> <li>収着を伴う拡散 (多孔質媒体) 及び移流・分散による移行 (亀裂状媒体)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地形、地質構造と対応する水理・水文場</li> <li>核種移行機構</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質環境の天然バリア性能を信頼性をもって定量化し得る範囲の明確化</li> </ul>	
	データベースの充実				
	多重バリアの性能評価				

## II. 試験研究計画

人工バリアの性能の定量的評価を目標とする第2次取りまとめに向けた性能評価研究施設の試験研究計画は、以下のテーマより構成される。

### ① モデルの開発確証に関する試験研究

性能評価上対象とするプロセスとして、

- ・放射性核種の溶解、沈殿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化学反応
- ・上記の化学反応と物質移動の複合プロセス
- ・人工バリア及び岩体中の水理・物質移動
- ・ニアフィールドの構造モデルを規定する熱-水理-応力の連成プロセス
- ・人工バリアの構造力学的安定性に影響を及ぼす可能性のある事象及びプロセスなどが重要な評価対象となる。

### ② データベースの充実

熱力学データや各種化学反応データの取得及び圧縮ベントナイトの高側圧下での力学特性等に関するデータの取得を実施する。

### ③ シミュレーションシステムの構築

各試験研究から得られたデータ、モデルを統合化して、地層処分システム全体の性能評価シミュレーションシステムを構築する。

## 1. モデルの開発確証についての試験研究

### 1.1 化学反応に係る試験研究

#### (1) 試験研究の目標

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、液相中での化学種分配の問題、溶解・沈殿・酸化・還元・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、上記の範囲のうちイオン交換、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すべての速度論的解析について未開発な状況である。

また、地層処分の性能評価上対象とする複雑な反応系に対して、化学種分配、酸化、還元、溶解、沈殿に関しても素反応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のが現状である。

さらに、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。

以上のよう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、以下をその基本的考え方として試験研究を実施する。

#### (a) 定量的モデルの開発とその確証

##### 1) 平衡論的モデルの開発確証

化学種分配、酸化、還元、溶解、沈殿については、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わ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性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境界条件、特に低酸素濃度あるいは炭酸濃度を正確に設定することが重要であり、このような系を模擬可能な化学平衡反応試験設備 (BDAS)において、人工バリア材、岩石等の反応物について、いずれも構成材料や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、このモデルの確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、例えば放射性核種の溶解度を規定する環境条件としては、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、この為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地下水特性に支配的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、粘土鉱物等に着眼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て種々の反応を想定して研究を進める。

## 2) 速度論モデルの開発

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。

## 3) 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る。

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系及び環境条件下での信頼すべき観察を可能とすることを考慮する。

## 4) 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、改良されていくこととなる。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、対応する基本定数等のデータを取得し、その網羅性と精度を高めることとする。また、このようにして改良されるコードとデータは逐次実験結果と比較すべく解析において活用する。

(2) モデル開発の現状

地層処分の性能評価上対象とする化学反応モデルは、以下の通りである。

- ① 岩石-水反応
- ② ベントナイト-水反応
- ③ オーバーパックの腐食
- ④ ガラス固化体の浸出・核種の溶解
- ⑤ 人工バリア及び天然バリア中の核種移行

岩石-水反応については、地下水組成の近似的な評価が一般的に可能と考えられる平衡論モデル（コード；PHREEQE）を用いて、地層処分の性能評価上重要な地下水水質であるpH、Eh、イオン濃度に着目して地下水の起源、造岩鉱物の風化反応の進展度合い及び酸化還元反応の寄与の度合いを考慮して4種類のモデル地下水を導出した。

用いた熱力学データについては、上記各反応に係わる重要な鉱物や水溶性化学種のデータをNEA/TDBやUSGS/TDBより引用している。

ベントナイト-水反応については、実験結果との対比が良好で解釈が容易なベントナイトの仮想イオン交換反応及び随伴鉱物（方解石等）の溶解反応を平衡モデル（コード；PHREEQE）を用いて解析し、人工バリア材による地下水の化学的変遷過程を評価した。用いた熱力学データは、イオン交換平衡定数以外は、岩石-水反応と同じである。

オーバーパックの腐食については、経験的なデータに基づき保守性を考慮して酸素による腐食、水の還元による腐食及びバクテリアによる硫黄化合物の還元物質による影響を個々に評価し、これらの腐食形態の全てが働いて腐食が進行するものと仮定して炭素鋼オーバーパックの腐食速度を算出した。

ガラス固化体の溶解については、短期的にシリカの溶出速度に律速される一次反応モデルにより、長期的にはガラス固化体の長期溶解速度に律速されるものと仮定した。したがって、セシウム等の可溶性元素については、このガラス固化体の溶解速度に調和して溶出してくるものと仮定した。一方、難溶性元素については、比較的短期間で溶解度に達するものと仮定し、上記の人工バリア材による地下水の変化を考慮した平衡モデル（コード；PHREEQE）により、各元素の溶解度を算出した。

人工バリア及び天然バリア中の核種移行については、評価上で重要な特性値である分配係数及び実効拡散係数について既存データを整理し、分配係数については線形吸着モデルを、実効拡散係数については各媒体の形状因子と自由水中の拡散係数の積を各々採用し核種移行解析（コード；RELEASE(人工バリア中)等)の入力データとして使用した。



## (3) モデル開発方針 (図II-1)

岩石-水反応については、「1.2 化学反応と物質移動との複合プロセスに係る試験研究」における連続部分平衡モデルの確証と整合をとりつつ重要な地下水水質を支配する各鉱物の熱力学データの確証を深部化学環境を考慮して行う。

また、鉱物の反応速度と地下水流速との関係から、平衡論モデルだけでは不十分な場合を想定し、鉱物-水反応速度論モデル(コード; EQ3/6)と物質移行モデルのカップリングモデルの開発を行う。したがって、反応速度が遅く地下水水質に有意な影響を与えると考えられる鉱物については、深部化学環境を考慮した反応速度式、速度定数を取得する。

ベントナイト-水反応については、上記のイオン交換/鉱物の溶解平衡モデルの確証と整合をとりつつ、重要な随伴鉱物の熱力学データの確証を深部化学環境を考慮して行う。

一方、ベントナイト-水反応の経時的な変化を予測するため(コード; EQ3/6)、スメクタイトや随伴鉱物について深部化学環境を考慮した反応速度式、速度定数を取得する。

オーバーパックの腐食については、周囲の長期的な環境変化と対応させた破壊・貫通シナリオに基づきモデル開発(全面腐食、局部腐食)を行う必要がある。

全面腐食モデルの開発では、腐食速度と腐食の不均一化の定量的な把握を行う。

一方、局部腐食モデルの開発では、すきま腐食/孔食の進展を解析するためのモデル(コード; CAMLB)を開発中であり、化学的環境条件を考慮した電極反応速度データ、すきま腐食/孔食のアノードサイドでの溶液組成等のデータを取得する。

また腐食反応の進展に伴う化学的環境の変化に関するモデルについて、腐食反応-鉱物反応-物質移行連成モデルの開発を行う。

ガラス固化体の溶解については、その溶解が促進されると言われているFe-Si 相互作用及び反応機構が同定されておらず長期的なガラス固化体溶出挙動の評価上重要な最終溶解速度に関するモデル開発を行う。前者は、反応経路計算によるモデル化(コード; EQ3/6)を、後者はpH, SA/V, ガラス固化体の表面変質層内の溶出元素の拡散を考慮した速度式の導出である。また難溶性元素の溶解度については、酸化還元雰囲気に鋭敏なコールド元素(Se, Pd, Sn等)について、溶解度データを取得し既存の熱力学データの確証や新規データの取得を行う。

人工バリア及び天然バリア中での核種移行については、核種の吸着現象について、吸着を支配していると考えられる表面のコーティング風化鉱物である  $\text{FeOOH}$  や  $\text{Al(OH)}_3$  等への吸着を表面錯体生成モデル(コード; HYDRAQL)を用いて解釈するとともに、地質環境条件が与えられたときの分配係数を同モデルを用いて予測する。データ取得が必要な基本定数は、表面錯体平衡定数である。

一方、核種の拡散現象については、電気二重層モデルを用いた界面電気化学理論と空隙構造により実効拡散空隙モデルを確立し、地質環境条件が与えられた時の実効拡散係数を同モデルを用いて予測する。データ取得が必要な基本定数は、実効拡散空隙率である。これら定数は、核種移行解析モデル（コード；CHEQMATE, Chemxport, HYDROGEOCHEM）の入力特性値または基本定数として使われる。

これまで詳細な検討がされていない現象であるコロイド形成、天然有機物の挙動、微生物の挙動については以下の方針の基に研究を進める。

コロイド形成については、粒径分布、熱力学的安定性及び表面電気化学特性に関する測定手法を確立するとともに、ファンデルワールス力及び電気二重層の相互作用を取り入れたモデル化の検討を行う。

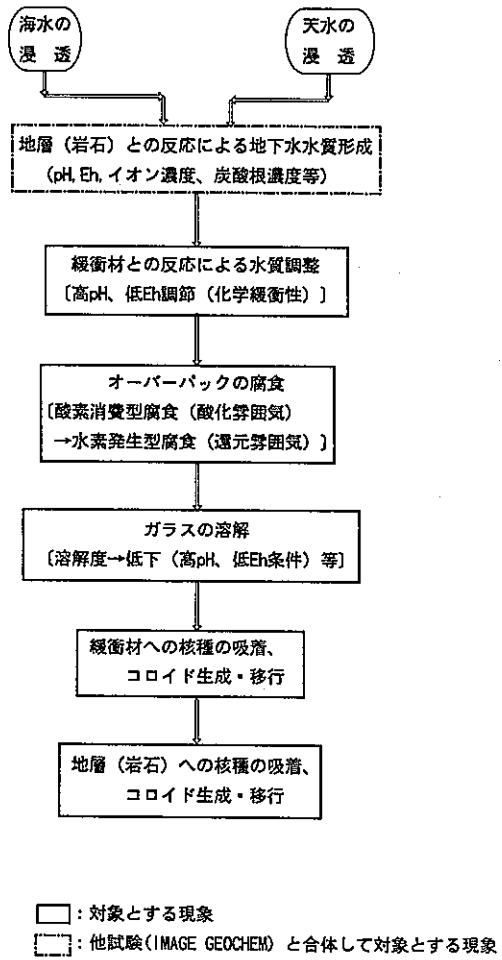
有機物の挙動については、核種との錯形成定数の取得を進めるとともに、複雑多岐にわたる有機物についての錯形成定数の類型化、一般化を試みる。

微生物については耐性領域図を作成し、着目すべき微生物に的を絞りオーバーパックの腐食、核種移行挙動（配位子供給、バイオフィルム吸着、バイオ吸着移行）の観点から、その影響評価研究を行う。

#### (4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

空間的不均一な場における超長期にわたる評価を行うために、化学反応メカニズムに基づく現象モデルを開発する。本設備で取得されるデータは、この開発に用いられる。

現象の流れ



試験研究フロー

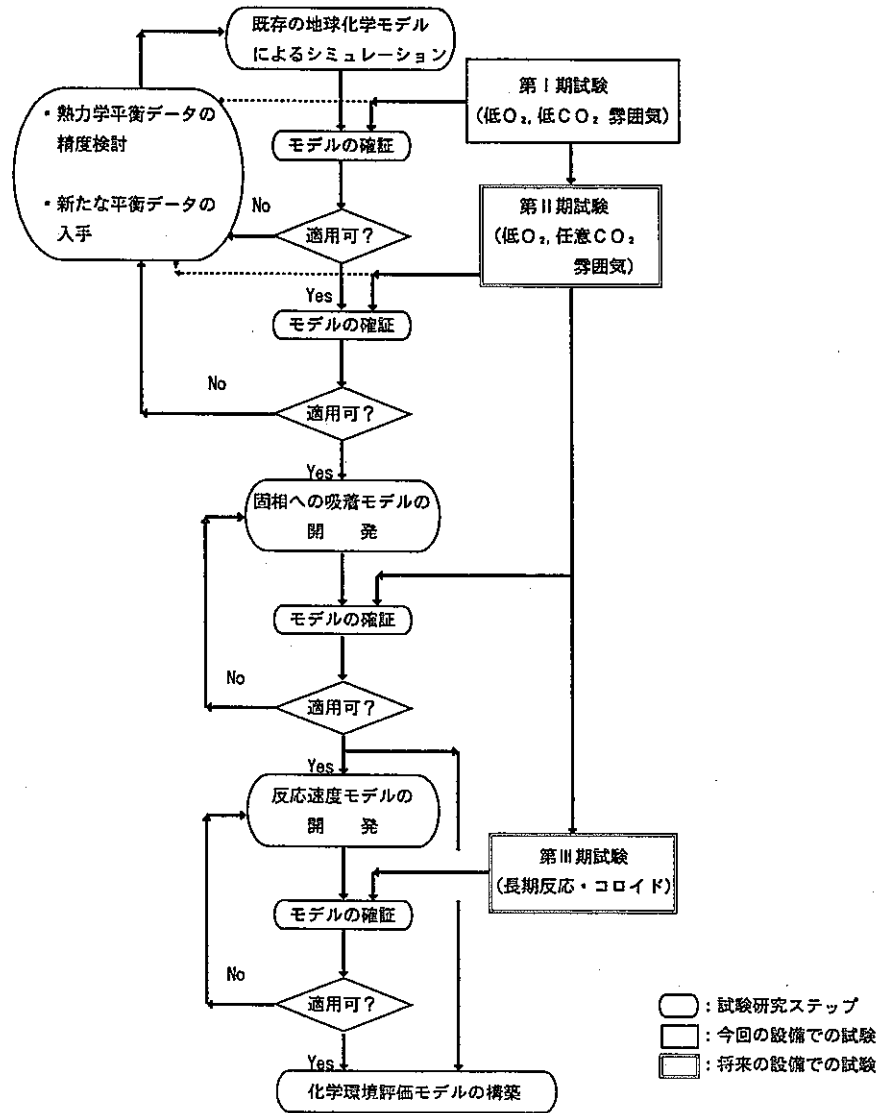


図 II - 1 化学反応に係る試験研究

## 1.2 化学反応と物質移動との複合プロセスに係る試験研究

### (1) 試験研究の目標

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、このような状況下で行うべき複合プロセスの試験研究としては、各課題についての成果の統合、完成ではなく、むしろ以下のような目標設定を行う必要がある。

- ① 化学反応及び物質移動において、個別に詳細な研究開発を実施すべき項目の抽出
- ② 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

#### 〔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的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ような反応型のフローセルを用いた地下水水質形成過程試験設備(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。

#### 〔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、いわゆる瞬時平衡の仮定が採用されている。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わけではなく、岩石の化学的変遷の過程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、

- ① 瞬時平衡の仮定が成立するような、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
- ② 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反応経路及び各律速過程の速度式を解法するようなモデルの開発と確証

等の課題については、上記の試験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。

これらの試験においては、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よう、単純な系から複雑な系へと漸進させるものとする。

(2) モデル開発の現状

地層処分の性能評価上重要な地下水水質 (pH, Eh, イオン濃度) 形成機構を解明するため、これら重要な地下水水質を支配する3つの要因として地下水の起源 (天水/海水)、造岩鉱物の風化反応の進展度合、Fe, S, Cに関する酸化還元反応の寄与の度合を抽出し、主に堆積岩中の鉱物及び亀裂内充填鉱物として常時現れるものを考慮して、部分平衡モデルの組合せによる平衡モデルに基づき4種類の地下水組成を類型化、導出した。

(3) モデル開発方針 (図II-2)

部分平衡モデルの組合せによる連続化学平衡モデル (コード; PHRBBQE) の確証を行う。

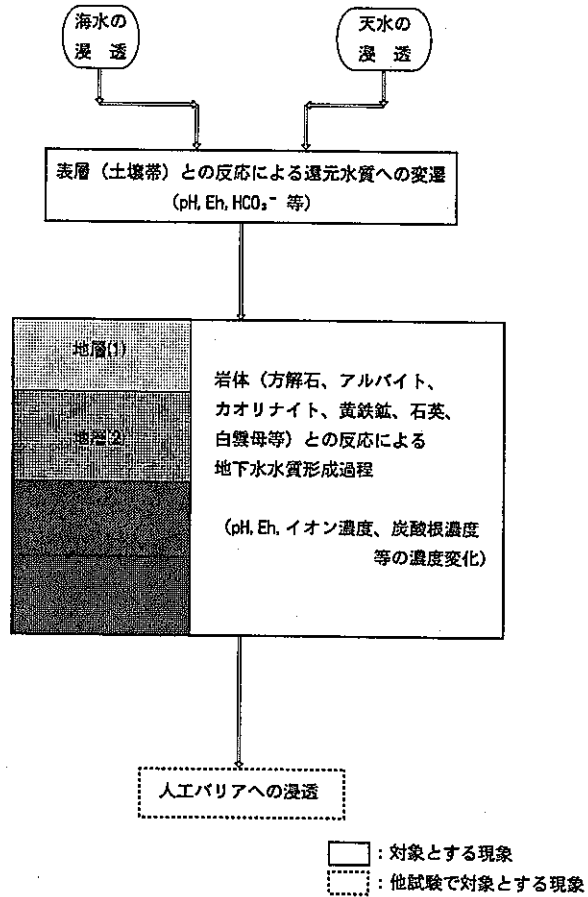
また、地層処分の性能評価上重要な地下水水質を支配する各鉱物の反応速度と地下水流速の関係から平衡論モデルだけでは不十分な場合を想定して、鉱物-水反応速度論モデル (コード; BQ3/6) と物質移行モデルのカップリングモデル (原型となるコード (地球化学の部分平衡論); CHEQMATE, Chemxport, HYDROGEOCHEM) の開発を行う。

(4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

超長期性の問題については、基本シナリオであれば (すなわち地層層準の変化はない)、特に対応すべき項目はないが、変動シナリオについては、酸化性地下水に対する地層の持つEh緩衝性 (土壌, Fe, S, Cを含む鉱物・物質の反応) を試験する。また、反応速度が極端に遅いもので有意な反応が検知された場合については、EDASのデータ取得及び短期カラム試験の結果を踏まえてモデル化により予測を行う。

空間的不均質性の問題については、鉱物種の組合せ、層準の設定により地下水水質を支配する地球化学反応がどのように変化するか調査する。

現象の流れ



試験研究フロー

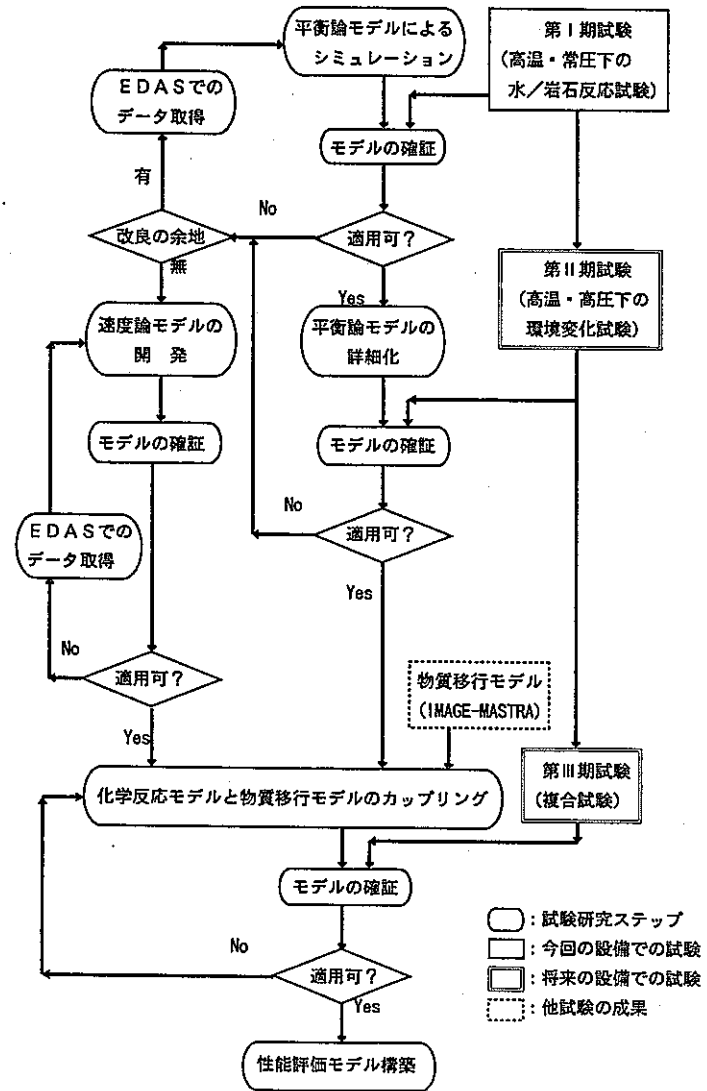


図 II - 2 地下水水質形成過程試験研究

### 1.3 水理・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行に影響を及ぼす地下水溶存成分の移動、さら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、本分野に特有な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場における上記の基本的な理論ないしはそれらを組み合わ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

性能評価研究施設におけるこれらの試験としては、構造モデルを人為的に設定した系において、①に対してはニアフィールド物質移動試験設備(IMAGE-MASTRA)により、また、②に対しては多孔質媒体について多孔質媒体水理試験設備(MACRO2D)、亀裂状媒体について亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK/GEOTEX)により水理・物質移動試験を実施する。

さらに、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ように、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。

### 1.3.1 ニアフィールド物質移動試験研究(IMAGE-MASTRA)

#### (1) 試験研究の目標

処分により地下環境に導入された物質は、その環境において化学的に緩慢に反応し、徐々に安定化していく。その際、周囲から廃棄体へ向かう反応性物質の移動及び反応により生成した物質の外側への移動が生じる。さらにこのような場において、ガラス固化体が溶解し、核種等の成分の放出・移行が起こる。

