

# 人工バリアの信頼性向上及び 高度化技術の研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究概要)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
ㄨ	J1150 95-002	1995. 8. 14
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1995年2月

石川島播磨重工業株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱には十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用には事業団の承認が必要です。また今回の配布目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒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

Limited Distribution

PNC ZJ1150 95-002

February, 1995

Study on Reliability Improvement and Advanced Technique of  
Engineering Barrier for Geological Disposal of Radioactive Wastes

A b s t r a c t

Basic specification and manufacturing method of composite canister for deep underground disposal of high-level radioactive wastes, in which titanium- or copper-made outer lining surrounds an inner shell of carbon steel, were studied. Stress analysis of the overpack was also carried out. In addition, required items of quality assurance for the overpack manufacturing were surveyed. And the basic specification and preferable character of the composite canisters, which are currently studying in the outside countries, were investigated. On the other hand, to study on reliability improvement of engineering barrier, concepts for large scale test equipment, which include the following five(5) theme of structural performance for outside compression, overpack welding, emplacement of buffer material, sealing method for underground tunnel and mechanical stability of the engineering barrier, and required R&D items for each test equipment were studied.

---

Work performed by Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No. : 060D0137

PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section,  
Tokai Works  
(Tadashi Mano)

配布限定

PNC ZJ1150 95-002

1995年2月

## 人工バリアの信頼性向上及び高度化技術の研究

石川島播磨重工業株式会社

### 要旨

放射性廃棄物地層処分のオーバーパックについて、チタンあるいは銅と炭素鋼を組み合わせる複合オーバーパックの仕様と製作方法を検討し、構造解析を行ってその概念をまとめた。また製作に関連する品質管理項目を調査した。さらに諸外国で研究中の複合オーバーパックについて仕様、機能等を調査して整理し、今回の検討と合わせて複合オーバーパックの製作に関する研究課題を整理した。一方、人工バリアの信頼性向上のための試験設備として、オーバーパックの耐圧性、オーバーパックの溶接性能、緩衝材の施工性、シーリング性能及び人工バリアの機械的安全性の5テーマについて、性能を確認する試験設備について概念を構築し、それぞれの設備の具体化に必要な技術開発課題を整理した。

---

本報告書は、石川島播磨重工業株式会社が動力炉・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 : 060D0137

事業団担当部課室および担当者 : 東海事業所 環境技術部 地層処分開発室  
(間野 正)

## 第1章 序論

地層処分の研究開発は、性能評価研究、処分技術の開発研究、および地質環境条件の調査研究の3分野で進められている。この中の処分技術の開発研究では、人工バリアの設計、製作、施工、および処分施設の設計、建設、操業、閉鎖等に係る要素技術の工学的検討を行って、地層処分システムに要求される性能すなわち安全性の確保を確認することが課題とされている。

「平成3年度-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、「平3レポート」と略す）等で行われてきたこれまでの研究の結果、人工バリアについてオーバーパックとしては炭素鋼、緩衝材としてはベントナイトが候補材料として挙げられ、それらの設計、施工等については、基本的に現状技術が適用できる見通しであることが示されている。しかし、処分に適用しうる要素技術の信頼性の向上、仕様の具体化と合理化に関して、安全的かつ合理的に地下環境を模擬した大型試験設備による性能、品質の確認が必要であることも指摘されている。

以上のことから、本研究は人工バリアに要求される性能の確保に係わる技術課題を明らかにするために、人工バリアの合理化として複合オーバーパックの採用について、また人工バリアの信頼性向上に関して以下の確証試験設備概念の検討を行ったものである。

- ①オーバーパックの耐圧性
- ②オーバーパックの溶接性能
- ③緩衝材の施工性
- ④坑道のシーリング性能
- ⑤人工バリアの機械的安全性

## 第2章 複合オーバーパックの検討

### 2.1 目的

耐食性材料としては、銅またはチタンが優れた候補材料とされており、外側の材料にこれらの耐食性を、内側の材料に炭素鋼による耐圧強度を機能分担するという複合構造の概念があるが、製作性に関する検討は国内では行われていない。

ここでは、人工バリアの信頼性の向上と仕様の合理化をはかる観点から、オーバーパックとしての要件を満足する複合オーバーパックの仕様とその製作方法、品質管理の考え方に関する検討を行った。また、これに関連して諸外国における複合オーバーパックの仕様例を調査、整理した。

## 2.2 複合オーバーパックにおける複合方式の原理と適合性

### 2.2.1 複合オーバーパックの考え方

今回の研究では、複合オーバーパックに要求される機能と複合方式を次のように設定した。

- ①耐食性機能……外側の表面ライニング（Ti、Cu）にて担保
- ②耐圧性機能……内側の支持構造物（炭素鋼）にて担保

### 2.2.2 複合オーバーパック製作方法の検討

複合オーバーパックの支持構造物として炭素鋼を採用する場合、胴体部及び蓋部の製作は現状技術によって十分対応可能であり問題はない。ここでは、複合オーバーパックの製作において開発要素を含む蓋部の接合方法及びライニング材の接合方法についての検討を行った。

蓋部の溶接方法としては、電子ビーム溶接および狭開先TIG溶接が有望であるが、現時点においてより実現性のあるのは、狭開先TIG溶接であると考えられる。ただし、複合オーバーパックの板厚は合理化によって約150mm程度まで減らせる見込みがあり、両溶接方法とも炭素鋼単体の場合より制約は軽減される。

機械的接合方式としては、①ねじ締結、②ピン締結、③焼きばめ締結の適合性を検討した。機械的接合方法のうち、ねじ締結による方法の適合性が高いと考えられる。なお、機械的接合方法については地下水の侵入を防ぐ長期間の水密性が耐腐食層によって担保されるとしても、接合部の長期的な機械的健全性については信頼性の課題が残される。

ライニング材の取付方法としては、①機械的固定方法、②爆着、③溶接、④拡散接合について検討し、溶接が最も有望な方法であると評価された。

ライニング材の溶接に関しては、遠隔作業をできるだけ少なくするために、ふた溶接前（ガラス固化体挿入前）に円筒胴部及び蓋部の大部分にあらかじめライニング材を接合しておき、蓋溶接後（ガラス固化体挿入後）に残る溶接部周囲にライニング材を遠隔にて接合する方法が適当と考えられる。

材料としては、チタンおよび銅ともに炭素鋼との直接溶接は困難であるが、チタンおよび銅の同材溶接は可能である。そこでライニング材の取付方法の案としてあらかじめ本体にライニング材と同部材をライニング固定板として埋め込んでおき、それにライニング材を溶接する方式が考えられる。

### 2.2.3 複合オーバーパックの概念図

図2.2.3-1に「複合オーバーパック概念図」を示した。なお、蓋部の接合に関する方法としてはこの図では溶接の概念を示した。

## 2.3 複合オーバーパックスの板厚合理化の検討

耐圧性機能を満足する厚さの設定に関しては、現状ではオーバーパックスの強度計算方法を定めた技術基準はない。ASMEでは機器設計の考え方として「解析的手法による設計」と「規定された計算式による設計」の2通りを挙げているので、ここでは仕様の合理化の観点から前者に基づいて、必要な円筒胴および蓋厚さの検討を行った。

なお、本研究においては、オーバーパックスには垂直方向と水平方向で異なる地圧が外力として作用することを想定し、解析する機器形状を仮定するにあたっては、合理的な概略板厚を与える手法として「円環モデルの考え方」を試みとして適用した。

仮定した厚さのオーバーパックスについてFEM解析を行うことによって、構造強度を評価確認した結果、「平3レポート」で想定されているように地下1,000mの深度において初期地圧を外圧として考え、初期地圧の垂直成分を27.5MPaとし水平成分は2倍までの偏圧を考慮する条件において、約150mm厚さのオーバーパックス本体によって必要な構造強度が得られることがわかった。

## 2.4 品質管理手法の検討

円筒胴部、蓋部単体については製作中に直接検査を行うことが可能なので、材料、溶接等に係る強度的健全性は確認できる。ライニング材についても工場にて取り付ける部分については、同じく直接検査が可能であるため適切な検査を行うことにより健全性（耐食性）を確認できると考えられる。

そこで品質管理手法については、ガラス固化体封入後の蓋接合部およびライニング材接合部の健全性の評価について検討を行った。

### 2.4.1 蓋接合部の信頼性

金属材料の溶接部非破壊検査としては、①超音波探傷検査（UT）②放射線探傷検査（RT）③磁粉探傷検査（MT）④浸透探傷検査（PT）があり、今回のような厚肉溶接部の機械的強度を担保するための検査には、深部検査であるRTまたはUTが適用されるのが一般的であるが、RTについては、内部に放射線源となるガラス固化体が入っているため適用は難しい。一方、UTは現状技術の延長線上で対応可能であると考えられ、今後、遠隔UT検査装置の開発が必要である。

### 2.4.2 ライニング材取付部の健全性

チタンや銅などのライニング溶接部の非破壊検査については、表面欠陥を探知するためのPT検査が行われているが、PT検査は①前処理②浸透処理③洗浄処理④現像処理の手順で行われるため、遠隔で行うのは困難であると考えられる。

一方UT検査の一種である表面波探傷法は、表面欠陥を効率よく検出できることが知られている。したがって表面欠陥を検出可能とする遠隔UT検査装置の開発が必要である。

## 2.6 複合オーバーパックの仕様例の調査

異なる2つの材料を組み合わせることで処分用の容器(Composit canister)とする構想が海外にある。設計の概念としては、次の2つの理由によって容器の構造を外層と内層の2重構造としている。

- ・外層：耐食性金属を用いた防食層
- ・内層：構造材料を用いた機械的強度層

こうした構造の処分容器を検討している国には、スウェーデン、フィンランド、米国がある。いずれも使用済燃料の直接処分用容器を対象としている。ここではこうした国々の複合材料型の処分容器の仕様を調査した。結果を表2.6-1に示した。

## 第3章 人工バリアの信頼性向上のための試験設備の検討

### 3.1 オーバーパックの耐圧性

#### 3.1.1 目的

地下深部に埋設されるオーバーパックは、処分場閉鎖後の水圧、地圧等の荷重下で長期間の人工バリアとしての機能を要求される。オーバーパックの構造的健全性を確認し、力学的解析評価手法の妥当性を検証するためには、このような地下深部の力学的環境を模擬した試験設備による確認が必要である。

ここでは、長期間（1年間以上）、高圧力下（100 MPa程度）でオーバーパックの構造強度の評価が可能な耐圧試験装置の設備概念を検討した。

#### 3.1.2 試験内容及び装置概念

処分場閉鎖後の地中で受ける力としては、均圧状態よりも偏圧状態の方がオーバーパックの構造強度的には厳しい条件となる。そこで、オーバーパックの健全性を保守的に確認する方法として、偏圧の極端な場合を想定して、胴部または蓋部に対して一方向のみに荷重をかける試験を行い、各部の変位量等を測定し、応力解析とあわせて評価することによって全体としての健全性を確認する方法が考えられる。

図3.1.2-1「耐圧試験装置概念図（偏圧変形試験）」にこの方法の試験装置の概念を示した。

### 3.2 オーバーパックの溶接性能

#### 3.2.1 目的

「平3レポート」においては、オーバーパックは30cm厚さの炭素鋼製（強度代25cm、腐食代5cm）を候補材料の一つとして考えているが、その蓋の溶接は高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）収納後に行うことになる。従って、遠隔自動操作、遠隔保守性



を考慮した高能率の溶接技術及びその検査技術に関する研究が必要であり、具体的に溶接条件の選定等を可能にする設備での試験が望まれる。

ここでは固化体収納後の溶接方法として、現実的な溶接方法及びそれに関連した蓋の構造等を検討し、それらを実証できる溶接装置とその周辺装置の概念をまとめることを目的とする。なお、溶接サンプルから試験片をとり、その溶接状態の確認ができるように考慮した。

### 3.2.2 試験内容及び装置概念

蓋部の溶接方法について調査し、①狭開先TIG溶接、及び②電子ビーム溶接の2つの方法が有望であると判断した。また、蓋部形状についてはハンドリング及び溶接施行性の観点から落とし蓋方式を選定した。

#### (1)溶接性能試験装置

溶接性能試験で確認する項目には下記のものがある。

##### ①溶接施工法

- 1)開先形状
- 2)溶接速度
- 3)溶接電流、溶接電圧
- 4)熱処理（予熱、焼鈍）の要否

##### ②非破壊検査

- 1)UTによる実際上の性能や留意点、検討項目の抽出
- 2)RTとUTの性能比較検査の実施
- 3)PTとUTの性能比較検査の実施

##### ③溶接部の機械的諸試験（基本的にサンプル片で実施）

- 1)母材の化学成分
- 2)物理的諸性質（主として機械的性質）
- 3)欠陥の有無
- 4)溶接割れ試験
- 5)溶接熱影響試験
- 6)脆性破壊試験
- 7)疲労破壊試験
- 8)耐食性試験

以上を観察するために、固化体収納後のオーバーパックの蓋の溶接を模擬するための溶接装置の概念を、狭開先TIG及び電子ビームそれぞれについて図3.2.2-1「溶接

性能試験装置概念図」に示した。

### (2)溶接および熱処理による入熱のガラス固化体への影響試験装置

本装置による試験では、温度計等を取り付けた模擬ガラス固化体を収納し、実際にオーバーパックの溶接または熱処理を行った際のガラス固化体およびオーバーパックに与えられる熱影響を観察する。

装置概念を図3.2.2-2「熱影響試験装置概念図」に示した。

## 3.3 緩衝材の施工性

### 3.3.1 目的

廃棄体（オーバーパック）の定置には坑道横置き方式と処分孔縦置き方式の2つの方法が考えられる。各方式に対して、実規模相当の大きさを有する模擬坑道に緩衝材を設置する試験を行い、具備すべき機能を確保する技術的な裏付けを得ると共に、品質保証や検査に係る着眼点を抽出する必要がある。

ここでは、実規模相当の大きさを有する模擬坑道の中で、各々の方式において任意の寸法に成形された緩衝材の施工試験が可能となるように設備検討を行うことを目的とする。

### 3.3.2 試験内容及び装置概念

実規模のモックアップを使用して緩衝材施工を実施し、施工性の確認を行う。具体的な緩衝材施工方法としては次のものがある。

- ①成形緩衝材の積み上げ
- ②成形緩衝材の積み上げ+粉体緩衝材の吹き付け
- ③粉体緩衝材吹き付け+締め固め

模擬処分孔レイアウトについては、複数回に及ぶ試験や緩衝材への湿度管理を考慮して専用の建屋内に縦孔、横孔をそれぞれを有する屋内設備とした。

試験概念を図3.3.2-4「緩衝材施工性確認試験イメージ図」に示す。

なお、成形緩衝材の形状寸法は作業性を左右する大きな要因となるので、緩衝材の円周方向の分割数と軸方向の厚み（高さ）を組み合わせて、その単体重量と処分孔を充填するために必要な数量を計算した。

## 3.4 シーリング性能

### 3.4.1 目的

坑道の閉鎖は、廃棄体（オーバーパック）の定置後、周辺の地質環境を可能な限り元の状態に戻すために行うもので、埋め戻し、プラグ、グラウトの3つの要素技術がある。埋め戻しについては埋め戻しに用いた充填物による水理機能の状態を、プラグについては充填物の移動、流出の防止を、グラウトについてはグラウトによる岩盤部

分の修復、補強効果等に着目し、各々に期待される性能の確認のために諸材料を組み合わせた工学規模の試験によって、シーリングの技術的な裏付けを得られる装置の検討を行う必要がある。しかし、坑道の具体的な閉鎖方法に関しては多くの不確定要素が残されているのが現状であり、未だ模擬坑道としての供試体を設定できる段階には至っていない。

従って、本研究においては、処分坑道における埋め戻し材のシーリング性能に関与する力学的、水理的、および熱的環境を模擬することに着目し、不特定の模擬坑道に加圧することを考慮した装置概念の検討を行った。

#### 3.4.2 試験内容及び装置概念

試験において観察すべき項目は水理特性データを観察するために注入水浸透量分布とそれに大きく係わる温度分布やシーリング材料移動傾向や移動量があげられる。

プラグ周辺の処分坑道（グラウト範囲、周辺岩盤を含む）を実寸法で再現すると、試験体の径は $\phi 6\sim 8\text{m}$ となり、長さも $4\sim 10\text{m}$ となるので、試験範囲、要求仕様を考慮に入れて縮尺1:4の試験体（ $\phi 2\text{m}\times 2\text{m}$ ）とした。

以上の検討に基づく装置概念を図3.4.2-2「シーリング試験装置概念図」に示した。

### 3.5 人工バリアの機械的安全性

#### 3.5.1 目的

処分場閉鎖後の放射性核種の閉じ込めは人工バリアの性能に大きく関わる。生物圏への影響を効果的に低減するために、人工バリアには廃棄体中の放射性核種の減衰を待つ千年程度の長期間にわたって核種漏洩を防止、遅延する能力が求められている。