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、このように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。第2次取りまとめに向けて、ニアフィールドにおけるより現実的な評価を進めていく上では、ニアフィールドの水理特性に応じた外側境界条件の設定による評価を行うことのできる物質移動モデルの開発を目標の一つに設定している。

このためには、周辺岩盤の性状、特にその不均質性に起因する水理特性に応じた分散現象に関するモデルを考慮して、ニアフィールド全体の物質移動モデルの開発確証を行う。

#### (2) モデル開発の現状

緩衝材外側から周辺母岩への核種放出率は、人工バリアシステムの性能を評価する上で重要な指標の一つである。この評価解析では、ガラス固化体から溶出した核種が崩壊遅延を行いながら緩衝材中を拡散により移動するとして、古典的な物質移動理論が適用されている。周辺母岩の有する性状は、この拡散問題の外側境界（即ち、緩衝材/周辺母岩界面）条件の設定において考慮される。従来、人工バリアシステムの性能解析では、最も保守的な想定として周辺母岩を無限希釈媒体と考え、外側境界で濃度=0と設定する方法があり、これは、H3報告書でも採用されている基本的考え方である。このモデルでは、周辺母岩の性状などに依存するニアフィールド水理特性に関する条件は保守的に無視され、性状に関する条件設定に伴う不確実性は考慮していない。

#### (3) モデル開発方針（図Ⅱ-3）

解析解とのベンチマークによるモデルの検証が可能であることを考慮して、周辺母岩を均質な多孔質媒体と考えた移流・分散モデルを適用し、必要に応じて改良を行う。入力データである透水係数などの水理特性は、サイトが選定されていないので変動パラメータとして試験、解析を行う(FEMWATER/WASTE)。



さらに、周辺母岩の性状、不均質性に関する理解を踏まえ、不均質性を有する岩体と接した緩衝材からの核種放出率を評価する、二次元の現象解析モデルを開発する（数値計算モデル）。この場合においても、水理特性は変動パラメータとして扱う。

(4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

超長期性の取扱いは、考慮すべき性能評価上のシナリオに対応して、試験条件を設定できるように装置に柔軟性を持たせることにより行う。基本シナリオに対しては、現在の試験体系で対応可能である。また、種々の変動シナリオ（緩衝材、周辺母岩中のチャネリング発生等）については、これを扱うことができるように今後装置の改良を検討する。また、空間的不均質性の実現に関しては、試験として考えうる不均質性を可能な限り扱う。不均質性のタイプの設定に当たっては、統計理論に基づいて発生させたもの（MACRO）や実際の地層の観察から得られた知見を反映させる。

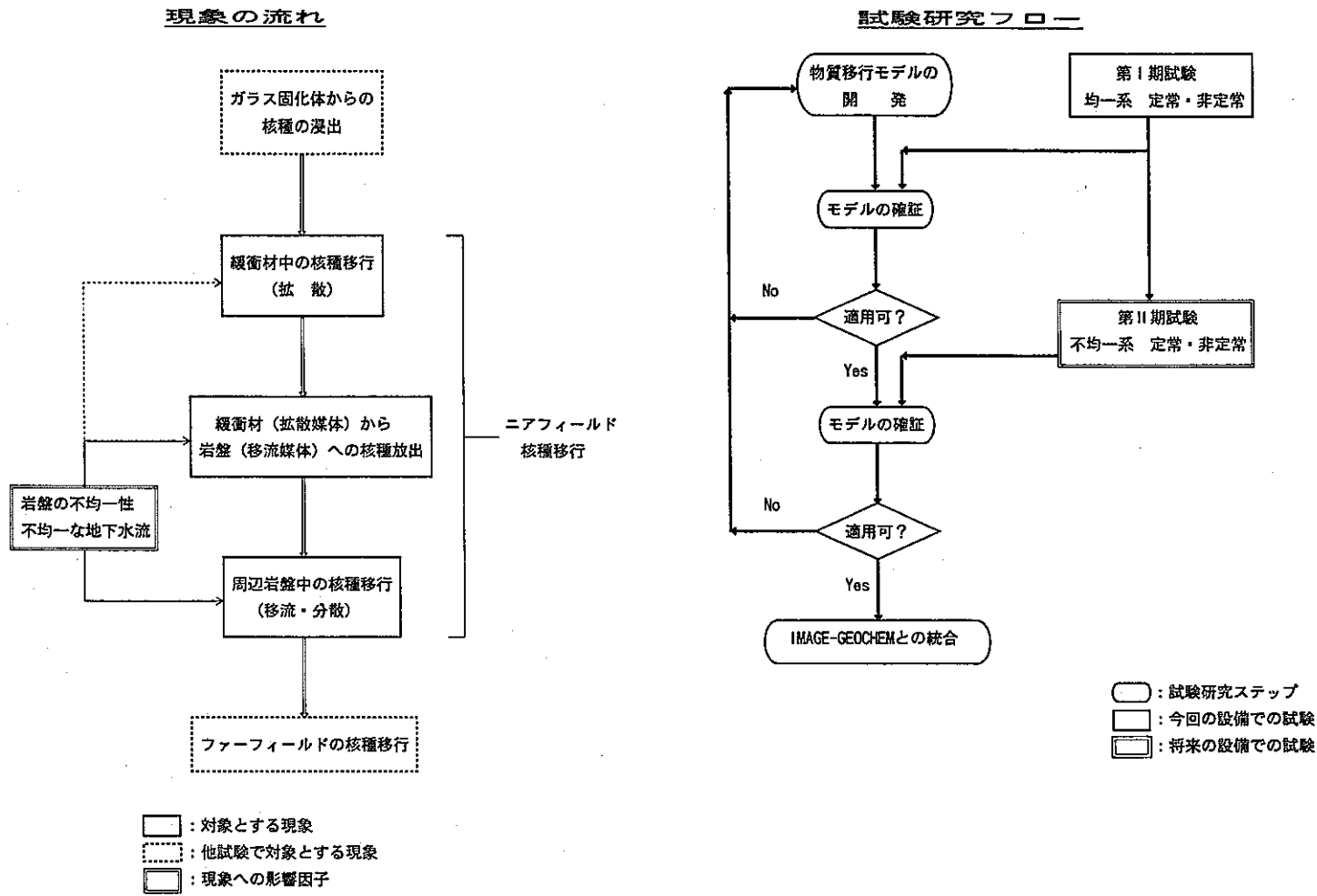


図 II - 3 ニアフィールド物質移動試験研究

### 1.3.2 多孔質媒体水理試験研究(MACRO2D)

#### (1) 試験研究の目標

処分システムの性能評価においては、地層のもつ不均質性を考慮して核種移行現象のモデル化を行うことが必要となる。本試験研究は、不均質な多孔質媒体中での物質移動現象に着目し、通常解析に使用される移流分散モデルの適用の妥当性の検討及びフィック則に類似させて設定している分散係数の妥当性を検討することを通じて、分散現象の基本的理解、新たな分散モデルの構築へ向けてのデータ収集、解析を進めていく。

第2次とりまとめに向けては、実際の地層中での核種移行を地層の不均質性、等価多孔質媒体を仮定することの妥当性を考慮して、現実にもつた形で評価していくことが課題になってくるものと思われる。本試験研究は、不均質性を有する地層中での分散現象に焦点をあてて実験を試み、従来の分散モデルについての問題点を解決し、分散現象に関する新たな知見を得て、モデルの改良、開発を行うと同時にコードの検証を行い、第2次取りまとめでの性能評価計算に役立てることを主眼として実施する。

#### (2) モデル開発の現状

現在の地層中の核種移行評価では、岩盤を亀裂性媒体と多孔質媒体の2種類に分けて解析を行っている。亀裂性媒体に関しては、岩体マトリクス中に開口幅一定の単一亀裂を有する媒体を仮定し、岩体マトリクス中では拡散現象、亀裂中では移流分散現象を考えている。ここで使用している移流分散モデルの重要なパラメータは、流速及び分散係数であるが、このうち分散係数は従来のモデルと同様に流速と分散率の積の形で定義している。流速は地下水流動計算を基に設定し、分散率は評価を行うスケールに応じて文献値を参考にして設定している。この移流分散モデルを使用した解析の問題点としてモデリング、コード化の観点から以下の項目が挙げられる。

モデリングに関する問題点は、

- ① 地層の不均質性を考慮していない。
- ② 分散係数は、輸送されるフラックスが核種の濃度勾配に比例するとしたフィック則を適用してモデル化されており、分散係数はその際の比例定数と定義している。
- ③ 分散係数は流速と分散率の積の形で表現されている。
- ④ 実際の分散率の値は、評価スケール（時間的、空間的）に比例した変化を示すが、この変化を直接モデル化することはできない。

ことである。コード化に関する問題点は、

- ⑤ 不均質な媒体に対しては、解析解が存在しない。

- ⑥ 数値的に解を得ようとする場合、移流及び分散係数の場所的な変化が存在するために数値解の発散、振動を生じ適切な解が得られない。

ことである。

均質多孔質媒体に関しては、室内試験から従来の分散モデルの妥当性が確認されており解析解も存在する。しかしながら、不均質多孔質媒体に関しては、①～⑥で述べたような問題が存在するために適切な仮定を置き、モデルを簡略化して分散現象を解いているのが現状である。これらの問題点は不均質場の信頼性のあるモデル化を行うために解決されなければならない、そのために本試験研究で人工的に不均質の場を作製し、物質移動の実験を行うことが重要となる。

### (3) モデル開発方針 (図Ⅱ-4)

#### (a) 新たな分散モデルの構築

質量保存則から支配方程式(移流分散方程式)を誘導する場合、微小六面体(コントロールボリューム)を設定し、物質収支を考える。このとき流速及び濃度は、この微小六面体に対して平均化されるが、現在のモデルでは、この平均化により生じる流速、濃度の偏差部分のフラックスが分散係数×平均濃度の勾配で与えられるフラックスに等しいと仮定して分散現象を表現している。よって、このフラックスに別の表現を与えることにより、新たな分散モデルを構築する。

また、現在分散係数は、分散率×流速の形(流速の線形関数)で表されているが、分散係数を流速の非線形関数で表したほうが良好な結果を与えることがBear等により述べられていることから、これを確証する。

#### (b) 分散係数のスケール依存性及び時間依存性

上記(a)で述べた微小六面体において、全領域が均質であれば分散率は、一定の値が得られるはずである。この微小六面体中に不均質性が存在し、これが等価多孔質媒体とみなせるならば、ここでの分散率は、不均質性に依存した値となることが予想される。このように六面体のなかにどの程度のスケールの不均質性が存在すれば六面体のスケールをどの程度とらなければならないかの法則性を得る。また、上記の法則性を得ることにより、数値計算を行うに際しての適切なメッシュサイズを決定する。

さらに、試験によりスケール依存性および時間依存性の程度、理由について確認し、モデルの構築に反映する。

## (c) 統計的解析手法の適用

実験により帯水層各ポイントにおける濃度の時系列曲線を得、これらのデータの相関関係を調べることにより、各ポイント付近および各ポイント間の統計的性質を把握する。これにより、物質の移動挙動が同じ特性を示す不均質性のスケールを把握し、このスケールに対応した等価多孔質媒体を仮定する。

本来、地層の不均質性は限られた孔井から得られる水理情報（地下水面の位置、透水量係数等）をもとに推定されるものである。よって、このために開発された統計的推定手法を前もって地層構造および水理情報が分かっている本試験装置上に適用することによりその妥当性を示す。

分散現象は、地層中の地下水流速のランダム性が原因で生じるものである以上、地層の透水係数分布に大きく依存する。よって、分散現象の特性値（例えば分散係数）と透水係数の関係を帯水層の持つ統計情報を基に決定できる可能性がある。また、原位置において深さ数百メートルでのトレーサ試験は現実的ではなく、透水試験から得られる孔井周辺の透水係数を利用して地層の分散係数を推定する手法を確立することは非常に重要と考えられる。本試験では、そのための知見を得る。

## (d) コードの検証

現在の大部分の核種移行に関するコンピュータコードは移流等による数値解の発散、振動に関してUpstream Method, Mass Lumping Method, 等の数値的に連立方程式中に現れる係数を操作して問題を解決する手法が主流であり、解の精度も悪かった。これに対してMultiple Grid Method, Eulerian Lagrangian Method, Characteristic Lines Methodは数学モデルを直接変形して、数値的な操作を加えることなく精度の良い解がえられることが知られている。よって、本試験で仮定した数学モデルをこれらの手法を用いてコード化することにより、数値的な誤差を最小限に抑える。

## (4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

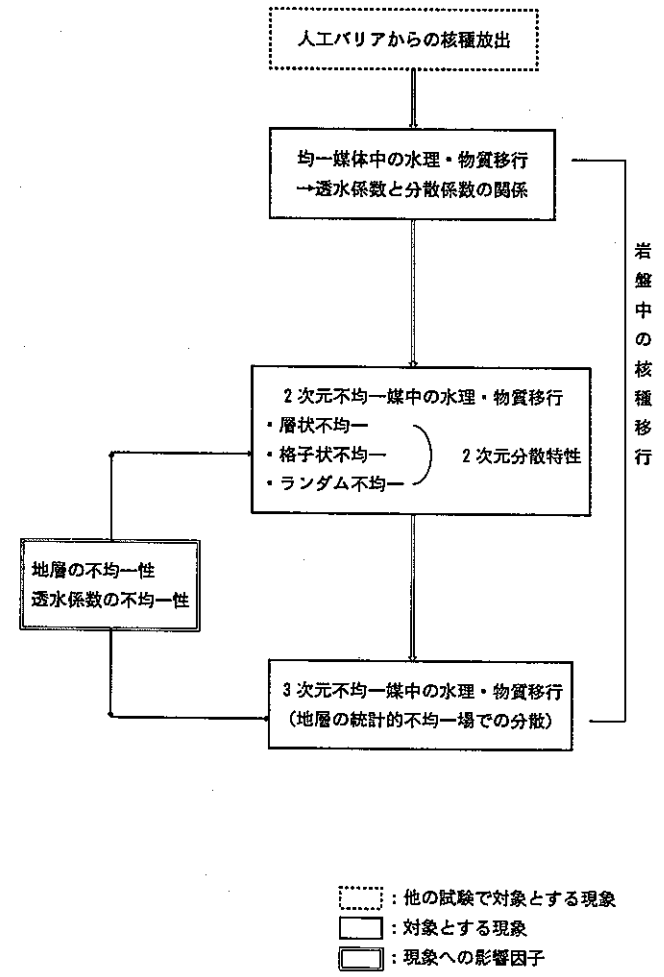
本試験研究は、純粋な分散現象について議論するために実施するものである。

このため、トレーサの媒体への吸着、媒体の変形等は考慮していない。逆にこのような現象が生じない、すなわち微視的に見て固定された空隙内での物質移行において移流が卓越する条件下で試験を実施する。よって試験方法及び試験設備として超長期性は配慮していない。ただし、本試験により確証あるいは開発されたモデルに対して時間軸方向への不確実性を導入して性能評価解析を行うことは可能であり、この場合、実際に生じ得る超長期性を考慮に入れた場合のアウトプットがある範囲で示されることになる。

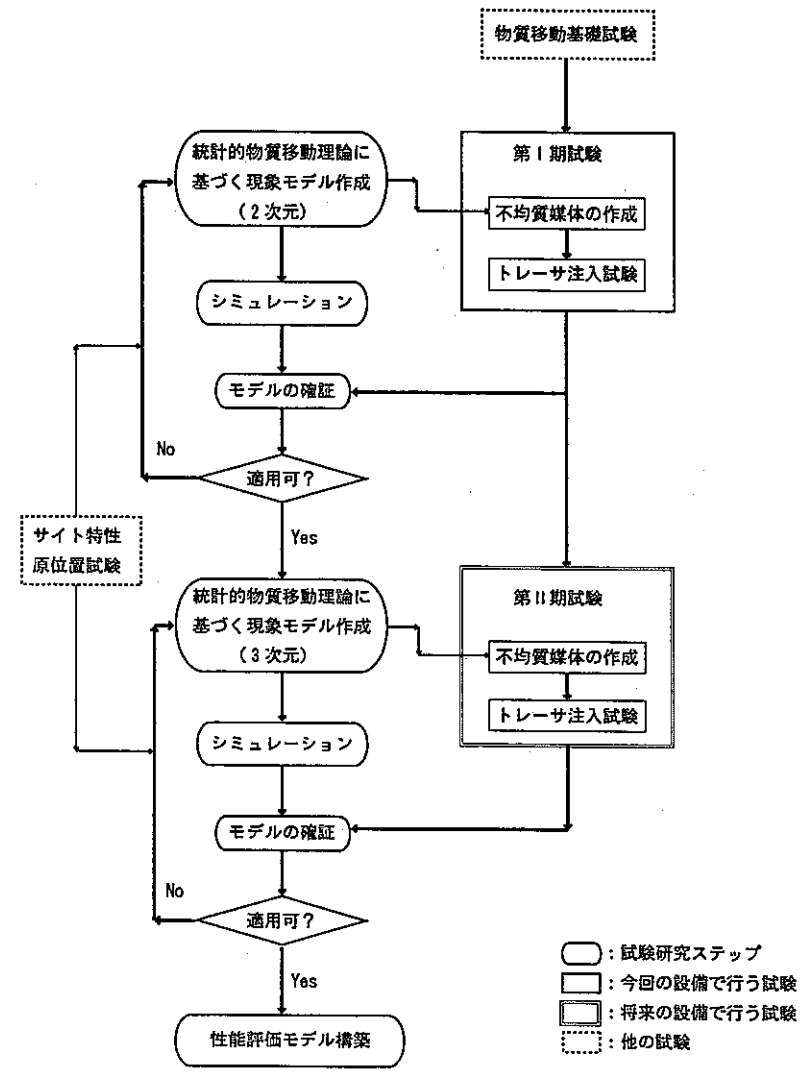
空間的不均質性に関しては、試験前にフラクタルに基づいた不均質性発生アルゴリズムを用いて発生させた透水係数場に対応させて、試験装置上にビーズを充填していく。

装置としては、ビーズ充填タンクを幾つか設け、このタンクから対応する多孔質媒体槽内の位置に充填する。充填に際しては、ビーズしきり板を設ける。このようにして不均質な多孔質媒体槽が作製される。

現象の流れ



試験研究フロー



[Dashed Box] : 他の試験で対象とする現象  
 [Solid Box] : 対象とする現象  
 [Box with Dotted Border] : 現象への影響因子

[Oval] : 試験研究ステップ  
 [Solid Box] : 今回の設備で行う試験  
 [Box with Dotted Border] : 将来の設備で行う試験  
 [Dashed Box] : 他の試験

図 II - 4 多孔質媒体水理試験研究

### 1.3.3 亀裂状媒体水理試験研究(LABROCK/GEOTEX)

#### (1) 試験研究の目標

地層処分システムの性能評価においては、人工バリア周辺岩盤中での核種移行評価が、重要であることが明らかになってきている。

亀裂性岩盤中の核種移行評価に際しては、主要な移行プロセスである、「移流」「分散」、「マトリクス拡散」および「収着」の各現象をモデル化する必要がある。これら、各プロセスは核種移行の場である、亀裂中の流路の形状と下記のように密接に関連している。

- ・移流：流路の断面積、流路長に支配される。
- ・分散：流速の異なる複数の流路の分岐・合流に支配される。
- ・マトリクス拡散：流路中において、溶液と接触する面積、マトリクス拡散深さ、tortuosity、有効間隙率に支配される。
- ・収着：流路中において、溶液と接触する面積に支配される。

したがって、流路形状を正確にモデル化することは、モデルの信頼性を向上する上で極めて重要な課題である。

このため、亀裂状媒体における移流、分散、マトリクス拡散現象を対象としたモデルの開発、確証に資する。

#### (2) モデル開発の現状

H3報告書の主要な結論の一つは、10m程度の岩盤が核種の移行を十分に遅延させる機能がありうるという点である。

H3報告書の解析において、最も遅延に大きな効果を及ぼしているのは、マトリクス拡散であり、これに影響を及ぼす要因の正確なモデル化が重要な課題であることが明らかとなっている。

H3報告書の岩盤中の核種移行解析においては、平滑な亀裂表面を持つ亀裂が、複数並行して配列する簡略化した構造を仮定して評価が実施されていること、流動方向に垂直な亀裂の奥行き方向の規模が考慮されていないと言った点において、課題が残されている。



## (3) モデル開発方針 (図Ⅱ-5)

前述した課題を解決可能な亀裂中の核種移行の詳細なモデルの開発・確認を行うためには、マトリクス拡散に重要な影響を与える要因として流速、溶液と亀裂表面の接触面積、マトリクス拡散深さ、tortuosity、有効間隙率に関するデータを取得しモデルを用いた予測と比較可能な試験を行うことが必要不可欠である。

このうち、LABROCK/GEOTEXにおいては、流速を規定する流路の断面積、流路長、またマトリクス拡散を規定する溶液と亀裂表面の接触面積に主眼を置いた研究を行う。

改良版FracMan/MAFIC (Golder Associates Inc. に委託開発中) を適用する。

単一亀裂内の開口幅の二次元での不均質性のモデル化は、平成3年度で完了している。FracMan/MAFIC は、以下の4種類の不均質性モデルで、実測された開口幅データをフィッティングするとともに、フィッティングより得られた統計値より不均質性を発生することが可能である。

- Geostatisticalモデル
- Fractal モデル
- Non-stationaryモデル
- Empirical モデル

平成4年度は、マトリクス拡散項の追加と亀裂交差部のモデル化を実施中である。従って、I期設備完成時までには、非収着性トレーサーのモデル化が可能となる。平成5年度には、収着項の追加を予定しており、収着性トレーサーを用いた試験のモデル化も可能となる。

## (4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

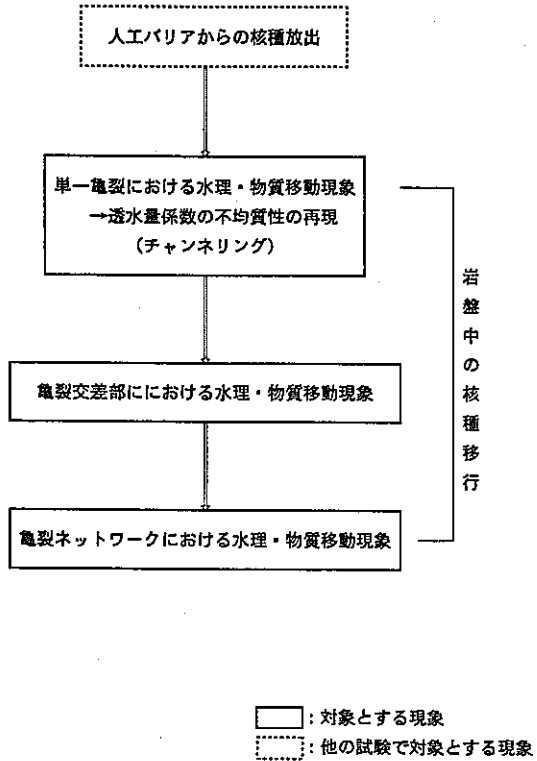
超長期性に関して考慮すべき事項は、亀裂内充填鉱物の変化（鉱物進化、新たな鉱物の沈殿、亀裂内充填物質の流出）及びこれらに伴う目詰まりによる流路の変化がある。

しかし、これらは緩慢な現象でありモデル化は非常に難しいものと思われる。したがって、今後これらの現象に関してはどのように考慮するのかコンセンサスを得ていく必要がある。したがって、当面は基本シナリオとしてこれらの緩慢な現象を考慮せず、現状の亀裂の状況に基づく評価を行う。

空間的不均質性に関しては、H3レポートの結論から、処分場近傍(10～数10m)のニアフィールド岩盤に対して考慮する必要がある。この範囲については、釜石フェーズⅡ原位置試験において単一亀裂および亀裂交差部でのトレーサー試験が予定されており、原位置でのトレーサー試験後、複数のLABROCK 岩体を切り出すことにより、より大きなスケールでの不均質性をモデル化することが可能となる。

また、最近の世界の動向として、実際の処分場の安全審査においては、処分場の操業が終了して閉鎖する時点での安全審査が重要であると考えられてきており、この場合、サイト特性調査および処分場の建設において相当量のデータが取得されるものと考えられる。従って、空間的不均質性に関しては相当量のデータが得られるものとする。

現象の流れ



試験研究フロー

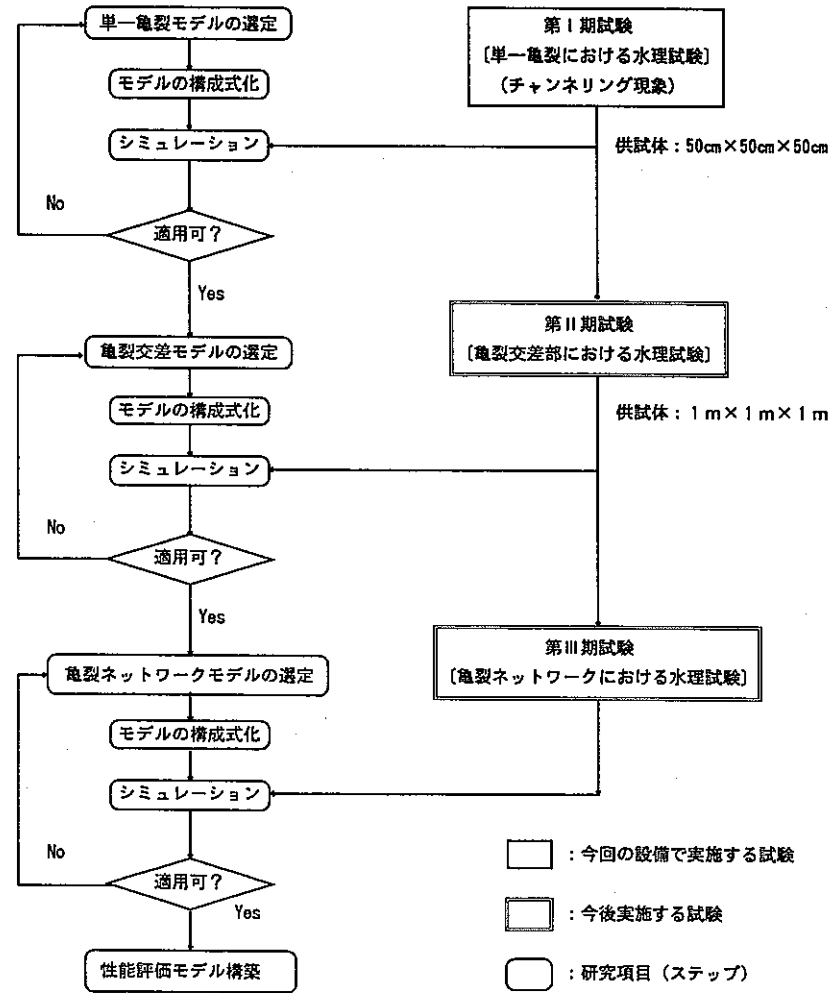


図 II - 5 亀裂状媒体水理試験研究

## 1.4 連成プロセスに係る試験研究

### (1) 試験研究の目標

地層処分システムの性能評価において、ニアフィールドの熱、水、応力の条件を明確にする観点から、人工バリア及び周辺岩盤における熱-水-応力連成現象を定量的に評価することは重要な課題である。しかし、H3レポートでは、ニアフィールドの熱、水理、応力については、個別の現象評価に留まっており、今後の課題となっている。このため、第2次とりまとめに向けて、熱-水-応力の連成モデルを開発・確証し、連成効果を定量的に評価しニアフィールド環境を示す必要がある。

緩衝材中で発生する熱応力（最大1.5MPa程度）や膨潤応力（乾燥密度1.8g/m<sup>3</sup>で約3MPa）は地圧（約30MPa）に比べて小さく、その発生時期も処分初期の数百年の期間であるため、ニアフィールド水理への影響は小さいと考えられるが、その確認が必要である。また、処分孔掘削の際、発生する緩み域については中部事業所での原位置試験の結果で、立坑掘削後の弾性係数の増加、透水係数の減少という緩み域の発生とは逆の現象が観察されている。

さらに、ストリパにおいて同様の掘削に伴う透水性の低下が報告されている。

これらの現象は、岩盤の不均一性、応力の集中、空気の浸入等が原因と考えられるが、原位置試験では不明な点が多くデータの解釈が困難となっている。

そこで、周辺の温度、応力等の境界条件を様々なコントロール可能な人工バリア系を、均一で物性の明らかな実岩体を使用して模擬した熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)を用いて、地下深部の処分環境下における地圧の作用、地下水の浸入による緩衝材の膨潤応力の発生、廃棄体の発熱による熱応力等が周辺岩盤の緩み域や亀裂中の水理特性に及ぼす影響を評価し、連成モデルの開発・確証を行う。

### (2) モデル開発の現状

現在、緩衝材中の熱-水-応力の連成現象については、既に緩衝材大型試験においてデータを取得するとともに、モデルの開発・確証を実施中である。緩衝材中の水分の移動に関しては、液状水状態での移動と蒸気水状態での移動の2つの移動形態を考慮してモデル化を行っている。緩衝材の膨潤挙動や水の相変化に係わるエネルギーレベルの移動については、現在検討中である。

また周辺岩盤の熱-水-応力連成現象については、国際共同プロジェクト(DECOVALEX)において、主に硬岩を対象とした緩み域や亀裂のモデル化及びそれらの領域での水の移動のモデル化に取り組んでいる。

(3) モデル開発方針 (図Ⅱ-6)

ニアフィールドの熱-水-応力連成モデルは、緩衝材中の連成モデルと周辺岩盤の連成モデルとを合わせたものとする。

第一段階として、不飽和領域における二相流連続体モデルを開発し、第二段階で、不飽和領域における多相流不連続体モデルを開発する。本試験研究においては、THAMES, FINAS, SIGNAS等の既存コードの適用・改良を行うことによってニアフィールドの熱-水-応力連成モデルの開発を行う。

今後、モデル開発に際して考慮する点は次のとおり。

- ① 緩衝材の膨潤挙動
- ② 温度勾配が緩衝材中の水分移動に与える影響の非線形性
- ③ 緩衝材中の水分の変化に伴うエネルギーの移動
- ④ 様々な応力が周辺岩盤の緩み域や亀裂中の水理特性に及ぼす影響

(4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

超長期性に関して考慮すべき事項として、緩衝材の粘土鉱物の層間イオンの置換や変質がある。これらについては、処分場周辺の水質や温度条件により左右されるとともに、工学的規模での試験では確認が困難なため、室内試験での基礎的データの蓄積を今後とも実施するものとし、本試験ではメカニカルな熱-水-応力連成現象のうち、応力による緩み域の発生がニアフィールドの水理特性に及ぼす影響を中心とした試験を行う。

本試験はまず均質な岩体を用いた試験を行い、基本的な連成現象を確認するものであり、最初は緩み域、次に亀裂に着目した一連の試験を行いつつ、原位置試験を補完していくものである。

岩盤の空間的不均質性については、不均質な岩体・試験体を用いた試験を行うことにより評価する。

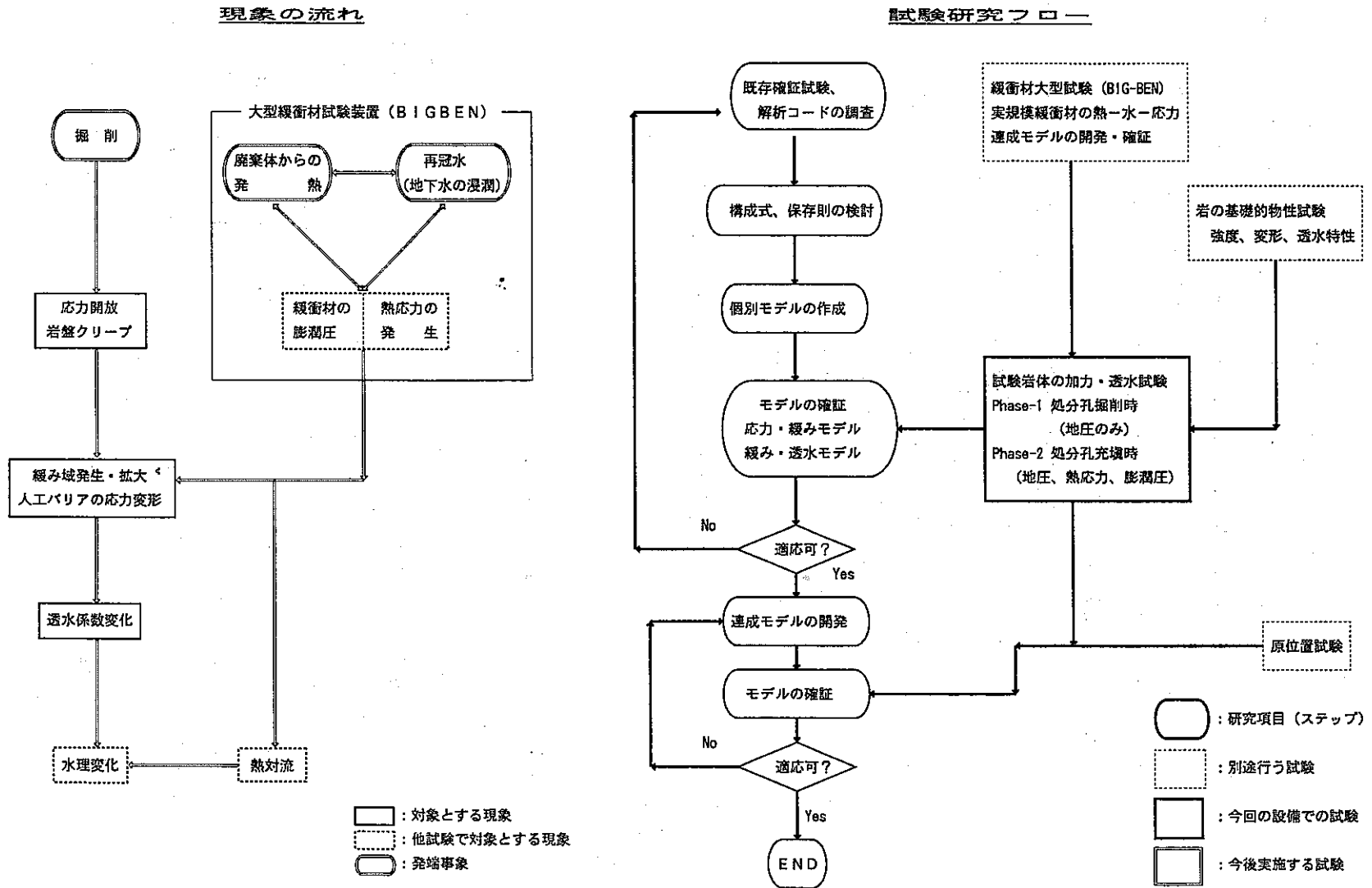


図 II - 6 熱 - 水 - 応力連成試験研究

## 1.5 構造力学に係る試験研究

性能評価研究施設において中心となる基本シナリオは、決定論的に発生する事象により構成されている。これらの基本シナリオを構成する事象に関して現象を解明し、論理モデルを作成し、そのモデルの妥当性を確認するために試験研究が展開される。

さらに確認されたモデルを用いて定量的予測及び評価が成され、その結果に従い高レベル放射性廃棄物の地層処分システムに関する概念構築が実施される。

このような決定論的事象の現象解明及びモデル化において、人工バリアの経時的構造変化を取り扱うことは、地層処分の前提条件であるバリア機能の超長期間にわたる性能予測及び評価に関係するため不可欠であり、また境界条件の変化をパラメータとして人工バリアの構造変化を予測し評価するためにも必要となる。

そこで、他の決定論的事象に関する試験研究で現状では取り扱われていない事象から人工バリアの構造上の変化に関する重要な事象として、

- ① オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの移行
- ② ニアフィールド水理場における緩衝材の物理的安定性
- ③ 人工バリア及び周辺岩盤の変形

に着目し、水素ガス移行挙動試験設備(HYDROGEN)及び緩衝材流出挙動試験設備(BENTFLOW)、緩衝材力学試験設備(TRIAX)を用いた試験により、現象解明、そのモデル化及びモデルの確認を行う。

### 1.5.1 水素ガス移行挙動試験(HYDROGEN)

#### (1) 試験研究の目標

還元環境における炭素鋼オーバーパックの腐食は、水素型腐食が主である。

このため、発生する水素ガスは、膨潤した緩衝材中の地下水に溶解し、拡散もしくは通気して人工バリアの外側へ移行するか、緩衝材の内側に蓄積することになる。緩衝材中の水素ガスの拡散移行速度は、ガス発生速度に比べて小さいため、発生したガスは徐々に緩衝材とオーバーパックの間に蓄積することになる。また、この蓄積したガスによる応力の発生は、緩衝材及び周辺岩盤の変形等により緩和されることが期待されるが、緩衝材の通気が悪い場合には、腐食反応の平衡圧力が約100MPaと高いため、30MPa程度の地圧を越えて増加することにより岩盤に影響を及ぼす可能性がある。

そこで、このような水素ガスの通気特性及び移行メカニズムを把握し、ガス移行モデルの開発を行う。

## (2) モデル開発の現状

ガスの移行に係わる研究開発は、諸外国において進められており多孔質/破碎岩中のガス移行挙動評価コードも開発されている。以下にその代表例を示す。

## ① TOUGHコード

本コードはL B Lで開発され、一次元～三次元多孔質及び破碎媒体内の流体（液体及び不活性ガス）及び熱モデルシミュレーションである。オリジナル版は、破碎凝灰岩中の高レベル放射性廃棄物周辺の流体及び熱モデルに、リビジョン版は、低・中レベル放射性廃棄物中のガス移行にも適応可能である。解法は、差分方程式を用いたNewton-Raphson反復法により、また数値マトリックスはGaussの消去法を用いている。

## ② TRACR3Dコード

ロスアラモス国立研究所で開発され、多孔質媒体中の等温条件下の二相流多成分溶質移行コードである。一次元～三次元直交または円筒座標を取り扱うことができ、平衡または非平衡状態での移流、拡散、分散計算が可能である。解法は、差分法でレイノルズ数10～100の層流ではダルシー則に従うとし、乱流は非線形Forchheimer方程式に基づいている。

## ③ NORIAコード

サンディア国立研究所でネバダ核廃棄物貯蔵調査プロジェクトの一環で開発されたものである。解法は、Galerkin方程式を用いたFEM解法であり、ガス圧力勾配が大きく多孔質媒体中の非等温下の二相流を対象としている。また、部分的に飽和多孔質媒体中の水、水蒸気、空気、熱エネルギー移行に関する非線形方程式を解いている。

## ④ GWHRTコード

スウェーデン王立技術研究所及びイスラエル技術研究所により開発され、飽和したあるいは部分飽和した多孔質あるいは破碎岩内の地下水及び熱流方程式を解いている。一次元～三次元問題に適応でき、ガス移行モデル化は破碎岩盤内に限定している。破碎面は、一定幅としあるいは無秩序な幅分布をもつ集合体としている。

## ⑤ PBTR0Sコード

サンディア国立研究所によりネバダ核廃棄物貯蔵調査プロジェクトの一環として開発された。一次元差分法コードであり、部分飽和した多孔質媒体中の3流体成分（水、空気、水蒸気）及び熱の移行を計算できる。

ガス相は、空気及び水蒸気の二成分を混合体として取り扱われ、ダルシー則及び二成分拡散式が考慮されている。



(3) モデル開発方針 (図Ⅱ-7)

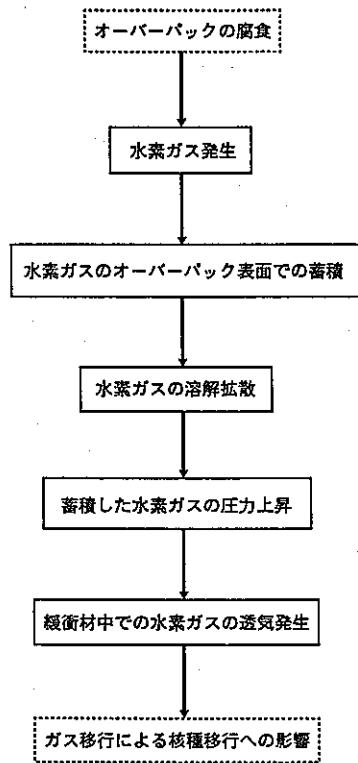
本研究開発においては、ガスが通気し始める臨界圧力と膨潤圧力との関係、透気発生後の定常流の透気係数の把握、ガス透気経路の観察及び間隙水との相互作用等のデータを取得するとともにメカニズムの把握を実施する。

また、これらの現象理解を基にしたガス移行モデルの開発にあたっては、上記に示したような諸外国のコード及びモデルを参考とし、あるいはその適用性を検討してモデルの構築を図るものとする。

(4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

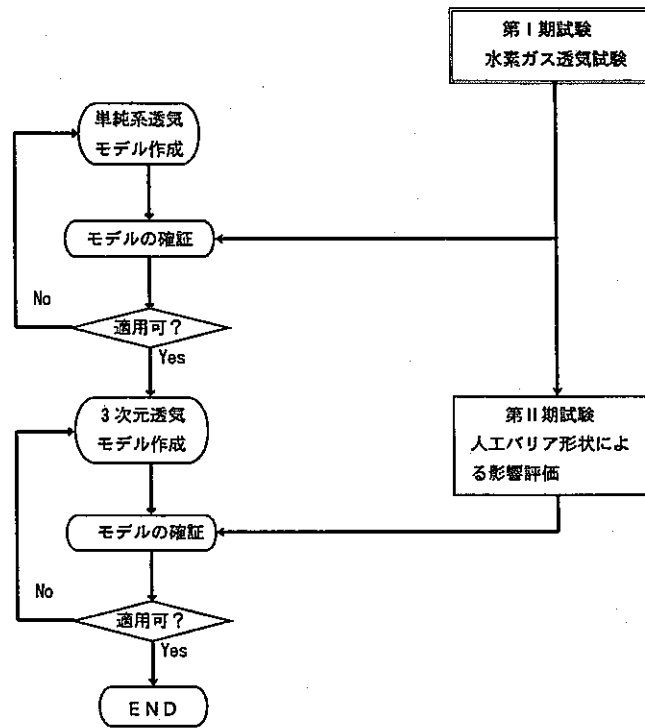
対象とする現象では、反応の進展に伴い徐々に水素ガスが蓄積されるため、超長期性に関する配慮が必要となるが、今回の試験に関しては、強制的にガス圧をかけるため実際よりも厳しい条件で行われることから、その結果は保守的な値となる。また、空間的不均質性に関しては、緩衝材の不均質性が考えられるが、長期的には緩衝材は膨潤しておりほぼ均質と考えられることから特に配慮しない。

現象の流れ



[Solid Box] : 対象とする現象  
 [Dashed Box] : 他試験で対象とする現象

試験研究フロー



[Oval] : 試験研究ステップ  
 [Solid Box] : 今回の設備での試験  
 [Solid Box] : 将来の設備での試験  
 [Dashed Box] : 別途行う試験

図 II - 7 水素ガス移行挙動試験研究

## 1.5.2 緩衝材流出挙動試験(BENTFLOW)

### (1) 試験研究の目標

緩衝材は地下水の浸潤により膨潤、飽和し、周辺の岩盤亀裂中に流出することが考えられる。この現象を経時的に見ると、まず膨潤によって緩衝材の亀裂中への侵入が発生し、次いで亀裂中における緩衝材がゲル化して地下水に溶出することにより持ち去られ、その分の量を再度緩衝材が補充するといったプロセスを繰り返すような場合が想定される。