従って、バリア機能が要求される期間中に処分孔近傍で天然バリア側に大きな変形が発生した場合の人工バリアの健全性を確認することは重要である。

ここでは、例えば、処分孔を横切るような断層発生を想定した場合の人工バリアの挙動（緩衝材やオーバーパックの変形挙動）を模擬、観察し、健全性の確認ができることを目的として、緩衝材について岩盤による拘束を受けた状態での処分孔のせん断に対する力学的緩衝性を確認する試験設備について検討した。

#### 3.5.2 試験内容及び装置概念

処分孔のせん断事象として、円柱状の人工バリアに対して胴方向からのせん断をかけることとした。緩衝材の応力緩衝作用は膨潤状態での観察が重要であると考えられるが、緩衝材の厚さが大きい場合には膨潤に要する時間がかかりすぎるため、緩衝材厚さを概ね30cm以下になるようにスケールを検討し、供試体のスケールを1:4に設定した。

試験装置は、人工バリアを収納する分割式のケースと、ケースに上下の剪断力を加える油圧装置で構成される。図3.5.2-1に「せん断試験装置概念図」を示した。

## 第4章 人工バリアに関する研究スケジュール

### 4.1 目的

本研究においては、複合オーバーパックや実規模レベルの各試験装置の概念構築を実施したが処分技術を確立して行くためには今後、概念の詳細化、実製作へと更なる研究が必要なる。そこで本研究の位置付けを明確にすることを含めて将来的な研究項目の概要を整理した。

### 4.2 研究スケジュール

#### 4.2.1 複合オーバーパック

今後試作を念頭に置いてその仕様を具体化するためには次の4つの観点からの総合的な検討が必要になる。

- ①機能（性能）確保：オーバーパックに要求される機能を複数の材料でどのように達成するかということを経験的な構造とから検討する。  
候補手法の中からの選択が必要。
- ②製作性：内層、外層それぞれの材料に適した製作方法の選択と、最終的な複合化、溶接、封入手法の検討。
- ③ハンドリング性：特に外層材料の形状、寸法、強度等に着眼して、構造上の整合性を取るような検討が必要。
- ④経済性：複合化することによる経済的な特徴を候補となる複合方式の中で、及び単体材料オーバーパックと比較、検討する。

#### 4.2.2 オーバーパックの耐圧性

今後本装置を具体化するために必要な課題は大きく次の4つの分野に分けられる。

- ①試験条件の整理：本試験では、処分孔に設置されたオーバーパックに外圧がかかる場合を想定してその力学的な応答状態を測定する。従って模擬すべき力学的環境については地下環境、処分孔環境などについてさらに調査し、試験設備の仕様に反映していく必要がある。
- ②試験装置の仕様：上記の条件に基づいて加圧方式、必要な試験時間、供試体の寸法（サイズ）を設定する。
- ③データ収集：次の変形挙動解析手法の開発に反映することも考慮して、取得すべき力学データの選定とそれらの測定数（測定点）を検討して試験設備の設計に反映する。
- ④変形挙動解析：様々な力学的環境条件下でのオーバーパックの変形挙動を解析的手法の開発に検討するために計算コードの開発を行う。

#### 4.2.3 溶接、検査

TIG、EB溶接ともに、オバーハークへの適用をめざすとそれぞれ次のような課題がある。またこの2方法に代わる代替手法の調査、検討、開発も併せて必要である。また溶接手法の比較、選択はオバーハークの材質や構造、特に蓋部の形状、溶接深さ等と深く関わっており、また溶接部の品質管理を考えると検査手法とも関係がある。従って溶接及びその検査手法の検討においては、オバーハークの構造との調整を念頭に置くものとする。

- ①TIG溶接：厚板炭素鋼の自動溶接技術はほぼ確立されているといえる。しかし、オバーハークを対象とすると次のような開発課題がある。
  - a. 高能率化：溶接時間の短縮
  - b. 狭開先：溶接部の開先形状の最適化を行うために、種々の開先条件による溶接試験の実施が必要。
  - c. 自動化：蓋の全周溶接を用意にするための自動化
  - d. 入熱評価：入熱が大きいことから周辺部への熱影響を評価し、必要な対策を検討する。
  - e. 残留応力：熱影響による残留応力の程度を把握する。
- ②EB：厚板でも直線の溶接技術は確立されているといえる。従ってオバーハークに適用する場合には蓋の全周溶接、特に周溶接を最後に止める際の欠陥の発生を防ぐための手法確立が課題となる。
- ③代替手法：上記2手法以外にオバーハーク溶接に適する手法を調査、比較する。
- ④検査手法：欠陥の判定基準が重要な因子となるが、非破壊検査手法をその自動化を含めて開発する。

#### 4.2.4 緩衝材の施工

緩衝材の施工性確認は設置する緩衝材の形状と要求される施工精度に大きく影響される。設置場所となる模擬処分孔については大きな開発課題はないと考えられるが、設置手法に関しては前記のように取り扱う緩衝材の性状と施工精度に対して適切な手法を適用すべきである。このことから、開発課題として次のような項目が考えられる。

- ①緩衝材関連：寸法、形状の設定。物性、特に力学的物性値（乾燥状態）の把握。ブロックの場合は合理的な分割個数の設定。
- ②作業手順の検討：緩衝材の形状に合った合理的な搬送手順、及び施工手順を設定し、必要な作業項目を抽出する。
- ③搬送方法の検討：上記手順の検討結果に基づいて緩衝材の搬送方法を具体化し、そこで必要な機器、装置類の仕様を設定する。
- ④施工方法の検討：上記手順の検討結果に基づいて緩衝材の施工方法を具体化し、そこで必要な機器、装置類の仕様を設定する。
- ⑤遠隔技術の開発：必要とされる諸設備について、地下環境で操業することを

前提として、必要な遠隔操作機能を整理、検討する。

- ⑥施工精度の検討 : それぞれの緩衝材について施工後に必要とされる精度（粉末：充填密度、充填量。ブロック：ブロック間の隙間の考え方。など緩衝材の機能に影響する点）を検討する。

これらの課題は緩衝材単独ではなく、オーバ-パ-ックの搬送、施工とも深く関わっている。また、処分孔の形、すなわち処分孔縦置か坑道横置かによっても作業手順やそれに要する搬送、施工設備の仕様は異なって来る。こうした点にも十分留意する必要がある。

#### 4.2.5 シーリング性能の評価

本検討では処分坑道の閉鎖技術に関して、埋め戻し材のシーリング性能に関与する力学、水理及び熱的環境を模擬すること着目し、模擬坑道に加圧が行える試験設備の概念をまとめた。しかしシーリング性能の評価は使用する埋め戻し材の物性値とその施工性に大きく依存する。また埋め戻す坑道の状態にも影響される。従って試験設備の開発のためには、埋め戻し材そのものに関連する項目、処分坑道に関連する項目、埋め戻し作業に関わることのそれぞれについてさらに検討する必要がある。

- ①埋め戻し材関連 : 埋め戻し材の組成、基本物性（密度、粒度、水分量）といった使用する材料の性状を検討する。
- ②処分坑道関連 : 模擬すべき坑道の状態、特に埋め戻し材が直接接する坑道表面の状態の設定について検討し、その模擬手法を開発する。
- ③埋め戻し作業関連 : 埋め戻し材、グラウト、プラグ等の各材料の性状や形状に合わせて施工方法を選択する必要がある。作業内容はシーリング性能そのものに大きく影響すると考えられる。従って施工作业について、手順、手法、必要機器の仕様といったように徐々に作業内容を具体化してそこで行う作業内容をまとめると共に、必要な機器、設備等への要求も抽出する。

なおシーリング性能の評価については、坑道の埋め戻しについてその基本的な方法（どのような材料をどのように使用するかということ）を明確にする必要がある。またシーリング性を評価する上で判断の基準となる項目とその数値（例えば透水係数）を具体的にしていく必要がある。

#### 4.2.6 人工バリアの機械的安全性（せん断）

せん断試験設備の開発について、さらに検討が必要とされるのは模擬すべきせん断事象をより具体的にしてそれを再現する装置の仕様に反映することである。また試験条件を具体化して試験装置の機能に必要な幅を持たせることも重要である。さらにこのようなせん断事象を数値解析によって解けるように解析手法を開発、整備することがより幅の広いせん断挙動の検討を可能にすると考えられる。これらの課題を整理すると次のようになる。