このような流出現象は、緩衝材の密度低下をもたらし、その結果緩衝材に要求されている地下水の透水抑制機能、放射性核種の吸着保持機能等の低下をまねくことが考えられる。

本試験研究では、このような流出現象を、

- ① 緩衝材の膨潤による亀裂への侵入現象と
- ② 亀裂へ侵入した緩衝材ゲルの地下水による浸食現象

という2つの観点に区分して現象の理解及びモデルの開発確証を実施する。

### (2) モデル開発の現状

緩衝材の膨潤による亀裂への侵入については、R. Pusch の実験によれば、亀裂の開口部に応じてある一定量の緩衝材が入り込むと、亀裂への侵入が止まることが確認されている。また、ゲルの浸食については、流速 $10^{-4}$  m/s からエロージョン及び流出が始まり、 $10^{-3}$  m/s では微細構造の破壊が起こり大きな粒子も剝離するという結果を導出している。

モデルについては、基本的なレオロジカルモデル等を適用した評価を行っている。

事業団においては、対象はことなるものの閉鎖技術の要素技術であるグラウト材の浸透過程を把握するために、平板隙間試験を実施し、ビンガム流体モデルの適用性を評価している。

### (3) モデル開発方針 (図Ⅱ-8)

ベントナイトの侵入に係わる物理モデルについては、不飽和域から液性限界までの広範囲な含水比にあるベントナイトを対象とする必要があり、レオロジー的には非ニュートン流体として挙動することが予測される。そこでベントナイト浸透の平行平板、軸対象流れに対する解析的アプローチとして、例えばナビエ-ストークスの一般式を軸対象問題として理論展開していく理論解析手法等に基づきベントナイト浸透拡散モデルを開発する。

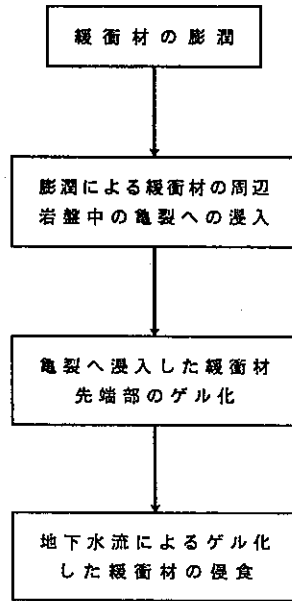
ベントナイトのゲル化浸食については、ゲルフロントにおける粒子間結合力、ゲル濃度分布等微細構造的検討により実験的考察を進めながら、剝離モデルの開発を行う。

(4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

超長期性に関して配慮すべき事項は、評価対象期間長く、実験系では長期データの取得が困難なことから現象の初期データでモデルの確認を実施し、それを外挿することによって長期予測を行う。また、長期的には亀裂の変化や地下水流速の変化等非定常状態も考えられるが、当面は定常状態について評価する。

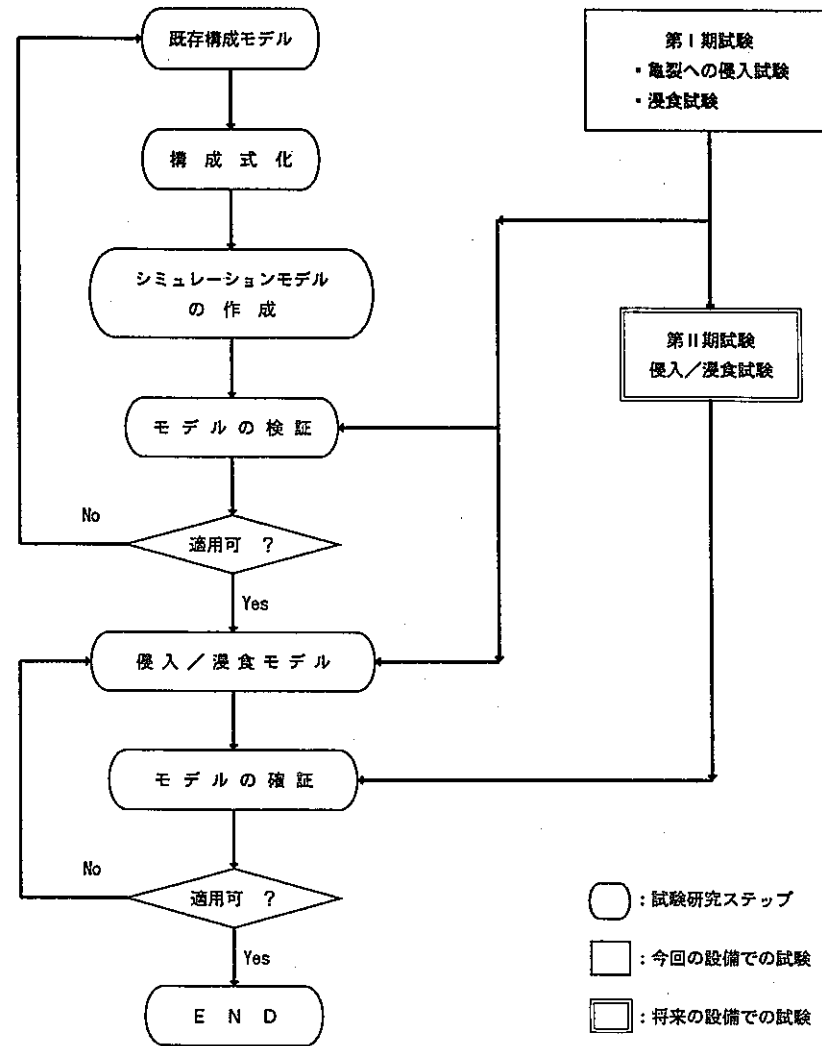
空間的不均質性に関しては、単一平滑スロットにより亀裂を模擬することから特に配慮しない。しかしながら、将来的には亀裂の幾何学的形状を考慮した、実岩体を用いた試験等へと展開する。

現象の流れ



□ : 対象とする現象

試験研究フロー



○ : 試験研究ステップ  
 □ : 今回の設備での試験  
 □ : 将来の設備での試験

図 II - 8 緩衝材流出挙動試験研究

### 1.5.3 緩衝材力学試験(TRIAX)

#### (1) 試験研究の目標

人工バリアの各バリア機能を維持する本質的な構造・特性が、地震や地殻変動といった事象や周辺岩盤の不均質変形等によって、どの程度変化をこうむるのかを定量的に評価するためには、まず、人工バリアの構造・特性を詳細に把握する必要がある。特に緩衝材については、今までの特性データに加え地下深部の環境を考慮した圧力及び温度条件下でのデータの取得が必要である。

そこで、緩衝材、すなわち圧縮ベントナイトの高側圧条件下における三軸圧縮試験を実施し、緩衝材の力学的特性データの充実を図る。また、これらのデータは緩衝材力学モデルの開発へ反映される。

#### (2) 試験の現状

圧縮ベントナイトの力学的特性試験については、緩衝材の乾燥密度、飽和度、温度、ケイ砂含有率をパラメータとして、非圧密非排水三軸圧縮試験を実施しており、静的な応力条件下の変形特性、剪断特性やその密度、飽和度、温度依存性等に関するデータを取得しているが、2MPa程度の低拘束圧下での試験である。

#### (3) 試験の方針

処分環境条件を考慮し、緩衝材の排水条件、温度、拘束圧をパラメータとした試験を実施する。

#### (4) 超長期性と空間的不均質性に対する基本的考え方

本試験は、緩衝材の力学的特性試験であることから、特にこれらは考慮しない。

## 2. データベースの充実

多重バリアシステム性能評価モデルの開発・確証に必要な以下のデータを取得する。

- ① シナリオの同定のための諸現象のデータ
- ② モデルの妥当性を確証するためのデータ
- ③ 原位置試験, ナチュラルアナログ研究, 個別要素に関する試験等から得られるデータを性能評価用のデータとして位置づけ, 再構築するため試験条件を制御した試験によって次のデータを取得する。
  - ・ ナチュラルアナログデータについては, 系の初期条件, 境界条件の補完のためのデータ
  - ・ 腐食試験, 固化体浸出試験, 透水試験等による個別要素のデータについては, 複合性の補完のためのデータ

各試験において取得される具体的データについては, 『Ⅲ. 試験設備の概要』で述べる。

## 3. 性能評価シミュレーションシステムの開発研究

### (1) 試験研究の目標

地層処分研究開発に関連するデータ・情報を集約し, 地層処分システムの全体性能評価のシミュレーション・システムを構築するために, 以下の研究開発を進める

#### ① シミュレーション・システムの構築 (図Ⅱ-9)

地層処分システムのシミュレーションを行うために, 性能評価上考慮すべき現象を網羅し, それらの個別現象モデルを開発するとともに, 幾つかのモデルを適宜連結させて解析できるように集約し, 最終的に一つに統合化したシミュレーション・システムを構築する。

#### ② 計算機システムの開発 (図Ⅱ-10)

上記モデルの統合化の作業や試験結果のシミュレーション解析を行うためには個別モデルの組み合わせやパラメータ等を適宜自由に変えられるようなリアルタイム処理機能, 並列計算機能を有する計算機システムが必要である。

なお, 本計算機システムには, 性能評価研究のデータ・情報を画像処理し, 専門家間での合意形成や一般公衆の理解促進を図るために大型スクリーン等に結果を表示させるためのビジュアライゼーション機能を持たせるほか, 試験設備から得られるデータを管理するプロセスデータ管理用計算機システム, 一般的な情報処理を行う情報管理用計算機システム, 並びに施設内の各部屋から端末を介し本システムにアクセスするための施設内LANを設ける。また, 画像データ伝送専用の施設内LANも設置する。

(2) 今後の展開

第2次取りまとめに向けてニアフィールド性能の詳細評価および第3次取りまとめの全体性能評価に向けて、段階的にモデルの開発・統合化および計算機システムの拡充を図る。

① シミュレーション・システムの構築

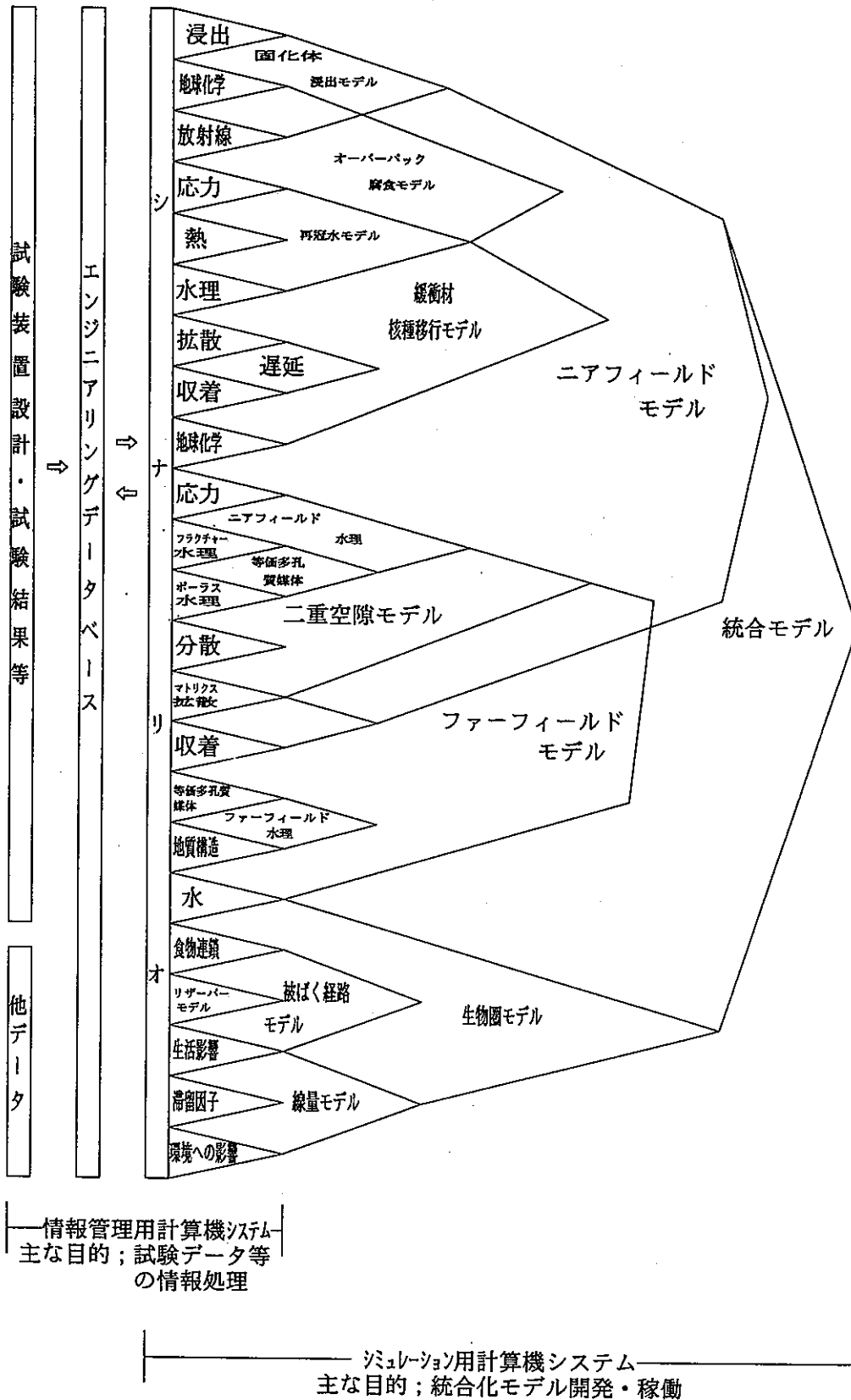
第2次取りまとめに向けて、段階的に各コードの開発・導入および統合化を行っていく。

② 計算機システムの開発

現在の計算機システムに以下のシステムを逐次増設して、シミュレーション計算機システムを整備する。

- ・ 連成コード等の高速数値演算用の超高速・超並列計算機システムの増設
- ・ モデル開発、プレ/ポスト処理、データベース、ビジュアライゼーション用のワークステーションの増設。
- ・ 施設内画像データ伝送用LANシステム設備の増設
- ・ 個人用データ処理のためのパソコン類の増設





図II-9 シミュレーションシステムの概念図

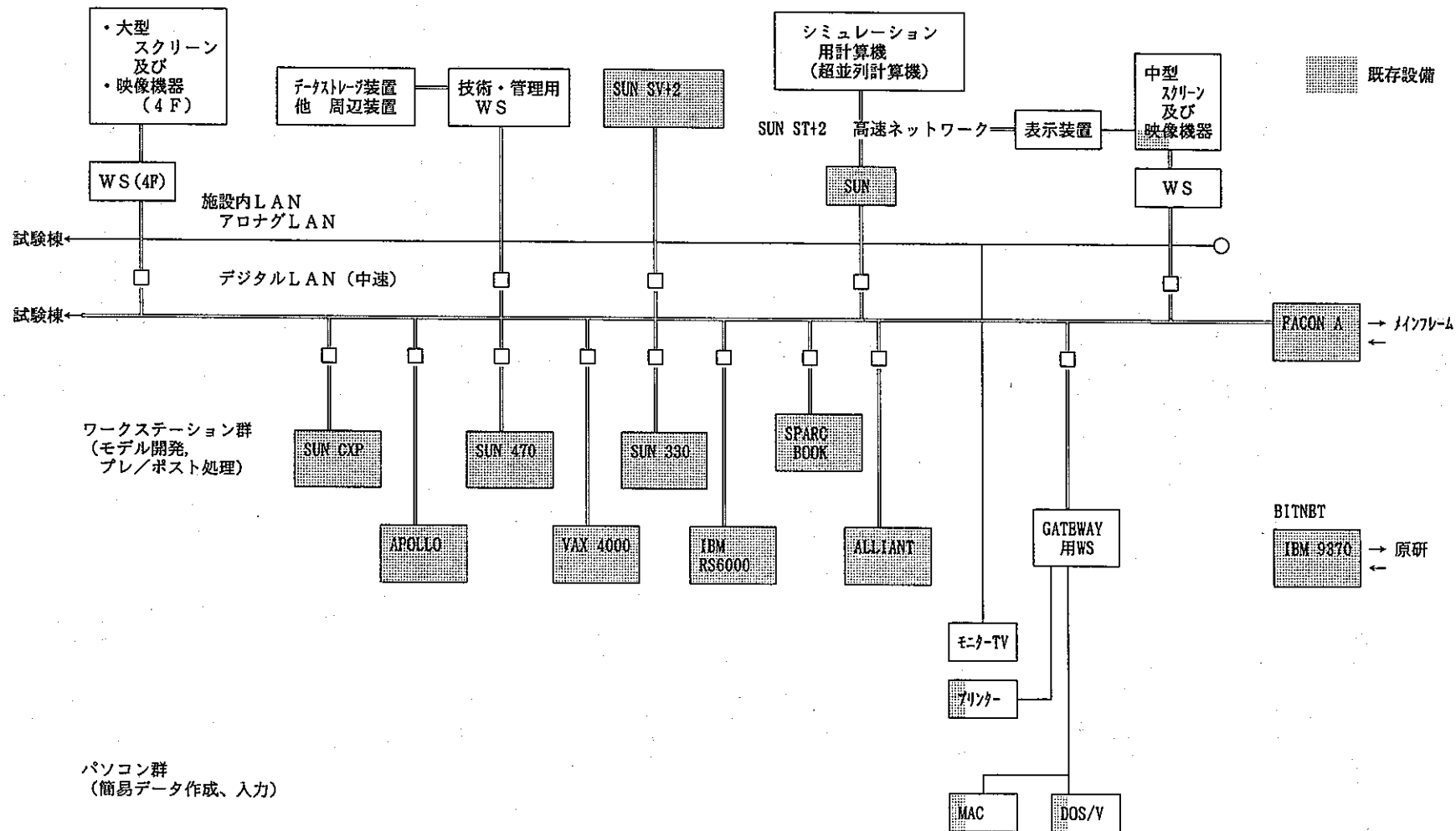


図 II - 1 0 計算機システム概念図

### Ⅲ. 試験設備の概要

#### 1. 化学平衡反応試験設備 (EDAS)

##### (1) 試験研究の内容

本EDASでは、地層処分環境を模擬するため、酸素濃度・二酸化炭素濃度等を制御した環境を気密性のチェンバー内に作り出し、この環境下で多重バリア構成要素（岩石、緩衝材、オーバーパック、ガラス固化体）と地下水との化学反応試験を実施する。

I期設備では、低酸素濃度、任意の二酸化炭素濃度に制御した雰囲気下でのデータを取得する。II期設備では、さらに温度、圧力の他、必要に応じ $CH_4$ 分圧を制御した雰囲気下のデータの取得を行う。

##### (2) 主要制御項目

本設備では、試験する環境の雰囲気を制御する。

I期設備では、主に低酸素濃度、任意の二酸化炭素濃度に試験環境の雰囲気を制御する。

II期設備では、低酸素濃度、任意の二酸化炭素濃度に加えて、必要に応じて $CH_4$ 濃度等の試験環境の雰囲気を制御する。また、温度、圧力の効果を確認するため、雰囲気制御に加え温度、圧力も制御する。

##### (3) 取得するデータ (表Ⅲ-1)

###### (a) 緩衝材-水反応試験

ベントナイト（随伴鉱物を含む）と地下水との反応試験を実施し、緩衝材-水反応のモデル化に関するデータ（試験前後の溶液組成、 $B_h$ 、 $pH$ およびベントナイトに含まれる鉱物（モンモリロナイト、パイライト、カルサイト等）の変化）を取得する。

I期設備では、H3報告書で採用しているイオン交換および随伴鉱物の溶解平衡モデルの確証データ、および速度論モデルの開発に必要なスメクタイトや重要な個々の随伴鉱物（黄銅鉱、方解石等）の速度式・速度定数の取得を行う。

II期設備では、温度や $CH_4$ 分圧を考慮した同様のデータ取得を行う。

###### (b) オーバーパック材料の腐食試験

EDAS内で浸漬試験・電気化学試験を実施し、極低溶存酸素濃度条件下における腐食メカニズムの解明を行う。取得するデータは腐食速度、不動態化条件、電極反応速度定数、腐食生成物の組成と構造、局部腐食の発生条件と停止条件等である。

また、腐食生成物-水反応試験を実施し、モデル化に資するデータ（試験前後の溶液組

成, Eh, pHおよび, 腐食生成物の変化) を取得する。

上記データのうち, I期設備では, 低酸素, 低二酸化炭素濃度条件下でのデータを主に取得する。II期設備では, 低酸素, 任意の二酸化炭素濃度条件下でデータを取得する。

(c) 炭素鋼—ガラス共存浸出試験

模擬廃棄物ガラスとオーバーパック候補材料である炭素鋼を共存させて浸出試験を実施し, Fe-Si 反応の廃棄物ガラスの浸出挙動への影響を評価する。

本試験は, I期設備で終了させる。

(d) 溶解度試験

溶液のEh, pHおよび炭酸濃度に敏感な元素の溶解度を測定する。FP元素およびランタニド元素(アクチニド元素のアナログ等)を本試験の対象とする。

I期設備では, 核種移行評価上溶解度データ取得で優先すべき元素のうちコールドで可能なSn, Se, Zr, Ni, Pdやアナログ元素としてSm, Ndを, II期設備では, 上記以外のPb, Sb, Nb, Biのデータを取得する。また, 温度(高温)およびCH<sub>4</sub>分圧制御下での試験を行う。

(e) 収着試験・拡散試験

安全評価上重要で溶液のEh, pHおよび炭酸濃度に敏感な元素(安定同位体の存在するもののみ)についてベントナイトおよび岩石を使用して収着試験・拡散試験を実施する。

I期, II期設備におけるデータ取得対象元素や条件は(d)に同じである。

(f) 岩石—水反応試験

IMAGE-GEOCHEMでの試験から熱力学データが欠如している, または平衡論的に取り扱えないと判断された反応について, EDAS内でのバッチ試験から熱力学データ及び反応速度に関する基礎データを取得する。

岩石—水の平衡試験を実施し, その実測データと地球化学コードの解析結果と比較することで, モデルおよびデータベースの妥当性を評価する。

I期設備では, H3報告書で地下水水質形成にとって重要と考える鉱物や, 反応速度の遅い鉱物(黄銅鉱, アルバイト, カオリナイト, スメクタイト等)についてデータ取得を行う。

II期設備では, 現状で知見の少ない鉱物(有機物等)や温度やCH<sub>4</sub>分圧を考慮したデータ取得を行う。

(4) I期設備とII期設備の関係

(a) I期設備

低酸素濃度、低二酸化炭素濃度（各 0.1ppm 以下）の還元環境条件下で(2)に示す試験を実施するために、平成2年度下期に高性能雰囲気制御ボックスの製作を行なった。今回は本設備に二酸化炭素濃度の制御機能（0.5 ppm ～10%）を付加した雰囲気制御設備を製作し、設備全体としての機能向上を図ったものである。

(b) II期設備

I期設備において製作した雰囲気制御チャンバーを増設し、いくつかの試験をより広範囲のパラメータで並行して実施することが可能となるようにする。

また、I期設備を用いて得られた試験結果を検討し、機能の改良（二酸化炭素濃度の制御範囲を広くすること、および分析設備の充実）を行う。

(5) I期設備の仕様とII期設備計画

(a) I期設備の仕様（図Ⅲ-1）

I期設備は、既設の高性能雰囲気制御装置に付加する形で、チャンバー、および二酸化炭素濃度を制御できる雰囲気ガスの供給装置を新たに製作している。

〔設備仕様〕

- ・チャンバー：内容積約 2 m<sup>3</sup>
- ・酸素濃度：0.1 ppm 以下
- ・CO<sub>2</sub> 濃度：0.5 ppm ～10%

(b) II期設備

I期設備において製作した雰囲気制御チャンバーの増設の検討、全体的な性能向上を目指した検討を進めている。

表Ⅲ-1 EDAS試験計画(1/2)

試験名称	試験内容
①緩衝材-水反応試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在行われている大気下での緩衝材-水反応試験を還元条件下で実施する。</li> <li>・岩石-水反応で得られた地下水を用いて、地下水-ケルV1反応試験を還元条件下で実施する。</li> <li>・ベントナイト(副鉱物を含む)-水反応試験を行う。 脱気水作製→ベントナイトと脱気水の反応→遠心分離 →限外ろ過→液中元素濃度測定</li> </ul>
②オーバーパック材料の腐食試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雰囲気制御下の電気化学試験(定電位/分極特性等)</li> <li>・腐食試験やNA採取サンプルを密閉容器により、EDAS内に持込み、試料調整を行いXRDで分析する。</li> <li>・ベントナイト、溶液、炭素鋼粉末等をセットした容器をEDAS内に所定期間設置し、間隙水の分析、容器内Bh等を測定する。</li> </ul>
③炭素鋼-ガラス共存浸出試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・P0798 ガラス(ブロック、粉末)と鉄等(炭素鋼、マグネタイト)を脱気水に浸漬し、ガラスの浸出に及ぼすFe-Si反応の影響を把握する。</li> </ul>
④溶解度試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地層処分の安全評価上重要な元素について、深地層環境を模擬し(<math>O_2</math>, <math>CO_2</math>濃度コントロール下)、溶解度データを取得する。 使用する元素は、FP元素、ランタニド元素(アクチニド元素のアナログとして)、および酸化還元反応に鋭敏な元素とする。</li> </ul>

表Ⅲ-1 EDAS試験計画(2/2)

試験名称	試験内容
⑤収着試験・拡散試験  ⑤収着試験・拡散試験 (続き)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイトおよび岩石への核種収着試験                コールドで行える核種の収着試験を行う。特にホット施設には、雰囲気制御できる試験設備が無いため、現状では酸化還元反応を評価することができない。                使用する核種は、主要元素中で行えるSe, Nb, Pb, Sn, Sb, Smで、その他TRUのアナログ元素としてランタニド元素を使用する。</li> <li>・自由水中の核種の拡散試験                核種を含んだ溶液の電気伝導度を測定し、拡散係数を求める。                -対象核種：Re, Se, Nb, Sn, Sb, Sm                -試験溶液：全て雰囲気制御下で行う。</li> <li>・ベントナイト中の核種の拡散試験                ステンレス製の拡散カラムに円筒形状のベントナイトを充填し、ベントナイトの中心面に核種を含んだ溶液を垂らして試験を行う。                -試験溶液：全て雰囲気制御下で行う。</li> </ul>
⑥岩石-水反応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下深部での岩石-水反応を模擬した試験を行い、今後の実験に供する地下水を得る。(中部等の地下水作製)</li> <li>・PHREEQEで計算した地下水の妥当性を評価することを目的としてデータを取得する(特に、局所的な還元作用を示すFe, S, Cについての挙動を把握する。)</li> </ul>
⑦その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雰囲気制御下でのコンクリートの浸出試験                -試験温度：50~90℃                -試験溶液：蒸留水系</li> </ul>

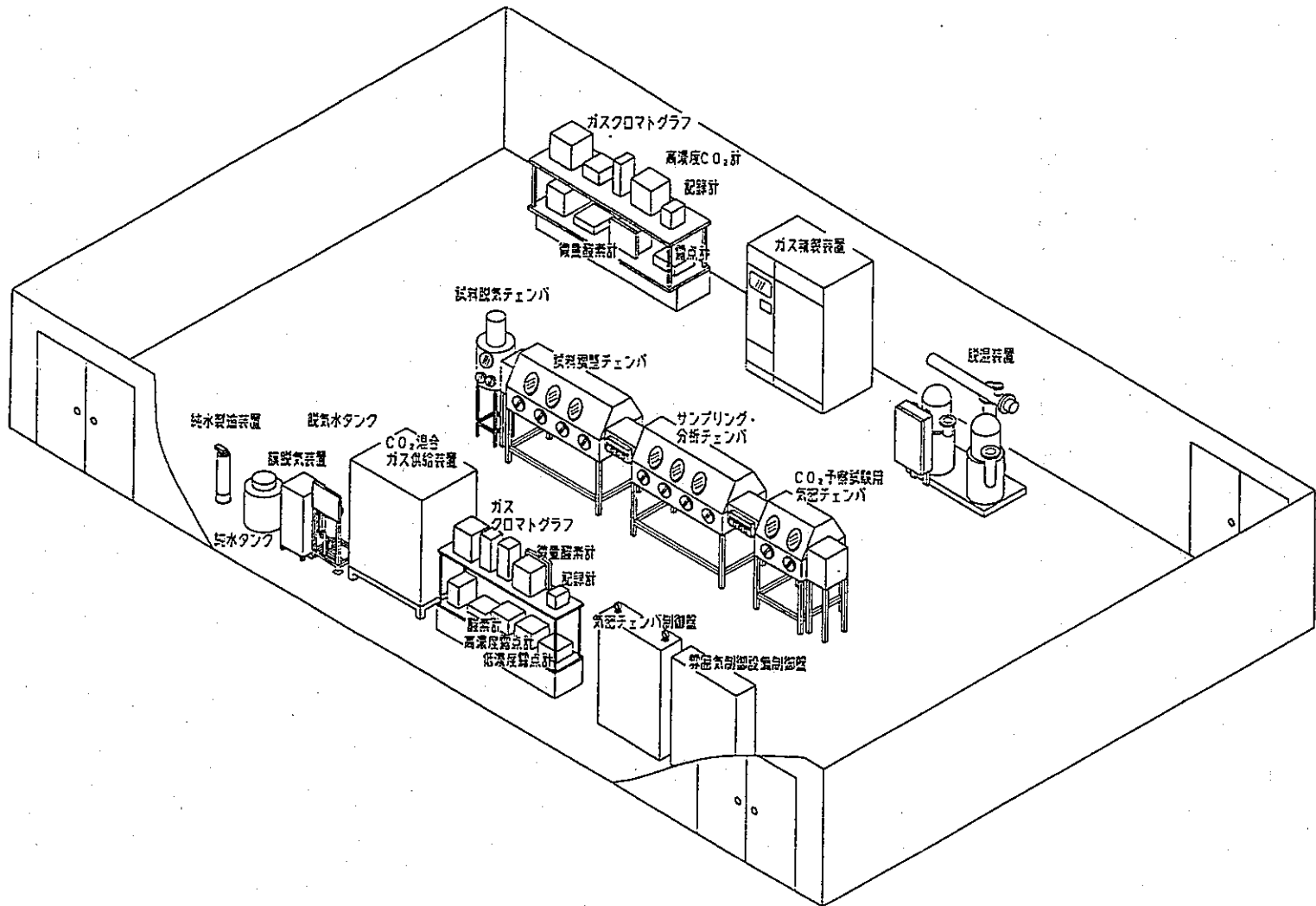


図 III - 1 化学平衡反応試験設備



## 2. ニアフィールド物質移動試験設備 (IMAGE-MASTRA)

### (1) 試験研究の内容

I期設備では、緩衝材および均質な岩体を模擬した異なる空隙率からなる、均質多孔質な2つの領域における、拡散、移流、分散現象の解析モデルの開発・検証を行う。

具体的には、模擬緩衝材部分と模擬岩体部分の透水係数をパラメータとして、過渡状態から定常状態に至る、トレーサーの濃度分布を測定し、解析モデルによる計算結果と比較評価する。

II期設備では、模擬岩体部分を不均質多孔質媒体として、同様の試験および評価を行う。

### (2) 主要制御項目

I期設備では、

- ① 岩体を模擬したフローセル中の流速
- ② 緩衝材中を移行する物質の拡散
- ③ 岩体と緩衝材の接触面積

を制御し、II期設備では、さらに流速分布(岩体の不均質分布)を加える。

### (3) 取得するデータ

I期、II期設備とも以下のデータを取得する。

- ① 岩体を模擬したフローセル中の移行物質の濃度分布、ならびにその経時変化
- ② 緩衝材を模擬した拡散セル中の移行物質の濃度分布並びにその経時変化

また、入力条件(岩体の均質、不均質分布、不均質を考慮した岩体中の流速分布、移行物質の拡散係数、移行物質の初期濃度分布)を用いて得られる2次元の数値計算モデルの解析結果とこれらのデータとを比較・検討し、モデルの検証を進める。

### (4) I期設備とII期設備の関係

#### (a) I期設備

I期設備はII期設備の検証設備および上記のモデル開発のための検証用装置として位置づける。即ち本研究は性格上、試験装置がモデルの入力条件に則した機能を果たしていることが必要条件となる。試験設備の機能特性および固有特性をより単純な系(均質系)を用いて確認し、装置設計上の知識として蓄積する。

不均質系を扱う現象解析モデルの開発については、まず移流分散モデルに関する数値計算コードを開発し、この適用性を試験装置のgeometryに合わせて検討して精度上の適用限

界を明らかにする。この結果を踏まえて、不均質性を扱う現象解析モデルの開発方針を確定する。

(b) II期設備

II期設備は、I期試験の研究を基に装置上の不確実性を低減した上で開発される。この設備を用いた試験を実施することにより不均質な周辺母岩の特性を考慮した物質移動に関する現象解析モデルの確証を行う。

(5) I期設備の仕様とII期設備計画

(a) I期設備の仕様(図III-2)

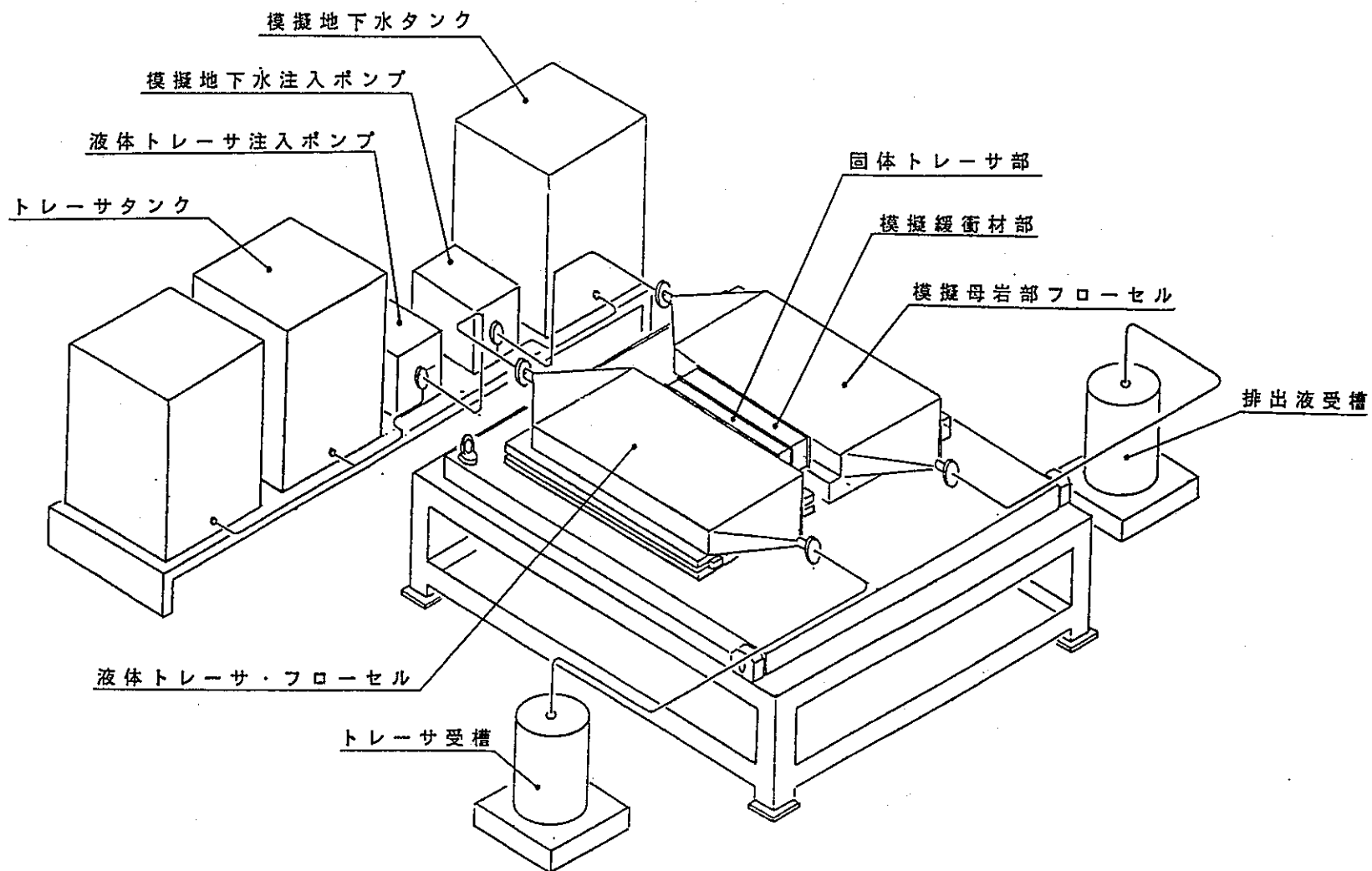
本設備は、岩体を模擬する模擬母岩フローセル、緩衝材を模擬する模擬緩衝材拡散セル、固体トレーサー部、液体トレーサー使用時のためのトレーサーフローセル、模擬地下水供給部および計測装置からなる。

[設備仕様]

- ・ 模擬母岩フローセル : アクリル製  $500\text{mm}^W \times 900\text{mm}^L \times 100\text{mm}^H$   
(角錐部含まず。)
- ・ トレーサーフローセル : アクリル製  $500\text{mm}^W \times 900\text{mm}^L \times 100\text{mm}^H$   
(角錐部含まず。)
- ・ 模擬緩衝材拡散セル : アクリル製  $50\text{mm}^W \times 600\text{mm}^L \times 100\text{mm}^H$
- ・ 模擬媒体 : ガラスビーズ 粒径  $0.4\text{mm}$  (模擬母岩),  
 $10\mu\text{m}$  (模擬緩衝材)
- ・ トレーサー : ナフタリン
- ・ 測定項目・方式 : 光学式濃度測定
- ・ 模擬地下水流速 :  $10^{-6} \sim 10^{-3}\text{cm/s}$

(b) II期設備

不均質系を扱う現象解析モデル(数値モデル)について調査中である。また、試験条件として与える不均質性の範囲、程度についても調査中である。



図Ⅲ-2 ニアフィールド物質移動試験設備

## 3. 地下水水質形成過程試験設備 (IMAGE-GEOCHEM)

## (1) 試験研究の内容

I期設備においては、大気雰囲気下でカラムをシリーズに連結し、H3報告書で類型化した4種類の地下水生成平衡論モデルに基づいて、カラム内に鉱物や岩石を順に充填し起原水を流し、カラム出口より出てくる溶液のpH, Eh, イオン濃度等の溶液組成を連続的に測定する。圧力は、常圧であるが、温度は必要に応じて変化させる。平衡モデルでの解析結果との比較を通して、必要な場合は速度論-物質移行連成モデルの開発を行う。

II期設備においては、雰囲気制御下において温度、雰囲気、圧力(ガス)を変化させ、I期と同様の試験を行う。

## (2) 主要制御項目

I期設備においては、大気雰囲気下で鉱物種及びその組合せ-鉱物粒径-層準-初期水の種類-流速-温度を制御して試験を行う。

II期設備では、さらに雰囲気・圧力(ガス)の制御も行う。

## (3) 取得するデータ

I期設備では、大気下で、II期設備では、雰囲気・圧力(ガス)の制御下で、以下のデータを取得する。

- ① 各カラム出口\* における地下水化学 (pH, Eh, Na, Ca, Mg, K, Si, Fe, S, C等) の経時変化 <pH, Ehのみインライン分析>
- ② 実流速, 温度
- ③ 所定時間経過後の鉱物種の水流通方向変化プロファイル (特に新鮮造岩鉱物を用いた場合の風化挙動)
- ④ 土壌粒子の加工が可能な場合には、土壌帯を上部においた場合のpH, Eh,  $\text{HCO}_3^-$  の変化 (還元環境への変遷の調査) これらは前もって、既存データを用いてEQ3/6により予測解析を試みる。

データ取得のための試験手順は以下の通りである。

- ① 単一鉱物(物質) バッチ試験 (EDAS対応)
- ② 単一鉱物カラム試験, 分類土壌\* カラム試験 (例: アルミナ質土壌, 有機質土壌等)
- ③ 複数鉱物カラム試験, 土壌\* 鉱物カラム試験
- ④ 土壌\* -複数鉱物複合カラム試験 (\*: 土壌粒子の加工性を検討中)

(4) I期設備とII期設備の関係

(a) I期設備

H3報告書で使われている平衡論モデルの妥当性確認試験及び地球化学-物質移行連成モデル開発のための基礎データ取得を行う。

(b) II期設備

I期設備で開発された連成モデルの確証試験、温度、圧力（ガス）依存性試験を行う。また、雰囲気制御機能を具備させる。

(5) I期設備の仕様とII期設備計画

(a) I期設備の仕様（図Ⅲ-3）

I期設備はカラム（10本）とそれらを収納し、90℃まで昇温・制御可能な恒温槽、溶液を採取するボックス、カラムに試験水を送る注水装置から成る。

〔設備仕様〕

- ・試験カラム :  $\phi 30 \text{ mm}^{\text{ID}} \times 1000 \text{ mm}^{\text{H}}$
- ・温度制御範囲 : 室温～90℃
- ・圧力制御範囲 : 0～10 kg/cm<sup>2</sup>G
- ・試験水注入量 : 1～1000 ml/h
- ・測定項目 : pH, Eh, 電気伝導度(インライン測定), イオン濃度, 排出液量