- ①せん断事象の調査 : 変位量（せん断速度）の設定について調査、検討を行う。
- ②試験条件の具体化 : 変位量（せん断速度）の設定幅を検討して装置の仕様に反映する。
- ③数値解析手法の開発 : せん断挙動の数値解析手法の調査を行い、モデルの構築を行い、解析手法を確立する。

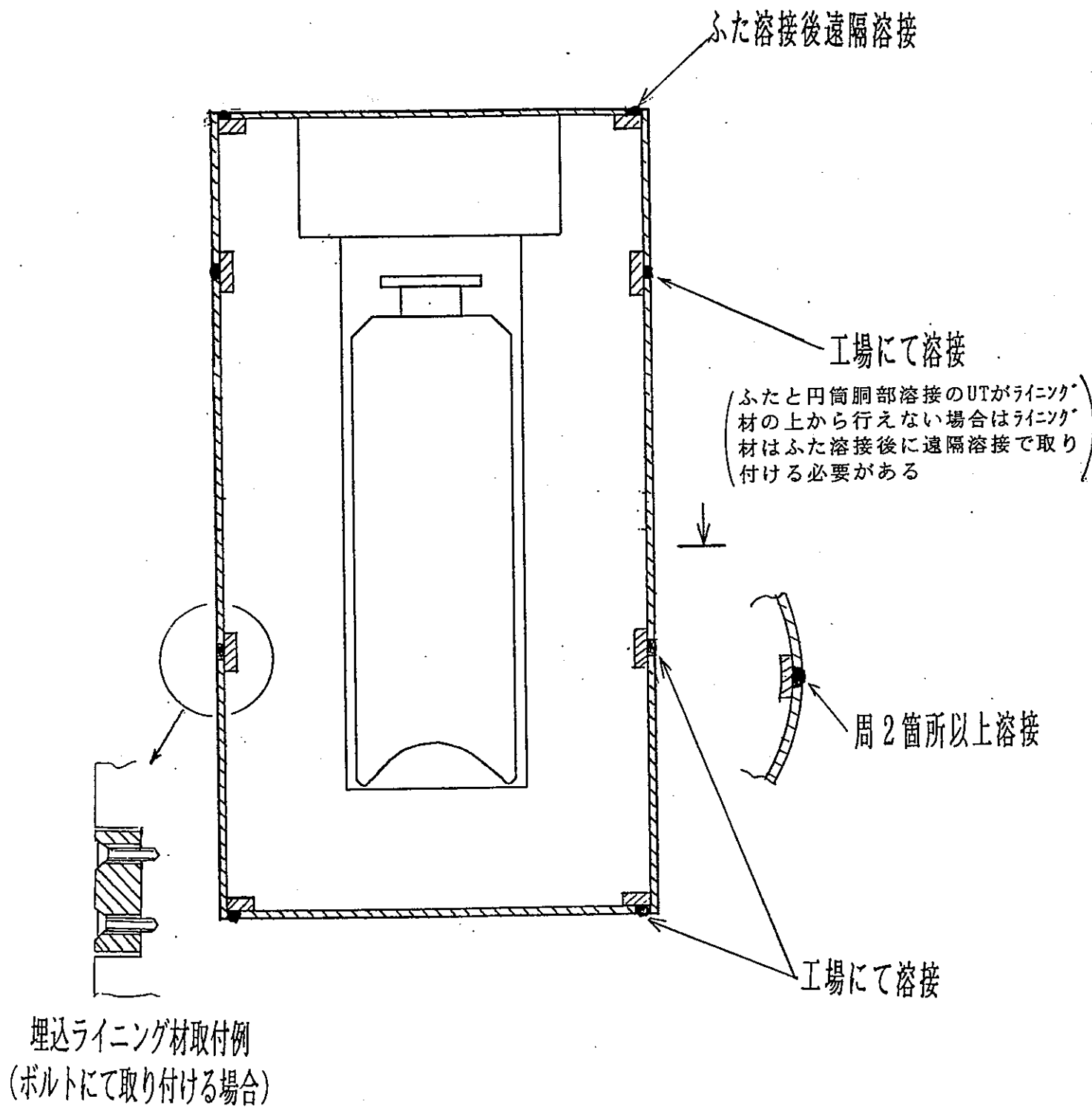


図2.2.3-1 複合オーバパック概念図



表2. 6-1 複合オーバーパックの仕様例(1/2)

国名	処分対象	材質	寸法・形状	ハンドリング方法	評価方法 (強度, 耐熱, 腐食)	製作方法	検査方法	備考
スウェーデン	使用済燃料	外容器: 銅、チタン 内容器: 銅	<p><b>KBS-3</b></p> <p>①銅/鋼キャニスタ 外容器(銅) 直径: 880mm, 全長: 4850mm, 厚さ: 50mm 内容器(鋼) 厚さ: 50mm</p> <p>②銅/鉛充填キャニスタ 直径: 800mm, 全長: 4680mm, 厚さ: 60mm</p> <p>③HIPキャニスタ 直径: 800mm, 全長: 4610mm</p> <p>④鋼/鉛充填キャニスタ 直径: 800mm, 全長: 4700mm, 厚さ: 25mm</p> <p>⑤鋼製キャニスタ 直径: 880mm, 全長: 4740mm, 厚さ: 100mm</p> <p><b>VLR</b></p> <p>①銅/鋼キャニスタ(両端面鏡) 外容器(銅) 直径: 1600mm, 全長: 5650mm, 厚さ: 60mm 内容器(鋼) 厚さ: 160mm</p> <p>②銅/鋼キャニスタ(円筒型) 外容器(銅) 直径: 1600mm, 全長: 4985mm, 厚さ: 60mm 内容器(鋼) 厚さ: 160mm</p> <p><b>VDH</b></p> <p>①コンクリート充填チタン製キャニスタ 直径: 500mm, 全長: 4760mm, 厚さ: 6mm</p>	<p>①水プール貯蔵されている使用済燃料を輸送キャスクに搭載し、ホットセルに移送する。</p> <p>②ホットセル内で、使用済燃料をオーバーパックに装荷する。</p> <p>③蓋を電子ビーム溶接した後、非破壊検査する</p> <p>④表面汚染検査する。</p> <p>・KBS-3の場合</p> <p>⑤エレベータを用いて処分場に移送する。</p> <p>⑥オーバーパックを架台上にねかせ、処分坑道を移送する。</p> <p>⑦架台上のクレーンを用いて、オーバーパックを処分孔(縦孔)に装填する。</p> <p>・VLRの場合</p> <p>⑤エレベータを用いて処分場に移送する。</p> <p>⑥オーバーパックをワゴン上にねかせ、処分坑道を移送する。</p> <p>⑦オーバーパックを、処分孔中に設置された緩衝材の型の上に、ねかせたまま押し出す。</p> <p>・VDHの場合 &lt;記載なし&gt;</p>	<p>・銅キャニスタ ①クリープ試験 ②腐食試験</p> <p>・炭素鋼キャニスタ 部分腐食試験</p>	<p>・外容器(銅)の製作方法 ①無酸素銅の鑄造 ②a 熱間圧延後、ロール曲げ b 熱間押し出し加工 ③電子ビーム溶接</p>	<p>・超音波探傷 ・表面汚染検査</p>	<p>・以下の3種類の処分方法を研究中。 ①KBS-3 ②VLR(Very Long Holes) ③VDH(Very Deep Holes)</p> <p>・処分方法により、キャニスタの設計、構造が異なる。</p> <p>・VLRのレイアウトは、スイスのNAGRAの処分概念に類似している。</p>
フィンランド	使用済燃料	外容器: 銅 内容器: 銅	<p>①外容器 直径: 822mm, 全長: 4520mm, 厚さ: 60mm 内容器 直径: 702mm, 全長: 4400mm, 厚さ: 55mm</p> <p>②外容器 直径: 802mm, 全長: 4500mm, 厚さ: 50mm 内容器 直径: 702mm, 全長: 4400mm, 厚さ: 50mm</p>	<記載なし>	<記載なし>	<p>・外容器(銅)の製作方法 ①無酸素銅の鑄造 ②a 熱間圧延後、ロール曲げ b 熱間押し出し加工 ③電子ビーム溶接</p> <p>・その他、HIP、遠心鑄造などが候補。</p> <p>・内容器(鋼) ①シームレスチューブ ②鑄造</p>	<記載なし>	<p>・スウェーデンの処分方法(KBS-3)を採用している。</p> <p>・銅と鋼による複合キャニスタの設計・評価をスウェーデンと共同で行っている。</p> <p>・キャニスタ充填材 ①粒状鉛(粒径: 1.5mm) ②石英砂(粒径: 0.5mm~2mm) ③ガラスビーズ</p>