なお、I期設備による試験研究に関しては、EQ3/6による予備解析および、速度論-物質移行連成モデルの簡易モデルの作成を実施中である。

(b) II期設備

I期設備の結果を考慮して判断するが、設備の具体的な検討に必要な深部地下環境との対応（雰囲気、温度、圧力（ガス））について調査中である。

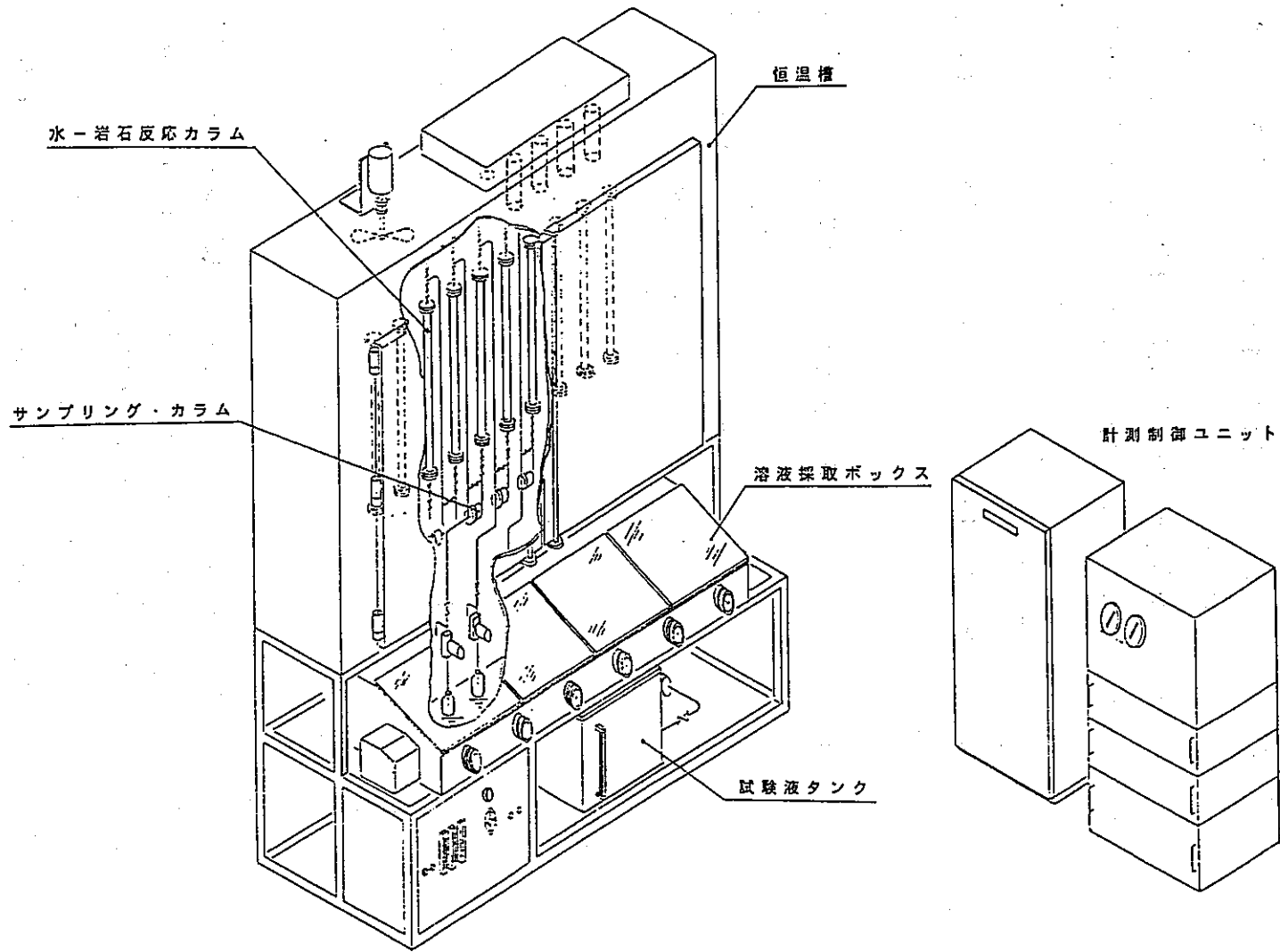


図 III - 3 地下水水質形成過程試験設備

#### 4. 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK/GEOTEX)

##### (1) 試験研究の内容

##### (a) I期設備

単一亀裂を有する試験岩体を用いて、亀裂中の水理・物質移行試験を以下の手順で行う。

##### ① 原位置の垂直荷重条件の再現

- 本試験に使用する試験岩体とは別に、原位置で透水試験を行ったボーリング孔を岩体中央に有する試験体を用い、原位置での透水性を再現するように垂直荷重を調整する

##### ② 岩体側面での開口幅の測定

- 岩体側面での開口幅を測定する。このデータを用いて、岩体内部の開口幅分布を予測する。

##### ③ 透水試験

- 透水圧を変化させながら、透水量の変化および岩体内部での圧力分布を測定する。

##### ④ トレーサー試験

- 亀裂側面より、全面注水モード、区間(5区間)毎注水モードによりトレーサーを注入し、岩体内部(最大25点)および出口(最大5点)におけるトレーサー濃度を測定する。

##### ⑤ 樹脂注入

- 樹脂を注入し、チャンネルを固定する。

##### ⑥ 岩体の分解、開口幅の測定、②のモデルの確証

- 岩体を分解し、開口幅を測定する。測定した開口幅分布を②で予測した開口幅と比較検証する。

##### ⑦ モデルによる最終解析

##### (b) II期設備

複数亀裂を有する試験岩体を用い、原位置トレーサー試験に対応させて、温度、雰囲気等も制御した試験を行い、亀裂中および亀裂交差部の水理・物質移行試験を行う。

##### ① 原位置の垂直・剪断荷重、温度、雰囲気条件の再現

- 本試験に使用する試験岩体とは別に、原位置で透水試験を行ったボーリング孔を岩体中央に有する試験体を用い、原位置での透水性を再現するように垂直・剪断荷重を調整する。

- 原位置での透水試験時の温度条件を再現する
- 原位置でのトレーサー試験時の雰囲気条件を再現する
- ② 岩体側面での開口幅の測定
  - 岩体側面での開口幅を測定する。このデータを用いて、岩体内部の開口幅分布を予測する。
- ③ 透水試験
  - 岩体に複数のボーリング孔を掘削し、クロスホール水理試験を行う。特に、亀裂交差部をまたぐクロスホール水理試験を複数実施し、亀裂および亀裂交差部の水理特性を把握する。
  - 透水圧を変化させながら、透水量の変化および岩体内部での圧力分布を測定する
- ④ トレーサー試験
  - 岩体内部に設けた複数のボーリング孔から注入孔、揚水孔の組合せを複数設定し、トレーサー試験を実施する。
  - 注入孔、揚水孔の組合せについては、各亀裂内での組合せと亀裂交差部をまたぐ組合せの両方について行う。
  - 最初は、非収着性トレーサーを用い、次に弱収着性トレーサー、最後に収着性トレーサーを用いて試験する。
- ⑤ 樹脂注入
  - 樹脂を注入し、チャンネルを固定する。
- ⑥ 岩体の分解、開口幅の測定、②のモデルの確証
  - 岩体を分解し、開口幅を測定する。測定した開口幅分布を②で予測した開口幅と比較検証する。
- ⑦ モデルによる最終解析

(2) 主要制御項目

(a) I期設備

- ① 開口幅
- ② 垂直応力
- ③ 透水圧
- ④ トレーサー濃度、注入時間



(b) II期設備

- ① 開口幅
- ② 垂直応力, 剪断応力
- ③ 透水圧
- ④ トレーサー濃度, 注入時間
- ⑤ 化学的雰囲気
- ⑥ 温度

(3) 取得するデータ

(a) I期設備

- ① 亀裂出口(最大5ヶ所)および岩体内部(最大25ヶ所)におけるトレーサー濃度の  
継時変化  
- 予測解析との比較に用いる
- ② 岩体内部(最大25ヶ所)での圧力分布  
- 水理モデルを構築するため, 圧力データを取得する。
- ③ 亀裂の開口幅分布  
- 単一亀裂内の構造モデルを作成するために取得する。
- ④ 亀裂内充填物質の空間分布  
- 単一亀裂内の構造モデルを作成するために取得する。

(b) II期設備

- ① 亀裂出口および岩体内部におけるトレーサー濃度の継時変化  
- 予測解析との比較に用いる
- ② 岩体内部での圧力分布, 流速分布  
- 水理モデルを構築するため, 圧力データを取得する。
- ③ 亀裂の開口幅分布  
- 単一亀裂内の構造モデルを作成するために取得する。
- ④ 亀裂交差部での開口幅分布  
- 亀裂交差部の構造モデルを作成するために取得する。
- ⑤ 亀裂内充填物質の空間分布  
- 単一亀裂内の亀裂内充填物質の不均質性をモデル化するために取得する。
- ⑥ 収着性トレーサーの分布

(4) I期設備とII期設備の関係

II期設備については、詳細な検討を行っていないが、以下の点でグレードアップをすることが考えられる。

- ① 岩体規模を50cmから1mに拡大する。  
→亀裂のネットワーク構造の試験を行うため。
- ② 地下1000mでの応力条件を再現する。  
→処分場の応力条件をカバーするため。
- ③ 剪断応力を制御する。  
→剪断応力は亀裂の透水性に大きな影響を与えるため。
- ④ 温度を制御する。  
→水の粘性を変化させないため。
- ⑤ 岩体内部での実流速を測定する。  
→ホット試験施設とすることも考えられる。

また、必要に応じて、

- ⑥ 化学的雰囲気  
→収着性トレーサーを用い、化学的作用のモデル化を行うため。

(5) I期試験設備の仕様とII期試験設備計画

(a) I期設備の仕様(図Ⅲ-4)

I期試験設備の仕様は、およそ以下の通りである。

- 試験体規模: 50cm × 50cm × 50cm
- 荷重方式: 油圧式による垂直荷重制御  
最大荷重375 トン(150kg/cm<sup>2</sup>)
- 注入方式: ステッピングモーターによる圧力フィードバック方式  
放射流については、エアレギュレーター方式  
最大透水圧は10kg/cm<sup>2</sup>
- 注入ポイント: 最大5ヶ所
- 排水ポイント: 最大5ヶ所
- モニタリング項目: 垂直荷重

水圧(入口側, 出口側, 岩体内部[最大25ヶ所])

流量(入口側最大5ヶ所, 出口側最大5ヶ所)

温度(岩体内部3ヶ所, 室温1ヶ所)

トレーサー濃度(入口側1ヶ所, 出口側最大5ヶ所, 岩体内部最大25ヶ所)

(b) II期試験設備計画

II期設備については、亀裂のネットワーク構造の試験を行うこと、剪断応力を制御すること、化学的雰囲気を制御することが主な残された課題である。

また、I期設備の最大の課題は、岩体内部における実流速の把握ができないことであったが、II期設備についてはホット試験施設とすること等により、この課題を解決することが望まれる。

従って、II期試験設備については以下のような概略仕様が考えられる。

- 試験体規模:100cm×100cm ×100cm
- 荷重方式: 油圧式による垂直・剪断荷重制御  
最大荷重2600トン(260kg/ cm<sup>2</sup>)
- 注入方式: ステッピングモーターによる圧力フィードバック方式またはエアレギュレーター方式
- グローブボックスによる化学的雰囲気制御
- モニタリング項目: 垂直荷重, 水圧, 流量, 温度, トレーサー濃度, pH, Eh

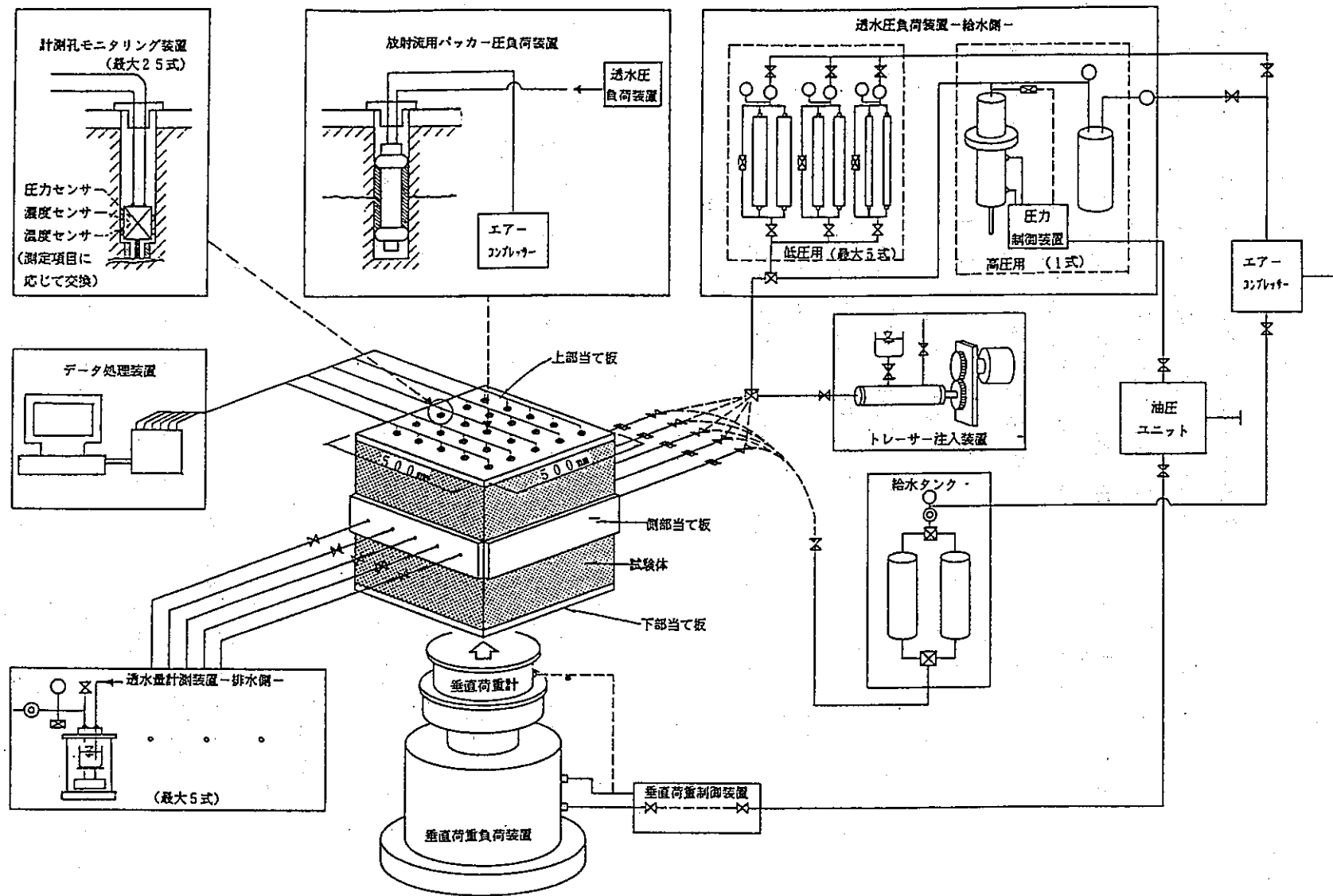


図 III - 4 亀裂状媒体水理試験設備

## 5. 多孔質媒体水理試験設備 (MACRO 2 D)

### (1) 試験研究の内容

#### (a) I 期試験

I 期試験では、2次元不均質媒体中の物質移動現象について試験を行う。多孔質媒体槽は200cm × 100cm × 10cmの寸法を有する。上流、下流双方の境界については全水頭固定で、水頭差が最大50cmまでかけられる。側方境界は不透水境界となっている。トレーサは多孔質媒体槽上流側境界から数cm内側、高さ方向に対して中心位置にポイントソースの形で注入する。トレーサ注入はパルス型、ステップ型双方行える。測定は圧力と濃度について行い、圧力は25ヶ所、濃度は100ヶ所の位置で測定できるようにしてある。測定された圧力及び濃度はデータロガーに集積され、A/D変換された後、計測専用マシンTEXBLA/LTES上に記録される。測定機器のキャリブレーションは試験開始前にTEXBLA/LTES上で実施される。また、不均質作成に関しては、フラクタルにもとづく不均質発生プログラムを使用し、多孔質媒体槽内に各透水係数に対応したビーズを割り当てる。

最小ビーズブロックサイズは5cm × 5cmとする。各粒径のビーズの特性値(透水係数、分散率)測定はカラム型分散試験装置を使用して事前に実施する。

以上で測定されたデータに基づき粒子追跡法をベースとした解析コードを使用して解析を行い、試験の検討、REVの評価等を行う。

#### (b) II 期試験

II 期試験はI 期試験の2次元試験を3次元試験に拡張して試験を実施する。

装置の大きさは未定である。境界条件、周辺機器についてはI 期試験と同じである。不均質発生プログラムについては3次元バージョンが必要となる。水理・トレーサ移行解析コードも同様である。ハードウェア上の問題点として、圧力、濃度測定センサの設置深さ、測定方法、場を乱さない状態を保つ範囲内での最大本数等が挙げられる。

### (2) 主要制御項目

#### (a) I 期試験

- ① 多孔質媒体槽内流速及び流向
- ② 多孔質媒体槽内の飽和状態(気泡等が生じないようにする)
- ③ トレーサ濃度(密度勾配を生じない溶液)
- ④ トレーサの注入条件(パルス状、ステップ状)
- ⑤ 温度(多孔質媒体槽内一定)
- ⑥ 不均質性要素の作成

(b) II期試験

- ① 多孔質媒体槽内流速及び流向
- ② 多孔質媒体槽の飽和状態（気泡等が生じないようにする）
- ③ トレーサ濃度（密度勾配を生じない溶液）
- ④ トレーサの注入条件（パルス状、ステップ状）
- ⑤ 温度（多孔質媒体槽内一定）
- ⑥ 不均質性要素の作成
- ⑦ 測定用センサの多孔質媒体槽内の位置及び数

(3) 取得するデータ

(a) I期試験

- ① 多孔質媒体槽各位置におけるトレーサ濃度（2次元平面内）
  - ・各時間ステップにおける浸透層内の濃度分布をグラフィック表示させる。
  - ・開発したコードの検証に用いる。
  - ・多孔質媒体槽各位置における分散係数を決定する。
- ② 多孔質媒体槽各位置におけるポテンシャル（2次元平面内）
  - ・多孔質媒体槽各位置の流速を計算する。
- ③ 多孔質媒体槽出口における流出濃度
  - ・多孔質媒体槽全体の分散係数を計算する。

(b) II期試験

- ① 多孔質媒体槽各位置におけるトレーサ濃度（3次元空間内）
  - ・各時間ステップにおける浸透層内の濃度分布をグラフィック表示させる。
  - ・開発したコードの検証に用いる。
  - ・多孔質媒体槽各位置における分散係数を決定する。
- ② 多孔質媒体槽各位置におけるポテンシャル（3次元空間内）
  - ・多孔質媒体槽各位置の流速を計算する。
- ③ 多孔質媒体槽出口における流出濃度
  - ・多孔質媒体槽全体の分散係数を計算する。

(4) I期設備とII期設備の関係

II期設備では、トレーサの3次元的な物質移動現象を把握できるようにする。

(5) I期設備の仕様とII期試験設備計画

(a) I期設備の仕様(図III-5)

I期試験設備は、地層を模擬する多孔質媒体槽、模擬地下水供給部、トレーサ注入系、および計測系等と使用するガラスビーズの透水係数を測定する透水係数測定装置から成る。

[設備仕様]

- 多孔質媒体槽：アクリル製 約 $2,000\text{mm}^{\text{W}} \times 1,000\text{mm}^{\text{H}} \times 100\text{mm}^{\text{D}}$
- 模擬媒体：ガラスビーズ 粒径=0.1, 0.15, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 (単位：mm)
- トレーサ：NaCl
- 測定項目：トレーサ濃度(100点)，圧力(25点)，流量

(b) II期試験設備計画

I期設備における問題点の解決可能性が示された後に設計されるべきものである。分散現象は、現状ではモデリングの限界が指摘されており、それを解決するには十分な時間が必要となると考えられる。この問題が解決されればII期設備はI期設備の応用ケース(3次元版)として、I期設備で開発されたモデルあるいは統計的解析手法の3次元領域での妥当性確認の場になるものと考えられる。

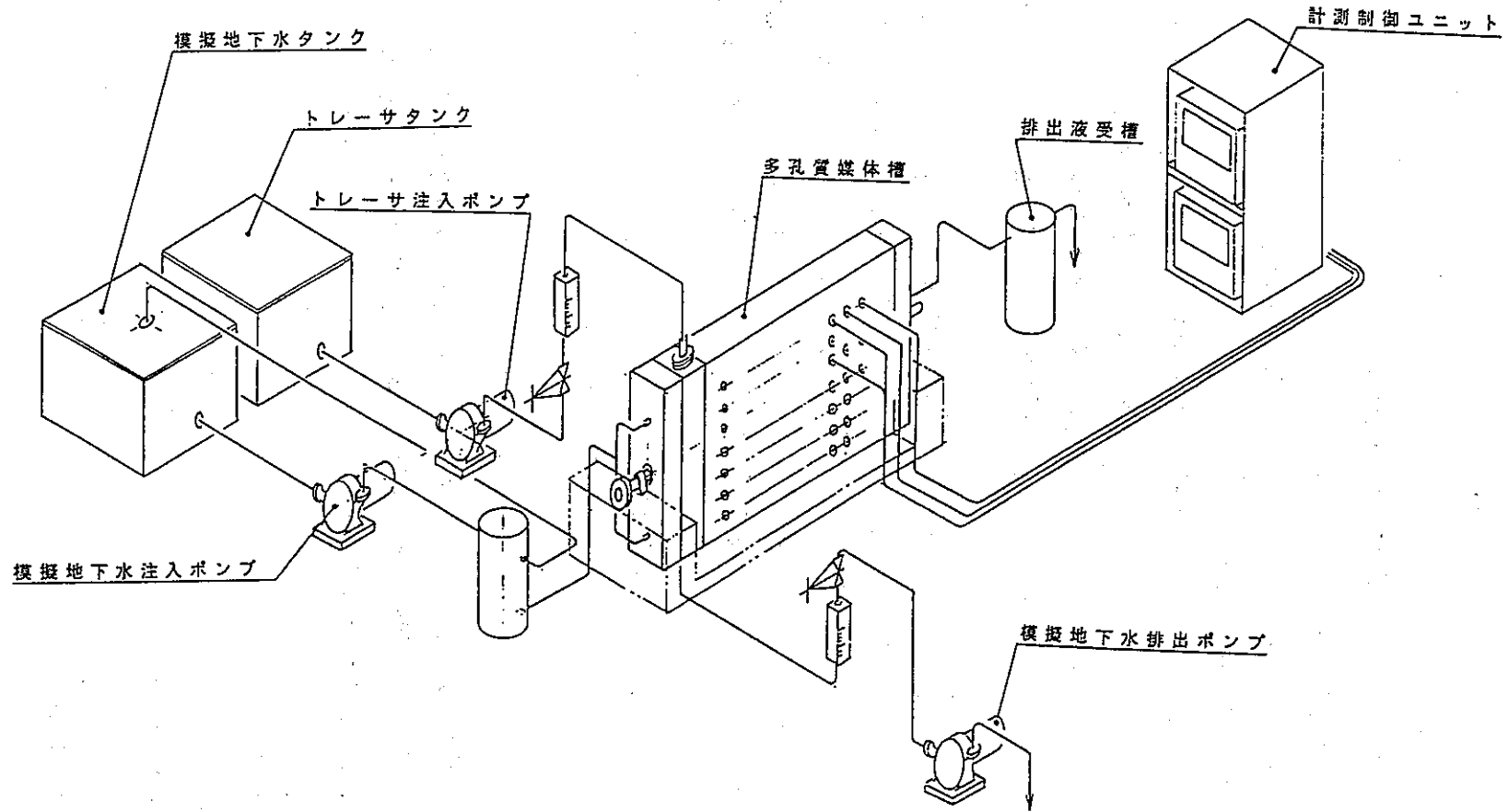


図 III - 5 多孔質媒体水理試験設備



## 6. 緩衝材流出挙動試験設備 (BENTFLOW)

### (1) 試験研究の内容

#### (a) I期試験

緩衝材の流出という現象を経時的に見ると、

- ① 緩衝材の膨潤による亀裂への侵入
  - ② 亀裂へ侵入した緩衝材先端部の地下水による侵食
- の2つに大きく分類できる。

①については、膨潤した緩衝材の亀裂への侵入プロセスの解明に力点を置くという観点から、静水下における緩衝材の流出挙動メカニズムを把握する。

一方、②においては、膨潤により亀裂へ侵入した緩衝材先端部のベントナイトゲルの侵食プロセスの解明に力点を置くという観点から、流水下における緩衝材の流失挙動メカニズムを把握する。