表 2. 6 - 1 複合オーバーパックの仕様例 (2 / 2)

国名	処分対象	材 質	寸 法 ・ 形 状	ハンドリング方法	評 価 方 法 (強度, 耐熱, 腐食)	製 作 方 法	検査方法	備 考
米 国	使用済燃料 ガラス固化体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・候補材料は以下。</li> <li>① S U S 304 L</li> <li>② S U S 316 L</li> <li>③ インコロイ 825</li> <li>④ 高純度鋼 CDA102</li> <li>⑤ Cu-Ni合金 CDA715</li> <li>⑥ Al-Cu合金 CDA613</li> <li>⑦ ニッケル基合金 C-4</li> <li>⑧ チタン Grade12</li> <li>・耐食性の観点からは以下の材料を選定している。</li> <li>① 低炭素鋼</li> <li>② 低銅鋼</li> <li>③ 低合金鋼</li> <li>④ 鋳鉄</li> <li>⑤ 7%or亜鉛メッキ鋼</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>以下は候補</li> <li>① 使用済燃料用 外容器 (インコネル) 直径: 66cm, 全長: 476cm, 厚さ: 76.2mm 内容器 (ステンレス) 厚さ: 25.4mm</li> <li>② 使用済燃料用 外容器 (鋼) 直径: 826mm, 全長: 4986mm, 厚さ: 51mm 内容器 (Al-Cu合金or鋼) 厚さ: 25.4mm</li> <li>③ ガラス固化体用 直径: 66cm, 全長: 328cm, 厚さ: 25.4 -76.2mm</li> </ul>	<記載なし>	<記載なし>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・容器の製作方法</li> <li>① 圧延曲げ後、溶接</li> <li>② 造心鍛造<sup>1)</sup></li> <li>・蓋の溶接方法</li> <li>① 電子ビーム溶接</li> <li>② T I G溶接</li> <li>③ プラズマ溶接</li> <li>④ レーザービーム溶接</li> <li>⑤ 摩擦溶接<sup>2)</sup></li> </ul>	超音波探傷	<ul style="list-style-type: none"> <li>・薄壁設計に適切な材料</li> <li>① チタン Grade12</li> <li>② ニッケル基合金 C-4</li> <li>③ インコロイ 825</li> <li>1) 薄い容器製作用。</li> <li>2) 摩擦溶接は、インコロイ 825及びCu-Ni合金には好適だが、純銅には不適 (熱伝導率が非常に大きいため)。</li> </ul>

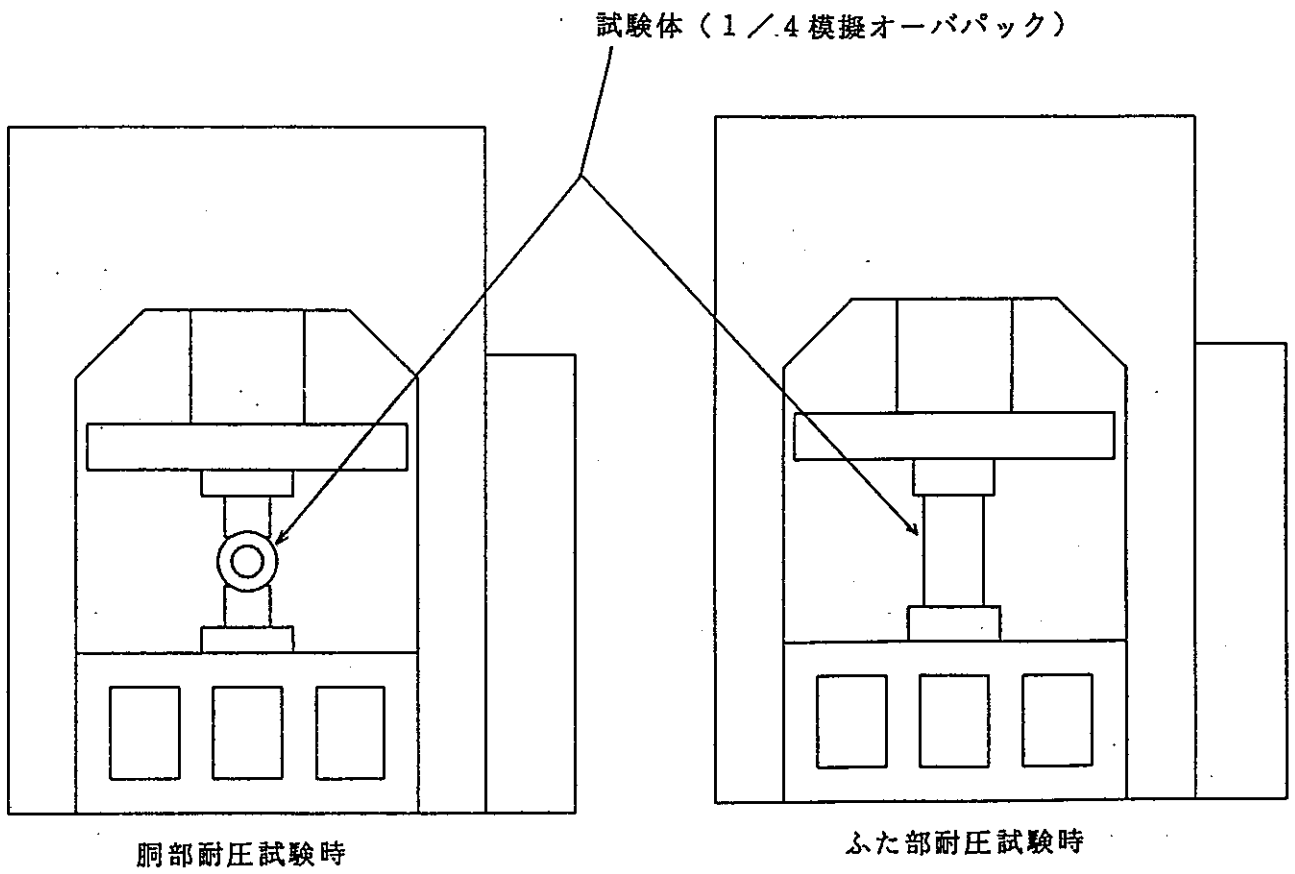
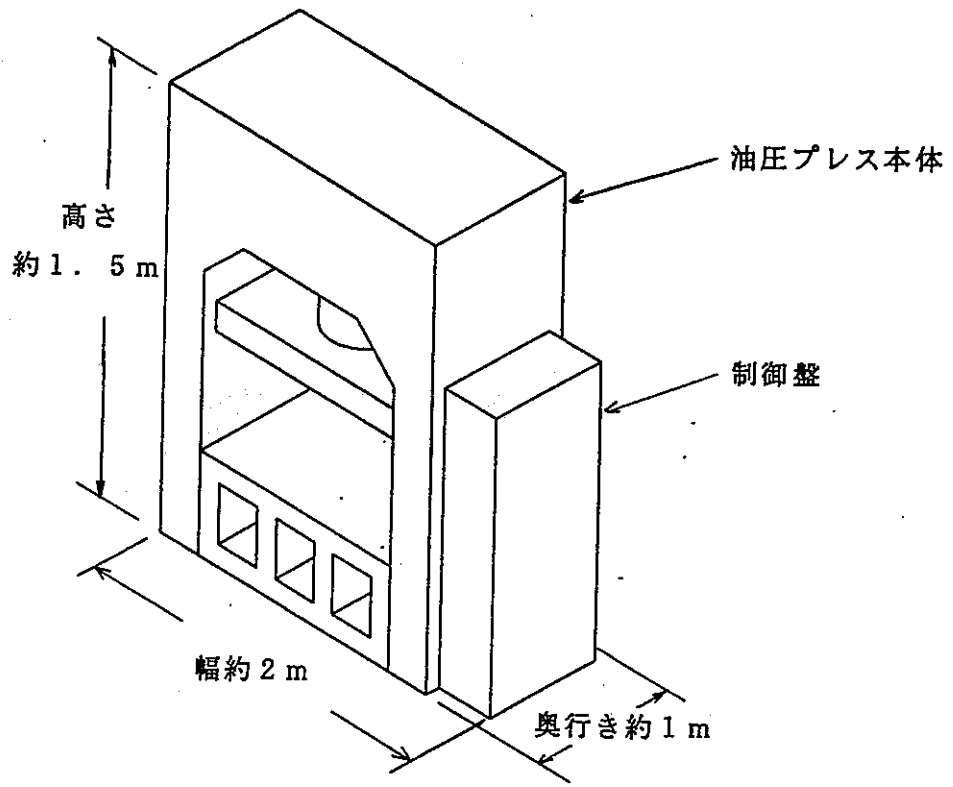
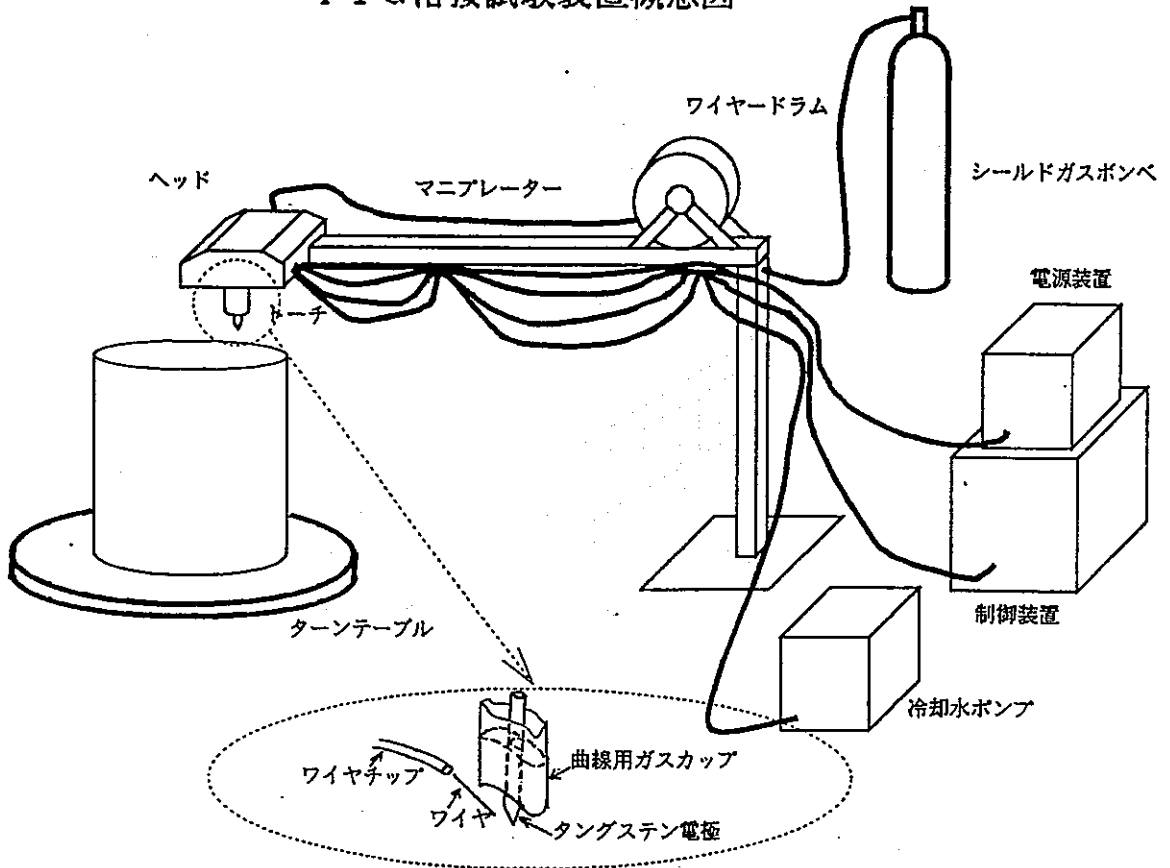


図3.1.2-1 耐圧試験装置概念図 (偏圧変形試験)

### TIG溶接試験装置概念図



### 電子ビーム溶接装置概念図

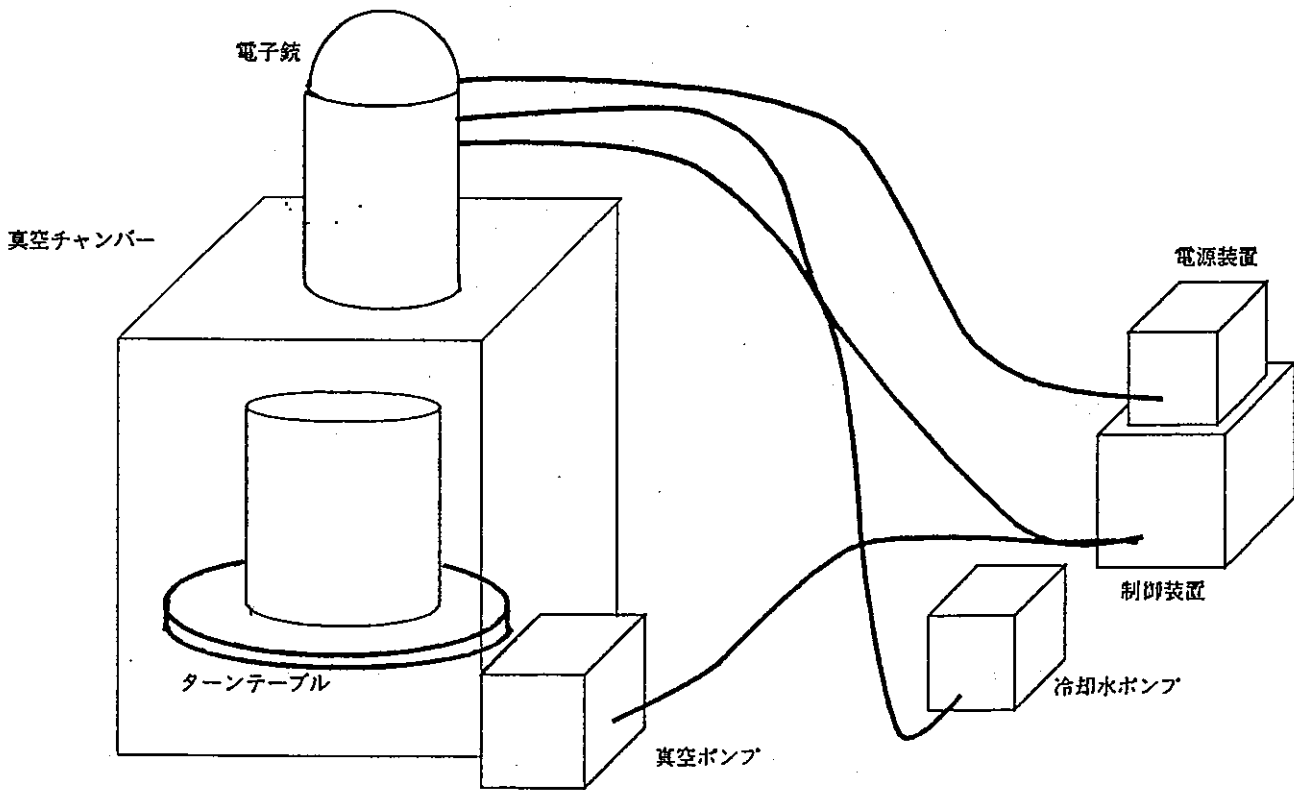
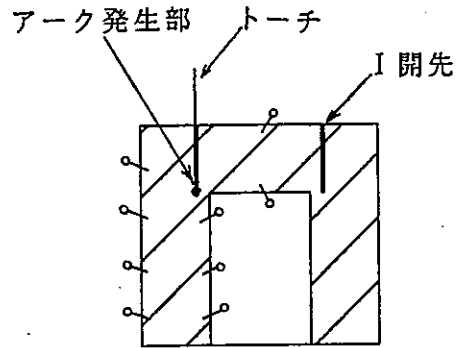
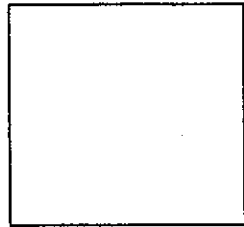
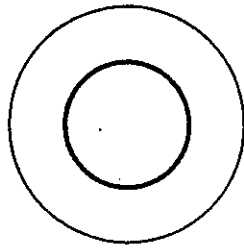
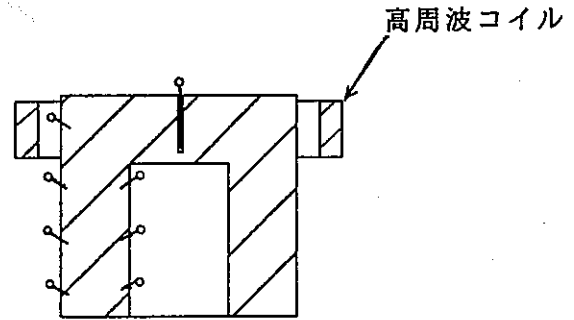
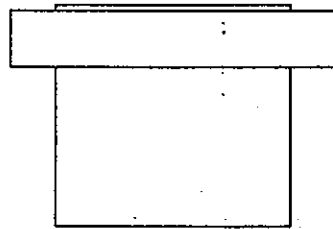
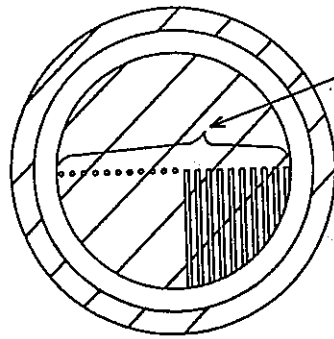