また、このような流出現象には、①緩衝材物性、②環境因子、③亀裂の幾何学的形状、④化学因子、⑤緩衝材ゲル特性などの多くの因子が複雑に作用するものと考えられることから、すべてを一度に考慮することは効率的ではない。そこで、段階的かつ着実な試験の実施という観点から、多くの作用因子の中から、基本的な因子として、亀裂幅（単一な平滑スロットにより模擬）と地下水の流速をパラメータとした試験を実施する。（第一段階試験）

さらに、これらの成果を踏まえながら、第二、第三段階と徐々に作用因子（亀裂の幾何学的形状を除く）を追加しながら試験を進める。

#### (b) II期試験

II期試験においては、I期試験で開発されるモデルを改良・確証するために、亀裂の幾何学的形状（粗度係数、形状）や処分環境条件を模擬するという観点から、温度、圧力等の条件を付加した試験を実施する。

### (2) 主要制御項目

#### (a) I期試験

- ① 緩衝材密度
- ② 地下水流速
- ③ 亀裂開口幅

(b) II期試験

- ① 緩衝材密度
- ② 地下水流速
- ③ 亀裂開口幅
- ④ 亀裂形状, 粗さ

(3) 取得するデータ

(a) I期試験

- ・ 緩衝材の亀裂への侵入距離および速度
- ・ 亀裂侵入部の水分分布
- ・ 膨潤圧
- ・ 剝離・流失量

(b) II期試験

- ・ 緩衝材の亀裂への侵入距離および速度
- ・ 亀裂侵入部の水分分布
- ・ 膨潤圧
- ・ 剝離・流失量
- ・ 亀裂形状
- ・ 粗度係数

(4) I期設備とII期設備の関係

I期設備では、緩衝材の膨潤による亀裂への侵入およびベントナイトゲルの剝離に力点を置き、既存モデルの確証・改良を行う。その他の現象に関しては、II期設備でのモデルの開発・確証に備え、試験設備への要求機能の確認を行う。

II期設備に関しては、亀裂の幾何学的形状、温度、圧力を考慮し評価を行う。

(5) I期設備の仕様とII期試験設備計画

(a) I期設備の仕様(図Ⅲ-6)

I期設備は、流水用試験容器、静水用試験容器、給水装置および計測系から成る。

[設備仕様]

• 流水用試験容器

—材 質：透明アクリル

—概略寸法：200 mm  $\phi$   $\times$  200mm<sup>H</sup>

—最小亀裂幅：約0.1mm

—供試体寸法：10 mm  $\phi$   $\times$  10 mm<sup>H</sup>

• 静水用試験容器

—材 質：透明アクリル

—概略寸法：500 mm  $\phi$   $\times$  200mm<sup>H</sup>

—最小亀裂幅：約0.1mm

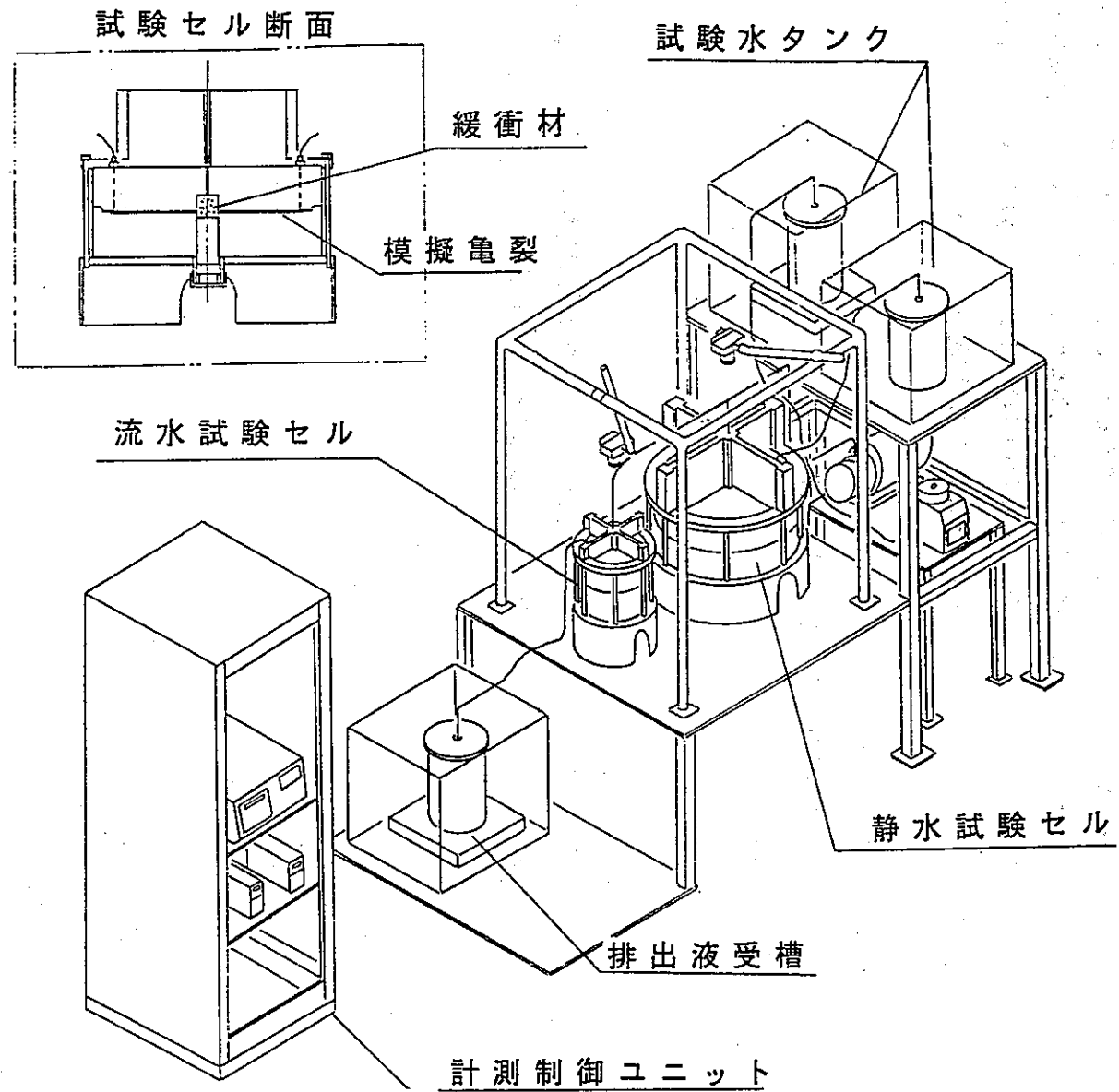
—供試体寸法：50 mm  $\phi$   $\times$  50 mm<sup>H</sup>

• 測定項目：膨潤応力，流出距離，流出量等

• 観測項目：流出状況

(b) II期試験設備計画

II期試験設備については，亀裂の幾何学的形状の模擬の方法等に関する検討が必要である。



図Ⅲ-6 緩衝材流出挙動試験設備

## 7. 水素ガス移行挙動試験設備 (HYDROGEN)

### (1) 試験研究の内容

#### (a) I期試験

オーバーパックの腐食反応の進行に伴って発生する水素ガスは、緩衝材の通気が悪い場合、オーバーパック表面近傍に蓄積し時間の経過に伴って蓄積ガスの圧力が上昇する。その圧力が緩衝材の膨潤応力の20～90%に達すると、緩衝材の中を通過して外側に移動する。このように透気現象は、緩衝材の膨潤応力と透気発生時のガス圧（以下、臨界圧力という）に密接に関係する。また、徐々に緩衝材中を移行するという観点から、緩衝材の厚さの影響も考えられる。したがって、本試験では、膨潤圧および緩衝材厚さと臨界圧力との関係に主眼を置き、

- ① 臨界圧力の確認
  - ② 透気発生後のガスの定常流の透気係数の把握
  - ③ ガスの透気経路の観察
- 等を実施する。

#### (b) II期試験

II期試験においては、I期試験の成果を踏まえ、処分形態と同じ幾何学的形状で試験を行い、形状による透気現象への影響（局所的蓄積の有無、局部的透気等）を把握する。

### (2) 主要制御項目

#### (a) I期試験

- ① 緩衝材の密度
- ② 緩衝材の厚さ
- ③ ガス圧

#### (b) II期試験

- ① 緩衝材の密度
- ② 緩衝材の厚さ
- ③ ガス圧
- ④ 間隙水圧
- ⑤ 温度

(3) 取得するデータ

(a) I期試験

- ・緩衝材温度
- ・膨潤応力
- ・ガス圧
- ・ガス流量
- ・室温
- ・透気経路（観察）

(b) II期試験

I期試験データに加え、幾何学的形状による影響の直接観察（局部蓄積，局部透気），またオンラインの透気経路の観察を行う。

(4) I期設備とII期設備の関係

I期設備では、膨潤圧，緩衝材厚さおよび臨界圧力との関係に主眼を置く。

II期設備では、処分形態と幾何学的に同じ形状で試験を行い、形状による透気現象への影響（局所的蓄積の有無，局部的透気等）を把握する。そのため非接触の内部観察装置の付加，試験系の形状変更等のグレードアップを行う。

(5) I期設備の仕様とII期試験設備計画

(a) I期設備の仕様（図Ⅲ-7）

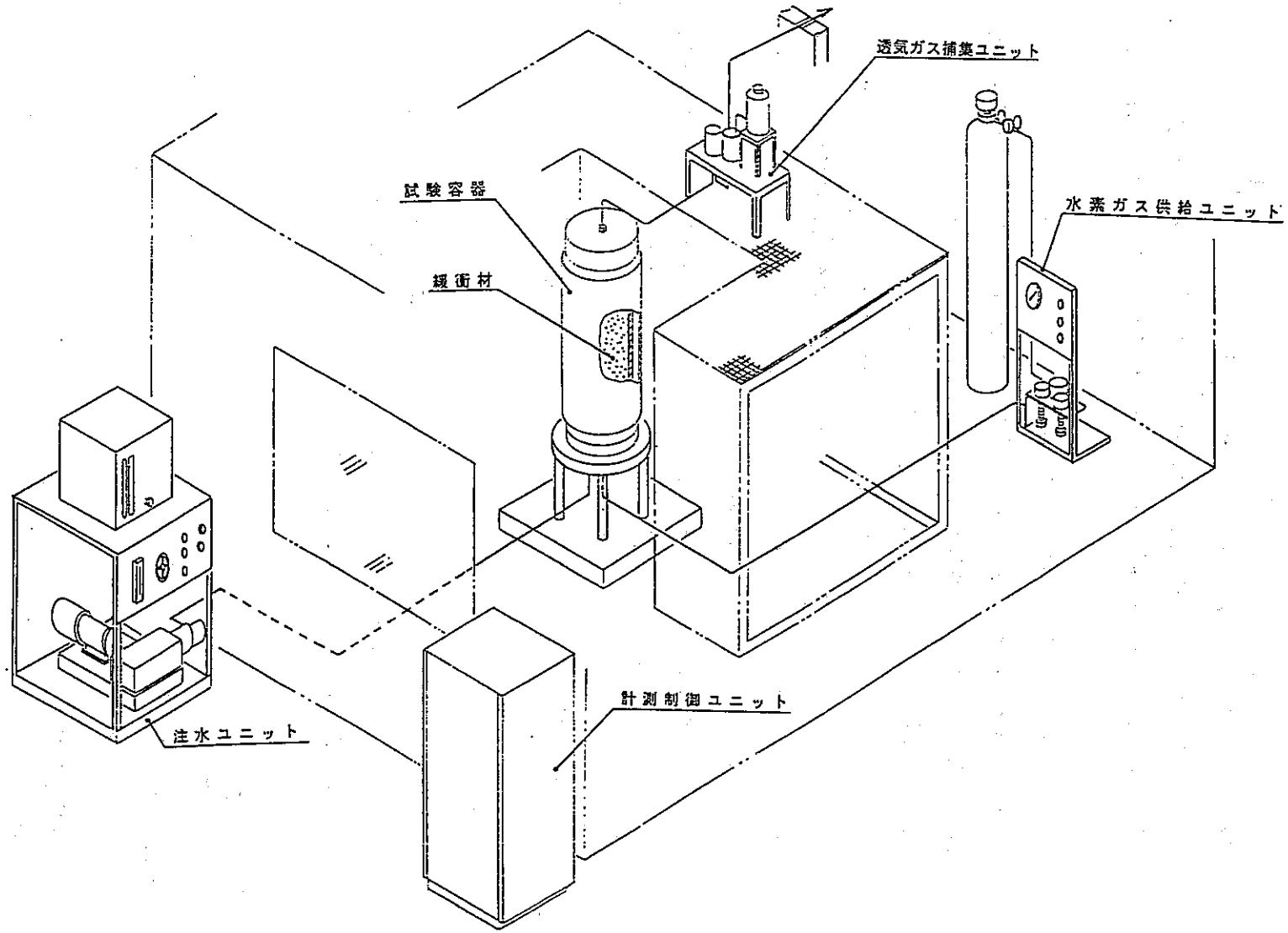
I期設備は、緩衝材を設置，保持する試験容器，緩衝材への注水装置，試験体へのガス供給装置，付帯安全装置，および計測系等から成る。

〔設備仕様〕

- ・試験容器；
  - －構造：縦型円筒容器（両端フランジ構造）
  - －設計圧力：100kg/cm<sup>2</sup>
  - －設計温度：90℃
  - －概略寸法：φ500mm × 1,400mm<sup>H</sup>
  - －供試体寸法：φ300mm × 300mm<sup>H</sup>，φ300mm × 1,000mm<sup>H</sup>
- ・水素ガス供給圧力：最高 95kg/cm<sup>2</sup>
- ・最高加熱温度：90℃
- ・測定項目：膨潤応力，臨界ガス圧，ガス通気量，緩衝材温度等

(b) II期試験設備計画

II期試験設備に関しては、非接触内部観測装置および詳細な付帯設備に関する検討が必要である。



図Ⅲ-7 水素ガス移行挙動試験設備



## 8. 熱-水-応力連成試験設備 (COUPLE)

### (1) 試験研究の内容

#### (a) I期設備

##### —健全な熱-水-応力連成試験, 装置の機能確認

健全な状態の試験岩体に荷重, 熱を加え, 岩体の応力, 温度, 透水性, AE, 弾性波の変化を測定する。試験条件として, 温度は25°C, 50°C, 荷重は2MPa, 10MPa を考える。

##### —処分孔掘削による緩み域の発生, 透水性の変化

次に, 健全な岩体にφ250 mmの模擬処分孔を掘削し, 処分孔周辺の緩み域の発生, 透水性の変化を測定し, 現象を評価する。

##### —緩衝材の膨潤, ヒータ加熱による連成現象評価

処分孔掘削による影響を評価したのち, 模擬緩衝材, ヒータを処分孔に埋設し, 緩衝材の膨潤およびヒータ加熱による連成現象を評価する。連成現象評価のために, 岩盤変位, 応力変化, AE, 弾性波速度等を測定する。

##### —地圧を変化させての緩み域の評価

さらに, 地圧を最大15MPa まで変化させて緩み域の評価を行う。その連成現象を評価するために岩盤変位, 応力変化, AE, 弾性波速度等を測定する。

##### —樹脂注入法による緩み域の詳細構造の直接観察。

—その後, 各種岩体や亀裂を有する岩体について同様の試験を行う。

#### (b) II期設備

本試験に関しては, 特に新たなII期設備を製作する予定はないが, 今後展開される原位置試験に応じて, 必要であればI期設備の一部グレードアップ (センサーの改良, 追加等) を行い, I期設備での試験と同様の試験を行う。

### (2) 主要制御項目

#### (a) I期設備

- ・試験岩体周辺の温度
- ・応力場 (水平方向, 異方性含む)
- ・処分孔内発熱量

#### (b) II期設備

I期設備と同様

(3) 取得するデータ

(a) I期設備

- ・地圧, 膨潤応力, 熱応力による処分孔周辺での緩み域の塑性ひずみ, 応力の変化
- ・緩み域の発生による岩体の透水性の変化, 亀裂を有する岩体の透水性の変化
- ・廃棄体の崩壊熱による温度分布の変化
- ・緩み域の微細構造の直接観察

(b) II期設備

I期設備と同様

(4) I期設備とII期設備の関係

前述の通り, 本試験では, II期設備として新たな設備製作の計画はないが, 今後行われる原位置試験に応じ, 試験装置の一部グレードアップ(センサーの改良, 追加等)で対応する。

(5) I期設備の仕様とII期設備計画

(a) I期設備の仕様(図III-8)

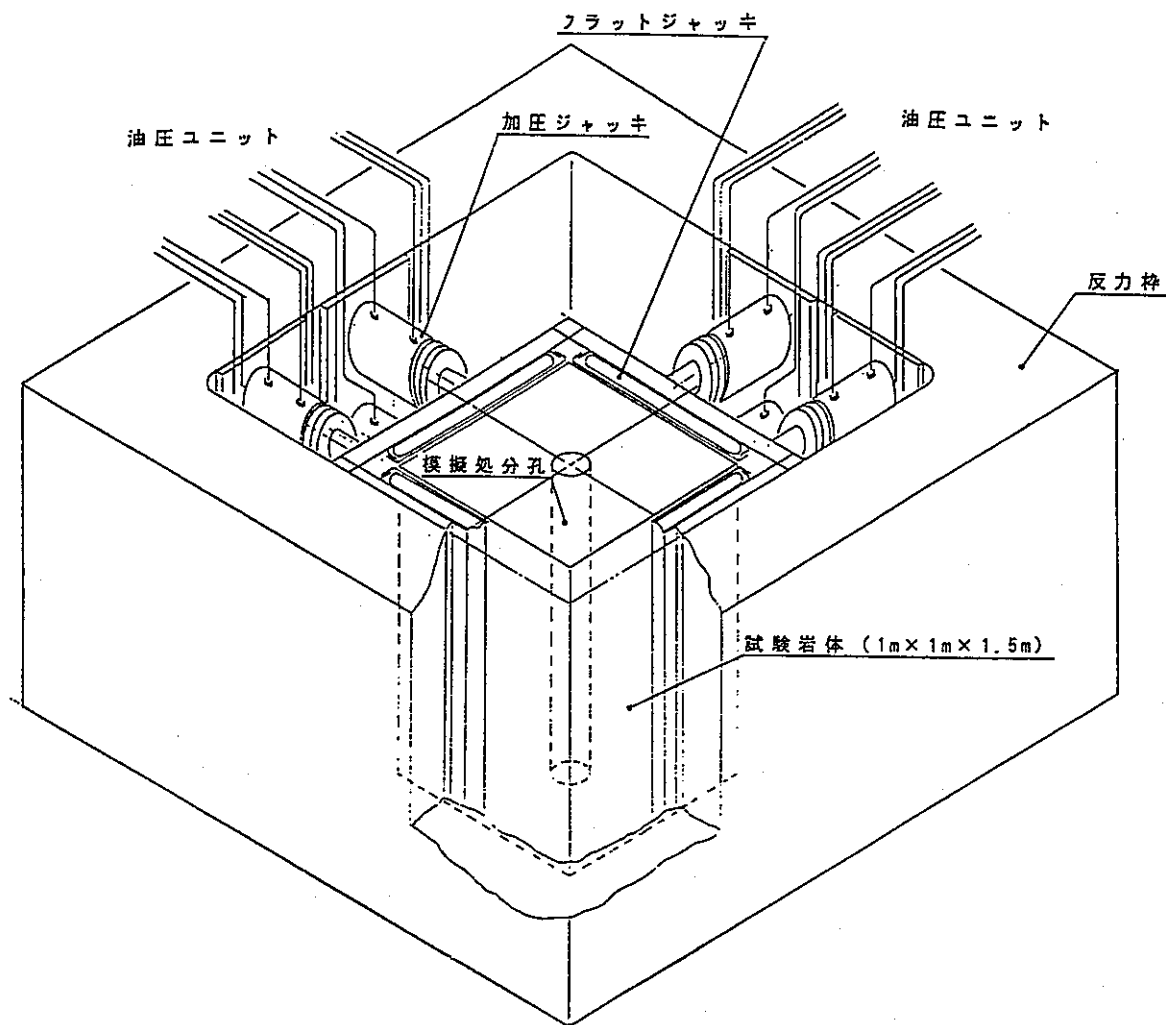
本設備は, 試験岩体に圧力を加える载荷装置, 反力枠, 試験岩体の周辺温度を一定に保つ恒温水槽, 恒温水循環装置および装計測装置等からなる。

[設備仕様]