図3.2.2-1 溶接性能試験装置概念図

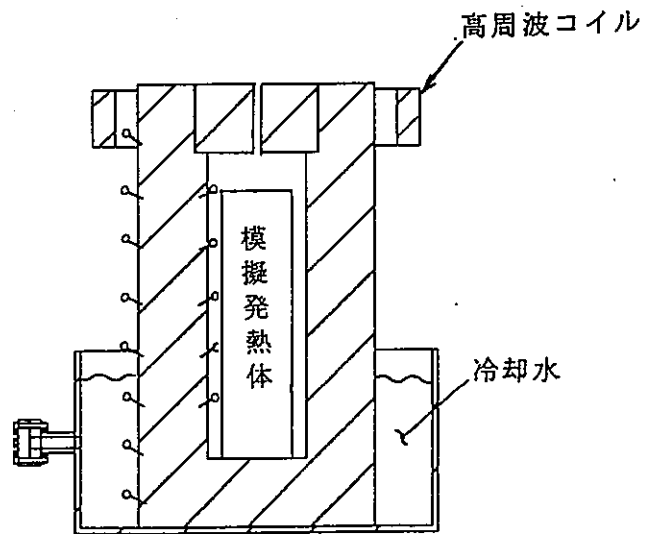
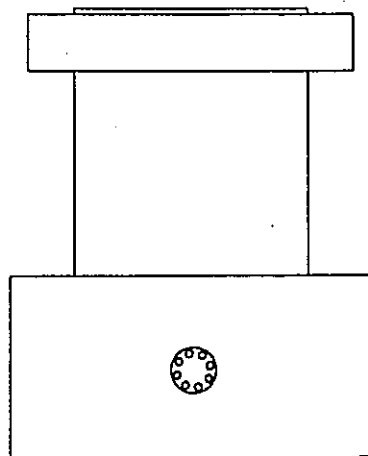
熱電対



溶接用熱量計測装置



高周波焼鈍特性調整試験装置



冷却性能試験装置

図3.2.2-2 熱影響試験装置概念図

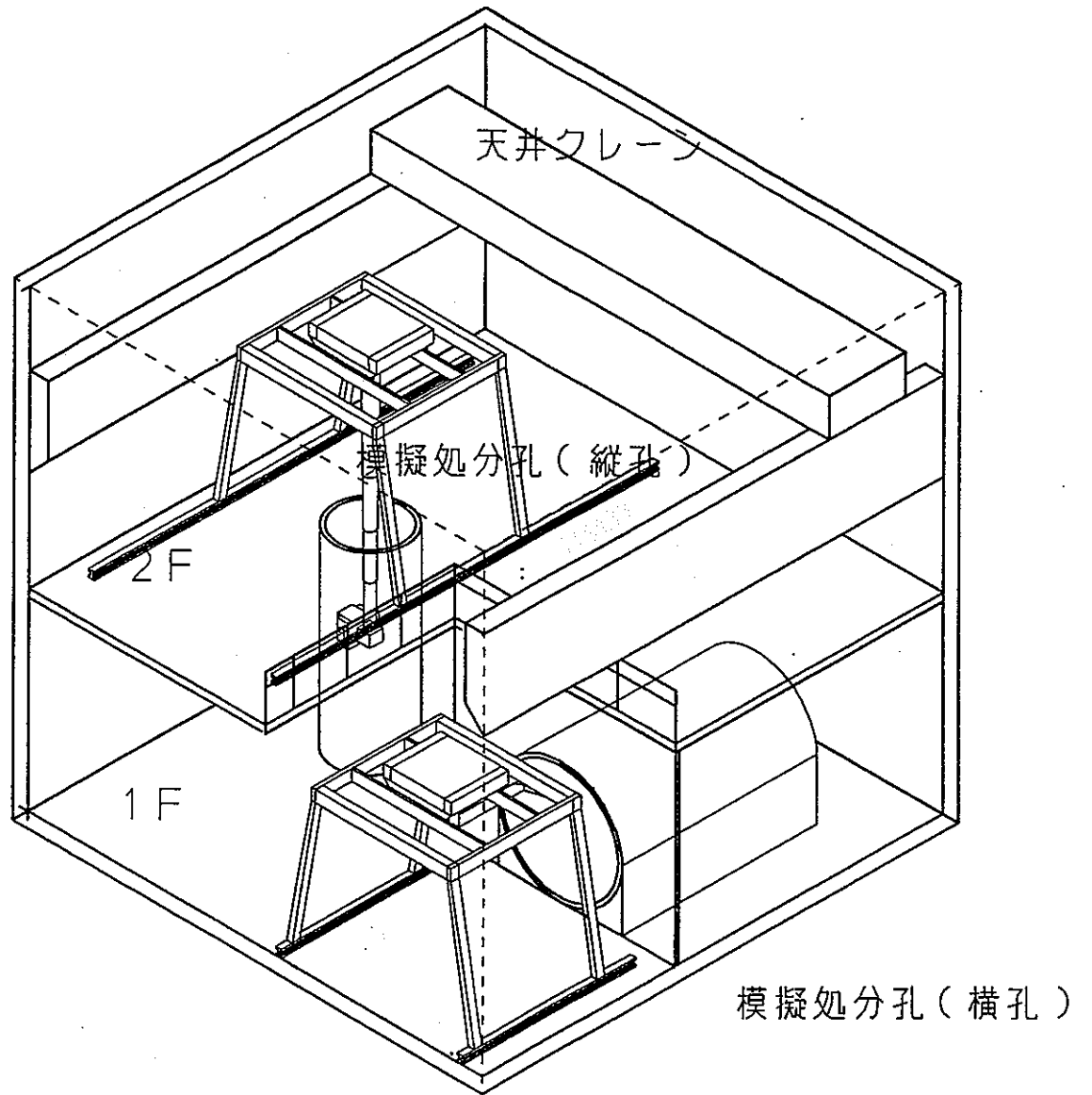
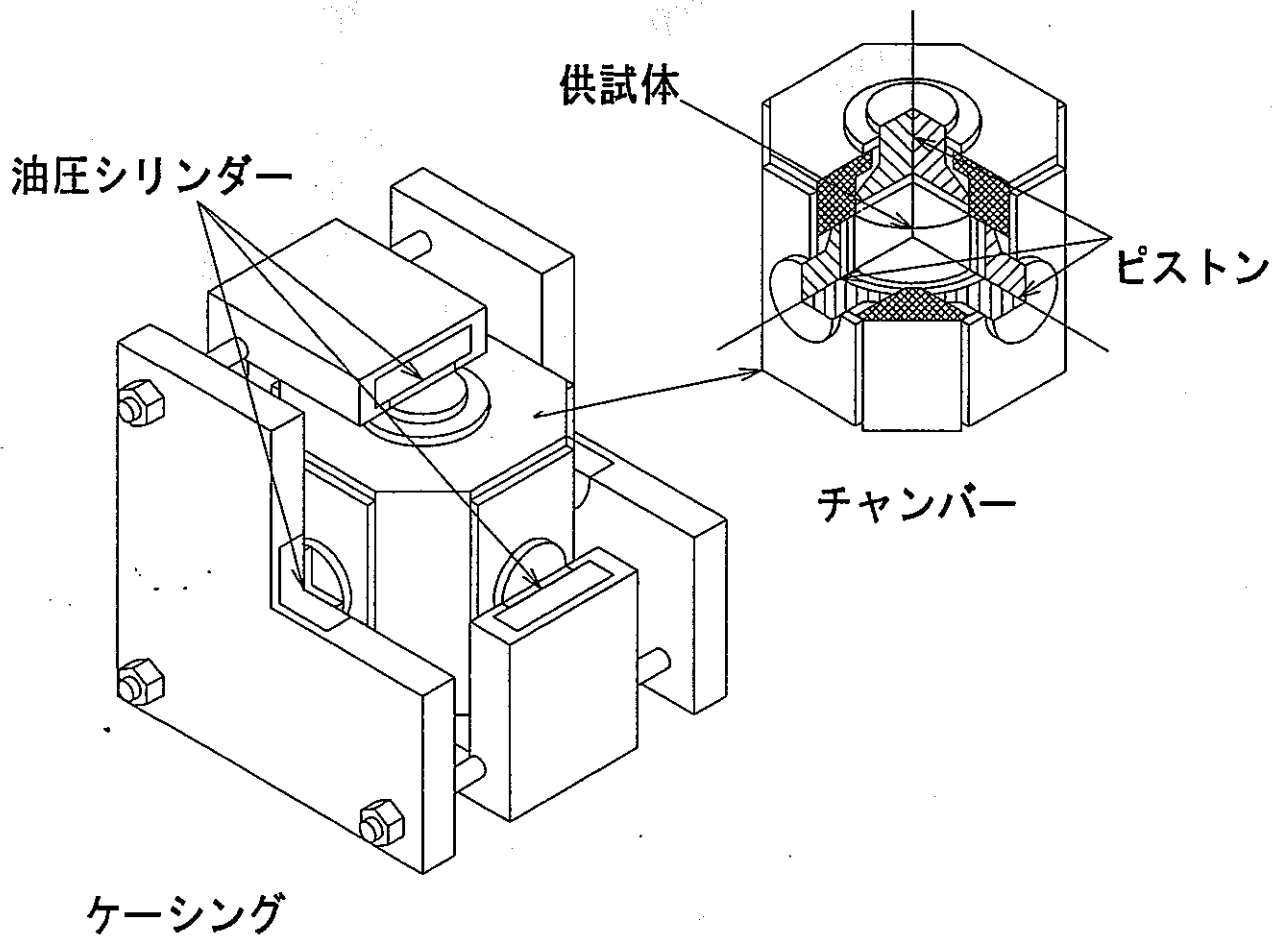
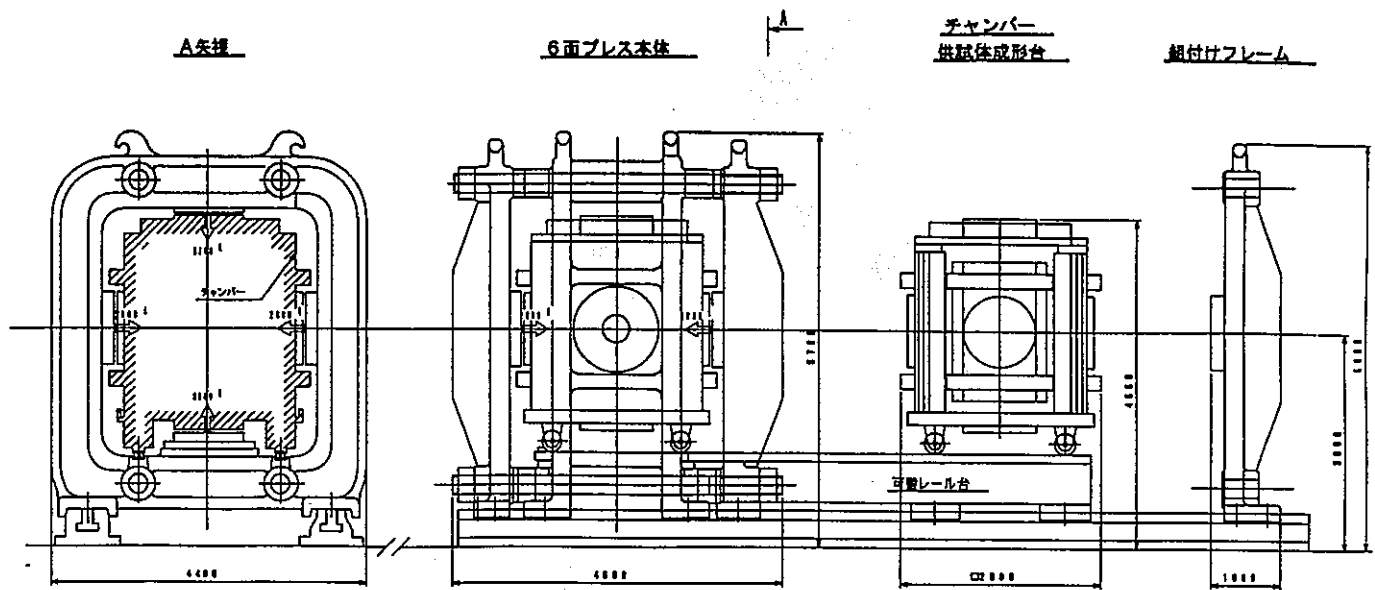


図3.3.2-4 緩衝材施工性確認試験イメージ図



装置概略イメージ

図3.4.2-2 シーリング試験装置概念図

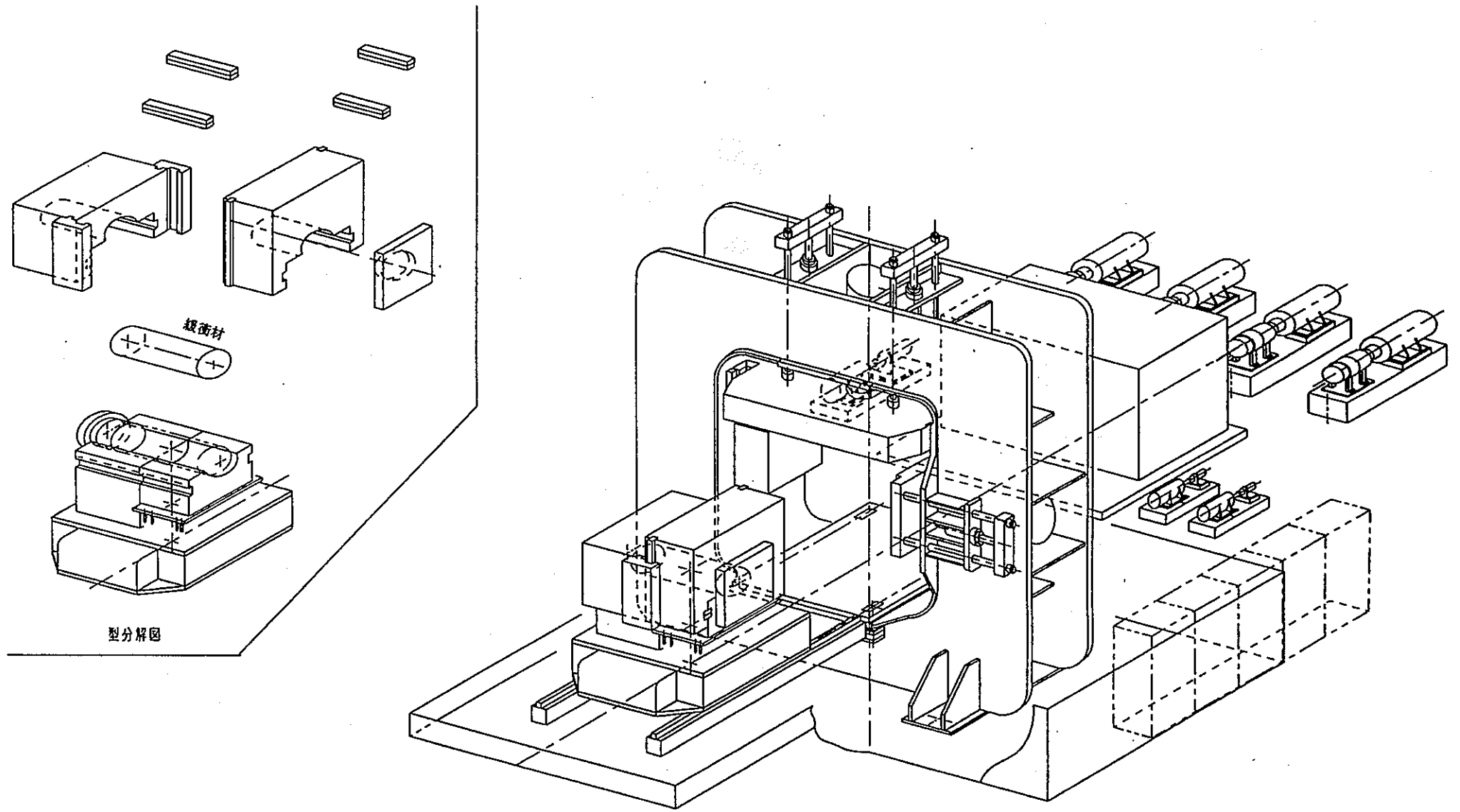


図3.5.2-1 せん断試験装置概念図