- ・载荷装置 : 油圧ジャッキ方式(12基)
- ・载荷能力 : 最大15 MPa
- ・最大変位 : 100 mm
- ・温度制御範囲 : 室温~50℃
- ・試験岩体寸法 : 約1m×1m×1.5m<sup>H</sup>
- ・測定項目 : 応力, 変位, 間隙水圧, 温度, 弾性波等

(b) II期設備計画

現時点では, 具体的計画はない。



図Ⅲ-8 熱-水-応力連成試験設備

## 9. 緩衝材力学試験設備 (T R I A X)

### (1) 試験研究の内容

#### (a) I 期試験

人工バリアの各バリア機能を維持する本質的な構造、特性が、地震や地殻変動といった事象や周辺岩盤の不均質変形等によってどの程度変化をこうむるのかを定量的に評価するためには、まず人工バリアの構造、特性を詳細に把握する必要がある。

特に緩衝材については、今までの特性データに加え、地下深部の環境を考慮した様々な条件下でのデータの取得が必要となる。

したがって、I 期試験では処分環境条件を考慮した人工バリアの特性データの取得という観点から、緩衝材に力点を置いた高拘束圧下における三軸圧縮試験を実施し、緩衝材の力学的特性データを充実させ、緩衝材の力学モデルを開発する。

#### (b) II 期試験

II 期試験については、I 期試験のデータおよび評価シナリオの整備等が整った時点で検討する。

### (2) 主要制御項目

#### (a) I 期試験

処分環境条件下における緩衝材の力学特性データの取得という観点から、以下の項目を制御した試験を実施する。

- ① 垂直荷重
- ② 側 圧
- ③ 温 度
- ④ 間隙水圧

#### (b) II 期試験

I 期試験で得られたデータを用いた人工バリア構造解析の結果等を基に、必要に応じて人工バリア構造力学試験を検討する。

### (3) 取得するデータ

#### (a) I 期試験 (緩衝材力学試験)

処分環境条件下における緩衝材の粘着力と内部摩擦角および圧縮強度、膨潤圧、間隙水圧、透水係数等に関するデータを取得する。

(b) II期試験

必要に応じて今後検討する。

(4) I期設備とII期設備の関係

I期設備は、人工バリアシステムの構造力学的挙動を把握するための予察試験として、人工バリアを構成する緩衝材の特性の詳細検討を行うものである。

II期設備は、本成果およびシナリオの整備等を踏まえ、人工バリアシステムの構造力学的挙動が地震、地殻変動、周辺岩盤の不均一変形等によってどの程度の変化をこうむるのかを定量的に評価する。

(5) I期設備の仕様とII期試験設備計画

(a) I期設備の仕様(図III-9)

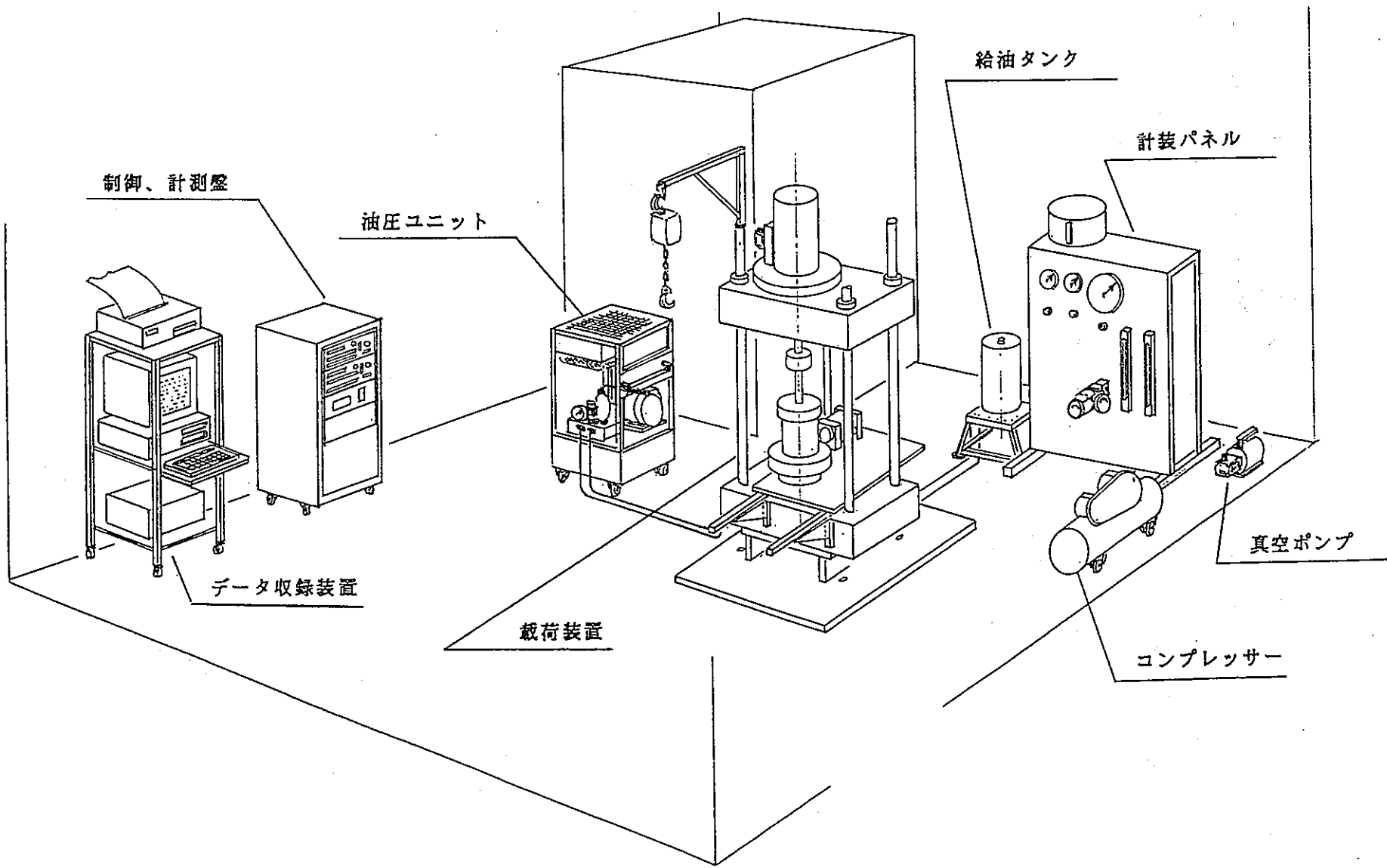
I期設備は、供試体を設置し、載荷するための載荷装置、その駆動源となる油圧ユニット、および計測系から成る。

[設備仕様]

- ・ 載荷装置 ;
  - 型式 ; 軸力付加装置 (油圧サーボ式アクチュエータ)
  - 側圧付加装置 (油圧サーボ式プースター)
  - 最大垂直荷重 : 50t
  - 最大側圧 : 500kg/cm<sup>2</sup>
  - 軸変位量 : ±25mm
  - 側圧変位量 : ±50mm
- ・ 供試体加熱温度 : ~ 150℃
- ・ 供試体寸法 : 50mmφ × 100 mm<sup>H</sup>
- ・ 測定項目 : 垂直荷重, 側圧, 軸方向変位, 間隙水圧等

(b) II期試験設備計画

II期設備に関しては、試験を実施するための対象とする現象に対するシナリオ等の条件自体の整備等が行われていない状況であり、今後そういった試験実施に踏み切るための条件設定に関する試験研究を実施する必要があると考える。



図Ⅲ - 9 緩衝材力学試験設備

#### IV. 施設概要

性能評価研究施設は、研究資源を集約するための研究棟及び比較的大型の試験設備を収納する試験棟により構成され、その機能及び立地条件から、以下の事項を基本方針として設計した。

- (1) 長期研究開発の拠点として機能の充実した快適な研究空間とすること。
- (2) 地層処分研究開発全体の成果情報を集約して、性能評価シミュレーション・システムを構築していくための機能を備えていること。
- (3) 将来のレイアウト変更に対応しうるフレキシビリティを備えていること。
- (4) 研究施設としての安全性、信頼性を備えていること。
- (5) 建設工費及び維持管理費の低減を図ること。
- (6) 海岸に近接していることから、塩害対策、砂塵対策を行うこと。

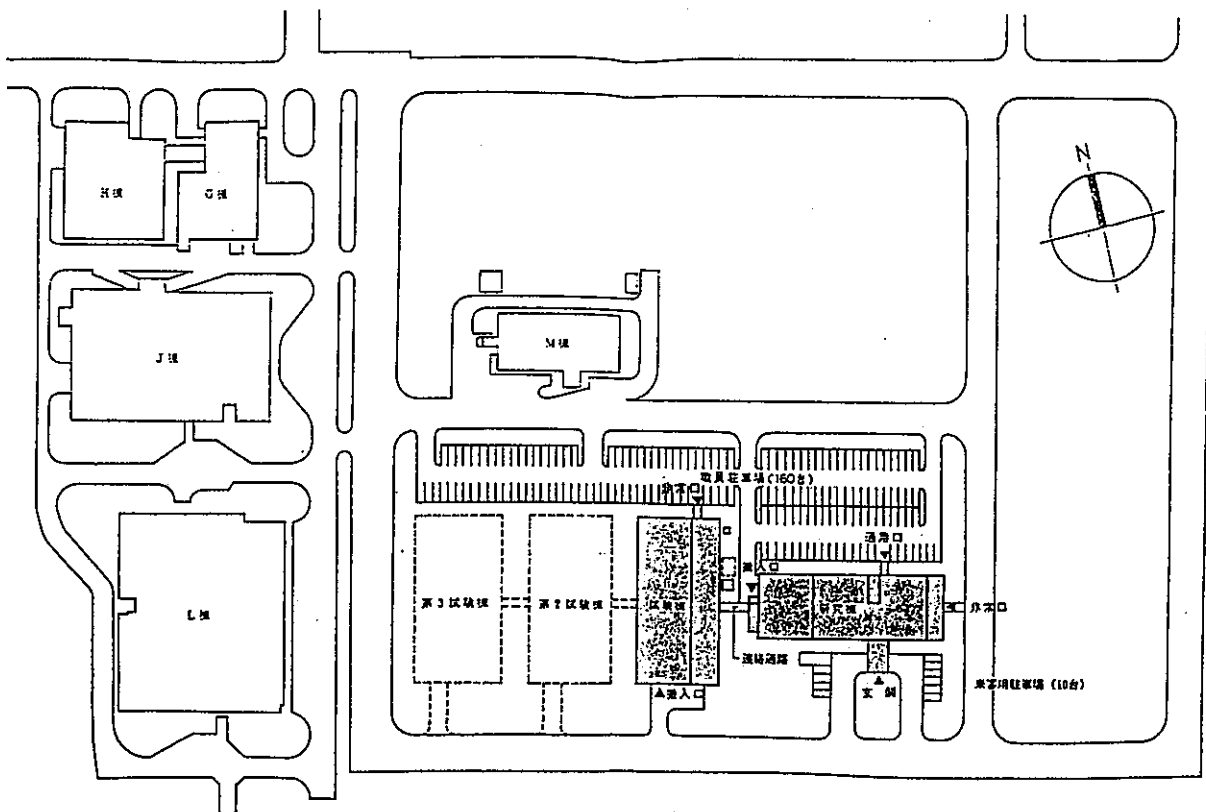
## 1. 建屋仕様

項目	研 究 棟	試 験 棟
階 数	地上4階, 塔屋1階	地上1階
構 造	鉄筋コンクリート造	鉄 骨 造
建 築 面 積	1, 3 5 0 . 8 8 4 m <sup>2</sup>	1, 4 9 2 . 6 8 1 m <sup>2</sup> (付属建屋) 2 7 . 6 8 6 m <sup>2</sup>
延 べ 面 積	4, 5 4 8 . 5 2 4 m <sup>2</sup>	1, 4 9 2 . 6 8 1 m <sup>2</sup> (付属建屋) 2 7 . 6 8 6 m <sup>2</sup>
軒 高	2 0 . 7 m	7 . 8 m
最 高 部 高	2 1 . 3 m	8 . 6 5 m
基 準 階 高	4 . 2 m	—
基 準 階 天 井 高	2 . 6 m	—
外 部 仕 上 屋 根 外 壁	アスファルト防水コンクリート 押え コンクリート打放し 弾性吹付タイル (AR)	アスファルト露出防水  石綿セメント押出成形板 弾性吹付タイル (AR)



## 2. 敷地配置概要

- (1) 研究棟，試験棟は，機能的に異なるので2棟に分け，屋内連絡通路を設けた。
- (2) 研究棟は，南面とし，太平洋の眺望を得るため，敷地東側に配置した。
- (3) 敷地西側に将来の第2，第3試験棟用地を確保した。また，研究棟北側に将来第2研究棟を設けられるよう配慮した。
- (4) 研究棟南側に玄関を設け，車寄せ，来客用駐車場を設けた。  
また，職員用駐車場は，研究棟北側に設けた。



図IV-1 性能評価研究施設敷地配置図

### 3. 建屋配置概要

#### (1) 研究棟

- ① 1階南側に2階まで吹き抜けた玄関ホールを配置し、隣接して展示室を設けた。
- ② 1～3階を研究エリア、眺望の良い4階を会議エリアとし、階により機能を分けた。
- ③ 給排水、窒素ガスなどが供給される実験室を、ユーティリティー供給を行う試験棟に近い1、2階北側に集約して配置し、設備の効率化を図った。
- ④ 上記③の実験エリア及び便所、湯沸室の1階床下に給排水配管の保守更新用の配管ピットを設けた。
- ⑤ 振動を嫌う電子顕微鏡関連分析機器の諸室を1階の南西に配置し、塵埃を嫌う計算機関連の諸室を3階の北西に配置した。
- ⑥ 研究員室は、2、3階の南側に配置した。
- ⑦ 最上階にシミュレーションホール兼大会議場等を設けた。

#### (2) 試験棟

- ① 天井クレーンを必要とし、また空調までは必要としない大型試験エリアと空調を必要とする試験エリア、データ処理室及び電気室、排水処理室、便所などの付帯諸室に大きく二分した。
- ② 窒素ガス等を供給するガス供給設備は、試験棟屋外に設けた。  
図IV-2に性能評価研究施設鳥瞰図を示す。

### 4. 動線

#### (1) 建物へのアプローチ

- ① 来客は、研究棟南側の玄関より、また職員は研究棟北側の通用口より建物へ出入りする。
- ② 機器等の搬出入は、研究棟西側の搬入口、試験棟南側の搬入口より行う。

#### (2) 建物内動線

- ① 研究棟には、エレベータを1台設け、4階会議エリアへの利便を図った。
- ② 研究棟は、全長60mと長いので、屋内階段を2ヵ所設け利便を図った。
- ③ 研究棟、試験棟間に屋内の連絡通路を設けた。
- ④ 研究棟、試験棟ともに将来の拡張方向に通路、出入り口を設けた。

## 5. 電気設備概要

### (1) 受変電設備

- ① 受電方式 ; 既存特高変電所より 3 相 3 線 6.6kV 1 回線 (試験棟で受電)
- ② 設備容量 ; 試験棟 1150kVA  
研究棟 800kVA
- ③ 型式 ; 閉鎖配電盤
- ④ 変圧器 ; 乾式モールド形
- ⑤ 遮断器 ; 真空遮断器

### (2) 蓄電池設備

- ① 型式 ; キュービクル形
- ② 蓄電池 ; 鉛蓄電池

### (3) 配電方式

- ① 構内配線 ; 3  $\phi$  3 W 6.6kV
- ② 建屋内配線 ; 3  $\phi$  3 W 210V  
1  $\phi$  3 W 210V-105V  
DC 100V

### (4) 照明設備

- ① 研究棟 ; 研究エリア ; 500LX (蛍光灯)  
電算機, 大会議室 ; 700LX (蛍光灯)
- ② 試験棟 ; 高天井部 ; 500LX (メタルハライドランプ)  
低天井部 ; 500LX (蛍光灯)

### (5) 通信情報設備

電話配管設備, 拡声設備, テレビ共同受信設備, LAN

### (6) 防災設備

自動火災報知設備, 自動防排煙設備

## 6. 換気空調設備概要

### (1) 空調設備

- ① 研究室, 実験室 ; 外調機 (パッケージ) + 天吊空冷ヒートポンプパッケージ (マルチ方式)
- ② フィルタリオン室兼大会議室 ; 空冷ヒートポンプパッケージによる単一ダクト方式
- ③ コンピュータ室 ; 空冷電算機用パッケージ (直吹型)
- ④ 試験棟試験エリア ; 空冷ヒートポンプパッケージ (直吹型) によるスポット空調

### (2) 換気設備

- ① 除塩フィルタ設置による外気取入
- ② 第1種換気 ; 電気室, ELV機械室, 試験棟試験エリア
- ③ 第3種換気 ; 便所, 湯沸室
- ④ 特殊換気 ; 実験用ドラフト排気

### (3) 排煙設備

排煙方式 ; 自然排煙方式

### (4) 自動制御設備

- ① 制御方式 ; 電気式及び電子制御方式
- ② 運転操作 ; 事務室にて外調機の発停操作, 監視を行う。

## 7. 衛生設備概要

### (1) 給水設備

- ① 飲料水 ; 直結給水方式
- ② 工業用水 ; 直結給水方式 (一般用)  
ブースターポンプ圧送方式 (屋外消火栓)  
消火水槽ポンプアップ方式 (屋内消火栓)

### (2) 給湯設備

給湯方式 ; 局所給湯方式 (湯沸室-電気湯沸器)

(3) 排水設備

- ① 生活排水 ; 構内既存排水系に放流
- ② 実験排水 ; 中和処理後構内ユーティリティ排水系に放流
- ③ 空調排水 ; 構内ユーティリティ排水系に放流
- ④ 雨水排水 ; 敷地内浸透

(4) 消火設備

消火器具, 屋内消火栓 (研究棟), 屋外消火栓

(5) ユーティリティ供給設備

N<sub>2</sub>ガス, 混合ガス (N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>), Arガス, 冷却水( 試験棟)

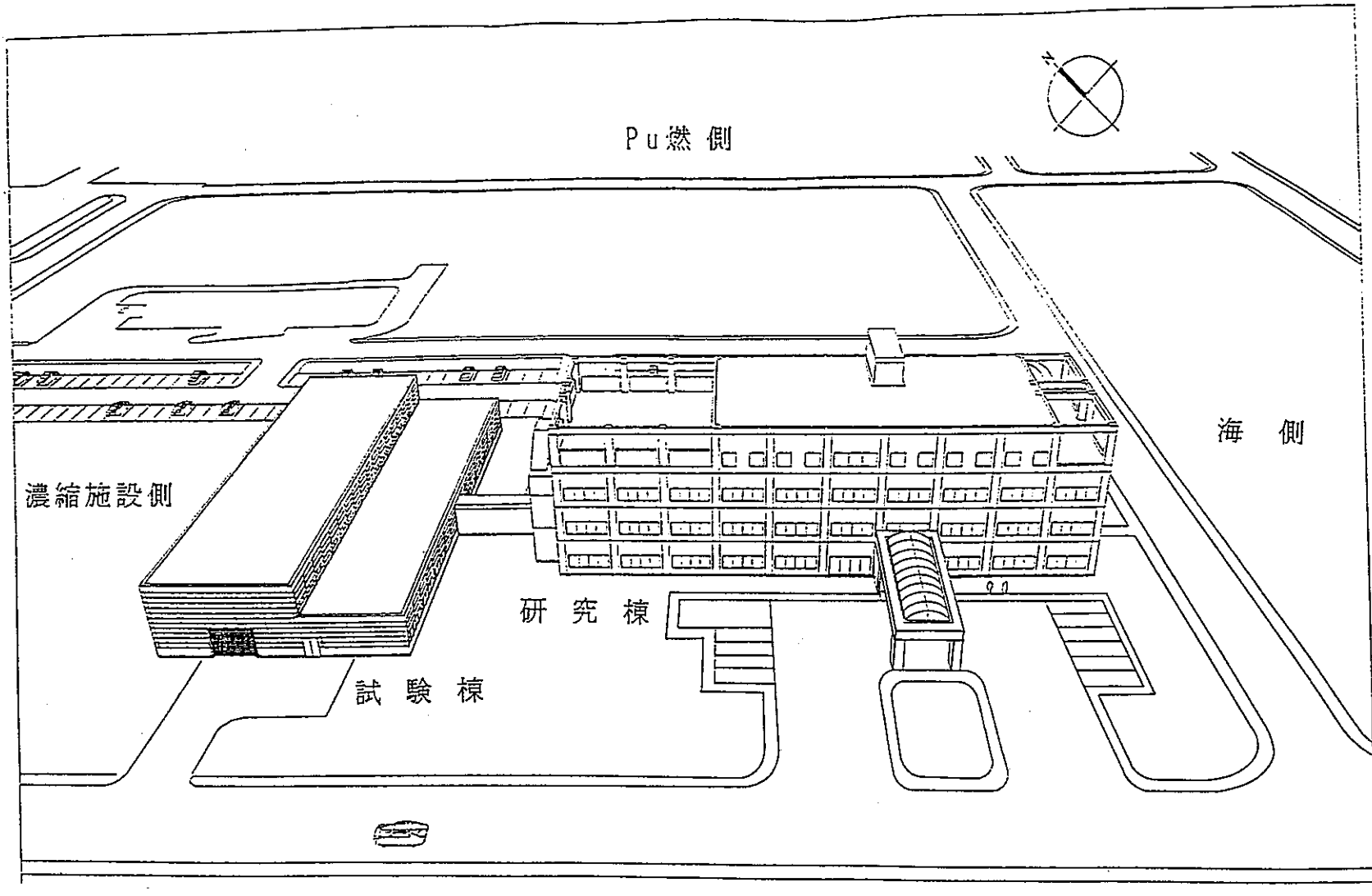


図 IV - 2 性能評価研究施設鳥瞰図